「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」
終了時評価報告書

２０２４年３月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

2024 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー･産業技術総合開発機構
　理事長　　斎藤　保　殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長　　木野　邦器

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」
終了時評価報告書

２０２４年３月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

目　次

はじめに　1
審議経過　2
分科会委員名簿　3
研究評価委員会委員名簿　4

第１章　評価
１．　評価コメント　1-1
１．１　意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋
１．２　目標及び達成状況
１．３　マネジメント
（参考）分科会委員の評価コメント　1-3
２．評点結果　1-21

第２章　評価対象事業に係る資料
１．事業原簿　2-1
２．分科会公開資料　2-2

参考資料１　分科会議事録及び書面による質疑応答　参考資料 1-1
参考資料２　評価の実施方法　参考資料 2-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」の終了時評価報告書であり、NEDO 技術委員・技術委員会等規程第 32 条に基づき、研究評価委員会において設置された「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（終了時評価）分科会において評価報告書案を策定し、第 76 回研究評価委員会（2024 年 3 月 18 日）に諮り、確定されたものである。

2024 年 3 月
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

● 分科会（2023 年 11 月 21 日）

公開セッション

１．開会、資料の確認
２．分科会の設置について
３．分科会の公開について
４．評価の実施方法について
５．プロジェクトの概要説明
６．プロジェクトの詳細説明

非公開セッション

７．全体を通しての質疑

公開セッション

８．まとめ・講評
９．今後の予定
１０．閉会

● 第 76 回研究評価委員会（2024 年 3 月 18 日）

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（終了時評価）

分科会委員名簿

（2023 年 11 月現在）

	氏名	所属、役職
分科会長	池谷（いけや）　知彦（ともひこ）	一般財団法人電力中央研究所　企画部グループ 特任役員
分科会長 代理	飯山（いいやま）　明裕（あきひろ）	山梨大学　水素・燃料電池ナノ材料研究センター 水素・燃料電池技術支援室　特任教授 センター長　兼　室長
委員	尾方（おがた）　成信（しげのぶ）	大阪大学*　大学院基礎工学研究科 機能創成専攻　機能デザイン領域　教授
	櫻井（さくらい）　輝浩（てるひろ）	燃料電池実用化推進協議会　企画部　部長
	原田（はらだ）　文代（ふみよ）	株式会社日本政策投資銀行　常務執行役員
	丸田（まるた）　昭輝（あきてる）	株式会社テクノバ　研究部　研究第 3 グループ 上級主席研究員
	三浦（みうら）　真一（しんいち）	株式会社神戸製鋼所　新事業推進本部技術部　兼務 総務 CSR 部営業企画 Gr　兼務　事業開発部 シニアプロフェッショナル

敬称略、五十音順

注*：実施者の一部と同一大学であるが、所属部署が異なるため（実施者：大阪大学理学研究科）「NEDO 技術委員・技術委員会等規程(平成 30 年 11 月 15 日改正)」第 35 条(評価における利害関係者の排除)により、利害関係はないとする。

研究評価委員会委員名簿

（2024 年 3 月現在）

	氏　名	所属、役職
委員長	木野（きの）　邦器（くにき）	早稲田大学　理工学術院　教授
委員	浅野（あさの）　浩志（ひろし）	岐阜大学　特任教授 一般財団法人電力中央研究所　研究アドバイザー
	稲葉（いなば）　稔（みのる）	同志社大学　理工学部　教授
	五内川（ごないかわ）　拡史（ひろし）	株式会社ユニファイ・リサーチ　代表取締役社長
	鈴木（すずき）　潤（じゅん）	政策研究大学院大学　政策研究科　教授
	原田（はらだ）　文代（ふみよ）	株式会社日本政策投資銀行　常務執行役員
	松井（まつい）　俊浩（としひろ）	東京情報デザイン専門職大学　情報デザイン学部 学部長・教授
	松本（まつもと）　真由美（まゆみ）	東京大学　教育学部附属教養教育高度化機構 環境エネルギー科学特別部門　客員准教授
	吉本（よしもと）　陽子（ようこ）	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部　経済政策部　主席研究員

敬称略、五十音順

第１章　評価

１．評価コメント

１．１　意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

水素社会の構築は、脱炭素社会の実現に向けての期待が大きく、燃料電池自動車（FCV）や水素エンジン自動車を始め、船舶、航空、さらには建設機械までの利用拡大が注目されている。その中で、水素インフラ整備の先駆けとして、水素ステーションの整備・運用コストの低減を図ることが、水素社会の実現に向けて求められている。

本事業のアウトカム達成までの道筋では、FCV 及び水素ステーションの本格普及並びに水素ステーションの自立化に向けて規制の適正化と水素ステーションのコスト低減、国際展開・国際標準化の 3 つの柱によって事業を推進する戦略であり、必要と思われる取り組みが網羅されていた。

水素ステーション関連の標準化推進においては、日本が ISO/TC197 水素ステーション関連の議長を務めるなど、本事業において、データに基づいた妥当な標準案の提案と議論をリードしてきたことで、世界各国からも高く評価され、大きな成果があったといえる。

一方、水素ステーションの整備費や運営費については、アウトカム達成の見込みが立っていない。実現するためには、本事業開始時の低コスト化に向けた戦略シナリオの作成や事業期間中でのアウトカム目標の適正な見直し、戦略ロードマップなど反映への働きかけがまだ不十分であったと言わざるを得ない。後継事業では、目標に至るためにどの項目を重点的に進めるべきか、実施すべき課題を抽出して進めていただくことを期待する。

知的財産・標準化戦略においては、単に技術開発で得られた成果を特許で守るという考え方ではなく、水素分野の技術開発を展望し、社会実装していくためにどのような戦略をもつかという視点で捉えることが重要である。また、適正な全体観をもって、本事業の戦略と水素分野全体での戦略の下で、標準化戦略・国際化戦略を議論していくことを期待する。さらに、日本の国際標準化の活動を高いレベルで維持、発展できるように、国際標準化活動の主体となる人材を継続して育成していくことが重要である。

１．２　目標及び達成状況

アウトカム指標・目標値については、二つの項目のうち、整備費の低減は目標達成が難しい状況であるが、運営費の低減では、遠隔監視などの導入により達成する見込みが得られた。アウトプット指標・目標値については、国内規制の適正化、国際標準化の点で大きな前進があったと考える。特に、低コスト化を目指した材料・評価手法の開発、運用時の保安監督者の削減や、無人運転に向けた遠隔監視など多くの成果については、早期の実用化も見込まれると評価する。また、期中で、新たな動きに対応して HDV 向けの新プロトコルに対応した水素燃料計量システム技術と充填技術の開発に向けた取り組みや、水素大量輸送のためのパイプラインの安全性評価とコスト分析などの取り組みは、水素社会実現に向けた課題への対応として特筆に値する。

一方、アウトカム目標のうち、整備費低減については、当初想定よりもコスト低減効果が小さく、目標達成時期も 2030 年以降になる見込みとしているが、アウトカム目標はアウトプット目標や本事業で実施しない部分の規制見直しや民間企業の取り組みに加えて、

設備製造数に大きく依存していることから、個別事業の成果を正確に評価することを難しくしており、アウトカム目標の設定とその評価には課題があると考える。後継事業においては、急激な資材価格や建設費、人件費の高騰等の要因に加え、FCV 導入台数が当初目標を大幅に下回っている現状を踏まえ、事業内で専門家によるコスト分析・調査などを実施し、コスト低減目標の適正な見直しがあればよかった。

今後は、事業者に対しても低コスト化に向けた目標などを明確に示すことや、外部環境の変化に対応しどのような仕様の設備でどのように普及・低コスト化を目指すか、さらには、普及にあわせどのように実運用結果を吸い上げ、改良開発していくかというようなシナリオの策定と取り組み体制の構築が期待される。

情報発信などの成果の普及方策については、引き続ききめ細かに最新の各国政策動向、世界の主要プレーヤーの技術開発の進展を把握しながら我が国の強みを活かした、国際協調と戦略分野での国際競争のバランスを取った対応を期待する。

注）HDV：Heavy Duty Vehicle

１．３　マネジメント

実施体制においては、水素ステーションの整備費と運営費の低減を目指した総合的且つ多方面な研究開発の実施にあたって、適材適所の配置によりオールジャパンの体制で進められた。また、鋼材の研究開発や圧力容器、シール、ホース、充填技術の研究開発から得られたデータや知見を ISO 規格の提案に反映するなど、実施者間の連携は適切に行われていたと評価できる。さらに、採択時に、一律ではなく個別事業の内容に応じて研究開発の継続又は中止を判断するための要件・指標を定め、ステージゲート方式を設定するなど、事業運営において適切に取り組まれていたといえる。

研究開発計画については、二つのアウトカム目標のうち、整備費の低減は達成できない見込みであるが、各個別事業としてアウトプット目標は概ね達成されており、スケジュールも適切に管理されていたといえる。検討委員会や規制・制度の改訂 WG などを設定して、成果をいち早く実用化に向けて推進したことは、NEDO の強みを活かしたマネジメントであったといえる。また、事業者にとっては、毎年の成果報告会が大きなチェックポイントとなっており、個別事業内でも、委員会方式がとられるなど、進捗管理と外部チェックが働くようになっていたと考える。一方、事業全体での情報共有や相互理解は適切に進められていなかった。適切に進めることで、より効率的に目標達成に繋がったと考えられる。

今後、後継事業では、水素ステーション整備費のコスト低減において十分な成果が得られていないことを踏まえ、実施者間での情報共有ならびに課題共有、さらに研究開発データの活用及び提供方針についても再検討されることが望まれる。また、社会実装においては潜在的なユーザーが技術を採用するかどうかにかかっていることから、ユーザーとのコミュニケーションを定期的に行い、ユーザーが求めるコストベネフィットを把握し、個別事業における費用対効果の詳細な分析を実施していくことが期待される。

（参考）分科会委員の評価コメント

１．１　意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

＜肯定的意見＞

・ 水素社会構築は、脱炭素社会の実現に向けて、期待が大きい。そのような中で、燃料電池自動車や水素エンジン自動車を始め、船舶、航空、さらには建機まで、利用拡大が注目されている。その中で、水素インフラ整備の先駆けとなっている水素充填スタンドがある。水素充填スタンドの整備・運用コストの低減は、その実現に向けて重要である。また、ここの研究開発は、ほかの水素社会実現に向けた事業でも活用できる。NEDO が中心となって推進する意義は大いにある。事業開始時に設定した水素充填スタンドの設置・運用の低コスト化という困難な目標に対して、研究開発を推進するには、NEDO が、オールジャパンでの体制を構築してけん引することは意味がある。また、国外に向けては、国内産業の躍進も期待され、国際標準化・基準作りの対応もあり、NEDO が推進するのが妥当である。加えて、コストダウンに向けて、材料開発、周辺機器開発などの技術開発、実証機器でのデータ収集、規制緩和、国際基準策定と、必要な項目に対応した総合的な推進を実施した。必要に応じて、個別事業に合わせて、検討委員会やワーキングを設定して、5 か年という短時間で、効率的に推進したことは評価できる。事業成果の情報発信も、国内外で適宜行っている。推進途中で、国内外から HDV 対応の要望を受けて、対応を加えたことは、事業後の展開に向けて準備したことは、柔軟なマネジメントができたと評価できる。

・ 実用化事業化に向けた着実な成果を上げている。オープンな市場形成のために、規制緩和、基準標準化を国内で強力に進めている。また材料では、元素組成からコスト低下を図るために詳細な評価を進めているのは、評価できる。国際標準化では、積極的に参加して、国際市場の形成に関与している。我が国が中心で推進できると良い。一方で、外部状況として、輸送部門での大型車両（HDV）への低炭素化が注目されつつあるなか、適切に対応しているのは高く評価できる。

・ 汎用鋼材の使用拡大に資する安全基準案の作成、規制適正化など、整備や運営コストの低減につながる永年の課題が解決されてきている。大型商用車の FC 化の加速という新たな動きに対応して、追加の事業として福島水素充填技術研究センターを世界に先駆けて整備して迅速にデータ取得に至ったのは高く評価できる。

・ ステーション関連の ISO 標準化推進などにおいて、非競争領域は公開し、海外への情報流出を防ぐ必要のあるものは秘匿するなど、適切に領域を設定し、管理されている。ISO 化などが必要になるなどの環境の変化に対しては適宜公開するなど妥当な対応である。ISO/TC197 水素ステーション関連の議長を日本が務めるなど、ISO 国際標準化活動は、これまでの事業を継続して、データに基づいた妥当な標準案の提案と議論をリードしてきた日本の進め方が世界各国から高く評価されたもので、大きな成果といえる。

- FCV や水素ステーションの本格普及、水素ステーションの自立化に向け、規制の適正化、水素ステーションのコスト削減、国際展開国際標準化の 3 つの柱によって事業を推進する戦略であり、その中に必要と思われる取組が網羅されている。研究成果の発表や報告会、さらには関連技術の国際標準化を通じて幅広く情報発信をすることも行っている。
- 国際標準の制定について、日本がリーダーシップを発揮して、国際的プレゼンスを獲得していることを高く評価する。オープン・クローズ戦略もその境界を明確に設定しており、妥当である。NEDO 鋼材データベース検討会で得られたデータを一般利用できる仕組みを構築したことが高く評価できる。
- FCV 台数および水素ステーション設置数が当初目標から乖離している現状を踏まえて関係各所と対策を検討して自律的展開を達成するとしている。この結果、さらなるコスト低減が見込めるテーマ、大型車対応の取り組みを後継事業で実施する計画があるなど、事業環境の変化を踏まえた取組を実施して、アウトカム達成を目指すマネジメントを概ねしていると考えられる。
- 外部環境の変化は、知的財産・標準化戦略へ大きな影響を与えておらず、またオープン・クローズ戦略も妥当であったと評価する。オープン・クローズ戦略が明確に定められた結果、ISO 化などで日本が議論をリードする場合は適宜秘匿情報も公開する臨機応変な対応がとられたのは、その例の一部と評価する。
- 全体として、当初建てられた個別のゴールはアウトカム達成までの道筋に対し、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認等については必要な場合は適切に見直しがされていた。また、役割分担、時間軸は明確に定められていた。自立化については事業毎にそれぞれ定義されていた。
- オープン・クローズ戦略に基づき、競争域と非競争域は適切に設定されており、必要に応じ再検討も実施されていた。国際標準の制定の計画においても、役割分担やスケジュール等適切に管理されていたと評価。
- 安全性基準の作成、標準化、国際連携はよく進められていると思われる。広報はさらに展開が可能。技術開発（鋼材、シール材、流量計）などは日本としての技術優位性を示すことができており、今後のビジネス・国際展開が期待される。
- オープン・クローズ戦略や知財戦略は、一般論としては妥当である。国際標準の制定は、事業者含め、よく実施されている。実際の国際連携作業は、報告対象とはなっていない部分での努力もあると想定されることから、引き続きこのまま進めていただきたい。
- 安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されており、水素という新しいエネルギーを使えるようにするための枠組み作りとして将来像（ビジョン・目標）の実現に向けてバランスよく取り組まれてきている。研究開発項目Ⅰ「国内規制適正化」、研究開発項目Ⅲ「国際展開・国際標準化」については、適切に対応されてきたと認められる。研究開発項目Ⅱ「水素ステーションコスト低減」についても採択・実施された事業に対する研究開発管理は適切に行われ、各事業個別には適切に事業目標を達成されている。

・ 1）タツノによるディスペンサー米国事業、岩谷／トキコの米国進出により計量技術・充填技術はディファクト化が狙える状況を作れているのではないか。欧米でもFCV の普及が進まないなか市場は不透明な状況にあるが、HDV など大型化への関心が高く計量器の大流量化は需要が高まる可能性がある。小型・中型の実績の上に流量計の大型化は実現すると考えられ、計量技術・充填技術での成果は今後も展開してほしい。

2）九州大学による水素機器用高分子材料水素特性データベースは、特定分野の標準化に関心がある企業群の合意で作成されるフォーラム標準戦略として機能しつつあるのではないか。DOE と連携してデータベースを拡充し国際標準に向けた取り組みを強化していることも評価できる。超高圧水素を扱う水素ステーションの基盤的な課題は、従来にない起動停止を繰り返す設備の使い方において漏洩事象を如何に抑え込むかにある。その際に従来知見のない高圧水素の加圧・減圧における高分子材料の振る舞い・素材への影響を適切に把握し技術戦略にフィードバックすることは重要である。この 2 点を中心に「知的財産・標準化戦略」として機能させていけるのではないか。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

・ 本事業開始時に水素充填スタンドの整備・運用コスト低減を設定しながら、低コスト化に向けた戦略シナリオがないままに進められたのではないかと懸念する。個々の要素での要因分析が必要ではなかったか。例えば、量産効果で解決できる事項、材料自体の低コスト化・多様化、新規開発が必要な事項など、個々の要因での対応を事前に分析するとよかった。さらに、中間評価でのアドバイスを受けて、修正の機会もあったが、それが活かされずに進められていたのは残念である。そのため、効果的なコスト削減に向けた技術開発が進められなかったのではないかと思われる。全体的なマネジメントがかけていたのではないかと考える。また、追加公募でも、過不足を補うこともできたはずだが、この機も十分な検討ができずに、機を逸した。後継プロジェクトのためにも、残された課題に対する整理が必要。目標に至らなかったことを分解して、どの項目を重点的に進めるべきであった、今後すべき課題を抽出して進めるべきとのまとめがあるとよい。
・ 全体的に情報共有ができていないため、相互での実状、実態、また、要求を知ることなく、個別に進めている。そのため、事業全体で、相互の事業間でのシナジー効果で醸し出された成果は見当たらないのが残念である。外部発信は、シンポジウム、学会、論文で積極的にしており高く評価できるが、特許が少ないのは残念である。まだ、民間レベルの競争領域ではないということは理解できるが、業界で競い合える領域に至らないと低コスト化は難しい。また、国際市場での戦略を考えると、取捨選択して国際特許の戦略があってもよいのではないか。国内産業の躍進となる国際標準化、基準作りを考えるとよい。

- 水素ステーションの整備費や運営費について、アウトカム達成までの道筋を示すまでには至っていない。NEDO の責任範囲以外の項目にも影響されるため、ステーションの自立化が実現できるよう、役割分担や実施内容を具体的に検討して、幅広いステークホルダーに必要な情報発信をお願いしたい。
- 提言であるが、国際標準化活動の主体となる人材を継続して育成する取り組みをしてほしい。現在 ISO/TC197 活動を支えている方々は、キャリアが長く、その分活動に精通するとともに国際的な信頼も高く、また人的ネットワークも広い。この人材に続くべき次世代の標準化を担う人材をここ 5 年程度で育成して、継続的に日本の国際標準化の活動をハイレベルで維持発展できるようにしてほしい。
- HDV 用実証試験設備を建設し、国際標準化の取組を開始しているとのことは評価できる。実証が始まったばかりとは思うが、大型トラックユーザーの水素 ST への要求をどのように反映していくのかについて問題意識を持っている。大型対応を含む後継事業では、大型トラックユーザー等の意見を反映できるように、幅広いステークホルダーへの情報発信と関係者へのヒアリングを事業計画段階や事業初期などに十分に行ってほしい。大型トラックユーザーが自家用水素 ST を建設したくなるようなところを HDV 用のアウトカムにできたら、整備数目標からの乖離が減り、さらに社会実装も加速するのではないか。
- 標準化戦略で、海外の様々な動きにも目を配ってほしい。日本では、大型トラックに圧縮水素を搭載することを主流として活動しているが、大型車の場合は、天然ガス自動車で CNG から LNG 化への動きもあったので、十分に情報収集をして進めてほしい。
- グローバルレベルではウクライナ侵攻以降のエネルギー情勢の変化に伴う水素関連技術への積極投資、急激なインフレによる資材価格の急騰、国内での建設費、人件費の高騰を鑑みるに、当初計画時よりも水素ステーション事業の経済的自立化はさらに困難さを増している。加えて FCV 導入台数が当初目標を大幅に下回っている現状を踏まえ、本来は事業期間中にアウトカム目標の適正な見直しや、戦略ロードマップ等への反映への働きかけが可能であればより有効であった可能性もある。幅広いステークホルダーに情報発信や国際連携等、多くの事業で適切に実施されていたが、広く一般向けの分かりやすい広報についてはさらに工夫の余地があろう。
- 論文発表方法、一般に向けた分かりやすい情報発信、成果の普及方策については更に検討、改善の余地があると思われる。世界各国は野心的な目標と共に次々と基本戦略を打ち出し、様々な税制優遇や補助金等、積極的な支援策が導入されている。今後とも大きな環境変化が継続することが想定されるなか、最新の各国政策動向、他国のプレーヤーの技術開発の進展を正確に把握する仕組みを当初から事業に内包しておくことが有効ではないか。
- 官民の分担は基本的には問題ないが、米 DOE は Request For Information（RFI）を重視しており、また欧 Clean Hydrogen Partnership では Board に民間企業が加わって民間の考えを公募に反映させる仕組みがある。日本では採択委員会がその役

割を担っているとはいえ、スピードが早い分野である以上、公募テーマ作成から民間のニーズを把握していく必要がある。

- オープン・クローズ戦略では、むしろ課題はオープン戦略にある。日本は技術発信力が弱いので、国際連携でも欧米の後塵を排する状況にある。世界の国際会議やシンポジウムでも存在感が薄い。言語バリアは言い訳にはならず、NEDO はこれまで以上に日本企業が国際的な場で技術 PR ができる機会を提供することが望まれる。
- コメントとして以下の 4 点について記述する。 ①アウトカムは「水素ステーションの低コスト化」でなく「水素ステーションの自立」であるべき ②水素 ST の自立に向けた課題 ③コスト分析の必要性 ④情報公開・情報共有の必要性。
  アウトカムは水素ステーションコストの低減であるが、基本計画の「本事業のねらい」は「2025 年以降の FCV 及び水素ステーションの本格普及、2030 年以降の水素ステーションの事業自立化」にあり、その手段のひとつが低コスト化である。2023 年度 11 月断面において、FCV の普及数は METI ロードマップ 2020 年目標 4 万台に対して 7800 台程度であり達成されておらず、水素ステーションの設置数も 6 か所／年程度に下がっている。結果的には水素ステーション稼働率と FCV 台数含め、自立化シナリオというアウトカムの前提がそもそも崩れている点に大きな問題がある。税金を使った技術開発事業として、自立化シナリオを含むアウトカムの見直し議論・検討が必要であったのではないか。「2.1(2)アウトカム目標達成の見込み」の項に「上記状況から、水素基本戦略には、水素ステーション自立化のための目標見直しを実施するとの記載がある。」との記載にとどまっており、NEDO 事業として主体的に「誰が何をどのように実施するのか」が明確になっていない。さらに後継事業である「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」基本計画には「自立」の文字がなくなっており、技術開発事業の目的が見失われている。この点は改善すべきである。
  水素ステーションの自立の課題には a）水素の販売価格と調達価格（調達価格には、水素の製造費用や輸送費用の低減も含まれる） b）水素の販売量（FCV の普及数と水素 ST の整備の関係・水素 ST 整備の地域的なバランス） c）水素 ST のコストとしての建設費と運営費の 3 つの項目があり、これらの関係を明確にすべきである。水素原価を抑え込むには水素製造費用の低減と水素流通網の確立が必要である。「水素販売量」は水素需要の確保・創出であり、それぞれ技術開発や補助金の設定などでの対応を明確に位置づけるべきである。これらに関係する各項目を精査してほしい。
  「低コスト化」を標榜しながらコストの前提となる市場・数量効果が適切に考慮・議論されていなかったことも本事業の課題として指摘したい。科学的にコスト分析を実施し投資対効果を評価・適正化していくことは NEDO 事業全体にとっても急務ではないか。さらに水素インフラの整備にとっては安全も重要な視点である。社会導入したインフラとして改良・改善を通した安全が実現されてこそコスト低減に意味がある。

最後に、水素 ST の運営に係る様々な情報が共有されるような取り組みとしてほしい。水素 ST に限らず情報公開・情報共有が積極的に行われることは社会監視という意味にとどまらず、情報共有が関係分野への企業参入を促して活性化させるとともに人々の共感を呼ぶことにつながるだろう。

・ 知的財産・標準化戦略は単に技術開発で得られた成果を特許で守るという考え方ではなく、水素分野の技術開発をどのように展望して社会実装していく戦略をもつかという視点が重要である。

圧縮機・蓄圧器・冷凍機などの「主要機器による水素ステーションの全体構成」としては、米国や欧州では FCV 需要の少ない黎明期の戦略として＜既存の高圧（20MPa 以上）吸込小型高圧ブースターと CNG 向けを改良した高圧蓄圧器を組み合わせた小型のパッケージ＞を中心に展開している。一方日本では普及期を見据えて NEDO プロで開発した低圧吸込（1MPa 以下）・大風量（実風量としてはブースターの 20～30 倍に相当する）の圧縮機設備を中心に整備してきた。NEDO として計量・充填などの個別の取り組みの管理は機能しているが、欧米とのインフラ整備の全体観の違い・ひいてはあるべき姿と知的財産・標準化戦略を考えるような司令塔的な枠組みもあった方がよかったのではないか。また、標準化戦略としては、エネファームのような「汎用機の知的財産・標準化戦略」と「非汎用となるインフラ設備の知的財産・標準化戦略」とは異なるものでなければならない点にも留意が必要である。「量産型の安価な汎用機」に対して「超高圧・大型・高価で、FCV の普及の様態によって仕様や機能を時間軸によって変えていかねばならない非汎用機」は異なるものであり、軽々に標準仕様を決めることはできない課題もある。知的財産・標準化戦略は、産業振興という意味で重要なものなのだが、「モノづくり」の面からの産業振興にむけて、メーカー側の参加・関与が少なかった点も課題として認識すべき。

カーボンニュートラルのような新しい分野では個別の技術開発事業参加者の管理だけでなく、あるべき姿を考え・議論して誘導するようなこれまでより一歩踏み出した難しいことも NEDO に求められているのではないか。適正な全体観をもった事業戦略・分野戦略のもとで、標準化戦略・国際化戦略は議論されるべきだと思う。

１．２　目標及び達成状況

＜肯定的意見＞

・ 水素充填スタンドの整備、運営費の低コスト化は、水素社会実現に向けて、重要であり、課題でもある。削減の項目を絞り込んで、各課題を明確化して、取り組んだのは高く評価できる。コスト低減につながる発信、実用化を進めている。運用コストでは、アウトプットとしては、確実に達成できている。特に、運営コストでは、定期検査や運営での問題である水素漏洩、水素漏洩センサー開発などを対象にした。その成果はすぐに活用が期待され、高く評価できる。また、材料開発や材料評価手法の開発は、今後の低コスト化を見込んだ投資であり、適切である。

- 概ねの課題で成果は上がっている。しかし、最終的な目的である設置のコストダウンは、達成できなかったのは残念である。一方、運用に関しては達成が見込まれたのは評価できる。また、新たな材料開発や運用方法の提案もあり、今後を期待したい。充填スタンドの低コスト化は達成できなかったが、それに向けた多くの成果、アウトカムは認められる。さらに、本事業の後に、成果の実用化、普及が期待される。それらによる、更なる低コスト化につながると期待したい。低コスト化ための材料・評価手法の開発、運用時の保安監督官、遠隔監視などは、特筆できる。得られた成果の国際標準化には、さらに時間を要する。本事業の後で期待が見込まれる。特に、本事業で得られた、新規の材料や検査・評価手法の開発、検査の簡略化、センサーなど多くの成果があり、早期の実用化も図れると評価する。
- アウトカム目標のうち、運営費低減については目標達成の見込みとなったことは高く評価できる。
- 各事業テーマは最終目標をほぼ達成している点は高く評価できる。HDV 等の新プロトコル対応の計量システム技術と充填技術に関する研究開発の必要性から、事業期間中に新たに取り組みを開始し、HDV 用の計量システムを開発して福島水素充填技術研究センターを完成させたことは、これまでの成果を迅速に集大成した成果とも言え、高く評価できる。またこの福島水素充填技術研究センターにおける今後の研究開発により、HDV はもとより、鉄道や船舶などさらなる水素燃料電池の普及を促進できる波及効果が期待される。また同様に 2022 年度から追加の事業で、水素の社会実装において課題となる、短距離・大量輸送の技術基準を検討するため、パイプラインによる水素輸送の課題を調査検証したことは、将来の水素大量利活用時代における水素供給コストの低減につながる優れた成果と評価できる。
- 整備費のコスト低減効果が小さいことなど明確な根拠のもと、今後の見通しを立て、達成見込みを△としており、妥当である。
- 3 つの研究開発項目それぞれが目標を達成しており、高く評価できる。商用車 HDV 用の水素ステーションの研究開発を開始し、HDV 用研究施設を完成させたことは高く評価できる。
- 運営費について、アウトカム目標達成の見込みがあるとのことであり、評価できる。
- アウトプット目標は、すべて達成しており、なかには大幅達成、早期に達成も含められていることは大いに評価でき、事業関係者に敬意を表する。
- 当初設定された、または期間中に見直しが行われたアウトカム指標・目標値について、概ね各事業で達成が見込まれている。特に運営費コスト低減、規制の適正化への道筋や、国内規制の適正化国際標準化については大きな前進があった。特に HDV 対応について、新プロトコルに対応した水素燃料計量システム技術と充填技術の開発に向けた取り組みや、水素大量輸送のためのパイプラインの安全性評価、コストと分析等、ステーション事業のみならず、水素社会実現に向けた課題への対応も開始したことは特筆に値する。

- オープン・クローズ戦略に基づき、競争域と非競争域は適切に設定されており、必要に応じ再検討も実施されていた。また、一部の研究については汎用的な材料を幅広く使用できる環境の構築が趣旨である等の理由から、成果の特許化は行っていないが、論文発表や講演、HP での適切な対外発表は実施している。ISO/TC197 における国際標準化として 12 件の規格を発行、うち 4 件が、日本が議長国（提案国）となったこと、水素品質関連 2 規格（議長国日本）および充填インターフェース関連 2 規格を発行したこと等の貢献から、2021 年より日本が ISO/TC197 議長国となったことは大きな成果である。
- 「達成状況の計測が可能な指標」としては定量的目標が設定されており、正しい方針である。
- 個別のテーマ（要素開発）のアウトプットは、おおむね適切に設定されていたと想定される。途中での見直しの必要性はほとんどなかったと想定する。副次的効果として、シール材では加速試験方法や劣化の解析に知見が増えており、鋼材溶接の材料特性に関する詳細知見が集約でき、今後の展開が期待される。
- 1）構成機器低コスト化の計数効果の追記：2019 年 3 月の METI による「水素・燃料電池戦略ロードマップ」見直しにおいて、2025 年頃の水素ステーション各構成機器の低コスト化目標にはじめて「〇台/年・社、〇本/年・社」とコスト目標達成のための前提条件の記載が追記された。これは「NEDO において検討された技術開発ロードマップを参考に記載」と注記されており、「アウトカム目標の達成のための前提」を検討・追記したという意味で合理的な見直しがされた。このような記載変更のハードルが高かったことは容易に理解でき、NEDO の担当部門として「アウトカム指標・目標値」を適切に見直し、政策適正化にむけた努力をしたことがわかり評価できる。

  2）FCV の HDV 対応への取り組み：欧州では 2023 年 2 月に EU 委員会によってトラック・バス等の大型自動車に関する 2030 年以降の二酸化炭素排出量削減目標案が発表されている。米においても DOE のプログラムでは Heavy-Duty Fast-Flow Fueling R&D が行われている。浪江町に HDV 充填センターを建設した対応は時宜を得たものである。
- 個々の事業については、概ね良い活動がされていたのではないか。

  1．国内規制適正化
  - 無人運転の実現・遠隔監視セルフスタンドの要件整備／保安統括者の複数兼任／障壁に係る技術基準の見直し／水素出荷設備に係る保安統括者等の選任緩和／蓄圧器等の常用圧力上限値見直しなどは、水素ステーションの設置運用に係る規制適正化に向けたデータ取得及び基準案の作成の取り組みとして、水素ステーション整備コストの低減や運用コストの低減に資する。
  - 汎用材料の適用範囲拡大も成果が認められる。
  - 中空試験片材料試験法規格化も低温水素のさらなる利用に向けた取り組み拡大に寄与するような取り組みとして期待している。

2. 水素ステーションのコスト低減に向けた取り組み

・蓄圧器の圧力振幅幅に応じた損傷評価への見直しは、蓄圧器の設備寿命を運営実態に応じて評価し直させることで蓄圧器の寿命延長ができるという意味で合理的でありコスト低減には大きく寄与すると思う。また AE 法によるタイプ 2 容器の非破壊検査（供用中検査法の確立）もコスト低減に期待できる。

・シール継ぎ手部材・ホースの研究は水素ステーションの運営にとって課題である漏洩事業の理解と対策に向けた基盤的な取り組みとして重要な取り組みだと思う。

・HDV 用水素計量・充填の取り組みは FCV - 水素ステーションの本格普及にとって重要な取り組みでありしっかり取り組んでほしい。

3. 水素 ST 関連技術の国際標準化（ISO-TC197）、IEA 等海外政策・市場・研究開発動向調査

・ISO-TC197 への対応はインフラ技術開発の基盤活動として重要である。

・国際動向地調査は各国の水素関連の動きが活発になるなかでしっかりと取り組んでほしい。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

・ 事業開始時の目標設定時に、達成を見込めたのかが説明を聞けなかった。事業開始まで低コスト化に向けた戦略がないと達成できない課題である。コスト分析などを事業開始後に追加しても良かった。事業開始時点での戦略的なシナリオ設定がなく進めており、運用コストは辛うじて達成できたが、整備コストに関しては未達となった。個々の内容を確認して、再整理する必要がある。例えば、材料での多様性、評価の短縮などが、どのように低コスト化につながり、圧縮機や貯蔵タンク、配管などの低コスト化に至るかを想定して進めてほしかった。特に、機器メーカーの要望等を調査して進める必要がある。また、圧縮機の低コスト化では、水素吸蔵合金を用いた新たな技術開発を進めたのは評価できるが、既存の設備と比較した低コストに向けた目標の設定などが明確化されることなく、推進したのではと懸念される。低コスト化には、競争力が必要だが、未だ、民間レベルでの競争になるような市場とはなっていない。充填スタンドの設置、運用での更なる低コスト化が必要である。そのためには、設置と運用での各項目でのコスト評価、削減可能量の評価など、費用対効果、即効性を考慮した課題整理が必要である。

・ 充填スタンドの設置および運用のコストダウンを目指していたが、設置では達成できなかった。事業開始時に、整備、運用費で見込みのある目標であったのか疑問が残る。設置、運用でのそれぞれの積み上げでのコスト分析が欲しい。耐久性やコストダウンで無理な仕様、目標設定となっていないか、部品交換などで代替できるところなどはなかったか。コストを分解して、それぞれの費用対効果を考えた分析評価があってもよい。整備・運営コストの低減達成を評価するにあたり、どんな想定で試算したのかを明確にするとよい。量産効果が見込める見込まない項目を洗い出

すだけでも、今後の展開には活用できる。国際標準化や国内標準化、規格整備は、国内産業活性化、躍進のために進めるべきであるが、技術開発との連携が取れていない感がある。技術開発での課題、進展、産業界での課題を見て、相互協力の下で進める必要がある。

- アウトカム目標のうち、整備費低減については、多くの事業の個別の成果と、NEDO事業外のコストや設置台数の実数などに深く関連している。今回アウトカム達成の見込みを△とされているが、これは水素ステーション設置が当初見込みよりも遅れるため、整備費の目標達成時期が遅れるとの理由もその一つであった。水素ステーションの設置台数がアウトカム目標に達していたと台数を仮定した場合に、アウトカム目標のNEDO事業責任分の目標に到達していれば、技術開発事業に対して、一定の高い評価を与えてもよいのではないか。整備費全体の算出が、NEDO事業以外のコスト要因の把握が不明確なため困難であるというのであれば、水素ステーションの整備費を算出・推定することができるように、何らかの工夫を考えてほしい。例えば、毎年第3者の目で最新の事業成果や外部動向を経済的な観点から分析・評価して、水素ステーション設置にかかわる整備費全体の推定値を算出・モニターする体制の整備、あるいは事業として実施する、などが考えられる。事業実施した場合、その実施者の成果発表・公表として、必要な公開を行うことも可能となる。DOEでも、燃料電池システムのコスト見通しを毎年、最新の成果を専門家が技術的・経済的にコスト分析を行う事業として実施している。コスト低減の障壁となる技術課題を明確に抽出でき、活用しているとみられる。
- 今回の整備費削減の計算の中に、本事業の技術的成果のうち、コスト換算が難しいため含まれていない項目があるとのことである。多少にかかわらず、コスト換算の可能性があるもの、あるいは推定できるものを再度精査して、達成見込み値に追加して、本事業の成果として整備費の削減可能幅として示したらどうか。今後のロードマップ改訂における整備費の目標値検討論議にも、今回の事業から得られた成果、見解、見通しとして活用できると思われる。アウトカムの整備費の削減について、技術開発以外の要素も多い。アウトカム目標達成のために取り組みが必要な項目は何か、を抽出して、NEDOで技術開発するものと、それ以外のもの（誰が何をすべきかについても明らかにしてほしい）に分けて、今後の取り組みに反映させてほしい。
- アウトプット指標や目標値は国内においては適切な設置であったと考えられる。一方、目標値を海外と比較することは、技術的・経済的優位性を確保するうえでも重要と思われる。海外では同一の法令が適用されているわけではないため、評価が困難な点が多いのも事実ではある。そこで、例えば、国内外のユーザー企業から見た価格・相場などの共通的な経済的指標により比較できると、優位性がはっきりするのではないか、と思われる。メーカーから直接的にコストや価格の開示をしてもらうことは極めて難しいと思われるため、使用者側に立った視点の第三者によるコスト分析・調査を事業化して、適宜公表あるいは内部情報化して、NEDOのマネジメントに用いることも有効ではないか。

・ 論文数に比べて研究発表・講演が多い。もし、研究発表・講演で発表しているが、論文や報告書などに掲載されていない公開すべき情報がある場合には、何らかの手段で公開を検討する必要がある。
・ 整備費については、アウトカム目標達成の見込み達成度を△としている。設備製造数100台/年の場合のコストダウンをアウトカム目標値としており、設備製造数の減少が影響を与えているとのことであるが、アウトカム目標の見直しは必要なかったのか。最終目標の変更が難しいのであれば、マイルストーンを設定するなどして設置数の変化を反映してアウトカム目標の達成時期を変更してもよかったのかもしれない。または、設備製造数100台/年を想定して、習熟曲線などを活用して推定値で評価してもよかったのかもしれない。いずれにしても未達の理由を、設備製造数だけで説明し、△と評価するのは無理があるのではないかと考えている。アウトプット目標を達成しているのだから、参加事業者の努力が報われる評価ができるように工夫すべきではないかと考えている。アウトカム目標が、アウトプット目標、本事業で実施しない部分の規制見直しと民間企業の取り組みに加えて、設備製造数100台/年の場合に依存していることは、事業の成果を正確に評価することを難しくしている。すべてが計画通り好循環していけばよいが、不確定要素の設備製造数や、本事業では評価できない事業外の規制見直しと民間の取り組みを含んでのアウトカム目標の設定とその評価には課題があるのではないか。後継事業のためにも様々な要素によって事業成果が影響を受ける場合に、事業が事業自体で正当に評価されるように事業設計をすることも必要ではないかと考えている。また、FCV用300Nm³/hの水素STから、HDV用の水素STの目標を持つようになると思うので、その目標は、FCV用との継続性を合理的に説明できるように設定されるべきと思う。
・ しかしながら、アウトプット目標が達成できていて、整備費のアウトカム目標達成の見込みが立たないことに対して、アウトプット目標を適切に見直すことも必要ではなかったかと考えている。特に、整備費のなかの工事費については、早期にメスを入れることを本事業の中で計画をしてもよかったのではないかと思料する。
・ 急激なインフレによる資材価格、建設費、人件費の高騰等のマクロ経済要因については、現状本事業のアウトカムの判断に際して考慮に加えられていない。FCV導入台数が当初目標を大幅に下回っている現状を踏まえ、コストダウンのアウトカム目標の適正な見直しを要する。かつ他国の戦略や技術開発が進展するなか、技術的優位性にかかるアウトカムについても一部見直しが必要である。特に整備費については、当初想定よりもコスト低減効果が小さく、目標達成時期も2030年以降になる見込みであることから、規制緩和、更なる支援を含む当該事業による技術研究開発を超える抜本的な戦略見直しが必要。
・ 論文発表方法、一般に向けた分かりやすい情報発信、成果の普及方策については更に検討、改善の余地があると思われる。世界各国は野心的な目標と共に次々と基本戦略を打ち出し、手厚い支援も用意している国も多い。引き続ききめ細かに最新の各国政策動向、世界の主要プレーヤーの技術開発の進展を正確に把握しながら、我

が国の強みを活かし、国際協調と戦略分野での国際競争のバランスを取りつつ対応してゆくことを期待する。

- そもそも水素ステーションの工事費が低減できず、達成見込みがないことは中間評価段階から顕在化してきていたと思われるので、途中からでも追加のR&D対策が必要であった（規制見直しや許認可の課題などの分析）。すでに世界的に水素社会の実現は単なるFC車両と水素ステーションだけで語ることはできず、産業とインフラ全体を議論しなければならなくなっている。FC車両でも、FCVからHDVへの流れは2021年には顕著になっていたので、「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」の一部でも先取りした活動ができたと思われる。改訂水素基本戦略で「35MPaの導入ポテンシャルも踏まえて検討」とあるので、NEDOとしてどのようにR&Dに反映するかの検討も必要である（開発用要素があるかどうか）。
- アウトカム目標が不適切になってきている以上、まずはその修正が必要で、それにあわせてアウトプット目標も修正されるべき（今回はそのタイミングはなかったと想定）。そもそもTRL指標を適切に公募や評価で活用しているか疑問である。欧米ではTRLを応募・評価で必ず用いており、R&DがTRLをどれだけ進展させたかが明確である。改訂水素基本戦略が「技術で勝ってビジネスでも勝つ」 ことを求めている以上、ビジネス化と社会実装を明確な出口にすべき。「論文発表、特許出願等」は形式的な話になりがちである。特許でも数より「有用性」を問うべきであり、事業者からの報告では、有用性の説明があってしかるべき。
- 1）アウトカム目標（コスト）の設定根拠。水素・燃料電池戦略ロードマップの整備費のコスト目標は、エネ庁側が野村総研に調査させた情報をもとに米国の水素ST価格は2.2億円と公表されているが、（第6回水素・燃料電池戦略協議会資料）その出典は不明であり、戦略協議会資料には「水素STの規模・仕様の違いもあり、単純比較は困難」とコメントが付記されている。つまりアウトカム目標のコストは根拠において仕様と切り離されており根拠として機能していない。NEDOで技術開発にブレークダウンする際にはせめてコスト目標の根拠を明示し共有する取り組みをしてほしかった。税金を投じて技術開発を管理するNEDOとして、「アウトカム達成までの道筋の見直し」が可能であるようにアウトカム目標設定の根拠を明確にすることが求められる。

  2）社会インフラ整備に向けたビジョンの共有。水素ステーションの開発はインフラの整備であるので、将来像としてFCV普及の様態（FCVがどれだけ普及しているか・どのような種類のFCVが普及しているか）に対応した仕様の水素STを適切な配置で整備する必要がある。アウトカム指標の表面数値に引きずられて「水素ステーションの低コスト化」でコストだけに目が向くことは健全ではない。変革期のアウトカム指標として、上流側の水素の供給網の整備がどのように進んでいるかといった外部環境の変化に対応して、どのような仕様の設備を、時間軸としてどのように普及・低コスト化していき、普及にあわせてどのように実運用の結果を吸い上げて改良開発をしていくのかというような的確なビジョン策定・取り組み体制が必要ではないか。

3）新しい高圧エネルギーインフラの整備において、安全も重要な視点。水素ステーションという新しい高圧エネルギーインフラの整備において、「設備の低コスト化」「運用コスト低減」にスポットライトがあたるあまり、安全な設備運用・設備運用結果に対するフィードバックが疎かにならぬようにすることが重要である。社会導入したシステムの改良・改善を通した安全管理の実現（水素ステーションは超高圧システムの社会実装であるので、設備劣化に対する取り組みなど息の長い丁寧な取り組みが必要）などトータルでの社会コスト低減を達成できるような技術開発の枠組みを考えてほしい。

・ 1）公募に対応して応募して採択された個々のプロジェクトのアウトプットとしては概ね良い活動がなされ、それなりに取り組まれている。しかしアウトカム（水素ステーション自立および設備コスト低減）に向けた全体観として十分に機能している印象は弱い。全体仕様を見直す動き・最適化を考える動きや取り組みがないまま・全体展望なしに業界団体などにより個別の規制適正化や技術開発が行われていることに違和感がある。

2）行政側として問題意識・全体観をもってアウトカム（水素ステーションの低コスト化）に関する検討を働きかける取り組みが必要なのではないか。コスト低減が必要でしかもコスト目標の実現が不可能なのであれば、コストが下がるように仕様を見直すかコスト目標自体を見直すしかない。仕様見直しの例として例えば、充填時間を見直す（3分充填を5分充填とするなど）ことでMC法の採用と組み合わせ、小型の汎用圧縮機を採用すれば整備コストは下がるだろう。冷凍機もより汎用な冷凍機となるのでコストはさがる。充填時間が短くて済めば蓄圧器も本数削減が視野に入り、抜本的な低コスト化の議論が可能になるはずである。70MPa水素ステーション以外に低コスト型の35MPa水素ステーションを普及させることもひとつの方法である。

１．３　マネジメント

＜肯定的意見＞

・ 充塡スタンドの設置、運用のコストダウンを目指した総合的な、多方面での研究開発を実施するにあたってオールジャパンの体制で進めており、それぞれの適材適所の配置で適切である。各項目の担当は、機能的に解決を進め、規制緩和、規格標準化までも進めている例もあった。高く評価できる。水素漏洩は、喫緊の課題である。適切な実施者で推進した。本件は、早期に対応を望む。

・ 充塡スタントの整備、運営費でのコストダウンを目指して、各種機器、材料の開発、運用方法や制度、国際標準化を総合的に推進する研究計画である。各項目を適切に進捗管理した。検討委員会や規制・制度の改訂 WG などを設定して、成果をいち早く実用化に向けて推進したのは、NEDO ができる強みを活かしたマネジメントである。国際展開も視野に入れて、日本での規格標準化も協力に、国際標準化に研究計画に入れ込んでいる。国内外の情勢、要望を機敏に見て、HDV への対応も考慮して、研究計画を見直したのは評価できる。

- 各実施者は、十分にその技術力を発揮したと高く評価できる。研究開発データの利活用・提供方針は、適切であった。国際標準関連テーマでは、標準の制定による優位性の確保の一方、他国に不必要に技術情報が流出しないような配慮も必要となる。適切に公開/非公開の内容を明確に区別して標準化の活動をされていると思われる。鋼材の研究開発や圧力容器、シール、ホース、充填技術の研究開発から得られたデータや知見を、ISO 規格の提案に反映するなど、実施者間の連携は適切に行われたと評価できる。これは、日本の標準化活動が、産学官の連携によるデータに基づいた標準を提案して制定する、これまでの実績を支える他国ではまねのできない取り組み方として、各国からも信頼性と評価を勝ち得ている根源であると評価できる。今後も継続することが大切である。
- 各研究項目において、必要な要素技術の開発が網羅されていたと評価できる。また、3 年間で終了した課題もあり、また追加で公募された課題もあり、適切に継続または中止、追加を判断する仕組みが適切に運用されていたと評価できる。
- 実施体制は極めて妥当であり、有機的連携が取られて、十分に機能したことが見て取れる。事業採択プロセスも厳格である。
- アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されている。スケジュールも適切である。技術開発の内容が国際展開・標準化へと反映されるなど、連携は十分にとれている。
- 指揮命令系統は明確に整理されていることが、事業原簿 III-2 頁から読み取れる。実施体制の全体図から、アカデミアと企業がそれぞれの役割を持って参加しており、実用化を目指した体制となっているといえる。採択審査については、採択基準を明確にし、また、公募予告・期間とも適切に実施されており、公平性を担保して実施していたといえる。
- 中間評価での研究開発マネジメントにおける指摘により、整備費と運営費について実用化時期を見据えて横串を通すために技術検討委員会を定期的に開催していたこと、HDV 普及計画に伴う商用ステーションの大規模化の流れを見据えて浪江町に HDV 充填センターを建設したこと、同じく研究開発成果における指摘により、国際標準関連テーマ（ISO および GTR）についてオープン・クローズ戦略に基づいて議論を行って公開・非公開の内容を明確に区別したことなど、中間評価の指摘事項を反映して研究開発の進捗を管理していた点を評価する。
- 水素社会の実現に向けて、水素ステーションの普及に必要な技術的課題を選定し、戦略的な目標を設定していた。実施者間の競争については本事業においては必ずしも適用する性格のものではないが、結果として概ね目標が達成されていることから、当事業に最適な実施者を選定、実施者間の連携が機能したものと考える。
- 必要な要素技術は網羅され、進捗を管理する手法は概ね適切であった。
- 実施者は技術力及び実用化・事業化能力をおおむね発揮していたと思われる。指揮命令系統・責任体制もおおむね問題ない。PM/PL 制度は必要であるが、採択プロセスは、アウトプットに向けては必要十分ではある。研究の健全性・公平性（研究インテグリティ）では知る限りでは問題は聞いていない。

・ 「研究開発の進捗管理」は基本的に担当主査に任されていると思うが、事業者にとっては、毎年の成果報告会が大きなチェックポイントになっており、現状の展開でも問題ない。個別事業内でも、委員会方式がとられるなど、進捗管理と外部チェックが働くようになっている。このような委員会方式は今後も推奨されるべきであり、公募審査の採点基準となってもよいと思われる。ステージゲート審査は必要であり、おおむね問題はない。
・ アウトプットはほぼ達成されており、報告資料を見る限り大きな違和感はない。その意味で実施者は技術力を発揮している。実用化・事業化能力を十分に発揮できる市場となっていないことは、実施者の問題ではなく水素ステーションとして自立を目指せる枠組みを設定できていない行政側と実施している業界側（自動車・インフラ事業者）の問題である。
  全般的に狙った技術開発目標は達成され、影響度がそれほど大きくなくとも（低コスト化というアウトカム・さらに自立化という事業の狙いを実現するには至らない）それぞれ全体プログラムへ貢献を認めることができる。
・ 資料 6.1～6.4 にまとめられた「新たな水素特性判断基準の導入」「長寿命超高圧シール部材及び機器開発」「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術」「水素ステーション等機器の ISO／TC197 国際標準化の推進と水素品質規格」はそれぞれにユーザーが関与し、成果の実用化を目指した体制となっている。
・ アウトプットがほぼ達成されていることから、個別事業の採択プロセスにおいて採択審査も適切に機能していたと考えられる。
・ 各個別事業としてアウトプットは基本的に達成されており、スケジュールが適切に管理されていたことがわかる。
・ 安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など目標達成に必要な要素技術の開発を網羅しようと取り組まれている。
・ NEDO の技術開発で水素 ST 業界全体に関連する内容（充填・品質・計量・規制適正化・鋼種拡大・複合容器）などの進捗は業界団体 FCCJ 内で 4 か月に一度程度開催される水素インフラ SWG などで定期的に報告・共有されてきており、プログラム間・要素技術間で連携する努力、情報共有や進捗管理も事業者側・業界団体側で適切に行われてきている。
・ 採択にあたり、一律ではなく採択事業の内容に応じて研究開発の継続又は中止を判断するための要件・指標、ステージゲート方式を設定するなど、個別事業の管理も適切に実施されており、事業運営において適切に取り組まれていた。

＜問題点・改善点・今後への提言＞
・ 本事業の目標を実施者が、全体で意識したとは評価できない。事業全体で、整備・運用コストの低減に向けた役割、分担を意識して事業に向かうマネジメントがあるとよかった。実施者は、自分らの設定した目標に向けて、着実に進めた。しかし、その先にある水素充填スタンドの整備低コスト化の意識が薄かったのではないか

と懸念する。十分に良い体制を組み、成果は達成されているが、課題間での情報交換が十分になされていたのかが気になる。相互の成果を活用して、相互の課題を認識して推進すると、より良い成果が上がったと思われる。水素社会の実装では市場競争が不可欠であり、民間での開発競争を強化する必要がある。いつ、どのような状況に至れば、それが望めるかのシナリオを準備する段階にある。利用できる材料の範囲拡大に関する開発や評価手法の簡易化などは、低コストにつながるテーマである。しかし、実施者たちが、それを理解して推進している回答がなかった。よく理解して進めれば、低コスト化のシナリオもできたかもしれない。

- 事業開始時点でのコスト低減に向けた戦略的なシナリオが必要であった。中間評価でも指摘されていたが、充填スタンドの整備・運営費のコストダウンを目指して推進する事業であるが、項目に分割して、それぞれで、削減寄与を意識した目標を設定していたのかが理解できない。削減に向けた体制の変更強化で推進が必要でなかったか。また、追加公募に当たっては、進捗に合わせた加速、強化があっても良かったのではないか。中間評価の段階で、全体のコスト分析を実施するような研究項目を立てて評価してみることもあっても良かった。国際標準化活動では、前事業での成果も含めて、日本からの打ち出しをし、日本のプレゼンスを示せた。しかし、国内産業からの要望を受けて、活動してきたかは疑問が残る。O リングの劣化やシール材では、産業界では、未だ課題を抱えている状況であることを理解していたかが疑問である。相互に理解を深めて、産業界の意向にも耳を傾けて進めるとよい。特に、新規に開発を進めた IoT センサーのシステムや吸蔵合金を応用した昇圧機、水素品質管理などの事業では、進捗に合わせて、実用化に進むために、事業の進展を見ながら開発目標を見直すなどがあっても良かった。各項目での情報交換、共有化があったらよかったのではないか。二重配管の検討は、水素インフラ整備では重要な課題である。しかし、本事業で目標としている水素充填スタンドの整備・運用コストの低減に繋がるとのストーリーが見えない。水素スタンドの整備・運用コスト低減の補強が期待できる予算を有効に活用するとよかった。
- 実施者間の横の連携については、全体技術委員会を開催し情報共有を図ったとのことであるが、連携の具体例の説明が明確ではなかった。
- 本来であれば、アウトカム目標を一段ブレークダウンして、NEDO 事業で分担するべきアイテム、すなわち、技術開発が責任を持つアウトカムの分担目標のようなものを定めるべきだったのではないか。その分担目標の実現のため、NEDO 事業で取り組むテーマやその要素課題を設定し、その目標達成を NEDO で管理・評価するべきと思われる。今後の取り組みに期待したい。
- 国際展開・国際標準化の戦略に基づいた、技術開発への要求（フィードバック）があっても良いと思う。技術開発で得られた知見の中には、基礎研究の題材としても重要なものが多く含まれている。基礎研究を行う NEDO 以外の事業とも連携し、将来の我が国の技術開発の体力を蓄えることも、本事業の成果を最大に活用するためのひとつの方策である。

・ 後継事業で扱われる大型車は事業用の車両であるために、コスト評価が特に厳しいと思われる。また、内燃車に比べて運行に制約が生じないかとの懸念を事業者が持っていると思われる。大型トラックユーザーのこれらに対する意見も事業計画に反映すべきと考えている。
・ この事業全体の目的は水素ステーション事業の低コスト化であるが、個別の事業のそれぞれの低コスト化への貢献の内訳が見えないが必ずしもにどのようにつながるのかというデータが存在しない、または分析が不十分である事業もあった。現時点での費用対効果は今後継続して研究するかの判断には本来詳細なコストベネフィット分析が必要であろう。実装においては潜在的なユーザーが技術を採用するかどうかにかかっているため、ユーザーとのコミュニケーションを定期的に行い、必要に応じてアウトカムや手法の修正を実施することが有効ではないか。
・ 要素技術間で連携につき、特に各設備や部品に対する鋼材の研究においては更なる連携や軌道修正の余地があるのではないか。
・ 水素インフラという社会基盤に関する R&D 事業であるため、採択テーマでも「ハイリスク・ハイリターン」なものが少ない。ともすると保守的な目標設定と採用になりがちである。今回の事業でも、一部（水素センサーなど）では新しいアプローチがみられたが、今後もイノベーションを生み出すことを仕組み化（公募含め）することが必要である。個別のテーマ内では事業者間で連携はよく行われていたと想定されるが、事業全体としてもさらなる情報交換や連携の余地はある。より進んだ成果を国際標準化したり、水素ステーションのコストダウンに全方位から取り組む（全事業者の目標を一致させる）ことにもつながる。
・ 成果報告会ではいわゆるメリットレビュー方式も検討に値するが、それは本事業のようなインフラ関連事業よりも先導研究・基盤研究に親和性があると想定される。とりあえずは、現状の管理形式でよいと考える。
・ 各事業が「決められたことを実施する」という NEDO らしい外枠に阻まれて、「新しい水素の供給網を作る」という事業全体を一歩進める取り組み(実施者間での連携、実用化を目指した体制)に昇華できていないことが残念なところ。本事業に限らず補助金が支給されて進められている水素ステーション整備全般として十分な成果が得られていない中、情報共有が十分に進められていないために課題共有が進んでいないのではないか。研究開発データの利活用・提供方針についても再検討されることが望まれる。
・ 縦割り的には本事業の所管外のようだが、補助金により整備が進められてきた「水素ステーションの整備費の分析・運営費の分析情報」が十分に共有されないまま、水素ステーションの整備費低コスト化・運営費低コスト化の技術開発が進められているのが実態である。定量的な現状の分析を十分に行わず・共有されずに、業界事業者が設備の改良・改善に向けた技術開発議論を適切に展開できるとも思えない。NEDO だけの責任ではないが「指揮命令系統及び責任体制が明確であり、かつ機能していた」とは言い難く、監督官庁である METI ともこの点を議論するような取り組みを期待する。

- 米国 NFCTEC の取り組みのように、税金による運営費補助支給の条件として運営情報の報告を義務付け、その公開情報の分析をもとに技術開発プログラム実施内容の議論が展開されるような体制がとられるべきではないか。
- 「必要な要素技術の開発が網羅され」・「各個別事業で当初の狙い通りに成果がでており」・「事業間の連携・情報共有の努力も定期的に十分に行われている状況」にあって、アウトカムである整備費削減が達成されていないという状況、この事業の目的・ねらいである水素ステーションの自立も達成されていないという状況、この状況への対策の展望が共有できない状況である点が課題である。技術開発は前提と目標（アウトカム・アウトプット）の設定によって難易度も変わる。
- 社会へ実装されてはじめて意義をもつうえ、社会実装された状態での課題をフィードバックすることも重要である。技術開発の意義・アウトカム内容・そして技術の社会実装達成までの道筋について丁寧に見直しを実施し、ステークホルダーで共有し、社会実装に取り組むことが重要だろう。

２．評点結果

評価項目・評価結果		各委員の評価							評点
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋									
	(1)アウトカム達成までの道筋	C	B	A	B	B	B	B	2.0
	(2)知的財産・標準化戦略	B	A	A	A	A	B	B	2.6
2. 目標及び達成状況									
	(1)アウトカム目標及び達成見込み	B	B	A	B	B	C	B	2.0
	(2)アウトプット目標及び達成状況	C	A	A	B	A	C	A	2.3
3. マネジメント									
	(1)実施体制	B	A	A	A	B	B	B	2.4
	(2)研究開発計画	C	A	A	A	A	A	A	2.7

≪判定基準≫
A：評価基準に適合し、非常に優れている。 B：評価基準に適合しているが、より望ましくするための改善点もある。 C：評価基準に一部適合しておらず、改善が必要である。 D：評価基準に適合しておらず、抜本的な改善が必要である。

（注）評点は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算・平均して算出。

第２章　評価対象事業に係る資料

１．事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

資料 7

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 燃料電池・水素室

目次

概要 概要-1

プロジェクト用語集 プロジェクト用語集-1

Ⅰ. 事業・アウトカム（社会実装）達成までの道筋 Ⅰ-1

1. 本事業の位置づけ・意義 Ⅰ-1
   1.1 政策的な重要性 Ⅰ-1
   1.2 我が国の状況 Ⅰ-3
   1.3 世界の取り組み状況 Ⅰ-3
   1.4 本事業のねらい Ⅰ-3
2. アウトカム達成までの道筋 Ⅰ-4
3. 知的財産・標準化戦略 Ⅰ-4

Ⅱ. 目標及び達成状況 Ⅱ-1

1. アウトカム目標と達成見込みについて Ⅱ-1

【アウトカム目標】 Ⅱ-1

2. 実施の効果（費用対効果） Ⅱ-2
3. アウトプット目標及び達成状況 Ⅱ-12
   3.1 事業の目標 Ⅱ-12
   3.2 研究開発の内容 Ⅱ-12
   3.3 アウトプット達成状況 Ⅱ-23
4. 研究開発項目毎の成果 Ⅱ-26

Ⅲ. マネジメント Ⅲ-1

1. 実施体制 Ⅲ-1
   1.1 NEDO が関与することの意義 Ⅲ-1
   1.2 研究開発の実施体制 Ⅲ-1
   1.3 個別事業の採択プロセス Ⅲ-2
2. 受益者負担の考え方 Ⅲ-3
3. 研究開発計画 Ⅲ-3
   3.1 研究開発スケジュール Ⅲ-3
   3.2 進捗管理 Ⅲ-4

Ⅳ. 目標及び達成状況の詳細 Ⅳ-1

（添付資料）

- プロジェクト基本計画：添付-1
- 成果詳細：添付-2
- プロジェクト開始時関連資料：添付-3
- 特許論文等リスト：添付-4

概要

最終更新日	2023 年 10 月 19 日

プロジェクト名	超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業	プロジェクト番号	P18011
担当推進部/ ＰＭｇｒまたは担当者及び METI 担当課	次世代電池・水素部　横本克巳（2018 年 6 月～2020 年 11 月） スマートコミュニティ・エネルギーシステム部　大平英二（2021 年　8 月～2023 年 6 月現在）		
０．事業の概要	２０２５年以降のＦＣＶ及び水素ステーションの本格普及、２０３０年以降の水素ステーションの事業自立化に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、ＦＣＶ及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発を行い、一連の機器及びシステムのコスト低減、ＦＣＶの普及展開及び国際競争力確保に資する研究開発等を行う。 ・　本格普及期に向けた水素ステーションの安全性、新たな水素特性判断基準の導入に資する研究開発等を行う。 ・　水素ステーションの規格化・標準化、モジュール化、運営費低減、高圧対応高分子技術、次世代向け水素ステーションに資する研究開発を行う。 ・　ＩＳＯ、ＨＦＣＶ－ＧＴＲ、国際会議等を通じて、海外の政策・市場・研究開発動向を把握し、国内への適切な情報発信、及び日本の政策や技術開発への影響分析等に資する研究開発等を行う。		
１．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋			
1.1　本事業の位置付け・意義	（１）政策上の位置付け 「第４次エネルギー基本計画」（２０１４年４月閣議決定）では、「水素をエネルギーとして利用する”水素社会”についての包括的な検討を進めるべき時期に差し掛かっている」等の記載が盛り込まれており、多様化する柔軟なエネルギー需要構造の構築に取り組むこととされている。 更に２０１７年１２月には再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議にて「水素基本戦略」が発表され、２０５０年を視野に目指す目標や官民が共有すべき方向性・ビジョンが示された。 経済産業省資源エネルギー庁にて作成された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（２０１６年改訂）に、フェーズ１として運輸部門においての水素の利活用として水素ステーションの整備、ＦＣＶの普及目標値が明記されている。また、未来投資戦略２０１７では水素ステーションの戦略的整備に向けた官民一体の新たな推進体制の構築、コスト低減等に向けた技術開発・実証、新たな規制改革実施計画に基づく水素ステーションの保安管理等に関する規制改革をパッケージで推進しＦＣＶ、ＦＣバス、水素ステーションの普及を加速化すると記載されている。 （２）NEDO が関与する意義 FCV・水素ステーションの普及拡大に向けた規制見直し・技術開発は、以下の観点から NEDO が持つ知識、実績を活かして推進すべき事業である。 ・エネルギー政策上の重要度が高く、社会的必要性が大きい。 ・水素・燃料電池産業の競争力強化に貢献。 ・規制見直しの推進には、 産官学の緊密な連携が必要。 ・水素供給インフラについては FCV 普及初期の市場が限られるため、民間単独では開発リスクが大きい。 ・本格的普及、自立化に必要な規格化・標準化は全体として取組。		

		（３）実施の効果 市場規模予測（出典：富士経済「2023 年版水素燃料関連市場の将来展望」） ・水素ステーション　40 億円（2022 年） 339 億円（2030 年） ・FCV 用水素燃料　9 億円（2020 年） 433 億円（2030 年）
	1.2 アウトカム達成までの道筋	本研究開発を通して得られた成果は機構および実施者と共に社会実装に努める。また、本事業で扱っていたテーマの内、更なるコスト低減が見込めるテーマ、大型燃料電池車向けの計量・充填技術、および ISO/TC197 の国際標準化に向けた取り組みついては、後継事業である競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業において、継続して研究開発を実施し、水素ステーションコストの更なる低減、および大規模化への対応を継続して実施することで、アウトカム達成を目指す。 一方で、水素基本戦略にも記載の通り、FCV 台数および水素ステーション設置数が当初目標から乖離している現状を踏まえて、アウトカム目標の見直しについても機構および資源エネルギー庁ともに検討し、水素ステーションの自律的展開を達成する。
	1.3 知的財産・標準化戦略	①　成果の普及 得られた研究開発の成果は、機構及び実施者ともに普及に努める。 ②　標準化等との連携 得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業または国際標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供、標準技術情報（ＴＲ）制度への提案等を戦略的かつ積極的に行う。 ③　知的財産権の帰属 委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第２５条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。 ④　知財マネジメントに係る運用 本プロジェクトは、「ＮＥＤＯプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。
２．目標及び達成状況		
	2.1 アウトカム目標及び達成見込み	（１）アウトカム目標 水素ステーション（固定式オフサイトステーション・３００Ｎｍ３／ｈ）のコスト ２０２５年以降に、 ・　整備費を２．０億円以下まで低減させる。 ・　運営費を現行の１／２以下まで低減させる。 上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。 （２）アウトカム目標の達成見込み 運営費については、本事業の研究開発によって 2030 年度におけるコストが研究成果の社会実装が進めば、達成できる見込みがある。一方で、整備費（主に圧縮機、蓄圧器、および工事費）については、当初想定よりもコスト低減効果が小さいこと、および目標達成時期が 2030 年よりも後になる見込みであることから、全体としては目標達成が見込めない状況。 水素ステーション自立化のために必要とされるテーマについては、「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」において、更なるコストダウンに向けた研究開発を継続する。一方で、ロードマップ目標は水素ステーション構成機器の量産・大量受注を前提としているが、昨今の水素ステーションの建設数が増えていない状況から、本目標の前提が崩れている。上記状況から、水素基本戦略には、水素ステーション自立化のための目標見直しを実施するとの記載がある。

2.2 アウトプット目標及び達成状況	研究開発項目Ⅰ：「国内規制適正化に関わる技術開発」 ・アウトプット目標 主に汎用材料の適用範囲拡大に関し、高圧水素下での評価試験結果を基に基準案作成を行う。 ・達成状況 ◆ リスクアセスメントを実施し法規・基準の見直し緩和を図り新たな技術基準案を策定した。 ◆ 汎用性ステンレスの使用可能範囲拡大のための新たな水素特性判断基準を制定し、Ni 当量低減を図った。 研究開発項目Ⅱ：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」 ・アウトプット目標 水素ステーションを構成する機器、部品等の実用化見通し及びコスト低減効果を検証し、水素ステーション設備コスト低減の目処付けを行う。 ・達成状況 ◆技術開発及び新たな評価法を見いだすことで、運営コスト（メンテナンスコスト、消費電力、交換頻度）の低減や部材の長寿命化の目処を付けた。 研究開発項目Ⅲ：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」 ・アウトプット目標 ● 水素ステーション関連技術の国際標準化、ＦＣＶにおける国内規制の適正化・国際基準調和・国際標準化等に資するデータ取得を行う。 ● ＩＥＡ等海外の政策・市場・研究開発動向に係る情報を収集し、国内に発信する。 ・達成状況 ◆ 国際規格策定について世界をリードし、標準化活動に係る国際連携の推進を実施し、日本の産業振興・競争力強化を図った。	

3．マネジメント

3.1 実施体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギーシステム課 水素・燃料電池戦略室
	プロジェクトリーダー	―
	プロジェクトマネージャー	次世代電池・水素部 横本克巳（2018 年 6 月～2020 年 11 月） スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 大平英二（2020 年 8 月～2023 年 6 月現在）
	委託先	研究開発項目１ ［委託先］ (一財)石油エネルギー技術センター、(一財)石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、(大)九州大学、(一財)金属系材料研究開発センター、日本製鉄(株)、愛知製鋼(株)、(株)日本製鋼所、(国研)物質・材料研究機構 研究開発項目２ ［委託先］ ＪＦＥスチール(株)、ＪＦＥコンテイナー(株)、千代田化工建設(株)、(一財)石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、(大)東京大学、(株)日本製鋼所、(一社)水素供給利用技術協会、(大)九州大学、(一財)化学物質評価研究機構、ＮＯＫ(株)、髙石工業(株)、日本ピラー工業(株)、(株)キッツ、(株)フジキン、(株)タツノ、トキコシステムソリューションズ(株)、(大)九州大学、(一社)日

		本ゴム工業会、ＥＮＥＯＳ(株)、(株)本田技術研究所、トキコシステムソリューションズ(株)、(一社)水素供給利用技術協会、 (一財)金属系材料研究開発センター、日本製鉄(株)、ヌヴォトンテクノロジージャパン(株) 、(株)四国総合研究所、(国研)産業技術総合研究所、日本重化学工業(株)、(国研)産業技術総合研究所、岩谷産業(株)、(株)タツノ、トキコシステムソリューションズ(株)、(一社)水素供給利用技術協会、(一財)日本自動車研究所 研究開発項目３ ［委託先］ (一社)水素供給利用技術協会、(一財)日本自動車研究所、(一財)日本自動車研究所、(株)大和総研、(国研)産業技術総合研究所、NTT アノードエナジー(株)、豊田通商(株)

3.2 受益者負担の考え方

事業費推移（単位：百万円）

主な実施事項	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	
研究開発項目１ 国内規制適正化	→	→	→	→	→		
研究開発項目２ 水素 ST コスト低減	→	→	→	→	→	→	
研究開発項目３ 国際展開標準化	→	→	→	→	→		
会計・勘定	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	総額
一般会計	-	-	-	-	-	-	-
特別会計（需給）	1,611	2,579	2,295	3,260	6,091	53	15,890
開発成果促進財源	-	-	-	-	-	-	-
総 NEDO 負担額	1,611	2,579	2,295	3,260	6,091	53	15,890

3.3 研究開発計画

情勢変化への対応	2023 年 6 月の水素基本戦略改定版に記載の通り、HDV 普及に伴う商用ステーションの大規模化の流れを見据えて、2020 年に新たなテーマを採択し、浪江町に HDV 充填センターを建設するなど、市場の流れに対応した開発項目選定およびスケジュールの設定を実施した。	
中間評価結果への対応	研究開発マネジメント 【１】目標設定に関しては、整備費・運営費の削減等の目標は総合的なものであり、個々の要素が適切に構成され管理される必要がある。	技術検討委員会を定期的に開催し、各研究開発テーマの実用化により期待される水素ステーションの設置・運営費用削減効果について、実用化時期に留意しつつ横串を入れて整理した。また、世界市場の動向についての最新情報を積極的に収集し、個別テーマへフィードバックすることで実施者のモチベーション向上に繋げた。年に一度成果報告会を開催し、情報発信に努めた。
	研究開発マネジメント 【２】本事業は、商用ステーションの設置と並行して技術開発を進めるという特殊性から、開発成果の反映にはスピード感が求められる一方で、将来に向けた着実な成果も求められる。また、開発項目の選定や開発スケジュールの的確な設定、さらには技	個々の研究開発テーマについて、ターゲットとする出口を明確にしつつ、テーマ設定やスケジュールの妥当性、知財戦略等、技術委員会等において検証し、必要に応じて見直しを行った。また、HDV 普及に伴う商用ステーションの大規模化の流れを見据えて、浪江町に HDV 充填センターを建設するなど、市場

		術の公開・標準化によってコスト低減をはかるべきテーマか、独自性を保つことによって競争力を維持するべきテーマかの適切な選別等、NEDO のマネジメントに期待したい。	の流れに対応した開発項目およびスケジュールの設定を実施した。
		研究開発成果 【３】今後、国内外で水素戦略をリードするためには、知的財産権の出願・審査請求・登録を、競合国や競合企業との関係を考慮して適切に実施していただく。	研究開発成果が流出するリスクに留意し、適宜、事業実施者と知的財産権の出願要否を検討した。また、国際標準関連テーマ（ISO および GTR）については、オープン/クローズ戦略に基づいて議論を行い、公開/非公開の内容を明確に区別した。
		研究開発成果 【４】各国の R&D 情報を吸い上げ、新規アイディアの採択と率先実施等により、国際的に優位性のある技術やコンセプトの育成も行っていくことを期待したい。	諸外国の水素ステーションに関する事業動向について、各国関係者との意見交換を継続的に実施し、最新情報の収集・分析を行った。具体的には、NOW や DOE との国際インフラワークショップに運営メンバーとして参画し、参加メンバーの選定を行った上で、各国の情報収集を行った。また、技術委員会等を通じて、研究開発項目の追加等、柔軟な事業運営を行った。
		成果の実用化に向けた取り組み及び見通し 【５】製品の国内での社会実装に加え、国外へのインフラ輸出も視野に入れ、市場調査、競合技術評価、市場機会分析といった、世界市場の分析と国際展開に必要な戦略情報のさらなる収集が望まれる。	2020 年度で終了予定であった「水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究」（大和総研）を 2 年間期間延長し、本事業終了時まで継続的に世界市場や国際展開に係る情報の収集を行った。
		成果の実用化に向けた取り組み及び見通し 【６】本事業への理解促進、支援の継続・拡大や水素ステーション事業化への産業界の意欲を維持・増大させるために、事業成果全体をまとめて、水素ステーションの設置費用・運営費用が政府などの目標に対してどの程度にまで到達／到達見込み／到達可能性があるのかを、必要に応じてわかりやすく示すことが望まれる。	【１】の対応に同じ。
	評価に関する事項	事前評価	2017 年度実施　担当部　新エネルギー部
		中間評価	2020 年度実施　担当部　次世代電池・水素部
		終了時評価	2023 年度実施　担当部　スマートコミュニティ・エネルギーシステム部
別添			
投稿論文		30 件	
特　　許		「出願」26 件（うち国際出願　10 件）	
その他の外部発表（プレス発表等）		「研究発表・講演・新聞・雑誌等への掲載」 234 件	
基本計画に関する事項		作成時期	2018 年 3 月　作成
		変更履歴	2018 年 4 月　改訂（担当部を変更） 2018 年 8 月　改訂（研究開発項目の内容を一部改訂） 2020 年 8 月　改訂（プロジェクトマネージャーの追加）

プロジェクト用語集

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

1-(1)：「本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発」

一般財団法人石油エネルギー技術センター

	用 語	説 明
英数	FCV	燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle）のこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走る車を指す。
	FMEA	Failure Mode and Effects Analysis の略。故障モード影響解析。システムやプロセスの構成要素に起こりうる故障を予測し、考えられる原因や影響を事前に解析・評価することで設計・計画上の問題点を摘出し、事前対策の実施を通じてトラブル未然防止を図る手法。
	HAZOP	Hazard and Operability Studies の略。システムやプロセスの操作因子、制御因子などのパラメータに対して、それが適切な状態からはずれた場合にどのような災害につながるのかを分析する手法。
	HPIT	Hydrogen Powered Industrial Truck の略。燃料電池システムにより駆動される電動の Industrial Truck であり、フォークリフト、空港の牽引車両などが含まれる。
	KHK	高圧ガス保安法第１条に明記されている「高圧ガス保安協会」（協会）の略称。「高圧ガスの保安に関する自主的な活動を促進し、もつて公共の安全を確保する（同条）」という同法の目的を達成する中心的役割を担っている、「高圧ガスによる災害の防止に資するため、高圧ガスの保安に関する調査、研究及び指導、高圧ガスの保安に関する検査等の業務を行う（第 59 条の 2）」団体である。
	NFPA	The National Fire Protection Association の略で、米国防火協会を指す。NFPA は多くの防火安全基準を作成し、米国の多くの州で引用及び適用されている。水素に関する基準は NFPA2、防爆に関する基準は NEPS70 で規定されている。
	QRA	Quantitative Risk Assessment 定量的リスクアセスメント プラントの運転等に伴うリスクを定量的に評価するために用いられるリスクアセスメント手法のひとつであり、主に海外で、製油所やガス処理、液化天然ガス（LNG）プラントなどの建設を計画する際にしばしば実施される
あ行	圧力リリーフ弁	放出する気体の圧力を監視し、安全装置が作動する圧力より小さい値で設定された圧力以上の圧力になった場合に開となり、当該安全装置が作動する前に圧力を低下させる機能を有する弁
	安全弁	高圧ガス機器の内圧が設計圧力以上にならないように圧力を逃がすための安全装置。
	一般高圧ガス保安規則	高圧ガス保安法 （昭和二十六年法律第二百四号。以下「法」という。）に基づいて、高圧ガスに関する保安（コンビナート等保安規則 （昭和六十一年通商産業省令第八十八号）に規定する特定製造事業所に係る高圧ガスの製造に関する保安を除く。）について規定する。
	オフサイト方式	水素スタンドの敷地外で製造した水素を水素スタンド内に運び込む方式の水素スタンドのこと。
	オリフィス	流量を低減させるために配管中に設定される管径を狭めた部分

	用 語	説 明
	オンサイト方式	水素スタンドの敷地内で水素を製造する方式の水素スタンドのこと。
か行	ガイドライン	技術基準の分類における「技術文書」にあたる。技術文書とは、①技術的な成熟度その他の点で、十分なコンセンサスに達する段階には至っていない規格案であって、将来的に制定が期待されるもの、②規格等の作成根拠に関する技術調査報告書等を指す。
	ガス事業法	ガス事業の運営を調整することによって、ガスの使用者の利益を保護し、及びガス事業の健全な発達を図るとともに、ガス工作物の工事、維持及び運用並びにガス用品の製造及び販売を規制することによって、公共の安全を確保し、あわせて公害の防止を図ることを目的とする法律
	過流防止弁	水素ステーションの蓄圧器の出口、または充填容器等の出口側に設ける、圧縮水素の流量が著しく増加することを防止する為の弁
	嵌合	「かんごう」と読む。機械部品の軸と穴とを互いにぴったりと合うように入れ込むことをいう。ここでは、ディスペンサーノズルと車載容器レセプタクルの接合状態を示す。
	危害予防規程	危害予防規程は、高圧ガス保安法第２６条第１項に第一種製造者が定めるべきものとして規定されている。災害の発生の防止や災害の発生が起きた場合において、事業所が自ら行うべき保安活動について規定したもので、保安体制、緊急時の対応方法、設備の整備・点検等の管理方法等を記載する必要がある。本プロジェクトでは、技術基準案の一つとして危害予防規程の指針案を作成している。
	技術基準	本プロジェクトにおける「技術基準」とは、圧縮水素スタンドに係る圧縮水素等の取扱い及びこれらに係る設備、施設等の設計、施工、維持管理等並びに容器の製造、設計、試験、検査等に関する保安を推進するために、最新の技術的知見基づき制定される基準。技術基準には、規格、質疑応答・運用解釈、技術文書に分類される。
	基本通達 高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）	高圧ガス保安法や一般高圧ガス保安規則等の省令に記載された内容に関し、具体的な運用の仕方や解釈が記載されている。内規ともいう。本プロジェクトの成果として、「顧客に自ら充填に係る行為をさせる圧縮水素スタンド」における保安体制や駆けつけ体制等について追記された。 「保安監督者が複数のスタンドを兼任する場合」の「兼任保安監督者」及び「準保安監督者」等についても追記された。
	緊急遮断装置	緊急時に当該装置が遠隔操作により作動し、水素の流れを遮断するもの。規定した温度が超えたときに直ちに自動的に閉止作動するものも含まれる。
	兼任保安監督者	複数の水素スタンドを兼務する保安監督者のこと。現状の高圧ガス保安法では、複数のスタンドの兼任は許容されていないため、本プロジェクトで必要要件を検討し、保安を維持しながら複数のスタンドを兼任するための技術基準案を作成した。
	高圧ガス保安法	高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他の取扱及び消費並びに容器の製造及び取扱を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスの保安に関する自主的な活動を促進し、もつて公共の安全を確保することを目的とする法律。本プロジェクトにおける技術基準案はこれに基づいて作成される。
	公道ディスペンサー距離	水素ディスペンサーと公道との間に確保せねばならぬ距離であり、一般高圧ガス保安規則第７条の３において圧縮水素スタンド設備に義務付けられている。

	用 語	説 明
さ行	敷地境界距離	高圧ガス設備と敷地境界との間に確保せねばならぬ距離であり、一般高圧ガス保安規則第 7 条の 3 において圧縮水素スタンド設備に義務付けられている。
	車載容器	燃料電池自動車の車両に固定した燃料装置用として圧縮水素を充填するための容器。
	車載容器の記載事項	燃料電池自動車の車載容器の記載事項とは、車載容器総括証票における充填すべきガスの名称、搭載容器の本数、充填可能期限、検査有効期限、最高充填圧力、車台番号、及び容器再検査合格商標における再検査有効期限、再検査日をいう。高圧ガス保安法第 48 条より、車載容器に水素を充填する場合に、本記載事項を確認する必要がある。
	遮断弁	危険な事象が見つかり次第、有害な液体や外部の炭化水素（気体）の流れを遮断するよう設計された作動弁
	準保安監督者	保安監督者が兼務する水素スタンドに常駐が義務付けられている従業者のこと。本プロジェクトにおいて、保安監督者が複数の水素スタンドを兼任しても保安を維持できる要件として、スキルの高い従業者を選任することを提案した。この考え方が基本通達に盛り込まれる予定。
	障壁	法令（高圧ガス保安法等）で定める保安距離を緩和し、保安物件を有効に保護するために設置する強固な壁。（保安距離；高圧ガス設備から保安物件までの法令で定める距離）
	水素出荷設備	圧縮水素スタンドが有する圧縮機（出荷専用の圧縮機を有さない）や蓄圧器から供給される圧縮水素を、圧縮水素スタンド向け圧縮水素出荷用容器に充填するための専用の処理設備
	製造細目告示	製造施設の位置、構造及び設備並びに製造の方法等に関する技術基準の細目を定める告示。
	セルフ水素スタンド	ドライバーが自ら、燃料電池自動車（FCV）に燃料水素を充填することができる水素スタンド。本プロジェクトでは、国内でのセルフ水素スタンド実施の可能性及び詳細な規格・基準について検討。
た行	蓄圧器	燃料電池車に充填するための水素ガスを高圧で貯蔵する容器。蓄圧器はその構造、材料により「鋼製蓄圧器」（タイプ 1）と「複合容器蓄圧器」（タイプ２，３，４）に分類される。
	ディスペンサー	圧縮水素スタンド内の装置のうち、燃料電池自動車に燃料として水素ガスを供給する装置。筐体、流量計、バルブ、充填ホース、緊急離脱カップリング、充填カップリングで構成される。
は行	保安監督者	高圧ガス保安法第 27 条の 2 第 1 項第 1 号の経済産業省令で定める、保安統括者等の選任を必要としない第一種製造者において、高圧ガスの製造にかかる保安について監督するものの通称。圧縮水素スタンド（処理能力 25 万㎥/日未満）もこれに該当する。
	保安検査	高圧ガス保安法 35 条。 第一種製造者は、高圧ガスの爆発その他災害が発生するおそれがある製造のための施設について、経済産業省令で定めるところにより、定期に、都道府県知事が行う保安検査を受けなければならない。
ら行	離隔距離	水素スタンドで義務付けられている 3 つの距離（敷地境界距離、火気離隔距離、公道ディスペンサー距離）の総称。高圧ガス保安法で定義された用語ではない。
	リスクアセスメント	リスク解析によりハザードを特定し、ハザードから事故が起こるシナリオを明らかにし、次に、その起こりやすさと影響度を組み合わせてリスクの大きさ（リスクレベル）を算定し、リスク評価によ

	用 語	説 明
		りその許容基準を設定し、必要に応じてリスク低減策を講じる一連の検討プロセスのこと。
	例示基準	本項では「一般高圧ガス保安規則関係例示基準」のことを指す。一般高圧ガス保安規則関係例示基準は、一般高圧ガス保安規則に定める技術的要件を満たす技術的内容をできる限り具体的に例示したもので、一般高圧ガス保安規則の機能性基準を満たしているかどうかを判断する際の適合性評価に用いられ、このとおりであれば当該機能性基準に適合するとされる。

1-(2)-①：「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」

一般財団法人石油エネルギー技術センター／高圧ガス保安協会／
国立大学法人九州大学／一般財団法人金属系材料研究開発センター／
日本製鉄株式会社／愛知製鋼株式会社／株式会社日本製鋼所

	用 語	説 明
英数	0.2%耐力	オーステナイト鋼では応力-ひずみ線図において明瞭な降伏点が示されないため、0.2%の永久ひずみが表れる点が降伏点の代用として用いられる。JIS 規格においても降伏応力の代わりに 0.2%耐力が規定されている。
	Cr 当量	溶接分野において、溶接時のフェライトの生成のしやすさを指す指標。該当する元素の量を用いて以下の式で表される。 Cr 当量 ＝ Cr＋1.5×Si＋Mo＋0.5×Nb＋2×Ti（mass%）
	GTAW （ Gas Tungsten Arc Welding）	タングステンを電極棒に使用して、別の溶接材料（溶加材（溶接棒））をアーク中で溶融して溶接する方式。
	KHKS 0220	高圧ガス保安協会が発行する、超高圧ガス設備に関する技術基準。
	Ni 当量	1)熱力学的立場から導入された Fe-Cr-Ni 系ステンレス鋼の化学組成上のオーステナイト組織の安定度を示す式で、基準の元素として Ni を用いている。本事業で用いられる Ni 当量は下記の平山の式で求められる。 Ni 当量＝12.6×C+0.35×Si+1.05×Mn+Ni+0.65×Cr+0.98×Mo（mass%） 2)溶接分野においても Ni 当量という同音の用語が使用されるが内容は 1)と異なる。溶接分野では溶接時のオーステナイト相の生成のしやすさを指し、該当する元素の量を用いて以下の式で表される。 Ni 当量 ＝ Ni＋0.5×Mn＋30×C＋30×N（mass%） 溶接の項目において単に Ni 当量と呼ぶ場合は 2)を指し、1)の意味で用いる場合は Ni 当量（平山の式）と表記し区別する。
	REL（相対伸び）	SSRT 試験での試験片破断時における伸び量（破断伸び）について、高圧水素ガス雰囲気における値を大気または不活性ガス雰囲気における値で除した値。
	RRA（相対絞り）	SSRT 試験での試験片破断時における絞り量について、高圧水素ガス雰囲気における絞りを大気中または不活性ガス雰囲気における絞りで除した値。
	RTS（相対引張強さ）	SSRT 試験での試験片破断時における最大応力（破断強度）について、高圧水素ガス雰囲気における引張強さを大気中または不活性ガス雰囲気における引張強さで除した値。
	SSRT	低歪速度引張試験（Slow Strain Rate Test）のこと。ある環境下で一定の低歪み速度

	用 語	説 明
		で引張荷重を負荷していき、破断時の伸びや破面の観察で脆化の程度を評価する試験方法。
	SUH660	常温、及び高温において高い強度を有する析出強化型オーステナイトステンレス鋼である。SUS-316 に比べ Ni を多量に含み（24～27%）、Ti、Al、V 等の析出硬化性元素が添加されている。固容化熱処理（約 900℃、又は 980℃の急冷）と時効処理（700～760℃の徐冷）を行い製造される。高い強度と耐水素性を有する。やや加工性に難がある。
	SUS301L SUS304 SUS304L SUS304LN SUS305 SUS316 SUS316L	JIS 規格において規定されているオーステナイト系ステンレス鋼の種類。板、管などの形状によっても該当する規格が異なっている。 鉄のほか C, Si, Mn, P, S, Ni, Cr を含み、耐食性・耐孔食性を向上させたオーステナイト系ステンレス鋼。Mo を添加している場合もある。左記の名称の違いは主に成分の違いによる。 ステンレス鋼では表面に「不動態被膜」という薄い膜が形成され、耐食性や耐薬品性を向上させている。 名称の L は、炭素含有量がより低く規定された極低炭素鋼であることを意味し、耐粒界腐食性が向上し溶接用途に適している。 名称の LN は上記説明に加え鋼材中に窒素も含まれていることも示している。
あ行	一般則例示基準	本報告書では「一般高圧ガス保安規則関係例示基準」のことを指す。一般高圧ガス保安規則関係例示基準は、一般高圧ガス保安規則に定める技術的要件を満たす技術的内容をできる限り具体的に例示したもので、一般高圧ガス保安規則の機能性基準を満たしているかどうかを判断する際の適合性評価に用いられ、このとおりであれば当該機能性基準に適合するとされる。
	鋭敏化	溶接時の熱履歴が適正でなかった場合などに起こる現象であり、材料内のカーボンが結晶粒界に Cr との化合物を生成し、結晶粒界の近傍で Cr が不足することによって耐食性が低下する現象。
	応力-ひずみ線図	材料の引張試験によって得られる応力とひずみの関係図である。この図から引張強さ、伸び、0.2%耐力等の機械的特性値が得られる。
か行	共振疲労試験	垂直に設置した棒状試験片の上部に重錘を取付け，架台ごと振動させて試験片を共振させ破壊に至らしめる疲労試験方法。水素ガス環境中油圧サーボ疲労試験機では、荷重伝達ロッドと圧力容器の間の摺動部の存在により試験周波数が 1Hz 程度に制限されるのに対し、水素ガス環境中共振疲労試験機では摺動部が存在せず、数十 Hz での試験が可能である。
	許容引張応力	機械や構造物に許容される引張側の強さ。適用する材料の常温及び設計温度での引張り強さを設計係数で除した値、又は降伏点（又は耐力）を 1.5 で除した値のうち、最も小さい値を用いる。
	減面率	冷間加工度の項目を参照。
	固溶化熱処理	合金成分が固溶体に溶解する温度以上に加熱して十分な時間保持し、急冷してその析出を阻止する操作。ステンレス鋼では炭化物などを素地に固溶させて安定した耐食性を確保するために行われ、また時効硬化形合金では時効処理の前の準備として行われる。溶体化処理とも呼ばれる。一般にオーステナイト系ステンレス鋼では、1,010℃～1,150℃に加熱し急冷する。

	用 語	説 明
さ行	絞り	引張試験や SSRT 試験での試験片破断後における最小断面積とその原断面積との差の原断面積に対する百分率。
	シールドガス	溶接中にアークと溶接金属を覆い、空気が溶接雰囲気内に侵入することを防ぐために用いるガス。
	水素適合性	金属材料は水素による脆化を起こすことが知られている。水素中での使用に適した材料であれば水素適合性が高いという表現がなされる。Ni 当量の増加につれてオーステナイト構造が安定化、水素脆化への抵抗が増加して水素適合性が向上する。
た行	蓄圧器	水素スタンドにおいて、燃料電池車に充填するための水素ガスを高圧で貯蔵する容器。蓄圧器はその構造、材料により「鋼製蓄圧器」（タイプ 1）、金属層の胴部を炭素繊維強化プラスチックで補強した「鋼製蓄圧器（タイプ 2）、金属ライナーまたは樹脂製ライナーを炭素繊維強化プラスチックで補強した「複合圧力容器蓄圧器」（タイプ３，４）に分類される。
	低合金鋼技術文書 JPEC-TD0003	（一財）石油エネルギー技術センターが発行した低合金鋼の利用に関する技術文書を指す。
	特定則	「特定設備検査規則」のことで高圧ガス保安法における特定設備について製造方法や検査方法等を定めた規則。直管の曲げ加工に関しては別添に技術的な詳細が記載されている。
な行	熱間圧延	金属が加工による硬化を生じない再結晶温度以上の温度で圧延が行われる加工法。
	熱間鍛造	高温に熱した金属をプレスし金型成形を行う金属加工法。冷間鍛造に比較し、大型材料や複雑形状の加工に適する。
は行	バタリング溶接	アーク溶接の溶接現象に定義される用語の一つであり、 突合せ溶接（母材がほぼ同じ面内の溶接継手となる溶接）を行う際に、突合せ溶接継手の開先面に、肉盛溶接、溶射などのように母材表面に金属を溶着させる方法を行うこと。
	疲労試験	試験片に繰り返しの応力を加え、破断までの繰り返し数や破断が起こらない応力を評価する試験。試験結果は一般的には応力(S)を縦軸、繰り返し数(N)を横軸にとって表す。
	疲労限度	無限回繰返しても材料が破壊されずに耐えうる最大の変動応力。
や行	溶接後熱処理	溶接部を溶接後に徐加熱・保持・徐冷する処理で、溶接残留応力の緩和，溶接硬化物の軟化やじん性の向上などを図るために行う。溶接後熱処理を行わないものを As weld、溶接ままという。
	溶接熱影響部	溶接・切断などの熱で組織、冶金的性質、機械的性質などに変化が生じた、溶接金属の周囲に位置する溶融していない母材の部分をいう。
	溶体化熱処理	固溶化熱処理の項目を参照。
ら行	冷間加工	塑性変形を利用した加工方法。常温もしくは材料の再結晶温度未満で行なう加工である。主に金属材料で用いられるが、鋼の場合、通常は摂氏 350-500 度未満で行われる。冷間加工によって金属は加工硬化し、残留応力やひずみエネルギーが蓄積されるので加工前より不安定な性質となる。冷間加工の例では冷間圧延、引抜き、冷間鍛造、プレスなどがある。
	冷間加工度	冷間加工の前後による断面積の減少度合いを冷間加工度として表したもの。加工前の材料の断面積と加工後の断面積の差を加工前の材料の断面積で割った百分率（%）として計算され、減面率と等しい。

1-(2)-③：「中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発」

国立研究開発法人物質・材料研究機構

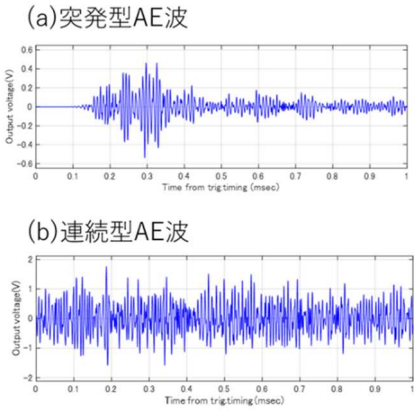
	用 語	説 明
英数	HPIS	High Pressure Institute of Japan Standard （日本高圧力技術協会規格）の略。
	ISO	International Organization for Standardization（国際標準化機構）の略。
	REL	Relative ELongation の略。相対伸びのこと。低ひずみ速度引張試験（SSRT）で得られた伸びについて、下記式に基づき算出した値。 相対伸び= (水素中の伸び)／(大気または不活性ガス中の伸び) 水素適合性を評価する指標となる。
	RRA	Relative Reduction of Area の略。相対絞りのこと。低ひずみ速度引張試験(SSRT)で得られた絞りについて、下記式に基づき算出した値。 相対絞り= (水素中の絞り)／(大気または不活性ガス中の絞り) 水素適合性を評価する指標となる。
	SSRT	Slow Strain Rate Test （低ひずみ速度（引張）試験）の略。ある環境下で一定の低ひずみ速度で引張荷重を負荷していき、破断時の伸びや絞り、破面の観察で脆化の程度を評価する試験方法。
た行	電着ダイヤモンド研磨	金属製の線材上に電気メッキによってダイヤモンド砥粒を固定させたものを作製し、それを用いて行う研磨。
ら行	ラウンドロビンテスト（RRT）	同じサンプルを同時に複数の試験所で試験・分析を実施し、統計的に測定値の偏りやばらつきを評価する方法。
	流動研磨	柔らかい研磨材と機械の組み合わせによって行う面研磨方法。
わ行	ワイヤカット	ワイヤーカットとは、真鍮製をはじめとした電極線（ワイヤー）を供給しながら通電を行い、電極からの放電によって、工作物を溶かして切断を行う加工方法。

研究開発項目２：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

2-(2)-①：「水素ステーション用タイプ２蓄圧器の供用中検査手法の研究開発」

JFE スチール株式会社／JFE コンテイナー株式会社／千代田化工建設株式会社

	用 語	説 明
英数	AE 法	材料が変形あるいは破壊する際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを音波（弾性波、AE 波）として放出する現象。AE 波は主に超音波領域(数 10kHz～数 MHz)の高い周波数成分を持つ。
	AE 振幅	AE 波の振動の大きさ。
	CFRP	炭素繊維強化プラスチック（CFRP: carbon fiber reinforced plastic, CFRP）は、強化材として炭素繊維を用いた繊維強化プラスチックである。母材には主にエポキシ樹脂が用いられる。単にカーボン樹脂やカーボンとも呼ばれる。

	用 語	説 明
か行	渦流探傷	金属などの導電体表面付近に存在する割れや腐食などの欠陥を非破壊で検査する手法
	技量認定技術者	非破壊検査技術者技量認定試験とは、非破壊で製品を傷つけることなく検査し、製品の安全性や品質を調査する技術者を認定する資格
	グランドナット	水素蓄圧器を構成する部材の一つであり、内包する水素ガスを封止するための蓋部材を支える。グランドナットの外周にはねじが切られており、水素蓄圧器の金属円筒に設けられた雌ねじと螺合することで固定される。
さ行	差圧充填	水素ステーションにおいて、車載高圧水素容器に水素蓄圧器の内圧のみで充填する方法
	充填プロトコル	車載高圧水素容器に水素を安全に効率よく充填する条件
た行	タイプⅢ	ライナーを繊維強化プラスチックで補強した構造（複合構造）を有する圧力容器の一種。金属ライナーを使用し、その全体（胴部と鏡部）を繊維で補強した複合容器をタイプ III と呼ぶ。
	定期自主検査	高圧ガス保安法 35 条の 2。第一種製造者、指定数量以上の第二種製造者は、製造又は消費のための施設であって経済産業省令で定めるものについて、経済産業省令で定めるところにより、定期に、保安のための自主検査を行い、その検査記録を作成し、これを保存しなければならない。
	突発型 AE 波	AE 信号は、性質の異なる 2 つの信号にわけられます。1 つは、下図(a)で示されるように、弾性波が立ち上がり、その後減衰していく「突発型 AE」、もう一つは摩擦・摩耗現象が起因とされる(b)「連続型 AE」 
な行	日本非破壊検査協会	一般社団法人 日本非破壊検査協会は、「非破壊検査法に関する調査・研究を行い、技術水準の向上・普及を図り、もって学術文化の発展に寄与する」ことを目的とした学術団体。
	日本非破壊検査協会規格	日本非破壊検査協会が制定するする非破壊試験関連の規格
	ノイズ	試験対象物の表面状態又は組織若しくは装置又は試験条件に起因する本来的でない指示。
は行	フェーズドアレイ法	超音波探傷検査の方法の一つ。アレイ探触子の各振動子から異なったタイミングで超音波を送信および受信し、アレイ探触子を走査することなく所定の領域全体を探傷できる。
	プラグ	水素蓄圧器を構成する部材の一つであり、内包する水素ガスを封止するための蓋部材である。
ら行	連続陰極水素チャー	溶液中に試験片と対極を浸漬し、試験片を陰極とし て水の電気分解を行うことにより、試

	用 語	説 明
	ジ	験片表面を水素 環境にばく露させる方法である。溶液の種類、電流密 度の制御等によって目標の水素量をチャージしやすい 方法である。陰極チャージ法とも呼ばれる。

2-(2)-②：「複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」

一般財団法人石油エネルギー技術センター／高圧ガス保安協会／
国立大学法人東京大学／株式会社日本製鋼所

	用 語	説 明
英数	JPEC-TD	一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）が発行する技術文書（Technical Document）。
	KHKS 0220	高圧ガス保安協会（KHK）が発行する技術基準「超高圧ガス設備に関する基準」。
	KHKS 0225	高圧ガス保安協会（KHK）が発行する技術基準「圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する基準」。
	S-N 線図	縦軸を Stress-amplitude（応力振幅）、横軸を Number of cycles to failure（破断までの繰返し数=疲労寿命、対数目盛）とした疲労特性の関係図。
あ行	圧力サイクル試験	容器に気体または液体（圧力媒体）によって繰返し圧力を加え、破断までの繰返し数(=疲労寿命)を計測する試験。 KHKS 0225 における疲労試験と同意。
	応力	部材内に発生している単位面積あたりの力を言い、部材の変形や破壊などに関する負担の大きさを検討するのに用いられる。破壊の条件をこの値に基づき設定することが多く行われている。 圧力によって容器に生じる応力は、周方向、軸方向、半径方向の 3 つの応力に整理される。引張応力はプラス、圧縮応力はマイナスで表示する。 単位は、圧力の単位と同じになり、MPa または N/mm^2 を使う場合が多い。
	応力範囲	繰返し圧力によって容器に生じる応力の、最大応力と最小応力の差。
	応力振幅	繰返し圧力によって容器に生じる応力の、最大応力と最小応力の差の半分。 材料の疲労特性の整理には応力振幅が用いられる。（S-N 線図項参照）
か行	鏡部	容器の円筒胴部の両端の椀状の蓋部分。
さ行	最適疲労曲線	ひずみ制御又は荷重制御の疲労試験の結果に最も適合するように、最小二乗法などによって定めた S-N 曲線をいう。縦軸はひずみ振幅に縦弾性係数の基準値を乗じた仮想弾性応力振幅又は実際の応力振幅を示し、横軸は破壊に至るまでの繰返し回数を示す。
	自緊処理	金属ライナーが塑性変形するのに十分な圧力を容器にかけて、金属ライナーに残留圧縮応力、金属ライナーの外周繊維に引張残留応力を発生させる圧力処理。残留する圧縮応力が、金属ライナーの疲労寿命を長くする。
	設計疲労曲線	最適疲労曲線を基準として、応力振幅及び破壊に至るまでの繰り返し回数に適切な安全係数を考慮して定めた、許容応力振幅と許容繰返し回数の関係を与える S-N 曲線。
た行	蓄圧器	水素スタンドにおいて、燃料電池車に充填するための水素ガスを高圧で貯蔵する容器。蓄圧器はその構造、材料により「鋼製蓄圧器」（タイプ 1）、金属層の胴部を炭素繊維強化プラスチックで補強した「鋼製蓄圧器（タイプ 2）、金属ライナーまたは樹脂製ライナーを炭素繊

	用 語	説 明
		維強化プラスチックで補強した「複合圧力容器蓄圧器」（タイプ 3, 4）に分類される。
	胴部	容器中央の円筒状部分。
は行	疲労寿命設計線図	本プロジェクトで作成する設計疲労曲線。
	部分充填	蓄圧器から燃料電池車への水素ガス充填において、蓄圧器と車両の燃料容器の圧力が平衡に達したとき、この平衡圧力より高圧力の次の蓄圧器に切り替えて充填を継続する方法が効率的であると言われている。この場合、個々の蓄圧器の圧力が 0 となる前に、蓄圧器に対する充填を行うので、蓄圧器に発生する圧力変動は小さくなる。このように蓄圧器の圧力変動を小さくして充填を繰り返し行うこと。
	平均応力	繰返し圧力によって容器に生じる応力の平均値。 （最大応力+最小応力）/2。 部分充填で用いる蓄圧器は、受けもつ充填圧力の領域によって平均応力が異なる。
	平均応力補正	供用中の蓄圧器の疲労強度を評価するために、疲労強度に影響を与える平均応力に対し、修正 Goodman 式などの平均応力補正式を適用すること。
ら行	累積損傷則	材料の疲労において、材料が変動応力を受けるときに、疲労破壊までの寿命を予測する実験則。 S-N 曲線における一定応力振幅の繰返し応力 σi に対する破断繰り返し数を Ni とし、この材料に σi が ni 回繰り返されたとき、下記疲労損傷度 D が 1 に達したときに疲労破壊するという考え方。 D = Σ（n i/ N i）= 1 で破壊。

2-(3)-①：「長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」

一般社団法人水素供給利用技術協会／国立大学法人九州大学／
一般財団法人化学物質評価研究機構／NOK 株式会社／高石工業株式会社／
日本ピラー工業株式会社／株式会社キッツ／株式会社フジキン／
株式会社タツノ／トキコシステムソリューションズ株式会社

	用 語	説 明
英数	EPDM	エチレン，プロピレンおよびジエン化合物の共重合体をベースとするゴム材料．低温特性に優れ，耐候性，耐溶剤性，耐オゾン性に優れたゴム材料である．共重合の組成比により様々な仕様の材料がある。
	FEM 弾塑性解析	固体の弾性変形と塑性変形を考慮した有限要素法による応力解析
	FT-IR	フーリエ変換赤外分光法のこと。測定対象の物質に赤外線を照射し、赤外線吸収スペクトルを利用して化合物を定性・定量する赤外分光法の一種
	HTC	水素供給利用技術強化（HySUT）の山梨水素技術センター。水素ステーションに係る高圧水素関連技術の試験を行う。
	KHK 事故事例データベース	高圧ガス保安協会（KHK）が製作し、運営管理している高圧ガス関連事故情報データの一覧表。収集した高圧ガス関連の事故情報データを決まった形式で整理し、一般公開している。

	用 語	説 明
	IR スペクトル	赤外吸収分光法(infrared absorption spectrometry, IR)とは、試料に赤外線をあてて得られる吸収スペクトルを測定する分析法で得られる。
	NBR	アクリロニトリルとブタジエンの共重合体をベースとするゴム材料．耐油性，耐熱性，耐摩耗性に優れたゴム材料である．共重合の組成比により様々な仕様の材料がある.
	O リング	溝に組み付けて単独またはバックアップリングとともに静的にまたは可動部分に用いられる円形断面をもった環状のゴムパッキン。
	POM	エンジニアリングプラスチックとして汎用的に用いられているポリオキシメチレンの略である．ポリアセタール樹脂とも呼ばれる．摺動特性に優れた樹脂である。
	PTFE	Polytetrafluoroethylene（四フッ化エチレン）。高い化学的，熱的安定性と優れた自己潤滑性を有する熱可塑性樹脂。しゅう動材やしゅう動用樹脂複合材の母材として広く用いられている。
	PPS	Polyphenylenesulfide（ポリフェニレンサルファイド）。高い強度と耐熱性を有する熱可塑性樹脂。耐摩耗性に優れ、しゅう動部材用樹脂複合材に充てん材として用いられる。
	SUH660	オーステナイト系の耐熱鋼です。 高温環境下での強度が高い。
	UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene の略称で、超高分子量ポリエチレンを示します。 高強度を有するエンプラに分類されるポリエチレン。
	X 線 CT	コンピュータ断層撮影（Computed Tomography）の略称。 X 線を照射し、物体の断面画像や立体像を得るための装置です。 CT は多方向から X 線を照射し、撮影した画像をコンピュータで解析する。
	６分力計	接触部がうける直交 3 軸方向の 3 つの力（Fx 、Fy 、Fz ）と、各軸まわりの 3 つのモーメント（Mx、My、Mz）の 6 分力を同時に計測できるロードセル
あ行	圧縮機	圧縮機とは、水素供給設備から供給された水素を昇圧する機器をいう。
	ウイリアムス摩耗試験	研磨材を設定した円板を回転させ，ゴム試験片を一定の荷重で密着させ，摩耗量を測定する方法．JIS K6264-2 に規定されている.
か行	ガスケット	気密性、液密性を持たせるために用いる固定用シール材である。固定用シール材に対し、運動用シール材をパッキンと呼ぶ。
	クラック	き裂と同義語である。材料の降伏変形により発生した裂け目、ひび割れを表す。
	グランドパッキン	バルブやポンプのような流体を制御する機器に使用。回転や往復運動する軸のまわりに詰め込み、流体の漏れを防ぎます。
	拡散係数	拡散とは、粒子、熱などが自発的に散らばり広がる物理現象である。拡散係数とは拡散の早さを規定する物理量であり、拡散する粒子や熱の流れ（流束密度）は粒子の濃度や温度の勾配に比例し、その比例係数を拡散係数と呼ぶ。固体中の水素の拡散係数は高圧水素中に曝露された際に発生する破壊現象などに影響を与える。
	機械継手	高圧ガス管を接続しねじを締めこむことで密封性を保つ鋼製ねじ込み式管継手の略称。
	共焦点レーザー顕微鏡	共焦点光学系を利用しレーザーを光源とした顕微鏡である。焦点が合った面だけの光を選択して像をつくる。そのため、落射蛍光顕微鏡よりもコントラストの強い像が得られる。
	コーン＆スレッド継手	ねじ込み式管継手の一種で、円錐形の密封部と締め込みねじから成る。
さ行	セーフティーデータベー	水素ステーションにおける事故、不具合等事例データの一覧表。

	用 語	説 明
	ス	NEDO 事業の一環として、水素供給利用技術協会（HySUT）が 2014 年度より製作／運営管理を行っている。
	座屈	構造物に加える荷重を次第に増加すると、ある荷重で急に変形の模様が変化し、大きなたわみを生ずることをいう。
	軸力	ボルトを締付けると、ボルト締付け部は軸方向に引っ張られ、この際に元に戻ろうとする反発力が軸力です。 軸力が発生することで被締結体が固定されます。
	充てん率	O リング溝体積に対する O リングの体積比率。
	常用圧力	その製造設備又は消費設備においてそれらが通常使用される状態での圧力（圧力が変動する場合は、その変動範囲のうちの最高の圧力）。
	設計圧力	設備を使用することができる最高の圧力として設計された圧力をいい、設備の強度を決定するために使用される。
	接触圧力	接触面の法線方向に作用する圧力。
た行	弾性接触理論	接触する二つの物体に生じる圧力分布について、ハインリヒ・ヘルツが理論的に解析したものをヘルツの接触理論（1881 年）と呼びます。
	弾性変形領域	軸力と伸びが比例関係にあり、力を取り除くとボルトの伸びも元に戻る領域のことで、この領域で締付けることを弾性域締付けといいます。 一方で、弾性域を超えてボルトに軸力を与えると、ボルトは塑性変形を起こし、力を取り除いても伸びが元に戻らなくなります。
	蓄圧器	水素ステーション内に設置される水素を蓄えるための容器。
	ディスペンサー	水素ステーションの設備で、燃料電池自動車等に燃料として高圧水素ガスを供給する装置。筐体、ガス用流量計、バルブ、充填ホース、緊急離脱カップリング、充填ノズル等で構成される。
	つぶし率	O リング太さに対する溝組み付け時につぶした長さ比率。
	トポグラフィー	対象物表面の凹凸および特徴を観察して、それを精細に表したものをいう。走査型電子顕微鏡で観察した試料表面の 3 次元形状を表す反射電子像（トポ像）。
な行	ノズル	水素を車両に供給するための機器。水素を充填する際に車と接続する箇所で、セルフ式ガソリンスタンドに例えると実際にドライバーが手にとって給油する部分。
	熱衝撃試験	試験シール部材が周囲温度の変化に対する耐性を評価する方法．本研究では，試験シール部材が高温室と低温室を繰り返し移動させた後にシール特性を評価することで繰り返し熱衝撃に対する耐性を評価した。
は行	ピストンリング	レシプロ式水素ガス圧縮機のピストン部に用いられ圧縮される水素ガスを封止する動的シール部材。
	プレクーラー	水素ステーションの設備の一つで、急速充填による車載タンク温度の上昇を防止するため、事前に水素を冷却する設備。熱交換器と冷凍機から構成される。
	バックアップリング	O リングのはみ出しを防止するために用いられる樹脂製の部品。
	比摩耗量	二つの物体間に働く摩擦による物体の体積または重量の減少量を摩耗量と呼び、単位すべり距離・単位荷重あたりの体積摩耗量を比摩耗量と呼ぶ。
	ブースター	油圧や圧縮空気でピストンを駆動させるガス圧縮装置。
	ブリスタ	ゴム内部に含まれている空気・ガス・水分などにより内部より生ずる膨れなどの破壊。

	用 語	説 明
ま行	摩擦係数	二つの物体の接触面に働く摩擦力と、接触面に垂直に作用する圧力（垂直抗力）との比を摩擦係数と呼ぶ。
	ミスアラインメント	管の接合部分に生じる軸のずれ。軸心の平行誤差と角度誤差がある。
ら行	ランク区分	水素ステーションで発生した事故、不具合等事例データについて、セーフティーデータベース上、A から E のいずれかに区分している。なお、ランク A、B、C については高圧ガス保安法上の事故に該当する。各ランク区分の定義は以下の通りである。 表．ランク区分 ランク区分 / 定義 A,B,C / 事故（高圧ガス保安法上の分類） D1 / 「A,B,C」以外のステーション運営に支障を及ぼした故障等 D2 / 「D1」以外の水素設備の故障 D3 / 「D1」以外の水素設備以外の機器等の故障 E / ヒヤリ・ハット

2-(3)-②：「水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発」

国立大学法人九州大学／日本ゴム工業会

	用 語	説 明
あ行	一般社団法人日本ゴム工業会	ゴム産業に関する生産、流通、消費等の調査・研究や技術、労働、環境・安全、標準化等に係る諸問題の調査・研究並びに対策の企画及びその推進等を行うことにより、我が国ゴム産業の健全な発展を図り、もって国民経済の健全な発展と国民生活に寄与することを目的として 1950 年に設立された団体である。本プロジェクトに協力いただいているホースメーカー２社も加盟している。また、ISO TC45（ゴムおよびゴム製品）の国内審議委員会が設置されており、ISO TC45 の National Mirror Committee である。TC45 ではゴム・樹脂ホースの規格、評価法について取り扱っており、高圧水素ホースの国際規格 ISO 19880-5 を担当する TC197（水素技術）とはリエゾンを行なっている。
か行	加速耐久性評価法	高圧水素ホースの評価において、水素ステーションの実用における充填回数・使用期間に比べ、少ない回数、短い期間にて評価するラボ試験を言う。
	高圧水素ホースの試用	これまでの NEDO 事業の成果として開発した高圧水素ホースについて、北米水素ステーションのステーションオーナーに協力いただき、国内メーカー製ホースを無償提供し、商用運営されている北米水素ステーションにおいて一般ユーザーの燃料電池自動車に対する実用の水素充填に使用する評価を言う。設置した水素ステーションは米国カリフォルニア州ロサンゼルス近郊の 2 か所であり、1 日の充填回数が 50 回～70 回程度であった。いずれもセルフ充填ステーションであり、充填操作、ホースの取り扱いはユーザー自身が行う。
さ行	水素インパルス試験法	高圧水素ホースを最小曲げ半径にて逆 U 字型に設定し、所定の条件で高圧水素を流通させることで供試ホースにパルス状の加減圧を印加する試験法。ISO 19880-5 の 7.9 項に記載されている。現状、1 MPa 以下の圧力から高圧水素ホースの圧力レベルの 1.25 倍の圧力まで 12 秒程度で加圧し、高圧で 5 秒保持、4 秒程度で 1 MPa 以下まで減圧し低

	用 語	説 明
		圧で 5 秒保持する 30 秒程度の圧力変動プロトコルにより 10,000 回のサイクル試験加減圧を行うことが求められている。
は行	パラボラパターン	ゴム、樹脂の破面に見られるパターンの一種である。破壊の進行方向に強度が低い欠陥が存在する場合、き裂の進展に伴いその欠陥からも破壊が放射状に発生し、主き裂の進展による破壊と重なった部分が放物線状の形態を示し、パラボラパターンとなる。
	ホース交換サイクル	水素ステーションにおいて高圧水素ホースを使用する際、交換後、次に交換するまでの限度となる充填回数を示す。
ら行	ラボ試験	本プロジェクトで言うホースの「ラボ試験」とは、実際の水素ステーションではなく、実験室に設置した高圧水素供給設備により所定の条件でホースに加減圧を行う試験の総称である。

2-(4)-①：「本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発」

ENEOS 株式会社／株式会社本田技術研究所／
トキコシステムソリューションズ株式会社／一般社団法人水素供給利用技術協会

	用 語	説 明
英数	FCV タンク初期圧	水素充填前の燃料電池車の高圧容器（タンク）圧力（燃料電池車が水素充填のため水素ステーションに来た際のタンク圧力）。
	HySUT ガイドライン	水素ステーションの充填性能が JPEC で制定する充填技術基準に合致するかどうか確認するための検査方法を規定するガイドライン。ガイドラインは HySUT がインフラ及び FCV 関連企業、団体と協議し制定する。JPEC-S0003(2012)、JPEC-S0003(2014)、JPEC-S0003(2016)に対応するガイドラインが制定されている。
	JPEC-S 0003	JPEC が策定する国内の圧縮水素充填技術基準。 一般則関係例示基準５５の２及び５９の４（コンビ則関係例示基準６２の２及び６６の４）に引用されており国内の水素ステーションにおける充填技術基準として広く使用されている。
	MC Multi Map 方式	MC フォーミュラをベースに水素ステーションの水素供給系熱容量と FCV タンク初期圧等に依存してプレクール温度及び昇圧率を動的に可変させる水素充填プロトコル。
	MC フォーミュラ方式	供給ガス温度等に依存して昇圧率を動的に可変させて充填する充填プロトコル。
	SAE	Society of Automotive Engineers: 米国自動車技術会、乗り物の標準化を推進する非営利団体
	SAE J2601	SAE の規格は J 番号で表される。J2601 は米国の充填プロトコルを規定する。
	SOC	State of Charge。高圧水素容器に搭載可能な最大水素量に対する実際の水素量の百分率。100%は、容器に最大水素量が格納されていることを示す。
	Type3 容器	金属製のライナー(ガスシール)層と炭素強化繊維プラスチック（CFRP)層からなる複合容器
	Type4 容器	プラスチック製のライナー(ガスシール)層と炭素強化繊維プラスチック（CFRP)層からなる複合容器
あ行	追い充填	燃料電池車に水素を充填中に何らかの理由により充填を中断し、時間を置かずに再度充填を開始すること。
	アボート信号	燃料電池車に水素を充填中に燃料電池車から発信される一括異常信号。

	用 語	説 明
	インテグリティー・チェック	ガス状態方程式に通信充填信号を入れて充填質量を計算することにより通信充填信号の異常（不正改造や故障等）を確認する手法。
か行	過充填	燃料電池車の燃料である水素を格納する高圧容器に規定量以上の水素を充填すること。危険であるため、防止する必要がある。
	協調制御	ダブル充填を行う際に双方の充填が干渉しないよう片方の昇圧率を調整する水素充填制御方法。
	コールドディスペンサー	前回の水素充填からの経過時間が短く、水素供給系が常温よりも冷却された状態のディスペンサー。
さ行	差圧充填	蓄圧器に蓄圧された水素の差圧を利用して燃料電池車へ充填する充填方法。
	水素圧縮機	水素ガスを昇圧する装置。
	水素技術センター	NEDO 事業で建設され HySUT が運営・維持管理している実証水素ステーション。
	充填プロトコル	燃料電池車に燃料の水素を充填する際の規定。過昇温・過充填などにならないように決められている。
た行	ダブル充填	2 台の燃料電池車に同時に水素充填を行うこと。
	蓄圧器	昇圧された水素ガスを貯留する装置。
	直充填	水素圧縮機から吐出される水素を燃料電池車へ充填する充填方法。
	ディスペンサー	圧縮水素を燃料電池車に充填する装置。
な行	ノズル	燃料電池車の車両側の燃料の供給口に接続する装置。燃料電池車に燃料の水素を供給する際に使用する。
は行	プレクール	高圧水素容器に燃料の水素を充填する際、予め供給水素を冷却すること。最低で-40℃まで冷却される。充填時の圧縮の影響によって容器内の気体温度が上昇する。この温度は85℃を上限としているため、これを超えないようにする必要があるために取られる措置である。
	併用充填	水素圧縮機から吐出される水素と蓄圧器に蓄圧された水素を併用して燃料電池車へ充填する充填方法。
	ホットソーク	暖房や日射などを想定し、燃料電池車の高圧水素容器内の温度が周囲の環境温度より高い状態のこと。これを前提にプロトコルは昇圧率を決める。
ら行	ルックアップテーブル方式	環境温度と FCV タンク初期圧により昇圧率と充填目標温度を決定する水素充填プロトコル。
	レセプタクル	燃料電池車の車両側の燃料の供給口。ノズルと接続することで、燃料電池車に燃料の水素を供給することが可能となる。

2-(4)-⑤：「高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発」

一般財団法人金属系材料研究開発センター／日本製鉄株式会社

	用 語	説 明
英数	35MPa 水素スタンド	水素スタンドの常用圧力が 40MPa 以下の圧縮水素スタンド。燃料電池自動車の 35MPa 充塡に対応したもの。
	70Mpa 水素スタンド	水素スタンドの常用圧力が 82MPa 以下の圧縮水素スタンド。燃料電池自動車の 70MPa 充塡に対応したもの。

	用 語	説 明
	ANSI	American National Standard Institute の略称。米国内で業製品の規格標準化を行なう団体。
	ASME	The American Society of Mechanical Engineers(米国機械学会)の略称。米国を中心に機械工学を中心とした分野の規格化や標準化、認定等の活動を行う民間の団体。
	ASTM	American Society for Testing Materials（アメリカ材料試験協会）の略称。世界最大規模の民間規格制定機関。
	BS	British Standards の略称。イギリスの国家規格。
	DIN-Norm	Deutsche Industrie-Norm(en)（ドイツ工業規格）の略称。ドイツ連邦共和国が定めた国家規格。
	EN 規格	European Norm 規格の略称。EU（ヨーロッパ連合）の中における統一規格(「European Standards。
	FCV	燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle）のこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走る車を指す。
	FC トラック	燃料電池（Fuel Cell）で走行するトラックのこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走るトラックを指す。
	FC バス	燃料電池（Fuel Cell）で走行するバスのこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走るバスを指す。
	GB 規格	Guo jia Biao zhun の略称。中国国家標準規格。
	HFCV-gtr	水素燃料電池自動車の安全性に関する世界統一基準であり、欧州を中心に作成され、国連の認証も受けている。燃料電池自動車用の規格であるが、現在作成中の JPEC-S「圧縮水素運送自動車用附属品の技術基準」にも必要箇所は準拠させる。
	ISO	International Organization for Standardization（国際標準化機構）の略称。国際的に通用する規格を制定する非政府機関。
	KHK	高圧ガス保安法第 1 条に明記されている「高圧ガス保安協会」（協会）の略称。「高圧ガスの保安に関する自主的な活動を促進し、もつて公共の安全を確保する（同条）」という同法の目的を達成する中心的役割を担っている、「高圧ガスによる災害の防止に資するため、高圧ガスの保安に関する調査、研究及び指導、高圧ガスの保安に関する検査等の業務を行う（第 59 条の 2）」団体である。
	KS 認定規格	Korean Industrial Standards(韓国産業規格)の略称(日本語表記)。韓国における工業製品規格。
	RRA	Relative Reduction of Area の略。相対絞りのこと。 相対絞り= (水素中の絞り)／(大気または不活性ガス中の絞り) 水素適合性を評価する指標となる。
	SSRT	低歪速度引張試験（Slow Strain Rate Test）のこと。ある環境下で一定の低歪み速度で引張荷重を負荷していき、破断時の伸びや破面の観察で脆化の程度を評価する試験方法。
	PED	The Pressure Equipment Directive**(**欧州圧力機器指令)の略称**。**EU における圧力機器の設計/製造に対して定められた法律
あ行	圧縮水素運送自動	高圧ガスに相当する圧縮状態の水素を移動するための車両であって、圧縮水素運送自動車用容器を車両に固定し、車両ごと移動できるものをいう。高圧ガスの製造/消費機能を有

	用 語	説 明
	車（水素トレーラー）	する移動式製造設備はこれに該当しない。
	圧縮水素運送自動車用容器	水素製造装置等から圧縮水素を運送するための自動車（トレーラー；圧縮水素運送自動車）に搭載される炭素繊維複合容器。地盤面に対して移動して使用するため、容器保安規則が適用される。
	圧力サイクル試験	容器、附属品は水素の充填、放出を繰り返すことにより、繰り返し疲労を受けることから、想定繰り返し回数加圧・降圧を繰り返しても必要強度・性能が確保されていることを確認する試験
	一般高圧ガス保安規則	高圧ガス保安法 （昭和二十六年法律第二百四号。以下「法」という。）に基づいて、高圧ガスに関する保安（コンビナート等保安規則 （昭和六十一年通商産業省令第八十八号）に規定する特定製造事業所に係る高圧ガスの製造に関する保安を除く。）について規定する。
	延性破壊	大きく変形した後、くびれを伴って破断する破壊。
	応力腐食割れ試験	HFCV-gtr では応力腐食割れが起こらないことの確認のため、アンモニア混合気にさらした試験の実施が規定されている。作成中の JPEC-S「圧縮水素運送自動車用附属品の技術基準」では銅系材料は対象外であり、ステンレス、アルミニウムも材料規格を指定しているので、試験対象外としている。
	オフサイト方式	水素スタンドの敷地外で製造した水素を水素スタンド内に運び込む方式の水素スタンドのこと。
	オンサイト型水素スタンド	水素スタンドの敷地内で水素を製造する方式の水素スタンドのこと。
	オンサイト方式	水素スタンドの敷地内で水素を製造する方式の水素スタンドのこと。
	温度サイクル試験	容器、附属品は水素の充填、放出の都度、温度が上昇・下降するため、温度の上昇・下降を繰り返しても必要強度・性能が確認されていることを確認する試験。FCV よりは圧縮水素運送自動車用附属品の方が使用温度範囲が狭いので試験条件を緩和できると考えられる。
か行	ガイドライン	技術基準の分類における「技術文書」にあたる。技術文書とは、①技術的な成熟度その他の点で、十分なコンセンサスに達する段階には至っていない規格案であって、将来的に制定が期待されるもの、②規格等の作成根拠に関する技術調査報告書等を指す。
	加速応力破壊試験	高圧ガス保安法容器保安規則により義務化された高圧ガス充てん用容器の試験の一つ。圧縮水素運送自動車用複合容器では、同一の型式内の一つの容器において、最高充てん圧力の 125%以上で加圧し、65℃以上で 1000 時間以上保持することにより行う。
	加速寿命試験	一般には試験時間短縮を目的とし、製品を設計条件より過酷な条件にさらし、不具合が生じないことを確認する試験をいう。 安全弁の場合は、作動条件より低い温度に規定時間さらし、劣化等により作動すべきでない温度で作動しないことを確認する。
	嵌合	「かんごう」と読む。機械部品の軸と穴とを互いにぴったりと合うように入れ込むことをいう。ここでは、ディスペンサーノズルと車載容器レセプタクルの接合状態を示す。
	技術基準	本プロジェクトにおける「技術基準」とは、圧縮水素スタンドに係る圧縮水素等の取扱い及び

	用 語	説 明
		これらに係る設備、施設等の設計、施工、維持管理等並びに容器の製造、設計、試験、検査等に関する保安を推進するために、最新の技術的知見基づき制定される基準。技術基準には、規格、質疑応答・運用解釈、技術文書に分類される。
	緊急遮断装置	緊急時に当該装置が遠隔操作により作動し、水素の流れを遮断するもの。規定した温度が超えたときに直ちに自動的に閉止作動するものも含まれる。
	公道ディスペンサー距離	水素ディスペンサーと公道との間に確保せねばならぬ距離であり、一般高圧ガス保安規則第 7 条の 3 において圧縮水素スタンド設備に義務付けられている。
さ行	車載容器	燃料電池自動車の車両に固定した燃料装置用として圧縮水素を充填するための容器。
	車載容器の記載事項	燃料電池自動車の車載容器の記載事項とは、車載容器総括証票における充填すべきガスの名称、搭載容器の本数、充填可能期限、検査有効期限、最高充填圧力、車台番号、及び容器再検査合格商標における再検査有効期限、再検査日をいう。高圧ガス保安法第 48 条より、車載容器に水素を充填する場合に、本記載事項を確認する必要がある。
	水素スタンド	燃料電池自動車（FCV）に燃料水素を供給する施設で水素ステーションと同義。現行の充填圧力は 70MPa。
	水素ステーション	燃料電池自動車（FCV）に燃料水素を供給する施設で水素スタンドと同義。現行の充填圧力は 70MPa である。
	水素トレーラー	水素の陸上輸送手段の一つ。タイヤのついたフレームに水素を充てんする容器を固定し、これをトラクターでけん引できるようにしたもの。輸送後にトラクターとフレームを分離することができる。
	設計確認試験	高圧ガス保安法容器保安規則により義務化された高圧ガス充てん用容器の試験の一つ。圧縮水素運送自動車用複合容器では、一定数量によって構成される組又は個々の容器ごとに行う容器検査の試験。
	セルフガソリンスタンド	ドライバーが自ら、内燃エンジン自動車に、ガソリンあるいは軽油を給油することができる水素スタンド。国内では、給油ポンプの起動は従業員が行う。
	セルフ水素スタンド	ドライバーが自ら、燃料電池自動車（FCV）に燃料水素を充填することができる水素スタンド。国内でのセルフ水素スタンド実施の可能性及び詳細な規格・基準について、本プロジェクトで検討。
た行	第一種製造者	高圧ガス保安法第五条第一項に掲げる者で、高圧ガスの製造の許可を受けた者をいう。（一日の処理能力が 100m^3 以上である高圧ガスの製造設備を使用する者）
	第二種製造者	高圧ガス保安法第五条第二項に掲げる者で、高圧ガスの製造の届出を行った者をいう。（一日の処理能力が 100m^3 未満である高圧ガスの製造設備を使用する者
	タイプⅢ	ライナーを繊維強化プラスチックで補強した構造（複合構造）を有する圧力容器の一種。金属ライナーを使用し、その全体（胴部と鏡部）を繊維で補強した複合容器をタイプ III と呼ぶ。
	タイプⅣ	ライナーを繊維強化プラスチックで補強した構造（複合構造）を有する圧力容器の一種。樹脂ライナーを使用し、その全体（胴部と鏡部）を繊維で補強した複合容器をタイプⅣと呼ぶ。
	蓄圧器	燃料電池車に充填するための水素ガスを高圧で貯蔵する容器。蓄圧器はその構造、材料に

	用 語	説 明
		より「鋼製蓄圧器」（タイプ 1）と「複合容器蓄圧器」（タイプ２， ３， ４）に分類される。
	超音波探傷検査方法	超音波を試験体中に伝搬させたときに、試験体の示す音響的性質を利用して、試験体内部のキズ又は材質を調べる非破壊試験方法。略語は UT
	定期自主検査	高圧ガス保安法 35 条の 2。第一種製造者、指定数量以上の第二種製造者は、製造又は消費のための施設であって経済産業省令で定めるものについて、経済産業省令で定めるところにより、定期に、保安のための自主検査を行い、その検査記録を作成し、これを保存しなければならない。
	ディスペンサー	圧縮水素スタンド内の装置のうち、燃料電池自動車に燃料として水素ガスを供給する装置。筐体、流量計、バルブ、充塡ホース、緊急離脱カップリング、充塡カップリングで構成される。
な行	熱作動式安全弁	容器等の温度が上がった場合、熱により作動し、容器内部の流体を容器外部に放出し、容器の破裂等を防ぐ装置
は行	破壊靱性試験	き裂・き裂状の欠陥を有する材料に、力学的な負荷が加わったときの破壊に対する抵抗を破壊靭性と言い、その値を測定する試験。
	保安検査	高圧ガス保安法 35 条。 第一種製造者は、高圧ガスの爆発その他災害が発生するおそれがある製造のための施設について、経済産業省令で定めるところにより、定期に、都道府県知事が行う保安検査を受けなければならない。
や行	容器保安規則	高圧ガス保安法、高圧ガス保安法施行令（平成九年政令第二十号。以下「令」という。）に基づいて、高圧ガスを充てんするための容器であって、地盤面に対して移動することができるもの（以下単に「容器」という。）に関する保安について規定している。
	焼入れ	鋼を加熱し、オーステナイトとした状態からその鋼を上部臨界冷却速度以上で冷却し、無拡散変態により硬質なマルテンサイト組織を得る熱処理
	焼入れ性	マルテンサイト組織のなりやすさの程度を表し、焼入れ性が良好な鋼は上部臨界冷却速度が小さく、冷却速度が遅くてもマルテンサイト組織が得られ、一方で焼入れ性が不芳な鋼は上部臨界冷却速度が大きく、冷却速度を速くしなければマルテンサイト組織が得られない
	焼もどし	焼入れ後に鋼の靭性を改善するために行う熱処理
ら行	例示基準	本項では「一般高圧ガス保安規則関係例示基準」のことを指す。一般高圧ガス保安規則関係例示基準は、一般高圧ガス保安規則に定める技術的要件を満たす技術的内容をできる限り具体的に例示したもので、一般高圧ガス保安規則の機能性基準を満たしているかどうかを判断する際の適合性評価に用いられ、このとおりであれば当該機能性基準に適合するとされる。

2-(4)-⑥：「新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発」

ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社

	用 語	説 明
英数	AI	「Artificial Intelligence」の略で、本プロジェクトではセンサモジュールの経時変動、環境変動を検知し、自己補正等に活用する。

	用 語	説 明
	FCV	燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle）のこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走る車を指す。
	IoT	「Internet of Things」の略で、様々な機器がインターネットに接続され、情報交換により相互に制御する仕組み。 本プロジェクトでは無線によるインターネット接続を想定している。
	IP65	日本工業規格(JIS)準拠の防塵防水規格。防塵 6 級：粉塵が中に入らない（耐塵形）、防水 5 級：あらゆる方向からの噴流水による有害な影響がない
	ISA100.11a	国際標準化された工業用無線規格の一つで、高い信頼性が特徴
	LTE-Cat.M1	LPWA(Low Power Wide Area)向け LTE 通信のカテゴリーの一つで、低電力/低遅延が特徴
	Pt 電極	センサエレメント電極に用いる。触媒作用により、水素がイオン化され、センサエレメントに到達することで水素が検知可能となる。
	ReRAM	Resistive Random Access Memory(抵抗変化型 RAM)の略で。電圧パルスを印加することで金属酸化物が酸化/還元され、抵抗が高抵抗化/低抵抗化される性質を電源を切っても記憶内容を保持できる不揮発性半導体メモリとして用いている。
あ行	アルゴリズム	水素検知センサエレメントの動作制御方法
	インフラ（水素）	水素の「製造→貯蔵→輸送→利用」までのプロセスを効果的に運用するための構造。例）水素パイプライン、水素運搬車
か行	環境分析	環境センサ(温度、湿度、気圧)を用い、センサモジュールの動作環境を分析すること
	間欠動作	システムの動作制御のひとつで、定期的に通常動作とスタンバイ動作を繰り返す制御方法。
	基板	電気的に外部と繋ぐため金属の配線を内蔵した、センサ素子を搭載する板
	クラウドサーバー	クラウド環境に作られたサーバーで、水素検知センサモジュールのログデータを蓄積し、AI 学習/診断を可能とする。
	検知ベース電流	水素が 0%の時の検知電流
	故障予測システム	センサモジュールから得られたデータを分析、異常を検知し故障予測することにより故障前のメンテナンス、 早期部品交換を可能とするシステム。
さ行	自己診断	水素検知センサエレメントの劣化状態をセンサモジュール自身で診断すること
	自己補正	センサモジュールの特性変動が発生した場合、印加電圧等を変更することでセンシング特性を補正し、センサモジュール寿命を延長させるための手段。
	純水素燃料電池	燃料が水素のみの燃料電池。 家庭用燃料電池（エネファーム）は都市ガスや液化天然（ＬＰ）ガスを改質器に通し、取り出した水素を使って発電する。これに対し、純水素燃料電池は改質器を通す必要がないため、起動が速く、出力を素早く切り替えられるメリットがある。
	水素開口窓	センサエレメント中に設けられ、Pt 電極上の絶縁膜を除去し、電極を露出させた領域。
	水素検知センサ	気体中の水素濃度を検知し、水素ステーション等での水素漏れを検知する為のセンサ。
	水素ステーション	燃料電池自動車（FCV）に燃料水素を供給する施設で水素スタンドと同義。現行の充填圧力は 70MPa である。

	用 語	説 明
	水素透過膜	水素だけを通し、その他ガスや水分を通さない膜
	水素パイプライン	製造した水素を輸送する為に地中等に敷設されたパイプライン。
	水素発電	水素と酸素の化学反応を使って電気と熱を生み出す発電方法。
	水素プラント	水素製造を行う設備。化学燃料から水素を生成する設備や最新のものでは自然エネルギーを利用して水素を生成する設備もある。 また、水素を液化する設備も水素プラントに該当する。
	スター型	機器(センサモジュール)とアクセスポイント(基地局等)が直接接続されるネットワーク形態であり、伝送遅延を最小化可能
	成膜	物体の表面に特定の材料を用いてごく薄い膜を形成すること
	接合	同種または異種材料をつなぎ合わせること
	接触燃焼方式センサ	酸化触媒上で可燃性ガスが燃焼する際の発熱量を利用したセンサで、世界で最も広く普及している可燃性ガス専用検知センサ。
	センサエレメント	水素濃度を検知する為の抵抗素子を指す。
	センサモジュール	センサエレメント、無線通信機器、制御用回路が一体となり、水素漏れ検知を可能としたモジュール。
	センサ素子	水素を検知するセンサ機能を有した電気回路などの構成要素。センサエレメントと同義。
た行	耐圧防爆	内部で水素爆発が発生した場合、制御盤がその圧力に耐え、かつ、外部水素への引火を防止した防爆構造。
	定置式センサモジュール	現在の水素ステーション等で用いられており、有線接続で定点設置されているセンサモジュール。
	ドリフト	検知ベース電流が時間と共に増加或いは減少方向に推移すること
な行	熱伝導方式センサ	ガスの熱伝導率の差をガス濃度として検知する、高濃度ガスの検知に適した実績のある可燃性ガス検知センサ。
は行	パッケージ	センサ素子の機能が果たせるよう、センサ素子自体を外部から保護する部位と、外部と電気的に接続するための端子などから構成されたもの
	半導体ウェハ	半導体材料を薄く円盤状に加工してできた薄い板のことで半導体基板の材料として用いられている。半導体ウェハ上に印刷・撮影技術を使って回路を書き込んでいき、LSI 半導体が出来上がる。
	半導体工場	半導体製品を製造する工場。製造工程の中で水素ガスを使用するケースが多くある。
	フィラメント	ReRAM において、金属酸化物層を絶縁破壊することで形成できる酸素欠損を含む導電領域。
	防爆構造	電気機器が点火源となり、周囲に存在する水素による爆発を防止する為に適用する技術的手法。
ま行	マスク	電子デバイス（半導体）やマイクロマシン（MEMS）などの精密部品を半導体プロセスで製造する際、回路を書き込むフォトリソグラフィ工程で使用されるツールで、パターニングの原版になるもの。
	メッシュ型	機器が中継機能をもち、網目状にネットワークが構成され、アクセスポイントと接続されるネットワーク形態であり、経路の冗長化が可能となり信頼性を高めることが可能

2-(4)-⑦：「半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発」

株式会社四国総合研究所

	用 語	説 明
英数	2f 検波法	レーザーの波長をガスの吸収ピークを中心として周期的に変化させ、検出器をその 2 倍の周波数に同期させて検出することで、信号を高感度に検出する手法。
	APD	Avalanche Photodiode の略称。検出素子である半導体に電圧を加えることで光子の衝突によって発生する電子を増幅し、通常のフォトダイオードよりも高感度に光を検出することができる。
	AR コート	Anti-Reflection コートの略称。光学素子の表面に誘電体の膜をコーティングすることにより、特定の波長の光の反射率を大幅に低減することができる。
	cm^{-1}	1 cm の長さに含まれる光の波数を表す単位。波長の逆数。波長に代わる単位として使用したり、励起光の波長を基準とする散乱光の波長のシフト量を表したりする際に使用する。
	CRDS	Cavity Ring-Down Spectroscopy の略称。2 枚の高反射率ミラーを向かい合わせにしたキャビティ（共振器）を利用して、低濃度のガスを高感度検出する光学的計測手法。
	DFB レーザー	Distributed Feedback レーザーの略称。半導体レーザーの一種。半導体素子内部のレーザー活性層に回折格子構造を作ることで、極めて細い線幅で発振する。電流や温度により多少の発振波長の制御が可能である。
	ECDL	External Cavity Diode Laser の略称。外部共振器型半導体レーザー。半導体レーザー本体とは別に外部に共振器を設けて構成するため、このように呼ばれる。
	FCV	Fuel Cell Vehicle の略称。燃料電池自動車。水素を燃料とする燃料電池によって発電した電気によって走行する、電気自動車の一種。水素ステーションにおいて燃料である水素を補給する。
	ICCD 検出器	Intensified Charge-Coupled Device 検出器の略称。入射した光を増幅するイメージインテンシファイア機構が内蔵されているため、一般的な CCD 検出器（カメラ）と比較して検出感度が高い。
	InAs 光検出素子	半導体であるヒ化インジウムを使った光検出素子。波長 1～3.5 μm 付近の赤外線検出器として使用される。
	IR	Infra-red の略。一般に赤外波長領域の、という意味で使われる。
	IR-ECDL	赤外波長領域で発振する半導体レーザーを光源とする外部共振器型半導体レーザー装置のこと。本事業においては、キャビティリングダウン分光法（CRDS）と組み合わせて、特に低濃度成分の計測に適用する予定である。
	IR-LD	赤外波長領域で発振する半導体レーザー。
	ISO	International Organization for Standardization の略称。国際標準化機構。各国の標準化団体で構成される非政府組織。スイス・ジュネーヴに本部があり、国際的な標準である国際規格（IS: international standard）を策定している。
	LED	Light Emitting Diode の略称。高輝度、長寿命であり、信頼性も高いことから、近年、白熱電球や蛍光灯に代わる照明用の光源として普及が進んでいる。LD（半導体レーザー）と

	用 語	説 明
		極めて近い構造だが、共振器構造を持たない点で異なる。LD と比べて安価であるため、本事業においても光源としての適用可能性を評価する予定である。
	LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy の略称。レーザー誘起ブレークダウン分光法。パルスレーザーを集光させて計測対象物質に照射することでプラズマ化し、励起された原子の発光を計測することで物質の組成を分析する分光計測手法。
	PBC	Power Build-up Cavity の略。光出力を増幅するための共振器を指す。本事業においては、半導体レーザーの外部共振器を PBC として使用し、共振器内部の光強度を高めることにより、成分ガスの高感度計測を目指す。
	PD	Photodiode の略。光検出器として働く半導体ダイオード。
	PMT	Photomultiplier tube の略称。光電子増倍管、フォトマルとも言う。光電面と呼ばれる検出領域に入射する光の光電効果により発生した電子を、高電圧によって増幅する。極めて感度が高く、応答も速いため、各種光計測実験において広く用いられている。
	ppb	parts per billion、比率あるいは濃度の単位。十億分の一。1 ppb は 0.001 ppm に同じ。
	ppm	parts per million、比率あるいは濃度の単位。百万分の一。1 ppm は 0.0001%に同じ。
	S/N 比	信号（Signal）とノイズ（Noise）の比率。
	Si 光検出器	シリコンを検出素子とする光検出器。シリコンフォトダイオードなど。可視～近赤外域に感度がある。
	TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy の略称。波長可変半導体レーザー吸収分光法。半導体レーザーの波長を対象となるガスの吸収線に合わせて変化させ、透過光強度からガス濃度を算出する。
	TEM_{00} モード	レーザーの横モードを示す記法。添字 $_{00}$ は基本モードであることを示す。TEM_{00} モードはガウシアンモードとも呼ばれ、ビーム中心の強度が最も高く、周辺に向かうに従い強度が低下する正規分布状の強度分布を示すモードである。TEM は Transverse electromagnetic の略で、光波の磁場と電場がともに伝搬方向に対して垂直であることを示す。
	Violet-ECDL	波長 400 nm～450 nm 付近の青紫色半導体レーザーを光源とする、外部共振器型半導体レーザー。本事業では、この Violet-ECDL の外部共振器内部で増幅されたビームを励起光源とするラマン分光法により、水素ガス中の不純物ガスの濃度計測を行う。ラマン散乱は、ガスの分子種に応じてそれぞれ異なる特定の波長において生じるため、原理的に、一台の光源で複数のガス種を同時に計測することが可能である。
あ行	アナモルフィックプリズムペア	２つの特殊形状のプリズムを組み合わせて使用することにより、楕円形のレーザービームを円形に整形する光学素子。
	エタロン	２つの反射面を向かい合わせて配置することで、光の干渉を利用して特定の波長のみを透過させるように機能する光学素子。
	オンサイト分析	現場での分析。ガスをサンプリングして持ち帰るのではなく、現場である水素ステーションに分析装置を持ち込んで分析することを指す。

	用 語	説 明
か行	回折格子	基板上に多数の微細な溝が等間隔に刻まれた光学素子で、反射した光を波長ごとに異なった角度に分散する。多くの分光器で使用されている。
	外部共振器	半導体レーザーは素子単体で共振器構造をもつが、それとは別に配置された共振器であることから、外部共振器と呼んでいる。
	ガウス分布	正規分布とも言う。中心付近で最も強度が高く、周辺に向かって連続的に強度が低下するような分布。
	ガスクロマトグラフ	各種の科学分野で汎用されている微量分析装置。
	キャビティ	共振器に同じ。
	キャビティミラー	共振器を構成する高反射ミラー。
	共振器	本事業においては、2 枚の高反射ミラーを向かい合わせにした、ファブリ・ペロー型と呼ばれる共振器を使用して開発を行う。2 枚のミラー間に閉じ込められた光は共振によって増幅され、定在波を形成する。
	空間モード	横モードとほぼ同じ意味。レーザービーム強度の空間的な分布。
	コア径（光ファイバ）	光ファイバのうち、実際に光が伝搬する部分であるコアの直径のこと。
	光電変換	光電効果を示す物質を利用することで、光を電流に変換すること。
	光路長	光が通過する経路の長さ。高反射ミラーからなる共振器では、内部を光が何度も往復することになるため、共振器を通過する光の光路長は共振器の物理的な長さよりも大幅に長くなる。
さ行	実効光路長	光路長は、光を遮断した場合の減衰時間を計測することにより求められる。共振器を通過する光の光路長はミラーの反射率から計算によって理論的に求めることもできるが、実際に計測された減衰時間から算出した光路長を実効光路長と呼んでいる。
	シリンドリカル	シリンダー（円筒）の一部分を切り取った形状をもつ光学素子の頭に付ける語。シリンドリカルレンズ、シリンドリカルミラーなど。
	水素	原子番号 1 の元素。常温常圧で気体であり、最も軽い気体である。次世代のエネルギー源として注目されており、燃料電池自動車 FCV の燃料となる。
	水素ステーション	燃料電池自動車 FCV への水素の供給を目的とする施設。本事業は、水素ステーションにおける水素ガスの純度分析装置開発を目的とする。
	スペクトラムアナライザ	波長計とも。一般にスペクトラムアナライザは電磁波のスペクトルを分析する機器の総称であるが、本事業においては特に光の波長を分析する機器を指す。本事業では、レーザーの波長の確認やガスの吸収スペクトルの計測に使用する。
	赤外吸収	赤外波長域における光の吸収のこと。ほとんどの物質はその分子に特異な赤外吸収スペクトルを示す。本事業では、各分析対象ガスに特異な吸収波長を見出し、その波長に合わせたレーザーを光源として使用する。
	全硫黄化合物	H_2S、COS、CS_2、メルカプタン等、硫黄を含む化合物。本事業では、H_2S を計測の対象とする。
	線幅	レーザーの発振特性に関する用語。発振しているレーザーの波長（または周波数）領域におけるスペクトルの分布する幅。レーザーの線幅が狭いほど、分光計測の精度は高くなる。
	全ハロゲン化合物	H-Cl 等の無機塩化物等や R-Cl 等の有機塩化物等。

	用 語	説 明
	線形性	計測された信号と測定対象の物理量との間に、比例関係がどの程度成り立つかを示す語。線形性が高いほど、計測精度が高まる。
た行	縦モード	レーザーの波長（あるいは振動数）領域でのスペクトルの形状。レーザーの光軸方向のモード。
	定在波	進行せず、その場にとどまって振動する波動。共振器内部では、逆方向に進行する２つの光波の干渉により、共振器内部に定在波が生じる。
	同期検波	レーザーの波長などを周期的に変調し、検出器をその変調周波数と同期させて目的の信号の検出を行う手法。雑音に埋もれた微小な信号の検出に有効である。
は行	発振	レーザー装置内部で光が増幅され、レーザービームが出射されることを一般に発振するという。
	半値全幅	山形の関数の広がりの程度を表す指標。ピーク値の半分の値を超える部分の幅。
	バンドパスフィルタ	特定の波長の光のみを通す光学フィルタ。
	ビームプロファイラ	レーザービームの品質（横モード）を評価する機器の名称。
	ビルドアップ	外部共振器（PBC）内部で光波が共振し、生じる定在波の強度が高まることをビルドアップされるという。
	フィードバック光	本事業では、外部共振器から漏れ出し、半導体レーザーの素子に帰還する光のこと。
	分光	光を波長ごとに分けること。プリズムや回折格子などの光学素子によってなされる。
	偏光	電場および磁場の振動方向が規則的な光のこと。一般に光学では、そのうち電場の振動方向を偏光方向と呼ぶ。
	偏光面	光波の進行方向ベクトルを含み、電場ベクトルもしくは磁場ベクトルのどちらかを含む平面。
	偏波保持ファイバ	光の偏光を保持したまま伝送することが可能な光ファイバ。
	防爆構造	電気機器が点火源となって、周囲に存在する爆発性ガスに点火させることがないように、電気機器に適用する技術的手法。
や行	横モード	進行方向に垂直な断面のレーザービームの強度分布、形状。
ら行	ラマン散乱	入射した光と異なる波長となって散乱される光のこと。
	ラマン散乱断面積	ラマン散乱の強度を表す指標。散乱断面積とは、量子力学において、入射粒子が散乱される確率を標的粒子の断面積として表わす量のこと。
	ラマンシフト	励起光からみたラマン散乱光の波長領域でのずれを示す値。単位 cm^{-1} で表されることが多い。
	ラマンスペクトル	ラマン散乱光のスペクトル。
	ラマン分光	ラマン散乱光を観測することにより物質の分析を行う分光光学的手法。
	利得帯域	本事業においては、半導体レーザー素子内部において、光の増幅が損失を上回り、レーザー発振が生じる可能性のある波長帯域のことをいう。
	リングダウン信号	キャビティリングダウン分光法（CRDS）において、光源の光を遮断した後、光が減衰していく様子を電気信号として捉えたもの。指数関数的に減衰する信号となる。
	ロングパスフィルタ	特定の波長よりも短い波長の光を遮断し、長い波長の光のみを透過させる光学フィルタ。

	用 語	説 明
あ行	圧力組成等温線	水素吸蔵特性を示す曲線で、ある一定温度における水素圧力と水素吸蔵量の関係を示す曲線。
さ行	シェルアンドチューブタイプ	多管式熱交換器とも呼ばれ、胴体に多数のチューブを収めた形の熱交換器の名称。
	水素吸蔵合金	水素を可逆的に高密度に吸蔵・放出できる合金。
	水素吸蔵・放出圧力	水素吸蔵合金が水素を吸蔵して水素化物になる圧力および水素化物が水素を放出して合金相に戻る圧力
	水素吸蔵・放出サイクル試験	水素の吸蔵反応・放出反応を繰り返し実施することで、材料の劣化状況を判断するための試験。一般的には水素を加圧・減圧することで評価されるが、本プロジェクトでは運用条件に合わせて温度を加熱・冷却することで吸蔵・放出反応を繰り返す。
な行	熱化学式水素圧縮機	熱エネルギーを利用して化学反応を生じさせることで水素圧力を高めることが可能な圧縮機。ここでは化学反応として、水素吸蔵合金の水素吸蔵・放出反応を利用する。
	熱伝導解析	初期温度分布や境界条件などを設定し、数値解析によりシステムの温度分布変化を求める解析
は行	ヒステリシス	ここでは、同一温度で評価した際の水素吸蔵圧力と水素放出圧力の差を指す。
	非定常熱伝導解析	所定の時間範囲における温度やガス流速の計算を行い、各時間における温度分布等を評価する解析
	ファントホッフの関係式	熱力学における状態関数の変化を評価するために使われる関係式。ここでは、温度の逆数と水素吸蔵・放出圧力をプロットすることで、反応のエンタルピー及びエントロピー変化を評価する。
ら行	律速過程	化学反応を複数の素反応に分割した際の一番時間を要する素反応過程。
	ルツボ	高周波誘導溶解を利用して金属を高温で溶解する際に、溶湯を保持する耐熱性容器。

2-(4)-⑨：「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発」

国立研究開発法人産業技術総合研究所／岩谷産業株式会社／株式会社タツノ／
トキコシステムソリューションズ株式会社／一般社団法人水素供給利用技術協会／
一般財団法人日本自動車研究所

	用 語	説 明
さ行	重量法	水素充填質量をはかりで計量して充填装置の表示と比較評価する方法。
	充填プロトコル（充填手順）	燃料電池自動車に安全かつ迅速に水素を充填するための技術基準。
た行	脱圧量	水素ステーションのディスペンサー付属ノズル取り外しのため行われる、脱圧時の水素放出量のことである。
	トレーサビリティ	ここでは、「計量トレーサビリティ」を指す。国家標準又は国際標準で決められた標準に関連づけられ得る測定結果又は標準の値の性質のこと。

	用 語	説 明
は行	不確かさ	測定の結果に付随した，合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ。測定された結果がどの程度確かなのかを示す指標で、計量トレーサビリティが確保できていることを証明するもの。
ま行	マスターメーター法	トレーサビリティが確保された流量計であるマスターメーターを用いて、ディスペンサーの計量評価を行う方法のこと。

研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

3-①：「水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発」

一般社団法人水素供給利用技術協会／一般財団法人日本自動車研究所

	用 語	説 明
英数	CHS	Center for Hydrogen Safety（水素安全センター）： 米国化学工学会（The American Institute of Chemical Engineers: AIChE）の下部に設立された水素安全の技術情報を集約する機関
	DOE	Department of Energy：米国エネルギー省
	FCV	燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle）のこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走る車を指す。
	Hydrogen fuel index	水素燃料指標。水素品質規格で定められる 13 成分の濃度の和を 100%から差し引いたもの。
	IEA/ HTCP	International Energy Agency (IEA) Hydrogen Technology Collaboration Program (TCP)：国際エネルギー機関／水素技術に関する国際協力プログラム
	ISO	International Organization for Standardization：国際標準化機構。国際規格の世界的相互扶助を目的とする独立組織で、国家間に共通な標準規格を提供し、世界貿易を促進している。約 2 万の規格は、電気通信を除く全分野、工業製品・技術・食品安全・農業・医療などの分野を網羅している。 また、ISO で策定される国際規格は ISO の後に番号を付け、水素燃料仕様の国際規格は ISO 14687 と称される。
	NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH（水素・燃料電池機構）：ドイツの燃料電池・水素ナショナルプロジェクトの研究開発をマネジメントする機関。
	SAE	Society of Automotive Engineers: 米国自動車技術会、米国の自動車用規格を定める標準化機関。 SAE の規格は「SAE J2600」と J のついた番号であらわされる。
	TC	Technical Committee：専門委員会 ISO の下に設置される各技術分野に関する標準化審議を担当する委員会。各委員会は番号で呼ばれ、水素技術の TC は 197 番 ISO/TC 197 と称される。
	WG	Working Groupe：作業グループ

	用 語	説 明
		通常 TC あるいは SC:Sub Committee（分科委員会）の下に設置され、個々の国際規格について審議する。TC/ SC と同様に番号で呼ばれ、例えば水素燃料仕様（ISO 14687）の WG は 27 番。ISO/TC 197/WG 27 と称される。

3-②：「燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発」

一般財団法人日本自動車研究所

	用 語	説 明
英数	1958 年協定	正式名称は「車両並びに、車両への取付け又は車両における使用が可能な装置及び部品に係わる統一的な技術上の要件の採用並びに、これらの要件に基づいて行われる認定の相互承認のための条件に関する協定」。自動車の構造及び装置の安全・環境に関する統一基準の制定と相互承認を図ることを目的とし、自動車の構造及び装置に関する規則(以下「UN 規則」)について規定されている。
	1998 年協定	1998 年にジュネーブで作成された「車両並びに車両への取付け又は車両における使用が可能な装置及び部品に係る世界技術規則の作成に関する協定。自動車の安全、環境、燃費及び盗難防止にかかわる世界技術規則「UN GTR」の制定と統一基準「UN 規則」との両立を目的とする。つまり、自動車の安全分野についてメーカーが製品の基準適合性を保証し、販売後に政府が市場の自動車の適合性を確認する「自己認証制度」を採用している国を考慮した協定。
	A6061-T6	マグネシウムとシリコンを加えた熱処理型アルミニウム合金の一種で、耐食性が高く、T6 処理により高い強度を有する。FCV では Type3 容器の金属製ライナーに広く使用されている。
	CFRP	炭素繊維強化プラスチック。10μm レベルの炭素繊維を数万本単位で幾層にも巻き付けることで、軽量化を実現しながら巻き付けた部品の強度アップを図ることができる。高圧容器の場合、ライナーの周囲に CFRP を数 10mm の厚さで巻きつけることで、高圧ガスを充填した際の耐圧性能を確保する。
	CSA	Canadian Standard Association
	FCV	燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle）のこと。水素を燃料とし、搭載した燃料電池で発電し電動機の動力で走る車を指す。
	GTR	自動車の安全性に関する世界統一基準であり、欧州を中心に作成され、国連の認証も受けている。燃料電池自動車用の基準は、GTR No.13 と呼ばれている。
	GTR13 Phase1	水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準の審議を行い、2013 年 6 月に採択された。GTR13 の第 1 フェーズ。
	GTR13 Phase2	Phase1 で残課題とされた項目を検討するため、2017 年度 10 月に審議が始まる。GTR13 の第 2 フェーズ。
	HRR	発熱速度（Heat release rate）のこと。火源の燃料の低発熱量[kJ/kg]×火源の流量[kg/min.]で表され、火源のエネルギーを表すための指標のひとつである。
	HRR/A	発熱速度（kW/㎡）とは、物が燃える時に発生するエネルギーを示す。一般的には発生するエネルギーが小さい程、防火性能が優れている。

	用 語	説 明
	ISO/TC197/WG18（車載用水素容器および安全弁）	ISO/TC197 は「エネルギー利用を目的とした水素の製造、貯蔵、輸送、測定および利用に関するシステム・装置に関わる標準化」を目的として、1989 年 11 月に国際標準 ISO 中に委員会として設立された。WG18 は、車載用高圧水素容器と熱作動式容器用安全弁(TPRD)を作業テーマとし、陸上乗用車両用燃料として高圧水素ガス・水素混合気体のガス容器に関する要求項目を規定する。また容器に付属する安全弁についての規定を担当するワーキンググループである。
	NWP	Nominal Working Pressure. 公称使用圧力のことで、基準温度(国際的には 15℃)における最大の使用圧力のこと。現在の FCV では 70MPa が主流。
	OICA	自動車製造業者の国際団体（Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles）である。フランス・パリに本部を置き、自動車産業の利益を代表する。現在約 40 カ国の自動車関連団体がメンバーとなっており、業者間の意見の交換・調整、自動車関連規制の国際調整のための協議、国際自動車展示会の認定・後援、世界的な視点での自動車生産の統計などをおこなっている。
	SAE	Society of Automotive Engineers。現在は、SAE International（SAE インターナショナル）と呼称している。SAE International は、航空機、自動車、商用車業界の関連技術の技術者および専門家が 128,000 人以上参加している世界規模の団体。SAE International のコア・コンピテンシー（中核技術）は、生涯学習と自発的合意によって、標準を策定すること。GTR13 審議においても重要な影響力を持っている。
	SAE J2578	Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety (燃料電池自動車の安全に係る標準)。FCV の水素漏れ等に関する安全の他、高電圧の電気安全等、車両に係る安全要件が規定されている。
	SAE J2579	Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles（燃料電池および水素自動車の燃料装置の標準）。GTR13-HFCV Phase1 の審議に、その当時の J2579 ドラフトがベースとして使われた。現在もドラフト審議中であり、GTR13-HFCV Phase2 の審議でもベースとして使用される可能性が高いため、日本からも審議に参加している。
	SSRT 試験	低ひずみ速度引張（Slow Strain Rate Tensile）試験。水素環境や腐食環境の影響を出しやすくするため、低ひずみ速度で引張試験を実施する方法。
	SUS304	SUS304 はクロムとニッケルを成分に含むオーステナイト系ステンレスの代表格であり、最もよく使われるステンレス。
	SUS316L	SUS304 同様オーステナイト系ステンレス鋼の一種。成分調整により高い水素適合性が認められている。
あ行	オーステナイト系ステンレス	常温でもオーステナイトの組織が安定している非磁性材料（オーステナイト相がフェライト相に変化することなく、結晶構造も面心立方格子を維持する）。一般に、耐食性、耐熱性に優れる。
	応力腐食割れ	引張り応力と腐食環境の相互作用で、材料にき裂が発生し、その亀裂が時間と共に進展する現象を応力腐食割れ(SCC：Stress Corrosion Cracking)と呼ぶ。 本事業で扱うアルミニウム合金の応力腐食割れは、特に湿潤環境中で発生する応力腐食

	用 語	説 明
		割れに着眼し、HG-SCC：Humid Gas-Stress Corrosion Cracking と称した。
か行	高圧ガス保安法	高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他の取扱及び消費並びに容器の製造及び取扱を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスの保安に関する自主的な活動を促進し、もつて公共の安全を確保することを目的とする法律。
	局所火炎暴露試験	車両火災時の最悪時を想定し，熱作動式安全弁から最も離れた箇所を局所的な火炎によって容器を晒す試験法である。GTR phase1 では容器底部温度のみが規定されていたため，試験機関によってバラツキがあることが分かった。そのため，Phase 2 では再現性向上のための試験法開発を実施している。
さ行	車載容器	燃料電池自動車の車両に固定した燃料装置用として圧縮水素を充填するための容器。
	自動車基準調和世界フォーラム UN/ECE/WP29	安全で環境性能の高い自動車を容易に普及させる観点から、自動車の安全・環境基準を国際的に調和することや、政府による自動車の認証の国際的な相互承認を推進することを目的としている。国連で世界的な基準調和を議論する唯一の場であり、UN 規則や UN GTR を作成している。
	水素適合性試験法	本事業では、高圧水素ガス環境中で金属材料の耐水素特性を評価する試験法を称する。金属組織の中に侵入した水素が拡散・集積して材料強度を低下させる従来のいわゆる"水素脆化"に対し、ここで扱う水素感受性に影響する現象はメカニズム的に異なるものとして、"水素適合性"と称した。
	世界統一技術基準（GTR）	GTR：Global Technical Regulation。自動車の装置ごとの安全・環境に関する世界の知見を集めた統一的な技術基準。各国法規への導入による基準の国際調和を目的として、国連において採択された 1998 年協定により制定される。
	赤外線熱画像装置	本装置は、被測定物からの赤外線エネルギーの温度を画像(熱画像)として表示でき、あらゆる物体の表面温度の分布状況の測定ができる
な行	熱作動式安全弁	容器等の温度が上がった場合、熱により作動し、容器内部の流体を容器外部に放出し、容器の破裂等を防ぐ装置
	熱電対	異種金属の２つの接点間の温度差により発生する熱起電力現象を利用して、温度差を測定する温度センサー。
	熱流束	対流、熱伝達及び輻射により伝達される熱量のこと
は行	発熱量	発熱量とは、一定の単位の燃料が完全燃焼するときに発生する熱量のこと。一般にボンベ熱量計を用いて測定される。それぞれの燃料に固有の値を持ち、燃料の性能を表すもっとも重要な指標である。発熱量の計算には、通常、低発熱量が用いられ、本試験法案にも低発熱量が使われる。
	破裂圧力 （破裂圧）	GTR13 等に規定されている設計確認試験の一つである破裂試験によって測定された圧力。
	破裂試験	GTR13 等に規定されている設計確認試験の一つ。 容器が破裂するまで昇圧することによって破裂圧を測定する試験。
	引張強さ	応力ひずみ線図で最大の応力を示すポイントをこの材料の引張強さと呼ぶ。通常この領域では試験片が大きく変形しており、力学的には意味のない値だが(変形前の断面積を元に

	用 語	説 明
		計算される公称応力であるため)、疲労限度や硬さと強い相関があるため広く用いられる。
	疲労限度 （疲労限）	材料の疲労において、物体が振幅一定の繰返し応力を受けるとき、これ以上回数を増やしても破断まで至らない下限の応力振幅値。
	疲労試験	規定された試験片を用い、繰返し応力に対する破断繰返し数を調査する試験。
	ブンゼン型バーナー	このバーナーはガスの供給口を小さな穴を通すことでベンチェリー効果が発生し、その側面から空気を取り込まれる予混合火炎である。構造が単純であり、火炎が安定化しやすい特徴がある。
	輻射	ここでは、熱輻射の意味で、（熱）放射ともいう。伝熱の一部で、熱が電磁波によって運ばれる現象。または、物体が熱を電磁波として放出する現象をいう。
	輻射熱	水素が漏洩し着火した際に発生する熱。輻射熱が 1.26kW/m2 以下となる距離が基準となる。ピンホール（口径 Φ1.0mm）から漏洩させて測定。
ら行	ラウンドロビンテスト	ラウンドロビンテストは、測定者の技量を含めて測定方法や測定装置の信頼性を検証するために、複数の試験機関に同一試料を回して測定を行う共同作業の一方法。最近は、国際標準試験法の策定や標準試料の選定に国を超えた取り組みも行われている。

3-③：「水素社会に係る国際関連機器等研究・政策動向に関する調査研究」

株式会社大和総研

特別な用語なし。

3-④：「水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究」

国立研究開発法人産業技術総合研究所／NTT アノードエナジー株式会社／豊田通商株式会社

	用 語	説 明
英数	CNP	カーボンニュートラルポートの略、国際物流の拠点となる港湾において、国土交通省が形成を目指す、脱炭素化に配慮した高度な機能を持ち、水素・燃料アンモニア等の大量・安定・安価な輸入、貯蔵等を可能とし臨海部産業との連携機能を備える港湾の総称
	DOE	アメリカ合衆国エネルギー省（United States Department of Energy 略称 DOE）エネルギー保障と核安全保障を所管する。
	OTDR	OTDR（Optical Time-Domain Reflectometer）は、光ファイバーケーブルの品質評価やトラブルシューティング、光ファイバーネットワークの設計および保守に使用される測定機器
	TNT 換算	燃焼や爆発により放出されるエネルギーを、同等のエネルギー量を有する TNT（トリニトロトルエン）の質量に換算する方法であり、爆発威力や爆風圧の推定に用いられる
あ行	圧縮水素	加圧下にある気体の水素。輸送に際してはカードルと呼ばれる容器に 20MPa 程度に圧縮し装填されてトラック輸送で需要先に運ばれる。
	圧力波	流体中を伝播する圧力変動の波動
	位相変化	ここでは光ファイバ内での位相変化を指す。光信号が光ファイバを伝播する際に、その波の位相がどのように変化するかを指す

	用 語	説 明
	液化水素	液化した水素のこと。沸点は-252.6℃で融点は-259.2℃である。圧縮水素に比べて圧倒的に密度が大きく、大量貯蔵・輸送に適している。
	応力歪	外部の力にさらされると発生する応力と歪
	音響振動	物体や媒質内を伝わる音の波動の振動パターンを指します。ここでは特に音波が光ファイバ中を伝わる際に生じる振動のことを指す
か行	加圧放置法	試験対象のガス配管や容器を不活性ガス等で加圧し、一定時間放置した際の圧力の変化を基に漏れ判定を行う方法
	火炎伝播	可燃性ガスと空気が混ざった状態で燃焼する際に、未燃の混合気に向かって火炎が伝播すること
	可燃濃度範囲	空気中で燃焼が可能となる可燃性ガス濃度の範囲。燃焼範囲あるいは爆発範囲とも言う。
	偽陰性	「偽陰性」（False Negative）は、テストの結果が実際の状態と一致しない状態のこと
	高圧水素カードル	圧縮水素を輸送する際に入れる容器、ボンベ。 1MPa 以上の高圧で充填されるため、容器に対しては高圧ガス保安法で技術上・保安上の基準が定められている。
さ行	再エネ水素	再生可能エネルギーから作られる水素。 風力発電・太陽光発電等からの水の電気分解で作られる水素など、再エネ水素は水素製造時の CO2 発生がなくグリーン水素と呼ばれる。
	事故シナリオ	事故に至る事象の進展であり、事故のきっかけとなる初期事象と、引き続き発生し事故に至るまでの一連の事象から構築される
	水素ステーション	燃料電池自動車（FCV）に燃料水素を供給する施設で水素スタンドと同義。現行の充填圧力は 70MPa である。
	層流火炎速度	層流状態で予混合火炎が伝播する速度
た行	中規模水素ステーション	水素供給能力が 300Nm3/h 以上 500Nm3/h 未満の規模の水素ステーション。FCV5 台/h 以上充填が可能なステーション。
	チューブトレーラー	高圧シリンダーで構成される圧縮水素トレーラー。45MPa、20MPa 等の高圧充填水素シリンダーを複数本横積みしてトレーラーヘッドで引っ張るもの。水素ローダーもほぼ同義。
	都市ガス中圧導管	中圧の都市ガスを流す導管。圧力 0.1～1MPa 未満が中圧、0.3MPa 以上を中圧 A と言い 0.3MPa 未満を中圧 Bと言う。
は行	爆轟	音速を超え衝撃波を伴いながら燃焼する現象
	火花放電	電極間に高電圧を印加した際に生じる、火花を伴う放電現象
	光損失	光ファイバ中を光信号が伝搬するときに生じる減衰量
	標準管路	マンホール、ハンドホール、とう道、所内マンホールの間を結ぶ管で、原則として掘削することなく 1 区間のケーブルを管内に引き込み、または引き抜くことができるように敷設したもの
	分布型センシング	ここではファイバーの全長を通して連続的に測定できるファイバーセンシング技術のことを指す
や行	予混合火炎	予め混合された可燃性ガスと酸化剤（空気）が着火した際に形成される火炎

Ⅰ. 事業・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

1. 本事業の位置づけ・意義

1.1 政策的な重要性

第 4 次エネルギー基本計画（2014 年）以降、水素・燃料電池戦略ロードマップ（経済産業省 2014 年 6 月）が策定され、水素社会実現に向けた技術開発課題を時間軸と共に提示され、2017 年 12 月には、世界で初めてとなる水素推進に向けた国家戦略となる水素基本戦略が取りまとめられた。

その後、この水素基本戦略を実現するためのアクションプランとして 2019 年 3 月に水素・燃料電池ロードマップが改訂されると共に、2020 年 10 月の 2050 年のカーボンニュートラル宣言に併せて「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定されている。

このグリーン成長戦略に関連して、研究開発から実証、社会実装までを見据えて企業等の取組を 10 年間の継続的な支援を行っていくための総額 2 兆円のグリーンイノベーション基金が造成され、水素社会構築にむけた技術開発が加速された。

さらに、2023年6月には、社会情勢の変化を踏まえて、水素基本戦略が改定された。本戦略の中では、3E+S の考え方の下、3E 達成のための水素製造からの利活用に至る取組に加えて、産業競争力強化のための水素産業戦略、S に対応するための水素保安戦略が一体となった戦略が示されている。

水素は、政策面・技術面で世界をリードしている分野であるが、近年、ウクライナ侵攻以降のエネルギー情勢変化等を踏まえ、欧米諸国を中心に野心的な目標の設定や積極的な投資を行うなど、水素を取り巻く国際的な環境は大きく変化しつつある。NEDO は、各国と協調して国際的な市場を創出すると共に、日本が強みを有する水素関連技術を維持・向上させるため現状の政策に基づき様々なステークホルダーと連携しながら技術開発を進めていく。

以下に、本「水素・燃料電池戦略ロードマップ」と「水素・燃料電池技術開発戦略」の抜粋を添付する。

「水素・燃料電池戦略ロードマップ」抜粋（資源エネルギー庁、2019/3/12）

アクションプランのポイント①　＜水素利用（モビリティ）＞

赤字は新規目標等

'25年～の本格普及期に向けたコスト大幅削減のため、量産技術の確立、徹底的な規制改革

	目指すべきターゲット	ターゲット達成に向けた取組
水素利用（モビリティ） FCV	● 2025年20万台、2030年80万台 ● 2025年頃にFCVをHV並の価格競争力へ価格差低減 （FCVとHVの価格差300万円→70万円） ● 2025年頃に主要な要素技術のコスト低減 （燃料電池システム約2万円/kW→0.5万円/kW 水素貯蔵システム約70万円→30万円） ● 2025年にボリュームゾーン向け車種展開	・関係企業・研究機関等の間での協調領域の技術情報や課題の共有 ・貴金属の使用量低減等に向けた技術開発 ・水素貯蔵システムにおける炭素繊維の使用量低減等に向けた技術開発
水素ST	● 2025年320箇所、2030年900箇所相当 ● 2020年代後半の自立化 ● 2025年頃までの整備費・運営費の抜本的な削減 （整備費3.5億円→2.0億円、運営費3.4千万円/年→1.5千万円/年） ● 個別機器の2025年頃のコスト目標の設定 （圧縮機0.9億円→0.5億円 蓄圧器0.5億円→0.1億円）	・徹底的な規制改革と技術開発の一体的な推進 （2020年オリパラまでに無人化の実現、低コスト鋼材の使用等） ・全国的な水素ステーションネットワーク構築の検討 ・営業時間・土日営業の拡大 ・ガソリンスタンド/コンビニ併設ステーションの拡大
バス	● 2030年1,200台 ● 普及地域の全国拡大 ● 2020年代前半の車両価格の半減（1億500万円→5,250万円） ● 2030年頃までに自立化	・燃費・耐久性向上に向けた技術開発 ・路線バス以外への車種展開 ・バス対応ステーションの整備促進
フォークリフト	● 2030年1万台 ● 海外市場への展開	・燃料電池ユニット等の多用途展開 ・簡素で運用が容易な充填設備の整備促進

※グリーン成長戦略の改訂（2021 年）にて、1,000 箇所へ引き上げられた。

※上記の他に、トラック、船舶、鉄道分野での水素利用拡大に向け、指針策定や技術開発等を進める

「水素・燃料電池技術開発戦略」抜粋（資源エネルギー庁、2019/9/18）

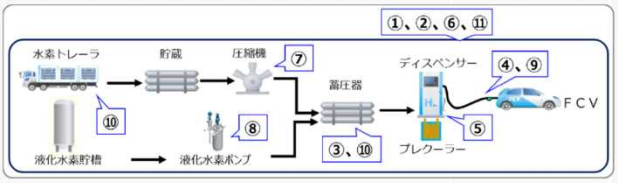
2. 水素サプライチェーン分野　水素ステーション

現状および目標

	2018年（実績）	2025年頃（目標）
圧縮機	0.60億円	0.50億円（100台/年・社）
蓄圧器	0.70億円	0.10億円（500本/年・社）
ディスペンサー	0.20億円	0.10億円（100台/年・社）
ブレクーラー	0.20億円	0.10億円（100台/年・社）
その他工事費	1.40億円	1.10億円
整備費計	**3.10億円**	**2.00億円**
	2017年（実績）	
運営費	**3.2千万円**	**1.5千万円**

※1 実績値は、補助金実績額より試算（固定式 オフサイト・300Nm³/h）。
なお、補助金支給対象とならない各種費用（キャパピー・障壁設置費用、土地代等）が存在することに留意。
※2 2025年のコスト目標については、一定の出荷数等を確保するといった前提条件あり。

【参考】水素ステーションイメージ図



主な課題

整備費の削減

運営費の削減

技術開発事項

①**遠隔監視による水素ステーション運転の無人化**や**設備構成等の見直し**に向けたリスクアセスメント
②**汎用金属材料の水素特性**等に係るデータ取得
③**蓄圧器**の寿命延長、新たな検査方法の開発
④**ホース及びシール材**の更なる耐久性向上
⑤**新たな充填プロトコルの開発**（水素供給温度緩和等）
⑥運用データの解析の結果等に基づく、水素ステーションの**各機器の仕様や制御方法の標準化・規格化**
⑦**圧縮機**の高効率化・低コスト化（**電気化学式圧縮機、熱化学式圧縮機**の開発等）
⑧**液化水素ポンプ**の開発
⑨燃料電池トラック等、**新たなアプリケーションに対応した充填、計量技術**の開発
⑩**大容量、軽量容器**の開発
⑪高容量、高耐久な**水素貯蔵材**の開発及び生産技術の確立

6

1.2　我が国の状況

水素・燃料電池戦略ロードマップで示された水素ステーションの２０２０年１６０箇所、２０２５年３２０箇所程度の設置を実現するためには、水素ステーション事業の自立化に向けたさらなるＦＣＶの導入支援と合わせてステーション整備費、運営費、更には水素調達コストの低減に係る技術開発が重要となる。世界に先駆けて商用水素ステーションの設置を進めてきたが、設置当初とは異なる新たな課題が明確になってきた。水素ステーション、ＦＣＶの本格的普及を実現する為に、新たな共通課題を解決することで、水素ステーション事業の自立化に向けた取り組みが求められている。

1.3　世界の取り組み状況

米・欧・中などにおいても、国家レベルで水素ステーション整備およびＦＣＶの導入目標数を設定し、基礎研究から技術開発、実証研究の取り組みを行い、さらに、我が国と同様にＦＣＶ及び水素ステーションの一般普及を目指している等我が国の国際競争力強化の観点から引き続き戦略的・重点的な取り組みが不可欠である。以下に日本及び主要各国の水素ステーション等の状況を示す。

表．日本及び主要各国の水素ステーション等の状況

国名		日本	米国	ドイツ	中国	韓国
燃料電池自動車 水素ステーション	研究開発	NEDO ・超高圧水素インフラ技術研究開発事業 ・燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業	エネルギー省 Hydrogen and Fuel cell Program H2@port 等	NOW Clean Energy Partnership (CEP)	科学技術部 再エネおよび水素技術重要特別プロジェクト等	水素経済委員会 Clean Hydrogen Portfolio Standard (2023 年 8 月)など
	商用水素ステーション設置目標数 (70MPa 充填)	320 箇所(2025 年) 1,000 箇所(2030 年) 設置補助金：国供出	1,000 箇所(2025 年) 4,300 箇所(2030 年) 設置補助金：州供出	400 箇所(2025 年) 1,000 箇所(2030 年) 設置補助金：官民折半（50%/50%） H2 Mobility 中心	300 箇所(2025 年) 1,000 箇所(2035 年)	1,200 箇所(2040 年)
	商用水素ステーション(建設予定含む) (2022 年度)	182	105	108	250	200
	FC 乗用車台数 (2022 年度)	約 8,000	約 15,000	約 2,200	約 500	約 32,500
	FC バス等台数 (2022 年度)	127	66	68	約 12,000 バス,トラック (35MPa 中心)	342
その他水素車両	FC 電動リフター (FC フォークリフト)	433	–	180	–	–

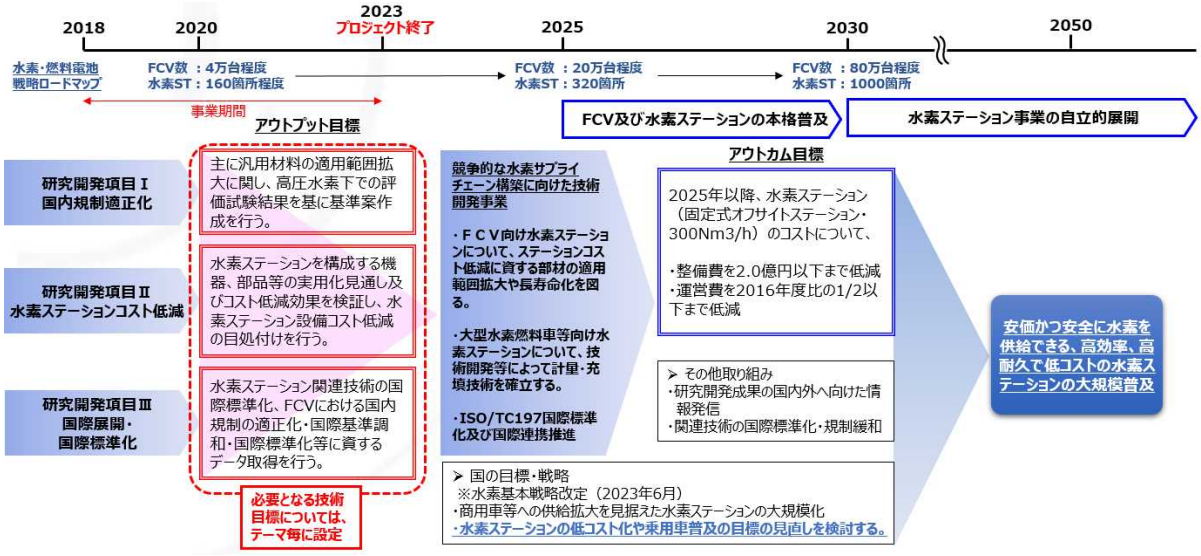
1.4　本事業のねらい

２０２５年以降のＦＣＶ及び水素ステーションの本格普及、２０３０年以降の水素ステーションの事業自立化に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、ＦＣＶ及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発を行い、一連の機器及びシステムのコスト低減、ＦＣＶの普及展開及び国際競争力確保に資する。

2. アウトカム達成までの道筋

本研究開発を通して得られた成果は機構および実施者と共に社会実装に努める。また、本事業で扱っていたテーマの内、更なるコスト低減が見込めるテーマ、大型燃料電池車向けの計量・充填技術、およびISO/TC197の国際標準化に向けた取り組みついては、後継事業である競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業において、継続して研究開発を実施し、水素ステーションコストの更なる低減、および大規模化への対応を継続して実施することで、アウトカム達成を目指す。

一方で、水素基本戦略にも記載の通り、FCV 台数および水素ステーション設置数が当初目標から乖離している現状を踏まえて、アウトカム目標の見直しについても機構および資源エネルギー庁ともに検討し、水素ステーションの自律的展開を達成する。



3. 知的財産・標準化戦略

① 成果の普及

得られた研究開発の成果は、機構及び実施者ともに普及に努める。

② 標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業または国際標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供、標準技術情報（ＴＲ）制度への提案等を戦略的かつ積極的に行う。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第２５条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

④ 知財マネジメントに係る運用

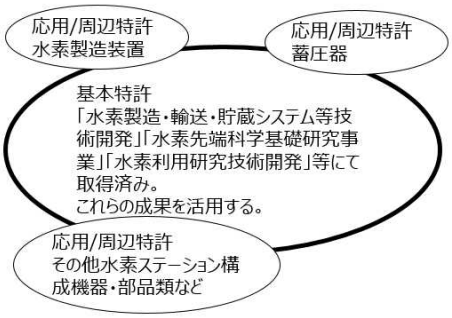
本プロジェクトは、「ＮＥＤＯプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

• 知財の取扱についての戦略及びルール

オープン／クローズ戦略の考え方

	非競争域	競争域
公開	**標準化推進** ・ISO水素ステーション関連 19880-5　充填ホース 19880-7　HRS用Oリング（新規） 複合容器　WG15　など	**知財のライセンスなど** ・水素製造装置、水素圧縮機、蓄圧器など水素ステーションを構成する装置・部品類に係る特許による各社の優位性の確保 ・水素品質分析サービスなど分析コストの低コスト化競争につながる場合は技術情報を開示
非公開		**秘匿化** ・高圧・低(高)温水素雰囲気下での鋼材の挙動に関する各種データ。⇒海外への情報流出を防ぐために原則非公開だが、ISO化などで日本が議論をリードする場合は、適宜公開する。

水素ステーションを構成する機器類の特許を取得し、並行して標準化に於ける議論を日本がリードする。
将来は輸出につなげられるよう、国際的な優位性の確保を視野に入れる。



基本特許：材料、構成、構造
周辺特許：用途、システム、周辺

II. 目標及び達成状況

1. アウトカム目標と達成見込みについて

国内規制の見直し、水素ステーション設備のコスト低減、構成機器の最適化、機器の省エネ化、高分子材料開発等の研究開発への取組みを通して、水素ステーションの整備費低減、運営費低減に資する低コスト水素ステーションの設計が可能となり、水素ステーションの地域拡大（４大都市圏から地方への展開）、水素関連産業の裾野拡大を目的とする多様化するニーズへの対応をすることで、自立的展開可能な水素インフラ実現し、水素ステーションを 2025 年に 320 箇所の整備が可能となる。

【アウトカム目標】

水素ステーション（固定式オフサイトステーション・３００Ｎｍ^3/ｈ）のコスト

２０２５年以降

- 整備費を 2.0 億円以下まで低減させる。
- 運営費を 1／2（1,500 万円／年）以下まで低減させる。

上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。

【アウトカム目標の達成の見込み】

目標 （2025年以降）	現状	達成見込み	達成の根拠／解決方針
水素ステーション（固定式オフサイトステーション・300Nm3/h）のコストを、２０２５年度以降に ・整備費を２．０億円以下まで低減させる。 ・運営費を１／２（1,500万円/年）以下まで低減させる。 上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。	■2022年度実績 ・整備費：3.3億円 ・運営費：3,100万円/年 (経済産業省の集計結果) ■2025年度見込み※ ・整備費：3.3億円 ・運営費：2,200万円/年 ■2030年度見込み※ ・整備費：3.1億円 ・運営費：1,500万円/年	△	各研究開発テーマにおける2025年度以降のコストダウン試算結果の合計が、目標値を下回っている状況。 水素ステーション自立化のために必要とされるテーマについては、「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」において、更なるコストダウンに向けた研究開発を継続する。 一方で、水素・燃料電池戦略ロードマップに掲げる目標値について、その根拠も含めた見直しを行い、水素ステーション事業の自立的展開のために真に必要とされる目標および方策について改めて協議する。

※本研究開発事業で得られた成果に基づいたコストダウン効果を各テーマの実施者にて試算し、NEDO が集計した数値を 2022 年度の実績から差し引いた金額。

（補足）

・運営費については、本事業の研究開発によって 2030 年度におけるコストが研究成果の社会実装が進めば、達成できる見込みがある。一方で、整備費（主に圧縮機、蓄圧器、および工事費）については、当初想定よりもコスト低減効果が小さいこと、および目標達成時期が 2030 年よりも後になる見込みであることから、全体としては達成見込みを△とした。

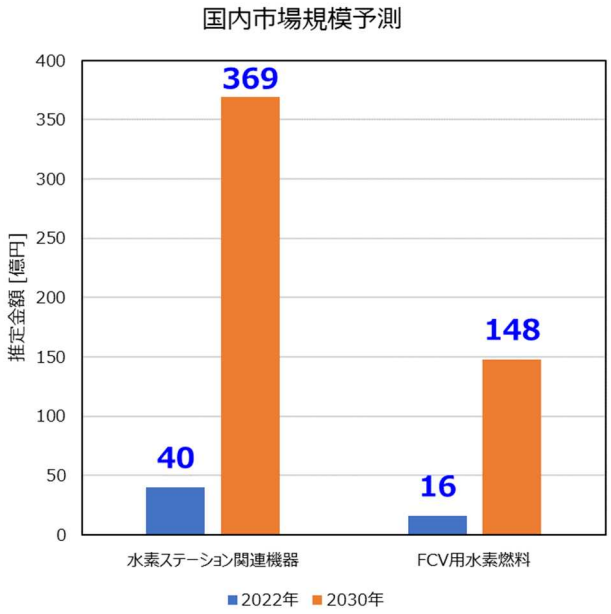
・一方で、ロードマップ目標は水素ステーション構成機器の量産・大量受注を前提（下記）としているが、昨今の水素ステーションの建設数が増えていない状況から、本目標の前提が崩れている。上記状況から、水素基本戦略には、水素ステーション自立化のための目標見直しを実施するとの記載がある。

各研究テーマにおける 2025 年度以降のコストダウン試算結果の合計が目標額を下回っている状況である。水素ステーションの自立化のために必要とされるテーマについては、後継事業の「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」において、更なるコストダウンに向けた研究開発を実施する。

2.　実施の効果（費用対効果）

市場規模予測（出典：富士経済「2023 年版水素燃料関連市場の将来展望」）

・水素ステーション　40 億円（2022 年）
　369 億円（2030 年）
・FCV 用水素燃料　16 億円（2022 年）
　148 億円（2030 年）



計算ベース
■水素ステーションの平均稼働率
（水素需要量/供給能力）
2022年：8.4%
2030年：42.3%
■1日あたりのFCV満充填台数平均
2022年：4～5台
2030年：24～25台

水素ステーション稼働率及び FCV 台数が想定通りに進めば、水素ステーション及び FCV 水素の市場は、2030 年には現状の 9 倍程度になると予測される。

次に、事業毎の実用化の見通しは以下の通り。

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

実用化の見通し
1-(1)本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発
遠隔監視セルフ水素ステーション及び保安監督者が兼務する水素ステーションに関しては、それぞれ、関連省令が施行され、自主基準である JPEC-S、JPEC-TD も制定され、既に運用が始まっている。今後は、それぞれが実績を積むことで、保安監督者が兼任する遠隔監視セルフ水素ステーションが実現される見通しである。 その他の技術基準見直し案についても、今後、法制局にて、順次制定されていく予定であり、自主基準は、省令等の改定に合わせて、制定していく予定である。 家庭用/小規模事業所における水素充塡の可能化、自家消費型の水素充填設備における技術基準の見直しは、大規模水素サプライチェーン構築のための重要な課題であり、引き続き検討を進めることが望まれる。
1-(2)-①新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発
（１）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大 ・伸び基準での新たな水素特性判断基準の考え方を確立した。高圧水素中での安全性や使用者に対する利便性、非プレクール部での使用を想定した適材適所での材料使用等も考慮し、新たな水素特性判断基準に基づく基準案を作成した。 ・新たな基準案では例示基準化されたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316/SUS316L の Ni 当量を低減させ、SUS305 の適用も可能と結論した。 ＜事業化について＞ 基準案における-45℃の部分は先行して例示基準化された。 今後、-45℃の項目以外の部分も例示基準化を図るべく働きかけを行う予定である。SUS305 が JIS 規格に圧力容器材料として登録される必要があり、時期は今年度の JIS B8265 の改訂後を見込んでいる。 （２）汎用ステンレス鋼冷間加工材 ・新たな水素特性判断基準に適合する SUS316/316L を冷間加工する場合、冷間加工度 40%まで水素適合性を維持できることを明確化した。 ・特定則記載の範囲での曲げは水素適合性に影響がないことを明らかにした。 ・冷間加工した SUS316/316L 棒材の許容引張応力を設定する上での課題を抽出した。 ・冷間加工した SUS316/316L 管の許容引張応力案を策定した。 ・SUS305 の冷間加工材が SUH660 を代替可能である可能性が示され、許容引張応力の付与に資する実験結果が得られた。 ・SUS305 母材に関する JIS 規格の圧力容器の材料としての新規登録、許容引張応力の付与に資する実験結果が得られた。 ・SUS305 母材は一般則例示基準 9.2 に記載できる可能性が示唆された。 ＜課題＞ 将来の大規模な水素利用社会の構築に向け、大型の冷間加工材の利用可能に資する、強度保証方法や許容引張応力の設定に向けた検討が必要であり、加工方法や加工条件の影響についてさらなる知見を得ることが必要である。

実用化の見通し
＜事業化について＞ 特定則記載程度の曲げでは水素適合性への影響がないため、追加の規制は設けないこととした。許容引張応力の設定については SUS305 冷間加工材が HPI で審議中であり議論の動向を注視する。 （３）汎用ステンレス鋼溶接材 ・材料特性、水素適合性等の技術指針作成に資するデータを取得した。 ・溶接金属におけるオーステナイト相、フェライト相に求められる水素適合性の要件を整理し、溶接技術指針を作成した。 ・溶接技術指針において SSRT による水素適合性の確認が不要となる事例を例示した。 ＜事業化について＞ 水素適合性の好適事例と水素適合性の判断基準を記載した溶接技術指針を成果報告書の他に JPEC のホームページで公開しており無償で入手可能である。 （４）汎用低合金鋼の高温適用 ・運転状態を想定した水素圧縮機内の暴露環境を模擬した低合金鋼の評価方法を構築、安全性の判断に資する実験結果を取得した。 ・低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 を改訂し、200℃までの使用と水素圧縮機への適用を可能とした。 ・2022 年度までの研究予定を 2020 年度に前倒し達成した。 ＜事業化について＞ 低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 が改訂され、JPEC のホームページで公開しており無償で入手可能である。高圧水素設備における低合金鋼の使用に際し、事前評価での利用が可能である。
1-(2)-③中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発
本事業の目的・目標は中空試験片高圧水素中材料試験法を確立することであり、規格原案を作成し制定団体に提出することが事業化へのシナリオである。本事業は当初、中空試験片高圧水素中低ひずみ速度引張試験(SSRT)を主に規格案を作成する実施計画であったが、順調に進んでいることから、中空試験片高圧水素中疲労試験についても試験法を確立し規格原案を作成するように実施計画を加速した。3 年目の 2020 年度に実施計画通りに中空 SSRT の規格原案を作成し、英文案を ISO に提案していることは、事業化に向けての成果が十分に達成されていることを示している。

研究開発項目２：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

実用化の見通し
2-(2)-①水素ステーション用タイプ 2 蓄圧器の供用中検査手法の研究開発
本研究開発の事業化は、NDIS 2436 が規格化され、それが保安検査基準に引用されることで達成される。 圧縮水素スタンド用の圧力容器は，KHK/JPEC S 0850-9（2018） によって保安検査基準が定められ，KHK/JPEC S 1850-9（2019） によって定期自主検査指針が定められている。保安検査基準と定期自主検査指針の高圧ガス設備（蓄圧器に限る。）の耐圧性能及び強度の内容の抜粋を次に示す。抜粋の蓄圧器は本体の高圧容器を示す。 蓄圧器の耐圧性能及び強度に係る検査は目視検査及び非破壊検査によるか耐圧試験によるものとし，耐圧性能及び強度に支障を及ぼす減肉，劣化損傷，その他の異常がないことを確認する。肉厚測定以外の非破壊検査（磁粉探傷試験，浸透探傷試験，超音波探傷試験，放射線透過試験，渦流探傷試験等）は，蓄圧器の内部について，原則として， 1 年に 1 回行う。ただし，管理された水素を取り扱う蓄圧器のうち，水素に接する部材に水素による劣化損傷が発生する恐れがない材料を用いている以外のもので，蓄圧器の材料，設計，構造等が適切であると認められたものであって，水素の影響を考慮した設計上の寿命が定められており，製作時の検査に合格した日から当該圧力容器に作用した圧力などの使用履歴の記録があるものの開放検査の周期は，完成検査を行った日から水素の影響を考慮した設計上の寿命に到達するまでに相当する期間の 1/2 に到達する日以内，その後の保安検査実施日から水素の影響を考慮した設計上の寿命に到達するまでに相当する期間の 1/2 に到達する日以内とする。ただし，蓄圧器の外部から適切な非破壊検査を毎年実施し異常のないことを確認した場合には，開放検査に代えることができる。また，毎年とする非破壊検査の周期については，水素の影響を考慮した設計上の寿命についての破壊力学的評価及びそれまでの検査の記録等並びに当該蓄圧器が設置されている圧縮水素スタンドの保安についての管理状況等を考慮した健全性の評価を行い，適切であると認められる場合には，延長することができる。
2-(2)-②複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発
水素ステーションに設置される容器のコスト削減に向け、容器評価方法の簡素化及び使用寿命延長に関する技術開発として、容器を構成する材料の最適疲労曲線、疲労寿命設計線図に関する検討、円筒試験体の評価法の検討、き裂進展寿命予測法の検討、タイプ 3 容器への累積損傷則の適用検討等を実施した。 さらに、技術基準を整備するため、タイプ 2 容器に関する技術文書 JPEC-TD 0008 を作成するとともに、タイプ 3 容器に関する技術文書 KHKS 0225 の改正に資する提案内容をまとめた。 タイプ 2 容器に関しては、制定した技術文書（JPEC-TD）の KHKS 0220 への附属書化を目指す。タイプ 3 容器に関しては、KHKS 0225 の改正案を作成し、提案した。2023 年度中に改正された KHKS 0225 が発行される予定である。これらの KHK 技術基準を広く活用してもらうことにより、容器に係る運営コスト低減に繋げる。
2-(3)-①長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発
本事業（2018～2022 年度）において、水素漏洩事例の整理解析や高圧水素機器用シール部材、レシプロ圧縮機用ピストンリング、継手締結部を対象とする材料や評価法に関する基盤技術研究を実施した。シール部材の加速耐久性評価法の開発、継手締結力喪失による水素漏えいの基本原理の解明、ピストンリング部材のトライボロジー特性と分解ガス生成挙動など、水素ステーションを構成する各種機器・配管の高信頼性化、長寿命化、低コスト化に資する開発成果を得るとともに、高圧水素環境下における評価を含む各種評価設備の整備，基盤となる知見の蓄積を進めてきた。 現在、日本の水素ステーションは 160 箇所を超え、FCV は 7,500 台以上となり、FC バスの普及や FC トラックの開発などが進んでいる。水素ステーションとそこで使用される設備、機器の性能・信頼性及び安全性がますます重要となっている。本事業

実用化の見通し
の実績を踏まえ、水素ステーションを構成する各種高圧水素機器、ホース等各種部材の高信頼性化、長寿命化による低コスト化をさらに進めるため、また、今後想定される HDV 向け高流量水素ステーションへの対応をも踏まえ、基盤となる研究開発をさらに推進する必要がある。 漏えいの無い長寿命・高信頼性のシール、継手の開発により、本プロジェクトの成果として、「水素ステーションの安全性向上、信頼性向上、水素ステーション運営コスト低減」が実現できる。
2-(3)-②水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発
本プロジェクトでは高圧水素加速耐久性評価法を確立し、開発した評価法を用いてホースメーカーより提供されたホースの評価を実施した。その結果をホースメーカーにフィードバックすることでホースメーカーにおける開発を加速し、最終的に水素ステーションにおける 30,000 回の充填に使用可能な長寿命ホースを実用化に資するデータを取得することを目的とした。 本プロジェクトにより得られた成果である高圧水素ホース加速耐久性評価法は高圧水素ホースメーカー，高圧水素ホースのユーザーであるディスペンサーメーカー，水素ステーションコンストラクター，水素ステーションオーナーなどステークホルダーが高圧水素ホースの耐久性を評価する指標として，開発した高圧水素ホース加速耐久性評価法を利活用し，新たな長寿命ホースの開発，ホース交換サイクルの延長による水素ステーション運営の低コスト化に資することが期待される。 開発した高圧水素ホース加速耐久性評価法の「実用化」は、関係するステークホルダー、規制当局により適切なホースの耐久性評価法として認めていただくことと考える。その一環として本プロジェクトで策定した高圧水素加速耐久性評価法規格案の国内規格化、国際規格化を推進する。 水素ステーションの安全性を確保した上での低コスト化は、燃料電池自動車普及のために喫緊の課題であり、十分なニーズが存在する。このことから研究開発成果は速やかに水素ステーションに導入されると考えられる。 ホースメーカーでは「水素利用技術研究開発事業」の成果として、82MPa ホースはすでに上市されており、87.5MPa ホースについても試作が完了している。試作ホースについて、ホース交換サイクル決定のための水素ステーションにおける実証データ、これと相関する加速耐久性評価法がないため国内ステーションにおいては実績をベースにした交換サイクルが設定されている。ホースメーカーから提供されたホースについて加速耐久性評価法の開発とともに国内外の実ステーションにおける実証を進め、これらの相関を明らかにし、加速耐久性評価法を確立することにより、ホース交換サイクルの延長、決定に資するデータを取得することが可能になる。ホースメーカーから提供されたホースの耐久性に関する評価結果を提供することが可能になり、これに基づいて、各ホースメーカーにおいて 30,000 回充填に対応可能な長寿命 87.5 MPa 高圧水素ホースの実用化・事業化が進展し，水素ステーションへの実装が進展すると考えている.
2-(4)-①本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発
本開発成果は、顧客の利便性を損なわず、低コストで高頻度充填に対応したシステムを構築できるため、本格普及期には必須の技術となり得る。「1 時間 10 台充填可能な高頻度充填システム（建設費 低）」と「水素供給温度を緩和しても充填時間が長くならないプロトコル（運営費 低）」の組み合わせにより、以下の効果が期待される。 ・ 顧客を待たせない（5 台／hr を超えても待ち時間が発生しない） ・ 低コストシステム（建設費の低減） ・ 電気代の低減（運営費の低減） ・ 部材、システムの信頼性向上（運営費の低減） また、今回開発した革新的充填プロトコル（MC-MM）は国内技術基準に反映され、一般則関係例示基準に引用されることにより業界に広く使用されることが期待される。

実用化の見通し
2-(4)-⑤高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発
高圧水素蓄圧器の大容量化によるコスト低減を実現すべく、低合金鋼に要求される焼入れ性および耐水素脆化特性に及ぼす製造条件の影響を調査し、目標性能を達成する条件を明確にした。また、蓄圧器適用性として、Mo-V 添加鋼および JIS 規格鋼のうち、特に優れた特性を示した鋼材において試設計評価を行い、設計が成立することを確認した。これより、大容量の高圧蓄圧器用鋼材として有望な鋼材が得られたと判断された。 本研究開発の事業化に向けては、以下の課題解決に取り組む必要がある。 ・ 高強度低合金鋼の安全性を立証するデータの拡充 ・ 大容量蓄圧器の実機試作による製造課題の抽出およびその解決 今後の水素ステーションの普及拡大に向けて、本格普及期における拡販および大型水素ステーションにおける採用によるコスト低減効果の発揮を目指し、上述の課題解決に取り組み、実用化に繋げていく。
2-(4)-⑥新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発
初めに水素検知センサのビジネスレイヤを説明する。水素検知センサはセンサエレメント、センサモジュール、センサシステムにビジネスレイヤを分類することができる。次に示す今後成長すると予想される新しい水素検知センサ用途（IoT、多湿環境）への展開をターゲットに各ビジネスレイヤをコンカレントに実用化を進める。 まず、水素検知センサビジネスの市場予測について説明する。水素検知センサビジネスについて、横軸を消費電力、縦軸を耐環境性（防水性）で表現したポートフォリオである。 従来の水素検知センサは黄色網掛けに示すとおり、主に定置式の漏れ管理用途であり、水素プラントや半導体工場、燃料電池車（FCV）等に使用されている。一方で、従来の水素検知センサでは展開できない市場の潜在ニーズがあると私たちは推察している。 具体的には、赤色網掛けに示す IoT 化(無線化)が必要な設置制約のある箇所での水素検知センサの市場と青色網掛けに示す 100%に近い高湿度で完全防水性が要求される箇所での水素検知センサの市場である。 IoT 化が必要な市場に関しては、本研究で開発を実施する超低消費電力を活かした IoT/電池駆動センサモジュールの実現により新規参入できると考えている。 また高耐湿/防水のモジュールを本研究開発で実現することにより 100%に近い多湿環境化での水素検知による水素制御や水素漏れ管理が必要な市場に新規参入できると考えている。 本研究で開発する技術をベースに、この 2 つの新規市場にフォーカスして市場獲得を目論んでいる。 NEDO プロジェクトによる研究開発終了後、2023 年度より実用化開発を開始する予定である。エレメント/モジュール/システム事業立ち上げをコンカレントに推進し、2026 年度以降に実用化を想定している。 本技術を活用した無線・電池駆動型水素検知センサの実用化によって、多点監視が必要な用途(水素ステーション、大型水電解装置など)においては、低コストかつ容易に多点監視を実現可能となり、より空間網羅性の高い漏れ検知が実現可能となる見通しである。 また、高湿度環境下での漏れ検知が必要な用途(燃料電池など)では、本技術を活用した高耐湿モジュールの実用化により、低コストかつ信頼度の高い漏れ検知が実現可能となる見通しである。 今後、実証実験や顧客とのやり取りを通じてターゲット市場およびセンサ仕様を明確化し、実用化検討を進める計画である。（～2026 年度実用化予定）

実用化の見通し

2-(4)-⑦半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発

本研究開発では、事業化に向けて必要となる基盤技術の開発をプロジェクト期間中に全て完了している。実用化・事業化のために、製品の開発や製造プロセスの確立等は必要となるが、原理検証的な研究開発を伴う事項はない。

特に Violet-ECDL を用いたラマン分光法によるマルチガス分析技術については、世界初の技術ということもあり、プロジェクト期間中から、アドバイザとして参画したエナジーサポート社をはじめ、複数の大手メーカーより新商品開発に関する引合いを得ており、一部については既に製品開発に向けた検討を進めている。いずれもターゲット市場は水素品質管理をはじめとする、カーボンニュートラル達成に向けた新エネルギー利用に関連する市場であることから、2～3 年間程度の期間で商品を完成させ、海外市場も視野に業界標準を狙いたい考えである。

少なくとも商品①（3 成分分析）については、装置としての実現可能性と現場におけるニーズが明らかになっているため、早期に事業体制を確立し、現場への実装を目指す。

本研究開発過程において、ECDL の発振とこれを光源としたガス計測の原理については十分に検証がなされており、これに係る産業財産権も出願済みである。したがって、同様の手法で他社との競争となった場合、受託者らが圧倒的に有利である。一方で、本事業が既存の分析機器市場を狙ったものであり、現在の分析機器市場が多くの装置について 2～3 社の大手メーカーによって占有されている状況にあるため、新たに参入し競争するよりも、これらの大手メーカーと共同で実施する形の事業スキームにできれば、社会実装及び収益化が効率的且つ早期に実現可能であると考えられる。また、本技術の将来性が評価され、既に複数のメーカーより新製品開発に係る引合いを得ていることから、このような事業スキームの実現可能性は高いと考えられる。

事業化までに想定される主な課題は、水素ステーション関連市場の獲得である。

現在の水素純度分析は、大手分析機器メーカーの十分に実績が積み上げられた製品が用いられている。前述のとおり分析機器市場は、大手メーカー数社によってシェアがほぼ独占されている 2 強・3 強型となっているが、現状これらのメーカーにおいて、オンサイトで複数種のガスが分析できる小型・軽量の分析機器の開発に向けた動きは認められない。視点を変えると、オンサイトで複数種のガスが分析できる小型・軽量の分析機器が実現できる技術は、現時点では本研究開発において確立した手法を除き存在しないという考え方もできる。また、ニーズについては、冒頭に述べたヒアリング結果のとおり明確であり、今後水素ステーションや関連施設の増加や、施設の経年劣化等を勘案すると、増加の一途を辿ることが予想される。

このような状況から、有用かつ将来性、発展性の高い技術であることを武器に、上に述べた大手メーカーをー含む事業スキームを実現することで、水素関連市場の獲得も十分期待できるものと考えられる。

・ 水素純度分析装置

水素純度分析に用いる 3 種の商品について、それぞれの事業化のスケジュールを図 20 に示す。これらの計画は表 3 の水素品質管理に係る現状と現場のニーズに関するヒアリング結果を反映している。

まず、商品①（3 成分分析装置）の実装を最優先に進める。その理由として、現場の要望が強いこと、要求される性能の観点で製品化に必要な期間が最も短く、コスト面でも顧客の持つ費用感との乖離が最も少ないと考えられること、などが挙がる。2022 年度に製作したプロトタイプをベースに、2023 年度に製品モデルの設計と製作を行う。

2024 年度は製品モデルを用いて現場での機能評価と改良を行い、2025 年度の現場実装開始を目指す。これらのスケジュールに照らすと、2023 度中にはライセンシーを確定する必要がある。現在、複数のメーカーがライセンシーの候補となっている状況にあるが、複数社とのライセンス契約を締結できる形が理想的である。

商品②、商品③について、一定の収益を確保するためには、後述する市場の醸成が必要となる。具体的には、商品②についてはオンサイト水素ステーションの普及拡大が、商品③については、水素ステーション新設件数の増加が必要であることから、製品設計、製作等を進めつつ、水素ステーションの普及状況に照らし、適切なタイミングで現場への実装を開始することが重要である。

実用化の見通し
・小型マルチガス分析装置 小型マルチガス分析装置については、水素関連市場ではないものの、現在想定されているターゲット市場がいずれもカーボンニュートラル達成に向けた新エネルギー利用に係る市場であることから、早期の現場実装を目指すべきであると考えられ、したがって商品①（3 成分分析）と同様のスケジュールで進める考えである。 事業化のスキームは、メーカー主体を想定している。受託者はメーカーとライセンス契約を締結し、ロイヤリティーを得る形とし、製品開発期間及び販売開始後も、必要な技術的検討は実施し、メーカーとの密な連携を図る。製造・販売・メンテナンス等についてはメーカーが実施することで、既存の製品販売によって培った知見やノウハウを生かして効率的に対応することができる。
2-(4)-⑧水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発
「昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発」では様々な AB2 型水素吸蔵合金の探索を行い、その結果「30℃において 20MPa～35MPa で水素を吸蔵し、80℃で 80MPa まで水素を放出する」という目標に近い、84℃で 80MPa まで水素昇圧が可能な水素吸蔵合金の開発に成功した。この 80MPa という超高圧の厳しい条件の熱力学特性を有する合金開発が本システムの実現にとって大きな課題の一つであったが、本研究成果からシステムの実現可能性が高まったと考えている。また、プロジェクトの開発に付随して行った 100MPa までの評価装置の開発についても新たな知見が得られるとともに評価方法を確立できたため、今後の超高圧下での材料探索にとって有益な設備となると期待している。 「昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討」では、耐圧性を有し、小規模水素ステーション向けを想定し 20Nm3/hour の昇圧システムの検討を行い、机上検討であるが昇圧に必要となるエネルギーの大半を水電解装置の排熱のみで賄うことができることを確認した。課題としては小規模実証システムの製作・実証を行い、実際の運用条件での熱収支の確認を行うと共に、顕熱回収方法など運転方法の最適化も必要と考えている。 「昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討」では、開発した AB2 型水素吸蔵合金の溶解手法を検討し、量産に用いられている高周波誘導溶解炉での溶解可能性を確認でき、水冷銅ルツボを用いた溶解に対して、安価に製造できる可能性を得られた。 事業化までのシナリオとして、最初の課題であった 80℃で 80MPa まで水素昇圧が可能な水素吸蔵合金の開発に成功した。今後はさらなる合金の高性能化を図るとともに、水素の連続昇圧・供給が可能な小規模システムを構築し運用することでシステムとしての課題抽出を行う。システムの規模の拡大を図りながら実用化を目指していく予定である。事業化のターゲットとしては大規模な水素ステーションから始めるのではなく、水素ステーション未整備地域への小規模水素ステーション向けをターゲットとし移動式水素ステーションや再生可能エネルギー由来小規模水素ステーションおよびフォークリフト用途の工場・市場等への導入を目指し、FCV

実用化の見通し
以外の用途展開を行いながらシェアの拡大に取り組んでいき、その後大規模ステーション用途へ展開していきたいと考えている。

2-(4)-⑨HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発

本事業において開発される水素燃料計量システム技術及び充填技術は、HDV をはじめとする様々な燃料電池モビリティとインフラの普及に資するものであり、国が策定した第五次エネルギー基本計画や水素基本戦略の目標達成に貢献すると期待される。これらの技術は燃料電池モビリティユーザーに適正な水素燃料商取引を提供するとともに、水素インフラ事業者に対して運営コストの低減により 2020 年代後半に設定されている自立化を支えるものである。

研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

実用化の見通し

3-①水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発

本プロジェクトは、従来から日本が世界の先導的役割を果たしてきた ISO/TC197（水素技術）が対象とする水素ステーション等機器に関する国際規格策定について、引き続き世界をリードするための取組みを実施するものである。更に標準化活動等に係る国際連携を推進し、日本の産業振興・競争力強化を図ることを目的とする。更に、上記の ISO 国際審議を日本が主導し、国際規格策定に資するため、水素品質に関する研究開発を行う。

このように、ISO/TC197 関連の国際標準化活動、国際連携及び関連する研究開発を積極的に実施することにより、国際連携における日本のプレゼンスが上がり、水素・FCV 関連の市場における日本の国際競争力を強化することが可能となる。以って水素・FCV の大量普及に資することが出来る。

3-②燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発

サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動

2017 年 10 月に開始された GTR13 Phase2 審議に参画し、日本から提案した主な課題（破裂圧力適正化・水素適合性試験法・アルミニウム合金の腐食試験法）および容器火炎暴露試験法を中心に、専門家によるデータに基づく技術審議を推進した。その結果、日本提案が織り込まれた GTR13 Phase2 の国際合意が得られたことで、本研究開発の目的を達成することができた。

今後、日本提案が織り込まれた GTR13 Phase2 が、国内導入されることにより、燃料電池自動車の円滑な国際展開が可能となる。また、容器破裂圧力の適正化および使用可能材料の拡大により、容器の軽量化・コスト削減が可能となる。

サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発

2-1.容器火炎暴露試験の見直し

GTR13 Phase1 では、海外で発生した圧縮天然ガス自動車の火災時の容器破裂事故を受け、容器の局所火炎暴露試験が規定された。しかしながら、この局所火炎暴露試験の再現性が低いことが明らかとなり、GTR13 Phase2 審議において、局所火炎暴露試験法の見直し（再現性向上）に関わる審議が開始された。これまでの JARI の火炎暴露試験関連のデータを整理した結果、火源の幅、火炎高さ、火源の均一性、風速および局所火炎域の長さなどの規定で再現性の向上が可能となる見込みがあることがわかった。本研究開発では、この火炎定義に基づいた日本提案のとりまとめおよび国際合意に資する技術

検討を実施した。

具体的には、(1)火炎高さ、(2)火源の幅、(3)火源の種類、(4)火源の均一性、(5)風の影響について、それぞれの影響や対応のため、数値シミュレーションや実証実験によって解析を行い、試験法案を提案した。また、CSA と共同で安定した火床仕様を実現できるブンゼン型バーナーを用いた試験法を検討した。基準バーナーとして、汎用品を用いたブンゼン型バーナーの仕様を規定した。試験法としては、ダミー容器を用いた Pre-test を実施し、既定の容器周囲温度プロファイルが実現できることを確認した上で本番試験を実施することとし、国際合意を得た。

2-2.金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大

GTR13 Phase1 では、金属材料に関する規定は見送られ、各国の基準を適用することとされた。そこで、前 NEDO 事業で水素適合性試験法の日本案およびアルミニウム合金の腐食試験法案を作成した。GTR13 Phase2 では、材料指定や成分規定の代わりとなる水素適合性試験法による材料選定についての審議が開始された。本研究開発では、前 NEDO 事業で作成した水素適合性試験法の日本案をベースに、海外の意見・データを考慮して試験法案を修正した。その結果、日本提案 SSRT 試験＋平滑法試験の場合とアメリカを中心とした海外の切欠き疲労試験のみの場合との並立とし、どちらかの方法で合格すれば使用可能とする試験法として取りまとめられ、国内合意を得たうえで、GTR13 Phase2 に提案された。

また、自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材である SUS304 を使用可能材料として確定するため、SUS304 の市中材の材料データ取得およびデータ解析を実施し、水素適合性試験法の日本案に適合することが確認できた。

アルミニウム合金の腐食試験法に関して、HPIS E103:2018 をベースにアルミニウム合金の HG-SCC 試験法を作成し、GTR13 Phase2 へ提案した。また本試験方法を用いてドイツの MPA で評価を行った結果、HG-SCC の発生が確認できた。

今後の課題として、GTR13 Phase2 で提案された水素適合性試験方法はオーステナイト系ステンレス鋼の試験結果をベースに作成されたものであるため、他金属材料への展開の際に注意すべき点が存在する可能性がある。また、将来的に十分なデータが蓄積された段階で、試験に合格した材料についてリスト化すると同時にその評価試験結果をデータベース化することによって、安全性と経済性を両立した材料選択が可能な環境を整えることが必要である。

3-③水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究

本調査をベースとし、今後も、水素社会の実現に向けて、可能な限り情報収集や分析を行い、情報発信する。情報発信の手法としては、セミナー講演、雑誌等寄稿、レポート執筆、書籍執筆などを想定する。

3-④水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究

二重配管方式による水素のパイプライン輸送に関する安全性評価に関しては、二重配管を模擬した配管系において、その間隙で水素と空気が混合し着火した場合、条件によっては爆轟が発生することが明らかとなった。これは本方式特有のリスクであるが、火炎から発生した圧力波は管路内において減衰することも示唆されており、安全性を確保するためにはこの現象の詳細な評価を行い、被害が発生しない条件を整理する必要がある。また、埋設管はマンホールやハンドホールあるいは共同溝等の空間に接続されることが想定されるため、それらの空間内へ水素が拡散することや、火炎や圧力波が伝播することを考慮したリスク評価も求められる。これらを踏まえ、今後の課題としては、二重配管方式において想定される事故シナリオを網羅的に整理し、それぞれのリスクおよび安全対策による被害低減効果を定量的に評価する必要がある。その評価結果に基づき漏洩検知の指針と安全対策の提案を行うことで、二重配管方式水素輸送システムの安全性確保に貢献する。

安全技術に関しては、二重配管方式と光ファイバセンシング技術を組み合わせることで付臭措置代替となる安全技術の評価・確立に向けた可能性を見出せた。さらに安全性を担保するためには、様々な事故シナリオによる異常状態の発生状況（管切

実用化の見通し
断事故による急激なガス漏洩、劣化等による少量のガス漏洩等）に対して適切な把握手段（モニタ、センサ等）と的確なアクションプランを遂行できる保守要件の明確化を行い、普遍的安全技術の確立に繋げ、安全技術基準策定を進めていく必要があると考える。 経済成立性に関しては、既設配管活用/二重管方式パイプライン水素輸送は比較的細い 50A の前提でも、配管コスト・安全コストの改善を要するものの、中・小規模での短距離の 10km 程度の輸送ではコスト優位性を持つ可能性が高いことがわかった。よって、最終アプリケーションに向けたラストワンマイルの輸送手段として適性があると判断できる。圧損が改善されればCAPEX 低減以上に輸送距離が延び適用性が広がるため、フレキ性を持ち圧力損失が低い新素材配管の調達/作り込みが技術課題となる。

3. アウトプット目標及び達成状況

3.1 事業の目標

２０２５年の水素ステーションの自立化、２０３０年以降の水素ステーション事業自立化に向け、水素ステーションの整備費、運営費を低減することを目指し、

- 国内の規制適正化に向けたデータ取得及び基準案の作成・提案を行う。
- 本格普及期を想定した水素ステーションの技術基準案（もしくはガイドライン案）を作成する。（水素ステーションで利用される機器の最適化、次世代水素ステーションの構成の最適化、長寿命化に関する提案など）
- 我が国の水素ステーション関連技術の国際競争力強化等の観点から、国際基準調和・国際標準化にかかる提案を行う。

3.2 研究開発の内容

事業の目標を達成するために、以下の研究開発項目について、研究開発を実施する。

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

主に将来に向けた水素ステーションに関する課題として、例えば省人・無人運転に関する法的課題の整理、省人・無人に必要な対応技術開発項目および安全性向上に関する検討し、
水素ステーションに関するリスクアセスメントの実施、最適な解析手法に基づく安全性向上に関する技術開発項目検討や代替措置の検討を行う。この結果を研究開発項目２の「水素ステーションの規格化・標準化、モジュール化等に関する研究開発」の技術基準見直しに反映し、
国内外の商用ステーションの現状調査、規格に基づく機器構成の比較するとともに、
家庭・小規模事業所等での水素充填等を可能にするための法的課題の抽出を行う。
汎用材料の適用性拡大のため、使用圧力・温度を検討し材料の疲労に関するデータ取得、解析を行い、水素特性判断基準を検討し、新たな水素特性判断基準に基づき、汎用材の適用範囲の拡大、合わせ

て工事費、メンテナンス費の低減、漏えい等の安全対策向上を目的として汎用材の溶接特性評価・検討するとともに、試験費用の低減及び試験期間短縮のために疲労試験方法に代わる簡易試験方法を確立する。

1-(1)：本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発（一般財団法人石油エネルギー技術センター）

水素ステーションの自立化、建設コスト低減を通じた自律的な水素販売ビジネスの展開を目的に、規制改革実施計画の案件を踏まえ、以下の４項目に対する研究開発を実施する。

1．　無人運転を実施するための研究開発

水素ステーションの無人運転を実現するために必要な技術基準案を策定する。そのために、現行規制の無人運転に対する課題整理と国内外の法規制の比較等も踏まえて、無人運転を実現するために対応が必要となる法規制の整理と課題抽出や対策検討等の法技術的な検討を行う。また、ステーションの無人運転に伴い生じる技術課題を抽出し、その結果を踏まえた安全対策の調査及び技術検討を実施する。これらをもとに技術基準案を策定する。

2．　リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発

リスクアセスメントの対象となる高圧ガス保安法一般高圧ガス保安規則（以下、一般則）第７条の３第２項を満足する狭小な水素ステーションモデルを構築するとともに、定量性と汎用性を高めることが可能となった新たなリスクアセスメント手法を構築する。そして、リスクアセスメントの再実施を行い、その結果に基づき、必要十分な安全対策を明確にし、技術基準等の見直しに資する検討を行う。そして、一般則第７条の３において、見直し余地のある条項を抽出し、安全対策の有効性検討により技術基準を見直し、技術基準案を策定する。

3．　その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施

(1)　　保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発

水素ステーションの保安を監督するものとして、各水素ステーションで選任が求められている保安監督者に関して、複数の水素ステーションの兼任を可能とするための要件の検討を実施し、検討から得られた兼任を可能とする要件を明確にする技術基準案を策定する。

(2)　　家庭・小規模事業所等での水素充塡のための法的課題抽出

FCV 普及の目的で家庭での充塡が可能になるよう、家庭用水素充塡設備のモデルを構築し、そのモデルに基づき、実現に向けての法的課題の抽出を実施する。

1-(2)-①：新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発（一般財団法人石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、国立大学法人九州大学、一般財団法人金属系材料研究開発センター、日本製鉄株式会社、愛知製鋼株式会社、株式会社日本製鋼所）

水素ステーションの普及目標として 2025 年に 320 か所の整備が掲げられている。実現には水素ステーション事業の自立化に向け、コスト低減のためのさらなる取り組みが必要である。 そこで水素ステーションで使用可能な材料の範囲を拡大するために以下の 4 項目の研究開発を行い、汎用レベルの材料の使用の

可能を目指す。

1. 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発

絞りに代わる新たな水素特性判断基準について可能性を検討し、安全を担保しつつ、規制の緩和につながる材料範囲の拡大に向けた検討を行う。例えばSUS316 系・SUS304 系といった汎用材について高圧水素環境での試験を行い、得られた試験結果とこれまでに報告されてきた既存データを元に総合的に解析して新たな水素特性判断基準を検討する。新たな水素特性判断基準に基づいて検討された、水素ステーションで使用可能な鋼材の範囲拡大について、一般則例示基準 9.2 への反映を目指し、基準化に資する資料を作成する。

2. 汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発

従来の研究において良好な水素適合性を有することが確認されているSUS316L やSUS305 等に上記のSUS304 等も加えた汎用ステンレス鋼について、冷間加工を施した場合の水素適合性や許容引張応力の設定を検討し、基準化に資する資料を提示するものである。

3. 汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発

研究開発 1 で新たに適用範囲拡大が見込まれる領域も含めたSUS316 等の汎用ステンレス鋼の溶接について強度等の材料特性や水素適合性を検討する。検討結果を踏まえ、汎用ステンレス鋼が使用可能な範囲、条件等を明らかにし、水素ステーションで汎用ステンレス鋼溶接材を用いる際の技術指針を作成する。

4. 汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発

圧縮機を想定した高温水素ガス中の使用に対する汎用低合金鋼の各種評価試験や検討を行い、水素圧縮機への適用可否について判断する。水素圧縮機への適用が可能と判断されれば、低合金鋼技術文書(JPEC TD 0003)を水素圧縮機の対象温度まで適用温度範囲を拡大する取組を行う。特に、圧縮機材料における水素の影響は、高温状態が維持されているときより、高温での運転中に鋼中へ水素が侵入し、停止により温度が下がった後、再起動で大きな圧力負荷が発生した場合が最も厳しい条件と考えられるが、そのような条件を想定した評価結果がほとんど存在しない。そこで、具体的な取り組みとしては、高温高圧水素ガス環境等により鋼中に水素を侵入させた材料を、鋼中から水素が抜けないように高圧水素ガス環境のまま温度を下げ、SSRT 試験、破壊靭性試験等を実施し、水素圧縮機の安全性を評価するための材料特性に関するデータを採取する。

1-(2)-③：中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発（国立研究開発法人物質・材料研究機構）

中空試験片高圧水素中 SSRT 法と中空試験片高圧水素中疲労試験法を確立するために以下の研究開発を行う。

1. 中空試験片高圧水素中材料試験法の試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発

水素ステーション常用圧力クラス以上でのデータを取得し、標準試験片の形状と条件を決める。

2. 中空試験片高圧水素中材料試験と中実試験片高圧水素中材料試験の相関に関する研究開発

同材質、同試験条件で両方式の試験データを比較し、中空・中実試験片方式間の相関関係を把握する。

3. 中空試験片高圧水素中材料試験法の規格化に向けた調査研究

規格化に向けて、外部有識者を含むタスクフォース等により研究項目①及び②の実施内容及び結果の評価を行い、当該試験法の規格案を作成する。

4. 事業間連携

重複データ取得を避けるため、連携する NEDO 事業である「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」と連携を図り、共同にて効率的な事業推進に努める。

研究開発項目２：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

標準的な仕様条件などの規格化、標準化を検討する。構成機器検討から得られる成果を具体的なシステムに落とし込みモジュール化、パッケージ化および規格化の検討、運営費低減のために、構成機器の寿命延長の安全性評価方法の確立と業界技術基準案の策定を行う。特に複合容器についてはＩＳＯ ＴＣ１９７ ＷＧ１５（複合容器分科会）への容器寿命検討に関する提案が出来るようデータ取得、理論構築、ヒートサイクル・圧力サイクルに対する信頼性向上として、長寿命高圧水素ホースの開発、長寿命高圧水素継手・シール部材の開発、本格普及期に必要と思われる大量かつ効率的な水素輸送やそれに伴う次世代向け水素ステーションの法的課題の抽出、技術課題の検討、さらに普及期を見据えた充填対応技術開発、省エネルギー等に資する機器開発を実施する。

2-(2)-①：水素ステーション用タイプ 2 蓄圧器の供用中検査手法の研究開発（ＪＦＥスチール株式会社、ＪＦＥコンテイナー株式会社、千代田化工建設株式会社）

水素蓄圧器の定期自主検査は、開放検査および非破壊検査（肉厚測定）を実施することが定められている。Type1 蓄圧器は UT を用いた供用中検査が可能である一方、タイプ 2 蓄圧器は表面が CFRP 層で覆われているため UT 法の適用が困難となり，コスト高な開放検査が必須である。タイプ 2 蓄圧器へのｱｺｰｽﾃｨｯｸ・ｴﾐｯｼｮﾝ法（AE 法）の適用技術を開発することで、タイプ 2 蓄圧器の供用中検査を可能とし、水素ステーションの保安検査の運営コストを削減する。

1. 定期自主検査への AE 法導入シナリオの構築
2. 鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動の AE による検出
3. 鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動の AE による検出
4. 実機タイプ 2 蓄圧器による高圧水素サイクル条件下で AE 法の構築
5. 基準化への取組

2-(2)-②：複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発（一般財団法人石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、国立大学法人東京大学、株式会社日本製鋼所）

水素ステーションに設置される複合圧力容器のコスト削減に向け、複合圧力容器評価方法の簡素化及び使用寿命延長に関する技術開発を実施するものである。具体的には、現状では実蓄圧器を用いた圧力サイクル試験により寿命を評価している、タイプ２およびタイプ３蓄圧器（複合圧力容器）を構成する材

料の材料試験片による疲労寿命評価方法、複合圧力容器の応力解析、疲労解析方法を確立し、疲労寿命設計線図を用いた疲労設計、累積損傷則の適用を可能とし、実容器疲労試験費用、試験時間の削減を図ると共に使用寿命の延長を図る。また、複合圧力容器の技術基準の整備に向け、タイプ２蓄圧器の技術基準に資する自主基準案を策定するとともに、タイプ３蓄圧器の技術基準である KHKS 0225 の改正に向けた内容検討を実施する。事業推進に当っては、圧力サイクル試験に替わる蓄圧器の寿命評価手法にあたる以下に示す１の技術開発に関して５テーマにわけ、計６テーマに取り組む。

1. 応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発
(1) ライナー試験片評価法の検討（KHK）
(2) CFRP 試験片評価法の検討（KHK、東京大学）
(3) 円筒試験体評価法の検討（JSW、東京大学）
(4) 自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成（東京大学）
(5) 応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の実証（JPEC）
2. 複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発（JPEC）

2-(3)-①：長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発（一般社団法人水素供給利用技術協会、国立大学法人九州大学、一般財団法人化学物質評価研究機構、ＮＯＫ株式会社、髙石工業株式会社、日本ピラー工業株式会社、株式会社キッツ、株式会社フジキン、株式会社タツノ、トキコシステムソリューションズ株式会社）

水素ステーションの設備信頼性向上のためには、継手、シールなど高圧水素インフラにおける締結・摺動要素に関する潜在的漏えい箇所について、その漏えい発生メカニズムの検討が必要である。また、水素ステーションの運営に際して、毎年実施される開放検査もコスト増大の一因となっている。例えば、プレクーラー以降の配管、付属品類（遮断弁、フィルター、緊急離脱カプラー、ノズル等）はヒートサイクル（外気温度⇔-40℃）及び圧力サイクル（0.1MPa⇔82MPa）に曝されることから、ガスケット、継手、グランド等で微少リークが発生する可能性があり、信頼性確保のため消耗品であるＯリング等シール部材を毎年交換している。本事業で、継手等の締結部材からの漏えい発生メカニズム、高圧水素シール部材の高圧水素環境下における劣化、寿命に関する知見を得て、継手、シール、弁の使用期間を延長し、もって開放検査の実施間隔の延長を可能とし、水素ステーションの運営コストの低減や稼働日数の増加を図ることを目的として、以下の５つのサブテーマにより研究開発を実施する。

1. セーフティーデータベースの解析知見の整理
2. 部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討
3. シール基盤・改良開発
4. 継手基盤・機器開発
5. シール成果に基づく機器開発

2-(3)-②：水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究

開発（国立大学法人九州大学、一般社団法人日本ゴム工業会）

現在、ホースメーカー各社はNEDO事業「水素利用技術研究開発事業」において試作した87.5 MPa水素ホースの実用化、事業化を進めるフェーズにあるため、本事業では、ホースメーカー各社がそれぞれの高圧水素ホース実用化、事業化を進める上で、共通の開発課題である高圧水素ホースの耐久性評価法に関する開発を目的とする。高圧水素ホース耐久性評価法及びその評価基準をホースメーカー各社及びディスペンサー等ステーション機器メーカー、ステーション運営事業者と共有することによって、さらなる高耐久性高圧水素ホースの開発及びその水素ステーションへの実装が進展し、高圧水素ホースの使用可能充填回数の延長によりステーション運営コストの低減に寄与できると考えられる。具体的な研究開発の内容は以下の４点である。

1. 高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明
2. 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明
3. 高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定
4. ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供

2-(4)-①：本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発（ＥＮＥＯＳ株式会社、株式会社本田技術研究所、トキコシステムソリューションズ株式会社、一般社団法人水素供給利用技術協会）

水素ステーションの自立化は、本格普及期（1 時間に 10 台充填）であり、水素社会を実現するためには、高頻度充填を狙った低コストなダブル充填システムを構築することが必須である。水素ステーションの低コスト化の鍵は、ステーション構成要素の簡素化と、それを可能とする充填プロトコルを含む低コストな充填システムの開発である。そこで、本事業では本格普及期において両者が達成できるよう、次の研究開発を実施する。

1. 低コスト対応プロトコルの開発

充填時間を延ばすことなく水素供給温度を緩和（高温化）可能とする革新的プトロトコルを開発する。

2. 低コスト高頻度水素充填システムの開発

整備費及び運営費を低減する、本格普及期に向けた低コスト高頻度充填システム（1 時間に 10 台充填可能）を開発する。

3. 水素充填及び水素ステーションシステムに関する調査

プロトコルの規格化に向けた調査・検討を行う。

4. 水素充填技術基準整備に関する研究開発

SAE J2601 の改正に対応し、国内の水素ステーションの諸制約に応じた水素充填技術基準の整備や研究開発 1 で開発されるプロトコルに対応した基準の整備に向けた技術検討を行い、基準案を作成する。

2-(4)-⑤：高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発（一般財団法人金属系材

料研究開発センター、日本製鉄株式会社）

水素ステーションでのコスト低減に寄与すべく、水素ステーションにおいて使用されているタイプⅠ型の高圧水素蓄圧器において、現在使用されている低合金鋼よりも高強度を有する鋼材を適用することにより、使用鋼材量の低減や蓄圧器製造プロセスに関するコスト低減を通じて蓄圧器に関する製造コストの低減を実現させることを目的としている。

実施内容は、前調査研究(課題番号 2-(4)-③)で明らかになった高強度化と水素適合性の両立の可能性を有する Mo-V 添加鋼と過去に水素適合性が未評価である低合金鋼規格材の評価を行うと共にコスト低減効果が期待される鋼材について、採取した実験データを用いて新型タンクの試設計とコスト比較調査を実施する。具体的な実施項目としては、以下の 3 項目に大別される。

1. Mo-V 添加鋼等の高強度化と水素適合性の評価

本項目は、Mo-V 添加鋼を中心に引張強さ 1000 MPa 以上の高強度と水素適合性を両立する低合金鋼の製造条件範囲および水素蓄圧器への適合可否について検討するものである。

2. 低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価

本項目は、JIS 規格に掲載されている低合金鋼の中で水素適合性が未評価の鋼種について、現在水素蓄圧器に使用されている鋼材よりも一段と高強度となる引張強さ 1000 MPa 以上を発現し、水素適合性と両立する鋼材の製造条件範囲および水素蓄圧器への適合可否について検討するものである。

3. 蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査

前調査研究では、Mo-V 添加鋼や他の高強度低合金鋼の高圧水素タンクへの適用の可能性を鋼材の強度と耐水素特性の面から調査した結果、蓄圧器の薄肉化により最大で 5 割程度の鋼材重量削減の可能性があり、水素ステーションの低コスト化に資する可能性があることが示された。本項目においては、新型高圧蓄圧器の実用化を念頭に、実際に水素ステーションで採用されるための条件を整理した上で、研究開発にフィードバックする目的で国内外の水素ステーションの建設実態調査およびタイプⅠ蓄圧器の需要予測と海外も含めた材料の技術規格・基準の調査を行う。また、蓄圧器のコストに関する情報を収集して、上記①および②において得られた有望な鋼材を用いた蓄圧器の試設計を実施し、コスト低減効果について明らかにする。

2-(4)-⑥：新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発（ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社）

2025 年以降の水素ステーションの本格普及、2030 年以降の水素ステーションの事業自立化に向けて、ステーション整備費、運営費のコストを低減する技術開発が重要である。一方で水素漏れを防ぐための「安心・安全」を担保するために費やすコストの課題が顕在化している。

本事業では、半導体メモリ方式による超低消費電力かつ耐環境性の高い電池駆動型の水素検知センサを開発し、IoT 技術を駆使した設置制約が緩くメンテナンス性に優れた低コストの水素検知システムを実現するため、以下の研究開発を実施する。

1. 超低消費電力水素検知センサエレメントの開発

2. 高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発
3. 自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発

2-(4)-⑦：半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発（株式会社四国総合研究所）

FCV に供給する水素の品質は ISO 国際規格（ISO14687）に基づき管理されている。水素中の不純物分析には複数の大型分析装置が必要、且つ微量成分分析には濃縮等の特殊な作業が必要となることから、分析の実施機関が限られているのが現状である。そこで、ISO 品質規格の全成分を対象として、より多くの成分が分析できる、小型・軽量・低コスト且つ応答が速いマルチガス複合水素分析装置を開発し、分析装置そのもののコストの低減及び、より簡便で短時間のオンサイト分析の導入によって、水素品質管理におけるトータルコストを大幅に削減することを目的とする。

1. Violet-ECDL を用いたラマン分光式マルチガス分析装置の研究開発

レーザーのビームを外部に設けた共振器内で増幅し、強力な定在波を生成する青紫色波長域の外部共振器型半導体レーザー（Violet-ECDL）を用いてガス分子を励起し、発生するラマン散乱光を検知することで、ガスに含まれる分子種とその濃度を特定する小型且つ低コストなマルチガス分析装置を開発する。外部共振器型半導体レーザー、小型共振器および高感度受光系を開発し、それらを最適化した分析装置のプロトタイプを設計・製作する。水素品質管理の対象となる物質のうち、ISO 規格値が ppm オーダーの物質についてガス濃度計測機能の検証を行い、性能を証明する。また、その結果を踏まえて、製品化に向けた課題の抽出およびコスト試算を行う。

2. IR-LD を用いた赤外吸収式高感度ガス分析装置の研究開発

赤外波長域の外部共振器型半導体レーザーと物質の赤外波長域における光吸収を利用するキャビティリングダウン分光法を用いて、対象ガスの高感度計測を可能とする小型且つ低コストなガス分析装置を開発する。ECDL および PBC を最適化した分析装置のプロトタイプを設計・製作する。水素品質管理の対象となる物質のうち、ISO 規格値がサブ ppm オーダーの物質についてガス濃度計測機能の検証を行い、性能を証明する。また、その結果を踏まえて、製品化に向けた課題の抽出およびコスト試算を行う。併せて、波長可変半導体レーザー吸収分光法など、新たな水素検知技術の実現可能性を明らかにする。

2-(4)-⑧：水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発（国立研究開発法人産業技術総合研究所、日本重化学工業株式会社）

35MPa の中圧水素を供給可能な電気化学式水素ポンプや高圧水電解と水素吸蔵合金を活用した熱化学式水素圧縮機を組み合わせたハイブリッドシステムの構築に必要となる熱化学式水素圧縮機の要素技術の開発および昇圧システムの省エネルギー効果の評価を実施する。

このシステムを構築するためには室温で 35MPa 以下の水素圧力(20～35MPa)で水素を吸蔵し、かつ、80℃の排熱により水素放出圧力が 80MPa を超える水素吸蔵合金を開発するとともに、良好な伝熱性能を備え、かつ 80MPa に対する耐圧性を有する熱交換器構造の最適化を実施し、新規熱化学式水素圧縮機の要素技術を開発する必要があるため、以下の研究開発を実施する。

1. 昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発
2. 昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討
3. 昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討

2-(4)-⑨：HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発
（国立研究開発法人産業技術総合研究所、岩谷産業株式会社、株式会社タツノ、トキコシステムソリューションズ株式会社、一般社団法人水素供給利用技術協会、一般財団法人日本自動車研究所、）

操作性・効率性に優れたマスターメーター法による FCV 実車充填計量検査方法と検査基準及び安全基準の策定に取り組む。加えて、様々な燃料電池モビリティ、特に HDV に対応するための大流量充填計量検査方法の確立および HDV に関連した新プロトコルに関わる条件出しと諸問題に対する調査・研究を実施し、安全かつ低コスト化に向けた提案および国際標準に資するデータを提供する。さらに、HDV の普及および HDV 用ステーションの実用化を目指し、水素モビリティ全般に関わる部品評価において国際共同研究を推進可能とする実証研究拠点として「水素先進技術研究センター（仮）」の整備に向けた検討を進める。これらの成果は、水素ステーションでの適正な運用に向けて業界団体や工業会の国内外の規格・ガイドライン等への技術基準として提供していく。

実施者らが前事業等で開発してきた水素ディスペンサー計量精度検査技術は世界的に先行しており、本研究開発テーマの成果も含め、国際的な超高圧水素インフラ本格普及に貢献するために相互比較による国際整合性の確認、国際技術基準の開発に取り組む。これらを実現するため、以下の研究開発を実施する。

1. マスターメーター法計量精度検査方法の高度化
2. 新プロトコルに対応する水素計量技術の開発
3. HDV 用の水素充填技術等に関する調査・研究
4. HDV 等の新プロトコル対応に係る技術検証
5. 高圧水素計量技術に関する国際協調

研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

ＩＳＯ等の標準化、国際的に調和、連携のための活動、ＨＦＣＶ－ＧＴＲ（水素・燃料電池自動車の世界統一基準）のＰｈａｓｅ２の技術課題対し、必要に応じ人的派遣、議論への参加を行い、国内基準との整合を図る検討、海外の政策・市場・研究開発動向を把握し、国内への適切な情報発信、及び日本の政策や技術開発への影響分析等を行う。

3-①：水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発
（一般社団法人水素供給利用技術協会、一般財団法人日本自動車研究所）

従来日本が世界の先導的役割を果たしてきた ISO/TC197（水素技術）が対象とする水素ステーション等機器に関する国際規格策定につき、引き続き世界をリードするための取組みを実施し、もって、日本の産業振興・競争力強化を図ること、更に、ISO 国際審議を日本が主導するため、水素品質に関する研究開発を行うことが本事業の目的であり、以下の研究開発を実施する。

1. 水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進

現在策定審議中の 14 の ISO 国際規格、並びに、今後新規提案される ISO 国際規格や既制定規格の改訂に関し、グローバル動向を踏まえつつ、日本の技術・知見を活かして制定を主導的に取り進める。

2. 標準化活動等に係る国際連携の推進

安全に関する国際連携のため、CHS 関連活動等に取り組む。グローバルな動向の把握のため、IEA HTCP 会議や NOW、DOE 等との国際インフラワークショップ会議等に参加して、海外事業者との意見交換、論議を行う。

3. ISO 水素品質国際規格のための研究開発

燃料電池に影響を及ぼすハロゲン化物等水素中に含まれる恐れがある不純物の成分を特定し、ISO 水素燃料仕様（ISO14687）で規定されているハロゲン化物をはじめとした不純物の許容濃度の妥当性を示すことで水素品質の管理対象物質の絞り込みと許容濃度の適正化を行う。併せて、ハロゲン、硫黄、微粒子などの適切な品質管理方法を机上検討し、水素品質ガイドライン案の改定を順次行う。

3-②：燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発（一般財団法人日本自動車研究所）

国際的な FCV の基準である HFCV-GTR（GTR13：水素および燃料電池自動車に関する世界統一技術基準）等の合理的な改定および円滑な国内導入のための審議を推進することにより、安全性を確保しつつ水素ステーションのコスト増加要因にならないよう注意を払い、過剰な要求を抑制し、円滑な国際取引を可能とすることで、高圧水素部品および FCV の低コスト化を加速することを目的として、以下の研究開発を実施する。

1. FCV の国際技術基準に関する国際基準調和・標準化活動

2017 年 10 月に HFCV-GTR の Phase2 審議が開始された。各技術課題に対し、専門家によるデータに基づく技術審議を行うことで、安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準となるよう審議を推進して国際技術基準として成立させ、その後の円滑な国内導入を行う必要がある。このため、国内審議体による日本案のとりまとめを行ったうえで、国際会議への専門家派遣を行い、審議を推進する。その後、UNR134（HFCV の相互認証基準）の Phase2 審議に参画し、国内基準との整合を図る。

また併せて国際標準化活動を行い、ISO/TC197/WG18（容器、TPRD の国際規格）、および米国 SAE 規格の審議に積極的に参画し、HFCV-GTR および国内基準との整合を図る。

2. FCV の国際技術基準策定に資する研究開発

以下の項目について、FCV の国際技術基準への日本提案作成に資する技術検討やシミュレーション解析結果に基づくデータ取得計画を策定し、海外との協力体制も踏まえて必要なデータ取得を実施する。

(1) 容器火炎暴露試験法見直し

火炎暴露試験の再現性向上に向けた適切な試験方法を導くため、試験結果のバラツキの要因と推定される火源の幅と火炎高さの影響について、安全弁の作動時間、容器周囲の熱流束や温度を、数値シミュレーション解析によって調査する。また、その数値シミュレーションモデルに基づいた火炎暴露試験を行い、数値シミュレーション結果の妥当性を検証する。これらの火炎定義に基づく日本提案を基に、OICA（国際自動車工業連合会）で検討方針と必要な実証試験計画を合意した上で、HFCV-GTR Phase2 へ検討方針と実証試験計画を提案する。実証試験計画に基づき、各国試験機関と協力・分担してデータ取得を開始し、HFCV-GTR Phase2 において、再現性向上に向けた火炎暴露試験法の合意を得る。

(2)　金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大

HFCV-GTR Phase1 では、金属材料に関する規定は見送られ、各国の基準を適用することとされた。国際流通を円滑にするため、材料の水素適合性に関する規定が必要である。そこで、前 NEDO 事業で水素適合性試験法の日本案を作成した。本事業では、前 NEDO 事業で作成した水素適合性試験法の日本案をベースに、海外の意見・データを考慮して試験法案を修正し、国際合意を得る。また、自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材である SUS304 を使用可能材料として確定するための材料データ取得およびデータ解析を完了する。

3-③：水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究（株式会社大和総研）

安全・環境に配慮した水素社会の実現に向け、世界各国の水素燃料電池に関する政策、市場、研究開発動向等の最新情報を幅広くタイムリーに収集、分析し、国内関係者に展開、共有していくことを目的として以下の研究開発を実施する。また、各国の政策や、市場および産業動向を正確に把握し、評価・分析することで、今後のわが国における水素燃料電池技術の開発戦略への示唆を得ることを目指す。

1. 最新動向調査
2. 各国政策・市場調査
3. 方向性検討

3-④：水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究（国立研究開発法人産業技術総合研究所、NTT アノードエナジー株式会社、豊田通商株式会社）

将来の水素大量消費社会の成立に向けて大きな課題となる水素輸送分野において、安全且つ安価な水素輸送インフラとして成立する可能性が高いと思われるパイプラインによる水素輸送の事業化を継続して検討するもので、水素大量消費社会を見据えて、最終目標としての地域におけるパイプラインによる水素供給手段の確立を目指すものである。安全確保上の課題、経済成立性の確保に向けた課題を検討し、パイプラインによる水素輸送の基本設計を完成させるための課題を抽出することを目的に以下の研究開発を実施する。

（１） ２重配管方式による水素輸送システムの安全性評価のための調査研究
（２）水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究

（３）経済成立性の評価

3.3　アウトプット達成状況

各研究開発項目についての成果概要は以下の通りである。

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」（委託事業）
研究開発項目２：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」（委託事業）
研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」（委託事業）

達成度「◎：大幅達成、○：達成、△：一部達成、×：未達」

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
1	主に汎用材料の適用範囲拡大に関し、高圧水素下での評価試験結果を基に基準案作成を行う。	◆リスクアセスメントを実施し法規・基準の見直し緩和を図り新たな技術基準案を策定した。 ・無人運転等に必要な技術基準案を策定した。 ◆汎用性ステンレスの使用可能範囲拡大のための新たな水素特性判断基準を制定し、Ni 当量低減を図った。 ・Ni 当量 26.9%の水素適合性データを取得し基準化案を策定した。 ・中空試験片高圧水素中材料試験法（SSRT・疲労）の試験条件を確立し規格案を策定した。	○	・運用実績を踏まえ、遠隔監視 ST での保安監督者の兼任を可能とすることで運営費の低減に繋げることが望まれる。 ・緊急駆付け時間の緩和により駆付け員の配置の融通が期待される。 ・大型の冷間加工材における強度保証方法の確立が必要である。 ・疲労試験におけるデータ取得・蓄積が必要である。

2	水素ステーションを構成する機器、部品等の実用化見通し及びコスト削減効果を検証し、水素ステーション設備コスト低減の目処付けを行う。	◆技術開発及び新たな評価法を見いだすことで、運営コスト（メンテナンスコスト、消費電力、交換頻度）の低減や部材の長寿命化の目処を付けた。 【蓄圧器】 ・高圧水素ガス環境下において疲労損傷にともなう AE の検知 ・容器圧力サイクル試験よりマイナー則に基づく累積損傷関係式を構築 ・引張強さ 1000MPa 以上と水素適合性が両立する製造条件の明確化 【シール継手部材、ホース】 ・充填 30,000 回のシール部材開発と加速耐久性評価法案設定 ・高圧水素加速耐久性評価法規格案によりホースの使用回数 3,000～4,000 回程度の見込み 【ディスペンサー】 ・プレクール温度緩和及び充填台数 10 台/h を可能とする新充填プロトコルの開発 【水素センサー、分析計】 ・IoT 対応水素センサモジュールの低消費電力化・小型化仕様を決定し、試作センサモジュールにて消費電力目標(≦10mW)を達成 ・小型マルチガス分析装置及び高感度ガス分析装置のプロトタイプ制作し、ISO 規格全成分への適用性を評価 【水素圧縮機】 ・80℃で 80MPa の放出圧力を示し、低ヒステリシスと高耐久性を両立した水素吸蔵合金　を開発 【HDV 用水素ステーション】 ・大流量化・変動充填・圧力及び熱損失等の性能評価を実施し HDV 用の計量システムを開発し福島水素充填技術研究センターを完成	○	・評価法としての採択と市場での運用。 ・タイプ 2 容器：技術文書 JPEC-TD の KHKS 0220 の附属書化を目指す ・タイプ 3 容器。：累積損傷関係式の水素ステーションへの導入を燃料電池実用化推進協議会殿と連携しながら進める。 ・水素ステーションを構成する各種高圧水素機器、ホース等各種部材の高信頼性化、長寿命化による低コスト化をさらに進めるため、また、今後想定される HDV 向け大流量水素ステーションへの対応をも踏まえ、基盤となる研究開発をさらに推進する必要がある。 ・特定の水素ステーションにおける耐久性を基準としているため，一般化する必要がある。水素ステーションにおける運用情報を統計的に解析し，結果に基づきホース耐久性に対する影響度を評価し，評価法に反映させる必要がある。 ・本開発成果をベースに MDV／HDV 用充填プロトコル開発が期待される。 ・開発鋼を適用した新型蓄圧器の実寸試作による材料特性および蓄圧器性能の確認。 ・プロトタイプ装置による水素中での数十 ppm 以下の安定的な分析を検証中（ラボベースでは検証済み） ・本システムに求められる熱力学特性を有する水素吸蔵合金の開発に目途が付いたが、今後は実際の運用に近い条件での耐久性評価や小型機での小規模実証試験が必要である。 ・HDV 充填に対応する大流量化に伴う、マルチ充填技術、ワイドレンジ高精度流量計の開発が必要である。圧損及び熱損影響評価を実施し、特性を向上させる必要がある。これらの影響評価を HDV 模擬試験条件に反映するために福島水素充填技術研究センターでの

項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
				系統的データ取得、分析が必要となる。また、マスターメーター法による計量試験を適正に行うため、使用する計量精度検査装置の基準化が必要である。
3	水素ステーション関連技術の国際標準化、ＦＣＶにおける国内規制の適正化・国際基準調和・国際標準化等に資するデータ取得を行う。 ＩＥＡ等海外の政策・市場・研究開発動向に係る情報を収集し、国内に発信する。	◆国際規格策定について世界をリードし、標準化活動に係る国際連携の推進を実施し、日本の産業振興・競争力強化を図った。 ・2018 年度から 2022 年度までの ISO/TC197 における国際標準化の実績としては、12 件（そのうち４件は日本の提案）の規格を発行した。 ・HFCV-GTR Phase2 審議に参画し、日本提案の国際合意に向けて、審議を推進。ドラフトドキュメントの国際合意を得た。 ・諸外国の最新の動向を調査し、定期的な情報発信を通じて情報の共有を実施した。 ・2 重配管における水素漏洩着火時の火炎伝播挙動の把握、影響度の推定、対処策の明確化を実施した。 付臭措置代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性調査ならびに各種水素センサの性能評価・取りまとめた。	○	・ISO/TC197 の議長国として水素技術の国際標準化の進展に的確に対応し、標準化の推進に貢献する。さらに日本の新規提案を促進する ・GTR13 Phase3 課題の対応（大型・商用車対応、試験法のさらなる合理化、液水貯蔵システム等の新技術） ・2019 年から 2022 年にかけて、水素を巡る環境は大きく変化した。国際動向をより正確に把握するためには、豪州、中東など視点を広げる必要がある ・安全性を担保するためには、様々な事故シナリオによる異常状態の発生状況（管切断事故による急激なガス漏洩、劣化等による少量のガス漏洩等）に対して適切な把握手段（モニタ、センサ等）と的確なアクションプランを遂行できる保守要件の明確化を行い、普遍的安全技術の確立に繋げ、安全技術基準策定を進めていく必要がある。

4. 研究開発項目毎の成果

各テーマについての成果概要は以下の通りである。

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

事業番号１-(１)：本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（１）無人運転を実施するための研究開発	・水素ステーション無人運転のための技術基準案の策定	省令として、一般則７条の４の技術基準案及び関連内規並びに関連例示基準案、自主基準として、遠隔監視セルフ水素スタンドの安全技術基準案、遠隔監視セルフ水素スタンドの危害予防規程の指針案、遠隔監視セルフ水素スタンドの保安教育計画の指針案、遠隔監視セルフ水素スタンドのガイドライン案を作成した。これらは、現在、全て制定・施行されている。	◎	・運用実績を踏まえ、遠隔監視 ST での保安監督者の兼任を可能とすることで運営費の低減に繋げることが望まれる。 ・緊急駆付け時間の緩和により駆付け員の配置の融通が期待される。
	・一般則７条の４第１項ステーションの見直しに資する技術基準案の策定	一般則７条の４第１項に定める離隔距離等で安全を確保している郊外型ステーションについて、７条の３第２項の技術基準から多くの条項（22 項目）が準用された。この準用された 22 項目について、一件ずつ詳細な検討を行い、準用の見直し検討を行い、8 項目について見直しの必要性を示し、具体的な修正文案の検討を含め省令等の見直し案を作成した。	○	検討結果を踏まえた省令等の見直し・改定が望まれる。
（２）リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	・多様化する水素ステーションの形態に展開可能な汎用性の高いリスクアセスメント手法の構築	リスクアセスメントの再実施のために、水素ステーションに適用するリスクアセスメント手法の構築を行った。QRAとリスクシナリオベース評価の２つの定量的なリスクアセスメント手法を採用し、内的要因、外的要因それぞれに対し網羅的なリスクアセスメントを実施した。構築した手法をガイドラインにまとめた。このリスクアセスメント手法により、7条の3第2項の技術基準で建設された水素ステーションのリスクアセスメントの再実施を行い、新たに追加すべき安全対策はないことことを確認した。	○	ガイドラインにまとめた定量的リスクアセスメント手法の活用が望まれる。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
	・リスクアセスメントの再実施に基づく安全設備の合理化に関する技術基準案の策定	構築したリスクアセスメント手法を用いて、現状施されている安全対策について合理化できないかを検討した。遮断弁・過流防止の配置の合理化、過流防止弁のオリフィス等への代替、圧力リリーフ弁の不要化について、合理化や変更を行ってもリスクに問題ないことがわかり、合理化案を反映した技術基準の見直し案を作成した。	○	検討結果を踏まえた省令等の見直し・改定が望まれる。
	・一般則 7 条の 3 の見直し（1 項、2 項間の不整合等）に資する技術基準案の策定	一般則 7 条の 3 の見直し（1 項、2 項間の不整合等）について、技術基準の改正に資する合理的なロジック構築の技術的な検討をおこなった。「貯槽間距離・基礎」「防消火設備」「容器置場」に関し、具体的な修正文案の検討を含め、省令等の見直し案を作成した。	○	検討結果を踏まえた省令等の見直し・改定が望まれる。
（3）水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	・水素出荷設備が、一般則 7 条の 3 で対象としている設備と同等の安全性を有し、同等の安全な管理体制有するための技術基準案の策定	安全性検討のために、設備のモデルと出荷作業のモデルを作成し、そのモデルに対して作業 HAZOP を実施し、事故シナリオを抽出した。この事故シナリオに対し、現状の安全対策及び追加の安全対策を検討し、設備と作業の安全性を確認した。そのうえで、水素出荷設備を有する水素スタンドの保安体制を検討し、保安監督者 1 名で保安管理するために必要な技術基準案（省令の改定案、自主基準案）を作成した。	○	検討結果を踏まえた省令等の見直し・改定が望まれる。
（4）蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	・82MPa より高い圧力での水素漏洩時の拡散濃度、爆風圧、水素火炎の輻射熱のデータの獲得及びそれに基づく敷地境界距離を中心とする技術基準改定案の策定	現行省令中に規定されている各種離隔距離は、圧力 82MPa の下での高圧水素の拡散・燃焼挙動の実験データに基づいて定められた経緯があるため、本研究開発では圧力を 93MPa に引き上げた条件下での水素拡散・燃焼挙動を実験的に確認し、必要な距離の検討を行った。そして、これら検討結果に基づいて、新たな技術基準案（省令、自主基準の改定案）を作成した。	○	検討結果を踏まえた省令等の見直し・改定が望まれる。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（５）その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施 ①家庭・小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出	・家庭/小規模事業所等での水素充填を可能にするための法的課題の明確化	検討のベースとなる家庭用小規模充填設備のモデルを構築し、それをもとに法的課題の抽出を行った。具体的には、高圧ガス保安法、ガス事業法について検討した。高圧ガス保安法のもとでは、大きな離隔距離が必要であり、現実的ではない。一方、ガス事業法及び関連省令を検討した結果、高圧ガス保安法に比べコンパクトな設置が可能となった。ただし、この場合、圧縮水素に関する技術指針の制定が必要になる。	○	今回の検討結果や抽出した法的課題を解決することにより、家庭・小規模事業者向けの水素サプライチェーン構築の推進が期待される
②保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発	・保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための技術基準案の策定	兼任した際に「平常時・緊急時に職務を全うできるか」と「複数のステーションが同時発災した場合、従業者を含め適切な対応が取れるか」を前提に 1）現状の水素ステーションの保安監督者、事業者、従業者の役割・作業内容の抽出、2）水素ステーションを兼任した場合の保安体制等のモデルの構築と課題の抽出、3）同時発災やヒューマンファクターを考慮した保安監督者が水素ステーションを兼任した場合のリスクアセスメントの実施により、保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための必要要件を抽出した。その要件を基に、技術基準案を作成した。これらは、期中に、自主基準として制定された後、高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）に反映された。	◎	・運用実績を踏まえ、遠隔監視 ST での保安監督者の兼任を可能とすることで運営費の低減に繋げることが望まれる。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
③障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討	・障壁に係る技術基準の見直しに資する技術基準案の策定	障壁の高さに関しては、隣地の状況（道路、農地、水路、駐車場等）に応じて対応を検討したが、水素ステーション事業者の管理が及ばない隣接地状況が想定されるため、一律に適用できる技術基準を策定することは困難と結論した。今回の検討内容を基に、水素ステーション事業者が、個別の水素ステーションに対して、障壁高さ低減のために（公開を目的とする）詳細基準事前評価申請を行う際に一助となるガイドライン案を作成した（図１６に検討フローを示す）（隣接地の状況に応じた障壁高さの検討に関するガイドライン JPEC-TD 0012 として 2023 年 8 月 10 日制定）。障壁の構造に関しては、（４）で検討した各種離隔距離の設定の考え方をもとに検討し、爆風圧の閾値である 4m 以上の敷地境界距離を有する場合、水素拡散を防止できるパネル状の不燃材料についても使用できる旨を追加した例示基準改定案を作成した。	○	検討結果を踏まえた例示基準の見直し・改定が望まれる。
④自家消費型の水素充填設備に関する予備検討	・水素充填設備の屋内設置に係る技術基準作成に向けた検討項目の明確化	高圧ガス設備（特に充填用ディスペンサー）の屋内設置に係る国内外の技術基準の整理、屋内設置に限らず、多様な自家消費型の水素充填設備の規制見直しのための課題抽出、HPIT用充填設備の規制見直しのための課題抽出を行った。	○	今回の検討結果や抽出した課題を解決することにより、FC-フォークリフトへの水素の屋内充填を可能とし、水素の自家消費等水素ステーションのマルチユースに貢献するとともに、水素サプライチェーン構築の推進が期待される。

事業番号 1-(2)-①　：新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
①汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発	新たな水素特性判断基準及びそれを満たす汎用ステンレス鋼を提示し、基準化に資する資料を作成する。	・伸び基準での新たな水素特性判断基準の考え方を確立した。 ・高圧水素中での安全性や使用者に対する利便性等も考慮し、新たな水素特性判断基準に基づく基準案を作成した。 ・新たな水素特性判断基準を適用する鋼種を SUS305 に拡大可能であることを示した。	○	

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
②汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発	水素ステーションにおける使用条件を明確化し許容引張応力を検討し、基準化に資する資料を作成する。	・冷間加工材について水素適合性に関する使用条件を明確化した。 ・冷間加工した SUS316/316L 棒材の許容引張応力を設定する上での課題を抽出した。 ・冷間加工した SUS316/316L 管の許容引張応力案を策定した。 ・SUS305 の冷間加工材が SUH660 を代替可能である可能性が示され、許容引張応力の付与に資する実験結果を得た。 ・SUS305 母材に関する JIS 規格の圧力容器の材料としての新規登録、許容引張応力の付与に資する実験結果を得た。	○	【課題】 大型の冷間加工材における強度保証方法の確立 【解決方針】 加工方法、加工条件の影響を詳細に検討する
③汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発	材料特性、水素適合性の測定結果に基づき、技術指針の作成に資するデータを取得し、技術指針案を作成する。	・材料特性、水素適合性等の技術指針作成に資するデータを取得した。 ・溶接金属のオーステナイト相、フェライト相に求められる要件を整理し、溶接技術指針を作成した。 ・溶接技術指針において SSRT による水素適合性の確認が不要となる事例を例示した。	○	
④汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発	高温水素ガス中使用を想定したデータを取得し、汎用低合金鋼の水素圧縮機への適用可否を判断し、検討結果に応じて低合金鋼技術文書を改定する。	・水素圧縮機の動作状況を模擬した評価方法を確立し、水素適合性を評価した。 ・評価結果を基に、低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 を改訂し汎用低合金鋼の適用温度を圧縮機の範囲に拡張した。	◎ 成果の前倒し達成 2022 年度 ⇒2020 年度	

事業番号 1-(2)-③　：中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
(I) 中空 SSRT ①試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究	・ラウンドロビンテスト（RRT）を行い、再現性を確認する(2020 年度)。 ・中空試験の簡素化を図る(2022 年度)。	・中空試験片の内面仕上げ条件を確定し、内径／外径寸法の許容範囲、ならびに試験条件を確認 ・ラウンドロビンテストを実施	○	中空試験片加工に適切なコストと時間で対応できる加工業者の拡大。
(I) 中空 SSRT ②中実試験片との相関確認	中空・中実試験片方式間の相関関係を明らかにする(2020 年度)。	4 種類の材料について、室温と低温で中空と中実間のデータの相関関係を確認	○	
(I) 中空 SSRT ③規格化に向けた調査研究	・規格案を作成する(2020 年度)。 ・解説書案・附属書案を作成する(2022 年度)。	中空試験片高圧水素中 SSRT 法の規格案を HPI の臨時専門委員会と ISO に提案	◎	

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
(II) 中空疲労 ①試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発	・試験片と試験条件の最適化（2021-2022 年度） ・ラウンドロビンテストを行う（2022 年度）	・中空疲労試験法の試験条件を確認 ・1, 10Hz で試験し、周波数の影響が無いことを確認 ・10^7 回疲労強度を取得 ・ラウンドロビンテストを実施	◎	中空試験片加工に適切なコストと時間で対応できる加工業者の拡大。
(II) 中空疲労 ②中実試験片との相関確認	中空と中実試験片間のデータの相関関係を明らかにする（2021 年度）	2 種類の中空と中実間のデータの相関関係を明確化	○	疲労試験におけるデータ取得・蓄積。
(II) 中空疲労 ③規格化に向けた調査研究	規格原案を作成する（2022 年度）	中空試験片高圧水素中疲労試験法の規格原案を作成	○	

研究開発項目 2 :「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

事業番号 2-(2)-① ：水素ステーション用タイプ 2 蓄圧器の供用中検査手法の研究開発」

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
定期自主検査への AE 法導入シナリオの構築	AE 法の供用中検査基準の策定	・日本非破壊検査協会での規格委員会の設置	○	
鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動の AE による検出	鋼の疲労き裂発生進展と AE 波の発生関係の評価	・蓄圧器使用応力場では AE が検出されず。 ・疲労限近傍の応力場で損傷が発生すれば AE は検知。 ・大気中および水素チャージ中で AE の有効性が確認。	○	
鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動の AE による検出	使用応力場及び疲労限近傍の応力場にての AE 発生挙動を確認	・高圧水素ガス環境下においても疲労損傷にともなう AE が検知できることを確認。	○	
実機タイプ 2 蓄圧器による高圧水素サイクル条件下で AE 法の構築	実機稼働中の AE 発生挙動を確認し、ノイズの原因や除去方法を確立。	・外乱ノイズは AE 波形の形状、波形の周波数成分の違い、信号の発生位置標定によって除去できることを確認。	○	
基準化への取組み	民間規格化（日本非破壊検査協会規格）の試み。	・日本非破壊検査協会において NDIS2436 の原案作成。	○	評価法としての採択と市場での運用

事業番号 2 -(2)-②：複合圧力容器の 評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
① 解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発	複合圧力容器の設計手法として、解析による設計（DBA）を導入した設計フロー図を構築し提案する	解析による設計（DBA）を導入した設計フロー図を構築した	○	特になし
①－１ ライナー試験片評価法の検討	アルミニウム合金の最適疲労曲線を作成する	アルミニウム合金の最適疲労曲線を構築した	○	－
①－２ CFRP 試験片評価法の検討	樹脂単体および CFRP の SN 線図の相関図を作成する	樹脂単体および CFRP の SN 線図の相関図を作成した	○	－
①－３ 円筒試験体評価法の検討	円筒試験体による圧力サイクル試験結果を最適疲労曲線と照合して結果の妥当性を検証する	円筒試験体の試験結果から疲労寿命設計線図の妥当性を確認した	○	－
①－４ 自緊を考慮した疲労寿命設計線図の作成	自緊を正確に評価する容器の疲労寿命予測手法を開発する	自緊を正確に評価する容器の疲労寿命予測手法を開発した	○	－
①－５ 複合圧力容器設計手法の実証	容器の圧力サイクル試験による累積損傷関係式（寿命延長式）を構築する	容器の圧力サイクル試験により、マイナー則に基づく累積損傷関係式を構築した	○	－
② 技術基準の整備に向けた技術開発	・タイプ２容器の技術文書案を完成する ・KHKS0225 改正に資する基準案を提案する	・タイプ２容器の技術文書案 JPEC-TD を完成した ・KHKS0225 改正に資する基準案を提案した	○	・タイプ２容器：技術文書 JPEC-TD の KHKS 0220 の附属書化を目指す ・タイプ３容器：累積損傷関係式の水素ステーションへの導入を燃料電池実用化推進協議会殿と連携しながら進める

事業番号 2-(3)-① ：長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
① セーフティーデータベース（SDB）の解析知見の整理	SDB 情報の整理、解析	商用水素ステーションの水素微量漏えい事例について、設備・部位を整理し、経時的な傾向の推移、充填回数に対する漏洩事例発生頻度の傾向について確認	○	漏洩防止対策や高耐久性機器の開発に活用できる漏洩事例詳細情報入手の仕組み構築
② 部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討	部材・機器の加速耐久性評価方法の確定	劣化要因に基づいたシール材の強制劣化手法と加速耐久性評価法を検証.強制劣化の程度と充填回数の関係性を確認するため検証試験を実施し、強制劣化手法の妥当性を確認	○	

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
③シール基盤・改良開発	水素ステーションにおける充填回数 30,000 回相当のシール部材開発 シール部材の加速耐久性評価法案設定	水素機器用高分子材料水素特性データベースを拡充 高圧水素シール部材 15k～30k 回充填相当劣化モデル作製ー高圧水素シール性評価による加速耐久性評価法開発，加速評価法案設定．O リング面圧時分割評価システムを開発．HRS 使用済みシール部材の回収，調査を実施． 30,000 回充填寿命担保シールシステム、シール部材の提示 高圧水素圧縮機ピストンリング材の摩耗に伴うトライボケミカル反応による硫化水素発生を確認．	○	水素ステーションを構成する各種高圧水素機器、ホース等各種部材の高信頼性化、長寿命化による低コスト化をさらに進めるため、また、今後想定される HDV 向け大流量水素ステーションへの対応をも踏まえ、基盤となる研究開発をさらに推進する必要がある
④ 継手基盤・機器開発	機械継手の漏洩の評価方法の確立 漏洩リスク低減の指針作成、 漏洩のない機械継手の開発	シール部の軸力低下の原因、完全緩みを生じる曲げモーメントを推定． 締結によるメステーパ面のシール部の塑性変形と繰り返しにより変形の進行を確認． 継手の FEM 解析で，締付けトルクやシール部軸力などが計算可能． 改良継手の検討、施工・保全指針案作成	○	漏えいインシデントのパターンを明らかにして、微量漏えいゼロをめざした技術開発が必要である。 さらに、HDV 対応へ向けて、大口径配管に対する継手締結部の技術開発が必要である
⑤シール成果に基づく機器開発	シール開発成果に基づく高耐久性機器開発	基盤・改良開発成果に基づき設計製作した機器（バルブ、フィルター等）の加速耐久性評価法による評価を実施	○	

事業番号 2-(3)-② ：水素ステーション用高圧ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発

研究開発項目	最終目標		成果	達成度	今後の課題
① 水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明	水素インパルス試験法、改良試験法と実水素ステーションにおける充填回数の相関係数を設定	・高圧水素ホース加速耐久性評価法規格案の作成 ・ホース交換サイクル充填回数 30,000 回以上の耐久性判断に資するデータ取	・米国カリフォルニア州水素ステーションにて 2017 年度版試作ホースの HRS 試用により実 HRS における充填可能回数 3,000 回と判断，加速耐久性評価法の耐久回数基準として設定 ・水素インパルス試験の検討により，加速耐久性評価として揺動インパルス試験を開発 ・設定した耐久回数基準に対して，開発した加速耐久性評価法の加速係数は 60℃において 1.3±0.2 程度である	○	特定の水素ステーションにおける耐久性を基準としているため，一般化する必要がある．水素ステーションにおける運用情報を統計的に解析し，結果に基づきホース耐久性に対する影響度を評価し，評価法に反映させる必要がある．

研究開発項目	最終目標		成果	達成度	今後の課題
② 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明（山形大，大阪大，弘前大[2021/9 から]再委託）	ホース耐久性に対する影響が大きい内層樹脂の劣化、破壊に影響する因子を明確化	得	・漏洩の原因である内層樹脂貫通クラック形成は高温，ホースの揺動変形が加速因子となることが判明 ・内層樹脂の結晶性高分子材料に対する高圧水素の影響として高圧環境下で侵入した水素が減圧時にミクロボイドを形成することが判明. ・ホースの大変形により発生する局所ひずみの評価法を開発	○	材料，局所的な応力場，ホースの大変形それぞれの解析により得られた結果に基づき，連成した解析を行うことが必要である.
③ 高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定	高圧水素ホース加速耐久性評価法を開発し、規格案を作成		・JIS 文書を想定した規格案策定	○	規格化（JIS 化）を想定したホース評価法についての検討を引き続き進める必要がある.
④ ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供	項目③で検討を進める加速耐久性評価法を用いてデータを取得し、ホースメーカーにフィードバック		・ホースメーカーから提供されたホースについて開発した揺動水素インパルス法を用いて 8 万～11 万回の耐久性を確認 ・本プロジェクト開始時（2018 年 4 月）：充填ホース 650～1000 回充填で交換 ・本プロジェクト終了時（2023 年 3 月）：充填ホース 3,000～4,000 回程度充填に使用可能	○	規格化（JIS 化）を想定したホース評価法についての検討を踏まえ，引き続きホースメーカーへの情報提供を進める必要がある.

事業番号 2-(4)-①：本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
低コスト対応プロトコルの開発	- 革新的充填プロトコル制御マップの完成 - 革新的充填プロトコルの安全性検証 - 熱容量測定方法確立	- プレクール温度緩和（電気代削減）可能な革新的充填プロトコルの制御マップ（MC-MM：MC Multi Map）を完成した。 - 革新的充填プロトコルの安全性検討・実証を実施した。 - 熱容量測定方法を確立し規格案〔JPE C-S 0012（2023）〕を策定した。	○	本開発成果をベースに MDV／HDV 用充填プロトコル開発が期待される。
低コスト高頻度水素充填システムの開発	- 低コスト高頻度充填システムの完成 - 協調制御システムの開発	- ダブル充填により1時間10台の充填を可能とする最小設備構成の低コスト高頻度充填システムを検討した。 - 合理的なダブル充填を可能とする協調制御システムを開発した。	○	MC-MM 方式では、FCV 初期圧の影響が大きいため、今後、実用化に向け多様な条件下での確認、改善が望まれる。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
水素充填に関する基準化	- SAE J2601改定内容を反映した充填技術基準案の作成 - 革新的充填プロトコルを反映した充填技術基準案の作成	- SAE J2601改定内容を反映した充填技術基準案〔JPEC-S 0003（2021）〕及び充填技術自主ガイドライン案〔HySUT-G 0003（2022）〕を作成した。 - 革新的充填プロトコルを反映した充填技術基準案〔JPEC-S 0003（2023）〕及び充填技術自主ガイドライン〔HySUT-G 0003（2023）〕を作成した。	○	今後、一般則関係例示基準に引用されることにより（NEDO事業外）、広く業界内で使用されることが期待される。

事業番号 2-(4)-⑤：高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
1.Mo-V 添加鋼の高強度化と水素適合性の評価	引張強さ 1000MPa 以上で水素適合性確保可能な鋼種と製造条件の明確化	引張強さ 1000MPa 以上と水素適合性が両立する製造条件を明らかにした。	○	開発鋼を適用した新型蓄圧器の実寸試作による材料特性および蓄圧器性能の確認
2.高強度低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価	引張強さ 1000MPa 以上で水素適合性確保可能な鋼種と製造条件の明確化	引張強さ 1000MPa 以上と水素適合性が両立する製造条件を明らかにした。	○	開発鋼を適用した新型蓄圧器の実寸試作による材料特性および蓄圧器性能の確認
3.蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査	上記特性を有する鋼材を用いた新型蓄圧器の試設計を実施し、併せて期待コスト低減効果を検討する。また、国内外の蓄圧器関連する最新情報を入手する。	上記鋼材を適用して新型蓄圧器の試設計を実施した。併せて現状とのコスト比較を行って予想されるコスト低減効果について検討し、蓄圧器本体のみで現状より約 24%低減可能と試算された。また、蓄圧器に関する国内外の最新情報を入手した。	○	上記新型蓄圧器の実寸試作を通じた製造プロセス上の課題の明確化とコスト削減効果の検証

事業番号 2-(4)-⑥　：新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
①超低消費電力水素検知センサエレメントの開発	・構造、回路最適化 →検知時間≦10sec @0.1%水素 ・信頼性評価仕様確立 →寿命≧10 年	・検知時間=5sec@0.1%水素(○) ・推定寿命≒16 年(○)	○	・特記事項なし
②高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発	・モジュール構造、工法の立案と課題抽出 ・水素雰囲気 1% 反応速度≦30sec ・湿度 100%RH5 年動作	・モジュール構造、工法決定(○) 透過膜を素子上に成膜 ・水素雰囲気 0.1% 反応速度≦10sec(○) ・高温高湿保存(60℃/100%RH) 実施、100%5 年相当保持（○）	○	・特記事項なし

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
③自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発	・検知器:IoT 方式決定, 消費電力≦10mW ・自己補正技術確立 ・故障予測モデル確立	・IoT 対応水素検知器仕様決定(○) 消費電力：9.4mW ・温度/劣化自己補正手法確立(○) ・故障予測、警報機能仕様確立(○)	○	・特記事項なし

事業番号２-(４)-⑦ ：半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
1-① Violet-ECDL の開発	・PBC 内光強度 10 W 以上	・光強度 100 W 以上を達成	◎	・光強度の時間的安定性向上（長時間動作）
1-② Violet-ECDL 光学系構成の最適化	・ECDL の発振線幅 30 cm^{-1} 以下	・発振線幅 12 cm^{-1} 以下を達成	○	
1-③ 光ファイバ伝送式の発振機能検証	・PBC 内光強度 5 W 以上	・光強度 50 W 以上を実証	◎	・光強度の時間的安定性向上（長時間動作）
1-④ 高感度受光系の開発	・受光系を試作し、酸素 ppm オーダーの感度を検証	・水素中の酸素 1.4 ppm（3σ）の検出を実証	○	・さらに集光効率の高い受光系の開発
1-⑤ マルチガス分析装置プロトタイプの開発	・ 40×50×30cm 以下、重量 10 kg 以下、量産価格 150 万円以下のプロトタイプ装置を開発	・寸法 34×42×17 cm，重量約 8 kg のプロトタイプ装置を開発	○	
1-⑥ プロトタイプによるガス濃度計測機能検証	・検出限界 1 ppm 以下、応答時間 1 分以下を検証	・1 ppm 以下の微量ガスを 0.5 秒で計測可能であることを検証（アルゴンベース） ・製作したプロトタイプ装置の原価から、量産価格 150 万円以下と評価	△	・プロトタイプ装置による水素中での数十 ppm 以下の安定的な分析を検証中（ラボベースでは検証済み）
1-⑦ 全成分分析の可能性評価	・研究開発成果等に基づき、ISO 品質規格全成分を対象として分析装置の適用可能性を検討し、検出可否（測定方法、濃度等）を含めて明示	・ 研究開発成果に基づき、ISO 品質規格全成分を対象として分析装置の適用可能性評価を行い、結果を成果報告書に明示 ・現状で 6 成分、追加の開発によって 10 成分が 1 台で分析可能と評価	○	・主に受光光学系の効率化により、さらに 1 桁程度検出下限を下げることができ、それによって 10 成分の 1 台での分析が可能と考えられる。
2-① IR-ECDL の開発	・実効光路長 200 m 以上	・実効光路長 7.4 km を達成	◎	
2-② IR-ECDL 光学系構成の最適化	・ECDL の発振線幅 0.3 cm^{-1} 以下	・ECDL の発振線幅 0.18 cm^{-1} を達成	○	

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
2-③ 光ファイバ伝送式の発振機能検証	・実効光路長 100 m 以上	・実効光路長 348 m を達成	○	
2-④ TDLASの適用可能性評価	・水素検出限界濃度 100 ppm 以下	・水素検出限界濃度 100 ppm 以下を達成	○	
2-⑤ 高感度ガス分析装置プロトタイプの開発	・寸法 40×50×30cm以下、重量 10kg 以下のプロトタイプ装置を開発	・寸法 34×42×17 cm、重量約 8 kg のプロトタイプ装置を開発	○	
2-⑥ プロトタイプによるガス濃度計測機能検証	・アンモニア検出限界サブ ppmオーダー以下、応答時間 1 分以下、コスト 150 万円以下（量産効果含む） ・硫化水素を対象として検出限界ppb オーダー以下を目指す。	・アンモニア 0.05 ppm の検出（応答時間 2 秒）を実証 ・製作したプロトタイプ装置の原価から、量産価格 150 万円以下と評価 ・実験結果に基づく検討により、硫化水素の検出限界 1.3 ppb に到達可能と評価	○	
2-⑦ 全成分分析の可能性評価	・研究開発成果等に基づき、ISO 品質規格全成分を対象として分析装置の適用可能性を検討し、検出可否（測定方法、濃度等）を含めて明示 ・全硫黄成分について計測方法を確立	・ 研究開発成果に基づき、ISO 品質規格全成分を対象として分析装置の適用可能性評価を行い、結果を成果報告書に明示 ・現状で 2 種（アンモニア、蟻酸）の微量成分、追加の開発により 5 種の微量成分の分析が可能と評価	○	・主に実装するデジタイザの高速化によって、全硫黄成分（硫化水素還元）を含む 5 種の微量成分の分析が可能と評価

事業番号 2-(4)-⑧：水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発	80℃で 80MPa の放出圧力が可能で、外挿から算出される30,000回の吸蔵放出サイクル後に初期容量80%以上容量を維持する水素吸蔵合金を開発する。	84℃で 80MPa まで昇圧可能なほぼ目標を満たす合金の開発に成功した。	○	本システムに求められる熱力学特性を有する水素吸蔵合金の開発に目途が付いたが、今後は実際の運用に近い条件での耐久性評価や小型機での小規模実証試験が必要である。
昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討	良好な伝熱性能を備え、80MPa の水素に対する耐圧性を有する昇圧用水 素吸蔵合金容器構造を開発する。	試作容器の設計検討を基に、昇圧システムの基本設計を実施した。	○	本技術を実用化するためには高圧ガス保安法に合致した安全対策が必要である。本技術に適した検査方法の確立が必要である。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討	量産炉に適用可能なルツボ材、溶解プロセスを確定し、本システムに適用される水 素吸蔵合金の大規模製造プロセスを確立する。	昇圧合金の量産適用可能な製造プロセスを確立した。	○	

事業番号２-(４)-⑨ ：HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
マスターメーター法計量精度検査方法の高度化	・水素ディスペンサー計量検査精度 2.0%、不確かさ 0.4%の達成 ・検査周期延長や充填条件の最適化により計量精度検査コストを現在の 1/3 程度まで削減	・低圧大流量水素試験設備の運用を開始し、設備特性評価を行った。また計量検査装置を用いて福島水素充填技術研究センターにて試験を実施した。 ・水素ステーションにおいて重量法とマスターメーター法とのクロスチェックを行うと同時に精度影響要因を分析し、計量検査期間の延長（2 年⇒3 年）によるコスト低減の見通しを得た。（初回及び後続試験で器差試験結果が判断基準値以内の場合）	○	・ HySUT ガイドラインの MPE10 %について、国際基準となる OIML 対応として精度等級 2 %を目指す必要があり、計量システムの研究改善による精度向上が必要である。NF,MF,HF 対応を勘案すると、精度等級 2%を検査できる 1/5 の不確かさのマスターメーター法計量試験装置の研究開発が必要となる。 ・計量精度影響因子を解明しコントロールすることにより、計量精度の経年的安定化を達成して、検査周期を最適化して、取引の公正を維持しながら運営経費を削減する。 ・評価装置における環境温度の影響についての評価、装置の持つ熱マスおよび内部の流体抵抗により、充填に影響ないようにするため、装置の仕様検討が必要。 ・脱圧量については、水素計量ガイドラインで脱圧量の補正について規定したことを勘案して、ステーションの計量システムが改善されてきた。脱圧量以外に、システムに固有の影響因子があって器差を変化バラツかせている。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
新プロトコルに対応する水素計量技術の開発	・1:500 のワイドレンジにも対応できる流量計測の実現 ・圧力変動、ガス温度の影響評価による器差低減 ・HDV の充填に求められる性能要件を基にヒートマス、圧力損失を評価	・MF、HF タイプの流量計開発を行うと共に 1:100 以上のワイドレンジ流量計測を実現した。 ・福島水素充填技術研究センターおいて NF/MF の充填模擬試験を行い圧力変動、ガス温度が計量精度に与える影響を評価した。 ・ヒートマス及び圧力損失の影響評価装置により、不確かさ要因としてヒートマス、圧力変動の影響を評価した。	○	HDV 充填に対応する大流量化に伴う、マルチ充填技術、ワイドレンジ高精度流量計の開発が必要である。圧損及び熱損影響評価を実施し、特性を向上させる必要がある。これらの影響評価を HDV 模擬試験条件に反映するために福島水素充填技術研究センターでの系統的データ取得、分析が必要となる。また、マスターメーター法による計量試験を適正に行うため、使用する計量精度検査装置の基準化が必要である。
HDV 用の水素充填技術等に関する調査・研究	・水素先進技術研究センター（仮）の基盤整備に資する HD 充填システムの概略仕様を提案し、各種ハードウェアの目標性能設定	・福島水素充填技術研究センターの最終仕様で、シミュレーションを繰返し、実充填と同様な結果を得た。 ・HF/MF/LF 各構成機器の流量特性・Cv 値を調査した。 充填時の温度上昇を模擬する 3 次元数値シミュレーションモデルを開発した。	○	充填プロトコルの最適化と基準化が未実施である。また、福島水素充填技術研究センターにおける能力検証するためのデータが不十分であるため、引き続き検証を行う必要がある。
HDV 等の新プロトコル対応に係る技術検証	・HDV 用 HRS を実用化するための HDV 用の水素計量や水素充填に関わる技術検証および国際基準調和・国際標準化活動を推進するためのデータの取得	・福島水素充填技術研究センターが 2022 年 9 月に完成。高圧ガス設備完成検査を受検し、技術基準に適合を確認した。 ・実証試験（充填、計量）を行い、HDV 用充填プロトコルの構築に必要な基礎データを取得した	○	・福島水素充填技術研究センターで、HDV 対応の計量技術及び充填技術を開発・基準化するために必要な基礎データの取得を進める。
高圧水素計量技術に関する国際協調	・マスターメーター法計量精度検査装置を仲介器としたラウンド・ロビンテストを実施し、各国で運用されている水素ディスペンサーの計量精度検査と検査装置のクロスチェックを行い、その成果を国際標準化に反映	・国家標準にトレーサブルな臨界ノズルを用いて国内外の高圧水素用コリオリ流量計の器差試験を行い、0.2～0.5 %の器差を確認した。	○	・国際基準を満たすために、より高精度な高圧水素用コリオリ流量計をマスターメーターとして採用し、検査方法を確立していく必要がある。

研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

事業番号３-①：水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
1-1 ISO 等国際規格の主導的な制定の取組みと、ISO 等国際標準と国内研究開発等との連携強化	策定審議中の ISO 国際規格、並びに、今後新規提案される ISO 国際規格や既制定規格の改訂に関し、日本案を策定して、グローバル動向を踏まえつつ、制定を主導的に取り進める。	2018 年度から 2022 年度までの ISO/TC197 における国際標準化の実績としては、12 件の規格を発行した。内 4 件は日本が議長国（提案国）として発行した国際規格である。また、当該期間中 25 件の規格を審議改訂しており、そのうち 7 件は日本が議長国、提案国として開発した規格である。特にステーション用蓄圧器（WG15：日米共同議長体制）、HRS 用 O-ring 規格の日本提案は顕著な成果である。	○	ISO/TC197 の議長国として水素技術の国際標準化の進展に的確に対応し、標準化の推進に貢献する。さらに日本の新規提案を促進する。国際標準化に係る後継人材の育成を進める。
1-2 燃料電池自動車関連の ISO 国際規格の制定推進	水素品質、インターフェース関連国際規格改訂に関し日本案を策定して、制定を主導的に取り進める。	水素品質関連 2 規格（議長国日本）および充填インターフェース関連 2 規格を発行した。水素品質規格は日本のデータを根拠に成分を削減した。充填インターフェース関連規格については、日本が提案したコネクタの氷結試験方法を内容に反映させるとともに、大型車を対象とした改訂議論を開始した。以上により 2022 年度までの目標を達成した。	○	大型車を対象とした改訂規格に、日本が提案する MF ツインノズルの内容を反映させる。
2 標準化活動等に係る国際連携の推進	国際連携の推進のため種々関連会議等への参加。CHS 等国際連携活動の継続。	CHS への Strategic Partner としての参加。その他海外の関連事業者との意見交換、論議に積極的に参加し、水素技術の分野の国際標準化に対するプレゼンスを高め、2021 年より日本が ISO/TC197 議長国となったことにつながった。	○	国際標準化の推進への寄与を目途として、今後も水素技術に関連する積極的に関連する海外の関連事業者との意見交換、論議に参加する。
3-1 水素品質管理方法の適正化のための不純物影響調査	ISO 水素燃料仕様改訂に必要なデータを見極め、海外と連携しながら検討結果を取りまとめる。	インフラ事業者の緩和要望をもとに、規格改訂のための根拠が必要な成分を絞り込み、ギ酸削除、ハロゲン絞込み、酸素緩和（2022 年度は短期影響）に関する単セル試験データを取得した。このうちギ酸は規格表からの削除が可能であることを示し、ISO/CD 14687 案に反映させることで分析コスト約 1 割低減の見通しを得た。また、海外主要研究機関との連携のためのプラットフォームの形成を企図し、5 回にわたるリモート会議を開催した。その中で改訂議論に上がったハロゲン化物・ギ酸の影響に関する情報交換を行うことで、効率的に不純物評価試験を進めた。	○	酸素規格値緩和の判断のため、長期的な劣化の影響調査が課題。後継事業で調査する。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
3-2 水素品質の管理方法適正化による運営費コストダウンの開発	水素品質管理の国際規格改訂に合わせたガイドライン改訂等の取組み。	もとの水素品質関連の ISO 国際規格の改訂に合わせて、2 度に亘る水素品質ガイドライン改訂案の策定を実施した。また、S の簡易分析について検知管等の精度を確認し、品質管理の低コスト化の可能性を示した。	○	日本で開発されている特に FCV 用水素品質規格に適用する分析法の適用の可能性を調査する。また、ガイドラインへのリスクアセスメント手法の導入案を策定する。

事業番号 3 -②：燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（１）サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動	2017 年 10 月に開始された HFCV-GTR（GTR13）Phase2 審議に参画し、専門家によるデータに基づく技術審議を行うことで、安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準となるよう審議を推進して国際合意を得る。	国連 GTR13 Phase2 審議に参画し、日本の提案項目（容器初期破裂圧適正化、金属材料試験法、火炎暴露試験法）について試験法案の提案またはドラフト提示を実施し、国際合意を得た。（2023 年 11 月の国連 WP29 で最終承認・発効の予定） GTR13 Phase2 の試験法を基にした、加盟国間の相互認証規則 UN R134 改定審議（02 series）に参画し、国際合意を得た。（2023 年 11 月の WP29 にて採択、2024 年 6 月頃発効の見込み）	○	・相互認証規則 UN R134 残課題対応（リモート TPRD、材料課題等）。 ・GTR13 Phase3 課題の対応（大型・商用車対応、試験法のさらなる合理化、液水貯蔵システム等の新技術）

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（２）サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発	HFCV-GTR (GTR13) Phase2 の課題の内、①容器の火炎暴露試験法と②金属材料試験法に対し、海外との協力体制も踏まえて、必要な技術検討やシミュレーション解析・実証試験等を行い、GTR13 Phase2 での日本提案の国際合意に資する。	①容器の火炎暴露試験法 ・火炎暴露試験結果およびシミュレーション解析結果等から、試験結果のバラツキを低減する試験手順および試験条件を提案し、GTR13 Phase2 ドラフトに採用された。 ・車両火災試験結果から、小径容器を連接した新構成容器の火炎暴露試験法を提案し、GTR13 Phase2 ドラフトに採用された。 ②金属材料試験法 ・前 NEDO 事業で作成した水素適合性試験法案を SAE 材料専門家会議で合意し、SAE から GTR13 Phase2 に提案され、参照試験法として GTR13 Phase2 ドラフトに織込まれた。 ・前 NEDO 事業で作成したアルミニウム合金の HG-SCC 試験法案を GTR13 Phase2 に提案し、参照試験法として GTR13 Phase2 ドラフトに織込まれた。 ・自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材である SUS304 を使用可能材料として確定するための SUS304 市中材の水素中 SSRT 試験データおよび水素中疲労試験データ取得を完了し、要求性能を満足することを確認した。	○	①に関して 大型・商用車を想定した場合の火炎暴露試験の合理化が必要である。例えば、リモート TPRD、Time out 試験法等の検討が必要である。 ②に関して GTR13 Phase2 の水素適合性試験方法はオーステナイト系ステンレス鋼の試験結果をベースに作成されたものであるため、他金属材料への展開の際に注意すべき点が存在する可能性がある。また、将来的に十分なデータが蓄積された段階で、試験に合格した材料についてリスト化し、同時にその評価試験結果をデータベース化することによって、安全性と経済性を両立した材料選択が可能な環境を整えることが必要である。

事業番号 3-③：水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（１）最新動向調査	世界各国の最新情報を継続的に収集し、水素燃料電池に関する世界的な最新動向を把握する。	英語に加え、中国語、韓国語にも対応し、主要国の最新動向把握に努めた。調査期間を通じて、5,044 件のニュースを収集、要約し、通算 17 本の国際会議に参加、レポーティングを行った。	○	2019 年から 2022 年にかけて、水素を巡る環境は大きく変化した。国際動向をより正確に把握するためには、豪州、中東など視点を広げる必要がある。また、研究開発フェーズから市場フェーズへ移行するにあたり、市場に関連する専門性の高い情報（例：仕様、規格など）も求められてくることも考えられる。
（２）各国政策・市場調査	主要国の水素燃料電池に関する政策・市場動向を正確に把握・分析する。	主要国（米国、EU、ドイツ、英国、中国、韓国）の水素政策動向及び市場動向を体系的に整理、分析した。	○	
（３）方向性検討	上記結果を踏まえ、国内政策への示唆を得る。	各国の水素戦略、注力分野、水素製造動向を比較分析し、特徴を抽出した。また、上記を踏まえた国内政策への示唆を検討した。	○	

事業番号３-④：水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（１）２重配管方式による水素輸送システムの安全性評価のための調査研究	二重配管方式水素輸送システムの安全性評価のためには、本方式に潜在する水素漏洩、燃焼、爆発リスクの評価が求められる。本研究項目では、二重配管を模擬した配管系において、その中空層に水素が漏洩し着火した場合の火炎伝播挙動を把握し、それを基に安全性評価における課題を抽出し対応策を明確化することを目標とした。	二重配管の中空層において水素と空気の混合気の火炎が伝播する条件および加速する条件を明らかにした。また、水素が中空層に漏洩し着火した場合の火炎伝播挙動を観測し、局所的には予混合火炎の伝播形態と対応すること、および、火炎から発生した圧力波は減衰しながら中空層を伝播することを明らかにした。これらの結果を基に、着火に至る事故シナリオの影響度を推定し、安全性評価の課題として影響度が高くなり得る事象を抽出し、影響度を低減させるための対応方針を明確化した。	○	二重配管方式において想定される事故シナリオを網羅的に整理し、それぞれのリスクおよび安全対策による被害低減効果を定量的に評価する必要がある。その評価結果に基づき、二重配管方式水素輸送システムの安全性確保するための漏洩検知の指針と安全対策の提案を行うことが課題である。
（２）水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究	二重配管方式水素輸送システムの安全性技術を確立するためには、本方式に適した新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性ならびに各種水素センサの性能評価などが必要となる。本研究項目では、実証環境を構築し収集した非定常時の基礎データから、二重配管方式に適した水素漏洩検知手法(ポイント／分布センシング)の導出・性能評価、異常検知における技術成立性調査など、付臭措置代替となる新たな検知手法の可能性を確認することを目標とした。	二重配管方式による水素のパイプライン輸送を社会実装するためには、安全技術の確立が必要となる。本研究開発では安全技術の確立を目指し、実証環境において収集した基礎データから二重配管方式における水素漏洩時の検知状況、ポイントおよび分布型センシング、異常検知など新たな検知手法の確立の基となる水素漏洩時の基礎データを収集・調査し、分析（データアナリティクス）を行った。本研究で二重配管方式に対して光ファイバセンシング技術やポイントセンシング技術を組み合わせることよって、付臭措置代替となる安全技術の可能性を確認できた。	○	安全性を担保するためには、様々な事故シナリオによる異常状態の発生状況（管切断事故による急激なガス漏洩、劣化等による少量のガス漏洩等）に対して適切な把握手段（モニタ、センサ等）と的確なアクションプランを遂行できる保守要件の明確化を行い、普遍的安全技術の確立に繋げ、安全技術基準策定を進めていく必要がある。

研究開発項目	最終目標	成果	達成度	今後の課題
（3）経済成立性の評価	経済成立性が不明確な二重配管方式の水素輸送システムに関し、実証における敷設コスト・安全コストを通じて単位コストを明確にし、実需の調査とコスト優位性を保つ条件・事業モデルを示すことにより、出口戦略となる一般的な導入モデル及び展開要件を明らかにすることを目標とした。	実証を通じた敷設コスト、安全コストの目途付けと各種条件設定から、中・小規模（～1 千t/年）かつ近距離（10km 程度）での水素輸送においては、圧縮水素及び液化水素よりも二重配管方式のパイプラインの方が経済性が高くなる可能性を示すことができ、比較的細い水素導管となる制約の中でも他水素輸送モードに対して優位性を保つ条件を明確化することができた。また中・小規模の需要家へのきめ細かい水素輸送をターゲットとする二重配管方式での出口戦略を示すことができた。	○	配管コスト、安全コスト改善の見極め、輸送距離延長に資する圧損の低い新素材配管の調査・作り込みが課題となる。また事業化に向けては地下インフラの元管配置状況の把握と管径の拡大等による輸送可能範囲の検証や、高圧水素も視野に入れた調査研究を進める必要があると考える。

Ⅲ. マネジメント

1. 実施体制

1.1 NEDO が関与することの意義

FCV・水素ステーションの普及拡大に向けた規制見直し・技術開発は、以下の観点から NEDO が持つ知識、実績を活かして推進すべき事業である。

- エネルギー政策上の重要度が高く、社会的必要性が大きい。
- 水素・燃料電池産業の競争力強化に貢献。
- 規制見直しの推進には、 産官学の緊密な連携が必要。
- 水素供給インフラについては FCV 普及初期の市場が限られるため、民間単独では開発リスクが大きい。
- 本格的普及、自立化に必要な規格化・標準化は全体として取組み。

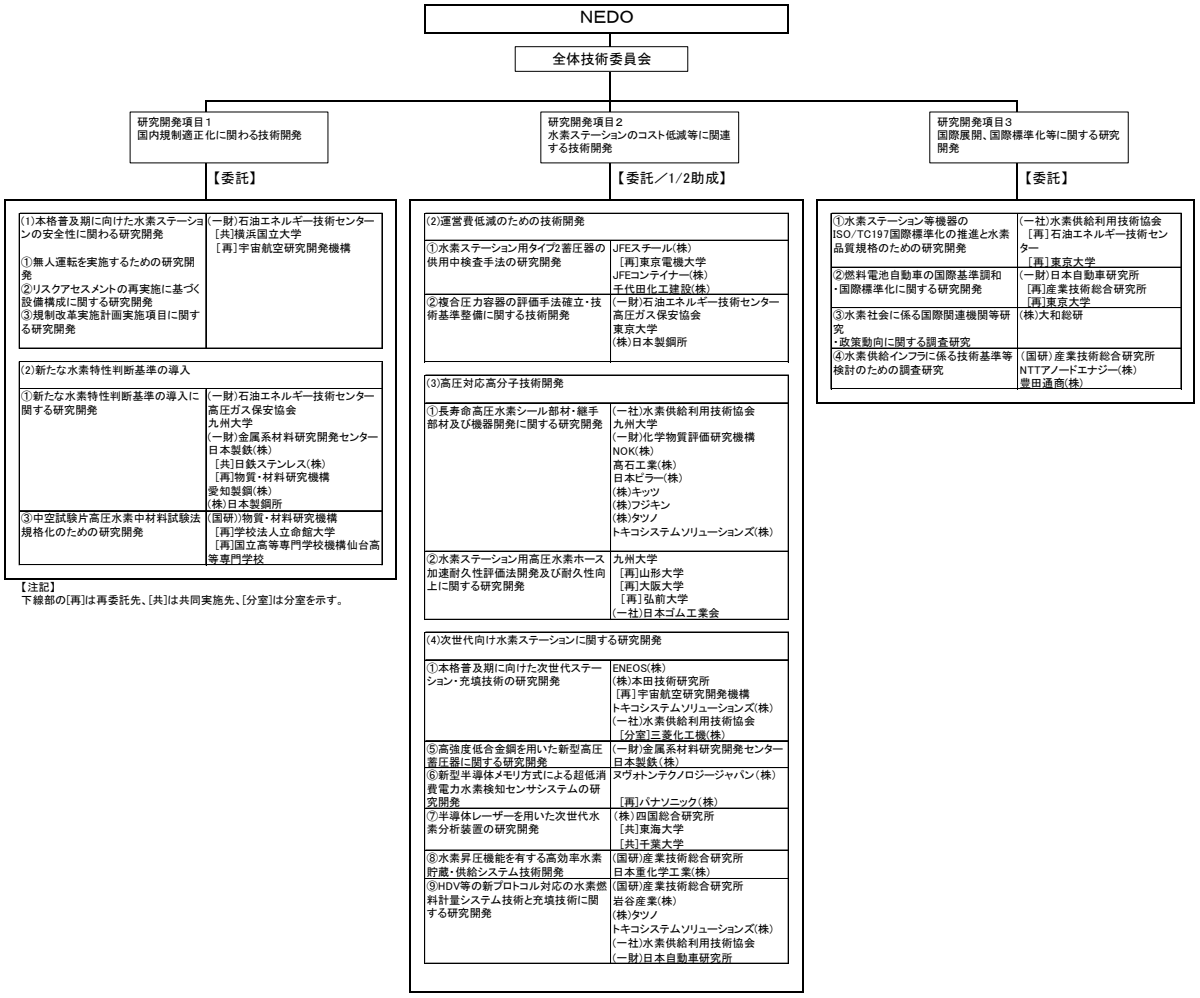
1.2 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー（以下ＰＭという）にＮＥＤＯ 次世代電池・水素部 大平英二統括研究員（研究開発項目２のうち「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発事業」のみ）、横本克巳（研究開発項目２の「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発事業」以外の事業）、をそれぞれ任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

研究開発項目間連携のため、「全体技術委員会」を設置し、それぞれの成果、課題を共有する体制とする。

ＮＥＤＯは公募により研究開発実施者を選定する。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

実施体制の全体図



1.3 個別事業の採択プロセス

公募後の採択審査委員会に当たっては、以下を採択審査基準として実施した。

① 【目標設定】：提案・申請内容が本事業の目的、目標に合致しているか。事業意義が明確か。

② 【技術の新規性】：提案・申請された方法に新規性があり、技術的に優れているか。

③ 【研究計画の妥当性】：提案・申請内容および研究計画に妥当性はあるか。

④ 【計画遂行力】：提案・申請者は本事業を遂行するに足る能力を有するか。

⑤ 【提案の経済性】：提案・申請内容の経済性は優れているか。開発予算は妥当であるか

⑥ 【実用化・経済波及効果】：提案・申請内容における実用化の見込み、企業化計画に妥当性はあるか。また国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか

また、公募毎の期間や採択数については下表の通り実施した。

	公募予告	公募期間	採択数
第１回公募	2018/2/20	2018/3/23 ～2018/4/23	11
第２回公募	2018/7/24	2018/8/24 ～2018/9/25	5
第３回公募	2020/2/25	2020/4/8 ～2020/5/12	5
第4回公募	2021/11/18	2021/12/3 ～2021/12/17	0
第5回公募	2021/9/24	2022/3/8 ～2022/4/8	1

公募実施時期と採択数

2.　受益者負担の考え方

本事業の各年度の予算実績は以下の通り。本事業は、国の政策実施、すなわち水素・燃料電池戦略ロードマップで定める水素ステーション普及のためのコストダウン目標の達成のために、必要なデータ等を取得、分析及び提供することを目的とした研究開発であることから、委託事業を基本として実施した。一方で、採択テーマの内、研究開発項目Ⅱ／「電気化学式ポンプの実証・開発」については、製品化検討段階の研究開発であることから、助成事業として実施した。

委託：21件、助成(1/2負担)：1件　（単位：百万円）

研究開発項目		2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	合計
(Ⅰ)国内規制適正化に関わる技術開発	委託100%	627	1,026	684	689	712	0	3,739
(Ⅱ)水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発	委託100%	828	1,249	1,411	2,447	4,692	53*	10,845
	助成50%	25	83	56	0	0	0	
(Ⅲ)国際展開、国際標準化等に関する研究開発	委託100%	131	221	144	123	686	0	1,305
合　計		1,611	2,579	2,295	3,260	6,091	53*	15,890

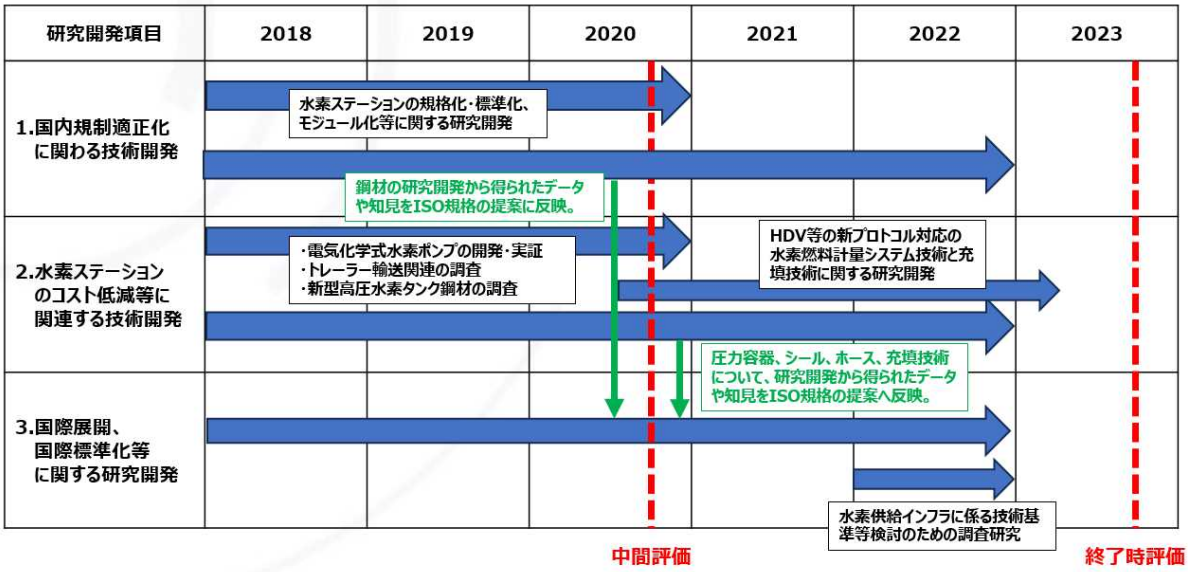
*予定金額

3.　研究開発計画

3.1　研究開発スケジュール

本事業の研究開発スケジュールは下表の通り。研究開発項目Ⅰの「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」、研究開発項目Ⅱの「複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」、「長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」、「水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発」、および「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発」にて得られたデータまたは知見を用いて、研究開

発項目Ⅲにて ISO／TC197 の規格化・標準化へ繋げた。また、欧米でも HDV 向け水素ステーションの検討が進んでおり、日本も遅れをとることなく、早期に実証試験に着手し、水素供給インフラに関する国際競争力を獲得することを狙いとして、2020 年度に追加公募を行い、「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発」を採用し、HDV センターの整備を行った。



3.2　進捗管理

ＮＥＤＯは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施した。

① 研究開発の進捗把握・管理

ＰＭは、研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握した。また、技術検討委員会等を設置し、外部有識者から技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握した。また、事業運営の形態（委員会の設置方法等）をスリム化し、意思決定のスピードアップを図るため、事業全体の調整、個別事業に反映させる全体技術委員会をＰＭが下記の頻度で開催した。

・2018 年度：2 回
・2019 年度：1 回（2 回目：METI との共催の公開評価 WEEK（成果報告レビュー）にて代替、3 回目：コロナの影響で中止）
・2020 年度：1 回
・2021 年度：1 回

② 技術分野における動向の把握・分析

ＰＭは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し技術の普及方策を分析、検討した。なお、調査の効率化の観点から、本プロ

ジェクトにおいて委託事業として実施した。

③ 研究開発テーマの評価

研究開発を効率的に推進するため、研究開発項目（１）～（３）を対象として、ステージゲート方式を適用した。

また、中間評価におけるコメントに対しては、以下の通り対応した。

「研究開発マネジメント」の指摘事項

【１】目標設定に関しては、整備費・運営費の削減等の目標は総合的なものであり、個々の要素が適切に構成され管理される必要がある。

⇒ 技術検討委員会を定期的に開催し、各研究開発テーマの実用化により期待される水素ステーションの設置・運営費用削減効果について、実用化時期に留意しつつ横串を入れて整理した。また、世界市場の動向についての最新情報を積極的に収集し、個別テーマへフィードバックすることで実施者のモチベーション向上に繋げた。年に一度成果報告会を開催し、情報発信に努めた。

【２】本事業は、商用ステーションの設置と並行して技術開発を進めるという特殊性から、開発成果の反映にはスピード感が求められる一方で、将来に向けた着実な成果も求められる。また、開発項目の選定や開発スケジュールの的確な設定、さらには技術の公開・標準化によってコスト低減をはかるべきテーマか、独自性を保つことによって競争力を維持するべきテーマかの適切な選別等、NEDO のマネジメントに期待したい。

⇒ 個々の研究開発テーマについて、ターゲットとする出口を明確にしつつ、テーマ設定やスケジュールの妥当性、知財戦略等、技術委員会等において検証し、必要に応じて見直しを行った。また、HDV 普及に伴う商用ステーションの大規模化の流れを見据えて、浪江町に HDV 充填センターを建設するなど、市場の流れに対応した開発項目およびスケジュールの設定を実施した。

「研究開発成果」の指摘事項

【３】今後、国内外で水素戦略をリードするためには、知的財産権の出願・審査請求・登録を、競合国や競合企業との関係を考慮して適切に実施していただく。

⇒ 研究開発成果が流出するリスクに留意し、適宜、事業実施者と知的財産権の出願要否を検討した。また、国際標準関連テーマ（ISO および GTR）については、オープン/クローズ戦略に基づいて議論を行い、公開/非公開の内容を明確に区別した。

【４】各国の R&D 情報を吸い上げ、新規アイディアの採択と率先実施等により、国際的に優位性のある技術やコンセプトの育成も行っていくことを期待したい。

⇒ 諸外国の水素ステーションに関する事業動向について、各国関係者との意見交換を継続的に実施し、最新情報の収集・分析を行った。具体的には、NOW や DOE との国際インフラワークショップに運営メンバーとして参画し、参加メンバーの選定を行った上で、各国の情報収集を行った。また、技術委員会等を通じて、研究開発項目の追加等、柔軟な事業運営を行った。

「成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通し」の指摘事項

【５】製品の国内での社会実装に加え、国外へのインフラ輸出も視野に入れ、市場調査、競合技術評価、市場機会分析といった、世界市場の分析と国際展開に必要な戦略情報のさらなる収集が望まれる。
⇒ 2020 年度で終了予定であった「水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究」（大和総研）を 2 年間期間延長し、本事業終了時まで継続的に世界市場や国際展開に係る情報の収集を行った。

【６】本事業への理解促進、支援の継続・拡大や水素ステーション事業化への産業界の意欲を維持・増大させるために、事業成果全体をまとめて、水素ステーションの設置費用・運営費用が政府などの目標に対してどの程度にまで到達／到達見込み／到達可能性があるのかを、必要に応じてわかりやすく示すことが望まれる。
⇒ 【１】の対応に同じ。

Ⅳ. 目標及び達成状況の詳細

添付:2 「成果詳細」による。

(添付-1)

プロジェクト基本計画

Ｐ１８０１１

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」基本計画

スマートコミュニティ・エネルギーシステム部

１．研究開発の目的・目標・内容

（１）研究開発の目的

①政策的な重要性

「第４次エネルギー基本計画」（２０１４年４月閣議決定）では、エネルギー政策の基本的視点として、「３Ｅ＋Ｓ」、安全性(Safety)を前提とした上で、エネルギーの安全保障（Energy Security)、経済効率性の向上(Economic Efficiency)による低コストなエネルギー供給を実現し、合わせて環境への適合（Environment）を図ることが確認されている。また「水素をエネルギーとして利用する“水素社会”についての包括的な検討を進めるべき時期に差し掛かっている」等の記載が盛り込まれており、多様化する柔軟なエネルギー需要構造の構築に取り組むこととされている。

更に２０１７年１２月には再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議にて「水素基本戦略」が発表され、２０５０年を視野に目指す目標や官民が共有すべき方向性・ビジョンが示された。

経済産業省資源エネルギー庁にて作成された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（２０１６年改訂）に、フェーズ１として運輸部門においての水素の利活用として水素ステーションの整備、ＦＣＶの普及目標値が明記されている。また、未来投資戦略２０１７では水素ステーションの戦略的整備に向けた官民一体の新たな推進体制の構築、コスト低減等に向けた技術開発・実証、新たな規制改革実施計画に基づく水素ステーションの保安管理等に関する規制改革をパッケージで推進しＦＣＶ、ＦＣバス、水素ステーションの普及を加速化すると記載されている。

②我が国の状況

水素・燃料電池戦略ロードマップで示された水素ステーションの２０２０年１６０箇所、２０２５年３２０箇所程度の設置を実現するためには、水素ステーション事業の自立化に向けたさらなるＦＣＶの導入支援と合わせてステーション整備費、運営費、更には水素調達コストの低減に係る技術開発が重要となる。世界に先駆けて商用水素ステーションの設置を進めてきたが、設置当初とは異なる新たな課題が明確になってきた。水素ステーション、ＦＣＶの本格的普及を実現する為に、新たな共通課題を解決することで、水素ステーション事業の自立化に向けた取り組みが求められている。

③世界の取り組み状況

欧・米・中などにおいても、国家レベルで水素ステーション整備およびＦＣＶの導入目標数を設定し、基礎研究から技術開発、実証研究の取り組みを行い、さらに、我が国

と同様にＦＣＶ及び水素ステーションの一般普及を目指している等我が国の国際競争力強化の観点から引き続き戦略的・重点的な取り組みが不可欠である。

④本事業のねらい

２０２５年以降のＦＣＶ及び水素ステーションの本格普及、２０３０年以降の水素ステーションの事業自立化に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、ＦＣＶ及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発を行い、一連の機器及びシステムのコスト低減、ＦＣＶの普及展開及び国際競争力確保に資する。

（２）研究開発の目標

①アウトプット目標

２０２５年の水素ステーションの自立化、２０３０年以降の水素ステーション事業自立化に向け、水素ステーションの整備費、運営費を低減することを目指し、

・国内の規制適正化に向けたデータ取得及び基準案の作成・提案を行う。
・本格普及期を想定した水素ステーションの技術基準案（もしくはガイドライン案）を作成する。（水素ステーションで利用される機器の最適化、次世代水素ステーションの構成の最適化、長寿命化に関する提案など）
・我が国の水素ステーション関連技術の国際競争力強化等の観点から、国際基準調和・国際標準化にかかる提案を行う。

研究開発項目内容は以下の通りとし、具体的な目標は別紙の研究開発計画に示す。

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

新たに規制改革実施計画に挙げられた項目の内、研究開発が必要とされる項目に関する研究開発を行う。

研究開発項目２:「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

２０２５年以降の水素ステーションの本格普及・自立化を見据え、水素ステーションの整備費・運営費低減に寄与する技術を確立する。

研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

ＩＳＯ関連、ＩＥＡ（国際エネルギー機関）、ＨＦＣＶ－ＧＴＲ（水素及び燃料電池に関する世界統一基準）関連など国際調和、海外施策・市場・研究開発動向の把握を行う。

②アウトカム目標

水素ステーション（固定式オフサイトステーション・３００Ｎｍ^3／ｈ）のコスト２０２５年以降

・整備費を２．０億円以下まで低減させる。
・運営費を現行の１／２以下まで低減させる。
上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。

③アウトカム目標達成に向けての取り組み
研究開発項目１、３で得られた規制見直し等の成果を研究開発項目２の技術開発に反映する等積極的に項目間連携を実施することにより、水素ステーションに係るコスト低減等を着実に図る。
更なる規制見直し、運営費低減、装置・構成部品の規格化・標準化、機器設備の長寿命化、高分子材料開発により、低コストステーションの設計が可能となると考えられる。また、入手しやすく、短納期が期待できる汎用材の適用拡大を図ることで、水素ステーション普及につながる裾野拡大に寄与する。更に水素ステーションへの多様化するニーズに対応可能となり、現状の４大首都圏へのステーション整備から地方への展開が可能となり、国が目標とする２０２５年３２０箇所（２０２０年１６０箇所）の整備に向けた自立的な普及が期待できる。

（３）研究開発の内容
上記目標を達成するために、以下の研究開発を実施する。なお、各研究開発項目の具体的内容は、別紙の研究開発計画に示す通りとする。

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」（委託事業）
研究開発項目２:「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」（委託事業、共同研究事業[負担率:1／2]・助成事業[助成率：１／２]）
研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」（委託事業）

２．研究開発の実施方式
（１）研究開発の実施体制
プロジェクトマネージャー（以下ＰＭｇｒという）にＮＥＤＯ　スマートコミュニティ・エネルギーシステム部　大平英二　ストラテジーアーキテクト（燃料電池・水素分野担当）を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。
研究開発項目間連携のため、「全体技術委員会（仮称）」を設置し、それぞれの成果、課題を共有する体制とする。
ＮＥＤＯは公募により研究開発実施者を選定する。
研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

（２）研究開発の運営管理

ＮＥＤＯは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

① 研究開発の進捗把握・管理

ＰＭｇｒは、研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、技術検討委員会等を設置し、外部有識者から技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

また、事業運営の形態（委員会の設置方法等）をスリム化し、意思決定のスピードアップを図るため、事業全体の調整、個別事業に反映させる全体技術委員会をＰＭｇｒが定期的に開催する。

② 技術分野における動向の把握・分析

ＰＭｇｒは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、本プロジェクトにおいて委託事業として実施する。

③ 研究開発テーマの評価

研究開発を効率的に推進するため、研究開発項目（１）～（３）を対象として、ステージゲート方式を適用する。

３．研究開発の実施期間

本研究開発事業の期間は２０１８～２０２３年度の６年間とする。

ただし、この期間内において、各テーマの実施期間は研究開発内容によりＮＥＤＯが設定する。

４．評価に関する事項

ＮＥＤＯは、技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による中間評価を２０２０年度に、事後評価を２０２３年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて前倒しする等、適宜見直すものとする。

５．その他の重要事項

（１）研究開発成果の取扱い

①成果の普及

得られた研究開発の成果は、機構及び実施者ともに普及に努める。

②標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業または国際標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供、標準技術情報（ＴＲ）制度への提案等

を戦略的かつ積極的に行う。

③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第２５条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

④知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「ＮＥＤＯプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

（２）基本計画の見直し

研究開発の内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

（３）根拠法

本研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第１５条第１号二及び第３号に基づき実施する。

６．基本計画の改訂履歴

（１）２０１８年３月　制定

（２）２０１８年４月　担当部を新エネルギー部から次世代電池・水素部に変更

（３）２０１８年８月　（別紙）研究開発項目の内容を一部改訂

（４）２０２０年８月　プロジェクトマネージャーの追加、和暦表記を西暦表記に変更。

（５）２０２３年３月　部署名を次世代電池・水素部からスマートコミュニティ・エネルギーシステム部に変更。研究開発の実施期間を２０２３年度までに延長。あわせて（別紙）研究開発スケジュールを更新。また、プロジェクトマネージャーの略称をＰＭからＰＭｇｒに変更。プロジェクトマネージャーの所属及び役職を更新。

以上

（別紙）研究開発計画

研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

１．研究開発の必要性

前事業において規制適正化のテーマとして挙げられた項目については一定の成果を上げた。その後、規制改革実施計画で挙げられた新たな項目に関し、技術的な裏付けを持った見直しが必要であり、迅速かつ着実に研究開発を進めて行くことが必要である。基礎的・共通的な問題解決を図ることは、企業単独実施に比べ、効率的、かつ公平性をもって推進することが必要である。

また、大学等による学術研究の成果を、実際に製品化するメーカー等と共に活用することで実用的な研究が実施可能である。

２．研究開発の具体的内容

２．１　目標

①最終目標（２０２２年度）

主に汎用材料の適用範囲拡大に関し、高圧水素下での評価試験結果を基に基準案作成を行う。

②中間目標（２０２０年度）

水素ステーションの規制見直し等のために必要となる研究データを取得し、新たな規制見直し検討項目に対する技術基準案、例示基準案を作成する。

２．２　内容

（１）本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発

①無人運転を実施するための研究開発

将来に向けた水素ステーションに関する課題として、例えば省人・無人運転に関する法的課題の整理、省人・無人に必要な対応技術開発項目および安全性向上に関する検討を行う。

②リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発

水素ステーションに関するリスクアセスメントの実施、最適な解析手法に基づく安全性向上に関する技術開発項目検討や代替措置の検討を行う。この結果を研究開発項目２の「水素ステーションの規格化・標準化、モジュール化等に関する研究開発」の技術基準見直しに反映する。

国内外の商用ステーションの現状調査、規格に基づく機器構成の比較を行う。

③その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施

家庭・小規模事業所等での水素充填等を可能にするための法的課題の抽出を行う。

（２）新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

汎用材料の適用性拡大のため、使用圧力・温度を検討し材料の疲労に関するデータ取得、解析を行い、水素特性判断基準を検討する。新たな水素特性判断基準に基づき、汎用材の適用範囲の拡大を目指す。合わせて工事費、メンテナンス費の低減、漏えい

等の安全対策向上を目的として汎用材の溶接特性評価・検討を行う。

また、試験費用の低減及び試験期間短縮のために疲労試験方法に代わる簡易試験方法を確立する。

研究開発項目２:「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

１．研究開発の必要性

世界に先駆け商用水素ステーションの設置を進めてきたことで、整備当初とは異なる新たな課題が明確になりつつある。また２０２５年の自立的展開可能なインフラ実現のためには、更なる整備費低減に加え、運営費低減が必要である。

２．研究開発の具体的内容

２．１　目標

①最終目標（２０２３年度）

水素ステーションを構成する機器、部品等の実用化見通し及びコスト低減効果を検証し、水素ステーション設備コスト低減の目処付けを行う。

②中間目標（２０２０年度）

水素ステーションコスト・性能目標を満足する機器・システム等の実用化技術開発を実施し、水素ステーション運営費・整備費低減のための規格案、技術基準案等を作成する。

２．２　内容

（１）水素ステーションの規格化・標準化、モジュール化等に関する研究開発

標準的な仕様条件などの規格化、標準化を検討する。構成機器検討から得られる成果を具体的なシステムに落とし込みモジュール化、パッケージ化および規格化の検討を行う。

（２）運営費低減のための技術開発

運営費低減のために、構成機器の寿命延長の安全性評価方法の確立と業界技術基準案の策定を行う。特に複合容器についてはＩＳＯ　ＴＣ１９７　ＷＧ１５（複合容器分科会）への容器寿命検討に関する提案が出来るようデータ取得、理論構築を行う。

（３）高圧対応高分子技術開発

ヒートサイクル・圧力サイクルに対する信頼性向上として、長寿命高圧水素ホースの開発、長寿命高圧水素継手・シール部材の開発を実施する。

（４）次世代向け水素ステーションに関する研究開発

本格普及期に必要と思われる大量かつ効率的な水素輸送やそれに伴う次世代向け水素ステーションの法的課題の抽出、技術課題の検討を実施する。

さらに普及期を見据えた充填対応技術開発、省エネルギー等に資する機器開発を実施する。

研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

１．研究開発の必要性

水素ステーション、ＦＣＶの世界市場を日本主導で開拓・拡大していくため、以下の取組を実施することが必要である。

水素ステーション関連技術のＩＳＯ等の標準化へ向けて積極的に情報収集と情報発信を行う。

ＦＣＶの国際技術基準について、必要なデータを揃え日本主導で議論を進める。

２．研究開発の具体的内容

（１）目標

①最終目標（２０２２年度）

水素ステーション関連技術の国際標準化、FCVにおける国内規制の適正化・国際基準調和・国際標準化等に資するデータ取得を行う。

ＩＥＡ等海外の政策・市場・研究開発動向に係る情報を収集し、国内に発信する。

（２）内容

ＩＳＯ関連、ＨＦＣＶ－ＧＴＲ関連、国際会議関連の下記活動を行う。

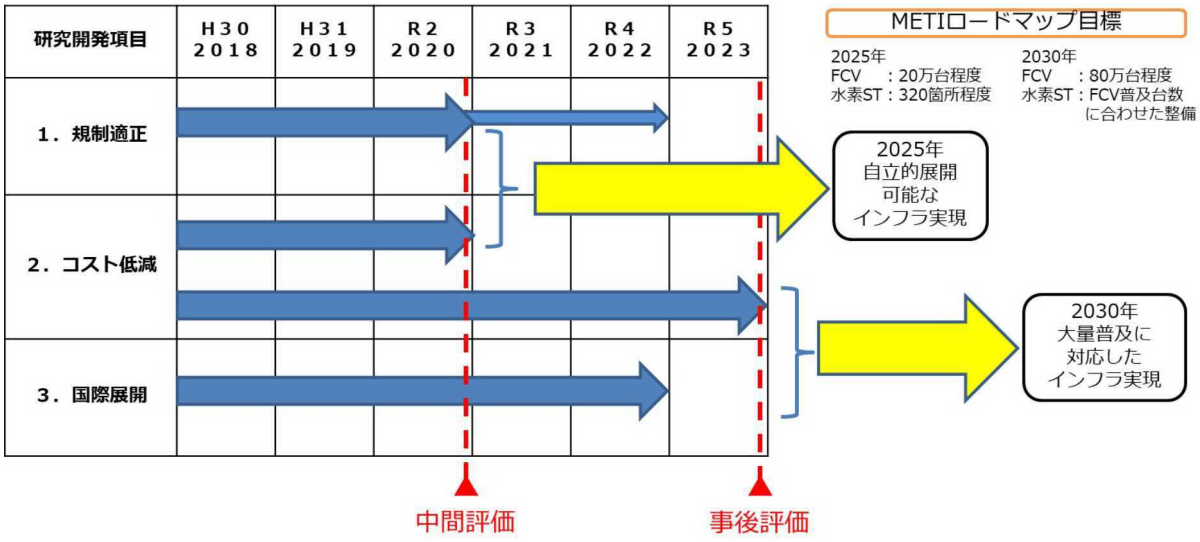
①ＩＳＯ等の標準化、国際的に調和、連携のための活動を実施する。

②ＨＦＣＶ－ＧＴＲ（水素・燃料電池自動車の世界統一基準）のＰｈａｓｅ２の技術課題対し、必要に応じ人的派遣、議論への参加を行い、国内基準との整合を図る検討を実施する。

③海外の政策・市場・研究開発動向を把握し、国内への適切な情報発信、及び日本の政策や技術開発への影響分析等を行う。

（別紙）

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」研究開発スケジュール



(添付-2)

各研究開発項目の詳細

研究成果詳細目次

（１）国内規制適正化に関わる技術開発

1-(1)　本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発・・・・・・・・・・・・・・・成果詳細-1

1-(2)-①　新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・成果詳細-26

1-(2)-③　中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発・・・・・・・・・・・・・成果詳細-54

（２）水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発

2-(2)-①　水素ステーション用タイプ２蓄圧器の供用中検査手法の研究開発・・・・・・・・・・・成果詳細-80

2-(2)-②　複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発・・・・・・・・・・成果詳細-99

2-(3)-①　長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発・・・・成果詳細-129

2-(3)-②　水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する
研究開発・・・成果詳細-173

2-(4)-①　本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発・・・・・・・・・・・・成果詳細-194

2-(4)-⑤　高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発・・・・・・・・成果詳細-218

2-(4)-⑥　新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発
・・・成果詳細-233

2-(4)-⑦　半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発・・・・・・・・・・・・・・・成果詳細-257

2-(4)-⑧　水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発・・・・・・・・・・・成果詳細-284

2-(4)-⑨　HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発
・・・成果詳細-303

（３）国際展開、国際標準化等に関する研究開発

3-①　水素ステーション等機器のＩＳＯ／ＴＣ１９７国際標準化の推進と水素品質規格
のための研究開発・・成果詳細-311

3-②　燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発・・・・・・・・・・・・成果詳細-331

3-③　水素社会に係る国際関連機器等研究・政策動向に関する調査研究・・・・・・・・・・・成果詳細-356

3-④ 水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・成果詳細-369

（1-(1)）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／国内規制適正化に関わる技術開発 ／本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発」

委託：一般財団法人石油エネルギー技術センター

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

・一般則7条の4（遠隔監視セルフ水素スタンド）制定に資する技術基準案の策定及び、制定された一般則7条の4第1項（郊外型）の技術基準の見直し案の策定
・一般則7条の3第2項（都市型）の安全設備に関する技術基準見直し案の策定及び、第1項（郊外型）、第2項（都市型）の技術基準の整合性を考慮した技術基準の見直し案の策定
・圧縮水素スタンドにおける保安監督者兼任の許容（一般則63条と64条の運用及び解釈について（内規））制定に資する技術基準案の策定
・出荷設備を有する圧縮水素スタンドにおける保安統括者等の選任の緩和に資する関係省令等の技術基準見直し案の策定
・蓄圧器等の常用圧力上限の見直しに資する関係省令等の技術基準見直し案の策定
・一般則7条の3第2項（都市型）における障壁の高さ・構造に係る技術基準の見直し案の策定

●背景/研究内容・目的

・2017年に閣議決定された「規制改革実施計画」において、燃料電池自動車、水素ステーション関連の規制見直し案件が示され、その後も都度、見直し案件が追加された。
・同じく2017年に再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議にて、2050年を視野に入れた「水素基本戦略」が策定された。
・このような背景のもと、水素ステーションの本格普及、自立化を加速するため、事業者要望も踏まえ規制見直し案件のうち取り組むべき課題を選定し、本研究開発にて実施した。
・法技術的な課題、技術的な課題を検討し、技術基準の制定、改定を目的に、省令案、例示基準案、自主基準案を作成した。

●研究目標

実施項目	目標
①無人運転を実施するための研究開発	・遠隔監視セルフ水素スタンドの技術基準案及び修正案作成
②リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	・安全設備に関する技術基準見直し案作成 ・1項/2項の技術基準の整合化
③水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	・保安監督者による保安管理に関する技術基準見直し案の作成
④蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	・常用圧力上限値見直しに関する技術基準見直し案の作成
⑤その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施	・家庭/小規模事業所での水素充塡、法的課題の明確化 ・保安監督者兼任技術基準案の作成 ・障壁の技術基準見直し案の作成 ・自家消費水素充塡設備、予備検討

●実施体制及び分担等

（共同実施先、実施項目）

NEDO ― 石油エネルギー技術センター ― 横浜国立大学①-④
　　　　　　　　　　　　　　　　　 ― JAXA④

●これまでの実施内容／研究成果

①無人運転を実施するための研究開発
・法技術的な課題、技術的な課題の検討　・遠隔監視水素スタンドのための安全対策等の立案/必要要件の検討
→一般則7条の4の制定に資する技術基準案（制定済み）、関連自主基準案の作成及び制定後の第1項の修正案の作成

②リスクアセスメント再実施に基づく設備構成に関する研究開発
・定量性/汎用性の高いリスクアセスメント手法の構築　・リスク算定実施と合理的な安全対策の検討
→遮断弁、過流防止弁、圧力リリーフ弁の合理化による技術基準見直し案の作成及び第1項と第2項の不整合見直し案の作成

③水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発
・設備モデルと作業手順に関するリスクアセスメントの実施　・保安監督者による保安管理体制の検討
→追加安全対策により、保安監督者にて運営できる技術基準の見直し案、関連自主基準案の作成

④蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究
・82MPa以上の圧力での水素漏洩時の拡散濃度、爆風圧、水素火炎の火炎長と輻射熱のデータ取得/解析
・敷地境界距離を中心とした技術基準の改定案の検討
→常用圧力上限値変更に伴う省令等の改正案を作成

⑤その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施
a)家庭・小規模事業所での水素充塡のための法的課題抽出
・家庭用水素充塡設備に関するモデルの調査　・保安法、ガス事業法のもとでの法的課題の明確化
b)保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための法的課題の明確化
・兼任ステーションのモデル化とリスクアセスメントの実施、必要要件の検討
→兼任のための自主基準案を作成（基本通達に引用済み）
c)障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討
・隣地条件の違いによる障壁高さの検討　・敷地境界距離に対応した障壁構造への影響因子の検討
→障壁高さ：自主基準案の作成　障壁構造：敷地境界まで4m以上の距離を有する場合の構造代替措置案（例示基準）の作成
d)自家消費型の水素充塡設備に関する予備検討
・水素充塡設備の室内設置に係る基準の整理及び自家消費、HPIT向け規制見直しのための課題抽出

●今後の課題

・家庭用/小規模事業所における水素充塡の可能化、自家消費型の水素充塡設備における技術基準の見直しは、大規模水素サプライチェーン構築のための重要な課題であり、引き続き検討を進めることが望まれる。

●実用化・事業化の見通し

・遠隔監視セルフ水素ステーション及び保安監督者が兼務する水素ステーションに関しては、それぞれ、関連省令が施行され、自主基準であるJPEC-S、JPEC-TDも制定され、既に運用が始まっている。今後は、それぞれが実績を積むことで、保安監督者が兼任する遠隔監視セルフ水素ステーションが実現される見通しである。
・その他の技術基準見直し案についても、今後、法制局にて、順次制定されていく予定であり、自主基準は、省令等の改定に合わせて、制定していく予定である。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	一般則第7条の4関連の技術基準案	◎
②	安全設備合理化に係る技術基準見直し案及び1項、2項の整合見直し技術基準案	○
③	出荷設備を有する水素スタンドの技術基準見直し案	○
④	常用圧力上限値見直しに伴う技術基準見直し案	○
⑤	・保安法、ガス事業法のもとでの法的課題の明確化 ・保安監督者兼任の技術基準案 ・障壁（高さ、構造）に係る技術基準見直し案 ・水素充填設備の室内設置基準作成に係る検討項目明確化	○ ◎ ○ ○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
０件	８件	２７件	０件

成果詳細-1

事業番号：1-(1)

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国内規制適正に関わる技術開発／本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発」

実施者：一般財団法人石油エネルギー技術センター
共同実施者：　　国立大学法人横浜国立大学
国立研究開発法人宇宙研究開発機構

１．研究開発概要

2016 年 3 月に水素・燃料電池戦略協議会が「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を改訂し、これまでの取組の進展を踏まえて水素ステーションに係る自立化に向けた道筋や定量目標等が改めて示された。その実現に向け、2017 年 6 月に規制改革実施計画が閣議決定され、燃料電池自動車、水素ステーション関連の規制見直し案件が示され、その後も都度、見直し案件が追加された。また、2017 年 12 月には再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議により、2050 年を視野に入れた「水素基本戦略」が策定された。この基本戦略において、FCV をはじめとするモビリティに向けた水素ステーションの数値目標が示され、日本が世界の水素社会実現を先駆ける姿勢が明確に示された。そういった中、これまでの延長線上の検討では、「水素基本戦略」の数値目標の達成、建設コスト低減を通じた自律的な水素販売ビジネスの展開は困難であり、新たなイノベーションが不可欠と考えられた。そこで、規制改革実施計画の案件を踏まえ、以下の 5 項目に対する研究開発を実施した。

（１）無人運転を実施するための研究開発
（２）リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発
（３）水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発
（４） 蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発
（５） その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施
　① 家庭・小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出
　② 保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発
　③ 障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討
　④ 自家消費型の水素充填設備に関する予備検討

２．研究開発目標

表１ 研究開発目標

実施項目	最終目標
（１）無人運転を実施するための研究開発	・水素ステーション無人運転のための技術基準案の策定 ・一般則 7 条の 4 第 1 項ステーションの見直しに資する技術基準案の策定
（２）リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	・多様化する水素ステーションの形態に展開可能な汎用性の高いリスクアセスメント手法の構築 ・リスクアセスメントの再実施に基づく安全設備の合理化に関する技術基準案の策定 ・一般則 7 条の 3 の見直し（1 項、2 項間の不整合等）に資する技術基準案の策定
（３）水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	・水素出荷設備が、一般則 7 条の 3 で対象としている設備と同等の安全性を有し､同等の安全な管理体制有するための技術基準案の策定
（４）蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	･82MPaより高い圧力での水素漏洩時の拡散濃度、爆風圧、水素火炎の輻射熱のデータの獲得及びそれに基づく敷地境界距離を中心とする技術基準改定案の策定
（５）その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施 ①家庭･小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出	・家庭/小規模事業所等での水素充填を可能にするための法的課題の明確化
②保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発	・保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための技術基準案の策定
③障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討	・障壁に係る技術基準の見直しに資する技術基準案の策定
④自家消費型の水素充填設備に関する予備検討	・水素充填設備の屋内設置に係る技術基準作成に向けた検討項目の明確化

２．２　設定した目標の意義・理由、妥当性について

（１）無人運転を実施するための研究開発

現行の水素ステーションの一般則7条の3が有人運転を前提に制定されていることから、今回、水素ステーションの無人運転を実現するために必要な技術基準案の策定を最終目標とした。さらに、2020年度に制定された無人運転ステーションの技術基準のうち、郊外型ステーションの技術基準一般則7条の4第1項に対して、有人の都市型水素ステーションの技術基準一般

則7条の3第2項から必要以上に準用されている可能性があることからこれらについて見直しを行い、見直した省令案を作成することとした。

（２）リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発

水素ステーションの設備構成を見直すためのリスクアセスメントの再実施においては、最新のリスクアセスメントの知見を活かし、定量性と汎用性の高いリスクアセスメント手法を構築して実施する必要がある。そして、このリスクアセスメント再実施の結果から、定量的に説明可能な安全対策の合理化案を提案し、技術基準の改定案を作成することとした。

また、本テーマは、規制改革実施計画の「No.38 水素スタンド設備に係る技術基準の見直し」に関連して実施しており、2021 年度より技術基準自体の見直しも行った。具体的には、一般則 7 条の 3 第 1 項と第 2 項が、その制定時期や制定時の環境の違いにより、同じ項目について異なる技術基準で運用されているものがあり、水素ステーションの整備が煩雑になっている。そこで、これらの整合を図り、技術基準の見直しを行うこととした。

（３）水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発

一般的な水素出荷設備は一般則 6 条の保安統括者等から成る保安体制が不可欠であるが、水素ステーションに併設する水素出荷設備が、一般則 7 条の 3 が対象とする水素ステーション設備と同等に安全であれば、水素ステーションの一部として保安監督者一名による保安管理が可能になると考えられる。その必要要件について検討を実施し、設備と管理体制に関する技術基準案を作成することとした。

（４）蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発

常用圧力の上限値を引き上げにより、敷地境界距離に影響与える水素漏えい時の拡散濃度、爆風圧や輻射熱等に関し、常用圧力（82MPa）以上での実験を行い、常用圧力上限引き上げに伴うリスクの検討を実施し、その結果に基づき技術基準の見直し案を作成することとした。

（５）その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施

①家庭・小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出

将来の水素エネルギー普及を前提に、家庭・小規模事業所等でも水素充填を可能にするための調査として、法的な課題の抽出を行うこととした。

②保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発

現行、水素ステーションの保安を監督するものとして、各水素ステーションでの選任が求められている。保安監督者に関して、複数の水素ステーションの兼任を可能にすることで、運営費削減等により水素ステーション普及が推進される。保安監督者兼任の必要要件を検討し、兼任のための技術基準案を作成することとした。

③障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討

現行、水素ステーションにおける障壁については、隣地条件や障壁構造への影響因子に依らず、一律に、高さや配置等の設置条件やその構造が規定されている。そこで、隣地条件や影響因子を勘案した技術基準の見直しにつなげる検討を実施することとした。

④自家消費型の水素充填設備に関する予備検討

自家消費型の充填設備として代表的なHPIT（FCフォークリフト等のFC産業用車両、Hydrogen powered industrial trucks）用充填設備は、現行、一般則第7条の3で建設・運用されている。水素エネルギー普及を前提とし、自家消費型の水素充填設備に対応した技術基準や規制の見直しに関する予備検討を実施することとした。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度（下線が最終目標と達成度）

（１）　無人運転を実施するための研究開発

水素ステーションの無人運転を実現するために必要な技術基準案を策定するために、無人運転実施に伴う技術的課題の検討と安全対策の立案を行った。その検討結果をもとに、省令案、自主基準案を作成した。経済産業省にて、遠隔監視型水素ステーションに係る省令7条の4が制定され、関連する製造細目告示、内規及び例示基準が改定された。さらに、制定された7条の4第1項に関する7条の3第2項からの準用に関する見直しを行い、見直した省令案を作成した。

① 水素ステーション無人運転のための技術基準案の策定（達成度◎）

2020 年（東京オリンピック開催予定）に向けて、目指すべき遠隔監視型水素ステーションを明確にし（図１）、必要要件として、従業員が不在でも十分な監視体制の確保等により保安を維持する対策（図２）、顧客によるセルフ充填を可能にするための安全対策（図３）を整理した。

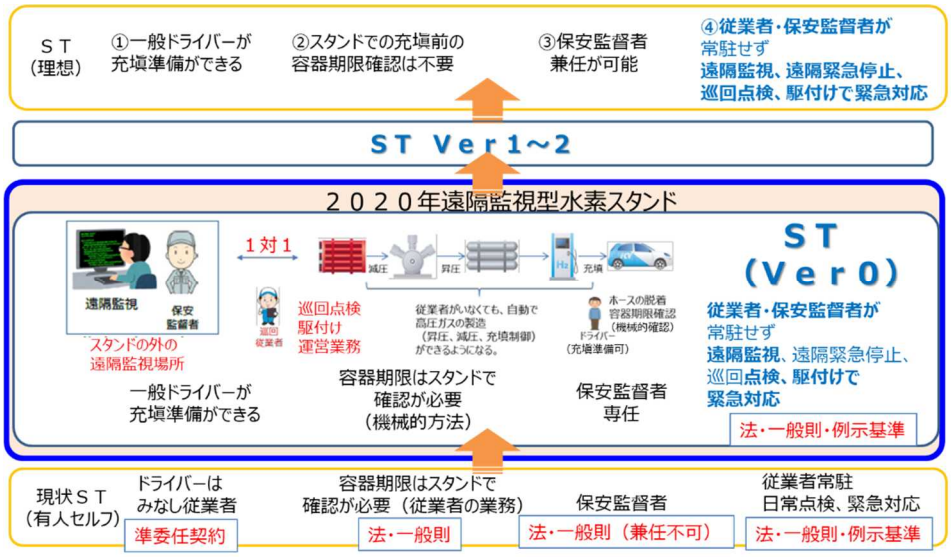


図１　遠隔監視型水素ステーション実現に向けたロードマップと 2020 年の目指すべき姿

	ハード対策	ソフト対策
平常時	・遠隔監視場所での**スタンドの場景監視措置** ・設備の**運転状況監視措置**	・保安監督者、遠隔監視員、巡回点検員、駆けつけ員による保安体制の確立
緊急時	・遠隔監視場所での**警報、緊急停止措置** ・インターロック、停電・サイバー対策	・同時発災も含めた、緊急時の保安体制、駆けつけ体制の確立

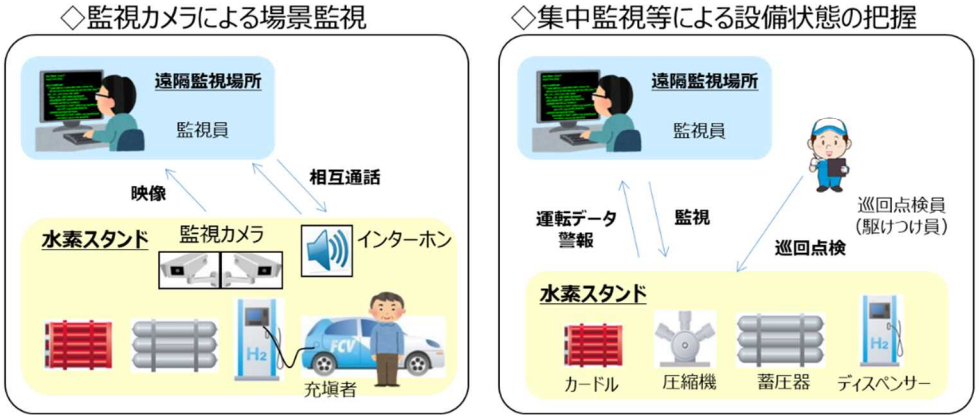


図２　従業員が不在でも十分な監視体制の確保等により保安を維持する対策

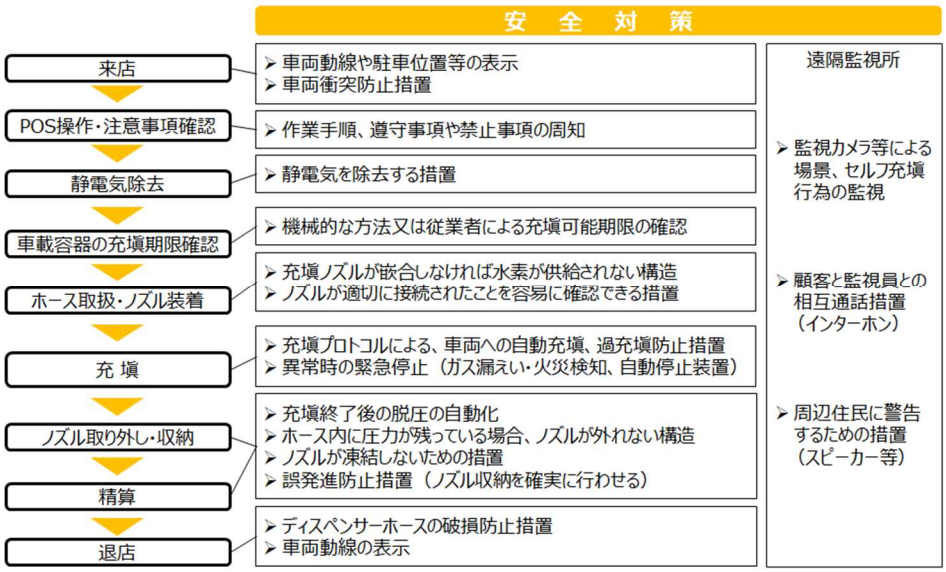


図３　顧客によるセルフ充填を可能にするための安全対策

これらをもとに、省令として、一般則７条の４の技術基準案及び関連内規並びに関連例示基準案、自主基準として、遠隔監視セルフ水素スタンドの安全技術基準案、遠隔監視セルフ水素スタンドの危害予防規程の指針案、遠隔監視セルフ水素スタンドの保安教育計画の指針案、遠隔監視セルフ水素スタンドのガイドライン案を作成した。これらは、現在、全て制定・施行されている（表２）。

表２　制定された省令、自主基準

制定された技術基準	施行時期
一般高圧ガス保安規則第７条の４（顧客に自ら圧縮水素の充填に係る行為をさせる圧縮水素スタンドに係る技術以上の基準）　新設	2020年８月７日
高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）　改定	2020年８月７日
製造施設の位置、構造及び設備並びに製造の方法等に関する技術基準の細目を定める告示　改定	2020年８月７日
一般高圧ガス保安規則関係例示基準　改定	2021年３月30日
遠隔監視セルフ水素スタンドの安全技術基準 JPEC-S 0011(2021)	2021年７月21日
遠隔監視セルフ水素スタンドの危害予防規程の指針 JPEC-TD 0009 (2021)	2021年７月21日
遠隔監視セルフ水素スタンドの保安教育計画の指針 JPEC-TD 0010 (2021)	2021年７月21日
遠隔監視セルフ水素スタンドのガイドライン JPEC-TD 0011 (2021)	2021年７月21日

② 一般則７条の４第１項ステーションの見直しに資する技術基準案の策定（達成度○）

一般則７条の４は、安全確保のための措置としてリスク低減に有効な多数の保安措置が施されている一般則７条の３第２項に定める都市型水素ステーションを前提に遠隔監視を行う際の安全検証が行われたために、一般則７条の４第１項に定める離隔距離等で安全を確保している郊外型ステーションについても、７条の３第２項の技術基準から多くの条項（22項目）が準用された。この準用された22項目について、一件ずつ詳細な検討を行い、準用の見直し検討を行い、8項目について見直しの必要性を示し（表３）、具体的な修正文案の検討を含め省令等の見直し案を作成した。

表３　見直すべき８項目と見直し方針

NO	準用項目 7条の3第2項	技術基準概要と見直し案（見直し理由）
2	第10号	**蓄圧器**から圧縮水素を受け入れる配管への**圧力リリーフ弁の設置**
		準用の削除（7条の3第1項とSTの状況変わらない、無人になることでの必要性なし）
5	第11号	**上記の圧力リリーフ弁のための放出管の設置**
		準用項目内容の修正（安全弁に関する記載もあるので、圧力リリーフ弁に関連する内容のみを削除）
7	第12号	蓄圧器出口配管への圧縮水素の**過流防止措置の設置**
		準用の削除（7条の3第1項とSTの状況変わらない、無人になることでの必要性なし） **注）成果報告書に、影響度対策としの過流防止弁を除くことは、安全確保の観点から課題が残ることを付記**
8	第13号	蓄圧器及びその出口配管遮断弁の**一フレーム内側への設置**
		準用の削除（7条の3第1項とSTの状況変わらない、無人になることでの必要性なし）
10	第15号	**移動式水素ステーション**の自動温度上昇防止措置
		準用の削除（7条の3第1項とSTの状況変わらない、移動式水素STの設置＝有人ST） **注）1項、2項の防消火設備見直しの代替措置として検討中**
16	第21号	自動停止および自動散水装置不調の際の**手動装置の設置**
		準用項目内容の修正（起動装置の設置場所に**「遠隔監視所」を追加**）
17	第22号	自動停止に伴う圧縮機停止及び遮断弁の**作動状況確認**
		準用項目内容の修正（**「遠隔監視所で**圧縮機の作動状況、遮断弁の開閉状況、閉止状態の異常が**確認できるようにする」**ことを条文に追加する）
20	第33号ヘ	容器置場の**車両衝突防止措置**
		1項、2項いずれからも関連条項を削除し、自主基準に具体的対策を記載（容器置場の設定位置から車両衝突の可能性は低い。それでも、事業者が、自主保安として、容器置場への車両衝突防止措置を実施してきた実情を踏まえ、一律に規制するのではなく、自主基準により対応する）

（２）リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発

水素ステーションの設備構成の見直しを行うために、既設の水素ステーションの設備仕様を基にしたモデルを構築し、定量的なリスクアセスメント手法を用い、リスクアセスメントの再実施を行った。その結果、現状の水素ステーションの安全対策は、必要十分であることが示された。また、安全対策の合理化を検討し、技術基準等の見直しを検討した。また、水素ステーションの省令7条の3において、1項ステーションと2項ステーションの技術基準の不整合について見直しを行い、見直した省令案を作成した。

① 多様化する水素ステーションの形態に展開可能な汎用性の高いリスクアセスメント手法の構築（達成度○）

リスクアセスメントの再実施のために、水素ステーションに適用するリスクアセスメント手法の構築を行った。リスクアセスメント手法の構築の考え方を図４に示す。また、網羅的なリスクアセスメントをすることが不可欠であることから、表４に示すようにリスクアセスメント手法の使い分けを実施した。このリスクアセスメント手法により、7条の3第2項の技術基準で建設された水素ステーションのリスクアセスメントの再実施を行い、新たに追加すべき安全対策はないことことを確認した。

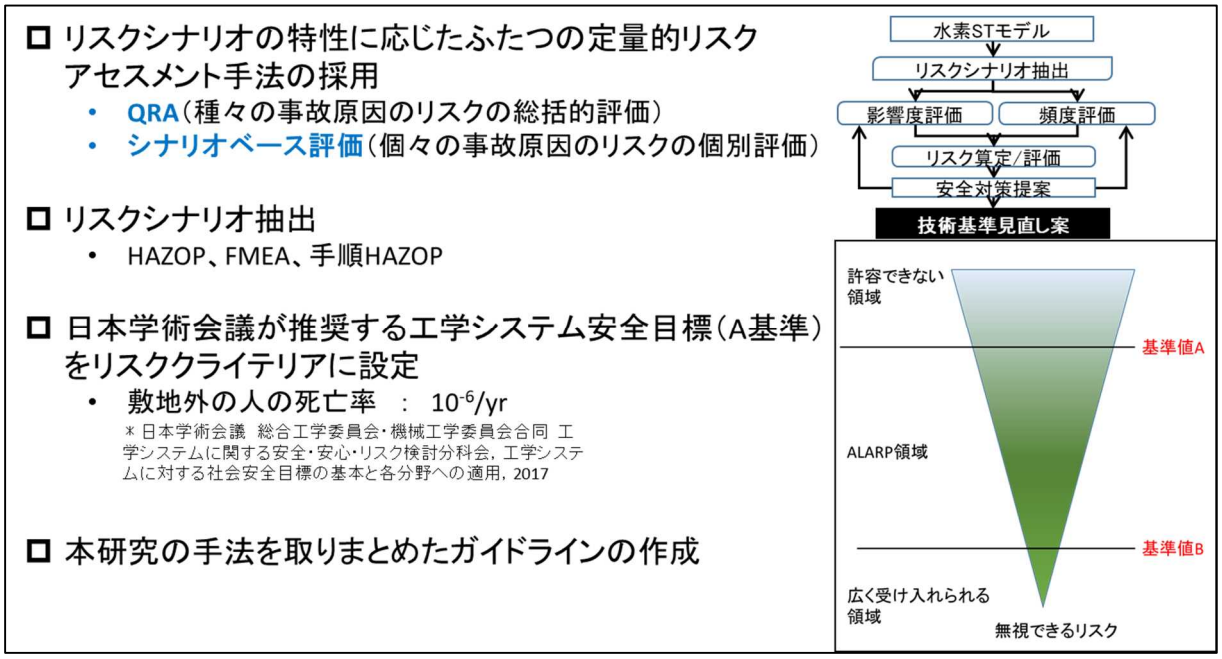


図４　リスクアセスメント手法構築の考え方

表４　網羅的なリスクアセスメント

	事故のトリガーによるリスクシナリオの分類	リスク分析手法			評価精度			対象となるリスクシナリオ
		リスクシナリオ特定	頻度分析	影響度分析	頻度評価	影響度評価	リスク評価	
内的要因	Ⅰ 内的要因に起因する事故 ・機器故障 ・機器故障の連鎖 ・設計不良、施工不良 ・ヒューマンエラー ・その他	HAZOP 作業HAZOP FMEA	漏洩頻度DB パーツカウント （狭義のQRA(TNO式)）	数値解析	○ （可能）	○ （可能）	○ （可能）	漏洩頻度データにより頻度の定量化が可能であり、定量的な評価が可能なリスク
内的要因	Ⅰa 機器故障の連鎖 ・遮断弁誤作動→圧力上昇→漏洩 ・	FMEA	機器故障率DB ETA	数値解析	○ （可能）	○ （可能）	○ （可能）	故障率データによりリスクの定量化が精度よく可能であり、定量的な評価が可能なリスク
内的要因	Ⅰb ヒューマンエラー ・誤操作 ・その他	作業HAZOP	ヒューマンエラー頻度DB ETA	数値解析	△ （精度 低）	○ （可能）	△ （精度 低）	頻度データの不確かさが大きいが、リスクを相対評価可能なリスク
外的要因	Ⅱ 外的要因に起因する事故 ・近隣火災 ・内部火災 ・地震（外力の作用） ・車両誤発進 ・車両飛込み 等	HAZOP What-if	類似事象の頻度データ ETA	数値解析	△ （精度 低）	○ （可能）	△ （精度 低）	頻度データの不確かさが大きいが、リスクを相対評価可能なリスク

[Iの最上段のみ] QRAを適用 （種々の事故原因のリスクの総括的評価）

[その他の3段] シナリオベース評価を適用 （個々の事故原因のリスクの個別評価）

② リスクアセスメントの再実施に基づく安全設備の合理化に関する技術基準案の策定（達成度○）

構築したリスクアセスメント手法を用いて、現状施されている安全対策について合理化できないかを検討した。遮断弁・過流防止の配置の合理化、過流防止弁のオリフィス等への代替、圧力リリーフ弁の不要化について、合理化や変更を行ってもリスクに問題ないことがわかり、表５に示す合理化案を反映した技術基準の見直し案（表５）を作成した。

表５　安全対策の合理化と技術基準の見直し案

項目	対象基準	要点	見直し提案内容
遮断弁二重化に関する配置の合理化	例示基準 19の2	緊急遮断装置のうち一つは蓄圧器から圧縮水素を送り出す集合配管に設置することが可能	例示基準に当該配置図を追加記載
過流防止弁の配置の合理化	例示基準 59の5	ディスペンサーに供給する配管に過流防止弁を設置することが可能（蓄圧器フレーム内）	左記を例示基準に追記
過流防止弁代替安全対策（オリフィス）	例示基準 59の5	過流防止弁の代替としてディスペンサー出口の最大流量（ホース破断時）を60g/sec以下となる措置（オリフィス等）を可能	左記を例示基準に追記
圧力リリーフ弁設置条件の見直し	一般則 7条の3 2項10号	蓄圧器配管の安全装置が揚程式バネ式安全弁で吹き出し量が一定以下の場合、圧力リリーフ弁は不要とする	安全弁に仕様条件を提示し、安全弁の放出口が上向きの場合とする

③ 一般則7条の3の見直し（1項、2項間の不整合等）に資する技術基準案の策定（達成度○）

（２）の研究は、2017年度の規制改革実施計画のNo.38の『水素スタンド設備に係る技術基準の見直し』に紐付くものである。リスクセスアセスメントの再実施に基づく設備構成の見直しとともに、現行の省令や例示基準における安全設備等に関わる技術基準の見直しについても、この研究の中で実施した。具体的には、一般則7条の3第2項のステーションで認められている代替措置が1項ステーションで認められていない事例などについて、1項に対しても代替措置として組み入れることを可能にすべく、技術基準の改正に資する合理的なロジック構築の技術的な検討を実施した。また、1項と2項とで、一般則6条からの準用項目に差異があるなどの不整合についても、技術基準の改正に資する合理的なロジック構築の技術的な検討を実施した。これらをまとめ（表６）、具体的な修正文案の検討を含め省令等の見直し案を作成した。

表６　7条の3第1項と第2項の不整合見直しのまとめ

貯槽間距離・基礎	
第1項	・第６条第１項の技術基準を準用 ・対象となる貯槽（貯蔵能力300m3 or 3000kg以上のもの）
第2項	・第1項とほぼ同じ記載 ・対象となる貯槽（液化水素貯槽以外にあっては、貯蔵能力300m3 or 3000kg以上のもの）
見直し案：関連省令を、より厳しい第２項の技術基準に統一する	
防消火設備	
第1項	・第６条第１項の防消火設備の技術基準を準用
第2項	・圧縮水素ステーションに即した技術基準 ・防火設備：蓄圧器の温度異常上昇検知、製造設備自動停止、散水装置自動起動
見直し案：	・関連省令を、具体的な防火対策を記している第２項の技術基準に統一する ・例示基準59の3．の第1項の鋼製蓄圧器への適用、屋根・覆いの位置づけ及び散水のための水源（上水の使用の可否）と水量を明確化する
容器置場	
第1項	・第６条第１項の容器置場関連の技術基準を準用
第2項	・圧縮水素ステーションに即した技術基準
見直し案：	圧縮水素ステーションに即した技術基準とし、第１項、第２項を可能な限り統一する ・1項ST；水素ステーションで使用しない高圧ガスに関する条項を削除する 直射日光を遮る措置に、代替措置として圧力リリーフ弁を追加する ・2項ST；圧縮水素容器の容器置場に関し、2階建可能とする

（３）水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発

一般則7条の3のもと、水素出荷設備を併設する水素ステーションの保安管理を、保安監督者一名による保安体制で可能とするために、水素出荷設備を有する水素ステーションモデルを対象としたリスクアセスメントを実施し、必要な安全対策と管理体制の検討を行った。その検討結果に基づき、技術基準案（省令案、例示基準案、自主基準案）を作成した。

①水素出荷設備が、一般則 7 条の 3 で対象としている設備と同等の安全性を有し、同等の安全な管理体制有するための技術基準案の策定（達成度○）

安全性検討のために、設備のモデル（図５、図６）と出荷作業のモデル（図７）を作成し、そのモデルに対して作業 HAZOP（表７）を実施し、事故シナリオを抽出した。この事故シナリオに対し、現状の安全対策及び追加の安全対策（表８）を検討し、設備と作業の安全性を確認した。そのうえで、水素出荷設備を有する水素スタンドの保安体制を検討し、保安監督者１名で保安管理するために必要な技術基準案を作成した（表９）。

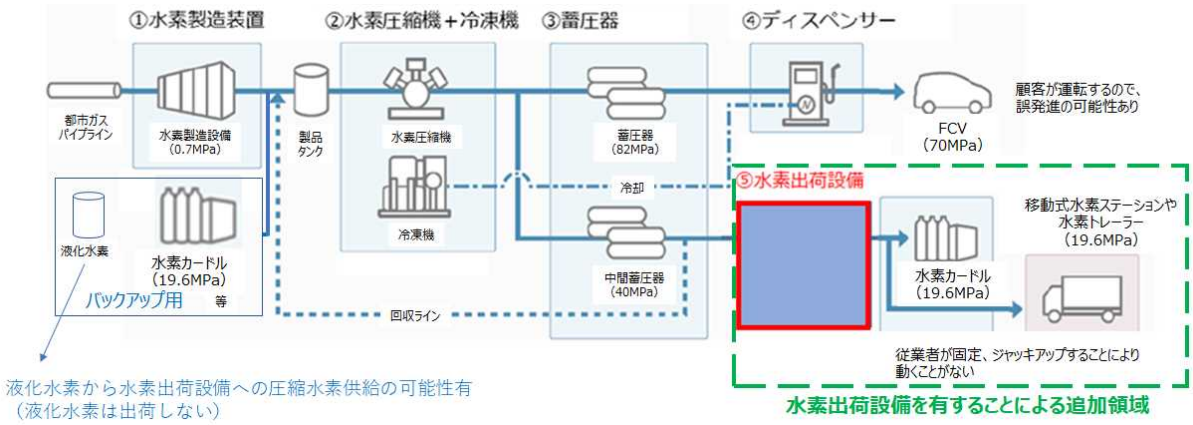


図５　水素出荷設備を有する水素ステーションの構成例

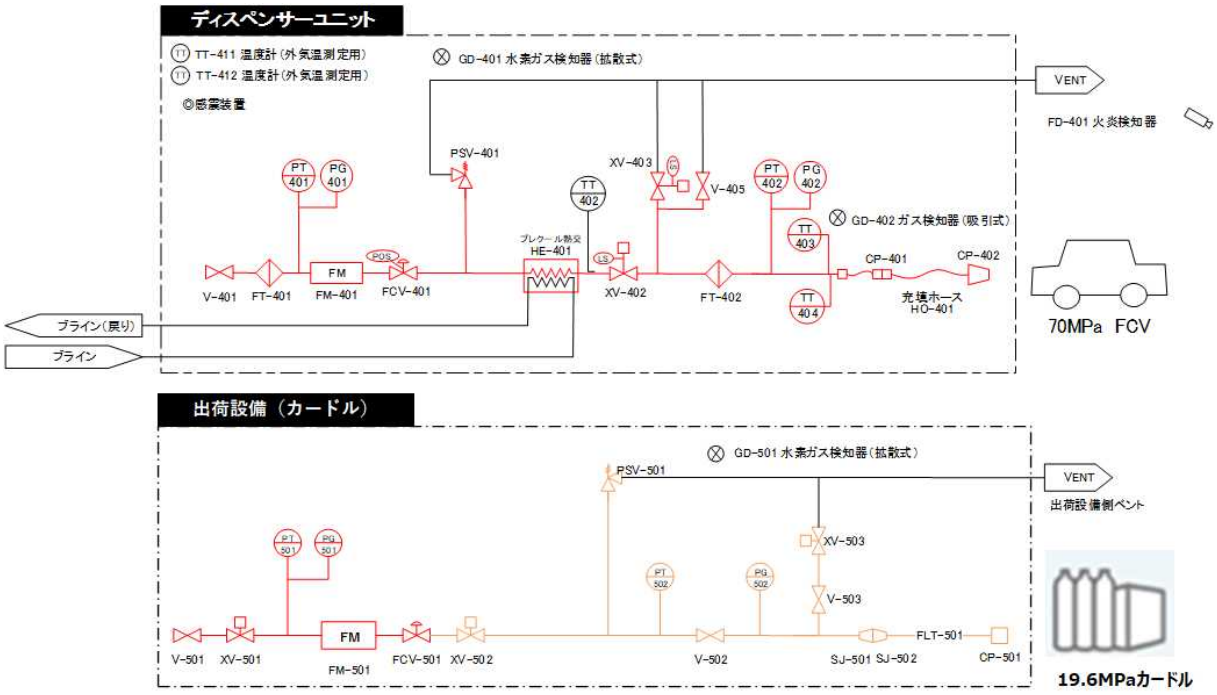


図６　ディスペンサーユニットと出荷設備の設備構成の比較

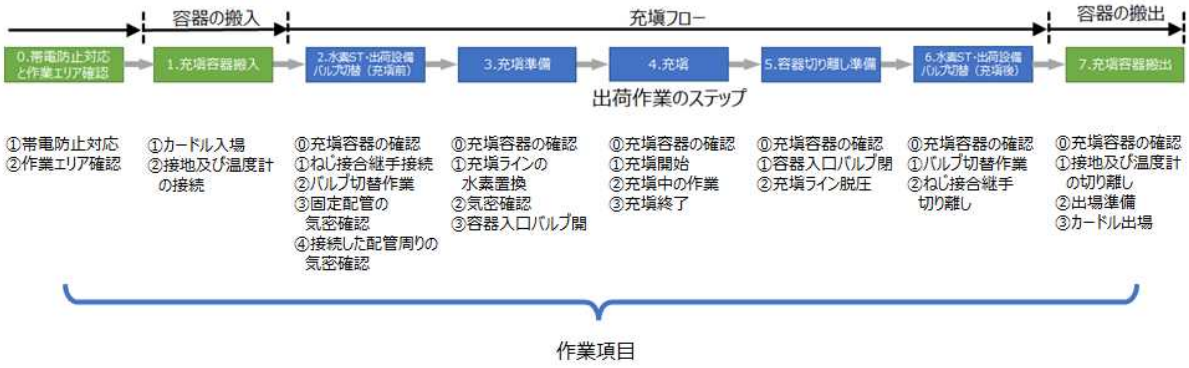


図７　水素出荷作業手順の整理

表７　作業 HAZOP 例

＜（例）充填容器搬入＞　　前提：安全対策がない状態

作業工程	作業手順	ガイドワード	偏差	原因	影響進展	判定	対策
カードル入場	⑥カードルを載せたステージを充填位置に移動する	忘れ	移動せず	移動せず	充填ができない→出荷できない	注意	
		不十分	移動不十分	充填位置まで移動せず	ロックできず→ステージが移動→ステージ損傷	注意	
					ロックできず→ステージが移動→従業者にぶつかって怪我	事故（怪我）	教育、マニュアルなど
		過大	過大な力	移動時に過大な力を加える	ステージが移動→充填位置を越える→ステージ損傷	注意	
					ステージが移動→充填位置を越える→カードルが転倒・損傷	事故（機器損傷）	カードルの固定など
					ステージが移動→充填位置を越える→カードルが転倒→出荷設備損傷	事故（機器損傷）	カードルの固定など
		各作業手順に対し、11種のガイドワードを対応させ、偏差、原因、影響進展（シナリオ）を検討（約3400のシナリオ）。判定結果に対する対策を抽出。					

表８　事故シナリオからの追加安全対策と関連する省令

追加理由（出荷設備の特徴）		追加の安全対策	関連する省令（7条の3）・例示基準
充填作業	異なる充填圧力の出荷容器への充填 →容器を間違えると過充填、漏洩の恐れがある	タッチパネルでの容器選定とインターロック	・第1項第5号/第2項第8号 （最高充填圧力での停止、漏洩防止） ・第1項第11号/第2項第28号（過充填防止） ・第3項第４号 （容器を損傷するおそれのない流量で充填） ・例示基準59.ディスペンサーからの漏えい等の防止措置 ・例示基準55の2.過充填防止のための措置 ・例示基準59の4.圧縮水素の充填流量の制限に係る措置
		切り離すと流路遮断される、充填圧力ごとに異なる口径のワンタッチカプラ、ノズル/レセプタクルを有するホースに接続し、充填	
	充填プロトコルを使わない充填 →過充填、漏洩の恐れがある	自動保圧、自動脱圧のシーケンス化	
		容器制限温度を超えない一定流量制御	
		上限圧力での充填停止制御	
	出荷容器積載車両の搬入・搬出 →車両衝突等によるガス設備の破損 →台車や車両の移動による充填ホースの破損	車両衝突防止柵等の設置	・第2項第23号 （ガス設備の位置、車両衝突防止措置） ・第2項第25号（充填ホース損傷防止） ・第3項第2号（ノズルを外した後に車両を発射させる） ・例示基準59の8.車両の誤発進等によるホースの破損を防止するための措置 ・例示基準59の9.車両の誤発進防止
		不特定の顧客への充填でないので、緊急離脱カプラ以外に、台車・車両の固定やエンジンキー預かり等でホースの破損を防止	
		事業者と搬入業者（B to B）であることを考慮したマニュアルの整備等	
位置	FCV充填場所と出荷設備が離れている →従業者不在の場合に事故発見が遅れる	出荷設備での水素漏洩、火災検知により警報かつST全体の運転の自動停止	・第2項第16号（漏洩検知、警報、自動停止） ・第2項第18号 （ディスペンサー周辺の火災検知、警報、自動停止） ・例示基準23.ガス漏えい検知警報設備及びその設置場所 ・例示基準59の2.火災を検知するための措置

表９　作成した技術基準案

技術基準案
一般則７条の３（圧縮水素スタンドに係る技術上の基準）　改定案
一般高圧ガス保安規則関係例示基準　　改定案
水素出荷設備を有する圧縮水素スタンドの危害予防規程の指針 JPEC-TD 0013（案）
水素出荷設備を有する圧縮水素スタンドの保安教育計画の指針 JPEC-TD 0014（案）
水素出荷設備を有する圧縮水素スタンドのガイドライン JPEC-TD 0015（案）

（４）蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発

本研究の目的は、水素ステーションの常用圧力の引き上げにより、蓄圧器１本当たりの水素保有量を増やし、蓄圧器本数やバンク数の低減を可能とし、建設費や維持費の低減に繋げることである。そのために、敷地境界距離に影響与える水素漏えい時の拡散濃度、爆風圧や輻射熱等に関し、常用圧力（82MPa）以上での実験、及び常用圧上限引き上げに伴うリスクの検討を実施した。その結果に基づき技術基準の見直し案を作成した。

① 82MPa より高い圧力での水素漏洩時の拡散濃度、爆風圧、水素火炎の輻射熱のデータの獲得及びそれに基づく敷地境界距離を中心とする技術基準改定案の策定（達成度○）

現行省令中に規定されている各種離隔距離は、圧力 82MPa の下での高圧水素の拡散・燃焼挙動の実験データに基づいて定められた経緯があるため、本研究開発では圧力を 93MPa に引き上げた条件下での水素拡散・燃焼挙動を実験的に確認し、必要な距離の検討を行った（図８～図１０）。そして、これら検討結果に基づいて、新たな技術基準の案を作成した（表１０）。

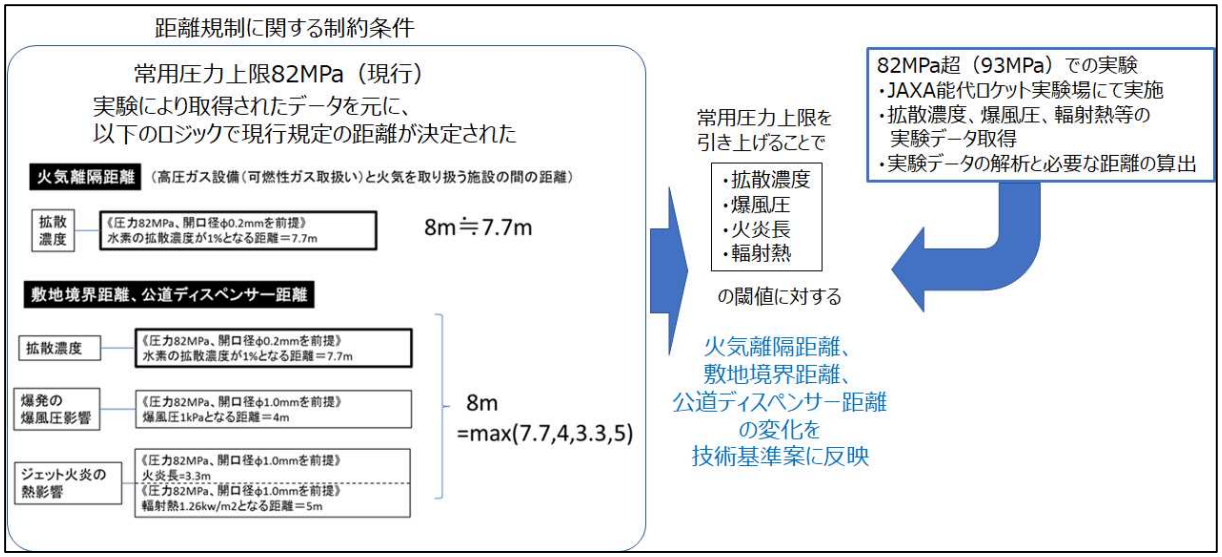


図８　本研究の概要

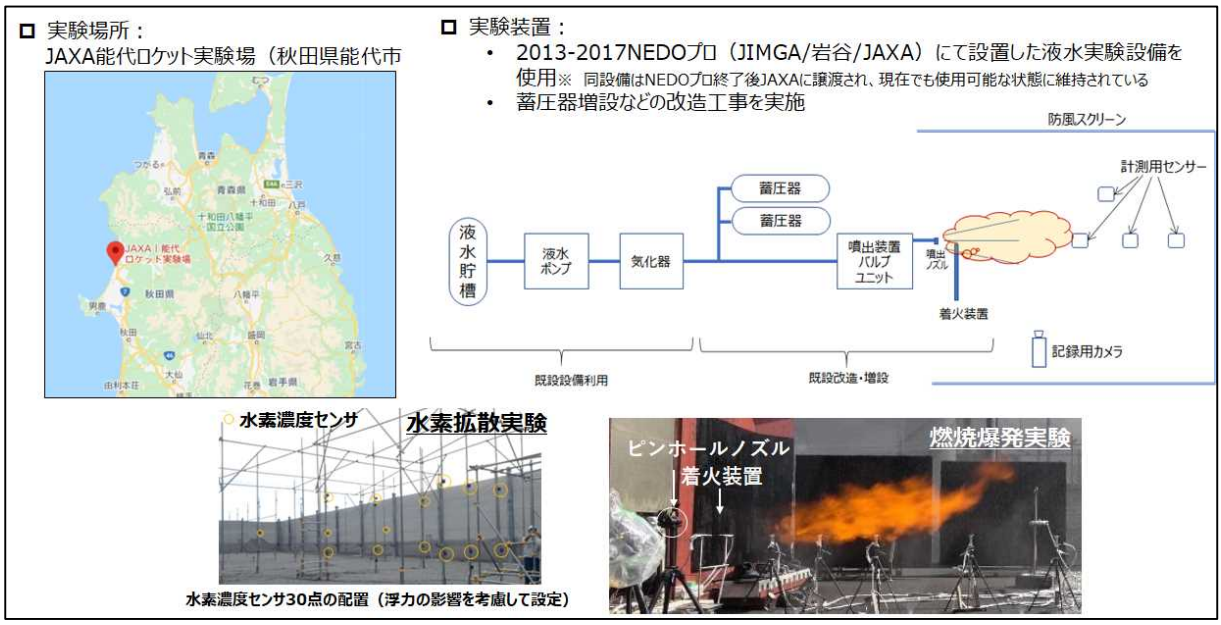
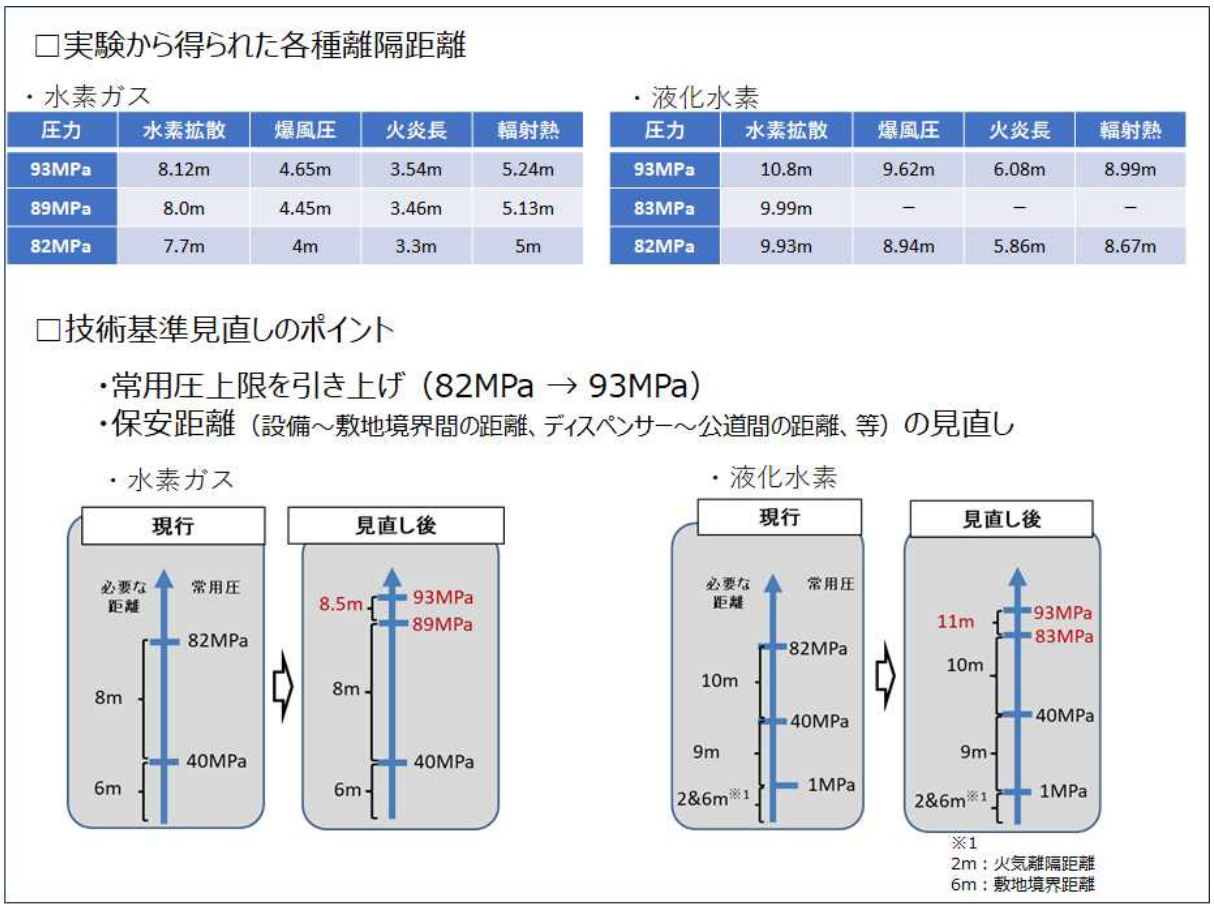


図９　実験施設の概要



圧力	水素拡散	爆風圧	火炎長	輻射熱
93MPa	8.12m	4.65m	3.54m	5.24m
89MPa	8.0m	4.45m	3.46m	5.13m
82MPa	7.7m	4m	3.3m	5m

圧力	水素拡散	爆風圧	火炎長	輻射熱
93MPa	10.8m	9.62m	6.08m	8.99m
83MPa	9.99m	–	–	–
82MPa	9.93m	8.94m	5.86m	8.67m

図１０　実験から得られた各種離隔距離と技術基準見直しのポイント

表１０　見直しを行った技術基準

常用圧力、離隔距離の見直しを行った技術基準
一般則 7 条の 3（圧縮水素スタンドに係る技術上の基準）
一般則 7 条の 4（顧客に自ら圧縮水素の充填に係る行為をさせる圧縮水素スタンドに係る技術上の基準）
一般則 8 条の 2（移動式圧縮水素スタンドに係る技術上の基準）
一般則 11 条（処理能力 30m3 以上の第 2 種製造者に係る技術上の基準）
一般則 12 条の 2（処理能力 30m3 未満の第 2 種製造者のうち圧縮水素スタンドにより製造する者に係る技術上の基準）
一般則 12 条の 3（処理能力 30m3 未満の第 2 種製造者のうち移動式圧縮水素スタンドにより製造する者に係る技術上の基準）
一般則 64 条（保安統括者の選任等）
ディスペンサー周辺の防爆基準 JPEC-S 0004
圧縮水素スタンド・移動式圧縮水素スタンドの距離規制の代替措置に関わる技術基準 JPEC-S 0008
圧縮水素スタンド安全技術指針 JPEC-TD 0001

（５）その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施

①家庭・小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出

FCV の広い普及のためには、家庭・小規模事業所等での水素充填を可能とすることは重要である。そのため、水素ステーションを除く既存の水素充填設備の調査を実施し、検討対象とする水素充填設備のモデルを構築した。そのモデルに基づき、法的課題抽出を行った。

・家庭/小規模事業所等での水素充填を可能にするための法的課題の明確化（達成度○）

家庭・小規模事業所等での水素充填実現に向けての法的課題の抽出のために、検討のベースとなる家庭用小規模充填設備のモデルを構築し、それをもとに法的課題の抽出を行った。具体的には、高圧ガス保安法、ガス事業法のもとで構築したモデル（図１１）を家庭に設置する場合を検討した。高圧ガス保安法のもとでは、左が住居ケース、右が事業所（ディーラー想定）であるが、いずれにしても大きな距離が必要であり、現実的ではないとの結果となった（図１２）。一方、ガス事業法で管理されている CNG 充填設備が非常にコンパクトであることが確認できたことから、ガス事業法及び関連省令を検討した結果、高圧ガス保安法に比べコンパクトな設置できる可能性があることがわかった（図１３）。ただし、この場合、圧縮水素に関する技術指針の制定が必要になると考えられる。

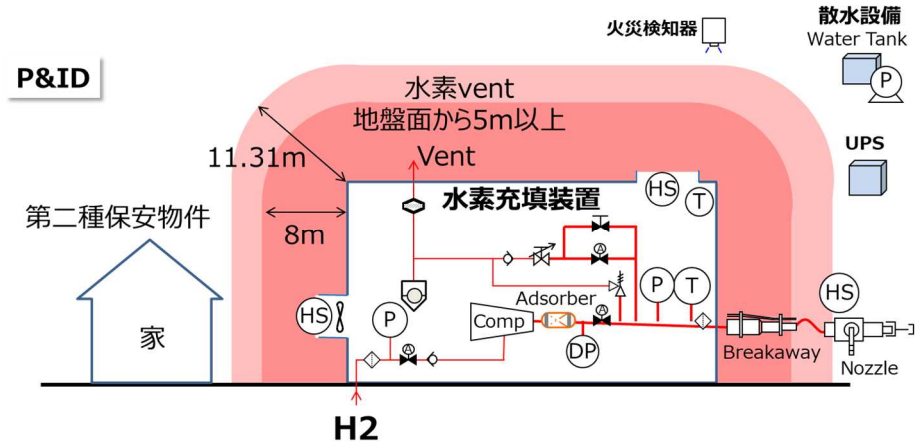


図１１　家庭用小規模充填設備モデル

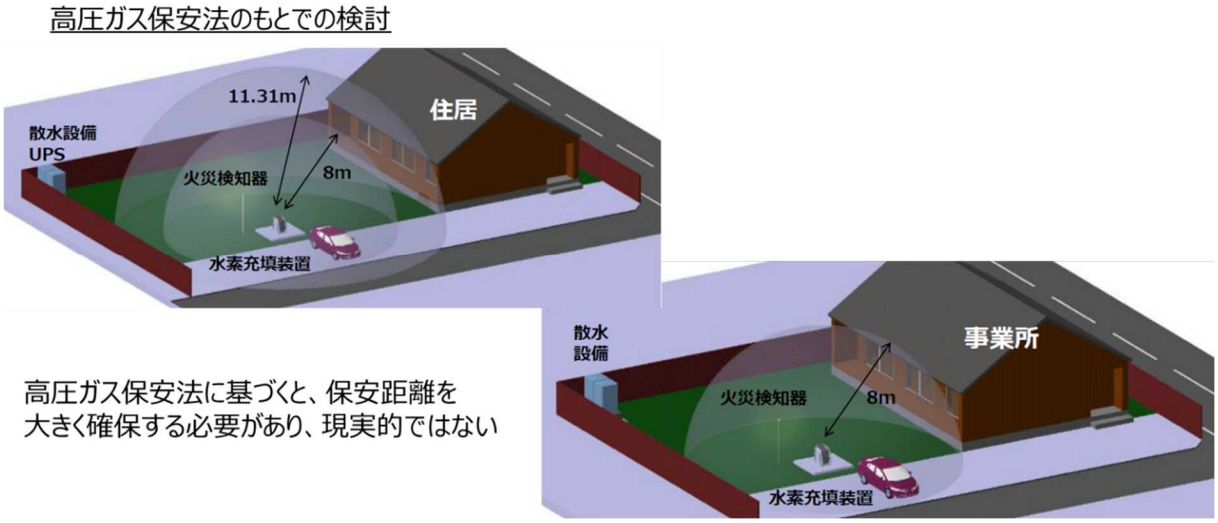


図１２　高圧ガス保安法による設置イメージ

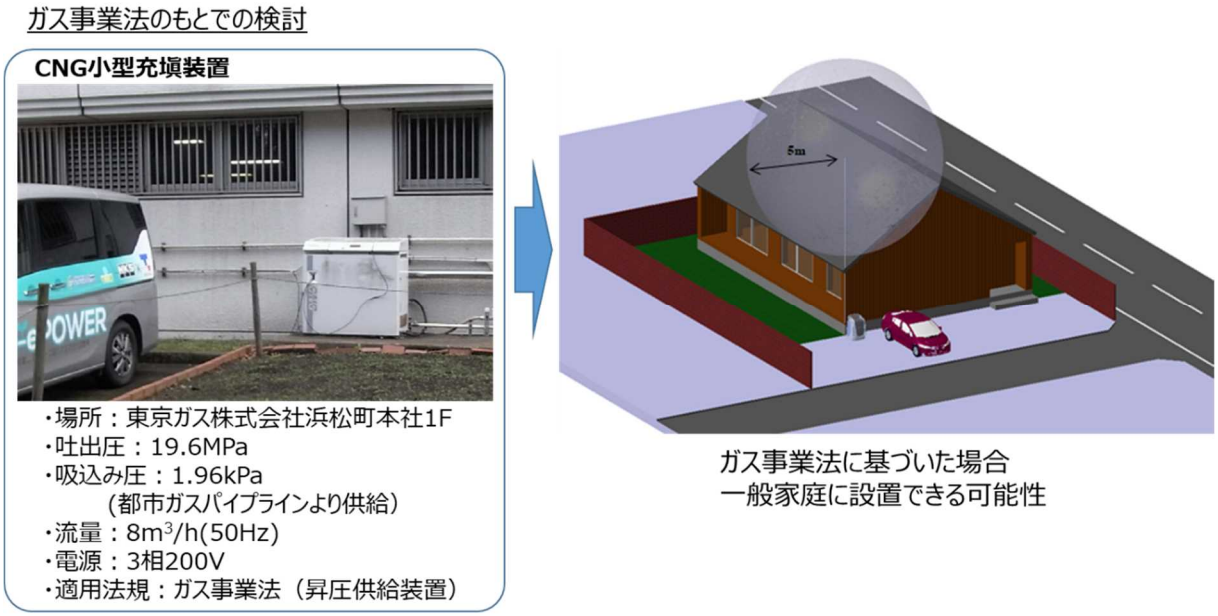


図１３　CNG 充填装置とガス事業法による設置イメージ

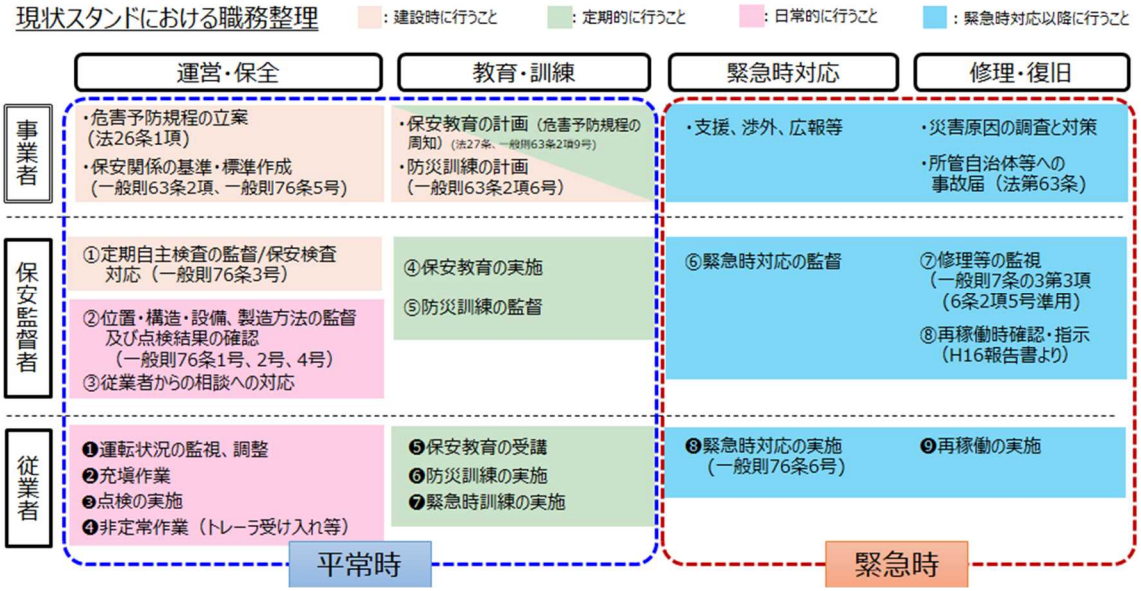
② 保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発

保安監督者が複数の水素ステーションを兼任した場合の保安体制等のモデルの構築と課題の抽出を行い、水素ステーションを兼任した場合のリスクアセスメントを実施した。その結果をもとにガイドライン案を作成した。

・保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための技術基準案の策定（達成度◎）

保安監督者兼任の要件検討として、兼任した際に「平常時・緊急時に職務を全うできるか」と「複数のステーションが同時発災した場合、従業者を含め適切な対応が取れるか」の検証が不可欠である。そのため、1）現状の水素ステーションの保安監督者、事業者、従業者の役割・作業内容の抽出（表１１）、2）水素ステーションを兼任した場合の保安体制等のモデルの構築と課題の抽出、3）同時発災やヒューマンファクターを考慮した保安監督者が水素ステーションを兼任した場合のリスクアセスメントの実施、により、保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための必要要件を抽出した（図１４）。その要件を基に、技術基準案を作成した。これらは、制定後、高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）に反映された（表１２）。

表１１　現状の水素ステーションにおける保安監督者、事業者、従業者の職務



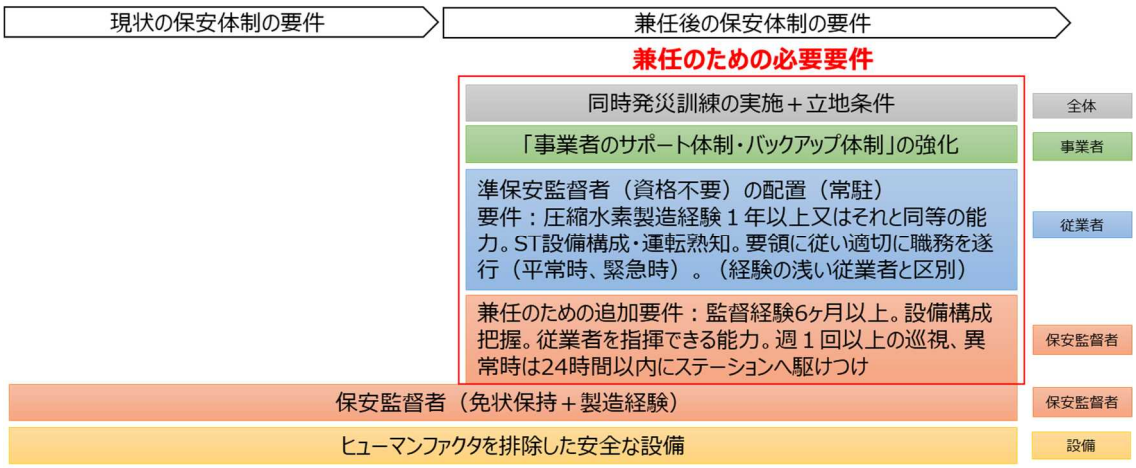


図１４　保安監督者兼任のための必要要件

表１２　制定された技術基準

制定された技術基準	施行時期
保安監督者が兼務する圧縮水素スタンド等の危害予防規程の指針 JPEC-TD 0005	2020 年 11 月 6 日
保安監督者が兼務する圧縮水素スタンド等の保安教育計画の指針 JPEC-TD 0006	2020 年 11 月 6 日
保安監督者が兼務する圧縮水素スタンド等のガイドラインJPEC-TD 0007	2020 年 11 月 6 日
高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）　改定	2020 年 11 月 9 日

③障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討

障壁の高さ、構造に関し、隣地の状況を加味した技術基準案を検討し、高さに関してはガイドライン案を、構造に関しては例示基準の修正案を作成した。

・障壁に係る技術基準の見直しに資する技術基準案の策定（達成度○）

現行、水素ステーションにおける障壁については、隣地条件や障壁構造への影響因子に依らず、一律に、高さやその構造が規定されている。そこで、隣地条件や影響因子を勘案した技術基準の見直しにつなげる検討を実施した。具体的には、まず、既設水素ステーションの障壁に関する状況調査を行った。障壁の高さに関しては、隣地の状況（道路、農地、水路、駐車場等）（図１５）に応じて対応を検討したが、水素ステーション事業者の管理が及ばない隣接地状況が想定されるため、一律に適用できる技術基準を策定することは困難と結論した。今回の検討内容を基に、水素ステーション事業者が、個別の水素ステーションに対して、障壁高さ低減のために（公開を目的とする）詳細基準事前評価申請を行う際に一助となるガイドライン案を作成した（図１６に検討フローを示す）（隣接地の状況に応じた障壁高さの検討に関するガイドライン JPEC-TD 0012 として 2023 年 8 月 10 日制定）。障壁の構造に関しては、これまで厚さ 12cm 以上の鉄筋コンクリート、厚さ 15cm 以上のコンクリートブロック又は厚さ 6mm 以上の鋼板に限られていたが、（４）で検討した各種離隔距離の設定の考え方をもとに検討（図１７）し、爆風圧の閾値である 4m 以上の敷地境界距離を有する場合、水素拡散を防止できるパネル状の不燃材料（構造計算等による強度設計は必須）についても使用できる旨を追加した例示基準改定案を作成した。



図１５　既設水素ステーションの障壁設置例

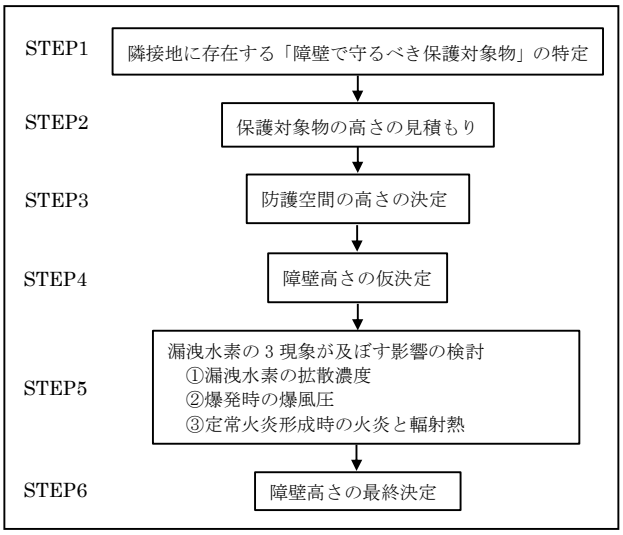


図１６　障壁高さの低減化検討フロー

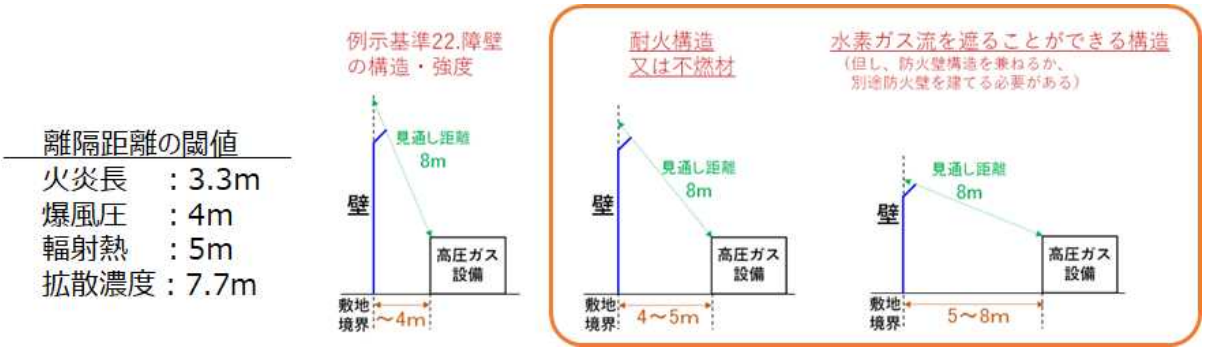


図１７　敷地境界距離と障壁構造の要件

③　自家消費型の水素充填設備に関する予備検討

高圧ガス設備（特に充填用ディスペンサー）の屋内設置に係る国内外の技術基準の整理、屋内設置に限らず、多様な自家消費型の水素充填設備の規制見直しのための課題抽出、HPIT用充填設備の規制見直しのための課題抽出を行った。

・水素充填設備の屋内設置に係る技術基準作成に向けた検討項目の明確化（達成度○）

上記検討内容のうち、特に FC-フォークリフトへの屋内での水素充填を可能としたいとう要望が高いため、これについて状況を整理し、以下のとおり、今後の検討項目を明確にした。

✓一般則 6 条 1 項 9 号「可燃性ガス又は特定不活性ガスの製造設備を設置する室は、当該ガスが漏えいしたとき滞留しないような構造とすること」、同 1 項 26 号「可燃性ガス（アンモニア及びブロムメチルを除く。）の高圧ガス設備に係る電気設備は、その設置場所及び当該ガスの種類に応じた防爆性能を有する構造のものであること」を満足すれば屋内での水素充填は可能と考えられる。→可燃性ガスが滞留しない構造や高圧ガス設備に係る電気設備の防爆性能などが明確でないことから、実質的に実施できていない。

✓滞留しない構造については、「例示基準 6. 滞留しない構造」に具体的で適切な換気方法に関する記載が追加されることが望まれる。具体的な記載として「例示基準 57. 地盤面下に設置する高圧ガス設備の室について」が参考となるが、記載内容の根拠、室内設置ディスペ

ンサーへ適用する妥当性の検証が必要。また、米国の NFPA2 の基準のように、室内設置のディスペンサーに限定した代替措置として、部屋の大きさ、充填方法と安全設備を組み合わせた対応方法も必要と考えられる。この場合、具体的な数値の根拠を明確にするとともに、国内の実情、事業者の受容性などを考慮することが必要。

✓防爆の基準については、「JPEC-S 0004 ディスペンサー周辺の防爆基準」の手法に従って、室内設置ディスペンサーの危険区域を設定することは比較的容易と考えられる。室内設置の場合、室内の換気量、換気方法、部屋の大きさ、などを反映した換気回数、換気効率を用いて「仮想の容積」を見積もる必要がある。必要に応じて、IEC 60079-10 に基づき経済産業省から出された「プラント内における危険区域の精緻な設定方法に関するガイドライン」を参照するとともに、比較検証をすることが必要。技術基準としては、上記のように見積もった室内設置ディスペンサーの危険区域の例を JPEC-S 0004 に追加することが考えられる。

３．２　成果の意義

本研究開発は、水素ステーションの本格普及期に向け、水素ステーションの自立化や普及目標（2030 年 1000 か所）達成に貢献すべく推進してきた。一方、本年度改定された水素基本戦略においては、水素の大規模サプライチェーンの構築を目標に掲げており、乗用車で培ってきた燃料電池技術を、商用車や FC-フォークリフト、港湾の荷役機械、鉄 道、空港車両での利用など、様々な活用シーンを想定し、導入を進めて行く。そして、こうした様々な分野への需要の広がりを見据え、水素ステーションのマルチ化が 2030 年に向けて推進されていく。そのような背景のもと成果の意義を以下に示す。

（１） 無人運転を実施するための研究開発

・複数の水素ステーションを１か所の遠隔監視所で監視することにより、ステーションの無人化が可能となり、水素ステーションあたりの運営費低減に貢献する。それにより、水素ステーションの普及が促進される。

・今後の水素ステーションのマルチ化に向けても、水素ステーションの無人化は重要なアイテムであり、水素サプライチェーン構築に貢献する。

（２） リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発

・安全設備の合理化による設備費、保守費の低減が可能となる。

・今後の水素ステーションのマルチ化に向けても、本研究での確立したリスクアセスメント手法の適用は有効であり、普及を推進できる。

（３） 水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発

・保安監督者１名での保安体制確立による有資格者低減による運営費低減が可能となり、併設する水素ステーションとの一体運営が可能となる。

・本研究の技術基準見直し手順は、水素ステーションのマルチ化を進める上で必要な技術基準検討の手法となりうる。

（４） 蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発

・常用圧力の引き上げにより、蓄圧器１本当たりの水素保有量が増え、蓄圧器本数やバンク数/附属安全設備等の低減が可能となり、建設費が低減できる。

・水素ステーションをコンパクトにできる可能性があり、今後の水素ステーションのマルチ

化にも貢献する。

（５） その他規制改革実施計画実施項目の内、研究開発が必要とされる項目の実施

① 家庭・小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出

・今回の検討結果や抽出した法的課題を解決することにより、家庭・小規模事業者向けの水素サプライチェーン構築を推進することができると考える。

② 保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発

・１名の保安監督者により複数の水素ステーションの保安を管理することにより、水素ステーションあたりの運営費の削減に繋がる。

・遠隔監視ステーションやマルチ水素ステーションにも適用することにより、更なる運営費削減、水素ステーションのマルチ化に貢献する。

③ 障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討

・障壁に関する建設費低減が見込まれる。

・今後、水素ステーションのマルチ化により、都市部にマルチ水素ステーションが設置される可能性が高く、その場合に必要な障壁の技術基準の緩和は、普及を促進すると考える。

④ 自家消費型の水素充填設備に関する予備検討

・今回の検討結果や抽出した課題を解決することにより、FC-フォークリフトへの水素の屋内充填を可能化するとともに、水素の自家消費等水素ステーションのマルチユースに貢献する。

３．３　開発項目別残課題

いずれのテーマも実施計画書にて掲げた開発項目は全て終了し、残課題はない。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

遠隔監視セルフ水素ステーション及び保安監督者が兼務する水素ステーションに関しては、それぞれ、関連省令が施行され、自主基準である JPEC-S、JPEC-TD も制定され、既に運用が始まっている。今後は、それぞれが実績を積むことで、保安監督者が兼任する遠隔監視セルフ水素ステーションが実現される見通しである。

その他の技術基準見直し案についても、今後、法制局にて、順次制定されていく予定であり、自主基準は、省令等の改定に合わせて、制定していく予定である。

家庭用/小規模事業所における水素充填の可能化、自家消費型の水素充填設備における技術基準の見直しは、大規模水素サプライチェーン構築のための重要な課題であり、引き続き検討を進めることが望まれる。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 5 月	JPEC フォーラム	無人運転を実施するための研究開発	今岸　健郎（JPEC）
2	2019 年 5 月	JPEC フォーラム	リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	佐藤　光一（JPEC）
3	2019 年 9 月	横浜国立大学　第２回メディア向け勉強会	横浜国大発「リスク共生学」から考える未来社会	伊里　友一朗（横国大）
4	2019 年 11 月	2019 年度　安全工学研究発表会	本格普及期における水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価フレームワーク	伊里　友一朗（横国大）
5	2020 年 5 月	JPEC フォーラム	（遠隔監視による）無人運転を実施するための研究開発	今岸　健郎（JPEC）
6	2020 年 5 月	JPEC フォーラム	リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	小森　雅浩（JPEC）
7	2020 年 5 月	JPEC フォーラム	保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発	種田　憲人（JPEC）
8	2020 年 9 月	JPEC レポート	水素スタンドの無人運転を実施するための研究開発	河島　義実（JPEC）
9	2020 年 9 月	International Journal of Hydrogen Energy Vol.46, Issue 11, pp. 8329-8343, 2021	Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model	鈴木　智也（横国大）
10	2020 年 10 月	ケミカルマテリアル Japan2020-ONLINE-	エネルギーシステムの安全	横国大 三宅研究室

		（WEB ポスター）		
11	2020 年 12 月	第 53 回安全工学研究発表会	水素ステーションモデルの定量的リスクアセスメント	鈴木　智也（横国大）
12	2021 年 3 月	FCCJ 令和 2 年度規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーションに係る規制見直し、自主基準化	河島　義実（JPEC）
13	2021 年 5 月	MIPRO2021	Tradeoff study between risk and benefit on the adequate safety device of hydrogen refueling stations by using a dynamic physical station plant model.	河津　要（横国大）
14	2021 年 5 月	MIPRO2021	Quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations using a dynamic physical model.	鈴木　智也（横国大）
15	2021 年 5 月	International Journal of Hydrogen Energy Vol.46, Issue 78, pp. 38923-38933, 2021	Quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations by using a dynamic physical model based on multi-physics system-level modeling	鈴木　智也（横国大）
16	2021 年 5 月	JPEC フォーラム	（遠隔監視による）無人運転を実施するための研究開発	河島　義実（JPEC）
17	2021 年 5 月	JPEC フォーラム	リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	小森　雅浩（JPEC）
18	2021 年 5 月	JPEC フォーラム	保安監督者が複数の水素ステーションを	種田　憲人（JPEC）

			兼任するための研究開発	
19	2021 年 5 月	エネルギー・資源学会　2021 年度第 1 回シンポジウム（第 12 回 ESI シンポジウム）	水素ステーションに係る規制の見直しと業界自主基準化	二宮　貴之（JPEC）
20	2021 年 6 月	安全工学シンポジウム 2021　討論テーマ：「水素エネルギー技術の社会実装におけるリスクを考える～水素ステーションを中心に～」	水素エネルギー関連技術の業界動向～水素ステーションに関して～	二宮　貴之（JPEC）
21	2021 年 6 月	安全工学シンポジウム 2021　討論テーマ：「水素エネルギー技術の社会実装におけるリスクを考える～水素ステーションを中心に～」	本格普及期における水素ステーションの定量的リスク評価	鈴木　智也（横国大）
22	2021 年 9 月	International Conference of Hydrogen Safety 2021	Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model	鈴木　智也（横国大）
23	2021 年 9 月	公益財団法人総合安全工学研究所　雑誌：SE（セイフティ エンジニアリング）Vol.206, pp. 15-19, 2022	本格普及期における水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価	鈴木　智也（横国大）
24	2021 年 9 月	JPEC レポート	保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発	岡安　良宣 種田　憲人 （JPEC）
25	2021 年 10 月	FCDIC「2021 年度版年報」	水素ステーションの規制適正化に関する研究開発	JPEC
26	2021 年 11 月	International	Dynamic Physical	河津　要

		Journal of Hydrogen Energy	Model of Japanese Hydrogen Refueling Stations for Quantitative Trade-offs Study between Benefit and Risk	（横国大）
27	2021 年 12 月	International Journal of Hydrogen Energy Vol.47, Issue 57, pp. 24242-24253, 2022	Trade-offs Study between Risk and Benefit in Safety Device of Hydrogen Refueling Stations by Using a Dynamic Physical Model	河津　要（横国大）
28	2021 年 12 月	一般社団法人火薬学会　学会誌『EXPLOSION』Vol.31,No.3,167-172,2021	水素エネルギー関連技術の業界動向～水素ステーションに関して～	二宮　貴之（JPEC）
29	2022 年 1 月	機械学会　第 49 回トワイライトセミナー	水素ステーションの規制適正化への取り組みから学ぶ水素安全の最前線	二宮　貴之（JPEC）
30	2022 年 3 月	FCCJ 令和 3 年度規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーションに係る規制見直し、自主基準化	河島　義実（JPEC）
31	2022 年 5 月	JPEC フォーラム	蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	小森　雅浩（JPEC）
32	2022 年 5 月	JPEC フォーラム	水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	佐藤　光一（JPEC）
33	2022 年 8 月	一般社団法人　水素バリューチェーン推進協議会(JH2A)　８月開催 JH2A 会員セミナー	水素ステーションに係る規制の見直しと業界自主基準化	二宮　貴之（JPEC）
34	2022 年 10 月	一般社団法人 水素エネルギー協会(HESS)　HESS_第	水素ステーションにおける規制と見直しへの取り組み	二宮　貴之（JPEC）

		169 回定例研究会		
35	2022 年 12 月	安全工学（安全工学会） Vol.61,No.6,408-414,2022	水素ステーションにおける規制と見直しへの取り組み	二宮　貴之 （JPEC）
36	2023 年 3 月	FCCJ 令和 4 年度規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーションに係る規制見直し、自主基準化	河島　義実 （JPEC）
37	2023 年 5 月	JPEC フォーラム	水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	川鍋　隆 （JPEC）
38	2023 年 5 月	JPEC フォーラム	蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	鈴木　慧 （JPEC）
39	2023 年 5 月	JPEC フォーラム	障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討	小野　孝也 （JPEC）

－特許等－

ありません。

（1-(2)-①）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／国内規制適正化に関わる技術開発／新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」

事業者名：（一財）石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、国立大学法人九州大学、（一財）金属系材料研究開発センター、日本製鉄株式会社、愛知製鋼株式会社、株式会社日本製鋼所

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

・汎用性ステンレスの使用可能範囲拡大のための新たな水素特性判断基準を制定し、Ni当量低減を図った。・冷間加工度40%まで母材の水素適合性を維持することを確認した。
・良好な水素適合性を示す母材と溶接金属の組み合わせを確認し、好適事例となる材料の例示と技術的根拠を記載した技術指針を作成、公開した。
・汎用低合金鋼が圧縮機使用においても安全に利用できる試験結果が得られ、蓄圧器を想定した低合金鋼技術文書を改正した。

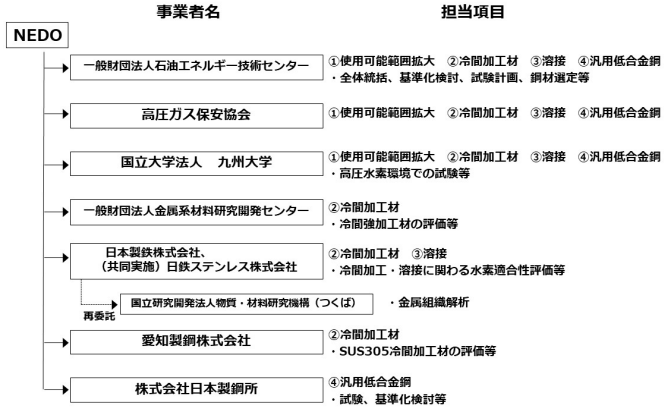
●背景/研究内容･目的

水素ステーションの普及目標として、2020年に160か所、2025年に320か所の整備が掲げられている。これを実現するためには水素ステーション事業の自立化に向け、コスト低減のためのさらなる取り組みが必要である。本事業では新たな水素特性判断基準の導入に関する研究に取り組み、水素ステーションの建設コスト低減に向けた例示基準の見直しに資する成果を生みだすことを目的としている。

●研究目標

実施項目	目標
①汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大	水素ステーションで使用可能なテンレス鋼の新たな水素特性判断基準確立、新たな水素特性判断基準を満たす汎用ステンレス鋼の提示、基準案の作成
②汎用ステンレス鋼冷間加工材	水素ステーションにおける使用条件の明確化、および許容引張応力の検討を行い、基準化に資する資料の作成
③汎用ステンレス鋼溶接材	溶接継手の作製、材料特性、水素適合性等の評価、および水素ステーションで使用可能な溶接に関する技術指針案の作成
④汎用低合金鋼の高温適用	高温水素ガス中使用を想定した水素圧縮機への適用可否の判断、および低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)の改訂検討

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容／研究成果

①汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大
伸びを指標とする新たな水素適合性判断基準を確立。一般則例示基準の改正に繋げた。
適材適所の温度領域における材料範囲の拡大基準案、鋼種にSUS305を追加する材料範囲の拡大基準案を作成した。

（本事業開始時）

温度範囲	絞り	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	材料規格（60%）に対し75%以上	材料規格の通り	28.5%以上
-10℃～250℃			27.4%以上
20℃～250℃			26.3%以上

・絞りの基準を撤廃
・-45℃において使用できるNi当量の低減
28.5%⇒26.9%

新基準案（施行済み）

温度範囲	絞り	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	材料規格の通り	材料規格の通り	28.5%以上
-10℃～250℃			27.4%以上
20℃～250℃			26.3%以上

温度範囲	材料形状	伸び	Ni当量
-45℃～250℃	棒	57%以上	26.9%以上
	管	50%以上	
	鍛鋼	42%以上	

適材適所の温度領域の材料範囲の基準案

温度範囲	材料形状	伸び	Ni当量
-10℃～250℃	棒	57%以上	26.0%以上
	管	50%以上	
	鍛鋼	42%以上	

温度範囲	材料形状	伸び	Ni当量
20℃～250℃	棒	57%以上	24.6%以上
	管	50%以上	
	鍛鋼	42%以上	

②汎用ステンレス鋼冷間加工材
冷間加工度40%まで母材の水素適合性を維持することを実証した。
SUS305の冷間加工材がSUH660を代替可能であることを示した。

③汎用ステンレス鋼溶接材
Ni当量≧28.5%を有するSUS316LとYS309LMo溶接材料の組み合わせの溶接継手においては、良好な水素適合性を示すことが明らかとなり、「高圧水素中で使用するためのステンレス鋼の溶接技術指針」としてまとめ、公開した。

④汎用低合金鋼の高温適用
汎用低合金鋼が水素圧縮機で安全に使用可能である試験結果が得られ、低合金鋼の適用温度範囲が水素圧縮機の使用条件である200℃まで使用可能となるよう、「低合金鋼技術文書JPEC-TD 0003」を改定した。

●今後の課題

①：更なる汎用材の利用のための水素適合性判断基準の確立
②：許容引張応力制定に向けたデータ取得、解析
③：技術指針への良好な水素適合性を有する溶接継手の組み合わせの拡充
④：改定した低合金鋼技術文書JPEC-TD0003の周知･利用促進

●実用化･事業化の見通し

本プロジェクトにおける「実用化･事業化」とは、当該研究開発に基づく結果が例示基準化あるいは技術文書化されることであり、水素ステーション事業に関わる企業が活用し企業活動(コスト、利便性等)に貢献することを指す。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	伸びを指標としたNi当量26.9%の例示基準改定に資するデータの取得、解析をおこなった。	○
②	冷間加工材の使用条件を明確化した。許容引張応力設定に対する技術課題を纏めた。	○
③	As weldの溶接継手を対象とした技術指針を策定した。	○
④	低合金鋼技術文書を改正し圧縮機まで適用範囲を拡大した。	◎ 前倒し達成

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	6	33	0

事業番号：1-(2)-①

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国内規制適正化に関わる技術開発／新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」

実施者：一般財団法人石油エネルギー技術センター
高圧ガス保安協会
国立大学法人九州大学
一般財団法人金属系材料研究開発センター
日本製鉄株式会社
愛知製鋼株式会社
株式会社日本製鋼所

１．研究開発概要

2016 年改訂の水素・燃料電池戦略ロードマップではフェーズ 1（水素利用の飛躍的拡大期）における運輸部門での水素の利活用として、2020 年に水素ステーション 160 箇所、FCV（Fuel Cell Vehicle：燃料電池自動車）4 万台、2030 年には水素ステーションは 900 箇所、FCV は 80 万台の目標が掲げられた。その実現に向けては制度面、技術面の両方の取り組みが必要である。2017 年に閣議決定された規制改革実施計画では水素ステーションや FCV に係る 37 項目の規制見直しが掲げられた。同年策定の水素基本戦略においても規制改革実施計画に基づく取り組みを加速させ水素利用の実態を踏まえた規制体系の在り方について検討するとしている。本研究はこの 37 項目の規制見直しの内容とも密接に関係しており、特に水素ステーションにおける低コスト鋼材の使用については 37 項目の規制見直しのうち主要 3 項目に挙げられている。

水素は金属に対し、一般的には脆化と呼ばれる悪影響を引き起こし、低温ではさらに助長される性質を持つ。よって水素ステーション用の高圧設備においては上記のような低温・高圧でも水素の影響に耐える材料を使用しなければならない。海外では平成 24 年に米国の水素スタンドで高圧水素での使用に適さない金属材料が使用され、設計の問題もあり蓄圧されていた水素の全量が漏洩、結果的に火災に至った事例が報告されており、日本では水素脆化に対して安全性が確認された材料から一般則例示基準 9.2 に追加された。これに記載されている範囲の材料であれば一般申請での使用が可能であり手続きも比較的簡便である。

しかしながらプレクール機能を有する水素ステーションの場合は水素温度が－40℃となるため、本研究開始時点では一般則例示基準 9.2 によれば低温（-45℃）・高圧（82MPa）の水素の使用に耐える金属材料の一例として、Ni 当量が 28.5%以上でかつ絞りが 75%以上であるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 または SUS316L ステンレス鋼であることが規定されている。上記材料は一般的な用途で用いられる SUS316/SUS316L とは成分的に乖離しており、規定の Ni 当量に到達させるために高価な原料である Ni や Mo を通常よりかなり多く含有させなければならない。

このことは潜在的に高コストであるとともに、一般的な市場での調達が著しく困難であることを示している。結果的に上記材料は高圧水素用途以外で使用されることはほぼ無く、調達コストの上昇や納期の長期化の要因となっている。そこで、高圧水素環境で安全に使用できることを示したうえで一般則例示基準 9.2 表（三）記載の SUS316 系ステンレス鋼の材料範囲（図 1）を市中に流通している汎用材のレベルにまで拡大することが望まれている。

表（三）

材料の種類	規格材料の引張試験又はミルシートにおける絞り	圧力・温度の条件	常用の温度におけるニッケル当量(注1)
JIS G3214(2009)圧力容器用ステンレス鋼鍛鋼品(SUSF316、SUSF316L に限る。) JIS G3459(2004)配管用ステンレス鋼管(SUS316TP、SUS316LTP に限る。) JIS G4303(2005)ステンレス鋼棒(SUS316、SUS316L に限る。) JIS G4304(2010)熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯（SUS316、SUS316L に限る。) JIS G4305(2010)冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯（SUS316、SUS316L に限る。)	75%以上	常用の圧力：82MPa 以下 常用の温度：－45℃以上 250℃以下	－45℃以上－10℃未満である場合にあっては 28.5 以上 －10℃以上 20℃未満である場合にあっては 27.4 以上 20℃以上 250℃以下である場合にあっては 26.3 以上 （下図参照。）

（注 1）ニッケル当量は次式によって求めること。

ニッケル当量（質量%）＝12.6×C＋0.35×Si＋1.05×Mn＋Ni＋0.65×Cr＋0.98×Mo

ここで、C は炭素、Si はケイ素、Mn はマンガン、Ni はニッケル、Cr はクロム及び Mo はモリブデンの各質量分率の値（%）を示す。

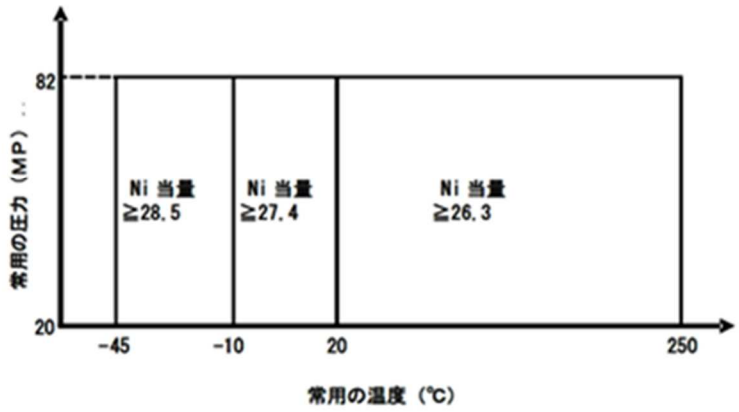


図　常用の圧力及び常用の温度と必要とされるニッケル当量の関係

図 1　一般則例示基準 9.2 表（三）（2019 年時点）

本研究では、大別して 4 つのサブテーマを実施する。以下、サブテーマごとに概要を述べる。

（1）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発

水素ステーションの高圧水素部には、絞りを指標とした Ni 当量規制に適合した鋼材が使用されている。現規制に適合する鋼材は水素の影響がないものの、結果として市中で流通しており汎用的に使用される鋼材とはかけ離れた特殊な材料となり、流通量も少なく調達コストも高くなっ

ている。一方、水素環境での材料評価試験のデータが蓄積されていく中で、汎用材の材質によっては、現行の判断基準（Ni 当量）は満足しないものの、水素ステーションで使用できる水素適合性を有しているとみられるものがあることが分かってきた。

そこで、絞りに代わる新たな水素特性判断基準について可能性を検討し、安全を担保しつつ、規制の緩和につながる材料範囲の拡大に向けた検討を行う。例えば SUS316 系・SUS304 系といった汎用材について高圧水素環境での試験を行い、得られた試験結果とこれまでに報告されてきた既存データを元に総合的に解析して新たな水素特性判断基準を検討する。新たな水素特性判断基準に基づいて検討された、水素ステーションで使用可能な鋼材の範囲拡大について、一般則例示基準 9.2 への反映を目指し、基準化に資する資料を作成する。

（2）汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発

オーステナイト系ステンレス鋼を冷間加工することで塑性硬化により強度が上昇するため、高圧ガス設備を製造する上で肉厚を低減でき部材の小型化、軽量化、使用鋼材量の低減に効果があることから高圧水素用途での使用が要望されている。水素ステーション用機器に冷間加工材を使用する事業者の利便性を図るためには、一般則例示基準等に当該材料の使用が可能であることを規定することが望ましいが、そのためには、当該材料の水素適合性検証及び許容引張応力の設定が要件となる。

但し冷間加工に伴う水素適合性への影響度も明確ではなく、冷間加工材には機械的性質や耐圧設計に必要な許容引張応力も規定されていない。水素ステーションで簡便に使用できるようになるためにはこれらの課題を解決していくことが必要である。本項目では、従来の研究において良好な水素適合性を有することが確認されている SUS316L や SUS305 等の汎用ステンレス鋼について、冷間加工を施した場合の水素適合性や許容引張応力の設定を検討し、基準化に資する資料を提示するものである。

（3）汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発

一般高圧ガス保安規則の圧縮水素スタンドに係る技術上の基準において、「圧縮水素のガス設備に係る配管、管継手及びバルブの接合は、溶接により行うこと。ただし、溶接によることが適当でない場合は、保安上必要な強度を有するフランジ接合又はねじ接合継手による接合をもつて代えることができる」とあるが実際は機械式継手が多用されているのが実情である。溶接の使用を促すためにはコスト面および規制面でのアプローチが必要であり、汎用的な材料を極力簡便な手法で使用でき、認可手続もスムーズに行えることが理想的である。SUS316 等の汎用ステンレス鋼の溶接について強度等の材料特性や水素適合性を検討する。検討結果を踏まえ、汎用ステンレス鋼が使用可能な範囲、条件等を明らかにし、水素ステーションで汎用ステンレス鋼溶接材を用いる際の技術指針を作成する。

（4）汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発

SNCM439 など水素適合性が認められている低合金鋼は低合金鋼技術文書 JPEC-TD0003 に記載があるが、水素適合性確認の試験温度が 85℃までであったため本研究開始時点では使用温度の上限が 85℃までとなっている。そのため、水素ステーションにおいては蓄圧器に事実上用途が限定されていた。一方、レシプロ型の水素圧縮機の水素出口付近では 100℃超の高温高圧水素に耐

える材料としてオーステナイト系耐熱鋼 SUH660 が用いられるが加工性、入手性、コストに難がある。低合金鋼の水素適合性が 200℃まで確認できれば低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 の改訂が可能となり、これらの問題点を改善できる。

そこで、圧縮機を想定した高温水素ガス中の使用に対する汎用低合金鋼の各種評価試験や検討を行い、水素圧縮機への適用可否について判断する。水素圧縮機への適用が可能と判断されれば、低合金鋼技術文書(JPEC-TD 0003)を水素圧縮機の対象温度まで適用温度範囲を拡大する取組を行う。

２．研究開発目標

本研究における実施項目（サブテーマ）と事業目標の一覧を表 1 に示す。

表 1 研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発	新たな水素特性判断基準及びそれを満たす汎用ステンレス鋼を提示し、基準化に資する資料を作成する。
（2）汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発	水素ステーションにおける使用条件を明確化し許容引張応力を検討し、基準化に資する資料を作成する。
（3）汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発	材料特性、水素適合性の測定結果に基づき、技術指針の作成に資するデータを取得し、技術指針案を作成する。
（4）汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発	高温水素ガス中使用を想定したデータを取得し、汎用低合金鋼の水素圧縮機への適用可否を判断し、検討結果に応じて低合金鋼技術文書を改定する。

（1）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲を拡大するには、超高圧水素インフラで使用可能な鋼材の範囲が例示された一般則例示基準 9.2（2019 年度版）の範囲拡大に資するための検討が必要である。この範囲拡大のためには実際の高圧水素環境での使用において安全を担保できることの確認が必要となる。具体的には、高圧容器の耐圧部分には実使用環境における強度・延性・疲労特性が確保されている材料を使用することが要件となるが、一般則例示基準 9.2（2019 年度版）では SUS316/316L の延性の指標として絞りが採用されている。水素による影響を最も受けやすい機械的性質が絞りであり、絞りを指標とする以上は材料に求められる要求も高くなる。そこで、新たな判断基準として伸びを指標にすることが可能になれば、水素ステーションで使用できる鋼材の範囲を拡大できる可能性がある。本研究では、延性の指標として伸びを用いた新たな水素特性判断基準について検討を行い、安全を担保しつつ材料範囲の拡大について検討する。新たな水素特性判断基準を確立し、これに基づく材料の基準案を作成することにより一般則例示基準 9.2（2019 年度版）の範囲拡大に資する技術資料とすることが可能である。

（2）汎用ステンレス鋼の冷間加工材の利用は部材の薄肉化や部品の小型化を可能とし低コスト化に寄与する。しかし冷間加工材の機械的特性値や許容引張応力は現在の規格では規定されておらず、加工に伴う水素の影響の増減も未知である。汎用ステンレス鋼を冷間加工することで塑性硬化により強度が上昇する一方、冷間加工に伴う結晶格子構造の変化が水素感受性を高める可能性が懸念される。そこで冷間加工に伴う水素適合性への影響や材料内部の機械的性質の挙動を系統的に評価・検討し、基準案の作成ないし基準化に資する知見をまとめていくことが今後の冷間加工材の利用の簡便化、将来の例示基準化に向けて必要である。

（3）高圧水素設備における事故の多くを占めているのが配管の継手からの水素の微小漏洩であり、高圧水素インフラの配管接続における溶接の利用は漏えいリスクの低減や継手類の部品点数の削減等に寄与すると考えられ、かつ日常点検の労力も機械式継手に比して軽減されるものと考えられるため遠隔監視型の水素ステーションや複数の水素ステーションにおける保安監督者の兼任といった運用面にも寄与できる。

水素ステーションにおいて溶接継手が広範に利用されていくためには廉価な汎用ステンレス鋼が使用できるだけでなく、溶接まま（As weld）の溶接継手が使用できることが望ましい。一般則例示基準 9.2 記載のオーステナイト系ステンレス鋼は水素適合性が保証された材料であるが、溶接することで材料の組織変化や成分の偏析等を生じて溶接部分では水素適合性が低下する可能性がある。溶接部の水素適合性に関する規則･基準類は存在しないため、実施者が水素適合性の確認を求められる場合も想定されるが、-45℃･水素圧 82MPa 以上の環境下における溶接継手の水素適合性を SSRT（低ひずみ速度引張試験）によって確認することは実施者にとって非常に負担が大きい。As weld での水素適合性を懸念して溶接後に溶体化処理を追加することで対応も可能であるが、使用する全ての溶接継手を熱処理することは工数やコストの上昇につながり簡便とは言い難い。そこで、As weld の溶接材の水素適合性を保証する母材と溶接材料の組合せが明示されることが大変望ましく、各種母材と溶接材料の組合せにおける溶接金属の水素適合性および溶接金属組織の解析等を通じて As weld でも高圧水素環境下で使用できる母材と溶接棒の組合せと溶接部の水素適合性の判断方法について検討し技術指針化できれば、水素ステーションに汎用ステンレス鋼の溶接材を用いる上で利便性の向上に資するものと考えられる。

（4）SNCM439、SA-723 に代表される汎用低合金鋼は水素蓄圧器で使用可能であるが、低合金鋼技術文書(JPEC TD-0003)で水素適合性が確認されている上限温度は 85℃であり、85℃を超える場合の水素適合性については検証されていないのが実状である。また、レシプロ型の水素圧縮機の動作状況を考慮すると、高温時に鋼中への水素の侵入が容易となり、圧縮機の停止により温度が下がった後の再起動で大きな圧力負荷が発生した場合が最も水素の影響が顕著であると考えられる。

そこで、汎用低合金鋼の水素圧縮機への適用を判断するには、圧縮機の動作状況を模擬した環境における水素の影響について各種評価試験や検討を行い、汎用低合金鋼の水素圧縮機への適用可否について判断する必要がある。本研究においては上記の状況を模擬するための試験方法を考案し、水素適合性や破壊靭性の評価結果に基づき、水素圧縮機への適用可否の判断を行う。適用可と判断された場合は低合金鋼技術文書(JPEC TD-0003)の改訂を行うことにより、水素圧縮機への汎用低合金鋼の使用を促し、水素圧縮機の製造における利便性向上、コスト低減に繋げられる。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１） 汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発

高圧水素環境下で使用可能なオーステナイト系ステンレス鋼の材料基準には、水素中での絞りが水素適合性の判断指標として用いられており、水素中における絞りが規格材料の絞り以上であることが水素適合性の基準とされた。その結果、SUS316/316L についてはミルシート上の絞り値が 75%以上であり、かつ水素中におけるオーステナイト構造の安定度の指標である平山の式（式 1）で表される Ni 当量ともに例示基準化がなされていた（図 1）。

$$\text{Ni 当量} = \text{Ni} + 12.6\text{C} + 0.35\text{Si} + 1.05\text{Mn} + 0.65\text{Cr} + 0.98\text{Mo (mass \%)} \quad \text{…式 1}$$

水素の影響は伸びより絞りの方が顕著に表れることから、判断指標を絞りから伸びに変えることで SUS316/316L の使用可能範囲の拡大が図れると期待されるが以下の課題があった。

課題①　伸びのデータの取扱いに関する検証
課題②　伸び指標における安全性の考え方の確立（強度・延性・疲労限度の確保）
課題③　新指標の実効性
課題④　新たな材料範囲と従来の例示基準範囲との整合性
課題⑤　材料の形状（板材、管材、棒材）の違いに関する検討

これらの課題に対して本研究で検討を行い、それぞれの課題を解決した。

課題①については、既存の論文では伸びに対する水素の影響の検討にあたり、伸びの計測はストローク変位と標線間距離の 2 通りで行われており統一されていない。そこで両者の測定方法を比較検証した結果（図 2）、伸びの測定方法ごとの区別は不要であり、既存の文献等の報告値を活用しての検討が可能であると判断した。

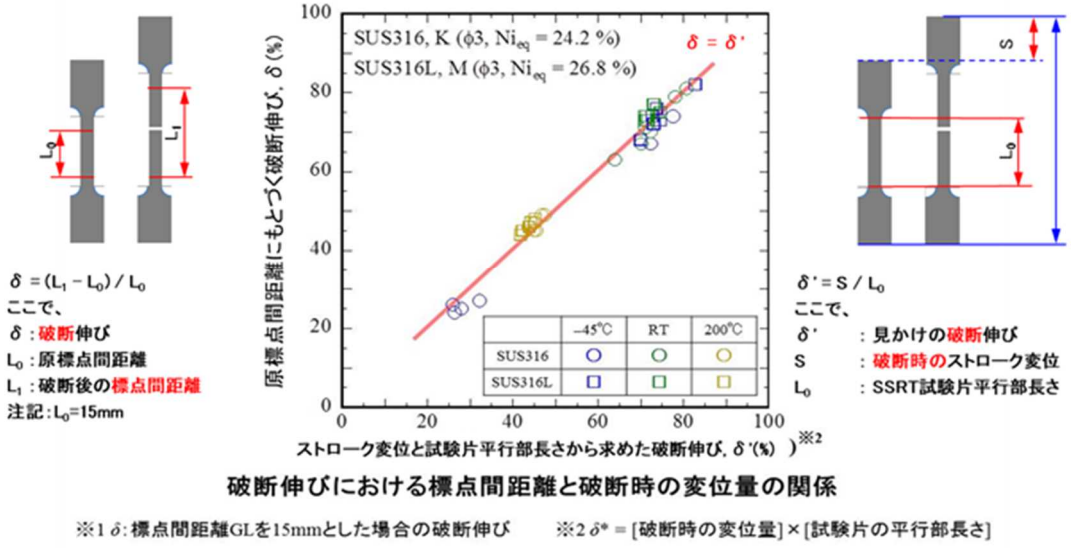


図 2　破断伸びにおける標点間距離と破断時のストローク変位量の関係

課題②については、高圧容器材料には使用環境における強度・延性・疲労特性の確保が必要であり、材料の水素適合性の判断基準を絞りから伸びに変える場合においても同様である。本研究では、強度・延性・疲労特性の確保の要件は以下とした。

・強度に対する要件：使用環境中においてRTS（強度の相対比）＝1
・伸びに対する要件：使用環境中において一様伸びを確保し、式2の関係を満たすこと

実材料の伸び×REL（伸びの相対比）　≧　伸びの材料規格値　…式2

・疲労特性に対する要件：使用環境中における疲労限度が大気中と変わらないこと

SSRT等の実験結果、既存の報告データを用いて検討した結果、-45℃100MPa超の水素中の場合はNi当量26.8%以上であればこれらの条件を満たすことがわかった。

課題③について、材料の伸びとNi当量の関係は超高圧ガス設備に関する基準KHKS 0220記載の式3で表され、Ni当量26.8%以上で、式2を満たす材料の伸びとNi当量の組合せは計算上では多数存在する。

$$REL = 0.6 + 0.4 \times \tanh[(\text{Ni当量} - 26.51)/1.49] \quad (-45℃の場合) \quad …式3$$

市中に流通するSUS316系材料の実際の伸びとNi当量について市場調査を行い、式2と式3を満たし、かつ最も入手しやすいと思われる、伸びとNi当量の組合せの検討を行った。水素ステーション用途と推測されるものを除外し汎用材と思われるJIS G4303、JIS G4304、JIS G4305に適合する計175件のSUS316/SUS316Lのデータを対象に解析した結果、Ni当量26.9%で伸び57%のときに最も入手確立が高くなるとの検討結果が得られた。

課題④について、従来の例示基準ではNi当量28.5%以上（-45℃）であれば材料の伸びは規格値(40%)で合格であるため、Ni当量28.5%以上の場合にも伸び57%以上の条件を適用すると部分的に規制強化となる。そこで、Ni当量28.5%の場合での-45℃100MPa超の水素中での伸びの挙動を検討したところ、水素中で伸びの減少は起こらないことが確認できた。よって、新たな基準案においてもNi当量28.5%以上の領域では、材料の伸びは規格値を満足していれば、延性に対する要件を満足することが確認できた。

課題⑤について、例示基準で認められる材料の形状は5種類であり、形状によって伸び・絞りの機械的性質は異なる（表2)。従来例示基準では絞りの規定がない形状にも絞り75%以上の条件が一律に課せられていた。

本研究では形状の違いについても検討した。Ni当量26.9%のときに式3で得られるRELを用い、形状ごとに式2を適用したところ、棒・板材では伸び57%、管では50%、鍛鋼では伸び42%以上であれば、延性に対する要件を満足することがわかった。

表 2 JIS 規格に定められる SUS316L の材料形状ごとの機械的性質（一部）

形状（JIS 番号）	引張強さ	伸び	絞り
鍛鋼　G3214	480MPa	29%	45%*
管　G3459	480MPa	35%**	規定なし
棒　G4303	480MPa	40%	60%
板（熱間圧延）G4304	480MPa	40%	規定なし
板（冷間圧延）G4305	480MPa	40%	規定なし

*サイズにより複数の規定値を採る。
**試験片形状により異なる。11 号試験片での数値を記載。

これら課題の検討を通して、伸びの指標を用いた新たな水素適合性判断基準を確立できた。新たな水素適合性判断基準について簡単にまとめると、水素中で強度・延性・疲労限度を確保することである。但し、延性の判定に絞りは使用しない。水素中において絞り・伸びの低下をある程度許容するが、伸びが低下する場合は規格材料レベルの伸びを確保するために伸びに裕度を持たせる（材料規格よりも高い伸びのものを使用する）。

＜伸びの指標を用いた新たな水素適合性判断基準の要約＞

・強度に対する要件：使用環境中において RTS（強度の相対比）＝1

・伸びに対する要件：使用環境中において一様伸びを確保し、式 2 の関係を満たすこと

実材料の伸び×REL（伸びの相対比）　≧　伸びの材料規格値　…式 2

REL の計算には KHKS 0220 記載の式 3 を用いる。

$REL = 0.6 + 0.4 \times \tanh[(Ni\ 当量 - 26.51)/1.49]$　（-45℃の場合）　…式 3

・疲労特性に対する要件：使用環境中における疲労限度が大気中と変わらないこと

また、プレクールを行わない高圧水素設備では-45℃の高圧水素に耐えるレベルの水素適合性は不要であり、使用温度の下限値次第では Ni 当量の必要値を下げられるといった適材適所の考え方が可能である。SUS316/SUS316L については例示基準（図 1）における残り 2 つの温度帯（-10℃、20℃）について、また、SUS304 についても各種温度域で新たな水素適合性判断基準を満たす条件について検討した。

SUS316/SUS316L について-10℃で Ni 当量 26.0%、20℃で Ni 当量 24.6%（実材料の伸び値は-45℃の例と統一）となり、従来例示基準の Ni 当量より 1%以上の引き下げを可能とする基準案を作成した。

SUS304 については新たな水素適合性判断基準を満たせる温度は 85℃以上と高くなったため、用途展開が見込めないことから基準案への追記は行わないこととした。

さらに、冷間加工のテーマで検討した SUS305 も、SUS304 や SUS316 と同様のオーステナイト系ステンレス鋼であり、両者のほぼ中間の組成であり伸びの規格値は同じである。得られた SSRT の結果でも Ni 当量に応じて SUS316 と同じ挙動を採ることが確認できた。Ni 当量によって水素適合性を判定可能であることから、SUS316/SUS316L と同じ条件を課すことによって水素適合性を確保することが可能であるため、SUS305 についても基準案化した（表 3）。

なお、本研究中に SUS316/SUS316L の-45℃における材料範囲（表 3 における-45℃以上 250℃以下の範囲）については、基準案の範囲が例示基準として採用され 2020 年 11 月に例示基準が改正された。

【成果まとめ】　達成度：○

・伸び基準での新たな水素特性判断基準の考え方を確立した。高圧水素中での安全性や使用者に対する利便性、異なる温度での使用を想定した適材適所での材料使用等も考慮し、新たな水素特性判断基準に基づく基準案（表 3）を作成した。

・新たな基準案では、従来課されていた絞り 75%の規定を廃するとともに、材料に JIS 規格値を上回る一定の伸びを要求することを条件に、-45℃高圧水素中におけるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316/SUS316L の Ni 当量を 28.5%から 26.9%に、-10℃においては 27.4%から 26.0%に、20℃においては 26.3%から 24.6%に引き下げ、さらに基準を適用する鋼種を SUS305 にも拡大することを可能とした。基準案の一部は例示基準の改正に寄与した。

表 3　伸びを指標とする新たな水素適合性判断に基づく材料範囲の基準案

材料の種類	常用温度の範囲	Ni 当量（平山の式）
JIS G3214 圧力容器用ステンレス鍛工品 （SUSF316、SUSF316L）	-45℃以上 250℃以下	28.5%以上 （伸びが 42%以上の場合にあっては 26.9%以上
	-10℃以上 250℃以下	27.4%以上 （伸びが 42%以上の場合にあっては 26.0%以上
	20℃以上 250℃以下	26.3%以上 （伸びが 42%以上の場合にあっては 24.6%以上
JIS G3459 配管用ステンレス鋼管 （SUS316TP、SUS316LTP）	-45℃以上 250℃以下	28.5%以上 （伸びが 50%以上の場合にあっては 26.9%以上
	-10℃以上 250℃以下	27.4%以上 （伸びが 50%以上の場合にあっては 26.0%以上
	20℃以上 250℃以下	26.3%以上 （伸びが 50%以上の場合にあっては 24.6%以上
JIS G4303 ステンレス鋼棒、 JIS G4304 熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯、 JIS G4305 冷間圧延ステンレス鋼板および鋼帯 （SUS305、SUS316、SUS316L）	-45℃以上 250℃以下 （注）	28.5%以上 （伸びが 57%以上の場合にあっては 26.9%以上
	-10℃以上 250℃以下 （注）	27.4%以上 （伸びが 57%以上の場合にあっては 26.0%以上
	20℃以上 250℃以下 （注）	26.3%以上 （伸びが 57%以上の場合にあっては 24.6%以上

注：SUS305 にあっては許容引張応力が付与された最大温度を上限とする

（2） 汎用ステンレス鋼冷間加工材に関する研究開発

水素ステーションへの使用を目指した冷間加工材の基準案を作成するために、以下の課題を解決する必要がある。

課題① 冷間加工材の水素適合性

・水素適合性を確保できる冷間加工度の範囲

課題② 冷間加工材の許容引張応力の設定

・許容引張応力を設定したい材料の寸法情報

・材料形状、寸法や加工度、加工方法による機械的性質への影響

① 冷間加工材の水素適合性

新たな水素特性判断基準に合致する SUS316 系ステンレス鋼を用いる場合の冷間加工材に対する水素適合性の判断基準について検討した。しかし、そもそも冷間加工材には機械的性質に関する規格値が存在しないため、「（1）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発」で確立した水素適合性の判断方法をそのまま適用することはできない。そこで、冷間加工前の状態では水素適合性については十分であるという点に着目し、水素適合性（伸びを延性の指標としているので、伸びの相対値 REL）が低下しない範囲の冷間加工度であれば許容できるとの考え方を提案した。

新旧例示基準の-45℃における Ni 当量の基準値に近い、Ni 当量 28.6%と 26.6%の板材を種々の減面率（冷間加工度）で圧延し、SSRT による水素適合性の評価を行った結果（図 3）では、ともに冷間加工度 40%までは REL、RTS は母材（冷間加工度 0%）の値を維持していた。即ち、伸びを指標とする新たな水素適合性判断基準に適合する SUS316/316L を冷間加工により用いる場合は、冷間加工度 40%以内であれば高圧水素環境において引続き使用が可能であると結論した。

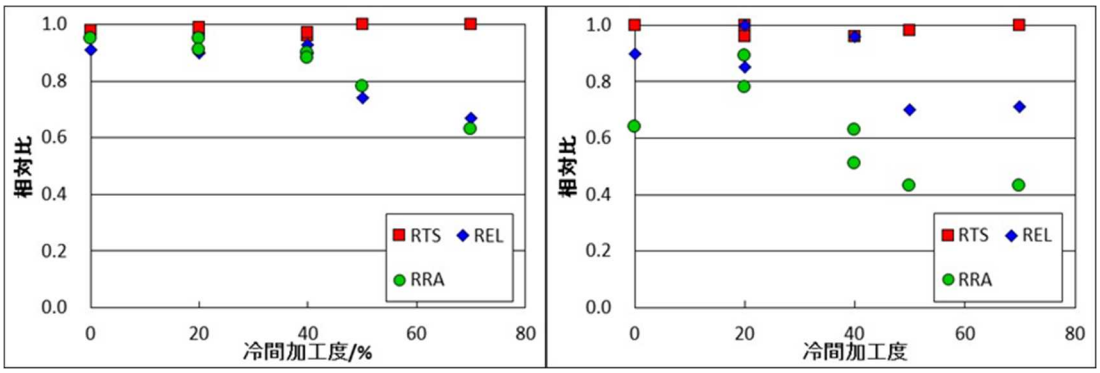


図 3 冷間圧延材の SSRT 評価結果（左：Ni 当量 28.6%、右：Ni 当量 26.6%）

試験条件 温度：-45℃（冷間加工度 0~40%）-40℃（冷間加工度 50～70%）

水素圧力：106MPa（冷間加工度 0~40%）70MPa（冷間加工度 50～70%）

管を曲げて使用する場合の曲げ部の水素適合性について検討した。曲げも塑性変形を伴う加工であるから冷間加工と同様に水素適合性を議論することが可能である。管の曲げの場合、曲げによる冷間加工度は、「管の肉厚に対する減肉率＝冷間加工度」となる。高圧ガス設備で

用いられる 4D 曲げ（曲げ半径が管の外径の 4 倍）について曲げ部の肉厚の変化を調べたところ、最大でも 5%程度の厚み変化であったことから水素適合性への影響はないと考えられる。また、4D 曲げよりも小さい半径の曲げも特定則別添 1 に規定されているが、「高圧ガス特定設備等の試験検査に関する質疑応答集」（KHK）によれば、曲げ半径ごとに許容される肉厚減少率は異なるものの 40%を超える肉厚減少率が許容されることはない。

よって、例示基準に適合する管を用いて特定則の範囲内の曲げを行う場合、水素適合性への影響はないことから、管の曲げに関して、水素適合性に関する追加条項は不要であることがわかった。

② 冷間加工材の許容引張応力の検討

水素ステーションにおいて冷間加工を使用したいケースとして推測されるのは、施工における管の曲げ、バルブ等の機器類に関してはボディ部への棒材の適用と考えられる。許容引張応力の設定は、引張強さ等の機械的性質に関する実験データを取得した材料の大きさまでしか適用されないため、検討にあたり水素インフラ関係事業者への聞き取りを実施し、検討する材料の大きさを決定した。SUS316/316L については管の外径は最大φ25.4、棒材は将来の水素の大規模利用を見据えた大径の材料の要望があり最大φ80 の各種寸法・冷間加工度の冷間引抜材を準備した。冷間加工法による差異を確認するため、冷間圧延材（最終厚み 20 ㎜）の作製も行った。機械的性質を検討する冷間加工度の範囲は、用途が水素ステーションへの適用であることを踏まえ、水素適合性に影響が出ない冷間加工度 40%までとした。SUS305 については用途が特定可能なことから、外径φ20～42 の丸棒に冷間引抜加工したものを使用した。

＜冷間引抜・棒＞

SUS316/316L の冷間引抜棒の検討を行うにあたり、種々の冷間加工度・寸法の冷間加工材の機械的性質や水素適合性に関するデータを比較・議論するため、冷間引抜を行う母材を共通化する必要があった。そこで、φ90 の棒材を母材として、冷間引抜と溶体化処理・急冷を繰り返して共通の母材からなる各種寸法・冷間加工度の冷間引抜材を作製した（表 4・図 4）。

表 4　作製した冷間引抜材の冷間加工度と外径の一覧

冷間加工度	材料寸法
0%（母材）	φ90
20%	φ20、φ40、φ62、φ80
40%	φ20、φ40、φ62

母材：SUS316L（Ni 当量 27.2%）



図 4　作製した冷間引抜材の外観
（冷間加工度 40%、φ20、酸洗浄済）

一般に、冷間引抜を行うと、材料断面に一様に加工は入らない。断面のビッカース硬さを測定すると材料中心と外表面付近では硬さは異なり、傾向として断面中心から表面に向かって硬度が上昇した（図 5）。この結果は冷間加工を行うことで材料の均質性が失われていることを示唆する。

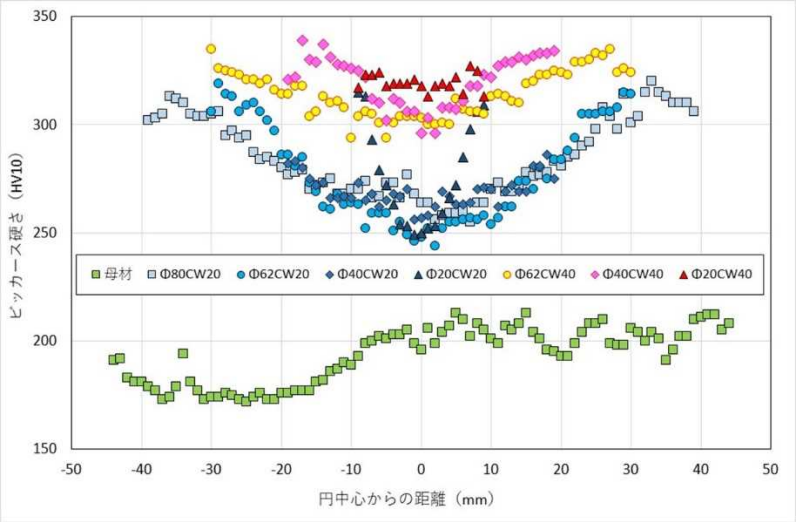


図 5　作製した冷間引抜材のビッカース硬さ分布（HV10）

作製した各種寸法・冷間加工度の冷間引抜材について、材料中心から様々な距離で試験片を採取し、SSRT による水素適合性の評価と引張試験による機械的性質の評価を実施した。

水素適合性については項目①の結果から予想された通り、冷間加工度 40%以内のため寸法・試験片位置の影響は見られず、水素適合性に関する特別な注意点はないことが確認できた。

機械的性質については引張強さが寸法・試験片採取位置・冷間加工度の影響を受け（図 6）、必ずしも材料中心部が最弱とならないとの結果が得られた。また、厚さ 20 ㎜同士の冷間圧延材と冷間引抜材の比較では、材料中心部の引張強さも 100MPa 近く異なっており、加工方法の影響も受けることがわかった。

本事業の冷間圧延、冷間引抜はそれぞれ異なる加工メーカーが実施しており、加工速度等の加工条件の統一は考慮されていない。材料内部への加工の入り方次第で機械的性質が変わり材料内部の引張強さや最弱部位置への影響する可能性も考えられる。基準化するためには、各々の加工業者が実施する多種多様な冷間加工に対応する必要があり、今回の結果により、冷間加工材の強度をどのように保証するか（許容引張応力の設定にも影響する）ということが課題として抽出された。

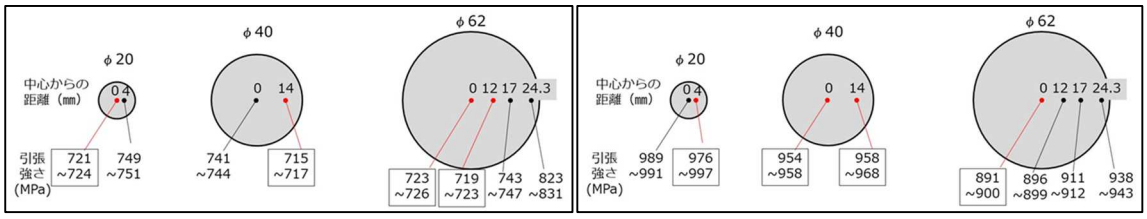


図 6　冷間引抜材の寸法・試験片採取位置ごとの引張強さの分布
(左：冷間加工度 20%、右：冷間加工度 40%)

＜冷間引抜・管＞

冷間引抜管の場合、JIS 11 号試験片を用いて引張試験を行うと全断面積で引張強さを評価できるため、試験片には必ず最弱部を存在させることが可能である。即ち、全断面積で評価することによって材料の強度を保証できると考えられる。そこで、JIS 11 号試験片を用いることを前提に、冷間引抜管の許容引張応力を検討することとした。

材料の機械的性質の基準値（保証値）が明確であれば許容引張応力の検討は可能である。各温度における許容引張応力は特定則第 14 条第 1 項第 1 号に基づき、当該温度における最小引張強さの 1/4 と当該温度における最小 0.2%耐力の 1/1.5 のどちらか低い方を採用すればよい。そこで、水素インフラ事業者等に冷間引抜管に対する要望、事前評価の実績についての聞き取りを行い、冷間引抜管の機械的性質について仮の規格値（＝室温における材料の保証値、表 5）を設定し、室温の引張強さに対して温度変化時の強度変化を反映させて許容引張応力案を作成するという手法を採った。

表 5　冷間加工した SUS316/316L 管の機械的性質値案

鋼種	機械的性質				備考
	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り	
SUS316/316L TP	500MPa	800MPa	12%	-	11 号試験片によること 外径 25.4 ㎜まで適用 300℃まで適用

各温度における引張強さと 0.2%耐力の求め方には 2 通りの方法があり、KHK S0220 (2020)に記載の強度低下係数を用いる方法と、実測による温度依存性（温度トレンド）を求める方法がある。強度低下係数を用いると保守的な結果となるため、実測での温度トレンドを求め、両者を比較してより高い許容引張応力が得られる方を基準案とした。

φ14.3～25.4 の冷間引抜管（引張強さ 800MPa 以上）を室温～200℃で引張試験を行い、温度依存性から得られた実測に基づく許容引張応力と、強度低下係数から求めた許容引張応力がほぼ同じであったため、適用温度範囲が 300℃までと広い、強度低下係数から求めた許容引張応力（表 6）を基準案に採用した（実測による場合は、測定温度上限より 50℃低い温度までしか許容引張応力を申請できないため、上限が 150℃となる）。

表 6　SUS316/316L 冷間加工管の許容引張応力案

温度（℃）	～40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
許容引張応力（MPa）	200	188	184	181	177	175	172	171	169	168	168
（備考）　加工後の引張強さは 800MPa 以上であること（11 号試験片によること） 加工後の 0.2%耐力は 500MPa 以上であること（11 号試験片によること） 冷間加工度（減面率）の範囲は 20%～50%であること											

＜SUS305＞

SUS305 冷間加工材は快削性が高く、Mo を含んでおらず省資源性に優れ、冷間加工による塑性硬化で 900MPa 程度の引張強さが見込める。一方、現在の高圧水素機器に使用されている析出硬化系耐熱合金 SUH660 は高コストで製造工程が煩雑、長納期、加工性が低いという問題があることから、SUH660 の置き換えを測るべく、例示基準化を目指した検討を行った。また、SUS305 は母材の状態で例示基準化されていないため、強度特性に加えて水素適合性に関する検討を行った。

表 7 に示す 4 種の Ni 当量の母材から外径φ20～42、冷間加工度 30～35%の SUS305 冷間引抜棒を作製した。これらの冷間引抜棒に加え母材も含め、室温、90℃および-45℃で水素適合性を、各種温度で機械的性質を評価した。

表 7 冷間引抜棒の作製に用いた SUS305 母材の化学成分（%）

溶解番号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ni当量
1	0.11	0.93	1.91	0.029	0.024	12.83	18.78	28.75
2	0.11	0.89	1.90	0.026	0.027	11.99	18.63	27.79
3	0.11	0.90	1.91	0.027	0.027	10.99	18.68	26.84
4	0.04	0.90	1.89	0.027	0.024	10.99	18.69	25.94
JISG4303 SUS305 成分規格	0.12以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	10.50 ～13.00	17.00 ～19.00	—

注:Ni当量は、式①に化学成分の成績を代入して求める。なお、Moは不純物元素であるため、Mo=0%として計算する。

Ni当量(%)=12.6C+0.35Si+1.05Mn+Ni+0.65Cr+0.98Mo…①(平山の式)

水素適合性については、-45℃においては Ni 当量 26.84～28.75%の母材は良好な水素適合性を示した。この結果は（1）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大における各種 Ni 当量の SUS316/316L で得られた結果とも合致した。例示基準化された SUS316/316L と同じオーステナイト構造を有し、Ni 当量で水素適合性を判断可能（式 2 の元となったデータは SUS304 と SUS316/316L の実験結果であり、SUS305 は同じ構造を持ち両者の中間の組成を有する）であることがわかったため、SUS305 の母材も伸びを指標とする新たな水素適合性判断基準に基づいて水素適合性を保証できることがわかった。この結果から、表 3 の基準案に SUS305 を追加することとした。

機械的性質については、-50～175℃で引張試験を行い評価した。外径 φ 42 の場合は材料中心・JIS 規格指定位置・表面近傍の 3 か所で試験片を採取している。試験結果の一例として、0.2%耐力・引張強さに関する結果を表 8 に示す。冷間加工した SUS305 では室温の引張強さが 900MPa 程度となり、SUH660 を十分代替可能であることが示された。

また、本研究で得られた一連の実験結果は HPI：（一社）日本高圧力技術協会に提出され、許容引張応力の付与に関する検討が行われている。うち、母材（固溶化熱処理材）は JIS B8265 に圧力容器の材料として新規登録され、許容引張応力が付与される見込みとなっている。

表 8 強度特性評価の結果（0.2%耐力・引張強さ）

溶解番号	直径(mm)	減面率(%)	採取位置	引張試験結果(MPa)																					
				項目	−50℃			室温			75℃			100℃			125℃			150℃			175℃		
1	φ29	0	中心	0.2%耐力	371	373	368	289	292	292	245	248	248	235	232	232	219	219	221	214	215	216	207	205	204
				引張強さ	741	739	738	620	622	621	579	580	580	564	563	564	550	550	551	546	546	545	539	538	537
	φ20	30	中心	0.2%耐力	981	991	981	899	914	896	853	848	843	842	822	824	813	819	822	816	805	812	804	811	814
				引張強さ	1060	1062	1061	953	956	954	893	888	884	879	871	872	858	860	859	848	848	848	857	857	853
		35	中心	0.2%耐力	1082	1079	1083	999	1010	1010	947	932	931	920	915	916	907	902	893	893	893	898	889	879	890
				引張強さ	1143	1137	1138	1036	1043	1038	972	961	958	939	943	940	924	927	926	911	911	913	904	902	904
	φ42	30	中心	0.2%耐力	810	786	782	775	741	758	695	769	751	750	726	715	720	728	695	737	699	660	667	687	681
				引張強さ	1058	1052	1052	936	936	937	881	877	881	861	870	861	857	857	850	839	844	839	835	841	839
			JIS	0.2%耐力	833	814	825	781	793	788	763	770	777	782	755	721	726	712	743	708	738	699	701	749	733
				引張強さ	1075	1070	1069	968	976	968	911	918	914	901	904	894	884	887	884	872	875	867	871	876	869
			表層	0.2%耐力	994	993	982	917	931	911	889	874	894	847	862	885	859	852	871	866	836	859	840	820	823
				引張強さ	1140	1148	1141	1048	1047	1046	983	993	982	971	964	971	958	957	957	949	939	948	940	929	936
2	φ20	0	中心	0.2%耐力	314	315	311	247	254	252	204	207	203	206	206	199	194	191	188	198	190	186	167	170	167
				引張強さ	733	732	727	601	601	597	558	553	556	529	529	529	514	523	515	514	509	508	483	486	483
		30	中心	0.2%耐力	922	910	914	837	835	847	808	803	796	773	773	770	766	759	764	740	746	741	752	743	748
				引張強さ	1023	1010	1014	897	892	893	853	841	842	827	828	822	822	811	816	805	813	803	810	801	806
		35	中心	0.2%耐力	1002	1009	1016	912	938	926	893	900	903	864	867	858	855	855	866	838	842	841	835	833	831
				引張強さ	1084	1084	1091	967	975	974	919	935	933	903	910	900	896	892	906	875	882	883	869	871	872
3	φ20	0	中心	0.2%耐力	321	315	318	252	251	258	208	205	207	198	208	207	186	188	189	189	192	188	178	174	177
				引張強さ	757	752	753	608	612	610	559	556	558	530	530	534	512	512	512	499	504	504	500	501	499
		30	中心	0.2%耐力	909	918	918	839	834	845	803	811	812	793	793	799	744	745	744	724	733	741	740	739	737
				引張強さ	1022	1029	1030	910	911	910	862	863	865	847	847	844	823	820	821	810	808	819	818	818	811
		35	中心	0.2%耐力	1026	1027	1031	945	973	969	923	902	918	881	881	880	851	858	855	842	846	849	836	824	830
				引張強さ	1110	1111	1114	1009	1010	1008	955	952	956	928	930	928	910	911	922	901	901	903	892	887	884
4	φ20	0	中心	0.2%耐力	251	252	257	214	214	214	167	178	171	176	174	173	154	153	166	162	163	165	158	143	144
				引張強さ	744	746	739	556	551	555	498	496	496	469	466	469	454	458	457	443	445	446	435	433	433
		30	中心	0.2%耐力	848	842	840	797	799	789	748	739	748	713	713	717	682	681	678	662	665	659	655	648	652
				引張強さ	957	948	949	849	851	848	795	798	791	767	768	774	754	749	749	735	737	736	728	719	721
		35	中心	0.2%耐力	935	939	933	884	853	885	838	834	837	801	803	794	780	775	780	769	771	773	751	754	756
				引張強さ	1018	1018	1014	929	929	927	873	872	872	841	844	840	828	826	832	820	821	824	806	806	806

【成果まとめ】　達成度：○

・新たな水素特性判断基準に適合する SUS316/316L を冷間加工する場合、冷間加工度 40%まで水素適合性を維持できることを明確化した。
・特定則記載の範囲での曲げは水素適合性に影響がないことを明らかにした。
・冷間加工した SUS316/316L 棒材の許容引張応力を設定する上での課題を抽出した。
・冷間加工した SUS316/316L 管の許容引張応力案を策定した。
・SUS305 の冷間加工材が SUH660 を代替可能である可能性が示され、許容引張応力の付与に資する実験結果が得られた。
・SUS305 母材に関する JIS 規格の圧力容器の材料としての新規登録、許容引張応力の付与に資する実験結果が得られた。
・SUS305 母材は一般則例示基準 9.2 に記載できる可能性が示唆された。

（3） 汎用ステンレス鋼溶接材に関する研究開発

溶接継手を高圧水素で使用する場合は溶接健全性の確保だけでは不十分であり、溶接部の水素適合性の確認も必要である。溶接が様々な分野で使用され、溶接施工者毎に多種多様なノウハウを蓄積し発展させてきた経緯から、本研究の溶接技術指針では、溶接健全性の確保は各々の溶接事業者の手法に委ね、水素適合性に特化した内容とすることとした。

課題①　溶接材の水素適合性の判断基準の作成

・元々、溶接材の機械的性質（延性）に関する数値上の取り決めがない。
・As weld のオーステナイト鋼の溶接部はフェライト相が共存する場合が多い。フェライト相はオーステナイト相より水素の影響を受けやすいとされるが、フェライト相に Ni 当量の議論を適用できずフェライト相の水素適合性を予測できない。
・凝固時の成分偏析を考慮した水素適合性の判断基準が必要となる。
・SSRT による水素適合性評価はコストが高いため、実際の水素ステーションの施工において、溶接事業者に SSRT の実施を強いることのないよう配慮が必要。

課題②　溶接材の水素適合性の評価方法

・実際の溶接継手から採取する引張試験片は、両端が母材で中央が溶接金属（母材と溶接棒の溶融物）となる。SSRT 評価では水素中と大気中で試験片の破断部位が異なり水素適合性を表す相対比を求められない可能性がある。

課題③　溶接技術指針の構成

・溶接事業者が SSRT による水素適合性の確認を都度行う必要がない、母材希釈率 0~100%全てで良好な水素適合性を示す（＝様々な溶接条件に対応）、母材と溶接材料の組合せを例示する。
・溶接条件の制限を設けることは極力避けて技術指針を作成する。

＜水素適合性の評価＞

4 種の母材とその共金溶接材料について、材料単体および As weld の溶接継手の水素適合性を SSRT で評価した。母材に SUS316L (Ni 当量 28.6%)、SUS316 (Ni 当量 26.6%)、SUS304L(Ni 当量 23.5%)、SUS304LN(Ni 当量 25.2%)、溶接材料に YS309LMo、YS316L、

YS308L、308LN を選定した。

溶接には Ar シールドガスを使用した自動 GTAW（Gas Tungsten Arc Welding）溶接を用いた。いずれの試料作製においても溶接後の熱処理は行っていない。

溶接材料の材料単体の水素適合性評価には、溶接材料を開先面にバタリング溶接したのち自動 GTAW 溶接で多層溶接を施した全溶着金属を作製し、溶接線と平行方向に採取することで溶接材料のみからなる試験片（図 7）を得た。溶接材料の溶接は入熱 0.9～1.2kJ/mm、パス間温度は 150℃以下の条件で行った。

溶接継手の作製も同様に自動 GTAW を用い、入熱 4-7kJ/cm、パス間温度は 150℃以下、3 パス溶接により作製した。溶接継手の場合は、SSRT 試験片は溶接線と直角方向に採取した（図 8）。

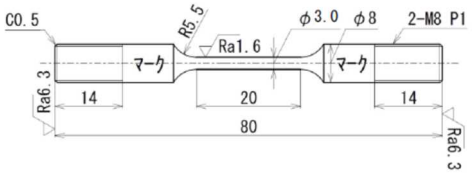


図 7　溶接検討用 SSRT 試験片

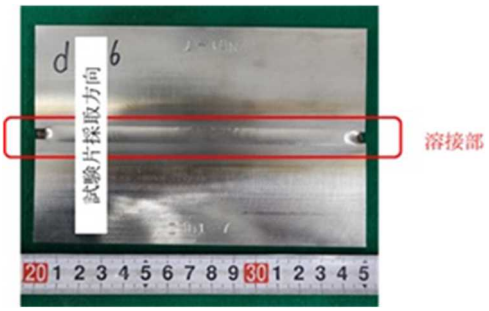


図 8　溶接継手の外観と試験片採取方向

SSRT による水素適合性評価を室温および-40℃、70MPa 水素中で行った。-40℃における結果を表 9 に示す。表中の BM および WM は SSRT での試験片が破断した位置（BM＝母材、WM＝溶接金属）を表す。

表 9　母材、溶接材、溶接継手の-40℃における水素適合性評価結果（相対比のみ）

	母材 （Ni当量）	SUS304L(ZNC1) (23.5%)	SUS304LN(ZND1) (25.2%)	SUS316(ZNA3) (26.5%)	SUS316L(ZNB3) (28.5%)
溶接材料 （Ni当量）	水素適合性	RRA:18.1% RTS:66.1% REL:29.8%	RRA:18.0% RTS:99.2% REL:73.7%	RRA:41.1% RTS:85.2% REL:44.5%	RRA:78.7% RTS:100.5% REL:101.4%
YS308L (24.6%)	RRA:30.9% RTS:77.3% REL:43.3%	溶接継手 作製せず	溶接継手 作製せず	溶接継手 作製せず	RRA:27.6% RTS:98.8% REL:46.4% (BM/WM)
308LN (26.6%)	RRA:82.4% RTS:99.6% REL:91.6%	溶接継手 作製せず	溶接継手 作製せず	溶接継手 作製せず	RRA:72.9% RTS:100.6% REL:95.8% (BM/BM)
YS316L (29.4%)	RRA:94.4% RTS:98.1% REL:114.9%	RRA:18.4% RTS:73.5% REL:44.1% (WM/BM)	RRA:56.2% RTS:100.3% REL:56.2% (WM/WM)	RRA:32.6% RTS:94.0% REL:66.0% (WM/WM)	RRA:66.1% RTS:100.3% REL:98.4% (WM/WM)
YS309L Mo (33.9%)	RRA:93.3% RTS:98.6% REL:89.8%	RRA:16.3% RTS:106.5% REL:101.6% (WM/WM)	RRA:69.1% RTS:78.3% REL:44.1% (WM/BM)	RRA:46.6% RTS:101.0% REL:82.1% (WM/BM)	RRA:94.3% RTS:94.3% REL:87.5% (BM/WM)

＊数値下の記載は（大気中の破断位置／水素中の破断位置）
BM：母材破断、WM：溶接部破断

最も水素適合性が良好であった、Ni 当量 28.5%の SUS316L 母材と YS309LMo の溶接材との組合せについて、入熱量や溶接速度を変化させ、各種の母材希釈率に対応する溶接継手を作製した。溶接継手の評価において水素中と大気中で破断部位が一致しない事例があったため、試験片は溶接線平行方向に採取し、金属組織解析や SSRT による評価を行った。

各種母材希釈率の溶接継手の評価結果（概略）：

・溶接金属中にδフェライトは5～15%程度含まれていた。全ての母材希釈率でδフェライトはバミキュラー構造をとって溶接金属中に分散していた（表10）。

・溶接後熱処理を行わないため凝固偏析が起こっており、オーステナイト相ではNi濃度が低下している領域が見られた。（例：母材希釈率100%（Ni当量28.5%の母材同士の溶接）では、部分的にオーステナイト相のNi当量は27.6%に低下していた）

・母材希釈率0~100%の全ての溶接金属で、-40℃70MPa水素中で良好な水素適合性が得られた（表11）。

表10　Ni当量28.5%のSUS316L母材とYS309LMoとの溶接継手における母材希釈率を変化させた際の溶接金属部の組織評価結果

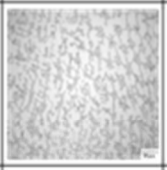
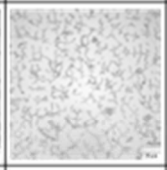
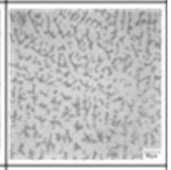
母材希釈率	0％	20％狙い	40％狙い	60％狙い	80％狙い	100％
実測	-	21.92％	40.64%	59.02%	78.75%	-
溶接金属組織						
δフェライト量	15.0％	11.0％	10.2％	8.1％	6.5％	5.1％
凝固モード	FA	FA	FA	FA	FA	FA
フェライト形態	バミキュラー	バミキュラー	バミキュラー	バミキュラー	バミキュラー	バミキュラー

表11　Ni当量28.5%のSUS316L母材とYS309LMoとの溶接継手における母材希釈率を変化させた際の溶接金属部の水素適合性評価結果

母材希釈率(%)		試験条件	RRA (%)	RTS (%)	REL (%)
狙い	実測値				
0	-	70MPa@-40℃	93.3	98.6	91.9
20	24.4	70MPa@-40℃	99.9	101.5	109.3
40	40.2	70MPa@-40℃	108.0	101.6	110.9
60	59.7	70MPa@-40℃	108.9	101.1	91.2
80	74.8	70MPa@-40℃	95.1	102.1	122.2
100	-	70MPa@-40℃	66.3	101.9	82.6

これらの評価結果を基に、溶接技術指針の策定を行った。オーステナイト系ステンレス鋼を溶接するとオーステナイト相とフェライト相との分離が避けられないため、それぞれの相について水素適合性に関する要件を検討することとした。

オーステナイト相については凝固偏析を考慮した要件を定める。凝固偏析により Ni 当量が低下している領域が溶接金属中に存在しても、その領域のNi当量が26.8%以上であれば、-45℃の高圧水素中において、強度・延性・疲労特性を確保できているオーステナイト相であることが（1）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大に関する研究開発の章で示されているので、これをオーステナイト相に関する要件と結論した（但し、凝固モードによってオーステナイト相内のNi当量が低下する領域は異なるので注意）。

フェライト相については水素適合性を予測する手段が現状無く、既報の知見も取り入れて

要件を検討した。δフェライト量が多くなると溶接金属全体の水素適合性は低下すると言われており、これはδフェライトの方が高い水素感受性を示し、フェライト相の内部でき裂進展が進むことによるようである。δフェライト量が 20%以下であれば影響がないとも言われているが、本研究では 15%を超えるδフェライト量での確認はできず、数値による規定は見送ることとした。フェライト相の内部でのき裂の伝播による溶接継手全体の破壊を防ぐため、溶接金属内でフェライト相が連通しておらずオーステナイト相中に分散していることを、フェライト相に関する要件と結論した。

オーステナイト相とフェライト相に関する要件の確認は、SSRT 試験を行わなくても実施可能であり、これらの要件を満たすための溶接条件は指定しない。多層溶接の場合は、熱履歴を最も受けている初層を確認するとよい。

全ての母材希釈率においてオーステナイト相とフェライト相の要件を満たし、SSRT 試験においても良好な水素適合性を確認済みの、Ni 当量 28.5%の SUS316L と YS309LMo の組合せは、低温高圧水素における水素適合性の好適事例として例示できる。

溶接健全性が確認できている上でこれらの水素適合性に関する要件を満たしていれば低温高圧水素環境で使用できることを溶接技術指針としてとりまとめた（JPEC ホームページで公開中）。

＜低温高圧水素環境で使用可能な As weld のステンレス鋼溶接継手の条件＞

1) 溶接健全性が確認できていること
2) Ni 当量(平山の式)28.5%以上の SUS316L と YS309LMo との溶接継手であること

【2)以外を使用する場合は、3)または 4)のどちらかを満たしていること】

3) 溶接金属初層において、フェライト相が溶接金属内を連通せずオーステナイト相中に分散しており、かつオーステナイト相の Ni 当量(平山の式)が 26.8%以上(-45℃以上の高圧水素に用いる場合)であること
4) 実使用条件の温度･圧力の高圧水素条件で SSRT による溶接継手の評価を行い、強度および延性が水素の影響を受けないことが確認できていること

【成果まとめ】　達成度：○

・材料特性、水素適合性等の技術指針作成に資するデータを取得した。
・溶接金属におけるオーステナイト相、フェライト相に求められる水素適合性の要件を整理し、溶接技術指針を作成した。
・溶接技術指針において SSRT による水素適合性の確認が不要となる事例を例示した。

（4） 汎用低合金鋼の高温適用に関する研究開発

汎用低合金鋼を高温高圧水素環境での使用、とりわけ水素圧縮機への適用を目指した場合に、以下のことが課題となる。

課題　水素圧縮機の作動状況の模擬

・水素蓄圧器に用いる場合と異なり、水素圧縮機では急激な温度・圧力の変動を伴う。鋼を 200℃の高温高圧雰囲気に曝すと鋼中に水素が侵入する。動作時に鋼の内部に水素がチャージされ、停止により温度が下がり、再稼働で水素圧が上がった直後、内部水素・

外部水素・外圧が加わり、最も水素の影響を大きく受ける状態になると考えられる。

＜材料特性に対する水素の影響の検討＞

本研究では 850℃で 2h 焼き入れ、640℃で焼き戻しした SNCM439、SA-723M、870℃で 2h 焼き入れ、610℃で焼き戻しした SCM435 の各種低合金鋼を使用した。

圧縮機の稼働時に部材が高温・高圧の水素ガスに曝露され水素が材料中に侵入する状況を模擬するため、高温高圧で水素ガス曝露を施した後に室温高圧水素ガス中で各種材料試験を行った。それらの試験結果を用いて、水素ガス曝露により材料内部に侵入した水素（内部水素）が、水素ガス環境中試験（外部水素の試験）の結果に及ぼす影響を評価することとした。

図 9 に、水素ガス曝露から各種材料試験直前までの過程を示す。水素ガス曝露条件は、温度：200℃、雰囲気：115 MPa 水素ガス、保持時間：1 時間である。水素ガス曝露後、水素ガス圧力を 100～115 MPa の範囲に保持しつつ、温度を 200℃から室温まで段階的に降下させた。水素ガスの圧力が 115 MPa、温度が室温に到達した後、各種試験を開始した。

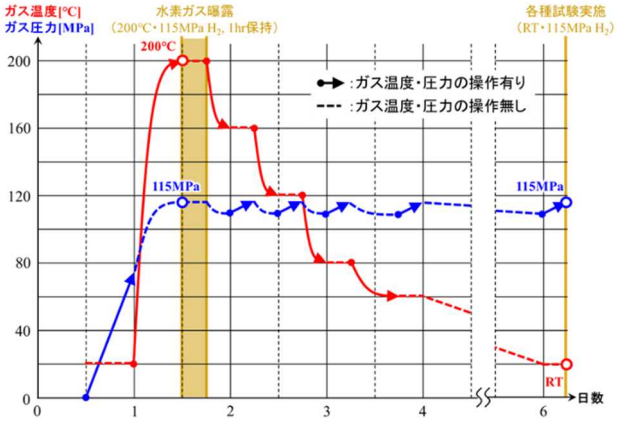


図 9　本研究における高温・高圧水素ガス曝露プロセス

高温・高圧水素ガス曝露により水素チャージした低合金鋼の水素適合性評価として、SSRT 試験、破壊靭性試験、疲労き裂進展試験を実施した。一例として、SNCM439 について結果の一部を示す。図 10 に示す室温高圧水素中における SSRT 試験結果では、外部水素（雰囲気）により破断伸び・絞り（図中省略）が不活性ガス中に比べて低下したものの内部水素（水素チャージ）による差異は見られなかった。

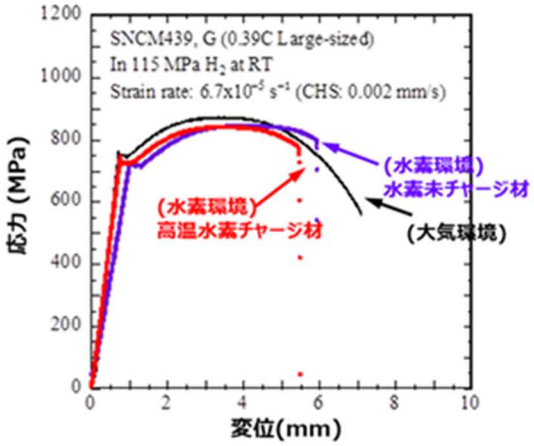


図 10　低合金鋼 SNCM439 の SSRT 特性に及ぼす高温・高圧水素ガス曝露の影響

図 11 に示す室温高圧水素中の破壊靭性試験の結果は、高温・高圧水素ガス曝露による水素チャージを行った場合でも荷重－き裂開口変位曲線の比較から同程度の破壊靭性となることを示した。

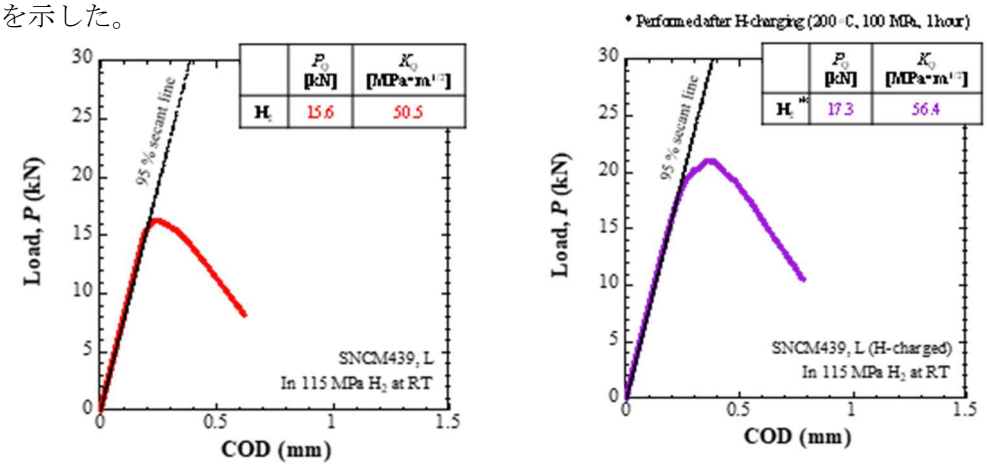


図 11　低合金鋼 SNCM439 の荷重－き裂開口変位曲線
（左：水素チャージなし、右：水素チャージあり）

図 12 に示すき裂進展速度－応力拡大係数範囲曲線では、試験を実施した応力拡大係数の全範囲において室温高圧水素中では大気中に比べ、き裂進展加速率は $\Delta K = 25$ MPa・m$^{1/2}$ で約 40 倍と加速されるものの、高温・高圧水素ガス曝露による水素チャージの影響は認められなかった。

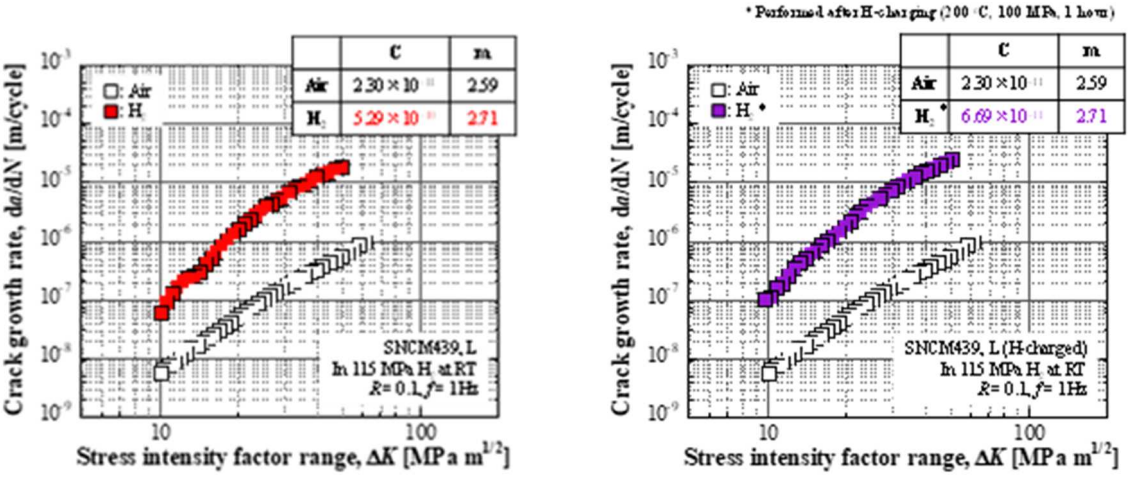


図 12　低合金鋼 SNCM439 のき裂進展速度－応力拡大係数範囲曲線
（左：水素チャージなし、右：水素チャージあり）

これらの試験の結果から、汎用低合金鋼が長期間高圧水素に曝露されて材料内部に水素が侵入・飽和した状態であっても、各種特性に対する水素の影響はチャージされた内部水素よりも外部水素の方が支配的であり、また、図示は省略するが-45℃～200℃の温度範囲において引張強さは水素による影響を受けないことがわかった。

＜低合金技術文書の改訂＞

低合金鋼が高温でも高圧水素用耐圧材料として安全に使用できることが立証されたため、低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 の改訂について、NEDO 事業実施者に蓄圧器メーカーを

加えた「低合金鋼技術文書検討タスクフォース（TF)」と、学識有識者からなる「低合金鋼技術文書検討分科会」を組織し（図 13)、審議を行った。

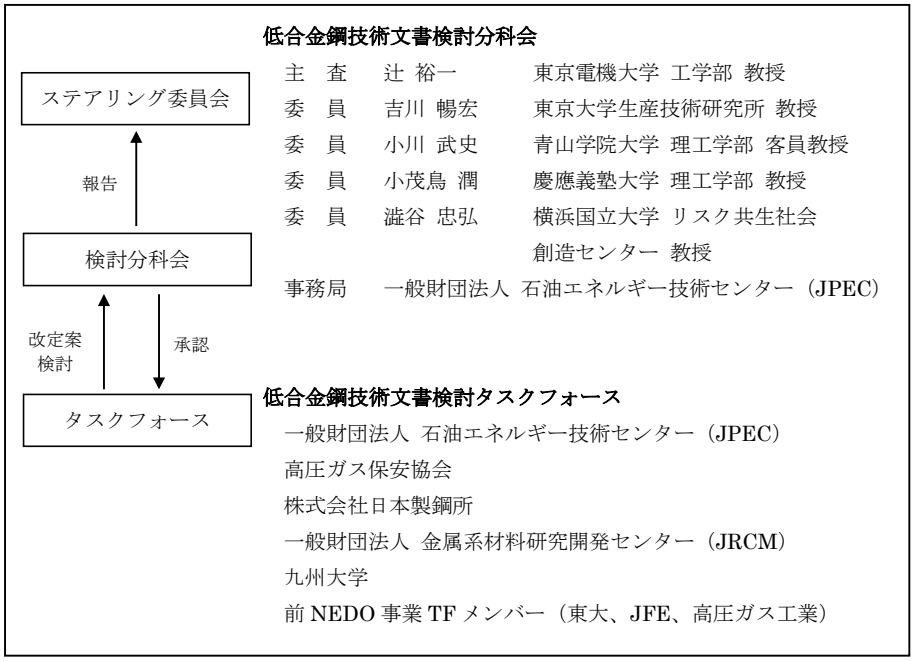


図 13　低合金鋼技術文書改定の審議体制

審議を経て、低合金鋼技術文書は文書名に圧縮機を追加する形で改題し、「水素スタンドで使用される低合金鋼製圧縮水素用設備（蓄圧器および圧縮機）に関する技術文書」JPEC-TD 0003(2020)として 2021 年 3 月 12 日に改定・発行された。以下、改訂の要点を示す。

- 高温における水素影響評価結果を勘案し、技術文書の適用温度範囲の上限を 200℃に拡張した。
- 低合金鋼を水素圧縮機へ適用する際の規定を新たに追加した。
- 特定設備の技術基準の解釈別添 7 の圧力上限が撤廃されたことを受け、本技術文書が想定する詳細基準事前評価申請時の根拠となる技術基準として、特定設備の技術基準の解釈別添 1 に加え、別添 7 を追加した。
- 前項の変更に伴い、許容引張応力設定時の設計係数は 4.0 又は 3.5 とした。
- 技術文書本文中に併記されていた実機蓄圧器の解体調査事例は解説に集約した。
- 保安検査の検討状況を鑑み「設計段階における疲労き裂進展解析」は本文から解説に移した。

【成果まとめ】　達成度：◎

- 運転状態を想定した水素圧縮機内の暴露環境を模擬した低合金鋼の評価方法を構築、安全性の判断に資する実験結果を取得した。
- 低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 を改訂し、200℃までの使用と水素圧縮機への適用を可能とした。
- 2022 年度までの研究予定を 2020 年度に前倒し達成した。

３．２　成果の意義

（１）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

新たな水素適合性判断基準の確立により、安全を確保しつつ材料範囲を拡大できることを示した。本研究の基準案の実現は、他の産業用途でも用いられる汎用レベルの SUS316L が水素ステーションの高圧水素部分に使用できるようになることを意味する。

本研究の基準案は既に-45℃の部分が例示基準化されているが、適材適所での温度域での使用を見据えた、-10℃および 20℃の基準案が例示基準化されれば、非プレクール部の高圧水素部分に用いる鋼材のさらなる規制緩和となる。

（２）汎用ステンレス鋼冷間加工材

例示基準化された汎用ステンレス鋼の冷間加工による使用において、水素適合性判断基準の考え方を確立し冷間加工度 40%まで維持できるとしたことは、高圧水素における冷間加工の使用を促すもので、部材の薄肉化や部品の小型化、機械式継手を用いない配管の曲げにつながり将来の低コスト化に寄与するものである。

許容引張応力に関しては冷間加工管の許容引張応力の強度保証方法と許容引張応力案を提示できたことは今後の基準化に資する。大型の冷間加工材の利用は将来の大規模な水素利用社会の構築に向けて重要な意味合いを持つものであり、許容引張応力の設定について課題が明らかとなったことで今後のさらなる研究につなげていく。

本研究で得られた SUS305 の冷間引抜棒は強度、水素適合性ともに良好であり、コスト・加工性・入手性に難がある SUH660 を十分に代替できることを示した。

（３）汎用ステンレス鋼溶接材

As weld の状態で SUS316L の溶接継手を高圧水素中で用いるための判断基準を確立し、溶接後の熱処理が不要であり、SSRT による水素適合性の確認が不要な材料の組合せを例示することができた。この内容を溶接技術指針として公開できたことは、溶接事業者にとっての利便性向上、一般申請の円滑化に寄与するものと考えられ、高圧水素配管への汎用ステンレス鋼による溶接の使用を促して水素漏洩のリスク低減に資するものと考えられる。

（４）汎用低合金鋼の高温適用

起動停止・温度圧力サイクルを繰り返す水素圧縮機環境での安全性を示し、低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 の改訂という形で公表できたことにより、水素圧縮機に用いられている SUH660 を SNCM439 などの汎用低合金鋼で置き換えれば、コスト・加工性・入手性の改善が見込める。

３．３　開発項目別残課題

① 優先度を下げたため解決しなかった課題：　なし

② 実施期間内での技術開発が追いつかなかった課題：　なし

③ 新たに見出された課題

冷間加工材（大型の棒材）の機械的性質には冷間加工度だけでなく多種多様な加工条件、加工方法が影響することが示唆され、それらの影響を考慮した強度保証の方法を確立し、その上で許容引張応力について議論する必要があることが明らかとなった。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

水素ステーションにおいて、より汎用的な鋼材の使用を目指した研究が行われ、下記の成果を得た。

（１）汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大

・伸び基準での新たな水素特性判断基準の考え方を確立した。高圧水素中での安全性や使用者に対する利便性、非プレクール部での使用を想定した適材適所での材料使用等も考慮し、新たな水素特性判断基準に基づく基準案を作成した。

・新たな基準案では例示基準化されたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316/SUS316L の Ni 当量を低減させ、SUS305 の適用も可能と結論した。

＜事業化について＞

基準案における-45℃の部分は先行して例示基準化された。

今後、-45℃の項目以外の部分も例示基準化を図るべく働きかけを行う予定である。SUS305 が JIS 規格に圧力容器材料として登録される必要があり、時期は今年度の JIS B8265 の改訂後を見込んでいる。

（２）汎用ステンレス鋼冷間加工材

・新たな水素特性判断基準に適合する SUS316/316L を冷間加工する場合、冷間加工度 40%まで水素適合性を維持できることを明確化した。

・特定則記載の範囲での曲げは水素適合性に影響がないことを明らかにした。

・冷間加工した SUS316/316L 棒材の許容引張応力を設定する上での課題を抽出した。

・冷間加工した SUS316/316L 管の許容引張応力案を策定した。

・SUS305 の冷間加工材が SUH660 を代替可能である可能性が示され、許容引張応力の付与に資する実験結果が得られた。

・SUS305 母材に関する JIS 規格の圧力容器の材料としての新規登録、許容引張応力の付与に資する実験結果が得られた。

・SUS305 母材は一般則例示基準 9.2 に記載できる可能性が示唆された。

＜課題＞

将来の大規模な水素利用社会の構築に向け、大型の冷間加工材の利用可能に資する、強度保証方法や許容引張応力の設定に向けた検討が必要であり、加工方法や加工条件の影響についてさらなる知見を得ることが必要である。

＜事業化について＞

特定則記載程度の曲げでは水素適合性への影響がないため、追加の規制は設けないこととした。許容引張応力の設定については SUS305 冷間加工材が HPI で審議中であり議論の動向を注視する。

（3）汎用ステンレス鋼溶接材

・材料特性、水素適合性等の技術指針作成に資するデータを取得した。
・溶接金属におけるオーステナイト相、フェライト相に求められる水素適合性の要件を整理し、溶接技術指針を作成した。
・溶接技術指針において SSRT による水素適合性の確認が不要となる事例を例示した。

＜事業化について＞

水素適合性の好適事例と水素適合性の判断基準を記載した溶接技術指針を成果報告書の他に JPEC のホームページで公開しており無償で入手可能である。

（4）汎用低合金鋼の高温適用

・運転状態を想定した水素圧縮機内の暴露環境を模擬した低合金鋼の評価方法を構築、安全性の判断に資する実験結果を取得した。
・低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 を改訂し、200℃までの使用と水素圧縮機への適用を可能とした。
・2022 年度までの研究予定を 2020 年度に前倒し達成した。

＜事業化について＞

低合金鋼技術文書 JPEC-TD 0003 が改訂され、JPEC のホームページで公開しており無償で入手可能である。高圧水素設備における低合金鋼の使用に際し、事前評価での利用が可能である。

５．研究発表・特許等

(1) 研究発表・講演

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
渡邊　義典	愛知製鋼株式会社	愛知製鋼における高圧水素用ステンレス鋼の開発取り組み	愛知県主催「水素貯蔵技術ワーキンググループ」第２回セミナー	2019.12
松永　久生	九州大学	Recent activities for hydrogen compatibility of materials used in hydrogen station in Japan	International workshop on standards and codes for hydrogen infrastructure safety	2018.11
岡﨑　三郎	九州大学	Influence of hydrogen on tensile and fatigue properties of 304／308 austenitic stainless steel butt welded joints	ASME PVP 2018	2018.7

松永　久生	九州大学	Ｍｅｔｈｏｄｓ ｏｆ ｍａｔｅｒｉａｌ ｔｅｓｔｉｎｇ ｉｎ Ｈｉｇｈ－ｐｒｅｓｓｕｒｅ ｈｙｄｒｏｇｅｎ ｅｎｖｉｒｏｎｍｅｎｔ ａｎｄ ｅｖａｌｕａｔｉｏｎ ｏｆ ｈｙｄｒｏｇｅｎ ｃｏｍｐａｔｉｂｉｌｉｔｙ ｏｆ ｍｅｔａｌｌｉｃ ｍａｔｅｒｉａｌｓ：ｃｕｒｒｅｎｔ ｓｔａｔｕｓ ｉｎ Ｊａｐａｎ	ＡＳＭＥ　ＰＶＰ２０１８	2018.7
高桑　脩	九州大学	Ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ ｄｅｐｅｎｄｅｎｃｅ ｏｆ ｆａｔｉｇｕｅ ｃｒａｃｋ ｇｒｏｗｔｈ ｉｎ ｌｏｗ－ａｌｌｏｙ ｓｔｅｅｌ ｕｎｄｅｒ ｇａｓｅｏｕｓ ｈｙｄｒｏｇｅｎ	ＡＳＭＥ　ＰＶＰ２０１８	2018.7
岡﨑　三郎	九州大学	オーステナイト系ステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労強度	溶接学会　平成３０年度　秋季全国大会	2018.9
高桑　脩	九州大学	高圧水素ガス中におけるオーステナイト系ステンレス鋼の強度特性	溶接学会　平成３０年度　秋季全国大会	2018.9
中村　眞実	九州大学	高圧水素ガス中におけるオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属３１７ＬのＳＳＲＴ特性	溶接学会　平成３０年度　秋季全国大会	2018.9
松永　久生	九州大学	高圧水素ガス環境中における材料強度試験	溶接学会　平成３０年度　秋季全国大会	2018.9
山田　敏弘	高圧ガス保安協会	水素スタンド設備に使用するオーステナイト系ステンレス鋼の選定基準	ＫＨＫ水素保安セミナー	2019.12
佐野　尊	高圧ガス保安協会	鋼種拡大に関するこれまでの成果と今後の取組について	ＫＨＫ水素保安セミナー	2018.12
加藤　明	高圧ガス保安協会	圧縮水素スタンドにオーステナイト系ステンレス鋼の冷間圧延材を使用する可能性について	ＫＨＫ水素保安セミナー	2021.3
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーションで使用する金属材料の規制見直しと今後の方向性	九州水素・燃料電池フォーラム＆水素先端世界フォーラム２０２０	2020.1
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用の材料選定（例示基準化）に向けた取り組み	２０２１年度第３回「水素脆化の基本要因と実用課題」フォーラム	2022.1
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用の材料選定（例示基準化）に向けた取り組み	兵庫県試験・分析技術研究会	2022.1
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素インフラの現状と将来展望	溶接接合工学振興会Ｈ３０年度セミナー	2018.12
鈴木　修一	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用金属部材の今後の例示基準化の方向性	水素貯蔵技術ＷＧ第２回セミナー	2019.12
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーションで使用する鋼材の規制と今後の展開	第８回次世代ものづくり基盤技術産業展「ＴＥＣＨ　Ｂｉｚ　ＥＸＰＯ２０１９」	2019.2

小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	ＦＣＣＪ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	2019.2
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	令和元年度ＦＣＣＪ　規制見直し・標準化等動向説明会（水素インフラＳＷＧ）	2020.2
林　郁孝	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の基準・規格化	令和３年度ＦＣＣＪ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化　等動向説明会	2022.3
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	令和２年度ＦＣＣＪ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化　等動向説明会	2021.3
鈴木　修一	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０１９年度ＪＰＥＣフォーラム	2019.5
小林　拡	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０２０年度ＪＰＥＣフォーラム	2020.5
鈴木　修一	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０２１年度ＪＰＥＣフォーラム	2021.5
鈴木　修一	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０２２年度ＪＰＥＣフォーラム	2022.5
小林　拡	石油エネルギー技術センター	水素社会を取り巻く環境、規制、規制緩和	水素貯蔵技術WG第１回セミナー	2019.9
林　郁孝	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の基準・規格化	令和 4 年度 FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化 等 動向説明会	2023.3

(2)　論文

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	ページ番号	発表年月
Hironobu Arashima	Japan Steel Works M&E、Inc.	Effects of inclusions on the fatigue life of SNCM439 steel in high−pressure hydrogen gas	Hydrogen Energy	25057-25065	2022.7
江藤　翔平、渡邊　義典	愛知製鋼株式会社	引張強さ９００MPａ級ＳＵＳ３０５冷間引抜材の高圧水素環境における強度特性	愛知製鋼技報	27-31	2021.3

岡﨑　三郎 ほか５名	九州大学	Ｉｎｆｌｕｅｎｃｅ ｏｆ ｈｙｄｒｏｇｅｎ ｏｎ ｔｅｎｓｉｌｅ ａｎｄ ｆａｔｉｇｕｅ ｐｒｏｐｅｒｔｉｅｓ ｏｆ ３０４／３０８ ａｕｓｔｅｎｉｔｉｃ ｓｔａｉｎｌｅｓｓ ｓｔｅｅｌ ｂｕｔｔ ｗｅｌｄｅｄ ｊｏｉｎｔｓ	Ｐｒｏｃｅｅｄｉｎｇｓ ｏｆ ＡＳＭＥ ＰＶＰ２０１８		2018.7
小林　英男 ほか１１名	高圧ガス保安協会 ほか	Ｍｅｔｈｏｄｓ ｏｆ ｍａｔｅｒｉａｌ ｔｅｓｔｉｎｇ ｉｎ Ｈｉｇｈ－ｐｒｅｓｓｕｒｅ ｈｙｄｒｏｇｅｎ ｅｎｖｉｒｏｎｍｅｎｔ ａｎｄ ｅｖａｌｕａｔｉｏｎ ｏｆ ｈｙｄｒｏｇｅｎ ｃｏｍｐａｔｉｂｉｌｉｔｙ ｏｆ ｍｅｔａｌｌｉｃ ｍａｔｅｒｉａｌｓ： ｃｕｒｒｅｎｔ ｓｔａｔｕｓ ｉｎ Ｊａｐａｎ	Ｐｒｏｃｅｅｄｉｎｇｓ ｏｆ ＡＳＭＥ ＰＶＰ２０１８		2018.7
高桑　脩　ほか５名	九州大学	Ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ ｄｅｐｅｎｄｅｎｃｅ ｏｆ ｆａｔｉｇｕｅ ｃｒａｃｋ ｇｒｏｗｔｈ ｉｎ ｌｏｗ－ａｌｌｏｙ ｓｔｅｅｌ ｕｎｄｅｒ ｇａｓｅｏｕｓ ｈｙｄｒｏｇｅｎ	Ｐｒｏｃｅｅｄｉｎｇｓ ｏｆ ＡＳＭＥ ＰＶＰ２０１８		2018.7
林　郁孝、 鈴木　修一、 佐藤　慎也	石油エネルギー技術センター	水素ステーションに適用する金属材料の基準化に向けた取り組み	月刊　溶接技術　２０２１年４月号		2021.3

(3) 特許等（知財）

なし

(4) 受賞実績

なし

(5)　成果普及の努力（プレス発表等）

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
佐野　尊	高圧ガス保安協会	鋼種拡大に関するこれまでの成果と今後の取組について	高圧ガス誌	2018.12
佐野　尊	高圧ガス保安協会	水素スタンドで使用される材料の選定について	エネルギー総合工学研究所「エネルギー総合工学」	2018.11
林　郁孝	石油エネルギー技術センター	水素ステーションの規制適正化に関する研究開発	（一社）燃料電池開発情報センター「日本における燃料電池の開発２０２１」	2022.1
鈴木　修一	石油エネルギー技術センター	高圧水素中で使用するための鋼材に関するＮＥＤＯ事業解説	ＪＰＥＣ　ＲＥＰＯＲＴ　２０２１．３月号	2021.3
鈴木　修一	石油エネルギー技術センター	高圧水素中で使用するためのステンレス鋼の溶接技術指針	ＪＰＥＣ　ＲＥＰＯＲＴ　２０２３．３月号	2023.3

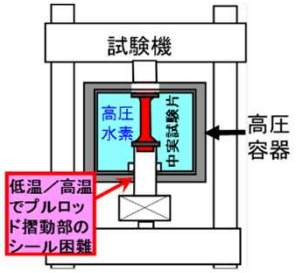
（1-(2)-③）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／国内規制適正化に関わる技術開発／中空試験片 高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発」

委託先：国立研究開発法人物質・材料研究機構

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

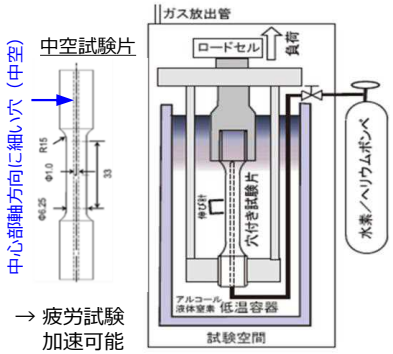
- 中空試験片を用いた低ひずみ速度引張試験（SSRT）と荷重制御疲労試験について、試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究と中実試験片との相関確認を行った。
- 中空試験片を用いた高圧水素中SSRT法の原案と解説案を作成し、高圧力技術協会（HPI）およびISOに提案した。
- 中空試験片を用いた高圧水素中荷重制御高サイクル疲労試験法の原案を作成した。

●背景/研究内容・目的



→ 疲労試験 1 Hz

従来の中実試験片方式
（試験片は高圧容器内）



→ 疲労試験加速可能

中空試験片方式
（試験片内に高圧環境）

高圧水素中材料試験費用の低減及び試験期間の短縮のために標準的な試験方法として**中空試験片高圧水素中材料試験法（SSRT・疲労）**を確立する。

●研究目標

実施項目		目標
(I) 中空 SSRT	① 試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究	・試験条件の最適化を行う（2020年度） ・ラウンドロビンテストを行う（2020年度） ・中空試験の簡素化を図る（2022年度）
	② 中実試験片との相関確認	中空と中実試験片間のデータの相関関係を明らかにする（2020年度）
	③ 規格化に向けた調査研究	規格原案を作成する（2020年度） 解説書案・附属書案を作成する（2022年度）
(II) 中空 疲労	① 試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発	・試験片と試験条件の最適化（2021-2022年度） ・ラウンドロビンテストを行う（2022年度）
	② 中実試験片との相関確認	中空と中実試験片間のデータの相関関係を明らかにする（2021年度）
	③ 規格化に向けた調査研究	規格原案を作成する（2022年度）

●実施体制及び分担等

NEDO ― 物質・材料研究機構（実施項目(Ⅰ)(Ⅱ)） ―（再委託）― 仙台高等専門学校（実施項目(Ⅰ)-①の一部）

●これまでの実施内容／研究成果

(I) 中空SSRT

- 引張強度を超えるまでの変位範囲で中実試験片と同等の応力ー変位線図が得られること、中空部の加工が困難かつ高額にならないことを考慮して標準試験片を決定した。また、中空内表面仕上げ条件を確定した。
- ラウンドロビンテストを実施し、その結果をもとに中空試験片高圧水素SSRT法の原案と解説案を作成した。

(II) 中空疲労

- 中空試験片形状と中空内表面仕上げ条件を確定した。
- 低合金鋼において、水素環境中で10 Hzに加速することによる高サイクル疲労特性への影響は見られなかった。
- 室温、-45℃、105 MPa水素環境下で10^7回までの疲労試験を実施可能とした。
- ラウンドロビンテストを実施し、その結果をもとに中空試験片高圧水素中疲労試験法の原案を作成した。

●今後の課題

- 疲労試験におけるデータ取得・蓄積。
- 中空試験片加工に適切なコストと時間で対応できる加工業者の拡大。

●実用化・事業化の見通し

- HPIに原案を提出済。臨時専門委員会での検討後に制定見込み。
- ISO/TC 164/SC 1/WG 9 “Tensile testing, method in high-pressure hydrogen environment”が2021/9/27に発足。4回の会議を経て、DIS登録済み。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
(Ⅰ)-①	・中空試験片の内面仕上げ条件を確定し、内径／外径寸法の許容範囲、ならびに試験条件を確認 ・ラウンドロビンテストを実施	○
(Ⅰ)-②	4種類の材料について、室温と低温で中空と中実間のデータの相関関係を確認	○
(Ⅰ)-③	中空試験片高圧水素中SSRT法の規格案をHPIの臨時専門委員会とISOに提案	◎
(Ⅱ)-①	・中空疲労試験法の試験条件を確認 ・1, 10Hzで試験し、周波数の影響が無いことを確認 ・10^7回疲労強度を取得 ・ラウンドロビンテストを実施	◎
(Ⅱ)-,②	2種類の中空と中実間のデータの相関関係を明確化	○
(Ⅱ)-③	中空試験片高圧水素中疲労試験法の規格原案を作成	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	2	9	0

事業番号：１－⑵－③

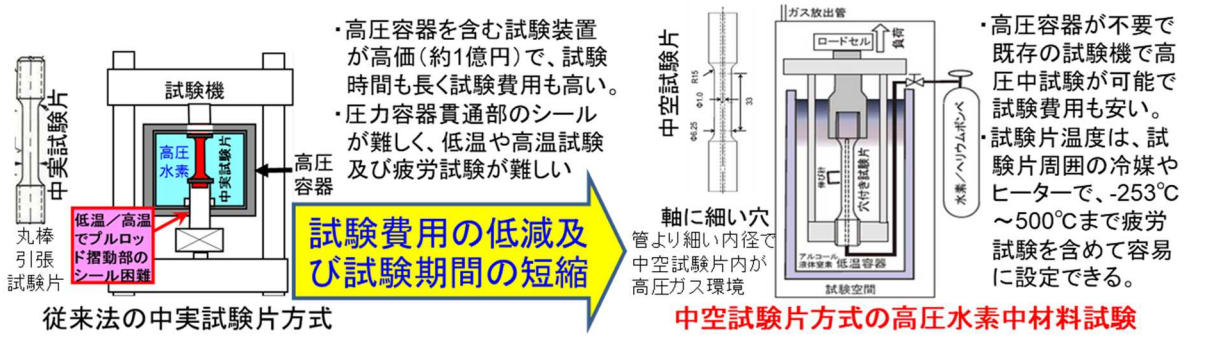
研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国内規制適正化に関わる技術開発／中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発」

実施者：国立研究開発法人　物質・材料研究機構

１．研究開発概要

水素ステーション事業の自立化に向けたさらなるＦＣＶの導入支援と合わせてステーション整備費、運営費、更には水素調達コストの低減に係る技術開発が重要となる中で、高圧水素中で使用可能な鋼材の普及に必要な材料特性評価に関わる試験機が高額な上、疲労試験では試験片１本のデータ取得に数か月を要することが課題となっている。これまでの研究で、従来の方法に代わる簡易な試験方法が示唆されデータ取得を行ってきたが、代替法としての確立までには至っていない。

高圧水素環境中の低ひずみ速度引張試験(SSRT)と疲労試験費用の低減及び試験期間の短縮のために、簡易な標準試験方法として中空試験片高圧水素中材料試験法を確立する。



２．研究開発目標

表１　研究開発目標

実施項目	最終目標
（Ⅰ）中空 SSRT 法	
①試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発	ラウンドロビンテスト（RRT）を行い、再現性を確認する(2020 年度)。 中空試験の簡素化を図る(2022 年度)。
②中実試験片高圧水素中材料試験の相関に関する研究開発	中空・中実試験片方式間の相関関係を明らかにする(2020 年度)。
③規格化に向けた調査研究	規格案を作成する(2020 年度)。 解説書案・附属書案を作成する(2022 年度)。

（Ⅱ）中空疲労	
①試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発	保持時間や繰返し速度等の影響評価を行い、中空試験片による疲労試験条件を確定し、RRT を行う(2022 年度)。
②中実試験片高圧水素中疲労試験との相関に関する研究開発	中空・中実試験片方式間の相関関係を明らかにする(2021 年度)。
③規格化に向けた調査研究	中空試験片高圧水素中疲労試験法の規格案を作成する(2022 年度)。

表 2-1 (Ⅰ) 中空 SSRT 法に関する事業項目と実施計画線図

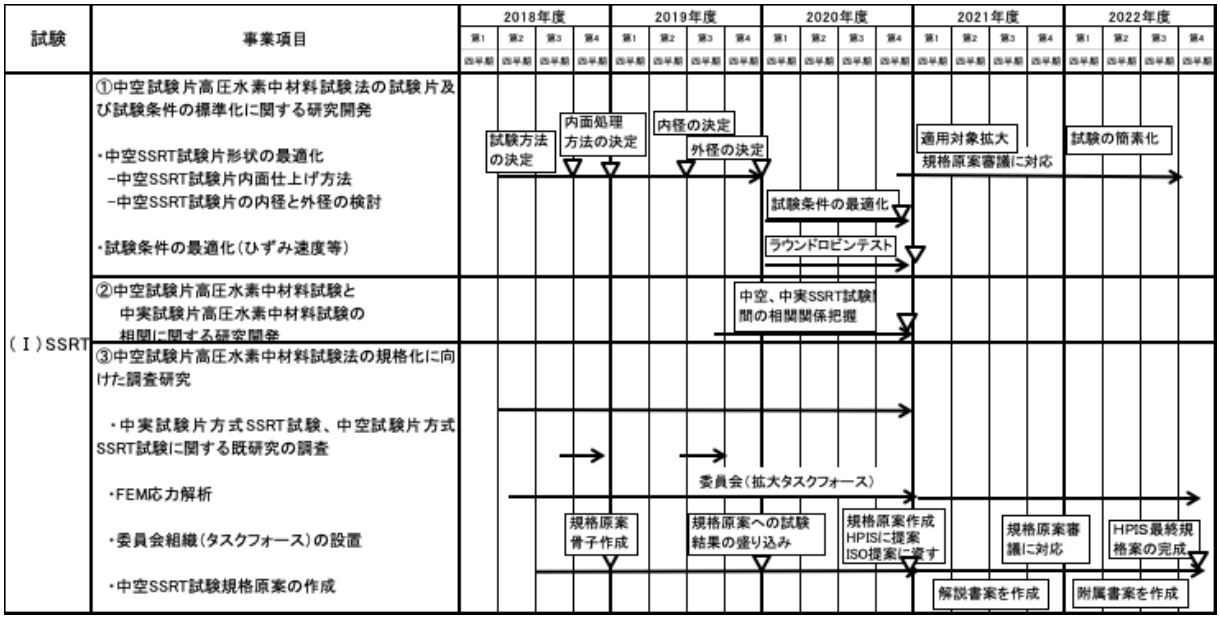
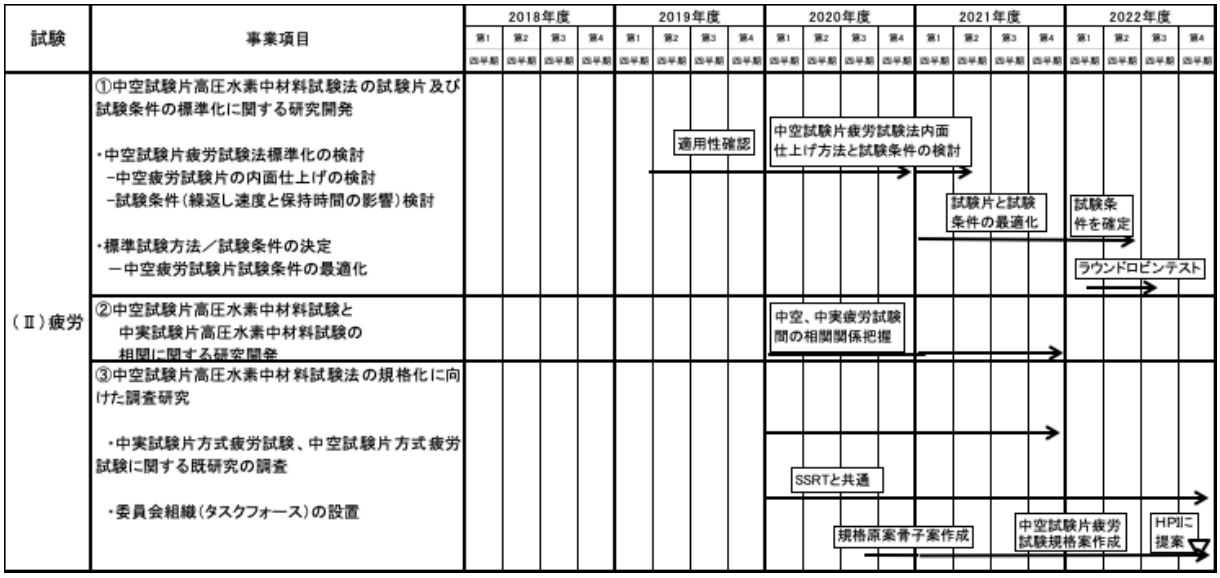


表 2-2 (Ⅱ)中空疲労試験法に関する事業項目と実施計画線図



３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）中空 SSRT 法

（1）−① 試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発

a. 内面処理条件の確定

中空試験片の試験片形状のうち、中空内面処理条件を確定するため、以下の内面処理条件および SSRT の試験条件を設定して評価を行った。図 1 は、本研究開発で用いる中空 SSRT 試験片の基本形状である。

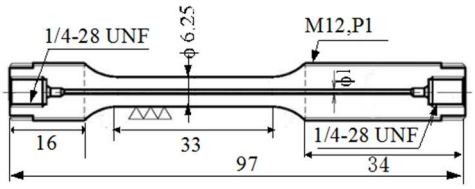


図 1 中空 SSRT 試験片の概要と寸法（単位：mm）

ⅰ．内面処理 3 条件：

A) Ra：1.5 μm 狙い　ワイヤカット仕上げ

B) Ra：0.3 μm 狙い　電着ダイヤモンド縦研磨（電着研磨）

C) Ra：0.02 μm 狙い　流動粉を用いた鏡面仕上げ（流動研磨）

※なお、全ての内面処理条件において目標の Ra は達成されていた。

ⅱ．試験条件

- 試験温度 3 条件：　㋐ -80℃　㋑ -45℃　㋒ 室温
- 試験材料 2 鋼種：　SUS316L（ A)B)×㋐㋑㋒ ）　SNCM439（ A)B)C)×㋑㋒ ）

各材料の化学成分と熱処理は、以下の通りである。

○ SUS316L(JIS G 4304:2015　30 mmt, Ni 当量 26.8 %)

化学組成（mass%）0.018C-0.62Si-0.83Mn-12.11Ni-17.49Cr-2.09Mo

最終熱処理条件　1120℃-4 min　→　水冷

○ SNCM439(JIS G 4053　30 mmt)

化学組成（mass%）0.39C-0.22Si-0.79Mn-0.016P-0.002S-1.8Ni-0.84Cr-0.26Mo

熱処理条件　焼入れ 850℃×2hr → 油冷　焼戻し 640℃×4hr → 空冷

ⅲ. 事業間連携として、取得データを共有し活用するため、「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」で使用している SUS316L と、平成 25 年度～平成 29 年度に「水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発」で使用・評価された SNCM439 を用いた。

この SNCM439 では、中実試験片を用いた室温、-45℃での水素ガス環境 SSRT において、応力-変位線図で極大値を示すことが確認されている。

- ガス　2 種類：水素（H_2）とヘリウム（He）ガス　（圧力 105 MPa）
- N 数　各条件 3 本：　中空試験片　試験数　全 72 本
- 初期ひずみ速度　：　5×10^{-5}/sec

（「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」の事業の試験条件と整合）

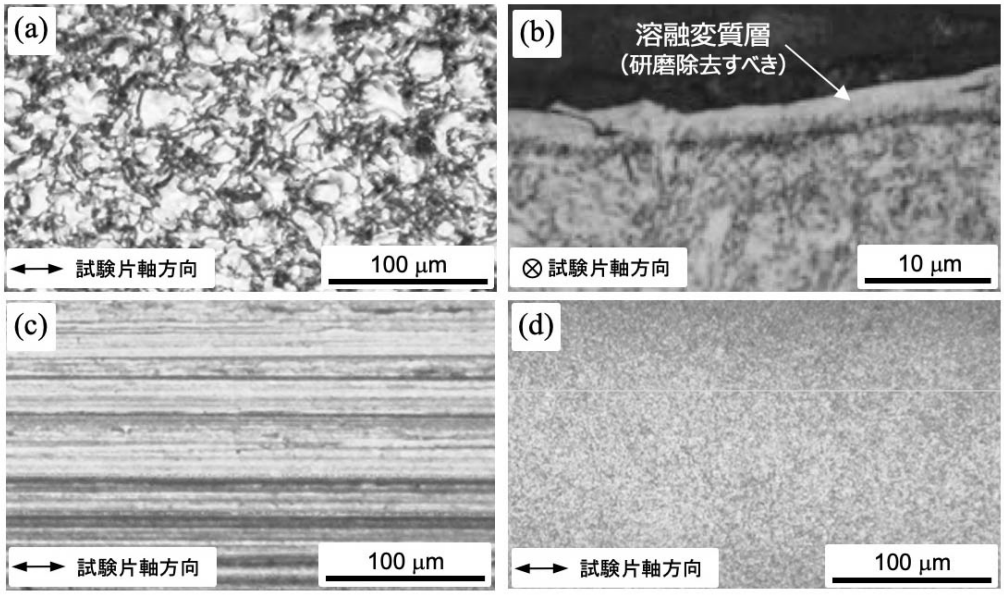


図 2 SNCM439 中空試験片内表面様相

(a), (b)ワイヤカット (c) 電着ダイヤモンド縦研磨後 (d) 流動研磨後

図 2 は、内面処理を施した SNCM439 の中空 SSRT 試験片の内表面の拡大写真を示す。ワイヤカット仕上げ（a）では、溶融加工に伴って形成された凹凸が見られる。試験片軸方向に対して垂直な断面について組織観察を行った結果、内表面には溶融変質層が観察された（b）。硬さ測定の結果より、溶融変質層は内部に比べて高硬度であった。ワイヤカットにおいて表面が高温に曝され、その後急冷されることを考えると変質層の組織は焼入れままのマルテンサイトと推察される。一方、電着ダイヤモンドで研磨した試験片では、試験片軸方向に平行に、すなわち研磨方向に沿った筋状の跡が観察された（c）。同試験片では、研磨によって溶融変質層が除去されていた。流動研磨仕上げした試験片では、表面は非常に滑らかであり、表面粗さは最も小さくなっていた（d）。同試験片でも、研磨によって溶融変質層が除去されていた。SUS316L でワイヤカット仕上げを行った場合には、内表

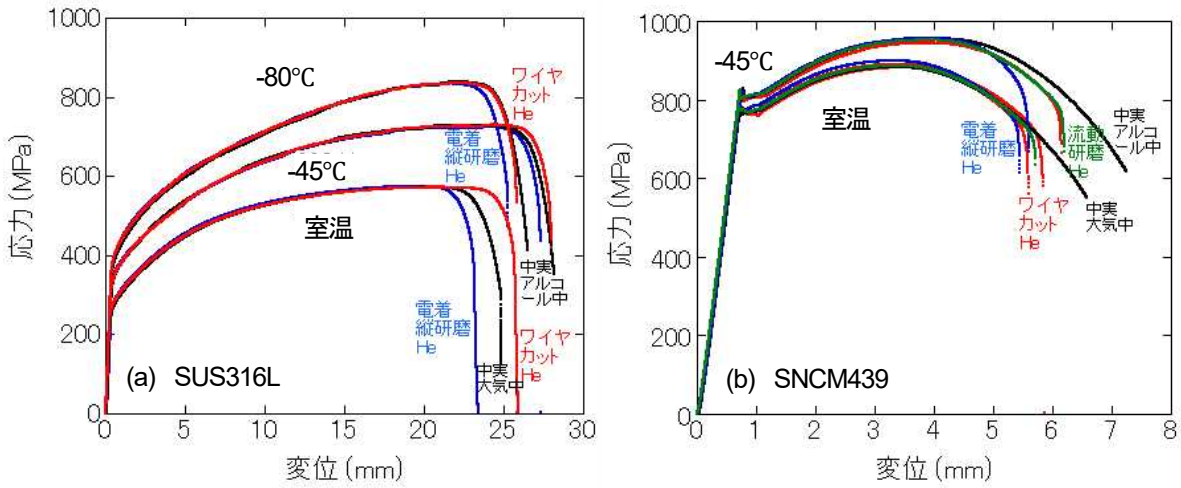


図 3　中空試験片（105 MPa ヘリウム中）と中実試験片（室温大気中あるいは低温アルコール中）の応力-変位曲線の比較

(a)SUS316L（試験温度：室温、-45℃、-80℃）, (b)SNCM439（試験温度：室温、-45℃）

面には溶融変質層は確認されなかった。これはワイヤカットで表面が高温に曝されても急冷されることで再度オーステナイト組織が得られるためと考えられる。

中空部の影響を検討するために、中空試験片の 105 MPa ヘリウム環境での応力-変位曲線と中実試験片（外径 φ6.25 mm, 平行部長さ 33 mm）の応力-変位曲線を比較した。環境は室温大気中あるいは低温アルコール中であり、その結果を図 3 に示す。SUS316L(a)では、中空試験片の内表面の仕上げにかかわらず、また、-80℃～室温では温度にかかわらず、中実試験片とほぼ同等の応力-変位曲線と引張特性が得られることを確認した。一方、SNCM439(b)においては、中空試験片の 105MPa ヘリウム環境では、中実試験片より伸びが小さくなっており、形状（中空）の影響が確認された。この結果は図 13 に示す FEM 解析結果でも確認されている。なお、SNCM439 でも中空試験片の内表面の仕上げによる大きな違いは無い。

図 4 は、中空内面処理が異なる SUS316L について、105MPa ヘリウム環境と水素環境で得られた応力-変位曲線を比較したものであり、室温(a)と-45℃(b)の結果を示している。なお、参考のために室温大気中と低温アルコール中で取得した中実試験片（外径 φ6.25 mm, 平行部長さ 33 mm）のデータも示す。室温では、中空内表面仕上げの違いにかかわらず、伸びと絞りに大差はなく、水素環境ですら中実と同等の特性が得られた（図 5(a)、図 6(a)参照）。一方、-45℃では、ヘリウム環境では中空内表面仕上げの違いにかかわらず、伸びと絞りに大差は無く（図 5(b)、図 6(b)参照）、中実とほぼ同等の特性が得られた。しかし、水素環境では、中空内面仕上げの違いによらず早期破断が生じた。

図 5 は、図 4 に示した SSRT より得られた伸びおよび相対伸びの室温(a)と-45℃(b)の結果を示したものである。参考のために中実試験片で得られたデータも示している。室温では、中空内の環境ならびに中空内面処理条件によらず中実試験片とほぼ同じデータが得られている。一方、-45℃では、応力-変位線図（図 4(b)）で見られたように、ヘリウム環境では中実試験片と同等の伸びが得られるが、水素環境では中空試験片の伸びが若干低くなる。この理由ついては、図 14 に示す FEM 解析結果をもとに検討している。

図 6 は、図 4 に示した SSRT より得られた絞りおよび相対絞りの室温(a)および-45℃(b)の結果を示したものである。参考のために中実試験片で得られたデータも示している。室温では、伸びと同様に中空内の環境ならびに中空内面処理条件によらず中実試験片とほぼ同じデータが得られている。た

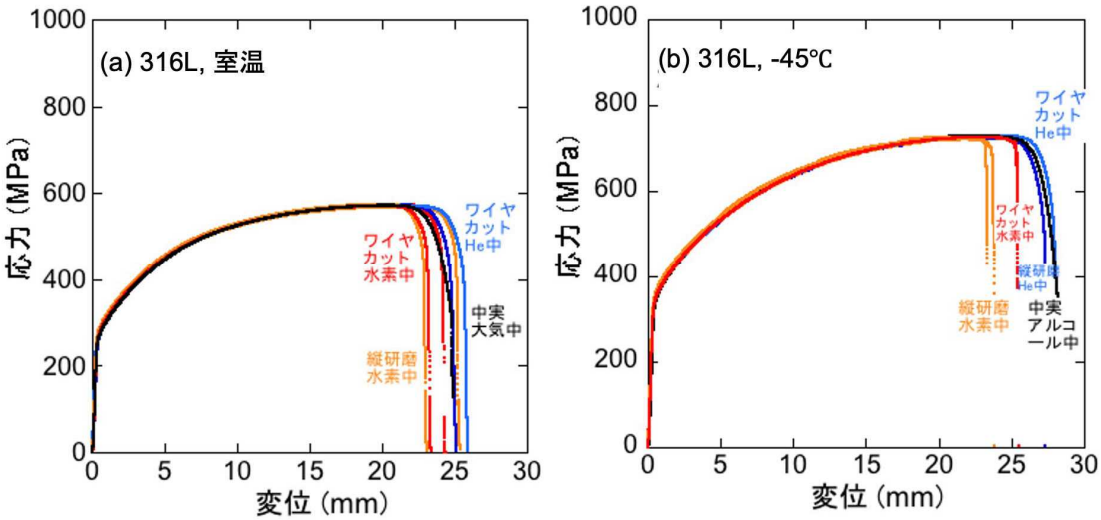


図 4　SUS316L の応力-変位曲線に及ぼす内表面仕上げ条件の影響　(a)室温　(b)-45℃

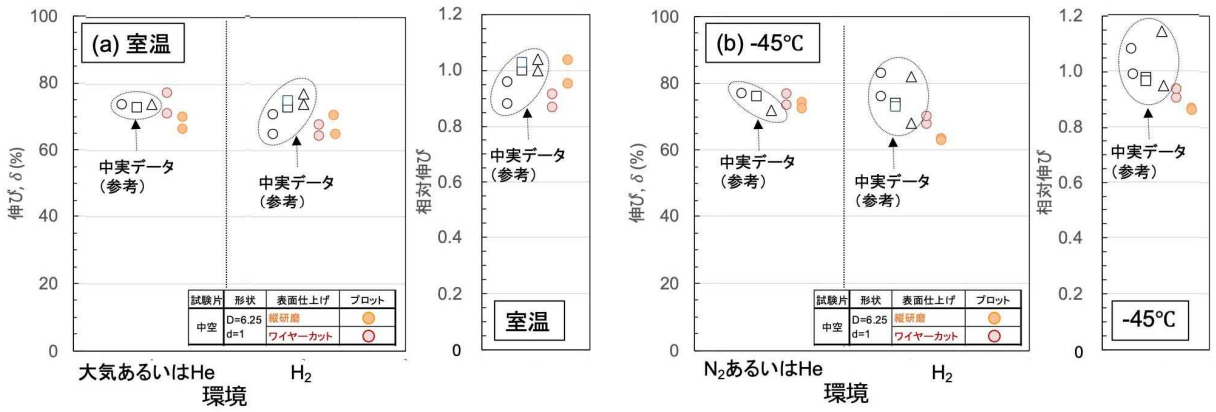


図 5　SUS316L の伸びと相対伸び（a）室温、（b）-45℃

中実データは「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」で取得されたデータである。

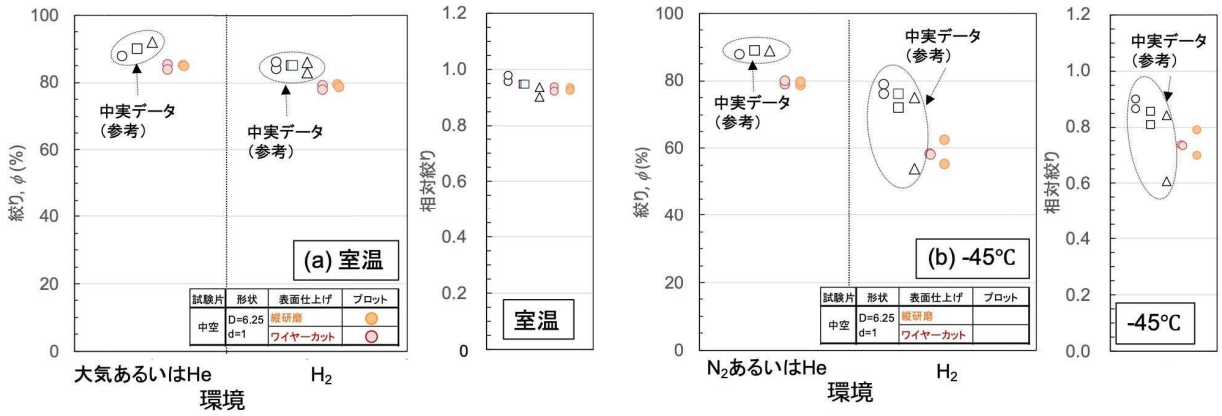


図 6　SUS316L の絞りと相対絞り（a）室温、（b）-45℃

中実データは「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」で取得されたデータである。

だし、-45℃、ヘリウム環境では中実試験片に比べて絞りが低くなっていることから、中空試験片では形状（中空）の影響により、中実試験片に比べて絞りが小さくなり、低温ほどより小さくなる傾向があるようである。-45℃、水素環境では中空試験片の絞りが低くなっており、その結果相対絞りも低くなる傾向にある。すなわち、低温では中空試験片の方が中実試験片に比べて厳しめの評価になっている。この理由ついては、図 14 に示す FEM 解析結果をもとに検討している。なお、SUS316L ではワイヤカット仕上げと電着研磨仕上げにおいて有意差は認められなかった。これは、SUS316L ではワイヤカット仕上げを行っても、溶融に伴って内表面に変質層が形成されないことと関係していると推察される。

「JPEC-TD 0003(2017) 水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」では、蓄圧器に使用する低合金鋼では、水素ガス環境の応力-変位曲線において、極大値を示すことが重要とされている。図 7 は、各内面処理条件における SNCM439 の応力-変位曲線である。室温（300 K）では、内面処理条件によらず、水素ガス環境で極大値を示した上で破断している。一方、-45℃（228 K）では、ワイヤカット（a）と電着研磨（b）は加工硬化過程で破断しており、それらの有意差は認められない。一方、流動研磨では極大値近傍手前で破断している。また、図 9 に示す電着研磨した SNCM439 の応力-変位曲線では、-45℃でも極大値付近まで変形した後で破断している。有意

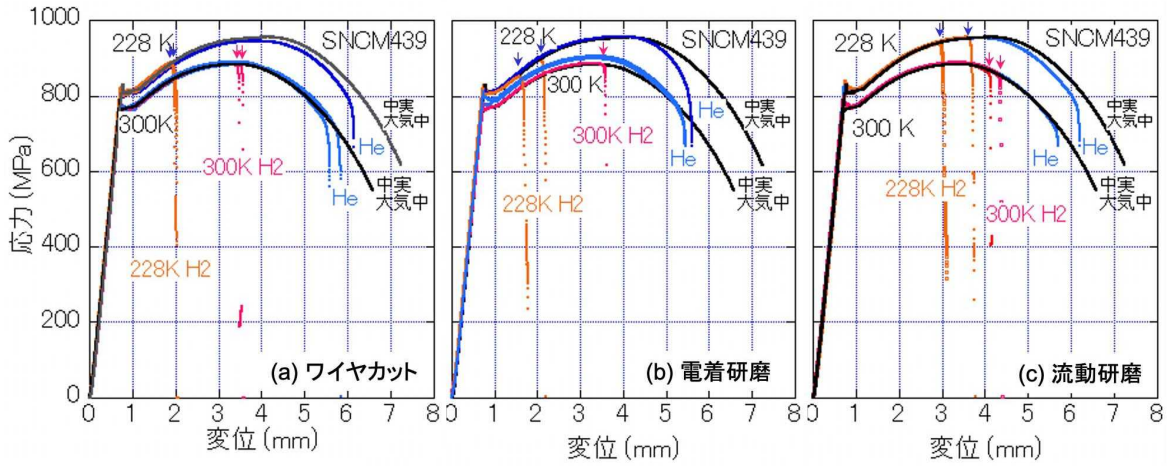


図 7 各内面処理条件における SNCM439 の室温（300 K）と-45℃（228 K）での応力-変位曲線
（a）ワイヤカット（b）電着研磨（c）流動研磨

差は認められない。一方、流動研磨では極大値近傍手前で破断している。また、図 9 に示す電着研磨した SNCM439 の応力-変位曲線では、-45℃でも極大値付近まで変形した後で破断している。

以上の内表面処理条件の異なる中空試験片を用いた結果において、SUS316L および SNCM439 ともに室温では中実試験片と同等の評価ができたものの、低温では中実試験片に比べて厳しめの評価になることが判明した。この点については図 14 に示す FEM 解析結果をベースに引き続き検討していく。なお、中空試験片を用いた高圧水素環境 SSRT を行う場合には、（中空形状の加工方法にもよるが、）ワイヤカットによって内表面形成される溶融変質層の影響を除去するために、電着研磨、流動研磨等の研磨を行う必要がある。○

b. 平行部外径と中空内径の許容範囲の決定

以下の試験条件を設定し、図 1 の試験片の内径と外径を変えて評価を行った。

・平行部外径／内径 3 条件：

① 外径（D）6.25 mm, 内径（d）1.0 mm　d/D=0.16

② 外径（D）6.25 mm, 内径（d）1.7 mm　d/D=0.27

③ 外径（D）4.0 mm, 内径（d）1.0 mm　d/D=0.25

・内面仕上げ条件は電着ダイヤモンド研磨仕上げとし NIMS で実施。
電着ダイヤモンドワイヤによる研磨後の Ra は 0.5μm 以下であることを確認。

・試験温度 3 条件の内の 2 条件：㋐ -80℃　㋑ -45℃　㋒ RT

・試験材料 2 鋼種：　SUS316 （①②③×㋐㋒）　SNCM439（①②③×㋑㋒）

○ SUS316(20 mmt, Ni 当量 26.6 %)
化学組成（mass%）0.019C-0.37Si-1.37Mn-11.97Ni-16.32Cr-2.12Mo
最終熱処理条件　1130℃-30 min → 水冷

○ SNCM439(JIS G 4053　30 mmt)
化学組成（mass%）0.39C-0.22Si-0.79Mn-0.016P-0.002S-1.8Ni-0.84Cr-0.26Mo
熱処理条件　焼入れ：850℃×2hr → 油冷　焼戻し：640℃×4hr → 空冷

事業間連携として、取得データを共有し活用するため、「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」で使用している SUS316 と、平成 25 年度～平成 29 年度に「水素ステーション用金属材料

の鋼種拡大に関する研究開発」で使用・評価された SNCM439 を用いた。

・ガス　　2 種類：　H_2 と He ガス　（圧力 105 MPa）

・他の試験条件（ひずみ速度）は a. 内面処理条件の確定と同じ。

SUS316 について、内径と外径の異なる試験片を用いて 105 MPa 水素あるいはヘリウム環境で SSRT を行った。得られた応力-変位曲線を図 8 に示す。室温(a)と-80℃(b)での結果である。なお、D=4.0 mm の試験片では D=6.25 mm の試験片より試験荷重が低いため、プルロッドが弾性変形しない分、同じ応力でもストローク値が小さくなっている（この傾向は図 9 に示す SNCM439 の方が変形量が少ないため明確に分かりやすい）。内径が大きいあるいは d/D が大きい方が、破断までの伸びが小さい傾向で、平行部外径 4 mm で内径 1 mm は d/D が近い外径 6.25 mm で内径 1.7 mm より、伸びが明らかに小さい。105MPa 水素中においても内径が大きいあるいは d/D が大きい方が破断までの伸びが小さい。

図 9 に内径外径の異なる SNCM439 試験片の 105 MPa ヘリウムおよび水素環境における応力-変

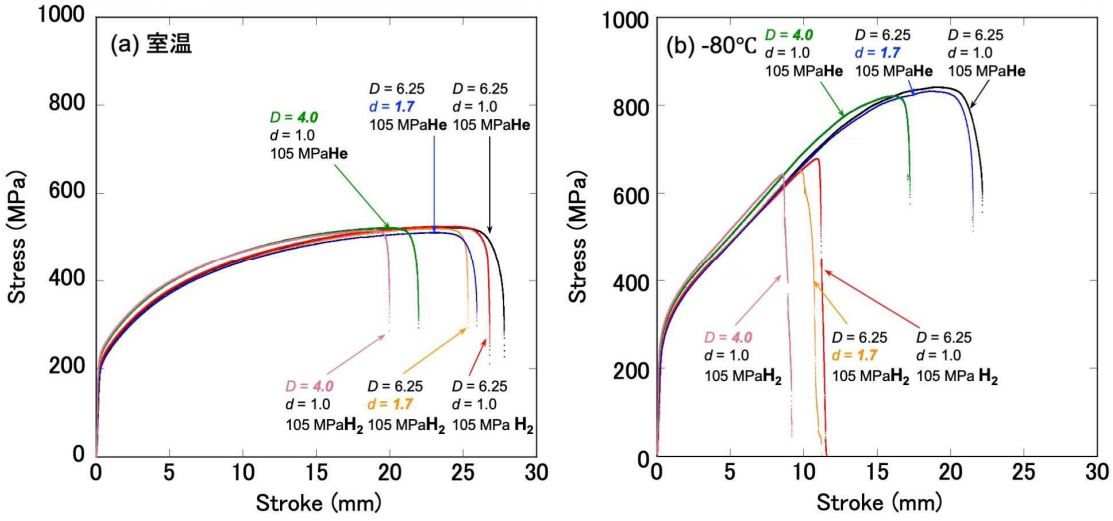


図 8 外径と内径の異なる SUS316 中空試験片の 105 MPa ヘリウム／水素環境の応力-変位曲線

(a)　室温　　(b) -80℃

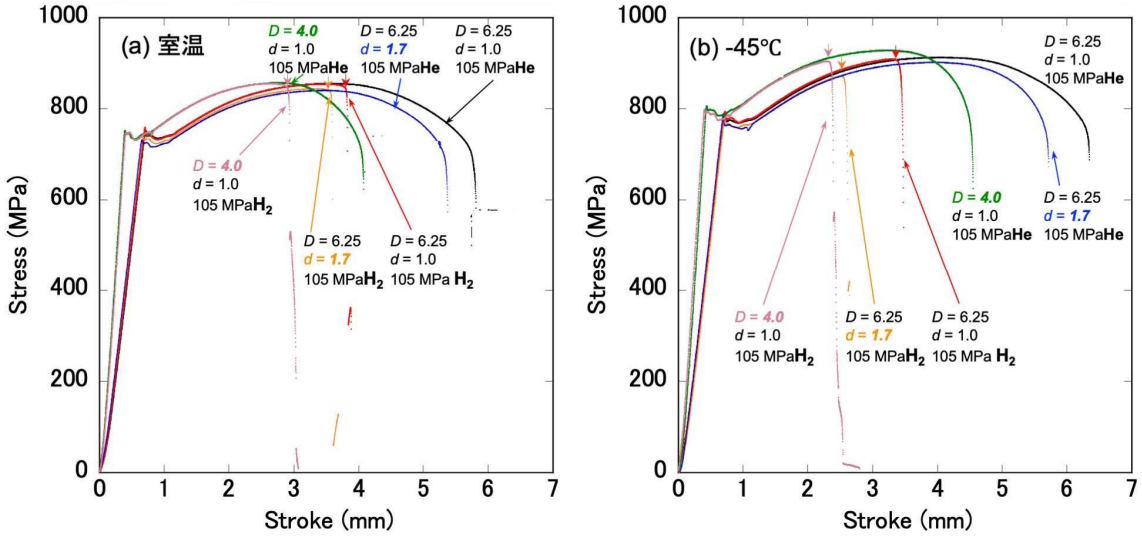


図 9 外径と内径の異なる SNCM439 中空試験片の 105 MPa 水素中とヘリウム中の応力-変位曲線

(a)　室温　(b) -45℃

位曲線を示す。室温(a)と－45℃(b)の結果である。SUS316 の結果と同様に、内径が大きいあるいは d/D が大きい方が、破断までの伸びが小さい傾向にある。この傾向は図 13 の FEM 解析の結果とも合うが、平行部外径 4 mm で内径 1 mm は d/D が近い外径 6.25mm で内径 1.7mm より、伸びが明らかに小さい。この理由は現在検討中である。室温では、試験片形状によらず、水素ガス環境で極大値を示した上で破断している。一方、-45℃では、水素ガス環境において極大値を示さずに加工硬化過程で破断している。

図 10 に、SUS316 の相対伸び(a),(c)と相対絞り(b),(d)に及ぼす内径/外径の影響を示す。室温(a),(b)と-80℃(c),(d)の結果である。現状評価を行った試験片形状の範囲では、室温、-80℃の相対伸び、室温の相対絞りについては中空試験片の形状によらず、同様の評価結果が得られている。また、室温の相対伸びと相対絞りについては中実試験片と同等の評価ができていることが分かる。一方、-80℃での相対絞りは、外径 6.25 mm の試験片は内径によらず同様の評価ができているが、外径 4 mm の試験片では、外径 6.25 mm の試験片に比べて相対絞りが小さい。こちらは中空試験片の平行部の厚さが、① 外径（D）6.25 mm, 内径（d）1.0 mm では 2.6 mm、② 外径（D）6.25 mm, 内径（d）1.7 mm では 2.3 mm、③ 外径（D）4.0 mm, 内径（d）1.0 mm では 1.5 mm と③が最も薄いことが関与しているものと考えており、検討を行っている。①と②の試験片については、破断までの伸びが小さい割合は、ヘリウム、水素環境で大きく変わらないようで、水素の影響の評価の指標となる相対伸びと相対絞りに有意な差は見られなかった。ただし、中実試験片と同等の評価をする必要があることを考えると平行部外径 6.25 mm で内径 1 mm が最も無難で最適と考える。○

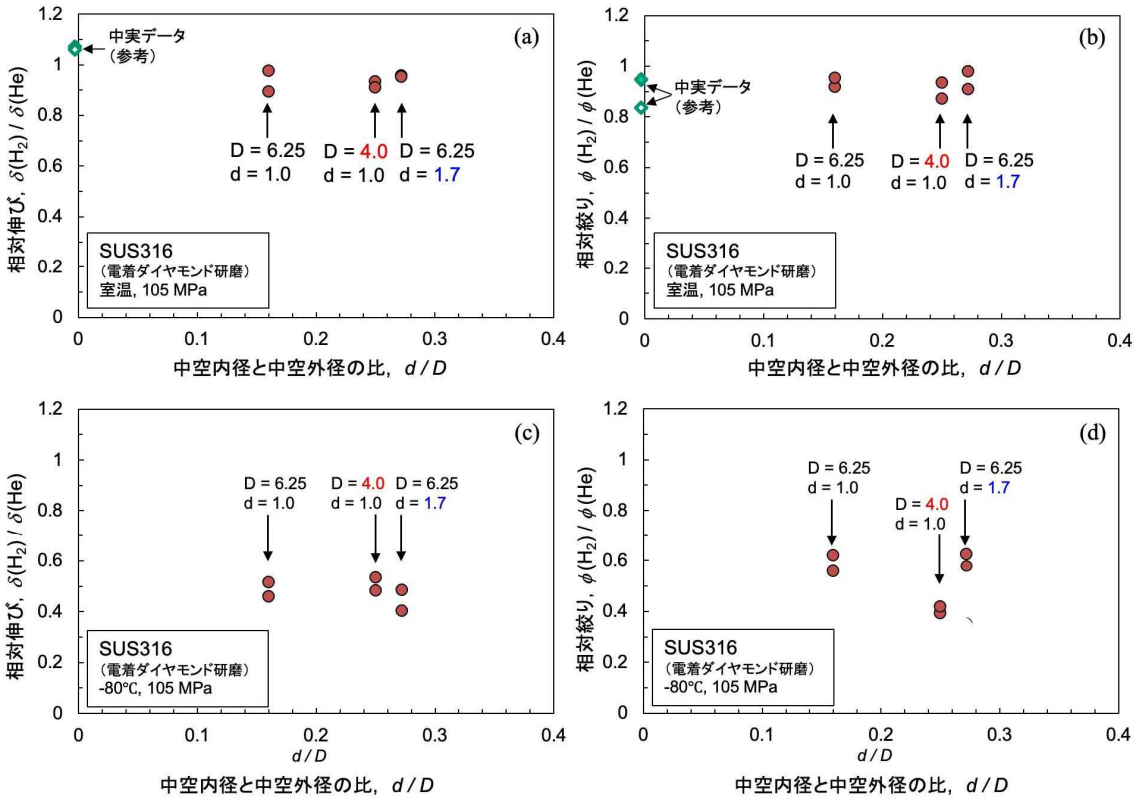


図 10　SUS316 の相対伸び(a), (c)と相対絞り(b), (d)に及ぼす内径/外径の影響
(a), (b)室温, (c), (d)-80℃

中実データは「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」で取得されたデータである。

c. 中空試験片を用いたラウンドロビンテスト（SSRT）

中空試験片高圧水素中 SSRT 規格原案に基づき、三機関によるラウンドロビンテスト（RRT）を行った。なお、RRT の目的は、加工業者が同じ試験片を用いて、試験機関（試験装置）の違いを検証することである。なお、RRT を実施するにあたり、記録するデータや試験の手順を纏めた実施要領を作成した。

・材料

材料は、「a. 内面処理条件の確定」で使用した材料と同じ下記のものを用いた。

○ SUS316L（JIS G 4304:2015　30 mmt, Ni 当量 26.8 %）*1

○ SNCM439（JIS G 4053　30 mmt）*1

・試験片（内面仕上げまで同じ加工業者に依頼）

形状：平行部外径φ6.25 mm, 内径φ1 mm（図 1）

内面仕上げ：ワイヤーカット後、電着ダイヤモンドワイヤー（ヤスリ）による縦研磨

・試験条件・本数（各機関）：

SUS316L 温度　-45±5℃　圧力 105±5 MPa　水素ガス中 3 本、ヘリウムガス中 2 本

SNCM439 温度　室温(23±5℃) 圧力 105±5 MPa　　水素ガス中 3 本、ヘリウムガス中 2 本

・その他

○初期ひずみ速度：　5×10^{-5}/sec　（「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」事業と整合）

○ データサンプリング速度：　2 点/sec

○ 試験機：　二機関　油圧サーボ式、　一機関　ギア式

○ 試験ガス：　高純度水素ガス　全機関 7N、ヘリウムガス　一機関 4N5　二機関 6N5

○ 伸び計：　全機関使用

なお、本事業原簿に示す公称応力-公称ひずみ線図の公称ひずみ(%)は、各機関データの比較のため、①低ひずみ側は伸び計のデータをもとにひずみを算出し、②高ひずみ側は 100×（ストローク／平行部長さ（33 mm））とした。ただし、①と②を繋ぐ部分では差が生じているため、②を①側にオフセットした。

・結果

試験中の温度と圧力の条件管理は、三機関の全試験において達成された。これにより、RRT の実施要領に示した試験環境のセッティングおよび管理手順に問題無いことが確認された。◎

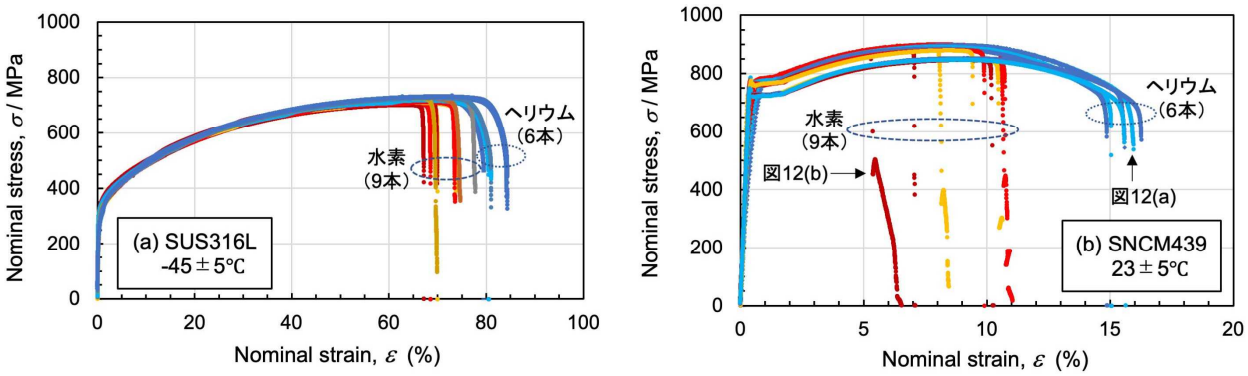


図 11 RRT で得られた公称応力-公称ひずみ線図 (a)SUS316L -45±5℃ (b)SNCM439　23±5℃

図 11 に RRT で得られた SUS316L(a)と SNCM439(b)の全試験片の公称応力-公称ひずみ線図（以下、応力-ひずみ線図）を示す。SUS316L では、引張強度付近までは、試験機関、試験片によらず、ほぼ同じ応力-ひずみ線図が得られた。また、ヘリウム（He）環境に比べて水素（H_2）環境では早期破断が起こり、この現象はどの機関でも確認された。He 環境では、伸びは 74～78%、絞りは 77～80%とばらつきは小さい。H_2 環境では、伸びは 63～73%、絞りは 57～66%であり、He 環境に比べてばらつきは大きい。SNCM439 についても、それぞれの環境において、ほぼ同じ応力-ひずみ線図が得られており、どの機関においても、He 環境に比べて H_2 環境で早期破断が起こり、延性が低下している。He 環境では、伸びは 16～18%、絞りは 50～56%、H_2 環境では、伸びは 7.5～13%、絞りは 24～34%である。SNCM439 では、H_2 環境において、極大値を示さずに早期破断した試験片が確認された。前述のように、本供試材は、室温、高圧水素環境の応力-変位線図で、極大値を示すことが中実試験片を用いた SSRT で確認されている。このため、中空試験片における水素環境での早期破断の理由については今後詳細検討を行う。

図 12 は、図 11(b)中に矢印で示した応力-ひずみ線図を得た試験片の破面を示す。He 環境で破断した試験片(a)では、中空がある内側から破壊が起きて外側にシアーリップが形成される、所謂カップアンドコーン型の破面を呈している。中空付近には浅いディンプルが観察された(c)。H_2 環境で破断した試験片(b)では、①中空表面からき裂が発生し、試験片外側表面に向かって進展する。破線で囲んだ領域は H_2 の影響を受けて擬へき開破面が形成されている(d)。②図 12 (b)中の矢印付近でき裂が試験片表面に到達すると、H_2 ガスは漏洩するため、破断していない破線外側の領域は大気中で延性破壊し、シアーリップを形成している。応力-ひずみ線図はこの破壊過程に対応して変化しており、①の過程で応力（荷重）が低下し、②の過程で一旦応力（荷重）が上がった後、破断している。破断前にガスが漏洩した試験片に関して、伸びの評価を行う上でリーク後の変形量を考慮すべきかどうか検討を行った。その結果、今回の供試材のように水素適合性が高い材料では、リーク後の変形量を考慮する必要がないことが示唆された。また、絞りは、水素脆性を安全側で評価するため、破断部における最大径を使って算出した方がよいことが確認された。

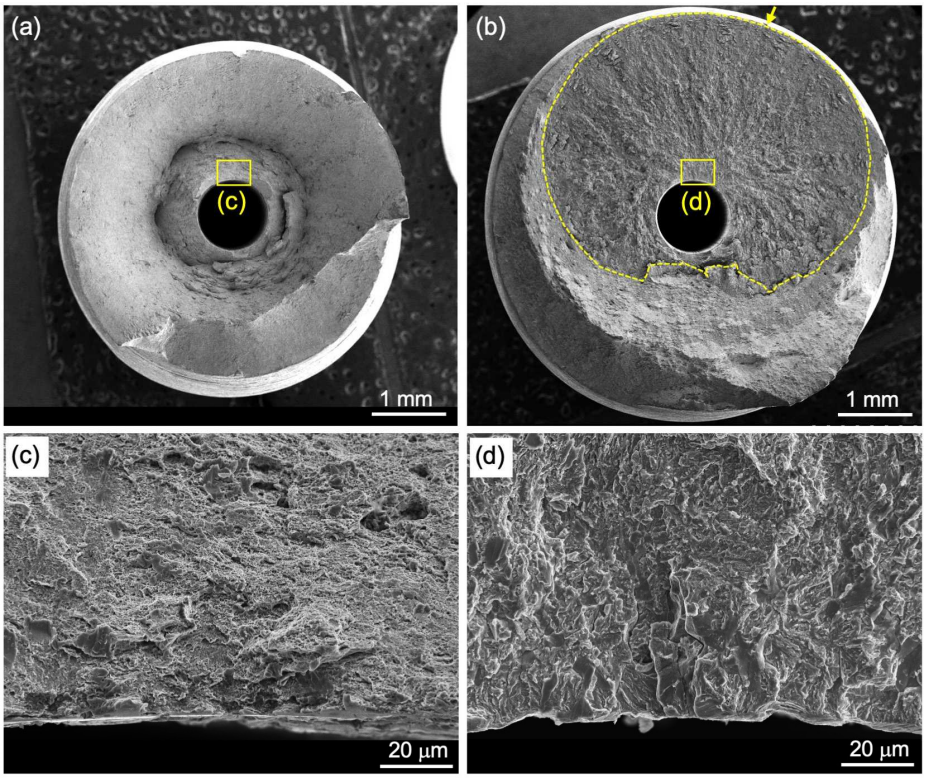


図 12 SNCM439 の破面観察結果 (a), (c) 107 MPa He 環境、 (b) , (d) 107 MPa H_2 環境

（1）－② 中空試験片高圧水素中材料試験と中実試験片高圧水素中材料試験の相関に関する研究開発

・中空試験片方式 SSRT と中実試験片 SSRT の比較を行うために、中実試験片と同じ試験対象材料を選択し、試験片を実施した。○

（1）－③ 中空試験片高圧水素中材料試験法の規格化に向けた調査研究

a. 中実試験片方式試験、中空試験片方式試験に関する既研究の調査

・これまでに NEDO 事業で実施されている中実試験片方式 SSRT 試験及び疲労試験について調査し、研究項目②で結果を比較するために、試験対象材料を Ni 当量 26.8%の SUS316L と熱処理条件を揃えた SNCM439 とし、SSRT の初期ひずみ速度を 5×10^{-5} s^{-1} とした。

・中実試験片と中空試験片について引張試験中の大変形弾塑性有限要素法解析を行い、本研究開発で得られた試験データの妥当性を確認した。○

その結果を以下に示す。

コード：Ansys

ⅰ. 要素モデル：大変形を考慮した二次元軸対称要素

ⅱ. 材料モデル：多直線近似弾塑性モデル

ⅲ. モデル寸法：図 13 にモデル寸法を示す（試験部がくびれるように、図の下端をわずかに細くした）。穴径はφ1、3.5 mm とした（図 13 の X=0.5, 1.75）。

ⅳ. 要素サイズ： 試験片中央が変形によりくびれた時に、要素が崩れないように要素を分割した（図 14）。下端部の最小メッシュサイズは X 方向に 0.025mm、Y 方向に 0.005mm とした。

ⅴ. 拘束条件：図 15 に境界条件を示す。上端は Y 方向一様変位として強制変位を負荷した。分布荷重 p（無し or 100 N/mm^2）を先に付与する。内外圧を付与する際、上端の Y 方向変位は拘束しない。

ⅵ. 負荷：変位制御で端面に引張り負荷

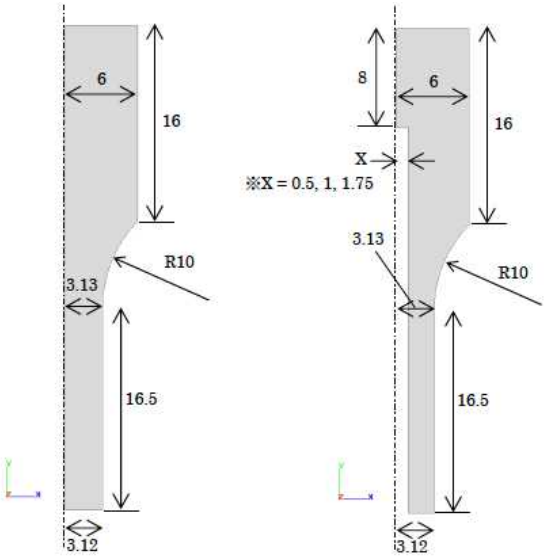


図 13　モデル寸法　(a) 中実モデル　　(b) 中空モデル（X=1）
（試験部がくびれるように、図下端をわずかに細くした）

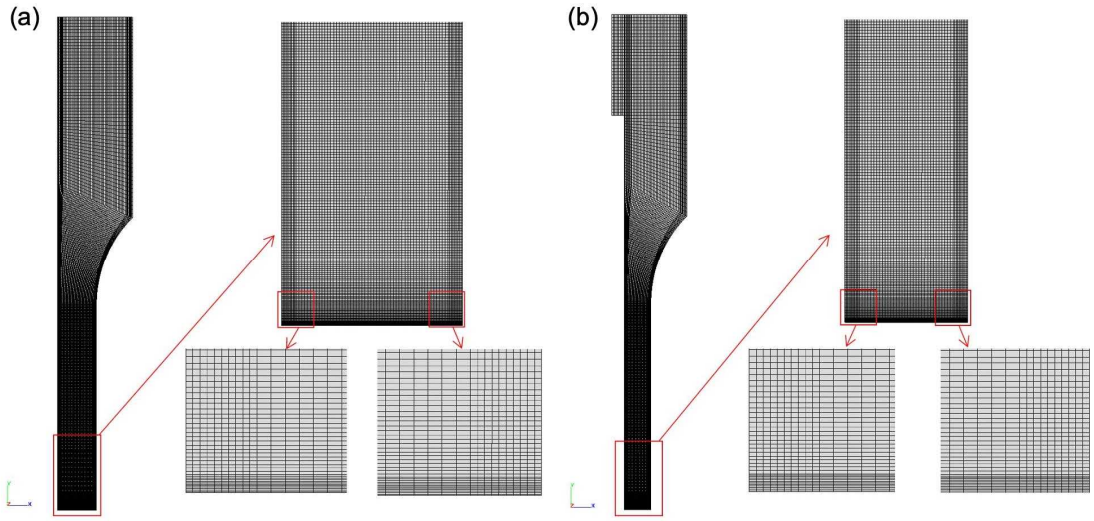


図 14　メッシュ図（a）中実モデル　（b）中空モデル（X=1）

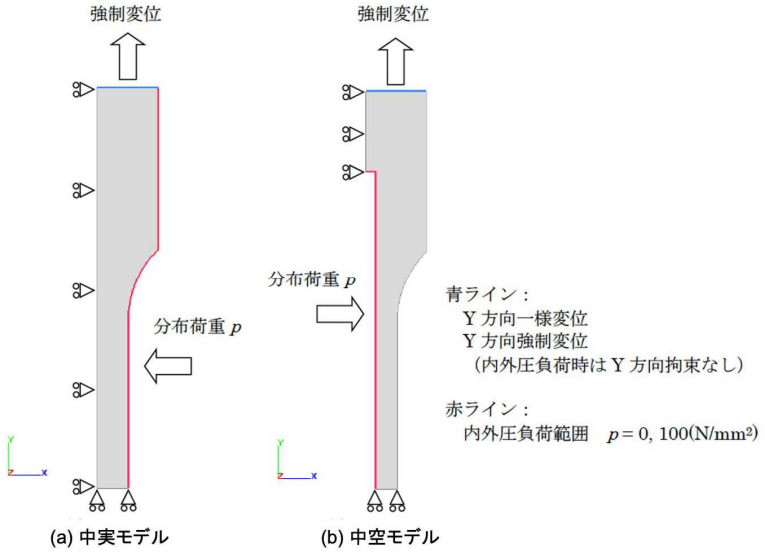


図 15　境界条件　（a）中実モデル　（b）中空モデル

図 16 には、SNCM439 について、平行部外径が 6.25mm の中空試験片と中実試験片の引張試験時の大変形弾塑性有限要素法解析を行った結果を示す。内径および圧力の影響で引張強度以降の塑性変形挙動が変化する（ただし、ボイド形成、破壊は考慮されていない）。中空試験片において、内径が小さく、内圧がない場合（d=1, p=0）は、中空試験片と中実試験片の応力－ひずみ曲線は殆ど同じであることが分かる。ただし、同じ内径でも内圧がかかった場合（d=1, p=100）は、内圧無しに比べて伸びが小さくなることが分かる。これは図 3（b）に示す試験結果と一致している。また、中空試験片で、内径を大きくした場合（d=3.5）には伸びが小さめに出ることを示しており、これは図 9 に示す試験結果と一致する。なお、内径が大きくなる方が、内圧の影響で伸びがさらに短くなる傾向も示している。

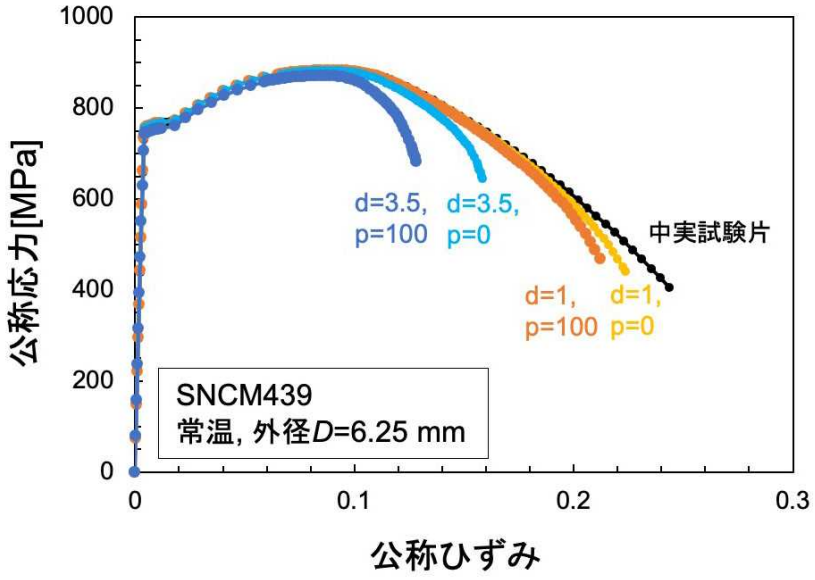


図 16　応力-ひずみ曲線に及ぼす中空内径と内圧の影響の FEM 解析結果（SNCM439, 室温）

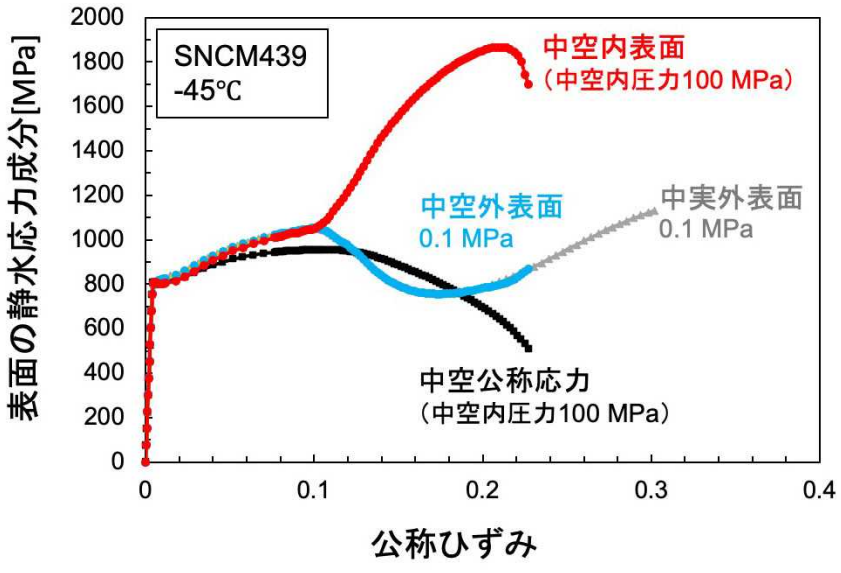


図 17　SNCM439 の-45℃における中空／中実試験片表面の静水応力成分の変化

図 17 には、SNCM439 の-45℃における中空／中実試験片表面の静水応力成分の変化を示している。中空内外表面の静水応力差（赤と青のデータの差）は絞り開始から急激に大きくなり、中空内表面の静水応力は大きい。これに対して、中空、中実試験片の外表面の静水応力分布は同等である。すなわち、この結果より、中空試験片では絞り開始から静水応力がより高くなる中空内表面側に高圧水素環境があるため、外表面に水素環境がある中実試験片よりも厳しい結果（安全側）になると推察される。○

b. 委員会組織（タスクフォース）の設立

・中空試験片方式 SSRT の規格化に向け、2018 年度に「中空試験片高圧水素中材料試験法規格化検討委員会」（タスクフォース）を立ち上げ、「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」事業と連携するとともに、事業全体の試験方法や試験結果の妥当性を確認した。○

c. 規格原案の作成

・2018 年度は、規格原案の骨子を作成し、内面仕上げについての検証結果をもとに、規格には、「中空内部内表面は研磨仕上げとする」と記述することが、タスクフォースで承認された。

・2019 年度に、平行部外径と中空内径の影響の検証結果から、「試験片平行部の外径は原則として 4 ㎜～8 ㎜の範囲とする。中空部(穴)の内径は原則として 1 ㎜～2 ㎜の範囲とする。」と記述することが、タスクフォースで承認され、規格原案を作成した。

・2020 年度には、規格原案の解説案を作成した。○ さらに、英文原案を ISO に提案した。◎

d. 海外調査

・中空試験片高圧水素中材料試験法の日本国内における活用と高圧ガスの規制が異なる海外においても中空試験片方式の普及を図るため、2018 年 7 月にチェコで開催された ASME PVP と 2019 年 7 月に米国で開催された ASME PVP とにおいて、中空試験片方式の概要とこれまでに得られているデータおよび規格化に向けての取り組みと得られているデータを発表した。○

（2）中空疲労試験法

（2）−① 試験片形状及び試験条件の標準化に関する研究開発

(1) 目的

中空試験片高圧水素中疲労試験法の標準化にあたり，本調査では，疲労寿命と疲労限度に及ぼす中空部内面仕上げと試験周波数の影響を調査した。

(2) 試験方法

供試材は、SUS316L および SNCM439 であり、5.1.4 中空試験片を用いたラウンドロビンテスト（SSRT）に示したものと同じである。板材の圧延方向と引張方向が一致するよう、図 18 に示す試験片を採取した。中空部内面は、電着ダイヤモンドワイヤによる縦研磨仕上げもしくは流動粉による流体研磨仕上げとした。105 MPa の H_2 および He 環境において、荷重制御高サイクル疲労試験を実施した。また，一部の試験片においては、中空部にガスを封入せずに大気中で試験を行った。試験温度は室温とし、応力比 $R = -1$、試験周波数 $f = 1$〜10 Hz とした。

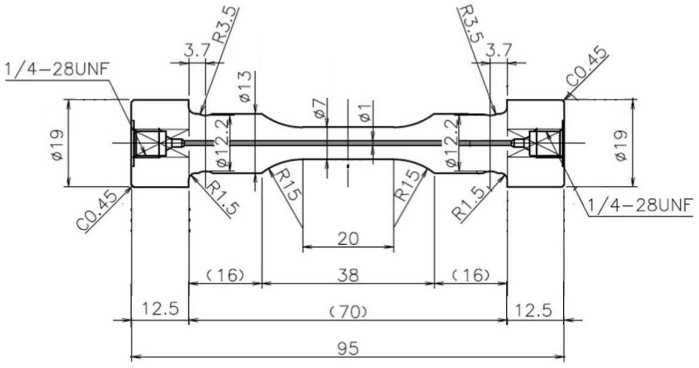


図 18　試験片形状および寸法（mm）

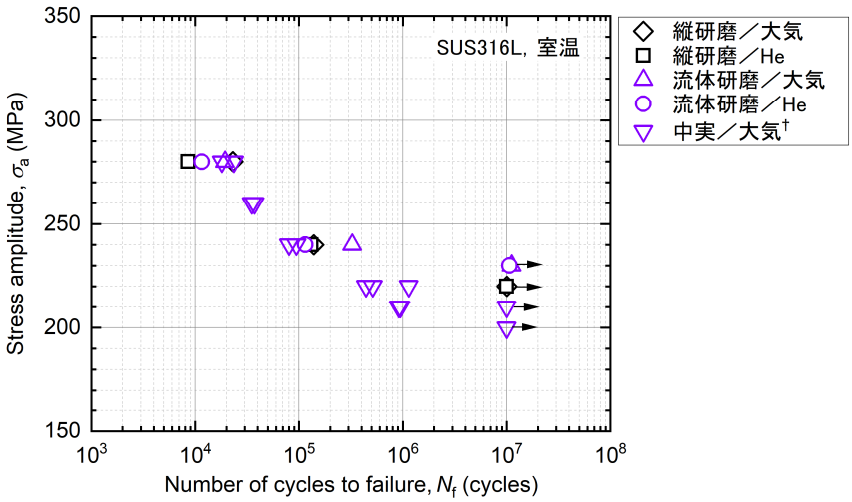
(3) 中空部内面仕上げの影響

図 19 に、室温において、縦研磨および流体研磨で中空部内面を仕上げた試験片により取得した S-N 線図を示す。大気および 105 MPa He 中（a）および 105 MPa H_2 中（b）のいずれにおいても、10^7 回まで疲労試験を実施できた。なお、疲労寿命および疲労限度に優位な差は認められなかった。以上の検討から、今回適用した加工条件においては、縦研磨および流体研磨のいずれで中空部内面を仕上げたとしても、疲労試験結果に及ぼす影響は実用上無視できるレベルであると結論づけた。

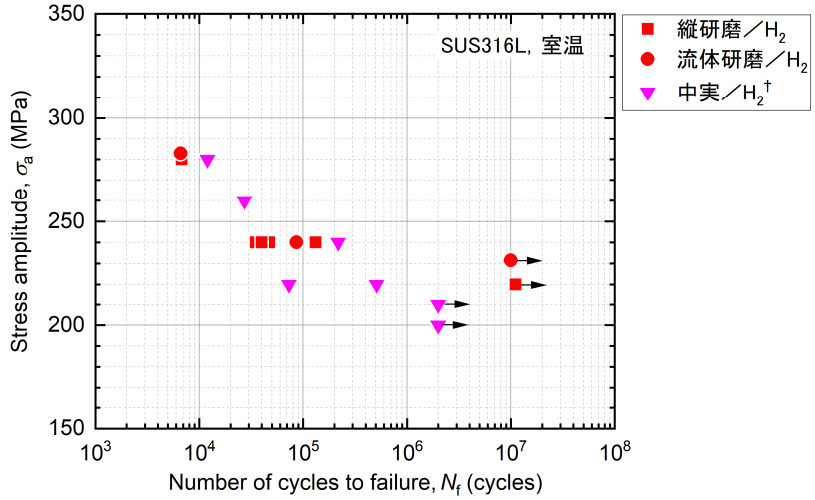
(4) 試験周波数の影響

中実試験片方式の場合、試験機摺動部シールの都合により、試験周波数は最大で 1 Hz 程度に制限される。一方、中空試験片方式の場合、摺動部のシールの必要性は無く、周波数に制限を受けないため、試験実施速度の加速が可能である。ただし、一般に水素脆化は材料内部に侵入した水素と金属材料との相互作用により生じ、その相互作用は水素の拡散に律速されるため、材料の水素感受性が試験周波数の影響を受けることが知られている。そのため、試験周波数を上げるには、周波数範囲で水素中の試験結果が変化しないことを担保する必要がある。そこで、試験周波数を従来の調査の 1 Hz から本事業の目標である 10 Hz に上昇させた場合の水素中の試験結果に及ぼす影響を調査した。

図 20 に、SNCM439 の室温、105 MPa H_2 中における S-N 線図を示す。図中には、弊機構にて取得したデータに加え、外注により民間の試験実施機関で取得したデータを含めている。試験周波数 1 Hz および 10 Hz にて取得したデータ間に差異はほとんど認められなかったことから、本材料では 1〜10 Hz の周波数範囲で取得した水素ガス中疲労試験結果は同等と見なせると結論づけた。○



(a)　大気および 105 MPa He 中



(b)　105 MPa H2 中

図 19　SUS316L の室温における *S-N* 線図（中空部内面仕上げの影響）

†SUS316L の中実／大気と中実／H_2のデータは、「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」事業で取得されたデータである。

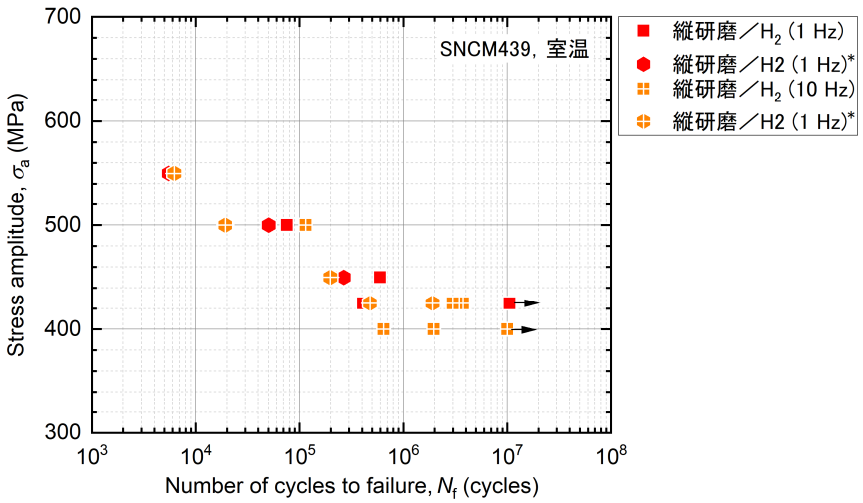


図 20　SNCM439 の室温、105 MPa H_2 中における *S-N* 線図（*試験外注により取得）

（2）－② 中空試験片高圧水素中疲労試験と中実試験片高圧水素中疲労試験の相関に関する研究開発

⑴ 目的

現行の規制・基準では、材料の水素適合性評価の判定のために、中実試験片方式の試験結果が用いられる。一方、試験コストを低減し、材料の水素適合性評価に要する時間短縮のために、中空試験片方式での評価のニーズが高まっている。そこで疲労試験結果に及ぼす試験方式の影響を調査した。

⑵ 試験方法

供試材は、c. 中空試験片を用いたラウンドロビンテスト（SSRT）と同じ SUS316L と SNCM439 を用いた。図 21 に SNCM439 の介在物プロファイルを示す。板材の圧延方向と引張方向が一致するように図 18 の試験片を採取した。中空部内面は、電着ダイヤモンドワイヤによる縦研磨仕上げもしくは流動粉による流体研磨仕上げとした。105 MPa の H_2 と He 環境で疲労試験を実施した。一部の試験片では、中空部環境を大気（室温）もしくはエタノール（室温未満）として試験した。試験温度は室温と−45℃（SUS316L のみ）とし、応力比 $R = -1$、試験周波数 $f = 1$〜10 Hz とした。

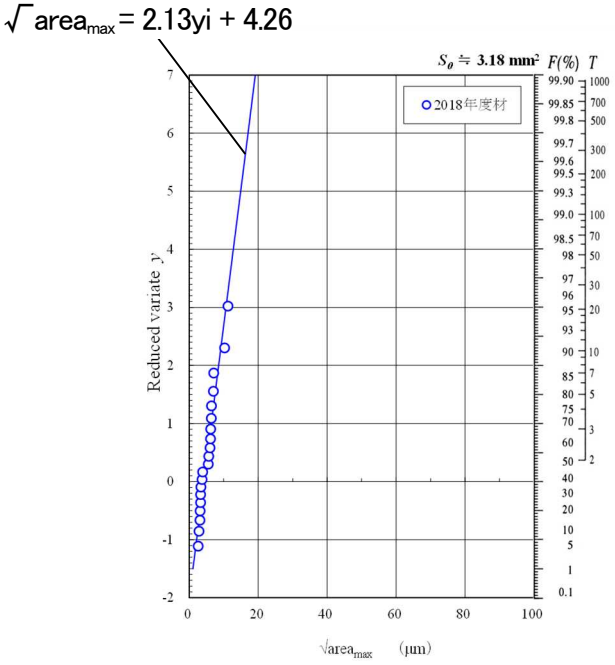
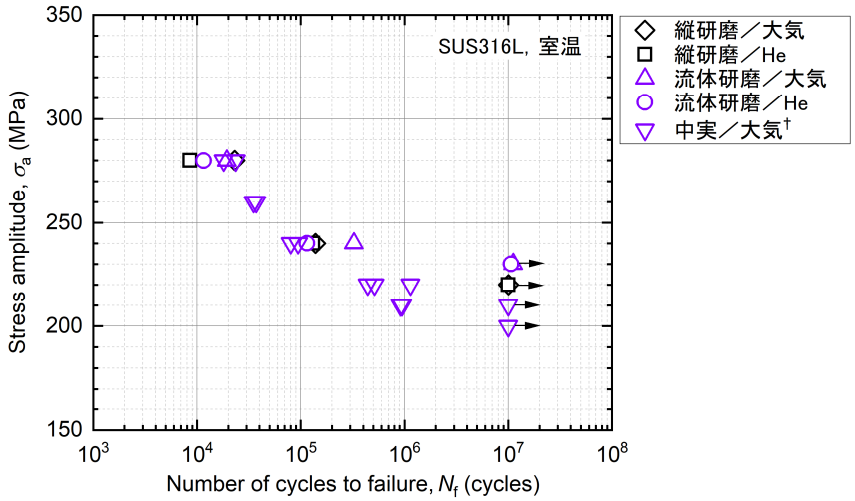


図 21　SNCM439 の介在物プロファイル

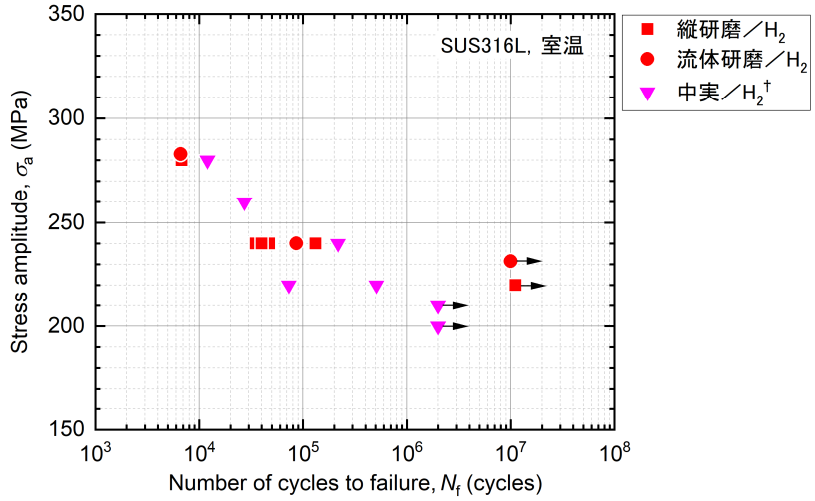
⑶ 試験結果

図 22 に、室温での SUS316L の *S-N* 線図を示す。大気／105 MPa He 中および 105 MPa 水素ガス中のいずれにおいても、疲労寿命に及ぼす試験片形状の影響はほとんど認められなかった一方、疲労限度（中実試験片では 2×10^6 回で定義）については中空試験片の方がわずかに高い値を示した。

図 23 に、室温、105 MPa H_2 中で破断した SUS316L の破面写真を示す。中空部の表面を起点にき裂が発生し、破断に至ったと考えられる。



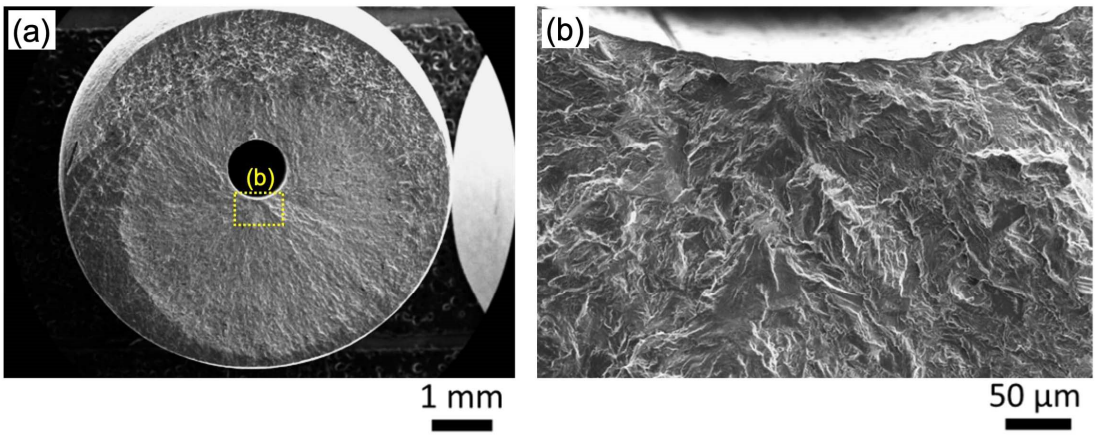
(a)　大気および 105 MPa He 中



(b)　105 MPa H2 中

図 22　室温における SUS316L の *S-N* 線図

†SUS316L の中実／大気と中実／H_2のデータは、「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」事業で取得されたデータである。



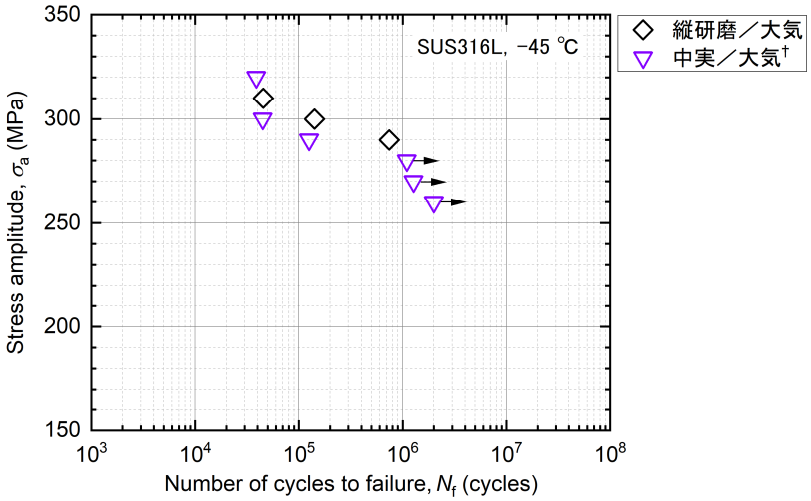
(a) 破面全体　　(b) 起点部付近拡大

図 23　室温、105 MPa H_2 中で破断した SUS316L の破面（σ_a = 240 MPa、N_f = 86,271）

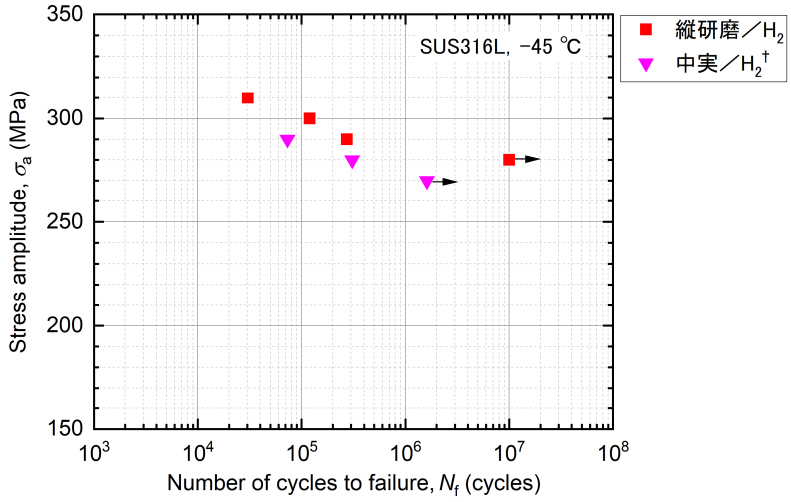
図 24 に、−45℃ における SUS316L の *S-N* 線図を示す。-45℃において、105 MPaH_2 環境で 10^7 回まで疲労試験を実施することができた。大気中および 105 MPa 水素ガス中のいずれにおいても、疲労寿命に及ぼす試験片形状の影響はほとんど認められなかった一方、疲労限度（中実試験片では 2×10^6 回で定義）については中空試験片の方がわずかに高い値を示した。

図 25 に、室温における SNCM439 の *S-N* 線図を示す。大気／105 MPa He 中において、疲労寿命および疲労限度に及ぼす試験片形状の影響はほとんど認められなかった。105 MPa 水素ガス中においては、中実試験片による試験結果が存在しないことから疲労限度に及ぼす試験片形状の影響は不明であるものの、疲労寿命に及ぼす試験片形状の影響はほとんど認められなかった。

図 26 および図 27 に、室温、105 MPa H_2 中で破断した SNCM439 の破面写真を示す。長寿命域においては介在物起点の破壊が支配的であり、短寿命域では表面起点の破壊が支配的であった。◎



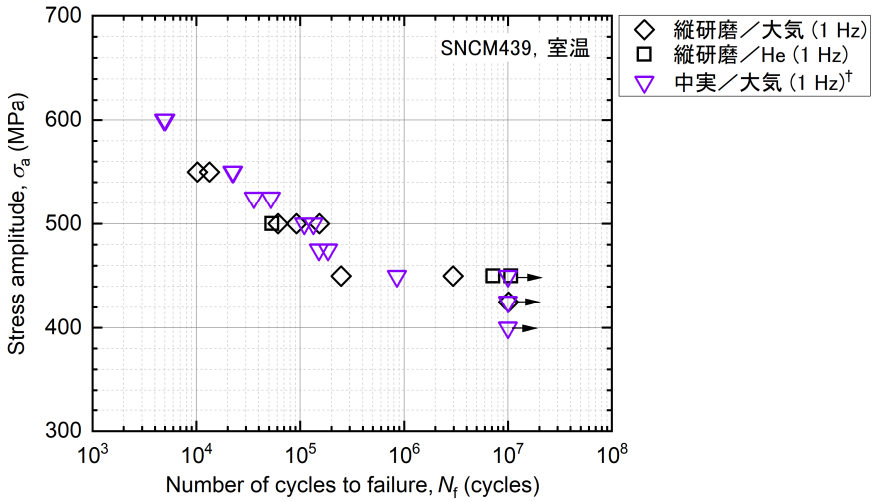
(a)　大気および 105 MPa He 中



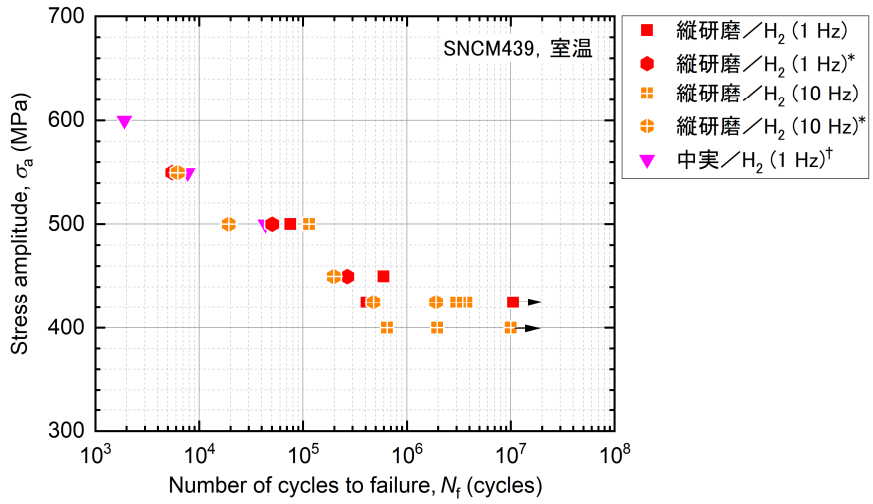
(b)　105 MPa H2 中

図 24　−45℃における SUS316L の *S-N* 線図

†SUS316L の中実／大気と中実／H_2のデータは、「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」事業で取得されたデータである。



(a)　大気および 105 MPa He 中



(b)　105 MPa H_2 中

図 25　室温における SNCM439 の S-N 線図

†SNCM439 の中実／大気と中実／H_2 のデータは、平成 25～29 年度に「水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発」で取得されたデータである。

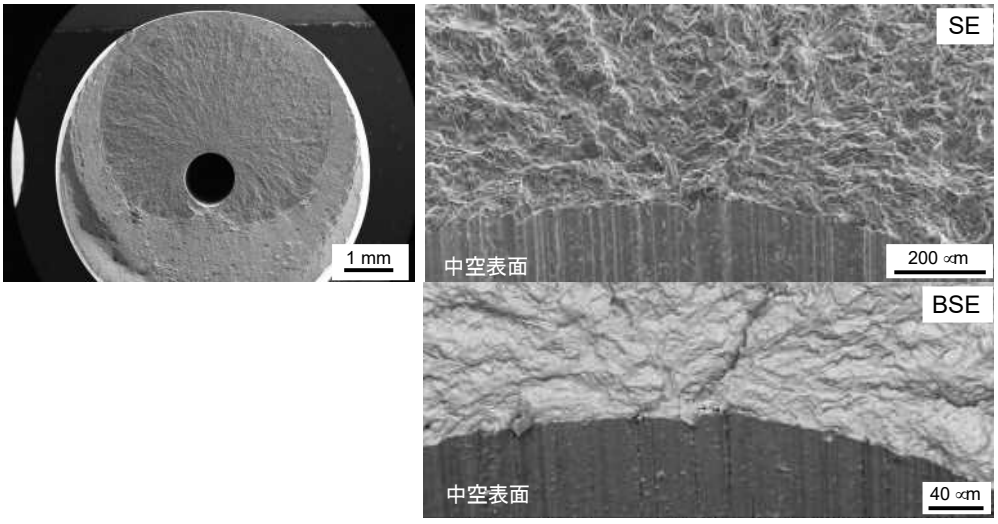


図 26　室温、105 MPa H_2 中で破断した SNCM439 の破面（σ_a = 550 MPa、N_f = 5,926）

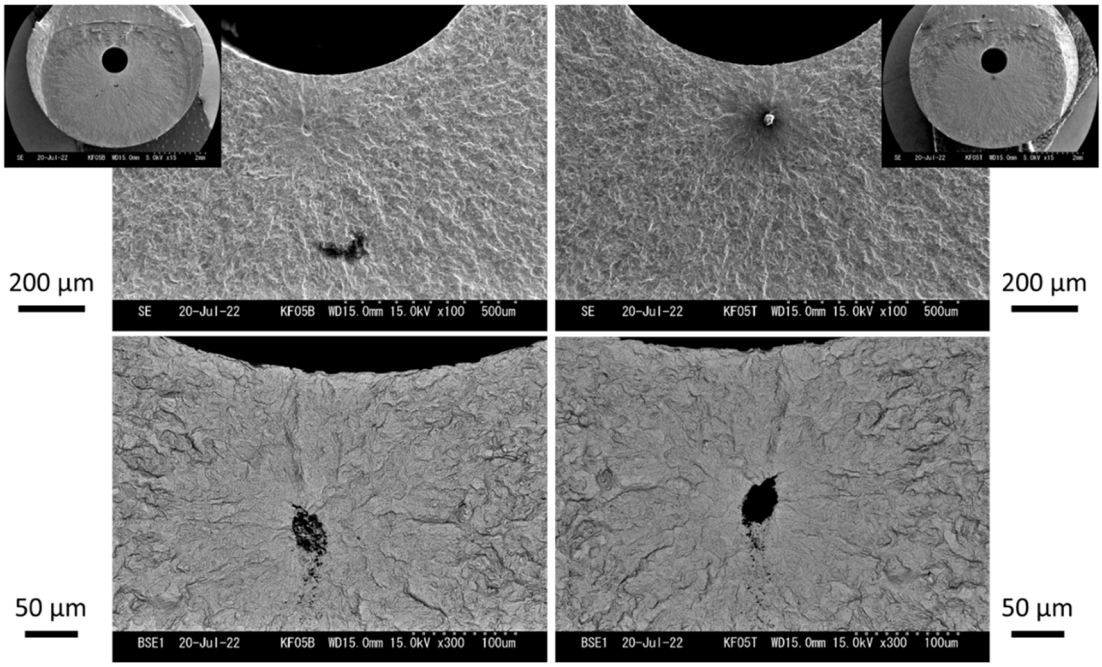


図 27　室温、105 MPa H_2 中で破断した試験片の破面（σ_a = 425 MPa、N_f = 3,756,902）

（2）−③ 中空試験片高圧水素中疲労試験法の規格化に向けた調査研究

(1) ラウンドロビン試験の実施

供試材は、c. 中空試験片を用いたラウンドロビンテスト（SSRT）と同じ SUS316L と SNCM439 を用いた。図 28 に SNCM439 の介在物プロファイルを示す。板材の圧延方向と引張方向が一致するように図 18 の試験片を採取した。中空部内面は、電着ダイヤモンドワイヤによる縦研磨仕上げもしくは流動粉による流体研磨仕上げとした。105 MPa の H_2 環境において、応力比 R = −1 にて引張圧縮疲労試験を実施した。SUS316L の試験は−45℃ にて実施し、試験周波数 f = 1 Hz とした。SNCM439 の試験は室温にて実施し、試験周波数 f = 10 Hz とした。

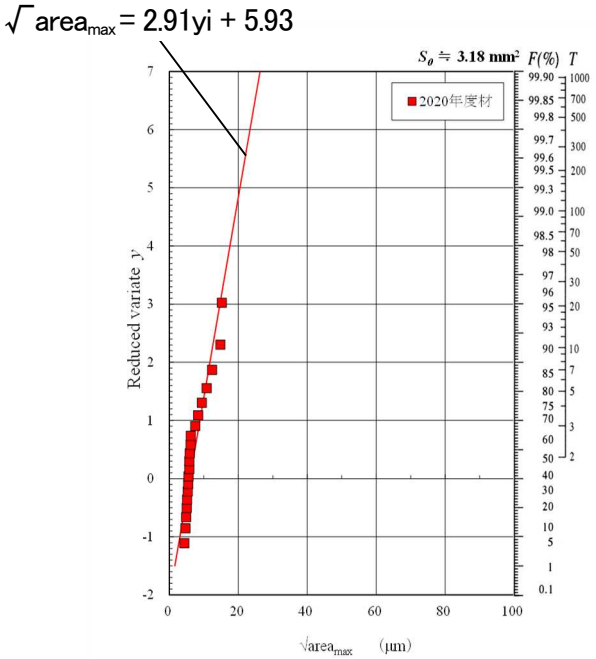


図 28　SNCM439 の介在物プロファイル

図 29 に、−45°C、105 MPa H_2 中で取得した SUS316L の S-N 線図を示す。有限寿命域での試験に限られるが、この範囲では、実施機関による試験結果の差異は認められなかった。

図 30 に、室温、105 MPa H_2 中で取得した SNCM439 の S-N 線図を示す。疲労限度付近である σ_a = 450 MPa で試験機関による疲労寿命の差異が認められるものの、高応力域では試験機関による疲労寿命の差異はほとんど無い。また、疲労限度も、試験機関による結果の差異は認められなかった。

以上の結果をもとに、中空試験片を用いた高圧水素中荷重制御高サイクル疲労試験法の原案を作成した。○

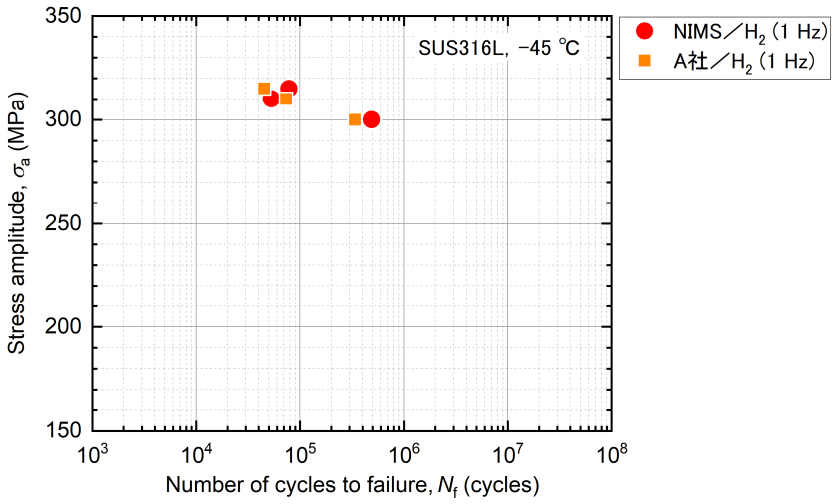


図 29　SUS316L のラウンドロビン試験結果

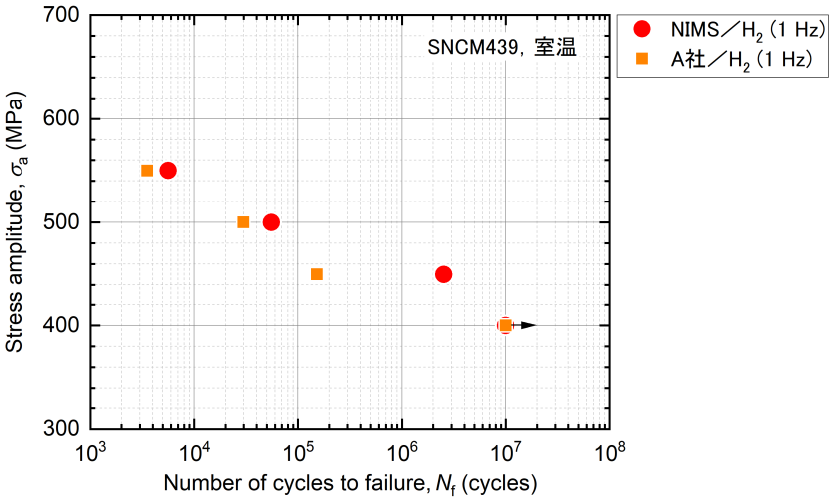


図 30　SNCM439 のラウンドロビン試験結果

（3）事業間連携

「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」事業と連携を図り、共同にて効率的に事業を推進するため、鋼材ステアリング委員会に本事業の概要と進捗状況を報告し、確認を受けた。○

3．2　成果の意義

前項の３．１ 研究開発成果で得られた結果及び活動は、全て有効に規格原案に反映され、規格原案の作成に役立った。○

３．３　開発項目別残課題

(1) 中実試験片に比べて、中空試験片を用いた疲労試験データにおけるデータ取得・蓄積。

(2) 中空試験片を用いた試験を加工に適切なコストと時間で対応できる加工業者の拡大。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本事業の目的・目標は中空試験片高圧水素中材料試験法を確立することであり、規格原案を作成し制定団体に提出することが事業化へのシナリオである。本事業は当初、中空試験片高圧水素中低ひずみ速度引張試験(SSRT)を主に規格案を作成する実施計画であったが、順調に進んでいることから、中空試験片高圧水素中疲労試験についても試験法を確立し規格原案を作成するように実施計画を加速した。3 年目の 2020 年度に実施計画通りに中空 SSRT の規格原案を作成し、英文案を ISO に提案していることは、事業化に向けての成果が十分に達成されていることを示している。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2018 年 7 月	口頭発表／ASME PVP 2018	Simple Mechanical Testing method to Evaluate Influence of High Pressure Hydrogen Gas	緒形俊夫
2	2018 年 7 月	口頭発表／ASME PVP 2018	Influence of 70 MPa Hydrogen Gas on SUS 630 from 77 K to 373 K by Simple Testing Method	緒形俊夫
3	2019 年 3 月	講演／立命館大学 エネルギーイノベーション材料研究センター　シンポジウム	水素エネルギーインフラの普及に向けた中空試験片による簡便な高圧水素中材料試験法の標準化と水素脆化の本質の考察	緒形俊夫
4	2019 年 3 月	口頭発表／日本鉄鋼協会春季講演大会	ステンレス鋼の高圧水素環境中破断変形挙動に及ぼす水素の影響	緒形俊夫
5	2018 年 8 月	誌上／日本鉄鋼協会会報ふぇらむ8月号	極限環境材料評価法開発と標準化および強度と脆性の電子軌道による説明	緒形俊夫
6	2018 年 12 月	誌上／水素利用技術集成 Vol.５～水素ステーション・設備の安全性	高圧水素ガス環境中の簡便な材料評価技術	緒形俊夫

7	2019年7月	ASME PVP 2019	Influence of Roughness of Inner Surface of Simple Mechanical Testing Method to Evaluate Influence of High Pressure Hydrogen Gas	緒形俊夫、小野嘉則
8	2019年9月	日本鉄鋼協会秋季講演大会	中空試験片による高圧水素環境下材料特性評価法の規格化	緒形俊夫、小野嘉則、西川嗣彬
9	2020年10月	ISO TC164(金属の機械的試験) SC1(単軸引張試験)（注1）	Metallic materials – Tensile testing – Hollow-type test pieces for severe environment tests and slow-strain rate tensile test (SSRT) method in high-pressure hydrogen environment	緒形俊夫
10	2021年11月	NIMS WEEK 2021	中空試験片による高圧水素ガス環境下での材料試験法	小野嘉則、緒形俊夫
11	2022年12月	Webセミナー&展示会「カーボンニュートラル時代への取り組み」	水素社会実現のための物質・材料研究機構の取り組み　極低温／高圧水素環境における材料特性評価	小野嘉則
12	2023年2月	HYDROGENIUS, I2CNER, HYDROMATE AND SINTEF Joint Research Symposium2023	Materials Characterization in Cryogenic and High-Pressure Hydrogen Gas Environments - NIMS Initiatives for a hydrogen energy society -	小野嘉則

（注1）ISO/TC 164/SC 1/WG 9 “Tensile testing, method in high-pressure hydrogen environment”が2021/9/27に発足。4回の会議を経て、DIS登録済み。

以上

（2-(2)-①）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／水素ステーション用タイプ2蓄圧器の供用中検査手法の研究開発

委託：事業者名　JFEスチール(株)、JFEコンテイナー(株)、千代田化工建設(株)

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

・蓄圧器使用応力場ではAEは検出されず、疲労限近傍の応力場で損傷が発生すればAEは検知可能であることを試験片及び容器で確認され、AE法の有用性を立証。
・実水素ステーションでは種々のノイズが存在したが、そのノイズは波形の特徴が疲労き裂進展時の波形とは異なるため除去可能であることが確認できた。
・研究成果を関係学会誌へ掲載5件、関係学会への口頭発表11件を実施し、本開発技術の有効性を公知とすることで、NDIS2436の原案作成を完了した。

●背景/研究内容・目的

【背景】 水素蓄圧器の定期自主検査は、開放検査および非破壊検査（肉厚測定）を実施することが定められている。Type1蓄圧器はUTを用いた供用中検査が可能である一方、ﾀｲﾌﾟ2蓄圧器は表面がCFRP層で覆われているためUT法の適用が困難となり，コスト高な開放検査が必須。
【研究内容・目的】 ﾀｲﾌﾟ2蓄圧器へのｱｺｰｽﾃｨｯｸ・ｴﾐｯｼｮﾝ法（AE法）の適用技術を開発することで、Type2蓄圧器の供用中検査を可能とし、水素ｽﾃｰｼｮﾝの保安検査の運営ｺｽﾄを削減する。

●研究目標

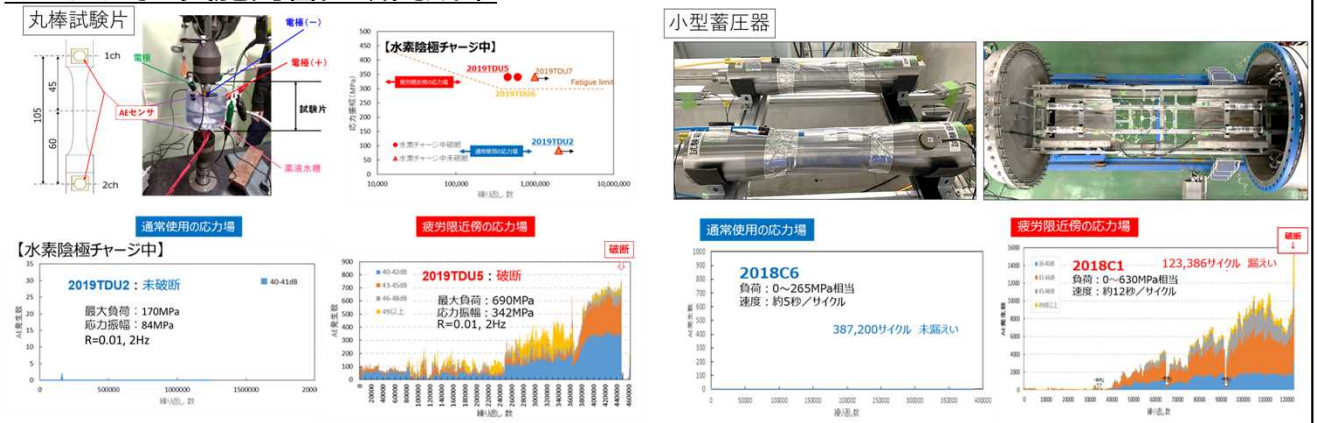
実施項目	最終目標
(1) 定期自主検査へのAE法導入シナリオの構築	AE法の供用中検査基準の策定
(2) 鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出	鋼料の疲労き裂発生進展とAE波の発生関係の評価
(3) 鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出	使用応力場及び疲労限近傍の応力場にてのAE発生挙動を確認
(4) 実機タイプ2蓄圧器による高圧水素サイクル条件下でAE法の構築	実機稼働中のAE発生挙動を確認し、ノイズの原因や除去方法を確立。
(5) 基準化への取り組み	民間規格化（日本非破壊検査協会規格）の試み。

●実施体制及び分担等

- NEDO
  - JFEｽﾁｰﾙ(株)〔(1),(2),(5)〕 ― 東京電機大〔(1),(2),(3),(5)〕
  - JFEｺﾝﾃｲﾅｰ(株)〔(1),(3),(4),(5)〕
  - 千代田化工建設(株)〔(1),(2),(3),(4),(5)〕

（再委託等）

●これまでの実施内容／研究成果



・高圧水素環境下での試験片及び小型蓄圧器の疲労試験中のAE計測を実施。
⇒ 蓄圧器使用応力場ではAEが検出されない事を確認した。
　一方，疲労限近傍の応力場において，わずかでも損傷が発生すればAEが顕著に観察。
⇒ 蓄圧器の供用中検査手法としてAE法が有効であることが示された。

●今後の課題

保安検査基準へのNDIS 2436への引用。

●実用化・事業化の見通し

① 定期自主検査指針などの供用中検査基準にAE法が導入される事により、運営コスト削減を可能とし、市場の拡大につながる。
② 先行するフェーズドアレイ法と比較して、供用中検査の作業負荷が少なく、優位性が高い。
③ 保安検査基準へのNDIS 2436への引用されることで蓄圧器の検査基準として適用できる。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
(1)	日本非破壊検査協会での規格委員会の設置	○
(2)	・蓄圧器使用応力場ではAEが検出されず。 ・疲労限近傍の応力場で損傷が発生すればAEは検知。 ・大気中および水素チャージ中でAEの有効性が確認。	○
(3)	・高圧水素ガス環境下においても疲労損傷にともなうAEが検知できることを確認。	○
(4)	・外乱ノイズはAE波形の形状、波形の周波数成分の違い、信号の発生位置標定によって除去できることを確認。	○
(5)	日本非破壊検査協会においてNDIS2436の原案作成。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	5	11	0

事業番号：2-(2)-①

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／水素ステーション用タイプ 2 蓄圧器の供用中検査手法の研究開発」

実施者：JFE スチール株式会社
JFE コンテイナー株式会社
千代田化工建設株式会社

１．研究開発概要

１．１　タイプ 2 蓄圧器の供用中検査方法の必要性

水素・燃料電池戦略ロードマップで示された水素ステーションの 2020 年 160 箇所、2025 年 320 箇所程度の設置を実現するためには、水素ステーション事業の自立化に向けたさらなる水素燃料電池自動車（FCV：Fuel Cell Vehicle）の導入支援と合わせて水素ステーション整備費、運営費、更には水素調達コストの低減に係る技術開発が重要となる。世界に先駆けて商用水素ステーションの設置を進めてきたが、設置当初とは異なる新たな課題が明確になってきた。水素ステーション、FCV の本格的普及を実現するために、新たな共通課題を解決することで、水素ステーション事業の自立化に向けた取り組みが求められている。

一方、水素ステーションの設備構成においては、水素蓄圧器のコスト比率が大きく課題となっている。そこで、NEDO 事業「水素利用研究開発事業」において、量産型の継ぎ目なし厚肉鋼管を素材とする低合金金属円筒を炭素繊維強化プラスチックで補強するタイプ 2 蓄圧器が実用化のレベルに至っている。このタイプ 2 複合蓄圧器を使用すれば、既存の鍛造製タイプ 1 蓄圧器と比較して、コスト低減、重量効率の向上が可能となるため，タイプ 2 蓄圧器の拡販が期待されている。

水素ステーションの運営費の中で水素蓄圧器の定期自主検査費用が課題となっている。水素蓄圧器の耐圧性能および強度に関する検査は、目視検査および非破壊検査（肉厚測定）を実施することが定められており、現状では 2～3 年に一度は蓄圧器を開放し、目視検査を実施している。しかしながら、定期自主検査は水素ステーションを連続 10 日程度の休業させる必要があり、運営の大きな負担となる。そこで，近年では保安検査基準（一般高圧ガス保安規則関係（スタンドおよびコールド・エバポレーター関係を除く。）KHKS 8501-1(2011)の附属書 D(規定)供用中探傷試験では、当該附属書の D.3 a） 1） において供用中探傷試験として、超音波探傷試験法（UT 法）が定義されている。この保安検査基準が改訂されたことで、スタンドへの適用が予定されている。非破壊検査協会から新たに発行された蓄圧器に係る UT 法を用いて、供用中探傷試験を行う事により、定期自主検査の代替となりえ、定期自主検査にともなる運営費低減に繋がることが期待されている。

一方、タイプ 2 蓄圧器は金属円筒の外表面が CFRP 層で覆われていることから、超音波が大きく減衰し、CFRP 層からの蓄圧器内面の欠陥の検査は現実的ではない。そこで，Type2 蓄圧器においても供用中で非破壊・非開放で検査できる技術開発が求められている。そこで、本研究開発では、タイプ 2 蓄圧器の供用中検査手法に UT よりも実用的で簡便な非破壊検査技術のひとつである AE を適用し、金属円筒の損傷（疲労き裂発生やき裂進展挙動）を供用中に開放せずに検知する検査法を実用化する技術開発を目的とする。本技術開発により，AE 法が従来の検査法に替わる適切な検査手法であることを検証し、検査による水素ステーションの長期間の休業を不要とし、ユーザーの利便性向上、メンテナンスコストの低減が可能となる。

１．２　AE 法の概要（従来AE 法と現在の最新AE 法の比較）

AE とは、固体材料内部で局所的かつ急激なエネルギー開放を生じる現象が発生すると、それに伴い超音波領域の周波数の弾性波（AE 波）が放出される現象である。図１左に示すように、材料中のき裂形成に伴って発生したAE 波（図１右）を対象材料表面に設置したAE センサによって検出し、その波形を分析、評価することによって材料の損傷の検知や損傷形態の情報を得ることができる。

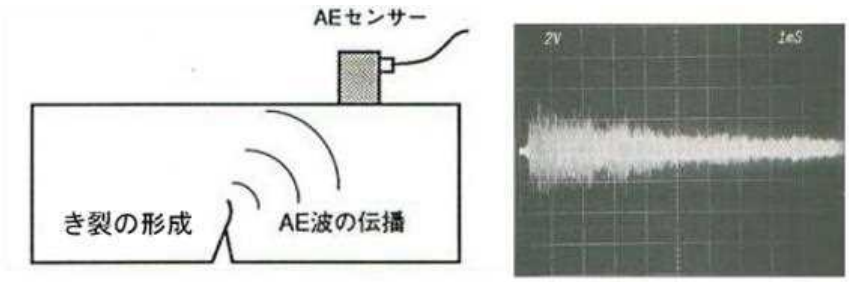


図１　AE 法の概念

AE 法の主な特徴は以下のように挙げられる。

・き裂が発生するAE を検出するため、UT のように超音波エネルギー等を与える必要がない（受動的）

・センサ走査しなくても広域の検査が可能であり、複数のセンサを用いれば、AE 源の位置標定可能（広域的）

・活性で危険度の高いき裂ほど検出が容易。

・センサ設置後、遠隔・自動検査が可能。

AE 法は 30 年以上前より、材料開発や圧力蓄圧器の品質管理等に活用されてきたが、近年の IT 関連技術の劇的な進歩によって、最新のAE 法は従来のそれと比較して格段に向上している。

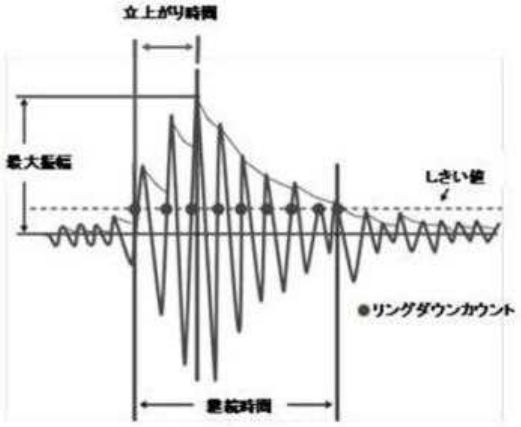


図２　従来のAE 波形分析法（AE パラメーター法）

過去の AE 計測においては、計測用コンピュータの計算処理速度や記憶速度・記憶容量に限界があり、発生した全てのAE 波形をコンピュータに記録できず、図２に示すようなAE パラメータ法と呼ばれる、最大振幅や継続時間などの波形の特徴量だけを数値で抽出して分析、評価を行うものであり、重要なAE 波形の取り逃がしや、ノイズ処理に課題があった。

一方、近年のIT 技術によってコンピュータの処理速度、記憶媒体の大容量化によって最新のAE 法は詳細なAE 波形の分析・評価が可能となった。そのため、図３に示すようなコンピュータ内部にAE 波形を直接読

み込むことが可能になると共に、1秒間に数万のAE波形を記録、処理することができるようになり、重要なAE波形を取り逃す事なく全てのAE波を分析・評価することができるようになった。更に、最新の各種デジタル信号処理技術を実時間で導入でき、図3に示すように材料の損傷に起因した真のAE波（図3(a)）とノイズ（図3(b)）との弁別にパターン認識法などが適用できるようになり、計測後、数時間という実用的な処理時間で正確に真のAE波を抽出できるようになったのが最新のAE技術である。本提案のタイプ2蓄圧器の供用中検査手法には上記のような最新のAE技術を適用する。

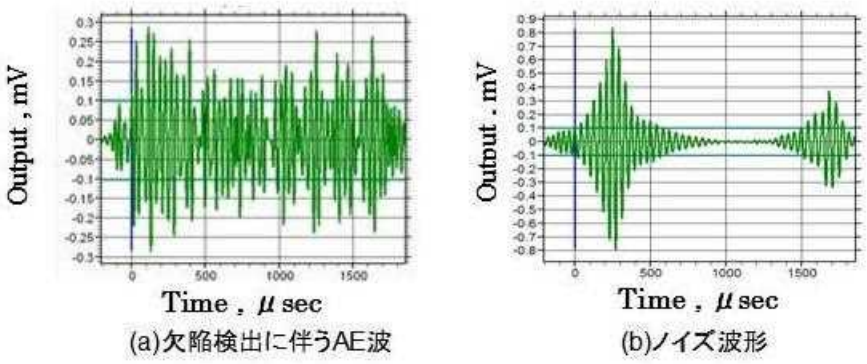


図3　最新のAE波形分析法（波形パターン分類法など）

2．研究開発目標

表1 研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）：定期自主検査へのAE法導入シナリオの構築	AE法の供用中検査基準の策定
（2）：鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出	鋼料の疲労き裂発生進展とAE波の発生関係を明らかにし，定期自主検査への導入、保安検査基準策定に資するデータの取得。
（3）：鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出	使用応力場及び疲労限近傍の応力場にてのAE発生挙動を確認
（4）：実機タイプ2蓄圧器による高圧水素サイクル条件下でAE法の構築	実機稼働中のAE発生挙動を確認し、ノイズの原因や除去方法を確立する。
（5）：基準化への取組	JSNDIの規格委員会において協議/審査し、2022年度までに日本非破壊検査協会規格の制定を試みる。

2．1　（1）：定期自主検査へのAE法導入シナリオの構築

（担当：JFEスチール㈱、JFEコンテイナー㈱、千代田化工建設㈱）

本研究開発の成果は、定期自主検査などに導入されて始めて　水素ステーションのライフサイクルコスト（整備費用、運営費用）の低減が可能となる。AE法による供用中検査は業界全体で共有できる検査方法とする事が重要であり、定期自主検査不要になる取組を関係機関と共に検討する事が重要である。本項目では、本研究開発成果の業界全体へ波及を鑑み、業界と連携した定期自主検査への「供用中AE法（以降、AE法）」の

導入シナリオの構築を目的とし，最終目標をAE法の供用中検査基準の策定とする。

２．２　（2）：鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出

（担当：JFEスチール㈱、千代田化工建設㈱）

今回の対象である低合金鋼の疲労に伴うAEデータについては、AEと疲労現象とを明確に結びつけた事例は無く、詳細な検討をする必要がある。蓄圧器の疲労試験では、試験時間が長くなり、試験費用も高額になるため、複数の条件での試験を実施するためには試験片による試験が必要となる。また、試験片と蓄圧器では、同じ金属材料の疲労に伴うAEは同じであるが、疲労する領域の違いや応力のかかり方という観点で挙動が異なることも考えられるため、蓄圧器を用いた試験も実施し検証を行う。

タイプ2蓄圧器の金属円筒にき裂が発生すると、水素の漏洩に繋がる。金属材料は、疲労の進行とともに、段階的に疲労破壊が発生する。これらの変化に対し、AE法が有効であると考えられ、疲労き裂の進展状況を検知できれば、有効な保全管理技術になり得る。本項目では、鉄鋼材料の疲労き裂発生進展とAE波の発生関係を、鋼製小型片を用いて評価する事を目的とする。更に、実機蓄圧器では、高圧水素による水素劣化が想定される事から、連続陰極チャージ法を併用して、水素環境下における疲労き裂発生進展とAE波の発生挙動に及ぼす水素劣化の影響を評価する事を目的とする。最終目標は、上述の知見を元に鋼料の疲労き裂発生進展とAE波の発生関係を明らかにし，定期自主検査への導入、保安検査基準策定に資するデータの取得することとする。

２．３　（3）：鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出

（担当：JFEコンテイナー㈱、千代田化工建設㈱）

タイプ2蓄圧器の金属円筒にき裂が発生すると、水素の漏洩に繋がる。金属材料は、疲労の進行とともに、段階的に疲労破壊が発生する。これらの変化に対し、AE法が有効であると考えられ、疲労き裂の進展状況を検知できれば、有効な保全管理技術になり得る。本項目では、小型鋼製蓄圧器の疲労き裂発生進展とAE波の発生関係を、鋼製蓄圧器を用いて評価する事を目的とする。最終目標は、使用応力場及び疲労限近傍の応力場にてのAE発生挙動を確認し，AE法を供用中検査手法への適応の可能性を検証することとする。

２．４　（4）：実機タイプ2蓄圧器による高圧水素サイクル条件下でAE法の構築

（担当：JFEコンテイナー㈱、千代田化工建設㈱）

タイプ2蓄圧器の金属円筒がき裂を発生すると、水素の漏洩に繋がる。金属材料は、疲労の進行とともに、段階的に疲労破壊が発生する。これらの変化に対し、AE法が有効であると考えられ、疲労き裂の進展状況を検知できれば、有効な保全管理技術になり得る。しかしにながら、実環境においては疲労き裂の進展に伴うAE信号のみならず，周辺機器の作動音等の外乱ノイズが発生するため，疲労損傷にともなうAE信号とは分離する必要性がある。そこで、本項目では実機タイプ2蓄圧器を用いて、3バンク方式などの実操業の昇圧・減圧条件でAE監視の妥当性の検証を行い、環境騒音、振動等の外乱ノイズの影響を検証することを目的とする。最終目標は、実機稼働中のAE発生挙動を確認し、ノイズの原因や除去方法を確立する。

２．５　（5）：基準化への取り組み

（担当：JFEスチール㈱、JFEコンテイナー㈱、千代田化工建設㈱）

研究開発項目(1)、(2)、(3)及び(4)の項目の研究開発を推進して、2018～2020年度末までの期間に、AE法の規格化に資する技術的データ、法的検討資料を蓄積し取り纏める。本項目(5)では、纏めたデータ/資料に基づいて

規格原案を作成し、参考として、2021 年度～2022 年度の二年間に、規格化に資する有識者による検討委員会の設置/運営を JSNDI に外注する。当該委員会を通じた本研究開発成果の AE 法に関する協議/審査によって民間規格（日本非破壊検査協会規格、NDIS）で制定を試みることを最終目標とする。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）定期自主検査への AE 法導入シナリオの構築

・高圧ガス製造施設の保安の維持・向上には事業者における定期自主検査の充実が不可欠であり、高圧ガス保安法ではその詳細が規定されていない定期自主検査の方法について、事業者の参考のために高圧ガス保安協会は定期自主検査指針(圧縮水素スタンド) KHK/JPEC S 1850-9 を制定した。定期自主検査指針では、保安検査基準(KHK/JPEC S 0850-9) に定めた事項の他、 肉厚測定以外の非破壊検査について、先進的な検査技術の検討等を行い、検査方法を採択するよう努めることの明記などを追加しており、本 AE 法による供用中検査手法は先進的な検査技術に該当することを確認した。

・蓄圧器管理への AE 法適応への考え方

蓄圧器寿命と AE 発生挙動との相関を理解するために、従来から存在する有限寿命蓄圧器を例に説明する。

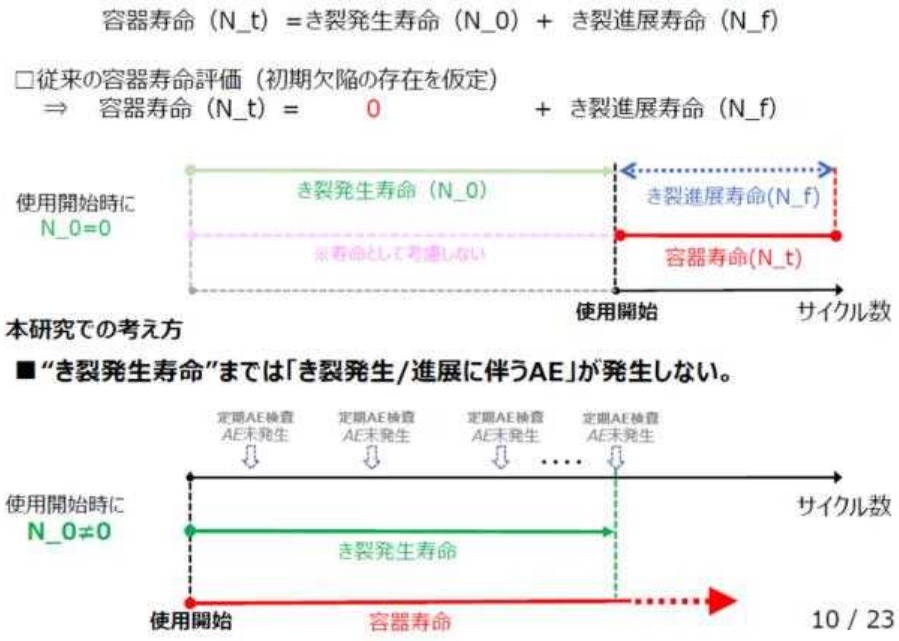


図４　蓄圧器管理への AE 法適応への考え方

図４に従来の有限寿命蓄圧器の寿命の考え方を示す。従来蓄圧器の寿命は蓄圧器の内部に欠陥（き裂）が存在することを前提とし、そのき裂が進展し蓄圧器肉厚を貫通するまで回数を評価し，その回数に安全率を乗じた値が寿命と判定される。本質的な蓄圧器寿命 (Nt) はき裂発生寿命 (N_0) とき裂進展寿命(Nf)の和であるが，き裂発生寿命は現時点では予測およびその計測が困難であることから、安全側に寿命評価されるように蓄圧器寿命 (Nt) ≒き裂進展寿命(Nf)として取り扱われている。本研究開発の結果から，AE 信号は蓄圧器内面に何かしらの損傷が生じた際に発生するものであることを見出した。すなわち、何かしらの損傷である“き裂発生寿命 (N_0) ”までは、き裂発生およびき裂進展にともなう AE が発生しないことを定性的に明らかにした。その知見を元に、新たな考え方として、図４下部に示すように定期的に蓄圧器の AE 計測を実施し，AE が検出

されなければ“き裂発生寿命（N_0）”はまだ残存されており、蓄圧器は無欠陥と等しいと言える。またAE信号が検出された場合は何かしら損傷が発生したものとし，その時点を定期自主検査の時期として設定することで，適切な蓄圧器定期自主検査時期を診断することができることを提案した。

この方法ではき裂発生寿命（N_0）を包含した蓄圧器寿命診断となるため，本来の蓄圧器寿命である（Nt）として蓄圧器寿命を評価することが可能であることが特徴である。適正な寿命となるため検査開放周期を実質的に延長することが可能となり、運営費削減につながる。

上記の方法をもって定期自主検査へのAE法導入シナリオを検討し、複合蓄圧器ステアリング委員会等にて、その方向性の妥当性を議論した結果，有識者からの賛同を得た。「基準化への取組」において、2018年度から2020年度までの研究成果を纏めたデータ/資料に基づいて規格原案を作成し、有識者による検討委員会の設置/運営を日本非破壊検査協会(JSNDI)に委託した。

達成度：○

（2）鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出

・疲労試験中AE挙動およびAE法適用の技術的妥当性の検証

大気環境にて試験片を用いた高サイクル疲労試験を実施し、疲労き裂発生進展挙動とAE信号の関係を検証した。試験には、TYPE2蓄圧器で用いられるライナー材と同等の低合金鋼（SCM435相当）を用い、引張強さは807MPa、上降伏点718MPa、下降伏点690MPaである。試験片形状は、一般的な中実丸棒疲労試験片（中心部φ6mm）を用い、試験片のネジ部に平面部を加工しAEセンサを設置した（図5）。試験条件と結果のSN線図を図6に示した。応力比（R）によって疲労限が異なり、R=-1の時は約420MPa、R≒0の時は約320MPaであった。このうち、破断に至ったTP10と実蓄圧器の使用時の負荷に近い低負荷条件のTP17について、AE計測結果を比較した（図7-8）。破断に至ったTP10は、漏洩までの繰返し数（Nf）と繰返し数（N）の比（N/Nf）が約40%付近（約70,000cycle）以降ではAE振幅36dB以上のAEが急激に増加しているが、TP17では、30dBを超えるAEは認められなかった。これにより低合金鋼の疲労損傷の有無がAEで評価できることが示唆される結果を得た。

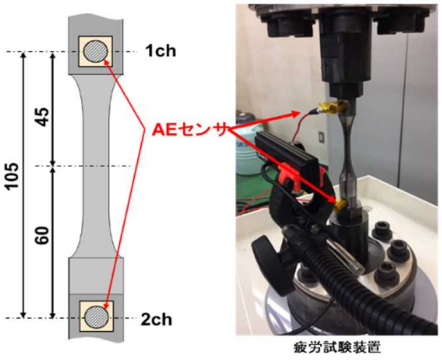


図5　AEセンサ設置状況

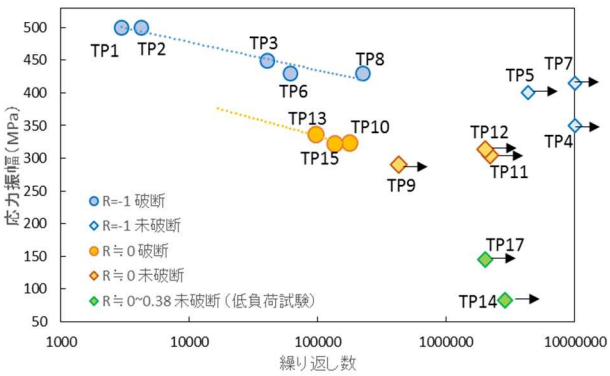


図6　大気中疲労試験のSN線図

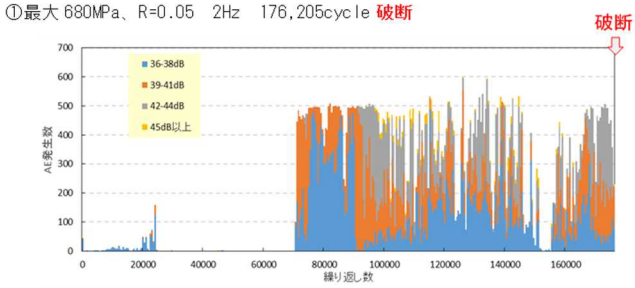


図7　AE計測結果(TP10)

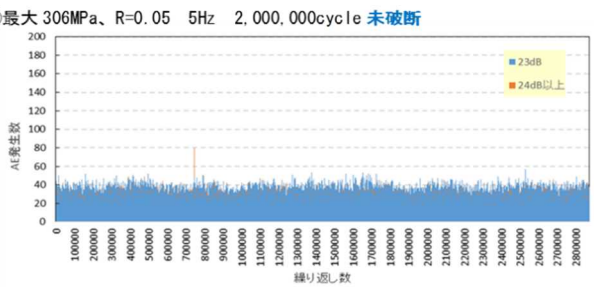


図8　AE計測結果(TP17)

・連続陰極水素チャージ疲労試験中のAE計測技術の開発

東京電機大学に一部再委託を行い、AE 法適用のための技術的な妥当性の検証を実施している。低合金鋼の小型試験片の高サイクル疲労試験において、疲労き裂発生・進展過程に対応したAE信号の確認などの、AE法の基本的な技術的妥当性を検証した。そのため、図9に示すように、連続陰極水素チャージ法を併用して、疲労き裂の発生・進展とAE波の発生挙動に及ぼす高圧水素環境の影響を評価できる試験環境を開発した。陰極水素チャージによる気泡発生に対して、有意なAEを検知できることを確認した。

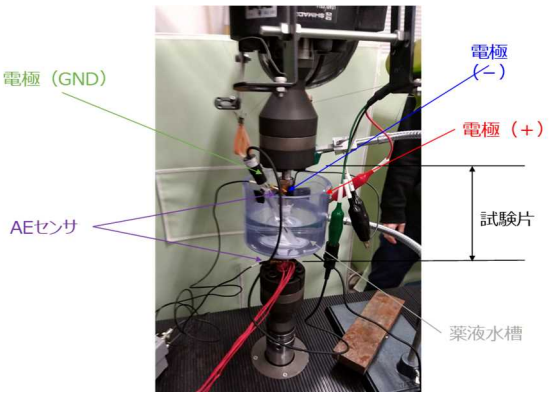


図9　連続陰極水素チャージ疲労試験の実験風景

・水素環境下（連続陰極水素チャージ）疲労試験中のAE挙動およびAE法適用の技術的妥当性の検証

AE信号に及ぼす水素環境下疲労損傷の影響を調査するために，連続陰極水素チャージ環境にて試験片を用いた高サイクル疲労試験を実施し、疲労き裂発生進展挙動とAE信号の関係を検証した。試験には、Type2蓄圧器で用いられるライナー材と同等の低合金鋼（SCM435 相当）を用い、引張強さは 807MPa、上降伏点718MPa、下降伏点690MPaである。試験片形状は、一般的な中実丸棒疲労試験片（中心部φ6mm）を用い、試験片のネジ部に平面部を加工しAEセンサを設置した（図10）。試験条件と結果のSN線図を図11に示した。 TDU-5のAE発生挙動として図12にAE発生数を示す。疲労試験の初期はAE発生が活発であるが、しばらくして落ち着き、その後、試験片破断が近づくにつれ、再びAE発生が活発になる。図13はTDU-2のAE発生挙動としてAE発生数を示す。疲労試験の全期間に渡って40dBを超えるようなAE発生がない。これらの結果から，陰極水素チャージ疲労試験において、未破断試験片ではAE発生が認められず、破断試験片では破断が近づくにつれAE発生が活発になる。すなわち、健全な蓄圧器であればAEは発生せず、蓄圧器に疲労き裂進展が起きている状況では水素環境においてもAEを検出できるということを意味する。

達成度：○

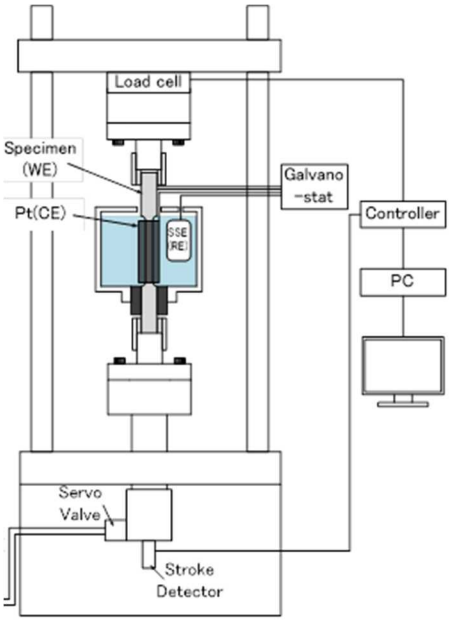


図 10　連続陰極水素チャージ疲労試験の試験装置の構成

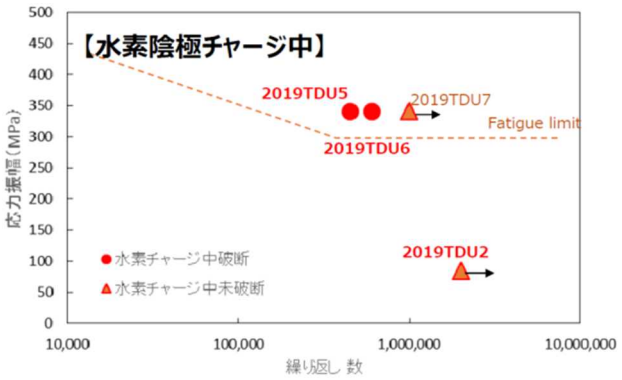


図 11　連続陰極水素チャージ疲労試験（R = 0.01）の S-N 関係

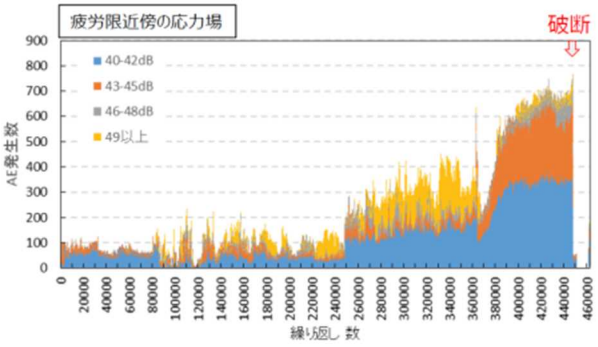


図 12　破断試験片（TDU-5、応力振幅 342 MPa、応力 R =0.01、2Hz）において得られた AE 発生挙動

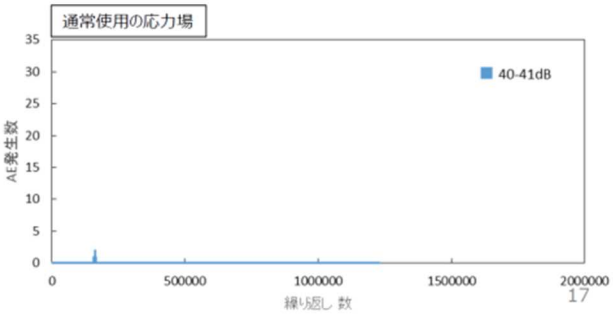


図 13　未破断試験片（TDU-2、応力振幅 84 MPa、応力 R=0.01、2Hz）において得られた AE 発生挙動

（3）鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動の AE による検出

・鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動の AE による検出

鋼製小型蓄圧器による水圧サイクル試験を実施し、疲労き裂発生・進展挙動と AE 信号の関係を検証した。水圧疲労試験中の AE 発生数の変化を図 14-15 に示した。ここで、大気中試験片で破断に至った応力相当（最大 630MPa）で試験を実施し漏洩に至った容器 2 と、実ステーションでの容器使用負荷相当の低負荷で試験を実施した容器 6 について示している。容器 2 では、漏洩までの繰返し数（Nf）と繰返し数（N）の比（N/Nf）が約 40%付近から AE 振幅値 36dB 以上の比較的高振幅な AE の発生数が増加する傾向が見られた（図 14）。一方、容器 6 では、AE 振幅 36dB 以上の AE の発生は全く認められなかった（図 15）。したがって、容器 2 で得られた AE 発生数の増加は、漏洩に至る間の疲労損傷に起因した AE と考えることができ、漏洩に至らな

い場合は、そのAEの発生がほとんどないと考えることができる。

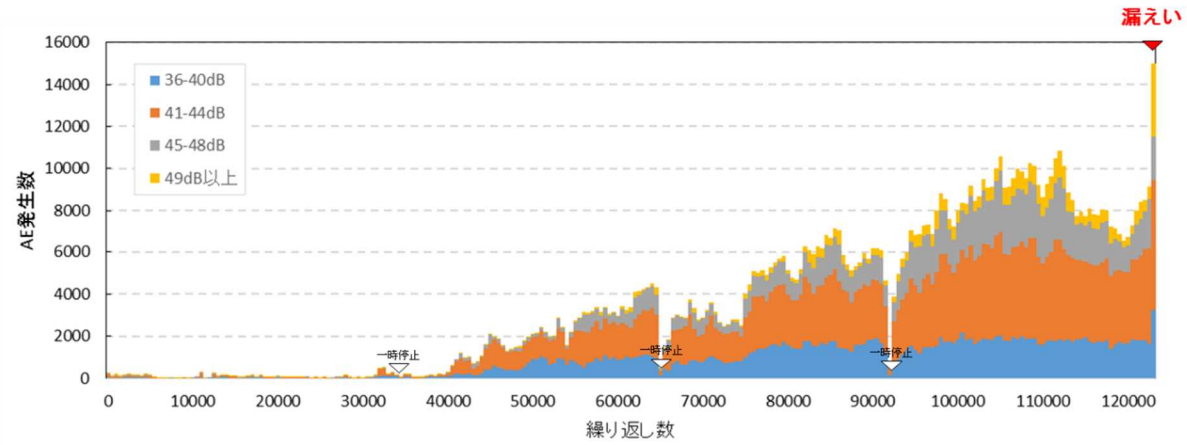


図14　鋼製小型蓄圧器の水圧疲労試験中に得られたAE発生数の変化（容器2）

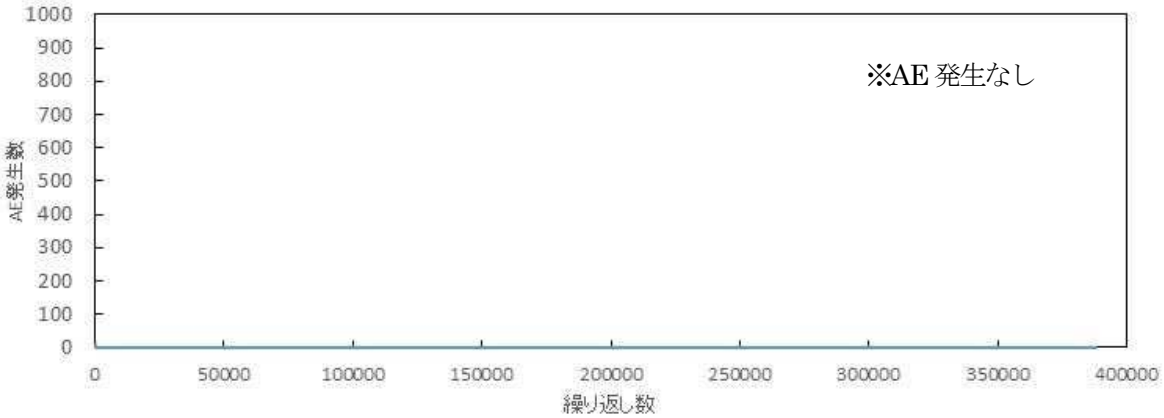


図15　鋼製小型蓄圧器の水圧疲労試験中に得られたAE発生数の変化（容器6）

・鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展・漏洩時のAEによる位置標定

図14でAEを計測した鋼製小型蓄圧器における水圧疲労試験の状況を図16に示す。圧力サイクル試験中に疲労き裂が進展して、き裂貫通部位から加圧水の漏洩が確認された。AE法ではAEセンサを複数設置した場合、それぞれのAEセンサへの信号到達時間差により、AE信号の発生位置を推定する位置標定が可能である。累積AE発生数とそのAE信号の位置標定結果を図17 に示す。容器入り口側のセンサから約200mmの位置に多数のAE信号が検出された。そのAE信号が多数検出された位置から、蓄圧器の漏洩が確認された。したがって、き裂進展とき裂貫通に伴う漏洩時に両端のAEセンサへの信号到達時間差により、き裂発生及び漏洩位置の標定が可能であることが明らかとなった。



図 16　鋼製小型蓄圧器の疲労き裂進展試験の状況

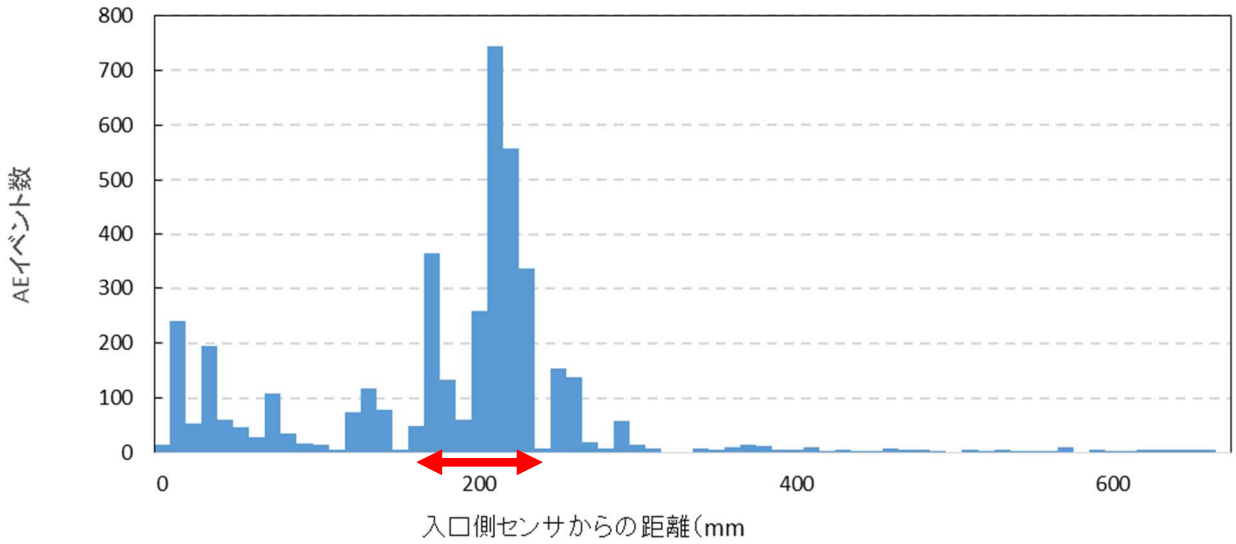


図 17　鋼製小型蓄圧器の複数の AE センサによる位置標定結果

（4）実機タイプ 2 蓄圧器による高圧水素サイクル条件下で AE 法の構築

実機タイプ 2 蓄圧器の概要を表 2 に示す。図 16 の鋼製小型蓄圧器と同様に蓄圧器の両端に AE センサを設置した。設置された AE センサは、光ファイバ AE センサであり、防爆仕様が要求される蓄圧器の設置場所にての AE 信号計測を可能としている。実機蓄圧器への光ファイバ AE センサの装着状況及び管理事務所にての AE 信号計測状況を、図 18 に示す。各種の充填作業を想定して、充填試験を実施した。実機蓄圧器を低圧バンクとして運用した場合（A）,中圧バンクとして運用した場合（B）及び高圧バンクとして運用した場合（C）のそれぞれの運転時の圧力推移、AE 信号の発生状況を図 19 に示す。蓄圧器減圧時にノイズが多数観察される一方で、蓄圧器昇圧時のノイズは少なく高圧になるほどノイズは少ない知見が得られた。

表２　実機タイプ２蓄圧器の概要

（1）蓄圧器の製造者	JFE コンテイナー株式会社
（2）蓄圧器の種類	タイプ２
（3）圧力仕様：：	35~93 MPa
（4）内容積:	200 リットル
（5）蓄圧器の設置場所:	水素供給利用技術協会水素技術センター（甲府市）



図 18　実機蓄圧器の光ファイバ AE センサ装着状況及び AE 信号計測状況

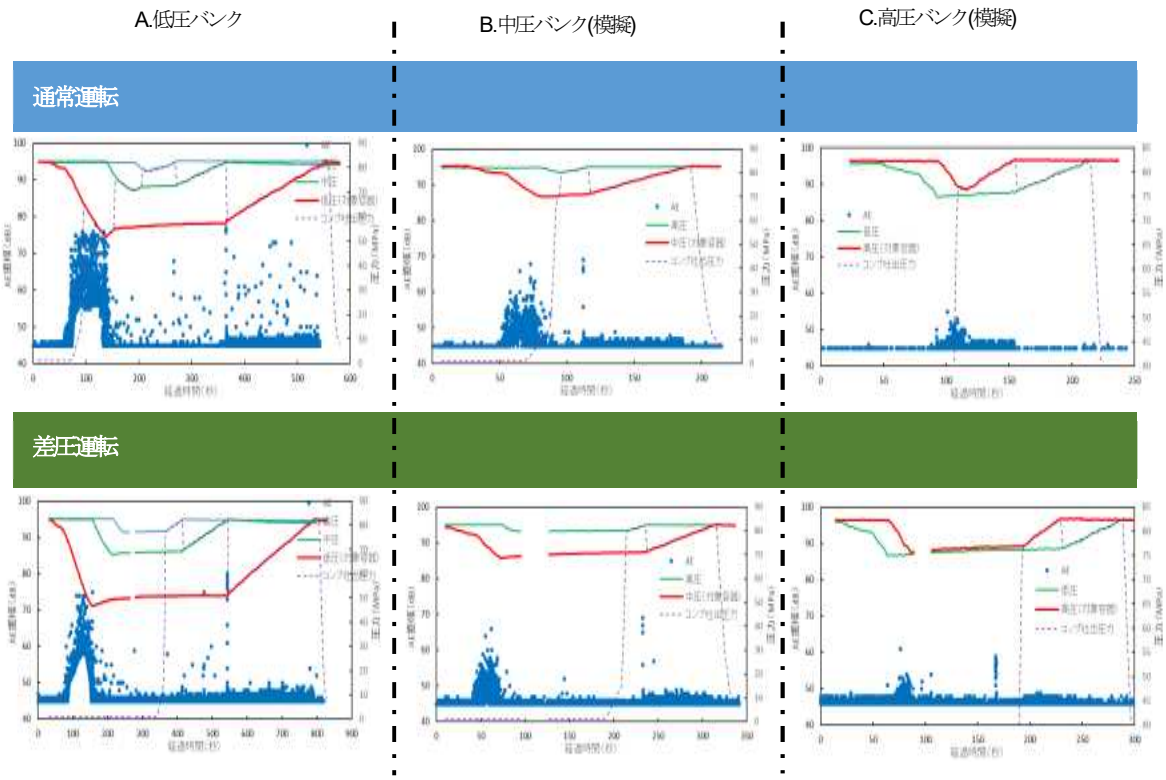


図 19　実機蓄圧器の AE 信号発生状況

低圧バンク・差圧充填時のノイズ発生状況を図 20 に示す。図の点線枠の信号は、蓄圧器の減圧運転時のノイズ発生挙動を示す。

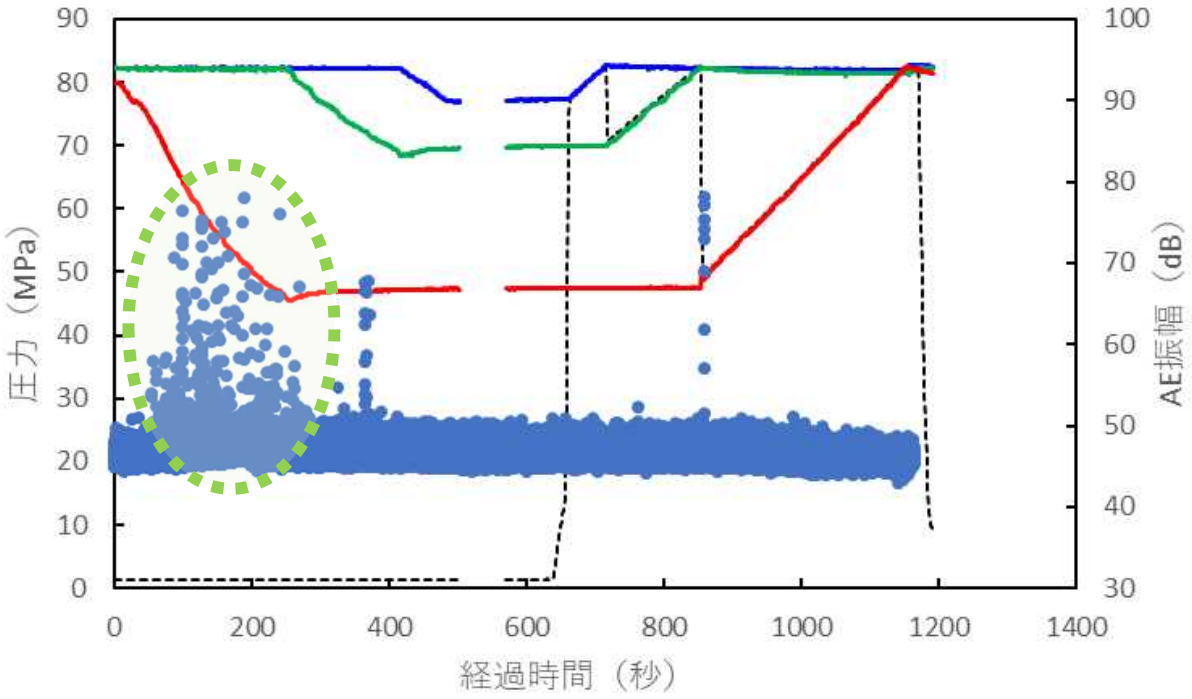


図 20　低圧バンク・差圧充填時のノイズ発生状況

ノイズの波形と損傷に伴う AE 波形を比較した結果を図 21 に示す。図の左側が、蓄圧器の減圧時のみ観測された AE 信号（ノイズ）の波形を示す。右側は、試験片及び鋼製小型蓄圧器にて疲労き裂進展試験において観測された AE 信号（損傷に伴う信号）を示す。

ノイズは、立ち上がりが緩やかな波形で、150kHz の低周波数である。一方、損傷に伴う AE 信号は、突発型の波形であり、150 kHZ 近傍のピークと 200~500 kHz の周波数から構成されている。

ノイズは、低周波数で、蓄圧器の両端近傍の全周から発生し、加圧時には認められず、減圧時のみ観測される事が明らかとなっている。これらのノイズの挙動から、ノイズ発生は蓄圧器の貯蔵部ではなく、プラグ・グランドナットの近傍から発生していると推定している。これらのノイズの除去方法などの対応は現在検討中である。

達成度：△

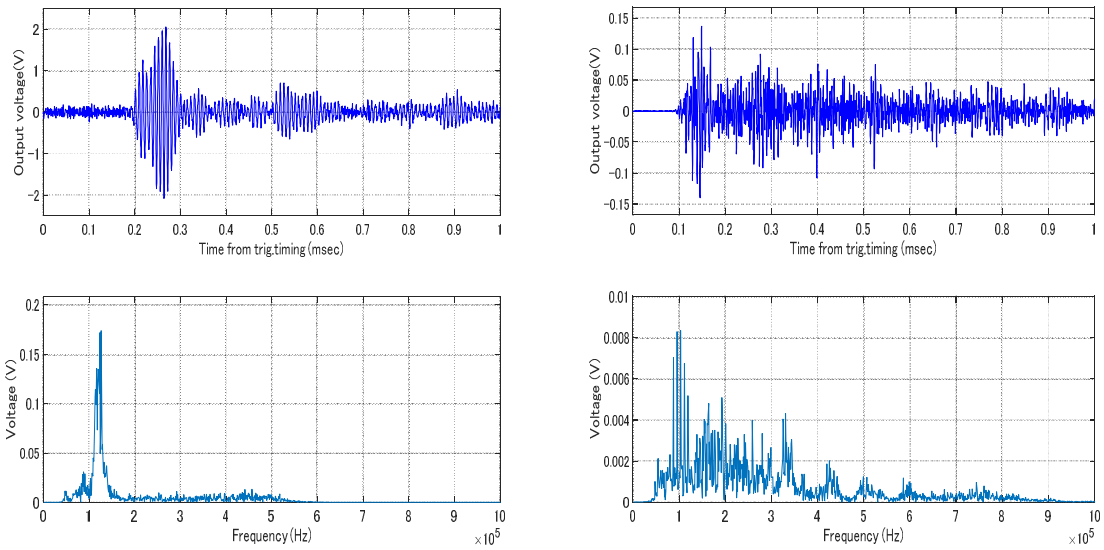


図 21　ノイズ波形と損傷に伴う AE 波形の比較

（5）基準化への取組

AE 法の規格化に資する技術的データ、法的検討資料を蓄積し取り纏め、本研究開発成果の AE 法に関する協議/審査によって民間規格（日本非破壊検査協会規格、NDIS）で規定するための活動を実施した。

・NDIS2436 原案作成準備委員会（2021 年度）

日本非破壊検査協会の規格として NDIS2436「圧縮水素スタンド用炭素繊維強化鋼製圧力容器のアコースティック・エミッション試験方法」原案作成準備委員会を設置し活動を行った。参加委員は次の通り

主査	水谷 義弘	東京工業大学
副主査	宅間 正則	関西大学
副主査	松尾 卓摩	明治大学
	横野 泰和	日本非破壊検査協会（ポニー工業株式会社）
	瀬野 和久	高圧昭和ボンベ株式会社
	村松 征直	東邦ガス株式会社
	高野 俊夫	JFE コンテイナー株式会社
幹事	鈴木 裕晶	千代田化工建設株式会社
オブザーバ	岡野 拓史	JFE スチール株式会社
	石田 智治	JFE スチール株式会社
	北川 敏	JFE コンテイナー株式会社
	前田 守彦	千代田化工建設株式会社

以上のメンバーで 2021 年度に 4 回の委員会を開催し議論を行った。

・NDIS2436 原案作成委員会（2022 年度）

前記(1)の原案準備を経て、「圧縮水素スタンド用鋼製圧力容器のアコースティック・エミッション試験方法」 原案作成委員会を設置し活動を行った。

参加委員は次の通り。

委員長	水谷 義弘	東京工業大学
委 員	横野 泰和	日本非破壊検査協会(ポニー工業㈱)
	辻 裕一	東京電機大学
	結城 宏信	電気通信大学
	宅間 正則	関西大学
	松尾 卓摩	明治大学
	瀬野 和久	高圧昭和ボンベ㈱
	村松 征直	東邦ガス㈱
	中村 英之	㈱IHI 検査計測
	壹岐 修治	ENEOS㈱
	市橋 竜太郎	岩谷産業㈱
	古田 博貴	東京ガス㈱
幹 事	高野 俊夫	ＪＦＥコンテイナー㈱
	鈴木 裕晶	千代田化工建設㈱
オブザーバ	佐藤 裕	高圧ガス保安協会(KHK)
	小林 拡	石油エネルギー技術センター(JPEC)
	井山 望	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
	加納 雅俊	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
	湯浅 実	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
	鈴木 敦之	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)
	岡野 拓史	JFE スチール株式会社
	石田 智治	JFE スチール株式会社
	北川 敏	JFE コンテイナー株式会社
	前田 守彦	千代田化工建設株式会社

以上のメンバーで 2022 年度に 3 回の分科会、3 回の委員会を開催し議論を行った。以降、2023 年 5 月の委員会で原案完成の予定。

達成度：○

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

４．１　成果のまとめ

⑴定期自主検査へのAE法導入シナリオの構築

本研究開発成果の業界全体へ波及を鑑み、業界と連携した定期自主検査への「供用中AE法（以降、AE法）」の導入シナリオの構築を目的とし、実際にデータを取得しながら、得られる知見を基にどの様にAEを適応することが妥当であるかを検証し、技術基準にすべく様々有識者との議論を行うなどの活動を行った。

・複合容器ステアリング委員会への参加

・日本非破壊検査協会での規格委員会設置準備

・学協会での発表及び講演

⑵鋼製試験片の疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出

蓄圧器に使用されている低合金鋼の疲労損傷に伴うAEデータの収集を目的に、複数の応力負荷条件で試験片を用いた疲労試験を実施した。疲労試験の環境は大気および連続陰極水素チャージによる高圧水素模擬環境とした。

疲労破壊した試験片は，破断の前にAEが増加し，疲労損傷にともなうAEが検知された。また，実際の水素ステーション蓄圧器で使用されるような疲労損傷が生じない低い応力水準では破壊に至らず，AEも検知されなかった。したがって，破断に至るような疲労損傷が生じている場合にはAEが検知可能であり，疲労損傷が生じていない場合にはAEが発生しないことを確認した。

⑶鋼製小型蓄圧器による疲労き裂発生進展挙動のAEによる検出

前記試験片と同等の材料を用いて小型蓄圧器を製作し疲労試験を実施した。水を媒体とした水圧サイクル試験において、疲労破壊した小型蓄圧器は漏洩の前にAEが増加し疲労損傷にともなうAEが検知された。また，実際の水素ステーション蓄圧器で使用されるような疲労損傷が生じない低い応力水準では漏洩に至らずAEも検知されなかった。これは試験片の結果と一致した。

同様の小型蓄圧器を用いた高圧水素ガス環境下での圧力サイクル試験を実施し、同様のAEの発生挙動が確認できた。さらに、得られたAE波形は試験片および小型蓄圧器を用いた水圧サイクル試験と同様であった。したがって、高圧水素ガス環境下においても疲労損傷にともなうAEが検知できることを確認した。

⑷実機タイプ２蓄圧器による高圧水素サイクル条件下でAE法の構築

実ステーションにおいて実操業中の昇圧および減圧時に発生するAEを計測した。その結果、環境騒音、振動等の外乱ノイズが発生する一方、外乱ノイズはAE波形の形状、波形の周波数成分の違い、信号の発生位置標定によって除去できることを確認できた。

⑸基準化への取組

AE法の規格化に資する技術的データ、法的検討資料を蓄積し取り纏め、本研究開発成果のAE法に関する協議/審査によって民間規格（日本非破壊検査協会規格、NDIS）で規定するための活動を実施した。

・日本非破壊検査協会においてNDIS2436の原案作成準備委員会の設置（2021年度）

・日本非破壊検査協会においてNDIS2436の原案作成委員会の設置（2022年度）

４．２　本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

既に概要で述べた通り、タイプ１水素蓄圧器の耐圧性能および強度に関する検査は、目視検査および非破壊検査（肉厚測定）を実施することが定められている。現状では 2～3 年に一度は蓄圧器を開放し、目視検査を実施している。定期自主検査は水素ステーションを連続 10 日程度の休業させる必要があり、運営の負担となる課題がある。そのため、 保安検査基準（一般高圧ガス保安規則関係（スタンド及びコールド・エバポレーター関係を除く。）KHKS 8501-1(2011)の附属書 D(規定)供用中探傷試験では、当該附属書の D.3 a） 1） において供用中探傷試験として、超音波探傷試験法（UT 法）が定義され、今回の保安検査基準の改訂により、スタンドへの適用が予定されている。非破壊検査協会から新たに発行された蓄圧器に係る UT 法を用いて、供用中探傷試験を行う事により、定期自主検査の代替となりえる。

一方、タイプ 2 蓄圧器は、表面が CFRP 層で覆われている事から、UT 法の適用が困難。ｱｺｰｽﾃｨｯｸ・ｴﾐｯｼｮﾝ法（AE 法）はタイプ 2 蓄圧器への適用が可能。AE 法が基準化され、供用中検査法として適用される事により、定期自主検査の代替となりえる。結果、保安検査に関わる水素ステーションの運営コストを削減できるため、実用的な保安検査基準となりえる。

４．３　事業化までのシナリオ

本研究開発の事業化は、NDIS 2436 が規格化され、それが保安検査基準に引用されることで達成される。

圧縮水素スタンド用の圧力容器は，KHK/JPEC S 0850-9（2018） によって保安検査基準が定められ，KHK/JPEC S 1850-9（2019） によって定期自主検査指針が定められている。保安検査基準と定期自主検査指針の高圧ガス設備（蓄圧器に限る。）の耐圧性能及び強度の内容の抜粋を次に示す。抜粋の蓄圧器は本体の高圧容器を示す。

蓄圧器の耐圧性能及び強度に係る検査は目視検査及び非破壊検査によるか耐圧試験によるものとし，耐圧性能及び強度に支障を及ぼす減肉，劣化損傷，その他の異常がないことを確認する。肉厚測定以外の非破壊検査（磁粉探傷試験，浸透探傷試験，超音波探傷試験，放射線透過試験，渦流探傷試験等）は，蓄圧器の内部について，原則として，１年に１回行う。ただし，管理された水素を取り扱う蓄圧器のうち，水素に接する部材に水素による劣化損傷が発生する恐れがない材料を用いている以外のもので，蓄圧器の材料，設計，構造等が適切であると認められたものであって，水素の影響を考慮した設計上の寿命が定められており，製作時の検査に合格した日から当該圧力容器に作用した圧力などの使用履歴の記録があるものの開放検査の周期は，完成検査を行った日から水素の影響を考慮した設計上の寿命に到達するまでに相当する期間の 1/2 に到達する日以内，その後の保安検査実施日から水素の影響を考慮した設計上の寿命に到達するまでに相当する期間の 1/2 に到達する日以内とする。ただし，蓄圧器の外部から適切な非破壊検査を毎年実施し異常のないことを確認した場合には，開放検査に代えることができる。また，毎年とする非破壊検査の周期については，水素の影響を考慮した設計上の寿命についての破壊力学的評価及びそれまでの検査の記録等並びに当該蓄圧器が設置されている圧縮水素スタンドの保安についての管理状況等を考慮した健全性の評価を行い，適切であると認められる場合には，延長することができる。

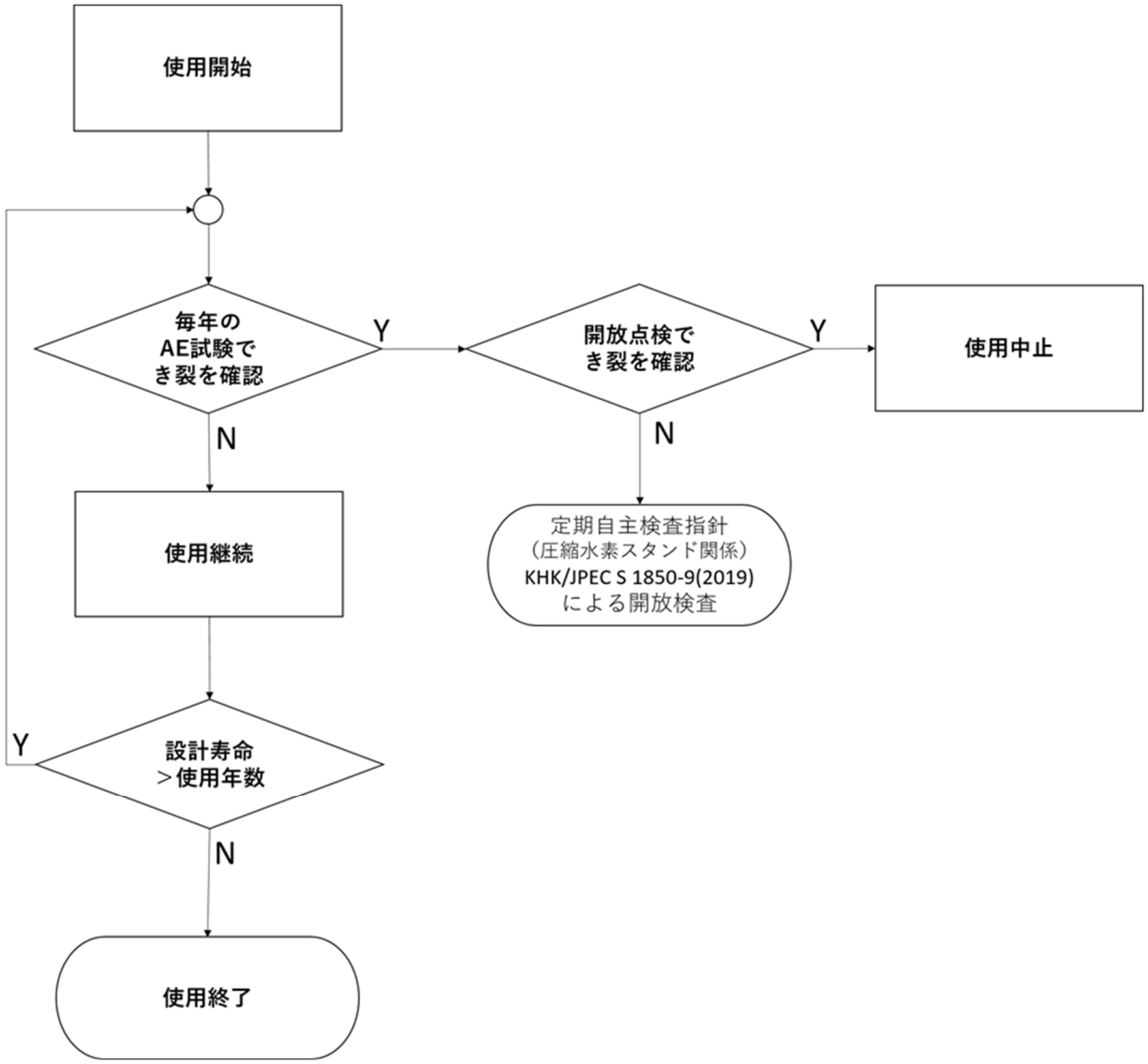


図 22－AE 試験と KHK/JPEC S 0850-9（2018）及び KHK/JPEC S 1850-9（2019） との関係

AE 試験は，上記の抜粋に示されている蓄圧器の外部から異常のないことを確認できて，開放検査の代替となる非破壊検査手法である。AE 試験と KHK/JPEC S 0850-9（2018）及び KHK/JPEC S 1850-9（2019） との関係を図 22 に示す。

図 22 より，圧縮水素スタンドで使用が開始された圧力容器は，開放検査前に AE 試験を実施し，その後は毎年実施する AE 試験によって疲労き裂などの損傷の有無を確認する。損傷が確認されなければ開放検査を省略して翌年まで使用を継続する。毎年の AE 試験を実施し，毎年損傷が確認されなければ設計寿命まで開放検査を省略することができる。しかしながら，AE 試験によって損傷に起因する AE が観察された場合には，開放検査によって異常がないことを確認し，開放検査によって異常が確認された場合は使用を中止する。一方，開放検査によって異常が確認されなかった場合は，それ以降は AE 試験を実施せず，KHK/JPEC S 0850-9（2018）及び KHK/JPEC S 1850-9（2019） による開放検査を行う。

５．研究発表・特許等

ー研究発表・講演、文献等、その他ー

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019/8/9	日本非破壊検査協会　AE部門講演会	AE法による水素ステーション用蓄圧器の供用中検査手法の開発	前田守彦(千代田化工建設)
2	2019/8/9	日本非破壊検査協会　AE部門講演会	水素蓄圧器の保安検査へのAE適用の期待	高野俊夫（JFEコンテナー）
3	2020/3/24	日本高圧力技術協会　高圧水素技術専門研究委員会	水素ステーション用タイプ2蓄圧器の供用中検査手法の研究開発	鈴木裕晶(千代田化工建設)
4	2020/06	日本非破壊検査協会 機関誌「非破壊検査」第69巻6号	AE による水素ステーション用複合蓄圧器の供用中検査	前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設)
5	2020/6/4	日本非破壊検査協会 非破壊検査総合シンポジウム	水素ステーション用タイプ2蓄圧器の供用中検査手法の研究開発	鈴木裕晶(千代田化工建設)
6	2020/11/27	日本非破壊検査協会 保守検査ミニシンポジウム	水素蓄圧器用低合金鋼の疲労損傷中のAE計測	岡野拓史/髙木周作(JFEスチール),高野俊夫(JFEコンテイナー)，前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設)
7	2020/11/27	日本非破壊検査協会 保守検査ミニシンポジウム	タイプ2蓄圧器のAE法による定期自主検査	高野俊夫(JFEコンテイナー)，岡野拓史/髙木周作(JFEスチール),前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設)
8	2021/1/15	AEWG News Letter	Japanese Society for Non-Destructive Inspection is developing the standard for AE testing of Type 2 composite cylinders for hydrogen refueling stations	Y. Mizutani(Tokyo Tech.)
9	2021/6	工業ガス専門誌ガスレビュー　水素・燃料電池マーケティング・ブック「ハイドリズム」vol.11	水素ステーション用蓄圧器の定期自主検査へのAE法の適用を目指す	JFEコンテイナーへの取材記事
10	2021/10	日本非破壊検査協会 機関誌「非破壊検査」第70巻10号	水素ステーション用タイプ２蓄圧器の供用中検査手法の研究開発	前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設),北川敏/高野俊夫(JFEコンテイナー)，岡野拓史(JFEスチール),辻裕一（東京電機大）
11	2021/11/18	日本高圧力技術協会　HPI技術セミナー「エネルギー貯槽技術の最新動向」	水素ステーション用タイプ2蓄圧器の自主保安検査としてのAE試験	水谷義弘(東工大)
12	2022/3/18	日本非破壊検査協会　AE部門講演会	水素ステーション用蓄圧器の保全管理におけるAE活用	前田守彦/甲斐大介/日置輝夫/鈴木裕晶(千代田化工建設)，北川敏/高野俊夫(JFEコンテイナー)，岡野拓史/石田智治(JFEスチール)，辻裕一(東京電機大)
13	2022/5/18	米国AEWG 第63回年次大会	R&D Trends of Non-Destructive Testing of CFRP High-Pressure Hydrogen Tanks in Japan	Y. Mizutani(Tokyo Tech.), T. Matsuo(Meiji Univ.), K. Ito(NIMS), H. Suzuki (Chiyoda corp.) and M. Takuma(Kansai Univ.)
14	2022/9/27	日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス	水素ステーション用タイプ２蓄圧器材料の疲労損傷過程におけるＡＥ発生挙動の評価	東京電機大学辻裕一、齋藤博之 JFEスチール㈱岡野拓史、石田智治 千代田化工建設㈱前田守彦、鈴木裕晶 JFEコンテイナー㈱高野俊夫
15	2022/11/1	日本非破壊検査協会 IAES26	AT standard for steel pressure vessels for a hydrogen refueling station	Yoshihiro Mizutani1), Hiroaki Suzuki2) and Toshio Takano3) 1) Tokyo Institute of Technology, 2-12-1-I1-70, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan. 2) Chiyoda Corp., 4-6-2 M/MGCT, Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa, 220-8765, Japan. 3) JFE Container Co., Ltd., 1-5-15-9F, Saguraku-cho, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan, 101-0064, Japan
16	2023/10	日本非破壊検査協会 機関誌「非破壊検査」第72巻10号	高圧水素蓄圧器の出荷時および運用中の非破壊検査	岡野拓史(JFEスチール)，高野俊夫(JFEコンテイナー)，鈴木裕晶(千代田化工建設)

ー特許等ー

該当なし。

以上

(2-(2)-②)「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」

委託先：(一財)石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、(国)東京大学、(株)日本製鋼所

●成果サマリ（実施期間　：2018年度～2022年度）

- タイプ３容器ライナー材の最適疲労曲線を構築した。また、CFRP材との比較から、容器の疲労寿命はライナー材の疲労強度（最適疲労曲線）で決まることを見出した。
- タイプ３容器に関して、修正マイナー則に基づいた累積損傷関係式（容器寿命延長式）を構築した。また、実証試験により水素ステーションへの導入可能なことを確認した。
- タイプ２容器は技術文書JPEC-TD0008制定に資する文書案を完成させた。完成版を JPECのHPにて公開中である。
- タイプ３容器はKHKS0225改正に資する基準案を完成させた。設計手法に解析による設計を導入すること等により、容器試験の数を11～14個 から 2個に低減した。

●背景/研究内容・目的

水素ステーションに設置される複合圧力容器のコスト削減に向け、複合圧力容器評価方法の簡素化及び使用寿命延長に関する技術開発を実施する。具体的にはタイプ3複合圧力容器の応力解析、疲労解析による容器設計手法を確立し、実容器疲労試験費用、試験時間の削減を図ると共に使用寿命の延長を図る。また、複合圧力容器の技術基準の整備に向け、タイプ２容器に関する技術文書の制定、タイプ３容器の技術基準KHKS 0225の改正に資する提案を行う。

●研究目標

実施項目	目標
①解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発	複合圧力容器の設計手法として、解析による設計（DBA）を導入した設計フロー図を構築し提案
①－１　ライナー試験片評価法の検討	アルミニウム合金の最適疲労曲線の作成
①－２　CFRP試験片評価法の検討	樹脂単体およびCFRPのSN線図の相関図の作成
①－３　円筒試験体評価法の検討	円筒試験体による圧力サイクル試験結果を最適疲労曲線と照合して結果の妥当性を検証
①－４　自緊を考慮した疲労寿命設計線図の作成	自緊を正確に評価する容器の疲労寿命予測手法を開発
①－５　複合圧力容器設計手法の実証	容器の圧力サイクル試験による累積損傷関係式（寿命延長式）を構築
②　技術基準の整備に向けた技術開発	タイプ２容器の技術文書案を完成 KHKS0225改正に資する基準案提案

●実施体制及び分担等

- NEDO
  - (一財)石油エネルギー技術センター
  - 高圧ガス保安協会
  - (国)東京大学
  - (株)日本製鋼所

●これまでの実施内容／研究成果

①：複合圧力容器の設計手法として、解析による設計（DBA）を導入した設計フロー図を構築した。

①－１：アルミニウム合金試験片による疲労試験結果から、最適疲労曲線を構築した。その結果として公式 $\sigma_a = 2.58\sigma_u N_f^{-0.12}$ に適合することを確認した。σ_a：応力振幅、σ_u：引張強さN_f：破断までの繰返し数

①－２：樹脂試験片、CFRP試験片による疲労試験の結果をアルミニウム合金試験片（ライナー材）と比較することにより、容器の疲労寿命はライナー材の疲労強度（最適疲労曲線）で決まることを見出した。

①－３：円筒試験体の圧力サイクル試験結果から、タイプ２容器の疲労寿命設計線図の妥当性を確認した。また、小型容器の圧力サイクル試験結果から、タイプ３容器の疲労寿命設計線図の妥当性および、累積損傷関係式の妥当性を確認した。

①－４：アルミニウム合金ライナーの弾塑性変形とCFRP層との接触を考慮した有限要素解析モデルを構築し、自緊を正確に評価する容器の疲労寿命予測手法を開発した。

①－５：タイプ３容器のサイクル試験データから、修正マイナー則に基づいた累積損傷関係式（容器寿命延長式）を構築した。また、実証試験により水素ステーションへの導入可能なことを確認した。

②：タイプ２容器は技術文書案JPEC-TD0008を完成し、タイプ３容器はKHKS 0225改正に資する基準案を完成した。

●今後の課題

タイプ２容器は、技術文書JPEC-TDのKHKS 0220の附属書化を目指し、タイプ３容器は、累積損傷関係式の水素ステーションへの導入を燃料電池実用化推進協議会殿と連携しながら進める計画である。

●実用化・事業化の見通し

- タイプ２は技術文書案JPEC-TD0008を制定しJPECのHPにて公開してる。
- タイプ３は2023年3月にKHKS 0225改正に資する提案を行った。2023年度中に改正されたKHKS 0225が制定される予定である。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	解析による設計（DBA）を導入した設計フロー図を構築	○
①－１	アルミニウム合金の最適疲労曲線を構築	○
①－２	樹脂単体およびCFRPのSN線図の相関図を作成	○
①－３	円筒試験体の試験結果から疲労寿命設計線図の妥当性を確認	○
①－４	自緊を正確に評価する容器の疲労寿命予測手法を開発	○
①－５	容器の圧力サイクル試験により、マイナー則に基づく累積損傷関係式を構築	○
②	タイプ２容器の技術文書案JPEC-TD完成 KHKS0225改正に資する基準案を提案	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
5	0	26	0

事業番号：2-(2)-②
研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」

実施者：一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）
高圧ガス保安協会（KHK）
国立大学法人東京大学（東京大学）
株式会社日本製鋼所（JSW）

１．研究開発概要

本事業は、水素ステーションに設置される複合圧力容器のコスト削減に向け、複合圧力容器評価方法の簡素化及び使用寿命延長に関する技術開発を実施するものである。

具体的には、現状では実容器を用いた圧力サイクル試験により寿命を評価している、タイプ 2 およびタイプ 3 複合圧力容器（以下、「容器」と示す）を構成する材料の材料試験片による疲労寿命評価方法、複合圧力容器の応力解析、疲労解析方法を確立し、疲労寿命設計線図を用いた疲労設計、累積損傷則の適用を可能とし、実容器疲労試験費用、試験時間の削減を図ると共に使用寿命の延長を図る。

また、複合圧力容器の技術基準の整備に向け、タイプ 2 容器の技術基準に資する自主基準案を策定するとともに、タイプ 3 容器の技術基準である KHKS 0225 の改正に向けた内容検討を実施する。

事業推進に当っては、圧力サイクル試験に替わる容器の寿命評価手法にあたる①の技術開発に関して以下の 5 テーマにわけ、計 6 テーマに取り組む。

①応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発

①－１　ライナー試験片評価法の検討（KHK）

①－２　CFRP 試験片評価法の検討（KHK、東京大学）

①－３　円筒試験体評価法の検討（JSW、東京大学）

①－４　自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成（東京大学）

①－５　応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の実証（JPEC）

②複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発（JPEC）

２．研究開発目標

研究開発目標を以下のとおりとする。

表 1 研究開発目標（大テーマ）

実施項目	最終目標
（1）応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発	〔目標〕複合圧力容器の設計手法として、解析による設計（Design By Analysis : DBA）を導入した設計フロー図を構築し提案する。

〔意義〕現行の複合圧力容器の技術基準（KHKS 0225）は試験による設計（Design By Test：DBT）が主体となっているため、認可取得に多くの費用がかかる。そこで、解析による設計を主体とした設計手法を確立し、認可取得のコスト低減を図る。	
（2）複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発	〔目標〕複合圧力容器（タイプ 2 およびタイプ 3）の技術基準の整備に資する提案を行う。
〔意義〕本テーマ受託時において、タイプ 2 複合圧力容器の技術基準は存在しないため、普及の障壁となっていた。また、タイプ 3 複合圧力容器の技術基準は、DBT が主体であり、認可取得に多くの費用がかかる。そこで、複合圧力容器を普及すべく技術基準の整備を図る。	

大テーマを構成する各テーマの開発目標は以下のとおりとする。

①応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発

①－1　ライナー試験片評価法の検討（KHK）

〔目標〕アルミニウム合金の最適疲労曲線を作成し、平均応力補正方法を提案する。

樹脂含浸連続炭素繊維の疲労強度は Al 合金ライナーの疲労強度よりも高いことから、タイプ 3 容器の疲労強度を支配するのは、Al 合金ライナーの疲労強度である。タイプ 3 容器の圧力サイクル寿命を予測するため、Al 合金製疲労試験片を用いた疲労試験を実施し、最適疲労曲線を構築する。また、従来の平均応力の補正方法では主に引張平均応力を対象とするが、Al 合金ライナーでは自緊処理による圧縮平均応力の場合と充填の圧力変動による引張平均応力の場合の両方があるため、平均応力が正負の場合に適用できる平均応力の補正方法の検討が必要である。

①－2　CFRP 試験片評価法の検討（KHK、東京大学）

〔目標〕CFRP 軸荷重試験片を用いて行う疲労試験を完了し、CFRP と樹脂材の疲労強度における相関を整理する。

タイプ 2 容器およびタイプ 3 容器に利用される炭素繊維強化プラスチック（carbon fiber reinforced plastic：CFRP)に関しては、金属材料と異なり疲労設計の方法論が確立していない。そこで、まず一方向強化 CFRP 試験片を用いた疲労試験に関して、一般性の高い評価法で疲労寿命予測を可能とする必要がある。CFRP 試験片の疲労強度は樹脂が支配し、樹脂の応力評価により CFRP 試験片の疲労寿命を予測できるとの仮定の下、フィラメントワィンディングされた CFRP 製容器における主要な荷重であるフープ方向荷重を受けるフープ巻き CFRP 層を想定して炭素繊維の配向方向が荷重に対して 0°となる CFRP 試験片の疲労試験と、樹脂単体の疲労試験を行い、その結果から繊維方向の公称ひずみ振幅で評価すれば CFRP 試験片の疲労寿命は樹脂単体の疲労寿命から予測できることを示す。

①－3　円筒試験体評価法の検討（JSW、東京大学）

〔目標〕タイプ 2 およびタイプ 3 複合圧力容器対応円筒試験体（または小型容器）による圧力サイクル試験を実施し、試験結果を試験片の最適疲労曲線と照合して結果の妥

当性を確認する。

疲労寿命設計線図を検証するためには、部分充填により使用される実容器の想定寿命 100 万回規模の圧力サイクル試験が必要となる。実容器を用いた試験では現実的な時間内に試験が終了しない。そのため、実容器の応力状態を反映させた円筒試験体（または小型容器）を作製し、長時間の圧力サイクル試験を実施し、疲労寿命設計線図の信頼性を確認する。

①－４　自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成（東京大学）

〔目標〕軸対称有限要素モデルを用いた解析によるタイプ 3 複合圧力容器の疲労寿命予測法を確立するため、自緊処理により発生する残留応力を正確に評価する手法を開発する。

試験片を用いた疲労試験より得られた疲労寿命設計線図の検証を実容器および円筒試験体（または小型容器）を用いた圧力サイクル試験を通じて行うためにはライナーの正確な応力評価が必要となる。有限要素シミュレーションによる応力評価の信頼性を確認し、DBA 基準を実効性のあるものとするためにも、自緊効果を考慮した応力評価を可能とする必要がある。

①－５　応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の実証（JPEC）

〔目標〕複合圧力容器の応力解析及び疲労解析に基づく設計手法の実現に資する実容器疲労試験データ等を蓄積し、疲労寿命設計線図を用いた設計手法を実証する。

疲労寿命設計線図を用いた設計手法を実証するためには、さまざまな複合圧力容器の仕様において、圧力サイクル試験を実施し累積損傷則が成立するかの確認を行う必要がある。

②複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発

〔タイプ 2 目標〕タイプ 2 複合圧力容器技術基準の整備に必要なデータを蓄積し、自主基準案の策定を図る。

本テーマ受託時において、タイプ 2 複合圧力容器の技術基準は存在しないため、普及の障壁となっていた。

〔タイプ 3 目標〕応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法を確立し、KHKS 0225 の改正に向けた提案を行う。

タイプ 3 複合圧力容器の技術基準は、DBT が主体であり、認可取得に多くの費用がかかる。そこで、DBA を主体とした設計手法を確立し、認可取得のコスト低減を図る。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）　各テーマごとの成果、達成度

①応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の確立に向けた技術開発

①－１　ライナー試験片評価法の検討（KHK）

手法：

Al 合金疲労試験片（図 1）を用いた疲労試験データ（荷重制御、単軸応力下、室温大気中、応力比 R=－1）を取得し、最適疲労曲線を定式化する。また、平均応力を変えた疲労試験のデータを対象に、平均応力の補正方法を提案し、構築した最適疲労曲線と多軸応力下のサイクル試験データを比較検討することで、自緊処理の影響を検証する。

母材…JIS H 4080 継目無管
砂時計部分の表面…＃2000 仕上げ
周方向採取…L=17.6mm
軸方向採取…L=27.6mm

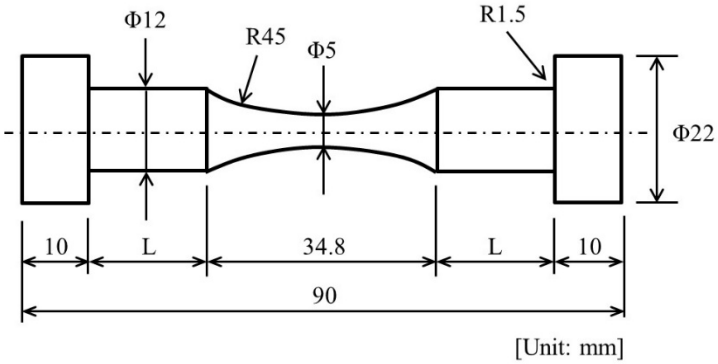


図 1　試験片の形状

結果：

応力比 R=－1 として、Al 合金を対象に疲労試験を実施した（図 2)。データの疲労寿命の範囲は、タイプ 3 容器の想定設計寿命 10^5 回を含む $10^4 < N_f < 10^8$ 回であり、明瞭な疲労限度を示さない傾向を確認した。また、疲労強度は引張強さ依存性を示し、引張強さ σ_u が高いほど疲労強度は高い。

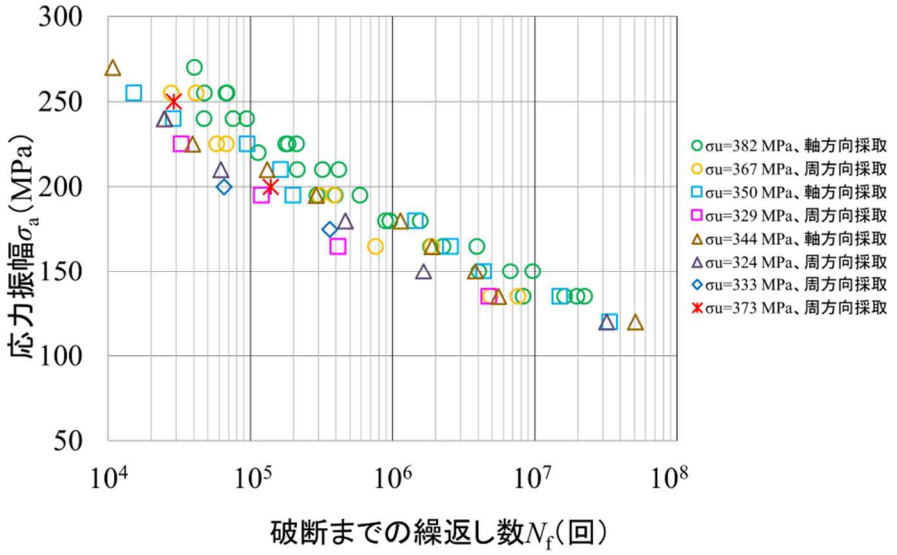


図 2　疲労試験結果（R=－1）

そこで、「アルミニウム合金 A6061-T6 の最適疲労曲線の構築と平均応力の補正方法」の文献において公開されている式(1)の最適疲労曲線を使用し、式(1)と荷重制御疲労試験データを比較検討した。縦軸を引張強さでノルマライズした S-N 線図より、荷重制御疲労試験データの引張強さに関わらず、式(1)と荷重制御疲労試験データの相関を確認できた。（図 3）。

$$\sigma_a = 2.58\sigma_u N_f^{-0.12} \qquad (1)$$

ここで，σ_a は応力振幅[MPa]、σ_u は引張強さ[MPa]、N_f は破断までの繰返し数[回]である。

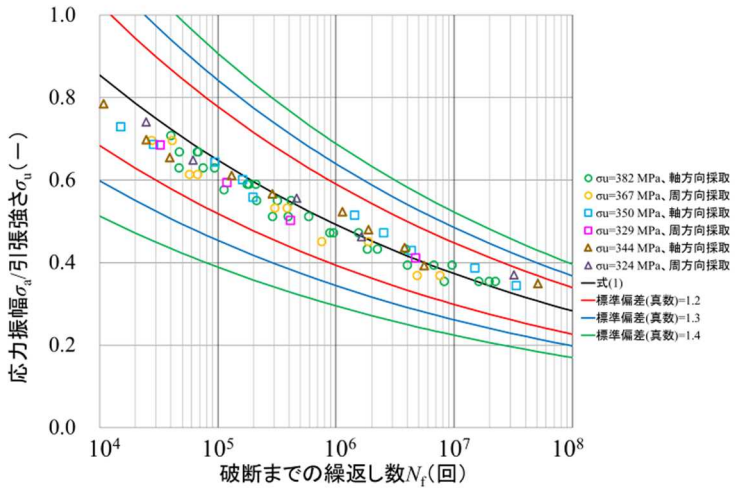


図 3　S-N 線図と標準偏差（真数）の表示

平均応力の補正方法について調査したところ、KHKS 0220（2020）には、SWT 式が採用されている。SWT 式を式(2)に示す。SWT 式は、平均応力の符号に関わらず補正が可能であり、最大応力（S_{alt}+S_{mean}）が正の値となる場合が適用範囲である。

$$S_{eq} = \{S_{alt}(S_{alt} + S_{mean})\}^{0.5} \qquad (2)$$

ここで，S_{eq} は平均応力の補正をした等価応力振幅[MPa]、S_{alt} は繰返し応力強さの振幅[MPa]、S_{mean} は繰返し応力強さの平均[MPa]である(出典：KHKS 0220(2020))。

金属ライナー製容器に適用するライナーを想定して、「アルミニウム合金 A6061-T6 の最適疲労曲線の構築と平均応力の補正方法」の文献では、Walker 式の等価応力範囲を SWT 式に適用した平均応力の補正方法が検討されている。掲載されている平均応力の補正方法を式(3)に示す。

$$\sigma_{aeq} = \sigma_{max}^{0.2}\sigma_a^{0.8} \qquad (3)$$

ここで，σ_{aeq} は等価応力振幅[MPa]、σ_{max} は最大応力[MPa]、σ_a は応力振幅[MPa]である。

材料定数 γ=0.5 である式(1)の SWT 式と比較して、この文献では材料定数 γ=0.8 を設定して検討を行っている。これは、ライナーの平均応力の補正では、最大応力 σ_{max} よりも応力振幅 σ_a の影響の方が相対的に大きいことを示している。

平均応力を変えた疲労試験を実施し、式(3)の平均応力の補正方法を用いて検討を行ったところ、最適疲労曲線の標準偏差 2σ の範囲に収まっていることが確認できた。(図 4 および図 5)

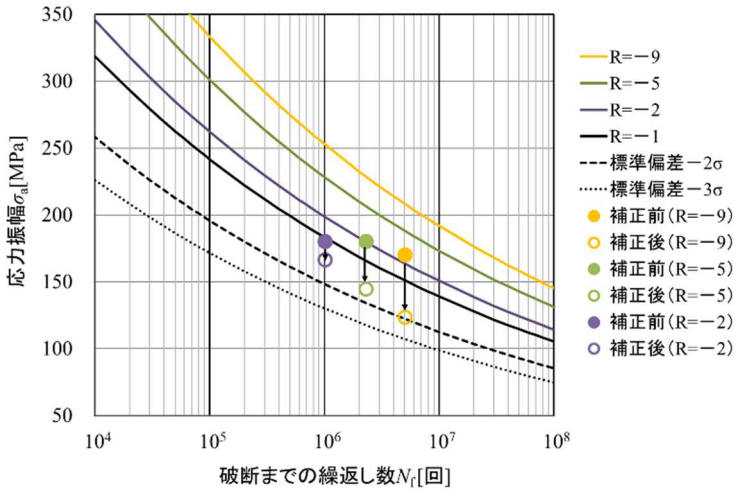


図 4　平均応力を変えた疲労試験の結果（応力比 R=−2、−5 および−9、ロット No.20043、ピーク時効品、引張強さ σ_u=373MPa、降伏応力 σ_y=354MPa)

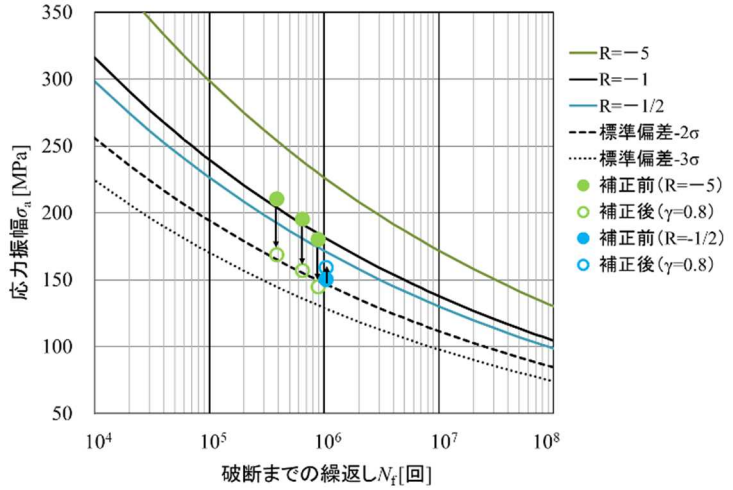


図 5　平均応力を変えた疲労試験の結果（応力比 R=－1/2、－5、
ロット No.10250、ピーク時効品、引張強さ σ_u=370MPa、降伏応力 σ_y=351MPa）

達成度：○

Al 合金疲労試験片を対象に疲労試験を行い、最適疲労曲線を構築した。加えて、平均応力の補正方法については、Walker 式（γ=0.8）が精度よく補正できる可能性を見出した。ライナー試験片では明瞭なストライエーションは確認できなかったが、応力解析時に自緊処理の影響をストライエーション間隔で評価できるよう、実容器の破面観察結果を検証した。

①－２　CFRP 試験片評価法の検討（KHK、東京大学）

手法：

荷重方向と炭素繊維配向方向のなす角度を 0°, 45°, 90°とした CFRP 試験片（図 6）および樹脂単体試験片（図 7）を用いて疲労試験を実施した。樹脂の疲労強度が CFRP の疲労強度を支配すると仮定して樹脂単体の疲労試験結果から、CFRP の疲労寿命設計線図を得るための最大公称応力に替わる力学量を検討した。そのために、各試験片に関して、樹脂と炭素繊維を区分するミクロススケール有限要素シミュレーション（図 8）を実施して、その評価結果から適切な力学量を策定した。その力学量の一候補を図 9 に示す、2 本の炭素繊維の中心軸を結ぶ最短線分の垂直二等分面に関する垂直応力として定義される Interfacial Normal Stress　(INS)とした。

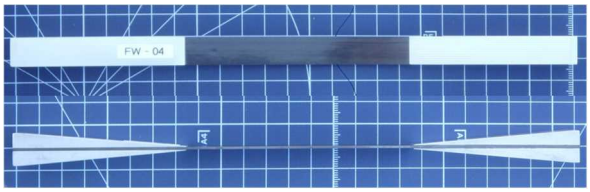


図 6　CFRP 試験片

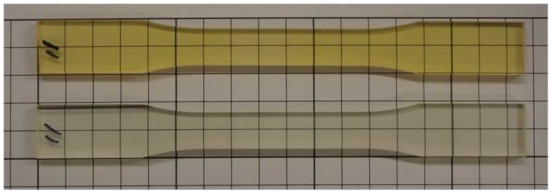


図 7　樹脂単体試験片

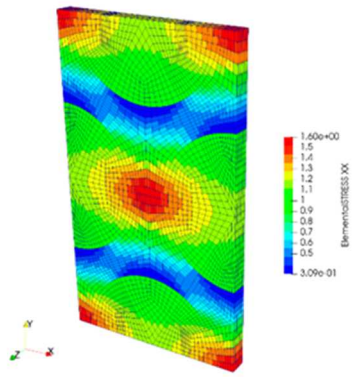


図 8　ミクロスケール有限要素モデル

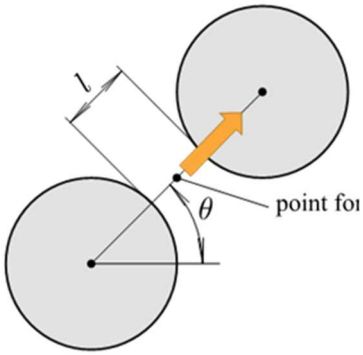


図 9　Interfacial Normal Stress

成果：

炭素繊維方向 0° の試験片に関しては最大公称ひずみで整理することで樹脂単体と同一の疲労寿命設計線図が得られることを確認した（図 10）。最大公称ひずみで整理すれば、樹脂および CFRP 試験片（0° ）の疲労強度は、アルミ合金や低合金鋼のそれよりも十分長寿命側にあり、容器胴部の主要破損モードである周方向応力による軸方向き裂の貫通に関しては、CFRP 層ではなく金属ライナーの疲労破壊が支配的であることがわかった。炭素繊維方向 45°，90° の試験片に関しては、INS によることで樹脂単体と同一の疲労寿命設計線図が得られるかを検討している。

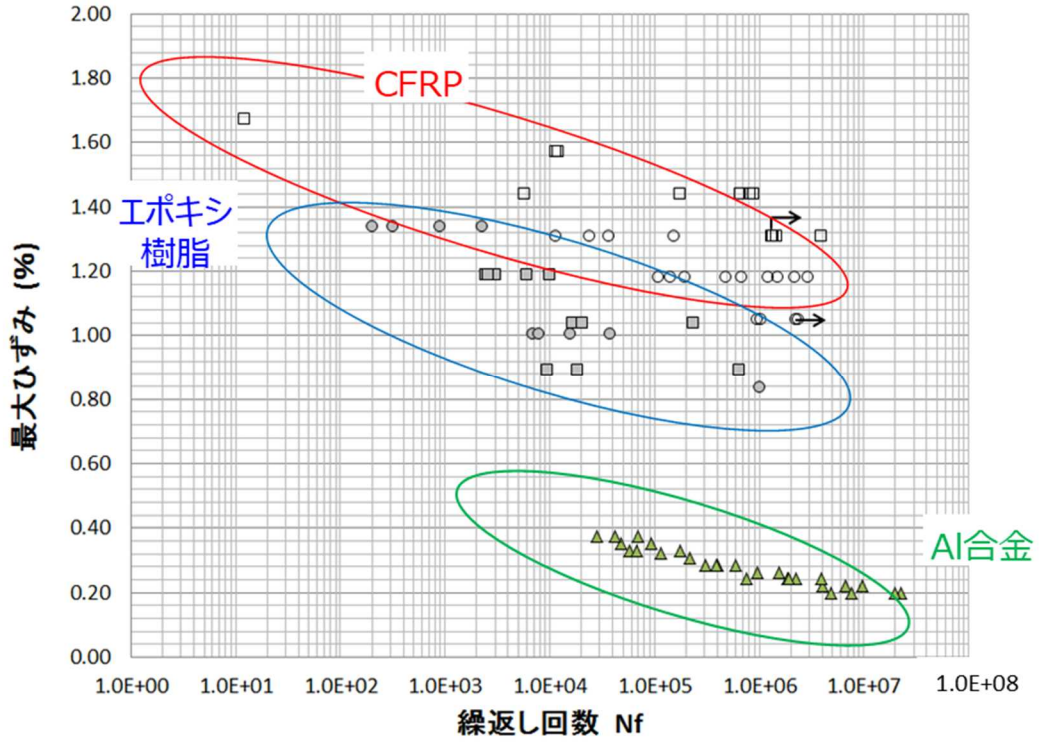


図 10　最大公称ひずみで整理した *S-N* 線図

（CFRP・樹脂：R=0.1、荷重制御、Al 合金ライナー：R=-1、荷重制御）

達成度：○

INS による評価方法を検討し、試験片に関する疲労寿命評価手法が確立できれば、CFRP フープ層およびヘリカル層でのミクロスケール力学場を評価することで、容器 CFRP 層の疲労寿命評価に展開可能である。

①－３　円筒試験体評価法の検討（JSW、東京大学）

手法：

タイプ 2 容器に関して DBA の妥当性を検討するため、フープラップ対応円筒試験体を 2 種類設計し（図 11 および図 12）破壊に対する評価を行った。計算と解析から周方向応力を検討し、設計係数 2.4 の試験体は金属層厚さ 8.2mm、CFRP 層厚さ 2mm、設計係数 3.5 の試験体は金属層厚さ 13.2mm、CFRP 層厚さ 3mm とした。製作した円筒試験体を用いて、圧力サイクル試験を実施した。

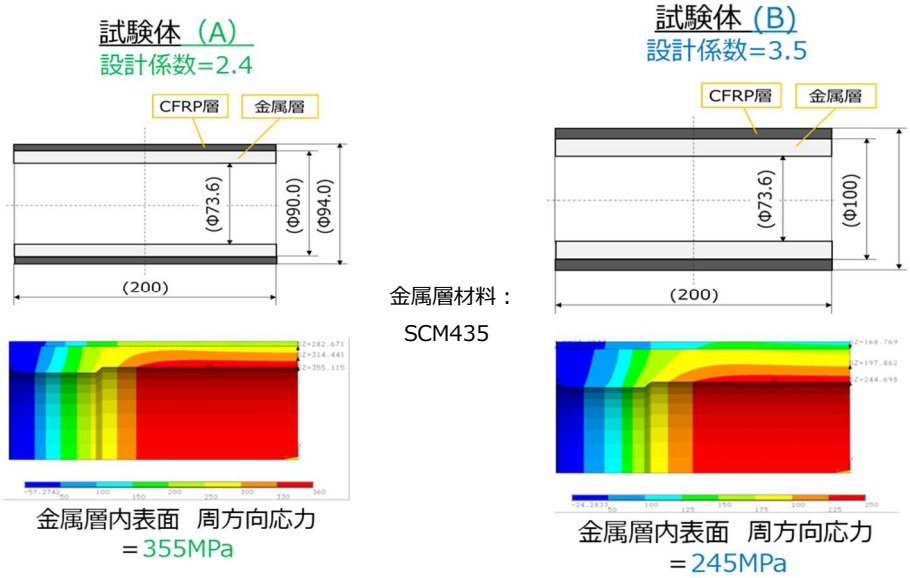
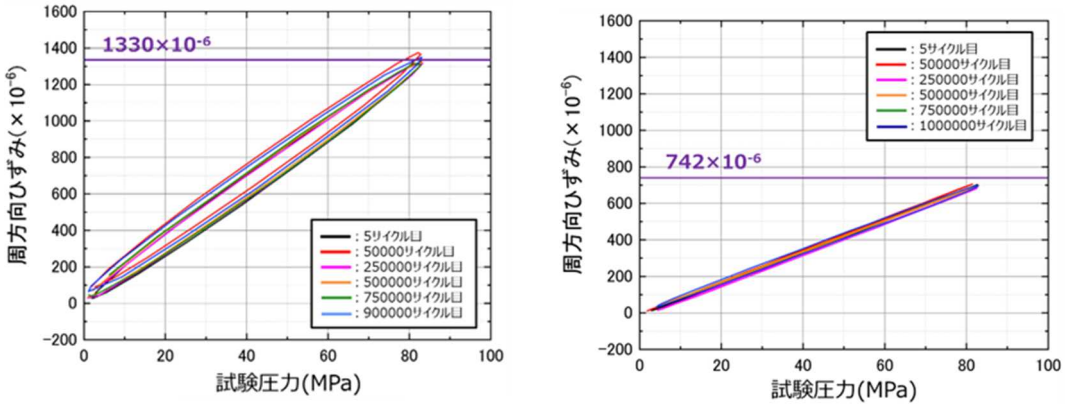


図 11　試験体形状と周方向応力分布
(設計係数 2.4)

図 12　試験体形状と周方向応力分布
(設計係数 3.5)

S=2.4 の試験体と、S=3.5 の試験体にひずみゲージを CFRP 層外面に貼付け、サイクル速度を約 6～7 回/分、圧力範囲を 82⇔2 or 4MPa として約 100 万回まで試験を実施し、試験時のひずみ量測定と漏水の有無確認を行った。

S=2.4 試験体と S=3.5 試験体の圧力サイクル試験における、試験体上面位置でのひずみ測定結果を図 13 に示す。何れの試験体でも、漏水・破裂は認められず、各試験体のひずみ量には再現性が認められた。S=2.4 試験体の 82MPa 昇圧時の周方向ひずみ量は約 1350×10^{-6} であり、この数値はタイプ 2 技術文書案の式から算出される周方向ひずみ量（1330×10^{-6}）と概ね一致した。また、S=3.5 試験体の 82MPa 昇圧時の周方向ひずみ量は約 700×10^{-6} であり、タイプ 2 技術文書案の式から算出される周方向ひずみ量（742×10^{-6}）と概ね一致し、何れの試験体においても実測値と計算値で一致する結果を得た。図 14 に試験体の等価応力振幅とサイクル数の関係を示す。



（a） S=2.4　　(b) S=3.5

図 13　試験体の圧力サイクル試験時におけるひずみ-圧力線図

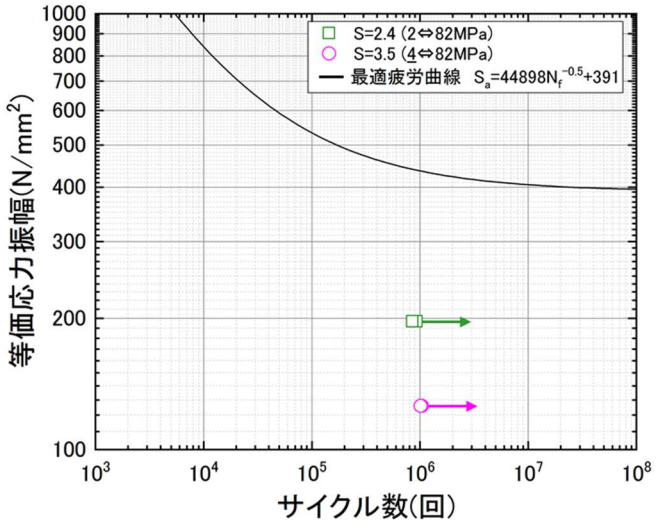


図 14　試験体の等価応力振幅とサイクル数の関係（図中の矢印は未破断）

容器にフープ巻きされた CFRP 材料の疲労寿命予測手法を確立するため試験片を用いて行った CFRP 材料の *S-N* 曲線がフープ巻きされた CFRP に対しても有効か検証するため、プラスチック円筒フープラップ容器対応試験体による圧力サイクル試験を実施した。ライナーの素材を検討し、融点が高いこと、破断ひずみが高いことよりライナーの素材をポリフッ化ビニリデンとした。試験機の芯金のサイズより樹脂ライナーのサイズを決定した。対象とした樹脂ライナーを図 15 に示す。

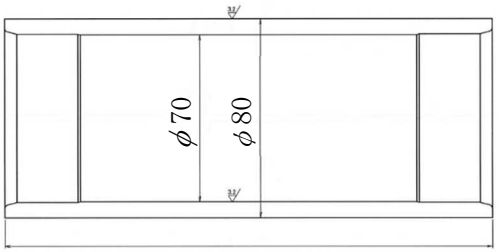


図 15　樹脂ライナー寸法

0° 方向強化 CFRP 試験片の疲労試験結果より 100 万回程度の内圧圧力サイクルで破壊す

る炭素繊維の公称ひずみ範囲を検討し、有限要素解析により圧力範囲を 0～50MPa とした。試験体 2 体について、229,000 サイクルと 253,000 サイクルでライナーとフープ層が破壊して寿命を迎えた。平均応力の影響を検討するため圧力範囲を 5MPa～55MPa と設定し試験体 2 体の圧力サイクル試験を実施した。67,000 サイクルと 17,000 サイクルで試験体 2 体ともライナーとフープ層が破壊して寿命を迎えた。

応力比＝0 を基準とした Walker 式(4)により 0° 方向 CFRP 強化試験片の疲労試験結果とフープラップ試験体の圧力サイクル試験結果の平均応力補正を行った。

$$\Delta Seq=S\ 0.2\ max\Delta S\ 0.8 \qquad (4)$$

ここで、等価応力強さ範囲を ΔSeq、最大の主応力差を Smax、応力強さ範囲を ΔS で表した。圧力サイクル試験結果整理を図 16 に示す。試験体の圧力サイクル試験結果は試験片の疲労試験結果より若干長寿命となった。

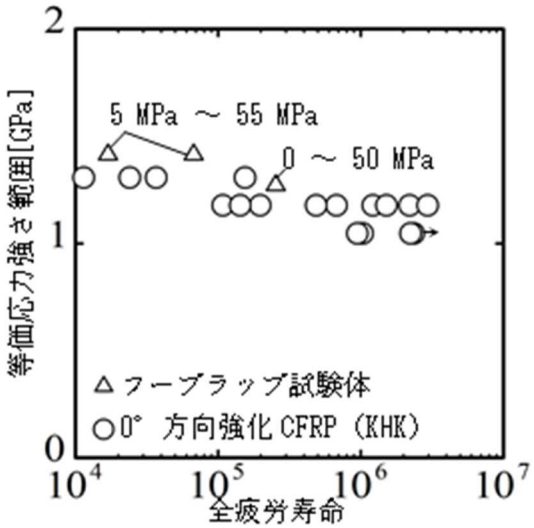


図 16　圧力サイクル試験結果整理

アルミニウム合金試験片を用いた疲労試験より得られたタイプ 3 アルミニウム合金ライナーの疲労寿命設計線図を検証するため、タイプ 3 容器対応円筒試験体による圧力サイクル試験を実施した。試験機の芯金のサイズより円筒試験体ライナーの全長と両端の直径を定めた。ライナー形状を図 17 に示す。100 万サイクル程度で胴部から漏洩することを想定し試験体のライナー胴部内面の応力状態が 76L サブスケール容器のライナー胴部内面の応力状態に近い設計を検討し、試験体胴部の CFRP 層の厚さをフープ 0.9mm/ヘリカル 7mm と決定した。自緊圧と圧力範囲を変えて圧力サイクル試験を実施した。結果を表 2 にまとめる。

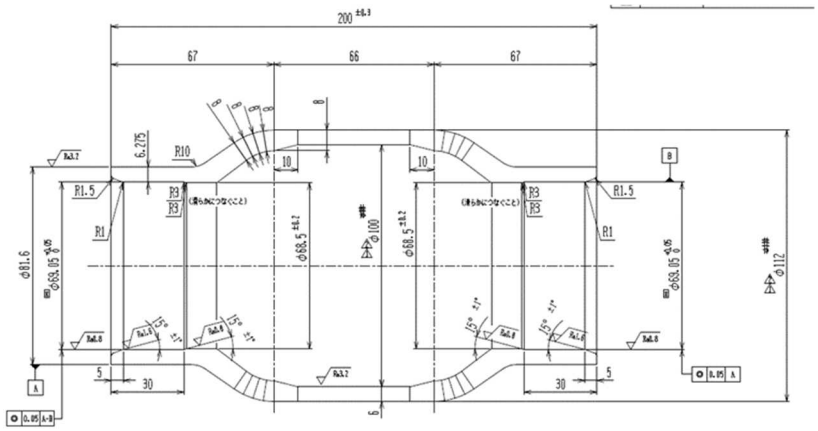


図 17　フルラップ対応円筒試験体ライナー

表 2　圧力サイクル試験結果整理

フープ層の厚さ/ヘリカル層の厚さ[mm]	オートフレッテージ圧[MPa]	圧力範囲[MPa]	損傷部	応力強さ振幅[MPa]	最大の主応力差[MPa]	平均応力[MPa] KHK規準／ASME規準: β= 0.2	等価応力強さ振幅[MPa] KHK規準／ASME規準: β= 0.2	全疲労寿命	き裂発生寿命	き裂進展寿命
0.9/ 7.0		0 ～ 30	胴部	81	162	81/ 25	93/ 96	128,000	113,000	15,000
		0 ～ 30	胴部	81	162	81/ 25	93/ 96	123,000	104,000	19,000
0.9/ 7.0	70	0 ～ 30	ボス部					229,000		
		0 ～ 30						210,000		
		0 ～ 30						230,000		
		0 ～ 30						206,000		
0.9/ 7.0	75	0 ～ 30	ボス部	32	2	-30/ 6	18/ 33.1	274,000	243,000	31,000
		0 ～ 30	ボス部	32	2	-30/ 6	18/ 33.1	268,000	239,000	29,000
0.9/ 7.0	85	0 ～ 30	ボス部	32	3	-29/ 5	20/ 32.9	515,000	488,000	27,000
		0 ～ 30	ボス部	32	3	-29/ 5	20/ 32.9	485,000	460,000	25,000
0.9/ 7.0	95	0 ～ 30	ボス部	32	7	-26/ 3	24/ 32.5	911,000	872,000	39,000
		0 ～ 30	ボス部	32	7	-26/ 3	24/ 32.5	952,000	923,000	29,000

ボス部の内面のみ疵を検出

76L サブスケール容器圧力サイクル試験による累積損傷則適用可能性の検討で実施できなかった部分充塡長寿命圧力サイクル試験データを取得するため、内容積 7.5L のタイプ 3 容器を用いて圧力サイクル試験を行った。試験結果を表 3 に示す。圧力範囲 32MPa～36MPa の試験体は 100 万サイクルに到達し試験を打ち切った。

表 3　圧力サイクル試験結果

オートフレッテージ圧[MPa]	圧力範囲[MPa]	損傷部	総疲労寿命
61	0 ～ 36	胴部	9, 700
	0 ～ 36	胴部	10, 600
61	30 ～ 36	胴部	273, 100
	30 ～ 36	胴部	273, 200
61	32 ～ 36		
	32 ～ 36		

成果：

タイプ 2 小型円筒試験体で圧力サイクル試験を実施した結果、S=3.5 の試験体では約 100 万回、S=2.4 の試験体では約 85 万回の圧力サイクル試験で、漏水・破裂は認められず、試験体で実測されたひずみ量は、タイプ 2 技術文書案の式による計算値と概ね一致した。

試験片を用いて行った CFRP 材料の *S-N* 曲線はフープ巻きされた CFRP に対しても有効であることがわかった。7.5L タイプ 3 容器の圧力サイクル試験結果より 100 万回を超える圧力サイクル寿命に対しても提案している累積損傷則が適用可能であることを示した。

達成度：○

タイプ 2 小型円筒試験体における容器胴部の疲労特性については、タイプ 2 技術文書案の妥当性が示され、公式による設計、DBA で、安全性には問題ないと考えられた。

7.5L タイプ 3 容器を用いて目標とする長寿命圧力サイクル試験を実施し提案の累積損傷則が適用可能であることを示した

①－４　自緊効果を考慮した疲労寿命設計線図の作成（東京大学）

手法：

CFRP 積層構成を忠実に反映した軸対称有限要素モデルを用いた解析によるタイプ 3 容器の疲労寿命予測法を確立することを目的とし、自緊処理により発生する残留応力を正確に評価する手法を開発した。破面観察の結果得られたき裂進展速度を再現できる有限要素モデルにより正確な残留応力評価が実現できることをしめした。疲労寿命評価の基準となるアルミニウム合金ライナー材料の疲労寿命設計線図を、アルミニウム合金材料の試験片を用いた疲労試験から得られた最適疲労曲線を基準として作成した。正確な残留応力評価を行った応力解析結果を用いて実容器に近いサブスケール容器の圧力サイクル試験結果を整理し、最適疲労曲線に対して適切な安全係数を設定することで、ライナー材料の疲労寿命設計線図を作成した。

圧力サイクル試験が実施された内容積 76L タイプ 3 サブスケール容器について軸対称有限要素モデルを作成した（図 18）。自緊処理圧力をかけた後除荷する自緊処理過程を含めたサイクル圧力負荷までの荷重プロセスに従って解析を行った結果を用い、KHKS 0220 のき裂進展解析方法に従いき裂進展寿命を計算し、その結果を圧力サイクル試験後に破面観察で測定したストライエーション間隔から計算したき裂進展寿命と比較した。また同じ有限要素モデルを用いて評価した応力値に基づき、圧力サイクル寿命の予測を試み、その結果からアルミニウム合金ライナー材料の疲労寿命設計線図を作成した。

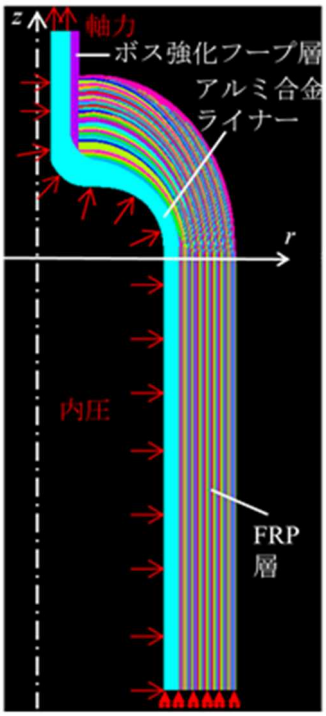


図 18　76L サブスケール容器の有限要素モデル図

タイプ 3 容器の圧力サイクル寿命はアルミニウム合金ライナー材料の疲労寿命により決定される。CFRP 材料の疲労寿命の定量的予測方法を開発し、アルミニウム合金材料の疲労寿命設計線図との比較から、CFRP 材料の疲労寿命が十分長く、アルミニウム合金ライナー材料の疲労寿命設計線図を基準にタイプ 3 容器の圧力サイクル寿命を予測できることを示した。

成果：

タイプ 3 容器に関して、CFRP 硬化後に発生するアルミニウム合金ライナーと CFRP 間の隙間を適切に設定できれば、図 19 に示すようにストライエーション間隔を的確に評価できることがわかった。

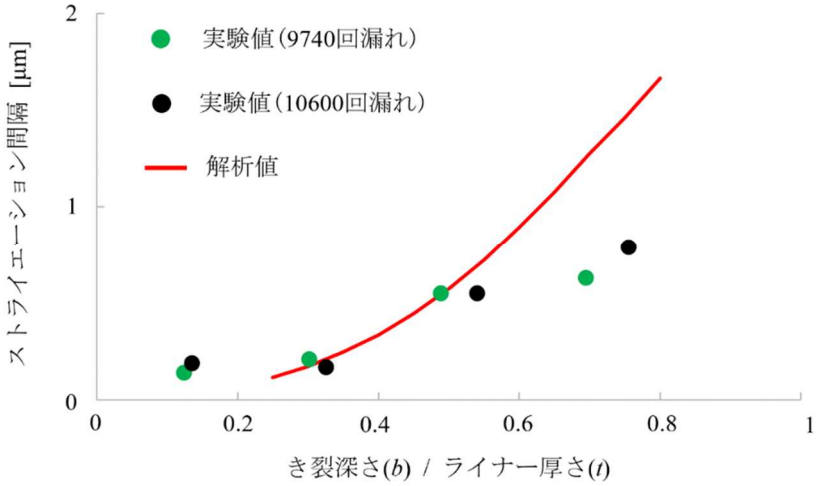


図 19　き裂深さ別のストライエーション間隔の変化(隙間ありモデル使用)

76L サブスケール容器の圧力サイクル試験結果と解析結果を用いて A6061-T6 の最適疲労曲線に安全係数を考慮した疲労寿命設計線図を次式のように求めた。

$$\sigma_a = 2.58(\sigma_u / K_p)N^{-0.12} \qquad (5)$$

自緊処理圧力 197MPa の容器を用いて圧力範囲 0-89MPa で行った圧力サイクル試験結果と解析結果を合わせてプロットした結果を図 20 に示す。

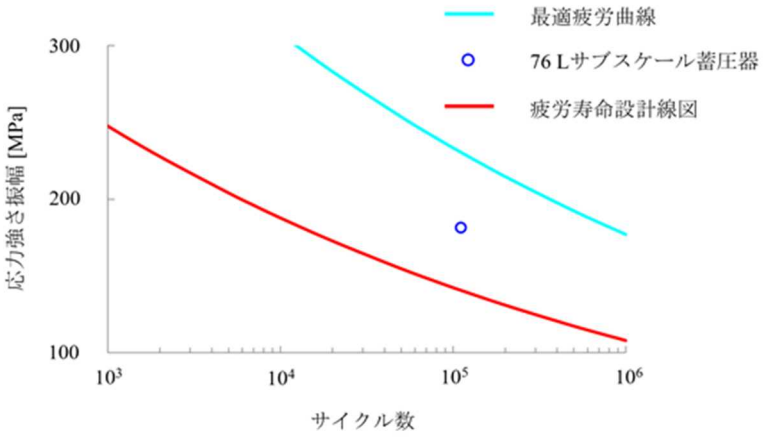


図 20　A6061-T6 の *S-N* 線図(76L サブスケール容器、サイクル圧力：0-89MPa)

CFRP 試験片と樹脂単体試験片を用いた疲労試験の結果から、図 21 に示すように、荷重方向が繊維方向と一致する 0°試験片では荷重方向の公称ひずみで整理することで疲労寿命を予測可能であることが分かった。アルミニウム合金ライナー(図中、緑△印)の疲労試験結果と比較すると CFRP（図中、赤）および樹脂(図中、青)は十分高い疲労強度を有していることが分かる。

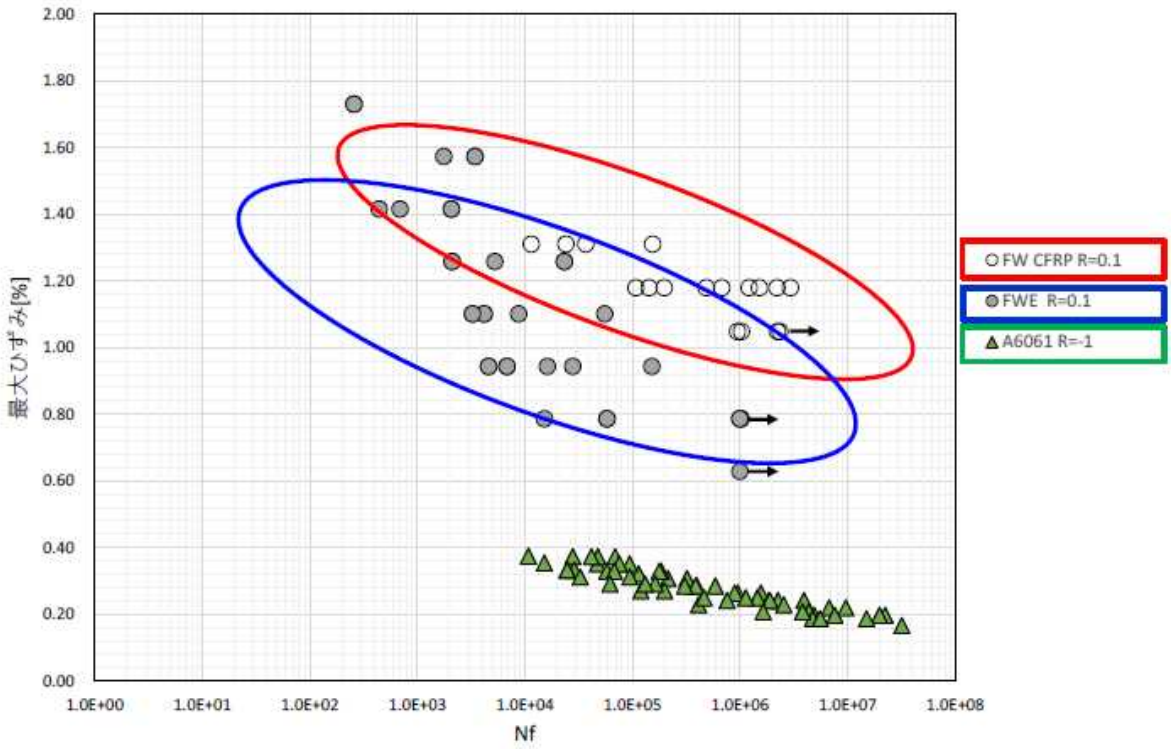


図 21　CFRP、樹脂、アルミニウム合金ライナーの疲労強度の比較図

達成度：○

有限要素モデルの設定が適切であることをストライエーション間隔の測定結果と照合することで確認し、タイプ 3 容器の圧力サイクル寿命をアルミニウム合金ライナー材の疲労寿命設計線図に基づき行い得ることを示した。

①－５　応力解析及び疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法の実証（JPEC）

手法：

疲労寿命設計線図を用いたタイプ 3 容器の設計手法の実現に資するデータ採取のため、タイプ 3 容器を用いて、圧力範囲、および自緊条件が異なる容器について漏洩に至る迄の圧力サイクル試験を実施した。また、容器の疲労カウントの最適化によるコストダウンを図るため、試験データを基に、タイプ 3 容器への累積損傷則の適用について検討した。

成果：

表 4 にタイプ 3 容器（サブスケール容器）の仕様を示す。

表 4　タイプ 3 容器仕様

材質	ライナー;A6061-T6，　繊維;PAN系炭素繊維
内容積	約76ℓ
設計圧力	99MPa
容器寸法	外径:458.7mm　長さ:1,520mm
損傷形態	**胴部を起点とするLBB**
最小破裂圧力	223MPa(設計圧力の2.25倍)以上

表 5 に各容器における圧力サイクル試験結果を示す（容器 B、容器 C は前 NEDO 事業のデータ)。また、表 6 には容器 A の自緊圧（標準：100%）を変えた場合の試験結果、および複数の圧力範囲を組合せた場合の試験結果を示す。

表 5　容器における圧力サイクル試験結果

容器	内容積	寸法	圧力範囲（MPa） 上限	下限	サイクル回数
〔容器 A〕本NEDO事業	76L	φ459×L1520	89	0	111,177
			89	30	346,195
			89	50	364,624
			89	50	390,749
			89	69	827,494
			93	0	71,093
〔容器B〕	100L	φ396×L2073	93	54	246,706
			93	74	725,051
			110	0	19,615
			110	55	60,493
			110	82.5	167,800
〔容器C〕	111L	φ489×L1290	85.5	0	29,042
			85.5	28.5	53,310
			85.5	47.5	93,021
			85.5	66.5	280,475

表 6　自緊条件を変えた場合、複数の圧力範囲を組合せた場合の圧力サイクル試験結果

			圧力範囲（MPa）		
容器	自緊	圧力条件	上限	下限	サイクル回数
〔容器 A〕本NEDO事業	100%	単一	89	0	111,177
	93%		89	0	137,549
	85%		89	0	55,248
	85%		89	20	94,367
	85%		89	50	216,010
	73%		89	0	48,879
	73%		89	50	166,498
	73%		89	69	852,425
	100%	組合せ 1	89	0	480
	100%		89	50	391,051
	100%	組合せ 2	89	50	347,180
	100%		89	79	

圧力振幅範囲を種々の条件で行ったタイプ 3 容器の漏洩に至る迄の圧力サイクル試験データから、累積損傷則に基づいた容器寿命延長式（累積損傷関係式）を構築した。

部分充塡サイクル試験の圧力範囲の比とサイクル増加比の関係を調べるために以下の 3 条件で整理を行った。

ⅰ）X 軸を圧力振幅比（無次元化）、Y 軸をサイクル増加比（無次元化）とすること

ⅱ）水素ステーションの使用条件である最大圧力固定の圧力振幅データとすること

ⅲ）容器の使用条件である高サイクルデータ（寿命 10,000 回以上）とすること

その結果、仕様、自緊、最大圧力の異なる容器（自緊の違いを含む）においても指数関数の形で相関良く整理することが可能となった（図 22）。

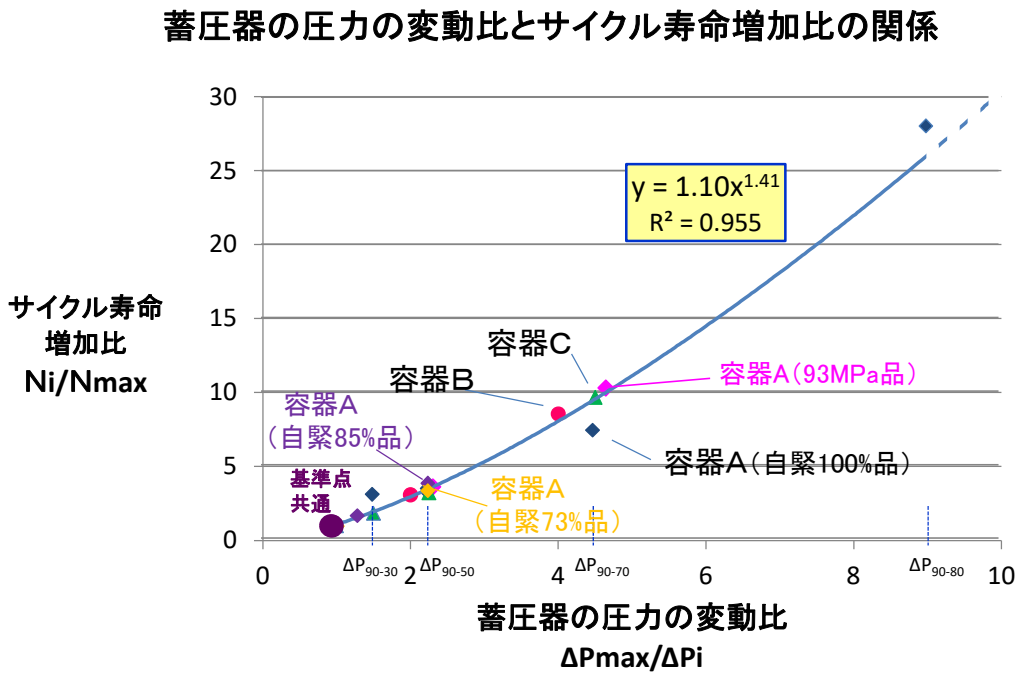


図 22　部分充塡サイクル試験の圧力範囲の比とサイクル増加比の関係

次に、HySUT 水素技術センターにて累積損傷関係式の実証試験を行い、水素ステーションの水素充填プログラムに導入可能であることを実証した。

図 23 にフルサイクルの圧力サイクル試験における圧力変動をΔＰｍａｘとし、使用時の圧力変動をΔＰｉとした場合の、疲労損傷度ΔＬｉおよび累積の疲労損傷度Ｌの算出方法を示す。

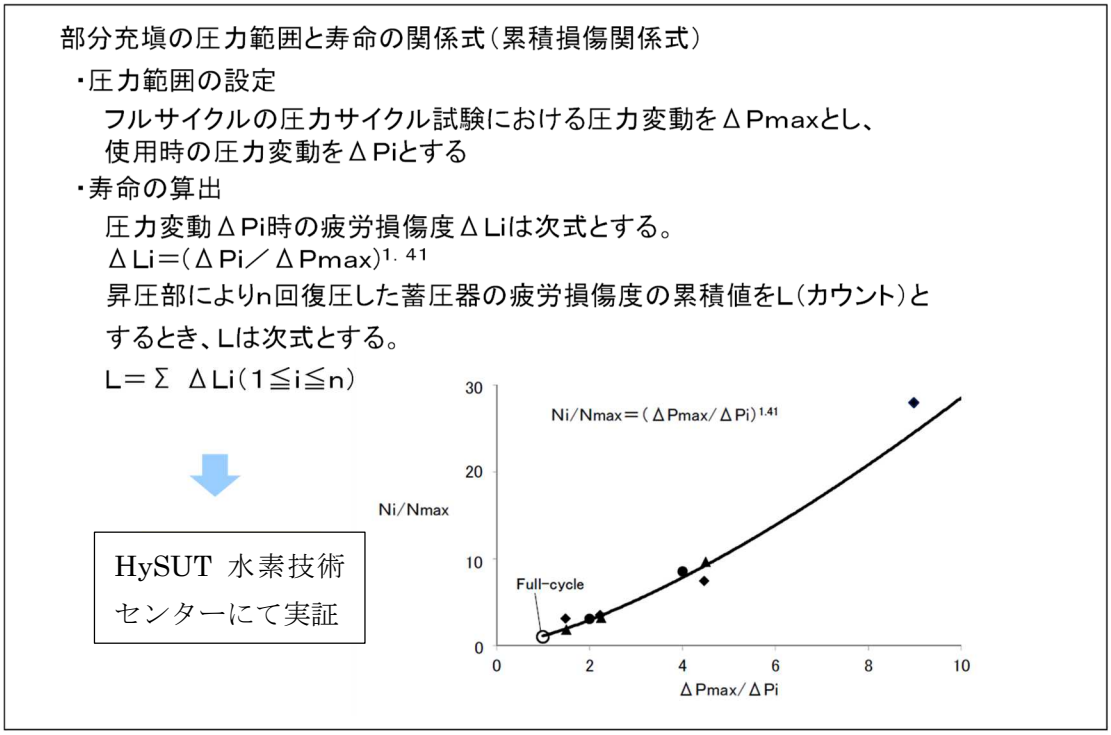
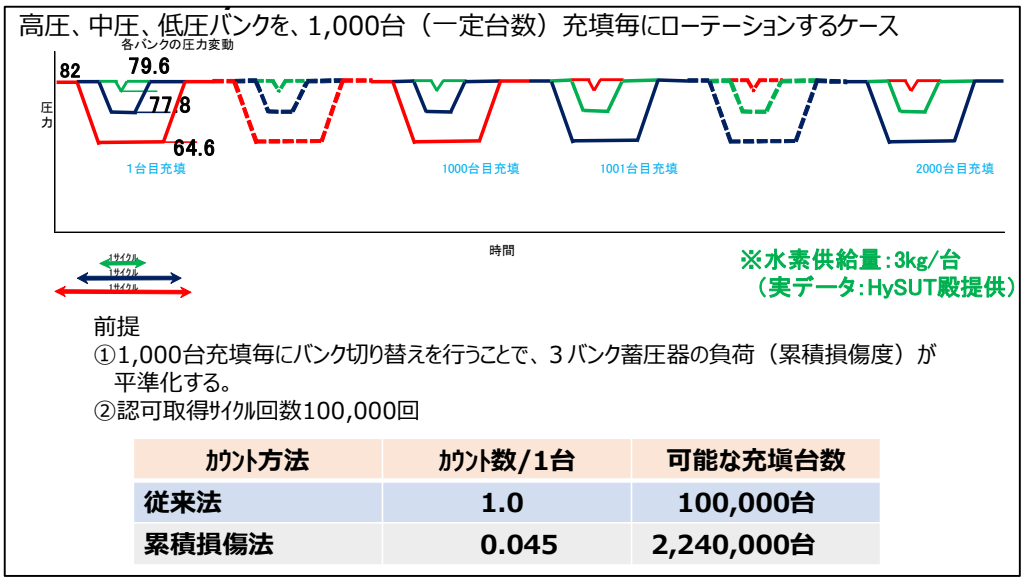


図 23　損傷度ΔＬｉおよび累積の疲労損傷度Ｌの算出方法

本成果に関しては、改正予定の KHKS 0225 の附属書（規定）に掲載予定である。

この累積損傷関係式を用いることにより、従来 FCV10 万台に充填可能なタイプ 3 容器が FCV224 万台まで充填台数を伸ばせることを見出した（図 24）。



ｶｳﾝﾄ方法	ｶｳﾝﾄ数/1台	可能な充填台数
従来法	1.0	100,000台
累積損傷法	0.045	2,240,000台

図 24　HySUT 充填実証データを用いた寿命延長効果の検証例

本累積損傷関係式は、内容を基本特許、運用特許、復圧途中の充塡特許の 3 つに分け、国内出願 3 件、PCT 出願 2 件の合計 5 件を出願した。

達成度：○

今後の展開として、圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する基準 KHKS 0225 の改訂版技術基準に、本累積損傷則に基づいた容器寿命延長式（累積損傷関係式）導入を提案する。さらに、ISO／TC197／WG15 で作成中の Gaseous hydrogen — Cylinders and tubes for stationary storage（19884-1, 19884-3）にも、タイプ 3 容器として累積損傷則に基づいた容器寿命延長式（累積損傷関係式）の導入を目指す。

②複合圧力容器の技術基準の整備に向けた技術開発（JPEC）

（1）タイプ 2 容器

手法：

タイプ 2 容器の普及を促進し、水素ステーションの整備費、運営費の低減に貢献することを目的として、タイプ 2 容器の製造（材料、公式および DBA、工作及び検査等）に関する技術文書（JPEC-TD）案を作成する。

前 NEDO 事業にて実施したタイプ 2 容器の実容器試験結果および既存の圧力容器規格を参考に、実容器試験を行わない公式による設計および DBA の考え方を検討する。技術文書案を検討するため、タスクフォースおよび検討分科会を新たに立ち上げ、タイプ 2 容器技術文書の考え方を議論し技術文書案としてまとめる。

成果：

タイプ 2 容器は炭素繊維層が金属層の周方向応力を分担している鋼製圧力容器である。従って、既存の鋼製圧力容器と同様に、実容器試験を課さない設計が可能であるとの結論を得た。既存の鋼製圧力容器規格である超高圧ガス設備に関する基準（KHKS 0220）の設計思想をベースに技術文書案を検討した。金属層材料の水素適合性評価、疲労解析方法等は、2020 年 9 月に発行された KHKS 0220（2020）の内容と整合を図った。タスクフォース（8 回）および分科会（8 回）で議論し、タイプ 2 技術文書案（表 7）が完成した。

表 7　タイプ 2 技術文書案の構成

項目	内容	参考規格
適用範囲	内容積、設計圧力・温度、使用期間	KHKS 0220 ASME BPVC Sec.Ⅷ Div.3
材料	金属層に用いる材料 樹脂含浸炭素繊維層に用いる材料 樹脂含浸炭素繊維層の機械的性質の設定	KHKS 0220 KHKS 0225
設計	金属層材料の許容引張応力 樹脂含浸炭素繊維層の許容ひずみ 式による厚さの設定 詳細応力解析（強度解析、破裂前漏洩解析、疲労解析）	KHKS 0220 ASME BPVC Sec.Ⅷ Div.3
工作および検査	自緊処理、電位差腐食防止、ワインディング、熱硬化処理、製造状態の確認など	KHKS 0220 KHKS 0225
耐圧試験		KHKS 0220
気密試験		KHKS 0220

達成度：〇

今後の展開として、成果の普及のために超高圧ガス設備に関する基準（KHKS 0220）の附属書化および ISO／TC197／WG15 で作成中の Gaseous hydrogen — Cylinders and tubes for stationary storage （19884-1, 19884-3）への展開を目指す。

（2）タイプ 3 容器

手法：

フルラップ容器の規格である KHKS 0225（2019）は、設計確認試験として実容器試験（DBT）を課す内容となっている。これは、容器保安規則の車載容器に対する試験内容を反映させて作成されたためである。そのため、認可取得の容器設計に多額の費用が掛かっている。

フルラップ容器の製造における法規は特定設備検査規則になる。本 NEDO 事業では、容器に掛かるコスト低減を図るため、DBR と DBA を確立し、KHKS 0225 改正案を作成し、高圧ガス保安協会（KHK）に改正提案をすることを目的とした。実容器試験の大幅な試験項目の削減については、設定経緯も調査して内容を精査し、容器の安全性の確保を考慮しながら検討した。改正に当たっては、これまでにタイプ 4 容器の申請実績がないことから、対応する容器はタイプ 3 容器のみとし、胴部漏洩設計を主とする容器に関して検討した。

成果：

改正内容を審議するため、有識者を中心に KHKS 0225 改正 TF を立ち上げた。審議項目を図 25 に示す。



図 25　KHKS 0225 改正 TF スケジュールと審議項目

①設計について

a）設計において適切な公式により設計初期の厚さを計算できるようにするため、容器の設計初期の厚さを計算する公式を構築して例示することとした。具体的には、最小厚さの計算において DBA による詳細設計に入る前に DBR による設計初期厚さを決定する（図 26）。これにより、胴部漏洩設計のバラツキを小さくできると考えている。



図 26　DBR による設計初期厚さの決定

次に、本 DBR の確からしさを実証試験により確かめた結果を図 27 に示す。結果から、破裂試験による破裂圧 P_B、DBR による破裂圧 P_{Br}、および DBA による破裂圧 P_{Ba} の値が同等であることが確認できた。

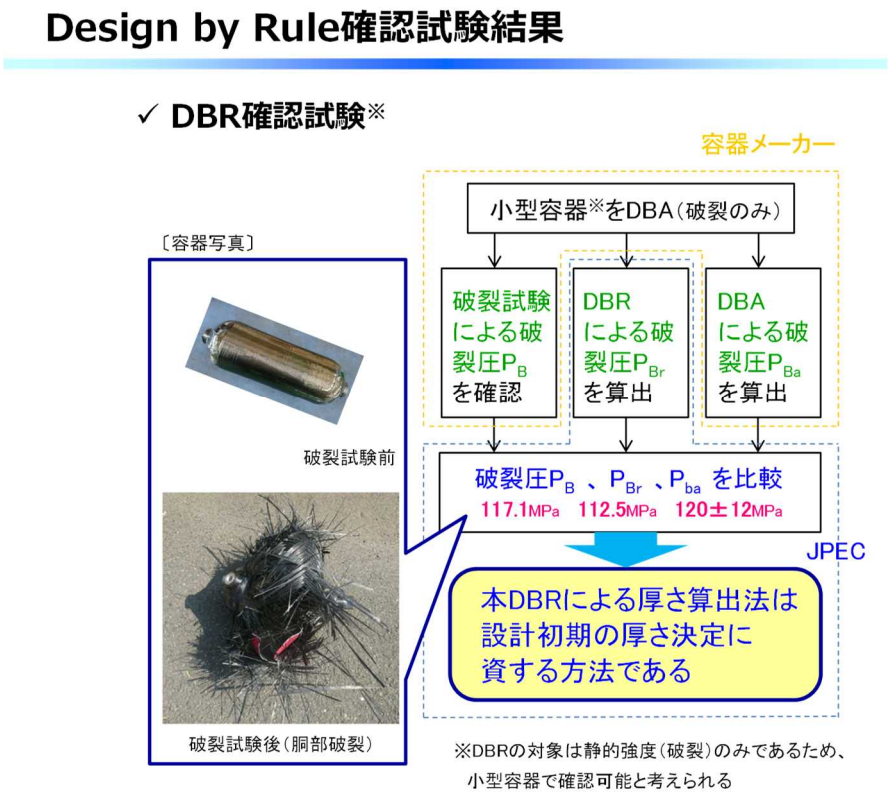


図 27　DBR の確認試験結果

b）新設した、漏洩部位を胴部に限定する場合の設計フロー図は以下の流れである（図 28）。設計係数 α_1 は材料ばらつきを考慮した係数で、2σ の値（1.29）又は 3σ の値（1.47）を製造者が選択する。また、自緊処理の影響（圧縮残留応力）については、自緊処理により発生する圧縮残留応力が正確に評価できている場合に限りその効果を取り入れることができるとし、評価方法の例を KHKS 0225 附属書（参考）に示した。

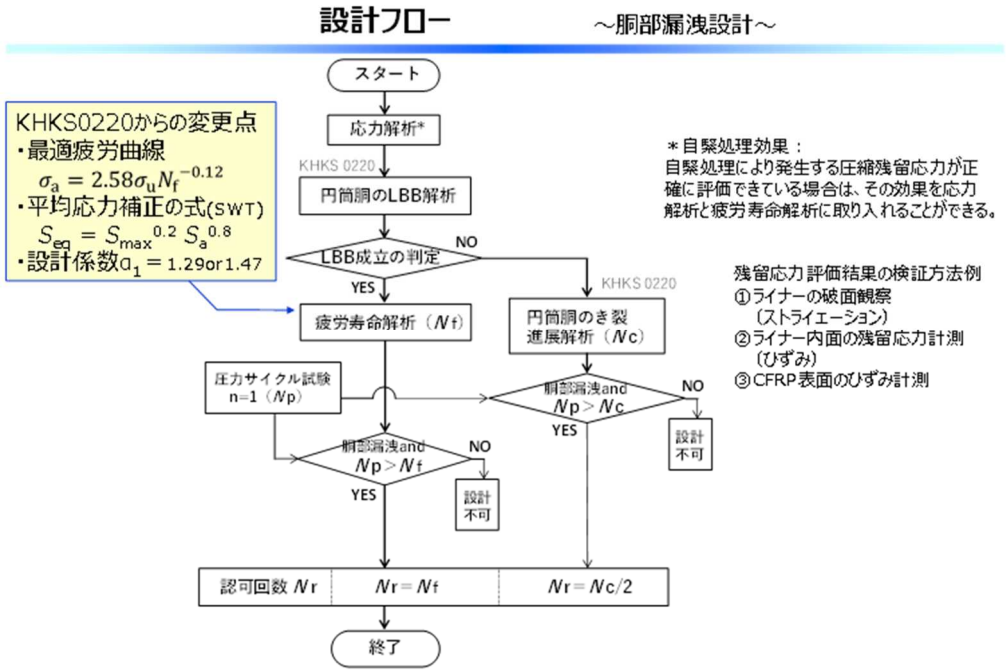


図 28　設計フロー（胴部漏洩設計）

②CFRP 層厚さ計測手法について

現行規格では CFRP 層及び保護層の層毎の厚さを、容器等の胴部及び鏡部を切断機等により切り出し、その切断面で厚さを測定する規定になっており、測定における検査時間や検査費用も掛かっていた。この改正を考える上で、切断面以外での厚さを測定する方法がないかを調査したところ、非接触で厚さを測定するプロファイル測定器があることが分かった。CFRP の割合を検証したところ、ワインディング時に各層の厚さ測定を行った結果が、容器切断による厚さ測定結果とほぼ一致した。そのため、切断面以外の測定法としてワインディング時の計測も可能とすることとした。ただし、ワインディング時に厚さを測定しない場合は、構造の検査において従来法により樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の厚さを測定することとする。

③気密試験時のガス検知器使用について

気密試験は、目視や発泡検査であったが、ガス検知器の技術向上から、検査方法を「検査条件を考慮して、目視、発泡検査及び発泡検査と同等以上の検知ができるガス検知器等のうち適切な方法により検査を行う。」とした。

④試験の削減案

上述のタスクフォース（TF）にて審議をおこない、漏洩部位を胴部として設計する場合、現行 11～14 の容器試験の数を 2 個に削減する改正案をまとめた（図 29）。

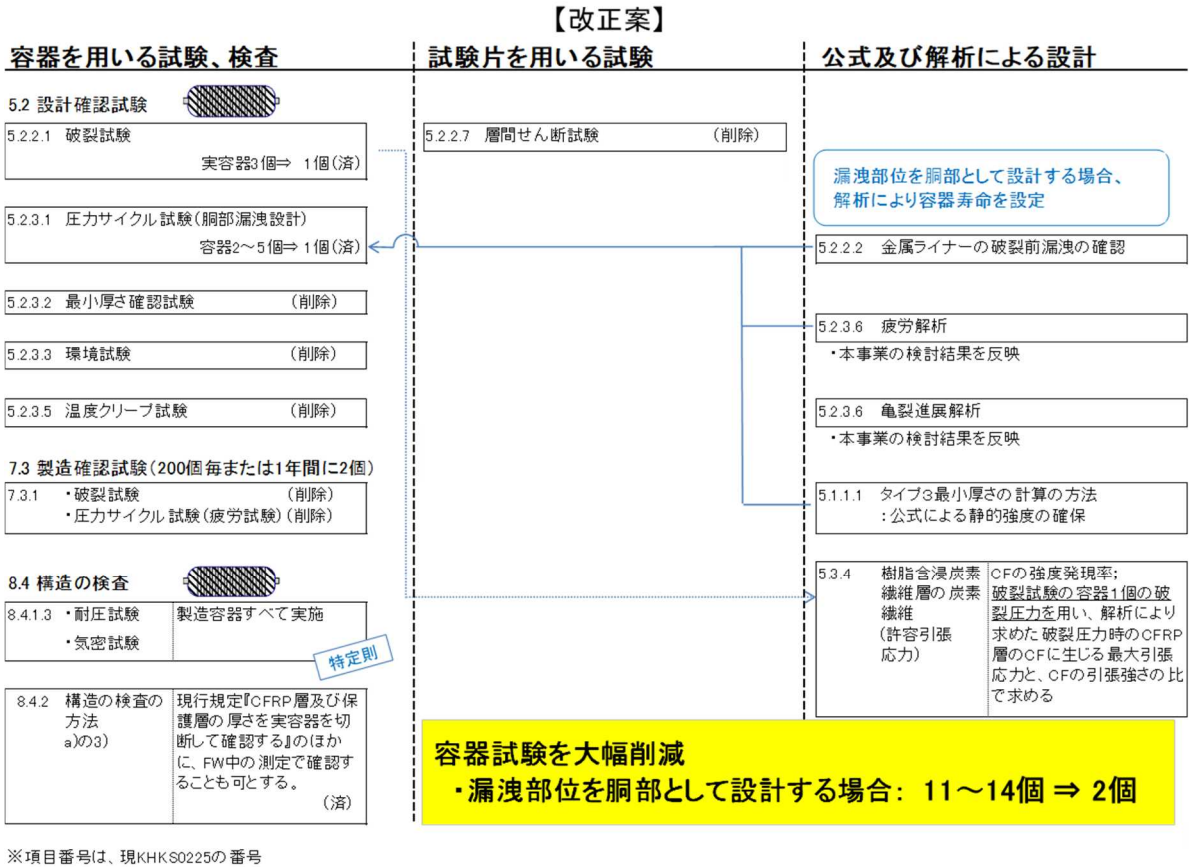


図 29　KHKS 0225 試験数削減の改正案概要

達成度：○

応力解析・疲労解析に基づく複合圧力容器設計手法を確立し、KHKS 0225 の改正に資する提案内容をまとめることができた。DBA を主体とした設計手法を確立することにより、認可取得のための試験容器の数を現状の 11～14 個から 2 個に低減した。

３．２　成果の意義

タイプ 2 容器に関する技術文書案を完成し、KHKS 0220 への附属書化を目指す。また、タイプ 3 容器に関する技術基準 KHKS 0225 の改正案を作成し改正提案をする。これらの基準を広く活用してもらうことにより、容器に係る運営コスト低減に繋げる。

３．３　開発項目別残課題

当初の研究開発目標については達成見込みであり、残課題はない。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

４．１まとめ

水素ステーションに設置される容器のコスト削減に向け、容器評価方法の簡素化及び使用寿命延長に関する技術開発として、容器を構成する材料の最適疲労曲線、疲労寿命設計線図に関する検討、円筒試験体の評価法の検討、き裂進展寿命予測法の検討、タイプ 3 容器への累積損傷則の適用検討等を実施した。

さらに、技術基準を整備するため、タイプ 2 容器に関する技術文書 JPEC-TD 0008 を作成するとともに、タイプ 3 容器に関する技術文書 KHKS 0225 の改正に資する提案内容をまとめた。

本文の中から主たる内容を 5 年間の成果の全体イメージとしてまとめたものを図 30、図 31 に示す。

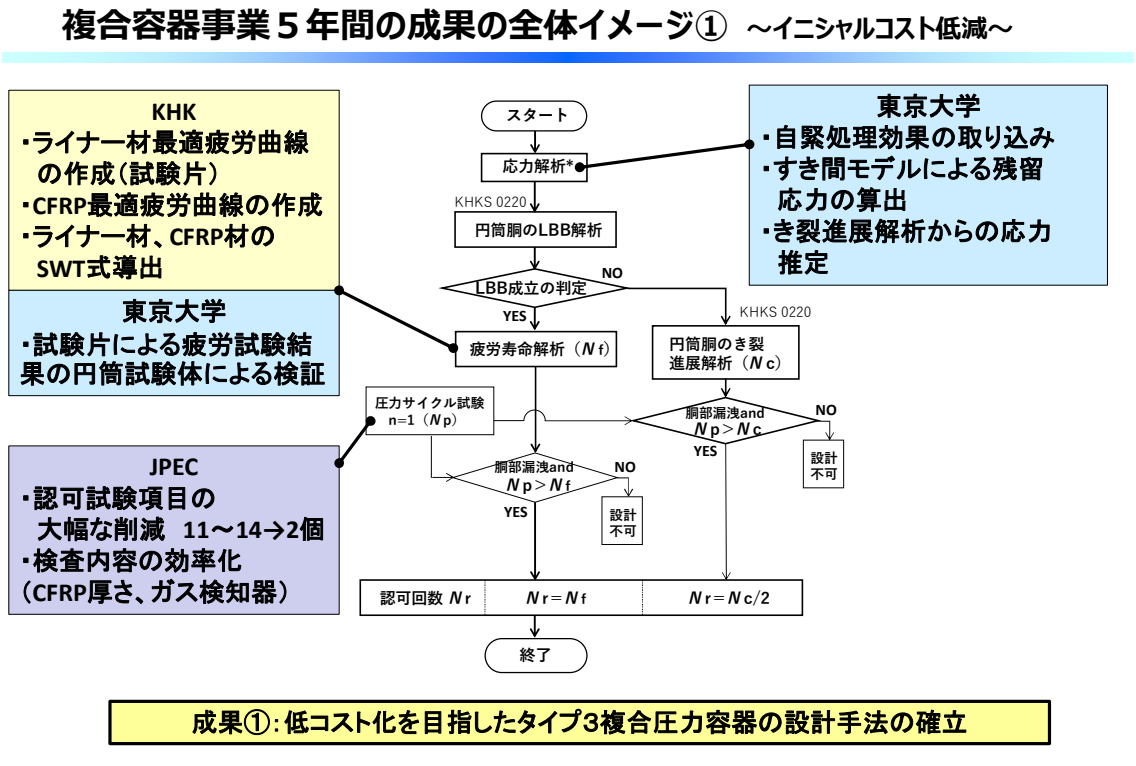
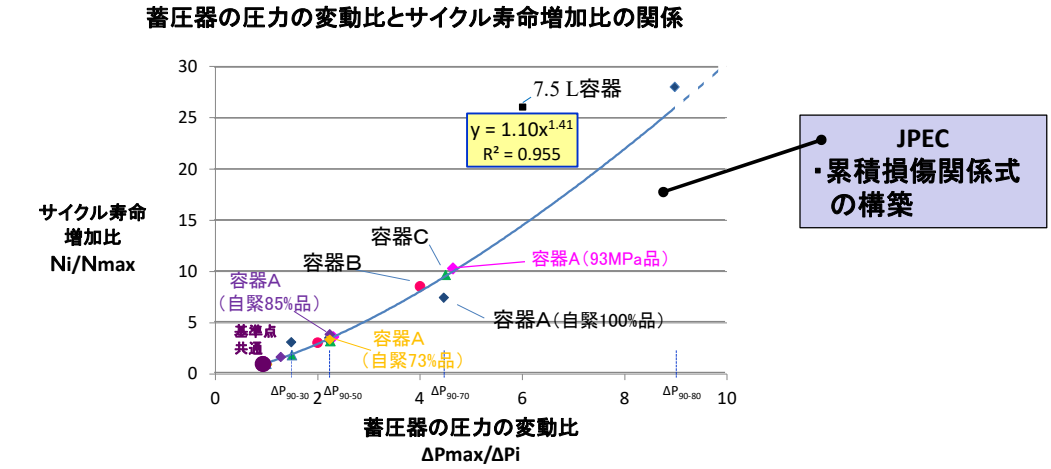


図 30　5 年間の成果の全体イメージ（イニシャルコスト低減）

複合容器事業５年間の成果の全体イメージ② ～ランニングコスト低減～



〔前提条件〕
・認可回数 :100,000回
・バンクローテーション実施

ｶｳﾝﾄ方法	ｶｳﾝﾄ数/1台	可能な充填台数
従来法	1.0	100,000台
累積損傷関係式	0.045	2,240,000台

成果②：FCV充填台数増を目指したタイプ3複合圧力容器の疲労評価手法の確立

図 31　5 年間の成果の全体イメージ（ランニングコスト低減）

４．２課題及び事業化までのシナリオ

タイプ 2 容器に関しては、制定した技術文書（JPEC-TD）の KHKS 0220 への附属書化を目指す。タイプ 3 容器に関しては、KHKS 0225 の改正案を作成し、提案した。2023 年度中に改正された KHKS 0225 が発行される予定である。これらの KHK 技術基準を広く活用してもらうことにより、容器に係る運営コスト低減に繋げる。本事業では累積損傷関係式の水素ステーションにての実証まで行っており、現行の充填プログラムに累積損傷関係式を組み込み蓄圧器の疲労損傷度が算出可能なことを確認している。実際に水素ステーションへ累積損傷関係式を導入することに関しては、燃料電池実用化推進協議会殿を通じて水素インフラ業界との連携を検討する。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

・石油エネルギー技術センター（JPEC）

（口頭発表　2018年度：2件、2019年度：4件、2020年度：4件、2021年度：2件、2022年度：2件）

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2018 年 11 月 29 日	日タイ技術交流会	Research and Development on Technical Standard of Composite Pressure Vessel for Hydrogen Fueling Station	佐藤

2	2019 年 2 月 12 日	FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	小林
3	2019 年 5 月 8 日	2019年度JPECフォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林
4	2019 年 9 月 27 日	愛知県主催2019年度「水素貯蔵技術ワーキンググループ」第1回セミナー	水素ステーションで使用できる金属材料・蓄圧器	福本
5	2020 年 2 月 3 日	愛知県主催2019年度「水素貯蔵技術ワーキンググループ」第3回セミナー	水素ステーション用蓄圧器の技術基準	林
6	2020 年 2 月 17 日	FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	小林
7	2020 年 5 月 8 日	2020年度JPECフォーラム (フォーラムは中止。HPで資料を公開)	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発（タイプ 2）	佐藤
8	2020 年 5 月 8 日	2020年度JPECフォーラム (フォーラムは中止。HPで資料を公開)	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発（タイプ 3）	東條
9	2020 年 7 月 20 日	ASME PVP 2020	INTRODUCTION OF THE TECHNICAL DOCUMENT IN JAPAN FOR SAFETY USE OF TYPE2 PRESSURE VESSELS IN HYDROGEN REFUELING STATIONS	JPEC：佐藤、小林、福本 KHK：前田 東大：吉川 JSW：荒島
10	2021 年 3 月 1 日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林
11	2021 年 5 月 12 日	2021年度JPECフォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	東條

12	2022 年 3 月 9 日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林
13	2022 年 5 月 11 日	2022年度JPECフォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	東條
14	2023 年 3 月 2 日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林

（新聞・雑誌等へ掲載　2018年度：1件、2019年度：1件、2021年度：2件、2022年度：1件）

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 2 月	石油学会誌 PETROTECH	水素ステーションで使用する複合圧力容器蓄圧器の技術基準複合容器基準について	小林、藤澤
2	2020 年 1 月	JPEC NEWS　1 月号	NEDO事業紹介「複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」	
3	2021 年 10 月	JPEC レポート	水素ステーションでの低合金鋼の利用に向けて制定された技術文書	小林
4	2022 年 1 月	一般社団法人燃料電池開発情報センター「日本における燃料電池の開発 2021」	水素ステーションの規制適正化に関する研究開発	林
5	2023 年 2 月	一般社団法人日本ボイラ協会「ボイラー年鑑 2022 年版」	水素ステーション用蓄圧器に係る技術基準の整備状況の紹介	林

・高圧ガス保安協会（KHK）

（口頭発表　2018年度：3件）

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2018 年 7 月 18 日	ASME PVP 2018	STUDY ON FATIGUE CHARACTERISTICS OF CFRP	KHK：竹花、山田、佐野、木村、宮下、志賀 東大：吉川 JPEC：小林

2	2018 年 7 月 18 日	ASME PVP 2018	STUDY ON STRESS RUPTURE CHARACTERISTICS OF CFRP	KHK：佐野、山田、竹花、宮下、志賀 東大：吉川 JPEC：小林
3	2018 年 11 月 29 日	平成30年度 日本高圧力技術協会 秋季講演会	アルミニウム合金A6061-T6の最適疲労曲線	KHK：志賀、山田、佐野 JPEC：小林

（新聞・雑誌等へ掲載　2019年度：1件、2021年度：1件）

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 4 月	高圧ガス誌	ASME 2018 Pressure Vessels & Piping Conference（PVP会議）の参加報告	佐野
2	2021 年 5 月	一般社団法人日本高圧力技術協会(圧力技術)	アルミニウム合金A6061-T6の最適疲労曲線の構築と平均応力の補正方法	KHK：志賀、小林、山田、佐野 横浜国立大学：澁谷

・東京大学

（口頭発表　2018年度：1件）

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2018 年 7 月 17 日	ASME PVP 2018	Numerical Fatigue Life Evaluation with Experimental Results for Type Ⅲ Accumulators	東大：吉川、キム JPEC：小林、藤澤 KHK：佐野

・株式会社日本製鋼所（JSW）

（口頭発表　2019年度：1件）

№	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 12 月 2 日	KHK水素保安セミナー	タイプ２複合容器蓄圧器の設計	高坂

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2020 年 4 月 17 日	特願 2020 - 074196	蓄圧器の寿命判定方法	JPEC 、 東 大 、 KHK、JSW

2	2020 年 4 月 17 日	特願 2020 - 074235	蓄圧器の寿命判定方法を用いた水素ステーションの運転方法	JPEC 、東大、KHK、JSW
3	2020 年 11 月 5 日	PCT/JP2020/041411	蓄圧器の寿命判定方法	JPEC 、東大、KHK、JSW
4	2020 年 11 月 5 日	PCT/JP2020/041416	蓄圧器の寿命判定方法を用いた水素ステーションの　運転方法	JPEC 、東大、KHK、JSW
5	2022 年 10 月 18 日	特願 2022 - 167148	蓄圧器の寿命判定方法、および、この蓄圧器の寿命判定方法を用いた水素ステーションの運転方法	JPEC

（2-(3)-①）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」

委託先：一般社団法人水素供給利用技術協会、国立大学法人　九州大学、一般財団法人化学物質評価研究機構、NOK株式会社、髙石工業株式会社、日本ピラー工業株式会社、株式会社キッツ、株式会社フジキン、株式会社タツノ、トキコシステムソリューションズ株式会社

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

・商用ST等使用済シール部材および故意的に劣化因子を与えた従来シール部材の評価を行い、劣化要因を検討した。劣化度と漏えいの相関を確認し、加速耐久性評価法の概要を検討した。
・水素機器用高分子材料水素特性データベースを拡充した。また、高圧水素シール部材標準評価法、劣化モデルシール部材作製法を開発。
・機械継手のゆるみとガス漏洩を評価する試験法と試験装置を開発し、シール部接触面圧低下に至る複数因子の作用について試験と解析により明らかにした。
・シール基盤・改良開発に基づき、新たな機器（バルブ、フィルター等）の設計検討を実施した。

●背景/研究内容・目的

- 継手部材，シール部材の耐久性を，水素ｽﾃｰｼｮﾝにおける充填回数30,000回相当とする。
- 継手部材，シール部材の加速耐久性評価法案を確立する。

●研究目標

実施項目	目標
①セーフティーデータベース（SDB）の解析知見の整理	SDB情報の整理、解析
②部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討	部材・機器の加速耐久性評価方法の確定
③シール基盤・改良開発	HRSにおける充填回数 30,000 回相当のシール部材開発 シール部材の加速耐久性評価法案設定
④継手基盤・機器開発	機械継手の漏洩の評価方法の確立 漏洩リスク低減の指針作成、 漏洩のない機械継手の開発
⑤シール成果に基づく機器開発	シール開発成果に基づく高耐久性機器開発

●実施体制及び分担等

NEDO
- HySUT（実施項目①②）
- 九州大学（実施項目③④）
- CERI（実施項目③）
- NOK（実施項目③）
- 日本ピラー工業（実施項目③）
- 高石工業（実施項目③）
- キッツ（実施項目②④⑤）
- フジキン（実施項目②④⑤ ）
- タツノ（実施項目②）
- ﾄｷｺｼｽﾃﾑｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ（実施項目②⑤）

●これまでの実施内容／研究成果

- シール、継手の漏洩事例解析で、発生設備・部位の傾向、経年傾向や充填回数に対する発生頻度推移を整理した。
- 商用ST等使用済シール部材および故意的に劣化因子を与えた従来シール部材の評価を行い、劣化要因を絞り込み、加速耐久性評価法を検討し、強制劣化程度と充填回数の関係を検証した。
- 水素機器用高分子材料水素特性データベースを拡充。
- HRS使用済みシール部材の調査を実施し、劣化モデルシール部材作製法を開発し、加速耐久性評価法案を設定した。
- 水素圧縮機ピストンリングの摩擦に伴うトライボケミカル反応による硫化水素発生を確認し、各種リング材を評価した。
- 継手シール部の接触面圧に着目した新たな評価方法と試験装置を開発し、シール部軸力低下の原因、緩み発生因子を推定した。FEM解析で締付けトルクやシール部軸力などが計算可能.となった。
- 締結時のシール面塑性変形と繰り返しによる変形進行を確認した。
- 改良継手の検討、施工・保全指針案作成。
- シール基盤・改良開発に基づき、新たな機器（バルブ、フィルター等）の設計検討を実施した。

●今後の課題

- 水素ステーションを構成する各種高圧水素機器、ホース等各種部材の高信頼性化、長寿命化による低コスト化をさらに進めるため、また、今後想定されるHDV向け高流量水素ステーションへの対応をも踏まえ、基盤となる研究開発をさらに推進する必要がある。

●実用化・事業化の見通し

- 漏えいの無い長寿命・高信頼性のシール、継手の開発により、成果として、「水素ステーションの安全性向上、信頼性向上、水素ステーション運営コスト低減」が実現できる。
- 具体的な成果として
  - ○水素ステーション休業日数削減：1日/年
  - ○メンテ期間の短縮：2～3日/定修（およそ1回/年）
  - ○運営コスト低減：1～2百万円/年
- 従って、日本全体の水素ステーションでは3.2～6.4億円/年の低減が見込まれる。（2025年度　水素ステーション数：320）

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①セーフティーデータベース（SDB）の解析知見の整理	商用水素ステーションの水素微量漏えい事例について、設備・部位を整理し、経時的な傾向の推移、充填回数に対する漏洩事例発生頻度の傾向について確認.	○
②部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討	劣化要因に基づくシール材強制劣化手法と加速耐久性評価法を検証.強制劣化の程度と充填回数の関係性確認の検証試験を実施し、強制劣化手法の妥当性を確認.	○
③シール基盤・改良開発	水素機器用高分子材料水素特性データベースの拡充．シール部材劣化モデル作製ー高圧水素シール性評価による加速耐久性評価法開発，加速評価法案設定．30,000回充填担保シールシステム、シール部材の提示 高圧水素圧縮機ピストンリング材の摩耗に伴うトライボケミカル反応による硫化水素発生を確認.	○
④継手基盤・機器開発	シール部軸力低下の原因、緩み発生因子を推定.締結時のシール面塑性変形と繰り返しによる変形進行を確認. FEM解析で締付けトルクやシール部軸力などが計算可能. 改良継手の検討、施工・保全指針案作成.	○
⑤シール成果に基づく機器開発	基盤・改良開発成果に基づき設計製作した機器（バルブ、フィルター等）の加速耐久性評価法による評価を実施.	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
2	0	20	0

事業番号：2-(3)-①
研究開発名　：**「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」**

１．研究開発概要

１．１　目的

2017 年 12 月 26 日に再生可能エネルギー･水素等関係閣僚会議が発表した水素基本戦略では、モビリティにおける水素利用の中核は 燃料電池自動車と水素ステーションの普及であると位置づけられており、水素ステーションについては 2020 年度までに 160 箇所、2025 年度までに 320 箇所の整備を目標とし、2020 年代後半までに水素ステーション事業の自立化を目指すとの国家方針が示されている。

事実、最近の商用水素ステーション数は 100 ヶ所に近づき着実に導入が進んでいる。

ところが、高圧ガス保安協会から報告された水素ステーションにおける事故は 2011～2015 年度に 28 件を数え、その原因は全て水素の漏えいである。更に、漏えい部位の 3/4 が締結部とシール部である。今後の水素ステーションの増加と、充填頻度と多様化によって、今後更に漏えい事故が増加すると予想されるために漏えい防止の過半を占める締結部とシール部の漏えい防止対策が急務となっている。

継手部やシール部など、水素ステーションで多数存在する漏えいが懸念される部材について、多様な漏えい原因の切り分け、検証と漏えい防止策を策定し、もって漏えいの無い継手や弁・フィルター等の機器を開発して、水素ステーション設備の信頼性向上と運営コストの低減に寄与することを、本事業の目的とする。

１．２　概要

本事業は、一般社団法人水素供給利用技術協会（以下、HySUT)、国立大学法人九州大学（以下、九大)、一般財団法人化学物質評価研究機構（以下、CERI)、NOK 株式会社（以下、NOK)、髙石工業株式会社（以下、髙石工業)、日本ピラー工業株式会社（以下、日本ピラー)、株式会社キッツ（以下、キッツ)、株式会社フジキン（以下、フジキン)、株式会社タツノ（以下、タツノ）およびトキコシステムソリューションズ株式会社（以下、トキコ）の 10 社（団体）が実施する。

水素ステーションの設備信頼性向上のためには、継手、シールなど高圧水素インフラにおける締結・摺動要素に関する潜在的漏えい箇所について、その漏えい発生メカニズムの検討が必要である。

また、水素ステーションの運営に際して、毎年実施される開放検査もコスト増大の一因となっている。例えば、プレクーラー以降の配管、付属品類（遮断弁、フィルター、緊急離脱カプラー、ノズル等）はヒートサイクル（外気温度⇔-40℃）及び圧力サイクル（0.1MPa⇔82MPa）に曝されることから、ガスケット、継手、グランド等で微少リークが発生する可能性があり、信頼性確保のため消耗品である O リング等シール部材を毎年交換している。

本事業で、継手等の締結部材からの漏えい発生メカニズム、高圧水素シール部材の高圧水素環境下における劣化、寿命に関する知見を得て、継手、シール、弁の使用期間を延長し、もって開放検査の実施間隔の延長を可能とし、水素ステーションの運営コストの低減や稼働日数の増加を図ることを目的とする。

以下の５つのサブテーマにより研究開発を実施する。

(1)　サブテーマ１：セーフティーデータベースの解析知見の整理
(2)　サブテーマ２：部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討
(3)　サブテーマ３：シール基盤・改良開発
(4)　サブテーマ４：継手基盤・機器開発
(5)　サブテーマ５：シール成果に基づく機器開発

１．３　研究体制

サブテーマ１では HySUT が前事業で作成しているセーフティーデータベース（SDB）のバルブ、シール等の不具合情報を整理し、発生状況、頻度、原因などを本事業委託先に展開した。

サブテーマ２では、セーフティーデータベースの解析知見の整理の結果や、水素ステーション使用済みシール部材の評価の結果を基に、バルブメーカー（キッツ、フジキン)、ディスペンサー

メーカー（タツノ、トキコ）共同で、商用ステーションの継手、シール、バルブの使用条件を考慮した用途別評価条件を決定し、本項の継手・シールの基盤・改良開発の前提試験条件を検討した。

サブテーマ３では、現状のシール部材、シールシステムの現状を把握し、各種モデル材料の高圧水素環境下における挙動の把握、高圧水素環境下における劣化特性、破壊特性を明らかにする。また、ラボ評価と実水素ステーションにおける劣化挙動の相関を調査する。これらの知見に基づいて、シール部材、シールシステムの加速耐久性評価法を確立する。また、改良開発として、基盤研究により得られた知見、加速耐久性評価法を活用し、シール部材メーカーにて長寿命シール部材、シールシステムの開発を実施する。

サブテーマ４では、高圧水素ガス漏洩事故の発生部位として最も多い機械継手について、漏洩機構解明を行うとともに、漏洩のない機械継手を開発する。基盤研究においては、継手のゆるみと接触界面の漏れ経路発生に及ぼす、施工時・運転時・メンテナンスにおける配管の組付け精度（軸の偏心・偏角）、温度変化、圧力変化、振動（振幅、周波数、モード）などさまざまな因子による応力変動と表面損傷の影響を明らかにするために、事故事例の分析、評価試験、理論解析、および実地検証を行う。機器開発においては、基盤研究の結果にもとづき、改良継手の開発を行って充填実条件試験を行って既存品と比較する。以上にもとづいて、機械継手の漏洩リスクの評価方法とリスク低減策を検討し、漏洩リスク低減の指針を作成する。

サブテーマ５では、既存弁・フィルターの繰返し実充填試験を行い、問題発生状況を把握する。加えて、シール基盤・改良開発で開発した改良シールを備えた改良弁・フィルターを、サブテーマ２部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討で決定した加速試験条件にて試験し評価する。

本事業の実施体制を図１に示す。

また、委員会、チーム会議体制を図２のように構築し、検討・審議を実施した。

シール部材・継手部材検討委員会においては、水素ステーション運営事業者、ディスペンサーメーカー、水素事業関連の業界団体（FCCJ）や研究開発法人などの外部有識者が広く参画し、本事業の審議を行った。

委託先が 10 社と多数であること、また各々の実施内容を共有し連携して効率的な事業推進を図るために、委託先メンバーによって組織される連携会議を設置した。

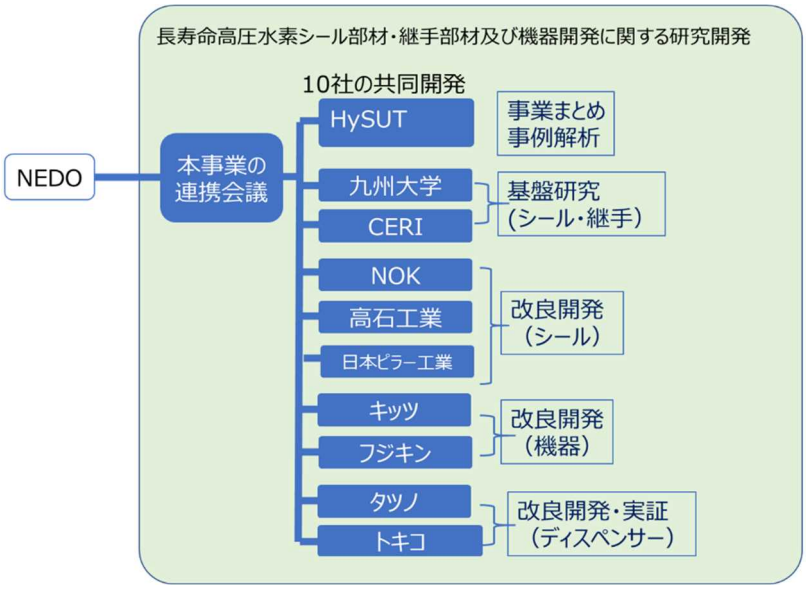


図１．実施体制

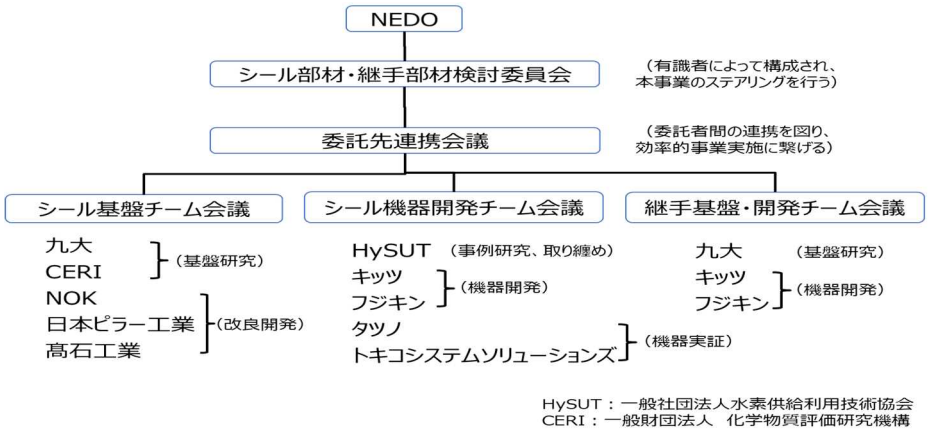


図２．委員会、チーム会議体制

２．研究開発目標

＜全体目標＞

・ 継手部材，シール部材の耐久性を，水素ｽﾃｰｼｮﾝにおける充填回数30,000回相当とする。

・ 継手部材，シール部材の加速耐久性評価法案を設定する。

＜テーマ別目標＞

① サブテーマ 1：セーフティーデータベースの解析知見の整理

・ 前事業で作成した SDB 情報の整理、解析

② サブテーマ 2：部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討

・ 加速試験評価方法の確定

・ 実充填方法と加速試験評価方法の相関性の確認、新規シール材機器の評価試験

③ サブテーマ 3：シール基盤・改良開発

・ 想定したシール部材劣化因子ごとの試験法確立

・ 加速耐久性評価法案の設定

・ 長寿命シール部材の開発

④ サブテーマ 4：継手基盤・機器開発

・ 機械継手の漏洩の評価方法の確立

・ 漏洩リスク低減の指針の作成と、漏洩のない機械継手の開発

⑤ サブテーマ 5：シール成果に基づく機器開発

・ 新規シール材・機器を用いて、加速耐久性評価法による要素試験の実施および評価

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）サブテーマ 1：セーフティーデータベースの解析知見の整理

HySUT が前事業で収集・蓄積した水素ステーションの各種トラブルに関するセーフティーデータベース（SDB）の事例を対象に、シール及び継手に関する事に絞り込んで解析した。2015 年～2021 年の商用水素ステーションのトラブル事例のうち、水素微量漏えい事例について、設備区分および部位を整理し、経時的な傾向の推移を確認した。また、充填回数に対する漏洩事例発生頻度の傾向についても確認した。

①水素ステーションのトラブル状況（2015 年～1018 年 1 月）

HySUT が前事業で収集・蓄積した水素ステーションの各種トラブルに関するセーフティーデータベース（SDB）の事例を対象に、シール及び継手に関する事例に絞り込んで解析した。絞り込みは、最近のトラブル事例に関し、事例が多く発生しているディスペンサー、昇圧設備、蓄圧設備の部位に関する重要事例（水素微量漏えい故障、ST 運営に支障を及ぼした故障）を対象とした。

シールに起因するトラブルの解析より、部位別のシール故障は、ディスペンサー部分が最も多く、かつプレクール二次側の低温部の遮断弁等のバルブで多くの故障が発生している。シール構造別では、グランドパッキンの不良や緩み、O-リング不良が多いことを確認した。（表 1）

表１．漏洩事例の設備内訳（左表）、ディスペンサーシールでの詳細部位内訳（右表）

		外部漏えい		内部漏えい	計
設備	種別	件数	比率	件数	件数
ディスペンサー	シール	19	73%	25	44
	継手	7	27%	0	7
	計	26	100%	25	51
昇圧設備	シール	4	27%	26	30
	継手	11	73%	0	11
	計	15	100%	26	41
蓄圧設備	シール	5	56%	0	5
	継手	4	44%	0	4
	計	9	100%	0	9
合計	シール	28	56%	51	79
	継手	22	44%	0	22
	計	50	100%	51	101

	部位	詳細部位	合計		うちPC二次側	
			件数	比率	件数	比率
遮断弁その他弁類	グランド部	グランドパッキン不良	2	11%	2	100%
		グランドナット緩み	7	37%	5	71%
		Oリング不良	4	21%	3	75%
		その他	1	5%	0	0%
		計	14	74%	10	71%
	バルブ底部	Oリング不良	4	21%	4	100%
		計	18	95%	14	78%
その他	離脱カプラ	Oリング破損	1	5%	1	100%
合計			19	100%	15	79%

継手に関する解析結果より、昇圧設備（圧縮機）の継手不良件数と、ディスペンサーの継手不良がほぼ同数となっている。ディスペンサー部位の継手不良は全てプレクールの二次側で発生し

ていることを確認した。

SDB の事例を対象に、トラブルが発生するまでの充填回数を整理した結果、充填回数０～50 回での漏えい件数が最も多く、各 ST の充填回数の中央値（充填回数 647 回）であることからも運転初期の段階で漏えいが多く発生していることが明確となった。（図３）

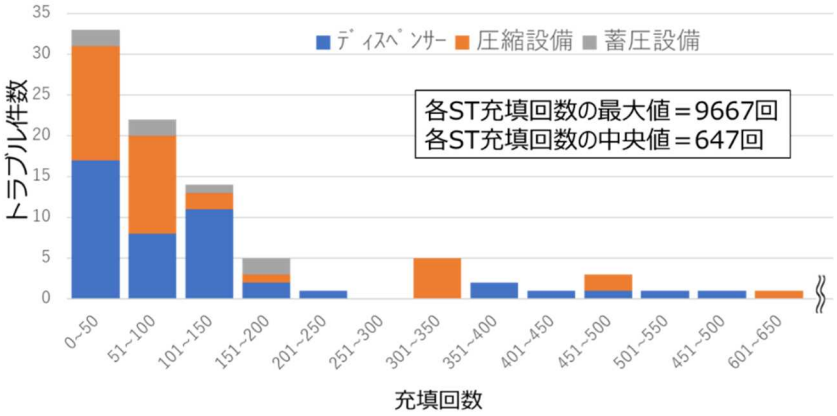


図３．シール部材・継手部材の漏洩事例に係る充填回数ヒストグラム（設備区分別）

②漏洩事例発生傾向の推移

2018 年度以降の SDB データ提供についてはインフラ事業者から、商用 ST 固有の情報等が開示されないことを条件として情報活用することとなった。

また、従来、水素漏洩はすべて事故扱い（Ｃランク）であったものが、2019 年より微量漏洩（カニ泡程度）はＤランクの故障扱いとなり（高圧ガス･石油コンビナート事故対応要領(内規)改正)、SDB からの微量漏洩についての漏洩状況の詳細が困難となった。そこで、今までの SDB の微量漏洩を含む水素漏洩事例をあらためて整理し、水素ステーション数の増加、充填回数の増加にともなう漏洩事例発生の推移や、発生設備、発生部位の傾向を把握することとした。

・対象期間　：　2015 年～2022 年
・発生設備　：　昇圧設備　　･･･　圧縮機/ブースターとその周辺機器、配管
　　蓄圧設備　　･･･　蓄圧器付帯及び関連バルブユニット等機器、配管
　　ディスペンサー･･　ディスペンサーユニット内機器、配管
・発生部位　：　継手、０リング、グランド、ガスケット等その他シール部

表 2 に年別、発生設備、部位の発生状況を示す。

表 2. 漏洩事例の発生状況

発生年	外部漏洩						計	内部漏洩
	ディスペンサー		昇圧設備		蓄圧設備			
	シール部	継手	シール部	継手	シール部	継手		
2015	2	1		1			4	3
2016	9	4	2	6	1	2	24	18
2017	6	2	2	2		2	14	30
2018	3	1	5	4	4		17	9
2019	3	2	3	14	2	5	29	8
2020	8	7	1	7		3	26	6
2021	8	10	14	15	2	2	51	7
2022	7	11	16	8	6	4	52	5

a. 漏洩事例（外部漏洩、内部漏洩）発生の傾向と推移

2015 年から 2022 年までの外部漏洩と内部漏洩の発生件数の推移を図 4 に示す。

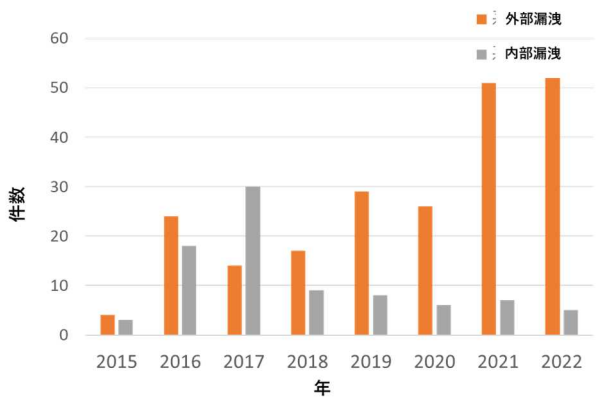


図 4　漏洩発生件数の推移

外部漏洩件数は 2017 年以降増加傾向にあるが、近年は微増で増加傾向は収束しつつあるように見える。

水素ステーションは年々増加しており、2022 年では 164 箇所となっている。１ステーション当たりの漏洩発生件数の推移を図 5 に示す。外部漏洩の ST 当たりの発生頻度は、2017 年以降年間 0.2～0.3 回程度へ若干増加傾向であったが、2022 年は 0.3 回程度で発生頻度は定常状態になっている。

水素ステーション数の増加、FCV の増加にともない国内総充填回数の大きく伸びている。2016 年～2022 年の国内充填回数と外部漏洩件数及び充填回数当たりの外部漏洩件数の推移を図 6 に示した。国内総充填回数は年々増加し、2022 年には、2021 年より大幅に増加し約 18 万回/年となった。2017 年以降、外部漏洩は充填回数 1000 回当たり年間 0.３回前後の発生頻度で推移しており、2022 年は若干低下傾向に転じている。充填回数が増えても漏洩発生は大きく増えていない。

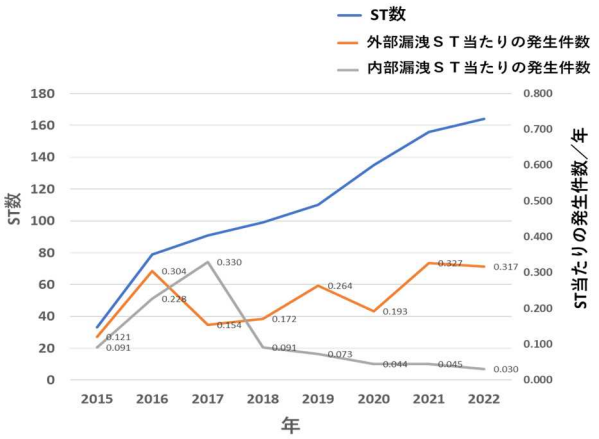


図 5　　1 ST 当たりの漏洩事例発生率



図 6　　充填回数と漏洩事例発生

b.　漏洩発生設備、漏洩発生部位（シール部）の傾向と推移

2015 年～2022 年における外部漏洩発生設備の推移と発生シール部位についてまとめた結果を図 7、図 8 に示す。

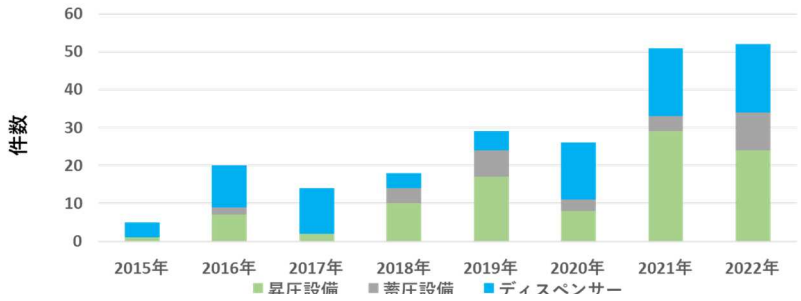


図 7　　外部漏洩発生設備の推移

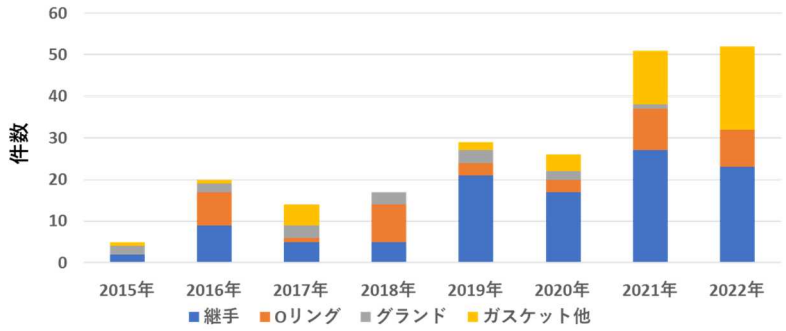


図 8　外部漏洩発生部位の推移

昇圧設備の漏洩は継手と 0 リング、ガスケットその他シールからが多い。蓄圧設備の漏洩は減少傾向である。ディスペンサーの漏洩は継手、0 リングからが多く、発生件数は増加傾向にあり、ノズル／ホースの継手、緊急離脱カプラー／ホースの継手（充填時の可動部分）の漏洩が増加している。

設備により漏洩発生部位は偏りがあり、振動が大きい昇圧設備では継手の緩みによる漏洩が想定されるが、近年は圧縮機シリンダーヘッドの 0 リング、ダイアフラムガスケットの損傷が目立つ。2021、2022 年は昇圧設備、ディスペンサーの漏洩事例比率が大きく、ST の稼働率が上がり、動的な部分の劣化が進んだ可能性も示唆される。

③目標達成度

SDB からの漏洩事例情報を整理し、漏洩発生の傾向や水素ステーションの普及や経年に伴う設備、シール部位の発生状況変化を整理、解析できた。（〇）

今後の課題　：　現行の SDB から水素漏洩データでは、漏洩の発生状況や発生場所の詳細が不明なものが多く、漏洩防止対策や高耐久性機器の開発に活用できる漏洩事例情報の獲得可能な漏洩情報整理の仕組みが必要である。

（２）サブテーマ２：部材・機器の用途別評価条件の選定、試験方法の検討

セーフティーデータベースの解析知見の整理の結果や、水素ステーション使用済みシール部材の評価の結果を基に、バルブメーカー（キッツ、フジキン）、ディスペンサーメーカー（タツノ、トキコ）共同で、商用ステーションの継手、シール、バルブの使用条件を考慮した用途別評価条件を決定し、本項の継手・シールの基盤・改良開発の前提試験条件を検討した。

加速耐久性評価法確立までの流れを図 1 に示す。

①Oリング、グランドパッキン

本研究開発事業の目的は、「シール部材の耐久性を水素ステーションにおける充填回数 30,000 回相当とする」であるが、30,000 回相当の充填回数を評価試験で実施することは、評価機関・事業期間の観点から考えると現実的に難しい。そこで、30,000 回相当の充填回数を加速評価試験として実施できるよう、シール部材毎に劣化要因を使用済シール材から分析し、加速耐久性評価法を確立した。

水素ステーション使用済シール部材の評価を行い、商用ステーションのシール、バルブの使用条件を考慮した用途別評価条件(加速耐久性評価条件)を決定し、改良シール材開発の前提試験条件とした。

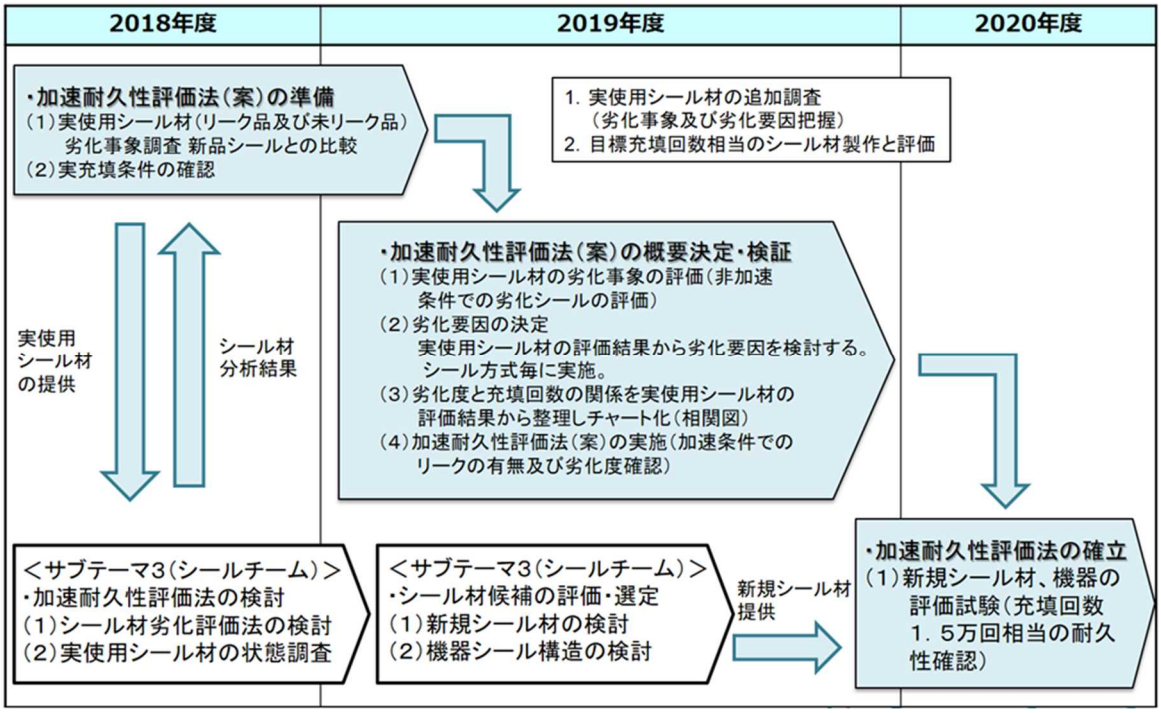


図 1　加速耐久性評価法確立までの流れ

a．商用ステーションのバルブ不具合内容等の把握

・商用ステーションでの使用済シール材(0 リング)の分析

メンテナンス等で回収した使用済シール材 193 点のデータを整理した。外部漏洩が発生しているのは底プラグ 0 リングシール部であった。図 2 に底プラグ構造を示す。

外部漏洩が発生した 0 リングを分析した結果、0 リングの諸元値・物性値は未使用品から大きく変化していなかった。

一方、バックアップリング側への 0 リングはみ出しは全数に確認された。0 リングの部分欠損が漏洩の原因となっている可能性があると考えられる。(化学的変化ではなく物理的変化のみが確認された)

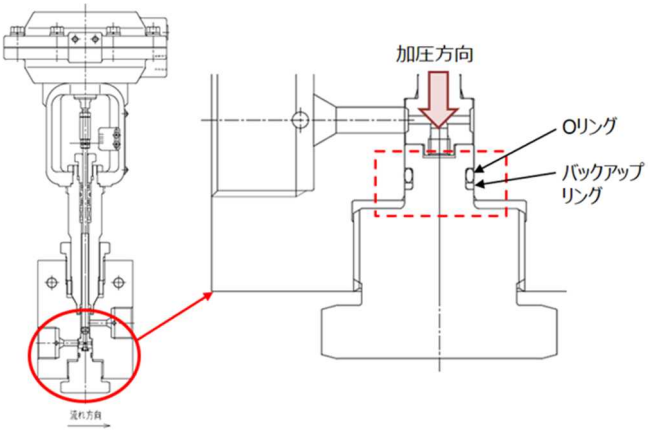


図 2　底プラグ構造　0 リングシール部

よって、底プラグ部 0 リングの劣化度として 0 リングのはみ出し量に着目し、充填回数との関係性を調査することとした。

・HySUT 山梨水素技術センター(以下、HTC)　使用済シール材分析

グランドパッキンは商用水素ステーションで外部漏洩が発生しているサンプルが無かった為、調査する時点で充填回数履歴が多かった HTC ディスペンサーで使用していた遮断弁からグランドパッキンを回収し、シール材を分析した。図 3 にグランドパッキン構造を示す。

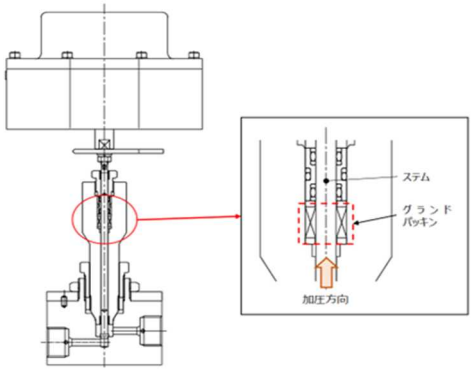
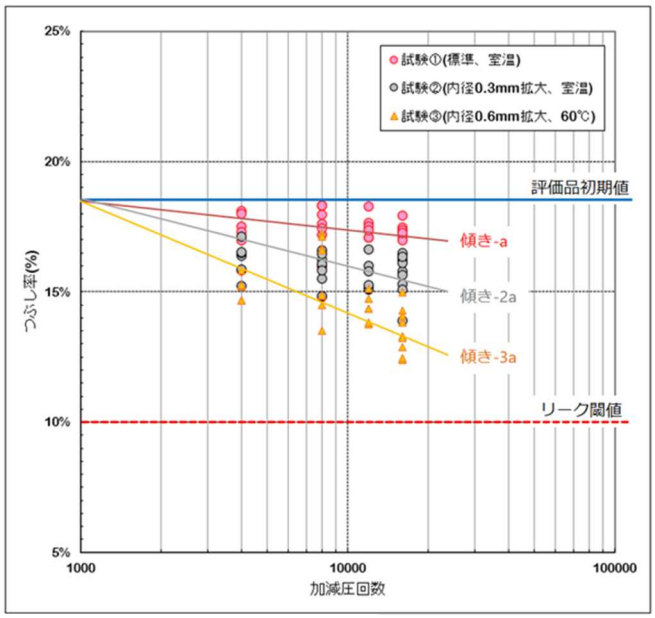


図 3　グランドパッキン　シール部構造底プラグ構造　0 リングシール部

HTC から回収したグランドパッキンを分析した結果、グランドパッキンの諸元値・物性値は未使用品から大きく変化していなかった。
一方、線径・内径の寸法変化が確認された。弁の繰り返し開閉により、ステムと接触する内径側が摩耗し、漏洩に繋がる可能性がある。(化学的変化ではなく物理的変化のみが確認された)
よって、本グランドパッキンの劣化度として、グランドパッキンの変形・摩耗に着目し、充填回数との関係性を調査することとした。

b．加速耐久性評価法の検討
・底プラグ部 0 リング
底プラグ部 0 リングの劣化度として、0 リングのはみ出し量を設定した。0 リングはみ出し量と充填回数との関係性を調査し、加速耐久性評価法の検討を実施した。
0 リングのはみ出し量を定量化する為、0 リングが意図的にはみ出しやすくなるようバックアップリング内径寸法を変化させ、圧力サイクル試験を実施した。バックアップリング側内径を変化させることで、0 リングの消失面積・はみ出し面積が相関性を以って変化していくことが確認できた。
0 リングの外部シール力を得る為には、一定の 0 リング潰し量が必要であるが、0 リングがバックアップリング等隙間にはみ出すことによって潰し量に変化が生じ、外部シール力低下に繋がることが予測される。はみ出しによる 0 リング消失面積から、はみ出し後の潰し率に換算し、グラフ化した。
0 リング潰し率変化のグラフに、評価品初期値の潰し率 18.5%を切片とした近似線を追加したグラフを図 4 に示す。
試験①のグラフの傾きを-a とした場合、試験②、試験③はそれぞれおよそ-2a、-3a となる。バックアップリング内径寸法と 0 リングはみ出し量に相関性が見られることから、本条件を 0 リングの加速耐久性評価条件として設定した。験①のグラフの傾きを-a とした場合、試験②、試験③はそれぞれおよそ-2a、-3a となる。バックアップリング内径寸法と 0 リングはみ出し量に相関性が見られることから、本条件を 0 リングの加速耐久性評価条件として設定した。



No.	試験温度	バックアップリング	加速倍率※1
試験①	室温	標準	1
試験②	室温	内径0.3mm拡大	2
試験③	60℃	内径0.6mm拡大	3

図 4　0 リング加速耐久性評価条件

・グランドパッキン
グランドパッキンの劣化度として、グランドパッキンの変形・摩耗量を設定した。グランドパッキンの変形・摩耗量と充填回数との関係性を調査し、加速耐久性評価法の検討を実施した。
意図的にグランドパッキンとステムとの接触量を低減させるグランドパッキンを製作し、グランドパッキン内径の変化と外部漏洩の発生有無を調査した。
図 5 に拡径程度と漏洩の関係の一例を示す。外部漏洩が発生する時のグランドパッキン内径が約 5.6mm 程度に拡がる(グランドパッキンの内径変化)ことが外部漏洩に繋がる可能性があることを確認した。

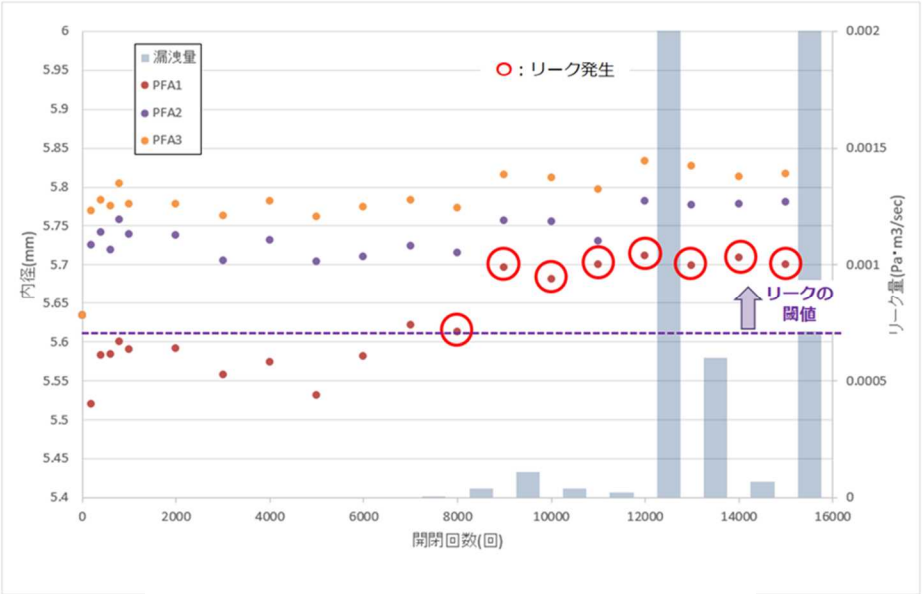


図 5 グランドパッキン内径変化推移

・加速耐久性評価条件の決定

ステム表面粗さと外部漏洩発生時の開閉回数のグラフ(累乗近似線)から、漏洩発生までの開閉回数の比率を設定。標準設計条件 Ra0. 4 を 1 とした場合、表 1 の様にグランドパッキンの加速耐久性評価条件を設定した。

表 1　グランドパッキンの加速耐久性評価条件

No.	表面粗さ狙い値	開閉回数 (リーク発生時の平均)	加速倍率※1
1	Ra0.4	16,700 回	1
2	Ra1	6,000 回	2.8
3	Ra2	4,300 回	3.9
4	Ra4	3,300 回	5.1

※1 累乗近似線の近似式から算出

②U リング、O リング(P9：固定軸シール)

ディスペンサーにおいてはキッツ製の遮断弁は採用実績が無く、実機からの回収が出来ないことと、データが無いため、HySUT 山梨水素技術センターのディスペンサーにキッツ製の遮断弁を組込み、約 100 回の繰返し充填試験を実施し、試験品シールを回収した。更に水素ステーションの蓄圧器バルブユニットに組み込まれている遮断弁のシールを回収した。

・対象シール部

[U リング（摺動軸シール）]

・開閉作動、圧力変動及び温度の変化に対して外部封止が必要な箇所である

・最も漏洩しやすいと考えられるシールである。

[O リング(P9：固定軸シール)]

・ディスペンサーのプレクーラーで冷却された水素ガスの流路に接している。

・圧力変動と温度変化の影響を受けるシールである。

ａ．漏洩確認と要因の検討

水素ステーション使用済み回収品及び実機試験ではシール部からの漏洩は無かったため、漏洩を加速させるために可能な限りサイクル数を増やし、強制漏洩させ、充填回数とシールの変化における相関図を作成するため、漏洩に起因する劣化への作用の特定及び漏洩の充填回数を確認することとした。しかし、充填模擬試験、圧力サイクル試験、連続作動試験の全てで水素ガスの外部漏洩は無かった。また、圧力サイクル試験の規定回数毎の内部漏洩も無かった。

・U リングの摩耗調査と分析

作動を伴った試験項目品(充填模擬試験と連続作動試験)及び水素ステーション使用済み U リングのジャケット部の肉厚を X 線 CT で測定した。肉厚変化結果を図 6 に示す。

連続作動試験品では内周及び外周共に変化はなかった。特に、摺動部である内周側には摩耗による変化はないことを示している。更に表面粗度の測定もしたが、変化はなかった。また、充填模擬試験品及び水素ステーションからの回収品においては内周側のみ肉厚が微小ではあるものの、若干厚くなっていることから、圧力振幅が掛かる状態では内周側に圧力負荷の影響を受けていることが分かった。また、充填模擬試験品と回収シールが同じ変化を示していることから、温度による U リングのジャケットへの影響は無いと考えられる。

更に圧力振幅が 2,000 回で肉厚の変化が飽和状態であることが分かったことから、2,000 回以上の圧力サイクルを掛ければ、肉厚変化を加味した検証が可能であると考えた。

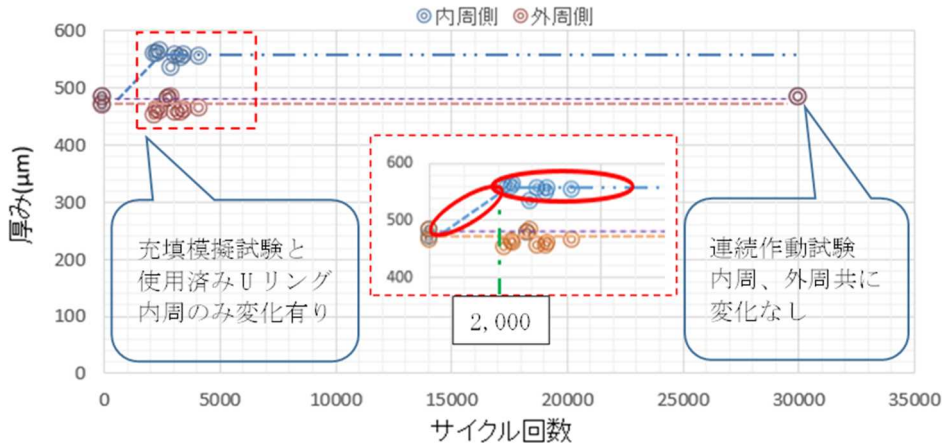


図 6 U リング-ジャケットの肉厚変化

b．加速耐久性評価法の検討と検証

・強制劣化品シールの製作

［U リング］

圧力振幅による作用から、潰し疲労による強制劣化としたかったが、ジャケットとスプリングからなる複合シールであり、潰しを行うとジャケット内のスプリングも潰してしまうため断念した。拡径治具で強制的に内径を 2.5%～3.5%を目標に拡大させることとした。

[O リング]

樽状ロッド治具で拡径させた。樽状ロッドにて拡径率 2.5～4%を目標として製作したが、拡径率が大きすぎると、O リングに破壊が起こってしまった。破壊が起こらない強制劣化の拡径限界は 2.0%未満であったが、微小な表面摩耗とヒダを許容し、2.5%付近までの強制劣化品も製作した。

・検証試験結果

[U リング]

圧力サイクル試験で連続的な漏洩を確認することができた。一方で連続作動試験では連続した漏洩は無かった。拡径と漏洩件数の関係を図 7 に示す。

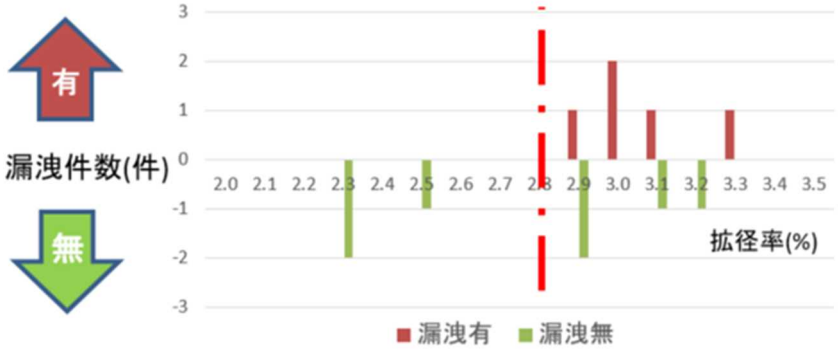


図 7 拡径率と漏洩件数の関係

[O リング]

圧力サイクル試験による内部漏洩は無かった。

Ｕリングについては、拡径による劣化手法は非常に有効であることが証明された。また、圧力サイクル試験で漏洩が確認できたことから、想定した試験方法が検証試験で正しいことが分かり、更には拡径での強制劣化による漏洩の閾値が 2.5～3%付近にあることも分かった。連続作動試験では強制劣化品でも連続的な漏洩が発生しなかったことから、開閉作動による影響は無いと判断できるため、現行品の評価で連続作動試験は不要であると判断した。

Ｏリングについては、限界まで拡径したが漏洩させることは出来ず、漏洩の確認は困難であり、Ｏリング(サイズ P9)を評価不可能と判断した。

但し、これまでの試験結果による評価やシールチームの知見を基に、Ｏリング(P22)を使用した新設計(図 1.3.2.13 参照)のバルブとし、サブテーマ 5 のシール開発に基づく機器開発と同時に、加速耐久性評価法の策定を実施することとした。

ｃ．Ｕリング加速耐久性評価法の策定

・強制劣化手法の妥当性確認

拡径率が何回の充填相当回数(圧力サイクル回数)にあたるのかを検証するため、新品のＵリングで 15, 000 回、30, 000 回の圧力サイクル試験(各 n=2)を実施し、漏洩するサイクル数の確認と試験後の内径の寸法変化を調査した。

表 2 に 15, 000 回と 30, 000 回の試験結果を示す。

表 2　圧力サイクル試験結果(15, 000 回、30, 000 回)

	サイクル数	連続漏洩及び発生回数
供試体No.1(1)	15,000回	無し
供試体No.1(2)	15,000回　(No.1のUリング交換)	有り　約14,500回　(110ppm)
供試体No.2	30,000回	有り　約15,500回　(100ppm)
供試体No.3	30,000回	有り　約11,000回　(130ppm)

漏洩したサイクル回数の結果を仮想相関図に重ね、図 8 に示した。拡径率の目標値に近いところから漏洩が確認できた。

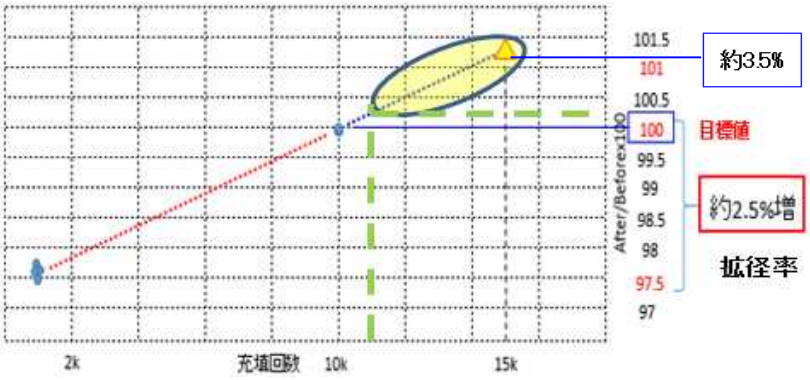


図 8　拡径による漏洩と充填回数

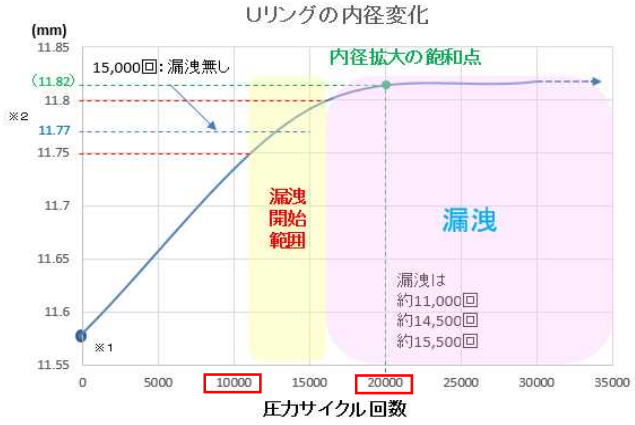


図 9　Ｕリングの相関図

Ｕリングの内径と圧力サイクル回数の相関図を図 9 に示す。

相関図から圧力サイクル回数によるＵリングの状態と漏洩過程が分かった。

・0～約 10, 000 回は比例状態であることから弾性変形領域であることを示す。

・約 10, 000～20, 000 回は対数曲線であることから疲労を示す。(漏洩開始)

・約 20, 000 で内径が飽和し、疲労限度を示す。

・Uリング加速耐久性評価策定のまとめ

1) Uリングは圧力振幅により内径の拡大が起きていることが分かった。

2) Uリングの大きな劣化要因は圧力振幅であることが分かり、試験方法を圧力サイクル試験に絞ることが出来た。

3) 充填回数(圧力振幅回数)とUリングの劣化における相関図を作成することが出来た。

4) 拡径による強制劣化手法を策定できた。

上記より、Uリングの加速耐久性評価法は内径の拡大による強制劣化手法による加速耐久性評価法で、試験期間及び費用を大きく圧縮することが出来る。

d．0リング(P22)の加速耐久性評価法の策定

これまでの0リング(P9)と同様に、圧力振幅による物理的変化の影響が大きいという見解から、強制劣化手法を平面シールに置き換え、0リングに掛かる圧力は繰り返し潰しによる疲労を与えることとした。

・強制劣化手法の妥当性確認

0リング(P9)の試験方法を参考とし、圧力振幅の回数分を繰り返し疲労に当てはめた。漏洩させる目的で限界の潰し率138%で繰り返し回数1万回(10k)と1.5万回(1.5k)の強制劣化品を製作した。

強制劣化品に漏洩(50ppm以上、200ppm未満)を発生させることが出来た。138%-15kは約1,000回程度で漏洩が発生した。

・相関図の作成

外径変化率に注目し、Normal品の圧力サイクル回数と外径の寸法変化をプロットし、図10の相関図を作成した。138%-15kの外径平均値が26.73mmであった。その時の圧力サイクル回数が約15,000回を示すことから、潰し回数とほぼ合致している。また、約20,000回付近で外径は飽和している結果となった。

Normal品は30,000回まで継続的な漏洩は発生しなかった。また、強制劣化品138%-15kも約1,000回の圧力サイクル数で漏洩しており、138%-10kも微漏れを漏洩前兆と捉えれば、こちらもグラフと合致することから、潰し疲労による強制劣化手法は有効であることが分かった。

一方で、0リングの30,000のサイクル試験時は継続的な漏洩が発生していないことを考慮すると、強制劣化手法が限界の潰しであったことから、過剰であった可能性もある。潰し率を調整し、漏洩の閾値と変化率を確認することで、精度の高い加速耐久性評価法を策定することが出来る。

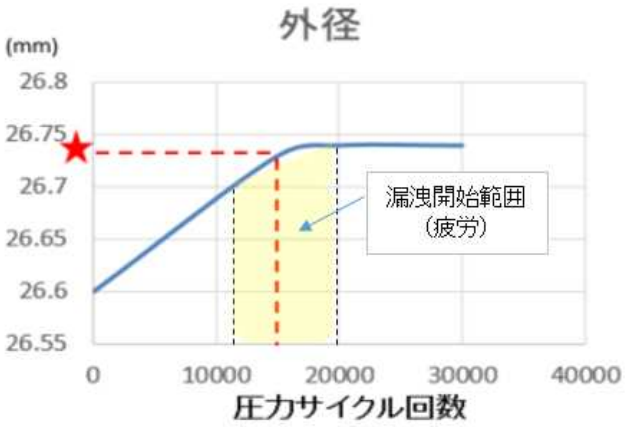


図10 外径変化と圧力サイクル数

③目標達成度

バルブの使用済シール部材（固定用0リング・運動用グランドパッキン）を回収し、分析した結果、シール部材の劣化要因は主に物理的な変化であることが確認された。（○）

0リングはバックアップリング内径寸法拡大によるはみ出し量を、グランドパッキンはステム表面粗さ変更による内径摩耗を劣化度と定義し、各シール部材の加速耐久性評価法を確立した。（○）

（３）サブテーマ３：シール基盤・改良開発

シール部材、シール部材用材料の基盤研究として、①高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化特性データベースの構築、②高圧水素シール部材加速耐久性試験法の開発、③水素ステーション使用済みシール部材の評価、について実施した。これらの研究開発により、現状のシール部材、シールシステムの現状を把握し、各種シール部材用モデル材料の高圧水素環境下における挙動の把握、高圧水素環境下における劣化特性、破壊特性、シール部材を用いたシールシステムの漏洩のメカニズムを明らかにした。これらの知見に基づいて、シール部材、シールシステムの加速耐久性評価法案を策定した。

上記の基盤研究の成果を踏まえ、(4)改良開発として、基盤研究により得られた知見、加速耐久性評価法を活用し、シール部材メーカーにて長寿命シール部材、シールシステムを開発した。

①高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化特性データベースの構築

ａ．高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化特性データベース

長寿命シール部材開発の基礎データを取得することを目的とした基盤研究として実施した。これまでにＮＥＤＯ事業「水素利用技術研究開発事業」において、「日本ゴム協会水素機器用エラストマー材料研究分科会」と連携して作成し、シール部材メーカーや材料メーカー、シール部材ユーザーなどステークホルダーへの情報共有を進めてきた。「水素機器用高分子材料水素特性データベース」に収載するデータは、高圧水素機器に用いられるゴム、樹脂材料の設計、選定のための基礎的なデータとなる。産業界からの要望に基づき高圧水素用0リングのモデル配合ゴム材料データ、樹脂材料として高圧水素に直接曝露される0リングによるシールシステムに使用されるバックアップリング材、ガスケット等の樹脂シール部材、高圧水素ホース内層樹脂材、タイプ４タンクライナー材、圧縮機ピストンリングなどの水素特性評価、トライボロジー評価を進め、本プロジェクトにおける開発項目（2）、（3）、（4）に活用するとともに、高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化特性データベースとしてデータを拡充した。ゴム材料について、標準材180点／38種，実用材70点／14種について計測し、データベースに既に収載されている標準材950点／90種に追加した。樹脂材料については800点／75種について計測し、既存データの標準材350点／56種に追加してデータベースに収載した。拡充したデータベースは「日本ゴム協会水素機器用エラストマー材料研究分科会」を通じて、ステークホルダーへの情報共有を実施した。

ｂ．ピストンリング部材の評価

レシプロ式圧縮機において、シリンダ内にガスを封止して圧縮するためのピストンリング材の長寿命化と、ピストンリング材からの分解ガスによる水素ガスの品質低下の抑制に資するデータの蓄積を目的とし、ピストンリング材の摩擦・摩耗特性、しゅう動にともない発生する分解ガスの同定と定量を行った。加えて、高圧水素曝露試験を通し、前述の各種特性に対する高圧水素曝露の影響、高圧水素曝露による水素侵入量、熱安定性への影響、内部微小欠陥への影響を評価した。

レシプロ式圧縮機のメーカー2社から提供された、ピストンリング材5種（A、B、C、D、E）を評価対象とした。このうち、B、C、D、Eは硫黄とベンゼンの化合物であるポリフェニレンサルファイド（PPS）を充てん材として含んでおり、A材はPPSを含まない硫黄フリー材である。

高純度水素ガス雰囲気においてしゅう動するピストンリング材の摩擦・摩耗特性を評価すると同時に、ピストンリング材から発生す

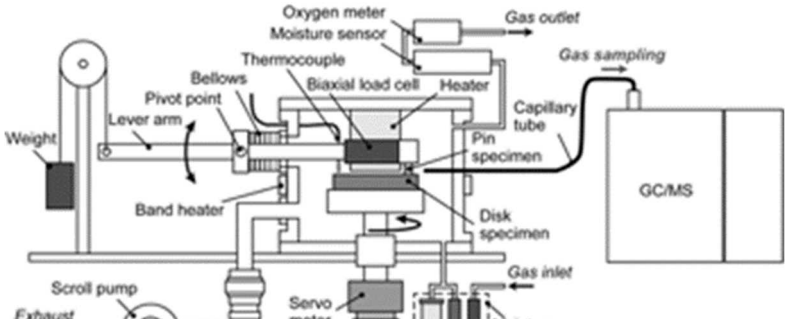
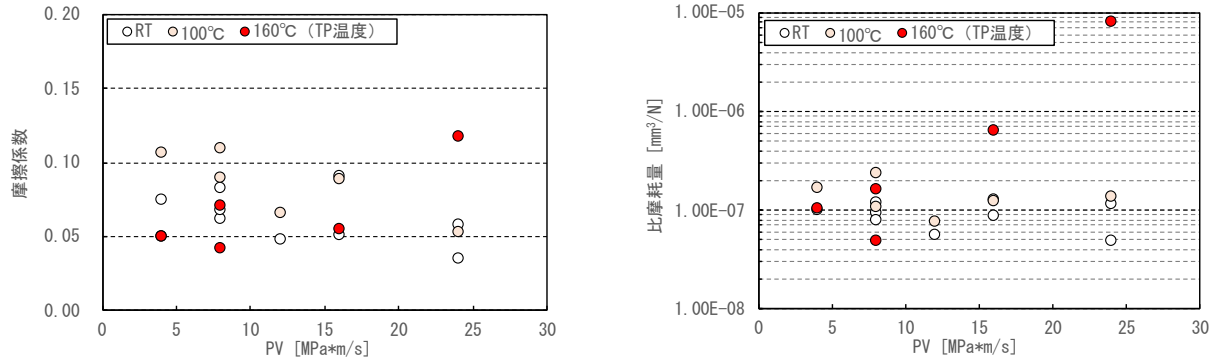


図１　しゅう動試験 in-situ ガス分析システム概要

る分解ガスを同定・定量するため、高度雰囲気制御摩擦試験機の環境チャンバとガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS）を発生ガス誘導管により連結し、しゅう動試験中の雰囲気ガスをその場分析することが可能な、しゅう動試験in-situガス分析システムを構築した。システムの概要を図1示す。

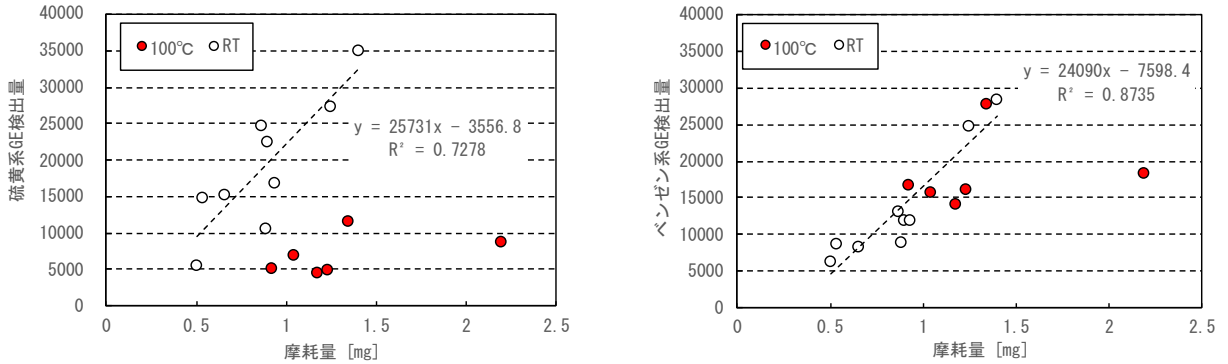


(a) 摩擦係数　　(b)比摩耗量

図 2　摩擦・摩耗特性に対する温度の影響

ピストンリング材Cについて、接触面圧P（MPa）と滑り速度V（m/s）の積であるPV値と摩擦係数および比摩耗量の関係を図2に示す。一般的なPTFEのガラス転移温度である115℃を超える160℃に設定した場合、PV値の上昇とともに比摩耗量が急激に増加するシビア摩耗遷移が生じた。このことから、高温条件下では耐摩耗性が著しく劣化し、PV値を低く抑えなければならないことが確認された。

上記の試験において、GC/MSによりピストンリング材のベースレジンであるPTFEの分解成分に加え、充てん材であるPPSに由来する複数の分解ガス成分が検出された。硫黄を含む成分を硫黄系分解ガス、ベンゼン由来の成分をベンゼン系分解ガスとし、それぞれの検出量総和とピストンリング材の摩耗量の関係を図3に示す。特に室温条件下では、硫黄系、ベンゼン系ともに、検出量とピストンリング材の摩耗量の間に高い正の相関が確認された。そのため、これらの分解成分は、水素雰囲気でのピストンリング材の摩耗に伴い、充てんされたPPSが水素とのトライボケミカル反応を通して分解され、形成、放出されたと考えられる。



(a) 硫黄系分解ガス　　(b)ベンゼン系分解ガス

図 3　PPS 由来の分解ガス成分の検出量とピストンリング材摩耗量の関係

ピストンリング材A、B、C、D、Eについて、高温条件下での摩擦・摩耗特性への影響を検討した。高圧水素曝露前後での重量変化を図4に示す。AおよびBは高圧水素ガスに曝露することにより、重量の減少が認められた。特に100℃の高温高圧水素ガスに曝露した場合のAの重量変化が顕著

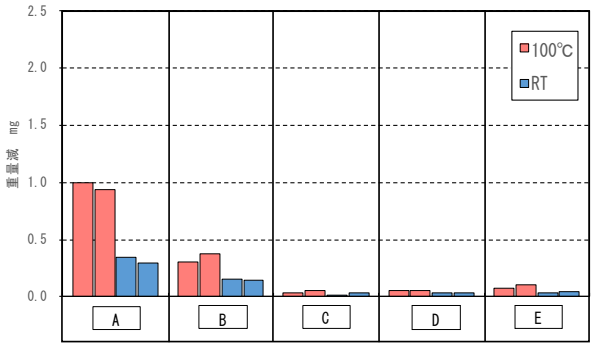


図４　高圧水素ガス曝露による重量減少

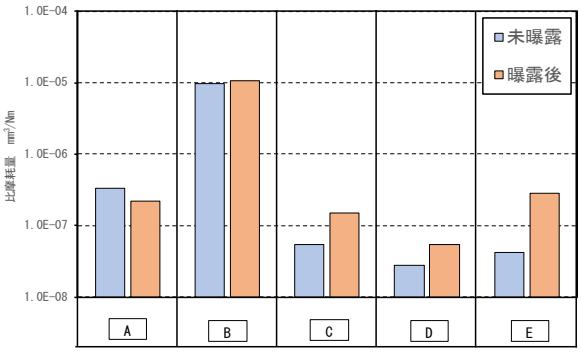


図５　耐摩耗性に対する高圧水素ガス曝露の影響

であり、これはAの吸湿性が高く、乾燥による影響が顕著に表れたためと考えられる。図5に、高温高圧水素への曝露の有無による比摩耗量の相違を示す。Aおよび比摩耗量が高いBでは影響が見られないものの、C、D、Eでは高温高圧水素に曝露することにより、比摩耗量が増加する傾向が示され、特にEにおいてその傾向が顕著であった。

②高圧水素シール部材加速耐久性試験法の開発

実ステーションにおける水素機器の耐久回数予測制度向上のため、実ステーション使用時の故障モードを想定し、各種の劣化要因を考慮した評価を実施することによりそれぞれの寄与率を明確化し、さらにその重畳効果を明らかにすることで、実ステーションでの使用に伴う各種劣化要因に関する試験法の確立・加速耐久性試験法を検討した。

図６に加速耐久性試験法の開発を進めるにあたって検討したシール寿命の要因に関する検討結果を示す。シール単体による寿命評価について、シール寿命に影響を与える因子について検討し、加速因子として選定した。図６に示した通り、加速因子としてシール部材の表面摩耗、機械的疲労、ヒートサイクル、熱劣化（熱による酸化）、発泡（ブリスタ）の５因子について検討を進めることとした。

基本的な考え方として、選定した因子ごとに0リング単体に対して加速的に実機で発生しうる負荷を加えることで劣化を模擬した0リングを作製し、高圧水素シール性を確認することで、想定される加速因子による劣化模擬0リングの寿命を検証することとした．また、劣化模擬0リングについて、表面粗さ、寸法のなど外形寸法、形状の変化、硬度、弾性率などの物性の変化、化学構造の変化などを計測、調査し、シール性能に及ぼす因子を明確化するとともに、実機の劣化状況との比較を実施した。

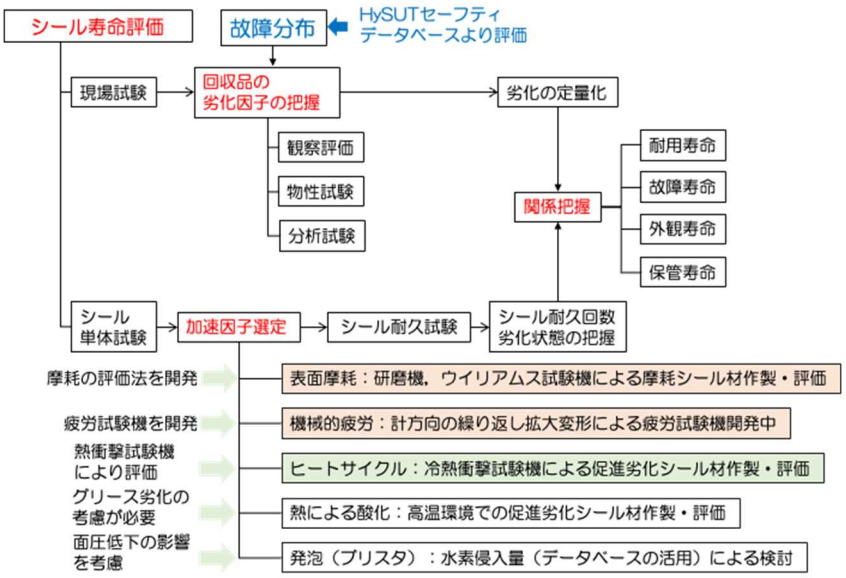


図６　シール寿命要因図

ａ．表面摩耗

0リングシールを用いた水素機器に加減圧を行うことにより、0リングは高圧側の圧力により0リング溝内での変形が発生する。このことから、0リングは0リング溝内で加圧に伴い低圧側に押し付けられることが想定され、0リング変形の際、0リング溝の金属部材の表面との摺動が発生する。この際の摺動を模擬して発生する0リング表面の摩耗を模擬した劣化模擬0リングを作製した。0リングのシール構造として平面シールと軸シールの２種があることから、ウイリアムス試験機，研磨機を用いて0リングの

円周上面を摩耗させる方法と、シリンジ構造の摩耗試験機を開発し、ピストン内面の表面粗さを規定し、ピストンに装着した0リングを摺動させることで軸シールを模擬した0リング円周外面の摩耗させる手法を用いて検討した。開発した表面摩耗劣化模擬0リング作製方法を図７に示す。実機における劣化と表面摩耗試験による劣化模擬状況の相関については、0リングを装着したバルブ等の水素ステーション機器の充填時の作動状況として水素ステーション１充填に際しての作動回数、1回の作動時の摺動距離を考慮して、目的とする水素ステーションにおける充填回数に対応した摺動距離を設定し、劣化模擬0リングを作製することが可能である。

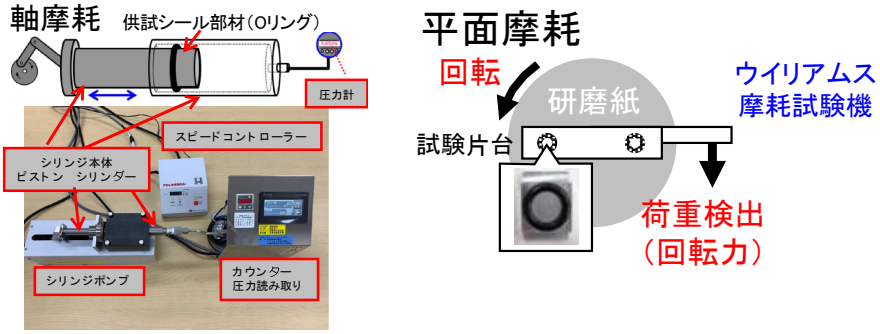


図７　表面摩耗劣化模擬0リング作製方法

ｂ．ヒートサイクル

水素ステーションでは環境温度で保持されているシール部材に-40℃のプレクール水素が流通する際の熱衝撃により劣化が加速することが懸念される。このことを検証するため、冷熱衝撃試験機を用いて0リング単体を65℃に設定した高温槽と-40℃，-60℃に設定した低温槽間を繰り返し移動させることで熱衝撃を繰り返し負荷するヒートサイクル試験を実施した。水素ステーションにおいて1充填につき1回の熱衝撃が付加されると考え、30,000回までのヒートサイクルを実施し，劣化模擬0リングを作製した。

ｃ．機械的疲労（拡径）

0リングシールを用いた水素機器に加減圧を行うことにより、0リングは高圧側の圧力により0リング溝内での変形が発生する。このことから、0リングには加減圧時に0リング溝内で加圧に伴い低圧側に押し出される変形が発生すると想定される。平面シール構造の際に想定される変形は加減圧に伴い拡径･縮径を繰り返すことが考えられ、変形に伴う疲労が懸念される。この状況を模擬して、0リング径の拡径･縮径を繰り返す疲労試験機を開発した。開発した疲労試験機を図８に示す。縮径時の0リング内径を想定したロッドに拡径時の内径を想定した樽状の大径部を持ったロッドを繰り返し0リング内径部に挿入、移動させることで拡径・縮径の疲労試験を実施した。水素ステーション実機の充填時の加減圧回数に相当する疲労回数を設定し、目的とする充填回数の劣化状況を模擬した模擬劣化0リングを作製した。

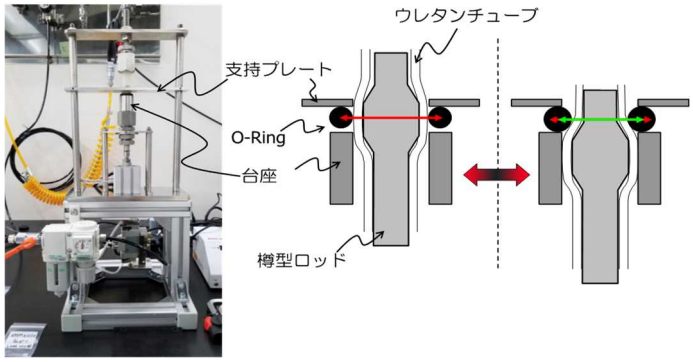


図８　０リング拡径疲労装置

ｄ．グリース浸漬

0リングの酸化劣化等の劣化試験については既に一般的な0リングの規格であるJIS　B2401-1に規定されている。高圧水素シール用については、シールすべき流体が酸素を含まない水素で

あり、還元性雰囲気で使用されることから、熱劣化、酸化劣化については既存の規格に適合する部材を使用することで問題ないと考えている。使用済みシール部材の調査においても問題となるような酸化劣化は確認されていない。しかしながら、使用済みシール部材の調査の過程で、機器に使用されるグリースの影響でシール部材の劣化が進行することが懸念された。このため、高圧容器中にグリースを充填し、供試0リングをグリース中に浸漬し、想定されるガス圧力までグリースを加圧した状態で所定の温度で一定時間保持して劣化状況を模擬した劣化模擬0リング・シール部材を作成した。

［加速因子影響まとめ］

上記の４種の劣化因子について、モデル0リングを用いて各因子による劣化模擬0リングを作製し、0リングの劣化、摩耗、変形とシール特性の相関を把握した。それぞれの加速因子により摩耗・劣化させた劣化模擬0リングを試験用高圧水素ガス容器に装着し、水素ガスにより水素ステーションにおける上限と考えられる90 MPaまで加圧し、シールの可否、リークの有無を確認し、シールが担保された場合には水素透過曲線を取得した。透過曲線から0リングの水素透過量を評価し、さらに10回～50回の加減圧を繰り返したのちに同様に透過量を評価することでシール性能の変化を確認した。透過量の変動から0リングのシール性低下，破壊に伴う漏洩を検出する評価法を確立した。

表1に評価した加速因子が高圧水素シール性に与える影響についてまとめて示す.
表1に示した通り、高圧水素機器の使用に伴い、高圧水素シール部材である0リングへの負荷を想定したヒートサイクル、0リング溝内での0リング移動による摩耗、0リングの拡径疲労について評価した結果、ヒートサイクルについては高圧水素シール性に対する顕著な影響がなく、摩耗、拡径疲労が主な因子であることが判明した。

表 1 加速因子まとめ

試験法	劣化試験機・劣化条件	評価項目	評価結果
ヒートサイクル	冷熱衝撃試験機 -40℃⇔＋65℃，-60℃⇔＋65℃ 0，15，150，1,500，15,000，30,000回	ヒートサイクル回数が大きい劣化Oリングはシール時の**水素透過量小さくなる.**	**定圧透過量：不変** **サイクル透過量：減少** 架橋密度上昇による硬度上昇に伴う面圧の増加によりシール性向上
平面摩耗	ウィリアムス試験機/研磨機 研磨紙：#240，#400，#1000 摩耗体積：0.4%，0.8%，1.2%	ウイリアムス試験後の劣化Oリングは最大表面粗さでリーク. 研磨機摩耗劣化Oリングは**表面粗さと水素透過量が相関.**	**定圧透過量：増加** **サイクル透過量：不変** 加減圧時のOリング摺動による表面摩耗によるリークパス形成，シール性低下
軸摩耗	ピストン型摩耗試験機 Rz：300、Rz6.3、Rz3.2、Rz1.6 摩擦距離50cm，500cm，5000cm	表面粗さが小さいシリンダーによる摩耗が顕著．劣化Oリングは表面粗さと水素透過量の相関が見られない.	
機械疲労(拡径)	Oリング拡径疲労試験機 100，1,000，10,000，100,000回	拡径疲労によりOリング内径が拡大．**水素透過量は疲労回数の増加により増大.**	**可塑剤配合ゴム** **定圧透過量：増加** **サイクル透過量：減少** 可塑剤ブリードによる硬度上昇に伴う変形抑制によりシール性低下 **可塑剤未配合ゴム** **定圧透過量：不変** **サイクル透過量：減少** 架橋密度低下による硬度低下に伴う変形拡大によりシール性向上

［加速耐久性評価法案］

上述の結果を踏まえ、0リングの摩耗および拡径疲労による高圧水素シール機能への影響を想定し、高圧水素機器の高圧水素シール部材として使用される0リングの加速耐久性評価法案を下記手順①～④の通り策定した。

手順①

水素ステーションにおいて使用される高圧水素機器について、水素充填に伴い発生する圧力変動を確認する。

手順②

当該高圧水素機器における0リングシールシステム、すなわち0リングおよび0リング溝の設計および手順①で確認した圧力変動から１回の水素充填に伴う0リングへの負荷を算出し、0リング拡径疲労装置における拡径率、拡径疲労回数、0リングシリンジ式軸摩耗装置およびウイリアムス式摩耗試験機における摩耗距離、摺動回数を設定する。

手順③

所定の条件において、目標とする充填回数、例えば15,000回相当、30,000回相当の拡径疲労を0リング拡径疲労装置、摩耗試験を0リングシリンジ式軸摩耗装置またはウイリアムス式摩耗試験機にて実施し、所定の充填回数使用相当の劣化0リングを調整する。

手順④

劣化0リングを高圧水素機器に装着し、当該機器の所要の試験条件において高圧水素シール性を確認する。所定の高圧水素シール性が確認された場合、設定した充填回数相当の耐久性を確認できたと判定する。所定の高圧水素シール性が確認できなかった場合、設定した充填回数以下で漏洩等の事象が発生すると判定される。

③水素ステーション使用済みシール部材の評価

現状の実水素ステーションにおけるシール部材の劣化状況を把握するため、また、得られた知見を基に加速耐久性評価法を確立するため、構造や充填回数などの使用履歴の異なるバルブから表x-xのシール部材を回収し、シール部材の物理的及び化学的劣化を評価した。

回収したシール部材からは変形や欠損などの物理的なダメージが複数認められた。

回収したシール部材の化学的劣化状況の解析のため、FT-IR測定を実施した。その結果の一例を図９に示す。回収品と新品の表面のIRスペクトルには有意差が認められず、酸化劣化などの化学的劣化は認められなかった。そのほかのシール部材でも同様に回収品には酸化劣化などの化学的劣化は認められなかった。

以上の結果より、今回、回収した水素ステーション使用済みシール部材からは化学的劣化は認められず、変形や摩耗などの物理的劣化が劣化の主体であることが明らかになった。

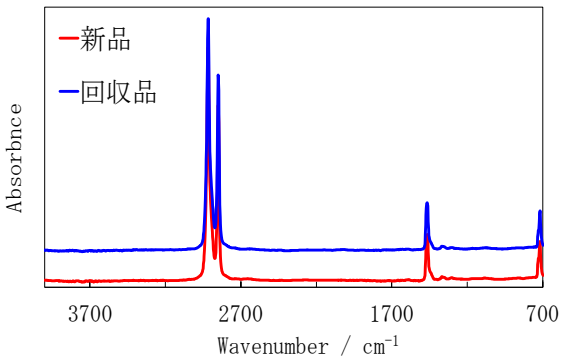


図９ 新品と回収品の IR スペクトル（一例）

④改良開発

基盤研究により得られた知見、加速耐久性評価法を活用し、シール部材メーカーにて長寿命シール部材、シールシステムの開発を実施した。

ａ．NOK株式会社

漏れ要因について、水素膨潤による体積増加や，摩耗によるシール面粗さの増加および摩耗粉のシール面噛み込みが考えられた。溝設計および潤滑剤等の併用条件による破壊現象防止効果を確認し、評価結果を表２にまとめて示す。この表は、本検討において設定した条件下における実験結果であり、保証値ではない。本結果を参考に用途を考慮し、事前に耐久評価を行うなどした上で、適切な選定が必要である。

表　2　評価結果まとめ

条件	一般的推奨値	高圧水素環境下	備考
圧縮率	8～30%で設定されることが推奨される。	35%程度まで高圧縮化することで、シール性向上だけでなく、しゅう動抵抗増加により摩耗抑制される場合がある。	過剰な高圧縮化は圧縮割れ、低圧縮化はシール性を損なう可能性がある。
充填率	シール部材や溝寸法の公差を考慮した上で、中央値75%狙い、最大90%以下で設定されることが推奨される。	中央値 75～85%程度の充填率にすることで、しゅう動距離減少により、摩耗抑制される場合がある。	過剰な高充填化では内外周すき間へのはみだし、低充填化は座屈が発生する可能性がある。
溝底角	シール部材の寸法により一律に設定されている。	圧縮後変形したシール部材形状に沿った寸法とすることで、しゅう動距離減少により、摩耗抑制効果が認められる。	シール部材ごとの圧縮時の形状変化の把握や溝のカスタムが必要であり、コストと汎用性の低さが課題である。
グリース	取り付け作業性向上目的で使用される。ゴム材料との相性を考慮した選定が必要である。	シール面すき間を埋めることにより、シール性維持の場合がある。しゅう動時の摩擦力低減が見込める。	しゅう動抵抗が減少するため、圧縮率および充填率による影響を考慮する必要がある。高親和性のグリースを用いた場合、膨潤による強度低下で破損が発生する可能性がある。
溝すき間	流体圧力、ゴム硬度によって適切な設定が必要である。	0.01mm程度まで縮小しても、過剰な高充填でははみだしが発生する場合がある。可能な限り 0 とすることが望ましい。	バックアップリングと併用することも推奨される。

b．高石工業株式会社

0リング溝の表面粗さと漏洩の関係性を評価した。-40℃の高圧水素ガスをシールする場合、リング溝の表面粗さはRz1.6S以下が好ましいことが判明した。

次に円筒シール構造で一般的に使用されているバックアップリングと0リングのはみ出しの関係性について評価を実施した。圧力サイクル、温度-40℃の条件にて5,000回サイクル試験を実施した。試験後の0リング外観を図１０に示す。

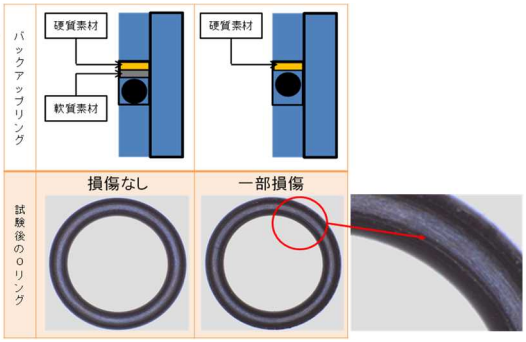


図 10　-40℃×5,000 回 サイクル試験後の 0 リング外観

バックアップリングを硬質素材単体、硬質素材と軟質素材を組み合わせたもので比較した結果、硬質素材と軟質素材を組み合わせることではみ出しによる0リングの損傷を抑えられることが判明した。

これらの結果より、高圧水素ガスのシールには、0リング溝の表面粗さはRz1.6S以下かつ、バックアップリングは硬質素材と軟質素材を組み合わせることが長寿命化に有効な手段であり、上述の手法は15,000回充填相当のシール寿命を担保しうるシールシステムであると言える。

30,000回充填相当の長寿命シール部材の開発として、現行材料の引裂き強度向上および耐摩

耗性の改良に取り組んだ。引裂き強度の向上は30,000回充填相当の圧力サイクル、耐摩耗性の改良は圧力サイクルによる溝内での微小摺動による摩耗の抑制を目的とした。それぞれ改良した結果を図１１、図１２に示す。

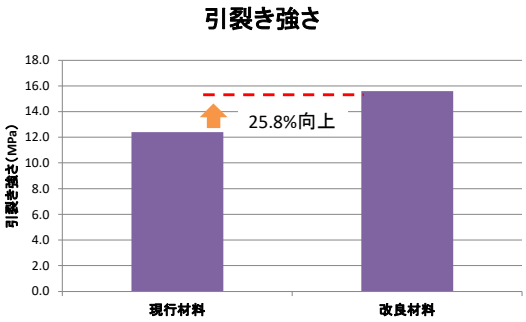


図 11　引裂き強度の改良

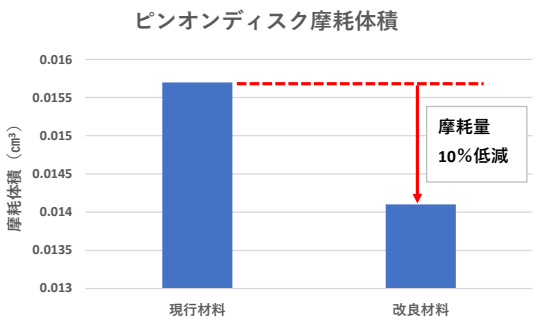


図 12　耐摩耗性の改良

改良効果の検証として、図1.4.34に示す条件で耐久試験を実施した結果、引裂き強度を改良した材料において、30,000回のサイクルを達成することができた。

以上の結果より、現行品の引裂き強度を改良した材料は、-40℃の高圧水素ガスのシールにおいて、前述のシールシステムと組み合わせることで30,000回充填相当のシール寿命を担保しうることが確認できた。

ｃ．日本ピラー工業株式会社

バルブステム用シールの候補材として、水素透過特性を評価した。水素透過に特段優れた材料は見当たらなかったが、入手性なども考慮して5種（POM：1種、UHMWPE：4種）に絞り込んだ。

当該シールは、90°回転往復動ステム（ボールバルブ：キッツ様）や往復動ステム（ニードルバルブ：フジキン様）用のシールとして使用する事から、長期使用においては耐摩耗性が必要な為、絞り込んだ5種の摩擦摩耗評価を行った結果、低い摩擦係数であり、かつ摩耗量が少ないベスタールG（POM）を主シール材としてシール設計を行う事で、長期使用に耐え得るシールシステムの確立が可能と判断した。

ボールバルブ用シールとして設計したD形状ゴムリング（耐水素ゴム材）を内包したPOM製シールリング（1次シール）とPOM製Vパッキン（2次シール）のシールユニット（図13）にて、30,000回相当の充填に耐え得るシール構造がほぼ確立できた。

ニードルバルブ用シールとして設計したシール構造の形状（図14）にて、POMの優れた耐摩耗性とVパッキンのシール性を発揮し、30,000回相当の充填に耐え得るシール構造が確立できた。

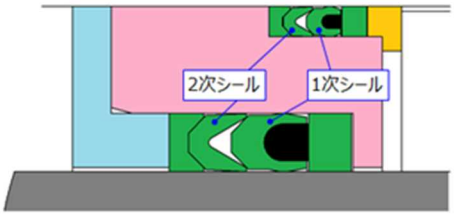


図 13　改良ボールバルブシール構造

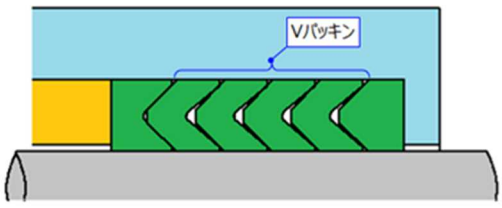


図 14　改良ニードルバルブシール構造

⑤目標達成度

シール部材、シール部材用材料の基盤研究として、高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化特性データベースの構築、高圧水素シール部材加速耐久性試験法の開発、水素ステーション使用済みシール部材の評価について実施した。

水素ステーション使用済み回収品を分析し、現状のシール部材、シールシステムの現状を把握し、各種シール部材用モデル材料の高圧水素環境下における挙動の把握、高圧水素環境下におけ

る劣化特性、破壊特性、シール部材を用いたシールシステムの漏洩のメカニズムについて検討した。(○)
　各種劣化因子について評価した結果、ヒートサイクルについては高圧水素シール性に対する顕著な影響がなく、摩耗、拡径疲労が主な因子であることが判明した。これらの知見に基づいて、シール部材、シールシステムの加速耐久性評価法案を策定した。(○)
　水素ガス圧縮機のピストンリング等のしゅう動シール材料について、水素ガス中でのしゅう動により発生するガス成分の分析のため、摩擦試験 in-situ ガス分析システムを開発した．これを用い、各種圧縮機用ピストンリング材の摩擦・摩耗特性、分解ガス発生を評価するとともに、それらに対する高圧水素曝露の影響を明らかにした。(○)
　基盤研究の成果を踏まえ、シール部材メーカーにおいて長寿命シール部材、シールシステムの開発を実施した。
溝設計およびグリース適用による摩耗の抑制を検討した結果、0 リング装着時にグリースを使用した場合、使用しない場合ともに 0 リング溝のつぶし率を 35%とすることでつぶし率 10%時に比べ摩耗を抑制できること、溝内周すき間の縮小が内周側はみだし抑制に有効であることが判明した。つぶし率 35%におおいて、充填率 75、85%とすることで屈曲座屈破損を抑制できることも判明した。(○)
　ゴム材料の引裂き強度を向上による 0 リング損傷抑制を目的として新たなゴム配合を開発した。開発材の耐久性評価を行い、高圧水素の圧力サイクル試験、加速劣化試験により水素ステーションにおける 30,000 回充填相当の耐久性を確認した。これによりサブテーマ⑤のバルブメーカーと評価用バルブに適用する 0 リングを設計し加速劣化評価を実施した。(○)
　ボールバルブ、ニードルバルブ用シール部材を開発した。水素透過特性、摩擦特性の観点から、シール部材用材料としてポリオキシメチレン（POM）材を選択した。ボールバルブ用シール部材として 0 リングまたは D リングを内包した POM 製 U リング＋V パッキンを開発した。これにより水素ステーションにおける 30,000 回充填相当の耐久性を確認した。(○)
　ニードルバルブ用シール部材としてオール POM 製 V パッキンを開発した。これにより水素ステーションにおける 30,000 回充填相当の耐久性を確認した。(○)

（４）サブテーマ 4：継手基盤・機器開発
　高圧水素ガス漏洩事故の発生部位として最も多い機械継手（コーン＆スレッド継手）の漏洩機構の解明と漏洩リスク低減を目的として、コーン＆スレッド継手の緩みが、配管組み付け時の初期歪みと、温度変化や振動などによる外力の作用との複数因子によって生じると考え、緩みと漏洩の試験評価法を開発して試験を行うとともに、FEM による数値解析を行って緩みと漏洩の機構解明を行った。その結果にもとづいて機械継手の漏洩リスク低減のための継手の改良を検討するとともに、設計・施工・保守管理の指針を提案した。

①継手要素評価試験
　コーン＆スレッド継手の緩みと漏えいを評価するための試験装置として、継手要素評価試験装置と超高圧継手要素評価試験装置を開発した。
Ａ．継手要素評価試験装置
　継手と管の締結、継手に締結した管への外力負荷、継手シール部での力の作用、及び継手の緩みを捉えるために、電気油圧サーボ負荷機構（島津製作所、サーボパルサ EHF-U）と多軸センサ（HBK 社、６分力計 MCS10）を用いた装置を開発した（図 1)。
Ｂ．超高圧継手要素評価試験装置
　継手と管の締結時と継手に静的荷重が作用している時の、高圧水素ガス（90MPa）の漏えいを検出し、そのときの継手シール部での力の作用を６分力計で計測する装置を開発した（図 2)。

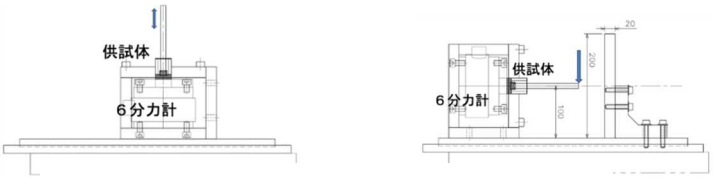


図 1　継手要素評価試験装置

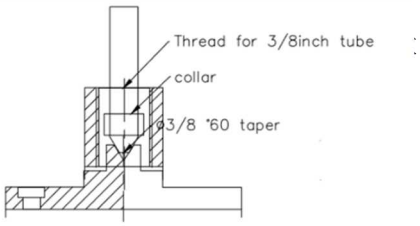


図２　超高圧継手要素試験装置

継手要素評価試験装置を用いて、継手の締結試験、軸方向負荷試験、軸方向の繰返し負荷試験（温度サイクルを模擬）、曲げの繰返し負荷試験、及びそれらに軸方向ないし横方向のミスアラインメントを与えた試験を行った（表 1）。

超高圧継手要素評価試験装置では、締結試験、締め付け状態から管に軸方向引張力をステップ状に増加させる引張漏洩試験、ガス圧を増減させる内圧サイクル試験、などを行った（表 2）。

表１　継手要素試験装置による試験

初期ミスアラインメント（取付誤差）	なし	軸方向	横方向
締結試験 繰返し締結試験			
軸力試験 軸力サイクル試験			
曲げサイクル試験			

表２　超高圧継手要素試験装置による試験

初期ミスアラインメント（取付誤差）	なし	軸方向	横方向
締結試験 繰返し締結試験			
引張漏洩試験			
内圧サイクル試験			

ａ．締結試験

図 3 に 3/8in 継手に管を締付けたときの六分力の変化を示す。締付けトルクは標準の 43Nm とした。軸方向が z であり、継手における軸方向力 Fz を赤色、z 軸まわりのモーメント Mz を緑で示している。図の試験では締め付けた後に一回緩め、その後再度締め付け、締結状態を維持した。図から、締め付けによって軸力 Fz だけでなく軸方向以外の力も発生していることがわかる。軸力 Fz は一定ではなくわずかに減少し、その減少は一様ではない。Fz の減少と同期してモーメント Mz や管に垂直方向の力 Fx，Fy なども変化している。以上から、管と継手には形状誤差や取り付け位置の誤差があり、締結後に安定な接触状態となるように、すなわちいわゆる座りがよくなるように、力の成分が変化すると考えられる。このように一旦低下した軸力を所定の値まで戻すために増し締めが行われている。　継手の各部へのグリース塗布の影響を調べた結果を図 4 に示

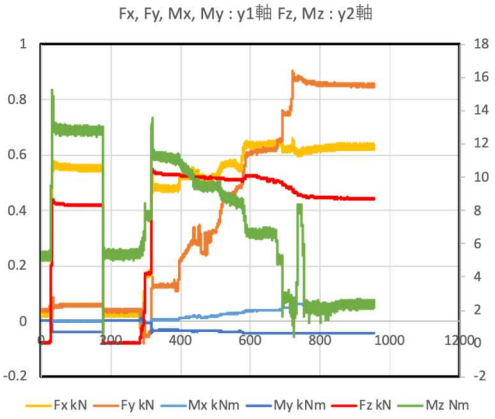


図３　供試体締め付け時の６分力の例

す。グリース塗布の有無により締付けトルクと軸力の関係が変わり、同じ締付けトルクに対する軸力の値は、グリースを塗布したときに比べて、塗布しないときに著しく低下することがわかる。

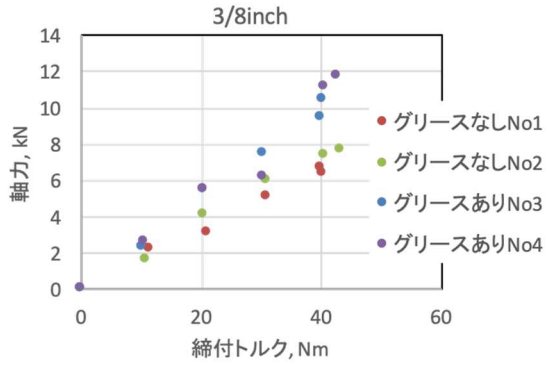


図４　グリース塗布の影響

次に、締め付け時にミスアラインメントを与えた場合の影響を調べた。図 5 に軸方向スアラインメントを与えながら締め付けたときの締付けトルクと軸力の関係を示す。ここでミスアラインメントとは、管を継手に締め付ける際に、管と継手のテーパ部が接触する位置から管を軸方向に所定の距離だけずらしてシール部に間隙がある状態にしてから締め付けたことを意味する。図からわかるとおりミスアラインメントが大きくなるほど、同じ締め付けトルクに対する発生軸力 Fz が低下することがわかる。すなわち、ミスアラインメントがある場合に所定の締付けトルクで締め付けた場合に、期待される軸力が得られない。

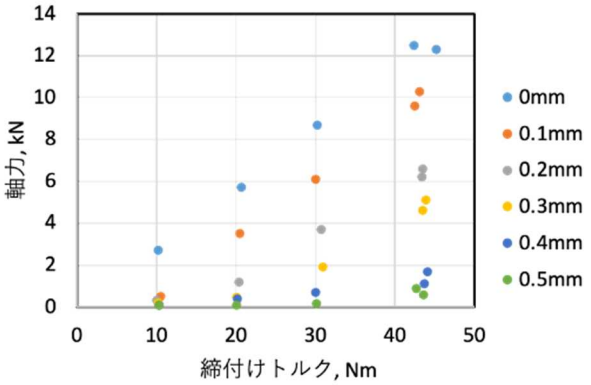
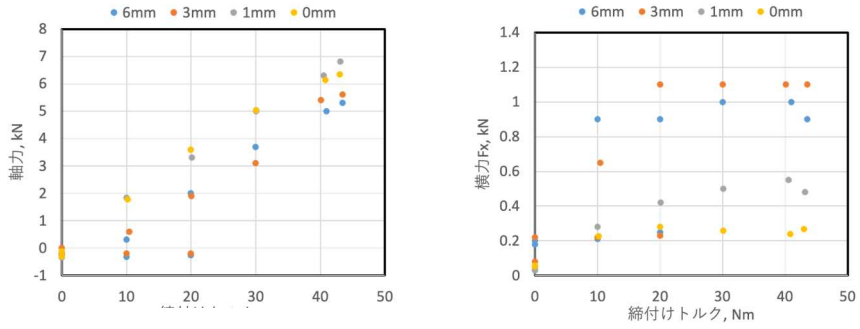


図５　軸方向ミスアラインメントの影響

次に横方向ミスアラインメントを与えた試験を示す。管を継手に挿入したあと継手を軸方向と垂直方向に所定の距離押した状態で、ナットを締め付けた。図 6 に締付けトルクに対する軸力 Fz と横力 Fx の変化を示す。横方向のずれが 3㎜, 6mm の場合に、締付けトルク 20Nm をかけても軸力が上昇せず、トルクが突然ゼロになった。その後さらにナットを締めるとトルクとともに軸力が上昇したが、最終的に締付けトルクは、ミスアラインメントがないときに比べて低い値にとどまった。芯がずれた状態で無理に締め付けると、継手シールに軸力だけでなく大きな横力が作用することを意味している。



メントの影響

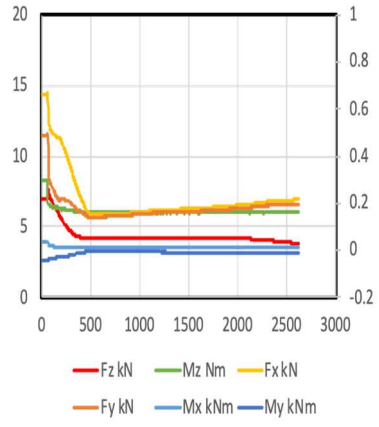


図７　引張圧縮サイクルでの六分力の例

ｂ．軸力サイクル試験

管に振動が加わる場合や、温度変化によって管が膨張収縮したときの継手への影響を調べた。

長さ 150mm の管試験片の他端に周波数 2Hz の繰り返し引張圧縮変位を与えたところ、振幅が小さいときは六分力の値はほとんど変化せず継手は緩まなかった。変位を±0.3mm としたときの六分力の変化を図 7 に示す。この条件で、500 サイクルまでに継手は締結力を失って緩んだ。

図 8 に変位 0～-0.2mm、0～-0.3mm の圧縮サイクル試験での六分力を示す。変位が 0～-0.2mm の場合には、軸力 Fz ほかの力に変化は認められなかったが、0～-0.3mm の場合には 500 サイクルまでに Fz が低下し、締結力が低下してナットが緩んだ。

サイクル試験結果を図 9 にまとめる。横軸にサイクル試験で与えたストローク ΔL を、縦軸には軸力によって発生する応力振幅 Δσ をとって、締結力を維持した試験を青丸で、締結力が低下した試験を赤色×印で示す。応力振幅は管長と変位から計算した単純ひずみに材料のヤング率を乗じたものである。

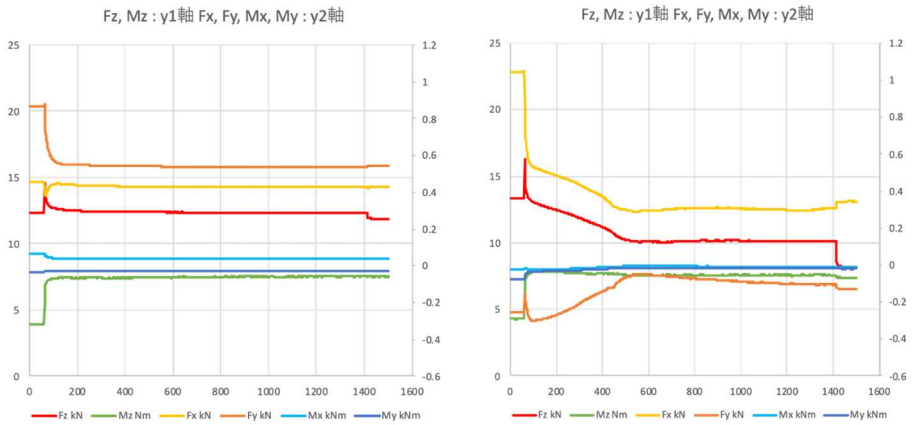


図 8　圧縮サイクル試験における六分力

熱変形を想定した場合、このひずみを生じる温度変化 ΔT は以下で表される。

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$$

ここで α は材料の線膨張係数（単位 deg^{-1}）である。熱ひずみ、したがって熱応力は配管長 L によらず温度変化に比例する。これらの関係から ΔL に相当する温度変化 ΔT を計算した結果を図 10 に示す。上記の ΔL=0.2～0.3mm は、温度変化が 100° 前後に相当することがわかる。

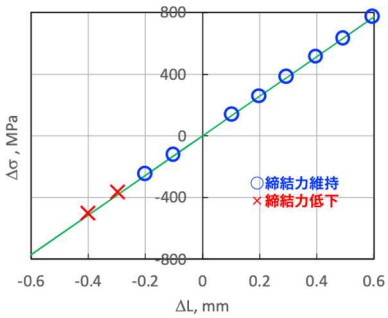


図 9　軸力サイクル試験のまとめ

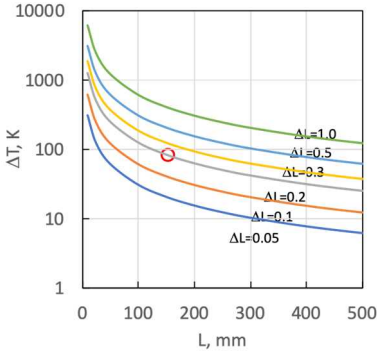


図 10 軸長と温度変化の関係

以上で圧縮力の繰り返し作用によって締結力が消失する応力とそれに相当する温度変化が得られた。しかし、高圧ガスの漏洩は継手が完全に緩まなくても起こっているはずである。そこで、継手の締結力消失に至らずに高圧ガスの微小漏洩を生じる、微小の軸力低下を生ずる条件を探索するため、最大 100 万サイクルまでの繰返し引張圧縮試験を実施した。軸方向変位の振幅は 0.2mm 以下とした。

本試験のミスアラインメントの範囲内で、圧縮サイクルによる締結力消失の条件は、ミスアラインメントの有無に影響されないことがわかった。

また、引張サイクルにおいてはミスアラインメントの有無にかかわらず締結力消失はみられなかった。

ｃ．曲げサイクル試験

配管の振動を想定して、繰り返し曲げ試験を行った。３つの異なる管長について、それぞれ管の中央に周波数 2Hz で軸垂直方向に繰り返し変位を与えた。管径 3/8in、9/16in の結果を図 11 にまとめる。横軸に管長の半分の値を、縦軸に曲げモーメントの値をとり、締結力の維持・消失を示す。

図から、3/8in では曲げモーメントが 36Nm 以上で、9/16in では 90Nm 以上で締結力が失われることがわかる。締結力が消失した場合の６分力のデータは、圧縮サイクル試験と同じように、軸力 Fz が徐々に低下し、他の成分もこれに伴って変化している。

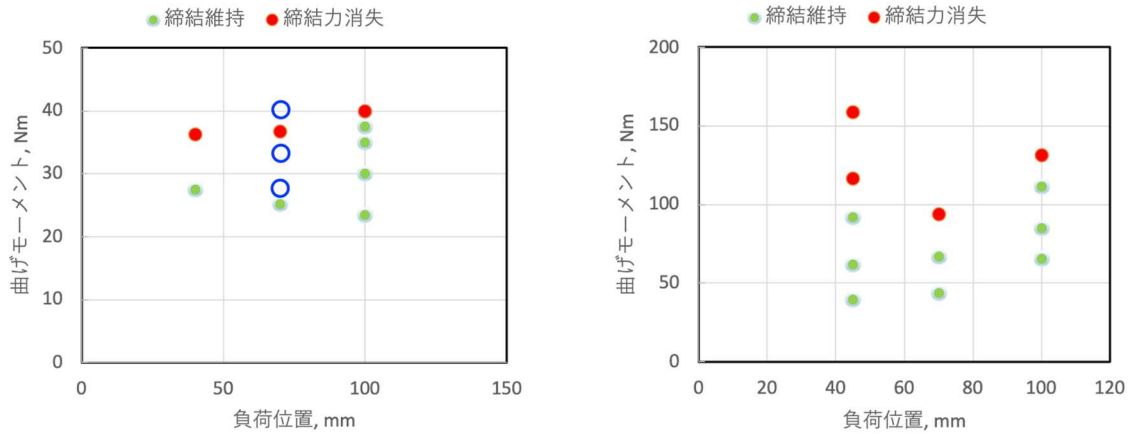


図 11　曲げサイクル試験のまとめ（左図 3/8in、右図 9/16in）

配管に軸方向ミスアラインメント、または横方向ミスアラインメントを与えながら繰り返し曲げモーメントを付与する試験を行ったが、実施した試験条件の範囲ではミスアライメントの締結力消失への影響は認められなかった。

前項と本項で、さまざまな条件を与えて試験を行ったが、圧縮サイクルや曲げサイクルによるシール部の微小の軸力低下の条件を見出すことはできなかった。取付状態のばらつきの影響や、今回想定しなかった負荷状態を考慮にいれて、試験方法を再検討する必要がある。

ｄ．高圧水素の漏えい試験

高圧水素継手要素評価試験装置を用いて、繰り返し締め付け試験、及び引張漏洩試験を行った。また配管先端の、及び管先端の曲率半径やテーパ角を変えた場合の、締付けトルク、締め付け時の軸力、ガス漏洩時の軸力を調べた。試験はいずれも室温で行った。

図 12 に 9/16in 配管の締付けトルクと初期軸力、緩めトルクの関係を示す。この測定では、軸力をモニターしながら図示したそれぞれの締付けトルクの値で締め付けたあとナットを緩めた。この一連の試験で、ナットを緩めた時点で高圧ガスが漏れたのは、締付けトルクが 10Nm の場合のみであった。すなわち締付けトルクが 20Nm 以上で初期軸力が数 kN 以上であれば、少し緩めてもガスは漏洩しない。ただし、これは締め付け後にガス圧以外の外力が働いていない状況でのことである。引張りや曲げなどの繰り返し負荷によって継手シール部の状態が変わり漏洩パスができやすくなる可能性について検討が必要である。

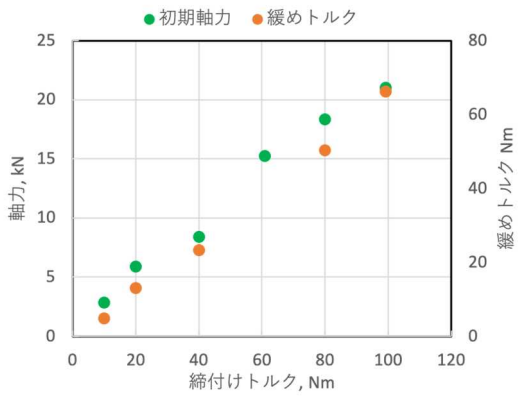
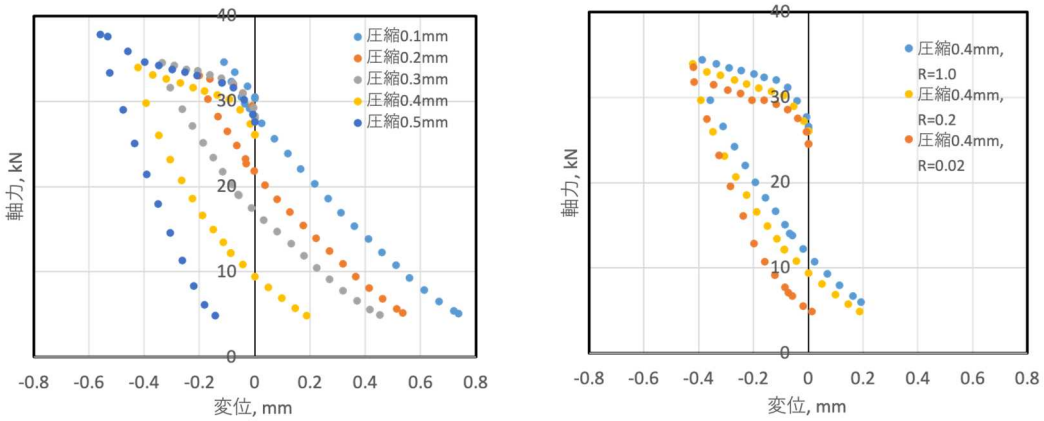


図 12　軸力とトルクの関係（9/16in）

引張漏洩試験で引張開始前に圧縮方向のミスアラインメントを与えた試験の結果を示

す。圧縮量は管他端の軸方向変位の値で表す。図 13(a)に、圧縮と引張の過程での軸力の変化を５つの初期変位 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm について示す。初期軸力は図中の変位 0 の値で、25～30kN であり、圧縮変位によって軸力が増加し、その後引張りによって軸力が低下する。継手締結後に何らかの原因で管が軸方向に圧縮された場合、変位量が大きいときには圧縮力を除荷するだけで漏洩が起こることを意味している。



（a）R=0. 2　　（b）管先端曲率半径 R の影響

図 13　圧縮方向のミスアラインメントを与えた引張試験

図 13(b)に、異なる先端半径 R について圧縮変位を 0.4mm の場合の結果を比較した。曲率半径 R が小さいものほど、圧縮時とその後の引張時の軸力が小さく、圧縮負荷によって漏洩し易くなることがわかる。

以上のとおり単に軸力を一回加えただけで漏洩するときの状態が変わることがわかった。曲げなどの繰り返し負荷によって継手シール部の状態がどう変わるのか、詳細な検討が必要である。

ｅ．内圧サイクル試験

配管への 90MPa 水素ガスの供給と排気を繰り返し行う、内圧サイクル試験を行った。配管内のガス圧を増減させると、軸力 Fz がわずかに低下することがわかり、テーパシール部の接触位置ないし姿勢が変化したことを示唆している。サイクル数が 10 程度の変化は軽微であることがわかったが、内圧増減のサイクル数を増やした場合の検討が必要である。

②継手の応力解析

ａ．継手シール部の接触

コーン＆スレッド継手では、テーパ形状をもったシール面と管先端を軸方向に押し付けることで高圧ガスの密封を維持している。FEM による計算を行う前に、ヘルツの弾性接触理論にもとづいて接触応力のオーダを見積もった。図 14 に示すように軸力 Fz のテーパ面に垂直な方向の分力 w（周方向の単位長さ当たり）による最大ヘルツ圧とヘルツ接触半幅を管径 9/16inch の場合について計算した。管先端の曲率半径 R = 0.02～1 mm、荷重 Fz = 5～25 kN の条件で計算を行った結果、最大ヘルツ圧はすべて 1 GPa 以上となり、継手材の弾性限界を大幅に超えていた。すなわち、シール部の接触面圧を正しく捉えるためには塑性変形を考慮にいれた弾塑性解析が必要であり、また塑性変形後の形状にもとづく接触解析が必要であることが確認できた。

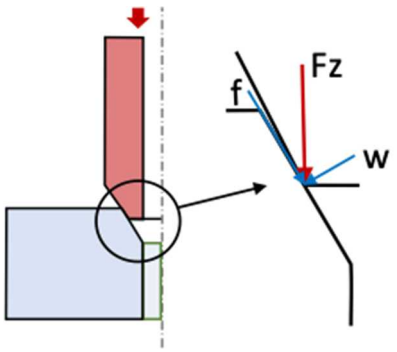


図 14　テーパ部の接触

ｂ．FEM 解析

有限要素法解析ソフトウエア ANSYS Academic Research Mechanical 2020R2 を用いて、コーン＆スレッド継手の弾塑性変形の有限要素シミュレーションのスキームを開発した。ハードウエア

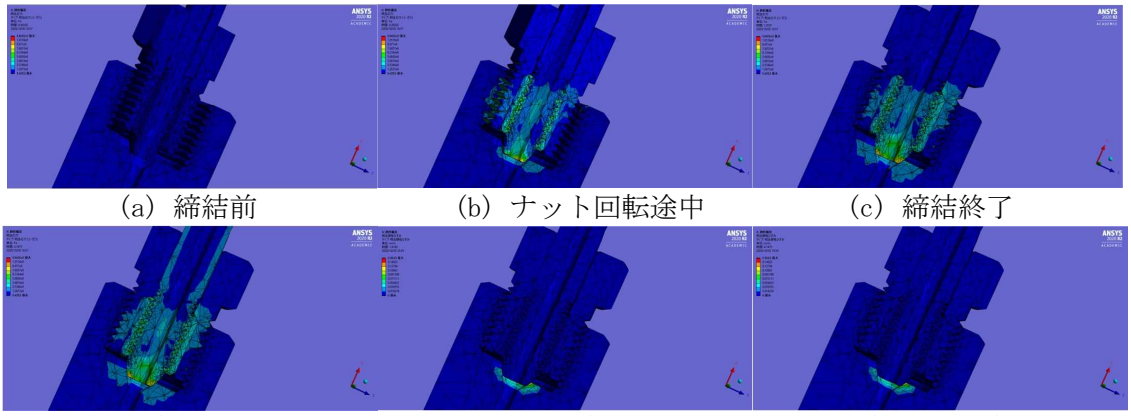
として Dell Precision 7920（CPU Intel® Xeon® Gold 6134 CPU@3.2GHz (8 コア)×2、メモリ 128GB）を用い、16 コア全て使用した並列計算を行った。ねじ部は規格に基づいて Space Claim（ANSYS 内に内蔵）でモデリングした。

・解析結果

「継手要素評価試験」で行った継手の締結と外力負荷の条件を模擬した弾塑性変形のシミュレーションを行った。繰り返し負荷・除荷を計算機上で実現することが技術的に困難であったため、締結と外力負荷がそれぞれ単一の場合のみを対象とした。以下の計算例で示すとおり、それぞれの過程での継手のシール部とねじ部の応力分布の変化と塑性変形の発生を確認することができた。

まず、継手を締結したあと曲げを加えた場合のシミュレーション結果を示す。管は 3/8inch 径である。締結では、ナットを時計回りに 60° 回転させた。そののちナットの強制回転変位を無効として、管の他端 150mm の位置に軸方向に垂直な方向に変位 2mm を付与して曲げを与えた。接触部の摩擦係数は 0.2 とした。図 15 に結果の一部について、ミーゼス等価応力と相当塑性ひずみの分布を示す。

第一に締結時の軸方向力によって継手のシール部とカラーに高い応力が生じ、ボディーのテーパ部に塑性変形が生じることがわかった。第二に、曲げモーメントによって継手シール部の応力分布は大きく変化しないことがわかった。

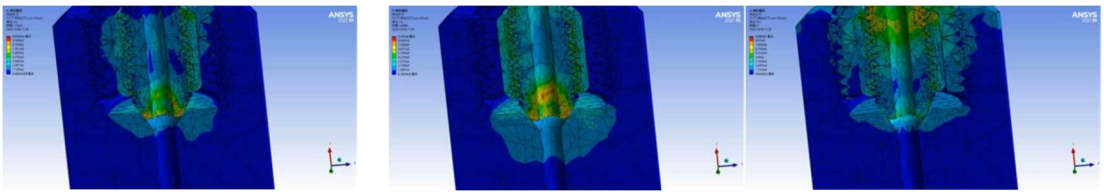


(a) 締結前　(b) ナット回転途中　(c) 締結終了

(d) 曲げ作用時　(e) 締結終了時の塑性ひずみ　(f) 曲げ作用時の塑性ひずみ

図 15　締結と曲げにおけるミーゼス応力の分布 (a-d) と相当塑性ひずみ (e, f)

締結後に管の他端 150mm の位置に±0.3mm の圧縮引張変位を加えた場合のシミュレーション結果を図 16 に示す。締結後に管を軸方向に圧縮変位させると発生した圧縮力はすべてシール部に伝わるため、接手テーパ部の応力が締結終了時からさらに上昇することがわかる。圧縮変位終了後、引張変位を作用させるとテーパ部での圧縮力が失われるとともに、ボディテーパの塑性変形域が回復しないためその部分の応力は低下するが、管とカラー間のねじ部端部の応力上昇が著しい。



(a) 締結終了　(b) 圧縮後　(c) 引張後

図 16　締結と圧縮引張におけるミーゼス応力の分布

図 17 に締結後の継手ボディの塑性ひずみ分布をテーマ部上方からみた図を示す。ーパ部の上の平面部からテーパ部の中程まで塑性変形していることがわかる。テーパ面の母線上の変位の方向と大きさを図 18 に示す。変位は半径方向に最も大きく、これは締結時の塑性変形によってテーパの形が半径方向に拡がっていることを示している。

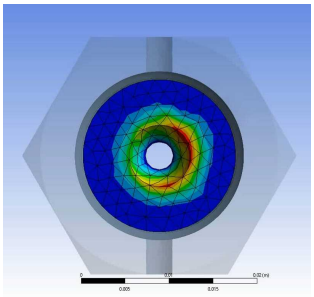


図 17　継手テーパ部の塑性ひずみ分布

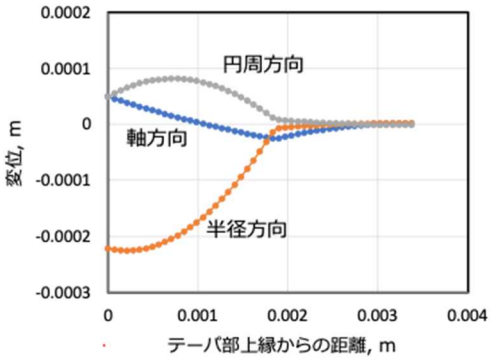


図 18　継手テーパ面の変位の分布

実際に近い条件での弾塑性応力解析により、継手要素評価試験の結果を裏付けることができるようになったが、繰り返し負荷、接触面の表面粗さ、形状や取り付けの誤差を考慮に入れた計算を行うためには、シミュレーション技術の高度化が必要である。

ここで開発した FEM 解析スキームは、ねじの緩み条件の検討に際して、コーン＆スレッド継手のねじ締結体としてのばね定数の算出においても有効に活用することができた。

③継手シール部の測定と解析

ａ．表面トポグラフィーの測定

9/16in 継手ボディのテーパ部と管先端部の表面トポグラフィーを、共焦点レーザ顕微鏡、レーザ 3D 形状測定機、デジタルマイクロスコープなどで観察した。

継手ボディのテーパ面をみた例を図 19、20 に示す。図 19 は締付けトルクが異なる場合である。締付けトルク 10Nm の場合は変形の痕跡はほとんどみられないが、締付けトルクが高いほど、テーパ面の塑性変形部の幅が大きいことがわかる。締付けトルクが高い場合、テーパ面の入口端部周辺（各写真の上部）にも塑性変形と思われる痕が認められる

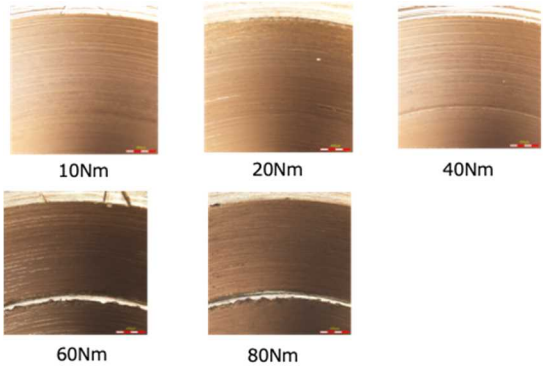


図 19　各締付けトルクでのボディテーパ部：
管先端 R=0.2㎜

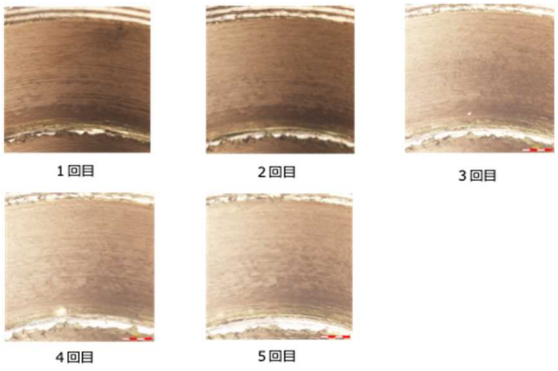


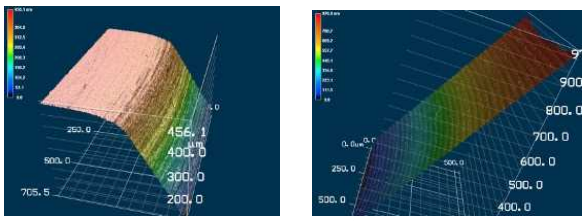
図 20　締め付け後のボディテーパ部：
管先端 R=0.02㎜

図 20 は締結を 5 回繰り返した場合で、繰り返すほどテーパ部中ほどの塑性変形部の幅が大きくなっていることがわかる。口端部まで広がる。また、以上の塑性変形は、管先端の曲率半径 R が小さいほど激しい。

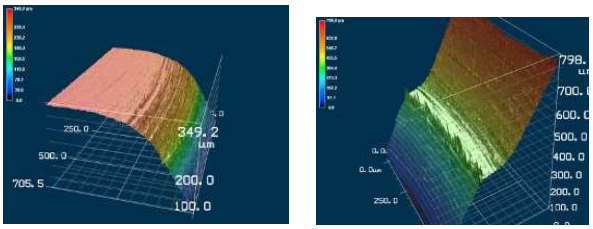
図 21 に、締め付け前後の管先端と継手ボディのテーパ部の共焦点レーザ顕微鏡データの 3D 表示を示す。管先端は締結前後で違いが明確ではないが、ボディのテーパ面は締結前には単純な円錐面であるが締結後には上述の局所的な塑性変形による段がはっきり捉えられている。

図 22 に、締め付け回数 2 回と 10 回の締め付け後の継手ボディのテーパ部の 3D 像を示す。明らかに、締め付けを繰り返すほど塑性変形部の幅が大きくなっている。

繰り返し外力を加えるとこの塑性変形域がさらに広がる。図 23 に圧縮サイクル試験における継手ボディのテーパ部の 3D 像を示す。締結後（図 21(b)）に比べて塑性変形による段部が広がったことがわかる。

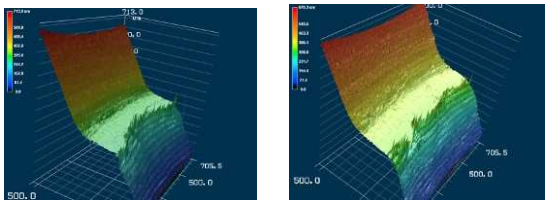


(a) 締結前



(b) 1 回締結後

図 21　締結前後の管先端（左）とボディテーパ部（右）の共焦点レーザ顕微鏡像



(a) 2 回締結後　　(b) 10 回締結後

図 22　締結後のボディテーパ部の共焦点レーザ顕微鏡像

曲げサイクルの場合にも塑性変形は進行するが、変形域の拡大とともに周方向の変形域の不均一性が大きくなる。

以上から、締結によって継手ボディのテーパ面のシール部は局所的に塑性変形して段が形成されるとともに、テーパ面のより広い範囲でも塑性変形が生じており、締め付けの繰り返しや外力負荷によりそれらの変形が進行することが明らかになった。またテーパ面の塑性変形の程度は配管先端 R によって変わることがわかった。

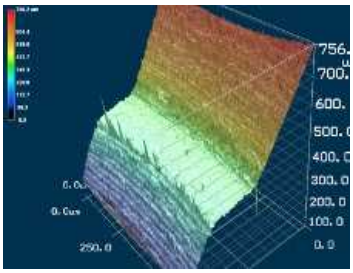


図 23　圧縮サイクルを受けたボディテーパ部の共焦点レーザ顕微鏡像：圧縮変位 0.4㎜、サイクル数 100

b．表面トポグラフィーの接触モデルの検討

ここでの接触モデルの目的は、継手テーパ部での接触において、二面間にガス漏洩の流路が形成される軸力を求めることである。そのためには、二面の接触状態を粗さレベルで捉える必要がある。表面粗さの特性と流路形成の関係を求める従来の静的シールの解析モデルでは、粗さをもつ平面対平面を想定し、表面粗さを統計モデルで表現して、流路形成と条件を求めている。最も一般的なものは表面形状のランダム性とマルチスケール性を考慮した、自己アフィンフラクタルの表面トポグラフィーによる解析である。

しかし、このような一般化された接触モデルはいずれも平面対平面を仮定しており、複雑に塑性変形して巨視的な平面が保たれないコーン＆スレッド継手のトポグラフィーに直ちに適用できないことが、前項までの試験と解析で明らかになった。適用するためには、両面の位置関係を考慮した高度な形状測定、ないしは局所的な塑性変形を捉えられるような FEM 解析を実施することが必要である。

④継手の緩み過程

コーン＆スレッド継手の緩みと漏洩について、新しい試験評価方法を開発して試験を行うとともに、試験片の表面観察と理論解析を行った結果、継手シール部の接触面圧低下の要因として締結時や外力作用によって生じるシール部の塑性変形が最も有力であることが明らかになった。

図 24 は継手の締結と緩みに関わる力を簡略化して示したものである。図で青色が継手のボディ、赤色が管、黄色がカラー、薄緑色がナットである。まず締結において、所定のトルクでナットを締め付けるとカラーを介して管が左方に押され、ボディのテーパ部（図中、赤丸）に軸方向力 Fz で押しつけられ、管に働く圧縮力とボディに働く引張力が釣り合った状態で締結状態となる。このとき管にはねじりモーメントも生じる。ねじ部等での摩擦が大きい場合や、管を軸方向ないし横方向にずれた状態（ミスアラインメント）で締め付けた場合には締結力が低下する。

上述のとおり締結力は管の圧縮弾性変形とボディの引張弾性変形によって維持される。これは図25に示すねじ締結体の締付け線図で表現される。図中の K_b, K_c はボディと管のばね定数を表し、λ_b, λ_c はそれぞれの軸方向変形量、F は軸力である。締結体全体の弾性変形に加えて、テーパ部の外接的接触部（円状の線接触）では高接触面圧のもとで硬度の低いボディ側に塑性変形が生じる。この塑性変形によって形成される有限幅の接触帯で高圧ガスは密封される。気密を維持するためには押し付け力 Fz を維持する必要があるが、繰り返し締結や外力の作用によって塑性変形が進行し Fz が低下する。顕著な塑性変形は軸方向圧縮力作用時に起こる。この塑性変形はねじ締結体のいわゆる「へたり」に相当する。へたり量 δ と締結力の低下量 F_s との関係は以下の式で表される。F_s が初期締結力に等しくなると、ねじの回転なしに初期締結力が失われる、

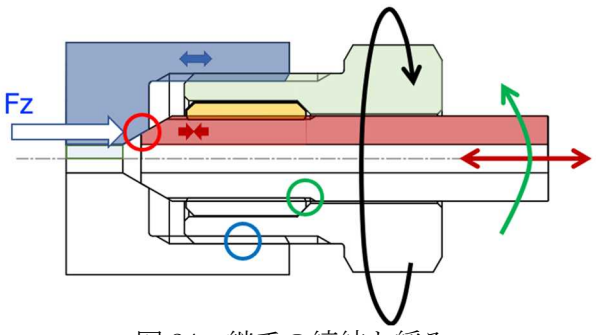


図 24　継手の締結と緩み

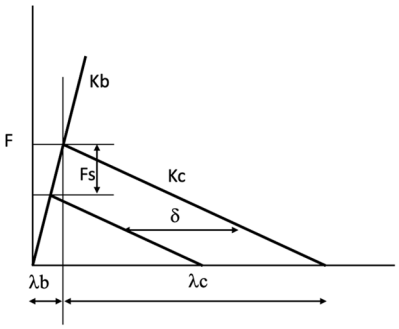


図 25　継手締結体の締付け線図

いわゆる非回転緩みが起こる。

$$F_s = \frac{K_b K_c}{K_b + K_c}\delta$$

へたりは継手のねじ部でも起こりうる。FEM 解析の結果から、引張力作用時に管とカラーのねじ部（図中、緑の円）で応力が比較的大きい。また、ボディとナットのねじ部の応力は曲げモーメント作用時に高くなる。引張や曲げによるねじ面のへたりについて本研究では未検討である。またこれらの外力の繰り返し作用によってねじの非回転緩み発生の可能性もあるが、本研究のサイクル試験の条件のもとでは確認できていない。

⑤継手改良の検討

以上の結果にもとづき、継手を緩みにくくするためには、塑性変形の進行による形状変化を抑え、かつシール部の接触面圧を低下させないことが必要である。そのための改善策として、以下の検討を行った。

ａ．テーパ面の硬度を上げる

テーパ面に表面硬化処理を施す、継手ボディに別の材料を用いる、などを検討した。以下では継手ボディの材料として SUH660 時効処理材を用いた場合の結果を示す。

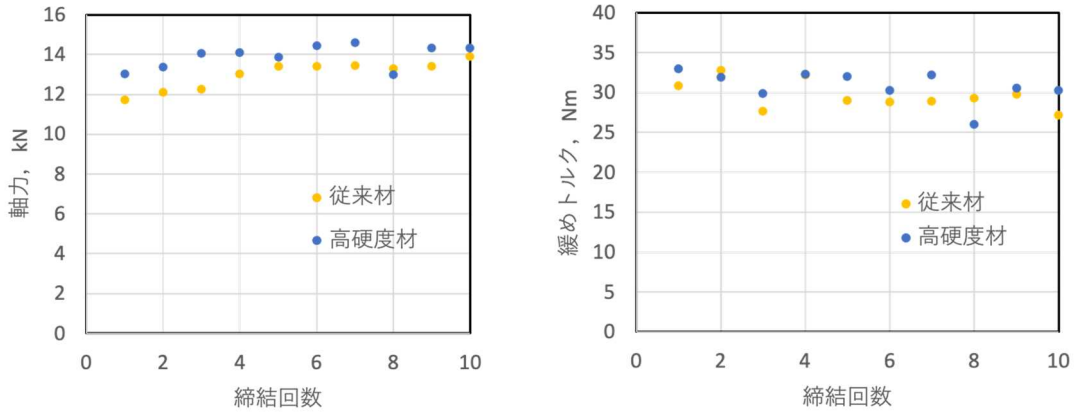


図 26　高硬度材の繰返し締結試験

図 26 に 3/8in 配管、管先端 R が 0.2mm の場合の繰り返し締結試験の結果を示す。高硬度材は締結時の軸力 Fz が高くなり、緩めトルクも高くなった。すなわち緩みにくくなった。3/8in 配管の圧縮サイクル試験を行った結果、従来品では圧縮量 0.3mm で継手の締結力が消失したが、高硬度材では圧縮量 0.4mm まで締結力が失われなかった。継手の硬度を高くすることによりテーパ部での塑性変形が抑えられ、へたり量が低減したためと考えられ、繰返し圧縮力に対しても高硬化材は効果があった。

図 27 に、9/16in 配管による繰り返し締結・引張漏えい試験の結果を示す。3/8in の場合と異なり初期軸力はばらついている。締め付け時の接触位置のずれを塑性変形で吸収しにくくなったためと考えられる。また、高圧水素ガス漏えい時の軸力は 7kN 程度であり、従来材の場合の 5kN よりも大きい。これは、継手が緩みはじめたときに従来品に比べて漏れやすい可能性があることを示唆している。

以上より、高硬度材は総じて締結力を確保でき外力の作用による緩みを生じにくいことが明らかになったが、シール部での塑性変形によるなじみ性と密封性確保の優劣についてさらに検討が必要である。

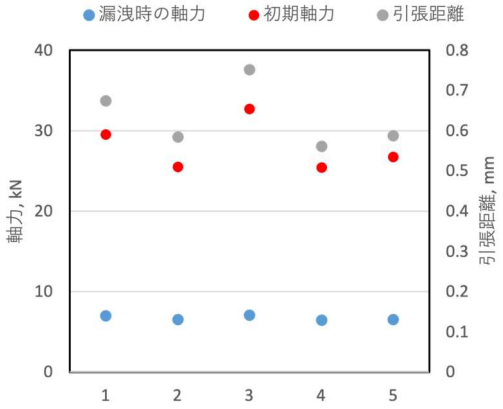


図 27 高硬度材の締結・引張漏えい試験

b． シール部の形状を変える

継手ボディの形状として、円錐状のテーパ部のかわりに、管が挿入される穴の入口縁に曲率半径を与えた形状を考案した。円形状の縁と管のテーパ面が接触してシール部を形成する。材料は従来品と同じである。

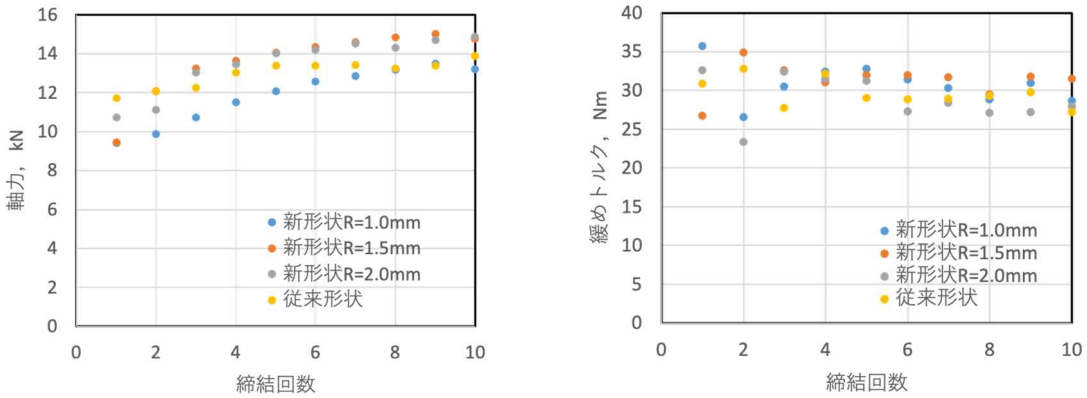


図 28　新形状継手の繰り返し締結試験

図 28 に 3/8in 配管、縁の曲率先端 R が 1m, 1.5mm, 2mmm の場合の繰り返し締結試験の結果を示す。締結時の締付けトルクは(2)でおこなった従来品のときのものと同じである。縁の曲率先端 R が 1.5mm, 2mmm の場合は、締結回数 3 回以上で、従来材に比べて締結時の軸力 Fz が高くなり、緩めトルクも高くなった。一方、3/8in 配管の圧縮サイクル試験では、圧縮量 0.3mm で継手の締結力が消失し、消失までのサイクル数は従来品よりも少なかった。したがって外力の繰り返し負荷に対しては改善がみられなかった。

図 29 に、9/16in 配管による繰り返し締結・引張漏えい試験の結果を示す。縁部の曲率半径 R は 1.5mm である。締め付け時の軸力は低いレベルであるが安定している。高圧水素ガス漏えい時の軸力もばらつきが小さいが値は 8kN 程度であり、従来材の 5kN よりも大きい。高硬度材と同様に、継手が緩みはじめたときに従来品に比べて漏れやすい可能性がある。高圧ガスの密封性についてさらに検討が必要である。

以上より、新形状の継手は外力の作用による締結力消失の面では改善がみられなかったが、締結状態のばらつきは小さかった。今回は限られた縁部形状の検討にとどまったが、形状設計による改善の追求はさらに続けるべきである。

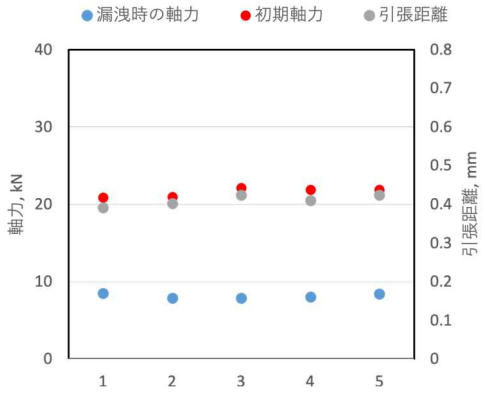


図 29 新形状継手の締結・引張漏えい試験

⑥漏洩リスク低減に向けた設計・施工・保守管理の指針

ａ．本研究で得られた知見の要点

本研究の知見は、(6)節以外は、コーン＆スレッド継手本体の材料 JIS G 4303 SUS316 高 Ni 材、配管材料 JIS G 3459 SUS316TP を用いた評価試験にもとづいている。以下、「軸力」は継手テーパシール部に働く軸方向の力をさす。

1）継手シール部には必ず偏心があり、締め付け時に軸方向以外の横方向の力（接触と変形）を生じる。
2）初期軸方向ミスアラインメント、及び横方向ミスアラインメントにより軸力が低下する。
3）締め付け時の潤滑状態（グリース塗布の有無）によって締付けトルクと軸力の関係が変化する。
4）継手締め付け後の温度変化により、配管に軸方向力が作用し、軸力が変化する。
5）継手締め付け後の系の振動により、管に軸方向力、曲げモーメントが作用し、軸力が変化する。この軸力変化は、ナットが回転しなくても起こりうる（非回転緩み）。
6）管に軸方向圧縮力が繰り返し作用すると、圧縮力がある値以上の場合に、接触部に表面損傷が発生し、軸力が低下して継手は締結力を失い、継手が緩む。この場合、管に曲げモーメントが同時に作用してもその影響は小さい。
7）管に軸方向引張力が繰り返し作用しても継手は緩まず、管に曲げモーメントが同時に作用してもその影響は小さい。
8）管に曲げモーメントが繰り返し作用すると、モーメント値がある値以上の場合、軸力が低下して継手が緩む。
9）繰返し圧縮、繰返し曲げにおいて締結力消失条件以下の条件では 100 万サイクルの負荷でシール部の軸力低下は生じない。
10）継手の締め付け、緩め、締め付けを繰り返し行うと締結時の軸力は上昇する。
11）継手締結直後の状態でガス漏えいを生じるときの軸力は 5kN（9/16in 配管 HP）程度（トルク 100 Nm で締め付けた場合）。この値は管先端の曲率半径によって変わる。
12）継手の締め付けにより継手のテーパシール部及びその周辺は塑性変形し，締結の繰り返しにより変形が進行する。
13）継手テーパシール部の塑性変形は管先端 R の影響を受ける。
14）締結後に軸に圧縮変位を加えたあと引っ張ると、変位をゼロにもどしたときの軸力が低下する。この低下量は管先端 R の影響を受ける。
15）継手の緩みの要因の第一は、上記塑性変形を含む様々な要因によって生じる軸力低下であり、これはねじ締結体の力学モデルで説明できる。

ｂ．継手の締結力消失を回避するための設計・施工・保守管理の指針

上記知見にもとづいて検討した、配管の設計製作、施工、保守管理において継手の緩みのリスクを抑えるための注意事項を以下に挙げる。現時点で定量的に信頼できるデータが十分ではないため、定性的な記述にとどめる。

[配管の設計製作において]
1) 温度変化や振動がある場合、管に軸力、曲げモーメントが作用し、継手の軸力が低下し締結力喪失の原因となる。その作用は管の形態と他端部の支持方法によって変わるため、軸力や曲げモーメントの発生を助長しないような配管設計（配管サポート含む）が必要である。
2) 管の先端 R は接触部のシール性能と塑性変形に影響を及ぼすため、適度な値の R 部を設けることが望ましい。

[配管の組み付けにおいて]
1）管と継手を結合する際に、軸方向と横方向のミスアラインメントは最小限に抑える。
2) 管の他端部の継手を取り付ける際には、管のねじりと管長さの過不足が生じないようにする。
3) 同じ締付けトルクのもとで潤滑剤の有無でシール部の軸力が変わるため、管と継手を結合する際に、管先端と継手テーパ部、およびナットのネジ部には必ずグリースを塗布して安定した軸力を発生させ、同時に焼付き・かじりを防止する。
4) 配管サポートの締め過ぎ等で配管に過大な外力をかけないようにする。

[保守管理において]
1) 増し締めによって継手テーパ部の塑性変形が進むため、不必要なときは増し締めを行わず、トルクチェックに留めるほうがよい。前回締付時と同じトルクを印加して、合マークにて緩みの有無を確認する。
2) 不必要に取り外しを行わないほうがよい。
3) 増し締めによって配管他端部の締結力に影響がないことを確認する。
4) 漏えい事象が起こったときには、漏えい停止の措置を行なったあと、漏えい箇所の関連情報（幾何学的配置（継手、振動元、熱源の位置関係)、継手部の状況、運転情報（温度、圧力等)、保守管理の履歴ほか）を記録する。

⑦目標達成度
機械継手（コーン＆スレッド継手）の漏洩リスク低減のため、継手の緩みと漏洩の評価方法を確立し、継手の締結力消失の過程を明らかにした。(○)
配管の初期組付け精度（ミスアラインメント)、温度変化を模擬した軸方向力、振動、圧力変動など複数因子の作用によるシール部の接触力低下を測定できる試験装置と、90MPa の水素ガスの継手からの漏洩を調べる試験装置を開発した。(○)
これらの装置を用いた試験により、種々の外力の繰り返しとミスアラインメント、グリース潤滑の有無、管の先端形状の違いなどによるシール部軸力の変化、継手の締結力消失に至る圧縮応力と曲げモーメント、高圧ガス漏洩時の軸力などを明らかにした。(○)
また、FEM 応力解析を行って継手の締め付け、圧縮力及び曲げモーメント付与などの条件下での継手の応力分布と塑性変形発生を明らかにした。さらに、継手シール部の表面トポグラフィーを測定し、継手テーパ部に段状の塑性変形部が形成されること、締結の繰り返しにより塑性変形が進行し特異的な接触形状になることを明らかにした。(○)
ねじ締結の原理にもとづき、ねじの回転なしに初期締結力が失われるときの塑性変形量を求めた。以上を総合して、締結力消失の主な原因は継手シール部の塑性変形による軸力低下と結論づけた。(○)
また、漏洩リスクを低減させる方策として、継手テーパ部の硬度と継手の形状を変更する改良方法を検討しその特性を確認した。最後に、締結力消失を回避するための設計・施工・保守管理の指針を提案した。(○)

今後の課題：今後さらに普及が拡大し使用頻度が高まる水素ステーションの安全性向上、保全作業の効率化、メンテナンスコスト低減を図るために、漏えいインシデントのパターンを明らかにして、微量漏えいゼロをめざした技術開発が必要である。
さらに、HDV 対応へ向けて、90MPa 級の超高圧水素用の配管径 3/4 インチ以上の大口径配管に対する継手締結部の技術開発が必要である。

（５）サブテーマ５：シール成果に基づく機器開発

シール基盤チームが提案した新型シール材を取り付けて設計したバルブ及びフィルターについて、サブテーマ２で確立した加速耐久性評価法を基に、水素流体を用いた評価を実施した。0 リング及びグランドパッキンは新品及び加速耐久性条件を適用し、圧力は 82MPa 以上、温度は室温及び-40℃の条件で評価した。この結果、充填回数３万回相当の圧力サイクルに耐えうることを確認すると共に、シール部材には適切なメンテナンスが必要になることを確認した。

①機器開発（フジキン）

シールチームと共に開発した改良シール材を備えた改良弁・フィルターが、本研究開発事業の目的「シール部材の耐久性を水素ステーションにおける充填回数 30,000 回相当とする」に対し、充分な性能を有しているか確認する為、シールチームで開発したシール部材の加速劣化手法及び加速耐久性評価条件を用いて評価を行い、妥当性を確認した。

ａ．改良シール材の加速耐久性評価試験

設定した加速耐久性評価条件を用いて、改良シール材の加速耐久性評価試験を実施し、水素ステーションにおける充填回数 30,000 回相当の妥当性を確認した。改良シール材は、シールチーム(底プラグ 0 リングは高石工業様、グランドパッキンは日本ピラー工業様)に協力頂き、以下の狙いで製作頂いたものを使用した。

・底プラグ 0 リング

0 リングの劣化度として、はみ出し量を定義し、0 リングがはみ出した場合の損傷を抑制する為、引裂き強さを向上させた改良品。

・ グランドパッキン

グランドパッキンの劣化度として、グランドパッキンの変形・摩耗を定義し、締付け時の変形やステム摺動時の内径摩耗を抑制する為、強度を向上させた改良品

表１に改良 0 リングの圧力サイクル試験の結果を示す。改良 0 リングは充填回数 15,846 回相当で漏洩が発生したものの、その他は充填回数 30,000 回相当以上の耐久性能を有しており、性能向上によるメンテナンスコスト削減が見込めることが確認できた。

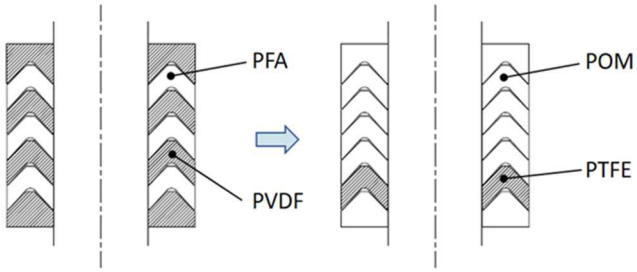
安定した性能を確保する為には、年 1 回程度の消耗品交換が必要となる。

表１　改良 0 リング　圧力サイクル試験(ガス温度：-40℃)

No.	0 リング					評価結果
	強制劣化回数※1	相当充填回数※2	潰し率(%)	加速倍率※3	合計回数	
1	0	5,333	19.1	1	5,333	漏洩なし
2	0	5,333	16.4	1	5,333	漏洩なし
3	0	5,333	13.7	1	5,333	漏洩なし
4	15,000	5,333	18.7	1	20,333	漏洩なし
5	15,000	846	16.0	1	15,846	**15,846 回で漏洩**
6	15,000	5,333	13.3	1	20,333	漏洩なし
7	30,000	4,956	19.1	1	34,956	漏洩なし
8	30,000	4,956	16.0	1	34,956	漏洩なし
9	30,000	5,333	13.7	1	34,956	漏洩なし
10	0	5,333	18.7	2	10,666	漏洩なし
11	0	5,333	16.0	2	10,666	漏洩なし
12	0	5,333	13.3	2	10,666	漏洩なし

・改良グランドパッキンの加速耐久性評価試験

改良グランドパッキンの材質を POM(ベスタール G)に変更した。現状品からの材質変更点を図 1 に示す。



※PTFE は、パッキン間に滞留するガスの排気性を良くする目的で組み込んだ。

図 2 グランドパッキン材質変更仕様

改良グランドパッキンの性能を確認する為、HTC遮断弁に改良グランドパッキンを組込み、繰り返し充填試験を実施した。5,003回の充填において、外部漏洩はなかった。

繰り返し充填試験後のグランドパッキンを回収し、シールチーム(九州大学様)と共にて分析を行った。その結果を図 3 に示す。

結果は比較の為、①弊社標準遮断弁商用ステーション回収品(C160)、②HTC 回収品、③改良グランドパッキン　の 3 点について実施した。

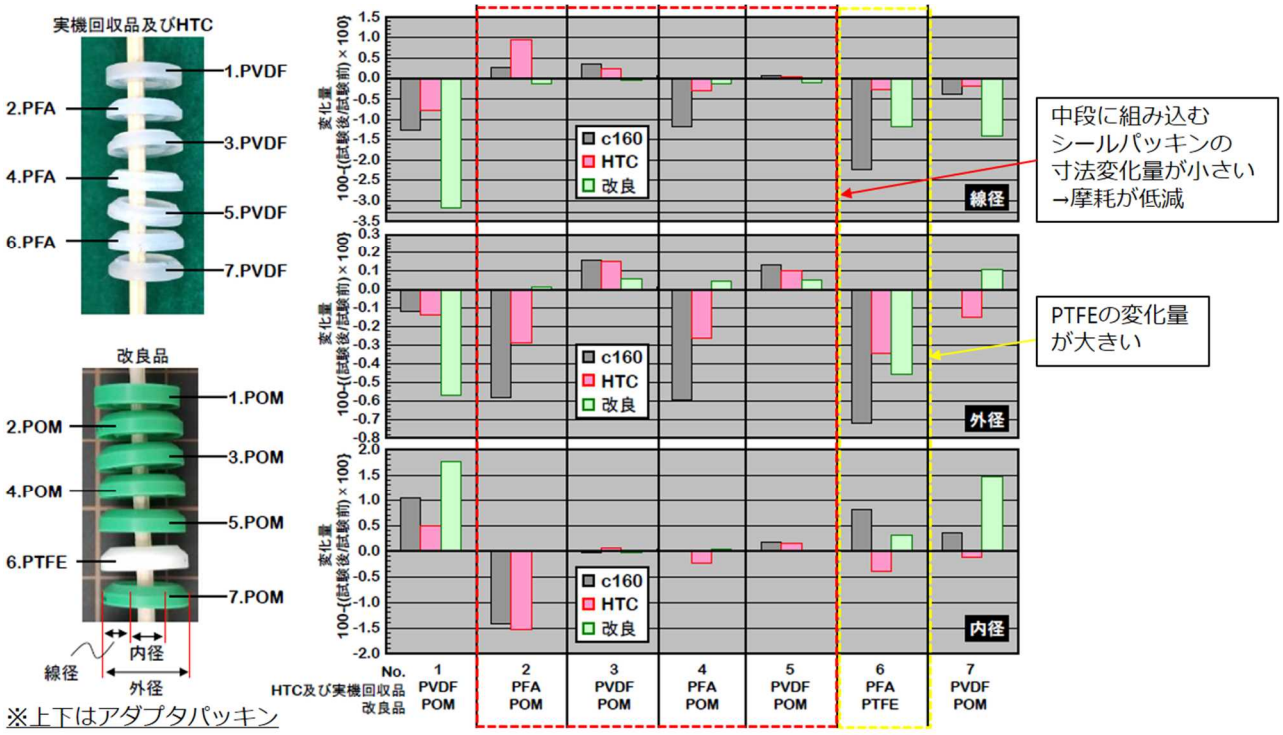


図 3　繰り返し充填試験後のグランドパッキン分析結果

改良グランドパッキンは、弊社標準遮断弁商用ステーション回収品(C160)及び HTC 回収品と比較して、線径・外径・内径の変化量が小さい(摩耗しにくい)事が確認できた。

一方で、1 段組み込んでいる PTFE の寸法変化は大きく、X 線 CT による内径側変形量確認の結果においても、同様の事象が示された。充填試験後のグランドパッキンから多量の摩耗粉も確認した。この結果により、PTFE を POM に変更した仕様に変更し、再度 HTC にて繰り返し充填試験を実施した。改良グランドパッキンからの材質変更点を図 4 に示す。

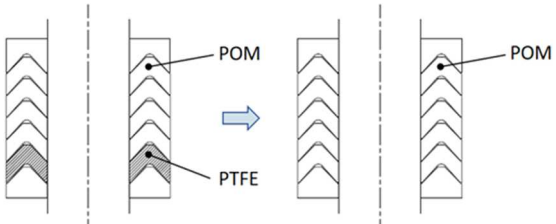


図 4　再改良グランドパッキン材質変更仕様

再改良グランドパッキンの性能を確認する為、HTC 遮断弁に改良グランドパッキンを組込み、繰り返し充填試験を再度実施した。7,123 回の充填において漏洩はなかった。

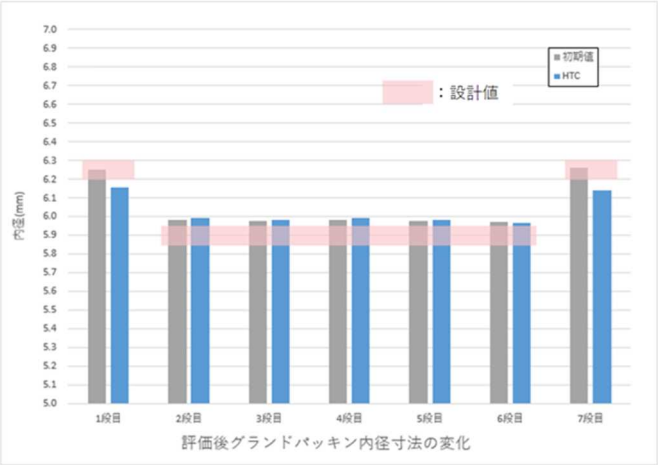


図 5　繰り返し充填試験後のグランドパッキン内径寸法

図 5 に試験後のグランドパッキン内径寸法の変化を示す。シールパッキンに該当する 2 段目～6 段目について、繰り返し充填試験後においてもグランドパッキン内径変化量は約 0.01 であり、グランドパッキン内径摩耗量が低減していることを確認した。

以上より、再改良グランドパッキン仕様にて、加速耐久性評価を実施した。

・再改良グランドパッキンの加速耐久性評価試験

圧力サイクル試験（再改良グランドパッキン）

- 実施日：2023 年 11 月 16 日～12 月 7 日
- 実施場所：公益財団法人水素エネルギー製品研究試験センター様
- 評価条件：圧力サイクル試験

試験圧力：0⇔82MPa

試験流体：水素ガス

ガス温度：-40℃

評価結果を表 2 に示す。

表 2　再改良グランドパッキン　圧力サイクル試験結果

No.	グランドパッキン				評価結果
	開閉回数	相当充填回数※1	加速倍率	合計回数	
1	30,000	10,000	1	10,000	漏洩なし
2	30,000	10,000	1	10,000	漏洩なし
3	30,000	10,000	1	10,000	漏洩なし
4	40,000	13,333	2.8	37,332	漏洩なし
5	40,000	13,333	2.8	37,332	漏洩なし
6	40,000	13,333	2.8	37,332	漏洩なし

※1　相当充填回数：評価で付与した回数(サイクル数×1/3)

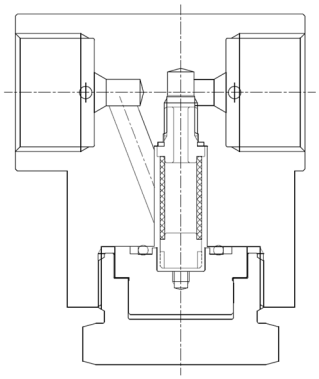
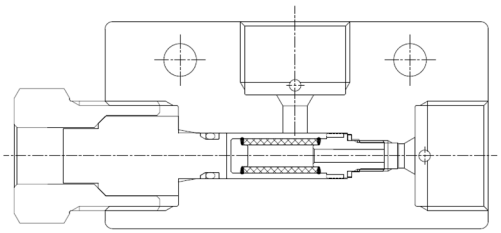
シールパッキンに該当する 2 段目～6 段目について、圧力サイクル試験後においてもグランドパッキン内径変化量は約 0.05～0.1mm であり、グランドパッキン内径摩耗量が低減していることを確認した。また、ステム表面粗さを変更した加速耐久性評価においても漏洩は確認されなかった。

再改良グランドパッキンは、充填回数 30,000 回相当以上の耐久性能を有しており、性能向上によるメンテナンスコスト削減が見込めることが確認できた。

b．新型フィルターの開発

既存フィルターはエレメントを分解する為には、ネジ接合しているボディ A,B を分解する必要

があり、ボディ A,B はそれぞれ配管とコーン&スレッド継手接続している為、配管からフィルター全体を取外してからメンテナンスする必要がある。メンテナンス性を向上させる為、以下 2 案の新型フィルターを考案した。

項目	案 1	案 2
形状	T 型	L 型
外部シール方式	O リングによる平面シール	O リングによる軸シール
構造		
利点	IN、OUT の接続位置が 同じ水平位置になる	継手とフィルターを一体型にできる (エルボ継手 1 ヶ削減)

水素圧力サイクル試験等の結果により案２の L 型を新フィルター構造として採用した。

L 型軸シール新型フィルターについて、予め強制劣化させた 0 リングを組込み、圧力サイクル試験を実施した。評価設備、評価期間の制約があり、実際の充填回数を模擬することが出来ない為、強制劣化させた 0 リングを用いて加速耐久性評価を実施した。表 3 にその結果を示す。

・圧力サイクル試験
・ 実施場所：公益財団法人水素エネルギー製品研究試験センター様
・ 評価条件

圧力サイクル試験
試験圧力：0⇔82MPa
試験流体：水素ガス
ガス温度：室温、−40℃

表 3　強制劣化 O リングを用いた圧力サイクル試験(ガス温度：-40℃)

No.	O リング			評価結果
	強制劣化回数※1	相当充填回数※2	合計回数	
1	0	15,000	15,000	漏洩なし
2	0	15,000	15,000	漏洩なし
3	0	15,000	15,000	漏洩なし
4	15,000	15,000	30,000	漏洩なし
5	15,000	15,000	30,000	漏洩なし
6	15,000	15,000	30,000	漏洩なし
7	30,000	10,900	40,900	漏洩なし(500ppm 以下の反応有)
8	30,000	12,900	42,900	漏洩なし(700ppm 程度の反応有)
9	30,000	15,000	45,000	漏洩なし
10	50,000	3,600	53,600	漏洩なし(500ppm 以下の反応有)
11	50,000	15,000	65,000	漏洩なし
12	50,000	12,900	62,900	漏洩なし(590ppm 程度の反応有)

※1　強制劣化回数：予め O リングに付与した表面摩耗の劣化回数

※2　相当充填回数：評価で付与した回数(サイクル数×1/3)

本評価結果より、ガス温度：室温、-40℃共に、充填回数 30,000 回相当の耐久性があることが確認でき、新型フィルターとしての性能を満足していることを確認した。

②機器開発（キッツ）

ａ．実機充填によるシールからの漏洩確認

HySUT 水素技術センター（HTC）のディスペンサーのプレクーラー2 次側にキッツ製の遮断弁(ボールバルブ)を組み込み、ハンディーのガス検知器で遮断弁の各リークポートにて外部漏洩を確認し、弁座部の内部漏洩はディスペンサー2 次側の圧力監視にて問題(落圧)が生じるか確認を行った。

約 100 回の繰返し充填試験を実施したが、外部漏洩及び内部漏洩の発生は無かった。

ｂ．改良設計対象部位

サブテーマ２の検討より得られた知見より、図 6 に示す部位のパッキンを改良設計の対象とした。

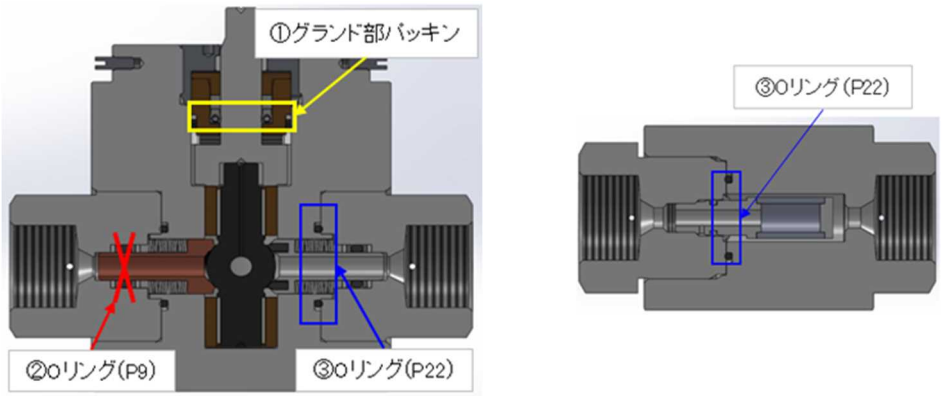


図 6　遮断弁とフィルターの改良設計部位

サブテーマ 2 の評価において、②O リング(P9)を限界まで強制劣化させ、強制漏洩をさせる試験を実施したが、漏洩を発生させることが出来なかったため、評価不可能と判断し改良設計も不可能と判断した。図中にある③O リング(P22)でシールとしている箇所は元々金属ガスケットであり、締め付けトルクが約 400N・m と大きく、現場でのメンテナンスが困難であることから、締め付けトルクの軽減を目的とした改良設計とし、③O リング(P22：平面固定構造)を採用した。

ｃ．遮断弁グランド部の改良シール設計と評価

改良設計のシールはサブテーマ３のシールチームである日本ピラー工業(株)殿より提供頂くため、設計仕様について協議し、以下のように決定した。

1)パッキン室の寸法は不変とした。

2)開閉作動トルクは現行品と同等以下を目標とした。

3)90° の揺動運動を考慮した耐摩耗性の材料を選定

改良設計品を遮断弁に装着し、気密試験および圧力サイクル試験、連続作動試験等を社内及び HyTReC で実施した。試験では期待した性能が得られず改良を重ねた。改良シール＃1～3 の結果と考察から改良シール＃4 の設計に至った。その概要を図 7 に示す。

改良シール＃4 では 1 次シールリングが脱落するケースもあったが、1 次シールの D リングが定位に収まり、機能していれば封止性能が十分に発揮できることが分かった。一方で改良シールの#2 と#3 同様に 1 次シールが機能しなければ、次シールへの影響が大きくなってしまうことから、1 次シールの D リングが安定して定位に収まれば、漏洩しないシール構造となる。

改良シールの設計と評価に時間が掛かってしまい、サブテーマ 2 で策定した拡径による評価は残念ながら出来なかった。しかし、基礎評価試験によって改良シール#4 の内周側シールにおいては現行シールを上回る性能を持っていることが分かった。また、漏洩においては 1 次シールではなく、2 次シールの V パッキンをいかに拡径させないかが重要であることも分かり、サブテーマ 2 で策定した加速耐久性評価法の強制劣化手法(拡径)の妥当性としても一貫性があり、問題がないことが分かった。

今後の課題は 1 次シールの D リング寸法の精度向上やグランド部のクリアランスを考慮した

パッキン押えの再設計により、D リングを定位に保持させ、安定したシール性能を発揮させることで、改良シール開発を達成させることが出来る。

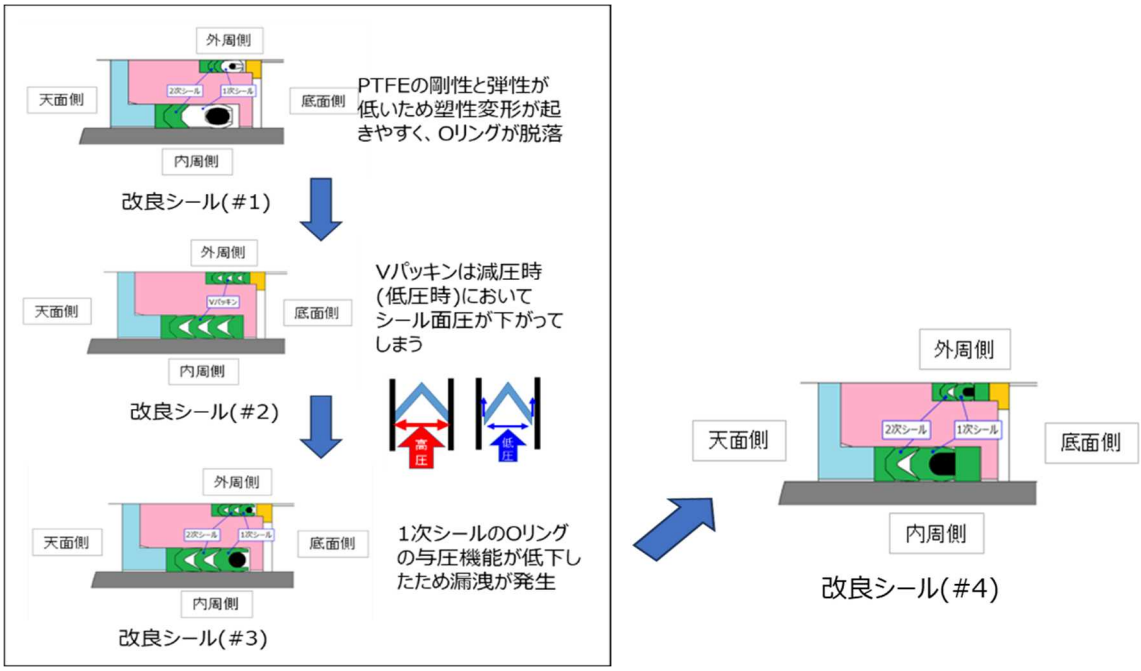


図 7　遮断弁グランドシールの改良経緯

ｄ．胴着部の改良シール(0 リング)設計と評価

サブテーマ 2 の評価試験では、30,000 回の圧力サイクル試験で継続的な漏洩は発生していないことから、0 リングのシール性能としては問題が無いと言える。

また、胴着部の締め付けトルクの設定も実施し、現場でのメンテナンスで十分に作業が出来るトルク設定とすることが出来た。

今後の課題として、ある程度劣化した際に起きた朝一の昇圧時に発生した瞬間的な微少漏れにおいては、パッキン室の寸法変更とともにバックアップリングの追加等で 0 リングの変形を分散させ、封止性能を安定化させることが出来る。

③目標達成度

シールチームで開発したシール部材の加速劣化手法及び加速耐久性評価条件を用いて評価を行い、妥当性を確認した。(○)

開発された改良シール材を用いた機器開発を行い、30,000 回の圧力サイクル試験等の耐久性評価を実施し、性能を確認した。(○)

３．２　成果の意義

高圧ガス保安協会から報告された水素ステーションにおける事故は 2011～2015 年度に 28 件を数え、その原因は全て水素の漏えいである。更に、漏えい部位の 3/4 が締結部とシール部である。今後の水素ステーションの増加と、充填頻度と多様化によって、今後更に漏えい事故が増加すると予想されるために漏えい防止の過半を占める締結部とシール部の漏えい防止対策が急務となっている。

漏えいの無い長寿命・高信頼性のシール、継手の開発により、本プロジェクトの成果として、「水素ステーションの安全性向上、信頼性向上、水素ステーション運営コスト低減」が実現できる。

具体的な成果として、

〇水素ステーションの休業日数の削減：1 日/年

〇メンテ期間の短縮：2～3 日/定修（定修はほぼ 1 回/年）

〇運営コスト低減：1～2 百万円/年

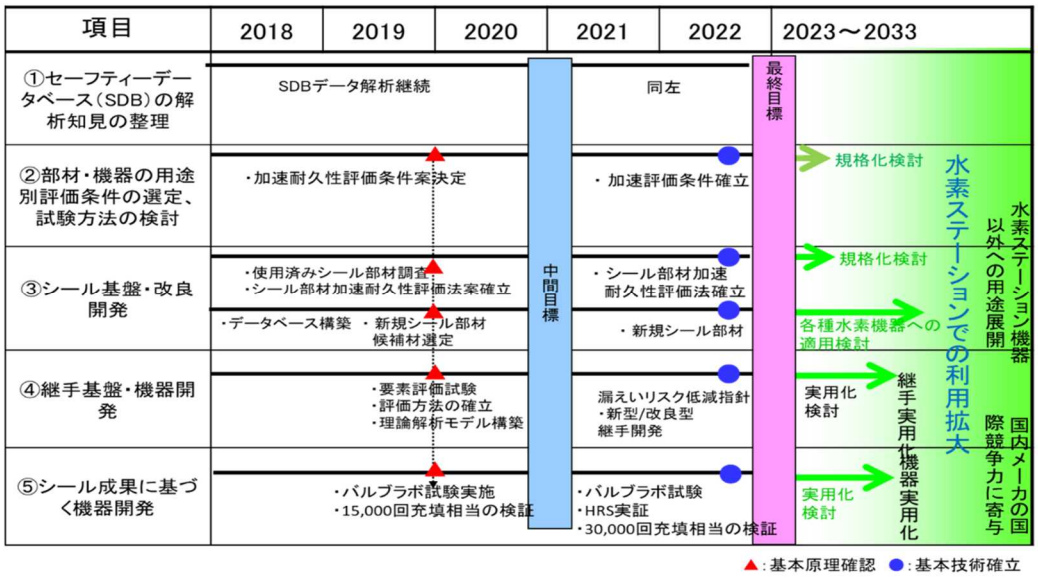
従って、日本全体の水素ステーションでは 3.2～6.4 億円/年の低減が見込まれる。（2025 年度水素ステーション数：320）

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本事業（2018～2022 年度）において、水素漏洩事例の整理解析や高圧水素機器用シール部材、レシプロ圧縮機用ピストンリング、継手締結部を対象とする材料や評価法に関する基盤技術研究を実施した。シール部材の加速耐久性評価法の開発、継手締結力喪失による水素漏えいの基本原理の解明、ピストンリング部材のトライボロジー特性と分解ガス生成挙動など、水素ステーションを構成する各種機器･配管の高信頼性化、長寿命化、低コスト化に資する開発成果を得るとともに、高圧水素環境下における評価を含む各種評価設備の整備，基盤となる知見の蓄積を進めてきた。

現在、日本の水素ステーションは 160 箇所を超え、FCV は 7,500 台以上となり、FC バスの普及や FC トラックの開発などが進んでいる。水素ステーションとそこで使用される設備、機器の性能･信頼性及び安全性がますます重要となっている。本事業の実績を踏まえ、水素ステーションを構成する各種高圧水素機器、ホース等各種部材の高信頼性化、長寿命化による低コスト化をさらに進めるため、また、今後想定される HDV 向け高流量水素ステーションへの対応をも踏まえ、基盤となる研究開発をさらに推進する必要がある。

漏えいの無い長寿命・高信頼性のシール、継手の開発により、本プロジェクトの成果として、「水素ステーションの安全性向上、信頼性向上、水素ステーション運営コスト低減」が実現できる。継手、機器実用化へ向けた見通しを以下に示す。



５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 1 月	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム	Establishment of evaluating methods aiming to develop long-life sealing rubber -New attempt of HYDROGENIUS Polymer Team	藤原広匡（九州大学）
2	2019 年 1 月	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム	Influence of morphology on high-pressure hydrogen property of rubber material	藤原広匡（九州大学）
3	2019 年 1 月	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム	Influence of phase transition on Polytetrafuoroethylen (PTFE) with high pressure hydrogen exposure	藤原広匡（九州大学）
4	2019 年 1 月	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム	Hydrogen permeation property of polyethylene under high pressure condition	藤原広匡（九州大学）
5	2019 年 1 月	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム	Influence of the high-pressure hydrogen gas exposure repetition on the internal damage evolution of high-density polyethylene	小野皓章（九州大学）
6	2019 年 5 月	日本ゴム協会 2019 年年次大会 研究発表会	水素機器用エラストマー材料研究分科会モデル配合 WG 活動報告(5) 練り条件の違いが高圧水素特性に与える影響(1) ＝共通コンパウンド材の高圧水素特性を中心に＝	藤原広匡（九州大学）
7	2019 年 5 月	日本ゴム協会 2019 年年次大会 研究発表会	水素機器用エラストマー材料研究分科会モデル配合 WG 活動報告(6) 練り条件の違いが高圧水素特性に与える影響(2) ＝共通コンパウンド材の配合剤の分散・常温常圧下の物理的特性＝	二口真行（化学物質評価研究機構）
8	2019 年 9 月	第 68 回高分子討論会	ポリテトラフルオロエチレンの高圧水素特性評価(1)	藤原広匡（九州大学）
9	2019 年 9 月	第 68 回高分子討論会	高圧水素曝露により高分	小野皓章

			子材料中に侵入した水素分子の赤外線吸収スヘクトル	（九州大学）
10	2019年12月	Chemical physics letters	FT-IR study of state of molecular hydrogen in bisphenol A polycarbonate dissolved by high-pressure hydrogen gas exposure	小野皓章（九州大学）
11	2020年1月	日本ゴム協会・東海支部 2019 年度アドバンストセミナー	『特殊な環境や性能に対応するゴム・エラストマー』高圧水素ガス環境下用ゴム材料の評価	藤原広匡（九州大学）
12	2020年5月	トライボロジー会議2020春　東京	高圧水素環境下におけるゴム製0リングの密封特性について	竹越雅史（ＮＯＫ）
13	2020年11月	第 61 回高圧討論会(日本高圧力学会)	高圧透過試験法を使用したポリエチレンの水素ガス透過特性	藤原広匡（九州大学）
14	2021年11月	第32回エラストマー討論会	高圧水素シール開発向け加速劣化試験 (1)	藤原広匡（九州大学）
15	2021年11月	第32回エラストマー討論会	高圧水素シール開発向け加速劣化試験 (2)	二口真行（化学物質評価研究機構）
16	2021年11月	第32回エラストマー討論会	高圧水素シールゴムの開発コスト低減を指向した機械学習によるゴムの水素特性予測	小野皓章（九州大学）
17	2022年1月	2022 HYDROGENIUS & I2CNER TRIBOLOGY SYMPOSIUM	Fundamental study on cone and thread fittings in high pressure hydrogen systems	杉村丈一（九州大学）
18	2022年11月	FCCJ 第２回エンジニアリング分科会	長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発 サブテーマ(3)シール基盤・応用開発 劣化模擬シール部材作製・シール性評価法	西村　伸（九州大学）
19	2022年11月	FCCJ 第２回エンジニアリング分科会	超高圧水素インフラの継手締結部の漏えい防止	杉村丈一
20	2023年1月	2023 HYDROGENIUS & I2CNER TRIBOLOGY SYMPOSIUM	Gas Emission from Polymer Composites Sliding Against Metal in Hydrogen	澤江義則（九州大学）

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2019 年 12 月 3 日	特願 2019-218534	フィルタ内蔵継手	株式会社フジキン
2	2021 年 9 月 7 日	T1589（受付番号）	フィルタ内蔵継手	株式会社フジキン

以上

（2-(3)-②）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発」

委託／共同研究／助成先：国立大学法人九州大学
一般社団法人日本ゴム工業会

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度予定）

・高圧水素ホース加速耐久性評価法案として，高温ホース揺動水素インパルス試験法を設定．
・北米水素ステーションにおける87.5 MPa試作ホースの試用を実施し，3,000回の充填を実証．

●背景/研究内容･目的

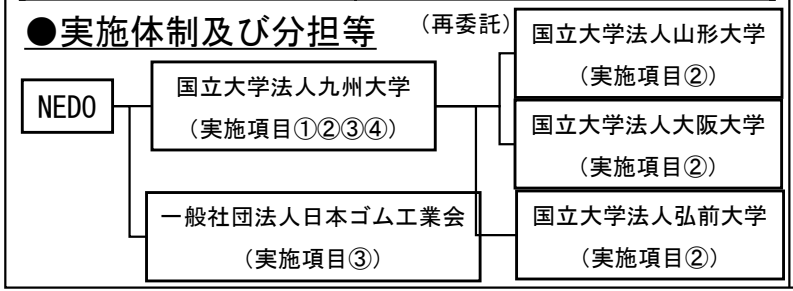
2017年度までのNEDO事業において開発された87.5 MPa試作ホースの水素インパルス試験法による評価は数万回の耐久性を示すことが判明している．このため，これらのホースの水素インパルス試験による耐久性評価は長期間を要する．この結果，ホース交換サイクルの設定に資する評価結果が十分に得られず，ホース耐久性の実力値に比して限定的なホース交換サイクルを設定せざるを得ない状況となっている．

加速耐久性評価法を確立することにより，短時間での耐久性評価を実施し，ホースメーカーにおけるホース交換サイクルの設定に資するデータを蓄積することが可能となる．これらの加速耐久性評価データは，ホース耐久性の実力値に応じたホース交換サイクルの設定，高耐久性ホースの開発に活用される．

●研究目標

実施項目	目標
①水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明	水素インパルス試験法、改良試験法と実水素ステーションにおける充填回数の相関係数設定
②高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明	ホース耐久性に対する影響が大きい内層樹脂の劣化、破壊に影響する因子を明確化
③高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定	高圧水素加速耐久性評価法を開発し、**高圧水素加速耐久性評価法規格案を作成**
④ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供	加速耐久性評価法を用いてデータを取得し、ホースメーカーにフィードバック． **ホース交換サイクル＞30,000回に資するデータ取得**

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容／研究成果

（実施項目①）水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明

・北米水素ステーションにおいて試作87.5 MPaホースの試用を実施した．試作87.5MPaホース（N=3）の水素ステーションにおける耐久回数を3,000回と設定した．急加圧を含む圧力パターン，内外層温度差，高ひずみホース設定，揺動試験後のホース評価など，想定された各種の加速因子を加えた水素インパルス試験を実施した結果，いずれも10,000回以上の耐久性を示し，固定ホースの水素インパルス試験に対する加速効果が見られないことが判明した．これらの結果を踏まえ，ホースの揺動を行い，ホース伸長状態での水素インパルス圧力パターンでの加減圧を行う「ホース揺動水素インパルス試験」を設定した．評価時のホース表面温度を制御することで温度依存性を確認したところ，加速係数（実水素ステーション充填耐久回数(3,000)／揺動水素インパルス試験耐久回数）は，30℃から85℃の範囲では、ばらつきが大きいアレニウス型の依存性と考えられる．加速係数は60℃で1.3±0.2であり，加速耐久性評価法案として設定した．

（実施項目②）高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明

水素インパルス試験の加速因子として抽出した温度変動，加減圧パターンにおける加圧速度，高圧保持時間の影響，ホースの表面温度，ホースの屈曲による影響について，それぞれの因子を個別に水素インパルス試験のプロトコルに組み込んで検証し，評価後のホース調査を実施した．その結果，漏洩の原因である内層樹脂貫通クラック形成は高温，ホースの揺動変形が加速因子となることが判明した．（山形大学再委託）内層樹脂の結晶性高分子材料に対する高圧水素の影響として高圧水素曝露後の減圧過程において試験片中に赤外線波長レベルの大きさの気泡が多量に発生することを見出した．（大阪大学再委託）ホースの大変形により発生する局所ひずみ評価数理モデルを開発した．（弘前大学再委託）

（実施項目③）高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定

一般社団法人日本ゴム工業会に高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化ワーキングチーム(WT)を設置した．WTは本プロジェクト実施者，ホースメーカー、水素利用技術協会のメンバーにより構成され，18回のWT会議および規格案文書について議論するサブWTを開催し，ホースの試験結果、試験後のホース解析結果などの議論およびホース揺動水素インパルス試験法について規格案文書を策定した．

（実施項目④）ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供

ホースメーカー２社より提供いただいたホースの評価結果をそれぞれホースメーカーにフィードバックした．その結果，水素ステーションにおける使用回数は2017年度の650回～1,000回に対して，3,000～4,000回程度となることが見込まれた．

●今後の課題

特定の水素ステーションにおける評価結果を対象とする耐久性評価法を一般化するため水素ステーションにおける運用情報を統計的に解析し，それぞれのパラメータのホース耐久性に対する影響度をそれらの平均値のみならず分布の影響を考慮した評価法を検討する．

●実用化の見通し

開発した高圧水素ホース加速耐久性評価法による評価結果に基づきホース使用回数が約4倍の見通しを得る成果を得た．評価法としての「実用化」は関係するステークホルダー，規制当局により適切なホース耐久性評価法として認められることと考える．その一環として高圧水素加速耐久性評価法規格案の国内規格化，国際規格化を計画中である．

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	ホース揺動水素インパルス試験の加速係数60℃で1.3±0.2を設定	○
②	ホース内層樹脂の構造変化，疲労特性明確化，およびホース大変形解析数理モデル構築	○
③	ホース揺動水素インパルス試験法について規格案文書を策定	○
④	水素ステーションにおける使用回数3,000～4,000回程度となることが見込まれた．	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	7	0

事業番号：2-(3)-②

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発」

実施者：国立大学法人九州大学
一般社団法人日本ゴム工業会

１．研究開発概要

燃料電池自動車（FCV）及びその水素供給インフラである水素ステーションはエネルギー源のベストミックスやCO2排出量削減の有効策として、経済産業省資源エネルギー庁にて策定された「エネルギー基本計画（平成26年改訂）」において引き続き重要な技術に位置付けられている。「エネルギー基本計画」に基づいて策定された「水素・燃料電池ロードマップ（平成28年3月改訂）」では、平成26年に燃料電池自動車の市販開始、商用ステーションの開設が実現し、本格的な水素エネルギーシステムの社会実装が具現化したことを踏まえ、水素社会の実現に向けた取組の加速のための様々な施策が提言されている。

九州大学は、 NEDO事業「水素先端科学基礎研究事業（2006年度～2012年度）」において、水素機器の水素シール、ホース内層材として使用されるゴム、樹脂材料について、設計指針を提示し、材料選定のための基礎的なデータである「モデル配合ゴム材料データ」を提示した。また、ホースメーカーである横浜ゴム株式会社は水素ステーションの構成要素である高圧水素ホースについても、高圧化とこれに伴う水素冷却に対応した技術開発を推進し、NEDO事業「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」において70 MPaまでの圧力については主要機器の1年間の耐久性（ノーメンテナンス性）が確認された。これらにより70 MPa水素ステーション先行整備が実現した。引き続き九州大学では、 NEDO事業「水素利用技術研究開発事業（2013年度～2017年度）」において、ホースメーカーである横浜ゴム株式会社、水素供給・利用技術研究組合（2016年度より一般社団法人水素供給利用技術協会）、一般財団法人化学物質評価研究機構、NOK株式会社、日本合成化学工業株式会社と共同で「水素ステーションの高圧水素用ホースとシールシステムに関する研究開発（2013～2017年度）」、株式会社ブリヂストンと共同で「高圧水素機器用ホース等システム部材の研究開発（2015年度～2017年度）」を推進し、水素ステーションにおける燃料電池自動車へ水素充填に用いられる高圧水素ホース開発を進めてきた。「水素利用技術研究開発事業」では高圧水素ホースとして82 MPaホースの実用化、87.5 MPaホースの試作評価を完了した。これらのホースの開発のため必要となる高圧水素ホース評価法として、-40°C環境下において、T40（−33°C～-40°C）規格に温度制御した水素により、1サイクル30 秒程度の加減圧プロファイルにより最高常用圧力まで繰り返し加減圧を行う水素インパルス試験法を開発した。開発した水素インパルス試験法はISO/TC197において規格化が進められている高圧水素ホース国際規格（ISO 19880-5）に採用され、2020年11月に発行された。

水素インパルス試験法により、82 MPaホース、試作87.5 MPaホースのサイクル寿命6,600回以上の耐久性を確認した。この結果に基づいて、82 MPaホースを使用する国内の水素ステーションにおけるホース交換サイクルを100回充填から650回充填に延長する成果を得た。また、6,600回のサイクル寿命が確認されたこれらの試作87.5 MPaホースについて、引き続き水素インパルス試験を継続した結果、ホース仕様により異なるが50,000回～70,000回程度までの耐久性を持つことを確認した。

しかしながら，水素ステーションにおける現在の 82 MPa ホース交換サイクルは水素ステーションの自立展開、大量普及のためには未だに高コストであり、ホース交換サイクルの大幅な延長によるホース交換にかかるコストの低減が必要である。水素インパルス法により高圧水素ホースとしての低温環境下における高圧水素による繰り返し加減圧による耐久性が確認されているものの、SAE J2601、JPEC-S 0003 で規定される水素ステーションでの充填プロトコルに基づく充填時の温度・圧力の変動を完全に再現した条件とはなっていない。しかしながら、約 3 分程度の実ステーションにおける充填プロトコルに一致した条件での耐久性評価は、水素ステーションにおける使用可能期間と同等の試験期間を要するため、試験期間、試験費用の点で実施が困難である。現状では水素ステーションにおける使用回数と水素インパルス試験における耐久回数の相関が明確ではなく、水素インパルス試験により実証された 50,000～70,000 回の耐久回数の約 1/100 となる 650 回が水素ステーションにおいて許容される充填回数として設定されている。水素ステーションにおける高圧水素ホースの充填回数の大幅な延長、ホースメーカーにおいて、さらなる高耐久性ホースの開発のためには、2020 年以降に水素ステーションにおいて求められる 1 年間の所要の充填回数 30,000 回に相当する負荷を短期間で実現する加速耐久性評価法の確立が不可欠である。さらに、水素ステーションにおける充填と加速耐久性評価法との相関が確立することが求められている。

本事業では、ホースメーカーにおいて、高圧水素ホース交換サイクルの大幅な延長を判断すること、また、さらなる高耐久高圧水素ホース開発に必要となる耐久性評価に資する加速耐久性評価法の開発及びその水素ステーションにおける充填との相関を確立することを目的として研究開発を推進している。これらを実現するため、水素ステーションにおける充填に伴う高圧水素ホース劣化データの取得、高圧水素ホースの加速耐久性評価法の開発、高圧水素ホース交換サイクルの延長・高耐久高圧水素ホース開発に資する加速耐久性評価データ取得及びこれらのデータのホースメーカーへの提供を進めている。

現在、ホースメーカー各社は NEDO 事業「水素利用技術研究開発事業」において試作した 87.5 MPa 水素ホースの実用化、事業化を進めるフェーズにあるため、本事業では、ホースメーカー各社がそれぞれの高圧水素ホース実用化、事業化を進める上で、共通の開発課題である高圧水素ホースの耐久性評価法に関する開発を目的とする。高圧水素ホース耐久性評価法及びその評価基準をホースメーカー各社及びディスペンサー等ステーション機器メーカー、ステーション運営事業者と共有することによって、さらなる高耐久性高圧水素ホースの開発及びその水素ステーションへの実装が進展し、高圧水素ホースの使用可能充填回数の延長によりステーション運営コストの低減に寄与できると考えられる。

具体的な研究開発の内容は①「水素利用技術研究開発事業」にて開発した水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明、②高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明、③高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定、④ホース交換サイクル設定に資するデータの取得およびホースメーカーへのデータ提供、の４点である。これらの課題に対して、九州大学が主体となり、高圧水素ホースを含むゴム製品製造業者の業界団体である一般社団法人日本ゴム工業会と連携し、一部山形大学、大阪大学、2021 年 9 月より弘前大学に再委託して検討を進めた。③高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定については、一般社団法人日本ゴム工業会に検討ワーキングチーム（WT）を設置し、実施期間中 18 回の WT、高圧水素ホース加速耐久性評価法規格案文書作成のため 3 回のサブ WT を開催し、規格案を策定した。

２．研究開発目標

表 1 研究開発目標

実施項目	最終目標	
(1) 水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明	水素インパルス試験法、改良試験法と実水素ステーションにおける充填回数の相関係数を設定。 （ホースのラボ試験から実機の耐久性を判断するため必要）	・高圧水素ホース加速耐久性評価法規格案の作成 ・ホース交換サイクル充填回数 30,000 回以上の耐久性判断に資するデータ取得 （項目①～④の成果に基づいて、高圧水素ホース加速耐久性評価法の普及、水素ステーションにおいて 1～2 年程度,、30,000 回充填まで交換不要な高圧水素ホースの耐久性の確認のため必要）
(2) 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明	ホース耐久性に対する影響が大きい内層樹脂の劣化、破壊に影響する因子を明確化。 （試験時の加速因子の探索およびラボ試験と実機の劣化、破壊メカニズムの同一性を確認するため必要）	
(3) 高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定	高圧水素ホース加速耐久性評価法を開発し、規格案を作成する。 （項目(1)、(2)の結果を評価法としてまとめ、高圧水素ホース加速評価法を普及させるために必要）	
(4) ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供	項目(3)で検討を進める加速耐久性評価法を用いてデータを取得し、ホースメーカーにフィードバック。 （加速耐久性評価法案を用いたデータに基づいて、ホース開発に活用するため必要）	

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）　水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明

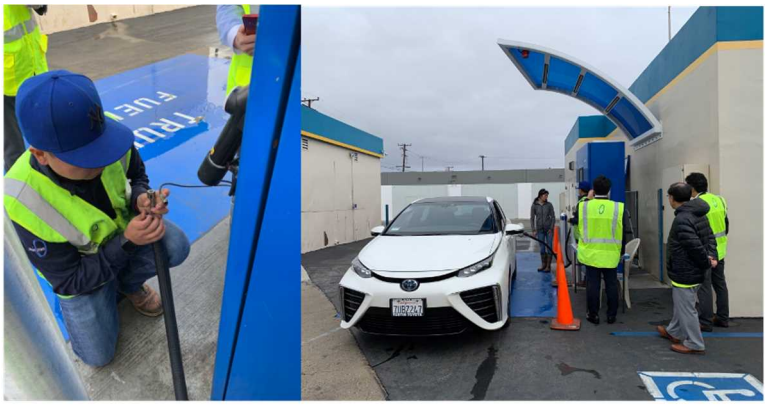
①　実水素ステーションにおける実証

現在の高圧水素ホースの実ステーションにおける耐久性を検証するため、ホースメーカーおよび北米水素ステーションオーナーの協力を得て 2019 年 1 月より水素ステーションにおけるホース実証試験を実施した。

現状、国内の水素ステーションにおいて、試作ホースの試用及び当該ホースの寿命末期まで試用を継続し、実機における耐久回数を確認することは極めて困難である。一方、2017 年度に海外の水素ステーションの運営状況を調査した結果、北米の水素ステーションにおいては、顧客の FCV への水素充填の際、不具合が生じた場合に対応する形で運営されていることが判明した。米国カリフォルニア州において水素ステーション運営事業を展開する First Element 社は 2017 年当時 18 箇所の水素ステーションを運営し、13 箇所で建築中であった。First Element 社の水素ステーションは無人で運用されており、水素ステーションにおける水素

漏洩の検知、圧力上昇速度の低下などの不具合が発生した際、エンジニアを派遣して原因を特定し、水素充填ホースの破損など、水素充填ホースの不具合であることが判明した場合にホースを交換する対応となっている。

First Element 社及びホースメーカーの協力を得て、2019 年 1 月より米国カリフォルニア州ロサンゼルス近郊の水素ステーションにおける試作 87.5 MPa ホースの試用による実証試験を実施した.　試作 87.5 MPa ホース 3 本について、First Element 社の運営するコスタ・メサ水素ステーション及びロングビーチ水素ステーションにおいて試用を行った。図 1 にロングビーチ水素ステーションにおけるホースの取り付け、充填時の状況を示す。当該水素ステーションにおける水素充填回数は 40～50 回/日程度であった。その結果、実水素ステーションにおける充填において、3,000 回を超える耐久回数を確認した。いずれのホースも水素ステーションにおける水素充填中に発生した水素漏洩により試用が中止された。試作 87.5 MPa ホース（N=3）は、漏洩発生まで 3,000 回程度の充填が可能であり、供試ホースの水素ステーションにおける耐久回数は 3,000 回と判断された。



(a) ホース取り付け作業　　(b) FCV充填状況

図 1 コスタ・メサ水素ステーション（米国カリフォルニア州）における試作 87.5 MPa ホース試用状況

使用済みホースを回収し、ホースの調査を実施した。試用に供した高圧水素ホースは、図 2 に示す通り内層樹脂のチューブを金属線、あるいは高強度繊維で補強し、外層樹脂で被覆した構造となっている。回収ホースを調査した結果、試作 87.5 MPa ホースの内層樹脂チューブに樹脂の疲労による貫通クラックが発生していることが確認された。貫通クラックはホース下流の継手近傍で発生していた。この現象は 70 MPa 水素ステーションにおいて発生した漏洩や水素インパルス試験が漏洩により終了した際に確認された貫通クラックと同様の破壊モードであることが確認された。

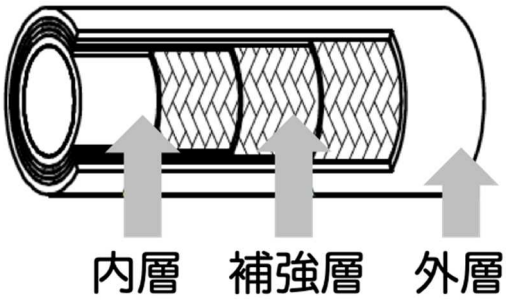


図 2 高圧水素ホースの構造

北米水素ステーションにおいて、従来から使用している高圧水素ホースの耐久性、交換頻度などの調査を実施した。2017 年の調査段階では水素ステーションにおける高圧水素ホースの充填耐久回数の平均は 700 回程度で、耐久回数のばらつきが大きいとのことであったが、2019 年に再度調査したところ、海外メーカー製の高耐久ホースが開発されており、北米水素ステーションでは当該ホースの試用を経て、多くの水素ステーションで採用されるに至っている。

北米水素ステーションにおけるホース試用、当該水素ステーションにおけるホース試用状況の調査を行なった結果、北米水素ステーションでの実使用時の耐久性、同水素ステーションにおける従来ホースの耐久性

が明確になった。これにより、後述する高圧水素ホース耐久性加速評価法の耐久回数の比較基準として使用し、加速係数を検討した。

② 水素インパルス試験加速因子検討

米国水素ステーションでの試用により水素ステーションにおける耐久回数が3,000回であることが確認された試作87.5 MPaホースについて、既存の試験方法である水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）による評価を実施し、水素インパルス試験法を基準として、ホース設定の高ひずみ化、試験時の水素圧力パターンに急加圧を追加、流通する水素温度と、雰囲気温度の差を拡大する、などの方法で加速を試みた。

Test 0 水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）

「水素利用技術研究開発事業」において、米国水素ステーションで試用した試作87.5 MPaホースの水素インパルス試験を実施した結果、50,000回～70,000回程度の耐久性を持つことが確認されている。図3にISO 19880-5、7.9項及びAnnex Cに記載されている水素インパルス試験の圧力プロファイルを示す。供試ホースはホースメーカー指定の最小曲げ半径で逆U字形に設定し、環境温度-40℃上限圧力87.5MPa，加圧12～15秒，高圧保持5秒，減圧4秒，低圧保持5秒の30秒/サイクルの加減圧を実施する評価法が設定されている。

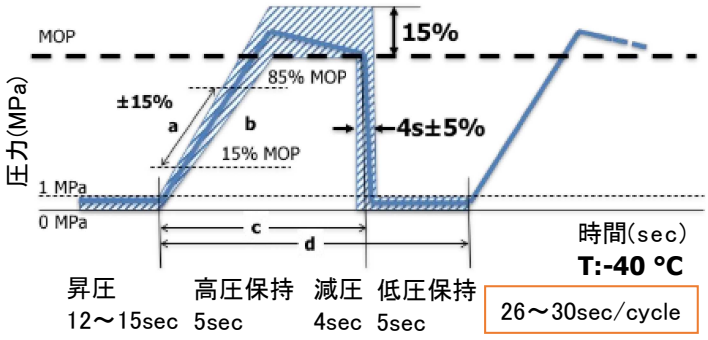


図3 水素インパルス試験（ISO 19880-5 7.9項）圧力プロファイル

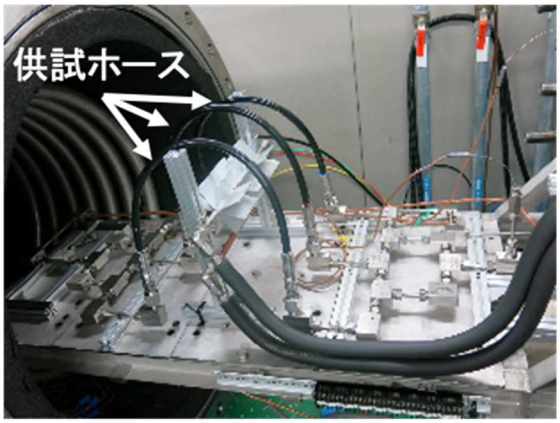


図4 水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）のホース設定状況

一方、前項に示した結果から、北米水素ステーションにおける試作87.5 MPaホースの実水素ステーションにおける水素充填の耐久回数は3,000回と判断した。同事業で設定した条件における水素インパルス試験による評価は、水素ステーションにおける実機の耐久回数を大幅に上回る耐久性を示した。水素インパルス試験においては、水素ステーションにおける耐久回数の15倍から20倍程度の耐久回数となることが判明した。

上述の通り、現行の水素インパルス試験の条件においては、水素ステーションの充填耐久回数の15～20倍となる加減圧耐久回数となることを基準として設定し、水素インパルス試験の水素ガスによる加減圧に対して実水素ステーションにおいてホースに与えられる負荷を想定した加減圧の圧力パターンの変更、環境温度の変更、U字に設定しているホース設定形状の変更などによる加速試験条件を検討することとした。

Test 1 環境温度および圧力パターン

現行の水素インパルス試験と同様のホース設定により、加減圧における圧力パターンを変更し、環境温度を55℃として実水素ステーションにおける充填時の環境を模擬した条件による試験を実施した。実水素ステーションにおいては車載タンクに残圧があり、必ずしも1 MPa以下まで減圧されないことが多いと推定される。また、充填終了時に所定の圧力に到達した後、直ちに減圧されることから到達した圧力での保持は短時間である。このことから現行の水素インパルス試験における1 MPa以下から一定の加圧速度で12～15秒で昇圧し、昇圧後5秒間保持する圧力パターンを50 MPaまで1秒以下での急加圧し、50 MPaから上限圧力87.5 MPaに到達後1秒保持したのちに急減圧する圧力パターンを採用し、ホース設定、環境温度、水素ガス温度は現行の水素インパルス試験同様の設定で試験を実施した。図5に採用した圧力パターンを示す。その結果、供試ホースである試作87.5 MPaホースの耐久回数3,000回を大きく上回る10,000回以上の耐久回数を示し、加速効果は得られなかった。

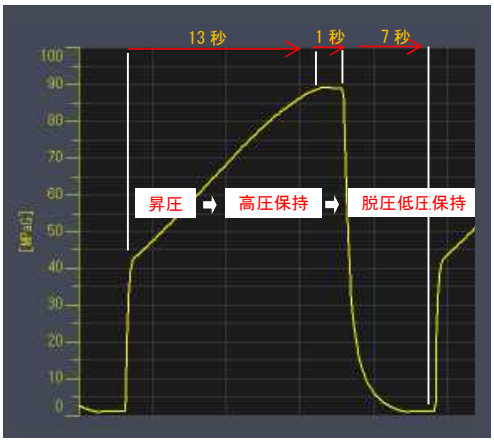


図5 タンク残圧を模擬した水素インパルス試験圧力パターン

Test 2 高ひずみホース設定

現行の水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）では、供試高圧水素ホースを当該ホースの最小曲げ半径（ホースメーカーが設定）の逆U字で設置することとなっている。このため、応力集中が懸念される逆U字の頂点部分やフィッティング近傍においても基本的に大きな応力集中がない形に設定して試験を実施している。水素ステーション、特に北米の水素ステーションにおいては、ユーザー自身が充填操作を行うセルフステーションとなっており、ホースの取り回しやディスペンサーと車両の駐車位置の関係からホースにひずみが発生した状態で充填が行われるケースもある。このため、逆U字設定のフィッティング間隔を調整し、ホースの逆U字の頂点、フィッティング近傍に応力集中が発生する状況での水素インパルス試験を試みた。現行の水素インパルス試験のホース設定を図6に示す。ホースをU字設定する際に最小曲げ半径rを基準として、供試体であるホースのフィッティング間のホース長はホース外径dを加味して$p\ (2r+d/2)+2d$と設定した上で、試験時の水素供給を行う固定したフィッティングの間隔を$2r+d$に設定している。Test 2においては、ホース長を現行の水素インパルス試験と同様$p(2r+d/2)+2d$とし、フィッティング間隔を最小曲げ半径rの2倍または1/2を基準として$2(2r)+d$（Test 2-1）または$2(r/2)+d$（Test 2-2）と設定して水素加減圧条件は現行の水素インパルス試験と同様の条件で実施することとした。図7に示した通り、最小曲げ半径200 mmの供試ホースについて、現行の水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）ではフィッティング間隔として400 mmで設定するが、250 mmおよび550 mmとしてホースの逆U字頂点部、フィッテ

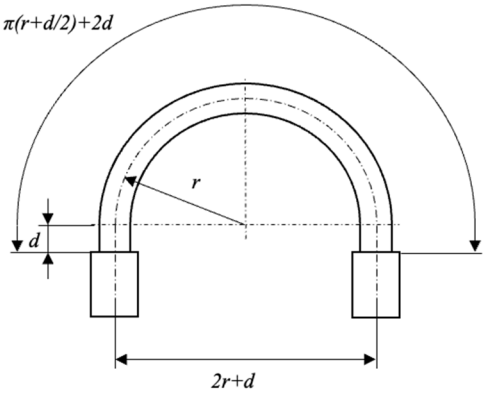


図6 水素インパルス試験（ISO 19880-5 7.9項）ホース設定（U字）

ィング近傍に応力集中させるホース設定を行なった。ホース設定以外、環境温度、ガス温度とも-40℃、圧力パターンは図 3 に示した水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）条件とした。

その結果、供試ホースである試作 87.5 MPa ホースの耐久回数 3,000 回を大きく上回る 10,000 回以上の耐久回数を示し、加速効果は得られなかった。また、Test 2-1 同様にフィッティング間隔を *2(2r)+d* として、環境温度を 85℃として高温における高ひずみ状態での試験（Test 2-3）による加速を試みたが、試作 87.5 MPa ホースの耐久回数 3,000 回を大きく上回る 10,000 回以上の耐久回数を示し、加速効果は得られなかった。

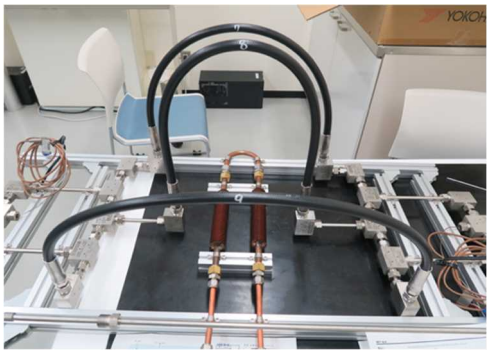


図 7 高ひずみホース設定

Test 3 揺動試験後ホースの水素インパルス試験

実水素ステーションにおいては高圧水素による加減圧のみならず充填時の車両への接続、終了後の収納に伴うホースの変形が発生する。このことを踏まえ、ホースの変形を加味した条件とすることで充填時の挙動の模擬を試みた。揺動条件として、油圧ホースの耐久試験としてホースに揺動と脈動圧を印加するホース揺動インパルス試験が規定されている。（ISO 6802 2018 : Rubber and plastics hoses and hose assemblies with wire reinforcements — Hydraulic impulse test with flexing）Test 3 では ISO 6802 を参照し供試ホースに揺動による変形を所定の回数加えた後、現行の水素インパルス試験の温度、圧力条件で水素による加減圧を実施した。水素インパルス試験を実施した。ホースの形状はホース揺動インパルス試験において採用されているハーフ Ω 型設定とした。図 8 にホース揺動試験時のホース形状を示す。垂直に設定したフィッティングを固定し、水平に設定したフィッティングを揺動させる。フィッティング間のホース長 640 mm に対して、最小間隔 245 mm、最大間隔 539 mm として、室温においてストローク 294 mm、0.5 Hz で揺動試験を実施した。揺動試験において設定したハーフ Ω の最大間隔時の形状により、現行水素インパルス試験の温度、圧力条件で水素インパルス試験を実施した。Test 3-1 として揺動試験を行わずハーフ Ω 形状で水素インパルス試験を実施し、揺動試験を 30,000 回（Test 3-2）、50,000 回（Test 3-3）、100,000 回（Test 3-4）した後、同様に水素インパルス試験を実施した。その結果、いずれの試験においても試作 87.5 MPa ホースの耐久回数 3,000 回を大きく上回る 10,000 回以上の耐久回数を示し、加速効果は得られなかった。

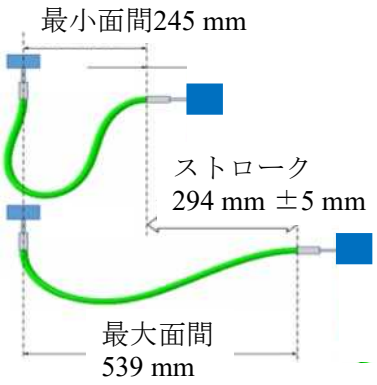


図 8 ホース揺動試験時のホース形状
（ホース長 640 ㎜）

以上、Test 1～3 として実施した通常の水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）条件に温度、ホース設定によるひずみ、事前の揺動を与えた場合においても、Test 0 に示した通常の水素インパルス試験および水素ステーション実証により得られた耐久回数に対する加速効果は見出されなかった。表 1 に実施した各種負荷を加えた水素インパルス試験法の試験条件と結果をまとめて示す。前事業において水素ステーションにおける圧力、温度の変動を模擬した加減圧パターンを設定し、類似の仕様のホースを評価した結果、数千回の加減圧によりホース内層樹脂の貫通クラックによる漏洩が確認された。現行の水素ステーションにおけ

る充填プロトコルSAE J2601を模擬した加減圧プロセスを模擬した圧力パターンに加え、-40℃の水素の流通が停止している低圧時の保持時間を250秒程度設定し、-40℃の水素流通により冷却された内層樹脂がほぼ常温に復する条件とした。その結果、毎回の加減圧時に熱衝撃が発生する影響が見られたと考えられる。しかしながら、耐久回数は水素ステーションでの試用実績と同等レベルとなるものの、１サイクルの所要時間が大きく、８分程度となり、全体の評価時間が長くなる問題がある。3,000回程度の耐久試験に２ヶ月を要し、加速効果が期待できないと判断した。

以上の結果から、ホースを固定した設定での水素インパルス評価において、温度、圧力変動パターン、事前の揺動試験などの因子を与えても加速が困難であると判断した。

表１負荷を加えた試作87.5 MPa ホース水素インパルス試験条件と結果

	ホース形状	上限圧力 (MPa)	加圧時間 (秒)	上限圧力保持時間 (秒)	環境温度 (℃)	ホース表面温度 (℃)	水素ガス温度 (℃)	結果 (回)	備考
Test 0 （基準）	U字 最小曲げ半径	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	ISO 19880-5　7.9項記載の方法
Test 1	U字 最小曲げ半径	87.5	12～13 (50 MPaまで急加圧)	1	55	制御せず	-40	＞10,000	50 MPaまでの急加圧，高い環境温度による実機模擬
Test 2-1	U字 最小曲げ半径×2	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	フィッティング間隔を最小曲げ半径の2倍に設定
Test 2-2	U字 最小曲げ半径／2	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	フィッティング間隔を最小曲げ半径の半分に設定
Test 2-3	U字 最小曲げ半径×2	87.5	12～15	5	室温	85	-40	＞10,000	フィッティング間隔を最小曲げ半径の2倍，高い環境温度を設定
Test 3-1	ハーフΩ	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	ホース揺動試験におけるホース形状
Test 3-2	ハーフΩ	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	試験前にホース揺動試験30,000回実施
Test 3-3	ハーフΩ	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	試験前にホース揺動試験50,000回実施
Test 3-4	ハーフΩ	87.5	12～15	5	-40	制御せず	-40	＞10,000	試験前にホース揺動試験100,000回実施

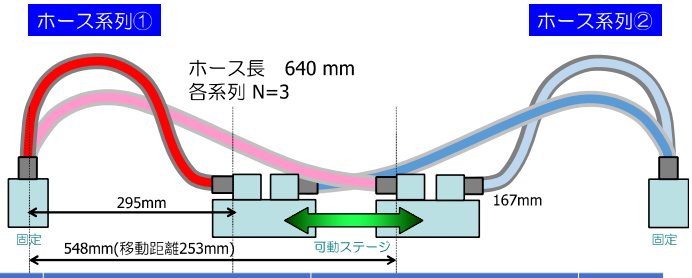
③　ホース揺動水素インパルス試験

表１に示した実水素ステーションにおける負荷を加えた条件による水素インパルス試験では加速効果が見られなかった。このことから、ISO 6802で規定されているホースの揺動による変形とホース内の脈動圧の重畳による加速を検討した。ISO 6802においては、揺動と脈動圧を個別に制御して負荷する方法である。0.5 Hz程度に規定されるホース形状の変動と１Hz程度に規定される内圧の変動（1 Hz）は必ずしも連携して制御されていない。水素ステーションにおいて、揺動による変形はホースの車両への接続と収納による変形を模擬し、水素ガスによる内圧の負荷は充填時の圧力変動を模擬していることから、揺動による変形において、接続時の状況を模擬したホース伸長時の状態で水素ガスによる内圧負荷を実施するホース揺動水素インパルス試験を検討した。

図９に開発したホース揺動水素インパルス試験の設備の概要を示す。垂直方向に固定した水素ガス供給側フィッティングを２系列設定し、図９に橙色で示した移動ステージを中央部に設け、移動ステージ上に水平

にフィッティングを設定し、揺動試験時のハーフΩ型にホースを接続した。稼働時はステージを移動させることで移動ステージ両側に各3本接続したホースが伸長・収縮を繰り返す。

図10に評価プロトコルとしてホース揺動水素インパルス試験のホース形状と圧力変動を示す。Step 1で伸長側のホースについて水素インパルス試験（ISO 19880-5 Clause 7.9）条件で加減圧を実施し、屈曲側は休止する。Step 2でステージが移動し、加減圧が終わった状態のホースが屈曲状態になり、休止ホースが伸長状態になる。引き続き伸長状態のホースに加減圧を実施し、終了後、Step 4で再びステージが移動し、Step 1の状態に戻る。図10にそれぞれの系列について、揺動時の伸長状態および屈曲状態のホースの形状を示す。片側の系列に接続したホースが伸長した状態で水素インパルス試験と同様-40℃に冷却した87.5 MPaの水素ガスを流通させる。減圧後、移動ステージを移動させて収縮状態とするとともにもう一方の系列に接続したホースが伸長状態となり、水素ガスを流通させる。この揺動による変形、伸長時のガス流通による加減圧サイクルを約60秒で繰り返す評価パターンを設定した。ホースに流通する87.5 MPaの水素ガス温度は-40℃とし、環境温度は室温により実施した。さらに、温度依存性を評価するため、ホース外表面にリボンヒータを巻きつけてホース表面温度を所定の温度に制御した。移動時間と反対側のホースの加減圧に要する時間が加わることから、通常の水素インパルス試験より休止時間が30秒程度長くなる。



STEP	ホース系列①		ホース系列②		時間
	面間 (mm)	圧力 (MPa)	面間 (mm)	圧力 (MPa)	
1	548	1.0→90→1.0	167	1.0	26 sec
2	548→295	1.0	167→420	1.0	3 sec
3	295	1.0	420	1.0→90→1.0	26 sec
4	295→548	1.0	420→167	1.0	3 sec

図10 ホース揺動水素インパルス試験のホース形状と圧力変動

表2に試作87.5 MPaホース揺動水素インパルス試験結果を示す。環境温度を室温としてホース表面温度を制御しなかった場合5,145回、3,819回の揺動水素インパルスによりホースからの漏洩が発生した。

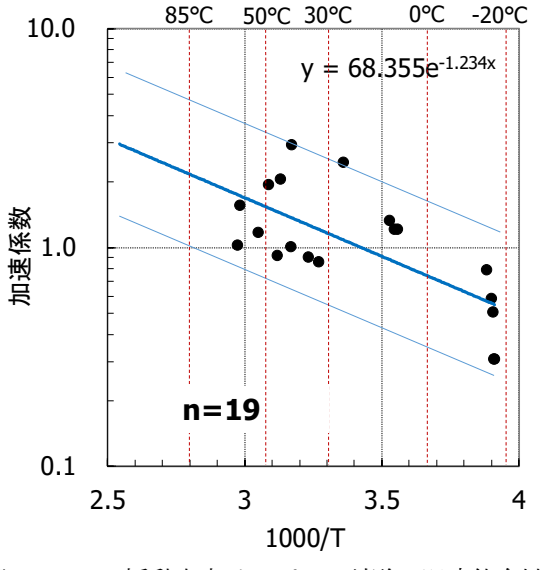
表2 試作87.5 MPaホース揺動水素インパルス試験結果

ホース	ホース表面温度	耐久回数	加速係数
試作87.5MPaホース	室温	5,145	0.58
試作87.5MPaホース	室温	3,819	0.79
試作87.5MPaホース	30℃	2,259	1.33
試作87.5MPaホース	30℃	2,478	1.21
試作87.5MPaホース	30℃	2,479	1.21

水素インパルス試験にホース揺動を負荷することで形状を固定したホースの水素インパルス試験に対してより小さい回数で漏洩が発生し、耐久性評価の加速が確認できた。ホース表面温度を室温として、ホース表面温度を制御しなかった場合、水素インパルスにより-40℃の水素ガスを流通させることによりホースの表面温度が-20℃程度に低下する。これによりホース内面と外面の温度差が小さくなる。ホース内面と外面の温度差を拡大することで加速効果が大きくなると考えられる。このことから、ホース外表面にリボンヒータを設置してホース表面温度を30℃に制御して同様に揺動水素インパルス試験を実施した。その結果、表2に示した通り、実水素ステーションにおいて3,000回の耐久回数を示した試作87.5 MPaホースの評価をした結果、2,259回、2,478回、2,479回の揺動水素インパルスにより漏洩が発生した。実水素ステーションにおける耐久回数に対してより小さい揺動水素インパルス回数での漏洩が確認された。試作87.5 MPaホースの実水素ステーションにおける耐久回数3,000回を漏洩に至る揺動水素インパルス回数で除した値を加速係数として

定義し、これにより加速係数 1.2 程度の加速評価が可能であると判断した。漏洩が発生したホースについて、漏洩の要因を調査した結果、実水素ステーション、擾動水素インパルス試験とも内層樹脂チューブの長手方向にスリット状に形成された樹脂材の疲労による貫通クラックであることが判明した。これらの結果から、高圧水素ホースの擾動水素インパルス試験は実水素ステーションにおける耐久回数の加速的な評価が可能であると考えられる。

図 11 に試作 87.5 MPa ホースの擾動水素インパルス試験の加速係数の温度依存性を示す。横軸をホース表面温度計測値の平均値 T の逆数、縦軸を加速計数の対数としたアレニウスプロットを示す。ホース表面温度は試験中の低温の水素ガス流通に伴う変動が大きいため、試験中の平均温度で整理した。加速係数（実水素ステーション充填耐久回数(3,000)／擾動水素インパルス試験耐久回数）は，30℃から 85℃の範囲では、ばらつきが大きいアレニウス型の依存性と考えられる。加速係数は 60℃で 1.3±0.2 程度と考えられる。



試験終了後、漏洩箇所の調査を行なった結果、いずれも内層樹脂チューブに貫通クラックが発生していることが確認され、実機における漏洩と同様の事象により漏洩が発生したことが確認された。図 12 に漏洩の原因となった貫通クラックの光学顕微鏡写真を示す。実水素ステーションにおける漏洩の際にも同様に内層樹脂チューブの貫通クラックが原因であり、貫通クラックの破断面にはストライエーションが形成されていることが確認された。すなわち、加圧・減圧の繰り返しによる疲労によってクラックが進展し、貫通するに至り、漏洩したと考えられる。また、実機の破断面において、放物線状の構造（パラボラパターン）が発生していることから、クラックの進展により、不安定クラックの進展も見られることが判明した。これに対して、ホース擾動インパルス試験の場合、ストライエーションも観察されているが、実機より多くのパラボラパターンが観察され、高温での試験の場合、パラボラパターンの形成がより顕著である。このことから、高温におけるホースの擾動と加減圧による疲労が重畳し、不安定クラック形成の加速により内層チューブに形成されたクラックが貫通クラックに至る過程を加速したと考えられる。

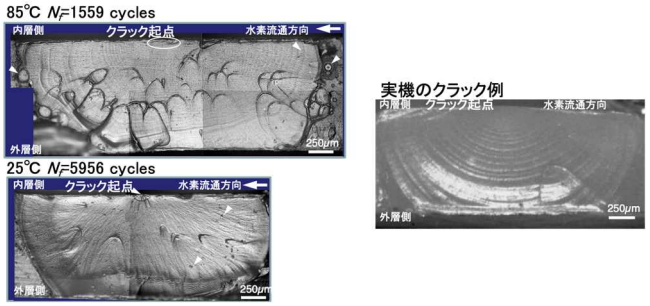


図 12 試作 87.5MPa ホースのホース擾動水素インパルス試験ホース漏洩箇所の観察結果

上述の通り、本研究開発項目については、達成したと判断した。

（2） 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明

① 試験後ホースの調査

水素インパルス試験の加速因子として抽出した温度変動、加減圧パターンにおける加圧速度、高圧保持時間の影響、ホースの表面温度、ホースの屈曲による影響について、それぞれの因子を個別に水素インパルス

試験のプロトコルに組み込んで検証した。その結果、ホースの表面温度、ホースの屈曲が水素インパルス試験におけるホースの加減圧耐久回数への影響が大きいことが判明した。試験終了後のホースについて、X 線 CT によりホース内層樹脂材の破壊状況について調査した。内層樹脂チューブ形状のまま計測が可能であり、クラックの形状について観察することが可能であった。水素インパルス試験と水素ステーションにおけるホース内の水素の流通状況を検証するため、計算流体力学を応用したシミュレーションを試みた。両者で水素流通量が大きく異なることが判明した。また、選択された加速係数の議論に基づいて、ホースの水素インパルス試験条件について検討した。水素インパルス試験プロトコルの昇圧速度、高圧保持時間、加圧中の水素温度変動、ホース表面温度、ホースの揺動について、水素インパルス試験のプロトコルに組み込むことで個別に評価した。その結果、ホースの表面温度とホース揺動が水素インパルス試験のホースの耐久性に影響を与えることが判明した。これらの条件による評価済みホースについて、内層材料の劣化と疲労挙動について調査を実施した。その結果、実水素ステーションにおける試用、水素インパルス試験終了時に確認されたホースからの漏洩事象は、いずれもホース内層樹脂チューブの長手方向に樹脂の疲労により形成されたスリット状の貫通クラックであることが判明した。内層樹脂の疲労による貫通クラックの形成が漏洩の要因であることから、高圧水素ホース内層樹脂材料のモデル材料としてポリアミド 11、ポリエチレンを設定し、高圧水素環境における劣化、強度特性、破壊挙動について調査を実施した。設定した高圧水素ホース内層樹脂のモデル材料について、劣化メカニズムの検討（一部国立大学法人大阪大学再委託）、材料強度特性、破壊挙動の調査（一部国立大学法人山形大学再委託）を実施した。さらに、2021 年 9 月よりホースの大変形挙動の解析手法の検討（一部国立大学法人弘前大学再委託）を行い、前述の内層樹脂劣化、強度特性、破壊破壊挙動の調査により判明した内層樹脂チューブにおける貫通クラック形成が、ホース全体の変形に伴い発生する応力場の状況の調査を実施した。

これらの実施内容について、一般社団法人日本ゴム協会水素機器用エラストマー材料研究分科会との連携し、「水素機器用ゴム・樹脂材料水素特性データベース」に収載された高圧水素ホース内層樹脂材料の基礎的な高圧水素曝露時の水素侵入量、拡散係数など水素特性及び高圧水素曝露による破壊挙動に関する知見を活用し、検討を進めた。

② 高圧水素ホース内層樹脂の劣化メカニズムの検討（国立大学法人大阪大学再委託）

高圧水素ホース内層樹脂モデル材料としてポリアミド 11、低密度ポリエチレン、高密度ポリエチレンを選定した。ダイヤモンド窓板を持つ高圧水素ガスセルを用いて、赤外分光法によりその場測定を実施した。図 3 に測定に用いた設備を示す。水素エネルギー製品研究試験センター（福岡県糸島市）の高圧水素試験室に設置された耐爆カバー内に、高圧セル赤外分光装置を設置し、遠隔操作により赤外透過スペクトルを測定した。

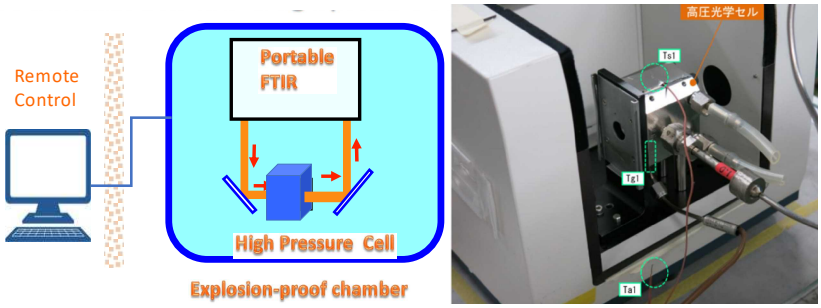


図 13 高圧水素環境下におけるその場赤外分光測定装置。左：装置概要、右：赤外分光装置の試料室に取り付けられた高圧水素ガスセル

この結果、低密度ポリエチレンや高密度ポリエチレンと比較して、高圧水素ガスへの曝露がポリアミド11に与える影響は概して少ないが、その構造変化の程度は著しい温度異存性があることが明らかになった（図14）。

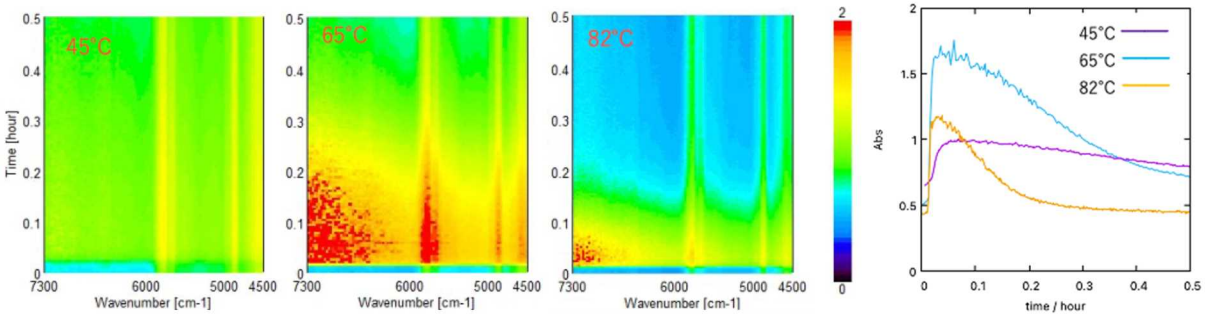


図14 ポリアミド11の透過赤外スペクトルの脱圧後の経時変化(左)と波数6001cm^{-1}の位置におけるベースライン高さの時間依存性(右)

左側の3つの2次元スペクトルは異なる温度、45℃、65℃、82℃において90MPa　水素ガスに13時間曝露した後に、約一分間で常圧まで減圧して放置した際のスペクトル変化を追跡した結果を示している。横軸が波数、縦軸が脱圧後の経過時間である。いずれの温度においてもベースラインは脱圧直後に急激に上昇し最大値を示した後に減少に転じている。しかし、右側のグラフに示す様に、その変化の大きさと時間依存性において大きな違いが認められる。ベースライン変動は、65℃で曝露したもので最も大きく、45℃で曝露したもので最も小さい。一方、ベースラインの高さが最大に達する時間、引き続いてのベースライン高さが減衰する速さにも明瞭な温度異存性が見られ、温度が高いほど速い減衰が見られる。
図4のベースラインの変動は、試料内のボイドによる光散乱に帰することができる。従って、上記の変化は、①脱圧過程で試料中に発生するボイド量は65℃で最も大きいこと、そして②発生したボイドの収縮は、温度が高い程速いことを示している。①と②には、相反する温度変化を示す2つの因子、高分子材料内の水素拡散係数、そして高分子材料の水素溶解度係数、が関係すると推測される。

③ 高圧水素ホース内層樹脂の材料強度特性、破壊挙動の調査
(国立大学法人山形大学再委託)

高圧水素ホースの内層樹脂材である結晶性高分子材料の劣化、疲労/クリープ挙動について、モデル材料としてポリアミド11を選定した。対称三角波形及び台形波形による疲労破壊寿命特性の繰返し速度（周波数）依存性を、試験材料のガラス転移点温度 T_g 及び延性・ぜい性転移点温度 T_{BD} を挟む周囲温度範囲で検討した。なお、試験には、すべて片側き裂曲げ（SENB）試験片を用いた。結果は、破壊時間速度 $1/tf$ と繰返し速度 f の両対数関係から得られる疲労破壊及びクリープ破壊寿命機構線図（図15）から、寿命特性の帰属分類が可能となっ

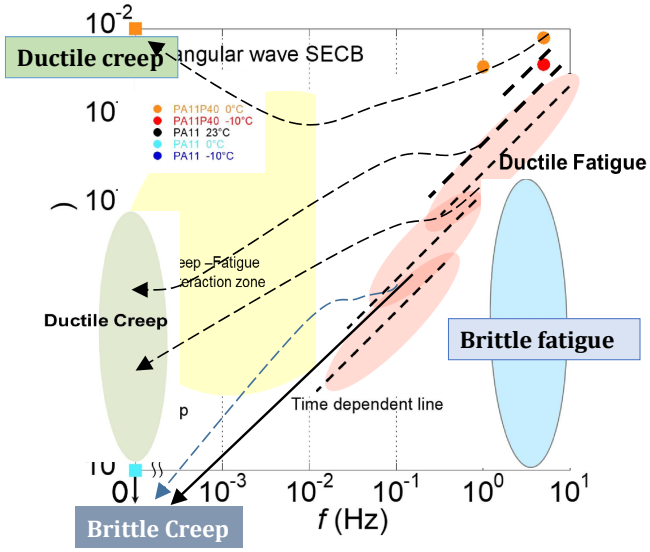


図15 疲労破壊及びクリープ破壊寿命機構線図

た。すなわち、寿命が時間だけに支配されるクリープ寿命特性は、「延性クリープ」と「ぜい性クリープ」に分類され、特に後者は、低速クリープき裂成長が破壊寿命を支配した。他方で、寿命が、時間とは無関係に（繰り返し速度に依存せずに）繰返し回数だけで決定される疲労破壊特性となる試験条件が、見いだされた。このとき、き裂先端に形成される損傷領域（図16）の大きさは、小規模降伏条件を満たしき裂先端周りの応力拡大係数に支配されていた。ただし、これらの試験条件が、延性・ぜい性転移を示す温度・繰返し速度条件を超えると、予き裂材にも拘わらず寿命バラツキが大きくなり，寿命温度依存性に速度論支配が不明確になる疲労機構が出現した。この場合、主き裂先端部より離れた位置に、独立に二次成長した幾つかのき裂の様子が破面に認められた。このように、両者の疲労機構が明確に異なることが示され、前者を「延性疲労」に、後者を「ぜい性疲労」と機構分類した。以上のクリープ及び疲労のそれぞれ破壊機構分類について、可塑化ポリアミド11においても同様に成立した。なお、クリープと疲労の相互作用については、「延性クリープ」と「延性疲労」の間で顕著に表れ、双方の時間寿命より、加速する場合がみられた。この場合、「延性疲労」が成立する、き裂端の小規模降伏条件から逸脱による力学的要請によるもので、小規模降伏条件が維持される「ぜい性クリープ」と「延性疲労」との間での相互作用は、ほとんど、認められなかった。このことは、「延性疲労」寿命から「ぜい性クリープ」寿命予測及び周波数の増加による促進試験の可能性を示唆する。

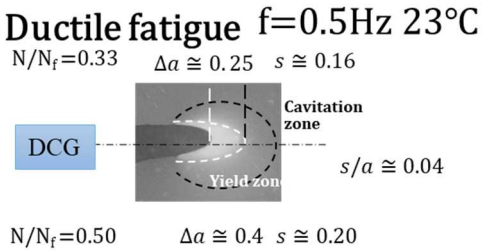


図16 延性疲労き裂先端部での変形の様子

実使用ホース内装樹脂層破損品から得られた破面直下の偏光顕微鏡観察結果を図17に示した。このとき、破面には不連続低速き裂成長の痕跡となる“striation pattern”が観察され、その直下では分子配向の伴う塑性変形が認められた。これらの比較から、ホース内層樹脂材の破壊メカニズムは、大気圧下での延性疲労が支配的であることが判明した。

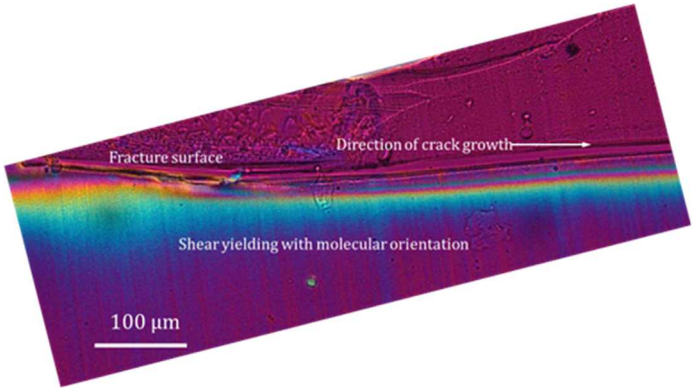


図17 実使用ホース内装樹脂層破損品から得られた破面直下の偏光顕微鏡観察写真

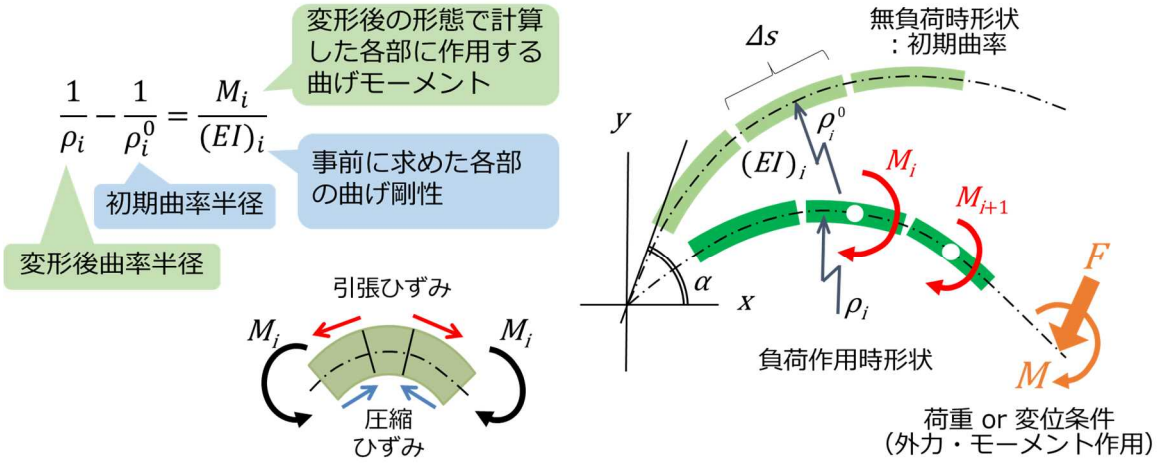
実ホースでは、耐圧性を確保のためホース内層の周方向に一定歪み範囲以下に変形が拘束されるように補強されると同時に、除圧時の可撓性確保のため補強部は織構造を有している。そのため、可除圧時のホース曲げ変形から、ホース内層の軸方向引張応力が局所的に発生する。つまり、ホース内層は、内径/厚さ比では薄肉円筒に近いが、周方向変形の拘束から圧肉円筒と同様な平面歪み条件となり、さらに、曲げ変形による局所的に応力三軸度の高い部位が存在する。そのため、ホース内層内面近傍に、き裂の前駆段階となる局所なボイド列形成、すなわち、クレイズの発生がある。今回の結果は、大気中で予き裂試験片による力学作用によるボイド発生・成長である（図16参照）。水素暴露の脱圧時でのボイド発生成長との重畳効果（相互作用）については、き裂発生と成長の各過程での応力状態の大きな相違（応力特異性の有無）を十分考慮して検討する必要がある。

④ ホースの大変形挙動の解析手法の検討

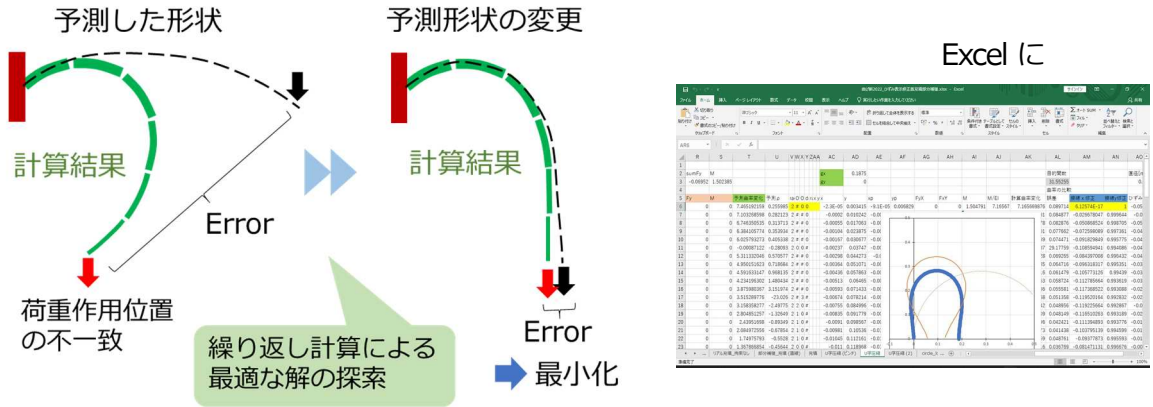
（国立大学法人弘前大学再委託、2021 年 9 月～2023 年 3 月）

水素ステーションで用いられる水素充填ホースは 3 m 程度の長さであり、かつ樹脂チューブを高強度繊維もしくは金属ワイヤーで補強した多層構造となっている。数値解析手法として一般に用いられる有限要素法を適用するためには、これらの構成材料をモデル化し、それぞれの材料を微小な計算要素に分割する必要がある。水素充填ホースのように細長く、局所に異種材料が組み込まれた複合体を解析対象とする場合、構成材料の微視構造を正確に再現し、ホース全体にわたって要素分割すると、要素総数が膨大となり計算の実施が困難になる。このため、ホース形状変化の主要因となる曲げ変形に注目し、大変形挙動を記述するための数理モデルを構築することによりホース全体の変形形状を予測し、局所に発生するひずみ、応力場の解析を試みた。

図 18 に開発したホース大変形挙動数理モデルの概要を示す。ホースの曲げによって生じる局所変形は、各部の曲げ剛性と、その場所に作用する曲げモーメントの大きさによって決まり、曲率の変化として表すことができる。ホースに外力と外モーメントが作用すると全体が変形し、その変形によって各部に作用する曲げモーメントも変化する。したがって、大変形を伴う場合は、変形後のホース形状において、曲率変化と曲げモーメントのつり合い関係が満たされている必要がある。そこで本シミュレーション手法では、変形後のホース形状を予測し、予測形状に基づいて定めた荷重条件にて曲げ変形解析を行う。この時の予測形状と解析



(a) 曲げ変形の数理モデル

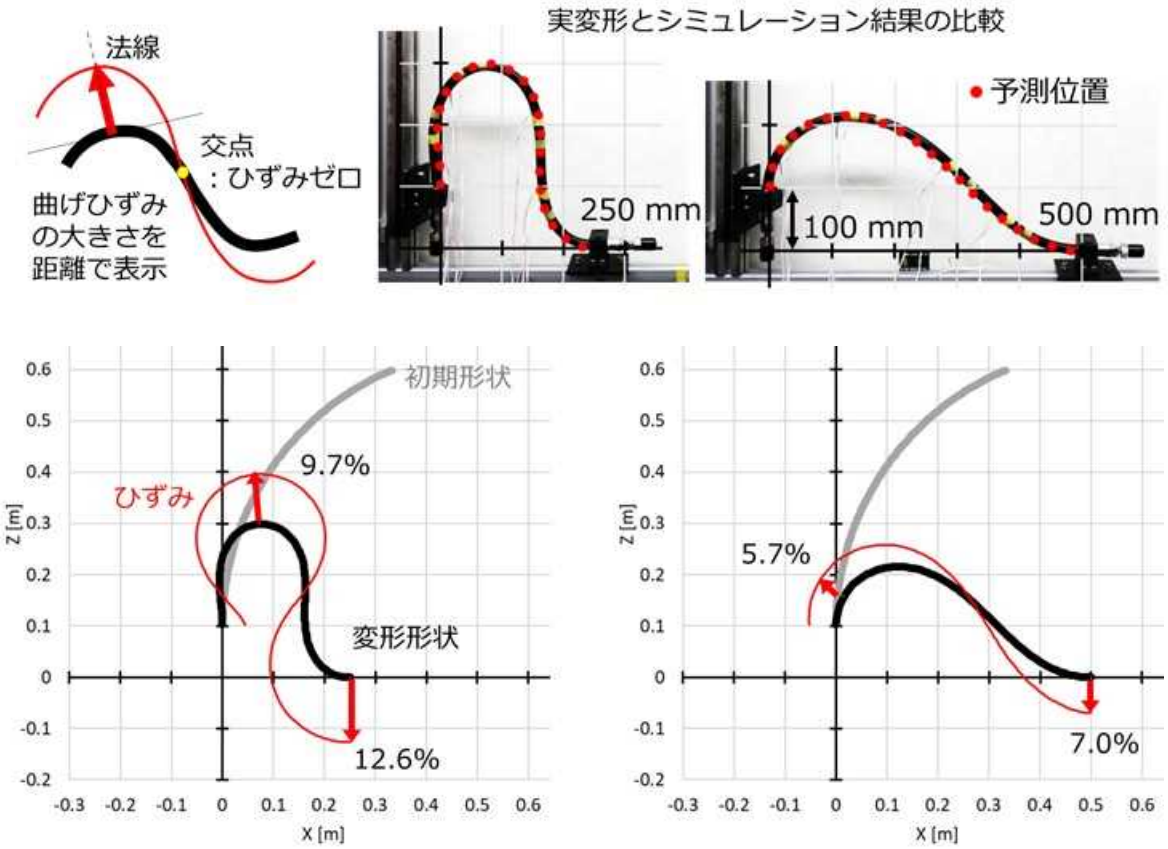


(b) 解析手法と表計算ソフトへの実装

図 18 ホース第変形挙動解析数理モデル

結果の誤差を求め、その誤差が最小となる最適解を、非線形計画法に基づく繰り返し計算によって決定する計算アルゴリズムを構築した。本手法を汎用の表計算ソフト（Microsoft Excel）に実装し、耐久試験時のホース変形をシミュレーションにより再現した際の各部の曲げひずみを計算した。

図 19 に解析例を示す。本例ではホース端部の固定位置を耐久試験に合わせて制約条件として定め、変位の境界条件（強制変位）を満たすホースの変形を予測した。



（a）収縮時の変形とひずみ　　（b）伸長時の変形とひずみ

図 19 解析に基づく局所ひずみ

なお、ホースの解析パラメータである曲げ剛性は、実際のホースを曲げ変形させる力学試験によって得られた値を用いた。本図では計算によって得られたホース形状と曲げひずみ分布を表しており、各部のひずみの大きさを両グラフ間の距離によって表現している。また、矢印によって指示した箇所が固定側、駆動側に区分した時のひずみのピーク位置となり、曲げ応力のピーク位置と一致する。ホースは初期曲率を有することから、取り付け方によっても局所に生じるひずみの大きさは異なるが、耐久試験の駆動範囲において最大で 10%超える大きなひずみが生じていることが確認された。また、駆動部の移動に合わせて最大ひずみの発生位置や大きさが変化する様子を可視化することが可能になった。

本解析は耐久試験の負荷条件設定や、変形に伴う破損位置の推定、ステーションでの実使用においてホースを安全に運用するための機器や車両の配置、ホース操作法といった運用基準を策定する際に活用することが期待される。

上述の通り、本研究開発項目については、達成したと判断した。

（3） 高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定

高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発、およびその規格案策定を目的として、一般社団法人日本ゴム工業会にワーキングチーム(WT)を設置した。WT は本プロジェクトの実施者6名（2021年9月より7名）に加え、関係者としてホースメーカー、水素利用技術協会のメンバーを加えて構成し、議論を進めた。WT 委員を表3に示す。「高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化WT」は実施機関中、18回開催した。開催日程を表4に示す。2018年度～2021年度に開催した第1回～第14回 WT においては主に本プロジェクトの研究開発についての進捗報告及びその結果の議論を中心に進め、最終年度である2022年度に開催した第15回～第18回 WT において高圧水素ホース加速耐久性評価法案の策定に関する議論を進めた。WT における議論準備のため、（一社）日本ゴム工業会、国立大学法人九州大学、ホースメーカー2社からの委員により構成される高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化サブワーキングチーム（SWT）を3回開催し高圧水素ホース加速耐久性評価法案の詳細検討及び規格文案作成を行なった。

表3 高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化WT

氏名	所属	備考
畑中　進	横浜ゴム株式会社	主査：第1回～第14回
大倉　美恵	横浜ゴム株式会社	主査：第15回～第18回
西村　伸	国立大学法人九州大学	
栗山　卓	国立大学法人山形大学	
金子　文俊	国立大学法人大阪大学	
藤崎　和弘	国立大学法人弘前大学	第11回～第18回
富岡　秀徳	（一社）水素供給利用技術協会	
金子　彰一	（一社）水素供給利用技術協会	第1回～第6回
水村　康	株式会社ブリヂストン	
松山　史昌	株式会社ブリヂストン	
鈴木　幸治	株式会社ブリヂストン	第1回～第3回
鈴木　健也	株式会社ブリヂストン	第7回～第18回
柴野　宏明	横浜ゴム株式会社	第1回～第8回
本開　盛道	横浜ゴム株式会社	第9回～第18回
山口　尚志	横浜ゴム株式会社	
遊佐　郁真	横浜ゴム株式会社	第1回～第4回
眞榮田　大介	横浜ゴム株式会社	第5回～第18回
荒木　俊二	（一社）日本ゴム工業会	
谷村　博史	（一社）日本ゴム工業会	
青木　正己	（一社）日本ゴム工業会	
碓井　俊一	（一社）日本ゴム工業会	第5回～第18回
冨川　久里子	（一社）日本ゴム工業会	

＊備考空欄は第1回～第18回

表4 高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化WT 開催状況

回	開催日
第1回	2018年6月25日
第2回	2019年1月23日
第3回	2019年3月4日
第4回	2019年5月17日
第5回	2019年8月29日
第6回	2020年1月15日
第7回	2020年7月17日
第8回	2020年10月9日
第9回	2021年1月21日
第10回	2021年3月15日
第11回	2021年6月3日
第12回	2021年9月28日
第13回	2021年12月17日
第14回	2022年3月18日
第15回	2022年6月24日
第16回	2022年9月27日
第17回	2022年12月15日
第1回SWT	2022年12月21日
第2回SWT	2023年1月16日
第3回SWT	2023年2月17日
第18回	2023年2月21日

＊SWT：サブワーキングチーム

SWT における議論及び規格案文の作成、WT における議論の結果、本規格案はJIS 文書を想定して記述すること、水素に限定せず高圧ガスホースの加速耐久性評価法として適用可能な方法として策定した。

ホースの（1）項で述べた水素インパルス試験、ホース揺動水素インパルス試験の試験条件について、（2）項で実施した各種加速因子の検討結果などを踏まえ、WT にて議論の上策定した。これらの水素インパルス試験、ホース揺動水素インパルス試験の結果、北米水素ステーションにて3,000回充填の耐久性を示した高圧水素ホースについて、ホース設定を固定した水素インパルス試験においては、ホースのひずみ、評価前のホースの揺動、内外層の温度差、旧加圧を含む加減圧パターンの設定など、想定された種々の加速因子を設定して実施した際にも10,000回以上の耐久性を

示すことから、加速評価が困難であると判断した。これに対して、ホース内外層の温度差を大きく設定し、ホースの揺動を行い、ホース伸長状態で水素による加減圧を行う評価法により、漏洩に至るまでの加減圧回数は25℃において8,000回程度、85℃において1,800回程度となり、北米水素ステーションにおける耐久性を下回る加減圧回数で、実機同様内層樹脂チューブの貫通クラック形成により漏洩が発生した。より高温である85℃の場合に加速係数約1.6倍となった。このことから、ホース揺動水素インパルス試験をホース耐久性加速評価法案として検討することとし、再現性の確認を進め、より詳細な条件設定について検討し、検証をすすめることとした。

また、WT会議において、学会、米国エネルギー省Annual Merit Review、ISO国際会議等への参加、CSA Langley Laboratory（カナダ）、National Renewable Energy Laboratory（米国）など海外の研究機関訪問、海外水素ステーション調査など、海外調査結果について報告し、高圧水素ホースの開発状況、海外ステーションの状況、高圧水素関係の評価試験機関の状況、水素技術、ホースに関する国際規格の状況などに関する情報共有を図った。

上述の通り、本研究開発項目については、達成したと判断した。

（4） ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供

試作87.5 MPaホースの評価結果及び漏洩の要因調査、加速因子に関する検討結果について、高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化WTを通じて共有し、ホースメーカーにおける開発に活用いただいた。

試作87.5 MPaホースについての評価により加速係数1.2程度で実水素ステーションにおける耐久回数の評価が可能であることが確認された揺動水素インパルス試験法を用いて、ホースメーカーより提供された2仕様のホース評価を実施した。表5に評価結果を示す。提供ホース2仕様はいずれも目標とする30,000回以上の耐久回数を示し、引き続き評価を継続した結果、提供ホースA及び提供ホースBの1本が80,000~100,000回程度で漏洩が確認された。提供ホースBについては110,000回以上の耐久性を示し、設定した評価期間内に漏洩が確認されなかった。

表5 提供ホース揺動水素インパルス試験結果

ホース	ホース表面温度	耐久回数	備考
提供ホースA	30℃	91,690	
提供ホースA	30℃	87,644	
提供ホースB	30℃	99,359	
提供ホースB	30℃	113,278	漏洩なく終了
提供ホースB	30℃	115,726	漏洩なく終了

これらの結果について、ホースを提供いただいた各ホースメーカーにフィードバックし、水素ステーションにおける使用回数設定のための検討に活用いただいた。本プロジェクトが開始された2018年度当初において、水素ステーションにおける使用回数は650回から1,000回に設定され、この回数を目安に水素ステーションにおいてホースが交換されていた。本プロジェクトの成果を活用したホースメーカーによる検討の結果、水素ステーションにおける使用回数は3,000回から4,000回程度が見込まれ、水素ステーションにおけるホース交換頻度低減、これによる水素ステーション運営コスト低減に寄与することができたと考えている。

上述の通り、本研究開発項目については、達成したと判断した。

３．２ 成果の意義

2017年度までのNEDO事業において、ホースメーカー２社により開発された試作87.5 MPaホースについて、実水素ステーションにおける寿命末期までの使用は困難であること、ホースの耐久性評価法として水

素インパルス試験法が開発され、ISO 19880-5 に採用されているが、水素インパルス試験による耐久回数と水素ステーションにおいて充填に使用した際の耐久回数との相関が明確ではなく、かつ、上述の２社のホースを水素インパルス試験法により評価した場合、数万回の耐久性を示すことが判明している。このため、これらのホースの水素インパルス試験による耐久性評価は長期間を要する。ホースメーカーにて水素ステーションにおけるホース交換サイクルの設定に資する評価結果が十分に得られず、ホース交換サイクルについて、ホース耐久性の実力値に比して限定的な回数を設定せざるを得ない状況となっている。このため、加速耐久性評価法を確立することにより、短時間での耐久性評価を実施し、ホースメーカーにおけるホース交換サイクルの設定に資するデータを蓄積することが可能となる。本研究の結果得られた加速耐久性評価データはおよび評価後ホースの解析結果、高圧水素環境下での材料構造変化、疲労特性データ、さらにホースの第変形挙動数理解析モデルは、耐久性の実力値に応じたホース交換サイクルの設定、高耐久性ホースの開発に活用される。

３．３　開発項目別残課題

⑴ 水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明

現状、米国カリフォルニア州コスタメサおよびロングビーチ水素ステーションの実証結果をホース耐久性の基準とした試験法と水素ステーションにおける充填回数の相関を検討し、試験法と水素ステーション充填回数の相関を明らかにした。特定の水素ステーションにおける耐久性を基準とした相関を一般化し、すべての水素ステーションに適用するためには水素ステーションにおける運用情報、例えば充填時の充填水素量、充填速度、温度変化などのデータ、充填時のホース変形などの情報について、統計的に解析し、それぞれのパラメータのホース耐久性に対する影響度をそれらの平均値のみならず分布の影響も評価する必要があると考える。

⑷ 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明

高圧水素に直接曝露されるホース内層樹脂を想定した結晶性高分子材料について、高圧水素環境下における構造の変化、疲労特性について明らかにするとともに、水素漏洩の原因である内層樹脂チューブの貫通クラック形成メカニズムが明らかになった。また、ホース大変形挙動解析数理モデルを開発し、水素ステーションにおけるホースの変形に伴うひずみの発生状況の解析が可能となった。それぞれの解析により得られた材料の構造変化、局所の応力場による材料破壊、ホース大変形による応力場の解析を連成した解析を行うことが残課題である。

⑶ 高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定

実施項目（1）により得られた水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関、実施項目（2）で得られたに高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子に基づき、ホース揺動インパルス試験法を開発した。前述の通り、特定の水素ステーションにおける耐久性を基準とした検討結果に基づく評価法であり、一般化のためには水素ステーションにおける運用情報を統計的に解析した結果に基づく加速係数を設定することが残課題である。

⑷ ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供

ホースメーカーに提供した本プロジェクトの成果を踏まえ、水素ステーションにおける使用回数は2017 年度の 650 回～1,000 回に対して 3,000～4,000 回程度となることが見込まれている。水素ステーションにおける使用回数が 3～4 倍となる成果が得られているが、これらのホースの開発したホース揺動インパルス試験による評価結果から想定される回数より小さい値となっている。このことも特定の水素ステーションにおける充填回数を基準とした評価であることに起因し、前述の通り水素ステーションにおける運用情報を統計的に

解析した結果に基づく加速係数を設定することが残課題である。引き続きホースメーカーへの情報提供を進める。

4．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

図 20 に実用化・事業化に向けた具体的取り組みを示す。本プロジェクトでは高圧水素加速耐久性評価法を確立し、開発した評価法を用いてホースメーカーより提供されたホースの評価を実施した。その結果をホースメーカーにフィードバックすることでホースメーカーにおける開発を加速し、最終的に水素ステーションにおける 30,000 回の充填に使用可能な長寿命ホースを実用化に資するデータを取得することを目的とした。

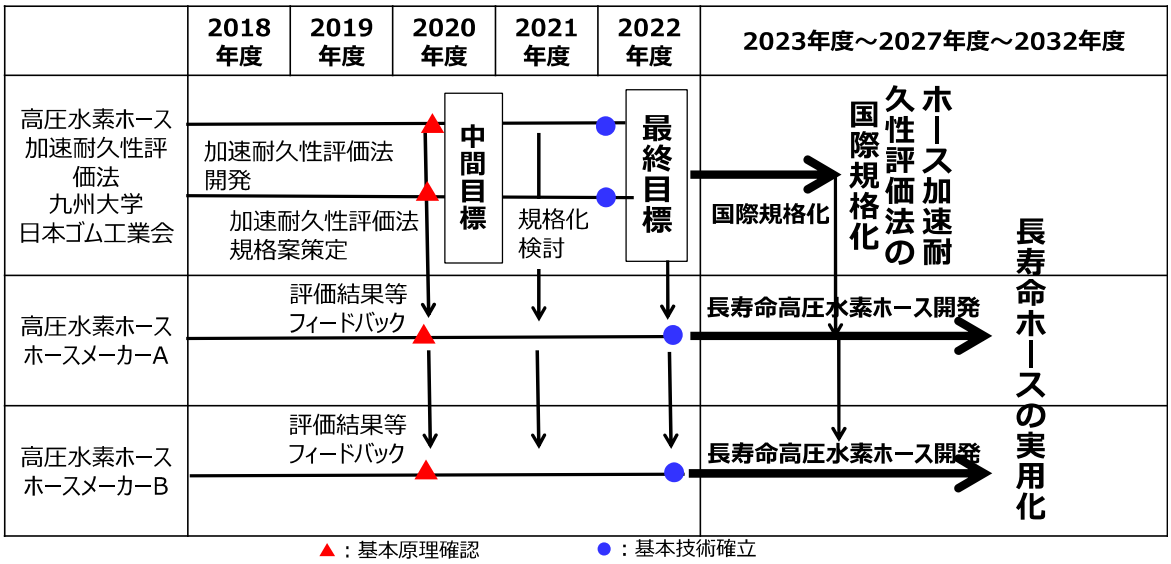


図 20 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

本プロジェクトにより得られた成果である高圧水素ホース加速耐久性評価法は高圧水素ホースメーカー，高圧水素ホースのユーザーであるディスペンサーメーカー，水素ステーションコンストラクター，水素ステーションオーナーなどステークホルダーが高圧水素ホースの耐久性を評価する指標として，開発した高圧水素ホース加速耐久性評価法を利活用し，新たな長寿命ホースの開発，ホース交換サイクルの延長による水素ステーション運営の低コスト化に資することが期待される。

開発した高圧水素ホース加速耐久性評価法の「実用化」は、関係するステークホルダー、規制当局により適切なホースの耐久性評価法として認めていただくことと考える。その一環として本プロジェクトで策定した高圧水素加速耐久性評価法規格案の国内規格化、国際規格化を推進する。

水素ステーションの安全性を確保した上での低コスト化は、燃料電池自動車普及のために喫緊の課題であり、十分なニーズが存在する。このことから研究開発成果は速やかに水素ステーションに導入されると考えられる。

ホースメーカーでは「水素利用技術研究開発事業」の成果として、82MPa ホースはすでに上市されており、87.5MPa ホースについても試作が完了している。試作ホースについて、ホース交換サイクル決定のための水素ステーションにおける実証データ、これと相関する加速耐久性評価法がないため国内ステーションにおいては実績をベースにした交換サイクルが設定されている。ホースメーカーから提供されたホースについて加速耐久性評価法の開発とともに国内外の実ステーションにおける実証を進め、これらの相関を明らかにし、加速耐久性評価法を確立することにより、ホース交換サイクルの延長、決定に資するデータを取得する

ことが可能になる。ホースメーカーから提供されたホースの耐久性に関する評価結果を提供することが可能になり、これに基づいて、各ホースメーカーにおいて30,000回充填に対応可能な長寿命87.5 MPa高圧水素ホースの実用化・事業化が進展し，水素ステーションへの実装が進展すると考えている.

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019/1/30	水素先端世界ﾌｫｰﾗﾑ2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	Structure Change Caused by Exposure to High-pressure Hydrogen Gas : Influence of Crystallinity in Polyamide11	大山 恵子
2	2019/5/31	第68回高分子学会年次大会 （大阪国際会議場）	高圧水素ガスの結晶性高分子の構造に与える影響に関する赤外分光法による研究	金子 文俊・大山 恵子 ・藤原 広匡 ・西村 伸
3	2019/9/16	第68回高分子討論会 （福井大学）	FTIR分光測定による高圧水素ガスの結晶性高分子の構造に与える影響に関する研究	金子 文俊 ・大山 恵子・藤原 広匡・西村 伸
4	2019/9/5	PDDG 2019 33rd Polymer Degradation Discussion Group Conference (Marta)	Infrared spectroscopic study on the influence of high pressure hydrogen gas on crystalline polymers	Fumitoshi Kaneko, Keiko Ohyama, Hirotada Fujiwara, Shin Nishimura
5	2021/8	第70回高分子討論会	高圧水素曝露によりポリアミド11に形成されたナノボイドの小角X散乱法による定量評価手法の確立	大山恵子
6	2021/9	高分子討論会	高圧水素ガスが高分子材料に与える影響に関する FTIR分光その場測定 による研究	金子 文俊
7	2022/9	第71回高分子討論会	高圧水素曝露により形成されたナノボイドの小角X線散乱法を用いた構造解析	大山恵子

－特許等－

なし

（2-(4)-①）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術」

ENEOS(株)、(株)本田技術研究所、トキコシステムソリューションズ(株)、（一社）水素供給利用技術協会

●成果サマリー（実施期間：2018年度～2022年度）

・低コスト対応プロトコルの開発：革新的充填プロトコル（MC Multi Map：MC-MM）を開発し、T20相当へのプレクール温度緩和が見通せる結果が得られた。
・低コスト高頻度水素充填システムの開発：合理的なダブル充填を可能とする協調制御システムを開発し、最小設備構成で充填台数10台/hの技術を完成した。
・水素充填技術基準整備：SAE J2601改訂内容（MCフォーミュラ等）及び革新的充填プロトコル（MC-MM）を反映した技術基準案を策定した。

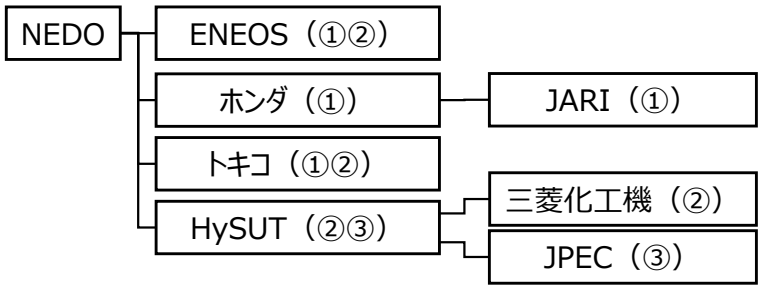
●背景/研究内容・目的

水素ステーションの低コスト化の鍵は、ステーション構成要素の簡素化と、それを可能とする充填プロトコルを含む低コストな充填システムの開発である。
そこで、下記の研究目標達成に向け開発を行った。

●研究目標

実施項目	目標
①低コスト対応プロトコルの開発	• 水素ステーション側の熱容量、FCVタンクの初期圧力等の値を適正化した革新的充填プロトコル（MC−MM）の制御マップを完成させる。（現行：-35～-38℃⇒緩和後：-26～-33℃／-17.5~-26℃）
②低コスト高頻度水素充填システムの開発	• 1時間10台の充填を可能とする低コスト高頻度充填システムを完成させる。
③水素充填技術基準整備に関する研究開発	• SAE J2601改定内容（MCフォーミュラ等）の国内適用における妥当性を検討し、充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案を作成する。 • ①で開発した革新的新規プロトコル（MC −MM）充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案を作成する。

●実施体制及び分担等



●実施内容／研究成果

① 低コスト対応プロトコルの開発
- 水素供給系熱容量、FCVタンク初期圧等の値を適正化した革新的充填プロトコル（MC-MM）を開発し、夏場の気温でもT20相当（-26℃以上）へのプレクール温度緩和を見通した。
- プレクール温度緩和による異常発生リスク（FCVタンク温度上昇）について、対策の検討と実証を行った。
- 水素供給系統の構成部材の熱容量測定方法を確立した。

② 低コスト高頻度水素充填システムの開発
- ダブル充填により1時間に10台の充填を可能とする最小設備構成についてシミュレーション検討した。
- 最小設備構成でダブル充填可能な協調制御システムを開発し、安定的に満充填できることを実証した。

③ 水素充填技術基準整備に関する研究開発
- SAE J2601の改正版入手、改正部分を確認、各部分の改正理由を整理し、充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案を策定。
- ①で開発した革新的充填プロトコル（MC-MM）を反映した充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案を策定。

●実用化・事業化の見通し

本開発成果は、顧客の利便性を損なわず、低コストで高頻度充填に対応したシステムを構築できるため、FCV本格普及期には必須の技術となり得る。

また、革新的充填プロトコル（MC-MM）は、国内充填基準（JPEC-S 0003）に反映され、広く業界で使用されることが期待される。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	プレクール温度緩和を可能とする革新的充填プロトコルの開発	○
②	充填台数10台/hが可能な低コスト高頻度充填システムの開発	○
③	充填技術基準案の策定	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
8	1	10	0

事業番号：2-(4)-①
研究開発名　：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術」

実施者：ENEOS 株式会社
株式会社本田技術研究所
トキコシステムソリューションズ　株式会社
一般社団法人水素供給利用技術協会

１．研究開発概要

１．１　目的

水素社会の実現に向けて最も注力しなくてはならないことの一つは、社会インフラである水素ステーションの低コスト化に関わる技術開発である。2015 年度～2017 年度の水素利用技術研究開発事業／水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発／実環境下における安全運用技術の研究開発のサブテーマ「低コストステーション技術の安全性検討」（2016 年度～2017 年度）において、普及期（1 時間に 5 台充填）における最適な仕様検討、充填制御の安全性／運用性検証等を実施した。しかしながら、水素ステーションの自立化は、本格普及期（1 時間に 10 台充填）であり、水素社会を実現するためには、高頻度充填を狙った低コストなダブル充填システムを構築することが必須である。水素ステーションの低コスト化の鍵は、ステーション構成要素の簡素化と、それを可能とする充填プロトコルを含む低コストな充填システムの開発である。

低コスト対応の充填プロトコルとして、任意の水素温度に対応して、スムーズに充填速度を変更できるプロトコル（MCフォーミュラー等）が候補だが、日本仕様の水素ステーション（蓄圧器の上限圧力 82MPa）で検証の必要があった。また、現行の米国のプロトコル〔SAEJ2601（2016）〕では、十分すぎる機器の熱容量を仮定しており、実状に沿っていない。そこで、実水素ステーションでの検証を行いつつ、それぞれのマージンについての妥当性検証を行い、新たな低コスト対応プロトコル開発に取り組んだ。

高頻度充填を可能にするためには、現行と同じ設備を 2 系列設置することも考えられるが、次のデメリットがある。1）主要機器（圧縮機、蓄圧器、冷凍機等）が増えるので日常の保守点検作業が増大する。2）設備コスト、定期メンテナンスコストが増大する。そこで、主要機器をできるだけ共有化し、低コスト化したダブル充填システムによる高頻度充填の研究開発を行う必要がある。ダブル充填システム化は、2 台同時充填を可能とするが、普及期においては、充填する車両 2 台の充填開始タイミングや車両毎の充填量の違いなど、様々な充填条件が想定されることから、充填時の信頼性、利便性を損なわないために必要な圧縮機や蓄圧器等の最適な運転条件を検討する必要がある。

１．２　概要

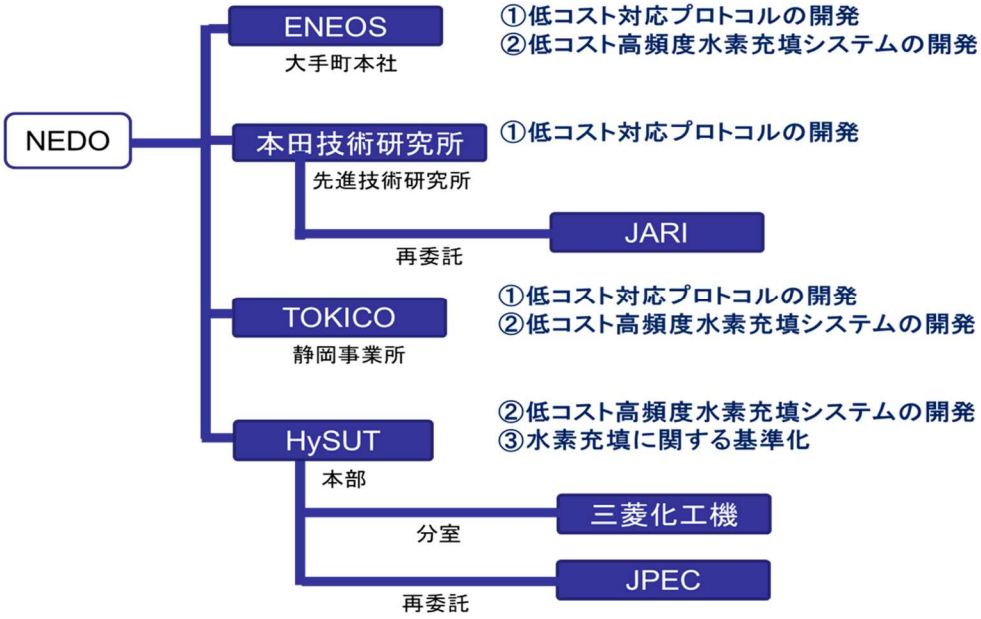
本事業では本格普及期に向けた低コストな高頻度充填システムを開発するため、以下を実施した。

① 低コスト対応プロトコルの開発：充填時間を延ばすことなく水素供給温度を緩和（高温化）可能とする革新的充填プトロトコル（MC Multi Map：MC-MM）を開発。

② 低コスト高頻度水素充填システムの開発：整備費及び運営費を低減する本格普及期に向けた低コスト高頻度充填システム〔2 台同時充填（ダブル充填）で 1 時間に 10 台充填可能〕を開発。

③　水素充填技術基準整備に関する研究開発：SAE J2601 の改正（MC フォーミュラ等）に対応し、国内の水素ステーションの諸制約に応じた水素充填技術基準の整備や①で開発する革新的充填プトロトコル（MC-MM）に対応した基準の整備に向けた技術検討を行い、基準案を作成。

１．３　研究体制



２．研究開発目標

表1．研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）低コスト対応プロトコルの開発	- 水素ステーション運営費（電気代）削減を可能とする水素ステーション側の熱容量及びFCVタンク初期圧等の値を適正化した革新的充填プロトコルの制御マップの完成 - 革新的充填プロトコルの安全性検証 - 熱容量測定方法の確立
（2）低コスト高頻度水素充填システムの開発	- ダブル充填により1時間10台の充填を可能とする低コスト高頻度充填システムの完成 - 合理的なダブル充填を可能とする協調制御システムの開発
（3）水素充填に関する基準化	- SAE J2601改定内容の国内適用における妥当性を検討し、充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案を作成 - 革新的充填プロトコルの充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案を作成

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）低コスト対応プロトコルの開発

【目的・課題】

現在、日本国内で用いられている充填プロトコル（ルックアップテーブル方式）で充填時間を 3 分程度にするためには、水素供給温度区分を T40（−40～−33℃）に保つ必要がある（表 2）。これは水素ステーションで電気代がかかる要因の 1 つとなっており、例えば冷凍機 40kW でフル稼働した場合、年間 400 万円程度かかる可能性がある（前提：15 時間×310 日×21 円/kwh）。

また、厳しい運転環境のために充填システムの信頼性や部材の耐久性が低いという課題もある。例えば充填ホースの認可回数は 1,000 回程度となっており、急激なヒートサイクル（常温→−40℃）や圧力サイクル（0→Max.82MPa）が寿命低下の一因となっている。

表 2. 水素供給温度と充填時間の例

水素供給温度区分	充填時間
T40（-40～-33℃）	3′40″
T30（-33～-26℃）	6′07″
T20（-26～-17.5℃）	12′13″

そこで、本事業においてプレクール温度緩和に向けた取り組みを行うこととした。現行のルックアップテーブル方式では安全サイドでパラメーターが設定されており、図 1 のような段階的なアプローチで緩和を目指すことにした。Phase0 は米国で先行導入されている MC フォーミュラ方式である。リアルタイムに昇圧率を制御することでプレクール温度の緩和、合理的な充填が可能となる。Phase1 は水素ステーション側の前提条件を適正化することで過剰なマージンを減らし、プレクール温度を T30 相当まで緩和することを目指したものである。さらに Phase2 では車側の前提条件を変更することで T20 相当への緩和を検討した。

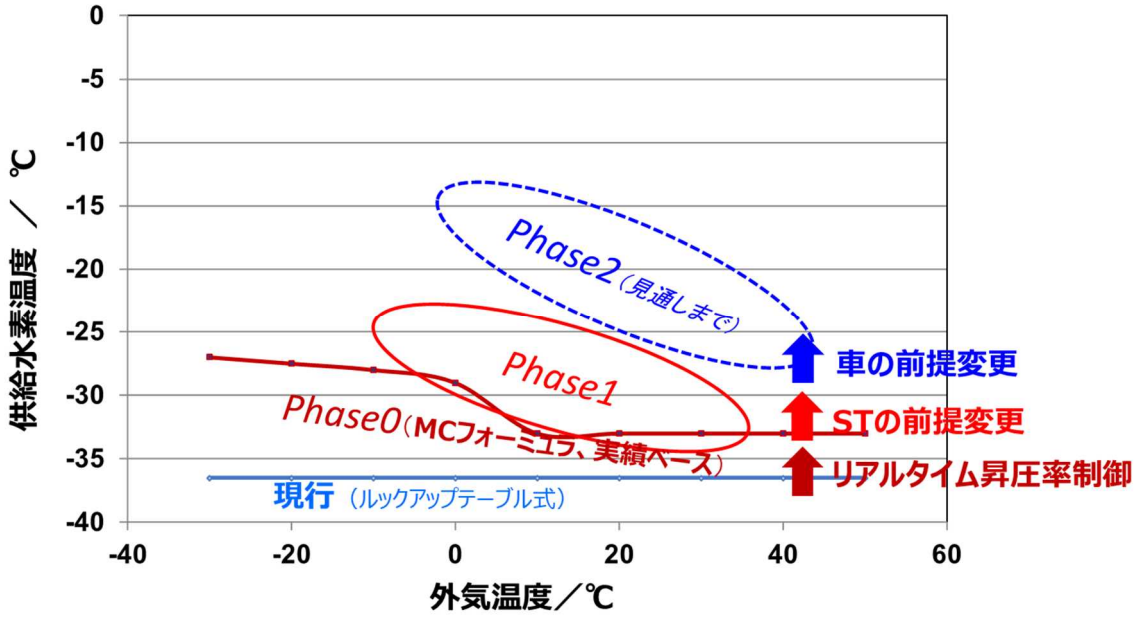


図１．プレクール温度の緩和に向けたアプローチ

【新規充填プロトコルの開発・実証】

Phase1 は MC フォーミュラの改良型ということもあり、最初に Phase0 として MC フォーミュラの検証を行った（図 2）。米国では先行導入されており、国内の水素ステーションで性能を検証した位置づけである。HySUT 水素技術センターで試験を行い、現行プロトコル（ルックアップテーブル方式）よりも充填時間が短くなることを確認した。充填時間が同じ場合、プレクール温度を緩和できることになる。

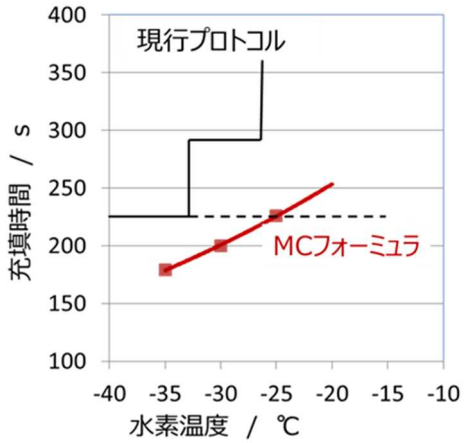


図 2. MC フォーミュラの検証結果（冬，初期圧 5MPa）@HySUT 水素技術センター

次のステップとして、本事業の Phase1 では水素ステーション側の前提条件と FCV タンク初期圧を適正化することで過剰なでマージンを減らす取り組みを進めた。現行プロトコルでは、最悪ケースを想定した場合でも FCV タンク温度が 85℃を超えることがないよう、安全サイドでパラメーターが設定されている。例えば水素ステーションの各部品で奪われる冷熱は、実際には現行規格の設定（ワーストケース）よりも小さい。そこで計算の前提を変更し、実態に合わせた新たな充填制御マップを作成すれば、プレクール温度の緩和が可能となる。

また、MC フォーミュラでは FCV タンク初期圧は 0.5／5MPa が設定されているが、これまでの商用水素ステーションにおける実績では、FCV タンク初期圧が 5MPa 以下で水素ステーションに来る FCV は極めて稀であり、ほとんどの FCV はタンク圧力（初期圧）が 10～30MPa 程度でやってくる。FCV タンク初期圧が高いということは水素充填量が小さくなり、かつ、タンク内にある水素も熱容量を持つことから水素充填時のタンク温度の上昇が抑制されるためプレクール温度の緩和が可能と考えられる。（図 3）

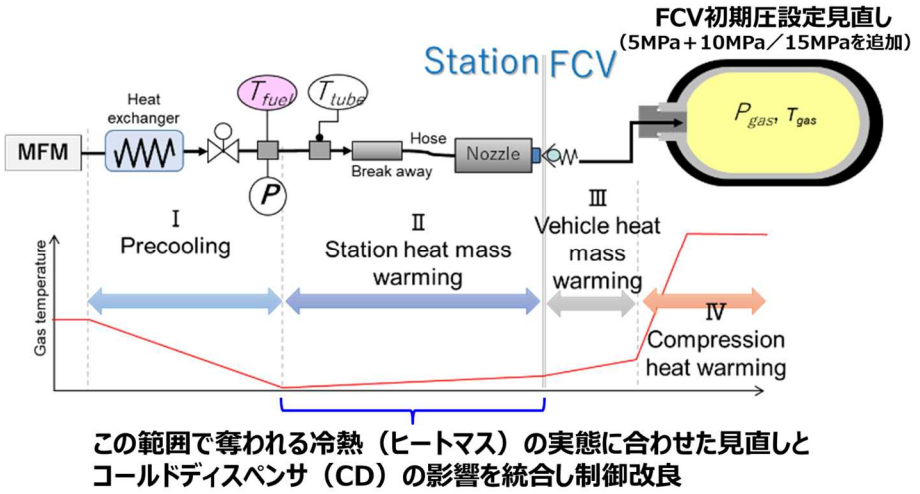


図 3. Phase1（水素ステーションの前提変更）の概念

Phase1 で取り組んだ充填制御のコンセプトを図 4 に示す。SAE J2601 で定められた MC フォーミュラをベースに水素供給系配管類のヒートマスと FCV タンク初期圧をリアルタイムに取り込む制御を追加し、あらたな革新的充填プロトコル（MC Multi Map：MC-MM）を開発した。ヒートマスと FCV タンク初期圧の組み合わせごとに、過剰なマージンを削減した充填制御マップを複数用意し、各条件に応じてマップを選択することとした。これにより、各水素ステーションのヒートマスの実力値と充填する FCV タンク初期圧に合わせてプレクール温度の緩和が可能となる。

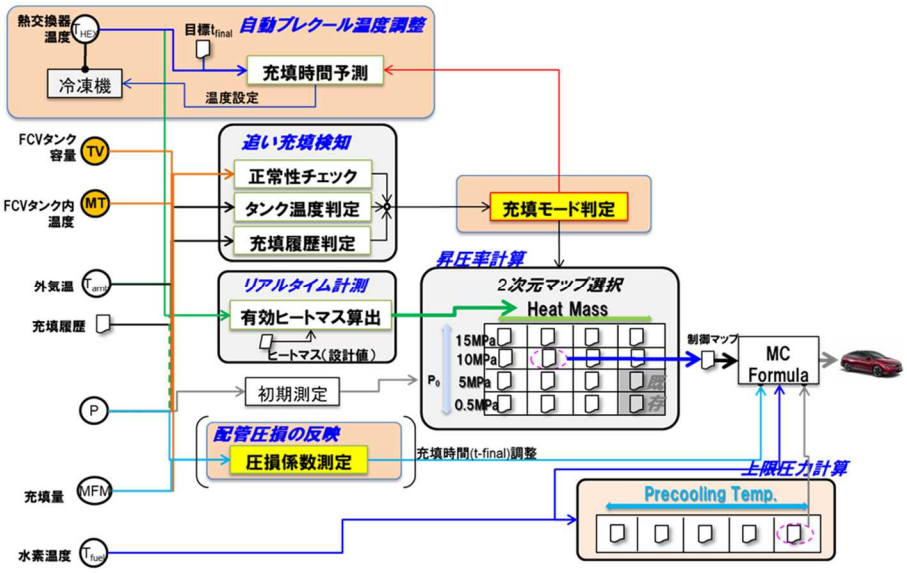


図 4.　Phase1：充填制御コンセプト

2019 年秋に水素ステーション側の前提条件を適正化した最初の充填制御マップを開発し、米国の実証水素ステーションで検証を行った。試験結果を図 5 に示す。米国の標準的な水素ステーション仕様で、ルックアップテーブル方式や MC フォーミュラと比べて充填時間を短くできることを確認した。プレクール温度を T30 相当まで高めても実用的な充填時間となった（@気温 25℃）。ディスペンサーが予冷された状態（＝コールドディスペンサー）では充填時間がさらに短くなり、FCV 本格普及期には連続充填によるコールドディスペンサーの効果が期待できる。

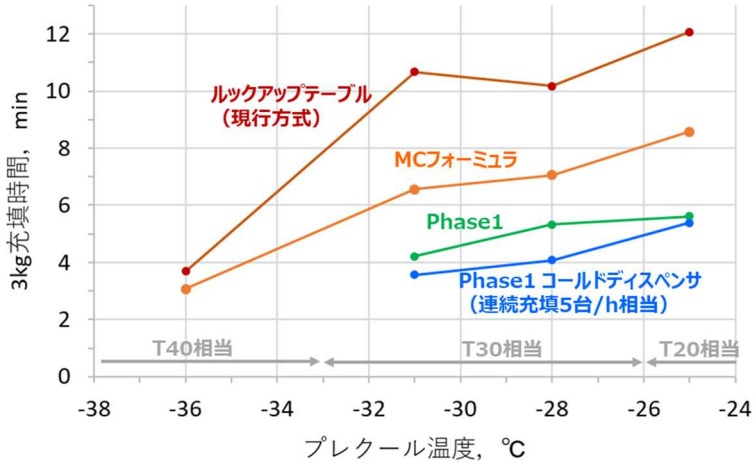


図 5.　米国試験の結果（2019 年 10 月、気温 25℃程度）

※3kg 充填時間の計算方法：MIRAI に 3kg 充填する場合を想定し、23→82MPa の昇圧にかかる時間を各プロトコルの昇圧率から求めた。さらにスタートアップ時間（操作、初期圧チェック等）を一律 0.5 分加えた。

その後、充填制御マップに改良を加え、初期圧 10MPa のマップを新たに追加した。国内の標準的な水素ステーション仕様での冬季試験という位置づけで、2020 年 2 月に HySUT 水素技術センターで試験を行った（図 6）。米国での夏季試験と同様に、国内の水素ステーションにおいてもルックアップテーブル方式や MC フォーミュラと比べて充填時間を短くできることを確認した。Phase1 の充填制御マップではプレクール温度−25℃で充填時間 3 分程度、連続充填 5 台／hr 相当のコールドディスペンサーではプレクール温度−20℃で充填時間 4 分程度となった。冬場の気温では T20 相当を見通せる結果が得られた。

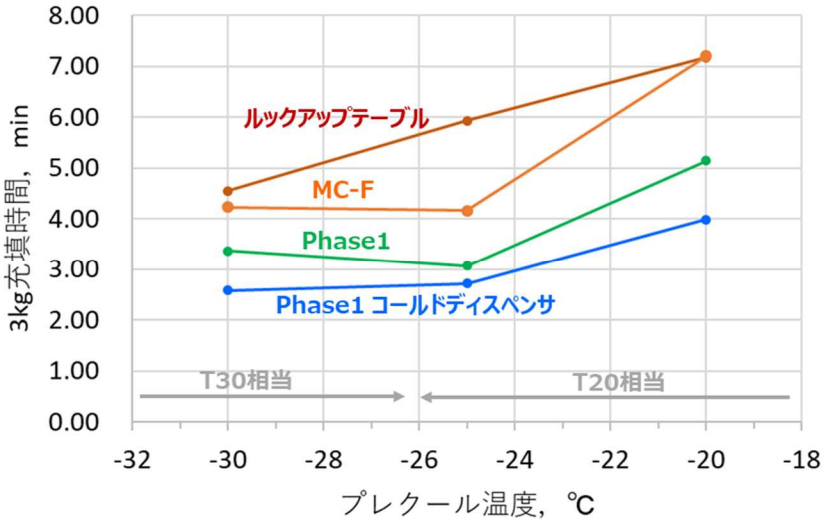


図 6. HySUT 水素技術センターでの国内試験の結果（2020 年 2 月、気温 3～17℃）

さらに、充填制御マップに更なる改良を加え、初期圧 15MPa のマップを新たに追加した。国内での夏季試験という位置づけで 2020 年 8 月に HySUT 水素技術センターで試験を行った（図 7）。プレクール温度緩和という観点では冬季試験より厳しい条件となる。連続充填 5 台／hr 相当のコールドディスペンサーで、気温 33℃以下において、T20 相当で 4 分程度の充填が可能なことを確認した。

当初の計画では Phase2 で FCV 側の前提条件変更により T20 相当を目指した。自動車会社と議論を重ねた結果、実際の車載タンクの耐熱温度は現行の上限温度（85℃）に対し十分な裕度を有することは確認できたが、上限温度を変更することは FCV 自動車メーカにおける製造規格変更など影響が大きいことと、これまでの検討において水素ステーション側の充填条件の見直しにより T20 相当の技術的見通しが得られたことから、車載タンクの上限温度見直しに関する検討は完了とした。

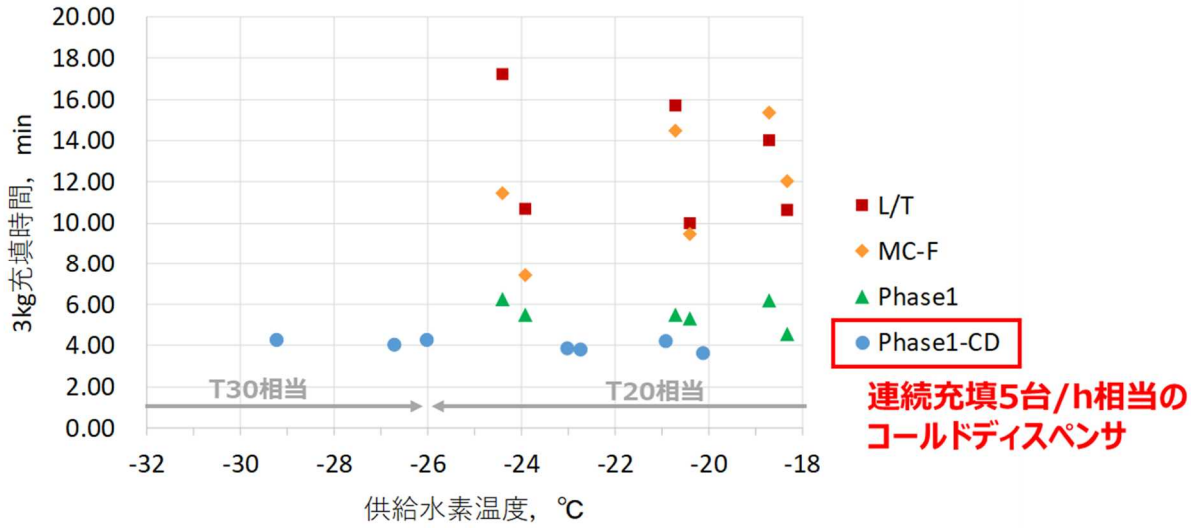


図 7. HySUT 水素技術センターでの国内試験の結果（2020 年 8 月、気温 22～35℃）

MC-MM 方式の効果を図 8 に示す。現行ルックアップテーブル方式から水素ステーション熱容量と FCV タンク初期圧の適正化とリアルタイム制御を適用することで温度緩和が可能となり、さらに連続充填によるコールドディスペンサー効果によりほぼ全域（環境温度≦35℃）で T20 相当へのプレクール温度緩和の見通しが得られた。

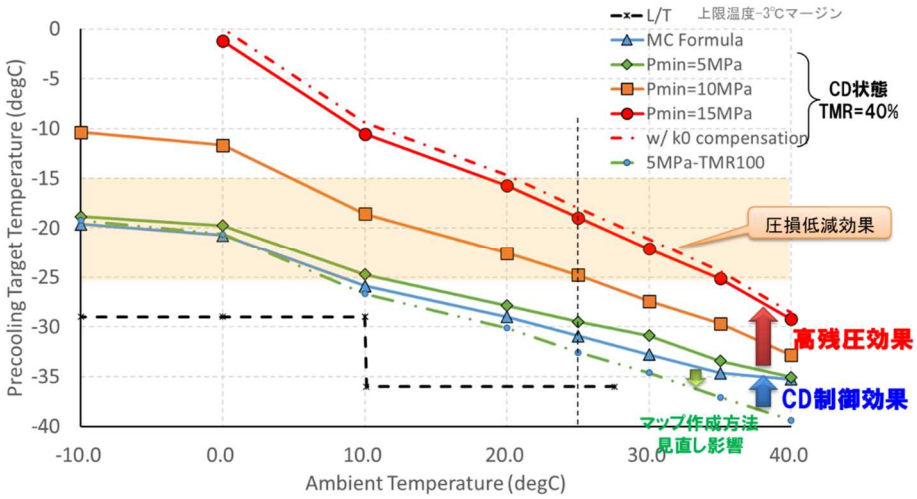


図 8. MC-MM のプレクール温度効果

【消費電力量低減効果】

MC-MM 方式を適用することで T20 相当へのプレクール温度緩和が示唆された。これにより、表 3 に示すように冷凍機消費電力は現行（T40）の凡そ半減となることが期待できる（冷凍機フル稼働とした場合、312 万円／年×0.53＝166 万円／年）。

表 3. 温度区分ごとの消費電力量の比較

計算条件	T40	T30	T20
プレクール温度（℃）	-40～-33	-33～-26	-26～-17.5
冷凍機消費電力（kW）	32	24	17
営業時間（時間／日）	15		
営業日数（日／年）	350		
年間電力量（kWh／年）	168,000	126,000	89,040
電気代低減効果（%）	―	75	53

※ 冷凍機が常時定格運転される想定の試算。
実施には環境温度、FCV 充填台数等により変動する。

【安全性の検討】

市場において水素ステーションには、様々なFCVがやってくる。中には正常ではない車両も考えられる。その際も安全を確保して充填する必要がある。本事業では、表4に示すように想定されるエラーとその対応について、検討・実証を行った。

表4.　充填異常と対応

分野	*エラー種類*	*検知方法*	*対応*
ユーザー	追い充填	ホットソークチェック 充填履歴チェック	初期圧変更モード MC-MM充填だがP_{min}=5MPaみなし （前の充填の初期圧力を想定して充填を続けるため）
	初期温度異常	ホットソークチェック	初期圧変更モード MC-MM充填だがP_{min}=0.5か5MPaみなし （夏季にエアコンを付けて駐車しているケース、追い充填と同様に扱う）
	4kg以下、10kg超	通信充填信号、内容量検知	MC-MMの範囲外[*1]のため充填中止
FCV故障	内容量TV違い	内容量検知、ｲﾝﾃｸﾞﾘﾃｨﾁｪｯｸ	コンサバ・モードで充填（非通信扱い）
通信	非通信車	通信チェック	コンサバ・モードで充填
	異常値送信	ｲﾝﾃｸﾞﾘﾃｨﾁｪｯｸ	コンサバ・モードで充填
	通信途絶	通信チェック	終了圧変更モード MC-MM充填だが目標圧力終了
	アボート	通信充填信号	充填中止

【熱容量測定方法の開発】

MC-MM方式では、水素ステーションの水素供給配管系部品の熱容量を制御に使用する。このために、熱容量測定方法の規格化が必要である。測定技術の確立とともに、関連業界内への周知を推進し、利用するための指針を示すことが重要である。このため「配管熱容量検討会」を立上げ、熱容量測定方法の実証試験と実証結果に基づく検討を行い、その成果をJPEC－S 0012に取りまとめた。

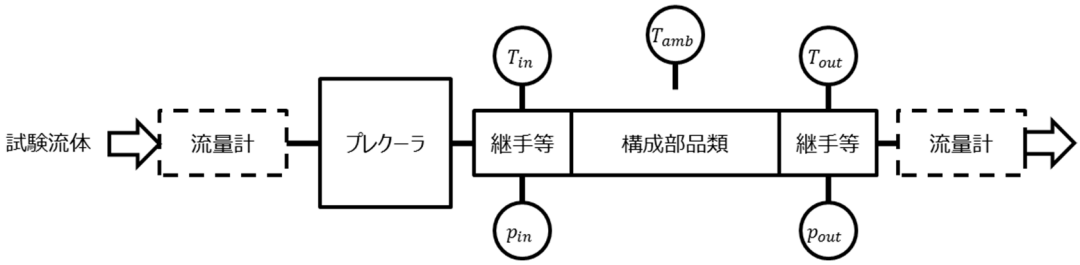


図 9.　試験装置の概要

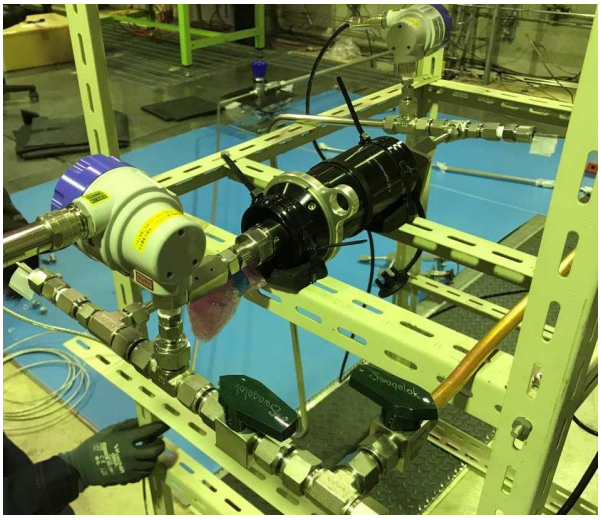


図10.　熱容量測定試験

【達成度】

- 水素ステーション運営費（電気代）削減を可能革新的充填プロトコルの制御マップの完成　○
- 革新的充填プロトコルの安全性検証　○
- 熱容量測定方法の確立　○

（2）低コスト高頻度水素充填システムの開発

【目的・課題】

METI ロードマップによると、1 日 70 台以上の充填が 2025 年度頃から必要になる（図 11）。これは 1 日 14 時間として 1 時間当たり 5 台以上に相当する。水素ステーションの能力は現状 5 台／hr 程度であり、10 台／hr 程度への能力増強が必要となる。一方、高頻度充填に対応して 2 系列の設備を設けると水素ステーションの建設費が高くなるという課題がある。

そこで、同じ設備を 2 系統設置するのではなく、圧縮機・蓄圧器の共用により最小設備構成で 10 台／hr に対応した低コストなシステムを開発することとした（図 12）。

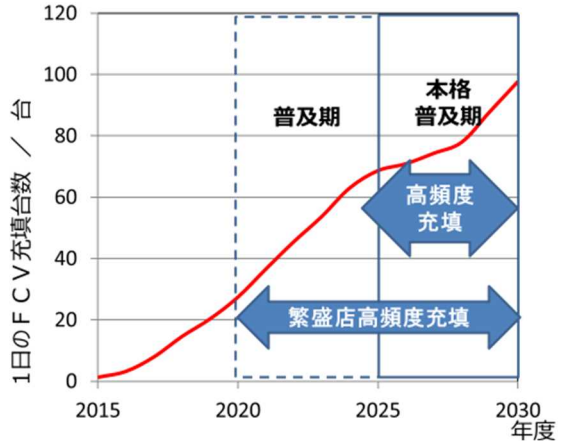


図 11. FCV 充填台数の想定

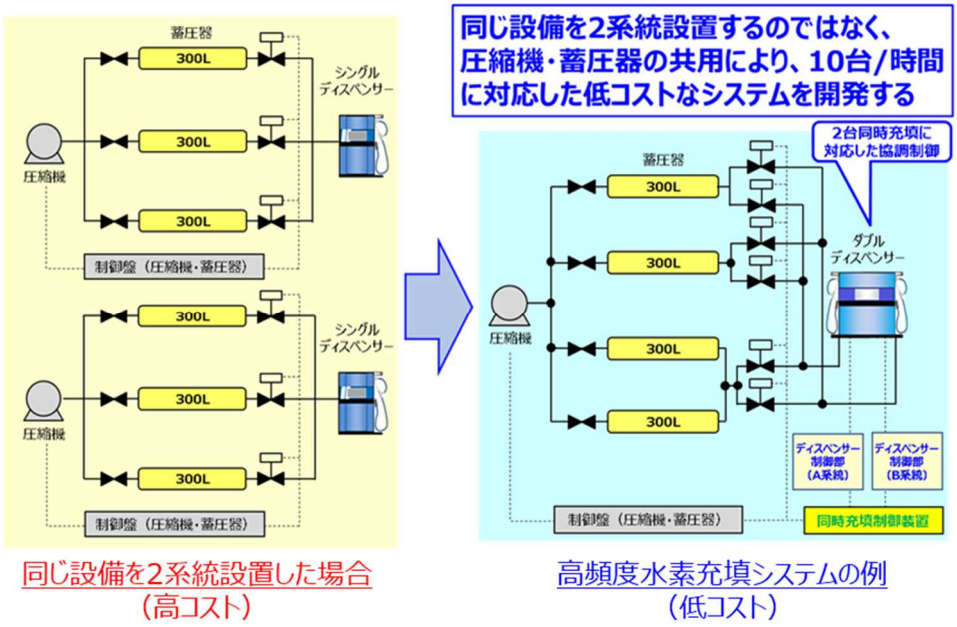


図 12. 高頻度水素充填システムの概要

【最小設備構成の検討（シミュレーション）】

最初に図 13 の手順に従ってシミュレーションを行った。前提条件として、現行水素ステーションの標準的な圧縮機能力や平均的な FCV 充填量を用いた。バンク構成や充填パターンを変えてシミュレーションを行い、以下のような評価基準で有望な構成を選定した。

① 充填時間　　直充填時間（圧縮機で直接昇圧する時間）で判定
② 充填の安定性　　バンク切替前後のバンク圧力差で判定
③ 蓄圧器本数　　少ないほどコスト的に優位
④ バルブ数　　少ないほどコスト的に優位



図 13.　シミュレーションの手順

シミュレーションで選定した 4 構成を図 14 に示す。0−B は 3 バンク構成で容量と本数が最も小さく、これでダブル充填が成立するようであれば最も良い。0−D、1 - B、3−B も現行水素ステーションの蓄圧器を単純に 2 倍したものより少ない設備で済み、有望な構成である。実証試験を行い、4 構成の比較を行うこととした。

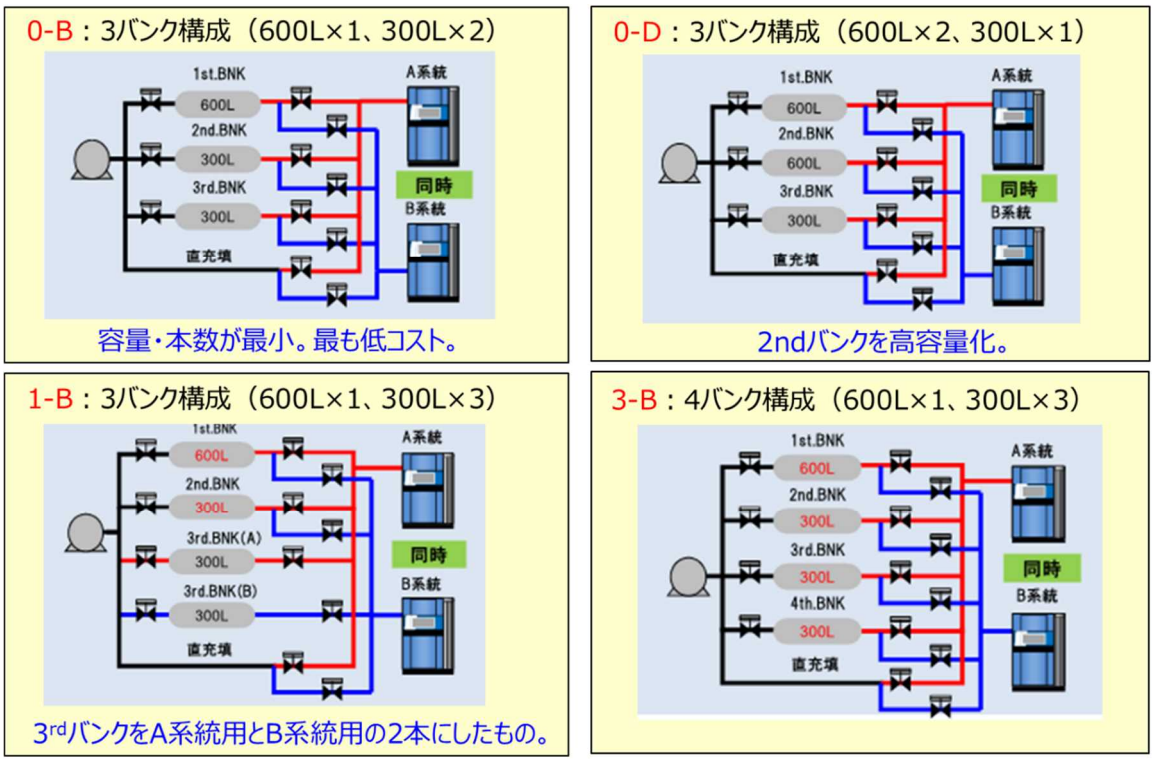


図 14.　シミュレーションで選定した 4 構成

実用に耐得る最小構成を検討するため、通常の充填における FCV タンク初期圧力の低圧側（15MPa）を初期圧とした同時充填条件で、各蓄圧器バンク構成をシミュレーションした結果を表 5 に示す。

これは充填量 3.4kg／台に相当し、平均的な充填量 3kg より若干多い。充填時間はいずれも 3 分台で、いずれも満充填まで完了し、0－B は若干直充填時間が長くなる傾向が見られたが、充填時間、充填の安定性ともに 4 構成のいずれも問題ないという結果が得られた。

表 5. FCV タンク初期圧力 15／15MPa 同時充填時の構成別シミュレーション結果

No.	構成	充填ﾀｲﾐﾝｸﾞ [sec.]	1stBNK [L]	2ndBNK [L]	3rdBNK [L]	4thBNK [L]	総容量 [L]	車両	初期圧 [MPa]	充填時間 [sec.]	直充填時間 [sec.]	判定
1	0-B	同時	600	300	300	－	1200	A	15	219	45	△
								B	15	219		
2	0-D	同時	600	600	300	－	1500	A	15	204	24	○
								B	15	203		
3	1-B	同時	600	300	300	－	1500	A	15	197	22	○
					300			B	15	197	15	◎
4	3-B	同時	600	300	300	300	1500	A	15	195	10	◎
								B	15	195		

候補に挙がった 4 構成において、最大負荷となる FCV タンク初期圧力 6／6MPa 同時充填でのシミュレーション結果を表 6 に示す。また、FCV タンク初期圧力 6／30MPa での結果も併せて示す。

実際の商用水素ステーションでは極めて稀な FCV タンク初期圧力 6MPa（ほぼ空状態）の FCV が同時充填するケースまで対応できるようにする場合は、構成 3-B（4 バンク）もしくは 1-B（3rd.バンク個別）が必要となる。

しかしながら、実用レベルで問題なく、高負荷時でも多少時間が掛ることを容認し、確実に満タン充填ができるならば、構成 0－B（3 バンク 1200L）が低コスト水素ステーションとして最適な構成と言える。

表 6. FCV タンク初期圧力 6／6MPa、6／30MPa 同時充填時の構成別シミュレーション結果

No.	構成	充填ﾀｲﾐﾝｸﾞ [sec.]	1stBNK [L]	2ndBNK [L]	3rdBNK [L]	4thBNK [L]	総容量 [L]	車両	初期圧 [MPa]	充填時間 [sec.]	直充填時間 [sec.]	判定
1	0-B	同時	600	300	300	－	1200	A	6	266	71	×
								B	6	266		
2	0-D	同時	600	600	300	－	1500	A	6	260	61	×
								B	6	260		
3	1-B	同時	600	300	300	－	1500	A	6	240	39	○
					300			B	6	240	39	○
4	3-B	同時	600	300	300	300	1500	A	6	239	35	○
								B	6	239		
5	0-B	同時	600	300	300	－	1200	A	6	226	26	○
								B	30	135	0	◎
6	0-D	同時	600	600	300	－	1500	A	6	217	12	◎
								B	30	134	0	◎
7	1-B	同時	600	300	300	－	1500	A	6	226	26	○
					300			B	30	135	0	◎
8	3-B	同時	600	300	300	300	1500	A	6	215	11	○
								B	30	137	0	◎

【建設費低減効果試算】

前項で検討した低コスト水素ステーションとして最適な構成である構成 0－B（3 バンク 1200L）の建設費低減効果を試算した結果を表 7 に示す。

1 レーン水素ステーション（充填能力＝5 台／hr）を 2 系統として充填能力を倍増（充填能力＝10 台／hr）すると水素ステーション建設費は 814,000 千円（407,000 千円×2 系統）となる。これに対し、同等の充填能力を持つ構成 0-B の水素ステーション建設費は 486,500 千円であり、▲327,500 千円（シングルディスペンサー当り 163,750 千円）の建設費低減効果が期待される。

表 7. 水素ステーション建設費の比較　　（千円）

区分	費　　目	1レーンST	2レーンST （構成0-B）
設備費	圧縮機	60,000	60,000
	蓄圧器	60,000	70,000
	プレクーラー	20,000	20,000
	ディスペンサー	20,000	40,000
	その他機器類	37,700	45,200
	設備費小計	197,700	235,200
工事費	設計費	28,000	30,000
	土建工事	18,000	21,000
	現地配管工事	21,500	26,500
	電気工事	15,000	19,000
	現場管理費・経費	46,800	57,300
	工事費小計（補助対象）	129,300	153,800
	土建工事（補助対象外）	80,000	97,500
	工事費小計	209,300	251,300
建設費合計		407,000	486,500

【最小設備構成の実証】

シミュレーションにより得られた高頻度水素充填システムの最小構成候補（図 14）について、水素技術センター（HTC）で実証試験を実施し、以下の通り、シミュレーション結果と整合する結果を得た。

最初に、通常充填を想定した平均充填量（約 3kg）より少し多めの充填量となる FCV タンク初期圧力 15MPa からの 2 台同時充填でのダブル充填試験を実施した。結果を表 8 に示す。

FCV タンク初期圧力 15MPa の場合、充填時間は何れも 3 分前後で、満充填まで安定的に推移した。充填時間、充填の安定性ともに 4 構成の何れも問題ないといえる。

表 8. FCV タンク初期圧力 15／15MPa 同時充填結果（T_{amb}：15.1～16.7℃、@HTC）

バンク構成	ディスペンサ	FCV 初期圧 (MPa)	充填開始からバンク切替までの時間(s)				充填時間 (s)	直充填時間 (s)	SOC (%)	充填量 (kg)
			1st→2nd	2nd→3rd	3rd→4th or 3rd→直	4th→直				
0-B (600-300-300)	A	15	97	126	150	–	183	33	97.9	3.4
	B	15	98	127	154	–	180	26	98.1	3.4
0-D (600-600-300)	A	15	100	133	153	–	171	18	97.7	3.4
	B	15	100	134	154	–	166	12	98.0	3.4
1-B (600-300-300/300)	A	15	101	127	160	–	167	7	98.1	3.4
	B	15	101	128	155	–	162	7	97.9	3.4
3-B (600-300-300-300)	A	15	96	124	143	163	168	5	98.0	3.4
	B	15	98	127	146	なし	164	0	98.0	3.5

次に、通常では稀なケースとなるほぼ空状態といえる FCV タンク初期圧力 6MPa からの 2 台同時充填でのダブル充填試験を実施した。結果を表 9 に示す。

FCV タンク初期圧力 6MPa の場合、構成 3－B 以外は充填の安定性にやや課題があるものの SOC 94%以上は確保できた。充填時間は何れも 3 分台で問題ない。

本実証結果を踏まえ空状態の FCV でも 2 台とも満充填可能とする協調制御技術御開発に取り組んだ。

表 9. FCV タンク初期圧力 6／6MPa 同時充填結果@HTC

（T_{amb}：0-B、D 13.2～17.5℃、1-B、3-B 7.8～9.0℃@HTC）

バンク構成	ディスペンサ	FCV 初期圧 (MPa)	充填開始からバンク切替までの時間(s)				充填時間 (s)	直充填時間 (s)	SOC (%)	充填量 (kg)
			1st→2nd	2nd→3rd	3rd→4th or 3rd→直	4th→直				
0-B (600-300-300)	A	6	110	143	166	–	175	9	94.1[1)]	4.1
	B	6	108	138	166	–	198	32	97.9	4.3
0-D (600-600-300)	A	6	122	161	191	–	212	21	97.7	4.3
	B	6	113	152	172	–	181	9	95.0[1)]	4.1
1-B (600-300-300/300)	A	6	99	135	171	–	188	17	98.1	4.4
	B	6	98	131	157	–	170	13	94.2[1)]	4.1
3-B (600-300-300-300)	A	6	98	129	150	168	200	32	98.0	4.3
	B	6	94	127	151	168	197	29	98.0	4.4

1) 流量低下で途中停止　　2) 直充填なしの設定としたため満充填に至らず

【協調制御技術の開発】

ダブル充填時の課題と対策案について、表 10、図 15 に示す。

表 10. ダブル充填の課題と対策案

No.	課　題	対策案	内　容
1	充填時間が延びる	充填開始遅延機能	初期圧力が低い車輌へ同時充填する場合には、2台目の充填開始を遅らせる
2	同時充填時に圧力の高い車輌が待たされる	圧力上昇率（APRR）低減機能	①同時に直充填に入るか判定し、同時充填となる場合は2台目のAPRRを下げる ②または圧力の低い方のAPRRを下げる
3	バンク切替時の差圧により過流防止弁が作動する	早期バンク切替機能	差圧が大きくなる前に充填圧の高い側のバンク切替を行う

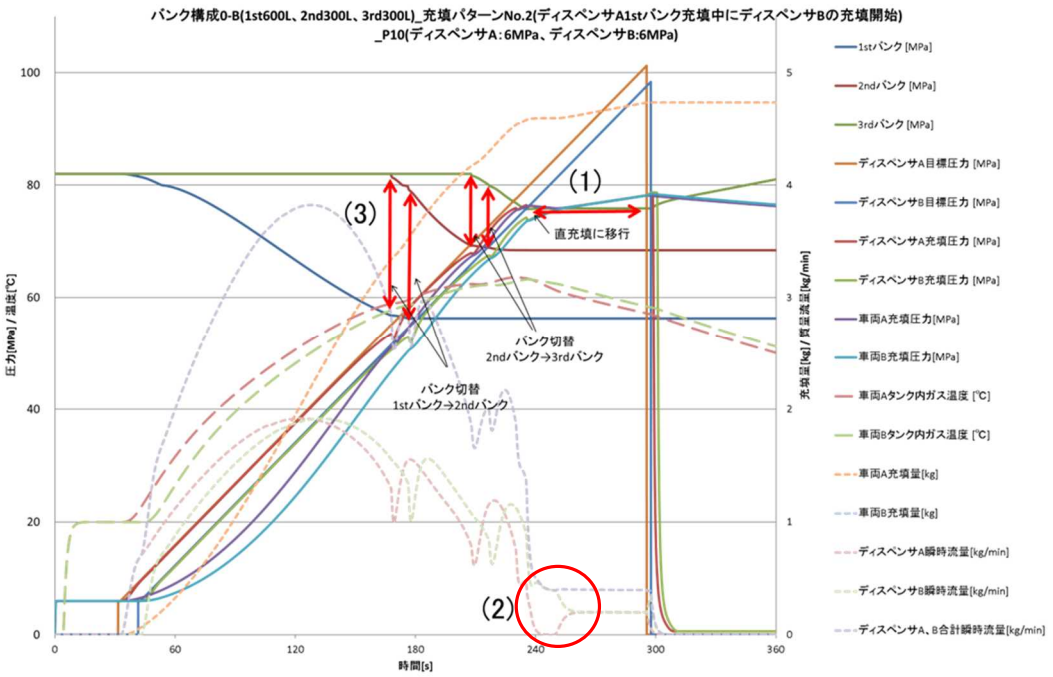


図 15. ダブル充填の課題

課題 1 については、設備能力（蓄圧器容量、圧縮機吐出量）との兼合いになるが、最小構成で制御により成行き充填時間（遅延）を減らす方法として、2 台目の充填開始を遅らせる等、同時充填時間（重なり）を減らすことが有効となる。

同時充填時間を減らし、直充填による成行き充填時間を極力減らすことで、各車両の充填時間が長くなることを防止できる。但し、2 台目の充填開始を遅延させることは、充填顧客の満足度（CS）低下となる。なお、課題 1 の充填時間が数分延びることは、課題 2 の満タンにできないことに比べると対策の優先度は低くなる。

課題 2 については、ダブル充填における重要な課題であり、優先度は高い。課題解決の基本として、圧力上昇率（APRR）低減機能を協調制御の基本的な方針とする。

課題 3 については、1st.バンクを 600L と大容量化することで対策されており、かつ蓄圧器の使用制限（50MPa 以下からの復圧回数 100 回が上限）対策のため、蓄圧器圧力が 50MPa 以下にならないようバンク切替を行う機能が標準化されており、本課題は解決済みと考える。

協調制御のシステム構成例を図 16 に示す。低コスト高頻度水素充填システムとしては、最小構成 0-B でのダブル充填時に双方の車両が共に満充填できるシステムを提供することが必要である。

2 台同時充填時に満充填にならずに終了する現象を図 17 に示す。充填終盤（3rd.バンク or 直充填）において 2 台の車両の充填圧力に差があると、充填圧力の高い側への充填が停止（充填流量が低下）し、満充填にならずに充填終了となる。

この対策案として、充填終盤で高圧バンク及び直充填が 2 台同時とならないよう、タイミングをずらすことで実現可能となる。

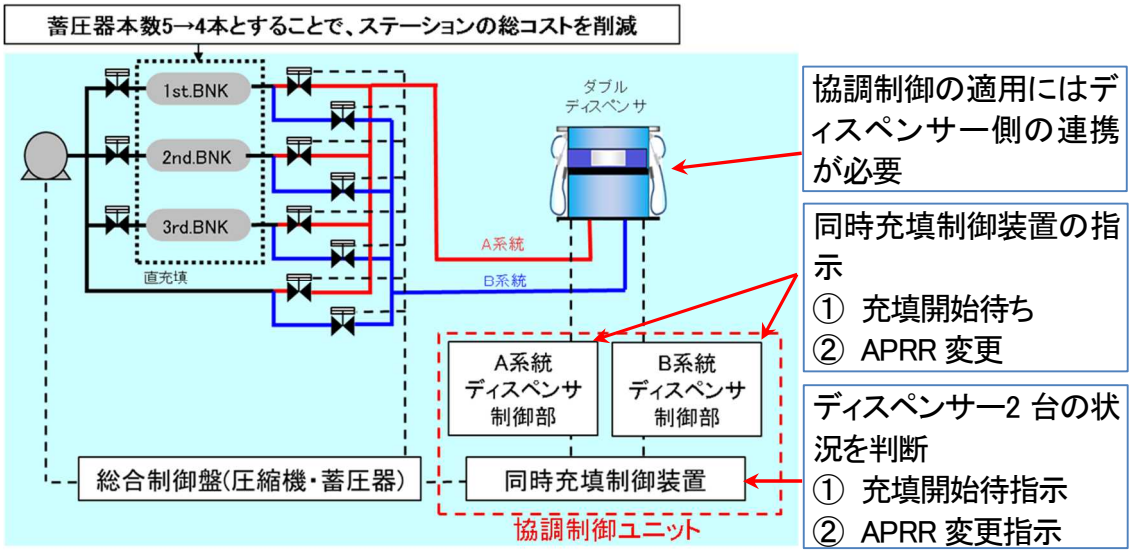


図 16.　協調制御システム構成例

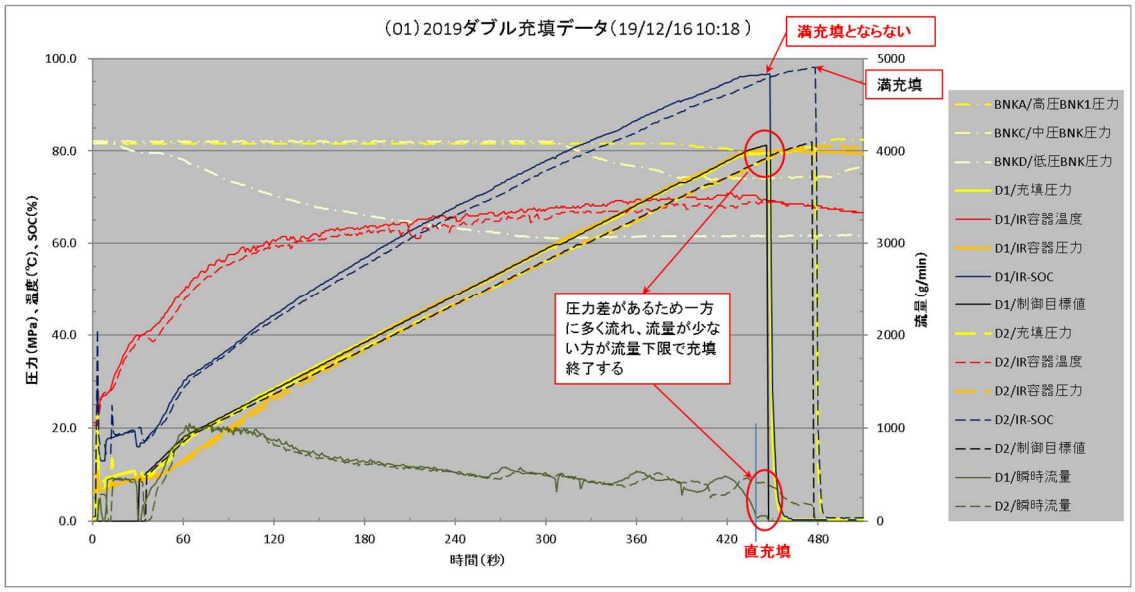


図 17.　ダブル充填の課題

【協調制御の実証試験】

協調制御技術の開発・実証は、各充填プロトコル方式（ルックアップテーブル方式、MC フォーミュラ方式及び MC-MM 方式）について段階的に実施した。以下に MC-MM 方式における協調制御技術の実証結果について記載する。

設備最小構成 0-B（3 バンク）における 2 台同時充填の試験結果を表 11 に示す。

MC-MM 方式においても、協調制御を実施することで満タン（SOC=98%）充填が確認できた。

図 18 に同時充填終了時の例を示す。初期圧力 10／15MPa で 60 秒差で充填開始した。充填開始から所定時間経過後に充填終了時間を判定し、ディスペンサーA（D1）が先に終了する判断となり、同時充填終了（協調 A）が選択された。

また、図 19 に時間差充填終了時の例を示す。初期圧力 10/10MPa で 30 秒差で充填開始した。充填開始から所定時間経過後に判定し、ディスペンサーA（D1）が先に終了する判断となり、ディスペンサーB（D2）を遅延させる時間差充填終了（協調 B）が選択された。

表 11. MC-MM 方式 2 台同時充填の試験結果

充填条件	気温（℃）	ディスペンサ	FCV 初期圧（MPa）	充填時間（s）	直充填時間（s）	SOC（%）	充填量（kg）	協調制御
Bを30秒遅延	-1.5	A	10	147	0	97.9	3.81	
	0.1	B	10	147	0	97.9	3.90	B
Aを45秒遅延	-1.1	A	10	213	0	97.9	3.86	B
	0.5	B	10	193	0	97.9	3.91	
Bを30秒遅延	4.2	A	10	147	0	98.1	3.89	
	5.9	B	15	147	0	97.9	3.43	A
AB同時	3.8	A	10	229	0	97.9	3.88	B
	5.4	B	15	148	0	98.3	3.38	
Bを60秒遅延	3.3	A	10	234	15	98.0	3.90	A
	4.9	B	15	168	14	97.9	3.42	

協調制御） A：同時終了、B：設定時間遅延

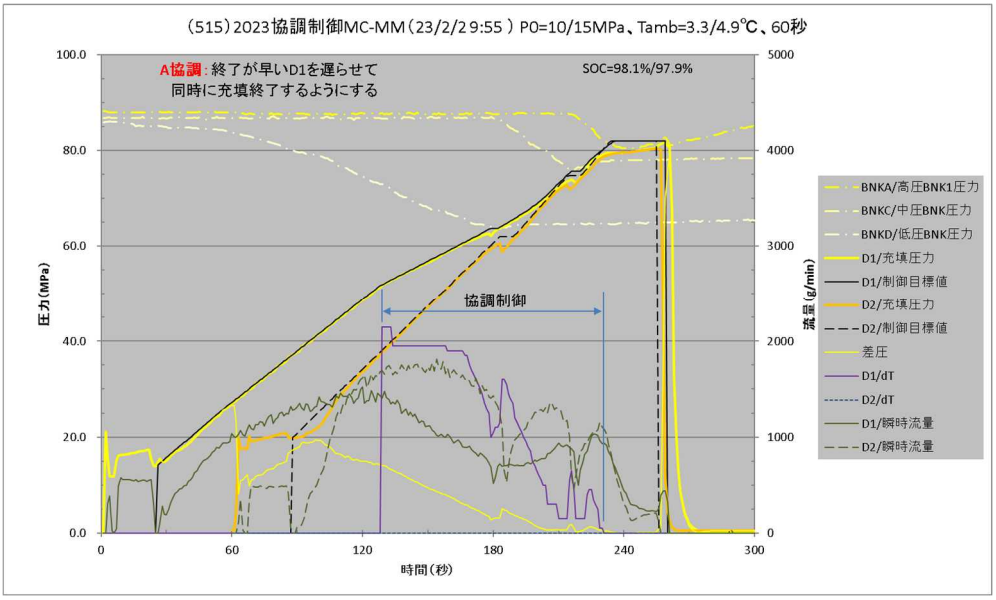


図 18. 同時充填終了例（MC-MM 方式）

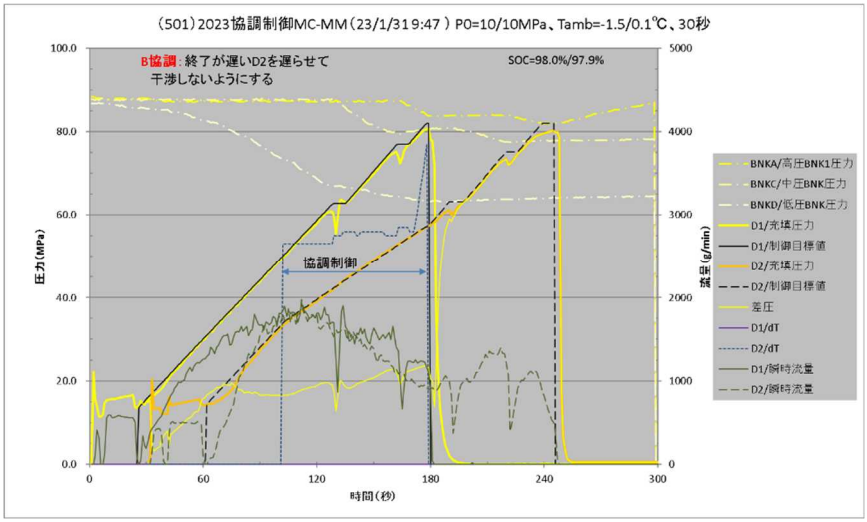


図 19. 時間差充填終了例（MC-MM 方式）

比較対象のため協調制御が無い場合の同時充填での充填率を確認した。結果を図 20 に示す。初期圧力 5／5MPa でディスペンサーB（D2）から充填を開始し、10 秒差でディスペンサーA（D1）を充填開始した。ディスペンサーA／B が独立して充填し、直充填に入ったところで充填圧力が高いディスペンサーB（D2）への流量が低下し、途中終了した。ディスペンサーA（D1）は満タン充填（SOC=98%）できたが、途中終了したディスペンサーB（D2）は SOC=89.4% に止まり、SOC で 8.6%、圧力で 9.4MPa 少ない結果となった。

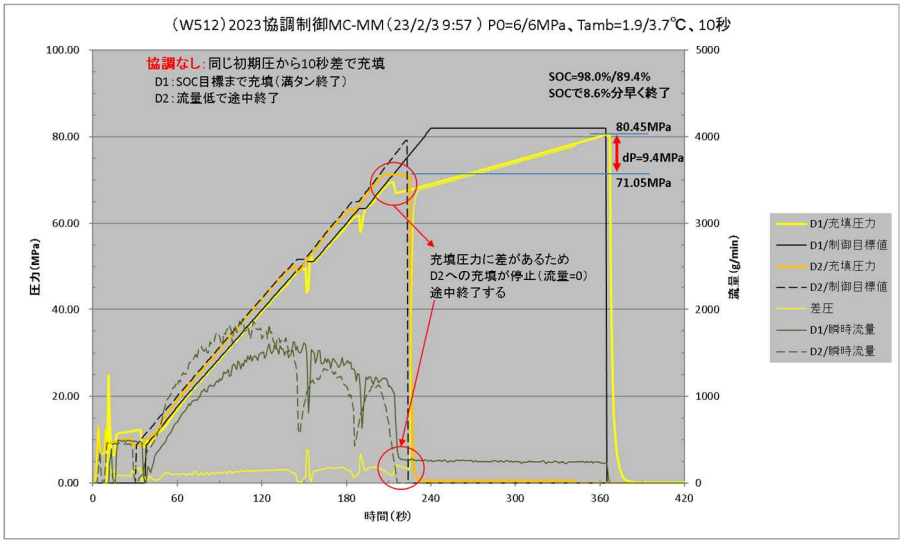


図 20. 協調制御なしワーストケース例（MC-MM）

【達成度】

- ダブル充填により1時間10台の充填を可能とする低コスト高頻度充填システムの完成　○
- 合理的なダブル充填を可能とする協調制御システムの開発　○

（3）水素充填技術基準整備に関する研究開発

【技術基準改正手順】

国内充填技術自主基準 JPEC-S 0003 は、NEDO 事業において技術的検討および妥当性検証を行ない自主基準（案）を作成の上、この基準（案）について JPEC（HySUT 助成）事業において充填基準分科会および水素インフラ規格基準委員会で審議して改正される（図 21）。

前 NEDO 事業で検討した 10 kg超容器を持つバス等の大型車向けへの充填プロトコルが付属書 I という形で 2016 年 JPEC-S 0003（2016）に規定された。また、付属書 I は、SAE J2601 にも採用され、今回の改正の一部として、最新版にも盛り込まれている。

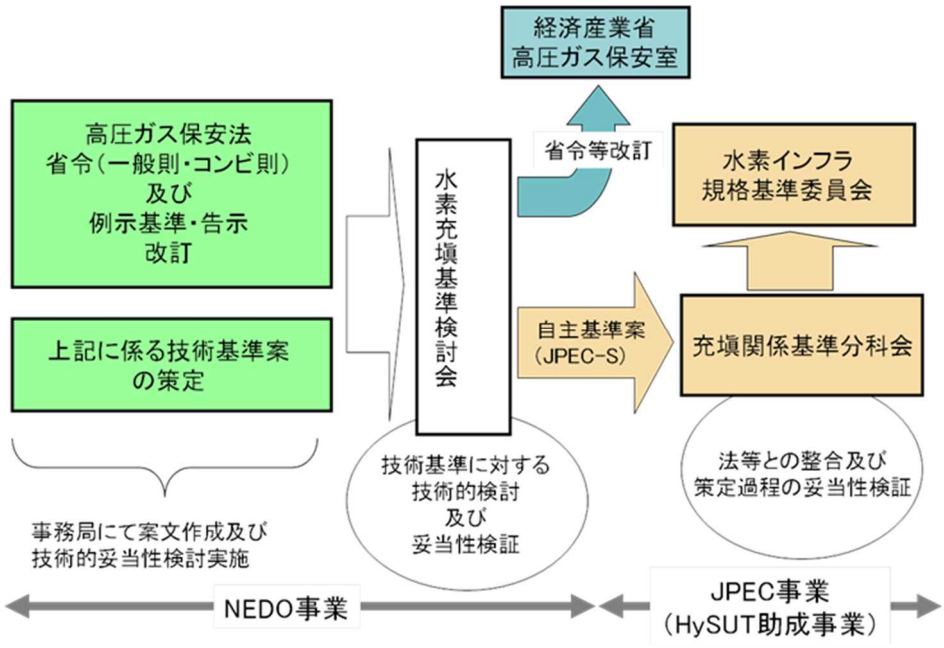


図 21. 技術基準改正手順

【MC フォーミュラの技術基準への反映】

業界では、 2020 年 5 月に改訂された国際的充填技術基準 SAE J2601 の最新版との調和と MC フォーミュラの国内充填技術基準（JPEC-S 0003）への反映が望まれていた。

そこで、最新の SAE J2601 202005（2020 年 5 月改訂版）の改訂部分を洗い出し、国内固有の制約等を踏まえて、既に先行して取り入れている内容は確認し、新たに取り入れられる条項は反映し、国内固有の制約等で取り入れることが相応しくないものは反映を見送ることとした。

また、本事業で国内での実証が行われたMCフォーミュラ方式を JPEC-S 0003 に追記し、SAEJ2601 の改訂部分の反映と合わせて、JPEC-S 0003（2021）（案）を策定した。

本事業にて得られた JPEC-S 0003（案）（MC フォーミュラ方式追記版）は、その後、JPEC の自主事業（HySUT 助成）にて、更にブラッシュアップし、自主基準化し、JPEC-S 0003（2021）として制定を行っている。

【MC－MM の技術基準への反映】

本事業で開発された革新的充填プロトコル（MC Multi Map ：MC-MM）方式の充填プロトコルの効果及び課題を整理し、プレクール温度の大幅な緩和（－17.5～－26℃）が期待できる革新的充填充填プロトコルの充填技術自主基準案及び充填技術自主ガイドライン案の策定に向け「新規充填プロトコル検討会」を発足し検討を行った。

本事業で策定した前述の JPEC-S 0003（2021）に MC-MM 方式に係る固有の要件を追記、また MC-MM 方式で用いる用語についても用語欄に追記することにより、JPEC-S 0003（2023）（案）を策定した。

本事業にて得られた JPEC-S 0003（案）（MC-MM 方式追記版）はその後、JPEC の自主事業（HySUT 助成）にて更にブラッシュアップし、自主基準化し、JPEC-S 0003（2023）として制定を行っている。

また、KHK 主催の圧縮水素スタンド関連規制等に係る法技術的な課題の検討委員会において、MC-MM 方式を反映した自主基準 JPEC-S 0003（2023）の安全面での配慮等について説明し、既に引用されている JPEC の自主基準 JPEC-S 0003（2014）や JPEC-S 0003（2016）と同様に、一般則関係例示基準５５の２及び５９の４（コンビ則関係例示基準６２の２及び６６の４）において引用していただきたい旨を説明し、了承が得られている。

【熱容量測定方法の規格化】

本事業で開発された MC-MM 方式を可能とするため、水素ディスペンサー配管熱容量検討会において検討された原案を基に配管等の有効熱容量測定の性能評価基準（案）を策定した。

その後、JPEC の自主事業（HySUT 助成）にて、更にブラッシュアップし、自主基準化し、圧縮水素スタンドの配管等の有効熱容量測定の性能評価基準 JPEC-S 0012（2023）として制定を行っている。

【達成度】

- SAE J2601改定内容を反映した充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案の作成　○
- 革新的充填プロトコルを反映した充填技術基準案及び充填技術自主ガイドライン案の作成　○

３．２　成果の意義

MC-MM の開発により、夏場の気温でも T20 相当（－26℃以上）へのプレクール温度緩和が見通せる結果が得られ、運営費（電気代）削減や構成部材耐久性向上に寄与する充填プロトコルを開発した。

また、水素充填技術基準整備に関する研究開発により、今回開発した革新的充填プロトコルを含めた最先端の充填プロトコルに関する国内技術基準案を策定し、広く業界で使用できる道筋をつけた。

さらに、低コスト高頻度水素充填システムの開発により、最小設備構成でダブル充填可能な協調制御システムを開発し、安定的に充填できることを実証し、合理的な水素ステーション整備に関する知見が得られた。

３．３　開発項目別残課題

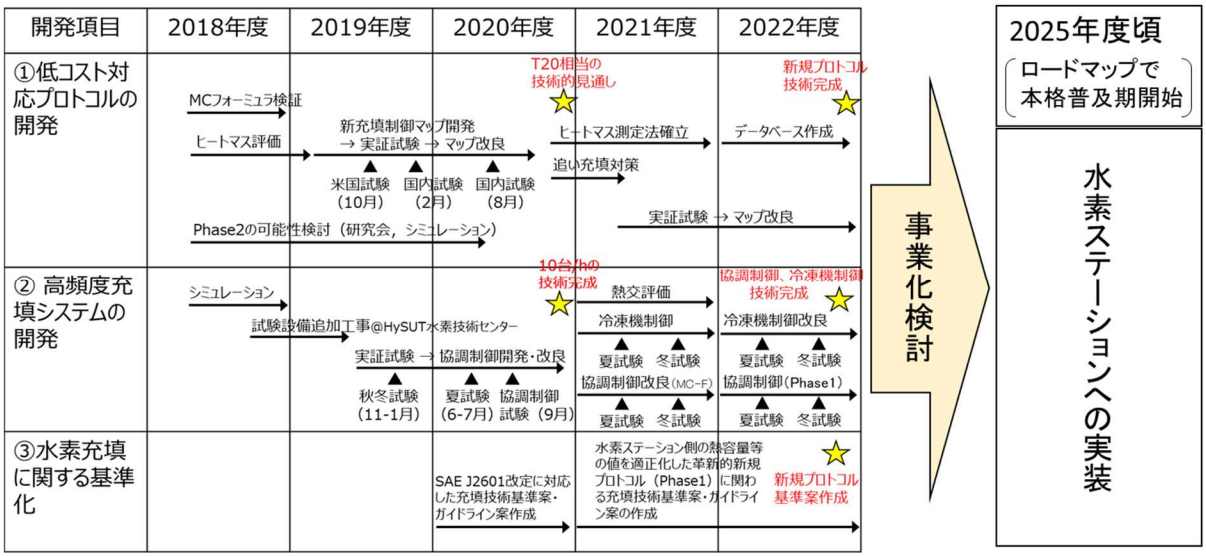
本事業では LDV（Light Duty Vehicle）を対象に、充填時間を延ばすことなく水素供給温度を緩和する充填プロトコルを開発した。一方で、今後開発される MDV（Medium Duty Vehicle）や HDV（Heavy Duty Vehicle）用充填プロトコルでは大量の水素を短時間に充填することが重要となる。本事業成果は水素供給温度を現行と同等とすることにより充填時間短縮を可能とする技術でもある。MDV／HDV 用充填プロトコルでは、水素供給温度緩和を充填時間短縮の双方の視点からの最適化を行い、開発に取り組むことが望まれる。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本開発成果は、顧客の利便性を損なわず、低コストで高頻度充填に対応したシステムを構築できるため、本格普及期には必須の技術となり得る。「1 時間 10 台充填可能な高頻度充填システム（建設費 低）」と「水素供給温度を緩和しても充填時間が長くならないプロトコル（運営費 低）」の組み合わせにより、以下の効果が期待される。

- 顧客を待たせない（5 台／hr を超えても待ち時間が発生しない）
- 低コストシステム（建設費の低減）
- 電気代の低減（運営費の低減）
- 部材、システムの信頼性向上（運営費の低減）

また、今回開発した革新的充填プロトコル（MC-MM）は国内技術基準に反映され、一般則関係例示基準に引用されることにより業界に広く使用されることが期待される。



５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、論文等－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021 年 5 月	燃料電池実用化推進協議会　令和３年度　第１回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
2	2021 年 8 月	International journal of hydrogen energy	Precooling temperature relaxation technology in hydrogen refueling for fuel-cell vehicles	判田　圭（㈱本田技術研究所）
3	2021 年 11 月	令和 3 年度 FCCJ 第 1 回 FCV・水素インフラ WG	Technologies, Standards and Regulations for Hydrogen Refueling Station in Japan	池田哲史（(一社)水素供給利用技術協会）
4	2022 年 3 月	燃料電池実用化推進協議会　令和３年度「燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会」	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
5	2022 年 5 月	燃料電池実用化推進協議会　令和４年度第１回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
6	2022 年 9 月	8th International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation	“MC Multi Map” refueling protocol	判田　圭（㈱本田技術研究所）
7	2022 年 10 月	SAE J2601-1　Fuel cell interface task force	“MC Multi Map” refueling protocol development in Japan.	判田　圭（㈱本田技術研究所）
8	2022 年 10 月	燃料電池実用化推進協議会　令和４年度第２回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
9	2022 年 11 月	ISO TC197-WG5	A thermal mass measuring method for hydrogen refueling component.	判田　圭（㈱本田技術研究所）
10	2023 年 1 月	燃料電池実用化推進協議会　令和４年度第３回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
11	2023 年 2 月	燃料電池実用化推進協	本格普及期に向けた次世代	前原　和巳

		議会　令和３年度 「燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会」	ステーション・充填技術の研究開発	(ENEOS㈱)

－特許等－

出願者	出願番号	国内・国外・PCT	出願日	状態	名称
福永、蓮仏、坂本	特願 2018-102762	国内・PCT（ｱﾒﾘｶ、ｵｰｽﾄﾗﾘｱ、中国）	平成 30 年 5 月 29 日	登録 日本:特許第 7048417 号 ｱﾒﾘｶ: 11346503 ｵｰｽﾄﾗﾘｱ: 2019278632 中国: 112204298	水素ガス充填方法及び水素ガス充填装置
判田	特許 6995989	国内	令和 1 年 5 月 31 日	登録	ガス充填方法
判田	P2021-210452	国内 PCT(US)	令和 2 年 4 月 16 日	公開	追い充填検知による水素充填制御方法
大島、蓮仏	特願 2021-033609	国内・ PCT（移行前）	令和 3 年 3 月 3 日	出願中	ガス充填装置
判田	P2022-139225	国内 PCT(US)	令和 4 年 9 月 1 日	出願中	追い充填検知による水素充填制御方法
蓮仏	特願 2022-141035	国内	令和 4 年 9 月 5 日	出願中	ガス充填装置
判田	P2022-142847	国内 PCT(US)	令和 4 年 9 月 8 日	出願中	大容量水素タンクの為の水素充填方法
判田	P2022-154474	国内 PCT(US)	令和 4 年 9 月 28 日	出願中	水素充填方法の改良

以　上

（2-(4)-⑤）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発」

委託先：(一財)金属系材料研究開発センター、日本製鉄株式会社

●成果ｻﾏﾘ（実施期間：2020年度～2022年度終了）

・Mo-V添加鋼を中心に1000MPa以上の引張強さを有し、新型高圧水素蓄圧器に適用可能な高強度低合金鋼の化学成分と熱処理条件を提示した。
・JIS低合金鋼の中で1000MPa以上の引張強さを有し、新型高圧水素蓄圧器に適用可能な高強度低合金鋼の鋼種と熱処理条件を提示した。
・水素ステーション用蓄圧器に関する国内外の技術動向およびコストに関する調査を行い、上記高強度低合金鋼を用いた新型蓄圧器の試設計を通じたコスト低減効果を検討した。

●背景/研究内容・目的

本事業では、水素ステーションの2025年以降の本格普及および2030年以降の自立化に向けて、蓄圧器の大幅なコスト低減を実現すべく、1000MPa以上の高強度を有する低合金鋼を適用した新型高圧蓄圧器に関する研究開発を行う。

●研究目標

実施項目	目標
1. Mo-V添加鋼の高強度化と水素適合性の評価	左記鋼種を中心に引張強さが1000MPa以上となる化学成分および熱処理条件を明らかにし、目標強度を満たす材料についてSSRTによる水素適合性評価を行い、強度と水素適合性が両立する製造条件を明らかにする。
2.高強度低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価	過去に水素適合性が未評価のJIS低合金鋼を中心に、引張強さが1000MPa以上となる鋼種および熱処理条件を明らかにし、目標強度を満たす材料についてSSRTによる水素適合性評価を行い、強度と水素適合性が両立する製造条件を明らかにする。
3.蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査	水素ステーション用蓄圧器の国内外の技術動向およびコスト構造等の調査と上記特性発現鋼材を用いた蓄圧器の試設計を行うと共に現状とのコスト比較を行ってコスト改善効果を検証する。

●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 金属系材料研究開発センター(実施項目2, 3)
  - 日本製鉄株式会社 （実施項目１）

●実施内容／研究成果

1. Mo-V添加鋼の高強度化と水素適合性の評価
・Mo-V添加鋼において目標性能を達成する製造条件(化学成分、熱処理条件)を明らかにした。
・候補鋼材を適用した高容量蓄圧器の試設計評価より、設計成立を確認した。大容量化を実現する高強度低合金鋼の候補材として有望な鋼材が得られた。

2.高強度低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価
・JIS規格鋼において目標性能を達成する製造条件(化学成分、熱処理条件)を明らかにした。
・候補鋼材を適用した高容量蓄圧器の試設計評価より、設計成立を確認した。大容量化を実現する高強度低合金鋼の候補材として有望な鋼材が得られた。

3.蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査
・高強度低合金鋼(Mo-V添加鋼、SNCM439鋼：引張強さ1000MPa以上)の材料データに基づく高容量蓄圧器の試設計結果から、蓄圧器１ディスペンサーあたりの製造コストを24～26%低減可能と判明した。
・2030~2050年の水素ステーション建設はFCVに加えてFCバスおよびFCトラック用の需要増が予想される。
・水素ステーションの建設コスト削減には、高強度低合金鋼適用による設置本数削減が有効と判明した。

●今後の課題

高容量蓄圧器の実寸試作を通じて、製造プロセス課題と対策を明確にすると共に、コスト低減効果を更に精査し、製品として実生産・実用化に向けた検討を行う。

●実用化・事業化の見通し

本研究開発の成果により高強度低合金鋼を適用した現状より高容量な蓄圧器の導入により、設備費や運営費に関するコスト低減が可能であることが示された。
今後は実生産を意識した製造プロセスの確立と課題抽出、製品としての信頼性を担保するデータの蓄積を進めて実用化を図る。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
1.Mo-V添加鋼の高強度化と水素適合性の評価	TS1000MPa以上と水素適合性が両立する製造条件を明らかにした。	○
2.高強度低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価	TS1000MPa以上と水素適合性が両立する製造条件を明らかにした。	○
3.蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査	最新の関連技術情報を入手すると共に現状とのコスト比較を行ってコスト改善効果を検証した。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	2	0	0

事業番号:2-(4)-⑤
研究開発名:「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発」

実施者:一般財団法人金属系材料研究開発センター
日本製鉄株式会社

１．研究開発概要

本研究開発は水素ステーションでのコスト低減に寄与すべく、水素ステーションにおいて使用されているタイプⅠ型の高圧水素蓄圧器において、現在使用されている低合金鋼よりも高強度を有する鋼材を適用することにより、使用鋼材量の低減や蓄圧器製造プロセスに関するコスト低減を通じて蓄圧器に関する製造コストの低減を実現させることを目的としている。

実施内容は、前調査研究(2018、2019 年度実施)で明らかになった高強度化と水素適合性の両立の可能性を有する Mo-V 添加鋼と過去に水素適合性が未評価である低合金鋼規格材の評価を行うと共にコスト低減効果が期待される鋼材について、採取した実験データを用いて新型タンクの試設計とコスト比較調査を実施する。具体的な実施項目としては、以下の 3 項目に大別される。

(1)Mo-V 添加鋼等の高強度化と水素適合性の評価

本項目は、Mo-V 添加鋼を中心に引張強さ 1000 MPa 以上の高強度と水素適合性を両立する低合金鋼の製造条件範囲および水素蓄圧器への適合可否について検討するものである。

(2)低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価

本項目は、JIS 規格に掲載されている低合金鋼の中で水素適合性が未評価の鋼種について、現在水素蓄圧器に使用されている鋼材よりも一段と高強度となる引張強さ 1000 MPa 以上を発現し、水素適合性と両立する鋼材の製造条件範囲および水素蓄圧器への適合可否について検討するものである。

(3)蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査

前調査研究では、Mo-V 添加鋼や他の高強度低合金鋼の高圧水素タンクへの適用の可能性を鋼材の強度と耐水素特性の面から調査した結果、蓄圧器の薄肉化により最大で 5 割程度の鋼材重量削減の可能性があり、水素ステーションの低コスト化に資する可能性があることが示された。本項目においては、新型高圧蓄圧器の実用化を念頭に、実際に水素ステーションで採用されるための条件を整理した上で、研究開発にフィードバックする目的で国内外の水素ステーションの建設実態調査およびタイプⅠ蓄圧器の需要予測と海外も含めた材料の技術規格・基準の調査を行う。また、蓄圧器のコストに関する情報を収集して、上記①および②において得られた有望な鋼材を用いた蓄圧器の試設計を実施し、コスト低減効果について明らかにするものである。

以上のように、本研究開発では、水素ステーションの 2025 年以降の本格普及および 2030 年以降の自立化に向けて、蓄圧器の大幅なコスト低減を実現すべく、現状より高強度を有する低合金鋼を適用した新型高圧蓄圧器に関する研究開発を行う。

2. 研究開発目標

本研究開発を構成する上記のように３つの主要実施項目に大別されるが、項目(1)では Mo-V 添加鋼を中心に、項目(2)では JIS 規格鋼について、各々1000MPa 以上の引張強さを発現する化学成分あるいは鋼種とその製造プロセス条件を探索する。項目(3)ではそれらの結果を基に鋼材使用量を削減した新型蓄圧器の試設計を行うと共にコスト試算を行い、コスト低減効果を検証する。
各項目の最終目標を表 1 に示す。

表 1　研究開発目標

実施項目	最終目標
(1)Mo-V 添加鋼等の高強度化と水素適合性の評価	・引張強さ 1000MPa 以上および水素適合性を両立し，焼入れ性に優れた鋼材の化学成分および熱処理条件を提示する。 ・技術基準に準拠した蓄圧器適合性評価を行う。
(2)低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価	・引張強さ 1000MPa 以上および水素適合性を両立し，焼入れ性に優れた鋼材の化学成分および熱処理条件を提示する。 ・技術基準に準拠した蓄圧器適合性評価を行う。
(3)蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査	水素ステーション用蓄圧器の国内外の技術動向およびコスト構造等の調査と上記特性を発現する鋼材の特性データを用いて蓄圧器の試設計を行うと共に現状とのコスト比較を行ってコスト改善効果を検証する。

3. 研究開発成果

3.1　研究開発成果、達成度

2020 年 8 月より研究開発を開始し、2023 年 3 月事業終了時における研究開発成果および達成度を下記に示す。

表 2　研究開発の達成度

実施項目	最終目標（2022 年度）	達成内容	達成度 (2023/3)
(1)Mo-V 添加鋼等の高強度化と水素適合性の評価	・引張強さ 1000MPa 以上および水素適合性を両立し，焼入れ性に優れた鋼材の化学成分および熱処理条件を提示する。 ・技術基準に準拠した蓄圧器適合性評価により、大容量蓄圧器への適用可否を明確化する。	Mo-V 添加鋼において ・目標性能を達成する製造条件を明確化した。 ・候補材の試設計評価より、設計成立を確認した。大容量化を実現する高強度低合金鋼の候補材として有望な鋼材が得られた。	○
(2)低合金鋼規格材の高強度化と水素適合性の評価	・引張強さ 1000MPa 以上および水素適合性を両立し，焼入れ性に優れた鋼材の化学成分および熱処理条件を提示する。 ・技術基準に準拠した蓄圧器適合性評価により、大容量蓄圧器への適用可否を明確化する。	JIS 規格鋼において ・目標性能を達成する製造条件を明確化した。 ・候補材の試設計評価より、設計成立を確認した。大容量化を実現する高強度低合金鋼の候補材として有望な鋼材が得られた。	○
(3)蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査	水素ステーション用蓄圧器の国内外の技術動向およびコスト構造等の調査と上記特性を発現する鋼材の特性データを用いて蓄圧器の試設計を行うと共に現状とのコスト比較を行ってコスト改善効果を検証する。	・高強度低合金鋼(Mo-V 添加鋼、SNM439 鋼：引張強度 1000MPa 以上)の材料データに基づく大容量蓄圧器の試設計結果から、１ディスペンサーあたりの蓄圧器製造コストを 24～26%程度低減できることがわかった。 ・2030~2050 年：水素ステーション建設は、FCV 用のみならず、FC バス用、FC トラック用の建設需要が増加することは判明。水素ステーションの建設コスト削減には、高強度低合金鋼を適用した蓄圧器設置本数削減が有効であることがわかた。	○

３．２　成果の意義(内容)

(1) Mo-V 添加鋼等の高強度化と水素適合性の評価

①　Mo-V 添加鋼の焼入れ性および水素適合性評価

表３に、供試材の化学成分を示す。これらの鋼を実験室で真空溶製し、熱間鍛造で丸棒と板材を作製した。丸棒はソーキング熱処理を行って、ジョミニ式一端焼入れ性試験の試験片を採取した。試験片を 920℃、JIS 規格鋼は 900℃の条件で加熱し、試験片の片端面からジェット水流で冷却することで焼入れを行った。その後、面削および研磨を行って、研磨面において焼入れ端部から所定の間隔で硬さを測定し、焼入れ性を調査した。図１にジョミニ式一端焼入れ性試験の結果を示す。いずれの鋼種も水冷端からの距離が大きくなるにつれて、ロックウェル硬さは低下した。

板材は熱間圧延を行って 12mm 厚さとし、表４に示す条件で焼入れ焼もどし熱処理を行って、それぞれ焼もどし温度条件を 2～4 水準変化させて強度を変えて、低ひずみ速度引張試験(Slow Strain Rate Test、 SSRT) の試験片を採取した。室温大気環境下および 85MPa 高圧水素ガス環境下の SSRT をひずみ速度が 3.0×10^{-6}/s の条件で行って、水素適合性を示す限界引張強さ(以下、限界引張強さ)を評価した。水素適合性の判定方法は、低合金技術文書に準拠し、大気環境の応力―変位線図における応力の極大値における変位を水素ガス環境の応力―変位線図の変位値が超え、大気環境と同様に水素ガス環境でも極大値を示す場合は水素適合性あり、極大値を示さない場合は水素適合性なしと判定した。図２に各鋼種の限界引張強さを示す。Mo-V 添加鋼の 6 鋼種のうち、0.5Cr-1.5Mo 材の限界引張強さが最も高かった。一方、0.5Cr のみ限界引張強さが 1000MPa 以下となり、目標性能に到達しなかった。

以上により、目標性能に到達する鋼種を Mo-V 添加鋼で 5 鋼種見出した。しかし、焼入れ性評価結果より、大容量蓄圧器の設計肉厚を考慮すると、焼入れ性の改良が望ましいと考えられた。また、高圧水素蓄圧器への適用可否を判定するためには後述の試設計評価を行い蓄圧器の寿命を評価する必要がある。そこで、候補材を選定または一部は改良をした材料で試設計評価を行った。

表３　Mo-V 添加鋼の化学成分(mass%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb
Mo-0.10V	0.40	0.19	0.44	1.25	0.73	0.10	0.025
Mo-0.26V	0.40	0.2	0.45	1.27	0.76	0.26	0.025
SNB16-0.26V	0.38	0.19	0.61	1.05	0.66	0.26	0.026
SNB16-0.37V	0.37	0.2	0.62	1.04	0.67	0.37	0.027
1.0Mo	0.37	0.2	0.62	1.01	1.00	0.36	0.024
1.5Mo	0.36	0.2	0.62	1.05	1.55	0.38	0.026
0.5Cr	0.39	0.2	0.63	0.51	0.67	0.37	0.026
0.5Cr-1.5Mo	0.38	0.2	0.58	0.5	1.49	0.36	0.024

表４　焼入れ焼もどし熱処理条件

Quenching	Tempering
920℃×45min→OQ	600, 640, 660, 680℃×1h→AC

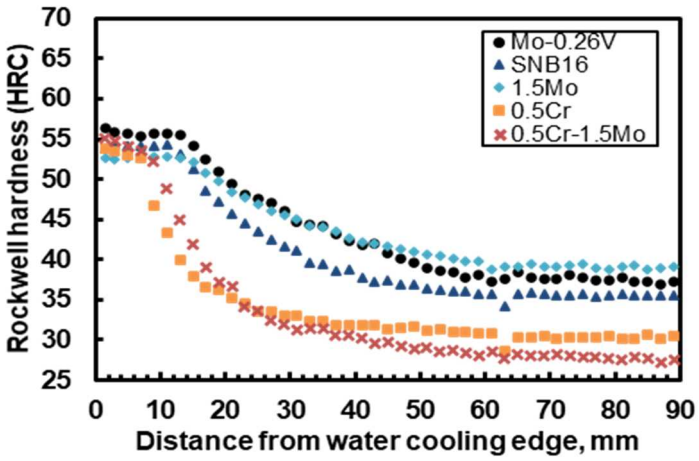


図１　Mo-V 添加鋼の水冷端からの距離およびロックウェル硬さの関係

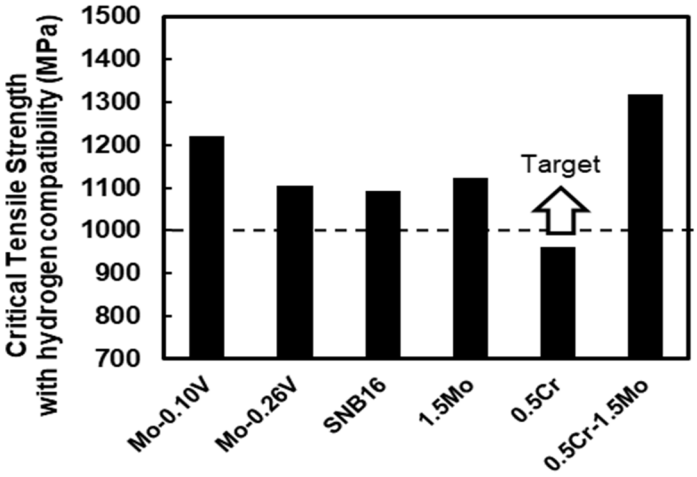


図２　Mo-V 添加鋼の水素適合性を示す限界引張強さ

②　Mo-V 添加鋼の試設計評価による高圧水素蓄圧器への適用検討

供試材として、SNB16、0.5Cr-1.5Mo から焼入れ性改良を試みた 0.5Cr-1.3Mo-B の化学成分を持つ鋼を実験室で真空溶製した。その後、熱間鍛造、熱間圧延、焼入れ熱処理を行って、厚さが 35mm の板材を作製した。焼入れ後の板材の肉厚―圧延方向から試験片を採取し、肉厚方向のビッカース硬さ試験を行って、いずれも肉厚端部と中心部の硬さにほとんど差がないことを確認した。それぞれ焼もどし温度条件を調整し、所定の強度特性を持つ板材を作製した。図３に疲労き裂進展解析の概念図を示す。疲労き裂進展解析では、蓄圧器実機の荷重変動を想定して、限界き裂長さを水素環境下破壊靭性特性(水素助長割れ下限界応力拡大係数、 K_{IH})より、限界き裂長さに至る繰り返し数を水素環境下疲労き裂進展特性で評価し、安全マージンを考慮した値を許容繰り返し数とする。KHKS　0220 に準拠して、水素環境下疲労き裂進展試験、K_{IH}評価としてライジングロード試験を実施し、得られた水素環境下の特性から疲労き裂進展解析により設計成立可否を判定する試設計評価を行った。解析の前提条件は、日本国内で主流の 300L 蓄圧器に対し、容量が 1.5 倍となる 450L 蓄圧器において、円筒胴部内面が圧力 82MPa と 50MPa の繰り返し応力負荷を受けることを想定した。初期欠陥は長さ 1.60ｍｍ、深さ 0.53ｍｍの軸方向に半楕円形状のき裂とし、今回は限界き裂深さの 1/4 が初期き裂深さよりも大きくなる場合を設計成立(valid)と判定した。

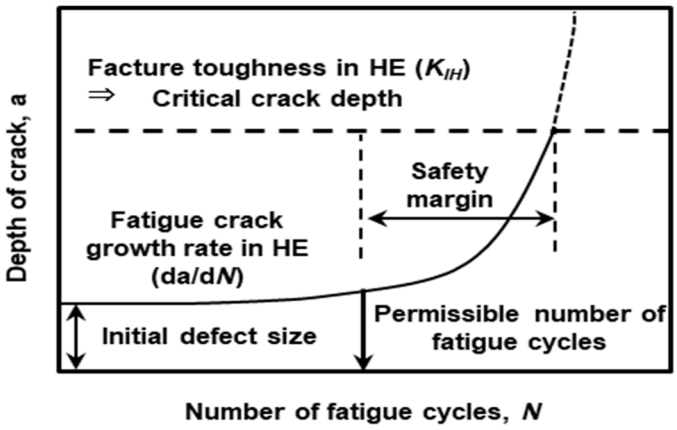


図３　疲労き裂進展解析の概念図

図４に 0.5Cr-1.3Mo-B（TS:1175MPa）およびあわせて SNCM439(TS:1026MPa)の室温 90MPa 高圧水素ガス環境下における疲労き裂進展試験より得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示す。試験は応力比 0.1 の荷重(⊿P)一定制御で、波形は正弦波、周波数は 1Hz で行った。0.5Cr-1.3Mo-B の水素環境下疲労き裂進展速度は SNCM439 よりも速くなったがこれは強度特性の違いによるものであると考えられる。水素環境下疲労き裂進展速度より、KHKS 0220 に準拠した疲労き裂進展解析を行って、限界き裂深さの 1/4 が初期き裂深さよりも大きくなる条件を算出した。K_{IH}≧30 MP・$m^{1/2}$ の場合、設計が成立することが分かった。

図５に室温大気環境下および 85MPa 高圧水素ガス環境下のライジングロード試験より得られた供試材の K_{IH} および引張強さの関係を SNCM439 の結果とあわせて示す。試験は変位制御で行い、開口変位速度は 0.0002mm/s とした。大気中および水素中の荷重―開口変位曲線を重ね合わせ、大気中から水素中の荷重―変位曲線が逸脱する点をき裂進展開始荷重として、K_{IH} を求めた。SNB16(強度変化材)と 0.5Cr-1.3Mo-B（TS:1175MPa）を比較すると、化学成分の違いによらず Mo-V 添加鋼の K_{IH} と引張強さは比例関係にあり、引張強さの上昇に伴って K_{IH} は低下する傾向であった。また、

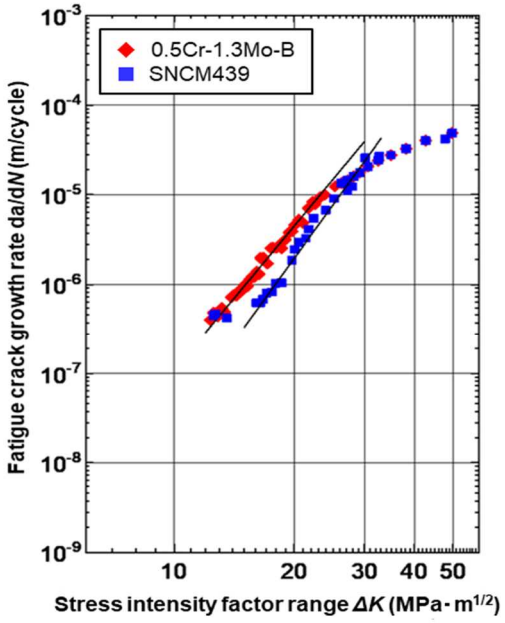


図４　疲労き裂進展速度(da/dN)および応力拡大係数 ΔK の関係

Mo-V 添加鋼と SNCM439 を比較すると、SNCM439 よりも Mo-V 添加鋼のほうが強度―靭性バランスに優れていた。疲労き裂進展解析より算出した設計成立条件の K_{IH}≧30 MP・$m^{1/2}$ となる引張強さはそれぞれ Mo-V 添加鋼が約 1100MPa、SNCM439 が約 1000MPa であった。

以上により、試設計評価を行った Mo-V 添加鋼は高圧水素蓄圧器の大容量化を実現する高強度低合金鋼の候補材として有望であると結論付けた。

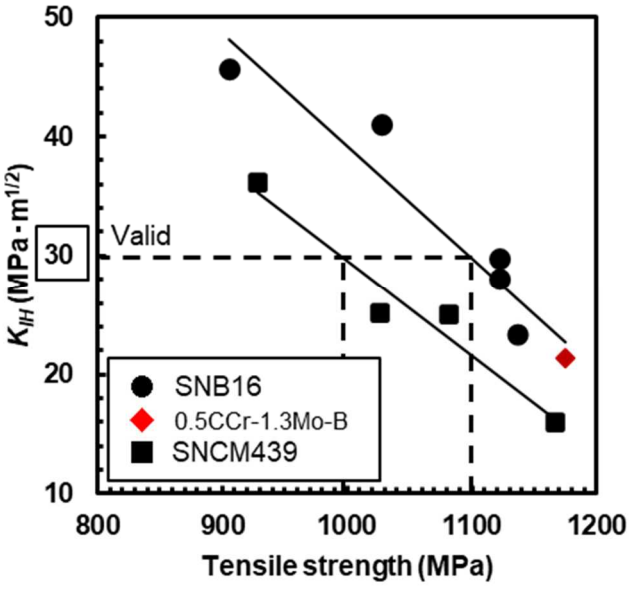


図５　引張強さと K_{IH} の関係

(2) 低合金鋼規格鋼の高強度化と水素適合性の評価

①　低合金鋼規格鋼の焼入れ性および水素適合性評価

表５に供試材の化学成分を示す。鋼種は蓄圧器既存鋼の SCM435、SNCM439 および高圧水素環境下で未評価の JIS 規格鋼として、SCM445、SNCM447 とした。これらの鋼を実験室で真空溶製し、熱間鍛造で丸棒と板材を作製した。丸棒はソーキング熱処理を行って、ジョミニ式一端焼入れ性試験の試験片を採取した。試験片を 900℃の条件で加熱し、試験片の片端面からジェット水流で冷却することで焼入れを行った。その後、面削および研磨を行って、研磨面において焼入れ端部から所定の間隔で硬さを測定し、焼入れ性を調査した。図６にジョミニ式一端焼入れ性試験の結果を示す。JIS 規格鋼のうち 2.0mass%Ni を添加した SNCM439 と SNCM447 は水冷端からの距離に対するロックウェル硬さの低下が小さく、優れた焼入れ性を示した。

板材は熱間圧延を行って 12mm 厚聡、焼入れを行って、表６に示す条件でそれぞれ焼もどし温度条件を 2～4 水準変化させて強度を変えて、低ひずみ速度引張試験(Slow Strain Rate Test、SSRT)の試験片を採取した。室温大気環境下および 85MPa 高圧水素ガス環境下の SSRT をひずみ速度が 3.0×10^{-6}/s の条件で行って、水素適合性を示す限界引張強さ(以下、限界引張強さ)を評価した。水素適合性の判定方法は、Mo-V 添加鋼と同様に、低合金技術文書に準拠した前述の方法で水素適合性の有無を判定した。図７に各鋼種の限界引張強さを示す。SNCM439 のみが目標性能に到達した。

以上により、目標性能に到達する鋼種を JIS 規格鋼で既存鋼ではあるが SNCM439 の 1 鋼種を見出した。

表５　低合金鋼規格鋼の化学成分(mass%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
SCM435	0.38	0.20	0.61	0.92	0.30	—
SCM445	0.47	0.20	0.62	0.92	0.30	—
SNCM439	0.37	0.21	0.62	0.92	0.30	2.00
SNCM447	0.49	0.20	0.62	0.92	0.30	2.00

表６　焼入れ焼もどし熱処理条件

Quenching	Tempering
900℃×45min→OQ	500, 550, 600, 650℃×1h→AC

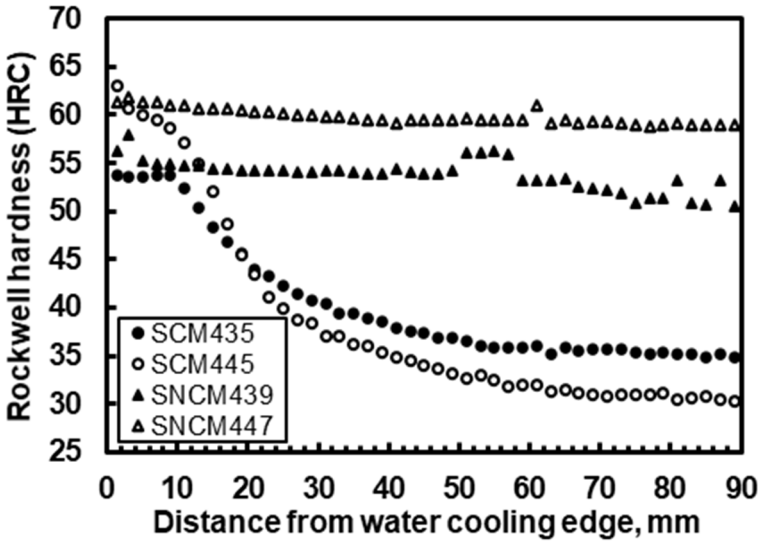


図６　低合金鋼規格鋼の水冷端からの距離およびロックウェル硬さの関係

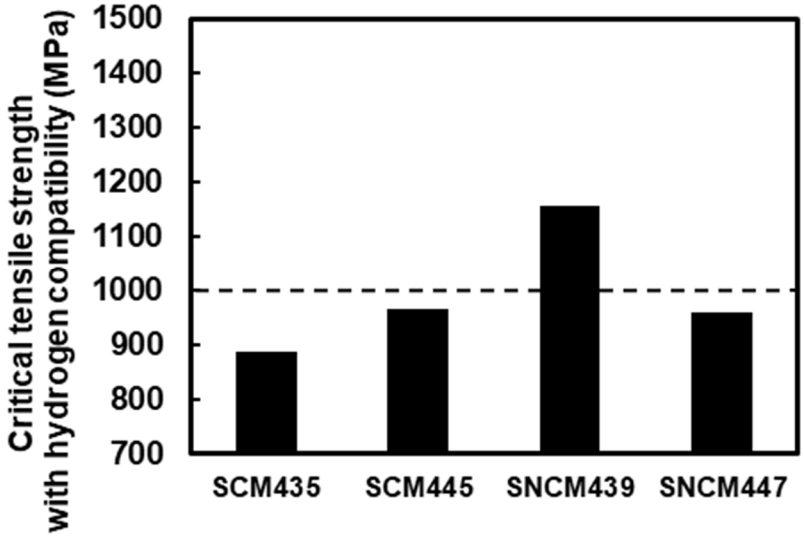


図７　低合金鋼規格鋼の水素適合性を示す限界引張強さ

② 低合金鋼規格鋼の試設計評価による高圧水素蓄圧器への適用検討

供試材として、SNCM439 の化学成分を持つ鋼を実験室で真空溶製した。その後、熱間鍛造、熱間圧延、焼入れ熱処理を行って、厚さが 35mm の板材を作製した。焼入れ後の板材の肉厚―圧延方向から試験片を採取し、肉厚方向のビッカース硬さ試験を行って、肉厚端部と中心部の硬さにほとんど差がないことを確認した。焼もどし温度条件を調整し、所定の強度特性を持つ板材を作製した。

Mo-V 添加鋼と同様の条件で KHKS 0220 に準拠して、水素環境下疲労き裂進展試験、K_{IH} 評価としてライジングロード試験を実施し、得られた水素環境下の特性から疲労き裂進展解析により設計成立可否を判定する試設計評価を行った。なお、解析の前提条件についても Mo-V 添加鋼と同様である。

図４に 0.5Cr-1.3Mo-B (TS:1175MPa)、SNCM439(TS:1026MPa)の室温 90MPa 高圧水素ガス環境下における疲労き裂進展試験より得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係をあわせて示した。水素環境下疲労き裂進展速度より、SNCM439 についても KHKS 0220 に準拠した疲労き裂進展解析を行って、限界き裂深さの 1/4 が初期き裂深さよりも大きくなる条件を算出した。Mo-V 添加鋼と同様に SNCM439 は K_{IH}≧30 MP・$m^{1/2}$ の場合、設計が成立することが分かった。

図５に室温大気環境下および 85MPa 高圧水素ガス環境下のライジングロード試験より得られた供試材の K_{IH} と引張強さの関係を示した。疲労き裂進展解析より算出した設計成立条件の K_{IH}≧30 MP・$m^{1/2}$ となる引張強さは SNCM439 の場合、約 1000MPa であった。

目標性能の引張強さ 1000MPa 以上において、試設計評価により設計が成立することが確認できたため、SNCM439 についても高圧水素蓄圧器の大容量化を実現する高強度低合金鋼の候補材として有望であると結論付けた。

(3)　蓄圧器に関する技術動向調査、新型水素蓄圧器の試設計と製造コスト比較調査

①　高圧水素蓄圧器の試設計と製造コスト調査

(2)項目において、高圧蓄圧器に採用する高強度低合金鋼は、Mo-V 添加鋼および高強度 SNCM439 鋼が有望であると結論されている。ここでは、上記鋼種を対象とした高圧水素蓄圧器の大容量化による製造コストの低減効果についての検討した結果を報告する。図８には、水素ステーションの１ディスペンサーあたりの蓄圧器構成を変更(現行 300ℓ×3 本⇒変更後 450ℓ×2 本へ)したコスト削減効果について事前検討した結果を示す。

また、技術動向調査により蓄圧器製造コスト構造に関しては、下記に示すことがわかった。

１)蓄圧器コスト＝鋼材コスト+製造(加工)コスト

２)製造(加工)コスト：口径が多少大きくなっても(蓄圧器メーカー既存設備で扱える範囲内であれば)製造コストは大差がない。

３)鋼材使用量は概ね　容量×圧力／鋼材強度に比例し、一本当たりの容量を変えても鋼材使用量は大差がない。

以上より、水素ステーションに設置する水素蓄圧器を現行 300ℓ×3 本から 450ℓ×2 本(総容量変更なし)へ変更することで、トータルコストを 23～30%低減できることが試算された。

図９には、鋼材の特性データを用いて高圧水素蓄圧器の試設計で得られた蓄圧器容量 450ℓにおける組立図の一例を(口絞り型を前提)、表７には、試設計によるコスト低減効果について検証した結果を示す。試設計は、蓄圧器容量 450ℓ蓄圧器について KHKS 0220 に準拠して設計成立することを確認している。表７より、Mo-V 添加鋼および高強度 SNCM439 鋼を前提とし、水素ステーションの１ディスペンサーあたりの蓄圧器構成を変更(現行 300ℓ×3 本⇒変更後 450ℓ×2 本)した結果、引張強度 1100MPa 級では、トータルコストは 26%程度、トータル重量は 27%程度低減されること、引張強度 1000MPa 級ではトータルコストは 24%程度、トータル重量は 20%程度低減されることがわかった。また、高強度低合金鋼の採用により、水素蓄圧器の薄肉化が可能となり、熱処理過程における材質均質化が期待できる。

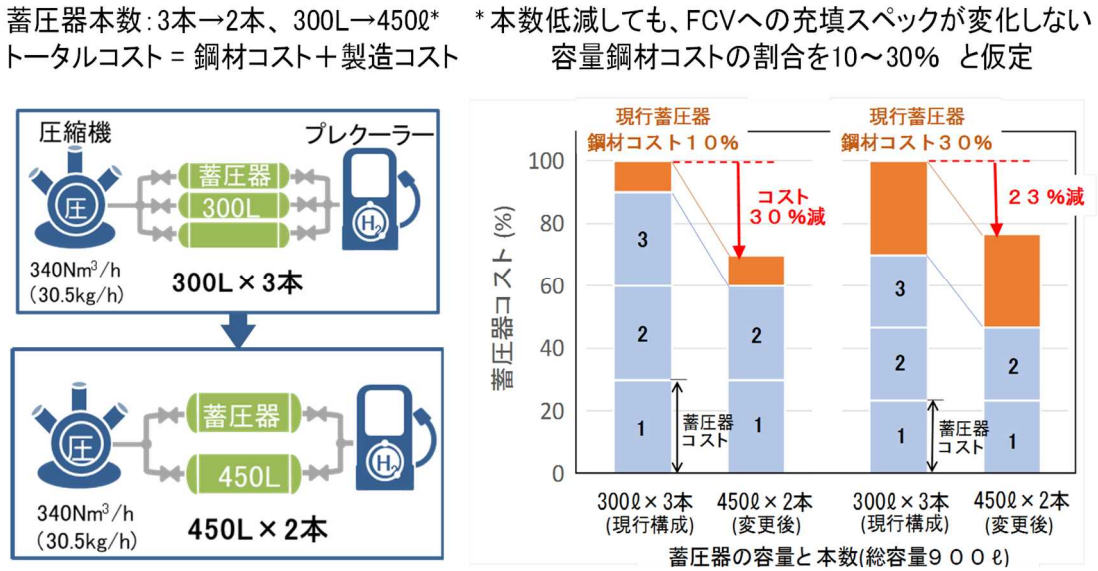


図８　蓄圧器コスト削減のための１ディスペンサーあたりの蓄圧器構成の変更

評価材　:Mo-V添加鋼(TS:1100MPa)、SNCM439 (TS:1000MPa)
設計条件:圧力変動:50⇔82MPa、初期想定き裂深さ:0.533×10^{-3}m
鋼材評価内容:SSRT、水素環境下破壊靭性試験(K_{IH})、疲労き裂進展試験

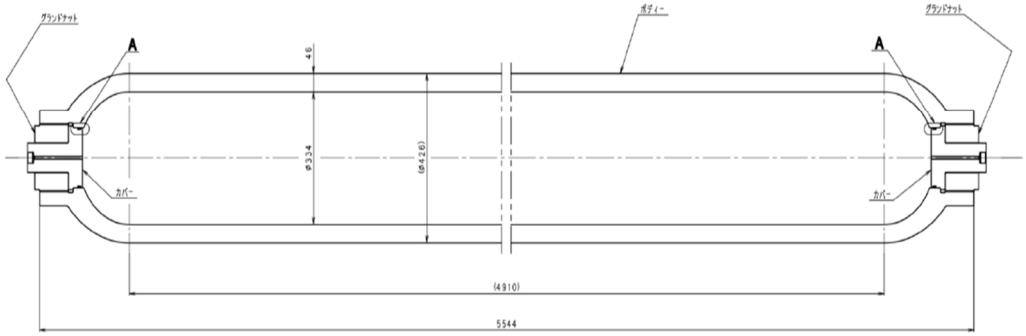


図９　両端口絞り型の蓄圧器の試設計組立図面

表７　両端口絞り型の蓄圧器寸法、製造コストおよびトータル重量低減効果

	引張強度 (MPa)	容量 (ℓ)	内径 (mm)	外径 (mm)	肉厚 (mm)	長さ (mm)	コスト比(%)		蓄圧器重量(kgf)		トータル
							蓄圧器１本	トータル	蓄圧器１本	トータル重量	重量比(%)
既存鋼SNCM439	880	300	314	406	46[1)]	4300	100	100(3本)	1650	4950(3本)	100(3本)
高強度低合金鋼	1000	450	342	**426**[2)]	42	5312	113.8	75.9(2本)	1996	3992(2本)	80.6(2本)
	1100	450	348	**426**[2)]	39	5148	110.8	73.9(2本)	1811	3622(2本)	73.2(2本)

1) 試作メーカーの焼入肉厚限界(硬度確保)
2) 国内シームレス鋼管の製造限界(外径426mm)

②　高圧水素蓄圧器を展開するための動向調査

本節では、水素ステーション建設動向の現状と将来予測を調査した結果から、前節で述べてきた高強度低合金の水素高圧蓄圧器への展開について検討した結果を報告する。

(a)　国内外の水素ステーション建設動向

表８には、国内外における直近の既存データから、水素ステーション(HRS)の建設動向について調査した結果を示す。現状の国内外の水素ステーションは、アジア(日中韓)、欧州、北米で建設されている。2022 年度現在では、アジア地域における建設が半数以上を占めている。北米, 欧州地域では、2030 年に向けて水素ステーション建設は大幅に増加する目標を掲げていることがわかった。この調査結果から、高圧水素蓄圧器の需要は今後大幅に伸びることが推察される。一方、中国は FC 車におけるタンク圧力は、中圧(圧力 35MPa)を中心に採用されていることから、

表８　国内外の水素ステーション建設動向

	2020年	2022年	2025年	2030年	2050年
日本	162	184	320	900	
韓国	88	170	450	660	2,000
中国	118	250	300	1,000	
EU	203	250	1,500	3,750	33,000
米国	75	165	1,000	4,300	

高圧水素蓄圧器の需要は少ないことが推測される。

図１０には、2030 年～2050 年における車種別(FCV、FC バス、FC トラック)水素ステーション建設動向について調査した結果を示す。図中の★は、現状調査した結果、具体的なデータがないため、現状の各国の車種別保有台数に、2050 年で車種の保有率が示されている FCV(日本 16.79%)、FC バス(EU25%)、FC トラック(EU21%)のデータと同等と仮定して推定した結果である。2030～2050 年、水素ステーション建設は、日本および米国では、FCV 用の他に、FC バス用、FC トラック用が、韓国では、FC バス用が、EU では FCV 用、FC バス用が、大幅に増加することが見込まれる。すなわち、高圧水素蓄圧器の設置台数は、FCV 水素ステーションのみならず、今後、FC バスおよび FC トラックに対応した水素ステーションの建設ニーズが多くなると推察される。また、FCV 用の水素ステーション設置予定数は、米国や EU で、日本の４～１５倍程度に、FC バスでは２～５程度に、FC トラックでは、米国が日本の６倍になることが推察される。すなわち、今後、高強度低合金鋼を採用した高圧水素蓄圧器は、国内だけでなく米国や EU への展開が有望視されることがわかる。表９には、車種別の１ディスペンサーあたりの高圧水素蓄圧器の構成(容量×本数)を示す。ここで、高圧水素蓄圧器１本、現状容量 300ℓを基準とした場合、水素充填に必要な最小限の本数は、FCV、FC バス、FC トラックでそれぞれ３、７、１４本となる。これに対し、3.1 節で述べた高強度低合金鋼を水素蓄圧器に採用し、容量 450ℓを基準とした場合、１ディスペンサーあたり FCV、FC バス、FC トラックで、高圧水素蓄圧器の設置削減本数はそれぞれ１、２、４本となる。3.1 節で示した FCV ステーションのみならず、FC バスや FC トラックに対する水素ステーションでも蓄圧器設置本数削減による建設費用のコスト削減効果が見込まれる。今回、高圧水素蓄圧器の大容量化による蓄圧器本数削減の検討は大容量 450ℓを前提としたが、製造可能な限界まで大容量化を行うことができれば、さらなる設置本数の削減が見込まれる。蓄圧器本数の削減は、バルブ類、計装品、付属配管などの削減つながることから、更なるコスト低減効果が見込まれる。

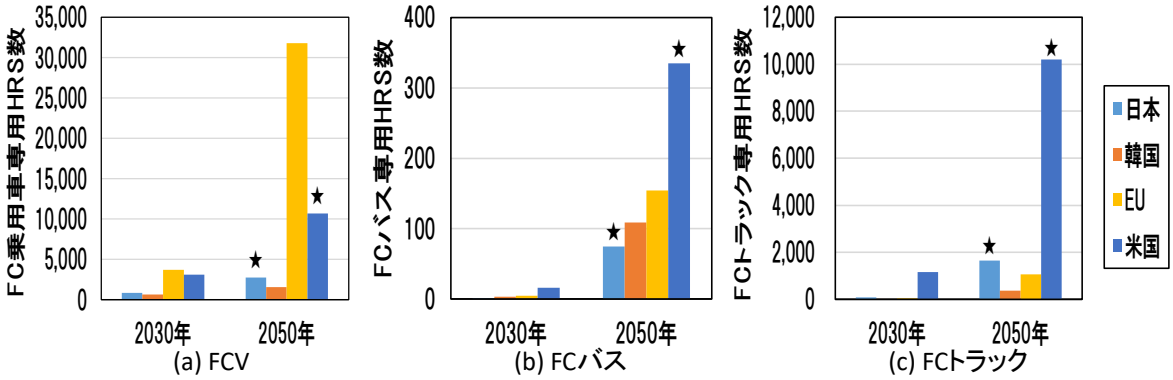


図１０　車種別の水素ステーション建設目標数の予測結果

表９　車種別の１ディスペンサーあたりの水素蓄圧器の構成

車種	車両			水素高圧蓄圧器(１ディスペンサー)				
	タンク圧(MPa)	タンク容量(?)	水素充填量	蓄圧器圧力(MPa)	現状		大容量化	
					容量(?)	本数	容量(?)	本数
FCV	70	154	6	82	300	3	450	2
FCバス		616	24			7		5
FCトラック		1540	60			14		10

(b)　水素蓄圧器製造規格に関する情報収集

高合金低合金鋼を採用した高圧水素蓄圧器の米国、EU への海外展開(蓄圧器や鋼材の輸出)は、今後の水素ステーション建設数（蓄圧器設置本数）からみて、有望な市場となると推察される。そこで、本項では高強度低合金鋼を用いた水素蓄圧器や蓄圧器用鋼材の輸出を前提にした場合、海外技術基準・規格類に関する調査を行うとともに、日本の規格類と比較し、海外輸出への課題について整理した。表１０には、それらを整理した結果を示す。ISO では合金成分の含有量を規定、ASME(米国)規格(Sec.VIII div.3)では適用可能な鋼材をリスト化、EN 規格(欧州)では、引張強さ≧950MPa 以上の鋼材を使用する際は、別途試験が必要。以上より、JIS 材や開発高強度合金鋼を海外で現状のまま適用ができないことが判明した。

また、海外蓄圧器メーカー(FIBA)へのヒアリング結果から、新鋼種を採用する場合は、疲労き裂進展速度の確認が重要になること、ASME の Code Case に準じた試験が必須になることがわかった。

表１０　　水素蓄圧器に関する海外の技術基準・規格類の調査結果

国・地域	規格・基準類	海外基準との違いに関する主な比較結果
国際機関	ISO	① 引張強度 ≦ 1300MPa ② V、Nb、Ti、B、Zrの合計含有量 ≦ 0.15%
米国	ASME ASTM ANSI	【ASME】 ①div.3の安全率は1.732 （KHKS0220では2.4） ②水素蓄圧器用鋼材はリスト化 ③最大引張強度＞950MPaの場合は（$K_{Imax} + K_{I\,res}$ ≦0）
欧州	EN規格、PED、 DIN-Norm(ﾄﾞｲﾂ) BS(ｲｷﾞﾘｽ)	【EN規格】 引張強度950MPaの場合、破裂前漏洩試験をはじめとする性能確認試験が必要。
中国	GB規格	35MPa程度の中圧が主流。輸出先としては期待薄。
韓国	KS認証規格	タイプⅠ蓄圧器に関してはISO準拠。

３．３　開発項目別残課題

特になし。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

高圧水素蓄圧器の大容量化によるコスト低減を実現すべく、低合金鋼に要求される焼入れ性および耐水素脆化特性に及ぼす製造条件の影響を調査し、目標性能を達成する条件を明確にした。また、蓄圧器適用性として、Mo-V 添加鋼および JIS 規格鋼のうち、特に優れた特性を示した鋼材において試設計評価を行い、設計が成立することを確認した。これより、大容量の高圧蓄圧器用鋼材として有望な鋼材が得られたと判断された。

本研究開発の事業化に向けては、以下の課題解決に取り組む必要がある。

- 高強度低合金鋼の安全性を立証するデータの拡充
- 大容量蓄圧器の実機試作による製造課題の抽出およびその解決

今後の水素ステーションの普及拡大に向けて、本格普及期における拡販および大型水素ステーションにおける採用によるコスト低減効果の発揮を目指し、上述の課題解決に取り組み、実用化に繋げていく。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2023 年 9 月	JRCM NEWS No.440	高圧水素蓄圧器への高強度低合金鋼の適用に関する検討(1)―高強度低合金鋼の水素環境下特性評価―	山村実早保、大村朋彦、中山英介、高町恭行、前田尚志
2	2023 年 10 月	JRCM NEWS No.441	高圧水素蓄圧器への高強度低合金鋼の適用に関する検討(2)―水素蓄圧器に関する技術動向調査―	高町恭行、前田尚志、山村実早保、大村朋彦、中山英介

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名

（2-(4)-⑥）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発
／新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発」

委託先：ヌヴォトンテクノロジージャパン（株）

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2020年度～2022年度終了）

・超低消費電力水素検知センサエレメントの開発、高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発、自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発、全ての開発項目の目標を達成

●背景/研究内容・目的

２０２５年以降の水素ステーションの本格普及、２０３０年以降の水素ステーションの事業自立化に向けて、ステーション整備費、運営費のコストを低減する技術開発が重要である。一方で水素漏れを防ぐための「安心・安全」を担保するために費やすコストの課題が顕在化している。

本事業では、半導体メモリ方式による超低消費電力かつ耐環境性の高い電池駆動型の水素検知センサを開発し、ＩｏＴ技術を駆使した設置制約が緩くメンテナンス性に優れた低コストの水素検知システムを実現する。

●研究目標

項目	目標@2020～2022年度
①	・センサエレメント構造、回路レイアウト仕様の最適化 ［反応速度≦10sec@0.1%水素］ ・センサエレメント信頼性評価仕様確立［寿命≧10年］
②	・モジュール構造、工法の 立案と課題抽出 ・高耐湿/防水センサモジュールの仕様確立 [水素雰囲気1% 反応速度≦30sec] ・センサモジュール信頼性評価仕様確立 [100%RH≧5年]
③	・小型・低消費電力IoT対応センサモジュール仕様の確立 検知器:IoT方式決定, 消費電力≦10mW ・自己補正技術/故障予測モデルの確立

●実施体制及び分担等

NEDO ― ヌヴォトンテクノロジージャパン（株）（実施項目①②③） ― パナソニック（株）（実施項目②）（再委託）

●これまでの実施内容／研究成果

①超低消費電力水素検知センサエレメントの開発

従来方式と同程度の水素検知感度を有しつつ１万分の1 以下の超低消費電力を備えるセンサエレメント構造/製造条件/回路レイアウト/動作条件の検討を行い、目標検知特性:10秒以下@0.1%水素を実現(○)。加えて、長期安定動作の観点からセンサエレメント寿命を見極めるための信頼性評価技術および評価仕様の検討を行い、推定寿命が目標寿命:10年以上に達している事を確認(○)。

②高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発

高湿環境に耐える金属膜、及び高耐湿モジュール構造を決定、目標検知時間(1%水素反応≦10s)を達成(○)。また、高温高湿保存による信頼性評価手法を確立、高温高湿保存(60℃/95%RH、2000h)手法を確立、100%湿度での5年相当の寿命を確保(○)。

③自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発

IoT対応水素センサモジュールの低消費電力化・小型化を検討、仕様を決定し、試作センサモジュールにて消費電力目標(≦10mW)を達成(○)。

温度変動/素子経時劣化を抑制・予測すべく、センサ動作アルゴリズムを検討し、温度/劣化自己補正手法を確立、故障予測可能な水素検知センサシステム仕様を確立(○)。

●今後の課題

特記事項なし

●実用化・事業化の見通し

量産時期：2026年度
事業形態：エレメント販売
モジュール販売
システム販売
サービス事業

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	超低消費電力水素センサを実現	○
②	水素センサモジュールの高耐湿化に目途	○
③	小型・低消費電力IoT対応水素センサシステムを構築・実証	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
9	1(投稿中)	7	0

事業番号：2-(4)-⑥

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発」

実施者：ヌヴォトンテクノロジージャパン（株）

１．研究開発概要

2025 年以降の水素ステーションの本格普及、2030 年以降の水素ステーションの事業自立化に向けて、ステーション整備費、運営費のコストを低減する技術開発が重要である。一方で水素漏れを防ぐための「安心・安全」を担保するために費やすコストの課題が顕在化している。

本事業では、半導体メモリ方式による超低消費電力かつ耐環境性の高い電池駆動型の水素検知センサを開発し、IoT 技術を駆使した設置制約が緩くメンテナンス性に優れた低コストの水素検知システムを実現する。

２．研究開発目標

表 1 に各研究開発項目の開発目標(2020～2022 年度)を示す。

表 1 研究開発目標

実施項目	開発目標
（1）超低消費電力 水素検知センサエレメントの開発	【2020 年度】 センサエレメント構造、回路レイアウト仕様の確立 ［反応速度≦10sec@水素雰囲気 0.5%］ 【2021 年度】 センサエレメント構造、回路レイアウト仕様の最適化 ［反応速度≦10sec@水素雰囲気 0.1%］ 【2022 年度】 センサエレメント信頼性評価仕様確立 ［寿命≧10 年］

（2）高耐湿/防水対応 水素検知センサモジュールの開発	【2020 年度】 モジュール構造仕様、工法の課題抽出と対策方針決定水素透過膜の検証方法の決定 水素透過膜の検証方法の決定 ［モジュール構造、工法の立案と課題抽出］ 【2021 年度】 高耐湿/防水センサモジュールの仕様確立 ［水素雰囲気 1%、湿度 100%RH、反応速度≦30sec（暫定）］ 【2022 年度】 センサモジュール用信頼性評価の仕様確立 ［湿度 100%RH、5 年動作（暫定）］
（3）自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発	【2020 年度】 低消費電力、IoT 対応センサモジュール仕様の確立 ［IoT 方針決定、低電力回路設計完（≦10mW）］ 【2021 年度】 自己補正技術の仕様確立 ［自己補正アルゴリズムの確立］ 【2022 年度】 故障予測データベース構築、警報機能の仕様確立 ［故障予測モデル完成］

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）　超低消費電力水素検知センサエレメントの開発

本研究項目では、当社半導体メモリ方式の特徴である低消費電力特性を維持しつつ、検知速度、検出濃度限界などのセンサ感度特性における目標特性を実現するため、センサエレメント構造、製造条件、回路レイアウト、動作条件の検討および最適化を行った(2020～2021 年度)。加えて、センサの長期安定動作の観点から、センサエレメント寿命を見極めるための信頼性評価技術および評価仕様の検討を行い、推定寿命が実用レベルに達しているかを検証した(2022 年度)。

表 2 にセンサエレメント開発目標とその成果を示す。目標検知特性であった 10 秒以下@0.1%水素の実現に成功するとともに(評価結果：5 秒@0.1%(○))、信頼性加速評価手法を確立し、推定寿命が目標レベル：10 年以上に達している事を確認した(評価結果：推定寿命約 16 年(○))。

表 2 超消費電力水素検知センサエレメント　開発目標と成果

	年度計画	マイルストーン	目標仕様	成果
2020 年度	センサ構造及び、回路レイアウトの検討を通じ、低消費電力を維持しながらセンサ感度を高める。	センサエレメントの構造、回路レイアウト仕様の確立	検知時間≦10sec @0.5%水素	検知時間=10sec @0.5%水素 で達成（〇）
2021 年度	センサ構造及び、回路レイアウトの最適化を進め、実使用を想定したセンサ感度を実現する。	センサエレメントの構造、回路レイアウトの最適化	検知時間≦10sec @0.1%水素	検知時間=5sec @0.1%水素 で達成（〇）
2022 年度	2021 年度までに開発したセンサエレメントをベースに信頼性評価の仕様を確立する。	センサエレメント用信頼性評価の仕様確立	寿命≧10 年	推定寿命 約 16 年 で達成（〇）

以降、研究結果の詳細を示す。図 1 はセンサ感度特性向上のために行った改善施策の例を示している。センサエレメントにおける Pt 電極膜厚、開口窓パターン等の最適化により低濃度水素での反応特性を向上する共に、ブリッジ回路方式の採用により外部環境への依存を低減し、測定精度を向上することに成功した。

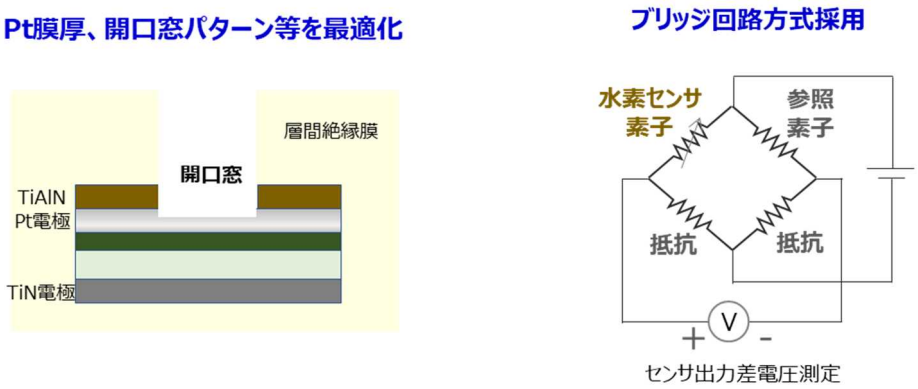


図 1.　エレメント構造/条件、回路レイアウト仕様改善施策の例

図 2 にセンサエレメント構造、製造条件、回路レイアウト仕様最適化前後の水素反応特性比較を示す。最適化によって、低濃度 0.01～0.1%水素に対する反応量が増加すると共に、反応時間が速くなっていることが分かる。これらの最適化により、当社は目標検知特性：10 秒以下@0.1%水素を上回る特性(5 秒@0.1%水素)を実現する事に成功した。

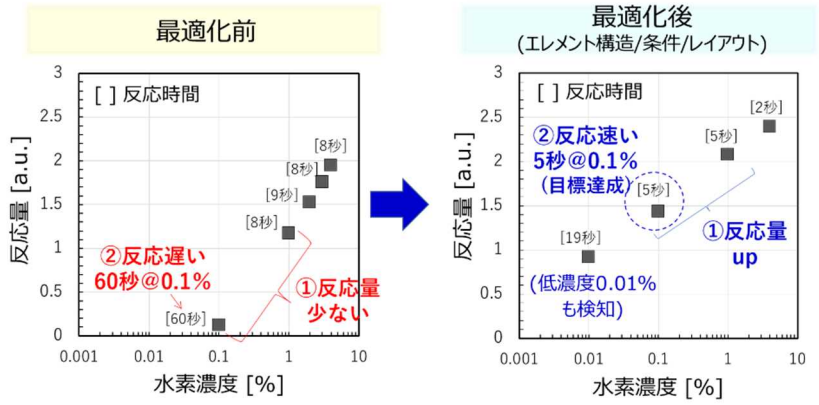


図 2.　エレメント構造/条件、回路レイアウト仕様最適化による特性改善結果

一方、水素センサの実用化に向けて、水素反応特性の目標指標達成に加え、顧客ニーズに応じた長期間の安定動作、すなわち長期信頼性の確保についても重要な取り組みの一つとなる。また、この長期信頼性を限られた期間の中で評価し、実力を見極めるためには、加速評価手法の確立と、それに基づく実使用条件での寿命推定が必要となる。

図 3 に単位時間あたりのパルス印加回数とベース電圧(水素無し状態での基準電圧)劣化速度との関係を示す。パルス印加回数 1～100 の範囲においては、印加回数と劣化速度が正比例に近い関係を持っていることが確認できる。当社はこの関係を利用し、標準条件である単位時間あたりのパルス印加回数 1 回に対し、100 回のパルス印加を行う事で劣化速度を 100 倍に加速し、実使用条件での寿命推定を 1/100 の時間で行う事が可能となった。

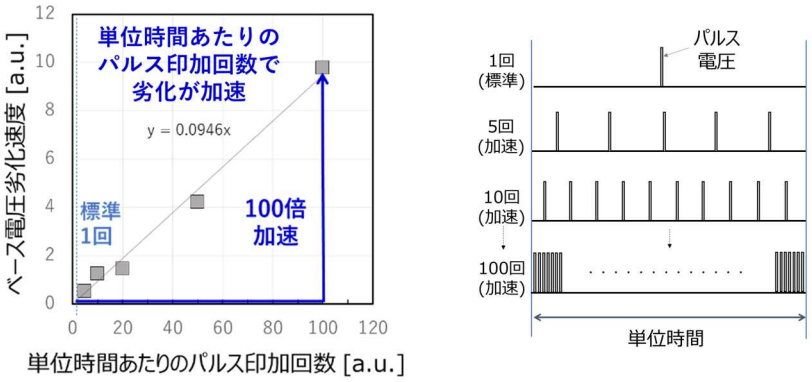


図 3.　信頼性(センサ寿命)加速評価手法検討結果

図 4 に前述の 100 倍加速評価手法を用いて行った長期連続パルス印加試験の結果を示す。試験開始後、約 60 日でベース電圧が大きく低下している事から、実使用条件における推定寿命は約 6000 日(約 16 年）と推定できる。本結果から、当社はセンサエレメント目標寿命：10 年以上の実現目途を立てることに成功した。

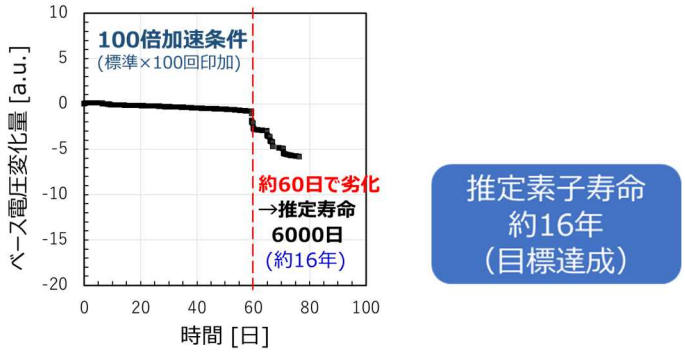


図 4.　長期信頼性(センサ寿命)加速評価結果

（２）高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発

本研究項目では高湿環境に耐える金属膜の選定と薄膜化・接合条件の検討を行い、「実装技術」、「成膜技術」に関する要素技術を開発して、性能と耐環境性を考慮したセンサモジュールの構造、工法の目途付けを行った。

表 3 に高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発目標と成果を示す。2020 年度は高耐湿化に向けたモジュール構造、工法を検討し、仕様、工法の対策方針決定を行うと共に、高湿環境下でのセンサ特性評価方法についての調査を実施した(〇)。2021 年度は立案した構造、工法を元に実際に耐湿、防水筐体の検討を進め、検知水素濃度、反応時間など水素透過膜の仕様も含めたモジュール仕様を確立し、水素雰囲気 0.1%にて 10s 以内の反応速度を達成した(〇)。2022 年度には、2021 年度に確立した構造・工法にて作製したパッケージにおける信頼性試験を行い、高温高湿保存試験にて 2000h をクリアし 5 年以上の動作保証を達成した(〇)。さらに、湿度 100%RH 環境下での水素検知も実現し、高耐湿/防水水素検知センサモジュール仕様を確立した。

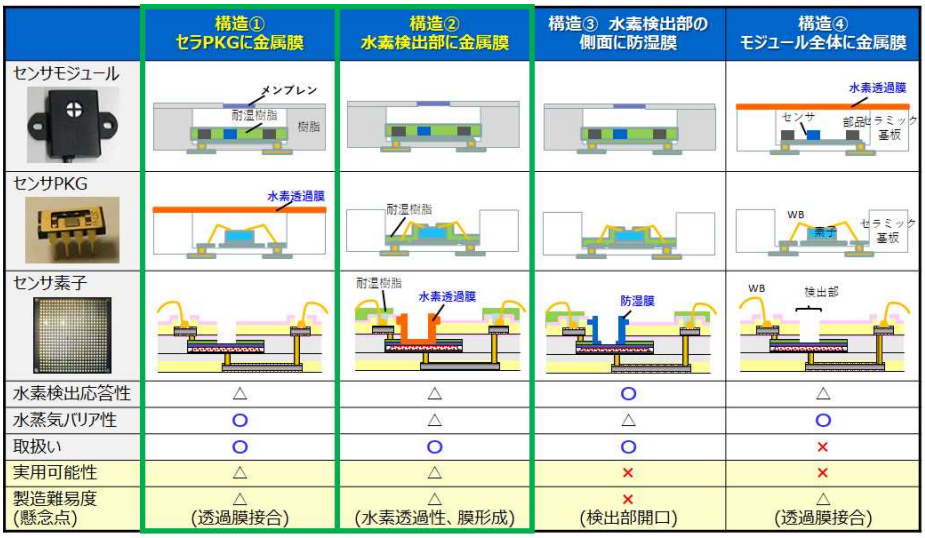
表 3 高耐湿/防水水素検知センサモジュール　開発目標と成果

	年度計画	マイルストーン	目標仕様	成果
2020 年度	2020年度は高耐湿化に向けたモジュール構造、工法を検討し、耐湿性向上の取組を進める。 水素透過膜の性能検証・実現性検討の方針を策定する。	モジュール構造仕様、工法の課題抽出と対策方針決定 水素透過膜の検証方法の決定	モジュール構造、工法の立案と課題抽出	モジュール構造、工法案決定（〇） ①透過膜をパッケージに接合 ②透過膜をセンサ素子上に成膜
2021 年度	2021年度は2020年度に決定した構造、工法をベースに耐湿、防水筐体の検討を進め、高耐湿/防止センサモジュールを開発する。 水素透過膜との組み合わせを考慮し、実使用を想定したセンサ感度を実現する。	高耐湿/防水センサモジュールの仕様確立	水素雰囲気1% 湿度100%RH 反応速度≦30sec (暫定)	モジュール仕様を確立し、水素雰囲気 0.1%にて反応速度 10s 以内を達成（〇）

2022 年度	2021 年度までに開発したセンサモジュールをベースに信頼性評価の仕様を確立する。	センサモジュール用信頼性評価の仕様確立	湿度100%RH 5 年動作 (暫定)	高温高湿保存試験 (60 ℃ /100%RH)にて 2000h 性能保持 (5 年相当)（〇）

高耐湿センサモジュールの構造案として表 4 に示すように、パッケージ表面に防湿性水素透過膜として機能する金属箔を接合する構造案 1 と、センサ素子の水素検知部上に水素透過膜を形成する構造案 2 を構想した。さらに、各構造案における工法選定およびプロセス評価により実現性の検証を行った。

表 4. モジュール構造案一覧



①セラミックパッケージに金属膜を接合する工法(構造案 1)の検証

図 5 に構造案 1 として検討したパッケージコンセプト図を示す。パッケージ内部に水分を通さず水素を透過することが必要なため、水素のみが透過する金属の水素透過膜をセラミックパッケージ表層に接合する構造とした。

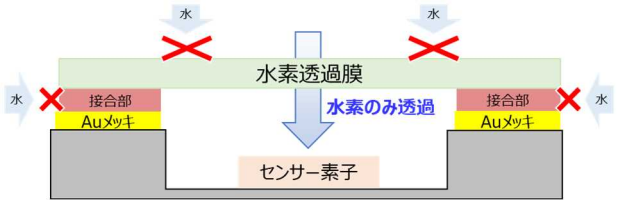


図 5. 構造案 1 パッケージコンセプト

使用する水素透過膜材料については、高耐湿の観点から、金属箔に絞り選定した。特に、汎用工法にて薄箔が形成可能な Pd 系合金を選定し、Pd 系合金の中でも水素透過性が高く耐水素脆化特性に優れた PdCu 箔を選択した。PdCu 箔の水素透過度は箔形成工法や厚みにより異なる。また、各工法における箔形成の限界厚みには差異があり、めっき工法では最薄 5μm、

圧延工法では最薄 10μm である。そこで、箔の最適仕様を見極めるために箔単体での水素透過度を測定した。図 6 に箔形成工法および厚みと水素透過度の関係を示す。水素透過度は、めっき工法の場合 10μm よりも 5μm の方が高く、さらにめっき工法よりも圧延工法により形成された PdCu 箔の方が高い傾向を示した。圧延工法による膜厚 10μm の水素透過膜では、水素透過度が最も高く、5800cc/m²/day といった特性を示した。

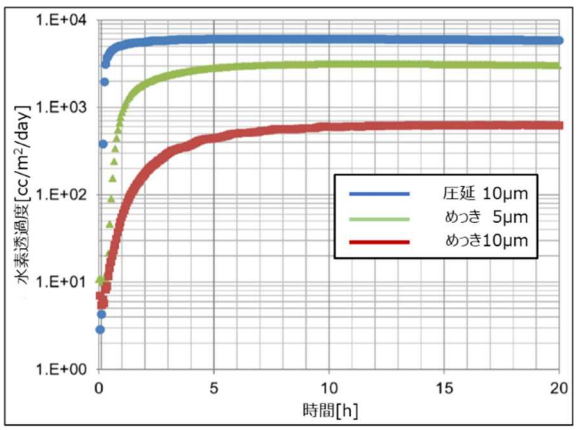


図 6.　箔形成工法、厚み違いの水素透過度比較

また、セラミックパッケージへの PdCu 箔の接合工法としては、水分や水蒸気の不透過性が重要視されるため、金属接合を選定した。特に、量産工程での汎用性を考慮し、超音波接合とリフローはんだ接合の二つの工法に絞り込み、セラミックパッケージ表層の Au メッキと PdCu 箔との接合可能性を検証した。

超音波接合とリフローはんだ接合の比較検証結果より、接合部の安定性、またパッケージ反り抑制の観点から、リフローはんだ接合を選定した。リフローはんだ接合におけるプロセスフローの説明図を図 7 に示す。まず、センサ素子が搭載されたセラミックパッケージ上に、パッケージ形状に合わせて打ち抜きした水素透過膜と金錫リボンを重ねて位置合わせする。次に、水素透過膜上に錘を搭載しリフロー装置にて 305℃ピークの温度プロファイルにて加熱しはんだ接合する。

本プロセスフローによりリフローはんだ接合を行った結果、水素透過膜である PdCu と接合材である AuSn 間の金属拡散が確認できた。リフロー接合時の温度や加熱時間などのプロファイル条件を適正化することで、課題視していた接合部クラックレスやボイドレスの金属接合を実現することができ、He リーク量 1.0E-9atm・cc/s 以上の気密性を達成した。また、パッケージ内部の湿度量変化を評価するため、パッケージ内部に湿度センサを内蔵したパッケージを製作し、湿度変化をモニタリングした。その結果、60℃100%RH1000h 高温高湿保存試験においてパッケージ内部の湿度変化量ゼロを実証することができた。水素透過金属箔による封止構造では、センサエレメント単体と比較して、水素反応速度が低下する傾向が見られたが、図 8 に示すように、目標である水素雰囲気 0.1%において水素反応速度 10s 以内を達成した。

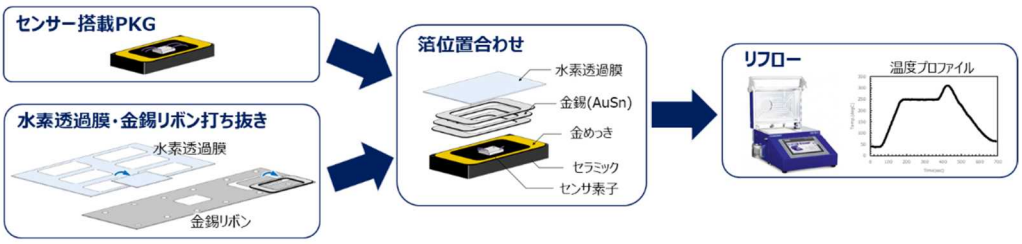


図 7.　リフローはんだ接合プロセスフロー

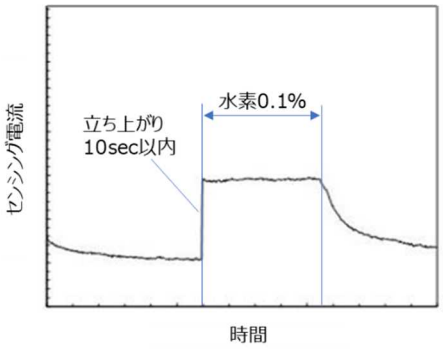


図 8.　構造案 1 の水素検知結果

②センサ素子の水素検知部上に水素透過膜を形成する工法(構造案 2)の検証

構造案 2 においては、スパッタ工法による水素透過膜形成プロセスの検証および水素透過膜の候補材料である Pd、PdCu、TiN の基本性能の確認を行った。水素透過度の測定、水素透過後の剥離発生等を指標とし、水素透過膜材料として TiN を選定した。

次に、センサ素子への TiN 膜形成の実証を行った。TiN の膜形成は反応性スパッタリング法を用い、窒素ガス流量により決勝は意向を制御し成膜した。TiN スパッタ成膜後の断面 TEM 画像を図 9 に示す。狙いの通り、水素検知する開口部において、底面と側面に TiN が形成されていることを確認した。スパッタリング法の性質上、側面への成膜レートは低くなるため、底面と底面の膜厚比は 4:1 程度となった。

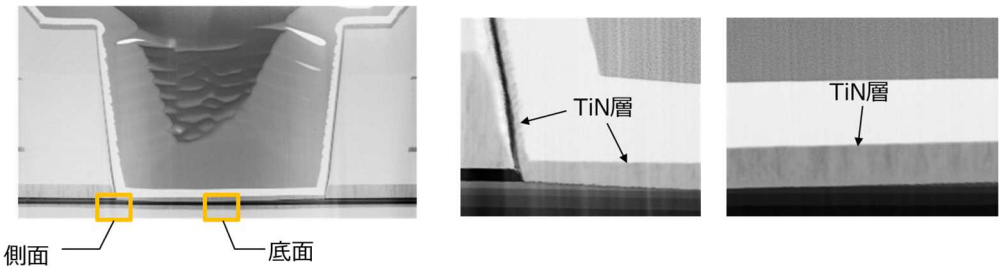


図 9.　水素検知部 TiN 膜の断面 TEM 画像

次に、センサ素子の水素検知部に TiN 膜を形成したパッケージ組立品にて水素検知機能の実証を行った。図 10 に示すように、水素雰囲気 0.1%において反応速度 10sec 以内といった水素検知機能を確認した。

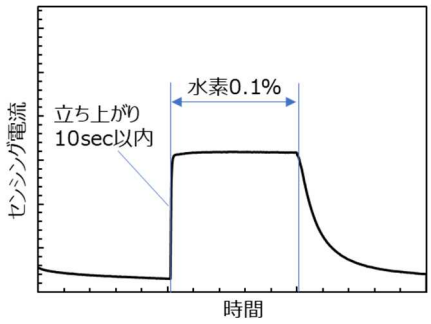


図 10.　構造案 2 の水素検知結果

③構造案 1 および構造案 2 における信頼性試験

構造案 1、構造案 2 のパッケージ組立品における高湿度環境下での動作について確認するため、高温高湿(60℃/100%RH)保存試験による信頼性試験を行った。図 11 に示すように、パッケージ組立後（初期）では、構造案 1 の方が構造案 2 よりも検知感度が高い結果を示した。一方、信頼性試験経過での水素検知感度は、構造案 1、構造案 2 ともに、初期、試験 500h 後、試験 1000h 後と経過時間が長くなるほど水素検知感度が低下する傾向が見られた。試験 2000h 後では構造案 2 は水素検知が確認されたが、構造案 1 では水素検知機能が確認できない結果となった。

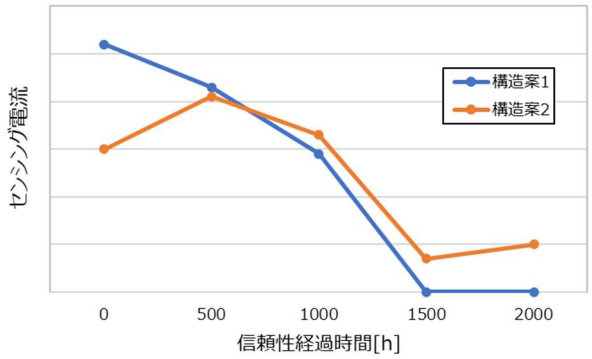


図 11.　高温高湿保存試験(60℃/100%RH)後の水素検知結果

最終のパッケージ構造は、信頼性試験結果と量産を想定した場合の生産性・コストおよびパッケージ設計自由度の観点から、スパッタ工法による水素透過膜形成構造である構造案 2 に決定した。決定したパッケージ構造品を用いて、高湿環境下での水素検知機能の確認を行った。評価方法は、湿度制御可能な試験ボックス内に水素センサモジュールを設置し、湿度を 45%RH、60%RH、95%RH と変化させ水素雰囲気 0.1%にした時の水素検知有無を確認した。図 12 に示すように、全ての湿度条件において水素検知機能が確認できた。

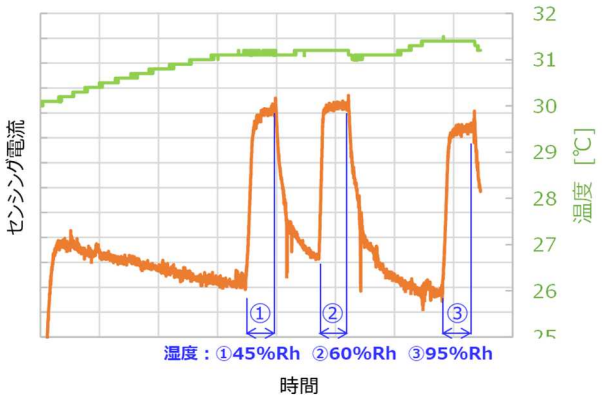


図 12.　高湿環境下の水素検知結果

（3）自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発

本研究開発項目では、水素ステーションにおいてあらゆる箇所の水素漏れ検知が可能な電池駆動の IoT(無線)対応センサモジュールと水素検知センサシステムの検討、開発を行った。

2020 年度から 2022 年度までの自己補正、故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発目標及び成果を表 5 に示す。

2020 年度に（1）の超低消費電力水素検知センサエレメントの開発と並行して、無線方式/水素検知センサモジュールの低消費電力化の検討を行い、IoT 対応水素検知センサモジュールの仕様を確立した(2021 年 3 月)。また、図 13 に示すように IoT 対応水素検知センサモジュールは、無線、電池、センサエレメント、環境センサ、制御 IC を 1 モジュール化し、多機能化を実現しながら小型化を行った。

2021 年度は、仕様確立（2021 年 3 月）した IoT 対応水素検知センサモジュールを元に、周辺環境(温度、湿度等)のデータ取得を行い、その収集したデータと水素濃度との紐付けを行い、自己濃度補正技術を確立した。更に、センサエレメントの水素濃度検知特性の経時劣化(検知ベース電流のドリフト)を、抵抗変化パルスを適切に印加することで制御し、検知ベース電流を適正範囲に補正する制御アルゴリズムを確立し、濃度/経時劣化を自己補正可能な IoT 対応水素検知センサモジュールの開発行った(2022 年 3 月)。

2022 年度には、IoT 対応水素検知センサモジュールの連続動作寿命評価を元に、センサエレメントの寿命予測モデルを構築し、クラウドシステムで故障予測を可能とした。更に上記技術確立に加え、水素漏洩検知警報機能を搭載した水素検知センサシステム仕様を確立した(2023 年 3 月)。

表5 自己補正、故障予測システムを備えた水素検知センサシステム　開発目標と成果

	年度計画	マイルストーン	目標仕様	成果
2020 年度	2020 年度は小型で低消費電力化に対応した IoT 対応センサモジュールの仕様検討を行う。	低消費電力、IoT 対応センサモジュールの仕様確立	IoT 方式決定 低電力回路設計完 （≦ 10mW）	・IoT 方式決定、及びセンサモジュールの仕様決定 ・低電力回路設計を行い、消費電力 9.4mW を達成（○）
2021 年度	2021 年度は 2020 年度仕様検討した IoT 対応センサモジュールをもとに、使用環境下での自己補正技術を確立する。	自己補正技術の仕様確立	自己補正アルゴリズムの確立	・自己補正アルゴリズム確立を達成（○）
2022 年度	2021 年度までに開発したシステム技術をベースに警報（漏洩/故障）機能を搭載したシステム技術を確立する。	・故障予測データベース構築 ・警報機能の仕様確立	故障予測モデル 完成	・故障予測モデル 完成（○） ・IoT 対応水素検知センサシステムへ警報機能搭載を実現（○）

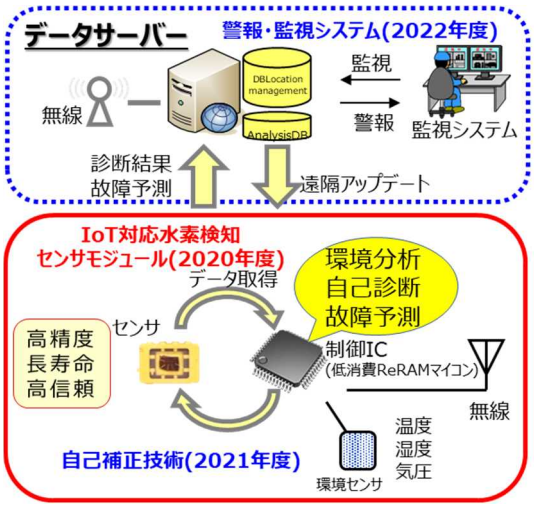


図 13. IoT 対応センサモジュール/システムコンセプト

① IoT 対応水素検知センサモジュールの仕様検討、及びデモ機試作

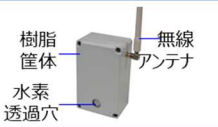
先ず無線方式/水素検知センサモジュールの低消費電力化の検討を行った。具体的には無線、電池、センサエレメント、環境センサ、制御 IC を 1 モジュール化し、多機能化を実現しながら小型化/10mW 以下の低消費電力化をターゲットとして仕様を検討した。

無線方式としては、ゲートウェイ GW の設置が不要で低コスト、かつ低消費で広範囲での通信安定性が高い無線通信方式 LTE-Cat.M1 を選定、電池に関しては、産業用長寿命タイプの塩化チオニルリチウム電池（7.7Ah)を選定した。さらに、温度、湿度、気圧を把握し、センサ感度にフィードバックするシステムの構築を視野に環境センサも導入した。制御 IC としてはセンサエレメント構造のベースとなる低消費電力での動作が可能な ReRAM（Resistive Random Access Memory)を搭載したマイコンを選定した(図 13 参照)。センサエレメントは①の超低消費電力水素検知センサエレメントの開発で決定したセンサ構造及びセンサレイアウトを適用した。これらの部品・機能を 1 モジュール化し、IoT 対応水素検知センサモジュールの仕様を計画通り確立した。更に目標仕様として挙げていた 10mW 以下の低消費電力動作(9.4mW)を達成した。表 6 に IoT 対応水素検知センサモジュールベンチマークを示す。従来の接触燃焼方式の無線ガス検知器では、センサエレメント部で大電流(100mA 以上)を流すヒーター構造が必要となるため、消費電力が極めて大きくなり、有線の電源配線が必須となっている。このように、当社の IoT 対応(無線)電池駆動型水素検知センサモジュールは、小型でかつ配線工事が不要でどこにでも簡便に設置できるため、空間網羅性の高い水素漏洩検知が可能となり、安心安全性の向上と共に配線工事削減による低コスト化を実現する。

また、社会実装化に向けて、アプリケーションにも依存するが、電池寿命 5 年以上を目標としている。電池寿命の向上には、超低消費電力水素検知センサエレメント、IoT 対応水素検知センサモジュール、電池容量の最適化が必要である。例えば、1 日 3 回の人による水素漏洩検知の日常点検(ハンディタイプの水素検知器使用)を、IoT 対応水素検知センサモジュールを多点設置することで代用し日常点検工数を削減する場合、水素濃度の測定頻度及び無線データ送信頻度を共に 1 日 3 回にすることで、電池寿命 5 年以上を確保可能である。

表 6. IoT 対応水素検知センサモジュールベンチマーク

消費電力目標 10mW以下達成

品名		IoT水素検知センサモジュール	無線ガス検知器
研究開発機関		ヌヴォトンテクノロジージャパン	A社
検知方式		・ReRAM方式	・接触燃焼方式
モジュール外観			
仕様	無線方式	LTE-Cat. M1	ISA100.11a
	電源	塩化チオニルリチウム電池 (7.7Ah) ○	DC24V（有線） ✕
	消費電力	**平均9.4mW(ヒーター無)** → 目標 電池寿命5年以上 ○	最大3.5W （ヒーター必須で電力大） ✕
	外形寸法	120x80x56mm(ｱﾝﾃﾅ含まず)	H338×W146×D160mm

② 自己補正技術の検討

次に、実使用環境下での自己補正技術確立を目標に取り組みを進めた。具体的には、センサエレメントの水素濃度検知特性の経時劣化(検知ベース電流のドリフト)を、抵抗変化パルスを適切に印加することで制御し、検知ベース電流を適正範囲に補正する制御アルゴリズムを検討し、更

に、周辺環境(温度、湿度等)データを取得し、その収集したデータと水素濃度との紐付けを行うことにより、自己濃度補正技術を確立した。

先ず、センサエレメントの経時劣化補正制御アルゴリズム検討にあたって、ReRAM を応用したセンサエレメントに対して、図 14 に示すように、メモリ的に抵抗変化動作をさせる抵抗変化電圧(VR)を階段状にステップアップさせながら印加することで、検知ベース電流のドリフトを初期ベース電流値に近付けることが可能な経時劣化補正シーケンスを見出した。この経時劣化補正シーケンスを複数回(100 回)繰り返すことで、劣化した検知ベース電流を初期ベース電流値にほぼ回復できることを確認した(図 15 参照)。これにより、センサエレメントの長寿命化に向けた経時劣化補正技術仕様を予定通り確立できた。

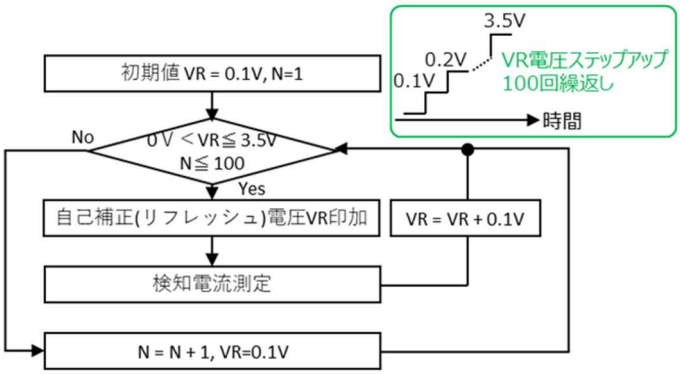


図 14. 水素センサ自己補正アルゴリズム

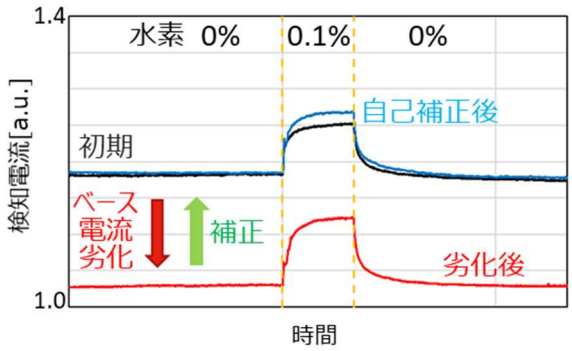


図 15. 経時劣化補正前後の水素反応特性

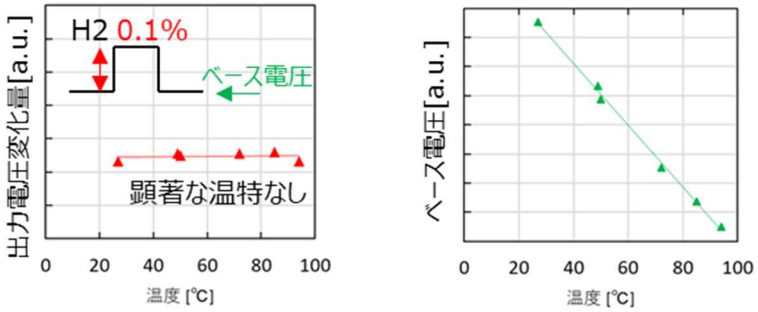
次に、図 16 に示すように、周囲温度が水素濃度測定に与える影響を検討するために、検知水素濃度(0.1%)の温度依存性(27℃～85℃)を評価した。結果は、水素による出力電圧変化量(a)に顕著な温度依存性は見られなかったが、水素がない場合の検知ベース電圧(b)には、顕著な負の線形温度依存性が確認できた。このため、温度による水素濃度出力の補正を行わなければ、図 17(a)に示すように 50℃以上で水素 0.1%雰囲気中においても水素濃度 0%と出力してしまう。そこで、検知ベース電圧の温度による減少を式 1 のアルゴリズムで補正することで水素濃度出力の補正を行った。

式 1 ：H_2 濃度(T) ＝ A×(出力電圧(T) － ベース電圧(T)) + B

ベース電圧(T) = ベース電圧(T0) + C×(T - T0)

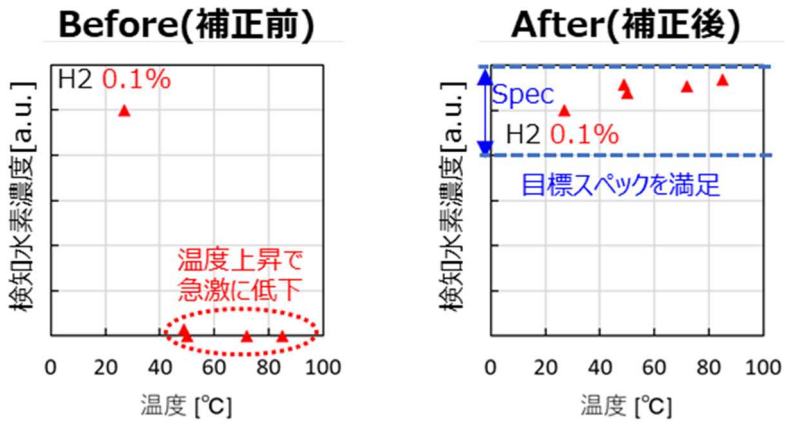
（T：測定温度、T0：室温(27℃)、A, B, C：補正係数）

温度補正後の水素濃度出力は、図 17(b)に示すように概ね 0.10%～0.11%となり、目標スペック（精度±20%）を達成、水素濃度出力の温度補正技術の妥当性を確認した。今回、低温(-20℃～0℃)での水素濃度出力の温度依存性評価は未実施であるが、今後、低温での温度特性データを取得し、高温側と同様に水素濃度出力の温度補正を行う予定である。



(a)出力電圧変化量　　(b)ベース電圧

図 16. 水素反応特性の温度依存性



(a)温度補正前　　(b)温度補正後

図 17. 検知水素濃度の温度依存性

③ IoT 対応水素検知センサシステムの検討

IoT 対応水素検知センサモジュールの連続動作寿命評価を元に、センサエレメントの寿命予測モデル構築を検討し、上記技術確立に加え、警報機能を搭載した無線水素センサシステムの仕様検討、及びシステム構築・実証実験を行った。

(a) センサエレメント寿命予測技術の確立

先ず、センサエレメントの寿命予測モデルを検討するために、水素無し環境下での連続通電動作評価を実施した(図 18 参照)。動作時間増加と共にベース電圧がほぼ線形的に減少(劣化)して行き、寿命時間 T に到達すると、急激に減少、以降水素検出が適切に出来なくなる。ここで、緩やかな線形劣化領域での劣化速度(電圧/時間)を S、寿命時間 T までの初期ベース電圧 V0 からの劣化量を Z、X 日後ベース電圧を Vx と定義する。次に、センサエレメント劣化速度のエレメント印

加電圧依存を評価した。図 19 に示すように劣化速度 S は、印加電圧に対し指数関数的に増加し、また、図 20 に示すように寿命までの劣化量 Z は、印加電圧に対し線形的に増加する特性を確認した。これら図 19、図 20 に示す相関式から劣化速度 S と寿命までの劣化量 Z の相関式を求めると、図 21 に示す式 2 となる。

式 2：$Z = A \times \ln S + B$ (A,B：定数)

ここで、劣化速度 S は、式 3 のように表せる。

式 3：$S = (V0-Vx)/X$

従って、式 2 と式 3 から、予測寿命 T は Z/S で算出でき、残存寿命は T-X で推定可能となり、当初目標通りセンサエレメントの寿命予測技術を確立した。このように、IoT 対応水素検知センサモジュールに残存寿命推定式を導入することで、センサエレメントの交換時期が予測可能となり、センサエレメントが故障する前に適切なタイミングで交換できるようになるため、インフラ設備・装置の稼働ロス低減、またセンサエレメントを最大限使用可能となり、センサエレメントの交換コスト削減にも期待できる。

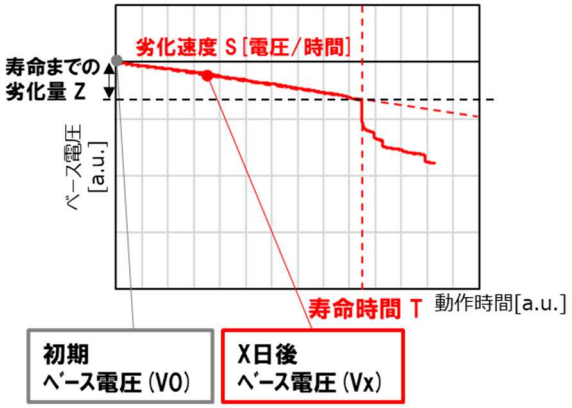


図 18. 無水素環境下における検知ベース電圧の経時劣化特性

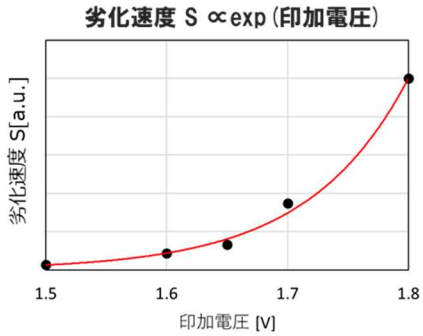


図 19. センサエレメント劣化速度の印加電圧依存性

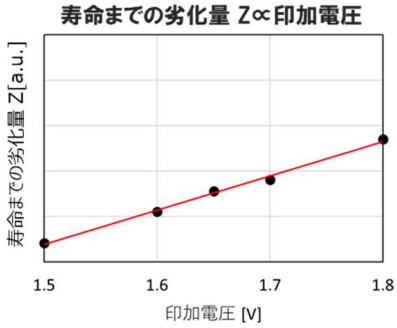


図 20. センサエレメント寿命までの劣化量の印加電圧依存性

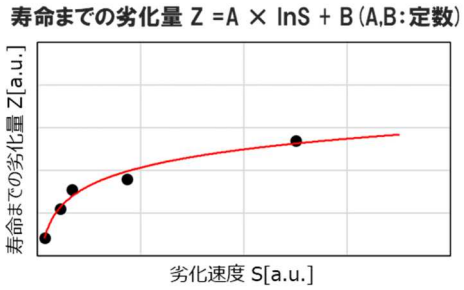


図 21. センサエレメント寿命までの劣化量の劣化速度依存性

(b) 警報機能を搭載した無線水素センサシステムの仕様検討

表 7 に示すように水素ステーション向け IoT 対応水素検知センサシステム仕様を一般社団法人水素供給利用技術協会（HySUT）等水素ステーション運営事業者にヒアリングしながら検討した。高圧ガス使用エリアへの設置を想定し、一般高圧ガス保安規則関係例示基準 23.1.4(以下、高圧ガス保安法)を満足するように水素漏洩・検知から警報発報(H_2：≧1%)までの目標時間を 30 秒以内に設定した。一般的な水素ステーションのサイズから、無線通信距離は、数 10m～100m まで、また設置台数は、10 台～20 台とした。さらに無線データ送信周期は、電池消耗を抑制するため、水素漏洩を検出していない通常動作時の送信周期を水素漏洩検知時よりも長周期に設定した。

表 7. 水素ステーション向け IoT 対応水素検知センサシステム仕様

項目	IoT対応水素検知センサシステム仕様
IoT対応水素センサモジュール稼働台数	10台～20台
通信距離	数10m~100m@GW1台
警報発報時間	≦30秒
警報設定値	H_2：1%(変更可)
自主警報設定値	H_2：0.1%(変更/無効化共に可)
水素検知範囲	0%～4.0%
水素濃度測定周期	1回/1秒
無線データ送信周期	通常時：1回/1時間(変更可)、水素漏洩検知時：1回/10秒(変更可)
送信データ量	22byte/回(水素濃度、温度、湿度、気圧)

水素ステーション向け IoT 対応水素検知センサシステム概略図を図 22 に示す。今回は 30 秒以内の安定した警報発報が必須のため、IoT 対応水素検知センサモジュールを無線でメッシュ(網目)

状に接続するネットワーク構成を採用し、通信安定性と低消費高速性を両立可能とする無線方式を選定した。水素センサモジュールで測定したデータ(水素濃度、温度、湿度、気圧)は、マルチホップ無線通信で、各水素センサモジュールを介して無線ゲートウェイ(GW)まで伝送され、GW からは LTE 無線通信を利用してクラウドサーバーに保存・蓄積される。その後保安室に設置された PC 上の Web アプリケーションにより測定データをダウンロード・可視化し、水素濃度の監視が可能となる。水素漏洩が発生した場合には、先ず水素センサが漏洩を検知(10 秒以内@≧0.1%)し、検知以降は、水素濃度データ(@警報設定値以上)送信、クラウドサーバー保存、保安室 PC 上での警報発報までをトータル 30 秒以内に行う。

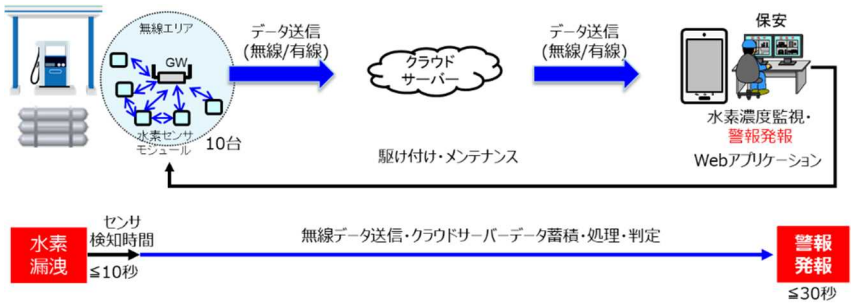


図 22. 水素ステーション向け IoT 対応水素センサシステム概略図

そこで、表 7 に示した水素検知センサシステム仕様に基づき、小型・防水の IoT 対応水素検知センサモジュールを作製した(図 23 参照)。表 8 の水素センサモジュール仕様に示すように、低消費電力・長距離通信が可能な LPWA(Low Power Wide Area)の無線通信モジュールとしては、920MHz 版と 2.4GHz 版の 2 種類を用い、2 種類の水素センサモジュールを開発した。特徴としては、920MHz 版は、障害物に対し高い回り込み性を有し、長距離送信が可能となり、一方 2.4GHz 版は、より低消費電力送信が可能である。

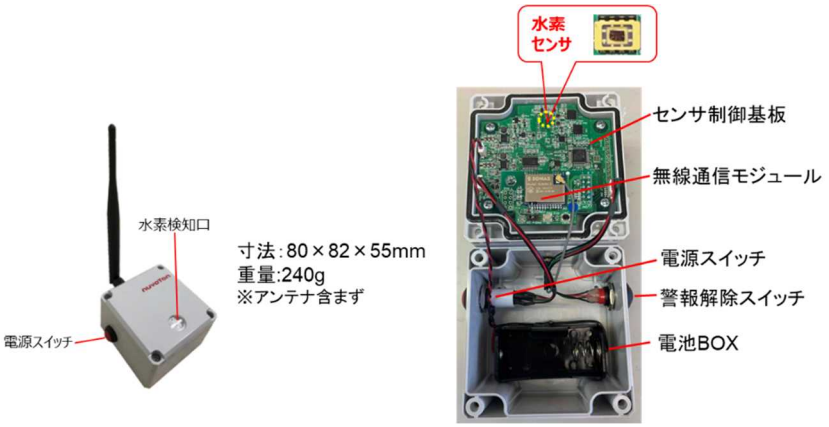


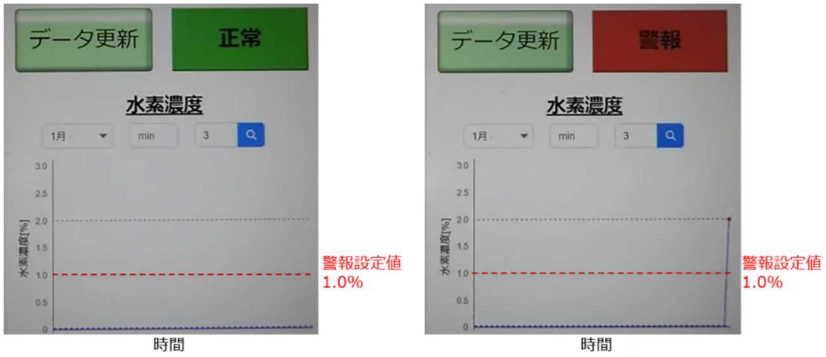
図 23. 水素ステーション向け IoT 対応水素検知センサモジュール

表 8. 水素ステーション向け IoT 対応水素検知センサモジュール仕様

		920MHz版	2.4GHz版
寸法		80mm x 80mm x 56mm （アンテナ、器具取付足含まず）	
重量		240g (電池48g含む、アンテナ含まず)	
通信距離(1HOP)		～2km(見通し)	～500m(見通し)
電源		DC 3.6V 7700mAh	
消費電流		平均：3.89mA	平均：2.02mA
動作温度		-20℃～＋75℃	
測定周期		1s (変更可)	
水素センサ	濃度範囲	0.0% ～ 4.0%	
環境センサ	気温測定範囲	-20℃～＋80℃	
	気圧測定範囲	300hPa ～ 1100hPa	
	湿度測定範囲	0～100%	
各種センサ値出力		無線：[通常時]1時間周期 (変更可能)， [水素検知中] 10秒周期 (変更可能)	
防水		IP65相当	

(c) IoT 対応水素検知センサシステム構築、及び水素漏洩検知実証実験

IoT 対応水素検知センサモジュール開発と並行して、図 22 及び図 24 に示すようにクラウドサーバー上の水素濃度等のデータを PC 上で遠隔監視する Web アプリケーションも作製し、IoT 対応水素検知センサシステムを構築した。ここでは、警報設定値を水素濃度 1.0%に設定し、先ず水素検知センサモジュールを水素無し環境下で通常動作させ、水素濃度を PC 画面上でモニター(図 24(a))し、その後水素(3%)を吹きかけると、検出水素濃度(2.0%)が警報設置値(1.0%)を超え、図 24(b)に示すように警報発報する所望の動作を確認できた。



(a)水素検知前(通常動作)　　(b)水素検知後(警報発報)

図 24. 水素検知センサシステム Web アプリケーション(水素濃度グラフ)

この IoT 対応水素検知センサシステムを水素ステーションで実証するために、一般社団法人水素供給利用技術協会(HySUT)の協力を頂き、HySUT 水素技術センター(山梨県米倉山)に IoT 対応水素検知センサモジュールを図 25 に示すように 10 箇所に設置した。具体的には、圧縮機ユニット内に 4 箇所(①～④)、蓄圧器ユニット内に 4 箇所(⑤～⑧)、カードル置き場に 2 箇所(⑨⑩)にそれぞれ 920MHz 版モジュールと 2.4GHz 版モジュールを設置し、各水素センサモジュールの無線ネットワーク通信確立後、水素吹きかけ試験による警報発報時間の実証評価を実施した。

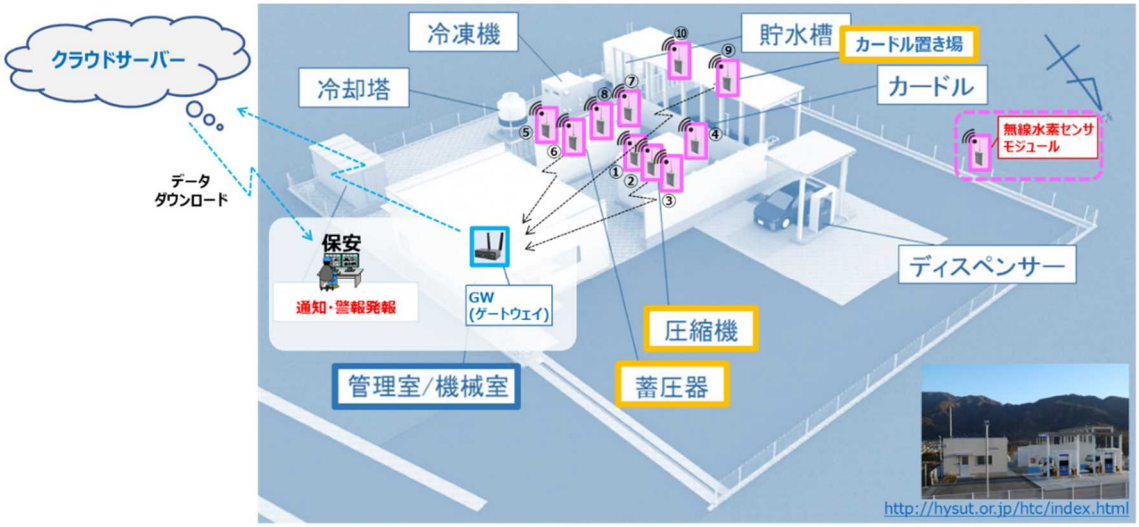


図 25. 水素ステーション(水素技術センター)での IoT 対応水素検知センサシステム実証実験

評価方法としては、濃度 1.6%の水素を各水素検知センサモジュールの水素検知口に吹きかけ、図 26 に示すように水素吹きかけ、検知から GW(ゲートウェイ)までのデータ到達時間 T1 と、GW から管理室設置 PC 上での警報発報までのデータ到達時間 T2 を測定し、水素吹きかけから警報発報までのトータル時間(=T1+T2)を全箇所、全水素検知センサモジュール(合計 20 台)において 3 回繰り返し評価した。結果は、図 27 に示すように全水素検知センサモジュール(920MHz 版/2.4GHz 版)、全測定回で、水素吹きかけから 30 秒以内に警報発報可能であることを確認できた。データ到達時間 T1 は、11 秒以下で比較的安定しているが、データ到達時間 T2 は、LTE 無線回線(GW～クラウドサーバー)及び有線回線におけるデータ混雑状況によりバラツキが大きくなっている。今回は、遠隔監視にも対応させるためクラウドサーバーに一度データを転送し、その後水素濃度の可視化、警報発報動作を行ったが、必要に応じて GW からローカルサーバーに有線で直結することにより、データ到達時間 T2 が大幅に減少するため、警報発報の時短化、及びバラツキ低減することも可能である。

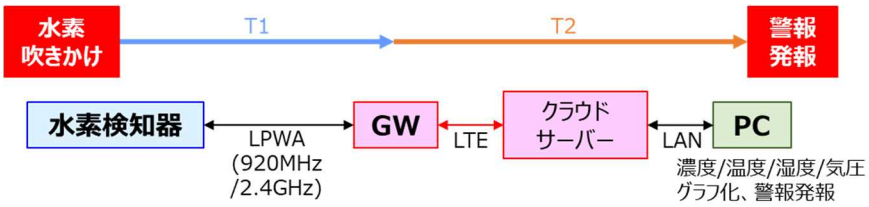


図 26. 水素検知後の警報発報フロー

	T1	T2	警報発報時間(=T1+T2)	目標仕様
920MHz版	2秒 ～ 8秒	4秒 ～ 22秒	8秒 ～ 25秒	≦30秒
2.4GHz版	1秒 ～ 11秒	4秒 ～ 25秒	5秒 ～ 27秒	

図 27. IoT 対応水素検知センサシステムにおける警報発報時間評価結果

３．２　成果の意義

本事業の成果の意義は従来では実現できない、場所を選ばず容易に設置できる水素検知センサシステムを研究開発することにより、安心安全な水素社会を実現することにある。図 28 に本委託事業で描く水素社会における水素検知センサの在り方を示す。

また水素ステーションでは水素漏れ防止に費やすコスト課題が顕在化している。本事業では IoT 技術を駆使して、設置制約の緩和だけでなくメンテナンスに優れた低コストの水素検知センサシステムを実現可能である。

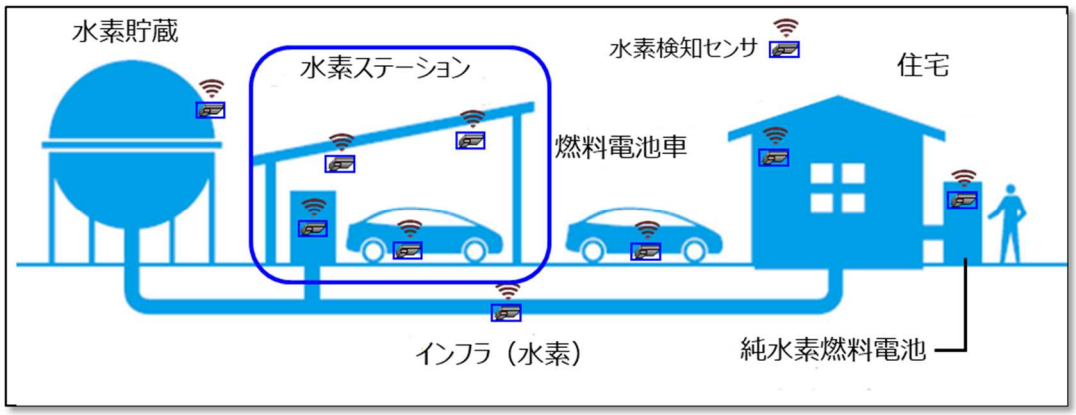


図 28. 本委託事業で描く水素社会おける水素検知センサの在り方

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

４．１　実用化・事業化の考え方

初めに水素検知センサのビジネスレイヤを説明する。図 29 に示すように水素検知センサはセンサエレメント、センサモジュール、センサシステムにビジネスレイヤを分類することができる。「4.2」項に示す今後成長すると予想される新しい水素検知センサ用途（IoT、多湿環境）への展開をターゲットに各ビジネスレイヤをコンカレントに実用化を進める。



図 29. 水素検知センサのビジネスレイヤ

４．２　実用化・事業化に向けた戦略

まず、水素検知センサビジネスの市場予測について説明する。図 30 は水素検知センサビジネスについて、横軸を消費電力、縦軸を耐環境性（防水性）で表現したポートフォリオである。

従来の水素検知センサは黄色網掛けに示すとおり、主に定置式の漏れ管理用途であり、水素プラントや半導体工場、燃料電池車（FCV）等に使用されている。一方で、従来の水素検知センサでは展開できない市場の潜在ニーズがあると私たちは推察している。

具体的には、赤色網掛けに示す IoT 化(無線化)が必要な設置制約のある箇所での水素検知センサの市場と青色網掛けに示す 100%に近い高湿度で完全防水性が要求される箇所での水素検知セ

ンサの市場である。

IoT 化が必要な市場に関しては、本研究で開発を実施する超低消費電力を活かした IoT/電池駆動センサモジュールの実現により新規参入できると考えている。

また高耐湿/防水のモジュールを本研究開発で実現することにより 100%に近い多湿環境化での水素検知による水素制御や水素漏れ管理が必要な市場に新規参入できると考えている。

本研究で開発する技術をベースに、この２つの新規市場にフォーカスして市場獲得を目論んでいる。

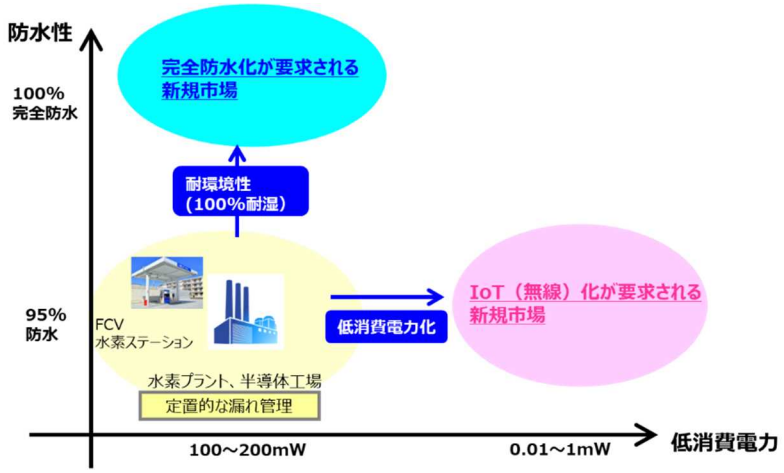


図 30. 事業ポートフォリオと市場予測

４．３　実用化・事業化に向けた取り組み

表 9.に実用化に向けたスケジュールを示す。NEDO プロジェクトによる研究開発終了後、2023 年度より実用化開発を開始する予定である。エレメント/モジュール/システム事業立ち上げをコンカレントに推進し、2026 年度以降に実用化を想定している。

表 9 実用化に向けたスケジュール

研究開発項目		2020~2022年度	2023年度	2024年度	2025年度~	2026年度~
①	超低消費電力水素検知センサエレメントの開発	NEDOプロジェクトによる研究開発	製品用エレメント試作		信頼性確認	実用化へ
②	高耐湿/防水対応水素検知センサモジュールの開発（再委託）		モジュール設計（耐湿、防塵、防爆）	製品用モジュール試作	信頼性確認	
③	自己補正・故障予測システムを備えた水素検知センサシステムの開発				製品用システム設計	

４．４　成果の実用化・事業化の見通しまとめ

本技術を活用した無線・電池駆動型水素検知センサの実用化によって、多点監視が必要な用途(水素ステーション、大型水電解装置など)においては、低コストかつ容易に多点監視を実現可能と

なり、より空間網羅性の高い漏れ検知が実現可能となる見通しである。

また、高湿度環境下での漏れ検知が必要な用途(燃料電池など)では、本技術を活用した高耐湿モジュールの実用化により、低コストかつ信頼度の高い漏れ検知が実現可能となる見通しである。

今後、実証実験や顧客とのやり取りを通じてターゲット市場およびセンサ仕様を明確化し、実用化検討を進める計画である。(～2026 年度実用化予定)

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020.9	2020 年第 81 回応用物理学会秋季学術講演会	ReRAM 技術とその新しい展開－デジタルメモリから AI、センシング技術へ	粟村　聡資
2	2023.3	Workshop on Hydrogen Detection Technologies for Safety	Ultra low power Hydrogen sensor based on semiconductor memory technology	河合　賢
3	2023.3	Nuvoton ソリューションウェビナー	水素社会での安心安全を実現する超低消費水素センサ技術	元持　健治
4	2023.9	Nuvoton ソリューションウェビナー	水素社会の安心安全のために求められる新しいセンサ技術とは？	南川　智宏
5	投稿中	IEEE Sensors Journal	The behavior of protons in a Pt/Ta2O5/TaOx/TaN structure	本間　運也
6	2022.10	CEATEC2022	新型半導体メモリ方式 超低消費電力 水素センサ	米田　慎一 伊藤　理 河合　賢 南川　智宏
7	2023.3	二次電池展	ワイヤレス・バッテリ駆動の水素検知器を実現する超低消費電力水素センサ技術	米田　慎一 伊藤　理 河合　賢 南川　智宏
8	2023.9	ながさきデジタル DEJIMA 産業メッセ 2023	新型半導体メモリ方式 超低消費電力水素センサ	南川　智宏 黄　川洋

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2021/8/11	2021-130998	水素センサ	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
2	2021/9/22	2021-154912	水素検知装置及び水素検知装置の制御方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
3	2021/9/28	2021-157653	ガスセンサ装置	パナソニックホールディングス株式会社
4	2022/1/17	2022-005362	水素検知方法、駆動回路および水素検知装置	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
5	2022/7/4	2022-107765	水素検知装置及びその製造方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
6	2022/7/4	PCT/JP2022/26591	水素検知装置及び水素検知装置の制御方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
7	2022/7/29	PCT/JP2022/29406	水素センサ	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
8	2022/12/22	PCT/JP2022/47403	水素検知方法、駆動回路および水素検知装置	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
9	2023/6/29	PCT/JP2023/ 24224	水素検知装置及びその製造方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社

（2-(4)-⑦）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発」

株式会社四国総合研究所

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2020年度～2022年度終了）

・水素ガス中の複数の不純物成分について，新型レーザー光源（Violet-ECDL）によるppmオーダーでの分析を実証するとともに，重量8kgの可搬型プロトタイプ装置を製作した。
・IR-LD（赤外半導体レーザー）を用いたCRDS法を計測原理とするプロトタイプ装置（重量8kg）を製作し，水素ガス中のアンモニア0.1ppm以下の2秒での分析を実証した。
・TDLAS(波長可変半導体レーザー吸収分光法)により，水素ガス100ppm以下の直接計測が可能であることを実証した。

●背景/研究内容・目的

[背景] 水素ステーション事業の自立化に向け、整備費、運営費、水素調達コストなどを低減する技術開発が重要である。水素中の不純物分析には大型・高コストの分析装置が必要、且つ分析実施機関が限られているのが現状であり、水素品質管理におけるトータルコストの大幅な削減に資する技術が求められている。

[目的] ISO品質規格の全成分を対象として、より多くの成分が分析可能な小型・軽量・低コスト且つ応答が速い水素純度分析装置の開発を目的とし、1.Violet-ECDLを用いたラマン分光式マルチガス分析装置と、2.IR-LDを用いた赤外吸収式高感度ガス分析装置を開発する。

●研究目標

実施項目	目標
1-①②	10W以上，線幅30cm^{-1}以下のECDL光源を開発する。
1-③	光ファイバー伝送型光源（5W以上）を開発する。
1-④	高感度受光系を開発しppmオーダーの分析を実証する。
1-⑤⑥	40×50×30cm，10kg，量産価格150万円以下のプロトタイプ装置を製作し，1ppm以下の分析を実証する。
1-⑦	研究開発成果等に基づき、ISO品質規格全成分分析の可能性について検討し、検出可否を含めて明示する。
2-①②	光路長200m以上，線幅0.3cm^{-1}以下の光源の開発。
2-③	光ファイバー伝送型光源（光路長100m以上）の開発。
2-④	TDLAS法による水素ガス100ppm以下の分析を実証。
2-⑤⑥	40×50×30cm，10kg，量産価格150万円以下のプロトタイプ装置によるサブppmオーダーの分析を実証する。
2-⑦	研究開発成果等に基づき、ISO品質規格全成分分析の可能性について検討し、検出可否を含めて明示する。

●実施体制及び分担等

NEDO
- 四国総合研究所（すべての実施項目）
  - 東海大学（1-②、1-③、2-②）
  - 千葉大学（1-④、2-④）

●これまでの実施内容／研究成果

1．Violet-ECDLを用いたラマン分光式マルチガス分析装置の研究開発

1-①②③ 散乱光強度が高く高感度化に有利な青紫色半導体レーザーを外部共振器と組み合わせた小型の新型レーザー光源（Violet-ECDL）を開発し，目標を大きく上回る強度（30W～最大100W程度）の励起光を発生させることに成功した。光ファイバー伝送型光源についても開発を完了し，最大60Wに達することを実証した。

1-④ 高感度受光系を開発し，酸素，窒素，メタン等複数成分の水素中でのppmオーダーでの分析を実証した。

1-⑤⑥ 重量8kgとなる可搬型プロトタイプ装置を製作し，ppmオーダーでのガス分析が可能であることを実証した。

1-⑦ 水素ベース標準ガスを用いたラマン分光分析による実測データを基に，ISO規格全成分の測定時間1分での検出下限濃度を評価し，明示した。現段階で6成分，追加の開発により将来的に10成分の1台での分析が可能であると評価した。また，水素そのものについても1ppm以下の検出が可能であることを実証した。

2．IR-LDを用いた赤外吸収式高感度ガス分析装置の研究開発

2-①②③ 1.5μm帯のIR-LDを用いた吸収分光計測用光源を開発し，目標を上回るkmオーダーの実行光路長が得られることを実証した。また，ファイバー伝送型の開発についても完了した。

2-④ 2.1μm帯のIR-LDを光源とするTDLAS法により，水素ガス100ppm以下の測定が可能であることを実証した。

2-⑤⑥ 重量8kgとなる可搬型プロトタイプ装置を製作し，IR-LDを用いたCRDS（Cavity ring-down spectroscopy）法により，水素ガス中のアンモニア0.1ppmを2秒で分析できることを実証した。

2-⑦ 研究開発成果を基に，ISO規格全成分の内，現段階ではViolet-ECDLでの分析が困難であると考えられるサブppmオーダーの5種の不純物成分について，検出下限濃度を評価し明示した。現段階でアンモニアと蟻酸の2成分，追加の開発により将来的に全硫黄化合物（硫化水素換算）を含む5成分の分析が可能であると評価した。

●今後の課題

長時間の連続測定における安定性や運搬・振動に対する耐久性の向上に向けた取り組みを行っていく。また，光学設計の見直しによる小型化，受光光学系の改良による高感度化等についても検討を進める。

●実用化・事業化の見通し

小型・軽量・低コスト・低消費電力でありながら，水素，窒素，酸素等を含む混合ガスを高感度かつ高速で測定可能なマルチガス分析装置として，水素ステーションのみならず，水素製造の現場等を含む幅広い市場に展開可能な画期的新技術として実用化できる可能性がある。

すでに大手分析機器メーカーと，オンサイト水素純度分析に向けた小型マルチガス分析計の製品化に向けた具体的な検討を開始しており，今後も実用化・製品化に向けた開発を継続的に行っていく予定である。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
1-①②③	目標を大きく上回る性能の光源を開発。	◎
1-④	複数成分のppmオーダでの分析を実証。	○
1-⑤⑥	プロトタイプ装置を製作し性能を検証。	○
1-⑦	成果に基づく評価結果を明示。	○
2-①②③	目標仕様を満たす光源を開発。	○
2-④	水素100ppm以下の計測を実証。	○
2-⑤⑥	プロトタイプ装置を製作し性能を検証。	○
2-⑦	成果に基づく評価結果を明示。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
2件	－	14件	－

事業番号：2-(4)-⑦
研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発」

実施者：株式会社四国総合研究所

１．研究開発概要

１．１　事業目的

水素・燃料電池戦略ロードマップで示された水素ステーションの 2020 年 160 箇所、2025 年 320 箇所程度の設置を実現するためには、水素ステーション事業の自立化に向けたさらなる FCV の導入支援と合わせてステーション整備費、運営費、水素調達コストなどを低減する技術開発が重要である。FCV に供給する水素の品質は ISO 国際規格（ISO14687）に基づき管理されている。水素中の不純物分析には複数の大型分析装置が必要、且つ微量成分分析には濃縮等の特殊な作業が必要となることから、分析の実施機関が限られているのが現状である。

そこで、ISO 品質規格（表 1）の全成分を対象として、より多くの成分が分析できる、小型・軽量・低コスト且つ応答が速いマルチガス複合水素分析装置を開発し、分析装置そのもののコストの低減及び、より簡便で短時間のオンサイト分析の導入によって、水素品質管理におけるトータルコストを大幅に削減することを目的とする。

１．２　事業概要

ISO 品質規格（表 1）の全成分を対象として、より多くの成分が分析できる、小型・軽量・低コスト且つ応答が速い水素純度分析装置（図 1、図 2）を開発する。このために、以下 2 つのサブテーマを設定し研究開発を行う。

[サブテーマ１] Violet-ECDL を用いたラマン分光式マルチガス分析装置の研究開発

レーザーのビームを外部に設けた共振器内で増幅し、強力な定在波を生成する青紫色波長域の外部共振器型半導体レーザー（Violet-ECDL）を用いてガス分子を励起し、発生するラマン散乱光を検知することで、ガスに含まれる分子種とその濃度を特定する小型且つ低コストなマルチガス分析装置を開発する。

外部共振器型半導体レーザー（ECDL）、小型共振器（PBC）および高感度受光系を開発し、それらを最適化した分析装置のプロトタイプを設計・製作する。水素品質管理の対象となる物質のうち、ISO 規格値が ppm オーダーの物質についてガス濃度計測機能の検証を行い、性能を証明する。また、その結果を踏まえて、製品化に向けた課題の抽出およびコスト試算を行う。

[サブテーマ２] IR-LD を用いた赤外吸収式高感度ガス分析装置の研究開発

赤外波長域の外部共振器型半導体レーザー（IR-ECDL）と物質の赤外波長域における光吸収を利用するキャビティリングダウン分光法（CRDS：Cavity Ring-Down Spectroscopy）を用いて、対象ガスの高感度計測を可能とする小型且つ低コストなガス分析装置を開発する。

ECDL および PBC を最適化した分析装置のプロトタイプを設計・製作する。水素品質管理の対象となる物質のうち、ISO 規格値がサブ ppm オーダーの物質についてガス濃度計測機能の検証を行い、性能を証明する。また、その結果を踏まえて、製品化に向けた課題の抽出およびコスト試算を行う。

併せて、波長可変半導体レーザー吸収分光法（TDLAS：Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy）など、新たな水素検知技術の実現可能性を明らかにする。

表1　水素品質基準（ISO国際規格14687Grade-D Table2）規格値一覧

分析項目		単位	ISO 規格値
水素	H_2	Vol.%	≧99.97
水	H_2O	ppm	≦5
全炭化水素	1 炭素換算	ppm	≦2
メタン	CH_4	ppm	≦100
酸素	O_2	ppm	≦5
ヘリウム	He	ppm	≦300
窒素	N_2	ppm	≦300
アルゴン	Ar	ppm	≦300
二酸化炭素	CO_2	ppm	≦2
一酸化炭素	CO	ppm	≦0.2
全硫黄化合物	（H_2S 換算）	ppm	≦0.004
ホルムアルデヒド	HCHO	ppm	≦0.2
蟻酸	HCOOH	ppm	≦0.2
アンモニア	NH_3	ppm	≦0.1
全ハロゲン化合物	（ハロゲンイオン換算）	ppm	≦0.05
最大微粒子濃度	固体・オイル・液体	mg/kg	≦1

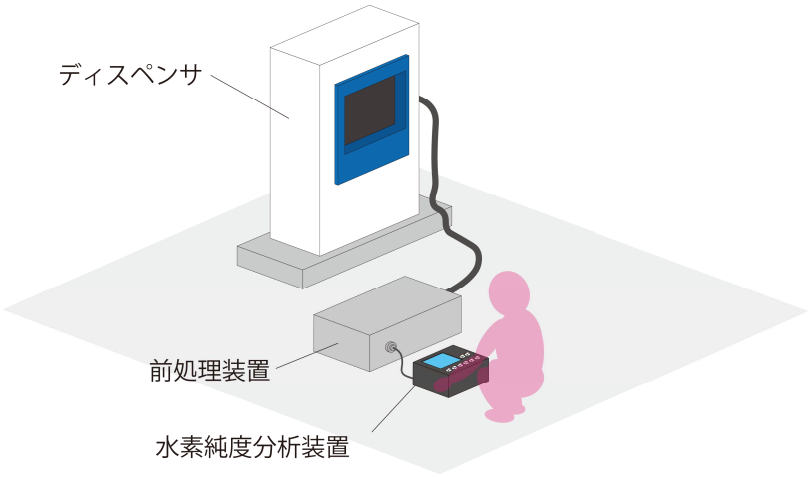


図 1　次世代水素純度分析装置のイメージ

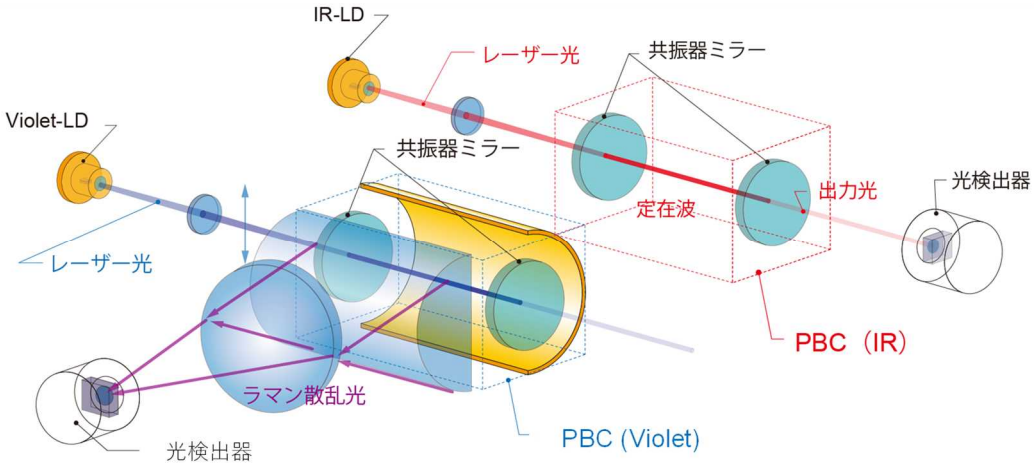
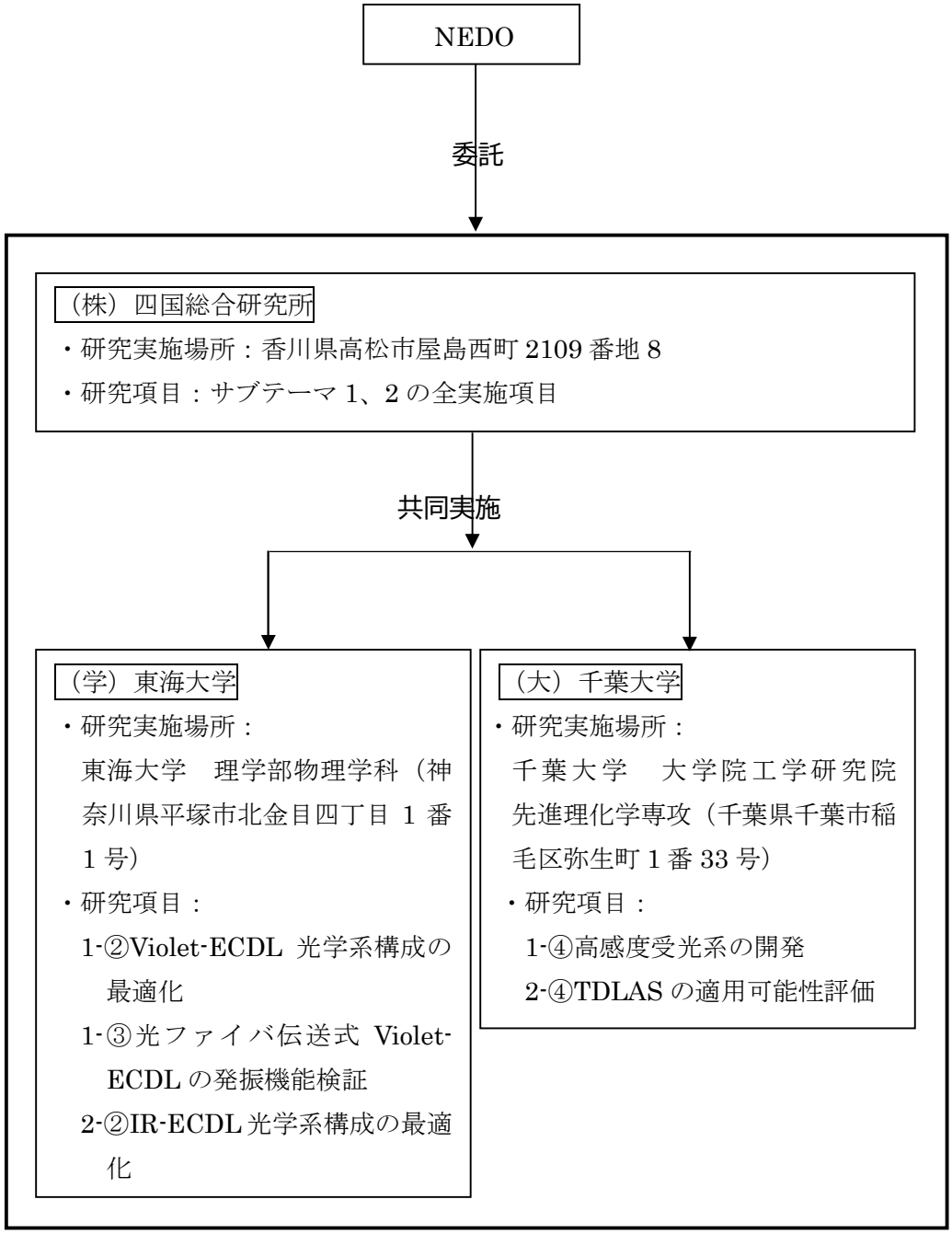


図 2　水素純度分析装置内部の光学系構成例

１．３　実施体制

本研究開発は下図に示す体制及び役割分担にて実施した。



２．研究開発目標

本事業における研究開発目標を表 2 に示す。

表 2 研究開発目標

[サブテーマ 1] Violet-ECDL を用いたラマン分光式マルチガス分析装置の研究開発

実施項目	最終目標
1-①　Violet-ECDL の開発	・PBC 内光強度 10W 以上を持つ ECDL を開発する。 ・安定性確認のため、水素を用いてガス濃度計測機能を検証する。 （ppm オーダー以下の不純物分析のための光源として必要な光出力を設定）
1-②　Violet-ECDL 光学系構成の最適化	・ECDL の発振線幅 30 cm^{-1} 以下を達成する。 （単一の分析装置で複数種の不純物を分析するための光源として必要な発振線幅を設定）
1-③　光ファイバ伝送式 Violet-ECDL の発振機能検証	・PBC 内光強度 5 W 以上を達成する。 （光ファイバ伝送による損失を考慮した上で、不純物分析に必要な光出力を設定）
1-④　高感度受光系の開発	・受光系を試作し、酸素を用いて目標感度 ppm オーダー（S/N 比 10 以上）を達成する。 （ppm オーダー以下の不純物を分析するための受光器として必要な S/N 比を設定）
1-⑤　小型マルチガス分析装置プロトタイプの開発	・寸法 40×50×30 cm 以下、重量 10 kg 以下を達成する。 （既存技術に対し十分な小型、軽量化を達成するために 5 分の 1 以下の数値を設定）
1-⑥　プロトタイプによるガス濃度計測機能検証	・酸素、窒素及び水素を含む 3 種以上の物質を対象として検出限界 1 ppm 以下、応答時間 1 分以下、コスト 150 万円以下（量産効果含む）を達成する。 （単一の装置で複数の成分分析が可能であること、ppm オーダー以下の分析が可能であること、高速応答による作業の効率化、装置の低コスト化が実現可能であることを示すために設定）
1-⑦　全成分分析の可能性評価	・2022 年度までの研究開発成果等に基づき、ISO 品質規格全成分を対象として小型マルチガス分析装置の適用可能性を検討し、検出可否（測定方法、濃度等）を含めて明示する。 （全成分への適用可能性を高精度に明らかにするために設定）

[サブテーマ 2] IR-LD を用いた赤外吸収分光式高感度ガス分析装置の研究開発

実施項目	最終目標
2-① IR-ECDL の開発	・光路長 200 m 以上を達成する。 ・安定性確認のため、アンモニアを用いてガス濃度計測機能を検証する。 ・極微量成分検知の実現性評価のため、硫化水素を用いたガス濃度計測実験を行う。 （サブ ppm オーダー以下の不純物分析のための光源として必要な光路長を設定）
2-② IR-ECDL 光学系構成の最適化	・ECDL の発振線幅 0.3 cm^{-1} 以下を達成する。 （極微量成分を分析するための光源として必要な発振線幅を設定）
2-③ 光ファイバ伝送式 IR-ECDL の発振機能検証	・実効光路長 100 m以上を達成する。 （光ファイバ伝送による損失を考慮した上で、微量不純物分析に必要な光出力を設定）
2-④ TDLAS の適用可能性評価	・水素検出限界 100 ppm 以下を達成する。水素分析への適用可能性を評価する。 （現状の水素検知器の検出限界以下の値を設定）
2-⑤ 高感度ガス分析装置プロトタイプの開発	・寸法 40×50×30 cm 以下、重量 10 kg 以下を達成する。 （既存技術に対し十分な小型、軽量化を達成するために 5 分の 1 以下の数値を設定）
2-⑥ プロトタイプによるガス濃度計測機能検証	・アンモニアを対象として検出限界サブ ppm オーダー以下、応答時間 1 分以下、コスト 150 万円以下（量産効果含む）を達成する。 ・硫化水素を対象として検出限界 ppb オーダー以下を目指す。 （サブ ppm オーダー以下の分析が可能であること、高速応答による作業の効率化、装置の低コスト化が実現可能であることを示し、極微量分析となる全硫黄化合物への適用可能性を示すために設定）
2-⑦ 全成分分析の可能性評価	・2022 年度までの研究開発成果等に基づき、ISO 品質規格全成分を対象として高感度ガス分析装置の適用可能性を検討し、検出可否（測定方法、濃度等）を含めて明示する。 ・全硫黄成分について、計測方法を確立する。 （全成分への適用可能性を高精度に明らかにするために設定）

また、本目標設定や研究開発終了後の事業化における商品の仕様決定等に向けて必要な情報を収集するために、実際に水素エネルギー利用に携わる国内の主要水素プレイヤー3 者から水素品質管理の現状やニーズに関するヒアリングを実施した結果は次のとおりである。

図@に示すように、実運用において水素品質管理に係る純度分析には以下の 3 つのケースがある。ケース①はステーション開設時に実施する純度分析であり、ISO14687 に定められている全ての不純物を分析する。ケース②は年 1 回の実施が義務付けられている定期点検時の純度分析であり、ISO14687 に定められた不純物のうちの一部を分析する。オンサイト型ステーションの場合、水、酸素、窒素等 6 種、オフサイト型・移動式の場合は水、酸素、窒素の 3 種である。ケース③はトラブルが発生し、水素の供給系を開放し対処した後の復旧時に、系内に大気の残存が無く、商用水素に全置換されているかどうかを確認する目的で実施するものであり、対象成分は、水、酸素、窒素の 3 種である。現状では年 1 回程度の頻度であるが、トラブルの発生件数に依存するところから勘案すると、将来的には、水素関連施設の増加や、施設の老朽化に伴い、分析件数の増加が予想される。このように、実運用上の水素純度分析は大きく分けると、全成分分析、6 成分分析、3 成分分析の 3 つのパターンに分けることができる。

次に、それぞれのパターンについて、現状の手法とニーズ等について整理した結果を表@に示す。

表 1-2 に示すように、現在は、いずれのパターンにおいても全てサンプルを分析機関に持込んで不純物の測定が行われている。分析に係るコストについては、当然ではあるが、成分数が少ないほど安価になるが、分析に要する期間はガスのサンプリングや持込みといった、分析そのもの以外に必要な作業があることから、3 成分でも 1～2 日間を要している。

ニーズの詳細についてみると、全成分分析については、低コスト化のニーズは非常に高いものの、開設に係る他の作業に期間を要するため、分析のみが短期間化してもメリットは薄いとのコメントであり、短期間化のニーズは低い。加えて、全成分分析は開設時の 1 回だけ実施するものであるため、頻度を勘案すると，他のケースと比較して優先順位は下がるとのコメントであった。

6 成分分析については、定検期間が短いほどステーションの停止期間が短くなるため短期間化のニーズが高く、また、分析機関に運搬するためのサンプリングの段階で大気が混入するケースがあり，オンサイト分析のニーズが高い。3 成分分析についても同様であるが、加えて、現状オフサイト型水素ステーションが多く運用されており、更に、トラブル復旧時にも対応可能となる点からニーズは高い。6 成分、3 成分の両者については、分析コストが比較的安価であるが、低コス



図 3　実運用における水素品質管理に係る純度分析のパターン

表 3　水素純度分析の各パターンにおける現状とニーズのまとめ

（※ニーズの程度の指示　◎：強　○：中　△：弱）

	全成分	6 成分	3 成分
現状の分析手法	全て分析機関	全て分析機関	全て分析機関
現状の分析コスト	120 万円程度	25 万円程度	15 万円程度
現状の分析期間	4 日程度	1～2 日程度	1～2 日程度
低コスト化のニーズ※	◎	○	○
短期間化のニーズ※	△	◎	◎
オンサイト分析のニーズ※	○	◎	◎
ニーズコメント詳細　等	・開設に係る他の作業に期間を要するため分析のみが短期間化してもメリットは薄い。 ・全成分分析は開設時の 1 回のみ，即ち各ステーションについて 1 回だけ実施するため，低コスト化のニーズは高いが，頻度を勘案すると，他のケースと比較して優先順位は下がる。	・定検期間は短いほどステーションの停止期間が短くなるため短期間化のニーズは高い。 ・分析機関に運搬するためのサンプリングの段階で大気が混入するケースがあり，オンサイト分析のニーズが高い。	・定検期間が短いほどステーション停止期間が短くなるため短期間化のニーズは高い。 ・分析機関運搬前のサンプリングの段階で大気が混入するケースがあり，オンサイト分析のニーズが高い。 ・現状オフサイト型が多く、トラブル復旧時にも対応可能となるためニーズは高い。

ト化のニーズはある。

これらの実運用中のプレイヤーからのコメントを総括すると、研究開発及び現場への実装が優先的に求められているのは、3 成分分析（水、酸素、窒素）であり、次いで 6 成分分析（水、酸素、窒素、THC、一酸化炭素、全硫黄化合物)、全成分分析の序列となっている。また、不純物ではなく水素濃度そのものの計測についても一定のニーズが存在する。

したがって、本事業ではこれらのニーズを、研究開発の実施内容に反映させると共に、後述する事業化計画を立案した。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）Violet-ECDL を用いたラマン分光式マルチガス分析装置の研究開発

サブテーマ 1 として、水素純度分析装置の中核となる新技術である、Violet-ECDL を用いたレーザーラマン分光法に基づくマルチガス分析装置の開発を行った。図 4 に、Violet-ECDL の光学系構成例を示す。本技術は、青紫色の波長域（約 400～480 nm）の半導体レーザー（LD：Laser Diode）を、正対する 1 組の高反射ミラーからなるファブリ・ペロー型外部共振器（PBC: Power Build-up Cavity）と組み合わせることにより、PBC 内部に高強度の定在波を発生させ、これを励起光源とするラマン分光計測によって、微量ガスの高感度分析を実現するものである。本事業においては、上記手法の適用により、従来の分析装置よりも大幅に小型・軽量・低コスト且つ応答の早い次世代水素純度分析装置の実現を目的とした研究開発を行い、以下の成果を得た。

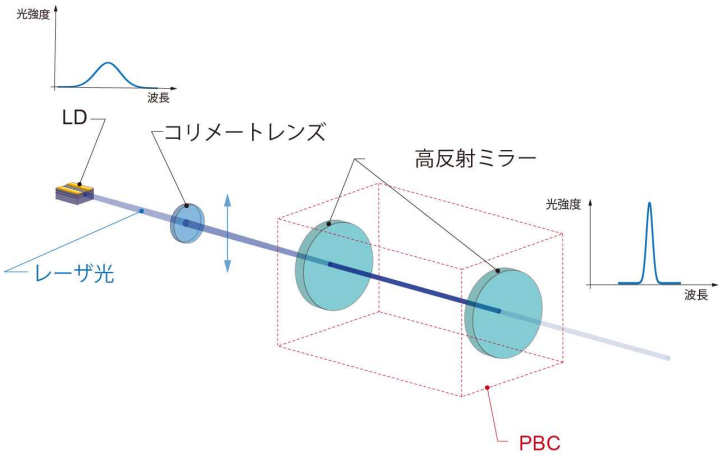


図 4　Violet-ECDL の光学系構成例

① Violet-ECDL の開発（主担当：株式会社四国総合研究所）

本事業において開発した Violet-ECDL の外観を図 5 に示す。光学素子の仕様検討、光学配置の最適化に関する理論的考察及び実験による検証を行うことで、PBC 内部に生成する定在波強度の最大化を図り、目標値である 10 W を大幅に上回る、100 W を超える高輝度光源の開発に成功した（◎）。

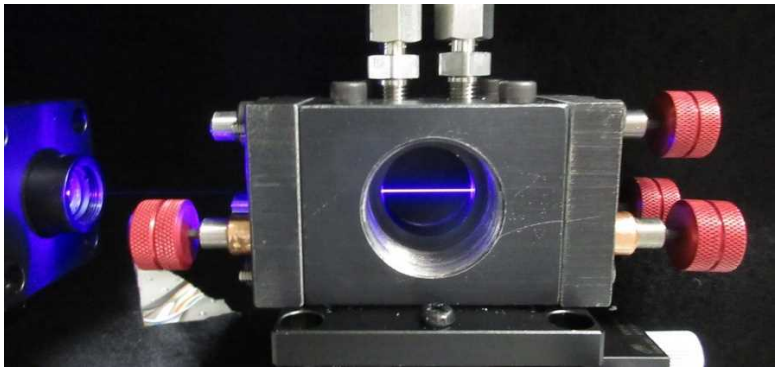


図 4　製作した Violet-ECDL の外観

② Violet-ECDL 光学系構成の最適化

ラマン分光分析による多成分測定においては、複数の成分を分離測定するため、光源の線幅（発振する波長域の幅）が狭いほど有利であり、高い識別性能が得られる。LD とコリメートレンズの間に狭帯域バンドパスフィルターを挿入することにより、Violet-ECDL の発振波長を制御し、目標として設定した発振線幅 30 cm^{-1} 以下となる線幅 12 cm^{-1}（0.2 nm）以下を達成した（○）。これは、本事業で分析対象となる ISO 不純物成分の分離識別に十分な値である。バンドパスフィルターの挿入によって狭線化した Violet-ECDL の発振スペクトルを図 6 に示す。

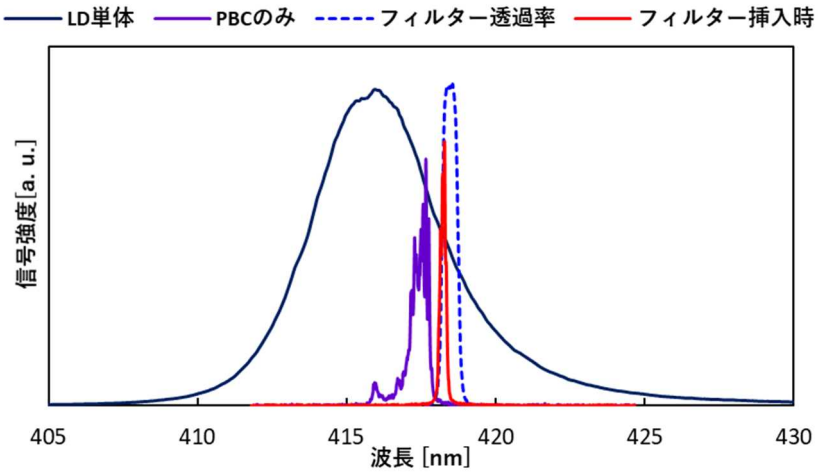


図 6　バンドパスフィルターの挿入によって狭線化された Violet-ECDL の発振スペクトル

また、LD と PBC の空間的結合状態によって、PBC 内部に生成される定在波の、光軸に垂直な方向における断面形状（横モード）が変化する。結合状態を最適化することにより、分光測定に最適な TEM_{00} モード（ビームの断面形状が単峰のガウス分布となる）の共振器内定在波を生成可能であることを実証した（〇）。結合状態によって変化するビームの断面形状の例を図 7 に示す。

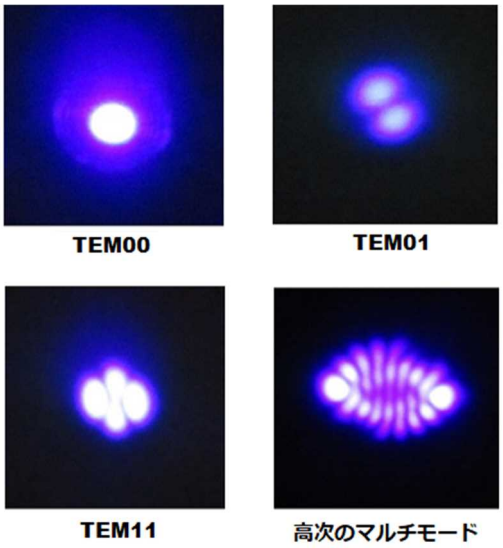


図 7　PBC 内部に生成される定在波の断面形状（横モード）

③ 光ファイバ伝送式 Violet-ECDL の発振機能検証

LD 端面から出射されるビームをシングルモードファイバに結合して伝送し、ファイバから出射したビームをコリメートして PBC に結合する光ファイバ伝送式 Violet-ECDL についても開発し、発振機能の検証を行った。ファイバ伝送式とすることで、ガスのセンシング部分となる PBC を、レーザー電源等を含む分析装置本体から切り離して設置することができ、装置の適用範囲を広げられる。PBC 部分は光学部品のみで構成されるため容易に本質防爆安全構造とすることができ、防爆を必要とする現場への適用範囲が広がる。製作した光ファイバ伝送式 Violet-ECDL の外観を図 8 に示す。側面に設けたポートは、一般的なレー

ザー電源及び温調装置と接続して使用できる仕様とした。

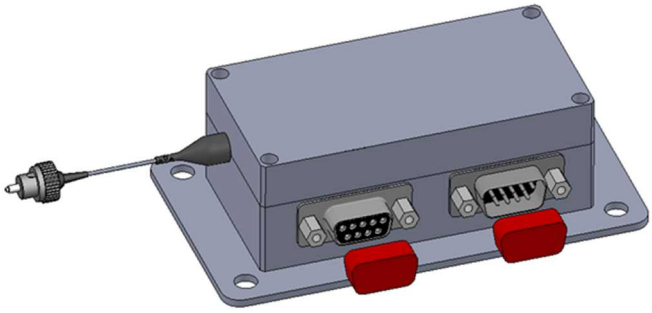


図 8　光ファイバ伝送式 Violet-ECDL の外観

製作した光ファイバ伝送式 Violet-ECDL を用いて発振機能の検証試験を行い、目標として設定した PBC 内光強度 5 W 以上を大きく上回る最大 60 Wでの発振を実証した（◎）。

④ 高感度受光系の開発

本事業では、高感度受光光学系としてシリンドリカル放物面ミラーを用いた受光系を設計・製作し、ラマンスペクトルの測定試験を行った。受光系の光学設計を図 9 に、製作した受光系を用いた測定試験の実施状況を図 10 にそれぞれ示す。製作した高感度受光系を用いて、目標感度として設定した酸素 ppm オーダー(S/N 比 10 以上)での検出を検証した(○)。

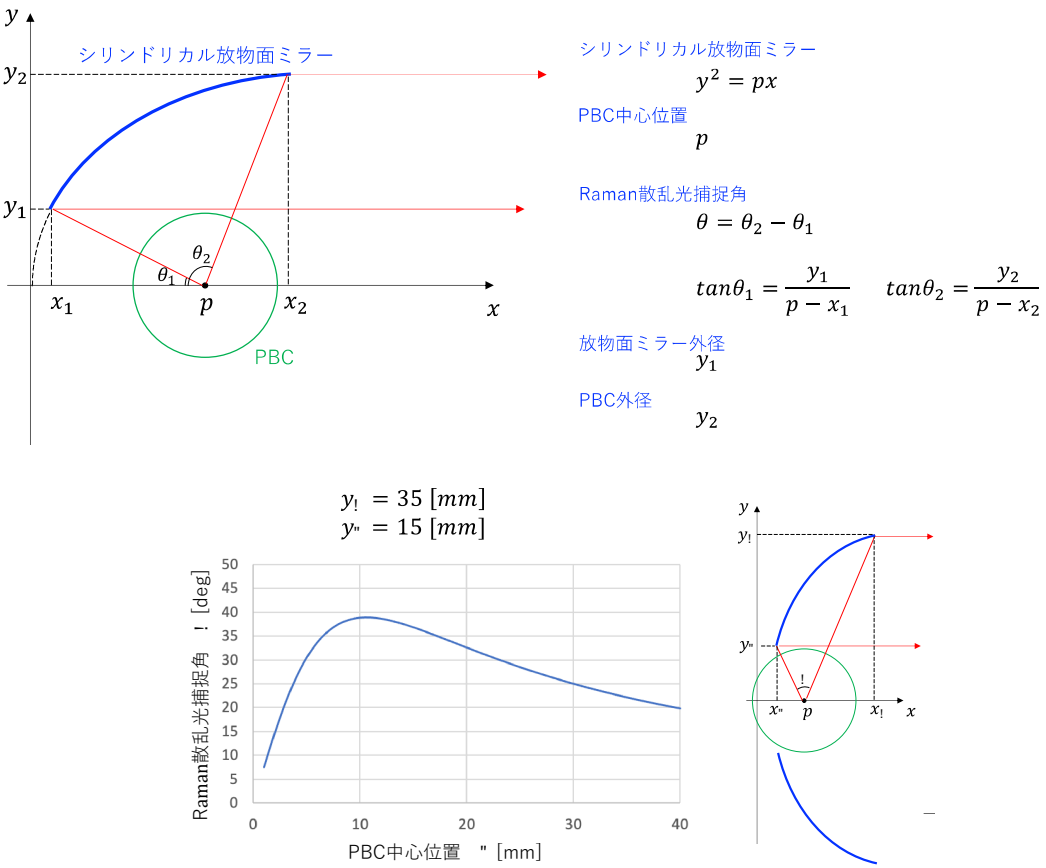


図 9　高感度受光系の光学設計

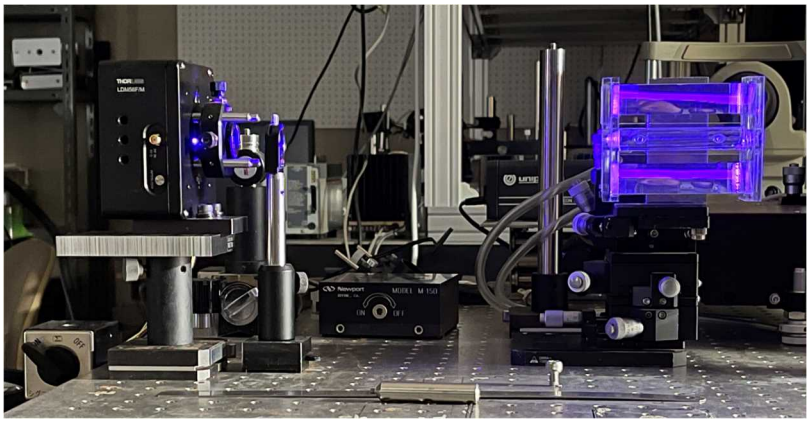


図 10　製作した高感度受光系を用いた検証試験実施状況

⑤ 小型マルチガス分析装置プロトタイプの開発

開発目標である寸法 40×50×30 cm 以下、重量 10 kg 以下となる寸法 34×42×17 cm、重量 8 kg の可搬型分析装置プロトタイプを製作した（○）。製作したプロトタイプの外観及び設計を図 10 に示す。

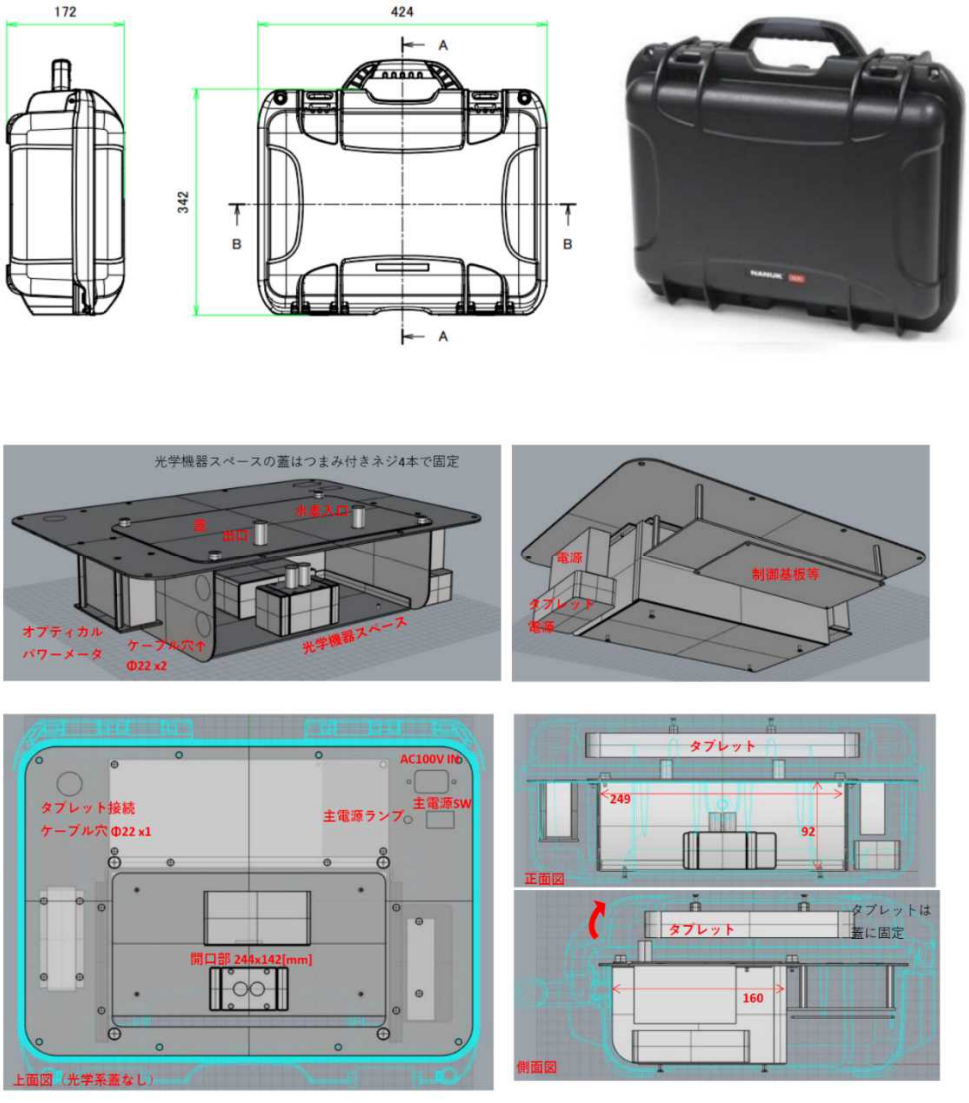


図 11　製作したプロトタイプ分析装置の外観及び設計

⑥ プロトタイプによるガス濃度計測機能検証

図 12 に Violet-ECDL を用いた水素中における微量酸素のスペクトル計測事例を示す。1551cm^{-1} 付近に濃度 10ppm の酸素に由来するラマンスペクトルのピークが確認できており、ppm オーダーの計測が十分可能であることを示している。図 13 に水素中の微量窒素を規格値の 300ppm から低下させた場合の窒素濃度と信号強度の相関を示す。両者は線形の関係を示し、規格値以下の分析が十分可能であることがわかる。図 14 に微量水素ガスの分析事例を示す。アルゴンベースとして水素 5ppm から濃度を低下させた場合の分析結果として、1ppm 以下まで線形の相関が確認できた。これらの事例において 1 回の分析に要する時間は概ね 1 秒程度であり、1ppm 以下など、極微量の場合でも 30 秒程度であった。また、ECDL の出力は今後更に高めることができる可能性を残しており、これを勘案すると更なる高感度化、高速化の実現が期待できる。

本研究開発で試作したプロトタイプ装置についてコスト試算を行ったところ、材料費について 96 万円程度に抑えることができた。したがって、量産効果等を勘案すると、製造コスト 150 万円以下が十分視野に入る。また、これを受け販売価格についても高速多成分分析計として従来にない安価な製品の実現も期待できる（〇）。

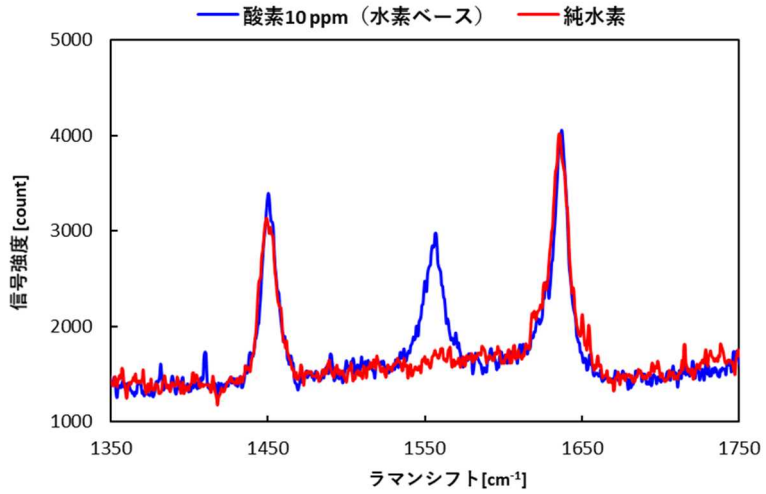


図 12　水素ベース酸素 10 ppm のラマンスペクトル測定結果

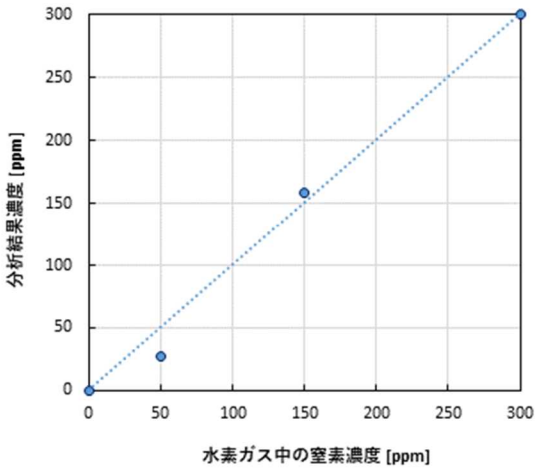


図 13　水素ガス中窒素の分析結果

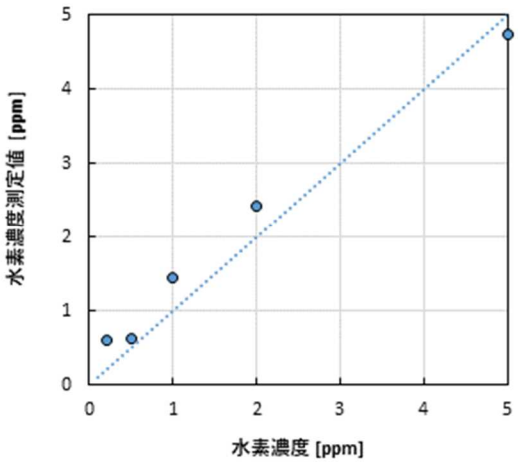


図 14　微量水素ガスの分析結果

⑦ 全成分分析の可能性評価

本事業の研究開発成果に基づいて、ISO 品質規格全成分分析の可能性評価を行った（〇）。評価結果を表 4 に示す。受光系の効率に改善の余地が残されており、追加の開発による効率化が実現すれば、さらに 1 桁程度検出感度を向上させられる見込みであるため、効率化が実現した場合の検出限界濃度についても併記した。

表 4　Violet-ECDL による水素中不純物全成分の分析可能性評価結果

青: 1 分以内に規格値濃度以下の分析が可能　　赤：1 分以内での分析は困難

分析項目	ISO 規格値 [ppm]	検出限界濃度 [ppm]	
		本事業による評価 3σ/1σ	受光系の効率化が実現した場合 3σ/1σ
水	≦5	0.82 / 0.27	0.08 / 0.03
全炭化水素	≦2	0.11 / 0.04	0.01 / 0.004
メタン	≦100	0.20 / 0.07	0.02 / 0.007
酸素	≦5	1.4 / 0.47	0.14 / 0.05
窒素	≦300	1.8 / 0.61	0.18 / 0.06
二酸化炭素	≦2	1.53 / 0.51	0.15 / 0.05
一酸化炭素	≦0.2	1.78 / 0.59	0.18 / 0.06
全硫黄化合物	≦0.004	0.34 / 0.11	0.03 / 0.01
ホルムアルデヒド	≦0.2	0.66 / 0.22	0.07 / 0.02
蟻酸	≦0.2	0.77 / 0.26	0.08 / 0.03
アンモニア	≦0.1	0.58 / 0.19	0.06 / 0.02
ヘリウム	≦300	ラマン分光法の適用は困難	
アルゴン	≦300	ラマン分光法の適用は困難	
全ハロゲン化合物	≦0.05	サブテーマ 2 において分析方法を検討	
最大微粒子濃度	≦1	フィルター捕集+重量法による分析	

本事業において実証した水素中不純物分析結果に基づく評価によって、ISO 規格値全成分のうち、水、全炭化水素、メタン、酸素、窒素、二酸化炭素の 6 成分が 1 分以内に分析可能であると評価できる。このうち全炭化水素については、検出感度的には分析可能であるが、メタンとの分離識別が必要であるため、分析可否の確定には実ガスを用いた基礎試験の実施が必要と思われる。一酸化炭素、全硫黄化合物、ホルムアルデヒド、蟻酸、アンモニアの 5 成分については、現段階では規格値濃度以下の分析は困難と思われるが、受光効率の向上による感度向上が実現できた場合には、全硫黄化合物を除く 4 成分についての分析が可能と評価できる。この場合には、全硫黄化合物を除く 10 成分を 1 台で 1 分以内に分析可能な装置が実現できる可能性がある。全硫黄化合物（硫化水素）についても、高感度化が実現した場合には 0.01 ppm、現状でも 0.1 ppm 程度までの分析が可能であると考えられ、ISO 規格値濃度以下の分析には及ばないものの、異常の早期発見やトラブル対処等の観点も含めて考えれば、1 ppm 以下の不純物を短時間で分析可能な本技術の有用性は極めて高いと考えられる。

（２）IR-LD を用いた赤外吸収分光式高感度ガス分析装置の研究開発

サブテーマ 2 では、サブテーマ 1 の Violet-ECDL によるラマン分光計測で分析が難しいと考えられる極微量成分の分析を目的とした装置の研究開発を行った。本事業における計測手法として採用した Cavity Ring-down 分光法（CRDS）は、微量成分の高感度計測技術として、近年盛んに研究開発が行われている手法である。計測に使用する波長帯域について検討を行った結果、品質の高い光学部品の調達が容易な 1.5 μm 帯での計測を中心とした研究開発を行った。

① IR-ECDL の開発

サブテーマ 2 においても、サブテーマ 1 と同様に、AR-LD とファブリ・ペロー外部共振器を組み合わせた複合共振器型半導体レーザー（IR-ECDL）の開発を行った。AR-LD として、安価に入手可能な THORLABS 社の利得チップ（型式 : SAF1093H）を選定し、空間結合型 IR-ECDL の構築を行った。開発した IR-ECDL の光学系構成を、図 15 に示す。

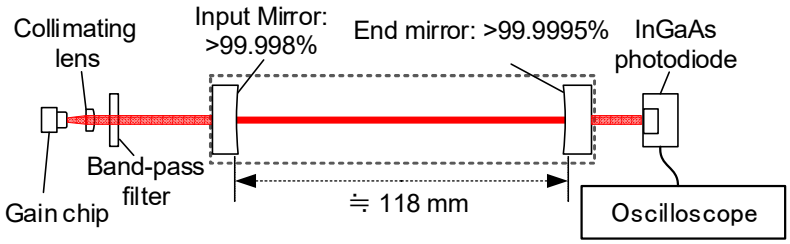


図 15　IR-ECDL の光学系構成

共振器透過光の時間減衰波形の測定により、小型の波長可変光源でありながら、12 cm 程度の共振器長で 7 km を超える実効光路長を得られることを実証した（〇）。

② IR-ECDL 光学系構成の最適化

光学素子のアライメントを調整することにより、分光計測に最適な TEM_{00} モードでの発振が可能であることを実証するとともに、狭帯域バンドパスフィルターを光路中に挿入することで、目標値である 0.3 cm^{-1} 以下となる発振スペクトルの半値全幅（FWHM）0.18 cm^{-1} を達成した（〇）。ビームプロファイラで観測した TEM_{00} モード発振時の強度分布を、図 16 に示す。

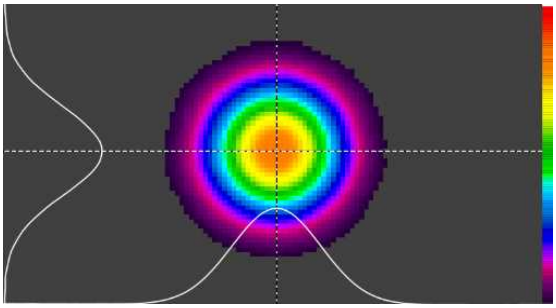


図 16　TEM_{00} モード発振時の IR-ECDL の横モードプロファイル

③ 光ファイバ伝送式 IR-ECDL の発振機能検証

サブテーマ 2 においてもサブテーマ 1 と同様に、LD をシングルモードファイバに結合して伝送し、センシング部となる PBC を装置本体と分離可能な光ファイバ伝送式の開発を行い、目標である 100 m 以上を超える 348 m の実行光路長が得られることを検証した（○）。

④ TDLAS の適用可能性評価

水素は近紫外から近赤外波長にかけて顕著な吸収スペクトルをもたないため、これまで吸収分光法による計測は困難とされてきたが、2.1 μm 付近の近赤外波長域に弱い吸収線が存在している。近年、ノルウェーの分析機器メーカーがこの吸収線を利用して、TDLAS 法を検出原理とするレーザー式水素分析計を開発し、製品としての販売を開始している。

水素ステーション等における燃料水素ガスの管理運用においては、不純物成分の濃度管理だけではなく、水素そのものの純度を測定可能な装置技術の開発が求められており、TDLAS 法による水素の直接計測が実現すれば、現状では不純物濃度の合計を 100%から差し引いて算出している水素ガスの純度を直接測定可能な装置として実用化できる可能性がある。また、TDLAS 法は遠隔計測への適用も可能であるため、将来的には、水素ガスの遠隔計測技術としての発展も考えられる。

以上のような背景から本事業では、TDLAS 法の適用による水素ガス濃度の直接計測に関する研究開発を行い、検出限界濃度 100 ppm 以下が実現可能であることを検証した（○）。図 17 に、開発した TDLAS 法による水素測定装置プロトタイプの構成を示す。

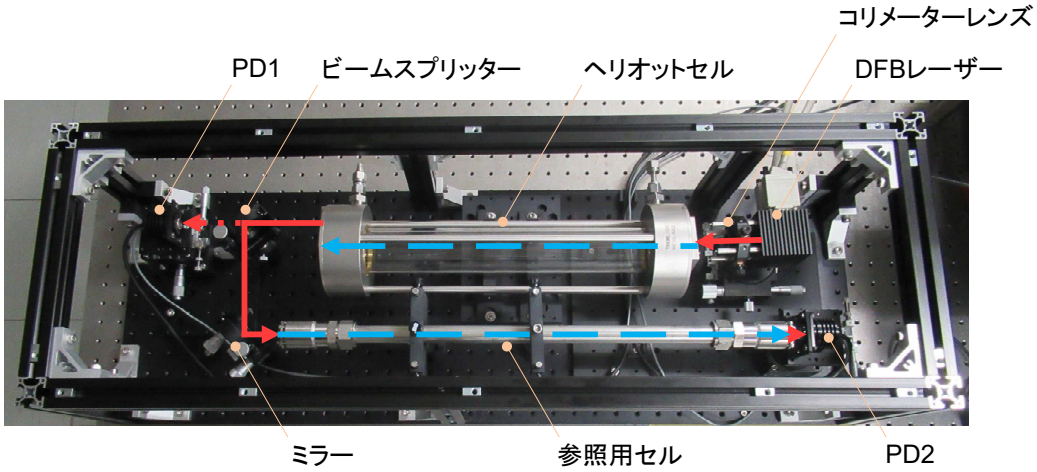
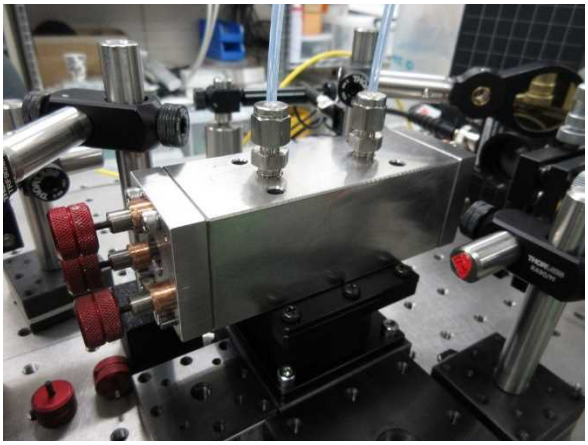


図 17　TDLAS 法による水素測定装置プロトタイプの構成

⑤ 高感度ガス分析装置プロトタイプの開発

サブテーマ 1 と同様に、サブテーマ 2 においても、高感度ガス分析装置プロトタイプの開発を行った。プロトタイプ装置の製作に先立ち、安定した CRDS 計測を可能とするため測定用ガスセルを製作した。製作したガスセル及びガスセルを内蔵したプロトタイプ装置の外観を図 18 に示す。ガスセル内部には高反射ミラーが入っており、超長光路の吸収分光測定用セルとして機能する。共振器長の変動による共振の不安定化を防ぐため、常温付近において非常に膨張率の小さなスーパーインバーを加工して製作した。プロトタイプ分析装置の外

形寸法及び重量はサブテーマ 1 の Violet-ECDL 型プロトタイプ装置とほぼ同じであり、開発目標以下の装置サイズを実現した（○）。



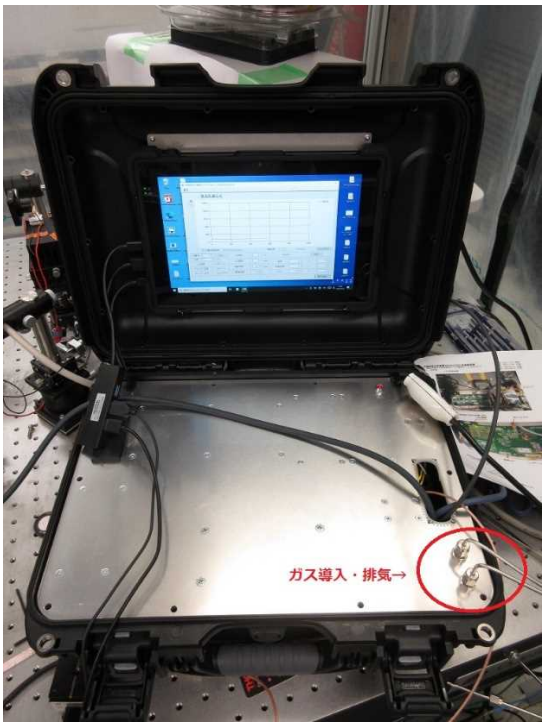


図 18　左： CRDS 計測用ガスセル、右：ガスセルを内蔵したプロトタイプ分析装置

⑥ プロトタイプ分析装置によるガス濃度計測機能検証

製作したプロトタイプ分析装置を使って、CRDS による水素ベース低濃度アンモニアの計測機能検証試験を行った。計測結果を図 19 に示す。

リングダウンタイム（共振器を透過するレーザー光の時間減衰波形）の計測結果は、水素ガス中のアンモニア濃度と良好な相関を示しており、図 19 の結果から、製作したプロトタイプ装置によって水素ガス中のアンモニア 0.1 ppm 以下が分析可能であることを検証した（○）。

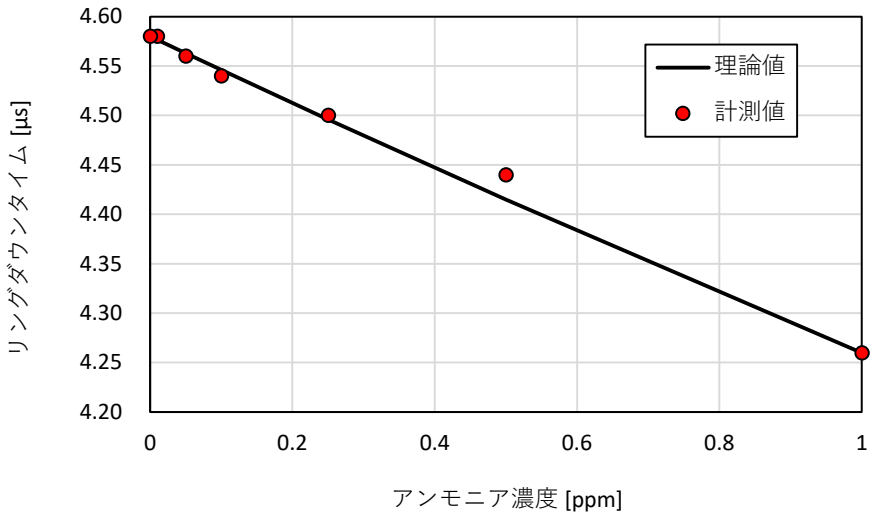


図 19　プロトタイプ装置を用いた CRDS 計測による水素ベース低濃度アンモニアの計測結果

⑦ 全成分分析の可能性評価

研究開発成果を基に、ISO 規格不純物全成分について、赤外吸収分光方式（CRDS）による分析可能性評価を行った。表 5 に評価結果を示す（〇）。

水、全炭化水素、メタン、酸素、窒素、二酸化炭素の 6 成分については、サブテーマ 1 の Violet-ECDL での分析を想定している。検出限界濃度の評価は、本事業において製作した分析装置プロトタイプによる水素中微量アンモニアの分析結果をもとにした評価と、追加の開発（デジタイザの高速化とセルの長光路化）によって高感度した場合の評価の 2 パターンを明示した。

表 5　赤外吸収分光法（CRDS）による水素中不純物全成分の分析可能性評価結果

青: 規格値濃度以下の分析が可能　　赤：規格値濃度以下の分析は困難

分析項目	ISO 規格値 [ppm]	検出限界濃度［ppm］	
		プロトタイプによる評価	高感度化した場合の評価
水	≦5	サブテーマ 1 の Violet-ECDL による分析	
全炭化水素	≦2		
メタン	≦100		
酸素	≦5		
窒素	≦300		
二酸化炭素	≦2		
一酸化炭素	≦0.2	15	0.0055
全硫黄化合物	≦0.004	3.5	0.0013
ホルムアルデヒド	≦0.2	0.55	0.0002
蟻酸	≦0.2	0.05	0.00002
アンモニア	≦0.1	0.05	0.00002
ヘリウム	≦300	適用が困難	
アルゴン	≦300	適用が困難	
全ハロゲン化合物	≦0.05	HCl、HF など分子種が特定されれば分析可能性あり	
最大微粒子濃度	≦1	フィルター捕集+重量法による分析	

プロトタイプ装置によるアンモニア測定結果に基づく評価では、アンモニア以外に蟻酸の分析が可能と考えられる。一酸化炭素については検出限界濃度が 15 ppm と高くなっているが、これは 1.5 μm 付近における一酸化炭素の吸収断面積が小さいためである。一酸化炭素は 2 μm よりの長波長側により強い吸収帯を複数もっているため、それらの吸収帯を利用することでより低濃度の分析が可能と考えられる。ホルムアルデヒドについては、0.55 ppm と規格値濃度 0.2 ppm に近い濃度まで分析可能と評価しており、プロトタイプの軽微な仕様変更等によって分析できる可能性がある。CRDS による赤外吸収分光計測における検出限界濃度は、分析対象の吸収断面積、A/D 変換を行うデジタイザの分解能、吸収計測を行う長光路セル（共振器）の実効光路長、の 3 つに依存する。本研究開発では、10 cm 程度の長さの共振器を使って、5 km を超える実効光路長が得られることを確認した。本事業においては開発期間の制約等から 50 MHz での A/D 変換を行ったが、5 GHz 程度の A/D がすでに実

装可能な価格で市販されており、このような高速 A/D と長光路化したセルを組み合わせた場合、吸収断面積の比較的小さい成分であっても、ppb オーダーまでの分析が可能であると考えられる。実際に、ISO 規格（ISO 21087）においても、複数の不純物成分の分析方法として CRDS が明示されており、ISO 規格の不純物分析に関する研究開発も欧米を中心に行われている。

全硫黄化合物については、低濃度分析に対するニーズが高いと考えられるが、還元処理によって硫化水素に変換した後、高感度化 CRDS により ppb オーダーでの分析が可能と評価した。全ハロゲン化合物については、HCl、HF など分子種が特定されれば分析できると考えられるが、分析対象分子種が多岐に亘るため、コストメリットの観点から、現時点では CRDS による測定手法の適用は現実的ではないと考えられる。微粒子の分析については、現在行われているフィルター捕集と重量法による分析の踏襲が合理的であると考えられる。

CRDS 等の高感度赤外吸収分光法は、燃料水素ガス中の不純物分析手法として有効であると考えられ、他の分析方法との測定精度やコストメリットの比較等も含めて、社会実装に向けた検討を進めていくべきであると考えられる。

３．２　成果の意義

本事業においては、半導体レーザーを用いた光学的手法により、ISO 14678（2019）に規定された燃料水素ガス中の複数の不純物をオンサイトで分析可能な可搬型分析装置に関する研究開発を行った。研究開発の成果をもとに、ISO 規格全成分分析の可能性について評価を行い、現時点で 6 成分、将来的には 10 成分の 1 台での分析が可能との評価結果を得た。水素ステーション等の水素ガス実運用現場では、定期的な品質管理だけでなく、突発的なトラブル等にも迅速に対応できる現場分析技術が強く求められており、本事業における研究開発の成果は、これらのニーズに答え、水素ステーションにおける水素運用管理に係るトータルコストの大幅削減に資するものであると考えている。

サブテーマ 1 で開発した新型半導体レーザーについては、小型の光源でありながら、これまでのラマン分光方式では実現できなかった性能のガス分析計として実用化できる可能性があり、現在、実用化・製品化に向けた取り組みを行っているところである。本事業においては、水素ステーションにおける燃料水素中の不純物分析を目的とした研究開発を行ったが、この技術は、ラマン不活性ガスを除く極めて多くのガス種の即時分析を可能とするものであり、例えば、水素製造プロセスにおける品質管理、大気汚染計測、呼気分析による病理診断など、幅広い応用が考えられる。また、水素に対する感度も高いため、小型高感度かつ応答の早い水素センサーとしての実用化も考えられる。

サブテーマ 2 で開発した CRDS 方式の計測は、微量成分の分析手法として、大学や研究機関などアカデミックな場を中心に認知され広く研究開発が行われている手法であり、国際規格（ISO 21087）においても、燃料水素中の不純物分析手法として例示されている。本事業において製作したプロトタイプ装置では、波長 1.5 m 付近の半導体レーザーによって水素中でのアンモニア 0.05 ppm の分析を実証した。信号処理技術の向上や光学素子製造技術の向上によって、CRDS による高感度計測技術は身近なものになりつつあり、今後さらに普及が進んでいくと思われるが、本事業における研究開発の成果が、その一助となれば幸いである。

３．３　開発項目別残課題

本事業においては、研究開発計画において設定した開発項目別の目標をすべて達成し、開発目標に照らした残課題は発生していないと考えている。開発の過程において見出された今後の課題としては、以下のものがある。

・開発項目 1-①　Violet-ECDL の開発

開発目標である 10W を大幅に上回る 100W 超える励起光の発生を実証したが、時間的安定性には課題があることが分かった。今後、安定化に向けた開発を継続して行う（分類③）。

・開発項目 1-⑥　プロトタイプによるガス濃度計測機能検証

本事業では、開発した Violet-ECDL を用いたラマン分光測定による 1 分間の分析で、水素ガス中の ppm オーダーの不純物成分を分離識別可能であることを実験により検証した。一方で、現在の装置構成では、水素のラマンスペクトルなど他の光応答の影響が要因となって、計測結果に変動が生じる場合があり、実現場において安定的に高感度計測機能を発揮するには改善が必要である。例えば、波長分離を行う光学フィルターの狭帯域化などの対策によってクリアできるものと考えられるため、今後、プロトタイプ装置の改良に向けた開発を継続する（分類③）。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

４．１　まとめ

[サブテーマ１] Violet-ECDL を用いたラマン分光式マルチガス分析装置の研究開発

サブテーマ 1 では、ラマン分光法を計測原理とする可搬型水素純度分析装置に関する研究開発を行った。分析装置として要求される水素ガス中での ppm オーダーの不純物成分の計測を可能とするための新たな光源として、AR（Anti-Reflection: 反射防止）コート付き青色レーザーダイオードと、高反射率の誘電体多層膜ミラー2 枚で構成されるファブリ・ペロー型外部共振器（PBC: Power Build-up Cavity）とを組み合わせた新型レーザー光源（Violet-ECDL）の開発を行った。適切な光学素子の選択や光軸調整、各光学素子の空間的配置の最適化等によって、50～70 mA 程度の注入電流から PBC 内部に最大 100 W を超えるパワーの定在波を生成できることを実証した。この定在波の波長は狭帯域光学バンドパスフィルターの挿入による安定化が可能であり、ラマン分光による多成分の分離識別に十分な安定性・狭線性を確保できる。本事業では、この新型レーザーを励起光源とするラマン分光計測により、水素ガス中の微量不純物成分の分析可能性について評価を行った。窒素、メタン、酸素について、水素ベース標準ガスを用いた分析試験を行い、ISO 規格値濃度（それぞれ 300 ppm、100 ppm、5 ppm）以下の分析が 1 分以内に可能であることを実証した。また、ベースガスである水素についても 1 分で 1 ppm 以下の分析が可能であることを確かめた。これらの研究開発成果をもとに、ISO 規格の不純物全成分の即時オンサイト分析の実現可能性について評価を行った。また、AR-LD をシングルモードファイバに結合して伝送し、伝送先で PBC に結合して増倍させるファイバ伝送型光源の開発を行い、60 W を超える定在波が得られることを実証した。ファイバ伝送型のセンシング部分は光学部品のみで構成される本質防爆安全構造となるため、防爆エリアへの設置などが容易であり、分析計としての適用範囲が広がる。さらに、重量 8 kg の可搬型分析装置プロトタイプを製作し、実用化に向けた課題の抽出を行った。

[サブテーマ 2] IR-LD を用いた赤外吸収分光式高感度ガス分析装置の研究開発

サブテーマ 2 では、1.5 μm 帯の赤外領域においてサブテーマ 1 と同様の外部共振器型 LD 光源

の開発を行い、10 cm 程度の共振器長で 7 km を超える実効光路長を得られることを実証するとともに、光ファイバ伝送型光源についても開発を行った。また、CRDS（Cavity ring-down spectroscopy）法を計測原理とする分析装置プロトタイプを製作し、計測時間 2 秒で水素ガス中のアンモニア 0.1 ppm 以下を分析可能であることを実証した。さらに、水素ガス分析手法の一つとして、水素純度の直接計測や遠隔計測に応用しうる TDLAS（Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy）法についても研究開発を行い、2.1・m 帯の半導体レーザーを光源として水素ガス 100 ppm 以下の直接計測が可能であることを実証した。サブテーマ 2 についても、これらの研究開発成果をもとに、ISO 規格の不純物全成分分析の可能性について評価を行った。

４．２　課題

本研究開発では、いずれのサブテーマについてもプロトタイプの完成及びその機能の実証に至り、Violet-ECDL については単一の装置で高速多成分微量分析が可能な、過去に例の無い装置として、IR-ECDL については、ppm オーダを大きく下回る極微量成分分析が可能な装置として、実用化が可能であることを示した。

特に、Violet-ECDL については、その動作原理の合理性や、非常に高い性能と現実的な製造コストから、本事業終盤から複数の大手分析機器メーカから引合いを得るに至っており、後述するスキームでの事業化に向け順調に滑り出していると考えている。

実用化に向け解決すべき重要な課題は、いずれの光学機器についても言えることであるが、光源を長期安定化させることである。本技術は光源そのものの開発が核となっている新技術であることから、安定化手法について明らかになっている先行事例はない。しかしながら、共振器を内蔵しながらも持ち運び可能な光学機器や、劣悪な環境でも使用可能なレーザ装置等が既に運用されていることから、実験によって ECDL の安定動作に必要な条件を洗い出すと共に、これらの精密光学機器の構造を調査・参照し、長期安定動作と堅牢性の視点から、本研究開発における ECDL に最適な光学系配置と固定構造を見出すことは十分可能であると考えられる。

４．３　事業化までのシナリオ

（１）実用化・事業化を行う製品・サービス等の概要

a.　水素純度分析装置

水素品質管理のためのオンサイト水素純度分析に使用する、小型・軽量で高感度不純物計測が可能な分析装置を提供する。

表 3 の水素品質管理に係る現状と現場のニーズに関するヒアリング結果に照らし、考えられる商品ラインナップを表 6 に示す。

表 6　水素純度分析装置の商品ラインナップ

	商品① 3 成分分析装置	**商品②** 6 成分分析装置	**商品③** 全成分分析装置
装置構成	Violet-ECDL　1 式	Violet－ECDL　1 式 IR-ECDL　1 式	Violet-ECDL　1 式 IR-ECDL　4 式　他
価格目標 （量産効果有）	150 万円	300 万円	800～1000 万円

コストメリット・ 実装時期　等	・オフサイト型ステーションの定期点検（年 1 回）及びオンサイト・オフサイトステーションのトラブル復旧時（年 1 回程度）の水素分析をオンサイト，短期間化。 ・5 店以上のステーションでシェアすると 1 年間の分析費用分（15 万円×2 回×5 店以上）で装置費用は採算がとれる。 ・分析に要する期間が最大 2 日であったものが数時間～半日程度に短縮されることにより，早期の運転再開が可能。売上の面でもメリットがある。 ・既運用中のステーションにおいて現時点でもニーズがあり，早期実装が求められている。	・オンサイト型ステーションの定期点検（年 1 回）の水素分析をオンサイト，短期間化。 ・5 店以上のステーションでシェアすると 3 年間の分析費用分（25 万円×3 回×5 店以上）で装置費用は採算がとれる。 ・分析に要する期間が最大 2 日であったものが数時間～半日程度に短縮されることにより，早期の運転再開が可能。売上の面でもメリットがある。 ・現在のところオンサイト型ステーションの割合は少なく（全体の 15～20%程度），また，増加が緩やかであることから，市場の拡大に合わせた 2027 年度以降の実装が適当であると考えられる。	・ステーション開設時の水素品質分析をオンサイトで実施する。 ・4 日程度を要していた分析が半日程度まで期間短縮が可能。 ・分析事業者が装置を購入してオンサイトで分析する場合を想定すると，ステーションが分析事業者に支払う費用が 50 万円程度に低減でき，分析事業者は 30～40 件程度の受注で装置費用の採算がとれる。 ・売上の拡大には，年間の新設ステーション件数の増加が必須であることから 2030 年以降の社会実装が現実的である。

b. 小型マルチガス分析装置

環境分野、医療分野、産業分野、学術分野等における様々なシーンにおいてオンサイト分析が可能な小型・軽量で高感度計測が可能なマルチガス分析装置を提供する。分析機器メーカーからのヒアリング結果に基づき設定した商品の特徴を表 7 に示す。

表 7　小型マルチガス分析装置の商品としての特徴

	商品④　小型マルチガス分析装置
装置構成	Violet-ECDL　1 式
価格目標	500～1000 万円
コストメリット・ 実装時期　等	[ターゲット] 主にガスクロマトグラフが利用される市場を狙う。 ・　環境分野：環境汚染成分分析、悪臭物質分析 ・　医療分野：生体物質検出 ・　産業分野：各種工場における工程管理、品質管理、新エネルギー利用に向けた各種研究開発 [コストメリット] ガスクロマトグラフに高速計測と簡便な多成分分析の機能が付加されることから、現行の分析計の価格帯～プラスアルファでも十分市場での競争は可能であると考えられる。 [実装時期] 特段の期限はないが、カーボンニュートラルに向けた各産業分野での取組みにおいて大型の市場が見込まれることから、2～3 年程度での社会実装が望ましい。

（2）事業化に向けた計画

a. 概要

本研究開発では、事業化に向けて必要となる基盤技術の開発をプロジェクト期間中に全て完了している。実用化・事業化のために、製品の開発や製造プロセスの確立等は必要となるが、原理検証的な研究開発を伴う事項はない。

特に Violet-ECDL を用いたラマン分光法によるマルチガス分析技術については、世界初の技術ということもあり、プロジェクト期間中から、アドバイザとして参画したエナジーサポート社をはじめ、複数の大手メーカーより新商品開発に関する引合いを得ており、一部については既に製品開発に向けた検討を進めている。いずれもターゲット市場は水素品質管理をはじめとする、カーボンニュートラル達成に向けた新エネルギー利用に関連する市場であることから、2～3 年間程度の期間で商品を完成させ、海外市場も視野に業界標準を狙いたい考えである。

少なくとも商品①（3 成分分析）については、装置としての実現可能性と現場におけるニーズが明らかになっているため、早期に事業体制を確立し、現場への実装を目指す。

b. 他との競争力

本研究開発過程において、ECDL の発振とこれを光源としたガス計測の原理については十分に検証がなされており、これに係る産業財産権も出願済みである。したがって、同様の手法で他社との競争となった場合、受託者らが圧倒的に有利である。一方で、本事業が既存の分析機器市場を狙ったものであり、現在の分析機器市場が多くの装置について 2～3 社の大手メーカーによって占有されている状況にあるため、新たに参入し競争するよりも、これらの大手メーカーと共同で実施する形の事業スキームにできれば、社会実装及び収益化が効率的且つ早期に実現可能であると考えられる。また、本技術の将来性が評価され、既に複数のメーカーより新製品開発に係る引合いを得ていることから、このような事業スキームの実現可能性は高いと考えられる。

c. 事業化に向けた課題と解決方法

事業化までに想定される主な課題は、水素ステーション関連市場の獲得である。

現在の水素純度分析は、大手分析機器メーカーの十分に実績が積み上げられた製品が用いられている。前述のとおり分析機器市場は、大手メーカー数社によってシェアがほぼ独占されている 2 強・3 強型となっているが、現状これらのメーカーにおいて、オンサイトで複数種のガスが分析できる小型・軽量の分析機器の開発に向けた動きは認められない。視点を変えると、オンサイトで複数種のガスが分析できる小型・軽量の分析機器が実現できる技術は、現時点では本研究開発において確立した手法を除き存在しないという考え方もできる。また、ニーズについては、冒頭に述べたヒアリング結果のとおり明確であり、今後水素ステーションや関連施設の増加や、施設の経年劣化等を勘案すると、増加の一途を辿ることが予想される。

このような状況から、有用かつ将来性、発展性の高い技術であることを武器に、上に述べた大手メーカーを一含む事業スキームを実現することで、水素関連市場の獲得も十分期待できるものと考えられる。

d. 事業化のスケジュール

・ 水素純度分析装置

水素純度分析に用いる3種の商品について、それぞれの事業化のスケジュールを図20に示す。これらの計画は表 3 の水素品質管理に係る現状と現場のニーズに関するヒアリング結果を反映している。

まず、商品①（3 成分分析装置）の実装を最優先に進める。その理由として、現場の要望が強いこと、要求される性能の観点で製品化に必要な期間が最も短く、コスト面でも顧客の持つ費用感との乖離が最も少ないと考えられること、などが挙がる。2022 年度に製作したプロトタイプをベースに、2023 年度に製品モデルの設計と製作を行う。

2024 年度は製品モデルを用いて現場での機能評価と改良を行い、2025 年度の現場実装開始を目指す。これらのスケジュールに照らすと、2023 度中にはライセンシーを確定する必要がある。現在、複数のメーカーがライセンシーの候補となっている状況にあるが、複数社とのライセンス契約を締結できる形が理想的である。

商品②、商品③について、一定の収益を確保するためには、後述する市場の醸成が必要となる。具体的には、商品②についてはオンサイト水素ステーションの普及拡大が、商品③については、水素ステーション新設件数の増加が必要であることから、製品設計、製作等を進めつつ、水素ステーションの普及状況に照らし、適切なタイミングで現場への実装を開始することが重要である。

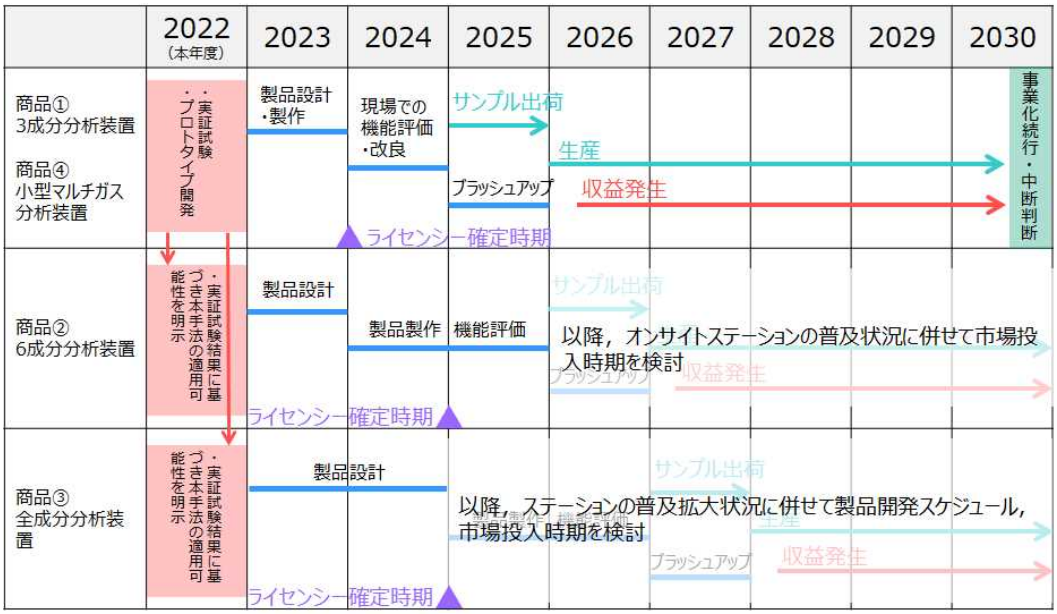


図 20　水素純度分析装置の事業化スケジュール

・ 小型マルチガス分析装置

小型マルチガス分析装置については、水素関連市場ではないものの、現在想定されているターゲット市場がいずれもカーボンニュートラル達成に向けた新エネルギー利用に係る市場であることから、早期の現場実装を目指すべきであると考えられ、したがって商品①（3 成分分析）と同様のスケジュールで進める考えである。

e. 事業化のスキーム

事業化のスキームは、メーカー主体を想定している（図 21）。受託者はメーカーとライセンス契約を締結し、ロイヤリティーを得る形とし、製品開発期間及び販売開始後も、必要な技術的検討は実施し、メーカーとの密な連携を図る。製造・販売・メンテナンス等についてはメーカーが実施することで、既存の製品販売によって培った知見やノウハウを生かして効率的に対応することができる。

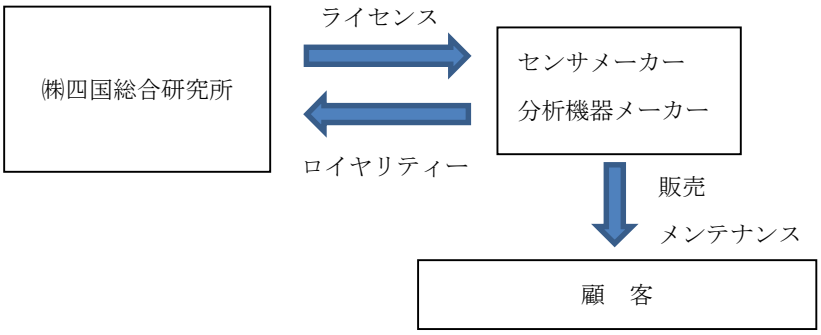


図 21　事業化のスキーム

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021.1	レーザー学会学術講演会　第 41 回年次大会	外部共振器型半導体レーザーを用いたラマン分光式ガス分析装置の開発に向けた基礎検討	横井　清人
2	2021.9	第 39 回レーザセンシングシンポジウム	青色外部共振器型半導体レーザを用いた水素ガス純度分析装置の開発	市川　祐嗣
3	2021.9	第 39 回レーザセンシングシンポジウム	高感度ガスセンサの実現に向けた赤外外部共振器型半導体レーザの開発	横井　清人
4	2022.1	レーザー学会学術講演会　第 42 回年次大会	外部共振器型半導体レーザーを用いた赤外吸収分光式ガス分析装置の開発	横井　清人
5	2022.1	レーザー学会学術講演会　第４２回年次大会	青色外部共振器型半導体レーザーを用いた小型高輝度ラマン分光分析装置の研究開発	市川　祐嗣
6	2022.1	レーザー学会学術講演会　第 42 回年次大会	ラマン分光光源用青色半導体レーザ外部共振器の基礎特性に関する研究	徐　鳴雪
7	2022.4	The 11th Advabced Lasers and Photon Sources (ALPS 2022)	Cavity Enhanced Raman Spectroscopy of Gas Species Utilizing a Blue External Cavity Diode Laser	市川　祐嗣

8	2022.9	第40回レーザセンシングシンポジウム	ファブリ・ペロー型 IR-ECDL を用いた低濃度ガス分析装置の研究開発	横井　清人
9	2022.9	第40回レーザセンシングシンポジウム	青色外部共振器型半導体レーザを用いた微量ガス分析装置の開発	市川　祐嗣
10	2023.1	レーザー学会学術講演会　第41回年次大会	CRDS による IR-ECDL を用いたガス分析装置の低濃度検出に向けた検討	横井　清人
11	2023.1	レーザー学会学術講演会　第43回年次大会	ラマン分光計測用小型青色半導体レーザー外部共振器高輝度化に関する研究	徐　鳴雪
12	2023.1	レーザー学会学術講演会　第43回年次大会	共振器増強ラマン分光法を用いた小型高感度ガス分析装置の開発	市川　祐嗣
13	2023.9	第41回レーザセンシングシンポジウム	共振器増強ラマン分光法による高感度ガス分析技術の開発	市川　祐嗣
14	2023.9	第41回レーザセンシングシンポジウム	CRDSによる可搬型水素中微量アンモニア計測装置の開発	横井　清人

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2023.4.20	２０２３－０６９４３０	光共振器および外部共振器型レーザー装置	(株)四国総合研究所
2	2023.4.20	２０２３－０６９４３１	光共振器および外部共振器型レーザー装置	(株)四国総合研究所

（2-(4)-⑧）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発」委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、日本重化学工業株式会社

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2020年度～2022年度）

・様々なAB2型ラーベス相の水素吸蔵合金の試作を行い、ヒステリシスが小さく、84℃で80MPaまで昇圧可能な水素吸蔵合金を開発した。
・小スケール試作容器の設計・検討を行い、昇圧装置の基本設計を実施した。排熱を有効活用することにより、昇圧に係るエネルギーを削減できる可能性を見出した。
・昇圧用AB2型ラーベス相の量産性について、ルツボ材質の検討、高周波誘導炉を用いて溶解試験を行い、量産適用可能な製造プロセスを確立した。

●背景/研究内容・目的

水素ステーションの整備費、運営費の削減を目指し、水素の貯蔵・昇圧のために活用する排熱(作動温度)を80℃以下に絞った熱化学式昇圧システムの構築を行う。この昇圧システムを実用化・商用化するため、システムに適した材料特性を有する水素吸蔵合金の開発、その水素吸蔵合金の量産性の検討を実施するとともに、昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化に取り組む。

●実施体制及び分担等

NEDO

- 国立研究開発法人産業技術総合研究所
  ・実施項目A：昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発
- 日本重化学工業株式会社
  ・実施項目B：昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討
  ・実施項目C：昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討

●研究目標

実施項目	目標
A	80℃で80MPaの放出圧力が可能で、外挿から算出される30,000回の吸蔵放出サイクル後に初期容量80%以上容量を維持する水素吸蔵合金を開発する。
B	良好な伝熱性能を備え、80MPaの水素に対する耐圧性を有する昇圧用水 素吸蔵合金容器構造を開発する。
C	量産炉に適用可能なルツボ材、溶解プロセスを確定し、本システムに適用される水 素吸蔵合金の大規模製造プロセスを確立する。

●これまでの実施内容／研究成果

・各種AB2型ラーベス相の水素吸蔵合金の試作を行い、30℃で20~35MPaで水素を吸蔵する数多くの水素吸蔵合金を見出すとともに、ヒステリシスの低減により、84℃で80MPaまで水素昇圧が可能な水素吸蔵合金を開発した。
・昇圧装置の設計検討、昇圧時の熱マネジメントに関する試算を実施。高圧水電解装置の排熱を有効活用することにより、昇圧に係るエネルギーを削減できる可能性があることを確認した。
・昇圧用合金について、量産適用可能な製造プロセスを確立した。

●今後の課題

・本システムに求められる熱力学特性を有する水素吸蔵合金の開発に目途が付いたが、今後は実際の運用に近い条件での耐久性評価や小型機での小規模実証試験が必要である。
・本技術を実用化するためには高圧ガス保安法に合致した安全対策が必要である。一般的に定期自主検査では開放検査が求められるが、水素吸蔵合金を用いたタンクでは合金を大気にさらすことができないため、本技術に適した検査方法の確立が実用化に向けた課題と考えている。

●実用化・事業化の見通し

上記課題を解決していくことで水素吸蔵合金を用いた熱化学式水素昇圧システムを実用化できると考えられる。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	84℃で80MPaまで昇圧可能なほぼ目標を満たす合金の開発に成功した。	○
B	試作容器の設計検討を基に、昇圧システムの基本設計を実施した。	○
C	昇圧合金の量産適用可能な製造プロセスを確立した。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	5	13	0

事業番号：2-(4)-⑧

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発」

実施者：国立研究開発法人産業技術総合研究所
日本重化学工業株式会社

１．研究開発概要

水素をエネルギーとして利用する「水素社会」への移行を牽引する燃料電池自動車、水素ステーションの自律的普及が喫緊の課題である。普及拡大には、水素ステーションの整備費、運営費、さらには水素調達コストの低減にかかる技術開発が必要とされている。現在の水素ステーションでは長く商用化されている機械式圧縮機が使用されているが、圧縮機のコストは全体ステーションコストの約20%を占めるだけでなく、機械式圧縮機の機構上、昇圧のエネルギー効率が低いこと、摺動部の摩耗による定期的なメンテナンスが必要なこと、振動・騒音などの課題が存在する。このような状況は日本国内だけでなく米国でも同様であり、米国DOEではHydrogen Delivery Technical Barriersとして水素圧縮の信頼性およびコストが挙げられ、信頼性向上、低コスト化、圧縮効率の向上が技術開発項目として設定され、次世代水素昇圧システムの研究開発が進められている。

水素吸蔵合金を活用した熱化学式水素圧縮機は、低コストで高効率な次世代水素昇圧システムとして期待されている。この熱化学式水素圧縮機では水素吸蔵合金の冷却・加熱に伴う水素の吸蔵・放出によって水素の昇圧を行う。図1には水素吸蔵合金の水素吸蔵・放出特性の温度依存性の模式図を示す。試料温度の逆数と水素吸蔵・放出圧力には相関があり、試料温度が高くなると水素吸蔵・放出圧力はともに上昇する。そのため、水素吸蔵合金を活用した熱化学式水素圧縮機では、水素吸蔵合金が室温近傍で100MPa相当の高い体積密度で水素を貯蔵でき、加熱温度を

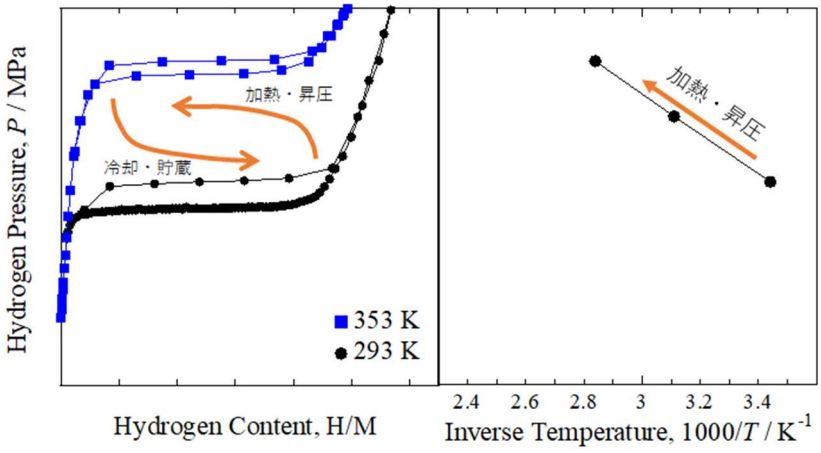


図１ 水素吸蔵合金の水素吸蔵・放出特性の温度依存性の模式図

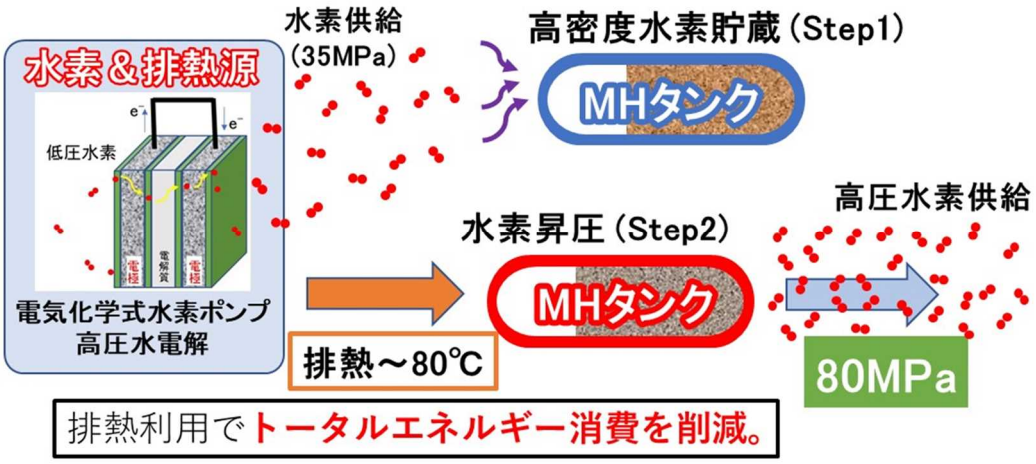


図２ 水素吸蔵合金を用いた新規熱化学式水素圧縮機の昇圧イメージ図

変えることにより任意の目的圧力までガス圧力を高められる特長を利用している。この圧縮機の利点として、①排熱を効果的に活用することで昇圧に必要となるエネルギーを低減できること、②摺動部がないため水素漏洩のリスク、メンテナンス頻度が低いこと、③振動・騒音が無いことなどがあげられる。本事業では、シンプルで高効率・低コストな水素昇圧システムとして、35MPaの中圧水素を供給可能な電気化学式水素ポンプや高圧水電解と水素吸蔵合金を活用した熱化学式水素圧縮機を組み合わせたハイブリッドシステムを提案する。図２に水素昇圧プロセスのイメージを示す。このシステムは1次圧力源から製造された中圧水素を本事業で開発する水素吸蔵合金に室温にて貯蔵させた後、作動温度が80℃近傍である電気化学式水素ポンプや高圧水電解の排熱を水素吸蔵合金タンクに供給することで80MPaまで昇圧させ、水素を燃料電池自動車に供給するものである。すなわち、電気化学式水素ポンプや高圧水電解を水素源としてだけでなく、排熱源としても利用するシステムである。本システムの利点は、電気化学式水素ポンプや高圧水電解での水素発生圧力を35MPaまでに抑えることで技術的な困難さを回避するだけでなく、35MPaから80MPaまでの昇圧に対して排熱以外のエネルギー投入を大幅に低減できることである。また、作動温度を100℃以下に限定することで、昇圧に必要となるエネルギーに低品位の排熱を有効利用できるだけでなく、熱媒・冷媒に同一の媒体を利用することが可能で、熱交換器の構造が簡便になり、エネルギー効率の向上と低コスト化にもつながると期待できる。

このシステムを構築するためには、本事業では室温で35MPa以下の水素圧力(20～35MPa)で水素を吸蔵し、80℃の排熱により水素放出圧力が80MPaを超える水素吸蔵合金を開発するとともに、良好な伝熱性能を備え、かつ80MPaに対する耐圧性を有する熱交換器構造の最適化を実施し、新規熱化学式水素圧縮機の要素技術の開発を行う必要がある。材料開発の課題としては、これまでに探索されていない高圧領域で作動する新規水素吸蔵合金の設計・開発、昇圧に必要となる温度差を小さくするためのヒステリシス(同一温度での水素吸蔵圧力と水素放出圧力の差)低減や耐久性の向上がある。また、タンクシステムとしての課題として、短時間での昇温、冷却可能な熱交換構造と耐圧を兼ねそろえたタンク設計がある。そこで本事業では、我々が提案する新たな熱化学式水素圧縮機に適した材料特性を有する水素吸蔵合金の開発、その水素吸蔵合金の量産性の検討を実施するとともに、熱伝導解析および構造解析の手法を用いた昇圧用水素吸蔵合金容器の構造の最適化に取り組み、高圧領域において摺動部がない安全で高効率な水素貯蔵・供給システム技術の開発に取り組む。

２．研究開発目標

本事業では、35MPa の中圧水素を供給可能な電気化学式水素ポンプや高圧水電解と水素吸蔵合金を活用した熱化学式水素圧縮機を組み合わせたハイブリッドシステムの構築に必要となる熱化学式水素圧縮機の要素技術の開発および昇圧システムの省エネルギー効果の評価を実施する。

このシステムを構築するためには室温で 35MPa 以下の水素圧力(20～35MPa)で水素を吸蔵し、かつ、80℃の排熱により水素放出圧力が 80MPa を超える水素吸蔵合金を開発するとともに、良好な伝熱性能を備え、かつ 80MPa に対する耐圧性を有する熱交換器構造の最適化を実施し、新規熱化学式水素圧縮機の要素技術を開発する必要がある。

そこで本事業は、（１）昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発、（２）昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討、（３）昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討の 3 つの実施項目から構成される。それぞれの実施項目の最終目標は表１に示す。

表１ 研究開発目標

実施項目	最終目標
（１）昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発	・80℃で 80MPa の放出圧力が可能で、外挿から算出される 30,000 回の吸蔵放出サイクル後に初期容量 80%以上容量を維持する水素吸蔵合金を開発する。
（２）昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討	・良好な伝熱性能を備え、80MPa の水素に対する耐圧性を有する昇圧用水素吸蔵合金容器構造を開発する。 ・昇圧容器に必要となる熱交換システムなども含めた設計検討を行い、実用化・事業化を意識した水素昇圧システムを確立する。
（３）昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討	・ルツボ材の使用可能回数を調査検討し、製造コストについて提示する。量産炉に適用可能なルツボ材、溶解プロセスを確定し、本システムに適用される水素吸蔵合金の大規模製造プロセスを確立する。

（１）昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発では、最終目標を達成するためさらに 3 項目に細分化して実施する。①-1 水素吸蔵合金の圧力レンジの最適化、①－２．低ヒステリシス化技術開発、①－３．高耐久化技術開発である。①-1 水素吸蔵合金の圧力レンジの最適化では 2020 年度は既設の 40MPa までの評価装置を活用し、30℃において 20MPa～35MPa に水素吸蔵圧力を示す水素吸蔵合金の候補材料の開発を目指す。2021 年度以降はこれら合金群の水素吸蔵特性の改良により 80℃における水素放出圧力を段階的に 80MPa まで上昇させることで、最終目標である 80℃で 80MPa の放出圧力が可能な合金を開発する。一方で、一般的な水素吸蔵合金の水素吸蔵圧力と水素放出圧力には差が表れる。この圧力差はヒステリシスと呼ばれる。図 3 に示すように、このヒステリシスの大きさは昇圧できる圧縮比に影響するため、水素吸蔵合金のヒステリシスを小さくすることも、水素昇圧システムにおいて重要である。例えば、ヒステリシ

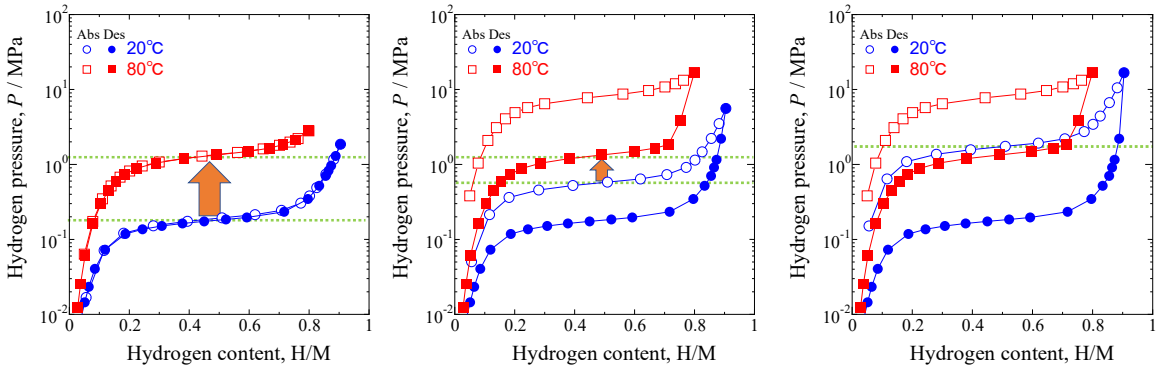


図 3 ヒステリシスの大きさが圧縮比に与える影響。ヒステリシスを低減した産総研知財合金の場合（実測）（左）、

スが大きい場合(図 3 中)、20℃での吸蔵圧力から 80℃の放出圧力までの圧力差(=昇圧分)が小さく、極端な場合(図 3 右)では、80℃の放出圧力の方が 20℃での吸蔵圧力より低く昇圧できなくなる。一方で、ヒステリシスの低減に成功した産総研知財合金では、図 3 左に示すように同じ温度差であってもより高い圧縮比で水素を昇圧することが可能である。そのため、①－２．低ヒステリシス化技術開発として、①-1 で見出された有力な候補材料に対してヒステリシス低減に効果的な元素置換を実施し、その置換元素の種類・置換量を最適化することで、段階的にヒステリシスを低減し、昇圧に必要となる温度差の低減(目標温度差 : ΔT=50℃)を目指す。①－３．高耐久化技術開発では①-1 および①－２で見出された合金に対して温度可変サイクル試験を 500 サイクル程度実施し、そのデータの外挿から 30,000 回の吸蔵放出サイクル後に初期容量 80%以上容量を維持する合金の開発を行う。

下記の年度ごとの目標をマイルストーンとして、最終目標の達成を目指す。

＜2020年度目標＞

- 既設の40MPaまでの評価装置を活用し、30℃において20MPa～35MPaに水素吸蔵圧力を示す水素吸蔵合金の候補材料を開発し、80℃における水素放出圧力をファントホッフの関係式から外挿し算出する。

＜2021年度目標＞

- 30℃において20MPa～35MPaに水素吸蔵圧力を示し、80℃において70MPa以上の水素放出圧力を示す水素吸蔵合金の候補材料を開発する。
- ヒステリシスを$\ln(P_{ab}/P_{des})$<0.2まで低減した合金を開発する。
- 100回の吸蔵放出サイクル後においても80%以上容量を維持する合金を開発する。

＜最終目標＞

- 80℃で80MPaの放出圧力が可能で、外挿から算出される30,000回の吸蔵放出サイクル後に初期容量80%以上容量を維持する水素吸蔵合金を開発する。

（２）昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討

35MPaの中圧水素を供給可能な電気化学式水素ポンプや高圧水電解と熱化学式水素圧縮機を組み合わせたハイブリッド型水素昇圧システムの構築に必要となる熱化学式水素圧縮機の関連技術開発（熱伝導解析および構造解析の手法を用いた昇圧用水素吸蔵合金の構造の最適化、昇圧容器に必要となる熱交換システムなども含めた設計、水素吸蔵合金の量産性の検討）を実施

する。

水素吸蔵合金による昇圧を効率的に達成するためには、短時間でシステム中の合金層を昇温、冷却可能な熱交換構造が必要となる。熱交換性能の向上には、可能な限り合金層の厚さを薄くすることなどが有効であるが、同時に80MPaの高圧に耐える構造にする必要がある。良好な伝熱性能を備え、かつ80MPaに対する耐圧性を有する熱交換器構造に関する技術開発は、これまでほとんど検討されていない。

80MPaを超える高圧に耐える構造として、シェルアンドチューブタイプのチューブ内部に水素吸蔵合金（MH）および、伝熱促進用のフィンを装填する水素昇圧容器を想定している。耐圧性能を備え、かつ水素昇圧特性を達成に必要となる、適切なチューブ外径、肉厚、内部の伝熱フィンの構造等について設計検討が必要になる。

水素昇圧特性を検討する際には、シミュレーション技術を活用して、設計検討を行う。水素吸蔵合金の反応は、通常、熱伝導が律速過程となり反応が進行する。そのため、水素吸蔵合金の充填層（熱交換構造）をモデル化し、非定常熱伝導解析を行なうことによって、水素吸蔵・放出特性を予測することができる。

そこで、熱伝導解析および構造解析の手法を用いて、良好な伝熱性能を備え、かつ80MPaに対する耐圧性を有する熱交換器構造の最適化について研究開発を実施する。

下記の年度ごとの目標をマイルストーンとして、最終目標の達成を目指す。

＜2020 年度目標＞

- 想定する水素昇圧能力（20Nm3/hour）を達成するために、初期試作検討として、2 時間で昇圧・再吸蔵するタンク構造の検討を行い、検討した結果、1/数十スケールの試作容器①を設計する。
- 水素昇圧システムの熱マネージメントについて検討し、昇圧システムの省エネルギー効果を定量的に示す。

＜2021 年度目標＞

- 初年度設計した容器の性能評価を行い、さらなる性能向上方策を検討する。得られた成果より、1 時間で昇圧・再吸蔵するタンク構造の検討を行い初年度と同規模の試作容器②を設計する。
- 試作容器②の性能を評価(80MPa への昇圧、昇圧速度の検証)し、20Nm3/hour の昇圧速度を検証可能な試作容器③を設計する。（試作容器③の規模は、①、②の数倍規模）
- 昇圧システムに必要となる熱交換システムなどの付帯設備を設計する。

＜最終目標＞

- 良好な伝熱性能を備え、80MPa の水素に対する耐圧性を有する昇圧用水素吸蔵合金容器構造を開発する。
- 昇圧容器に必要となる熱交換システムなども含めた設計検討を行い、実用化・事業化を意識した水素昇圧システムを確立する。

（3）昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討

水素吸蔵合金は、2次電池用の負極材料として用いられており、日本重化学工業では、1990年代より、量産規模（500kg/バッチ）での生産を継続して行っている。本研究開発で昇圧用として検討している水素吸蔵合金はTi系の水素吸蔵合金であり、これまで量産規模での生産は、ほとんど行われていない。課題としては、量産実績のある希土類とニッケルの合金系とは異なり、融点が高いこと、ルツボとの反応性が高いなどがあげられ、量産炉（高周波溶解炉）に適用可能なルツボ材について、1kg溶解炉、10kg溶解炉を用いて検討を行う。

下記の年度ごとの目標をマイルストーンとして、最終目標の達成を目指す。

＜2020 年度目標＞

- Ti 系合金の溶解に使用されるルツボ材に関する調査を行い、適したルツボ材の候補を選定する。

＜2021 年度目標＞

- 候補となるルツボ材を用いて溶解試験を行い、Ti 系合金の溶解に適したルツボ材を決定する。

＜最終目標＞

- ルツボ材の使用可能回数を調査検討し、製造コストについて提示する。量産炉に適用可能なルツボ材、溶解プロセスを確定し、本システムに適用される水素吸蔵合金の大規模製造プロセスを確立する。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発

「80℃で80MPaの放出圧力が可能で、外挿から算出される30,000回の吸蔵放出サイクル後に初期容量80%以上容量を維持する水素吸蔵合金を開発する。」を最終目標として以下の3つの視点で研究開発を実施した。①水素吸蔵合金の圧力レンジの最適化、②低ヒステリシス化技術開発、③高耐久化技術開発である。

80MPa まで水素昇圧を可能とする材料探索を行うにあたり、100MPa までジーベルツ法で評価が可能な水素吸蔵特性および水素昇圧挙動観察装置の構築を行った(図 4)。少量の水素吸蔵合金でも高精度に水素吸蔵特性および水素昇圧挙動を観察するため、配管部分の容積は可能な限り小さくした。しかしながら、従来の計算方法にて水素吸蔵量を算出したところ図 5(a)に見られるように、ブランクデータ、実試料データのどちらでも奇妙な形状の圧力組成等温

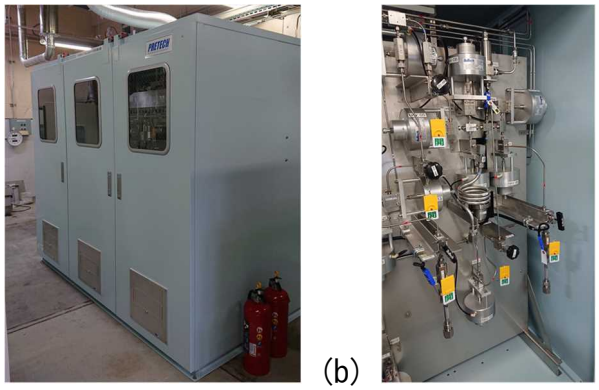


図 4 100MPa までの水素吸蔵特性評価装置；(a)全体像、(b) 評価装置部分

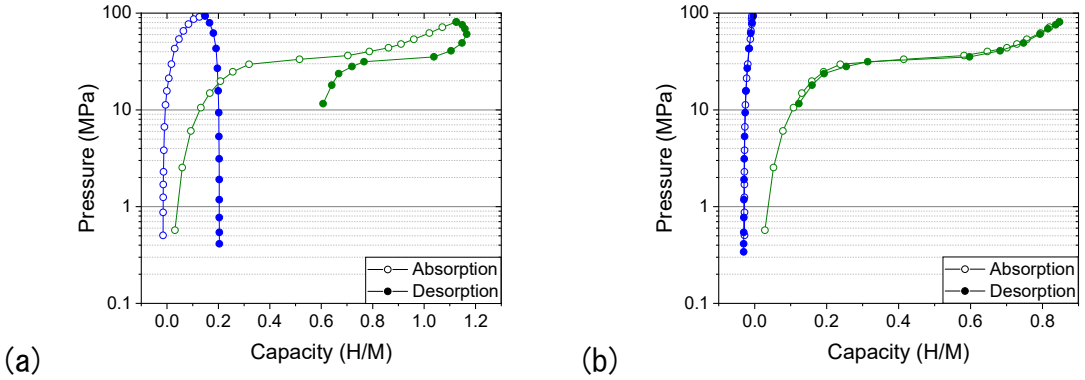


図 5 100MPa までの水素吸蔵特性評価；(a)従来法、(b)本プロジェクトで考慮した解析方法；青：ブランクデータ、緑：$Ti_{0.98}Zr_{0.02}Cr_{1.25}X_{0.75}$

線が得られた。そこで、奇妙な形状の圧力組成等温線の原因として、バルブの開閉に伴う配管空隙の体積変化および圧力変化、また水素吸蔵放出に伴う試料体積の変化を考慮したところ、図 5(b)に示すように高精度に圧力組成等温線が得られるようになった。本成果はプロジェクトの付随的なものではあるが、今後の材料評価・開発にとって非常に有益な成果であると考えている。

そこで、既設の装置および本装置を用いて「30℃において20MPa～35MPaで水素を吸蔵し、80℃で80MPaまで水素を放出する」特性を有する水素吸蔵合金の開発を行った。ここでは良好な結果が得られたTi(Cr,Mn,X)2をベースとした合金の成果について記載する。高い水素吸蔵圧力を有する$TiMn_2$とヒステリシスが小さい$TiCr_2$が全率固溶体を形成することを利用し、両合金の特徴を活かした3元系合金を作製した。$TiCr_{2-x}Mn_x$合金のX線回折パターン・SEM観察から目的組成に近い合金であることを確認した。図6に示すように、圧力組成等温線は1段の平坦なプラトーを示したが、水素吸蔵圧力は室温では$TiCr_{1.5}Mn_{0.5}$で9MPa、$TiCr_{1.25}Mn_{0.75}$で12MPaであった。一方で、Crリッチ組成であることに起因して、両合金ともに室温でのヒステリシスファクターはかなり小さく、かつ、温度の逆数に対して線形関係が得られた。そこから実際の水素放出温度（80℃）でのヒステリシスファクターを算出すると両合金ともゼロとなり、プロジェクトの目標であった0.2を満たした。このことから、$TiCr_{1.5}Mn_{0.5}$合金と$TiCr_{1.25}Mn_{0.75}$合金はヒステリシスの観点から非常に良好な材料と言える。

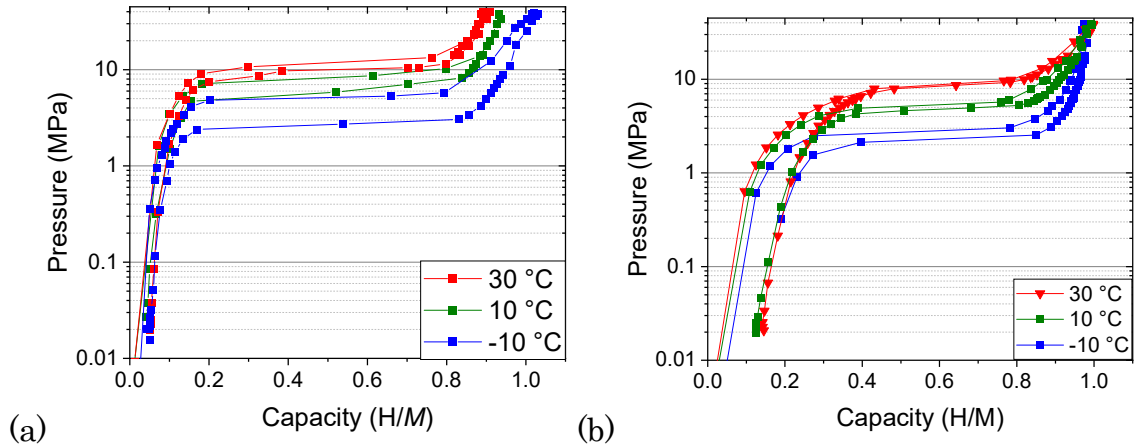


図 6 $TiCr_{2-x}Mn_x$ 合金の水素吸蔵特性；(a) $TiCr_{1.25}Mn_{0.75}$、(b)$TiCr_{1.5}Mn_{0.5}$

低温での反応ほどプラトーの幅が広く、ヒステリシスも大きくなることから、水素吸蔵特性の劣化が加速すると期待して-70℃で耐久性評価を行った。初期サイクルで水素吸蔵量の低下が見られたが、その後 300 サイクルまで水素吸蔵量の低下はほとんど確認できなかった(図 7)。$TiCr_{1.5}Mn_{0.5}$ は容量維持率が 90%と目標の 80%を上回る維持率であった。また、水素吸蔵量の容量低下は初期サイクルのみで確認されたことから、本合金では 100 サイクル程度の耐久性評価で十分で、長期耐久性評価は必要ないと言える。

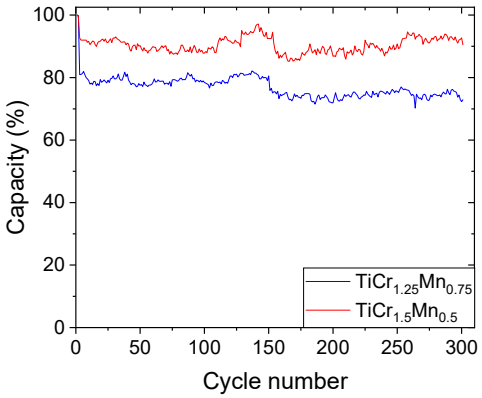


図 7 $TiCr_{2-x}Mn_x$ 合金の繰り返し耐久性結果(-70 ℃)

$TiCr_{2-x}Mn_x$ 合金は水素吸蔵・放出圧力がプロジェクト目標に対して若干低いが、ヒステリシスが小さく、プラトーの平坦性が良好で、繰り返し耐久性も良好であったことから、本合金をベースに水素吸蔵・放出圧力の高圧化に取り組んだ。ここでは、$TiCr_{1.25}Mn_{0.75}$ に対して Mn より原子半径の小さな X 原子で置換を行った。X 置換量が増加すると 30℃での水素吸蔵圧力は 29.8MPa、38.5MPa と $TiCr_{1.25}Mn_{0.75}$ の 12.35MPa と比較し大幅に増加した(図 8)。また、ファントホッフプロットから算出した 80℃での水素放出圧力も X の置換量とともに 38.4MPa、53.6MPa、61.4MPa、72.2MPa と大幅に上昇した(図 9)。ただし、水素吸蔵データと水素放出データのファントホッフプロットが 30℃と 80℃の間で交差しているため、放出圧力は実測する必要がある。そこで、100MPa まで評価可能な装置で圧力組成等温線図を測定した結果、$TiCr_{1.25}Mn_{0.15}X_{0.6}$ および $TiCr_{1.25}X_{0.75}$ の 80℃での水素放出圧力はそれぞれ 65MPa、79.5MPa であった。79.5MPa の水素放出は本プロジェクトの目標であった 80MPa をほぼ満たす結果と言える。最後に、$TiCr_{1.25}Mn_{0.15}X_{0.6}$ に対して、初期水素圧力を 41.3MPa に設定して水素昇圧試験を行った。84℃への加熱から 15 分以内で圧力が 80MPa に達し、101℃で 90.4MPa まで昇圧できた(図 10)。このように、$TiCr_{1.25}Mn_{0.15}X_{0.6}$ および $TiCr_{1.25}X_{0.75}$ は、それぞれ 84℃で 80MPa、80℃で 76MPa までの水素昇圧ができることを実験的に示した。これら温度・圧力条件は本プロジェクトの目標にかなり近い値であることからも目標達成の目途が立ったと言える。

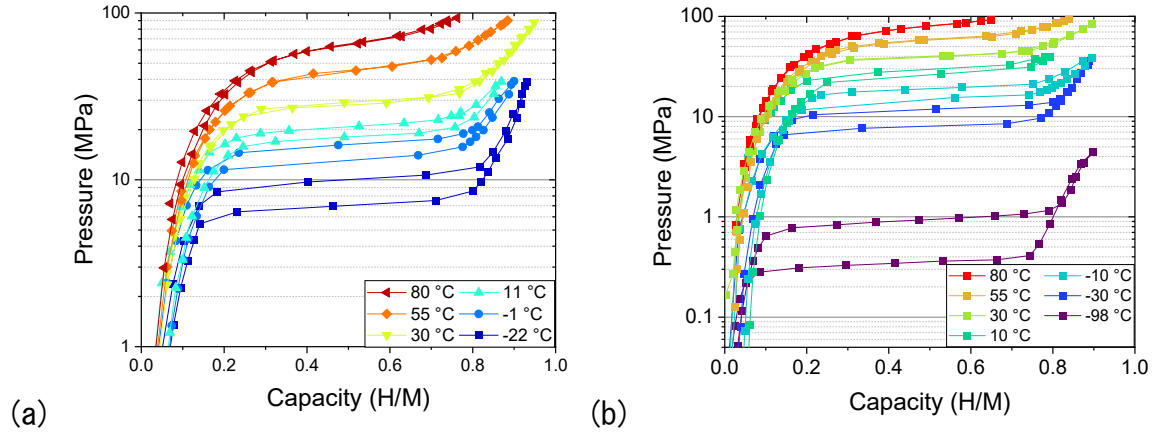


図 8 $TiCr_{1.25}Mn_{0.75-x}X_x$ 合金の水素吸蔵特性; $TiCr_{1.25}Mn_{0.15}X_{0.6}$(a)、$TiCr_{1.25}X_{0.75}$(b)

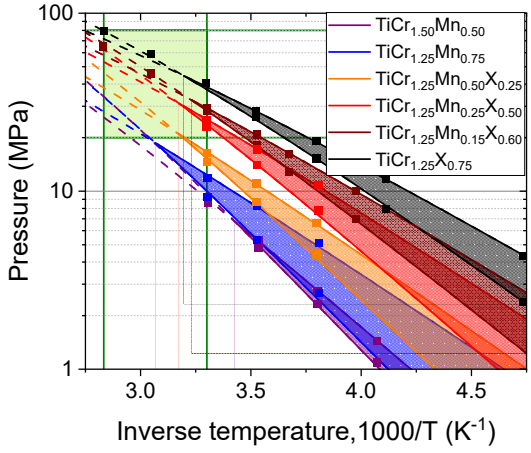


図 9 $TiCr_{1.25}Mn_{0.75-x}X_x$ 合金のファントホッフプロット

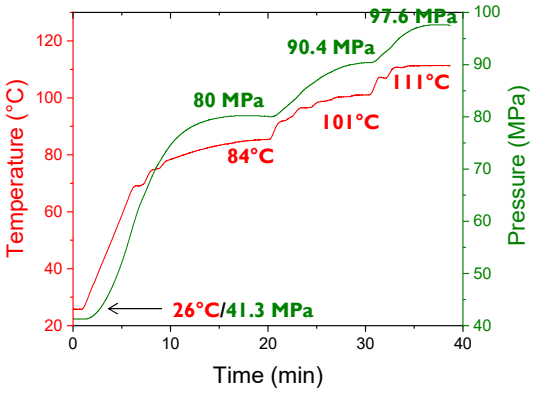


図 10 $TiCr_{1.25}Mn_{0.15}X_{0.6}$ の昇温・昇圧試験結果； 温度圧力の時間変化

（２）昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討

本事業では、高圧水電解装置や電気化学水素ポンプと組み合わせたハイブリッドシステムを想定している。まずは、これまでに検討されているこれら前段の装置規模に合わせ、水素昇圧能力として20Nm3/hourを達成するために必要となる昇圧装置の基礎検討を実施した。水素吸蔵合金による昇圧を効率的に達成するためには、短時間で昇圧容器内の合金層を昇温、冷却可能な熱交換構造が必要となる。熱交換性能の向上には、可能な限り合金層の厚さを薄くすることなどが有効であるが、同時に80MPaの高圧に耐える構造にする必要がある。そこで、良好な伝熱性能を備え、かつ80MPaに対する耐圧性を有する熱交換器構造に関して検討した。検討の結果、80MPaを超える高圧に耐える構造として、シェルアンドチューブタイプのチューブ内部に水素吸蔵合金（MH）および、伝熱促進用のフィンを装填する水素昇圧容器を想定した。

はじめに、合金充填用のチューブの外径を変化させ、80MPaの耐圧に必要となる肉厚を計算により求めた。チューブ外径を大きくすると、肉厚が厚くなり伝熱性の観点からは好ましくないため、チューブ外径としては10.5mm、17.3mm、19.05mm、21.7mmとした場合について検討した。

計算により求めた外径および肉厚、配管材の物性、水素吸蔵合金の物性を基に、定常状態での管外部表面からMH充填層中心付近までの熱抵抗、総括熱抵抗Rを求めた。

計算時に用いたパラメーターを表1に示す。水素吸蔵合金充填層の見かけの熱伝導率（合金粉内部の熱伝導、合金粉と合金粉との接触による熱伝導、合金と流体との対流による熱伝達）は、合金種による差は小さく、1～2W/(m・K)程度と報告され、見かけの熱伝導率は低く、通常は合金層の熱伝導が律速過程となり、水素吸蔵・放出が進む。

そこで、合金層の熱伝導を改良するために、アルミニウムフィンの挿入やエンジニアリンググラファイトなどの高い熱伝導率を有する材料と複合化する等の工夫が行われている。本検討では、伝熱改良を組み合わせることを想定し、熱伝導率を5W/(m・K)として試算した。その他のパラメーターについても表1に記載の値を用いて計算を行った。水素吸蔵合金の反応熱は、80℃で80MPa以上の平衡圧力を示す合金を想定して、ΔH=-16.0(kJ/mol H2)とした。

表2 熱抵抗、熱通過率の計算結果

SUS外径	10.5	17.3	19.05	21.7	mm
SUS外半径	5.25	8.65	9.525	10.85	mm
肉厚	2.6	4	4.19	4.5	mm
SUS内半径	2.65	4.65	5.335	6.35	mm
MH評価半径	0.05	0.05	0.05	0.05	mm
充填長さ L	16,794	5,453	4,142	2,924	mm
熱抵抗 Rt	0.009	0.030	0.040	0.058	K/W
熱通過率 K	109.49	33.51	25.02	17.27	W/K

求めた熱通過率を用いて、合金1kgあたりの水素放出速度に必要となる温度差ΔT（熱媒温度と合金層中心部の温度）の関係を調査した（図11）。図11に示す通り、容器外径が大きくなるほど、伝熱距離が増加するため、同じ水素流量を得るためには、必要な温度差ΔTも大きくなる。水素吸蔵合金を用いた昇圧では、合金層の温度により圧力が決まるため、合金層の温度低下が大きいと、得られる水素圧力も低下してしまう。もしくは、同じ圧力を得るためには、より高温の排熱が必要となる。

水素吸蔵合金の有効水素吸蔵量を145NL/kgとした場合、1時間で吸蔵・放出する場合2.5(NL/min.・kg)の速度で吸蔵・放出させる必要がある。この速度であれば、外径21.7mmの場合でも必要な温度差は1.7℃であり、実運用を想定すると問題ないと考えられる。より細いチューブとすることにより、速度的には有利となるが、容器重量が増加するため、チューブ外径としては、21.7mmとして設計検討する事とした。

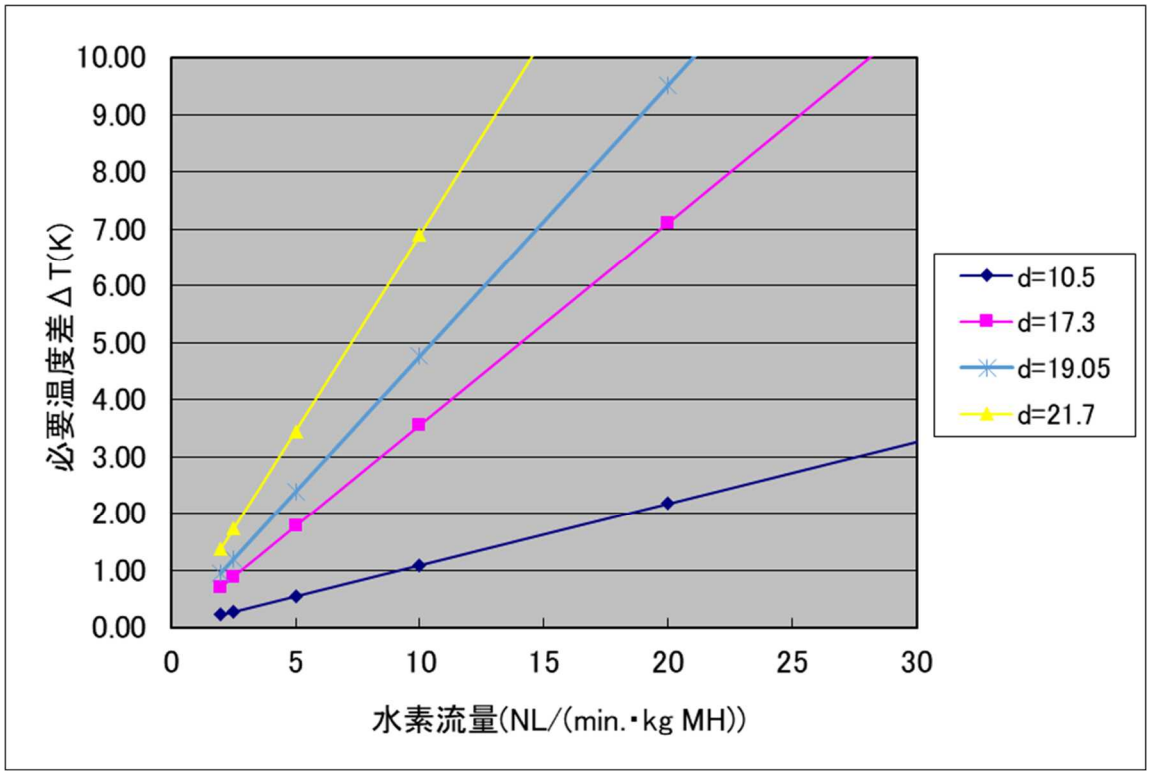


図7 容器外径と水素流量、必要となる温度差の関係

小規模の試作容器を製作し・性能評価を実施した。なお、初期の評価としては熱伝導性能を確認することを目的として、試験の実施しやすい10MPa以下の圧力にて評価を実施した。水素吸蔵

合金は、昇圧用の水素吸蔵合金とは異なるが、熱容量などが同等となる同じ系統の水素吸蔵合金（Ti系水素吸蔵合金）を採用した。

SUS チューブ内に合金を充填し、フィルター―ガスケットを用いて、合金が配管内に漏洩しないようにした。水素導入及び、初期活性化時の真空排気用のバルブを設け、本試験では 8MPa 以上で作動する圧力逃し弁を蓄圧器の手前側に設け、昇圧後の水素を蓄圧器に導き、その圧力変化より水素昇圧速度を確かめた。具体的には、初期活性化処理（真空排気処理後に、水素化を行い、脱水素）を実施した後に、30℃で水素を吸蔵させ、80℃の恒温槽に MH 容器を浸漬し、加熱する事により MH からの水素放出速度（昇圧速度）を確認した。

容器を恒温水槽に浸漬して 2 分後に圧力逃し弁が作動し、蓄圧器に水素が流れはじめる。水素流量としては、初期の流量が大きく、反応が進むにつれて水素流量が低下する。これは水素吸蔵合金の PCT 特性図より、MH に水素が十分に吸蔵された H/M＝１に近い吸蔵量の場合、水素吸蔵合金の平衡圧力が高くなるので、圧力逃し弁との作動圧との差圧をより大きく得られることから、初期の流量が大きい。一方で、水素吸蔵合金から水素が放出され、H/M が低くなると圧力差が小さくなることから、反応が進むにつれて流量が小さくなる。本試験結果より、30 分程度で水素の放出が完了し、平均の水素放出速度は 3.0(NL/min.・kg)であった。目標とする 20Nm3/hour.の達成に必要となる水素放出速度は 2.5(NL/min.・kg)であることから、21.7mm の径で要求仕様を満たせることを確認し、昇圧システムの基本設計を実施した。

昇圧時の水素吸蔵合金の加熱源としては、高圧水電解や電気化学式水素ポンプの排熱を利用することにより、昇圧に係る省エネが可能であるか検討を行った。本事業では、高圧水電解装置などの開発は実施しないが、水電解装置の知見を有する有識者と面談を行い、利用可能な排熱量（想定される排熱量として約 2,000kJ/Nm3）についてのデータを提示いただいた。そこで、1Nm^{3}の水素を 35MPa から 80MPa へ昇圧するのに必要な熱量を算出し、水電解装置の排熱で昇圧に必要となるエネルギーを賄うことができるかについて検討した。

水素吸蔵合金については、Ti系のAB2合金をベースに開発を実施している。水素吸蔵量は、合金組成により決定されるが、Ti系の水素吸蔵合金の場合、160NL/kg～200NL/kg程度(H/M=1.0)の吸蔵量を示す。水素吸蔵・放出に利用できる有効水素吸蔵量は、多くてもその8割程度であるので、128NL/kg～160NL/kg.程度となる。そこで、本検討では、有効水素吸蔵量として、その中央値である144NL/kgとして試算を行った。

容器材質としては、高圧水素下で使用できる SUS 系材料を使用することを想定した。外径 21.7mm のパイプを用いる場合、合金 1kg を充填するのに必要なパイプ長さは 2,924mm となり、容器重量は 5.62kg となった。有効水素吸蔵量を 144NL/kg とすると、1Nm3 の昇圧をするためには水素吸蔵合金量としては 6.9kg、容器重量は 38.78kg となる。合金及び SUS 系材料の比熱を 0.5kJ/kg・K とし、冷媒と熱媒との温度差ΔT=50K、水素吸蔵合金の反応熱ΔH=-16(kJ/mol H2)とすると、昇圧容器の加熱に必要となる熱量は Q1=MCΔT＝(6.9+38.78)×0.5×50＝1142kJ/Nm^3、水素吸蔵合金の反応に必要な熱量は Q2＝ΔH×mol＝16*1000/22.4=714.3kJ/Nm^{3}となる。したがって、1Nm^{3}の昇圧に必要となる熱量は Q＝Q1＋Q2＝1,863kJ/Nm^{3}となる。水電解装置より得られる排熱 2,000kJ/Nm^{3}と同等もしくは、若干小さな値となった。

実際のシステムでは、排熱を利用するための熱交換器でのロスや、放熱ロスが発生するこ

とが想定されるが、昇圧容器を複数システム組み合わせて運転を行う事を想定しており、昇圧容器間での顕熱回収の熱媒循環を行うことにより、昇圧による熱量を削減することも可能である。熱媒循環ポンプ等の補器類の駆動エネルギーは別途必要となるが、昇圧に必要となるエネルギーの大半を水電解装置の排熱のみで賄うことができることを確認した。

（3）昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討

本研究開発で昇圧用として検討しているTi系水素吸蔵合金製造を、比較的安価に、かつ量産規模で製造可能な高周波誘導溶解炉での製造可能性について検討を行った。具体的には量産炉（高周波溶解炉）に適用可能なルツボ材について、1kg溶解炉（図8）、10kg溶解炉を用いて検討を行い、量産規模(鉄換算500kg溶解炉)での製造が可能かを検討した。



図8 1kg小型高周波溶解炉の概観



図9　合金溶解時の様子

Ti系水素吸蔵合金の溶解に適したルツボ材に関し、文献による調査、ルツボメーカーへのヒアリングによる調査を行い、その候補の選定を行った。その結果、カルシアルツボが一番適している可能性が高いという結論を得た。

一方、カルシアは吸水性(水を吸い、脆くなる)があることから、ルツボ焼成時から焼成後の保管にいたるまで注意が必要であること、また、Tiは溶湯の濡れ性が大きく、溶解時にルツボへの合金の浸み込みが発生することが予想された。

そこで実際にカルシアルツボをルツボメーカーに作製してもらい、図8に示す試作用の1kg小型高周波溶解炉を用いてTi系水素吸蔵合金の溶解を行った。図9に、溶解炉の覗き窓からの合金溶解時の様子を示す。

1kg 小型高周波溶解炉に入手したカルシアルツボをセットし、坩堝内に原料を装填後に、真空排気を数回繰り返した後に、入電し加熱、溶解を行った。溶解後は、銅鋳型へ鋳込み、冷却後に取り出した。

溶解後に取り出したルツボの状況を図 10 に示す。ルツボへの Ti の浸み込みも少なく、ルツボ内部で、合金の溶解は出来ており、カルシアルツボを用いて Ti 系の水素吸蔵合金を溶解可能な事を確認できた。





(a)合金を鋳込む銅鋳型　　(b)鋳込み後の合金　　(c)カルシアルツボと合金

図10　溶解後の合金を銅鋳型へ鋳込んだ様子

1kg 小型高周波誘導溶解炉において、Ti 系水素吸蔵合金に対するカルシアルツボの適正が確認できたため、量産に向けた検討を進めた。具体的には、1kg 小型高周波誘導溶解炉使用時の溶解量(100g 程度)の 100 倍(10kg 程度)の中型高周波溶解炉を用いて溶解を行い、1kg 小型高周波誘導溶解炉と同様に、昇圧用合金を溶解できるか検証した。

図 11 は、中型高周波溶解炉においてカルシアルツボを用いて溶解した Ti 系水素吸蔵合金(TiCr1.25Mn0.15X 合金)の鋳込み後の写真である。溶解中に合金のカルシアルツボへの染み出し等も見られず、鋳型への合金の鋳込みも問題無く出来ることを確認した。



図 11　中型高周波溶解炉で溶解した合金

主成分の分析結果、および微量成分の分析結果を表 3～5 に示す。目標組成に対し、分析した結果は非常に近い値を示しており、目標組成通りの溶解を実施することができた。

また、微量・ガス成分についても、ルツボの耐火物由来の成分である Ca についても低く、合金溶湯への耐火物成分の溶け込みも見られなかった。

表 3　中型高周波溶解炉で作製した組成分析結果(主成分)

	Ti	Cr	Mn	X
目標値 (wt.%)	30.96	42.04	5.33	21.67
分析値 (wt.%)	30.35	42.30	5.41	21.95

表 4　中型高周波溶解炉で作製した組成分析結果(微量成分)

	Ca	Mg	Pb	Si	Cu	Mo	Zn
分析値（ppm）	30	90	<100	60	<10	10	60

表 5　中型高周波溶解炉で作製した組成分析結果(ガス成分)

	C	S
分析値（ppm）	65	32

昇圧用水素吸蔵合金として Ti 系水素吸蔵合金の量産に向けた検討を中型高周波溶解炉(溶解量 5kg 程度)で行った結果、カルシアルツボでの溶解が可能であることを確認でき、鋳型への鋳込み状況、合金への不純物量の少なさ、ルツボへの浸み込み状況などから、繰り返し使用できる可能性も得られ、量産炉（鉄換算 500kg 炉）で生産できる見込みを得られた。

耐火物を用いた高周波誘導溶解炉での生産の可能性を確認することができ、水冷銅ルツボを用いた溶解に対して、安価に製造できる可能性を得られた。

３．２　成果の意義

熱化学式水素昇圧システムの実現のため、システムに求められる条件を満たす熱力学安定性を示す水素吸蔵合金の開発に取り組んだ。これまでは 10MPa を超える超高圧下での水素吸蔵特性評価が困難であったが、本プロジェクトにおいて 100MPa まで評価可能なシステムおよび水素吸蔵量の高精度な解析方法を構築することに成功し、材料特性を実測できるようになった点は今後の材料開発・システム評価の観点から意義があると考えている。また、これら評価設備を使うことでほぼ目標を満たす 84℃で 80MPa まで水素昇圧が可能な水素吸蔵合金を開発することができた。今後システム運用条件下での小規模実証や法規制対応など課題は残されているが、システムの実用化につながる重要な成果である。

３．３　開発項目別残課題

（１）昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発では「30℃において 20MPa～35MPa で水素を吸蔵し、80℃で 80MPa まで水素を放出する」という目標に対して、84℃で 80MPa とほぼ目標を満たす合金の開発に成功した。一方で、耐久性試験に関して、初期劣化以降は容量の低下が見られなかったため、上記の圧力調整に注力し、100 サイクル程度で終了した。実際の運用条件の加熱・冷却を伴う条件でのサイクル試験を行い、耐久性を評価することが課題であると考えている。

小規模実証システムの製作・実証を行い、実際の運用条件での熱収支の確認を行うと共に、顕熱回収方法など運転方法の最適化も必要と考えている。

プロジェクト全体としては、本技術を実用化するためには高圧ガス保安法に合致した安全対策が必要である。一般的には定期自主検査で開放検査が求められるが、水素吸蔵合金を用いたタンクでは合金を大気にさらすことができないため、検査方法の確立が実用化に向けた課題と考えている。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

「昇圧用水素吸蔵合金の材料設計および高耐久化技術開発」では様々な AB2 型水素吸蔵合金の探索を行い、その結果「30℃において 20MPa～35MPa で水素を吸蔵し、80℃で 80MPa まで水素を放出する」という目標に近い、84℃で 80MPa まで水素昇圧が可能な水素吸蔵合金の開発に成功した。この 80MPa という超高圧の厳しい条件の熱力学特性を有する合金開発が本システムの実現にとって大きな課題の一つであったが、本研究成果からシステムの実現可能性が高まったと考えている。また、プロジェクトの開発に付随して行った 100MPa までの評価装置の開発についても新たな知見が得られるとともに評価方法を確立できたため、今後の超高圧下での材料探索にとって有益な設備となると期待している。

「昇圧用水素吸蔵合金容器構造の最適化と、水素昇圧システムの実用化・事業化に向けた検討」では、耐圧性を有し、小規模水素ステーション向けを想定し 20Nm3/hour の昇圧システムの検討を行い、机上検討であるが昇圧に必要となるエネルギーの大半を水電解装置の排熱のみで賄うことができることを確認した。課題としては小規模実証システムの製作・実証を行い、実際の運用条件での熱収支の確認を行うと共に、顕熱回収方法など運転方法の最適化も必要と考えている。

「昇圧用水素吸蔵合金の量産性検討」では、開発した AB2 型水素吸蔵合金の溶解手法を検討し、量産に用いられている高周波誘導溶解炉での溶解可能性を確認でき、水冷銅ルツボを用いた溶解に対して、安価に製造できる可能性を得られた。

事業化までのシナリオとして、最初の課題であった 80℃で 80MPa まで水素昇圧が可能な水素吸蔵合金の開発に成功した。今後はさらなる合金の高性能化を図るとともに、水素の連続昇圧・供給が可能な小規模システムを構築し運用することでシステムとしての課題抽出を行う。システムの規模の拡大を図りながら実用化を目指していく予定である。事業化のターゲットとしては大規模な水素ステーションから始めるのではなく、水素ステーション未整備地域への小規模水素ステーション向けをターゲットとし移動式水素ステーションや再生可能エネルギー由来小規模水素ステーションおよびフォークリフト用途の工場・市場等への導入を目指し、FCV 以外の用途展開を行いながらシェアの拡大に取り組んでいき、その後大規模ステーション用途へ展開していきたいと考えている。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021/09/17	日本金属学会 2021 年秋季大会	In-situ observation of the hydrogenation/dehydrogenation reactions of AB2 Laves phases compounds under ultra-high hydrogen pressure	Charbonnier Véronique, 内海伶那, 齋藤寛之, 佐藤豊人, 折茂慎一, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
2	2021/09/23	E-MRS 2021 Fall Meeting	TiMn2-based Laves phase compounds for application in ultra-high pressure part of a metal-hydride compressor	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司

3	2021/10/28	2021 KIChE Fall Meeting and International Symposium	Development of Ti-based AB2 type hydrogen storage materials for a metal hydride compressor	Charbonnier Veronique, 榎浩利, 内海伶那, 齋藤寛之, 佐藤豊人, 折茂慎一, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
4	2021/11/08	水素化物に関わる次世代学術・応用展開研究会 2021	Investigation of TiMn2-based compounds for ultra -high pressure metal-hydride compressor	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
5	2021/11/29	エネルギー技術シンポジウム 2021	Investigation of hydrogenation properties of Laves phase compounds for metal-hydride compressor application	Veronique Charbonnier, 榎浩利, 浅野耕太, Kim Hyunjeong, 榊浩司
6	2021/11/29	エネルギー技術シンポジウム 2021	水素吸蔵合金を活用した水素貯蔵・供給・利用技術の開発	浅野耕太、Charbonnier Véronique, Kim Hyunjeong, 榎浩利, 榊浩司
7	2021/12/13	Material Research Meeting 2021 (MRM2021)	Research and development of Ti based hydrogen storage compounds with a C14 Laves structure for a thermochemical metal hydride compressor in an ultra high pressure	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
8	2022/09/22	日本金属学会 2021 年秋季大会	TiCr1.25Mn0.75-xXx for ultra high-pressure metal-hydride compressors	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
9	2022/10/31	17th international symposium on Metal-Hydrogen systems 2022	Ti0.9V0.3MnNi0.8 Laves phase compound under very high hydrogen pressure	Charbonnier Véronique、内海伶那、中平夕貴、齋藤寛之、榎 浩利、Kim Hyunjeong、浅野 耕太、榊 浩司
10	2022/12/02	水素化物に関わる次世代学術・応用展開研究会 2022	水素吸蔵合金を用いた高圧水素供給・水素精製技術	榊 浩司、Charbonnier Véronique、新里 恵多、榎 浩利、Kim

				Hyunjeong、浅野 耕太
11	2022/12/02	水素化物に関わる次世代学術・応用展開研究会 2022	Van't Hoff plots and PCTs in the ultra-high-pressure range	V. Charbonnier, K. Asano, H. Kim, H. Enoki and K. Sakaki
12	2022/12/12	エネルギー技術シンポジウム 2022	排熱を利用した水素昇圧技術の研究開発	榊 浩司、Charbonnier Véronique、榎 浩利、Kim Hyunjeong、浅野 耕太
13	2022/12/12	エネルギー技術シンポジウム 2022	熱化学式水素昇圧に適した超高圧作動型水素吸蔵合金の開発	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021/10	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 46-73, 36369-36380	Tuning the hydrogenation properties of Ti1+yCr2-xMnx laves phase compounds for high pressure metal-hydride compressors	Charbonnier Véronique, 榎浩利, 浅野耕太, Kim Hyunjeong, 榊浩司
2	2022/08	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 47, 32252-32261	Improvement of hydrogenation sorption properties of Ti0.90V0.30Mn1.00Ni0.80 for ultra-high pressure metal-hydride compressor	Charbonnier Véronique、榎 浩利、浅野耕太、Kim Hyunjeong、榊 浩司
3	2022/08	Progress in Energy 4, 042005	Research and Development on Hydrogen Carrier Based Solutions for Hydrogen Compression and Storage	Martin Dornheim、榊 浩司、Charbonnier Véronique et al.
4	2023/10	Journal of Alloys and Compounds 960, 170860	How to evaluate hydrogen storage properties by Sieverts' method in the pressure range up to 100 MPa	V. Charbonnier, K. Asano, H. Kim, K. Sakaki
5	2023/11	Journal of Alloys and Compounds 965, 171348	Hydrogenation behavior of a C14 Laves phase under ultra-high hydrogen pressure	V. Charbonnier, R. Utsumi, Y. Nakahira, H.

				Enoki, K. Asano, H. Kim, T. Sato, S. Orimo, H. Saitoh, K. Sakaki

（2-(4)-⑨）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／HDV等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発」

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所，岩谷産業株式会社、株式会社タツノ，トキコシステムソリューションズ株式会社，一般社団法人水素供給利用技術協会，一般財団法人日本自動車研究所

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2020年度～2023年度終了）

・マスターメーター法による計量精度検査の信頼性向上を目的にトレーサビリィティ体系を再構築するため、新たな試験設備を整備し、運用を開始
・検査運用コストを低減を目標に、STで収集したデータを解析・考察した結果、後続検査周期を2年間から3年に延長できることを確認し、HySUTガイドライン案を完成
・福島水素充填技術研究センターを整備し、HDVに関する水素充填・計量の実証試験を日本で初めて実施してHDV用充填プロトコルの構築に必要な基礎データを取得

●背景/研究内容・目的

HDV等への大流量充填時における水素計量に関する技術開発と充填技術の開発・基準化に向けた基礎構築を目的とする。また、HDVに関する各種技術課題を検証するための大型水素ステーションを備えた福島水素充填技術研究センターを構築し、我が国が世界を先導して国際基準に資するデータを取得するとともに、国際協調を実施する。

実施項目1)マスターメーター法計量精度検査方法の高度化
実施項目2)新プロトコルに対応する水素計量技術の開発
実施項目3)HDV用の水素充填技術等に関する調査・研究
実施項目4)HDV等の新プロトコル対応に係る技術検証
実施項目5)高圧水素計量技術に関する国際協調

●研究目標

実施項目	目標
1	低圧大流量水素試験設備の整備
2	HDV充填での計量精度影響要因の妥当性評価
3	HDVの水素充填技術等の調査・仕様の確定
4	HDV対応の実証試験実施。約10分で充填完了
5	水素燃料計量用流量計の性能把握

●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 産総研（取り纏め,1,5）
  - 岩谷産業（実施項目1,2）
  - タツノ（実施項目1,2,3）
  - トキコ（実施項目1,2,3）
  - HySUT（実施項目1,4）
    - 三菱化工機（実施項目4）（分室）
  - JARI（実施項目3,4）

●これまでの実施内容／研究成果

実施項目1)マスターメーター法計量精度検査方法の高度化

マスターメーター法による計量精度検査の信頼性向上を目的にトレーサビリィティ体系を再構築するため、低圧大流量水素試験設備を整備し、計量性能確認を開始した。また、検査運用コストの低減を目標に、STで収集したデータを解析・考察した結果、器差が安定しているディスペンサーにおいては後続検査周期を2年間から3年に延長できることを確認し、これに基づくHySUTガイドライン案を完成させた。

実施項目2)新プロトコルに対応する水素計量技術の開発

HDV充填での計量精度影響要因（①高レンジアビリティ②変動充填③ヒートマスおよび圧力損失）について実施社設備や福島水素充填技術研究センターにて評価試験を実施し、各要因の妥当性を確認した。

実施項目3)HDV用の水素充填技術等に関する調査・研究

福島水素充填技術研究センターにおける設備仕様に反映させることを目的に、HDVの充填に関わるシステム・制御・ハード等の詳細ニーズや性能調査を行い、センターに設置する機器を評価、選定した。

実施項目4)HDV等の新プロトコル対応に係る技術検証

整備した福島水素充填技術研究センターで実証試験（充填・計量）を行い、基礎データを取得した。

実施項目5)高圧水素計量技術に関する国際協調

マスターメーター法計量精度検査装置を仲介器としたラウンド・ロビンテストを実施するため、各国の水素燃料計量用流量計の高圧水素性能評価試験を実施した。

●今後の課題

福島水素充填技術研究センターで、HDV対応の計量技術及び充填技術を開発・基準化するために必要な基礎データの取得を進める。また、検査運用コスト低減のための基盤データを蓄積するのと並行して、計量検査技術を高度化し国際基準をクリアしなければならない。

●実用化・事業化の見通し

・現在の1/3程度のコストでの水素計量検査運用
・HDV等に対応した充填ハードウェアおよび新プロトコルへの貢献
・開発技術の国際標準化への反映

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
1	低圧大流量水素試験設備の整備	○
2	センターでの実証試験で影響評価完	○
3	HDV用水素充填技術等の確立	○
4	センターの整備完了、性能目標達成	○
5	流量計性能評価試験実施	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	9	0

事業番号：2-(4)-⑨
研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発」

実施者：国立研究開発法人産業技術総合研究所
岩谷産業株式会社
株式会社タツノ
トキコシステムソリューションズ株式会社
一般社団法人水素供給利用技術協会
一般財団法人日本自動車研究所

１．研究開発概要

本事業では、操作性・効率性に優れたマスターメーター法による FCV 実車充填計量検査方法と検査基準及び安全基準の策定に取り組む。加えて、様々な燃料電池モビリティ、特に HDV に対応するための大流量充填計量検査方法の確立および HDV に関連した新プロトコルに関わる条件出しと諸問題に対する調査・研究を実施し、安全かつ低コスト化に向けた提案および国際標準に資するデータを提供する。さらに、HDV の普及および HDV 用ステーションの実用化を目指し、水素モビリティ全般に関わる部品評価において国際共同研究を推進可能とする実証研究拠点として「福島水素充填技術研究センター」の整備に向けた検討を進める。これらの成果は、水素ステーションでの適正な運用に向けて業界団体や工業会の国内外の規格・ガイドライン等への技術基準として提供していく。

実施者らが前事業等で開発してきた水素ディスペンサー計量精度検査技術は世界的に先行しており、本研究開発テーマの成果も含め、国際的な超高圧水素インフラ本格普及に貢献するために相互比較による国際整合性の確認、国際技術基準の開発に取り組む。

２．研究開発目標

本事業における研究開発目標を表１に示す。

表 1 研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）マスターメーター法計量精度検査方法の高度化	・水素ディスペンサー計量検査精度 2.0 %、不確かさ 0.4 %の達成 ・検査周期延長や充填条件の最適化により計量精度検査コストを現在の 1/3 程度まで削減
（2）新プロトコルに対応する水素計量技術の開発	・1:500 のワイドレンジにも対応できる流量計測の実現 ・圧力変動、ガス温度の影響評価による器差低減 ・HDV の充填に求められる性能要件を基にヒートマス、圧力損失を評価

（3）HDV 用の水素充填技術等に関する調査・研究	・福島水素充填技術研究センターで用いるコンポーネント機器の性能調査と、システムの仕様を調査検討し、センターに最適な仕様を選定する。
（4）HDV 等の新プロトコル対応に係る技術検証	・HDV 用 HRS を実用化するための HDV 用の水素計量や水素充填に関わる技術検証および国際基準調和・国際標準化活動を推進するためのデータの取得
（5）高圧水素計量技術に関する国際協調	・マスターメーター法計量精度検査装置を仲介器としたラウンド・ロビンテストを実施し、各国で運用されている水素ディスペンサーの計量精度検査と検査装置のクロスチェックを行い、その成果を国際標準化に反映

各実施項目に設定した目標について以下に述べる。

２．１　マスターメーター法計量精度検査方法の高度化

国内基準における水素ディスペンサーの計量精度（最大許容誤差[1]）は測定量の 10 %まで許容されている。2018 年に改定された国際法定計量機関勧告では、国内基準よりも高精度な計量管理が求められており、更なる計量精度検査技術の開発が必要である。本事業では、国際勧告で明記されている目標値である最大許容誤差 2.0 %、不確かさ 0.4 %の達成を目標とする。また、現在、国内の水素ステーションにおける水素ディスペンサー計量精度は重量法計量精度検査によって実施されているが、様々な燃料電池モビリティ、特に、将来の HDV 対応のためにはマスターメーター法による計量精度検査が最適で、HDV 用の容器と秤、それらを搭載する特殊車両が必要となる重量法と比べて装置コストが 1/10 程度に抑えることができ、検査周期の延長でさらに計量精度検査費用が 1/3 程度まで削減する。

２．２　新プロトコルに対応する水素計量技術の開発

HDV の充填過程においては、FCV に比べて、流量の増大、バンク切り替え等による流量の急激な変化、マスターメーター法計量精度検査装置の使用によるヒートマスや圧力損失の増加等が想定され、これらに対応した水素計量技術の開発が必要である。

２．３　HDV 用の水素充填技術等に関する調査・研究

HDV 用燃料システムへの水素充填技術に関わる基礎研究を実施する。HDV に求められる性能を明らかにするため、燃料供給要件（充填時間、流量など）、想定する HDV の要求仕様（航続距離、タンク容量、シングル・ダブルフロー充填、複数容器システムなど）、HDV 燃料供給ハードウェア（HF ノズル、レセプタクル、ホース、流量計等）などのニーズや性能（圧力損失特性、ヒートマス他、各機器固有の特性）に関する最新技術や海外動向を調査し、将来の HDV 用充填プロトコルを作成するためのシミュレーションモデルの境界条件やテーマ 4 における福島水素充填

[1] 最大許容誤差（MPE: maximum permissible errors）とは、許容される器差に対する最大値。計量検査時における合否判定基準となる。

技術研究センターにおける設備仕様に反映する。

２．４　HDV 等の新プロトコル対応に係る技術検証

HDV 用 HRS を実用化するための HDV 用の水素計量や水素充填に関わる技術検証および国際基準調和・国際標準化活動を推進するためのデータを取得することを目的とし、HDV 用に特化した水素充填設備や計量関連技術等の将来の HDV に関わる各種水素関連製品の試験評価が可能な設備等を備えた福島水素充填技術研究センターの整備を実施する。その整備のため将来の技術を見据えた試験項目や研究計画およびセンターの設備・工事の仕様、建設者や事業運営者の決定に関し、審議体制を構築し、関係ステークホルダーとの議論を行いながら整備を進める。具体的には、センターの詳細仕様決定、建設および建設後の技術検証内容の策定等のため、水素ステーション事業者、エンジニアリング会社、装置メーカ、シンクタンクメンバー、自動車会社、業界団体等から構成される「福島水素充填技術研究センター検討委員会」を設置する。また、委員会の下に「福島水素充填技術研究センター検討 WG」を設置し、詳細議論を行うことで検討の効率化を図る。なお、審議体制は検討の進捗に合せて柔軟に対応し、必要に応じ専門のタスクフォース（TF）等の設置も検討する。

また、GTR（世界統一技術基準）や ISO 等の国際基準・国際規格に資する研究開発および国際審議を推進する別事業（いわゆる GTR 事業や ISO 事業）では将来の HDV 普及を見据えた課題審議が開始されている。本事業ではそこで得られる情報も活用し、センターの詳細仕様および技術検証データの取得計画策定を推進する。将来的にはそれら別事業で推進する国際審議の場に、本センターで取得した研究データを基に HDV の実用化のための技術課題を提供し、日本の国際的イニシアティブ確保への貢献も視野に入れて事業間連携を進め、別事業「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発」で実施中の GTR や ISO などの標準化に貢献する。さらに、別事業である「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発」とも連携し、充填技術の効率的技術検証を実施する。

２．５　高圧水素計量技術に関する国際協調

我が国の水素ステーションの設置数は世界で群を抜いている。加えて、水素ディスペンサーの計量精度検査のための技術開発や実証実績においても世界を先導してきている。このような背景のもと、業界ガイドラインや国内工業規格を制定し、法定計量に関する国際勧告である OIML R139 の改定においても co-convener として貢献してきた。米国、EU、中国、韓国などの先進各国でも燃料電池モビリティの普及と水素インフラの整備が進められており、我が国がリーダーシップを発揮し国際協調を行っていくことは重要な役割である。高圧水素計量技術に関する国際協調として、国家気体流量標準にトレーサブルな基準流量計を用いて海外製高圧水素用流量計の比較試験を行い、国際整合性の評価を実施する。その後、マスターメーター法計量精度検査装置を仲介器としたラウンド・ロビンテストを実施し、各国で運用されている水素ディスペンサーの計量精度検査と検査装置のクロスチェックを行い、その成果を国際標準化に反映させる。このような国際協調により、我が国の水素計量技術の優位性が確認できれば、国内水素計量器並びに水素ディスペンサーメーカーの国際競争力強化に繋がり、関連業界の活性化に貢献できるものと考える。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）　マスターメーター法計量精度検査方法の高度化

マスターメーター法による計量精度検査の信頼性向上を目的にトレーサビリィティ体系を再構築するため、低圧大流量水素試験設備を整備し、運用を開始した。最大許容誤差の目標値であった 2.0 %については、重量法とのクロスチェックにおいて達成した。また、検査運用コストの低減を目標に、検査周期や充填試験条件を適正化するための基盤となるデータ取得を行った。また、水素ステーションで収集したデータを解析・考察した結果、器差が安定しているディスペンサーにおいては後続検査周期を 2 年間から 3 年に延長できることを確認し、これに基づく HySUT ガイドライン案を完成させた。（◯）

（２）新プロトコルに対応する水素計量技術の開発

FCV の充填過程とは異なる HDV の場合に想定される事象に対応した水素計量技術の開発に関連して、下記を実現した。

・MF、HF タイプの流量計開発を行うと共に 1:100 以上のワイドレンジ流量計測を実現した。
・福島水素充填技術研究センターにおいて NF／MF の充填模擬試験を行い圧力変動、ガス温度が計量精度に与える影響を評価した。
・ヒートマス及び圧力損失の影響評価装置により、不確かさ要因としてヒートマス、圧力変動の影響を評価した。
・大流量用流量計の開発・評価を行った。
・水による実流試験装置の高レンジ化、高性能化を目指し、改良を行った。

（◯）

（３）HDV 用の水素充填技術等に関する調査・研究

福島水素充填技術研究センターにおける設備仕様に反映させることを目的に、HDV の充填に関わる詳細ニーズや性能についての調査を行い、下記を実現した。

・各コンポーネント機器の仕様・性能を調査した。
・流体シミュレーションを行い、システム全体の充填性能を確認した。
・システムに適切な、畜ガス量、圧縮機能力、配管口径等の選定、適切な制御を検討した。

（◯）

（４）HDV 等の新プロトコル対応に係る技術検証

福島水素充填技術研究センター検討委員会・WG で設備仕様等を決定し、2022 年秋に福島水素充填技術研究センターが完成した。福島水素充填技術研究センターで実証試験（充填・計量）を行い、基礎データを取得した。（◯）

（５）高圧水素計量技術に関する国際協調

マスターメーター法計量精度検査装置を仲介器としたラウンド・ロビンテストを実施するため、各国の水素燃料計量用流量計の高圧水素性能評価試験を実施した。（◯）

３．２　成果の意義

様々な燃料電池モビリティ、特に HDV 等の新プロトコルに対応した水素燃料計量システム技術と充填技術の開発に向けた取り組みを開始した。

HDV 対応計量技術においてはマスターメーターを用いた計量方法が優れており、更なる高度化に向けて低圧大流量水素試験設備の整備に向けた仕様検討を開始した。当設備は国際規格における目標値の達成へ向けて、飛躍的に計量性能の向上が期待できる。本事業において、我が国で稼働しているすべての水素燃料システム計量精度検査装置によるデータ取得が開始され、基盤データの集積により、検査周期の延長や充填試験条件の適正化が図られた。水素ステーションで収集したデータを解析・考察した結果、器差が安定しているディスペンサーにおいては後続検査周期を 2 年間から 3 年に延長できることを確認し、ガイドラン案を完成させた。これにより、計量検査に関する年間運用費用を約 3 割削減することができた。

HDV 等に関する各種技術課題を検証するための福島水素充填技術研究センターの整備へ向けて、調査・研究とともに検討委員会・WG による仕様検討を行い、2022 年秋に福島水素充填技術研究センターが完成した。実証試験（充填・計量）を行い、基礎データを取得した。そして、低圧大流量水素試験設備や福島水素充填技術研究センターは、国際共同研究や国際比較にも活用することを想定しており、成果の国際標準への反映や国際協調の拠点となり得るものである。

３．３　開発項目別残課題

（1）マスターメーター法計量精度検査方法の高度化

国際規格における不確かさの目標値達成のため、低圧大流量試験設備によるトレーサビリィティ体系の再構築と影響要因削減をしなければならない。また、水素ディスペンサー側の計量精度影響因子の調査が不十分であるため、データ蓄積・分析により誤差要因を顕在化が急務である。圧損・熱マス・脱圧影響を減らし、マスターメーター法の高精度高信頼性化が課題である。

（2）新プロトコルに対応する水素計量技術の開発

HDV に対応するための大流量化に伴い、圧損や熱損失の増加が予測され、マルチ充填技術やワイドレンジ流量計の開発及び圧損及び熱損影響評価を実施する必要がある。これらの影響評価を HDV 模擬試験条件に反映するために実証試験設備での系統的データ取得が必要である。また、マスターメーター法に使用する計量精度検査装置の品質を確保するために基準化が必要である。

（3）HDV 用の水素充填技術等に関する調査・研究

充填プロトコルの最適化と基準化が未実施である。また、テーマ 4 で整備した福島水素充填技術研究センターにおける能力検証の確認実験が不十分であるため、引き続き検証を行う。（短時間多量の水素充填をいかに効率的に安全に行うか、制御・プロトコルの最適化、シングル／ツイン充填や、NF／MF 充填、その組み合わせ充填の確認等）

（4）HDV 等の新プロトコル対応に係る技術検証

福島水素充填技術研究センターで、HDV 対応の計量技術及び充填技術を開発・基準化するために必要な基礎データの取得を進める必要がある。

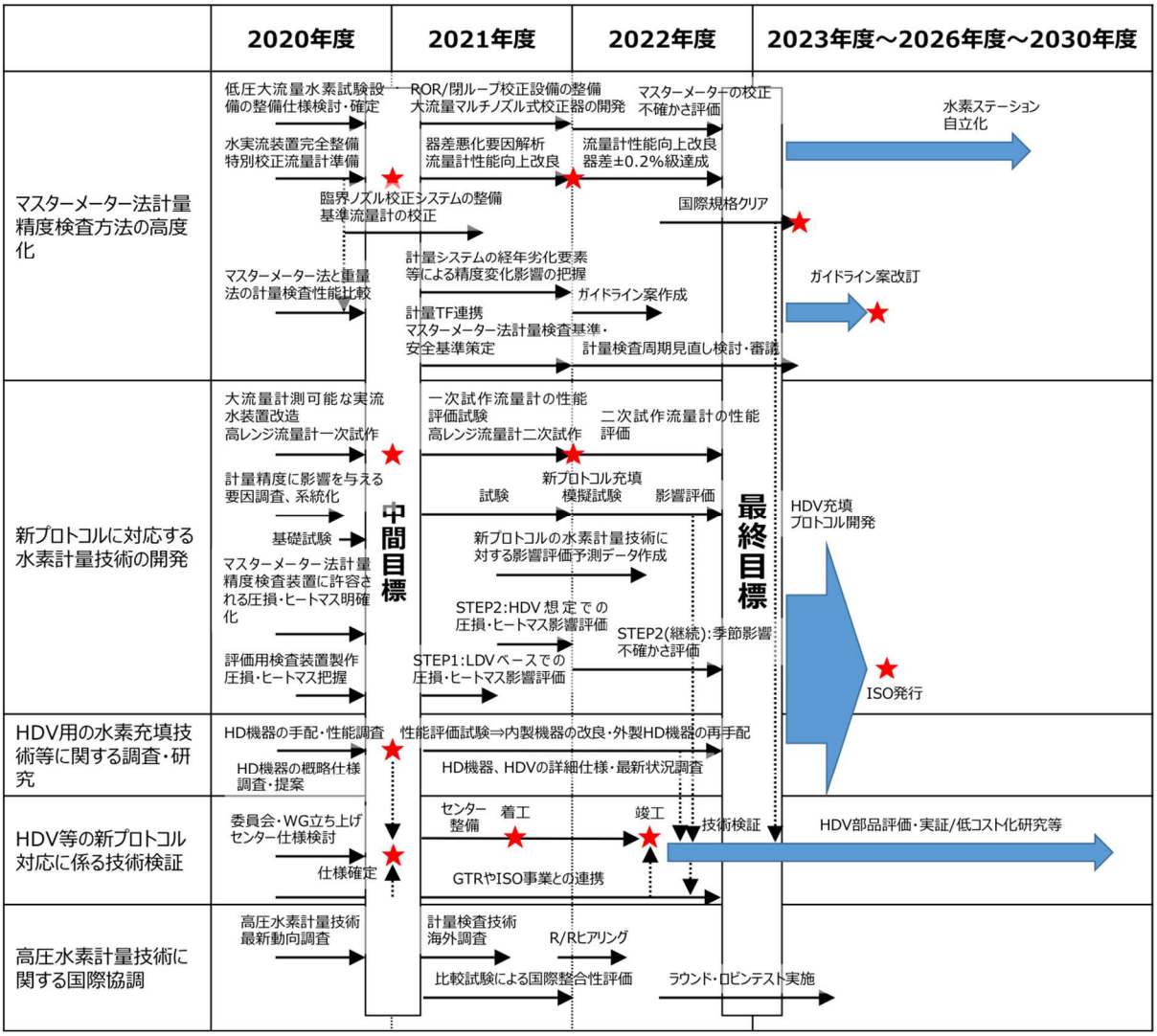
（５）高圧水素計量技術に関する国際協調

諸外国との間で法規制の相違があるため、相互承認や整合性調査を行い、仲介器の仕様も含め国際比較スキームを検討する必要がある。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本事業において開発される水素燃料計量システム技術及び充填技術は、HDV をはじめとする様々な燃料電池モビリティとインフラの普及に資するものであり、国が策定した第五次エネルギー基本計画や水素基本戦略の目標達成に貢献すると期待される。これらの技術は燃料電池モビリティユーザーに適正な水素燃料商取引を提供するとともに、水素インフラ事業者に対して運営コストの低減により 2020 年代後半に設定されている自立化を支えるものである。

事業の具体的な取組を以下に示す。



５．研究発表・特許等

1）池田哲史（HySUT），水素ステーションの構成と規制，福岡県主催 令和 3 年度人材育成セミナー水素入門コース，2021/11.

2）大沢紀和，松田花南（タツノ），Dispenser for Heavy Duty Vehicles with Twin Nozzle,

International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation, (Brussels, Belgium), 2022/09/13.

3) 森岡敏博（産総研), Hydrogen Metering for HDV in Japan, International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation, (Brussels, Belgium), 2022/09/13.
4) 大沢紀和（タツノ), 池田哲史（HySUT), HDV hydrogen refueling station in Japan, ISO WG24 Meeting, 2022/09/26.
5) 森岡敏博（産総研), Performance evaluation test of Coriolis flow meters for hydrogen metering at high pressure, FLOMEKO 2022 (Hybrid), (Chongqing, China), 2022/11/03.
6) 池田哲史（HySUT), Activities for Hydrogen Infrastructure in Japan, ISO/TC 197 Strategic Planning Meeting, 2022/12.
7) 池田哲史（HySUT), ISO/TC197 Hydrogen Technologies Update, Hydrogen & Fuel Cell Seminar 2023, 2023/02.
8) 池田哲史（HySUT), 水素ステーションの構成と規制, 福岡県主催 令和 4 年度人材育成セミナー水素入門コース, 2023/02.
9) 池田哲史（HySUT), NEDO Program for Development of Hydrogen Fueling Technology for Heavy Duty Vehicles, ISO/TC 197 WG24 Meeting / Paris, France, 2023/06.

（3-①）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／水素ステーション等機器のISO/TC197国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発」

委託先：（一社）水素供給利用技術協会(HySUT)、（一財）日本自動車研究所(JARI)

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

・ISO/TC197における国際標準化の実績としては、12件（内4件は日本提案）の規格を発行し、期間中25件（内7件は日本提案）の規格を審議改訂・開発している。
・国際連携の推進のため種々関連会議等への出席。特にCHS（Center for Hydrogen Safety）へ上位メンバーとして登録・参加した。
・次期水素品質規格改訂の根拠となる試験データが必要な成分を絞り込み、試験データによるギ酸削除、ハロゲン種の絞り込み、酸素緩和に関するデータの取得を行った。
・水素中の硫黄等に関する分析方法・検知限度・コスト等を調査した。水素品質ガイドライン改訂案の策定を2回にわたり実施した。

●背景/研究内容・目的

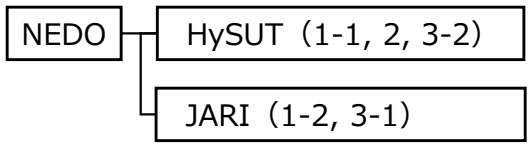
本事業では、従来から日本が世界の先導的役割を果たしてきたISO/TC197 (水素技術）が対象とする水素ステーション機器等に関する国際規格策定について、引き続き世界をリードするための取組を実施する。更に標準化活動等に係る国際連携の推進を実施し、もって、日本の産業振興・競争力強化を図ることを目的とする。

また、上記のISO国際審議を日本が主導し、国際規格策定に資するため、水素品質に関する研究開発を行う。

●研究目標

実施項目	目標
1-1	ISO/TC197（水素技術）関連国際規格の発行と日本からの新規提案の具体化
1-2	水素品質、充填インターフェース関連国際規格の発行
2	国際連携推進のため種々関連会議等への参加
3-1	ISO水素燃料仕様で規定される不純物の許容濃度適正化の妥当性を示す。
3-2	適切な管理方法を検討し、水素品質ガイドライン案を作成する。

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容／研究成果

1-1　ISO/TC197における国際標準化の実績として、12件の規格を発行し、内4件は日本が議長国（提案国）として発行した国際規格である。また、期間中25件の規格を審議改訂しており、そのうち7件は日本が議長国、提案国として開発した規格である。特にステーション用蓄圧器（WG15：日米共同議長体制）、HRS用O-ring規格の日本提案は当初想定外の顕著な成果である。

1-2　水素品質および水素充填インターフェース関連のISO国際規格について、日本の意見を十分に反映して発行と改訂を推進した。

2　HySUTはCHSにStrategic Partnerとして影響力を行使するとともに、IEA HTCP会議、NOW、DOE等との国際会議等に参加して、海外事業者との意見交換、論議を実施した。

3-1　単セル試験データに基づいて水素品質規格からギ酸を削除することで分析コストを低減、また、ハロゲン化物の絞り込みおよび酸素規格値緩和の根拠となるデータを取得した。

3-2　水素中の硫黄等に関する分析方法・検知限度・コスト等を調査するとともに、簡易分析法として検知管の適用可能性を検討した。水素品質ガイドライン改訂案の策定を2回にわたり実施した。

●今後の課題

1-1 今後新たに日本提案の案件を増やし、日本の意向が反映されるよう的確に対応する。

1-2 大型車用の改訂規格に日本提案のMFツインノズルの内容を反映させる。

2　CHS等国際連携活動の継続。

3-1 酸素規格値緩和の判断に向けた長期的な劣化の影響調査が必要。

3-2 水素品質管理の国際規格改訂に合わせたガイドライン改訂等の取組み。

国際標準化に係る後継人材の育成を進める

●実用化・事業化の見通し

国際標準化及び国際連携を推進することで、水素・FCVの国際市場での日本の関連産業振興・競争力強化が期待される。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
1-1	ISO/TC197（水素技術）関連の国際規格12件（うち4件は日本提案）の発行	○
1-2	水素品質、充填インターフェース関連国際規格5件の発行と改訂の対応	○
2	国際連携推進のため種々関連会議等への参加	○
3-1	ギ酸削除、酸素緩和データ取得	○
3-2	2件の水素品質ガイドライン案の改訂	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	3	11	1

事業番号：3-①

研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発」

実施者：（一社）水素供給利用技術協会
（一財）日本自動車研究所

１．研究開発概要

日本は過去 10 年余り、米国加州と共に、水素ステーション等機器の ISO 国際標準化（ISO：International Organization for Standardization、国際標準化機構）において先導的役割を果たしてきた。近年、ドイツを中心とする欧州や、中国などでの水素に関する国際的動向が高まる中、国際標準化の取り組みの重要性が更に増してきている。日本が引き続き水素の取組みにおいて世界をリードして日本の産業振興・競争力強化を図るため、国際的な枠組みを活用しつつ、水素技術に関する ISO/TC197（国際標準化機構水素技術専門委員会）標準化への取り組みの主導が重要である。そのためには、グローバルな動向を常に把握し、国内外の関係機関との連携を図ることが重要である。また、そのためには国内の関連する技術開発との連携を図ることが重要である。

更に、上記の ISO の国際審議を日本主導でリードし、技術提案を行うために水素品質に関する研究開発を行う。加えて、燃料電池自動車は日米欧をはじめとして世界中で普及させる取り組みが成されており、これら水素及び燃料電池自動車関連の規格の国際調和が非常に重要であることから、ISO や SAE（Society of Automotive Engineers、米国自動車技術会）、CHS（Center for Hydrogen Safety）、NOW（Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie GmbH、独国 水素・燃料電池機構）などと連携することが重要である。

このため、従来日本が世界の先導的役割を果たしてきた ISO/TC197（水素技術）が対象とする水素ステーション等機器に関する国際規格策定につき、引き続き世界をリードするための取組みを実施し、もって、日本の産業振興・競争力強化を図ること、更に、ISO 国際審議を日本が主導するため、水素品質に関する研究開発を行うことが本事業の目的である。

本研究開発では、一般社団法人水素供給利用技術協会（以下、HySUT）と一般財団法人日本自動車研究所（以下、JARI）が、下記の(1) (2)及び(3)を行う。

(1) 水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進

本研究開発開始時に策定審議中の 14 の ISO 国際規格、並びに、その後、新規提案される ISO 国際規格や既制定規格の改訂に関し、グローバル動向を踏まえつつ、日本の技術・知見を活かして制定を主導的に取り進める。

(2) 標準化活動等に係る国際連携の推進

安全に関する国際連携のため、CHS（Center for Hydrogen Safety）関連活動等に取り組む。グローバルな動向の把握のため、IEA HTCP 会議や NOW、DOE（Department of Energy, 米国エネルギー省）等との国際インフラワークショップ会議等に参加して、海外事業者との意見交換、論議を行う。

(3) ISO 水素品質国際規格のための研究開発

燃料電池に影響を及ぼすハロゲン化物等水素中に含まれる恐れがある不純物の成分を特定し、ISO 水素燃料仕様（ISO14687）で規定されているハロゲン化物をはじめとした不純物の許容濃度の妥当性を

示すことで水素品質の管理対象物質の絞り込みと許容濃度の適正化を行う。

併せて、ハロゲン、硫黄、微粒子などの適切な品質管理方法を机上検討し、水素品質ガイドライン案の改訂を順次行う。

図１に本事業の研究体制を示す。

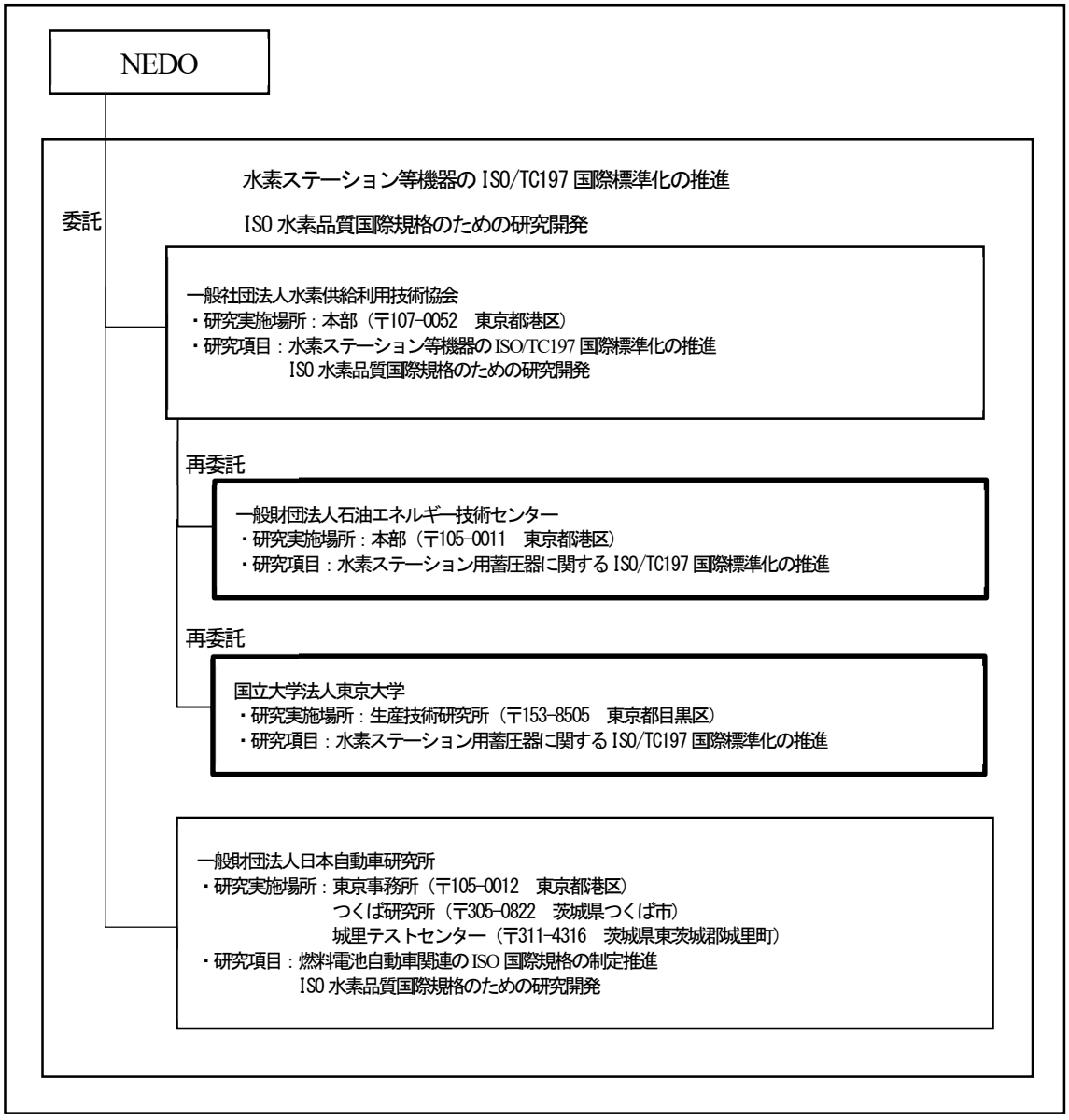


図１　本事業の研究体制

２．研究開発目標

表１　研究開発目標

実施項目	最終目標
１　水素ステーション等機器の ISO/TC197 国際標準化の推進	
1-1　ISO 等国際規格の主導的な制定の取組みと、ISO 等国際標準と国内研究開発等	策定審議中の ISO 国際規格、並びに、今後新規提案される ISO 国際規格や既制定規格の改訂に関し、日本案を策

との連携強化	定して、グローバル動向を踏まえつつ、制定を主導的に取り進める。
1-2 燃料電池自動車関連の ISO 国際規格の制定推進	水素品質、インターフェース関連国際規格改訂に関し日本案を策定して、制定を主導的に取り進める。
2 標準化活動等に係る国際連携の推進	国際連携の推進のため種々関連会議等への参加。CHS 等国際連携活動の継続
3 ISO 水素品質国際規格のための研究開発	
3-1 水素品質管理方法の適正化のための不純物影響調査	ISO 水素燃料仕様改訂に必要なデータを見極め、海外と連携しながら検討結果を取りまとめる
3-2 水素品質の管理方法適正化による運営費コストダウンの開発	水素品質管理の国際規格改訂に合わせたガイドライン改訂等の取組み

設定した目標の意義・理由、妥当性

- ✓ 日本は過去 10 年余り、水素ステーション等機器の ISO 国際標準化において先導的役割を果たしてきた。
- ✓ 近年、米国、欧州や、中国などでの水素に関する国際的動向が注目される中、国際標準化の取り組みの重要性が更に増してきている。
- ✓ 日本が引き続き水素の取組みにおいて世界をリードして日本の産業振興・競争力強化を図るため、国際的な枠組みを活用しつつ、水素技術に関する ISO/TC197 における国際標準化への取り組みの重要性が増している。
- ✓ そのためには、グローバルな動向を常に把握し、国内外の関係機関との連携を図ること、また、そのためには国内の関連する技術開発との連携を図ることが重要である。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（1）ISO 等国際規格の主導的な制定の取組みと、ISO 等国際標準と国内研究開発等との連携強化

①　概要

一般社団法人水素供給利用技術協会（HySUT）は ISO/TC197 の国内審議団体として一般財団法人日本自動車研究所（JARI）の協力を得て、水素ステーション用機器等水素関連技術に関する国際標準化を進める ISO/TC197 の動向調査、国際会議への有識者の派遣、関係団体との連携等を行うとともに国内委員会活動を充実させ日本が主導的な立場で水素関連技術の国際標準化を推進できるよう活動した。

図 2 に TC197 の対象範囲を俯瞰した図を示す。この図が示す通り、水素ステーション、FCV に関係する広範な標準化活動が進められていることが分かる。

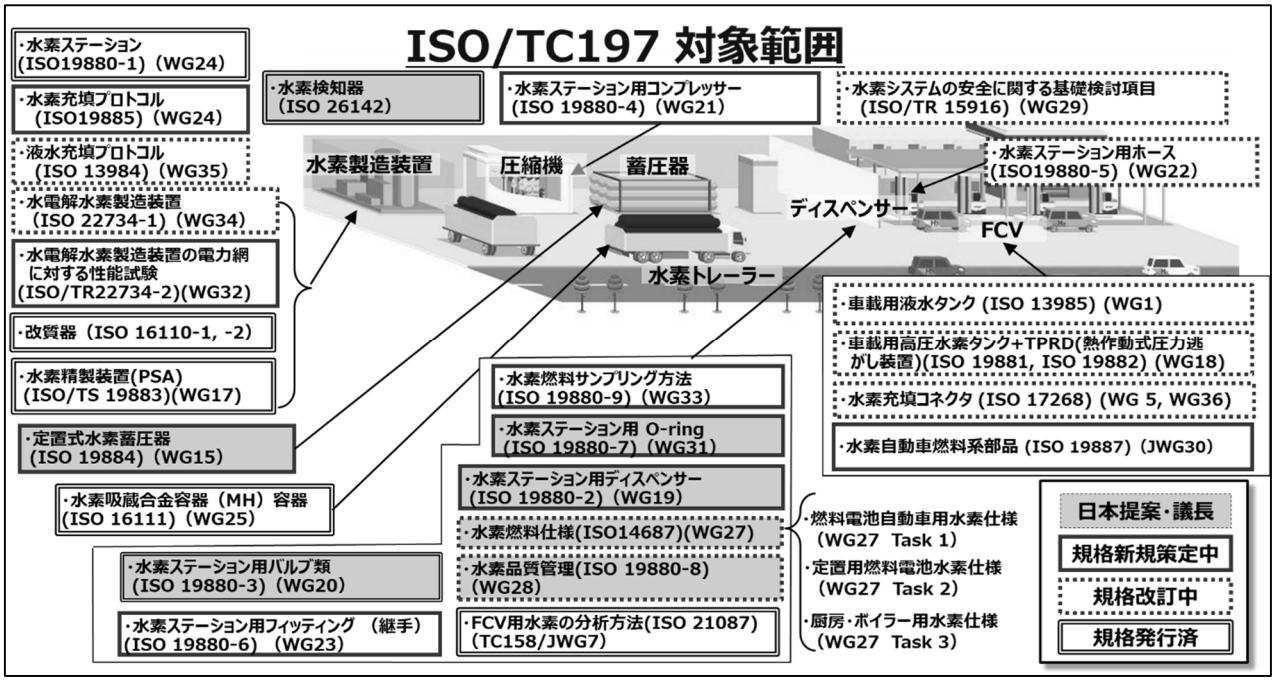


図２　ISO/TC197 国際標準化に係る対象範囲

また、図３は ISO/TC197 の活動に対応する国内体制を示している。TC197 の下で活動する各 WG に対して、各々国内 WG 委員会を設置して、対応を進めている。これらの WG の中で、WG5、WG18、WG27、WG28 は、その技術内容が FCV と密接に関係することから、JARI がその標準化審議を実施する体制を取っている。

（一社）水素供給利用技術協会

ISO/TC197水素技術標準化委員会

ISO/TC197WG国内委員会

WG番号	規格名	ISO番号	議長（コンビナー）	標準化対応
WG1	車載用液水タンク	13985	ドイツ	JARI（別事業）
WG5	水素充填コネクタ：120g/s以下･120g/s以上	17268-1, -2	カナダ	JARI
WG15	定置式水素蓄圧器	19884	米国＋日本	HySUT
WG17	水素精製装置（PSA）	TS19883	中国	HySUT
WG18	車載用高圧水素タンク・TPRD (熱作動式圧力逃し装置)	19881・19882	カナダ	JARI（別事業）
WG19	水素ステーション用 ディスペンサー（充填機）	19880-2	日本	HySUT
WG20	水素ステーション用 バルブ類	19880-3	日本	HySUT
WG21	水素ステーション用 コンプレッサー	19880-4	米国	HySUT
WG22	水素ステーション用 ホース	19880-5	米国	HySUT
WG23	水素ステーション用 フィッティング（継手）	19880-6	米国	HySUT
WG24-1	水素ステーション	19880-1	米国＋フランス	HySUT
WG24-2	水素充填プロトコル	19885	米国	JARI
WG25	水素吸蔵合金（MH）容器	16111	フランス	HySUT
WG26	水電解装置	22734	米国	HySUT
WG27	水素燃料仕様（ISO 14687：2019の改定）	14687	日本	JARI
WG28	水素品質管理	19880-8	日本	JARI
WG29	水素システムの安全に関する基礎検討項目	TR 15916	米国	HySUT
JWG30	水素自動車燃料系部品	19887	米国	JARI（別事業）
WG31	水素ステーション用 Oリング	19880-7	日本	HySUT
WG32	水電解水素製造装置-電力網に対する性能試験法	TR22734-2	ドイツ	HySUT
WG33	水素燃料サンプリング方法	19880-9	ノルウェー＋英国	HySUT
WG34	水電解水素製造装置（ISO 22734:2019の改訂）	22734-1	英国	HySUT
WG35	液水充填プロトコル	13984	ドイツ	JARI
WG36	水素充填コネクタ（Cryo-compressed Hydrogen）	17268-3	ドイツ	JARI

図３　ISO/TC197 国内活動体制

本研究開発期間中ISO/TC197における国際標準化の実績としては、12件の規格を発行した。内4件は日本が議長国（提案国）として発行した国際規格である。また、当該期間中25件の規格を審議改訂しており、そのうち7件は日本が議長国、提案国として開発した規格である。以下に個々の活動の内容について記述する。

② 水素技術標準化委員会（2019年の委員会にて「水素エネルギー技術標準化委員会」より改称）

水素技術標準化委員会はISO/TC197の国際作業部会に対応する国内委員会を統括する委員会であり、下記の内容にて開催した。各年度のTC197総会の対応、報告、各WG国内委員会の報告と確認を実施し、TC197国内審議団体としての機能を積極的に有効に推進した。

a 2018年11月
各WGの動向と今後の対応、および2018年12月開催のISO/TC197の第27回年次総会への対応の審議、確認。

b 2018年2月
各WGの動向およびISO/TC197第27回年次総会の結果に基づく今後の方針の審議、確認。

c 2019年11月
各WG国内委員会の動向と今後の対応、および2019年12月開催のISO/TC197第28回年次総会への対応の審議、確認。

d 2020年2月
各WG国内委員会の動向およびISO/TC197第28回年次総会の結果に基づく今後の方針の審議、確認。

e 2020年11月
各WG国内委員会の動向と今後の対応、および2020年12月開催のISO/TC197第29回年次総会への対応の審議、確認。

f 2021年2月
各WG国内委員会の動向およびISO/TC197第29回年次総会の結果に基づく今後の方針の審議、確認。

g 2021年11月
各WG国内委員会の動向と今後の対応、および2021年12月開催のISO/TC197第30回年次総会への対応の審議、確認。

h 2022年2月
各WG国内委員会の動向およびISO/TC197第30回年次総会の結果に基づく今後の方針の審議、確認。

i 2022年11月
各WG国内委員会の動向と今後の対応、および2022年12月開催のISO/TC197第31回年次総会への対応の審議、確認。

j 2023年2月
各WG国内委員会の動向およびISO/TC197第31回年次総会の結果に基づく今後の方針の審議、確認。

以上のように、各年度のTC197総会の対応、報告、各WG国内委員会の報告と確認を実施し、TC197国内審議団体としての機能を積極的に有効に推進した。

③ 規格開発の状況 1（当プロジェクト期間で発行した規格）

2018年度

a 水素ステーション用バルブ類規格（ISO19880-3）（議長国：日本）
- 2014年に日本が新規規格開発を提案しコンビナーとして国際作業部会を取りまとめ規格開発を主導してきたもの。
- 2018年6月ISO国際規格（ISO19880-3）発行。
- ISO/TC197で開発中の水素ステーション関連規格の内最初の規格発行。
- 国内委員会2回開催。

b 水素吸蔵合金（MH）容器規格（ISO16111）
- 2018年8月ISO国際規格（ISO16111）発行。
- 国内委員会2回開催。

c 車載用高圧水素タンク（ISO19881）
- 2018年10月ISO国際規格（ISO19881）発行。
- 国内委員会開催なし。（メール審議対応）

d 同熱作動式圧力逃し装置（ISO19882）
- 2018年11月ISO国際規格（ISO19882）発行。
- 国内委員会開催なし。（メール審議対応）

2019年度

e FCV用水素の分析方法規格（ISO21087）
- 2019年6月ISO国際規格（ISO21087：2019）発行。
- ISO/TC158と共同で開発し、TC158から規格発行。
- 国内委員会1回開催。

f 水電解装置規格（ISO22734）
- 2019年9月ISO国際規格（ISO22734：2019）発行。
- 国内委員会1回開催（メール審議）。

g 水素品質管理（ISO19880-8）（議長国：日本）
- 2019年10月ISO国際規格（ISO19880-8：2019）発行。
- 国内委員会5回開催。

h 水素ステーション用ホース（ISO19880-5）
- 2019年11月ISO国際規格（ISO19880-5：2019）発行。
- 国内委員会1回開催（メール審議）。

i 水素燃料仕様（ISO14687）（議長国：日本）
- 2019年11月ISO国際規格（ISO14687：2019）発行。
- 国内委員会5回開催。

j 水素充填コネクタ（ISO17268）
- 2020年2月ISO国際規格（ISO17268：2020）発行。

- 国内委員会5回開催（内1回メール審議）。

k　水素ステーション（ISO19880-1）

- 2020年3月ISO国際規格（ISO19880-1：2020）発行。
- 国内委員会1回開催（メール審議）。

2021年度

l　水素品質管理（ISO19880-8 Amd 1）（議長国：日本）

- 2021年8月、ISO国際規格（ISO 19880-8：2019）に対する追補（Amendment：ISO 19880-8 Amd 1: 2021）発行
- 国内委員会6回開催。

④　規格開発の状況 2（当研究開発期間にて開発中の規格）

当研究開発において、TC197が直接管理する国際規格としては、22件のISO国際規格の開発を17つの国内委員会が担当して進めた。HySUTが開発担当した規格が17件、JARIが開発を担当した規格が5件。以下22件の規格開発が進行中。

a.　水素充填コネクタ（Heavy Duty用含む）

- ISO/TC197/WG5（コンビナー：カナダ）。日本提案の氷結及びAbuse試験が採用された規格（ISO17268）の次期改訂に、新たにHeavy Dutyを規定する為準備中。

b.　水素ステーション用蓄圧器規格（ISO19884-1, ISO/TR 19884-2, -3）（議長国：日本・米国）

- 先のフランスの議長の下でのFDIS投票において、そのままの規格案では危険との判断から、同様に反対する国々と協力し、2019年に否決した。
- 一旦プロジェクトとしてはキャンセルになったが、当該規格の必要性を謳い、米国との共同議長体制で、改めて新規提案を行い、2020年度に承認された。
- 日本からも積極的なアプローチで得られた成果であり、今後、共同議長国として責務を果たし、国際合意の取れた規格の策定が必須となる。
- JPEC及び東京大学が再委託先として参加。規格策定、関連技術情報の調査などについて積極的に貢献した。それらの成果により、新たに2022年に関連する技術情報の掲載のため2件のTRを日本より提案。原案策定した。

c.　車載用高圧水素タンクおよび熱作動式圧力逃し装置（GTR13との整合）

- 2018年10月ISO国際規格（ISO19881）発行。
- ISO/TC197/WG18（コンビナー：カナダ）。GTR Phase2との整合取りを中心に各国からの指摘事項を反映して改訂作業中。

d.　水素ステーション用ディスペンサー規格（ISO19880-2）（議長国：日本）

- 2013年に日本の新規規格開発提案がされ、日本がコンビナーとして国際作業部会を取りまとめ規格開発を主導。
- 水素ステーションの規格がまとまったのを受け規格案調整を再開。
- 関連する他規格との整合を期して調整中。

e.　水素ステーション用バルブ類規格（ISO19880-3）（議長国：日本）

- 2014年に日本が新規規格開発を提案しコンビナーとして国際作業部会を取りまとめ規格開発を主導してきたもの。
- 2018年6月ISO国際規格（ISO19880-3）発行。

- ISO/TC197 で開発中の水素ステーション関連規格の内最初の規格発行。

f. 水素ステーション用コンプレッサー規格（ISO19880-4）
- 規格体系の中で、水素特有の要件で規格を再構成中。

g. 水素ステーション用ホース（ISO19880-5）
- ISO19880-5:2019 に盛り込めなかった技術的課題の追加。
- プロジェクトリーダーに日本のエキスパートを起用として。改訂作業の迅速化を進める。

h. 水素ステーション用フィッティング（継手）規格（ISO19880-6）
- 2024 年の規格発行を目指す。

i. 水素充填プロトコル規格（ISO19885-1, -2, -3）
- 2020/3 月に発行された ISO 19880-1（水素ステーション規格）の中から充填プロトコルに特化した規格として、2020 年米国より新規提案された。
- 一般要件、通信、HDV 用プロトコルの 3 部に分けて開発中。
- ISO19885-1（一般要件）は、車両以外に船舶、鉄道も含む範囲で、充填概念を規定する。2024/2 月の規格発行を目指す。
- ISO 19885-2（充填通信制御）は、TS 規格として 2024/8 月発行を目指す。
- ISO 19885-3（HDV 用）は、SAE J2601-5 と連携し推進中。5 つのサブグループ別に課題の議論を行い、2024/8 月規格発行を目指す。

j. 水素燃料燃料仕様（ISO14687）（議長国：日本）
- WG27 での審議再開予定。ISO14687 の改訂に着手。
- FCV 用水素品質規格（Grade D）について、ギ酸を品質項目から外すなど、日本の本事業のデータが分析費用削減等に結び付く改訂に寄与した。
- その他の Grade についても今後の市場形成を見据えて開催作業を実施。内燃機関用の新しい Grade F も設定した。
- 2024 年に発行を目指す。

k. 水素品質管理（ISO19880-8）（議長国：日本）
- 水素品質規格 ISO14687 の改訂作業と強調して品質管理規格 ISO19880-8 も改訂作業に着手。欧州規格の改訂とも整合しながら、ISO14687 との同時発行を目指す。

l. 水素システムの安全に関する基礎検討項目（ISO/TR 15916）
- TR（Technical Report）としての取りまとめ後、ISO の書式のルールが変わったことから、そのままの形で TR とすることが不可となった。
- TR のまま文言を修正して発行を目指すか、TS（Technical Specification）に変更する WG 内及び TC で検討中。

m. 水素ステーション用 O リング規格（ISO19880-7）（議長国：日本）
- NEDO 事業で得られた成果の一部を軸に日本から 2020 年に新規提案・承認された。
- 水素特有の要件について規定する。
- CD コメント審議を実施し、2024 年の発行を目指す。

n. 水電解水素製造装置 – 電力網に対する性能試験法（ISO/TR 22734-2）
- 欧州の水素関連事業で得られた成果の一部を軸に新規提案・承認された。今後新たに設置された TC 197/SC 1 へ切り替えられま予定である。

o. 水素燃料サンプリング（ISO19880-9）

- 主にFCV用ステーションからのサンプリング方法を安全も含めて規定。
- 関連技術である。ISO14687、ISO198808と町道歩調を取って審議を進める。
- 2024年の発行を目指す。

p. 水電解水素製造装置（ISO/TR 22734-1）

- 2019に発行されたISO22734の改訂作業を開始。
- 変動電源に対する電解水素製造装置の安全性を中心とした規格策定。（英国と韓国が議長）

q. 液水充填プロトコル（ISO13984）

- 1999年に発行されたISO13984の改訂作業を開始。
- 2025年末の発行を目指す。

⑤ TC197/SC 1（Sub-Committee）の発足

英文名：Hydrogen at scale and horizontal energy systems

日本名：水素の大規模利用とエネルギーシステムへの水平展開

Scope：水素の大規模利用とエネルギーシステムへの水平展開に関連する試験、認証、持続可能性と社会的位置づけの標準化及び他の標準化団体、関係機関との調整

【概要】

- 設立：2022年
- 幹事国：カナダ　　議長国：カナダ（A. Tchouvelev）
- 国内審議団体：HySUT（一般社団法人水素供給利用技術協会）
- ISO/TC197/SC1加盟国（2023年3月）
  - Pメンバー（22ヶ国）：アルゼンチン、オーストラリア、オーストリア、ブラジル、カナダ、中国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、イタリア、日本、韓国、オランダ、ノルウェー、ロシア、スペイン、スウェーデン、スイス、ウクライナ、イギリス、アメリカ
  - Oメンバー（1ヶ国）：ベルギー

⑥ TC197/SC 1の規格開発の状況

a. 水素製造時の温室効果ガス発生の算出方法（ISO/TS 19870）

- SC1の最初のWG 1として2022年12月に発足。カーボンニュートラルの実現に向けた世界の要請に応え、IPHEでの活動の成果を基に、国際標準化を目指す。
- 日本も開始当初から積極的に審議に参加する体制を取っている。

⑦ 規格開発の状況のまとめ

以上の項目について、的確に対応し、特にWG15及びO-ringを含めた国際規格については、日本が議長国を獲得し、当初想定以上の成果を得た。ISO/TC197（水素技術）関連の国際標準化活動を積極的に実施する中で、特に日本を議長国とする新規提案が上記のように2件承認されたことは、今後の当該分野の日本の立場を優位にする上で意義が大きい。

その他の標準化項目においても、日本が議長国である案件は当然のことながら、その他の規格についても日本のポジションを背景に、積極的に審議に参加し、その貢献度は高い。（〇）

（2）標準化活動等に係る国際連携の推進（HySUT）

ISO/TC197 関連国際標準化の円滑な活動に資するため、以下の活動を実施した。安全に関する国際連携のため、CHS（Center for Hydrogen Safety）関連活動等に参加した。グローバルな動向の把握のため、IEA HTCP 会議や NOW、DOE（Department of Energy, 米国エネルギー省）等との国際インフラワークショップ会議等に参加して、海外事業者との意見交換、論議を行った。これらの活動は、水素技術の分野の国際標準化に対するプレゼンスを高め、2021 年より日本が ISO/TC197 議長国となったことにつながった。

- IEA 水素実施協定の下、Task 38、Task 37、その後継の Task 43 会議に日本の専門家を派遣し、議論を進めた。
- グローバルな関連技術動向の把握のため、国際インフラワークショップやDOE、NOW、H2 Mobility 等との国際連携を図った。
- 安全に関する国際連携のため、2019 年度より HySUT は CHS（Center for Hydrogen Safety）にメンバーとして参加し、2019 年 10 月に CHS として開催する初の国際会議（サクラメント）において日本の状況を報告した。また、2020 年 7 月より、Strategic Partner としてメンバー資格を上げ、より影響力を行使できる体制を築き、国際会議の準備委員を務めるなど CHS の活動に貢献した。

上記のように国際連携に必要な活動を積極的に実施する中で、日本の当該分野でのプレゼンスを高め、今後の国際協調に必要なプラットフォームへの参画を容易とする基盤を醸成した。（○）

（3）ISO 水素品質国際規格のための研究開発

①水素品質管理方法の適正化のための不純物影響調査

燃料電池自動車（FCV）に供給するための水素品質規格は、2012年に普及初期のFCVを水素品質に由来する問題から守るようISO 14687-2として発行された。その後、欧州でISO 14687-2に適合した水素品質保証が困難との考えから、品質規格と、品質管理・保証は分離して考えることとなった。これを受け、水素の普及拡大期に向けた規格として一部成分の許容濃度を緩和したISO 14687（自動車用途はGrade D）および、水素品質管理を定めたISO 19880-8が2019年に発行された。

このように水素品質関連規格が制定されてきた一方で、ISO 14687 は更なる改訂に向けて検討が必要との国際共通認識が得られている。これは水素品質規格で依然として多くの成分を規定しており、水素および FCV の大量普及期に向けては、それぞれの成分に対する水素品質管理の負担をさらに減らす必要があるためである。2019 年に行われた ISO/TC 197/WG 27 会議において、次期規格緩和に向けた候補を議論した。具体的には、日本のインフラからは①水の規格値の除去（水素品質管理での規定）、②CO は 0.2 ppm を維持、③硫黄はデータに基づき緩和も含めた議論を要望、④ハロゲンの成分絞り込み等を提案した。欧州のインフラからは、①炭化水素、硫黄化合物およびハロゲン化物で"Total"を避けること、②O_2の緩和、③ギ酸の緩和などの要望が挙がった。日本のインフラ事業者、海外のインフラ事業者共に、対象成分の絞り込みと、一部成分の許容濃度緩和をすることが水素品質管理の負担低減になりうるという意見で一致した。日本の自動車会社からは燃費の低下に直結する理由から Hydrogen fuel index 99.97%を維持することなどが示された。

このような議論を受け、JARI において成分の絞り込みによる分析コストへのメリットを試算した。ギ酸に関する規定の削除、ハロゲン化物の Cl のみへの絞り込みができれば、約 2 割弱の分析コスト低減が見通せるという試算結果を得た。特にギ酸の項目削除は、分析自体が不要になることから、コスト削減への影響が大き

いことが見込まれると判断した。これに加えて、分析技術に関する障壁が小さくなることで新規参入・裾野拡大に貢献することができると考えられる。加えて、酸素については今後普及が想定される水電解由来の水素に不純物として含まれることから、規格値緩和により水素製造コスト削減につながる試算例もある。

そこで、図 4 に示す水素品質規格の緩和検討ロジックに基づき、ギ酸について規格から除外する可能性を判断するために必要なデータを取得した。さらに、欧米など海外研究機関と連携しながら、水素品質規格改訂に向けてハロゲン化物絞り込みのためのデータを補完した。加えて、水電解由来水素中に含まれる可能性が高い酸素についても、規格値緩和に向けた判断のため燃料電池性能に与える短期的な影響を評価した。得られた結果は燃料標準化 WG において審議し、水素品質規格改訂に関する最終判断を行ったうえで、ISO 14687 改訂議論に反映させた。

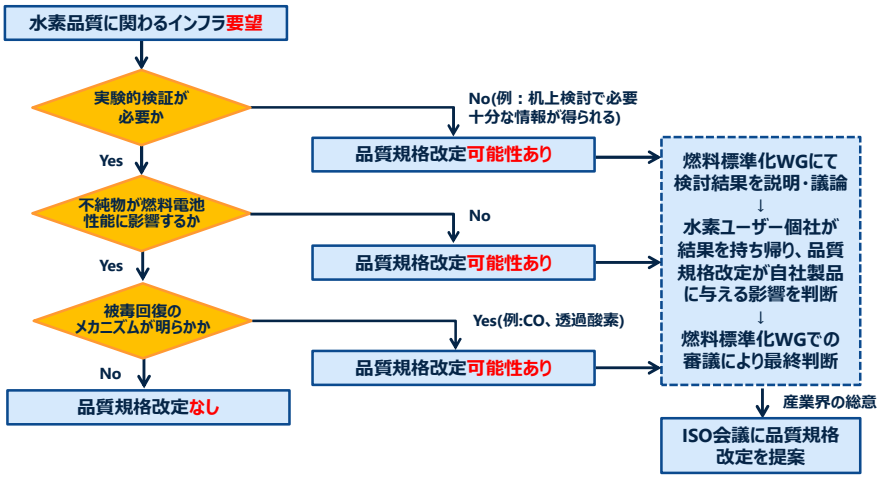


図 4　本事業で検討した水素品質規格緩和検討ロジック

ギ酸の緩和可否に向けた実験的な検証を行った結果の一例を図 5 に示す。現規格におけるギ酸の許容濃度は 0.2 ppm であるが、それより濃度が大幅に高い 15 ppm 程度でも電圧が数 mV 低下するのみであることが分かった。濃度が高いほど電圧が低下するが、濃度に対する感度は図 6 に示すように、過去に評価した CO、HCHO などの不純物に対して小さいことも明らかとなった。

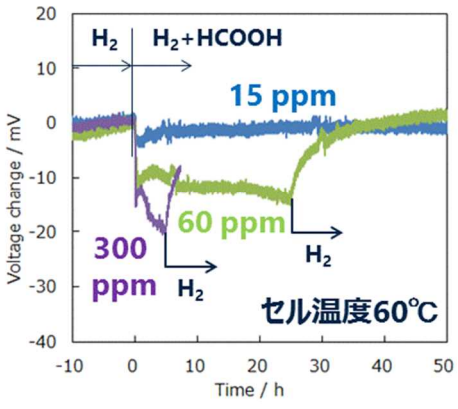


図 5　ギ酸による燃料電池電圧への影響（60℃、1.0 A cm^{-2}）

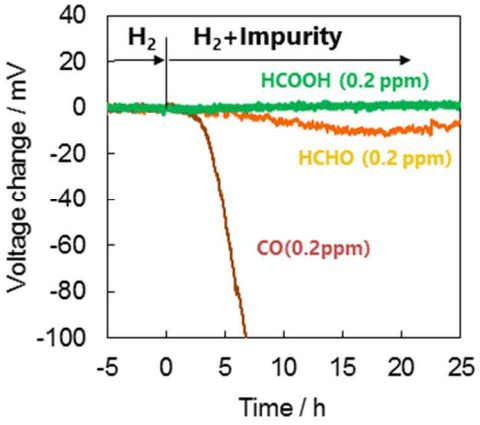
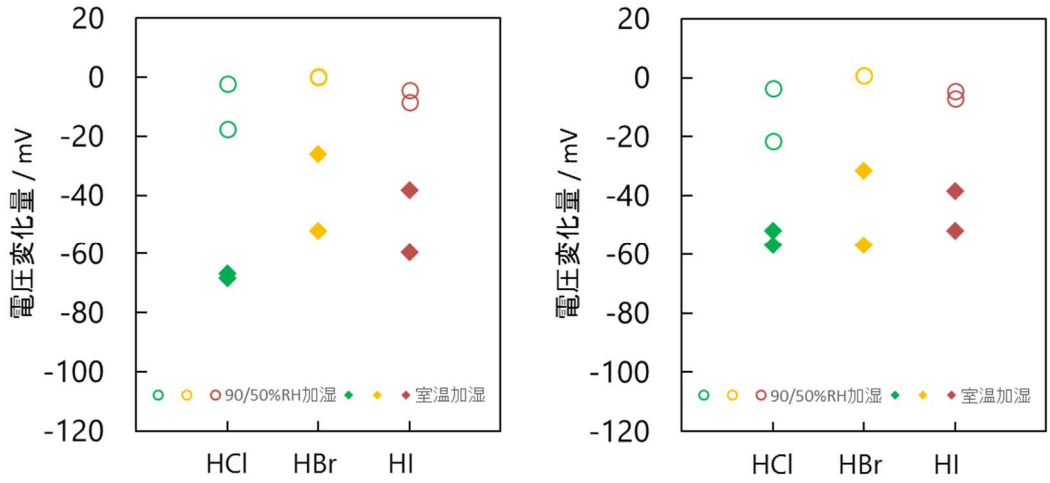


図 6　種々の不純物による燃料電池電圧への影響（60℃、1.0 A cm^{-2}）

ハロゲン化物については、SINTEF では触媒レベルで Br, I による影響を評価しているが、単セルでの影響

は把握していないことが確認された。そこでJARIでは、他の無機ハロゲン種の基礎的な影響を単セルレベルで評価した。ハロゲン化物による影響について、濃度 2 ppm として 10 時間添加したときの電圧低下量を図7(a)に示す。電圧変化量は、ハロゲン化物を添加し始めた時に対する電圧との差分として求めた。ハロゲンを添加してから 10 時間後の電圧は、室温加湿の場合に-20～-70mV 低下した。これに対し、90/50%RH 加湿とした場合の電圧低下量は 0～-20mV 程度となった。この結果から、湿度が高い場合にはハロゲン化物による被毒への影響が小さいことが明らかとなった。なお、ハロゲン化物の種類（HCl、HBr および HI）による影響について、明確な差は見られなかった。ハロゲンを添加し終えてから燃料を高純度水素に切り替えて、電圧の回復有無を評価した結果は図 7(b)のようになり、いずれの場合も電圧は回復しなかった。このことから、ハロゲン化物による電圧への影響は種類によらず不可逆的である可能性がある。



(a)HX10 時間添加後　　(b) (a)ののち $H_2$5 時間供給後

図 7　ハロゲン化物（HX : X=Cl, Br, I, 2ppm）を添加後および高純度水素 5 時間添加後における電圧低下量の経時変化（セル温度 60℃、1.0 A cm^{-2}）

酸素濃度と性能低下の関係を調査するため、出口開放系における短期的な性能低下への影響を評価した結果を図 8 に示す。酸素濃度 0 ppm と 50 ppm では、1.0 A cm^{-2} で 50 時間電流密度を保持しても電圧変化量に有意差は見られなかったことから、50 ppm の酸素を導入しても電圧には影響しないと考えられる。また、排水分析の結果からも酸素の影響はほとんど見られなかった。以上の結果より、水素中に含まれる酸素濃度を 5 ppm から 50 ppm に引き上げても、出口開放系においては短期的な性能低下は見られないと考えられる。

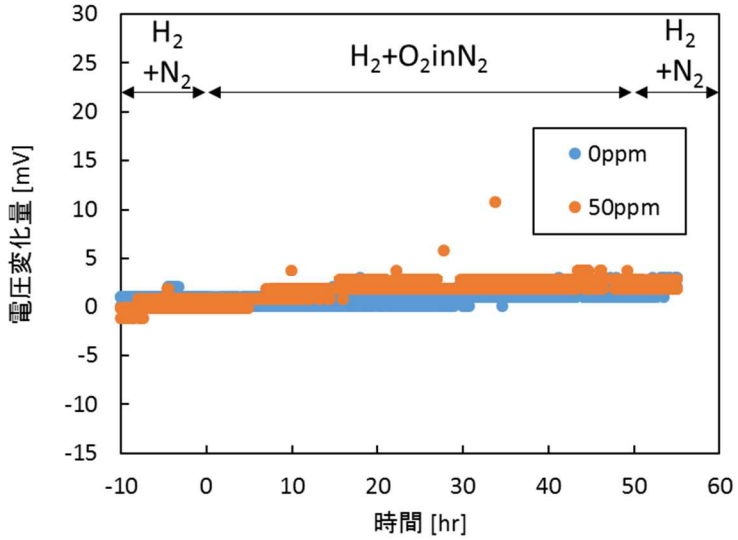


図８　アノード水素中への酸素導入（酸素濃度 0, 50 ppm）による電圧変化量

このように、机上検討により水素品質規格緩和に向けた対象成分を絞り込み、規格緩和検討ロジックを設計した。そして、緩和検討ロジックに基づき、ギ酸を規格から除外する可能性を判断するために必要な技術データを取得することで、ギ酸は現状の規格値（0.2 ppm）でも燃料電池性能を低下させないことを実証した。この結果から、ギ酸は炭化水素の規格（C1 equivalent　2 ppm）の中で扱い、水素品質管理上必要に応じ分析する方向となった。

さらに、欧米など海外研究機関と連携しながら、水素品質規格改訂開始に向けてハロゲン化物絞り込みのためのデータを補完した。今回調査した Cl, Br, I ではハロゲン化物の種類によらず低加湿条件で電圧が低下することを明らかにした。その結果、水素品質規格では、ハロゲン化物の絞り込みはせず、水素品質管理上必要に応じ分析する方向となった。

これらの結果は燃料標準化 WG においてインフラ各社および自動車会社等との審議を経て、ISO 14687 改訂議論に反映された（○）。

② 水素品質の管理方法適正化による運営費コストダウンの開発

- 硫黄の簡易分析法として H_2S 硫黄検知管による測定法について調査し、検知限度が ppb 等の精密な定量は難しいものの、硫黄の有無の簡易分析法として再現性良く測定可能であることを明らかにした。その内容について図９に示す。

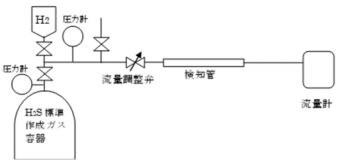
【目的】FCV用の燃料水素中の硫黄分の簡易分析法として硫黄検知管について調査した。（ISO国際規格（ISO14687-2）：全硫黄分0.004ppm）

【硫黄検知管：H2S検知用】

種類	検知限度	測定範囲
Aメーカー	0.05ppm（試料100mL採取時）	0.1～3ppm
Bメーカー	0.01ppm（試料200mL採取時）	0.05～0.1ppm

上記の2種の検知管は、ISO規格値0.004ppmを検知できない仕様である。ここで、試料量を増加させて測定することで、ISO規格値を検知可能であるかを検討した。

<検知管測定試験フロー>



【H2S濃度の測定結果】

		通ガス総量（mL）		
検知管	標準ガス濃度（ppb）	5000	6500	13000
		H2S濃度測定値(ppb)		
Aメーカー	4	4～6	5	
Aメーカー	0	×	×	
Bメーカー	4	4～6	5	5
Bメーカー	0	×	×	×

×：変色せず



変色前



変色後

図９　硫黄の簡易分析法として H_2S 硫黄検知管による測定法の検討

- 水電解法（アルカリ型、PEFC 型）の製品水素中のハロゲンや酸素の混入について調査した。
- 品質異常発生時の対応、及び水素品質規格 ISO14687 の改訂版発行に伴う品質管理手法の整合のため、2 度に亘る水素品質ガイドライン改訂を策定した。
  - 品質異常時の対応の追加（2019 年 9 月改訂）

    水素品質ガイドラインは、FCV 用水素の品質仕様である ISO 国際規格を遵守することを規定しているが、現状の水素 ST における品質管理方法は、まだ過渡期であり、100 ヶ所程度と決して多くない水素ステーションの営業を可能な限り継続することが重要である。

    このため、「水素中の各不純物の影響度（Severity Class)を勘案して、ISO 規格値を越えても、今回新たに設定する上限値の範囲内であった場合は、水素ステーションを営業しながら、決められた対処期間内に水素品質を改善することができる。」旨の品質異常時の対応を追加した。

  - 水素品質規格 ISO14687 の発行に伴う改訂（2020 年 3 月改訂）

    当初の水素品質管理ガイドラインは、ISO14687-2 に準拠し、これを遵守することを前提に策定されていた。

    ISO14687-2 は 2019 年 11 月に PEM 定置用、その他の ISO と統合すると共に、新たな不純物許容濃度等が ISO14687 Grade D として制定されたので、水素品質管理ガイドライン案を ISO14687 Grade D に準拠・遵守する旨の改訂を行った。

上記の品質管理手法の検討、コスト解析、技術動向に合わせたガイドラインの改訂により水素供給の発展向上、低コスト化に資することが出来る。（○）

３．２　成果の意義

（国際標準化・国際連携対応）

本プロジェクトは、従来から日本が世界の先導的役割を果たしてきたISO/TC197（水素技術）が対象とする水素ステーション等機器に関する国際規格策定について、引き続き世界をリードするための取組みを実施するものである。更に標準化活動等に係る国際連携を推進し、日本の産業振興・競争力強化を図ることを目的とする。更に、上記のISO国際審議を日本が主導し、国際規格策定に資するため、水素品質に関する研究開発を行うとしている。

このように、ISO/TC197関連の国際標準化活動、国際連携及び関連する研究開発を積極的に実施することにより、国際連携における日本のプレゼンスが上がり、水素・FCV 関連の市場における日本の国際競争力を強化することが可能となる。以って水素・FCVの大量普及に資することが出来る。ISO/TC197（水素技術）関連の国際標準化活動を積極的に実施する中で、日本の意見を十分に反映して発行できたこと、また、日本も各国と共に問題とする蓄圧器の規格の否決に続き、日本を共同議長とする新規提案承認など、今後の当該分野の日本の立場を優位にする上で意義が大きい。

今後も中心的な位置での活動を継続することにより、水素技術に係る国際標準化におけるプレゼンスがますます高まる。これまでも日本の高い水素関連技術から、各国際標準化案件への積極的な参画により、当該TCでの日本の一定のプレゼンスはあったが、活動を維持することにより、影響力、発言力は、さらに高まる。それにより、日本の持つ高い技術力に対して、国際標準化の側面からそれを裏打ちすることから、国際市場における日本の国際競争力を維持・発展することが出来る。

（ISO水素品質国際規格のための研究開発）

FCV用などをはじめとする水素品質関連規格については、これまで日本が規格作成・改訂議論を主導してきた結果、日本の自動車メーカーおよびインフラ事業者の意見を反映しつつ、かつ国際協調しながら2019年に発行された。一方で、発行されたISO14687:2019は水素およびFCVの普及拡大期を想定している。水素およびFCVの大量普及に向けては、ISO14687:2019をさらに改訂する必要があるとの共通認識がこれまでの国際審議で得られている。世界において水素およびFCVの普及・燃料電池の多用途展開に向けた動きが活発化する中で、インフラ・自動車共に水素関連産業の自立的拡大に向けた課題を解決する必要がある。インフラ側から見れば、水素品質管理の負担低減のため、全般的に可能な限り規格値の緩和が求められている。水素品質管理の負担低減により、水素分析コストの低減に加え、高度な分析技術が不要となることで分析技術に関する障壁が小さくなり、既存の事業者のみならず新規参入者の増加が期待でき、水素分析に対応できる事業者が増加することで将来の水素ステーション増加に伴う水素供給量を確保する体制を整えることができる。その一方で、FCV側から見れば、商用車を含むFCVの大量普及のために燃料電池システムの高性能化、低コスト化に取り組む中で、FCV の性能および耐久性に影響を与えない規格であることが求められる。本研究開発の成果により、次期水素品質規格の改訂を日本が主導しつつ海外と協調しながら進めることが、水素およびFCVの今後の普及拡大・燃料電池の多用途展開に大きく貢献するものと考えられる。

３．３　開発項目別残課題

（国際標準化・国際連携対応）

HySUTはISO/TC197の中で国際連携としてそのマネージメントに深くかかわっている。TC197の国際議長が日本より選出され、他にHySUT要員がTechnical Advisory Board の6名の諮問委員の一人として、TC197の意思決定に加わっている。

今後、日本主導で水素技術の国際標準化を推進するにあたり、このような体制を維持してゆくことが重要な要素となる。日本が議長国として提案、承認、発足した蓄圧器（ISO 19884）、O-ring（ISO 19880-7）のみ

ならず、SC1 の設置などの新しい動きに的確に捉え、それらの分野でも日本の中心的な役割を維持し、もって日本の国際競争力、市場優位性を確保する。そのためにも、国際規格策定については、特段注意を払い、国際合意を醸成することが必須となる。

また、CHS などの国際連携に係る活動については、国際連携における日本のプレゼンスが上がり、参加する各国より注目されることから、より積極的な取り組みが望まれる。

更には、今後の上記活動を維持推進するため、国際標準化に係る人材育成も急務である。

（ISO 水素品質国際規格のための研究開発）

ISO 議論の進展にともない、新たな課題として、水電解由来水素中に含まれる可能性が高い酸素についても、規格値緩和に向けた判断が必要となった。酸素について燃料電池性能に与える短期的な影響を評価したところ、酸素濃度 50ppm で、短期的には燃料電池性能への大きな影響が見られないことを確認したものの、水素注への酸素の共存によって、燃料電池内でヒドロキシラジカルを生成することで長期的に劣化が起こる可能性が指摘されている。酸素に関する緩和可否の判断には技術データによる根拠が必要であり、今後は長期的な影響も評価し、性能劣化と材料劣化の両方の観点から技術データを取得することが必要である。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本プロジェクトは、従来から日本が世界の先導的役割を果たしてきた ISO/TC197（水素技術）が対象とする水素ステーション等機器に関する国際規格策定について、引き続き世界をリードするための取組みを実施するものである。更に標準化活動等に係る国際連携を推進し、日本の産業振興・競争力強化を図ることを目的とする。更に、上記の ISO 国際審議を日本が主導し、国際規格策定に資するため、水素品質に関する研究開発を行う。

このように、ISO/TC197 関連の国際標準化活動、国際連携及び関連する研究開発を積極的に実施することにより、国際連携における日本のプレゼンスが上がり、水素・FCV 関連の市場における日本の国際競争力を強化することが可能となる。以って水素・FCV の大量普及に資することが出来る。

５．研究発表・特許等

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
松田佳之	一般財団法人日本自動車研究所	Effect of impurities in hydrogen fuel on the performance of polymer electrolyte fuel cells for automotive applications	World Hydrogen Technology Convention 2019	2019.6
松田佳之、清水貴弘、橋正好行	一般財団法人日本自動車研究所	水素中のホルムアルデヒドによる燃料電池発電性能への影響	第 62 回電池討論会	2021.12
松田佳之	一般財団法人日本自動車研究所	燃料電池自動車用水素品質規格の動向と JARI の取り組みについて	2020HESS 特別講演会	2021.3
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	The prospect of the international standardization on hydrogen technology (Activities in ISO/TC197)	2021 International Conference on Hydrogen Economy Standards（オンライン開催）	2021.10
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	Technologies, Standards and Regulations for Hydrogen Refueling Station in Japan	2021 CDTI-NEDO online Joint Workshop on the Hydrogen Technology	2021.11
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	水素ステーションの構成と規制	福岡県主催　令和３年度　人材育成セミナー水素入門コース	2021.11
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	Activities in Japan and ISO/TC197 Hydrogen technologies Update	"8th International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation" Brussels, Belgium	2022.9
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	ISO/TC197 Hydrogen Technologies Update	Hydrogen & Fuel Cell Seminar 2023／ロングビーチ（米国）	2023.2
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	ＩＳＯ／ＴＣ１９７（水素技術）の活動内容および国内の取組み	九州水素・燃料電池フォーラム&水素先端世界フォーラム２０２３	2023.2
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	水素ステーションの構成と規制	福岡県主催　令和４年度　人材育成セミナー水素入門コース	2023.2

松田佳之、清水貴弘、今村大地	一般財団法人日本自動車研究所	水素中のハロゲン化物による燃料電池発電性能への影響	電気化学会第 90 回大会	2023.3
松田佳之、清水貴弘、今村大地	一般財団法人日本自動車研究所	自動車用燃料電池における水素中不純物評価に関する JARI の取り組み	第 30 回燃料電池シンポジウム	2023.5

(1) 論文

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	ページ番号	発表年月
松田佳之、清水貴弘、橋正好行	一般財団法人日本自動車研究所	Effect of Carbon Monoxide on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance with a Hydrogen Circulation System	Journal of the Electrochemical Society	167, 044509	2020.2
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	ＩＳＯ／ＴＣ１９７の活動内容および国内における取組み	「圧力技術」誌	1―4	2022.6
松田佳之、高橋研人、沼田智昭、清水貴弘、今村大地	一般財団法人日本自動車研究所	自動車用燃料電池における水素燃料および空気中の微量成分評価に対する JARI の取り組み	JARI Research Journal	20221003	2022.10

(2) 特許等（知財）

出願者	出願番号	国内・国外・PCT	出願日	状態	名称

(3) 受賞実績

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
吉原美智子	一般財団法人日本自動車研究所	長年にわたる ISO の電動車両の国際標準化	２０１９年度　日本機械学会標準事業	2020.3.2

		の主導		

(4) 成果普及の努力（プレス発表等）

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月

（３-②）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業 ／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発」

委託先：一般財団法人日本自動車研究所

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2018年度～2022年度終了）

・GTR13 Phase2審議に参画し、日本の提案項目について試験法案の提案またはドラフト提示を実施し、ドラフトドキュメントの国際合意を得た。
・火炎暴露試験結果およびシミュレーション解析結果等から、再現性向上に向けた火炎暴露試験法案を提案し、一部がドラフト案として採用された。
・国際合意可能な水素適合性試験法案をSAE材料専門家会議で合意し、SAEからGTR13 Phase2に提案された。

●背景/研究内容・目的

国際的なFCVの普及拡大、さらには水素ステーションの自立化に向けて、国連の水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準（GTR13）の改定（Phase2審議）が必要である。

国内法への円滑な反映を前提としたGTR13の国際合意を得ることを目的とする。そのため、GTR13 Phase2審議に参画し、専門家によるデータに基づく技術審議を行うことで、安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準となるよう審議を推進する。

●研究目標

実施項目	目標
A：FCVに関する国際基準調和・標準化活動 (サブテーマ1)	・各審議課題に対する日本提案（試験法等）をHFCV-GTR Phase2に提案し、国際合意を得る。 ・国際標準化活動を行い、HFCV-GTRおよび国内基準との整合を図る。
B：容器火炎暴露試験法見直し (サブテーマ2-1)	・再現性向上に向けた火炎暴露試験法案および根拠データを提案する。
C：金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大 (サブテーマ2-2)	・国際合意可能な水素適合性試験法案およびその技術的根拠を提案する。 ・自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材であるSUS304を使用可能材料として確定するための材料データ取得およびデータ解析を完了する。

●実施体制及び分担等

（再委託）

NEDO
- 日本自動車研究所（実施項目A, B,C）
  - 東京大学（実施項目C）
  - 産業技術総合研究所（実施項目C）

●これまでの実施内容／研究成果

A ・国連GTR13 Phase2審議に参画し、日本の提案項目（容器初期破裂圧適正化、金属材料試験法、火炎暴露試験法）について試験法案の提案またはドラフト提示を実施し、ドラフトドキュメントの国際合意を得た。
・ 日本の国際提案に先立ち、国内のHFCV基準検討委員会を開催し、専門家による事前審議・承認を行った。

B ・火炎暴露試験結果およびシミュレーション解析結果等から、試験手順およびバラツキ影響を低減するための方策を提案し、一部がGTR13 Phase2ドラフトに採用された。
・車両火災試験結果から、小径容器を連接した新構成容器の火炎暴露試験法を提案し、GTR13 Phase2ドラフトに採用された。

C ・前NEDO事業で作成した水素適合性試験法案をSAE材料専門家会議で合意し、SAEからGTR13 Phase2に提案され、参照試験法としてGTR13 Phase2ドラフトに織込まれた。
・前NEDO事業で作成したアルミニウム合金のHG-SCC試験法案をGTR13 Phase2に提案し、参照試験法としてGTR13 Phase2ドラフトに織込まれた。
・自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材であるSUS304を使用可能材料として確定するためのSUS304市中材の水素中SSRT試験データおよび水素中疲労試験データ取得を完了し、要求性能を満足することを確認した。

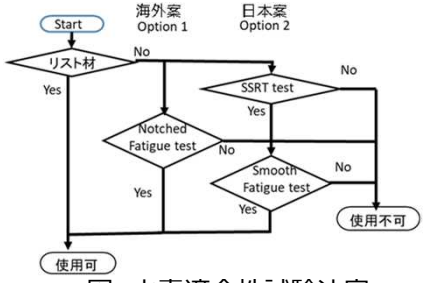


図　水素適合性試験法案

●今後の課題

・GTR13 Phase2の国内導入
・UNR134（HFCV）の改定審議
・GTR13　Phase3課題の対応

●実用化・事業化の見通し

・HFCV-GTRの合理的な改定により、過剰な要求を抑制し、円滑な国際取引を可能とすることで、高圧水素部品およびFCVの低コスト化に繋がる。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	HFCV-GTR Phase2審議に参画し、日本提案の国際合意に向けて、審議を推進。ドラフトドキュメントの国際合意を得た。	○
B	火炎暴露試験結果およびシミュレーション解析結果等から、試験手順およびバラツキ影響を低減するための方策を提案し、一部が試験法草案に採用された。	○
C	・海外案と日本案を選択可能とする水素適合性試験法案をSAE材料専門家会議で合意し、SAEからGTR13 Phase2に提案された。 ・自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材であるSUS304を使用可能材料として確定するためのSUS304市中材データ取得を完了した。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	7	0

事業番号：３－②
研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発」

実施者：一般財団法人日本自動車研究所

１．研究開発概要

水素ステーションの普及・自立化には、燃料電池自動車（FCV）の普及拡大による水素ステーション需要増加が不可欠である。FCV の市販は開始されたが、普及を加速するためには、高圧水素部品（圧縮水素容器等）の低コスト化が必須となる。グローバルな流通製品である自動車の要件には日本はもとより諸外国の規制がかかり、その制約の中で安全性を確保しつつ安価で高い商品力を持たせることが必要不可欠となる。

このため、本研究開発では、国際的な FCV の基準である HFCV-GTR（GTR13：水素および燃料電池自動車に関する世界統一技術基準）等の合理的な改定および円滑な国内導入のための審議を推進することにより、安全性を確保しつつ水素ステーションのコスト増加要因にならないよう注意を払い、過剰な要求を抑制し、円滑な国際取引を可能とすることで、高圧水素部品および FCV の低コスト化を加速することを目的とする。また FCV 技術でトップランナーである日本が国際議論をリードすることで、世界に先駆けて FCV の低コスト化を早期に実現することも可能となる。図 1-1 に水素・燃料電池戦略ロードマップ改訂版（2016 年 3 月）およびその中での本研究開発の役割を示す。

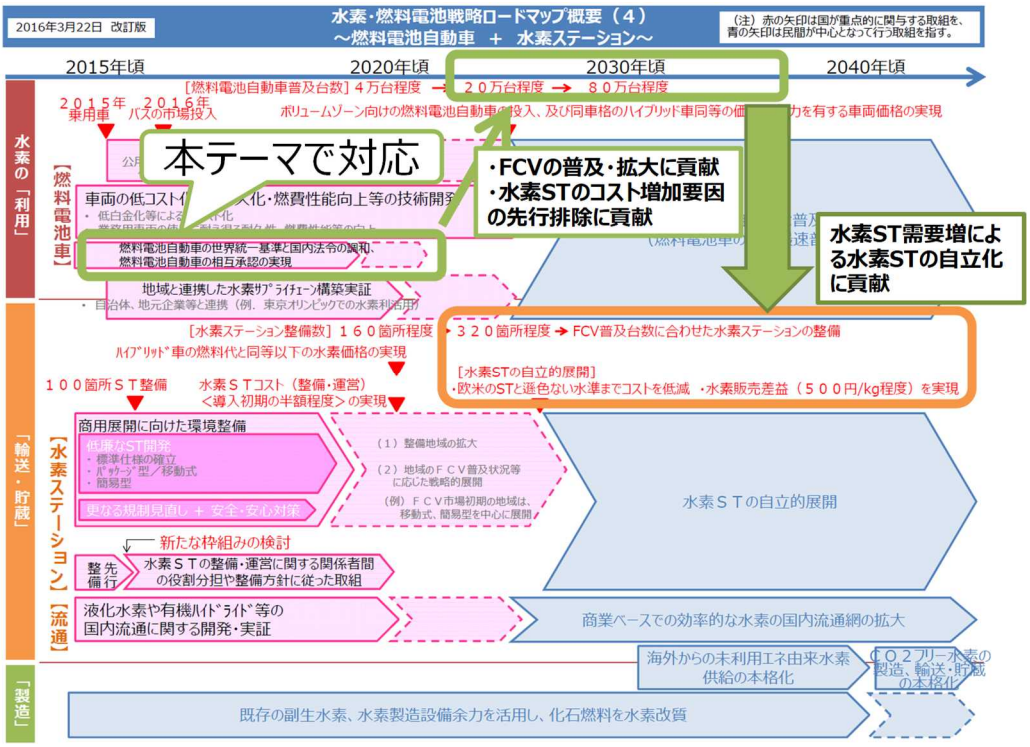


図 1-1　本研究開発の役割

２．研究開発目標

表 2-1　研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動	2017 年 10 月に開始された HFCV-GTR (GTR13) Phase2 審議に参画し、専門家によるデータに基づく技術審議を行うことで、安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準となるよう審議を推進して国際合意を得る。
（2）サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発	HFCV-GTR (GTR13) Phase2 の課題の内、容器の火炎暴露試験法と金属材料の水素適合性試験法に対し、海外との協力体制も踏まえて、必要な技術検討やシミュレーション解析・実証試験等を行い、GTR13 Phase2 での日本提案の国際合意に資する。

本研究開発では、以下の 2 つのサブテーマを実施する。

サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動

サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発

本研究開発は、一般財団法人日本自動車研究所からの再委託先である国立大学法人東京大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所と協力して実施する。

実施に当たっては、他の NEDO 事業による研究開発（新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発等）、燃料電池実用化推進協議会、一般社団法人日本自動車工業会および関係省庁などと連携し、インフラ及び自動車業界の要望を、最終的な技術基準化を考慮した上で、本研究開発に反映させる体制を整える。

サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動

2017 年 10 月に HFCV-GTR (GTR13) の Phase2 審議が開始された。各技術課題に対し、専門家によるデータに基づく技術審議を行うことで、安全性を確保しつつ、過剰な要求を抑制した合理的な基準となるよう審議を推進して国際技術基準として成立させ、その後の円滑な国内導入を行う必要がある。このため、国内審議体による日本案のとりまとめを行ったうえで、国際会議への専門家派遣を行い、審議を推進する。その後、UNR134（HFCV の相互認証基準）の Phase2 審議に参画し、認証方法や組試験の方法等も検討・審議する。

また併せて国際標準化活動を行い、ISO/TC197/WG18（容器、TPRD の国際規格）、および米国 SAE 規格の審議に積極的に参画し、GTR13 および国内基準との整合を図る。

サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発

以下の項目について、FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）への日本提案作成に資するため、技術検討やシミュレーション解析結果に基づき、海外との協力体制も踏まえ、必要なデータ取得を実施する。

・2-1：容器火炎暴露試験法見直し
・2-2：金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大

2-1：容器火炎暴露試験法見直し

火炎暴露試験の再現性向上に向けた適切な試験方法を導くため、試験結果のバラツキの要因と推定される火源の幅と火炎高さの影響について、安全弁の作動時間、容器周囲の熱流束や温度を、数値シミュレーション解析によって調査する。また、その数値シミュレーションモデルに基づいた火炎暴露試験を行い、数値シミュレーション結果の妥当性を検証する。

これらの火炎定義に基づく日本提案を基に、OICA（国際自動車工業連合会）で検討方針と必要な実証試験計画を合意した上で、GTR13 Phase2 へ検討方針と実証試験計画を提案する。実証試験計画に基づき、各国試験機関と協力・分担してデータ取得を開始し、GTR13 Phase2 において、再現性向上に向けた火炎暴露試験法の合意を得る。

2-2：金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大

HFCV-GTR Phase1 では、金属材料に関する規定は見送られ、各国の基準を適用することとされた。国際流通を円滑にするため、材料の水素適合性に関する規定が必要である。そこで、前 NEDO 事業で水素適合性試験法の日本案を作成した。本事業では、前 NEDO 事業で作成した水素適合性試験法の日本案をベースに、海外の意見・データを考慮して試験法案を修正し、国際合意を得る。

また、自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材である SUS304 を使用可能材料として確定するための材料データ取得およびデータ解析を完了する。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動

① 国際基準調和活動（担当：日本自動車研究所）

ａ．活動概要

国連の HFCV 国際統一技術基準 GTR13 Phase2 策定のため、各国代表による技術審議を行う Informal Working Group（IWG）が 2017 年 3 月に発足した。JARI は第 1 回 IWG から日本代表の一員として参加している（本研究開発での活動は 2019 年 3 月の第 5 回 IWG 以降）。

図 3-1 に示すように、IWG は 2022 年 6 月の第 15 回まで開催された。本研究開発の成果による試験法提案も予定通り全て国際合意に至り、それらも含めて最終ドラフトを IWG で合意し、同年 9 月に上位会議体の GRSP（衝突安全分科会）に提出され、同年 12 月の GRSP で承認された。現在 GRSP から最上位会議体の WP29（自動車基準調和世界フォーラム）に最終ドラフトが提出され、2023 年 6 月の WP29 での承認および即時成立が見込まれている。またこの GTR13 Phase2 の試験法を基に、加盟国間の相互認証規則 UN R134 の審議も開始され、2023 年 5 月の GRSP 合意を目標に議論を継続している。最終的には 2023 年 12 月の WP29 で承認後、2024 年の発効を目指している。

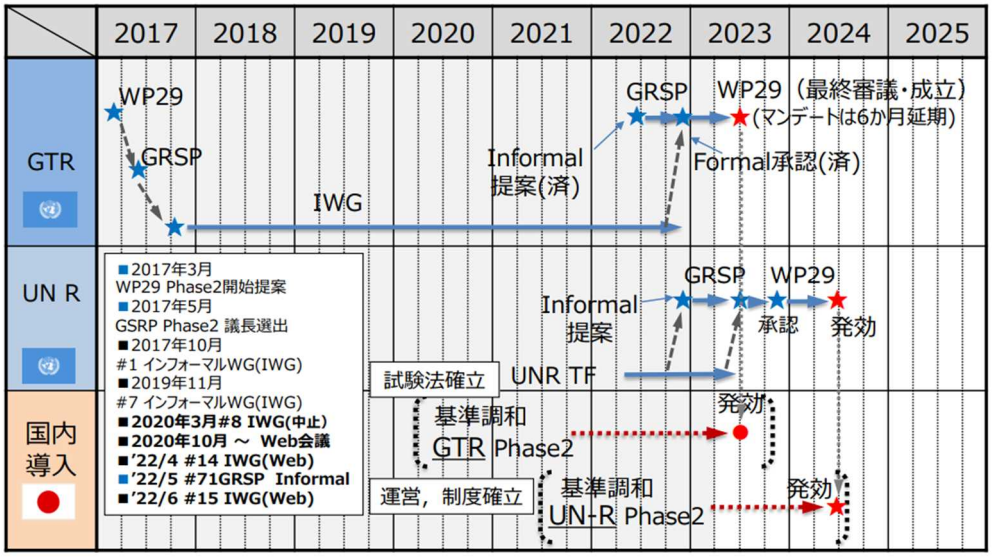


図 3-1　GTR13 Phase2 および UN R134 審議日程（国内導入日程は参考）

a．容器初期破裂圧適正化

FCV に搭載される高圧水素容器は、貯蔵した水素ガスの外部への透過を防止するライナー（金属製または樹脂製）と、内圧に対する強度を保持するためにライナー周囲に巻く CFRP とで構成される。しかしながらこの CFRP は非常に高価なため、容器の大幅なコスト低減のためにはこの CFRP の使用量削減が非常に有効な手段になる。現在各国の容器基準では容器の初期破裂圧が公称使用圧力（NWP）の 225%で規制されており、この規制値の適正化が期待されている。

一方で容器の経年劣化後の容器破裂圧規制値は、15 年使用相当の負荷を加えた後で NWP の 180%の破裂圧を保持することとなっている。今回容器の初期破裂圧を適正化するために、前 NEDO 事業にて、市場で販売されている容器をサンプルに初期破裂圧と劣化後破裂圧の各バラツキを含めて実力評価を行った。その結果、図 3-2 に示すように、初期破裂圧 225%NWP 以上を有する容器の劣化後破裂圧は最大バラツキを考慮しても 180%NWP に対して十分な余裕を有することが分かり、劣化後破裂圧基準を満足しつつ、初期破裂圧規制値を 200%NWP に低減できることが判明した。

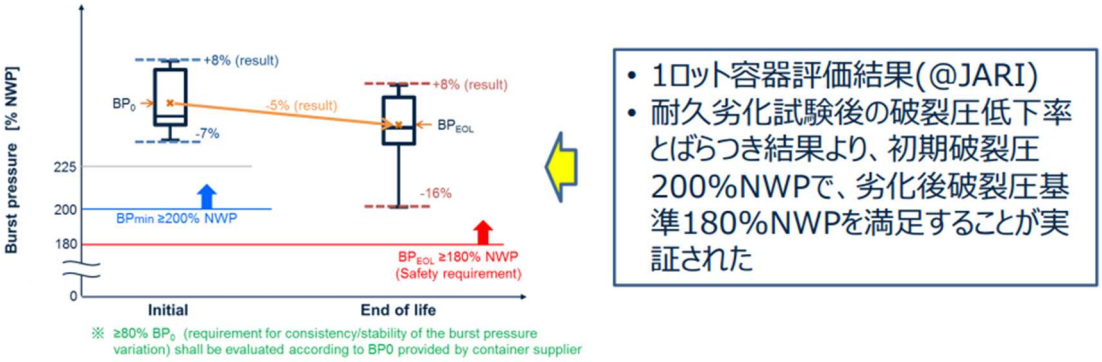


図 3-2　容器初期破裂圧適正化の実証（前 NEDO 事業成果）

本事業では上記前 NEDO 事業で得られたエビデンスを基に国連の GTR13 Phase2 審議に初期破裂圧基準を 200%NWP に低減することを提案した。これまでの国際審議の結果、中国を除く参加国の合意を得て、判定基準の見直し、およびその技術的根拠を示すドラフト文面を作成し、国際審議への提案を完了した。

IWG での議論では、中国を除く参加国の賛同を早期に得られた。中国からは自国で主体的に使われる 35MPa 容器について十分な実証データがないとの理由で、200%NWP 化に反対が示された。最終的な国際審議の結果、容器初期破裂圧規定は 200%NWP を基本として、35MPa 容器に限り 225%NWP と 200%NWP の両者を選択可能として、国際合意がなされた。

b．金属材料の水素適合性試験法

高圧水素環境下で自動車用水素貯蔵部品に使用される金属材料は、水素中の材料強度保持（水素適合性）の観点から、国際的にオーステナイト系ステンレス鋼の SUS316L 材、およびアルミニウム合金の A6061-T6 材の 2 種類に限定されている。これに対し水素貯蔵部品のコスト低減のために、材料単価の安い材料への置換、またはより高強度材を採用して全体肉厚を低減することなどが広く自動車産業界から求められている。しかしながら高圧水素中での使用を可能とする材料種を拡大するためには、適切な材料試験法に基づいたデータ検証が必要となるが、現在国際的に水素適合性を適切に評価できる試験法が存在していない。そこで本事業では国際的に合意可能な試験法を策定し、GTR13 Phase2 に織り込み、将来的な FCV の安全な国際流通性の確保に貢献することとした。

本事業では前 NEDO 事業、および連携する他事業から提供された実証データに基づき、米国 SAE 規格の審議組織内に各国専門家で構成される材料専門家会議を構成し、その中で特に深い知見を有する日米独の専門家を中心に協議した結果、性能要件として規定される金属材料の水素適合性試験法案を策定した。試験法案の具体的な内容は、後述のサブテーマ 2-2．a を参照願いたい。

その後、上記 SAE での専門家合意結果を基に、GTR13 Phase2 第 7 回 IWG（2019 年 11 月）で、米国 Sandia National Laboratories から水素適合性試験法として提案され、図 3-5 に示す内容で国際合意を得た。但しこの試験法は GTR13 として技術的な合意は得られたものの、相互認証国に加盟していない米国、カナダ、中国から、自国の法体系上、材料に関する試験法の規定はそぐわないとう意見があり、統一材料試験法の規定に賛成した相互認証加盟国（日本、EU、韓国）との間で意見が分かれた。その後議論の結果、GTR13 としては、ドキュメント内の試験法本文を記述する Part Ⅱ部分ではなく、技術的根拠（Rationale）を示す Part Ⅰに記載することで国際合意がなされ、世界統一の参照基準の位置づけで記載されることになった。試験法としての Mandate 化は、その後の相互認証規則 UN R134 の審議に持ち込まれた（2023 年 9 月現在、基準化に向けて最終審議中）。

c．アルミニウム合金の HG-SCC（湿潤ガス応力腐食割れ）試験法

アルミニウム合金は一般的に水素の影響を受けにくい材料とされている。一方で 1990 年代に 6351 合金を使用したスクーバ用圧力容器で、湿潤環境に起因する応力腐食割れによる破裂事故が多発した。通常圧力容器に使用される 6061-T6 合金は、この応力腐食割れに対しても使用実績上問題はないものの、将来アルミニウム合金の使用材料種を拡大する際に、湿潤環境中の応力腐食割れの耐性を適切に評価できる材料試験法が必要とされてきた。日本国内ではアルミニウム合金の評価研究で多くの学術研究が進んでおり、これらの知見も活用して、湿潤ガス応力腐食割れ（Humid Gas Stress Corrosion Cracking：HG-SCC）試験を提唱した。前 NEDO 事業ではこの試験法確立のための実証データを取得し、HG-SCC 試験法案を作成した。その後本案を基に、日本高圧力技術協会規格 HPIS E 103：2018 として国内規格を制定した。

本研究開発ではこの HPIS E 103：2018 を基に、GTR13 Phase2 への試験法織込みを目指して IWG で国際提案を行った。提案当初は材料腐食の観点で図 3-3 に示すように試験法の必要性の理解が進まず、IWG での審議が進まなかったが、図 3-4 に示すように、金属組織的な腐食メカニズム（通常の電気化学的な腐食と今回の応力腐食のメカニズムの違い）まで遡って丁寧に説明することで、試験法の必要性が理解された。その結果、GTR13 Phase2 ドキュメントへの HG-SCC 試験法織込みの国際合意を得た。但し本試験法は金属材料の試験法の一つとして前述の水素適合性試験法と同様の扱いとなり、GTR13 Phase2 では、試験法本文を記述する Part Ⅱ部分ではなく、技術的根拠（Rationale）を示す Part Ⅰに記載することで国際合意がなされ、世界統一の参照基準の位置づけで記載されることになった。こちらも同様に、試験法としての Mandate 化はその後の相互認証規則 UN R134 の審議に持ち込まれた（2023 年 9 月現在、基準化に向けて最終審議中）。



図 3-3　HG-SCC 試験法の GTR13 Phase2 IWG での審議経過

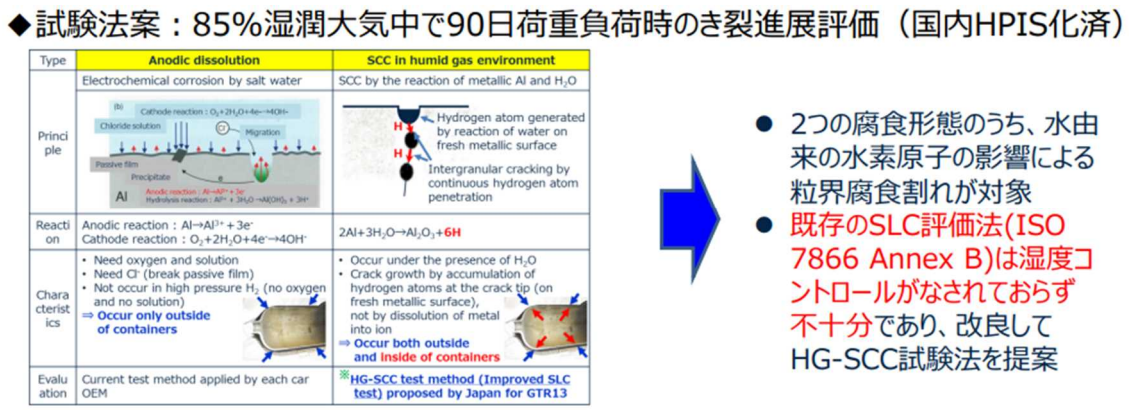


図 3-4　アルミニウム合金の HG-SCC 試験法の提案内容

d．容器火炎暴露試験法見直し

GTR13 Phase1 で規定された火炎暴露試験法は、LP ガスによる火炎を部分火炎状態から全面火炎状態に変化させ、その間に容器が破裂することなく TPRD から安全に水素が放出されることを確認することで、車両火災時の安全性を模擬評価している。その際、図 3-5 の既存状態に示すように、試験中の容器の燃焼状態を規定するために容器底部の温度条件のみが設定され、この条件に合致すれば火源の火床仕様は実施する試験機関の裁量に任されている。このため同図に示すように様々な火床形態が存在し、結果容器が晒される火炎の全体プロファイルも大きく異なることで TPRD の作動開始時間が試験機関毎に異なり、適切な評価が困難な状況であることが顕在化していた。この状況を改善するため、GTR13 Phase2 では火炎暴露試験の安定した結果が得られるよう、試験法の見直しをすることになった。

この議論には各国試験機関および産業界との国際連携が必須であり、米国 SAE の安全技術を議論する Task Force の場に各国関係者が集まって議論を進めた。その中でカナダにある試験機関の CSA（当時）から JARI に対し、安定した火床仕様を実現できるブンゼン型バーナを用いた試験法の共同検討の申し出があった。これに対し Round Robin 試験も兼ねて JARI が CSA の試験場に出向き、共同でデータ取りを行い、その結果を基に JARI Hy-SEF の防爆試験ドーム（CSA の屋外設備に対して JARI 設備は屋内設置であり、風の影響も受けずにより正確なデータ取得が可能）で検証試験を行った。

この CSA との共同検討結果も踏まえ、SAE の場で更に JARI から補足データも追加して議論を継続した結果、容器底部のみの温度条件規定ではなく、容器周囲の温度プロファイルを規定して、安定した火災暴露試験の実現を可能とする試験方針を確立した。



図 3-5　容器火炎暴露試験法の修正提案内容

上記 SAE での国際合意を経て SAE Task Force リーダーから GTR13 Phase2 IWG に試験法が提案された。図 3-6 に示すように、最終的には本番試験前に Pre-test を実施し、既定の容器周囲温度プロファイルが実現できることを確認した上で本番試験を実施する、とい

う内容となった。技術的詳細内容は、サブテーマ 2-1 を参照願いたい。

◆GTR13 Phase1からの変更点

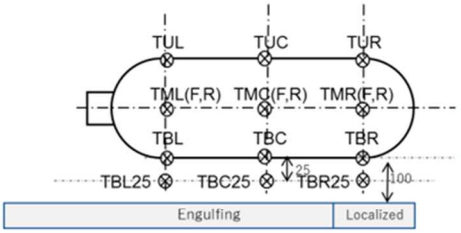
- ✓ 火炎幅：500±50mm（火炎長1.65m±50mm）➔ 容器サイズに寄らない
- ✓ 標準バーナ：予混合ノズル、ノズル間隔・配管径を規定
- ✓ Pre-test：本番試験前にダミー容器を用いてバーナー設定の適正化を評価した上で本試験を実施（ダミー容器：Φ0.32m，0.8m長以上、かつ本番試験容器以上の長さ）

Definition of Burner Nozzles for the Prescribed Burner	
Item	*Description*
Nozzle Type	LPG fuel nozzle with air pre-mix
• LPG Orifice in Nozzle	1mm ± 0.1mm ID
• Air Ports in Nozzle	Four (4) holes, 6.4 mm ± 0.6 mm ID
• Fuel/Air Mixing Tube in Nozzle	10 mm ± 1mm ID
Number of Rails	6
Center-to-center Spacing of Rails	100 mm ± 5mm
Center-to-center Nozzle Spacing Along the Rails	50 mm ± 5mm



◆Pre-test実施内容

- ✓ 規定される単位面積あたりの発熱速度（HRR/A）でダミー容器を火炎に晒し，容器周囲の温度を計測
- ✓ それらの温度が下記表の規定温度(60秒平均）になることを確認し、本試験における$Tmin_{LOG25}$と$Tmin_{ENG25}$の温度を導く



	測定	許容HRR/A	目標HRR/A
局所火炎時	HRR/A	200～325 kW/m²	285 kW/m²
	TB_{LOC} (TBR)	450℃～700℃	
	TMF_{LOC}&TMR_{LOC} (TMR(F,R))	700℃未満	
	TU_{LOC} (TUR)	300℃未満	
	バーナモニター温度 $Tmin_{LOG25}$ (TBR25)	TB_{LOG25}の平均温度から-50℃引いた値とする。ただし、その値が600℃を超える場合、600℃とする。	
全面火炎時	HRR/A	395～760 KW/m²	685 kW/m²
	TB_{ENG} (TBR,TBC,TBL)	600℃以上	
	TM_{ENG} (TNL(F,R),TMC(F,R), TMR(F,R))	―	
	TU_{ENG} (TUL,TUC,TUR)	260℃～750℃	
	バーナモニター温度 $Tmin_{ENG25}$ (TBL25,TBC25,TBR25)	TB_{ENG25}の平均温度から-50℃引いた値TB_{LOG25}の平均温度から-50℃引いた値とする。ただし、その値が800℃を超える場合、800℃とする。	

図 3-6　GTR13 Phase2 の容器火炎暴露試験法概要

② 国際標準化活動（担当：日本自動車研究所）

ａ．ISO/TC197/WG18（容器、TPRD の国際規格）

対象となる国際規格は、ISO 19881（容器）および ISO 19882（TPRD）である。GTR13 Phase2 の国際審議が継続されていたため、本 WG18 の議論は暫く休眠していたが、GTR13 の技術審議がほぼ終息した 2021 年に、GTR との整合取をメインに WG18 国際審議が再開した。2024 年 11 月の IS 化を目指して現在国際審議が続いており、日本からも必要なコメントを出して議論に参加している。

ｂ．SAE 規格（米国水素安全、容器安全）

対象となる米国規格は、SAE J2578（車両水素安全）および SAE J2579（容器安全）である。本 SAE 活動は HFCV-GTR Phase2 提案に向けた前哨戦として実質的な技術審議の場となり、国際的な審議効率化のため積極的に参加して日本の意見出しを行った。特に材料試験法の審議については SAE 活動の中に各国専門家による材料専門家会議が設置され、根拠データとともに日本の材料試験法案を提案し、GTR13 Phase2 国際審議へ提案する試験法案として採用された。2023 年 3 月に今後の水素安全および容器安全の SAE 審議が再開され、GTR13 Phase2 から持ち越しとなった国際審議課題に連動する形で、今後日本としてイニシアティブを取るべき将来課題の紹介を行った。

（２）サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発

① サブテーマ 2-1：③容器火炎暴露試験法見直し（担当：日本自動車研究所）

ａ．容器火炎暴露試験法見直しの背景

2013 年 6 月に採択された GTR13 Phase1 の自動車用圧縮水素容器の局所火炎暴露試験は各試験機関で実施された再現性が低いことが明らかとなり、効率的に試験を実施する上での制約、ひいては FCV の開発効率低下の原因となった。そこで、2017 年 10 月に開催された GTR13 Phase2 審議において、局所火炎暴露試験法の見直しに関わる審議が開始された。試験の再現性向上策として、欧州などからは火源の発熱量を極めて大きくする方法や韓国からは熱流束計によって火源の熱流束を規定する方法などが提案された。しかし、いずれの方法も自動車火災の実態とかけ離れた発熱量などで規定されるため、これらが適用された場合、不必要に過剰な容器性能を要求することになり、容器および車両のコストアップに繋がる可能性がある。さらに、試験法がますます高度化・複雑化し、試験設備の高額化・大型化にも進展する恐れがある。

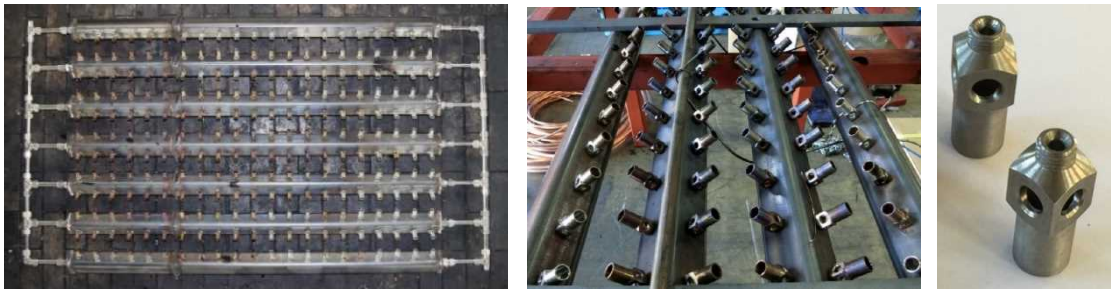
本来、火炎暴露試験の目的は、容器に装着された熱作動式安全弁（TPRD：Thermal-activated Pressure Relief Device）の作動を確認するための試験であるため、容器の耐火性能ではなく、安全弁の作動時間の観点からバラツキをなくすことが重要である。そこで、本事業では、これまでの過去に実施した火炎暴露試験関連のデータを整理し、火源の幅、火炎高さ、火源の均一性、風速および局所火炎域の長さなどの規定により、再現性の向上が可能となる見込みがあることがわかった。本研究では、この火炎定義に基づいた日本提案のとりまとめおよび国際合意に資する技術検討を実施した。

ｂ．容器火炎暴露試験法の再現性向上方法の検討

これまでの NEDO 事業（水素・リチウムイオン電池関係）で実施された火炎暴露試験関連のデータを整理した結果、検討方針として、バラツキの要因となる 5 項目（(1)火炎高さ、(2)火源の幅、(3)火源の種類（拡散火炎・予混合火炎）、(4)火源の均一性、(5)風の影響）に着目し、試験法改定に向けた検討を実施した。

基準バーナ

各試験機関が、新たなバーナを開発しなくても済むように、基準バーナを検討した。本検討には、カナダの試験機関である CSA（Canadian Standard Association）と協力しながら作業を行った。その結果、図 3-7 に示されるブンゼン型バーナを選定した。本基準バーナは風の影響が受けづらく、かつバーナの口金は誰もが入手できる汎用品とし、SAE の局所火炎暴露法の草案に採用された。



(a)バーナの全体　　(b)バーナ口金の配置　　(c)バーナ口金

図 3-7　基準バーナの選定

(1) 火炎高さ

SAE Safety TF の議長である Glenn Scheffler 氏は、局所火炎暴露試験での適切な火炎高さを導くために、過去に JARI で実施した模擬容器を搭載した車両火災試験での容器周囲の表面温度を解析した。局所火災の温度プロファイルは、火炎暴露試験の容器周囲の温度と火炎高さの関係から、火炎高さがタンク直径の 1/2 に相当すること。同様に、全面火炎時においてはタンク直径の 2/3 に相当する。接炎側と接炎反対側の温度差は火炎高さを変えることで再現できることを示唆し、Scheffler 氏は、JARI 車両火災試験データから示唆された温度差を火炎高さによって設定することで、実体に即した再現性のある試験方法を定義する方針とした。

通常、内装材等の燃焼試験では、定められた標準火源により試験体を火炎に晒し、延焼速度などが評価される。局所火炎暴露試験においても、試験前に標準火源を設定することとする。その流れは、以下の通りである。

1. 要求すべき火炎長となる標準火源を定義するために、JARI 車両火災データから導いた接炎側の容器温度を容器底部温度とみなした容器各部の温度条件を規定する。
2. この条件となる基準火源を得るために、試験で用いるバーナー火源がその要求条件を満たすために、以下の方法でバーナーを検定する。
   (ア) JARI 車両火災試験で使用した直径 320mm 容器の鉄管やペール缶のダミー容器を用い、従来の温度測定に加えて、容器中央および容器頂部などのダミー容器の表面温度を計測する。
   (イ) このダミー容器を局所火炎暴露させ、JARI 車両火災試験での容器周囲の温度分布になるように、LPG 流量を可変させる。
3. 容器を設置し、②（イ）で得られた LPG 流量によって、容器の火炎暴露試験を実施する。

(2) 火炎の幅

GTR13 Phase1 の局所火炎暴露試験では、バーナーで使用する火源の長さは局所火炎および全面火炎では定義されているが、火炎の幅に関しては規定されていない。火源の幅の違いによる火炎規模への影響を調査した。

図 3-8 に Henmi らによる、各種大きさを持つ長方形プロパンバーナーを用い、HRR/バーナー面積（A）と火炎高さの関係を示す。

HRR/A ＜ 1,000kW／m^2の場合、HRR/A が増加するにつれて火炎高さは増加する。また、バーナーの大きさが異なると、同じ HRR/A でも火炎の高さが若干異なり、その差は 0.2～0.4 m となる。よって、HRR/A ＜ 1,000kW／m^2では、火炎高さを同条件にするには、バーナーのサイズ（火源長と幅）を規定する必要がある。

同様に、数値シミュレーションモデル（CFD）によって、火炎幅の影響を調べた。図 3-9 にバーナ幅の容器底部の温度影響を示す。このシミュレーション結果からも、HRR / A が一定であっても火炎の高さはバーナーの幅に影響する。よって、HRR/A によって火源を規定する場合、バーナーの幅も規定する必要がある。

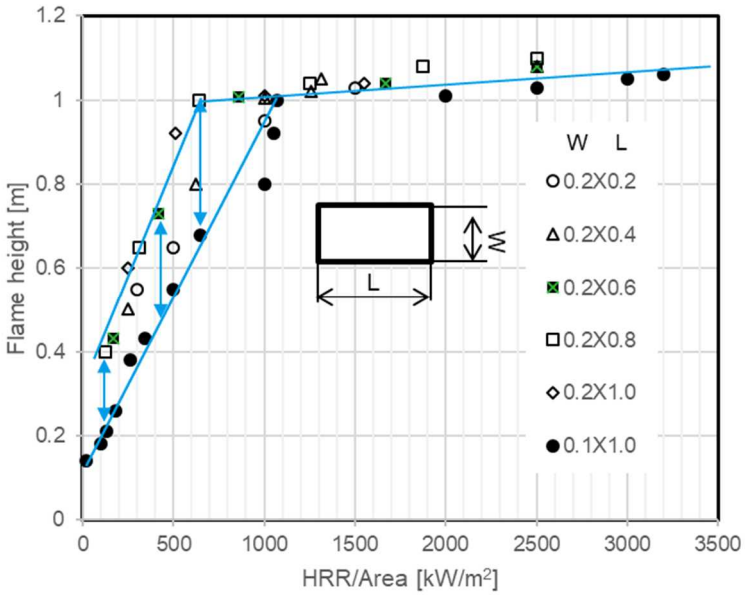


図 3-8　各種大きさの長方形プロパンバーナーの HRR/バーナー面積と火炎高さの関係

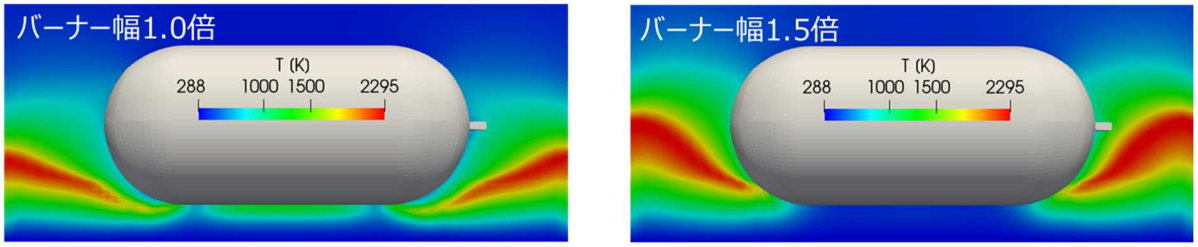


図 3-9　*HRR/A* が同一の場合のバーナ幅の容器底部の温度影響

そこで、火炎幅を規定するために、直径 700mm 程度の容器であっても対応できる火炎幅を調査した結果、火炎幅 500mm であればリーズナブルに対応できることが分かった。そのため、試験法草案には火炎幅を 500mm と設定することになった。

(3) 火源の均一性

LPG バーナーは、基本的にひとつのポート毎から燃料（あるいは空気と燃料の混合気）が噴出されて炎が形成され、その炎が複数集合した火源である。しかし、GTR13 Phase1 では、バーナーのポート間隔が規定されていないため、図 3-10 に示されるように、火源の不均一性は、容器への受熱に影響することが考えられる。よって、火炎の均一化が必要であるが、その均一性を定義および評価することは容易ではない。そのため、火炎の均一化を図るには、バーナーポート間隔の規定が必要となる。

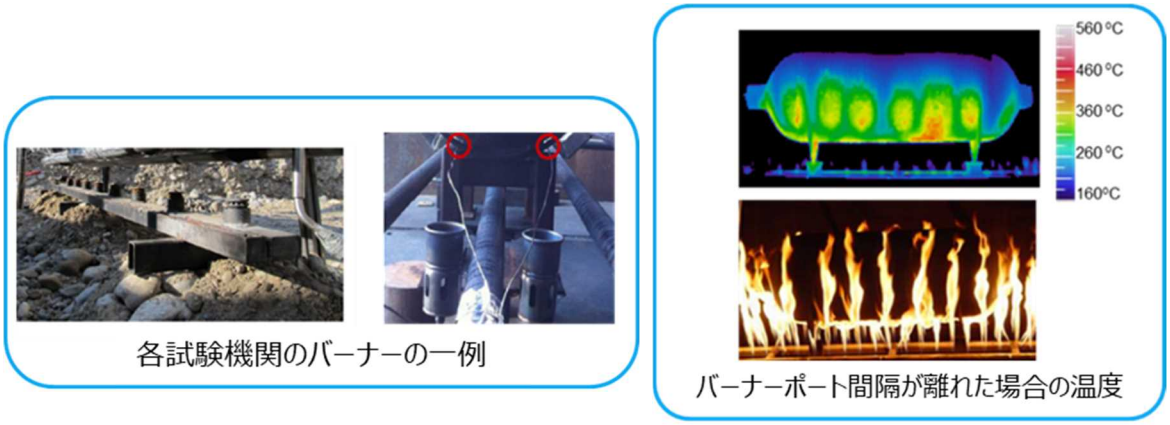


図 3-10　各試験機関でのバーナーのポート間隔とポート間隔による容器への熱影響

(4) 風の影響

火炎暴露試験は、日本自動車研究所（JARI）では屋内試験場を所有するが、国内外のほとんどの試験機関では、屋外にて実施される。故に、試験の再現性向上には、風の影響も考慮する必要がある。

風防のない屋外で実施した試験時の状況を図 3-11 に示す。また、この実験では風が強く、双方のバーナーは風の影響を受けた。

本ブンゼンバーナーは構造がシンプルであり、温度範囲が広く、かつ流量を増大させることにより拡散火炎と同様な火炎長が得られ、JARI の車両火災試験データに基づく温度設定要件を満たせる特性があった。



パイプバーナー（拡散火炎バーナー）



ブンゼン型バーナー

図 3-11　風防のない屋外で実施した試験時の状況

ラウンドロビン

本試験法に基づき、カナダ（Powertech と TestNET）、アメリカ（SWRI）、日本（JARI）が参加し、ラウンドロビン試験を実施した。ラウンドロビンの結果、一部の試験機関において風の影響を強く受けたことから、他の試験機関と外れている結果が得られているが、ほとんどの機関において、HRR/A に対する要求温度を満足した。この結果を受け、本試験法が GTR13 Phase2 にて提案・審議され、本試験法が採用されることになった。

ｃ．小径容器（新構成容器）の局所火炎暴露試験法

新構成容器（小径連結容器、Conformable 容器等）は幅広形状のため、単体容器に対する評価試験手法として設計された現行の GTR13 Phase1 では、火炎幅（500 ㎜）や火炎長さ（1650mm）のが新構成容器の全体を火炎暴露できない場合がある。そこで、新構成容器に対する適切な火炎暴露条件を検討し、安全を担保しつつ合理的な試験法案を提案する必要がある。本研究では新構成容器のための適切な試験手法を提案するため、ａ）模擬小径容器を搭載した車両火災試験およびｂ）既存の試験法案に基づく方法による小径容器の火炎暴露試験を実施した。

これらの結果を受けて、試験法案には、全面火炎域は TPRD の方向へ延長するようにバーナの設置要件（図 3-12）およびバーナと供試体の高さ要件（200~250mm）（図 3-13）が加えられた。

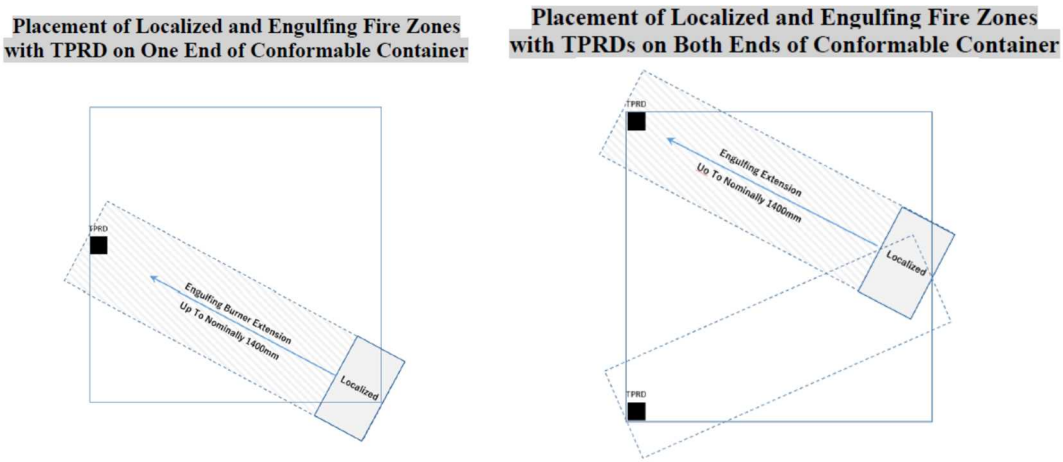


図 3-12　小径容器の火炎暴露試験の TPRD とバーナーの設置要件

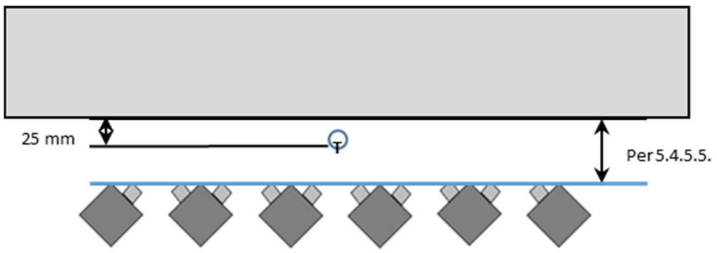


図 3-13　バーナーと供試体の高さ要件

② サブテーマ 2-2：金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大

2017 年 10 月に開始された GTR13 Phase2 では、材料指定や成分規定の代わりとなる水素適合性試験法による材料選定についての審議が開始された。GTR13 に提案する水素適合性試験法については、米国 SAE (Society of Automotive Engineers) Fuel Cell Safety Task Force の中に設けられた材料専門家会議に、各国が意見を持ち寄って議論する形で進められた。

2017 年度までの NEDO「水素利用技術研究開発事業」（前 NEDO 事業）では、オーステナイト系ステンレス鋼の規格下限材料評価データに基づく水素適合性試験法および判定基準の日本案を構築し、SAE 材料専門家会議へ提案した。元来日本では平滑試験片の引張・圧縮疲労の S-N 曲線を求め、水素適合性の合否を判定しており、提案した日本案もこの判定方法に基づいている。一方海外では、比較的試験の容易な切欠き試験片の引張・引張疲労データによる材料の水素感受性評価に特化して適否を判定する手法が主流となっており、切欠き試験片で疲労寿命を確認する評価法が海外から提案されている。これら二つの案がある中で、GTR13 に提案する水素適合性試験法をどのようにまとめるか国内外で審議し、合意を得る必要があった。

また、自動車用水素部品の鋼種拡大によるコスト低減を実現するため、日本提案の水素適合性試験法を用いて自動車業界が将来的に採用を要望する廉価材の SUS304 市中材を評価した。この水素適合性材料評価データの取得・解析を国立研究開発法人産業技術総合研究所に再委託して実施した。

水素適合性試験法国際合意案の検討については、国立大学法人東京大学に再委託して実施した。また、GTR13 Phase2 の審議課題の一つである、アルミニウム合金の HG-SCC（湿潤ガス応力腐食割れ）試験法は日本の提案であり、国際合意するための最終提案が必要となる。本件についても水素適合性試験法に準ずる材料評価法の一環として、国立大学法人東京大学に再委託し国際提案のためのドラフトおよび技術的根拠の明文化を行った。さらに、UN R134 (HFCV)への織込みに向けた課題についても、国立大学法人東京大学に再委託してまとめた。

ａ．金属材料の水素適合性試験法確立（担当：日本自動車研究所、再委託：東京大学）

自動車用圧縮水素容器の安全性を保持し、コスト削減ならびに量産性向上などもあわせて成立させるためには、容器および周辺機器に使用される鉄鋼材料に関して、高圧水素中の材料特性と使用条件を正確に把握した上で、供用期間中に十分な信頼性が確保できる基準を設定可能な合理的材料試験法の確立と国際基準調和・国際標準化が極めて重要である。そのためには高圧水素中の材料特性検証結果に基づいた合理的でかつ安全性を確保した鋼種を限定しない材料評価方法を提案し、GTR13 Phase 2 の審議を通して国際基準調和を進める必要がある。

2017 年度までの NEDO 事業「水素利用研究開発事業／燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化、国際基準調和・国際標準化に関する研究開発／自動車用圧縮水素容器の基準整備・国際基準調和に関する研究開発」では、オーステナイト系ステンレス鋼の規格下限材料評価データに基づくオーステナイト系ステンレス鋼の水素適合性試験法を作成し、米国 SAE J2579（水素容器）へ提案した。

その後、日本案と海外案を組み合わせた SAE 案が GTR13 Phase 2 へ提案された。元来日本では平滑試験片の引張・圧縮疲労の S-N 曲線を求め、水素適合性の合否を判定している。一方海外では比較的試験の容易な切欠き試験片の引張・引張疲労データによる材料の水素感受性評価に特化して材料適否を判定する手法が主流となっている。よって、日本案は平滑試験片で疲労寿命を確認する評価法だが、海外案では切欠き試験片で疲労寿命を確認する評価法が提案されている。

本事業では、GTR13 Phase 2 での国際合意に向けて、課題整理およびその対応策を作成し、国内合意を得た水素適合性試験法（国内案）を基に、SAE の材料専門家会議および GTR13 Phase 2 インフォーマルワーキング（IWG）で議論を進め、水素適合性評価試験法案、Rationale 案について技術的な面からの再検討を行って修正を進め、提案の採択に繋げることを目的とする。

前事業の成果であるオーステナイト系ステンレス鋼の高圧水素中材料評価試験法案について、SAE 材料専門家会議で従来から議論を続けてきた試験法案との違いを明確にした。その結果に基づき、国際合意を得る目的で SAE 材料専門家会議にて日本から提案する材料評価方法案を作成、HFCV 基準検討委員会で議論して国内合意を得た。さらにその試験法案を基に SAE 材料専門家会議、GTR Phase2 IWG 会議等にて自動車搭載用高圧水素部品の水素適合性評価方法について議論し、各国の意見を集約しながら試験法案の修正を進めてきた。

今までは主としてオーステナイト系ステンレス鋼で得られたデータを基に議論を進めてきたが、GTR13 では対象材料がオーステナイト系ステンレス鋼から全ての金属材料に拡大されるため、評価基準等において細かい点で矛盾が生じるようになった。そこで SSRT 試験の評価基準の見直しを行い、判定基準を水素中において降伏強度の低下しないことに限定した。さらに従来の試験結果で観察された試験片あるいは試験装置等に起因するバラツキを考慮して、水素中の降伏強度が同一温度において大気中にて求められた降伏強度の 80%を超えることとした。

一方で疲労試験については、アメリカなど海外の主張する切欠き疲労試験と、日本が主張する平滑疲労試験の間で意見相違があり、最終的に両者を認めることとした。水素適合性試験の最終的な形として、切欠き疲労試験のみの試験方法(Option 1)と SSRT 試験と平滑疲労試験の両者を課す試験方法(Option 2)を並列し、どちらか一方の試験でパスすれば合格とすることで合意した。

Option 1 では SSRT 試験は課さず、切欠き疲労試験のみで評価する。一方 Option 2 ではまず SSRT 試験で評価した後、基準をクリアした材料を平滑疲労試験で評価する。評価基準については引張強度の三分の一の応力にて試験を行い、所定回数(切欠き試験片：10^5 回、平滑試験片：2×10^5 回)で破断しないこととした。試験方法の流れを図 3-14 に示す。

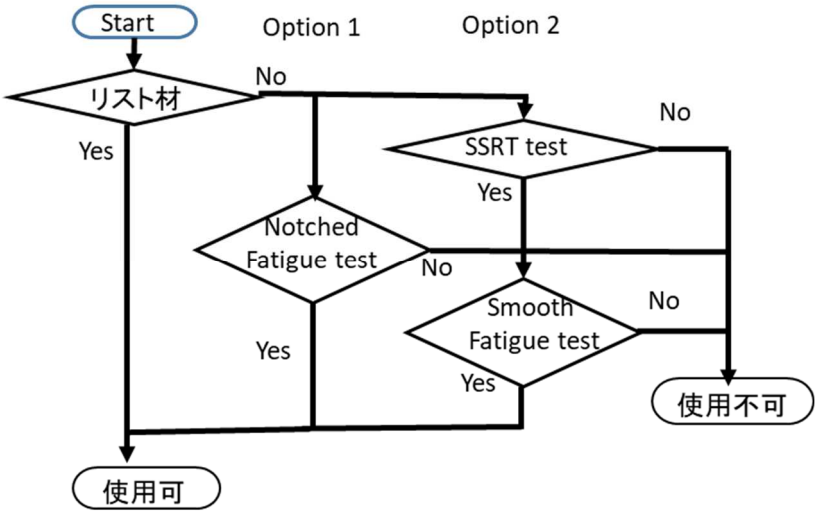


図 3-14　水素適合性試験のフロー

試験条件に関しては、SSRT 試験、疲労試験ともそれぞれ従来の試験データに基づいた最も厳しい条件のみに限定することとした。疲労試験では実証試験データ、および従来の試験データから、室温試験における疲労限応力が低温試験で得られる値よりも低くなることが確認されたことにより、試験温度条件は切欠き試験片、平滑試験片とも室温(293±5K)のみとした。一方 SSRT 試験では、実証試験で得られたオーステナイト系ステンレス鋼の試験データによって、高圧水素中において伸び等の劣化度が低温試験の方が室温試験より大きいことが確認されていることから、試験温度条件は低温(228±5K)とした。その他の試験条件は従来どおりで変更なし。試験条件と評価基準を表 3-1 に示す。

表 3-1　試験条件と評価基準

試験条件		切欠き付き疲労 (Option 1)	平滑疲労 (Option 2)
疲労寿命試験	試験条件	水素圧：1.25NWP 以上 温度：293±5K 試験応力：≧1/3 TS Frequency：1 Hz	水素圧：1.25NWP 以上 温度：293±5K 試験応力：≧1/3 TS Frequency：1 Hz
	試験数	3	3
	要求値	$N>10^5$	$N>2\times10^5$
SSRT 試験	試験条件	Not Required	水素圧：1.25NWP 以上 温度：228±5K 歪速度：$\leqq 5\times10^5\ S^{-1}$
	試験数		3
	要求値		$YS(H_2) > 0.8\times YS(Air)$

ｂ．水素適合性材料評価データの取得（担当：日本自動車研究所、再委託：産業技術総合研究所）

自動車用水素関連部品での利用が期待されている SUS304 材を使用可能材料として確定するためのデータ取得を目的とする。現在流通している種々の材料に対応するために、3 種の国内流通の SUS304 材を用いて、室温と低温の SSRT 試験及び室温と低温の疲労寿命試験を実施した。

1)　試験材料

国内市場で手配可能な材料について調査を行った結果、SUS304 市中材として国内メーカー2 社製鋼材（A 材、B 材）および国内流通海外材として海外メーカー製鋼材（C 材）を入手した。ミルシートから転載した各社製鋼材の組成ならびに機械的特性を、平成 25～29

年度に実施された水素利用技術研究開発事業で用いた SUS304 市中材（以後前 NEDO 事業材と記す）とともに、表 3-3、表 3-4 に示す。表 3-3 より A 材、B 材、C 材全ての材料組成は JIS 基準を満たしており、表 3-4 より降伏応力は（前 NEDO 事業材）＞B 材＞A 材＞C 材の関係であった。
また、図 3-15 に入手した A 材、B 材、C 材に関する圧延ロール当たり面、圧延方向軸平行側面､圧延方向軸垂直面の光学顕微鏡による結晶組織写真を前 NEDO 事業材とともに示す。A、C 材は、前 NEDO 事業で用いた SUS304 と比較してやや粗い結晶組織であった。組織写真より線分法で求めた 3 方位を含んだ平均結晶粒径は、前 NEDO 事業材 32μm、A 材 57μm、B 材 34μm、C 材 79μm であり、C 材＞A 材＞B 材＞前 NEDO 事業材の関係であった。

表 3-3　入手した SUS304 市中材の材料組成(mass%)

SUS304	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	Cu	N	Fe	Ni当量
JIS spec.	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	8.00 ～10.50	18.00 ～20.00	–	–	–	–	Bal.	
前NEDO	0.06	0.40	0.83	0.028	0.004	8.09	18.17	0.22				Bal.	21.6
A	0.04	0.54	1.24	0.030	0.001	8.21	18.25	0.1				Bal.	22.1
B	0.05	0.55	0.92	0.037	0.002	8.05	18.16	0.23				Bal.	21.6
C	0.051	0.50	0.96	0.031	0.002	8.04	18.24	0.18	0.12	0.25	0.037	Bal.	21.8

Hirayama の Ni 当量=12.6[%C]+0.35[%Si]+1.05[%Mn]+[%Ni]+0.65[%Cr]+0.98[%Mo]

表 3-4　入手した SUS304 市中材の機械的特性

SUS304	*Ys* (MPa)	*Ts* (MPa)	*El* (%)
JIS spec.	≧205	≧520	≧40
前NEDO	279	646	60
A	264	639	65
B	269	653	58
C	244.0	653.7	65.8

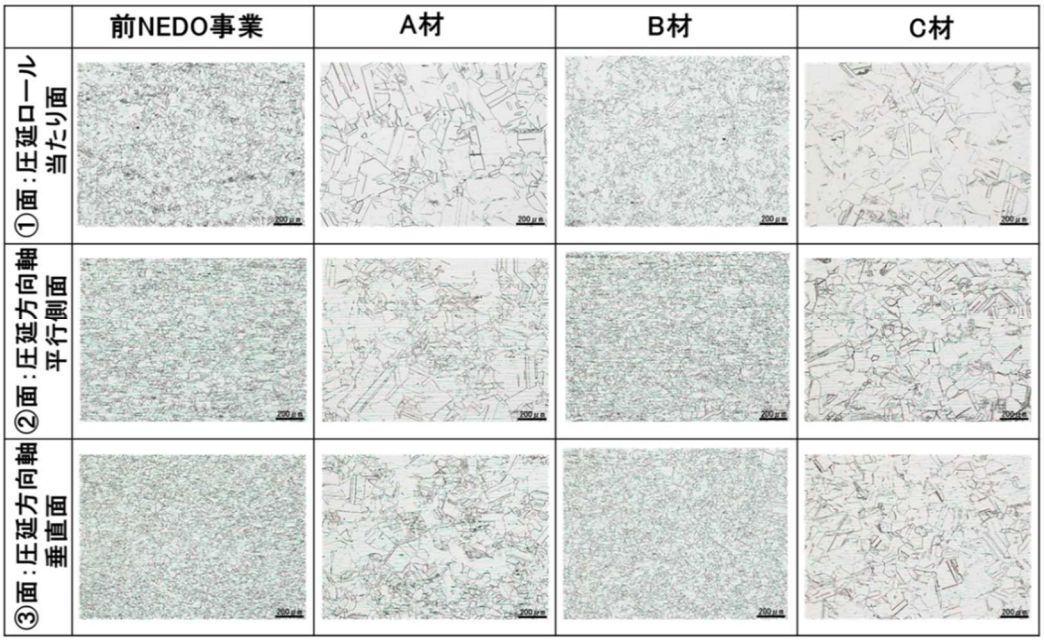


図 3-15　入手した SUS304 市中材の結晶組織写真

2) 試験片形状及び試験条件

試験片形状については前 NEDO 事業と同様とし、SSRT 試験片は ASTM E3 に準拠した直径 6mm の平滑丸棒試験片、疲労寿命試験片は ASTM E466 に準拠し九州大学で用いられている直径 7mm の平滑丸棒試験片とした。図 3-16 に SSRT 試験片形状を、図 3-17 に疲労試験片形状を示す。

SSRT 試験条件は SUS304 に関する前 NEDO 事業実証試験結果から、大気中ならびに 105MPa（1.5 NWP）水素ガス中、室温（25±5℃）、-45±5℃、歪速度は ASTM G142 に準拠した 5×10^{-5} /s で各 3 本実施し、0.2%耐力に相当する降伏応力（Ys）、引張り強さ（Ts）、破断後試験片の突き合わせ伸び（El）、および絞りを求めた。試験結果より、105MPa 水素ガス中、-45±5℃での Ys が室温と同等以上、El が 10%以上かを確認することとした。ただし、大気中 SSRT 試験と高圧水素ガス中 SSRT 試験は異なる材料試験装置を用いた。

疲労試験条件についても、前 NEDO 事業と同じ条件を用いた。まず参照用のデータを取得するために、大気中室温（25±5℃）で試験周波数 1Hz、引張-圧縮荷重下（R = -1）の条件で最大 1×10^6 回まで疲労試験を実施し、疲労限応力を確認した。高圧水素ガス中の疲労試験は、1.25NWP（90MPa）以上である 100MPa 水素ガス中、室温（25±5℃）、-45±5℃、試験周波数 1Hz、引張-圧縮荷重下（R = -1）において実施した。先ず試験片 1 本について、大気中の疲労限応力に相当する試験応力を印加し高圧水素ガス中室温で 1×10^6 回まで試験を実施し、室温での疲労限応力が大気中と水素ガス中で同等であること確認することとした。さらに試験片 1 本について、大気中の疲労限応力相当以上の試験応力を印加し高圧水素ガス中低温で 2×10^5 回まで試験を実施し、高圧水素ガス中低温での疲労強度が大気中室温よりも高いこと確認することとした。次いで、3 本の試験片を用いて、ミルシートに記された引張強さ（Ts）の 1/3 に相当する試験応力（A 材：213MPa、B 材：218MPa、C 材：218MPa）で高圧水素ガス中室温および低温で 2×10^5 回まで疲労試験を行い、未破断を確認することとした。ただし、大気中疲労試験と高圧水素ガス中の疲労試験は異なる材料試験装置を用いたため、大気中と高圧水素ガス中疲労試験の試験応力は厳密には一致していない。

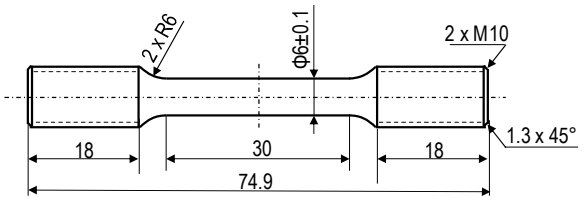


図 3-16　SSRT 試験片形状

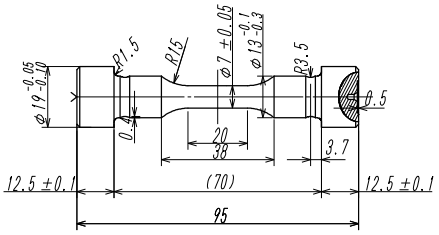


図 3-17　疲労寿命試験片形状

3) 試験結果

A 材、B 材、C 材の室温（25±5℃）における大気中および高圧水素ガス中での SSRT 試験結果ならびに低温（-45±5℃）における大気中および高圧水素ガス中での SSRT 試験結果をそれぞれ図 3-18(a)、(b)、図 3-19(a)、(b)、図 3-20(a)、(b)に示す。また、SSRT 試験結果より得られた *Ys*（降伏応力）、*Ts*（引張強さ）、伸び、絞りの平均値を表 3-5、表 3-6、表 3-7 にそれぞれ示す。全ての試験条件において *Ys* は B 材＞A 材＞C 材の順に低下した。C 材の *Ys* は A 材、B 材よりも低い値を示したが、ミルシートに記された A 材、B 材、C 材の *Ys* 値の傾向と矛盾していない。また、A 材、B 材、C 材ともに同じ試験温度において高圧水素ガス中で得られた *Ys* は大気中で得られた *Ys* の 80%以上の値を示しており、高圧水素ガス中と大気中では異なる試験装置を使用していることを考慮しても、SUS304 市中材の高圧水素ガス中での降伏応力 *Ys* は大気中とほぼ同等であると考えられる。さらに、全ての測定条件において伸び（*El* ）は 10%以上であった。よって、SUS304 市中材は GTR13 Phase2 において議論されている高圧水素ガス中 SSRT 試験に関する水素適合性試験案に適合すると想定される。

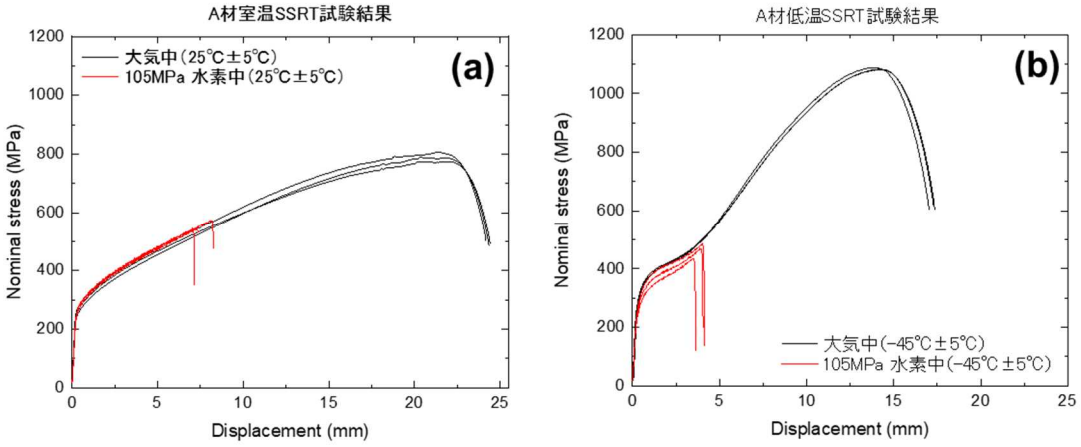


図 3-18　SUS304 A 材の SSRT 試験結果　(a)室温（25±5℃）　(b)低温（-45±5℃）

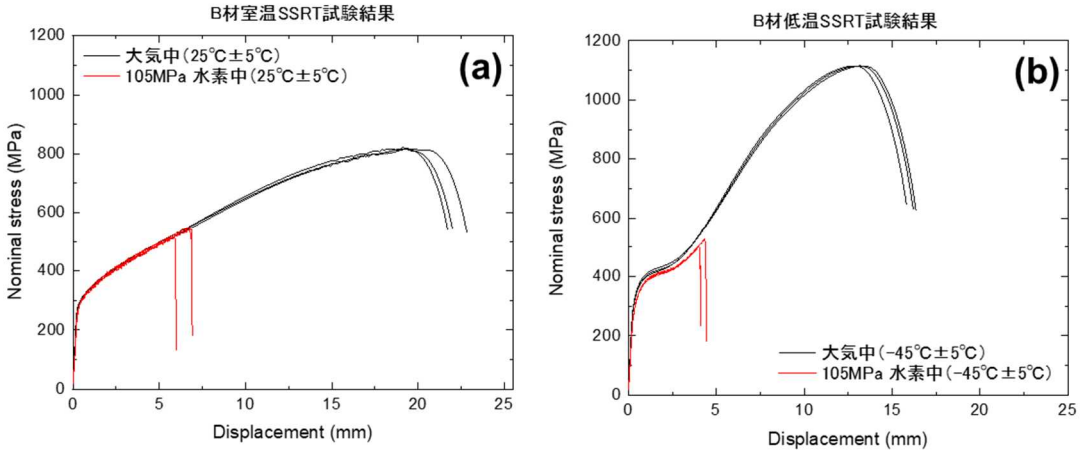


図 3-19　SUS304 B 材の SSRT 試験結果　(a)室温（25±5℃）　(b)低温（-45±5℃）

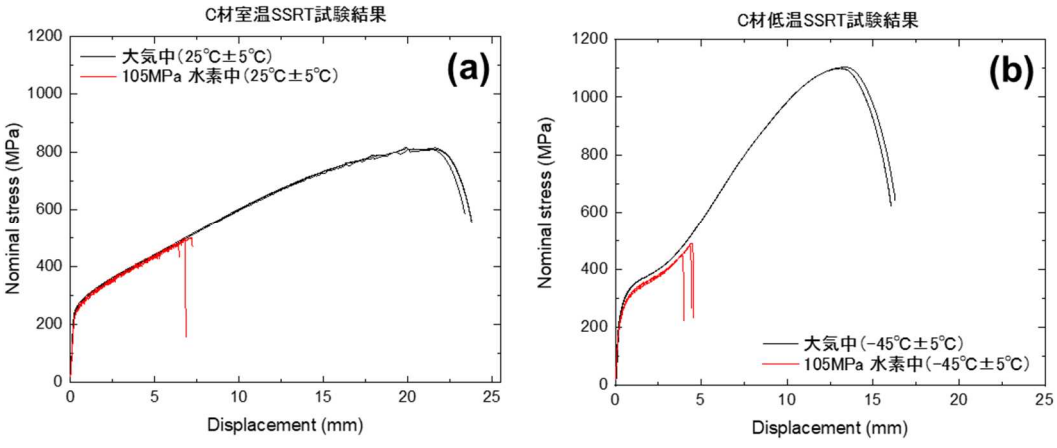


図 3-20　SUS304 C 材の SSRT 試験結果　(a)室温（25±5℃）　(b)低温（-45±5℃）

表 3-5　SUS304 A 材の SSRT 試験結果

SUS304 A材	環境	試験温度	*Ys* (MPa)	*Ts* (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
JIS			≧205	≧520	≧40	
ミルシート			264	639	65	
平均値	大気中	25±5℃	246	791	71.7	79.8
平均値	水素中	25±5℃	254	556	22.5	23.0
平均値	大気中	-45±5℃	272	1084	48.2	78.3
平均値	水素中	-45±5℃	248	465	12.4	12.4

表 3-6　SUS304 B 材の SSRT 試験結果

SUS304 B材	環境	試験温度	*Ys* (MPa)	*Ts* (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
JIS			≧205	≧520	≧40	
ミルシート			269	653	58	
Ave	Air	R.T.	274	818	66.3	78.6
Ave	H2	R.T	269	536	19.5	17.6
Ave	Air	-45 ℃	297	1115	45.7	78.1
Ave	H2	-45℃	283	511	13.2	12.9

表 3-7　SUS304 C 材の SSRT 試験結果

SUS304 C材	環境	試験温度	*Ys* (MPa)	*Ts* (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
JIS			≧205	≧520	≧40	
ミルシート			244.0	653.7	65.8	
Ave	Air	R.T.	237	813	67.5	76.6
Ave	H2	R.T	231	491	20.5	22.1
Ave	Air	-45 ℃	235	1102	44.6	76.5
Ave	H2	-45℃	215	475	13.0	11.2

図 3-21 に A 材、B 材、C 材の室温（25±5℃）および低温（-45±5℃）での疲労試験の結果を、前 NEDO 事業で得られた破壊確率データとともに示す。SSRT 試験結果からも予想されるように、C 材の *Ys* は A 材、B 材よりも低いため、大気中での疲労試験から想定される疲労限応力は低めとなった。そこで、図 3-21 のデータを基に、疲労試験の試験応力（σa）をミルシートの降伏応力（σy）で除すことで正規化した S-N 線図を図 3-22 に示す。A 材、B 材、C 材の疲労限応力は前 NEDO 事業で求めた破壊確率 10%～90%の領域に収まっており、これら全ての SUS304 の疲労特性は同等であると考えられる。併せて図 3-21、図 3-22 では、大気中疲労試験で求めた疲労限応力に相当する試験応力（A 材：241MPa、B 材：246MPa、C 材：218MPa）および、ミルシートに記された引張強さの 1/3 に相当する試験応力（A 材：213MPa、B 材：218MPa、C 材：218MPa）で高圧水素ガス中疲労試験を各 3 本実施した結果も赤色で示している。図から分かるように、高圧水素ガス中において 1×10^6 回まで破断しないことから、疲労強度は大気中と高圧水素ガス中ではほぼ同等と考えられる。低温（-45±5℃）水素中では室温大気中における疲労限直上の応力レベルでも未破断であり、低温の疲労限は、室温よりも高いと考えられる。

また、同じく図 3-21 のデータを基に、疲労試験の試験応力（σa）をミルシートの引張強さ（σb）で除して正規化した S-N 線図を図 3-23 に示す。図中の緑色の横線は引張強さの 1/3 を示す。高圧水素ガス中において引張強さの 1/3 の試験応力で疲労試験を実施した場合、A 材、B 材、C 材ともに 2×10^5 回まで未破断であることが分かる。

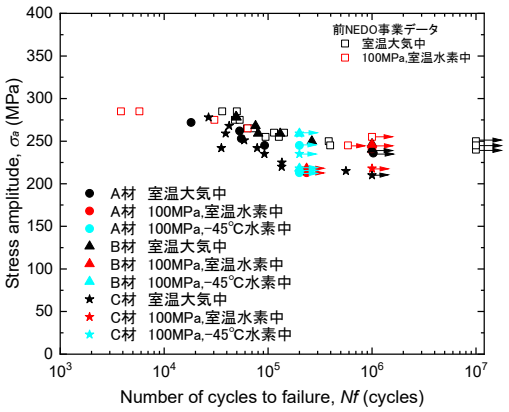


図 3-21　A 材、B 材、C 材の室温（25±5℃）、低温（-45±5℃）疲労試験結果

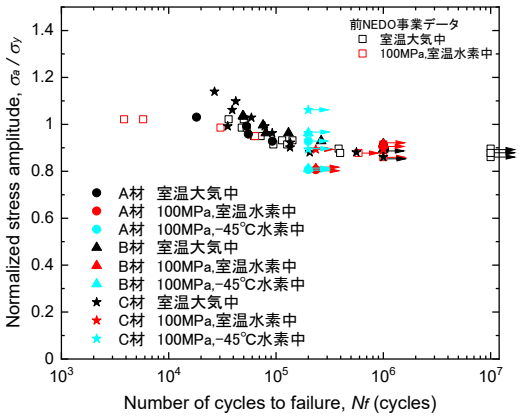


図 3-22　降伏応力で正規化した A 材、B 材、C 材の室温（25±5℃）、低温（-45±5℃）疲労試験結果

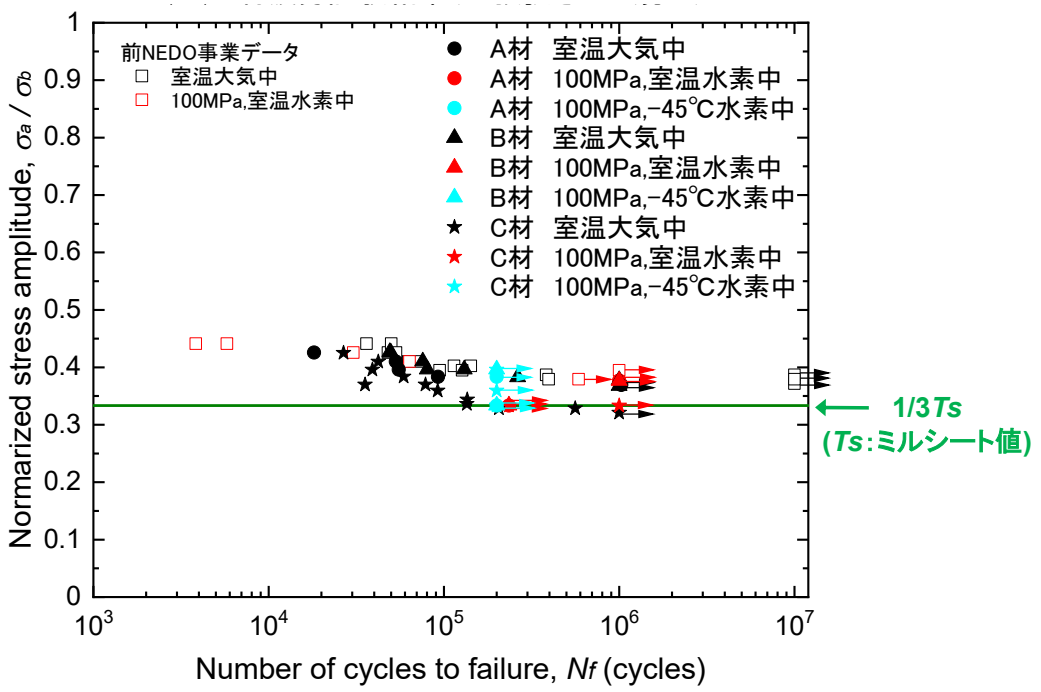


図 3-23　引張強さで正規化した A 材、B 材、C 材の室温（25±5℃）、低温（-45±5℃）疲労試験結果

4)　まとめ

代表的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 の市中材について、大気中および高圧水素ガス中で室温（25±5℃）もしくは低温（-45±5℃）で、低歪速度引張（SSRT）試験ならびに疲労寿命試験を実施し、試験データを取得した。

SSRT 試験においては、試験温度が同じ場合、高圧水素ガス中の降伏応力（*Ys* ）は大気中とほぼ同等であることが明らかになった。室温で実施した疲労試験においては、大気中と高圧水素ガス中の疲労限応力はほぼ同等で有った。また、高圧水素ガス中低温での疲労強度は高圧水素ガス中室温での疲労強度よりも高いと想定された。さらに、ミルシートに記された引張強さの 1/3 に相当する試験応力で高圧水素ガス中室温および低温において疲労試験を実施した場合、全ての試験片が 2×10^5 回まで未破断であることを確認した。よって、SUS304 市中材は GTR13 Phase2 において議論されている高圧水素ガス中疲労試験に関する水素適合性試験案に適合するものと考えられる。

３．２　成果の意義

国際商品である FCV の普及拡大には、水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準 HFCV-GTR などの国際基準調和の推進による安全基準の共通化や相互認証の実現に向けた取り組みが不可欠である。また、こうしたイニシアチブを通して先行技術の優位性を確保することにより、国際競争力の確保や産業育成にも貢献し、HFCV-GTR Phase2 の円滑な国内導入を図ることができる。そのためには、HFCV-GTR Phase2 の審議を日本がリーダシップを発揮しながら活動する必要があり、本課題の成果は、この活動のために寄与され、国際標準化に貢献する。

３．３　開発項目別残課題

（１）国際基準調和活動

国連の HFCV 国際統一技術基準 GTR13 Phase2 策定のため、各国代表による技術審議を行う Informal Working Group（IWG）が 2017 年 3 月に発足した。IWG は 2022 年 6 月の第 15 回まで開催された。本研究開発の成果による試験法提案も予定通り全て国際合意に至り、それらも含めて最終ドラフトを IWG で合意し、同年 9 月に上位会議体の GRSP（衝突安全分科会）に提出され、同年 12 月の GRSP で承認された。現在 GRSP から最上位会議体の WP29（自動車基準調和世界フォーラム）に最終ドラフトが提出され、2023 年 6 月の WP29 で承認され最終的なエディトリアル修正が行われ、2023 年 11 月の WP29 で発効となる予定。またこの GTR13 Phase2 の試験法を基に、加盟国間の相互認証規則 UN R134 の審議も開始され、2023 年 5 月の GRSP 合意を目標に議論を継続している。最終的には 2023 年 12 月の WP29 で承認後、2024 年の発効を目指している。図 3-24 に国際基準調和の成果と今後の課題を示す。

項目	目標	結果（GTR13 Phase2）	今後の課題
容器初期破裂圧適正化	初期破裂圧基準 225%NWP ➡200%NWP	**国際合意** (35MPa容器は225%NWP選択可：中国要望)	なし
容器火炎暴露試験再現性向上	試験機関によらず結果が同一となる試験法に改訂	**国際合意** (バーナー仕様統一、容器周辺温度プロファイルの規定)	なし 但しHDV対応、次世代容器対応は要検討
金属材料の水素適合性試験法作成	FCV用材料認定基準として世界共通となる試験法の作成	**国際合意** (Part I：Rationaleパートに記載)	緊急性のある課題はなし 但し以下は要検討 ・OK材料のリスト整備 ・鋼種拡大時の適合性
	SUS304市中材の水素適合性評価の完了	**評価完了** GTR13提案試験法の要求を満足することを確認	技術課題はなし 今後の対応は、産業界が活用可能なデータベース化
アルミニウム合金の腐食試験法(HG-SCC試験法)作成	湿潤環境中の応力腐食割れ耐性を正しく評価できる試験法の作成	**国際合意** (Part I：Rationaleパートに記載)	なし

図 3-24　国際基準調和の成果と今後の課題

（２）火炎暴露試験法

・火炎暴露試験（Time out 試験法）の検討

大型・商用車の場合、金属性の車両のフレーム上に樹脂等の可燃物となる材料が、連続して分布していないケースがあり、火災時において、必ずしも大型車のすべてが全焼するとは限らない。そのため、長尺容器を大型・商用車に搭載した場合、条件次第では、長尺容器全体が火炎に晒されない可能性がある。現行の GTR13 Phase1 の火炎暴露試験法は乗用車火災がベースとなっており、車両火災が発生すれば、最終的に容器全体が火炎に包まれ、TPRD

が作動する設計となっている。一方、大型・商用車で想定される長尺容器においては、TPRD まで火炎が届かず、TPRD の作動が遅延する、あるいは作動しない懸念がある。このような背景から、米国 NIKOLA 社は、TPRD の作動遅延や作動しない想定であっても、大型・商用車が出火から鎮火するまでの時間を根拠とした火炎暴露時間に耐え、かつ火炎暴露後も焼損容器が一定の耐圧性能を有していれば、容器の安全性能を満足しているとみなす Time out 試験法を提案した。本試験法を適用するためには、各国間で使用されている車種等の適用範囲なども考慮した上で、安全かつ合理的な試験法にする必要があり、それぞれの国で普及する大型車両の実態に合わせて試験法の国際統一基準化が求められる。このため日本を含めて世界各国がデータを取りまとめた上で、試験法の開発および妥当性の検証に取り組む必要がある。

・3m 以上の長尺容器に対する火炎暴露試験手法の検討
GTR13 の火炎暴露試験法では火源長が 1.65m と規定されているが、大型・商用車で想定される 3m 以上の長尺容器の場合、TPRD に火炎が届かず、TPRD を作動させることが困難である。そのため、TPRD を作動させるために、容器から延長配管を用いて火炎が届く範囲に TPRD を設置する手法、あるいはリモート TPRD が検討されている。しかし、延長配管は衝突時の加速度や接触などによる変形、火災時の熱を受けた配管の強度低下や熱応力などによって破断や接続部の外れ等が生じ、水素漏洩する可能性がある。また、リモート TPRD に関しては、経年劣化や衝撃などによる信頼性の問題が考えられる。このため、TPRD の延長配管に対する衝撃および耐火性能などを評価し、延長配管によるリスクを抽出するとともに、提案された試験法に対する評価を行う必要がある。

（3）水素適合性試験法
SAE 材料専門家会議で合意した試験方法は、オーステナイト系ステンレス鋼を使用した試験データに基づいて検討された。そのためにそれ以外の材料へ展開されたことにより、いくつかの課題が存在している。
SSRT 試験の温度に関しては、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、低温で歪を加えることによってマルテンサイト変態が生じ、水素脆化感受性が増大する。そのため実証試験結果に基づいて-45℃が最も厳しい条件として試験方法に取り込まれた。一方で、低温でも結晶構造が変わらない他の材料において、-45℃付近が最も厳しい条件かどうかはまだ十分に検証されていない。水素の拡散挙動を考えた場合、材料によっては水素が動きやすいより高い温度が厳しくなる可能性もある。現在はオーステナイト系ステンレス鋼が車載用高圧水素容器部品として考えられているので問題はないが、将来他の材料を検討する場合には、より安全性を高めるために-45℃だけでなく、幅広い温度条件における挙動も考慮しておく必要がある。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ
サブテーマ１：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）に関する国際基準調和・標準化活動
2017 年 10 月に開始された GTR13 Phase2 審議に参画し、日本から提案した主な課題（破裂圧力適正化・水素適合性試験法・アルミニウム合金の腐食試験法）および容器火炎暴露試験法を中心に、専門家によるデータに基づく技術審議を推進した。その結果、日本提案が織り込まれた GTR13 Phase2 の国際合意が得られたことで、本研究開発の目的を達成することができた。
今後、日本提案が織り込まれた GTR13 Phase2 が、国内導入されることにより、燃料電池自動車の円滑な国際展開が可能となる。また、容器破裂圧力の適正化および使用可能材料の拡大により、容器の軽量化・コスト削減が可能となる。

サブテーマ２：FCV の国際技術基準（HFCV-GTR Phase2 等）策定に資する研究開発
2-1.容器火炎暴露試験の見直し
GTR13 Phase1 では、海外で発生した圧縮天然ガス自動車の火災時の容器破裂事故を受

け、容器の局所火炎暴露試験が規定された。しかしながら、この局所火炎暴露試験の再現性が低いことが明らかとなり、GTR13 Phase2 審議において、局所火炎暴露試験法の見直し（再現性向上）に関わる審議が開始された。これまでの JARI の火炎暴露試験関連のデータを整理した結果、火源の幅、火炎高さ、火源の均一性、風速および局所火炎域の長さなどの規定で再現性の向上が可能となる見込みがあることがわかった。本研究開発では、この火炎定義に基づいた日本提案のとりまとめおよび国際合意に資する技術検討を実施した。

具体的には、(1)火炎高さ、(2)火源の幅、(3)火源の種類、(4)火源の均一性、(5)風の影響について、それぞれの影響や対応のため、数値シミュレーションや実証実験によって解析を行い、試験法案を提案した。また、CSA と共同で安定した火床仕様を実現できるブンゼン型バーナーを用いた試験法を検討した。基準バーナーとして、汎用品を用いたブンゼン型バーナーの仕様を規定した。試験法としては、ダミー容器を用いた Pre-test を実施し、既定の容器周囲温度プロファイルが実現できることを確認した上で本番試験を実施することとし、国際合意を得た。

2-2.金属材料の水素適合性試験法確立と鋼種拡大

GTR13 Phase1 では、金属材料に関する規定は見送られ、各国の基準を適用することとされた。そこで、前 NEDO 事業で水素適合性試験法の日本案およびアルミニウム合金の腐食試験法案を作成した。GTR13 Phase2 では、材料指定や成分規定の代わりとなる水素適合性試験法による材料選定についての審議が開始された。本研究開発では、前 NEDO 事業で作成した水素適合性試験法の日本案をベースに、海外の意見・データを考慮して試験法案を修正した。その結果、日本提案 SSRT 試験＋平滑法試験の場合とアメリカを中心とした海外の切欠き疲労試験のみの場合との並立とし、どちらかの方法で合格すれば使用可能とする試験法として取りまとめられ、国内合意を得たうえで、GTR13 Phase2 に提案された。

また、自動車用水素部品の低コスト化に向け、廉価材である SUS304 を使用可能材料として確定するため、SUS304 の市中材の材料データ取得およびデータ解析を実施し、水素適合性試験法の日本案に適合することが確認できた。

アルミニウム合金の腐食試験法に関して、HPIS E103:2018 をベースにアルミニウム合金の HG-SCC 試験法を作成し、GTR13 Phase2 へ提案した。また本試験方法を用いてドイツの MPA で評価を行った結果、HG-SCC の発生が確認できた。

今後の課題として、GTR13 Phase2 で提案された水素適合性試験方法はオーステナイト系ステンレス鋼の試験結果をベースに作成されたものであるため、他金属材料への展開の際に注意すべき点が存在する可能性がある。また、将来的に十分なデータが蓄積された段階で、試験に合格した材料についてリスト化すると同時にその評価試験結果をデータベース化することによって、安全性と経済性を両立した材料選択が可能な環境を整えることが必要である。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 9 月	The 8th international conference on hydrogen safety (ICHS 2019)	The Study on Permissible Value of Hydrogen Gas Concentration in Purge Gas of Fuel Cell Vehicles	山崎 浩嗣, 田村 陽介 (JARI)
2	2019 年 9 月	The 8th international conference on hydrogen safety (ICHS 2019)	Influences of hydraulic sequential tests on the burst strength of type-4 compressed-hydrogen containers	冨岡 純一, 増田 竣亮, 田村 浩明, 田村 陽介 (JARI)
3	2019 年 9 月	The 8th international conference on hydrogen safety (ICHS 2019)	A study of decrease burst strength on compressed-hydrogen Containers by drop test	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 田村 陽介 (JARI)
4	2019 年 11 月	第 33 回数値流体力学シンポジウム	高圧水素容器の火炎暴露試験の数値シミュレーション	山田 英助, 田村 陽介 (JARI)
5	2019 年 12 月	(一社)日本高圧力技術協会 技術セミナー	湿潤ガス応力腐食割れ挙動に基づくアルミニウム合金の適合性評価	小川 武史 (青学大)
6	2019 年 12 月	(一社)日本高圧力技術協会 技術セミナー	燃料電池自動車用高圧水素タンク部品材料の水素適合性評価方法と国際基準化の動き	木村 光男 (東京大)
7	2019 年 12 月	オープン CAE シンポジウム 2019	高圧水素容器の火炎暴露試験における燃焼と固体熱伝導の数値シミュレーション	山田 英助, 田村 陽介 (JARI)
8	2021 年 1 月	38th International Symposium on Combustion	A bonfire test for compressed hydrogen cylinder simulated with OpenFOAM	山田 英助, 田村 陽介 (JARI)

－文献等－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020 年 11 月	International Journal of Hydrogen Energy	A study of decrease burst strength on compressed-hydrogen Containers by drop test	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 山崎 浩嗣, 田村 陽介（JARI）
2	2021 年 4 月	ISIJ International	Test method to establish hydrogen compatibility of materials in high pressure hydrogen gas environments for fuel cell vehicles	木村 光男, 吉川 暢宏, 田村 浩明, 飯島 高志, 石塚 歩, 山辺 純一郎（東京大, 他）
3	2022 年 10 月	JARI Research Journal	水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準Ｎｏ．１３（GTR13）の最新動向	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 山崎 浩嗣, 田村 陽介（JARI）
4	2023 年 5 月	月刊 JETI	水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準Ｎｏ．１３（GTR13）の最新動向（転載）	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 山崎 浩嗣, 田村 陽介（JARI）

－特許等－
なし

（3-③）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究」

株式会社大和総研

●成果サマリ（実施期間：2018年度～2022年度）
・水素・燃料電池に関する主要機関の公開情報を日々ウォッチして収集し、最新情報の隔週報告および四半期ごとに情報精査・傾向分析を実施。
・米国、欧州、ドイツ、中国、韓国について水素政策等の全体像の体系的な整理・分析を実施。
・各国比較や国際機関の報告書などの分析、各国の特徴から得られる示唆の検討を実施。

●背景/研究内容・目的

（課題意識）

日本が、世界に先駆けて水素社会を実現し、世界をリードするには、**国内外の水素に関わる広範な情報をタイムリーに収集、把握し、政策・制度、市場対応などを積極的に進めていく**ことが肝要。

（目的）

本調査研究では、世界各国の水素燃料電池に関する政策、市場、研究開発動向等の最新情報を幅広くタイムリーに**収集、分析し、国内関係者に展開、共有する**こと、また、各国の政策や、市場および産業動向を**正確に把握し**、評価・分析することで、今後のわが国への**示唆を得る**ことを目的とする。

●研究目標

実施項目	目標
（1）最新動向調査	世界各国の最新情報を継続的に収集し、水素燃料電池に関する世界的な**最新動向を把握**する。
（2）国別政策・市場調査	主要国の水素燃料電池に関する**政策・市場動向を正確に把握**・分析する。
（3）方向性検討	上記結果を踏まえ、**国内政策への示唆**を得る。

●実施体制及び分担等

NEDO ― 株式会社大和総研

●これまでの実施内容／研究成果

（1）最新動向調査

水素・燃料電池に関する主要機関の公開情報を日々ウォッチし、最新情報を隔週報告し、四半期ごとに情報の精査・傾向分析を行った。

成果物：隔週リスト：105本（vol.1～vol.105）、合計ニュース数：5,044件
四半期報告書：16本（'19Q1～'22Q4）、国際会議への参加、報告：17本

（2）国別政策・市場調査

米国、欧州、ドイツ、英国、中国、韓国の水素政策および市場動向の全体像を体系的に整理した。

（3）方向性検討

（1）、（2）の調査を踏まえ、各国比較や国際機関の報告書などを分析し、各国の特徴を明らかにし、日本への示唆を検討した。

主要国の戦略はいずれも、①クリーン水素の製造、②水素サプライチェーン・インフラ構築、③戦略的な需要創出を重視。一方で注力分野は国情に応じて選択。

各国の方向性を踏まえると、①縦割り型から拠点・ビジネスモデル型への支援制度、②クリーン水素の基準設定、③輸入国との連携、④Justiceの視点等が示唆される。

図表　主要国の水素戦略

	エネ需要 (Mtoe)	水素戦略等	水素戦略の概要	注力分野 交通	民生	発電	産業	水素輸入	水素製造	水素製造目標など
米国	2,155 (第2位)	"Road Map to A US Hydrogen Economy" (2019/11)	業界団体（FCHEA）により、米国が世界の水素エネルギーにおいてリーダーシップをとる道筋が示された。水素が再生可能エネルギーの展開をサポートするとともに、エネルギーの輸送・貯蔵、燃料、熱源などとして多面的に利用可能であることを強調。	○普通、中大型	○オンサイト					【2030年】水素需要は1,400～1,700万トン（うち、既存需要は1,300万トン）
EU	1,619 (-)	"EU Hydrogen Strategy" (2020/7)	電化が困難なセクターの脱炭素化と同時に、エネルギーキャリアとしての水素の確立を目指す。再生可能水素と短中期的には低炭素水素を活用。官民連携のEuropean Clean Hydrogen Alliance を設立し、投資拡大とクリーン水素需要拡大を図る。共通基準や認証などの導入、最先端の技術への助成など。	○中大型			○化学		○クリーン	【2030年】クリーン水素製造1,000万トン、電解槽は40GW以上
ドイツ	311 (第6位)	"The National Hydrogen Strategy" (2020/6)	水素製造が重要であり、2030年までに5GW、早ければ2035年に追加の5GWの電解槽を導入する。水素利用の主体は、産業分野と交通分野になる。ただちに、関連法規（EEG、RED Ⅱ）と整合をとる。これまでのNIPの取り組みを強化・補完する。	○普通、中大型、列車			○	○	○グリーン	【2030年】グリーン水素需要14TWh（≒42万トン）＝電解槽5GW
英国	175 (-)	（策定中）	-	○中大型、船舶	○暖房				○ブルー	-
韓国	282 (第9位)	"Hydrogen Economy Roadmap 2040" (2019/1)	世界クラスのFCV・FC技術、石油プラントでの経験、LNGインフラの活用により、水素経済で世界をリードする。FCVと定置用FCの導入を進め、将来的に水電解や水素輸入からの水素供給を目指す。水素経済への移行により、2040年までにGDP2.5%成長に寄与し、42万人の雇用を創出する。	○普通、中大型		○		○		【2030年】水素需要194万トン（うち、既エネ利用は13万トン）
中国	3,077 (第1位)	"新エネ・省エネ自動車技術ロードマップ（2016/10）""中国製造2025"（2018/2）	技術面で性能向上、寿命向上、低温稼働、コスト低減を目指し、2030年にFCV100万台、HRS1000か所導入を目指す。	○中大型						【2030年】HRS1,000か所、FCV100万台

●今後の課題

水素を巡る環境は大きく変化しており、国際動向の把握には豪州、中東など視点を広げる必要がある。また、市場フェーズへ移行するにあたり、専門性の高い情報も求められる。

●実用化・事業化の見通し

該当なし

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
（1）最新動向調査	最新情報を隔週報告し、四半期ごとに情報の精査・傾向分析を行った。	○
（2）国別政策・市場調査	主要国の水素政策、市場動向等について体系的に整理した。	○
（3）方向性検討	各国の特徴から得られる示唆を検討した。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	2	0

事業番号：3-③
研究開発名：「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究」

実施者：株式会社大和総研

１．研究開発概要

１．１　背景

2018 年 8 月に策定された「第 5 次エネルギー基本計画」では、“水素社会の実現に向けた取組みの抜本強化”が掲げられ、モビリティにおける水素利用の加速をはじめ、再生可能エネルギー由来水素の利用拡大や 2020 年東京五輪でのショーケース化など、あらゆる方面での水素活用を強化する姿勢が示された。

また、2017 年 4 月には「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」が組成され、同 12 月に「水素基本戦略」を策定、資源に恵まれないなか、科学技術立国として成長してきたわが国こそが、世界に率先して水素分野でのイノベーションに挑戦し、世界をリードすべきとし、官民挙げて共有すべき方向性・ビジョンが示された。

わが国の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（2016 年改訂）では、水素ステーションを 2020 年に 160 か所程度、2025 年に 320 か所程度設置するとともに、2020 年代後半までに水素ステーション事業を自立化するという目標が掲げられている。こうしたなか、本事業（「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」）では、水素ステーション（HRS）に係る超高圧水素技術等に関して、普及期を見据えた課題に対応するための研究開発等を進めるため、規制見直しの推進や水素ステーションの整備費・運営費の低減に資する技術開発を担っている。

１．２　目的

“水素社会”実現に向けた水素サプライチェーンの確立にあたっては、水素の「製造」、「貯蔵・搬送」、「利用」の多岐に亘る課題を一体的に解決していくことが重要となる。したがって、わが国が、世界に先駆けて“水素社会”を実現し、世界をリードしていくためには、国内外の水素に関わる広範な情報をタイムリーに収集、把握し、必要に応じた政策・制度対応、市場対応などを積極的に進めていくことが肝要となる。

本調査研究では、安全・環境に配慮した水素社会の実現に向け、世界各国の水素・燃料電池に関する政策、市場、研究開発動向等の最新情報を幅広くタイムリーに収集、分析し、国内関係者に展開、共有していくことを目的とする。また、各国の政策や、市場および産業動向を正確に把握し、評価・分析することで、今後のわが国における水素・燃料電池技術の開発戦略への示唆を得ることを目指す。

２．研究開発目標

本調査研究は、下記 3 つの目標に基づき遂行する（図表 1）。

図表 1 研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）最新動向調査	世界各国の最新情報を継続的に収集し、水素・燃料電池に関する世界的な最新動向を把握する。
（2）各国政策・市場調査	主要国の水素・燃料電池に関する政策・市場動向を正確に把握・分析する。
（3）方向性検討	上記結果を踏まえ、国内政策への示唆を得る。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）　最新動向調査

水素・燃料電池に関する主要機関の公開情報を日々ウォッチし、最新情報を隔週報告し、四半期ごとに情報の精査・傾向分析を行った。（○：達成）

① 成果物

下記の成果物を NEDO に提出した。

- 隔週情報リスト：105 本（vol.1～vol.105、ニュース総数：5,044 件）（図表 2）
- 隔週情報リスト概要 PDF（事業者展開用）
- 四半期報告書：16 本（2019Q1～2022Q4）
- 国際会議への参加記録：17 本（DOE-AMR、WHTC、FCVC、FCHJU、水素閣僚会議、インフラワークショップ、HOC 他）

図表 2　情報リスト（例）

No.	年月日	国名	分野1	分野2	Keywords	タイトル(英文)	タイトル(和文)	概要（和文）	ソース	URL
1	2018/12/19	スイス	技術	製造-再エネ水素	Paul Scherrer Institut (PSI)	PSI Researchers: New Paths for Energy with Hydrogen	PSI研究者：水素によるエネルギーへの新たな道	スイス政府の「エネルギー戦略2050」による再生可能エネルギー増大と原発停止の方針を受け、スイスの民間研究機関Paul Scherrer Institute（PSI）は、水素混入天然ガス網の活用のために、ガスタービン発電を研究している。PSIのEnergy System Integration（ESI）に設置した小型ガスタービンで、水素・メタン混合ガスでの耐久性を検証し、将来的に水素をそのまま使用する可能性を研究する。	PSI（Paul Scherrer Institute）	https://www.psi.ch/media/new-paths-for-energy-with-hydrogen
2	2018/12/19	ドイツ	技術	利用-移動体用FC	NOW	BMVI supports the development of pressure tanks for fuel cell vehicles	BMVIは燃料電池自動車用高圧タンクの開発を支援	FCVにおける高圧タンクのコスト・重量低減に向けたDELFINプロジェクトに対して、BMVIのNIPから750万ユーロが、NOWを介して拠出される。参加企業はFord, BMW, NuCellSys, NPROXX, Elkamet Kunststofftechnik, Teijin Carbon Europe, ISATEC, BAM, RWTH-IKVなど。	NOW-GMBH	https://www.now-gmbh.de/en/news/press/bmvi-supports-the-development-of-pressure-tanks-for-fuel-cell-vehicles
3	2018/12/19	フランス	経済-ビジネス	利用-HRS	Atawey, EU	"Last Mile Project" : Atawey and its Partners will Deploy 33 Hydrogen Refuelling Stations in France	ラストマイルプロジェクト：Ataweyらはフランスに33の水素ステーションを展開	Atawey, Akuo Energyらは、EUの「ラストマイル」プロジェクトに参画し、パリとその他のフランスの都市の市内・郊外に33の水素ステーションを設置する。同時に400台のFCVによる物流も計画している。	Atawey	http://atawey.com/en/actualites/last-mile-projectr-atawey-and-its-partners-will-deploy-33-refuelling-stations-in-france-53.html
4	2018/12/19	オーストラリア	政策	その他	Victoria	Victoria launches programme	ビクトリア州がプログラムを発表	豪州ビクトリア州では、水素技術開発に2百万ドルの投資を行うと発表した。ビクトリア州では2030年までに50%を再エネで賄い、雇用を生み出す予定。再エネ水素は日本、韓国への輸出機会にも繋がる。	Victorian Government	https://www.premier.vic.gov.au/new-program-to-drive-investment-in-hydrogen-energy/
5	2018/12/19	フランス	経済-ビジネス	利用-HRS	Morbihan Energies	Green Hydrogen: Morbihan Energies Hydrogen Station Awarded at Cop 24	グリーン水素：COP24にてMorbihan Energiesの水素ステーションが受賞	Morbihan énergies（フランスモルビアン県が運営する電力会社）が設置した水素ステーションが、COP24で開催されたGreen Solution Awards 2018 で第2位を獲得した。2017年に導入されたVannes-Luscanenの同社の敷地に導入されたステーションでは太陽光発電で製造される水素を供給している。	Fuel Cell Works	https://fuelcellsworks.com/news/green-hydrogen-morbihan-energies-hydrogen-station-awarded-at-cop-24/

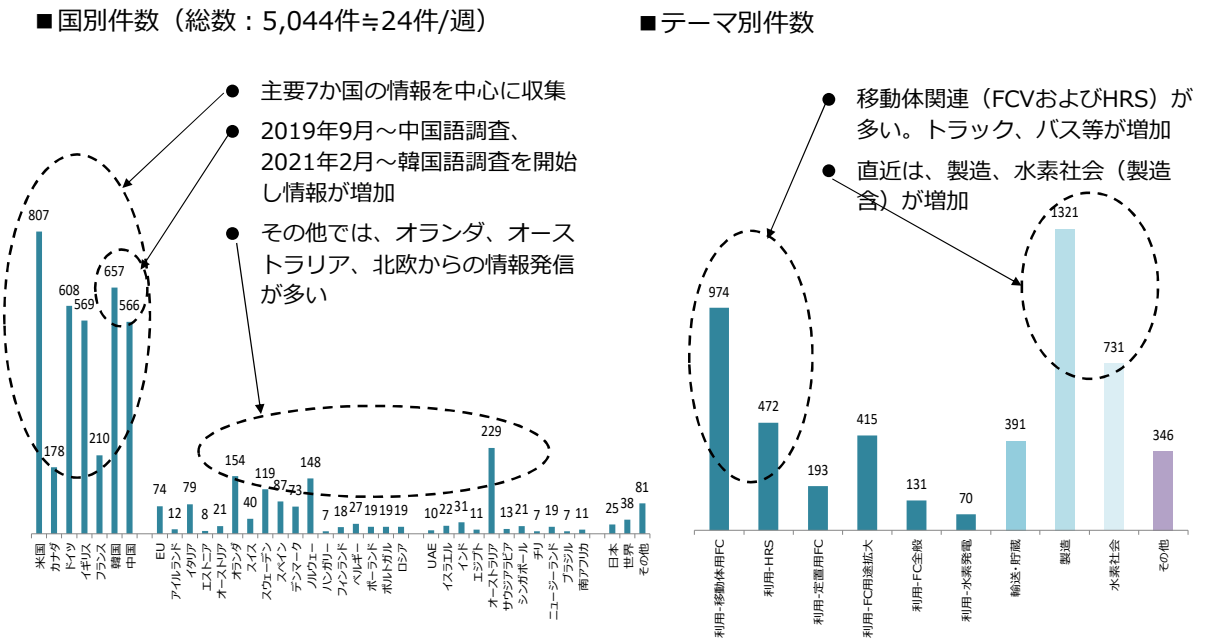
（出所　大和総研作成）

期間中のニュース総数は 5,044 件となった（図表 3）。

国別内訳をみると、主要 7 か国（米国、ドイツ、イギリス、フランス、中国、韓国）の情報が多いが、特に、中国に関しては 2019 年 9 月以降、韓国に関しては 2021 年 2 月以降、原語による情報収集を開始し情報量を増加した。その他では、オランダ、ノルウェー、オーストラリアの情報が比較的多く得られた。

テーマ別内訳でみると、2019 年当初は移動体関連（移動体 FC と HRS）に関する情報が最も多かったが、2020 年以降は水素製造に関する情報が増加した。その他、水素バレー（供給および需要を含む）構想などの水素社会に関連する情報も多く見られた。

図表 3　ニュースの内訳



（出所　大和総研作成）

② 2019～2022 年度の主要トピック

2019～2022 年に水素を取り巻く環境は大きく変化した。

2019 年は（図表 4）、年初より韓国による水素ロードマップ“Hydrogen Economy Roadmap 2040”の発表があり、2030 年に FCV180 万台導入という高い目標が注目された。平仄を合わせるように Hyundai が“FCEV Vision 2030”を発表、2030 年までに年間の FC 生産を 70 万台にすることが掲げられた。一方、中国では全人代の「2019 年政府活動報告」に水素が初めて掲載され、各地方政府が「水素計画」を策定する端緒となった。その後、IEA による報告書“The Future of Hydrogen”、IRENA による報告書“Hydrogen: a renewable energy perspective”など国際機関による水素レポートが相次いで発行され、水素エネルギーの意義、必要性などが国際的に認識される契機となった。

2020 年（図表 5）、EU は 2019 年末に誕生した新 EC 体制が発表した“A European Green Deal”のもと、2050 年カーボンゼロの法制化に向けて大きく動いた。コロナからの経済回復を目指す“Next Generation EU”では、クリーン水素加速のための資金が確保された。7 月には、EU の水素戦略“A Hydrogen Strategy for a climate-neutral Europe”が発表され、その中心には 40GW の電解槽導入など水素製造が据えられた。欧州各国で水素戦略策定が相次ぎ、6 月にはドイツが“National Hydrogen Strategy”を、12 月には英国が“Ten Point Plan”を発表した。供給面の議論はアジアでも進み、4 月には中国が、従来の FCV 補助金からモデル都市型の補助金に切り替える旨の発表があった。米国では、年初に DOE が FC トラックの目標値を策定したことから、大型 FC 車両拡大に向けた州政府の連携や、業界団体の連盟設立の動きが見られた。ビジネスでは、Plug Power や Volvo、Daimler などが大型トラック向け FC 製造に乗り出し、Hyundai や Cummins でも大型 FC トラック開発での進捗があった。

2021 年（図表 6）、米国では、新生バイデン政権のもとパリ協定への復帰を果たし、水素の重要性が再認識されたことから、水素製造コストを 10 年で 1kg、1 ドルにする“Hydrogen Shot”の発表に至った。それらを受け、ビジネスでは、Plug Power が相次いでグリーン水素製造拠点の建設を開始した。また、カリフォルニアで FC トラックの導入目標が設定されたことなどから、Hyzon Motors や Nikola でも FC トラックの製造、開発で進捗が見られた。欧州では、COP26 のホスト国となった英国が、新たな 2030 年 GHG 削減目標を設定するなど積極的に動き、国家水素戦略“UK Hydrogen Strategy”が策定された。英国の水素製造はブルーとグリーン

の両輪で進められることとなり、BP は Teeside で 1 GW 規模のブルー水素、500MW 規模のグリーン水素製造の両プランを発表した。同様に 2030 年の GHG 削減目標の引き上げを行った韓国では、1 月に水素経済法が施行され、首相を議長とする水素経済委員会が発足した。経済界では大手企業（SK、HMC、POSCO、Hanhwa、Hyosung）が今後 10 年の水素投資を発表し、新たな韓国水素協議会を発足するなど官民が足並みを揃えた。こうしたなか、中国では、燃料電池自動車モデル都市群の 3 地域が発表され、モデル都市群を中心に地方政府、企業の動きが回復した。

2022 年（図表 7）は、ロシアによるウクライナ侵攻を受け欧州を中心にエネルギー安全保障を見直す動きがあり、クリーン水素導入目標の引き上げなど水素社会を加速する流れとなった。欧州は、2022 年 3 月に“REPowerEU”を発表し、2030 年のクリーン水素導入目標を引き上げた。また、「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト」（IPCEI）として、総額 100 億ユーロ規模の IPCEI Hy2Tech と IPCEI Hy2Use が承認され、水素の市場化フェーズへの移行を後押しする。米国では、バイデン政権による気候変動対策として、「インフラ投資・雇用法」に続き「インフレ削減法」が導入され、水素セクターに対する支援が強化された。9 月に国家水素戦略“DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap”（案）が公表され、クリーン水素が中心に据えられた。中国では、3 月に水素エネルギー分野における最高レベルの計画文書「水素産業発展中長期計画（2021-2035 年）」が発表され、国有中央企業が水素の製造から貯蔵、充填、利用に至るサプライチェーンの各所に参入を始めた。各国でクリーン水素を定義（閾値）する動きも見られた。

4 年間のトピックから、以下 3 点の大きな変化が見られた。

- 水素戦略の焦点が「モビリティ（FCV）」から「クリーン水素」へ移った
- カーボンニュートラルを目指すうえで、HTA（Hard to Abate）な分野での水素活用が一般的な考え方となった
- 気候変動や安全保障への早期対応が求められるようになり、研究開発投資から、大規模な水素製造・利用に支援が向けられるようになった

図表 4　2019 年の主なニュース

	政策	ビジネス・経済 FCV	ビジネス・経済 水電解、他
上期	✓ **韓国：**“Hydrogen Economy Roadmap 2040”を発表。2030年FCV180万台にする目標 ✓ **EU：**グリーン水素生産地保証**CertifHy**スタート ✓ **EU：**Hydrogen Europeが**“Hydrogen Roadmap Europe”**を発表 ✓ **中国**：全人代「2019年政府活動報告」に初めて水素が記載される ✓ **WEC**による報告書**“New Hydrogen Economy”** ✓ **IEA**による報告書**“The Future of Hydrogen”** ✓ **英国：“Climate Change Act 2008”**を改定。2050年ネットゼロ目標を法制化。CCSと水素（水電解6-17GW）が重要とされる	✓ **Hyundai（韓）**：“FCEV Vision 2030”を発表。 ✓ **Nikola（米）**：アリゾナ州に400ﾋﾆ（35,000台/年）のFCトラック製造用地を確保 ✓ **Bosch （独）**：車両用FC大量生産でPowercellと提携 ✓ **Audi（独）**：FCV開発計画を加速。2021年に小型シリーズ販売 ✓ **Alstom（独）**：世界最大規模のFC列車27台を受注 ✓ **Cummins（米）**：Hydrogenicsと、Loop Energyの株式を取得 ✓ **Faurecia、Michelin（仏）**：水素事業を統括するJVを設立	✓ **KOGAS（韓）**：2030年までに水素製造施設25か所、パイプライン700kmを新設 ✓ **ITM Power（英）：**PLP Bessemer Parkに製造用地を確保。世界最大1GW/年の電解槽を製造 ✓ **PlugPower（米）**：NY州Rochesterの研究施設を拡張。 ✓ **Northern Gas Networks（英）：HyDeploy；**2020年から、既存パイプラインに20%のグリーン水素混合実証開始 **H21；** 2020年1月から、水素へ100%転換プログラムの第2段階開始
下期	✓ **カリフォルニア**：FCEBs（バス）のロードマップを公表 ✓ **IRENA**による報告書**“Hydrogen: a renewable energy perspective”** ✓ **米国**：**FCHEA**が**“Road Map to a US Hydrogen Economy”** を発表 ✓ **豪**: **“Australia’s National Hydrogen Strategy”**発表 ✓ **EU：**フォンデアライエン新体制のもと、2050年クライメートゼロに向けた“European Green Deal”を発表		

（出所　大和総研作成）

図表 5　2020 年の主なニュース

	政策	ビジネス・経済 FCV	ビジネス・経済 水電解、他
上期	✓ **米国**：DOEがFCトラックに関する技術目標を策定 ✓ **オランダ**：“Government Strategy on Hydrogen ”を発表 ✓ **中国**：新エネ自動車助成金、全国型から都市集中型へ ✓ **EU**：Hydrogen Europeが**“2x40GW Green Hydrogen Initiative”**で電解設備の見通しを提示 ✓ **EU**：経済回復策**“Next Generation EU”** で7,500億ユーロを投入。グリーン水素加速を含む ✓ **ノルウェー**：“government's hydrogen strategy”を発表 ✓ **ドイツ**：“National Hydrogen Strategy”を承認	✓ **Weichai（中）**：2万台のFCエンジン工場を始動 ✓ **Loop Energy（加）**：南京公共バスから7,000台の50kWFC受注 ✓ **Volvo、Daimler（独）**：大型車両向けFCで新会社を設立。量産体制へ ✓ **豊田（日）**：中国で6社連合の商用車用のFC研究開発会社設立 ✓ **Hyundai（韓）**：世界初の大型FCトラックXCIENTを欧州へ出荷 ✓ **Nikola（米）**：GMと戦略的パートナーシップを締結 ✓ **米国産業界**：西部13州の水素・燃料電池業界が大型車両展開に向けた連盟を結成 ✓ **欧州産業界**：水素トラックのマスマーケット展開に向けてH2Accelerateを設立	✓ **ITM Power（英）**：Ørstedと洋上風力と電解槽の統合で協力 ✓ **英国ガス産業団体**：政府に9億ポンドのグリーン水素インフラ投資を要求 ✓ **Thyssenkrupp（独）**：電解槽の生産能力をGW規模に拡大 ✓ **Plug Power（米）**：United Hydrogen等を買収。供給水素のグリーン化へ ✓ **Siemens（独）**：世界初のP2X2P実証で電解槽と水素タービン12MWを提供 ✓ **Iberdola、Ørsted、Snam**ら：グリーン水素6社が、6年間で製造能力50倍に拡大するために協力
下期	✓ **EU**：“A Hydrogen Strategy for a climate-neutral Europe”を発表 ✓ **米国**：15州とD.C.がゼロエミ中大型車両市場拡大に向けた覚書締結。2050年までに新車販売を100%ZEV化 ✓ **フランス**：“French Hydrogen Strategy ”を発表 ✓ **中国**：SAICが『省エネルギーと新エネルギー自動車技術ロードマップ』2.0を発表 ✓ **英国**：グリーン産業革命のための**Ten Point Plan**を発表。2030年までに電解槽5GWとする		

（出所　大和総研作成）

図表 6　2021 年の主なニュース

	政策	ビジネス・経済 FCV	ビジネス・経済 水電解、他
上期	✓ **中国**：**「水素白書2020」**発表。再エネからの水素製造は2030年にパリティ到達とした ✓ **米、加、日**：気候リーダーズサミット開催。2030年GHG排出削減目標数値を引き上げる ✓ **豪**：CSIROが新しい水素産業ミッションを発表。製造コスト2ドル/kg未満とし、2030年までに水素輸出大国となる。 ✓ **米国**：DOEが“Hydrogen Shot”を発表。10年間でクリーン水素製造1ドル/kgを目指す	✓ **Nikola（米）**：北米でのFCEVプログラムの詳細を発表。2023年後半に生産を開始 ✓ **Element Two（英）**：英国で2030年までに2,000か所のHRSを整備 ✓ **中国石化（中）**：1,000か所の水素または複合ステーションの配備を計画 ✓ **Hyzon Motors（米）**：シカゴ郊外に米国最大のMEA製造ラインを建設 ✓ **韓国大手企業**：商用車向け水素インフラSPC"KoHygen"を設立 ✓ **Daimler**：FCトラックのテストを開始、2023年には顧客テスト	✓ **BP（英）**：英国最大のブルー水素製造プラントをH2Teesideで建設。2030年に1GW製造 ✓ **韓国大手企業**：2030年までに水素経済に合計43兆ウォンの投資を発表 ✓ **Shell（蘭）**：Rheinlandの欧州最大の10MWPEM電解槽がグリーン水素生産を開始。将来100MWへ。 ✓ **英国大手企業**：北西イングランドと北ウェールズにある24の大手企業がHyNet水素ネットワークへの接続に合意 ✓ **Shell、RWE（独）**：協力を加速し、洋上風力発電による水素製造を推進 ✓ **SoCalGas（米）**：Bloom Energyと2022年にガス混合プロジェクト（10%）を開始
下期	✓ **Ca州**：FCトラックに関するレポートを発表。2035年までに大型FCトラック7万台、大型向けHRS200か所を目指す ✓ **英国**：“UK Hydrogen Strategy”を発表。新たな2.4億ポンドの“Net Zero Hydrogen Fund”を設計 ✓ **中国**：FCVモデル都市群として、①北京・天津・河北、②上海、③広東省を選定 ✓ **中国**：**「ダブル炭素政策」**を発表。炭素ピークアウトと2060年カーボンニュートラルを目指す ✓ **英国**：“Net Zero Strategy”を発表。2030年に向けた詳細計画 ✓ **米国**：“インフラ投資・雇用法”を発表。地域クリーン水素ハブの形成に新規投資		

（出所　大和総研作成）

図表 7　2022 年の主なニュース

	政策	ビジネス・経済	
		モビリティ	製造その他
上期	✓ **中国**： FCVモデル都市群として、①河南、②河北を追加 ✓ **中国**：国家発展改革委員会と国家能源局が共同で「**水素産業開発の中長期計画（2021-2035）**」を公布 ✓ **EU**：**"RePowerEU"**を発表し、クリーン水素目標を引き上げ ✓ **英国**：**"UK Energy Security Strategy"**を発表。水素製造能力目標を倍増 ✓ **韓国**：**「水素法」**の改正案が可決。クリーン水素認証制度、クリーン水素販売義務制度の導入へ ✓ **中国**：中国水素エネルギー連盟研究院とロッキー研究所が「2030年『再生可能水素100』発展ロードマップ」を発表	✓ **StasHHコンソーシアム(欧)**：中大型車用FC規格を策定 ✓ **Nikola(米)**：Ca州に3か所のHRS新設用地を公表、インフラ拡大を継続 ✓ **Shell(英)**：申能(Shenergy)と合弁会社を設立、アジアHRS市場へ初進出 ✓ **ZeroAvia(米)**：PowerCellと航空用FCスタックの共同開発で署名 ✓ **BMW(独)**：iX5 Hydrogen向けFCの自社生産を開始 ✓ **Alstom(仏)**：Coradia iLint がドイツで世界初100%水素旅客サービスを開始	✓ **Ningxia Energy(中)**：世界最大150MWのグリーン水素製造開始 ✓ **欧州電解槽業界**：2025年に電解槽の製造能力を10倍の17.5GW/年にする ✓ **bp(英)**：西豪州に世界最大のグリーン水素ハブ（年間160万t）を計画 ✓ **豪独企業連合**：ドイツに水素供給する「グリーン水素ロードマップ」を公表 ✓ **Gasunie (蘭)**：オランダで全国水素ネットワークの建設を開始 ✓ **Salzgitter(独)**：Rio Tintoの鉄鉱石でグリーン製鉄SALCOSプロジェクト ✓ **中国石化**：水素中長期開発戦略を発表 ✓ **Air Products(米)**：NY州のグリーン水素製造に向けて5億ドルを投資 ✓ **GE(米)**：ガスタービン水素専焼に向けた技術革新。主要電力12社より賛同。
下期	✓ **英国**：'twin track approach'の詳細公表。 ✓ **ドイツ**：National Hydrogen Councilが水素戦略の改訂に向けた論点ペーパーを発表 ✓ **欧州**：**"IPCEI Hy2Tech"、" IPCEI Hy2Use"**が承認 ✓ **米国**：**"インフレ削減法"**が成立。水素業界から歓迎の声 ✓ **米国**：**"National Clean Hydrogen Strategy"案を発表** ✓ **IEA**：**"Global Hydrogen Review 2022"、"World Energy Outlook 2022"**を発表		

（出所　大和総研作成）

（２） 各国政策・市場調査

米国、欧州、ドイツ、中国、韓国について水素政策の全体像を体系的に整理した。（〇：達成）

① 米国

米国のエネルギー需要は世界第 2 位。シェール革命により近年は天然ガスの需要比率が拡大し自給率は 90%超で安定。輸送部門におけるエネルギー需要が高い（41%）特徴がある。

米国のエネルギー政策は、各政権の考えと外部環境（原油価格、自給率）の影響を大きく受けてきた。2000 年代、環境推進派ではなかったブッシュ政権だが、エネルギー危機の影響を受けてエネルギー政策を強化した。"National Energy Policy"において、水素への将来的な期待が盛り込まれたことから、国家エネルギー省（DOE）は"Hydrogen & Fuel Cells Program"など水素に関するビジョン、計画を整備した。その後、オバマ政権下の 2011 年に"The Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program Plan"が策定され、サブプログラムごとの中期研究開発計画"Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan"（2012-2020）のもとで目標管理されてきた。2020 年には新たな"Hydrogen Program Plan"が策定され、2030 年前後に向けた中期の水素戦略の方向性が示された。2021 年のバイデン新政権発足に伴い、米国はパリ協定に復帰、6 月には、2030 年までの 10 年間（1Decade）で、水素 1kg 当たり 1 ドルを目指す"Hydrogen Shot"が発表された。気候変動対策として水素セクターに対して大規模な支援策が進められ、2021 年 11 月の「インフラ投資・雇用法」と 2022 年 8 月の「インフレ削減法」は、米国の関連市場で強く歓迎された。

FCV 普及ではカリフォルニア州が突出しており、1999 年に FCV 普及のための官民連携組織として、カリフォルニア州燃料電池パートナーシップ（The California Fuel Cell Partnership ：CaFCP）が設立され、組織的に導入がすすめられてきた。CaFCP による"Fuel Cell Revolution—2030 Vision report—"では、2030 年までに州内に 100 万台の FCV を導入させ、1,000 か所以上の水素ステーションを整備することを目標に示している。Gavin Newsom 州知事が 2035 年までに乗用車のすべてをゼロエミッション化する方針を示した（2020 年 9 月）。2021 年 8 月には"Fuel Cell Electric Trucks: A Vision for Freight Movement in California and Beyond"を発表し、2035 年までに 7 万台の FC トラックの普及を目指す方針を示した。同州の ZEV への取り組みは他州にも波及しており、2022 年には CaFCP の取組を全米に拡大すべく、組織名を Hydrogen Fuel Cell Partnership に変更した。

② EU

EU 全体のエネルギー需要は世界第 3 位の規模に相当。暖房負荷が高いことから業務・家庭部門におけるエネルギー需要が高い特徴がある（38%）。近年再生可能エネルギー導入量が増えており、総発電電力の 3 割を占めている。

EU は気候変動対策に積極的に取り組んできており、2018 年に策定された長期ビジョン“Clean Planet for All”では、2050 年までに GHG 排出量を実質ゼロにすることを発表した。同ビジョンでは、異なる技術ドライバーによる 8 つのシナリオ分析が行われており、「水素」と「P2X」シナリオも含まれている。2021 年 6 月には、2030 年までの GHG 削減目標（1990 年比 55%減）を法的に担保する“European Climate Law”が採択された。

水素に関しては、2008 年に水素燃料電池関係の公募・補助金管理・R&D 政策を行う官民パートナーシップである欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH-JU：Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking）が設立された。後継の FCH 2 JU とあわせて 287 件、合計 10.77 億ユーロ規模の多年度プロジェクトが実行された。現行の CH-JU（Clean Hydrogen Joint Undertaking）は、合計 12 億ユーロ（2021-2027）の資金規模に拡大している。

2019 年 12 月に発足した新 EC（ウルズラ・フォン・デア・ライエン委員長）は、新しい成長戦略“A European Green Deal”の中で水素を重要なエネルギー源に位置付けた。それを受け、2020 年 7 月、欧州の水素戦略“EU Hydrogen Strategy”が発表された。戦略におけるロードマップでは、水素経済は以下 3 つのフェーズを経て様々な分野でそれぞれ異なる速度で成長させていく方針である。

- フェーズ 1（2020～24 年）：既存の工業プロセス（石油精製、化学工業）で使用されている化石燃料由来の水素をクリーン水素で脱炭素化するために、少なくとも 6GW の電解槽で最大 100 万トンのクリーン水素が製造される。
- フェーズ 2（2025～30 年）：少なくとも 40GW の電解槽で最大 1,000 万トンのクリーン水素が製造され、製鉄、トラック輸送、鉄道、一部海運を含む分野に展開される。
- フェーズ 3（2030～50 年）：さらに大規模に生産されることで、空運および海運、さらに脱炭素化が困難と考えられている一部の産業用途に至るまで水素利用が浸透する。

2022 年 3 月、ロシアによるウクライナ侵攻を受け、エネルギー安全保障問題に対処するために“REPowerEU”が発表され、2030 年のクリーン水素導入目標が域内 1,000 万トン、域外 1,000 万トンに引き上げられた。また、「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト」（IPCEI）として、総額 100 億ユーロ規模の IPCEI Hy2Tech と IPCEI Hy2Use が承認された。水素が、R&D から市場化フェーズに移行したこと、また、“域内連携”による発展が強く意識されている。

③ ドイツ

ドイツのエネルギー需要は世界第 5 位。豊富な石炭により産業発展してきた経緯があるが、近年は天然ガスと再生可能エネルギーの比率が増加している。暖房需要により、業務・家庭部門のエネルギー需要が高い特徴がある（40%）。

ドイツは、2011 年の福島原発事故を受け、メルケル政権のもと、再生可能エネルギーを主体とした社会を目指す“Energiewerde”政策を推進してきた。2016 年に UNFCCC に提出された“Climate Action Plan 2050”では、長期目標を「2050 年までにカーボンニュートラル」に引き上げ、中間点である 2030 年目標（90 年比 55%削減）が掲げられた。2019 年 12 月には、2030 年目標を法的拘束力のあるものにする“Climate Action Law”が施行された。同法は 2021 年 6 月に改正され、2030 年目標の引き上げ（90 年比 65%削減）とカーボンニュートラル達成の 5 年前倒しが行われた。

水素に関しては、2007 年から水素・燃料電池技術革新国家プログラム（NIP）を開始。2008 年には、連邦交通デジタルインフラ省（BMVI）のもとに国家水素・燃料電池技術機関（NOW GmbH）を設立し、NOW が NIP を一元的、戦略的に管理している。第 1 フェーズ（2007 年

～2016 年）では、連邦政府が 7 億ユーロを拠出し、産業界から 7 億ユーロの研究開発投資を得た。第 2 フェーズ（2016 年～2026 年）では、BMVI は当初（2019 年まで）2.5 億ユーロを拠出、連邦経済エネルギー省（BMWi）が年間 2,500 万ユーロを拠出する計画となっている。

前述の“Climate Action Law”の審議では、水素燃料電池技術がドイツの気候変動対策における目標達成の鍵であることが認識されたことから、2020 年 6 月に“The National Hydrogen Strategy”が発表された。同戦略では、70 億ユーロの追加投資を行うこと、グリーン水素にフォーカスすることなどが掲げられた。水素製造については、2030 年までに 90-110TWh の水素需要を想定し、5GW の電解槽の導入（2035 年には追加の 5GW を導入）を目指すとした。そのために、CO2 価格などの制度設定、資金、洋上風力区画の割り当てなどの具体的方策が掲げられている。なお、現在導入・計画中の電解槽は 55MW とされている。同戦略は 3 年毎に見直されることから次期改定に向けて電解槽目標値の引き上げ等が議論されている。また、2021 年にグリーン水素の生産と輸入を促進するための H2Global 財団が設立された。

④ イギリス

英国のエネルギー需要は世界第 12 位。天然ガスが主要なエネルギー源だが自給率は低下しており、エネルギー安全保障に対する危機感は高い。暖房需要により、業務・家庭部門のエネルギー需要が高い（42%）。

2008 年に世界初の気候変動に関する法律である“Climate Change Act 2008”（気候変動法）が制定され、2050 年の目標として、GHG 排出量を「1990 年比 80%削減」することが法制化された。実行戦略として策定された“Clean Growth Strategy”（2017 年）では、グリーン・ファイナンスの導入、原発の新設、2025 年までの石炭火力の撤廃、2040 年までにガソリン・ディーゼル車の販売禁止などが盛り込まれた。また、シナリオ分析では「水素シナリオ」が策定されるなど、当初より水素の活用が意識されてきた。

2020 年 6 月、英国議会は“Climate Change Act ”の改正法案を可決し、「2050 年ネットゼロ」への目標引き上げを法制化し、その後、「2030 年に 1990 年比で 68%削減」する中期目標の引き上げも行った。新たな目標達成の戦略として 2020 年 11 月に策定された“Ten Point Plan”では、重要 10 項目の 1 つとして水素が位置付けられ、2030 年までに、低炭素製造能力を 5GW 生み出すことが目標とされた（製造量は 42TWh）。そのために、2 億 4000 万ポンドのネットゼロ水素基金を含む様々な支援措置を行うとした。そして、2021 年 8 月には、英国初の国家水素戦略となる“UK Hydrogen Strategy”が策定され、低炭素水素にはグリーン水素とブルー水素の二本柱を進める‘twin track’approach の方針が打ち出された。供給面ではパイプラインの活用、利用面では、中大型移動体、産業部門のほか家庭での熱利用を目指すとした。

2022 年 4 月、エネルギー安全保障戦略”British Energy Strategy”を発表、エネルギー利用の効率化と再生可能エネルギーの国内供給能力を高めるために、洋上風力の拡大、原子力の活用と並び、水素の製造拡大が必要とした。水素製造の目標は 5GW から 10GW に引き上げられた。2022 年 7 月に発表された‘twin track’approach の詳細では、「ネットゼロ水素ファンド」による CAPEX 支援と、「水素ビジネスモデル」による OPEX 支援により、低炭素水素の開発を促進していくメカニズムが示された。

⑤ 中国

中国のエネルギー需要は世界第 1 位。石炭が安定したエネルギー源であり自給率は 8 割を超える。エネルギー需要の約 50%を産業部門が占める消費構造である。

中国での水素燃料電池への関心は、大気汚染対策を主とした低排出自動車の導入という文脈から始まった。中国の新エネルギー自動車産業発展経緯及び一連の関連政策を時系列にふりかえると、主に 3 つの階段に分けられる。①戦略準備期（2001 年～2008 年）；②産業化導入期（2009 年～2015 年）；③成長期（2016 年～）（水素・FCEV 産業化加速）である。

国務院が 2012 年に発布した「省エネルギーと新エネルギー自動車産業発展計画（2012 年～

2020 年)」は、この時期に施行された諸政策の基本政策となってきた。計画のもと、特に EV 導入が積極的に推進されてきたが、2019 年 3 月の「政府工作報告」が FCV に言及したこと、また、同月の「新エネルギー自動車に関する財政補助改善通知」により、補助金が EV から FCV 重視に移行したことなどから、2019 年に急激な FCV の導入拡大が進んだ。しかし、2020 年 4 月、一律補助金から指定モデル都市への奨励制度に変更する旨が通知され、FCV 市場は一時的に冷え込んだ。2020 年 9 月に奨励制度の詳細が明らかになり、その後、モデル都市群の提案と審査を経て、2021 年 9 月に①北京都市群、②上海都市群、③広東都市群が、2022 年 1 月に①河北城市郡、②河南城市郡がそれぞれモデル都市群に指定されている。

他方で、2020 年 9 月に習国家主席が「双炭」(2030 年までにカーボンピーク、2060 年までにカーボンニュートラル）を発表したことから、2021 年 10 月に「双炭の全面的実施に関する意見」および「2030 年までの行動法案」が発表され、中国がカーボンニュートラル達成に向けて大きく動き始めた。その一手段として水素が注目され、2022 年 3 月、中国の水素エネルギー分野における最高レベルの計画文書「水素産業発展中長期計画 (2021-2035 年)」が発表された。この時期から、国有中央企業が水素サプライチェーンの各所に本格参入を始めた。主に西北と華北地区に水素製造拠点が計画され、主に華東、南方などの先進都市でアプリケーションの利用が進められている。

⑥ 韓国

韓国のエネルギー需要は世界第 8 位。エネルギーの海外依存度は 9 割近くを占める。また、エネルギー需要の約 50%を産業部門が占める消費構造である。

韓国は、1992 年の気候変動枠組み条約締結時には OECD 非加盟国であったことから、経済成長を優先しながら気候変動政策に取り組んできた。しかし、2020 年 10 月に文在寅大統領が 2050 年カーボンニュートラルを宣言したことから、気候対応の議論が急速に進み、2021 年 9 月には炭素中立法が制定された。2021 年 12 月に国連に更新提出された NDC では、GHG 排出量を「2030 年に 2018 年比で 40%削減」することが設定された。

2010 年に発表されたグリーン成長戦略に基づき、PHEV、HEV、FCV の開発と普及に取り組んできた。2013 年に Hyundai が世界に先駆けて FCV の量産体制を構築したことから、FCV への本格的な助成支援が始まった。補助金額は、従来車との価格差が 3 割程度であることを踏まえ、購入代金の 3 割程度が目安となっている。2017 年には官民連携により、FCEV および水素エネルギー産業の発展を目指す H2KOREA が発足。H2KOREA のもと、2018 年には、水素ステーション建設を企図する SPC である HyNet が民間企業 13 社により設立された。

こうした背景を踏まえ、2019 年 1 月、文大統領が、水素経済への移行を正式に表明、“Hydrogen Economy Roadmap 2040”が発表された。ロードマップでは、2022 年までに国内 6.7 万台の FCV と 310 か所の HRS を導入し、2040 年までに国内 290 万台の FCV と 1,200 か所の HRS を導入する目標が掲げられた。具体的政策として公的機関における FCV の積極導入や HRS の設置および運営補助金を継続することなどが示された。また、2040 年には水素需要量 526 万トン、水素価格 3,000 ウォン/kg とする目標等が設定された。当初は副生水素と天然ガス改質を活用するものの、将来的に再生可能エネルギーによる水電解やグリーン水素の輸入を活用するとした。2021 年 11 月の「水素経済実施計画」では、クリーン水素の方針が示された。国内資本と技術を活用した海外でのグリーン水素生産を積極推進するとし、2050 年には 40 ルートの供給網を確立するとしている。

2020 年 1 月には、水素経済法“Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Law”が可決され、2021 年 2 月に施行された。水素に特化した企業の育成や教育プログラムをサポートするなど、韓国水素経済の下地を育てることを企図している。同法のもと、首相を代表とした水素経済委員会が設立された。2021 年 3 月に開催された第 3 回水素経済委員会では、SK、HMC、POSCO、Hanhwa、Hyosung らにより、2030 年までに総額 43 兆ウォン（382 億米ドル）に上る水素経済への投資計画が発表された。同法は 2022 年 5 月に改正され、クリーン水素認証制度、クリーン水素販売義務制度などが追加された。

（3） 方向性検討

（1）、（2）の調査を踏まえ、各国比較や国際機関の報告書などを分析し、各国の特徴を明らかにしたうえで、日本への示唆を検討した。（○：達成）

国別比較として、主要国の水素戦略を整理する（図表 8）。いずれの水素戦略も、①クリーン水素の製造、②水素サプライチェーン・インフラの構築、③戦略的な需要創出の 3 点を重視している。ただし、特に注力分野を見ると、各国が国情に応じた水素の利用・製造方法にフォーカスしていることがわかる。例えば、EU・英国は、配管への水素混入を含む暖房などの熱利用、米国・韓国は定置用燃料電池や水素タービンによる発電利用、米国・中国は再エネなどの電力余剰が発生していることがありグリッド安定化に資する水素のエネルギー貯蔵に期待している。

図表 8　主要国の水素戦略と注力分野

	エネ需要(PJ)*	水素戦略等	水素戦略の概要	注力分野							水素需要
				交通	民生	発電	産業	水素貯蔵	水素輸入	水素製造	
米国	92,644	"DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap"（2022/9）	3軸を優先戦略と位置付ける。①戦略的クリーン水素利用:Hard to Abateセクターへの支援を通じた価値の最大化、②クリーン水素コストの低減:Hydrogen Shot目標達成を基に民間投資や大規模普及の促進、③地域ネットワーク：地域クリーン水素ハブを基に市場確立、雇用創出と競争力強化	○HD、海事、航空、鉄道		○FC、タービン	○製鉄、化学	○グリッド		○クリーン	【2030】1,000万トン 【2040】2,000万トン 【2050】5,000万トン
EU	-	"EU Hydrogen Strategy"（2020/7） "REPowerEU"（2022/5）	産業・輸送・発電など電化が困難なセクターの脱炭素化を目指すと同時に、水素のエネルギーキャリアとしての確立を目指す。再生可能水素を中心に、短中期的には低炭素水素の活用も挙げる。ロードマップは、2024年までに6GW級,2030年までに40GW級の電解槽導入、2050年までに再生可能水素技術の成熟を目指す。ウクライナ危機を受け、電解槽目標を65GWに引き上げ。	○MHD	○ビル・熱		○石油・化学		○	○クリーン	【2030】665TWh（2,000万トン相当） 【2050】2,251TWh（6,700万トン相当）（Hydrogen Europe ambitiousシナリオ）
ドイツ	12,323	"The National Hydrogen Strategy"（2020/6）	水素は「持続可能性」が重要。2030年までに5GW、早ければ2035年に追加の5GWの電解槽を導入する。水素の貯蔵性、媒体可能性を評価。水素利用の主体は、電気で代替することが困難な輸送分野と産業分野とする。H2Global設立により、水素の海外製造・輸入を強化する方向。	○MHD HCV、列車			○既存（石油・化学）		○	○グリーン	【2030】90～110TWh（270～330万トン相当）
英国	7,145	"UK Hydrogen Strategy"(2021/11) "British Energy Security Strategy"(2022/2)	ネットゼロのカギとなるのが水素。2030年までに5GWの低炭素水素製造が目標。水素製造はグリーンとブルーのtwin trackの方針。2.4億ポンドのネットゼロ基金を新設。パイプラインへの混合、町単位での熱利用を目指す。ウクライナ侵攻を受け、原子力・再エネ投資の拡大と共に、2030年の水素製造目標を10GWに引き上げ。	○MHD、船舶	○暖房		○既存			○低炭素水素	【2050】250～460TWh（750～1380万トン相当）
韓国	11,731	"Hydrogen Economy Roadmap 2040"（2019/1） "水素経済実施基本計画"(2021/11)	クリーン水素の製造、流通、利用のライフサイクル全体の包括的な戦略を確立するための3つの方針を掲げる。①国内外の水素製造をクリーン水素に転換、②クリーン水素を利用できるインフラ整備、③あらゆる日常での水素利用	○FCV、MHD		○FC、タービン	○		○	○クリーン	
中国	141,903	"水素産業発展中長期計画"（2022/3）	グリーン水素の比率を次第に高めることを前提に2025、2030、2035年のマクロ目標を設定。主な内容は、①エネルギー構造と国民経済における水素エネルギーの位置づけの明確化、②水素エネルギー産業発展の数量目標の設定、③水素エネルギーインフラ建設の推進、④水素エネルギー多元化モデルの応用の推進	○MHD			○化学、鉄鋼	○蓄電		○再エネ水素	【2030】3,715万トン（15%グリーン）

（出所　大和総研作成）

次に、主要国のクリーン水素製造動向を整理した（図表 9）。いずれの国も、クリーン水素の製造目標を、トン数、GW などで具体的に掲げており、また、クリーン水素製造基準を設けることで、カーボンニュートラルへの貢献を担保するようになった。製造方法を見ると、原発を積極的に活用する米国・英国や、再エネに特化する中国、輸入を前提とする欧州、ドイツ、韓国など国情に応じた手法が検討されていることがみられる。実際のクリーン水素製造プラントの導入・稼働状況については、各国とも初期の MW 規模の電解槽案件が稼働を始めたところであるが、特に再エネ資源が豊富な中国や英国では、多くの計画中案件が控えている。これらの稼働実績が今後の投資決定に影響を与えると考えられる。2050 年に向けて、水素輸出国となる豪州やアフリカ、南アメリカでの GW 規模の大型案件の稼働が期待されている。

図表 9　主要国の水素製造目標と実施状況

	再エネ電力比率* *IEA (2020)	水素戦略における水素製造目標	水素コスト目標	クリーン水素基準	製造方法					稼働中水素製造PJT* *IEA Database 2022	水素製造の実施状況
					再エネ電解槽	SMR CCUS	原発電解槽	バイオ廃棄物	輸入		
米国	20%	【2029～2036】年間**1,000万トン**以上のクリーン水素製造	2026年までに2ドル/kg 2031年までに1ドル/kg	CHPS：4kgCO2e/kgH2(ライフサイクル排出量) インフラ投資・雇用法：2kgCO2e/kgH2(水素製造時排出量)	○	○	○	○	輸出（将来）	20.8MW	・PlugPower、AirProductsらが100MW規模の案件を計画中。インフレ削減法が後押し ・constellationの原子力実証1MWが開始 ・SGH2、Ravenらによる廃棄物由来水素製造技術あり
EU	-	【2030年】域内製造**1,000万トン**、域外輸入**1,000万トン** 電解槽は**65GW**	見通し：2030年までに1～2€/kg（2×40GW Green Hydrogen Initiative）	EUタクソノミー：水素製造のライフサイクルCO2排出はSMRの73.4%減（3.0kgCO2/kgH2未満）	○	○			輸入	-	・CH-JUによりH2future(6MW)、Refhyne(10MW)、Djewels(20MW)など実証導入済 ・今後、Hydrogen Valley、IPCEIのスキームにより支援を拡大
ドイツ	40%	【2030年】電解槽**5GW***でグリーン水素製造14TWh 【2035年】追加の5GW ＊10GWに引き上げる方向	-	欧州レベルの持続可能性と品質の基準を策定	○				輸入	66.5MW	・2011年からkW規模のPtG事業を支援 ・2020年以降、Refhyne(10MW)やSALCOS(2.5MW)などがMW規模が稼働を開始
英国	41%	【2025年】 電解槽1GW、CCUS1GW 【2030年】低炭素水素製造目標**10GW**（電解槽：CCUS＝1:1） 【2050年】低炭素水素供給を240-500TWh	差額保障を提供（2025年までに価格競争力による選定へ）	低炭素水素基準：20gCO2/MJLHV	○	○	○		輸出	11MW	・豊富な風力資源を背景に、Orkney(1MW)、Tyseley Energy Park(3MW)などが稼働開始 ・水電解とCCSの両輪で大型案件が計画中。CCSではHynet（9万トン）、H2H Saltend（15万トン）、H2Teeside（12.5万トン）など
韓国	6%	【2030年】クリーン水素**390万トン** 【2050年】クリーン水素2,790万トン	-	改正水素法で「クリーン水素認証制度」の導入を決定 詳細・発効日は未定	○	○			輸入	0MW	・JEJUで水電解の実証が始まる（10MW規模） ・エンドユーザーである電力会社と連携しSK、GSなど海外水素製造拠点開発を推進
中国	23%	【2025】再生エネルギー水素製造：**12-20万t/年** 【2030】グリーン水素製造規模：**100GW**（中国2030年"可再生氢100"发展路线图）	-	-	○				–	204MW	・世界最大Ningxia Solar（150MW）やShell Zhangjiakou（20MW）などが稼働開始 ・内モンゴル、新疆、甘粛など豊富な再エネ資源を背景に100MW超の大型案件が多数建設中

（出所　大和総研作成）

各国の特徴から、下記の示唆を得た。

◆ 要素技術開発を目的とした縦割り型の支援制度から、拠点型・ビジネスモデル型の支援制度への移行
- 米国 "Hydrogen Hub"、欧州 "Hydrogen Valley"では、複数の最終用途を含む地域的領域を支援。英国 "Business Model"では、投資だけでなく運営費も支援。中国は補助金をモデル都市型に転換してきた。
- 水素サプライチェーンを一体的に支援することで、需・送・給バランスを確保し、持続性のある事業組成に注力している。

◆ クリーン水素の基準および製造における CO2 排出量算定方法の設定
- 米国"CHPS: Clean Hydrogen Production Standard"、欧州"タクソノミー"、英国"LCHS: Low Carbon Hydrogen Standard"では、製造ライフサイクルにおけるクリーン水素の算出方法および基準値を設定。補助金や投資判断の閾値としても活用されている。
- 水素導入の目的は気候変動への貢献。貢献度の透明性、他の政策と比較した際の優位性を提示する必要性がある。

◆ 政府コミットによる水素輸出国との連携を重視
- 韓国は、水素輸入に向けて、相手国との政府間・業界団体間で協力関係を構築したのち、財閥企業と電力会社によるコンソーシアムで水素製造開発プロジェクトを組成。水素発電義務化制度の導入により確実な需要を示す。
- 政府による協力関係構築と需要の提示により、相手国の信頼を確保。気候変動と安全保障だけでなく、水素技術の輸出も想定する。

◆ 投資効果の還元に Justice の視点
- 米国は、気候変動対策等に関する連邦政府による投資効果の 40%以上を Disadvantaged Communities へ還流することを求める「Justice 40 Initiatives」を掲げる。
- 水素戦略においても、 「DE&I（多様性、公平性、包括性）の醸成」 、「エネルギー・環境正義の進展」、「サステナブル雇用の拡大」など 8 つの原則を掲げる。特定の企業、地域、需要家だけでなく、広く地域、社会への貢献を示す。

３．２　成果の意義

（課題意識）
わが国が、世界に先駆けて“水素社会”を実現し、世界をリードしていくためには、国内外の水素に関わる広範な情報をタイムリーに収集、把握し、必要に応じた政策・制度対応、市場対応などを積極的に進めていくことが肝要となる。

（目的）
本調査研究では、世界各国の水素燃料電池に関する政策、市場、研究開発動向等の最新情報を幅広くタイムリーに収集、分析し、国内関係者に展開、共有すること、また、各国の政策や、市場および産業動向を正確に把握し、評価・分析することで、今後のわが国への示唆を得ることを目的とする。

（成果の意義）
本調査では、
- 世界各国の水素燃料電池に関する最新動向を隔週の「情報リスト」としてとりまとめ、NEDO および事業参加企業と共有し、国内関係者による最新動向の収集、把握を支援する。
- 各国の政策・市場動向等を体系的にとりまとめ、市場参加者が基礎情報を把握することを支援する。
- 収集した情報や分析結果から、各国の特徴を明らかにし、国内への示唆となるポイントの抽出を図り、政策決定者およびビジネスの意思決定の一助となることを目指す。

３．３　開発項目別残課題

2019 年から 2022 年にかけて、水素を巡る環境は大きく変化した。本事業では主要国 7 か国を中心に最新動向調査を行ったが、国際動向をより正確に把握するためには、豪州、中東など視点を広げる必要がある。また、研究開発フェーズから市場フェーズへと移行するにあたり、市場に関連する専門性の高い情報（例：仕様、規格など）も求められてくることが考えられる。

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本調査をベースとし、今後も、水素社会の実現に向けて、可能な限り情報収集や分析を行い、情報発信する。情報発信の手法としては、セミナー講演、雑誌等寄稿、レポート執筆、書籍執筆などを想定する。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
-	2020 年 1 月 30 日	公益財団法人原総合知的通信システム基金主催特別セミナー「水素・燃料電池技術開発戦略と新展開」	「水素・燃料電池分野における海外最新動向と今後の展開」	平田　裕子
-	2020 年 12 月 3 日	近畿経済産業局主催「水素エネルギー」セミナー（仮題）	「水素・燃料電池分野における海外最新動向と今後の展開」（仮題）	平田　裕子

以上

（３-④）「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究」

委託／助成先：国立研究開発法人産業技術総合研究所
NTTアノードエナジー株式会社
豊田通商株式会社

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：2022年度）

・二重配管方式の水素パイプラインにおいて水素が漏洩し着火した場合の挙動を評価し、着火時の影響度に関して、安全性評価における課題を抽出した。
・光ファイバセンシング技術の提案による付臭措置代替の可能性、教師データによる異常検知学習モデルの作成・初期検討、各種水素センサの性能評価、課題抽出を達成した。
・経済性検証により、比較的細い配管であっても各種コストの改善を要するものの、10km程度の輸送領域において圧縮水素等に対して優位性を持つ可能性が高いことがわかった。

●背景/研究内容・目的

・水素利用拡大に向け、大量かつ安定的な水素輸送手段が必要
・水素パイプラインはコスト・環境性の観点から、臨海から内陸部への輸送などの用途で有力な輸送手段の候補となる

課題：安全対策が未確立、埋設での敷設コストが高い

既存の地下インフラを活用した２重配管方式の水素パイプラインに関する基礎検討として、以下項目を実施した
(1) 2重配管方式による水素輸送システムの安全性評価のための調査研究
(2) 水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究 (水素漏洩検知手法の検討・性能評価)
(3) 経済成立性の評価

●研究目標

実施項目	目標
(1)安全性評価	二重配管における水素漏洩着火時の現象把握、安全性評価の課題抽出と対応策の明確化
(2)水素漏洩検知手法の検討・性能評価	付臭措置代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性調査ならびに各種水素センサの性能評価・取りまとめ
(3)経済成立性評価	二重配管方式水素パイプラインの経済成立性の検証

●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 産業技術総合研究所（安全性評価）
  - NTTアノードエナジー (水素漏洩検知手法の検討・性能評価)
  - 豊田通商（経済成立性評価）

●これまでの実施内容／研究成果

(1)安全性評価
実施内容：模擬二重配管系において水素漏洩を模擬し着火時の火炎伝播挙動を調査し、影響度を検討
研究成果：二重配管の中空層で火炎が伝播する条件と加速する条件を明らかにし、着火に至る事故シナリオの影響度を推定し、安全性評価の課題として影響度が高くなり得る事象を抽出した。水素漏洩を模擬した条件において着火時の圧力伝播挙動を観測し、影響度を低減させるための対応方針を明確化した。

(2)水素漏洩検知手法の検討・性能評価
実施内容：①付臭代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・実地調査。②異常検知(圧力、流量)に関する学習モデルの作成、実環境適用に向けた初期検討。③実環境における各種水素センサの性能評価を実施
研究成果：①光ファイバセンシング技術の提案により付臭措置代替技術の可能性を確認した。②教師データの取得による異常検知学習モデルを作成し、シミュレーションによる評価を実施するなど初期検討を達成した。③安全性を最優先とした場合のセンサ設置間隔の導出を達成した。

(3)経済成立性評価
実施内容：2重配管形式で輸送管をSUSフレキ50A(可撓性、さや管径70Aから設定)として経済性を評価。
研究成果：中・小規模（～1千t/年）かつ近距離（10km程度）での水素輸送においては、圧縮水素及び液化水素よりも本方式のパイプラインの方が経済性が高くなる可能性があることが分かった。

●今後の課題

(1)安全性評価
事故シナリオ毎の影響度と低減効果評価
(2)水素漏洩検知手法の検討・性能評価
普遍的安全技術の確立・技術基準策定
自然災害等非定常時の安全機能維持
(3)経済成立性評価
圧損の少ない配管材の選定
地下インフラの元管状況の把握

●実用化・事業化の見通し

実用化・事業化に向けて以下取組を推進
①定量的リスク評価に基づく安全対策の提案
②社会システムとしての安全性確保、ルール化
③高圧水素も視野に入れた配管調査 等

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
(1)安全性評価	火炎伝播挙動の把握、影響度の推定、対処策の明確化	○
(2)水素漏洩検知手法の検討・性能評価	付臭措置代替となる安全技術の評価・確立、ならびに自然災害等非定常時の安全機能維持に関する詳細要件・設計(FD行程)に目途付け	○
(3)経済成立性評価	成立要件の確認と経済成立性の目途付け	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	0	0

事業番号：３－④

研究開発名：超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国際展開、国際標準化等に関する研究開発／水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究

実施者：国立研究開発法人産業技術総合研究所
NTT アノードエナジー株式会社
豊田通商株式会社

１．研究開発概要

将来の水素大量消費社会の実現に向けて、地域の需要家に水素を安価・安定的に供給する手段の確立が求められている。現状の一般的な水素供給手段は高圧水素カードル・チューブトレーラーなどのトラック輸送であり、臨海部の水素拠点などから幅広いエリアに供給が行われているが、1 台あたりの輸送量が限られており大量輸送に適した手段とはなっていない。また、一部の液化水素プラントからはタンクローリーによる輸送が行われており、高圧水素と比べて輸送効率が高い特徴があるが、プラントの建設・運用コストが極めて高額となる課題がある。臨海部のコンビナート内や工場敷地内においてはパイプラインによる水素供給がほとんどで、近距離かつ大量供給に適した輸送効率の高い手段として用いられているが、これらのエリア外での導入事例は少ない。

短距離・大量輸送の条件下においてはパイプラインによる供給のコスト優位性が高く、水素大量消費社会に求められる有望な水素供給手段と考えられる一方、コンビナート外・工場敷地外への展開に際しては経済性や安全性などの課題を解決することが必要である。

本研究開発では将来の水素大量消費社会の成立に向けて大きな課題となる水素輸送分野において、安全且つ安価な水素輸送インフラとして成立する可能性が高いと思われるパイプラインによる水素輸送の事業化を継続して検討するもので、水素大量消費社会を見据えて、最終目標としての地域におけるパイプラインによる水素供給手段の確立を目指すものである。本研究開発においては、安全確保上の課題、経済成立性の確保に向けた課題を検討し、パイプラインによる水素輸送の基本設計を完成させるための課題を抽出する取り組みとした。

２．研究開発目標

表１ 研究開発目標

実施項目	最終目標
（1）2重配管方式による水素輸送システムの安全性評価のための調査研究	二重配管方式水素輸送システムの安全性評価のためには、本方式に潜在する水素漏洩、燃焼、爆発リスクの評価が求められる。本研究項目では、二重配管を模擬した配管系において、その中空層に水素が漏洩し着火した場合の火炎伝播挙動を把握し、それを基に安全性評価における課題を抽出し対応策を明確化することを目標とした。
（2）水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究	二重配管方式水素輸送システムの安全性技術を確立するためには、本方式に適した新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性ならびに各種水素センサの性能評価などが必要となる。本研究項目では、実証環境を構築し収集した非定常時の基礎データから、二重配管方式に適した水素漏洩検知手法（ポイント／分布センシング）の導出・性能評価、異常検知における技術成立性調査など、付臭措置代替となる新たな検知手法の可能性を確認することを目標とした。
（3）経済成立性の評価	経済成立性が不明確な２重配管方式の水素輸送システムに関し、実証における敷設コスト・安全コストを通じて単位コストを明確にし、実需の調査とコスト優位性を保つ条件・事業モデルを示すことにより、出口戦略となる一般的な導入モデル及び展開要件を明らかにすることを目標とした。

３．研究開発成果

３．１　研究開発成果、達成度

（１）２重配管方式による水素輸送システムの安全性評価のための調査研究

パイプラインを用いた水素の輸送形式の一つとして想定される二重配管方式では、地中に埋設された管（以下、埋設管と記す）内に水素を輸送するための配管（以下、輸送管と記す）が設置される（図１）。安全性評価に関する本方式の特徴としては、輸送管が埋設管に保護された構造であり、その中空層に水素センサを設置することで輸送管から漏洩した水素を直接検知可能であることが挙げられる。

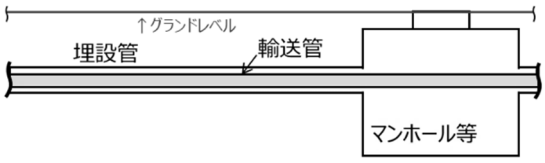


図１．二重配管方式水素パイプラインの模式図

水素パイプラインで一般的に想定される主なリスクは、配管から水素の漏洩が発生し、漏洩した水素が空気と混合し、何らかの原因により着火し、燃焼、爆発を引き起こすことである。安全性評価においては、事故に至る事象の進展（事故シナリオ）に対して、その可能性と影響度を評価する必要がある。大気中への水素漏洩については、既往の調査研究等において着火時の影響度が評価されている。一方で、二重配管方式に特有の事象として、輸送管からの水素漏洩時に、水素が埋設管内を拡散しながら滞留することが想定される。水素が漏洩した場合の事故シナリオの進展としては、輸送管と埋設管の間隙部である中空層において水素と空気が混合することで可燃性の混合気が形成し、着火により火炎が生じること、そして生じた火炎や圧力波がマンホール等の地下空間に伝播し被害をもたらすことが考えられる。従って本方式の安全性評価のためには、中空層に漏洩した水素に着火した場合の影響度を評価する必要があり、そのためには水素の火炎が中空層を伝播する挙動を把握する必要がある。そこで本研究開発では、二重配管を模擬した配管系（模擬二重配管）を構築し、二重配管の中空層に漏洩した水素に着火した場合の火炎の伝播挙動を評価した。その結果を基に、本方式に潜在する燃焼、爆発等の物理的危険性を含む安全性評価に関する課題の抽出と対応策の明確化を行った。

産業技術総合研究所つくば西事業所の可燃性ガス風洞設備内に全長約 16.3m の模擬二重配管を設置し、着火実験を行った。模擬二重配管は、埋設管を模擬した 75A の鋼管と、輸送管を模擬した 50A のステンレスフレキシブル管で構成される。模擬二重配管の中空層に水素を導入し、火花放電により点火し、その後の火炎伝播挙動を圧力センサ、光センサおよび温度センサを用いて観測した。

①基礎燃焼特性の把握

まず、二重配管の中空層における基礎的な燃焼特性として、水素と空気の予混合気の伝播挙動を評価した。二重配管の片側を封止端、他方を開放端とし、中空層に予混合気を充満させ、封止端の近傍で点火し、火炎が伝播する速度を測定した。伝播速度の水素濃度依存性を図２に示す。伝播速度は濃度に依存し、水素濃度 20-45 vol%においては超音速での火炎伝播、つまり爆轟が観

測された。ただし、その速度は理想的な条件における爆轟速度（図中実線）よりやや低下していることが分かった。火炎速度が超音速に達するまでの距離は点火位置から 1 m 以内であった。水素濃度 12-15 および 50-56 vol%においては、燃焼生成物の音速（鎖線）と同程度の速度で火炎が伝播した。さらに低濃度側の 6-11 vol%では火炎は層流火炎速度（点線）より速く、高濃度側の 57-72 vol%では、層流火炎速度と同程度かそれよりやや遅い火炎伝播が観測された。これらの結果から、二重配管の中空層における予混合水素火炎の伝播挙動が明らかになり、水素が漏洩した際に形成される濃度分布に応じて着火時の火炎伝播形態を予測することが可能となった。

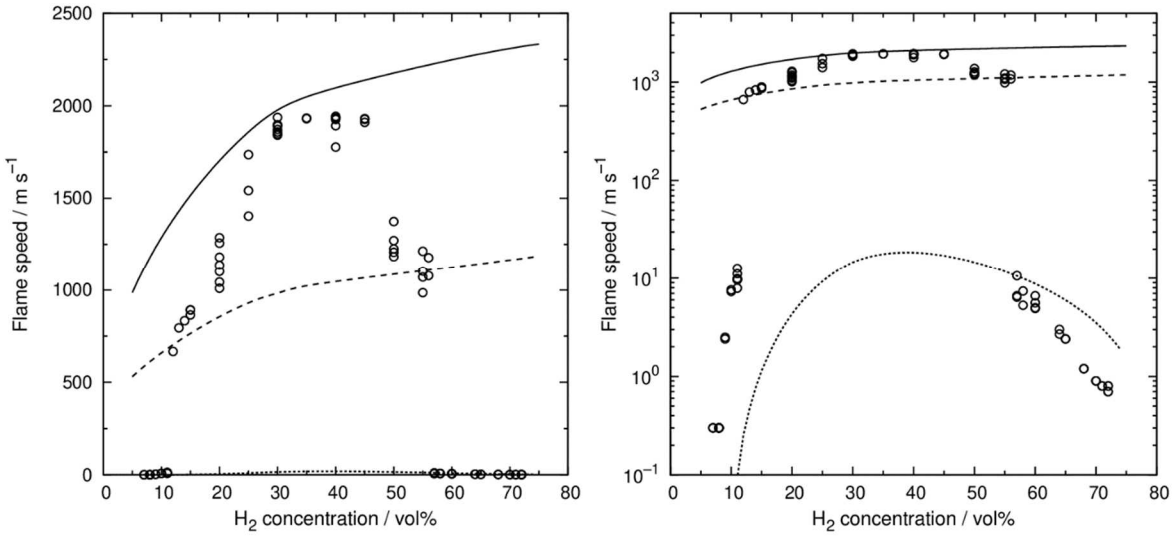


図２．模擬二重配管の中空層を伝播する水素空気予混合火炎の速度（左：線形軸、右：対数軸、○：実験値、実線：爆轟速度、鎖線：生成物の音速、点線：層流火炎速度）

②漏洩拡散および火炎伝播挙動の調査

次に、模擬二重配管の中空層に水素が漏洩することを模擬した条件において、着火した際の火炎の挙動を評価した。模擬二重配管の中央付近に漏洩口を設け、空気で満たされた中空層に水素を一定流量で導入することで漏洩を模擬した。水素導入開始後、一定時間経過した時点で、任意の位置で点火し、その後の火炎伝播挙動を圧力センサで測定した。漏洩流量は 1 L/min および 0.1 L/min とした。これらの値は、配管設置後に実施可能な漏れ検査として、加圧放置法により検出可能な流量を目安として設定したものである。

漏洩開始から点火時点までの水素の拡散挙動を把握するため、漏洩口から管軸方向への水平距離 0、1、2、3.5、および 5.5 m の位置に水素濃度センサを設置し、水素供給開始後の中空層内における水素濃度の推移を測定した。漏洩流量 0.1 L/min における測定結果を図 3 に示す。漏洩開始後 20 秒以内に漏洩口近傍の水素濃度は可燃濃度範囲に到達し、約 2 時間で可燃濃度範囲の上限界に近い 73 vol%に達した。管軸方向へは単調に水素が拡がり、漏洩開始後約 30 分および 60 分の時点で、距離 3.5m および 5.5m の地点でそれぞれ水素を検知した。それらの時点では、水素を検知した地点より漏洩口側の領域には広範囲に可燃濃度範囲内の混合気が形成されていた。

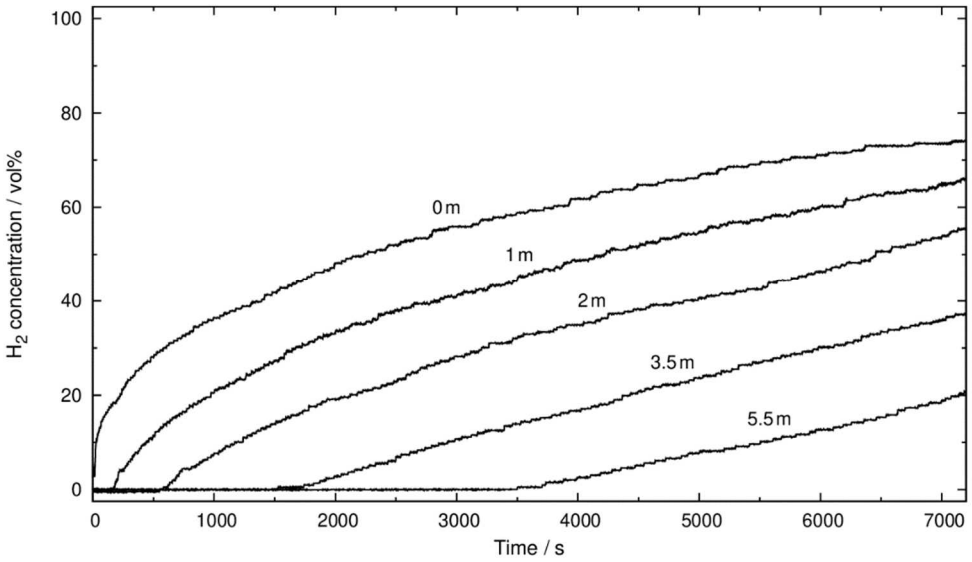


図３．模擬二重配管の中空層への水素漏洩実験において観測された、中空層内の各位置（漏洩口からの距離）における水素濃度の変化（水素流量 0.1 L/min）

漏洩した水素に着火した場合の圧力の観測例として、流量 0.1 L/min において漏洩開始から 30 分経過後に、漏洩口から 1m の位置で点火した際に観測された圧力履歴を図４に示す。時間軸は点火電極に電圧を印加した時点を原点としており、縦軸は漏洩口からの管軸方向距離毎に設置した圧力センサにおいて測定された各圧力の時間変化を示す。着火後に鋭い過圧ピークを伴う超音速での火炎伝播が確認された。点火時点では漏洩口の前後 2m の範囲内において爆轟が発生し得る水素濃度 20-45%の混合気が存在しており、前述の予混合火炎伝播挙動の評価結果を踏まえると、本実験においても爆轟が発生したと考えられる。発生する過圧は漏洩条件と点火条件により異なるが、図に示す実験条件においては最大 6.9 MPa の過圧が確認された。爆轟により生じた圧力波は、水素が検知されていない距離 5.5m 以遠の地点においても減衰しながら伝播を続けた。その伝播速度は空気中の音速である 340 m/s に一致した。最も遠方に設置した、漏洩口から距離 7m 地点の圧力センサでは、約 20-40kPa 程度の過圧が約 5 ミリ秒間継続することが確認された。

以上のことから、二重配管において水素が中空層に漏洩し着火した場合の火炎伝播挙動としては、局所的には予混合火炎の伝播形態と対応すること、および、火炎から発生した圧力波は減衰しながら中空層を伝播することが明らかとなった（○）。

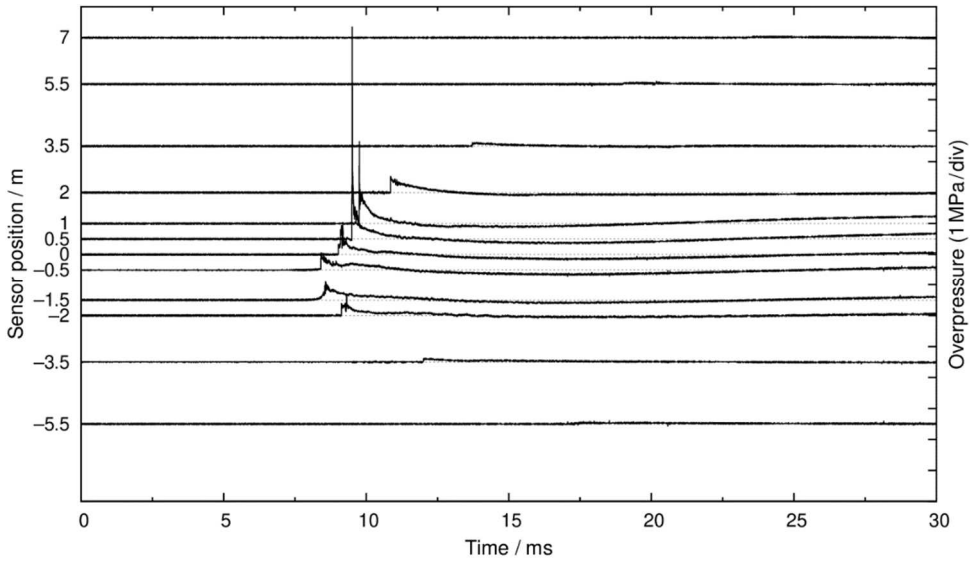


図４．模擬二重配管の中空層に水素を漏洩させ着火した際の圧力伝播挙動（水素流量 0.1 L/min、漏洩時間 30 分、点火位置 -1 m）

③影響度の検討と課題の抽出

以上の実験評価結果に基づき、想定する事故シナリオにおける着火時の影響度を検討した。本研究で想定した二重配管系では、輸送管から漏洩した水素が埋設管内の空気と混合することで着火に至る事故シナリオが進展する。送風や不活性ガスの充填など、埋設管内の状態を制御することで、漏洩した水素の着火性を制限できる可能性はあるが、ここでは最も単純な場合として、本実験条件と同様に、埋設管と輸送管の間隙には空気が滞留している状況を想定する。

最も影響度が高いと考えられる事故シナリオとしては、輸送管から漏洩した水素がマンホールや共同溝等の大きな容積の空間内に侵入し、空気と混合した状態の可燃性混合気が空間内に充満し、着火することが挙げられる。可燃性混合気が空間内に充満する条件としては、当該空間内または空間に近い二重配管部から比較的大きな漏洩が発生する場合、あるいは小流量の漏洩であっても適切な検知に失敗する場合が挙げられる。空間内の着火源により着火するか、あるいは接続された二重配管部から着火する可能性があり、いずれも空間内でのガス爆発に至る。特に配管部で着火した場合には、本研究で明らかになったように爆轟への遷移が進行し得るため、空間に爆轟波が入射することも想定される。従って、空間内の混合気が爆轟した場合が最も影響度が高い想定である。典型的な内容積のマンホールに充満した水素と空気の混合気が爆轟する場合には、TNT 換算で最大約 3.4 kg 相当の爆発威力が想定される。実際にはコンクリート壁などの構造物にエネルギーが吸収される事や、密閉状態の場合は構造物の破壊にエネルギーが消費されることが考えられるため、上記の距離はマンホール蓋が開放されていた場合など威力が低減しない状況下において想定される最大値であると見做すことができる。この推算結果は、万が一最悪シナリオが進展した場合の対応を検討するための目安となる。

次の事故シナリオとして、二重配管部において漏洩が発生し着火する場合を検討した。本研究により、中空層に水素が漏洩した場合には直ちに可燃濃度範囲に到達する領域が現れ、その領域が短距離であっても着火時には爆轟遷移が起こる場合があり、圧力波が発生し得ることが明らかとなった。短距離かつ短時間においてもこれらの事象が進展し得ることから、実プロセスにおい

ては漏洩が検知される前あるいは検知した漏洩に対処する前に着火し、圧力波が発生する可能性がある。二重配管部は埋設されており人の進入は考えられないことから、二重配管に接続するマンホールやハンドホール等の空間に圧力波が伝播することを想定し、当該空間に立ち入る可能性がある人への影響を検討した。本事故シナリオでは、二重配管部の限られた領域において火炎が伝播し圧力波が発生するが、燃焼が継続されない場合には発生した圧力波は減衰する。本研究の実験で想定した条件では、爆轟により発生した圧力波は伝播する過程で減衰し、配管出口付近では約 20-40 kPa 程度の過圧が約 5 ミリ秒継続した。例えばハンドホールを想定し、この過圧が容積 1 m3 の空間に伝播し内圧が均一に上昇した場合、空間内圧は最大で約 0.13kPa 上昇すると推定される。このように圧力波が減衰することで当該空間への影響度は緩和される。従って、二重配管の中空層へ水素が漏洩した場合には、可燃性混合気が形成されることを前提として、着火した際の圧力伝播による影響が許容可能かという観点での安全性評価が必要となる。本研究は主に現象の把握を目的としており、想定される漏洩条件や着火条件を網羅するものではないため、このシナリオのリスクを定量的に評価するためには、様々な想定条件における漏洩拡散挙動の測定および着火時の圧力伝播挙動の測定が必要である。その評価結果を基に、影響度を許容される範囲に制限するための漏洩検知方法や漏洩検知時の対応方法を検討することが望ましい。

以上のように、二重配管の中空層における水素火炎伝播挙動の実験結果を基に事故シナリオの影響度を検討した。その結果として、水素が漏洩することで中空層に形成される可燃性混合気に着火した際の影響に対処する必要があることが、安全性評価における課題として抽出された（○）。抽出された課題への対応策として、着火時に発生する圧力が減衰し被害が発生しなくなる条件を評価し、それを基に適切な漏洩検知方法と漏洩検知時の対応方法を確立する必要があることが明らかとなった（○）。

（２）水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究

日本工機(株) 白河製造所（福島県西白河郡西郷村)の敷地内にて標準管路を再現した環境に水素パイプライン設備を加えた実証環境の整備（図５）を行った。設備は、「水素供給装置」、「水素配管」、「標準管路(250m)」、「燃料電池」、「仮設事務所」の全長 300m で構成され、その実証環境において二重配管方式（水素輸送用配管(内管)と、さや管（外管)）で構成される二重配管）の水素供給インフラの安全性に係る技術基準の策定に必要となる水素漏洩時の基礎データを収集・調査・分析（データアナリティクス）することを目的とし、収集した基礎データから二重配管方式における水素漏洩時の検知状況、ポイントおよび分布型センシング、異常検知などの付臭措置代替となる新たな検知手法の可能性を確認することを目標として、以下の実地検証を実施した。

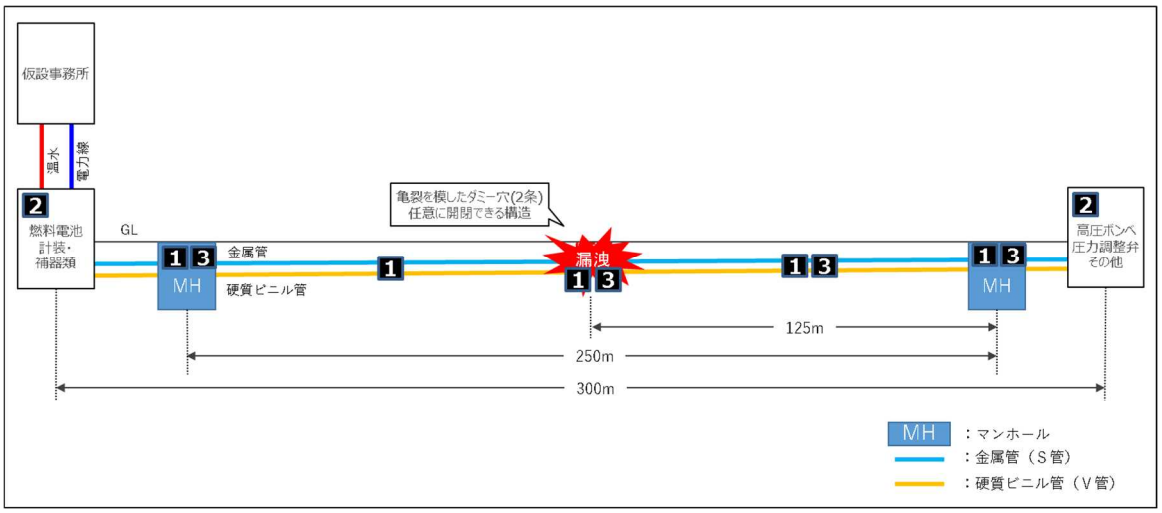


図５．実証環境の概略図

①付臭代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・実地調査

光ファイバケーブルの防爆性および分布的な検知が可能な点に着目した、光ファイバケーブルによる水素漏洩検知の有効性についての検証を実施した。

a) 直接的な水素漏洩検知 … 光ファイバケーブルに漏洩した水素を直接吸収させることによる光学特性の変化を用いた漏洩点の検出方法（光損失の検証）

b) 間接的な水素漏洩検知 … 水素漏洩にともなう光ファイバケーブルへの音響変化分布の検知による漏洩点の検出方法（位相変化の検証）

c) 異常予兆に関する検討 … 二重配管に対して過剰な外力が加わることによる応力歪を、光ファイバケーブルを用いることで破損による経時的な変化に至る前に異常を検知する技術成立性についての検証

光ファイバケーブルを利用した検知方式において 100 時間程度経過後に微小な光損失（図６）が確認できること、水素漏洩地点において、音響振動による漏洩検出（図７）が可能であることなどの成果が得られた。また、重機での破壊の際、光ファイバケーブルにかかる応力歪を OTDR で測定することが原理的に可能であることを確認した。（〇）

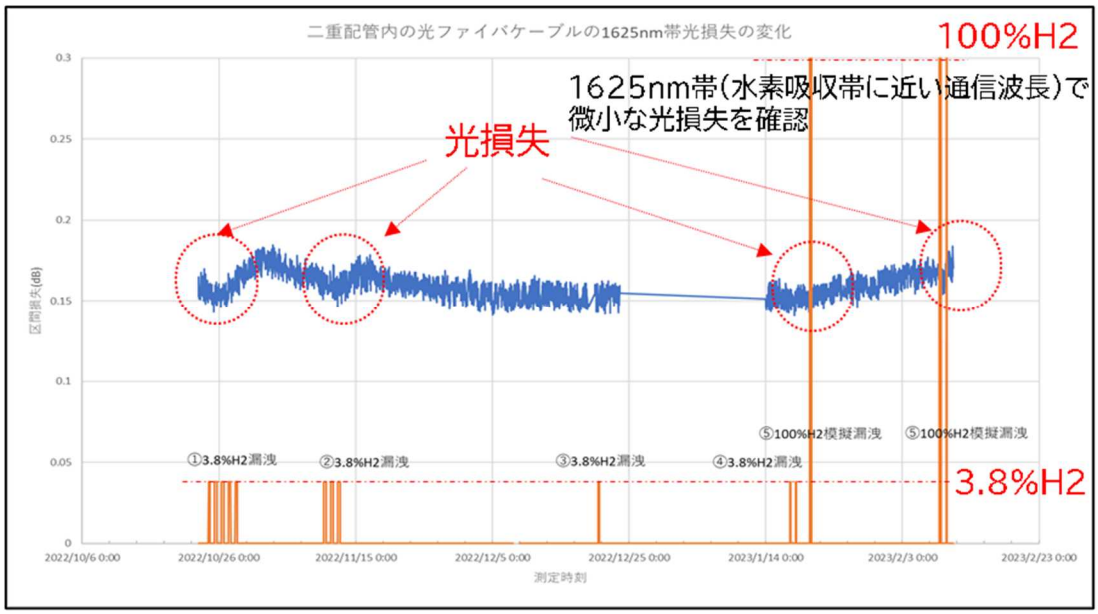


図６．二重配管内の光損失変化(1625nm)

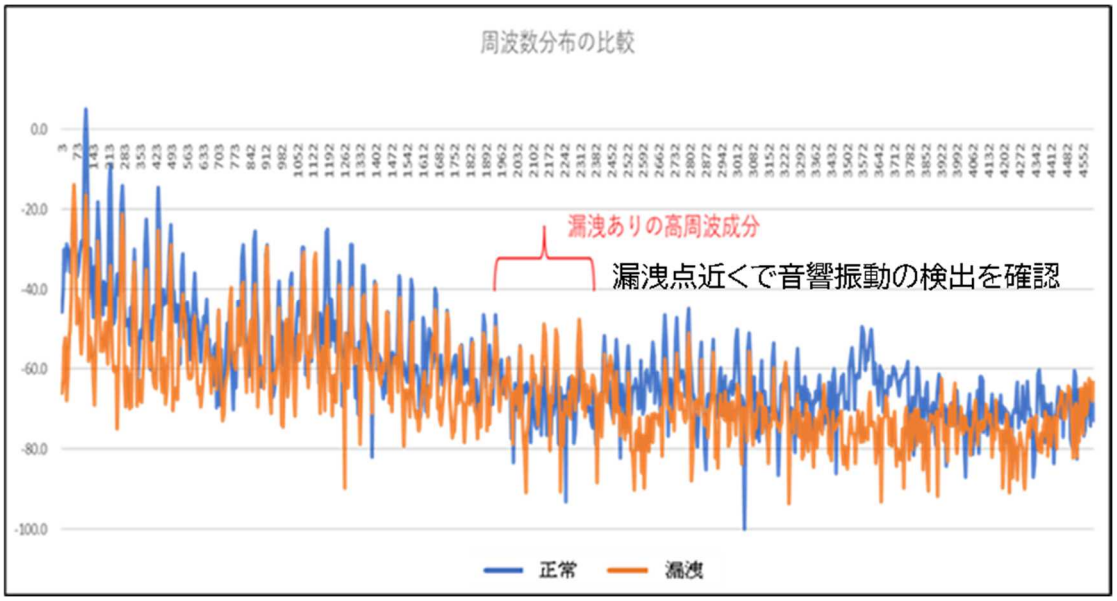


図７．漏洩点のハンドホール上で測定した動音響振

②異常検知(圧力、流量)に関する学習モデルの作成、実環境適用に向けた初期検討

異常検知に向けて、正常時データ(圧力、流量)ならびに水素漏洩時の観測データをもとに基礎となる異常検知モデルを作成し、これを基に実環境適用に向けた異常検知モデルの技術成立性に関する初期検証を実施し異常検知モデル作成時の課題や、異常検知精度の分析・課題の検討を行った。

水素漏洩事象のデータが限られ、偽陰性の誤検知に関する性能を偽陽性と同様の手法で評価できないという課題があったが、質量保存の法則に基づく検知方式の採用により、誤検知の仕組みが明確となり、偽陰性を含めた誤検知の性能評価が可能となった。本検知方式を正常時および漏洩時の実験データに適用し、流量低下開始から約 30 分以内に異常検知（図８）が可能といった検知性能を明らかにするとともに、実験の漏洩を検知できることを示した。

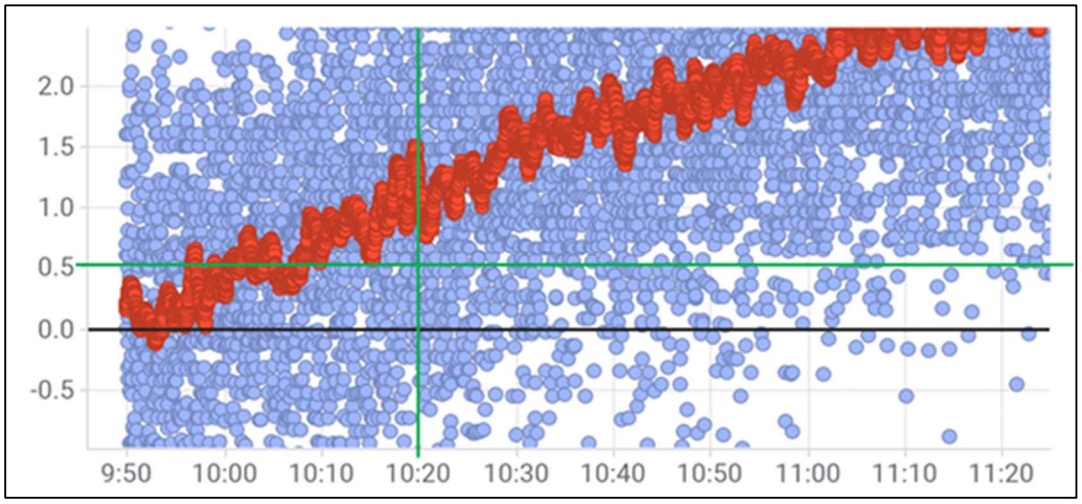


図８．水素漏洩（模擬）時の異常度

しかしながら、本手法による局所的水素漏洩点の検出は極めて困難であることが判明した。(○)

③実環境における各種水素センサの性能評価

実証環境において二重配管内の中空層内に疑似漏洩させた水素の直接的な検知における各種水素センサの性能検証を実施した。

光ファイバ式水素センサで水素輸送用配管とさや管の間の中空層に漏洩した水素を 25%LEL 以下で検知（図９）できること。また更には、異常予兆に関する技術・機能要件の抽出や、事故シナリオに基づき安全性を確実に担保する場合、中空層に漏洩した水素濃度分布ならびに拡散挙動の経時変化の観点より、光ファイバ式水素センサを約 10m 間隔で設置することが必要であるなどの成果が得られた。(○)

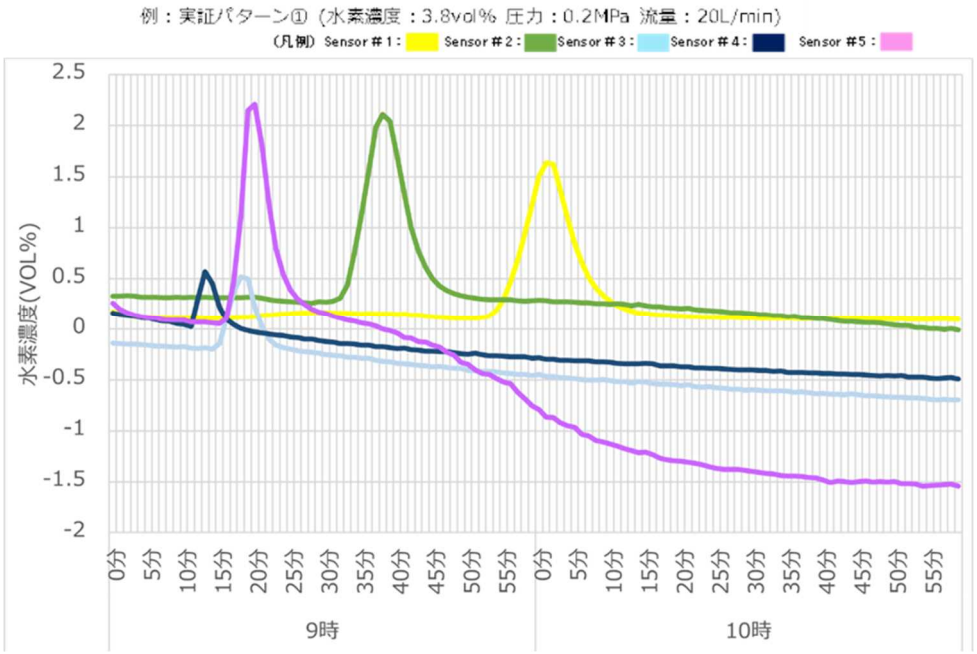


図９．水素輸送用配管とさや管の間の中空層に漏洩した水素の検知例

（３）経済成立性の評価

①パイプライン輸送のターゲット

2030 年以降、大規模水素サプライチェーンが構築されること等を通じて水素供給コストが大幅に低減し、業務・産業等の幅広い分野に水素需要が広がる社会状況を前提とする。その際、CNP など輸入水素サプライチェーンの玄関口となる港湾周辺では、事業用発電所等の大規模需要家向けに大口径・高圧の水素パイプラインが敷設されると見込まれるが、この水素パイプラインは大規模設備であるため高コストで、高圧ガスからの離隔距離確保等の安全対策も大掛かりとなるため、幅広いエリア・需要に対して水素供給するにはハードルが高いと想定される。

上記のパイプラインを補完する役割を担うため、港湾から工業エリア、再エネ水素製造拠点から周辺エリア等、中距離・中規模の水素輸送のニーズをターゲットとして、これを経済的に実現するパイプライン輸送モデルの構築を目指す。下図赤枠の部分となる。

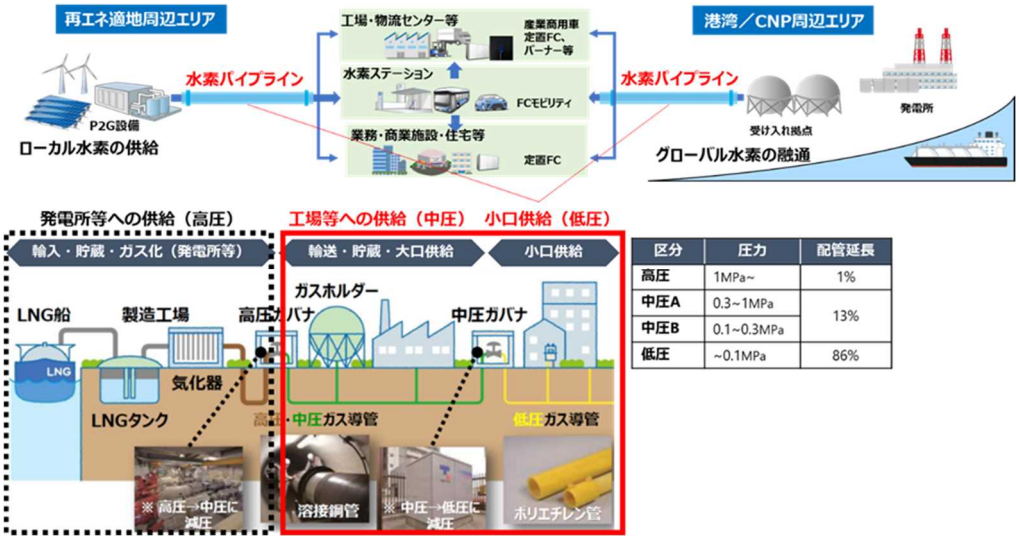


図１０．水素輸送モデルと都市ガス供給フローとの比較[1]

中距離・中規模での水素供給は、下イメージの通り、数十 km 程度の延長において、水素需要量が数十～数百トン/年程度の需要家を対象として検討することとした。赤枠の部分となる。

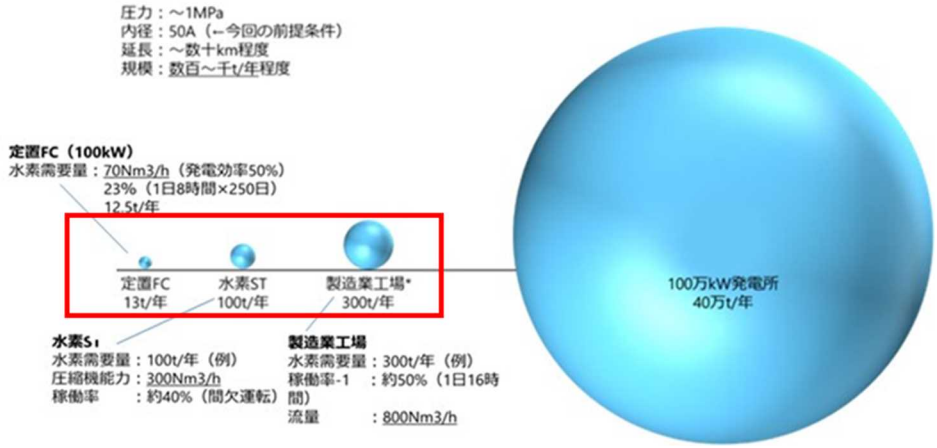


図１１．中距離・中規模の水素輸送イメージ

1 日本ガス協会公表資料から作成

②輸送可能量の検証

本事業の実証で用いた SUS フレキ配管（50A）について、都市ガス供給等で用いられている SGP 管との比較では、SUS フレキ配管の圧損は SGP 管の約 5 倍との想定が行われており、同じ流量や許容圧力損失等の設定条件下での移送可能距離は約 5 分 1 となる。

都市ガス中圧導管内のガス流速は一般に 20m/s（または 10m/s）程度に抑えることが多いとされることを踏まえ、流量を 1,400Nm3/h、800Nm3/h、300Nm3/h として比較した場合、以下の通りの考察が得られる。これを踏まえてケーススタディの方向性を検討した。

・1,400Nm3/h：流速 22.62m/s、移送距離 1.9km　⇒流速が早い・距離が極短い
・800Nm3/h：　流速 12.92m/s、移送距離 5.2km　⇒距離が短い
・300Nm3/h：　流速 4.84m/s、移送距離 29.2km　⇒距離は長いが流量が少ない

① 現状のSUSフレキ管ベース：
-1)1条あたり800Nm3/h程度（稼働率100%で625t/年）として、数kmごとに増圧（ブースター）を設けるモデル**（中規模モデル）**

-2)1条あたり300Nm3/h程度（水素ST1基レベル、～100t/年）として、水素STから周辺地域の定置FC等向けに水素を供給するモデル**（小規模モデル）**

② 改善後の配管ベース：
-1)SUSフレキ管の改善等を想定し、圧損の低下による経済成立性の向上等を検討する

図１２．ケーススタディの方向性

③条件・ケース設定

a. 中規模モデル

圧縮水素・液化水素・パイプラインを同様の条件でコスト比較できるよう、液化機の能力 5t/日を律速ベースに圧縮水素向けの圧縮機の能力、パイプライン向けの圧縮機能力・配管本数、水素需要等を設定した。結果 1,500t/年の水素需要となり製造業工場 5 カ所規模への水素供給、コスト比較の輸送距離は 3km、10km、30km と設定した。

b. 小規模モデル

明らかに高コストとなる液化水素を除外し、方向性で示す通り中規模水素ステーションの圧縮機能力 300Nm3/h を律速とし、圧縮水素・パイプラインを同様の条件で比較できるよう、供給設備及び水素需要を設定した。このケースでは水素需要は 100t/年で 100kW 程度の複数の業務用機器に向けた供給となる。距離については同じく 3km、10km、30km と設定した。

④コスト設定

a. 二重配管方式のコスト設定値

試験環境整備費実費も参考に、中規模モデル・小規模モデルに関して、以下の通りとした。尚、DOE がホームページで公表している水素供給に関する技術目標（DOE Technical Targets for Hydrogen Delivery[2]）では、パイプライン（10MPa）の敷設に係るトータルコストの 2020 年度目標として約 2 万円/inch･m が示されており 50A の配管で 1km あたりに換算すると 4 千万円/km となり日本での目標にもなるものと考えこれを採用した。一方で実際の試験環境での敷設

[2] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-delivery

コスト・安全コストはありものの調達となることもあり高額、個別にコストダウンの可能性を検討した結果、DOE コストの倍の 8 千万円/km 程度にまで抑えられる可能性が見えることから後段の感度分析ではあらためて 8 千万円/km のケースも示している（〇）。

パイプライン敷設コスト　：4 千万円/km（DOE コスト水準）、償却年数 30 年
ブースター（増圧）コスト：4 千万円/箇所（水素ステーション圧縮機コストをもとに想定、0.2Mpa⇒0.9Mpa）、償却年数 10 年
配管長　：配管の曲がり・エルボ等を考慮して距離の 1.3 倍として計算
OPEX（管理・メンテ費等）　：パイプラインは投資額の 1%/年
圧縮機は投資額の 3%/年

b. 圧縮水素の設定値

圧縮水素は設定値を 20MPa とし、CAPEX, OPEX を既往研究より設定した。輸送については 2600Nm3 ローダーによるトレーラー輸送とし単位距離当たり輸送費は国交省の標準的な運賃を適用した。

c. 液化水素の設定値

液化水素は 5t/d=2, 333, 333Nm3/h の製造量とし、設備費用については既往研究より設定した。その他個別のコスト情報がすべて明らかではないため、国資料において示されている液化コストと独自に想定した輸送コストを組み合わせて計算する。

⑤ケーススタディ結果まとめ

敷設コストが DOE 水準の 4 千万円/km の場合において、圧損の改善（1/3, 1/5）も試算し、ケーススタディとして結果を以下の通りまとめた。中規模モデルで直線距離 8km 程度までは圧損が改善されなくてもコスト優位となり、圧損が改善されるに従い優位距離が延びる状況が示された（〇）。

表 1．ケーススタディ結果まとめ

前提	ケーススタディ結果
現状の配管条件（摩擦等）	● 中規模モデル（800Nm3/h）では移送可能距離が短いため増圧コストが高くなり、パイプラインの成立領域はかなり限られる（～8km程度）
	● 小規模モデル（300Nm3/h）では移送可能距離が長い、また水素STの圧縮機を共用できるとすると、パイプラインの成立領域は15km程度まで広がる
配管の摩擦抵抗（圧損）を1/3とした場合	● 中規模モデルでの成立領域が広がる（～12km程度）
	● 小規模モデルでは成立領域が広がらない（もともと移送可能距離が長いため）
配管の摩擦抵抗（圧損）を1/5とした場合	● 中規模モデルでの成立領域が広がる（～20km程度）
	● 小規模モデルでは同上

更に敷設コストが前述の試験環境整備実費用からのコストダウンの可能性を勘案した 8 千万円/km のケースも加えてグラフ化すると下図の通りとなった（〇）。

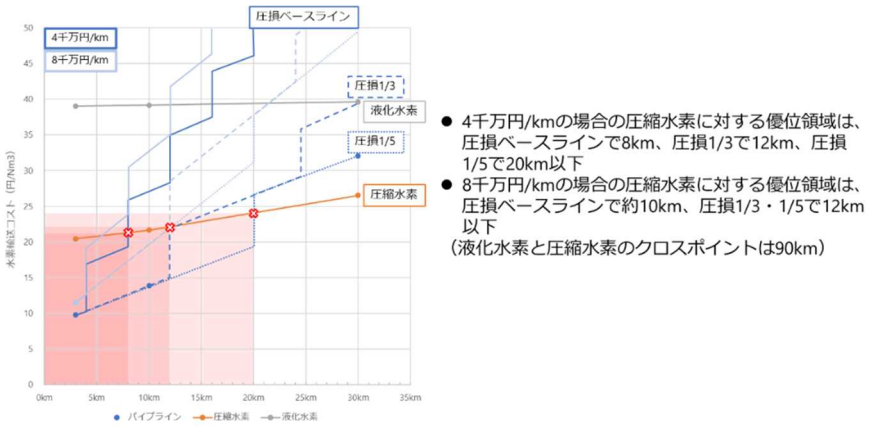


図１３．感度分析結果

参考までに本検討のパイプライン圧力を中低圧（0.9Mpa～0.2MPa）ではなく、高圧（例えば7Mpa～0.2MPa）での運用とした場合の優位領域も同様に試算し、現状の配管条件下でも一定まで優位領域が拡大すること可能性があることがわかった。ただし、高圧での運用に伴う安全コスト上昇等の可能性に留意が必要である。二重配管システムの近距離輸送のコスト優位性については以下の通り整理することができた（〇）。

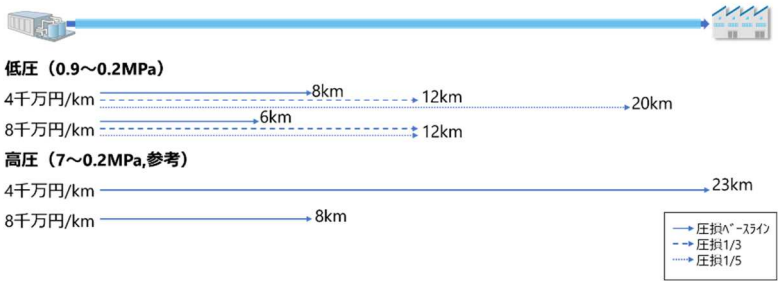


図１４．優位性の整理

⑥国内 3 大港湾の水素需要ポテンシャルと二重配管方式による出口戦略

国内 3 大港湾での需要ポテンシャルを下記の通り取りまとめた（〇）。海外水素の受け入れ、高圧パイプライン輸送、湾岸周辺での利活用が検討されている 3 大港湾エリアでは、都市部エリアでもあり通信管以外に都市ガス配管その他選択肢等の活用可能性があると考えられる。

表２．国内 3 大港湾のまとめ

項目	名古屋港	神戸・関西圏	横浜港・川崎港
プレーヤー	● 中部圏水素利用協議会（住商、トヨタ、SMBC） ● 豊田通商・東邦ガス等	● 神戸・関西圏水素利活用協議会（岩谷、デロイト、丸紅）	● 横浜市 ● 川崎市 ● ENEOS（JFE、JERA）
検討状況	● 大規模、中小規模需要が推計されている（協議会） ● 海外輸入水素の受入・配送の調査、名古屋港水素利活用モデルの調査が行われている（NEDO事業）	● 大規模、中小規模需要が推計されている（協議会） ● 臨海エリアにおける水素供給モデルの調査、神戸港水素利活用モデルの調査が行われている（NEDO事業）	● 大規模需要を中心に推計されている（NEDO事業） ● 東京湾岸エリアにおける水素供給モデルの調査、横浜港水素利活用モデルの調査が行われている（NEDO事業）
周辺地域の中小需要（推計）	● 工場、水素ST、街利用により2万t/年以上	● 工場、水素ST、街利用により1.5万t/年程度	● 工場、水素ST、街利用の推計無（周辺地域は都市部）

元管についても以下の通り各種選択肢があることがわかっているが、詳細については今後の調査課題となる。

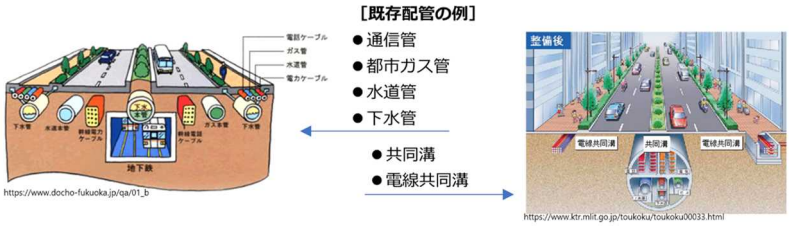


図１５．二重管方式の例

CNP から需要家までのサプライチェーンにおける二重配管方式パイプラインの出口戦略を以下の通り確認することができた。各需要先への水素輸送に際して、幹線部分を大型洞道を前提とする最適管径（数百 A）での設計とし、そこから個別需要先へのラスト 10 マイル程度を 50A で分岐輸送することで、圧損等の程度次第ではあるが、コスト優位性のある事業モデルが成立する可能性があることがわかった（○）。

表３．サプライチェーンと出口戦略

CNP <例> 名古屋港	ハブ拠点 発電所・豊田三河各地区向け	エリア拠点 需要地複数カ所向け	中・小規模需要家 トヨタ系工場・水素ST・他
			
●各ハブ拠点からの大規模輸送、超長距離・超大量輸送が想定され、鋼管配管での高圧輸送が本命 （エリア拠点10カ所への輸送） ・80,000Nm3/h=30,000t/y ・入口5MPa→出口1MPa ・輸送距離 50km以上 ・ストレート管と仮定 →管径概算：300A程度	●各エリア拠点からの大規模輸送、長距離・大量輸送が想定され、鋼管配管での高圧輸送が本命 （各需要地10ヵ所への輸送） ・8,000Nm3/h=3,000t/y ・入口5MPa→出口1MPa ・輸送距離 50km以上 ・ストレート管と仮定 →管径概算：100A程度	●需要家直前の中・小規模輸送 800Nm3/h=300t/y (稼働50%) の輸送 対象 製造業工場換算 1件 水素ST換算 3件 定置FC換算 24基 ●圧縮水素に対し競争力を持つ輸送距離 CAPEX8000万条件で 15km 〃 4000万 〃 26kmまで →需要家の直前ラスト１マイルの水素供給に適性がありSUSフレキ50Aで検討可能	
二重配管化のための既存配管の選定と鋼管配管の可撓性が課題、配管設計・製造コスト・安全コストが未検証		出口戦略として需要家への中・小規模のきめ細かい水素輸送をターゲットとする	

３．２　成果の意義

二重配管方式による水素のパイプライン輸送を社会実装するためには、その安全性に関する科学的な評価と安全技術の確立が必要である。本研究開発では、安全性評価において課題となる二重配管方式特有の事象について、火炎伝播という基礎現象の科学的解明に基づき、その影響度を評価するための基礎検討を行った。本研究により二重配管方式における安全面の課題と対応策を明確化し、安全性を確保するための道筋を明らかにしたことは、二重配管方式パイプラインを水素輸送インフラとして実装するための基礎となる成果である。

また、安全技術の確立を目指し、実証環境において収集した基礎データから二重配管方式における水素漏洩時の検知状況、ポイントおよび分布型センシング、異常検知など新たな検知手法の確立の基となる水素漏洩時の基礎データを収集・調査し、分析（データアナリティクス）を行った。本研究で二重配管方式に対して光ファイバセンシング技術やポイントセンシング技術を組み合わせることよって、付臭措置代替となる安全技術の可能性を確認できたことが、基礎的な成果である。

元管への挿入敷設となる二重配管方式については、ここまで実績がなく経済成立性が不明確であったが、実証を通じた敷設コスト、安全コストの目途付けにより、比較的細い水素導管となる制約の中でも他水素輸送モードに対して優位性を保つ条件を明確化することができた。また需要調査と細い水素導管での供給可能量の検証から、中小規模且つ近距離の場合の成立性を示すことができ、水素インフラとしての二重配管方式パイプラインの一般的な導入モデル及び展開要件を可能性として明らかになった点が大きな成果と考える。

３．３　開発項目別残課題

特に無し

４．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

二重配管方式による水素のパイプライン輸送に関する安全性評価に関しては、二重配管を模擬した配管系において、その間隙で水素と空気が混合し着火した場合、条件によっては爆轟が発生することが明らかとなった。これは本方式特有のリスクであるが、火炎から発生した圧力波は管路内において減衰することも示唆されており、安全性を確保するためにはこの現象の詳細な評価を行い、被害が発生しない条件を整理する必要がある。また、埋設管はマンホールやハンドホールあるいは共同溝等の空間に接続されることが想定されるため、それらの空間内へ水素が拡散することや、火炎や圧力波が伝播することを考慮したリスク評価も求められる。これらを踏まえ、今後の課題としては、二重配管方式において想定される事故シナリオを網羅的に整理し、それぞれのリスクおよび安全対策による被害低減効果を定量的に評価する必要がある。その評価結果に基づき漏洩検知の指針と安全対策の提案を行うことで、二重配管方式水素輸送システムの安全性確保に貢献する。

安全技術に関しては、二重配管方式と光ファイバセンシング技術を組み合わせることで付臭措置代替となる安全技術の評価・確立に向けた可能性を見出せた。さらに安全性を担保するためには、様々な事故シナリオによる異常状態の発生状況（管切断事故による急激なガス漏洩、劣化等による少量のガス漏洩等）に対して適切な把握手段（モニタ、センサ等）と的確なアクションプランを遂行できる保守要件の明確化を行い、普遍的安全技術の確立に繋げ、安全技術基準策定を進めていく必要があると考える。（図１６）

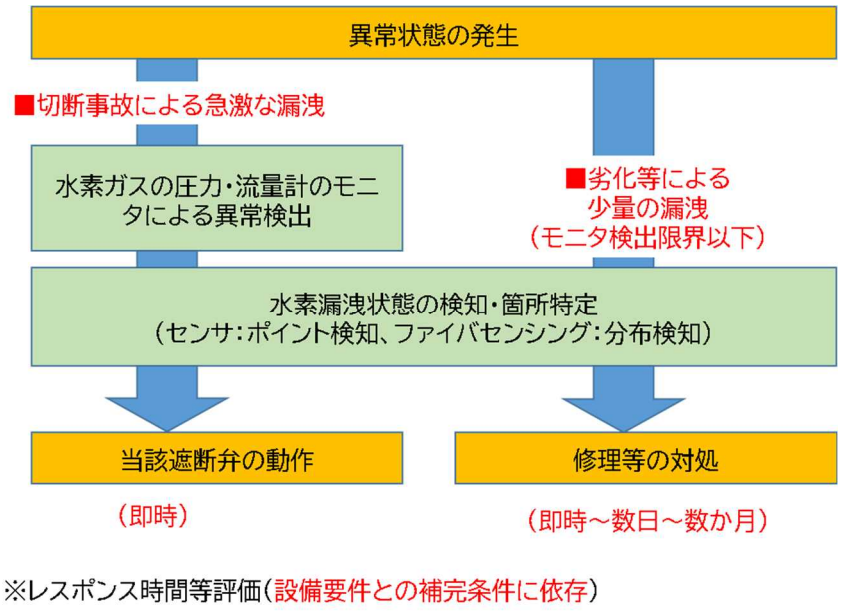


図　１６　異常状態の発生状況に対する把握手段とアクションプラン

経済成立性に関しては、既設配管活用/二重管方式パイプライン水素輸送は比較的細い 50A の前提でも、配管コスト・安全コストの改善を要するものの、中・小規模での短距離の 10km 程度の輸送ではコスト優位性を持つ可能性が高いことがわかった。よって、最終アプリケーションに向けたラストワンマイルの輸送手段として適性があると判断できる。圧損が改善されればCAPEX低減以上に輸送距離が延び適用性が広がるため、フレキ性を持ち圧力損失が低い新素材配管の調達/作り込みが技術課題となる。

二重管構成とするための適用可能な元管の配置等状況の調査が実装に際しての課題である。海外水素受入拠点等からの大量水素出しについても、例えば下水道等の大口径元管の設定が可能となれば圧損の小さい大口径大流量で最終需要家直前までの水素輸送もカバーできる可能性があり、事業化に向けて今後は元管調査も進めながら展開可能性を検討する。

５．研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名

（添付-3）
プロジェクト開始時関連資料
（事前評価結果、パブリックコメント募集の結果）

平成 29 年度事前評価結果

研究評価委員会において平成 30 年度NEDO新規案件の事前評価を実施しました。結果は以下の通りです。

当該評価結果は、今後基本計画等に反映してまいります。

平成 29 年 9 月
平成 29 年 12 月更新

案件名	新産業創出に向けた新技術先導研究プログラム
推進部署	イノベーション推進部
総合コメント	民間の研究開発が短期的な成果重視になりがちなのに対して、画期的な「技術の原石」を探し出し、磨き上げていく本制度は、今こそ必要なものであり、NEDO として実施する意義は高い。ただし、アウトプット目標やアウトカム目標は、先導研究実施件数や国家プロジェクトに繋げた先導研究件数にとどまらず、その効果の内容まで踏み込んだ目標を期待したい。制度の枠組みとして、短期間の先導研究では、人材を含めた研究資源の確保や企業側の事業性評価を取り入れたビジネスプランへのパス検証が困難になるなど、研究組織としてのリスクがあるため、実施期間延長を可能とする柔軟な実施体制が望まれる。また、技術課題の広範な設定、あるいは、設定にとらわれない提案の可能性等を検討すべきである。研究開発推進委員会を設置して研究の進捗状況を管理することは評価できるが、目標達成の成否の議論だけでなく、事業化に向けての研究助言も与えられる委員会になることが望ましい。先導研究の成果が真に有用でかつ収益力のある技術や製品に成長するためには、各テーマの技術開発だけではなく、それらの有効な連携・統合を評価し、加速の判断が出来る仕組みも検討すべきである。また、各テーマ終了後の継続的な投資として、ベンチャーキャピタル等に接続していくための有効な仕組み作りを期待する。

案件名	次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発事業
推進部署	ロボット・AI 部
総合コメント	AI 及びロボットは今後の産業の中核要素技術の一つであるが、特に AI 分野の開発や応用で出遅れている我が国の状況を考えれば、これらの技術の融合を積極的に推進する意義は極めて高い。本提案が、プラットフォーム化のための技術開発と啓蒙教育、及びユーザーや専門家を含めた現場の実証を行う実践的な内容となっていることは評価できる。 ただし、国際的な競争が特に激しいこれらの分野での差別化、ポジショニング及び優位性確保のための戦略を明確にすることが求められる。そのためにはベンチマーキングを実施し、強み・弱み分析等から課題設定の妥

	当性を十分に詰めておくべきである。また、目標や実施計画が機動的に変更できる柔軟なマネジメントの方策を、具体的に検討する必要がある。 　研究開発内容とアウトプット目標に関して、より具体的な記述が求められるが、先行プロジェクト等で実施する AI モジュール開発を考慮して、早急に社会実装のターゲットテーマを具体化すべきである。また、ソフトとハードの開発だけでなく、コンテンツ作成に有効なシステム開発が必要である。加えて、独創的な研究成果を事業化に結びつける橋渡し人材の育成も重要である。さらに、NEDO 内外のプロジェクトとの連携や、民間資金をうまく活用できるコンソーシアム形成の検討を期待したい。 　アウトカム目標として、CO_2 排出削減と市場獲得だけでなく、生産性向上や国民生活の利便性と安心・健康について設定することが求められる。また、新市場創出効果は、生産性の向上による既存事業の効率化と、新規サービス市場の創出を区別して検討するとよい。 　既に AI の社会活用は想定の範囲内にあり、非連続ナショナルプロジェクトに選定すべきかは再考を要する。

案件名	高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発事業　※
推進部署	IoT 推進部
総合コメント	半導体及びコンピューティング分野で、世界における我が国のプレゼンスが低下している中、それを覆す可能性を持ったプロジェクトであり、着実に推進するべきである。ハードウェア、ソフトウェア、応用を一体で開発することにより、具体的な社会課題解決に繋がることを期待したい。日本の産業の真の復活を目指す戦略的提案に繋げるべく、国内外の先端研究プロジェクトの動向と成果を精査し、研究開発シーズの現状把握と強み・弱みの分析をしっかり行った上で、研究開発項目のより具体的な選定と、それらの有機的な連携を実現するシナリオを策定する必要がある。 　このような非連続的イノベーションを目指す研究では、単純な数値目標や年次線表で道筋を示すような進捗管理ではなく、リーダーの権限を強化し、機動性・融通性を重視した、スピード感のあるプロジェクトマネジメントが重要である。また、人材の発掘・育成・活用が成功の鍵であり、産学連携や中小ベンチャー企業支援を通じて、それらを柔軟に行える体制づくりをするべきである。

案件名	AI チップ開発加速のためのイノベーション推進事業　※
推進部署	IoT 推進部
総合コメント	半導体及びコンピューティング分野で、世界における我が国のプレゼンスが低下している中、それを覆す可能性を持ったプロジェクトであり、着実に推進するべきである。ハードウェア、ソフトウェア、応用を一体で開発することにより、具体的な社会課題解決に繋がることを期待したい。日本の産業の真の復活を目指す戦略的提案に繋げるべく、国内外の先端研究プロジェクトの動向と成果を精査し、研究開発シーズの現状把握と強み・弱みの分析をしっかり行った上で、研究開発項目のより具体的な選定と、それらの有機的な連携を実現するシナリオを策定する必要がある。 このような非連続的イノベーションを目指す研究では、単純な数値目標や年次線表で道筋を示すような進捗管理ではなく、リーダーの権限を強化し、機動性・融通性を重視した、スピード感のあるプロジェクトマネジメントが重要である。また、人材の発掘・育成・活用が成功の鍵であり、産学連携や中小ベンチャー企業支援を通じて、それらを柔軟に行える体制づくりをするべきである。

※「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発事業」及び「AI チップ開発加速のためのイノベーション推進事業」については、事前評価当時は一事業であったため、同一の評価結果を記載しています。

案件名	省エネ製品開発の加速化に向けた複合計測分析システム研究開発事業
推進部署	材料・ナノテクノロジー部
総合コメント	計測分析機器の技術開発及び社会実装は、科学技術に基づく社会の発展及び産業競争力向上に不可欠であり、推進する意義は大きい。幅広い活用シーンを想定した研究開発内容となっているが、日本の高い技術ポテンシャルを活かせる領域に絞り込み、現実にシェアを獲得できる、具体的なアウトプット目標を設定すること。計測機器の改善が産業界全体の高度化に繋がるためには、ユーザ側を広く巻き込み、活用方法や汎用性について検討を進める必要がある。また、他省でも実施されている計測分析機器に関する研究開発と情報・成果を共有し、位置付けを明確化した上で、NEDO は個別のシーズ開発を超えたシステム及びプラットフォーム構築を進めるべきである。

案件名	超高圧水素技術等を活用した低コスト水素供給インフラ構築に向けた研究開発事業
推進部署	新エネルギー部
総合コメント	水素・燃料電池戦略において、水素ステーションの設置にかかわるコスト削減に寄与する研究開発は必須であり、インフラ整備として国が推進するべき開発である。また技術開発とそれによる規制改革を目指すことは妥当である。 研究開発内容では、インフラ整備・運営コストの大幅な引き下げを可能とする具体的な要素技術とその構成方法を明示すること。また、FCV 利用者の増加等、水素ステーションの運営を民間主体で持続させられるような水素利用普及の具体的なアウトカム指標を設定することが望ましい。さらに、自動車以外への応用も視野に入れた取組を期待する。

案件名	海洋エネルギー発電技術の早期実用化に向けた研究開発事業
推進部署	新エネルギー部
総合コメント	離島用電源として海洋エネルギー発電の実用化・高効率化を目指すことは、我が国の将来のエネルギー施策において極めて重要である。その目的での開発課題を明確化した上で、これまで実施してきたプロジェクトの成果及び活用法を整理し、本プロジェクトの開発要素をより具体的に示すこと。また、発電方式はプロジェクトの中で適宜適切な選択や複合を図ることが望まれる。さらに、メンテナンス（耐久性や保守性など）の評価方法についても詳細に検討すべきである。プロジェクトのアウトカム達成までに時間を要することは理解できるが、課題解決の道筋をより具体化することで、早期の実用化を期待したい。

案件名	省エネ型電子デバイス材料の評価技術の開発事業
推進部署	スマートコミュニティ部
総合コメント	材料要素技術から評価技術・シミュレーション・標準化までを包含した研究開発であり、実用化に向けて必要な技術開発項目がよく検討されている。アウトカムとして、経済性に加えて様々な産業分野への波及、日本の産業競争力の強化を期待したい。プロジェクトの重要なアウトプットとして、技術側面だけではなく、応用先の拡大を加味した社会実装へのシナリオを描くことが望まれる。 なお、リチウムイオン二次電池は産業内で競争的に開発が進んでいる技術であるため、民間による独自のオープンイノベーションを阻害しないプロジェクト管理をすべきである。チーム間の相乗効果、ユーザーとの連携効果が十分発揮できるよう、機動的な体制の構築及び運営が望まれる。研究

	開発内容については、第 1 期の研究成果をきちんとレビューした上で、国際競争力の強化とシェアの拡大を実現していくための本質的課題を明確にし、それを加速する評価技術の確立を行うべきである。

案件名	省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発
推進部署	環境部
総合コメント	本プロジェクトで取り上げる高効率低 GWP 冷媒は、過去の NEDO の開発成果に基づく優れた技術シーズであり、それを活用した次世代空調機器開発の基盤技術として、評価手法の開発及び標準化は、国が世界をリードして取り組むべき課題である。 国際標準獲得のロードマップを実効性あるものにするためには、この材料の高い性能と安全性を広く世界に認知させ、支援国を増やすことが鍵であり、その目的を踏まえてアウトプット目標をより具体的に設定する必要がある。また、気体爆発を含む可燃性冷媒の爆発影響評価はハードルの高い課題であるため、専門家を巻き込んで、通常の屋内環境だけでなく作業場での環境も考慮した安全性の検証を慎重に進めること。 さらに、世界市場シェア獲得というアウトカム目標達成に至るまでの道筋を明確にするためには、次世代空調機器の事業戦略にまで踏み込んだ検討をするべきである。

案件名	環境調和型製鉄プロセス技術の開発事業（水素還元活用製鉄プロセス技術の開発事業）
推進部署	環境部
総合コメント	温室効果ガス排出削減および日本の産業競争力強化に貢献するプロジェクトである。開発内容、アウトプット目標は具体的に設定されているが、アウトカム目標については、2030 年以降のビジョンも明示するべき。また、CO_2 分離・貯留については、すでに行われている研究開発との相違を明確にし、独自性のあるアウトプットを明確にすることが望ましい。開発に実効性を持たせるための具体的な戦略を示し、スピード感をもって進めることを期待する。 実施に当たっては、フェロコークス活用プロセスと水素還元活用製鉄プロセスは、一体のプロジェクトとして相互に連携すべきである。そのためには、プロジェクト参加企業のシナジー効果を発揮させるために有効なマネジメント体制のほか、知財戦略や知財ルールの運用が重要である。ノウハウも含めて技術的成果の共有を NEDO が中心となって図ることが望ましい。

作成：平成30年2月

研究テーマ名　超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業

研究目的

本事業では、2025年以降のFCV及び水素ステーションの本格普及、2030年以降の水素ステーションの事業自立化に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、FCV及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発を行い、一連の機器及びシステムのコスト低減、FCVの普及展開及び国際競争力確保に資する。

プロジェクトの規模

事業費	約24億円（平成30年度：想定）
研究期間	平成30～平成34年度（5年間）

研究開発の目標

水素ステーション設備費　2億円以下／システム（注1）

水素ステーション運営費　2000万円以下／年（注1）

（注1）平成37年（2025年）以降の固定式オフサイトステーションで300Nm3／h規模の場合（土地取得価格を除く）。また、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。

研究内容概略

本事業は、以下の3項目により構成する。必要に応じて各項目間の連携を積極的に実施することで着実にコスト低減（整備費、運営費）等を図る。

（Ⅰ）国内規制適正化に関わる技術開発

新たに規制改革実施計画に挙げられた項目の内、研究開発が必要とされる項目に関する研究開発を行う。また、無人運転を実施するための研究開発や現行の水素ステーションに関するリスクアセスメント、新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発等も行う。

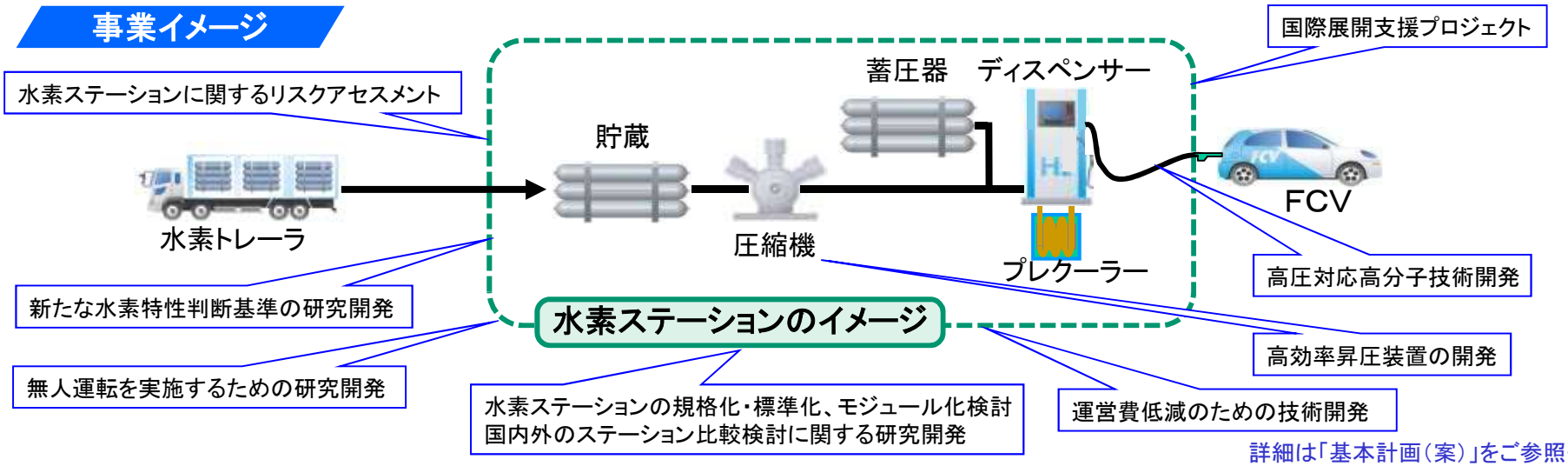
（Ⅱ）水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発

平成37年（2025年）以降の水素ステーションの本格普及・自立化を見据え、水素ステーションの整備費・運営費低減に寄与する技術を確立する。例えば、水素ステーションのモジュール化や構成機器の寿命延長化、高圧対応高分子技術開発等を行う。

（Ⅲ）国際展開、国際標準化等に関する研究開発

ISO関連、IEA（国際エネルギー機関）、IPHE（国際水素エネルギー・燃料電池パートナーシップ）等、HFCV－GTR（水素及び燃料電池に関する世界統一基準）関連など国際調和、海外施策・市場・研究開発動向の把握を行う。

事業イメージ



詳細は「基本計画（案）」をご参照ください

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成３０年３月２３日
NEDO
新エネルギー部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

１．　パブリックコメント募集期間
　　平成３０年２月１９日～平成３０年３月５日
２．パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞
　　計０件

以上

（添付-4）
特許論文等リスト

１．研究開発項目１：「国内規制適正化に関わる技術開発」

１-(１)：「本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発」

(一財)石油エネルギー技術センター

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 5 月	JPEC フォーラム	無人運転を実施するための研究開発	今岸 健郎（JPEC）
2	2019 年 5 月	JPEC フォーラム	リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	佐藤 光一（JPEC）
3	2019 年 9 月	横浜国立大学 第２回メディア向け勉強会	横浜国大発「リスク共生学」から考える未来社会	伊里 友一朗（横国大）
4	2019 年 11 月	2019 年度 安全工学研究発表会	本格普及期における水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価フレームワーク	伊里 友一朗（横国大）
5	2020 年 5 月	JPEC フォーラム	（遠隔監視による）無人運転を実施するための研究開発	今岸 健郎（JPEC）
6	2020 年 5 月	JPEC フォーラム	リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	小森 雅浩（JPEC）
7	2020 年 5 月	JPEC フォーラム	保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発	種田 憲人（JPEC）
8	2020 年 9 月	JPEC レポート	水素スタンドの無人運転を実施するための研究開発	河島 義実（JPEC）
9	2020 年 9 月	International Journal of Hydrogen Energy Vol.46, Issue 11, pp. 8329-8343, 2021	Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model	鈴木 智也（横国大）
10	2020 年 10 月	ケミカルマテリアル Japan2020-	エネルギーシステムの安全	横国大 三宅研究室

		ONLINE- （WEB ポスター）		
11	2020 年 12 月	第 53 回安全工学研究発表会	水素ステーションモデルの定量的リスクアセスメント	鈴木 智也 （横国大）
12	2021 年 3 月	FCCJ 令和 2 年度 規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーションに係る規制見直し、自主基準化	河島 義実 （JPEC）
13	2021 年 5 月	MIPRO2021	Tradeoff study between risk and benefit on the adequate safety device of hydrogen refueling stations by using a dynamic physical station plant model.	河津 要 （横国大）
14	2021 年 5 月	MIPRO2021	Quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations using a dynamic physical model.	鈴木 智也 （横国大）
15	2021 年 5 月	International Journal of Hydrogen Energy Vol.46, Issue 78, pp. 38923-38933, 2021	Quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations by using a dynamic physical model based on multi-physics system-level modeling	鈴木 智也 （横国大）
16	2021 年 5 月	JPEC フォーラム	（遠隔監視による）無人運転を実施するための研究開発	河島 義実 （JPEC）
17	2021 年 5 月	JPEC フォーラム	リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発	小森 雅浩 （JPEC）
18	2021 年 5 月	JPEC フォーラム	保安監督者が複数の水	種田 憲人

			素ステーションを兼任するための研究開発	（JPEC）
19	2021 年 5 月	エネルギー・資源学会 2021 年度第 1 回シンポジウム（第 12 回 ESI シンポジウム）	水素ステーションに係る規制の見直しと業界自主基準化	二宮 貴之 （JPEC）
20	2021 年 6 月	安全工学シンポジウム 2021 討論テーマ：「水素エネルギー技術の社会実装におけるリスクを考える～水素ステーションを中心に～」	水素エネルギー関連技術の業界動向～水素ステーションに関して～	二宮 貴之 （JPEC）
21	2021 年 6 月	安全工学シンポジウム 2021 討論テーマ：「水素エネルギー技術の社会実装におけるリスクを考える～水素ステーションを中心に～」	本格普及期における水素ステーションの定量的リスク評価	鈴木 智也 （横国大）
22	2021 年 9 月	International Conference of Hydrogen Safety 2021	Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model	鈴木 智也 （横国大）
23	2021 年 9 月	公益財団法人総合安全工学研究所 雑誌：SE（セイフティ エンジニアリング） Vol.206, pp. 15-19, 2022	本格普及期における水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価	鈴木 智也 （横国大）
24	2021 年 9 月	JPEC レポート	保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発	岡安 良宣 種田 憲人 （JPEC）
25	2021 年 10 月	FCDIC「2021 年度版年報」	水素ステーションの規制適正化に関する研究開発	JPEC
26	2021 年 11 月	International Journal of Hydrogen Energy	Dynamic Physical Model of Japanese Hydrogen Refueling Stations for Quantitative Trade-	河津 要 （横国大）

			offs Study between Benefit and Risk	
27	2021 年 12 月	International Journal of Hydrogen Energy Vol.47, Issue 57, pp. 24242-24253, 2022	Trade-offs Study between Risk and Benefit in Safety Device of Hydrogen Refueling Stations by Using a Dynamic Physical Model	河津 要（横国大）
28	2021 年 12 月	一般社団法人火薬学会 学会誌『EXPLOSION』 Vol.31,No.3,167-172,2021	水素エネルギー関連技術の業界動向～水素ステーションに関して～	二宮 貴之（JPEC）
29	2022 年 1 月	機械学会 第 49 回トワイライトセミナー	水素ステーションの規制適正化への取り組みから学ぶ水素安全の最前線	二宮 貴之（JPEC）
30	2022 年 3 月	FCCJ 令和 3 年度 規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーションに係る規制見直し、自主基準化	河島 義実（JPEC）
31	2022 年 5 月	JPEC フォーラム	蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	小森 雅浩（JPEC）
32	2022 年 5 月	JPEC フォーラム	水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	佐藤 光一（JPEC）
33	2022 年 8 月	一般社団法人 水素バリューチェーン推進協議会(JH2A) 8 月開催 JH2A 会員セミナー	水素ステーションに係る規制の見直しと業界自主基準化	二宮 貴之（JPEC）
34	2022 年 10 月	一般社団法人 水素エネルギー協会(HESS) HESS_第 169 回定例研究会	水素ステーションにおける規制と見直しへの取り組み	二宮 貴之（JPEC）
35	2022 年 12 月	安全工学（安全工学会） Vol.61,No.6,408-414,2022	水素ステーションにおける規制と見直しへの取り組み	二宮 貴之（JPEC）
36	2023 年 3 月	FCCJ 令和 4 年度 規	水素ステーションに係る規	河島 義実

		制見直し・標準化等動向説明会	制見直し、自主基準化	（JPEC）
37	2023 年 5 月	JPEC フォーラム	水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発	川鍋 隆（JPEC）
38	2023 年 5 月	JPEC フォーラム	蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発	鈴木 慧（JPEC）
39	2023 年 5 月	JPEC フォーラム	障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討	小野 孝也（JPEC）

1-(2)- ①：「新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」

(一財)石油エネルギー技術センター／高圧ガス保安協会／
(大)九州大学／(一財)金属系材料研究開発センター／
日本製鉄(株)／愛知製鋼(株)／(株)日本製鋼所

(1) 研究発表・講演

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
渡邊 義典	愛知製鋼株式会社	愛知製鋼における高圧水素用ステンレス鋼の開発取り組み	愛知県主催「水素貯蔵技術ワーキンググループ」第２回セミナー	2019.12
松永 久生	九州大学	Recent activities for hydrogen compatibility of materials used in hydrogen station in Japan	International workshop on standards and codes for hydrogen infrastructure safety	2018.11
岡崎 三郎	九州大学	Influence of hydrogen on tensile and fatigue properties of 304／308 austenitic stainless steel butt welded joints	ASME PVP2018	2018.7
松永 久生	九州大学	Methods of material testing in High-pressure hydrogen environment and evaluat	ASME PVP2018	2018.7

		ion of hydrogen compatibility of metallic materials: current status in Japan		
高桑 脩	九州大学	Temperature dependence of fatigue crack growth in low-alloy steel under gaseous hydrogen	ASME PVP2018	2018.7
岡﨑 三郎	九州大学	オーステナイト系ステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労強度	溶接学会 平成30年度 秋季全国大会	2018.9
高桑 脩	九州大学	高圧水素ガス中におけるオーステナイト系ステンレス鋼の強度特性	溶接学会 平成30年度 秋季全国大会	2018.9
中村 眞実	九州大学	高圧水素ガス中におけるオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属317LのSSRT特性	溶接学会 平成30年度 秋季全国大会	2018.9
松永 久生	九州大学	高圧水素ガス環境中における材料強度試験	溶接学会 平成30年度 秋季全国大会	2018.9
山田 敏弘	高圧ガス保安協会	水素スタンド設備に使用するオーステナイト系ステンレス鋼の選定基準	KHK水素保安セミナー	2019.12
佐野 尊	高圧ガス保安協会	鋼種拡大に関するこれまでの成果と今後の取組について	KHK水素保安セミナー	2018.12
加藤 明	高圧ガス保安協会	圧縮水素スタンドにオーステナイト系ステンレス鋼の冷間圧延材を使用する可能性について	KHK水素保安セミナー	2021.3
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーションで使用する金属材料の規制見直しと今後の方向性	九州水素・燃料電池フォーラム＆水素先端世界フォーラム2020	2020.1
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用の材料選定（例示基準化）に向けた取り組み	2021年度第3回「水素脆化の基本要因と実用課題」フォーラム	2022.1
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用の材料選定（例示基準化）に向けた取り組み	兵庫県試験・分析技術研究会	2022.1
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素インフラの現状と将来展望	溶接接合工学振興会H30年度セミナー	2018.12
鈴木 修一	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用金属部材の今後の例示基準化の方向性	水素貯蔵技術WG第2回セミナー	2019.12
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーションで使用する鋼材の規制と今後の展開	第8回次世代ものづくり基盤技術産業展「TECH Biz EXPO 2019」	2019.2

小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	ＦＣＣＪ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	2019.2
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	令和元年度ＦＣＣＪ 規制見直し・標準化等動向説明会（水素インフラＳＷＧ）	2020.2
林 郁孝	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の基準・規格化	令和３年度ＦＣＣＪ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化 等 動向説明会	2022.3
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	令和２年度ＦＣＣＪ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化 等 動向説明会	2021.3
鈴木 修一	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０１９年度ＪＰＥＣフォーラム	2019.5
小林 拡	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０２０年度ＪＰＥＣフォーラム	2020.5
鈴木 修一	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０２１年度ＪＰＥＣフォーラム	2021.5
鈴木 修一	石油エネルギー技術センター	新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	２０２２年度ＪＰＥＣフォーラム	2022.5
小林 拡	石油エネルギー技術センター	水素社会を取り巻く環境、規制、規制緩和	水素貯蔵技術ＷＧ第１回セミナー	2019.9
林 郁孝	石油エネルギー技術センター	水素ステーション用鋼材・複合容器の基準・規格化	令和４年度 FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化 等 動向説明会	2023.3

(2) 論文

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	ページ番号	発表年月

Hironobu Arashima	Japan Steel Works M&E、Inc.	Effects of inclusions on the fatigue life of SNCM439 steel in high−pressure hydrogen gas	Hydrogen Energy	25057-25065	2022.7
江藤 翔平、渡邊 義典	愛知製鋼株式会社	引張強さ９００ＭＰａ級ＳＵＳ３０５冷間引抜材の高圧水素環境における強度特性	愛知製鋼技報	27-31	2021.3
岡﨑 三郎 ほか5名	九州大学	Influence of hydrogen on tensile and fatigue properties of 304／308 austenitic stainless steel butt welded joints	Proceedings of ASME PVP2018		2018.7
小林 英男 ほか１１名	高圧ガス保安協会 ほか	Methods of material testing in High−pressure hydrogen environment and evaluation of hydrogen compatibility of metallic materials: current status in Japan	Proceedings of ASME PVP2018		2018.7
高桑 脩 ほか５名	九州大学	Temperature dependence of fatigue crack growth in low−alloy steel under gaseous hydrogen	Proceedings of ASME PVP2018		2018.7
林 郁孝、 鈴木 修一、佐藤 慎也	石油エネルギー技術センター	水素ステーションに適用する金属材料の基準化に向けた取り組み	月刊 溶接技術 ２０２１年４月号		2021.3

1-(2)- ③：「中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発」

(国研)物質・材料研究機構

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2018年7月	口頭発表／ASME PVP 2018	Simple Mechanical Testing method to Evaluate Influence of High Pressure Hydrogen Gas	緒形俊夫
2	2018年7月	口頭発表／ASME PVP 2018	Influence of 70 MPa Hydrogen Gas on SUS 630 from 77 K to 373 K by Simple Testing Method	緒形俊夫
3	2019年3月	講演／立命館大学 エネルギーイノベーション材料研究センター シンポジウム	水素エネルギーインフラの普及に向けた中空試験片による簡便な高圧水素中材料試験法の標準化と水素脆化の本質の考察	緒形俊夫
4	2019年3月	口頭発表／日本鉄鋼協会春季講演大会	ステンレス鋼の高圧水素環境中破断変形挙動に及ぼす水素の影響	緒形俊夫
5	2018年8月	誌上／日本鉄鋼協会会報ふぇらむ8月号	極限環境材料評価法開発と標準化および強度と脆性の電子軌道による説明	緒形俊夫
6	2018年12月	誌上／水素利用技術集成 Vol. 5 ～水素ステーション・設備の安全性	高圧水素ガス環境中の簡便な材料評価技術	緒形俊夫
7	2019年7月	ASME PVP 2019	Influence of Roughness of Inner Surface of Simple Mechanical Testing Method to Evaluate Influence of High Pressure Hydrogen Gas	緒形俊夫、小野嘉則
8	2019年9月	日本鉄鋼協会秋季講演大会	中空試験片による高圧水素環境下材料特性評価法の規格化	緒形俊夫、小野嘉則、西川嗣彬

9	2020年10月	ISO TC164(金属の機械的試験) SC1(単軸引張試験) （注1）	Metallic materials – Tensile testing – Hollow-type test pieces for severe environment tests and slow-strain rate tensile test (SSRT) method in high-pressure hydrogen environment	緒形俊夫
10	2021年11月	NIMS WEEK 2021	中空試験片による高圧水素ガス環境下での材料試験法	小野嘉則、緒形俊夫
11	2022年12月	Webセミナー&展示会「カーボンニュートラル時代への取り組み」	水素社会実現のための物質・材料研究機構の取り組み 極低温／高圧水素環境における材料特性評価	小野嘉則
12	2023年2月	HYDROGENIUS, I2CNER, HYDROMATE AND SINTEF Joint Research Symposium2023	Materials Characterization in Cryogenic and High-Pressure Hydrogen Gas Environments - NIMS Initiatives for a hydrogen energy society -	小野嘉則

2．研究開発項目２：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」

2-(２)- ①：「水素ステーション用タイプ２蓄圧器の供用中検査手法の研究開発」

ＪＦＥスチール(株)／ＪＦＥコンテイナー(株)／千代田化工建設(株)

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019/8/9	日本非破壊検査協会　AE部門講演会	AE法による水素ステーション用蓄圧器の供用中検査手法の開発	前田守彦(千代田化工建設)
2	2019/8/9	日本非破壊検査協会　AE部門講演会	水素蓄圧器の保安検査へのAE適用の期待	高野俊夫（JFEコンテナー）
3	2020/3/24	日本高圧力技術協会　高圧水素技術専門研究委員会	水素ステーション用タイプ2蓄圧器の供用中検査手法の研究開発	鈴木裕晶(千代田化工建設)
4	2020/06	日本非破壊検査協会 機関誌「非破壊検査」第69巻6号	AE による水素ステーション用複合蓄圧器の供用中検査	前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設)
5	2020/6/4	日本非破壊検査協会 非破壊検査総合シンポジウム	水素ステーション用タイプ2蓄圧器の供用中検査手法の研究開発	鈴木裕晶(千代田化工建設)
6	2020/11/27	日本非破壊検査協会 保守検査ミニシンポジウム	水素蓄圧器用低合金鋼の疲労損傷中のAE計測	岡野拓史/高木周作(JFEスチール),高野俊夫(JFEコンテイナー)，前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設)
7	2020/11/27	日本非破壊検査協会 保守検査ミニシンポジウム	タイプ2蓄圧器のAE法による定期自主検査	高野俊夫(JFEコンテイナー)，岡野拓史/高木周作(JFEスチール),前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設)
8	2021/1/15	AEWG News Letter	Japanese Society for Non-Destructive Inspection is developing the standard for AE testing of Type 2 composite cylinders for hydrogen refueling stations	Y. Mizutani(Tokyo Tech.)
9	2021/6	工業ガス専門誌ガスレビュー　水素・燃料電池マーケティング・ブック「ハイドリズム」vol.11	水素ステーション用蓄圧器の定期自主検査へのAE法の適用を目指す	JFEコンテイナーへの取材記事
10	2021/10	日本非破壊検査協会 機関誌「非破壊検査」第70巻10号	水素ステーション用タイプ２蓄圧器の供用中検査手法の研究開発	前田守彦/鈴木裕晶(千代田化工建設),北川敏/高野俊夫(JFEコンテイナー)，岡野拓史(JFEスチール),辻裕一（東京電機大）
11	2021/11/18	日本高圧力技術協会　HPI技術セミナー「エネルギー貯槽技術の最新動向」	水素ステーション用タイプ2蓄圧器の自主保安検査としてのAE試験	水谷義弘(東工大)
12	2022/3/18	日本非破壊検査協会　AE部門講演会	水素ステーション用蓄圧器の保全管理におけるAE活用	前田守彦/甲斐大介/日置輝夫/鈴木裕晶(千代田化工建設)，北川敏/高野俊夫(JFEコンテイナー)，岡野拓史/石田智治(JFEスチール)，辻裕一(東京電機大)
13	2022/5/18	米国AEWG 第63回年次大会	R&D Trends of Non-Destructive Testing of CFRP High-Pressure Hydrogen Tanks in Japan	Y. Mizutani(Tokyo Tech.), T. Matsuo(Meiji Univ.), K. Ito(NIMS), H. Suzuki (Chiyoda corp.) and M. Takuma(Kansai Univ.)
14	2022/9/27	日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス	水素ステーション用タイプ２蓄圧器材料の疲労損傷過程におけるＡＥ発生挙動の評価	東京電機大学辻裕一、齋藤博之 JFEスチール㈱岡野拓史、石田智治 千代田化工建設㈱前田守彦、鈴木裕晶 JFEコンテイナー㈱高野俊夫
15	2022/11/1	日本非破壊検査協会 IAES26	AT standard for steel pressure vessels for a hydrogen refueling station	Yoshihiro Mizutani1), Hiroaki Suzuki2) and Toshio Takano3) 1) Tokyo Institute of Technology, 2-12-1-I1-70, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan. 2) Chiyoda Corp., 4-6-2 M/MGCT, Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa, 220-8765, Japan. 3) JFE Container Co., Ltd., 1-5-15-9F, Saguraku-cho, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan, 101-0064, Japan
16	2023/10	日本非破壊検査協会 機関誌「非破壊検査」第72巻10号	高圧水素蓄圧器の出荷時および運用中の非破壊検査	岡野拓史(JFEスチール)，高野俊夫(JFEコンテイナー)，鈴木裕晶(千代田化工建設)

2-(2)- ②：「複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」

(一財)石油エネルギー技術センター／高圧ガス保安協会／
(大)東京大学／(株)日本製鋼所

－研究発表・講演、文献等、その他－

・石油エネルギー技術センター（JPEC）

No.	年月	発表先	題目	発表者

1	2018年 11月29日	日タイ技術交流会	Research and Development on Technical Standard of Composite Pressure Vessel for Hydrogen Fueling Station	佐藤
2	2019年 2月12日	FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	小林
3	2019年 5月8日	2019年度JPECフォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林
4	2019年 9月27日	愛知県主催2019年度「水素貯蔵技術ワーキンググループ」第1回セミナー	水素ステーションで使用できる金属材料・蓄圧器	福本
5	2020年 2月3日	愛知県主催2019年度「水素貯蔵技術ワーキンググループ」第3回セミナー	水素ステーション用蓄圧器の技術基準	林
6	2020年 2月17日	FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	水素ステーション用鋼材・複合容器の技術開発動向	小林
7	2020年 5月8日	2020年度JPECフォーラム(フォーラムは中止。HPで資料を公開)	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発（タイプ2）	佐藤
8	2020年 5月8日	2020年度JPECフォーラム(フォーラムは中止。HPで資料を公開)	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発（タイプ3）	東條
9	2020年 7月20日	ASME PVP 2020	INTRODUCTION OF THE TECHNICAL DOCUMENT IN JAPAN FOR SAFETY USE OF TYPE2 PRESSURE VESSELS IN HYDROGEN REFUELING STATIONS	JPEC：佐藤、小林、福本 KHK：前田 東大：吉川 JSW：荒島
10	2021年 3月1日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林
11	2021年 5月12日	2021年度JPECフォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	東條
12	2022年 3月9日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林

13	2022 年 5 月 11 日	2022年度JPECフォーラム	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	東條
14	2023 年 3 月 2 日	FCCJ燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会	複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発	林

―新聞・雑誌等―

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 2 月	石油学会誌 PETROTECH	水素ステーションで使用する複合圧力容器蓄圧器の技術基準複合容器基準について	小林、藤澤
2	2020 年 1 月	JPEC NEWS 1 月号	NEDO事業紹介「複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」	
3	2021 年 10 月	JPEC レポート	水素ステーションでの低合金鋼の利用に向けて制定された技術文書	小林
4	2022 年 1 月	一般社団法人燃料電池開発情報センター「日本における燃料電池の開発 2021」	水素ステーションの規制適正化に関する研究開発	林
5	2023 年 2 月	一般社団法人日本ボイラ協会「ボイラー年鑑 2022 年版」	水素ステーション用蓄圧器に係る技術基準の整備状況の紹介	林

・高圧ガス保安協会（KHK）

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2018 年 7 月 18 日	ASME PVP 2018	STUDY ON FATIGUE CHARACTERISTICS OF CFRP	KHK：竹花、山田、佐野、木村、宮下、志賀 東大：吉川 JPEC：小林
2	2018 年 7 月 18 日	ASME PVP 2018	STUDY ON STRESS RUPTURE CHARACTERISTICS OF CFRP	KHK：佐野、山田、竹花、宮下、志賀 東大：吉川 JPEC：小林
3	2018 年 11 月 29 日	平成30年度 日本高圧力技術協会 秋季講演会	アルミニウム合金A6061-T6の最適疲労曲線	KHK：志賀、山田、佐野 JPEC：小林

―新聞・雑誌等―

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019年 4月	高圧ガス誌	ASME 2018 Pressure Vessels & Piping Conference （PVP会議）の参加報告	佐野
2	2021年 5月	一般社団法人日本高圧力技術協会(圧力技術)	アルミニウム合金A6061-T6の最適疲労曲線の構築と平均応力の補正方法	KHK：志賀、小林、山田、佐野 横浜国立大学：澁谷

・東京大学

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2018年 7月17日	ASME PVP 2018	Numerical Fatigue Life Evaluation with Experimental Results for Type Ⅲ Accumulators	東大：吉川、キム JPEC：小林、藤澤 KHK：佐野

・株式会社日本製鋼所（JSW）

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019年 12月2日	KHK水素保安セミナー	タイプ２複合容器蓄圧器の設計	高坂

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2020年 4月17日	特願2020-074196	蓄圧器の寿命判定方法	JPEC、東大、KHK、JSW
2	2020年 4月17日	特願2020-074235	蓄圧器の寿命判定方法を用いた水素ステーションの運転方法	JPEC、東大、KHK、JSW
3	2020年 11月5日	PCT/JP2020/041411	蓄圧器の寿命判定方法	JPEC、東大、KHK、JSW
4	2020年 11月5日	PCT/JP2020/041416	蓄圧器の寿命判定方法を用いた水素ステーションの運転方法	JPEC、東大、KHK、JSW

5	2022 年 10 月 18 日	特願 2022-167148	蓄圧器の寿命判定方法、および、この蓄圧器の寿命判定方法を用いた水素ステーションの運転方法	JPEC

2-(3)- ①：「長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」

(一社)水素供給利用技術協会／(大)九州大学／
(一財)化学物質評価研究機構／ＮＯＫ(株)／
高石工業(株)／日本ピラー工業(株)／(株)キッツ／
(株)フジキン／(株)タツノ／
トキコシステムソリューションズ(株)

－研究発表・講演、文献等、その他－

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
藤原広匡 西村伸	九州大学	Establishment of evaluating methods aiming to develop long-life sealing rubber -New attempt of HYDROGENIUS Polymer Team-	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	2019.1
藤原広匡 西村伸 仲山和海 近藤寛朗 古賀敦	九州大学 化学物質評価研究機構 NOK㈱	Influence of morphology on high-pressure hydrogen property of rubber material	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	2019.1
藤原広匡 葛西昌弘 小野皓章 大山恵子 西村伸	九州大学	Influence of phase transition on Polytetrafuoroethylen (PTFE) with high pressure hydrogen exposure	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	2019.1
藤原広匡 西村伸	九州大学	Hydrogen permeation property of polyethylene under high pressure condition	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	2019.1

小野皓章 藤原広匡 西村伸		Influence of the high-pressure hydrogen gas exposure repetition on the internal damage evolution of high-density polyethylene	水素先端世界フォーラム 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	2019.1
藤原広匡 西村伸 古賀敦 岡本浩二, 竹内孜介 高橋良 堀田透 室井伸也 二口真行 仲山和海 近藤寛朗	九州大学 NOK㈱ 日本スピンドル製造㈱ ㈱マスオカ 髙石工業㈱ 藤倉ゴム工業㈱ ㈱興国ゴム技術研究所 化学物質評価研究機構	水素機器用エラストマー材料研究分科会モデル配合 WG 活動報告(5) 練り条件の違いが高圧水素特性に与える影響(1)＝共通コンパウンド材の高圧水素特性を中心に＝	日本ゴム協会 2019 年年次大会 研究発表会	2019.5
二口真行 仲山和海 近藤寛朗 古賀敦 岡本浩二 竹内孜介 高橋良 堀田透 室井伸也 藤原広匡 西村伸	人化学物質評価研究機構 NOK㈱ 日本スピンドル製造㈱ ㈱マスオカ 髙石工業㈱ 藤倉ゴム工業㈱ ㈱興国ゴム技術研究所 九州大学	水素機器用エラストマー材料研究分科会モデル配合 WG 活動報告(6) 練り条件の違いが高圧水素特性に与える影響(2)＝共通コンパウンド材の配合剤の分散・常温常圧下の物理的特性＝	日本ゴム協会 2019 年年次大会 研究発表会	2019.5
藤原広匡	九州大学	ポリテトラフルオロエチレンの高圧水素特性評価（1）	第 68 回高分子討論会	2019.9
小野皓章	九州大学	高圧水素曝露により高分子材料中に侵入した水素分子の赤外線吸収スペクトル	第 68 回高分子討論会	2019.9
藤原広匡	九州大学	日本ゴム協会・東海支部 2019 年度アドバンストセミナー	『特殊な環境や性能に対応するゴム・エラストマー』高圧	2020.1

			水素ガス環境下用ゴム材料の評価	
小野皓章 藤原広匡 尾上清明 西村伸	九州大学	Chemical physics letters	FT-IR study of state of molecular hydrogen in bisphenol A polycarbonate dissolved by high-pressure hydrogen gas exposure	2019.12
竹越雅史 佐藤陽平 本田重信	NOK㈱	高圧水素環境下におけるゴム製Oリングの密封特性について	トライボロジー会議 2020 春 東京	2020.5
藤原広匡 西村伸	九州大学	高圧透過試験法を使用したポリエチレンの水素ガス透過特性	第 61 回高圧討論会（日本高圧力学会)	2020.11
藤原広匡 西村伸 二口真行 近藤寛朗 仲山和海	九州大学 化学物質評価研究機構	高圧水素シール開発向け加速劣化試験（1）	第 32 回エラストマー討論会	2021.11
二口真行 仲山和海 近藤寛朗 藤原広匡 西村伸	化学物質評価研究機構 九州大学	高圧水素シール開発向け加速劣化試験（2）	第 32 回エラストマー討論会	2021.11
小野皓章 藤原広匡 西村伸	九州大学	高圧水素シールゴムの開発コスト低減を指向した機械学習によるゴムの水素特性予測	第 32 回エラストマー討論会	2021.11
杉村丈一 田中宏昌 八木和行 森田健敬 澤江義則 大道邦彦 薬師神忠幸 平松浩司 渡辺統 緒方邦行	九州大学 ㈱フジキン ㈱キッツ	Fundamental study on cone and thread fittings in high pressure hydrogen systems	2022 HYDROGENIUS & I2CNER TRIBOLOGY SYMPOSIUM	2022.1
西村伸	九州大学	長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関	FCCJ 第２回エンジニアリング分科会	2022.11

		する研究開発 サブテーマ(3) シール基盤・応用開発 劣化模擬シール部材作製・シール性評価法		
杉村丈一	九州大学	超高圧水素インフラの継手締結部の漏えい防止	FCCJ 第２回エンジニアリング分科会	2022.11
澤江義則	九州大学	Gas Emission from Polymer Composites Sliding Against Metal in Hydrogen	2023 HYDROGENIUS & I2CNER TRIBOLOGY SYMPOSIUM	2023.1

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2019 年 12 月 3 日	特願 2019-218534	フィルタ内蔵継手	株式会社フジキン
2	2021 年 9 月 7 日	T1589（受付番号）	フィルタ内蔵継手	株式会社フジキン

2-(3)- ②：「水素ステーション用高圧水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発」

(大)九州大学／(一社)日本ゴム工業会

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019/1/30	水素先端世界ﾌｫｰﾗﾑ 2019 HYDROGENIUS 研究シンポジウム 高分子材料研究部門	Structure Change Caused by Exposure to High-pressure Hydrogen Gas : Influence of Crystallinity in Polyamide11	大山 恵子
2	2019/5/31	第 68 回高分子学会年次大会 （大阪国際会議場）	高圧水素ガスの結晶性高分子の構造に与える影響に関する赤外分光法による研究	金子 文俊・大山 恵子 ・藤原 広匡 ・西村 伸
3	2019/9/16	第 68 回高分子討論会 （福井大学）	FTIR 分光測定による高圧水素ガスの結晶性高分子の構造に与える影響に関する研究	金子 文俊 ・大山 恵子・藤原 広匡・西村 伸

4	2019/9/5	PDDG 2019 33rd Polymer Degradation Discussion Group Conference (Marta)	Infrared spectroscopic study on the influence of high pressure hydrogen gas on crystalline polymers	Fumitoshi Kaneko, Keiko Ohyama, Hirotada Fujiwara, Shin Nishimura
5	2021/8	第 70 回高分子討論会	高圧水素曝露によりポリアミド 11 に形成されたナノボイドの小角 X 散乱法による定量評価手法の確立	大山恵子
6	2021/9	高分子討論会	高圧水素ガスが高分子材料に与える影響に関する FTIR 分光その場測定 による研究	金子 文俊
7	2022/9	第 71 回高分子討論会	高圧水素曝露により形成されたナノボイドの小角Ｘ線散乱法を用いた構造解析	大山恵子

2-(４)- ①：「本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発」

ＥＮＥＯＳ(株)／(株)本田技術研究所／トキコシステムソリューションズ(株)／
(一社)水素供給利用技術協会

－研究発表・講演、論文等－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021 年５月	燃料電池実用化推進協議会 令和３年度 第１回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原 和巳（ENEOS㈱）
2	2021 年８月	International journal of hydrogen energy	Precooling temperature relaxation technology in hydrogen refueling for fuel-cell vehicles	判田 圭（㈱本田技術研究所）
3	2021 年 11 月	令和３年度 FCCJ 第１回 FCV・水素インフラ WG	Technologies, Standards and Regulations for Hydrogen Refueling Station in Japan	池田哲史（(一社)水素供給利用技術協会）
4	2022 年３月	燃料電池実用化推進協議会 令和３年度「燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原 和巳（ENEOS㈱）

		明会」		
5	2022 年 5 月	燃料電池実用化推進協議会　令和４年度第１回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
6	2022 年 9 月	8th International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation	“MC Multi Map” refueling protocol	判田　圭（㈱本田技術研究所）
7	2022 年 10 月	SAE J2601-1　Fuel cell interface task force	“MC Multi Map” refueling protocol development in Japan.	判田　圭（㈱本田技術研究所）
8	2022 年 10 月	燃料電池実用化推進協議会　令和４年度第２回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
9	2022 年 11 月	ISO TC197-WG5	A thermal mass measuring method for hydrogen refueling component.	判田　圭（㈱本田技術研究所）
10	2023 年 1 月	燃料電池実用化推進協議会　令和４年度第３回水素インフラＳＷＧ	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）
11	2023 年 2 月	燃料電池実用化推進協議会　令和３年度「燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等動向説明会」	本格普及期に向けた次世代ステーション・充填技術の研究開発	前原　和巳（ENEOS㈱）

－特許等－

出願者	出願番号	国内・国外・PCT	出願日	状態	名称
福永、蓮仏、坂本	特願 2018-102762	国内・PCT（ｱﾒﾘｶ、ｵｰｽﾄﾗﾘｱ、中国）	平成 30 年 5 月 29 日	登録 日本：特許第 7048417 号 ｱﾒﾘｶ: 11346503 ｵｰｽﾄﾗﾘｱ: 2019278632 中国: 112204298	水素ガス充填方法及び水素ガス充填装置

判田	特許 6995989	国内	令和１年５月 31 日	登録	ガス充填方法
判田	P2021-210452	国内 PCT(US)	令和２年４月 16 日	公開	追い充填検知による水素充填制御方法
大島、蓮仏	特願 2021-033609	国内・ PCT（移行前）	令和３年 ３月３日	出願中	ガス充填装置
判田	P2022-139225	国内 PCT(US)	令和４年９月 １日	出願中	追い充填検知による水素充填制御方法
蓮仏	特願 2022-141035	国内	令和４年 ９月５日	出願中	ガス充填装置
判田	P2022-142847	国内 PCT(US)	令和４年９月 ８日	出願中	大容量水素タンクの為の水素充填方法
判田	P2022-154474	国内 PCT(US)	令和４年９月 28 日	出願中	水素充填方法の改良

2-(４)- ⑤：「高強度低合金鋼を用いた新型高圧蓄圧器に関する研究開発」

(一財)金属系材料研究開発センター／日本製鉄(株)

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2023 年９月	JRCM NEWS No.440	高圧水素蓄圧器への高強度低合金鋼の適用に関する検討(1)―高強度低合金鋼の水素環境下特性評価―	山村実早保、大村朋彦、中山英介、高町恭行、前田尚志
2	2023 年 10 月	JRCM NEWS No.441	高圧水素蓄圧器への高強度低合金鋼の適用に関する検討(2)―水素蓄圧器に関する技術動向調査―	高町恭行、前田尚志、山村実早保、大村朋彦、中山英介

2-(４)- ⑥：「新型半導体メモリ方式による超低消費電力水素検知センサシステムの研究開発」

ヌヴォトンテクノロジージャパン(株)

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020.9	2020 年第 81 回応用物理学会秋季学術講演会	ReRAM 技術とその新しい展開－デジタルメモリからAI、センシング技術へ	粟村 聡資
2	2023.3	Workshop on Hydrogen Detection Technologies for Safety	Ultra low power Hydrogen sensor based on semiconductor memory technology	河合 賢
3	2023.3	Nuvoton ソリューションウェビナー	水素社会での安心安全を実現する超低消費水素センサ技術	元持 健治
4	2023.9	Nuvoton ソリューションウェビナー	水素社会の安心安全のために求められる新しいセンサ技術とは？	南川 智宏
5	投稿中	IEEE Sensors Journal	The behavior of protons in a Pt/Ta2O5/TaOx/TaN structure	本間 運也
6	2022.10	CEATEC2022	新型半導体メモリ方式 超低消費電力 水素センサ	米田 慎一 伊藤 理 河合 賢 南川 智宏
7	2023.3	二次電池展	ワイヤレス・バッテリ駆動の水素検知器を実現する超低消費電力水素センサ技術	米田 慎一 伊藤 理 河合 賢 南川 智宏
8	2023.9	ながさきデジタル DEJI-MA 産業メッセ 2023	新型半導体メモリ方式 超低消費電力水素センサ	南川 智宏 黄 川洋

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2021/8/11	2021-130998	水素センサ	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
2	2021/9/22	2021-154912	水素検知装置及び水素検知装置の制御方	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会

			法	社
3	2021/9/28	2021-157653	ガスセンサ装置	パナソニックホールディングス株式会社
4	2022/1/17	2022-005362	水素検知方法、駆動回路および水素検知装置	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
5	2022/7/4	2022-107765	水素検知装置及びその製造方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
6	2022/7/4	PCT/JP2022/26591	水素検知装置及び水素検知装置の制御方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
7	2022/7/29	PCT/JP2022/29406	水素センサ	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
8	2022/12/22	PCT/JP2022/47403	水素検知方法、駆動回路および水素検知装置	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社
9	2023/6/29	PCT/JP2023/ 24224	水素検知装置及びその製造方法	ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社

2-(４)- ⑦：「半導体レーザーを用いた次世代水素分析装置の研究開発」

(株)四国総合研究所

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021.1	レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会	外部共振器型半導体レーザーを用いたラマン分光式ガス分析装置の開発に向けた基礎検討	横井 清人
2	2021.9	第 39 回レーザセンシングシンポジウム	青色外部共振器型半導体レーザを用いた水素ガス純度分析装置の開発	市川 祐嗣
3	2021.9	第 39 回レーザセンシングシンポジウム	高感度ガスセンサの実現に向けた赤外外部共振器型半導体レーザの開発	横井 清人
4	2022.1	レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会	外部共振器型半導体レーザーを用いた赤外吸収分光式ガス分析装置の開発	横井 清人
5	2022.1	レーザー学会学術講演会第４２回年次大会	青色外部共振器型半導体レーザーを用いた小型高輝度ラマン分光分析装置の研究開発	市川 祐嗣
6	2022.1	レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会	ラマン分光光源用青色半導体レーザ外部共振器の基礎特性に関する研究	徐 鳴雪
7	2022.4	The 11th Advabced Lasers and Photon Sources (ALPS 2022)	Cavity Enhanced Raman Spectroscopy of Gas Species Utilizing a Blue External Cavity Diode Laser	市川 祐嗣
8	2022.9	第 40 回レーザセンシングシンポジウム	ファブリ・ペロー型 IR-ECDL を用いた低濃度ガス分析装置の研究開発	横井 清人
9	2022.9	第 40 回レーザセンシングシンポジウム	青色外部共振器型半導体レーザを用いた微量ガス分析装置の開発	市川 祐嗣
10	2023.1	レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会	CRDS による IR-ECDL を用いたガス分析装置の低濃度検出に向けた検討	横井 清人
11	2023.1	レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会	ラマン分光計測用小型青色半導体レーザー外部共振器高輝	徐 鳴雪

			度化に関する研究	
12	2023.1	レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会	共振器増強ラマン分光法を用いた小型高感度ガス分析装置の開発	市川 祐嗣
13	2023.9	第 41 回レーザセンシングシンポジウム	共振器増強ラマン分光法による高感度ガス分析技術の開発	市川 祐嗣
14	2023.9	第 41 回レーザセンシングシンポジウム	CRDS による可搬型水素中微量アンモニア計測装置の開発	横井 清人

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2023.4.20	２０２３－０６９４３０	光共振器および外部共振器型レーザー装置	(株)四国総合研究所
2	2023.4.20	２０２３－０６９４３１	光共振器および外部共振器型レーザー装置	(株)四国総合研究所

2-(４)- ⑧：「水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発」

(国研)産業技術総合研究所／日本重化学工業(株)

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021/09/17	日本金属学会 2021 年秋季大会	In-situ observation of the hydrogenation/dehydrogenation reactions of AB2 Laves phases compounds under ultra-high hydrogen pressure	Charbonnier Véronique, 内海伶那, 齋藤寛之, 佐藤豊人, 折茂慎一, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
2	2021/09/23	E-MRS 2021 Fall Meeting	TiMn2-based Laves phase compounds for application in ultra-high pressure part of a metal-hydride compressor	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
3	2021/10/28	2021 KIChE Fall Meeting and International Symposium	Development of Ti-based AB2 type hydrogen storage materials for a metal hydride compressor	Charbonnier Veronique, 榎浩利, 内海伶那, 齋藤寛之, 佐藤豊人, 折茂慎一, Kim Hyunjeong,浅野耕太, 榊浩司
4	2021/11/08	水素化物に関わる次世代	Investigation of TiMn2-based	Charbonnier

		学術・応用展開研究会 2021	compounds for ultra -high pressure metal-hydride compressor	Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
5	2021/11/29	エネルギー技術シンポジウム 2021	Investigation of hydrogenation properties of Laves phase compounds for metal-hydride compressor application	Veronique Charbonnier, 榎浩利, 浅野耕太, Kim Hyunjeong, 榊浩司
6	2021/11/29	エネルギー技術シンポジウム 2021	水素吸蔵合金を活用した水素貯蔵・供給・利用技術の開発	浅野耕太、Charbonnier Véronique, Kim Hyunjeong, 榎浩利, 榊浩司
7	2021/12/13	Material Research Meeting 2021 (MRM2021)	Research and development of Ti based hydrogen storage compounds with a C14 Laves structure for a thermochemical metal hydride compressor in an ultra high pressure	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
8	2022/09/22	日本金属学会 2021 年秋季大会	TiCr1.25Mn0.75-xXx for ultra high-pressure metal-hydride compressors	Charbonnier Véronique, 榎浩利, Kim Hyunjeong, 浅野耕太, 榊浩司
9	2022/10/31	17th international symposium on Metal-Hydrogen systems 2022	Ti0.9V0.3MnNi0.8 Laves phase compound under very high hydrogen pressure	Charbonnier Véronique、内海伶那、中平夕貴、齋藤寛之、榎浩利、Kim Hyunjeong、浅野耕太、榊浩司
10	2022/12/02	水素化物に関わる次世代学術・応用展開研究会 2022	水素吸蔵合金を用いた高圧水素供給・水素精製技術	榊浩司、Charbonnier Véronique、新里恵多、榎浩利、Kim Hyunjeong、浅野耕太
11	2022/12/02	水素化物に関わる次世代学術・応用展開研究会 2022	Van't Hoff plots and PCTs in the ultra-high-pressure range	V. Charbonnier, K. Asano, H. Kim, H. Enoki and K. Sakaki
12	2022/12/12	エネルギー技術シンポジウム 2022	排熱を利用した水素昇圧技術の研究開発	榊浩司、Charbonnier

				Véronique、榎 浩利、Kim Hyunjeong、浅野 耕太
13	2022/12/12	エネルギー技術シンポジウム 2022	熱化学式水素昇圧に適した超高圧作動型水素吸蔵合金の開発	Charbonnier Véronique，榎浩利，Kim Hyunjeong，浅野耕太，榊浩司

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2021/10	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 46-73, 36369-36380	Tuning the hydrogenation properties of Ti1+yCr2-xMnx laves phase compounds for high pressure metal-hydride compressors	Charbonnier Véronique，榎浩利，浅野耕太，Kim Hyunjeong，榊浩司
2	2022/08	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 47，32252-32261	Improvement of hydrogenation sorption properties of Ti0.90V0.30Mn1.00Ni0.80 for ultra-high pressure metal-hydride compressor	Charbonnier Véronique、榎 浩利、浅野耕太、Kim Hyunjeong、榊 浩司
3	2022/08	Progress in Energy 4，042005	Research and Development on Hydrogen Carrier Based Solutions for Hydrogen Compression and Storage	Martin Dornheim、榊 浩司、Charbonnier Véronique et al.
4	2023/10	Journal of Alloys and Compounds 960, 170860	How to evaluate hydrogen storage properties by Sieverts' method in the pressure range up to 100 MPa	V. Charbonnier, K. Asano, H. Kim, K. Sakaki
5	2023/11	Journal of Alloys and Compounds 965, 171348	Hydrogenation behavior of a C14 Laves phase under ultra-high hydrogen pressure	V. Charbonnier, R. Utsumi, Y. Nakahira, H. Enoki, K. Asano, H. Kim, T. Sato, S. Orimo, H. Saitoh, K. Sakaki

2-(4)- ⑨：「HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発」
(国研)産業技術総合研究所／岩谷産業(株)／

(株)タツノ／トキコシステムソリューションズ(株)／
(一社)水素供給利用技術協会／(一財)日本自動車研究所

－研究発表・講演、文献等、その他－

1) 池田哲史 (HySUT), 水素ステーションの構成と規制, 福岡県主催 令和 3 年度人材育成セミナー水素入門コース, 2021/11.
2) 大沢紀和, 松田花南 (タツノ), Dispenser for Heavy Duty Vehicles with Twin Nozzle, International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation, (Brussels, Belgium), 2022/09/13.
3) 森岡敏博 (産総研), Hydrogen Metering for HDV in Japan, International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation, (Brussels, Belgium), 2022/09/13.
4) 大沢紀和 (タツノ), 池田哲史 (HySUT), HDV hydrogen refueling station in Japan, ISO WG24 Meeting, 2022/09/26.
5) 森岡敏博 (産総研), Performance evaluation test of Coriolis flow meters for hydrogen metering at high pressure, FLOMEKO 2022 (Hybrid), (Chongqing, China), 2022/11/03.
6) 池田哲史 (HySUT), Activities for Hydrogen Infrastructure in Japan, ISO/TC 197 Strategic Planning Meeting, 2022/12.
7) 池田哲史 (HySUT), ISO/TC197 Hydrogen Technologies Update, Hydrogen & Fuel Cell Seminar 2023, 2023/02.
8) 池田哲史 (HySUT), 水素ステーションの構成と規制, 福岡県主催 令和 4 年度人材育成セミナー水素入門コース, 2023/02.
9) 池田哲史 (HySUT), NEDO Program for Development of Hydrogen Fueling Technology for Heavy Duty Vehicles, ISO/TC 197 WG24 Meeting / Paris, France, 2023/06.

３．研究開発項目３：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」

３- ①：「水素ステーション等機器のＩＳＯ／ＴＣ１９７国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発」

(一社)水素供給利用技術協会／(一財)日本自動車研究所

－研究発表・講演、文献等、その他－

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
松田佳之	一般財団法人日本自動車研究所	Effect of impurities in hydrogen fuel on the performance of polymer electrolyte fuel cells for automotive applications	World Hydrogen Technology Convention 2019	2019.6

松田佳之、清水貴弘、橋正好行	一般財団法人日本自動車研究所	水素中のホルムアルデヒドによる燃料電池発電性能への影響	第 62 回電池討論会	2021.12
松田佳之	一般財団法人日本自動車研究所	燃料電池自動車用水素品質規格の動向と JARI の取り組みについて	2020HESS 特別講演会	2021.3
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	The prospect of the international standardization on hydrogen technology (Activities in ISO/TC197)	2021 International Conference on Hydrogen Economy Standards（オンライン開催）	2021.10
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	Technologies, Standards and Regulations for Hydrogen Refueling Station in Japan	2021 CDTI-NEDO online Joint Workshop on the Hydrogen Technology	2021.11
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	水素ステーションの構成と規制	福岡県主催　令和３年度　人材育成セミナー水素入門コース	2021.11
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	Activities in Japan and ISO/TC197 Hydrogen technologies Update	“8th International Workshop on Hydrogen Infrastructure for Transportation” Brussels, Belgium	2022.9
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	ISO/TC197 Hydrogen Technologies Update	Hydrogen & Fuel Cell Seminar 2023／ロングビーチ（米国）	2023.2
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	ＩＳＯ／ＴＣ１９７（水素技術）の活動内容および国内の取組み	九州水素・燃料電池フォーラム＆水素先端世界フォーラム２０２３	2023.2
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	水素ステーションの構成と規制	福岡県主催　令和４年度　人材育成セミナー水素入門コース	2023.2
松田佳之、清水貴弘、今村大地	一般財団法人日本自動車研究所	水素中のハロゲン化物による燃料電池発電性能への影響	電気化学会第 90 回大会	2023.3
松田佳之、清水貴弘、今村大地	一般財団法人日本自動車研究所	自動車用燃料電池における水素中不純物評価に関する JARI の取り組み	第 30 回燃料電池シンポジウム	2023.5

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	ページ番号	発表年月
松田佳之、清水貴弘、橋正好行	一般財団法人日本自動車研究所	Effect of Carbon Monoxide on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance with a Hydrogen Circulation System	Journal of the Electrochemical Society	167, 044509	2020.2
池田哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会	ＩＳＯ／ＴＣ１９７の活動内容および国内における取組み	「圧力技術」誌	1−4	2022.6
松田佳之、高橋研人、沼田智昭、清水貴弘、今村大地	一般財団法人日本自動車研究所	自動車用燃料電池における水素燃料および空気中の微量成分評価に対する JARI の取り組み	JARI Research Journal	20221003	2022.10

(1) 受賞実績

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
吉原美智子	一般財団法人日本自動車研究所	長年にわたる ISO の電動車両の国際標準化の主導	２０１９年度 日本機械学会標準事業	2020.3.2

3- ②：「燃料電池自動車の国際基準調和・国際標準化に関する研究開発」

(一財)日本自動車研究所

－研究発表・講演－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019 年 9 月	The 8th international conference on hydrogen safety (ICHS 2019)	The Study on Permissible Value of Hydrogen Gas Concentration in Purge Gas of Fuel Cell Vehicles	山崎 浩嗣, 田村 陽介 （JARI）
2	2019 年 9 月	The 8th international conference on hydrogen safety (ICHS 2019)	Influences of hydraulic sequential tests on the burst strength of type-4 compressed-hydrogen containers	冨岡 純一, 増田 竣亮, 田村 浩明, 田村 陽介 （JARI）

3	2019年9月	The 8th international conference on hydrogen safety (ICHS 2019)	A study of decrease burst strength on compressed-hydrogen Containers by drop test	増田 竣亮, 冨岡純一, 田村浩明, 田村陽介（JARI）
4	2019年11月	第33回数値流体力学シンポジウム	高圧水素容器の火炎暴露試験の数値シミュレーション	山田 英助, 田村 陽介（JARI）
5	2019年12月	(一社)日本高圧力技術協会 技術セミナー	湿潤ガス応力腐食割れ挙動に基づくアルミニウム合金の適合性評価	小川 武史（青学大）
6	2019年12月	(一社)日本高圧力技術協会 技術セミナー	燃料電池自動車用高圧水素タンク部品材料の水素適合性評価方法と国際基準化の動き	木村 光男（東京大）
7	2019年12月	オープンCAEシンポジウム2019	高圧水素容器の火炎暴露試験における燃焼と固体熱伝導の数値シミュレーション	山田 英助, 田村 陽介（JARI）
8	2021年1月	38th International Symposium on Combustion	A bonfire test for compressed hydrogen cylinder simulated with OpenFOAM	山田 英助, 田村 陽介（JARI）

－文献等－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020年11月	International Journal of Hydrogen Energy	A study of decrease burst strength on compressed-hydrogen Containers by drop test	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 山崎 浩嗣, 田村 陽介（JARI）
2	2021年4月	ISIJ International	Test method to establish hydrogen compatibility of materials in high pressure hydrogen gas environments for fuel cell vehicles	木村 光男, 吉川 暢宏, 田村 浩明, 飯島 高志, 石塚 歩, 山辺 純一郎（東京大, 他）
3	2022年10月	JARI Research Journal	水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準Ｎｏ．１３（GTR13）の最新動向	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 山崎 浩嗣, 田村 陽介（JARI）
4	2023年5月	月刊 JETI	水素・燃料電池自動車の世界統一技術基準Ｎｏ．１３（GTR13）の最新動向（転載）	増田 竣亮, 冨岡 純一, 田村 浩明, 山崎 浩嗣, 田村 陽介（JARI）

3- ③：「水素社会に係る国際関連機器等研究・政策動向に関する調査研究」

(株)大和総研

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
-	2020年1月30日	公益財団法人原総合知的通信システム基金主催特別セミナー「水素・燃料電池技術開	「水素・燃料電池分野における海外最新動向と今後の展開」	平田　裕子

		発戦略と新展開」		
-	2020 年 12 月 3 日	近畿経済産業局主催 「水素エネルギー」セミナー（仮題）	「水素・燃料電池分野における海外最新動向と今後の展開」（仮題）	平田　裕子

３－④：「水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究」

(国研)産業技術総合研究所／NTT アノードエナジー(株)／
豊田通商(株)／

該当無し

以上

２．分科会公開資料

次ページより、推進部署・実施者が、分科会において事業を説明する際に使用した資料を示す。

資料５

「超高圧水素インフラ本格普及技術開発事業」（終了時評価）2018年度～2023年度　6年間プロジェクトの概要（公開版）

2023年11月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
スマートコミュニティ・エネルギーシステム部　燃料電池・水素室

超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業

プロジェクトの概要

・燃料電池自動車(FCV)の世界最速普及を実現するため、水素ステーション（HRS)等に係る超高圧水素技術（大気圧の約千倍の水素を安全かつ安価に製造・貯蔵・輸送するための技術）等に関して、普及期を見据えた課題に対応するための研究開発等を進め、規制改革実施計画等に基づく規制見直しの推進（金属材料の水素特性判断基準、リスクアセスによる設備構成検討等）や水素ステーションの整備費・運営費の低減に資する技術開発（高圧水素対応の高分子技術、電気化学式ポンプ、機器のパッケージ化検討等）を実施する。

・FCVの国際競争力確保に向け、車載用高圧水素タンクや充填する水素の品質管理方法等の国際基準調和・国際標準化等について研究開発を実施する。

想定する出口イメージ等

アウトプット目標	2030年以降の水素ステーション事業自立化に向け、水素ステーションの整備費、運営費を低減することを目指し、 ・国内の規制適正化に向けたデータ取得、基準案の作成・提案。 ・本格普及期を想定した水素ステーションの技術基準案を作成。 （構成機器の最適化、次世代水素ステーションの構成の最適化、長寿命化に関する提案など） ・我が国の水素ステーション関連技術の国際競争力強化等の観点から、国際基準調和・国際標準化にかかる提案。
アウトカム目標	2025年以降：HRSに対する（固定式オフサイト　300m3/h） ・整備費（建設コスト）：2.0億円以下まで削減 ・運営費：現行の1/2以下まで削減 ※NEDOが実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取組を含めたアウトカム
出口戦略 （実用化見込み）	NEDOの研究成果により得られる規制見直しや技術開発を通じて、最終的には2020年代後半の水素ステーションの普及自立化を目指す。 （METI水素・燃料電池戦略ロードマップ目標：HRS普及に関して2020年160箇所、2025年320箇所の設置）
グローバルポジション	プロジェクト開始時：LD　→　プロジェクト終了時：LD 日本は世界に先駆けてHRSの整備を進めており、その設置数は国際的には多く、運転実績から設備の信頼性は高い。今後も日本の安全性、信頼性を維持しつつ更なるコストダウン、規制の見直しを進める必要がある。

既存プロジェクトとの関係

「水素利用技術研究開発事業」（2013年～2017年度）においては、2020年以降のFCV及び水素ステーション（HRS)の普及に向け、規制の見直し、構成機器の低コスト化、安全基盤整備等を進め、一定の成果が得られた。しかし、世界に先駆け商用水素ステーションの設置を進めてきたことで、整備開始当初とは異なる新たな課題（運営費、省エネルギー機器など）が明確になり、本プロジェクトではこれらの課題を踏まえた技術開発を実施する。

更に継続が必要なコスト低減の取り組み及び大型燃料電池車（HDV）向けの技術開発等については、「競争的水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」（2023年～2027年度）にて技術開発予定である。

事業計画

期間：２０１８～２０２３年度（６年間）

総事業費（ＮＥＤＯ負担分）：１５９億円（プロジェクト費用）

（委託／1/2共同研究・助成）

＜研究開発スケジュール・評価時期・想定する予算規模＞

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
国内規制適正化に関わる技術開発	■	■	■	■	■	
水素STのコスト低減等に関連する技術開発	■	■	■	■	■	
国際展開、国際標準化等に関する研究開発	■	■	■	■	■	
評価時期			中間評価			終了時評価
プロジェクト費用（億円）	16	26	23	32	61	0.5

報告内容

1．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2．目標及び達成状況（概要）

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3．マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

ページ構成

- □ 事業の背景・目的・将来像
- □ 政策・施策における位置づけ
- □ 技術戦略上の位置づけ
- □ 国内外の動向と比較
- □ 他事業との関係
- ■ アウトカム達成までの道筋
- ■ 知的財産・標準化戦略
- ■ 知的財産管理

- ■ アウトカム目標の設定及び根拠
- ■ 波及効果
- ■ 本事業における「実用化」の考え方
- □ 費用対効果
- ■ アウトプット（研究開発成果）のイメージ
- ■ アウトプット目標の設定及び根拠
- ■ アウトプット目標の達成状況
- ■ 研究開発成果の意義
- ■ 副次的成果及び波及効果
- ■ 特許出願及び論文発表

- ■ NEDOが実施する意義
- ■ 実施体制
- ■ 個別事業の採択プロセス
- □ 予算及び受益者負担
- ■ アウトプット（研究開発成果）のイメージ（再掲）
- ■ 目標達成に必要な要素技術
- ■ 研究開発のスケジュール
- ■ 進捗管理
- ■ 進捗管理：中間評価結果への対応
- ■ 進捗管理：動向・情勢変化への対応

□ （塗りつぶしなし） ：評価対象外

＜評価項目１＞意義･アウトカム（社会実装）達成までの道筋

（1）アウトカム達成までの道筋
（2）知的財産･標準化戦略

報告内容

1．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2．目標及び達成状況（概要）

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3．マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

- □ 事業の背景・目的・将来像
- □ 政策・施策における位置づけ
- □ 技術戦略上の位置づけ
- □ 国内外の動向と比較
- □ 他事業との関係
- ■ アウトカム達成までの道筋
- ■ 知的財産・標準化戦略
- ■ 知的財産管理

□ （塗りつぶしなし） ：評価対象外

事業の背景・目的・将来像

社会的背景

地球温暖化、化石燃料の枯渇等の課題に対し、省エネルギーの抜本的強化、エネルギーセキュリティの向上、環境負荷の低減等が求められている。

燃料電池自動車及び水素製造・輸送・貯蔵技術は、国の政策において重要技術と位置づけられ、早期の普及拡大が期待されている。

事業の目的

2025年以降のFCV及び水素ステーションの本格普及、2030年以降の水素ステーションの事業自立化に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、FCV及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発を行い、一連の機器及びシステムのコスト低減、FCVの普及展開及び国際競争力確保に資する。

政策・施策における位置づけ

内閣

- 2050年を見据えたビジョン（水素をエネルギーの選択肢の1つとする）と、2030年までの導入目標値を提示

水素基本戦略

METI

- 技術のスペックやコスト内訳について、様々な目標値を設定するとともに、取り組み内容を記述

水素・燃料電池戦略ロードマップ

NEDO

- 国の目標達成に向けた技術課題を設定
- 技術課題克服へ向けた研究開発、実証プロジェクトを展開

NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ
研究開発、実証プロジェクト

政策・施策における位置づけ

水素分野における戦略等の策定状況・各種目標について

- 日本は**世界で初めての水素基本戦略**を**2017年12月**に策定。EU、ドイツ、オランダなど各国も、昨年以降、**水素戦略策定の動きが加速化**するなど、**水素関連の取組を強化**。
- 2020年10月の菅総理(当時)のCN宣言を受け、**グリーン成長戦略でも重点分野の一つに位置づけ**。需給一体での取組により、**導入量の拡大**と**供給コストの低減**を目指す。

国内外の情勢変化、戦略策定の状況

2017年12月
水素基本戦略策定

2019～2020年
各国水素戦略策定及び、経済対策で水素に注力

2020年10月
菅総理（当時）による2050年CN宣言

2020年12月
グリーン成長戦略策定（水素の位置付）

2021年
第６次エネ基閣議決定、水素基本戦略見直しを見据えた検討

2023年6月
水素基本戦略改定

グリーン成長戦略における量及びコストの目標

ロ 年間導入量*：発電・産業・運輸などの分野で幅広く利用

現在（約200万t）　→ 2030年（最大300万t）　→ 2050年（2000万t程度）

※水素以外にも直接燃焼を行うアンモニア等の導入量（水素換算）も含む数字。

ロ コスト：長期的には化石燃料と同等程度の水準を実現

現在（100円/Nm3*）　→ 2030年（30円/Nm3）　→ 2050年（20円/Nm3以下）

※ ST販売価格

第6次エネルギー基本計画において設定した新たな定量目標

2030年の電源構成のうち、**1%**程度を水素・アンモニアとすることを目指す。

【2030年】
水電解装置導入目標（国内外）：15GW程度

【2040年】
水素等の導入目標：1200万t/年程度

等

出典：2023年1月4日　総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 水素政策小委員会/資源・燃料分科会 アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会 合同会議 中間整理（水素基本戦略の改定に関してNEDO追記）

技術戦略上の位置づけ

水素・燃料電池戦略ロードマップのアウトカム目標

	目指すべきターゲット	ターゲット達成に向けた取組
水素利用（モビリティ） FCV	● 2025年20万台、2030年80万台 ● 2025年頃にFCVをHV並の価格競争力へ価格差低減 （FCVとHVの価格差300万円→70万円） ● 2025年頃に主要な要素技術のコスト低減 （燃料電池システム約2万円/kW→0.5万円/kW 水素貯蔵システム約70万円→30万円） ● 2025年にボリュームゾーン向け車種展開	・関係企業・研究機関等の間での協調領域の技術情報や課題の共有 ・貴金属の使用量低減等に向けた技術開発 ・水素貯蔵システムにおける炭素繊維の使用量低減等に向けた技術開発
水素ST	● 2025年320箇所、2030年900箇所相当＊ ● 2020年代後半の自立化 ● 2025年頃までの整備費・運営費の抜本的な削減 （整備費3.5億円→2.0億円、運営費3.4千万円/年→1.5千万円/年） ● 個別機器の2025年頃のコスト目標の設定 （圧縮機0.9億円→0.5億円 蓄圧器0.5億円→0.1億円）	・徹底的な規制改革と技術開発の一体的な推進 （2020年代までに無人セルフの実現、低コスト鋼材の使用等） ・全国的な水素ステーションネットワーク構築の検討 ・営業時間・土日営業の拡大 ・ガソリンスタンド/コンビニ併設ステーションの拡大
バス	● 2030年1,200台 ● 普及地域の全国拡大 ● 2020年代前半の車両価格の半減(1億500万円→5,250万円) ● 2030年頃までに自立化	・燃費・耐久性向上に向けた技術開発 ・路線バス以外への車種展開 ・バス対応ステーションの整備促進
フォークリフト	● 2030年1万台 ● 海外市場への展開	・燃料電池ユニット等の多用途展開 ・簡素で運用が容易な充填設備の整備促進

※上記の他に、トラック、船舶、鉄道分野での水素利用拡大に向け、指針策定や技術開発等を進める

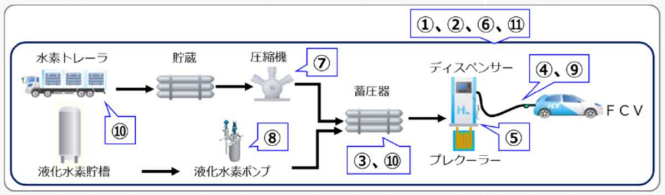
＊ グリーン成長戦略の改訂（2021年）にて、1000箇所へ引き上げられた。

出典：水素・燃料電池戦略ロードマップ（資源エネルギー庁、2019年3月12日）

技術戦略上の位置づけ

水素・燃料電池技術開発戦略の例

2. 水素サプライチェーン分野　水素ステーション

現状および目標	主な課題	技術開発事項
2018年（実績）／2025年頃（目標） 圧縮機：0.60億円 → 0.50億円（100台/年・社） 蓄圧器：0.70億円 → 0.10億円（500本/年・社） プレクーラー：0.20億円 → 0.10億円（100台/年・社） ディスペンサー：0.20億円 → 0.20億円（100台/年・社） その他工事費：1.40億円 → 1.10億円 **整備費計：3.10億円 → 2.00億円** 2017年（実績） **運営費：3.2千万円 → 1.5千万円** ※1 実績値は、補助金実績額より試算（固定式 オフサイト・300Nm³/h）。なお、補助金支給対象とならない各種費用（キャノピー・障壁設置費用、土地代等）が存在することに留意。 ※2 2025年のコスト目標については、一定の出荷数等を確保するといった前提条件あり。 【参考】水素ステーションイメージ図  	**整備費の削減** **運営費の削減**	①**遠隔監視による水素ステーション運転の無人化**や**設備構成等の見直し**に向けたリスクアセスメント ②**汎用金属材料の水素特性**等に係るデータ取得 ③**蓄圧器**の寿命延長、新たな検査方法の開発 ④**ホース及びシール材**の更なる耐久性向上 ⑤**新たな充填プロトコルの開発**（水素供給温度緩和等） ⑥運用データの解析の結果等に基づく、水素ステーションの**各機器の仕様や制御方法の標準化・規格化** ⑦**圧縮機**の高効率化・低コスト化（**電気化学式圧縮機、熱化学式圧縮機**の開発等） ⑧**液化水素ポンプ**の開発 ⑨燃料電池トラック等、**新たなアプリケーションに対応した充填、計量技術**の開発 ⑩**大容量、軽量容器**の開発 ⑪高容量、高耐久な**水素貯蔵材**の開発及び生産技術の確立

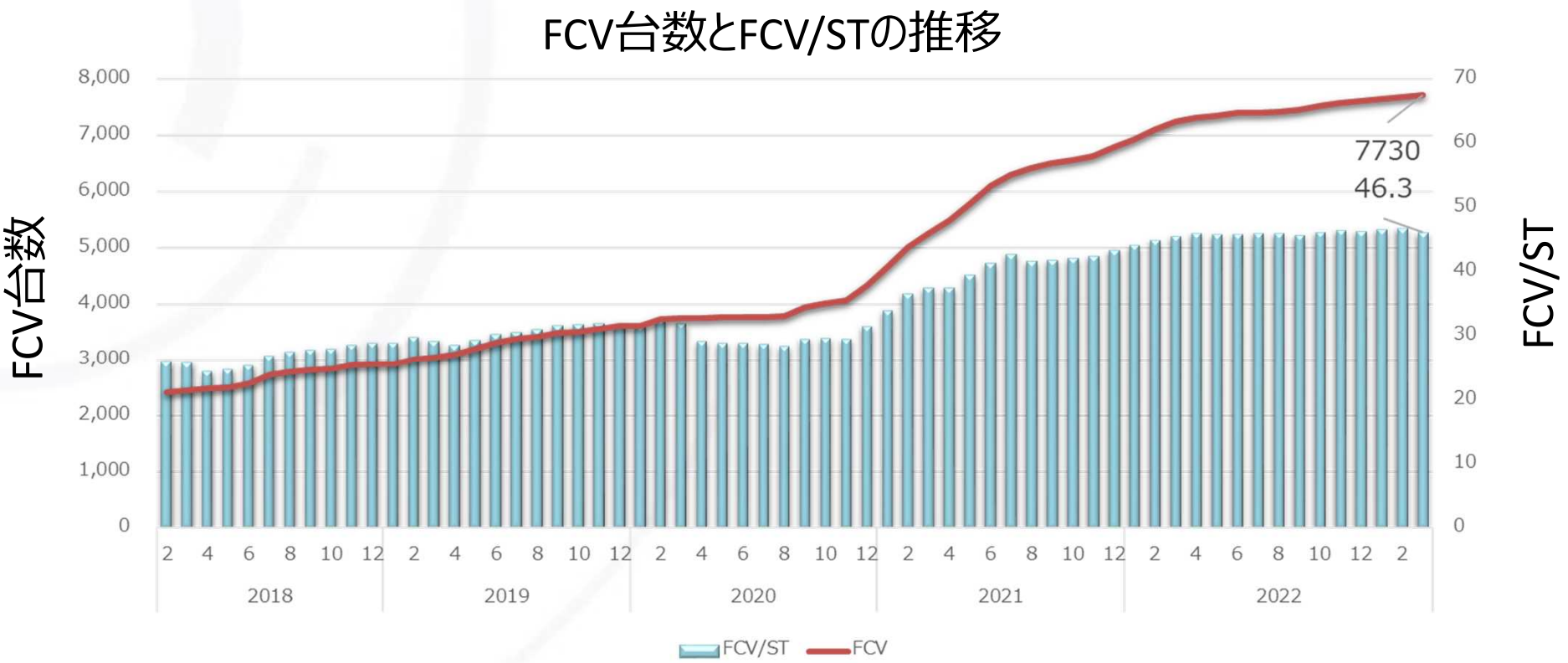
出典：水素・燃料電池技術開発戦略協議会資料より抜粋（資源エネルギー庁、2019年9月）

国内外の動向と比較

国名		日本	米国	ドイツ	中国	韓国
水素ステーション 燃料電池自動車	研究開発	NEDO ・超高圧水素インフラ技術研究開発事業 ・燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業	エネルギー省 Hydrogen and Fuel cell Program H2@port など	NOW Clean Energy Partnership (CEP)	科学技術部 再エネおよび水素技術重要特別プロジェクト　など	水素経済委員会 Clean Hydrogen Portfolio Standard (2023年8月) など
	商用水素ステーション設置目標数	320箇所(2025年) 1,000箇所(2030年) 設置補助金：国供出	1,000箇所(2025年) 4,300箇所(2030年) 設置補助金：州供出	400箇所(2025年) 1,000箇所(2030年) 設置補助金：官民折半 H2 Mobility 中心	300箇所(2025年頃) 1,000箇所以上(2035年)	1,200箇所(2040年)
	商用水素ステーション(建設予定を含む)(2022年度)	182	105	108	250	200
	FC乗用車台数(2022年度)	約8,000	約15,000	約2,200	約500	約32,500
	FCバス等台数(2022年度)	127	66	68	約12,000 Bus,Truck (35MPa中心)	342
FC車輌 その他	FC電動リフター(FCフォークリフト)	433	–	180	–	–

出典：富士経済「2023年版水素利用市場の将来展望」
大和総研「水素社会に係る国際関連機関等研究・政策動向に関する調査研究　成果報告書」
IPHE(International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy）第40回運営委員会資料

国内外の動向と比較

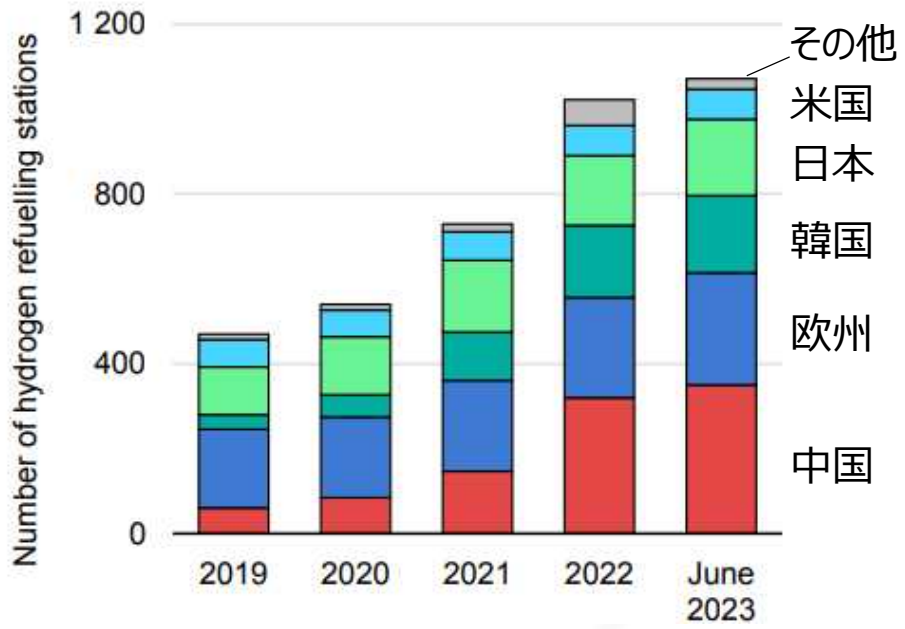


- ✓ 国内のFCV導入台数は近年緩やかな増加傾向。
- ✓ FCV/STについては停滞の状況。

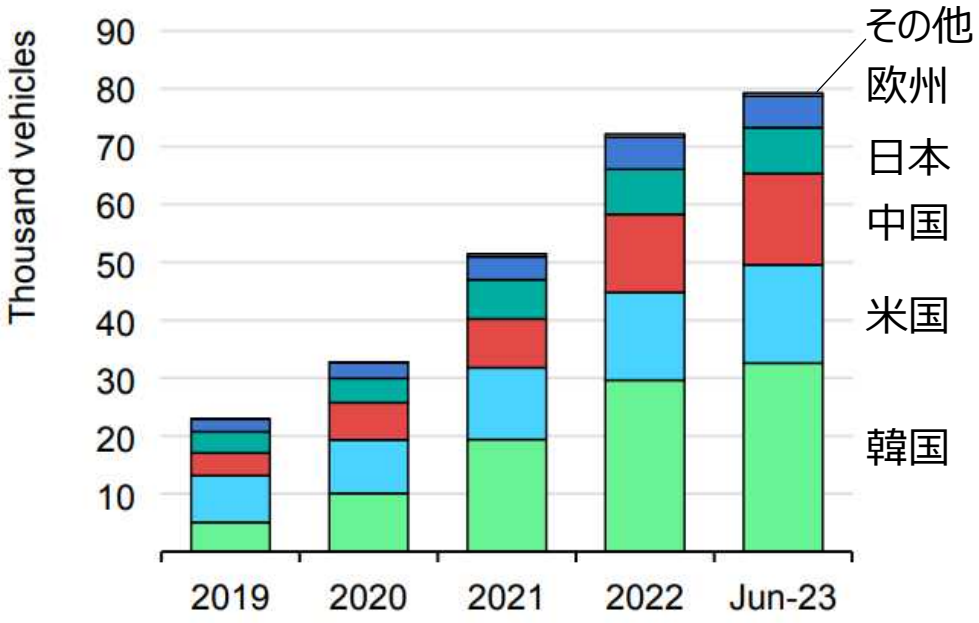
出典：日本水素ステーションネットワーク合同会社資料より抜粋（2023年6月9日）

国内外の動向と比較

国別の水素ステーション設置数推移



国別のFCV導入台数推移



- ✓ 水素ステーション数およびFCV台数は全体的に増加傾向。
- ✓ 水素ステーション数は近年中国および韓国において顕著な増加傾向。
- ✓ FCV台数は韓国において顕著な増加傾向。

出典：Global Hydrogen Review 2023（IEA）

国内外の動向と比較

★：戦略・ロードマップ策定国

欧州委員会★：Clean Hydrogen Partnership
設立、水素に積極投資

ノルウェー★：天然ガス・水力発電での水素製造、水素船

オランダ★：水素発電の実証プロジェクトを計画
洋上風力による大型水素製造を計画

カナダ★：燃料電池を開発、輸出に関心

イギリス★：パイプライン網への水素注入、洋上風力活用

ドイツ★：再エネからの水素製造の実証、**燃料電池列車**の導入

中国★：燃料電池バスを導入
地域間で競争

日本★：燃料電池自動車の開発・導入、水素サプライチェーン実証

米★：カリフォルニア中心に**燃料電池自動車**導入（世界最多の10000台超）、野心的な水素低コスト目標

フランス★：パリ、グルノーブルで**燃料電池自動車**導入、FCバス、トラム、電車も

オーストリア：再エネ水素による製鉄プロセス実証

韓国★：燃料電池自動車の開発・導入

ポルトガル★：
水素輸出も視野

サウジ・UAE：石油資源、太陽光を活用した水素製造

ブルネイ：天然ガスから水素製造。日ブルネイで実証を実施

チリ★：豊富な再エネ資源を生かし、**水素輸出国を目指す**

オマーン：太陽光からの再エネ水素製造に期待

インド★：CNG・水素混合ガスによるバス、再エネ水素

ｱﾙｾﾞﾝﾁﾝ：風力や太陽光の豊富な再エネを活かした水素の製造・輸出に関心

ｽﾍﾟｲﾝ★：再エネ水素実証導入計画多

豪州★：褐炭や再エネからの水素の製造。**日豪で実証**を実施中

ﾆｭｰｼﾞｰﾗﾝﾄﾞ★：地熱エネルギーからの水素の製造。日本企業と実証実施

国内外の動向と比較

米国

- 2022年9月に、国家クリーン水素戦略とロードマップのドラフトを公表。
- 2022年8月にはインフレ抑制法が成立し、水素の生産と投資に長期かつ大規模な税額控除制度を創設。
- クリーン水素ハブ構想（インフラ投資・雇用法）：クリーン水素の生産・加工・輸送・貯蔵・利用を一体的に実証するためのクリーン水素地域ハブの構築に総額80億ドルを助成。

  2023年10月、7つの水素ハブの選定を発表。

【水素・燃料電池技術の普及状況】



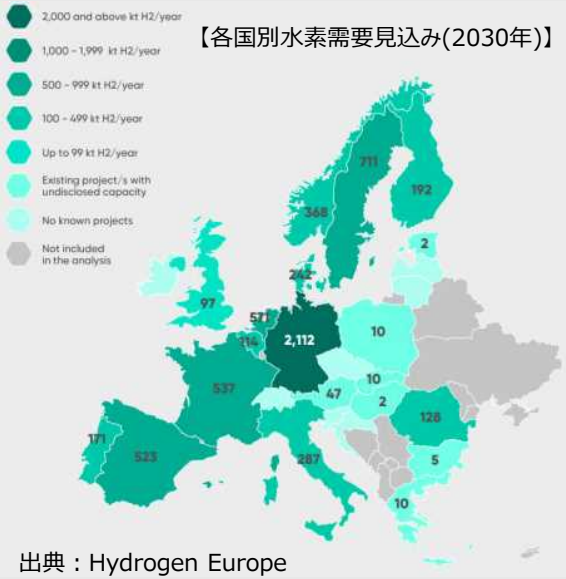
出典：DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (Draft)

- 【現状】
  水素は主にメキシコ湾岸で製造され、総計1,600マイルに及ぶ水素パイプラインで、製油所やアンモニア・メタノール製造工場に供給。
  PEM型の電解装置は、2022年5月時点で620MWが稼働中または建設中。
- 【見通し】
  DOEは、水素価格が各分野の支払意思額まで低下した場合の想定需要量を積み上げると、少なくとも2030年に1,000万トン、2040年に2,000万トン、2050年に5,000万トンと試算。

欧州

- 2022年**「REPowerEU計画」の公表**
  「水素加速化計画」により、2030年に2,000万トン導入（域内1,000万+輸入1,000万）
- 2023年**「グリーンディール産業計画」の公表**
  「ネットゼロ産業法案」により、規制環境整備、許認可を迅速化。電解槽技術を含むネットゼロ戦略分野においては、2030年までに域内供給比率40%を目指す。
- 各国の政策（代表例）
  - 【ドイツ】
    欧州域外からの水素輸入サポートメカニズムH2Globalを展開、2023年度予算は35億€。
  - 【ポルトガル】
    ガスパイプラインに混入する水素調達を目的とした入札制度導入、合計3,000t/年を10年契約にて調達。
  - 【欧州委員会】
    イギリスでのCfD制度導入検討に続き、「水素銀行構想(予算規模:8億€)」を検討。

【各国別水素需要見込み(2030年)】



出典：Hydrogen Europe "Clean Hydrogen Monitor (2022)"

出典：第31回 水素・燃料電池戦略協議会 資料4、5等より抜粋

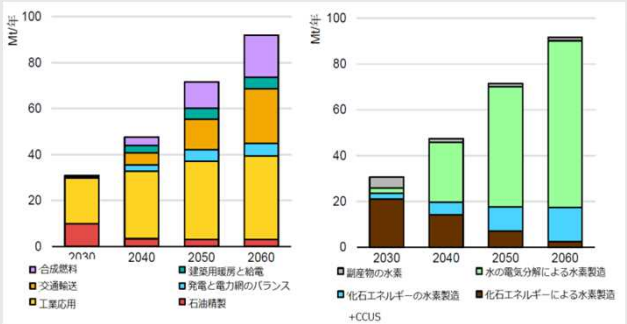
国内外の動向と比較

中国

- 中国の水素需要は年間約3300万トン（世界総需要の約3割）。水素生産は2060年に約9000万トンに拡大予想
- 2022年3月、国家発展改革委員会及び国家能源局は、「水素エネルギー産業発展の中長期計画」を公表。

2025年までに、燃料電池車5万台、グリーン水素製造年間10～20万トン等の数値目標を設定。

- 2020年9月、燃料電池自動車の支援について、モデル都市群を選定し、車両・基幹部材のサプライチェーン整備に応じて補助金を拠出する政策を発表。現在までに、北京、天津、河北省、上海、広東など５か所のモデル都市群が選定。2025年までに年間最大約340億円※を助成。



IEAの発表シナリオにおける中国の水素需要量（左）と生産量（右）の展望（2030-2060年）

韓国

- 2021年10 月、「水素先導国家ビジョン」を公表。

クリーン水素製造量として 2030年には 100 万トン（グリーン 25 万トン、ブルー75 万トン）、2050 年には 500 万トン（グリーン 300 万トン、ブルー 200 万トン）という目標を掲げている。

- 2022年11月、水素経済政策を発表し、成長戦略である**「3up戦略」**を公表。
- 水素法改正（2022/6）により、クリーン水素の認定・生産・流通・活用に向けた制度を包含
- 2023年8月、クリーン水素発電義務化制度（CHPS）の第１回オークションを実施。
  715GWh（全体で1.3TWhのうち半分）相当の5事業への投資が決定された。

出典：水素基本戦略、
IPHE(International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy）第40回運営委員会資料

出典：第31回 水素・燃料電池戦略協議会 資料6、8より抜粋　※は当該資料で「元」での表記を日本円に換算して記載

他事業との関係

	革新的技術開発	要素技術の研究開発～技術実証	大規模化・商用化実証
製造	**水素利用等先導研究開発事業**（終了事業） ・2040年以降の長期的な視点で社会実装を目指す技術開発 （例：高効率水電解、メタン熱分解、超効率水素発電、エネルギーキャリア、等）	**燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業（水電解システム）** **水素社会構築技術開発事業** ・再エネ由来電力等による水素製造技術開発 **競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業** ・水素サプライチェーン構築に向けた要素技術の更なる高度化、低コスト化、多様化に向けた技術開発	**グリーンイノベーション基金事業** ・水電解装置の大型化技術等の開発、Power-to-X 大規模実証 ・水電解装置の性能評価技術の確立
輸送・貯蔵		・国内外の未利用資源を活用した水素の製造・輸送・貯蔵技術開発（終了） **超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業** ・水素ステーションのコスト低減等	・水素輸送技術等の大型化・高効率化技術開発・実証 ・革新的な液化、水素化、脱水素技術の開発
利用		・水素ガスタービン等を用いた発電システム等の技術開発（終了） **燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業（燃料電池）**	・水素発電技術（混焼、専焼）の実機実証
分野横断	**共通基盤技術開発** ・液化水素関連材料評価基盤の整備 ・国内規制適正化、国際標準化 ・材料・製品の品質評価、安全評価等	・地域で水素を利活用するためのポテンシャル調査、水素社会のモデル構築実証 **脱炭素化・エネルギー転換に資する我が国技術の国際実証事業**	

他事業との関係

2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024

燃料電池



固体高分子型燃料電池利用高度化技術開発事業
（2015～2019FY）

固体酸化物型燃料電池等実用化推進技術開発事業
（2013～2019FY）

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた
共通課題解決型産学官連携研究開発事業
（2020～2024FY）





水素社会

水素利用技術研究開発（2013～2017FY）

**超高圧水素インフラ本格普及技術
研究開発事業（2022～2023FY）**

競争的な水素サプライチェーン
構築に向けた技術開発事業
（2023～2027FY）

水素社会構築技術開発事業（2014～2025FY）



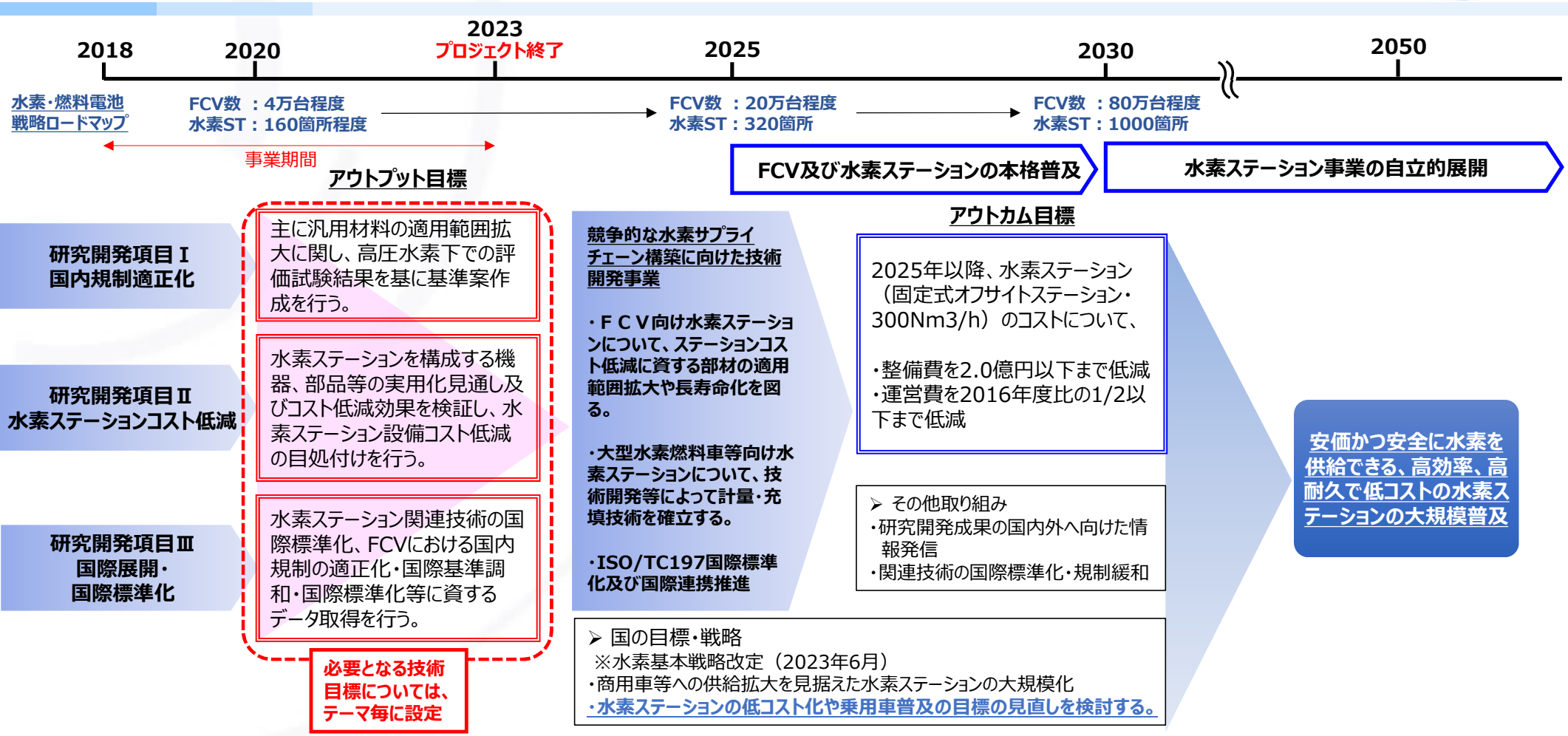
水素利用等先導研究開発事業（2014～2022FY）





グリーンイノベーション基金事業
（2021～2030FY）

アウトカム達成までの道筋



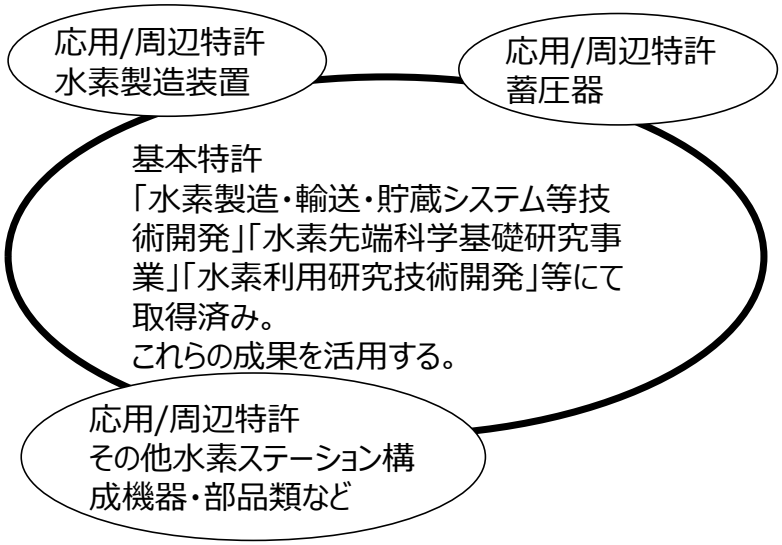
知的財産・標準化戦略

• 知財の取扱についての戦略及びルール

オープン／クローズ戦略の考え方

	非競争域	競争域
公開	**標準化推進** •ISO水素ステーション関連 19880-5　充填ホース 19880-7　HRS用Oリング（新規） 複合容器　WG15　など	**知財のライセンスなど** • 水素製造装置、水素圧縮機、蓄圧器など水素ステーションを構成する装置・部品類に係る特許による各社の優位性の確保 • 水素品質分析サービスなど分析コストの低コスト化競争につながる場合は技術情報を開示
非公開		**秘匿化** • 高圧・低(高)温水素雰囲気下での鋼材の挙動に関する各種データ。⇒海外への情報流出を防ぐために原則非公開だが、ISO化などで日本が議論をリードする場合は、適宜公開する。

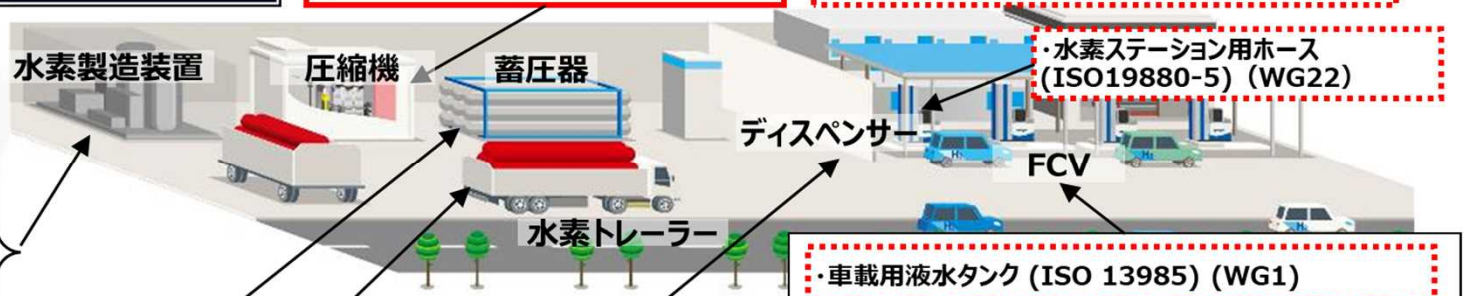
水素ステーションを構成する機器類の特許を取得し、並行して標準化に於ける議論を日本がリードする。
将来は輸出につなげられるよう、国際的な優位性の確保を視野に入れる。



基本特許：材料、構成、構造
周辺特許：用途、システム、周辺

知的財産・標準化戦略

ISO/TC197 対象範囲



- ・水素ステーション (ISO19880-1) (WG24)
- ・水素充填プロトコル (ISO19885) (WG24)
- ・液水充填プロトコル (ISO 13984) (WG35)
- ・水電解水素製造装置 (ISO 22734-1) (WG34)
- ・水電解水素製造装置の電力網に対する性能試験 (ISO/TR22734-2)(WG32)
- ・改質器 (ISO 16110-1, -2)
- ・水素精製装置(PSA) (ISO/TS 19883)(WG17)
- ・定置式水素蓄圧器 (ISO 19884) (WG15)
- ・水素吸蔵合金容器 (MH) 容器 (ISO 16111) (WG25)
- ・水素検知器 (ISO 26142)
- ・水素ステーション用バルブ類 (ISO 19880-3) (WG20)
- ・水素ステーション用フィッティング (継手) (ISO 19880-6) (WG23)
- ・水素ステーション用コンプレッサー (ISO 19880-4) (WG21)
- ・水素燃料サンプリング方法 (ISO 19880-9) (WG33)
- ・水素ステーション用 O-ring (ISO 19880-7) (WG31)
- ・水素ステーション用ディスペンサー (ISO 19880-2) (WG19)
- ・水素燃料仕様(ISO14687)(WG27)
- ・水素品質管理(ISO 19880-8) (WG28)
- ・FCV用水素の分析方法(ISO 21087) (TC158/JWG7)
- ・水素システムの安全に関する基礎検討項目 (ISO/TR 15916) (WG29)
- ・水素ステーション用ホース (ISO19880-5) (WG22)
- ・車載用液水タンク (ISO 13985) (WG1)
- ・車載用高圧水素タンク+TPRD(熱作動式圧力逃がし装置)(ISO 19881, ISO 19882) (WG18)
- ・水素充填コネクタ (ISO 17268) (WG 5, WG36)
- ・水素自動車燃料系部品 (ISO 19887) (JWG30)
- ・燃料電池自動車用水素仕様 (WG27 Task 1)
- ・定置用燃料電池水素仕様 (WG27 Task 2)
- ・厨房・ボイラー用水素仕様 (WG27 Task 3)

日本提案・議長
規格新規策定中
規格改訂中
規格発行済

知的財産・標準化戦略

＜NEDO鋼材データベース検討会の設置＞

全78冊，総ページ数：約1800頁，提供総数：3,543件

HYDROGENIUS

R03/12現在
()内:H25以降

規制見直し・使用材料拡大作業

石油エネルギー技術センター（JPEC）[規制見直し]

高圧ガス保安協会（KHK）[規制見直し]

水素供給利用技術協会（HySUT）[水素インフラ整備推進]

水素ステーション設置のための特認取得

81冊（68冊）

246冊（102冊）

193冊（0冊）

FCVと水素ステーションの低コスト化

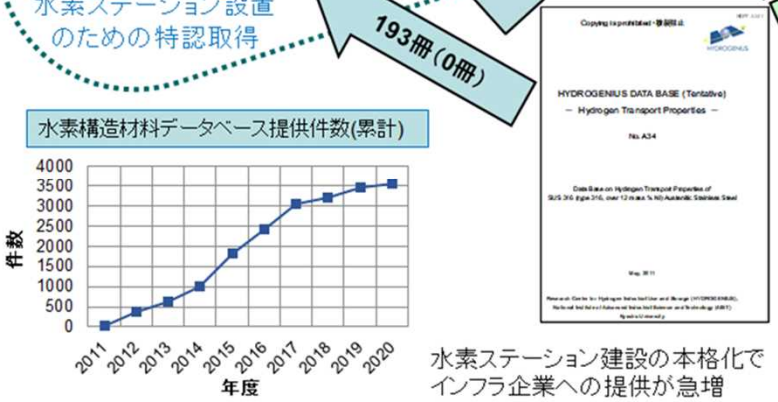
自動車企業
水素インフラ関連企業
[水素ステーション建設・特認]

3023冊（3005冊）

知見の提供

国際貢献
IPHEラウンドロビンテストへのコメント

事前申請、規制緩和、国際規格の議論における技術的根拠として活用



水素ステーション建設の本格化でインフラ企業への提供が急増

HYDROGENIUS
材料強度データベース
- SSRT特性
- 疲労寿命特性
- 疲労き裂進展特性
- 水素拡散特性

SUS316(hi-Ni), SUS304, SUS316, SUS316L, SUH660, XM-19 (HRX19), 6061-T6, SCM435, SNCM439, etc.

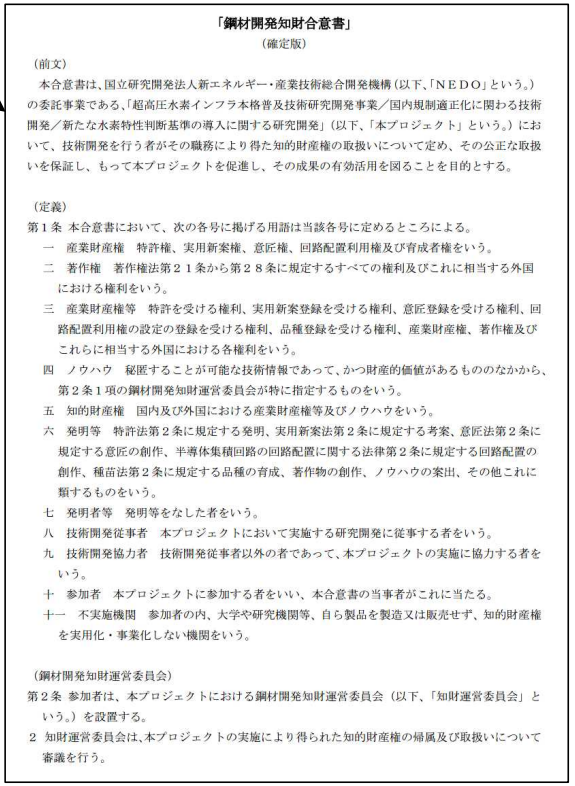
・本事業で得られた有用なデータを一般に利用できる仕組み　⇒社会に還元

知的財産管理

■委託事業・共同研究事業については、「ＮＥＤＯプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に基づき、テーマ毎に「**知財の取扱いに関する合意書**」を策定。

■合意書では、知財運営委員会や知財の帰属、秘密の保持等、プロジェクトの出口戦略において重要となる知財ルールを整備。

■助成事業については、個々の事業者の知財戦略を尊重し、アウトカムの最大化を図る。



「鋼材開発知財合意書」
（確定版）

（前文）
本合意書は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「ＮＥＤＯ」という。）の委託事業である、「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／国内規制適正化に関わる技術開発／新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」（以下、「本プロジェクト」という。）において、技術開発を行う者がその職務により得た知的財産権の取扱いについて定め、その公正な取扱いを保証し、もって本プロジェクトを促進し、その成果の有効活用を図ることを目的とする。

（定義）
第１条 本合意書において、次の各号に掲げる用語は当該各号に定めるところによる。
一　産業財産権　特許権、実用新案権、意匠権、回路配置利用権及び育成者権をいう。
二　著作権　著作権法第２１条から第２８条に規定するすべての権利及びこれに相当する外国における権利をいう。
三　産業財産権等　特許を受ける権利、実用新案登録を受ける権利、意匠登録を受ける権利、回路配置利用権の設定の登録を受ける権利、品種登録を受ける権利、産業財産権、著作権及びこれらに相当する外国における各権利をいう。
四　ノウハウ　秘匿することが可能な技術情報であって、かつ財産的価値があるもののなかから、第２条１項の鋼材開発知財運営委員会が特に指定するものをいう。
五　知的財産権　国内及び外国における産業財産権等及びノウハウをいう。
六　発明等　特許法第２条に規定する発明、実用新案法第２条に規定する考案、意匠法第２条に規定する意匠の創作、半導体集積回路の回路配置に関する法律第２条に規定する回路配置の創作、種苗法第２条に規定する品種の育成、著作物の創作、ノウハウの案出、その他これに類するものをいう。
七　発明者等　発明等をなした者をいう。
八　技術開発従事者　本プロジェクトにおいて実施する研究開発に従事する者をいう。
九　技術開発協力者　技術開発従事者以外の者であって、本プロジェクトの実施に協力する者をいう。
十　参加者　本プロジェクトに参加する者をいい、本合意書の当事者がこれに当たる。
十一　不実施機関　参加者の内、大学や研究機関等、自ら製品を製造又は販売せず、知的財産権を実用化・事業化しない機関をいう。

（鋼材開発知財運営委員会）
第２条 参加者は、本プロジェクトにおける鋼材開発知財運営委員会（以下、「知財運営委員会」という。）を設置する。
２ 知財運営委員会は、本プロジェクトの実施により得られた知的財産権の帰属及び取扱いについて審議を行う。

＜評価項目 2＞目標及び達成状況

（1）アウトカム目標及び達成見込み
（2）アウトプット目標及び達成状況

報告内容

1．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2．目標及び達成状況（概要）

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3．マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

ページ構成

- ■ アウトカム目標の設定及び根拠
- ■ 波及効果
- ■ 本事業における「実用化」の考え方
- □ 費用対効果
- ■ アウトプット（研究開発成果）のイメージ
- ■ アウトプット目標の設定及び根拠
- ■ アウトプット目標の達成状況
- ■ 研究開発成果の意義
- ■ 副次的成果及び波及効果
- ■ 特許出願及び論文発表

□ （塗りつぶしなし） ：評価対象外

アウトカム目標の設定及び根拠

アウトカム目標	根拠
水素ステーション（固定式オフサイトステーション・300Nm3/h）のコストを、２０２５年度以降に ・整備費を２．０億円以下まで低減させる。 ・運営費を現行の１／２（1,500万円/年）以下まで低減させる。 上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。	水素・燃料電池戦略ロードマップの記載。

	導入初期	2016年	2025年頃
圧縮機	1.40億円	0.90億円	0.50億円（100台/年・社）
蓄圧器	0.50億円	0.50億円	0.10億円（500本/年・社）
プレクーラー	0.30億円	0.20億円	0.10億円（100台/年・社）
ディスペンサー	0.60億円	0.20億円	0.20億円（100台/年・社）
その他工事費	1.80億円	1.70億円	1.10億円
整備費計	**4.60億円** →	**3.50億円** →	**2.00億円**
運営費	**4~5千万円** →	**3.4千万円** →	**1.5千万円**

※NEDO において検討された技術開発ロードマップを参考に記載。
※導入初期の価格は 2013 年の補助金申請額の平均値であり、2016 年の数値については 2016 年の補助実績額の平均値。
※前提としているステーションの仕様は、定置式オフサイトで供給能力が 300N ㎥のもの。
※補助対象外の経費は、含まれていない。
※構成機器のコスト目標については、規制見直し、安定した仕様のもとにおける主要構成機器の量産及び大量受注において適切な納期分散が為されている等の前提条件のもと設定されている。
※○台/年・社、○本/年・社とは、コスト目標達成のための前提条件であり、「１社が１年に○台、○本生産を行った場合」の意味。

本事業における「実用化」の考え方

当該事業の実用化とは・・

- 当該研究開発にて開発された試作品等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されること
  例えば、Oリング、充填ホース、バルブなど

- また、当該研究開発に係る規格や業界基準、試験法のドラフトが作成されて、業界団体等において検討が開始されること
  例えば、規制の見直し、ISO、金属材料適用範囲拡大、材料（素材） 開発など

をいう。

アウトカム目標の達成見込み

目標 （2025年以降）	現状	達成見込み	達成の根拠／解決方針
水素ステーション（固定式オフサイトステーション・300Nm3/h）のコストを、２０２５年度以降に ・整備費を２．０億円以下まで低減させる。 ・運営費を１／２（1,500万円/年）以下まで低減させる。 上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業等の取り組みを含めている。	■2022年度実績 ・整備費：3.3億円 ・運営費：3,100万円/年 (経済産業省の集計結果) ■2025年度見込み※ ・整備費：3.3億円 ・運営費：2,200万円/年 ■2030年度見込み※ ・整備費：3.1億円 ・運営費：1,500万円/年	△	各研究開発テーマにおける2025年度以降のコストダウン試算結果の合計が、目標値を下回っている状況。 水素ステーション自立化のために必要とされるテーマについては、「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」において、更なるコストダウンに向けた研究開発を継続する。 一方で、水素・燃料電池戦略ロードマップに掲げる目標値について、その根拠も含めた見直しを行い、水素ステーション事業の自立的展開のために真に必要とされる目標および方策について改めて協議する。

※ 本研究開発事業で得られた成果に基づいたコストダウン効果を各テーマの実施者にて試算し、NEDOが集計した数値を2022年度の実績から差し引いた金額。

アウトカム目標の達成見込み

- ✓ 運営費については、本事業の研究開発によって2030年度におけるコストが研究成果の社会実装が進めば、達成できる見込みがある。一方で、整備費（主に圧縮機、蓄圧器、および工事費）については、当初想定よりもコスト低減効果が小さいこと、および目標達成時期が2030年よりも後になる見込みであることから、全体としては達成見込みを△とした。

- ✓ 一方で、ロードマップ目標は水素ステーション構成機器の量産・大量受注を前提（下記）としているが、昨今の水素ステーションの建設数が増えていない状況から、本目標の前提が崩れている。上記状況から、水素基本戦略には、水素ステーション自立化のための目標見直しを実施するとの記載がある。

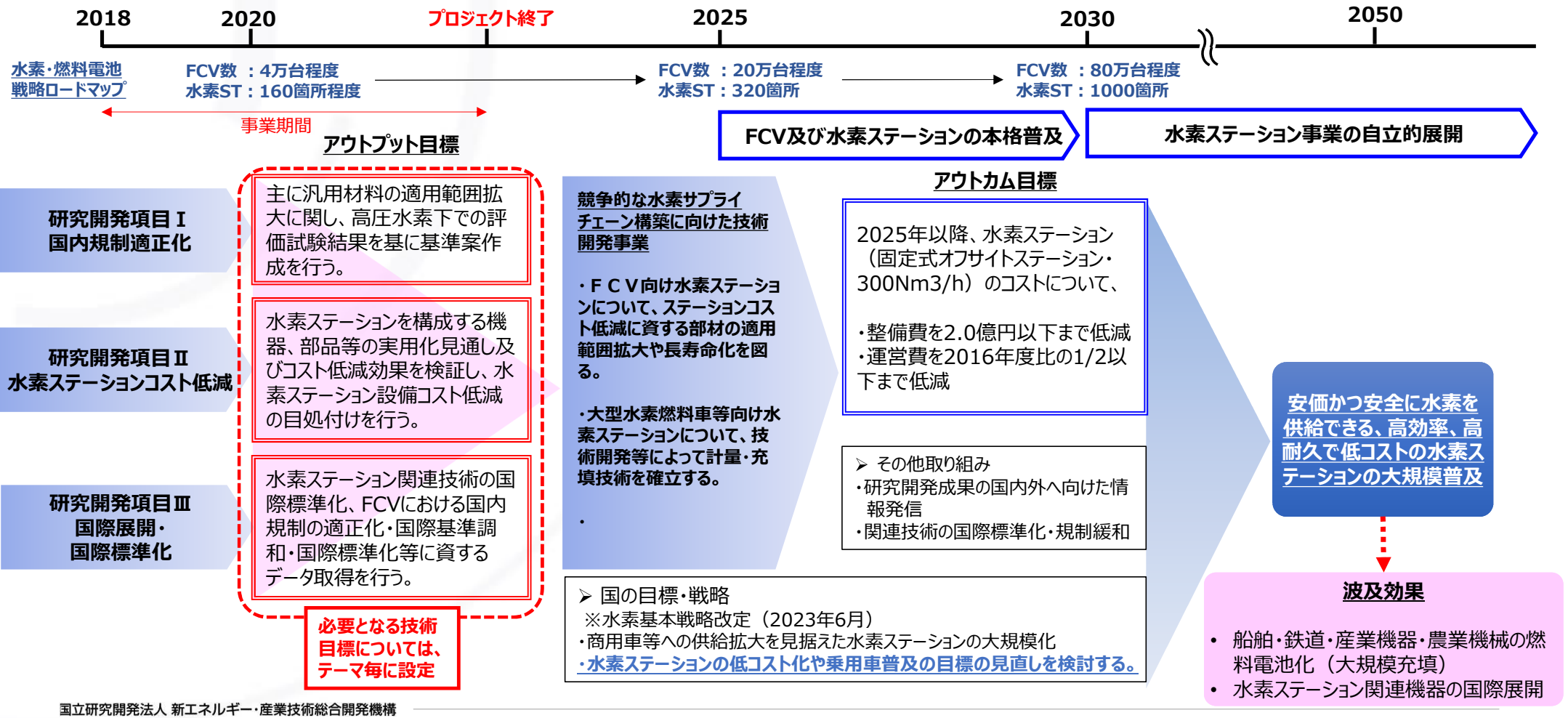
※構成機器のコスト目標については、規制見直し、安定した仕様のもとにおける主要構成機器の量産及び大量受注において適切な納期分散が為されている等の前提条件のもと設定されている。
※〇台/年・社、〇本/年・社とは、コスト目標のための前提条件であり、「1社が1年に〇台、〇本生産を行った場合」の意味。

	導入初期	2016年	2025年頃
圧縮機	1.40億円	0.90億円	0.50億円（100台/年・社）
蓄圧器	0.50億円	0.50億円	0.10億円（500本/年・社）
プレクーラー	0.30億円	0.20億円	0.10億円（100台/年・社）
ディスペンサー	0.60億円	0.20億円	0.20億円（100台/年・社）
その他工事費	1.80億円	1.70億円	1.10億円
整備費計	**4.60億円** →	**3.50億円** →	**2.00億円**
運営費	**4~5千万円** →	**3.4千万円** →	**1.5千万円**

※NEDOにおいて検討された技術開発ロードマップを参考に記載。
※導入初期の価格は2013年の補助金申請額の平均値であり、2016年の数値については2016年の補助実績額の平均値。
※前提としているステーションの仕様は、定置式オフサイトで供給能力が300N㎥のもの。
※補助対象外の経費は、含まれていない。
※構成機器のコスト目標については、規制見直し、安定した仕様のもとにおける主要構成機器の量産及び大量受注において適切な納期分散が為されている等の前提条件のもと設定されている。
※〇台/年・社、〇本/年・社とは、コスト目標達成のための前提条件であり、「1社が1年に〇台、〇本生産を行った場合」の意味。

出典：水素・燃料電池戦略ロードマップより抜粋

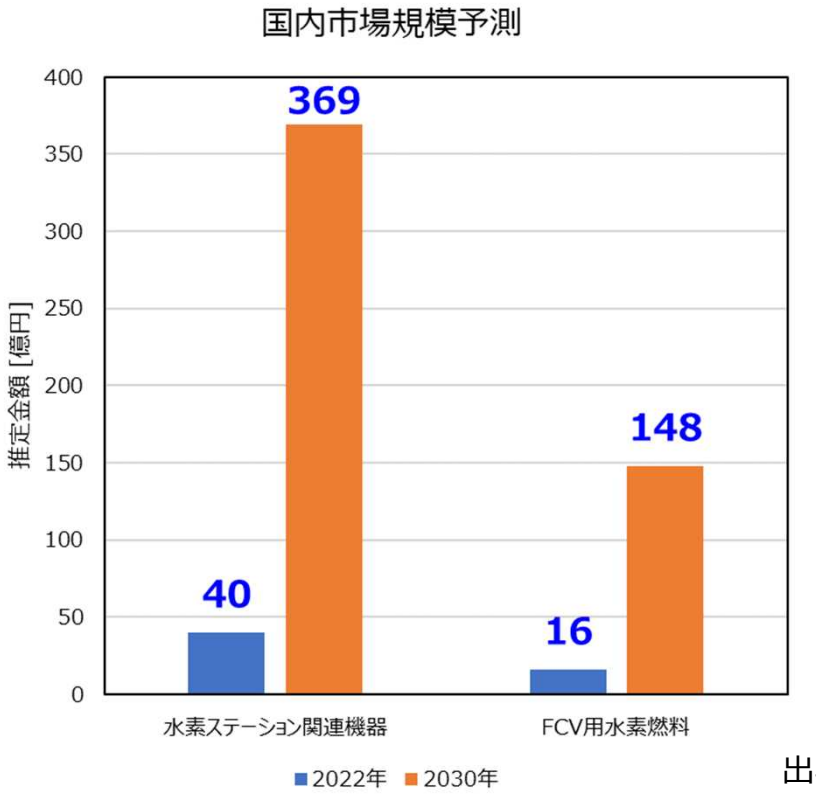
波及効果


2018
2020
プロジェクト終了
2025
2030
2050
水素・燃料電池
戦略ロードマップ
FCV数 ：4万台程度
水素ST：160箇所程度
FCV数 ：20万台程度
水素ST：320箇所
FCV数 ：80万台程度
水素ST：1000箇所
事業期間
FCV及び水素ステーションの本格普及
水素ステーション事業の自立的展開
アウトプット目標
研究開発項目Ⅰ
国内規制適正化
主に汎用材料の適用範囲拡大に関し、高圧水素下での評価試験結果を基に基準案作成を行う。
研究開発項目Ⅱ
水素ステーションコスト低減
水素ステーションを構成する機器、部品等の実用化見通し及びコスト低減効果を検証し、水素ステーション設備コスト低減の目処付けを行う。
研究開発項目Ⅲ
国際展開・
国際標準化
水素ステーション関連技術の国際標準化、FCVにおける国内規制の適正化・国際基準調和・国際標準化等に資するデータ取得を行う。
必要となる技術目標については、テーマ毎に設定
競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業
・ＦＣＶ向け水素ステーションについて、ステーションコスト低減に資する部材の適用範囲拡大や長寿命化を図る。
・大型水素燃料車等向け水素ステーションについて、技術開発等によって計量・充填技術を確立する。
・
アウトカム目標
2025年以降、水素ステーション（固定式オフサイトステーション・300Nm3/h）のコストについて、
・整備費を2.0億円以下まで低減
・運営費を2016年度比の1/2以下まで低減
➢ その他取り組み
・研究開発成果の国内外へ向けた情報発信
・関連技術の国際標準化・規制緩和
➢ 国の目標・戦略
※水素基本戦略改定（2023年6月）
・商用車等への供給拡大を見据えた水素ステーションの大規模化
・水素ステーションの低コスト化や乗用車普及の目標の見直しを検討する。
安価かつ安全に水素を供給できる、高効率、高耐久で低コストの水素ステーションの大規模普及
波及効果
• 船舶・鉄道・産業機器・農業機械の燃料電池化（大規模充填）
• 水素ステーション関連機器の国際展開

費用対効果

本事業（超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業）の総事業費

⇒**159億円**



計算ベース

■水素ステーションの平均稼働率

（水素需要量/供給能力）

2022年：8.4%

2030年：42.3%

■1日あたりのFCV満充填台数平均

2022年：4～5台

2030年：24～25台

出典：富士経済「2023年版水素利用市場の将来展望」

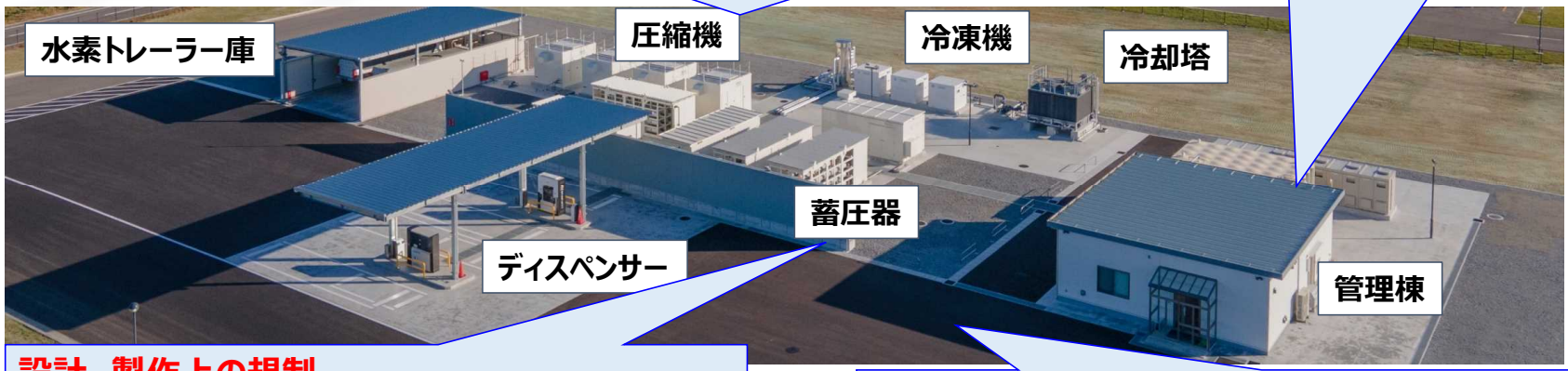
✓ 水素ステーション稼働率およびFCV台数が想定通りに進めば、水素ステーションおよびFCV水素の国内市場は**2030年には現状の9倍程度**となると予測される。

アウトプット（研究開発成果）のイメージ／(Ⅰ)規制適正化

水素ステーションの設置・運用等における規制の適正化に関し、規制内容の検討、安全性検証・検討、技術基準案策定、課題整理などを行う。

材料の規制
○Ni当量26.9%の鋼材の例示基準改定に資するデータの取得、解析
○冷間加工材の使用条件の明確化。許容引張応力設定に対する技術課題纏め
○熱処理無しの溶接継手を対象とした技術指針の策定
○低合金鋼技術文書を改正し、圧縮機まで適用範囲を拡大
○中空試験片高圧水素中材料試験法の規格化

運営の規制
○無人運転のための技術基準案作成
○保安統括者等の選任の緩和に関する技術基準見直し案作成
○保安監督者兼任の技術基準案作成



設計、製作上の規制
○安全設備合理化に係る技術基準案作成
○常用圧力上限値見直しに関する技術基準案作成
○障壁に係る技術基準見直し案作成

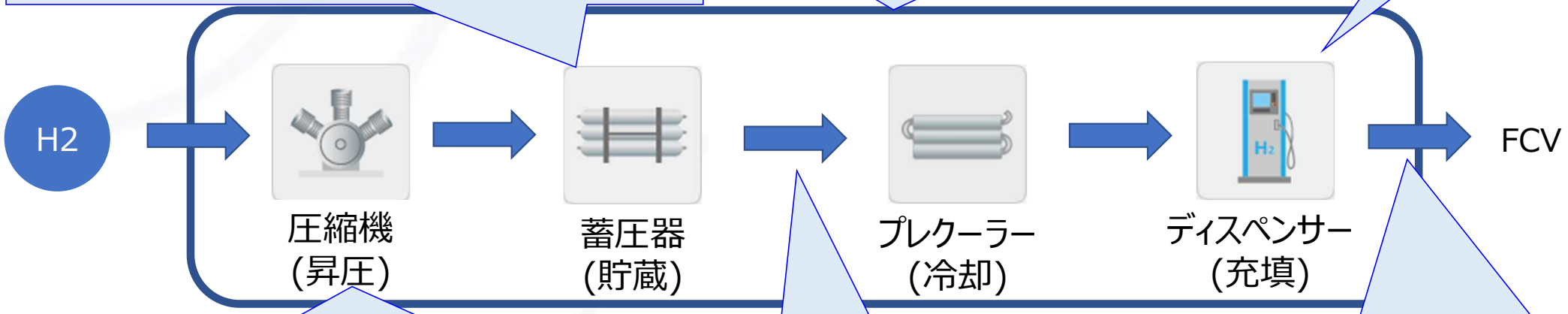
その他の規制
○家庭・小規模事業所等での水素充填に関する保安法、ガス事業の法的課題の明確化
○保安統括者等の選任の緩和
○水素充填設備の室内設置基準のための検討項目明確化

アウトプット（研究開発成果）のイメージ／(Ⅱ)コスト低減

○高圧水素ガス環境下においても蓄圧器の疲労損傷を検知する手法の開発。
○容器の圧力サイクル試験により、使用回数の考え方を再定義するための関係式を構築。
○引張強さ1000MPa以上と水素適合性が両立する製造条件の明確化。

○充填回数 30,000 回相当のシール部材開発とシール部材の加速耐久性評価法案設定。
○IoT対応水素センサモジュールの低消費電力化・小型化を検討、仕様を決定し、試作センサモジュールにて消費電力目標(≦10mW)を達成。

○プレクール温度緩和及び充填台数10台/hを可能とする新充填プロトコルの開発。



○80℃で80MPaの放出圧力を示し、吸蔵圧力と放出圧力の差が小さく、高耐久性を有する水素吸蔵合金を開発。

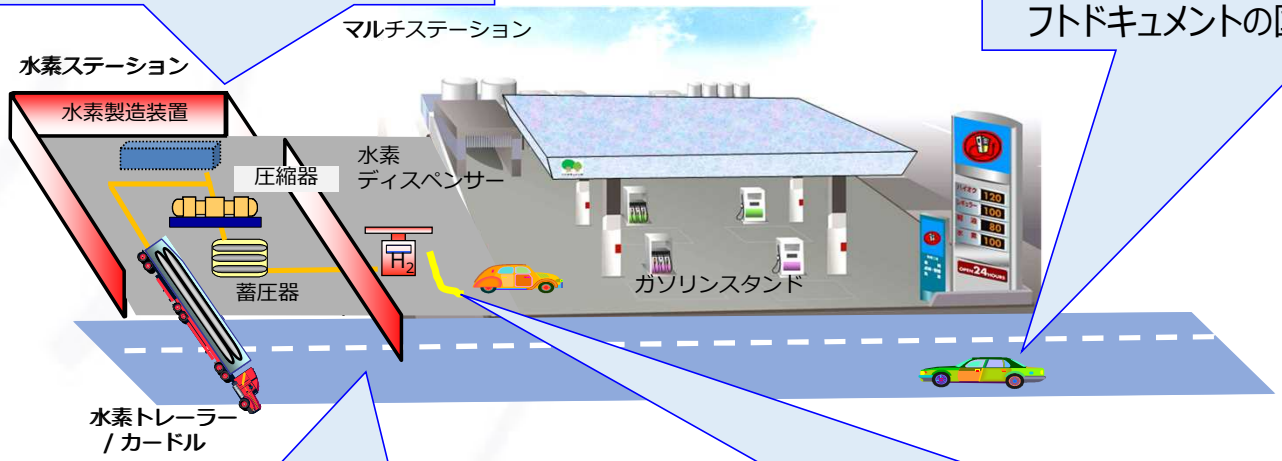
○小型且つ高感度な水素ガス分析装置のプロトタイプ制作し、ISO規格全成分への適用性を評価。

○高圧水素加速耐久性評価法規格案によりホースの80,000～110,000サイクルのデータ取得。
○大流量化・変動充填・圧力及び熱損失等の性能評価を実施、HDV用の計量システムを開発し、福島水素充填技術研究センターを完成。

アウトプット（研究開発成果）のイメージ／(Ⅲ)国際展開・国際標準化

○諸外国の最新の動向を調査し、定期的な情報発信を通じて情報の共有を実施。

○自動車の安全性に関わる世界統一基準(GTR)の審議会に参画し、日本の試験方案に関するドラフトドキュメントの国際合意を取得。



○2重配管における水素漏洩着火時の火炎伝播挙動の把握、影響度の推定、対処策の明確化を実施。
○付臭措置代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性調査ならびに各種水素センサの性能評価・取りまとめ。

○ISOの水素技術に関する専門委員会において、12件の規格を発行。
（そのうち4件は日本提案）
- ✓ 水素品質関連規格（議長国日本）および充填インターフェース関連規格を5件発行。
- ✓ 次期水素品質規格改訂の根拠となる試験データが必要な成分を絞り込み、試験データによるギ酸削除、ハロゲン種の絞り込み、酸素緩和に関するデータの取得。

アウトプット目標の設定及び根拠

研究開発項目	研究開発目標（最終目標）	根拠
研究開発項目Ⅰ：「国内規制適正化に関わる技術開発」	• 主に汎用材料の適用範囲拡大に関し、高圧水素下での評価試験結果を基に基準案作成を行う。	◆規制改革実施計画（2017/6月） 水素スタンド設備に係る技術基準の見直し、水素特性判断基準にかかる例示基準の改正等の検討。
研究開発項目Ⅱ：「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」	• 水素ステーションを構成する機器、部品等の実用化見通し及びコスト削減効果を検証し、水素ステーション設備コスト低減の目処付けを行う。	◆水素・燃料電池戦略ロードマップ（2019/3/12） 安定収益の裏付けのある水素ステーション整備と整備費・運営費の低減を通じた自立的な水素拡販ビジネスの展開が必要である。
研究開発項目Ⅲ：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」	• 水素ステーション関連技術の国際標準化、ＦＣＶにおける国内規制の適正化・国際基準調和・国際標準化等に資するデータ取得を行う。 • ＩＥＡ等海外の政策・市場・研究開発動向に係る情報を収集し、国内に発信する。	◆水素基本戦略（2023/6/6） 水素サプライチェーンの構築や水素関連産業への波及といった広い視点から、必要な標準化を戦略的に検討する。

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目	目標 （2023年３月）	成果（実績） （2023年3月）	達成度	達成の根拠／解決方針
研究開発項目Ⅰ： 「国内規制適正化に関わる技術開発」	・主に汎用材料の適用範囲拡大に関し、高圧水素下での評価試験結果を基に基準案作成を行う。	◆リスクアセスメントを実施し法規・基準の見直し緩和を図り新たな技術基準案を策定した。 ・無人運転等に必要な技術基準案を策定した。 ◆汎用性ステンレスの使用可能範囲拡大のための新たな水素特性判断基準を制定し、Ni当量低減を図った。 ・Ni当量26.9%の水素適合性データを取得し基準化案を策定した。 ・中空試験片高圧水素中材料試験法（SSRT・疲労）の試験条件を確立し規格案を策定した。	○	汎用材料の鋼材の適用範囲を拡大し高圧水素適用性評価試験を基に基準化案を策定した。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、 ×未達

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目	目標 （2023年３月）	成果（実績） （2023年3月）	達成度	達成の根拠／解決方針
研究開発項目Ⅱ： 「水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発」	・水素ステーションを構成する機器、部品等の実用化見通し及びコスト削減効果を検証し、水素ステーション設備コスト低減の目処付けを行う。	◆技術開発及び新たな評価法を見いだすことで、運営コスト（メンテナンスコスト、消費電力、交換頻度）の低減や部材の長寿命化の目処を付けた。 【蓄圧器】 ・高圧水素ガス環境下において疲労損傷にともなうAEの検知 ・容器圧力サイクル試験よりマイナー則に基づく累積損傷関係式を構築 ・引張強さ1000MPa以上と水素適合性が両立する製造条件の明確化 【シール継手部材、ホース】 ・充填 30,000 回のシール部材開発と加速耐久性評価法案設定 ・高圧水素加速耐久性評価法規格案によりホースの使用回数3,000～4,000回程度の見込み 【ディスペンサー】 ・プレクール温度緩和及び充填台数10台/hを可能とする新充填プロトコルの開発 【水素センサー、分析計】 ・IoT対応水素センサモジュールの低消費電力化・小型化仕様を決定し、試作センサモジュールにて消費電力目標(≦10mW)を達成 ・小型マルチガス分析装置及び高感度ガス分析装置のプロトタイプ制作し、ISO規格全成分への適用性を評価 【水素圧縮機】 ・80℃で80MPaの放出圧力を示し、低ヒステリシスと高耐久性を両立した水素吸蔵合金を開発 【HDV用水素ステーション】 ・大流量化・変動充填・圧力及び熱損失等の性能評価を実施しHDV用の計量システムを開発し福島水素充填技術研究センターを完成	○	水素ステーションを構成する機器、部材等の実用化の見通しをたて、コスト削減効果がある研究開発テーマを検証し、水素ステーション設備コスト削減の目処をつけた。今後はHDV用の設備を視野に引き続き競争的サプライチェーン構築に向けた技術開発事業でコスト低減を図るようする。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、 ×未達

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目	目標 （2023年6月）	成果（実績） （2023年6月）	達成度	達成の根拠／解決方針
研究開発項目Ⅲ：「国際展開、国際標準化等に関する研究開発」	・水素ステーション関連技術の国際標準化、ＦＣＶにおける国内規制の適正化・国際基準調和・国際標準化等に資するデータ取得を行う。 ・ＩＥＡ等海外の政策・市場・研究開発動向に係る情報を収集し、国内に発信する。	◆国際規格策定について世界をリードし、標準化活動に係る国際連携の推進を実施し、日本の産業振興・競争力強化を図った。 ・2018年度から2022年度までのISO/TC197における国際標準化の実績としては、12件の規格(そのうち4件は日本の提案)を発行した。 ・HFCV-GTR Phase2審議に参画し、日本提案の国際合意に向けて、審議を推進。ドラフトドキュメントの国際合意を得た。 ・諸外国の最新の動向を調査し、定期的な情報発信を通じて情報の共有を実施した。 ・2重配管における水素漏洩着火時の火炎伝播挙動の把握、影響度の推定、対処策の明確化を実施した。 付臭措置代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性調査ならびに各種水素センサの性能評価・取りまとめた。	○	水素ステーション関連技術の国際標準化、FCVにおける国内基準調和・国際標準化に資するデータ取得を行い、ISO/TC197の国際標準化に繋げた。 今後はHDV用の技術基準化を視野に引き続き競争的サプライチェーン構築に向けた技術開発事業でISO国際標準化を図るようする。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、 ×未達

研究開発成果／福島水素充填技術センター（2022年12月完工）



研究開発成果の意義（副次的成果）

◆研究開発項目と成果

Ⅰ【国内規制適正化に関わる技術開発】

⇒リスクアセスメントを実施し、法規・基準の見直し・緩和を図り新たな技術基準案を策定

Ⅱ【水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発】

⇒運営コストのアウトカム目標達成が見込まれた（メンテナンスコスト低減、消費電力削減、部材の長寿命化）

Ⅲ【国際展開・国際標準化等に関する研究開発】

⇒国際規格策定で世界をリードし、日本の産業振興・競争力強化

◆研究開発成果の意義

- ✓ 水素ステーションの運営コストの低減。
- ✓ 2025年度以降の水素ステーションの**本格普及**、2030年度以降の水素ステーションの**事業自立化**に向けた、後継の研究開発へのフィードバック。
- ✓ 大型商用車用の水素ステーションへの拡大の流れに対応した**研究開発基盤の整備**を実施した。

◆副次的成果（波及効果）

- ✓ 商用車HDV（大型トラック）用の水素ステーションの研究開発に向けた取組を開始（2023年度より競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業を開始）
  ①HDV用充填プロトコル・計量技術の開発
  ②HDV用のシール等の部材技術の開発
- ✓ HDV用の研究施設 ⇒ **福島水素充填技術研究センターを**完成。

特許出願及び論文発表

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	計
特許出願（国際出願）	**1（1）**	**2**	**5（1）**	**6（1）**	**12（7）**	**26（10）**
論文	**0**	**1**	**6**	**9**	**14**	**30**
研究発表・講演	**41**	**51**	**27**	**53**	**62**	**234**
受賞実績	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**

※2023年9月現在

※特許出願の内訳：水素検知センサ9件、充填プロトコル8件、蓄圧器評価手法5件、
水素分析装置2件、シール部材2件

※主な研究発表・講演：
■”Methods of material testing in High-pressure hydrogen environment and evaluation of hydrogen compatibility of metallic materials: current status in Japan”（ASME PVP 2018）
■”Establishment of evaluating methods aiming to develop long-life sealing rubber -New attempt of HYDROGENIUS Polymer Team-”（水素先端世界フォーラム2019 HYDROGENIUS研究シンポジウム 高分子材料研究部門）
■”The prospect of the international standardization on hydrogen technology (Activities in ISO/TC197)”
（2021 International Conference on Hydrogen Economy Standards）

＜評価項目３＞マネジメント

（１）実施体制

(※) 受益者負担の考え方　　＊終了時評価においては対象外

（２）研究開発計画

報告内容

1．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2．目標及び達成状況（概要）

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3．マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

ページ構成

- ■ NEDOが実施する意義
- ■ 実施体制
- ■ 個別事業の採択プロセス
- □ 予算及び受益者負担
- ■ アウトプット（研究開発成果）のイメージ（再掲）
- ■ 目標達成に必要な要素技術
- ■ 研究開発のスケジュール
- ■ 進捗管理
- ■ 進捗管理：中間評価結果への対応
- ■ 進捗管理：動向・情勢変化への対応

□ （塗りつぶしなし） ：評価対象外

NEDOが実施する意義

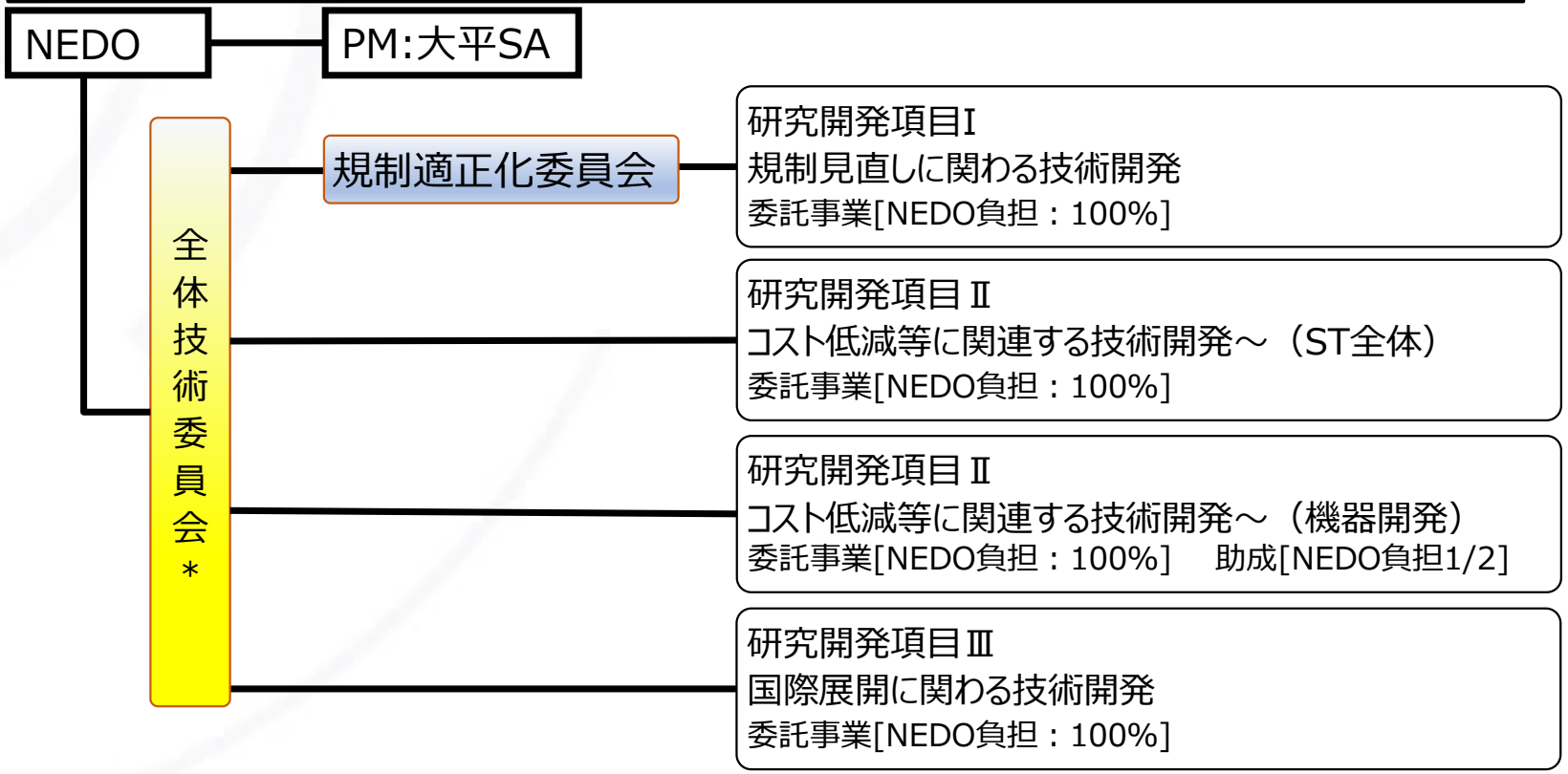
FCV・水素ステーションの普及拡大に向けた規制見直し・技術開発は、

- ○ エネルギー政策上の重要度が高く、社会的必要性が大きい
- ○ 水素・燃料電池産業の競争力強化に貢献
- ○ 規制見直しの推進には、産官学の緊密な連携が必要
- ○ 水素供給インフラについてはFCV普及初期の市場が限られるため、民間単独では開発リスクが大きい
- ○ 本格的普及、自立化に必要な規格化・標準化は全体として取組が必要

ＮＥＤＯがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

実施体制（実施者間での連携）

- 技術開発の結果を早期に社会実装するため、事業運営の形態（委員会の設置方法等）を スリム化。意思決定のスピードアップを図る。



（*）事業進捗、コスト低減、国際調和に関する事業全体の調整を行い、個別事業に反映。

個別事業の採択プロセス

	公募予告	公募期間	採択数
第１回公募	2018/2/20	2018/3/23 ～2018/4/23	11
第２回公募	2018/7/24	2018/8/24 ～2018/9/25	5
第３回公募	2020/2/25	2020/4/8 ～2020/5/12	5
第4回公募	2021/11/18	2021/12/3 ～2021/12/17	0
第5回公募	2021/9/24	2022/3/8 ～2022/4/8	1

採択条件；採択審査委員会では、以下を採択審査基準として実施した。

①【目標設定】：提案・申請内容が本事業の目的、目標に合致しているか。事業意義が明確か。

②【技術の新規性】：提案・申請された方法に新規性があり、技術的に優れているか。

③【研究計画の妥当性】：提案・申請内容および研究計画に妥当性はあるか。

④【計画遂行力】：提案・申請者は本事業を遂行するに足る能力を有するか。

⑤【提案の経済性】：提案・申請内容の経済性は優れているか。開発予算は妥当であるか

⑥【実用化・経済波及効果】：提案・申請内容における実用化の見込み、企業化計画に妥当性はあるか。また国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか

予算及び受益者負担

◆プロジェクト費用

委託：21件、助成(1/2負担)：1件　（単位：百万円）

研究開発項目		2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	合計
(Ⅰ)国内規制適正化に関わる技術開発	委託100%	627	1,026	684	689	712	0	3,739
(Ⅱ)水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発	委託100%	828	1,249	1,411	2,447	4,692	53*	10,845
	助成50%	25	83	56	0	0	0	
(Ⅲ)国際展開、国際標準化等に関する研究開発	委託100%	131	221	144	123	686	0	1,305
合　計		1,611	2,579	2,295	3,260	6,091	53*	15,890

*予定金額

委託事業の理由：本事業は、国の政策実施、すなわち水素・燃料電池戦略ロードマップで定める水素ステーション普及のためのコストダウン目標の達成のために、必要なデータ等を取得、分析及び提供することを目的とした研究開発であることから、委託事業を基本として実施した。

助成事業の理由：採択テーマの内、研究開発項目Ⅱ／「電気化学式ポンプの実証・開発」については、製品化検討段階の研究開発であることから、助成事業として実施した。

【再掲】アウトプット（研究開発成果）のイメージ／（Ⅰ）規制適正化

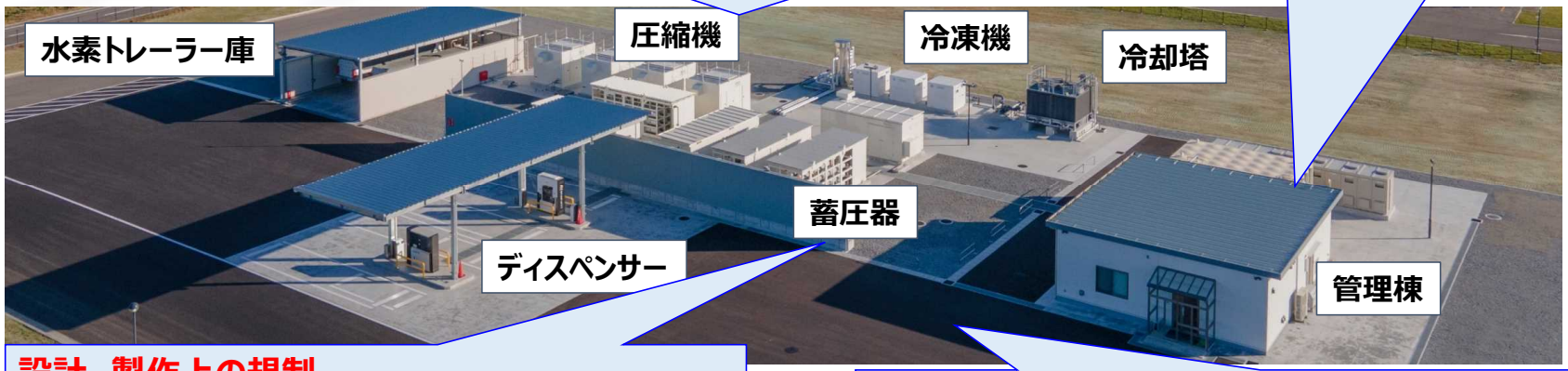
水素ステーションの設置・運用等における規制の適正化に関し、規制内容の検討、安全性検証・検討、技術基準案策定、課題整理などを行う。

鋼材

材料の規制
- ○Ni当量26.9%の鋼材の例示基準改定に資するデータの取得、解析
- ○冷間加工材の使用条件の明確化。許容引張応力設定に対する技術課題纏め
- ○熱処理無しの溶接継手を対象とした技術指針の策定
- ○低合金鋼技術文書を改正し、圧縮機まで適用範囲を拡大
- ○中空試験片高圧水素中材料試験法の規格化

リスクアセスメント

運営の規制
- ○無人運転のための技術基準案作成
- ○保安統括者等の選任の緩和に関する技術基準見直し案作成
- ○保安監督者兼任の技術基準案作成



設計、製作上の規制
- ○安全設備合理化に係る技術基準案作成
- ○常用圧力上限値見直しに関する技術基準案作成
- ○障壁に係る技術基準見直し案作成

技術基準見直し

小規模設備

その他の規制
- ○家庭・小規模事業所等での水素充填に関する保安法、ガス事業の法的課題の明確化
- ○保安統括者等の選任の緩和
- ○水素充填設備の室内設置基準のための検討項目明確化

【再掲】アウトプット（研究開発成果）のイメージ／(Ⅱ)コスト低減

○高圧水素ガス環境下においても蓄圧器の疲労損傷を検知する手法の開発。
○容器の圧力サイクル試験により、使用回数の考え方を再定義するための関係式を構築。
○引張強さ1000MPa以上と水素適合性が両立する製造条件の明確化。

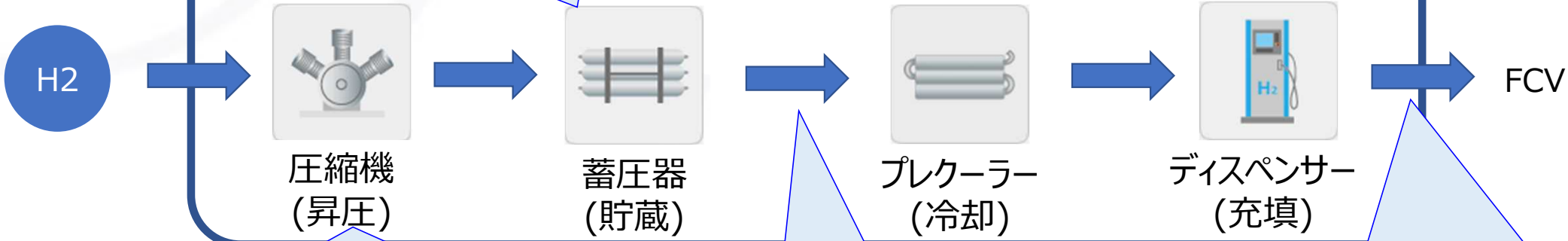
金属材料特性評価　・試験法

○充填回数 30,000 回相当のシール部材開発とシール部材の加速耐久性評価法案設定。
○IoT対応水素センサモジュールの低消費電力化・小型化を検討、仕様を決定し、試作センサモジュールにて消費電力目標(≦10mW)を達成。

水素検知　　シール・継手技術

○プレクール温度緩和及び充填台数10台/hを可能とする新充填プロトコルの開発。

充填プロトコル



○80℃で80MPaの放出圧力を示し、吸蔵圧力と放出圧力の差が小さく、高耐久性を有する水素吸蔵合金を開発。

水素吸蔵合金昇圧

○小型且つ高感度な水素ガス分析装置のプロトタイプ制作し、ISO規格全成分への適用性を評価。

水素品質分析

○高圧水素加速耐久性評価法規格案によりホースの80,000～110,000サイクルのデータ取得。
○大流量化・変動充填・圧力及び熱損失等の性能評価を実施、HDV用の計量システムを開発し、福島水素充填技術研究センターを完成。

ホース・計量

【再掲】アウトプット（研究開発成果）のイメージ／(Ⅲ)国際展開・国際標準化

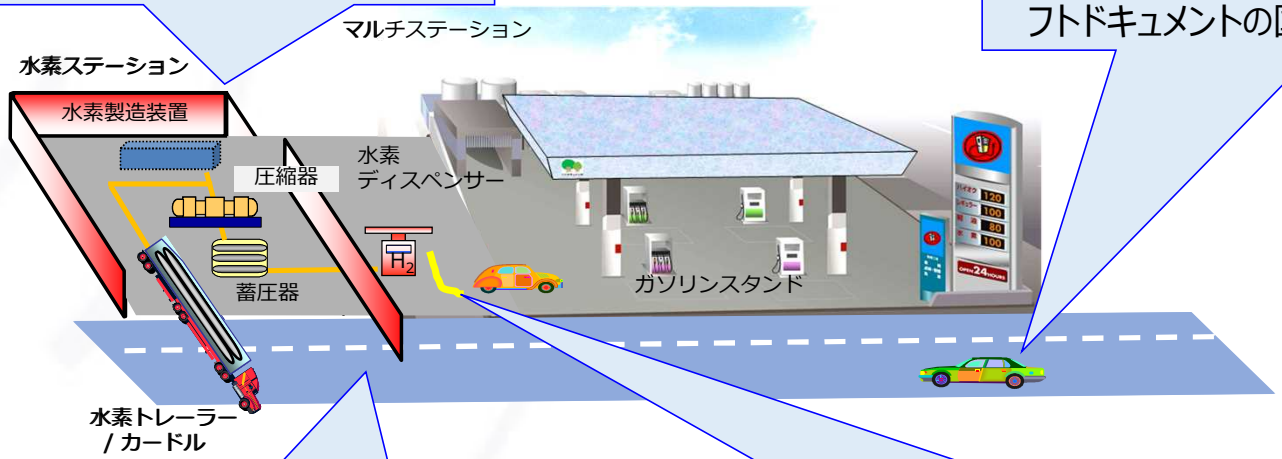
国際動向調査

○諸外国の最新の動向を調査し、定期的な情報発信を通じて情報の共有を実施。

国際規格・国際調和

○自動車の安全性に関わる世界統一基準(GTR)の審議会に参画し、日本の試験方案に関するドラフトドキュメントの国際合意を取得。

GTR



ISO

○ISOの水素技術に関する専門委員会において、12件の規格を発行。（そのうち4件は日本提案）
- ✓ 水素品質関連規格（議長国日本）および充填インターフェース関連規格を5件発行。
- ✓ 次期水素品質規格改訂の根拠となる試験データが必要な成分を絞り込み、試験データによるギ酸削除、ハロゲン種の絞り込み、酸素緩和に関するデータの取得。

○2重配管における水素漏洩着火時の火炎伝播挙動の把握、影響度の推定、対処策の明確化を実施。
○付臭措置代替となる新たな水素漏洩検知手法の検討・性能評価、異常検知の可能性調査ならびに各種水素センサの性能評価・取りまとめ。

パイプライン輸送・異常検知

個別事業

研究開発項目I　規制見直しに関わる技術開発

事業名	事業番号	事業者名
本格普及期に向けた水素ステーションの安全性に関わる研究開発	1-(1)	一般財団法人石油エネルギー技術センター
新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発	**1-(2)-①**	**一般財団法人石油エネルギー技術センター、高圧ガス保安協会、九州大学、金属系材料研究開発センター、日本製鉄、愛知製鋼、日本製鋼所**
中空試験片高圧水素中材料試験法規格化のための研究開発	1-(2)-③	国立研究開発法人物質・材料研究機構

赤枠：発表事業

参考資料１　分科会議事録及び書面による質疑応答

研究評価委員会
「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（終了時評価）分科会
議事録及び書面による質疑応答

日　時：2023 年 11 月 21 日（火）10：00～16：55
場　所：NEDO 川崎 2301～2303 会議室（オンラインあり）

出席者（敬称略、順不同）

＜分科会委員＞

分科会長	池谷　知彦	一般財団法人電力中央研究所　企画部グループ　特任役員
分科会長代理	飯山　明裕	山梨大学　水素・燃料電池ナノ材料研究センター 水素・燃料電池技術支援室　特任教授 センター長 兼 室長
委員	尾方　成信	大阪大学　大学院基礎工学研究科 機能創成専攻 機能デザイン領域　教授
委員	櫻井　輝浩	燃料電池実用化推進協議会　企画部　部長
委員	原田　文代	株式会社日本政策投資銀行　常務執行役員
委員	丸田　昭輝	株式会社テクノバ　研究部 研究第 3 グループ　上級主席研究員
委員	三浦　真一	株式会社神戸製鋼所　新事業推進本部技術部 兼務　総務 CSR 部営業企画 Gr　兼務　事業開発部 シニアプロフェッショナル

＜推進部署＞

坂 秀憲	NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 室長
金田 充弘	NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 主査
松井 鐘慶	NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 主任
菖蒲 一歩	NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 主任

＜実施者※メインテーブル着席者のみ＞

鈴木 修一	一般財団法人石油エネルギー技術センター 水素エネルギー部 水素利用推進室 主任研究員
小林 拡	一般財団法人石油エネルギー技術センター 水素エネルギー部 水素利用推進室 主任研究員
林 郁孝	一般財団法人石油エネルギー技術センター 水素エネルギー部 水素利用推進室 室長
髙井 康之	一般社団法人水素供給利用技術協会技術 シニアマネージャー
森岡 敏博	国立研究開発法人産業技術総合研究所 上級主任研究員
櫻井 茂	トキコシステムソリューションズ株式会社 設計開発本部 開発部 主管技師
中西 功	一般社団法人水素供給利用技術協会 技術部長
池田 哲史	一般社団法人水素供給利用技術協会 事務局長
富岡 秀徳	一般社団法人水素供給利用技術協会 技術部 部長
今村 大地	一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 主管

＜オブザーバー＞

板倉 悠輝　　経済産業省 資源エネルギー庁 水素・アンモニア課 係長

＜評価事務局＞

三代川 洋一郎　NEDO 評価部 部長

山本 佳子　　NEDO 評価部 主幹

佐倉 浩平　　NEDO 評価部 専門調査員

松田 和幸　　NEDO 評価部 専門調査員

議事次第

（公開セッション）

１．開会、資料の確認

２．分科会の設置について

３．分科会の公開について

４．評価の実施方法について

５．プロジェクトの概要説明

5.1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

5.2 目標及び達成状況

5.3 マネジメント

5.4 目標及び達成状況（詳細）

5.5 質疑応答

６．プロジェクトの詳細説明

6.1 国内規制適正化に関わる技術開発／新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

6.2 水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発

6.3 水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発

6.4 国際展開、国際標準化等に関する研究開発／
水素ステーション等機器の ISO／TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発

（非公開セッション）

７．全体を通しての質疑

（公開セッション）

８．まとめ・講評

９．今後の予定

１０．閉会

議事内容

（公開セッション）

１．開会、資料の確認

・開会宣言（評価事務局）

・配布資料確認（評価事務局）

２．分科会の設置について

・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明。

・出席者の紹介（評価委員、評価事務局、推進部署）

【池谷分科会長】　電力中央研究所企画部グループの池谷と申します。専門は、二次電池、電力貯蔵からエネルギー貯蔵と全般的にやっております。また、2002 年から 4 年間 NEDO にお世話になっていましたので、実はこの事業の頭出しをつくったのは私かもしれないといった思いもございます。そういう意味では、少し反省の意味を込めながら評価を行いたいと思いますので、どうぞよろしくお願いいたします。

【飯山分科会長代理】　飯山でございます。この事業の中間評価のときにも携わらせていただきました。その結果も今回終了時の評価ということで改めて見させていただきたいと思います。よろしくお願いいたします。

【尾方委員】　尾方でございます。専門は機械材料になります。本日は、そういった観点から話を伺い、ご質問等をさせていただきたいと思います。どうぞよろしくお願いいたします。

【櫻井委員】　櫻井でございます。専門分野はコージェネレーションの原動機としてのガスエンジンや燃料電池等の開発で、あと一部ですが、天然ガス自動車のスタンド、水素ステーションの建設といった仕事に携わった経験があります。本日はよろしくお願いいたします。

【原田委員】　原田でございます。もともとのバックグラウンドはエネルギーインフラストラクチャー、プロジェクトファイナンス等ですが、水素に関しては 2015 年から水素燃料電池戦略協議会に入れていただいております。また、この事業につきましては中間評価でもお世話になっております。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【丸田委員】　丸田でございます。専門分野はエネルギー全般の調査研究であり、特に蓄電池、水素燃料電池及び過去二十何年間にわたりまして、国際連携のほうの水素分野を手伝わせていただきましたので、その点でもコメントできればと思っております。本日はよろしくお願いいたします。

【三浦委員】　神戸製鋼の三浦でございます。私の専門分野は、もともとプラントのプロセスエンジニアで、この水素ステーションの建設には初期から関わってまいりました。FCCJ 業界団体のエンジニアリング分科会といったメーカー側の分科会の主査を 2016 年ぐらいからしてきておりますので、どちらかというと、ものづくりの現場の側からコメントをさせていただきます。この事業に関しては最初から採択委員もさせていただいておりますので、業界の皆様とのコミュニケーションもございます。よろしくお願いします。

３．分科会の公開について

評価事務局より資料 2 及び 3 に基づき説明し、議題 7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。

４．評価の実施方法について

評価の手順を評価事務局より資料 4-1 から 4-5 に基づき説明した。

５．プロジェクトの概要説明

（1）意義・社会実装までの道筋、目標及び達成度、マネジメント

推進部署より資料5に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。
それでは、ご意見、ご質問等を受け付けます。飯山会長代理お願いします。

【飯山分科会長代理】　ご説明ありがとうございました。各事業がアウトプットとしては丸だということで、皆様よく頑張って成果を上げられたと思います。その上で、アウトカムのところの達成見込みにおいて、例えば 28 ページで三角というところのご説明として、29 ページにもありますように、ステーションの台数が見込みどおりではないということが挙げられているので、そこをよく理解したいと思っております。この 28 ページにある整備費のお金について、米印の部分を見ますと、「各テーマの実施者にて試算し NEDO が集計した」と書いてあるのですが、コストダウン効果を各テーマの実施者で試算したときに、その前提となる台数、例えば 29 ページにあるような 100 台/年・社とか、この 29 ページにあるようなロードマップの値の生産台数で算出をしたのか。どういう数値を用いられたのかをまずお伺いいたします。

【坂室長】　ご質問ありがとうございます。この点に関する詳細は非公開のセッションで説明させていただきますが、今回ここに示してあるような前提条件として、1 社当たり年間 100 台とか 500 本とかそういったところでやっているのではなく、現状の普及の見込みを含めて各事業者に試算していただいたと認識しております。

【飯山分科会長代理】　ありがとうございます。そうすると、技術開発という技術の面だけで言えば、恐らくコストは生産台数によって大きく変わってきて量産効果が見込めるものだと思いますので、少なくとも技術開発についてだけ申しますと、やはりロードマップの目標値の台数での試算ではどうだったのかということで、普及が目標どおりであれば整備費も目標どおり下がった技術開発をしたのかというところは、技術開発の成果を見通す上での大事なポイントではないのかと思います。現状の普及が想定よりも少ないのでというのは技術開発から切り離し、少なくとも技術のアウトプットの評価をすべきではないかと思われるのですが、いかがでしょうか。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。私自身、この評価を取りまとめるときに、そこが一番悩ましいと思っておりました。アウトカムの目標値を設定し、研究開発としてコスト削減できるものはどれぐらいなのか、そして量産効果でコスト削減できるのはどれぐらいなのかというところが、やはり切り分けて考えられていなかったところが我々の反省点ではあります。量産効果だけであれば研究開発というものではございませんので、午後のセッションの方で、具体的に個別にどれぐらいを想定しているのかという数値についてはご説明をさせていただきますが、やはり研究開発としてこれぐらい下げていけるというところは明確にした上で目標設定をすべきだったのではないかとは認識しております。

【飯山分科会長代理】　その量産効果というよりは、技術開発がこの事業としてできたか、できないかというのは、この想定するロードマップの台数をつくったときのコストは幾らなのかということで判断でき得るはずですし、そう判断すべきではないかと思い伺った次第です。

【坂室長】　そういう意味では、例えばここで FCV 台数 20 万台、そして水素ステーション設置数 320 か所達成できたとしたら、この技術開発でどれぐらいコストを低減できるかという評価をすべきという趣旨になりますか。

【飯山分科会長代理】　技術開発事業ですから、まずはそれで一区切りをつけ、その上でさらに現実には台数が伸びないので幾らコストアップをするとかそういう分析をしたらどうかと思ったのですけれども。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。現時点で実際にこの数字を前提としたコスト低減という試算は残念ながらしていないところではございますが、そういった視点は非常に重要だと思います。

【飯山分科会長代理】　やはり生産台数を決めないとコストは出ないので、それはやったほうがいいように思いました。また、28 ページの見込みの整備費等いろいろと出している中で、例えば 49 ページにアウトプットのイメージで各事業のコストを低減に資するようなアウトプットが載っているのですけれども、この中で全て取り入れられているのだろうかと。要は、コストについて機微な情報なので、NEDO 様のほうに上がってこなかったとか、実は含んでいないとか見通しが立てられなかったとか、せっかく技術開発をやったコスト低減のためのテーマなのだけれども、今回の 28 ページの整備費の試算・積算の中に載っていないものというのはないのでしょうか。

【坂室長】　こちらも午後のセッションで詳細を説明させていただきますが、実際、例えば材料、部材を開発し、メーカーがつくるときに、どれくらいこの部材を使っていただけるかどうかというのは、材料を提供する側は分からない部分もございますので、なかなかどれくらい削減できるのかというところの試算が難しいということで、このコスト削減の試算の中になかなか組み込められなかったというものはございます。そういったところも含め、今後しっかりと精査していかなければいけないと思っております。

【飯山分科会長代理】　そうなりますと、やはりアウトカムの水素ステーション全体で幾らになるのかというのを、ある意味、検討するテーマ、事業といいますか、それ専門の活動のアクティビティというのは必要なのではないかと思います。それは第三者の目で技術をしっかり評価するのと、あと鋼材だったら鋼材のメーカー様が今回事業者ですけれども、使う側の方々のヒアリングなりなんなりを集計し、ステーション全体のコストはこのぐらいになるはずだとか、あるいは吸蔵合金のように、量産といいますか、台数を出したときのコストが分からない場合でも、習熟係数を持って推算できるすべを持っている方はおられると思うので、そういった第三者がやるためにお金を NEDO が事業としてやる。それは DOE でもやっていますよね。あのように横断的なコスト全体を毎年リニューアルして俯瞰するような活動が今回のような事業にはどうしても必要ではないかと考えましたが、いかがでしょうか。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。私自身も今回全体を俯瞰したところ、やはりなかなか全体像が把握できないといいますか、企業も研究開発はやるけれども、実際どれぐらいコスト低減できるのかという詳細なところまでなかなか考えられなかった等いろいろな要因がございますので、やはり NEDO がリーダーシップを取って、その材料を提供するところ、そしてメーカーも含め、しっかりと情報を集めて、この水素ステーションのコスト低減のロードマップ、将来像として、現時点ではここまで来ている、将来的にはここを目指そうというようなしっかりとした調査なのか、定期的にレビューしていくような取組というのが非常に重要だと思っておりますので、ご指摘を含めて検討させていただきます。

【飯山分科会長代理】　ぜひ、そこに少しお金を使ってもいいのではないかと思いましたので、よろしくお願いします。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございました。

【池谷分科会長】　それでは、原田委員お願いします。

【原田委員】　まず運営費のコスト低減が見えてきたであるとか、規制の適正化にかなりプラスになる、国際標準化についても大きな成果があったということで、非常に全体としてはよい成果があったという印象です。また、特にヘビーデューティービークルについてプロトコルをつくられたとか、当初目的に入っていなかったパイプラインとかいろいろな付加的なものも入ってきたのは、まさに非常にタイミングとして重要なものですので、よかったものと思います。一方、米国の「National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap」、それから韓国、豪州でも「ハイドロジェン・ヘッドスタート」など、各国より加速している中において、これが今から見て何か不十分なものがあるかどうかというような観点として、逆に費用については先ほどインフレであるとか、建設費の高騰等の影響というのはあまりここでは含めていないということで、私もこの評価に含める必要はないと思うのですけれども、ただ全

体としてどのくらい効いてくるのかというようなことをイメージとして持っているのかどうかをお教えいただけたらと思います。

また 2 点目は、飯山先生のお話と全く同じ内容を事前質問でさせていただきましたが、やはりこの部材が、例えば低価格材料に差し替えられたときに、結局何グラム、何キロが代替されて、その製造費がどれだけ低下し、結果的に例えばモデルステーションの低下にどの部分が寄与するのかというのが分からないと、引き続き研究すべきなのかという費用対効果を分析できないように思いまして、その点で残念ながら全体感があまり理解できなかったと思います。一方、これも質問させていただいたのですが、これが水素ステーション以外のいろいろな水素関連であるとか、また水素以外でも適用の可能性があるのかどうかということを一つの部材についてご回答いただいたのですが、これら全体としてどれくらい本来の水素ステーション以外の日本全体の水素の取扱いに寄与するかということも分析されると、より事業の意義が出てくるかと思います。

最後にマネジメントについてなのですが、本当にいろいろな個別の事業であるとか、別々の企業様が動かれている中で、マネジメントで全体としての調和を取っていくとか、効率を上げるというのは大変重要だと思いますけれども、そういう意味において、例えばこういうことでマネジメント機能が発揮できて、より事業がスムーズにいったとか、コストが削減できたという好事例があればぜひ教えていただきたいです。以上でございます。

【坂室長】　最初にいただいた海外との状況の不十分かどうかという観点でいくと、我々は定期的に海外の機関と情報交換を行い、先ほど申し上げた国際のインフラワークショップなども通じて、海外の取組状況も把握しながら日本にフィードバックするような取組をさせていただいております。

また 2 点目、インフレのところをどのように評価されているのかという観点ですが、我々残念ながらそこまで詳細な分析はできておりませんが、いろいろ IEA の報告等によると、プロジェクトの見込みが 2 割、3 割膨れ上がったとか、場合によっては 50%膨れ上がったという話も聞いておりますので、そういったところの影響も少し考慮すべきとは考えております。

また、部材に関してどれぐらい寄与するのかというところを、我々も実は非常にそこは知りたいところなのですが、やはり材料メーカーと装置をつくるメーカー、そこがしっかりとコミュニケーションを取っていないので、どれぐらい部材として使うのかというところが現時点では明確にはなっていないという状況ですので、そこもしっかりと NDA なり機密情報の保持を確保した上で情報交換をしながら、そこの部分については定量的にやっていきたいと思います。その上で、水素ステーションとか全体にどのように寄与していくのかというところですが、当然、水素ステーションを目的とした事業でございますが、そのほか鋼材に関しては水素を扱うところは何でも効いてくるところですので、例えばパイプラインのところもそうですし、そのほかの発電所の配管のところもそうだと思いますし、どんどんそういったところに適応するような形でこの事業としての波及効果としての影響もしっかりと試算できればと思います。

それからマネジメントの観点は、残念ながら具体的なところは申し上げることはできないのですが、我々の基本的なスタンスとしては、横連携といいますか、成果報告会、そしてこの全体のレビュー間を通じてしっかりと進捗を管理し、リアルタイムで情報を共有していく。NEDO のほかの事業ですと、事業が終わった後に成果報告会をするような形ですけれども、我々は事業の途中で毎年レビューしていく。そして外部に見せてしっかりと意見をもらう。そういったところを通じて、ある意味、緊張感を持ってマネジメントをしているところは、定性的には非常によい効果があったのではないかと思っております。以上でございます。

【原田委員】　ありがとうございます。特に 3 点目のところ、一部整備費については、もちろんこの事業がということではなく、全体として下がらなかったということで未達成な部分があるといった評価にな

っているとすると、この水素ステーション以外のところで将来的にこれくらいのコスト削減に日本の水素全体として寄与するということをむしろ言っていただくほうが、これは三角だけれども将来的にはもっといいことがあるのだというような正当な評価に結びつくのではないかと思いますので、ぜひそういう記載の在り方も含め、ご検討いただければと思います。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。参考にさせていただきます。

【池谷分科会長】　少し今の点で私からコメントをいたしますと、部材に関しては圧力の環境下が違うので、そんなに簡単に「ほかのところに使えます」とは言い切れません。今回は特に超高圧のところに使うことを目指していますし、ここまで高い圧力をほかの分野で使うというのは、ほぼないと思いますので、その辺を少し考えてNEDOとしては発言を行ってほしいです。

【坂室長】　失礼いたしました。

【池谷分科会長】　それでは、櫻井委員お願いいたします。

【櫻井委員】　飯山先生と原田先生と同じところで申し訳ございません。やはり28ページのところの達成見込み、アウトカムに三角がついていて、コストダウンのところの37ページが丸であるというふうに整理されているところが非常に引っかかっています。量産効果で説明なさっているのですけれども、量産効果であれば、先ほど飯山先生がおっしゃられていたように、その台数が出たら達成できるのだという書き方をされてもよいように思います。その点については、先ほどの議論で伺いましたので、回答は不要ですが、さらに28ページのところで、目標の下のほうに「上記目標値は、本事業で実施しない部分の規制見直し、民間企業の取組を含めている」との記載がありますから、不確定要素が入った中での目標設定になっているということだとすると、今この部分をどのように評価なさっているのかをお聞きしたいです。

また、もう一つは、同じように28ページで、今、福島実証で大型車用のステーションを造られたといったところで、いずれ目標値とかいろいろ出てくると思うのですが、後継事業も始めている中で、次のアウトカムをどう設定していくのか。具体的な数字というのはこれからだと思うのですけれども、現状での考え方についてご紹介いただけると助かります。今はFCV用の300Nm³/hというのが造られていて、今度大型車用になると、その10倍といったところを目指すのではないかと思うのですけれども、それとの関係を含め、今後どのように整理されていくつもりなのか。現状で構わないので、ご紹介いただける範囲でお願いしたいと思います。

【坂室長】　ご質問ありがとうございます。まず1点目の目標値は、本事業で実施しない部分の規制を見直した民間企業の取組を含めているというところなので、申し訳ございません。残念ながらNEDOの中でそこまで調査をして、どんな取組があってどれくらい寄与するのかというところは調査をできておりません。先ほど飯山委員からご指摘いただいた今後NEDOの中で評価する中で、NEDOとしてこれだけ効果があって、ほかの民間の事業だとか、規制の見直しの中でこれくらい効果があったというのは、しっかりと試算してそこも含めた検討を行っていきたと思っております。

また、2点目の大型車向けのヘビーデューティー用の充填の件に関して、現在新しく新規事業、後継の事業の中でやっていて、本事業の中では一旦この整備をする、大型向けの水素ステーションの整備をしていく。今後、大型車両向けのプロトコルをしっかりとつくり、そして標準化に目がけてデータを取っていくところが重要なところと考えております。具体的には、ノーマルフローだとかミドルフロー、一部ハイフローの部分も含めてしっかりとプロトコルを検討していくところ、そして海外とも共有をしながらやっていく。また計量の部分、重量法では大量に水素を測ることはできない中で、マスターメーター法という方法を用いて、低コストでしっかりと評価、計量をできるようにしていく。さらに、それをラウンドロビンテストで海外の標準化の機関と調和を取っていく。そういったところで、このHDV用の水素ステーションにもしっかりと取り組んでいきたいと考えております。

【櫻井委員】　今後の技術開発のポイントについて今整理をいただいたのですが、28 ページのところに 30 年度見込みで整備費 3.1 億円、1,300 万円/年の運営費というのが出ているのですけれども、大型が出てきたときにこの数字はどう見直されるのかという考え方について説明をいただきたかったのですけれども。要するに、すげ変わってしまってはいけないと思って、これまでの経緯を含めてどうこれを整理するのかというのが非常に気になっておりました。質問の仕方が悪かったので失礼いたしました。

【坂室長】　失礼いたしました。こちらは 2030 年ということで資料のほうに提示してあるとおり、手元の資料では修正されておりませんが、運営費のほうは 1,500 万円程度を見込んでおります。ここに関してはあくまでも 1 時間当たり 300Nm³/h の小規模の水素ステーションを対象としたものでございまして、HDV 用に関しては別途考えなければいけということで、これは全く別物として理解していただければと思います。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。ここについては、是非、折角作ったものですから、よく見直していただいて、次の事業につながるように整理していただけると非常に助かると考えますので、お願いしたいと思います。それでは、丸田委員お願いいたします。

【丸田委員】　ここの話ばかりで恐縮でありますが、やはり 29 ページあたりのステーションの話でございます。技術開発と量産で落ちる部分のほかに課題になってきているだろうというのが工事費の問題でしょうか。もちろん研究開発とは相入れないがあるかもしれませんが、やはりここの部分を何とか原因を切り分けないと、さらなる低コストというのがなかなか見えてこない。日本の特殊事情で、工事費が高いとかエンジニアコストが高いというのはあるとはいえ、規制的な見込み、規制的な緩和などでもう少し頑張れるところもあるのではないか。この辺をどう突き詰めていくかは少し検討が必要かと思います。

それから 2 点目が、40 ページあたりの研究開発の意義の副次的効果に関するところで、直近の水素基本戦略が改定され、あそこに明示的に書いてあるのが、「技術で勝って、ビジネスでも勝て」ということが今の水素基本戦略に書いているわけです。今の NEDO 様のこの事業のアウトカムというのは、「世界レベルにコストを安くしろ」ということで、つまり日本がようやく世界レベルに何とかいくというのが目標なのですが、やはり舞台は世界、ビジネスでも勝てと言われると、我々は世界に出ていかなくてはいけない。逆にマーケットは世界のようなところがある。特に水素ステーションも含めて広がっていくというのが、やはり海外であったりもするわけで、そうすると、今回の NEDO 事業で開発されていた個々の要素でビジネス面を拡大していくようなところは当然あるだろうと思います。それは個々の部材とかステーション周りの物品でもあるわけです。ですので、この副次的成果の中には、やはりそういうビジネスでの拡大というのは当然書いていただいても構わないと思いますし、これは NEDO 様の中で整理をしていただきたいと思います。多分、場合によっては、それはなかなかオープンにできない企業レベルの話があると思いますので、それを少なくとも NEDO 内部でまとめられて、少なくともこの水素基本戦略で抱えている新しい「ビジネスで勝て」ということにどれだけ NEDO のこの事業が貢献したかというのを言えるようにまとめておくのが一つよろしいのではないかと思いました。こちらはコメントになります。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。まず工事費の部分ですが、詳細は非公開セッションでご説明いたしますけれども、やはりここが結構な額になっておりまして、なかなかここのコスト削減が難しい状況でございます。その具体的な要因は何なのかというところも今後しっかりと詰めながら考えていきたいと思います。やはり人件費だとかそういったところの高騰の影響もあると思うので、しっかりそこは見極めていきたいと思っております。また、「ビジネスで勝つ」というのはおっしゃるとおりです。海外への展開というところは、残念ながらこの事業の中では若干スコープから外れているようなところではございますけれども、国際標準化の活動を通じてしっかりと国際調和を取りながら、日本の技

術をインプットしていきたいと考えております。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。国際戦略というのは、やはり標準化を取るのはあくまでも国内産業が勝てるように戦略をつくって、国際標準化を持っていくというのが戦略だと思います。調和ではなく、まず国内の産業技術が海外に勝てるように標準化をつくる。言い方は悪いですが、「ひん曲げてでもつくる」というのが本当はありますが、そこまでちゃんと考えてやってほしいところです。調和よりもむしろ戦略を考えてもらえたらと思います。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございました。その点については、恐らく午後にご説明があるかもしれません。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。それでは、三浦委員お願いいたします。

【三浦委員】　質問の前に、この事業全体のご説明について、私は業界でNEDO様の取組を一つ一つ見てきたところでは、この事業はバランスよく幅広くテーマを選定し、よくやられていたのではないかと思います。成果報告会についても、この間の成果報告会及びポスターセッションは、それまでと比べるとよく工夫されていました。これまでは、ポスターセッションについて時間が短く一方通行だと思っていたところが、この間の報告会では、長くポスターセッションの時間を取られ、かなりあちらこちらで議論も盛り上がっていましたし、そういうところはよく工夫されていたと感じました。

2018年に始まったこの事業自体が立ち上がった頃は、まだ水素ステーションが始まって数年だったので、そういう意味では規格も含め、先導的な事業としてよくやられてきたとも思います。ただ、結局技術開発なので、フィードバックの仕組みがすごく大切だと考えます。量産効果によるコストダウン効果についてはメーカー側からずっと申し上げてきて受け入れていただいたと理解をしています。ただ、それをいかに技術開発にフィードバックするかというところ、そういう仕組みが十分ではないと感じています。そこについてどう考えていられるのかは、後で教えていただきたいです。

そして実際、私、採択委員もしてきましたけれども、民間企業からの応募、そして採択と、そういう一連の流れの中で、途中の採択数を見ても分かるように、だんだん採択が減っていきました。質のよい応募もどうしても減ってきて、きちんと採択しようと思うと削っていかざるを得ないというようなことがありました。この事業は低コスト化の技術開発を公募するのですけれども、個々の事業者さんに「よい提案を応募してきてください」と言うだけではインフラのコスト低減は実現できない面があります。そこに行政側のアプローチが必要ではないかと思います。今我々がやろうとしているのは、カーボンニュートラル、水素という新しいインフラをつくっていくということで、「クリエイティブにいかないといけない」わけですが、各事業者もリスクも大きいということで足踏みをするというようなところもあります。新しいインフラの低コスト化をNEDOとして、どのように取り組むのかということが大切かと思います。

アウトカムが水素ステーションの低コスト化となっていますけれども、基本的にこの低コスト化は、水素ステーションの事業の自立化のための一手段として選定されているものだと思います。そういう意味では、水素ステーションの自立化はどこへいったのだということだろうと考えます。水素ステーションが増えなくなっていることは、水素ステーションが自立化できていないことが原因で、低コスト化が実現していないことが原因ではありません。水素ステーションの整備事業には補助金が交付されています。インフラの事業者にとっては補助金が入っているので、表面的にはコストが下がった形になっています。それでも水素ステーションが増えないという形になっています。

考えるべきは、インフラとしてどう自立化をするかということで、低コスト化はその手段のひとつです。低コスト化よりも自立化に向けてどうするのか。これはNEDOの枠組みを確かに超えているとは思います。行政機関としてMETI様とどう協力をしていくのか。それが多分大切なことだと思います。

また最初に飯山先生や原田様が言われたように、コスト分析のところをきちんとやるべきですし、そういう分析をしたもの、もしくは調査したことをなるべく広くフィードバックしていろいろな人たちに関わってもらうことが、新しいインフラの構築には必要です。そういうフィードバックが足りないと常々感じてきています。コスト分析というのは学問ですから、大学の先生など声をかけてやってもらうといった取組もあるのではないかと思います。メーカー側としては、仕様があってコストがあるわけですからコストを仕様と別に議論するのはやめるべきだとも思います。アメリカやヨーロッパの水素ステーションと日本の水素ステーションは仕様が違います。その仕様が違うものを、アメリカ、ヨーロッパ並みのコスト・2億円程度にしろと言っているのがこの事業です。日本はNEDO様が頑張って技術開発を中心とした新しい水素ステーションを開発していますけれども、アメリカやヨーロッパは例えば汎用の小さな圧縮機を使って水素ステーションをつくるということをやっています。初期は汎用の小さい圧縮機で、FCVが増えてきたら小さな圧縮機を2連にするというアプローチをしています。基本的に欧米と水素ステーションの規模仕様が違うということをちゃんと理解をすることが必要です。そういう意味で、仕様とコストを結び付けた分析・調査をして、その分析の結果を共有、フィードバックすることが大切ではないか。

最後に、先ほど材料の話がありましたが、材料の技術開発は池谷分科会長が言われるように、材料開発をしても直接コストは下がらないです。ただ、意味がないかというとこれも難しく、メーカー側からすると選択肢が増えること自体はありがたいです。今回、メーカーの各事業者に「この材料の技術開発は本当に必要なのか」を聞いて回りました。メーカー側は「この材料開発があればコストが下がる」とは皆言いません。「ただ、選択肢が増えるのはありがたい」と言っていました。

そういう意味で、最初にお話しした全体の事業のコントロールをどうするのかということに返ってくると思うのです。応募して採択によってやられたことに関してはすごくよくやられているものの、全体のコントロールをどうするかという仕組みづくりを工夫してほしいという形なのではないかと思います。長くなりましたが以上です。

【坂室長】　全てに解答できるわけではないですが、R&Dに対するフィードバックというのは、これからもしっかりと続けていきたいと思っております。また低コスト化の部分、そして自立化の部分ですが、我々低コスト化を目指してきたわけですけれども、そもそも最終的な自立化というところ、補助金が入っているというご指摘もございましたので、我々研究開発としてどこを目指していくのかというところは、政策的なことも含めて経済産業省と一緒にしっかりと検討していきたいと思っております。

それから、今回ご指摘いただいた、調査をして分析をしていくというところはぜひやっていきたいと思っております。我々海外の事例だとか、材料の部分でなかなか難しい評価になるかもしれませんけれども、しっかりとそこは全体感を持っていく。そして研究開発の項目に落とし込んでいけるような、外部の目にさらしながらしっかりと取り組んでいきたいと思っておりますので、よろしくお願いいたします。ありがとうございました。

【三浦委員】　ありがとうございます。

【池谷分科会長】　それでは、尾方委員お願いします。

【尾方委員】　今日ご説明いただきまして、より内容について理解することができました。もう時間もないので、私から端的に幾つかご質問させていただきたいと思いますが、先ほど分科会長からも「この規格を通じて世界をリードしていく」という話がございましたが、将来的には水素事業をしっかり大きくしていって、世界で日本の水素事業のプレゼンスを上げていくということが大きな目標かと思うのですけれども、この規格化と水素事業の世界でのプレゼンスというところの間に少し私の中ではギャップがありまして、どのようにして規格を立てて、それを世界での日本の水素事業のプレゼンスを上げていくのかといったところのストーリーを教えていただければと思います。

それから細かいことになりますけれども、成果の公開方法について、いろいろな論文とか研究発表とか報告会とかを開催されていて非常にいろいろな形で成果を公開されているのですが、主に発表とか報告会のプレゼンがベースになっておるかと思うのですけれども、せっかくの成果ですから、文書化して後々いつでもどなたでも公開される情報については参照できるような状況になっているのが好ましいと思うのです。そういった形での公開というのはされているのかどうかを2点目として伺います。

それから3点目、FCVの話がメインですが、競合するといいますか、電気自動車なんかも今世界でかなり普及しており、これから10年、20年とたちますと、恐らく電気自動車もかなりの普及が見込まれると思うのですけれども。そういった類似の技術との関連性を見ながら、将来この水素自動車、水素技術の経済的な部分でのインパクトみたいなものも考えられて、将来2030年、2050年というものを検討されているのかどうか、そのあたりを教えていただければと思います。

【坂室長】　ご質問ありがとうございます。規格を通じて世界をリードしていく、水素事業を全体的に盛り上げていくというところですけれども、規格化を通じて、先ほどもご指摘ございましたとおり、しっかりと日本の産業戦略として規格というものを戦略的に使っていくというところは、まさに我々が目指しているところでございます。ここに掲げてあるようなISO/TC197の中で、日本が提案してリーダーシップを取っているところがございますので、そういったところを中心に日本の存在感を出しながら、リードしていければと思っております。この点についての技術的な観点は、是非午後のセッションで説明できれば幸いです。

また、公開に関しては、もちろん我々委託事業に関しての成果報告書のデータベースを持っておりますので、しっかりとそこは文書として提示させていただいているところでございます。

それから3つ目のEVとの比較というところで、私、10月頭にアメリカのハイドロジェンアメリカサミットというところに出張で行ってきたときに同じような議論になっていて、「LDVはもう終わりなのではないか」、「もう水素に関してはHDVの一辺倒になるのではないか」、「もうEVにやられるのではないか」という会場からの質問に関していろいろ議論がされていました。やはりEVですと蓄電池周りの資源制約だとかもございますし、充電時間だとか様々な課題があって、そこは要所要所でそれぞれ水素とEVの特徴を含め、しっかりと共存するような部分があるのではないかという議論はされており、私もそう思うところです。ただ、今後技術が進展するにしたがって、また状況も変わってくると思いますので、そこはしっかりとウオッチしながら進めていきたいと思っております。ありがとうございます。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。1点だけ私のほうからマネジメントについて伺います。45ページの委員会というのは、内部の委員会になりますか。

【坂室長】　こちらは一般に公開するものではなく、内部でやっているものになります。

【池谷分科会長】　評価の先生方がおられるのですか。

【坂室長】　そうなります。そういった方々にレビューをしていただくような会議になっております。

【池谷分科会長】　そのときに、追加項目をそこで決められてきたのですか。

【坂室長】　ここでは追加項目を決めるのではなく、進捗管理ということでやっております。追加項目に関しては経産省とも議論をしながらやっているような状況でございます。

【池谷分科会長】　全体的な俯瞰をしている人がいないという話があったので、ここがそうなのかと思って聞いたのですが、そうではないのですね。それでは、どこでやられているのかがすごく気になるのですけれども。

【坂室長】　全体の俯瞰という観点では、NEDOがPM中心にやっており、経済産業省としっかりと最新の動向を含めて検討しているという状況になります。

【池谷分科会長】　先ほどまでの議論で「三角になっていない。丸になっている」というのがいろいろあったことは後に置いておくとしても、そこで不足しているのはどこなのかというのをNEDOが一人で考えていたのか、それともこういった委員会を使ってやってきたのか、それがマネジメントとして重要なところであって、産業界から聞いてどこが抜けているのかということをちゃんと見るようなマネジメントができていたのかというのが疑問に思い伺った次第です。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。そういった面に関して、全てができているとは私の立場からなかなか申し上げられませんが、今後そういった何か足りない部分があるのではないかといったところも含めて全体委員会でしっかりと指摘できるような体制が必要になってくると思います。

【池谷分科会長】　先ほどの整備のコストの低減というのは非常に大事なところであって、中間評価でいただいた意見に対して、それを達成できなかったというのを感じているので、そういう意味ではこういった委員会が活用できていなかったのではないかという思いが少しありまして、ほかのところもあるのですよと言えばそれでいいのですけれども、その辺の推進の仕方というのは少し考えてもいいのではないかというのが感想です。

【坂室長】　ご指摘ありがとうございます。そういった点では、今後運営について見直していきたいと思っております。

【池谷分科会長】　それでは、時間が来ておりますので、以上で議題5を終了といたします。

6．プロジェクトの詳細説明

6.1 国内規制適正化に関わる技術開発／新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発

実施者より資料6.1に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。

ただいまのご説明に関しまして、ご意見、ご質問等を受け付けます。尾方委員お願いします。

【尾方委員】　ご説明ありがとうございます。基礎研究をやっている立場から幾つか細かいことに言及してしまうかもしれませんが、質問をさせてください。伸び基準を新たに導入されたということで、汎用鋼の利用がさらに促進されるという非常に重要な方向性だと思うのですけれども、この科学的根拠として、伸び基準にすることで大丈夫かということが当然皆様心配になると思うのですけれども、その点はどのような形で担保されたのかということがまず一つです。

それから、冷間加工の加工度の影響に関して、16ページで実際のグラフを提示され、40%という一つの基準を設けられたわけですけれども、このグラフは信用しないわけではないのですが、若干相対伸びのプロットもばらついておりますし、具体的にはどれぐらいの数の試験をされて、そして当然平均などを取って40という数を出されたと思うのですけれども、この一つのグラフからは、何回試験をしてもこのような値になるのかというのは少し疑問が残るので、どれぐらいのデータからこういう40という数を導かれたのかというのが2つ目でございます。例えばエラーバーを書くと、どれぐらいのエラーバーになるのかとか、そういったところが気になります。

それから、溶接の知見も非常に重要な知見で、フェライト、それからオーステナイトの組織分散に関してすばらしい知見が21ページにございます。こういった複雑な組織になっていきますと、オーステナイト中のき裂進展というのが、フェライトが組織を貫通しているようなものでなければ大丈夫だと結論づけられているのですが、こういった違う組織が入っている場合は、界面とかも非常にきっと重要になってくるのではないかと想像するのです。そのあたりの、例えば疲労試験をした場合には、界面が少し気になると個人的に思うのですけれども、特に疲労において、単一の引っ張り試験ではなく、何回も繰返し荷重をかけるような疲労試験では一体どうなのかといったところで、そのあたりはご検討さ

れたのでしょうか。細かい点では以上3点になります。

それから大きなところでは、こうした新たに基準を設けてやるというような形でいろいろな材料を使えるようにする動きは国外ではどういう形で進められているのか、日本の立ち位置がどうなるかも気になりますので、お伺いできればと思います。

【鈴木主任研究員】　まず1番目の質問、伸びに関する安全度ということですが、高圧容器で材料を用いる場合は、強度と延性が大事になります。延性の指標は伸びと絞りの大きく2つ。従来はその指標に絞りというのを使ってきました。今回伸びを使ったのですけれども、伸びの基準として、例えば水素ということを度外視して考えると、規格のSUS316系材料であれば全て高圧で使えます。そこで水素の場合は、水素による伸びの低下を許容しても水素中で規格材料レベルの伸びを維持しているということを延性の基準に置きました。そこから、「実材料の伸び×最低温度のREL」が伸びの材料規格値以上とすること、高圧容器の材料として使える延性のレベルを水素の場合に適合でき、安全であると考えています。

2番目について示しきれていない評価結果もあります。示した図表の評価については、水素のデータはN=2からN=3で取っています。冷間加工度50を超えたところで明らかに影響が大きくなっているというところも加味して判断しました。示した図表では相対比が比較的高い結果が得られていますが、伸びの指標の検討基準ではRELは0.7程度に相当しており、今回の40%までの冷間加工であればRELはいずれも0.8を超えていることから、ばらつきは見えるが、水素では安全であるとの結論に至りました。

3番目は、溶接に関するオーステナイトの金属構造の組織的部分の質問でしょうか。

【尾方委員】　そうです。界面とかがもしかしたら重要になってくるかもしれないと思いました。破壊起点とかそういったところが。

【鈴木主任研究員】　溶接に関しては、溶接の健全性はきちんと確認されていることが前提で、その溶接が水素に使えるかを議論しています。端部とか、粒界がもろくなるといった現象は水素適合性の以前に、溶接の健全性で引っかかる部分と考えています。溶接片を使った疲労評価は実施していないのですが、汎用ステンレス鋼の検討では例示基準のニッケル当量(26.9%)よりもかなり低いニッケル当量のオーステナイト鋼であっても水素中で疲労限度は変わらないといったデータも得られています。溶接技術指針では、溶接健全性の議論に踏み込むよりも溶接金属部の水素適合性を明らかにすることが急務であり検討いたしました。

最後の質問については、国外とは規制の仕方が異なります。国外では、高圧ガス保安法のような法律で材料を細かく決めることはしていません。ただ、日本の場合は、海外で起こった高圧ガスに関する事故等を鑑み、安全・安心を特に重要視し、最初は厳しめの基準が設けられました。今回の事業成果により例示基準が改正されましたが、審議過程において公開の場という別の議論の場が設けられ、技術者・法規制側だけではなく、一般市民を代表する方々も議論に参加し、安全を広く議論した上で漸く実現できた経緯があります。国外と比べて安全・安心にウエートを非常に高く置いているのが日本の規制であると考えています。

【尾方委員】　分かりました。データ数を多分いっぱい取られているとは思うのですけれども、基準の見直しのときにはたくさんのデータを出されることが、皆様の安心・安全を感じるために重要な情報になるかと思いますので、またその辺もご検討いただければと思います。

【池谷分科会長】　ご回答いただく際には、短的にお願いできればと思います。

【鈴木主任研究員】　大変申し訳ございません。

【池谷分科会長】　それでは、丸田委員お願いします。

【丸田委員】　例示基準を持っている我々として、これは仕方がない、やらなくてはいけないことで、成果としては非常に評価できると思います。ですので、後はこれをどうやってプラスアルファとして展開するかというところで興味があるのが、29ページに書いてあるように、これのデータベースの国際貢献、あるいは今まさにご説明されましたアズウェルドのようなところの知見はかなり世界的にもないのではないかという感覚を持っておりますので、規制緩和だけではなく、こういうものをぜひ国際的な展開など、あるいはそういった知見の情報などで日本の立場を取っていただきたいというコメントでございます。

【池谷分科会長】　三浦委員お願いします。

【三浦委員】　このような超高圧水素のアプリケーションで安全に使える材料の範囲を増やすということは取組として意義があることだと思います。ただ、この成果が実際にどう使われているかというようなことのフィードバック、分析といったところが大事なのではないかと思うのですけれども、実際にやられたこの技術開発で、水素ステーションのコストはなかなか計算できないというのは分かるのですけれども、どれだけ実際に使われているのかといったアンケートを取るとか、データとして積み上げることはされているのでしょうか。

【鈴木主任研究員】　この事業の中では行っておりません。参考にさせていただければと思います。

【三浦委員】　よろしくお願いいたします。

【池谷分科会長】　原田委員お願いします。

【原田委員】　私も、これが結果としてどのように利用されて、どう低コスト化するのかというのは今回のスコープではないという理解はしておりますけれども、むしろNEDO様にやっていただくということなのかもしれません。それと今回非常に超高圧ということで、水素ステーションならではの材質ということになるかもしれませんけれども、ちょっと朝のセッションでもお聞きしたのですが、それ以外の例えばタンク側とかそういうところに応用が効く部分があるのか。もし材料そのものとして使えなくても何か検査手法とかそういう研究のやり方とか、そういうことで応用ができることがどれくらいあるのかというのを教えていただければと思います。

【鈴木主任研究員】　タンクは、別のNEDO事業で研究されています。

【原田委員】　趣旨としましては、手法とかアプローチが何か横展開できるかといったところで伺いました。

【池谷分科会長】　では、後でコメントをいただければと思います。それでは、櫻井委員お願いいたします。

【櫻井委員】　溶接のところで健全性が確立されている、要するに「使える、適用可能」といったときの健全性に実は引っかかっておりまして、例えば欠陥の発生率とか、溶接ですと溶接欠陥が多分出てくるのではないかと思うのですが、これは被破壊検査の検査率とかそういうところに影響を与えているのでしょうか。適用できるということは、周辺部分も含めて整備されないと実際には使えないのではないかと思うのですけれども、そういったところも含めてどう考えたらいいのかをお聞きいたします。

【鈴木主任研究員】　高圧ガスに関する溶接の健全性については、既存のJISや特定則で取決めがあります。その取決めに従って、まず高圧ガスで使えるという基準をクリアすることが前提です。その上で、水素にを使う場合の追加の基準を検討したのが本事業です。

【櫻井委員】　そうすると、欠陥の発生率といったところについては、これは影響を与えるか、与えていないかという検査で調べていないということでいいのですか。

【鈴木主任研究員】　この事業で溶接したサンプルは別途、表曲げ、裏曲げやブローホール等、健全性の確認は行っております。

【櫻井委員】　それで影響はないということですか。

【鈴木主任研究員】　影響はございません。

【櫻井委員】　分かりました。ありがとうございます。

【池谷分科会長】　今のところは少し気になります。やはりどう確認して「健全性だ」と言い切ったのかということは、事業者としては説明をできるようにしておいてほしいというのが要望です。

【鈴木主任研究員】　承知いたしました。

【池谷分科会長】　そのほかいかがでしょうか。では、私のほうから伺います。この事業を始めるときに一番の大本は低コスト化という、ステーションの低コスト化という目的なのですけれども、これに対してどういう戦略を持ってこの事業を始めたかというのをちょっと教えてほしいのですが。

【鈴木主任研究員】　資料図で示したとおり、事業開始時点で高圧水素に使える材料というのは、ほかの用途では使用が見込めませんでした。水素に特化した材料しか使えないようでは、低コスト化は望めませんので、他の用途で使うレベルに下げることを念頭に置きました。

【池谷分科会長】　それは分かります。少し言い方を変えますが、何割ぐらいカットできるという計算で始めたというのはありますか。

【鈴木主任研究員】　機器の個別コストの開示は受けておりません。

【池谷分科会長】　全体事業が目的はそれになっているので、その意識なしにやったとなると、私はかなり問題かと思います。

【鈴木主任研究員】　問題には当たらないと認識しております。ニッケル当量低減の要望は（事業実施者の要望ではなく）、当事業以前の「規制改革実施計画」の中で、ニッケル当量低減の業界要望を受けて始めたもので、（安全安心を担保した上で）ニッケル当量をどこまで下げられるかがこの事業の検討事項です。

【池谷分科会長】　分かりました。ほかに質問はございますか。九州大学の松永先生が何かご発言でしょうか。

【松永教授】　大体鈴木さんに答えていただきましたので、大丈夫です。失礼しました。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。そのほかいかがでしょうか。そうしましたら、委員会の設定について教えてほしいのですが、この委員会というのはどんな委員会だったのでしょうか。

【鈴木主任研究員】　本事業のほか、中空試験法、連続陰極水素チャージ法など、鋼材系を扱うようなほかのNEDOプロと情報共有や技術的な議論を行うことで、それぞれの実施者が有する知見や知識をほかの事業に展開させて、より広範で深い議論ができるように設置されました。事業を超えた連携の枠組みになります。

【池谷分科会長】　これは外部の先生をお呼びしていたのですか。

【鈴木主任研究員】　ステアリング委員会自体は、本事業の体制とは別の外部の委員会でございます。

【池谷分科会長】　そのほか、メーカーや他企業をお呼びになったのですか。

【鈴木主任研究員】　そうなります。委員の方には材料メーカーだけではなく、機器メーカー等も入っていただいていますし、あとは金属の学術系の大学の先生方にもご参加をいただいてステアリング委員会を構成しています。

【池谷分科会長】　そういう意味では、非常に外部からの意見も聞いているということなので、先ほどの原田先生のご質問に対しては、ある程度の考えを持ってやっていただいたものと考えてよろしいでしょうか。

【鈴木主任研究員】　はい。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。時間となりましたので、以上で議題6. 1を終了といたします。

6.2 水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
長寿命高圧水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発

実施者より資料6.2に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。

それでは、ご意見、ご質問等を受け付けます。三浦委員お願いします。

【三浦委員】　2点伺います。1点目は、6ページで経年劣化の影響が見られるのかどうかです。年度別で6ページでは漏洩件数が説明されていますが、設置何年目のものがどれだけの漏洩度数かという分析をされているのでしょうか。

それから2点目が、シール継ぎ手のプロジェクト全体についてです。HDVに向けた水素ステーションにスポットライトが当たっていますが、この HDV になると配管径が大きくなるとか充塡時間が延びるとか、要するに冷やしているので低温の時間が長くなるとか、もしくは流速が速くなるといった違いがあると思うのですけれども、こういう違いについて、今のLDVに対してそういうことを考えていかなければ成果を生かせないと思うのですが、そういう視点での取組というのは何か検討されているのでしょうか。

【髙井シニアマネージャー】　1つ目について、6ページで示したように実際、漏洩件数は推移しているのですけれども、水素ステーションは設置当初から徐々に年を取ってきており、一応この件については、今回報告はしませんでしたけれども、設置当初1年目、あるいはずっと経年になってきて、その2つにピークがあるという傾向が見えております。これをもっと明らかにするために、各事象をパターン化し、こういうことはどの段階で起こり得るのかを後継事業の中で詳細にメンテナンス並びに経年の両方から絞って調査をしていきたいと思っております。

それと2件目の HDV ですが、これに関しましては、おっしゃるように配管径が今の1㎝ぐらいではなく、もっと大きくなることが当然考察されます。それに合うような、どこまで高圧にそれが対応できるのか。今 1 インチぐらいまでは物としてはあるのですけれども、まだ高圧で使われておりませんので、それがどうなのかといった部分も含めて後継事業で HDV 向けの要素も含めた評価の方法を構築していく計画を進めているところでございます。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。原田委員、お願いします。

【原田委員】　2点質問がございます。まず1点目、こちらのシール材の強度を高めるということは、要するにホースを交換しなくていいということに直結し、それで低コスト化をするのか。また、交換のときの何らかの休業をしなくてはいけないとか、また部品が来るまで待たなくてはいいけないといった意味の両方があるのかもしれませんけれども、何をもって低コスト化に結びつくストーリーなのかを教えていただきたいです。

2点目は、ヒートサイクルですとか、それから物理的な機械的疲労に対する強化ということであれば、これはいろいろな水素関連のもの、ステーション以外に使えるような気がするのですが、そういう理解でよろしいでしょうか。

【髙井シニアマネージャー】　最初のコスト低減のポイントですが、まず非常に大きいのは、漏洩事故として事故を起こすと少量の事故でも昔は営業停止だったものですから、非常に営業期間が絞られる制約、利便性が損なわれるということで、それに対するコストが一つ。それと交換することで交換頻度がどんどん高くなれば、交換するためには機械を止めて工事をし、また検査をして品質を確保してといった一連のコストもかかる。別に漏洩を未然に交換で防いだとしてもコストは上がるということで、できるだけ長期間をノーメンテナンスで使えることが重要だと思っております。

2点目は、水素の高圧ということでなくても、水素に対する劣化というものは当然水素のほか、どんなものでも表面の粗さが荒れてくると漏れる、径が広がると漏れるという知見は当然ほかの分野にも広く応用できるものだと考えております。そのために、もう少し理論的な解明と論理づけのメカニズムを明らかにし、これからいろいろ紹介していくことも念頭に置いて次のステップへ進みたいと思って

おります。

【池谷分科会長】　よろしいでしょうか。それでは、飯山会長代理お願いします。

【飯山分科会長代理】　26 ページの水素ステーションの休業日数の削減、1 日/年及びメンテ期間の短縮二、三日/定修についてお伺いします。先ほどの原田先生のところと関連しまして、休業日数というのはトラブルによる休業日数が 1 日ぐらい減るのではないかといったご説明と理解したのですが、それで合っているでしょうか。また、メンテ期間の短縮が 1 年に 1 回の定修当たり二、三日削減されるといった意味になるのか。このあたりの根拠として、今回事例でいろいろご説明をいただいたのですけれども、どういうところがこれに寄与しているのだろうかといった点を説明いただけると大変ありがたいです。

【髙井シニアマネージャー】　この実用化に関する効果として休業日数のトータルが、日本全国の中で各ステーションについて平均してみると、1 ステーション当たり水素漏洩がなくなってくると 1 日程度といった計算上の設定だったと思います。メンテ期間の短縮に関しては年 1 回、これも今のところ短いところでは 1 週間、長いところでは 2 週間以上停止期間がかかっております。それに関しては定期的なメーカー推奨である部品交換というものもかなり含まれておりますので、そういうもので耐久性が上がって 2 年間持つとなれば、平均すると二、三日、1 週間かかったものが 5 日で済むということで考えております。この辺の数値は、各ステーション事業者についての定性的なヒアリングで導き出されたものと認識しております。

【飯山分科会長代理】　ありがとうございます。そうすると、ある意味、交換の頻度は間隔が空くけれども、交換することはもちろんあるので、そのときは例えば交換しなかったときに二、三日減るが、交換する年は元の日数がかかる。その平均だという理解ですか。

【髙井シニアマネージャー】　そうご理解いただければと思います。

【飯山分科会長代理】　分かりました。ありがとうございます。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。丸田委員、お願いします。

【丸田委員】　精緻な研究で意義は大変あると思います。その上で 9 ページについて、もしこの九大の加速劣化の考え方がそのとおりであれば、これは非常に有効性が高く、ほかにもいろいろ使えるだろと思いました。ただ、※印 1、2、3 が書かれていないので分からなかったところと、それで下の加速倍率 2 と上の加速倍率 1 との違いがなかなか分からないところがございます。これは後でしっかり書いていただければよろしいかと思います。

それから評価結果で 2,000ppm 超だと駄目だが、500ppm だと漏洩なしといったところで、多分これは何らかの背景に考えがあって線を引かれたと思うのですが、それの根拠というのが必要だと思いますので、そこはご説明いただきたいと思います。

それから、この加速結果の方法論として確立するために 4、5、6 の差というのを突き詰められているのか、まだ検討中なのか。これがよく精緻に研究をされているのであれば何か見えてくるのではないかという気がいたしました。

【髙井シニアマネージャー】　明確にお答えすることができないのですが、これはメーカーから頂いたデータをそのまま載せてしまい、それを代表して説明するものとしては非常に申し訳なく思っております。漏洩なし 500ppm 以下での反応ありというのは、これは閾値を彼らが漏洩あり、なしのところで……

【池谷分科会長】　本日、フジキン様は入っていられるのでしたか。そうであれば、フジキン様にご説明をいただくとよいように思うのですが。

【髙井シニアマネージャー】　入っておられないと思います。

【池谷分科会長】　それでは、後から文面で返してもらうということでよろしいでしょうか。

【丸田委員】　これは重要な点と思いました。原簿のほうにもあまりないので、これはよく書いていただくとよいと思っております。

【髙井シニアマネージャー】　承知いたしました。

【池谷分科会長】　これについては、事務局を通して回答を即座に出してほしいということで、よろしくお願いします。ほかにございますか。櫻井委員、お願いします。

【櫻井委員】　少しうがった見方をしているかもしれませんが、今回の報告のスライド 4 ページのところに①から⑤までやりましたと書いてありますが、その中で①から④まではこのスライドの中で説明をされていて⑤だけが抜けているのはなぜかと。そして「シール成果に基づく機器開発」という名称で開発となっているのですが、よく中を見ると、評価が事業原簿も含め実施のところまでになっているので、最終目標と成果のところと、やっている内容について内容の表し方が適切ではないように思いました。それで成果のところまで疑って見えてしまったのですが、この部分について解釈といいますか、説明をしていただいたほうが後々我々誤解しなくていいのではないかと思い、少しコメントをいただければ幸いです。

【髙井シニアマネージャー】　サブテーマ②と⑤というのは、これは非常に関連しており、②各機器メーカーのほうで強制劣化法の妥当性を確認して、なおかつ、それに基づいた機器開発をして評価実施をするという連続した作業になっております。今回、成果の意義のところでも、サブテーマ②とサブテーマ⑤で加速耐久性試験と、それを実機で評価したという結果として 2 つをまとめたような形でご報告させていただきました。非常に分かりづらい構成で申し訳ございません。

【池谷分科会長】　よろしいでしょうか。

【櫻井委員】　さらに言えば、終わっていないのではないかと思ったのが、27 ページの次の計画のところに「実用化検討」と書いてあるので、評価したけれども使うかどうかといった点にたどり着いていないのではないかと、この部分はどうなのだろうかと疑問に思っておりますので、どういうステータスにいるのかを説明いただけたらと思います。

【髙井シニアマネージャー】　実際、継手に関しては改良継手ということで材質の硬度であるとか、テーパー部の先端の形状等で一定程度の効果があるというのは見えてまいりましたので、実際に商品としてそこまで追い込めるかどうかというところが今後の課題になってきております。また⑤の機器開発に関しましても、設計と検証におきましてはほぼ問題ないレベルまで来ましたので、今後それが実装機器として製品化されていくというのが今後の取組になると考えております。

【櫻井委員】　どうもありがとうございました。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。尾方委員お願いします。

【尾方委員】　まず低コスト化に関して、恐らくシール材とかピストンリング材は、そもそも部品としてはそれほど高くないものと想像しますが、交換コストがかかるのが問題かと思います。例えば交換でステーションを止めるというのもありますけれども、交換にかかる工数を減らすということで、例えば機械の設計を少し工夫することで交換を非常に容易にするといった考えはあるでしょうか。

それからもう一点は、先ほどの疲労試験を考案されたということで、いろいろ検討されてこれに到達したのではないかと想像しますが、どういうことを検討されて最終的にこの加速試験手法にたどり着いたのかというのを教えていただければと思います。

【髙井シニアマネージャー】　最初のコスト低減、部品交換に関わる工数に関しましては、実際これを交換するときには完全にピュアな水素雰囲気が一旦壊れてしまいますので、それで取り外し、それから交換作業、組立て、気密試験、それからまた組み付けて系内をピュアな水素に戻すという、実際の交換工数よりも、その前工程、後工程のほうがどうも長いような気はしております。

それともう一つ、加速評価の方法なのですが、実際に劣化といいますか、ずっと現場で使ってきたリングとかO リング等を分析して、新品のときに比べて何が変わっているのかを解析いたしました。そうすると、使っていると軸であれば内径が広がっている、あと固定されていても圧力が振幅する中でOリングが動きますので、それで表面が擦られて荒れるというところが主要因という解析をして、それを模擬的に再現するような形で加速試験を設定いたしました。

【尾方委員】　分かりました。ありがとうございます。

【池谷分科会長】　それでは、私から１点。結局漏洩は抑えられたのですか。

【髙井シニアマネージャー】　最初のところにあるように、いまだにほんの僅かな微少漏洩まだ完全に抑え切れておりません。

【池谷分科会長】　そうなると、交換の度合いをいつ頃にするかというのは大体分かってきたのですか。

【髙井シニアマネージャー】　大体、今メーカーで使っている材料等で指針が示されていることだと私は考えております。

【池谷分科会長】　漏洩はとにかく一番事故につながりますので、多少オーバースペックといいますか、安全に見ているということでもよいので、いつのタイミングで交換するかということは少しまとめていただけたらと思います。

【髙井シニアマネージャー】　おっしゃるとおりです。

【池谷分科会長】　ここでもし何か事故を起こすと、折角、ここまで来た進捗が全て返されてしまいます。私の経験でいくと、あるときにホースで１回漏れまして、それが大問題になって、それですごいプロジェクトをつくらなければいけなくなったこともありました。確かにピュア水素の環境を整えるというのは非常に時間がかかることはよく分かりますが、安全性については担保してほしいというのが私の希望であり、ぜひそれを成果報告の中にまとめていただけることを望みます。そして、それは公表していただけたらと思います。ほかにございますか。どうぞ。

【飯山分科会長代理】　セーフティデータベースなのですけれども、これは極めて重要な活動だと思いますが、27 ページを見ると矢印が右の方に出ないのですけれども、これは終わりなのだろうか。海外との同様な情報を共有化するとか、海外のステーションの情報もセーフティデータベースがあれば、そういった事例を収集し、我々の日本の技術課題に資するべきかどうかも検討するべきであり、HDV にこれから出ていくので、そういったときの仕様の違いでどういうことが起こり得るのかというところもセーフティデータベースを基に考えられるのではないかと思いますので、ぜひ活動を充実されたらいかがでしょうか。

【髙井シニアマネージャー】　有益なコメントをありがとうございました。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。それでは、時間となりましたので、以上で議題 6.2 を終了といたします。

6.3 水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／
HDV 等の新プロトコル対応の水素燃料計量システム技術と充填技術に関する研究開発

実施者より資料6.3に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。

それでは、ご意見、ご質問等を受け付けます。櫻井委員お願いします。

【櫻井委員】　実際に物を見たことがないのでお聞きしたいのですが、15 ページのところを見て何となく分かったような気がしてきたものの、ツインノズルというのは、車の受け口を 2 個同時に使うという意味なのですか。

【森岡上級主任研究員】　おっしゃるとおりです。
【櫻井委員】　そうすると、この 15 ページの絵にあるディスペンサーというのは、中は 2 系統丸々持っているというものなのですか。
【森岡上級主任研究員】　系統としては流量計も 2 つです。
【櫻井委員】　では、全て 2 つ持っているということですね。
【森岡上級主任研究員】　そうです。今のところはそれがスタンダードといいますか、今使われているものはそういう形になります。それが将来的に 1 系統になるのか、どこで 1 系統になるのかというのは、これから選択していくことになると思います。
【櫻井委員】　分かりました。メーター1 個でノズル 2 個というものもあるかなと思ったのですが、そこは今後どうするかを決めていくということでしょうか。
【森岡上級主任研究員】　おっしゃるとおりです。
【櫻井委員】　分かりました。ありがとうございます。
【池谷分科会長】　2 本で一遍になりますか。
【森岡上級主任研究員】　タンク自体、蓄圧容器自体は後ろにつながったものが大きなものとしてございます。
【池谷分科会長】　車のほうはどうですか。
【森岡上級主任研究員】　車は、その中に 2 個から分かれていって、例えば 3 本ずつとか 6 つのタンクに分けていくといったような構造になります。
【池谷分科会長】　では、2 本で一遍に 1 つの体積の中に入れるということではないのですか。
【森岡上級主任研究員】　そうです。
【池谷分科会長】　了解しました。ありがとうございます。
【森岡上級主任研究員】　すみません、発言を訂正させてください。先ほどの点、1 つだそうです。
【池谷分科会長】　それでは、もう一回説明をお願いします。
【森岡上級主任研究員】　容器について今、「分かれている」と発言しましたが、現状「1 つである」と訂正をいたします。
【池谷分科会長】　1 個のタンクに 2 つのディスペンサーから一遍に入れて圧力を上げるということでよろしいでしょうか。
【森岡上級主任研究員】　そうなります。
【池谷分科会長】　了解しました。
【森岡上級主任研究員】　申し訳ございませんでした。
【櫻井委員】　80 キロを 1 つの容器に一気に入れる。そういった容器があるのですか。
【森岡上級主任研究員】　複数の容器なのですが、つながっているという意味で一つとなります。
【櫻井委員】　ブドウのようにつながっているという理解でしょうか。
【森岡上級主任研究員】　そうなります。申し訳ございません。
【池谷分科会長】　後ろの方で、補足があるのならご説明をお願いいたします。
【櫻井主管技師】　櫻井です。今走っている MIRAI で言いますと、タンクを 3 つ積んでおります。それが連通して、あたかも一つの容器のようになっています。HDV はそのタンクがより大きくなっていて、容量が大きい。今回トラックで言いますと 6 本入っているような、そういったタンクの数なのですけれども、配管は 1 つの配管でつながっていますので、ディスペンサーから 2 本入れますが、容器は車 6 つありますけれども 1 つの容器と同じような状態で充填をしているということです。
【池谷分科会長】　ありがとうございます。それを聞きたいと思ったのです。真ん中で切ってはいないということですね。それでは、原田委員よろしくお願いします。

【原田委員】　すみません。これは、もともと何をゴールにしたのか。充填のところのプロトコルですが、10分程度で80 kgを達成するためにやり方を考えたということで、この10分ということに何か非常に大きな意味があるのか。ヘビーデューティーであれば非常にすぐに充填することが乗用車でそこまで重要なのかということと、仮にこれが少し速度を例えば20分でいいのであればツインにする必要ないとか、これとコストのところがどう考えればいいのか。そして何が最適なのかというところの考え方を教えていただければと思います。

【池田事務局長】　HySUTの池田と申します。乗用車の場合は、自動車業界から「3分で満タンにしてほしい」という要望がございました。そのときの水素は5 kgを充填する場合になります。ヘビーデューティーは大体80 kgから100 kgの水素を充填します。ですから、そのために安全に早く入れる方法を開発するのが技術開発でございます。こちらも自動車業界からの要望で、「80 kgを満タンにするのを10分程度の時間でやってほしい」という要望がありますので、インフラとしてはそれを目標に頑張っているところでございます。

【原田委員】　そうすると、80 kg 10分というのがある意味所与で、それに合わせられたということでしょうか。ただ逆に、何かそこを守らないことですごくコストが下がるとか、やり方がうまくいくというようなことはなかったのでしょうか。

【池田事務局長】　それもトレードオフの関係になりますけれども、やはり使う側の利便性をある程度を担保しないと技術開発としては使っていただけないということもありますので、こちらとしてはそれが目標になっております。

【池谷分科会長】　ちょっと今回が「低コスト化を考える」というテーマになるので、そこを考えた場合に、その利便性だけを追いかけるのがよいのかというのは、少し疑問があります。それでは、飯山会長代理お願いいたします。

【飯山分科会長代理】　2本使いと1本使いのハイフローがある、それが候補だと受け取ったのですが、日本は2本使いで海外がハイフローの1本使いだということで、これは国際標準の観点でどう捉えればいいのでしょうか。要はそういうインフラは、例えば電源のコネクタの形状のように各国で違ってもよいのか。それとも世界標準にすべきなのか。それならば1本化をすべきなのかといったところで、どういった感触で捉えられているのですか。

【森岡上級主任研究員】　今ご説明にあった点も含まれると思いますが、やはりハイフロー1本でといったところで、なぜ日本でこの2本使いを選んだのかですけれども、先ほどありましたように180グラム毎秒といった2本でそういった流れになります。一方、ハイフローですと300グラム毎秒1本で充填する。そういったときに何が必要かと言えば、前の発表において質問があったような大口径であるとか、大流速化、それに伴ってインフラ側の圧縮機等々も高性能化というのが入っていきますので、そういったところで現状の日本の技術の中でより充填量が増やせるといったところを見ると、MFのツインといった形を選定しています。将来は国際動向を踏まえながらHFにするのかどうかというのをどこかの時点で見極めなければいけないとは考えていますが、そこで懸念されているような国際標準に対して日本だけガラパゴスのような形になるのは避けていかなければいけませんので、そこは常にウオッチしながら進めていかなければいけないと考えています。

【飯山分科会長代理】　ありがとうございます。

【池谷分科会長】　それでは、三浦委員お願いします。

【三浦委員】　まずマスターメーターの話は難しいので、皆様分かりにくいと思うのですけれども。4ページの説明で一番上の「マスターメーター法計量精度検査方法の高度化」の枠の「成果」の項に3つ「・」があります。3つ目の「・」というのは実はマスターメーター法の話ではなく、従来の流量計の話（重量法でデータ検証をしている）をされているのですよね。

「今後の課題と方針」の項ところも分かりにくいのですけれども3つ「・」がある中で、2つ目の「・」だけ従来の流量計（重量法でデータ検証をしている）の話をされているものと理解しますが、合っているでしょうか。

【森岡上級主任研究員】　おっしゃるとおりです。申し訳ございません。順番と説明が足りておりませんでした。現状、日本にある商用ステーションでデータが蓄積されているのは重量法といったマスターメーター法ではなく容器に詰めた重さを測るという方法でデータを蓄積し、その上で、検査周期を 2 年から 3 年にできるといった判断を今回このプロジェクトの中でもしました。ですので、マスターメーター法の計量制度の高度化のところにこれが入っているということは確かに違和感があるかと思うのですが、我々の中では、そこで、重量法が今既にある程度の技術を持っている中で、マスターメーター法と比較することによってしっかりとマスターメーター法の制度というものを担保していくという意味で並行して進めました。ただ、成果としては、ちゃんと分けてご報告しなければいけなかったと思いますし、今後の課題についても2番目に書いてあるというのは申し訳ございませんでした。

【三浦委員】　皆様に理解していただくことは大切ですので、よく整理してください。流量計については米国・DOE がタツノ様の流量計を米国のプロジェクトの中で使っているなど、日本の流量計が評価されている、よくやっていただいていると思っています。

その上で、海外では HDV に対して、ハイフロー・1 ノズルでやると言っていて、日本ではミドルフロー・2 ノズルと言っているという状況があると理解しています。私もあまりよく理解できていないのですが、ミドルフローで先ほど言った自動車側でタンクを連通している HDV タンクに対してノズルを 2 つ刺すときには、二次側の圧力が当然それぞれ変わるわけです。2 つそれぞれの二次側の圧力(背圧)が変わることが、それぞれの流量計の精度にどう影響するのでしょうか。要は流量計だけでもすごく精度の確認が難しいのに、二次側の圧力が変わるといったことが、流量計の精度開発の中できちんと評価できるような取組になっているのだろうか。それがずっと分からないため、教えてください。

【森岡上級主任研究員】　そのような評価は 5 番目に示されているのですけれども、この左側にあるようなフローの中で、この流量計の背圧などを変えることによって、もしくはここには示されておりませんが、容器をつけてその中に充填していって、圧力がどんどん上がっていったときに流量値が変わるかどうかというのは確かめており、それは大きな差はありませんでした。ご存じのとおり、（水素を自動車側タンクに）入れていけば（時間とともに）流量が小さくなっていく、そういったときの影響は高圧・低圧に限らず、流量が小さくなっていったときに流量計の性能誤差が大きくなっていくというのはありますので、そこの精度を高める意味ではしっかりと評価をしていかなければいけないですが、今おっしゃったような背圧、二次圧の影響というのは大きいものとは考えていません。

【三浦委員】　これはサイエンスかつ技術開発なので、森岡様が問題ないと考えているというのではなく、そこをきちんと技術開発の中で検証していって説明していくようにしてください。

【森岡上級主任研究員】　承知いたしました。気をつけます。

【池谷分科会長】　三浦委員の今の話というのは、15 ページのところが重量法でやっているところを、流量計に変えますよという理解になりますか。

【三浦委員】　1 つ目の質問は重量法での確認でさらにデータを充実させるのですねという質問でした。2 つ目の質問は、これからマスターメーター法であろうと何だろうと、基本的にはこれを流量計で測るので、流量計というのはご存じのように一次圧と二次圧で決まってくるので、1 つだったら二次圧は当該流量計だけに影響するわけですが、2 つあると途中の例えば配管の圧損等によってそれぞれの流量計の二次圧が微妙に変わってくることがある。そうすると測るものの精度が変わってくるので、その精度をちゃんと追いかけられるような技術開発をしなければいけない、そこをフォローしてくださいというお願いです。

【池谷分科会長】　よろしいでしょうか。

【森岡上級主任研究員】　実際、私の報告が不十分で申し訳なかったのですけれども、そのマスターメーター法の評価においては、流量計の一次側、二次側の温度、圧力も測ってそれのデータ解析をしていますので、そういったところの報告が足りなかったのは気をつけたいと思います。

【池谷分科会長】　この重量法では何がいけないのですか。

【森岡上級主任研究員】　重量法は、今乗用車用ですと未来のユニット、アセンブリーも含めてユニットをはかりの上に乗せて測っております。大体フル充填で 5 ㎏を測りますが、例えば 80 ㎏を入れるためにトラックと同じ容器とそれを乗せるはかり用意しなくてはいけない。トラックと同じような重量設備というものをつくらなければいけないということからすると、それをつくるよりも、こちらにありますような流量計とトラックの間に挟むだけで計量ができるといった手法に、ヘビーデューティーになった場合にはこちらのほうが有効であると考えています。

【池谷分科会長】　コスト削減はできるのでしょうか。

【森岡上級主任研究員】　これ自体は、流量計と配管、あとはノズルとかホースがありますけれども、コスト的には非常に重量法に比べれば安価になっています。

【池谷分科会長】　その評価がないと、これは「コスト低減」のテーマなのに、どこにもコストという言葉が出なかったのが不思議だと思いながら聞いていたのです。この事業は何のためにやっているかというとコスト低減であり、何が効いて今回開発をするのか、どのような成果があったのかということを 1 分で教えてください。

【森岡上級主任研究員】　計量に関しては、先ほど三浦委員のほうからご指摘いただいたように、重量法を用いたデータの蓄積により、こちらにあります検査周期を伸ばすことができました。それによって今まで 2 年だったものが、3 年にすることができるといったガイドラインの改定を行いますので、それによって検査周期というものは。イコール検査にかかるコストが低減されるということになります。

【池谷分科会長】　周期が長くできるということで、そこで平均になったということですね。ありがとうございました。そのほか何かご質問ございますか。尾方委員お願いします。

【尾方委員】　充填シミュレーションのところだけ少し教えていただきたいのですけれども、これは具体的には 3 次元の流体のシミュレーションだと思うのですが、具体的にこのシミュレーションでほぼ実機に対する充填現象というのは再現できると考えてよろしいですか。それとも、まだ少し考えなければいけないことがあるのでしょうか。

【森岡上級主任研究員】　まだ今回のシミュレーションなどは、福島に設置される容器に対してのシミュレーションになっています。おっしゃるとおりシミュレーションですので、容器の形状や容量は変えることができると思いますが、そこは逆に、それを評価した後に実証をどうやってするかといったところにも関わっていきますので、本年度から行われている事業の中でも引き続き進めているところです。

【尾方委員】　分かりました。まだ少し検証の余地があるということですね。

【森岡上級主任研究員】　おっしゃるとおりです。

【池谷分科会長】　それでは丸田委員お願いします。

【丸田委員】　4 ページで、新プロトコルに対する水素計量技術の開発は達成度が丸と書いてあり、11 ページのところだと「1 : 500 のワイドレンジにも対応できる」といった目標に対して「1 : 100 以上を実現した」と。お話の中では見通せたということでしたが、もう少し説明をされたほうがよいように思います。

【森岡上級主任研究員】　申し訳ございません。質問票に同様のご指摘がありましたので、書かせていただいたのですが、当初 1 対 500 と考えていたのは 50 キロ毎分で充填しようという設定値を設けていますけれども、実際には 18 キロ毎分というのが今国際的にはマックスになっていますので、そういったと

ころで言いますと 10 キロ毎分というのはクリアしてきているので、日本の MF ツインといったところではそれぞれ半分ずつ流れますので、クリアをしているという意味で達成したと判断しました。ですが、丸田委員のおっしゃるとり、そこが説明されていないと不十分だということは理解いたしました。ありがとうございます。

【池谷分科会長】　それでは、最後に私から。福島センターができたというところが重要だということだけでは事業としてはまずいです。是非これを活用してくれなくては困ります。今後どう活用することによって、低コストのためのテーマなので、それで入れた以上はそのように使ってほしいのですが、何かそういった展開があればご説明願いたいです。

【森岡上級主任研究員】　今後このセンターにおいては、計量、充填双方と、それからプロトコル開発もこれから具体的に進められていきます。そうしていきますと、設定値が変わることによって付随するインフラといいますか、圧縮機、蓄圧器もそうですが、それからプレクーラーの設定温度等が変わっていきますので、そうすると充填側のコストも低減していくことが予想されます。そういったところをこのセンターでしっかりと実証及び確認していきたいと思っています。

【池谷分科会長】　ありがとうございます。実はタイトルが「充填技術の開発」になっていて、そこが気になっていたのです。何か新しい技術開発してくれたのかと思ったら、そうでもなく、評価技術とか検証技術がメインだったので、一つその辺がまた進め方によってはと思いました。今回はせっかくセンターをつくったのですから、今後そこでうまく使っていただいて、ぜひ低コスト化に向かってやっていただきたいと思います。今おっしゃってくれたように、充填スタンドの低コスト化なので、そういう意味では、周辺機器もどう安くできるかとか、そういったところを少しやっていただけるとよいと思います。是非そのように進めながら活用してほしいところです。

それからもう一つ、先ほど「法的な縛りが渡航できなかった」とおっしゃっていたのは、どういった内容になりますか。

【森岡上級主任研究員】　海外で行えなかったのは、高圧ガス保安法等の違いで、まだ海外で「商用ステーションでの実証ができない」という回答が来まして、日本では実際、重量法もマスターメーター法もできているのですが、海外に持っていくと、そもそもステーションでできないといったところがございました。

【池谷分科会長】　分かりました。向こうの安全保安の話になるのですね。

【森岡上級主任研究員】　そうなります。

【池谷分科会長】　了解しました。それでは時間となりましたので、以上で議題 6.3 を終了といたします。

6.4 国際展開、国際標準化等に関する研究開発／
水素ステーション等機器の ISO／TC197 国際標準化の推進と水素品質規格のための研究開発

実施者より資料6.4に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。

最初に 1 点私からよろしいでしょうか。少し教えてほしいのですが、13 ページの「実水素ステーションガスを用いた巻子派遣吠えによる濃度試験」とは何ですか。

【富岡部長】　申し訳ございません。これは何をどう間違えてしまったのか。これはステーションのガスを用いた検知管を使った試験をやっているのですが、低濃度にまで応用できるかどうかというものになるのですが。

【池谷分科会長】　これを開発したということですか。

【富岡部長】　もともとこの検知管というのは市販のものではございまして、ただ、要するに測らなければいけない 0.004ppm という 4ppb という低い濃度なので、それを検知できるかどうかということで、多少ガスの量を何倍か長く流すと一応このような低い濃度でも検知はできますということと、ある程度比較検討ができるということが一応この検討で分かったところです。必ずしも高圧の水素を即座に測る手だてではないので、どう利用するかという問題があるのですが、少なくとも簡易的なサルファの検知としては手法として役立つというところが一応分かりました。

【池谷分科会長】　今回は 4ppb まで測ることができましたということですか。

【富岡部長】　そうなります。

【池谷分科会長】　分かりました。それでは三浦委員お願いします。

【三浦委員】　CHS について教えてください。このストラテジーパートナーというのは、日本の代表として参加しているという意味ですか。

【富岡部長】　こちらは池田より回答をさせていただきます。

【池田事務局長】　HySUT の池田よりお答えいたします。普通の会員ではなく、日本の事務局的な役割を担ってほしいと CHS から頼まれて、この会員ランクになりました。いろいろな会議だとかイベントの案内を私どもで受けて関係者に流すであるとか、アンケートみたいなものを調整するなどを行い向こうに返すという仕事を行っています。

【三浦委員】　要は業界団体として受け手になってほしい、それが今までいなかったからということですね。

【池田事務局長】　日本の代表として受けてほしいといったものになります。

【三浦委員】　分かりました。HySUT 様の説明の ISO/TC197 といった活動はよくやっていただいていると思うのですけれども、この CHS の関係というのは少し趣が違う話だと思うのですが、安全の確立のために国内の例えば、KHK 様も水素センターが出来ましたので、そういうところとはどのように協力しておられるのでしょうか。

それから 2 点目、CHS に誰かが事務局をしないといけないので、それは意義のあることだと思うのですけれども、事務局をやっていただいて、例えば日本の安全にどう寄与するのか、どのように情報を CHS に上げ、CHS の情報をどのように日本にフィードバックして、いろいろな事業者だとかいろいろな人たちに返すといった活動について教えてください。

【池田事務局長】　池田です。1 点目は、KHK 様も CHS の正式な会員になりました。ですから、我々、本来ストラテジックパートナーになる前は通常会員だったのですが、KHK 様が通常会員になって、日本からのデータだとか、やり取りは非常にまた加速されると思っております。

【三浦委員】　最近なられたということですか。

【池田事務局長】　最近になります。

【三浦委員】　KHK に水素センターが出来たのは最近のことですからね。

【池田事務局長】　そうです。それから 2 番目の国際連携的な位置づけですが、今のところ、安全の団体というのは多々ございまして、はっきり言って CHS はあまりまだ盛り上がっておりません。その点では KHK 様も入ったことで、向こうをうまく使う。また少し別な話になりますが、ISO の目的の一つも水素安全でございますので、そのあたりをできるところは連携し、逆に日本からの情報発信を高めていこうという動きもこれから可能になってくると思います。

【三浦委員】　ありがとうございます。先ほどのシール継手もそうですが、要は現実にどう運用がされていて、どんな課題があって・・みたいなことを、国際的にどう連携するかということが大切です。これから水素インフラをつくっていく上ですごく大事になっていきます。そういう意味では、事務局だけではなくて、KHK 様とどう連携するかとか、そういうこともよくこれから検討いただければと思います。池田様のおっしゃるように、まだまだこの分野は黎明期ですので、ぜひそういう前向きな取組にして

いただければと思います。

【富岡部長】　ご意見ありがとうございます。

【池谷分科会長】　それでは、飯山会長代理お願いします。

【飯山分科会長代理】　TC197 の議長を日本が、池田様が取ったというのは大変すばらしいと思いますし、またそのベースを、富岡様がおっしゃったように、データに基づくいろいろな活動を日本がしてきたといったところが非常に説得力のある活動ができたものと確かに思いました。今後とも継続してほしいと思います。そういった意味で先ほどのノズルの件でハイフローと MF 掛けるツインについて、少し教えてください。まず、MF ツインが日本にとって主張する有利となるのか。なぜ日本はそれを主張するのかといったところになります。また、他国の状況として、賛成している国は何かあるのだろうかといったそういう状況をお伺いしたいと思います。

【富岡部長】　私が答えるのが適切かどうかとも思うのですが、基本的には「ミディアムフロー」と称しているレセプタクルの構造は、普通のフローのものと互換性が完全にございます。要するに、ノズルの脱着は両方とも相互にできるということになっています。最大流量だけが 1.5 倍違うということで、今後もしかするとミディアムフローに移行するかもしれないというところも視野に入れながら、恐らく日本のマーケットでハイフロー、ヘビーデューティー専門のステーションというのをどれだけつくるのかとか、ステーションのマーケットの中でどういう構成をするかというのがまだ決まっていないところがございます。ただ、今ある技術で 1.5 倍流すだけであれば、基本的には既存の技術で大体フォローできるということが分かっていて、実際に福島を建てるというところもあり、それから今後の日本の市場の中での動きを考えたときに、ハイフロー専用ではなく、普通の通常の車両も充填できるし、ヘビーデューティーも充填できる。そういうフレキシビリティが日本のマーケットにはよいかもしれないという発想があるということと、それとアメリカでは、基本的にはシングルのハイフローを志向されているようにお見受けをします。ヨーロッパはちょっとまだ分かりません。確かにヨーロッパで実施されているヘビーデューティー用の充填プロトコルのプロジェクトの中では、ハイフローのシングルノズルが一つ上がってはいるのですが、実際問題として二本使いの充填というのがヨーロッパの中では実施されていることもあるので、今日本でやっている機構とは多少違うのですけれども、その意味でヨーロッパではもしかすると市場の中で使われてくる可能性があるのではないかということで、規格屋側から言うと、とりあえず規格としてはそろえておきます。今まだハイフローについては、これからレセプタクルの構造を決めるという段階なので、まだ現実のものでは規格にはなっていない。その中では、いち早く取りあえずミディアムフローだけは規格の中に乗せておいて、あとは市場に決めていただく。私どもとして一番気をつけるのは日本の技術が国際規格の中で使えなくなるということだけは絶対阻止しなければいけないことで、少なくともそれは阻止できている。要するに、MF のレセプタクル構造は国際規格に乗るといったところまで持ってきているので、あと成り行きは、日本も今後どうしていくかというのもまだ決まっていることではないので、今後試験研究の中でといいますか、マーケットが決めていくことだと理解しています。

【飯山分科会長代理】　ありがとうございました。中国はどうでしょうか。

【富岡部長】　申し訳ございません。中国は承知しておりません。

【飯山分科会長代理】　分かりました。ぜひよろしくお願いいたします。

【池谷分科会長】　MF と HF だとノズルが違うのですか。

【富岡部長】　HF は完全に違います。MF とノーマルフローは近いというか完全に互換性を持っているので、一応そういった切り分けになっています。加えまして、中国について頭の中から飛んでいたのですけれども、35MPa の「YHF : Very High Flow」という規格を今取り入れようとされていて、鉄道用の規格をされようとしているものと近い構造と聞いています。

【池谷分科会長】　それでは、櫻井委員お願いします。

【櫻井委員】　8ページでTC197の対象範囲を非常に分かりやすく整理してくれてありがたい表なのですが、ここで2つ気になることがございます。これだけ大きな範囲を扱うといったところで、見込みとしては大体いつ頃までにやるのか、この範囲をいつまでかけてやるのですか、というのがまず分かりません。

あともう一つ、ここを見たときに液水が入っているのですけれども、大型車を対象にするといったときに、アメリカやスペインで見たことがあるのですが、LNGトラックというのが走っていて、結局気体を積むよりは液体を積んだほうが大型トラックには楽なので、我々は気体のほうばかりをやっているので土俵を変えられてしまうのではないかとすごく心配をするのですが、この液水については今どういう見解をHySUT様は持っているのでしょうか。

【富岡部長】　まず、これをいつまでというのは、残念ながら全部をきれいに終了しましたというところまでいくのはなかなか難しいと思います。ここにあるように、もう既に発行済みの規格も、それを改定するという第三次改定まで簡単に進んでいくので、その意味で完全に仕上がる形はいつなのですかというと、あと5年ぐらいを見ています。要するに技術がどんどん進んでいるので、規格をそこで最終的に終了しますとは言い切れないところが理由の一つとしてございます。

それと液水というと、このところを話題として出てきて、もう規格がスタートしているということで、まず自動車用から始まっているのですけれども、当然これはフォローしていかないといけないということで、注視をしながら日本もしっかりエキスパートとして参加をしております。かつ、日本の液水関係の専門家もエキスパートとして参加しております。日本のマーケットがどうなるかというところがまず一つあるのですが、日本としても液水の動きには必ずついていくということで対応を考えているところです。

【丸田委員】　まずは活動していただいてありがとうございます。日本の不利を避けていただいて感謝するところですが、このページでもう一つ気になるのがホースです。Oリングみたいに成果が出てくるのは非常によいことですが、今ホースはどういう現状ですか。

【富岡部長】　ホースは基本的には大体仕上がっているところがあって、今改定をしておりますけれども、現状ある技術についてのホースの規格というのは、今回の改定でおおむね下駄を履くのではないかと理解をしています。

これは余計な話なのですけれども、アメリカの提案で、今日本がプロジェクトリーダーをとって、ほぼ日本の議長国に近い規格になっている。要するに、規格そのものは全部日本がつくっているという形ですので、これも日本の貢献の高い規格です。これは今の圧力と温度であれば大体次の規格で下駄を履けるものと理解しています。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。こういう規格はデータが大事だというのは、よく分かるのですけれども、今回の事業で次のフェーズに向けてデータを集めたというのはあるのですか。

【富岡部長】　シールもそうですし、ホースもまだこれからデータを取るというところで、これは耐久性等の問題で、必ずしも規格に結びつくかどうかは完全には承知しておりません。あとは、「まだしつこくやっている」と言う方もいらっしゃるのですが、水素品質をまだ低減できるというか、緩和できるものはないかといって、例えば酸素、ホルムアルデヒド等を引き続きやっているということで、そのあたりのデータは引き続き取っていきながら、できるだけ「低コスト」という言い方をするのかどうかはありますが、使いやすい水素の環境を整えていきたいというところです。

【池谷分科会長】　今の酸素とホルムアルデヒド、ハロゲン系というのはどこでやっている事業なのですか。

【富岡部長】　JARI様でやっておられます。

【池谷分科会長】　この事業ですか。

【富岡部長】　水素品質については、当事業でやっております。
【池谷分科会長】　ちょっと説明がなかったので。
【富岡部長】　説明をしたつもりでおりました。
【池谷分科会長】　この事業というのは、国際事業でやったということですか。ほかの事業を使ってやったということではなく。
【富岡部長】　水素についてはこの事業でやっております。
【池谷分科会長】　あそこで取ったというデータがそれなのですね。
【富岡部長】　そうです。あれが当該事業のデータになります。
【池谷分科会長】　こういった事業は永遠に終わらないのですよね。どんどん低コスト化するということを含め、事業化を進めれば進めるほどできてくる。そういう意味ではNEDO事業を利用してデータを集めていき、次のフェーズだと私はいつも思っていますので、ぜひ次のフェーズに生かすように今回の事業をまとめていただいて取り組んでほしいと思います。
【富岡部長】　承知いたしました。ありがとうございます。
【池谷分科会長】　それでは、時間となりましたので、以上で議題6.4を終了といたします。

（非公開セッション）

7．全体を通しての質疑
省略

（公開セッション）

8．まとめ・講評

【三浦委員】　ご説明ありがとうございました。全般的には、事業として各事業者様ともアウトプットに向けてよくやっていただいていると思います。あとは、どんな水素ステーションをつくっていくのか、どう整備していくのかも含めて、NEDO様もしくはMETI様でもう少し突っ込んだ議論を行われ、そして柔軟なプログラムづくりが必要ではないかと思っておりますので、よろしくお願いします。
【池谷分科会長】　ありがとうございました。続きまして、丸田委員お願いします。
【丸田委員】　事業者の皆様ありがとうございました。皆様、非常に真面目かつ熱心にちゃんと取り組まれて成果を上げていることを理解いたしました。ただ、世の中は、世界は早く動いているということで、韓国、中国その他の国がもう金に物を言わせてやっているのは事実です。我々が淡々とやっている以上のことをやらなくてはいけないというのが今我々に課せられていることということで、まずはNEDO様へのお願いになりますが、全体感を持った進め方を引き続きお願いしたいです。また、水素ステーションのほかにもサプライチェーン全体を見てということで、これは次期実証において全体での水素のコストダウンというところにおいて、ぜひ一体感を持ってやっていただきたいと思っております。それが、いわゆる「技術でも勝って、ビジネスでも勝つ」という今の改定された戦略にもつながるだと思います。それからもう一つ、やはり民間からのイノベーションはあるはずだという新しい技術をどうやって取り込んでいくかということで、今回も幾つか新しいセンサーやいろいろと面白そうな技術というのが確かにあると思いますので、これをぜひ拾ってイノベーションを起こすような仕組みをしていただきたいと考えます。やはりヨーロッパのようなPPPといったパートナーシップの仕掛けではないので、そこは戦略的に何か入れる仕掛けを考えていただきたいというのが、NEDO様への期待です。
【池谷分科会長】　ありがとうございました。続きまして、原田委員お願いします。
【原田委員】　本日ご発表があったもの、なかったものも含め、全体としては当初立てられた個別のゴールに

対して成果が挙げられたのではないかという認識です。NEDO 様と実施者の方々のご努力に敬意を表したいと思います。特に運営費のコスト削減、それから規制の適正化の道筋、それから国際標準化については大きな前進があったと認識しております。一方で、本日の質疑応答でも何度かやり取りが出てきましたし、私自身も質問させていただいたのですが、この事業全体の目的は低コスト化であり、さらに言うと、もっと大きな目的はカーボンニュートラルに向けた普及というようなことなので、そういう大きな目標の中で一連の個々の事業がどうつながっていくのかというのが少し見えにくかった印象です。それぞれの事業が相互に関係しているとか、また個別のものを全て盛り込むということが逆に非効率になるような可能性もありますけれども、やはり、個別の事業に対して現時点での費用対効果を把握する必要がありますし、それを踏まえた上で今後継続していくのかという判断が必要となりますので、そこはコストベネフィットをきちんと一つずつ見ていただきたいと思います。

また、こうした個別事業の範囲を超えているということかもしれませんけれども、例えば、当初の前提条件を少し変えることで何か大きなコストが下がるというようなご提案があるのか、ないのかといったことも研究結果の生かし方だと思います。例えば、もちろん安全性の担保が大前提ということですけれども、安全性にかかわらないような要求水準を少し緩和することで大幅にコストが下がるというようなことがあるのであれば、それは考慮する必要があるのではないでしょうか。

最後に、この研究以外でのコストの上昇、低下の要素についてはやはり一定把握しておく必要があると考えます。それというのは、一般の国民として、この税金を費やす技術開発による低コスト化というものが、ステーション事業、また水素事業全体のコストにどれほどの影響があるのかというのが、ほとんど影響は仮にないということであれば、そこにどれだけのお金をかけるのかということになりますので、その全体間の中でのこの事業、この事業の個別といったことを少し掘り下げていただきたいと思います。ありがとうございます。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。続きまして、櫻井委員お願いします。

【櫻井委員】　本日は一日ありがとうございました。非常に内容がよく分かるいいプレゼンをしていただいたと思います。そのような中で、全般的なところは先ほどから出ていますけれども、アウトプットに関して達成されているといったところ、全般的な取組としては非常によくやられているのではないかと思います。ただ、既に申し上げているように気になる点としてはアウトカムの見込みをどのように評価していくかというのが一つございます。要するに、不確定要素がある中においてアウトカムがこのように設定されたというところで、せっかく皆様がアウトプットをでるようにきちんと取り組まれていて、それがアウトカムのところにどのように反映されていくかといったところ。その不確定要素がある場合の評価の仕方も含めて一度議論していただいて、後継事業では、このような場合のアウトカムの取り扱いを、ぜひ事業の評価に入れていただきたいと思っております。

それからもう一つ、今回、事業評価として見させていただいたときに、ユーザーの視点に思うところがありました。FCV のユーザーというのは、自動車会社がマーケティングをやられていて非常によく分かっているといったところで、自動車会社の意見というのは非常に大事になると思うのですけれども、今回、商用車をやるのだとすると、トラックユーザーの意見も大切になってくると思います。全日本トラック協会のホームページを先日見たのですが、「環境優良車普及機構 LEVO」といったところで「こちらに補助金があります」と書かれていただけで、全日本トラック協会は何をやるのだろうかといったところがちょっと見えなかったのです。そういったところもあるので、ぜひともユーザーを巻き込んでいただきたいと思います。先ほど来出ているように、縦割りといった中において経済産業省と国土交通省といったところがあるのかもしれないのですけれども、普及したときに国民が得る利益というのは共通のところになると思いますので、ぜひともそういうところも視野に入れていただきたいと思います。トラックユーザーを引き込むためには、何らかのインセンティブが必要かもしれませんが、そ

こも含めてご議論いただきたいと思います。以上です。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。続きまして、尾方委員お願いします。

【尾方委員】　本日はどうもありがとうございました。規格の適正化、コスト低減、国際展開という 3 本柱でこの事業が進められておりますが、今日拝見して本当に成果が上がっていると思いました。本当にこの事業を進められた方々に敬意を表したいと思います。また、この規格の見直し等々の中で、新しい試験法や、あとは材料の新しい水素化での知見みたいなものも出てきているように思いますので、基礎研究をやっている私としては、そういうものを基礎研究側にまたフィードバックしていただいて、そして、それを次のイノベーション、材料イノベーション、試験法イノベーションのシーズとしていただくことができれば、5 年、10 年後にまた新しいブレークスルーが訪れるのではないかと思いますので、ぜひ基礎研究へのフィードバックもお願いしたいと思います。それから、「世界で日本のプレゼンスを示していく」といったところもございました。今後も、ぜひともこのように皆様で力を合わせてこういった事業を進めていただいて、日本が水素の事業の中で世界をリードするといった立場に位置づけることができるように、また努力をしていただけたらと心より思います。

また、質問の中でも少し申し上げたのですが、規格の変更とか試験法の変更、改善等いろいろされてきたとは思うのですけれども、やはり、そういう場合には十分なデータ量というのがあったほうが本当に説得力は増していきますし、特に安心・安全に関わる事項が多いと思いますし、やはりデータ量が安心感とかそういったものに直結していくと考えます。そのあたり、もちろんデータを取るのが難しい試験もいっぱいあると思いますが、そういったところも少しご検討いただけたら幸いです。全体としてはすばらしい事業になったという感想を持っております。以上でございます。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。続きまして、飯山会長代理お願いいたします。

【飯山分科会長代理】　ご説明をいろいろとありがとうございました。本当にこれまでの委員の皆様と同じように、各事業において皆様立派に行われたものと思います。あと、アウトカムの目標についても三角というご説明があったのですけれども、そのあたりが今回の事業の総括というところで、もう少し数値やアプローチ、こういうものを取りまとめるいろいろな分野の事業が並行して進むときに、どのように全体のステーションとしてのコストというものにまとめ上げていくのかといったところが一つの大きなポイントのような気がしました。実はそこは NEDO 様が取りまとめる責任があるのかもしれませんし、逆にそれを取りまとめる手段としてもう一つの事業を何かしら起こして、そこできちんとやっておられる計画テーマの技術を第三者的に公平・公正に評価をし、角度の高いコストはこういう形になりますよというのを見ていくのも一つの立派な事業なのではないかとい感じたところです。特に今回あまり事業の中に入っていなかった工事費とかそういうものがかなり大きなポーションを占めるのであれば、なおさら NEDO 様のところに残された事業として、技術開発の事業でやるところはどこなのか。そこだけは立派な責任を果たしましたよというような説明なり、取組がなされるのがよいではないかと思います。そのように、現在の NEDO 事業で取り組まれている課題がまだどこに残っているかとか、あとは感度の解析、どうやれば一番下がりそうなのかとか、個別の技術はこういったコスト的に見るとどういう価値があるのかとかそういう分析もできると思いますので、そういった能力を NEDO 全体で高めていただくのがよいのではないでしょうか。今回のこの事業は格好の材料で、出発点でもありますし、「NEDO の今後のロードマップの恐らく改定も考えなくてはいけない」といった声もありますので、そういったところの出発点としての現時点での棚卸しをしっかり今回の事業を終了するにあたってやられて、そこから次のロードマップあるいは取組の事業の確実性を高めていただければと思います。

その点で、櫻井委員のおっしゃるように今は HDV 用のステーションがターゲットでございますので、そこはまた乗用車用とは少し違うのかもしれない。そういったところは、運輸会社様によくヒアリングをされて、新しい観点のコスト低減の機会はないのかと。例えばここは省略できそうだとか、ここはスペックダウンしてもよさそうだとか、何かそういったトラックの使い方で出てくるようなものを一生懸命探すとか、そういう活動もしていただけると、誰が来てもちゃんと対応できる。乗用車とは違うプロが決められた時間に決められたように動くだけですので、そういうところでは、また違うコストの低減のアイテムもあるかもしれないという感じもいたしますので、そういったところを工夫し、今回の事業の総括と次の事業への反映といいますか、既にもう始まっていますので、途中からの追加になるとは思うのですけれども、よりよい事業にするために生かしていただければと思いました。本当に皆様ありがとうございました。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。それでは最後に私のほうから講評をいたします。まず今、飯山先生がおっしゃったように前提条件を少し変えてみてコストがもしかすると下がるのなら、それも考えてもいいように思います。また今回の委員会で原田先生からご指摘がありましたが、10 分とは何なのかと。10 分なのか、それとも 20 分でコストダウンが倍になるのなら、やはり 20 分なのではないかと。やはり流通系というのはすごくコストに効いてくるのです。私たちが今使っているペン 1 本でさえ流通に乗っていてこのコストに上がっているので、ぜひその辺は考えていただいて、もう違う方法でもコストダウンができるのならそちらにいこうではないかといったところもありではないでしょうか。

それから、ロードマップは私も国の委員会にいろいろと出る中で何度もつくりましたが、あの目標値を分析する、それをどう NEDO 事業だとか開発事業に生かすかという分析をぜひ NEDO 様にやっていただきたいです。無理なものは無理だと。そうしたら、その前提条件をどう変えるか。ぜひその辺は柔軟に考えられて、METI 様等と相談をされてというのがあると思いますが、そうでないと無理があったのかもしれないというのもあると思いますので、ぜひその辺は忌憚のない意見を NEDO でまとめられるとよいように思います。ロードマップというのはあくまでも業界でこれならいけるのではないか、これなら海外に勝てるのではないかというのが設定であって、あれが黙ってうまくいくのだったらロードマップは要りません。ぜひその辺は分析されるとよいように思います。

そういう意味では、今回福島につくっていただいたのは非常によいもので、あれは私もこの間、NEDO からの推薦をいただいて拝見してまいりまして、非常に勉強になりました。やはり、実地を見るとよく分かります。その一方、これは大変だなと思いました。あれだけの蓄圧器があるとなると少し怖いところでもありますし、そうなるとどうなるかを考えた安全担保とが大事だと思います。ぜひあれを見て、課題をよく見ていただいて、どこにコストダウンの可能性があるのか。例えばここに壁を 1 個造ると緩和できるのだというのであれば壁を造るとか、何かそういったことがあってもよいように思いました。ぜひ NEDO としては、私がやったときには九州大学につくるとか、JAL につくるとかいろいろとやっていきましたが、今回は大きなものとしては福島につくられたので、あれを今回つくったで終わらせるのではなく、あそこを事業の展開をぜひこれからもやっていただいて、継続的に事業をやってほしい。なおかつ成果を出してほしいと思います。先ほどの税金の話もありましたが、国民の税金を使っているのですから、ぜひ有効に使っていただいて、無駄なくやっていただきたいと思います。

そして国際標準化に関しましては、これは何度も言っているように、これは国内産業の優位を持つのが第一です。ちょっと今日の話の中では国際事業だけでクローズしているというのがあったので、ぜひ技術開発のところとかユーザーからの意見を聞いて国内の産業がどう国際展開できるかということを意識しながらデータ取りをするとか、改定を進めていくということも大事かと思います。そうでないと国際標準化というのは、「日本は国際協力をしていますよ」というだけのポーズだけになってしまいま

すので、そうなれば、もしかすると量産技術も 1,000 台ではなく 2,000 台、3,000 台まで進めるかもしれないので、それも意識しながら、逆に産業界からの声を聞いていただけるといいのではないかと思いました。次の事業もあるということをお聞きしましたので、それはNEDOがよく全体を俯瞰しながら、事業間での隔たりがあってはよくないので、ぜひ中心になり、広い視野を持って耳を傾けていただいて聞いていただけるとよいと思います。長くなりましたが以上でございます。ありがとうございました。

【松田専門調査員】　委員の皆様、ご講評をいただきありがとうございました。ここで、オブザーバーで参加されております経済産業省資源エネルギー庁 水素・アンモニア課、板倉係長より一言いただきたいと思います。板倉様、よろしくお願いいたします。

【板倉係長】　経済産業省資源エネルギー庁水素・アンモニア課の板倉です。まずは、本事業に従事いただきました全ての事業者様と委員の皆様、管理運営を務めていただきましたNEDOの皆様のご尽力に感謝を申し上げます。本事業では水素ステーションに関する事業を数多く実施いただきました。我が国の水素戦略において、水素ステーションは重要な根幹事業であると改定した水素戦略にも記載させていただきましたところ、現状を踏まえて分析を行い、目標の見直しや水素ステーションの仕様も含めた検討を行っていく必要性を認識しております。今年度に、後継事業として「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」もスタートさせていただきました。その中で、一部事業では本事業から継続した研究を実施していただいており、より高度な専門的データの習得を進めていただいております。本事業で至らなかった部分の改善点は後継事業に活かさせていただきたく、引続きご指導を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。改めまして、本日長時間のご講評をいただきました委員の皆様とNEDOの皆様への感謝をもって結びとさせていただきます。本日はありがとうございました。

【松田専門調査員】　板倉様ありがとうございました。続いて、推進部から一言お願いいたします。

【坂室長】　委員の皆様、本日は長丁場にわたりご審議いただきまして誠にありがとうございました。この評価委員会にあたって、私、実はこのアウトカムのところが三角ということでドキドキしながらこの委員会に臨みました。いろいろ厳しいご意見をいただくかと思ったのですが、今回こういった形でご意見をいただいて、非常にありがたいお言葉をたくさんいただいたと思います。やはり全体感を持ってしっかりとNEDOとしてリーダーシップを持ってマネジメントしていくところ、そこはしっかりと責任を持ってやっていきたいと思っております。また、現行の後継の今年から始まった事業、そこにいち早く今回の委員の皆様からご指摘いただいた内容を反映して、水素ステーションのコスト低減、さらには水素社会実現に向けてしっかりと事業者含めて一丸となって進めていきたいと思います。本日はありがとうございました。

【池谷分科会長】　ありがとうございました。それでは、以上で議題８を終了いたします。

９．今後の予定

１０．閉会

配布資料

資料１	研究評価委員会分科会の設置について
資料２	研究評価委員会分科会の公開について
資料３	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における技術評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料５	プロジェクトの概要説明資料（公開）
資料６	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
資料７	事業原簿（公開）
資料８	評価スケジュール
番号なし	質問票（公開 及び 非公開）

以上

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（終了時評価）分科会

ご質問への回答（公開分）

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 7 II-27ﾍﾟｰｼﾞから 29ﾍﾟｰｼﾞまで	***「検討結果を踏まえた省令等の見直し・改定が望まれる。」***と、一連に記載があるが、すべて、事務的な手続きだけが残っている。もう、進むはずだということか？技術的な課題、残された課題はないと整理できているのか？それぞれで、レベルが違うことはないのかと思われる。	池谷 分科会長	基準案の策定までは本事業で完了しています。これを高圧ガス保安法の省令等に反映（見直し、改訂）が必要になります。それは NEDO 事業ではありませんので、手続きを高圧ガス保安協会並びに経済産業省にて実施頂くことになります。
資料 7 II-30、 詳細 49、164ﾍﾟｰｼﾞ	汎用ステンレス鋼の利用は、低コスト化の大きなポイントである。審議会を設定して改定したのは大きな成果である。これらの材料は、実用化の段階に至っていると言ってよいか？実用化には、何が残っているのか？	池谷 分科会長	基準案の策定までは本事業で完了しています。これを高圧ガス保安法の省令等に反映（見直し、改訂）が必要になります。その後設備製作する事業者等が、高圧ガス保安法の製造許可申請時に適用されると実用化されます。
資料 7 II-33 成果詳細 192	「事業番号 2-(3)-②：水素ステーション用高圧ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発」では、「耐久性向上」とのタイトルです。「耐久性向上」に関する実施内容、成果はありますか？	池谷 分科会長	ホースの耐久性向上ですので、使用頻度の向上になります。現状はメーカー保証値が 1,000 回もしくは 1 年未満であるため、その数値で交換しておりますが、今後 30,000 回とするための耐久性向上の評価法を実証事業で実施しました。本事業では、3,000 回程度の見通しとなりました。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
資料 7 II-37-38、 成果詳細 284	「事業番号 2-(4)-⑧：水素昇圧機能を有する高効率水素貯蔵・供給システム技術開発」では、水素吸蔵合金を活用した新な手法での昇圧器として期待できる。安全性やコストの評価で、従来のピストン駆動と比較した評価はありますか？また、開発開始時に設定した性能（エネルギー消費、コンパクト化、重量など）、コスト目標に対して、達成度を示して下さい。	池谷 分科会長	プロジェクト開始時「80℃で 80MPa の放出圧力が可能で、吸蔵放出サイクル後に初期容量 80%以上容量を維持する水素吸蔵合金を開発する。」、「良好な伝熱性能を備え、80MPa の水素に対する耐圧性を有する昇圧用水素吸蔵合金容器構造を開発する。」、「本システムに適用される水素吸蔵合金の大規模製造プロセスを確立する。」を目標に設定しました。開発した合金では室温から 84℃への加熱で 80MPa まで 15 分程度で昇圧できることを実証しました。また、これら合金はサイクル初期に 10~20%程度の容量低下が見られましたが、その後数百サイクルの間に容量低下が見られず良好な耐久性を有していることも確認しています。小規模の試作容器を製作・性能評価を実施し目標とする水素放出速度に対し、容器径 21.7mm で仕様を満たせることを確認しました。高圧水電解装置から想定される排熱量(約 2,000kJ/Nm^3)に対し、水素吸蔵合金を用いた昇圧装置で必要となる熱量を 1,860kJ/Nm^3 と試算し排熱利用での運用が期待できます。量産化の検討・試作を行い、高周波誘導溶解で製造した水素吸蔵合金への不純物量の少なさ、るつぼへのしみこみ状況などから量産炉で安価に生産できる可能性が得られました。以上のように開発当時の設定目標をほぼ達成しています。 対象圧力は異なりますが、コスト比較された論文では以下のものがあります。56.63Nm^3/hour.の 6.89bar から 248.2bar に昇圧するシステムの比較では Initial Cost でも若干熱化学式水素昇圧機の方が安価で、電力代、メンテナンスコストの運営費で約 1/10 という試算された論文の報告があります。 E. Stamatakis et al., Renewable Energy 127 (2018) 850-862

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
資料 7 II-38	「NF,MF,HF 対応を勘案すると、精度等級 2%を検査できる 1/5 の不確かさのマスターメーター法計量試験装置の研究開発が必要となる。」とあるが、次に残す取りまとめとして、解決策のヒントがありますか？	池谷 分科会長	マスターメーターは低圧小流量から高圧大流量まで広範囲にわたって段階的に行われています。そのため、不確かさが必然的に大きくなってしまっています。また、高圧大流量かつプレクーリングを想定した-40 ℃程度の低温条件を安定的に発生できる設備は世界的にも存在せず、マスターメーター法計量精度検査装置の不確かさ低減を達成するためには、トレーサビリィティ体系の再構築による校正ステップの削減や高圧大流量・低温条件を安定的に発生することのできる設備の整備やその技術進展が必至となります。
資料 7 II-43	「二重配管方式水素輸送システムの安全性確保するための漏洩検知の指針と安全対策の提案を行うことが課題である。」とあるが、漏洩探知のためのセンサーは、本事業での半導体センサと関連して進めらえているのか？半導体センサーでは、課題が示されていないかった。情報交換などの活動連携はしていないのか？この分野での活用はないのか？	池谷 分科会長	漏洩検知に関する技術については、本テーマの研究開発項目（2）「水素供給インフラに係る技術基準等検討のための調査研究」にて検討されています。安全を確保するためには、発生し得る現象を把握した上で適切な漏洩検知と対応を行う必要があり、漏洩検知に関するセンサ類の性能検証と関連した調査研究が必要です。そのため、各種センサの調査を含む研究開発項目（2）と関連した調査研究を行っています。本事業の他テーマで開発されている半導体センサについては、本調査の結果を基に安全確保に必要なセンサ性能を明らかにした上で活用の可能性を今後検討いたします。
資料 7 II-44	配管輸送は、水素インフラ整備では重要な案件で、波及効果は大きい。 「3）経済成立性の評価」では、二重配管方式の出口戦略が示せたとあるが、水素のみか、ほかの配送方法とは何にか？合成メタンなどとの比較もあるのか？ほかの事業とも関連するの	池谷 分科会長	中小規模、比較的近距離の水素需要家に向けては二重配管方式パイプラインでの水素輸送は圧縮水素、液化水素による水素輸送に比して有望との結論で、水素の直接輸送同士の比較です。MCH、吸蔵合金等の給/脱水素及び精製プラント等が必要となる輸送方法については規模がキーとなるため比較対象とはしていません。また合成メタンは水素利用方法の一つとなりますが、需要側の水素利用については特に規定はしていません。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	で、出口戦略をもう少し紹介してほしい。		出口戦略は中小規模需要家が集まるエリア内の拠点デポ（タンク）からの各最終要家向けの面的輸送において近距離であればコスト優位性を有し、エリアインフラとしての二重配管方式パイプライン網の敷設が成立する可能性が高いというもので、共同溝や通信配管など元管があるエリアでのインフラ事業と密に関連すると考えます。また個別需要家への個別受渡条件（圧力・量・発停等々）への対応等更なる検討課題は多いと考えております。
詳細 79	中空試験片高圧水素試験方法のメリットは、試験期間の短縮と理解した。大きな成果である。材料の種類組成で対応できる制限はあるか？また、どれくらいの材料調整・準備に時間が増え、試験時間が短縮できたかを紹介してほしい。	池谷分科会長	中空試験片で特性評価を行う場合、中空部および配管接続のためのネジ加工が適切にできるかどうかがポイントになります。水素ステーションで使用されような金属材料であれば、中空部を加工する上で材料の種類の制限はありません。 中空試験片加工に必要な時間は、中実試験片のそれに比べて 1.5～3 倍になります。なお、この差は試験片加工業者の技術によります。また、各試験に必要な時間を以下に例示致します。 低温高圧水素ガス環境下で低ひずみ速度引張試験（SSRT）を実施する場合、中実試験片の場合には試験片取り付け後に冷却するのに 1 日、SSRT に 1 日、室温に戻して試験片を取り外すのに 1 日と、1SSRT に 3 日間を要します。一方で、中空試験片の場合には、同じ工程は 1 日で終わります。 また、荷重制御の疲労試験では、中実試験片を用いる場合、高圧シール部の制約上繰り返し速度を 1 Hz までしか上げることができません。一方、中空試験片を使用する場合には、高圧シール部の問題はありませんので、繰り返し速度を通常の疲労試験のように 10 Hz、20 Hz と加速することができます。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
			本事業において、SNCM439 強度低減材について、中空試験片で 1 Hz と 10 Hz で水素環境下で疲労試験を行った結果、疲労寿命に繰り返し速度依存性は見られませんでした。今後他の材料でも水素環境下疲労特性データの蓄積を図る必要はありますが、繰り返し速度依存性がなければ、試験を加速することができ、その分試験時間の短縮につながります。 なお、ヒアリングでは、中空試験片を用いる試験設備では、中実試験片用のそれに比べて導入コストを半額以下に抑えることができると伺いました。すなわち、中空試験片用試験設備の場合には複数台の導入が可能であり、そのような運用により更に試験時間を短縮することもできます。
	規制緩和や規格の改訂、制定を進めているが、それぞれで、規制緩和や制定・改訂に至ったもの、規制緩和や制定・改訂の準備が終えているもの、規制緩和や制定・改訂の前段階だがすぐに始められるもの、などを列挙できいないか。それぞれの目的とレベル感がわかるとよい。大まかでも良い。	池谷 分科会長	**・無人運転を実施するための研究開発** 目的：これまでの国内水素ステーションはセルフも含め有人であったものを、無人のセルフ水素ステーションを可能にすることで、運営費削減に貢献する。 成果：検討結果は、一般則第 7 条の 4 （顧客に自ら圧縮水素の充填に係る行為をさせる圧縮水素スタンドに係る技術上の基準）及び関連省令、自主基準の制定のもととなり、現在、遠隔監視による無人水素ステーションの設置が可能となった。すでに実績あり。 **・保安監督者が複数の水素ステーションを兼任するための研究開発** 目的：これまで、1 ステーションに 1 保安監督者の選任が必要であったものを1名の保安監督者で複数の水素ステーション

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
			の保安を管理できるようにすることで運営費の削減に貢献する。 成果：検討結果は、自主基準として制定し、基本通達に反映され、1名の保安監督者が複数の水素ステーションを兼任することが可能となった。すでに実績あり。 **・リスクアセスメントの再実施に基づく設備構成に関する研究開発** 目的：定量的なリスクアセスメントを実施し、設備構成の合理化を検討し、コストダウンに貢献する。 成果：検討の結果、遮断弁・過流防止の配置の合理化、過流防止弁のオリフィス等への代替、ばね式安全弁代替による圧力リリーフ弁の不要化が可能であることを示した。本年中に省令等改正予定。 **・蓄圧器等の常用圧力上限値の見直しのための研究開発** 目的：現状の常用圧 82MPa の上限値を上げることで、蓄圧器本数削減等の設備費低減に貢献する。 成果：93MPa のデータ取得し、圧力と離隔距離の関係を明確にし、関係省令の改正案を作成。現在、経産省高圧ガス保安室にて省令化を準備中。 **・水素出荷設備に係る保安統括者等の選任の緩和に関する研究開発** 目的：現状、複数の有資格者がいる保安体制を保安監督者1名体制に。運営費削減

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
			・1 項ステーション関連の技術基準の不整合等の見直し 目的：1 項､2 項ステーションの技術基準の不整合等の見直し。設備費、運営費の削減 **・障壁に係る技術基準の見直しに向けた技術検討** 目的：2 項ステーションに係る障壁の高さ、材質に関する基準の見直し。設備費の削減 成果：検討結果は、KHK 水素法技術検討委員会にて審議・承認ずみ。法制側にて法制化検討段階。自主基準は作成済み。 **・家庭・小規模事業所等での水素充填のための法的課題抽出** 目的：家庭などでの小規模水素充填設備設置に向けた法的課題の抽出。水素需要拡大。 **・自家消費型の水素充填設備に関する予備検討** 目的：HPIT 等のための屋内水素充填に関する法的課題の抽出と予備検討。水素需要拡大。 成果：規制緩和、法整備のための課題整理、予備検討を実施。規制緩和のためには、今後の継続的な検討が必要。
資料 7 詳細 96	AE 法は、簡便にタイプ 2 に適用することができると理解した。現状でもう使えるとのことか？認可等は必要なのか？利用方法としては、年に 1 回の定期検査の時に、充填放出時に計測すれ	池谷 分科会長	Q：AE 法は、簡便にタイプ 2 に適用することができると理解した。現状でもう使えるとのことか？ 回答：技術としては確立済みです。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	ばよいということか？タイプ 3 にも利用できるのか？		Q：認可等は必要なのか？ 回答：認可は必要であり、各都道県の消防保安課が承認します。 圧力容器の検査に関わる法規・技術基準は KHK/JPEC S 0850-9 があり、本技術基準に記載の『蓄圧器の外部から適切な非破壊検査を毎年実施し、異常のないこと確認した場合には、開放検査に変えることができる。』と定められています。 この適切な非破壊検査として、日本非破壊検査協会規格 NDIS 2436 "圧縮水素スタンド用圧力容器のアコースティック・エミッション試験"（23 年 10 月に承認済み）が引用されることで、各都道府県の承認に資することになります。 Q：利用方法としては、年に 1 回の定期検査の時に充填放出時に計測すればよいということか？ 回答：⇒ 検査方法は NDIS 2436 に準じます。検査のタイミングは運用に関わる事項であるため NDIS 2436 の範囲外となります。運用について、KHK/JPEC S 0850-9 に準ずることになります。 Q：タイプ 3 にも利用できるのか？ 回答：⇒ NDIS2436 は適用範囲が明記されており，タイプ 3 には利用できません。ただし，タイプ 3 への AE 法の適用については，別途に技術課題を検討する事によって利用できる可能性もある。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
資料 7 詳細 134	充填スタンドの事故で、水素漏洩が多く、継ぎ手とのことだが、国外でも同様なのか？日本での特有のことなのか？	池谷 分科会長	海外では過去に水素ステーションの爆発火災事故が複数件発生しておりますが、日本では未だそのような大きな事故は発生していません。日本では高圧ガス保安法のもと厳密に水素ステーションの技術基準が定められ、海外では問題視されないような微量の水素漏洩も取り上げて改善しようとしております。
資料 7 詳細 169	プレクールの二次側での水素漏洩が多いとのことであったが、-40℃での環境下の影響などの検討を説明してほしい（PP. 146 では、検討結果として「影響なし」）。また、これで、漏洩は抑えらえれるとのまとめだが、一部では特定できなく、「保証価でない（PP.)147」や「定性的な記述」（PP.161）とのことであった。もう漏洩はないとのことで良いのか？漏洩抑制はできたと言い切れるのか？二次側で大方理由は何か？漏洩抑制ができないならば定期的なリングの交換を推奨する方が良いのではないか。	池谷 分科会長	プレクール二次側では FCV への充填時に常温～-40℃の温度変化、常圧～82MPa の温度変化が生じます。常温以上～-40℃のヒートサイクル試験を実施し、O リング等のシール部材ではヒートサイクルによるシール性への影響は少ないとの結果が得られました。O リング等のシール部材に関してはメーカーより交換周期が推奨されています。プレクール二次側での漏洩は配管継手からの事例が多く、温度変化による軸力（締結力）への影響が確認されており、配管取付け・支持方法の影響も考えられ、NEDO 後継事業で具体的なメンテナンス、施工方法の指針を検討する計画です。
資料 7 詳細 192	加速評価試験方法は、国際標準化すれば、海外で日本メーカの高い品質が理解してもらえる。国際標準化の準備はできているのか？	池谷 分科会長	高圧水素ホースの加速耐久性評価法の国際標準化について，これまでの NEDO 事業の成果を活用して取り組みを進めております．高圧水素ホースの国際標準化は ISO TC197 WG22 において検討されており，「水素利用技術研究開発事業」にて開発しました水素インパルス試験をホースの加速耐久性評価法とする水素充填ホースの国際標準開発を進め，その結果 2019 年 11 月に ISO 19880-5 Gaseous Hydorgen -Fuelling Stations- Hoses and Hose

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
			Assemblies として発行されております．現在，ISO 19880-5 の改訂作業を進めておりますが，今回の改訂では本法によるデータの蓄積や市場データとの相関が十分に取られている状況ではなかったことから事業原簿に記載しました揺動水素インパルス試験を加速耐久性試験法として記述することはできませんでしたが，次回，3 年後と想定される改訂の際には ISO 19880-5 の加速耐久性評価法としての採用を目指し，データの蓄積，市場データとの相関評価を進める予定です．
資料 7 詳細 232	Mo-V などの特許は確保できないのか？また、国内外で利用できるようにするために必要なデータ取りは終えているのか？さらに必要なのか？	池谷 分科会長	・Mo-V 添加鋼の特許は当該事業開始前に日本製鉄(株)が下記を出願済の状況です。 特許第 6648646 号(登録日：2020.1.20) 特許第 6648647 号(登録日：2020.1.20) ・本事業では Mo-V 添加鋼の実験室溶製材で国圧水素環境下で各種機械的性質の評価試験を実施し、特に水素適合性評価については最も基本的な試験とされる低ひずみ速度引張試験 (SSRT)を中心に実施しており、特に製品の安全性確保の面で重視される高圧水素環境下における疲労強度、破壊靭性、疲労亀裂進展速度、等に関する試験データの蓄積は十分ではなく、今後データの蓄積が必要な状況です。また、実際の製品サイズにおける評価は未実施の状況であり、今後実際の製造工程により製造された大型蓄圧器形状について、実験室溶製材と同様の性能を発揮し、安全性を担保できるかについて確認する必要があると考えています。
資料 7 詳細 285	可動式の昇圧機を代替するのが目標になっていますか？コスト、大きさなどの設定は不可欠である。また、耐久	池谷 分科会長	"上記で記載したように今回開発した水素吸蔵合金の繰り返し耐久性が良好であること、また上述の既報の論文からメンテナンス費用は軽減できると考えています。システム体積についても

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	性、メンテナンスなど運用時を想定した、運用コストも試算してほしい。排熱利用とあるが、昇圧が必要なときに排熱があるとは限らない、また、設置場所によっては、排熱がない場合もある、加熱のためのエネルギー消費を考慮した、エネルギー消費量を試算してほしい。本当に取って代われるものなら、今後さらに加速してやるべき事項である。		機械式圧縮機(6000L)に対して MH システムは 400L と 1/10 以下のコンパクトになると報告されています。現在は高圧への昇圧システム実現のためのコア技術である 80MPa まで昇圧可能な水素吸蔵合金の開発ができた段階であるため、詳細なコスト試算は今後継続して検討していきたいと考えています。 ご指摘のように廃熱が無い場合は加熱のためのエネルギー投入が必要となります。一方でプロジェクトで想定したシステムでは高圧水電解や電気化学式水素昇圧機と組み合わせたシステムであるため、排熱が得られる条件となります。上述のように現在のシステムデザインで昇圧に必要な熱量(1,860kJ/Nm^3)は電気化学式のデバイスからの排熱(約 2,000kJ/Nm^3)より少ないと試算しています。この結果は DOE のプロジェクトの報告（C. Corgnale et al., ECS Transactions, 80 41-54 (2017))とも一致しています。高圧水電解や電気化学式水素昇圧機からの廃熱以外にも山梨県企業局の NEDO 水素社会構築技術開発事業で開発されていた統合型熱コントロールシステムのコンセプトのように周辺機器（除湿器、プレクーラー、燃料電池等）からの熱を有効利用したり、顕熱を回収したりすることで消費エネルギーを機械式圧縮機以下に低減できると考えています。"
資料 7 詳細 307	MF,HF、NF/MF とは何を意味するのかを紹介してください。用語集に見当たらなかった。	池谷 分科会長	コネクタ（ノズル+レセプタクル）の種類と性能（流量カテゴリ）を表すもので、NF（Normal Flow：最大 60g/s)、MF（Middle Flow：最大 90g/s)、HF（High Flow：最大 300g/s）のことをさします。NF/MF とは NF ディスペンサと MF ディスペンサそれぞれで充填試験をしたという意味です。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 7 詳細 307	1：100 のワイドレンジに計測できるようになったとあるが、その時の誤差は十分に小さいのか？	池谷分科会長	MF, HF の実験モデルにおいては、1：100 のワイドレンジで、器差±0.5%を確認しましたが、実流校正設備側の問題で、微小流量域の器差が 1～2%に悪化することもありました。 （「成果報告書 1.3.1.1 中流量及び大流量コリオリ流量計の開発」参照下さい。）なお、今年度の NEDO 事業「マルチフロー計量」でも、引き続き改善改良を進めています。
資料 7 詳細 321	水素品質管理では、257 ページにある「レーザー半導体を用いた次世代水素分析」と連携しているのか？分析対象物が異なっているのに読める。事業内での連携、情報交換・共有はしていたか。	池谷分科会長	ご指摘の事業の対象とする水素品質は、水素燃料品質規格 ISO 14687 の燃料電池自動車用 Grade D であると承知しております。本事業期間において具体的な連携という形はとっておりませんでしたが、これまでも情報交換は実施しております。今後、当該成果を基に分析法として確立されてくれば、具体的に品質管理の低コスト化への寄与等、検討が進められるものと考えます。
資料 7 詳細 327	国際標準化で、当面、力を入れるのは、水素品質管理であるか？そのほかもあれば、教えてほしい。	池谷分科会長	水素品質関連の規格については、日本が議長国であり、今後の改訂に向けてしっかりとしたサポートが必要です。ただ、これに限らず、最近の動向として、これまでのコンポーネント関連の規格から、広がるアプリケーション、サプライチェーンに関連した項目も重要視されています。具体的には HDV（大型車)、鉄道、船舶等へのアプリケーションの標準化、或いは温室効果ガスの排出等に関わる測定法などのカーボンニュートラルを目指した標準化等が着目されており、今後の水素技術関連の国際標準化の重要な項目として考えております。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
資料 7 詳細 337	TPRD とは何でしょうか？説明を願います。用語集にもない。 339 にありました。位置の変更！	池谷 分科会長	ご指摘の通り、詳 339 の熱作動式安全弁（TPRD：Thermal activated Pressure Relief Deveice）です。また、用語集にも、熱作動式安全弁の説明のみで「TPRD」の説明がありませんでした。ご指摘ありがとうございます。 説明：容器等の温度が上がった場合、熱により作動し、容器内部の流体を容器外部に放出し、容器の破裂等を防ぐ装置。
資料 7 詳細 338	図 3-6 で、安全弁はどこについているのでしょうか？加熱後のタンクの動作では、安全弁は開放されなかったのでしょうか？	池谷 分科会長	GTR13 Phase2 では、火炎暴露試験の再現性向上のために、ダミー容器を用いた Pre-test を実施します。このダミー容器は大気開放系の（ガス充填ができない）鋼製円管を使うことが規定され、ダミー容器には安全弁を取り付ける必要がありません。
資料 7 詳細 341	バーナーが不均一に当たると、何が課題になるのでしょうか？不均一に当たる試験はありますか？自動車との衝突を考えると、不均一になることにはならないのでしょうか？	池谷 分科会長	火炎暴露試験法は、容器全体が火災に晒された場合に、安全弁が安定的に作動するかを評価する試験です。火炎暴露試験の試験結果の再現性向上の観点において、容器に接触されるバーナー火炎が不均一になると、同一の発熱速度で燃料を供給した場合であっても、試験体の容器へ入熱される熱量が異なり、試験結果のバラツキに繋がります。そのため、バーナーポートの間隔を規定し、火源の均一化を図る必要があります。 一方、現実の火災においては、火災の初期段階において、局所的に火炎が形成されることがあります。本試験では、実車火災試験による延焼速度から得られた局所火炎となる滞留時間と最悪状況を考慮し、安全弁から最も離れた箇所で局所火炎によって 10 分間、容器を晒した後に、安全弁を含めた全面火炎へ移行する火炎のモードを変えます。これにより、局所火炎による容器の健全性が評価されます。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 7 詳細 343	今回の事業で、国際標準に持ち込めそうな事項はありますか？低コスト化の材料やプレクールは、交国際標準の改訂の対象でしょうか？	池谷 分科会長	今回の国連の世界統一技術基準がそうであるように、国際標準議論でも将来の低コスト化は強く求められています。水素技術を扱う ISO/TC197 の規格の中でも、例えば ISO19881&19882(容器&TPRD)、ISO19884(定置式蓄圧器)、ISO19887(中低圧の燃料系部品) などで、材料規定方法に関する議論が行われています。本事業で今回国際提案した材料試験法およびその関連データは、これら国際標準の議論にも共有できるものと考えます。一方で現時点の各国際規格は、それぞれのフィールドごとに議論がなされてきた歴史的背景があり、古い材料規定等がなかなか払拭できない状況も散見され、水素中で扱う材料議論が必ずしも効率的に進んでいない懸念も感じます。それを打破するには、各国および各基準・標準の知見者が協調して、将来の低コスト化を踏まえた建設的な意見交換が必要と感じます。その点で機会があれば、本事業で得られた成果を広く共有できるよう、常に意識していきたいと考えているところです。
資料 7 詳細 358	HRS とは？	池谷 分科会長	Hydrogen Refuring Station の略で、水素スタンドや水素ステーションを意味します。
資料 7 詳細 368	水素利用としては、FCV 以外にも、水素エンジン自動車や定置用 FC、さらには産業用水素利用や火力発電での利用もある。FCV での利用以外の動向は、水素供給の政策としてないのか？	池谷 分科会長	詳細 366 図表 8 の「注力分野」で示す通り、各国政策からは、FCV 以外に注力する利用分野を模索していることが読み取れます。具体的には、EU、英国では熱需要、米国、韓国では定置用 FC および水素タービン発電、米国、中国ではグリッド安定化のための水素貯蔵、すべての国で化学、製鉄分野での産業利用、などが考えられています。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 7 詳細 381	パイプラインの整備は、水素インフラ整備では重要です。パイプライン設置の検討で、バッファータンクは不要でしょうか？途中で昇圧するならますます必要ではないでしょうか？	池谷 分科会長	配管輸送は水素貯蔵にも資するとの前提と、今回の経済成立性評価におきましては昇圧設備を備え昇圧をした時点でコスト優位性がほぼなくなるとの結論から、需要家エリア入口で水素を受けるデポ以外でのタンクの設置は無しで考えております。 近距離エリアで昇圧がない条件でコスト優位が成立する可能性が高いという検証結果ですので、エリア内で輸送距離を延ばす必要がある場合は昇圧ではなく圧損の改善（配管の径・形状・材質＝流量流速）で対応することになると考えています。
	本事業全体での、年次ごと、更に 2 ヵ年までの計画で、特許、論文、学会発表、規制緩和・標準規格への寄与件数、国際標準化のリストはあるか？各項目ではあるが、取りまとめた表あるとよい。 資料 5 に論文らはありました。「規制緩和・標準規格への寄与件数、国際標準化」はありませんか？トータルでよい。	池谷 分科会長	規制緩和 25 件、国際標準化 24 件、標準規格化 16 件の結果となっております。詳細は別添の非公開資料「規制緩和・国際標準化・標準規格化リスト」をご参照ください。
資料番号 6.1 質問箇所 P15	開発項目①で汎用ステンレス鋼の使用可能範囲拡大の成果が示されているが、海外の同様な基準、規格などと比べるとどのような位置づけになるのか？説明をしてほしい。他の開発項目の成果についても、可能な範囲で海外との比較をご説明いただきたい。本事業終了後も、まだ使用可能鋼材の選択	飯山 分科会長 代理	国内の材料規格は米国規格を参考にしており非常に近いが、ASME KD-10 には高圧水素に関する材料のリストがあるが使用可能な圧力や温度条件が示されていません。 国内では高圧ガス保安法を実施するための技術基準を示した各種規則が存在し、これを満たすための具体的事例を示した例示基準が定められ、高圧水素設備に関する材料種やその範囲について示されているが、海外ではその部分の法令化はされていません。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	の観点からみると、実用上の差異（海外よりも日本の方が使用可能な鋼材種類の範囲が狭いという状況）が存在している状況なのか？ご説明をいただきたい。		国内の規制は過去の高圧ガス事故が多発した背景から生まれた法体系であり、安全安心を最優先としており、また法律上で保証するためには保守的な法規制となり、海外に比して制限された範囲となることは止むを得ないと考えます。 さらに、国内は例示基準化材の使用の要望が強いが、海外は各メーカの責任に基づいて使用しており、このような状況もあり国内の材料の使用可能範囲は海外に比して狭いと言わざるを得ません。 実際、ステンレス鋼については海外では高圧水素用に使われていても国内では使用できない場合が存在します。 低合金鋼は材料面では海外と遜色ないと思われます。
資料番号 6.3 質問箇所 P11	成果と意義のマスターメーター法計量精度検査方法の高度化の達成状況のところ、『不確かさ X%達成にはトレーサビリティ体系の再構築や革新的な技術進展が必至』とあるが、『革新的な技術進展』とはどのようなものか、またその今後の対応（後継事業における取組）について、ご説明をいただきたい。	飯山 分科会長 代理	マスターメーターは低圧小流量から高圧大流量まで広範囲にわたって段階的に行われています。そのため、不確かさが必然的に大きくなってしまっています。また、高圧大流量かつプレクーリングを想定した-40 ℃程度の低温条件を安定的に発生できる設備は世界的にも存在せず、マスターメーター法計量精度検査装置の不確かさ低減を達成するためには、トレーサビリィティ体系の再構築による校正ステップの削減や高圧大流量・低温条件を安定的に発生することのできる設備の整備やその技術進展が必至となります。
資料番号 6.3･ 質問箇所 P11	新プロトコルに対応する水素計量技術の開発の達成状況のところ、ワイドレンジ流量計測の実現数値と、最終目標（2022 年度末）にある流量計測のワイドレンジ目標数値が異なっている。達成された数値と目標値との差異の意	飯山 分科会長 代理	HDV 車両で流量カテゴリ HF は 18kg/min が最大流量ですが、今後のモビリティ大容量化を想定し、50kg/min の最大流量を想定しました。これに流量カテゴリ NF からをカバーするレンジとして 1：500 と目標値を設定しました。現状の実現数値としては 1：100、つまり、10kg/min となっています。（NF～MF はカバー可能）

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	味するところについて、ご説明いただきたい。		
6.1 ｽﾗｲﾄﾞ 11	伸びを指標とする新たな基準で良いとする根拠とこれまでに用いられてきた基準を教えてください	尾方委員	高圧材料では延性の確保が重要であり、従来は延性の基準として絞り特性を使っていました。 絞りは水素の影響を如実に受けるので絞りで基準を作ると厳しくなります。 伸びも延性を示すパラメータですので、基準に伸び特性を用いても構いません。従来は高圧水素での伸びに関するデータの信頼性を詰め切れておらず採用しませんでしたが、本事業で伸びに関するデータの信頼性や水素中での不安定破壊の挙動等を検証し、新たに指標とできることを結論付けました。
6.1 ｽﾗｲﾄﾞ 16	グラフの縦軸の意味と、何を見て、冷間加工度 40%まで影響なしとしたのか教えてください	尾方委員	縦軸は、水素中の特性（強度、伸びなど）÷不活性雰囲気中の特性 の相対比であり、これが 1 に近いほど水素の影響を受けないことを意味します。本事業では水素中の伸びの挙動に着目しており、伸びの相対比（REL）は冷間加工度 40%まで、母材と同じ値（＝加工の影響を受けていない）を示しています。
6.1 ｽﾗｲﾄﾞ 23、6.2､6.3 も同様	外部発表が主に学会での講演であるが、論文など広く文書として公開はしていないのでしょうか	尾方委員	現状、学会での発表講演が大半です。2019 年 12 月には九州大学が Chemical physics letters に「FT-IR study of state of molecular hydrogen in bisphenol A polycarbonate dissolved by high-pressure hydrogen gas exposure」に発表されています。今後、後継 NEDO 事業で検討を深め、論文発表に繋げていくものと考えています。
I-4	大型対応は次期事業で反映とのことだが、事業変化はいつごろから生じ始めたのか。事業中であった場合に	櫻井委員	大型車両へのトレンド変化は本事業期間中に生じたため、2020 年度より本事業の中でHDV用の充填・計量等の技術開発に必要な実証試験設備として「福島水素充填技術研究センター」の建

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	次期事業での対応になった理由があれば教えてほしい。		設に至りました。次期事業においては、建設した設備を用いて、更なる研究開発を実施いたします。
I - 4､5	大型車への対応が事業内であった場合に、知的財産・標準化戦略へ影響を与えたかについて教えてほしい。	櫻井委員	直接的に知的財産・標準化戦略への影響はありませんが、これから国際標準化のためにも「福島水素充填技術研究センター」で実証を進めて参ります。
III-2	実施体制の全体図が示されているが、これらの中で実施者間の連携や成果のユーザーによる関与などに関する実用化を目指した事例が事業期間にあったならば、具体的に例を挙げて教えて欲しい。	櫻井委員	ISO の国際標準化の事業は、他の事業である、シール等継手(2-(3)-①)、ホース(2-(3)-②)、充填プロトコル（2-(4)-①）及び計量（2-(4)-⑨）等と連携が必要で、水素技術 ISO/TC197 での活動を連携して進めました。
III-6	大型車は事業用の車両であるために、コスト評価が厳しいと思われる。参考のためにコスト面から普及を評価してただけると助かる。	櫻井委員	大型車両用の水素STの整備費および運営費につきましては、ご指摘の通り、現時点では評価が困難であるため、今後の検討課題と捉えております。
	※III-2 の中の番号と成果詳細の番号が異なっていませんか？ 例えば 2(2)②は表では九大、詳細ではJPECになっています。	櫻井委員	誤植ですので公開時の資料は修正致します。
資料5 P31	「費用対効果」でも、P29に記載のあるように、「水素ステーションの伸び悩みで前提が崩れている」ことを踏まえると、「水素ステーション稼働率および FCV 台数が想定通りに進めば、水素ステーションおよび FCV 水	丸田委員	ご指摘の通り、P.31 の「費用対効果」に記載の市場予測につきましても、FCV 台数および水素 ST の普及が想定通りに進んでいることを前提としているため、あくまで予測と捉えております。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	素の国内市場は 2030 年には現状の 9 倍程度となると予測される」という結論は齟齬があるのではないでしょうか。		
資料 6.2 P7	「セイフティーデータベース」の今後の展開の見込み、また世界との情報交換・連携の可能性とその意義を教えてください。特に、欧州プロの知見が集約されている「HIAD」との連携の可能性はありますか。	丸田委員	セーフティーデータベースそのものから得られる情報は大まかなものであり、今後その中から重要と思われる事例を抽出し、詳細に調査（現地調査を含め）して漏洩原因の解明に繋げていく計画です。また、海外の事故情報の解析も有効なものがあると思っています。海外情報では我々が問題視している微少漏洩に関連するデータはあまりないようですが、 HySafeno「HiAD」の事故原因に関する知見は漏洩メカニズム解明に有効と思われ、その活用は今後検討したいと思います。
資料 6.3 P10	HDV 充填では欧州プロジェクトが先行していますが、今後どのように連携しますか。	丸田委員	HDV 充填プロトコルの国際規格の開発動向を調査し、関連機関との情報交換を勧めており、米国 NREL での充填試験の連携を検討しています。 HDV 計量については、国際度量衡局（BIPM）や EMPIR の関連プロジェクトと情報交換を行っており、国際比較等による連携を検討しています。
資料 6.4 P7	「12 件の国際規格を発行した。内 4 件は日本が議長国（提案国）として発行」の残り 8 件の国の内訳を教えてください。 「期間中 25 件の規格を審議・改訂しており、そのうち 7 件は日本が議長国、提案国」の残り 18 件の内訳を教えてください。	丸田委員	発行済みの国際規格について日本以外は、フランス・3 件、米国・3 件、カナダ・3 件となっております。このうち一件は米国とフランスの共同議長でしたので総数は 9 件となっていることご承知おきください。 開発中の国際規格については、フランス・2 件、ドイツ・2 件、米国・10 件、カナダ・3 件、ノルウェー・1 件、英国・2 件、韓国・1 件となり、計 21 件でございますが、この際も共同議長により重複を含んでいることをご承知おきください。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
資料 6.4 P10	CHS の活動への貢献が、いかにして日本の水素インフラ構築や水素社会構築に貢献していることを示してください。	丸田 委員	CHS 等の国際貢献の活動については、先ずは国際標準化活動に資することを前提としております。その中で当該活動を通して得られた国際的な水素安全に関する情報を国内へ広く展開し共有を図ることにより、国内の水素インフラや水素社会の構築に水素安全という側面から貢献できたと考えております。また、同時に本活動を通じて日本の水素安全の考え方を海外に示すことにもつながり、間接的には国内関連産業の国際競争力向上にも寄与しているものと考えております。
事業原簿成果 詳細 38	4 段落目、強度の保証のためには冷間加工条件を定める必要があるのか、または適切な試験方法を定めるということでしょうか？質問の趣旨として、他の現在定まった基準がない類似の課題についてどのようにアプローチすべきか、という問題意識です。	原田 委員	後継の事業で冷間加工材の強度保証に関する検討を行っていますが、両方の必要性を視野に入れて検討すべきと考えています。
事業原簿成果 詳細 44	第 1 段落、溶接部位の水素適合性は δ フェライト相内部でのき裂の伝播でほぼ説明がつくと理解すればよろしいでしょうか？	原田 委員	溶接金属部の水素適合性はオーステナイト相、フェライト相両方に起因します。フェライト相のき裂の伝播だけによるのではなく、オーステナイト相が十分なオーステナイト安定度を有していなければオーステナイト相の水素脆化で破断する場合もあります。
資料 6.2 P7 及び 事業原簿 成果詳細 133	漏洩事例につき、2016 年に多く発生しているのは、初期不良やオペレーションが不慣れだったことが影響しているのでしょうか？使用部材の差異などがあったのでしょうか？	原田 委員	2016 年に漏洩事例が増えましたが、この年に商用水素ステーションが多く開業し、施工の不慣れや機器初期不良が影響していると思われます。その後の機器の改良、手直しで充填回数当たりの漏洩発生頻度はほぼ一定で推移しています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
資料 6.2 P7 及び 事業原簿 成果詳細 135	漏洩事例につき、2021 年、22 年は記載のように動的部分の劣化が原因と考えるべきでしょうか？それ以外に例えば気温や日照などの影響はありますでしょうか？	原田 委員	2021年、2022年はディスペンサー、圧縮機等の動的部分の発生が多いですが、これは水素ステーションの稼働（充填回数）が大きく伸びたため、充填時のディスペンサーでの常温～-40℃までの温度変化や圧縮機廻りの振動による影響が大きくなったと考えています。ステーションの機器類は基本的には日射を遮る場所に設置されており、気温や日照の影響はほとんどないと思います。
事業原簿 成果詳細 149-150	本事業により達成されたバルブのシール材の適用範囲について、高圧の水素を取り扱うステーション以外の用途にも広く応用が可能なのでしょうか？今後乗用車、商用車以外、例えばパイプラインでの輸送や発電等の別の用途が考えられるための確認です。	原田 委員	本事業で検討されたシール部材は水素ステーションに限らず、水素を取り扱う他の用途にも広く活用可能です。「日本ゴム協会水素機器用エラストマー材料研究分科会」と連携して作成し、シール部材メーカーや材料メーカー、シール部材ユーザーなどステークホルダーへの情報共有を進めてきた「水素機器用高分子材料水素特性データベース」に、本事業で検討されたシール部材の基礎データを高圧水素シール用ゴム・樹脂材料劣化特性データベースとしてデータを拡充しました。
事業原簿 成果詳細 305	2.1 中で最大許容誤差 2.0%は国際勧告で明記されているとのことですが、この数値自体が十分小さいと考えてよろしいのでしょうか？他の気体や燃料の計量装置との比較等、参照できるものがあればご教示ください。仮に±２%誤差となるとステーション側の収入も±2%変動が生じることになるように思われます。	原田 委員	国際法定計量機関勧告 OIML R139 の中で、圧縮天然ガス燃料の最大許容誤差は±1.5 %に設定されています。燃料の計量取引においては、このあたりの誤差が許容されています。燃料油関係の計量法、特定計量機検定の公差は、自動車・小型車載・大型車載・定置が0.5%、微流量が１%、液化石油ガスが１%、また、一般的なガスメータは１%（0.1Q 以下は 3%）です。したがいまして、水素の２%は十分小さいとは言えませんし、達成レベルも十分とは言えませんので、国際的にも更なる向上に向けた研究開発が、鋭意進められているところです。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
事業原簿 成果詳細 308	3.3(1)中の水素ディスペンサー側の影響因子について、現時点で推測できているものがあればご教示ください。	原田 委員	ディスペンサー側の影響因子の一つとしてコリオリ流量計の精度が 0.5%程度あり、1 ないし 2 割の影響量と考えられます。残部は経路内での状態変化とそのタイミングによるものと考えられます。非測定時の流量計前後各部での圧力・温度・密度、容積等の状態量変化、計量の開始・停止とバルブタイミング、弁内漏れの影響などがあり、ディスペンサー外からの影響が大きく関わります。
資料 6.3 P8	模擬容器の温度上昇につき、安全上適応できる上限、または劣化に影響しない温度は何度でしょうか？	原田 委員	設計上の模擬容器の温度条件は-30～+85℃です。
資料 6.4 P6,11	ISO 水素品質国際規格につき、資料で挙げられている項目以外に今後改定することで分析コストが低減するような物質や事項が特定されていればご教示下さい。	原田 委員	現状では、既に危険等として挙げられている酸素の規格値の適正化はさらにデータが必要との判断から次回の改訂のの際対応する予定となっております。その他の成分について、今後の改訂の中でどの成分が対象となるかは具体的に特定はされておらず、今後の検討によりますが、ホルムアルデヒド、硫黄等の緩和の可能性について検討されるものと考えます。
事業原簿成果詳細 376	1 段落目「本研究は想定される漏洩条件や（以下略）」とありますが、そのシナリオは他の気体、例えば都市ガス等と同様な事故シナリオを想定すればよろしいのでしょうか？または質量等の要素で水素特有の事象も多くありえるのでしょうか？	原田 委員	ここで主に想定されるのは都市ガス等の輸送で想定されるシナリオも含みますが、拡散性や透過性と言った物性の違いに起因する水素特有の事象、ならびに二重配管方式に特有の事象も考えられます。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
事業原簿成果詳細 381	④で参照されている DOE のモデルは天然ガスパイプラインのスプレッド工法や敷設権を前提としているものでしょうか？日本の場合の工法や管路の確保等、主としてどのような点が差異となりうるでしょうか？	原田委員	DOE コストはアメリカ国内での数値の目標として新しい工法等含めたアメリカ国内での水素パイプライン敷設の実績に基づくものと考えられますが、敷設権については技術課題とは異なるため含まれていません。日本の場合は工法や敷設権などの違いにより埋設方式ではコストが大きく異なり、アメリカの方が特に土木工事部分等を要因として大幅に安いと考えています。 今回の研究対象は既設配管を活用することで土木工事をせずに配管を敷設する方式のため土木工事費が不要ですが、参照できる価格目標値がないため、アメリカでの敷設方式による敷設費を１つのベンチマークとしました。
資料 6.1 P15	「事業開始時点 一般産業用途で用いられる SUS316／SUS316L は - 45℃の高圧水素では使用できない」は、日本の高圧ガス保安法に限ったことであり、海外では Ni 当量規制はなくすべての SUS316L 材が使用可能であると聞いています。 ただし Ni 当量による適用制限に意味がないわけではなく海外でも「Ni 当量品を使ってくれるなら（仕様書で指示まではしないけれど）それは好ましい」という程度の理解（SUS 材料として Ni 含有量が多くなれば安全サイド）が得られている状態と聞いています。海外ではこれまでの製作実績に基づいて材料指定がされるため、Ni 当	三浦委員	日本が 70MPa 水素ステーションの建設計画に着手する時にカリフォルニアの水素ステーションにてバルブの水素脆化による事故を受け、METI より安全が確認された材料を例示基準化を図る方針が示されたところが国内の規制の出発点です。 当時前例がなく水素という物質に対する社会的な理解が充分とは言えない中で 82MPa の低温・超高圧の水素を安全に利用するため、METI の方針に従い過去の NEDO 事業で保守的ではあったが Ni 当量規制による絞り基準、伸び基準による例示基準化、緩和を図ってきました。 後継の NEDO 事業において、更なる緩和に向けた取組に着手しているところであり、この取り組みはなおも継続中の段階です。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	量という新しい研究成果に実績がおいついていないともいえるように思います。 Ni 当量規制は日本のみでの材料制約となっておりコスト高の一因でもあるわけですが、「極力安全な材料を使え」という基準の設定自体には保安上の意味はあると思います。 NEDO の取り組みとしては、この Ni 当量基準を「国際的な基準」として認知されるようにすることこそが重要であると思います。業界側として、国際的な基準調和を唱えており Ni 活動の当量に関連した活動の意義はそこにあるべきだとも思います。そのような取り組みについて「取り組みと展望」を報告してください。		
事業原簿 成果詳細 - 39(154/561)	「＜SUS305＞ SUS305 は冷間加工材で快削性が高く、Mo を含んでおらず省資源性に優れ・・・・・SUH660の置き換えを測るべく例示基準化を目指した検討を行った。」との記載があります。 この頁までの事業原簿の記載において、SUS305は(2)汎用ステンレス鋼冷間加工材として説明されています。	三浦委員	SUH660 は析出硬化系耐熱合金であり、高強度、高水素適合性であることから圧縮機の高温部だけでなく、水素充てん用のノズルや安全弁類等にも用いられています。そのため、テーマ（2)(4）両方の代替ターゲットになっております。 SUH660 は 24.00～27.00%Ni、1.00～1.50%Mo、1.90～2.35%Ti および、0.10～0.50%V を添加しており、レアメタルの使用量が多いです。 同等の強度を実現できる SUS305 冷間加工材が水素でも使用できるのであれば、使いたいというユーザーの声はあります。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	SUH660 は(4)汎用低合金鋼として説明されており、代替材としてはSNCM439があげられています。 ここまで（1）から（4）と切り分けて説明しながら、（4）に位置付けられている SUH660 を（2）の成果であるSUS305に置き換えることがいきなり記述されています。このため、この技術開発全体の説明として混乱し理解しにくい説明となっています。 成果詳細 - 48（163／561）に「本研究で得られたSUS305の冷間引抜棒は強度、水素適合性ともに良好であり、コスト・加工性・入手性に難があるSUH660を十分に代替できることを示した」という記載がありますが、「冷間引抜棒」は圧縮機シリンダなどとして使う材料としても評価されているということを確認してください。 この評価はSUS305の材料メーカーが自社でデータ採取したうえでユーザーに提示すべきものではないでしょうか？　材料メーカーではなく NEDO プロでデータをとって評価した理由を説明してください。		SUS305は、SUS316やSUS316Lと比較して、成分規格における C 上限量が高いため、冷間加工により高強度を得やすい特長がありますが JISB8265 の圧力容器材料となっておらず許容引張応力が設定されていません。SUS305 は規格材料であり、許容引張応力を設定することができればメーカーを問わず製造、利用ができるものです。公益に資するものであるため、NEDO事業で行うことが妥当と考えています。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	税金でデータを取る以上「SUS305 を使いたいというユーザーの声」やユーザーが使う展望を明示してください。		
事業原簿 成果詳細 - 77(193/561)- 78(194/561)	＜中空試験片＞ 5 年間の事業の成果の意義として ＜3.2 成果の意義＞ 「前項の３．１研究成果で得られた結果及び活動は、全て有効に規格原案に反映され、規格原案の作成に役立った」という１行程度だけであることには違和感があります。 また、＜4．まとめ及び課題、事業化までのシナリオ＞には「事業化までのシナリオ」が記載されているとは思えません。 提案者以外によるこの中空試験法の材料評価への広がりが得られ試験法が普及しなければ、試験法基準化の意義は認められないと思います。 また、試験法ですので、他の研究者による試験法の改良・改善などが必要な面や別の分野での応用により技術利用の裾野が広がる可能性も高いと思います。 「成果の意義」と「事業化までのシナリオ」を補足して説明してください。	三浦 委員	本事業では、試験片の加工技術、試験技術の確立が最大の目的であり、中実試験片方式との対応やラウンドロビン試験など、試験結果の信頼性を高めるための活動を実施しました。本事業の成果をもとに作成した規格原案を日本高圧力技術協会に提出し、臨時専門委員会を設置して頂きました。同委員会で検討後に制定プロセスに進む見込みです。また、ISO にも提案し、ISO/TC 164/SC 1/WG 9 “Tensile testing, method in high-pressure hydrogen environment”が 2021/9/27 に発足しました。その後、4 回の会議を経て、現在 DIS として登録済みです。 本事業の成果により、中空試験片方式が高圧水素中材料試験費用の低減および試験期間の短縮するための標準的な試験方法として認知して頂けるようになったことに大きな意義があると考えています。なお、本事業の波及効果として下記民間企業 2 社ではすでに事業化がなされており、試験を受注されています。 ①コベルコ科研 https://www.kobelcokaken.co.jp/PDF/carbon_neutral/hydro1-2.pdf ②神戸工業試験場 https://www.kmtl.co.jp/wp-content/uploads/2023/05/金属材料の水素ガス環境中材料試験および分析・解析の受託試験サービスのご紹介.pdf

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
			海外では、例えばドイツ フランホーファー研究機構において、中空試験片を用いた研究開発が進められており、論文・学会発表がなされています。 Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM https://www.iwm.fraunhofer.de/en/services/assessment-materials-lifetime-concepts/highlights/hollow-samples.html さらに、ドイツで設立の会社で、世界中で各種試験機のサービスを提供している ZwickRoell Corporation (ツビックローエル)では、中空試験片用の装置が提供されています。 圧縮水素下での金属中空試験片の試験 https://www.zwickroell.com/ja/industries/energy/hollow-specimen-testing-under-compressed-hydrogen/
事業原簿 成果詳細 - 135(254/561)	‘(1)サブテーマ１；セーフティデータベースの解析知見の整理 ③目標達成度で、「漏洩情報を整理・解析できた」で ○ となっていますが、この事業の目的を考えてみると漏洩情報を整理することを通して、「漏洩情報を収集・整理したうえで漏洩を未然に防げるような仕組み」もしくは「漏洩を減らせるような取り組み」を確立できてはじめて〇ではないかと思います。 水素 ST の水素漏洩防止に、今回の「セーフティデータベースの解析知見の整理」の取り組みがどのように役立っているのかを説明してください。	三浦 委員	ご指摘の通り、事業目的から見ると漏洩情報から漏洩防止に繋がる解析ができるのが BEST です。しかしながら、現行のセーフティーデータベースの情報内容からの整理解析では、水素ステーションの水素微量漏えい事例について、設備・部位を整理し、経時的な傾向の推移、充填回数に対する漏洩事例発生頻度の傾向について確認することで、現状の水素ステーションの状況を把握するものです。 NEDO 後継事業で、漏洩防止対策や高耐久性機器の開発に活用できる漏洩事例詳細情報入手の仕組みを構築していきたいと考えています。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
事業原簿 成果詳細 - 176(296/561)	水素ステーションにおけるホース実証試験を北米で実施しています。 「現状、国内の水素ステーションにおいて、試作ホースの試用及び当該ホースの寿命末期まで試用を継続し、実施における耐久回数を確認することは極めて困難である」・・・・とだけ、その理由が記述されています。このことは今までも指摘がありましたので、今回の事業者の責任でないことは理解しています。 そのうえで、＜国内でこのホース技術開発の実証のできない理由＞＜わざわざ北米で検証しなければならない理由＞を法的根拠とともに課題として明記してください。 危険なことなら北米であっても実施してはいけないと思います。北米での検証は安全に行われているはずです。国内でできない法的根拠があるのであれば、法規改正を求めるなり対応を求めるなりすべきでしょう。 国内で検証できないとしたら、低コスト化という行政側の求める目標が達成されないことになります。	三浦 委員	「国内でこのホース技術開発の実証のできない理由」および「わざわざ北米で検証しなければならない理由」についてのご質問ですが，国内と海外（この場合北米）の水素ステーションオーナーの水素ステーション運営の考え方の相違に基づくもので，法的な根拠はありません．日本における水素ステーション運用におけるホース交換の考え方は，例えばホース製造メーカーが設定した耐久回数や耐用年数に基づき，ホースが寿命を迎える充填回数や期間内で交換し，水素ステーションにおいて寿命末期を迎えないことを大前提として運用が行われています．これに対して，試用に協力いただいた北米の水素ステーションオーナーの運用の考え方は，使用した結果寿命末期を迎えた機器や部材，この場合であればホースが寿命末期を迎え，水素充填の用を足さなくなった際に新しいものに交換する，という運用を行なっています．本プロジェクトにおいて北米にて試用した開発ホースは，2018 年度に試用を開始した段階では正式に発行していませんでしたが，水素充填ホースの国際標準 ISO 19880-5 の DIS に適合する製品レベルのホースです．各種耐久性評価の結果，2018 年度の段階ではホースメーカーにより 650 回の耐久回数が設定されており，日本の水素ステーションオーナーは 650 回以内で交換することを前提としてホースを採用し，寿命末期を迎えない状態でホースを交換するのに対して，北米の水素ステーションオーナーは国際標準に適合するレベルのホースであれば試用し，ホースメーカーによる 650 回の耐久回数が設定されていたとしても，充填ホースとしての用を足さなくなる段階まで実用に供する運用方法となっています．この結果，3 本のホースを試用いただき，試験に供したホースの水

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	成果詳細 - 191（311／561）～成果詳細 - 192（312／561）によれば、「長寿命ホースの実用化」まで開発項目残課題は多くあり、統計的な解析も必要であることがわかります。 「税金の適正利用」という面からも、日本で適切にホース寿命の検証が行われない理由を文書で明示し善処を求めておくことからも必要なことだと思います。 NEDO の終了報告時の重要事項として NEDO や行政側に善処・対応を要求したいところです。		素ステーションにおける充填耐久回数が 3,000 回であることが判明いたしました. 　このような日本と北米における運用方法の相違は北米においては最終的なホース破裂圧力を含む国際標準に適合するホースであれば，82MPa，北米では 87.5MPa の水素圧力で運用される水素ステーションにおいて漏洩が起こったとしても，現在明確になっている内層樹脂に発生する貫通クラックによる水素漏洩であり，人的・物的被害が発生しないとの考え方に基づくものです．日本でできない危険な実証を北米で実施したということではなく，実験室における評価の現状や実験室における加速耐久性評価時，寿命末期における水素漏洩メカニズムなどの検証結果を説明し，当該ホースの試用についてご判断いただいた結果，実現したものです．日本と北米における水素ステーション運用について法的な相違があるとすれば，新規開発ホースの採用に関する制限などではなく，充填ホースの寿命による水素漏洩が発生した際の取り扱いと考えます．北米においては充填ホースは消耗品と考え，漏洩が発生した際に交換する運用となっているのに対して，日本においては充填ホースからの漏洩が発生した際には事故として報告する必要が生じます．このため，水素ステーションオーナーは水素ステーションで寿命末期までの使用は困難であると考えておられます．これについて，究極的には北米のような運用が可能になることが望ましいと考えますが，法律の改訂のためにはさまざまな観点での安全性の評価や実績の蓄積が必要だと考えております。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
事業原簿 成果詳細 - 197(318/561)	「現在、日本国内で用いられている充填プロトコル（ルックアップテーブル方式）で充填時間を3分程度にするためには、水素供給温度区分をT40（-40℃～ - 30℃）に保つ必要がある（表 2)。これは水素ステーションで電気代がかかる要因のひとつとなっており・・・」との記載があります。 「水素 ST の整備費が高く、税金で補助補填をうけても事業的に成立しない」ため、水素 ST の建設が進まない・水素 ST の建設が進まないためにFCV が普及しない」という負の連鎖に陥っています。 しかも運営費である電気代もかかる要因になっていると記載しています。税金で補助をうけている水素 ST の建設や FCV の普及の妨げになっている現状を打開する工夫をすることは、税金で補助をうけている業界者側の責務だと思います。 このような状況下、「3 分で充填すること」に意味があるとは思えません。	三浦 委員	FCEV の利点として充填時間の短さや航続距離の長さが挙げられ、充填時間短縮も顧客利便性の一要素であると認識しております。 「5 kgの水素を 3 分程度で充填」という仕様は、当初より業界内で共有されており NeV 補助金制度の要件にもなっております。 水素ガス充填に関しては、容器の安全性確保のため、米国 SAE において規格としての充填プロトコル（Look up Table 方式）を開発しました。本プロトコル開発時の要求仕様として、ガソリン車給油時間と遜色のない 3 分程度での充填が性能要件として決められました。なお、上記は通常の要件であり、遅くても良い場合は、T30、T20 というプレクールカテゴリも併せて用意されています。 新しいプロトコル開発においても国際基準化を図るためには、性能の高い仕様での開発が必要となります。 （NEDO 向けの質問への回答） FCV ユーザーにとって利便性のある充填方法と、電気代の削減を両立するための研究開発は、NEDO としては必要であると考えています。今後、大型車向けの充填プロトコルについても、開発を進めていく予定です。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	水素インフラとして普及しなければ何も意味がありません。T30 でも十分だと思います。 なぜ3分充填の仕様の設備建設に拘るのですか？誰が判断をしているのでしょうか？ （NEDO への質問） NEDO は何故、このような意味のない状況が続くような事業を採択・実施するのですか？水素インフラの整備を、どうするつもりなのでしょうか。		
事業原簿 成果詳細 - 203(324/561)	「熱容量測定方法の規格化が必要である。測定技術の確立とともに、関連業界内への周知を推進し、利用するための指針を示すことが重要」と記載しています。 温度計は、それぞれの温度計の精度自体にバラつきがあって問題がありますし、熱容量測定には熱拡散率と熱伝導率を同時に推定して算入する必要があります。被測定物に熱を与え温度を変化させることで熱容量を測定しなければならないはずですが、配管や支柱など接続部への熱逃避や周囲環境からの熱影響を正確に見込む必要があり、温	三浦委員	熱容量は、部品の出入口で水素に温度差を生じさせます。実際のステーションに近しいやり方で水素を流し、温度差から熱容量を算出しています。この際に出入口の2本の温度センサーから差分を算出しているので、センサー誤差はキャンセルされます。 外部入熱の効果は、充填中は無視できます。充填終了後にゆっくりと温度上昇していきます。これは温度センサーを取り付けている SUS ブロックの温度になります。断熱材を付けない状態ですと、配管系全体を代表する温度と見なせることを熱容量測定結果から確認してます。MC-MM ではこれをコールドディスペンサー状態の定量化に使用し、熱容量マップ切替制御に使用しています。 「金属の比熱と重量を使った概算」は、SUS 配管部品なら可能です。しかしブレークアウェー、ホース、ノズルなどは温度が

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	度計の精度からいっても熱容量を精度よく算出することは簡単ではありません。 「測定方法を策定する」ことも「規格を作る」こともできると思いますが、原理的に精度は低く特別な方法をとらねば正確に熱容量を算出することはできないので意味はないと思います。目的は熱容量測定することではなく、充填プロトコルへの熱影響を見込むことですので熱容量は「金属の比熱と重量」を使って概算することで十分なはずであり、「熱容量測定方法の開発」は合理的な取り組みとは思えません。 熱容量測定方法の開発内容と、規格化して実施した成果（測定精度の確立状況）を定量的に説明してください。		不均一のため、この概算は出来ません。また 3D の熱伝導シミュレーションで熱容量を求める方法も考えられますが、公正のため第3者が実施する必要があり、却って費用がかかります。よって実際のガスを流す方式で温度差を測定する手法を選択しました。
事業原簿 成果詳細 - 307(433/561)	「(1) マスターメーター法計量検査方法の高度化」の項に、「マスターメーター法による計量精度検査の信頼性向上を目的にトレーサビリティ体系を再構築するため、低圧大流量水素試験設備を整備し、運用を開始した。最大許容誤差の目標値であった 2.0%については、重量法とのクロスチェックにおいて達成した」という記載があります	三浦 委員	重量法は 2014 年から計量試験を実施し約 1,000 以上の計量データがあるのに対し、マスターメーター法は 2020 年から計量試験を実施し約 200 弱の計量データの蓄積になります。現在の計量試験は殆どが重量法で行われております。一方で、今後の大容量化には重量法は現実的ではなくマスターメーターでの計量精度向上は必須であります。上記のとおり、トレーサビリティの再構築・技術進展を進めてまいります。また、マスターメーター法の計量試験は2年の期間が経過したのみであるため、マスタ

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	が、一方で「水素ステーションで収集したデータを解析・考察した結果、器差が安定しているディスペンサーにおいては後続検査周期を 2 年間から 3 年間に延長できることを確認し、これに基づく HySUT ガイドライン案を完成させた」との記載があります。 マスターメーターを使った較正によって、ほぼ各水素ステーションの計量器の精度を確認できるようになっている・重量法とのクロスチェックは検証のみという理解でよいでしょうか。 （しかし 3.3 開発項目残課題の項に、「マスターメーター法計量精度検査方法の高度化」という項目があり、誤差要因の顕在化が急務との記述もあります）水素計量はまだはじまったばかりであり、被測定器の経時劣化もあるため継続的な検証を続け、計量精度の向上に努め続けることが重要であると理解しています。 水素計量法確立に向けた取り組みの全体観を説明してください。		ーメーター法での検定期間延長も視野にいれ今後の水素計量技術の確立に取組んでいく所存です。
事業原簿 成果詳細 - 307(433/561)	「水素ステーションで収集したデータを解析・考察した結果、器差が安定しているディスペンサーにおいては後続	三浦委員	ご質問の通り、器差が安定しないディスペンサーの原因分析は重要であると認識しています。本事業においても、器差が安定していないディスペンサーに関して、調査、解析を進めてきま

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	検査周期を2年間から3年間に延長できることを確認し、これに基づくHySUTガイドライン案を完成させた」との記載があります。 器差が安定しているディスペンサーと器差が安定していないディスペンサーの分析こそが、黎明期の水素計量法確立に重要な取り組みと思われますが、どのような分析をしているのですか？		したが、まだ確定的な原因がわかっていません。次期NEDO事業においても、ステーション各社の協力を得て、引き続き調査、分析を進め、原因とそれに対応する対策を検討していきます。
資料6.4	「研究開発項目Ⅱ 国際展開・国際標準化等に関する研究開発」 NEDOへの質問です。 ここまでの「水素関係の国際展開・国際標準化」はいわば、FCVと水素STという民間の実施しているFCVと水素STという事業に関する国際展開・国際標準化でしたので、資料6.4 P2に示されるようなJARIとHySUTという枠組みによるISOでよかったのだろうと思います。 しかし水素インフラの取り組みが国の産業転換にもなろうという状況にかわりつつあるなか、水素のISOはFCVと水素STだけではなくなりつつあります。	三浦委員	ご指摘の通り、爆発安全のようなFCVや水素ST以外のISOについても今後国際標準化に取り組む必要があると認識しており、後継事業の「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」の中で実施していく予定です。

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	大規模インフラ構築に向けた取り組みとして、産総研などによって国際標準化の取り組みが展望され、爆発安全のような必要な部分を専門的に取り組む必要があるのではないでしょうか？		
事業原簿 成果詳細 - 357(486/561)	「水素社会にかかる国際関係機関等研究・政策動向に関する調査研究」は変革期にあり変化の激しい環境下、重要な調査だと思われます。 調査内容は、幅広く共有され議論に供されることにより意味があると思いますが、この調査内容・成果は、どのように一般に情報公開・情報共有されたのでしょうか？	三浦 委員	調査を通じて得た知見は、NEDO の成果報告書データベース、成果報告会を通じて一般公開され情報共有されています。
事業原簿 成果詳細 - 368(497/561)	成果の意義の項で、「情報リストを、NEDO 及び事業参加企業と共有し、国内関係者による市場参加者が基礎情報を把握することを支援する。」と記載されています。調査情報は研究開発情報ではないと思いますが、一般への情報公開とせずに NEDO 事業参加企業とのみの共有としている理由を説明してください。 本来は社会インフラ構築のため一般に公開・共有すべきものではないでしょうか？	三浦 委員	・事業開始当初、水素に関する情報が少ない中で、1次情報を中心とした情報収集・分析に力点が置かれました。したがって、情報発信を主目的とする事業のように、一般公開のツール開発（例：NEDO の Web サイトで掲示、NEDO アカウントで配信、受託企業側で発信サイトを構築、情報ソース企業と契約等）は仕様に含まれていませんでした。情報収集方法が確立された次フェーズとして、そうしたツールの開発・検討が期待されます。 ・①中国・韓国への関心が高く、中国語、韓国語の原語調査に幅を広げました。②FCV・HRS の定点での導入状況への関心が高く、成果報告会や技術検討会で定点での情報提供を行いました。③海外の規格（水素機器の周辺部材）への関心もありまし

資料番号・ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	（5～10 年前には調査情報の報告会が開催されていた覚えがあります）また「NEDO 及び事業参加企業と共有」した結果、どのようなフィードバックがあったのかを具体的に説明してください。		たが、技術専門分野であり当該事業での直接の対応は困難だったため、ニュースやセミナーで関連情報の収集に努めました。
事業原簿 成果詳細 - 368(497/561)	「本調査をベースとし、今後も水素社会の実現に向けて可能な限り情報収集や分析を行い、情報発信する。」とありますが、一般発表は 2020 年に 2 件しかなされていません。 この事業は、今後どのように活かされていくのでしょうか？	三浦委員	・シンクタンクである当社としてできることは、自前での調査レポートの発行やセミナーを通じた情報発信と考えています。（直近では、2023 年 11 月に一般社団法人水素エネルギー協会にて講演を予定しています） ・知見をとりまとめた成果報告書が一般公開されており、水素事業に取り組む各企業様のベース資料になると考えています。
事業原簿 Ⅰ - 4(46/561)	知的財産・標準化戦略として「オープン・クローズ戦略」の設定が求められている。 この「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」において、計量技術やシール技術、ホース技術、充填技術などでは「オープン・クローズ戦略」の意図を感じ取ることができている。 NEDO による水素 ST 全体マネジメントとしては、どのような意図をもって「オープン・クローズ戦略」を遂行・運用したのか？	三浦委員	現状、水素 ST に関しては海外展開のフェーズではないため、本事業においては、クローズドにして企業の優位性を保つ戦略ではなく、オープン戦略を主として遂行しました。一部、鋼材開発事業に関しては、海外への情報流出を防ぐために原則非公開としました。 （ISO 規格への反映などで日本が議論をリードする項目については、適宜情報を公開する方針としました）。今後、研究開発を進める中で、海外展開のフェーズに入った際は、クローズ戦略も検討していく予定です。

参考資料２　評価の実施方法

NEDO における技術評価について

1. NEDO における技術評価の位置付けについて

NEDO の研究開発の評価は、事業の実施時期毎に事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価が行われ、研究開発のマネジメントにおける PDCA サイクル（図 1）の一角と位置づけられています。さらに情勢変化の激しい今日においては、OODA ループを構築し、評価結果を計画や資源配分へ適時反映させることが必要です。

評価結果は、被評価事業等の資源配分、事業計画等に適切に反映させることにより、事業の加速化、縮小、中止、見直し等を的確に実施し、技術開発内容やマネジメント等の改善、見直しを的確に行っていきます。

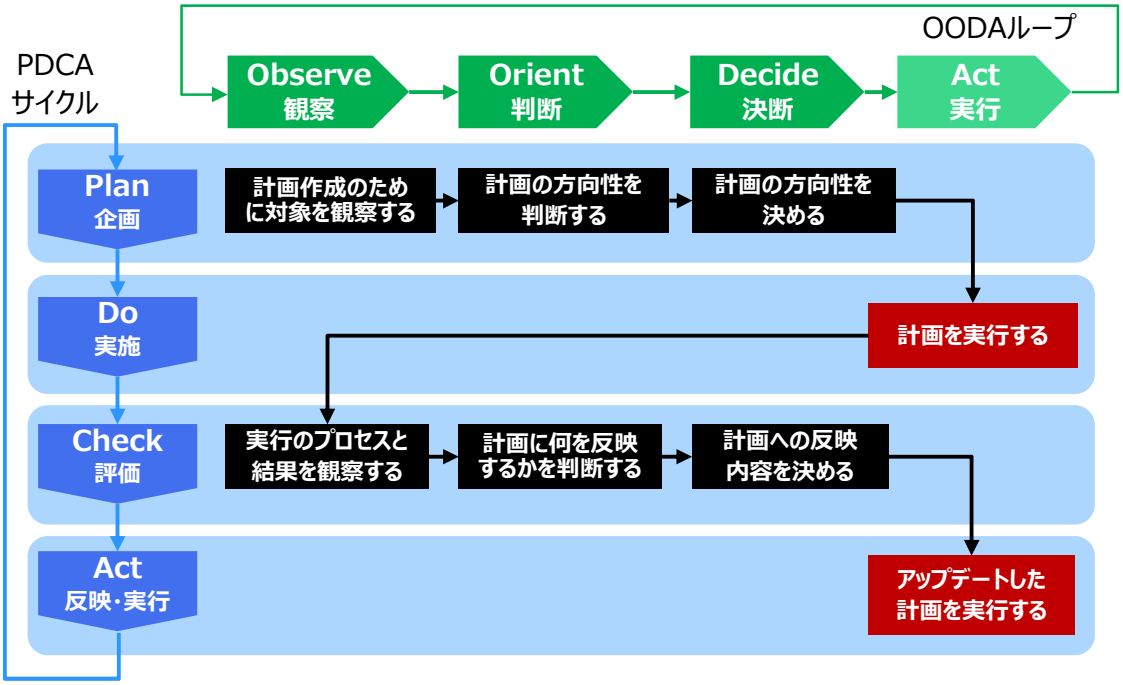


図 1　研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

2. 技術評価の目的

NEDO では、次の 3 つの目的のために技術評価を実施しています。

(1) 業務の高度化等の自己改革を促進する。

(2) 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む。

(3) 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する。

3. 技術評価の共通原則

技術評価の実施に当たっては、次の 5 つの共通原則に従って行います。

(1) 評価の透明性を確保するため、評価結果のみならず評価方法及び評価結果の反映状況を可能な限り被評価者及び社会に公表する。なお、評価結果については可能な限り計量的な指標で示すものとする。

(2) 評価の明示性を確保するため、可能な限り被評価者と評価者の討議を奨励する。

(3) 評価の実効性を確保するため、資源配分及び自己改革に反映しやすい評価方法を採用する。

(4) 評価の中立性を確保するため、可能な限り外部評価又は第三者評価のいずれかによって行う。

(5) 評価の効率性を確保するため、研究開発等の必要な書類の整備及び不必要な評価作業の重複の排除等に務める。

4. プロジェクト評価の実施体制

プロジェクト評価については、図 2 に示す実施体制で評価を実施しています。

(1) 研究開発プロジェクトの技術評価を統括する研究評価委員会を NEDO 内に設置。

(2) 評価対象プロジェクト毎に当該技術の外部の専門家、有識者等を委員とした分科会を研究評価委員会の下に設置。

(3) 同分科会にて評価対象プロジェクトの技術評価を行い、評価報告書（案）を取りまとめた上、研究評価委員会に諮る。

(4) 研究評価委員会の審議を経て評価報告書が確定され、理事長に報告。

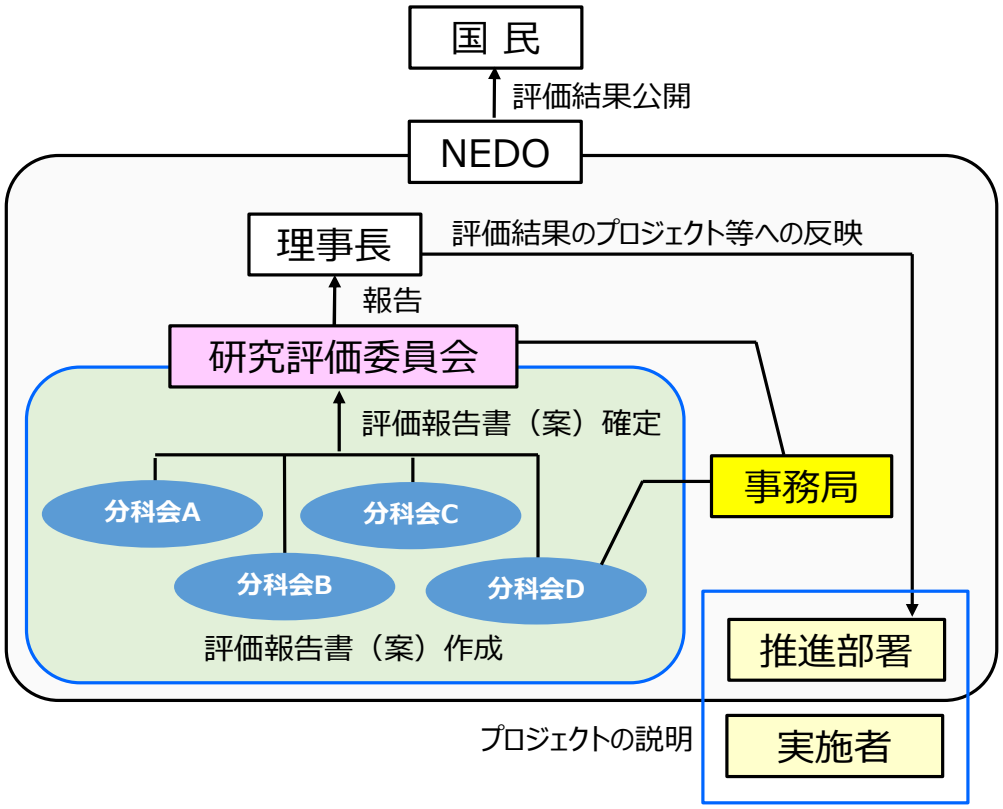


図 2　評価の実施体制

5. 分科会委員

分科会は、研究開発成果の技術的、経済的、社会的意義について評価できる NEDO 外部の専門家、有識者で構成する。

6. 評価手順

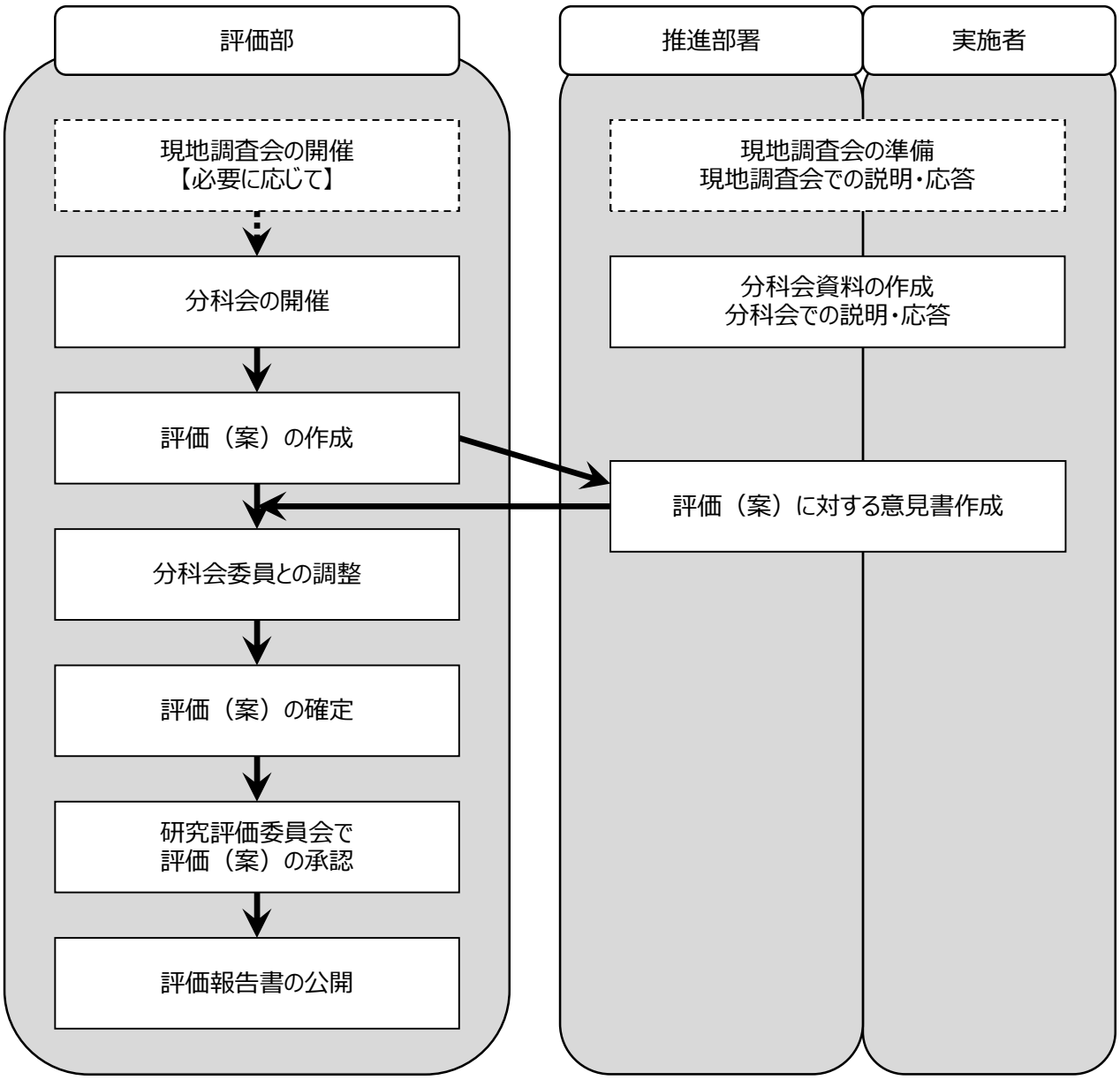


図 3 評価作業フロー

「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（終了時評価）分科会に係る
評価項目・評価基準

1．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(1) アウトカム達成までの道筋

・「アウトカム達成までの道筋」※の見直しの工程において、外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮したか。

※ 「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項
・将来像（ビジョン・目標）の実現に向けて、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されていること。
・官民の役割分担を含め、誰が何をどのように実施するのか、時間軸も含めて明確であること。
・本事業終了後の自立化を見据えていること。
・幅広いステークホルダーに情報発信するための具体的な取組が行われていること。

(2) 知的財産・標準化戦略

・オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データも含めた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、外部環境の変化等を踏まえてもなお、妥当であったか。
・本事業の参加者間での知的財産の取扱い（知的財産の帰属及び実施許諾、体制変更への対応、事業終了後の権利・義務等）や市場展開が見込まれる国での権利化の考え方は、オープン・クローズ戦略及び標準化戦略に整合し、研究開発成果の事業化に資する適切なものであったか。
・標準化戦略は、事業化段階や外部環境の変化に応じて、最適な手法・視点（デジュール、フォーラム、デファクト）で取り組んでいたか。
・国際標準の制定の計画において、制定までの役割分担が示されていたか。

2．目標及び達成状況

(1) アウトカム目標及び達成見込み

・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に※見直していたか。
・アウトカム目標の達成の見込みはあったか（見込めない場合は原因と今後の見通しは妥当であったか）。

※ アウトカム目標を設定する上で考慮すべき事項
・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値（市場規模・シェア、エネルギー・CO_2 削減量など）及びその達成時期が適切に設定されていること。
・アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果が優れていること。
・アウトカム目標の設定根拠は明確かつ妥当であること。
・達成状況の計測が可能な指標が設定されていること。

(2) アウトプット目標及び達成状況
・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトプット指標・目標値を適切に※見直していたか。
・最終目標は達成しているか。未達成の場合の根本原因分析や今後の見通しの説明は適切だったか。
・副次的成果や波及効果等の成果で評価できるものがあったか。
・オープン・クローズ戦略や実用化・事業化の計画を踏まえて、必要な論文発表、特許出願等が行われていたか。

※ アウトプット目標を設定する上で考慮すべき事項
・アウトカム達成のために必要なアウトプット指標・目標値及びその達成時期が設定されていること。
・技術的優位性、経済的優位性を確保できるアウトプット指標・目標値が設定されていること。
・アウトプット指標・目標値の設定根拠が明確かつ妥当であること。
・達成状況の計測が可能な指標（技術スペックと TRL※の併用）により設定されていること。

※ TRL：技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels）の略。

3．マネジメント

(1) 実施体制
・実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮したか。
・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能していたか。
・実施者間での連携、成果のユーザーによる関与など、実用化を目指した体制となっていたか。
・個別事業の採択プロセス（公募の周知方法、交付条件・対象者、採択審査の体制等）は適切であったか。

・本事業として、研究開発データの利活用・提供方針等は、オープン・クローズ戦略等に沿った適切なものであったか。また、研究者による適切な情報開示やその所属機関における管理体制整備といった研究の健全性・公平性（研究インテグリティ）の確保に係る取組をしたか。

(2) 研究開発計画

・アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は網羅され、要素技術間で連携が取れており、スケジュールは適切に計画されていたか。

・研究開発の進捗を管理する手法は適切であったか（WBS※1 等）。進捗状況を常に関係者が把握し、遅れが生じた場合、適切に対応していたか。

※1 WBS：作業分解構造(Work Breakdown Structure)の略。

・研究開発の継続又は中止を判断するための要件・指標、ステージゲート方式による個別事業の絞り込みの考え方・通過数などの競争を促す仕組みの運用は妥当だったか。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部
部長　三代川　洋一郎
担当　松田　和幸

＊研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。
（https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html）

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミューザ川崎セントラルタワー20F
TEL 044-520-5160　FAX 044-520-5162