# 「水素利用等先導研究開発事業」

# 終了時評価報告書

２０２３年１２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

2023 年 12 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。

# 「水素利用等先導研究開発事業」

# 終了時評価報告書

２０２３年１２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　1-15

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、「水素利用等先導研究開発事業」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「水素利用等先導研究開発事業」（終了時評価）分科会において評価報告書案を策定し、第 75 回研究評価委員会（2023 年 12 月 11 日）に諮り、確定されたものである。

2023 年 12 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 10 月 6 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

非公開セッション

６．プロジェクトの詳細説明

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 75 回研究評価委員会（2023 年 12 月 11 日）

「水素利用等先導研究開発事業」（終了時評価）

分科会委員名簿

（2023 年 10 月現在）

| | 氏名 | 所属、役職 |
|---|---|---|
| 分科会長 | 伊藤（いとう）　響（ひびき） | 中部大学　理工学部　数理・物理サイエンス学科<br>教授 |
| 分科会長<br>代理 | 盛満（もりみつ）　正嗣（まさつぐ） | 同志社大学　大学院　理工学研究科　教授 |
| 委員 | 工藤（くどう）　拓毅（ひろき） | 一般財団法人日本エネルギー経済研究所<br>理事 電力ユニット担任 |
| | 後藤田（ごとうだ）　浩（ひろし） | 東京理科大学*　工学部　機械工学科　教授 |
| | 清水（しみず）　陽一（よういち） | 九州工業大学　大学院工学研究院　教授 |
| | 藤田（ふじた）　照典（てるのり） | 三井化学株式会社　シニア・アドバイザー |
| | 矢加部（やかべ）　久孝（ひさたか） | 東京ガス株式会社<br>グリーントランスフォーメーションカンパニー<br>執行役員　水素・カーボンマネジメント技術戦略部長 |

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：東京理科大学工学部工業化学科）、「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

（2023 年 12 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<br>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<br>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<br>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<br>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

本事業は、水素製造・輸送・利用におけるアカデミア中心の革新的技術の研究開発であり、企業参加の次フェーズ事業に移行させる“橋渡し”機能も有していたといえる。2030年に水素30円/$Nm^3$、2040年に水素発電コスト12円/kWh以下という挑戦的かつ明確なアウトカム目標を設定している。

アウトカム達成までの道筋においては、この事業終了後の次ステージにつながる事業展開が計画され、そのなかでアカデミア、企業、政府・省庁の役割が時間軸も含めて明示されて、複数の個別テーマでは測定方法の標準化に取り組み、その一部がIEC規格に反映されるなど、将来ビジョンと目標の実現に向けた事業が実施されたものと考える。

知財戦略では、「仕上げたい技術の姿」と題するフォーマットを採用して事業実施者の意識付けを実施している点や、公募時より知財およびオープン・クローズ戦略の重要性について事業者に周知徹底している点は、合理的な取り組みであったと高く評価できる。繰り返しになるが、標準化戦略では、一部事業においてではあるものの具体的な体制の整備を行ってアプローチが行われている事例も認められている。

今後は、研究開発が進む中で、技術の適用先である地域や国を見定め、国際特許の権利化ができるような戦略の策定やそれを実施する企業との連携を意識した特許マネジメントが期待される。

１．２　目標及び達成状況

アウトカム目標は水素基本戦略に基づいて設定されており、本事業推進中に発表された政府などからの各種戦略やエネルギー基本計画あるいは中間評価で出された提言などに対しても配慮され、また、外部環境の変化に応じてアウトカム目標の検証や見直しなどが、事業期間を通じて適切に行われていたといえる。アウトカム達成の見込みとしては、メタン直接改質法において、水素製造量に制約があるものの、30円/$Nm^3$の可能性が見えてきており、これが実現できることで、日本経済や水素社会の実現に向けた問題解決に与える効果も期待できる。

各テーマがアウトプット目標を達成し、次のステージに進んでいることも評価できる。

特許出願においては、オープン／クローズ戦略に従い、出願件数は外国出願も含めて増加しており、この点も評価に値する。

一方、アウトカム目標である水素コストについては、現実的な視点として、水素発電・水素製鉄において経済的な実現可能性を慎重に見極める必要もあり、一律な数値設定ではなく、現実的な用途に応じて見直しも必要な段階にきているのではないかと考える。

また、アウトプット目標の達成度は、スタート時の競合分析に基づく設定目標に対するものであることから、達成度に加えて事業終了時の競合分析も示すことで、アウトカム目標である水素コストに対する達成状況の評価に部分的にでもつながるのではないかと考える。

１．３　マネジメント

本事業では、NEDO のマネジメントの下、PL および各テーマの事業責任者がそれぞれの役割を遂行し、テーマ間での連携を図った結果、各々のアウトプット目標の達成につながったといえる。また、事業者に対する進捗フォローで事業成果の＜姿＞の共有や対象技術のポジショニングといった新しい手法を導入したことで、産学連携を促しアカデミアに対し市場化の意識を醸成させ実用化を目指した体制になったと考える。

研究開発の進捗管理については、継続可否審査や中間評価などのほかに、定期的な会議（PL 定例会議、進捗フォロー会議、週例マネジメント会議）が開催され、情報交換や進捗管理にも十分に活かされていたと考える。また、研究分担、研究計画は、すべてのプロジェクトで、緻密に作られており、研究開発計画については高く評価できる。

今後、水素コストの目標を達成するためには、一つのテーマや技術で実現できるわけではないことから、競争と協調をうまくハンドリングしながら適切なマネジメントを実施することにより、各技術の総和として、シナジーをもって目標が達成できることを期待する。また、日本の電解技術力の向上と技術開発の加速につなげるためにも、評価／解析のための共通プラットフォームの構築が期待される。

（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＞

・ 本事業は 2014（前身は 2013）年度に始まり、NEDO のそれまでの事業における実績や経験の積み上げ、情報の多さ、などを考えれば、NEDO による事業の実施と推進は至極当然である。NEDO は、技術面だけではなく、学術面や経済性さらには投資状況、などの多岐に亘る国内外の情報収集に常に努め、外部環境やその変化に対応可能な状況を創出している。また、そういった情報の分析結果をアウトカム達成への道筋に反映し、本事業が及ぼす社会的影響への見込みにも配慮していると感じた。さらに、水素戦略の策定とともに関連事業を推進しており、活発化、本格化する政府の動きにも十分に対応している。本事業はアカデミア中心の革新的（基礎）技術の研究開発であり、所定レベルに達した事業は実用化をより意識する企業（主体）参加の次フェーズ事業に移行する“橋渡し”機能も有している。この点からも、本事業のアウトカム達成への道筋には、将来ビジョンの実現に必要な取り組みを網羅的に含み、明確化されていると考える。また、本事業をアカデミアと企業との出会いの場と考えれば、多くの事業が目標を達成して次フェーズ事業に移行しており、これもアウトカム達成への道筋の適正さを示していると考える。国際連携については「共通市場の創出を目指す方策で進める」との説明があったものの、本事業での出願数の急増や標準化に関わる成果からは、アウトカム達成とともに、日本の指導性の発揮をもうかがい知ることができた。

・ 知財・標準化戦略では、各事業におけるステアリング機能の強化とともに、3 大方針を決定し、「仕上げたい技術の姿」と題するフォーマットを採用して事業実施者の意識付けを実施している。オープン・クローズ戦略については、成果の公表や出願などが全体的に増加したことから、戦略が妥当であったと判断でき、本事業が革新的（基礎）技術の研究開発であることを考えれば、十分な成果が得られていると考える。一般的に、アカデミアは研究成果を論文や学会で発表し、出願に前向きであるとは言いがたい状況であるにもかかわらず、アカデミアが中心となって進められた事業において多くの出願が見られた点は、知財に関する体制や支援などを含めた戦略が適正であり、当を得たものであったことを示している。標準化に関しては、本事業で得られた成果として一件あがっている。事業実施者は目標達成度を「○」としているが、困難さや尽力に対して「◎」を附してもよいのではないかと考える。

・ 先導研究開発に位置づけられ、リスクのある先駆的な研究開発テーマにおいて、事業終了後の次ステージにつながる事業展開が計画され、そのなかでアカデミア、企業、政府・省庁の役割が時間軸も含めて明示されていた。複数の個別テーマで、測定方法の標準化に取り組み、その一部は IEC 規格に反映されるなど、将来ビジョンと目標の実現に向けた事業が実施され、成果が得られた。論文発表、口頭発表に加えて公開成果報告会も実施し、幅広いステークホルダーに向けた具体的な情報発信の取り組みがなされた。

- 2021 年度および 2022 年度の特許出願件数はそれ以前を大きく上回り、アカデミアの単独または共同での出願件数は外国出願も含めて増加した一方で、個別のテーマにおいて秘匿すべきノウハウを明確にして公開すべき情報を限定するなど、オープン・クローズ戦略が機能していた。外国出願は欧米、中国、豪州、カナダ、韓国など、本事業の対象とする水素利用技術において重要な市場が予測される地域を網羅しており、研究開発成果の事業化に資する特許戦略が実施されていた。第三者への実施権付与や権利移転の事例が見られ、知的財産が事業化に向けて適切に管理・利用されていることが示された。
- 外部環境の変化に応じたアウトカム目標の検証や見直しなど、事業期間を通じて適切に行われていたと思われる。また、本事業の目的である基盤的技術開発の成果を次のステップに引き継ぐといった事業がしっかり実現されており、将来的な水素サプライチェーンの構築に向けて貢献されることを期待したい。
- 標準化戦略では国内におけるステークホルダー間の体制整備が非常に多様であり、さらに海外との連携も含めたプレーヤーとの連携や、標準化を推進するための中心となるようなプレーヤーを育成することも重要と考えるが、一部事業において具体的な体制の整備を行いアプローチが行われている事例が認められた。また NEDO 自身も、IEA 等の海外での動向をフォローしながら、国際的な連携を諮る様な取り組みを実施されていた。
- 水素社会の実現に向けたビジョンと目的は明確であったと思われる。
- オープン・クローズ戦略は適切に設定されていたように思われる。
- 水素利用に関してさまざまな手法が提案され、第一段階としては着眼点、検討方法等良く考えて進んだと評価される。特に、関連する技術に関しては、国内のトップメーカーや有益な技術を有する大学・研究機関が参画しており、将来的にも世界トップ技術として展開できると期待できる。
- 特許化ですべてを抑えることが困難な時代、物質特許は積極的に取るとして、ノウハウのオープン・クローズ戦略は有効な手段と考えられる。本プロジェクトでこのような戦略を出されたことは大いに評価したい。標準化をここで議論することは戦略として大変重要である。現在進行形の評価法の標準化を日本主導で進めてほしい。
- 挑戦的かつ明確なアウトカム目標「水素 30 円/$Nm^3$、2030 年：水素発電コスト 12 円/kWh 以下、2040 年」を設定している。アカデミアを主体とする研究開発を起点として、技術開発の進捗に応じた企業への段階的移行／企業による継続開発により実用化を目指すという合理的なシナリオである。また、開発した技術を国際連携や国際標準化によりグローバルに活かすことも企図されている。従って、インパクトのあるアウトカム目標であり、かつ達成までの筋道と技術の展開が示されている。国が支援するに相応しいプロジェクトであった。
- 公募時より知財およびオープン・クローズ戦略の重要性について事業者に周知徹底している。アカデミアの知的財産に関わるリテラシーの向上および研究開発成果の実用化を支える基盤となることが期待できる。研究開発がアカデミア主体であるこ

とを受けた合理的な取り組みであり、高く評価できる。標準化という観点から、水電解の市場形成に重要である性能評価手法の開発を当該事業に取り込み、かつ成果の横展開（他事業者・企業）を図っており、この点も評価できる。

・ 水素利用等先導研究開発事業が開始されたのは 2014 年であり、まだ、水素基本戦略すら発表される前である。その後 COP21、IPCC 第 6 次報告書、第 6 次エネルギー基本計画、そして水素基本戦略の改定と、すさまじい勢いで外部環境が変化して来た。その間、内外動向を適切に捉え、水素に関する技術開発の道筋を見据え、水素社会構築のための水素低廉化の技術やビジネス展開など、柔軟に検討しながら軌道修正が為されている。

・ 先導研究は TRL の低いレベルからの出発であり、先の特許戦略が読みにくいところはあるが、事業後半に確実に特許数が増えるように特許化が進んでいる。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

・ アウトカム目標で提示された水素製造コストが国際的な情勢等の変化（外部環境の変化）によって変更せざるを得ない点は納得できるが、「水素導入量にも重きを置きたい」のであれば、水素製造コストと同様に水素導入量についても詳しい説明が必要であるように感じた。つまり、どのような背景から水素導入量が設定されたのか。これを達成するには何が課題になっているか、またはなりそうか。課題解決方法としては何が考えられるのか。現行の各事業はどの課題に取り組んでいるのかなどの説明が希薄であったように感じる。コスト目標は非常に分かり易い指標であり、導入量についても理解が進むような工夫をお願いしたい。

・ 本事業で目標を達成した事業は、次フェーズに移行して継続されることになるが、移行先の事業においては以下の 3 点について検討いただきたい。知財・標準化戦略を評価する指標の一つとして、秘匿性が高いために発表や出願を控えた件数等の提示。採択時などに実施者から示される知財・標準化計画と実施された発表や出願との整合性（計画通りに実施された内容は達成すべき成果に加えてもいいのではないか）。水素基本戦略（2023 年 6 月改定版）にもあるように「技術で勝ってビジネスでも勝つ」に貢献できる戦略の展開。

・ 公開成果報告会は新たな企業参入を促すと期待されるが、すでに企業と連携しているアカデミアの研究開発成果の利用は、新規参入を検討する企業にはきっかけ作りが難しい。測定方法の標準化を行ったテーマでは、多数の企業との NDA 締結による連携がうまれている点は高く評価できるが、標準化だけでなく、アカデミアによる研究開発成果をより多くの企業で実用技術化へ進めるための早期のグループ形成も望まれる。このような支援が NEDO の仲介で迅速かつ効率的に進められることが望まれる。

・ 国内外に出願された特許の権利化およびその実施状況について、事業終了後も追跡して情報を取りまとめることが必要である。また、特に重要と考えられる技術の基本特許については、テーマ実施者だけでなく、その技術に特化して国内外の出願状

況・技術レベル比較・本事業において出願された特許の優位性の変化などの調査・分析を、NEDO が支援して行うことも必要ではないか。

- 国内における標準化の推進体制構築のベストプラクティスを、他の事業でも共有化し、日本がリードするような標準推進の基盤形成に向けた働きかけを継続されることに期待する。
- 水素利用技術は先行していくものもいくつかあるが、多くは 10 年、20 年の長期の期間を要するものも少なくない、長期にわたって積み上げられてきた技術の継承や、これからの日本の技術展望を考えると是非とも若手研究者の育成を期待したい。さらに地方大学・機関、海外にも、優秀な研究機関があるので、しっかりと見極めて配慮してほしい。また、これら技術展開、新素材開発のなかで、資源の確保の問題、物質の毒性や作動中の安全性といった付随する案件も頻出するので考慮していただきたい。
- 標準化、特に世界戦略での世界標準化は、日本の技術がこれまでガラパゴス化で世界の覇権をとれなかった多くの先進技術の過去の例を鑑みると非常に重要な項目と思われる。まずは、この分野では日本が主導して、日米 EU 間で、測定法に加えて、技術や製品の世界標準化を進めてほしい。
- 水素をエネルギーという視点から捉えたシナリオとなっている。しかし、水素には化学品製造原料（$CO_2$資源化など）という重要かつ大きな将来用途もある。化学品製造は、エネルギー（燃焼）に比べて付加価値の高い用途といえる。早晩、水素に関わる技術の全体像（可能性と限界）が見えてくるものと思われる。従って、エネルギーに加えて化学品製造（汎用化学品・付加価値化学品）も出口とした水素活用の全体俯瞰図（達成水素コスト／可能な用途／用途ごとの必要水素量）を作成する時期であると考える。価値のないもの or 価値が乏しいものを燃焼させてエネルギーに変換するというのが原則である。水素の燃焼はこの原則に反する（もったいない)。現状の方針は、水素の大量導入による低コスト化となっているが、同時に、水素を可能な限り使わない（燃やさない）ためには、技術という観点から、何が必要か、何をすべきかという議論が必須であると思う。
- 特に改善点という事ではないが、今後とも水素を取り巻く環境変化は進展していくものと推定されるため、環境変化に対する機動力のある対応を期待する。
- 得てして知財は国内競合を優位に進めるために権利化されがちであるが、水素関連技術は国際競合の厳しい技術領域であり、技術を適用する国で権利化されていないと効力を発揮できない。事業が進む中では、技術の適用先である地域や国を見定め、是非国際特許の取得ができるような戦略、また、それを実施するには企業との連携が必須であり、企業連携を意識した特許マネジメントを期待する。

１．２　目標及び達成状況

＜肯定的意見＞

・ アウトカム目標は水素基本戦略に基づいて設定されており、本事業推進中に発せられた政府等からの各種戦略やエネルギー基本計画、あるいは中間評価で出された 9 つの提言などに対して、社会的影響や将来像に配慮した新規事業（開発項目Ｖなど）の立ち上げ、実施者や協業状態を勘考した進め方の変更や解決方法の提案などを実施してアウトカム目標を達成すべく尽力している。また、対応が急がれる案件については、非常に短期間で検討結果を出しており NEDO の迅速な対応力は評価に値する。これらは、本事業の特徴とも言うべき「アカデミアのチャレンジ、事業全体の TRL や事業毎に若干の差異が見られる TRL」にも配慮しながら実施されている。アウトカム目標の達成見込みでは、一件が未達とされているが、得られた成果を「熱需要への適用」技術として、これまでの成果を活かしつつ社会実装が果たせる内容に変更するとともに、既存の発電技術の取り込みによって要素技術を継続的開発に位置づけており、社会的影響等に配慮した見直しがなされたと考える。

・ アウトプット目標や指標は、アウトカム目標及び達成状況と同様に外部環境の変化への対応をはじめとして適切な見直しを実施していると考える。各研究開発項目（Ⅰ、Ⅲ～Ⅴ）の中の各事業実施者が取り組んだ研究開発項目においては未達が散見されるが、これらはより困難な課題へのチャレンジの結果であり、その原因分析なども実施されている。全ての研究開発項目（Ⅰ、Ⅲ～Ⅴ）において次フェーズに移行することになっており、最終目標は基本的には達成されたと判断できる。副次的・波及効果として、想定よりも多くの出願がなされ、測定法プロトコルの構築や IEC への登録などの成果も得られており、また、研究開発項目の中には新たなプレーヤーの参入を得ていることから、アウトプット目標や達成状況としては優れた事業であったと評価できる。論文発表や特許出願などもオープン／クローズ戦略に従い、事業化を見越した判断による実施を心掛けているにもかかわらず、多くの実施がみられており、この点も評価に値する。

・ アウトカム目標の設定根拠は明示され、本事業は「先導研究」として各テーマの技術成立性や経済成立性から、研究開発の次フェーズに移行できるかを判断し、そのような技術を創出することである点で、アウトカム目標の達成見込みのあるテーマが中間評価以降に継続されていた。水素利用の将来像とそれに対するアウトカム指標・目標値は世界の情勢も考慮して設定されており、それに必要な技術開発テーマおよび各テーマにおけるアウトプット目標との関係は明確であった。

・ 各テーマでは、数値化されたアウトプット目標が提示されていて、中間評価以降に見直しがなされたものを含めて適切に設定、管理されていた。多くの研究テーマが最終目標を達成し、本事業の終了後に、他事業における公募、審査、採択を経て、次のステージへ進んでいることから、目標達成状況は高く評価できる。特許戦略が機能したうえで、研究開発成果は論文、発表、特許などで公表されている。水電解技術ではアウトカム目標の達成につながるような新たな材料が開発され、今後のさ

らなる研究開発が期待される。研究開発成果が標準規格の一部に反映されるなどの成果も見られた。

- 外部環境の変化に応じたアウトカム目標の検証や見直しなど、事業期間を通じて適切に行われていたと思われる。特に、将来性が薄いとか見込めない事業に対する評価・判断をしっかり行うなど、事業の進捗状況に応じて継続の可否等の検討が適切に運営・管理されていた。
- アウトカム目標の達成は見込まれており、日本経済や水素社会の実現に向けた問題解決に与える効果も期待できるものであった。
- 今後の見通しに関する説明は、適切であったように思われる。
- 社会的影響は大きく変化しているが、水素利用技術として多くの基盤技術、先導的開発事業が提案、開発され、目標や達成見込み、課題が明らかになっている。アウトカムの目標は、現時点では妥当な値を達成していると思われる。
- コロナ禍の時期もあったが、種々の水素利用技術の初期目標はほぼ達成した、あるいは達成可能なレベルにあると考えられる。水素利用技術でアウトプット指標が、技術的に有効なレベルとして示され、ほとんどのプロジェクトは技術達成レベルにあったと判断される。
- 難易度の極めて高いアウトカム目標「水素 30 円/$Nm^3$、2030 年：水素発電コスト 12 円/kWh 以下、2040 年」であるが、達成を期待させる成果が得られつつある。すなわち、メタン直接改質法において、水素製造量に制約があるものの、30 円/$Nm^3$ の可能性が見えてきた。また、AEM 水電解では世界トップレベルの性能が実現されるとともに、低コスト化の方向性も明らかになった。さらに、高温水蒸気電解 SOEC においては耐久性 10 年に目途を得ると同時にコストダウンのポイントも明確にした。高く評価できる。水素発電（酸素-水素燃焼）はアウトカム目標「2040 年」の達成を議論できるステージにはないが、ゴール一直線ではなく、ステップワイズ（熱需要ニーズ）に展開させるという、社会に貢献しながら技術開発を進めるシナリオが構築できた。実施事業の多くが後継事業や実証事業として継続されることから、当該プロジェクトの技術開発の方向性の正しさと事業者選定の妥当性が示されたといえる。実施すべき、かつ実施して良かったプロジェクトと評価する。
- 事業者と NEDO マネジメントチームの擦り合わせにより、妥当な目標が設定されている。個別事業の達成度に、ばらつきはあるが全体として期待されるレベルの成果を上げたと判断できる。
- 応募テーマに依存するところではあるが、外部環境変化を反映して目標が適宜適切に変更されている。
- テーマによる違いはあるが、総じて、論文数の多い研究や権利化のできているテーマ、また、クローズ戦略で技術ノウハウを囲っているテーマなど、提案者の研究・事業環境に対して適切に運用されている。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

- 達成状況の計測については、水素製造コストにばかり目が行きがちであるが、本年6月に改訂された国の「水素戦略」においても掲げられている水素導入量への対応についても配慮が必要ではないかと考える。なお、今回の分科会では、委員から「水素の需要は二次エネルギーとしてだけではなく、化学製品の原料（G2X）としても需要がある」との発言があった。当然ながらNEDOのみで取り扱うべき内容ではないと考えるものの、「水素の利用先（需要）」として捉え、関係する有識者や事業者による意見交換をNEDOの主導で今一度実施すべきであり、必要であれば水素利用技術開発事業として立ち上げるべきではないかと考える。
- アウトプット目標の達成状況を計測（把握）するには何らかの数値が提示されるとより簡便で分かりやすいが、本事業のように次フェーズに移行可能な技術の確立を目標とする場合には数値化が難しい。以下のような項目の提示を検討いただきたい。各事業の開始時と中間・最終時(終了時)のTRLの提示（事業実施者による自己評価、NEDOによる評価、外部委員による評価、など）。事業実施者が取り組む研究開発の難易度。評価・解析技術の確立等を目標とする事業における達成成果（確立した技術）の効果や研究開発への貢献度（明確になった新たな課題、性能向上やコスト削減への貢献度）の提示。なお、継続可否審査や中間評価等で継続否となった事業者や終了時時評価において未達となった研究開発項目についてもフォローアップして、あくまでもポジティブに取り扱っていただきたい。
- アウトカム目標である水素コストについては一律な数値設定ではなく、現実的な用途に応じたコスト目標の設定（または見直し）も必要な段階にきているのではないか。先導研究ではリスクを伴うがそれが実現されることで大きな成果と社会的メリットがもたらされる研究開発を対象としていることから、本事業の場合、アウトカム目標の達成状況を計測可能な指標で示すことは難しいと思われる。よって、水素コストをアウトカム目標とする以外に、計測可能な指標が設定できるかどうかの検討が必要である。
- 先導研究はTRLの低い研究開発テーマを対象としているため、テーマ間の研究開発成果の比較が難しい点はあるが、各テーマで設定されたアウトプット目標の達成度だけではなく、異なる水電解技術間での比較を行うことなどが出来れば、アウトカム目標である水素コストに対する国内技術の成熟度の評価に部分的にでもつながるのではないか。このような比較の結果が、水素利用技術に関するロードマップの策定における有益な情報にもなるのではないか。NEDOにおいて、このようなテーマ間における技術レベルの比較を行う検討委員会（必ずしもオープンである必要はない）を作ってもよいのではないか。
- アウトプット目標と達成状況については、不十分と思われる点がいくつかある。①本事業の国際競争力に関連して、国際的な視点で、開発された技術の独自性と優位性が明確になっていない研究項目があったように思われる。開発された技術の世界レベルでの位置づけを明確にされた方がよいと思われる。②高IFの論文を評価に

値するとされているが、研究分野によっては、高 IF であっても同業者からの評価が低い学術誌も多く、高 IF を強調しすぎない方がよい。IF は一つの価値基準でしか無い。③採択の可否が決定していない投稿中（査読中）の論文を研究成果として認めるのは良くない。

- いくつかの事業では世界トップレベルのものが見られ大いにアウトカムを達成したものもあったが、一方で、実用化にはまだという技術も多々あった。欠点を明確に数値化し、KPI も、時間軸と労力やコストや設備等からしっかりと算出して、将来計画を示してほしい。
- アウトプットで技術は達成したので、この先の技術は既存のものを使うというものがあったが、ここはさらに踏み込んで新規技術として展開できるのではないかと思うので、今後検討して欲しい。5 年、10 年の資源や経済、環境など、外部変化の様子も考慮して、アウトプットを試算すると変動による影響が見やすいと思われる。
- 水素の重要性は論を待たない。従って、水素に関わる研究開発の実施はマストである。一方で、現実的な視点として、水素発電・水素製鉄において内外価格差を克服できるか否か、すなわち経済的な実施可能性があるかどうかを慎重に見極める必要もある。水素には化学品製造原料（$CO_2$ 資源化など）という重要かつ大きな将来用途もあり、発電・製鉄に比べるとコストの制約は大きくないと考えられる。20-30 円/$Nm^3$ ありきではなく、実現できる水素製造コストと展開「用途（発電、製鉄、汎用化学品製造、付加価値化学品製造 …）／必要水素量」という絵があったほうが良い。研究開発を実施する意義と成果ポテンシャルが分かりやすくなると思う。
- 各事業に対する達成度の評価は妥当と考えるが、達成度は設定目標（スタート時の競合分析に基づく）に対するものである。検討している技術が進歩するという事は、当然、競合技術も進歩する。従って、達成度に加えて、事業終了時の競合分析も示して欲しい。後継事業等の課題が明確になるとともに、競合する技術の勢いや伸びしろという観点からの情報が得られる。
- 目標の設定は事業の肝になる部分である。事業化に繋がりうる価値ある目標の設定という観点から、NEDO マネジメントチームには事業者の目標設定に更に深く関わっていただきたいと思う。
- 一般論として、特許出願件数のみから成果の大小は判断できないが、出願 0 件では技術としての成果が見えない。実施者には出願するように働きかけを強く望む。
- TRL の低い研究から出発している事業であるが、そのことを考慮しても、目標設定が定性的過ぎて、その目標を達成すればどのように先に進んで行けるのか判断できない。定性的な目標ながらも、目標を達成すれば、確実にアウトカムが見えてくるような設定、さらに、できれば、数値目標を課して、その目標値と事業成立の最終目標がどのようにリンクしているのか、次のステージではその目標値がどのように高くなっていくのか（その理由も）明確に設定されることを望む。

・ ほとんどのテーマが目標達成になっている。技術開発成果としては素晴らしい事であるが、極めて困難な難易度の高い研究を進めるのに、これほど目標が達成されていくのは不思議である。最終アウトカムに向かっての確実なステップを目標として掲げていることによるものと考えるが、技術開発はチャレンジであり、チャレンジを高めれば、一次目標が達成できなくても結果、実現の時期もパフォーマンスも早まる、高まる。目標設定は、半分が未達成になるぐらい、チャレンジ度高く設定されるようなマネジメントを望む。また、チャレンジした結果を評価する評価軸も必要である。

１．３　マネジメント

＜肯定的意見＞

・ 多くの個別事業（16 件中 15 件）が目標を達成（見込みも含む）しており、次フェーズへの移行が決定した事業もあることから、事業実施者はその能力を発揮して研究開発に取り組んだと考える。また、TRL が低い、目標達成が困難などのスムーズな進捗に支障が生じた事業に対しては、事業実施者の調整や技術委員会の設置などの措置を講じて当該事業に対するステアリング機能強化を図っている。これらの対応によって、個別事業あるいは本事業全体のスムーズな進展が図られており、NEDO の優れたマネジメントを示している。分科会委員からの「頑張っている」などの発言も含めて考えれば、NEDO のマネジメントの適正さは高く評価されるべきである。本事業は研究開発項目（Ⅰ、Ⅲ～Ⅴ）の四つに分類されているが、各項目間での連携はかなり希薄であるとの感があるものの、個別事業実施者間では十分な情報交換がなされているように感じた。先導的研究開発事業である本事業の位置づけが今後の技術開発体制を構築する足がかりであると理解すれば、連携体制の構築も目的の一つである。水素製造技術分野では、共通基盤・要素技術を扱うチーム作りに向けた動きも見受けられ、実用化開発に向けた体制作りを行っている段階であると考える。なお、分科会委員から「多岐にわたる内容がよくまとめられている」との発言があったことは管理手法の適切さを物語っていると考える。

・ 本事業では、継続可否審査、中間評価をはじめ、外部環境の変化に対応した新規事業の立ち上げや募集、などを実施してアウトプット目標やアウトカム目標の確実な達成に必要な進捗管理の場が設定されており、スケジュールは適切に計画されていたと考える。各事業における実施者の連携は果たされていたようであるが、要素技術間での連携については、実施体制でも述べたように、その体制が構築されつつある状況である。研究開発の進捗管理については、継続可否審査や中間評価などのほかに、定期的な会議（PL 定例会議、進捗フォロー会議、週例マネジメント会議）が開催されており、情報交換とともに進捗管理にも十分に努められたと考える。特に、事業者に対する進捗フォローでは事業成果の＜姿＞の共有や対象技術のポジショニングといった新しい手法を導入したことが一層効果的であったと考える。

- PL および各テーマの事業責任者がそれぞれの役割を遂行し、各テーマに参画した複数の実施者による連携を図った結果として、各テーマにおけるアウトプット目標の達成につながっている。一部のテーマの終了や新規テーマの公募など、採択プロセスとその後の管理は適切に行われたと思われる。研究開発データの利活用は、MI データベースの構築など適切に行われている。アカデミアと企業との連携によって実施されており、実用化を目指した体制となっていた。
- 各テーマにおいて研究開発計画は適切に計画・実行され、その成果がアウトプット目標の達成につながっている。
- 特に進捗管理のところでも実際に様々な体制をつくられ、そして実施者、それから将来的な受け渡し側の企業等々の橋渡し的な役、それからアカデミアの実施者の方々のそういった市場化の意識を醸成することで、より基盤研究的な中身の将来に向けたいろいろな意味での連携及びつながりを深める取組を検討、実施されていた。
- 実施者は技術力を発揮されていた。また、事業実施での責任体制も明確であったと思われる。
- アウトプットの達成に必要な技術開発は網羅されており、研究開発のスケジュールは適切に計画されていたように思われる。
- 産官学のいくつかのバリエーションもあるが、日本で実力のある実施体制と考えられ、その実力を発揮したと思われる。すべての事業で実用化を目指した体制となっていた。データの保護、守秘体制は充分であったと思われる。
- 研究分担、研究計画は、すべてのプロジェクトで、緻密に作られており、研究計画開発については問題ないと考えられる。研究手法も新しいものも取り入れており、報告された内容はすべて適切であった。
- NEDO マネジメントチームが企業出身メンバーをもつという特長を活かして、実用化に繋げるという視点から適切かつ効果的なマネジメントを実行している。当該委員が知る事業の中でもトップクラスに位置付けられる質の高いマネジメントであった。高く評価できる。
- 中間評価結果への対応が重要なマネジメントポイントとなるが、改善指摘項目に対して、適切な対応を行った。特に、企業-アカデミア協業事業におけるアカデミアの適正なプレーヤーへの変更マネジメント（プレーヤー選定／企業-アカデミアの合意）の難易度は高いと思われるが、最適と考えられるプレーヤーへの変更を実現するとともにマネジメント体制も強化して成果に結び付けた。高く評価できる。
- 専門性の高い PL、PM を設置し、定期的な報告会や外部への成果の発信、など、適切な PDA と客観的な評価の下で進められるようなマネジメントがなされている。
- 長期の研究開発の難しさはあるが、事業化に向けたロードマップが描かれ、外部環境変化の下で適宜変更されながら進捗管理と運用がなされている。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

- 本事業の達成目標では「手法や技術の確立」といった内容が多い。「手法や技術が確立」されれば目標は達成されたことになるが、確立された手法や技術が本事業全体あるいは個別事業の中においてどのような貢献をしたのか、どの部分の研究開発内容に関連付けられるのか、などを図表を用いてより明確に示していただきたい。
- 本事業には 4 つの研究開発項目（個別事業）があり、複数のテーマで構成されている事業もあれば、単一テーマの事業もある。また、4 つの個別事業は関連性の高い事業もあれば、専門性を異にする事業もある。「要素技術間の連携」を個別事業内部での連携と捉えれば問題はないとの評価になる。一方、本事業が革新的“要素”技術の研究開発事業であることを考えれば事業全体として見る必要があり、個別事業間の連携については専門性の観点からかなりハードルが高いように思う。但し、本事業から次フェーズに移行した後は、実用化に一歩近づいた要素・実証研究開発を進めていくことになる。水素社会実現への貢献を果たすべく、異なる専門分野との連携をも意識して（最近はあまり聞かなくなった）“オールジャパン”体制での事業展開を NEDO にはお願いしたいと考える。
- 短い事業期間の中でユーザーの関与までを進めることは容易ではないが、次のステージへ移行する段階で、ユーザーを含めた体制へと進化することが期待される。
- こうした研究者と事業者との連携を諮ることは、国プロとして重要な取り組みであり、実際の効果や課題を抽出し、他の研究開発事業に生かすような対応に期待したい。
- マネジメントについての今後への提言は、特に無い。研究開発メンバー間の研究体制が適切に機能していたかどうかを十分に把握しておく必要があると思われる。
- 多額の研究費が投じられていることから、研究開発の成果を結果論として判断せざるを得ないこともある。どの程度の頻度で、研究開発メンバーと関係者間が打合せを実施しているのかを、可能な範囲内で明確にされた方がよいと思われる。
- 基礎研究段階ではあるものの企業との連携が一部見られつつある。今後の取り組みにおいてパイロットプラントでの実証検討などが実施されることが期待される。今回の報告ではプロジェクトメンバーの細かい全体像までは見えないので、おそらく考慮されていると思われるが、若手研究者の積極的参画を望みたい。
- コロナ禍もあったのでこれは仕方がないかと思われるが、プロジェクトはグループで行われているが、それぞれが個別の技術（パーツ）をバラバラに担当し、それを後で組み合わせる手法のプロジェクトがほとんどであった。パーツは分担者のみに任せるだけでなく、グループ内である程度技術やノウハウを共有してクロスした協働プロジェクトという手法もあるべきと思う。研究手法はノーマルで結構であるが、特に耐久性については短時間での手法が確立されていないので検討してほしい。

・ プラットフォーム「評価／解析」の構築は日本の電解技術力の向上と技術開発の加速につながる重要なものである。”日本のプラットフォーム”とするためには、プラットフォームそのものの構築を事業者に委ねるのではなく NEDO が有識者等の意見を聞きながら各役割を果たす事業者を選定し、プラットフォームの構成を作り上げた方がよいと思う。
・ NEDO 評価項目・基準において終了時評価を更に価値あるものとするために、以下 2 点をお願いしたい。一点目は、質問-回答を現状の一度から、必要に応じて二度（再質問-回答）に増やしていただきたい。討議時間が限られているため、事前の質問-回答の充実が精度の高い評価に繋がると考える。もう一点は、「2.（2）アウトプット目標及び達成状況」に関連して、知財の重要性周知に加えて、競合分析に関するマネジメントも強化していただきたい。評価会において、競合分析を問う質問に対して、検討している技術の優位点のみを主張する返答があり、競合分析に対する意識の低さを感じた。これでは「やるべきことではなく、やりたいことをやっている」と取られかねない。事業終了時の競合分析は必須という意識付けのマネジメントをお願いしたい。
・ NEDO 事業に於けるマネジメントの難しいところは、類似提案テーマについては進捗を公表して競争させながら、一方で秘匿の内容は伏せて公平に開発を促進しなければいけないところである。お互いに共通する有用情報をシェアすることにより、無駄なくシナジーが期待できる場合もある。また、進捗状況によってはふるいにかけられて落ちて行くテーマもある。今後ともに競争と協調をうまくハンドリングしながら適切なマネジメントを期待する。
・ 例えば 30 円/$Nm^3$ の水素目標を達成するのは、一つのテーマや技術で実現できるわけではない。この技術、このテーマが入ってくれば、現在事業で進行している技術の先の可能性が活きてくる、というような場合がある。技術の網羅性を描き切るのは難しいが、最終的な目標に至る計画の中で、個の技術で不足する部分など、NEDO の方で適切に探索・網羅しながら、各技術の総和として、シナジーをもって国の目標が達成できるようにお願いしたい。

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 | A | A | A | A | A | A | A | 3.0 |
| | (2)知的財産・標準化戦略 | A | A | B | A | A | A | B | 2.7 |
| 2. 目標及び達成状況 | | | | | | | | | |
| | (1)アウトカム目標及び達成見込み | A | B | A | A | B | A | C | 2.4 |
| | (2)アウトプット目標及び達成状況 | A | A | A | B | A | A | B | 2.7 |
| 3. マネジメント | | | | | | | | | |
| | (1)実施体制 | A | A | A | B | A | A | B | 2.7 |
| | (2)研究開発計画 | A | A | A | B | A | A | B | 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

# 「水素利用等先導研究開発事業」

# （終了時評価）

# 事業原簿【公開】

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

## —目次—

# 内容


**概　　要 ..... 2**

**プロジェクト用語集 ..... 8**

**１．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋 ..... 34**

1.1 事業の位置づけ・意義 ..... 34
1.2. アウトカム達成までの道筋 ..... 38
1.3. 知的財産・標準化戦略 ..... 39

**２．目標及び達成状況 ..... 41**

2.1. アウトカム目標及び達成見込み ..... 41
2.2. アウトプット目標及び達成状況 ..... 43

**３．マネジメント ..... 82**

３.１実施体制 ..... 82
３.２予算及び受益者負担 ..... 84
３.３研究開発計画 ..... 85

**４．目標及び達成状況の詳細 ..... 89**

概要 ..... 89
４．１　水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 ..... 107
４．２　従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発 ..... 158
４．３　エネルギーキャリアシステム調査・研究 ..... 164
４．４　炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 ..... 177

**添付資料 ..... 205**

●プロジェクト基本計画 ..... 205
●特許論文等リスト ..... 222

## 概　要

| | |
|---|---|
| 最終更新日 | 2023 年 9 月 4 日 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| プロジェクト名 | 水素利用等先導研究開発事業 | プロジェクト番号 | １４０２１ |
| 担当推進部/<br>ＰＭｇｒ<br>及び METI 担当課 | ○担当推進部/ＰＭｇｒ<br>新エネルギー部　大平英二　（2013 年 4 月～2018 年 3 月）<br>次世代電池・水素部　原　大周　（2018 年 4 月～2021 年 7 月）<br>スマートコミュニティ・エネルギーシステム部　田中博英　（2021 年 8 月～2023 年 3 月）<br>○METI 担当課<br>産業技術環境局 環境政策課 エネルギー・環境イノベーション戦略室 | | |
| ０．事業の概要 | 脱二酸化炭素の社会の潮流の中で世界各国は、水素に将来のエネルギー源としての役割を担わせる水素社会の実現に期待を寄せている。このため本事業は 2040 年以降の長期的視点を見据えて水素等の新たなエネルギー源が従来の化石燃料と競合できる価格となることを目指し、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、炭化水素等からの水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術、及び高効率水素発電技術の先導的な研究開発に取り組むものである。 | | |
| 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 | 我が国においては、過去の原子力発電所における事故等も踏まえて「国民の安全の確保」を最優先とした上で、望ましいエネルギーミックスが可能となるようなエネルギー供給体制を構築することが求められている。エネルギーミックスの実現には、社会インフラの変革も視野に入れ、省エネルギー・節電対策を抜本的に強化すること、再生可能エネルギーの開発・利用を最大限加速させること、天然ガスを始め、環境負荷に最大限考慮しながら、化石燃料を有効活用すること（化石燃料のクリーン化利用）等が重要である。<br>このうち、再生可能エネルギー関係技術に対しては、出力変動のある太陽光発電、風力発電等を有効利用するための電力貯蔵や、移動体としての電気自動車用途を想定した二次電池の開発が進められているが、現状では電池のエネルギー密度が十分に高いとは言えないため、変動周期が長い風力発電等に対する大規模電力貯蔵能力の向上や、電気自動車の航続距離延長に貢献するための大規模蓄エネルギー体の実現が喫緊の課題となっている。また、海外では再生可能エネルギー又は炭酸ガス貯留技術と組み合わせた未利用化石燃料等の大規模開発が急速に進められているが、エネルギー適地がエネルギー消費地から長距離隔てられていることが開発の障害の一つとなっている。<br>このような問題に対し本事業は、再生可能エネルギー等からの高効率低コスト水素製造技術開発、高効率水素-エネルギーキャリア転換・輸送技術等の技術開発、高効率な国内外の再生可能エネルギー等の大規模利技術開発、再生可能エネルギー適地等の経済発展支援、世界規模での炭酸ガス排出削減等を図るものであり、我が国のエネルギーセキュリティの確保、並びに世界的な地球温暖化対策への貢献のために、本事業に国として投資を行うことは極めて重要である。 | | |
| 1.2 アウトカム達成までの道筋 | 本事業は「基礎的・基盤的研究開発」であり、プロジェクト終了後 5 年を目処に（もしくはそれ以上の期間で）、実用化まで達することを目指す研究開発として位置づけ、多様なテーマで実施する技術シーズの技術成立性や経済成立性等を確認して次の研究開発フェーズへ移行させるか否かを判断する。<br>本事業における「実用化」とは、「水素製造から、貯蔵・輸送、利用等まで水素サプライチェーンを構成する要素技術について、事業化に向けた次のフェーズの国家プロジェクトや自主研究開発等へ移行可能な技術が創出されること」と定義する。<br>本事業終了後、後継事業を橋渡しとして実施し、2030 年のアウトカム目標「水素製造・輸送：2030 年における水素コスト 30 円／Nm3 を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現」につなげる。ひいては、水素基本戦略で掲げる水素導入量目標（2030 年 300 万 t、2040 年 1200 万 t、2050 年 2000 万 t）に貢献し、水素社会の実現を目指す。 | | |
| 1.3 知的財産・標準化戦略 | 「NEDO 知財マネジメント基本方針」及び「経済産業省委託研究開発における知的財産マネジメントに関する運用ガイドライン」に則り戦略を策定した。特にアカデミア成果についてはオープン/クローズ戦略を進めるうえで重要な戦術としての出願やノウハウ指定などの権利主張についても丁寧な議論を推奨すると共に、「仕上げたい技術の姿」という定型プラットフォームを構築して、実施計画書に記載する実施項目のアウトプッ | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | トの絵姿を見える化したことで具体的な議論を推進した。また、知財届出申請書のフォーマットを変更し、成果の公開時に権利化していない場合はその理由も明記することで、知財創出に対する気付きを慫慂した。 | | | |
| 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 | アウトカム目標 | 再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。<br>水素製造・輸送については、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。<br>水素発電については、２０４０年以降、水素コスト２０円／Ｎｍ３において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。<br>また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。 | | |
| | | 目標に対する達成度 | 本事業では、「水素製造から、貯蔵・輸送、利用等まで水素サプライチェーンを構成する要素技術について、事業化に向けた次のフェーズの国家プロジェクトや自主研究開発等へ移行可能な技術の創出」を達成し、本事業終了後、全て後継事業に繋がっており、アウトカム達成に向けた取り組みは計画通り進んでいると考えられ、目標は達成の見込みと言える。 | | |
| | 2.2 アウトプット目標及び達成状況 | 研究開発項目 | 最終目標<br>（2022 年度） | 達成状況 | 説明 |
| | | Ⅰ水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | プラント引渡し価格３０円／Ｎm3 に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法を確立する。 | ○ | MI 等も活用し、アルカリ、PEM、AEM、SOEC 型水電解技術開発に取り組み、高性能・高耐久・低コストを成立させる材料からシステム開発、評価技術、劣化加速プロトコルを開発。目標水素価格実現に向けて開発の指針原案や性能等評価方法を確立した。 |
| | | Ⅲ従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発 | 事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。 | ○ | 発電効率 68%達成可能なシステムに係る高圧燃焼試験を実施した。また社会実装の検討においては 2030 年に社会実装を視野に熱需要への酸素水素燃焼の適用について具体的に案をまとめた。 |
| | | Ⅳエネルギーキャリアシステム調査・研究 | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。 | ○ | 有機ハイドライド製造に関する及び液体水素に関する解析モデルによる設計技術の構築と要素材料技術開発に取り組み、解析手法の提示と活用を進めた。 |
| | | Ⅴ炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する二酸化炭素を排出しない水素製造技術の設計指針を確立する。 | ○ | 水素製造プロセスについてベンチスケール試験を推進するとともに、副生する炭素の回収や利用についても検討が進み、プロセス設計指針を確立したことで、実証フェーズの検討を具体的に取り組むことができた。 |
| 3．マネジメント | | | | | |
| | 3.1 実施体制 | 経産省担当原課 | 産業技術環境局 環境政策課 エネルギー・環境イノベーション戦略室 | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | プロジェクトリーダー | 産業技術総合研究所 関西センター所長代理　栗山信宏 |
| | | プロジェクトマネージャー | 新エネルギー部　　大平英二　（2013 年 4 月～2018 年 3 月）<br>次世代電池・水素部　原　大周　（2018 年 4 月～2021 年 7 月）<br>スマートコミュニティ・エネルギーシステム部　田中博英<br>（2021 年 8 月～2023 年 3 月） |
| | | 委託先<br>（2021-2022 年度） | Ⅰ 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発（委託事業）<br>(1) 高温水蒸気電解技術の研究開発（東芝エネルギーシステムズ）<br>(2) 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発（理化学研究所）<br>(3) アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発（産業技術総合研究所、早稲田大学、北海道大学）<br>(4) 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発（東京工業大学）<br>(5) アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化/アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究（横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、公立大学法人大阪、東北大学、学校法人立命館、デノラ・ペルメレック、物質・材料研究機構）<br>(6) 高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発（山梨大学、パナソニック ホールディングス、タカハタプレシジョン、日本化学産業、東北大学）<br>(7) 低コストＡＥＭ型水電解システムの実現に向けたアニオン交換膜材料の高ロバスト化（東京工業大学、日本触媒）<br>(8) プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究（2022 年度から）（北海道大学）<br>Ⅲ 従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発（委託事業）<br>(1) 酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発（産業技術総合研究所、宇宙航空研究開発機構、東京工業大学、大阪大学、電力中央研究所、石炭フロンティア機構、川崎重工業、東芝エネルギーシステムズ）<br>Ⅳ エネルギーキャリアシステム調査・研究（委託事業）<br>(1) トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上（横浜国立大学、東北大学）<br>(2) 水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築（早稲田大学、荏原製作所、東京大学、東北大学）<br>Ⅴ 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発（委託事業）<br>(1) ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発（2021 年度まで）（筑波大学、東京工業大学、物質・材料研究機構、大阪大学）<br>(2) メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発（戸田工業、エア・ウォーター）<br>(3) メタン直接分解による水素製造技術開発（伊原工業、東京理科大学（2021 年度まで））<br>(4) メタン熱分解による水素製造技術の研究開発（産業技術総合研究所、京都大学、ＩＨＩ）<br>(5) メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造（物質・材料研究機構、太陽鉱工、静岡大学） |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.2 受益者負担の考え方<br><br>事業費推移<br>(会計・勘定別にNEDO が負担した実績額（単位:百万円)) | 実施事項 | 2017fy まで | 2018fy | 2019fy | 2020fy | 2021fy | 2022fy | |
| | 研究開発項目Ⅰ | | → | → | → | → | → | |
| | 研究開発項目Ⅱ | | → | → | | | | |
| | 研究開発項目Ⅲ | | → | → | → | → | → | |
| | 研究開発項目Ⅳ | | → | | | → | → | |
| | 研究開発項目Ⅴ | | | → | → | → | → | |
| | 会計・勘定 | 2017fy まで | 2018fy | 2019fy | 2020fy | 2021fy | 2022fy | 総額 |
| | 一般会計 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 特別会計（需給） | 5,986 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1,335 | 1,670 | 12,625 |
| | 開発成果促進財源 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 総 NEDO 負担額 | 5,986 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1,335 | 1,670 | 12,625 |

| | | |
|---|---|---|
| 3.3 研究開発計画 | | |
| 情勢変化への対応 | 本事業実施期間中、METI 革新的環境イノベーション戦略が 2020 年 1 月に公表された。ここでは①コスト目標、世界の削減量、②開発内容、③実施体制、④基礎から実証までの工程をイノベーションアクションプランとして明記され、水素も重要 5 分野の一つとして位置づけられた。これを受けて 2021 年度に新たなテーマ公募を実施し、新たな研究開発の進展を図った。 | |
| 中間評価結果への対応 | 指摘 | 対応 |
| | 事業の位置付け・必要性<br>【１】事業を効率的に推進し、成功の確率を高めるためには、単一の技術開発の組合せではなく、有機的に結びつけることが必要であると思われる。 | 本指摘は特に研究開発項目Ⅰ水電解に関する指摘として理解した。水電解分野の技術開発においてはその性能向上やコスト低減に対し部材レベルでのシーズ探索が点在している様相であった。そのため、これらのシーズ開発が要素部品開発を経て製品開発、さらには水電解プロセスに貢献し水素製造価格目標に到達するために事業者に対しバリューチェーンの上下流だけではなく、ステークホルダーに対する理解や連携を促した。その結果、後継事業では企業との共同提案が加速されただけでなく、これまであまり注目されなかったBOP のコストに対する課題認識を醸成することができた。 |
| | 研究開発マネジメント<br>【２】ほぼ全ての研究開発項目の達成度が「○」以上であり、達成できる目標を設定するのではなく、将来の実用化に繋がりうる目標を設定すべき。<br>【３】今後については、チャレンジングな目標に対しては、「未達＝ネガティブ評価」ではなく、研究開発のプロセスと挽回の為の方策を評価するという、評価サイドの見識が必要である。 | 中間評価後の 21 年度公募・研究開発項目Ⅴにおいて独創的かつチャレンジングな案件も、年度内に継続可否審査を受けることを条件に採択。継続可否の審査においては、1 事業については仮説検証が不十分として中止の判断をした。また 1 事業については共同提案であるアカデミアの取り組みが技術開発のバックアップとして十分機能していないとの判断から適切なアカデミアへの組換えを行った。 |
| | 研究開発成果<br>【４】全体に技術の比較が不十分であり、同種技術（材料）だけでなく異種技術（材料）に対しても比較した方が良い。 | 公募時の提案書様式に提案技術のポジションを明示的な記述を促すことを目的に、競合技術、代替技術及びそれらの水準について記載するよう工夫した。また、仕上げたい技術の姿において競合・代替技術を |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | 具体的に記述するなどに取り組み、提案技術の位置付けがより明確になった。 |
| | | 研究開発成果<br>【５】本事業での開発成果が、世界最高水準のものであるか、次世代技術の新開拓にどのように貢献していくかを示していくことも重要。 | 高 IF 誌への掲載（東工大 1 件、理研 1 件）もあり、当該事業での研究開発レベルをアピールすることができたと認識している。この掲載がきっかけでアカデミアである事業者と企業との連携が加速された。 |
| | | 研究開発成果<br>【６】研究発表は行われているが、知財戦略の手薄感が否めないので、特許出願や国内外の原著論文(査読付き)への掲載も目指して頂きたい。 | 「仕上げたい技術の姿」を活用し、事業において取り組む技術開発のバックグラウンド IP 及びフォアグランド IP を整理し、研究開発項目ごとに想定される知的財産の権利主張や公表の計画などを事業開始時に確認し、その進捗をステアリングした。 |
| | | 成果の実用化向けた取り組み及び見通し<br>【７】基礎的な内容を含む研究開発の中には、大きなブレークスルーが期待されつつも、その技術を事業化すると言った道筋が見えにくいものがあることから、成果の実用化戦略の中に、商業収入をえるまでに、今後どれだけの開発費用が掛かるのか等の想定を明示するなど、個社における事業化の困難さを把握することが望まれる。 | 研究開発Ⅲにおいてはコスト・効率・必要性・実現性から事業化の困難さを把握した。他方、技術開発の成果をより早く社会実装するために熱需要への適用を見出した。 |
| | | 成果の実用化向けた取り組み及び見通し<br>【８】今後については、前提条件を明確にして、コスト試算に納得感を持たせるなど、活動の中でしっかり考察していただきたいと考える。 | 研究開発項目Ⅰでは将来水素が必要とされつつも、市場が未成熟であるためユースケースの具体化が難しい側面もあるが、社会実装の姿を考慮しつつ部材開発の仕様を具体化する必要性があることを認識してマネジメントに取り組んだ。研究開発項目Ⅴでは条件が明確な実証地を得たうえで、実証試験に進むめどを立てた。 |
| | | 成果の実用化向けた取り組み及び見通し<br>【９】中小企業では出来ない学術的な分析を行うことで、合理的な開発の道筋を示して支援を行うような取り組みもあって良いと思われる。 | 研究開発項目Ⅴの 1 事業については適切な助言が期待できるアカデミアを新たに再委託するだけなく、技術委員会の委員による進め方委員会の形成や、副生炭素の利活用について助言できる外部有識者との連携を促すマネジメントを進めた結果、プロセス化を推進する企業の関心を得るとともに、副生炭素の新たな機能発見につながった。 |
| | | 評価に関する事項 | 事前評価　2013 年度　実施 |
| | | | 中間評価　2015 年度　中間評価実施 |
| | | | 中間評価　2017 年度　中間評価実施 |
| | | | 中間評価　2020 年度　中間評価実施 |
| | | | 終了時評価　2023 年度　終了時評価実施 |
| 別添 | | | |
| | 投稿論文 | 2021 年度 32 件、うち査読付き 26 件<br>2022 年度 62 件、うち査読付き 51 件 | |
| | 特　　許 | 2021 年度　54 件、うち PCT５件、外国出願 28 件（国内移行含む）<br>2022 年度　70 件、うち PCT6 件、外国出願 30５４件（国内移行含む） | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | その他の外部発表（プレス発表等） | ・口頭発表<br>2021 年度 63 件、うち査読付き 7 件<br>2022 年度 83 件、うち査読付き 15 件<br>・ポスター発表<br>2021 年度 8 件、うち査読付き 1 件<br>2022 年度 12 件<br>・メディアでの取り上げ<br>2021 年度 11 件、2022 年度 13 件<br>水の電気分解用、安価な触媒開発　日本経済新聞 朝刊 11 ページ　2021/3/8 他<br>・特記事項<br>ACS Applied Energy Materials　表紙<br>Reproduced with permission from Y. Sugawara, K. Kamata, A. Ishikawa, Y. Tateyama, T. Yamaguchi Efficient Oxygen Evolution Electrocatalysis on CaFe2O4 and Its Reaction Mechanism. ACS Appl. Energy Mater. 2021, 4, 4, 3057−3066 Copyright © 2021 American Chemical Society. | |
| | 基本計画に関する事項 | 作成時期 | 2014 年 3 月　作成 |
| | | 変更履歴 | 2016 年 2 月　改定（中間評価結果を踏まえ、研究開発項目の内容及び目標を改定）<br>2017 年 3 月　改訂（基本計画マニュアル改訂及び中間評価結果を踏まえ、プロジェクトリーダーの追記及び研究開発項目の目標を改訂）<br>2017 年 6 月　改訂（研究開発の実施期間及び評価に関する事項を一部改訂<br>2018 年 3 月　改訂（中間評価結果（２０１７年度）を踏まえ、事業期間の延長及び後期５年における実施内容の追加による改訂）<br>2018 年 5 月　改訂（プロジェクトマネージャー変更による改訂）<br>2019 年 1 月　改訂（研究開発項目②の達成目標の一部修正及び期間延長、研究開発項目⑤の追加）<br>2020 年 3 月　改訂（研究開発項目③の実施内容と名称の変更）<br>2021 年 1 月　改訂（研究開発項目④及び⑤の達成目標の追加、研究開発項目⑤の名称変更による改訂）<br>2022 年 2 月　改訂（事後評価実施年度の変更による改訂） |

# プロジェクト用語集

Ⅰ 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

Ⅰ-（1） 高温水蒸気電解技術の研究開発（東芝エネルギーシステムズ）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| GDC | GDC | 中間層材料。ガドリニア添加セリア（Gadolinia Doped Ceria）。$Gd_2O_3$-$CeO_2$ |
| IEA | IEA | 国際エネルギー機関（International Energy Agency） |
| IEC | IEC | 国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission） |
| ISO | ISO | 国際標準化機構（International Organization for Standardization） |
| SDC | SDC | イオン伝導体材料。サマリア添加セリア（Samaria Doped Ceria）。$Sm_2O_3$-$CeO_2$ |
| SOEC | SOEC | 固体酸化物電解セル（Solid Oxide Electrolysis Cell） |
| コウオンスイジョウキデンカイ | 高温水蒸気電解 | “固体酸化物形セル”を用い、水電解を高温で行う技術。 |
| コタイサンカブツデンカイセル | 固体酸化物電解セル | 主にセラミックス（およびサーメット）からなる、水素極／電解質膜／酸素極の積層構造体。高温で酸素イオン伝導性の高い酸化物を電解質膜とし、電場下で水素極側の水蒸気から酸素を酸素極側へ移動して水素製造する。電解質にプロトン伝導性の膜を使用する場合もある。 |
| スタック | スタック | 複数のセルを積層一体化したもの。ガス供給・排出、および給電のポートを備える。 |

Ⅰ-（2）非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と
安定性向上の研究開発（理化学研究所）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| MEA | MEA | Membrane Electrode Assembly、日本語では、膜電極複合体、もしくは、膜電極接合体と呼ばれる。アニオンもしくはカチオンを透過する高分子膜と触媒電極部を一体化した構造体。水電解の場合は、この電極部分で水電解反応を起こす。 |
| PEEC | PEEC | Polymer Electrolyte Electrochemical Cell、固体高分子型水電解セル。 |
| PEM | PEM | Polymer Electrolyte Membrane、固体高分子膜。 |
| アニオン | アニオン | 負に荷電したイオン。 |
| アノード | アノード | 反応物質を酸化する（反応物質から電子を取り去る）反応を生じさせる電極。外部から電流が流れ込む電極となる。 |
| カソード | カソード | 反応物質を還元する（反応物質に電子を与える）反応を生じさせる電極。外部へ電流が流れだす電極となる。 |
| カチオン | カチオン | 正に荷電したイオン |
| ききんぞく | 貴金属 | 化合物をつくりにくく希少性のある金属。金 (Au)、銀 (Ag)、白金 (Pt)、パラジウム (Pd)、ロジウム (Rh)、イリジウム (Ir)、ルテニウム (Ru)、オスミウム (Os) の8つを一般に貴金属元素という。 |
| こたいこうぶんしがたみずでんかいせる | 固体高分子型水電解セル | 高分子膜をイオン導電体として用いた水を電解して酸素と水素を生成するデバイス。高分子膜として、普通はカチオン透過膜を用いる。 |
| こたいこうぶんしまく | 固体高分子膜 | イオン導電性を持つ高分子膜。（電気化学では通常液体をイオン導電性物質として用いるため、こう呼ばれる。） |
| システム | システム | お互いに影響を及ぼす複数のデバイスを組み合わせることである目的に対応して動作する形としたもの。 |
| スタック | スタック | 一対のアノードとカソードをたくさん積層すること。これより動作電圧を高くすることが可能なため、デバイスとして制御が行いやすくなる。 |
| デバイス | デバイス | ある特定の機能を持つ機械。 |
| ひききんぞく | 非貴金属 | 貴金属元素以外の全ての金属元素。 |
| マルチスタック | マルチスタック | たくさん積み重ねること。 |
| みずでんかいせる | 水電解セル | 水を電解して酸素と水素を生成するデバイス。 |

Ⅰ-（3）アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発
（産業技術総合研究所、早稲田大学、法人北海道大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| AFM | AFM | 原子間力顕微鏡。微細な探針で試料表面を走査し、ナノスケールの凹凸形状を三次元的に計測する装置 |
| CCM | CCM | 表面に触媒を担持させた電解質膜。通常アイオノマを結着材に用いる。 |
| MEA | MEA | ガス拡散層、触媒層、固体高分子膜（電解質）、を貼り合わせて一体化した膜/電極接合体 |
| PTE | PTE | PTL（多孔質移動層）表面に触媒層を形成したもの。水電解セルではこの触媒面を電解質膜に押し付ける。CCSという場合もある。 |
| PTL | PTL | 水電解セルで電極と複極板の間に配され，反応物や生成物の移動や両者の間の電気伝導を担う．一般的に導電性材料を用いた多孔質媒体．燃料電池のガス拡散層に相当し、水電解セルでは給集電体とも呼ばれる。 |
| BPP | BPP | バイポーラープレート（複極板あるいは双極板）。セルをスタック化した際にセル同士を仕切る板となる。 |
| アイオノマ | アイオノマ | 高分子膜の主鎖およびイオン交換基をイソプロピルアルコールなどの溶媒に溶解させた溶液。乾燥させると高分子膜と近い性状を持つことになる。<br>電極を作成する際、触媒粒子の結着剤(バインダ)として用いられることが多い。 |
| アニオンコウカンマク | アニオン交換膜 | 負の電荷をもったアニオンをイオン伝導担体としてイオン伝導する固体高分子膜、一般的には炭化水素系の膜が多く，炭化水素系主鎖に四級アンモニウム塩などが官能基として付いていてアニオン伝導性を呈する。AEMと略する。 |
| アノード | アノード | 水電解セルでは酸素を発生する陽極 |
| カソード | カソード | 水電解セルでは水素を発生する陰極 |
| カッセイカカデンアツ | 活性化過電圧 | 電極反応速度が律速となる過電圧成分．触媒性能，触媒有効表面積に依存する. |
| カデンアツ | 過電圧 | 水電電解に要する理論電圧値と実際の電解電圧の差 |
| ショクバイ | 触媒 | 電極反応を促進するために用いる材料．アニオン交換膜時水電解では，アルカリ水電解と同様な触媒材料の使用が可能. |
| デンカイシツマク | 電解質膜 | 電気化学装置でイオン伝導を担う媒体である電解質に用いる固体高分子膜．主にカチオン交換膜とアニオン交換膜の二種類がある. |
| デンカイセイノウ | 電解性能 | 水電解セルでは，電流密度－電圧曲線が代表的性能指標．特定の電流密度における電圧は低いほど高性能. |
| ナノバブル | ナノバブル | １μm以下のナノメートル単位の気泡 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| ノウドカデンアツ | 濃度過電圧 | 反応物や生成物の物質移動が律速となって生じる過電圧成分. |
| バイポーラープレート | バイポーラープレート | 電解セルをスタックした際にセル同士の仕切り板となる導電性金属板であり，スタックでは一枚が陽極と陰極の働きを同時にする．水やガスを流すための流路を設けるための加工が施されている. |
| プローブケンビキョウ | プローブ顕微鏡 | 走査型トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡（AFM）に代表される、微小な針（探針：プローブ）で試料をなぞって、その形状や性質を観察することができる顕微鏡の総称 |
| ムデンカイセキシュツ | 無電解析出 | 金属薄膜を形成する電気化学的めっきプロセスの一つであり，還元剤の酸化反応からの電子供給によって金属イオンを還元することで膜を形成する．薄膜の析出均一性に優れ，樹脂等の不導体表面にも金属析出が可能であるという特長を有する. |
| ショクバイカク | 触媒核 | 無電解析出プロセスを利用して不導体上に金属薄膜を形成するにあたっては，その表面に対し，還元剤の酸化反応を選択的に促進する触媒（Pdなど）のナノ粒子をあらかじめ付与する必要がある．これを触媒核と呼ぶ．なお水素発生等のための触媒電極という意味での「触媒」とは異なる．無電解析出を用いた不導体基板への金属薄膜形成の高精度制御においては，この触媒核を均一に表面に付与する方法が最も重要な要素技術の一つとなる. |

Ⅰ-（4）高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発
（東京工業大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| HER | HER | カソードで起こる水素を生成する水素発生反応(Hydrogen evolution reactionの略号) |
| MEA | MEA | 膜電極接合体(Membrane-electrode assemblyの略号)。電解質膜とそれに接合された電極(触媒層+拡散層)が一体化した、水電解セルの中枢部。 |
| Niフォーム | Niフォーム | スポンジ状の多孔質ニッケル。 |
| OER | OER | アノードで起こる酸素を生成する酸素発生反応(Oxygen evolution reactionの略号) |
| アイオノマー | アイオノマー | 水電解セルの触媒層で用いられるイオン伝導性ポリマー。触媒(担体)の結着性も担うことからバインダーと表現されることもある。 |
| コタイアルカリミズデンカイ | 固体アルカリ水電解 | 電解質膜に固体のアニオン伝導性電解質膜を用いる水電解。 |
| コタイコウブンシガタミズデンカイ | 固体高分子形水電解 | 電解質膜に固体のプロトン伝導性電解質膜を用いる水電解。 |
| サイコウフィリングマク | 細孔フィリング膜 | 機械的強度の高い多孔質基材へ、イオン伝導性ポリマーを充填した電解質膜。 |
| スピネル | スピネル | 結晶構造の一種。組成は$AB_2O_4$(A, Bは異なる陽イオン)。 |
| ナノリュウシレンケツショクバイ | ナノ粒子連結触媒 | 金属ナノ粒子同士が連結した、ナノサイズのネットワークで構成される触媒。金属ネットワークは高い導電性を有するため、導電性カーボン担体を必要としない。 |
| ヒョウメンヒカッセイ | 表面比活性 | 表面積あたりの触媒活性であり、触媒の反応性を示す指標。 |
| ペロブスカイト | ペロブスカイト | 結晶構造の一種。組成は$ABO_3$(A, Bは異なる陽イオン)。 |
| ポリフェニレンケイアニオンデンドウポリマー | ポリフェニレン系アニオン伝導ポリマー | 側鎖にアニオン交換基を有し、主鎖に分解の起点となるエーテル等のヘテロ元素を含まない、高耐久なアニオン伝導ポリマー。 |

Ⅰ-（5）アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化／

アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究

（横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、公立大学法人大阪、東北大学、学校法人立命館、デノラ・ペルメレック、物質・材料研究機構）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| Nafion | Nafion | 米国DuPont社の開発したパーフルオロスルホン酸系イオン交換樹脂の商標（現在はChemours社の取り扱い）。食塩電解等の工業電解用の隔膜や固体高分子形燃料電池・水電解の電解質膜として広く利用されている。 |
| PDFカイセキ | PDF解析 | 二体分布関数解析。X線回折法では試料が散乱したX線のうち、回折波のみを解析するのに対し、PDF解析ではX線全散乱スペクトルを解析することで詳細な結晶構造を明らかにすることができる。特に非晶質や微結晶等の明確な回折線を生じない物質の解析に強みを有する。 |
| PEMミズデンカイ | PEM水電解 | 固体高分子形(SPE)水電解のうち、固体高分子形燃料電池などにも用いられるプロトン交換膜(Proton Exchange Membrane : PEM)を電解質を電解質に用いる水電解方式。電解質が固体のため電解質でのガスクロスオーバーが小さく、生成水素の純度が高く、薄膜電解質を用いるため抵抗損失が小さく電流密度を高くできる。非定常応答にも優れるなどの特徴を持つ。また、電極などを薄くすることができ、体積・重量あたりの生成速度に優位性がある。一方で一般にイリジウム等の貴金属触媒やチタン製の構成部材が必要となるなど材料コストが高い欠点もある。 |
| PV | PV | Photovoltaicの略。太陽光発電。 |
| RHE | RHE | 可逆水素電極（Reversible Hydrogen Electrode）。作用極と同じ支持電解質(電極反応する物質を含まない電解質)中に配置 して参照（基準）電極として用いられる。 |
| XANES | XANES | 「X線吸収計測」を参照 |
| Xセンキュウシュウスペクトル | X線吸収スペクトル | 「X線吸収計測」を参照 |
| Xセンキュウシュウケイソク | X線吸収計測 | ある原子によるX線の吸収は、原子核の周囲にある電子がエネルギーを吸収し、外側の電子軌道に移ることで行われ、その原子の電子構造による特定のエネルギーで吸収が起こり、それを吸収端と呼ぶ。吸収端のあとに現れる微細な構造をX線吸収微細構造（XAFS）と呼び、吸収端の直後のエネルギー領域に現れる構造をX線吸収端近傍構造（X-ray Absorption Near Edge Structure: XANES）、それより後に現れる構造を広域X線吸収微細構造（Extended XAFS: EXAFS）という。XANESから電子構造に、EXAFSから局所構造に関する情報が得られる。このような、X線の吸収を計測する測定手法をX線吸収計測という。 |
| YNUセル | YNUセル | 電極部に対して独立の締結構造を有する小型セルであり、本事業にて粉体触媒試料を積極的な後工程無しに測定するためのセルとして開発された。アルカリ水電解、固体高分子水電解、アニオン交換膜水電解等様々な方式の電解に利用でき、粉体触媒の測定の他、板状電極等他の電極形状を有するセルにも利用できる。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| アイオノマー | アイオノマー | プロトン等のイオン種を輸送するために触媒層内に添加される成分。燃料電池、水電解分野ではイオン交換樹脂（パーフルオロスルホン酸系が多い）を構成するイオン性ポリマーを指す。アイオノマーを有機溶媒等に溶解させた溶液を触媒粉末と混合したスラリーを用いて電極触媒層を形成する。電極触媒層内で触媒粒子を結着する役割も担うことからバインダーと呼ばれることもある。 |
| アノード | アノード | Anode。水電解の場合、陽極に対応し酸素が発生する。 |
| アルカリミズデンカイ | アルカリ水電解 | KOHなどアルカリ水溶液を電解質、活物質として用いる水電解方式。電極は両極ともに貴金属は必ずしも必要ではなくニッケルなどが使用可能であり、製造コストを抑制することができ大型化も容易である。 |
| ウルトラファインバブル | ウルトラファインバブル | 直径1 μm未満の気泡のことであり、消滅することなく水中に長時間漂うという他の気泡には無い性質をもっている。ナノバブルとも呼ばれる。水中に酸素を高濃度に保持させたり、汚れを簡単に浮かせる性質があり、これらの特異な性質が水電解の効率に影響を与える可能性がある。 |
| カソード | カソード | Cathode。水電解の場合、陰極に対応し水素が発生する。 |
| カソクレッカシケン | 加速劣化試験 | ある触媒の所定条件での長期耐久性を加速して評価するための試験技術。通常の条件よりも高温、高電流密度での試験や、電位サイクルを繰り返すと言った操作により、短期間で触媒の劣化を生じさせることができる。 |
| カイテンデンキョク | 回転電極 | Rotating disk electrode (RDE)。三電極式セルによる対流ボルタンメトリーに用いられる電極で、円板の作用極を回転させた状態で電気化学測定を行い活性を評価する。回転数を変化させた測定を行うことで、拡散の影響を取り除いたKineticな活性を外挿により求めることができる。触媒の評価では、円板電極上に触媒を担持して作用極とする。 |
| ギャクデンリュウ | 逆電流 | 2セル以上のバイポーラー型電解槽において電解停止後にバイポーラー板に対して、電解時の電流と逆方向に流れる電流。電解時に生成されるアノードの酸化体とカソードの還元体が電解停止時に元に戻る化学的駆動力が起電力となって、セル間においてマニホールド（液供給管）を通ってイオン電流が流れることにより閉回路を形成する。電極の酸化、還元が化学的、機械的要因により劣化に影響を与える。 |
| クロスリーク | クロスリーク | 隔膜を介して片方の電極反応生成物が反対側に通過してしまうこと。水電解の場合にはアノード側の酸素がカソード側に、もしくはカソード側の水素がアノード側に混入することであり、純度低下（広義でのファラデー効率低下）の問題がある。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
| --- | --- | --- |
| グリーンスイソ | グリーン水素 | 再生可能エネルギーから電解で生成するなどした環境負荷の小さい水素。欧州連合のCertifHyプロジェクトでは、水素1 Nm3製造時におけるCO2排出量をZ [kg-CO2 Nm-3-H2]とし、天然ガス改質から60%削減したZ ≦ 0.39でプレミアム水素と定義している。 |
| コタイコウブンシミズデンカイ | 固体高分子水電解 | 固体高分子膜を電解質に用いる水電解方式。液体ではなく固体の高分子膜を使うことで電解質でのガスクロスオーバーが小さいため生成水素の純度が高く、薄膜電解質を用いるため抵抗損失が小さく電流密度を高くできる。非定常応答にも優れる。プロトン交換膜(Proton Exchange Membrane : PEM)を電解質として使う場合にはPEM電解(Electrolytic cell :EC)とも呼ばれるが、アルカリ膜を用いる場合を含め広義に固体高分子形水電解（Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis : SPE電解）と呼ばれる。<br>「プロトン交換膜型水電解」「PEM水電解も参照」 |
| コウリュウインピーダンスソクテイ | 交流インピーダンス測定 | 電気化学系に交流信号を加え、その交流信号の伝達の性質を測定する方法を交流インピーダンス法といい、電極反応機構を解析する非定常測定法の一つである。実際には、電極電位あるいは平衡電位に微小な交流電圧変動を異なる周波数で与えたときの電流応答を測定し、振幅比と位相差からインピーダンス（交流で測定した抵抗）を求める。等価回路を仮定することにより電気二重層容量や電荷移動抵抗などを静電容量（キャパシタンス）や抵抗などの電気要素として求めることができる。 |
| サイクリックボルタンメトリー | サイクリックボルタンメトリー | Cyclic Voltammetry: CV 。一定速度で電位を変化させ、そのときに流れる電流を電流－電位曲線として記録する方法を電位走査法といい、決められた電位範囲を繰り返し電位走査する場合をサイクリックボルタンメトリーという。電極反応の起こる電位や速さ（電流）などを知ることができる。 |
| シャットダウンタイセイ | シャットダウン耐性 | 外部電源の変動・停止により、電解セルに使用する部材にはさまざまな劣化が発生する。このような操作に対して、部材性能が維持されることを耐性があるという。 |
| スタック | スタック | 水素製造速度を速めるため複数のセルを直列に接続させ、一つのユニットとしている状態。主に電解膜が重ねられた方向に配置されるためスタックと称する。 |
| タコウシツユソウソウ | 多孔質輸送層 | MEAの外側に配置されたガス、液輸送域となる多孔質体であり、触媒への電子伝導の役割がある。PTLはPorous Transport Layerの略。 |
| デンキカガクヒョウメンセキ | 電気化学表面積 | 電気化学的手法により求めた面積（ECSA: Electrochemical Surface Area）のことである。一般に、白金などの貴金属のECSAは、水素の吸脱着波やCO脱離波などから求めた電気量を、その貴金属の単位面積当たりの吸着電気量（既知）で除することにより求めるが、ニッケルなどの非貴金属電極やこれらの酸化物の電極では表面に一層だけ吸着する適当な物質が無いため評価が難しい。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
| --- | --- | --- |
| デンキニジュウソウヨウリョウ | 電気二重層容量 | 電気二重層容量（$C_{dl}$: Electric double-layer capacitance）は、電解液に浸漬させた電極の電極-電解液界面に電子やイオンが並んで形成される電気二重層に蓄えられる電荷の量（電気量）のことである。$C_{dl}$は電解液に接した電極表面の面積に比例するパラメータであるため、これをECSAの指標として用いることが可能である。 |
| デンキリョウ | 電気量 | 電気量（$Q$）は（電流×時間）の次元をもっており、導線に1 Aの電流が1秒間流れたときの電気量が1クーロン（C=A s）である。本文中での$Q_{ox}$は、Ni電極の最表面が酸化されるのに要した電気量である。 |
| バイポーラーデンカイソウ | バイポーラー電解槽 | アノード、カソード、膜で構成される単一セルを複数直列に接続させた電解槽の形式。単セル間を電気的に繋ぐ部材（バイポーラー板）の両面がアノードとカソードになる事からバイポーラー（複極式）と称する。大規模な水電解槽では一般的な形式である。 |
| ブンキョクソクテイ | 分極測定 | 電極を自然電位から電位（もしくは電流）走査する事でアノードとカソードの電流（もしくは電位）を計測する測定法。測定の際には基準電位となる標準電極（参照極）が必要である。過電圧測定と同義。 |
| ホウシャコウ | 放射光 | 放射光とは、シンクロトロン放射による電磁波である。放射光施設（SPring-8や立命館SRセンター等）において、高エネルギー電子が磁場で曲げられるときにその進行方向に放射される。指向性が高く、極めて明るいためにoperando計測に向いている。 |
| マテリアルズインフォマティクス | マテリアルズインフォマティクス | 従来の実験主導的研究に対し、機械学習、ベイズ最適化等の情報科学的手法を活用し、既存の大量の実験データの解析により目的の物性を有する材料の組成や構造を予測する手法。最適材料を見出すための実験数の大幅削減や、人間の解析では認識困難な新たな相関性の発見が期待される。 |
| マルチフィジックス | マルチフィジックス | 電気化学反応と流体・物質輸送、イオン輸送などの複数の物理現象・支配方程式を連成して解析する手法。電解槽などの複雑系のシステムに対して有効であるが、収束性や連成の解き方などに技術が必要であり解析の難易度は高くなる。 |
| マクデンキョクセツゴウタイ | 膜電極接合体 | MEA。固体高分子膜等の隔膜に触媒をスプレー法、転写法で塗布もしくは触媒が塗布された拡散層を熱加圧することで接合された部材。主にSPE水電解やPEFCで使用される。MEAはMembrane Electrode Assemblyの略。 |
| リニアスイープボルタンメトリー | リニアスイープボルタンメトリー | LSV。電気化学測定の一種で電位範囲の下限値から上限値あるいは上限値から下限値までを一定の電位走査速度で変化させ電流値を計測する測定法。LSVはLinear Sweep Voltammetryの略。 |
| リツメイカンダイガクSRセンター | 立命館大学SRセンター | 日本の私立大学で唯一、大学が所有する放射光施設で滋賀県草津市の立命館大学びわこ・くさつキャンパス内にある。国立研究開発法人理化学研究所が運営する世界最高性能の放射光施設であるSPring-8が、周長1436メートルであるのに対し、SRセンターは3.14メートルの小型放射光施設である。低いエネルギーのX線（軟X線）を利用して、電解触媒に含まれる軽元素や遷移金属の化学状態解析が実施可能であり、キャンパス内に位置することで、タイムリーな実験ができる利点を有している。 |

Ⅰ-（6）高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発
（山梨大学、パナソニック ホールディングス、タカハタプレシジョン、日本化学産業、東北大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| AEMWE | AEMWE | アニオン交換膜型水電解 |
| CCM | CCM | 触媒塗布膜、catalyst coated membrane |
| DFTケイサン | DFT計算 | 密度汎関数理論（みつどはんかんすうりろん、英: density functional theory、略称: DFT）<br>電子軌道内を運動する電子を、電子の密度分布で表現する。この電子密度と個々の電子間に働く引力・斥力相互作用を考慮することで、系内に存在する全ての電子間の相互作用を評価し、各原子・分子の安定構造を計算する。 |
| GDL | GDL | ガス拡散層 |
| LDH | LDH | 層状複水酸化物（LDH）例：NiFe-LDH:NiFe-Layered Double Hydroxides、ニッケル鉄層状複水酸化物 |
| MSD | MSD | 平均二乗変位(Mean Square Displacement)の略。アイオノマー内部の物質輸送特性を表す量 |
| NPHイッテイ | NPH一定 | 計算をすすめる過程で、系の分子数(N), 圧力(P), エンタルピー(H)を一定に保つ計算条件 |
| PEMWE | PEMWE | プロトン交換膜型水電解 |
| RDF | RDF | 動径分布関数(Radial Distribution Function)の略。アイオノマー内部の分子間距離の関係性を表し、高分子の構造上の特徴を表す量 |
| RHE | RHE | 可逆水素電極のことであり、その電位(E)は、$E = E_0 + (RT/F) \ln a_{H^+} - (RT/2F) \ln pH_2$にて求まる。（なお、プロトン活量1、水素分圧1バールの標準状態において$E_0 = 0$とする。） |
| STEM-EDX | STEM-EDX | STEM-EDX（Scanning Transmission Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）<br>走査透過型電子顕微鏡ーエネルギー分散型X線分光分析器<br><br>電子顕微鏡による評価方法の一種であり、物質の微細な構造や元素の分布を観察するために使用されます。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| アニーリング | アニーリング | 計算系を平衡状態に持って行く計算処理方法 |
| アニオンマク | アニオン膜 | マイナス電荷を持つイオンの伝導性を示す高分子膜。本事業では水酸化物イオン導電性の膜のことを意味する。 |
| アノード | アノード | アニオン膜型アルカリ水電解セルにおいて、OHイオンが酸化して酸素と水が生成する電極のこと |
| イオンコウカンヨウリョウ | イオン交換容量 | イオン性化合物におけるイオン性基の密度のこと。アニオン膜では膜重量当たりの水酸化物イオンのモル濃度。 |
| カソード | カソード | アニオン膜型アルカリ水電解セルにおいて、水が還元して水素とOHイオンが生成する電極のこと |
| サンゲンキョウジュウゴウタイ | 三元共重合体 | 3つの異なる化合物を構成成分とする高分子のこと。3種類の出発化合物（モノマー）を共重合させることによって得られる。 |
| サンメンシュウキキョウカイ | 三面周期境界 | 計算領域のすべての面に周期的に分子が存在すると仮定している境界条件。この境界条件を設定することにより、少ない分子の数で無限の大きさを持ったと仮定した系の計算を行うことができる。 |
| チョウオンパスプレー | 超音波スプレー | スプレーノズルの先端に超音波振動を与えて、周波数に応じたサイズの液滴を均一に滴下できるスプレー方法 |
| ポリマー | ポリマー | モノマーをいくつかつなげて構成した高分子。実際の分子モデルとしてはこちらを使用する |
| ミズクラスター | 水クラスター | アイオノマーの内部に存在している水分子の塊。これらの分布がアイオノマーのプロトン輸送性や酸素透過性に大きく影響する。 |
| モノマー | モノマー | 高分子を構成する分子構造の最小単位 |

Ⅰ-（7）低コストＡＥＭ型水電解システムの実現に向けたアニオン交換膜材料の高ロバスト化
（東京工業大学、日本触媒）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| アニオンコウカンマク | アニオン交換膜（AEM） | 内部をアニオン（陰イオン）が移動可能な材料で作られた高分子膜。高分子構造中にカチオン官能基を有することを特徴とする。 |
| AEMガタミズデンカイ | AEM型水電解 | アニオン交換膜をイオン伝導体として使用する水の電気分解。アニオン交換膜を使用することで、膜周辺の高価な金属材料を安価なものに置き換え可能になり、水電解装置コストおよび水素製造コストを抑制できる可能性がある。 |
| ベンジルトリメチルアンモニウム | ベンジルトリメチルアンモニウム | 1つのベンジル基と3つのメチル基が窒素原子に置換することで形成されるカチオン構造。既存のアニオン交換膜の多くに使用される。 |
| ポリアリーレン | ポリアリーレン | 単位構造中に芳香環を含み、その芳香環が別の構造単位の芳香環と炭素－炭素結合を介して結合することにより形成される高分子。 |
| ジュウリョウヘイキンブンシリョウ | 重量平均分子量 | 高分子の平均分子量を表す指標の一つ。高分子の各成分の分子量にその重量分率を掛け合わせた量の総和に相当する。 |
| ヒキキンゾクケイショクバイ | 非貴金属系触媒 | 白金やイリジウムなどの貴金属を使用しない触媒。汎用的な金属を使用することでコストを抑えることが可能。 |
| ポリエチレン（PE）ビタコウシツマク | ポリエチレン（PE）微多孔 | 微細な空孔構造を有するポリエチレンの膜。イオン交換膜の補強基材として使用されることがある。 |
| イオンコウカンヨウリョウ（IEC） | イオン交換容量（IEC） | イオン交換膜の単位重量当たりに含有されるイオン官能基の当量。単位：mmol/g（またはmeq/g） |
| イオンデンドウド | イオン伝導度 | 物質中のイオンの伝導のしやすさを表す物性量。単位：S/cm |
| フェントンハンノウ | フェントン反応 | 2価鉄と過酸化水素によってヒドロキシラジカルを発生させ、酸化的に種々の分解を行う反応。酸化反応に対する耐性を評価するために使用されることがある。 |
| テトラアリールホスホニウム | テトラアリールホスホニウム | 4つの芳香環がリン原子に置換することで作られるカチオン構造。 |
| 3キュウホスフィン | 3級ホスフィン | 3つのアルキル基またはアリール基がリン原子に置換して作られる化合物。 |
| アライン | アライン | 芳香環を形成する炭素－炭素結合の一つが三重結合になった化学種。高い反応性を有する。 |
| NMR | NMR | 核磁気共鳴分析。強い磁場中の試料に電磁波を照射した際、試料の原子核がそれぞれの化学的環境に応じた特定の周波数を吸収する現象を利用して、化合物の構造分析を行う方法。 |
| サイクルシケン | サイクル試験 | 特定のパターンで印加する電圧の昇降を繰り返し、水電解セルの耐久性を評価する試験方法。変動電源に対するセルの耐久性を模擬的に評価するために行われる。 |
| デンシキョウヨセイチカンキ | 電子供与性置換基 | 結合している原子の電子密度を増加させる効果を持つ置換基。 |
| SEC | SEC | サイズ排除クロマトグラフィー。高分子の分子量測定に使用される分析方法。 |
| ヨウエキキャスト法 | 溶液キャスト法 | 樹脂を溶媒で溶解させて平らな面上に長し、乾燥させることでフィルムを成形する方法。溶液流延法とも呼ばれる。 |
| ガンスイリツ | 含水率 | 材料中に含まれる水分の割合を示す指標。材料の乾燥重量に対する含水時の水分の重量の比率で算出される。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| サイコウフィリングマク | 細孔フィリング膜 | 多孔質基材の空孔内に電解質材料を充填することで作られる複合膜。 |
| SEM-EDS | SEM-EDS | 走査型電子顕微鏡（SEM）とエネルギー分散型X線分析装置（EDS）を組み合わせることにより、試料を高倍率で拡大し観察すると同時に、元素分布を調べることができる手法。 |
| ポリエーテル | ポリエーテル | 単位構造同士をエーテル結合を介して結合させることにより形成される高分子。 |
| アノード | アノード | 外部回路から電流が流入する側の電極。電気分解においては酸化が起こる電極であり、水電解であれば酸素が発生する。 |
| カソード | カソード | 外部開路に電流が流出する側の電極。電気分解においては還元が起こる電極であり、水電解であれば水素が発生する。 |
| アイオノマー | アイオノマー | 電解セルの電極触媒層において、触媒粒子を結着し、電解質膜や電極に固定するために使用するイオン伝導性のポリマー。 |
| セル | セル | 燃料電池や電解装置などにおいて、発電や電気分解などの機能を発揮する最小の構成単位。主に電極と電解質材料（セパレーター）から構成される。 |
| スタック | スタック | 燃料電池や電解装置などで、セルを積層して作成される部材。 |
| タンセルユウコウメンセキ | 単セル有効面積 | 単一の電解セルにおいて、実際に電気分解に使用される部分の面積。 |
| デンリュウミツド | 電流密度 | 単位面積に垂直な方向に単位時間に流れる電気量。単位：$A/cm^2$ |
| デンリョクミツド | 電力密度 | セルの単位面積当たりで消費される電力。単位：$W/cm^2$ |
| タンセルデンリョク | 単セル電力 | 単一の電解セルの消費電力。単位：W |
| DCFホウ | DCF法 | 割引キャッシュフロー法。企業や事業に置いて、将来生み出されると期待される価値をキャッシュフローをベースに割り引いて現在価値に換算する手法。 |
| LCOE | LCOE | Levelized Cost Of Electricityの略。 発電量あたりのコストを意味し、均等化発電原価とも言われる。国内外で、電源の経済性評価指標として広く用いられている。 |
| BOP | BOP | Balance of Plantの略。水電解装置においては、電解スタック本体を除いた電源やガス精製装置などの付帯設備が該当する。 |

Ⅰ-（8）プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究
（北海道大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| えむあい | MI | 機械学習等によるデータ科学手法を用い材料開発する分野 |
| せむ | SEM | SEMは、電子ビームを試料の表面に照射し、その反射電子や二次電子を検出することによって試料の表面形態や組成を観察するための顕微鏡 |
| てむ | TEM | TEMは、電子ビームを試料の薄い断片に透過させ、その透過電子を検出することによって試料の内部構造や結晶構造を高倍率で観察するための顕微鏡 |
| えっくすあーるでぃー | XRD | XRDは、試料にX線を照射し、その回折パターンを測定することによって試料の結晶構造や結晶性を分析する手法です。X線の回折パターンは試料の結晶格子の特徴を反映し、結晶の種類や配列を特定する |
| えっくすぴーえす | XPS | XPSは、試料表面から放出される光電子のエネルギーを測定することによって、試料の表面元素の種類や化学状態を分析する手法です。X線を照射することで試料表面の原子が光電子を放出し、そのエネルギースペクトルから試料の化学組成や酸化状態を推定することができる |
| なふぃおん | ナフィオン | ナフィオンは、フルオロポリマーの一種であり、高いプロトン伝導性を持つ特殊なイオン交換膜です。主に燃料電池や電解水素製造などの分野で使用され、高温・高湿条件下での安定なプロトン伝導を実現します。 |
| きかいがくしゅう | 機械学習 | 機械学習は、コンピュータシステムに対してデータから自動的に学習し、パターンや知識を抽出するための手法やアルゴリズムの総称です。データから統計的なモデルを構築し、未知のデータに対して予測や分類を行うことができます |
| でーたのかしか | データの可視化 | データの可視化は、データをグラフや図表などの視覚的な形式に変換することです。データの可視化により、データのパターンや関係性、傾向を直感的に理解しやすくすることができます。グラフやチャートを使用してデータを視覚化することで、データの特徴や異常値の検出、傾向の分析、パターンの発見などが行われます。 |
| そうかんかんけい | 相関係数 | 相関係数は、2つの変数間の関係性の強さと方向を測る指標です。相関係数は-1から1の範囲で表され、1に近いほど正の相関（変数が同じ方向に変化する）、-1に近いほど負の相関（変数が逆方向に変化する）、0に近いほど相関がないことを示します。相関係数を計算することにより、変数間の関係性を定量化することができます。 |
| あのーど | アノード | アノードは、電池や電解槽などの電気化学系において、電流が流入する側の電極を指します。アノードは一般に酸化反応が起こる場所です。 |
| あのーどざいりょう | アノード材料 | アノード材料は、電池や電解槽などの電気化学系においてアノードとして使用される材料のことです。アノード材料は、電池の充放電や電気分解反応などのプロセスに適した材料が選ばれます。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
| --- | --- | --- |
| かそーど | カソード | カソードは、電池や電解槽などの電気化学系において、電流が流出する側の電極を指します。カソードは一般に還元反応が起こる場所です。 |
| かそーどざいりょう | カソード材料 | カソード材料は、電池や電解槽などの電気化学系においてカソードとして使用される材料のことです。カソード材料は、電池の充放電や電気分解反応などのプロセスに適した材料が選ばれます。 |
| もくてきへんすう | 目的変数 | 目的変数は、統計や機械学習において予測や分析の対象となる変数です。目的変数は予測される変数や応答変数とも呼ばれ、他の変数（説明変数）との関係性や影響を調べるために使用されます。 |
| せつめいへんすう | 説明変数 | 説明変数は、統計や機械学習において目的変数を予測するために使用される変数です。説明変数は予測に寄与する要因や特徴を表すものであり、独立変数や特徴量とも呼ばれます。 |
| こうさけんしょう | 交差検証 | 交差検証は、機械学習モデルの性能を評価するための手法です。データセットを複数の部分に分割し、一部をモデルの学習に使用し、残りの部分をテストに使用することで、モデルの汎化性能を評価します。交差検証により、過学習やモデルの性能の安定性を把握することができます。 |
| けっていけいすう | 決定係数 | 決定係数は、回帰分析においてモデルの予測精度を表す指標です。観測データとモデルによる予測値の間の差を表す残差の分散に対し、観測データの全変動の分散を比較して計算されます。決定係数は0から1の範囲で表され、1に近いほどモデルの予測精度が高いことを示します。 |
| きじゅつし | 記述子 | 記述子は、化学や材料科学の分野で用いられる特徴量のことです。分子構造や物質の性質を数値化し、データ解析や機械学習に活用するための情報を提供します。例えば、分子の大きさ、形状、電荷分布などが記述子として使用されます。 |
| きじゅつしせっけい | 記述子設計 | 記述子設計は、特定の化学的・物理的性質や目的に応じた記述子の選択や設計を行うプロセスです。適切な記述子を選択することで、データの解析やモデルの構築において重要な情報を捉えることができます。記述子設計には、経験則や専門知識、統計的手法などが活用されます。 |
| はいするーぷっとじっけん | ハイスループット実験 | ハイスループット実験は、高速かつ自動化された方法で大量の試料や条件を同時に処理し、効率的にデータを生成する実験手法です。ハイスループット実験は、材料研究や医薬品開発などの領域で広く使用されており、高速なスクリーニングや最適条件の特定などに活用されます。 |
| ぺむがたみずでんかい | PEM形水電解 | PEM形水電解（Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis）は、水を電気エネルギーに変換する電気化学反応の一種です。PEM形水電解では、ナフィオンなどのポリマー電解質膜を使用し、水分子を水素と酸素に分解します。この反応により、水素を効率的に生成することができます。PEM形水電解は、持続可能なエネルギー源として注目されており、水素の製造やエネルギー貯蔵技術として利用されます。 |

Ⅲ従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発）

（1）酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発

（産業技術総合研究所、宇宙航空研究開発機構、東京工業大学、大阪大学、電力中央研究所、石炭フロンティア機構、川崎重工業、東芝エネルギーシステムズ）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| クローズドサイクル | クローズドサイクル | 作動流体の熱エネルギーが仕事に返還される熱機関で、作動媒体が循環しているもの。 |
| ガスタービン | ガスタービン | 回転する羽根車についている動翼、ケースに固定された静翼の組み合わせにより、作動流体が持つ熱エネルギーを回転運動に変え、動力として利用できる機械 |
| ネンショウキ | 燃焼器 | ガスタービンの燃焼器は、燃焼器の外形を構成するケーシングと内側のライナーから構成される。ライナーは多数の孔が開けられており、燃焼前の空気の層流で冷却されるように配置される。 |
| マルチクラスタバーナ | マルチクラスタバーナ | 酸化剤孔と燃料孔を多数組み合わせたクラスタバーナを複数組み合わせたバーナ |
| リムシール | リムシール | リムシールは蒸気タービンにおいて主流の高温蒸気がホイールスペースに逆流するのを防止し、ロータを高温蒸気から保護するためのシール技術である。 |

Ⅳエネルギーキャリアシステム調査・研究（委託事業）

Ⅳ-（1）トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上
（横浜国立大学、東北大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| アニオンコウカンマク | アニオン交換膜 | 固体高分子膜の一種。膜内をアニオン（陰イオン）が通過する事で電気伝導する。AEM(Anion Exchange Membrane)と略され水電解ではアルカリ溶液と共に隔膜として利用される。 |
| カチオンコウカンマク | カチオン交換膜 | 固体高分子膜の一種。膜内をカチオン（陽イオン）が通過する事で電気伝導する。プロトン交換膜として利用される場合、PEM(Proton Exchange Membrane)と略され水電解では隔膜として利用される。 |
| EW | EW | 等価質量(Equivalent Weight)の略。等価質量とは、PEMにおけるスルホン酸基1モルあたりのポリマーのグラム数を表す。 |
| マイクロポーラスソウ | マイクロポーラス層 | 拡散層もしくは物質移動層として利用されるカーボンペーパの表面（主に片面）に塗布形成される層で主にカーボン粉末とPTFE粒子が材料となる。MPLと略し、主に触媒層側がMPLとなるようにカーボンペーパが設置される。 |
| ギャクカクサン | 逆拡散 | 固体高分子膜を隔膜した膜電極接合体(MEA)による燃料電池や水電解では、例えばPEMを用いた場合、膜を介した水の移動はプロトンに随伴した水分子（随伴水）が主となる。本テーマ内の逆拡散はこの方向と逆に拡散により移動する水の事。トルエン電解水素化においては、アノード側に存在する硫酸に対し、プロトンによりカソード側へ移動した随伴水は硫酸濃度が下がる。よって濃度勾配によりカソード側からアノード側への逆拡散が起こる。 |
| アイオノマ | アイオノマ | 主に粉末状態で触媒（層）内に混入されるアニオンもしくはカチオン伝導性の固体高分子で触媒層内のイオン電導を担う働きを持つ。バインダーとしての役割もある。 |
| タンソクサコウゾウ | 短側鎖構造 | 固体高分子膜の分子構造は主鎖と側鎖で構成されるが、側鎖の長さが短い構造の事。 |
| イコウスイ | 移行水 | 隔膜を介して移動する水の事。随伴水や逆拡散等を含め、全体として最終的に移動する水の事。 |
| デンキシントウ | 電気浸透 | 固体と液体が接している状態で電圧をかけた場合に液体が移動する現象。 |
| 5ソウカイセキモデル | 5相解析モデル | 本テーマ内においてはトルエン／メチルシクロヘキサン、水相の2相の流動層とアイオノマー、固相および気相を加えた５相に対して流動相の輸送現象の流体解析を行うためのモデル |
| シュウデンタイ | 集電体 | セル部材においてエンドプレートもしくはセパレータと触媒層を電子伝道により電気的に繋ぐための部材。多孔質にすることで気液間等の物質移動を促進させる事も重要な機能となる。 |
| コウシヤXセンイメージング | 広視野X線イメージング | 対象物にX線を照射し透過光を撮像素子で検出する測定を広視野で行う事。撮像そのものは二次元であるが、対象物を回転させ三次元構成する事により疑似的に空間的撮像が可能。 |
| CTガゾウ | CT画像 | X線イメージングによって撮られた断面画像。Computed Tomographyの略。 |
| セパレータ | セパレータ | セルを構成する部材の一つでMEAの両端に設置される。主に流路やマニホールドが付けられ水電解では液を送り込み気液を排出する形状となっている。本来は気液を遮断する（分ける）意。 |

## Ⅳ-（２）水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築
## （早稲田大学、荏原製作所、東京大学、東北大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| エックスエーアイギジュツ | XAI技術 | 「 Explainable AI 」の略称で、AIによる予測、推定過程が人間によって説明可能になっている機械学習のモデルあるいはそれに関する技術や研究分野。 |
| エルエスティエムブンルイモデル | LSTM分類モデル | LSTM は深層学習長短期記憶とよばれ、主に系列データのモデリングに利用される。セルと呼ばれるある種のメモリを有することにより、長期の情報の保持を可能としたモデル。この長期情報を基礎にした分類手法。 |
| エンシンポンプ | 遠心ポンプ | ターボ型ポンプで、主に遠心力の作用で液体を昇圧するポンプ。一般には、回転軸方向に液体を吸い込み、回転軸の半径方向に吐出する。 |
| ギャクリュウヨクセイデバイス | 逆流抑制デバイス | 逆流とは，本来の流れとは逆方向に進む流れのことである．回転する羽根車を用いる流体機械においては，特に流速が低い条件において羽根車の上流側で逆流が発生し，流れが不安定化することがある．逆流抑制デバイスとは，この逆流を防ぐための装置であり，小径化することで局所的に流速を上げたり，旋回止めと呼ばれる羽根車の回転方向の流れを弱めるための障害物を設けることで，逆流を低減させるデバイスなどが提案されている． |
| キンシツバイタイキホウリュウモデル | 均質媒体気泡流モデル | 均質媒体とは，気体も液体も同じ速度で動く仮定のもとで，気体と液体が完全に混ざりあった状態を想定した流体のことである．また，均質媒体気泡流モデルとは，気泡群から構成される均質媒体を想定した物理モデルとなる． |
| クオリテイ | クオリティ | 気液二相流において、気相が占める質量割合 |
| シーエフデー | CFD | 数値流体力学．本来は連続している時間および空間を離散的に表す前提のもとで，流体力学の基礎方程式である質量・運動量・(必要に応じて)エネルギーの各保存則を時間および空間に対して離散化された連立方程式として表現し，これを繰り返し計算により近似的に解くための学問および手法を総称している． |
| シンソウガクシュウモデル | 深層学習モデル | 深層学習とは、ディープラーニングとも言われる機械学習の1つである。人間の神経細胞の仕組みを再現したニューラルネットワークが用いられており、画像認識や音声認識といった多数の分野で活用されている。 |
| スイコミセイノウ | 吸込み性能 | ポンプの揚程，すなわちポンプ前後の全圧差（ポンプの作用により流体が獲得するエネルギー）がポンプの入口圧力に対して示す依存性のこと．入口圧力が低下してキャビテーションが発達すると揚程が低下するが，揚程が下がり始める入口圧力が低ければ低いほど，吸込み性能は良い． |
| スイコミセイノウ | 吸込性能 | ポンプは、吸込側の静圧が低下すると、ポンプ内にキャビテーションが生じるため、所望の静圧上昇ができなくなる。どれくらい、吸込側を低圧にしても、静圧上昇が保たれるかを数値的に評価したものが吸込性能である。 |
| セイデンヨウリョウガタボイドリツケイ | 静電容量型ボイド率計 | 気相と液相の誘電率の違いを利用してボイド率を計測する方式。 |
| セッケイリュウリョウ，カダイリュウリョウ，ブブンリュウリョウ | 設計流量、過大流量、部分流量 | 流体機械において、設計仕様の流量を設計流量、それより大きな流量を過大流量、それより少ない流量を部分流量と呼ぶ。設計点流量、大流量、小流量と呼ぶ場合もある。 |
| センリンカイテン | 遷臨界点 | 遷臨界点（気体と液体が共存できる限界の温度・圧力条件の周辺）で生じる流体物性の急変現象 |
| ダイヨウリョウショウアツポンプ | 大容量昇圧ポンプ | 火力発電等の大型ガスタービンに燃料として液化水素を供給できる高圧大流量の液化水素ポンプ |
| タジュウプロセスガタモデル | 多重プロセス型モデル | キャビテーションは，気泡の発生や消滅，膨張や収縮，合体や分裂，蒸発や凝縮など，素過程と呼ばれる様々なプロセスが多重に生じる現象である．多重プロセス型モデルは，これらの主要な素過程を考慮したモデルとなっている． |
| タダンポンプ | 多段ポンプ | ターボ型ポンプで、高い吐出圧を達成するために、羽根車を直列多段に並べた形式のポンプ |
| ニオンドモデル | 二温度モデル | 気泡内部と周囲液体の温度を別々に取り扱うモデルのこと． |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| ネツリキガクテキコウカ | 熱力学的効果 | 気泡が成長する際に，周囲の液体が気泡内の蒸発へと相転移するために必要な熱量が奪われることで，気泡内および周囲の温度が低下し，気泡が収縮，かつ，飽和蒸気圧が低下することで蒸発が起こりにくくなり，気泡の成長が抑制される効果のこと. |
| ハネケイジョウ | 羽根形状 | ポンプの羽根形状とは、ターボ型ポンプの回転体部（これを羽根車と呼ぶ）の形状である。特に回転体部において流体を、おおよそ流れ方向に対して直交する方向に仕切る板状の要素を羽根と称し、この羽根の形状を意味する場合もある。流体機械の性能を決定する重要部位である。 |
| ハンヨウコード | 汎用コード | 流体シミュレーションあるいはCFDを実施するコンピュータープログラムを流体数値解析コードと呼称する場合が多い。この流体数値解析コード |
| フアンテイリュウドウジョウキョウ | 不安定流動状態 | 流体機械において、装置内の流動現象の不安定性によって変動が生じる状態。運転者側からは、流量や圧力の変動、さらに流体機械の振 |
| ボイドリツ | ボイド率 | 気液二相流において、対象の体積における気相が占める割合 |
| ボイルオフ | ボイルオフ | 外部入熱により沸騰現象 |
| ポンプセイノウマップ | ポンプ性能マップ | ポンプの性能を示すグラフ。一般的には、回転数一定の条件で、横軸に流量、縦軸に全圧上昇、効率、ポンプ軸動力を示す。ポンプの性能曲線とも呼ぶ。 |
| リュウタイシミュレーション | 流体シミュレーション | 流体力学の式をコンピューターを用いて数値計算で解くこと。<br>Computational Fluid Dynamics (CFD)とも呼ぶ |
| リュウドウヨウシキ | 流動様式 | 気液二相流において、空間的、時間的分布を類型化したもの。気泡流、スラグ流、層状流、環状流などがある。 |

Ⅴ炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発）

Ⅴ-（1）ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発（2021 年度まで）
（筑波大学、東京工業大学、物質・材料研究機構、大阪大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| だいいちげんりけいさん | 第一原理計算 | 量子力学の基礎方程式であるシュレーディンガー方程式を原子核・電子で構成される多粒子系について、実験を再現するためのパラメーターを用いることなく理論的に解き、分子・物質の構造やエネルギーなどを求める計算手法。 |

Ⅴ-（２）メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発
（戸田工業、エア・ウォーター）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| PVSA | PVSA | Pressure Vaccum Swing Adsorption。真空再生型圧力スイング吸着分離法と呼ばれているプロセスであり、分圧による分子の吸着容量差を利用して混合ガスから特定の成分を除去し、流体を精製する手法である。真空ポンプを使用して吸着塔内を真空状態とすることにより、有効吸着容量を確保でき吸着剤の必要量を低減できる。 |
| カーボンナノチューブ | カーボンナノチューブ | カーボンナノチューブは1枚の六角網平面のグラファイトシートを筒状に丸めて形成される単層カーボンナノチューブ（SWCNT）、それらを入れ子状に積層した多層カーボンナノチューブ（MWCNT）に分類でき、その直径は凡そ数nmから数10nmの範囲にあり，長さは数10μmに及ぶものもある。軽量、高強度かつ高伝導率・高熱伝導率などの優れた特長を持つことから夢の新素材として期待されており、リチウムイオン電池導電助剤をはじめ、導電性フィラー、補強材、電磁波吸収材等の幅広い用途で使用されつつある。 |
| カーボンブラック | カーボンブラック | 原料の油を不完全燃焼させて得られる煤状の化学品である。3-500 nm程度の炭素の微粒子であり、化学的には単体の炭素として扱われるが、表面には様々な官能基が残存した複雑な組成を持ち、いわゆる無定形炭素と呼ばれるものに含まれる。 |
| シッシキゴウセイホウ | 湿式合成法 | 水や有機溶媒中での合成法である。主に、溶媒中へ塩類を溶解させ加熱反応し、溶媒と副生成物を除去、乾燥して目的物を得る方法である。 |
| シュショクバイ | 主触媒 | 反応の中で直接的に関与し、反応速度を促進する役割を果たすものである。 |
| ジョショクバイ | 助触媒 | 助触媒は主触媒の反応速度を促進するが、それ自体は直接的に反応に関与しない。助触媒は主触媒と反応物質との間の相互作用を促進したり、反応条件を最適化する働きもある。 |
| セキサンスイソセイセイリョウ | 積算水素生成量 | 反応時間中の反応outガス中の水素濃度とガス流量から算出した水素生成量の積算値である。 |
| セキシュツチンデンホウ | 析出沈殿法 | 溶液中に溶解している物質を化学的な反応によって沈殿物として析出させる方法である。溶液中に担体粒子を分散させておくと担体粒子表面上に沈殿物を析出させることができる。 |
| ターコイズスイソ | ターコイズ水素 | メタンの熱分解により水素を生成し、CO2ではなく副産物として固体炭素を生成する。反応炉の稼働は、再生可能エネルギーまたはカーボン・ニュートラルエネルギー由来であることが条件となる。 |
| パイロットスケール | パイロットスケール | ほぼ実用スケールと同様の機能を持った試験室的段階と実用の段階との中間の位置づけとなる大きさである。 |
| バッチシキロータリーキルン | バッチ式ロータリーキルン | 炉内に被処理物を充填、加熱、冷却、排出を繰り返して行う方式のロータリーキルンである。毎回違う処理条件にすることが可能なため、多品種の熱処理に向いている。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| フクセイセイブツ | 副生成物 | 化学反応で、意図した反応とは異なる反応により生成した物質を示す。 |
| ブツリコンゴウホウ | 物理混合法 | 異なる２種類以上の物質をそれぞれの物質の性質を変えずに物理的に均一混合する方法である。 |
| フンタイテイコウ | 粉体抵抗 | 対向電極間に粉体試料を挿入して荷重をかけて試料を押し固めた状態で電極間抵抗を測定し、測定値と電極寸法や間隔を用いて算出した体積抵抗率として表す。電極間隔1cm、電極面積1cm2あたりの抵抗を示しており、その単位はΩ・cm表される。 |
| ブンリマク | 分離膜 | 気体・液体中に混在する物質を選択的に通過させる機能を備えた膜のことである。精密なフィルタの一種で、膜に開いた微細な穴の孔径や膜素材の性質を利用して分離を行う。 |
| ベットヒヒョウメンセキ | BET比表面積 | 不活性ガスの吸着等温線に BET 吸着等温式を適用して単分子層吸着量を算出し，この値と吸着分子の分子断面積を用いて算出した粉体の単位重量当たりの表面積を表す。 |
| マテリアルバランス | マテリアルバランス | 化学におけるマテリアルバランスは、ある化学反応の系において、その系に投入した物質の量と系から得られた物質の量との収支を算出したものである。物質収支とも言う。 |
| レンゾクシキロータリーキルン | 連続式ロータリーキルン | 連続式は、炉内に連続的に被処理物を供給しながら、加熱と冷却を行う方式のロータリーキルンである。常に同じ温度で同じ時間で処理できるため、大量に作ることに向いている。 |
| ロータリーキルン | ロータリーキルン | 回転炉とも言われ、横型円筒形の炉に投入された被処理物をゆっくりとした回転により攪拌・移動しながら焼成する方式の炉である。 |

Ⅴ-（３）メタン直接分解による水素製造技術開発（伊原工業、東京理科大学（2021 年度まで））

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| CCS | CCS | CCSは二酸化炭素回収・貯留技術のことで、CO2を地中深くに貯留・圧入するというもの。 |
| DSS | DSS運転 | DSSはDaily Start and Stopの略で、毎日発停運転のこと。 |
| wash-coat | wash-coat法 | 触媒のウォッシュコートとは、担体としてハニカム（蜂の巣）状のものを用いる場合に、担体を金属塩が溶解した溶液に浸し、引き上げ、乾燥させて活性部分を担持させる方法のこと。 |
| カーボンネガティブ | カーボンネガティブ | 二酸化炭素を含む温室効果ガスの排出量よりも吸収量が多い状態を意味する。 |
| カーボンブラック | カーボンブラック | 工業的に品質制御して製造される直径3-500 nm程度の炭素の微粒子。 |
| カイセン | 解繊 | 炭素繊維束を幅広く、薄く均一に広げて開繊糸を製造する技術である。 |
| カクサン | 拡散 | 粒子、熱、運動量、等が、散らばり、広がる、物理的な現象。 |
| カッセイサイト | 活性サイト | とくに触媒反応について用いられる用語で，反応が起こる場所をいう。 |
| キョウマク | 境膜 | 固液、固気接触系、あるいは二相流体系において流体が相対運動をしている場合に相境界に存在する、層流状態が保たれている極薄い領域のこと |
| グラファイト | グラファイト | 黒鉛化という高温熱処理をされる事により出来る、規則的な配列をしているカーボンの塊をいう |
| ケッチンブラック | ケッチンブラック | ケッチェンブラックは導電性カーボンブラックの商品名。<br>プラスチック・ゴムなどに混練することで、従来のカーボンブラックに比べ少量の添加量で同等の導電性を付与することができる。 |
| キンゾクコウゾウタイショクバイ | 金属構造体触媒 | 粉体ペレット状触媒に対し、触媒相を金属支持体で規則的に配列したもので、均一な空隙と低い圧力損失が特徴である。 |
| コヨウタイ | 固溶体 | 2種類以上の元素（金属の場合も非金属の場合もある）が互いに溶け合い、全体が均一の固相となっているものをいう |
| ショクバイカッセイサイト | 触媒活性サイト | 触媒の中で主として活性に寄与している成分を活性成分という．活性成分の中で触媒作用（化学結合の組み替え）に直接関係する部分を活性点（活性サイト）という． |
| セキシュツ | 析出 | 固体以外の状態にある物質が固体として現れる現象 |
| ソウショウキョウカイ | 双晶境界 | 結晶が成長時や塑性変形により、双晶境界を共有して対称な関係にある時、双晶の関係にあるとい う |
| ターコイズスイソ | ターコイズ水素 | 原料にメタンなどの化石燃料を用いるが、反応においてCO2を排出しない水素のことを指す |
| タイセキテイコウリツ | 体積抵抗率 | 単位体積あたりの電気抵抗値のこと |
| タイリュウネツデンタツ | 対流熱伝達 | 固体表面とその周りを流れる流体中との間で、流れによって熱エネルギーが伝えられる現象を対流といい、流体の流れと固体表面との間の熱の流れが対流熱伝達です。 |
| ネツデンドウリツ | 熱伝導率 | 温度勾配により生じる伝熱のうち、熱伝導による熱の移動のしやすさを規定する物理量である。 |

| 読み方 | 用語 | 解説 |
| --- | --- | --- |
| バイオメタン | バイオメタン | バイオメタンはバイオガスを精製してメタン濃度を90%以上にし、化石燃料の天然ガスに近い形にしたもの |
| フクシャネツ | 輻射熱 | 物体は温度が高くなると、電磁波を出して周囲に熱を伝えます。この現象を輻射といい、このとき伝わる熱を輻射熱と呼びます。 |
| フクセイタンソ | 副生炭素 | メタン直接分解において、メタンが水素と炭素に分解される時に、生成された固体の炭素。 |
| ヘイコウイドウノホウソク | 平衡移動の法則 | 反応により体積が減少する反応は高圧ほど，逆に体積が増加する反応は低圧ほど進み，また化学平衡に達した系の圧力を変化させると，その影響を打ち消す方向に反応が進み新しい平衡に達する。これらの関係は平衡移動の法則と呼ばれ，平衡状態の安定性を示す〈ル・シャトリエの法則〉の一つの例である。 |
| モジュールカ | モジュール化 | モジュール化とは、最終製品を構成する部品の一部を組み合わせてユニット化し、一つの製品ユニットとして再定義すること。 |

Ⅴ-（４）メタン熱分解による水素製造技術の研究開発（産業技術総合研究所、京都大学、ＩＨＩ）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| ガスカンキョウTEM | ガス環境TEM | 一般的なTEM（透過型電子顕微鏡）は真空中に保持された材料の構造を観察する装置だが，材料周辺のみをガス雰囲気にすることで，材料が実際に保持されている環境においてどのような変化を起こすかを動的に観察するために開発されたTEM。 |
| キャペックス | CAPEX | Capital Expenditureの略で、固定資産を取得するための支出のこと。本事業では、主に設備投資のこととなり、資産に計上され減価償却の対象となる |
| スイソカイシュウリツ | 水素回収率 | メタン分解が吸熱反応であるため、触媒と反応ガスに加えて反応エンタルピー分を外部より加える必要がある。本事業では、CO2の発生がない熱供給として生成物である水素の燃焼熱で供給した場合についてス水素回収率、すなわち、反応器で生成した水素のうち製品と回収できる水素の割合を算出した。 |
| タンソセキシュツソクド | 炭素析出速度 | メタン分解時における触媒上への炭素の析出速度。触媒の重量増加量は熱天秤で実験的に一定のガス組成条件下で測定できるので、重量増加の時間変化を微分することで算出する。この速度はモル基準で水素の生成速度の1/2になるため、水素生成速度を評価する指標となる。 |
| メソコウ | メソ孔 | 2～50nmの直径を有する細孔。IUPAC（ International Union of Pure and Applied Chemistry）において分類されている。 |
| リュウドウソウハンノウキ | 流動層反応器 | 触媒等の粒子を容器内に充填した層に、上向きにガスを噴出させることにって粒子をガスの流れ中に懸濁浮遊させた状態である流動層を利用した反応器。流動層では粒子が浮遊状態にあり、容器内でよく攪拌されながらガスと接触するため、粒子とガスの接触効率が良く、温度の制御性も高い。 |

Ⅴ-（5）メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造
（物質・材料研究機構、太陽鉱工、静岡大学）

| 読み方 | 用語 | 解説 |
|---|---|---|
| ディーアールエム | DRM | Dry Reforming of Methaneの略。乾式メタン改質、ドライメタン改質などと呼称される。$CH_4+CO_2=2H_2+2CO$なる化学反応に対応する。現在工業的水素製造の主流である湿式メタン改質：$CH_4+2H_2O=4H_2+CO_2$とならび、メタンから水素を抽出する化学反応のひとつとして知られている。 |
| タンソホシュウショクバイ | 炭素捕集触媒 | CO不均化反応（$2CO=CO_2$+固体炭素）を主体とした化学反応により、DRMによって$CH_4$・$CO_2$混合ガスから得られたCOガスから炭素成分を固体炭素の形態で捕集する触媒材料。 |
| スイソブンリマク | 水素分離膜 | 混合ガスから水素成分だけを選択的に分離・抽出する膜材料。超微細多孔質膜材料などが知られている。本プロジェクトにおいては、独自開発のバナジウム（V)合金分離膜を採用、燃料電池グレード（99.9999%）水素の100ℓ/時クラス抽出を実現した。 |
| コンリュウショクバイ | 根留触媒 | 触媒活性を備えた金属相と反応時のマスバランスを保つ働きを持つセラミックス相が極細繊維状に絡み合った形態をとるナノコンポジット触媒。移送絡み合い構造により、高度な反応安定性を発揮する。本プロジェクトでは、特に長時間安定性が求められるDRMに対し、根留触媒が採用された。 |
| エフティー | FT | Fischer-Tropsch反応の略。COと$H_2$からさまざまな炭化水素化学種を生成する反応一般を総称する用語である。メタンから出発してガソリンやオレフィンなど有用化学製品を得るC1化学の根幹をなす化学反応である。 |
| ディーアールエムヒカリショクバイ | DRM光触媒 | DRM反応を熱エネルギーではなく光子エネルギーで駆動する触媒。本プロジェクトを構成する研究チームにより世界で初めて発見された触媒反応および材料である（Nature Catalysis 3, 148–153 (2020)）。 |

# 1．意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

## 1.1 事業の位置づけ・意義

①政策的な重要性

水素は、これを燃料とした場合に二酸化炭素を排出しないという環境特性に加え、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯蔵、輸送、利用することができる特性（貯蔵性、可搬性、柔軟性）を有する。このため、水素を有効利用することで従来は利用困難であった海外の豊富な再生可能エネルギー資源や未利用エネルギー資源等を活用するとともにＣＣＳ適地等を利用することが可能となる。これは水素が、エネルギー資源の乏しい我が国にとってエネルギー安全保障と温暖化対策の切り札となる重要なカギとなることを意味する。

水素を日常の生活や産業活動で利活用する社会、すなわち“水素社会”を世界に先駆けて実現していくためには、水素を再生可能エネルギーと並ぶ新たなエネルギーの選択肢とすべく、環境価値を含め、水素の調達・供給コストを従来エネルギーと遜色のない水準まで低減させていくことが不可欠である。また、近年では水素の利活用が現実味を帯びて議論される中で様々な文脈で水素が語られ、エネルギーとしての利用だけでなく、化学品の原料や製鉄の還元剤等としても期待されている。

2023年６月に改定された『水素基本戦略』（再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議）では、国内外の情勢を踏まえつつ、2050 年カーボンニュートラルを達成するために、官民での共通認識として必要なビジョンを示しながら、課題認識と取組方針を明示している。




（出典：再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議（第４回））

**図表１　水素基本戦略**

②世界の取組状況

水素は脱炭素化に向けたキーテクノロジーとして国際的にも注目を集めており、欧米をはじめとする先進国のみならず、中国等のエネルギー需要の増大が続く新興国においても水素利用に向けた様々な取組が進められている

政策的には、米国は 2022 年 8 月に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した。また、2021 年には超党派のインフラ投資・雇用法によりクリーン水素の地域ハブ構築に総額 80 億ドルが投じられることが決まっている。欧州においては、2022 年に REPowerEU 計画が公表され、2030 年の水素導入量目標として域内製造で 1000 万 t、域外からの輸入で 1000 万 t の合計 2000 万 t を掲げた。また、「グリーンディール産業計画（2023 年 2 月）」を発表しており、その政策メニューの一つとして「欧州水素銀行」（EU Hydrogen Bank）を創設した。同銀行においては、再生可能エネルギー由来水素の域内製造を支援するため、10 年間にわたり、製造した再生可能エネルギー由来水素 1 kg あたり固定されたプレミアムを補助するための競争的入札を、2023 年秋に実施することを予定している。ドイツでは、入札を通じて水素の購入・販売を行う「H2Global」を導入し、初回入札を 2022 年 12 月より開始している。中国では、水素エネルギー産業発展中長期規画（2022 年 3 月）25 を策定し、2025 年に FCV 5 万台、再生可能エネルギー由来水素製造年間 10～20 万トン、CO2 排出削減量 100～200 万トン/年の実現を目指すこととしている。

近年のこれらの政策の動きに呼応して、欧米を始め世界各国において、再生可能エネルギー由来の電力を水素に変換する Power to Gas のプロジェクトが多数発表されているほか、水電解技術の開発も活発に行われている。米国では、DOE が新プロジェクト「Hydrogen Shot」を立ち上げ、「今後 10 年で水素製造コストを 1$/kg とする」という野心的目標に向けて、水電解や化石燃料改質+CCS の他にもあらゆる製造技術の可能性を追求、複数の製造技術の開発を推進する計画である。欧州では Clean Hydrogen Joint Undertaking のプログラムにおいて固体高分子形水電解のほか、近年は固体酸化物型水電解（SOEC）やアニオン交換膜型（AEM）の研究開発も目立ち始めた。また、IEA AFC TCP Task 30 等のワークショップでは、水電解技術に関する情報交換が定期的に行われている。

企業の動向として、水素製造技術に関しては、アルカリ水電解技術において Nel、Thyssenkrupp Nucera 等が大規模開発・実証を推進しており、固体高分子型水電解においては、Siemens、Nel、Cummins、ITM Power 等が大規模開発・実証を推進している。また、豪州 Hazer 社は、天然ガス及び類似のメタン原料に鉄鉱石触媒を利用して水素及びグラファイトに転換するプロセスを開発している。

水素輸送貯蔵技術に関しては、欧米では 100～200km 規模の水素専用パイプラインが複数整備されており、ノルウェーは水素戦略において、水電解や天然ガス改質等で製造した水素をパイプラインや船舶で輸出する可能性に言及している。

水素利用技術に関しては、例えば、オランダでは 440MW 天然ガス発電所のうちの 1 つを、水素専焼に転換する可能性調査を行っている。米国においてＧＥ社は、米国エネルギー省（DOE）の Advanced Energy Systems /Hydrogen Turbine プログラムに参画し、水素ガスタービンの研究開発を行っている。当該プロジェクトでは 2035 年頃までに 1,700℃級の水素タービンの開発・実証を予定している。

我が国には、こうしたグローバルな動向を適切に把握して世界と協調しつつ、水素社会の実現へ向けて世界をリードしていくことが求められる。

③我が国の状況

化石燃料等の天然資源に恵まれない我が国は、1970 年代の二度の石油危機以来、国民生活と産業活動の血脈であるエネルギーを海外に依存する構造的脆弱性を抱え続けている。加えて、2016 年 11 月のパリ協定の発効を受け、深刻化する地球温暖化問題に対し、我が国としての責任を一層果たしていくことが求められている。一次エネルギーのほぼ全てを海外の化石燃料に依存する我が国においては、エネルギー安全保障の確保と温室効果ガスの排出削減の課題を解決していくことが必要である。

このような課題解決に向けた具体的な我が国の取り組みとして、2021 年 6 月 18 日に「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、2050 年に向けて成長が期待される 14 の重点分野を選定し、2 兆円のグリーンイノベーション基金を造成した。本基金は、10 年間で技術開発から実証・社会実装まで一気通貫で支援するもので、水素関連のプロジェクトは 2021 年夏に事業を開始し、カーボンニュートラルの実現において水素は数多くの重点分野にて重要な位置を占めている。また、2023 年に水素基本戦略が改定されたことは前述の通りである。

④本事業の目的

本事業では、二次エネルギーとしての水素等を最大限に活用するため、2040 年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。具体的には、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に主として取り組む。

⑤本事業の意義

我が国政府には、過去の原子力発電所における事故等を踏まえて「国民の安全の確保」を最優先とした上で望ましいエネルギーミックスが可能となるようなエネルギー供給体制を構築することが求められている。 このエネルギーミックスの実現には、社会インフラの変革も視野に入れ、省エネルギー・節電対策を抜本的な強化、再生可能エネルギーの開発・利用を最大限加

速化、天然ガスシフトを始め、環境負荷に最大限配慮しながらの化石燃料の有効活用（化石燃料のクリーン利用）等が重要である。

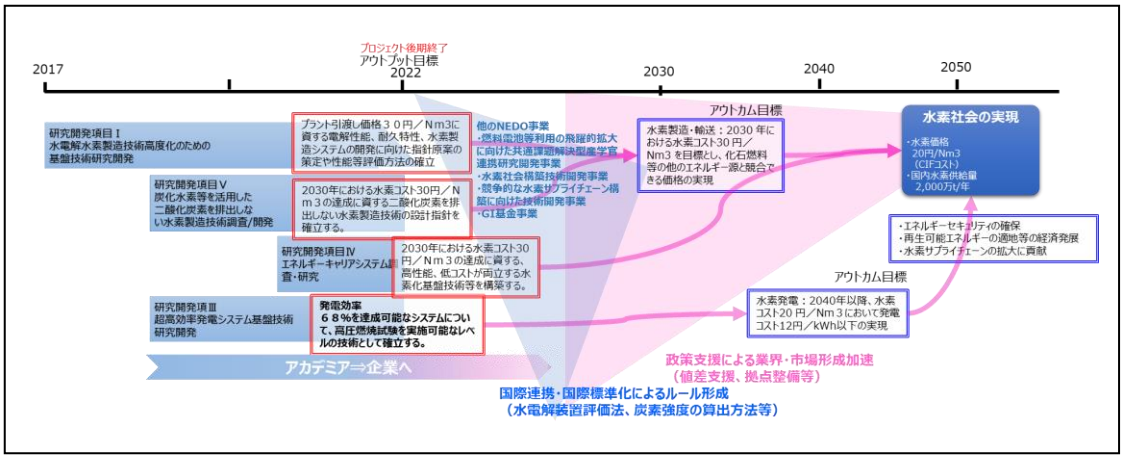
しかし、このうち再生可能エネルギーについては、出力変動のある太陽光発電、風力発電等と需要をバランスさせるための電力貯蔵用や電気自動車用の二次電池の開発が進められているものの、電気化学反応による物質の酸化還元を原理とする 2 次電池では十分なエネルギー容量を確保することが困難であるため需要の時間といった本質的な問題を内包している。また、海外では再生可能エネルギーや、低品位炭等の未利用化石燃料等とＣＣＳを組み合わせた技術の大規模開発が急速に進められているが、大抵の場合はエネルギー適地がエネルギー消費地から隔てられていることから効率的な輸送が難しいといった問題も生じている。

このような問題は喫緊に解決しなくてはならないが、超長期的かつ大規模な研究開発投資が必要であることから個別の企業や研究機関が対処することは困難である。従って公的研究開発推進として NEDO が本事業によりエネルギー媒体として水素を活用することで各エネルギーの価値を向上させることを目的として、再生可能エネルギー等からの高効率低コスト水素製造技術、高効率水素-エネルギーキャリア転換・輸送技術、高効率な国内外の再生可能エネルギー等の大規模水素利用技術開発等を推進する必要がある。さらに、公的研究開発機関として NEDO が関与することで、水素閣僚会議、IPHE（国際水素・燃料電池パートナーシップ）等の政府間ハイレベル会合への参加や IEA TCP（技術協力プログラム）等の各国技術開発期間のネットワークを通じて各国機関と密に情報を共有することができ、必要に応じて迅速に国家プロジェクト運営に反映することや、各国期間に必要事項をインプットすることが可能となる。

## 1.2. アウトカム達成までの道筋

本事業での研究開発成果を基に技術の社会実装を担う企業を巻き込み、要素技術開発・実証を行う他 NEDO 事業等に橋渡しを行って研究開発を継続しながら主体を段階的にアカデミアから企業へ移行していくことで、社会実装に繋げる。

他方で、アウトカム目標である「水素製造・輸送：2030 年における水素コスト 30 円／Nm3 を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現」や最終的な狙いである水素社会の実現は研究開発のみで達成できるものではなく、水素の導入支援、市場環境整備、国際連携によるルール形成等政策面での施策も不可欠であり、政策当局である経済産業省と一体的に実施することで、水素社会の実現を目指す。




**図表２　アウトカム達成までの道筋**

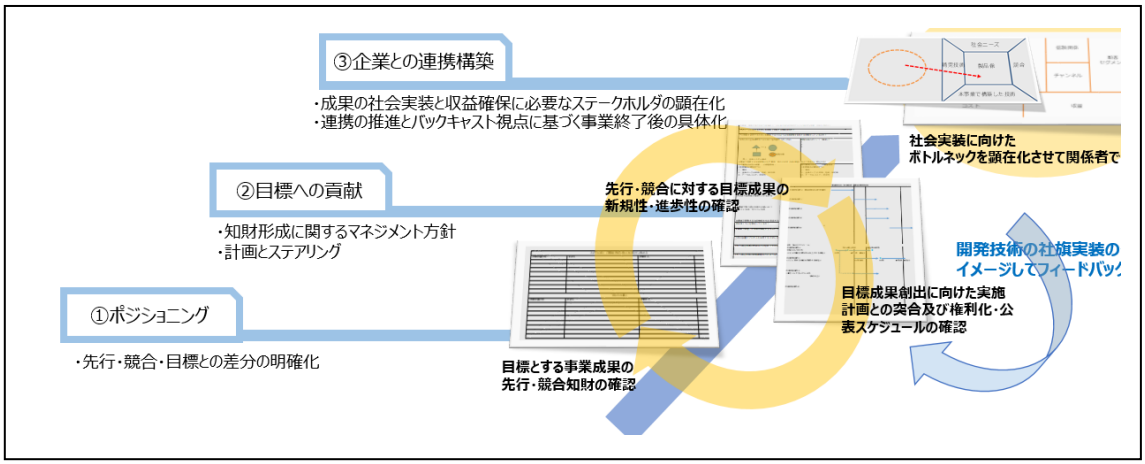
## 1.3. 知的財産・標準化戦略

基礎的な先導研究であろうとも、ＮＥＤＯ事業として、最終的には事業成果が市場獲得へ貢献することが重要である。

市場獲得には市場価格、参入障壁、差別化等の要因があるものの、先導研究である本事業では、先ずは技術的可能性を追求し基礎分野における知的財産権に注目し、特許の取得等を進めていくこととし、知的財産戦略の大きな方針は以下の３つとする。

- ポジショニング：先行又は競合技術と、本事業で創出する成果の差分を明確化。
- 目標への貢献：研究成果を、実用化を目指した事業目標に貢献するように知財化を支援。
- 企業との連携：技術の移転先となる企業との連携を慫慂。

この戦略を実行するための手段として、「仕上げたい技術の姿」と題した知財運用フォーマットを構築して、これを事業者との対話に用いて意識付けを行った。




**図表３　知的財産権の確保に向けた取組＜仕上げたい技術の姿＞活動**

また、公募時の提案書様式において、「研究開発対象のポジショニング」と「成果の取り扱いに関するマネジメント戦略」の項目を追加し、TRL の低いステージであるからこそ社会実装に向けた知的財産形成を見据えた活動を進めた。

さらに、課題に対する解決方法として、提案する技術の優位性の説明や特許出願による権利化だけでなく、秘匿化も含めオープンクローズの整理についても応募段階で説明を要求し、採択者説明会では特にクローズ戦略に対して NEDO 事業成果に対するノウハウ指定の手続きについて強調して説明した。

知的財産管理については、＜委託研究開発における知的財産マネジメントに関する運用ガイドライン＞に示される観点について実施者に改めて理解を求め、知的財産マネジメント基本方針やデータマネジメント基本方針に基づく対応を依頼した。

成果の権利化・公表については事前にその内容を確認するための本事業独自の様式を記入の上提出することを事業者に求め、出願や公表については事前に確認して事業成果としての知的財産管理を実施した。

＜実施計画との整合＞

●知財委員会での合意があるか（複数事業者の場合）

●成果に関する実施計画書における位置づけ・整合

●事業内成果と事業外成果の確認（必要に応じて）

＜公表内容の権利化状況＞

●公表する成果に関する権利化状況

●権利化せずに公表する成果に関する理由

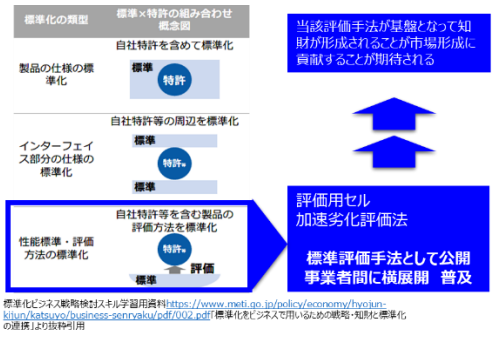
これらを推進するために＜仕上げたい技術の姿＞（前述）を活用して以下の確認を行った。

●競合・代替技術との対比

●バックグラウンド IP の状況・フォアグランド IP の計画

●ステークホルダーとの関係

標準化については、水素に関する市場自体が未成熟な中で、本事業で対象とする技術分野において製品仕様やインターフェイス等の標準化を検討する段階にはないと認識しているが、水電解について言えば要素技術も含めるとそのプレイヤーは多岐に渡り、水電解装置の使われ方も様々である中で、性能の共通的な評価手法は健全な市場形成においても重要であるため、本事業で取り組む評価手法を積極的に横展開している。



標準化ビジネス戦略検討スキル学習用資料https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/katsuyo/business-senryaku/pdf/002.pdf「標準化ビジネスで用いるための戦略・知財と標準化」の資料より抜粋引用

**出願状況**
**国内出願：電気化学セル**
**PCT出願：アノードの加速評価方法**
**（国内移行：CN、EP、KR、US、CA）**

**そのうえで評価手法を公開**
**研究開発項目Ⅰの他事業者や企業に横展開するとともに、GI基金で実施する水電解システムの評価基盤とも連携**

**学術誌にも掲載し広く周知**
（電気化学2022 年 90 巻 2 号 p. 136-158）
https://www.jstage.jst.go.jp/article/denkikagaku/90/2/90_22-TE0003/_article/-char/ja/

**図表４　水電解の性能評価手法に関する標準化**

# 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）アウトカム目標の設定

本事業の基本計画上のアウトカム目標は以下の通りであり、水素基本戦略の目標や既存化石燃料使用時と比較して同等の発電コストがその設定根拠である。

- 再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。
- 水素製造・輸送については、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。
- 水素発電については、２０４０年以降、水素コスト２０円／Ｎｍ３において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。
- また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。

他方で、これらのコスト目標は前提条件に大きく依存することや、近年水素の利活用の文脈が多様化していることを踏まえると、成果の価値は技術の使われ方に応じて柔軟に評価する必要があり、最終的には水素基本戦略で定める水素導入量目標（2030 年 300 万 t、2040 年 1200 万 t、2050 年 2000 万 t）と水素社会実現への貢献が目指すところである。

（２）本事業における「実用化」の考え方

当該事業は「先導研究」であり、多様なテーマで実施する技術シーズの技術成立性や経済成立性等を確認して次の研究開発フェーズへ移行させるか否かを判断するものである。そのため、本事業における「実用化」とは、「水素製造から、貯蔵・輸送、利用等まで水素サプライチェーンを構成する要素技術について、事業化に向けた次のフェーズの国家プロジェクトや自主研究開発等へ移行可能な技術が創出されること」と定義する。

（３）アウトカム目標の達成見込み

アウトカム目標の達成見込みを図表 5 に示す。

研究開発目標Ⅰ「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」については、複数件のテーマが企業を体制に加えて開発を継続しているほか、一部テーマは成果の実証を計画しており、社会実装に向けて着実に研究開発を継続しているため、○とした。

研究開発目標Ⅲ「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、現時点では次フェーズの発電技術開発に進んではいないが、本テーマのアウトプットを基に熱需要でいち早く酸素水素燃焼の社会実装を実現し、その成果を将来的な発電技術開発に活かす計画であるため、△とした。

研究開発項目Ⅳ 「エネルギーキャリアシステム調査・研究」については、本テーマが直接的に 30 円/Nm3 を実現するシステムを構築するわけではないが、MCH/液水を活用する企業へ基盤技術を提供する体制を構築したため、○とした。

研究開発項目Ⅴ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」については、企業を体制に加えて次フェーズの開発・実証（計画含む）を継続しているため、○とした。

| 研究開発項目 | アウトカム目標 | 最終的に目指す姿 | 現状 | 達成見込み | 根拠 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 研究開発目標①<br>水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 水電解システム普及による水素導入目標・水素社会実現への貢献 | アカデミア主体のテーマの内多くが社会実装を担う企業を巻き込み、次フェーズの研究開発に移行。企業による実施テーマは自主的な開発を継続し、成果の一部の実証を計画。 | ○ | 複数件のテーマが企業を体制に加えて開発を継続しているほか、一部テーマは成果の実証を計画しており、社会実装に向けて着実に研究会開発は継続しているため。 | ・要素技術プレイヤー間連携の流動性向上<br>・BOPコスト低減/電気化学以外のプレイヤーの参入（プラントエンジニアリングや運転制御最適化） |
| 研究開発目標③<br>超高効率発電システム基盤技術研究開発 | ２０４０年以降、水素コスト２０円／Ｎｍ３において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。 | エミッションフリーな超高効率発電を実現する酸素水素燃焼発電タービンの社会実装・普及を通じた、水素導入目標・水素社会実現への貢献 | 発電利用よりも早期に社会実装する適用先として熱需要への適用を調査研究に着手 | △ | 現時点では次フェーズの発電技術開発に進んではいないが、本テーマのアウトプットを基に熱需要でいち早く酸素水素燃焼の社会実装を実現し、その成果を将来的な発電技術開発に活かす計画であるため。 | ・燃焼試験結果に基づく要素技術開発の継続<br>・熱需要向け適用先での燃焼完結性及び制御方法の確立 |
| 研究開発項目④<br>エネルギーキャリアシステム調査・研究 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 水素キャリアの輸送コスト低減による水素導入目標・水素社会実現への貢献 | 基盤技術としての計測やシミュレーション手法の利活用やその高度化を行い、企業に知見提供すると共にコンソーシアムを構築。 | ○ | 本テーマが直接的に輸送システムを開発するわけではないが、MCH/液水を活用する企業へ基盤技術を提供する体制を構築したため。 | ・難易度の高い計測技術の課題解決<br>・液水関連企業との連携と設計実務への深い関与 |
| 研究開発項目⑤<br>炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 炭化水素等既存のエネルギーを活用した二酸化炭素を排出しない水素製造システム普及による水素導入目標・水素社会実現への貢献 | 複数テーマにおいて事業化を目指す企業が中心となって次のフェーズ（要素開発、実証）に進んでいる。 | ○ | 企業を体制に加えて次フェーズの開発・実証（計画含む）を継続しているため。 | ・水素製造コスト低減と副生炭素機能性獲得のトレードオフ最適化<br>・メタン直接熱分解の炭素強度計算の扱い |

**図表５　アウトカム目標の達成見込み**

## 2.2. アウトプット目標及び達成状況

### ２．２．１　アウトプット目標の設定及び根拠

本事業では、再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。水素製造・輸送については、2030 年における水素コスト 30 円/Nm3 を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。水素発電については、2040 年以降、水素コスト 20 円/Nm3 において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。

| 研究開発項目 | 研究開発内容 | 最終目標（2022年３月） | 根拠 |
|---|---|---|---|
| **研究開発項目①　水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発** | アニオン交換膜（ＡＥＭ）型水電解技術等の先端研究、変動電源に対する各種水電解技術の劣化機構の解明及び電解性能や劣化に関する共通評価手法の開発等。 | プラント引渡し価格３０円／Ｎｍ$^3$に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定や性能等評価方法の確立 | 水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm$^3$程度の水素コストの実現を目指す」という記述。 |
| **研究開発項目③　超高効率発電システム基盤技術研究開発** | 水素サプライチェーンのＬＣＡ(Life Cycle Assessment:ライフサイクルアセスメント）全体で二酸化炭素排出をゼロにすることは困難であることから、水素発電技術の更なる高効率化は必要不可欠。従来の開放系サイクルを大幅に凌駕する高効率の発電システムを構築する。 | 事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。 | 水素基本戦略に「水素を安定的かつ大量に消費する水素発電は国際的なサプライチェーンの構築とセットで進めるべき最重要アプリケーション」との記述。<br>2019年度継続可否審査において最終目標は「2022年度の事業終了時に実機レベルに移行可能な要素技術を確立すべき」という有識者意見。 |
| **研究開発項目④　エネルギーキャリアシステム調査・研究** | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。 | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。 | 水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm$^3$程度の水素コストの実現を目指す」との記述。 |
| **研究開発項目⑤　炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査** | メタン等の炭化水素やバイオマス資源等をはじめとした水素源から安価かつ大量の水素を製造する、二酸化炭素を排出しないコア技術の可能性を調査する。 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する二酸化炭素を排<br>出しない水素製造技術の設計指針を確立する。 | 水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm$^3$程度の水素コストの実現を目指す」との記述。 |

**図表６　アウトプット目標の設定及び根拠**

### ２．２．２ アウトプット目標の達成状況

本事業のアウトプット目標の達成状況は以下の通り。

研究開発目標Ⅰ「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」については、電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定をし、水電解装置やプラント基本設計に向けたプレイヤー間の連携を具体化させた。また評価標準化にむけプロトコルの確立とその水平展開も進めたため。なお、高 IF 誌への掲載や出願数も 2 年間で 100 件を超えるとともに、SOEC については生成ガス純度および流量、等の測定方法を IEC 62282-8-301 第 1 版に反映するなど一部テーマでは想定・計画以上の成果を創出したため、達成度は○とした。

研究開発目標Ⅲ「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、システム検討において動特性解析モデルを構築し、負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発においてシングルバーナにて 0.8 MPa・1kW 以上の条件にて燃焼試験を実施し、クローズサイクルを模擬した検証装置を構築する準備を整えることができたため、達成度は○とした。

研究開発項目Ⅳ 「エネルギーキャリアシステム調査・研究」については、有機ハイドライド製造についてはファラデー効率（水素生成を抑制し、MCH 直接製造割合 95%超え）を高める技術開発・設計指針の導出、及び運転プロトコルの導出により、他事業で実施する企業の実証に重要な知見を提供。液体水素については新規の現象把握を達成するとともに水素需要分野に新規に進出するプレイヤーの拡大にも貢献したため、達成度は○とした。

研究開発項目Ⅴ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」については、1 事業が実証フェーズに、2 事業が実証フェーズの検討段階に進み、実証フェーズに進んだ事業については、量産可能な触媒設計及び全体プロセスの仕様確定を踏まえ、実機スケールプラントの基本設計及び事業シナリオの策定を完了したため、達成度は○とした。

| 研究既発項目 | 目標<br>（2023年３月） | 成果（実績）<br>（2023年３月） | 達成度 | 達成の根拠／解決方針 |
|---|---|---|---|---|
| 研究開発項目①　水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | プラント引渡し価格３０円／Ｎｍ3に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立する。 | MI等も活用し、アルカリ、PEM、AEM、SOEC型水電解技術開発に取り組み、高性能・高耐久・低コストを成立させる材料からシステム開発、評価技術、劣化加速プロトコルを開発。目標水素価格実現に向けて開発の指針原案や性能等評価方法を確立した。 | ○ | 電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定をし、水電解装置やプラント基本設計に向けたプレイヤー間の連携を具体化させた。また評価標準化にむけプロトコルの確立とその水平展開も進めたため。なお、高IF誌への掲載や出願数も2年間で100件を超えるとともに、SOECについては生成ガス純度および流量、等の測定方法をIEC 62282-8-301第1版に反映するなど一部テーマでは想定・計画以上の成果を創出。 |
| 研究開発項目②　超高効率発電システム基盤技術研究開発 | 事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。 | 発電効率68%達成可能なシステムに係る高圧燃焼試験を実施した。また社会実装の検討においては2030年に社会実装を視野に熱需要への酸素水素燃焼の適用について具体的に案をまとめた。 | ○ | システム検討において動特性解析モデルを構築し、負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発においてシングルバーナにて0．８MPa・1kW以上の条件にて燃焼試験を実施し、クローズサイクルを模擬した検証装置を構築する準備を整えることができたため。 |
| 研究開発項目④　エネルギーキャリアシステム調査・研究 | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。 | 有機ハイドライド製造及び液体水素に関する解析モデルによる設計技術の構築と要素材料技術開発に取り組み、解析手法の提示と活用を進めた。 | ○ | 有機ハイドライド製造についてはファラデー効率（水素生成を抑制し、MCH直接製造割合95%超え）を高める技術開発・設計指針の導出、及び運転プロトコルの導出により、他事業で実施する企業の実証に重要な知見を提供。液体水素については新規の現象把握を達成するとともに水素需要分野に新規に進出するプレイヤーの拡大にも貢献したため。 |
| 研究開発項目⑤　炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する二酸化炭素を排出しない水素製造技術の設計指針を確立する。 | 水素製造プロセスについてベンチスケール試験を推進するとともに、副生する炭素の回収や利用についても検討が進み、プロセス設計指針を確立したことで、実証フェーズの検討を具体的に取り組むことができた。 | ○ | １事業が実証フェーズに、2事業が実証フェーズの検討段階に進み、実証フェーズに進んだ事業については、量産可能な触媒設計及び全体プロセスの仕様確定を踏まえ、実機スケールプラントの基本設計及び事業シナリオの策定を完了したため。 |

◎　大きく上回って達成、○達成、△一部未達、　×未達

**図表７　アウトプット目標の達成状況**

## ２．２．３　研究開発項目毎の達成状況

### Ⅰ　水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

### Ⅰ―１　高温水蒸気電解技術の研究開発（東芝エネルギーシステムズ）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **① SOEC セル・スタックの劣化機構解明** | SOEC セル・スタック部材・高温モジュール構造材の劣化機構を解明する | SOEC セルおよびスタック部材の劣化要因を抽出し、劣化機構を解明し高耐久化施策に繋がる世界初の知見を得た。高温モジュール構造材の劣化影響因子を抽出し、その影響度を明らかにした。 | ○ | |
| **② SOEC セル・スタック部材の設計指針策定** | 高耐久 SOEC セル・スタック部材の長寿命化施策を抽出、SOEC セル・スタック・高温モジュール部材の設計指針を策定する | 水素極/電解質および、酸素極電解質間の構造を制御することで、セル劣化率の低減に成功、耐久性 5 年に目途。また、セパレータからの Cr 被毒抑制可能な被膜構造提案し、10 年以上の耐久性に目途が立った。また、高温モジュール構造材については汎用 SUS 材への Al 浸透処理により長寿命化可能であることを実証した。 | ○ | |
| **③ 新規 SOEC 電極の設計指針策定** | セル性能・耐久性に優れた新規 SOEC 酸素極材料の設計指針を策定する | ペロブスカイト構造酸素極材料と電解質材料の材料両立性に注目し、LaNi(Fe)-SDC コンポジット材料および Ti 添加もしくは La 添加セリアと複合した La(Sr)Co(Fe)酸化物が有望であることを明らかにした。 | ○ | |
| **④ SOEC スタック運転条件検討** | SOEC スタックの長寿命化が可能な運転条件の設計指針を策定する | 一定/変動入力およびガス組成、運転温度、運転電流／電圧がセル・スタックの劣化に及ぼす影響を評価。電流 OCV 待機時間や変動速度を制御することで、劣化速度の低減が可能 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | になった。また、複数台連結スタックの劣化傾向を確認し、単スタックと同様の方法で劣化抑制可能であることを確認した。 | | |
| **⑤ SOEC 評価技術／標準化調査** | SOEC 試験方法、評価技術、標準化に関する動向を調査し開発へ反映する | SOEC 性能評価試験法案を作成。作成した試験方法が実施可能な評価試験機を製作した。開発したセルスタック性能評価技術は、新たな国際規格へ反映。 | ○ | |

## Ⅰ―2　非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発（理化学研究所）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ①―1<br>Mn 単体系触媒安定領域を 50 mV 拡大する作製条件の確立<br>①―2<br>含侵法による Mn-Ir 系触媒の 80˚C, 1 A/cm$^2$ の条件下で劣化率：10 mV/h 以下 | a) ２０２１年度に得られた結果を基に、Mn 単体系触媒の Pourbaix Diagram から考えられる安定領域より 50 mV 程度広い電位領域で用いることが可能な触媒の再現性まで含めた安定的な作製条件の確立を行う（東ソー担当） | a) MnOx 作製時の焼成温度を上げることで 1×1 と 1×2 構造の比（Pr 比）が 40%から 97%にまで増加、この Pr 比の増加に伴い、γ-$MnO_2$ が持つ安定電位領域が 50 mV 程度拡張し、$Mn^{7+}$の溶解が抑制されることを確認した。 | ○ | a) 今後の課題として、非貴金属触媒のみでのさらなる高電圧駆動の可能性の探索が挙げられるが、この検討にはしばらく時間がかかると考えられる。 |
| | b) 非貴金属系触媒について、さらなる電圧領域の拡張に必要な要因の指針を獲得する（理研担当） | b) MnOx の 1×1 と 1×2 構造の比（Pr 比）の増加に伴い、γ-$MnO_2$ が持つ安定電位領域が拡張することを確認した。 | ○ | b) 今後の課題は a と同様。 |
| | c) 安定領域を拡張した Mn 単体系触媒に対して含侵法により Ir 担持を行い、Ir 担持量 0.1 mg/cm2 以下において触媒評価用水電解セル温度 80ºC、印加電圧 2.0 V の条件の下で、1.0 A/cm2 以上の電流密度で安定的（劣化率：10μV/h 以下）に動作させる （理研担当 | c) Ir 含有量が 0.08 mg/cm$^2$ の触媒を担持した MEA を用いて、2.0 V・80℃の条件において 4.2 A/cm$^2$ の電流を得ることに成功した。1.8 A/cm$^2$ 環境下で MnIrOx (0.08 mg/cm$^2$) 触媒は、82%(HHV)の高効率を維持し続けながら 3000 時間の運転に成功し、劣化は観測されなかった(~2000 時間の劣化率：-7.4 μV/h)。さらに、2.0 A/cm$^2$ 環境下では、80%の電圧効率 3000 時間の連続運転が可能であることを確認した。 | ○ | c) 今後の課題は MnIrOx の性能を担保する触媒構造の確認と、動作時におけるこの構造の維持など、材料特性を明らかにすること。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ②―1<br>Mn-Ir 系 MEA 劣化機構の確認のため、水電解シングルセルを用いて供給水温 80ºC、印加電圧 1.8 V の条件の下で Ir 系触媒の劣化率の 2 倍以内を達成<br>**②―2**<br>Mn-Ir 系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの定常条件下での作製条件指針の作製 | a) ２０２１年度の活動を踏まえ、システム内に組み込むことが可能な安価に作製可能となる構造を持つシングルスタック水電解セルの構造を決定し、この水電解セル構造における貴金属触媒を用いた場合の基準となる電流密度、及び劣化率を取得する | a) システム内に組み込むことが可能な構造を持つシングルセルの水電解セルの構造を決定した。このセルによる貴金属触媒を用いた際の基準となる電流密度は 2.0 V･25 ºC で 1.4 A/cm$^2$、2.0 V･80 ºC で 2.2 A/cm$^2$ であった。基準となる劣化率は 1.8 V･80 ºC の連続運転前後の電流密度―電圧特性の測定による 1.8 V･80 ºC の電流密度で比較して 127%（初期値より増加）となった。 | ○ | a) 今後の課題として特に大きなことはないが、本検討を通じてセル構造やセル部材が特性に大きな影響を及ぼすことが明確になったため、今後ともセル構造改良の継続が必要である。 |
| | b) a の基準値に基づき、同じ水電解セル構造における Mn 酸化物触媒または Mn-Ir 系触媒を用いた場合の電流密度、及び劣化率を評価する | b) a の基準と同じ構造を持つ MnIrOx 触媒を用いた場合の電流密度、及び劣化率を評価した。 | ○ | b) 今後の課題は a と同様。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | c) これらの活動を通じて、安価に作製可能となるシステム組み込み可能な構造を持つシングルスタック水電解セルを用い供給水温 80ºC、印加電圧 1.8 V の条件の下で、基準とする貴金属触媒を用いた場合と比較して、動作初期において電流密度の 50%以上（最低でも約 0.5 A/cm2 以上）、供給水温 80 ºC、印加電圧 1.8 V の条件における水循環環境下において 28 日間定常動作動作後の劣化率として 200%以内を達成する | c) MnIrOx 触媒を用いた際の電流密度は 2.0 V・25 ºC で 0.6 A/cm$^2$、2.0 V・80 ºC で 2.0 A/cm$^2$ であった。基準となる劣化率は 1.8 V・80 ºC の連続運転前後の電流密度―電圧特性の測定による 1.8 V・80 ºC の電流密度で比較して 127%（初期値より増加）となった。 | ○ | c) 今後の課題として、長時間動作後の電流密度―電圧特性が向上しているため、最初の活性化条件の変更により、このより良い特性が得られる条件を探索する必要がある。 |
| | d) 実運転環境として想定される定常条件下における動作について、セル構成材料等の劣化箇所の確認および劣化原因の調査を理化学研究所で進めることにより、非金属系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの実用化可能な電解セル構造、セル構成材料および運転条件の指針を、日本カーリット株式会社において見出だす。 | d) 実運転環境を想定した定常条件下のセル構成材料等の劣化等の確認を行った。アノード周辺の構成部材は Pt コーティングが重要であり、安価に薄膜を形成可能な Ti 上の焼成法による Pt コーティングが有効であることを見出した。さらに、この部材を用いることで、直列抵抗の低下も期待可能である。さらに、本検討で主に用いている 5 cm$^2$ より面積が 3.2 倍ほど大きい 16 cm$^2$ のセルを作製し評価したところ、5 cm$^2$ とそん色ない結果が得られており、将来の大型化についても可能であることがわかった。 | ○ | d) 今後の課題としては、さらに実用化に向けたセル構造材料等の改良である。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ③―1<br>太陽電池の電力変動環境下の Mn-Ir 系触媒を用いた水電解セルの運転条件評価<br>**③―2**<br>Mn-Ir 系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの変動条件下での作製条件指針の作製 | a) システム接続して評価を行うマルチスタック水電解セルを製作し、この水電解セルに Mn 酸化物触媒または Mn-Ir 系触媒を組み込みシステム動作を行い、貴金属触媒を用いた場合と比較を行うことで、非貴金属系触媒を用いる | a) 水電解セルを利用するエネルギーマネージメントシステムに接続可能な 4 スタックの水電解セルを作製し、この水電解セルに MnIrOx 触媒を組み込んで動作確認を行った。スタックを行った関係で、直列抵抗の増加は見られたが、貴金属触媒を用いた場合と比較して、シングルセルで確認された違い以外の大きな違いは確認できなかった。 | ○ | a) 今後の課題としては、MnIrOx 触媒を用いる場合の材料特性上必要な、IrOx 触媒を用いた場合と異なる操作範囲の明確化である。 |
| | b) a の結果を基に、本システム動作に必要な水電解セルの特性を把握し、水電解セルの構造改良に反映する | b) 変動電源動作の基本動作確認を行った。結果、MnIrOx 触媒を用いた場合、動作温度による電流密度－電圧特性の変化が大きいため、システム側の制御範囲を逸脱する可能性があることがわかったが、材料特性のため水電解セルの構造改良については触媒構造周りの最適化以外は特に必要がない結果となった。 | ○ | b) 今後の課題は、MnIrOx 触媒を用いた場合の触媒周りの構造の最適化にある。（ＩｒＯｘ触媒を用いた場合であってもセル構造により最適条件は異なるため個別対応となる可能性がある。） |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | c) これらの活動を通して、D. Yamashita et al., Int. J. Hydrogen Energy 44 (2019) 27542 にある制御方法を用い、貴金属触媒を用いた水電解セルと比較して制御パラーメーターを変更するだけで貴金属触媒を用いた水電解セルと同等のシステム動作が可能なマルチスタック水電解セルの確立する | c) MnIrOx 触媒を組み込んだ４スタックセルをシステムに組み込み、制御可能なことを確認した。但し、水電解セルの電流密度―電圧特性が大きいため、水電解セルの動作温度を 50 ºC 以上に高くして動作をさせる必要があった。これはシステム側の対応可能な範囲の問題であり、普遍的ではない。 | ○ | c) 今後の課題はシステム組み込みに対し問題の有無を確認するために高電圧／低電圧サイクル試験を行った際に、ＩｒＯｘ触媒を用いた場合と、ＭｎＩｒＯｘ触媒を用いた場合でサイクル特性が異なっていた点である。この範囲や条件等は現状まだ十分解明できておらず、今後の検討が必要である。 |
| | d) システムに組み込んだ際に想定される変動条件下における動作について、セル構成材料等の劣化箇所確認および劣化原因調査を理化学研究所で進めることにより、非金属系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの実用化可能な電解セル構造、セル構成材料および運転条件の指針を日本カーリット株式会社において見出す。 | d) スタック化大型化の基礎として、第一段階として４スタック 16 $cm^2$ のセルを試作して、小型のセルにそん色ない結果を得ることが出来、1 kW 級水電解セルの実用化可能な電解セル構造、セル構成材料および運転条件の指針を得ることが出来た。 | ○ | d) 今後の課題としては、さらに実用化に向けたセル構造材料等の改良である。 |

## Ⅰ―3　アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発
## （産業技術総合研究所、早稲田大学、北海道大学）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **1-1　電解機構の解明および電解性能の改善【産総研】** | 電解電圧 1.80V 以下@1A/cm$^2$ | JARI セルにおいて 1 A/cm$^2$ における電解電圧 1.80V 以下を達成した。 | ○ | |
| **1-2　水素発生カソード触媒層開発　【早大】** | YNU 電解セル利用における電解セル試験において、-0.5 A/cm2 で Pt/C 電極と同程度もしくは0.9倍程度の電圧値を達成 | AEM 表面にバインダーフリーで直接非貴金属合金カソード触媒層を形成可能な新規無電解析出法を開発し、合金組成制御を経て Pt/C を超える性能を有する NiFeP 触媒電極の開発を達成（触媒性能は YNU 電解セル利用における-0.5 A/cm$^2$ 電解セル試験における電圧値で評価）。 | ◎ | |
| **1-3　酸素発生アノード触媒層開発　【早大】** | YNU 電解セル利用における電解セル試験において、+0.5 A/cm2 で現行電極と同程度もしくは0.9倍程度の電圧値を達成 | 電解析出法における印加電流波形を最適化し、現行電極（$CuCoO_x$）を超える性能を有する NiFe 触媒層電極を、PTL である Ni フォーム部材表面にバインダーフリーで緻密に直接形成することに成功（触媒性能は YNU 電解セル利用における+0.5 A/cm$^2$ 電解セル試験における電圧値で評価）。 | ◎ | |
| **1-4　アノード触媒層気泡離脱挙動解析【北大】** | 高電流実験および長時間電解で生じた触媒表面の変化を原子間力顕微鏡で観察し、表面 | 高速原子間力顕微鏡を用いて、ナノ気泡観察を行った。その結果、電極の表面状態（濡れ性、粗さ）によって、 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 粗さの定量的評価を行い、気泡発生挙動との関係を明らかにする | 気泡成長による被覆率変化（ナノスケール）を定量的評価することができた。 | | |
| **2-1 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価【産総研】** | JARI セル 1000 時間以上の一定負荷運転（1.0A/cm2）に対して、電解電圧上昇率 25μV/h 以下<br>YNU セル 2000 サイクルにおける定電流モード時定常電位の上昇 0.2V 以下 | JARI セル 1000 時間以上の一定負荷運転（1.0A/cm2）において、電解電圧上昇率 25μV/h 以下を確認した。<br>YNU セル 2000 サイクルにおける定電流モード時定常電位の上昇 0.2V 以下を実現した。 | ○ | |
| **2-2 構成部材の耐食性評価および防食技術開発【北大】** | ステンレス鋼の耐食性が見込まれない場合には表面被覆を行い耐食性評価（腐食速度 0.03mm/year 以下を実現する材料特定）<br>電位変動下での材料表面の変化について調べ、表面の保護性皮膜が電位変動によって剥離する場合には、剥離が起こる電析変動の条件を明らかにし、剥離が起こらない操業条件を提案する | ステンレス鋼の耐食性について、各種ニッケル濃度の異なる鋼を用いることで、腐食速度 0.03mm/year 以下を達成し、さらに加速試験についても検討した。<br>また、ステンレス鋼の耐食性にニッケルが大きく寄与することを明らかにした。<br>また、液の流動下では、静置状態よりも腐食速度が加速しながら腐食生成物はほぼ同じものが形成されることがわかった。 | ○ | 電位変動下での材料表面の変化については、腐食防食の加速試験を優先する方針に変更されたため、実施していない。 |
| **3-1 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価【産総研】** | 目標コスト達成に資する水素製造システム仕様の指針策定 | 補機類簡素化を考慮し、カソードドライ運転をベースとした水電解システムの構築が必要であることを特定した。 | ○ | |

## Ⅰ―4　高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発（東京工業大学）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①-1 固体高分子形水電解用電解質膜の研究開発** | ・変動電源に対して高性能かつ高耐久な固体高分子形水電解用電解質膜の材料設計指針の確立 | ・従来の Nafion 膜よりも優れた水素透過阻止性と膨潤抑制能を有するプロトン伝導性細孔フィリング膜を開発 | ○ | |
| **①-2 固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発** | ・固体アルカリ水電解に適した固体アルカリ水電解用電解質膜の材料設計指針の原案策定 | ・10 万以上の高分子量を有するポリフェニレン系アニオン伝導ポリマーを開発し、100 mS/cm 以上の高いイオン伝導性、優れたアルカリ耐久性、低いガス透過性を有する電解質膜の開発に成功 | ○ | |
| **②-1 Ir 系ナノ粒子連結触媒の研究開発** | ・変動電源に対して高性能かつ高耐久な固体高分子形水電解触媒の材料設計指針の確立 | ・1.8 nm の Ir ナノ粒子が連結した高表面積 Ir ナノ粒子連結触媒を開発し、市販 Ir 触媒より 5 倍高い OER 質量活性を達成 | ○ | |
| **②-2 固体アルカリ水電解用ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発** | ・ペロブスカイト・スピネル等触媒の固体アルカリ水電解セルへの適用と、電解性能向上に資する材料の設計指針の提案 | ・実験、DFT 計算、マテリアルズインフォマティクスを用いることで、結晶構造の観点から鉄系酸化物の触媒活性の新規な法則を発見し、$IrO_2$ 触媒よりも高い OER 活性を有する $CaFe_2O_4$ 卑金属触媒の開発に成功 | ○ | |
| **③-1 高性能固体高分子形水電解セルの開発** | ・変動電源に対して高性能な固体高分子形水電解に関する材料・セル設計指針の確立<br>・固体高分子形水電解セルの水電解性能として、2 A/cm$^2$ で電圧 1.63 V の達成 | ・従来研究の標準より 1/3～1/4 の Ir 使用量で十分に高い水電解特性を発現 | ○ | ・従来の Ir 使用量とすることで数値目標達成見込み |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発** | ・変動電源に対して高性能な固体アルカリ水電解に関する材料・セル設計指針を確立<br>・固体アルカリ水電解の水電解性能として、固体電解質膜を用いた水電解セルにおいて 0.6 A/cm$^2$ で電圧 1.65 V およびアニオン交換膜型水電解において、水素中酸素濃度および酸素中水素濃度を 0.1 mol%以下の達成 | ・80℃、純水供給の固体アルカリ水電解セルで高効率と定電流運転に対する高耐久の両立を実証<br>・水電解性能の過電圧分離や水電解試験中に in-situ でガスを定量分析できる評価系を構築<br>・アニオン交換膜型水電解において、水素中酸素濃度および酸素中水素濃度 0.1 mol%以下を達成<br>・水電解性能予測モデルを開発し、さらなる高性能化に必要な材料・セルの設計指針を獲得<br>・①-2, ⑥で開発したポリフェニレン系ポリマーと卑金属アノード触媒を組み合わせた MEA は 1.65 V@0.6 A/cm$^2$ に至る高い水電解性能を達成 | ◎ | ・当初の目標を達成しただけでなく、80℃、純水供給の固体アルカリ水電解セルで高効率と高耐久の両立を初めて実証する、大きな成果を得た |
| **④-1 固体高分子形水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析** | ・変動電源に対して高耐久な固体高分子形水電解に関する材料・セルの設計指針の確立 | ・Ir 担持量を減らすと負荷変動で Ir の溶出が問題となることを明らかとした | ○ | |
| **④-2 固体アルカリ水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析** | ・変動電源に対して高耐久な固体アルカリ水電解の材料・セルに関する設計指針の確立 | ・変動電源(起動停止運転)を模擬した電圧サイクル試験において、ポリフェニレン系ポリマーを用いた MEA の高耐久性を実証<br>・変動電源への対応には、生成ガスによる非線形な機械的負荷に対する高耐久化が重要であることを示唆 | ○ | |
| **⑤ 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映した固体アルカリ水電解用の電解質ポリ** | ・変動電源に対して高性能かつ高耐久な固体アルカリ水電解用電解質ポリマー・膜の材料設計指針の確立 | ・④-2 における実セルでの評価結果から、主鎖骨格構造を変更したポリフェニレン系ポリマー膜や、開発したポリマーを多孔質基材の細孔に充填した細孔フィリング膜を開発し、さらに高い機 | ◎ | ・高いイオン伝導性、ガス透過阻止性、化学的耐久性に加え、機械的耐久性の向上に成功し、高圧水素製造への展開が |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **マー・膜の高度化** | | 械強度を有する膜の開発に成功 | | 期待される有望な電解質ポリマー・膜を得たため |
| **⑥ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発** | ・固体アルカリ水電解用セルの変動電源に対する高性能・高耐久化に資する卑金属触媒の材料設計指針の確立 | ・多孔 Ni フォームの表面を電気化学的に改質した卑金属触媒において $IrO_2$ より高い OER 活性と耐久性を実現<br>・Ni フォーム表面に P と微量の Ru をドープした Pt フリーカソード触媒において、従来の Pt/C より高い HER 活性を達成 | ○ | |
| **⑦ ナノ細孔膜を用いた固体アルカリ水電解の研究開発** | ・固体アルカリ水電解用セルの高性能・高耐久化に資するナノ細孔膜の材料設計指針の確立<br>・ナノ細孔膜では水素中酸素濃度および酸素中水素濃度を 0.4 mol%以下とナノ細孔膜型水電解では 1 $A/cm^2$ で電圧 1.9 V を達成 | ・ナノ細孔膜の構造制御により高い電解性能を示す MEA の開発に成功<br>・ナノ細孔膜型水電解においてガスクロスオーバーおよび電解性能に関する数値目標を全て達成 | ○ | |

## Ⅰ―5　アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化／アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究
## （横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、公立大学法人大阪、東北大学、学校法人立命館、デノラ・ペルメレック、物質・材料研究機構）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **A. アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価基盤技術の開発** | ・AWE 部材の共通的活性・劣化評価法の開発<br>・AWE アノードの劣化機構解明<br>・電極から発生する気泡の輸送挙動解明<br>・電解槽のモデリング手法の開発<br>・MI 材料探索への電気化学データの提供 | ・粉末触媒評価用 YNU 標準セル及び起動停止試験用共通プロトコルを開発<br>・逆電流解析法の確立<br>・気泡観察法の確立と電極近傍の物質輸送モデル策定<br>・大型電解槽に対応した輸送シミュレーションモデルの確立<br>・MI 材料探索用電気化学データを提供 | ○ | |
| **B. 固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明** | ・ハーフセル及び水電解セルによる共通的なアノード触媒活性評価法の確立<br>・水電解セルの劣化要因解明と加速劣化手法の提案<br>・純水中不純物による電解セル特性劣化の解明 | ・ハーフセルによるアノード触媒活性評価プロトコルを開発<br>・セルの劣化要因を明確化<br>・電解セルの起動停止を模擬した加速劣化試験法を開発<br>・極微量の不純物イオンのセル特性劣化への影響を確認 | ○ | |
| **C. アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析技術開発** | ・A、B で開発される共通評価法・試験法と対応させた電気化学性能評価と対応させた、各種高度解析計測技術を総合したプラットフォームの構築、電極性能発現及び劣化機構の解明<br>・MI 材料探索用データを提供<br>・水電解の起動・停止時や、電力の変動時のバブル生成および離脱ダイナミクスの測定・定量化に基づく電極構造設計指針の提案 | ・開発したセルを用いて、加速劣化試験の電位変動に対応した電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法を確立<br>・電解触媒の反応場の酸素の電子構造を計測できる手法である operando 軟 X 線吸収分光法の開発に成功<br>・水電解触媒の活性支配因子を解明<br>・計測手法を NEDO プロジェクト参画大学、企業に展開<br>・MI 材料探索用データを提供 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ・電極表面構造と水素気泡発生点を約 1μm の空間精度で同定する技術の開発に成功<br>・多くの場合、水素気泡は深さサブμm の浅い凹点から発生することを確認 | | |
| **D. アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発」に関する実施内容** | ・AWE カソードでの触媒活性および耐久性の評価法の開発<br>・AWE カソード触媒の劣化評価法の確立ならびに劣化メカニズムの解明 | ・LSV の任意の電位での水素発生電流値およびターフェル勾配から触媒活性および耐久性を評価する方法を確立<br>・逆電流を模擬した起動停止試験用プロトコルを用いたカソード触媒の劣化評価法を確立<br>・逆電流によるカソード触媒劣化要因（触媒の脱落）を特定 | ○ | |
| **E. 再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発** | ・再エネからの出力変動電力に対応可能な水電解装置を利用した水素製造システムのモデル構築<br>・セルレベルから装置レベルまでの広範囲でかつ精緻で最適なシステムモデルの構築 | 水素製造システムを設計・設置し測定した実稼働データを用い、遺伝的アルゴリズムによる最適化により、再エネの変動に対して最適な制御手法と機器構成比を導出可能な水素製造システムモデルを開発 | ○ | |
| **F. 高度解析による劣化機構解析手法の開発** | ・複雑な運転条件下における触媒劣化因子を評価可能なＸ線吸収分光解析技術の確立<br>・運転終了後 2 週間で触媒を評価可能にする測定体制の確立<br>・MI 材料探索用基礎データとして構造解析データを提供 | ・アルカリ水電解での起動停止共通プロトコルによる劣化試料を解析し、劣化機構を解明<br>・電解セルから触媒試料を取り出し輸送するまでの手順を文書化し、触媒解析技術を確立<br>・X 線吸収スペクトルデータを提供し、MI 解析を実施 | ○ | |
| **G. 小型電解槽を用いた評価試験法の開発** | ・直流電源にて 8,000 時間、変動電源にて 1,000 時間の連続稼働の達成<br>・劣化機構の精密分析手法による解明<br>・STD セルの最終仕様確定<br>・2-4 台の稼働実現<br>・加速試験プロトコルの暫定仕様の提案 | ・AWE、PEMWE の各電解小型セルで目的とした稼働を達成<br>・それぞれの触媒劣化挙動について、セル電圧変化を評価し、消耗機構の類似性を解明<br>・各 2-4 台の STD セル仕様を稼働し、加速試験プロトコルを暫定的に確定 | ○ | |
| **MI アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解** | ・共通フォーマットに基づく系統的データベースの開発 | ・電気化学測定データを材料データリポジトリである MDR-Closed に蓄積 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究** | ・水電解データベースを用いたMI 解析による新規水素製造技術開発指針の提案 | ・ペロブスカイト系酸化物触媒の劣化データを用いた、MI による高活性・高耐久性触媒の新規組成を提案 | | |

## Ⅰ-6　高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発
## （山梨大学、パナソニック ホールディングス、タカハタプレシジョン、日本化学産業、東北大学）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ①高性能高耐久性アニオン膜・イオノマーの開発とスケールアップ技術の確立 | ・水中でのアニオン導電率が120mS/cm以上、破断強度が25MPa、破断伸びが250%以上、かつ80℃の4M KOH水溶液中で1000時間以上の耐久性を持つアニオン膜およびイオノマーを開発する。 | ・水中でのアニオン導電率が135mS/cm、破断強度が25MPa、破断伸びが284%、かつ80℃の4M KOH水溶液中で1000時間アニオン導電率を保持するアニオン膜を開発した。 | ○ | なし |
| | ・水素および酸素の透過係数が調節可能な分子構造設計指針を見通す。 | ・水素および酸素の透過係数を数倍以上向上させるアニオン膜の分子構造設計指針を見出した。 | | |
| | ・アニオン膜の製造コストが15000円/$m^2$以下を見通す。 | ・重合方法の改善によりアニオン膜の製造コストが15000円/$m^2$以下を見通した。 | | |
| | ・アニオン膜をA4サイズで製膜できる技術を開発する。 | ・ロールツーロール法によりアニオン膜をA4サイズで製膜できる技術を開発した。 | | |
| | ・アニオン膜、イオノマーを量合成する技術を開発し、更なる物性向上のための設計指針を得るとともに、国内関心表明企業等への提供と評価を行う。表明企業等への提供と評価を行う。 | ・アニオン膜、イオノマーを量合成する技術を開発し、更なる物性向上のための設計指針を得た。国内関心表明企業等へアニオン膜およびイオノマーを提供し評価を行った。 | | |
| | ・25g/バッチでアニオン膜およびイオノマーを量合成する技術を開発する。 | ・25g/バッチでアニオン膜およびイオノマーを量合成する技術を開発した。 | | |

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ②高活性高耐久性非貴金属系触媒の開発とスケールアップ技術の確立 | アルカリ水溶液中にてIrOxより高活性な非貴金属系酸素発生触媒を開発する。 | 1.40V(vs.RHE)にてIrOxよりOER活性が高い非貴金属触媒（NiCoO系・NiFeO系）を開発した。 | ○ | アルカリ溶液中（20℃～80℃）にてRDEを用いて評価 |
| | アルカリ水溶液中にてPtと同等以上に活性な非貴金属系水素発生触媒を開発する。 | -0.20V（vs.RHE）にてIrOxよりHER活性が高く、オンセット電位が-0.10V（vs.RHE）未満の非貴金属触媒（NiFeO系）を開発した。 | | アルカリ溶液中（20℃～80℃）にてRDEを用いて評価 |
| | ・アルカリ水溶液中にて触媒活性と耐久性を評価する。さらに、項目③の結果もフィードバックして、1.65 V(vs.RHE)にて1A/cm$^2$の電流密度を達成する非貴金属系酸素発生（アノード）触媒を開発する。 | ・1.65 V(vs.RHE)にて1A/cm$^2$の電流密度を達成する非貴金属系酸素発生(アノード)触媒(NiCoO）を開発し、RDEにて耐久性を確認後、MEAにて2.0V以下（1.0A/cm$^2$）にて1000時間の耐久性を確認した。 | | なし |
| | ・主にアルカリ水溶液中にて水素発生電位が-0.1V (vs. RHE）未満になると共に、10Ω・cm$^2$ 以下の電気抵抗率を示す非貴金属系水素発生（カソード）触媒を開発する。 | ・アルカリ水溶液中にて水素発生電位が-0.1V (vs. RHE）未満になるNiFeOにて、1Ω・cm$^2$以下の電気抵抗率を示す非貴金属系水素発生（カソード）触媒を開発した。 | | |
| | ・酸素発生/水素発生用非貴金属触媒を50g/hで量合成する技術を開発する。 | ・酸素発生/水素発生用非貴金属触媒（NiCoO系、NiFeO系）を50g/h以上で量合成する技術を開発した。 | | |
| | ・触媒性能を向上させる触媒熱処理技術を量合成レベルで開発する。 | ・上記触媒性能を発揮する触媒熱処理装置を開発し上記量合成レベルで合成できるようになった。 | | |

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ③膜/電極触媒界面の設計とアルカリ水電解MEAの構築 | ・本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いて1.65 Vにて1 A/cm$^2$の電流密度を達成するアルカリ水電解MEAを開発し、触媒及び高分子電解質材料の電解性能を検証する。 | 電解性能に関して、開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いて1.65 Vにて1A /cm$^2$の電流密度を達成するアルカリ水電解MEAを開発し、触媒及び高分子電解質材料の電解性能を検証することを達成した。 | ○ | なし |
| | 80 ℃の1M KOH水溶液中で電解時間1000h後の電解電圧2.0V以下@電流密度1A/cm$^2$を、I-V測定による負荷変動対応性について交えて確認しながら、本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いたMEAで達成する。 | 耐久性では、80 ℃の1M KOH水溶液中で電解時間1000h後の電解電圧2.0V以下@電流密度1A/cm$^2$を超える2200時間を本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いたMEAで達成した。 | ◎ | 目標の倍以上の耐久性を検証できた。 |
| | ・新規開発したカソード触媒を用いたMEAの性能を検証する。 | 新規開発したアノードおよびカソード触媒を用い両極貴金属フリーセルの水電解を、電流密度1.4A/cm$^2$@2.0 Vレベルの性能で検証できた。 | ◎ | 両極非貴金属の可能性を見出した。 |
| | ・再エネとの連携も考慮した変動耐久性試験を、PEMWEのアノードの低電位のプロトコル（カソードH2の透過によるアノード電位低下の影響検証）を参考に設備改良し実施し、課題を抽出する。 | 耐久試験は、I-V試験(0-2 A/cm$^2$)と定電流電解(1 A/cm$^2$, 8 h)を繰り返す負荷変動-定電流電解複合サイクル試験であり、さらに高負荷(4 A/cm$^2$, 10 s)での電解と水電解の停止(0.1 V, 10 s)をサイクルを繰り返す、PEMWEで提案されている起動停止も含んだ加速耐久試験を実施し、本研究で開発した電解質膜と触媒が2000サイクル以上の耐久性を持つことが検証でき、課題を抽出した。 | ○ | なし |
| | ・山梨大開発の触媒を用いた25cm2規模のMEA性能評価を設備導入し性能を検証する。 | 山梨大開発の触媒を用いた25cm2規模のMEA性能評価のための設備導入を完了し、1cm2とほぼ同等の性能を検証できた。 | | |
| | ・新材料を組み合わせたMEA調製と耐久性評価の予備的検討を行い、課題を抽出し2023年度以降の研究指針を得る。 | 耐久評価の予備検討の例として、KOH循環方式の影響も検証しPEMWEで標準的に実施しているアノードのみの循環では同等の電解性能が確認され、片側給水の可能性が示された。片側給水による気液界面における耐久評価の必要性が抽出された。 | | |

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ③膜/電極触媒界面の設計とアルカリ水電解MEAの構築 | ・上記、電解性能を達成するための触媒層、膜/電極触媒界面を構築、電解性能発現の主要メカニズムを解明し、各材料開発にフィードバックする。 | 劣化メカニズム解明としては、80 ℃の1M KOH水溶液中において、開発したアニオン膜・イオノマーおよび、非貴金属触媒に顕著な劣化は見られなかった。劣化の主要因としては、触媒層の厚みが薄い場合に、両極GDL繊維が膜に到達し、短絡を生ずる劣化が抽出された。 | ○ | なし |
| | ・上記、耐久性能を達成するために触媒層、膜/電極触媒界面の主要劣化メカニズムを解明し、各材料開発にフィードバックする。 | 上記各項目を達成するために、各材料開発へ、性能発現と劣化メカニズムの予測に基づき逐次、結果のフィードバックを実施した。 | | |
| | ・改良された開発膜や電解質アイオノマー、アノード＆カソード触媒を用いたMEAの検証評価と、これらの開発材料の性能を引き出す触媒層構造とガス拡散層開発を進めるため、アニオン交換膜形水電解スタック用のシステム設計等も考慮し産業界のニーズも取り入れた評価プロトコルや吸水方式での性能及び耐久性の評価結果をまとめる。 | 上記のように、改良された開発膜や電解質アイオノマー、アノード＆カソード触媒を用いたMEAの検証評価と、これらの開発材料の性能を引き出す触媒層構造とガス拡散層開発を進めるため、アニオン交換膜形水電解スタック用のシステム設計等も考慮し産業界のニーズも取り入れた評価プロトコルや吸水方式での性能及び耐久性の評価結果を計画通りまとめた。 | | |
| | 各開発材料や触媒層およびガス拡散層等の構成要素の高効率・高耐久化のための設計指針を構築し、各材料開発にフィードバックする。 | 新材料(BAF-QAF, QPAF-4)の触媒表面での吸着状態やガス透過性能を評価できるシミュレーターを構築し、電解性能に影響を及ぼす因子について検討した。 | | |

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ④MEA形成プロセス基盤技術の開発 | [インクプロセス]二次粒子の粒径：10 μm以下<br>インク粘度：5～100 mPa･s<br>最終目標：分散安定性60分以上 | インクプロセスに関して、二次粒子の粒径を目標である10 μm以下の1.2μm、インク粘度を目標である5～100 mPa･sに対して15.3～19.4 mPa･sを達成し、最終目標である分散安定性60分以上となる80分間分散安定なインクを達成した。 | ○ | なし |
| | [塗工プロセス]<br>MEA電極面積25cm2における担持量バラつき±10%以内<br>触媒層厚みバラつき±10%以内 | 塗工プロセスに関しては、目標である電極面積25cm2における担持量バラつき±10%以内、触媒層厚みバラつき±10%以内のMEAの形成に対して、開発したインクおよび超音波スプレーを用いて、担持量バラつき±1.5%および触媒層厚みバラつき±1.5%のMEA形成を達成した。 | | |

## Ⅰ-7　低コストＡＥＭ型水電解システムの実現に向けたアニオン交換膜材料の高ロバスト化（東京工業大学、日本触媒）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①-1. カチオン官能基の構造最適化による耐アルカリ性能の向上** | ベンジルトリメチルアンモニウム塩の 100 倍以上の耐アルカリ性を示すカチオン官能基の構築を達成。 | ベンジルトリメチルアンモニウム塩の 400 倍以上の耐アルカリ性を有する官能基構築を達成。カチオン部位の置換基の電子的効果によるさらなる安定化指針を確立。 | ◎ | 目標値を大きく上回る耐久性を確認。 |
| **①-2.カチオン官能基をもつポリマーの設計・合成および高分子膜としての性能を加味した分子設計** | 優れた耐アルカリ加水分解・耐酸化分解特性が見込まれるポリアリーレン型の主鎖骨格をもつ耐アルカリ性ホスホニウム官能基を有する高分子の合成。 | 重量平均分子量を 20 万に向上させたポリマーサンプルの合成を達成 (40 倍耐久カチオン含有)。230 倍および 400 倍以上の耐アルカリ性をもつカチオン含有ポリアリーレン型ポリマーの合成を達成（重量平均分子量４万以上）。 | ○ | |
| **②-1. 高ロバスト性カチオン含有ポリマーを使用した成膜方法の開発検討** | 標準サイズの電解セルで評価可能なサイズ（50mm 角）の成膜物の取得。 | ・研究開発項目①において開発されたホスホニウムポリマーを使用して 50mm 角の成膜物を取得した。<br>・PE 基材との複合膜を作成し機械的強度の向上を確認した。 | ○ | |
| **②-2. 新規アニオン交換膜の基礎物性評価** | 80℃ 4M KOH 中で 100 時間の耐久性試験後、イオン伝導性 $10^{-2}$ S/cm 以上の性能を維持すること。 | ・膜状態での耐アルカリ試験前後で安定であることを確認できたが、イオン伝導度は最高 $10^{-3}$ S/cm。<br>・ポリマーの耐酸化性を評価し、ポリアリーレン型ホスホニウムが既存材料に対する優位性をもつことを確認した。 | △ | 各種評価結果をポリマー分子設計にフィードバックし改良を検討。 |
| **③-1. 非貴金属系アニオン交** | 開発した高ロバスト性カチオン含有ポリ | ・市販膜が急速に劣化する水電解試験条件を明 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **換膜型水電解セルの開発** | マーを含有する膜および市販貴金属系触媒を用い、水電解性能として 1.75 V@ 1.0A/cm$^2$ 以下を目指す。80℃、KOH 4M水溶液供給で、0.1V-2.0V サイクル試験 1000 回後に、1.80 V@ 1.0 A/cm$^2$ 以下を目指す。また、膜中の官能基劣化率について、適宜外挿法または加速試験法を用いて、1000 時間相当の評価を行い、市販対照サンプルに対する優位性を示す。最後に非貴金属系触媒での性能を確認する。 | 確化した(80 ℃、1 or 4 M KOH 供給)。<br>・官能基劣化を評価可能な各種分析手法を確立した。<br>・本事業で開発した高ロバストポリマーを含む膜を用いた電解試験を実施し、80℃、KOH 4M水溶液供給で、0.1V-2.0V サイクル試験 1000 回後に、1.80 V @1.0 A/cm$^2$ 以下を達成。<br>・水電解性能として 1.75 V@1.0A/cm$^2$ 以下を達成。<br>・非貴金属系触媒での電解試験において、高耐久性を発揮。 | | |
| **④-1. 新規アニオン交換膜型水電解システムの経済性評価** | 研究開発項目①～③の成果を用いて水電解を実施した場合の水素製造コストを推算し、既存製法と比較する。また、推算の過程で感度分析を実施し、コスト支配要因を特定する。 | 開発品の初期性能を用いて、立地条件等のシナリオを仮定し、水素製造コストを試算した。PEM 型水電解システムとの比較では、ほぼ同等との試算結果を得た。感度分析においては、電力コスト、次いで設備コストが支配的であるが、長寿命化によりその他のコストも引き下げられる可能性が示唆された。 | ○ | |

## Ⅰ-８ プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究（北海道大学）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **A** | **PEM 型水電解のアノードの非貴金属化に関する既知情報からのデータベースの構築** | 1 万の PEM 型水電解装置の文献データベース構築を完了 | ◎ | 1 万を超える世界初の PEM 型水電解装置に関する文献データベースを作成した。 |
| B | MI の実践 | 機械学習等の MI 手法を実践し、アノード・カソード・MEA の材料探索ができることが判明した。 | ○ | |
| **C** | PI への MI 拡張に関する調査と提言 | ハイスループット実験とマテリアルズインフォマティクスを組み合わせることにより、効率的にアノードの非貴金属材料の探索が可能である提言と展望をまとめた。 | ○ | |

## Ⅲ　従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発

### Ⅲ―１　酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発

**（産業技術総合研究所、人宇宙航空研究開発機構、東京工業大学、大阪大学、電力中央研究所、石炭フロンティア機構、川崎重工業、東芝エネルギーシステムズ）**

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発** | シール技術の要素技術確立。燃焼器・翼材料技術、冷却技術の候補提示 | 要素技術確立。構造・材料の候補を提示。 | ○ | |
| **②システム検討** | 動特性解析が可能なダイナミックシミュレーション技術の確立 | 動特性解析モデル構築。 | ○ | |
| **③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発** | マルチクラスタバーナの高圧燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立バーナ試作のためのシミュレーション技術の確立 | 高温高圧試験実施。シミュレーション技術確立。 | ○ | |
| **④社会実装シナリオの構築** | 2050 年カーボンニュートラルを想定した社会実装に向けた実用化シナリオの策定 | シナリオ見直しとアクションプラン提示 | ○ | |

## Ⅳ エネルギーキャリアシステム調査・研究

### Ⅳ―１ トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上
### （横浜国立大学、東北大学）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ・アノード側の水供給法の検討 | アノード側の水供給法として液体方式と加湿空気方式の両方式の比較を検討、条件最適化。 | 加湿空気供給方式がアノードの水供給法として適用可能である事を実証。加湿空気温度、湿度、流量を最適化。 | ○ | |
| ・隔膜の物性、種類の検討 | アニオン交換膜を用いたトルエン水素化電解の適用可能性の検証<br>カチオン交換膜の物性の最適化。 | アニオン交換膜を用いた電解槽でトルエン水素化を確認。カチオン交換膜において EW や側鎖構造の電解性能への影響を確認。 | ○ | |
| ・カソード側要素技術の開発 | カソード要素の親疎水性を制御パラメータとしてアノードからの移行水の排出機構を検討し、電気化学特性を評価。 | マイクロポーラス層の新疎水制御により、電流効率の最適化を実証。 | ○ | |
| ・カソード室内の流体解析 | トルエン／メチルシクロヘキサン－水－気相－アイオノマー及び固相の 5 相モデルを構築と解析。 | 5 層解析モデルの構築。解析結果は Spring-8 での可視化においても同様の傾向を示し、モデル、解析の妥当性を実証。 | ○ | |
| ・水分布の可視化 | トルエン水素化電解槽の動作下で、液相や気相の空間分布ダイナミクスを数分の時間分解で計測。 | マイクロスケールの油相中の気泡分布の可視化および定量化に成功。液水によって水素気泡が押し出されている可能性を示唆。 | ○ | |
| ・水分布の可視化計測方法 | 計測用電解セルの設計と可視化計測条件の最適化。 | 放射光 CT 用セルの作製、SPring-8 にて得られた CT 画像に対して、深層学習の手法を用いた解析によるセル内要素のセグメンテーションの提示 | △ | 機械学習、深層学習による画像解析を更に進める必要有。 |

## Ⅳ―２　水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築
## （早稲田大学、荏原製作所、東京大学、東北大学）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **1.極低温試験装置の構築と実験計測の実施** | | | | |
| 液体窒素回流試験装置の構築 | 配管系、ポンプ系の断熱、温度制御方法を検討し、設計製作 | 断熱配管を有しポンプからモーターまで同軸の極低温ポンプを製作、効率の直接計測可能 | ○ | |
| 液体窒素遷臨界（3.4MPa,126K）試験装置の構築 | 液体窒素遷臨界状態を計測可能な試験装置の構築 | 圧力、温度、流量制御により遷臨界状態を作り、不安定流動状態の定量計測可能な装置を構築 | ○ | |
| 水素二相流状態の把握 | 水素試験装置を用いた水素二相流の様相可視化 | リークしない測定部の構造・仕様、耐圧・リーク試験の手順、機材の防爆仕様等の液体水素可視化試験のノウハウ取得。 | ○ | |
| 既存試験装置改修による液化水素を用いた実証試験 | 液化水素キャビテーションの温度・ボイド率測定 | 試験設備の構築、改修完了、液体窒素試験、液化水素試験の実施 | △ | 液化水素試験リークにより計画の実験未完了 |
| **2.革新的計測技術の開発** | | | | |
| 静電容量型ボイド率センサーの設計・開発（オール金属型、テーパー型、探針型） | オール金属型、テーパー型、探針方センサーの開発 | 全てのセンサー試作、検証完了し、特に金属型は、耐圧 3 MPa,平均誤差 6.5%(目標値：耐圧 1.3 MPa 以上、誤差 10%以下) | ◎ | 計画値以上のセンサー開発完了 |
| ボイド率計測と深層学習を組み合わせたマルチメーターの原理検証 | 流動様式、流量計測。目標はフルスケールの 5%精度 | LSTM 分類モデルで、96.7%の判別精度を達成(16 分類モデル)。回帰モデルによる流量計は、5%FS の誤差で判別精度 83.8%。 | ○ | |
| 高速液化水素流中の蒸気温度計測 | 流体シミュレーションのベンチマークデータを取得することによる、液化水素流れシミュレーション技術の高精度化に貢献 | 水素キャビテーション内部の 1K 程度の温度低下を高精度（17K から 25K までの温度範囲における計測で± 0.024K の不確かさ）に計測できる温度計測手法とその校正法を確立。 | ◎ | 計測精度は超過達成 |
| **3.液水大容量昇圧ポンプの設計と性能・流動予測** | | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 大容量昇圧ポンプの仕様検討と試設計 | 大容量昇圧ポンプの仕様決定とCAD 製作 | ポンプ仕様決定（3MPa、30t/h）および多段ポンプ設計（CAD 製作）完了 | ○ | |
| 液体窒素作動時における遠心ポンプの吸込性能に及ぼす羽根形状の影響調査 | 液体窒素下の吸込性能試験から、液体水素作動下における最適な羽根形状を考察 | 液体窒素下でのキャビテーションの熱力学的効果を確認。熱力学的効果は、キャビテーション発生量により設計流量点で最も小さく、過大流量、及び部分流量では大きくなることを確認。 | ○ | |
| **4.液化水素流体シミュレーションの高度化** | | | | |
| 液化水素解析技術の高度化 | 圧縮性を考慮した液化水素流体解析技術の構築と評価 | キャビテーション領域から吐出90MPa までの広い範囲での安定な解析を可能とする方法を構築 | ◎ | 計画外の超高圧での安定な解析手法構築 |
| 検証用ポンプの非圧縮性流体シミュレーション | ポンプの性能マップ（流量-圧力上昇-効率の特性カーブ）作成 | 50%～150%流量の範囲で性能マップを計算で予測 | ○ | |
| 検証用ポンプの圧縮性を考慮した流体シミュレーション | 液体水素の圧縮性を考慮した解析を実施し、ポンプの性能マップを予測 | 液化水素の圧縮性を考慮した効率計算法を決定し、50%～150%流量の範囲で性能マップを予測 | ○ | |
| 液体窒素ポンプ試験の流体シミュレーションと検証 | 液体窒素試験結果を検証データとした液化水素流体シミュレーションの課題を解決 | 液体窒素ポンプの流体解析を実施、50%～150%流量の範囲で性能マップを予測 | △ | 実験結果との比較による検証は未達。追加解析、試験にて検証実施予定。 |
| 熱力学的効果を考慮した均質媒体気泡流モデルによる CFD 解析 | 多重プロセス型モデルの極低温キャビテーション流れへの適用 | 多重プロセス型モデルを極低温流体に適用できるように改良、液体窒素を対象とした解析により予測精度向上の可能性を確認。 | ○ | 液化水素への適用を含め流体機械を対象としたより高度な検証が課題。 |
| | 気液両相の温度を考慮した二温度モデルの開発 | 気泡内外の温度差を直接考慮できる二温度モデルを新規開発。 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 液体窒素遷臨界流れの流動状況シミュレーション | 臨界点をまたぐ流体シミュレーションにより現象を把握 | 汎用コードに実物性値を用いて流れの不安定状態を再現できることを確認。 | ○ | |
| **5.液化水素の流動現象把握と不安定流動の把握、抑制** | | | | |
| 逆流抑制デバイス付きポンプの熱流動解析による逆流・吸込み性能の予測 | 液単相流解析による逆流抑制効果，局所温度上昇量の評価 | 旋回止め付小径吸込み管について液化水素でも逆流抑制の有効性を確認 | ○ | 液化水素等極低温流体を対象とした実験による検証が課題 |
| | キャビテーション熱流動解析による吸込み性能の評価 | キャビテーション解析により、液化水素の熱力学的効果による吸込性能向上を低流量でも確認 | ◎ | 計画外だった熱力学的効果を考慮した解析を実施、有用な結果を得た。 |
| コーティングによるボイルオフガスの低減と予冷の高効率化 | コーティング被膜の開発により冷却時間の短縮と予冷に必要な LH2 の量の低減 | 高効率で耐久性の高いコーティングの開発完了<br>液体窒素により、予冷時間を 1/5.2 に短縮、冷媒消費量を 77.9%削減。 | △ | 液化水素では予想された効果が見られなかった。現象解明と改良が必要。 |
| ポンプシステムの不安定流動状態の予測 | キャビテーション体積変動によるキャビテーションサージの模擬 | 流体解析によりキャビテーションサージの発生条件を整理、解析精度の評価を実施 | ○ | |
| 非定常キャビテーションの温度計測手法の構築と検証データの取得 | 非定常キャビテーションの温度計測において蒸気温度を推定する手法を構築 | 温度センサーの大きな時定数により困難であった非定常キャビテーションの温度推定手法を構築、非定常キャビテーション温度計測データを取得 | ◎ | 計画外の非定常キャビテーション計測手法を構築 |

## Ⅴ 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発

### Ⅴ―1 ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発（2021 年度まで）

**（筑波大学、東京工業大学、物質・材料研究機構、大阪大学）**

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| 研究項目①：繰り返しが可能なプロセスであることの原理立証 | 生成水素量がホウ化水素の保持している水素量以上となること(H が 8.5 wt%以上)、即ち水分子に由来する水素であることを定量的に実験により示す。 | 10 回のサイクルで HB 自身が持つ水素を超える量の水素分子（検出全 $H_2$ 量：$4.09\times10^{-3}$ mol 56.6%×2 = 113%（HB の保有する H と同量））を検出することに成功した。これは水の導入条件の変更によるもので研究当初の 100 倍の水素量が検出された。 | ○ | 水分解との区別化の必要性、酸素検出量が少ないという課題が得られた。また、1 回のサイクルでの生成量が条件に大きく依存すること（条件の更なる最適化の必要性）が判明した。試料が非晶質であるため、エッジや欠陥部分の効果の区別化を明確化させるための結晶性試料の合成に取り組んでいる。 |
| 研究項目②：生成酸素が導入水分子由来であることの原理立証 | 外部から導入した水がプロセスに関与しているという証拠を実験により明らかにする。 | $^{18}O_2$ と $D_2$ の信号をガスクロマトグラフィー質量分析器で検出した。 | △ | HB 試料が非晶質、欠陥とエッジ量のコントロールを含め高秩序材料の合成をまず行ったうえで放射光解析を行う必要がある。現在、新たに導入した in situ の四重極質量分析器によるサンプリングで赤外分光による試料の直接観察と同時にマスバランスを含めて証拠データを定量的に押さえる実験を進めている。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 研究項目③<br>プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータの算出 | プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータを実験に基づき定量的に算出する。 | ・想定した発熱と吸熱が起きていることが示され、試料の単位質量当たりの発熱量（3.75mW/mg）の算出を達成した。<br>・水素生成に必要な電位が-0.445 V vs. $Ag/Ag^{+}$であることを求め、この値が水からの水素生成よりも低いことを見出した。 | △ | ・電気化学的水素生成は特許出願し、企業との共同研究を開始した。また、論文投稿も予定している。<br>・熱量については現状で試料の全てが活性点ではないため、ガス生成量と突き合せた解析が必要。電気化学的アプローチによる酸素生成の実験が必要。 |
| 研究項目④：<br>ホウ化水素の加水分解 | ホウ化水素シートと水の反応性（何%が加水分解するか、繰り返しで起きてしまうか）について実験と理論計算の両方で検討する。 | ・水に投入すると加水分解反応が 1～7%程度進行し繰り返し起きないことが実験で示された。ホウ素が正に帯電していることが理論で示された。さらに HB シートが水に対して化学的に安定であることをシミュレーションにより示した。<br>・第一原理計算によりホウ化水素シート上において水の解離状態は熱力学的に安定であるが、活性化障壁が高いため水の解離は速度論的に起こりにくいことが分かった。 | ○ | ・加水分解が限定的であることとその起源を論文に報告した（Commun. Mate. 2 (2021) 81） |

## Ⅴ―２メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発
## （戸田工業、エア・ウォーター）

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①DMR 反応用高活性鉄系触媒の設計（戸田工業）** | ・積算水素生成量が 5.5mol/g-cat.以上の活性を有する鉄系触媒を設計する。<br>・上記鉄系触媒の月産 10t に向けた量産技術を確立する。 | ・積算水素生成量が 6.0mol/g-cat.の高活性触媒の設計に成功。<br>・戸田工業の既存製造設備を用いて、上記触媒を月産 10t 以上量産可能な製造仕様を確立。 | ○ | |
| **②高濃度水素を安定生成可能な DMR 反応仕様および制御技術の確立（戸田工業）** | ・パイロットスケール反応炉を用いて、DMR 反応 out ガス中水素濃度 70%以上が 100h 以上得られる DMR 反応仕様と制御技術を確立する。<br>・副生成物の CNT 品質は、粉体抵抗 0.020 Ω・cm（at 1g/cc）以下を達成する。 | ・従来触媒を用いて、DMR 反応 out ガス中水素濃度が 70%以上、連続 100h 以上を概ね達成。一方、CNT 粉体抵抗は目標未達。<br>・改良触媒を用いることで、CNT 粉体抵抗を 0.021Ω・cm まで改善できたが、安定的に水素濃度 70%以上が得られず。 | △ | 今後、改良触媒を用いて粉体抵抗を維持しつつ、水素濃度を安定化させる対策として、炉内構造の改良等の検討を行う。 |
| **③水素の高効率・高純度精製プロセスの確立（エア・ウォーター）** | ・パイロットスケールにて、DMR 反応から生成した水素を 99.99%以上まで精製する。<br>・高純度水素精製プロセスにおける PVSA での水素回収率 85%以上を達成する。 | ・連続 100h 以上に亘って 99.99%以上に高純度精製できることを確認。<br>・水素回収率は PVSA で 83%、水素精製装置全体で 80%を達成。 | ○～△ | 今後のスケールアップ時に、回収率向上に向けた最適化を図る。<br>さらに、未反応メタンの有効利用に向けて、利用先の検討・制御機構の検討を行う。 |
| **④実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定（戸田工業／エア・ウォーター）** | ・水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下が達成可能な実機スケールの高効率水素製造プラントの基本設計を完了する。<br>・水素提供価格 30 円/$Nm^3$ 以下を想定した事業化シナリオを策定する。 | ・パイロットスケール設備による実験結果を基に、実機スケールの高効率水素製造システムの基本設計を完了。<br>・副生成物の CNT を市場価格で販売することで、水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下を達成可能。 | ○ | 製造コストダウンの観点から、水素精製処理排ガス中メタンの原料ガスへのリサイクル使用を継続検討していく予定。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **⑤CNT の性能評価および用途開発（戸田工業）** | ・副生成物の CNT について競争優位性のある用途へのサンプルワークを行い、実用化用途と顧客を見出す。 | ・サンプルワーク活動により、確度の高い用途と顧客が明確化されつつある。 | △ | 今後も受注獲得に向けたサンプルワークを推進していく。 |

## Ⅴ―3　メタン直接分解による水素製造技術開発（伊原工業、東京理科大学（2021 年度））

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| 1.反応装置の熱効率の向上 | 反応炉温度700℃で水素濃度60%を DSS 運転にて 30 日以上持続。 | メタン分解反応は金属構造体触媒の境膜付近で進むこともあり、輻射熱を利用して金属構造体触媒自体を直接加熱することにより、反応炉のエネルギー効率を高めた。<br>反応炉内圧力を 0.5Mpa と高め反応装置を小型化した。 | ◎ | 従来法は、加熱したメタンガス（気体）を触媒層（固体）へと対流熱伝達による加熱が行われていた。 |
| 2. 水素製造装置の要素技術開発 | 反応炉のモジュール化 | 装置の多用途対応のために反応炉の各機能をモジュール化した。反応炉内の各モジュール間の配管を無くし、コストやエネルギーロスを低減した。 | ○ | |
| 3. 副生炭素の特性解析と幅広い利用方法の検討 | 副生炭素の特性解析 | 副生炭素は、繊維状炭素が凝集した状態であった。導電率や熱伝導率はカーボンブラックと、同等であったが、炭素が凝集しているため、空隙率が高かった。 | ○ | |
| 4. 生成水素及び水素混合ガスの用途検討 | 水素混合ガスの用途の検討 | 水素濃度が 25%以上の場合は、燃焼器の変更が必要となることが判明。 | ○ | |
| 5. 金属板触媒の性能向上 | 原子構造研究、Ni めっき膜触媒によるメタン分解の解明 | Ni 膜は 100～200nm 程度の微細粒から成る。水素の拡散による膜の破壊は、触媒を劣化させる反面、触媒を新生させる効果がある。微細粒の Ni-Cu 固溶体がメタン分解の触媒活性サイトとなって反応が進行する。大きなスケールの脱離は、DSS 運転中の加熱停止に伴い、サブμm の小さなスケールの剥離は、Ni の微粒子を内包してグラファイト層が析出することで Ni めっき層が消耗する様子が観察された。 | ○ | |

## Ｖ―４　メタン熱分解による水素製造技術の研究開発
## （産業技術総合研究所、京都大学、ＩＨＩ）

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **①メタン熱分解に適した触媒の研究開発** | ・高い性能を有し、流動層反応器に適用可能な触媒の開発<br>・生成固体炭素の形状制御条件の提示<br>・メタン熱分解反応速度式の定式化による炭素析出速度の推定手法の提示 | ・流動層反応器に適用可能な触媒調製法を開発、触媒評価を行い、目標とした炭素生成量 10 倍を超える性能を有することを確認<br>・炭素分離回収への適用に向けてファイバー状炭素が得られる温度等形状制御条件を提示、一方、高いメタン転換率と炭素形状制御の両立に向けては更なる触媒および反応条件の最適化が必要<br>・炭素析出速度について、触媒の孔内および粒子外表面に分けて定式化可能であることを提示 | △ | 触媒および反応条件の最適化に向けた更なるデータ取得が必要 |
| **②触媒開発と連動したメタン熱分解用反応器の研究開発** | ・流動層等の気固反応装置を用いた反応システムにおける開発触媒の性能評価と反応システム構築に必要となるデータの取得<br>・反応システムの技術成立性評価 | ・新規反応システム（移動層－流動層利用型循環システム）を提案、主要部分に係る試験設備を設計・導入、開発した触媒を用いたメタン熱分解反応試験を実施し触媒性能を評価、反応システム構築に必要となる知見を取得、一方で、これまでにはない新しいシステムの提案であり、その構築に必要となる更なるデータ取得等が必要<br>・技術成立性評価にいて、システム概念図等を作成し、水素製造価格を算出 | △ | 新しく提案に至った反応システム構築に向け、運転条件等に関する更なるデータ取得、また反応システムに合わせた全体プロセス検討・最適化が必要 |

## Ⅴ－５　メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造

### （物質・材料研究機構、太陽鉱工、静岡大学）

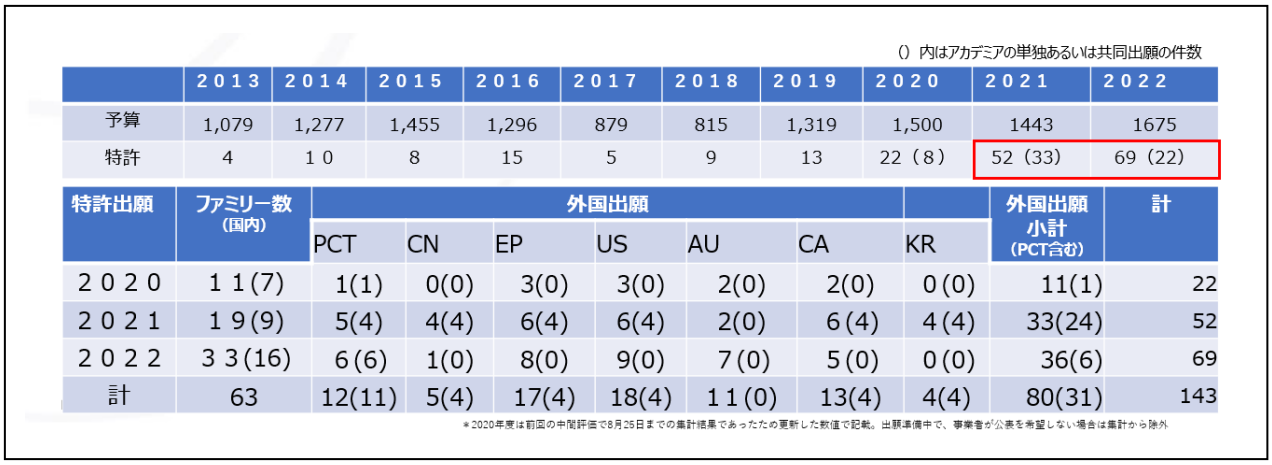
| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| A：DRM＋炭素捕集＋水素分離のパワーアップ（静岡大） | ・ガス流量３０ℓ/時から６０ℓ/時へ処理量増大<br>・炭素捕集率 20～30%の達成 | DRM・炭素捕集・水素分離直列システムによる水素抽出・炭素捕集を実証（C・Eと共同） | ○ | ・反応ガス総量 60ℓ/時で炭素捕集率 27%達成 |
| B：マスバランスと触媒活物質製造(物質材料研究機構) | ・ガス循環システム安定性への $H_2$/CO フィードバック量上限の評価<br>・100ℓ/時 くガス流量処理可能な大容量 DRM 根留触媒の実現 | ・$H_2$ フィードバック量上限決定<br>・根留触媒の量産と構造体化（Eと共同） | △<br>○ | ・CO フィードバック量上限は未決定<br>・同触媒による 102ℓ/時水素ガス製造達成（Dと共同） |
| C：水素分離膜デザイン最適化（太陽鉱工） | ・前段アウトガスのマスフローに応じた V 合金水素分離膜の組成・サイズや形状・膜厚およびスタック数の最適化 | $CH_4$・$CO_2$・CO・$H_2$ 混合気からの大容量水素抽出（Eと共同） | ◎ | ・システム実働条件組成の混合ガスからの安定的水素抽出を実証。 |
| D：昇圧型システムと水素製造試験（荏原製作所） | 純度 99.9999%水素 100ℓ/時製造の達成 | DRM・水素分離直列大型システムによる 99.9999%水 102ℓ/時製造達成（A・B・C・Eと共同） | ◎ | |
| F：DRM 光触媒（東京工業大学） | 高圧下 DRM 光触媒機能実証と材料開発 | 光触媒 DRM-FT タンデム反応による $C_n$ 分子生成の実証（Eと共同） | ○ | |

## ２．２．３　特許出願及び論文発表

（１）特許出願

20 年以降特許出願は飛躍的に件数が増加した。全事業 1 件以上の出願あるいは出願を準備中である。予算当たりの出願件数としても、2019 年度以前を大きく上回る。

アカデミアからの出願が増加し、外国出願のほか、第三者への実施権付与（2 例）、権利移転（1 例）も実施している。企業出願案件においては特に国内移行事例が増加し市場を視野に入れた動きが見て取れる。



() 内はアカデミアの単独あるいは共同出願の件数

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 予算 | 1,079 | 1,277 | 1,455 | 1,296 | 879 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1443 | 1675 |
| 特許 | 4 | 10 | 8 | 15 | 5 | 9 | 13 | 22（8） | 52（33） | 69（22） |

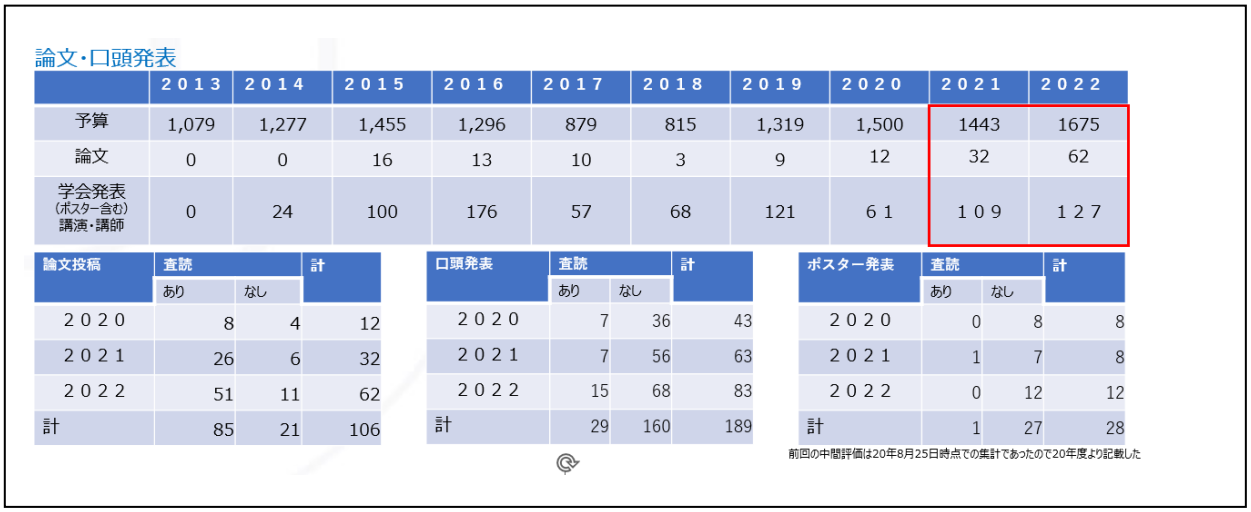
| 特許出願 | ファミリー数（国内） | 外国出願 | | | | | | | 外国出願小計（PCT含む） | 計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PCT | CN | EP | US | AU | CA | KR | | |
| 2020 | 11(7) | 1(1) | 0(0) | 3(0) | 3(0) | 2(0) | 2(0) | 0(0) | 11(1) | 22 |
| 2021 | 19(9) | 5(4) | 4(4) | 6(4) | 6(4) | 2(0) | 6(4) | 4(4) | 33(24) | 52 |
| 2022 | 33(16) | 6(6) | 1(0) | 8(0) | 9(0) | 7(0) | 5(0) | 0(0) | 36(6) | 69 |
| 計 | 63 | 12(11) | 5(4) | 17(4) | 18(4) | 11(0) | 13(4) | 4(4) | 80(31) | 143 |

＊2020年度は前回の中間評価で8月25日までの集計結果であったため更新した数値で記載。出願準備中で、事業者が公表を希望しない場合は集計から除外

**図表８　特許出願状況**

（２）論文･口頭発表

論文だけでなく、口頭発表やポスター発表においても査読付きの事例あり、事業成果を含む論文が高 IF 誌への掲載も実現した。2021 年 3 月に、東京工業大学の論文が ACS(American Chemical Society) Applied Energy Materials の表紙に掲載された。2022 年 2 月に、理化学研究所の論文が Nature Catalyst に掲載された。



論文･口頭発表

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 予算 | 1,079 | 1,277 | 1,455 | 1,296 | 879 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1443 | 1675 |
| 論文 | 0 | 0 | 16 | 13 | 10 | 3 | 9 | 12 | 32 | 62 |
| 学会発表（ポスター含む）講演･講師 | 0 | 24 | 100 | 176 | 57 | 68 | 121 | 61 | 109 | 127 |

| 論文投稿 | 査読 | | 計 |
|---|---|---|---|
| | あり | なし | |
| 2020 | 8 | 4 | 12 |
| 2021 | 26 | 6 | 32 |
| 2022 | 51 | 11 | 62 |
| 計 | 85 | 21 | 106 |

| 口頭発表 | 査読 | | 計 |
|---|---|---|---|
| | あり | なし | |
| 2020 | 7 | 36 | 43 |
| 2021 | 7 | 56 | 63 |
| 2022 | 15 | 68 | 83 |
| 計 | 29 | 160 | 189 |

| ポスター発表 | 査読 | | 計 |
|---|---|---|---|
| | あり | なし | |
| 2020 | 0 | 8 | 8 |
| 2021 | 1 | 7 | 8 |
| 2022 | 0 | 12 | 12 |
| 計 | 1 | 27 | 28 |

前回の中間評価は20年8月25日時点での集計であったので20年度より記載した

**図表９　論文･口頭発表**

# ３．マネジメント

## ３.１実施体制

（１）NEDO が実施する意義

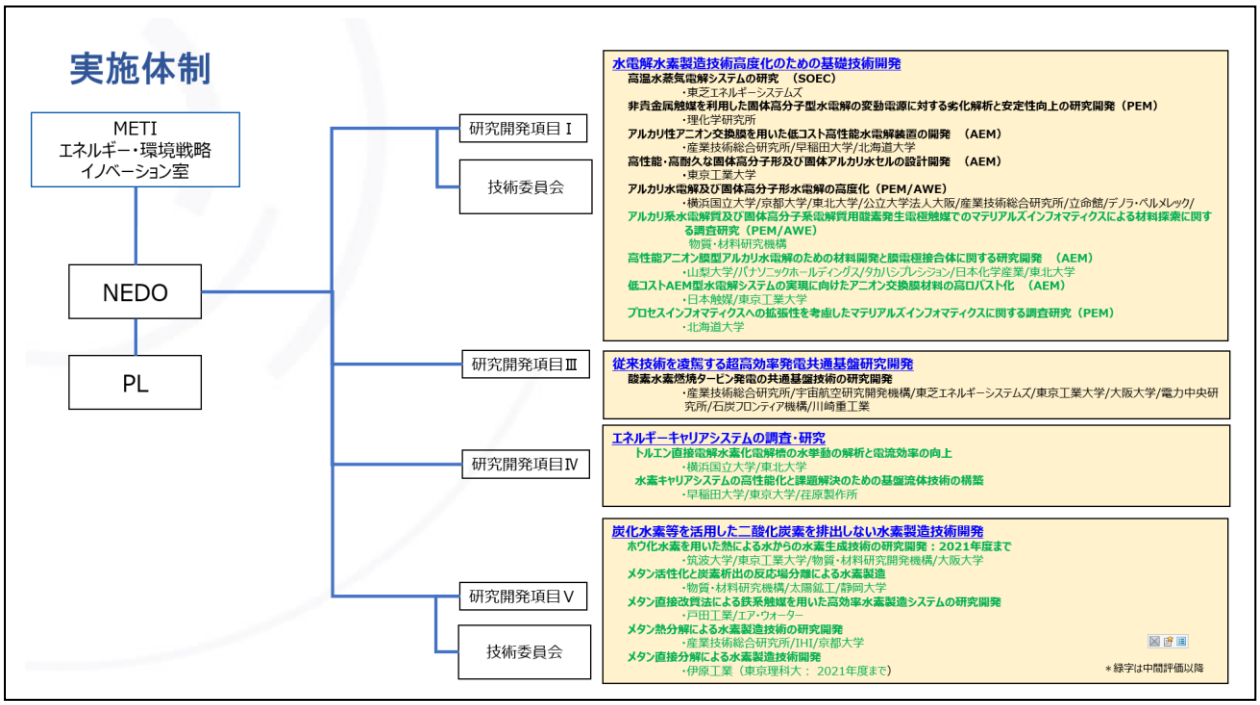
社会に新規のエネルギー種を導入することは事業化リスクが高く、投資規模が大きいことから個別の民間企業等が取り組むことは困難であるため、国家プロジェクトとして資金を提供するスキームが必要である。

水素社会の実現には水素の「製造、輸送・貯蔵、利用」といった一連のサプライチェーンの構築が必要不可欠であり全体を俯瞰しながら個別要素研究を推進する必要があるが、それを遂行可能な個別企業は存在しないためＮＥＤＯが国家プロジェクトを運営する必要がある。また、国家プロジェクトというスキームは多様な機関（アカデミア、公的研究機関、企業等）が連携して共通課題に対処する研究開発体制の構築のトリガーとなる。創出した成果を効果的かつ効率的に次の実用化フェーズの国家プロジェクトへ移行することが可能である。

加えて、水素閣僚会議、IPHE（国際水素・燃料電池パートナーシップ）等の政府間ハイレベル会合への参加や IEA TCP 等の各国技術開発機関のネットワークを通じて各国機関と密に情報を共有し、必要に応じて迅速に国家プロジェクト運営に反映することや、各国機関に必要事項をインプット可能である。

（２）実施体制

評価対象期間（2021 年～2022 年度）における実施体制は以下の通り。




**図表１０　実施体制**

（３）個別事業の採択プロセス

追加公募案件の採択に当たり、採択審査基準 「評価項目（2）提案技術の新規性・優位性」に関する「評価の視点」には、前回の中間評価の指摘事項を反映し、以下の通りとした。

① 既存技術が明確に説明され、それとの比較により提案内容のポジショニングが示されているか

・他の従来技術のベンチマークができているか

・ベンチマークとの比較により客観的に提案技術の新規性、優位性が示されているか。

②開発テーマの技術的問題点を明らかにし、その課題を解決できる提案内容か 。

・現状のボトルネックとなっている課題を具体的に示し、その解決に対する仮説と検証方法が具体的に示されているか。

③科学的根拠に立脚した 理論的な仮定が明確に説明されているか

・提案する技術は科学に立脚した仮定を検証するものであるか。

・その仮定は、科学的に理論が広く受け入れられているものであるか。

## ３.２予算及び受益者負担

2021 年度、2022 年度の予算実績は以下の通り。いずれの研究開発項目も市場形成が未成熟あるいは 2040 年をにらんだ次世代技術シーズであり、TRL が低いため、アカデミアや公的機関に参画を促すとともに、民間企業においてもリスクの高い技術領域に取り組んでもらうことを狙い委託事業として実施した。

委託100%　（単位：百万円）

| 研究開発項目 | 2021<br>年度 | 2022<br>年度 | 合計 |
|---|---|---|---|
| ①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | ８２０ | １０６０ | １８８０ |
| ③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発 | ２３５ | ２４２ | ４７７ |
| ④エネルギーキャリアシステム調査・研究 | ８４ | １０９ | １９３ |
| ⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | １９５ | ２５９ | 454 |
| 合　計 | １３３５ | １６７０ | ３００５ |

2023年8月29日の実績値に基づくただし、一部契約額で集計

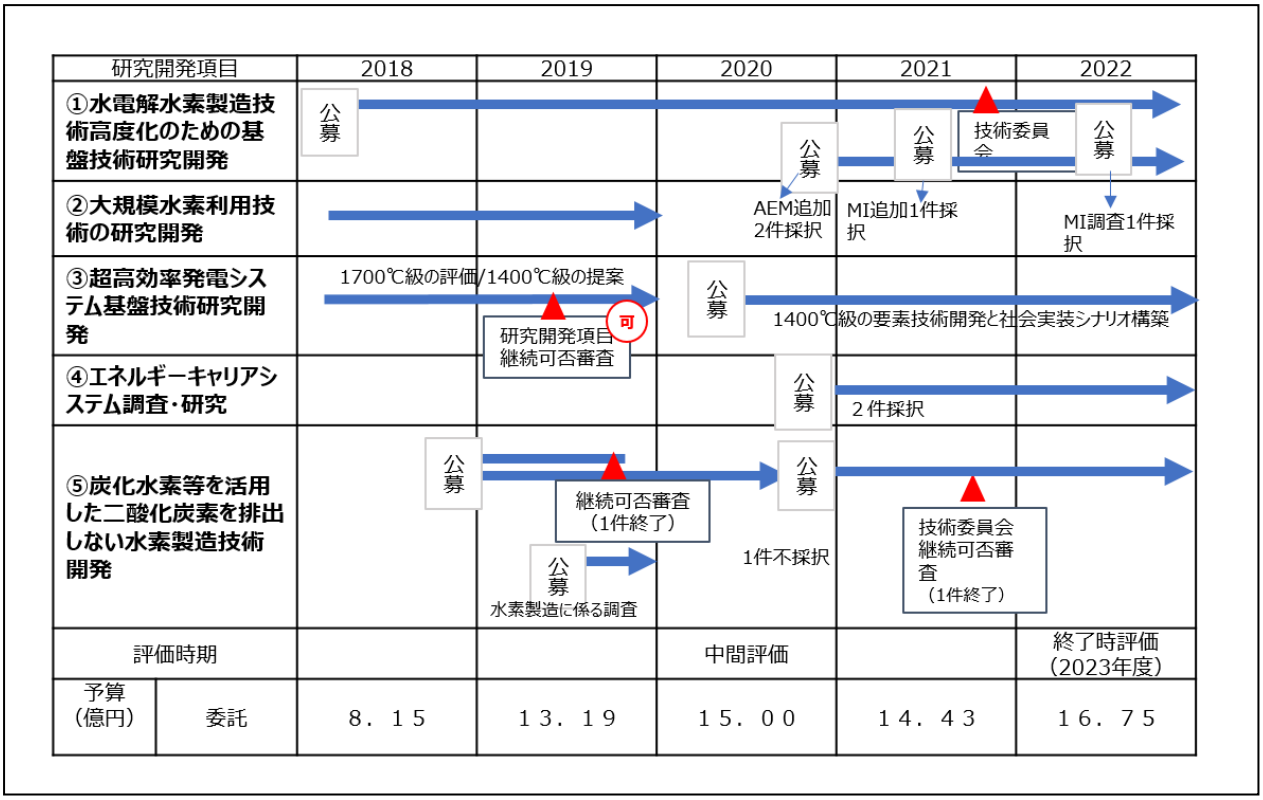
**図表１１　計上実績**

## ３.３研究開発計画

### ３．３．１　研究開発スケジュール

後期５年の研究開発スケジュールは以下の図表の通り。2021 年度の中間評価以降、2020 年 11 月 26 日　研究開発項目Ⅴ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査」の研究開発項目継続可否審査を実施し、多様な水素製造を持つということは重要で、メタンからの水素・炭素についても継続して取り組むという結論がでたことから、2021 年２月に「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」として公募開始。2021 年４月に採択決定し事業を実施した。また、水電解触媒分野にてＭＩ（マテリアルズインフォマティクス）を取り入れた動きがあることを踏まえ、2021 年度以降に公募を実施し、２事業を開始した。

2022 年１月 20 日　研究開発項目Ⅴ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」の継続可否審査・技術推進委員会を実施し、１つのテーマについて、独自性はあるものの研究の進め方、結果の解釈などに改善の余地があり、一旦終了して原理実証の目処がついてから再実施することとした。また、別のテーマについて、協業が技術開発の加速や効率化には結びついていないこととから、協業体制を見直して継続実施することとした。




**図表１２　研究開発スケジュール**

### ３．３．２ 進捗管理

（１）中間評価結果への対応

2020 年度の中間評価における指摘事項への対応状況は以下のとおり。

**「事業の位置付け・必要性」の指摘事項**

【1】「単一の技術開発の組合せではなく、有機的に結びつけることが必要である」

→本指摘は特に研究開発項目Ⅰに関する指摘と認識。水電解分野の技術開発においてはその性能向上やコスト低減に対し部材レベルでのシーズ探索が点在している様相であったが、これらのシーズ開発が要素部品開発を経て製品開発さらには水電解プロセスに貢献し水素製造価格目標に到達するために事業者に対しバリューチェーンの上下流だけではなく、ステークホルダーに対する理解や連携を促した。その結果、後継事業では企業との共同提案が加速されただけでなく、これまであまり注目されなかった BOP のコストに対する課題認識を醸成することができた。

**「研究開発マネジメント」の指摘事項**

【２】「ほぼ全ての研究開発項目の達成度が「〇」以上であり、達成できる目標を設定するのではなく、将来の実用化に繋がりうる目標を設定すべきであると考える。」

【３】「今後については、チャレンジングな目標に対しては、「未達＝ネガティブ評価」ではなく、研究開発のプロセスと挽回の為の方策を評価するという、評価サイドの見識が必要であると考えられる。」

→中間評価後の 21 年度公募・研究開発項目Ⅴにおいて実用化のシナリオが見通しやすい案件だけでなく、独創的かつチャレンジングな案件も 1 年以内に継続可否審査を受けることを条件に採択を行った。継続可否審査において、1 事業については独自性はあるものの研究の進め方、結果の解釈などに改善の余地があり、一旦終了して原理実証の目処がついてから再実施することとした。また 1 事業については共同提案であるアカデミアの取り組みが技術開発のバックアップとして十分機能していないとの判断から適切なアカデミアへの組換えを行った。

**「研究開発成果」の指摘事項**

【４】「全体に技術の比較が不十分であり、同種技術（材料）だけでなく異種技術（材料）に対しても比較した方が良いと思われる。」

→公募時の提案書様式に提案技術のポジションを明示的な記述を促すことを目的に、競合技術、代替技術及びそれらの水準について記載するよう工夫した。また、仕上げたい技術の姿において競合・代替技術を具体的に記述するなどに取り組み、提案技術の位置付けがより明確になった。

【５】「また、本事業での開発成果が、世界最高水準のものであるか、次世代技術の新開拓にどのように貢献していくかを示していくことも重要である。」

→高 IF 誌への掲載（東工大 1 件、理研 1 件）もあり、当該事業での研究開発レベルをアピールすることができたと認識している。この掲載がきっかけでアカデミアである事業者と企業との連携が加速された。

【６】「今後については、研究発表は行われているが、知財戦略の手薄感が否めないので、特許出願や国内外の原著論文(査読付き)への掲載も目指して頂きたい。」

→「仕上げたい技術の姿」を活用し、事業において取り組む技術開発のバックグラウンド IP 及びフォアグランド IP を整理し、研究開発項目ごとに想定される知的財産の権利主張や公表の計画などを事業開始時に確認し、その進捗をステアリングした。

**「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**

【７】基礎的な内容を含む研究開発の中には、大きなブレークスルーが期待されつつも、その技術を事業化すると言った道筋が見えにくいものがあることから、成果の実用化戦略の中に、商業収入をえるまでに、今後どれだけの開発費用が掛かるのか等の想定を明示するなど、個社における事業化の困難さを把握することが望まれる。」

→研究開発項目Ⅲにおいてはコスト・効率・必要性・実現性から事業化の困難さを把握した。他方、技術開発の成果をより早く社会実装するために熱需要への適用を見出した。

【８】今後については、前提条件を明確にして、コスト試算に納得感を持たせるなど、活動の中でしっかり考察していただきたいと考える。」

→研究開発項目Ⅰでは将来水素が必要とされつつも、市場が未成熟であるためユースケースの具体的化が難しい側面もあるが、社会実装の姿を鑑みつつ部材開発の仕様を具体化する必要性があることを認識してマネジメントに取り組んだ。研究開発項目Ⅲでは発電コストワーキンググループのコストレビューシート＊を参照したうえで試算をおこなった。

（＊発電コスト検証ワーキングコストレビューシート
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/index.html#cost_wg）

【９】また、中小企業では出来ない学術的な分析を行うことで、合理的な開発の道筋を示して支援を行うような取り組みもあって良いと思われる。」

→研究開発項目Ⅴの１事業については適切な助言が期待できるアカデミアを新たに再委託するだけなく、技術委員会の委員による進め方委員会の形成や、副生炭素の利活用について助言できる外部有識者との連携を促すマネジメントを進めた結果、プロセス化を推進する企業の関心を得るとともに、副生炭素の新たな機能発見につながった。

（２）動向・情勢変化の把握と対応

動向・情勢変化の把握と対応については、図表１３に示すとおり、革新環境イノベーション戦略の策定やカーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略の策定といった国の政策への対応、IEA AFC TCP TASK30（electrolyisis）や水電解触媒分野でのＭＩを取り入れた動きの対応、中間評価結果の反映、継続可否審査結果を反映した対応等を行った。

| 情勢 | 対応 |
| --- | --- |
| 2020年1月革新環境イノベーション戦略 | 2021年2月の公募に反映 |
| 中間評価（2020年度）の実施。 | 中間評価の指摘を踏まえて対応。 |
| 2020年11月26日　研究開発項目Ⅴ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査」の研究開発項目継続可否審査を実施し、多様な水素製造を持つということは重要で、メタンからの水素・炭素についても継続して取り組むという結論。 | 2021年2月に「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」として公募開始。2021年4月に採択決定し事業を実施。 |
| 2021年6月、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 | GI基金の立ち上げで実施者に共通基盤的知見の提供 |
| IEA　AFC TCP　TASK 30（electrolyisis）の開催 | 情報収集とその共有、課題設定の検討を継続。 |
| 水電解触媒分野にてＭＩを取り入れた動き | 2021年度公募を実施し、2事業を開始 |
| 2022年1月20日　研究開発項目Ⅴ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」の継続可否審査・技術推進委員会を実施。 | テーマAについて、独自性はあるものの研究の進め方、結果の解釈などに改善の余地があり、一旦終了して原理実証の目処がついてから再実施することとした。<br>テーマBについて、協業が技術開発の加速や効率化には結びついていないこととから、協業体制を見直して継続実施することとした。 |

**図表１３　動向･情勢変化の把握と対応**

## ４．目標及び達成状況の詳細

### 概要

# （４－１－１）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発／高温水蒸気電解技術の研究開発」

委託：東芝エネルギーシステムズ

## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０１８年８月～２０２３年３月終了予定

・SOECセル・スタック部材・高温モジュール構造材の劣化部位・要因を明確化し、それぞれの劣化機構を解明。長寿命化施策を検証し、セル・スタック交換寿命5年に目処。
・SOECセル性能・耐久性に優れた新規酸素極材料の設計指針を策定、候補材料を開発・検証。
・SOEC運転条件が、セル・スタック部材の劣化に及ぼす影響を明確化し、長寿命化可能な運転方案を策定。
・既存のSOFC/SOEC性能評価法国際規格（IEC62282-8-101）の問題点を抽出し、改良案を検討。新規格(IEC62282-8-301)の作成へ参画し、反映。

## ●背景/研究内容･目的

原理的に高い水素製造効率が期待できる高温水蒸気電解法は、近年各所で研究開発が進み、実用化を見通すことのできる段階に来ている。残された重要課題の一つは、SOECセル・スタック・高温モジュールの耐久性向上である。

本事業では、基盤技術に立ち戻り、セル・スタック・高温モジュールの劣化機構を解明することで、長寿命化への設定指針を得ることを目的とする。得られた成果は実用システムの設計へ反映する。

## ●目標

| 研究開発項目 | 目標 |
|---|---|
| A:セル・スタック劣化機構解明 | SOECセル・スタック部材・高温モジュール構造材の劣化機構を解明する |
| B:セル・スタック部材設計指針策定 | 長寿命化施策を抽出、SOECセル・スタック・高温モジュール部材の設計指針を策定する |
| C:新規電極の指針策定 | セル性能・耐久性に優れた新規SOEC酸素極材料の設計指針を策定する |
| D:スタック運転条件検討 | SOECスタックの長寿命化が可能な運転条件の設計指針を策定する |
| E:評価技術／標準化調査 | SOEC試験方法、評価技術、標準化に関する動向を調査し開発へ反映する |

## ●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 東芝エネルギーシステムズ（実施項目A～E）
    - ファインセラミックスセンター（実施項目A, B）
    - 産業技術総合研究所（実施項目A, B, E）

## ●これまでの実績/研究成果

A:SOECセル・スタックの劣化機構解明

SOECセルおよびスタック部材の劣化要因を抽出し、劣化機構を解明し高耐久化施策に繋がる知見を得た。高温モジュール構造材の劣化影響因子を抽出し、その影響度を明らかにした。また電気化学反応、電場、熱流体を連成した解析モデルを構築し、劣化要因となる各種パラメータの分布を評価した。

B:SOECセル・スタック部材の設計指針策定

水素極/電解質および、酸素極電解質間の構造を制御することで、セルの低減に成功、耐久性5年相当に目途。また、セパレータからのCr被毒抑制可能な被膜構造提案し、10年以上の耐久性に目途が立った。大面積化セパレータへの均一な被膜形成仕様および手法を確立した。また、高温モジュール構造材については汎用SUS材へのAl浸透処理により長寿命化可能であることを実証した。

C:新規SOEC電極の設計指針策定

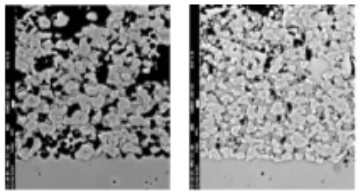
ペロブスカイト構造酸素極材料と電解質材料の材料両立性に注目し、LaNi(Fe)－セリア複合材料および、Ti添加もしくはLa添加セリアと複合したLa(Sr)Co(Fe)酸化物が有望であることを明らかにした。

D:SOECスタック運転条件検討

一定/変動入力およびガス組成、運転温度、運転電流／電圧がセル・スタックの劣化に及ぼす影響を評価。電流OCV待機時間や変動速度を制御することで、劣化速度の低減が可能になった。また、複数台連結スタックの劣化傾向を確認し、単スタックと同様の方法で劣化抑制可能であることを確認した。

E:SOEC評価技術／標準化調査

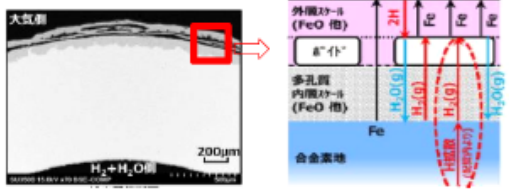
SOEC性能評価試験法案を作成。作成した試験方法が実施可能な評価試験機を製作した。開発したセルスタック性能評価技術は、新たな国際規格へ反映。



Niの蒸散した水素極上流部



Niが堆積した水素極下流部




高温モジュール構造材の劣化機構

## （４－１－１）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発／高温水蒸気電解技術の研究開発」

委託：東芝エネルギーシステムズ

### ●今後の課題

・本開発で得られたSOEC高耐久化への材料および運転条件に関する知見を踏まえたSOECセル・スタックの製造技術を確立や量産化技術の確立

・システム詳細設計およびスケールアップ化技術を確立し、検証・実証機の製造・運転検証による課題抽出／システム高効率化技術

・本格的な実用化を見据えた抜本的な低コスト化技術。

### ●実用化の見通し

東芝グループが長年培ってきた燃料電池や発電システムに関する技術蓄積を活用し、システム設計・制御技術、および運転マネジメント技術を併せ、2020年代中のSOECシステム実用化を目指す。

### ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| A:セル・スタック劣化機構解明 | 各々の劣化機構を解明。長寿命化施策を実施し、効果を検証。水素価格30円/$Nm^3$となる耐久性および劣化率に目処を立てた | ○ |
| B:セル・スタック部材設計指針策定 | | ○ |
| C:新規電極の指針策定 | 新規材料の設計指針を策定。候補材を検証した | ○ |
| D:スタック運転条件検討 | 単スタックおよび複数台連結スタックにおいて、長寿命化が可能な運転方案を策定した | ○ |
| E:評価技術／標準化調査 | 標準化測定法案を策定。一部を新規IEC規格へ反映した | ○ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 34(外国11) | 15 | 73 | - |

**（４－１－２）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発」**

委託：理化学研究所

## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０１８年６月～２０２３年３月終了

・MnOx触媒において2.0 V@80℃で2.0 A/cm2を達成／MnIrOx (Ir − 0.08 mg)触媒では2.0 V@80℃で4.2 A/cm2を達成、1.8 A/cm2では3000時間運転確認
・固体高分子型水電解セルの電流－電圧特性の主劣化要因が、水の酸化側の構成部材の溶解であり、これが固体電解質膜に留まることが要因と推定／水の純化で寿命向上
・変動電源ON/OFF繰り返し操作でIrOxとMnIrOx触媒での挙動が異なることを確認／太陽電池出力変動下でMnIrOx触媒を用いた水電解セルの動作を確認

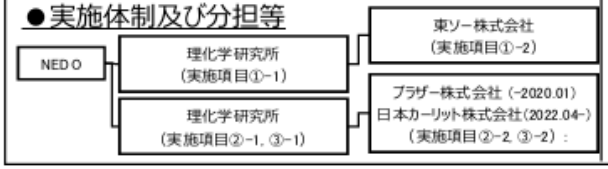
## ●背景/研究内容･目的

背景:
電源変動に比較的強い固体高分子型水電解セルの触媒は希少な貴金属が用いられており低コスト化･大規模普及に向けた課題となっている
研究内容･目的:
非貴金属系触媒を用いた固体高分子型水電解セルで
①電極触媒の性能発現と劣化機構の解明
②MEAとセル構造の最適化
③変動電源との連結による劣化特性評価
を行い、非貴金属触媒固体高分子型水電解セルの基盤技術の開発を目指す

## ●目標

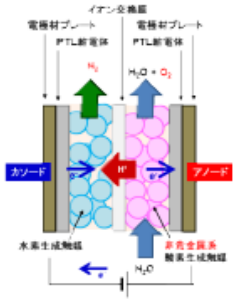
| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| ①−1 | Mn単体系触媒安定領域を50 mV拡大する作製条件の確立 |
| ①−2 | 含侵法によるMn−Ir系触媒の80℃, 1 A/cm²の条件下で劣化率：10 μV/h以下 |
| ②−1 | Mn−Ir系MEA劣化機構の確認のため、水電解シングルセルを用いて供給水温80°C、印加電圧1.8 Vの条件の下でIr系触媒の劣化率の2倍以内を達成 |
| ②−2 | Mn−Ir系触媒を用いた1 kW級水電解セルの定常条件下での作製条件指針の作製 |
| ③−1 | 太陽電池の電力変動環境下のMn−Ir系触媒を用いた水電解セルの運転条件評価 |
| ③−2 | Mn−Ir系触媒を用いた1 kW級水電解セルの変動条件下での作製条件指針の作製 |

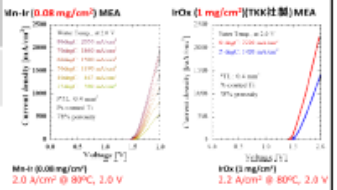
## ●実施体制及び分担等




## ●これまでの実施内容／研究成果

| 研究開発項目 | 目標に対する達成状況 | コストダウンへの貢献 | 自己評価 |
|---|---|---|---|
| ①−1 | 触媒安定領域拡大条件（70 mV）確立 | 高価なIr触媒不使用へ道 | 100% |
| ①−2 | 含侵法によるMn−Ir系触媒にて目標劣化率（−7.4 μV/h）達成 | 高価なIr触媒の利用量低減の実用化の近づく | 100% |
| ②−1 | Mn−Ir系触媒を用いたMEAの劣化率はIr系触媒より低い | Mn−Ir系触媒が優位性を持つ可能性を示す | 100% |
| ②−2 | 1 kW級セル作製指針を得る | 実用化への可能性 | 100% |
| ③−1 | 太陽電池電力変動環境下での水電解セル運転確認 | Mn−Ir系触媒が持つ可能性を示す | 100% |
| ③−2 | 変動条件下電解セル作製指針を確認 | 実用化への可能性 | 100% |



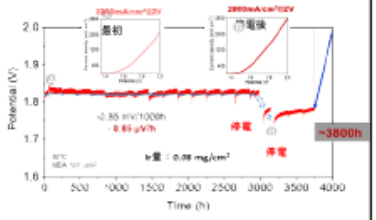




## ●今後の課題

性能を担保する触媒構造の明確化
水電解セルの初期化条件と運転条件範囲

## ●実用化･事業化に向けた取り組み

| 項目 | 実用化･事業化に向けた取り組み |
|---|---|
| ① | 東ソーにて事業化へ向けた取り組み開始 |
| ②③ | 日本カーリットにて実用化へ向けた取り組み開始 |
| ①②③ | MnIrOx触媒については実用化を目指して東ソーを中心としたNEDO事業での実施 |




| 特許出願 | ノウハウ指定 | 論文掲載 | 学会発表 | 講演･プレスリリース | その他 |
|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 0 | 1 | 13 | 1 | 0 |

# （４－１－３）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発」

委託：産業技術総合研究所、早稲田大学、北海道大学

## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０１８年７月～２０２３年３月）

・主に電極最適化により，電解電圧1.80V以下@1A/cm²を達成．耐久性についても当初の目標をクリア．さらにシステムコスト見積実施し，コスト削減の方針を確認した．
・電気化学的手法を適用して高密着性のｱｲｵﾉﾏｰﾚｽAEM上ｶｿｰﾄﾞ電極触媒層，及びPTL上ｱﾉｰﾄﾞ電極触媒層を開発し，いずれの触媒の性能も現行電極を上回ることを確認した．
・高速原子間力顕微鏡を導入し電解中のナノバブル発生のその場観察に成功し、またステンレス鋼の腐食機構の解明やAEM電解に最適な部材選定の知見を得た．

## ●背景/研究内容･目的

クリーン水素の需要が高まる中、低コストかつ高性能水電解装置の開発が求めらている。アルカリ性アニオン交換膜(AEM)を電解質膜に用いるAEM水電解装置は、セル部材に用いる材料の選択肢が広く低コストを実現できる一方で高い電解性能を発揮できる可能性を持つ新しい水電解装置である。

しかし同装置は、電極材料や構造にいまだ改善の余地を多く残し、さらに使用部材選定に必要な材料の電解環境下での腐食性に関する情報が十分ではない。

これらの技術的課題を克服し、アニオン交換膜(AEM)水電解装置の設計指針を獲得し、実用化に向けた橋頭保を築くべく、３提案者により包括的研究開発を行う。

## ●目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| (1-1) 電解性能改善 | 電解電圧1.80V以下@1A/cm² |
| (1-2) アノード触媒層開発 | 多孔性導電層形成方法の確立 |
| (1-3) カソード触媒層開発 | 組成、構造制御の方法論検討 |
| (1-4) 気泡挙動解析 | 気泡発生の動的挙動評価 |
| (2-1) セル耐久性評価 | 長期およびサイクル試験評価 |
| (2-2) 部材耐食性評価 | 腐食速度0.05mm/year以下 |
| (3-1) 水素製造コスト評価 | 10MWシステムのコスト見積 |

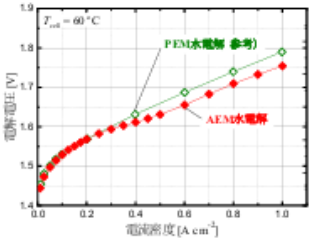
## ●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 産業技術総合研究所（1-1、2-1、3-1）
  - 早稲田大学（1-2、1-3）
  - 北海道大学（1-4、2-2）

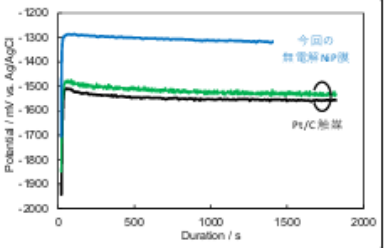
## ●成果

| 研究開発項目 | 目標に対する達成状況 | コストダウンへの貢献 |
|---|---|---|
| 1-1 | 電解電圧1.80V以下@1A/cm²達成 | 装置コストおよび運転コスト削減 |
| 1-2 | 多孔層形成方法は確立，Pt/C の1.2倍性能も達成 | 電極のアイオノマレス化と非Pt化の可能性を示唆 |
| 1-3 | 最適ﾊﾟﾙｽ条件を特定，従来電極1.1倍性能達成 | NiFe 材料を用いた低コスト電極作製の可能性を示唆 |
| 1-4 | 23年度末に目標達成 | 省電力電解装置開発へ貢献 |
| 2-1 | 定常運転およびサイクル試験で目標到達 | メンテナンスコスト削減 |
| 2-2 | 腐食速度0.05mm/year以下の確認 | 電極、電解槽の長寿命化に貢献 |
| 3-1 | 10MWシステムのコスト見積実施 | コスト削減に資するシステム構成特定 |

| 項目 | |
|---|---|
| 技術開発 | 実用化に必要となる基盤技術確立 |
| 企業連携 | 事業化を想定する企業との協力関係の確立 |
| 知財取得 | 電極などに関する基礎特許取得 |



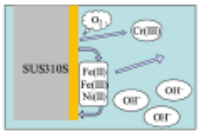

水電解性能改善




新規カソード触媒層性能



ナノバブル動画のその場観察




ステンレス材腐食機構の解明

| 特許出願 | ノウハウ指定 | 論文掲載 | 学会発表 | 講演･プレスリリース | その他 |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 0 | 8 | 24 | 4 | 0 |

## （４－１－４）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発」

委託：東京工業大学

### ●成果サマリ（実施期間　：２０１８年５月～２０２３年３月）

・主鎖を捻れたポリフェニレン系にすることにより、高分子量化、膜化が容易であり、高いOH⁻イオン伝導性とアルカリ耐久性を両立したアニオン交換膜の開発に成功
・実験、DFT計算、マテリアルズインフォマティクスを用いることで、結晶構造の観点から鉄系酸化物の触媒活性の新規な法則を発見し、$IrO_2$より高いOER活性の卑金属触媒を開発
・80℃、純水供給の固体アルカリ水電解セルで高効率と定電流運転に対する高耐久の両立を実証(図1)
・変動電源を模擬した電圧サイクル試験において、ポリフェニレン系ポリマーを用いた水電解セルの高耐久性を実証、およびセル高耐久化への指針獲得
・多孔Niフォーム(NF)の表面を電気化学的に改質した卑金属触媒において高いOER活性と耐久性を実現
・開発した改質NF触媒とポリフェニレン系ポリマーを組み合わせたMEAは1.65 V@0.6 A/cm²に至る高い水電解性能(図2)を達成

### ●背景/研究内容・目的

・水電解技術の現状の課題を解決し、変動電源に対して高性能・高耐久な電解質膜、電気化学触媒およびセル最適化
・変動電源へ追随する高性能単セルの設計指針確立
・変動電源に対する劣化機構の解明によるセル高耐久化指針確立

### ●目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| ① | 固体高分子形および固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発 |
| ② | 固体高分子形および固体アルカリ水電解用触媒の研究開発 |
| ③ | 変動電源に追随できる高性能水電解セルの設計・開発 |
| ④ | 水電解セルの変動電源に対する耐久性評価および劣化機構解析 |
| ⑤ | 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映した固体アルカリ水電解用の電解質ポリマー・膜の高度化 |
| ⑥ | 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発 |
| ⑦ | ナノ細孔膜を用いた固体アルカリ水電解の研究開発 |

### ●実施体制及び分担等

NEDO
- 東京工業大学（実施項目①-⑦）
  - ノリタケカンパニーリミテド（実施項目⑥）
  - KISTEC（実施項目②）
  - 鹿児島大学（実施項目③）

### ●研究成果

| 実施項目 | 達成度（自己評価） | コストダウンへの貢献 |
|---|---|---|
| ① | ○ | ○ |
| ② | ○ | ○ |
| ③ | ◎ | ◎ |
| ④ | ○ | ○ |
| ⑤ | ◎ | ◎ |
| ⑥ | ○ | ◎ |
| ⑦ | ○ | ◎ |

### ●実用化・事業化に向けた取り組み

| 実施項目 | 実用化・事業化に向けた取り組み |
|---|---|
| ⑤ | 合成プロセスを簡略化した高耐久アニオン交換膜の開発、サンプルワーク |
| ⑥ | スケールアップ容易な卑金属触媒の開発とサンプルワーク |
| ⑦ | 高耐久な固体膜アルカリ水電解の開発、企業への展開 |

図1：純水による固体アルカリ水電解の耐久性

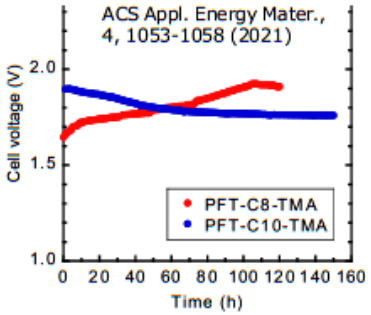
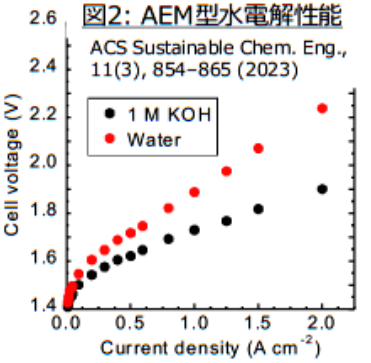



図2：AEM型水電解性能




| 特許出願 | 論文・総説 | 学会発表 | 招待講演・講師 | プレスリリース等 |
|---|---|---|---|---|
| 16 | 18 | 51 | 32 | 24 |

**（４－１－５）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／(A～G) アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化・アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化・(MI) アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究」**

委託：横浜国立大学，産業技術総合研究所，京都大学，大阪公立大学，東北大学，立命館，デノラ・ペルメレック(株)，物質材料研究機構

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：（A～G）２０１８年６月～２０２３年３月、（MI）２０２１年１２月～２０２３年３月）

・ アルカリ水電解および固体高分子形水電解の起動停止による劣化評価について、電気化学計測、高度解析による劣化解析に基づく加速劣化試験(ADT)法を提案、公開した。
・ 放射光を用いたアルカリ水電解および固体高分子形水電解の最先端解析法を開発し、電極触媒の活性および劣化機構を明らかに、解析プラットホームの基盤を整えた。
・ 電解槽開発と連携して再エネ利用P2Gシステム構成や運転アルゴリズムを開発し、システム設計手法の基盤を整えた。
・劣化に関する電気化学計測データを用いて、MIによる高活性・高耐久性触媒の提案手法を開発し、実際に新組成の触媒探索が可能であることを示した。

## ●背景/研究内容・目的

P2G用の水電解水素製造技術を開発するための基盤となる、変動電源に対応した材料やシステムを開発するための評価法や設計指針を開示することを目的とする。

## ●目標

| 研究開発項目 | 目標 |
|---|---|
| A | アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価基盤技術の開発 |
| B | 固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明 |
| C | アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析 |
| D | アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発 |
| E | 再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発 |
| F | 高度解析による劣化機構解析手法の開発 |
| G | 小型電解槽を用いた試験法の開発 |
| MI | アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究 |

## ●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 横浜国立大学（実施項目A）
  - 産業技術総合研究所（実施項目B）
  - 京都大学（実施項目C）
  - 大阪公立大学（実施項目D）
  - 東北大（実施項目E）
  - 立命館（実施項目F）
  - ﾃﾞﾉﾗﾍﾟﾙﾒﾚｯｸ（実施項目G）
  - 物質材料研究機構（実施項目MI）

## ●成果

| 研究開発項目 | 目標に対する達成状況 | コストダウンへの貢献 |
|---|---|---|
| A | ○ | 各種開発期間短縮 |
| B | ○ | PEM開発期間短縮 |
| C | ○ | 解析ﾌﾟﾗｯﾄﾎｰﾑ開発 |
| D | ○ | AWEｶｿｰﾄﾞ開発法 |
| E | ○ | ｼｽﾃﾑ最適設計法 |
| F | ○ | 解析ﾌﾟﾗｯﾄﾎｰﾑ開発 |
| G | ○ | 材料開発期間短縮 |
| MI | ○ | 材料開発期間短縮 |

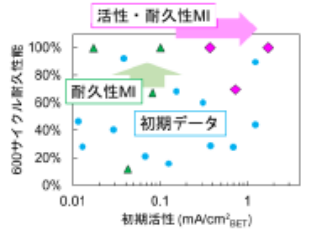
測定法：3か月で900回以上ﾀﾞｳﾝﾛｰﾄﾞ




YNUセル：2022.10までに65台出荷



MIによる活性・耐久性向上手法開発




2022.10までに48機関とNDA締結

## ●実用化・事業化に向けた取り組み

| 項目 | 実用化・事業化に向けた取り組み |
|---|---|
| 全体 | NDAに基づく連携機関の開発支援 |
| A~D,F,G | 測定法の開発公開による基盤技術共有 |
| A | ﾏﾙﾁｽｹｰﾙﾓﾃﾞﾙ設計支援技術ﾂｰﾙ共有 |
| E | P2Gｼｽﾃﾑ最適設計法の共有 |
| MI | MIによる触媒組成探索手法の共有 |

| 特許出願 | ノウハウ指定 | 論文掲載 | 学会発表 | 講演・プレスリリース | その他 |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | — | 28 | 126 | — | — |

## （４－１－６）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発」

委託：山梨大学、パナソニック、タカハタプレシジョン、日本化学産業、東北大学

### ●成果サマリ（実施期間　：２０２１年４月～２０２３年３月終了予定）

・アニオン導電率、機械強度、化学安定性に優れる高性能高耐久性アニオン膜およびイオノマーの開発に成功した。また、アニオン膜をA4サイズで製造できる製造技術を開発した。製造コスト15000円/$m^2$以下を見通した。
・アルカリ水溶液中において貴金属触媒($IrO_x$, Pt)よりも高活性な非貴金属系の酸素発生触媒および水素発生触媒を開発した。非貴金属系触媒を量合成する技術の開発にも成功した。
・本事業で開発したアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いたMEAを開発し、アルカリ水電解で欧米のベンチマークセルを大きく凌駕し、PEMWEに匹敵する性能と耐久性を達成した。

### ●背景/研究内容・目的

水素・燃料電池戦略協議会が設定したロードマップには、2030年に水電解システムコストを現状の20万円/kwから5万円/kwに低減し、水電解効率を現状の5kWh/$Nm^3$から4.3kWh/$Nm^3$に向上する目標が定められた。事業ではこの目標の達成に貢献するため、アニオン膜を用いたアルカリ水電解膜電極接合体(MEA)の開発を目指す。ボトルネック課題である、①アニオン膜・イオノマーの開発、②非貴金属系触媒の開発、③膜/電極界面の設計とMEA構築、④MEA形成プロセス基盤技術の開発、に産学で連携して取り組む。

### ●目標

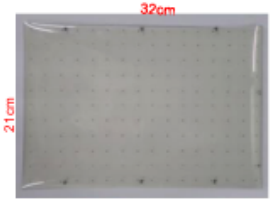
| 研究開発項目 | 目標 |
|---|---|
| ① | 高性能・高耐久性アニオン膜の開発 |
| ② | 高性能・高耐久性非貴金属触媒の開発 |
| ③ | 高性能・高耐久性膜MEAの開発 |
| ④ | アルカリ水電解用MEA形成技術の構築 |

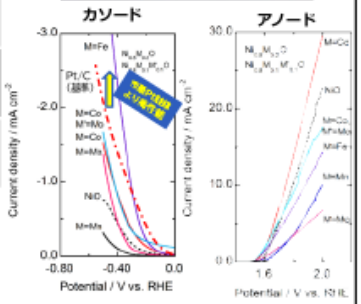
### ●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 山梨大学（実施項目①、②、③）
  - パナソニック（実施項目③、④）
  - タカハタプレシジョン（実施項目①）
  - 日本化学産業（実施項目②）
  - 東北大学（実施項目③）

### ●成果

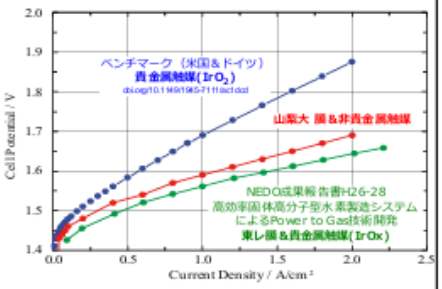
| 項目 | 目標に対する達成状況 | コストダウンへの貢献・ボトルネックの解決 |
|---|---|---|
| ① | 100%達成 | アニオン膜の製造コスト15000円/$m^2$達成・高耐久化を達成 |
| ② | 100%達成 | 貴金属触媒と同等以上に活性な非貴金属触媒を開発・量合成技術を達成 |
| ③ | 100%達成 | 上記①、②を用いたMEAで高性能、高耐久性を実証・性能/劣化機構を解明 |
| ④ | 100%達成 | MEA作製効率の大幅な向上を達成・非貴金属触媒に適したプロセスを開発 |




### ●実用化・事業化に向けた取り組み

| 項目 | 実用化・事業化に向けた取り組み |
|---|---|
| ① | アニオン膜のスケールアップ合成・製膜技術を開発し、関心企業にサンプル提供 |
| ② | 非貴金属触媒のスケールアップ合成技術を開発し、関心企業にサンプル提供 |
| ③ | 25$cm^2$のMEA性能評価設備を導入し性能を検証、関心企業MEAサンプルの評価実施 |
| ④ | 超音波スプレー法による均質な25$cm^2$のMEA作製技術を開発 |




| 研究発表・講演 | 論文掲載 | 特許 | 受賞実績 | 出版 |
|---|---|---|---|---|
| 27 | 13 | 0 | 4 | 1 |

## （４－１－７）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／低コストＡＥＭ型水電解システムの実現に向けたアニオン交換膜材料の高ロバスト化」

委託／共同研究：東京工業大学・日本触媒

### ●成果サマリ（実施期間　：２０２１年４月～２０２２年３月終了

・従来材料の100倍以上の耐アルカリ性を持つカチオン官能基と、耐酸化性に優れた主鎖構造を持つポリマーの合成に成功。
・上記材料を用いて電解評価可能なサイズの成膜物を取得。
・開発した材料を用いて電解評価を実施し、市販対照サンプルに対する優位性を確認。
・開発成果を用いた場合の水素製造コストを試算し、コスト支配因子を特定。

### ●背景/研究内容・目的

カチオン官能基の構造最適化を行い、実用可能なポリマー構造の有力候補を開発するとともに、イオン交換膜の長寿命化の指針を得ることを目標に取り組む。また、開発した材料のフィルム化と物性把握、水電解評価を含めた実用性の検証についても実施する。

### ●目標

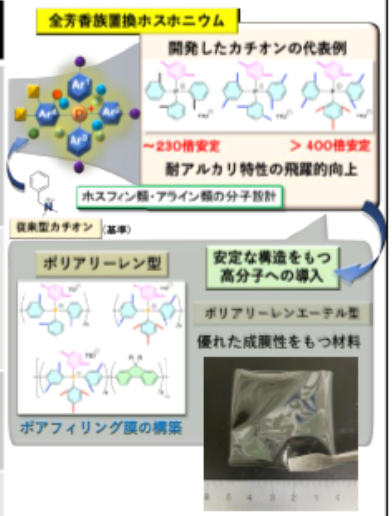
| 研究開発項目 | 目標 |
|---|---|
| ① | ベンジルトリメチルアンモニウム塩の100倍以上の耐アルカリ性を示すカチオン官能基の構築を達成<br>優れた耐アルカリ加水分解・耐酸化分解特性が見込まれるポリアリーレン型の主鎖骨格をもつ耐アルカリ性ホスホニウム官能基を有する高分子の合成 |
| ② | 標準サイズの電解セルで評価可能なサイズ（50mm角）の成膜物の取得。<br>80 ℃ 4 M KOH中で100時間の耐久性試験後、イオン伝導性$10^{-2}$ S/cm以上の性能を維持 |
| ③ | 開発した高ロバスト性カチオン含有ポリマーを含有する膜および市販貴金属触媒系を用い、水電解性能として1.75 V@1.0 A/cm² 以下を目指す。80 ℃、KOH 4 M水溶液供給で、0.1 V-2.0 V サイクル試験1000回後に、1.80 V@1.0 A/cm² 以下を目指す。また、膜中の官能基劣化率について、適宜外挿法または加速試験法を用いて、1000時間相当の評価を行い、市販対照サンプルに対する優位性を示す。最後に他プロジェクトの非貴金属触媒系での性能を確認する。 |
| ④ | 研究開発項目①～③の成果を用いて水電解を実施した場合の水素製造コストを推算し、既存製法と比較する。また、推算の過程で感度分析を実施し、コスト支配要因を特定する。 |

### ●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 東京工業大学
    - 富田研究室（実施項目①）
    - 山口研究室（実施項目②、③）
  - 日本触媒（実施項目①、②、③、④）

### ●成果

| 研究開発項目 | 目標に対する達成状況 | コストダウンへの貢献 |
|---|---|---|
| ① | 目標値を大幅に上回る400倍以上の耐アルカリ性を示すカチオン官能基を構築。<br>当該カチオン官能基を付与した重量平均分子量20万以上のポリマーサンプルの供給およびポリアリーレン型高分子の合成を達成。 | 装置寿命延長による水素製造コスト低減に貢献するため、アニオン交換膜材料の飛躍的な高耐久化を可能にする要素技術を開発。 |
| ② | ポリエーテル型ホスホニウムを使用して50mm角の成膜物を取得。<br>膜状態での耐アルカリ試験前後で安定であることを確認できたが、イオン伝導度は最高 $10^{-3}$ S/cmオーダー。 | 高耐久なホスホニウム系ポリマー材料を使用したアニオン交換膜の製造可能性を検証。 |
| ③ | 劣化評価条件(2.3 V以上, 1 M KOH)を確立。開発したポリマーを含む膜で高い耐久性を確認。 | 水電解条件での耐久性向上を確認するとともに、非貴金属触媒の使用可能性を検証。 |
| ④ | 水電解システムおよびシナリオ別水素製造コストの試算モデルを構築。既存法との比較、コスト支配要因の特定も実施。 | 開発した材料を用いた水素製造コスト低減の可能性を検証。 |




### ●実用化・事業化に向けた取り組み

| 項目 | 実用化・事業化に向けた取り組み |
|---|---|
| ①～④ | ポリマー合成・成膜条件最適化、スケールアップ、電解関連メーカーとの協業模索 |

・ポリマー改良、合成スケールアップ
・連続成膜技術の開発　など





→事業化に向け電解装置メーカー等との協業へ

| 特許出願 | ノウハウ指定 | 論文掲載 | 学会発表 | 講演・プレスリリース | その他 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 1 | 0 | 11 | 0 | 1 |

# （４－１－８）「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究」

委託／国立大学法人北海道大学

## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２２年１０月～２０２３年３月

・PEM型水電解装置に関連する文献データを11990データ収集し、世界初のPEM型水電解装置データベースの構築を完了した。
・マテリアルズインフォマティクス(機械学習、データ可視化)適用の可否を検討し、マテリアルズインフォマティクスが有効であることを示した。
・ 今後のPEM型水電解装置におけるマテリアルズインフォマティクス適用に必要な項目を提言した。

## ●背景/研究内容･目的

MIを用いた水電解水素製造装置 に関係する触媒、膜など素材開発の加速に資する文献データの調査やデータの収集といった方法論、存在するデータにについてデータ科学 手法を適用し、MI用の効果等について調査を実施する。具体的には触媒や膜に関する元素の選択やその組み合わせ、さら には性能を含む要求物性はもとより、合成の可能性とプロセスの最適化も含む、設計から製造までを一気通貫するプラットフォーム構築に関する調査を実施する。将来的には MEA（Membrane Electrode Assembly）としての最適化やプロセスインフォマティクス （PI）への拡張も視野に一連のプラットフォーム構築を目指すために取り組むべき方法 論も調査の対象とする。なお、本事業においてはPEM型水電解のアノードの非貴金属化を例に実施する。 本検討に基づき、アノードの非貴金属化を例に既知データによる予測について評価するとともに、MIを実施するために必要なデータについての提言とPIへの拡張に向けた具体的な提言をまとめる。

## ●研究目標

| 研究開発項目 | 目標 |
|---|---|
| A データベースの構築 | PEM 型水電解のアノードの非貴金属化に関する既知情報からのデータベースの構築 |
| B MIの実践 | MIの実践 |
| C PIへの拡張 | PIへのMI拡張に関する調査 ･提言 |

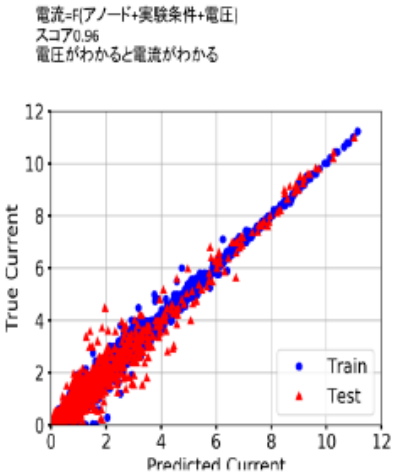
## ●実施体制及び分担等

NEDO
- 北大（研究開発項目A）
- （研究開発項目B）
- （研究開発項目C）

## ●これまでの実施内容／研究成果

・ PEM型水電解装置に関連する文献データを11990データ収集し、世界初のPEM型水電解装置データベースの構築を完了した。

構築したデータに対してMIの適用の可否を調査したところ以下が判明した。
・分類機で機械学習が適用できることが判明・回帰には記述子設計が必要
・可視化・相関係数など多くの方法が適用でき、傾向・相関がある。
・アノード・カソード・メンブレン・実験条件(圧力・温度)・合成方法、水流などの探索・効率化でMIが適用できる。
・2段階の機械学習で予測できる見込みがある。具体的には最初に電圧を予測し、その後電流予測が可能。
・文献データと機械学習による非貴金属アノードが提案された。
・触媒記述子を設計する必要がある。XRD/XPSによる構造情報、XAFS, BET, XPS, SEM, TEM等が有効と考えられる。




## ●今後の課題

文献データではアノードの80%はイリジウムである。そのため、ハイスループット実験等により非イリジウム・アノードデータの収集が今後のマテリアルズインフォマティクス導入において重要になる。

## ●実用化の見通し

ハイスループット実験とマテリアルズインフォマティクスを組み合わせることにより、効率的にアノードの非貴金属材料の探索が可能になると考えられる。またカソードやプロセスインフォマティクスによるPEM型水電解装置の最適化も可能と考えられる。

## ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| A | 1万の文献データベース構築 | A |
| B | MI導入による解析を実践 | A |
| C | MI導入の提言 | A |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 0 | （1）投稿中 | 0 | 0 |

# （４－２－１）「水素利用等先導研究開発事業／従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発／酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発」

委託／共同研究：国立研究開発法人産業技術総合研究所

## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２０年８月～２０２３年３月

・クローズドサイクルの共通基盤技術として、熱交換器概念設計、シール特性検討、水蒸気酸化試験、高温水蒸気環境下における暴露試験などの研究開発を実施した。
・動特性解析モデルを構築し、負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。タービンおよび蒸気圧縮機の概略設計で推定仕様を提示し、起動停止手順を検討した
・マルチクラスターバーナの高圧燃焼試験、高強度乱流酸素水素燃焼の直接数値計算技術、LES技術、燃焼器ライナー冷却、燃焼器内流動・燃焼の数値解析に取り組んだ。

## ●背景/研究内容･目的

水素社会の実現に向けて２０４０年以降という長期的視点から、従来の開放系サイクル技術とは一線を隔す超高効率の発電技術を現時点から検討しておく必要を踏まえ、従来技術を凌駕するポテンシャルを有する超高効率発電を対象として、燃焼器やタービン等の業界共通の要素研究を推進することにより、それらの基盤技術を確立することを目的として、下記を実施。

①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発
②システム検討
③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発
④社会実装シナリオの構築

## ●研究目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| ① | シール技術の要素技術確立。燃焼器・翼材料技術、冷却技術の候補提示 |
| ② | 動特性解析が可能なダイナミックシミュレーション技術の確立 |
| ③ | マルチクラスタバーナの高圧燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立バーナ試作のためのシミュレーション技術の確立 |
| ④ | 2050年カーボンニュートラルを想定した社会実装に向けた実用化シナリオの策定 |

## ●実施体制及び分担等




## ●これまでの実施内容／研究成果

①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発
　高温高圧条件における熱交換器概念設計、タービン翼冷却構造及びシール特性の検討、材料腐食に関わる劣化事象の調査、燃焼器及びタービンの複数候補材にて水蒸気酸化試験、高温水蒸気環境下におけるセラミック材減肉特性を評価するための暴露試験を実施した。
②システム検討
　動特性解析モデルを構築し、負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。タービンおよび蒸気圧縮機の概略設計で推定仕様を提示し、起動停止手順を検討した。本邦および各国市場のニーズに沿った負荷変化方法の要求項目を明確にし、さらに、コジェネレーション利用検討のモデルを構築した。
③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発
　シングルバーナで0.8MPaで1kW以上の燃焼試験実施、マルチクラスターバーナの試作等を行った。高強度乱流酸素水素燃焼の直接数値計算技術、LES技術、レーザ計測技術等を確立した。燃焼器ライナー冷却検討用模擬燃焼器の構築、火炎構造可視化用計測系整備、燃焼器内流動・燃焼の数値解析手法に取り組んだ。高圧水素酸素供給設備の改造、冷却水供給設備の設計を行った。
④社会実装シナリオの構築
　内外の動向を踏まえ、社会実装時期の早期化検討、シナリオの見直し作業を進めた。各国の電力市場に受け入れられるシステム、次期アクションプランを検討した。

## ●今後の課題

基盤技術開発を要素技術からシステムの要素として深耕して要素機器の開発に移行する。

## ●実用化の見通し

超高効率ベースロード電源として社会実装されるまでの長期間において、他の利用としての波及効果なども検討し、負荷変動対応、コージェネレーション、蒸気タービンの水素利用施設への順化を想定して、開発フェーズを検討した。
開発コストを抑える上では、既設の蒸気タービン発電設備を利用したロードマップも作成した。また、波及効果として、産業用熱供給での燃焼技術の展開を想定。

## ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| ① | 要素技術確立。<br>構造・材料の候補を提示。 | ○ |
| ② | 動特性解析モデル構築。 | ○ |
| ③ | 高温高圧試験実施。<br>シミュレーション技術確立。 | ○ |
| ④ | シナリオ見直しとアクションプラン提示 | ○ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 2 | 7 | 21 | 0 |

# （４－３－１）「水素利用等先導研究開発事業／エネルギーキャリアシステム調査・研究／トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上」

委託：横浜国立大学、東北大学
(再委託)高輝度光科学研究センター

## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２１年６月～２０２３年３月

- アノライトの硫酸濃度を高めると電流効率が向上すること、100℃以下の加湿空気供給で酸素発生電極が作動すること、流量やRHで制御可能なことを明らかにし、最適化した。
- アニオン交換膜で純水供給のトルエン電解水素化では水の移動を抑制し、高い電流効率が得られるが、アニオン交換膜水電解の材料の問題などが課題であること明らかにした。
- PEM水電解(水/アイオノマー/気相/固相)の4相モデルに油(TL-MCH)を加えた5相モデルに拡張してバリデーションを実施

## ●背景/研究内容・目的

トルエン直接電解水素化は、再生可能電力を電解システムのみでエネキャリに変換でき、原理的に高効率で電位変動追随性に優れているが、副反応である水素発生を抑制するためには、水電解を行う酸素発生電極側から水素化電極側に移行する水を抑制したり、水素化電極に移行した水を積極的に排出する技術が必要であり、各種要素材料技術開発と解析モデルによる設計技術の構築を目的とした。

## ●研究目標

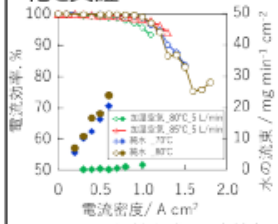
| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| A-1 | 水供給方式を選定し、ファラデー効率を安定化 |
| A-2 | イオン交換膜を選定してA-1にフィードバック |
| A-3 | 濡れ性制御でA-1にフィードバック |
| A-4 | TL／MCH－水相－気相-アイオノマー-固相の5相の数値解析モデルの構築とバリデーション |
| A-5 | 多孔質流路内の各層の空間分布の評価 |
| B | A-5と連携してデータ解析 |

## ●実施体制及び分担等

- NEDO
  - 横浜国立大学（実施項目A1～A4）
    - 高輝度科学研究センター（実施項目A5）
  - 東北大学（実施項目B）

## ●これまでの実施内容／研究成果

A-1:アノードの加湿空気供給方式により水透過をトルエン電解水素化を実証

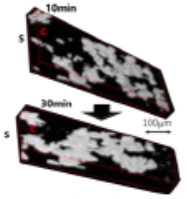



アノードの水供給方式と電流効率及び透過水の流束

A-2:アニオン交換膜を用いた電解槽でトルエン水素化を確認。カチオン交換膜においてEWや側鎖構造の電解性能への影響を確認。

A-3:MPL層の新疎水制御により、電流効率の最適化を実証。

A-4:5層解析モデルの構築。Spring-8での可視化との比較で同様の傾向を示し、モデル、解析の妥当性を実証。




カソード内気相分布の時間的変化

A-5:マイクロスケールの油相中の気泡分布の可視化および定量化に成功。液水によって水素気泡が押し出されている可能性を示唆。

B: 放射光CT用セルの作製、CT画像に対する深層学習の手法を用いた解析の有効性確認。

## ●今後の課題

移行水低減効果の電気化学性能への有効化（カソード触媒層内の停滞水の低減と物質移動の促進）。水分布把握の為の深層学習による画像解析。

## ●実用化の見通し

2023-25年度にENEOS(株)のGI基金事業内のDirect MCH技術開発の実証電解槽開発事業に横浜国立大学は基盤技術開発担当で再委託先として参画。

## ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| A-1 | 加湿空気供給方式の最適化 | ○ |
| A-2 | アニオン交換膜の適用性提示 | ○ |
| A-3 | MPL層の親疎水制御効果 | ○ |
| A-4 | 5層解析モデルの構築 | ○ |
| A-5 | 油相中の気相分布可視化 | ○ |
| B | 放射光用CTセルの作製 | △ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 2 | 3 | 11 | 1 |

# （４－３－２）「水素利用等先導研究開発事業／ エネルギーキャリアシステム調査・研究／ 水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築」

委託：早稲田大学、東北大学、東京大学、荏原製作所
再委託：九州大学、熊本高専

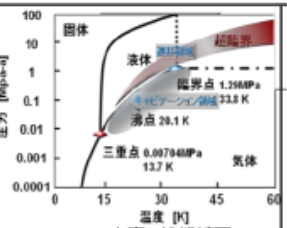
## ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２１年４月～２０２２年３月

**液化水素の特異な性質（圧縮性、沸騰、キャビテーション、遷臨界点不安定）解明のための実験設備、計測機器を開発し流体シミュレーションなどの基盤流体技術を構築**

可視化、性能、不安定流動計測可能な極低温ポンプ回流試験装置、遷臨界流動試験装置の構築と各種ボイド率センサー開発、高速液化水素中の蒸気温度計測手法の構築
キャビテーションから超高圧まで可能な液化水素流体解析の高度化、液水多段大容量ポンプの試設計、最適化と性能予測、ポンプ低流量域逆流抑制デバイスの開発と流動把握

## ●背景/研究内容･目的

【背景】
水素の長距離輸送，長時間貯蔵のためのエネルギーキャリアシステムの大型化／コストダウンと、各種利用シーンでの製品競争力強化を加速するために、流体機械・機器の開発基盤としての、流体シミュレーションを中核とする基盤流体技術の構築が必要。



水素の状態線図

【目的・研究内容】
液化水素基盤流体技術整備とシミュレーション高度化に向けた取り組み

**■極低温流体試験装置の構築と革新的計測技術の開発、検証データの取得**
・ 静電容量ボイド計、極低温キャビテーション内部温度高精度計測手法の開発
・ 実験と解析による臨界点近傍（気体、液体共存限界の周辺）で生じる流体物性急変現象の把握、リスク評価と制御

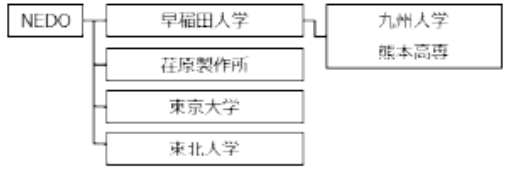
**■液化水素流体シミュレーションの高度化**
・ 物性急変を伴う流体シミュレーションの安定化、高精度化

**■液化水素の現象把握と課題の抑制**
・ 熱力学的効果の利用、流路内面コーティングによるボイルオフガス抑制
・ 流動不安定現象（キャビテーションサージ）予測と抑制

## ●研究目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| 早稲田大学 | 液化水素流体解析の高度化、ボイド率計測技術開発 |
| 九州大学 | ポンプ吸い込み性能予測、高度CFD解析 |
| 熊本高専 | ポンプ設計のためのキャビテーション性能解明 |
| 荏原製作所 | 流体機器内部流動予測・評価技術開発 |
| 東京大学 | 臨界点をまたぐ低温流体の不安定性予測 |
| 東北大学 | 高速液化水素中の温度計測 |

## ●実施体制及び分担等




## ●これまでの実施内容／研究成果

**■極低温試験装置の構築と実験計測の実施**

液化窒素を用いたポンプ性能・キャビテーション試験（熱力学的効果）、流動不安定計測、流れの可視化および液体窒素を用いた臨界点をまたぐ極低温流体の不安定流動挙動の計測が可能な試験装置を構築、検証データを取得。

**■革新的計測技術の開発**

ボイド率センサーの設計・開発と液化水素を用いた実証試験を実施。極板型、短針型(探針間距離２mm以下)、テーパー型センサーの開発と検証。水素キャビテーション内部の1K程度の温度低下を高精度に計測できる白金測温抵抗体を用いた温度計測手法を確立。

**■液水大容量昇圧ポンプの設計と性能・流動予測**

多段ポンプもインペラ、ディフューザを設計、圧縮性を考慮した液体水素の解析を行い性能を予測。羽根車吸込性能の形状影響確認

**■液化水素流体シミュレーションの高度化**

液化水素の有する圧力や密度の急な物性変化、低い沸点、相変化時の大きな熱力学的効果を考慮できる流体シミュレーション手法を構築。特に、多重プロセス型モデルの改善により熱力学的効果に伴う温度低下量を精度良く予測可能。

**■液化水素の流動現象把握と不安定流動の把握、抑制**

耐久性の高いコーティングにより、窒素ボイルオフガスを最大78％低減。ポンプ逆流抑制デバイスにより小流量での逆流抑制効果を実現。液化水素の熱力学的効果による吸込み性能向上を予測。臨界点をまたぐ流動不安定を実験的に計測、流体シミュレーションを実施。

## ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| 極低温試験装置の構築と実験計測の実施 | 極低温ポンプ回流試験装置、超臨界流体試験装置の構築とデータの取得、液化水素試験装置を用いた水素二相流可視化 | ○一部△ 液化水素実験未完了 |
| 革新的計測技術の開発 | 極板型、短針型、テーパー型ボイド率計測センサーの開発と検証。水素キャビテーション内部の温度低下の高精度計測可能な温度計測手法を確立 | ◎ 超過達成 |
| 液水大容量昇圧ポンプの設計と性能・流動予測 | 多段ポンプ羽根車とディフューザーを設計、圧縮性を考慮した液体水素解析により性能を予測、実験によるキャビテーションの熱力学的を確認 | ○ |
| 液化水素流体シミュレーションの高度化 | 高度流体シミュレーション手法を構築、多重プロセス型キャビテーションモデルの適用により、熱力学的効果に伴う温度低下量を精度良く予測可能。 | ○一部△ 検証は未完了 |
| 液化水素の流動現象把握と不安定流動の把握、抑制 | 極低温遠心ポンプの吸込性能への羽根形状の影響、コーティングによるボイルオフガスの低減、ポンプ逆流抑制デバイスによる小流量逆流抑制効果を確認。 | ○一部△ 液化水素検証未完了 |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 0 | 5 | 16 | 0 |

## ●今後の課題

・液化水素を用いた更なる実験データの取得による流体シミュレーションの適用拡大と高度化
・水素二相流状態を踏まえた各種技術・製品開発が必要

## ●実用化の見通し

液化水素基盤流体技術整備とシミュレーション高度化を以下に展開
・設備イニシャルコストの低減
・革新的プロセスの創案
・機械・機器高性能化によるランニングコストの低減

コンソーシアム構築により液化水素基盤技術を展開

## （４－４－１）「水素利用等先導研究開発事業/炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発/ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発」

委託／共同研究：事業者名

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２１年４月～２０２２年３月

・生成水素量がホウ化水素の保持している水素量以上となること（Hが8.5wt%以上）という目的が１０回のサイクルで達成され研究当初の100倍の水素量が検出された。
・$^{18}O_2$と$D_2$の信号をガスクロマトグラフィー質量分析器で検出した。
・−0.2V(vs. SHE)程度のカソード分極によって水素が生成することがわかった。
・水に投入すると加水分解反応が1～7%程度進行し繰り返し起きないことが実験で示された。また、この要因であるホウ素の正の電荷が実験に対応し理論でも示された。

### ●背景/研究内容･目的

熱を一次エネルギーに、水を原材料に、ホウ化水素（HB）と呼ばれる水素とホウ素が１：１の割合で構成される物質を反応場として大量の水素分子を酸素分子とは分離して安全にバルクケミカルとして製造する技術について実用化を見極める基盤研究開発を行った。具体的には原理実証となる基礎的な検討を実施し基礎的な原理について検証を行った。

### ●研究目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| 1 | 繰り返しが可能なプロセスであることの原理立証 |
| 2 | 生成酸素が導入水分子由来であることの原理立証 |
| 3 | プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータの算出 |
| 4 | ホウ化水素の加水分解 |

### ●実施体制及び分担等

NEDO
- 国立大学法人筑波大学
- 国立大学法人東京工業大学
- 国立大学法人大阪大学
- 国立研究開発法人物質･材料研究機構

### ●これまでの実施内容／研究成果

生成水素量がホウ化水素の保持している水素量以上となること（Hが８．５ｗｔ％以上）という目的が１０回のサイクルで達成されることを明らかにした。これは、実験条件を検証した結果達成された成果であり、プロジェクト前の準備実験で得られていた水素生成量と比べると１回あたりの水素生成量で比較して約１００倍の増加となった。次に、同位体を用いた実験で外部から導入した水がプロセスに関与していることを示唆する結果を得た。プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータを実験に基づき定量的に算出する取り組みでは、想定した発熱と吸熱が起きていることが示され、試料の単位質量当たりの発熱量（３．７５ｍＷ／ｍｇ）の算出を達成した。さらに、実験により－０．４４５Ｖ（ｖｓ．Ａｇ／Ａｇ$^{+}$）程度のカソード分極によって水素が生成することもわかった。最後に、ホウ化水素シートと水の反応性（何%が加水分解するか、繰り返しで起きてしまうか）について実験と理論計算の両方で検討した。この結果、水に投入すると加水分解反応が１～７%程度進行し繰り返し起きないことが実験により示され、ホウ素が正に帯電していることが水に対する耐久性の鍵であることが理論計算で示された。

### ●今後の課題

高効率で安定的な水素生成の実験条件を確立する必要がある。また、現状では試料全てが活性点ではないため、ガス生成量と突き合せた解析により実際の熱量変化を測定する必要がある他活性点を増やすことが必要。

### ●実用化の見通し

原理実証に向けた実験が引き続き必要な状況である。

### ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| 1 | 研究当初の100倍量の水素を検出 | ○ |
| 2 | $^{18}O_2$と$D_2$の信号をガスクロマトグラフィー質量分析器で検出 | △ |
| 3 | -0.2V(vs. SHE)程度のカソード分極によって水素が生成 | △ |
| 4 | 水に投入すると加水分解反応が1～7%程度進行し繰り返し起きないこと | ○ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0 | 0 |

## （４－４－２）「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発／メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発」

委託：戸田工業株式会社、エア・ウォーター株式会社

### ●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２１年４月～２０２３年３月）

連続式ロータリーキルンから水素精製装置までの一連のシステムを統合させたパイロットスケール設備を用いて、メタン直接改質（DMR）反応を行い、99.99%以上の高濃度水素を100h以上に亘って製造できた。水素の副生成物として生成する多層カーボンナノチューブ（CNT）の導電性は、概ね目標値（0.020Ω･cm）を達成できた。但し、その際の水素濃度は安定的に70%以上を維持できなかった。多層CNTを市場価格で販売できれば、水素製造コスト30円/$Nm^3$以下とシステム全体の収益確保が達成できることが判った。

### ●背景/研究内容･目的

DMR法は、メタンを原料として鉄系触媒等を用いて水素とカーボンナノチューブ(CNT)等の炭素材料を生成するクリーンな反応であり、得られる水素はターコイズ水素と呼ばれる。このDMR法は、水蒸気改質法と比較すると、メタン1分子当たりの水素生成量は1/2であるものの、製造時にメタン由来の$CO_2$を発生させない、すなわち$CO_2$フリーな反応であることが特長である。

本研究開発では、天然ガス等のメタン原料から、鉄系触媒を用いたDMR法により、$CO_2$を直接排出せず高純度水素(99.99%以上)を安価(製造コスト30円/$Nm^3$以下)かつ高効率に製造可能な水素製造プロセスおよびシステムを構築する。

### ●研究目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| ①DMR反応用高活性鉄系触媒の設計 | ・積算水素生成量5.5mol/g-cat.以上の鉄系触媒の設計<br>・触媒月産10tに向けた量産技術の確立 |
| ②高濃度水素を安定生成可能なDMR反応仕様および制御技術の確立 | ・DMR反応出口ガス中水素濃度70%以上かつ連続運転100h以上(パイロットスケール反応炉)<br>・副生成物CNTの粉体抵抗0.020Ω･cm (at 1g/cc)以下 |
| ③水素の高効率･高純度精製プロセスの確立 | ・精製後水素濃度99.99%以上、水素回収率85%以上(パイロットスケール) |
| ④実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定 | ・水素製造コスト30円/$Nm^3$以下の実機スケールプラントの基本設計完了と事業化シナリオ策定 |
| ⑤CNTの性能評価および用途開発 | ・競争優位性のある用途へのサンプルワークによる実用化用途と顧客の見出し |

### ●実施体制及び分担等

NEDO
- 戸田工業㈱（実施項目①②④⑤）
- エア･ウォーター㈱（実施項目③④）

### ●これまでの実施内容／研究成果

①DMR反応用高活性鉄系触媒の設計
- 固溶法（湿式合成法）を用いて調製したFe-Co-Al複合物は、目標の水素生成量5.5mol/g-cat.以上と目標CNT粉体抵抗0.020Ω･cm以下を達成した（小型バッチ式ロータリーキルンによる反応）。
- 上記触媒について月産10t以上の量産可能な製造仕様を確立した。

②高濃度水素を安定生成可能なDMR反応仕様および制御技術の確立
- パイロットスケール連続式ロータリーキルンによる従来触媒（Co固溶Fe酸化物＋Mg-Al複合物）の反応で、連続100h以上に亘って概ね目標とする水素濃度70％以上を達成した。但し、CNT粉体抵抗は0.032Ω･cmに留まった。
- 改良触媒（Fe-Co-Al複合物）を用いた場合、CNT粉体抵抗は0.021Ω･cmまで改善したものの、安定的に水素濃度70%以上が得られなかった。

③水素の高効率･高純度精製プロセスの確立
- 膜分離とPVSAを組み合わせた水素精製装置（パイロットスケール）を用いて、100h以上に亘って、DMR反応outガス中水素を高効率に高純度化（99.99%以上）可能なことを確認した。
- 水素回収率については、目標の85％に対して80%に留まった。

④実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定
- 実機スケールプラント（生産能力；水素11万$Nm^3$/月、CNT45t/月）の基本設計を完了した。
- 水素製造コストについては、副生成物のCNTを市場価格で販売できれば、水素製造システム全体として収益を確保しつつ、目標の30円/$Nm^3$以下を達成可能なことが明らかになった。

⑤CNTの性能評価および用途開発
- サンプルワークにより受注確度の高い用途と顧客が明確化されつつある。今後も受注獲得活動を継続する。

### ●今後の課題

- 安価なメタン原料の探査…温泉付随の未利用天然ガスが湧出している地域･場所
- 天然ガス等に含まれる微量ガス成分による水素･CNT品質への影響調査と前処理仕様の確立
- CNTの安定かつ多量の需要が見込める顧客の獲得…年間100t以上の用途探索

### ●実用化の見通し

- 2023～2025年度…商用スケール実証プラントの設計･製作および実証検討
- 2026年度以降…商用運転開始

### ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| ① | 積算水素生成量6.0mol/g-cat.の高活性鉄系触媒の設計に成功。 | ○ |
| ② | 水素濃度が70%以上、連続100h以上を概ね達成。改良触媒によりCNT粉体抵抗を0.021Ω･cmまで改善(安定的に水素70%以上は得られず)。 | △ |
| ③ | 100h以上に亘り高純度化(99.99%以上)可能なことを確認(水素回収率は80%)。 | ○～△ |
| ④ | 実機スケールの水素製造システムの基本設計完了。水素製造コスト30円/$Nm^3$以下を達成可能。 | ○ |
| ⑤ | サンプルワーク活動により受注確度の高い用途と顧客が明確化されつつある。 | △ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 3 | 0 |

# （４－４－３）「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発／メタン直接分解による水素製造技術開発」

委託／共同研究：株式会社伊原工業
再委託先：あいち産業科学技術総合センター、学校法人東京理科大学、国立大学法人名古屋大学、国立大学法人静岡大学

●反応炉温度 700℃で水素濃度 60%をDSS運転にて 30 日以上持続（実施期間　：２０２１年４月～２０２３年３月）

・反応炉装置の熱効率の向上と装置の要素開発・・・構造体触媒を輻射熱で加熱することにより、エネルギー効率を大幅に高めた。反応炉をモジュール化することによりコストを削減。
・副生炭素の特性解析と用途開発・・・副生炭素は繊維状炭素が凝集した状態で、導電率や熱伝導率はカーボンブラックと同等であったが空隙率が高かった。
・金属板触媒の性能向上・・・Ni膜は100～200nm程度の微細粒からなり、Ni-Cu固溶体がメタン分解の触媒活性サイトとなって反応が進行していた。

## ●背景/研究内容･目的

カーボンニュートラル実現のためには、再生可能エネルギー由来の電気を使った水電解による水素製造だけでは、水素が大幅に不足する。そのため、賦存量の多い天然ガス（メタン）から$CO_2$フリー水素を製造することが望まれている。しかし、従来のメタンの**水蒸気改質法では$CO_2$の発生を伴うためCCS等の大掛かりな後処理が必要**であった。そのため、中小規模の水素製造装置には不向きであった。

$$CH_4 \rightarrow 2H_2 + C\ (固体)$$

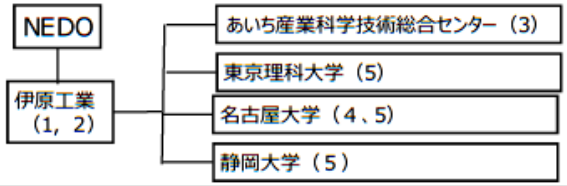
本事業では、**メタンを水素と固体の炭素に直接分解する**メタン直接分解法の実用化を目指して開発を行った。**ターコイズ水素の製造**と共に、**固体の副生炭素の有価値化**のための各種物性評価を実施した。

**本技術により地域のバイオマス資源を活用**した、**自立分散型水素活用モデル**を目指す。バイオメタンを使用することにより**カーボンネガティブ**を実現する。

## ●研究目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| 1 | 反応装置の熱効率の向上 |
| 2 | 水素製造装置の要素技術開発 |
| 3 | 副生炭素の特性解析と幅広い利用方法の検討 |
| 4 | 生成水素及び水素混合ガスの用途の検討 |
| 5 | 金属板触媒の性能向上 |

## ●実施体制及び分担等

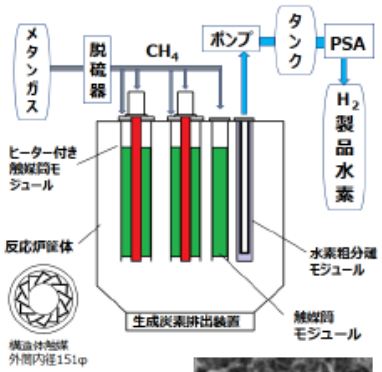



## ●これまでの実施内容／研究成果

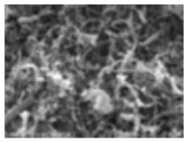
### 反応炉の開発（１，２）

**加熱法の改善**
反応は金属構造体触媒の境膜付近で進むこともあり、**輻射熱を利用して金属構造体触媒自体を直接加熱**した。反応に必要な触媒表面を中心に直接加熱することにより**反応炉のエネルギー効率を大幅に高める**ことができた。これにより、メタンの予熱も廃止することができた。

**反応炉のモジュール化**
装置の規模変化に対応可能。**反応炉内の各モジュール間の配管がない**ので、製造コストやエネルギーロスを低減可能。




反応炉中央部温度600℃、メタンガス圧0.5MPa、生成ガス中水素濃度60%、水素製造量256.8NL/ｈ



### 副生炭素の用途開発（３）

副生炭素は、繊維状炭素(繊維径：300～500nm)が凝集した状態であった。また、触媒金属が約1～2%程度含まれていた。**導電率･熱伝導率は、市販カーボンブラックと同等**であったが、**炭素が凝集しているため**、同等の導電率を得るためには**多くの副生炭素の充填率を必要**とする。

### 混合ガスの用途検討（４）

水素濃度25%以上では都市ガス用燃焼器の変更が必要。

### 金属触媒の性能向上（５）

Ni膜は100～200nm程度の微細粒から成る。水素の拡散による膜の破壊は、触媒を劣化させる反面、触媒を新生させる効果がある。Niの微粒子を内包してグラファイト層が析出することでNiめっき層が消耗する。

## ●今後の課題

- 実証炉を製造するプラントメーカーと提携し、小型実機サイズでのメタン直接分解反応炉の性能実証。
- 生成炭素の用途として、今後EV化に伴い増大するであろう導電用途に向けた、解繊技術の確立。
- 化学メーカー等のユーザーの協力を得て、生成炭素のC1化学の原料としての活用検討。
- 副生炭素の有価値化が必要。

## ●実用化の見通し

バイオメタンを使用した小型のターコイズ水素製造装置は2028年頃までには実現可能と思われる。

## ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| 1 | 触媒の輻射熱加熱法を開発 | ◎ |
| 2 | 製造装置のモジュール化推進 | ○ |
| 3 | 副生炭素の物性･用途開発 | ○ |
| 4 | 混合ガス使用時の燃焼器検討 | ○ |
| 5 | 金属板触媒の活性サイトの特定 | ○ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 3 | 3 | 4 | 0 |

# （４－４－４）「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発／メタン熱分解による水素製造技術の研究開発」

委託：国立研究開発法人 産業技術総合研究所、株式会社IHI、国立大学法人 京都大学、国立大学法人 東海国立大学機構 名古屋大学（再委託）

●成果ｻﾏﾘ（実施期間　：２０２１年４月～２０２３年３月終了）

・触媒を用いたメタン熱分解による水素製造プロセスを開発するべく、「メタン熱分解に適した触媒の開発」および「触媒開発と連動した反応器の開発」を実施
・高性能触媒の開発、炭素析出速度の推定手法の提示、新規反応システム提案、技術成立性評価等の成果を取得

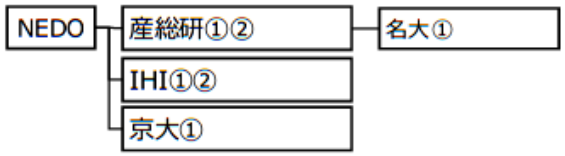
## ●背景/研究内容・目的

・水素社会の構築に向けて、多様な水素資源から安価かつ大量の水素を製造する技術の開発が求められている
・炭化水素等を活用した二酸化炭素（$CO_2$）を排出しない水素製造技術として、**「触媒を用いた熱化学的メタン分解による水素製造プロセス」**を開発
・2019～2020年度に実施した調査事業の成果を受け、2021～2022年度は、ボトルネックとなっている課題「触媒活性や生成する炭素の構造と、触媒構造や反応条件との関係の明確化・最適化」「触媒開発と連動した反応器設計・最適化」の解決に向け実施項目①②を推進

## ●研究目標

| 実施項目 | 目標 |
|---|---|
| ① | メタン熱分解に適した触媒の開発 |
| ② | 触媒開発と連動したメタン熱分解用反応器の開発 |

## ●実施体制及び分担等




## ●これまでの実施内容／研究成果

・2019～2020年度に実施した調査事業において、要素技術からシステム、シナリオに至る幅広い検討を実施、その成果を受け、ボトルネック課題の解決に向け実施項目①②を推進

実施項目①：触媒開発

・流動層反応器に適用可能で高い性能を有するメタン熱分解触媒を開発
・生成固体炭素の形状制御条件の提示に至る成果を得たが、高いメタン転換率と炭素形状制御の両立に向けては更なる触媒・反応条件の最適化が必要
・メタン熱分解反応速度式の定式化による炭素析出速度の推定手法を提示

実施項目②：反応器開発

・新規反応システム（移動層－流動層利用型循環システム）を提案、主要部分に係る試験設備を設計・導入、開発した触媒を用いたメタン熱分解反応試験を実施、反応システム構築に必要となる知見を取得、一方で、これまでにはない新しい反応システムの提案であり、その構築に必要となる更なるデータ取得等が必要
・技術成立性評価に向けて、システム概念図等を作成し、水素製造価格を算出

## ●今後の課題

・新しい反応システム構築に向けた更なるデータ取得、新システムに合わせた全体プロセス検 討・最適化
・ベンチ試験機等を用いたシステム実証

## ●実用化の見通し

・技術の社会実装に向けては、新規反応システム確立および導入シナリオ策定と合わせて、「メタン熱分解により得られる水素の標準化・規格化検討」や「得られる炭素の貯留に関するルール作り」が必要

## ●研究成果まとめ

| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| ① | 高性能な触媒の開発<br>炭素析出速度の推定手法提示 | △ |
| ② | 新規反応システム提案<br>技術成立性評価 | △ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 1 |

## （４－４－５）「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発／メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造」

委託：物質・材料研究機構／静岡大学／太陽鉱工株式会社

### ●成果サマリ（実施期間　：２０２１年４月～２０２３年３月終了

- DRM根留触媒Ni#$Y_2O_3$の大量製造（0.75 kg/ロット）と構造成型に成功（物質・材料研究機構／太陽鉱工／高知工科大学）
- ラボサイズDRM＋炭素捕集＋水素分離膜直列連結システムの構築と、一気通貫の炭素捕集と水素製造に成功（静岡大学／太陽鉱工）
- 大型DRM＋水素分離膜システムによる大容量（102ℓ/時）高純度水素製造に成功（荏原製作所／太陽鉱工）

### ●背景/研究内容・目的

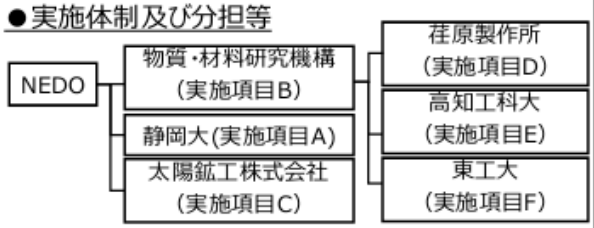
背景：$CO_2$大気放出を伴わない「クリーン水素」製造技術の開発と社会実装が急務。

目的：DRM＋炭素捕集＋水素膜分離からなる直列システムによるメタンからの水素製造の実証と要素性能最大化、並びに要素間マスバランスの確立。

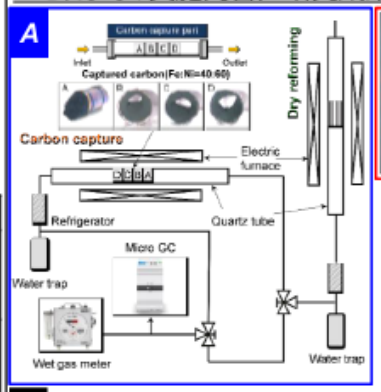
### ●目標

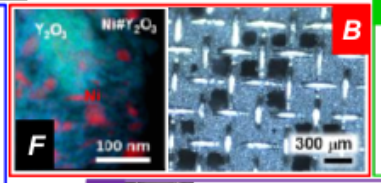
| 研究開発項目 | 目標 |
|---|---|
| A：DRM＋炭素捕集＋水素分離のパワーアップ | ・ガス流量：60ℓ/時<br>・炭素捕集率：20～30% |
| B：マスバランスと触媒活物質製造 | ・$H_2$/COフィードバック量上限値の決定<br>・100ℓ/時 <ガス流量処理可能な大容量DRM根留触媒の実体化 |
| C：水素分離膜デザイン最適化 | ・前段アウトガスのマスフローに応じたV合金水素分離膜の組成・サイズ・形状・膜厚およびスタック数の最適化 |
| D：昇圧型システムと水素製造試験 | 純度99.9999%水素100ℓ/時製造 |
| E：機能要素と固体炭素分析 | 先端電子顕微鏡によるナノ組織分析 |
| F：DRM光触媒 | 高圧下DRM光触媒の機能実証と材料開発 |

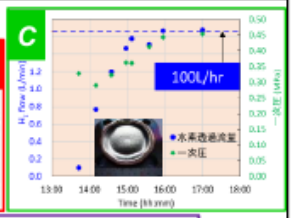
### ●実施体制及び分担等

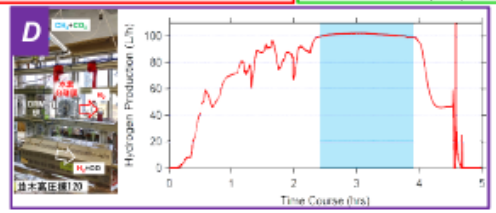


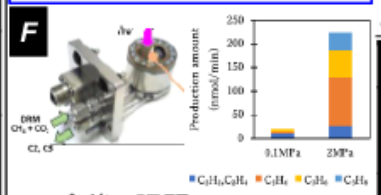

### ●これまでの実施内容／研究成果




### ●今後の課題

循環型システムの構築と$CO_2$無排出水素製造の実証

### ●実用化の見通し

・水素製造量100 $Nm^3$/時を実現する小型プラントの設計（荏原製作所）

・バイオガスなどさまざまな$CH_4$・$CO_2$混合ガスからの水素製造試験（荏原・NIMS）

### ●研究成果まとめ

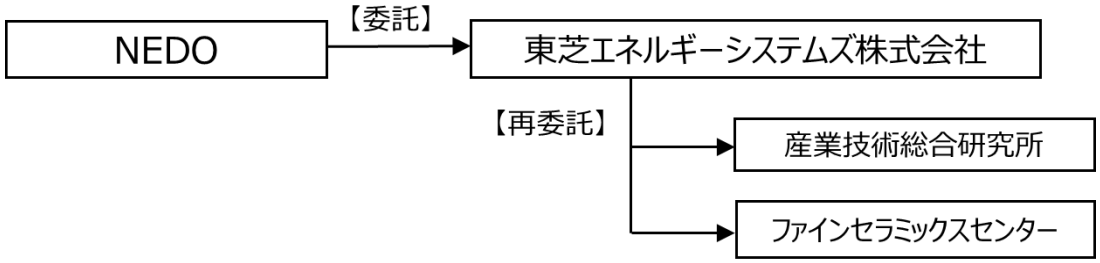
| 実施項目 | 成果内容 | 自己評価 |
|---|---|---|
| A | DRM・炭素捕集・水素分離直列システムによる水素抽出・炭素捕集実証（C・Eと共同） | ○ |
| B | DRM根留触媒の大量製造と構造体化（Eと共同） | ○ |
| C | $CH_4$・$CO_2$・CO・$H_2$混合気からの大容量水素抽出（Eと共同） | ◎ |
| D | DRM・$H_2$分離大型直列システムによる102ℓ/時水素製造（A・B・C・Eと共同） | ◎ |
| F | 光触媒DRM-FTタンデム反応による$C_n$分子生成の実証（Eと共同） | ○ |

| 特許出願 | 論文発表 | 外部発表 | 受賞等 |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 5 | 1 |

## ４．１　水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

### ４．１．１　研究開発テーマ：「高温水蒸気電解技術の研究開発」（東芝エネルギーシステムズ）

○実施者名、実施体制




○期間、予算

期間　　：2018 年 8 月~2023 年 3 月

予算　　：　　2018 年度：¥109,998,000

2019 年度：¥ 285,183,800

2020 年度：¥ 285,184,900

2021 年度：¥ 269,706,800

2022 年度：¥ 299,467,300

○実用化への道筋

SOEC を用いた水素製造システムの構築にはスケールアップ化技術が必要になる。本開発で得られた SOEC 高耐久化への材料および運転条件に関する知見を踏まえた SOEC セル・スタックの製造技術を確立し、システム設計を並行して検証・実証機の製造・運転試験を行うことでシステムアップ化技術を構築する。量産化技術およびシステム化技術を統合し、2020 年代中の SOEC システム実用化を目指す。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| ① SOEC セル・スタックの劣化機構解明 | SOEC セル・スタック部材・高温モジュール構造材の劣化機構を解明する | SOEC セルおよびスタック部材の劣化要因を抽出し、劣化機構を解明し高耐久化施策に繋がる世界初の知見を得た。高温モジュール構造材の劣化影響因子を抽出し、その影響度を明らかにした。 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ② SOEC セル・スタック部材の設計指針策定 | 高耐久 SOEC セル・スタック部材の長寿命化施策を抽出、SOEC セル・スタック・高温モジュール部材の設計指針を策定する | 水素極/電解質および、酸素極/電解質間の構造を制御することで、セル劣化率の低減に成功、耐久性 5 年に目途。また、セパレータからの Cr 被毒抑制可能な被膜構造を提案し、10 年以上の耐久性に目途が立った。また、高温モジュール構造材については汎用 SUS 材への Al 浸透処理により長寿命化可能であることを実証した。 | ○ | |
| ③ 新規 SOEC 電極の設計指針策定 | セル性能・耐久性に優れた新規 SOEC 酸素極材料の設計指針を策定する | ペロブスカイト構造酸素極材料と電解質材料の材料両立性に注目し、LaNi(Fe)-SDC コンポジット材料および Ti 添加もしくは La 添加セリアと複合した La(Sr)Co(Fe)酸化物が有望であることを明らかにした。 | ○ | |
| ④ SOEC スタック運転条件検討 | SOEC スタックの長寿命化が可能な運転条件の設計指針を策定する | 一定/変動入力およびガス組成、運転温度、運転電流／電圧がセル・スタックの劣化に及ぼす影響を評価。電流 OCV 待機時間や変動速度を制御することで、劣化速度の低減が可能になった。また、複数台連結スタックの劣化傾向を確認し、単スタックと同様の方法で劣化抑制可能であることを確認した。 | ○ | |
| ⑤ SOEC 評価技術／標準化調査 | SOEC 試験方法、評価技術、標準化に関する動向を調査し開発へ反映する | SOEC 性能評価試験方法案を作成。作成した試験方法が実施可能な評価試験機を製作した。開発したセルスタック性能評価技術は、新たな国際規格へ反映。 | ○ | |

○成果の意義

本事業では高温水蒸気電解法を適用した水素製造システム、および電力貯蔵システムの重要構成要素である固体酸化物電解セル・スタックおよび高温モジュール構造材の技術開発を行い、SOEC セル各部（水素極、酸素極、電解質）およびスタック部材（シール材、セパレータ材、集電材、Cr 飛散防止被膜）の劣化機構解明、高温モジュール構造材の劣化影響因子抽出・影響度評価、SOEC 運転条件がスタックの劣化に及ぼす影響度を明らかにした。また、上記劣化影響因子の明確化・機構の解明により、高耐久性 SOEC セル・スタック部材の設計指針を策定した。また、SOEC 評価技術を調査・開発し、標準化試験方法案を作成した。

これらの成果は、SOEC セル・スタックおよび高温モジュールの高耐久化に向けた改良指針となり、SOEC システム実用化のネックとなっている寿命特性の改善につなげることが可能である。今後、改良指針の検証と一層の最適化検討を行い、技術知見さらには知財権に裏打ちされた高耐久性 SOEC セル・スタックおよび高温モジュールの設計指針を策定することで、SOEC システムの実用化に向けた基盤技術を確立することができる。

高温水蒸気電解は、既に実用化されている低温型水電解システムに比べて、原理的に 30%程度の効率向上が期待できる技術で、実用レベルに完成させることができれば、種々水素ソリューションの社会実装拡大に大きく寄与するコア技術となり得る。本技術の開発は、欧州・米国等でも積極的に進められており、グリーン水素の市場拡大時期を睨みながら、競合していく状況にある。本事業で得られる耐久性向上技術は、本格的な実用化への最重要課題の一つであるコスト低減、すなわちセル・スタックの交換寿命や高温部の材料選定に直結するもので、実用化・事業化時に競合優位を確保するためのキーとなる。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

| | 特許出願 | 論文 | 学会発表・講演 |
|---|---|---|---|
| 2018 年度 | 2 件 | 3 件 | 11 件 |
| 2019 年度 | 4 件 | 2 件 | 14 件 |
| 2020 年度 | 4 件 | 3 件 | 7 件 |
| 2021 年度 | 12 件 | 3 件 | 13 件 |
| 2022 年度 | 12 件 | 4 件 | 13 件 |

○研究開発成果の詳細

(1) 実施項目 1 、 2 ：SOEC セルの劣化の機構解明／設計指針では、セルの劣化部位の解明を行い、水素極／電解質間で起こる元素拡散により、層間での構造変化がセル劣化に大きく寄与していることを明らかにした。そして、この層間の構造を改良することで、セルの性能向上および長寿命化が可能になった。さらに、セル機械的特性耐久検討を行うことを目的とし、機械的特性に影響を及ぼす因子を抽出した。欠陥低減、粒界強度改善、残留応力の寄与の 3 つの効果の複合効果について評価しセル高強度化に向けた設計指針を得た。また、セパレータ材料については、水素+水蒸気／空気雰囲気の二相環境下での酸化劣化挙動を把握し、劣化メカニズムを解明すると共に、表面への被膜形成により、腐食劣化を抑制可能であることを示し、セパレータ材料の設計指針を策定した。また、高温モジュール構造材料が曝露される環境に着目した劣化評価試験に基づき、材料劣化機構と劣化影響因子を解明し、材料の耐久性向上施策に向けた設計指針を

策定した。その結果、SOEC 高温モジュールで想定される水素+水蒸気／大気 2 相環境の大気側では、SUS316 鋼、304 鋼が水蒸気酸化類似の過酷な酸化劣化を生じた。この酸化による劣化は、単相水蒸気環境中で生じる酸化劣化と比較して、はるかに大きく、従来の材料設計指針における要求寿命を下回ると想定された。この材料劣化要因として、水素+水蒸気環境側の水素、あるいは水蒸気と金属の酸化反応で副生する水素の影響が示唆され、これまでの水蒸気酸化における解離機構説に基づき、水素+水蒸気環境側から大気環境側へ供給される水素の影響を考慮した新たな材料劣化機構モデルを提案した（図 1）。また、この 2 相環境大気側における水蒸気酸化類似の異常酸化に伴う材料劣化因子として、温度、時間、ならびに水素+水蒸気環境の水素濃度の 3 つが主たるものであることを明らかにした。また、SOEC 高温モジュールの水素+水蒸気／大気 2 相環境大気側で生じる過酷な水蒸気酸化類似の異常酸化に伴う材料劣化に対する材料の耐久性向上施策として、アルミニウム拡散浸透処理法の適用性を検討した。その結果、同処理で材料表面に生成する Fe-Al 合金層が本環境でも優れた耐久性能を有することを確認し、従来の材料設計指針における要求寿命を達成可能な見通しを得た。

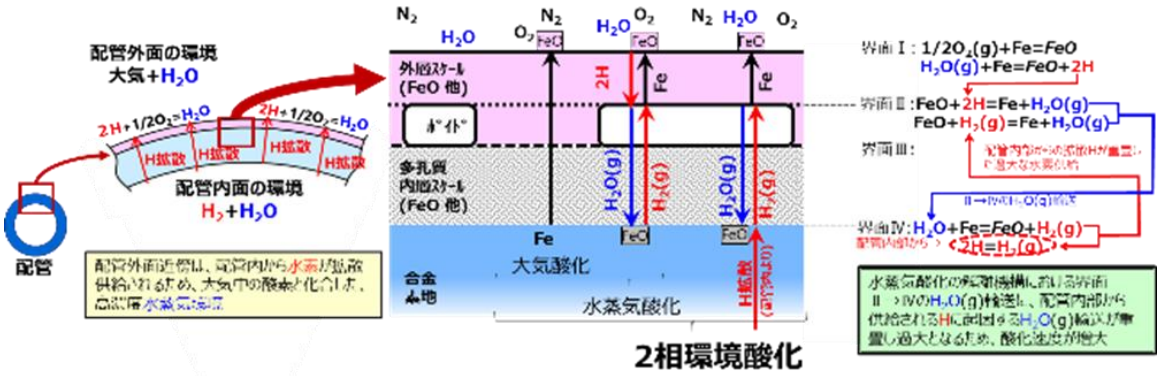



図 1. 水素+水蒸気/大気二相環境下での材料劣化機構モデル.

(2) 実施項目 3 ：新規 SOEC 用酸素極として、LaNi(Fe)系および La(Sr)Co(Fe)系ペロブスカイト酸化物材料に注目した。La(Ni)Fe 系酸化物材料は、ナノサイズの SDC と複合化することで、SOEC 酸素極活性を向上させることが可能になった。また、La(Sr)Co(Fe)系酸化物材料は、電解質材料と固相反応を起こさない材料組成を検討し、ペロブスカイト構造の B サイトの一部を 4 価の元素に置換することで、長寿命化可能な電極材料を形成することが可能となり、新規 SOEC 酸素極材料についての設計指針を得た。

(3) 実施項目 4 ：スタック運転条件検討においては、劣化に起因するパラメータを抽出し、各々のパラメータ（印加電流・印加電流波形・電解電圧・温度・ガス組成・水蒸気利用率）について、単スタックでの劣化影響度を評価した。その結果、SOEC スタックの劣化を抑制するための基本方針として (1) 電流密度、水蒸気利用率を高くする、(2)待機運転を避けるもしくは短くすることが挙げられた。これらの結果を踏まえ、図 2 に示す複数台スタック連結試験装置を用い 4 基のスタックを連結した評価を実施し、単スタック評価で得られた劣化抑制の基本方針を検証した。これらの実験データを踏まえ、再生可能エネルギーを想定した変動入力運転時の運用方法についての指針を策定した。

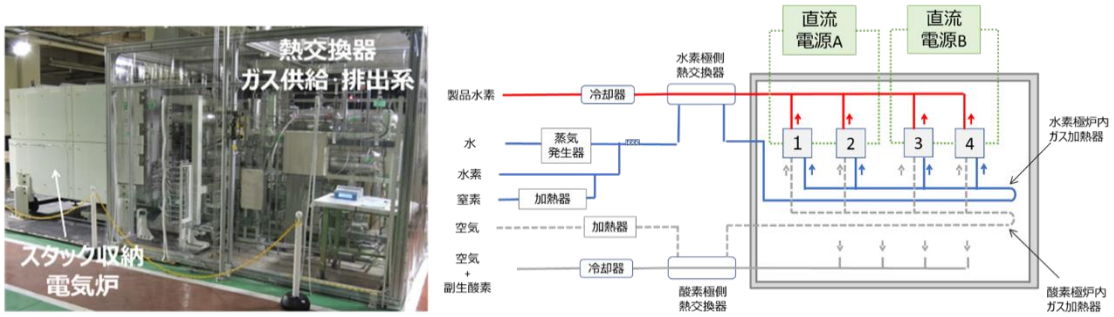



図 2. 複数台スタック連結試験装置の外観および概要.

(4) 実施項目 5 ：SOEC 評価技術／標準化調査では、米国、欧州を中心に、水素製造用の SOEC、SOFC/SOEC 可逆作動固体酸化物セル（RSOC）に関するプロジェクトで実施されている試験方法、標準化に向けた取組みを調査した。また、IEC、ISO、IEA で現在、作成済みあるいは作成中の関連技術の規格についてその内容を調査し、それらを適用する場合の問題点を抽出し、新たな SOEC 試験法案を策定した。また策定した試験法案を実施可能な試験システムを構築し、実スタックを用いた評価を行った。本開発で策定した試験法案の一部は、新たな国際規格に反映した。

**４．１．２　非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発（理化学研究所）**

○実施者名、実施体制

図１に示す。

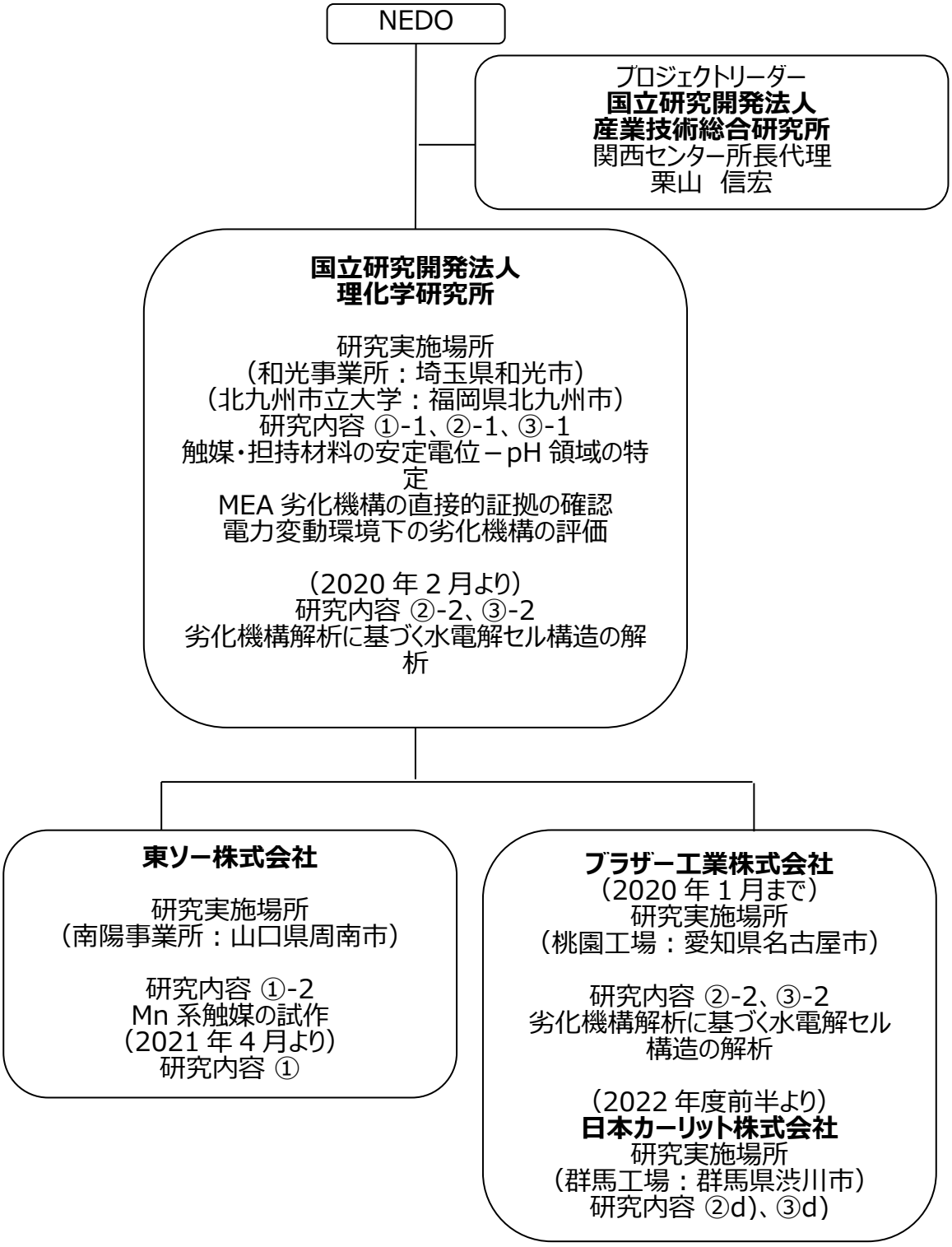



図１　実施者名、実施体制。

○期間、予算

期間　　：2018年6月~2023年3月

予算　　：直接経費 273,522,000 円、NEDO 負担額 330,355,500 円

○実用化への道筋

実用化への道筋は表 1 に示す。

表 1　実用化への道筋。

| **年度** | **事業** | **課題** |
|---|---|---|
| 2018~2022 | 先導研究（本事業） | 非貴金属系触媒の開発・特性把握 |
| 2023~2024 | 燃料電池（次期想定） | 触媒の運転方法・製造方法の確立と電解槽の設計 |
| ~2027 | --- | 触媒の工業製法確立、電解槽製造・運転 |
| ~2030 | （実証試験） | 長期運転・再生可能エネルギーとの接続 |
| 2030 頃 | 事業化 | |

○最終目標に対する成果と達成状況

最終目標に対する成果と達成状況は表 2 に示す。

表 2　最終目標に対する成果と達成状況。

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①―1 Mn 単体系触媒安定領域を 50 mV 拡大する作製条件の確立**<br>**①―2 含侵法による Mn-Ir 系触媒の 80˚C, 1 A/cm$^2$ の条件下で劣化率：10 mV/h 以下** | a) 2021 年度に得られた結果を基に、Mn 単体系触媒の Pourbaix Diagram から考えられる安定領域より 50 mV 程度広い電位領域で用いることが可能な触媒の再現性まで含めた安定的な作製条件の確立を行う（東ソー担当） | a) MnOx 作製時の焼成温度を上げることで 1×1 と 1×2 構造の比（Pr 比）が 40%から 97%にまで増加、この Pr 比の増加に伴い、γ-$MnO_2$ が持つ安定電位領域が 50 mV 程度拡張し、$Mn^{7+}$の溶解が抑制されることを確認した。 | ○ | a) 今後の課題として、非貴金属触媒のみでのさらなる高電圧駆動の可能性の探索が挙げられるが、この検討にはしばらく時間がかかると考えられる。 |
| | b) 非貴金属系触媒について、さらなる電圧領域の拡張に必要な要因の指針を獲得する（理研担当） | b) MnOx の 1×1 と 1×2 構造の比（Pr 比）の増加に伴い、γ-$MnO_2$ が持つ安定電位領域が拡張することを確認した。 | ○ | b) 今後の課題は a と同様。 |
| | c) 安定領域を拡張した Mn 単体系触媒に | | ○ | c) 今後の課題は MnIrOx の性能を |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 対して含侵法によりIr担持を行い、Ir担持量0.1 mg/cm2以下において触媒評価用水電解セル温度80ºC、印加電圧2.0 Vの条件の下で、1.0 A/cm2以上の電流密度で安定的（劣化率：10μV/h以下）に動作させる （理研担当 | c) Ir含有量が0.08 mg/cm$^2$の触媒を担持したMEAを用いて、2.0 V・80℃の条件において4.2 A/cm$^2$の電流を得ることに成功した。1.8 A/cm$^2$環境下でMnIrOx (0.08 mg/cm$^2$)触媒は、82%(HHV)の高効率を維持し続けながら3000時間の運転に成功し、劣化は観測されなかった(~2000時間の劣化率：-7.4 μV/h)。さらに、2.0 A/cm$^2$環境下では、80%の電圧効率3000時間の連続運転が可能であることを確認した。 | | 担保する触媒構造の確認と、動作時におけるこの構造の維持など、材料特性を明らかにすること。 |
| **②―1 Mn-Ir系MEA劣化機構の確認のため、水電解シングルセルを用いて供給水温80ºC、印加電圧1.8 Vの条件の下でIr系触媒の劣化率の2倍以内を達成**<br>**②―2 Mn-Ir系触媒を用いた1 kW級水電解セルの定常条件下での作** | a) ２０２１年度の活動を踏まえ、システム内に組み込むことが可能な安価に作製可能となる構造を持つシングルスタック水電解セルの構造を決定し、この水電解セル構造における貴金属触媒を用いた場合の基準となる電流密度、及び劣化率を取得する | a) システム内に組み込むことが可能な構造を持つシングルセルの水電解セルの構造を決定した。このセルによる貴金属触媒を用いた際の基準となる電流密度は2.0 V・25 ºCで1.4 A/cm$^2$、2.0 V・80 ºCで2.2 A/cm$^2$であった。基準となる劣化率は1.8 V・80 ºCの連続運転前後の電流密度―電圧特性の測定による1.8 V・80 ºCの電流密度で比較して127%（初期値より増加）となった。 | ○ | a) 今後の課題として特に大きなことはないが、本検討を通じてセル構造やセル部材が特性に大きな影響を及ぼすことが明確になったため、今後ともセル構造改良の継続が必要である。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **製条件指針の作製** | b) a の基準値に基づき、同じ水電解セル構造における Mn 酸化物触媒または Mn-Ir 系触媒を用いた場合の電流密度、及び劣化率を評価する | b) a の基準と同じ構造を持つ MnIrOx 触媒を用いた場合の電流密度、及び劣化率を評価した。 | ○ | b) 今後の課題は a と同様。 |
| | c) これらの活動を通じて、安価に作製可能となるシステム組み込み可能な構造を持つシングルスタック水電解セルを用い供給水温 80ºC、印加電圧 1.8 V の条件の下で、基準とする貴金属触媒を用いた場合と比較して、動作初期において電流密度の 50%以上（最低でも約 0.5 A/cm2 以上）、供給水温 80ºC、印加電圧 1.8 V の条件における水循環環境下において 28 日間定常動作動作後の劣化率として 200%以内を達成する | c) MnIrOx 触媒を用いた際の電流密度は 2.0 V･25 ºC で 0.6 A/cm$^2$、2.0 V･80 ºC で 2.0 A/cm$^2$ であった。基準となる劣化率は 1.8 V･80 ºC の連続運転前後の電流密度―電圧特性の測定による 1.8 V･80 ºC の電流密度で比較して 127%（初期値より増加）となった。 | ○ | c) 今後の課題として、長時間動作後の電流密度―電圧特性が向上しているため、最初の活性化条件の変更により、このより良い特性が得られる条件を探索する必要がある。 |
| | d) 実運転環境として想定される定常条件下における動作について、セル構成材料等の劣化箇所の確認および劣化原因の調査を理化学研究所で進めることにより、非金属系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの実用化可能な電解セル構造、セル構 | d) 実運転環境を想定した定常条件下のセル構成材料等の劣化等の確認を行った。アノード周辺の構成部材は Pt コーティングが重要であり、安価に薄膜を形成可能な Ti 上の焼成法による Pt コーティングが有効であることを見出した。さらに、この部材を | ○ | d) 今後の課題としては、さらに実用化に向けたセル構造材料等の改良である。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 成材料および運転条件の指針を、日本カーリット株式会社において見出だす。 | 用いることで、直列抵抗の低下も期待可能である。さらに、本検討で主に用いている 5 $cm^2$ より面積が 3.2 倍ほど大きい 16 $cm^2$ のセルを作製し評価したところ、5 $cm^2$ とそん色ない結果が得られており、将来の大型化についても可能であることがわかった。 | | |
| **③―1 太陽電池の電力変動環境下の Mn-Ir 系触媒を用いた水電解セルの運転条件評価**<br>**③―2 Mn-Ir 系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの変動条件下での作製条件指針の作製** | a) システム接続して評価を行うマルチスタック水電解セルを製作し、この水電解セルに Mn 酸化物触媒または Mn-Ir 系触媒を組み込みシステム動作を行い、貴金属触媒を用いた場合と比較を行うことで、非貴金属系触媒を用いる際に必要なパラメータの変更点等を評価する | a) 水電解セルを利用するエネルギーマネージメントシステムに接続可能な 4 スタックの水電解セルを作製し、この水電解セルに MnIrOx 触媒を組み込んで動作確認を行った。スタックを行った関係で、直列抵抗の増加は見られたが、貴金属触媒を用いた場合と比較して、シングルセルで確認された違い以外の大きな違いは確認できなかった。 | ○ | a) 今後の課題としては、MnIrOx 触媒を用いる場合の材料特性上必要な、IrOx 触媒を用いた場合と異なる操作範囲の明確化である。 |
| | b) a の結果を基に、本システム動作に必要な水電解セルの特性を把握し、水電解セルの構造改良に反映する | b) 変動電源動作の基本動作確認を行った。結果、MnIrOx 触媒を用いた場合、動作温度による電流密度－電圧特性の変化が大きいため、システム側の制御範囲を逸脱する可能性があることがわかったが、材料特性のため水電解セルの構造改良については触媒構造周りの最 | ○ | b) 今後の課題は、MnIrOx 触媒を用いた場合の触媒周りの構造の最適化にある。（ＩｒＯｘ触媒を用いた場合であってもセル構造により最適条件は異なるため個別対応となる可能性がある。） |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 適化以外は特に必要がない結果となった。 | | |
| | c) これらの活動を通して、D. Yamashita et al., Int. J. Hydrogen Energy 44 (2019) 27542 にある制御方法を用い、貴金属触媒を用いた水電解セルと比較して制御パラーメーターを変更するだけで貴金属触媒を用いた水電解セルと同等のシステム動作が可能なマルチスタック水電解セルの確立する | c) MnIrOx 触媒を組み込んだ 4 スタックセルをシステムに組み込み、制御可能なことを確認した。但し、水電解セルの電流密度―電圧特性が大きいため、水電解セルの動作温度を 50 ºC 以上に高くして動作をさせる必要があった。これはシステム側の対応可能な範囲の問題であり、普遍的ではない。 | ○ | c) 今後の課題はシステム組み込みに対し問題の有無を確認するために高電圧／低電圧サイクル試験を行った際に、ＩｒＯｘ触媒を用いた場合と、ＭｎＩｒＯｘ触媒を用いた場合でサイクル特性が異なっていた点である。この範囲や条件等は現状まだ十分解明できておらず、今後の検討が必要である。 |
| | d) システムに組み込んだ際に想定される変動条件下における動作について、セル構成材料等の劣化箇所確認および劣化原因調査を理化学研究所で進めることにより、非金属系触媒を用いた 1 kW 級水電解セルの実用化可能な電解セル構造、セル構成材料および運転条件の指針を日本カーリット株式会社において見出す。 | d) スタック化大型化の基礎として、第一段階として 4 スタック 16 $cm^2$ のセルを試作して、小型のセルにそん色ない結果を得ることが出来、1 kW 級水電解セルの実用化可能な電解セル構造、セル構成材料および運転条件の指針を得ることが出来た。 | ○ | d) 今後の課題としては、さらに実用化に向けたセル構造材料等の改良である。 |

○成果の意義

Mn 単体系触媒は学術的な意義は大きいが、実用化に向けてはまだ改善の余地があり、今後の非貴金属系の合金化を含めた検討によりさらなる高電圧耐性及び高電流密度対応が期待される。
MnIrOx (Ir 含有量 0.08 mg/cm$^2$：通常の Ir 含有量の 10%以下)は、2.0 V・80℃の条件において 4.2 A/cm$^2$ の電流密度、1.8 A/cm$^2$ 環境下で 3000 時間の運転に成功し、劣化は観測されなかった。これらはマルチスタック化が可能な構造を持つシングル水電解セルを用いた場合においても同様な結果が得られている。固体高分子型水電解セルの Ir 含有量削減はその資源量の問題から世界的な競争となっているが、本検討で得られたような Ir 添加量を 1/10 以下に削減したうえで、2.0 V・80℃における電流密度、定常条件下における特性変化の両方において IrOx 貴金属触媒を用いた場合と対比可能な結果は希少である。また得られた結果は実用的に利用可能なレベルであることから、本検討結果は学術的に見ても実用上の観点からも世界的に重要な結果である。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数については表 3 に示す。

表 3　特許出願、論文発表、学会発表・講演・成果の普及の年度別件数。

| 年度 | 特許出願 | 論文発表 | 学会発表 | 講演等 | 成果の普及 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2018 | | | | | |
| 2019 | 4 | | 8 | | |
| 2020 | | | 2 | | |
| 2021 | 1 | | 2 | | |
| 2022 | 3 | 1 | 1 | | 1 |

○研究開発成果の詳細

(1) 実施項目 1 ：触媒等の安定電位-pH 領域の特定

非貴金属系触媒として、Mn 単体系である MnOx を用いた場合、ガンマ型 $MnO_2$ （γ-$MnO_2$）が有する(1×1) 構造の比を高めることで、$MnO_2$ の安定電位領域が拡張することを発見した。この Mn 単体系触媒を用いて、2.0 V・80℃において 1.3 A/cm$^2$ を達成した。PEM 型水電解では 200 mA/cm$^2$ の定電流環境において、1000 時間の連続運転を達成した。さらに、焼成温度を上げることで 1×1 と 1×2 構造の比（Pr 比）が 40%から 97%にまで増加、この Pr 比の増加に伴い、γ-$MnO_2$ が持つ安定電位領域が 50 mV 程度拡張し、$Mn^{7+}$の溶解が抑制されることを確認した。

Mn 単体系触媒においてこのような安定領域の拡大、電流密度―電圧特性、低電流下における連続運転の報告はなく、学術的には優れた成果といえる。一方、実用の観点から見ると、触媒が安定に存在可能な電圧上限が短時間であっても 2.0 V 程度とまだ十分ではなく、また、安定に常用可能な電流密度として現状得られている数百 mA から比べてもう一桁高い電流密度が要望されており、十分とは言えない。現在のところ非貴金属系のみでの触媒としては Mn 単体系が最も良い成果を示しているが、実用化を考えた場合、今後の非貴金属系の合金化を含めた検討によりさらなる高電圧耐性及び高電流密度対応が期待される。

非貴金属系触媒として、MnIrOx を用いた場合、Ir 含有量が 0.08 mg/cm$^2$ の触媒を担持した MEA を用いて、2.0 V・80℃の条件において 4.2 A/cm$^2$ の電流密度を得ることに成功した。1.8 A/cm$^2$ 環境下で

$MnIrO_x$ (0.08 mg/cm$^2$)触媒は、82%(HHV)の高効率を維持し続けながら 3000 時間の運転に成功し、劣化は観測されなかった(~2000 時間の劣化率：-7.4 μV/h)。さらに、2.0 A/cm$^2$ 環境下では、80%の電圧効率 3000 時間の連続運転が可能であることを確認した。
Ir は、地球上でもっとも希少な貴金属の一つであり、価格もさることながら、その地球上での物質存在量の少なさから世界中で水電解セルを利用するようになった際には量的に不足するといわれている。そのため、再生可能エネルギー利用に必要であるといわれる固体高分子型水電解セルの Ir 使用量削減は喫緊の課題である。このため、世界中の研究機関が Ir 使用量の削減に向けた検討を行っているが、まだ十分良い成果が出ているとは言えない。本検討では MnIrOx (Ir 含有量 0.08 mg/cm$^2$)という通常の Ir 含有量の 10%以下にて、2.0 V・80℃の条件において 4.2 A/cm$^2$ の電流密度、1.8 A/cm$^2$ 環境下で 3000 時間の運転に成功し、劣化は観測されなかった点については、学術的に見ても実用上の観点からも世界的に重要な結果である。一方、まだこのような高い効率や長時間の安定性が得られる原因は十分明らかにはなっていない。さらに、本触媒を作製する手法が十分工業化を行いやすいプロセスではない点やまだ多数の機関で評価されたものでない点など、実用化に向けての課題はあるものの、Ir 含有量を削減することが可能な画期的な手法の一つである

(2) 実施項目 2 ：MEA 劣化機構の直接的証拠の確認
貴金属触媒を使った場合、非貴金属触媒を使った場合とも、動作時の構成金属部材の溶解と金属種の固体高分子膜中への滞留が水電解セルの電流密度－電圧特性の低下要因の一つと類推された。このため、アノード側へ供給する水をフィルターにより純化することで電圧一定における長時間動作の電流低下が起こりづらいことを見出した。そこで、水純化を行う形での評価を行った。
マルチスタック化が可能な構造を持つシングル水電解セルを用いた MnIrOx （Ir = 0.08 mg/cm$^2$）酸素生成触媒を使った MEA の電流密度－電圧特性は、従来から用いられている貴金属酸素生成触媒 IrOx （Ir =1.0 mg/cm$^2$）の特性に対し、水温 80˚C において 2.0 V 同一電圧に対する電流密度が 90%以上であった。また、定常運転による劣化評価においては、マルチスタック化が可能な構造を持つシングル水電解セルを用いた 1.8 V 印可時の電流密度は、IrOx 貴金属触媒に比較して MnIrOx 非貴金属系触媒は 73%のものを利用した。28 日間の 1.8 V を印可した状態による長期間測定では、1.8 V 印可時の電流密度の値で比較すると、MnIrOx 非貴金属系触媒の場合で開始時に比較して 127%、IrOx 貴金属触媒の場合も 127%となった。すなわち、いずれの場合も初期値より特性向上がみられる結果となった。
実験的なセルだけでなく、実用化に向けたマルチスタック化が可能な構造を持つシングルセルを用いた場合においても、MnIrOx 非貴金属系触媒を用いた場合に実験的評価を行った場合と同様な結果を得られたことは実用化に向けた可能性を示すものと考えられる。また、本実験で用いたセルと同じセルを用いた IrOx 貴金属触媒の場合と比較して、2.0 V・80℃の条件において電流密度が 90%以上であるという点も実用に向けたポテンシャルを示すものと考えられる。一方、定電圧長期間評価を行った際に電流の上昇がみられることから、まだ初期活性化条件が十分でない可能性も考えられるため、初期活性化条件についての検討・評価が必要である。

(3) 実施項目 3 ：電力変動環境下の劣化機構の評価
変動電源下の特性評価として、高電圧（1.8 V）と低電圧（0.05 V もしくは 1.5 V）の 30 sec ごとの電圧ステップ変化を約 5000 回繰り返すことにより行った。IrOx 貴金属触媒を用いた場合では、低電圧側が低い方が、その高電圧側で測定した電流密度の低下率が大きい。一方、MnIrOx 非貴金属系触媒を用いた場合は低電圧側が高い方が、その高電圧側で測定した電流密度の低下率が大きいことがわかった。さらにこの MnIrOx

非貴金属触媒を用いた４スタック水電解セルを作製、これを小型のエネルギーマネージメントシステムへ組み込んで動作を行うことが可能であることを示した。
高電圧と低電圧の電圧ステップ繰返し評価において、IrOx 貴金属触媒と MnIrOx 非貴金属系触媒の特性が異なる結果が得られた点は、これらの材料特性、すなわち、運転条件が異なる可能性を示しているため、今後詳細な評価を行う必要がある。また、装置内に組み込んで問題なく動作可能であることを示せた点は、MnIrOx 非貴金属系触媒の実利用の可能性を示せたものといえる。

## ４．１．３　アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発（産業技術総合研究所、早稲田大学、北海道大学）

○実施者名、実施体制
国立研究開発法人産業技術総合研究所
学校法人早稲田大学
国立大学法人北海道大学大学院工学研究院
○期間、予算
期間　　：2018 年 7 月~2023 年 3 月
予算　　：
2018 年度：39,998,800 円
2019 年度：61,106,800 円
2020 年度：30,550,600 円
2021 年度：55,166,600 円
2022 年度：35,800,100 円

○実用化への道筋
本事業で得られた成果・知見をベースとして、実用化を見据えた技術開発を引き続き行うことを考えている。具体的には本事業の参画者（産総研、早大、北大）に加えて、AEM 水電解開発に取り組む姿勢を有する企業と共同で NEDO 事業を実施することを考えている。この次期事業においておいては、AEM、バイポーラープレート（BPP），多孔移動層（PTL）、シール・ガスケット等のセル構成部材に係る事業化の指針策定までを視野に入れる。その後システムメーカーとの共同し、大型システム開発に関する実証事業を推進したのちに、AEM 大大型水電解システムの事業化を 2030 年度までに目指す。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **1-1　電解機構の解明および電解性能の改善【産総研】** | 電解電圧 1.80V 以下@ 1A/cm$^2$ | JARI セルにおいて 1 A/cm$^2$ における電解電圧 1.80V 以下を達成した。 | ○ | |
| **1-2　水素発生カソード触媒層開発【早大】** | YNU 電解セル利用における電解セル試験において、-0.5 A/cm2 で Pt/C 電極と同程度もしくは 0.9 倍程度の電圧値を達成 | AEM 表面にバインダーフリーで直接非貴金属合金カソード触媒層を形成可能な新規無電解析出法を開発し、合金組成制御を経て Pt/C を超える性能を有する NiFeP 触媒電極の開発を達成（触媒性能は YNU 電 | ◎ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 解セル利用における-0.5 A/cm$^2$ 電解セル試験における電圧値で評価）。 | | |
| **1-3 酸素発生アノード触媒層開発【早大】** | YNU 電解セル利用における電解セル試験において、+0.5 A/cm2 で現行電極と同程度もしくは 0.9 倍程度の電圧値を達成 | 電解析出法における印加電流波形を最適化し、現行電極（$CuCoO_x$）を超える性能を有する NiFe 触媒層電極を、PTL である Ni フォーム部材表面にバインダーフリーで緻密に直接形成することに成功（触媒性能は YNU 電解セル利用における+0.5 A/cm$^2$ 電解セル試験における電圧値で評価）。 | ◎ | |
| **1-4 アノード触媒層気泡離脱挙動解析 【北大】** | 高電流実験および長時間電解で生じた触媒表面の変化を原子間力顕微鏡で観察し、表面粗さの定量的評価を行い、気泡発生挙動との関係を明らかにする | 高速原子間力顕微鏡を用いて、ナノ気泡観察を行った。その結果、電極の表面状態（濡れ性、粗さ）によって、気泡成長による被覆率変化（ナノスケール）を定量的評価することができた。 | ○ | |
| **2-1 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価【産総研】** | JARI セル 1000 時間以上の一定負荷運転（1.0A/cm2）に対して、電解電圧上昇率 25μV/h 以下<br>YNU セル 2000 サイクルにおける定電流モード時定常電位の上昇 0.2V 以下 | JARI セル 1000 時間以上の一定負荷運転（1.0A/cm2）において、電解電圧上昇率 25 μV/h 以下を確認した。<br>YNU セル 2000 サイクルにおける定電流モード時定常電位の上昇 0.2V 以下を実現した。 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **2-2 構成部材の耐食性評価および防食技術開発【北大】** | ステンレス鋼の耐食性が見込まれない場合には表面被覆を行い耐食性評価（腐食速度 0.03mm/year 以下を実現する材料特定）<br>電位変動下での材料表面の変化について調べ、表面の保護性皮膜が電位変動によって剥離する場合には、剥離が起こる電析変動の条件を明らかにし、剥離が起こらない操業条件を提案する | ステンレス鋼の耐食性について、各種ニッケル濃度の異なる鋼を用いることで、腐食速度 0.03mm/year 以下を達成し、さらに加速試験についても検討した。<br>また、ステンレス鋼の耐食性にニッケルが大きく寄与することを明らかにした。<br>また、液の流動下では、静置状態よりも腐食速度が加速しながら腐食生成物はほぼ同じものが形成されることがわかった。 | ○ | 電位変動下での材料表面の変化については、腐食防食の加速試験を優先する方針に変更されたため、実施していない。 |
| **3-1 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価【産総研】** | 目標コスト達成に資する水素製造システム仕様の指針策定 | 補機類簡素化を考慮し、カソードドライ運転をベースとした水電解システムの構築が必要であることを特定した。 | ○ | |

○成果の意義

本事業においては水電解セルの中心部材である電解質膜－電極接合体（MEA）を構成する電極、PTL などを中心に高性能化・高耐久化に向けた研究開発を実施し、多くの成果を得た。

電極触媒や電極構造の最適化によりプロトン交換膜（PEM）水電解と同等の性能が得られることが確認できたことは、低コスト，高性能水電解装置として AEM 水電解開発を進めるうえで重要なメルクマールであると言える。さらに無電解めっきカソード、電析アノードは、AEM 水電解の高性能化、高耐久化を目指すうえで有望な電極であり、その製造に関する基盤技術を確立したことは、非常に重要な成果である。また、気泡核発生の様子をとらえることにより、電極の表面状態（濡れ性、粗さ）によって気泡成長による被覆率変化を定量的評価することができたことは、今後の電極設計において重要な指針となるものである。

セルの耐久性評価においては、1,000 時間程度の連続運転では AEM 水電解性能にほぼ劣化が見られないことを実証し、水電解環境下において現行セル部材が概ね安定であるということが確認できた。またアルカリ環境下におけるステンレス材の耐食性評価を精密に行い、ステンレス材料がセル構成部材として使用可能であるという結果が得られたことは、低コスト化に向けた重要な知見と言える.

水電解装置製造に係るコスト試算を行い、製造台数増加とともに補機類のコスト割合が増加し、システムコストの過半を占めることが予測される。これにより補機構成までを考慮したシステム設計の重要性が改めて確認できた。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数
特許出願
2020 年度：1 件
2022 年度：2 件

論文発表
2019 年度：1 件
2020 年度：2 件
2021 年度：3 件
2022 年度：2 件

学会発表・講演等
2018 年度：1 件
2019 年度：10 件
2020 年度：7 件
2021 年度：7 件
2022 年度：3 件

○研究開発成果の詳細
(1) 実施項目１：（1-1）電解機構の解明および電解性能の改善【産総研】
本項目においては、アニオン交換膜（AEM）水電解装置における電解質膜－電極接合体（MEA）を中心にセル構成部材の材料、構造、作製方法について種々の検討を行うことで、電解性能の改善を図りつつ、電解機構の解明を目指した。
最初にアノード電極構造の最適化に取り組み、アノード PTL への触媒塗工に際して、表面触媒被覆率を高めることが活性化過電圧低減に、触媒層の緻密度を上げることが濃度過電圧低減にそれぞれ効果を発揮することを定量的に確かめた。さらに濃度過電圧については、膜中水分移動と強い相関関係があることが分かった。さらにカソードについても検討を進め、その構造と触媒材料の最適化により、当初の目標としていた電流密度 1A/cm2 以上における電解電圧 1.8Ｖ以下という性能を実現した。

(2) 実施項目２：（1-2）水素発生カソード触媒層開発 【早大】
高性能水素発生カソード触媒層を AEM 表面に対しバインダーフリーで直接形成する手法を新規に開発することを目的に、電気化学反応プロセスの一つである無電解析出法に着目し、AEM 表面を対象にした新規な無電解析出プロセスの開発と、その最適化による触媒層性能制御に取り組んだ。
無電解析出法は大きく分けて、基板表面における還元剤の反応を促進させるための触媒核を表面に付与する前処理工程と、その触媒核によって促進された還元剤の酸化反応を利用して電解液中金属イオンを還元することで基板上に金属または合金層を形成する還元析出工程から成る。前処理工程に関しては、還元剤用触媒核

を AEM 膜表面に安定に付与するため、触媒核の前駆体となるイオンと AEM 表面の分子構造との相互作用に着目し、理論計算解析も駆使しながら最適な触媒核前駆体イオンの構造を決定した。還元析出工程に関しては、非貴金属の水素発生カソード触媒層を形成することを目指し、種々の Ni ベース合金に着目しその組成を最適化した。
前処理工程開発の結果、AEM 表面への金属・合金層を形成可能な無電解析出法を新規に確立することに成功した。還元析出工程の最適化の結果、YNU セルを利用した-0.5 A/cm$^2$ の定電流電解試験ベースで現行電極（Pt/C）を上回る性能を示す NiFeP 合金触媒層の開発に成功した。本項目の最終目標は、前述の試験ベースで Pt/C と同様の性能を有する触媒層を開発することであり、当初の目標を上回る成果を得ることができた。この成果は、耐久性の観点でバインダーが抱える問題の克服やプロセスの低コスト化、ひいては AEM 水電解デバイスの実用化に大きく貢献するものと期待される。

(3) 実施項目 3 ：（1-3）酸素発生アノード触媒層開発 【早大】
多孔質性基板（PTL）としてのフォーム状 Ni に対し新規高性能酸素発生アノード触媒層をバインダーフリーで形成する新規プロセスを開発すると共に、その最適化により触媒層の高性能化に取り組んだ。
PTL における多孔構造は、発生した酸素をデバイスの外へ円滑に排出しその運用効率を維持するために重要な要素であるため、PTL 上の触媒層形成に際してはその孔構造を埋めないための対策が必須である。また実施項目 2 で述べたように、バインダーフリーの触媒層形成には電気化学反応プロセスが有用でありさらに本項目の場合は、触媒層を形成する基板としての Ni フォームが導電体であるため電解析出法の適用が可能であるが、高比表面積の触媒層形成に向けた長時間にわたる電析過程を通して触媒層がフォームの多孔構造を埋めてしまうことが予備検討で示唆された。これに対し、還元反応のための電流/電位を印加する時間（on-time）とその休止時間（off-time）を交互に短い周期で繰り返す、所謂パルス電解析出の適用が有効であると示唆されたためその最適化に取り組んだ。特に on-time と off-time の比率、周期の長さ、そして on-time における電流値等を主なパラメータにして最適化した。
プロセス開発の結果、YNU セルを利用した+0.5 A/cm$^2$ の定電流電解試験ベースで現行電極（$CuCoO_x$）を上回る性能を示す、NiFe 合金触媒層を形成可能な最適パルス電解条件を特定し、プロセスを確立させた。これは項目 2と同様、当初の目標を上回る成果であり、触媒の耐久性向上やプロセスの低コスト化に貢献する。

(4) 実施項目 4 ：（1-4）アノード触媒層気泡離脱挙動解析 【北大】
水電解で発生する気泡は、電極や触媒に付着することで、反応面積の低下や触媒活性の失活を招く恐れがある。また気泡が拡散層中の水供給を阻害することで、物質移動抵抗が増加してしまう。AEM 水電解における反応部分は、固体電解質層・触媒層・ガス拡散層の 3 層からなる MEA 構造を有する。そこでは、ナノサイズで制御された触媒や空孔を有するガス拡散層が使用されている。そのため、触媒層中でのガス離脱挙動を把握するためには、電解で発生した同じスケールでの気泡挙動を解析することが重要である。そこで本実施テーマでは、固気液（電極/酸素ガス/電解液）三相界面での気泡成長から離脱過程を、高速原子間力顕微鏡（高速 AFM）を用いてナノレベルでリアルタイムに観察し、気泡挙動と電極表面状態との関係を調べた。
　高速原子間力顕微鏡を用いて、ナノ気泡観察を行った。その結果、電極の表面状態（濡れ性、粗さ）によって、気泡成長による被覆率変化（ナノスケール）を定量的評価することができた。その結果、発生するガス種によってナノバブルの形状や成長過程が異なることを発見した。これは、三相界面での表面張力に影響を与える表面エネルギーの変化によるものと考える。これらの知見は、気泡制御による高効率な水電解開発に貢献するものである。

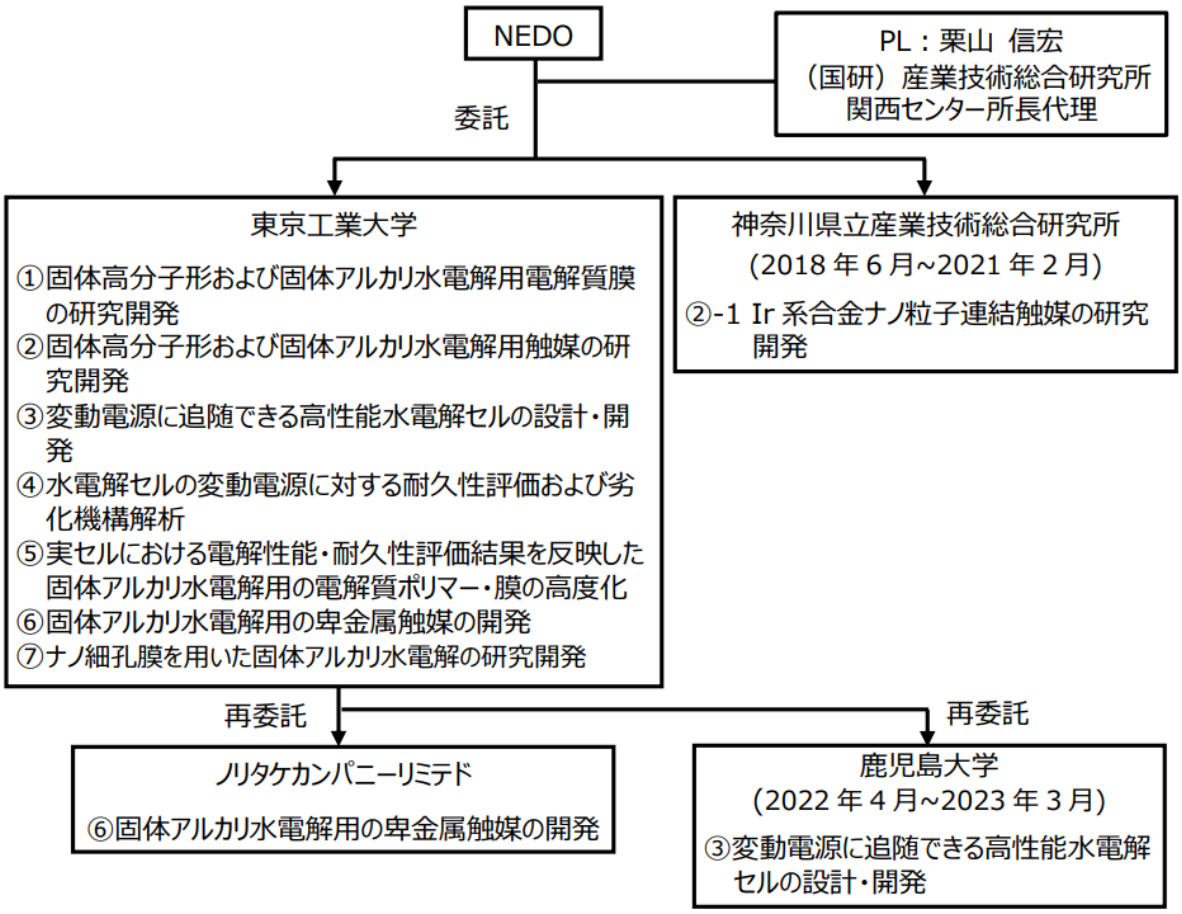
(5) 実施項目 5：（2-1）電解セル耐久性および変動負荷対応性評価 【産総研】
本項目では AEM 水電解装置の耐久性を検証することを目的に、水電解セルを用いた連続運転試験に取り組んだ。具体的には JARI 標準セル（25cm$^2$）を用いた「定電流連続試験」と YNU セル（1cm$^2$）を用いて負荷変動を連続的に与える「加速劣化試験」を実施した。
JARI セルを用いた定電流試験においては、1,000 時間におよぶ連続試験においてもセル電圧の上昇はほぼ見られず、抵抗の漸減傾向が続くため、電圧も安定した挙動を示し続けることが確認できた。これは触媒層の劣化も 1,000 時間程度の運転では顕在化しないことを示している。
YNU セルを用いた加速劣化試験においても、KOH および $K_2CO_3$ のいずれの電解溶液を用いた場合にも 2,000 サイクル間の電圧上昇値は目標（0.2V）範囲内に収まり、AEM 水電解の負荷変動耐性についても一定の目途を立てることができた。

(6) 実施項目 6：（2-2）構成部材の耐食性評価および防食技術開発 【北大】
AEM 型水電解セルの電極材料として現状では白金で被覆されたチタン材料が使用されているが、より安価な材料を考えた際の代替材料としてステンレス鋼が候補として考えられる。本研究課題では、汎用性の高いステンレス鋼に対して AEM 型水電解の電解液の候補である、NaOH、KOH および K2CO3 水溶液中で耐食性を評価し、次のステップとして電解液の流動の効果について調べた。対象となる鋼種は SUS304L と SUS310S である。この他に純ニッケル板を比較材料として用いた。
腐食速度と水電解中の電圧の値を考慮して KOH 溶液を電解液として選定した。ステンレス鋼の耐食性について、各種ニッケル濃度の異なる鋼を用いることで、目標値の腐食速度 0.03mm/year 以下を達成することができた。本項目では、種々の分析装置を用いてステンレス鋼の耐食性にニッケルが大きく寄与することを明らかにし、電解液の流動下では、静置状態よりも腐食速度が加速しながら腐食生物はほぼ同じものが形成されることを解明した。これらの知見は、電解液の選定や耐久性に優れた水電解装置開発に大きく寄与するものである。

(7) 実施項目 7：（3-1）水電解装置コストおよび水素製造コスト評価 【産総研】
本項目では、米国再生可能エネルギー研究所（NREL）が実施したプロトン交換膜（PEM）水電解装置における製造コスト解析をベースに、アニオン交換膜（AEM）水電解システムの製造コスト解析を行い、設置・導入コストの試算を行った。
本製造コスト評価によって明らかになったこととしては、セル・スタック製造コストにおける PEM と AEM の違いは、CCM 作製時の触媒材料費、アノード PTL および BPP 製造コストの差によって生じることが明確になったことである。AEM 水電解セルでは、アノード触媒に安価な材料(NiFe)を使用できるため、白金系材料（$IrO_2$）を用いる PEM に対して CCM コストが低減できる。さらに、アノード PTL については材料がチタンに限定され、かつ Au（あるいは Pt）コーティングを必要とする PEM に対し、AEM では比較的安価な Ni-foam をそのまま適用できる。また BPP においても基材への Au（あるいは Pt）コーティングを必要とする PEM に対し、ステンレス材をそのまま適用できる AEM がコスト的には有利となる。
またシステム全体のコストを見ると、PEM、AEM によらず製造システム数が増加するに伴い、製造コスト全体の中で BOP 製造コストの占める割合が増加する。システムコスト削減には BOP コストの低減が不可欠であり、システムの簡素化や BOP の中でも大きなコストシェアを占める電源の低コスト化が重要な課題であることが明らかとなった。

## ４．１．４　高性能･高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料･セルの設計開発（東京工業大学）

○実施者名、実施体制




○期間、予算

期間　　：2018 年 6 月~2023 年 3 月

予算　　：2018 年度:24,000,000 円、2019 年度:65,183,000 円、2020 年度:71,182,000 円、2021 年度:71,323,000 円、2022 年度:86,923,000 円

○実用化への道筋

我々と一緒にアニオン交換膜型水電解の実用化を推進する TokyoTech 固体アルカリ水電解コンソーシアム企業に技術移転し、本事業で開発した膜、触媒材料のスケールアップを進めている。それらの材料を電解槽メーカーが持つスケールアップした電解槽に組み込み、問題点を抽出し、さらなる研究開発を実施する。また、電解槽性能を把握するだけでなく、システムメーカーと共に、水電解プラント全体の省力化、低コスト化を目指す。2030 年より早い時期に、技術移転する企業により、海外の適地にアニオン交換膜型水電解プラントを建設することを目指している。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①-1 固体高分子形水電解用電解質膜の研究開発** | ・変動電源に対して高性能かつ高耐久な固体高分子形水電解用電解質膜の材料設計指針の確立 | ・従来の Nafion 膜よりも優れた水素透過阻止性と膨潤抑制能を有するプロトン伝導性細孔フィリング膜を開発 | ○ | |
| **①-2 固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発** | ・固体アルカリ水電解に適した固体アルカリ水電解用電解質膜の材料設計指針の原案策定 | ・10 万以上の高分子量を有するポリフェニレン系アニオン伝導ポリマーを開発し、100 mS/cm 以上の高いイオン伝導性、優れたアルカリ耐久性、低いガス透過性を有する電解質膜の開発に成功 | ○ | |
| **②-1 Ir 系ナノ粒子連結触媒の研究開発** | ・変動電源に対して高性能かつ高耐久な固体高分子形水電解触媒の材料設計指針の確立 | ・1.8 nm の Ir ナノ粒子が連結した高表面積 Ir ナノ粒子連結触媒を開発し、市販 Ir 触媒より 5 倍高い OER 質量活性を達成 | ○ | |
| **②-2 固体アルカリ水電解用ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発** | ・ペロブスカイト・スピネル等触媒の固体アルカリ水電解セルへの適用と、電解性能向上に資する材料の設計指針の提案 | ・実験、DFT 計算、マテリアルズインフォマティクスを用いることで、結晶構造の観点から鉄系酸化物の触媒活性の新規な法則を発見し、$IrO_2$ 触媒よりも高い OER 活性を有する $CaFe_2O_4$ 卑金属触媒の開発に成功 | ○ | |
| **③-1 高性能固体高分子形水電解セルの開発** | ・変動電源に対して高性能な固体高分子形水電解に関する材料・セル設計指針の確立<br>・固体高分子形水電解セルの水電解性能とし | ・従来研究の標準より 1/3～1/4 の Ir 使用量で十分に高い水電解特性を発現 | ○ | ・従来の Ir 使用量とすることで数値目標達成見込み |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | て、2 A/cm$^2$ で電圧 1.63 V の達成 | | | |
| **③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発** | ・変動電源に対して高性能な固体アルカリ水電解に関する材料・セル設計指針を確立<br>・固体アルカリ水電解の水電解性能として、固体電解質膜を用いた水電解セルにおいて 0.6 A/cm$^2$ で電圧 1.65 V およびアニオン交換膜型水電解において、水素中酸素濃度および酸素中水素濃度を 0.1 mol%以下の達成 | ・80℃、純水供給の固体アルカリ水電解セルで高効率と定電流運転に対する高耐久の両立を実証<br>・水電解性能の過電圧分離や水電解試験中に in-situ でガスを定量分析できる評価系を構築<br>・アニオン交換膜型水電解において、水素中酸素濃度および酸素中水素濃度 0.1 mol%以下をほぼ達成(水素中酸素濃度 0.05 mol%、酸素中水素濃度 0.37 mol%)<br>・水電解性能予測モデルを開発し、さらなる高性能化に必要な材料・セルの設計指針を獲得<br>・①-2, ⑥で開発したポリフェニレン系ポリマーと卑金属アノード触媒を組み合わせた MEA は 1.65 V@0.6 A/cm$^2$ に至る高い水電解性能を達成 | ◎ | ・当初の目標を達成しただけでなく、80℃、純水供給の固体アルカリ水電解セルで高効率と高耐久の両立を初めて実証する、大きな成果を得た |
| **④-1 固体高分子形水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析** | ・変動電源に対して高耐久な固体高分子形水電解に関する材料・セルの設計指針の確立 | ・Ir 担持量を減らすと負荷変動で Ir の溶出が問題となることを明らかとした | ○ | |
| **④-2 固体アルカリ水電解** | ・変動電源に対して高耐久な固体アルカリ水電解 | ・変動電源(起動停止運転)を模擬した電圧サイクル試験 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **セルの耐久性評価・劣化機構解析** | の材料・セルに関する設計指針の確立 | において、ポリフェニレン系ポリマーを用いた MEA の高耐久性を実証<br>・変動電源への対応には、生成ガスによる非線形な機械的負荷に対する高耐久化が重要であることを示唆 | | |
| **⑤ 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映した固体アルカリ水電解用の電解質ポリマー・膜の高度化** | ・変動電源に対して高性能かつ高耐久な固体アルカリ水電解用電解質ポリマー・膜の材料設計指針の確立 | ・④-2 における実セルでの評価結果から、主鎖骨格構造を変更したポリフェニレン系ポリマー膜や、開発したポリマーを多孔質基材の細孔に充填した細孔フィリング膜を開発し、さらに高い機械強度を有する膜の開発に成功 | ◎ | ・高いイオン伝導性、ガス透過阻止性、化学的耐久性に加え、機械的耐久性の向上に成功し、高圧水素製造への展開が期待される有望な電解質ポリマー・膜を得たため |
| **⑥ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発** | ・固体アルカリ水電解用セルの変動電源に対する高性能・高耐久化に資する卑金属触媒の材料設計指針の確立 | ・多孔 Ni フォームの表面を電気化学的に改質した卑金属触媒において $IrO_2$ より高い OER 活性と耐久性を実現<br>・Ni フォーム表面に P と微量の Ru をドープした Pt フリーカソード触媒において、従来の Pt/C より高い HER 活性を達成 | ○ | |
| **⑦ ナノ細孔膜を用いた固体アルカリ水電解の研究開発** | ・固体アルカリ水電解用セルの高性能・高耐久化に資するナノ細孔膜の材料設計指針の確立<br>・ナノ細孔膜では水素中酸素濃度および酸素中水素濃度を 0.4 mol% | ・ナノ細孔膜の構造制御により高い電解性能を示す MEA の開発に成功<br>・ナノ細孔膜型水電解においてガスクロスオーバー(水素中酸素濃度 0.22 mol%、酸素中水素濃度 0.28 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 以下とナノ細孔膜型水電解では 1 A/$cm^2$ で電圧 1.9 V を達成 | mol%)および電解性能に関する数値目標を全て達成 | | |

○成果の意義

本事業は、特に固体アルカリ水電解に関して優れた研究開発成果を得ることに成功した。固体アルカリ水電解は、コストの 4 分の 3 を占める Bipolar plate や集電体の部材を低価格なステンレス等へ変更することが可能な次世代型の水電解システムである。本事業では、世界で初めて性能と耐久性を両立した純水供給の固体アルカリ水電解に成功し、また、卑金属触媒(改質 Ni フォーム触媒)での高性能化の実証にも成功した。これらの成果を用いた固体アルカリ水電解では大幅なコスト低減により、プラント引き渡し価格 30 円/N·$m^3$-$H_2$ が可能になると見込まれる。さらに、開発した卑金属 NF 触媒、ポリフェニレンアニオン伝導性ポリマーおよびその電解質膜は、企業との共同研究により既に大量生産や大型化への検討を行っている。この様に、本事業は、変動電源に対して高耐久性で高効率変換を示す固体アルカリ水電解セルの実現に大きく貢献できる革新的成果を得たといえる。

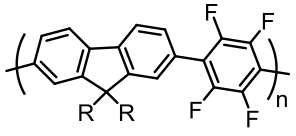
○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

| 年度 | 特許出願 | 論文・総説 | 学会発表 | 招待講演・講師 | プレスリリース等 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2018 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 2019 | 1 | 2 | 14 | 6 | 0 |
| 2020 | 2 | 3 | 17 | 2 | 18 |
| 2021 | 6 | 6 | 5 | 11 | 5 |
| 2022/2023 | 7 | 7 | 14 | 14 | 1 |

○研究開発成果の詳細

(1) 実施項目①：固体高分子形水電解用電解質膜として、スルホン化ポリエーテルスルホン酸ポリマーを多孔質ポリマー基材に充填した細孔フィリング電解質膜を開発し、従来の Nafion 膜よりも優れた水素透過阻止性と膨潤抑制能を持つ電解質膜の開発に成功した。

固体アルカリ水電解用電解質膜については、アルカリ溶液中における劣化機構の解析から、ポリマー骨格中にエーテル等の分解の起点をもたず、10 万以上の高分子量を有するポリフェニレン系アニオン伝導ポリマーを開発した(図 1)。開発したポリマーは簡便な 3 ステップで合成できるため、量産化に適した材料である。高分子量ポリフェニレン系アニオン伝導膜は、100 mS/cm 以上の高いイオン伝導性、優れたアルカリ耐久性、高い機械強度、低いガス透過性を示し、固体アルカリ水電解として非常に有用であることを実証した。




R: $\sim\!\!\sim(CH)_X\!-\!N^+(CH_3)_3\ OH^-$
(x = 6, 8, 10)

図 1. ポリフェニレン系アニオン伝導ポリマー(PFT-Cx-TMA)の化学構造.

このポリフェニレンアニオン伝導性ポリマーを多孔質基材の細孔に均一に充填した細孔フィリング電解質膜の作製に成功し、10 μm 以下の薄膜においても破断などが起こることなく機械的に安定であり、キャスト膜と同様に高いアルカリ耐久性と酸化耐久性を持つ事を見出した。

(2) 実施項目②：固体高分子形水電解用アノード触媒として、導電性カーボン担体を用いない、1.8 nm の Ir ナノ粒子が連結した高表面積 Ir ナノ粒子連結触媒を開発し、酸素発生反応(OER)に対して市販 Ir 触媒より 5 倍高い質量活性を達成した。さらに、コアシェル構造を有するナノ粒子連結触媒を開発し低 Ir 使用量でさらなる高活性化にも成功した。

固体アルカリ水電解用触媒として、貴金属を用いない、鉄およびアルカリ土類金属を含む金属酸化物の結晶性粒子触媒を開発した。実験、第一原理計算、データ科学(機械学習)を用いることで、結晶構造の観点から鉄系酸化物の触媒活性の新規な法則を発見し、$IrO_2$ 貴金属触媒よりも高い OER 活性を有する $CaFe_2O_4$ 卑金属触媒の開発に成功した(図 2)。さらに、鉄系リン酸触媒の開発に発展させることで、$CaFe_2O_4$ よりも高い活性を有する $Fe_3O_3(PO_4)$触媒の開発にも成功した。

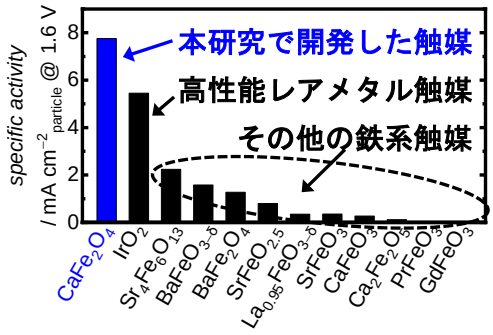



図 2. $CaFe_2O_4$ と他の鉄系酸化物触媒及び $IrO_2$ の OER 表面比活性の比較. *ACS Appl. Energy Mater.,* 2021, 4, 3057−3066.

(3) 実施項目③：開発した Ir ナノ粒子連結触媒をアノード触媒に用いた固体高分子形水電解用膜電極接合体(MEA)において、市販材料を用いた既往の報告と比べて Ir 担持量が少ない(従来の 1/3～1/4 程度)にもかかわらず、4 A/cm$^2$ に至る高電流密度領域において物質移動抵抗の影響が小さく高効率な水電解性能を得ることに成功した。

固体アルカリ水電解に関しては、開発したポリフェニレン系ポリマーを膜とアイオノマーを用いた MEA において、アルカリ水溶液供給だけでなく、80℃、純水供給の固体アルカリ水電解セルで高効率と定電流運転に対する高耐久の両立を世界に先駆けて実証した(図 3)。さらに、後述の研究項目⑥で開発した卑金属改質 Ni フォーム触媒と組み合わせた MEA は、アノード側に貴金属触媒を用いていないにもかかわらず、高い水電解性能を示した。

本事業では MEA での水電解性能を評価・解析するために、過電圧分離や in-situ でガスを定量分析できる評価系(ガスクロマトグラフィー一体型水電解装置)を構築した。開発したポリフェニレン系ポリマー膜を用いた MEA において、低い水素中酸素濃度(カソード側)および酸素中水素濃度(アノード側)が得られ、この膜は MEA 運転においてもガス透過阻止性に優れていることを実証した。

さらに、本事業では、固体アルカリ水電解のための水電解性能予測モデルを構築した。本モデルは反応・構造パラメータを各々独立に考慮でき、得られた計算結果から、さらなる高性能化に必要な材料・セルの設計指針を獲得した。

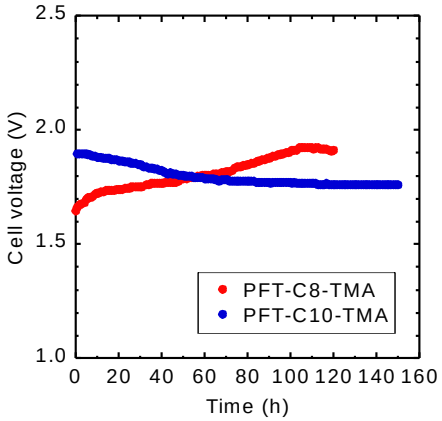



図 3. 開発したポリフェニレン系ポリマー(PFT-Cx-TMA)を用いた MEA の 80℃、0.2 A/cm$^2$、純水供給固体アルカリ水電解の耐久性. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2021, 4, 1053−1058.

(4) 実施項目④：固体アルカリ水電解セルの起動停止を模擬した矩形波の電圧サイクル試験(80℃、0.1 V ⇔ 1.6~2.0 V)において、市販のビニル系ポリマーを膜とアイオノマーに用いた MEA は低耐久であるのに対し、開発したポリフェニレン系ポリマーを用いた MEA は優れた耐久性を示した。詳細な構造・電気化学解析から、変動電源への対応には、アルカリ耐久性だけでなく、生成ガスによる気泡形成とその消失に伴う非線形な機械的負荷に対する高耐久化が重要であることを明らかにした。

(5) 実施項目⑤：変動電源運転に対するさらなる高耐久化に向けて、開発したポリフェニレン系ポリマーの骨格に 3 次元的なねじれ構造を導入し、より高い機械強度と柔軟性を有するアニオン伝導膜の開発に成功した。

(6) 実施項目⑥：結晶性粒子触媒の開発で得られた知見を基に、多孔 Ni フォーム(NF)の表面を Fe などで電気化学的に改質した卑金属触媒を設計・開発し、貴金属触媒の $IrO_2$ より高い OER 活性と耐久性を達成した。この開発した触媒とポリフェニレン系ポリマーを組み合わせた MEA は 1.65 V@0.6 A/cm$^2$ に至る高い水電解性能を発現した(図 4)。さらに、NF 表面に P と微量の Ru をドープした Pt フリーカソード触媒を開発し、従来の Pt/C より高い水素発生反応活性を達成した。

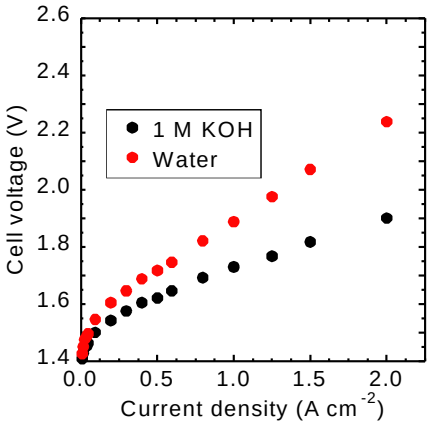
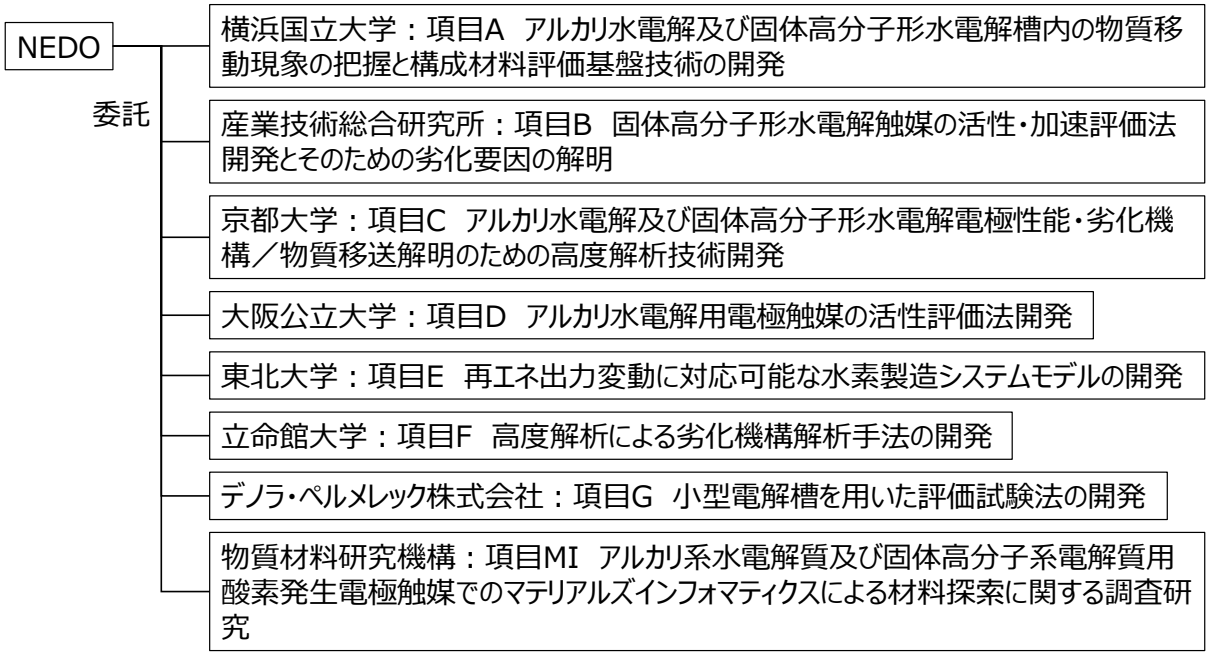



図 4. 開発した改質 Ni フォーム卑金属アノード触媒とポリフェニレン系ポリマーを用いた固体アルカリ水電解 MEA 性能：セル温度 80℃、1 M KOH または純水をアノードに供給. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2023, 11, 854−865.

(7) 実施項目⑦：ナノ細孔膜の構造制御により高い電解性能を示す MEA の開発に成功し、ナノ細孔膜型水電解においてガスクロスオーバーおよび電解性能に関する数値目標を全て達成した。

### ４．１．５ アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化／アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究（横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、公立大学法人大阪、東北大学、学校法人立命館、デノラ・ペルメレック、物質・材料研究機構）

○実施者名、実施体制




○期間、予算

**アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化・アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化**

期間　：　2018 年 6 月~2023 年 3 月

予算　：　18 年度 189,800,400 円

19 年度 301,645,700 円

20 年度 307,669,000 円

21 年度 226,575,700 円

22 年度 296,880,500 円

**アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究**

期間　：2021 年 12 月~2023 年 3 月

予算　：　21 年度 0 円

22 年度 19,800,000 円

○実用化への道筋

・本研究実施後の 2 年間の NEDO プロジェクトにおいて、水電解評価プラットフォームを構築し、本研究で開発した試験方法や解析アルゴリズムの関連企業への提供を開始する。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **A. アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価基盤技術の開発** | ・AWE 部材の共通的活性・劣化評価法の開発<br>・AWE アノードの劣化機構解明<br>・電極から発生する気泡の輸送挙動解明<br>・電解槽のモデリング手法の開発<br>・MI 材料探索への電気化学データの提供 | ・粉末触媒評価用 YNU 標準セル及び起動停止試験用共通プロトコルを開発<br>・逆電流解析法の確立<br>・気泡観察法の確立と電極近傍の物質輸送モデル策定<br>・大型電解槽に対応した輸送シミュレーションモデルの確立<br>・MI 材料探索用電気化学データを提供 | ○ | |
| **B. 固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明** | ・ハーフセル及び水電解セルによる共通的なアノード触媒活性評価法の確立<br>・水電解セルの劣化要因解明と加速劣化手法の提案<br>・純水中不純物による電解セル特性劣化の解明 | ・ハーフセルによるアノード触媒活性評価プロトコルを開発<br>・セルの劣化要因を明確化<br>・電解セルの起動停止を模擬した加速劣化試験法を開発<br>・極微量の不純物イオンのセル特性劣化への影響を確認 | ○ | |
| **C. アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析技術開発** | ・A、B で開発される共通評価法・試験法と対応させた電気化学性能評価と対応させた、各種高度解析計測技術を総合したプラットフォームの構築、電極性能発現及び劣化機構の解明<br>・MI 材料探索用データを提供<br>・水電解の起動・停止時や、電力の変動時のバブル生成および離脱ダイナミクスの測定・定量化に基づく電極構造設計指針の提案 | ・開発したセルを用いて、加速劣化試験の電位変動に対応した電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法を確立<br>・電解触媒の反応場の酸素の電子構造を計測できる手法である operando 軟 X 線吸収分光法の開発に成功<br>・水電解触媒の活性支配因子を解明<br>・計測手法を NEDO プロジェクト参画大学、企業に展開<br>・MI 材料探索用データを提供<br>・電極表面構造と水素気泡発生点を約 1μm の空間精度で同定する技術の開発に成功 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ・多くの場合、水素気泡は深さサブμm の浅い凹点から発生することを確認 | | |
| **D. アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発」に関する実施内容** | ・AWE カソードでの触媒活性および耐久性の評価法の開発<br>・AWE カソード触媒の劣化評価法の確立ならびに劣化メカニズムの解明 | ・LSV の任意の電位での水素発生電流値およびターフェル勾配から触媒活性および耐久性を評価する方法を確立<br>・逆電流を模擬した起動停止試験用プロトコルを用いたカソード触媒の劣化評価法を確立<br>・逆電流によるカソード触媒劣化要因（触媒の脱落）を特定 | ○ | |
| **E. 再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発** | ・再エネからの出力変動電力に対応可能な水電解装置を利用した水素製造システムのモデル構築<br>・セルレベルから装置レベルまでの広範囲でかつ精緻で最適なシステムモデルの構築 | 水素製造システムを設計・設置し測定した実稼働データを用い、遺伝的アルゴリズムによる最適化により、再エネの変動に対して最適な制御手法と機器構成比を導出可能な水素製造システムモデルを開発 | ○ | |
| **F. 高度解析による劣化機構解析手法の開発** | ・複雑な運転条件下における触媒劣化因子を評価可能なX線吸収分光解析技術の確立<br>・運転終了後 2 週間で触媒を評価可能にする測定体制の確立<br>・MI 材料探索用基礎データとして構造解析データを提供 | ・アルカリ水電解での起動停止共通プロトコルによる劣化試料を解析し、劣化機構を解明<br>・電解セルから触媒試料を取り出し輸送するまでの手順を文書化し、触媒解析技術を確立<br>・X 線吸収スペクトルデータを提供し、MI 解析を実施 | ○ | |
| **G. 小型電解槽を用いた評価試験法の開発** | ・直流電源にて 8,000 時間、変動電源にて 1,000 時間の連続稼働の達成<br>・劣化機構の精密分析手法による解明<br>・STD セルの最終仕様確定<br>・2-4 台の稼働実現<br>・加速試験プロトコルの暫定仕様の提案 | ・AWE、PEMWE の各電解小型セルで目的とした稼働を達成<br>・それぞれの触媒劣化挙動について、セル電圧変化を評価し、消耗機構の類似性を解明<br>・各 2-4 台の STD セル仕様を稼働し、加速試験プロトコルを暫定的に確定 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **MI. アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究** | ・共通フォーマットに基づく系統的データベースの開発<br>・水電解データベースを用いたMI 解析による新規水素製造技術開発指針の提案 | ・電気化学測定データを材料データリポジトリである MDR-Closed に蓄積<br>・ペロブスカイト系酸化物触媒の劣化データを用いた、MI による高活性・高耐久性触媒の新規組成を提案 | ○ | |

○成果の意義

・電気化学測定法、オペランド解析法の手法確立、ノウハウ公開により、水電解材料開発の新規参入を促進。
・異なる研究機関による活性・耐久性評価を共通の尺度で比較することで効率良く材料開発が可能。
・起動停止条件における電極劣化メカニズムを共有することで国内外研究機関による材料開発を加速。
・気泡や気液二相流からなる輸送現象の解明により高電密特性の向上、コスト低減に貢献。
・出力変動対応水素製造システムモデルの確立により、水電解制御手法と機器構成比の最適化に貢献。
・活性のみならず耐久性に着目した MI による材料探索法により、材料開発を加速。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

| 年度 | 特許 | 論文 | 学会口頭発表 | 学会ポスター発表 | 講演・講師 | メディア |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2018 | 0 | 0 | 5 | 0 | 1 | 0 |
| 2019 | 1 | 1 | 22 | 1 | 5 | 0 |
| 2020 | 4 | 5 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| 2021 | 1 | 7 | 34 | 7 | 6 | 0 |
| 2022 | 1 | 15 | 26 | 1 | 4 | 0 |

○研究開発成果の詳細

我が国のカーボンニュートラル達成に向け、再生可能エネルギーの大量導入が必要である。再生可能エネルギーの地域的・時間的偏在性を緩和するためには 2030 年頃には 250～300 TWh に達する余剰電力の水電解による水素への変換が期待されている。本研究では我が国の企業、国研、大学等の研究機関が効率良く水電解関連技術を開発し、国際競争力を強化するための基礎とするため、アルカリ水電解（AWE）及び固体高分子形水電解（SPEWE）における共通的材料評価法の開発、高度解析法の確立、性能発現機構の解明、電解槽モデリング手法、再生可能エネルギーに対応した水素製造システムモデルの構築に取り組んだ。

（A）アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価基盤技術の開発

電極独立締結構造を有する小型電解セル（YNU セル，図 1）や小型電解槽を開発し、粉末触媒の触媒活性評価、逆電流解析の手法を開発した。起動停止を模した加速劣化試験法（S/S-AST）を提案し、共通的に利用可能な材料評価基盤技術を構築した。これらを協力企業の材料解析に活用することで、本 PJ と別に協力企業における 6 件の特許申請につながる成果を得た。

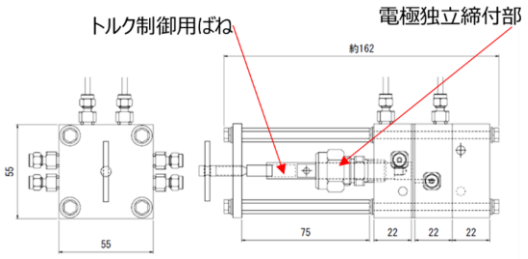


図 1. YNU セルの構造.

AWE の物質輸送解析では高速度ビデオカメラと顕微撮影システムによる気泡生成挙動計測システムを開発し、物質輸送に対する電極形状の影響を定量化し、界面気泡被覆層モデルを提案し、界面張力制御による輸送促進法を開発した。また、水電解により生成する UFB の物質輸送への影響、隔膜のクロスオーバーへの影響を明らかにした。さらに、熱・物質・化学反応を連成し、水電解槽の性能及び劣化現象の予測が可能な非定常数値解析モデルを構築し、電解槽シミュレーションの基盤技術を構築した。

（独） 工業所有権情報・研修館（INPIT）の知的財産プロデューサー派遣事業により、平成 25 年度 特許庁「特許出願技術動向調査報告書 電解式水素製造及びその周辺技術」及び以降の特許調査のデータを用い、2001 年から 2019 年における AWE、SPEWE、水蒸気電解等に関する技術動向調査を行った。

（B）固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明

ハーフセル（RDE）試験法及び、小型 PEM 水電解セル（MEA）試験法を開発した。最適化された評価手順により、RDE 法と MEA 法の評価結果がほぼ一致し（図 2）、RDE 法が MEA での活性推定に利用できることを明らかにした。

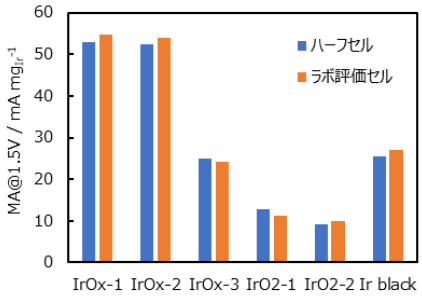


図 2. RDE 法と MEA 法の比較.

標準条件（80℃、2 A cm$^{-2}$）での連続電解による $F^-$の溶出、Ir の溶解・再析出を確認し、クロスオーバー酸素による過酸化水素生成を起点とした劣化メカニズムが推定された。起動停止模擬サイクル試験（S/S-AST）では、80℃、10,000 サイクルの条件で標準条件の 9 倍の加速劣化を達成した。

Ir 触媒の担持量を標準の 15%とすると、面内導電性の不足によると考えられる急速な劣化が見られたが、導電性担体に Ir を担持することで劣化を抑制可能となることを明らかにした。Ir 系触媒の活性表面積の計測手法として水銀 UPD 法を検討し、適切な評価条件を明らかにした。純水不純物として混入しうる微量の金属イオンの影響を検討し、電解質膜への蓄積によるセル抵抗への影響に加え、電極反応過電圧やガスクロスオーバーの増大、$F^-$溶出の加速などイオン種により異なる影響があることを明らかにした。

（C）アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析技術開発

共通評価法・試験法に対応した高度解析のための放射光分析用セルを開発し（図 3）、解析プラットフォームを構築した。共通評価プロトコル中でのオペランド XAFS 測定を実施し、AWE アノードにおける逆電流条件下での触媒構造変化を明らかにした。また、低結晶性 $IrO_2$ の結晶構造の PDF 解析より、高活性な monoclinic 相の存在を見出した。軟 X 線 XAS により、$IrO_2$ 触媒の表面被毒メカニズムを明らかにした。解析プラットフォームを複数の協力企業の材料解析にも利用し、研究開発に貢献した。

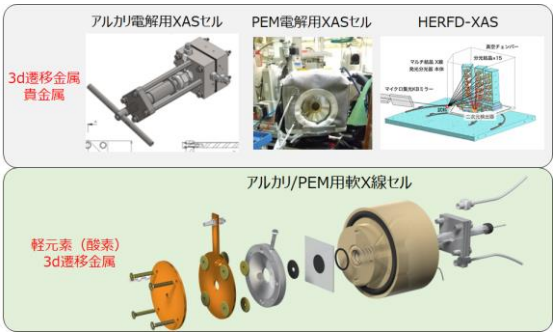


図 3. 共通評価法・試験法と対応した評価ツール.

一方、Ni 電極面から発生する水素気泡を高い時間・空間分解能で光学計測し、画像解析により気泡近傍の局所溶存気体濃度および局所対流速度を評価する手法を開発した。溶存水素の過飽和度の解析より、表面構造の影響下での不均一核生成によって水素気泡が生成することが示唆された。単一レーザーパルス照射によってマイクロ構造を制御した平板 Ni 電極により、水素気泡生成サイトは全て、sub-μm 程度の極浅凹構造であること、および気泡の成長速度や生成周期は全てのサイトで異なることを明らかにした。

（D）アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発

電極触媒活性評価法の確立に必要な電気化学活性表面積(ECSA)を評価するための方法について、研磨した Ni 板電極を例として検討した結果、サイクリックボルタンメトリーおよび交流インピーダンス法で評価した電気二重層容量（$C_{dl}$）が ECSA の指標として利用できることを明らかにした。Ni 板電極での結果を基に、多孔質構造の発泡 Ni 電極の $C_{dl}$ を求め、ECSA も見積もることができた。また、アルカリ水電解用起動停止劣化試験用プロトコルに従って、標準カソードおよび改良カソードの耐久性試験を行った結果、標準カソードの劣化は主に触媒の脱落によるものであり、改良カソードでは触媒の脱落が大幅に抑制されていることが明らかになった。

（E）再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発

再エネの変動出力に対応可能な水素製造システムモデルにおいて、システムの最適制御及びシステム構成比の最適化を実施し、電解槽保護も対応できるグリーン水素製造システムを開発した。また実際に水素製造システムを設計・設置して測定した実稼働データを利用して、各装置への電力配分を発電量と補器を含む総消費電力量をバランスさせながら水素製造を行うことができる新たなモデルを構築した。本装置モデルにてシミュレーションを実施し、遺伝的アルゴリズムを利用した最適化を行うことにより、再エネの変動に対して最適な制御手法と機器構成比を導出可能なシステムモデルを構築した。

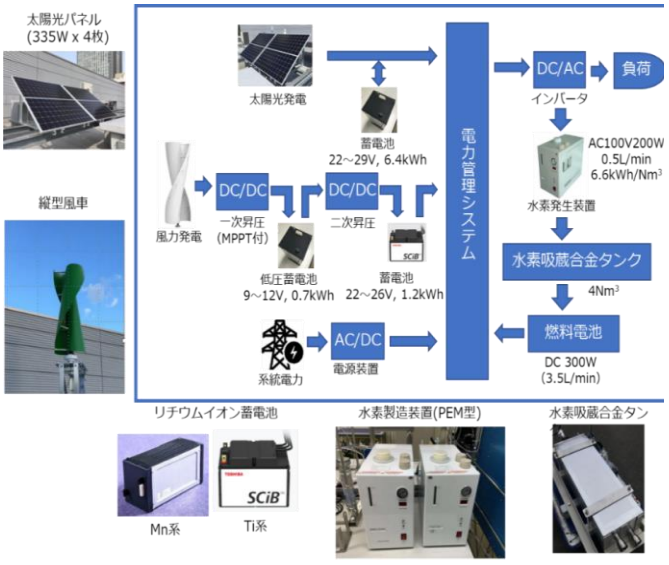


図 4. ラボスケールの MaSC 再エネ水素製造システム構成

（F）高度解析による劣化機構解析手法の開発

立命館大学 SR センターの放射光設備を利用し、劣化後を含む触媒試料について、タイムロスを最小限に抑え、解析・フィードバックを効率的に実施する体制を構築し、各機関から試料提供を受け、測定後の情報をフィードバックするまでを 2 週間程度で実施することが可能となった。これにより、ニッケル系触媒の電子状態マップ等の基盤情報を整備した。これらの参照データを用い、ニッケル系触媒の相変化による劣化、$IrO_2$ 触媒の酸化状態変化による劣化モードを特定した。

（G）小型電解槽を用いた評価試験法の開発

3 セル小型バイポーラ型電解槽を用いた AWE の 8000 時間連続試験及び加速劣化試験を実施し、本研究で提案した加速劣化試験の加速係数を 570 倍と推定した。バイポーラ型電解槽では外部からの電流の変動により特定セルに負荷がかかり劣化が加速する機構及びその連鎖機構を確認した。単セル SPEWE での 8000 時間連続試験及び加速劣化試験より、加速係数を 7 倍と推定した。この際、アノード Ir の溶解・カソード析出が生じ、同量の Ir を用いた電極の連続試験、加速試験の比較において電圧増加と Ir 析出量との相関性を得た。さらに、低触媒量のアノードにおける起動停止操作による触媒安定化効果に関する知見を得た。

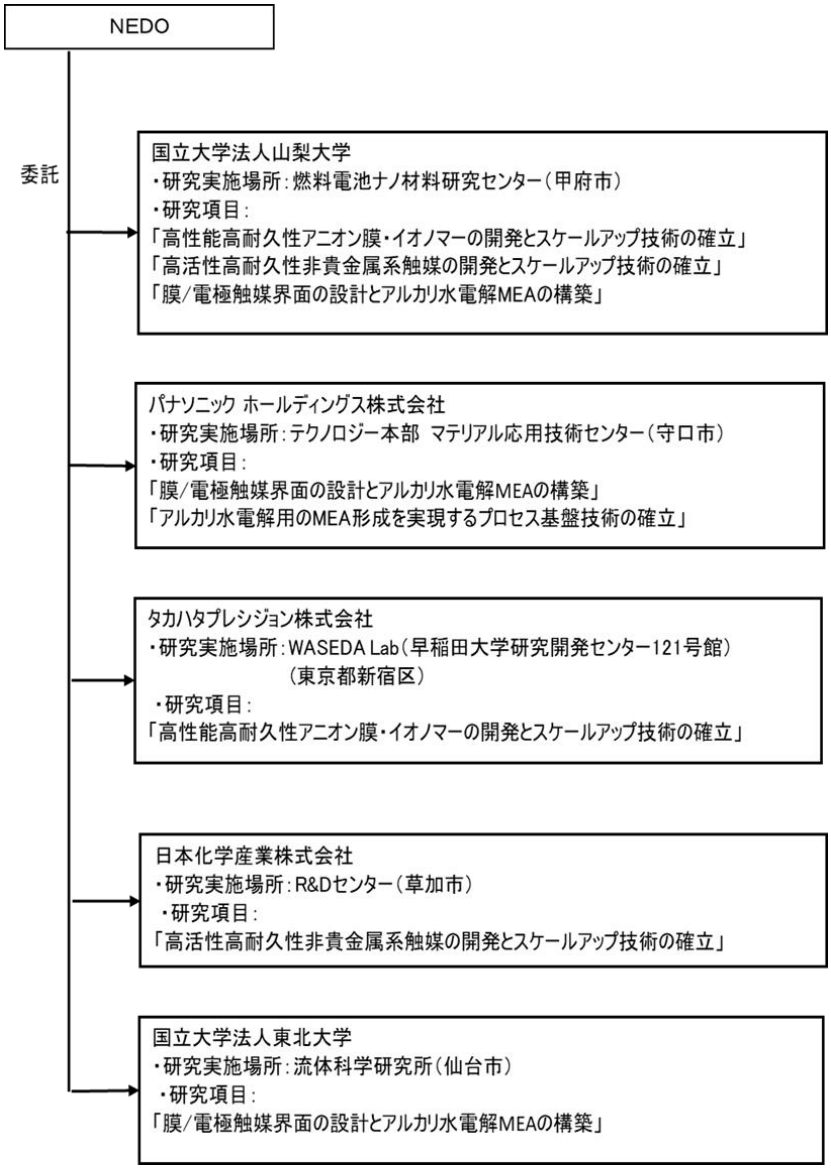
（MI）アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究

ペロブスカイト構造において触媒活性が高くかつ耐久性の高い新規触媒組成を見つけることを目的に、共通フォーマットを決めたデータベースを作成した。44 種の酸化物触媒における触媒活性および耐久性の評価データを利用し、構成元素（ペロブスカイトの A,B サイト)の基礎物性を耐久性予測のための特徴量として MI 解析を実施した。耐久性に関して Random Forest 法により比較的よく予測が出来たため、これを用いてペロブスカイトの A,B サイトに入り得る元素および組成の組合せを探索した。合成が可能と思われる組成を実験研究者の意見をもとに選択し、実際に合成および電気化学実験を行った結果、耐久性の高い組成を見つけることに成功した。さらに触媒活性も含めた組成探索も実施した。

## ４．１．６ 高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発（山梨大学、パナソニック ホールディングス、タカハタプレシジョン、日本化学産業、東北大学）

○実施者名、実施体制

国立大学法人山梨大学、パナソニックホールディングス株式会社、タカハタプレシジョン株式会社、日本化学産業株式会社、国立大学法人東北大学流体科学研究所




**○期間、予算**

期間　　：2021 年 4 月~2023 年 3 月

予算　　：2021 年度　¥64,818,400

2022 年度　¥172,331,500

合 計　　¥237,149,900

**○実用化への道筋**

アニオン膜、イオノマー、非貴金属触媒は、それぞれスケールアップ合成、コストダウン検討を進めており、本プロジェクト終了後も継続して行う。すでに関心表明企業などへのサンプル提供と評価を始めている。

25cm$^2$ サイズの MEA 作製技術を開発したので、性能や耐久性の評価を進めており、本プロジェクト終了後も継続して行う。今後、関心表明企業などへのサンプル提供も予定している。これらの活動により、2030 年代にアニオン膜型アルカリ水電解デバイスを実用化するための基盤技術として貢献する。

### ○最終目標に対する成果と達成状況

| 最終目標 | 成果 | 達成度 |
|---|---|---|
| ①高性能高耐久性アニオン膜・イオノマーの開発とケールアップ技術の確立 | | |
| ・水中でのアニオン導電率120mS/cm以上、破断強度25MPa、破断伸びが250%以上、かつ80℃の4M KOH水溶液中で1000時間以上の耐久性を持つアニオン膜およびイオノマーの開発。 | ・水中でのアニオン導電率：135mS/cm、破断強度：25MPa、破断伸び：284%、かつ80℃の4M KOH水溶液中で1000時間アニオン導電率を保持するアニオン膜を開発した。 | ○ |
| ・水素および酸素の透過係数が調節可能な分子構造設計指針を見通す。 | ・ 水素および酸素の透過係数を数倍以上向上させるアニオン膜の分子構造設計指針を見出した。 | |
| ・アニオン膜の製造コストが15000円/m$^2$以下を見通す。 | ・ 重合方法の改善によりアニオン膜の製造コストが15000円/m$^2$以下を見通した。 | |
| ・アニオン膜をA4サイズで製膜できる技術を開発する。 | ・ ロールツーロール法によりアニオン膜をA4サイズで製膜できる技術を開発した。 | |
| ・アニオン膜、イオノマーを量合成する技術を開発し、更なる物性向上のための設計指針を得るとともに、国内関心表明企業等への提供と評価を行う。表明企業等への提供と評価を行う。 | ・ アニオン膜、イオノマーを量合成する技術を開発し、更なる物性向上のための設計指針を得た。国内関心表明企業等へアニオン膜およびイオノマーを提供し評価を行った。 | |
| ・25g/バッチでアニオン膜およびイオノマーを量合成する技術を開発する。 | ・25g/バッチでアニオン膜およびイオノマーを量合成する技術を開発した。 | |

| 最終目標 | 成果 | 達成度 |
|---|---|---|
| ②高活性高耐久性非貴金属系触媒の開発とスケールアップ技術の確立 | | |
| アルカリ水溶液中にてIrOxより高活性な非貴金属系酸素発生触媒を開発する。 | 1.40V(vs.RHE)にてIrOxよりOER活性が高い非貴金属触媒（NiCoO系・NiFeO系）を開発した。 | ※ |
| アルカリ水溶液中にてPtと同等以上に活性な非貴金属系水素発生触媒を開発する。 | -0.20V（vs.RHE）にてIrOxよりHER活性が高く、オンセット電位が-0.10V（vs.RHE）未満の非貴金属触媒（NiFeO系）を開発した。 | ※ |
| ・アルカリ水溶液中にて触媒活性と耐久性を評価する。さらに、項目③の結果もフィードバックして、1.65 V(vs.RHE）にて1A/cm$^2$の電流密度を達成する非貴金属系酸素発生（アノード）触媒を開発する。 | ・1.65 V(vs.RHE)にて1A/cm$^2$の電流密度を達成する非貴金属系酸素発生(アノード)触媒(NiCoO）を開発し、RDEにて耐久性を確認後、MEAにて2.0V以下（1.0A/cm$^2$）にて1000時間の耐久性を確認した。 | ○ |
| ・主にアルカリ水溶液中にて水素発生電位が-0.1V (vs. RHE）未満になると共に、10Ω・cm$^2$ 以下の電気抵抗率を示す非貴金属系水素発生（カソード）触媒を開発する。 | ・アルカリ水溶液中にて水素発生電位が-0.1V (vs. RHE）未満になるNiFeOにて、1Ω・cm$^2$以下の電気抵抗率を示す非貴金属系水素発生（カソード）触媒を開発した。 | |
| ・酸素発生/水素発生用非貴金属触媒を50g/hで量合成する技術を開発する。 | ・酸素発生/水素発生用非貴金属触媒（NiCoO系、NiFeO系）を50g/h以上で量合成する技術を開発した。 | |
| ・触媒性能を向上させる触媒熱処理技術を量合成レベルで開発する。 | ・上記触媒性能を発揮する触媒熱処理装置を開発し上記量合成レベルで合成できるようになった。 | |

※アルカリ溶液中（20℃～80℃）にてRDEを用いて評価

| ③膜/電極触媒界面の設計とアルカリ水電解MEAの構築 | | |
|---|---|---|
| ・本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いて1.65 Vにて 1 A/cm$^2$の電流密度を達成するアルカリ水電解MEAを開発し、触媒及び高分子電解質材料の電解性能を検証する。 | 電解性能に関して、開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いて1.65 Vにて1A /cm$^2$の電流密度を達成するアルカリ水電解MEAを開発し、触媒及び高分子電解質材料の電解性能を検証することを達成した。 | ○ |
| 80 ℃の1M KOH水溶液中で電解時間1000h後の電解電圧2.0V以下@電流密度1A/cm$^2$を、I-V測定による負荷変動対応性について交えて確認しながら、本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いたMEAで達成する。 | 耐久性では、80 ℃の1M KOH水溶液中で電解時間1000h後の電解電圧2.0V以下@電流密度1A/cm$^2$を超える2200時間を本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いたMEAで達成した。 | ◎<br>※1 |
| ・新規開発したカソード触媒を用いたMEAの性能を検証する。 | 新規開発したアノードおよびカソード触媒を用い両極貴金属フリーセルの水電解を、電流密度1.4A/cm$^2$@2.0 Vレベルの性能で検証できた。 | ◎<br>※2 |
| ・再エネとの連携も考慮した変動耐久性試験を、PEMWEのアノードの低電位のプロトコル（カソードH2の透過によるアノード電位低下の影響検証）を参考に設備改良し実施し、課題を抽出する。 | 耐久試験は、I-V試験(0-2 A/cm$^2$)と定電流電解(1 A/cm$^2$, 8 h)を繰り返す負荷変動-定電流電解複合サイクル試験であり、さらに高負荷(4 A/cm$^2$, 10 s)での電解と水電解の停止(0.1 V, 10 s)をサイクルを繰り返す、PEMWEで提案されている起動停止も含んだ加速耐久試験を実施し、本研究で開発した電解質膜と触媒が2000サイクル以上の耐久性を持つことが検証でき、課題を抽出した。 | ○ |
| ・山梨大開発の触媒を用いた25cm2規模のMEA性能評価を設備導入し性能を検証する。 | 山梨大開発の触媒を用いた25cm2規模のMEA性能評価のための設備導入を完了し、1cm2とほぼ同等の性能を検証できた。 | |
| ・新材料を組み合わせたMEA調製と耐久性評価の予備的検討を行い、課題を抽出し2023年度以降の研究指針を得る。 | 耐久評価の予備検討の例として、KOH循環方式の影響も検証しPEMWEで標準的に実施しているアノードのみの循環では同等の電解性能が確認され、片側給水の可能性が示された。片側給水による気液界面における耐久評価の必要性が抽出された。 | |
| ・上記、電解性能を達成するための触媒層、膜/電極触媒界面を構築、電解性能発現の主要メカニズムを解明し、各材料開発にフィードバックする。 | 劣化メカニズム解明としては、80 ℃の1M KOH水溶液中において、開発したアニオン膜・イオノマーおよび、非貴金属触媒に顕著な劣化は見られなかった。劣化の主要因としては、触媒層の厚みが薄い場合に、両極GDL繊維が膜に到達し、短絡を生ずる劣化が抽出された。 | |
| ・上記、耐久性能を達成するために触媒層、膜/電極触媒界面の主要劣化メカニズムを解明し、各材料開発にフィードバックする。 | 上記各項目を達成するために、各材料開発へ、性能発現と劣化メカニズムの予測に基づき逐次、結果のフィードバックを実施した。 | |
| ・改良された開発膜や電解質アイオノマー、アノード＆カソード触媒を用いたMEAの検証評価と、これらの開発材料の性能を引き出す触媒層構造とガス拡散層開発を進めるため、アニオン交換膜形水電解スタック用のシステム設計等も考慮し産業界のニーズも取り入れた評価プロトコルや吸水方式での性能及び耐久性の評価結果をまとめる。 | 上記のように、改良された開発膜や電解質アイオノマー、アノード＆カソード触媒を用いたMEAの検証評価と、これらの開発材料の性能を引き出す触媒層構造とガス拡散層開発を進めるため、アニオン交換膜形水電解スタック用のシステム設計等も考慮し産業界のニーズも取り入れた評価プロトコルや吸水方式での性能及び耐久性の評価結果を計画通りまとめた。 | |
| 各開発材料や触媒層およびガス拡散層等の構成要素の高効率・高耐久化のための設計指針を構築し、各材料開発にフィードバックする。 | 新材料(BAF-QAF, QPAF-4)の触媒表面での吸着状態やガス透過性能を評価できるシミュレーターを構築し、電解性能に影響を及ぼす因子について検討した。 | |

※1 目標の倍以上の耐久性を検証できた。 ※2両極非貴金属の可能性を見出した。

| 最終目標 | 成果 | 達成度 |
|---|---|---|
| ④MEA形成プロセス基盤技術の開発 | | |
| [インクプロセス]<br>二次粒子の粒径：10 μm以下<br>インク粘度：5～100 mPa･s<br>最終目標：分散安定性60分以上 | インクプロセスに関して、二次粒子の粒径を目標である10 μm以下の1.2μm、インク粘度を目標である5～100 mPa･sに対して15.3～19.4 mPa･sを達成し、最終目標である分散安定性60分以上となる80分間分散安定なインクを達成した。 | ○ |
| [塗工プロセス]<br>MEA電極面積25cm2における担持量バラつき±10%以内<br>触媒層厚みバラつき±10%以内 | 塗工プロセスに関しては、目標である電極面積25cm2における担持量バラつき±10%以内、触媒層厚みバラつき±10%以内のMEAの形成に対して、開発したインクおよび超音波スプレーを用いて、担持量バラつき±1.5%および触媒層厚みバラつき±1.5%のMEA形成を達成した。 | |

**○成果の意義**

・アニオン導電率、機械強度、化学安定性に優れる高性能高耐久性アニオン膜およびイオノマーの開発に成功した。また、アニオン膜を A4 サイズで製造できる製造技術を開発するとともに、製造コスト 15000 円/$m^2$ 以下を見通した。アニオン膜型水電解セルの実用化に大きく貢献するアニオン膜とイオノマーを開発できた。

・アルカリ水溶液中において貴金属触媒($IrO_x$, Pt)よりも高活性な非貴金属系の酸素発生触媒および水素発生触媒を開発した。非貴金属系触媒を量合成する技術の開発にも成功した。アニオン膜型水電解セルの実用化に大きく貢献する触媒材料を開発できた。

・本事業で開発したアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いた MEA を開発し、アルカリ水電解で欧米のベンチマークセルを大きく凌駕し（1.0A/$cm^2$ の電流密度でセル電圧 1.65V、ベンチマークセルは 1.7V）、PEMWE に匹敵する性能と耐久性を達成した（2200 時間の耐久性）。

**○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数**

| 研究発表・講演 | 論文 | 特許出願 | 受賞実績 | 成果の普及活動 |
|---|---|---|---|---|
| 25 | 14 | 1 | 4 | 1 |

**○研究開発成果の詳細**

【１】高性能高耐久性アニオン膜・イオノマーの開発とスケールアップ技術の確立

（山梨大学、タカハタプレシジョン株式会社）

本研究開発項目では、アニオン膜の開発のボトルネック課題である高アニオン導電性、高耐久性、気体バリア性および透過性の制御、汎用溶媒への溶解性改善を独自の分子設計指針に基づいて山梨大学が取り組むとともに、開発する新型高性能高耐久性アニオン膜・イオノマーの低コストおよびスケールアップ合成、製膜技術をタカハタプレシジョンが取り組んだ。以下のように最終目標値を達成した。

① 水中でのアニオン導電率が 100mS/cm 以上、破断強度が 20MPa、破断伸びが 200%以上のアニオン膜を開発した。
② 80℃の 4M KOH 水溶液中で 1000 時間以上の耐久性を持つアニオン膜を開発した。
③ 水素および酸素の透過係数が調節可能な分子構造設計指針を見通した。
④ アニオン膜の製造コストが 15000 円/$m^2$ 以下を見通した。
⑤ アニオン膜を A4 サイズで製膜できる技術を開発した。
⑥ アニオン膜、イオノマーを量合成する技術を開発し、更なる物性向上のための設計指針を得るとともに、国内関心表明企業等への提供と評価を行った。
⑦ 水中でのアニオン導電率が 120mS/cm 以上、破断強度が 25MPa、破断伸びが 250%以上、かつ 80℃の 4M KOH 水溶液中で 1000 時間以上の耐久性を持つアニオン膜およびイオノマーを開発した。
⑧ 25g/バッチでアニオン膜およびイオノマーを量合成する技術を開発した。

【２】高活性高耐久性非貴金属系触媒の開発とスケールアップ技術の確立

（山梨大学、日本化学産業株式会社）

本項目ではアニオン交換膜型水電解のメリットを最大限に生かすため、高活性と高耐久性を両立しつつ高電気伝導性とガス拡散性も付与した非貴金属系触媒を創製することを目標とした。水電解用の電極触媒はガス拡

散電極を形成する必要があり、電気伝導性・ガス拡散性・高比表面積を両立させる必要がある。また、アルカリ環境下であるため IrOx は溶解することから従来にない酸素発生触媒の探索も必要がある。その中で、Ni 酸化物系に注目し、高活性と高耐久性をもつ酸素発生触媒の創製に成功している。更に、これまで Pt が主流であった水素発生触媒においても、新たな酸化物系触媒を創製し、両極にて非貴金属化に成功した。それらの触媒については、日本化学産業において量合成工程の検討も進めている。これらの研究開発を通し、以下通り最終目標を達成することができた。

① NiO への遷移金属元素のドープに成功すると共に、気相合成法の一つである火炎法を利用して、比表面積 20 $m^2g^{-1}$ 以上を有する酸素発生触媒の合成に成功した。

② 回転ディスク電極法を用いて、NiCoO 及び NiFeO 系の酸素発生活性が市販 $IrO_x$ 触媒より高いことを見出すこと成功した。

③ 光電子分光法、透過電子顕微鏡及び in situ Raman 分光法を駆使した複合解析を駆使し、②記載の触媒の高い酸素発生活性は最表面の非結晶相（厚み 3-6 nm 以下）の寄与によるものと解明した。

④ ②記載の触媒について、後処理工程を最適化することで酸素発生活性が大幅に変化すると共に、触媒活性のアレニウスプロットが 20-80℃にて直線性を有することから、律速段階や活性サイト数は測定温度範囲にて変化せず、初期性能レベルにて化学的に安定に作動することを確認した。

⑤ Pt に匹敵するオンセット電位を有する水素発生触媒として、比表面積 10 $m^2\,g^{-1}$ 以上を有する NiFeO 系触媒の創製に成功した。

⑥ 光電子分光法、透過電子顕微鏡及び in situ Raman 分光法を駆使した複合解析を駆使し、⑤記載の触媒の高い水素発生活性は最表面の結晶相の寄与によるものと解明した。

⑦ ②の酸素発生触媒及び⑤記載の水素発生触媒において、それらの電気伝導度は多孔性を有しながら 10 S $cm^{-1}$ 以上の金属伝導性を示すこと明らかにした。これにより、抵抗過電圧の大幅な抑制につながった。

⑧ ②の酸素発生触媒及び⑤記載の水素発生触媒において、それらの微細構造が多孔性の連珠構造を有していることを電子顕微鏡で確認した。これにより、濃度過電圧の大幅な抑制につながった。

⑨ 改良された火炎合成装置を利用し、有機金属錯体を適切に選択することで、②記載の酸素発生触媒の量合成（1 時間で 50 g 以上）することに成功した。

⑩ 改良された火炎合成装置を利用し、有機金属錯体を適切に選択することで、⑤記載の水素発生触媒の量合成（1 時間で 10 g 以上）することに成功した。

【３】膜/電極触媒界面の設計とアルカリ水電解 MEA の構築
（山梨大学、東北大学、パナソニック ホールディングス株式会社）

電解性能に関して、開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属アノード触媒を用いて 1.65 V にて 1A $cm^{-2}$ の電流密度を達成するアルカリ水電解 MEA を開発し、触媒及び高分子電解質材料の電解性能を検証することを達成した。

① 耐久性では、80 ℃の 1M KOH 水溶液中で電解時間 1000h 後の電解電圧 2.0V 以下@電流密度 1A/cm2 を超える 2200 時間を達成した。

この耐久試験は、I-V 試験(0-2 A $cm^{-2}$)と定電流電解(1 A $cm^{-2}$, 8 h)を繰り返す負荷変動-定電流電解複合サイクル試験であり、さらに高負荷(4 A $cm^{-2}$, 10 s)での電解と水電解の停止(0.1 V, 10 s)をサイクルする高負荷と水電解停止のサイクル繰り返す、PEMWE で提案されている起動停止も含んだ加速耐久試験を実施し、本研究で開発した電解質膜と触媒が 2000 サイクル以上の耐久性を持つことが検証できた。

② KOH 循環方式の影響も検証し PEMWE で標準的に実施しているアノードのみの循環では同等の電解性能が確認され、片側給水の可能性が示された。
③ 山梨大開発の触媒を用いた 25cm$^2$ 規模の MEA 性能評価のための設備導入を完了し、1cm$^2$ とほぼ同等の性能を検証できた。
④ 最も重要な成果として、両極貴金属フリーセルの水電解を、電流密度 1.4 A cm$^{-2}$@2.0 V レベルの性能で検証できた
⑤ 劣化メカニズム解明としては、80 ℃の 1M KOH 水溶液中において、開発したアニオン膜・イオノマーおよび、非貴金属触媒に顕著な劣化は見られなかった。劣化の主要因としては、触媒層の厚みが薄い場合に、両極 GDL 繊維が膜に到達し、短絡を生ずる劣化が抽出された。

以上、最終目標の項目すべてにおいて、達成することができた。

【４】アルカリ水電解用の MEA 形成を実現するプロセス基盤技術の確立
（パナソニック ホールディングス株式会社）

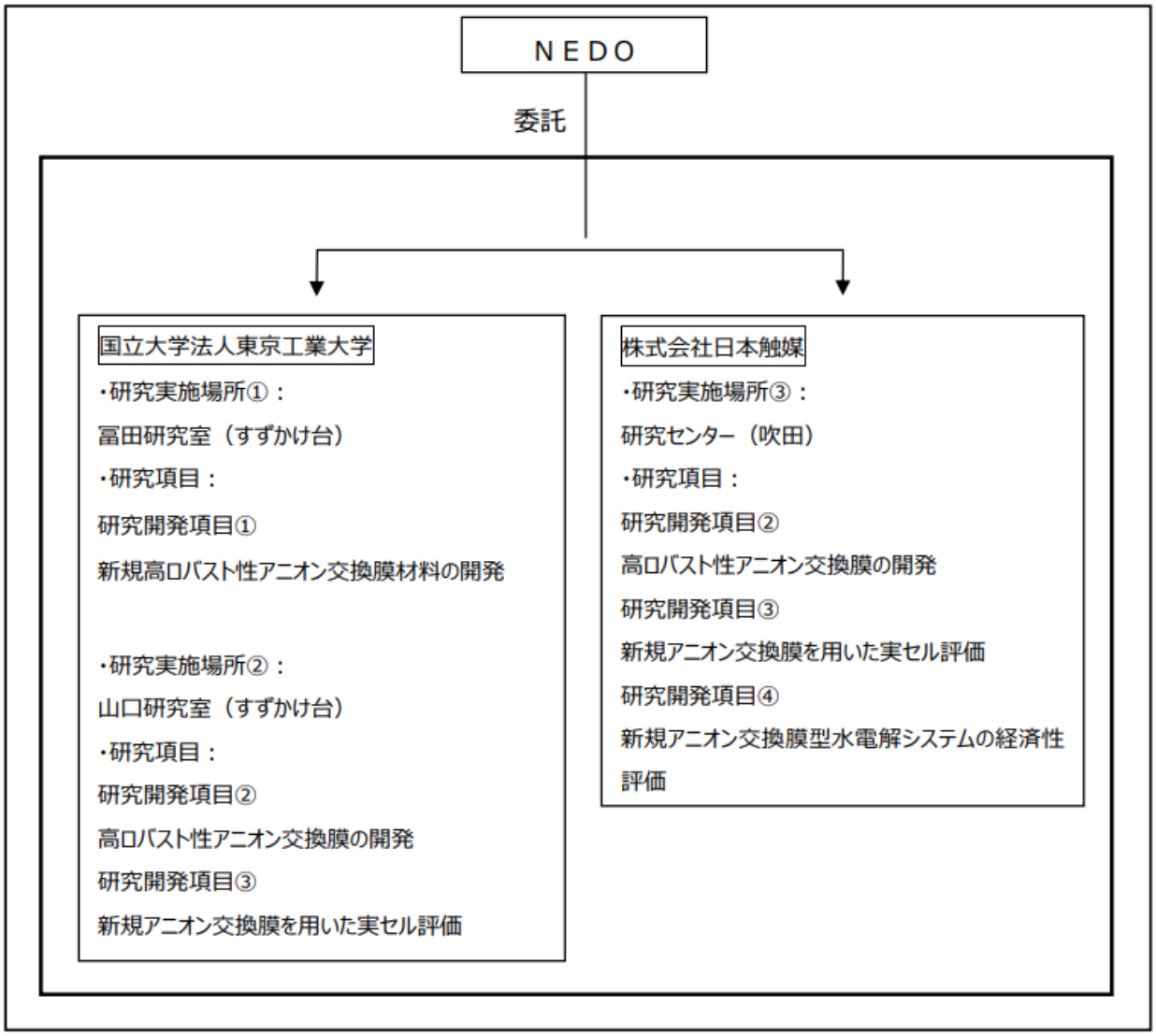
① インクプロセスに関して、二次粒子の粒径を目標である 10 μm 以下の 1.2μm、インク粘度を目標である 5～100 mPa･s に対して 15.3～19.4 mPa･s を達成し、最終目標である分散安定性 60 分以上となる 80 分間分散安定なインクを達成した。
② 塗工プロセスに関しては、目標である電極面積 25cm2 における担持量バラつき±10%以内、触媒層厚みバラつき±10%以内の MEA の形成に対して、開発したインクおよび超音波スプレーを用いて、担持量バラつき±1.5%および触媒層厚みバラつき±1.5%の MEA 形成を達成した。

**○まとめ**

- 芳香族基と部分フッ素化構造からなる新型の高性能高耐久性アニオン膜・イオノマーを開発し、低コスト化およびスケールアップ合成、製膜技術に取り組んだ。
- 表面構造と電子構造を厳密に制御した NiO 系ナノ粒子からなる触媒を開発し、貴金属系電極触媒に匹敵または凌駕する酸素発生触媒活性、水素発生触媒活性を示すことを見出した。
- 本プロジェクトで開発した新型のアニオン膜・イオノマーおよび NiO 系アノード触媒を用いて MEA を作製し、高性能かつ高耐久性のアニオン膜型アルカリ水電解セルを達成した。
- 加速劣化試験により GDL 繊維が引き起こす劣化メカニズムを明らかにした。
- 分子動力学シミュレーションと量子化学計算を用いて、触媒界面におけるイオノマーの構造や水クラスターの解析を行った。
- MEA 形成のための安定なインク形成技術を確立するとともに、超音波スプレーを用いて電極面積 25cm$^2$ において担持量や厚さが均一な MEA 形成を達成した。

## ４．１．７　低コストＡＥＭ型水電解システムの実現に向けたアニオン交換膜材料の高ロバスト化（東京工業大学、日本触媒）

○実施者名、実施体制




○期間、予算

期間　　：2021 年 4 月~2023 年 3 月

予算　　：2021 年度／59,791,500 円、2022 年度／58,412,400 円

○実用化への道筋

事業終了後は、産学連携をベースにポリマーの改良を継続するとともに、膜、セルの技術開発をさらに推進する。周辺部材、電解装置メーカーとの協業により実条件での要求性能を達成すると同時に、量産化のための生産技術上の課題を解決する。事業戦略としては、先行する海外市場にマーケットインし、国内市場への展開を目指す。2026 年度以降に有償サンプルの提供を開始し、2030 年度以降商業生産の開始を目標とする。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①-1. カチオン官能基の構造最適化による耐アルカリ性能の向上** | ベンジルトリメチルアンモニウム塩の 100 倍以上の耐アルカリ性を示すカチオン官能基の構築を達成。 | ベンジルトリメチルアンモニウム塩の 400 倍以上の耐アルカリ性を有する官能基構築を達成。カチオン部位の置換基の電子的効果によるさらなる安定化指針を確立。 | ◎ | 目標値を大きく上回る耐久性を確認。 |
| **①-2.カチオン官能基をもつポリマーの設計・合成および高分子膜としての性能を加味した分子設計** | 優れた耐アルカリ加水分解・耐酸化分解特性が見込まれるポリアリーレン型の主鎖骨格をもつ耐アルカリ性ホスホニウム官能基を有する高分子の合成。 | 重量平均分子量を 20 万に向上させたポリマーサンプルの合成を達成 (40 倍耐久カチオン含有)。<br>230 倍および 400 倍以上の耐アルカリ性をもつカチオン含有ポリアリーレン型ポリマーの合成を達成（重量平均分子量 4 万以上）。 | ○ | |
| **②-1. 高ロバスト性カチオン含有ポリマーを使用した成膜方法の開発検討** | 標準サイズの電解セルで評価可能なサイズ（50mm 角）の成膜物の取得。 | ・研究開発項目①において開発されたホスホニウムポリマーを使用して 50mm 角の成膜物を取得した。<br>・PE 基材との複合膜を作成し機械的強度の向上を確認した。 | ○ | |
| **②-2. 新規アニオン交換膜の基礎物性評価** | 80℃ 4M KOH 中で 100 時間の耐久性試験後、イオン伝導性 $10^{-2}$ S/cm 以上の性能を維持すること。 | ・膜状態での耐アルカリ試験前後で安定であることを確認できたが、イオン伝導度は最高 $10^{-3}$ S/cm。<br>・ポリマーの耐酸化性を評価し、ポリアリーレン型ホスホニウムが既存材料に対する優位性をもつことを確認した。 | △ | 各種評価結果をポリマー分子設計にフィードバックし改良を検討。 |
| **③-1. 非貴金属系アニオン交換膜型水電解セルの開発** | 開発した高ロバスト性カチオン含有ポリマーを含有する膜および市販貴金属系触媒を用い、水電解性能として 1.75 V @1.0A/$cm^2$ 以下を目指す。80℃、KOH 4Ｍ水溶液供給で、0.1V-2.0V サイクル試験 1000 回後に、 | ・市販膜が急速に劣化する水電解試験条件を明確化した (80 ℃、1 or 4 M KOH 供給)。<br>・官能基劣化を評価可能な各種分析手法を確立した。<br>・本事業で開発した高ロバストポリマーを含む膜を用いた電解試験を実施し、80℃、KOH 4Ｍ水溶液供給で、0.1V-2.0V サイクル | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1.80 V@1.0 A/$cm^2$ 以下を目指す。また、膜中の官能基劣化率について、適宜外挿法または加速試験法を用いて、1000 時間相当の評価を行い、市販対照サンプルに対する優位性を示す。最後に非貴金属系触媒での性能を確認する。 | 試験 1000 回後に、1.80 V@ 1.0 A/$cm^2$ 以下を達成。<br>・水電解性能として 1.75 V@ 1.0A/$cm^2$ 以下を達成。<br>・非貴金属系触媒での電解試験において、高耐久性を発揮。 | | |
| **④-1. 新規アニオン交換膜型水電解システムの経済性評価** | 研究開発項目①～③の成果を用いて水電解を実施した場合の水素製造コストを推算し、既存製法と比較する。また、推算の過程で感度分析を実施し、コスト支配要因を特定する。 | 開発品の初期性能を用いて、立地条件等のシナリオを仮定し、水素製造コストを試算した。PEM 型水電解システムとの比較では、ほぼ同等との試算結果を得た。感度分析においては、電力コスト、次いで設備コストが支配的であるが、長寿命化によりその他のコストも引き下げられる可能性が示唆された。 | ○ | |

○成果の意義

アニオン交換膜型水電解の普及に向けて、その重要な部材であるアニオン交換膜の耐久性が現状十分とは言えず、より高耐久な膜の開発が重要課題と位置づけられている。アニオン交換膜の耐久性を支配する要因として、高分子主鎖の安定性の安定性が議論されている。将来的に更なる高耐久性の実現に向けて、高分子主鎖に加え、カチオン官能基の安定性向上に資する技術検討も極めて重要である。本事業では優れた安定性をもつカチオン官能基の開発を基盤とした高ロバストアニオン交換膜材料の開発と応用を検討した。

アニオン交換膜は常にアルカリ環境にさらされ、高い耐アルカリ性が必要と考えられる。既存の多くの材料には、ベンジルトリメチルアンモニウム型のカチオン構造が付与されているが、この構造は高濃度のアルカリ条件では分解が進行することが指摘されており、低濃度のアルカリを使用する場合でも、実使用条件のような長期間の使用を想定すると、安定性が不十分になる可能性がある。

本事業では、カチオン部位として、テトラアリールホスホニウム塩を用い、その置換基を適切に設計することで飛躍的に耐アルカリ性を向上できることを明らかにし、加速条件における評価で、従来型アンモニウムの 400 倍安定なカチオンが得られた。また、この官能基を組み込んだポリマーの実用性についても検証した。本成果により、10 年以上の寿命をもつ高耐久な膜材料の開発が期待される。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

特許出願、成果の発表の実績については下記の通り。

| | 特許 | 論文 | 学会発表・講演 |
|---|---|---|---|
| 2021 年度 | 1 | 0 | 1 |
| 2022 年度 | 1 | 1 | 10 |
| 合計 | 2 | 1 | 11 |

○研究開発成果の詳細

本プロジェクトでは、アニオン交換膜の高耐久化を目指してカチオン官能基の構造最適化を行い、ポリマー構造の有力候補を開発するとともに、開発した材料のフィルム化と物性把握、水電解特性の評価を含めた実用性の検証を実施した。また、高耐久なアニオン交換膜を使用した水電解水素製造の経済性評価についても検討した。

(1) 研究開発項目①：新規高ロバスト性アニオン交換膜材料の開発

ベンジルトリメチルアンモニウム塩の 400 倍以上の耐アルカリ性を有するカチオン官能基をテトラアリールホスホニウム塩への嵩高い置換基の付与に基づき構築した。また、カチオン部位の置換基の電子的効果によるさらなる安定化を達成した（図 1）。

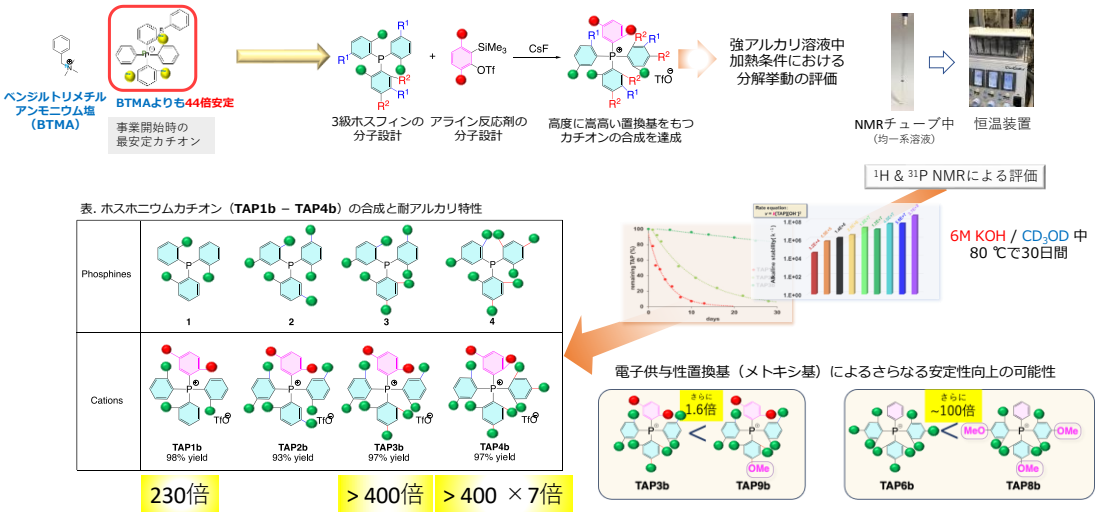



図 1. ホスフィン類とアライン類の付加反応に基づくテトラアリールホスホニウムカチオンの構築

また、重量平均分子量を 20 万に向上させたポリマーサンプルの合成を達成した (40 倍耐久カチオン含有)。230 倍および 400 倍以上の耐アルカリ性をもつカチオン含有ポリアリーレン型ポリマーの合成を達成した（重量平均分子量 4 万以上）（図 2）。

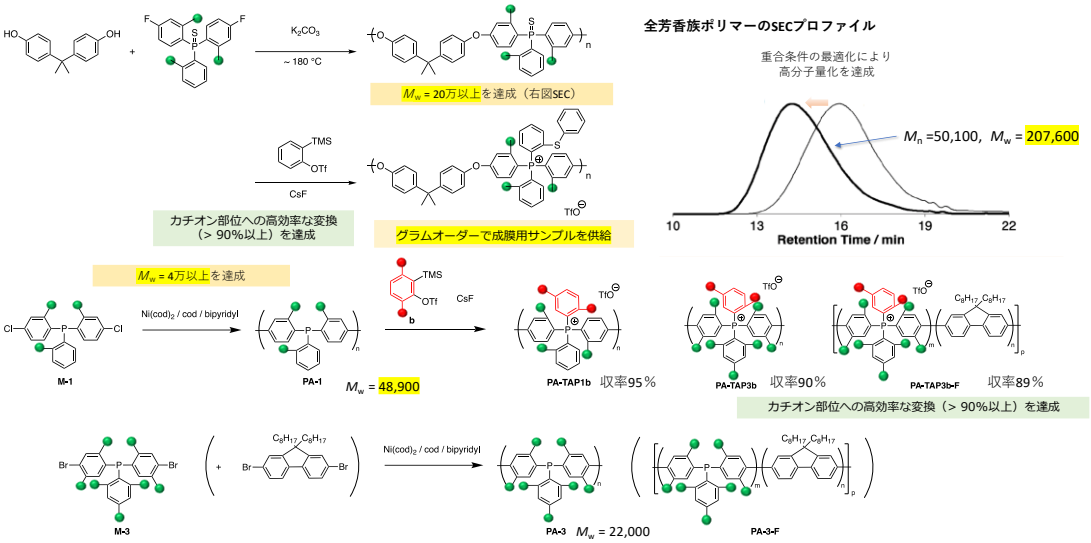



図 2. テトラアリールホスホニウム含有ポリマーの合成

(2) 研究開発項目②：高ロバスト性アニオン交換膜の開発

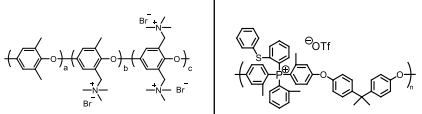
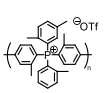
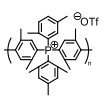
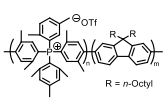
新規に開発したホスホニウムポリマーを使用してアニオン交換膜を作成し、含水率、イオン交換容量（IEC）、イオン伝導度、耐久性等を評価した。溶液キャスト法を用いて自立膜及びポリエチレン微多孔質膜基材を使用した細孔フィリング膜を作成した。性能評価の結果、ホスホニウム膜は IEC や含水率が低くなる傾向があったものの、アルカリ水溶液中で高い耐久性を示した（図 3）。




図 3. ポリエーテル型ホスホニウムの成膜検討及びアルカリ耐久性評価前後のイオン伝導度評価

また、ポリアリーレン型のホスホニウムポリマーはフェントン反応に対して耐性があり、高い耐酸化性をもつことが示唆された（表 1）。

表 1. ポリアリーレン型ホスホニウムのフェントン試験結果

| | アンモニウム系<br>ポリフェニレンオキシド | ポリエーテル型<br>ホスホニウム | ポリアリーレン型<br>ホスホニウム | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **PPO-BA** | **PTAPS1a** | **PA-TAP1b** | **PA-TAP3b** | **PA-TAP3b-F** |
| 構造 |  |  |  |  |  |
| 重量減少率 | >90% | 66% | <10% | <10% | <10% |

＜評価法＞各ポリマーを粉末状態で Fenton 反応⇒残存した固体の重量で主鎖の耐久性を評価（試験条件：3% $H_2O_2$、3ppm $FeSO_4$、80℃、2h）

(3) 研究開発項目③：新規アニオン交換膜型水電解セルの開発

市販膜が急速に劣化する水電解試験条件を明確化した(80 ℃、4 M KOH 供給)。官能基劣化を評価可能な各種分析手法を確立した。本事業で開発した高ロバストポリマーを含む膜を用いた電解試験を実施し、80 ℃、KOH 4 M水溶液供給で、0.1V-2.0V サイクル試験 1000 回後に、1.80 V@1.0 A/cm$^2$ 以下を達成した（図 4）。水電解性能として 1.75 V@1.0A/cm$^2$ 以下を達成した。非貴金属系触媒での電解試験において、高耐久性を発揮した（図 5）。

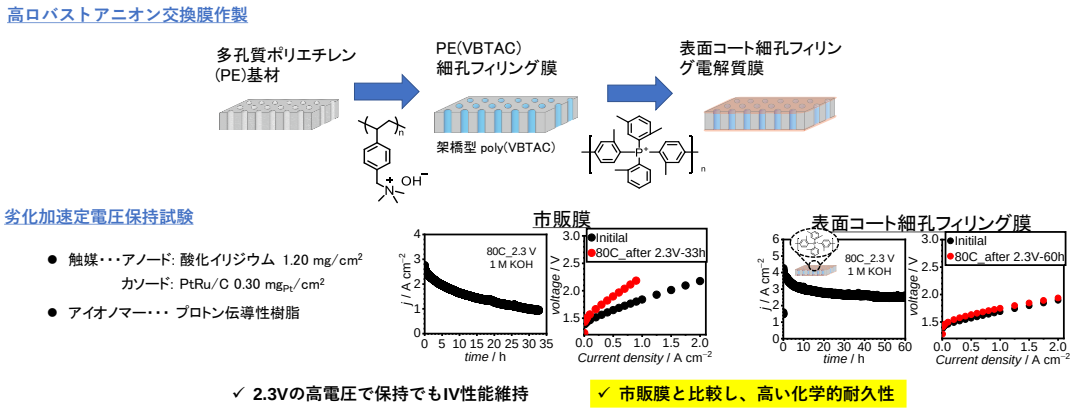



図 4. 高ロバストアニオン交換膜を使用した劣化加速試験

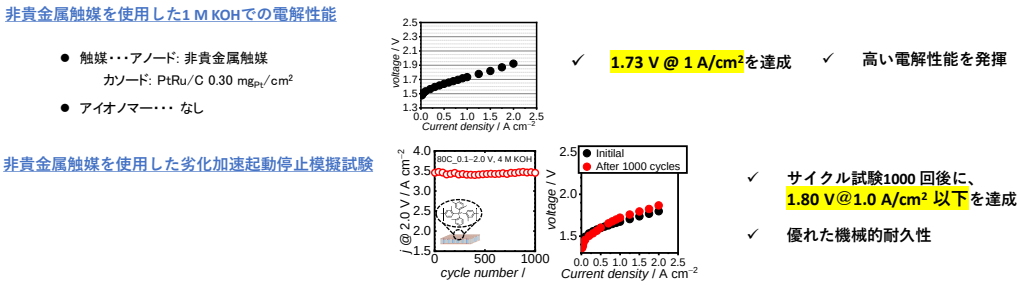



図 5. 非貴金属触媒を使用した水電解試験

(4) 研究開発項目④：新規アニオン交換膜型水電解システムの経済性評価

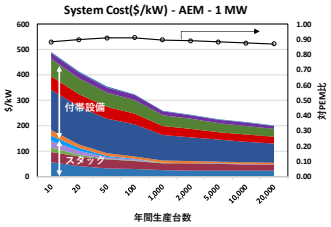
AEM 型水電解システムコストおよび水素製造コストの試算を行った。同システムのスタック本体は量産によるコスト低減が顕著であった。一方、付帯設備はコスト低減効果が表れにくく、コスト低減には同設備の共通化が有効と示唆された。水素製造コストは、電解性能、立地条件などに種々の仮定を置き、現地製造価格で 10 円台/$Nm^3$ で実現可能との試算結果が得られた（図 6）。

＜AEMシステムコスト＞

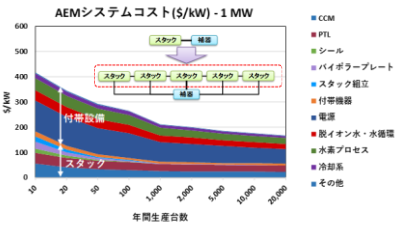
PEMの先行例*を参考に、積上げ方式で試算

セルの前提条件

| | |
|---|---|
| 単セル有効面積 ($cm^2$) | 約680 |
| 電流密度(A/$cm^2$) | 1.70 |
| 基準電圧(V) | 1.70 |
| 電力密度(W/$cm^2$) | 2.89 |
| 単セル電力(W) | 1,960 |
| セル枚数(枚) | 約500 |




1 MW システムの生産台数依存性



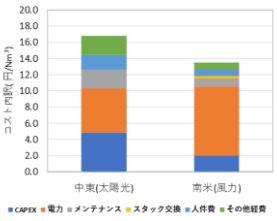

1 MW システムのBOP共通化の効果

* A. Mayyas, M. Ruth, B. Pivovar, G. Bender, and K. Wipke, Technical Report, NREL/TP-6A20-72740, August 2019.

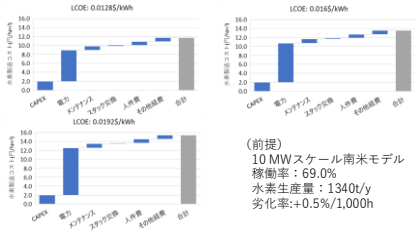
＜水素製造コスト試算＞

設備、電力、稼働率、劣化率、割引率、人件費、税率等の種々のパラメータを組込んだDCF法による試算モデルを構築。
再エネ適地で電源直結で水電解を実施するシナリオで現地製造価格を試算。
ドルベースで試算（事業開始時レート1$=110円）

| 立地 | 中東（サウジアラビア） | 南米（チリ） |
|---|---|---|
| 再エネ源 | 太陽光 | 風力 |
| 稼働率(%) | 27.0 | 69.0 |
| LCOE (USD/kWh) | 0.0104 | 0.016 |




10 MWスケールの現地水素製造コスト

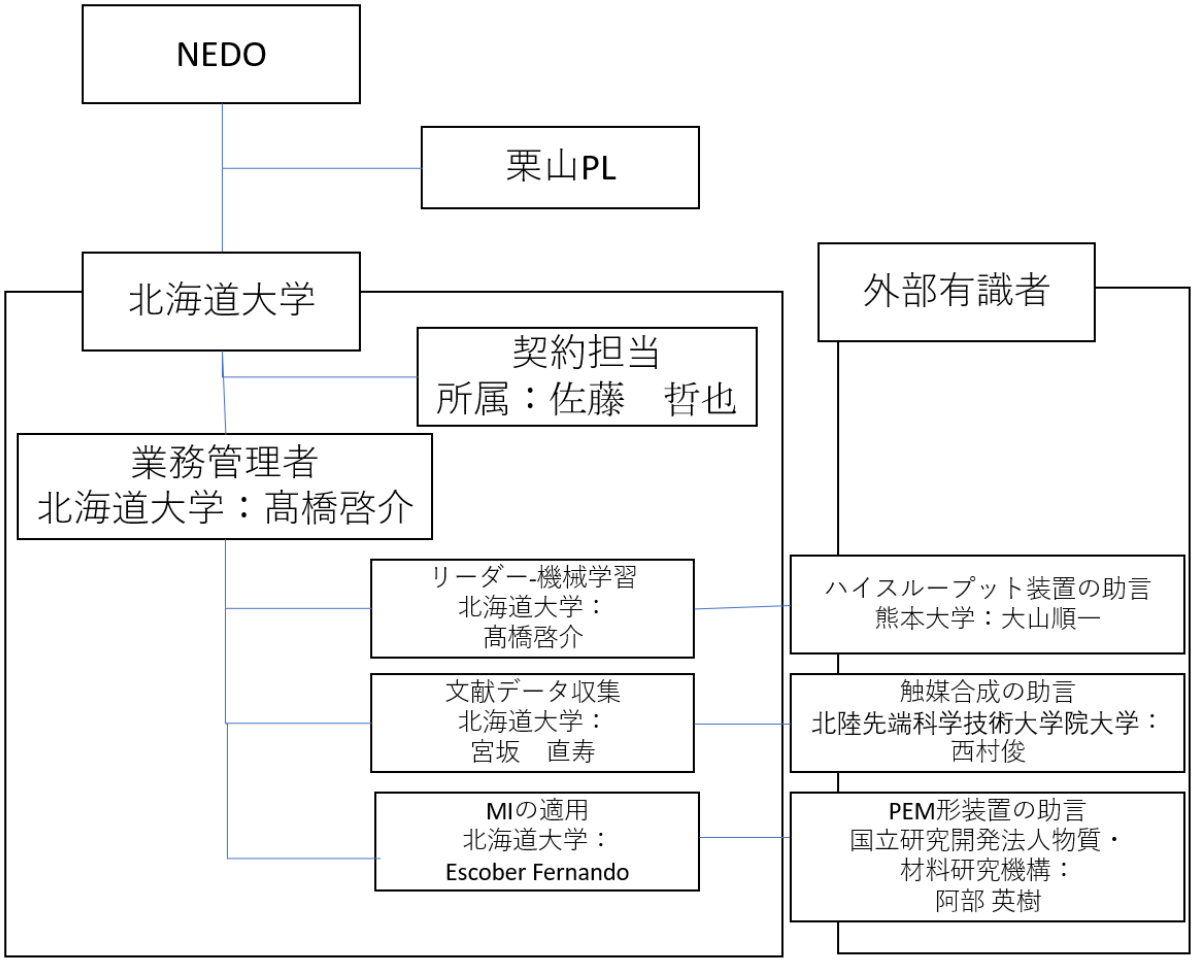



（前提）
10 MWスケール南米モデル
稼働率：69.0%
水素生産量：1340t/y
劣化率:+0.5%/1,000h

各LCOEでの水素製造コスト

図 6. AEM 水電解システムコスト及び水素製造コストの試算

**４．１．８プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究（北海道大学）**




○期間、予算

期間　　：2022 年 10 月~2023 年 3 月

予算　　：720 万円

○実用化への道筋

本調査によって、PEM 型水電解装置におけるマテリアルズインフォマティクス(MI)の適用が可能ということが判明した。今後ハイスループット実験による PEM 形水電解装置のビッグデータを収集することが出来れば機械学習をはじめとするマテリアルズインフォマティクスの導入が可能であり、アノード・カソード・高分子膜、実験条件の最適化など PEM 形水電解装置全般における技術開発が大幅に促進することが期待できる。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **A** | **PEM 型水電解のアノードの非貴金属化に関する既知情報からのデータベースの構築** | 1 万の PEM 型水電解装置の文献データベース構築を完了 | ◎ | 1 万を超える世界初の PEM 型水電解装置に関する文献データベースを作成した。 |
| **B** | MI の実践 | 機械学習等の MI 手法を実践し、アノード・カソード・MEA の材料探索ができることが判明した。 | ○ | |
| **C** | PI への MI 拡張に関する調査と提言 | ハイスループット実験とマテリアルズインフォマティクスを組み合わせることにより、効率的にアノードの非貴金属材料の探索が可能である提言と展望をまとめた。 | ○ | |

○成果の意義

PEM 型水電解装置分野においてデータを収集するという文化がこれまで存在してこなかった。本事業では 1 万を超える PEM 型水電解装置の文献データを世界で初めてデータベース化した。これにより PEM 型水電解装置分野の開発状況を俯瞰して議論することが可能となった。またマテリアルズインフォマティクス(MI)手法の適用が可能ということも同時に判明した。これは機械学習によってアノード・カソード・MEA、さらにはプロセスインフォマティクスへの展開による PEM 型水電解装置の最適化も可能ということが判明した。今後の MI 導入のきっかけとなる成果である。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

PEM 型水電解装置のデータベースと MI についての論文 1 編を国際誌(査読あり)にて査読中である。

○研究開発成果の詳細

(1) 実施項目 1 ：PEM 型水電解装置の文献データ収集

PEM 型水電解装置に関するデータを 11,990 データ収集した。データは 113 の文献から抽出したデータを収集した。データは「アノード、カソード、高分子膜」の材料、材料の合成方法、実験条件(水流、温度、圧力)、セルの面積、電圧-電流曲線等のデータを収集した。図 2 に示したように収集するデータ項目を決定し、そのルールに基づいてデータ収集は行われた。データは Google scholar, science direct, web of science の 3 つサイトを利用して収集した。検索クエリーは「PEM electrolysis catalysts」で検索した。合計 113 の文献データを収集した。PEM 型水電解装置に関するデータはこれまで一切存在していなかったため、世界で初めて PEM 型水電解装置のデータ収集方法を提案した。

(2) 実施項目 2 ：マテリアルズインフォマティクスによる文献データの解析

収集した 11,990 データに関して可視化、統計解析等のデータ解析を実行した。データ頻度解析ではデータに含まれる出現率の多い事柄を整理した。アノード・カソードの合成方法は図 4 に示したようにスプレーが半数以上を示し、次いで蒸着とコーティングが多いことが判明した。PEM 型水電解装置の性能評価方法では図 5 に示したように電圧-電流曲線による評価が 90%以上を占めている。劣化率に関する評価を記載している文献は全体の約 50%程度であった。このことから劣化率の試験はその特性から検証されない傾向にあることが分かった。図 6 に示したようにアノード・カソードの評価方法では SEM、TEM、XRD、XPS、表面積による評価が主な方法であった。特に SEM と XRD による構造情報や組織情報が多く調べられている傾向にある。使用されている材料についての頻度解析では、図 7 に示したように高分子膜の 9 割近くが Nafion という結果となり、高分子膜は固定されていることが判明した。アノード・カソード材料についての頻度解析を行った。アノードでは 80%以上がイリジウムを使用していた。イリジウム以外ではルテニウムが 2 番目に多く全体の 35%で使用されていた。コバルト、銅、プラチナ、酸化チタンのアノードも 10%未満ではあるが使用されていることが判明した。このように高分子膜と同じようにPEM 型水電解装置では Ir や Ru 等の材料に特化した研究が多いことがわかる。カソードの材料の頻度解析では、プラチナと炭素が 80%以上を占めている。また図 10 に示したように、電圧-電流曲線の結果を見るとイリジウムを含まれているものだけが実用化に必要な「電圧 1.8V、電流 2.5A」を達成するということがデータから判明し、Ir を含まない場合は高い電流を出すことができないことがわかる。このように Ir が特異点的な性能を持っていることが示されている。。以上のように PEM 型水電解装置における文献データに関する可視化・統計解析において大部分がイリジウムを含むなど、データに大きな偏りがあることが判明した。

収集した 11,990 データに対してマテリアルズインフォマティクスの適用を実施した。相関係数による解析では、図 11 に示したように電圧と反応温度は反比例の関係性、電流と反応温度は比例の関係であることが示された。アノード材料における相関係数の解析では、図 12 に示したように「Co、Ir、Pt、Ru、Ti」を増やすと電流も上昇することが判明した。反対に Cu を増やすと電流が下がることも判明した同じようにカソードでは Pt と C と電流は比例の関係にあるのに対して、「Ce、La、Ni、Ti」は電流と反比例の関係にあることが判明した。一方で電圧に関して Ir、Pt、Sn、Ti は量を増やすと電圧が下がるという反比例の関係であることも示された。電圧に関しては Co や Pd 等が比例の関係であった。

機械学習による電流と電圧の予測の可否を検討した。機械学習では Y=F(X)の関数を解いている。Y は目的変数で X は目的変数を説明する記述子である。そこで機械学習を用い、電流・電圧それぞれに影響のある記述子を評価した。その結果、電流では Co の有無が重要と判断された。本来 Ir の有無が重要と考えられるが、アノードデータの 80%が Ir のため高い重要度として認識されなかった可能性がある。そのためイリジウムに偏ったデータではイリジウムが入らない材料予測は困難と示唆された。同様にカソードにおける電流を決める因子を機械学習により探索したところ C の有無が重要と示された。しかしアノードと同じようにほとんどのデータが Pt に偏っているた

め、Pt が重要な因子として判別されなかったと考えられる。このように分散かつ均一なアノード・カソードのデータを作る必要があることが示唆された。
電流と電圧をそれぞれ目的変数とし、説明変数をアノード・カソード材料と実験条件として機械学習の作成を行った。結果として図 14 に示したようにアノード・カソード・実験条件から電流を予測することは非常に困難であることが機械学習によって示された。ところが電圧に関してはアノード・カソード・実験条件の情報により一定の学習機が作成できることが見いだされた。これは電圧を先に予想し、予測した電圧で電流を求めるという 2 段階の機械学習が可能ということが示唆された。そこで電流を目的変数とし、アノード・カソード・実験条件・電圧で機械学習を作成したところ、交差検証による決定係数の評価で 90%近い正当率が得られた。このように電圧がわかると電流の予測が可能という結果を得られた。また機械学習による予測精度に確証を得るため、目的変数である電流・電圧をグループ化した。例えば電圧 0V-1V はグループ 0 にする等データの前処理を行った。グループ化した電流・電圧それぞれに対して、アノード・カソード・実験条件を記述子として予測したところ 80%を超える精度で予測が可能となった。以上のことから機械学習による電流・電圧の予測はもちろんのことアノード・カソード材料の予測が可能なことが明らかとなった。
作成した機械学習に対して。電圧が 1.8V,セル温度が 70℃、圧力 1MPa、劣化率が 0 の時のアノードとカソード材料の予測を実施した。その結果、図 16 に示されたようにそれらの条件で電流が 1.2A 以上を達成するアノードは Ir、Ru、W が予測され、カソードでは Pt が予測された。以上の機械学習の解析によってアノード・カソードの構造情報が重要ということが示唆された。そこで X-Ray Diffraction Pattern によって酸化イリジウム、酸化ルテニウム、酸化コバルトの情報を実験より計測しデータ化した。構造情報を含む機械学習は予測精度の大幅な改善が達成された。このようにアノード・カソードの予測では構造情報が重要という結果が得られた。

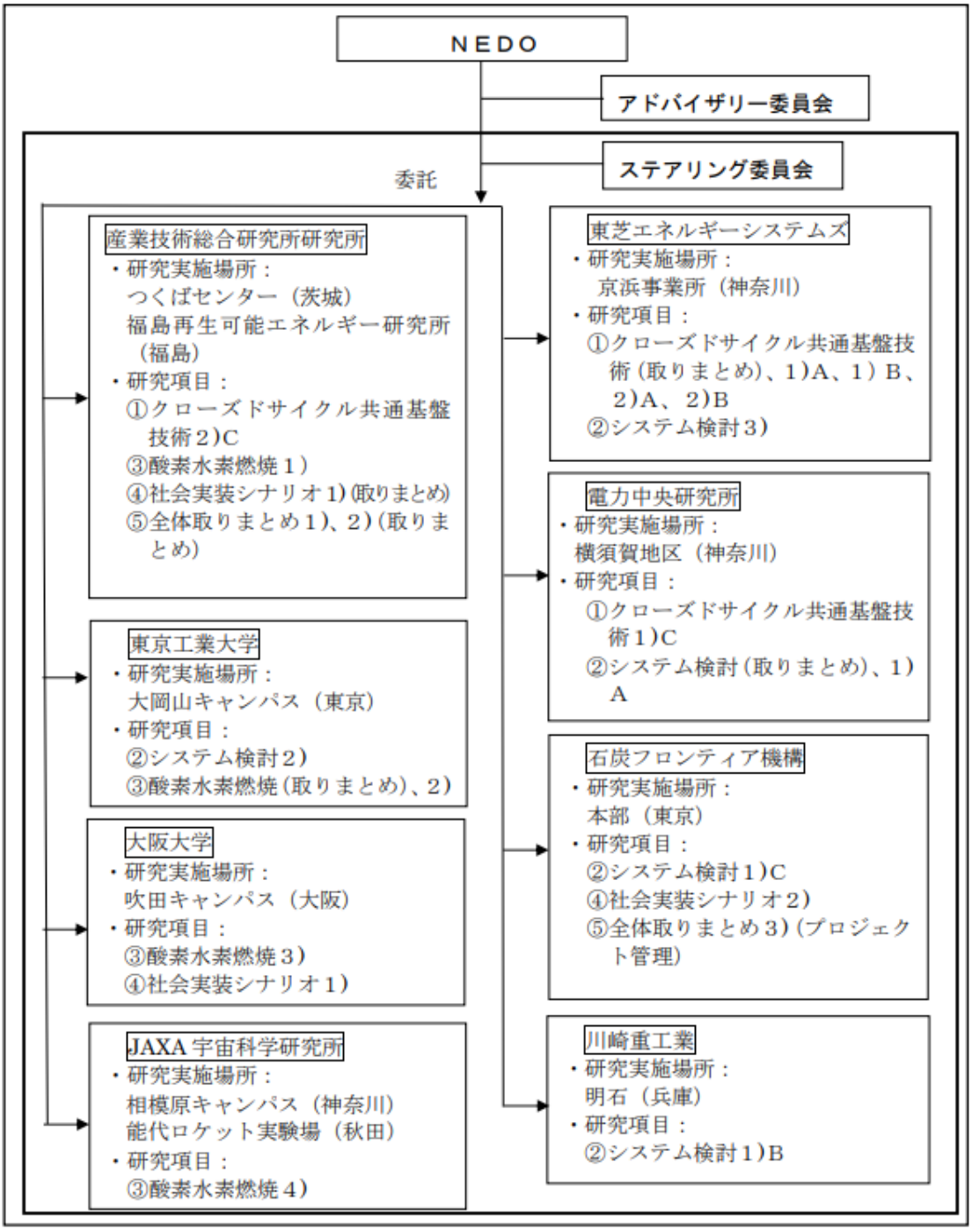
(3) 実施項目 3 ：PEM 型水電解装置における MI 拡張への提言・課題
・PEM 型水電解装置におけるデータ 11990 件を文献より収集し、データの収集方法も明確化した。
・MI の適用できる可能性が判明した。
・分類機による機械学習が適用できることが判明したが回帰による予測では記述子設計が必要
・可視化・相関係数など多くの方法が適用できる。特に傾向・相関がある。
・アノード・カソード・メンブレン・実験条件(圧力・温度)・合成方法、水流などの探索・効率化でマテリアルズインフォマティクスが適用できる。
・2 段階の機械学習で予測できる見込みがある。例えば電圧を予測し、その後電流予測
・文献データの結果をもとに、電極触媒を選定しベイズ統計によってデータ習得していく方向が良いと考えられる。
・触媒記述子を設計する必要がある。特に合成条件や XRD/XPS による構造情報等が有効である。
・ハイスループット実験によるデータ収集は重要だが、注意点として多くの元素をもれなくデータ化することが重要と判明した。
これからの提言を基盤にハイスループット実験による PEM 形水電解装置のビッグデータを収集することが出来れば機械学習をはじめとするマテリアルズインフォマティクスの導入が可能なことが判明した。マテリアルズインフォマティクスを使うことにより、アノード・カソード・高分子膜、実験条件など PEM 形水電解装置全般におけるマテリアルズインフォマティクスの適用が可能になると提言する。

## ４．２　従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発

### ４．２．１　酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発（産業技術総合研究所、宇宙航空研究開発機構、東京工業大学、大阪大学、電力中央研究所、石炭フロンティア機構、川崎重工業、東芝エネルギーシステムズ）

○実施者名、実施体制

国立研究開発法人　産業技術総合研究所、　国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、
国立大学法人東京工業大学、　国立大学法人大阪大学、一般財団法人電力中央研究所、
一般財団法人石炭フロンティア機構、川崎重工業株式会社、東芝エネルギーシステムズ株式会社



○期間、予算

期間　　：2020 年 8 月~2023 年 3 月

予算　　：全期間　686,582,700 円

2020 年度　203,663,600 円

2021 年度　241,924,300 円

2022 年度　240,994,800 円

○実用化への道筋

基盤技術開発を要素技術からシステムの要素として深耕して要素機器の開発に移行する。超高効率ベースロード電源として社会実装されるまでの長期間において、他の利用としての波及効果なども検討し、負荷変動対応、コージェネレーション、蒸気タービンの水素利用施設への順化を想定して、開発フェーズを検討した。

開発コストを抑える上では、既設の蒸気タービン発電設備を利用したロードマップも作成した。また、波及効果として、産業用熱供給での燃焼技術の展開を想定。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発** | シール技術の要素技術確立。燃焼器・翼材料技術、冷却技術の候補提示 | 要素技術確立。構造・材料の候補を提示。 | ○ | |
| **②システム検討** | 動特性解析が可能なダイナミックシミュレーション技術の確立 | 動特性解析モデル構築。 | ○ | |
| **③安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発** | マルチクラスタバーナの高圧燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立バーナ試作のためのシミュレーション技術の確立 | 高温高圧試験実施。シミュレーション技術確立。 | ○ | |
| **④社会実装シナリオの構築** | 2050 年カーボンニュートラルを想定した社会実装に向けた実用化シナリオの策定 | シナリオ見直しとアクションプラン提示 | ○ | |

○成果の意義

クローズドサイクルに必要な共通基盤技術について、材料技術、システムのダイナミックシミュレーション技術などの要素技術を確立したこと、酸素水素燃焼バーナについても高温高圧燃焼を実施したことにより、クローズサイクルを模擬した検証装置を構築する準備を整えることができた。次のステップとして、検証装置において共通基盤技術の検証が可能となり、小型のクローズド発電試験装置の設計に必要なデータを取得できるようになった。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

| | 2020 年度 | 2021 年度 | 2022 年度 | 2023 年度 | 計 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 特許出願 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | うち出願準備中 2 件 |
| 論文発表 | 0 | 2 | 1 | 4 | 7 | うち投稿中 2 件 |
| 講演 | 0 | 7 | 7 | 2 | 16 | |
| 成果の普及活動 | 0 | 4 | 0 | 1 | 5 | |

○研究開発成果の詳細

(1) クローズドサイクル共通基盤技術の研究開発：

**1)クローズドサイクル要素技術**

**A【シール】**酸素水素燃焼タービンで用いられる各シール技術について社内データ及び文献調査を実施し課題を抽出した。また、リムシールの必要流量特性把握は高温蒸気からのロータ保護と、起動過程のサイクル検討で重要な課題であるため、CFD 解析でリムシールの特性評価を実施した。

**B【熱交換器】**酸素水素燃焼タービンプラント向けの熱交換器について概念設計と基本計画を行い、数値解析による評価から成立性検討と課題抽出を実施した。

**C【熱交換器・配管材料】**700～100℃程度の温度範囲の熱交換器や配管について、作動流体が及ぼす材料の腐食への影響を調査した。

**2)燃焼器・翼材料技術、冷却技術の研究開発**

**A【燃焼器およびタービン材料】**高温高圧水蒸気環境における、ガスタービン用燃焼器、動翼材ならびに遮熱コーティングの適用性にて実験および評価した。結果として、天然ガス焚きガスタービン等で使用実績有する燃焼器、動翼材ならびに遮熱コーティングは、基本的には使用可能であることが判った。但し、高温高圧水蒸気環境における金属材料の振舞いは、酸化物の保護性の低下や水蒸気分圧の影響を受けるなどの事例も確認された。燃焼器材では Hastelloy®X、動翼材では CMSX®4 および MarM®247 が比較的耐酸化特性として優れていると考えられる。剥離スケールのデータと断面観察結果より、反応生成物の総量を求める手法を得ることができ、反応速度定数やスケール剥離挙動を定量的に評価することが可能となった。各種遮熱コーティング並びにボンドコート組成合金(CoNiCrAlY、NiCoCrAlY、NiCoCrAlYHf)に対する高温水蒸気環境中の酸化実験を実施し、それらの耐酸化性に及ぼす水蒸気分圧の影響を検討した。次に、基材が何らかの外力要因により負荷歪を受けた際の影響評価を行った。これより、これまで経験のない酸素水素タービンシステムにおいても、従来、天然ガス焚きガスタービンで使用してきた燃焼器、動翼材ならびに遮熱コーティングを基本的には使用可能であることが判った。

**B【翼冷却技術】**タービン入口温度が同じ 1400℃級の天然ガス焚きガスタービンの冷却翼構造を基本に、酸素水素タービンの冷却翼構造を検討した。初段静翼については、前側、中央部はインサート・インピンジ冷却を採用

し、後側は細孔冷却構造を採用した。空気と蒸気の物性の違いや密度の影響で高温主流、翼内部冷却蒸気共に熱伝達率が大きく、TBC とメタルで内外温度差が大きくなる傾向があることが確認されたため、主流温度を下げるためにフィルム冷却を採用した。構造解析では、高応力箇所はいずれも温度が低く、クリープ変形領域下のため強度上問題となる箇所はないことを確認し、初段静翼の成立性の目途が得られた。初段動翼については、前側、中央部は斜めリブ付きのリターンフロー冷却を採用し、後側はピンフィン冷却構造を採用した。さらに静翼同様にフィルム冷却も併用した。構造解析では高応力箇所が確認され、塑性変形での応力再配分や、静翼の冷却蒸気やシール吹き出し蒸気の冷却効果で熱応力の緩和が考えられ、強度上は問題とならない見込みが得られ、初段動翼の成立性の目途が得られた。

**C【コーティング】**水蒸気試験環境の整備とセラミックサンプル焼結体の試作し、水蒸気の噴霧投入により高温水蒸気環境での熱暴露試験(1200~1400℃)を実施した結果、目標である 2um/100h 試験を達成した。高速水蒸気ジェット減肉試験を実施（100m/s@1200℃）し、妥当性評価として SiC の結果を分析したが、YSZ、Al2O3 の減肉が少ないことが確認された。多層膜サンプルを試作し、耐剥離性、耐水蒸気減肉特性、耐久性の評価を行い、高温水蒸気環境のためのセラミックコーティングとして適切な構造として、APS、SPS ともに目標をクリアし、SPS はブラスト無しの機材においても熱サイクル特性は良好であることが確認された。

(2) システム検討：酸素水素燃焼タービンサイクルに関するシステム検討を行い、下記の結果を得た。

**1)負荷変動方法の検討**

**A【負荷変化方法の検討】**酸素水素燃焼タービンシステムについて、機器仕様や機器性能、システム系統や制御方法、出力指令などを柔軟に設定、変更ができるシミュレーション技術を構築した。これを用いて負荷変化手順や制御方法を検討し、並列から定格負荷までの負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。また、強化学習法の Deep Q-Learning Networks（DQN）による運転パラメータ探索技術を構築し、各種制約条件を回避しつつ速やかに負荷変化させる方法を示すことができた。さらに、国内外の関連特許を調査し、負荷変化時や、起動時・シャットダウン時の流体の変動、特に圧力の不安定を回避する方法などが提案されていることが分かった。

**B【負荷変化検討用データ抽出】**システムダイナミックシミュレーションを実施するために、1,400℃級、1,700℃級のそれぞれについてサイクルを構成する主要機器（タービン、圧縮機、熱交換器）の概略設計を行い、回転数や段数、寸法・重量などの諸元を推定するとともにシミュレーションに必要なデータを算出した。

**C【負荷変化ニーズ国内・海外調査】**我が国の需給調整市場は 2024 年以降も見直しがされると思われるが、負荷変動対応策が計画されており、酸素水素燃焼タービンは現在の汽力発電設備の負荷変動能力を実現できれば問題ないと考えられる。系統電源への負荷変動要因を太陽光発電の日没時の電力低下として、調整電源の負荷変動ニーズを 2020 年から 2050 年までの電源構成比から試算した。カーボンニュートラル社会において酸素水素燃焼タービンは再生エネルギーを貯蔵した水素を活用し、長期間の調整電源としての優位性がある。各国への酸素水素燃焼タービンの市場参入条件として各国の事情に適した負荷変動能力が求められ、それに対応する技術開発することが必要である。

**2)熱利用技術の供給モデルと運転方法の構築**

送電端効率を高めるため、水素冷熱を利用した酸素製造プロセスの酸素製造源単位を見積ったところ、0.396 から 0.265kWh/Nm3_O2 へ低減できた。また、コージェネレーションを考慮したサイクルの熱電比は他の技術と比較して低くガスエンジンと同程度であったが、発電効率と総合効率はかなり大きくなっており、本技術の優位性を示せた。

**3)起動・停止方法の研究開発**

酸素水素燃焼タービンサイクルの起動・停止方法および手順について提案した。酸素水素燃焼器においては、着火から定格運転状態までの幅広い圧力帯で運用可能な耐久性が求められ、開発設計条件への反映が必要である。起動過程で、クローズド部の蒸気循環が成立するまで外部からの蒸気供給の継続が必要となり、今後、起動時間の最適化が求められる際には、熱交換器ウォーミング方法等、クローズド部の蒸気条件が早期に成立するような対策が必要となる。今後、開発機器となる酸素水素燃焼タービン、蒸気圧縮機、熱交換器等の詳細計画、詳細設計によって明らかになる制約条件や要求仕様に応じて、起動・停止方法への反映による精度向上が求められる。

(3) 安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発：

**1)酸素水素バーナの研究開発**

**【マルチクラスターバーナの研究開発】**最小単位となるシングルバーナを対象として、0.8MPa で発熱量 1kW 以上の酸素水素燃焼試験を実現し、低圧条件（1MPa 以下）燃焼の安定化技術を確立した。この過程で昇圧途中（過渡的状態）の保炎範囲等を確認し、昇圧するための試験手順を構築した。また、酸素を水蒸気で希釈した後に噴射する手法を採用し、圧力と水蒸気希釈率を系統的に変化させる燃焼試験から、バーナの損傷及び高温純酸素の危険性を避ける手法を構築した。併せて、シングルバーナを３つ以上集合したマルチクラスターバーナの試作を行い、その燃焼特性を明らかにすることでマルチクラスターバーナの設計手法を確立した。

**【酸素水素燃焼火炎がバーナ壁面に及ぼす材料劣化の抑制】**

OH ラジカルのレーザ誘起蛍光法（LIF）計測装置を構築し、酸素水素火炎の火炎構造（OH 分布）を検討可能な計測手法を確立するとともに、実施項目「燃焼器・翼材料技術、冷却技術の研究開発」と連携して材料劣化の抑制方法を確立した。

**【高圧燃焼器用バーナの試作試験】**

燃焼・熱流動解析結果を活用して高圧高乱流燃焼試験用バーナ設計を検討し、1MPa 以上の試験用マルチクラスターバーナを試作した。2MPa 程度の高圧条件での燃焼実験を実現し、保炎するためのバーナ構造、水素／酸素／水蒸気の供給バランス等を明らかにした。

**2)酸素水素バーナシミュレーションの研究開発**

**【マルチクラスターバーナの燃焼状態のシミュレーション手法確立】**

マルチクラスターバーナ単体（火炎干渉を一部含む）及び複数干渉を対象として、詳細化学反応機構を考慮に入れた高強度乱流場における酸素水素燃焼の直接数値計算（DNS）技術（数値解析法の選択、格子解像度設定、化学反応解析手法等）を確立した。また、DNS 結果から高強度乱流中での水素、酸素及び水蒸気の混合特性、火炎基部構造等を明らかにし、高精度な Large Eddy Simulation(LES)実現に向けた基礎的知見を得た。同時に、複数火炎干渉の DNS 結果の詳細な解析から、マルチクラスターバーナ設計に重要となる物理現象を明らかにし、試験用マルチクラスターバーナの設計に寄与した。OH ラジカルの高速平面レーザ誘起蛍光法（PLIF）等のレーザ計測技術を確立し、火炎基部の動的特性、三次元火炎構造等の数値解析結果を検証するため基礎実験データを整備した。オープンソースソフトウェア（OSS）上で、簡易燃焼モデル(反応速度の第 0 近似)を採用した酸素水素火炎の LES 技術を実現した。この LES 技術を、高温水蒸気雰囲気下での酸素水素火炎に適用することで、マルチクラスターバーナの開発に利用可能な LES 予測技術を確立した。

**【高圧燃焼試験で得られた酸素水素燃焼バーナ試験データの分析】**実機用燃焼器の開発試験用マルチクラスターバーナを試作するための 1MPa 以上の圧力条件での高圧燃焼試験データを取得するとともに、共同で高圧水蒸気中の燃焼試験手法を確立した。

**3)酸素水素燃焼器の研究開発**

**【燃焼器ライナー冷却のための水蒸気制御】**

マルチクラスターバーナを設置し、ライナー冷却を検討可能な模擬燃焼器を構築するとともに、高度な水蒸気供給系を付加することで、水蒸気希釈酸素と水素の高圧燃焼試験及びライナー冷却試験を実現した。また、2波長 OH-PLIF 法による温度分布計測技術を確立し、ライナー部の温度計測と併せて流動特性とライナー冷却特性との関係を明らかにした。

**【燃焼器内の流動・燃焼状態の数値シミュレーション】**燃焼器ライナー用冷却蒸気と燃焼ガスの混合状態等を予測するできるふく射解析を含む流体固体連成解析技術を確立した。このシミュレーション技術を上述のライナー冷却を検討可能な模擬燃焼器に適用することで、開発シミュレーション技術はライナー冷却法の開発に十分適用できることを明らかにした。

**【高圧燃焼試験で得られた酸素水素燃焼バーナ試験データの分析】**実機用燃焼器の開発試験用マルチクラスターバーナを試作するための 1MPa 以上の圧力条件での高圧燃焼試験データを、共同で高圧水蒸気中の燃焼試験手法を確立した。

**4)高圧燃焼器の研究開発**

**【2MPa 以上の高圧燃焼試験手法及び試験設備運用法の確立】**1MPa 以上の圧力条件で高圧水蒸気中のバーナ試験を実施可能な設備を整備するために、高圧水素酸素供給設備の改造、酸素水素燃焼および水噴霧による高温高圧水蒸気供給設備の設置を行った。この設備に、開発した試験用マルチクラスターバーナを設置し、高圧燃焼試験を実現した。なお、高圧試験実施に際しては試験手法を提示するとともに、バーナ開発に伴う試験設備運用の課題を明確化した。

(4) 社会実装シナリオの構築

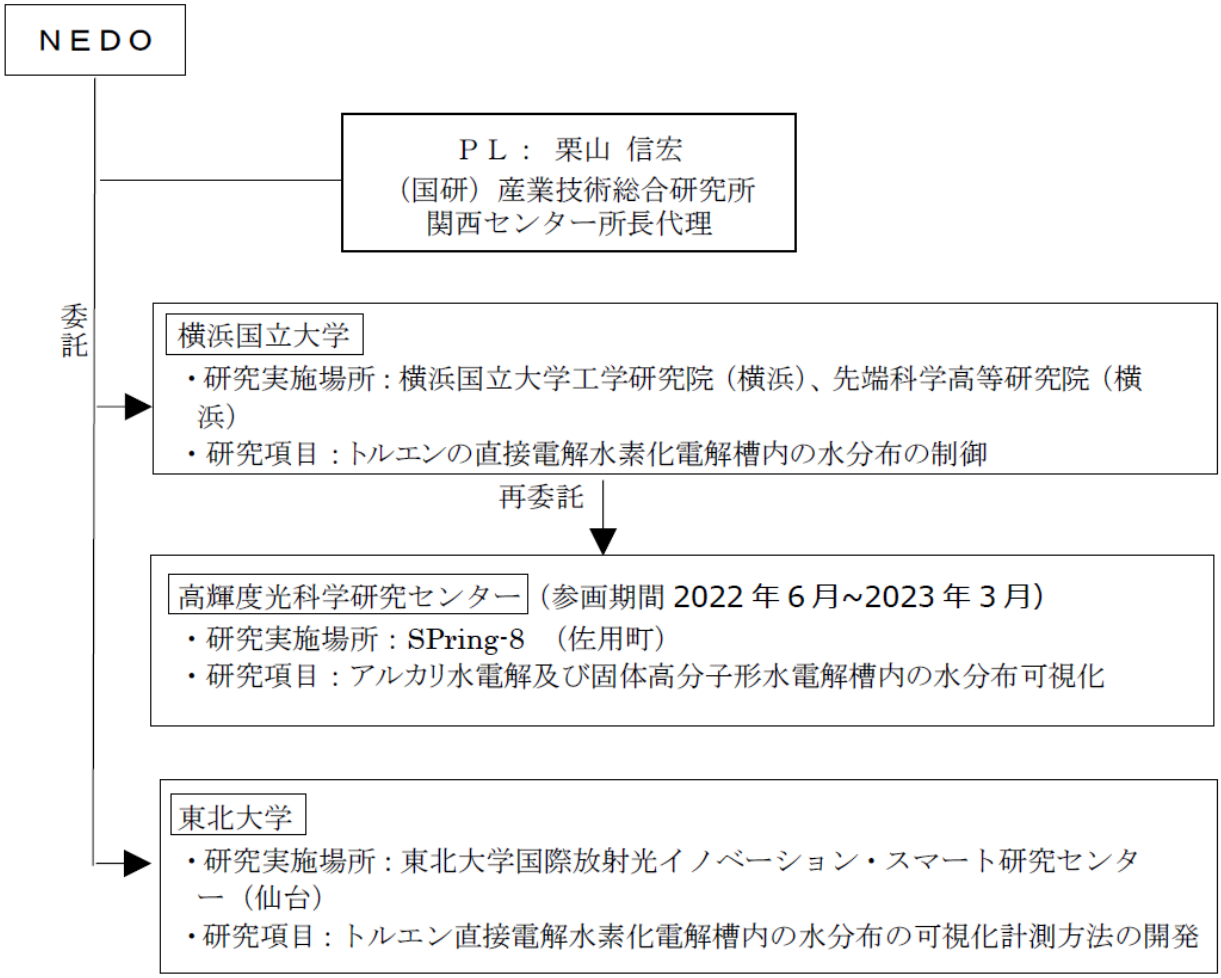
主なユーザーである電力企業から集約した意見を踏まえて、本技術の位置付け・優位性、環境特性、負荷調整力、経済合理性等に関するニーズ、および電力企業の本研究開発への参画意欲等を検討・評価し、実用化シナリオへ反映した。具体的には、各開発課題から得られた知見を踏まえ、高効率と経済性を両立する酸素水素燃焼タービン発電開発計画の策定のため、酸素水素燃焼タービンに関連する知財調査を進めた。またエネルギー基本計画の改定により、2030 年の水素の導入目標が明確化されるなど、COP26 や関連する内外の動向を踏まえ、社会実装の時期を早めることを検討し、シナリオの見直し作業を進めた。次期フェーズの開発としては、基盤技術開発を要素技術からシステムの要素として深耕して要素機器の開発に移行するとの整理を行った。その上で、超高効率ベースロード電源として社会実装されるまでの長期間において、他の利用用としての波及効果なども検討した。その上で、負荷変動対応、コージェネレーション、蒸気タービンの水素利用施設への順化を想定して、開発フェーズを検討した。さらに、開発コストを抑える上では、既設の蒸気タービン発電設備を利用したロードマップも作成した。

各国で電力市場の状況が異なるため、COP26 の合意事項及び各国のカーボンニュートラル宣言をもとに、先行する欧州、米国、豪州およびアジア各国地域の水素関連エネルギー動向や、再生可能エネルギーの導入による電力系統への影響を明確化し、酸素水素燃焼タービンの導入可能性を検討した。国別に「酸素水素燃焼タービン」の社会実装シナリオが異なるが、まず日本にて、早期に実証し技術の優位性と経済性を具体的に見極めながら、他国へ本技術の普及展開することが重要となる。

## ４．３　エネルギーキャリアシステム調査･研究

### ４．３．１　トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上（横浜国立大学、東北大学）

（１）実施者名、実施体制




（２）期間、予算

期間　　：2021 年 4 月~2023 年 3 月

予算　　：2021 年度　49,933,000 円, 2022 年度　54,082,000 円

（３）実用化への道筋

2021 年度～2025 年度 ENEOS 株式会社が委託業務実施している、「グリーンイノベーション基金事業／大規模水素サプライチェーンの構築／革新的な液化、水素化、脱水素技術の開発／直接 MCH 電解合成（Direct MCH）技術開発」に対し、2023 年度～2025 年度に横浜国立大学は再委託先として参画、ENEOS 株式会社のプラント開発、実証電解槽開発事業に対し、横浜国立大学は基盤技術開発を行う。

（４）最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **・アノード側の水供給法の検討** | アノード側の水供給法として液体方式と加湿空気方式の両方式の比較を検討、条件最適化。 | 加湿空気供給方式がアノードの水供給法として適用可能である事を実証。加湿空気温度、湿度、流量を最適化。 | ○ | |
| **・隔膜の物性、種類の検討** | アニオン交換膜を用いたトルエン水素化電解の適用可能性の検証<br>カチオン交換膜の物性の最適化。 | アニオン交換膜を用いた電解槽でトルエン水素化を確認。カチオン交換膜においてEW や側鎖構造の電解性能への影響を確認。 | ○ | |
| **・カソード側要素技術の開発** | カソード要素の親疎水性を制御パラメータとしてアノードからの移行水の排出機構を検討し、電気化学特性を評価。 | マイクロポーラス層の新疎水制御により、電流効率の最適化を実証。 | ○ | |
| **・カソード室内の流体解析** | トルエン／メチルシクロヘキサン－水－気相－アイオノマー及び固相の 5 相モデルを構築と解析。 | 5 層解析モデルの構築。解析結果は Spring-8 での可視化においても同様の傾向を示し、モデル、解析の妥当性を実証。 | ○ | |
| **・水分布の可視化** | トルエン水素化電解槽の動作下で、液相や気相の空間分布ダイナミクスを数分の時間分解で計測。 | マイクロスケールの油相中の気泡分布の可視化および定量化に成功。液水によって水素気泡が押し出されている可能性を示唆。 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **・水分布の可視化計測方法** | 計測用電解セルの設計と可視化計測条件の最適化。 | 放射光 CT 用セルの作製、SPring-8 にて得られた CT 画像に対して、深層学習の手法を用いた解析によるセル内要素のセグメンテーションの提示 | △ | 機械学習、深層学習による画像解析を更に進める必要有。 |

（５）成果の意義

本トルエン電解水素化法を用いたメチルシクロヘキサン合成は実用化の観点から ENEOS 株式会社が DirectMCH®として 2023 年 1 月より豪州実証プラントを運転開始する等、実証実験を進めており、アノード側からカソード側への移行水が主要な課題であることが分かっている。本成果はこの課題を解決する為の、基盤技術を提供する成果として位置付けられ、様々な角度からの移行水制御を提示する事で実証電解槽への実装と性能向上（コスト削減）に貢献する可能性を提供する意義がある。

（６）特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

・2021 年度
特許出願 0
論文 0
学会発表・講演 6
受賞 1

・2022 年度
特許出願 2
論文 3
学会発表・講演 5

（７）研究開発成果の詳細

(1) 実施項目１：アノード側の水供給法の検討

・目標：カソードからの逆拡散制御や、最低限の水供給によりカソードへの移動水の低減を図るため、アノード側の水供給法として液体方式と加湿空気方式の両方式の比較を検討し、トルエン水素化電解に適した方式を選定する。

・実施内容：液体方式では電解液の濃度の影響の検証、加湿空気方式では空気をキャリアガスとし、加湿器の温度及び相対湿度を制御した電解を行い、両方式に対して水供給法の最適化を行った。

・成果の達成状況：液体方式では高濃度硫酸の使用は随伴水を減少させることが可能であるが、実用的には部材の耐酸性との関係を考慮した設計が必要。加湿空気方式の検討の結果、ガス流量は 3.0 L/min 以上が最適値であり、この条件を適用し、ガス温度依存性を調べた結果、85℃への温度上昇で更にセル電圧の改善が見られた。純水方式との比較では、約 0.6 A/cm$^2$ まで純水方式と同等のセル電圧となることが分かった。電流効率は加湿空気温度を 85℃に設定することにより純水方式に対して性能が逆転する事が分かった。

・成果の意義：総合的に判断してトルエン電解水素化において液体方式に対し、加湿空気方式の有効性が示された（特許出願）。

(2) 実施項目 2 ：隔膜の物性、種類の検討

・目標： アニオン交換膜のトルエン直接水素化電解への適用可能性を明らかにする。市販品仕様のカチオン交換膜のセル性能及び水制御特性を把握し、トルエン水素化電解に最適な膜仕様を提示する。

・実施内容： 市販のアニオン交換膜を隔膜としたトルエン直接水素化電解を検討し、ファラデー効率、セル電圧、内部抵抗や移動水量の評価を行った。カチオン交換膜の最適化検討として、高分子電解質の側鎖形状及び EW による親疎水性の違いが及ぼす影響について検討した。

・成果の達成状況： アニオン交換膜を用いたトルエン直接電解水素化に関してはガスクロマトグラフィーによる同定の結果、メチルシクロヘキサンが生成していることを確認し、アニオン交換膜型のトルエン水素化電解槽構造はカチオン交換膜型と比較してアノード液やアイオノマー条件に依らず、大幅に随伴水流速が減少することが分かった。カチオン交換膜評価における、短側鎖構造かつ EW の異なる膜及びアイオノマーの影響は、セル電圧に対してはそれほど大きくないものの、随伴水、電流効率への影響は大きいことを確認した。

・成果の意義：アニオン交換膜はトルエン直接水素化電解の構成要素として成り立つことから今後の展開が期待される。 カチオン交換膜においては Nafion と同程度の疎水性（高 EW）を示す高分子電解質を用いるならば、膜、アイオノマーの物性を制御することにより、随伴水量を抑制し電流効率を向上させる可能性を示した。

(3) 実施項目 3 ：カソード側要素技術の開発

・目標：カソード要素の親疎水性を制御パラメータとしてアノードからの移行水の排出機構を検討する。

・実施内容：カソード触媒層と拡散層の間にあるマイクロポーラス層（MPL）内に吸水性多孔質酸化物として珪藻土を混入することで水の排出パスの生成を促すことを行った。

・成果の達成状況： 従来の珪藻土比率 0%の電流密度値に対して、珪藻土比率 8%のサンプルは性能の向上が確認され、本方法によって移行水排出機構が機能していることを確認した（特許出願）。

・成果の意義：カソード側の要素部材の親疎水制御が移行水の排出による電流効率向上に有効であることから MPL や触媒層の更なる検討が期待される。

(4) 実施項目 4：カソード室内の流体解析

・目標： トルエン／メチルシクロヘキサン－水相の 2 相の流動層とアイオノマー、固相及び気相を加えた 5 相の輸送現象に対して水素気泡や透過水の分布を考慮することで、構造及び材料の濡れ性をパラメータとした設計法を提案する為の数値解析モデルを作成する。

・実施内容：初段階ではトルエン／メチルシクロヘキサン－水相の 2 相の流動層とアイオノマー及び固相の 4 相モデルを構築した。ここではカソード GDL に加えカソード触媒層、電解質膜、アノード電極のメッシュ構造を対象とした。次段階ではトルエン／メチルシクロヘキサン－水－気相の 3 相の流動層とアイオノマー及び固相の 5 相モデルを構築し、触媒層の排水能の評価、構造及び材料の濡れ性をパラメータとした解析を行った。

・成果の達成状況： 4 相モデルで供給流体はトルエンとし、下方から流入させると下流(上方)に向かって水素化が進み濃度が低下していることが示された。液水はアノードから電気浸透によって輸送されるため、電解質側及び下流側の分率が高い結果となった。電解質中の含水量は電気浸透によってカソード側の濃度が高く、またアノード電極構造によって上下方向にも分布が生じていた。4 相モデルに水素気泡の気相を追加するよう拡張した計算モデルでは、表面張力の大きな液水によって気相が電解質膜から遠方まで押し出され、集電体側の分率が上昇している様子が観察された。

・成果の意義：SPring-8 での可視化においても同様の傾向は見られ、解析の妥当性が示された。

(5) 実施項目 5：水分布の可視化

・目標：特性条件の異なる複数の電解セルに対して、電解開始時の多孔質流路内のトルエン/メチルシクロヘキサン相と水相を可視化し、電解セルの仕様・動作条件と電解セル内の各相の空間分布の相関を定量評価する。

・実施内容： SPring-8 の BL20B2 中尺ビームラインに専用で開発した電解セルをセットし、広視野 X 線イメージングを用いてトルエン水素化電解槽の動作下での測定により、液相や気相の空間分布ダイナミクスを計測した。

・成果の達成状況：空間解像度の目標である 10μm 以下に対して、セル及び撮像条件の検討により、0.8um まで改善させた。本測定によりマイクロスケールの油相中の気泡分布の可視化及び定量化及びした。100 mA 印加時の運転時間変化による可視化では、セパレータ側に、より多くの気泡が存在し、液水によって水素気泡が押し出されている可能性を示唆した結果が得られた。

・成果の意義：前項目のカソード室内の流体解析に対して、数値解析のバリデーション対して貴重な情報が得られた。

(6) 実施項目 6：水分布の可視化計測方法

・目標：計測用電解セルの設計と可視化計測条件の最適化を行う。

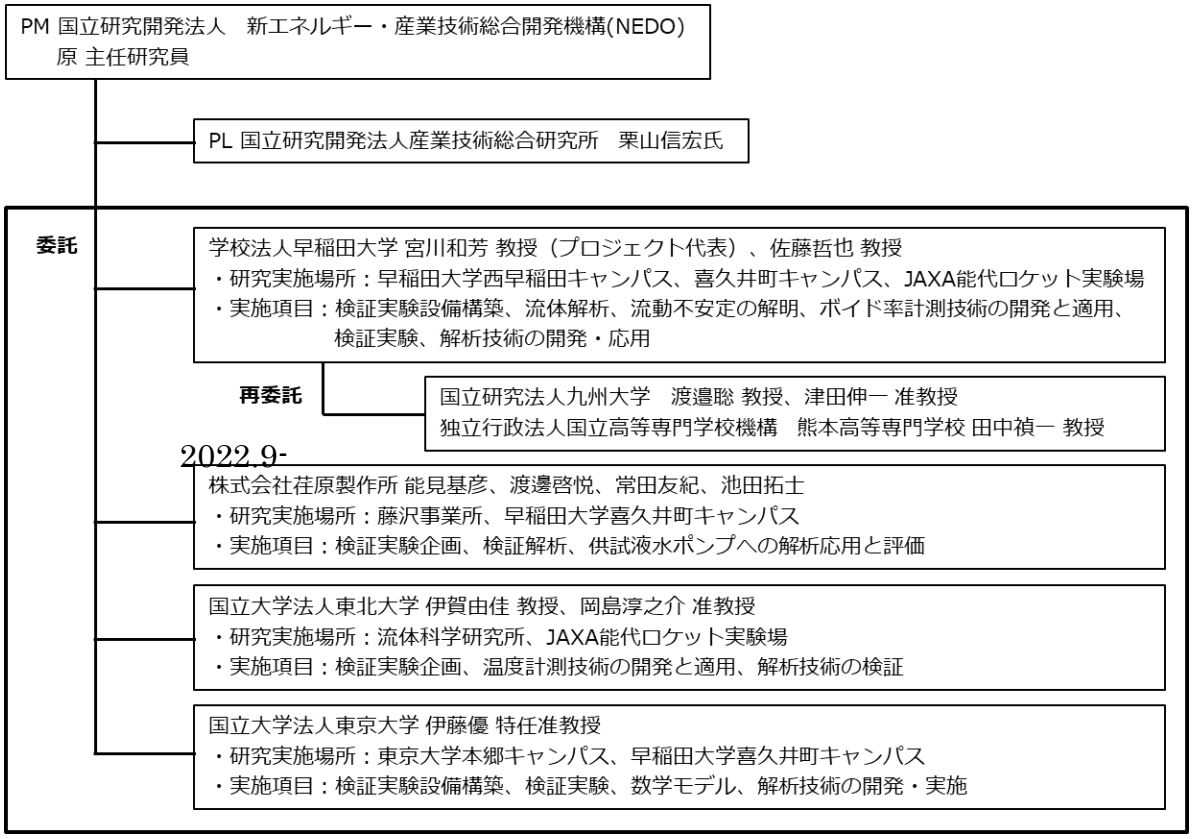
・実施内容： 横浜国立大学の指示を受け、高輝度光科学研究センターと連携して水分布可視化に関するデータを取得、整理した。

・成果の達成状況： 放射光 CT 用セルを作製し、SPring-8 にて得られた CT 画像に対して、深層学習の手法を用いた解析によりセル内要素のセグメンテーションを示した。

・成果の意義：本手法による更なる解析により解析的な水分布の分析が期待される。

## ４．３．２ 水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築（早稲田大学、荏原製作所、東京大学、東北大学流体科学研究所）

○実施者名、実施体制




○期間、予算

期間　　：2021 年 4 月~2023 年 3 月

予算　　：94,103,200 円

2021 年度：38,858,700 円

2022 年度：55,244,500 円

○実用化への道筋

液化水素に関わる主要な機械・機器のエンジニアリングでの基盤流体技術である流体シミュレーション技術と流体計測技術の構築のために ①液化水素解析，実験の高度化と不安定流動・蒸発抑制、極低温二相流計測技術の開発と高精度化、②流体機械内部流動予測・評価技術の開発、③臨界点をまたぐ低温流体の不安定性の予測、④高速液化水素流中の蒸気温度計測に関する研究を主に実施した。これらの研究開発で得られた成果をもとに、大容量昇圧ポンプの高性能化、高信頼性化につなげる。図 4.1 に大容量昇圧ポンプの開発、社会実装を見据えた開発計画を示す。コンセプト設計の実施後、信頼性、高性能化に向けた開発を実施し、2030 年の水素発電用ポンプの事業化を目指す。また、本事業の成果を広く社会に広めるために液化水素の基盤流体技術に関するコンソーシアムを形成する。NEDO 事業チームをベースとして、学協会まとめのコンソーシアムを通して企業でのアプリケーションの展開を図る。上記成果は、エネルギーキャリアとしての液化水素を用いる

あらゆる機械・機器への適用が可能である。また、本事業での試験装置を用いて革新的計測装置の実用化を図る研究も開始された。

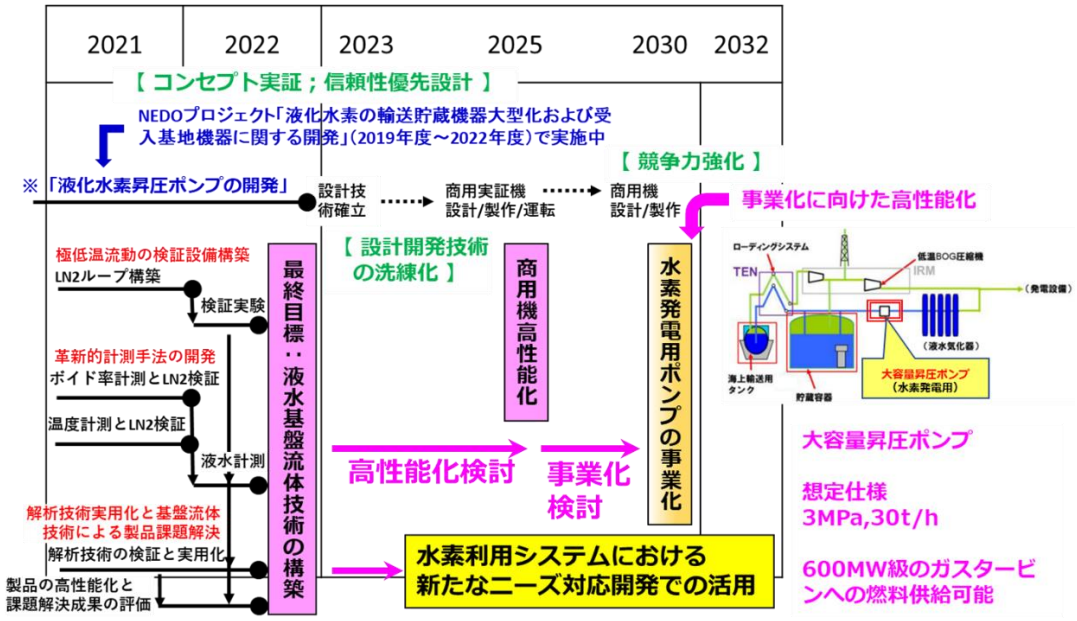



図 4.1　液化水素基盤流体技術の社会実装に向けた取り組み計画

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **1.極低温試験装置の構築と実験計測の実施** | | | | |
| **液体窒素回流試験装置の構築** | 配管系、ポンプ系の断熱、温度制御方法を検討し、設計製作 | 断熱配管を有しポンプからモーターまで同軸の極低温ポンプを製作、効率の直接計測可能 | ○ | |
| **液体窒素遷臨界（3.4MPa,126K）試験装置の構築** | 液体窒素遷臨界状態を計測可能な試験装置の構築 | 圧力、温度、流量制御により遷臨界状態を作り、不安定流動状態の定量計測可能な装置を構築 | ○ | |
| **水素二相流状態の把握** | 水素試験装置を用いた水素二相流の様相可視化 | リークしない測定部の構造・仕様、耐圧・リーク試験の手順、機材の防爆仕様等の液体水素可視化試験のノウハウ取得。 | ○ | |
| **既存試験装置改修による液化水素を用いた実証試験** | 液化水素キャビテーションの温度・ボイド率測定 | 試験設備の構築、改修完了、液体窒素試験、液化水素試験の実施 | △ | 液化水素試験リークにより計画の実験未完了 |
| **2.革新的計測技術の開発** | | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **静電容量型ボイド率センサーの設計・開発（オール金属型、テーパー型、探針型）** | オール金属型、テーパー型、探針方センサーの開発 | 全てのセンサー試作、検証完了し、特に金属型は、耐圧 3 MPa,平均誤差 6.5%(目標値：耐圧 1.3 MPa 以上、誤差 10%以下) | ◎ | 計画値以上のセンサー開発完了 |
| **ボイド率計測と深層学習を組み合わせたマルチメーターの原理検証** | 流動様式、流量計測。目標はフルスケールの 5%精度 | LSTM 分類モデルで、96.7%の判別精度を達成(16 分類モデル)。回帰モデルによる流量計は、5%FS の誤差で判別精度 83.8%。 | ○ | |
| **高速液化水素流中の蒸気温度計測** | 流体シミュレーションのベンチマークデータを取得することによる、液化水素流れシミュレーション技術の高精度化に貢献 | 水素キャビテーション内部の 1K 程度の温度低下を高精度（17K から 25K までの温度範囲における計測で±0.024K の不確かさ）に計測できる温度計測手法とその校正法を確立。 | ◎ | 計測精度は超過達成 |
| **3.液水大容量昇圧ポンプの設計と性能・流動予測** | | | | |
| **大容量昇圧ポンプの仕様検討と試設計** | 大容量昇圧ポンプの仕様決定と CAD 製作 | ポンプ仕様決定（3MPa、30t/h）および多段ポンプ設計（CAD 製作）完了 | ○ | |
| **液体窒素作動時における遠心ポンプの吸込性能に及ぼす羽根形状の影響調査** | 液体窒素下の吸込性能試験から、液体水素作動下における最適な羽根形状を考察 | 液体窒素下でのキャビテーションの熱力学的効果を確認。熱力学的効果は、キャビテーション発生量により設計流量点で最も小さく、過大流量、及び部分流量では大きくなることを確認。 | ○ | |
| **4.液化水素流体シミュレーションの高度化** | | | | |
| **液化水素解析技術の高度化** | 圧縮性を考慮した液化水素流体解析技術の構築と評価 | キャビテーション領域から吐出 90MPa までの広い範囲での安定な解析を可能とする方法を構築 | ◎ | 計画外の超高圧での安定な解析手法構築 |
| **検証用ポンプの非圧縮性流体シミュレーション** | ポンプの性能マップ（流量-圧力上昇-効率の特性カーブ）作成 | 50%～150%流量の範囲で性能マップを計算で予測 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **検証用ポンプの圧縮性を考慮した流体シミュレーション** | 液体水素の圧縮性を考慮した解析を実施し、ポンプの性能マップを予測 | 液化水素の圧縮性を考慮した効率計算法を決定し、50%～150%流量の範囲で性能マップを予測 | ○ | |
| **液体窒素ポンプ試験の流体シミュレーションと検証** | 液体窒素試験結果を検証データとした液化水素流体シミュレーションの課題を解決 | 液体窒素ポンプの流体解析を実施、50%～150%流量の範囲で性能マップを予測 | △ | 実験結果との比較による検証は未達。追加解析、試験にて検証実施予定。 |
| **熱力学的効果を考慮した均質媒体気泡流モデルによる CFD 解析** | 多重プロセス型モデルの極低温キャビテーション流れへの適用 | 多重プロセス型モデルを極低温流体に適用できるように改良、液体窒素を対象とした解析により予測精度向上の可能性を確認。 | ○ | 液化水素への適用を含め流体機械を対象としたより高度な検証が課題。 |
| | 気液両相の温度を考慮した二温度モデルの開発 | 気泡内外の温度差を直接考慮できる二温度モデルを新規開発。 | ○ | |
| **液体窒素遷臨界流れの流動状況シミュレーション** | 臨界点をまたぐ流体シミュレーションにより現象を把握 | 汎用コードに実物性値を用いて流れの不安定状態を再現できることを確認。 | ○ | |
| **5.液化水素の流動現象把握と不安定流動の把握、抑制** | | | | |
| **逆流抑制デバイス付きポンプの熱流動解析による逆流・吸込み性能の予測** | 液単相流解析による逆流抑制効果，局所温度上昇量の評価 | 旋回止め付小径吸込み管について液化水素でも逆流抑制の有効性を確認 | ○ | 液化水素等極低温流体を対象とした実験による検証が課題 |
| | キャビテーション熱流動解析による吸込み性能の評価 | キャビテーション解析により、液化水素の熱力学的効果による吸込性能向上を低流量でも確認 | ◎ | 計画外だった熱力学的効果を考慮した解析を実施、有用な結果を得た。 |
| **コーティングによるボイルオフガスの低減と予冷の高効率化** | コーティング被膜の開発により冷却時間の短縮と予冷に必要な | 高効率で耐久性の高いコーティングの開発完了 | △ | 液化水素では予想された効果が見られなかっ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | LH2 の量の低減 | 液体窒素により、予冷時間を 1/5.2 に短縮、冷媒消費量を 77.9%削減。 | | た。現象解明と改良が必要。 |
| **ポンプシステムの不安定流動状態の予測** | キャビテーション体積変動によるキャビテーションサージの模擬 | 流体解析によりキャビテーションサージの発生条件を整理、解析精度の評価を実施 | ○ | |
| **非定常キャビテーションの温度計測手法の構築と検証データの取得** | 非定常キャビテーションの温度計測において蒸気温度を推定する手法を構築 | 温度センサーの大きな時定数により困難であった非定常キャビテーションの温度推定手法を構築、非定常キャビテーション温度計測データを取得 | ◎ | 計画外の非定常キャビテーション計測手法を構築 |

○成果の意義

二次エネルギーである水素のカーボンフリーのためのエネルギーとしての地位確立に向けて、長距離輸送、長時間貯蔵のためのエネルギーキャリアシステムの大型化／コストダウンと、各種利用シーンでの製品競争力強化を加速するために、多彩な流体機械・機器の開発基盤としての流体シミュレーションを中核とする基盤流体技術の構築を進めた。液化水素などの極低温流体特有の特異な性質（圧縮性、沸点の低さ、臨界点の遷移）による複雑流動現象がボトルネックとなり、基盤流体技術は未確立である。ゆえに、高精度センサーの開発により精度の高い検証実験データを取得し、流体シミュレーション技術を中核とする基盤流体技術を構築した。本事業では、①液化水素解析、実験の高度化と不安定流動・蒸発抑制、極低温二相流計測技術の開発と高精度化、②流体機械内部流動予測・評価技術の開発、③臨界点をまたぐ低温流体の不安定性の予測、④高速液化水素流中の蒸気温度計測に関する研究を実施し、極低温流体向けの基盤流体技術を取得した。研究の実施にあたり、実験、解析とも大きな困難にあたり、改めて極低温流体取り扱いの難しさを認識したが、可能な限りのアプローチ手法を示した。本事業の成果により液化水素用機械・機器の性能，信頼性向上およびコストダウンに資する検討が可能となり、液化水素の貯蔵、輸送コスト低減が進むことを期待する。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

特許出願数　2021 年度：0 件、2022 年度：0 件、2023 年度：0 件
論文発表数　2021 年度：1 件、2022 年度：3 件、2023 年度：1 件
学会発表数　2021 年度：2 件、2022 年度：7 件、2023 年度：6 件
講演数　　2021 年度：0 件、2022 年度：0 件、2023 年度：1 件
受賞数　　2021 年度：1 件、2022 年度：1 件、2023 年度：1 件
新聞　　カーボンニュートラルに貢献するポンプの役割　日刊工業新聞　2023/7/6

○研究開発成果の詳細

(1) 極低温試験装置の構築と実験計測の実施

① 液体窒素用試験装置及び液体窒素ターボポンプの設計・製作と極低温流体用ターボポンプの数値流体解析により定常性能評価と非定常特性についての調査を行った。トルクの直接計測、圧力計測、温度計測によるポンプ性能試験とインデューサ可視化試験が可能である。特に回転トルクの計測は、極低温流体試験設備では断熱性の課題からトルク直接計測は困難であるため、本装置の大きな特徴である。設計したポンプモデルに対して作動流体を液体窒素、液体水素、水の解析を行い、結果の比較により、作動流体の物性や性質で、ポンプ性能に差があり、液体窒素、液体水素、水の順での性能の低下を明らかにした。

② 既存試験装置改修による液化水素を用いた実証試験では、高速液化水素流中の蒸気温度計測、革新的液化水素計測技術の研究開発における液化水素実液を用いた実証試験を行うべく、「液化水素通液試験装置」を構築することを目標とした。事業期間中に 3 シリーズの試験を実施した。温度、圧力、流量、ボイド率、キャビテーション温度の計測とヒーターによるクォリティの制御ができる設備を構築した。極低温下における可視化窓からの漏洩の改善に難航し、液化水素を用いた実液試験には望めなかったものの、液化窒素試験を通じて、研究例の些少な極低温環境下でのキャビテーション温度計測・ボイド率計測は達成できたため、やや未達と判断した。

(2) 革新的計測技術の開発

① ボイド率センサーの設計・開発(極板型，探針型，テーパー型)に関して、オール金属型ボイド率計(世界初)は、誘電体を必要としない構造ため、強度的に堅牢にできた。耐圧 3 MPa(目標 1.3 MPa)、常温流体で平均誤差 6.5%を達成した(目標 10%以下)。液化水素による感度実験も良好であった。テーパー型ボイド率計は、電場解析による最適化設計と試作、常温流体での試験を実施し、並行極板型の優位性を見出した。また、端部での精度の悪化が問題点としてあげられた。探針型ボイド率計は、常温流体による気泡探知を確認。プローブ位置による感度の違いにより、同じ気泡径でも静電容量値に最大 20%程度の誤差が生じたため、対策を検討中である。以上、予定した実施項目に加え、本期間中にテーパー型ボイド率計の開発に着手できたため、計画以上に達成したと判断した。

② マルチメータの原理検証については、らせん型ボイド率計と深層学習を利用して、気液二相流の「気相流量」と「液相流量」をそれぞれリアルタイムで計測可能なマルチフローメータの開発を目的とした。実験は、シリコンオイルと空気を用いた。最終的に、LSTM 分類モデル(16 分類)で、96.7%の判別精度を達成した(前年度 71.6%)。また、回帰モデルによる流量計は、5%FS の誤差で判別精度 83.8%となり、改善の余地が残った。今後の方向性として新しい深層学習モデル(Transformer)及び XAI 技術の導入が検討された。

③ 水素キャビテーション内部の 1K 程度の温度低下を高精度に計測できる白金測温抵抗体を用いた温度計測手法とその校正法を確立した。本温度センサーは 17K から 25K までの温度範囲における計測で±0.024K の不確かさを有する。窒素気液二相流の温度計測を実施し、本温度計測手法で妥当な温度が得られること、および本温度計測プローブの強度が十分にあることが確認された。また、温度センサーの時定数が大きいためにこれまで困難とされてきた非定常キャビテーションの温度計測において蒸気温度および時間平均キャビティ温度を推定する手法を構築したことは計画を上回る達成である。

(3) 液水大容量昇圧ポンプの設計と性能・流動予測

① ポンプの想定設計仕様としてチャレンジングな質量流量 30t/h、出口静圧 3MPa として、多段ポンプの設計と内部流れの解析を実施した。それぞれ単段であるポンプ遠心羽根車＋ディフューザー流路を対象に、汎用 CFD 解析コードを用い、状態方程式群をプログラム化したデータベースを用いる圧縮性液化水素の流体解析により性能マップ（性能曲線）を取得した。解析では、質量流量 30t/h の設計点流量で、出口静圧 3MPa 以上に達した。また、液体水素の多段解析が安定に解析できることを確認した。

② 極低温流体として液体窒素を用いた実験により、幅広い流量域での運転において、キャビテーションの熱力学的効果を最大限に活用できる羽根形状を明らかにすることを目標とし以下を実施した。実験は、サブクール状態の液体窒素作動下の実験、冷水作動時におけるキャビテーション実験が実施可能な熊本高専所有の液体窒素循環試験用ポンプシステムを用いて行われた。供試ポンプは、低比速度のセミオープン型羽根を持つマグネットポンプである。またキャビテーションに及ぼす羽根車諸元の影響を調べるため、羽根車羽根枚数が 5 枚と 7 枚、及び羽根入口角が 20°と 30°の計 4 種類の羽根車を製作したが、実験時間との関係で、今回は羽根枚数が 5 枚、羽根入口角が 20°の実験のみ実施された。本実験によって、冷水時よりも液体窒素作動時の方が、ポンプ揚程降下時のキャビテーション係数が小さくなっており、キャビテーションの熱力学的効果が発生していることを確認。また、熱力学的効果による温度降下量は、キャビテーションの発生量が少ないと推定される設計流量点で最も小さく、過大流量、及び部分流量ではキャビテーション発生量が増大するため、温度降下量は大きくなることが明らかとなった。

(4) 液化水素流体シミュレーションの高度化

① 液化水素ポンプの数値流体解析技術の基盤確立、汎用コードをベースとした流体解析技術の高度化と精度向上、液化水素用多段ポンプの設計と流体解析による性能の予測では、大容量液化水素ポンプ、ならびに LN2 試験ループポンプに関し、それぞれ水素、窒素の物性を考慮した流体数値解析を行い、安定に解析が実施でき、性能マップを得られることを明らかにした。

② 熱力学的効果を考慮した均質媒体気泡流モデルによる CFD 解析については、事業担当により開発された多重プロセス型モデルの極低温キャビテーション流れへの適用を実施した。多重プロセス型モデルを極低温流体に適用できるように改良し、単独翼周りの液体窒素のキャビテーション解析に適用した。その結果、既往のモデルよりも、キャビテーション発生に伴う温度低下量を精度よく予測し得ることが確認され、液化水素への適用を含め流体機械を対象としたより高度な検証が課題であるものの、物理に根差しつつ予測精度が向上できる可能性を示した．また、気液両相の温度を考慮した二温度モデルの開発については、均質媒体モデルに基づいた一温度モデルによる成果であるが、並行して、気泡内外の温度差を直接考慮できる二温度モデルも新たに開発した。

(5) 液化水素の流動現象把握と不安定流動の把握、抑制

① キャビテーションに起因する流動不安定現象の発生メカニズム解明と予測手法の検討を目的とし、 水、液体窒素を対象に、CFD によるキャビテーションサージの予測手法の検討、液体窒素ループ試験装置の構築、 極低温流体中におけるキャビテーション流動不安定現象の安定性解析を行った。

② 逆流抑制デバイス付きポンプの熱流動解析による逆流・吸込み性能の予測については、研究担当者がこれまでに水用に開発してきた旋回止め付小径吸込み管を対象に、液化水素ポンプインデューサに適用した場合の逆流抑制効果を汎用数値流体解析ソルバーを用いて調査した。大流量での性能を大きく損なうことなく、小流量での逆流抑制効果が得られる目途がたった。この逆流抑制デバイスについて、当初の計画外であった熱力学的効果を考慮したキャビテーションの CFD 解析を行い、液化水素特有の熱力学的効果による吸込み性能向上が見込めることを確認した。実験検証が課題であるものの、これらの結果は、燃料ポンプをはじめ、今後、様々な場面、様々な運転条件で使用される水素ポンプに対して、上記のデバイスが信頼性の観点で有用であることを想起させる有意義な成果である。

③ 臨界点をまたぐ低温流体は大きな物性変化を伴うため流動不安定の発生が懸念されることから、液化水素と類似の挙動を示す液体窒素を用いて流動不安定性を模擬する実験設備、シミュレーション技術を構築した。液体窒素加圧により窒素の臨界点 3.4 MPa，126 K（-147 ℃）を越える超臨界窒素の生成、熱交換器による圧力・温度の制御、出口バルブによる流量制御により検証試験流路内で臨界点をまたがせ（超臨界窒素→液体窒素）、流れの不安定状態を意図的に作成し定量計測可能な装置を構築した。また、汎用流体シ

ミュレーションコードにおいて低温流体の実物性値を用いた上で、臨界点をまたぐ試験流路にオリフィスを設置した数値シミュレーションを実施し、流れの不安定状態を再現できることを確認した。

④ コーティングによるボイルオフガスの低減と予冷の高効率化では「断熱層のパラドックス」の原理を用いて、配管表面に熱伝導率の低い被覆を局所的に施すことにより膜沸騰領域を迅速に通過し、高速な予冷を可能にするような表面加工法を開発した。実用に供せられる高効率で耐久性の高いコーティングの開発を完了し、液体窒素の実験により、予冷時間を 1/5.2 に短縮、冷媒消費量を 77.9%削減することを確認した。一方、液化水素を用いた実験では、冷却促進効果を確認することができなかった。これは液化水素特有の伝熱現象が関係していると思われこの伝熱現象の解明と、特性を生かした予冷促進方法の提案を試みる。研究は予定通りに進んだが、液化水素での効果を実証できなかったため、やや未達と判断した。

## ４．４　炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発

### ４．４．１　ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発（2021 年度）（筑波大学、東京工業大学、物質・材料研究機構、大阪大学）

本事業では以下の 4 項目を目標として取り組んだ。（１）生成水素量がホウ化水素の保持している水素量以上となること(H が 8.5 wt%以上)、即ち水分子に由来する水素であることを定量的に実験により示す。（２）同位体を用いた実験で外部から導入した水がプロセスに関与しているという証拠（$^{18}O_2$ の検出や放射光分光解析による中間体同定）を実験により明らかにする。（３）プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータを実験に基づき定量的に算出する。（４）ホウ化水素シートと水の反応性（何%が加水分解するか、繰り返しで起きてしまうか）について実験と理論計算の両方で検討する。

〇研究開発成果の詳細

**研究項目①：繰り返しが可能なプロセスであることの原理立証**

**研究目標：**生成水素量がホウ化水素の保持している水素量以上となること(H が 8.5 wt%以上)、即ち水分子に由来する水素であることを定量的に実験により示す。

**研究内容：**筑波大グループにおいてホウ化水素を合成し秤量したのち、これまで実績のある実験条件での一連のプロセス（不活性ガス雰囲気下での 200℃加熱により水素の放出を行ったのち、90℃での水蒸気放出により酸素放出・水素貯蔵）を行う。ガスクロマトグラフィーと四重極質量分析により生成する水素と酸素を定量的に検出する。このプロセスを繰り返し、得られる水素放出量が H で 8.5wt%以上となることを示す。具体的には、加水分解で予想される水素量をも上回る 3 倍の値。即ち 25.5 wt%の水素量の検出を目指す（筑波大）。また、フリーズドライ法で高分散した試料を合成し、活性の比較を行う（NIMS・筑波大）

**成果：**10 回のサイクルで HB 自身が持つ水素を超える量の水素分子（検出全 $H_2$ 量： $4.09\times10^{-3}$ mol 56.6%×2 = 113%（HB の保有する H と同量））を検出することに成功した。これは水の導入条件の変更によるもので研究当初の 100 倍の水素量が検出された（筑波大）

**課題：**加水分解との区別化の必要性、酸素検出量が少ないという課題が得られた。1 回のサイクルでの生成量が条件に大きく依存すること（条件の更なる最適化の必要性）が判明した。現在、引き続き高効率で安定的な水素生成の実験条件を確立させる。同時に現在の試料が非晶質であるため、NIMS と筑波大それぞれでエッジや欠陥部分の効果の区別化を明確化させるための結晶性試料の合成に取り組んでいる。

**研究項目②：生成酸素が導入水分子由来であることの原理立証**

**研究目標：**外部から導入した水がプロセスに関与している証拠を実験により明らかにする。

**研究内容：**上記研究項目①で示したプロセスにおいて、水蒸気として $H_2{}^{18}O$ 同位体を用い、得られる酸素が導入した水蒸気由来である実験的証拠を得る。即ち $^{18}O_2$ の検出を四重極質量分析計で実現する（筑波大グループ）。また、導入した $H_2O$ 由来の水素原子や酸素原子が材料に取り込まれている証拠・原理立証として、各プロセスの過程の試料の状態を放射光による分光解析で明らかにする（例：XAFS などで再表面の O1s や B1s の各状態を計測する）（NIMS グループ）

**成果：**$^{18}O_2$ と $D_2$ の信号をガスクロマトグラフィー質量分析器で検出した（筑波大）：

**課題：**検出感度が低いうえに実験条件の最適化が不十分、またガスクロだと空気の漏れ込みがあり信頼性に欠ける。HB 試料が非晶質、欠陥とエッジ量のコントロールを含め高秩序材料の合成をまず行ったうえで放射光解析を行う必要がある。現在、新たに導入した in situ の四重極質量分析器によるサンプリングで赤外分光による試料の直接観察と同時にマスバランスを含めて証拠データを定量的に押さえる実験を進めている。また、$MgB_2$ の Mg イオンとプロトンをイオン交換する際、間に LiH を用いることで結晶性の試料を作る試みを進めている（NIMS)。また、イオン交換条件を系統的に制御して赤外分光で観測される BHB と BH の量の比が異なる試料の作成ができてきている（結晶性試料は BHB のみ）（筑波大）。

**研究項目③：プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータの算出**

**研究目標：**プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータを実験に基づき定量的に算出する。

**研究内容：**熱量計で酸素放出時・水素放出時の熱を測定する（筑波大グループで合成した試料を筑波大グループから分析企業に依頼分析）。最終的に、横軸が水蒸気量で縦軸が熱や吸脱着量（圧力変動）のデータを取得して吸脱着と熱の関係を水蒸気量の関数で明らかにし、熱力学的なプロセスの原理立証を行う。また、「電気化学的」にホウ化水素の水素生成・貯蔵反応に必要な

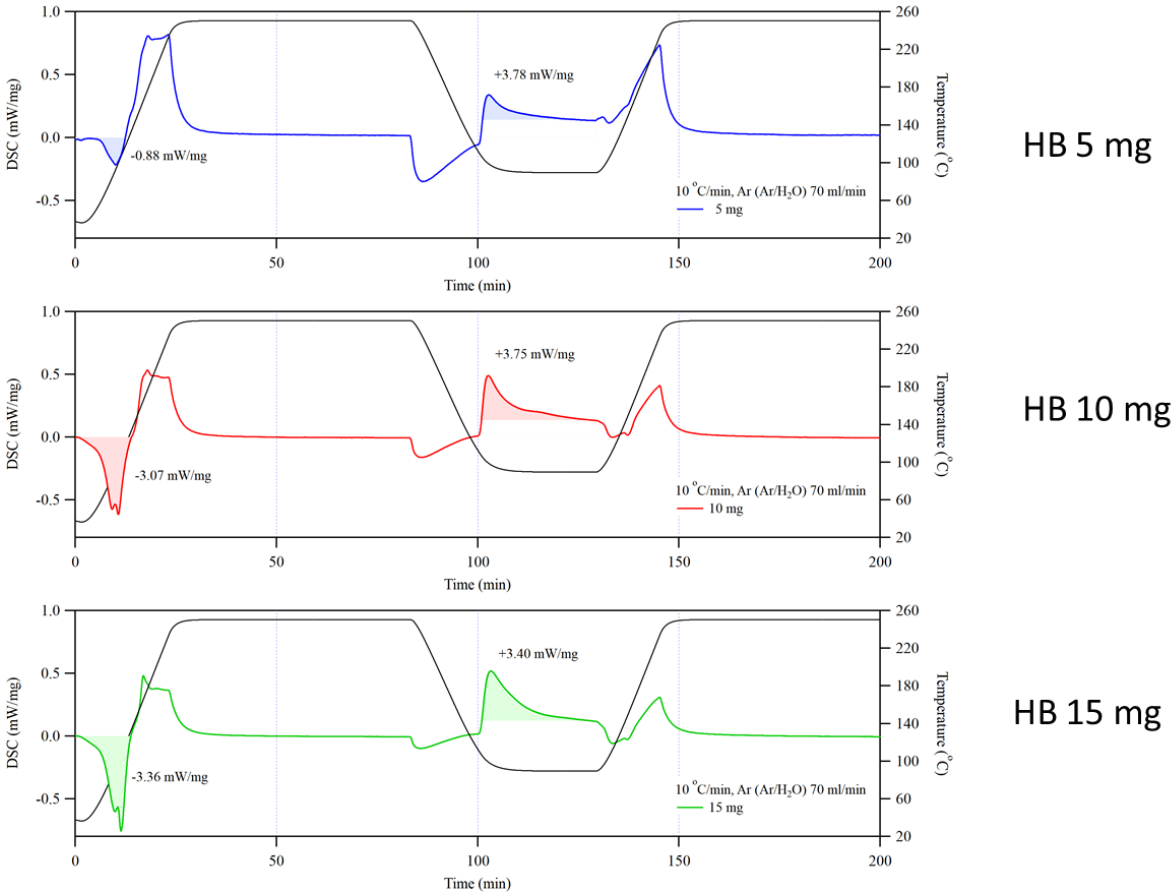



図 2 プロセスにおける熱量変化：水導入で発熱が見られ、ホウ化水素（HB）量で規格化して定量的な発熱量（3.75mW/mg）が得られた

エネルギーを求める。具体的には、ホウ化水素を担持した電極系、または、ホウ化水素シートを分散した電解液の電気化学系を用い、水素生成、水素貯蔵（酸素生成）に必要な酸化還元電位を求める。また、電気化学的に水素生成、水素貯蔵の繰り返し評価をおこなう。（東工大グループ）

**成果：**想定した発熱と吸熱が起きていることが示され（図２がその一例の実験結果である）、試料の単位質量当たりの発熱量（3.75mW/mg）の算出を達成（筑波大）。実験により −0.445 V (vs.Ag/Ag$^+$)程度のカソード分極によって水素が生成することがわかった（東工大）。

**課題：**熱量については現状で試料の全てが活性点ではないため、ガス生成量と突き合せた解析が必要（筑波大）。・電気化学的アプローチによる酸素生成の実験が必要（東工大）。

**研究項目④：ホウ化水素の加水分解**

**研究目標：**ホウ化水素シートと水の反応性（何%が加水分解するか、繰り返しで起きてしまうか）について実験と理論計算の両方で検討する。

**研究内容：**反応プロセスの理解に向けて必要な最初の段階として、ホウ化水素シートの劣化反応となる加水分解の反応性について実験において水との混合でホウ化水素の何%が加水分解するか、繰り返しで水に投入すると繰り返し加水分解が起きるかをガス分析、pH 分析などで定量的に明らかにする（筑波大学）。ホウ化水素シートの理想的な構造をスタート構造として、上記実験と対応する水分子との相互作用についてファンデルワールス相互作用を取り込んだ密度汎関数法による計算を行い、特にホウ素の電荷が及ぼす影響を明らかにし、反応する場合の具体的な構造即ち原子配列を示す。また、実験に対応する分子動力学シミュレーションを立ち上げ、ホウ化水素と水との相互作用について、欠陥がある場合とない場合の検証を行う（大阪大学）。

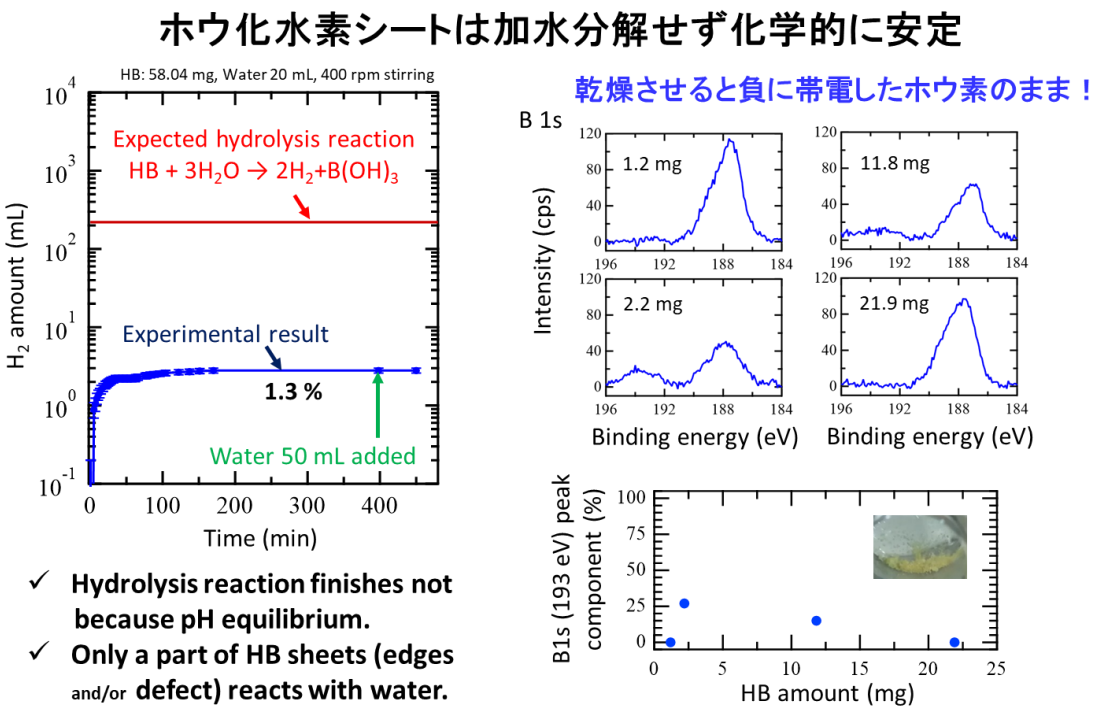



図３ ホウ化水素を水に投入した際の水素生成量は加水分解で想定される量の 1.3%のみ(左図)。乾燥させると負に帯電したホウ素が得られ酸化物は少ない（右図）

**成果：**水に投入すると加水分解反応が 1～7%程度進行し（図 3）繰り返し起きないことが実験で示された（図 4）。、ホウ素が正に帯電していることが理論で示された。さらに HB シートが水に対して化学的に安定であることをシミュレーションにより示した（図 5）。論文報告：K. Rojas, M. Miyauchi, S. Tominaka, T. Kondo, and I. Hamada, Communications Materials 2 (2021) 81.

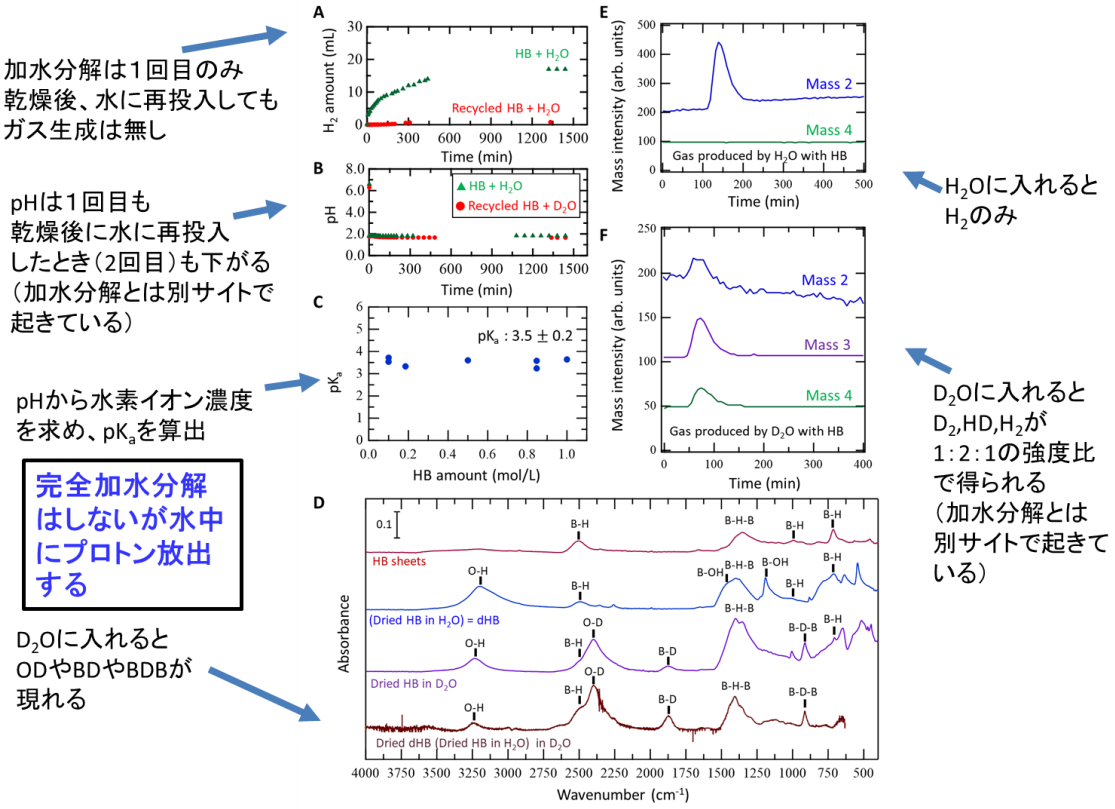
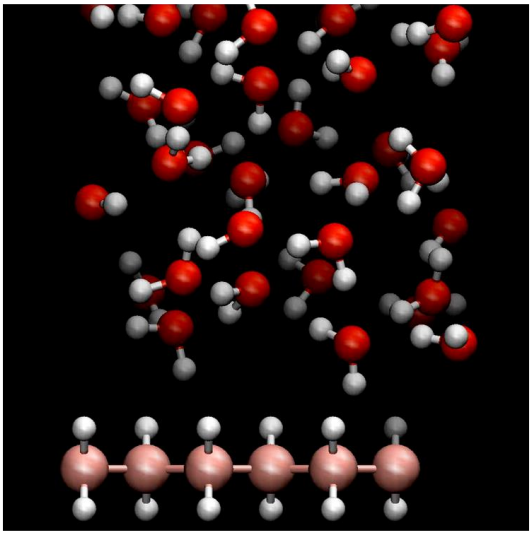



図４　ホウ化水素を水に投入して発生する水素は１回目の投入のみで２回は起きない（図 A）。

第一原理分子動力学シミュレーション（400 K）



Ta, Morikawa, Hamada (unpublished).

図５　HB シートが水に対して化学的に安定であることがシミュレーションにより示された。

**課題：**

・実験サンプルの不均一性による特性（エッジや欠陥の効果）が現状で不明

・加水分解に関するより多くの知見が必要：

・全てが加水分解する条件はあるのか（劣化の原因）

・最初の加熱で放出する水素と加水分解サイトの関連はあるのか

・加熱による水素放出後の加水分解は起きるのか

上記の課題解決および包括的な理解に向けた実験と計算を現在行っている：

・均一な試料の合成とよく規定された構造を持つ HB シートでの実験（筑波大）
・より現実に近い様々な欠陥構造を持つ HB シートでの計算（大阪大）

○期間、予算
期間　　：2021 年 4 月~2022 年 3 月
予算　　：29,999,800 円

○実用化への道筋
原理実証に向けた実験が引き続き必要な状況である。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **研究項目①：繰り返しが可能なプロセスであることの原理立証** | 生成水素量がホウ化水素の保持している水素量以上となること(H が 8.5 wt%以上)、即ち水分子に由来する水素であることを定量的に実験により示す。 | 10 回のサイクルで HB 自身が持つ水素を超える量の水素分子（検出全 $H_2$ 量：$4.09\times10^{-3}$ mol　56.6% ×2 = 113%（HB の保有する H と同量））を検出することに成功した。これは水の導入条件の変更によるもので研究当初の 100 倍の水素量が検出された。 | ○ | 水分解との区別化の必要性、酸素検出量が少ないという課題が得られた。また、1 回のサイクルでの生成量が条件に大きく依存すること（条件の更なる最適化の必要性）が判明した。試料が非晶質であるため、エッジや欠陥部分の効果の区別化を明確化させるための結晶性試料の合成に取り組んでいる。 |
| **研究項目②：生成酸素が導入水分子由来であることの原理立証** | 外部から導入した水がプロセスに関与しているという証拠を実験により明らかにする。 | $^{18}O_2$ と $D_2$ の信号をガスクロマトグラフィー質量分析器で検出した。 | △ | HB 試料が非晶質、欠陥とエッジ量のコントロールを含め高秩序材料の合成をまず行ったうえで放射光解析を行う必要がある。現在、新たに導入した in situ の四重極質量分析器によるサンプリングで赤外分光による試料の直接観察と同時にマスバランスを含めて証拠データを定量的に押さえる実験を進めている。 |
| **研究項目③** | プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の | ・想定した発熱と吸熱が起きていることが示され、試料の単位質量当たりの発熱量 | △ | ・電気化学的水素生成は特許出願し、企業との共同 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **プロセスにおける熱量変化やホウ化水素の熱力学的パラメータの算出** | 熱力学的パラメータを実験に基づき定量的に算出する。 | （3.75mW/mg）の算出を達成した。<br>・水素生成に必要な電位が -0.445 V vs. $Ag/Ag^+$であることを求め、この値が水からの水素生成よりも低いことを見出した。 | | 研究を開始した。また、論文投稿も予定している。<br>・熱量については現状で試料の全てが活性点ではないため、ガス生成量と突き合せた解析が必要。電気化学的アプローチによる酸素生成の実験が必要。 |
| **研究項目④：ホウ化水素の加水分解** | ホウ化水素シートと水の反応性（何%が加水分解するか、繰り返しで起きてしまうか）について実験と理論計算の両方で検討する。 | ・水に投入すると加水分解反応が 1～7%程度進行し繰り返し起きないことが実験で示された。ホウ素が正に帯電していることが理論で示された。さらに HB シートが水に対して化学的に安定であることをシミュレーションにより示した。<br>・第一原理計算によりホウ化水素シート上において水の解離状態は熱力学的に安定であるが、活性化障壁が高いため水の解離は速度論的に起こりにくいことが分かった。 | ○ | ・加水分解が限定的であることとその起源を論文に報告した（Commun. Mate. 2 (2021) 81） |

○成果の意義

ホウ化水素を用いた水と熱での水素生成という観点ではまだ引き続き実証研究が必要であるが、ホウ化水素が水に対して化学的に安定であることが実験と理論で明らかになったことは今後の様々な用途でのホウ化水素の利用の観点で意義深い。

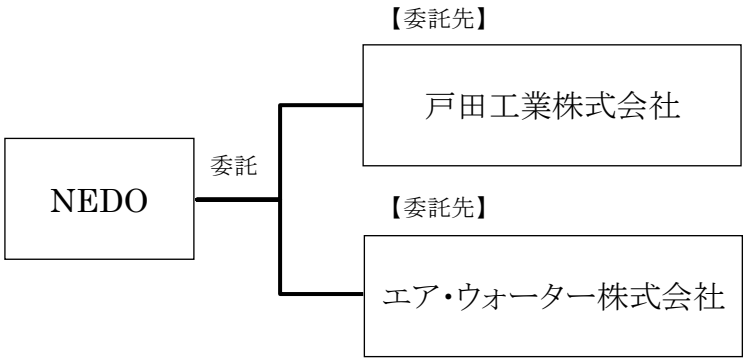
○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

特許：１件

論文発表：1 件

## ４．４．２メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発（戸田工業、エア･ウォーター）

○実施者名、実施体制




○期間、予算

期間　　：2021 年 4 月~2023 年 3 月

予算　　：2021 年度　32,546,800 円、 2022 年度　47,435,300 円（税込み）

○実用化への道筋

◆　実用化・事業化に対する今後の課題

- 安価なメタン原料の探査…温泉付随の未利用天然ガスが湧出している地域・場所
- 天然ガス等に含まれる微量ガス成分による水素・CNT 品質への影響調査と前処理仕様の確立
- CNT の安定かつ多量の需要が見込める顧客の獲得…年間 100t 以上の用途探索

◆　実用化・事業化に向けた具体的な取り組み（計画）

| **年度** | **実施事項** |
|---|---|
| 2023～2025 年度 | • 商用スケール実証プラント（水素 2～3 万 $Nm^3$/月、CNT 8～12t/月）の設計・製作および実証検討<br>※上記課題の解決および水素・CNT サプライチェーンの構築 |
| 2026 年度～ | • 上記実証プラントの商用稼働<br>• 商用初号機（生産能力：水素 11 万 $Nm^3$/月、CNT 45t/月）の設計・製作の実施。<br>※設置場所については、メタン調達価格やロケーション等を考慮して選定。 |

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **①DMR 反応用高活性鉄系触媒の設計（戸田工業）** | ・積算水素生成量が 5.5mol/g-cat.以上の活性を有する鉄系触媒を設計する。 | ・積算水素生成量が 6.0mol/g-cat.の高活性触媒の設計に成功。<br>・戸田工業の既存製造設備を用いて、上記触 | ○ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ・上記鉄系触媒の月産 10t に向けた量産技術を確立する。 | 媒を月産 10t 以上量産可能な製造仕様を確立。 | | |
| **②高濃度水素を安定生成可能な DMR 反応仕様および制御技術の確立（戸田工業）** | ・パイロットスケール反応炉を用いて、DMR 反応 out ガス中水素濃度 70%以上が 100h 以上得られる DMR 反応仕様と制御技術を確立する。<br>・副生成物の CNT 品質は、粉体抵抗 0.020Ω・cm（at 1g/cc）以下を達成する。 | ・従来触媒を用いて、DMR 反応 out ガス中水素濃度が 70%以上、連続 100h 以上を概ね達成。一方、CNT 粉体抵抗は目標未達。<br>・改良触媒を用いることで、CNT 粉体抵抗を 0.021Ω・cm まで改善できたが、安定的に水素濃度 70%以上が得られず。 | △ | 今後、改良触媒を用いて粉体抵抗を維持しつつ、水素濃度を安定化させる対策として、炉内構造の改良等の検討を行う。 |
| **③水素の高効率・高純度精製プロセスの確立（エア・ウォーター）** | ・パイロットスケールにて、DMR 反応から生成した水素を 99.99%以上まで精製する。<br>・高純度水素精製プロセスにおける PVSA での水素回収率 85%以上を達成する。 | ・連続 100h 以上に亘って 99.99%以上に高純度精製できることを確認。<br>・水素回収率は PVSA で 83%、水素精製装置全体で 80%を達成。 | ○ ～ △ | 今後のスケールアップ時に、回収率向上に向けた最適化を図る。<br>さらに、未反応メタンの有効利用に向けて、利用先の検討・制御機構の検討を行う。 |
| **④実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定（戸田工業／エア・ウォーター）** | ・水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下が達成可能な実機スケールの高効率水素製造プラントの基本設計を完了する。<br>・水素提供価格 30 円/$Nm^3$ 以下を想定した事業化シナリオを策定する。 | ・パイロットスケール設備による実験結果を基に、実機スケールの高効率水素製造システムの基本設計を完了。<br>・副生成物の CNT を市場価格で販売することで、水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下を達成可能。 | ○ | 製造コストダウンの観点から、水素精製処理排ガス中メタンの原料ガスへのリサイクル使用を継続検討していく予定。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **⑤CNT の性能評価および用途開発（戸田工業）** | ・副生成物の CNT について競争優位性のある用途へのサンプルワークを行い、実用化用途と顧客を見出す。 | ・サンプルワーク活動により、確度の高い用途と顧客が明確化されつつある。 | △ | 今後も受注獲得に向けたサンプルワークを推進していく。 |

○成果の意義

近年、気候変動を背景として脱炭素経営に向けた社会的要請が強まっており、多種多様な製品のサプライチェーン全体での脱炭素化に向けた取り組みが加速されつつある。このような社会的要請は企業に負担を強いる反面、早期に対応すれば企業価値の向上につながる絶好の機会ともいえる。本研究開発は安価な $CO_2$ フリー水素の早期社会実装を目指しており、その成果は既存水素サプライチェーンの脱炭素化という大きな変革をもたらしつつ、水素を利用している企業の価値向上に繋がることが期待される。さらに、$CO_2$ フリー水素の利用による企業価値の向上は収益面や人材面といった側面だけではなく、国際的な評価の改善にもつながり、水素を利用する企業の活性化や成長を促進するため、2050 年脱炭素社会の実現に向けた取り組みを加速すると同時に、国内産業の発展にも貢献できる。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

| 年度 | 特許出願 | 論文発表 | 講演 | 雑誌投稿 | 成果普及の努力 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | プレスリリース 1<br>展示会出展 2 |
| 2022 | 0 | 0 | 1 | 2 | 展示会出展 1 |

○研究開発成果の詳細

1．研究開発の概要

メタン直接改質（DMR）法は，メタンを原料として金属触媒等を用いて熱分解させ，水素とカーボンナノチューブ（CNT）等の固体炭素を生成するクリーンな反応（(1)式）である。この DMR 反応は，現在工業的に広く用いられている水蒸気改質法（(2)式）と比較した場合，メタン 1 分子当たりの水素生成量は 1/2 であるものの，水素生成に伴う直接的な $CO_2$ の発生がない，すなわち $CO_2$ フリーな反応となり，得られる水素はターコイズ水素と呼ばれる。また、DMR 法で得られた CNT をカーボンブラック等の他炭素材料の代替として利用すれば，さらなる $CO_2$ 削減が期待できる。すなわち，DMR 反応技術は，$CO_2$ フリーのクリーンな水素製造と高機能な CNT 製造の両立を可能とする SDGs およびカーボンニュートラル実現に貢献可能な技術であると言える。

$CH_4 \rightarrow 2H_2 + C$ (ｶｰﾎﾞﾝﾅﾉﾁｭｰﾌﾞ etc.)　　･･･(1)

$CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$　　･･･(2)

本研究開発は、天然ガスやバイオガス等の主成分であるメタン原料から、鉄系触媒を用いたメタン直接改質（DMR）法により、$CO_2$ を直接排出せず高純度水素（99.99%以上）を安価かつ高効率に製造可能な水素製造プロセスおよびシステムを開発することを目的とするものである。また、副生成物である高導電性の多層

カーボンナノチューブ（CNT）を高付加価値製品として市場展開することにより、水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下を達成しつつ、システム全体で収益確保可能な仕組みを構築する。

2．研究開発目標

下記に本研究開発の実施項目別の最終目標を示す。

| 実施項目 | 最終目標 |
|---|---|
| ①DMR 反応用高活性鉄系触媒の設計（戸田工業） | ・積算水素生成量が 5.5mol/g-cat.以上の活性を有する鉄系触媒を設計する。<br>・上記鉄系触媒の月産 10t に向けた量産技術を確立する。 |
| ②高濃度水素を安定生成可能な DMR 反応仕様および制御技術の確立（戸田工業） | ・パイロットスケール反応炉を用いて、DMR 反応 out ガス中水素濃度 70%以上が 100h 以上得られる DMR 反応仕様と制御技術を確立する。<br>・副生成物の CNT 品質は、粉体抵抗 0.020Ω･cm（at 1g/cc）以下を達成する。 |
| ③水素の高効率・高純度精製プロセスの確立（エア・ウォーター） | ・パイロットスケールにて、DMR 反応から生成した水素を 99.99%以上まで精製する。<br>・高純度水素精製プロセスにおける水素回収率 85%以上を達成する。 |
| ④実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定（戸田工業/エア・ウォーター） | ・水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下が達成可能な実機スケールの高効率水素製造プラントの基本設計を完了する。<br>・水素提供価格 30 円/$Nm^3$ 以下を想定した事業化シナリオを策定する。 |
| ⑤CNT の性能評価および用途開発（戸田工業） | ・副生成物の CNT について競争優位性のある用途へのサンプルワークを行い、実用化用途と顧客を見出す。 |

3．研究開発成果

3．1 研究開発項目別成果及び達成度

（1）実施項目 1 ：DMR 反応用高活性鉄系触媒の設計（担当：戸田工業株式会社）

① 触媒調製仕様の検討

DMR 触媒の高活性化を図るべく、触媒調製仕様の検討、具体的には主触媒（Fe, Co）組成の選定、および主触媒と助触媒（Al）との複合化方法の検討を行った。

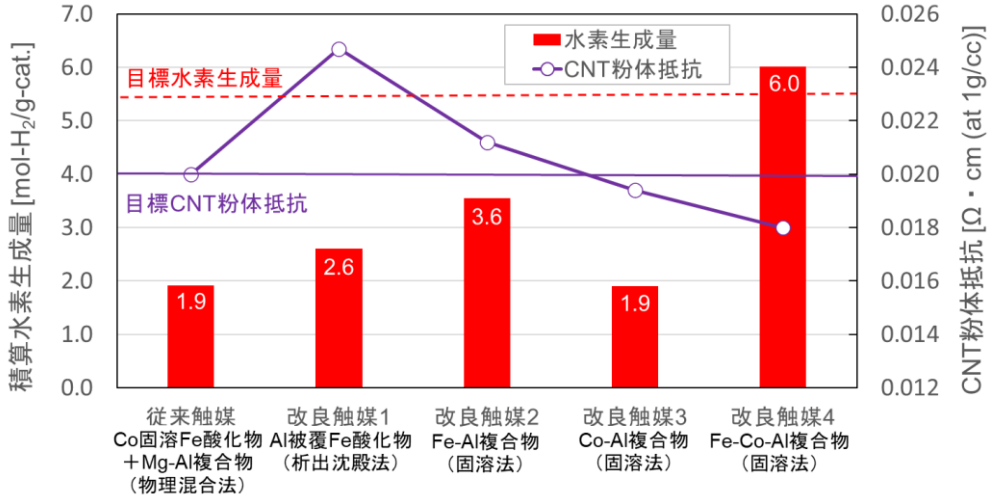
a. 実験方法

試料としては、物理混合法で調製した Co 固溶 Fe 酸化物と Mg-Al 複合物との混合物からなる従来触媒（BET 比表面積 35$m^2$/g）に対して、析出沈殿法で調製した Al 被覆 Fe 酸化物（BET83$m^2$/g）、固溶法（湿式合成法）で調製した Fe-Al 複合物（BET245$m^2$/g）、Co-Al 複合物（BET81$m^2$/g）および Fe-Co-Al 複合物（BET155$m^2$/g）をそれぞれ改良触媒 1, 2, 3, 4 として用いた。DMR 反応は、小型バッチ式ロータリーキルン（炉心寸法 155φ×370mm）を用いて行い、炉出口ガス中の水素濃度はガスクロマトグラフにてモニタリングした。また、反応終了後の CNT（触媒含む）粉体抵抗を測定した（嵩密度 1g/cc における体積固有抵抗率）。

b. 結果

各種触媒の DMR 反応時の積算水素生成量と CNT 粉体抵抗を図 1 に示す。固溶法を用いて主触媒 Fe と助触媒 Al をナノレベルで複合化させた改良触媒 2 は、比較的高い水素生成活性が得られたが、目標の水素生成量には達しなかった。また、主触媒として Fe の替わりに Co を用いた改良触媒 3 については、CNT 粉体抵抗が下がる傾向が見られた。

一方、固溶法を用いて主触媒 Fe と Co、および助触媒 Al をナノレベルで複合化した改良触媒 4 は、目標の 5.5mol/g-cat.以上の水素生成量を達成することができた。さらに、CNT 粉体抵抗についても目標の 0.020 Ω･cm を下回るものが得られた。




<反応条件> 触媒量: 3.0g, 原料ガス流量:13A 2L/min, 反応温度: 705℃, 反応時間: 4h

図 1　各種触媒の DMR 反応時の積算水素生成量と CNT 粉体抵抗

② DMR 触媒の量産技術の確立

改良触媒 4 にて、戸田工業㈱事業所内の生産設備での量産体制について検討を行った。改良触媒 4 の量産フローとしては、まず、Al，Fe，Co 溶液とアルカリ原料を投入して湿式反応させ、次いで触媒粒子を含むスラリーをろ過･洗浄した後、触媒ケーキを乾燥･焼成し、最後に粉砕･包装する流れとなる。本フローを基に試算すると、22t/月の生産能力となり、後述(4)に示す実機スケールプラントで必要となる年間 50t は約 2 か月半あれば生産可能となる。

(2) 実施項目 2 ：高濃度水素を安定生成可能な DMR 反応仕様および制御技術の確立（担当：戸田工業株式会社）

① パイロットスケール連続式ロータリーキルンによる DMR 反応仕様の検討

上記(1)の従来触媒と改良触媒 4 を用いて、新規導入したパイロットスケール連続式ロータリーキルンにおける DMR 反応仕様の最適化の検討を行った。

a. 実験方法

新規導入したパイロット連続式ロータリーキルン設備の外観写真を図 2 に示す。原料ガス（LNG）を所定量流通させたロータリーキルン炉心を 730℃に電気加熱した後、触媒フィーダーを用いて図 2 の炉体左端から触媒を所定速度で連続投入させた。ロータリーキルン炉心の内側にはヘリカルを設置しており、触媒の滞留時間を炉回転数で制御させるとともに、炉内での触媒の流動性を向上させ、触媒とメタンガスとの接触反応が促進する構造となっている。反応生成物である CNT と触媒の粉体混合物は下流側（図 2 右側下）の回収タンクに回収し、

所定の時間間隔で取り出し、粉体抵抗を測定した（嵩密度 1g/cc における体積固有抵抗率）。また，炉出口ガスについては、ガスクロマトグラフにて、水素、メタン等のガス濃度の推移をモニタリングした。
今回は、触媒の種類、原料ガス/触媒比（触媒供給量に対する原料ガス流量の比率）および原料ガス流向（触媒の流れに対する原料ガスの流れ方向）の違いによる反応ガス中水素濃度と CNT の粉体抵抗への影響を検討した。尚、触媒の流れ（進行）方向に対して原料ガスが同じ方向の流れを「ガス並流」，触媒の流れ方向に対して原料ガスが反対方向の流れを「ガス向流」と表記する。

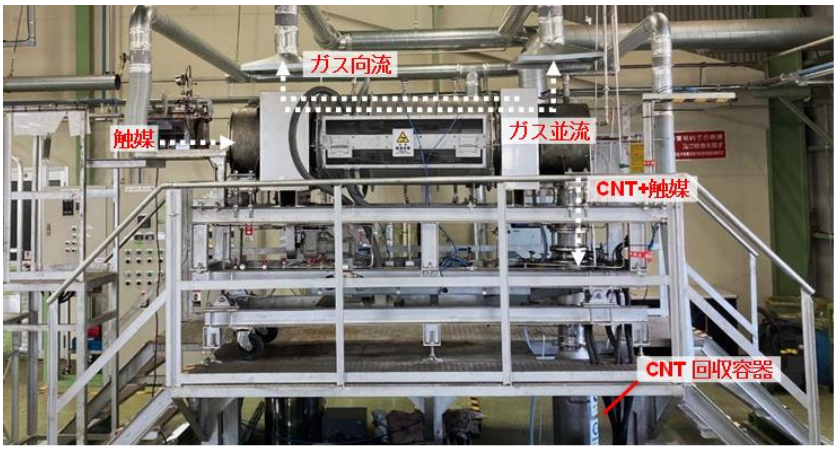



図 2　パイロット連続式ロータリーキルン本体（炉心寸法 250φ×2000mm）

b. 結果
従来触媒（Co 固溶 Fe 酸化物と Mg-Al 複合物の混合物）および改良触媒 4（Fe-Co-Al 複合物）を用いて DMR 反応させた際の反応経過時間と炉出口ガス中の水素濃度の関係を、それぞれ図 3、図 4 に示す。
従来触媒を用いた場合、連続 100h 以上に亘って水素濃度は概ね目標とする 70%以上を達成できた。但し、CNT 粉体抵抗については 0.032Ω･cm に留まった。
一方、高活性な改良触媒 4 を用いて原料ガスの流れ方向を「ガス並流」で反応させた場合、水素濃度は 70%以上を維持したままで CNT 粉体抵抗を 0.025Ω･cm まで改善することができた。さらに、原料ガスの流れ方向を「ガス向流」にした場合、CNT 粉体抵抗は 0.021Ω･cm となり概ね目標を達成できたものの、水素濃度は安定的に 70%以上が得られなかった。今後、この水素濃度を安定化させる対策として、炉内構造の改良等の検討を行う予定である。

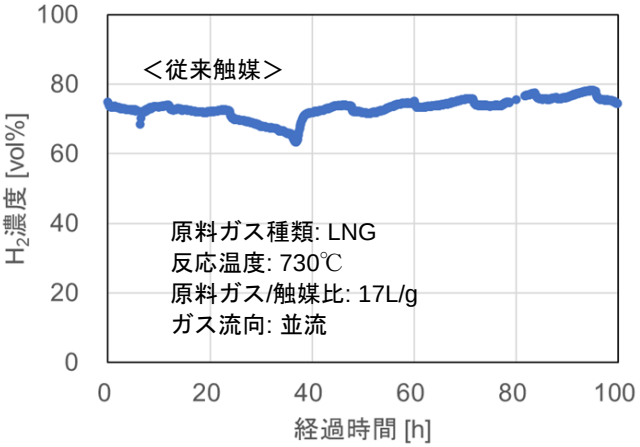



図 3　従来触媒による DMR 反応経過時間と炉出口ガス中水素濃度の関係

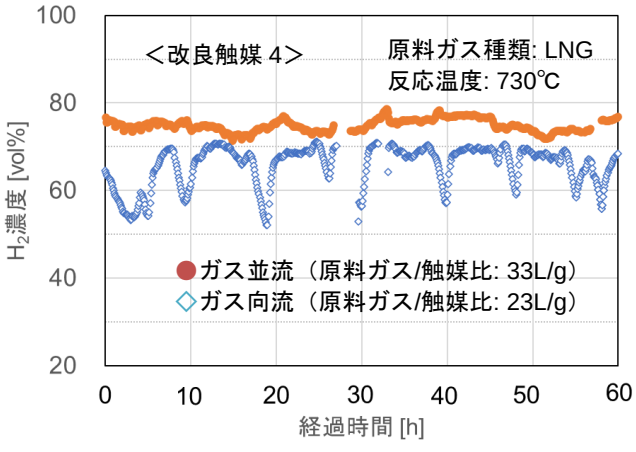



図 4　改良触媒による DMR 反応経過時間と炉出口ガス中の水素濃度の関係

(3) 実施項目 3：水素の高効率・高純度精製プロセスの確立（担当：エア・ウォーター株式会社）

① 水素精製プロセスの設計

本研究開発においては、水素を高純度に精製する基本技術である膜分離技術と吸着分離技術を組み合わせたプロセスを採用した。吸着分離装置には、一般的に対象ガスの高回収率が期待できる圧力スイング式吸着分離（PVSA）装置を用いた。図 5 に今回導入した水素精製パイロット機のフローを示す。

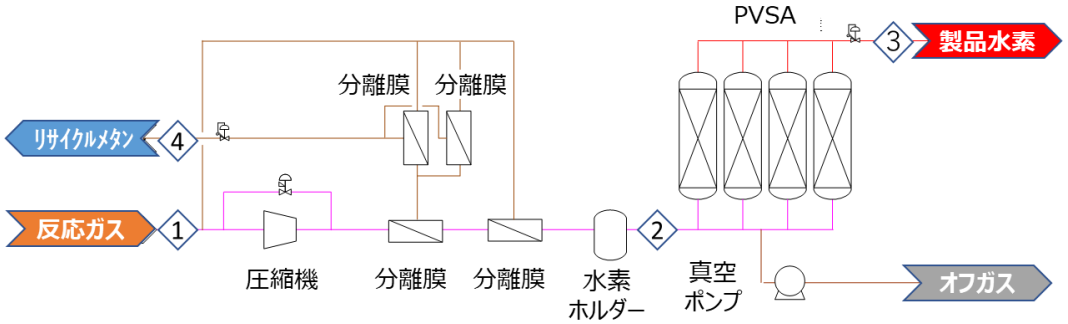



図 5 水素精製パイロット機（圧縮機～分離膜～PVSA）フロー

② 水素精製パイロット機を用いた連続実証試験

パイロット連続式ロータリーキルンと水素精製パイロット機を接続し、従来触媒を用いて DMR 反応から得られた水素濃度 70%以上を含む反応ガスを精製処理した。表 1 に連続運転時の水素精製マテリアルバランスを、表 2 に水素精製品質の目標値と実績値を示す。

連続運転 100h 以上に亘って、DMR 反応から得られる水素を高効率に高純度化（99.99%以上）できることを確認した。水素回収率については、目標の 85%に対し、80%に留まった。これは小規模スケール故の影響であり、実機スケールでは改善される見込みである。

表 1 連続運転時の水素精製マテリアルバランス

| Stream No. | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 処理ガス名 | | 原料ガス | 粗水素 | 製品水素 | リサイクルメタン |
| 流量 | [$Nm^3/h$] | 0.33 | 0.26 | 0.21 | 0.07 |
| 圧力 | [kPaG] | -4 | 490 | 300 | 660 |
| 温度 | [℃] | 40 | - | - | - |
| 組成 [mol%] | $H_2$ | 80 | 98.9 | 99.99< | 12.8 |
| | $CH_4$ | 19.9 | 0.8 | 0 | 87 |
| | $N_2$, CO, $CO_2$ etc. | 0.1 | 0.3 | 0 | 0.2 |

表 2 連続運転時の水素精製品質の目標値と実績値

| | 目標値 | 設計値 | 試験結果 |
|---|---|---|---|
| 原料ガス水素濃度 [%] | 70%以上 | 70%以上 | 70%以上 |
| 水素回収率（膜） [%] | - | 99 | 97 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 水素回収率(PVSA) [%] | - | 90 | 83 |
| 水素回収率(全体) [%] | 85< | - | 80 |
| 製品水素純度 [%] | 99.99< | - | 99.99< |

(4) 実施項目 4：実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定（担当：戸田工業株式会社、エア・ウォーター株式会社）

① 実機スケールプラントにおけるマテリアルバランスの計算

上記(2)および(3)の検討結果を基に、実機スケールプラント（生産能力；水素 11 万 $Nm^3$/月，CNT45t/月）を想定したマテリアルバランスを計算した。その結果を図 6 に示す。

尚、膜分離で精製した後のメタン、水素を含む処理排ガスを、当初は原料ガスへリサイクル使用する予定であったが、リサイクル実験を試行した結果、処理排ガス中の微量な CO 等が濃縮され、DMR 反応の制御が困難となったため、原料ガスへのリサイクルは行わず、炉加熱用の燃料ガスとして使用する仕様としている。

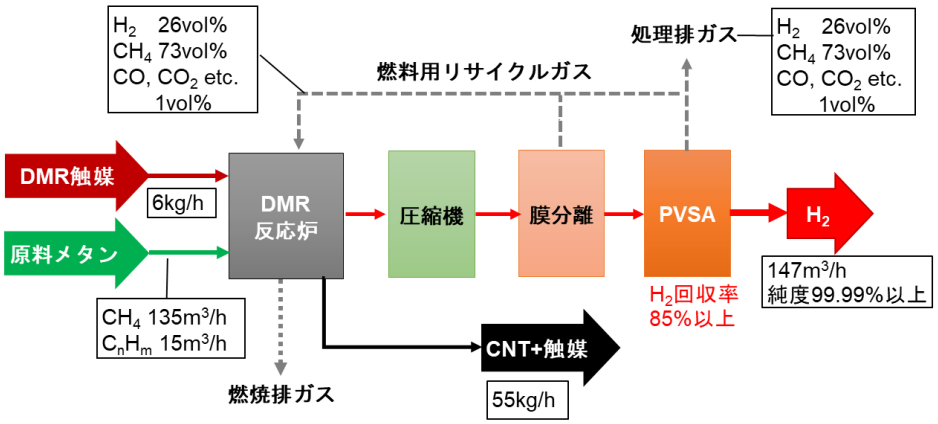



図 6 実機スケールプラントにおけるマテリアルバランス（想定）

② 水素製造コスト試算

上記のマテリアルバランスを基に、水素・CNT 製造コストを試算した結果、副生成物の多層 CNT を市場価格で販売できれば、水素製造システム全体で収益を確保しつつ、目標の水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下を達成可能なことが明らかになった。

(5) 実施項目 5：CNT の性能評価および用途開発（担当：戸田工業株式会社）

副生成物として得られる高品質 CNT について、用途別の性能評価を行うとともに競合品との差別化・競争優位性を明確化し、高付加価値用途を見出す検討を行った。

本研究開発採択に関する共同プレスリリースをはじめ、展示会への出展、講演発表などによる広報活動およびマーケティング活動により、問い合わせ、面談件数が大幅に増え、各種用途評価向けのサンプルワークも拡大した。その効果により、受注確度の高い用途と顧客が明確化されつつある。今後も受注獲得に向けたサンプルワークを推進していく。

3. 2 成果の意義

(1) DMR 反応用高活性鉄系触媒の設計

本研究開発において、主触媒組成および主触媒と助触媒との複合化方法を最適化することにより、高い水素生成能力を有するとともに、高導電性の CNT が得られる DMR 反応用高活性触媒が設計できた。DMR 反応において、高効率で水素を生成させるだけでなく、良質な CNT を同時に得るという観点から、触媒設計がなされた研究事例は殆ど報告されておらず、技術的な価値は非常に大きい。

(2) 高濃度水素を安定生成可能な DMR 反応仕様および制御技術の確立

連続式ロータリーキルンを用いて、DMR 反応 out ガス中の水素濃度を 100h 以上に亘って 70%以上維持しつつ、かつ粉体抵抗 0.020Ω・cm 以下の CNT を同時に得るという目標に対して、本研究開発期間中に充分な結果を得るには至らなかったが、目標達成の目処が立ったことは大きな成果であると考えている。生産効率の良い連続式ロータリーキルンを用いた DMR 反応技術の実用化事例として、本研究開発は先駆けとなる。

(3) 水素の高効率・高純度精製プロセスの確立

今回検討した水素精製技術は、既存の膜分離技術と吸着分離技術を組み合わせたものであるが、本 DMR 反応を用いた高効率水素製造システムにおいて、水素精製技術は必須であり、今回、DMR 反応ガスから得られる 70%程度の水素を高効率に 99.99%以上に高純度化できることを確認できたことは大きな成果である。今後、未反応メタンを含むリサイクルガスの効率的利用を図ることで、より製造コストを低減した水素製造システムを完成させて実用化・事業化を行う。

(4) 実機スケールプラントの基本設計および事業化シナリオの策定

本研究開発の検討結果により、実機スケール（生産能力；水素 11 万 $Nm^3$/月、CNT45t/月）において、副生成物の多層 CNT を市場価格で販売できれば、目標の水素製造コスト 30 円/$Nm^3$ 以下を達成でき、しかも水素製造システム全体で収益を確保できることを示せたことは事業化に向けて大きな成果である。

本高効率水素製造システムが社会実装されることにより、既存水素サプライチェーンの脱炭素化という大きな変革をもたらしつつ、水素を利用している企業の価値向上に繋がることが期待される。さらに、$CO_2$ フリー水素の利用による企業価値の向上は収益面や人材面といった側面だけではなく、国際的な評価の改善にもつながり、水素を利用する企業の活性化や成長を促進するため、2050 年脱炭素社会の実現に向けた取り組みを加速すると同時に、国内産業の発展にも貢献できる。

(5) CNT の性能評価および用途開発

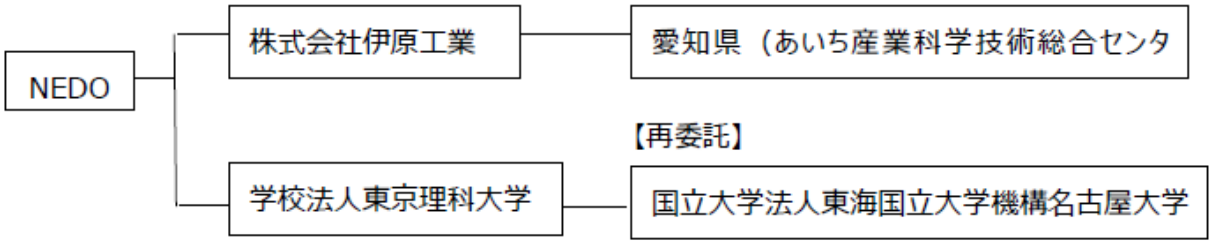
本研究開発を通じて、会社の認知度が上がり、各種用途評価向けのサンプルワークが格段に広がった。その結果、現時点では採用決定には至っていないが、受注確度の高い用途と顧客が明確化されつつある。今後、受注獲得に向けた活動を加速化させ、本高効率水素製造システムの早期社会実装化を実現する。

以上

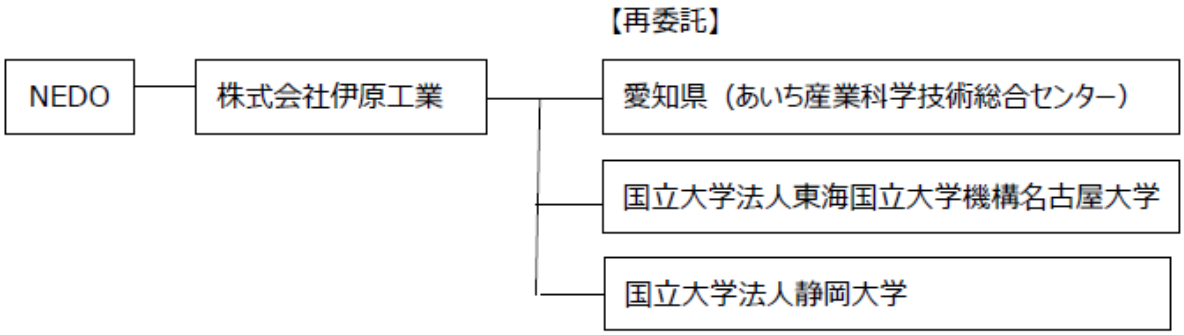
## ４．４．３メタン直接分解による水素製造技術開発（伊原工業、東京理科大学（2021 年度まで））

○実施者名、実施体制

２０２１年４月２３日から ２０２２年３月３１日まで




２０２２年４月１日から ２０２３年３月３１日まで
ただし、再委託については、期間 2022 年６月３０日から 2023 年３月 31 日迄である。




○期間、予算

期間　　：2021 年４月~2023 年３月

予算　　：2021 年度　26,348,300　円

　　2022 年度　78,442,900　円

○実用化への道筋

・実用化計画

2023 年内に大手プラントメーカーと実証炉製造予定。バイオメタンを使用することにより、カーボンネガティブを実現すべく検討開始。

副生炭素については、大手自動車部品メーカーにサンプル出荷し、自動車部品の原材料としての製品評価試験に合格したので、今後装置製造を含め協議する予定。

・課題

水素収率を上げ、水素製造装置のさらなるエネルギー効率を図る。

水素・メタン混合ガスから純水素の分離。

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| **1.反応装置の熱効率の向上** | 反応炉温度700℃で水素濃度60%を DSS運転にて 30日以上持続。 | メタン分解反応は金属構造体触媒の境膜付近で進むこともあり、輻射熱を利用して金属構造体触媒自体を直接加熱することにより、反応炉のエネルギー効率を高めた。<br>反応炉内圧力を 0.5MPa と高め反応装置を小型化した。 | ◎ | 従来法は、加熱したメタンガス（気体）を触媒層（固体）へ供給し、対流熱伝達による加熱が行われていた。 |
| **2. 水素製造装置の要素技術開発** | 反応炉のモジュール化 | 装置の多用途対応のために反応炉の各機能をモジュール化した。反応炉内の各モジュール間の配管を無くし、コストやエネルギーロスを低減した。 | ○ | |
| **3. 副生炭素の特性解析と幅広い利用方法の検討** | 副生炭素の特性解析 | 副生炭素は、繊維状炭素が凝集した状態であった。導電率や熱伝導率はカーボンブラックと、同等であったが、炭素が凝集しているため、空隙率が高かった。 | ○ | |
| **4. 生成水素及び水素混合ガスの用途検討** | 水素混合ガスの用途の検討 | 水素濃度が 25%以上の場合は、燃焼器の変更が必要となることが判明。 | ○ | |
| **5. 金属板触媒の性能向上** | 原子構造研究、Ni めっき膜触媒によるメタン分解の解明 | Ni 膜は 100～200nm 程度の微細粒から成る。水素の拡散による膜の破壊は、触媒を劣化させる反面、触媒を新生させる効果がある。微細粒の Ni-Cu 固溶体がメタン分解の触媒活性サイトとなって反応が進行する。大きなスケールの脱離は、DSS運転中の加熱停止に伴い、サブμmの小さなスケールの剥離は、Ni の微粒子を内包してグラファイト層が析出することで Ni めっき層が消耗する様子が観察された。 | ○ | |

○成果の意義

カーボンニュートラル実現のためには、再生可能エネルギー由来の電気を使った水電解による水素製造だけでは、水素が大幅に不足する。また、従来の水蒸気改質法では $CO_2$ の発生を伴うため CCS の後処理が必要となり、立地条件も限定されていた。そこで、賦存量の多い天然ガス等から $CO_2$ フリー水素を製造する技術を開発した。また、地域バイオマス資源活用のためには、反応炉規模に柔軟に対応し、安価な装置にする必要がある。
本事業では、メタンを直接水素と固体の炭素に分解するメタン直接分解法の実用化を目指して開発を行った。また、ターコイズ水素の製造と共に、固体の生成炭素の有価値化を図り、水素コストの低減を目指した。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

| 年度 | 特許 | 論文 | 学会口頭発表 | 講演 | メディア発表 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2022年度 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2023年度 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 |

○研究開発成果の詳細
(1) 実施項目１：反応装置の熱効率の向上
①構造体触媒の加熱法の改善
従来は、加熱されたメタン（気体）から構造体触媒（固体）へと対流熱伝達による加熱が行われていたので、非常にエネルギー効率が悪かった。そこで、実際のメタン分解反応は金属構造体触媒の境膜付近で進むこともあり、輻射熱を利用して金属構造体触媒自体を直接加熱した。これにより反応炉のエネルギー効率を大幅に高めることができた。
これにより、反応炉温度 700℃で水素濃度 60%を DSS 運転にて 30 日以上持続するという総合目標を達成することができた。
②反応炉内圧力の昇圧
反応炉を小型化する目的で、反応炉内のメタン圧力を上昇させて実験を行った。反応炉内圧力を上げると、平衡移動の法則により水素濃度が低下すると予想したが、0.5MPa 位から水素濃度の上昇が確認された。圧力を上げることにより、メタンガスが板触媒のミクロ孔まで到達した、圧力上昇に伴い熱伝導率が大きくなったことなどが考えられるが原因かは不明である。

(2) 実施項目２：水素製造装置の要素技術開発
①モジューラー反応炉用とモジュールの設計・製作
地域分散型水素製造装置に求められる、装置の規模変化に対応するために反応炉の各機能をモジュール化した。このことにより、反応炉内の各モジュール間の配管がないために、製造コストやエネルギーロスを低減できた。（図 1）

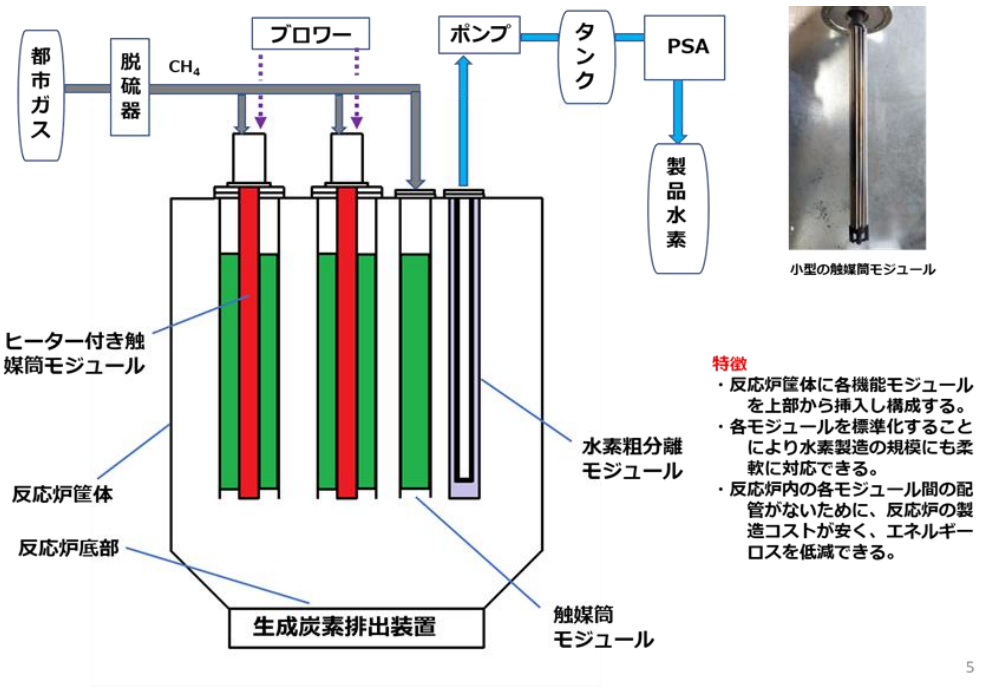



図 1　モジュール式水素製造装置

(3) 実施項目 3 ：副生炭素の特性解析と幅広い利用方法の検討

①副生炭素の特性解析

副生炭素は、繊維状炭素(繊維径：300～500nm)が凝集した状態で、触媒金属が約 1～2%程度含まれていた。導電率は、市販カーボンブラックと同等であったが、炭素が凝集しているため、同等の導電率を得るためには生成炭素の充填率を高める必要がある。

②副生炭素の用途開発

導電用途の検討のために、副生炭素の体積抵抗率を測定したら $1.8\times10^{-2}\Omega\cdot cm$ であった。この値は市販カーボンブラックと同等であることが分った。そこで、副生炭素／樹脂複合体を作製し体積抵抗率を測定した。しかし、カーボンブラックに比して高い充填率を必要とすることが分った。副生炭素の解繊の必要性が判明した。ゴム用途については、市販のカーボンブラック C に比べて、1/4 から 1/2 の強度であった。熱伝導率についても、カーボンブラックと同等の熱伝導率を有することが分かったが高熱伝導樹脂とされる 2～4W/mK には達しなかった。これは、複合体中の空隙率が高いことが原因であると考えられる。

(4) 実施項目 4：生成水素及び水素混合ガスの用途の検討

既存の都市ガス 13A（天然ガス）仕様の燃焼器に水素・メタン混合燃料を供給する時の制約条件を把握するために、燃焼特性を調査した。水素添加割合が 25%程度までであれば 13A の燃焼範囲にとどまるが、メタン直接分解水素製造装置から供給される水素濃度が 25%以上の場合は、燃焼器の変更が必要となることが分った。

(5) 実施項目 5：金属板触媒の性能向上

①Ni めっき触媒の原子構造研究

Ni 膜は 100～200nm 程度の微細粒から成り、Ni 微細粒が表面に対してランダムに配向していることがわかった。微細な Ni 粒子どうしの結晶粒界や Cu の双晶境界を拡散パスとして、メタンの分解により生じた炭素や水素の拡散が表面から膜内部に容易に生じることが推察される。水素の膜内部への拡散による膜の破壊は、触媒を

劣化させる原因となる反面、触媒の新生面を高頻度に露出させる効果があり、触媒活性の維持に寄与していることが推察される。

②Ni-Cu 系構造体触媒の展開

通常の含浸操作による Ni-Cu 成分の固溶体形成と wash-coat 法によってその構造体触媒化を図った触媒を調製し、そのメタン分解活性を調査した。Ni-Cu 系成分の比率の変化が分解活性に及ぼす影響についても調査し、比率の違いが影響することと、比率 50:50 が最も良好な分解活性を与えることが明らかとなった。

触媒上に分離して存在する Ni と Cu が相互拡散し、小さな粒径の Ni-Cu 固溶体を形成し、それがメタン分解の触媒活性サイトとなって反応が進行すると考えられる。粒径は nm オーダーの小さいものであった。

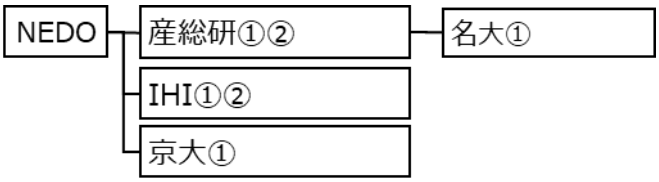
③Ni めっき膜触媒によるメタン分解の研究

粒子状 Ni を含有する粒状グラファイトは、粒子状 Ni を含有しないグラファイト層中に離散的に存在している。このグラファイトはシェル状の配向構造もつことが判明した。なお、初期めっき層中に含まれていた微量の Cu はグラファイト層中には観察されなかった。

数 10μm の大きなスケールの脱離は、DSS 運転中の加熱停止に伴い、Ni 基板と析出炭素間の線膨張係数の違いにより析出炭素と浸炭した Ni 層が剥離している可能性がある。この大きなスケールの剥離は、DSS 運転をおこなわない連続反応試験では観察されなかった。一方、サブμm の小さなスケールの剥離は、Ni の微粒子を内包してグラファイト層が析出することで Ni めっき層が消耗する様子が観察された。

## ４．４．４メタン熱分解による水素製造技術の研究開発（産業技術総合研究所、京都大学、ＩＨＩ）

○実施者名、実施体制
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
株式会社 IHI
国立大学法人 京都大学
国立大学法人 東海国立大学機構 名古屋大学（再委託）




研究開発項目①メタン熱分解に適した触媒の研究開発
研究開発項目②触媒開発と連動したメタン熱分解用反応器の研究開発

○期間、予算
期間　　：2021 年 4 月~2023 年 3 月
予算　　：2021 年度　59,957,200 円
2022 年度　59,976,300 円

○実用化への道筋
提案する新規反応システムにおける運転条件最適化やベンチ試験を用いたシステム実証等を通じて、2030 年代の実用化を目指す。実用化に向けては、新規反応システム確立および導入シナリオ策定と合わせて、「メタン熱分解により得られる水素の標準化・規格化検討」や「得られる炭素の貯留に関するルール作り」など制度面での取組も必須。

○最終目標に対する成果と達成状況

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **①メタン熱分解に適した触媒の研究開発** | ・高い性能を有し、流動層反応器に適用可能な触媒の開発<br>・生成固体炭素の形状制御条件の提示<br>・メタン熱分解反応速度式の定式化に | ・流動層反応器に適用可能な触媒調製法を開発、触媒評価を行い、目標とした炭素生成量 10 倍を超える性能を有することを確認<br>・炭素分離回収への適用に向けてファイバー状炭素が得られる温度等形状制御条件を提示、 | △ | 触媒および反応条件の最適化に向けた更なるデータ取得が必要 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | よる炭素析出速度の推定手法の提示 | 一方、高いメタン転換率と炭素形状制御の両立に向けては更なる触媒および反応条件の最適化が必要<br>・炭素析出速度について、触媒の孔内および粒子外表面に分けて定式化可能であることを提示 | | |
| **②触媒開発と連動したメタン熱分解用反応器の研究開発** | ・流動層等の気固反応装置を用いた反応システムにおける開発触媒の性能評価と反応システム構築に必要となるデータの取得<br>・反応システムの技術成立性評価 | ・新規反応システム（移動層－流動層利用型循環システム）を提案、主要部分に係る試験設備を設計・導入、開発した触媒を用いたメタン熱分解反応試験を実施し触媒性能を評価、反応システム構築に必要となる知見を取得、一方で、これまでにはない新しいシステムの提案であり、その構築に必要となる更なるデータ取得等が必要<br>・技術成立性評価にいて、システム概念図等を作成し、水素製造価格を算出 | △ | 新しく提案に至った反応システム構築に向け、運転条件等に関する更なるデータ取得、また反応システムに合わせた全体プロセス検討・最適化が必要 |

○成果の意義

①流動層反応器に適用可能で高い性能を有する触媒を開発、②システム構築に向けて必要となるメタン熱分解反応速度式の定式化による炭素析出速度の推定手法の提示、③新規反応システム（移動層-流動層利用型循環システム）の提案と導入設備による試験、④技術成立性評価・水素製造価格算出など、触媒を用いたメタン熱分解による水素製造システム構築に向けて必要かつ有益な知見を獲得。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数

特許出願：1 件　（2023 年度： 1 件）

論文発表：1 件　（2022 年度： 1 件）

学会発表・講演等： 2 件　（2022 年度：1 件、2023 年度： 1 件）

○研究開発成果の詳細

本事業では、炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術として、触媒を用いた熱化学的メタン分解による水素製造プロセスを開発することを目的とする。水素製造プロセス開発においてボトルネックとなっている課題である「触媒活性や生成する炭素の構造と、触媒構造や反応条件との関係の明確化・最適化」および「触媒開発と連動した反応器設計・最適化」の解決に向けて、研究開発項目として、「メタン熱分解に適した触媒の研究開発」および「触媒開発と連動したメタン熱分解用反応器の研究開発」について、国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）、株式会社 IHI（IHI）、国立大学法人京都大学（京大）、および国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学（名大、再委託）が連携して実施し、有益な知見を得た。

① メタン熱分解に適した触媒の研究開発

①-1 反応器開発と連動した触媒開発と固体炭素評価

メタン熱分解に適した触媒の開発に向け、Fe 系触媒を中心に、調製法開発および種々の条件における触媒評価を行った。その結果、目標とした活性金属重量当たりの炭素生成量 10 倍を大きく超える性能（20 倍以上）を有する粉末 $Fe_2O_3$-$Al_2O_3$ 触媒を開発した。また、流動層反応器に適用可能な触媒調製法を開発し、流動層用 $Fe_2O_3$-$Al_2O_3$ 触媒においても炭素生成量 10 倍を超えることを確認した。炭素分離回収への適用に向け、770℃以上の反応温度においてファイバー状炭素が得られる等、生成固体炭素の形状制御に関する知見を得た。流動層触媒においても 850℃以上の高温域では、目標としたメタン転化率 80%に達する結果を得たが、一方で、高温域では主にオニオンライク状の炭素が生成することから、高いメタン転換率と炭素形状制御の両立に向けて、引き続き触媒および反応条件の最適化に関する取組が必要である。製造される固体炭素の埋設等に向けて、ナノ材料関連の法規制について整理を行った。また、固体炭素の埋立処分および製鉄所における利用を想定したシナリオを設定、周辺のヒト健康リスクのスクリーニング評価を行い、適切な対策によって十分にリスク低減が可能であることを示す結果を得た。

反応条件と触媒上に生成する炭素の形態・構造の関係解明に向けて、ガス環境 TEM を用いて、$CH_4$ 雰囲気-加熱下における観察を行った。開発した触媒が、$CH_4$ を分解し、ファイバー状炭素を成長させる過程を確認できた。活性金属である Fe 粒子はカーボンファイバー先端に位置し、ファイバーを成長させるが、一方で、アルミナ上も拡散し、微細な粒子となって炭素中に含有されてしまうことから、Fe 粒子を含まない炭素を高収率で得ることは難しいことも明らかとなった。

①-2 システム検討に向けた触媒の炭素生成量評価

メタン熱分解触媒について、単位重量あたりに処理できるメタンの総量、炭素析出量を試験的に評価した。炭素が析出する様子は、70%付近までは堅調に増加し、その後、80%から 85%にかけてなだらかに増加する傾向が確認された。また、水素を還元ガスとした場合に鉄鉱石に与える影響を評価した。水素を用いた場合、700℃以上で触媒表面の還元が進行することを確認した。さらに、種々の反応条件がメタン熱分解特性におよぼす影響の評価および触媒への固体炭素成長状態の観察を行った。生成炭素について、貯留を想定した際の安全性評価を目的として、発火・飛散特性を評価した。非流動化状態ではあるが、反応温度 900℃条件で水素転化率 95%以上を示した。生成炭素について、炭素が析出することで、密度は低下するが粒子径が大きくなり、結果として流動化に必要なガス速度が増加することが分かった。また、発火温度は炭素析出量に関わらず概ね 500℃から 600℃の間にあることが分かり、従来の固体燃料に比べて自然発火の危険性は低いことが分かった。

①-3　メタン熱分解触媒の活性評価と反応速度式の構築

メタン熱分解反応速度の定式化による炭素析出速度の推定手法の提示に向けて、開発した $Fe_2O_3$-$Al_2O_3$ 触媒について、高精度熱天秤を用いて種々の条件でのメタン熱分解反応を行った。その結果、炭素析出速度について、触媒のメソ孔内および粒子外表面に分けて定式化することができた。炭素析出に伴って触媒活性が低下し、炭素析出速度が顕著に低下することを確認している。一方で、触媒活性抑制方法の提示について、共存水素ガスが活性低下を抑制する効果を持つことを明らかにした。充填層型反応器を用いた評価も行い、熱天秤の場合と同様の速度が得られることを確認した。開発する反応システムへの適用に向けて、更なるデータ取得・評価を進める必要がある。

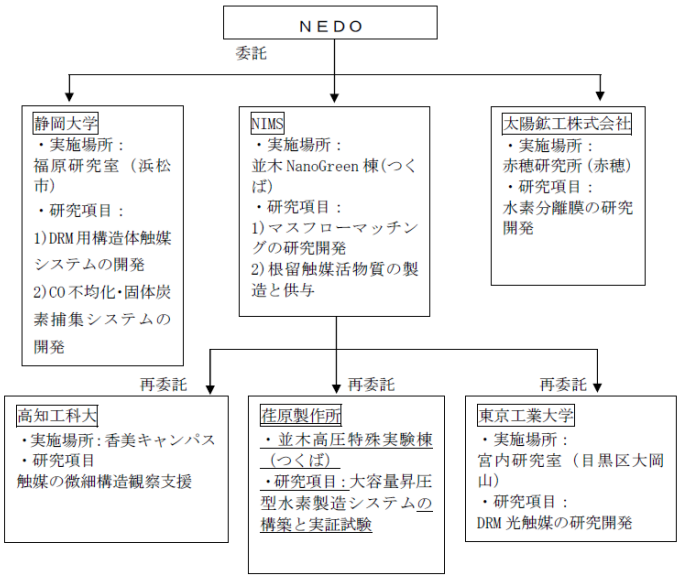
②　触媒開発と連動したメタン熱分解用反応器の研究開発

メタン熱分解を利用した水素製造技術の開発に向けて、①で得られた成果から、「炭素析出量の最大化と生成した炭素の分離」を実現する、新しいプロセスを構築する必要があることが明らかになった。本事業では、更に検討を重ね、「移動層－流動層利用型循環システム」という新しいコンセプトの提案に至った。反応システム設計に必要となるエンジニアリング的な知見を取得するべく、メタン熱分解-流動化繰り返し試験を行った。その結果、開発した流動層用 $Fe_2O_3$-$Al_2O_3$ 触媒について、ファイバー状炭素を生成しながらメタンを効率よく分解できる温度条件およびメタン供給条件を明らかにした。また、新しいシステムにおいて主要部分となる移動層反応器を中核とする実験装置「メタン分解移動層反応装置」を製作、導入した。本反応装置を用いて、開発した触媒によるメタン熱分解試験を行い、反応システム構築に必要となる知見を得た。これまでにはない新しい連続反応システムの提案であり、事業期間中における大きな方針転換となったことから、運転条件等に関する更なるデータ取得、また反応システムに合わせた全体プロセス検討・最適化が必要である。

メタン熱分解反応プロセスについて、水素分離を含むプロセスを想定し、熱バランスと水素回収率に関する評価・最適化検討を行った。その結果、水素回収率 0.8（80%）以上を達成できる条件を把握した。また、PSA による水素分離プロセスのコスト試算と最適化を行ったところ、80MPa までの昇圧コストを含めて 4.2 円/$m^3$ となった。

反応システムの技術成立性を評価するべく、システムのプロセスフロー図およびプラント全体の概念図を作成し、概算コスト評価を行った。その結果、水素製造価格について、触媒、天然ガスおよび機器を主体とする CAPEX が大きな割合を占めることを明らかにするとともに、30 円/$Nm^3$ を達成するために必要となることについて示した。

## ４．４．５　メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造（物質・材料研究機構、太陽鉱工、静岡大学）




○実施者名、実施体制

国立研究開発法人　物質・材料研究機構

国立大学法人　東京工業大学（再委託）

高知県立大学法人　高知工科大学（再委託）

株式会社　荏原製作所（再委託：2022年　4月～2023年3月）

国立大学法人　静岡大学

太陽鉱工株式会社

○期間、予算

期間　　：2021年4月~2023年3月

予算　　：56,885,600円（2021年度）

　　67,490,600円（2022年度）

○実用化への道筋

・水素製造量100 $Nm^3$/時級小型プラントの設計（～2025）

・バイオガスなどさまざまな $CH_4$・$CO_2$ 混合ガスからの水素製造試験（～2025）

○実用化への道筋コストダウン、量産体制、サプライチェーン構築等などの課題：

・循環型水素製造システムによる $CO_2$ ゼロエミッション水素製造の実証

・循環型水素製造システムの大型化によるスケールメリットの創出

・循環型水素製造システムの普及における経済合理性の樹立

○最終目標に対する成果と達成状況

| 実施項目 | 最終目標 | 成果 | 達成度 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| A：DRM＋炭素捕集＋水素分離の パワーアップ（静岡大） | ・ガス流量３０ℓ/時から６０ℓ/時へ処理量増大<br>・炭素捕集率 20～30%の達成 | DRM・炭素捕集・水素分離直列システムによる水素抽出と炭素捕集を実証（C・E と共同） | ○ | ・反応ガス総量 60ℓ/時で炭素捕集率 27%達成 |
| B：マスバランスと触媒活物質製造(物質材料研究機構) | ・ガス循環システム安定性への $H_2$/CO フィードバック量上限の評価<br>・100ℓ/時 <ガス流量処理可能な大容量 DRM 根留触媒の実現 | ・$H_2$ フィードバック量上限決定<br>・根留触媒の量産と構造体化（E と共同） | △<br>○ | ・CO フィードバック量上限は未決定<br>・同触媒による 102ℓ/時水素ガス製造達成（D と共同） |
| C：水素分離膜デザイン最適化（太陽鉱工） | ・前段アウトガスのマスフローに応じた V 合金水素分離膜の組成・サイズや形状・膜厚およびスタック数の最適化 | $CH_4$・$CO_2$・CO・$H_2$ 混合気からの安定的・大容量水素抽出（E と共同） | ◎ | ・システム実働条件組成の混合ガスからの安定的水素抽出を実証。 |
| D：昇圧型システムと水素製造試験（荏原製作所） | 純度 99.9999%水素 100ℓ/時 製造の達成 | DRM・水素分離直列大型システムによる 99.9999%水素 102ℓ/時製造達成（A・B・C・E と共同） | ◎ | |
| F：DRM 光触媒（東京工業大学） | 高圧下 DRM 光触媒機能実証と材料開発 | 光触媒 DRM-FT タンデム反応による $C_n$ 分子生成の実証（E と共同） | ○ | |

○成果の意義

本プロジェクトが最終的な達成目標に据えるものは、DRM 触媒・水素分離膜・炭素捕集触媒 3 つの機能要素からなるガス循環型の $CO_2$ ゼロエミッション水素製造システム（反応ガス流量＞ 100 $Nm^3$/時）の実体化と社会実装である。2021・2022 年度にわたって行われた上記の A～F 各研究項目は、互いに連携しながら、プロジェクト開始時の実験室レベル（$CH_4$・$CO_2$ 混合反応ガス流量～10 ℓ /時）からベンチレベル（反応ガス流量～100 ℓ /時）への各機能要素材料の量産と性能向上を図るとともに、各機能要素の直列連結からなる水素製造システムを設計・構築、ベンチレベル条件下における高純度水素製造（99.9999%;102 ℓ /時）と炭素捕集（捕集効率 27%）を実証することによって、上記ガス循環型水素製造システムの実体化にむけて、開発初期段階における「死の谷」の一つを越えたものと評価できる。加えて本プロジェクトでは、従来の熱励起型 DRM 触媒を陳腐化しうる独自の光子励起型「DRM 光触媒」に関する材料およびシステム開発を展開、ガス循環型水素製造システムの究極の進化系である「太陽光励起型 $CO_2$ ネガティブエミッション水素製造システム」の実現に道筋を開いた点も、未来技術への先行投資として意義が高い。

○特許出願、論文発表、学会発表・講演等の数
・２０２１年度
特許出願　1
論文 2
成果普及活動 2

・２０２２年度
特許出願　1 （２０２１年度出願特許の優先権出願並びに PCT 出願）
論文 2
成果普及活動 1

○研究開発成果の詳細

(1) 実施項目 A：本項目は、DRM 触媒・炭素捕集触媒・水素分離膜の直列接続からなる反応ガス流量最大 60 ℓ /時クラスの中型反応システムの設計・構築と、これを用いた、$CH_4$・$CO_2$ 混合反応ガスからの水素製造と炭素捕集を実証した。DRM 触媒・炭素捕集触媒・水素分離膜すべての機能要素を組み込んだシステムの動作実証は本実施項目のみが実施したものであって、これは、本プロジェクトが目標とするところの DRM 触媒・炭素捕集触媒・水素分離膜からなるガス循環型水素製造システムの実現可能性を直接的・肯定的に支持する重要な成果である。なお、システム構築と動作実証に際しては、実施項目 C による水素分離膜の提供と技術指導、実施項目 E による捕集炭素の顕微分析結果が際立って建設的であった。

(2) 実施項目 B：本項目は、DRM 触媒・水素分離膜の直列接続からなる反応ガス流量最大 1 ℓ /時クラスの小型反応システムの構築と、これを用いた、反応ガスからの水素製造におけるマ

スバランスの定量的評価を実施、循環型水素製造システムの安定的動作の必要条件の一つとして、DRM 触媒に帰還される水素分離膜下流のアウトガス中残留水素量の上限値を決定した。加えて本項目は、独自開発の長寿命高活性 DRM 根留触媒：Ni#$Y_2O_3$ 粉末の製造量増大を果たすとともに（研究開始時の 1 g/ロットから 0.75 kg/ロットへ）、実施項目 A・D・E との共同により、根留触媒活物質の金属メッシュ担体への分散固定法を開発。自在成型が可能であって、かつ熱収支に優れた、「構造体化 DRM 根留触媒」の実体化に成功した。

(3) 実施項目 C：本項目は、実施項目 E と共同で、水素製造システムのさまざまな動作状況における水素分離 V 合金膜の水素分離抽出性能、特に、DRM 触媒下流の一酸化炭素（CO）含有ガス暴露に対する V 合金膜性能の長時間安定性に対する定量評価を実施。CO ガス暴露による V 合金膜の水素抽出性能の顕著な低下と、分離膜最表面のパラジウム（Pd）薄膜層と V 合金との界面に多数のボイドが生じる現象を発見するとともに、同 V 合金膜の水素抽出性能に対して純粋な $CO_2$ が影響を与えない事実を突き止めた。さらに本項目は、水素製造システムの実働条件に近いガス組成（$CH_4$・$CO_2$・CO・$H_2$ 混合ガス）暴露に対し、同 V 合金膜は、１００ℓ/時クラスの高純度水素抽出性能を発揮・維持することを確認、V 合金膜が、本研究が目標とするガス循環型水素製造システムの要の一つである水素分離ユニットとして機能しうることを立証した。

(4) 実施項目 D：本項目は、実施項目 A の中型反応システムの設計を基に、DRM 触媒・水素分離膜の直列接続からなる反応ガス流量最大５００ℓ/時クラスの大型反応システムを設計・構築、これを用い、$CH_4$・$CO_2$ 混合反応ガスからの１００ℓ/時クラス水素製造の実証を果たした。システム構築に際しては、実施項目 C による水素分離膜の提供と、実施項目 E による触媒活物質の顕微分析結果が効果的・建設的に機能した。なお、当該システム実機は、実施項目 A との連携により、物質・材料研究機構並木キャンパスの特殊高圧ガス対応実験施設に構築され、運用に至った。

(5) 実施項目 E：本項目は、実施項目 A・B・C および F との連携により、それぞれが関係する材料（DRM 触媒：項目 B・D；分離膜：C；炭素捕集触媒および捕集炭素：A；DRM 光触媒：F）に対する詳細な電子顕微鏡分析を実施、各項目の研究開発を支持・促進した。

(6) 実施項目 F：本項目は、独自開発の DRM 光触媒材料と光照射型高圧ガスセルによる $CH_4$・$CO_2$ 混合反応ガスからの $C_n$ 分子生成に成功した。本成果は、本プロジェクトが目標とする $CH_4$・$CO_2$ 混合反応ガスからの $CO_2$ ゼロエミッション水素製造の究極の進化形：太陽光励起型水素製造システム実現のための先駆的な成果と位置付けられる。

# 添付資料

## ●プロジェクト基本計画

Ｐ１４０２１

「水素利用等先導研究開発事業」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

水素は、これを燃料とした場合に二酸化炭素を排出しないという環境特性に加え、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯蔵、輸送、利用することができる特性（貯蔵性、可搬性、柔軟性）を有する。水素を有効利用することで、これまで利用することが困難であった海外の豊富な再生可能エネルギー資源や未利用エネルギー資源、CCS 適地等を活用することが可能となる。エネルギー資源の乏しい我が国にとって、水素はエネルギー安全保障と温暖化対策の切り札となる重要な政策である。

２０１７年１２月２６日に取りまとめられた『水素基本戦略』（再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議）では、２０５０年を視野に入れた水素社会実現に向けて将来目指すべき姿や目標として官民が共有すべき方向性・ビジョンが示されている。

②我が国の状況

化石燃料等の天然資源に恵まれない我が国は、１９７０年代の二度の石油危機以来、国民生活と産業活動の血脈であるエネルギーを海外に依存する構造的脆弱性を抱え続けている。加えて、２０１６年１１月のパリ協定の発効を受け、深刻化する地球温暖化問題に対し、我が国としての責任を一層果たしていくことが求められている。一次エネルギーのほぼ全てを海外の化石燃料に依存する我が国においては、エネルギー安全保障の確保と温室効果ガスの排出削減の課題を解決していくことが必要である。

③世界の取組状況

水素は次世代のエネルギーとして国際的にも注目を集めており、欧米をはじめとする先進国のみならず、中国等のエネルギー需要の増大が続く新興国においても水素利用に向けた様々な取組が進められている。

個別の取組としては、特にドイツを中心として、再生可能エネルギー由来の電力を水素に変換するＰｏｗｅｒ　ｔｏ　Ｇａｓの取組が積極的に行われているが、製造した水素はそのまま貯蔵・利用される他、天然ガスパイプラインに供給されている。オランダでは４４０MW天然ガス発電所の一つを水素発電に変換する可能性調査を行っている(*1)。米国のＧＥ社は、米国エネルギー省（ＤＯＥ）の Advanced Energy Systems /Hydrogen Turbine プログラムに参画して、２０２０年頃までに１，４５０℃級の水素タービン、２０３５年頃までに１，７００℃級の水

素タービンの開発と実証実験を予定している(*2)。また、ＩＥＡ　ＡＮＮＥＸ３０等のワークショップでは、水電解に関する情報交換が定期的に行われている。

加えて２０２０年に入り、ドイツ政府が６月に国家水素戦略を策定し、水素製造装置設備に対して再エネ賦課金を免除するとした。これに次いでEUが７月に水素戦略を公表し、暫定的に低炭素水素（化石＋CCUS）も活用し、製造、輸送・貯蔵、利用に向けて取り組むことを示した。また、フランスは９月に水素戦略を改定しグリーンで水素の生産に向けた方向を示すなど水素関連技術開発に拍車がかけられている状況である。

我が国には、こうしたグローバルな動向を適切に把握して世界と協調しつつ、水素社会の実現へ向けて世界をリードしていくなか、政府は２０２０年１０月に「２０５０年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロ」とする目標を示してグリーンイノベーション戦略を強力に推し進めることとしており、その中でも特に水素は重要な役割として位置づけられている。

④本事業のねらい

本事業では、２０４０年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。具体的には、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に主として取り組む。

*1 出典：Statoil　ニュースリリース（２０１７年７月）
*2出典：経済産業省　水素発電に関する検討会　報告書（２０１５年３月）

（２）研究開発の目標

①アウトプット目標

【中間目標（２０１５年度末）】

・各研究開発テーマの中間目標（２０１５年度末）の達成
・研究戦略を策定し、新規テーマとの入れ替えも含め、各研究開発テーマを再編する。

【中間目標（２０１７年度末）】

・中間目標の達成状況を踏まえ、研究戦略に基づく設定目標（２０１７度末）の達成
注：（３）の研究開発項目③、④及び⑤について、研究成果を評価した上で必要性が認められるテーマを本格研究へ移行する。

【研究開発項目継続可否審査（２０１９年度）】

・後期５年間における研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、研究開発項目継続可否審査によりテーマ継続の可否を判断。

【中間目標（２０２０年度）】

・研究開発項目①「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」及び研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、中間目標の達成。

【最終目標（２０２２年度末）】

・中間目標（２０２０年度）の達成状況をふまえ、最終目標の達成。

②アウトカム目標

再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。

水素製造・輸送については、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ$^3$を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。

水素発電については、２０４０年以降、水素コスト２０円／Ｎｍ$^3$において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。

また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。

③アウトカム目標達成に向けての取組

再生可能エネルギーからの電力を用いて水素を製造する場合には一般に水電解が用いられるが、生成した水素は大規模水力発電を利用する場合を除き、現状では高価格で化石燃料とは競合できない。水素コストの過半は電力変換システムと電解システムから構成される水素製造システムの設備コストと消費電力のコストが占めるため、低コスト水素製造システムの研究開発では、まず、設備コストを５万円／ｋW程度に低減する低コスト水素製造システムの研究開発を行い、さらに高効率水素製造技術の研究により電解システムの電解効率を向上させ消費電力コストの低減を図る。

次いで製造した大量の水素を効率よく貯蔵及び利用するため、大規模水素利用技術の研究開発において、高効率な水素液化装置やボイルオフの少ない水素タンクなどの水素貯蔵に関する周辺機器、水素をエネルギーとする発電技術などの基盤技術を開発する。

エネルギーキャリアシステム研究では、従来プロセスに対し、エネルギー効率、経済性等を飛躍的に向上させる可能性のある新規プロセスについて、基盤技術を開発する。

また、トータルシステム導入シナリオ研究では本事業で開発する技術の速やかな実用化・普及と技術課題の明確化、将来の技術課題・シーズの発掘を目指し、普及シナリオを作成する。

さらに、中間評価における指摘事項を踏まえ、水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発及び従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発に取り組む。

（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。これらの事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則として委託事業として実施する。

【前期４年間】

研究開発項目①低コスト水素製造システムの研究開発

研究開発項目②高効率水素製造技術の研究

研究開発項目③大規模水素利用技術の研究開発

研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究

研究開発項目⑤トータルシステム導入シナリオ調査研究

【後期５年間】

研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

研究開発項目②大規模水素利用技術の研究開発

研究開発項目③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発

研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究

研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発

２　研究開発の実施方式

（１）研究開発の実施体制

本研究開発は、経済産業省において、２０１３年度より未来開拓研究プロジェクト「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」にて実施されているものであり、事業開始から５年間の研究開発実施者を経済産業省が２０１３年度に企業、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって選定し、委託契約等を締結する研究体を構築して開始したものである。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。）が本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、その時点までの進捗状況を踏まえて実施体制の妥当性について審議を行い、最適な研究開発体制を構築し、実施する。

本事業のプロジェクトマネージャー（以下「ＰＭ」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　田中博英を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、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。なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、ＮＥＤＯは研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を選定し、各実施者は下記プロジェクトリーダー（以下ＰＬという）の下でそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

・全体共通　栗山信宏氏

（国立研究開発法人産業技術総合研究所　エネルギー・環境領域電池技術研究部門　副研究部門長）

・知財管理　後藤新一氏

（一般財団法人エネルギー総合工学研究所プロジェクト試験研究部　参事）

なお、２０１８年度からは、ＰＬは上記栗山信宏氏の１名体制とする。

（２）研究開発の運営管理

ＰＭは、経済産業省、ＰＬ、研究開発実施者等と緊密に連携し、適切な運営管理を実施する。また、外部有識者や産業界の意見等を踏まえ、研究進捗把握等のマネジメントを行う。

（３）その他

後期５年の「研究開発項目③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発」は技術の不確実性が高いことから、本事業を非連続ナショナルプロジェクトとして取扱う。

３　研究開発の実施期間

経済産業省は、未来開拓研究プロジェクト「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」の事業期間として２０１３年度から２０２２年度（１０年間）を予定し、２０１３年度から２０１７年度までの５年間の実施体制を公募した。同事業がＮＥＤＯへ移管することを受け、ＮＥＤＯは２０１４年度から２０１７年度までの４年間の基本計画を策定し、研究開発を実施した。その後２０１８年度から２０２２年度の５年間については、２０１７年度に実施した外部有識者による中間評価の結果等を踏まえ、延長することとした。

４　評価に関する事項

ＮＥＤＯは、技術的及び技術的観点から、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、外部有識者による評価を原則として中間評価を２０１５年度、２０１７年度及び２０２０年度に、事後評価を２０２３年度に実施する。

なお、評価の時期については、当該研究開発に掛かる技術動向、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。

特に研究開発の最終段階にあるものや早期に成果が見込まれるものは、事業化の促進の取組も含め、適切に見直しを行うものとする。

５　その他重要事項

（１）研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

開発された成果を我が国の産業競争力強化に繋げるため、事業者だけでなく、潜在的なユーザー等の意見を聴いて、標準化戦略や成果の市場への受容を促すための安全・性能証明の方策を含む事業化戦略を策定する。

また、途中段階で得られた成果は他の施策と連携しつつ、事業化を図る。

②標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、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等を戦略的かつ積極的に行い、評価プロトコル策定や将来の標準化に繋げる。

③知的財産権の帰属、管理等取扱い

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、委託先に帰属させることとする。

また、推進体制を構成する企業等が相互に連携しつつ、研究開発及び事業化を効果的に推進するために、知的財産管理規程等を定めることを求める。

④知財マネジメントに係る運用

「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。

⑤データマネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち研究開発項目③、④及び⑤は、「ＮＥＤＯプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

（２）基本計画の変更

ＮＥＤＯは、国内外の関連技術の研究開発、市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、必要に応じて、基本計画に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。

（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条第一号ニに基づき実施する。

（４）その他

①他省庁の施策との連携体制の構築

ＮＥＤＯは、内閣府が所管する「戦略的イノベーション創造プログラム（ＳＩＰ）」と緊密に連携するため、各プロジェクトの統括者、所管省庁等の課室長等から構成される連携体制に参画する。当該連携体制では、プロジェクト間の事業計画の調整、成果の共有や取扱の調整、設備の共用や研究人材交流の促進等について協議を行うものとする。

６　基本計画の改定履歴

| | |
|---|---|
| ２０１４年３月 | 制定 |
| ２０１６年２月 | 中間評価結果を踏まえ、研究開発項目③④⑤の内容及び目標を改定 |
| ２０１７年３月 | 基本計画マニュアル改訂及び中間評価結果を踏まえ、プロジェクトリーダーの追記及び研究開発項目②、④の目標を改訂 |
| ２０１７年６月 | ３．研究開発の実施期間及び４．評価に関する事項を一部改訂 |
| ２０１８年３月 | 中間評価結果（２０１７年度）を踏まえ、事業期間の延長及び後期５年における実施内容の追加による改訂 |
| ２０１８年５月 | プロジェクトマネージャー変更による改訂 |
| ２０１９年１月 | 研究開発項目②の達成目標の一部修正及び期間延長、研究開発項目⑤の追加 |
| ２０２０年３月 | 研究開発項目③の実施内容と名称の変更 |
| ２０２１年１月 | 研究開発項目④及び⑤の達成目標の追加、研究開発項目⑤の名称変更による改訂 |
| ２０２２年２月 | 事後評価実施年度の変更による改訂 |

（別紙）研究開発計画

【前期４年】

研究開発項目①低コスト水素製造システムの研究開発

１．研究開発の必要性

我が国の産業競争力を維持・強化していくためには、エネルギー安全保障を確保し、安定的かつ低廉なエネルギーを供給することが不可欠である。そのため、本研究開発項目を実施する。

２．研究開発の具体的内容

アルカリ水電解、固体高分子型水電解等の水電解システムについて、電解電流密度の向上、電解セル大型化等により設備コストを低減するとともに、従来システムと同等の耐久性を維持しつつ、変動する再生可能エネルギーの有効活用が可能な水素製造システムの研究開発を行う。

３．達成目標

【中間目標（２０１５年度末）】

・風力発電システム等からの交流出力を交直変換して水電解システムに直流電力を供給する従来システムに対し、風力発電システム等の発電機出力を水電解用の直流電力へ変換する効率を５％以上向上させる技術を確立する。

・電解電圧１．８Ｖにおいて電流密度０．６Ａ／ｃｍ$^2$以上を達成する電解セル技術を確立する。

・風力発電システム等の変動が水素製造システムに及ぼす影響を明確化する。

【最終目標（２０１７年度末）】

・耐久性を低下させずに、変動する風力発電システム等との協調運転を可能とする技術を確立する。

・電解電圧１．８Ｖにおいて電流密度０．６Ａ／ｃｍ$^2$以上の性能を維持しつつ、単セルの電極面積を１～３ｍ$^2$程度まで大型化する技術等により、大量生産時の水電解装置コスト、電力変換装置コストとして２０万円／Ｎｍ$^3$／ｈ、６万円／Ｎｍ$^3$／ｈ以下が見通せる技術を確立する。

研究開発項目②高効率水素製造技術の研究

１．研究開発の必要性

水素を利用して、出力変動緩和のための蓄エネルギーシステムの可能性評価及び開発、再生可能エネルギーの調整電源化等をすることで再生可能エネルギーを効率的、安定的に活用可能とすることとなり、エネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の観点から極めて重要である。そのため、本研究開発項目を実施する。

２．研究開発の具体的内容

原理的に電解効率に優れた高温水蒸気電解等の技術について、電解セル構成材料、セル構造、セル運転条件等の革新及びセル・スタック製造技術の開発、耐久性向上の研究等により変動する再生可能エネルギーへの追従性を確保するとともに、水素製造効率を飛躍的に向上させる次世代水素製造技術の研究開発を行い、水素製造電力消費の低減、電力貯蔵等への適応可能性を明らかにする。

３．達成目標

【中間目標（２０１５年度末）】

・高温水蒸気電解システムとして、入力２ｋW程度の電解スタックにおいて各電解セルの平均電圧１．３Ｖ、水蒸気利用率７０%程度の時、平均電解電流密度０．５Ａ／ｃｍ$^2$以上を達成するセル・スタック製造技術を確立する。

・次世代水素製造システムとして、水素製造電圧１．６Ｖで電流密度０．６Ａ／ｃｍ$^2$以上または水素製造装置の単位体積あたりの水素生成能力５０Ｎｍ$^3$／ｈ／ｍ$^3$を達成する技術を確立する。

【最終目標（２０１７年度末）】

・高温水蒸気電解システムとして、入力２ｋW程度の電解スタックにおいて各電解セルの平均電圧１．３Ｖ以下、平均電解電流密度０．５Ａ／ｃｍ２程度の初期条件でスタックを２，０００時間以上電流密度一定で運転した時の１，０００時間あたりの電圧上昇率０．５%以下を達成する技術を確立する。

・次世代水素製造システムの新しい水素連続製造システムにおいて、温度２５℃、電流密度０．１Ａ/ｃｍ$^2$の運転条件下で、電力を水素に変換する効率について、９０%以上を見通せる技術を確立する。

研究開発項目③大規模水素利用技術の研究開発

１．研究開発の必要性

大量の水素の貯蔵・輸送に当たり、エネルギー密度を向上させるため、水素を液化、貯蔵することが有効である。現状では、液化のエネルギー効率が低い、液体水素のボイルオフ率が大きい等の課題が普及の障害となっている。また、再生可能エネルギーを利用して水素を製造する場合は、水素生成量が変動するので、その変動に対応した水素液化システムが必要となる。

更に水素エネルギー市場の形成の為には、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要となる。

２．研究開発の具体的内容

本事業では、水素生成量の変動に対応可能な大型（５０～１００ｔ／ｄａｙ）高効率液化システム、断熱性に優れた大型（５０，０００ｍ$^3$級）液体水素タンク等からなる水素液化貯蔵システムの基盤技術を開発する。

また環境負荷が低く、かつ大量水素の利用に繋がる基盤技術を開発する（但し燃料電池は除く）。

３．達成目標

③-1 水素液化貯蔵システム

【中間目標（２０１５年度末）】

・液化容量１ｔ／ｄａｙ、液化効率※２２０%程度のシステムを試作・開発して高効率化、大型化への課題と解決策を明確化する。また水素製造量の時間変動がシステムに及ぼす影響を把握し、技術課題を明確化する。

・３，０００$m^3$程度の液体水素タンクシステムに用いる液体水素ポンプ、ボイルオフ水素用圧縮機について、それぞれ、容量２００$m^3$／ｈ以上、ポンプ効率※３
５０%以上の液体水素ポンプ（揚程２６０m程度を想定）及び容量３，０００$m^3$／ｈ、効率６０%以上のボイルオフ水素用圧縮機（入口圧力１１０ｋＰａＡ、入り口水素温度３０Ｋ、出口圧力２００ｋＰａＡを想定）を可能とする技術を開発する。
・３，０００$m^3$程度の液体水素タンクシステムに使用可能な十分な耐久性を有する断熱材料（熱伝導率０．０１W／ｍ・Ｋ以下）を開発する。

※２　液化効率（逆カルノー効率）＝液化のための最小仕事／実際の投入エネルギー×１００

※３　ポンプ効率＝ヘッド圧×体積流量／投入動力×１００

【最終目標（２０１７年度末）】

・想定液化容量５～１０ｔ／ｄａｙ程度の水素液化システムに対し、２５%以上の液化効率が見通せる技術を開発する。また水素製造量の時間変動に対応するための解決策を明確化する。
・液体水素ポンプ技術、ボイルオフ水素用圧縮機技術等と組み合わせ、ボイルオフ水素発生率がタンク容量の０．１%／ｄａｙの液体水素タンクシステム（容量３，０００$m^3$程度）を可能とする技術を開発する。

③−２　大規模水素利用技術

【中間目標（２０１７年度末）】

環境負荷が低く、かつ大量水素を効率的に利用可能な基盤技術を開発する。本項目は提案公募として実施し、目標はテーマごとに決定する。

研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究

１．研究開発の必要性

国内外の再生可能エネルギー等を効率的、安定的に活用可能とすることは、エネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の点からも極めて重要であり、本事業の一刻も早い取組が求められている。

２．研究開発の具体的内容

有機ハイドライド、各種の炭化水素、金属など水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。具体的には、新規プロセスに必要な材料・要素機器の小規模な試作、性能評価やそのプロセスを含むシステムの特性解析などを行い、システム全体の性能・経済性、開発課題、開発目標を把握する。

３．達成目標

【中間目標（２０１５年度末）】

本項目は提案公募として実施し、目標はテーマごとに決定する。研究期間は４年以内とし、研究成果を評価した上で、必要性が認められるテーマについては、本格研究へ移行する予定。

【最終目標（２０１７年度末）】

④-１　高効率メタン化触媒を用いた水素・メタン変換

熱回収効率３５%以上の熱回収効率の最適化手法を確立して、総合効率７５．７%以上、転換率低下率５%未満（８，０００時間後）の最適プロセスを開発、設計を完了する。

④-２　溶融塩を用いた水と窒素からのアンモニア電解合成

窒素還元陰極の高性能化（３００ｍＡ／ｃｍ$^{3}$以上、一室型）、アンモニア生成反応制御の高収率化（収率９０%以上）及び酸素発生陽極の高性能化（消耗速度２０μm/年以下、電極内部抵抗０．０５ｍΩｍ$^{2}$以下）を達成する。

④-３　水素分離膜を用いた脱水素

セラミックス系水素分離膜の大面積化（水素透過性≧１×１０$^{-6}$ ｍｏｌ／ｍ$^{2}$・ｓ・Ｐａ、分離係数$H_2$／$SF_6$≧１６，０００）を達成する。水素分離膜型脱水素プロセスの経済的優位性の確認と多用途展開先の調査、商業化を見据えた水素分離膜型脱水素のパイロットプラントの概念設計を完了する。

研究開発項目⑤トータルシステム導入シナリオ調査研究

１．研究開発の必要性

本事業の成果（研究開発項目①～④）の速やかな実用化・普及を実現するため、水素・エネルギーキャリア技術が社会に導入されるシナリオを検討し、技術目標の妥当性の確認、更なる具体化を含む本事業の戦略策定の基礎となる情報を収集する必要がある。

２．研究開発の具体的内容

①再生可能エネルギーのポテンシャル調査（ケーススタディ等による量やコスト等の把握）、②エネルギーキャリア技術のコスト分析、③許容されるコスト（競合する既存システムのコスト等から導かれる）の分析等に基づいてシナリオを策定する。併せて、シナリオが実現した際のエネルギー需給や炭酸ガス排出削減、経済成長への寄与等を検討する。

シナリオは、①本事業で開発する水素製造技術、②液体水素、メチルシクロヘキサン等のエネルギーキャリア技術及び①と②を組み合わせたトータルシステムについて最低限策定する。シナリオの設定や分析にあたっては、秘密情報の確実な管理を前提に、本事業の参加者から技術情報等を収集するとともに、本事業内外の有識者の知見を幅広く得られる適切な体制を構築する。

さらに、水素製造から貯蔵、輸送、利用に至るサプライチェーン全体を通した経済性・環境影響等の分析・評価、エネルギーシステム全体の中での水素エネルギーの位置付けについての評価、要素・システム技術の将来予測に関する評価について、新たな評価軸の検討を含め、その方法を検討する。

シナリオ作成にあたっては、秘密保持の確実な管理を前提に、本事業の参加者との十分な連携による技術情報等の収集やフィードバックを行うともに、本事業内外の有識者の知見を反映させることが可能な適切な体制を構築する。

３．達成目標

【中間目標、最終目標について】

本項目は提案公募として実施し、研究期間は４年とする。前半２年で一通りのシナリオを完成させる。後半２年は、中間評価等も踏まえ、策定したシナリオの精緻化や新たなシナリオの設定、分析を行う。

【後期５年】

研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

１．研究開発の必要性

我が国の産業競争力を維持・強化していくためには、エネルギー安全保障を確保し、安定的かつ低廉なエネルギーを供給することが不可欠である。そのため、本研究開発項目を実施する。

２．研究開発の具体的内容

アルカリ水電解、固体高分子形水電解（ＰＥＭ）、高温水蒸気電解法（ＳＯＥＣ）等の水電解各方式において、電極触媒の性能発現と劣化機構の高度解析、電解槽の劣化機構、劣化評価法に関する共通的解析を行い、性能向上へフィードバックする。また各方式に応じた材料やシステムの高度化に向けた指針を確立するとともに、次世代材料等の検討を行う。

また、本研究開発によって得られた設計指針の原案等の成果は、産業界（水電解メーカーや材料メーカー等）と共有することで研究開発を促進するとともに、耐久性等の評価方法については必要に応じて国際間で情報共有を図る。

３．達成目標

【中間目標（２０２０年度）】

・変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明

・劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する設計指針の原案を策定

【最終目標（２０２２年度）】

・プラント引渡し価格３０円／Ｎｍ$^3$に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定や性能等評価方法の確立

研究開発項目②大規模水素利用技術の研究開発

１．研究開発の必要性

水素エネルギー市場の形成の為には、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要となる。

２．研究開発の具体的内容

環境負荷が低く、かつ大量水素の利用に繋がる基盤技術を開発する（但し燃料電池は除く）。

３．達成目標

３－１．研究開発の必要性

環境負荷が低く、かつ大量水素エネルギーを効率的に利用可能な基盤技術を開発する。

３－２．研究開発の具体的内容

＜水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発＞

・数百 MW 級の水素専焼ガスタービン燃焼器の開発（低 NOｘ、安定運用可能なノズル基礎設計）

＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞

・２MW 級の水素専焼ガスタービン燃焼器の開発（燃焼器の改良設計・試作）
・高圧水素燃焼試験

３－３．達成目標
【最終目標（２０１９年度）】
＜水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発＞
・燃焼試験により、シングルクラスターバーナ出口 NOx 50ppm 以下を達成する。
・燃焼試験により、フラッシュバックを発生しないことを確認する。
・大型ガスタービンに適用可能なクラスターバーナの基礎設計を完了する。
・燃焼振動を抑制し、安定燃焼できる条件の閾値を算出し、燃焼器体格を決定する。
＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞
・５０%負荷から定格１００%負荷相当条件にて、NOx 35ppm 以下の達成
・失火や逆火が生じない、安定燃焼の確認

研究開発項目③：従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発
１．研究開発の必要性
水素社会の実現のためには、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要であり、本事業で目指す２０４０年以降という長期的視点を睨み、従来の開放系サイクル技術とは一線を隔す超高効率の発電技術を現時点から検討しておく必要がある。

２．研究開発の具体的内容
本事業においてこれまで取り組んできた効率追求型 1,700℃級発電技術の成果や外部技術委員会での議論を踏まえ、経済性が確保され、かつ従来技術を凌駕する技術を創出する可能性があるとされる 1400℃級超高効率発電を対象として、燃焼器やタービン等の業界共通の要素研究を推進する。

３．達成目標
【研究開発項目継続可否審査（２０１９年度）】
・ＦＳを行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示すること。
・上記を通じて、発電効率７５%を達成しうるシステム構成を提示すること。
・上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示すること。

【最終目標（２０２２年度）】
事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。

研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究
１．研究開発の必要性
国内外の再生可能エネルギー等を効率的、安定的に活用可能とすることは、エネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の点からも極めて重要であり、本事業の一刻も早い取り組みが求められている。

２．研究開発の具体的内容

有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。具体的には、新規プロセスに必要な材料・要素機器の小規模な試作、性能評価やそのプロセスを含むシステムの特性解析などを行い、システム全体の性能・経済性、開発課題、開発目標を把握する。

３．達成目標

【最終目標（２０１９年６月）】

＜水素分離膜を用いた脱水素＞

前年度までに開発した大面積化及び水素分離性能向上を行ってきた水素分離膜を用いて、低コストシール法と効率的熱伝導方式を組み合わせた実用的なモジュール構造を開発する。また、1500 時間の耐久試験により劣化率を検証し、少なくとも１万 5 千時間程度（脱水素触媒と同等以上）の実用的な耐久性があることを見通す。水素分離膜型脱水素プロセスの経済的優位性の確認、商業化を見据えた水素分離膜型脱水素のパイロットプラントの概念設計を完了する。

【最終目標（２０２２年度末）】

＜エネルギーキャリア合成の基盤技術開発＞

有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。

研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発

１．研究開発の必要性

様々な資源から製造できるという水素の利点を生かすため、二酸化炭素を排出しない水素製造のコア技術の可能性を検討することが必要である。

２．研究開発の具体的内容

メタンやバイオマス等の炭化水素やその他の多様な水素資源から安価かつ大量の水素を製造する、二酸化炭素を排出しないコア技術（注）の可能性を調査する（基礎的な実験等を含む）。この際、エネルギー収支や効率、技術成立性、経済性等も検討する。

なお、２０２０年度に実施した技術成立性と経済性に関する外部有識者による継続可否審査の結果を踏まえ、２０２１年度からは二酸化炭素を排出しない水素製造プロセスに関する個別要素及びシステム全体の基盤技術を開発する。

（注）技術的新規性の低いもの、二酸化炭素を排出しないという意味において CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）を必要とするもの及び水電解水素製造技術等 NEDO で既に実施しているものを除く。

３．達成目標

【中間目標（２０２０年度）】

基礎研究の可能性調査を行い、技術成立性を理論的・科学的に提示する。また、当該技術を活用して水素を消費者まで安価かつ大量導入する実用化シナリオ原案を構築して経済性を提示する。

科学的根拠をもって実用面を踏まえた上で、長期目標としての 20 円/Nm3 を念頭に置いて、本事業のアウトカム目標である２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標に、当該技術がどのように貢献するか定量的に示す。当該実用化シナリオ原案を作成するにあたっては、国等が示す関連ロードマップに示す市場規模を用いることとする。

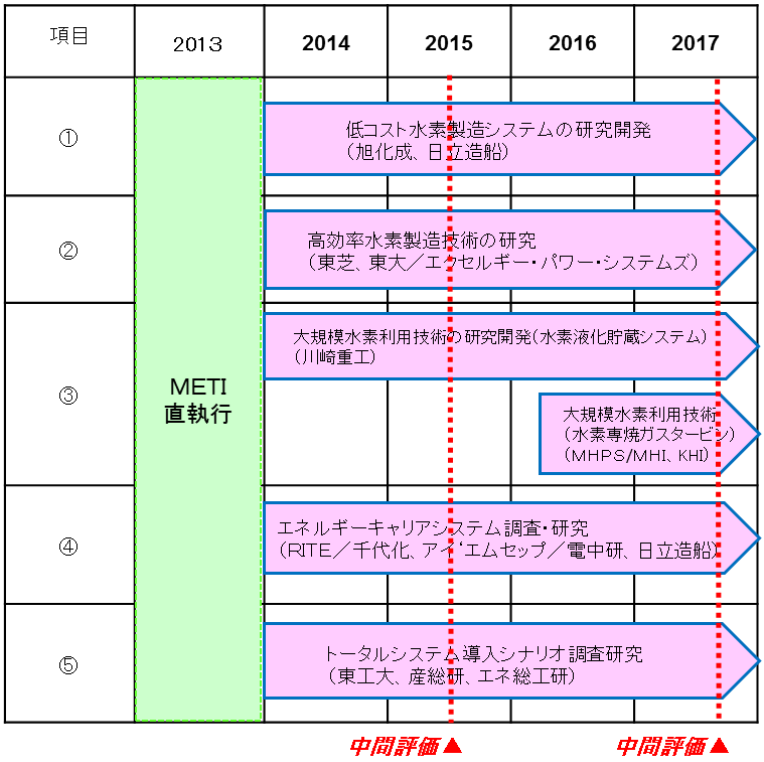
【最終目標（２０２２年度）】

２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する二酸化炭素を排出しない水素製造技術の設計指針を確立する。

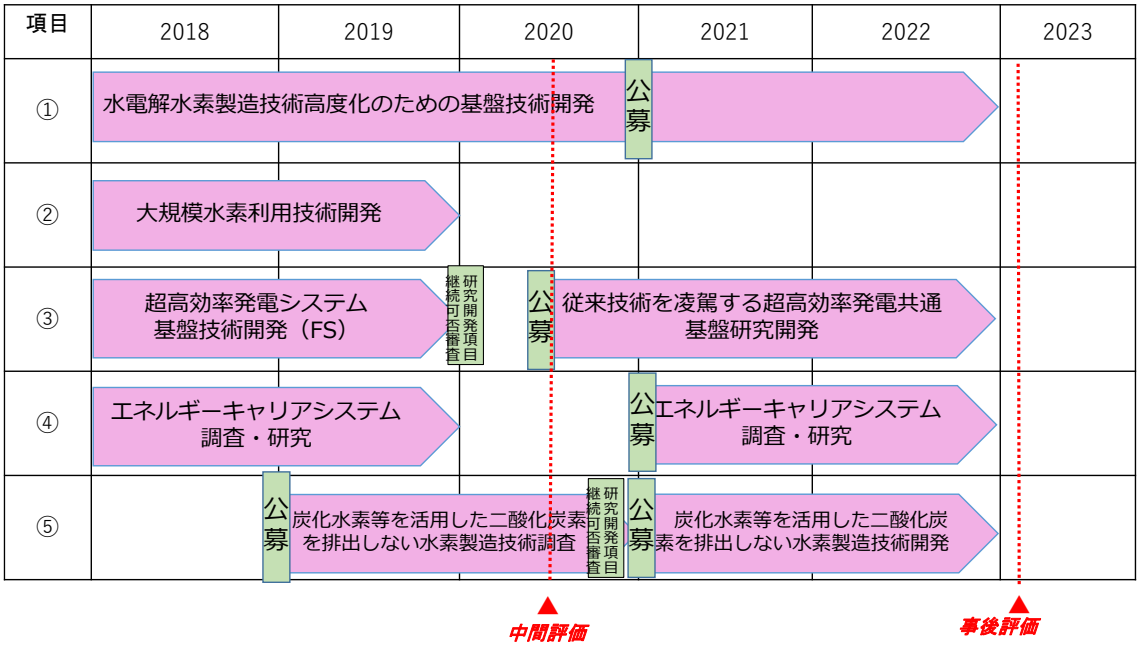
（別紙２）

研究開発スケジュール

前期５年（２０１３－２０１７）




後期５年（２０１８－２０２２）



特許論文リスト

【特許】21年度以降の出願。ただし、8月30日時点で、「公開」もしくは「登録」として事業者が集計したもののみを記載。

| 番号 | 出願番号 | 国・地域コード | 出願日 | 状態 | 発明の名称 | 出願人 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2021-143772 | 国内 | 2021.9.3 | 公開 | ポリマーの製造方法、ポリマー、電解質膜、燃料電池、及び電解装置 | 東京工業大学 |
| 2 | PCT/JP2022/008810 | PCT | 2022.3.2 | 公開 | ポリマー及びその製造方法、分離膜、電解質膜、燃料電池、水電解、並びに電解技術 | 東京工業大学 |
| 3 | 2023-011436 | 国内 | 2022.4.12 | 登録 | 炭化水素分解用構造体触媒の設計・配置方法、炭化水素分解反応装置の製造方法、炭化水素分解反応装置および反応炉 | 伊原工業 |
| 4 | PCT/JP2022/021646 | PCT | 2022.5.26 | 公開 | 触媒の製造方法、及び触媒 | 東京工業大学他 |
| 5 | PCT/JP2022/021636 | PCT | 2022.5.26 | 公開 | 触媒、及び触媒の製造方法 | 東京工業大学 |
| 6 | PCT/JP2022/021635 | PCT | 2022.5.26 | 公開 | 触媒、触媒の製造方法、及び中間品 | 東京工業大学 |
| 7 | 2022-118022 | 国内 | 2022.7.25 | 登録 | 炭化水素分解用触媒(分割) | 伊原工業 |
| 8 | 2022-179693 | 国内 | 2022.11.9 | 登録 | 炭化水素分解用触媒(分割) | 伊原工業 |
| 9 | 2023-051905 | 国内 | 2023.3.28 | 公開 | 打撃装置 | 伊原工業 |
| 10 | 2022-557457 | 国内 | 2021.10.14 | 登録 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 11 | PCT/JP2021/038116 | PCT | 2021.10.14 | 公開 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 12 | 2023-7014450 | KR | 2021.10.14 | 公開 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 13 | PCT/JP201/038117 | PCT | 2021.10.14 | 公開 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 14 | 2023-7014454 | KR | 2021.10.14 | 公開 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 15 | 2021-178675 | 国内 | 2021.11.1 | 公開 | 高温水蒸気電解セル及びその製造方法 | 東芝エネルギーシステムズ |
| 16 | PCT/JP2021/042309 | PCT | 2021.11.17 | 公開 | アノードの加速評価方法 | 横浜国立大学他 |

| 番号 | 出願番号 | 国・地域コード | 出願日 | 状態 | 発明の名称 | 出願人 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 17 | 2021-197664 | 国内 | 2021.12.6 | 公開 | 電気化学装置 | 東芝エネルギーシステムズ |
| 18 | 2021-099336 | 国内 | 2021.6.15 | 公開 | イリジウムーマンガン酸化物複合材料、イリジウムーマンガン酸化物複合電極材料、及びこれらの製造方法 | 理化学研究所他 |
| 19 | 2021-106029 | 国内 | 2021.6.25 | 公開 | 固体酸化物形電気化学セル及びその利用 | 東芝エネルギーシステムズ他 |
| 20 | US17/363323 | US | 2021.6.30 | 登録 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 21 | 2021-095905 | 国内 | 2021.6.8 | 公開 | 水素製造装置および水素製造方法 | 東芝エネルギーシステムズ |
| 22 | AU2021204646 | その他 | 2021.7.2 | 登録 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 23 | CA3123793 | その他 | 2021.7.2 | 公開 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 24 | EP21183423.9 | EP | 2021.7.2 | 公開 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 25 | PCT/JP2021/028171 | PCT | 2021.7.29 | 公開 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 26 | 202180058545.6 | CN | 2021.7.29 | 公開 | アルカリ水電解用アノード及びその製造方法 | 横浜国立大学他 |
| 27 | 2021-132001 | 国内 | 2021.8.13 | 公開 | 電気化学スタック用金属部材及び電気化学スタック | 東芝エネルギーシステムズ |
| 28 | 2021-126573 | 国内 | 2021.8.2 | 公開 | 電気化学システム | 東芝エネルギーシステムズ |
| 29 | 2021-144997 | 国内 | 2021.9.6 | 公開 | 保護層付きインターコネクタ、この保護層付きインターコネクタを具備するセルスタックならびに水素エネルギーシステム | 東芝エネルギーシステムズ |
| 30 | JP2022/003379 | PCT | 2022.1.28 | 公開 | 電気化学装置、および、その製造方法 | 東芝エネルギーシステムズ |

| 番号 | 出願番号 | 国・地域コード | 出願日 | 状態 | 発明の名称 | 出願人 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 31 | AU2022220602 | その他 | 2022.1.31 | 公開 | PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, CELL STACK INCLUDING THIS PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, AND FUEL CELL INCLUDING THE SAME | 東芝エネルギーシステムズ |
| 32 | EP2215419.2 | EP | 2022.1.31 | 公開 | PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, CELL STACK INCLUDING THIS PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, AND FUEL CELL INCLUDING THE SAME | 東芝エネルギーシステムズ |
| 33 | CA3148205 | その他 | 2022.2.1 | 公開 | PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, CELL STACK INCLUDING THIS PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, AND FUEL CELL INCLUDING THE SAME | 東芝エネルギーシステムズ |
| 34 | US17/591059 | US | 2022.2.2 | 公開 | PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, CELL STACK INCLUDING THIS PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, AND FUEL CELL INCLUDING THE SAME | 東芝エネルギーシステムズ |
| 35 | AU2022203352 | その他 | 2022.5.18 | 公開 | HYDROGEN PRODUCTION APPARATUS AND HYDROGEN PRODUCTION METHOD | 東芝エネルギーシステムズ |
| 36 | 2022-081464 | 国内 | 2022.5.18 | 公開 | 電気化学セルおよび電気化学セルスタック | 東芝エネルギーシステムズ |
| 37 | EP22175117.5 | EP | 2022.5.24 | 公開 | Hydrogen production apparatus and hydrogen production method | 東芝エネルギーシステムズ |
| 38 | AU2022203575 | その他 | 2022.5.26 | 公開 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |

| 番号 | 出願番号 | 国・地域コード | 出願日 | 状態 | 発明の名称 | 出願人 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 39 | EP22176699.1 | EP | 2022.6.1 | 公開 | Electrochemical cell and electrochemical cell stack | 東芝エネルギーシステムズ |
| 40 | CA3161426 | その他 | 2022.6.2 | 公開 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 41 | US17/833709 | US | 2022.6.6 | 公開 | HYDROGEN PRODUCTION APPARATUS AND HYDROGEN PRODUCTION METHOD | 東芝エネルギーシステムズ |
| 42 | US17/833527 | US | 2022.6.6 | 公開 | ELECTROCHEMICAL CELL AND ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 43 | CA3167527 | その他 | 2022.7.13 | 公開 | METAL COMPONENT FOR ELECTROCHEMICAL STACK AND ELECTROCHEMICAL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 44 | EP22184943.3 | EP | 2022.7.14 | 公開 | METAL COMPONENT FOR ELECTROCHEMICAL STACK AND ELECTROCHEMICAL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 45 | US17/865935 | US | 2022.7.15 | 公開 | METAL COMPONENT FOR ELECTROCHEMICAL STACK AND ELECTROCHEMICAL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 46 | AU2022204916 | その他 | 2022.7.8 | 公開 | METAL COMPONENT FOR ELECTROCHEMICAL STACK AND ELECTROCHEMICAL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 47 | AU2022211849 | その他 | 2022.8.3 | 公開 | Protective-layer-coated-interconnector, cell stack including this protective-layer-coated-interconnector, and hydrogen energy system including the sam | 東芝エネルギーシステムズ |
| 48 | CA3169495 | その他 | 2022.8.3 | 公開 | PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, CELL STACK INCLUDING THIS PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, AND HYDROGEN ENERGY SYSTEM INCLUDING THE SAM | 東芝エネルギーシステムズ |
| 49 | EP22188531.2 | EP | 2022.8.3 | 公開 | Protective-layer-coated-interconnector, cell stack including this protectivelayer-coated-interconnector, and hydrogen energy system including the same | 東芝エネルギーシステムズ |

| 番号 | 出願番号 | 国・地域コード | 出願日 | 状態 | 発明の名称 | 出願人 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | US17/883358 | US | 2022.8.8 | 公開 | PROTECTIVE-LAYER-COATED-INTERCONNECTOR, CELL STACK INCLUDING THIS PROTECTIVELAYER-COATED-INTERCONNECTOR, AND HYDROGEN ENERGY SYSTEM INCLUDING THE SAME | 東芝エネルギーシステムズ |
| 51 | AU2022235553 | その他 | 2022.9.20 | 公開 | INTERCONNECTOR FOR SOLID-OXIDE ELECTROCHEMICAL CELL STACK AND SOLID-OXIDE ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 52 | CA3175209 | その他 | 2022.9.21 | 公開 | INTERCONNECTOR FOR SOLID-OXIDE ELECTROCHEMICAL CELL STACK AND SOLID-OXIDE ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 53 | EP22197099.9 | EP | 2022.9.22 | 公開 | Interconnector for solid-oxide electrochemical cell stack and solid-oxide electrochemical cell stack | 東芝エネルギーシステムズ |
| 54 | US17/950611 | US | 2022.9.22 | 公開 | INTERCONNECTOR FOR SOLID-OXIDE ELECTROCHEMICAL CELL STACK AND SOLID-OXIDE ELECTROCHEMICAL CELL STACK | 東芝エネルギーシステムズ |
| 55 | US18/094546 | US | 2023.1.9 | 公開 | METAL MEMBER AND MANUFACTURING METHOD THEREOF | 東芝エネルギーシステムズ |

【論文】リスト

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Z. Long<br>K. Miyatake | University of Yamanashi | 有 | High-Performance Fuel Cell Operable at 120°C Using Polyphenlyene Ionomer Membranes with Improved Interfacial Compatibility | ACS Appl. Mater. Interfaces, 13 (No.13) | 2021 |
| 2 | S. Tanaka,<br>S. Takaya,<br>T. Kumeda,<br>N.Hoshi,<br>K. Miyatake,<br>M. Nakamura | Chiba University,<br>University of Yamanashi,<br>Waseda University | 有 | Tailoring the Hydrophilicand Hydrophobic<br>Reaction Fields of the Electrode Interface on Single Crystal Pt<br>Electrodes for Hydrogen Evolution/Oxidation Reactions | Int. J. Hydrog. Energy,<br>46<br>(No.55) | 2021 |
| 3 | Z. Long<br>K. Miyatake | University of Yamanashi,<br>Waseda University | 有 | ePTFE Reinforced,<br>Sulfonated Aromatic Polymer<br>embranes Enable Durable,High-Temperature Operable PEMFCs | iScience, 24<br>(No.9) | 2021 |
| 15 | 重政海都, 井上海星, Sunpil Jang, Fatima Isabella Reyna Pena, Antonio Atienza-Marquez, 荒木拓人, 寺尾卓真, 長澤兼作, 光島重徳 | 横浜国立大学 | 有 | Visualization of dragged water and generated hydrogen bubbles in a direct toluene electro-hydrogenation electrolyzer | Journal of Power Sauces554, 232304, 2023 | 2023 |
| 16 | 長澤兼作, 杉田雄也、Antonio Atienza-Marquez, 黒 | 横浜国立大学 | 有 | Effect of the cathode catalyst loading on mass transfer in toluene direct electrohydrogenation | Journal of Electroanalytical Chemistry938, 117431, 2023 | 2023 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 田義之・光島重徳 | | | | | |
| 17 | Fatima Isabella Reyna Pena, Antonio Atienza-Marquez, Sunpil Jang, 重政海都, 荒木拓人, 塩野竜平, 長澤兼作, 光島重徳 | 横浜国立大学 | 有 | In situ X-ray CT visualization of hydrogen bubbles inside porous transport layer of a direct toluene electro-hydrogenation electrolyzer | International Journal of Hydrogen Energy 投稿中 | 投稿中 |
| 18 | Yuma OKUBO, Junnosuke OKAJIMA, Yuka IGA | Tohoku Univ. | 有 | Estimation of temperature inside unsteady cavitation in high-temperature water | Journal of Fluid Science and Technology, Vol 17, No.317-3, JFST0008 | 2022 |
| 20 | 中尾圭吾, 坂野友香理, 坂本勇樹, 樺山昂生, 井上裕介, 佐藤哲也 | 早稲田大学, 宇宙航空研究開発機構 | 有 | 双方向長短期記憶ネットワークによる気液二相流の流動様式判別に関する研究 | 航空宇宙技術 21, p.68-76 | 2022 |
| 21 | Katsuyoshi Fukiba, Hiroki Adachi, Tetsuya Sato | Shizuoka university,Waseda university | 有 | Heat Transfer Enhancement in Pool Boiling of Liquid Nitrogen Using a Low Thermal Conductive Layer with Openings | International Communications of Heat and Mass Transfer127, p.1-7 | 2021 |
| 22 | 本田修一郎・池田隼人・能見基彦・常田友紀・橋元洋人・渡次圭・藤澤宏行 | 荏原製作所 | 有 | 水素・アンモニア発電に用いられるポンプとその技術 | ターボ機械 51-7,p.38-45 | 2023 |
| 23 | K. I. M. Rojas, N. T. Cuong, H. Nishino, R. Ishibiki, S. | 大阪大学, 筑波大学, 東京工業大学, デラサール大学 | 有 | Chemical stability of hydrogen boride nanosheets in water | Commun. Mater.2, 0, 81, 2021 | 2021 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ito, M. Miyauchi, Y. Fujimoto, S. Tominaka, S. Okada, H. Hosono, N. B. Arboleda Jr., T. Kondo, Y. Morikawa, and I. Hamada | | | | | |
| 24 | 宮澤薫一<br>朝原誠<br>宮坂武志<br>長井拓郎<br>木本浩二<br>田中優実 | 東京理科大学<br>岐阜大学<br>(国) 物質・材料研究機構 | 有 | Surface atomic structures of nickel plating films reacted with methane at high temperature | Surface and Interface Analysis55<br><br>PP. 321-328<br><br>2023 | 2023 |
| 25 | 宮澤薫一<br>田中優実 | 東京理科大学 | 有 | LAMMPS molecular dynamics simulation of methane decomposition on nickel thin films at high temperatures | Surface Science713<br>PP. 121904_1-10<br>2021 | 2021 |
| 26 | 鈴木正史<br>濱口裕昭<br>犬飼直樹<br>阿部祥忠 | 愛知県（あいち産業科学技術総合センター） | | メタン直接分解によって得られる固体炭素の物性評価 | あいち産業科学技術総合センター研究報告第12号 | 投稿中 |
| 27 | Martin Keller, Akimitsu Matsumura, Atul Sharma | 産業技術総合研究所 | 有 | Spray-dried Fe/Al2O3as a carbon carrier for COx-free hydrogen production via methane cracking in a fluidized bed process | Chemical Engineering JournalVolume 398, 15 October 2020, 125612 | 2022 |
| 28 | Martin Keller, Atul Sharma | 産業技術総合研究所 | 有 | Hydrogen Production via Methane Cracking on Dry-Coated Fe/ZrO2 with Support Recycle in a Fluidized Bed Process | Energy & FuelsVolume 35(1), 7 January 2021, 847-855 | 2021 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 29 | 中川浩行, 上田麻木 | 京都大学 | 有 | 多孔質炭素基材を利用したおがくずの熱分解における析出炭素の回収 | 日本エネルギー学会誌 101 (11), 210-217, 2022-11-20 | 2022 |
| 30 | 恒見清孝 | 産業技術総合研究所 | 有 | Screening Risk Assessment at the Production and Use Stage of Carbon Nanomaterials Generated in Hydrogen Manufacture by Methane Decomposition | SustainabilityVolume 14(11), May 2022, 6700 | 2022 |
| 31 | 恒見清孝 | 産業技術総合研究所 | 有 | Risk assessment of nano-scale solid carbon sourced from a CO2-free hydrogen manufacturer used at a steel plant and disposed at a landfill site | Process Safety and Environmental ProtectionVolume 170, February 2023, Pages 1032-1038 | 2023 |
| 32 | 篠田健太郎、鈴木雅人、シャヒン・モハメド、明渡純、高木英行、壹岐典彦 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 無 | 次世代耐環境コーティングに向けた微粒子スプレーコーティング技術 | 日本ガスタービン学会誌 | |
| 33 | Mamoru Tanahashi | 国立大学法人東京工業大学 | 有 | DNS of steam-diluted hydrogen/oxygen multi-cluster burner | The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2021) | 2021 |
| 34 | ◎ Hazim Shehab 、Yong Fan 、Norihiko Iki 、Osamu Kurata、 Taku Tsujimura 、Hirohide Furutani | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 有 | Structure of Non-Premixed Hydrogen-Oxygen Impinged Jet Flame under Elevated Pressure and Flow Rates | The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2021)49 巻、4 号、229-240、2021 | 2021 |
| 35 | 壹岐典彦 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 無 | カーボンニュートラルに向かう社会におけるガスタービン | 燃焼学会誌 64 巻、207 号 、35-40 、2022 | 2022 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 36 | 高橋徹 | 一般財団法人電力中央研究所 | 無 | 入門講座「コンバインドサイクル発電」XI章：コンバインドサイクルの将来展望 | 火力原子力発電技術協会協会誌 火力原子力発電 73 巻、3号、248-264、2022 | 2022 |
| 37 | Yutaka Watanabe 、Toru Takahashi 、Kojun Suzuki | 一般財団法人電力中央研究所 | 有 | Dynamic Simulation of an Oxygen-Hydrogen Combustion Turbine System Using Modelica | | 2022 |
| 38 | ◎ Hazim Shehab 、Yong Fan 、Norihiko Iki 、Osamu Kurata 、Hirohide Furutani 、Taku Tsujimura | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 有 | Impact of the impingement position on the structure of non-premixed hydrogen-oxygen jet flames | 14th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2023)2023/5/14-18 | 2023 |
| 39 | 渡邉泰、 高橋徹、 鈴木晃純 | 一般財団法人電力中央研究所 | 有 | Effect of load change operation on an oxygen-hydrogen combustion turbine system | International Conference on Power Engineering - 2023 (ICOPE-2023)ICOPE2023 | 2023 |
| 40 | 野崎智洋 | 国立大学法人東京工業大学 | 無 | 酸素水素燃焼と低炭素発電技術 | 自動車技術会 77 巻、7 号、2023 | 2023 |
| 41 | Hazim Shehab, Yong Fan, Norihiko Iki, Osamu Kurata, Taku Tsujimura, Hirohide Furutani | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 有 | Non-premixed hydrogen-oxygen impinged jet flame under various impinging angles | Internatinal Journal Hydrogen Energy 投稿中 | 投稿中 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 42 | Mohammed Shahien, Kentaro Shinoda, Masato Suzuki, Hideyuki Takagi, Norihiko Iki | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 有 | Durability of Dense Alumina Coating Deposited by Hybrid Aerosol Deposition under High-Speed Steam-Jet at Elevated Temperatures | Materials Transactions 投稿中 | 投稿中 |
| 43 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | ＳＯＥＣを用いた高温水蒸気電解技術の開発 | 東芝レビュー 2021 VOL.76 NO.276,2,p.39,2021 | 2021 |
| 44 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | ＳＯＥＣを用いた高温水蒸気電解技術の開発 | 燃料電池開発情報センター機関誌「燃料電池」春号 20,4,p.29-35,2021 | 2021 |
| 45 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | ペロブスカイト型化合物を用いた高温水蒸気電解技術 | 触媒誌 63 巻 2 号(2021)63,2,p.115-119,2021 | 2021 |
| 46 | 犬塚 理子 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | ＳＯＥＣセパレータ・配管向けステンレス鋼の大気／水素＋水蒸気 二相環境における高温酸化挙動 | 日本学術振興会 耐熱金属材料第１２３委員会 戦略企画分科会 令和４年３月期研究会 研究報告論文集 2022 | 2022 |
| 47 | 長田 憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | 高温水蒸気電解法による高効率水素製造技術 | エネルギー・資源学会誌、５月号 5,p.37-40,2022 | 2022 |
| 48 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | 固体酸化物形電解セル （ＳＯＥＣ） による水素製造とその高効率化 | 株式会社技術情報協会「水素の製造，輸送，貯蔵と利用技術」2022 | 2022 |
| 49 | 長田 憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 無 | Ｃｈａｐｔｅｒ １０： Ａｄｖａｎｃｅｓ ｉｎ Ｈｉｇｈ Ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ Ｅｌｅｃｔｒｏｌｙｓｉｓ ｕｓｉｎｇ Ｓｏｌｉｄ Ｏｘｉ | Ｓｐｒｉｎｇｅｒ ｂｏｏｋ （ＣＯ２ ｆｒｅｅ Ａｍｍｏｎｉａ ａｓ ａｎ Ｅｎｅｒｇｙ Ｃａｒｒｉｅｒ Ｊａｐ | 2022 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | de Electrolysis Cells | an's Insights) 2022 | |
| 50 | Ailong Li, Shuang Kong, Chenxi Guo, Hideshi Ooka, Kiyohiro Adachi, Daisuke Hashizume, Qike Jiang, Hongxian Han, Jianping Xiao, Ryuhei Nakamura | RIKEN CSRS, RIKEN CEMS, Dalian Institute of Chemical Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Tokyo Institute of Technology | 有 | Enhancing the stability of cobalt spinel oxide towards sustainable oxygen evolution in acid | Nat. Cat.5, 109-118,2022 | 2022 |
| 51 | 藤村樹，國本雅宏，福中康博，伊藤博，本間敬之 | 早稲田大学、産業技術総合研究所 | 有 | Direct Formation of Metal Layer on Anion Exchange Membrane Using Electroless Deposition Process | ElectrochemistryVol.89, pp.192-196, 2021 | 2021 |
| 52 | 藤村樹，國本雅宏，福中康博，本間敬之 | 早稲田大学 | 有 | Analysis of the hydrogen evolution reaction at Ni micro-patterned electrodes | Electrochimica ActaVol.368, pp.137678, 2021 | 2021 |
| 53 | 王 瑞祥、井ノ口魁、大橋 真智、染矢 聡、宗像鉄雄、石田 政義、伊藤 博 | 筑波大学、産業技術総合研究所 | 有 | Effect of catalyst distribution and structural properties of anode porous transport electrodes on the performance of anion exchange membrane water electrolysis | International Journal of Hydrogen EnergyVol.46, pp.37757-37767, 2021 | 2021 |
| 54 | 伊藤 博 | 産業技術総合研究所 | 無 | アニオン交換膜（AEM）を用いた水電解技術 | 電気化学 Vol.89, pp.247-251, 2021 | 2021 |
| 55 | 三田麻修，松島永佳，上田幹人，伊藤博 | 北海道大学、産業技術総合研究所 | 有 | In-situ high-speed atomic force microscopy observation of dynamic nanobubbles during water electrolysis | Journal of Colloid and Interface ScienceVol.614, pp.389-395, 2022 | 2022 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 56 | 王瑞祥，大橋真智，石田政義，伊藤博 | 筑波大学、産業技術総合研究所 | 有 | Water transport analysis during cathode dry operation of anion exchange membrane water electrolysis | International Journal of Hydrogen EnergyVol.47, pp.40835-40848, 2022 | 2022 |
| 57 | Roby Soni, Shoji Miyanishi, Hidenori Kuroki, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学，KISTEC | 有 | Pure Water Solid Alkaline Water Electrolyzer Using Fully Aromatic and High-Molecular-Weight Poly(fluorene-alttetrafluorophenylene)-trimethyl Ammonium Anion Exchange Membranes and Ionomers | ACS Applied Energy Materials4, 2, 1053 – 1058, 2021 | 2021 |
| 58 | Yuuki Sugawara, Takuya Hihara, Gopinathan M. Anilkumar, Keigo Kamata, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学，ノリタケ | 有 | Metal Oxide Electrocatalyst Support for Carbon-free Durable Electrodes with Excellent Corrosion Resistance at High Potential Conditions | Sustainable Energy & Fuels5, 1374 – 1378, 2021 | 2021 |
| 59 | Yuuki Sugawara, Keigo Kamata, Atsushi Ishikawa, Yoshikata Tateyama, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学，NIMS | 有 | Efficient Oxygen Evolution Electrocatalysis on CaFe2O4 and its Reaction Mechanism | ACS Applied Energy Materials4, 4, 3057 – 3066, 2021 | 2021 |
| 60 | 菅原 勇貴、山口 猛央 | 東京工業大学 | 有 | モデル計算と第一原理計算を活用した燃料電池および水電解デバ | マテリアルズインフォマティクスのためのデータ作成 | 2021 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | イスの触媒層・電解質膜の設計開発 | とその解析、応用事例 第 7 章, 3 節, p377–390, 2021 | |
| 61 | 菅原 勇貴、石川 敦之 | 東京工業大学, NIMS | 有 | 安価で高活性な水電解用カルシウム–鉄酸化物触媒を開発 | セラミックス 56, 8, 849, 2021 | 2021 |
| 62 | Yuuki Sugawara, Keigo Kamata, Eri Hayashi, Mitsuru Itoh, Yosuke Hamasaki, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学, 防衛大学校 | 有 | Comprehensive Structural Descriptor for Electrocatalytic Oxygen Evolution Activities of Iron Oxides | ChemElectroChem 8, 23, 4466–4471, 2021 | 2021 |
| 63 | 菅原 勇貴 | 東京工業大学 | 有 | 原子間距離の制御で水素製造用鉄系触媒の高性能化に成功 | 自動車技術 76, 3, 112–113, 2022 | 2022 |
| 64 | Yuuki Sugawara, Satomi Ueno, Keigo Kamata, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学 | 有 | Crystal Structures of Iron-Based Oxides and Their Catalytic Efficiencies for the Oxygen Evolution Reaction: A Trend in Alkaline Media | ChemElectroChem 9, 9, e202101679, 2022 | 2022 |
| 65 | 宮西 将史、黒木 秀記、山口猛央 | 東京工業大学 | 有 | アニオン交換膜型固体アルカリ水電解技術の進歩と展望 | 水素エネルギーシステム 47, 1, 26–33, 2022 | 2022 |
| 66 | Sasidharan Sankar Sasidharan Sankar, Soni Roby, Hidenori Kuroki, Shoji Miyanishi, Takanori Tamaki, | 東京工業大学, ノリタケ | 有 | High-Performing Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Using Self-Supported Metal Phosphide Anode Catalysts and an Ether-Free Aromatic Polyelectrolyte | ACS Sustainable Chemistry & Engineering11, 3, 854–865, 2023 | 2023 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Gopinathan M. Anilkumar, Takeo Yamaguchi | | | | | |
| 67 | Sankar Sasidharan, Rajith Illathvalappil, S. Assa Aravindh, Hidenori Kuroki, G. M. Anilkumar, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学，ノリタケ | 有 | Three-Dimensional Porous Metal Phosphide Cathode Electrodes Prepared via Electroless Galvanic Modification for Alkaline Water Electrolysis | Sustainable Energy & Fuels7, 2830 – 2840, 2023 | 2023 |
| 68 | Sreekanth Narayanaru, Shoji Miyanishi, Hidenori Kuroki, Gopinathan M. Anilkumar, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学，ノリタケ | 有 | Start-Stop Cyclic Durability Analysis of Membrane – Electrode Assemblies using Polyphenylene-Based Electrolytes for Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer | ACS Sustainable Chemistry & Engineering11, 25, 9295–9302, 2023 | 2023 |
| 69 | 黒木 秀記、山口 猛央 | 東京工業大学 | 有 | 酸素発生触媒の高性能化に向けた Ir ナノ粒子連結触媒の開発 | 水電解による水素製造技術 ～ 各種水電解法の基本・最新技術と世界の水素政策動向 第Ⅰ編, 第３章, 第２節, p61–68, 2023 | 2023 |
| 70 | 菅原 勇貴、山口 猛央 | 東京工業大学 | 有 | アニオン交換膜形水電解アノード反応に用いる高性能電極触媒の設計論 | 水電解による水素製造技術 ～ 各種水電解法の基本・最新技術と世界の水素政策動向 第Ⅰ編, 第４章, 第２ | 2023 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 節, 第 1 項, p119–131, 2023 | |
| 71 | 宮西 将史、山口 猛央 | 東京工業大学 | 有 | 高耐久性アニオン伝導膜の開発とアニオン交換膜型水電解への展開 | 水電解による水素製造技術 ～ 各種水電解法の基本・最新技術と世界の水素政策動向 第Ⅰ編, 第４章, 第３節, 第 1 項, p139–150, 2023 | 2023 |
| 72 | Yuuki Sugawara, Keigo Kamata, Aoi Matsuda, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学 | 有 | Unveiled Performance of Iron-based Phosphates as Precatalysts for Oxygen Evolution Electrocatalysis | ACS Applied Energy MaterialsAccepted | 2023 |
| 73 | Ashraf Abdel Haleem, Kensaku Nagasawa, Yoshiyuki Kuroda, Yoshinori Nishiki, Awaludin Zaenal, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学、デノラ・ペルメレック | 有 | A New Accelerated Durability Test protocol for Water Oxidation Electrocatalysts of Renewable Energy powered Alkaline Water Electrolyzers | Electrochemistry 89(2) 186-191, 2021 | 2021 |
| 74 | 光島重徳、黒田義之 | 横浜国立大学 | 無 | グリーン水素製造に向けた水電解技術 | 燃料電池 2021.4 | 2021 |
| 75 | 五百蔵勉、朝日将史、山崎眞一 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 無 | 産業技術総合研究所における固体高分子形燃料電池・水電解技術に関する取り組み | 燃料電池 21(1), 87-91, 2021 | 2021 |
| 76 | Kota Ando, Yoshiharu Uchimoto, | 京都大学 | 有 | Probing the Dissolved Gas Concentration on the Electrode through Laser-Assisted Bubbles | Journal of Physical Chemistry C125(38), 20952-20957, 2021 | 2021 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | and Takashi Nakajima | | | | | |
| 77 | Ren Yadan, Tomoya Horiguchi, Tomoki Uchiyama, Yuki Orikasa, Toshiki Watanabe, Kentaro Yamamoto, Tsuyoshi Takami, Toshiyuki Matsunaga, Yoshinori Nishiki, Shigenori Mitsushima, Yoshiharu Uchimoto | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 有 | Quantitative Evaluation of the Activity of Low Spin Tetravalent Nickel Ion Site for Oxygen Evolution Reaction. | ACS Applied Energy Materials4(10), 10731-10738, 2021 | 2021 |
| 78 | Kensaku Nagasawa, Taiki Ishida, Hayato Kashiwagi, Yosuke Sano and Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学、三菱マテリアル | 有 | Design and characterization of compact proton exchange membrane water electrolyzer for component evaluation test | International Journal of Hydrogen Energy46(74), 36619-36628, 2021 | 2021 |
| 79 | Ren Yadan, Kota Kashihara, Tomoki Uchiyama, Yuki Orikasa, Toshiki | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 有 | CaMn7O12 Quadruple Perovskite Oxides Proceed by Two-Active-Site Reaction Mechanism for the Oxygen Evolution Reaction | ChemElectroChem 8(23), 4605-4611, 2021 | 2021 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Watanabe, Kentaro Yamamoto, Tsuyoshi Takami, Toshiyuki Matsunaga, Yoshinori Nishiki, Shigenori Mitsushima, Yoshiharu Uchimoto | | | | | |
| 80 | Kensaku Nagasawa, Issei Matsuura, Yoshiyuki Kuroda, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学 | 有 | A Novel Evaluation Method of Powder Electrocatalyst for Gas Evolution Reaction | Electrochemistry90 (1), 017012, 2022 | 2022 |
| 81 | Tsukasa Nagai, Zyun Siroma, Tomoki Akita, Tsutomu Ioroi | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 有 | Observation of Mercury Underpotential Deposition on an Ir Surface using the Electrochemical Quartz Crystal Microbalance Technique | Electroanalysis34(9), 1381-1386, 2022 | 2022 |
| 82 | Hayata Ikeda, Ryuta Misumi, Yudai Kojima, Ashraf Abdel Haleem, Yoshiyuki Kuroda, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学 | 有 | Microscopic high-speed video observation of oxygen bubble generation behavior and effects of anode electrode shape on OER performance in alkaline water electrolysis | International Journal of Hydrogen Energy47(21), 11116-11127, 2022 | 2022 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 83 | Konosuke Watanabe, Kohei Wakuda, Kodai Wani, Takuto Araki, Kensaku Nagasawa, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学 | 有 | Existence of Dissolved Oxygen near Anode Catalyst in Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers | Journal of The Electrochemical Society169 (4), 044515, 2022 | 2022 |
| 84 | Kensaku Nagasawa, Kunpeng Lee, Yu Takenaga, Yoshiyuki Kuroda, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学 | 有 | Time zero Analysis method in activity evaluation of powder electrocatalyst for gas evolution reaction | Electrochemistry 90(4), 047004, 2022 | 2022 |
| 85 | Yadan Ren, Jun Oyama, Tomoki Uchiyama, Yuki Orikasa, Toshiki Watanabe, Kentaro Yamamoto, Tsuyoshi Takami, Yoshinori Nishiki, Shigenori Mitsushima, Yoshiharu Uchimoto | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 有 | State of the Active Site in La1 – xSrxCoO3 – δ Under Oxygen Evolution Reaction Investigated by Total-Reflection Fluorescence X-Ray Absorption Spectroscopy | ACS Applied Energy Materials5(4), 4108-4116, 2022 | 2022 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 86 | 五百蔵勉、五舛目清剛、小島宏一、伊藤博、岸本治夫 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 無 | 産業技術総合研究所における水電解水素製造技術の研究開発 | エネルギー・資源 43(3), 41-47, 2022 | 2022 |
| 87 | 光島重徳, 五百蔵勉, 黒田義之, 長澤兼作, 内山智貴, 折笠有基,井上博史, 樋口栄次,安東航太,三角隆太, 内本喜晴 | 横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、立命館大学、大阪公立大学 | 無 | 水電解用電極及び電極触媒に関する測定法 | 電気化学 90(2), 136-158, 2022 | 2022 |
| 88 | Asharf Abdel Haleem, Jinlei Huyan, Kensaku Nagasawa, Yoshiyuki Kuroda, Yoshinori Nishiki, Akihiro Kato, Takaaki Nakai, Takuto Araki, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学、デノラ・ペルメレック | 有 | Effects of operation and shutdown parameters and electrode materials on the reverse current phenomenon in alkaline water analyzers | Journal of Power Sources535, 231454, 2022 | 2022 |
| 89 | Kota Ando, Yoshiharu Uchimoto, and Takashi Nakajima | 京都大学 | 有 | Correlation between the forming sites of hydrogen bubbles and micro/nano structures on the electrode surface | Journal of Physical Chemistry C126(44), 18988-18993, 2022 | 2022 |
| 90 | Hayata Ikeda, Ryuta Misumi, Yohinori Nishiki, Yoshiyuki | 横浜国立大学、デノラ・ペルメレック | 有 | A dual bubble layer theory for modeling reactant transfer resistance in alkaline water electrolysis | Electrochimica Acta430, 141053, 2022 | 2022 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kuroda, Shigenori Mitsushima | | | | | |
| 91 | Kota Ando, Xiaofeng Wang, Yoshiharu Uchimoto, and Takashi Nakajima | 京都大学 | 有 | Dynamics of hydrogen bubbles formed at a laser-induced microstructure on a Ni electrode during hydrogen evolution reaction | International Journal of Hydrogen Energy47(92), 38930-38938, 2022 | 2022 |
| 92 | Tsutomu Ioroi, Tsukasa Nagai, Zyun Siroma, Kazuaki Yasuda | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 有 | Effect of rotating disk electrode conditions on oxygen evolution reaction activity of Ir nanoparticle catalysts and comparison with membrane and electrode assemblies | International Journal of Hydrogen Energy47(91), 38506-38516, 2022 | 2022 |
| 93 | Naruhisa Tsukase, Konosuke Watanabe, Takuto Araki, Kensaku Nagasawa, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学 | 有 | Novel T-shaped Electrodes for PEM Water Electrolysis and Numerical Evaluation of Three-dimensional Potential Distribution | Electrochemistry 90 (12), 127002-127002, 2022 | 2022 |
| 94 | Hayata Ikeda, Ryuta Misumi, Yohinori Nishiki, Yoshiyuki Kuroda, Shigenori Mitsushima | 横浜国立大学、デノラ・ペルメレック | 有 | tert-Butyl-alcohol-induced breakage of the rigid bubble layer that causes overpotential in the oxygen evolution reaction during alkaline water electrolysis | Electrochimica Acta452, 142283, 2023 | 2023 |
| 95 | 朝岡洸太, 和久田康平, 金 | 横浜国立大学 | 有 | 訓練データ自動生成によるディープラーニングベースの気泡検出(PEM 水電解への応用) | 日本機械学会論文集 89 (919), 22- | 2023 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | 査読の有無 | タイトル | 発表雑誌名巻、号、ページ、年、ステイタス等 | 発表年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 本凌， 諏訪秀樹， 荒木拓人 | | | | 00325-22-00325, 2023 | |

【外部発表】(a) 学会発表・講演

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 小澤佳弘<br>三宅純平<br>宮武健治 | 山梨大学 | アニオン導電性三元共重合体の合成と薄膜物性 | 第 70 回高分子学会年次大会 | 有 | オンライン | 2021.5 |
| 2 | K. Miyatake,<br>K. Otsuji,<br>K. Kakainuma,<br>M. Uchida | University of Yamanashi | Partially Fluorinated Anion Exchange Membranes for Alkaline Fuel Cells and Electrolyzers | Workshop on Ion Exchange Membrane for Energy Applications | 有 | オンライン | 2021.6 |
| 3 | K. Miyatake,<br>K. Otsuji,<br>K. Kakainuma,<br>M. Uchida | University of Yamanashi | Partially Fluorinated Anion Exchange Membranes for Alkaline Fuel Cells and Electrolyzers | European Electrolyzer & Fuel Cell Forum 2021 | 有 | オンライン | 2021.6 |
| 4 | K. Otsuji,<br>N. Yokota,<br>D. A. Tryk,<br>K. Kakinuma,<br>K. Miyatake,<br>M. Uchida | University of Yamanashi, Takahata Precision Co,Ltd | Effect of Water Management for Membranes and Catalyst Layers Using an In-House Developed Polymer Electrolyte on Cell Performance Hysteresis in Anion Exchange Membrane Fuel Cells | 241st ECS Meeting | 有 | オンライン | 2021.1 |
| 5 | 高橋彩夏,<br>大辻寛二,<br>岩瀧敏夫,<br>太農哲朗,<br>柿沼克良,<br>宮武健治,<br>内田 誠 | 山梨大学 | 非貴金属アノード触媒と炭化水素系電解質を用いたアニオン交換膜形水電解セルの性能・耐久性評価 | 電気化学会第 89 回大会 | 有 | オンライン | 2022.3 |
| 6 | 田辺雅子,<br>宮武健治 | 山梨大学 | 嵩高い基を導入したアニオン導電性高分子膜の合成と物性 | 第 71 回高分子討論会 | 有 | 北海道大学 | 2022.9 |
| 7 | M. Uchida,<br>Kanji Otsuji,<br>Yuto Shirase,<br>Donald A. Tryk,<br>Katsuyoshi Kakinuma,<br>Junji Inukai,<br>Kenji Miyatake | University of Yamanashi | Effect of water management in membrane and cathode catalyst layers on suppressing the performance hysteresis phenomenon in anion-exchange membrane fuel cells | 242nd ECS Meeting | 有 | アメリカ | 2022.10 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | G. Shi,<br>T. Tano,<br>D.A. Tryk,<br>M. Yamaguchi,<br>A. Iiyama,<br>M. Uchida,<br>K. Kakinuma | University of Yamanashi | Temperature Dependence of the Alkaline Oxygen Evolution Reaction Catalyzed By Amorphous/Crystalline Ni-Co Oxides | 242nd ECS Meeting | 有 | アメリカ | 2022.10 |
| 9 | 高橋彩夏,<br>岩瀧敏男,<br>太農哲朗,<br>柿沼克良,<br>宮武健治,<br>内田 誠 | 山梨大学 | 非貴金属触媒と炭化水素系電解質を用いたアニオン交換膜型水電解セルの性能・耐久性評価 | 電気化学会第 90 回大会 | 有 | オンライン | 2023.3 |
| 10 | 名取宗一郎<br>高橋 彩夏<br>岩瀧敏夫,<br>宮武健治,<br>朝澤浩一郎,<br>村瀬英昭,<br>内田 誠 | 山梨大学，パナソニックホールディングス | NiFe-LDH 触媒と炭化水素系電解質を用いたアニオン交換膜型水電解セルの性能・耐久性評価 | 電気化学会第 90 回大会 | 有 | オンライン | 2023.3 |
| 11 | 外山 美春、一二三遼祐、稲木 信介、冨田 育義 | 東京工業大学 | アニオン交換膜への応用を目的とした優れたアルカリ耐性を持つテトラアリールホスホニウム塩の合成と応用 | 日本化学会 第 102 春季年会（2022） | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 12 | 外山 美春・一二三遼祐・稲木 信介・冨田 育義 | 東京工業大学 | 高ロバスト性アニオン交換膜への応用を目的としたアルコキシ置換テトラアリールホスホニウム塩の開発と同骨格をもつポリアリーレンの合成と特性評価 | 日本化学会 第 103 春季年会（2023） | 無 | 千葉 | 2022.3 |
| 13 | 重政海都，井上海星，張淳弼，Rayna Fatima，荒木拓人，寺尾卓真，長澤兼作，光島重徳 | 横浜国立大学 | トルエン直接電解水素化プロセスにおける多孔質内物質輸送に関する可視化調査 | 第 58 回日本伝熱シンポジウム | 無 | オンライン | 2021.5 |
| 14 | 杉田雄也、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | 膜－電極接合体を用いたトルエン電解水素化におけるカソード触媒担持量の影響 | ２０２１年電気化学秋季大会 | 無 | 北海道 | 2021.9 |
| 15 | 杉田雄也、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | トルエン電解水素化におけるカソード触媒層内の物質移動解析 | 第 41 回水素エネルギー協会大会 | 無 | 東京 | 2021.11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | トルエン電解水素化電解槽の電流効率の向上 | 2021 年度クリーンエネルギー材料技術フォーラム | 無 | 神奈川 | 2021.11 |
| 17 | 工藤大輝，長澤兼作，黒田義之，光島重徳 | 横浜国立大学 | トルエン直接電解水素化用カソードの親疎水制御による反応選択率向上 | 電気化学会第 89 回大会 | 無 | 大阪 | 2022.3 |
| 18 | 光島重徳、長澤兼作、黒田義之 | 横浜国立大学 | エネルギーキャリアとしてのトルエン電解水素化によるメチルシクロヘキサン合成 | 第 29 回 燃料電池シンポジウム | 無 | 東京 | 2022.5 |
| 19 | 大井翔太、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | トルエン直接電解水素化における膜-電極接合体の熱処理温度と電流効率 | 2022 年電気化学秋季大会 | 無 | 神奈川 | 2022.9 |
| 20 | 光島重徳、寺尾卓真、黒田義之、長澤兼作 | 横浜国立大学 | Wet gas water feed of polymer electrolyte membrane electrolyzer for simultaneous hydrogenation of organic chemical hydride energy carrier and water | 242nd ECS Meeting | 無 | アトランタ | 2022.1 |
| 21 | 大井翔太・長澤兼作・黒田義之・光島重徳 | 横浜国立大学 | トルエン直接電解水素化における随伴水と電流効率の関係 | 第 46 回電解技術討論会 -ソーダ工業技術討論会- | 無 | 大分 | 2022.11 |
| 22 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | 脱炭素社会に向けた水電解および膜電解を応用した電解水素化 | 化学工学会第 1 回エネルギー部会シンポジウム | 無 | 東京 | 2023.1 |
| 23 | 篠原里緒、長澤兼作 、黒田義之 、光島重徳 | 横浜国立大学 | アニオン交換膜を用いたトルエン直接電解水素化における触媒材料 | 電気化学会第 90 回大会 | 無 | 宮城 | 2023.3 |
| 24 | Takeru Katagiri, Junnosuke Okajima, Yuka Iga | Tohoku Univ. | An Experimental Study on Thermodynamic Self-suppression Effect of Cavitation in a Single Hydrofoil with Slit | AJKFED2023, Osaka, No. C000303. | 無 | 大阪 | 2023.7 |
| 25 | Itaru Eguchi, Takashi Ohira, Junnosuke Okajima, Yuka Iga | Tohoku Univ. | Esitimation of Temperature in Unsteady Cavitating Flow Around Triangular Object | AJKFED2023, Osaka, No.A00347. | 無 | 大阪 | 2023.7 |
| 26 | 大場直哉，木津孝太，植田晃仁，中嶋和志，阪井健人，宮川和芳 | 早稲田大学 | 極低温流体数値解析を通じた各種 流体間でのターボポンプ損失特性の比較 | ターボ機械協会 第 88 回 総会講演会 | 無 | 東京 | 2023.5 |
| 27 | Katsuyoshi Fukiba, Kohei Suda, Ibuki Hori, | Shizuoka university, JAXA | Boiling Heat Transfer Enhancement of Piping System for Cryogenic Fuel | The 11th Asia joint Conference on | 無 | 石川 | 2023.3 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Yuki Sakamoto, Hiroaki Kobayashi | | | Propulsion and Power | | | |
| 28 | 中尾圭吾，宮瀬拓海，胡耀文，阿久津元秀，下田泰聖，島田航太郎，坂本勇樹，佐藤哲也 | 早稲田大学，宇宙航空研究開発機構 | LSTM を用いた気液二相流マルチメータの開発に向けた実験研究 | 令和 4 年度宇宙輸送シンポジウム | 無 | 神奈川 | 2023.1 |
| 29 | 須田公平，吹場活佳，堀伊吹，小林弘明，坂本勇樹 | 静岡大学，宇宙航空研究開発機構 | 低熱伝導率縦溝による配管予冷の促進 | 令和 4 年度宇宙輸送シンポジウム | 無 | 神奈川 | 2023.1 |
| 30 | 宮瀬拓海，坂本勇樹，中尾圭吾，阿久津元秀，下田泰聖，島田航太郎，佐藤哲也 | 早稲田大学，宇宙航空研究開発機構 | 気液二相流用静電容量式オール金属複数極板型ボイド率計の開発 | 日本機械学会 第 100 期 流体工学部門 講演会 | 無 | 熊本 | 2022.11 |
| 31 | 中嶋和志， Feng Yixin， Khozaei Mohammad ，宮川和芳 | 早稲田大学 | ベンチュリ管内に生じるキャビテー ション流動不安定現象の予測 | ターボ機械協会 第 87 回（京都）講演会 | 無 | 京都 | 2022.9 |
| 32 | 宮瀬拓海，坂本勇樹，中尾圭吾，阿久津元秀，船木響吾．池嶋隼，佐藤哲也 | 早稲田大学，宇宙航空研究開発機構 | 静電容量型探針式ボイド率計の開発 | 混相流シンポジウム | 無 | オンライン | 2022.8 |
| 33 | Nakao, K., Oinuma, M., Sakano, Y., Miyase, T., Akutsu, M., Sakamoto, Y., Sato, T. | Waseda University, JAXA | Experimental Study of a Flow Multimeter for Gas－Liquid Two-Phase Flow Using Bidirectional Long Short-Term Memory Network | 33rd International Symposium on Space Technology and Science | 無 | 福岡 | 2022.6 |
| 34 | 吹場活佳，亀谷悠作，小林弘明，坂本勇樹，佐藤哲也 | 静岡大学，JAXA，早稲田大学 | 表面の加工による極低温燃料予冷の促進 | 第 61 回航空原動機・宇宙推進講演会 | 無 | 島根 | 2022.3 |
| 35 | 中尾圭吾，阿久津元秀，生沼瑞基，宮瀬拓海，坂本勇樹，佐藤哲也 | 早稲田大学，宇宙航空研究開発機構 | 深層学習を用いた極低温二相流における計測技術の高度化に向けた実験研究 | 令和 3 年度宇宙輸送シンポジウム | 無 | 神奈川 | 2022.1 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 36 | 亀谷悠作，吹場活佳，須田公平 | 静岡大学 | 格子状コーティング伝熱面における開口比と溝深さが沸騰伝熱促進に及ぼす影響 | 令和 3 年度宇宙輸送シンポジウム | 無 | 神奈川 | 2022.1 |
| 37 | 岡島淳之介，羽入田卓，大久保雄真，伊賀由佳 | 東北大学 | キャビティ内温度の直接計測による高温水キャビテーション熱力学的抑制効果の評価 | キャビテーションに関するシンポジウム（第 20 回），仙台， pp. S1-5. | | 仙台 | 2021.12 |
| 38 | Okubo, Y., Iga, Y., Okajima, J. | Tohoku Univ. | Temperature Measurement inside Unsteady Cavitation in High Temperature Water | Proc. Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) , Sendai, pp. 836-837. | ー | 仙台 | 2021.10 |
| 39 | 宮澤薫一<br>朝原誠<br>宮坂武志<br>長井拓郎<br>木本浩二<br>田中優実 | 東京理科大学<br>岐阜大学<br>(国) 物質・材料研究機構 | Surface atomic structural analysis of nickel plating films reacted with methane at high temperature using HRTEM-EELS | 6th International Conference on Catalysis and Chemical Engineering, CCE-2022, 22-26 February 2022 (オンライン招待講演) | 無 | San Francisco, CA, USA | 2022.2 |
| 40 | 中川浩行 | 京都大学 | メタン分解プロセスの操作条件が水素回収率に及ぼす影響の検討 | 化学工学会第 52 回秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 41 | 中川浩行 | 京都大学 | アルミナ担持鉄触媒を用いたメタン分解による水素生成の速度解析 | 化学工学会第 53 回秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 42 | 恒見 清孝 | 産業技術総合研究所 | CO2 フリー水素製造に伴う固体炭素のタイヤ利用における大気拡散解析 | 日本リスク学会第 34 回年次大会 | 無 | オンライン | 2021.11 |
| 43 | 宮浦拓人 | IHI | メタン熱分解反応による固体炭素の回収を伴う水素製造技術の開発 | 第 26 回動力・エネルギー技術シンポジウム | 無 | 佐賀県佐賀市 | 2022.7 |
| 44 | 倉本 浩司 | 産業技術総合研究所 | Performance and deactivation of Al-Fe mixed oxides for catalytic methane decomposition to produce COx-free H2 and fibrous carbon | 20th International Conference in Carbon Dioxide Utilization | ー | Bari, Italy | 2022.7 |
| 45 | Kensuke SATO、Masayasu SHIMURA、 Yuki | 国立大学法人東京工業大学 | LARGE EDDY SIMULATION OF STEAM-DILUTED O2/H2 TURBLENT NON-PREMIXED | The Second Asian Conference on | 無 | オンライン | 2021.10 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MINAMOTO 、Mamoru TANAHASHI | | FLAME IN A MULTI-CLUSTER BURNER | Thermal Sciences、2nd ACTS | | | |
| 46 | Hazim Shehab、Yong Fan 、Norihiko Iki 、Osamu Kurata、Hirohide Furutani | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | Investigation on Steam Dilution Effects on Non-Premixed Hydrogen-Oxygen Impinged Jet Flame | 第４９回日本ガスタービン学会定期講演会 | 無 | オンライン | 2021.10 |
| 47 | 宮下竜太、志村祐康、店橋護 | 国立大学法人東京工業大学 | 酸素水素交差噴流非予混合火炎の安定燃焼特性 | 第 59 回燃焼シンポジウム | 無 | オンライン | 2021.11 |
| 48 | 冨澤陽亮、 店橋護、 源勇気、 志村祐康 | 国立大学法人東京工業大学 | 衝突流に形成される水蒸気希釈酸素水素浮き上がり火炎の燃焼特性 | 第 59 回燃焼シンポジウム | 無 | オンライン | 2021.11 |
| 49 | Mamoru Tanahashi | 国立大学法人東京工業大学 | DNS of steam-diluted hydrogen/oxygen multi-cluster burner | The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2021) | 有 | オンライン | 2021.12 |
| 50 | Hazim Shehab、Yong Fan 、Norihiko Iki 、Osamu Kurata、Taku Tsujimura 、Hirohide Furutani | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | Structure of Non-Premixed Hydrogen-Oxygen Impinged Jet Flame under Elevated Pressure and Flow Rates | The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2021) | 有 | オンライン | 2021.12 |
| 51 | 渡邉泰、 高橋徹、鈴木晃純 | 一般財団法人電力中央研究所 | Modelica による酸素水素燃焼タービン発電システムの 1D シミュレーション | 1DCAE・MBD シンポジウム 2021 | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 52 | 青木 里紗 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 酸素水素燃焼タービン関連材料技術 | 日本鉄鋼協会自主フォーラム第 4 回研究会 | 有 | 東京 | 2023.7 |
| 53 | Mamoru Tanahashi | 国立大学法人東京工業大学 | Investigation of Steam-Diluted Hydrogen/Oxygen Lifted Flame Formed with Cross Jets in a Multi-Cluster Burner | 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) & 8th Asian Pacific Congress on Computational | 有 | オンライン | 2022.7 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Mechanics (APCOM-VIII) | | | |
| 54 | Yong Fan、Norihiko Iki、Osamu Kurata | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | Recent AIST topics of gas turbine for hydrogen energy technology | TCP on Clean and Efficient Combustion、44th Task Leaders Meeting | 無 | 仙台 | 2022.8 |
| 55 | Mohammed Shahien、Kentaro Shinoda、Masato Suzuki、Yong Fan、Norihiko Iki | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | Ceramic coatings as an outstanding prospective towards environmental barrier layers in Hydrogen-Oxygen Combustion Gas Turbine | 第 116 回 溶射学会全国講演大会 | 無 | 刈谷 | 2022.11 |
| 56 | Hazim Shehab、Yong Fan、Norihiko Iki、Osamu Kurata、Hirohide Furutani、Taku Tsujimura | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | Impinging angle effects of the combustion efficiency of non-premixed hydrogen-oxygen impinged jet flame | 第 60 回 燃焼シンポジウム | 無 | 東京 | 2022.11 |
| 57 | Yutaka Watanabe、Toru Takahashi、Kojun Suzuki | 一般財団法人電力中央研究所 | Dynamic Simulation of an Oxygen-Hydrogen Combustion Turbine System Using Modelica | Asian Modelica Conference 2022 | 有 | 東京 | 2022.11 |
| 58 | 青木里紗、今井潔、鹿目浩正、窪谷悟 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 酸素水素燃焼タービン用 Ni 基合金の水蒸気酸化挙動に及ぼす水蒸気分圧の影響 | 日本金属学会2023年春期講演大会 | 無 | 東京 | 2023.3 |
| 59 | Hazim Shehab、Yong Fan、Norihiko Iki、Osamu Kurata、Hirohide Furutani、Taku Tsujimura | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | Impact of the impingement position on the structure of non-premixed hydrogen-oxygen jet flames | 14th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2023) | 有 | Kaoshung | 2023.5 |
| 60 | Yutaka Watanabe、Toru Takahashi、Kojun Suzuki | 一般財団法人電力中央研究所 | Effect of load change operation on an oxygen-hydrogen combustion turbine system | International Conference on Power Engineering - 2023 (ICOPE-2023) | 有 | 京都 | 2023.5 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 61 | 犬塚 理子 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | ＳＯＥＣセパレータ用ステンレス鋼の大気／水素＋水蒸気二相環境における高温酸化挙動に及ぼすＣｒ飛散抑制コーティングの影響 | 日本金属学会２０２１年秋期（第１６９回）講演大会・講演要旨集 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 62 | 川原 浩一 | 一般財団法人ファインセラミックスセンター | ＬＳＣＦ／ＧＤＣ／ＹＳＺ界面におけるＳｒＺｒＯ３形成に及ぼすＬＳＣＦへのＴｉ添加の影響 | 日本セラミックス協会２０２２年年会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 63 | 小林 昌平 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 固体酸化物形電解セル用インターコネクタの高耐久化 | 電気化学会第８９回大会 | 無 | 大阪 | 2022.3 |
| 64 | 犬塚理子 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | High temperature oxidation behavior of SOEC separator steels with Cr vaporization suppressive coatings under air ／ H2+H2O dual atmosphere | International Symposium on High-temperature Oxidation and Corrosion 2022 (ISHOC-2022) | 無 | 香川 | 2022.10 |
| 65 | 嘉藤徹 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | ＳＯＥＣ試験システムと円板型ＳＯＥＣの開発 | 第３１回ＳＯＦＣ研究発表会 | 無 | 東京 | 2022.12 |
| 66 | 川田康貴 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | ＳＯＥＣ配管・セパレータ材料の大気／水素＋水蒸気二相環境における高温酸化挙動に及ぼす水素水蒸気比率の影響 | 日本金属学会２０２３年春期（第１７２回）講演大会 | 無 | 東京 | 2023.3 |
| 67 | 侯召民 | RIKEN CSRS | Innovative Catalysts for Efficient Use of Natural Resources | Hope for the Future - RIKEN Symposium on Sustainable Resources Science | 無 | オンライン | 2021.05 |
| 68 | Yuko Harayama | RIKEN | Research and Development 20 for clean Energy Technologies | 3rd Research and Development 20 for Clean Energy Technologies (RD20) | 無 | オンライン | 2021.10 |
| 69 | Katushi Fujii et al | RIKEN RAP | System and Device Design for Independent and Self-Controlled Energy Supply System with Solar Cell Energy Source | Materials for Sustainable Development Conference 2022 Fall Meeting | 有 | Barcelona, Spain | 2022.10 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 70 | 藤村樹，平井綾香，國本雅宏，福中康博，伊藤博，本間敬之 | 早稲田大学、産業技術総合研究所 | Development of Direct Fabrication Process of Metal Layer on Anion Exchange Membrane Using Electroless Deposition Process | Interfinish2020 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 71 | 本多敦，松島永佳，上田幹人，伊藤博 | 北海道大学、産業技術総合研究所 | 流動下の KOH 溶液中における SUS304L 鋼の腐食挙動 | 第 144 回表面技術協会講演大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 72 | 本多敦，松島永佳，上田幹人，伊藤博 | 北海道大学、産業技術総合研究所 | KOH 溶液における酸素発生反応に伴うステンレス鋼表面での Ni の溶解挙動 | 第 145 回表面技術協会講演大会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 73 | 藤村樹，佐久間翔吾，平井綾香，石橋勇輝，國本雅宏，福中康博，伊藤博，本間敬之 | 早稲田大学、産業技術総合研究所 | 電解・無電解法によるアニオン交換膜型水電解プロセス用触媒電極の形成 | 電気化学会第 89 回大会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 74 | 伊藤博，大橋真智 | 産業技術総合研究所 | アニオン交換膜水電解における両極過電圧の分離に関する検討 | 電気化学会第 89 回大会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 75 | 本多敦，松島永佳，上田幹人，伊藤博 | 北海道大学、産業技術総合研究所 | 高濃度 KOH 溶液中での酸素発生電極としての SUS310S に対する撹拌の効果 | 第 146 回表面技術協会講演大会 | 無 | 埼玉 | 2022.9 |
| 76 | 広瀬陸，王瑞祥，石田政義，大橋真智，伊藤博 | 筑波大学、産業技術総合研究所 | アニオン交換膜水電解におけるカソード電極構造に関する検討 | 第 42 回水素エネルギー協会大会 | 無 | 東京 | 2022.11 |
| 77 | Hafis Pratama REndra Graha、宮西 将史、黒木秀記、山口 猛央 | 東京工業大学 | Thermal conversion and durability analysis of convertible anion exchange membrane for solid alkaline water electrolysis application | 日本膜学会第 43 年会 | 無 | オンライン | 2021.6 |
| 78 | 菅原 勇貴、鎌田慶吾、林 愛理、伊藤 満、濱嵜 容丞、山口 猛央 | 東京工業大学、防衛大学校 | 鉄系酸化物の酸素発生触媒作用における結晶構造効果の解明 | 化学工学会第 52 回秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 79 | 菅原 勇貴、上野里美、鎌田 慶吾、山口 猛央 | 東京工業大学 | データを活用した鉄系複合酸化物触媒の水電解アノード反応活性に対する普遍的構造因子の解明 | 化学工学会第 87 年会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 80 | 宮西 将史、黒木秀記、Roby Soni、榊原 朱夏、山口猛央 | 東京工業大学 | Development of durable ether free anion exchange membranes and their application to alkaline fuel cell and alkaline water electrolyzer | The 13th Conference of the Aseanian Membrane Society | 有 | Nanyang Technolog | 2022.7 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | ical University, Singapore | |
| 81 | 宮西 将史、山口猛央 | 東京工業大学 | 固体アルカリ水電解用ポリフルオレン系アニオン伝導膜の設計開発 | 第 71 回高分子討論会 | 無 | 北海道 | 2022.9 |
| 82 | 菅原 勇貴、上野里美、鎌田 慶吾、山口 猛央 | 東京工業大学 | 鉄系複合酸化物の結晶構造に基づく水電解アノード反応触媒の設計論の提案 | 第 130 回触媒討論会 | 無 | 富山 | 2022.9 |
| 83 | 菅原 勇貴、鎌田慶吾、松田 蒼依、山口 猛央 | 東京工業大学 | アルカリ水電解のアノード反応用鉄系リン酸化物型電極触媒の開発 | 化学工学会第 88 年会 | 無 | 東京 | 2023.3 |
| 84 | 黒木 秀記，Narayanaru Sreekanth，宮西 将史，Gopinathan M Anilkumar，山口 猛央 | 東京工業大学、ノリタケ | ポリフルオレン系アニオン伝導電解質を用いた膜電極接合体の水電解起動停止耐久性解析 | 化学工学会第 88 年会 | 無 | 東京 | 2023.3 |
| 85 | 菅原 勇貴、鎌田慶吾、松田 蒼依、山口 猛央 | 東京工業大学 | 鉄近傍の原子配置に基づく鉄系リン酸化物型酸素発生反応用触媒の設計開発 | 電気化学会第 90 回大会 | 無 | 宮城 | 2023.3 |
| 86 | Shoji Miyanishi, Roby Soni, Hidenori Kuroki, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学 | Development of durable ether free fluorene-based membranes for anion exchange membrane water electrolyzer | ICOM2023 | 有 | 千葉 | 2023.7 |
| 87 | Hidenori Kuroki, Shoji Miyanishi, Sreekanth Narayanaru, Roby Soni, Gopinathan M. Anilkumar, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学、ノリタケ | Highly Durable Membrane – Electrode-Assemblies Using High Mw and Ether-Free Polyfluorene-Based Electrolytes for Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer | 244th ECS Meeting | 有 | Gothenburg, Sweden | 2023.10 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 88 | Yuuki Sugawara, Keigo Kamata, Aoi Matsuda, Takeo Yamaguchi | 東京工業大学 | Iron Phosphates as Highly Efficient Precatalysts for Oxygen Evolution Reaction and Their in Situ Electrochemical Conversion | 244th ECS Meeting | 有 | Gothenburg, Sweden | 2023.10 |
| 89 | 中辻颯、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Fe ﾄﾞｰﾌﾟ LiNiO2 の酸素発生活性とNi,Feの電子状態 | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 90 | 任亜丹、堀口知也、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本 健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Quantitative Evaluation of the Activity of Tetravalent Nickel Ion Site at LiNi0.5Mn1.5O4 spinel for Oxygen Evolution Reaction | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 91 | 内山智貴、柏原浩大、折笠有基、渡邊 稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 異種元素ﾄﾞｰﾌﾟ CaMn7O12 の酸素発生活性と活性ｻｲﾄ構造の関係 | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 92 | 中辻颯、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Fe ﾄﾞｰﾌﾟ LiNiO2 の酸素発生活性とNi,Feの電子状態 | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 93 | 任亜丹、堀口知也、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本 健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Quantitative Evaluation of the Activity of Tetravalent Nickel Ion Site at LiNi0.5Mn1.5O4 spinel for Oxygen Evolution Reaction | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 94 | 内山智貴、柏原浩大、折笠有基、渡邊　稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 異種元素ﾄﾞｰﾌﾟ CaMn7O12 の酸素発生活性と活性ｻｲﾄ構造の関係 | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 95 | 中辻颯、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Fe ﾄﾞｰﾌﾟ LiNiO2 の酸素発生活性とNi,Fe の電子状態 | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 96 | 任亜丹、堀口知也、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本 健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Quantitative Evaluation of the Activity of Tetravalent Nickel Ion Site at LiNi0.5Mn1.5O4 spinel for Oxygen Evolution Reaction | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 97 | 内山智貴、柏原浩大、折笠有基、渡邊　稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 異種元素ﾄﾞｰﾌﾟ CaMn7O12 の酸素発生活性と活性ｻｲﾄ構造の関係 | 第３０回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2021.8 |
| 98 | 池田隼太、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解における酸素発生能と酸素気泡生成挙動に対するアノード電極形状の影響 | 化学工学会第５２回秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 99 | 黒田義之 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解用アノードの変動電源における耐久性 | 第３２回電解プロセス研究会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 100 | 石田泰基、長澤兼作、佐野陽祐、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学、三菱マテリアル | 固体高分子形水電解における多孔質移動層の圧縮が及ぼす分極への影響 | ２０２１年電気化学秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 101 | 永井つかさ、城間純、秋田知樹、五百蔵勉 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | EQCM による Hg の Ir 上への析出挙動の観察 | ２０２１年電気化学会秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 102 | 五百蔵勉、永井つかさ、秋田知樹、安田和明 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | PEM 型水電解触媒活性のﾊｰﾌｾﾙ評価 | ２０２１年電気化学会秋季大会 | 無 | オンライン | 2021.9 |
| 103 | 三角隆太、池田隼太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解における酸素・水素気泡の生成挙動とガス発生能との関係 | 日本機械学会 第９９期 流体工学部門 講演会 | 無 | オンライン | 2021.11 |
| 104 | 円城寺勇斗、アシュラフ アブドルハリム、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | 逆電流を考慮した加速劣化試験によるアルカリ水電解用Ｎｉ基板系アノードの劣化機構評価 | 第４１回水素エネルギー協会大会 | 無 | オンライン | 2021.11 |
| 105 | 池田隼太、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解における酸素発生能に関連する物質移動モデルの検討 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 106 | 松川和幸、池田隼太、黒田義之、三角隆太、俵山博匡、奥野一樹、東野孝浩、光島重徳 | 横浜国立大学、住友電工 | 振動解析を用いたアルカリ水電解用アノードの気泡脱離促進に向けた影響因子の評価 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 107 | 小沢遼、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | 水電解における水素ウルトラファインバブルの生成とその物質輸送への影響 | 第４１回水素エネルギー協会大会 | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 108 | 趙豪、堀口知也、任亜丹、内山智貴、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Quantitative Evaluation of the Activity of LiNi0.5Mn1.5O4 spinel for Oxygen Evolution Reaction | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 109 | 内山智貴、柏原浩大、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Sr,Cu,Al ﾄﾞｰﾌﾟ CaMn7O12 の酸素発生活性と活性ｻｲﾄ構造の関係 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 110 | 任亜丹、内山智貴、藤田光晴、有馬一慶、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利 | 京都大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 固体高分子形水電解ｱﾉｰﾄﾞ用酸化ｲﾘｼﾞｳﾑ触媒の活性支配因子と劣化機構 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 之、黒田義之、光島重徳、内本喜晴 | | | | | | |
| 111 | 中辻颯、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Fe ﾄﾞｰﾌﾟ LiNiO2 の酸素発生活性とNi,Feの電子状態 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 112 | 内山智貴、柏原浩大、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Sr,Cu,Al ﾄﾞｰﾌﾟ CaMn7O12 の酸素発生活性と活性ｻｲﾄ構造の関係 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 113 | 中辻颯、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Fe ﾄﾞｰﾌﾟ LiNiO2 の酸素発生活性とNi,Feの電子状態 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 114 | 趙豪、堀口知也、任亜丹、内山智貴、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Quantitative Evaluation of the Activity of LiNi0.5Mn1.5O4 spinel for Oxygen Evolution Reaction | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 115 | 内山智貴、柏原浩大、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Sr,Cu,Al ﾄﾞｰﾌﾟ CaMn7O12 の酸素発生活性と活性ｻｲﾄ構造の関係 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 116 | 任亜丹、内山智貴、藤田光晴、有馬一慶、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、黒田義之、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | 固体高分子形水電解ｱﾉｰﾄﾞ用酸化ｲﾘｼﾞｳﾑ触媒の活性支配因子と劣化機構 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 117 | 中辻颯、内山智貴、折笠有基、渡邊稔樹、山本健太郎、高見剛、松永利之、錦善則、光島重徳、内本喜晴 | 京都大学、立命館大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Fe ﾄﾞｰﾌﾟ LiNiO2 の酸素発生活性とNi,Feの電子状態 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 118 | 樋口栄次，外山夏海，知久昌信，井上博史 | 公立大学法人大阪 | アルカリ水電解における金属酸化物電極の劣化挙動解析 | 第４５回電解技術討論会（オンライン）、電気化学会電解科学技術委員会主催 | 無 | オンライン | 2021.12 |
| 119 | 趙　豪、堀口　知也、任　亜丹、内山智貴、渡邊　稔樹、山本　健太郎、高見　剛、松永　利之、錦　善則、光島重徳、内本　喜晴 | 京都大学、デノラ・ペルメレック、横浜国立大学 | Quantitative Evaluation of the Activity of Nickel Ion Site of LiNi0.5Mn1.5O4 spinel for Oxygen Evolution Reaction | 242nd ECS Meeting | 無 | アトランタ | 2022.1 |
| 120 | 北島大輔，　池田隼太，　三角隆太，　光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解における水素気泡生成挙動と水素発生能の関係 | 第２４回化学工学会学生発表会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 121 | 竹永優　、李坤朋　、長澤兼作　、黒田義之　、光島重徳 | 横浜国立大学 | ガス発生反応用の電極触媒材料の活性評価法 | 電気化学会第８９回大会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 122 | 五百蔵勉、永井つかさ、城間純、安田和明 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | ＰＥＭ型水電解セルの劣化解析 | 電気化学会第８９回大会 | 無 | オンライン | 2022.3 |
| 123 | 光島重徳、アシュラフ　ハリム、長澤兼作、黒田義之、加藤昭博、ザイナルアワルディン、錦善則、荒木　拓人 | 横浜国立大学、デノラ・ペルメレック | Leak Current Analysis of Stop Operation and its Modeling for the Development of Bipolar Alkaline Water Electrolyzer Electrodes | 241st ECS meeting | 無 | バンクーバー | 2022.5 |
| 124 | 内山　智貴、任　亜丹、藤田　光晴、有馬　一慶、渡邊　稔樹、山本　健太郎、高見　剛、松永　利之、黒田　義之、光 | 京都大学、横浜国立大学 | The activity mechanism study of iridium oxides for PEM-type water electrolysis using operando O K-edge XAS spectroscopy | 18th International Conference on X-Ray Absorption and Fine Structure HYBRID | 無 | シドニー（豪） | 2022.7 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 島 重徳、内本 喜晴 | | | | | | |
| 125 | 樋口栄次，外山夏海，知久昌信，井上博史 | 公立大学法人大阪 | アルカリ水電解における金属酸化物カソードの活性および耐久性評価 | 第３１回電極材料研究会 | 無 | オンライン | 2022.8 |
| 126 | 石田泰基、長澤兼作、佐野陽祐、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | 多孔質移動層の孔径と厚さが固体高分子水電解の分極に及ぼす影響 | 2022 年 電気化学秋季大会 | 無 | 神奈川 | 2022.9 |
| 127 | 円城寺勇斗、アシュラフ アブドルハリム、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解における起動停止模擬加速劣化試験のパラメータ設定 | 2022 年 電気化学秋季大会 | 無 | 神奈川 | 2022.9 |
| 128 | 五百蔵勉、永井つかさ、城間純、秋田知樹、安田和明 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | PEM 水電解セル加速劣化試験法の開発 | 2022 年電気化学会秋季大会 | 無 | 神奈川 | 2022.9 |
| 129 | 樋口栄次，外山夏海，知久昌信，井上博史 | 公立大学法人大阪 | アルカリ水電解用金属酸化物カソードの耐久性に及ぼす中間層の影響 | ２０２２年電気化学秋季大会 | 無 | 神奈川 | 2022.9 |
| 130 | 樋口栄次，井上博史 | 公立大学法人大阪 | アルカリ水電解用金属酸化物カソードの耐久性向上のための劣化要因の解明 | 第３３回電解プロセス研究会 | 無 | オンライン | 2022.9 |
| 131 | 光島重徳、アシュラフ ハリム、李坤朋、長澤兼作、黒田義之 | 横浜国立大学 | REQUIREMENTS FOR RENEWABLE ELECTRICITY DRIVEN WATER ELECTROLYSIS AND ELECTROCHEMICAL METHODS TO DEVELOP THEIR MATERIALS | 第9回 国際燃料電池ワークショップ 2022(IFCW2022) | 無 | 山梨 | 2022.11 |
| 132 | ハッサン・アシュラフ、フヤン・ジンレイ、長澤兼作、黒田義之、錦善則、加藤昭博、中井貴章、荒木拓人、光島重徳 | 横浜国立大学、デノラ・ペルメレック | Reverse Current Phenomenon and Accelerated Durability Test of Alkaline Water Electrolyzers under Dynamic Operation | 第9回 国際燃料電池ワークショップ 2022(IFCW2022) | 無 | 山梨 | 2022.11 |
| 133 | 北島大輔、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解における電流密度ごとの気泡生成挙動と水素発生能の関係 | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |
| 134 | 石田 泰基・長澤兼作・佐野 陽祐・黒田 義之・光島重徳 | 横浜国立大学、三菱マテリアル | 固体高分子水電解の多孔質移動層の性能への影響と物質移動および電子伝導解析 | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 135 | 円城寺 勇斗・アシュラフ アブドル ハリム・長澤 兼作・黒田 義之・光島 重徳 | 横浜国立大学 | 起動停止条件下におけるアルカリ水電解用 Ni 基板アノードの劣化メカニズム | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |
| 136 | 松川 和幸・黒田義之・長澤 兼作・東野 孝浩・奥野一樹・俵山 博匡・細江 晃久・光島重徳 | 横浜国立大学、住友電工 | Ni 発泡体を電極としたアルカリ水電解槽の性能評価と解析 | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |
| 137 | 内山 智貴、任 亜丹、藤田 光晴、有馬 一慶、渡邊 稔樹、山本 健太郎、高見 剛、松永 利之、黒田 義之、光島 重徳、内本 喜晴 | 京都大学、横浜国立大学 | 固体高分子形水電解用酸化イリジウム触媒の活性と電子構造 | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |
| 138 | 内山 智貴、任 亜丹、藤田 光晴、有馬 一慶、渡邊 稔樹、山本 健太郎、高見 剛、松永 利之、黒田 義之、光島 重徳、内本 喜晴 | 京都大学、横浜国立大学 | 固体高分子形水電解用酸化イリジウム触媒の活性に及ぼす電解質アニオンの影響 | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |
| 139 | 樋口栄次，外山夏海，知久昌信，井上博史 | 公立大学法人大阪 | アルカリ水電解の起動停止サイクルに伴う金属酸化物カソードの耐久性 | 第 46 回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | 無 | オンライン | 2022.11 |
| 140 | Y. Nishio, R. Misumi, S. Mitsushima | 横浜国立大学 | Effect of Electrolyte Circulation Flow Rate on Cell Overvoltage of Alkaline Water Electrolysis | YNU International Symposium 2022 | 無 | オンライン | 2022.12 |
| 141 | 安東航太，Xiaofeng Wang，内本喜晴，中嶋隆 | 京都大学 | レーザーで作成した電極表面マイクロ構造から発生する水素バブルのダイナミクス | レーザー学会学術講演会 43 回年次大会 | 無 | 愛知 | 2023.1 |
| 142 | 曽田圭亮，安東航太，内本喜晴，中嶋隆 | 京都大学 | 電極面のレーザー加工による電解効率の向上 | レーザー学会学術講演会 43 回年次大会 | 無 | 愛知 | 2023.1 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会 | 査読の有無 | 開催地 | 発表月 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 143 | 西尾友希、北島大輔、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解槽のセル過電圧に対する電解液循環流量の影響 | 第 25 回化学工学会学生発表会 | 無 | オンライン | 2023.3 |
| 144 | 新美光、北島大輔、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解の電極表面における酸素・水素気泡の成長速度の画像解析による定量化 | 第 25 回化学工学会学生発表会 | 無 | オンライン | 2023.3 |
| 145 | 永井つかさ、城間純、秋田知樹、五百蔵勉 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | スパッタ法で作製した Ir 電極への Hg-UPD/電析挙動の観察 | 電気化学会第 9 0 回大会 | 無 | 宮城 | 2023.3 |
| 146 | 五百蔵勉、永井つかさ、城間純、秋田知樹、安田和明 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | PEM 水電解セルの劣化解析 | 電気化学会第 90 回大会 | 無 | 宮城 | 2023.3 |
| 147 | 曽田圭亮，安東航太，内本喜晴，中嶋隆 | 京都大学 | 水電解用電極面のレーザー加工による電解効率向上 | 応用物理学会第 70 回春季学術講演会 | 無 | オンライン | 2023.3 |

( b )ポスター発表

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 学会名称 | 査読の有無 | 開催地 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | A. M. A. Mahmoud, K. Miyatake | University of Yamanashi | Optimization of Ammonium Head Groups in Partially Fluorinated Anion Exchange Membranes for Alkaline Fuel Cells | 241st ECS Meeting | 有 | カナダ（オンライン） |
| 2 | 小澤佳弘, 宮武健治 | 山梨大学 | アニオン導電性三元共重合体：脂肪族側鎖が膜物性に及ぼす効果 | 第 71 回高分子学会年次大会 | 有 | オンライン |
| 3 | 永原慶二郎, 宮武健治 | 山梨大学 | 多孔質基材によるアニオン導電性高分子膜の補強効果 | 第 71 回高分子討論会 | 有 | 北海道大学 |
| 4 | Y. Ozawa, K. Miyatake | 山梨大学 | Partially-Fluorinated Anion-Conductive Terpolymers: Effect of Aliphatic Side Chains on Membrane Properties | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |
| 5 | K. Nagahara, K. Miyatake | 山梨大学 | Reinforcement of Anion Exchange Membranes with Porous Polyethylene Substrates | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |
| 6 | M. Tanabe, K. Miyatake | 山梨大学 | Synthesis and Properties of Anion Conductive Membranes Containing Bulky Groups | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |
| 7 | A. M. A. Mahmoud, K. Miyatake | 山梨大学 | Towards Durable Anion Exchange Membrane for Fuel Cell Applications | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |
| 8 | S. Takahashi, T. Iwataki, T. Tano, T. Asakawa, K. Kakinuma, K. Miyatake, M. Uchida | University of Yamanashi | Performance and Durability of Membrane Electrode Assemblies Using a Non-Precious Metal Anode-Catalyst and a Hydrocarbon-Based Electrolyte for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |
| 9 | K. Miyatake, J. Inukai, K. Kakinuma, M. Uchida | University of Yamanashi | Robust Anion Exchange Membranes and Their Applications to Alkaline Fuel Cells and Water Electrolyzers | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | N. Yokota, Y. Takahashi, K. Shoho, T. Matsue, N. Watanabe, K. Miyatake | University of Yamanashi, Takahata Precision Co., Ltd, | Research and Development of Robust Anion Exchange Membranes for Water Electrolysis | The 9th International Fuel Cell Workshop 2022 | 有 | 山梨 |
| 11 | 一二三 遼祐・稲木 信介・冨田 育義 | 東京工業大学 | ホスフィンスルフィドを活性化基とする芳香族求核置換反応に基づく芳香族ポリエーテルの合成とホスホニウム型高分子電解質への展開 | 第 71 回高分子学会年次大会 | 無 | オンライン |
| 12 | 一二三 遼祐・池田 圭輔・稲木信介・冨田 育義 | 東京工業大学 | アラインの挿入反応を用いる嵩高いテトラアリールホスホニウム塩の合成と<br>その高分子電解質への応用 | 第 11 回 JACI/GSC シンポジウム | 無 | オンライン |
| 13 | 外山 美春・一二三 遼祐・稲木信介・冨田 育義 | 東京工業大学 | 高ロバスト性アニオン交換膜材料への応用を目的とする優れたアルカリ耐性をもつテトラアリールホスホニウム塩および同骨格をもつ高分子の合成 | 71 回高分子討論会 | 無 | 北海道 |
| 14 | 外山 美春・一二三 遼祐・稲木信介・冨田 育義 | 東京工業大学 | 高ロバスト性アニオン交換膜材料への応用を目的とする優れたアルカリ耐性をもつテトラアリールホスホニウム塩および同骨格をもつ高分子の合成 | 高分子学会関東支部第 7 回神奈川地区講演会 | 無 | 神奈川 |
| 15 | 一二三遼祐・王異升・外山美春・冨田育義 | 東京工業大学 | 嵩高いポリ（アリーレンホスフィン）の合成と高ロバスト性アニオン交換膜への応用を志向したホスホニウム型高分子電解質への展開 | 第 72 回高分子学会年次大会 | 無 | 群馬 |
| 16 | 杉田雄也、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | The effect of cathode catalyst loading for toluene direct electro – hydrogenation using membrane electrolyzer | 13th International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells | 無 | オンライン |
| 17 | 川原 浩一 | 一般財団法人ファインセラミックスセンター | ＳＯＥＣ・ＳＯＦＣの酸素極界面構造に及ぼすＴｉＯ２添加の効果、雰囲気制御下における界面由来抵抗評価技術、ＦＩＢ－ＳＥＭを用いた三次元構築 | ２０２１年度ＪＦＣＣ研究成果発表会 | 無 | オンライン |
| 18 | 川原 浩一 | 一般財団法人ファインセラミックスセンター | ＬａＣｏＯ３系材料を用いた電極／中間層／電解質界面の微細構造制御、ＳＯＥＣ／ＳＯＦＣ用電極材料の試作と特性評価、雰囲気制御下における界面由来抵抗評価技術、ＦＩＢ－ＳＥＭを用いた三次元構築 | ２０２２年度ＪＦＣＣ研究成果発表会 | 無 | 愛知 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 19 | 川原 浩一 | 一般財団法人ファインセラミックスセンター | ＬＳＣＦ／ＧＤＣ／ＹＳＺ界面でのＳｒＺｒＯ３形成抑制技術 | 第９回ＦＣ－Ｃｕｂｉｃオープンシンポジウム | 無 | ハイブリッド |
| 20 | 秋本 実乃里、黒木 秀記、杉田佳之、G.M. Anilkumar，田巻 孝敬、山口猛央 | 東京工業大学、ノリタケ | ファイバー状Irナノ粒子連結触媒を用いた固体高分子形水電解用触媒層の構造制御 | FCDIC 第 28 回燃料電池シンポジウム | 無 | オンライン |
| 21 | 秋本 実乃里、黒木 秀記、杉田佳之、G.M. Anilkumar，田巻 孝敬、山口猛央 | 東京工業大学、ノリタケ | 担体フリーファイバー状金属ナノ粒子連結触媒の開発 | 化学工学会第 52 回秋季大会 | 無 | オンライン |
| 22 | 孫福 幹太、菅原勇貴、山口 猛央 | 東京工業大学 | 鉄系 MOF 型電極触媒の酸素発生反応活性における鉄の構造効果の解明 | FCDIC 第 29 回燃料電池シンポジウム | 無 | 東京 |
| 23 | 佐々木 健人、黒木 秀記、山口猛央 | 東京工業大学 | 固体高分子形水電解の高耐久化に向けたIrナノ粒子連結触媒の酸化状態の制御 | FCDIC 第 29 回燃料電池シンポジウム | 無 | 東京 |
| 24 | 孫福 幹太、菅原勇貴、山口 猛央 | 東京工業大学 | アルカリ水電解における鉄系 MOF の活性評価、構造効果の解明 | 化学工学会第 53 回秋季大会 | 無 | オンライン |
| 25 | 孫福 幹太、菅原勇貴、山口 猛央 | 東京工業大学 | アルカリ水電解における鉄系 MOF 触媒の構造効果の解明 | 化学工学会第 88 年会 | 無 | 東京 |
| 26 | 菅原 勇貴, 鎌田慶吾, 上野 里美, 石川 敦之, 林 愛理, 伊藤満, 濱嵜 容丞, 館山 佳尚, 山口猛央 | 東京工業大学 | 結晶構造に基づく電気化学的水素製造用卑金属触媒の効率設計 | 第 12 回 JACI/GSC シンポジウム | 無 | 東京 |
| 27 | 円城寺勇斗、アブドルハリム アシュラフ, 長澤兼作、黒 | 横浜国立大学 | Degradation of Ni-Co coated Ni oxygen evolution electrodes in alkaline water electrolysis using | 240th ECS Meeting | 無 | オンライン |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 田義之、光島重徳 | | accelerated durability test based on reverse current phenomenon | | | |
| 28 | 松川、池田、黒田、三角、真嶋、俵山、奥野、東野、光島 | 横浜国立大学、住友電工 | Evaluation of Factors for Promoting Bubble Detachment from Anodes for Alkaline Water Electrolysis | 240th ECS Meeting | 無 | オンライン |
| 29 | 石田泰基、長澤兼作、佐野陽祐、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学、三菱マテリアル | Evaluation of anode porous transport layer using polarization separation method on PEM water electrolysis | 240th ECS Meeting | 無 | オンライン |
| 30 | 渡邊孝之介，和久田康平，和仁亨太，荒木拓人，長澤兼作，光島重徳 | 横浜国立大学 | Observation of Oxygen Bubble Growth near Anode Catalyst Electrode in PEMWE | 240th ECS Meeting | 無 | オンライン |
| 31 | 池田隼太、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | Relationship between evaluation of OER performance and oxygen bubble generation behavior in alkaline water electrolysis | 240th ECS Meeting | 無 | オンライン |
| 32 | 円城寺勇斗、アブドルハリム アシュラフ、長澤兼作、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学 | Degradation of Ni-Co coated Ni oxygen evolution electrodes in alkaline water electrolysis using accelerated durability test based on reverse current phenomenon | 13th International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells | 無 | オンライン |
| 33 | 石田泰基、長澤兼作、佐野陽祐、黒田義之、光島重徳 | 横浜国立大学、三菱マテリアル | Evaluation of anode porous transport layer using polarization separation method on PEM water electrolysis | 13th International Summer School on Advanced Studies of Polymer Electrolyte Fuel Cells | 無 | オンライン |
| 34 | 北島大輔、三角隆太、光島重徳 | 横浜国立大学 | アルカリ水電解のカソードにおける気泡生成挙動と水素発生能の関係 | 化学工学会第53回秋季大会 | 無 | 長野／オンライン |

（C）講演等

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 宮武健治 | 山梨大学 | 高性能・高耐久性炭化水素系電解質膜の創製 | 第 28 回燃料電池シンポジウム | オンライン | 2021.5 |
| 2 | 宮武健治 | 山梨大学 | アニオン交換膜の設計とアルカリ形燃料電池への応用 | 第 151 回燃料電池研究会セミナー | 東京 | 2021.7 |
| 3 | K. Miyatake | University of Yamanashi | Alkaline stable and highly conductive anion exchange membranes containing perfluoroalkyl groups | The 3rd Japan-China Clean Energy Forum-Hydrogen Energy and Carbon Capture | 中国 | 2021.9 |
| 4 | 宮武健治 | 山梨大学 | 新規高分子電解質膜の開発：耐久性向上のための設計指針 | 2021 東海シンポジウム | オンライン | 2022.1 |
| 5 | 宮武健治 | 山梨大学 | アニオン交換膜の設計とアルカリ型エネルギーデバイスへの応用 | FC EXPO2022 | 東京 | 2022.3 |
| 6 | 宮武健治 | 山梨大学 | アニオン交換膜の設計とアルカリ型エネルギーデバイスへの応用 | 第 95 回武蔵野地区高分子懇話会 | 山梨 | 2022.11 |
| 7 | 宮武健治 | 山梨大学 | アニオン交換膜の設計とアルカリ型エネルギーデバイスへの応用 | 第 21 回高分子ナノテクノロジー研究会講座 | オンライン | 2023.2 |
| 8 | 冨田 育義・外山 美春・一二三 遼祐・稲木信介 | 東京工業大学 | 高ロバスト性アニオン交換膜材料を指向した最強のアルカリ耐性をもつオニウム塩への挑戦 | 分子工学シンポジウム | 滋賀 | 2022.10 |
| 9 | Ikuyoshi Tomita, Yoshikazu Toyama, Ryoyu Hifumi, Shinsuke Inagi | 東京工業大学 | Design and Synthesis of Tetraarylphosphonium Salts with Excellent Alkaline Resistant Performance | The 15th International Symposium on Organic Reactions (ISOR-15) | Taichung | 2022.11 |
| 10 | Ikuyoshi Tomita | 東京工業大学 | Onium salts with excellent alkaline resistant performance and their application to highly robust | NPG Asia Materials Symposium 2022 | 東京 | 2022.11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | anion exchange membrane materials | | | |
| 11 | Ryoyu HIFUMI, Yoshikazu TOYAMA, Keisuke IKEDA, Shinsuke INAGI, Ikuyoshi TOMITA | 東京工業大学 | Development of Functional Polymers Based on Phosphine Sulfide | Japan-US nanohybrid workshop | 静岡 | 2022.12 |
| 12 | 光島重徳、長澤兼作、黒田義之 | 横浜国立大学 | エネルギーキャリアとしてのトルエン電解水素化によるメチルシクロヘキサン合成 | 第 29 回 燃料電池シンポジウム | 東京 | 2022.5 |
| 13 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | 脱炭素社会に向けた水電解および膜電解 を応用した電解水素化 | 化学工学会第 1 回エネルギー部会シンポジウム | 東京 | 2023.1 |
| 14 | 松井敏樹 | 戸田工業株式会社 | 鉄系触媒を用いたメタン直接改質反応による SDGs への取り組み | 第 54 回粉体工学に関する講演討論会 | 大阪市 | 2022.9 |
| 15 | 濱口裕昭 | 愛知県（あいち産業科学技術総合センター） | メタン直接分解によるターコイズ水素の製造 | 第 48 回工業技術研究大会 | 愛知県 | 2023.6 |
| 16 | 宮澤薫一<br>朝原誠<br>宮坂武志<br>長井拓郎<br>木本浩二<br>田中優実 | 東京理科大学<br>岐阜大学<br>(国) 物質・材料研究機構 | Surface atomic structural analysis of nickel plating films reacted with methane at high temperature using HRTEM-EELS (招待講演) | 6th International Conference on Catalysis and Chemical Engineering, CCE-2022 | オンライン | 2022.2 |
| 17 | 高木 英行 | 産業技術総合研究所 | カーボンニュートラルに向けた産総研の取組 | 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会 資源・エネルギーフォーラム | オンライン | 2022.2 |
| 18 | 高木 英行 | 産業技術総合研究所 | 産業技術総合研究所における水素エネルギー技術の研究開発 | 第 128 回触媒討論会 | オンライン | 2021.9 |
| 19 | 倉本 浩司 | 産業技術総合研究所 | メタンの触媒分解による固体炭素回収型水素製造 | 産業技術総合研究所エネルギー技術シンポジウム 2021 | オンライン | 2021.11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 曽根田 靖 | 産業技術総合研究所 | メタン分解炭素の分析・利用 | 産業技術総合研究所エネルギー技術シンポジウム 2021 | オンライン | 2021.11 |
| 21 | 高木 英行 | 産業技術総合研究所 | Trends in Technological Development and AIST's Activities on Hydrogen Energy Technology | MRM2021 | 神奈川 | 2021.12 |
| 22 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 水素社会構築に向けた取り組み－ＳＯＥＣ技術の進展－ | 固体酸化物エネルギー変換先端技術コンソーシアム（ＡＳＥＣ）公開シンポジウム２０２１ | オンライン | 2021.1 |
| 23 | 長田 憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 高温水蒸気電解法による高効率水素製造システムの実現に向けて | ＦＣ ＥＸＰＯ ２０２１ 専門技術セミナー | 東京 | 2021.3 |
| 24 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | ＳＯＥＣを用いた高温水蒸気電解技術開発への取組み | 燃料電池研究会第１５０回セミナー | 東京 | 2021.4 |
| 25 | 長田 憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 水素エネルギー社会実現に向けた東芝の取り組み | 日本鉄鋼協会自主フォーラム第一回研究会 | 大阪市 | 2021.6 |
| 26 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 固体酸化物形水電解（ＳＯＥＣ）による水素製造とその高効率化 | 技術情報協会セミナー水電解による水素製造とその材料、システム開発 | 東京 | 2021.1 |
| 27 | 吉野 正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 固体酸化物形電解セルを用いた高温水蒸気電解による水素製造 | 株式会社シーエムシー出版「水素エネルギー利用拡大に向けた最新技術動向」 | ー | 2021.11 |
| 28 | 長田 憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | Ｄｅｖｅｌｏｐｍｅｎｔ ｏｆ Ｓｏｌｉｄ Ｏｘｉｄｅ Ｅｌｅｃｔｒｏｌｙｓｉｓ Ｃｅｌｌ Ｓｙｓｔｅｍ ａｔ ＴＯＳＨＩＢＡ | 第１０回ＮＥＤＯ－ＣＤＴＩ合同ワークショップ | オンライン | 2021.11 |
| 29 | 犬塚 理子 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 高温水蒸気電解法による高効率水素製造システム開発の現状 | ＦＣＤＩＣ第３７回セミナー | 東京 | 2021.11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 北岡　諭 | 一般財団法人ファインセラミックスセンター | ＳＤＧｓに関するＪＦＣＣにおける取り組み | Ｇｉｆｕ Ｊｏｉｎｔ Ｄｅｇｒｅｅ Ｓｙｍｐｏｓｉｕｍ ２０２１ | 岐阜 | 2021.12 |
| 31 | 長田　憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 水素社会に向けた高効率水素製造システムの開発 | 電気化学会第８９回大会 | 大阪市 | 2022.3 |
| 32 | 長田　憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | ＳＯＥＣを用いた高効率水素製造システムへ期待と課題 | ＳＯＦＣ／ＳＯＥＣ課題共有フォーラム | 東京 | 2022.3 |
| 33 | 長田　憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 高温水蒸気電解法を用いた水素の高効率製造 | 技術情報センターセミナー「グリーン水素活用のための水電解水素製造技術と展望」 | ー | 2022.8 |
| 34 | 佐藤純一 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | カーボンニュートラルに貢献する水素エネルギーソリューションの技術 | 東芝技術サロン　オンライン会議 | オンライン | 2022.9 |
| 35 | 須釜由香梨 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | Ｈｙｄｒｏｇｅｎ Ｅｎｅｒｇｙ Ｓｏｌｕｔｉｏｎｓ ＰＥＭ ／ ＭＥＡ ／ ＳＯＥＣ ／ ＦＣ ／ ＥＰＣ | Ｗｏｒｌｄ Ｈｙｄｒｏｇｅｎ Ｃｏｎｇｒｅｓｓ ２０２２ | オランダ | 2022.1 |
| 36 | 吉野正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 固体酸化物形水電解を用いた水素製造とその効率化 | 技術情報協会セミナー「水素製造技術の動向・コストと水電解による製造、効率化」 | ー | 2022.1 |
| 37 | 長田　憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 東芝におけるＳＯＥＣ要素技術開発の現状と課題 | ＳＯＥＣ課題共有フォーラム | 東京 | 2022.11 |
| 38 | 吉野正人 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 東芝エネルギーシステムズにおけるＳＯＥＣに関する研究開発の取組み | 一般財団法人大阪科学技術センター　エネルギー技術対策委員会　燃料電池・ＦＣＨ部会　第２８１回定例研究会 | 大阪市 | 2022.12 |
| 39 | 長田　憲和 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 大容量電力貯蔵の実現に向けたＳＯＥＣ水素製造システム | 東芝Ｒ＆Ｄフェア２０２３カーボンニュートラル・ＧＸ技術展 | 東京 | 2023.1 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 亀田常治 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | カーボンニュートラルに向けた高温水蒸気電解技術の開発 | 日本セラミックス協会２０２３年年会 エンジニアリングセラミックス部会特別講演 | 神奈川 | 2023.3 |
| 41 | 伊藤博 | 産業技術総合研究所 | アニオン交換膜（AEM）水電解装置の特徴と開発状況 | 燃料電池研究会第 151 回セミナー | 東京 | 2021.7 |
| 42 | 伊藤博 | 産業技術総合研究所 | アニオン交換膜水電解による水素製造技術 | エネルギー技術シンポジウム 2021 | オンライン | 2021.11 |
| 43 | 伊藤博 | 産業技術総合研究所 | アニオン交換膜(AEM)を用いた低コスト・高効率な水電解水素製造技術 | S&T セミナー | オンライン | 2022.5 |
| 44 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 劣化機構から考える高耐久アニオン交換膜の設計・開発と燃料電池および水電解への応用 | 電気化学会第 151 回燃料電池研究会セミナー | オンライン | 2021.7 |
| 45 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 水素社会と燃料電池および水電解材料の展開 | 第 128 回触媒討論会 | オンライン | 2021.9 |
| 46 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 水素社会の必要性と燃料電池および水電解のための高分子電解質膜の展開 | 高分子学会 高分子同友会講演会 | オンライン | 2021.9 |
| 47 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | ２０５０年のあるべき社会からバックキャストして考える必要技術 | 分離技術会 2021 シンポジウム | オンライン | 2021.11 |
| 48 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | Development of membranes and catalysts for anion exchange membrane water electrolysis | Technical Advisory Committee symposium, the Materials and Chemical Laboratory (MCL) of Industrial Technology Research Institute, Taiwan | オンライン | 2021.11 |
| 49 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 水素社会に向けた燃料電池および水電解の新展開 | 新化学技術推進協会エネルギー・資源技術部会 エネルギー分科会勉強会 | オンライン | 2021.11 |
| 50 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | Systematic material design and development for fuel cell | 30th Topical Meeting of the International | オンライン | 2021.11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | and water electrolysis applications | Society of Electrochemistry (ISE-TM) | | |
| 51 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | Hydrogen production and usage: Anion exchange membrane water electrolysis and polymer electrolyte fuel cells | RWTH-Tokyo Tech Joint Work Shop Online | オンライン | 2021.12 |
| 52 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 水素社会のための水電解および燃料電池用電解質膜の設計・開発 | 日本海水学会 電気透析および膜技術研究会第 50 回荷電膜コロキウム | オンライン | 2021.12 |
| 53 | 菅原 勇貴 | 東京工業大学 | 実験/計算/データの活用による水素製造用高性能電極触媒の設計開発 | 2021 年度合同 Web 分科会 | オンライン | 2022.2 |
| 54 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 膜技術の新展開～水素・燃料電池材料から病気診断膜まで～ | 高分子学会 Webinar | オンライン | 2022.3 |
| 55 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 2050 年から考える必要技術～分離技術を中心に～ | 第一回 GSC イノベーションプラットフォーム出版記念シンポジウム | オンライン | 2022.4 |
| 56 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 再生可能エネルギーからの水素製造と利用 水電解および燃料電池材料およびシステムの設計・開発 | 第 11 回 JACI/GSC シンポジウム | オンライン | 2022.6 |
| 57 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 急速に現実化する水素社会と水電解・燃料電池材料およびシステム | 岐阜県次世代エネルギー産業創出コンソーシアム先端技術講習会 | オンライン | 2022.9 |
| 58 | 菅原 勇貴 | 東京工業大学 | 実験/計算/データの協働による水電解用触媒開発の高速化および結晶構造に基づく触媒設計論の確立 | 材料化学システム工学討論会 2022 | オンライン | 2022.9 |
| 59 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 再生可能エネルギーからの水素製造と利用 ～アニオン交換膜型水電解および固体高分子形燃料電池の展開～ | 東京工業大学 科学技術創成研究院グリーン・トランスフォーメーション・イニシアティブ GXI セミナー | 東京 | 2022.9 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 再生可能エネルギーで水を水素にする水電解 | 東京工業大学 科学技術創成研究院研究院紹介 | 東京 | 2022.10 |
| 61 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | Systematic material design for anion exchange membrane water electrolysis | The 14th Japan-Korea Symposium on Materials and Interfaces | 石川 | 2022.11 |
| 62 | 菅原 勇貴 | 東京工業大学 | 実験と計算を活用した水電解用電極触媒の効率設計 | 化学工学会 2022 新潟大会 | 新潟 | 2022.11 |
| 63 | 宮西 将史 | 東京工業大学 | グリーン水素製造における AEM を用いた水電解技術～アニオン伝導膜の特性・高耐久化とアルカリ水電解への展開～ | (株)情報機構 オンラインセミナー | オンライン | 2022.11 |
| 64 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | Systematic material design and development for polymer electrolyte fuel cells and Anion exchange membrane water electrolysis | IZES International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems | 東京 | 2023.1 |
| 65 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 水素社会とアニオン交換膜を用いた水電解による水素製造 | 東京工業大学 InfoSyEnergy 研究・教育コンソーシアム第四回公開シンポジウム | 東京 | 2023.1 |
| 66 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 再生可能エネルギーの大規模利用と高耐久アニオン交換膜型水電解の開発 | 高分子学会 ポリマーフロンティア 21 | オンライン | 2023.3 |
| 67 | 山口 猛央 | 東京工業大学 | 再生可能エネルギーからの水素製造と利用：水電解および燃料電池材料およびシステムの設計・開発 | 第 4 回透明酸化物光・電子材料研究会 | 東京 | 2023.4 |
| 68 | 菅原 勇貴 | 東京工業大学 | マテリアルズインフォマティクス手法を活用した水電解用電極触媒の効率設計 | 第 30 回 燃料電池シンポジウムプログラム | 東京 | 2023.5 |
| 69 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | 水電解が拓く水素エネルギー社会 | 第１０回ＪＡＣＩ／ＧＳＣシンポジウム ダイナミック・ケイパビリティ 変化 | オンライン | 2021.6 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 講演会・講習会・カンファレンス等の名称 | 開催地 | 発表日 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | する社会へ－新化学の挑戦 | | |
| 70 | 五百蔵勉 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 低ｲﾘｼﾞｳﾑPEM水電解ｱﾉｰﾄﾞ触媒と触媒活性評価 | 電気化学会　電解科学技術委員会　電解プロセス研究会 | オンライン | 2021.9 |
| 71 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | 水電解技術の展望とその基盤技術 | ＦＣＤＩＣ第３７回セミナー | オンライン | 2021.11 |
| 72 | 長澤兼作 | 横浜国立大学 | トルエン直接電解水素化および水電解における電解槽技術開発 | 第４５回電解技術討論会－ソーダ工業技術討論会－ | オンライン | 2021.12 |
| 73 | 中嶋　隆 | 京都大学 | 溶存濃度およびﾚｰｻﾞｰ駆動ﾊﾞﾌﾞﾙの光学計測法の開発 | 京都大学微細気泡研究会 | 京　都／オンライン | 2021.12 |
| 74 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | 再エネ電力導入に資する水電解技術の高度化 | ＲＥ２０２２オンラインフォーラム | オンライン | 2022.1 |
| 75 | 光島重徳、Ashraf Abdel Haleem、長澤謙作、黒田義之、荒木拓人 | 横浜国立大学 | 脱炭素に向けたグリーン水素製造技術としての水電解 | 公益社団法人 日本材料学会 腐食防食部門委員会 第342 回例会 | オンライン | 2022.5 |
| 76 | 光島重徳 | 横浜国立大学 | 脱炭素社会に向けた水電解および膜電解 を応用した電解水素化 | 化学工学会第 1 回エネルギー部会シンポジウム | 東京 | 2023.1 |
| 77 | 永井つかさ | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | イリジウム電極触媒の活性表面積 | 第８回電池技術研究部門フォーラム | オンライン | 2023.2 |
| 78 | 五百蔵勉 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 固体高分子水電解の技術動向と産総研関西センターの取り組み | 第８回電池技術研究部門フォーラム | オンライン | 2023.2 |

（ｄ）メディアでの取り上げ

| 番号 | 機関名 | タイトル | 媒体 | 公表日時 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 早稲田大学 | カーボンニュートラルに貢献するポンプの役割 | 日刊工業新聞 | 2023/7/6 |
| 2 | エア・ウォーター株式会社、戸田工業株式会社 | ＜プレスリリースおよび共同記者会見＞<br>NEDO 水素利用等先導研究開発事業における採択のお知らせ～メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発～ | 新聞メディア（日経、日刊工業、化学工業日報等） | 2021/7/7 |
| 3 | エア・ウォーター株式会社 | ＜パネル展示＞<br>DMR 法による CO2 フリー水素製造技術の開発～未利用メタンの有効利用～ | ビジネス EXPO2021 | 2021/11/11～11/12 |
| 4 | エア・ウォーター株式会社 | ＜パネル展示＞<br>DMR 法による CO2 フリー水素製造技術の開発～未利用メタンの有効利用～ | エコプロ 2021 | 2021/12/8 ～12/10 |
| 5 | 戸田工業株式会社 | ＜雑誌投稿＞<br>鉄系触媒を用いたメタン直接改質反応による SDGs への取り組み | 雑誌「粉砕」2023 | 2022/12/15 |
| 6 | 戸田工業株式会社 | ＜雑誌投稿＞<br>鉄系触媒を用いたメタン直接改質反応による SDGs への取り組み | 雑誌「JETI」2023 年 5 月号 | 2023/4/22 |
| 7 | 戸田工業株式会社 | ＜パネル展示＞<br>メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発（NEDO 水素利用等先導研究開発事業 実施期間 2021 年 4 月 23 日～2023 年 2 月 28 日） | nanotech2023 | 2023/2/1 ～2/3 |
| 8 | 愛知県 | ターコイズ水素と高付加価値固体炭素の製造を両立するメタン直接分解装置の開発 | 愛知県庁記者クラブ<br>刈谷市政記者クラブ | 2023/5/19 |
| 9 | 産業技術総合研究所 | メタンの熱分解による水素製造技術 | エネルギー・資源学会 「エネルギー・資源」 特集（解説記事） | 2021/3/10 |
| 10 | 産業技術総合研究所 | ターコイズ水素：メタン熱分解による水素製造 | カーボンニュートラルを目指す最新の触媒技術（書籍） | 2022/2/26 |
| 11 | 産業技術総合研究所 | CO2 フリー水素製造に伴うナノ固体炭素の製造・タイヤ利用の安全性評価 | 産業技術総合研究所安全科学研究部門ウェブサイト | 2022/9/2 |
| 12 | 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 酸素・水素で効率発電 川重・産総研など実証 | 日刊工業新聞オンライン | 2021/6/21 |
| 13 | 理化学研究所 CSRS | 酸性環境で駆動する非貴金属水電解触媒－固体高分子型（ＰＥＭ）水電解を用いた水素製造へ－ | 理化学研究所プレスリリース | 2022/2/15 |
| 14 | 東京工業大学 | 純水供給固体アルカリ水電解のための高性能・高耐久膜電極接合体の開発 | 東京工業大学化学生命科学研究所 NEWS & TOPICS | 2021/1/28 |

| 番号 | 機関名 | タイトル | 媒体 | 公表日時 |
|---|---|---|---|---|
| 15 | 東京工業大学, NIMS | 極めて安価な金属で世界トップクラスの活性を持つ水電解用触媒を開発 | 東工大ニュース | 2021/3/1 |
| 16 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Phys. org | 2021/3/2 |
| 17 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Eurekalert! | 2021/3/2 |
| 18 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Bioengineer.org | 2021/3/2 |
| 19 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | ScienMag | 2021/3/2 |
| 20 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Science Daily | 2021/3/2 |
| 21 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Mirage News | 2021/3/3 |
| 22 | 東京工業大学, NIMS | Scientists Find Remarkable Electrocatalyst Candidate for Cost-Effective Water Splitting | Azom.com | 2021/3/3 |
| 23 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning Electrocatalysts for Hydrogen Production with Inexpensive Alternative Material | Nanotechnology Now | 2021/3/4 |
| 24 | 東京工業大学, NIMS | Tokyo Tech team develops high-performance bimetallic OER electrocatalyst for water splitting | Green Car Congress | 2021/3/4 |
| 25 | 東京工業大学, NIMS | 東工大・物材機構、水電解の安価な触媒開発 | 日刊工業新聞 電子版 | 2021/3/5 |
| 26 | 東京工業大学, NIMS | 水電解の安価な触媒 | 日刊工業新聞 朝刊 19面 | 2021/3/5 |
| 27 | 東京工業大学, NIMS | 水の電気分解用、安価な触媒開発 | 日本経済新聞 朝刊 11ページ | 2021/3/8 |
| 28 | 東京工業大学, NIMS | 水の電気分解用、安価な触媒開発 | 日本経済新聞電子版 | 2021/3/8 |
| 29 | 東京工業大学, NIMS | 鉄とカルシウム CO2 削減の『切り札』に | 産経新聞 電子版 | 2021/3/13 |
| 30 | 東京工業大学, NIMS | Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Chem Europe | 2021/3/16 |
| 31 | 東京工業大学, NIMS | 水の電解触媒 価格３万分の１ | 日経産業新聞 朝刊 6 ページ | 2021/3/22 |
| 32 | 東京工業大学, NIMS | 安価・高活性な水電解正極 | 化学工業日報 朝刊 3 面 | 2021/4/7 |
| 33 | 東京工業大学, KISTEC | アニオン交換膜を利用した水電解による高性能、高耐久、低コストの水素製造システム | 東工大ニュース | 2021/4/7 |
| 34 | 東京工業大学, KISTEC | 水素製造、新たな膜で安く 貴金属を使わず、再エネ活用基盤に | 日経産業新聞 | 2021/5/14 |
| 35 | 東京工業大学, KISTEC | 水素製造コスト低減へ 白金不要の水電解システム 高耐久アニオン交換膜で | 化学工業日報 | 2021/6/18 |
| 36 | 東京工業大学 | 水電解技術のダークホース『AEM 形』 安価な鉄が高性能触媒に | 日経 XTECH | 2021/12/6 |

| 番号 | 機関名 | タイトル | 媒体 | 公表日時 |
|---|---|---|---|---|
| 37 | 東京工業大学 | 実験、第一原理計算、データ科学に基づく水素製造用鉄系電極触媒の設計戦略 | 東京工業大学化学生命科学研究所　NEWS & TOPICS | 2022/9/1 |

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

# 「水素利用等先導研究開発事業」（終了時評価）
# 2013年度～2022年度　10年間

# プロジェクト概要（公開版）

2023年10月06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

# 水素利用等先導研究開発事業

スマートコミュニティ・エネルギーシステム部
田中博英（燃料電池・水素室室長代理）

関連する技術戦略：革新的環境イノベーション戦略、水素基本戦略、水素・燃料電池戦略ロードマップ等

## プロジェクトの概要

２０４０年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。このため、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術ならびに炭化水素等からの二酸化炭素を排出しない水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術、大規模水素利用技術等の先導的な研究開発に取り組む。

## 想定する出口イメージ等

| | |
|---|---|
| アウトプット目標 | **（評価対象期間である2021～2022年度の実施項目を記載）**<br>**研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発**<br>プラント引渡し価格３０円／Ｎｍ３に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定や性能等評価方法の確立<br>**研究開発項目③：従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発**<br>酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立。<br>**研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究**<br>２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。<br>**研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発**<br>２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、二酸化炭素を排出しない水素製造技術の設計指針を確立。 |
| アウトカム目標 | 再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。<br>水素製造・輸送については、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。<br>水素発電については、２０４０年以降、水素コスト２０円／Ｎｍ３において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。 |
| 出口戦略<br>（実用化見込み） | 本事業では先導研究としてそれぞれの要素技術についての実現可能性などの見極めを実施。技術の進捗状況を踏まえつつ、実用化の目処がたってきた技術については、スケールアップや、他の技術との統合によるシステム研究等への移行を検討。<br>国際標準化提案：無 / 第3者提供データ：無 |
| グローバルポジション | 現在：ＤＨ⇒ＰＪ終了時：ＬＤ<br>（ＬＤ：リーディング、ＤＨ：デッドヒート、ＲＡ：ランアフター） |

## 既存プロジェクトとの関係

本研究開発は、未来開拓研究プロジェクト「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」として開始し、2014年度からNEDOに移管。2018年以降の後期5年間はアカデミアを中心にTRLの低い先導的な研究開発を実施。ＮＥＤＯの以下の他事業とも連携して、事業を実施する。

社会実装～基盤基礎研究：グリーンイノベーション基金事業

実証ステージ：水素社会構築技術開発事業／地域水素利活用技術開発

要素技術開発ステージ：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

## 事業計画

期間：２０１３～２０２２年度（10年間）
総事業費（ＮＥＤＯ負担分）：127億円）（実績）（委託）

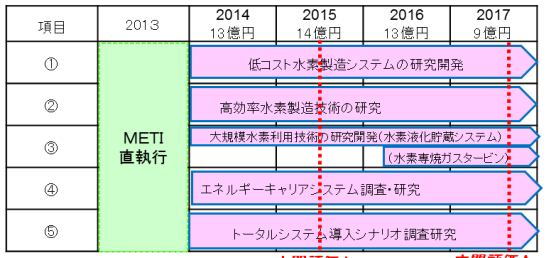
（百万円）

| 2013*1 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 合計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,079 | 1,277 | 1,455 | 1,296 | 879 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1,335 | 1,670 | 12,625 |

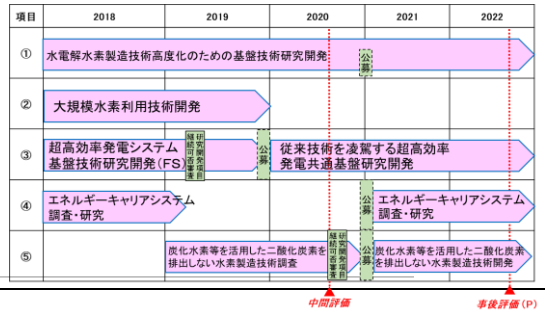
【注】*1：2013年度は経済産業省直執行予算、

**<研究開発スケジュール・評価時期>**

【前期4年間】




【後期5年間】



# 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

- □ 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
- ■ 非連続ナショプロに該当する根拠
- ■ 知的財産・標準化戦略
- ■ 知的財産管理

**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

- ■ 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・事業化」の考え方及び見込み
- □ 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

**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

- ■ 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
- ■ 進捗管理：開発促進財源投入実績
- ■ モティベーションを高める仕組み（該当事業のみ）

（※） 評価対象外
事前・中間評価時の資料ページは残す

□（塗りつぶしなし）：評基対象外

# 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
- ■ 非連続ナショプロに該当する根拠
- ■ 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

（※）評価対象外
事前・中間評価時の資料ページは残す

# ＜評価項目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　＊終了時評価においては対象外

（1）アウトカム達成までの道筋

（2）知的財産・標準化戦略

# 事業の背景・目的

水素をカーボンフリーな新たなエネルギーの選択肢として確立させることを目的にスタート。近年は水素の利用が現実味を帯びる中で期待される文脈も多様化

## 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・節電対策の抜本的強化、再生可能エネルギー導入・普及の最大限の加速、環境負荷に最大限配慮した化石燃料の有効活用等が求められている。
また、将来の二次エネルギーとして、電気、熱に加え、水素が中心的役割を担うことが期待されており、このような水素を本格的に利活用する水素社会を実現していくことが求められている。

## 事業の目的

二次エネルギーとしての水素等を最大限に活用するため、２０４０年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。このため、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術ならびに炭化水素等からの二酸化炭素を排出しない水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術、大規模水素利用技術等の先導的な研究開発に取り組む。

## 開始時以降の水素を取り巻く状況変化

・カーボンフリー（グリーン）な水素　→　LCAで見る炭素強度に注目した“クリーン”な水素へ。
・将来的な二次エネルギー　→　エネルギーだけでなく化学品の原料や製鉄の還元剤としても期待が高まる。

# 政策・施策における位置づけ

事業開始と同時期より水素社会の実現に向けた政府の動きが本格化

2014.4　第4次エネルギー基本計画
⇒将来の有望な二次エネルギー、「水素社会」に言及
2014.6　経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」策定
2015.12　気候変動枠組条約第21回締約国会合（COP21）
⇒「パリ協定」の成立
2016.3　「水素・燃料電池戦略ロードマップ」改訂
⇒FCV台数、水素ステーション設置数目標設定
2017.12　水素基本戦略
⇒府省横断的な、世界で初めての水素「戦略」
2018.7　第5次エネルギー基本計画
⇒エネルギー安全保障と温暖化対策の切り札として水素の研究開発の必要性を明確化
2018.10　水素閣僚会議2018（以後毎年開催）
2019.3　「水素・燃料電池戦略ロードマップ」改定
⇒アクションプランの明確化
2020.1　革新的環境イノベーション戦略
2020.12　グリーン成長戦略
2021.6　2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
2021.10　第6次エネルギー基本計画
⇒２０３０年のエネルギーミックスにおいて水素・アンモニアで１％
2023.6　水素基本戦略改訂

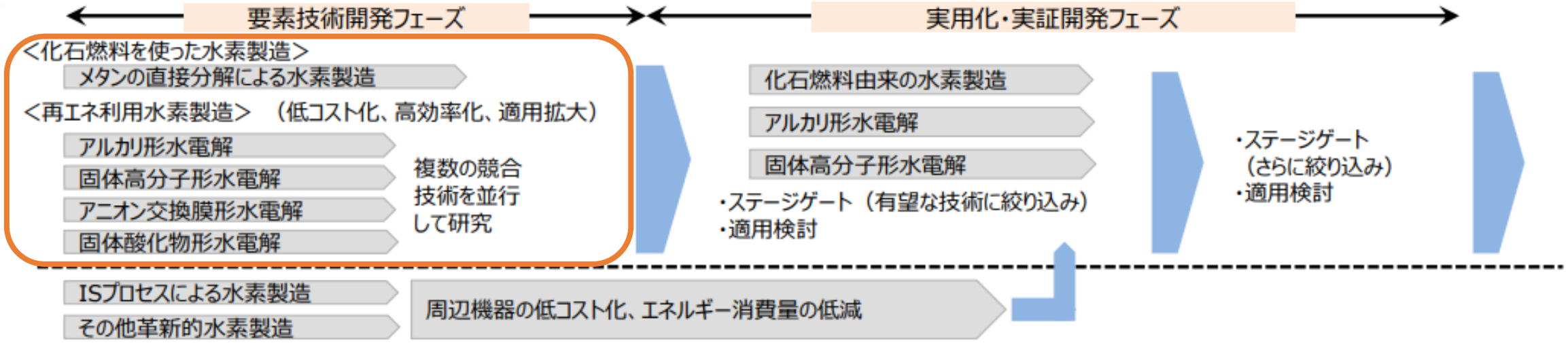
# 技術戦略上の位置づけ

経済産業省(ＭＥＴＩ)の技術戦略上でも水素が重要分野

■ **革新的環境イノベーション戦略（2020年1月公表）**

革新的技術の2050年までの確立を目指す具体的な行動計画（５分野16課題） －

①コスト目標、世界の削減量、②開発内容、③実施体制、④基礎から実証までの工程をイノベーションアクションプランとして明記。水素も重要5分野の一つとして位置づけ。



# 政策・施策における位置づけ

水素基本戦略が６年ぶりに改定。従来の目標に加え、水素導入量の２０４０年目標、我が国関連企業による水電解装置の導入目標を新規設定。



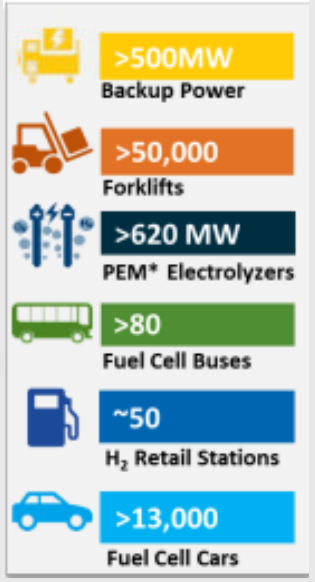

出典：再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議（第４回）

# 国内外の動向

## 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（現在、改訂作業中）。
- 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。
- 【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。

【水素・燃料電池技術の普及状況】

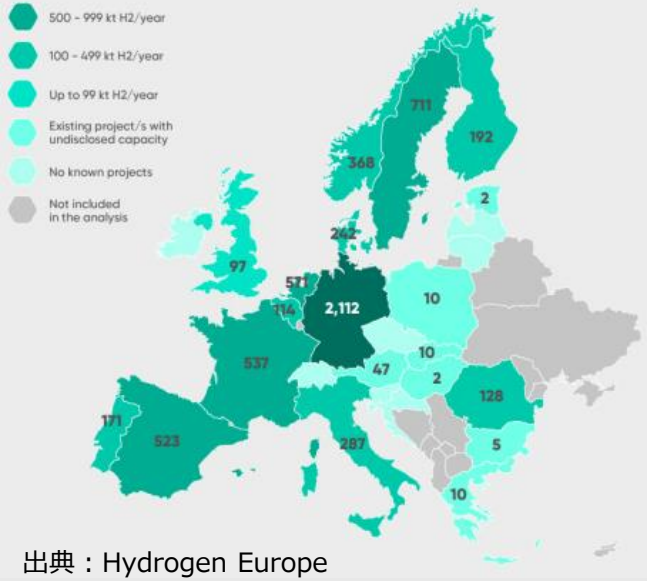



出典：DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (Draft)

## 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:88億€)」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

# 国内外の技術動向

- 米国DOEではHydrogen Shotにおいて野心的目標を掲げて研究開発を実施
- 欧州ではクリーン水素製造のスケールアップのための研究開発も推進

## 米国におけるグリーン水素製造の研究開発（Hydrogen Shot）

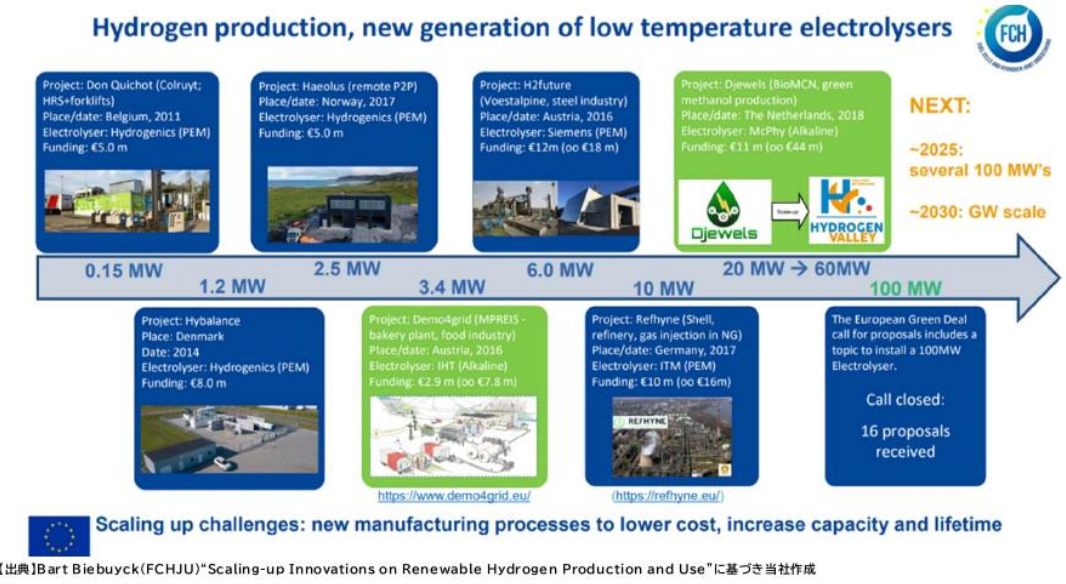
- DOEが新プロジェクト「**Hydrogen shot**」を立ち上げ、2021/8/31に「Hydrogen Shot Summit」開催
- 「**今後10年で水素製造コストを1$/kgとする**」という野心的目標に向けて、水電解や化石燃料改質＋CCSの他にも、**あらゆる製造技術の可能性を追求**、複数の製造技術の開発を推進する計画
- 個別のRD&D（研究開発＆技術実証）や社会実装に向けたワークショップでの議論を経て、**今後RD&D戦略等を打ち出す計画**




【出典】Sunita Satyapal, John Litynski, Linda Horton（DOE）"Hydrogen shot Overview"　"Hydrogen Shot"の今後の計画

## 欧州におけるグリーン水素製造の研究開発（MWからGWスケールへ）

- 現状開始中のFCHJUプロジェクトでは、例えば、オランダデルフザイルでの20MWの加圧形のアルカリ水電解装置（McPhy製）によるグリーン水素からのメタノール製造プロジェクト「Djewels」が最大級、2022年運転開始計画
- 今後、**2025年までに数百MWの電解装置、2030年頃までにGWスケールに拡張する計画**




【出典】Bart Biebuyck（FCHJU）"Scaling-up Innovations on Renewable Hydrogen Production and Use"に基づき当社作成

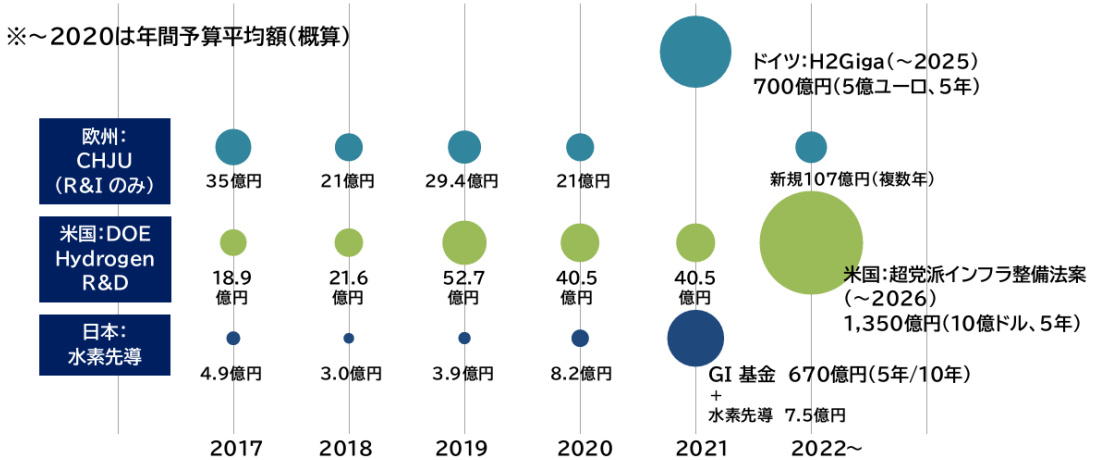
第8回FC-Cubicオープンシンポジウム　競争が激化するグリーン水素製造の世界動向　みずほリサーチ&テクノロジーズ（2022年7月13日）　資料より抜粋して引用　掲載許諾を得たうえで引用

# 国内外の技術動向

●国内外で水電解への予算は増加傾向。国内でも21年度からGI基金事業での水電解事業も開始
●欧州の近年の動向としてSOECの増加やAEMの着手が目立つ。当事業でも2018年（一部は2013年）から実施

## 海外と国内の水素製造（電解）に対する研究開発予算

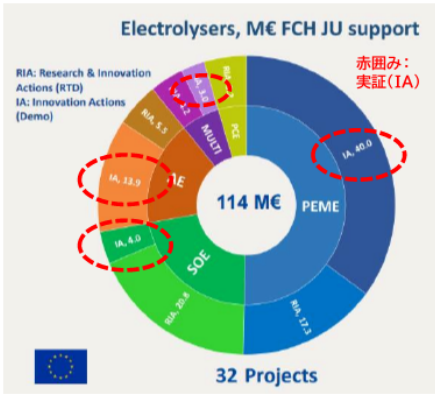
- 水電解（低温・高温）の研究開発に関する予算の推移についてはグラフに示す通り、2021年までは各国数十億円規模の予算の下で研究開発が進行
- 昨年度、国内はGI基金「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」で670億円（政府支援分）、ドイツでも2030年5GWの**電解装置大量生産を目指したH2Gigaプロジェクト（総額5億ユーロ）**が開始。米国では**クリーン水素電解プログラムで電解装置の大量普及に向けた総額10億ドルの大規模な投資**が計画



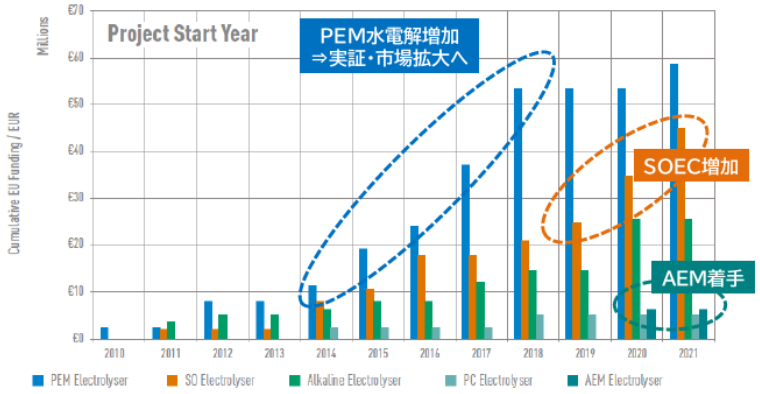

【出典】各種資料よりMHRT作成。金額は以下のレートを使用：135円/ドル，140円/ユーロ

## 欧州におけるグリーン水素製造の研究開発（電解種別予算の変化）

- 水電解プロジェクト全体の50%以上が実証（下左図の「IA」）に関するテーマで水電解技術の普及に注力、実証に関して積極的に投資を行っている点が特色。PEM形電解装置に関する実証で、電解装置全体の投資額の1/3を占める
- 電解種別の投資額内訳の推移を見ると、PEM水電解が一貫して多かったが**近年はSOEC/アルカリ水電解への投資も拡大していることに加え、AEM（アニオン固体高分子形）への研究開発**も開始




技術開発投資額の内訳（FY2019）



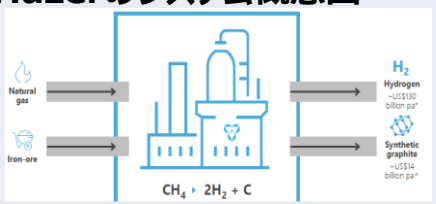
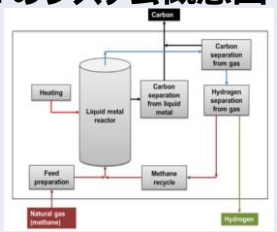
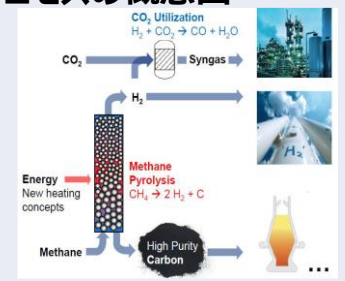

過去約10年間の電解種別予算の推移（累計）

【出典】FCHJU Programme Review Days資料をもとに作成

第8回FC-Cubicオープンシンポジウム　競争が激化するグリーン水素製造の世界動向　みずほリサーチ&テクノロジーズ（2022年7月13日）　資料より抜粋　掲載許諾を得たうえで引用

# 国内外の技術動向

メタン熱分解については、米国DOEのARPA-Eプロジェクトで「Methane Cohort」が2019年に開始。ドイツ水素戦略（2020年6月）において「ターコイズ水素」として定義され、各国で取り組みが行われる。

| オーストラリアHazer社 | ドイツカールスルーエ工科大 | 米国Monolith社 | ドイツBASF社他 |
|---|---|---|---|
| 触媒法 | 溶融金属 | プラズマ法 | 無触媒法 |
| 500-1000℃ | 1000-1175℃ | 低温プラズマ：700℃以下<br>熱プラズマ：700℃以上 | 1200-1400℃ |
| 鉄鉱石触媒を用いた独自のメタン熱分解の開発を進めており、水素3.6t/年生産できるパイロットプラントを2018年実証済み。<br>同社のプロセスで副生するグラファイトは製鉄向けの他車載用バッテリーや電極へ利用可能なグレードとされる。<br>2020年2月には千代田化工建設との日本展開に関する覚書を発表。国内未利用バイオマス等からの水素・グラファイト製造や地産地消水素サプライチェーン構築に取り組む。 | ドイツのカールスルーエ工科大学（KIT）はサスティナビリティ研究所と溶融金属（スズ）を用いたメタン熱分解システムを開発し、ラボスケールプラントで変換効率78%を達成。パイロットプラントへのスケールアップのための開発を実施中。 | 米国のMonolith社はメタン熱分解（熱プラズマ）によるカーボンブラック製造の技術開発を進める。<br>・カリフォルニアで700tのカーボン+200tの水素を製造可能な実証プラントを3700時間以上安全運転。<br>・2020年中にネブラスカで商用プラントを建設する計画。副生水素は125MWの火力発電所で燃料に利用予定。 | ・BASF、Linde,Thyssenkruppらは2013年よりドイツ連邦の支援を受けてメタン熱分解（無触媒）の研究を開始。<br>・製造した水素を合成ガス製造に利用するとともに、副生炭素を製鉄プロセスで利用する構想を発表している。<br>・2025年にパイロットユニットの試験を行う計画を発表済み。 |
| **Hazerのシステム概念図**<br>  <br>出典：Hazer"HydrogenProduction Disruption" | **KITのシステム概念図**<br>  <br>出典：Alberto Abánadeset al. "Development of methane decarbonisationbased on liquid metal technology for CO2-free production of hydrogen" | **建設中のプラント**<br>  <br>出典：Monolith" AIChEAmmonia Production fromNatural Gas Pyrolysis" | **プロセスの概念図**<br>  <br>出典：BASF"The quest for CO2-free hydrogen –methane pyrolysis at scale" |

当事業では
2018年から調査事業を開始（2か年）。
2020年11月の項目継続可否審査を経て開発事業を開始（2か年）

みずほ情報総研（現みずほR＆T）が作成したものを改変

# 他事業との関係

経済産業省をはじめとして、多くのを予算を水素・燃料電池事業に投入。NEDOは経済産業省の研究開発・実証部分を担う。

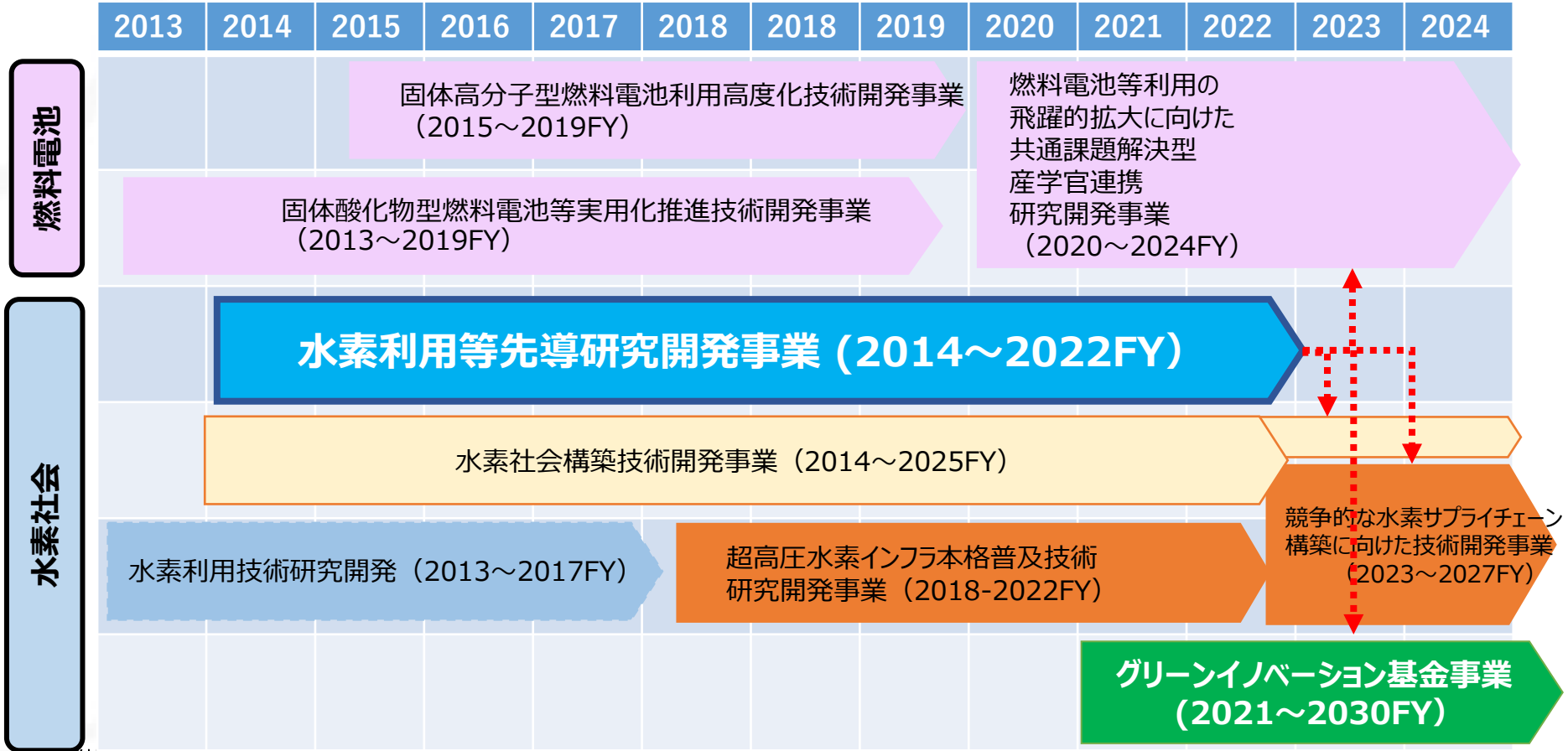
| 省庁 | 事業名及び概要 |
|---|---|
| 環境省 | **脱炭素社会構築に向けた再エネ等由来水素活用推進事業**<br>脱炭素な地域水素サプライチェーン構築、および水素活用による運輸部門等への脱炭素化を支援。 |
| 経済産業省 | **グリーンイノベーション基金事業**<br>2050年カーボンニュートラルに向けて、政策効果が大きく、長期間の継続支援が必要な領域において、最大10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援。 |
| (NEDO) | **水素利用等先導研究開発事業**<br>２０４０年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。具体的には、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に主として取り組む。 |
| | **水素社会構築技術開発事業（地域水素利活用技術開発）**<br>様々な①水素製造源、②輸送・貯蔵手段、③水素の利活用先等を組み合わせたモデル構築のための技術開発・実証を行い、水素製造の低コスト化、効率的な水素サプライチェーンを構築するとともに、基盤となる技術を確立。将来的な水電解技術の商用化や水素の社会実装に向けた展望を開く。 |
| | **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**<br>水素の供給基盤を確立するため、設備・機器・システム等の更なる高度化・低廉化・多様化につながる研究開発、および水素サプライチェーンにおける規制の整備や合理化、国際標準化のために必要な研究開発等について支援。 |
| | **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**<br>2030年以降の自立的普及拡大に資する高効率、高耐久、低コストの燃料電池システムを実現するための基盤技術、多用途展開のための技術並びに大量生産を可能とする生産プロセス又は検査技術、システム化技術等の開発について支援。 |
| | **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**<br>脱炭素化・エネルギー転換に資する我が国の技術について、海外実証を通じてその有効性・優位性を可視化し、実証国・地域等での導入及び我が国での普及展開に裨益することを目的とした事業（実施項目：⑤低コストな水素関連技術） |
| 国土交通省 | **カーボンニュートラルポートの形成等の港湾・海事分野における脱炭素化の推進**<br>「カーボンニュートラルポート（CNP）」の形成、海事分野のカーボンニュートラルを推進する。（水素に関しては、水素・アンモニア燃料船のバンカリング（燃料供給）に関するガイドラインの整備を実施） |



「水素社会構築技術開発事業／Ⅰ・Ⅲ」（中間評価）制度評価分科会2021年度～2023年度（2023年6月16日）を一部改変

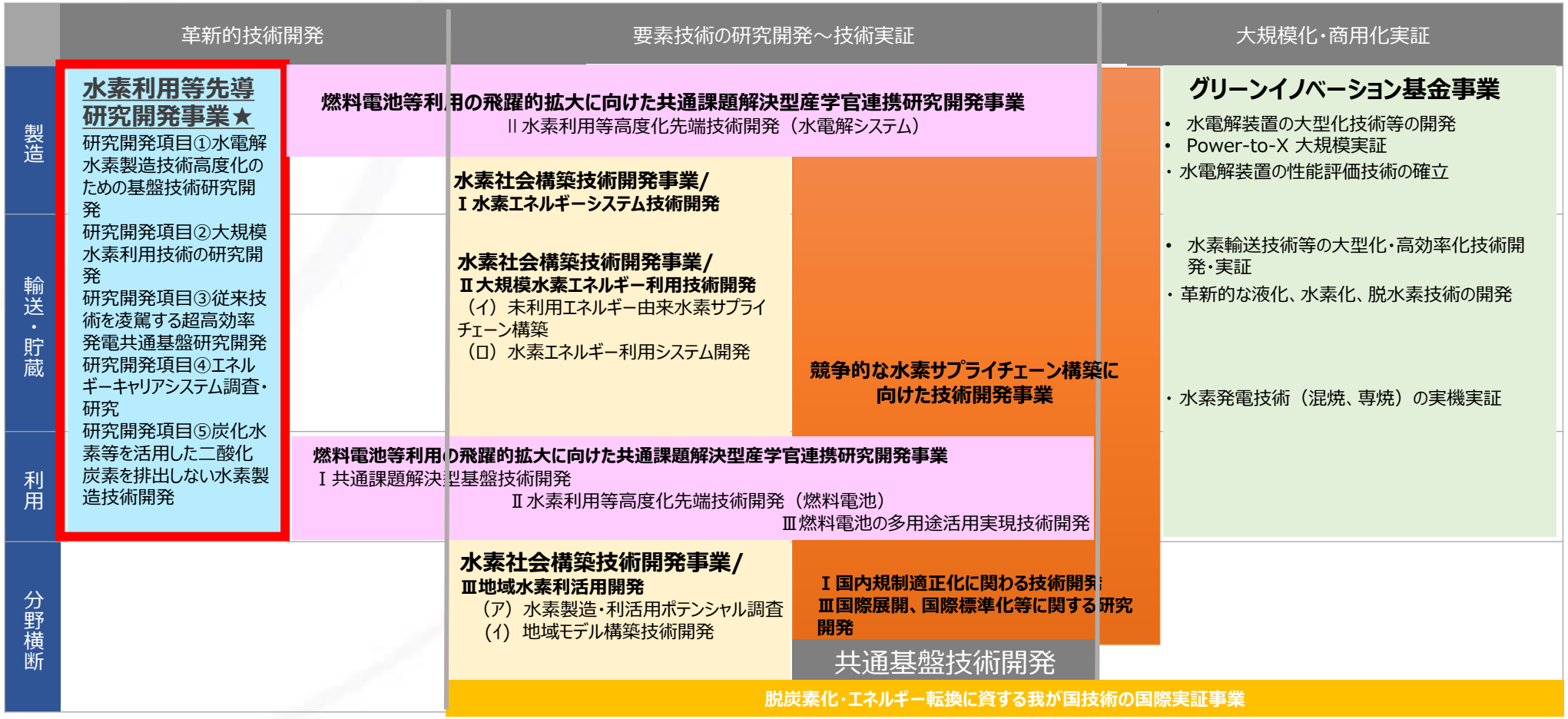
# 他事業との関係（燃料電池・水素室）

- ＮＥＤＯは、水素社会の早期実現に向けて水素の製造、輸送、利用まで全方位をカバーして事業を推進中。
- 本事業は先導研究という位置づけ。創出した成果は他の事業へ展開。



# 他事業との関係

NEDOの事業の中でも製造、輸送・貯蔵、利用までの幅広い分野をカバー



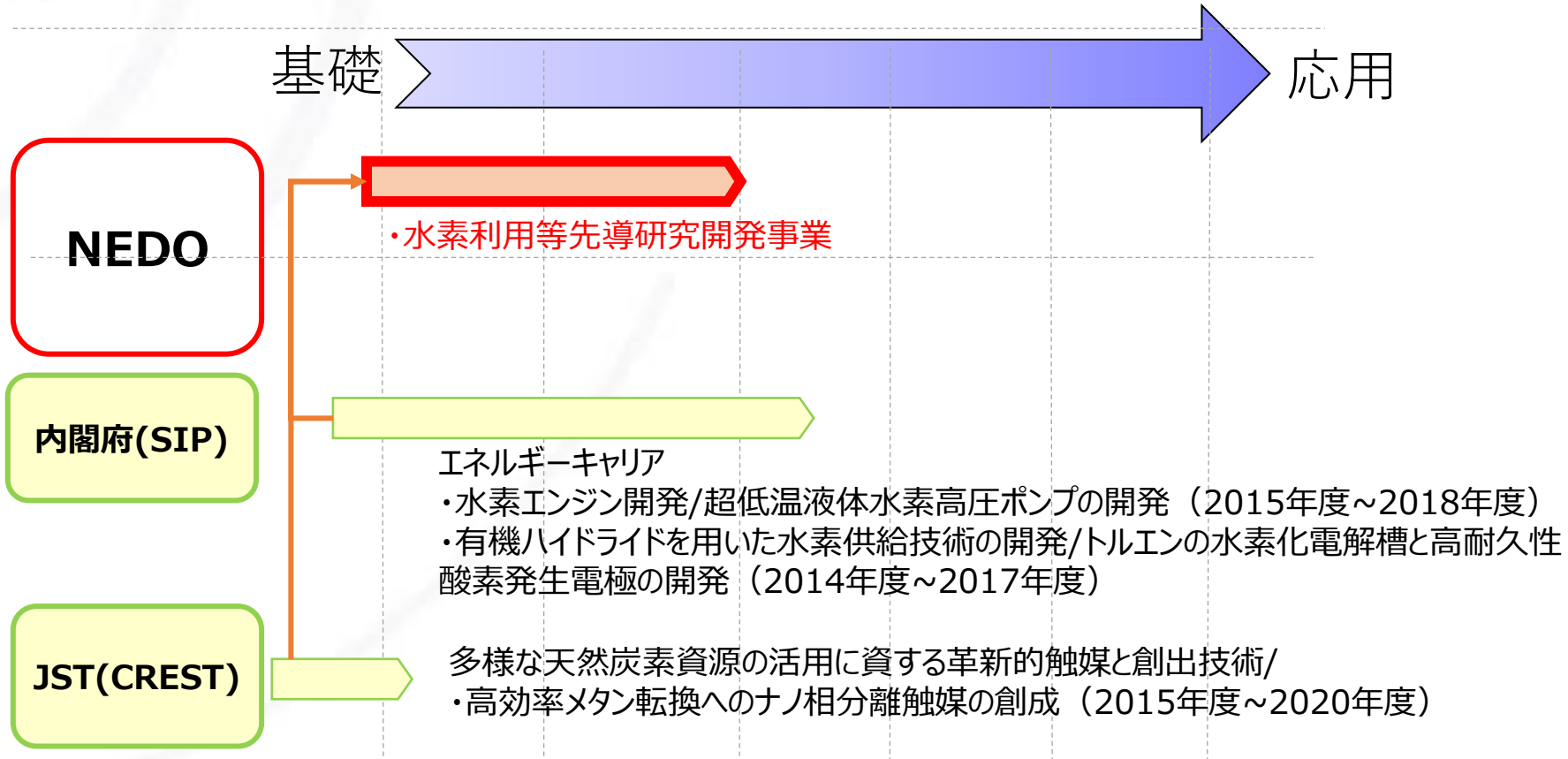

※　★は、今回の終了時評価における対象部分。



「水素社会構築技術開発事業／Ⅰ・Ⅲ」（中間評価）制度評価分科会2021年度～2023年度（2023年6月16日）より一部改変

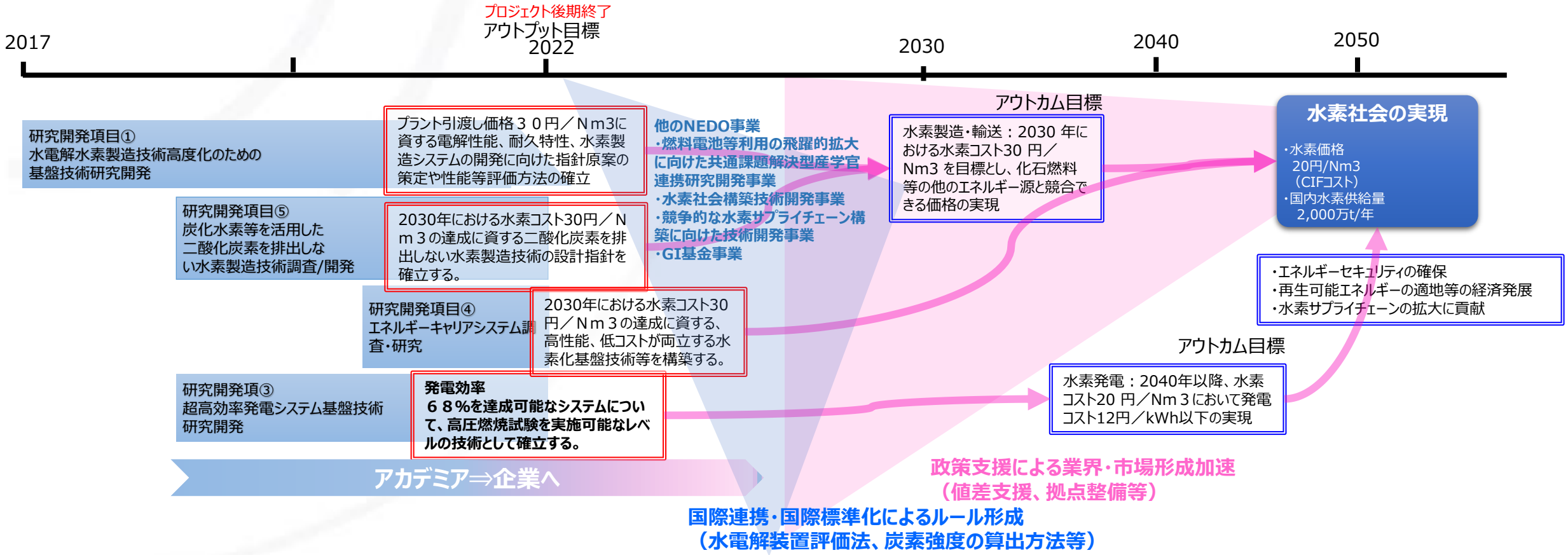
# 他事業との関係

●他省庁の先導的な研究開発事業とは分野／期間で重複しないよう課題設定型の案件を推進
●その成果は次のフェーズの事業に円滑に移管



# アウトカム達成までの道筋

●技術開発の主体をアカデミアから企業へ段階的に移行し、継続することで技術の実用化へ道筋
●METIによる政策的支援や国際連携によるルール形成等と連携し、水素社会の実現に貢献



# 知的財産・標準化戦略

●基礎的な先導研究であろうとも、ＮＥＤＯ事業なので最終的には事業成果が市場獲得へ貢献することが重要
●市場獲得には市場価格、参入障壁、差別化等の要因があるものの、先導研究である本事業では、先ずは技術的可能性を追求し基礎分野における知的財産権に注目し、特許の取得等を強く推奨

●知的財産戦略の大きな方針は以下の３点

ポジショニング：先行又は競合技術と、本事業で創出する成果の差分を明確化

目標への貢献：研究成果を、実用化を目指した事業目標に貢献するように知財化を支援

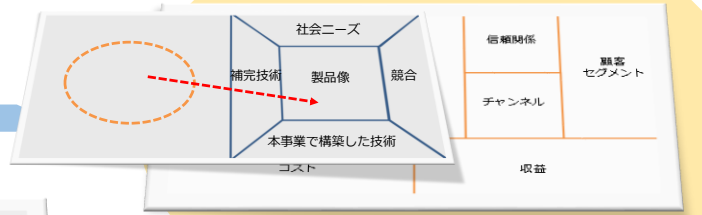
企業との連携：技術の移転先となる企業との連携を強く推奨

# 知的財産・標準化戦略

３つの戦略を実行するツールとして、「仕上げたい技術の姿」と題した知財運用フォーマットを構築し、事業実施者との対話に用いて意識付けを行った。

## ③企業との連携構築

・成果の社会実装と収益確保に必要なステークホルダーの顕在化
・連携の推進とバックキャスト視点に基づく事業終了後の具体化



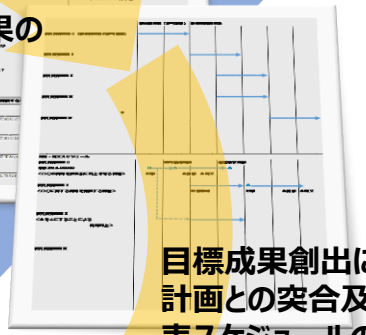

**社会実装に向けた**
**ボトルネックを顕在化させて関係者で共有。**

## ②目標への貢献

・知財形成に関するマネジメント方針
・計画とステアリング

**先行・競合に対する目標成果の**
**新規性・進歩性の確認**





**目標成果創出に向けた実施**
**計画との突合及び権利化・公**
**表スケジュールの確認**

## ①ポジショニング

・先行・競合・目標との差分の明確化



**目標とする事業成果の**
**先行・競合知財の確認**

**開発技術の社会実装の姿を**
**イメージしてフィードバック**

# 知的財産・標準化戦略

TRLの低いステージであるからこそ社会実装に向けた知的財産形成を見据え、
●公募時の提案書様式（別添１）において以下の項目を追加
**「研究開発対象のポジショニング」**
**「成果の取り扱いに関するマネジメント戦略」**
●課題に対する解決方法として提案する技術の優位性の説明や特許出願による権利化だけでなく、秘匿化も含めオープンクローズの整理についても応募段階で説明を要求
●採択者説明会では特にクローズ戦略に対してNEDO事業成果に対するノウハウ指定の手続きについて強調して説明

●説明会で取り上げたノウハウ指定の手続き

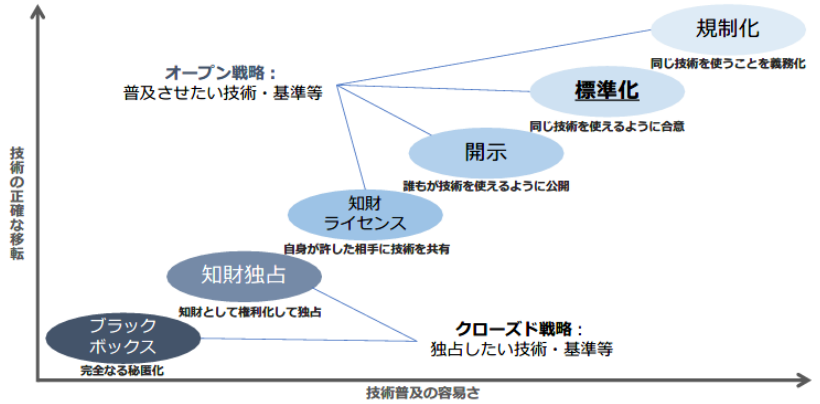



委託研究により生まれた技術／ノウハウか、それ以前から委託先が保有しているものかを明確にするため、契約締結後２月以内に「封印申請書」をNEDOに提出。（約款第３０条）
封印文書は委託先で保管

NEDOは委託先と協議の上「ノウハウ」を指定し、委託先は成果報告届出書とともに、当該ノウハウ（非公開情報）をNEDOに提出。
秘匿期間は原則５年間。
期間の延長あり（約款第２９条）
委託業務完了日の翌日から６１日以内に提出（約款第24条第1項）

ＮＥＤＯ委託事業における 知的財産権管理業務の説明資料

●事業の特性に応じたマネジメントの参考




標準化ビジネス戦略検討スキル学習用資料
https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/katsuyo/business-senryaku/pdf/002.pdf
「標準化をビジネスで用いるための戦略・知財と標準化の連携」より抜粋引用

# 知的財産管理

●知的財産権の帰属

## 委託事業と補助・助成事業

| 項目 | 委託（共同研究含む） | 補助・助成 |
|---|---|---|
| 事業の主体 | NEDO | 事業者 |
| 事業の実施者 | 委託先 | 事業者 |
| 取得資産の帰属 | NEDO<br>（約款20条1項該当） | 事業者 |
| 事業成果<br>（知的財産権）の帰属 | NEDO<br>バイ・ドール条項遵守の<br>場合は委託先帰属 （注） | 事業者 |
| 収益納付 | なし | あり |

（注）実証事業及び調査事業の委託では、約款上バイ・ドール条項に関する規定はない。

NEDO Web 掲載「知的財産権に関する説明資料（2022年７月版）抜粋

**＜委託研究開発における知的財産マネジメントに関する運用ガイドライン＞に示される以下の観点を実施者に改めて理解を求めた。**

●研究開発成果を最大限事業化に結び付け、国富を最大化することを念頭において運用することが重要

●そのためには事業戦略を鑑みた権利化・秘匿化を十分考慮し、成果を最大限国富に貢献させるようマネジメントする。

**そのうえで以下の手続きをすすめ、知財形成に関するマネジメント基盤を整備いただいた。**

●知財マネジメント基本方針（「NEDO知財方針」）に関する事項
NEDO知財方針に記載された「全実施機関で構成する知財委員会（又は同機能）」を整備し、「知財の取扱いに関する合意書」を作成する。

●データマネジメントに係る基本方針（NEDOデータ方針）に関する事項
NEDOデータ方針に記載された「全実施機関で構成する知財委員会（又は同機能）を整備し、「データの取扱いに関する合意書」を作成する。

**上記NEDO知財方針を事業者に理解いただいた上で、事業者に判断いただくためのツール（次ページ）を提供した**

# 知的財産管理

## 成果の権利化・公表については事前にその内容を確認するための様式を活用

出願や公表については事前に確認して事業成果としての知的財産管理を実施

＜実施計画との整合＞

●知財委員会での合意があるか（複数事業者の場合）

●成果に関する実施計画書における位置づけ・整合

●事業内成果と事業外成果の確認（必要に応じて）

＜公表内容の権利化状況＞

●公表する成果に関する権利化状況

●権利化せずに公表する成果に関する理由

●権利化も公表もしない成果については

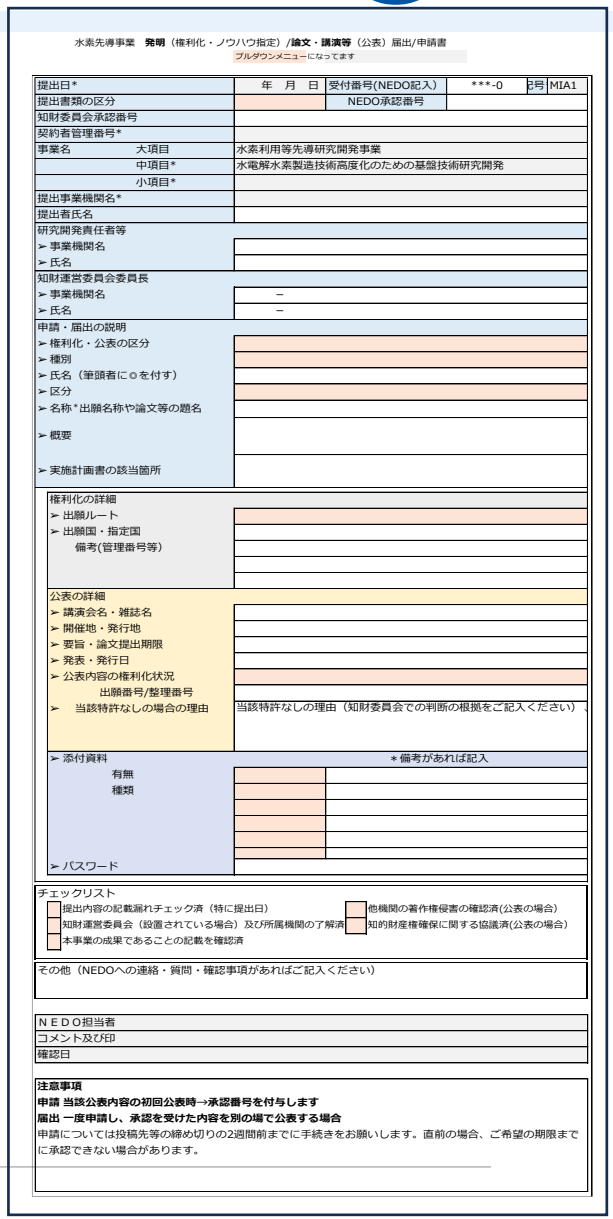
秘匿化としてノウハウ指定の手続きについて様式を通じて継続的に理解を求めた。

## これらを推進するために＜仕上げたい技術の姿＞（前述）を活用して以下の確認を行った

●競合・代替技術との対比

●バックグラウンドIPの状況・フォアグランドIPの計画

●ステークホルダーとの関係



水素先導事業 **発明**（権利化・ノウハウ指定）/**論文・講演等**（公表）届出/申請書

プルダウンメニューになってます

| | | | |
|---|---|---|---|
| 提出日* | 年 月 日 | 受付番号(NEDO記入) | ***-0 号 MIA1 |
| 提出書類の区分 | | NEDO承認番号 | |
| 知財委員会承認番号 | | | |
| 契約者管理番号* | | | |
| 事業名 大項目 | 水素利用等先導研究開発事業 | | |
| 中項目* | 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | | |
| 小項目* | | | |
| 提出事業機関名* | | | |
| 提出者氏名 | | | |
| 研究開発責任者等 | | | |
| ➢ 事業機関名 | | | |
| ➢ 氏名 | | | |
| 知財運営委員会委員長 | | | |
| ➢ 事業機関名 | － | | |
| ➢ 氏名 | － | | |
| 申請・届出の説明 | | | |
| ➢ 権利化・公表の区分 | | | |
| ➢ 種別 | | | |
| ➢ 氏名（筆頭者に○を付す） | | | |
| ➢ 区分 | | | |
| ➢ 名称*出願名称や論文等の題名 | | | |
| ➢ 概要 | | | |
| ➢ 実施計画書の該当箇所 | | | |
| 権利化の詳細 | | | |
| ➢ 出願ルート | | | |
| ➢ 出願国・指定国 | | | |
| 備考(管理番号等) | | | |
| 公表の詳細 | | | |
| ➢ 講演会名・雑誌名 | | | |
| ➢ 開催地・発行地 | | | |
| ➢ 要旨・論文提出期限 | | | |
| ➢ 発表・発行日 | | | |
| ➢ 公表内容の権利化状況 | | | |
| 出願番号/整理番号 | | | |
| ➢ 当該特許なしの場合の理由 | 当該特許なしの理由（知財委員会での判断の根拠をご記入ください） | | |
| ➢ 添付資料 | ＊備考があれば記入 | | |
| 有無 | | | |
| 種類 | | | |
| ➢ パスワード | | | |

チェックリスト

□提出内容の記載漏れチェック済（特に提出日）
□知財運営委員会（設置されている場合）及び所属機関の了解済
□本事業の成果であることの記載を確認済
□他機関の著作権侵害の確認済(公表の場合)
□知的財産権確保に関する協議済(公表の場合)

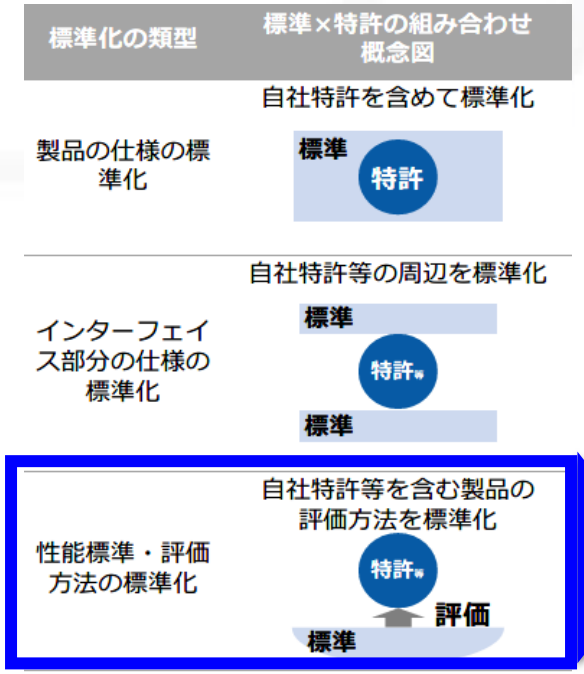
その他（NEDOへの連絡・質問・確認事項があればご記入ください）

ＮＥＤＯ担当者
コメント及び印
確認日

**注意事項**
**申請 当該公表内容の初回公表時→承認番号を付与します**
**届出 一度申請し、承認を受けた内容を別の場で公表する場合**
申請については投稿先等の締め切りの2週間前までに手続きをお願いします。直前の場合、ご希望の期限までに承認できない場合があります。

# 知的財産・標準化戦略

標準化に係る考え方
●水電解市場の本格的な形成はこれからであるが、要素技術も含めるとそのプレイヤーは多岐に渡る
●使われ方も様々である中で、性能の共通的な評価手法は健全な市場形成においても重要であり、本事業で取り組む評価手法を積極的に横展開




当該評価手法が基盤となって知財が形成されることが市場形成に貢献することが期待される

評価用セル
加速劣化評価法

**標準評価手法として公開**
**事業者間に横展開　普及**

標準化ビジネス戦略検討スキル学習用資料https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/katsuyo/business-senryaku/pdf/002.pdf「標準化をビジネスで用いるための戦略・知財と標準化の連携」より抜粋引用

**出願状況**
**国内出願：電気化学セル**
**PCT出願：アノードの加速評価方法**
**（国内移行：CN、EP、KR、US、CA）**

**そのうえで評価手法を公開**
**研究開発項目Ⅰの他事業者や企業に横展開するとともに、GI基金で実施する水電解システムの評価基盤とも連携**

**学術誌にも掲載し広く周知**
（電気化学2022 年 90 巻 2 号 p. 136-158 ）
**https://www.jstage.jst.go.jp/article/denkikagaku/90/2/90_22-TE0003/_article/-char/ja/**

# ＜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

- ■ 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・事業化」の考え方及び見込み
- □ 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

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

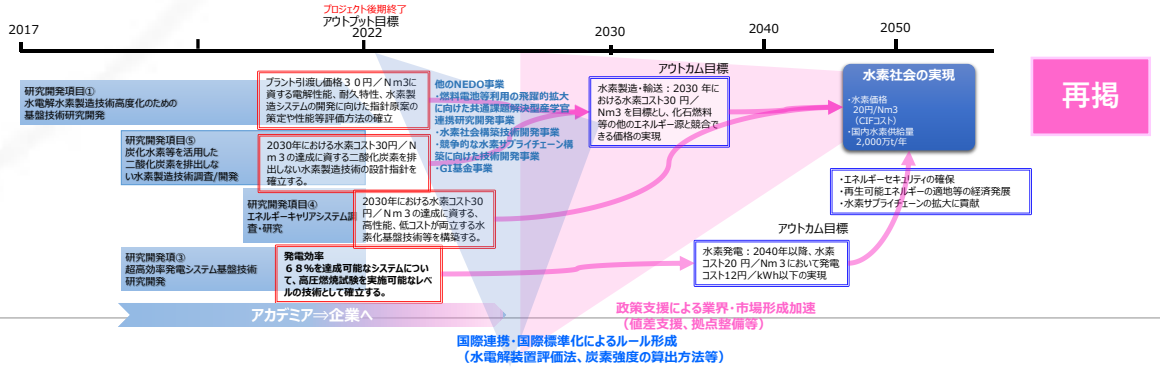
□（塗りつぶしなし）：評価対象外

（※） 評価対象外
事前・中間評価時の資料ページは残す

# アウトカム目標の設定及び根拠

●水素基本戦略の目標や既存化石燃料使用時と比較して同等の発電コストが本事業の基本計画上のアウトカム目標の設定根拠
●他方で、これらの目標は前提条件に大きく依存するところ、成果の価値は技術の使われ方に応じて柔軟に評価する必要あり
●最終的な狙いは、水素導入量目標（2030年300万t、2040年1200万t、2050年2000万t）・水素社会実現への貢献

| 研究開発項目 | アウトカム目標 | 根拠 | 最終的な狙い |
|---|---|---|---|
| 研究開発目標①「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」 | ２０３０年における水素コスト３０円／Nm³を目標都市、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 2030年ごろに～中略～30円/Nm3程度の水素コストの実現を目指す」という記述。水素基本戦略平成29年12月26日 | 水電解システム普及による水素導入目標・水素社会実現への貢献 |
| 研究開発目標③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」 | 水素発電については、２０４０年以降、水素コスト２０円／Nm³において発電コスト１２円／ｋWh以下の実現を目指す。 | 水素がＬＮＧと同等のコスト競争力を持つと期待される、２０４０年以降において、現行の日本のガス火力の発電コストと同等のコスト。 | エミッションフリーな超高効率発電を実現する酸素水素燃焼発電タービンの社会実装・普及を通じた、水素導入目標・水素社会実現への貢献 |
| 研究開発項目④ 「エネルギーキャリアシステム調査・研究」 | ２０３０年における水素コスト３０円／Nm³を目標都市、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 2030年ごろに～中略～30円/Nm3程度の水素コストの実現を目指す」という記述。水素基本戦略平成29年12月26日 | 水素キャリアの輸送コスト低減による水素導入目標・水素社会実現への貢献 |
| 研究開発項目⑤「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」 | ２０３０年における水素コスト３０円／Nm³を目標都市、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 2030年ごろに～中略～30円/Nm3程度の水素コストの実現を目指す」という記述。水素基本戦略平成29年12月26日 | 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造システム普及による水素導入目標・水素社会実現への貢献 |

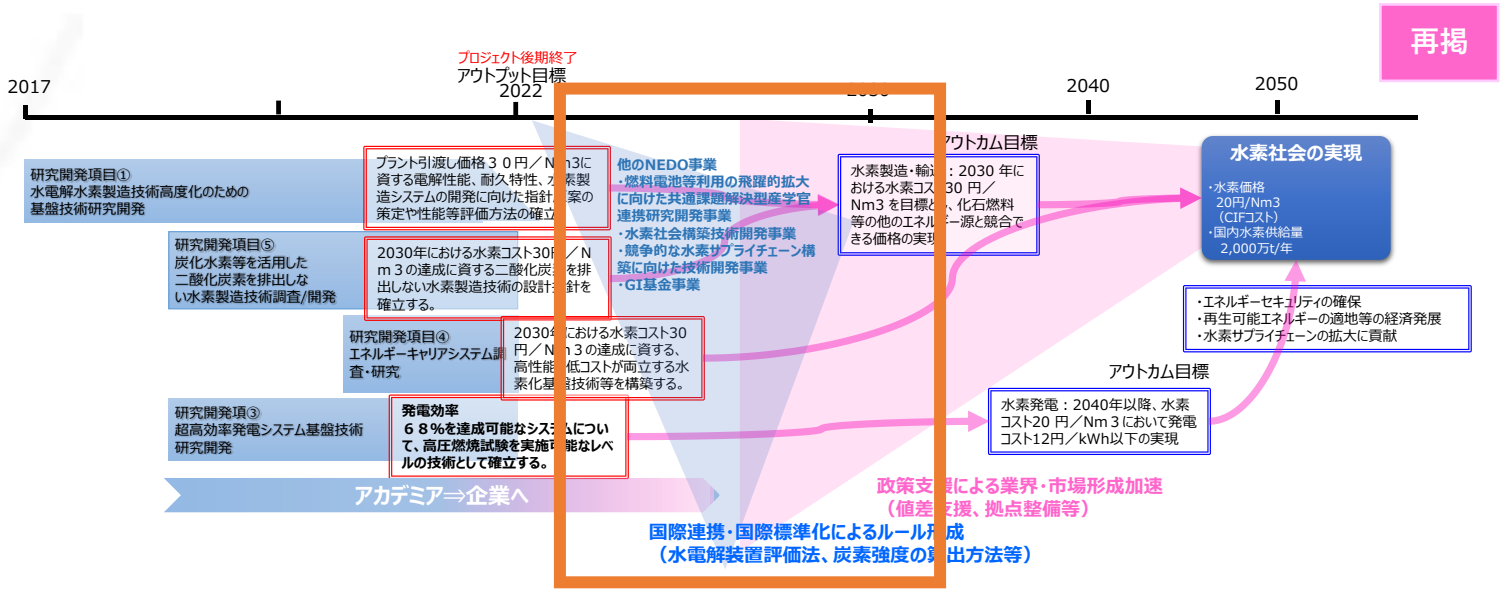


# 本事業における「実用化」の考え方

当該事業は「先導研究」であり、多様なテーマで実施する技術シーズの技術成立性や経済成立性等を確認して次の研究開発フェーズへ移行させるか否かを判断するもの。

そのため、本事業における「実用化」とは、「水素製造から、貯蔵・輸送、利用等まで水素サプライチェーンを構成する要素技術について、事業化に向けた次のフェーズの国家プロジェクトや自主研究開発等へ移行可能な技術が創出されること」と定義する。

| プロジェクト類型 | 実用化・事業化の考え方 | |
|---|---|---|
| 標準的研究開発 | プロジェクト終了後5年を目処に、事業化まで達することを目指す研究開発 | 該当しない |
| 基礎的・基盤的研究開発 | プロジェクト終了後5年を目処に（もしくはそれ以上の期間で）、実用化まで達することを目指す研究開発 | 該当 |
| 知的基盤・標準整備等の研究開発 | 知的基盤・標準整備等を目的としており、研究開発成果による事業化・実用化を目標としていない事業 | 該当しない |

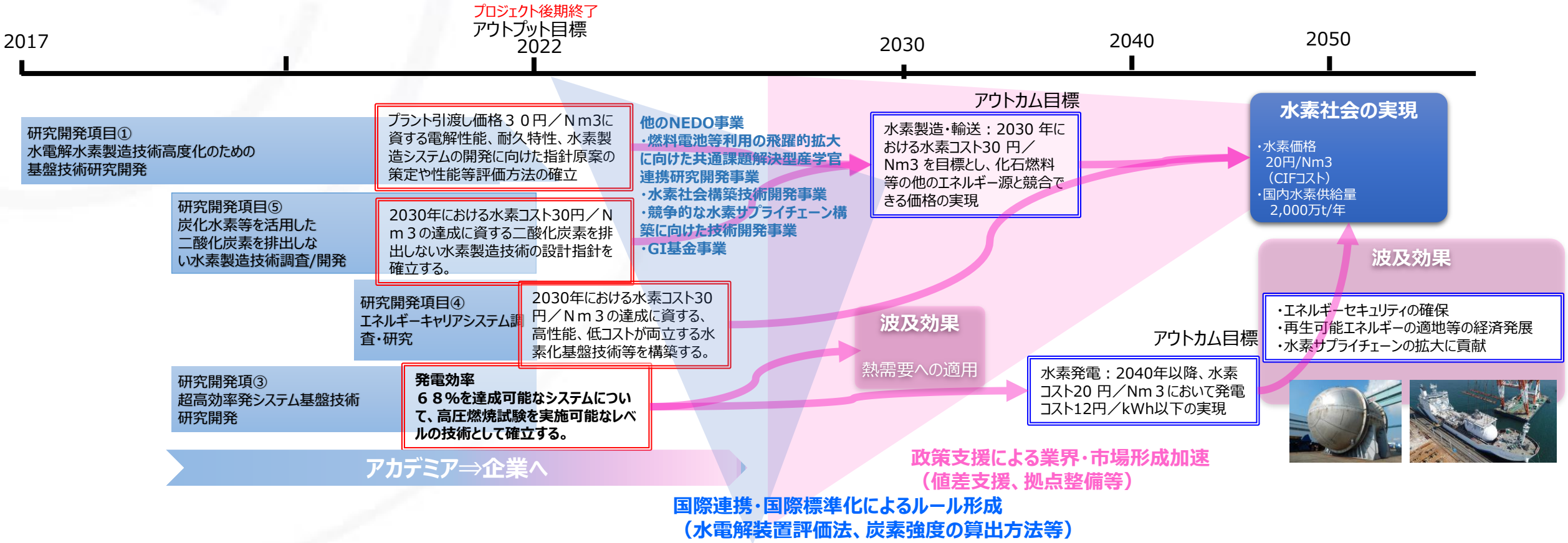


# アウトカム目標の達成見込み

| 研究開発項目 | アウトカム目標 | 最終的な狙い | 現状 | 達成見込み | 根拠 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 研究開発目標①<br>水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 水電解システム普及による水素導入目標・水素社会実現への貢献 | アカデミア主体のテーマの内多くが社会実装を担う企業を巻き込み、次フェーズの研究開発に移行。企業による実施テーマは自主的な開発を継続し、成果の一部の実証を計画。 | ○ | 複数件のテーマが企業を体制に加えて開発を継続しているほか、一部テーマは成果の実証を計画しており、社会実装に向けて着実に研究会開発は継続しているため。 | ・要素技術プレイヤー間連携の流動性向上<br>・BOPコスト低減/電気化学以外のプレイヤーの参入（プラントエンジニアリングや運転制御最適化） |
| 研究開発目標③<br>超高効率発電システム基盤技術研究開発 | ２０４０年以降、水素コスト２０円／Ｎｍ３において発電コスト１２円／ｋＷｈ以下の実現を目指す。 | エミッションフリーな超高効率発電を実現する酸素水素燃焼発電タービンの社会実装・普及を通じた、水素導入目標・水素社会実現への貢献 | 発電利用よりも早期に社会実装する適用先として熱需要への適用を調査研究に着手 | △ | 現時点では次フェーズの発電技術開発に進んではいないが、本テーマのアウトプットを基に熱需要でいち早く酸素水素燃焼の社会実装を実現し、その成果を将来的な発電技術開発に活かす計画であるため。 | ・燃焼試験結果に基づく要素技術開発の継続<br>・熱需要向け適用先での燃焼完結性及び制御方法の確立 |
| 研究開発項目④<br>エネルギーキャリアシステム調査・研究 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 水素キャリアの輸送コスト低減による水素導入目標・水素社会実現への貢献 | 基盤技術としての計測やシミュレーション手法の利活用やその高度化を行い、企業に知見提供すると共にコンソーシアムを構築。 | ○ | 本テーマが直接的に輸送システムを開発するわけではないが、MCH/液水を活用する企業へ基盤技術を提供する体制を構築したため。 | ・難易度の高い計測技術の課題解決<br>・液水関連企業との連携と設計実務への深い関与 |
| 研究開発項目⑤<br>炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。 | 炭化水素等既存のエネルギーを活用した二酸化炭素を排出しない水素製造システム普及による水素導入目標・水素社会実現への貢献 | 複数テーマにおいて事業化を目指す企業が中心となって次のフェーズ（要素開発、実証）に進んでいる。 | ○ | 企業を体制に加えて次フェーズの開発・実証（計画含む）を継続しているため。 | ・水素製造コスト低減と副生炭素機能性獲得のトレードオフ最適化<br>・メタン直接熱分解の炭素強度計算の扱い |

# 波及効果

水素社会を実現することで、エネルギーセキュリティの確保や再エネ適地の経済発展に繋がるほか、他産業（化学業界、製鉄業界等）における脱炭素化へも貢献。



# 費用対効果

プロジェクト費用の総額

総額127億円　（前期59.8億円・後期67.5億円　うち評価対象期間（21~22年度）31.2億円）




| | | | |
|---|---|---|---|
| **2050年における市場規模試算*** | 約4.4兆円 | 約5.5兆円 | 【水素発電タービン】約23兆円<br>【産業用（鉄鋼）】約40兆円<br>【定置用FC】約1.1兆円<br>【FC商用車】約300兆円 |
| **日本企業による2050年の獲得可能市場規模試算**** | 約35兆円 | | |
| **海外の主なプレイヤー** | Siemens（独）<br>Thyssenkrupp（独）<br>NEL（ノルウェー）<br>ITM Power（英）<br>Cummins（米） | 韓国造船海洋（韓）<br>大宇造船海洋（韓）<br>Shell（英）<br>Linde（独） | 【発電】GE（米）Siemens（独）<br>【産業利用（熱）】Siemens（独）<br>【定置用FC】Bosch（独）<br>【車】上海汽車（中）、ヒュンダイ（韓）、Daimler（独） |

＊　「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（本文）」（2021年6月18日）
＊＊第11回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーントランスフォーメーション推進小委員会／総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 2050年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合　資料１「GXを実現するための政策イニシアティブの具体化について」より資源エネルギー庁試算（2022年12月14日）

出典：第31回 水素・燃料電池戦略協議会　資料3

# 非連続ナショナルプロジェクトに該当する根拠

**◆非連続ナショナルプロジェクトの考え方**

➢ ＮＥＤＯでは、社会・経済的インパクトを持つ技術の創出に貢献するテーマを対象にした「非連続ナショナルプロジェクト」という枠を設定している。具体的には以下のとおり。

✓「非連続ナショナルプロジェクト」とは非連続なイノベーション（非連続な価値の創造）の創出を目的として行われる技術開発事業であって、特にリスクの高い（技術の不確実性）もの

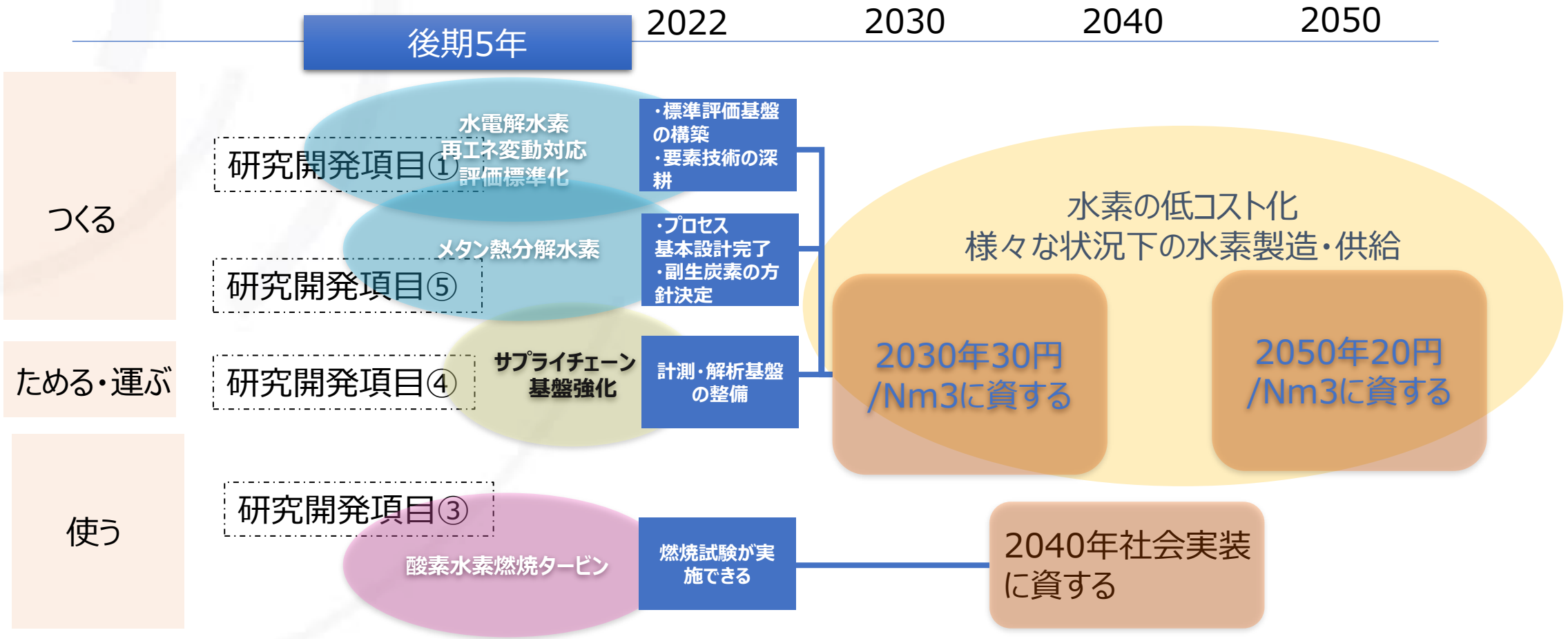
✓「非連続的な価値の創造」と「技術の不確実性」のどちらにも該当する場合を「非連続ナショナルプロジェクト」と定義する。

| | 内容 |
|---|---|
| 非連続的な価値の創造 | 画期的で飛躍的な変化を伴う価値が創造され、提供されることにより、生活、環境、社会、働き方などを変える |
| 技術の不確実性 | 難易度が高い技術的課題や、新領域へのチャレンジなどにより、目標とする特性値や技術は従来の延長上にはなく、リスクが特に高い |

➢ 本事業のうち、研究開発項目③「従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発」は非連続ナショナルプロジェクトとして扱う。

| | 理由 |
|---|---|
| ①非連続的な価値の創造 | 酸素・水素燃焼発電の実現及び液化水素冷熱の有効活用により、システムのトータルでのエネルギー効率を向上して水素エネルギーとして社会で利用していく意義をより高めることが可能となるため、水素を新たな産業として確固たるものにさせる |
| ②技術の不確実性 | 酸素水素燃焼型タービン発電技術の基盤研究開発では、現在実現していない新たなタービンの概念から研究するものであり技術の不確実性は高い。 |

# アウトプット（研究開発成果）のイメージ



# アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

| 研究開発項目 | 研究開発内容 | 最終目標（2022年３月） | 根拠 |
|---|---|---|---|
| **研究開発項目① 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発** | アニオン交換膜（ＡＥＭ）型水電解技術等の先端研究、変動電源に対する各種水電解技術の劣化機構の解明及び電解性能や劣化に関する共通評価手法の開発等。 | プラント引渡し価格３０円／Ｎｍ$^3$に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定や性能等評価方法の確立. | 水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm$^3$程度の水素コストの実現を目指す」という記述。 |
| **研究開発項目③ 超高効率発電システム基盤技術研究開発** | 水素サプライチェーンのＬＣＡ(Life Cycle Assessment:ライフサイクルアセスメント）全体で二酸化炭素排出をゼロにすることは困難であることから、水素発電技術の更なる高効率化は必要不可欠。従来の開放系サイクルを大幅に凌駕する高効率の発電システムを構築する。 | 事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。 | 水素基本戦略に「水素を安定的かつ大量に消費する水素発電は国際的なサプライチェーンの構築とセットで進めるべき最重要アプリケーション」との記述。2019年度継続可否審査において最終目標は「2022年度の事業終了時に実機レベルに移行可能な要素技術を確立すべき」という有識者意見。 |
| **研究開発項目④ エネルギーキャリアシステム調査・研究** | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。 | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。 | 水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm$^3$程度の水素コストの実現を目指す」との記述。 |
| **研究開発項目⑤ 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査** | メタン等の炭化水素やバイオマス資源等をはじめとした水素源から安価かつ大量の水素を製造する、二酸化炭素を排出しないコア技術の可能性を調査する。 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する二酸化炭素を排出しない水素製造技術の設計指針を確立する。 | 水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm$^3$程度の水素コストの実現を目指す」との記述。 |

# アウトプット目標の達成状況

| 研究既発項目 | 目標<br>（2023年３月） | 成果（実績）<br>（2023年３月） | 達成度 | 達成の根拠／解決方針 |
|---|---|---|---|---|
| 研究開発項目①　水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | プラント引渡し価格３０円／Ｎm3に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立する。 | MI等も活用し、アルカリ、PEM、AEM、SOEC型水電解技術開発に取り組み、高性能・高耐久・低コストを成立させる材料からシステム開発、評価技術、劣化加速プロトコルを開発。目標水素価格実現に向けて開発の指針原案や性能等評価方法を確立した。 | ○ | 電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定をし、水電解装置やプラント基本設計に向けたプレイヤー間の連携を具体化させた。また評価標準化にむけプロトコルの確立とその水平展開も進めたため。なお、高IF誌への掲載や出願数も2年間で100件を超えるとともに、SOECについては生成ガス純度および流量、等の測定方法をIEC 62282-8-301第1版に反映するなど一部テーマでは想定・計画以上の成果を創出。 |
| 研究開発項目②　超高効率発電システム基盤技術研究開発 | 事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。 | 発電効率68%達成可能なシステムに係る高圧燃焼試験を実施した。また社会実装の検討においては2030年に社会実装を視野に熱需要への酸素水素燃焼の適用について具体的に案をまとめた。 | ○ | システム検討において動特性解析モデルを構築し、負荷変化や周波数変動に対する動特性解析を可能とした。安定した酸素水素燃焼を可能にする高温高圧燃焼機器の開発においてシングルバーナにて0.８MPa・1kW以上の条件にて燃焼試験を実施し、クローズサイクルを模擬した検証装置を構築する準備を整えることができたため。 |
| 研究開発項目④　エネルギーキャリアシステム調査・研究 | 有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する、高性能、低コストが両立する水素化基盤技術等を構築する。 | 有機ハイドライド製造及び液体水素に関する解析モデルによる設計技術の構築と要素材料技術開発に取り組み、解析手法の提示と活用を進めた。 | ○ | 有機ハイドライド製造についてはファラデー効率（水素生成を抑制し、MCH直接製造割合95%超え）を高める技術開発・設計指針の導出、及び運転プロトコルの導出により、他事業で実施する企業の実証に重要な知見を提供。液体水素については新規の現象把握を達成するとともに水素需要分野に新規に進出するプレイヤーの拡大にも貢献した。 |
| 研究開発項目⑤　炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | ２０３０年における水素コスト３０円／Ｎｍ３の達成に資する二酸化炭素を排出しない水素製造技術の設計指針を確立する。 | 水素製造プロセスについてベンチスケール試験を推進するとともに、副生する炭素の回収や利用についても検討が進み、プロセス設計指針を確立したことで、実証フェーズの検討を具体的に取り組むことができた。 | ○ | １事業が実証フェーズに、2事業が実証フェーズの検討段階に進み、実証フェーズに進んだ事業については、量産可能な触媒設計及び全体プロセスの仕様確定を踏まえ、実機スケールプラントの基本設計及び事業シナリオの策定を完了したため。 |

◎　大きく上回って達成、○達成、△一部未達、　×未達

# 特許出願及び論文発表(特許)

- 20年以降特許出願は飛躍的に件数が増加。全事業1件以上の出願あるいは出願を準備中
- 予算当たりの出願件数としても2020年度以前を大きく上回る。
- アカデミアからの出願が増加し、外国出願のほか、第三者への実施権付与（2例）、権利移転（1例）も。
- 企業出願案件においては特に国内移行事例が増加し市場を視野に入れた動きが見て取れる。

() 内はアカデミアの単独あるいは共同出願の件数

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 予算 | 1,079 | 1,277 | 1,455 | 1,296 | 879 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1443 | 1675 |
| 特許 | 4 | 10 | 8 | 15 | 5 | 9 | 13 | 11（7） | 54(36) | 70(21) |

| 特許出願 | ファミリー数 | 外国出願 | | | | | | | 外国出願小計（PCT含む） | 計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PCT | CN | EP | US | AU | CA | KR | | |
| 2021年度 | 21(11) | 5(5) | 4(0) | 6(4) | 6(4) | 2(0) | 6(4) | 4(4) | 33(25) | 54(36) |
| 2022年度 | 34(15) | 6(6) | 1(1) | 8(0) | 9(0) | 7(0) | 5(0) | 0(0) | 36(6) | 70(21) |
| 計 | 55(26) | 11(11) | 5(0) | 14(4) | 15(4) | 9(0) | 11(4) | 4(4) | 69(31) | 124(57) |

・外国出願においてPCTは1件として集計。国内移行は各国1件として集計。
・出願準備中で、事業者が公表を希望しない場合は集計から除外して集計。
・2023年度に出願及び出願を予定しているのは2022年度に合算して集計。

# 特許出願及び論文発表(論文)

●論文だけでなく、口頭発表やポスター発表においても査読付きの事例あり。
●事業成果を含む論文が高IF誌への掲載も。
(21年3月：東京工業大学がACS Applied Energy Materials表紙掲載*・22年2月：理化学研究所がNat. Cat.に掲載)

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 予算 | 1,079 | 1,277 | 1,455 | 1,296 | 879 | 815 | 1,319 | 1,500 | 1443 | 1675 |
| 論文 | 0 | 0 | 16 | 13 | 10 | 3 | 9 | 12 | 32 | 62 |
| 学会発表<br>(ポスター含む)<br>講演・講師 | 0 | 24 | 100 | 176 | 57 | 68 | 121 | 61 | 109 | 127 |

| 論文投稿 | 査読 | | 計 |
|---|---|---|---|
| | あり | なし | |
| 2020 | 8 | 4 | 12 |
| 2021 | 26 | 6 | 32 |
| 2022 | 51 | 11 | 62 |
| 計 | 85 | 21 | 106 |

| 口頭発表 | 査読 | | 計 |
|---|---|---|---|
| | あり | なし | |
| 2020 | 7 | 36 | 43 |
| 2021 | 7 | 56 | 63 |
| 2022 | 15 | 68 | 83 |
| 計 | 29 | 160 | 189 |

| ポスター発表 | 査読 | | 計 |
|---|---|---|---|
| | あり | なし | |
| 2020 | 0 | 8 | 8 |
| 2021 | 1 | 7 | 8 |
| 2022 | 0 | 12 | 12 |
| 計 | 1 | 27 | 28 |

前回の中間評価は20年8月25日時点での集計であったので20年度より記載した。
＊前回の中間評価後の成果につき報告対象とした。

# 特許出願及び論文発表（メディア）

メディアへの取り上げ事例も増加。事業成果を含む東京工業大学ACS Applied Energy Materials表紙掲載関連記事では19例も。

| 年度 | 事例数 |
|---|---|
| 2020 | 19 |
| 2021 | 11 |
| 2022 | 13 |

（全事例アカデミア）

| 記事名称 | 媒体 | 掲載日 | 研究開発項目 |
|---|---|---|---|
| 極めて安価な金属で世界トップクラスの活性を持つ水電解用触媒を開発 | 東工大ニュース | 2021/3/1 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Phys. org | 2021/3/2 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Eurekalert! | 2021/3/2 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Bioengineer.org | 2021/3/2 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | ScienMag | 2021/3/2 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Science Daily | 2021/3/2 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Mirage News | 2021/3/3 | ②-2 |
| Scientists Find Remarkable Electrocatalyst Candidate for Cost-Effective Water Splitting | Azom.com | 2021/3/3 | ②-2 |
| Dethroning Electrocatalysts for Hydrogen Production with Inexpensive Alternative Material | Nanotechnology Now | 2021/3/4 | ②-2 |
| Tokyo Tech team develops high-performance bimetallic OER electrocatalyst for water splitting | Green Car Congress | 2021/3/4 | ②-2 |
| 東工大・物材機構、水電解の安価な触媒開発 | 日刊工業新聞 電子版 | 2021/3/5 | ②-2 |
| 水電解の安価な触媒 | 日刊工業新聞 朝刊19面 | 2021/3/5 | ②-2 |
| 水の電気分解用、安価な触媒開発 | 日本経済新聞 朝刊11ページ | 2021/3/8 | ②-2 |
| 水の電気分解用、安価な触媒開発 | 日本経済新聞電子版 | 2021/3/8 | ②-2 |
| 鉄とカルシウム CO2削減の『切り札』に | 産経新聞 電子版 | 2021/3/13 | ②-2 |
| Dethroning electrocatalysts for hydrogen production with inexpensive alternative material | Chem Europe | 2021/3/16 | ②-2 |
| 水の電解触媒 価格３万分の１ | 日経産業新聞 朝刊6ページ | 2021/3/22 | ②-2 |
| 安価・高活性な水電解正極 | 化学工業日報 朝刊3面 | 2021/4/7 | ②-2 |
| アニオン交換膜を利用した水電解による高性能、高耐久、低コストの水素製造システム | 東工大ニュース | 2021/4/7 | ②-2 |
| 水電解技術のダークホース『AEM形』 安価な鉄が高性能触媒に | 日経XTECH | 2021/12/6 | ②-2 |

# ＜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

- ■ 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
- ■ 進捗管理：開発促進財源投入実績
- ■ モティベーションを高める仕組み（該当しない場合は削除）

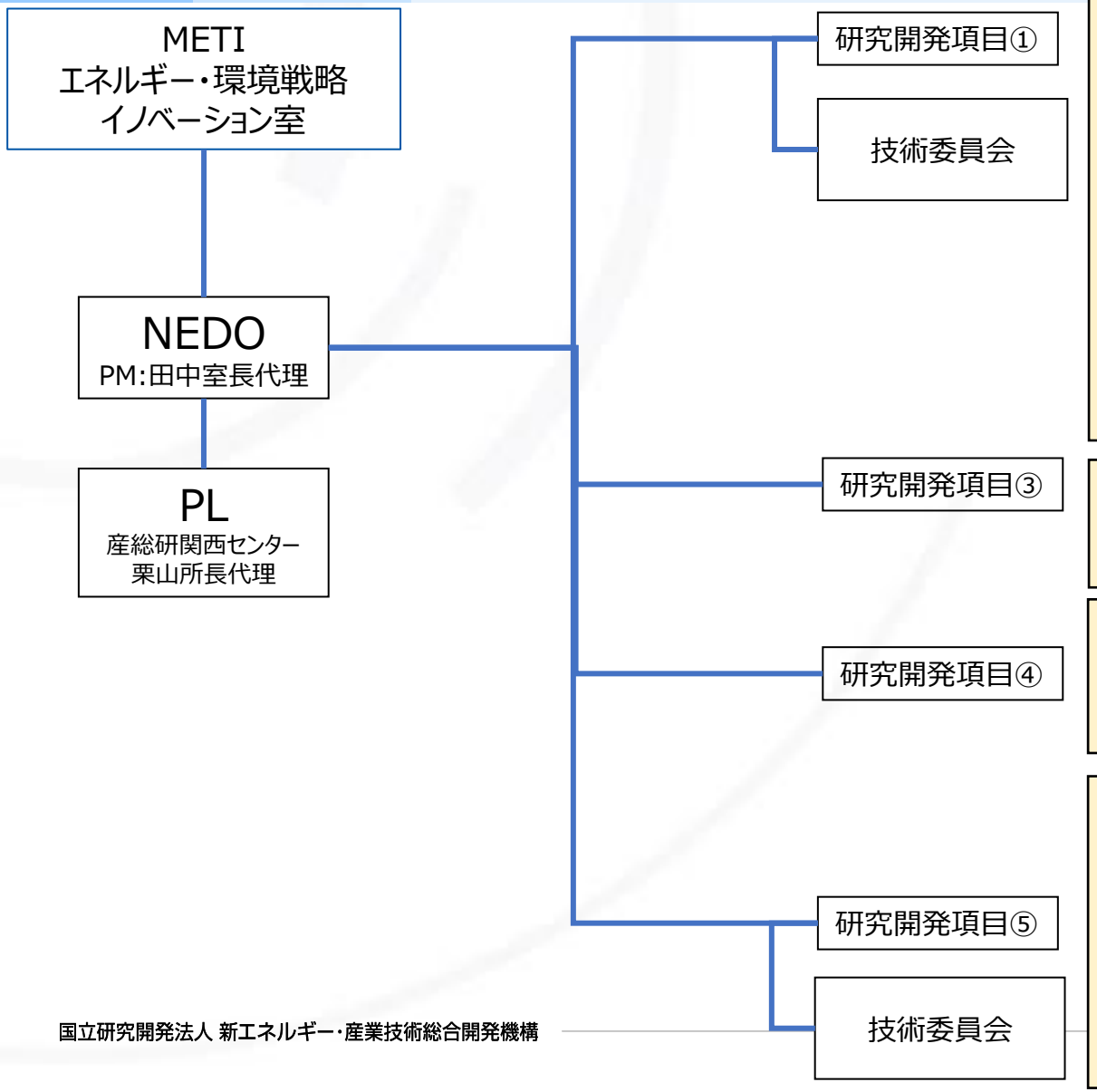
（※） 評価対象外
事前・中間評価時の資料ページは残す

□（塗りつぶしなし）：評価対象外

# NEDOが実施する意義

- 社会に新規のエネルギー種を導入することは事業化リスクが高く、投資規模が大きいことから個別の民間企業等が取り組むことは困難であるため、国家プロジェクトとして資金を提供するスキームが必要である。
- 水素社会の実現には水素の「製造、輸送・貯蔵、利用」といった一連のサプライチェーンの構築が必要不可欠であり全体を俯瞰しながら個別要素研究を推進する必要があるが、それを遂行可能な個別企業は存在しないためＮＥＤＯが国家プロジェクトを運営する必要がある。
- 国家プロジェクトというスキームは多様な機関（アカデミア、公的研究機関、企業等）が連携して共通課題に対処する研究開発体制の構築のトリガーとなる。
- 創出した成果を効果的かつ効率的に次の実用化フェーズの国家プロジェクトへ移行することが可能である。
- 水素閣僚会議、IPHE（国際水素・燃料電池パートナーシップ）等の政府間ハイレベル会合への参加やIEA TCP等の各国技術開発機関のネットワークを通じて各国機関と密に情報を共有し、必要に応じて迅速に国家プロジェクト運営に反映することや、各国機関に必要事項をインプット可能である。

# 実施体制（2021年度以降）




**水電解水素製造技術高度化のための基礎技術開発**

**高温水蒸気電解システムの研究　（SOEC）**
・東芝エネルギーシステムズ

**非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発（PEM）**
・理化学研究所

**アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発　（AEM）**
・産業技術総合研究所/早稲田大学/北海道大学

**高性能・高耐久な固体高分子形及び固体アルカリ水セルの設計開発　（AEM）**
・東京工業大学

**アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化（PEM/AWE）**
・横浜国立大学/京都大学/東北大学/公立大学法人大阪/産業技術総合研究所/立命館/デノラ・ペルメレック/

**アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究（PEM/AWE）**
物質・材料研究機構

**高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発　（AEM）**
・山梨大学/パナソニックホールディングス/タカハシプレシジョン/日本化学産業/東北大学

**低コストAEM型水電解システムの実現に向けたアニオン交換膜材料の高ロバスト化　（AEM）**
・日本触媒/東京工業大学

**プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究（PEM）**
・北海道大学

**従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発**

**酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発**
・産業技術総合研究所/宇宙航空研究開発機構/東芝エネルギーシステムズ/東京工業大学/大阪大学/電力中央研究所/石炭フロンティア機構/川崎重工業

**エネルギーキャリアシステムの調査・研究**

**トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上**
・横浜国立大学/東北大学

**水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築**
・早稲田大学/東京大学/荏原製作所

**炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発**

**ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発：2021年度まで**
・筑波大学/東京工業大学/物質・材料研究開発機構/大阪大学

**メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造**
・物質・材料研究機構/太陽鉱工/静岡大学

**メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発**
・戸田工業/エア・ウォーター

**メタン熱分解による水素製造技術の研究開発**
・産業技術総合研究所/IHI/京都大学

**メタン直接分解による水素製造技術開発**
・伊原工業（東京理科大： 2021年度まで）

＊緑字は前回中間評価(2020年度）以降に採択

# 個別事業の採択プロセス

2021年以降、研究開発項目I、IV、Vにおいて追加公募を実施。

| 採択テーマ | 公募予告 | 公募期間 | 採択数 | 特記事項 |
|---|---|---|---|---|
| 研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基礎技術開発<br>**アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究**<br>**高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発**<br>研究開発項目④エネルギーキャリアシステムの調査・研究<br>**トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上**<br>**水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築**<br>研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発<br>**ホウ化水素を用いた熱による水からの水素生成技術の研究開発**<br>**メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造**<br>**メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発**<br>**メタン熱分解による水素製造技術の研究開発**<br>**メタン直接分解による水素製造技術開発** | 2021年1月7日 | 2021年2月8日<br>~2021年3月10日 | 2 | AEM形2件採択<br>採択条件：予算の大幅削減 |
| | | | 2 | 採択条件：予算の大幅削減 |
| | | | 5 | 採択条件：予算の大幅削減。うち2件は1年目終了時に継続可否審査を実施の条件付き。 |
| 研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基礎技術開発<br>**アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究** | 2021年11月1日 | 2021年11月15日<br>~2021年11月29日 | 1 | |
| 研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基礎技術開発<br>**プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究** | 2022年7月12日 | 2022年7月26日~<br>2022年8月9日 | 1 | |

審査にあたり、採択審査基準　評価項目（2）提案技術の新規性・優位性に関する「評価の視点」には前回の中間評価の指摘事項を反映
① 既存技術が明確に説明され、それとの比較により提案内容のポジショニングが示されているか。
・他の従来技術のベンチマークができているか。
・ベンチマークとの比較により客観的に提案技術の新規性、優位性が示されているか。
②開発テーマの技術的問題点を明らかにし、その課題を解決できる提案内容か 。
・現状のボトルネックとなっている課題を具体的に示し、その解決に対する仮説と検証方法が具体的に示されているか。
③科学的根拠に立脚した 理論的な仮定が明確に説明されているか。
・提案する技術は科学に立脚した仮定を検証するものであるか。
・その仮定は、科学的に理論が広く受け入れられているものであるか。

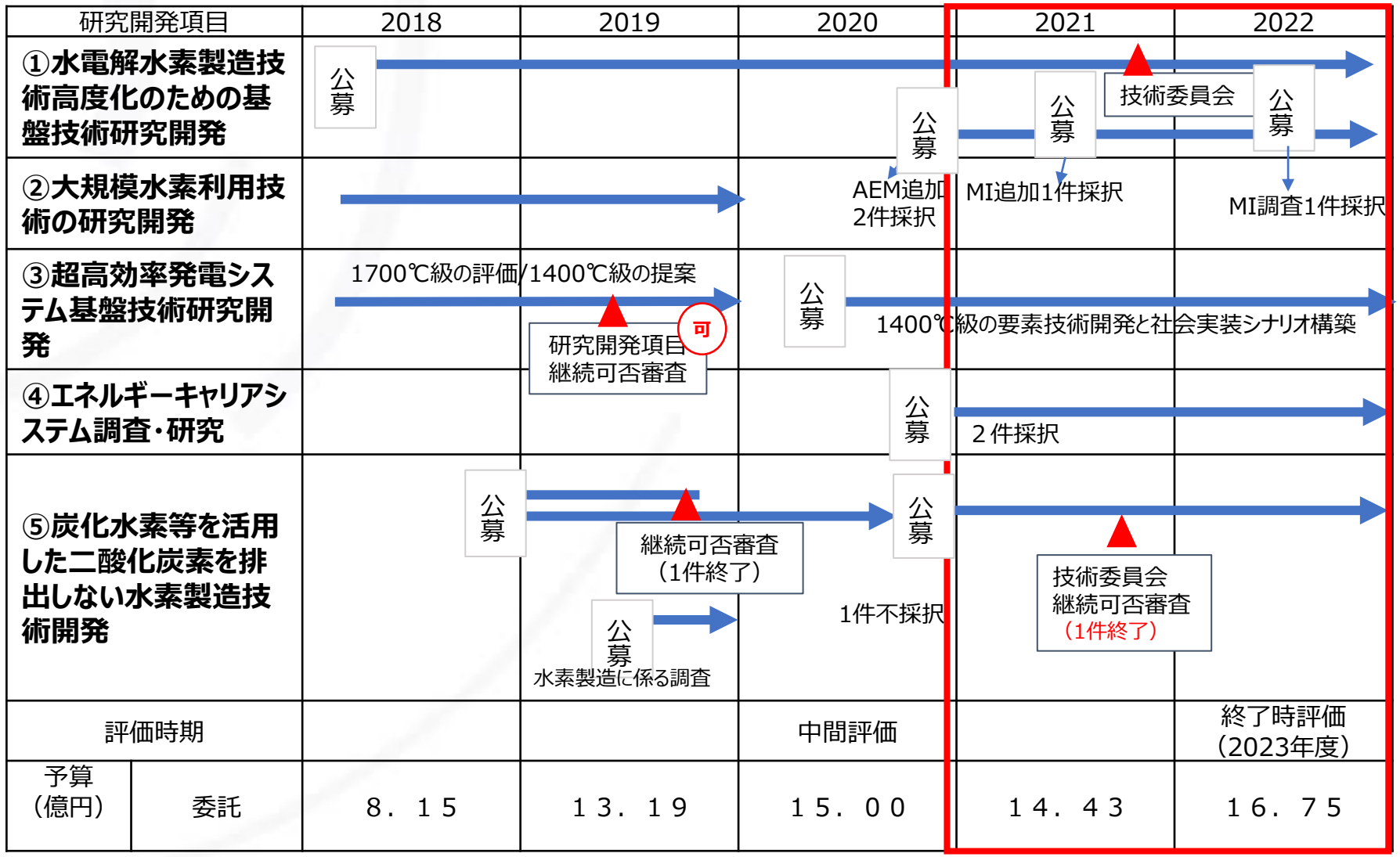
# 予算及び受益者負担

●いずれの研究開発項目も市場形成が未成熟あるいは2040年をにらんだ次世代技術シーズであり、TRLが低い。
●アカデミアや公的機関に参画を促すとともに、民間企業においてもリスクの高い技術領域に取り組んでもらうことを狙い委託事業として実施

| 研究開発項目 | 2021年度 | 2022年度 | 合計 |
|---|---|---|---|
| ①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | ８２０ | １０６０ | １８８０ |
| ③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発 | ２３５ | ２４２ | ４７７ |
| ④エネルギーキャリアシステム調査・研究 | ８４ | １０９ | １９３ |
| ⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発 | １９５ | ２５９ | 454 |
| 合　計 | １３３５ | １６７０ | ３００５ |

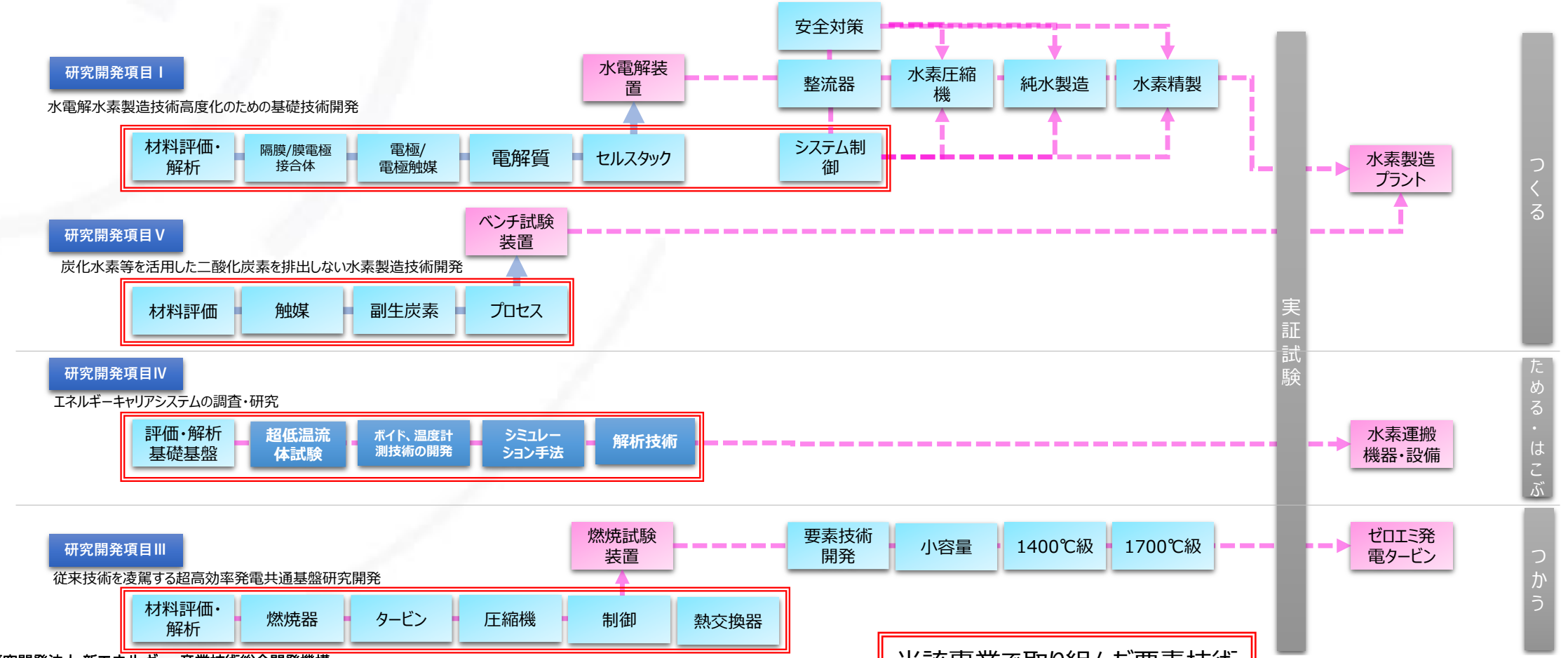
2023年8月29日の実績値に基づくただし、一部契約額で集計

# 研究開発のスケジュール



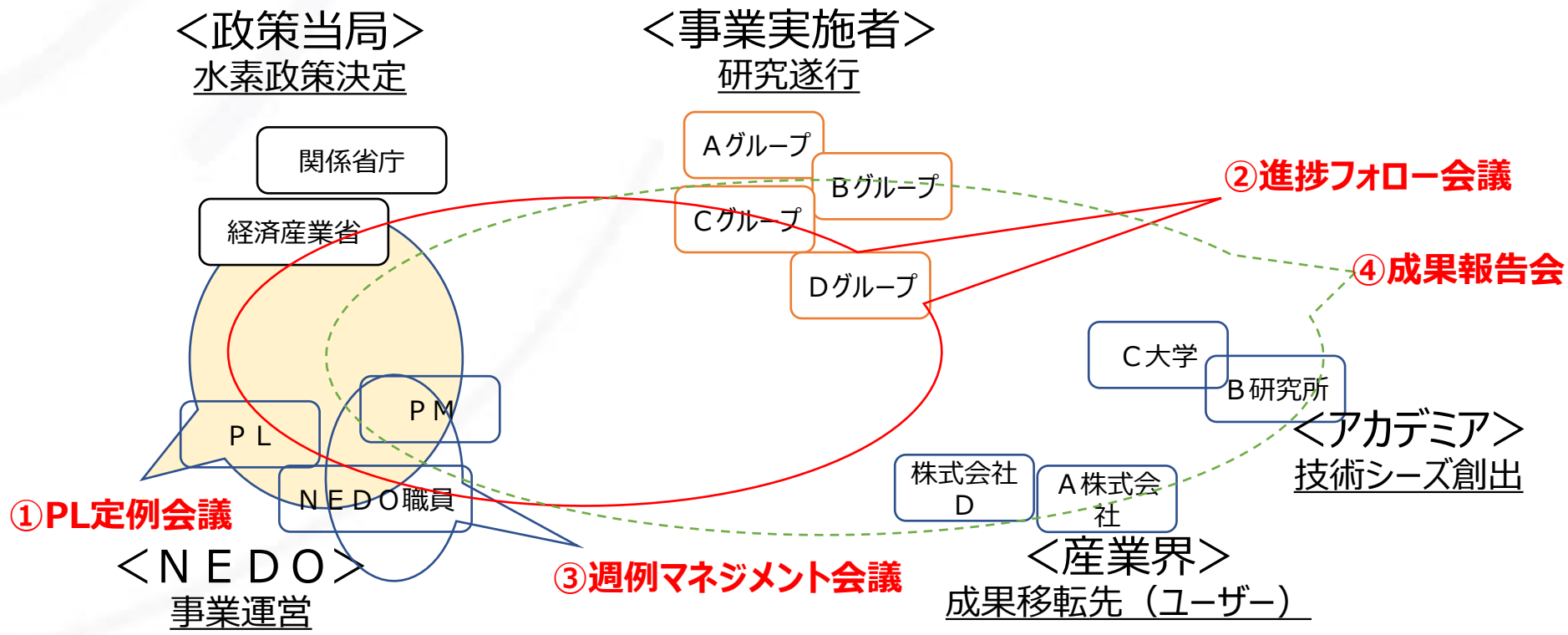
# 目標達成に必要な要素技術

各研究開発項目が目指す「製品」に向けては本事業で取り組む技術以外にも様々な要素技術が必要。本事業では、コアとなる技術や共通基盤技術にフォーカス。



# 進捗管理

● ＰＭは事業の資金計画を含む全体を運営。ＰＬは専門的知見からＰＭを支援
●研究を遂行する事業実施者の他に、政策決定を担う政策当局、技術の移転先となる産業界、技術シーズを創出するアカデミア等、事業を取り巻く多様なステークホルダーが存在
●ＮＥＤＯは上述のステークホルダーの貴重な意見を踏まえて多層的なチェック機能によるマネジメントを展開
主な例は以下のとおり



# 進捗管理

**①PL定例会議（1回/月、事業開始時から）**

- 目的：事業運営上の重要事項の情報を共有
  - ＰＬ、ＰＭ、ＮＥＤＯ担当者、経済産業省が出席
  - 各テーマの研究進捗状況、知財取得状況、成果創出状況の最新情報を共有

**②事業進捗フォロー（各事業につき2回/年、事業開始時から）**

- 目的：研究の進捗状況を確認する。
  - 研究開発実施者、ＰＬ、ＮＥＤＯ担当者、経済産業省が参加
  - 各テーマの研究進捗状況を現場で確認すると共に、特に2019年度からは実用化に向けた知財戦略の議論を強化

**③週例マネジメント会議（１回/週、2019年度から）**

- 目的：詳細な事務事項を含む最新情報の共有
  - ＰＭ、ＮＥＤＯ担当者が出席
  - ＮＥＤＯ内の方針、各事業で発生した最新情報を共有

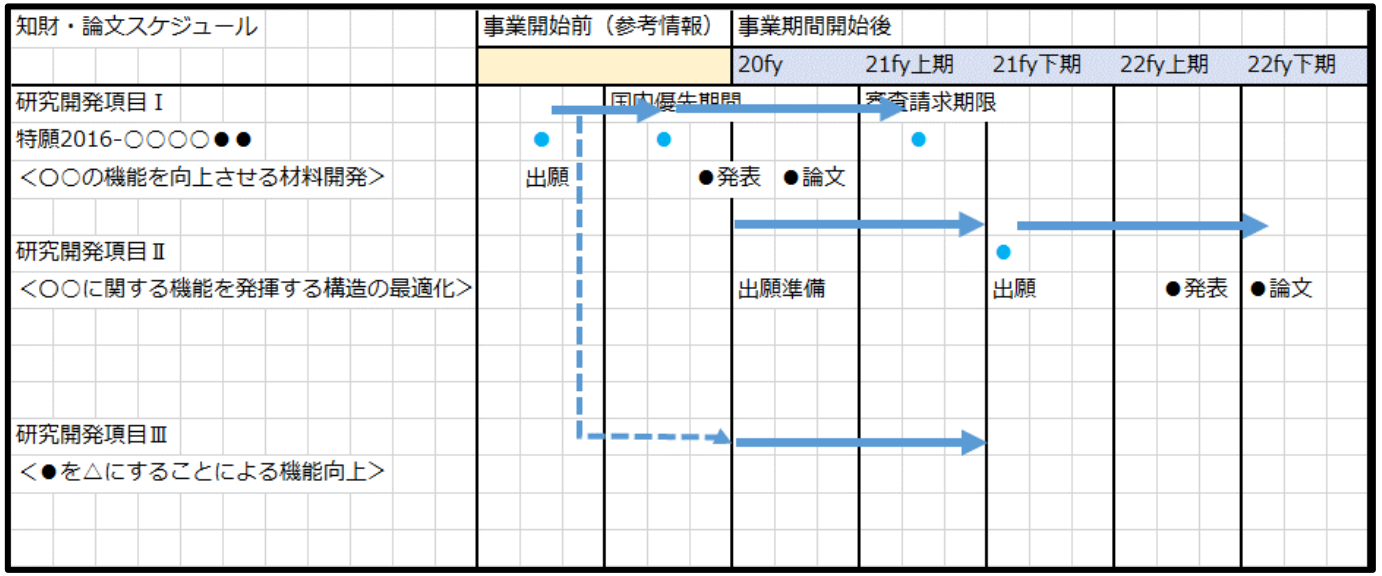
**④成果報告会（1回/年、事業開始時から）**

- 目的：成果を報告し、今後の方針を検討する場
  - 事業実施者、産業界やアカデミアの有識者、ＰＬ、ＰＭ、ＮＥＤＯ担当者、経済産業省等が出席
  - 成果技術の移転先となるユーザー企業等や技術アドバイザーたるアカデミアとの意見交換を通じて今後の研究方針を検討

# 進捗管理

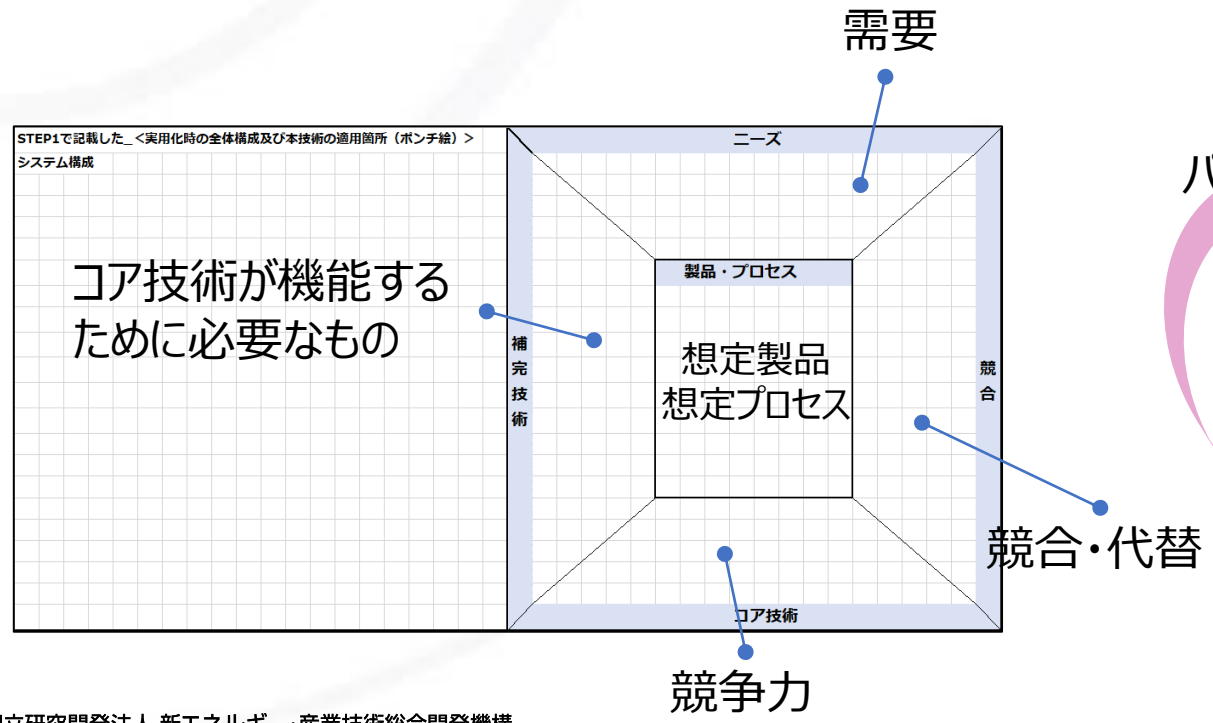
②事業者進捗フォロー
●年に２回、技術開発状況について報告を受け、進捗状況を把握すると共にPLからアドバイスを実施
●対話にあたり、先述の知財管理フォーマット＜仕上げたい技術の姿＞を活用し、オープン・クローズマネジメントに留意

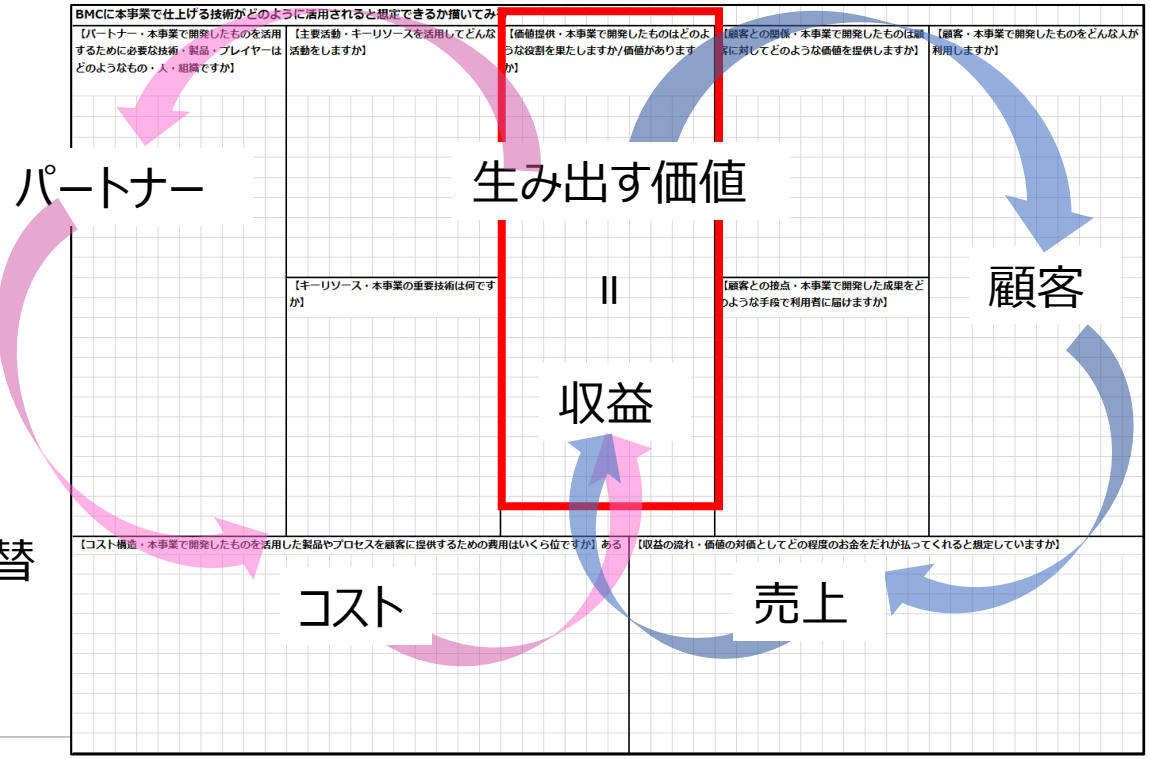
**事業成果の＜姿＞の共有**
**仕上げたい技術の姿　②目標への貢献　の様式を用いた事業者との対話**
**事業開始時**
研究開発項目ごとの成果のまとめ方について方針とスケジュール確認した。
**事業開始後**
研究開発項目ごとにその進捗を確認した。



# 進捗管理

②事業者進捗フォロー
対象技術のポジショニング
技術の側面：想定する**製品・プロセス**とその**ニーズ**・取り組む技術開発の**コア**とその**補完技術/競合**の整理
事業の側面：技術開発成果で得られる見込みの**価値**や**パートナー**、**収益構造**の整理
ビジネスモデルキャンバス（BMC）の適用



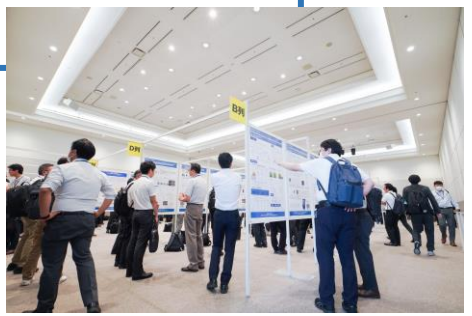



# 進捗管理

④NEDO水素・燃料電池成果報告会
●毎年度、2日間にわたり分野ごとに口頭発表とポスター発表を実施した。
●2023年は対面参加延べ約1,100人、動画再生約5100回

**日時**　2023年7月13日（木）および2023年7月14日（金）
**場所**　パシフィコ横浜 アネックスホール
**開催形式**　ハイブリッド・動画配信あり


基調講演


ポスターセッション

**水素利用等先導研究開発事業からの口頭発表**

| 事業名 | 実施者 |
|---|---|
| 高温水蒸気電解技術の研究開発 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 |
| アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化／アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究 | デノラ・ペルメレック株式会社／学校法人立命館／国立大学法人東北大学金属材料研究所／公立大学法人大阪／国立大学法人京都大学／国立研究開発法人産業技術総合研究所／国立大学法人横浜国立大学／国立研究開発法人物質・材料研究機構 |
| 高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発 | 日本化学産業株式会社／国立大学法人東北大学流体科学研究所／国立大学法人山梨大学／タカハタプレシジョン株式会社／パナソニックホールディングス株式会社 |
| 酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社／川崎重工業株式会社／一般財団法人石炭フロンティア機構／一般財団法人電力中央研究所／国立大学法人大阪大学／国立大学法人東京工業大学／国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構／国立研究開発法人産業技術総合研究所 |
| 水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築 | 国立大学法人東北大学流体科学研究所／国立大学法人東京大学／株式会社荏原製作所／学校法人早稲田大学 |
| メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発 | 戸田工業株式会社／エア・ウォーター株式会社 |

# 進捗管理：中間評価結果への対応

| | 指摘 | 対応 |
|---|---|---|
| 事業の位置付け・必要性 | 【１】事業を効率的に推進し、成功の確率を高めるためには、単一の技術開発の組合せではなく、有機的に結びつけることが必要であると思われる。 | 本指摘は特に研究開発項目①に関する指摘と認識。水電解分野の技術開発においてはその性能向上やコスト低減に対し部材レベルでのシーズ探索が点在している様相であったが、これらのシーズ開発が要素部品開発を経て製品開発さらには水電解プロセスに貢献し水素製造価格目標に到達するために事業者に対しバリューチェーンの上下流だけではなく、ステークホルダーに対する理解や連携を促した。その結果、後継事業では企業との共同提案が加速されただけでなく、これまであまり注目されなかったBOPのコストに対する課題認識を醸成することができた。 |
| 研究開発マネジメント | 【２】ほぼ全ての研究開発項目の達成度が「〇」以上であり、達成できる目標を設定するのではなく、将来の実用化に繋がりうる目標を設定すべきであると考える。 | 中間評価後の21年度公募・研究開発項目⑤においてステージゲートを設定した採択を行った。継続可否の審査において、１事業については独自性はあるものの研究の進め方、結果の解釈などに改善の余地があることから終了し、原理実証の目処がついてから再度NEDO事業へ応募することを推奨した。また1事業については共同提案であるアカデミアの取り組みが技術開発のバックアップとして十分機能していないとの判断から適切なアカデミアへの組換えを行った。 |
| | 【３】今後については、チャレンジングな目標に対しては、「未達＝ネガティブ評価」ではなく、研究開発のプロセスと挽回の為の方策を評価するという、評価サイドの見識が必要であると考えられる。 | |
| 研究開発成果 | 【４】全体に技術の比較が不十分であり、同種技術（材料）だけでなく異種技術（材料）に対しても比較した方が良いと思われる。 | 公募時の提案書様式に提案技術のポジションを明示的な記述を促すことを目的に、競合技術、代替技術及びそれらの水準について記載するよう工夫した。また、仕上げたい技術の姿において競合・代替技術を具体的に記述するなどに取り組み、提案技術の位置付けがより明確になった。 |
| | 【５】また、本事業での開発成果が、世界最高水準のものであるか、次世代技術の新開拓にどのように貢献していくかを示していくことも重要である。 | 高IF誌への掲載（東工大1件、理研1件）もあり、当該事業での研究開発レベルをアピールすることができたと認識。この掲載がきっかけでアカデミアである事業者と企業との連携が加速された。 |
| | 【６】今後については、研究発表は行われているが、知財戦略の手薄感が否めないので、特許出願や国内外の原著論文(査読付き)への掲載も目指して頂きたい。 | 「仕上げたい技術の姿」を活用し、事業において取り組む技術開発のバックグラウンドIP及びフォアグランドIPを整理し、研究開発項目ごとに想定される知的財産の権利主張や公表の計画などを事業開始時に確認し、その進捗をステアリングした。 |
| 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通し | 【７】基礎的な内容を含む研究開発の中には、大きなブレークスルーが期待されつつも、その技術を事業化すると言った道筋が見えにくいものがあることから、成果の実用化戦略の中に、商業収入をえるまでに、今後どれだけの開発費用が掛かるのか等の想定を明示するなど、個社における事業化の困難さを把握することが望まれる。 | 研究開発項目③においてはコスト・効率・必要性・実現性から発電用途としての事業化の困難さを把握した。他方、技術開発の成果をより早く社会実装するために熱需要への適用を見出した。 |
| | 【８】今後については、前提条件を明確にして、コスト試算に納得感を持たせるなど、活動の中でしっかり考察していただきたいと考える。 | 研究開発項目①では将来水素が必要とされつつも、市場が未成熟であるためユースケースの具体化が難しい側面もあるが、社会実装の姿を鑑みつつ部材開発の仕様を具体化する必要性があることを認識してマネジメントに取り組んだ。研究開発項目③では発電コストワーキンググループのコストレビューシート＊を参照したうえで試算をおこなった。 |
| | 【９】また、中小企業では出来ない学術的な分析を行うことで、合理的な開発の道筋を示して支援を行うような取り組みもあって良いと思われる。 | 研究開発項目⑤の1事業については適切な助言が期待できるアカデミアを新たに再委託するだけなく、技術委員会の委員による進め方委員会の形成や、副生炭素の利活用について助言できる外部有識者との連携を促すマネジメントを進めた結果、プロセス化を推進する企業の関心を得るとともに、副生炭素の新たな機能発見につながった。 |

＊発電コスト検証ワーキングコストレビューシートhttps://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/index.html#cost_wg

# 進捗管理：動向・情勢変化の把握と対応

➢ 以下の様な情勢変化に迅速に対応した。

| 情勢 | 対応 |
|---|---|
| 2020年1月革新環境イノベーション戦略 | 2021年2月の公募に反映 |
| 中間評価（2020年度）の実施。 | 中間評価の指摘を踏まえて対応。（別スライドにて説明） |
| 2020年11月26日　研究開発項目Ｖ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査」の研究開発項目継続可否審査を実施し、多様な水素製造を持つということは重要で、メタンからの水素・炭素についても継続して取り組むという結論。 | 2021年2月に「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」として公募開始。2021年4月に採択決定し事業を実施。 |
| 2021年6月、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 | GI基金の立ち上げで実施者に共通基盤的知見の提供 |
| IEA　AFC TCP　TASK 30（electrolyisis）の開催 | 情報収集とその共有、課題設定の検討を継続。 |
| 水電解触媒分野にてＭＩを取り入れた動き | 2021年度以降公募を実施し、2事業を開始 |
| 2022年1月20日　研究開発項目Ｖ「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術開発」の継続可否審査・技術推進委員会を実施。 | テーマAについて、独自性はあるものの研究の進め方、結果の解釈などに改善の余地があり、一旦終了して原理実証の目処がついてから再実施することとした。<br>テーマBについて、協業が技術開発の加速や効率化には結びついていないこととから、協業体制を見直して継続実施することとした。 |

# 進捗管理：動向・情勢変化への対応

水電解触媒の開発においてもマテリアルズインフォマティクスが活用される中で、本事業においても既存テーマとの連携や将来的な課題抽出を見据え、調査研究を実施

- 2020年10月に、カーネギーメロン大学とFacebook AI Researchが水素製造要反応の触媒に関するオープンプロジェクト「Open Catalyst Project OC20」とデータセットを公開。
- 機械学習モデルをトレーニングするためのOpenCatalystデータセットには120万の分子緩和が含まれており、2億5000万を超えるDFT計算の結果が得られる。

**Open Catalyst Project OC20**
https://opencatalystproject.org/

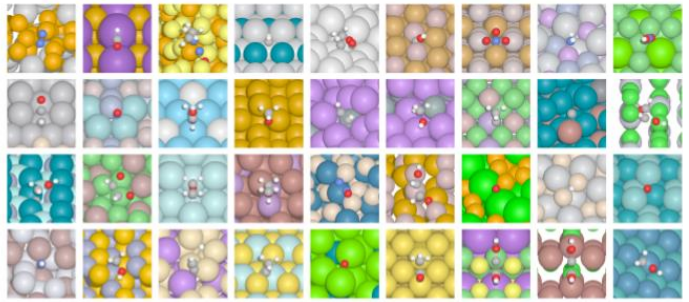


Figure 13. Examples of catalysts (larger atoms) and adsorbates (smaller atoms) in the OC20 dataset. Spheres represent the atoms with th color and size indicating the atomic number (element type) and the atomic radii, respectively. For example, the small white, red, grey, an blue spheres are hydrogen, oxygen, carbon and nitrogen, and the larger spheres are mostly metals.

出典：”AnIntroductiontoElectrocatalystDesignusingMachineLearning forRenewableEnergyStorage”

| Reaction | Name |
|---|---|
| $2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$ | Hydrogen Evolution Reaction (HER) |
| $2H_2O \longrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ | Oxygen Evolution Reaction (OER) |
| $H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$ | Hydrogen Oxidation Reaction (HOR) |
| $4e^- + O_2 + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O$ | Oxygen Reduction Reaction (ORR) |
| $CO_2 + 4H_2 + \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$ | Methanation |
| $N_2 + 3H_2 \longrightarrow 2NH_3$ | Haber-Bosch |
| $N_2 + 6H^+ + 6e^- \longrightarrow 2NH_3$ | Nitrogen Reduction Reaction (NRR) |
| $2NH_3 \longrightarrow N_2 + 3H_2$ | Ammonia Decomposition |
| $CO_2 + ne^- + nH^+ \longrightarrow$ products | $CO_2$ Reduction Reaction ($CO_2RR$) |
| $CO + H_2 \longrightarrow$ products | Fischer-Tropsch |
| $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$ | Water Gas Shift (WGS) |
| $C_2H_6 \longrightarrow C_2H_4 + H_2$ | Non-Oxidative Ethane Dehydrogenation |

みずほ情報総研（現みずほR＆T）が作成したものを許可を得て引用・補足

2021年度以降2件のテーマを採択して追加実施

**アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究**
国立研究開発法人物質・材料研究機構

**プロセスインフォマティクスへの拡張性を考慮したマテリアルズインフォマティクスに関する調査研究**
国立大学法人北海道大学

# 進捗管理：追加予算

成果創出の加速化や、社会実装を担う企業との連携を見据えた追加データの取得等のために、技術委員会やPLの助言を踏まえつつ期中の追加予算についても柔軟に対応

２０２１～２０２２年度加速実績

| 研究開発項目 | 加速テーマ数、総額 | 内容 | 狙い・効果 |
|---|---|---|---|
| 研究開発項目①<br>水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 | ５テーマ、150百万 | MEA評価の大面積化、サンプル数増加によるMIデータ精度向上、より精緻なデータを取るための計測・評価装置の追加取得等 | 成果創出の加速、企業との連携に向けた追加データ取得等 |
| 研究開発項目④<br>エネルギーキャリア・システム調査研究 | １テーマ、14百万 | 液体窒素実験設備の改造およびテーパー型ボイド率センサーの開発 | 企業との連携に向けた精度の高いデータ取得等 |

# 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
# 「水素利用等先導研究開発事業」（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 10 月 6 日（金）9：40～16：30
場　所：NEDO 川崎本部 2101-2103 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 | 伊藤　響 | 中部大学　理工学部　数理・物理サイエンス学科　教授 |
| 分科会長代理 | 盛満　正嗣 | 同志社大学　大学院　理工学研究科　教授 |
| 委員 | 工藤　拓毅 | 一般財団法人　日本エネルギー経済研究所　理事 |
| 委員 | 後藤田　浩 | 東京理科大学　工学部　機械工学科　教授 |
| 委員 | 清水　陽一 | 九州工業大学　大学院　工学研究院　教授 |
| 委員 | 藤田　照典 | 三井化学株式会社　シニア・アドバイザー |
| 委員 | 矢加部　久孝 | 東京ガス株式会社　グリーントランスフォーメーションカンパニー 執行役員 |

＜推進部署＞

| | |
|---|---|
| 大平 英二 | NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 ストラテジーアーキテクト |
| 田中 博英(PM) | NEDO 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 室長代理 |
| 高岡 一栄 | NEDO 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 主査 |
| 尾沼 重徳 | NEDO 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 主査 |
| 坂本 俊 | NEDO 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 主査 |
| 八木 厚太郎 | NEDO 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 主任 |
| 堀口 柊 | NEDO 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 職員 |
| 髙橋 孝志 | NEDO 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 専門調査員 |

＜実施者※メインテーブル着席者のみ＞

| | |
|---|---|
| 栗山 信宏(PL) | 産業技術総合研究所 関西センター所長代理 |
| 松井 敏樹 | 戸田工業株式会社 事業支援推進室 室長 |
| 山野 めぐみ | エア・ウォーター株式会社 グローバル＆エンジニアリンググループ<br>プラント･機器開発センター 主任 |
| 光島 重徳 | 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 |
| 荒木 拓人 | 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 |
| 黒田 義之 | 横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授 |
| 長澤 兼作 | 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 主任研究員 |
| 袖山 慶太郎 | 物質材料研究機構 マテリアル基盤研究センター 分野長 |
| 加藤 昭博 | デノラ・ペルメレック株式会社・開発部 部長補佐 |
| 内田 誠 | 山梨大学 大学院総合研究部 教授 |
| 横田 尚樹 | タカハタプレシジョン株式会社 次世代技術・事業開発部門 研究員 |
| 壹岐 典彦 | 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域再生可能エネルギー研究センター<br>招聘研究員 |

＜オブザーバー＞

| | |
|---|---|
| 倉谷 健太郎 | 経済産業省 産業技術環境局 環境政策課<br>エネルギー・環境イノベーション戦略室 調査官 |
| 清水 健司 | 経済産業省 産業技術環境局 環境政策課<br>エネルギー・環境イノベーション戦略室 室長補佐 |
| 金地 隆志 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価調整官 |
| 村中 祥子 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 課長補佐 |
| 亀山 孝広 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 課長補佐 |
| 浅野 常一 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価係長 |
| 小林 義昭 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 評価企画係長 |
| 渡辺 智 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価専門職員 |
| 宝関 義隆 | 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 技術評価専門職員 |

＜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 |
| 宮代 貴章 | 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 質疑応答

（非公開セッション）

６．プロジェクトの詳細説明

6.1 全体説明

6.2 メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発

6.3 トルエン直接電解水素化電解槽の水挙動の解析と電流効率の向上

6.4 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化/アルカリ系水電解質及び固体高分子系電解質用酸素発生電極触媒でのマテリアルズインフォマティクスによる材料探索に関する調査研究

6.5 高温水蒸気電解技術の研究開発

6.6 高性能アニオン膜型アルカリ水電解のための材料開発と膜電極接合体に関する研究開発

6.7 酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発

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）

【伊藤分科会長】　本日の分科会長を仰せつかりました中部大学の伊藤と申します。専門は、大学院時代より固体酸化物形燃料電池の研究開発を続けております。また、ここ5年、10年ほどは、それこそ今話題になっている水素や再生可能エネルギーの研究にも携わるようになっております。本日は1日がかりの分科会となりますが、皆様よろしくお願いいたします。

【盛満分科会長代理】　同志社大学の盛満と申します。私は電気化学を専門としており、主に電気化学触媒の研究などを長く行ってきました。また、今回関係する分野では、水電解の酸素触媒といったものを現在研究している次第です。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【工藤委員】　日本エネルギー経済研究所の工藤と申します。私は、エネルギー需給の分析予測であるとか様々なエネルギー関連政策の分析に長らく関わってまいりました。気候変動政策等をいろいろ取り組む中で、最近ではISO等をはじめ、温室効果ガス排出量のインベントリや算定方法等の国際標準化等にも関わっており、そういったようなものが今後の水素、もしくは水素に関連した様々なカーボンマネジメント等にも関係してくるのではないかということで、いろいろ検討させていただいております。よろしくお願いいたします。

【後藤田委員】　東京理科大学の後藤田と申します。最近の専門分野は数理情報学になりますが、燃焼工学も専門としております。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【清水委員】　九州工業大学の清水と申します。専門は電気化学であり、長らく空気・電池燃料・液体に関わってきてございます。材料はセラミックスをやっており、それを用いた触媒であるとか、そういった研究をやっております。本日はよろしくお願いします。

【藤田委員】　三井化学の藤田と申します。私は企業で長く研究を行っていましたので、モノになりそうなものとそうではないものとの区別が大分つくようになったと思っています。専門は触媒化学、高分子化学と、技術経営です、今日は科学技術からの質問に加えて、研究開発マネジメントという視点からも意見を申し上げたく思っております。よろしくお願いいたします。

【矢加部委員】　東京ガスの矢加部と申します。私の専門は燃料電池や水素になりますが、最近は広く脱炭素、カーボンリサイクルということで、CCUやCCSにも携わっております。どうぞよろしくお願いいたします。

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6.「プロジェクトの詳細説明」及び議題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。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。

全体の説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、今からお受けさせていただきたいと思います。それでは、工藤委員お願いします。

【工藤委員】　ご説明ありがとうございました。始まりから数えれば10年間、そして、特にアカデミア中心にいろいろ基盤研究的な視点で5年間の諸活動の成果ということだと考えます。特にアウトカムとか意義のところで、全体の環境変化が非常に大事である。もともと水素というものに特化した考え方から、どちらかというと炭素強度に着目した世界に移っている。これは、どちらかというと最近変化しつつあるところでもございますが。それから、カーボンマネジメント的な発想というものが、要は水素というものの広がり、派生というものを基盤研究の中でどう意識して考えていくのかと。そういった環境変化が起こりつつあり、こういうことがとても大事だと思っている次第です。そういった中で、評価が難しいのですが、やはりマネジメントは大事なのだろうと思います。特に進捗管理のところでも実際に様々な体制をつくられ、実施者、それから将来的な受け渡し側の企業等々の橋渡し的な役、それからアカデミアの実施者の方々のそういった市場化の意識を醸成することで、より基盤研究的中身の将来に向けた連携及びつながりを深める取組をされたと。これは非常に大事な工夫だと考えるところで、何か具体的な事例があれば伺いたく思います。

また2点目として、まだ基盤的な要素であるため、標準化戦略をある程度意識をしながらとおっしゃられていたところで、標準化戦略というのはステークホルダーが非常に多様であり、さらに海外との連携も含めたいろいろな意味でのプレーヤーといいますか、中心となるようなプレーヤーを育成することも大事だと思います。そういった意味で、特にこの基盤研究を担われているアカデミア等の中で、そういった人材育成といいますか、何かしらの取組であるとか、コミュニケーションも含め、どういったアプローチを取られているのか。このあたりについて、お伺いできればと思います。

【田中PM】　まず1つ目のご質問として、マネジメントの結果としてアカデミアの方々の意識が具体的に変化して成果という形につながっているかというところですが、こちらは、理想としては我々も事業者の皆様にアンケートを取って「実際にどうでしたか」という点を聞けばよかったのですけれども、そこまでは実際には実施しておりません。ですので、実際にどこまでこのマネジメント事例が数値としてインプルーブしたところに貢献したかというのは定量的に出すことはできず、申し訳ございません。これは我々の肌感覚にはなりますが、アカデミアの事業者様と一言で言っても、やはり企業様との連携等に関する意識というのは本当にまちまちでございまして、一部の大学の先生方というのは、もう既に多くの企業様方と連携を取りながらコンソーシアムを組まれているとか、日頃から情報交換やサンプルのやり取りをしていく中で、本事業の成果というものをしっかりと展開していただくといった方もおられます。一方、言い方は難しいのですが、アカデミアの中だけでとじてしまっている提案というのもあったのは事実だと理解してございます。そういった事業者様に対しては、今回提示しております知財フォーマットというのは、結構ビジネス要素が全面に押し出されているものですから、最初に提示した際には若干抵抗感を示されるような事業者様もいらっしゃいました。ですが、そこは我々が必要性を強くお話しすることでご理解をいただいた次第です。詳細な部分は非公開の部分でまたお話をさせていただければと思いますが、そういう提案時にあまり企業とつながっておらず、アカデミアでとじていた提案に関しましても、この事業を実施する中で連携する企業様を見つけて具体的に次の提案に至っている、次の研究開発フェーズにステップアップしているテーマというのも実際にございます。マネジメントの上でどれだけ定量的に貢献したかというのは、先ほど申し上げたとおりアン

ケート等を取っていないところもございますが、我々の肌感覚としては実際につながったものと捉えてございます。

それから標準化に関しては、本日お越しいただいている横浜国立大学の光島先生のところを中心に水電解の評価手法を実施いただいてございますけれども、水電解の評価という意味においては、グリーンイノベーション基金のほうで我々が実施しております中で、産総研様に担っていただいている「水電解の評価基盤技術の確立」というテーマもございまして、そちらのほうと本テーマはしっかり連携させていただいているところでございます。そちらのグリーンイノベーション基金事業のほうで、「水電解評価に関する標準化をしっかり見ていこう」という話になっており、この水素先導事業の中で直接的にという話ではないのですけれども、そちらの GI 基金事業の方で標準化に関する国内委員会というのも、国内の標準化を取りまとめる HySUT 様とも連携しながら、議論していく体制というのは構築されています。その中では、もちろん光島先生にも関与いただいていますし、本事業の栗山 PL にもそういったところにご参加いただきながら、標準化に対する体制というのは組んでいるところでございます。

【工藤委員】　ありがとうございます。いろいろな取組を検討されているということが非常に大事だと思ったのは、NEDO が実施する意義という中身の中で、やはり今おっしゃったようにいろいろなトライアルとその結果と、そこからこう変えたらいいのではないかといったいろいろな経験、蓄積、情報が集積しているのが NEDO 様ではないかと思ったところです。そういった意味で、言ってみればナショナルプロジェクトを今後もいろいろと進めていく際の様々なアイデア、ヒントといったものも、NEDO の中から発信していくといった、そういうファンクションになり得ることは非常に大事ではないかと思いました。分散した経験値等をそのまま進めていくだけでは見えないところがきっとあると思いますから、そうしたところでの NEDO としての組織の特性をいい意味で活かしていく、そういったメリットというものも、この意義というところに組み込んでもいいように感じました。

【大平ストラテジーアーキテクト】　ありがとうございました。一点だけ補足いたします。評価、標準のところですが、このテーマを始めたのが 2018 年からであり、ご案内のように電気関係の例えば蓄電池にしても燃料電池にしても、製品ができた後に例えば劣化を見るとか、解析のほうに一回戻そうと。言わばバックトゥベーシックをしようという流れがありますから、それは必要だと思っているのが一つございます。また、この事業テーマを始める前に、私も参加しています IEA の例えば Advanced Fuel Cells で、新しい分科会として水電解の評価をやろうではないかと。JARI セルぐらいのものですが、ラウンドロビンをやろうといった提案がありまして、それに参加しようと。そこは、ある意味補完するという形でもあるので、このテーマを立てたというのがあります。そこでそういう反応解析をしつつ、先ほど田中が申し上げた GI 基金でやっているというものに関しては、今度それを大型化してスタック評価をしていこうと。ショートスタック 500 キロワットですけれども、ショートスタックで評価をしていく。これもまた IEA の流れの中で各国とも協調していきましょうということになってございます。ですので、社会情勢を見ながらそれに準じたテーマを設定していくというのが、我々のある意味やれるところと思っております。

【伊藤分科会長】　それでは、藤田委員お願いします。

【藤田委員】　全体としての話ですが、水素をつくる、運ぶ、貯める、使うといった非常に多様さがあって、しかも研究のステージも本当にばらばらで、始めたところのものから、かなり進んでいるところまであるわけで、これをマネージするのは大変だと思うのですが、外にいて田中様がしっかりやっているというのが聞こえてきますので、非常によいマネジメントだといいますか、やはりそういうプロジェクトというのはよいのだなと感じてございます。NEDO 事業というのは、究極は実用化を目指して社会に貢献するといったところを前面にぜひ出していただき、実施者とマネジメント側が一致するまで

マネジメントをやるといった姿勢で今後ともぜひやっていただけたらと思います。

あとは少し細かい話になりますが、個別の事業があって全体があるのだと。しかも、今の研究ステージというのはまだまだ技術をつくるレベルなわけで、本当に価値があるかどうか、本当にできるのかというのはまだ分からないので、やはり全体の評価とはいえ、数行でも各事業に対する評価欄というのもぜひ入れてほしいと。部分があって全体があるということで、これはお願いをしたいです。

それから、マネジメントの評価というのはすごく難しいと思うのですが、マネジメントを評価するためには、例えば研究所長がグループリーダーを評価するときに何を見るかというと、グループリーダーがどういう指導をして、どんな成果が出て、どういう評価をしているかと、それを評価するわけで。そういう意味で、マネジメント側、例えばPMとかPLが各事業をどう評価したかと、これを教えてほしいのです。逆に、そういう項目を入れることによって事業側をいい意味で牽制することになって、好き勝手はやらせないと。ちゃんと税金を使っているという視点からの評価をしますよというのを知ってもらうといった意味も持ちますから、ぜひ入れていただけたらとお思います。今回はもう間に合いませんが、次回からは個別の事業の評価、マネジメントサイドからの各事業の評価、情報として入れていただけたら幸いです。

それから、2030年に何万トンというような数字を出していますが、それに対して製造方法と用途があるわけで、それに対して整合性が取れているかどうかというのをお聞かせいただけるとありがたいです。

また、研究というのは多産多死なものです。多産多死というのは、たくさんやっていいのが残ってきて、それがまたさらによくなるというもので。そういう意味で、もう少し幅広く取って、それでチェックをして落としていく、いいやつを残す、そういう方法を取ったほうが多分成果につながるのではないかと思います。今回一つのプロジェクトであまりよろしくないものがあって途中でやめられたというものがあって、そういうのは非常にメリハリがあってよかったと思いますし、幅広く緩やかに取って厳しく評価して絞るといったことをやっていただければよいと感じます。

それから、コスト目標のところで、これがあまり前面に出過ぎると技術をゆがめるといいますか、実施者にとってはできもしないことを約束させられたことになるので、少しまずいと感じます。そういう意味で、あまり数字で厳しくするよりは方向性みたいなもののほうがいいのではないかと。それに関連しての質問で「30円の達成ができるのか」とほとんどの委員の方が書かれており、その答えの中で「性能面とコスト面があって、性能面ではクリアした」と。「これからコスト面だ」という答えがあって驚いたのですが、性能というのはコストを達成するための性能でなければ駄目ですから、そこを区分けしてしまうと非常にまずいなと。だから、あまり細かい話をせずに、やはり方向性で議論をすべきではないでしょうか。付随してもう一点は、20円、30円は多分難しいと思うので、達成できなかったときにどうするのだというシナリオが欲しいところです。以上になります。

【田中PM】 いろいろなコメント、ご意見、ご質問をいただきましたが、質問としていただいた部分に絞ってお話をさせていただければと思います。まず30年以降の導入量目標が掲げられている中での用途と技術との整合性というところで、水素基本戦略で掲げられております導入量目標の中で、分解してどれだけの量を、例えば国内の水電解でどれだけの量を輸入水素でというのは定められているところではございませんけれども、やはり30年という短いターゲットで考えていった際に、国内の再エネの価格とかをいろいろ考えていくと、なかなか国内の再エネを活用した水電解で大量の水素をつくるというのは、直近ですぐに実現するかというと難しい部分があるのではないかなと思っています。そういう意味では、海外からの輸入の水素というところが最初のところでは大きくなってくるのではないかと考えるところです。そうしたところでは、本事業のエネルギーキャリアに関する技術開発というところで、MCHの直接電解に関するテーマというものを行ってございます。先ほどコストと性能という

ところの関係性、整合性というお話もありましたけれども、こちらのテーマに関しましては、30 円/$Nm^3$ というのは、あくまでも一定の条件下においてという試算ではありますが、その条件下において 30 円/$Nm^3$ を達成するために必要な電解の効率というところを実現するための技術的な指針、そういったところをしっかり見いだすと。そういう意味では今、藤田先生がおっしゃったような研究開発の方向性というのをしっかり見出して企業に橋渡しを行っていったところでは一つあるかと思ってございます。

それから用途という意味においては、やはり様々な輸送の観点であるとか発電の観点、いろいろと水素の用途需要を増やしていくという点等いろいろ考えられてございますが、直近 2030 年で水素の導入量を多くしていくために需要をどこに大きくつくっていくかとなると、やはり規模の面では水素の発電になろうかと思います。ちょっと本事業で直接的に取り組んでいるところとはまた外れてきてしまいますが、空気/水素の混焼、空気/水素の専焼というところの発電技術、本事業の前半 5 年で取り組んでいた発電技術というのが今 GI 基金等で実証であるとか、NEDO で行う国際実証事業で海外展開に向けた技術開発の実証も行ってございますけれども、そういった技術がまず 2030 年で水素の導入量を多くしていくための用途の大きな技術として考えられているのではないかと思います。もちろんそれ以外にも、これも本事業での取組とはまた話が外れてくるところではございますが、我々GI 基金事業の中でも、こちら水電解になりますが、Power to X という観点で化学品の原料としての水素利用というところの実証も取り組んでございますし、また熱需要への水素の適用というところで様々な分野でしっかりと水素が使われていくように、供給だけではなく需要をしっかり伸ばしていくといったところも取り組んできてございます。

続きまして、R&D は多産多死であるべきだというのは、我々としてもそこのご指摘は非常に同じ思いでございます。他方で、ちょっと制度的な部分は経済産業省様といろいろと議論する中で難しい部分があるのですが、選択と集中という幅をどういうレベルで取るのかというところは非常に難しい話だと思ってございます。我々のほうで実施しております水素先導事業以外のところでも先導的な研究開発の取組の制度がございますけれども、先導的と言いつつ、複数件を取らずに 1 件だけを採択して、そこに結構大きな金額を投じて先に進むかどうかということだけを見るような制度で実施してきてしまっている部分もございますので、ご指摘の多産多死、非常に多くの点、いろいろな技術を試して実施していくというのは非常に重要な観点かと思いますので、我々の今後の事業検討を行っていく中で、そういった視点を踏まえながら議論をしていけたらと思います。

それから、あとのご質問はコストに係る内容だったでしょうか。

【藤田委員】　コストの話でしたが、それはもう分かりました。方向性は合っていたと。ただ、コストと性能と分けるとまずいといったところです。

最後に、たくさんの技術を使っていると、それぞれの技術が、自分が一番重要だと主張するのは研究者として当たり前の話ですが、やはりマネージ側としては、優先順位と言ってしまうとそこで終わってしまうので、優先順位というのは、実質は緊急度と重要度であると。緊急度と重要度と、あとは、なければ絶対困るものと、あったほうがいいものに区別して一度分類をしていただくと、多分こんなことをやっているのかとか、ここに金をかけ過ぎているというのが見えると思うので、そういう優先順位的なところの区分けもぜひやっていただけたらと思います。

【田中 PM】　ありがとうございます。そういう意味では、マネジメント側の評価というお話もありましたけれども、我々もともとこの資料を作成させていただく際に、事業者様の自己評価をベースに作成しているところではあるのですが、我々マネジメント側から見て、これは本当に丸でいいのかというようなテーマもございます。やはり事業者様が自分たちで実施されているテーマですので、性能評価の目標を達成しましたという形で出していきたい気持ちは非常に理解するところでもありますが、実際にそこは事業者様と議論しながら書き換えた部分もございます。

【伊藤分科会長】　それでは、盛満先生お願いします。

【盛満分科会長代理】　2点伺いますが、まず1点目として、この事業というのはアカデミアも多く参加した先導研究ということで、その次のフェーズにつながるような研究開発であるかどうかの判断と、そういった次のフェーズにつながるような研究開発の創出というのが一つの目標達成の指針かと思っております。21年度、22年度に実施された内容も、具体的にそういった次の事業のほうへ移っているものがあるのだと思いますが、その研究開発項目についてどのような内容がどういった事業にというのをまず教えていただければと思います。

【田中PM】　ありがとうございます。詳細につきましては、非公開資料に各テーマがどのような形で次のフェーズに進んでいるかという記載がございますので、非公開のほうでご説明させていただければと思います。

【盛満分科会長代理】　ありがとうございます。実際にはそういった次の事業につながっているということで確認いたしました。

次にもう一点ですが、やはりアカデミアの立場で考えると、水素利用に関わる企業様に多く手を挙げていただく、さらには小さな新しい会社も含めてそういったプレーヤーが増えていただくというのが非常に重要です。その点で研究成果を公開して広く新しく出てきた技術、今後期待できそうな技術を周知するという活動をされているのは分かる一方で、既に個別の研究開発項目の中には企業様も参画をされておられて、そうすると新しく入っていくときに少し敷居を感じるといいますか、そういった部分も実際にはあると思うのです。そういう意味では、公開での成果報告ということももちろん重要ですが、一方で、ある程度個別の研究開発項目ごとにクローズドな形で、新しい企業様等を集めて意見交換をする場もあるといいように考えますが、そのあたりというのは、NEDO様の中ではどのようなことをやられているか、もしくはどのような考え方であるかというのを教えていただけますか。

【田中 PM】　ご指摘のクローズドの場での関係するような企業様を呼んだ成果報告や議論は、大々的には本事業では実施してきてはおりませんが、個々のテーマに関しましては、先ほど来申し上げているとおり、企業様の巻き込みというのは極めて重要だというのをお話しさせていただいた中で、もちろん既に連携している企業様がいらっしゃるところはその連携している企業様が中心ではありますけれども、まだ、なかなか企業様をつかまえていないようなところに関しましては、場合によってはNEDOから「こういった企業様はいかがですか」というようなお話もさせていただきながら、必要に応じてつなぐというようなこともやってきています。また、その場でNEDOも同席しながら意見交換をいろいろ行っていくというような個別のところでのマネジメントでそういった対応はしてきているところでございます。

【盛満分科会長代理】　ありがとうございました。ヨーロッパ、アメリカにかかわらず、日本でも、やはり企業側のプレーヤーが増えないと、なかなか需要までの道筋が立ちにくい状況もあると思いますので、ぜひそういったところもアカデミアの新しい技術が広く利用されるような機会をつくっていただければと思います。

【栗山 PL】　補足をさせていただきます。部分的にということで、例えば水電解のほうの光島重徳先生の横浜国大のグループのものになりますが、その中で企業が集まるクローズドの会議をNDAの下に実施するということも行っておりますし、そのほか、レベルを分けて単に情報交換の場を設け、その中ではもっと協同研究的なところまでシステムというのをつくっております。詳細は後であるかと思いますけれども、その関係の中で、企業様は個別に先生方等に相談に行くというのも聞いております。そういう意味では、プラットフォームをつくるというところは成功したものと思っております。

【盛満分科会長代理】　ありがとうございました。

【伊藤分科会長】　それでは、清水委員お願いします。

【清水委員】　標準化のところでコメントいたします。例えば評価に対しては標準化をつくるということですが、プロダクトについて出来たものとして、例えば昔のVHSだとベータとVHSの戦い、それからガラケーで日本が世界に負けたとか、それからコネクタ1個にしてもiPhoneだってタイプUSB-Cに今度なると。グローバルになっていくということで、これはお願いなのですが、日・米・EUでそういう規格を統一してやらないと、絶対にいいものはできると思うものの、それが活かされない事態になってしまうので、そこは規格というか世界標準をつくっていただきたく思います。

【田中 PM】　ありがとうございます。標準化のところでうまく立ち回れずに日本企業の事業がというところの事例はお伺いのとおりだと思います。その技術分野によっても適する、適さないというのはあると思いますし、また、企業のビジネス上でどう考えられるかというのは非常に重要な観点になっていきます。この水素先導事業でそこまでの議論は、アカデミアが中心だったということもあり至っておりませんけれども、その他の事業においてどう標準化を考えていくのか、評価とか、基盤というところ以外での標準化をどう考えていくかというのは、企業様とか経済産業省等を含めて議論を行っていきたいと思います。

【大平ストラテジーアーキテクト】　1点だけ補足をいたします。製品の標準化というのは、ご指摘のとおり非常に大事なところでございます。これからつくる市場を考えると、日本の技術というのは大概排他的なものであるというところで、そうなった瞬間に各国の補助金が取れなくもなりますから、やはりそれは各国共通の市場をつくるといったところが望ましいと考えます。その意味で、ここではないのですが、例えば水素ステーションもしくはFCVに関しましては、大分2000年の頭ぐらいから国際標準の話になっていて、車の標準化もしくは重点の標準化というところで、これは蓄電池とは違うところでありますけれども、ノズルの形状も全て国際標準化できているところであります。同様に、技術そのものにはなりませんけれども、この先出てくるのは、例えば水素製造時の二酸化炭素の計算方法であるとか、もしくは今、水電解の標準化というのをやっていますが、これはやはり性能評価というところで信頼性のあるものをちゃんと使ってもらえるようにしようではないかという、そういう裏は少しあるわけでございます。その意味でも、先進国、アメリカ、ヨーロッパ及び電解装置に関わるメーカーといったところは念頭に置きながら標準化に取り組んでいるところであります。

【伊藤分科会長】　続きまして、後藤田委員お願いします。

【後藤田委員】　特許出願、論文発表数、メディア等に関して伺います。2020年頃と比較して、掲載された論文数が12本から62本まで、特許件数も54件から70件まで増えております。これらの成果はNEDO様がご期待されている以上のような成果であると理解してよろしいでしょうか。また、これらの成果の中で大半が水電解に関わるものであり、課題1に偏った成果であるような印象を受けますが、他の課題で得られた成果は少なかったのでしょうか。その点を教えて頂ければと思います。

【田中PM】　全体の件数としては、中間評価のときにも「なかなか出てきていない」というご指摘を受けながら、最後の2年間でこれだけ件数としても大きく出てきてくれたというのは、我々の期待か、それを上回るぐらいに出てきてくれたものと思ってございます。ただ、個別に細かく見ていくと、やはり事業者様ごとによってかなり多く積極的に出していただいているところから、一応全事業を出していただいてはいるものの、件数が少ないところもございます。1件、2件だから悪いという話ではございませんが、かなり濃淡があるのも事実でございまして、おっしゃるとおり水電解は結構積極的に出していただいているものの、例えば発電のところに関しましては、最後の出願に向けてやっていただいたところではございますけれども、論文として公開をするのか、特許として持っていくのかというところの方針として、次の事業をどう進めるかというところも含めて議論をしている中で件数が伸びなかった部分もございます。個別具体的に見ていった中で一件一件を細やかにケアしていくか、マネジメントをしていくか、それを数につなげていくかというところは、本事業は終了しておりますが、橋渡し

をした先の事業におけるマネジメントでもしっかり見ていかなければならないところと思ってございます。

【後藤田委員】　ありがとうございます。

【栗山 PL】　補足をさせていただきます。今のオープン・クローズを考えながら、数合わせの特許を出すのではなく、適切なものを出していただきたいというのは、それぞれのミーティングのときにアドバイスといいますか、コメントをさせていただきました。場合によっては、オープンにすることで、特に測定手法なんかは世界をなびかせるという戦略もありますので、そういう標準化のやり方も考えて適当なやり方をということで議論をさせていただきました。

【伊藤分科会長】　それでは、矢加部委員お願いいたします。

【矢加部委員】　まずテーマの選定進捗、それからステージアップになりますが、水素社会実現のために様々なテーマのマッピングを多分おつくりになって、網羅できるような形で進めておられると。それから幾つか複数の事業が並行して進んでおり、先の事業への橋渡しということもいろいろ意識しながら進められたテーマだと思っております。ただ、これだけの中で、応募者のよしあし、それから手を挙げる、挙げないというのがあって、まだ足りていないところがあるとか、ここのところはできればあったほうがいいなと思われるところがあるのかどうなのかと。そして、盛満先生の話でもございましたが、どのように橋渡しをこれからされるのかというのは気になっているところです。加えて、TRL の話をされていたので、そういう意味では、TRL をどこからどこというところで。あまりその TRL の数字と事業化のところは直接リンクしている感じではないと思いますが、確実にこの数年ぐらいで TRL が上がったというような認識であり、幾つからというようなことが評価されているのかどうか。以上の点をまず 1 点目として伺います。

【田中 PM】　TRL に関しましては、確実にこの数値まで持っていくという何か決められたルールがあるわけではございませんが、大体の認識としては、この水素先導事業で、提案時点では様々技術成熟度の差はあるものの、IEA の TRL1 から TRL3 ぐらいのものを TRL4 まで持っていく、企業の開発のほうに橋渡しをしていくところが一つ大体の関係者の共通認識として持っていたところと思ってございます。あと、足りていないところがあったかどうかというお話でございますけれども、本事業で実施してきた中で様々取り組んでいて、ある程度は見てこれたかと思うところですが、ただ、その成果の橋渡し先としてこの先導事業と同じぐらいの技術領域であるとか、はたまた TRL4 ぐらいといっても、橋渡しできる先の事業というのが、その分野によって受け取れる事業であるとか、受け取れない事業であるといったところがある中で、そこを今後取り組んでいけるかどうかというのが一つあるところだと思ってございます。

【矢加部委員】　次に特許戦略ですが、アカデミアが多いこともあり、相当苦労されてここ 1 年ぐらいでやっと出てきたということではあるともちろん認識しているのですけれども。ここで難しいと思うのは、もちろん国内の競争もありますが、最後に海外の競争に勝っていくということで、海外のどこで特許を取るのかと。PCT を出しておられるので、そういう意味ではここが出発点で、そこから今度は各国への特許に進んでいくものと考えますが、そのあたりのマーケット調査というのはアカデミアでは難しいので、どこか企業様と組んでおられるところがいいとして、そうでないところも、そういうところまで NEDO 様のほうで見てあげておられるのかどうかを 2 点目として伺います。

【田中 PM】　本事業において、特許に関する分析というのを大々的に実施して事業者様のほうにここを狙っていきましょうというような形の活動まではできていないというのが実態のところではございますけれども、我々担当のレベルのほうで各分野における特許の分析等は行っており、動向といったところは見た上で、事業者様との対話の中に活かしてきているところでございます。また、一部の事業者様におきましては、事業者様の実施の中で特許論文等の分析等を行い、その先の事業化の計画をどう考

えるかといったところも実施しているテーマも一部ございます。

【矢加部委員】　分かりました。最後に国際競争の観点ですが、今の特許戦略にも関係いたしますが、33 ページのアウトプットの成果のイメージといったあたりで、1 から 5 までということで 2 がないわけです。そういう意味で、ここを拝見すると、まず水電解は間違いなく国際競争をしていく領域であり、サプライチェーンも輸入元にうまく適合させていくということで国際競争と。一方で、メタン熱分解は多分国内で使うのか、酸素水素タービンも国内で使うのかと。そういう国際競争と国内で適用させる何か仕分けは行われていますか。それとも、どれもできれば海外でも競争をさせていくというイメージになるのでしょうか。

【田中 PM】　明示的に各項目で国内を絶対にターゲットにしてください、海外を絶対に狙ってくださいと言っているものではございませんが、ご指摘のとおり、ある程度技術の分野ごとに色が出てきているものと思います。水電解は本当に世界で競争が激しい分野というのはおっしゃっていただいたとおりでございますし、サプライチェーンに関しましては、実際に水素を持ってくるというところで、液水しかり MCH しかり、持ってくるというところをそもそも取り組まなければいけない国がどれだけあるかというと、そこまで多くないので。競争という観点で見ると、世界的に全ての国が取り組んでいるという話ではないのですが、ただ、やはりおっしゃるとおり、相手が企業にちゃんと適合する形で技術をつくっていかなければいけないというのはご指摘のとおりです。メタン熱分解等に関しては、海外で展開できるのであればぜひ展開していただきたいところでもありますし、そこは企業様もいろいろお考えになっていただいているところとは思いますけれども、他方で、使われる際に、これは先ほど来話に出ています炭素集約度の観点でメタン熱分解がどう扱われるのかというところは、まだ詳細な議論をされていない部分もありますので、そういったところの議論も踏まえながら、海外で使って日本に持ってくるところに使われるのか、それともドメスティックに使っていくことになるのかが分かれてくるのではないかと思います。

【矢加部委員】　ありがとうございます。

【伊藤分科会長】　それでは、藤田委員お願いします。

【藤田委員】　細かい点になりますが、31 ページの「費用対効果」と書いている部分について、費用対効果というのは結果が出て初めて議論できるものですから、これは広告審査機構の視点から言うとかなり誇大になるかと。むしろ「プロジェクトの成果の広がり」であるとかそういった夢のある形で記載いただきたく思います。

【田中 PM】　ありがとうございます。失礼いたしました。評価のフォーマットにのっとった形で記載してしまい、こういう形になってございますが、ご指摘のとおりと思います。

【伊藤分科会長】　それでは、工藤委員お願いします。

【工藤委員】　いろいろ個別の評価結果を見た際に、ほぼほぼ達成であって丸（○）だとされています。そして 1 件だけ、ある一部分が大いに達成というのもあります。ここの評価基準なのですが、もともと設定した目標水準が高ければ達成したことはすばらしいと解釈するのか、達成に対する評価基準の考え方は、どう考えればいいのでしょうか。やはり、この事業全体として見れば達成しているということが非常に高く評価すべきということでしょうか。ただし、それをさらに高い効果を得られる場合は、それは非常にすばらしいと。そういうふうに捉えるべきものなのか否か、その辺を教えていただければと思います。

【田中 PM】　個々のテーマにおける目標は、やはり粒度が結構ばらつく部分というのはございまして、あと濃淡もありますし、どれだけ細かく書いているかというところも結構事業者様によって違うというのも事例としてはございます。ですので、我々として重要視しているのは、やはり各テーマで定められた目標を達成しているかどうかというところも非常に重要なことだと思いつつも、とにかく得られた成

果でもって、次にどうつなげていくのかというところが一番重要な観点だと思っています。そういう意味で、しっかり次のステップに進むためにも、企業様に成果を出して、企業様が乗ってきてくれるような形まで持っていけたのか、その企業様たちを巻き込んで次の研究開発ステップに進めたのかというその観点が非常に重要と考え、もちろん技術的によしあし、方向性を見いだすという観点での目標達成の重要性もありますけれども、次のステップに進むという観点を非常に重要視してやってきたところでございます。

【伊藤分科会長】　それでは、藤田委員お願いします。

【藤田委員】　目標設定のところで言い忘れたのですが、目標設定は事業者様にやってもらうのではなく、これはNEDOが中心に設定すべきだと思います。それというのは、やはり人間というのは弱いもので、達成できそうな目標を書くのです。それで丸を取って自己満足をするというのが多いので、そうではなくて価値ある目標といいますか、先ほど田中様が言われたように、次につながると。そこが一番大事なところですから、少なくとも、ある塊で評価するときには目標設定のところの基準を統一し、NEDOが間に入ってちゃんとそれをそろえるといった形でぜひお願いできればと思います。あと、マル・バツというところで、未達だから駄目なのではなく、未達の場合はやはりプロセスを、要するに達成しても価値がないものもあるわけで、プロセスを見てあげるといった部分を入れれば、チャレンジングな目標を設定するようになるのではないかと思います。ぜひそういったマネジメントをよろしくお願いいたします。

【田中PM】　ありがとうございます。目標設定は、我々もプロジェクトをスタートする際にいつも事業者様とやり取りをして悩ましいところでもあります。ご指摘のとおり、どうしても評価を考える際に達成しているとよい、達成していないとプロジェクト自体が駄目というようなイメージに引きずられる部分が、我々に限らず関係者の方々としても多いと思いますので、そこの意識を少しずつ変えていきながら、ご指摘の形で実施していけるように考えていきたいところです。

【栗山 PL】　補足をいたします。目標設定はNEDOの全体のアウトプットとしてどう集めるかというところですが、マネジメントの中では中間的な目標というのは、「ここまでいってもらえないと次に進めない」という話はしてきました。そういう意味では、管理上というのはやってきております。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。それでは、時間が参りましたので、以上で議題5を終了といたします。

（非公開セッション）

6．プロジェクトの詳細説明

省略

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

【矢加部委員】　本日は、NEDO 様及び事業者様から幾つものご説明も聞かせていただき、これまでの 10 年、そして 5 年の取組を非常によく理解をいたしました。確かに「先導研究」という名前なこともあり、TRL2 や TRL3 といったプリミティブなレベルの技術の研究開発からスタートして進んできているといったところでしょうか。また、目標設定、達成度については、ほとんどの目標が達成になってお

り、これは途中にも申し上げましたように、このプリミティブなところからスタートしているからこそ、もっともっとストレッチした目標設定にしてみてはどうかと思います。当然100%目標を達成できるわけではないと理解した上で、評価方法も変えてみる。そして、目標は全ての項目で達成になるのではなく、企業の立場から言えば、多分企業はどこも30%もしくは50%くらい達成できればいいといった目標設定をされていると思うのです。その代わりに達成度合いであるとかプロセスで評価をするようにされれば、もっともっと開発も進むのではないかと思います。それからもう一つ、ステージが浅いということもございますが、やはり目標設定がすごく定性的過ぎるでしょうか。その設定の理由も書いてはありますが、その達成で本当に最終的なアウトカムが実現できるのかが分からないため、次のステージのところでは目標の明確化、それから定量性をしっかりと定めていただければいいのではないかと考えます。今度また水素のロードマップをつくるという話も聞いておりますから、その水素基本戦略を受け、2030年を超えた先のところに向けて、今回の先導事業の成果が次の事業で一歩でも二歩でも実用化につながって事業化に至り、それが日本の国際競争力の高まりにつながり、2040年に向けての新たな先端的な研究が開始されることを願っております。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。続きまして、藤田委員お願いします。

【藤田委員】　皆様、本日は大変お疲れさまでした。水素の話というのは非常に難しいものです。それというのは、技術的に難しいだけでなく、ステージ等の話もあって非常にマネジメントも難しいといったところがございます。そうした中で、PMやPLを中心によりよいマネジメントにチャレンジをされたことが非常に伝わってきまして、そこは非常によかったと思います。また、技術のほうも濃淡がありますが、進んでいるものと感じた次第です。その一方では、例えばメタンから炭素材料と水素をつくるといったところでは、やはりコスト目標の厳しさというのを改めて実感しました。それで、コストはもちろん大事なのですが、そこが前面に出過ぎると技術をゆがめるといったところを本日申し上げたように、コストは重要なものの、もう少し緩やかな方向づけといったところでの目標があってもいいのではないかと考えます。一例として、本日の冒頭で田中様が言われたように、エネルギーだけではなく、水素製鉄や化学品の製造といったところで。正直、水素製鉄はまだピンと来ていないところもございますが、化学品の製造というのは絶対に必要になるもので、恐らくあるタイミングで数百万トンの水素が必要になると。そういったところで、それはもう並べて議論していただいたほうがいいように思いました。水素を原料に使うほうについては20円というのは多分ないと思いますから、もう少し緩やかな目標にできるのではないかといったところで、出口の水素の裾野をちょっと広げる。化学品も入れた上でもう一回チャレンジがしやすく、かつ追い詰められないような目標といいますか、そういった設定をしていただければと思いました。どうもありがとうございました。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。続きまして、清水委員お願いします。

【清水委員】　本日は午前中から聞かせていただいたのですが、あっという間に終わるような中身の濃い内容だったと思います。電気化学でこういうビッグプロジェクトが走っているといったところで、日本は電気化学のトップランナーであるべきだと思っておりますし、これを続けて全世界の覇権を取っていただきたいです。そのためにも、10年後、20年後に向けて、若い研究者を今から育てるというのも大事だと考えます。また、最初の挨拶で言い忘れましたが、私は化学センサーをやっておりまして、何か水素ガス以外にもキャリアをちょっとキャッチするようなセンサーというのも必要だと感じた次第であり、そういう裾野を広げていくべきと思いました。本日はどうもありがとうございました。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。続きまして、後藤田委員お願いします。

【後藤田委員】　本日は誠にありがとうございました。水素利用先導研究開発事業で実施された多くの研究内容を聞かさせて頂きました。すべての研究テーマで独自の技術開発が含まれておりました。研究成果から判断して、まだまだ発展途上の研究課題やすでに完成度の高い研究課題などもございましたが、

全体的に非常に価値ある研究内容でございました。近年、日本の国際的なプレゼンスの低下が懸念されていると思われます。欧米や中国などを中心に、我が国で独自に開発された水素利用に関する技術が、世界的にどのような位置づけにあるのかをもう少しご説明された方がよいのではと思いました。世界レベルでの研究成果の独自性と優位性を強調して頂ければと思いました。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。続きまして、工藤委員お願いします。

【工藤委員】　本日はどうもありがとうございました。会議の冒頭で推進部から説明があったとおり、水素をめぐる環境が、ライフサイクルで炭素集約度の評価をし、その支援策を検討するとか、カーボンマネジメントの考え方に基づいて水素を起点とした他の技術との組合せによるサプライチェーンを構築するといった多様な局面に今移行しているものと思っております。すなわち、水素への期待値がより高まってきているといったところで、その実現可能性を高めるためにも、将来の水素生産なり、利用をめぐる先導的な基盤技術開発というものは非常に重要な取組だと感じております。また、事前質問へのご回答を含め、本日のご説明、質疑を通じて全体としての運営状況の理解がより進みましたし、事業全体は適切に運営されている印象でございました。本事業の目的である、例えば基盤的技術開発の成果を次のステップに引き継ぐといった事業がしっかり実現されているようで、将来的な水素サプライチェーンの構築に向けて、そういった取組が貢献することに期待したいと思います。逆に、事業の途中で将来性が薄いとか、見込めないというものについてもしっかりと判断をされているということで、国プロとしての特性をきちんと留意した運営がなされているものと理解してございます。それからマネジメントの観点では、これはコメントもいたしましたように、アカデミアと事業者のつなぎ役となるべくいろいろと工夫をされているのはとてもいいことであり、実際にNEDO自身が国プロ実施主体として唯一無二の役割を今日本の中で担っていらっしゃるところで、そうした様々なマネジメントの工夫による効果であるとか課題をうまく集積し、このプロジェクトのみならず、関連するプロジェクトのみならず、今後の国プロ運営にもうまく活用していってもらえたらと思います。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。続きまして、盛満分科会長代理からお願いします。

【盛満分科会長代理】　本日は、午前と午後にわたり、NEDO様や各事業者様から説明を伺いまして、水素利用等の研究開発事業に関する全体的なイメージを持つことができました。ありがとうございます。特に、非公開の部分で具体的なお話を伺いましたが、採択されて実施された多くの事業が、次のステージであるとか別の事業として進んでいる点は非常によいことだと思っております。また、先導事業ということで、アカデミアからいろいろな発想やアイデアが始まる中、途中から新たな企業の方が加わる、もしくは次の後継事業において、さらに別の企業が加わる予定であるといった点は、まさに先導研究が目指すべき一つの姿ではないかと考えます。また、知財マネジメントで言えば、オープン・クローズの戦略に沿った形で知財戦略を取られているとことが把握でき、NEDO様のマネジメントが活きたところではないかと思うとともに、この先導研究全体としては高く評価される点だと感じております。最後に一つ付け加えますと、これは先導研究に対する評価では決してないのですが、現在の水素コストに対する2030年もしくは2050年といった目標が全体に対する説明の中でも数値が出ていた一方で、先導研究という中で出てくる新しい技術とその水素コスト目標というのは、今の時点ですぐに道筋がつながる、もしくは容易に説明できるものではないと考えます。ただ、この事業にかかわらず、そういったコスト目標に対してこの技術が今どういう位置にあるのか、どういう考え方でこれを説明していけばいいのかという点では、常に事業者もしくはNEDO様、そして他のステークホルダーも含めて考えておかなければいけない部分とも思うところです。そういった点も含めまして、ぜひ引き続きご検討いただければ幸いでございます。本日はありがとうございました。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。それでは、最後に私からですが、既に皆様がいろいろなことをおっしゃられたとおりだと思ってございます。水素という技術を中心にいろいろな方々が多方面で貢

献をされて様々な成果を出されていることが十分に伝わってきました。今日お越しになっている評価委員の中には、前回の中間評価のときにも委員をされていた方が何人かいらっしゃいますが、実はそのときには相当厳しいご発言やご指摘があったことを記憶しています。そういった点に対しても十分に応えていただけたものと私自身は感じた次第です。今回の事業は非常に優れたといいますか、非常によいマネジメントをされながら事業全体を引っ張ってこられたNEDOの方がいらっしゃることを、ここで一言申し上げておきたく思います。もちろん議論の中では、今後に向けてのご指摘やコメントというものも委員から出ておりますが、それはぜひとも今後に向けてつなげていただければよいのではないでしょうか。また、技術レベル（TRL）の話題のところで感心をした点として、技術レベルを上げましょうというのは当然の話ですが、実は人材育成についても考えていらっしゃる、何らかのお考えを持っていらっしゃることが見えてまいりました。それこそ、今後の日本の状況を考えれば厳しい状況になっていくのは皆様ご存じのとおりですが、そういった人材育成の面でもNEDOの方々にも力を発揮していただけると、よい日本ができてくるのではないかなと、今日の題目とは外れるものの、そういった面でも私はお話をずっと伺っておりました。最後になりますが、本日のこの評価を受けるにあたり、まず事業を実際に進められた方々、それからNEDOの皆様、そして評価委員の皆様、関係する皆様に対しまして、お疲れさまでした、ご苦労さまでしたと一言申し上げ、私の講評に代えさせていただきます。

【宮代専門調査員】　評価委員の皆様、ご講評を賜りまして誠にありがとうございました。続きまして、スマートコミュニティ・エネルギーシステム部の大平ストラテジーアーキテクトより一言よろしくお願いいたします。

【大平ストラテジーアーキテクト】　本日は、ご評価をいただきまして大変ありがとうございました。このプロジェクトは10年にわたるプロジェクトであり、ある意味、私事でございますが、着任したのが2013年4月、NEDOに移管されたのは2014年4月ですけれども、経済産業省のほうで始まったのがちょうど同じタイミングでございました。そうしたところで、10年間いろいろな形でこのプロジェクトを見てきております。これ自体で完結するわけではない先を見た技術であり、またご案内のとおり、水素というのは幅広い技術領域でございますので、ある意味、いろいろなものをやっている、一つで評価するのが大変難しいプロジェクトだったかと思ってございます。その中でも過分なお話をいただきまして大変ありがたい限りです。この事業だけではなくNEDOとしての運営の在り方、特にマネジメントの在り方に対してのご指摘も頂戴いたしました。マネジメントというのは、なかなかこれだというものはないもので、いろいろな意見を頂戴しながらブラッシュアップをしていくことだと受け止めております。それから、目標設定の在り方、様々な特許・知財の扱い方、外との連携、情報発信、人材育成も含めたご指摘を、私どもが動かしているほかの事業にもぜひ反映させながら、ほかのプロジェクトにおいても高度化を図っていければと考える次第です。今後とも様々な形で、ご示唆を頂戴できれば幸いでございます。ありがとうございました。

【伊藤分科会長】　ありがとうございました。それでは、以上で議題8を終了といたします。

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（非公開） |
| 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。

「水素利用等先導研究開発事業」（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<br>説明 |
|---|---|---|---|
| 資料 5 全般 | 諸外国（特に欧米中）における水素製造技術ならびにその関連技術の開発研究に対する国レベル、企業レベルの過去、現在、将来の投資はどの程度になっているかを分かる範囲でご説明いただきたい。 | 伊藤<br>分科会長 | 2023 年 6 月 6 日に公表された改定版水素基本戦略（令和 5 年 6 月 6 日再生可能エネルギー・水素棟関係閣僚会議）によれば、国レベルにおいては以下の通りです。<br>米国　2021 年 6 月から開始した Hydrogen Shot において、10 年以内に 1kg のクリーン水素を 1 ドルにするとの目標を発表。「クリーン水素戦略&ロードマップ（2022 年 9 月）」のドラフトでは、クリーン水素の生産量を 2030 年までに 1,000 万トン/年、2040 年までに 2,000 万トン/年、2050 年までに 5,000 万トン/年にする等の目標を掲げている。目標達成に向けては、インフレ削減法（IRA、2022 年 8 月）において、3,690 億ドル（約 51.7 兆円）をエネルギー・気候変動分野に投じ、クリーン水素製造に対する 10 年間の税額控除を打ち出し、最大 3 ドル/kg の控除を実施することを示した。超党派インフラ法（BIL、2021 年 11 月）では、クリーン水素関連プロジェクトに対し、5 年間で 95 億ドル（約 1.34 兆円）を投資する等、大胆な先行投資を実施している。そのうち最大 70 億ドル（約 9,800 億円）は水素源、最終用途、地理的な多様性に基づき、6 から 10 の地域水素ハブを支援するために使われる。<br>欧州　「欧州の気候中立への水素戦略（2020 年 7 月）」では、2024 年までに最低 6GW の再生可能エネルギー水電解装置を導 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | | | 入、2030 年までに最低 40GW の再生可能エネルギー水電解装置の導入を掲げている。また、REPowerEU（2022 年 3 月）では、2030 年より前にロシアからの化石燃料脱却を目指し、域内製造 1,000 万トン/年、輸入 1,000 万トン/年を供給できる体制を構築することとしている。これらの目標を裏付ける支援として、IPCEI「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト」を二度（2022 年 7 月、9 月）にわたって選定・公表している。2022 年 7 月に行われた第一弾公募「Hy2Tech」では、①水素製造技術、②燃料電池技術、③水素の貯蔵、輸送、流通技術、④エンドユーザー（特にモビリティ分野のプロジェクト）を対象とした総計 41 プロジェクトに対し、最大 54 億ユーロの公的資金を投入することで、民間から 88 億ユーロの投資を引き出そうとしている。また、2022 年 9 月に行われた第二弾公募「HyUSE」では、①水素関連インフラ、②水素の産業利用の分野の総計 35 プロジェクトに対し、最大 52 億ユーロの公的資金を投入することで、民間 70 億ユーロの投資を引き出そうとしている。直近では、「グリーンディール産業計画（2023 年 2 月）」を発表しており、その政策メニューの一つとして「欧州水素銀行」（EU Hydrogen Bank）を創設した。同銀行においては、再生可能エネルギー由来水素の域内製造を支援するため、10 年間にわたり、製造した再生可能エネルギー由来水素 1kg あたり固定されたプレミアムを補助するための競争的入札を、2023 年秋に実施することを予定している。加えて、2021 年 7 月に公表された「欧州脱炭素化政策パッケージ（Fit for 55）」の一部である再生可能エネルギー指令の改正に際し、産業部門の水素需要につ |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | | | いて、2030年までに42%をグリーン水素とする等の導入目標に暫定合意した。<br>中国　水素エネルギー産業発展中長期規画（2022年3月）を策定し、2025年にFCV5万台、再生可能エネルギー由来水素製造年間10～20万トン、$CO_2$排出削減量100～200万トン/年の実現を目指すこととしている。また、2020年9月、財政部等関連5部門は、FCV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している。条件に基づき2025年までに年間最大17億元（約340億円）を助成することとしている。自治体レベルでも水素産業の発展等に関する計画を相次いで発表しており、例えば、北京市は2020年9月に「北京市水素燃料電池自動車産業発展計画」を発表、2025年までにFCV1万台、水素ステーション計74か所の導入を掲げている。また、吉林省では2022年10月に「水素エネルギー・吉林」アクションを発表し、グリーン水素製造を2025年に6～8万トン/年（アンモニア等は25～35万トン/年)、2030年に30～40万トン/年（アンモニア等は200万トン/年）とする目標を掲げている。<br>加えて、革新的技術シリーズ1水素産業で日本が存在感を示すための方策～水電解槽を題材に～　野村卓人　みずほ銀行　産業調査部資料第209号　2023年7月25日によれば、水素はカーボンニュートラル実現に向けて重要な役割を果たすエネルギーである。水の電気分解によって水素を製造するための装置である水電解槽は今後市場拡大が見込まれ、メーカー間の競争が始まっている。このような状況で、日本政府は、2023年6月に改訂した水素基本戦略で、「市場の立ち上がりが早い」「市場規 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | | | 模が大きい」「日本企業が技術的優位性を持つ」という条件を満たす、水電解槽を含む 5 類型 9 分野を戦略分野として位置づけ、2030 年までの日本企業による水電解槽導入目標を 15GW とした。また、国際エネルギー機関（IEA）の Net Zero Scenario（NZE シナリオ）によれば、2050 年には世界の水素需要は現在の約 6 倍に増加する見通しで、日本でも水素需要の飛躍的拡大が見込まれており、政府は水素の導入目標を 2030 年 3 百万トン、2040 年 12 百万トン、2050 年 20 百万トンと置いている。2050 年に向けては、グリーン水素が供給の中心的な役割を担うと予想される。2030 年時点で、NZE シナリオにおけるグリーン水素生産量から、必要な水電解槽容量は約 800GW と試算されるとしている。他方、現在進行中のプロジェクトに基づいた 2030 年時点での水電解槽設置容量の予測は欧州やオーストラリアを中心 134GW にとどまるが、今後脱炭素化の潮流が世界で加速するにつれ、水電解槽の設置容量は増加していくと考えられるとのこと。2030 年までの累積市場規模は世界・積み上げベースで 8 兆円（134GW）、世界 IEANZE シナリオベースで 47 兆円、2050 年までの累積市場規模 368 兆円とされており、水電解槽に関わる企業にとっては大きなチャンスとされているとのことです。 |
| 資料 5<br>P.14 ~ 16<br>(~17) | NEDO 殿ご担当の各事業(先導、社会構築、サプライチェーン、など)には、共通した研究開発項目が記載されており、同時並行で進められるように見える。これらの棲み分けがどのようになっているのか、例えばア | 伊藤<br>分科会長 | 水素利用等先導研究開発事業（当該事業）は特に後期 5 年において「Back to Basic」をメインにアカデミアを主体として課題解決を中心に取り組む事業です。<br>他方で、「水素社会構築技術開発事業」や「競争的な水素サプライチェーン構築のための技術開発事業」、「燃料電池利用等の飛躍的拡大のための共通課題解決型産学官連携研究開発事業」 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | カメディア中心であるとか、企業中心であるとか、または、革新的・要素技術を脱して応用の範疇に展開といった成熟度、などをご説明いただきたい。時間軸や事業期間を併記していただけると全体を俯瞰できると考える。 | | 等、NEDO で行う他の事業は、扱う技術領域が異なったり、対象とする技術成熟度に多少の幅はありますが、企業を主体に（企業の関与を強め）要素技術開発や技術実証に取り組む性格の事業です。そのため、本事業で取り組んだアカデミアが育てた技術シーズを、企業の関与を強めてこれらの事業に橋渡しする形での棲み分け・連携を行っています。<br>資料 5 P16 にご指摘の主旨の記載をしておりして、当事業は「革新的技術開発」のフェーズに対応した技術シーズへ対応しております。 |
| 資料 5<br>P.18 | 研究開発項目①、④、⑤において、2022 年頃に記載されている「プラント引渡し水素価格(30 円/$Nm^3$)」は、2030 年頃に達成すべき目標となっている「水素価格 (30 円 /$Nm^3$)」と同じでよいか。2030 年頃の水素価格は、「プラント引渡後の輸送コストを含めた他と競合可能な価格」とも受け取れるため、どちらで考えればよいかご説明いただきたい。<br>一方、研究開発項目③で示されている 2040 年における水素価格（20 円/$Nm^3$)は、2050 年の水素の目標価格（但し、CIF コスト込み）と同額である。CIF コストの見積もり内容で水素のみの製造（目標）コストが判 | 伊藤<br>分科会長 | 研究開発項目①、④、⑤における「プラント引渡し価格」は、水素需要家側のプラントで引き渡す際の価格であり、水素製造後に需要地までの輸送コストを含めた価格ですので同一のものとお考えください。<br>研究開発項目③における水素コスト 20 円/$Nm^3$ は本事業における目標ではなく発電コストを算出するための前提条件ではありますが、輸入港までの輸送コストを差し引いて水素製造価格を算出するという点では御理解のとおりです。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | 明すると考えるが、このような認識でよいか。 | | |
| 資料 5<br>P.19~24､36 | 知財戦略等に関連して、“知財委員会”に関する情報（構成や決定権など）を今一度簡単にご説明いただきたい。<br>また、アカメディア(特に大学)では資金や時間を要するなどの理由により、権利獲得には消極的との評もあるが、2020 年度以降ではアカメディアからの出願数が多くなっている。NEDO 殿において何らかのサポートをされたのかも合わせてお伺いしたい。 | 伊藤<br>分科会長 | 知財委員会は複数事業者による事業の場合、知財合意書の作成、知財運営委員会の整備をお願いしております。こちらマネジメントに関しては経済産業省によるガイドラインが策定されており、こちらに基づく運用をお願いしております。知財合意書の作成及び知財委員会は事業者が主体として運営するものですが、NEDO が示す合意書のひな形を参考にしていただいております。委員会の構成や決定権は委託事業者間で定める知財運営委員会規則によって定められることになっております。いずれも NEDO よりひな形を提示しており、内容の事前確認はお願いしておりますが、事業者様主体で進めていただいております。詳しくはこちら<br>（https://www.nedo.go.jp/itaku-gyomu/shisan.html）<br>をご参照ください。<br><br>2020 年度以降アカデミアからの出願が多くなっておりますのは、2018 年度以降に開始した案件の研究活動の成果が形成される時期であること、2019 年度から本事業のマネジメントで取り組んだ「仕上げたい技術の姿」活動を通じて、事業成果の知財化の重要性についてアカデミアの先生方により深くご理解いただけたという部分もあるのではないかと考えております。<br><br>なお、アカデミアにおかれましては資金面の制約から権利獲得が難しい場合もありますが、共同提案者との共同出願により資金面での問題を解消するなどの工夫をされているケースもござ |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | | | います。また、アカデミアの知財を広く多くの企業に実施許諾することが必要とのご認識のアカデミアは、大学ベンチャーを創設し知財を保有したうえで複数の実施権付与を目指すなどの取り組みをされているケースもございます。NEDO の事業費では、国内外特許出願、PCT 出願、国内外意匠出願、ハーグ協定のジュネーブ改正協定に基づく意匠の国際出願に要した費用については計上できるようになっております。 |
| 資料 7 | 個々の研究開発課題では目標に対する達成状況が示されているが、本事業全体の位置づけ・意義に基づいて、研究開発課題間での目標達成度の比較は行われたか。例えば、同じ電解方法に関する技術開発を行った課題間で、技術達成度を相互に比較し、それを踏まえて次の事業期間における開発目標の設定につながるような、研究開発成果の整理は NEDO においてなされたか。なされていない場合、今後行う具体的な予定はあるか。 | 盛満分科会長代理 | 研究開発項目①においては横浜国立大学を中心とする事業において、評価標準化に取り組み、MEA評価のための共通セルの開発とそのセルによる評価を他の事業者にも採用いただき、技術達成度を相互評価できる道筋をつけました。標準セルを使用した評価については評価プロトコルが整いつつあり、この評価プロトコルによる評価とその結果による相互比較はこれからになりますが、ご指摘の点に対する布石をうったというのが本事業のフェーズになります。今後につきましては、研究開発項目①の成果の橋渡し先である「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」において引き続き水電解の課題について取り組む中で、水電解に関する評価解析プラットフォームの構築を進めており、その取り組みによってより精緻な相互比較と開発のステアリングに取り組みを継続しております。また、グリーンイノベーション基金で整備の進んでいる水電解の評価拠点である産総研との連携なども含めて充実と拡張を進めていくことになると考えております。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| 資料 7 | 本事業において得られた複数の課題における研究開発成果や達成された目標は、水素技術に関するロードマップの策定のためにどのように活かされたか。例えば、2023 年 2 月に水電解技術に関するロードマップのための技術課題が NEDO から公表されたが、この技術課題の整理を行った委員会やロードマップ作成の受託事業者に対して、本事業の成果はいつ、どのような形で展開されたか。 | 盛満<br>分科会長<br>代理 | ロードマップ検討委員に対して、特別に本事業成果についてご説明する機会は設けませんでしたが、委員会傘下の WG のメンバーに本事業の実施者が選定されており、本事業の成果も踏まえて技術課題が作成されていると理解しています。また、本事業の成果については毎年 7 月ごろに実施している「NEDO 水素・燃料電池成果報告会」において広く一般に公開しているところです。<br>加えて、事業者との進捗や成果等に関する対話から、水電解装置やその部材・材料だけでなく、水電解プラントとしての CAPEX 及び OPEX に対する課題としてこれまで事業で取り上げていなかった整流器をはじめとする補機類の課題を認識にするに至り、ヒアリング対象に補機メーカーを含めるなどしてロードマップ策定に反映しています。 |
| 資料 7 | 水素コストの 2030 年目標や 2040 年以降の目標に対して、これらのコスト目標と個々の研究開発課題で達成された目標との関係をつなぐには、何が必要であるかの検討や整理はなされているか。また、その検討や整理に基づいて、本事業が今後継続される際に、研究開発課題の設定・採択・実施においてそれはどのように活かされる必要があるか。 | 盛満<br>分科会長<br>代理 | 個々のテーマの研究開発を継続して最終的なアウトカム目標や社会実装を達成するために必要な具体的な取り組みは個々の事業者で検討の上で次フェーズの提案を行うようマネジメントしてきたところです。共通して言えることは「社会実装を担う企業を巻き込み、開発成果を実現するためのエンジニアリング的観点からの検討を行うこと」、「企業主導の下、技術の最終的な使われ方を具体的に想定した上で次のステップの目標を定め、アカデミアが解決すべき課題を明確にすること」と考えており、本事業の成果の橋渡し先である「燃料電池利用等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」や「競争的な水素サプライチェーン構築のための技術開発事業」における採択審査やマネジメントにおいても意識しています。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答 |
|---|---|---|---|
| | | | 説明 |
| 全体 | 評価全般に関する質問です。今回は最終審査ということで、「背景」部分は評価しない点を理解しました。その上で、評価を行う対象ですが、NEDO 事務局としての事業全体の評価なのか、各事業毎の詳細な評価を行うのか、目的を確認させて下さい。会議当日は各事業の説明と質疑応答がありますが、委員会としての評価取り纏めは事業全体に関するものの様に見受けられるため、この点をご教示ください。 | 工藤委員 | 終了時評価になりますので、目的としましては事業全体の評価になります。掲げられましたアウトカム、アウトプット達成に向けて 各事業毎の達成状況が貢献したか、より貢献するためには、どうあるべきだったかなどの評価をいただきたいと考えております。各事業毎の達成度合いを考慮して、全体評価をしていただきたます。<br>補足になりますが、中間評価、終了時評価のどちらであっても評価分科会は事業全体に対する評価でありますが、各事業の詳細説明は、事業全体のアウトカム、アウトプット目標の達成状況、達成見込み、波及効果などの評価いただく際に影響するものであるため実施しております。各事業成果の意義が大きく、また、同事業者が社会実装に進める建付の事業の場合、その計画がしっかりと示されているものは、事業全体としても目標の達成見込みは高いと判断されると考えられます。尚、終了時評価に事業の意義（背景）が評価項目に入っていない理由は、終了した事業に対する評価はその後の反映の観点においても重要度が低いとの判断から、新評価制度から除外されています。 |
| 分科会発表資料､P19 他 | 些細なコメントですが、公開資料としての表記として「慫慂」は理解が難しいと感じます。今少しかみ砕いた表記にしてはいかがでしょうか。 | 工藤委員 | ご指摘ありがとうございます。「強く推奨」に修正しました。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| 同上、P19-24 | 基礎技術の市場プレーヤーへの移行を促す取り組みは非常に重要と考えます。本事業では知財形成に係るマネージメント基盤（文書）を整備し、事業者の理解増進を図る取り組みをされたとされていますが、具体的にはどういった活動をされたのでしょうか（例えば、資料共有、説明会、個別協議（一般的な回数、等)。 | 工藤委員 | 「仕上げたい技術の姿」については様式を事業者に説明・展開し、記入していただくことから着手しました。ご記入いただいた内容から、事業者の研究シーズの位置づけや製品展開段階での各プレイヤーの役割などについて、事業者がどのように考えているかNEDO側の理解が進み、実施計画書の実施内容と知財形成の関係等をより深く把握することができました。また、記入内容を基に、事業者の立ち位置から社会実装に向けた知財形成や協力関係が必要なプレイヤーの探索など、次のフェーズに進めるための対話のきっかけとして活用いたしました。 |
| 同上 | 上記の取り組みを行う中で、認識・事業者より指摘されたメリット・デメリットとして特記すべきことはありますか？また、その中で事業期間中の修正対応、将来の類似事業への示唆等はありましたでしょうか。 | 工藤委員 | 上述の「仕上げたい技術の姿」のメリットとしては、当該様式の意図を良く理解の上でご対応いただいた事業者について、その後企業コンソーシアム形成の活動など具体的な動きにつながった部分があると考えています。他方、技術の成果が社会実装される際の資金の流れ（ビジネスの形）まで想定して作成する必要があることから、アカデミアを主な事業者とする本事業においては、当初様式の記入に抵抗感を持たれる方がいたのも事実です。そのため、NEDO 事業は成果を最終的に産業に結びつけることが求められていることにご理解をいただきつつ、研究成果を「課題解決」の手段として具体化するために、提供させていただいたツールをご活用いただくようお願いいたしました。産業形成を指向する技術開発にはビジネス形成の思考展開は必須であり、技術開発の当事者自身がそのスキルを身に着けることが事業化や企業への移転に際しても大変有益なことだと考えています。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答 |
|---|---|---|---|
| | | | 説明 |
| 同上、P32 | ①非連続的な価値の創造に貢献する理由として「社会で利用していく意義を高める」とありますが、表現が曖昧に感じます。本質的には、脱炭素化の効果も含めたエネルギーとしての市場性を高める（実現する）といった解釈でしょうか。 | 工藤委員 | ご指摘の通り、脱炭素化も含めた水素のエネルギーとしての価値／市場性を高める、と御理解いただければと存じます。 |
| 同上、P34-35 | 目標設定の根拠、達成の根拠は、基本的に水素基本戦略に記載された技術的到達目標が記されています。一方で、技術的到達目標が真に市場性を有する水準であるかの評価も、時間的経過による国内外の環境変化に基づいて行うことが肝要と考えます。今回の最終審査での評価スコープ外かもしれませんが、そういった課題意識はお持ちでしょうか（もしくは、別の機関等で行うべき事項でしょうか) | 工藤委員 | 国の戦略を引用する形で目標を設定していることから、NEDO独自で目標とする水素コストを見直すことはしておりませんが、取り組んでいる技術が環境変化を踏まえて競争力を持つか否かについては日々の事業者との対話の中で常に意識しながらマネジメントを行っています。また、水電解については「燃料電池利用等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」において技術開発ロードマップ策定に向けた調査を2022 年度から開始しており、近年の国内外における環境変化や海外のベンチマークも踏まえて、水電解がどのような使われ方をするか、そのために解決すべき技術課題は何か、といった議論を行っています。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答 |
|---|---|---|---|
| | | | 説明 |
| 同上､P41 | NEDO が実施する意義の項目で「創出した成果を効果的かつ効率的に次の実用化フェーズの国家プロジェクトへ移行することが可能である。」という点が特に重要と感じます。この観点で NEDO が有する比較優位性は具体的にどの部分が該当するとお考えでしょうか。例えば、後段で説明されている体制、採択プロセス、進捗管理等は「何を行った」という説明が中心ですが、この中で NEDO の比較優位性はどこにあると考えればよいでしょうか（例えば、この規模の事業運営を実施する体制を有する機関は日本に存在しない、等） | 工藤委員 | 例に挙げていただいたとおり、水素の製造、輸送・貯蔵、利用まで、また、TRL の比較的低い基礎的な研究開発から TRL の高い要素技術開発、実証まで一体的に実施を行っている機関は日本において NEDO 以外にないと理解しています。本事業の担当者は、ほぼ全員が本事業以外の水素関連事業のマネジメントにも従事しており、（公募で厳正且つ公平に採択審査されることは前提として）次のフェーズのプロジェクトに進むためにはどのような検討・取り組みが必要かという視点を持って日頃のマネジメントにおいて事業者と対話を行うことで、成果の橋渡しをより効果的かつ効率的に行うことが可能であると認識しています。 |
| 資料 5 | P2014 年からの事業開始で、これまでに、COP21 パリ協定，水素基本戦略、2050 年 CN 宣言、第 6 次エネルギー基本計画、水素基本戦略改定と外部環境の大きな変化と国の方針の大きな動きがありましたが、それを受けて NEDO における事業の考え方の変化やマネジメントの変化はどのようなものでしたでしょうか。 | 矢加部委員 | 本事業が開始された 2013 年度（NEDO への移管が 2014 年）時点では、 NEDO で水電解や水素発電の開発に取り組んでいたのは本事業のみであり、将来技術としてこれらに取り組む企業が本事業に参画していたところです。その後、ご指摘の外部環境の変化、国の方針策定等も踏まえて水素関連技術が現実的なオプションとして見なされ始め、要素技術開発や実証を担う NEDO の他のプロジェクトにおいてもこれらの技術分野に取り組むようになり、企業主体の技術開発がこれらのプロジェクトに移行していく中で、本事業はアカデミア主体の研究開発プロジェクトとしての位置づけをより明確化し、他事業への成果の |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答<br>説明 |
|---|---|---|---|
| | | | 展開を強く意識しながらマネジメントを行うようになりました。 |
| 資料 5 | P19 から P24 の特許戦略ですが、特に水電解は世界市場で競争していく競合技術と思います。特許戦略として、どの国を市場とし、どの国のどの技術と競合し、そこにどの技術を競合させ、競合で勝てるポイントは特許上どの点である、といような明確なビジョンがありましたら聞かせてください。 | 矢加部委員 | 当該事業におけるマネジメントとしては特許出願件数を確保する観点から取り組み、出願内容の観点については（連携する企業の意向も踏まえつつ）事業者の考えを第一とするマネジメントをしておりました。<br><br>他方、ご指摘の通り特に水電解は近年の世界で競争が激化している技術であり、市場と技術の選択と競合と協調を柔軟に使い分ける戦略は重要と考えます。<br>例えば、2022 年 5 月に公表された IRENA による Innovation Trends in Electrolysers for Hydrogen Production によれば、2016 年を分岐点に水電解による水素製造技術の出願数が炭化水素系の水素製造技術の出願数を上回り、年ごとに出願が増加している状況で、現状日本はセルオペレーション・構造、触媒材料、セパレーター、スタックいずれも出願数も多く、リードしているように見ることができます（2005 年-2020 年）が、新興プレイヤーに日本企業はわずかしかなく、プレイヤーの拡大と今後の開発ポテンシャルの持続性の観点では脆弱な状況と見て取れ、対策が必要との認識を持っております。加えて、NEDO 事業に関係しないプレイヤーも顕在しており、そういったプレイヤーも含めた強みの分析と施策が必要とも考えられます。<br>また、部材や要素部品開発が開発のコアを占めておりますので、企業間連携は必須の認識です。当該資料においても国際連携状況の分析結果も示されており、国内だけでなく広く海外のプレイヤーとの連携も考慮する必要があると考えられます。 |

| 資料番号・ご質問箇所 | ご質問の内容 | 委員名 | 回答 |
|---|---|---|---|
| | | | 説明 |
| | | | 今後、「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」においてロードマップ策定の作業を引き続き進めておりますなかで特許戦略の観点も含めた議論もいただけるような工夫も必要かと考えます。またご議論の結果から戦略のポイントを整理しマネジメントに反映する等、対応してまいりたいと考えます。 |
| 資料 5 | P35 で、アウトプット目標の達成状況として、全て達成になっています。どの項目も、開始時の目標としては、概ね、2030 年水素コスト 30 円/$Nm^3$ の達成指針を確立する、や基盤技術を構築する、という漠然とした目標設定にはなっていますが、全て達成、ということは、この方法でやって行けば 30 円/$Nm^3$ は達成できる、ということが明確に見えた、ということでよろしいでしょうか？ | 矢加部委員 | マネジメントにおいて、2030 年度目標に貢献するための 2022 年度末に達成すべき目標へのブレイクダウンについて事業者と対話してきておりました。研究開発項目①では特に SOEC においてはスケールアップや社会実装に取り組み、具体的な実証研究にも進んでおります。また、AEM に取り組む事業者では部材レベルの要因分析を精緻に行い、2030 年を見据えた目標設定を行って推進いただいており、一定の条件下において 30 円/$Nm^3$ の達成が見える成果が創出されています。 |

# 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。

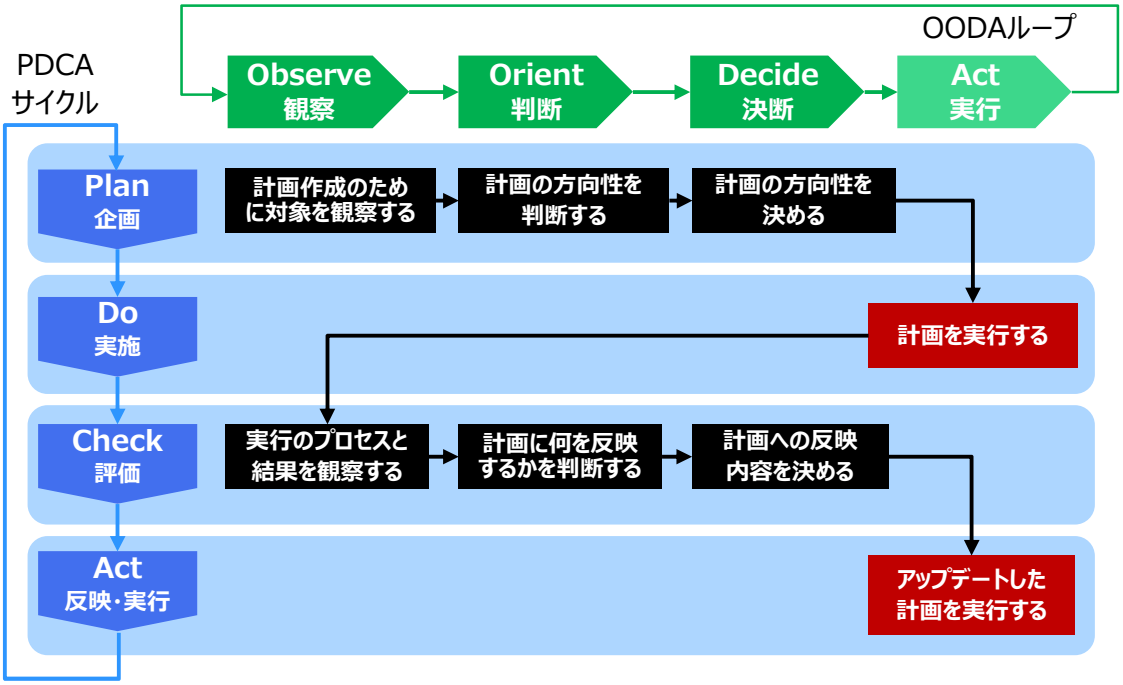



図 1　研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

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。

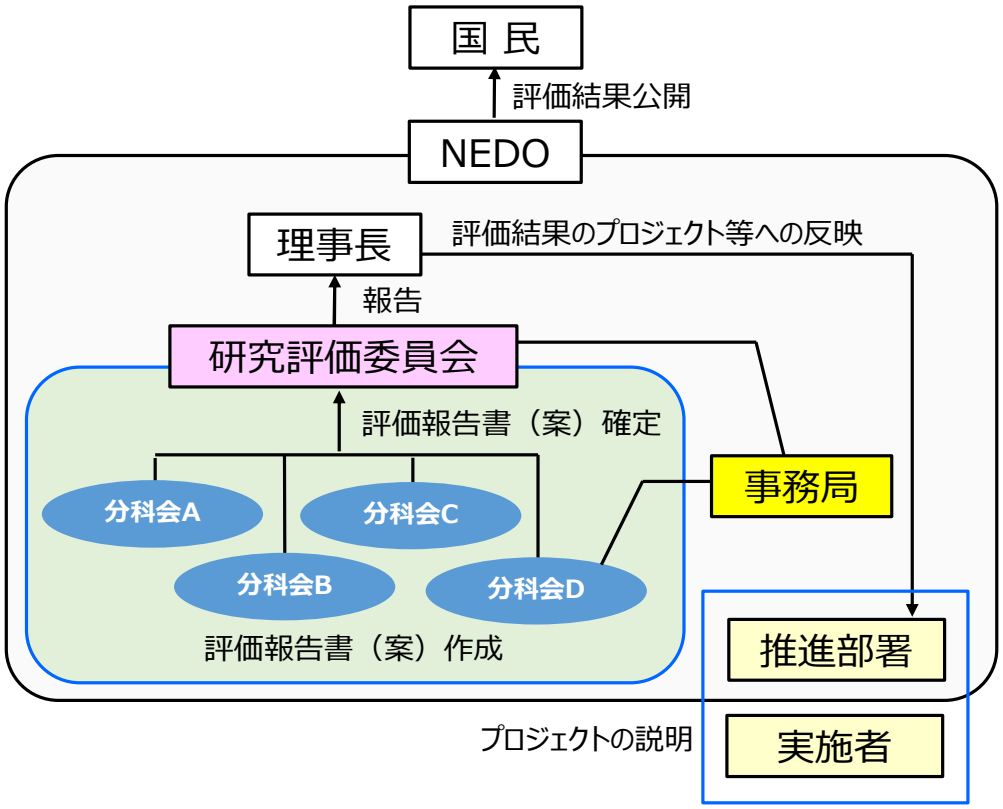



図 2　評価の実施体制

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

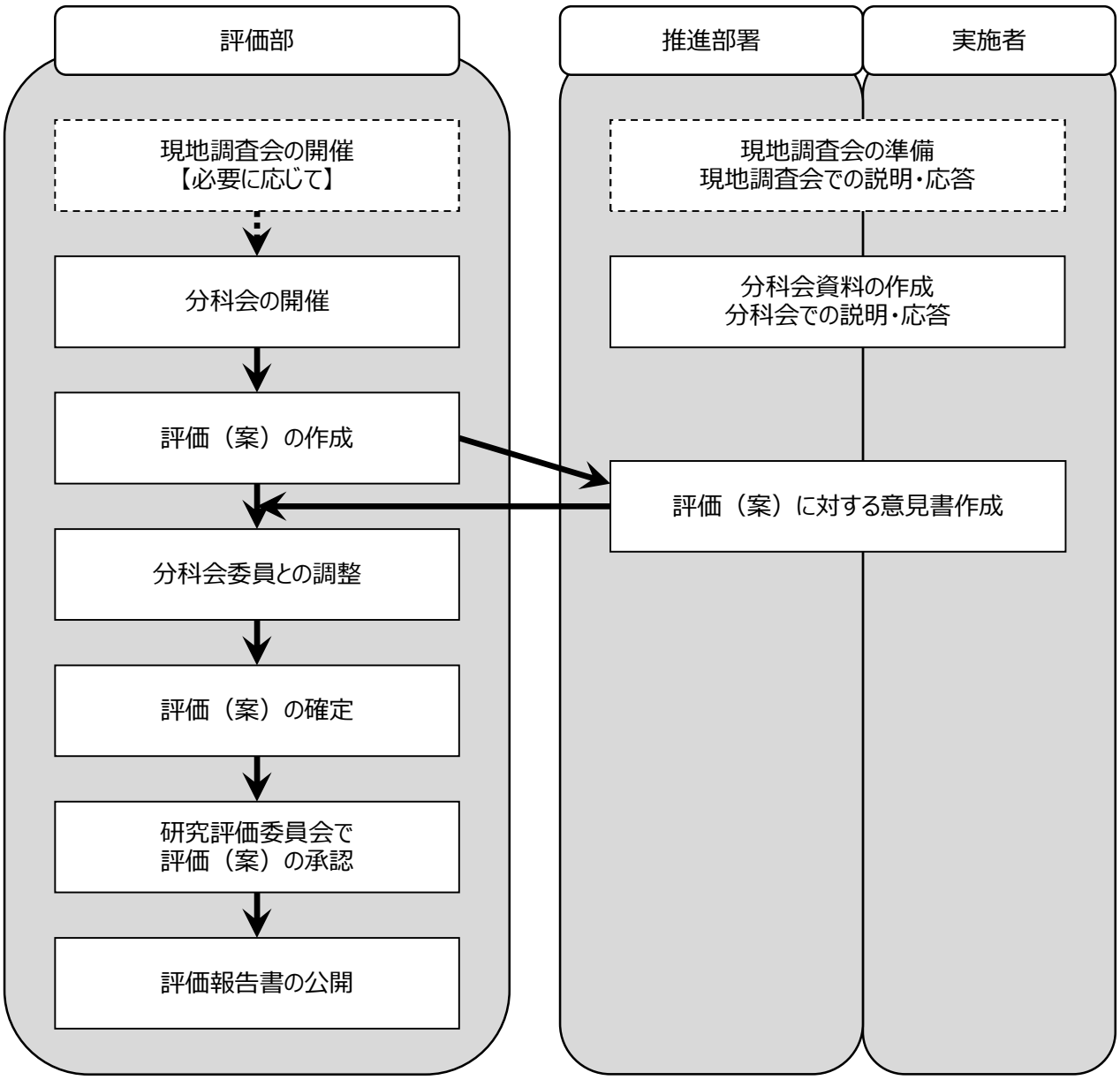



図 3 評価作業フロー

「水素利用等先導研究開発事業」（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。

## 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。

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　宮代　貴章

＊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