

発表No.B1-13

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／
大規模水素サプライチェーンの構築に係る技術開発／

低炭素社会実現に向けた 水素30vol%超混焼ガスタービン発電設備の研究開発

発表者名

松本 照弘

団体名

三菱重工業株式会社

発表日

2025年7月15日

連絡先：
三菱重工業株式会社
<https://www.mhi.com/>

事業概要

1. 期間

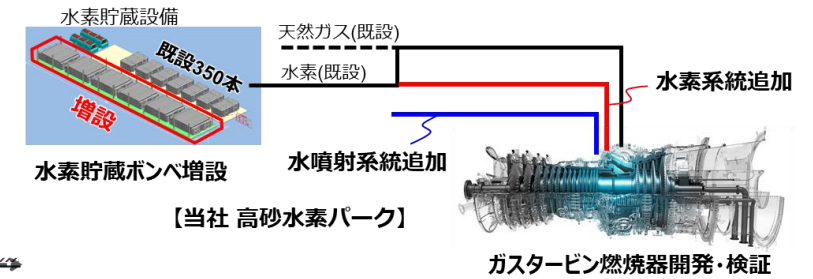
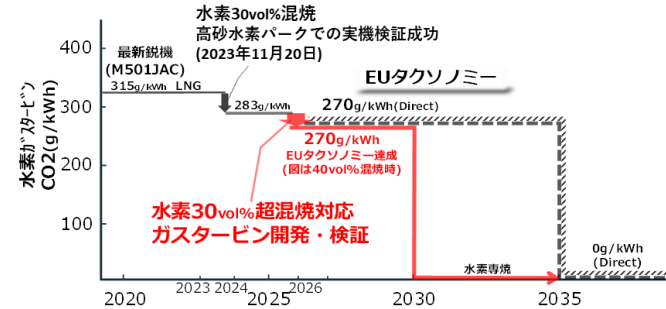
開始 : 2023年 8月
終了（予定） : 2026年 3月

2. 最終目標

- A) 既存の予混合燃焼器の改良により逆火を抑制し、**水素30vol%超における安定運転を可能とするガスタービン燃焼器を開発**、当社高砂水素パーク内の実証発電設備にて検証、安定運転を確認しEUタクソミーのCO2排出基準：**270g/kWhを達成**する（当社大型高効率GTCCの場合は水素40%レベル）
- B) 開発した燃焼器の実機適用を迅速に行うために、既存天然ガス焚きプラントでの改造範囲をミニマムとする系統設計を行い、また、高砂水素パークにおける実機実証を実現するため、**水素貯蔵設備、水素供給系統の設計・敷設および運用・制御の開発を完了**する

3. 成果・進捗概要

- A) 逆火を抑制しながら水素混焼率を増加させる 打ち手①～③ を開発中
- 打ち手① 拡散燃焼方式のパイロットノズルから多くの水素を投入、NOx低減水噴射要**：単缶燃焼試験にて水素50%に到達、EUタクソミ達成の実現可能性があること確認
- 打ち手② 逆火耐性向上**：逆火しうる低流速域の特定と改良設計を行い、気流試験で効果を確認、燃焼試験に進む
- 打ち手③ 新たな燃料ステージング(下流から高濃度水素投入)**：単缶燃焼試験にて水素混焼率40%を確認。当社実証発電設備にてまずは水素29%まで確認、引き続き水素混焼率増加の検討・検証を進める。
- B) 当社高砂水素パークでの実機検証に向けて必要な改造項目の抽出と図面作成を行い、**水噴射系統以外は改造工事完了**。水素供給量の大容量化のため、**蓄圧器全700本の据付を完了**。増設した蓄圧器と追設した水素100%燃料系統、および開発した運用・制御を使用した運転に問題なく成功した。

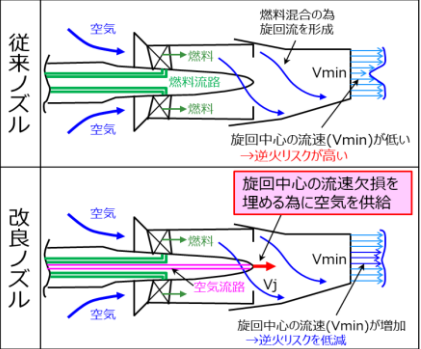


1. 事業の位置付け・必要性 ◆ 先行NEDO事業の紹介

- NEDO事業にて水素30vol%混焼燃焼器の開発完了 ➡ 新設・既設改造の両面で複数の商談あり
- 2023年11月20日、当社 高砂水素パーク内のGTCC実証発電設備（第二T地点）において水素30%混焼運転に成功

NEDO事業成果(2015~2018年度)

- ✓ 旋回中心の速度欠損部に空気を供給する事で、渦芯の速度を上昇させ、フラッシュバックに対する耐性を向上させた。
- ✓ 改良ノズルの実圧燃焼試験の結果、水素30vol%条件においてフラッシュバック発生の際候無く、安定運用が可能なることを確認。

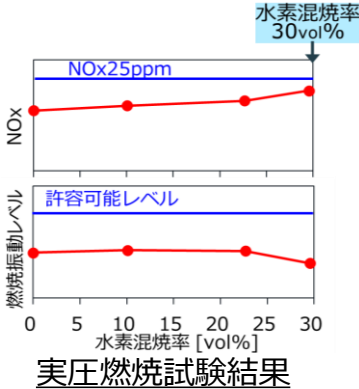


ノズル改良内容



実圧燃焼試験設備

研究目標：
水素20vol%混焼
燃焼器の開発
↓
水素30vol%混焼
燃焼器の開発完了



2023年11月
高砂水素パーク内の実証発
電設備において、
水素30vol%混焼運転に成功



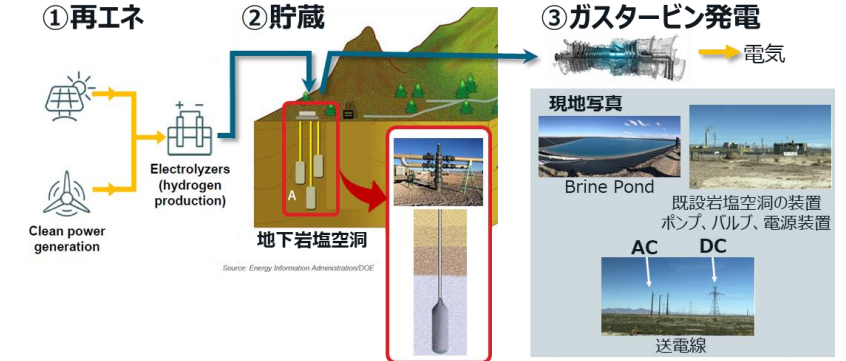
事業化
➡

事業化事例

米国マクドノフ・アトキンソン発電所での実証試験 成功

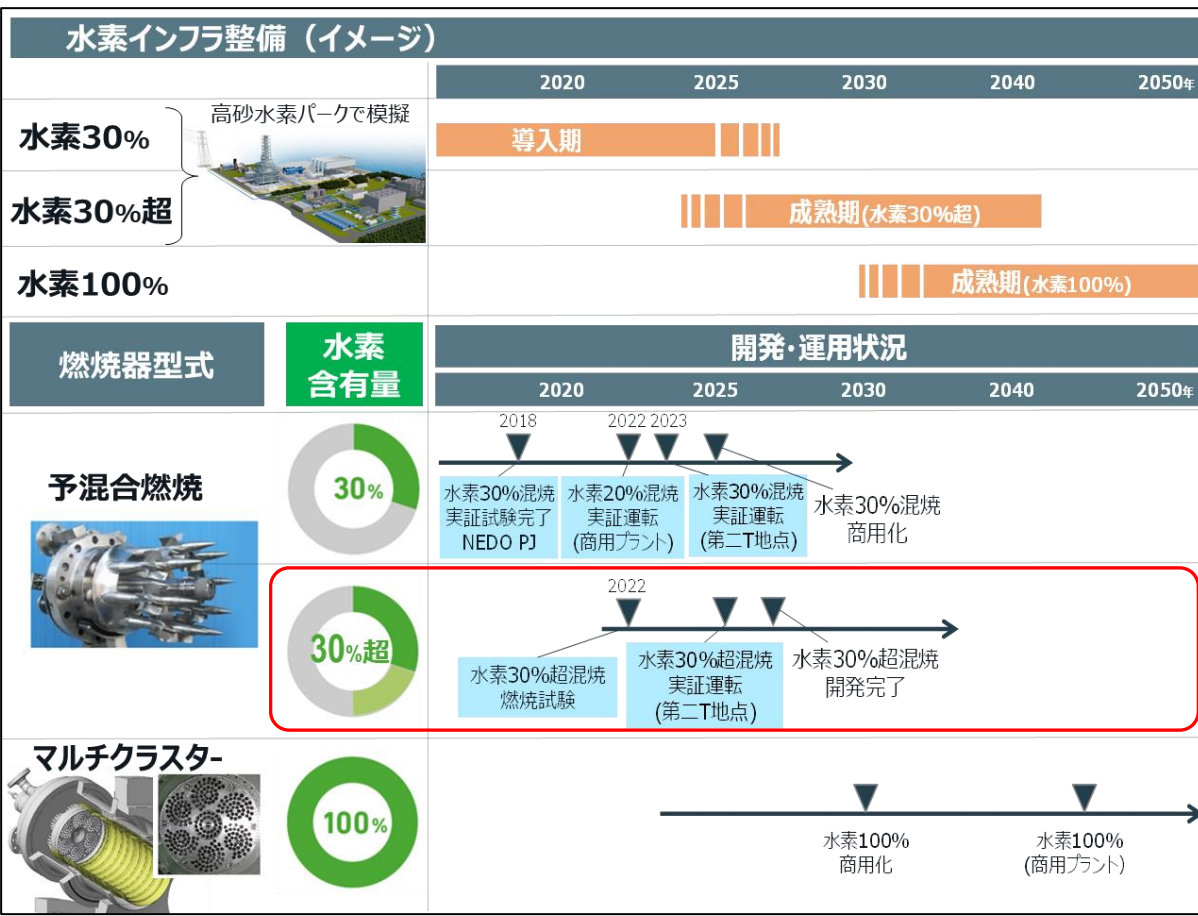
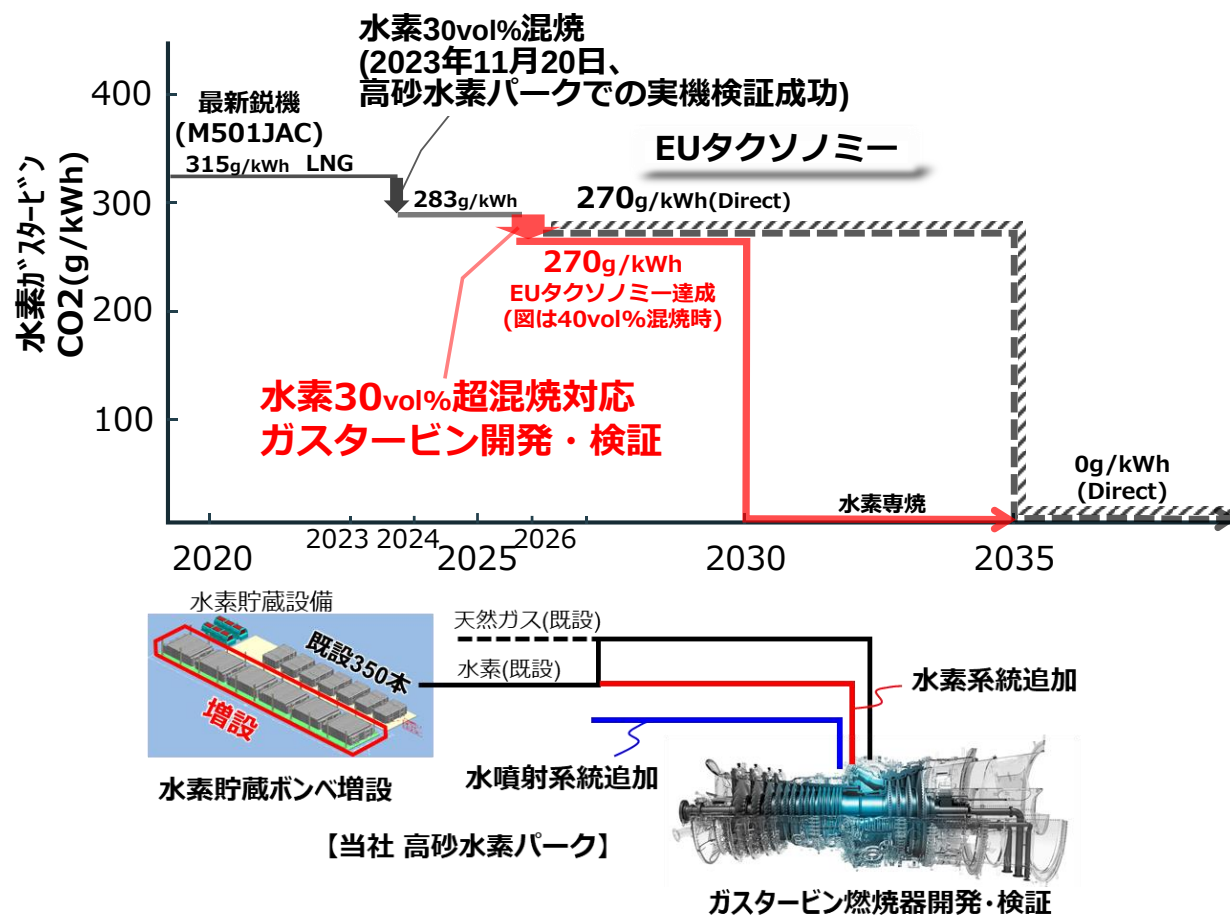


米国インターマウンテン電力が計画するGTCC PJ受注
水素焚き501JAC形ガスタービン840MWを受注済
2025年に水素30%混焼 / 2045年までに100%専焼を計画



1. 事業の位置付け・必要性 ◆事業概要と社会実装イメージ

- NEDO事業にて水素30vol%混焼燃焼器の開発完了 ➡ 新設・既設改造の両面で複数の商談あり
- EUは新たなCO₂排出基準“EUタクソミー”を定め、この基準を満たすためには更なる水素混焼率の拡大が必要。
当社は、水素専焼燃焼器の開発を実施中だが、一足飛びに水素専焼とはならず、30vol%と100vol%の間をつなぐものが必要。
- ➡ **水素インフラ導入期での実用化を目指し、水素30vol%超混焼を可能とするガスタービン燃焼器の開発を行い、海外他社に先駆けてEUタクソミーのCO₂排出基準270g/kWhの達成し、国内外の火力発電所へ適用、カーボンニュートラル社会実現に貢献する**



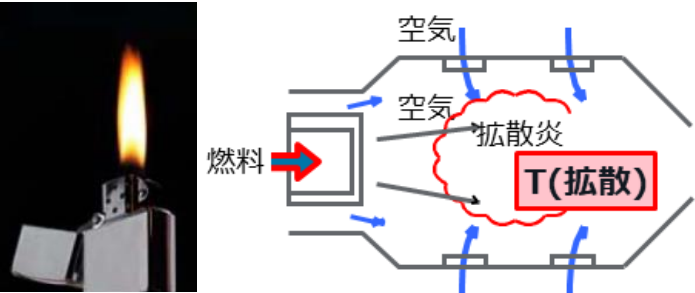
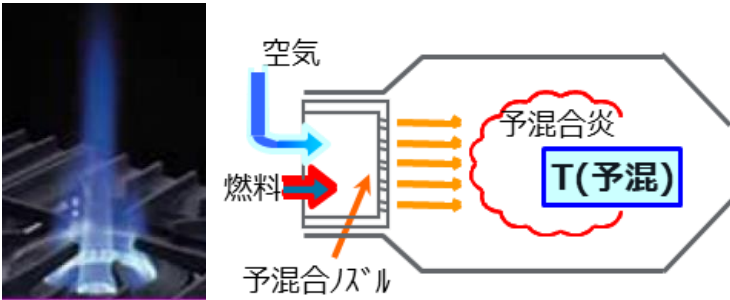
1. 事業の位置付け・必要性

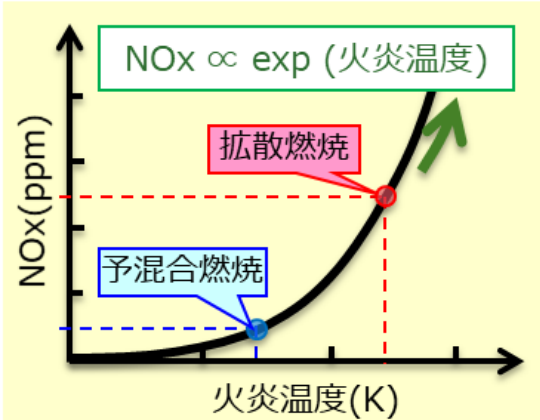
◆水素燃焼による課題

燃焼器低NOx化技術(拡散方式と予混合方式)

予混合方式とは

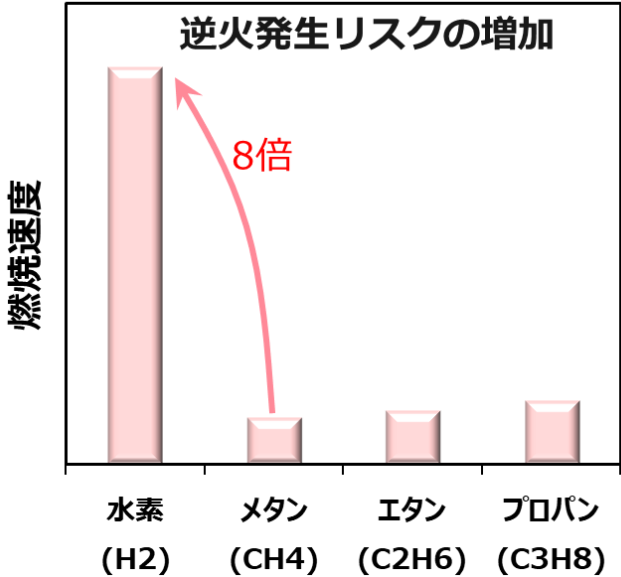
多くの大型プラントに適用、燃焼ガス温度を下げることによりNOx低減が可能
一方で、火炎の位置が不安定になる場合があり、**逆火(フラッシュバック)リスク**を伴う

形式	拡散方式	予混合方式
構造		
燃焼特性	- 燃料と燃焼用空気を別々に噴射 - 高温スポットが生じやすい (NOx高) - 火炎が安定	- 燃料は空気と混合され噴射 - 高温スポットが生じにくい (NOx低) - 火炎の位置が不安定: 逆火リスク
特徴	- 燃料性状変動への許容範囲が大きい - 燃料系統が簡素 - NOx対策(蒸気/水噴射)による性能低下	- CO2削減(高効率)と低NOx化を両立 - 燃料系統が複雑



水素燃焼による課題

水素は“燃えやすい”燃料であり、
燃焼速度が上昇 ⇒ **逆火発生リスク増加**

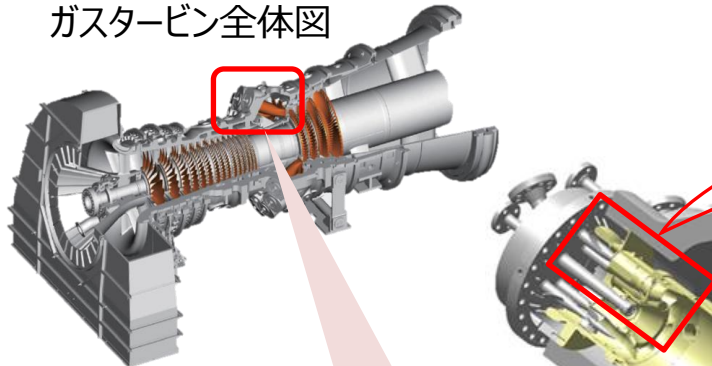


1. 事業の位置付け・必要性 ◆水素燃焼による課題

水素は“燃えやすい”燃料であり、燃焼速度の上昇による逆火*(フラッシュバック)発生リスクの増加が課題

*逆火とは、燃焼速度が燃焼器内空気流速より早い時、火炎面が上流側に移動することを指し、逆火によりノズル等が高温に晒されるため、損傷が発生する

ガスタービン全体図



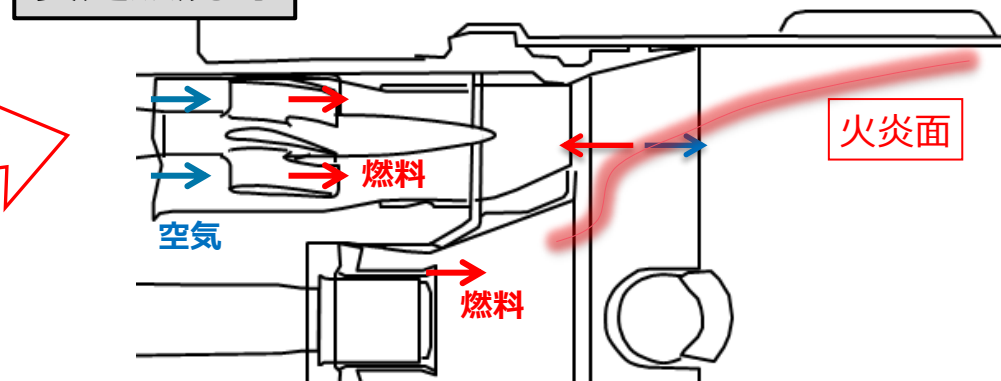
低NOx燃焼器

燃焼器

空気と燃料を混合、燃焼することで、タービンを作動する為の高温/高圧ガスを生成する

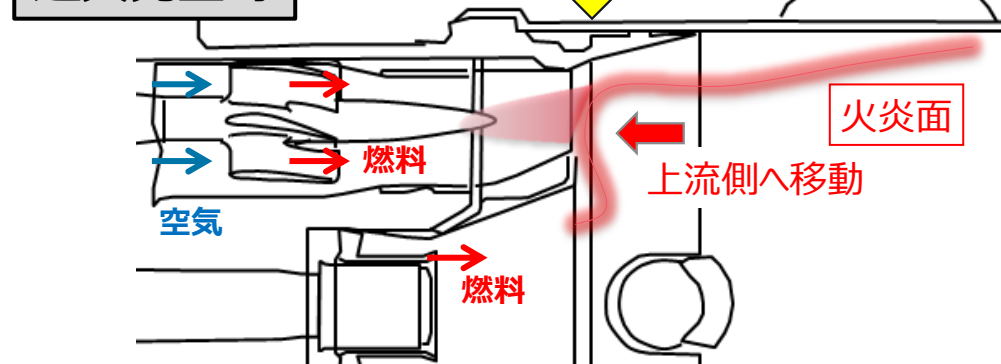


安定燃焼時

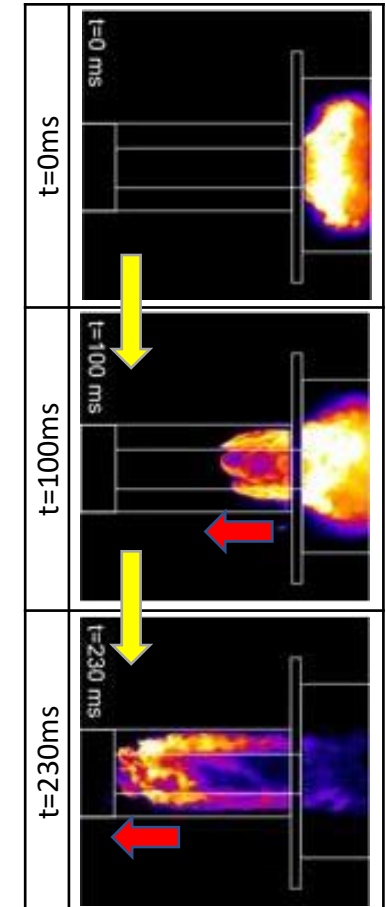


空気流速 < 燃焼速度

逆火発生時



逆火発生時の様子

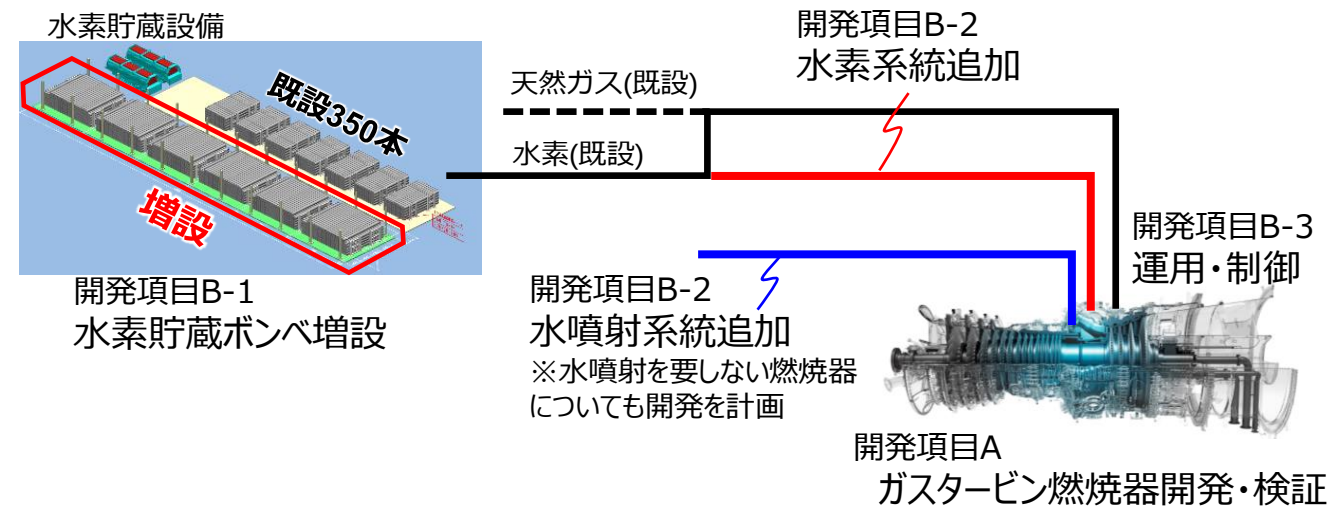


出典：University of Michigan at the 2014 University Turbine Systems Research Workshop

2 . 研究開発マネジメントについて

◆研究概要・スケジュール

- 研究開発項目A：ガスタービン燃焼器設計技術
- 水素混焼率の増加は 逆火(火炎の遡上)のリスクが高まる。既存の予混合燃焼器の改良により逆火を抑制し、水素30%超混焼における安定運転を可能とするガスタービン燃焼器の開発を行い、当社『高砂水素パーク』内の実証発電設備にて検証、安定運転を確認する。
- 研究開発項目B：プラント設計技術
- 開発した燃焼器の実機適用を迅速に行うために、既存天然ガス焚きプラントでの改造範囲をミニマムとする系統設計を行う。また、高砂水素パークにおける実機実証を実現するため、水素貯蔵設備、水素供給系統の設計・敷設および運用・制御の開発を行う。



水素30%超混焼燃焼器を
国内外の発電所へ適用
➡カーボンニュートラル社会
実現に貢献

		2023年度	2024年度	2025年度	2026年度
研究 開発項目 A	A-1:逆火耐性向上設計技術	数値解析・非燃焼試験・要素試験 単缶燃焼試験 実機検証			
	A-2:単缶燃焼器による実機圧力燃焼試験				
	A-3:当社実証発電設備での実機検証				
研究 開発項目 B	B-1:水素供給量の大容量化	設計・図面作成・据付工事・検証 設計・図面作成・改造工事・検証 運用方針策定・検証			
	B-2:天然ガス焚きからの仕様変更方針策定				
	B-3:運用・制御に関する検討				

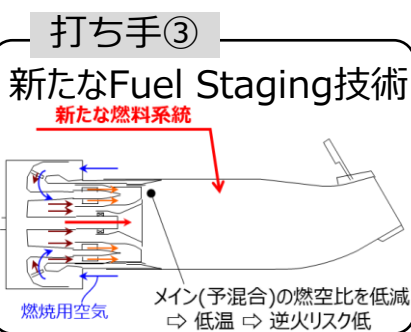
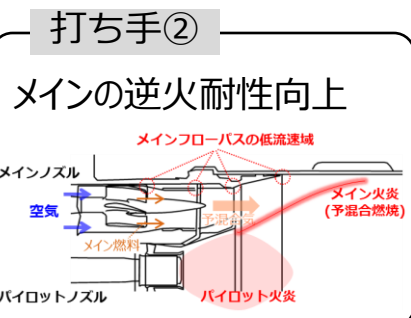
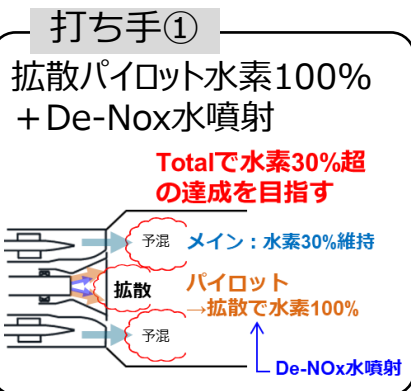
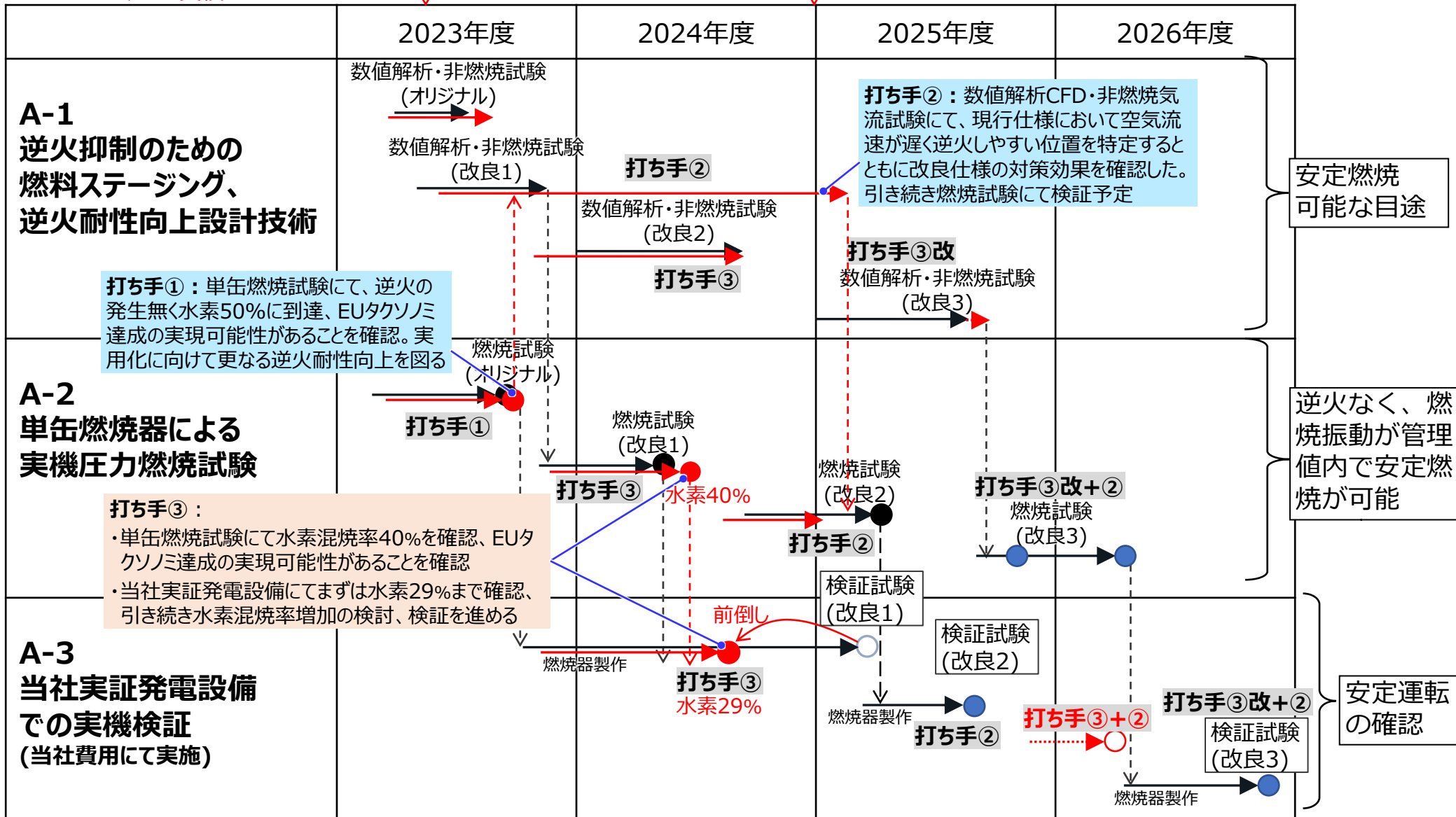


3. 研究開発成果について ◆A 燃焼器開発 開発進捗

: 計画
 : 実績

NEDO事業開始

'24年3月末

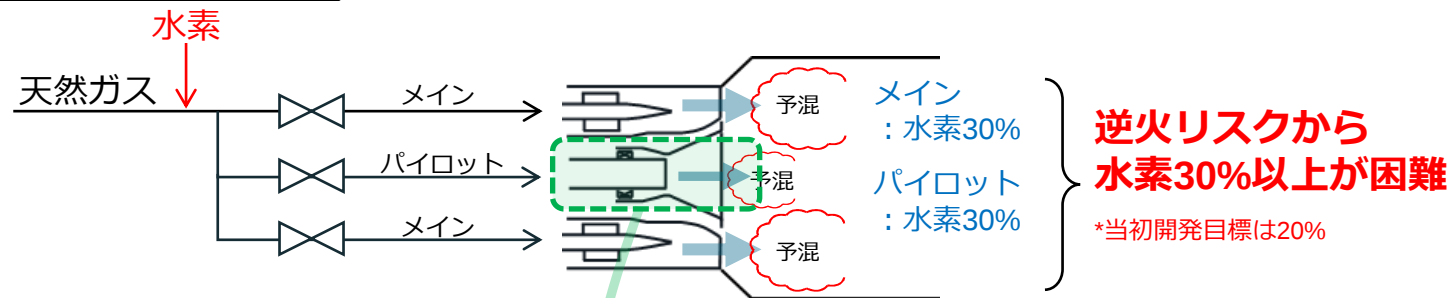


3. 研究開発成果について ◆A 燃焼器開発： 目標達成に向けた打ち手①

打ち手①： 逆火リスクを伴わない拡散燃焼方式をパイロット側に用い、水素混焼率を増加させる。
進捗： 単缶燃焼試験にて逆火の発生なく水素混焼率50vol%に到達、EUタクソニ達成の実現可能性があることを確認

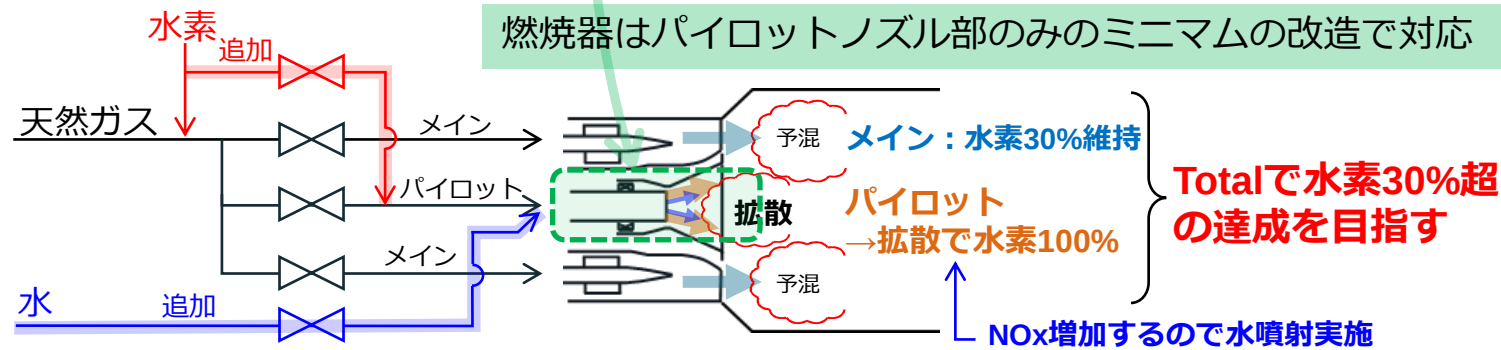
水素混焼30vol%

(過去のNEDO事業にて燃焼器開発)

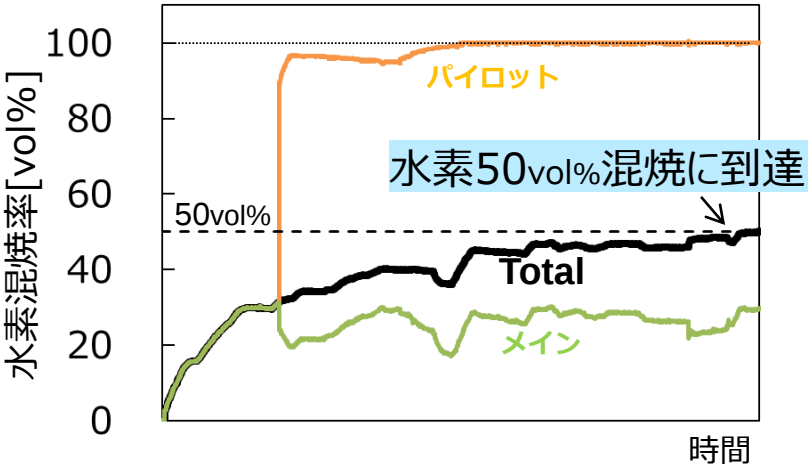


水素混焼30vol%～

打ち手① パイロットを逆火リスクを伴わない拡散燃焼方式(*)にしてパイロット側で多くの水素を消費し、Total水素混焼率を増加させる。なお窒素酸化物(NOx)は増加するのでDe-NOx水噴射(拡散燃焼器と比較すると少量)が必要となる。
(*拡散パイロット系統も標準的に搭載済み)



実圧燃焼試験設備



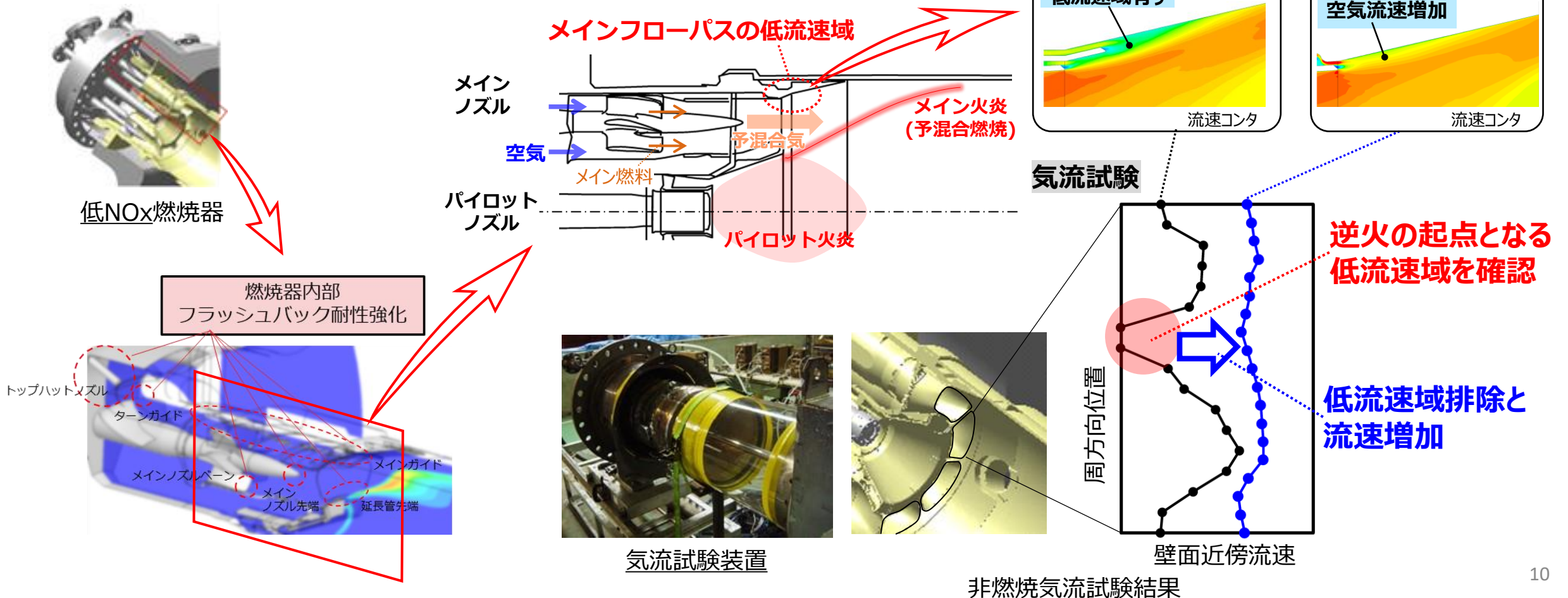
実圧燃焼試験結果

3. 研究開発成果について ◆A 燃焼器開発： 目標達成に向けた打ち手②

- 目標：数値解析・非燃焼試験にて逆火が生じやすい領域の特定と逆火耐性の向上を図る
- 成果：数値解析・非燃焼試験にて逆火が生じる可能性がある低流速域を確認、低流速域を排除する構造の検討完了
- 成果の意義：逆火耐性の向上を可能とする構造検討完了、引き続き燃焼試験にて改良効果の検証を行う

打ち手② メインの逆火耐性向上

メインフローパスの低速域を排除して逆火耐性を向上する

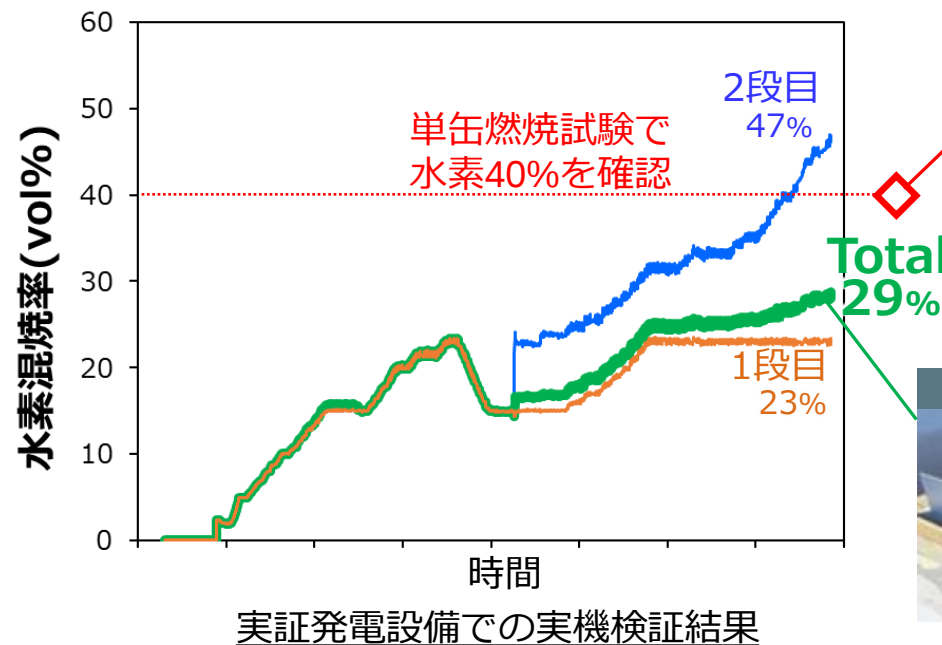
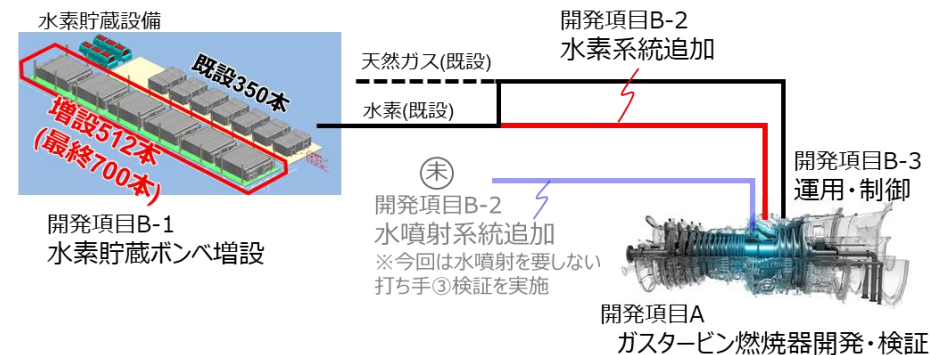
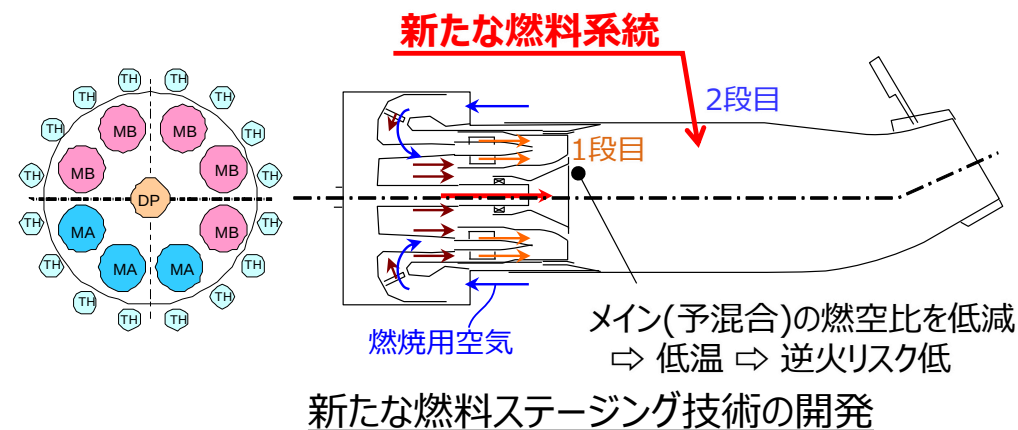
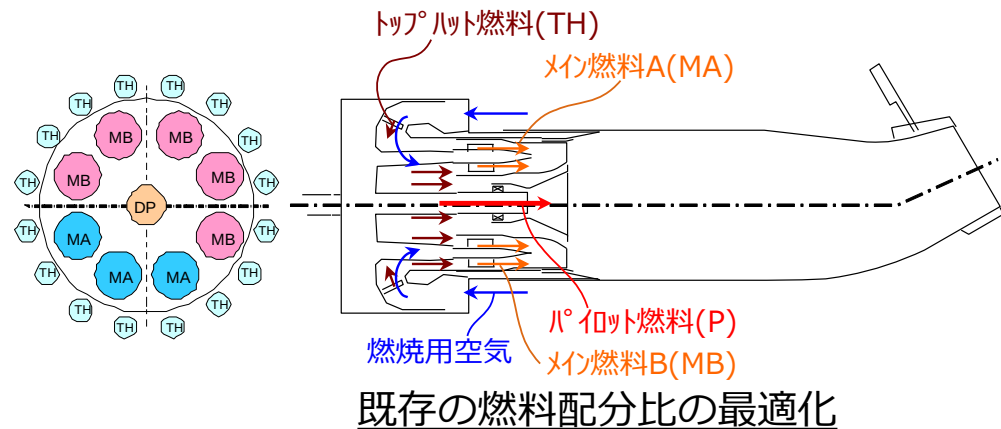


3. 研究開発成果について ◆A 燃焼器開発： 目標達成に向けた打ち手③

打ち手③： 燃料配分比の最適化 および 新たな燃料系統追加によりメイン(予混合)の燃空比を下げ逆火耐性を向上

進捗： ・ 単缶燃焼試験にて水素混焼率40%を確認、EUタクソノミ達成の実現可能性があることを確認した
・ 当社実証発電設備にてまずは水素29%まで確認、引き続き水素混焼率増加の検討・検証を進める

打ち手③ 燃料ステージングによる逆火耐性向上



3. 研究開発成果について ◆B プラント設計技術

- ・ 開発した燃焼器の実機適用を迅速に行うために、既存天然ガス焚きプラントでの改造範囲をミニマムとする系統設計を行う
- ・ 高砂水素パークにおける実機実証を実現するため、水素貯蔵設備、水素供給系統の設計・敷設および運用・制御の開発を行う



HYDROGEN PARK
TAKASAGO

水素貯蔵設備



水素貯蔵ポンプ増設

現状設備



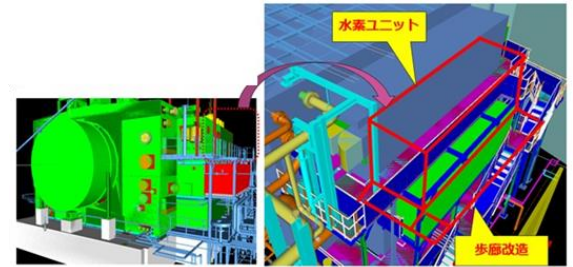
設備増強後

水素ポンプ	: 350本	1050本
水素貯蔵量	: 39,000Nm3	120,000Nm3
水素充填圧力	: 19.6MPag	19.6MPag
試験可能時間	: 約15分	約1時間

開発項目B-2

課題：天然ガス焚きからの仕様変更方針確定

検討事項：水素パーク内の実証発電設備における水素混焼化工事を通して天然ガス焚きからの仕様変更項目を洗い出し最低限の改造内容を決める



GTパッケージ 水素ユニット

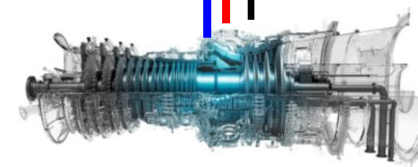
水素系統増設

水噴射系統増設

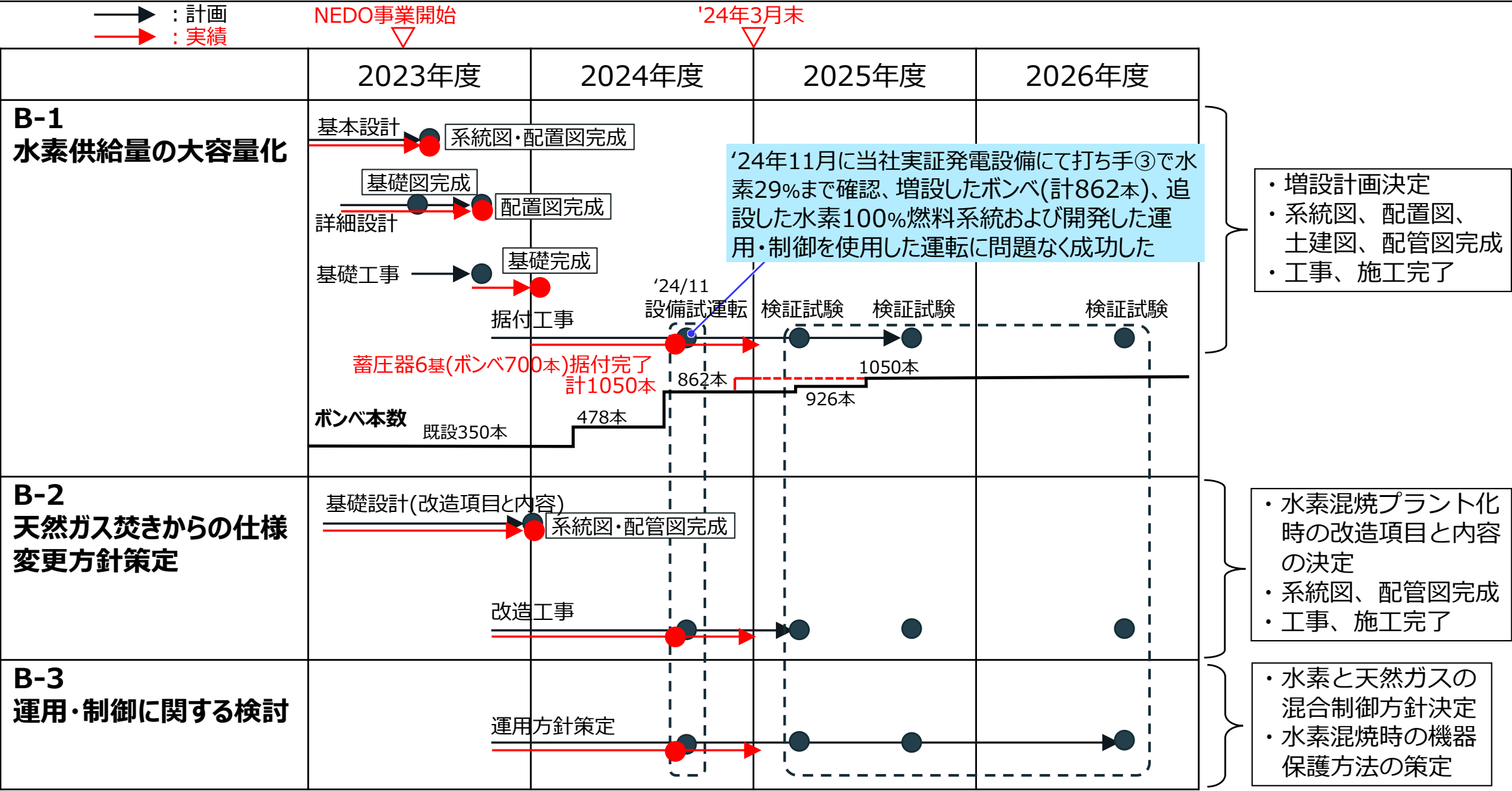
開発項目B-3

課題：運用・制御

検討事項：当社実証発電設備へ適用、運転検証を実施し、改善点をフィードバックすることで水素混合設備の運用・制御を確立する



3. 研究開発成果について ◆B プラント設計技術 開発進捗



3. 研究開発成果について ◆B-1 水素供給量の更なる大容量化

- 目標：水素蓄圧器1基当たりのポンペ本数を増やすことで配置を効率化し、時間当たりの供給量を増加する
- 成果：ポンペ本数を増やした水素貯蔵設備 6基、計700本の据付完了
- 成果の意義：2基の蓄圧器を設置出来た事で既設と同等のエリアに既設の2倍の水素ポンペを配置する目途を得た

<水素貯蔵設備の増強>

現状設備 → 設備増強後

水素ポンペ : 350本 → 1050本
水素貯蔵量 : 約39 kNm³ → 約120 kNm³
5基×128本+1基(60本)
=計700本増設

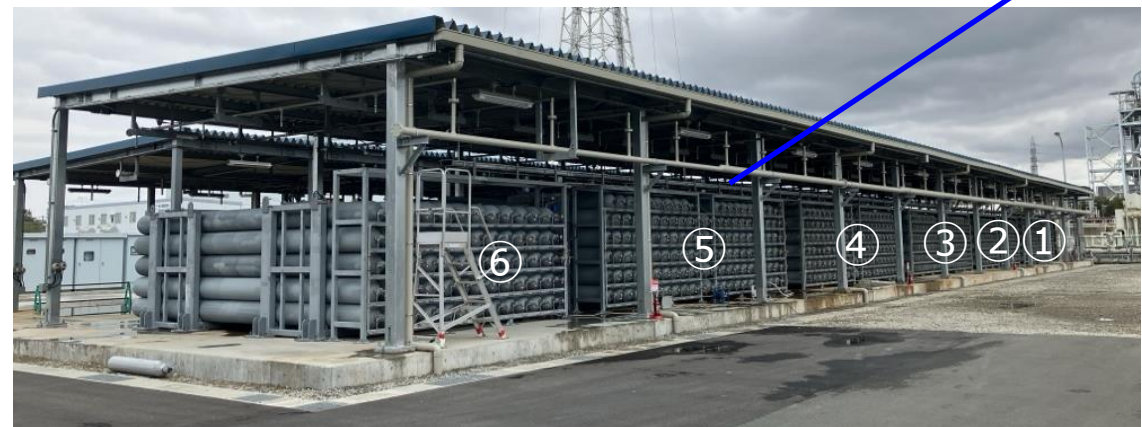
既設 : 50本/基
横10本×5段積み



増設 : 128本/基
横22本×5段積み
+18本



(参考)既設350本 : 全7基中、4基を据付時点



全6基の蓄圧器据付完了

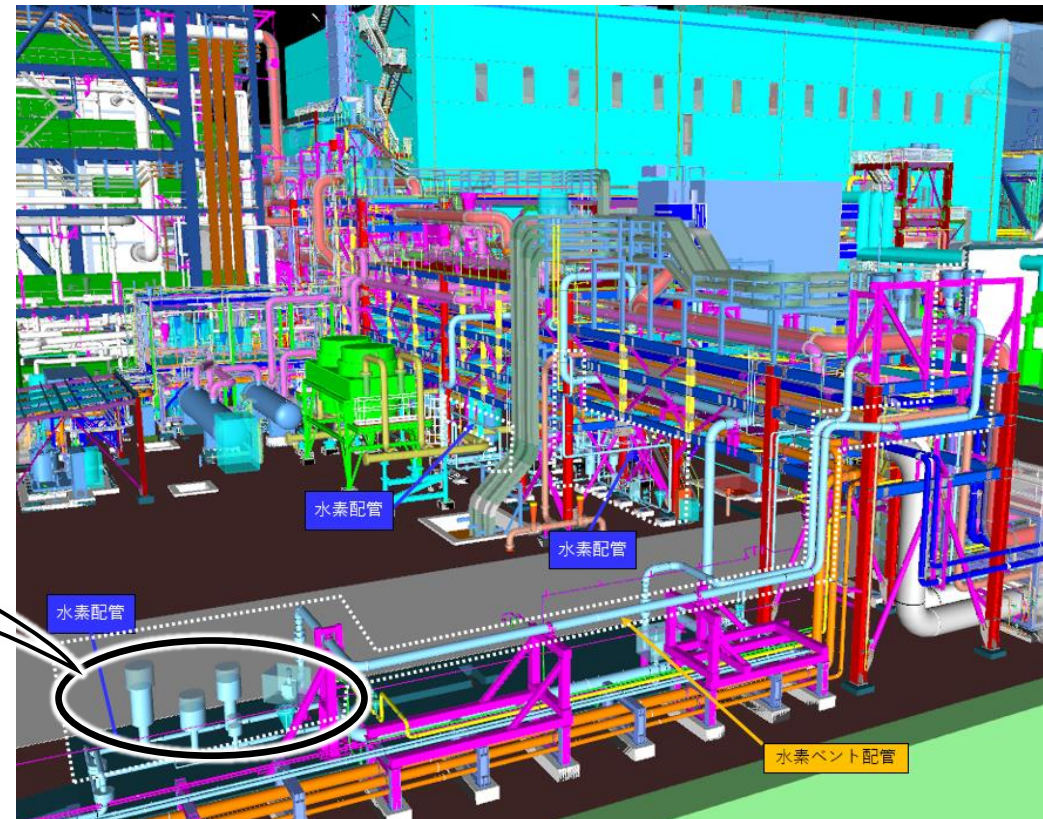
3. 研究開発成果について ◆B-2 天然ガス焚きからの仕様変更方針策定

- 目標：天然ガス焚き設備の水素30%超混焼化する際の改造項目と内容の決定
- 成果：天然ガス焚き設備を水素混焼化する際の改造項目洗出し、改造計画、水素系統については改造工事を完了した
- 成果の意義：商用機を水素混焼機へ改造する際の計画期間短縮、及び、信頼性の向上

< 改造項目 >

水素系統追加、水噴射系統追加、窒素系統追加、防爆仕様変更

水素系統追加（屋外）

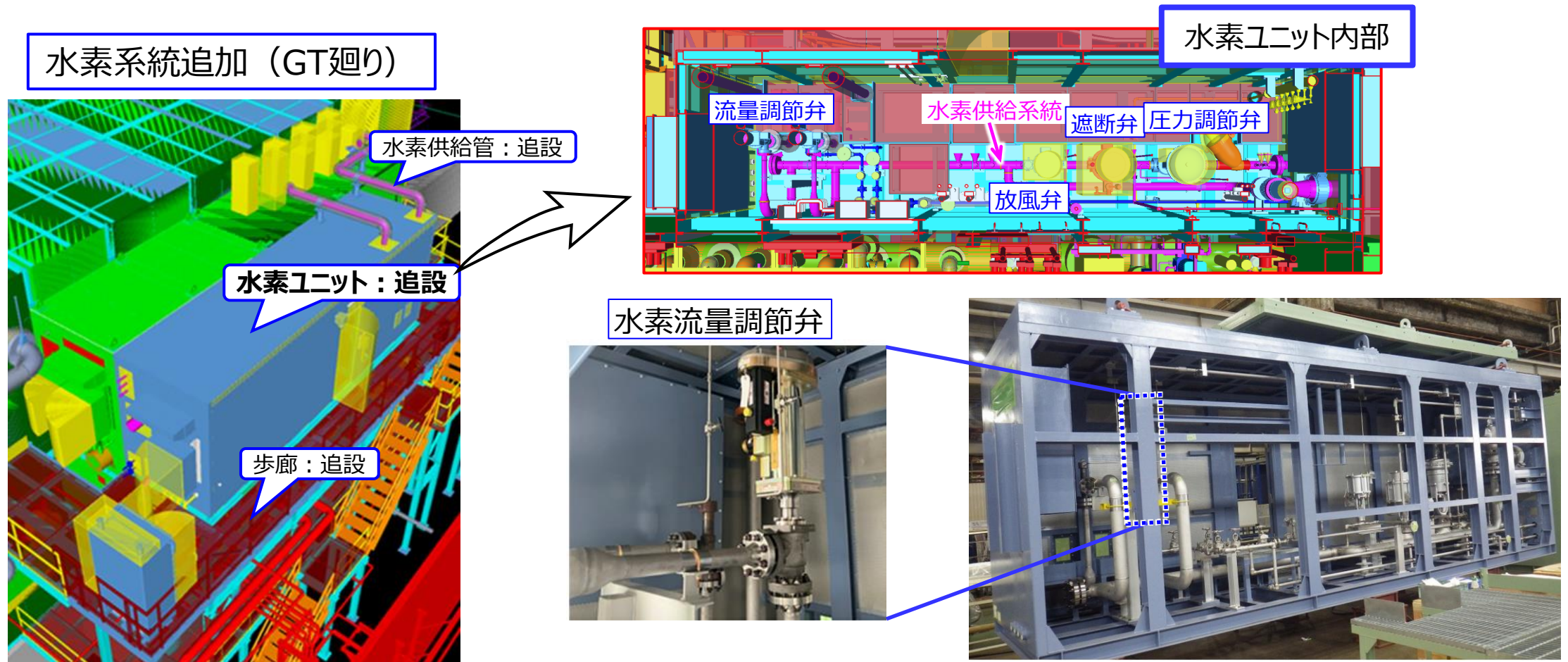


3. 研究開発成果について ◆B-2 天然ガス焚きからの仕様変更方針策定

- 目標：天然ガス焚き設備の水素30%超混焼化する際の改造項目と内容の決定
- 成果：天然ガス焚き設備を水素混焼化する際の改造項目洗い出し、改造計画、水素系統については改造工事を完了した
- 成果の意義：商用機を水素混焼機へ改造する際の計画期間短縮、及び、信頼性の向上

< 改造項目 >

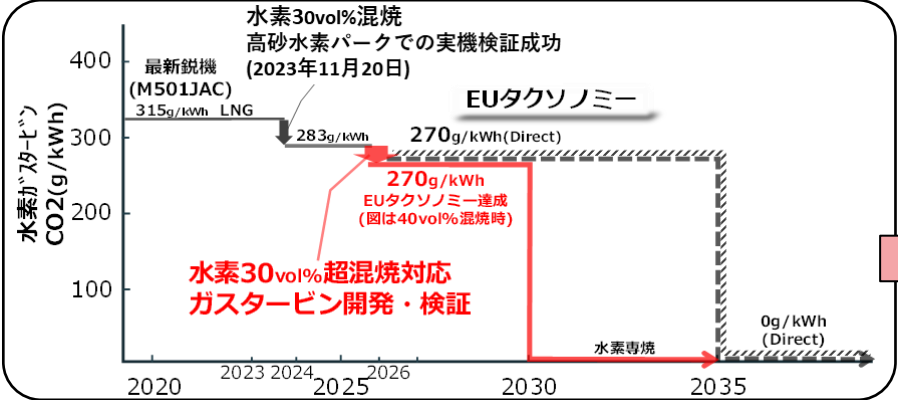
水素系統追加、水噴射系統追加、窒素系統追加、防爆仕様変更



4. 今後の見通しについて ◆成果の実用化・事業化の見通し

高効率ガスタービン発電設備における水素の利用は、大きなCO2排出量削減に加えて、大規模水素需要の発生による水素インフラ拡充やコスト低減を促し、重要な役割を担います。

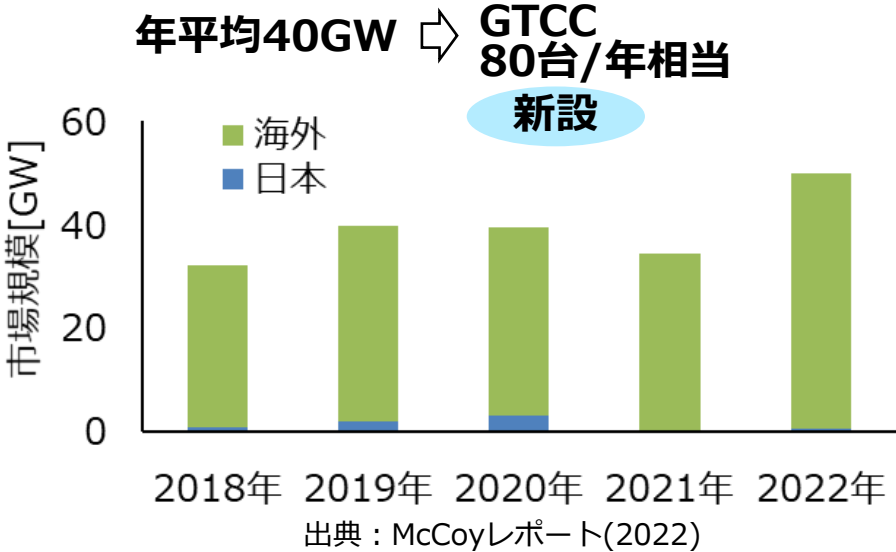
➡ 水素インフラ導入期での実用化を目指して、水素30vol%超混焼を可能とするガスタービン燃焼器の開発を行い、海外他社に先駆けてEUタクソミーのCO2排出基準270g/kWhの達成し、国内外の火力発電所へ適用、カーボンニュートラル社会実現に貢献します



年度	2020	2025	2030	2035
水素供給	インフラ導入期	インフラ成熟期 (水素30%超)		インフラ成熟期 (水素100%)
開発フェイズ	設計・試験・実機実証		本格的な実機展開	

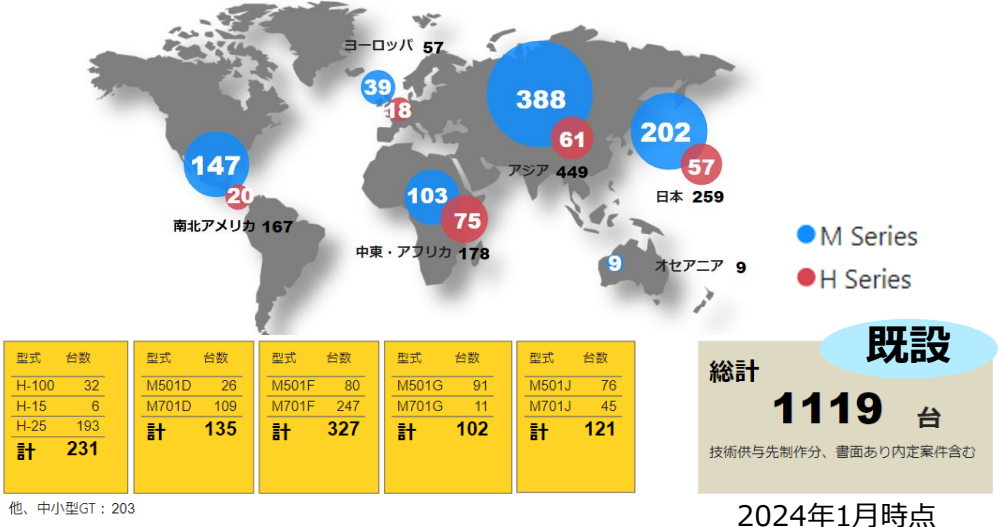
海外他社に先駆けてEUタクソミーを達成し、世界各国の新設・既設GT市場でのプロジェクト開拓

【新設ガスタービン市場規模】



【既設ガスタービン改造市場】

三菱ガスタービン納入・受注実績





三菱重工