評価ウィーク
II-3

①「水素社会構築技術開発事業
大規模水素エネルギー利用技術開発
水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」

②「水素利用等先導研究開発事業
大規模水素利用技術の研究開発
水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」

川崎重工業株式会社
株式会社大林組

2019年6月18日

1. 期間

① 開始 ：２０１５年１１月
終了 ：２０１９年　２月
② 開始 ：２０１６年　６月
終了 ：２０１９年　３月

●実施体制および分担等

①
NEDO
- **大林組**（(統合型EMSの開発、双方向蒸気融通技術の開発）
- **川崎重工業**（(水素CGSの開発）

②
NEDO
- **川崎重工業**（(水素GT燃焼技術の開発）

2. 最終目標

実施項目	最終目標
①（大林組） 統合型EMSの開発	電気・熱・水素を総合管理し、事業性と環境性を確保する統合型EMSの構築、双方向蒸気融通システムの構築
①（川崎重工） 水素CGSの開発	水素ガスタービンでの実負荷運転時の水素混焼割合の切替え時の燃焼安定性の検証
②（川崎重工） 水素GT燃焼技術開発	燃焼器単体でのNOx排出値35ppm以下（16%O_2換算）

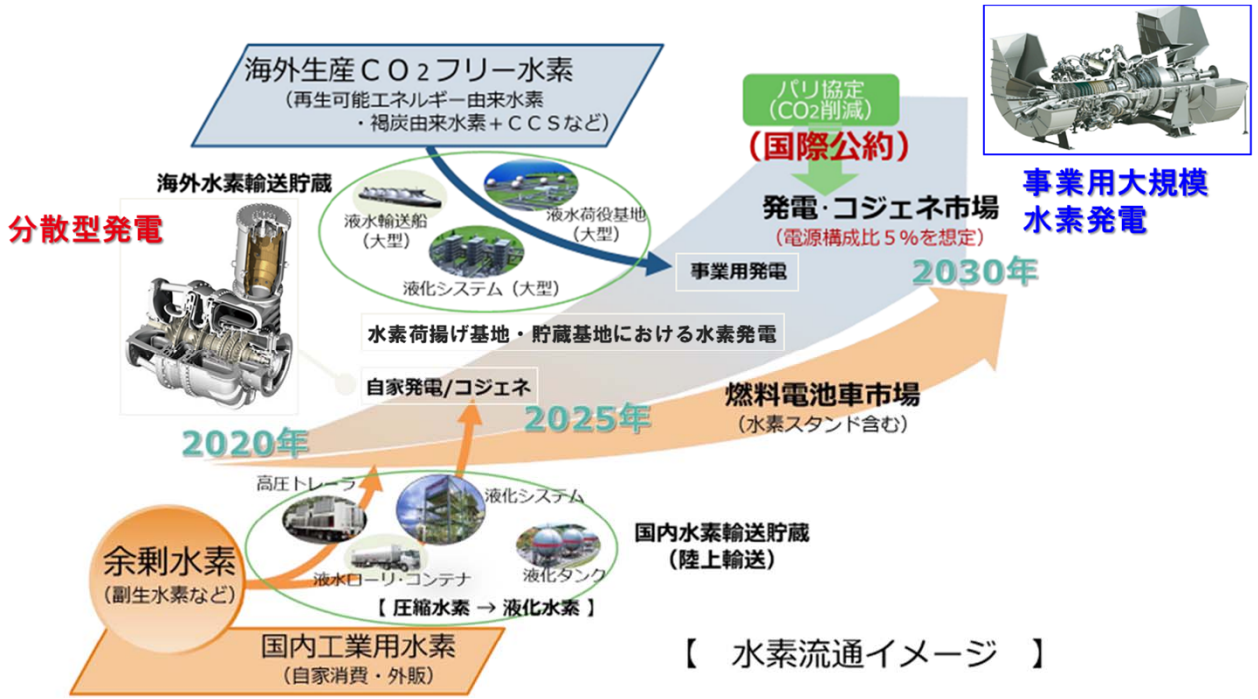
3.成果概要

実施項目	成果内容	自己評価 （事業終了時点）
①（大林組） 統合型EMSの開発	1MW級水素CGS実証試験設備を用い、電気・熱・水素を総合管理する統合型EMSの構築、および双方向蒸気融通システムの構築を完了。	◎
①（川崎重工） 水素CGSの開発	水素ガスタービンを用いた水素CGS実証試験設備を建設し、実負荷運転での水素専焼/混焼運転、および混焼割合の切替え時の燃焼安定性の確認を完了。	◎
②（川崎重工） 水素GT燃焼技術開発	ドライ低NOx水素燃焼器を試作し、燃焼器単体で燃焼試験を実施することで、NOx排出値35ppm以下(16%O_2換算）と安定燃焼を達成。	◎

第5次エネルギー基本計画、水素基本戦略、水素・燃料電池戦略ロードマップ

- 将来の二次エネルギーでは水素が中心的役割を担うことを期待
- 水素はエネルギー安全保障と温暖化対策の切り札
- 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のアプリケーション

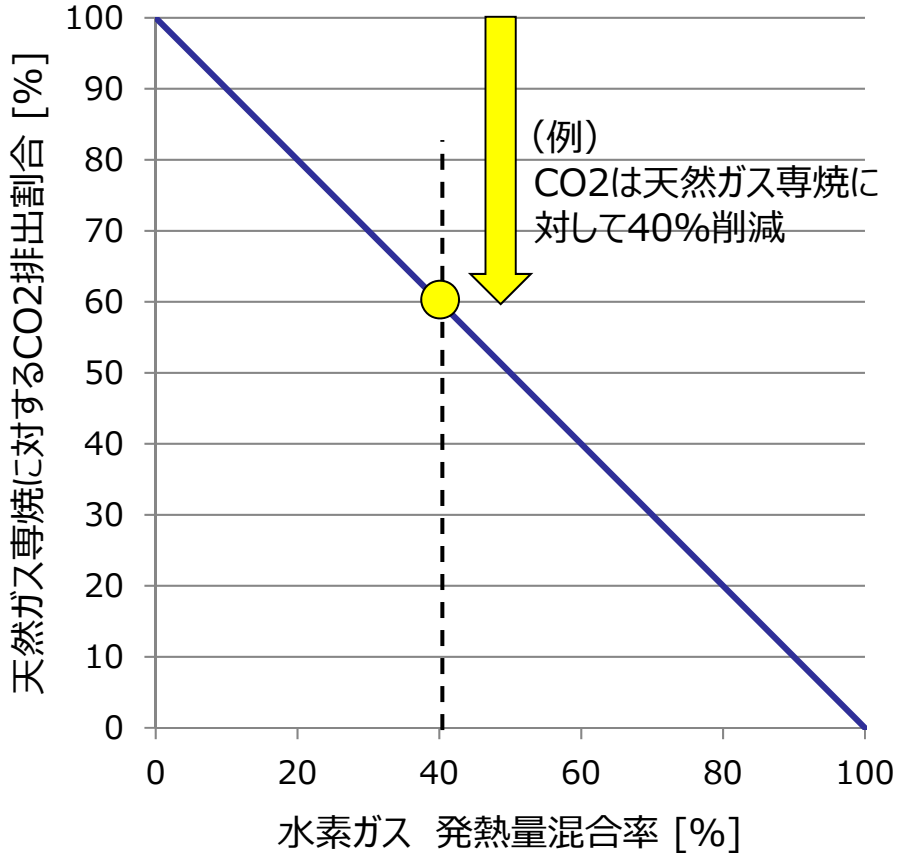
【研究目的】「水素発電」の実現に向けた水素ガスタービンの技術開発・実証と社会受容性の醸成

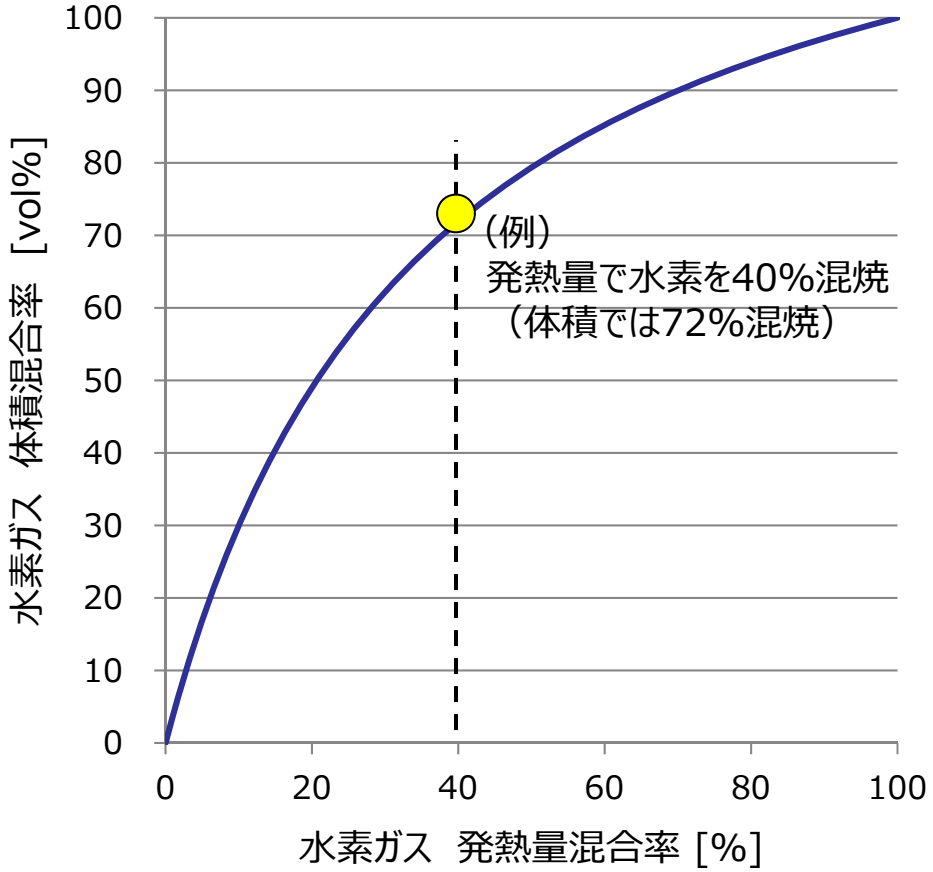


【　水素流通イメージ　】

水素ガスタービンのCO_2削減効果と水素消費量

燃料ガス中の天然ガスを水素に置き換えた分だけ、CO_2はダイレクトに削減する





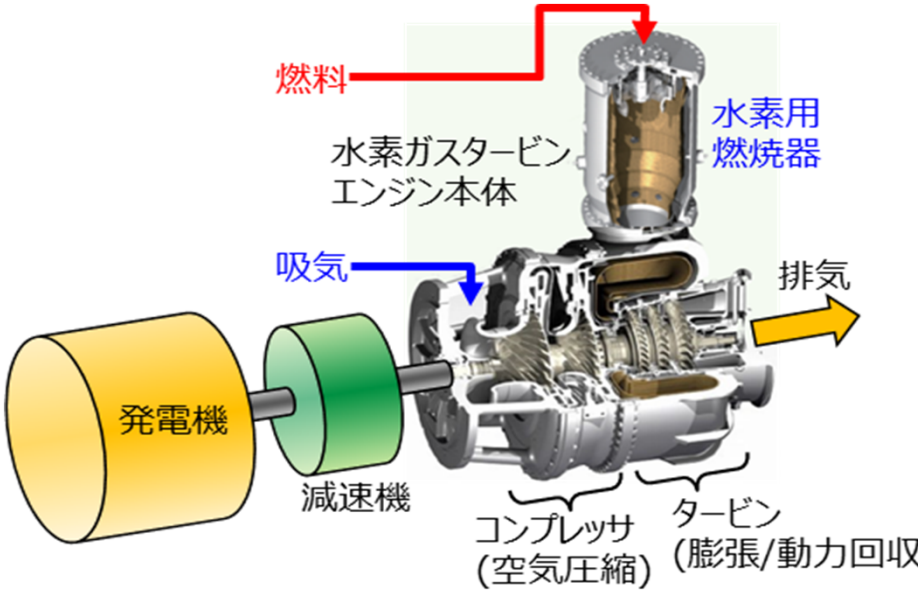
【1MWクラスの水素ガスタービン発電で年間8,000時間/
100%負荷/100%水素で発電運転した場合】

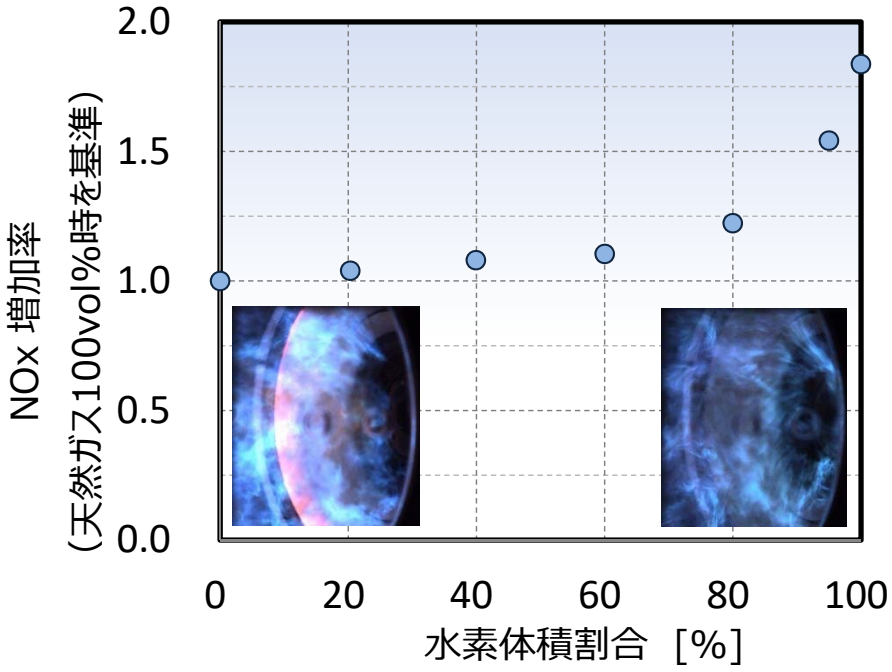
年間のCO_2削減量(対天然ガス発電)：約10,000ton
年間の水素消費量：約1,600ton(1,800万Nm^3)

水素ガスタービン開発における技術課題

【“キー技術は水素燃焼，キーハードは燃焼器”】

- 燃焼速度が速い→逆火などの燃焼不安定が発生
- 燃焼中に局所的に高温化→ NOx：窒素酸化物が多量に発生





天然ガス焚きガスタービンの燃焼器を水素用に改良し水素燃焼へ対応（エンジン本体は変更無し）

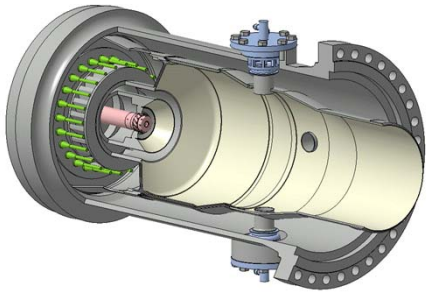
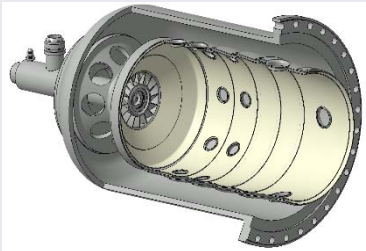
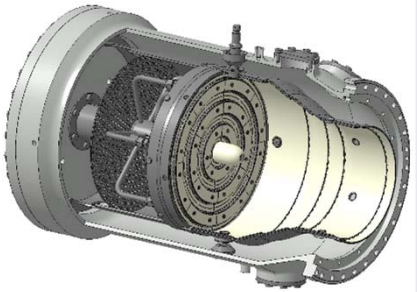
NOxが数百ppmオーダー
水素割合の増加と共にNOxも増加

川崎重工における水素ガスタービン燃焼器の開発状況

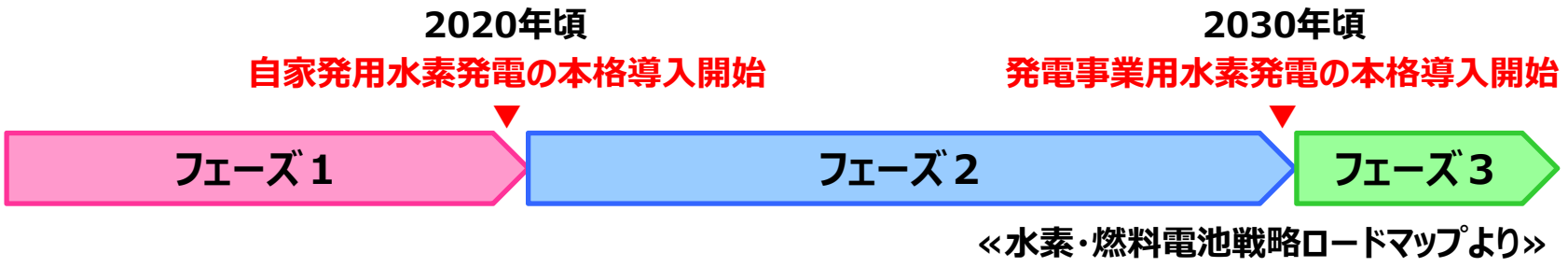
燃焼器を自社開発し、①「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」でガスタービンに搭載して実証運転を完了

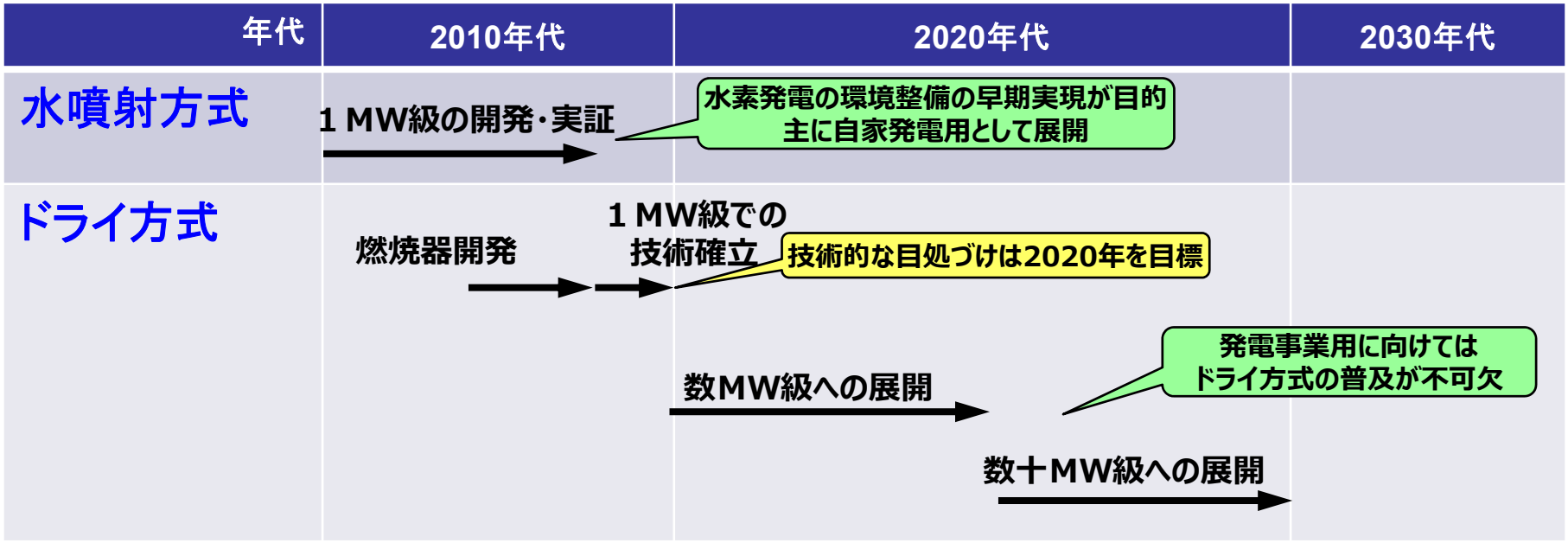
自社/SIP※/②「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」で燃焼器単体の開発を完了

※内閣府SIP（Strategic Innovation Promotion Program）におけるエネルギーキャリア「水素燃焼技術の開発」

水素燃焼方式	追焚き水素混焼	① 拡散燃焼	② 微小水素火炎（新方式）
NO x 低減方法	ドライ	水噴射	ドライ
燃焼器形状			
最大水素量	50vol%	100vol%	100vol%
開発状況	自社開発し実用化済み	神戸実証プラントで運転完了	燃焼器単体の開発完了

水素ガスタービンの将来の展開イメージ





- 水噴射方式水素ガスタービンは、早期に分散型コジェネ需要に対応し、水素発電の初期の普及に資する
- ドライ方式水素ガスタービンは、分散型コジェネの対応以降、数MW～数十MW級の水素発電へ実現に資する
- 統合型EMSは、普及過渡期の燃料を使う水素発電の普及に資する

①「水素社会構築技術開発事業
大規模水素エネルギー利用技術開発
水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」

株式会社大林組
川崎重工業株式会社

研究内容・目標

テーマ	目標	NEDO「水素社会構築技術開発事業」基本計画 最終目標	意義
A. 統合型EMSの開発	● 電気・熱・水素を総合管理し、事業性と環境性を確保する統合型EMSの構築 ● 双方向蒸気融通システムの構築	水素発電等を組み込んだエネルギーシステムについて、市場化に必要な技術を確立する	水素需要の創出・利用拡大 水素社会の実現
B. 水素CGSの開発	● 実負荷運転における水素混焼割合切替え時の燃焼安定性の検証	水素を混焼あるいは専焼で発電する技術に関して既存の燃料と同等の発電効率、環境性を満たす技術を確立する	

本事業では、国内に点在する様々な水素源の有効活用、更に将来の水素サプライチェーンの実現も見据え、自家発電やコミュニティレベルでの水素活用ニーズに向けて

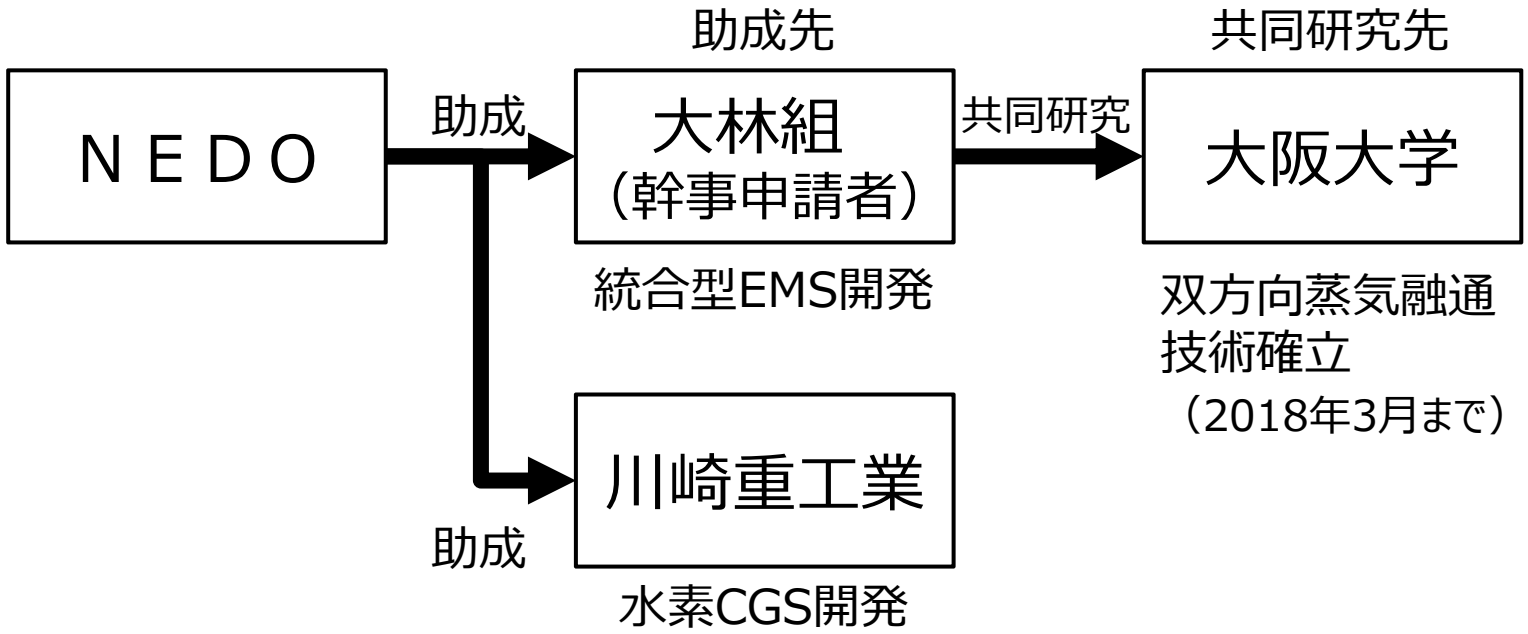
・1 MW級の水素ガスタービンを用いた水素CGS

・電気／熱／水素の最適マネジメントを目指す統合型EMS

の技術開発・実証を行う。

ガスタービンによる純水素の大量利用を市街地で実施する点、近隣の複数の公共施設へCO_2ゼロエミッションの熱電供給を行う点で、 世界初の取り組みとなり、技術および社会実証の両面で大きな意義を持つ。

事業実施体制



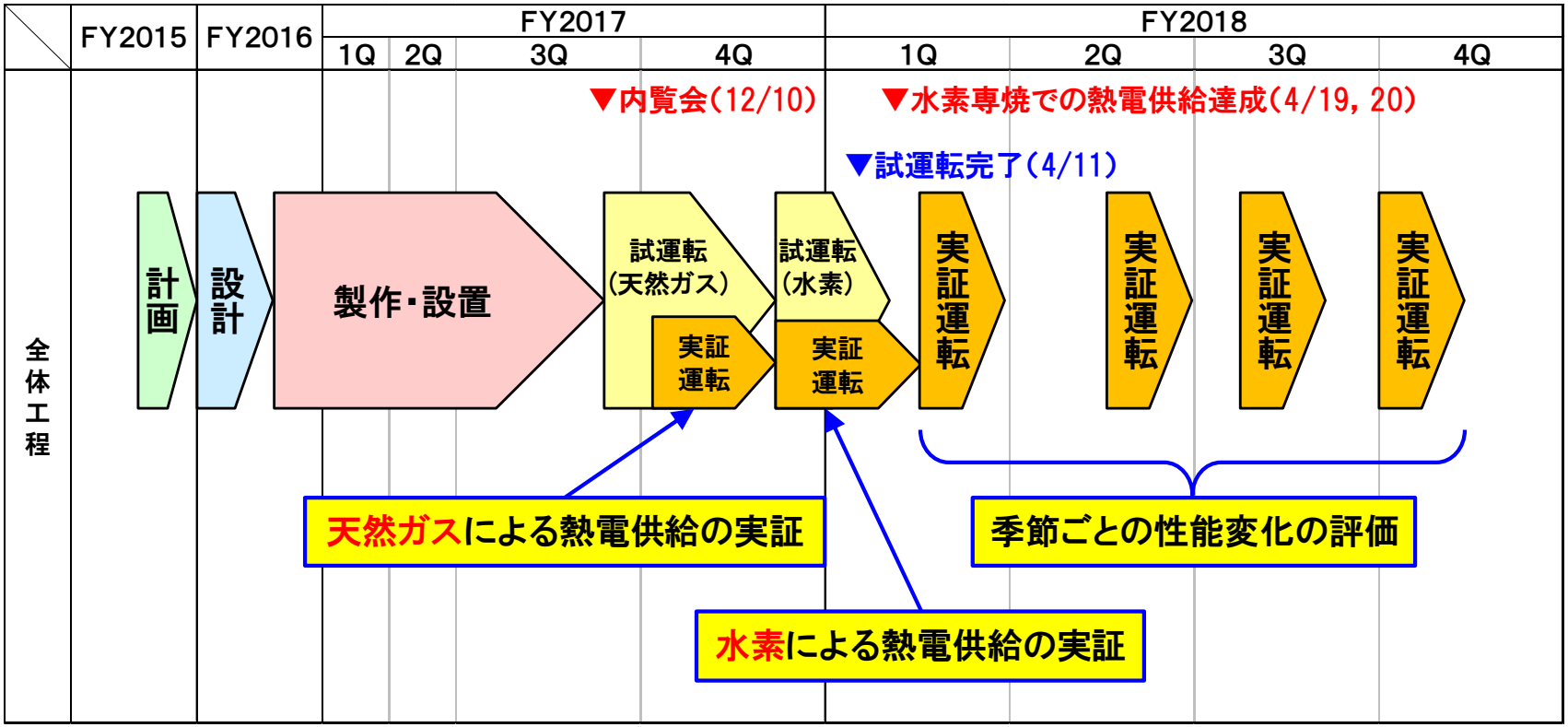
【協力団体・企業など】

神戸市	関西電力	岩谷産業	関電エネルギーソリューション
・実証場所提供 ・社会的受容性の普及活動	・統合型EMS／水素CGSの運用評価 ・電力供給に係る支援	・水素関連設備 ・液化水素供給	・運転、点検業務

実証事業の全体スケジュール

期間

① 開始 ：２０１５年１１月
終了 ：２０１９年　２月

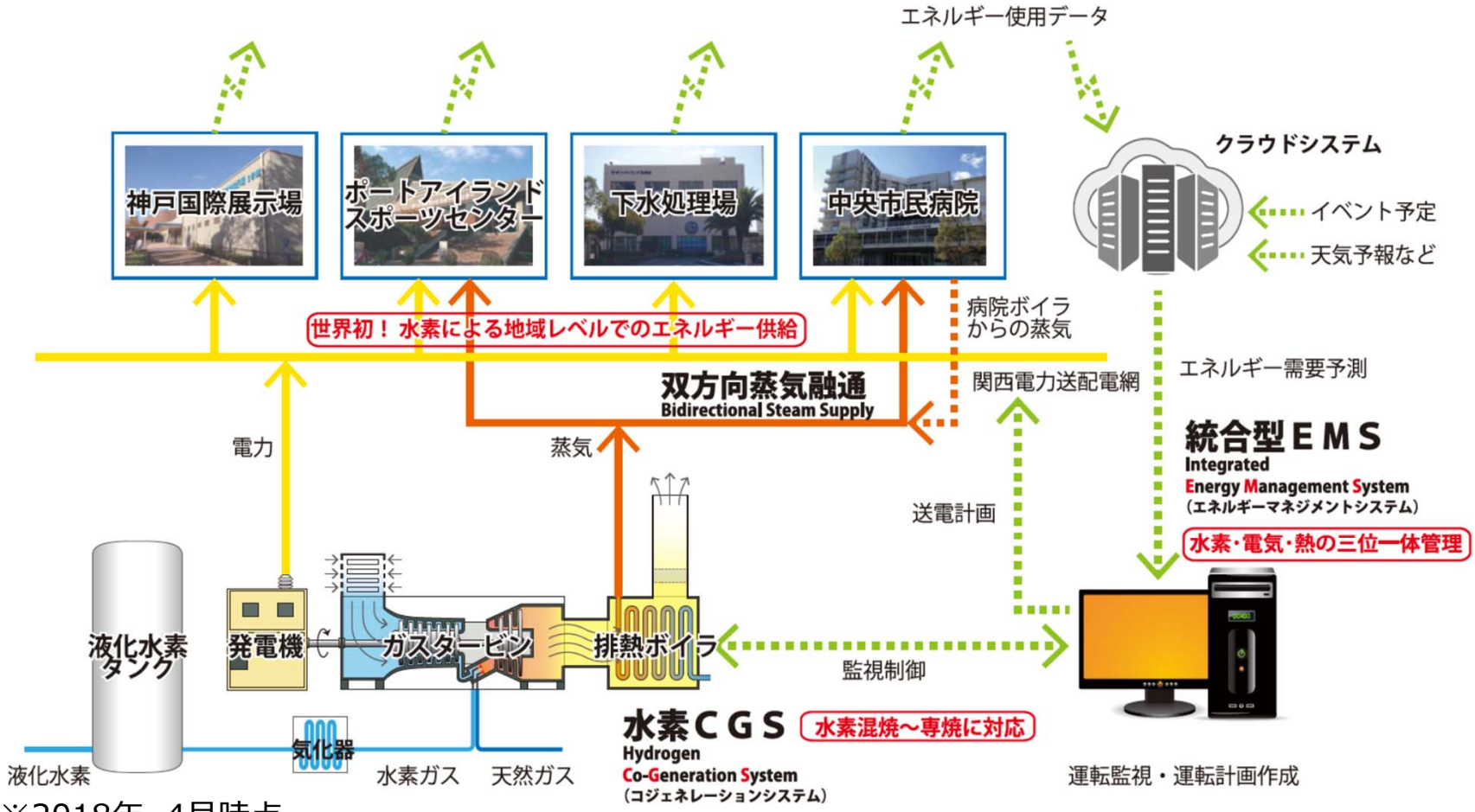


※2014年度にＦＳ調査を実施

実証事業の全体イメージ

- 市街地で純水素をガスタービンにより大量利用
- 複数の近隣公共施設へCO_2ゼロの熱電供給

世界初



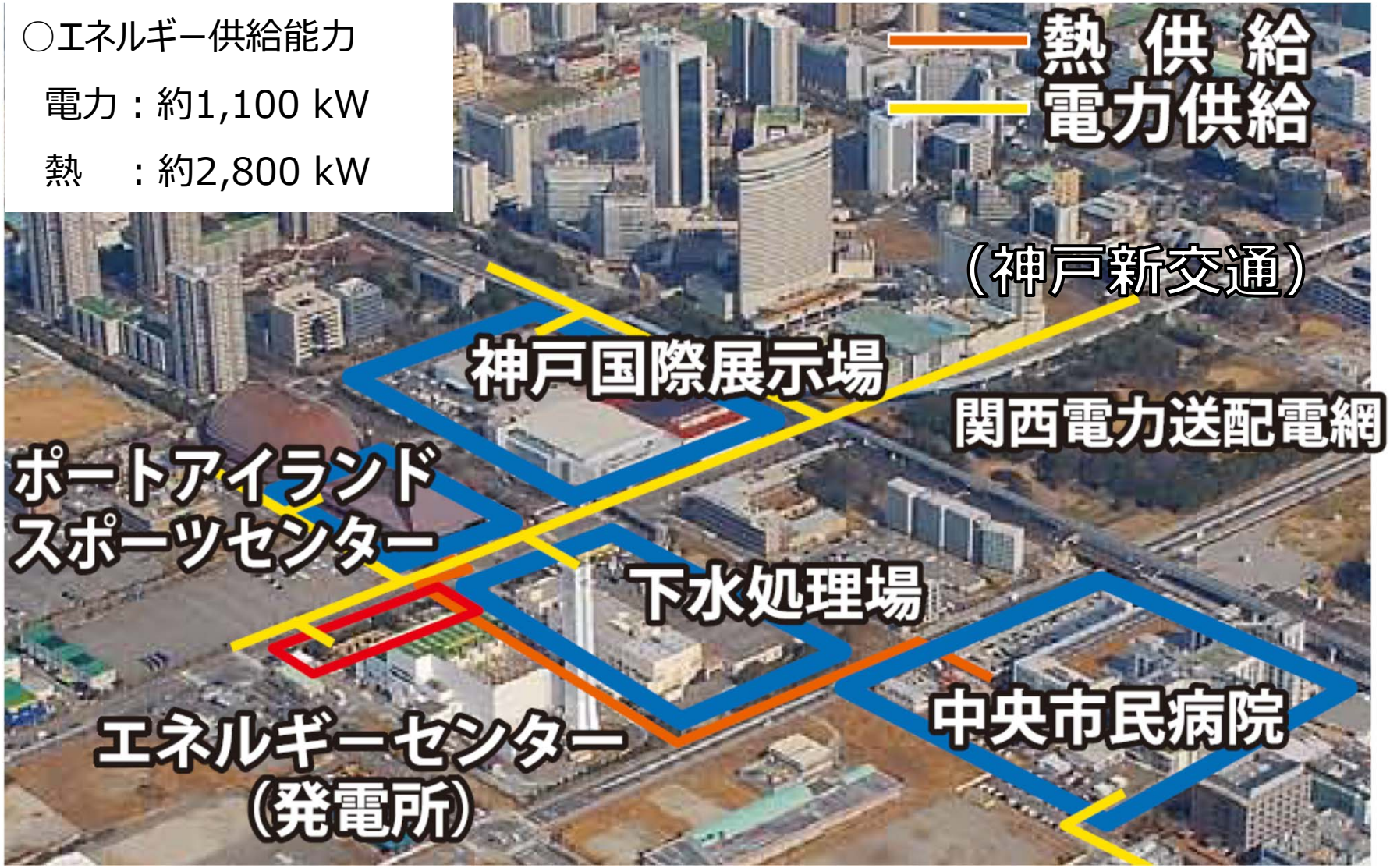
※2018年　4月時点
　電力は、2019年5月まで「中央市民病院」へ供給、11月から「神戸新交通」へ供給

エネルギー供給先

○エネルギー供給能力

電力：約1,100 kW

熱　：約2,800 kW



※2018年　4月時点

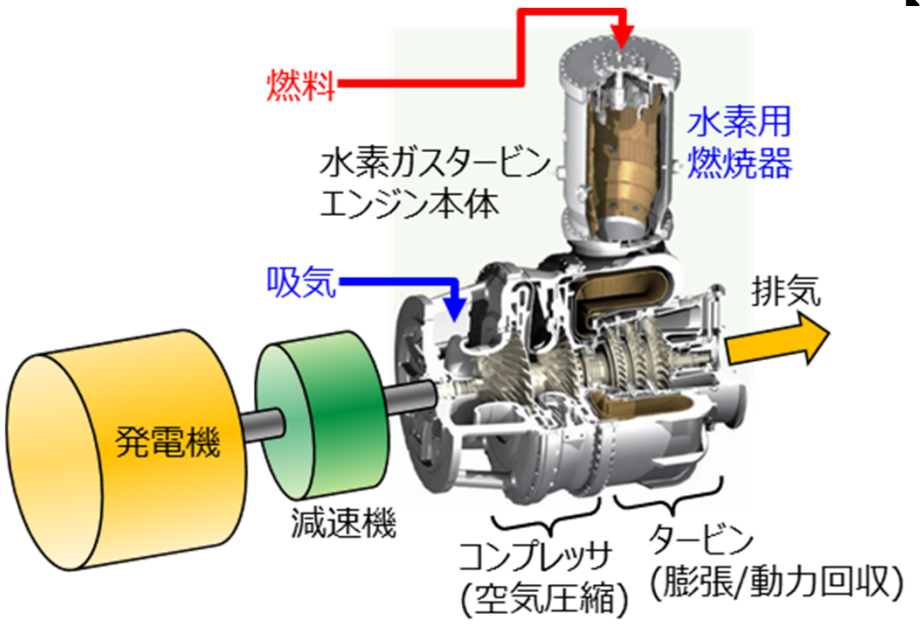
電力は、2019年5月まで「中央市民病院」へ供給、11月から「神戸新交通」へ供給

写真提供：神戸市

水素CGSの開発

川崎重工

天然ガス焚きガスタービンの燃焼器を改良し水素燃焼へ対応させたガスタービンを
本実証設備へ実装



**水素ガスタービンの
キー技術は燃焼器**

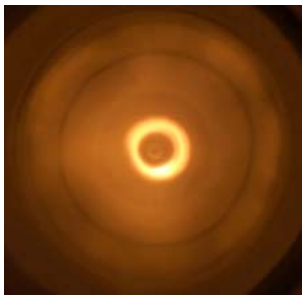
【改良した水素燃焼器の特徴】

- 水素燃焼の特性に適合(逆火の抑制)させるため燃料ノズルを改良
- NOx低減と安定燃焼を同時に成立させるための低NOx燃焼技術
- 水素と天然ガスを任意の割合で混合した燃料(任意混焼率)への対応

改良した燃料ノズル（逆火の抑制）

＜改良前＞

燃焼速度が速い ➡ 逆火・焼損



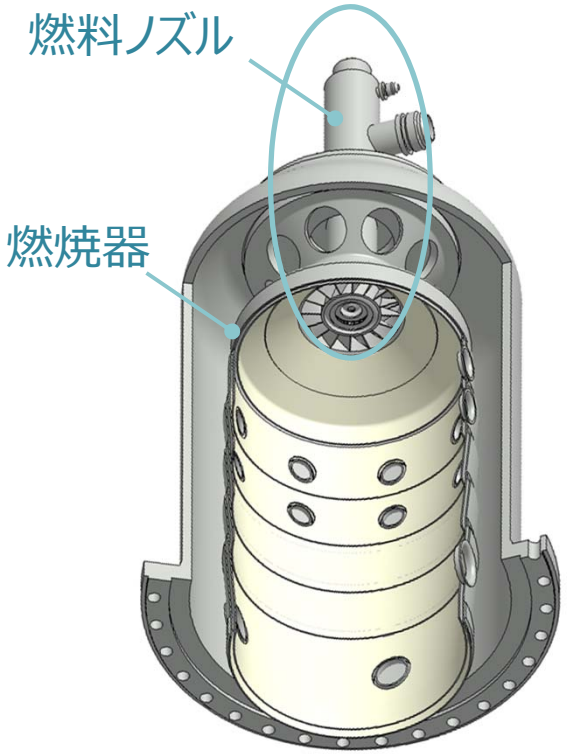
燃焼時の赤熱

既存燃料ノズルの焼損

＜改良後＞

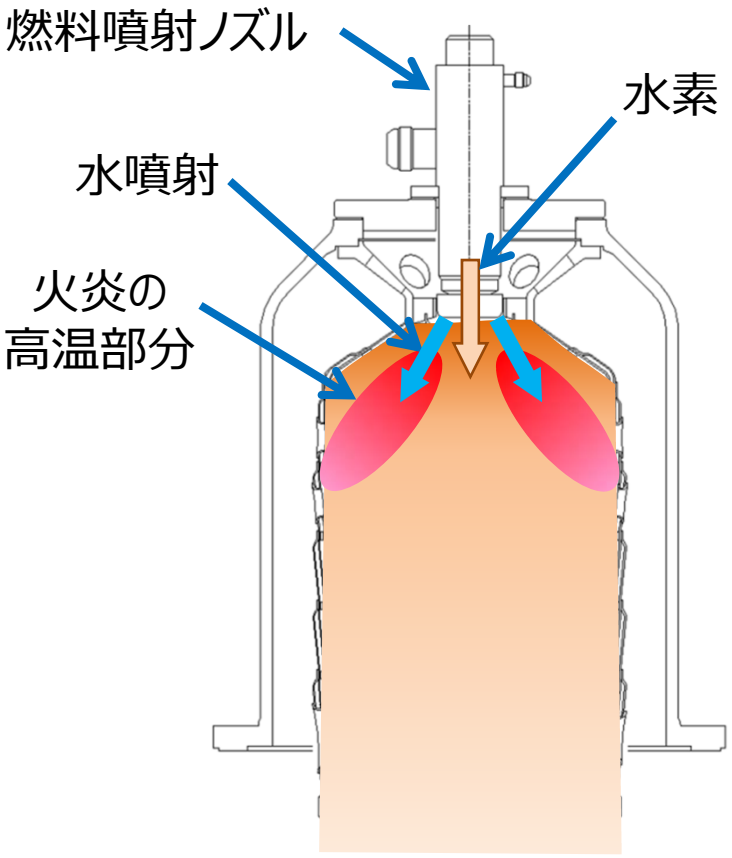
水素/天然ガス用燃料ノズル

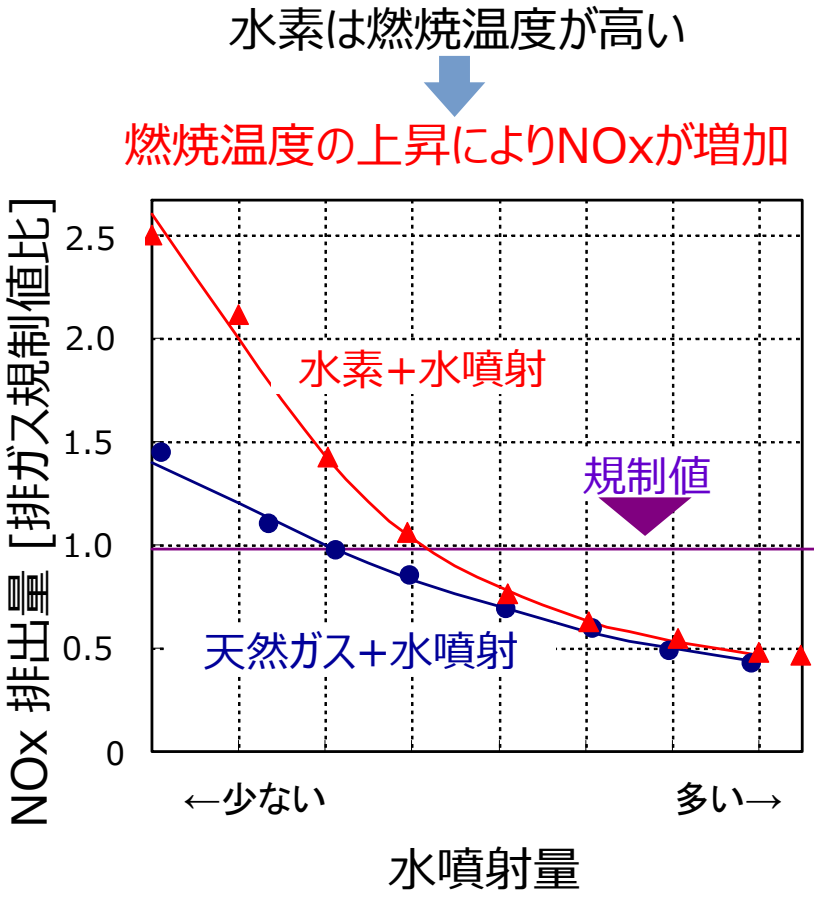
水素燃焼の特性に合わせてノズル形状を最適化



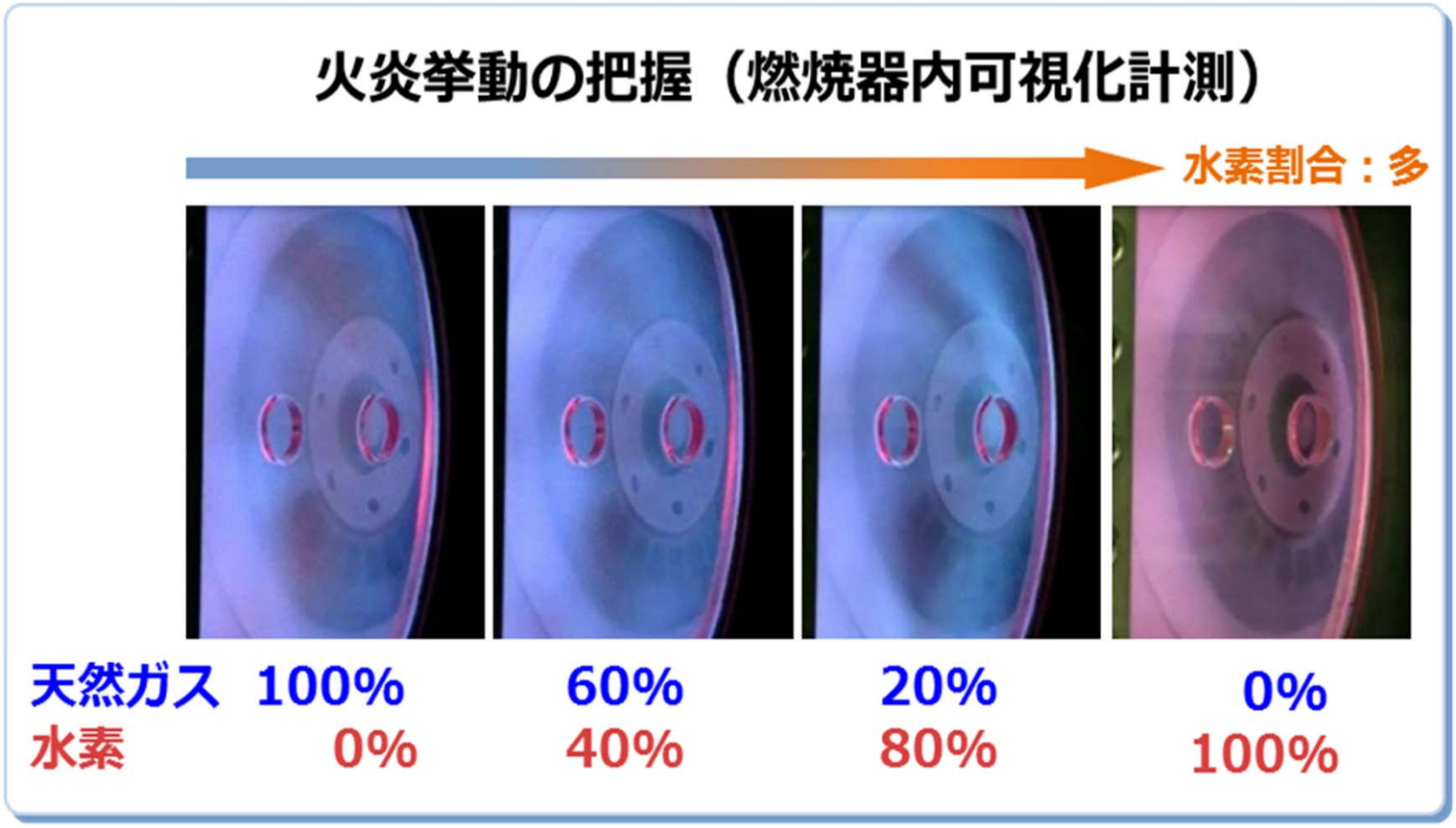
燃焼器と燃料ノズル

低NOx燃焼技術（水噴射方式）





水噴射によりNOxを規制値以下まで低減

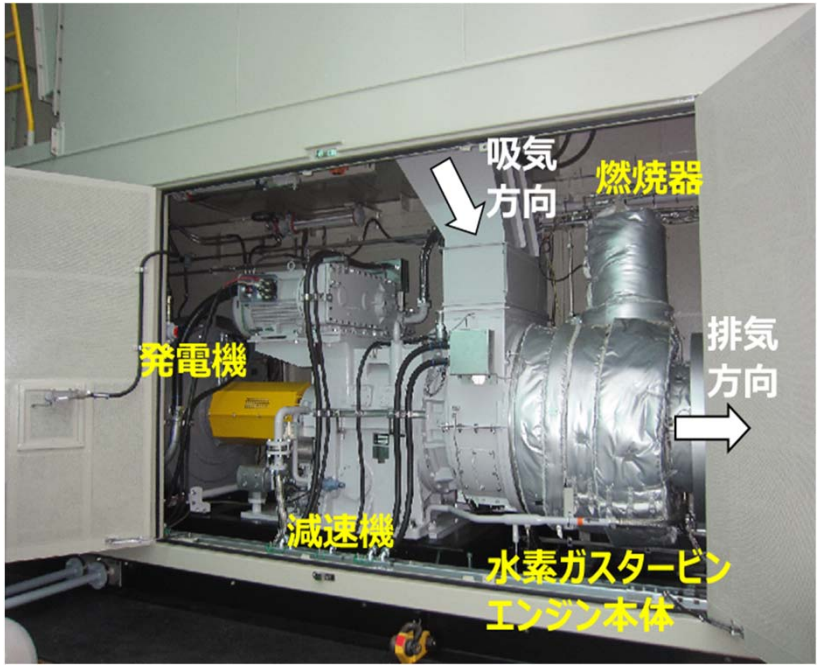


水素価格が高価な普及初期でも混焼率を下げることで、発電コストを抑えつつ、CO_2排出量を低減できる水素発電を導入

将来、水素の大量流通により水素価格が低減するのに合わせて、混焼率を上げてゆくことで、CO_2排出量を低減してゆくことが可能

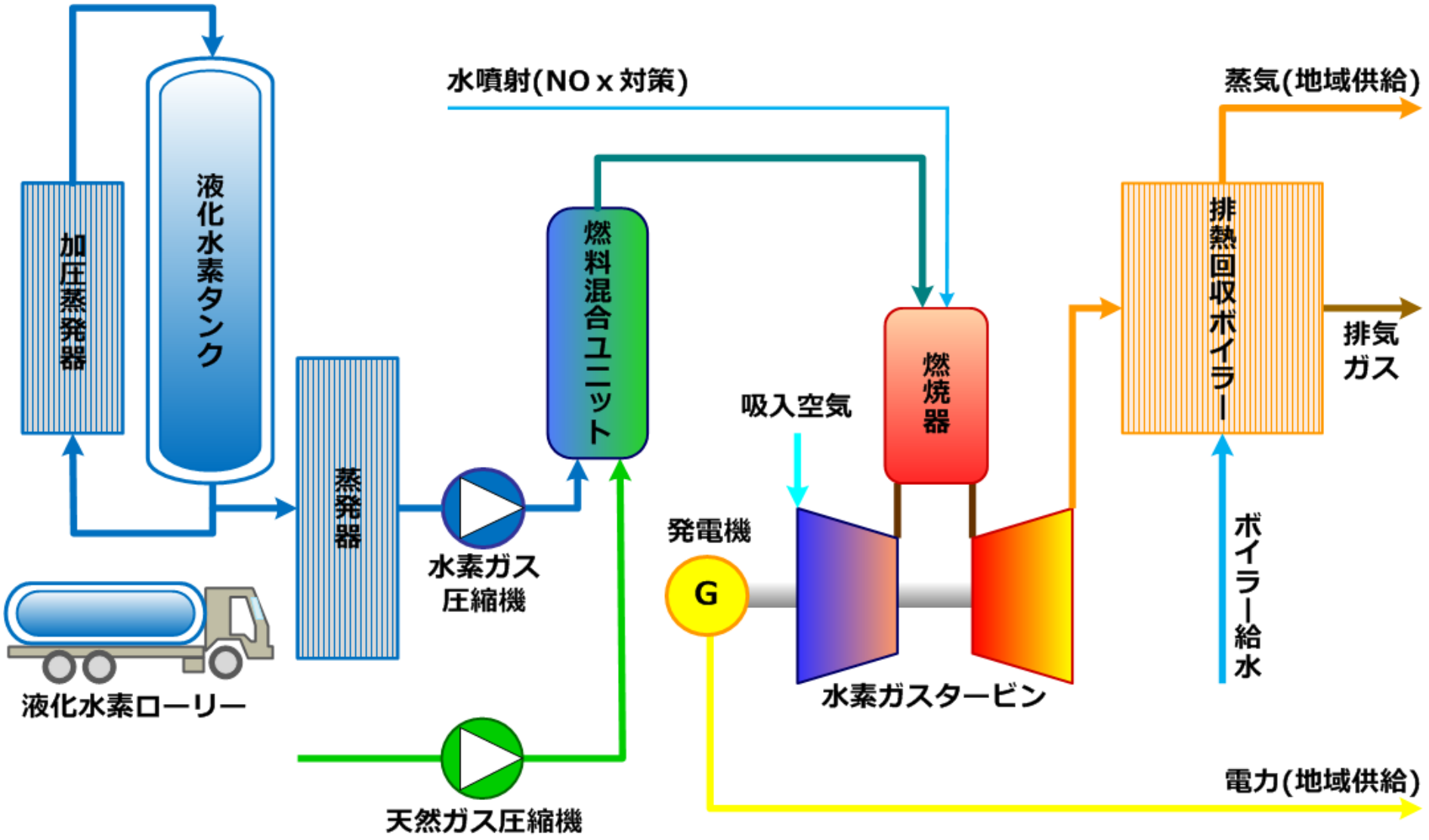
- 水素専焼(水素100%)及び水素と天然ガスの任意割合の混焼において、安定した燃焼を実現する
- 1MW級ガスタービンの運転試験により、データの蓄積と安定性の確認を通して技術を実証し、水素発電の実用化に資する

M1A-17 ガスタービン

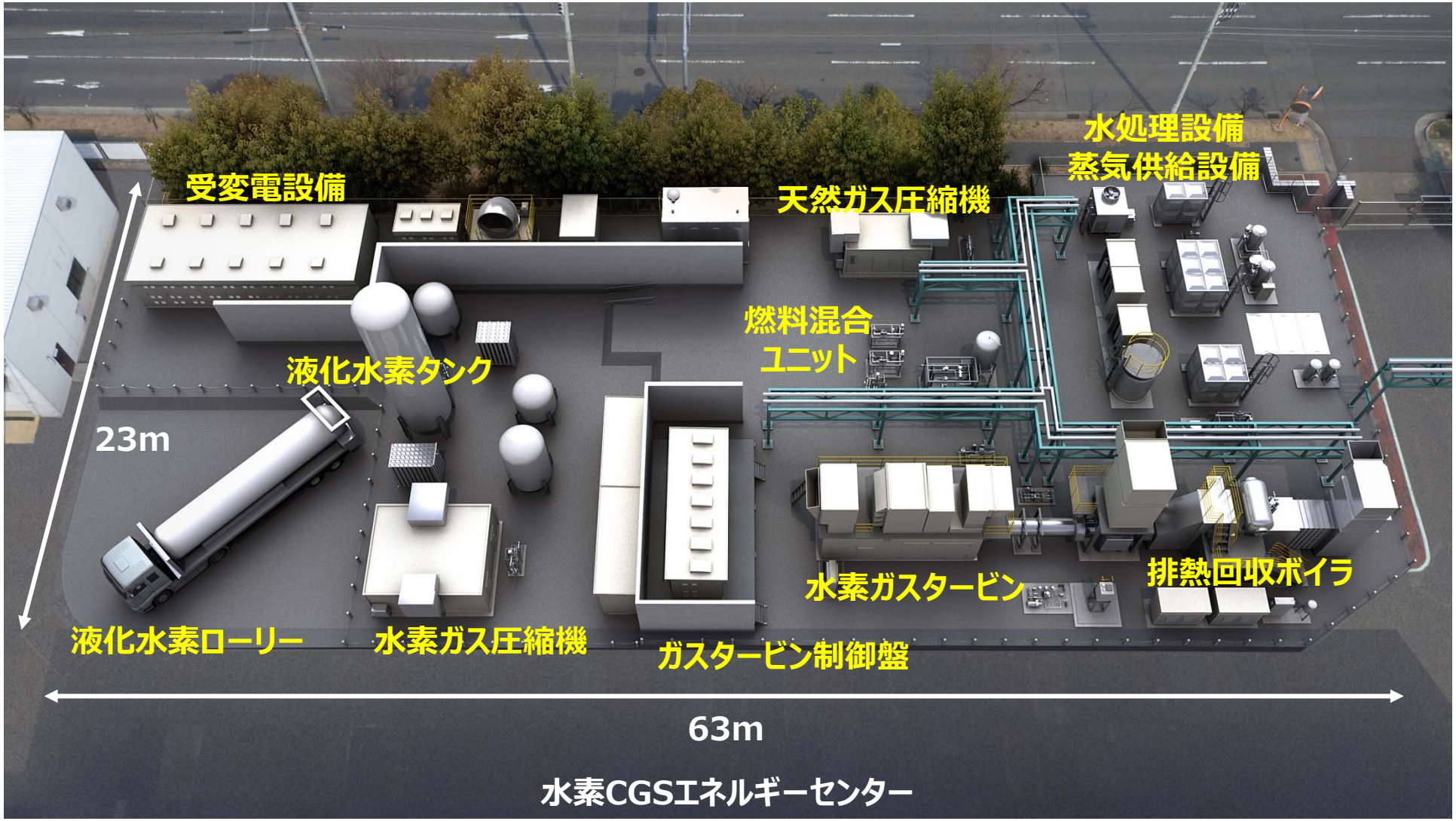


水素ガスタービン・パッケージ

水素CGSシステムフロー図



実証設備レイアウト（CGイメージ図）

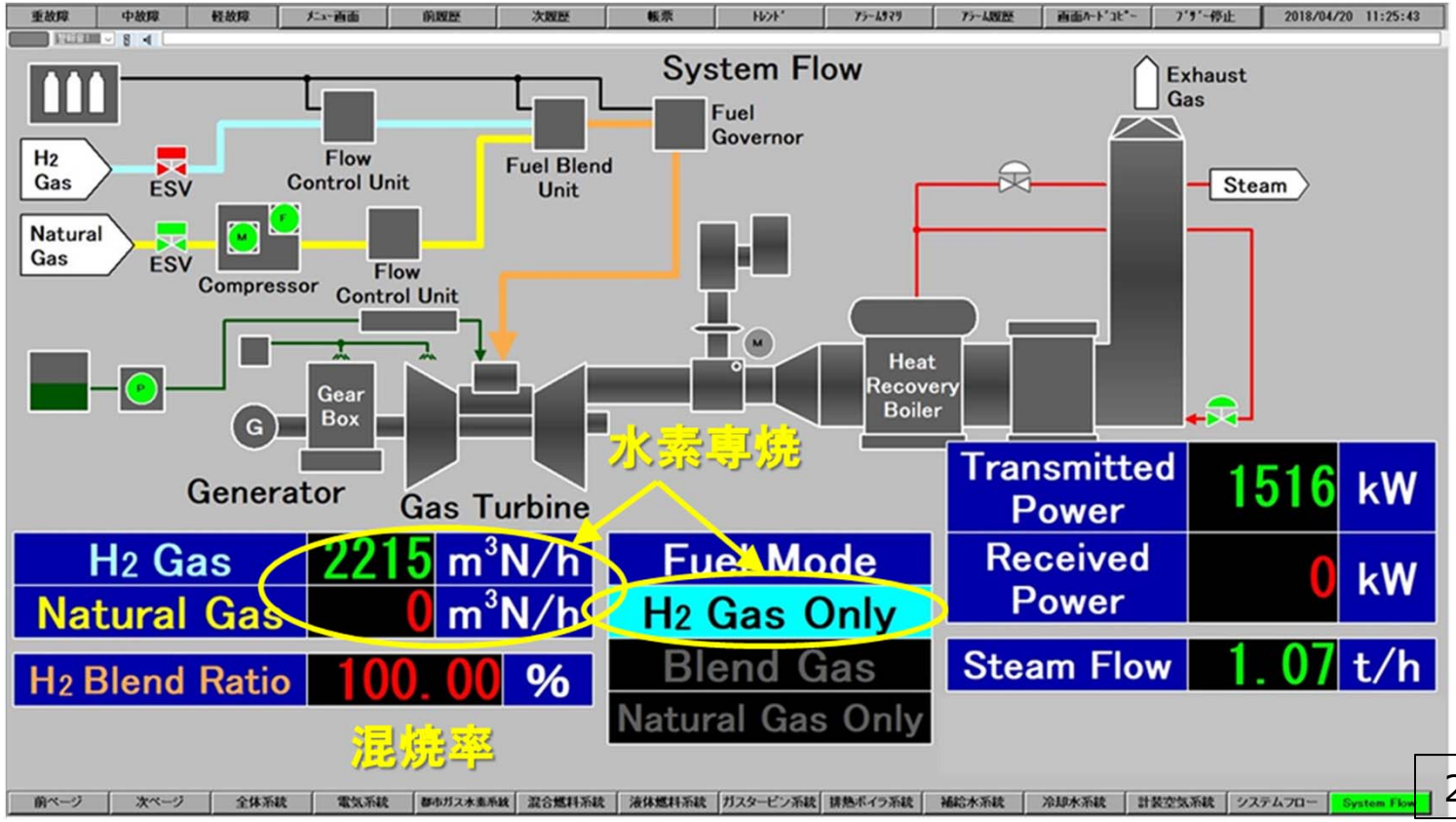


実証設備外観

- 2017年12月に
  設備の設置工事が完了
- 2018年2月より
  実証試験を開始

水素専焼による熱電供給実証試験の結果

- 2018年4月19日、4月20日に世界初となる市街地におけるガスタービンCGSでの水素100%による熱電供給を達成
- NEDO・大林組・川崎重工業との共同で4月20日にプレスリリース
- 実負荷運転における水素専焼／混焼運転時、および水素混焼割合切替え時の燃焼安定性の確認を完了
- 日本初の「100%水素で運転可能な火力発電所」として審査に合格



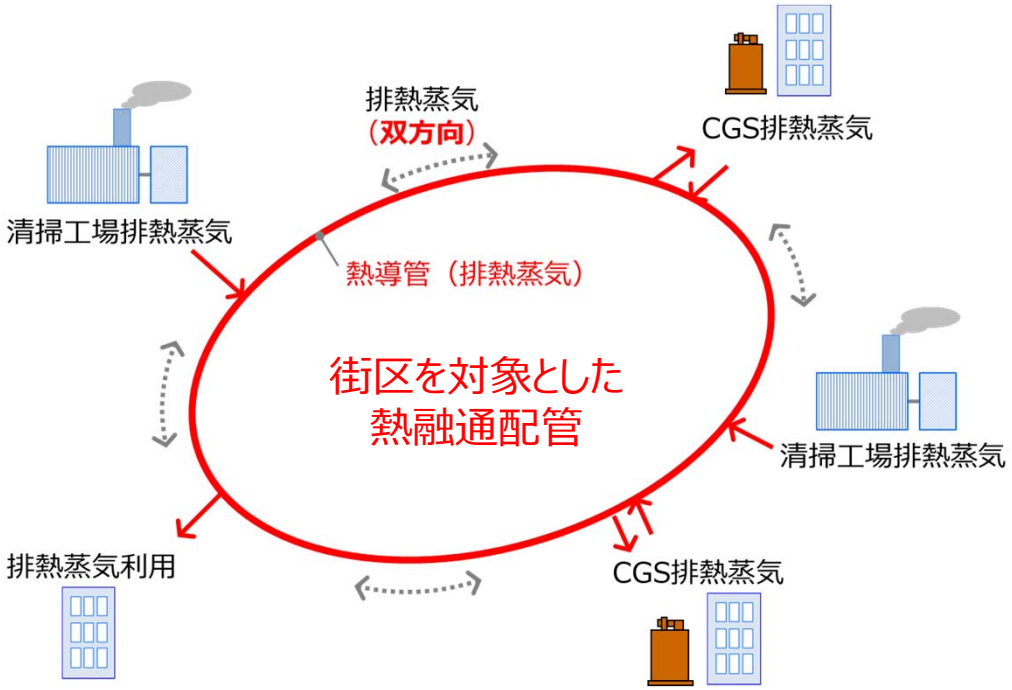
統合型EMSの開発

・双方向蒸気融通技術の開発

・統合型EMSの開発

大林組

双方向蒸気融通の目的



スマートコミュニティ実現に向けて

・発電所や清掃工場などの排熱を有効利用することで、エネルギー利用効率を向上。
・複数施設間による熱融通を推進するには、初期コストの削減が課題。
・蒸気管を1本（単管）にする双方向蒸気融通システムを導入できれば初期コストの削減に繋がる。

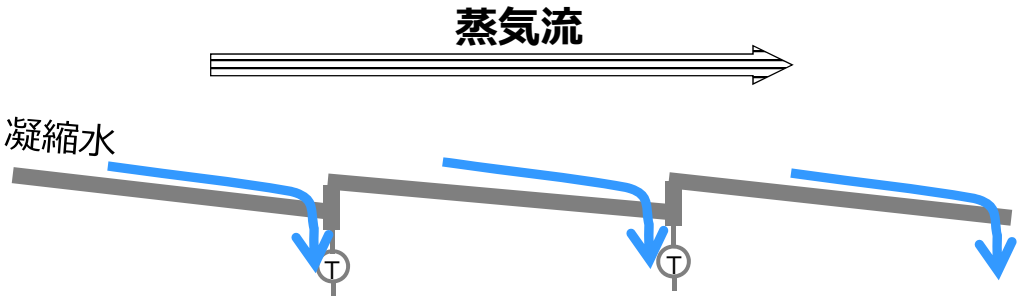
課題：単管の蒸気供給システムにおけるハンマー現象の防止

双方向蒸気融通の課題

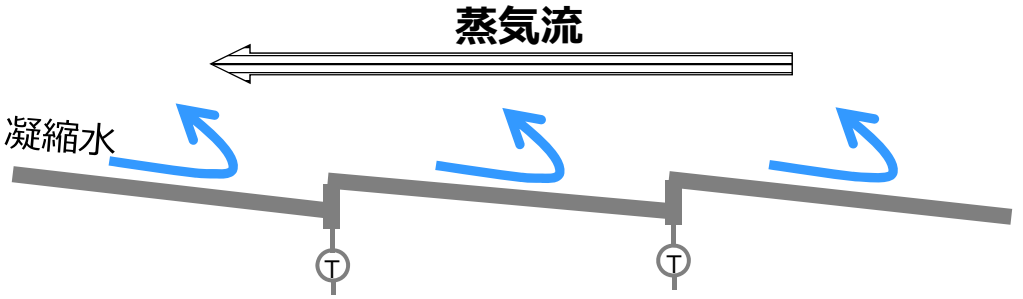
従来の蒸気供給システム

配管に勾配をつけて凝縮水を排出し、ハンマー現象を防止

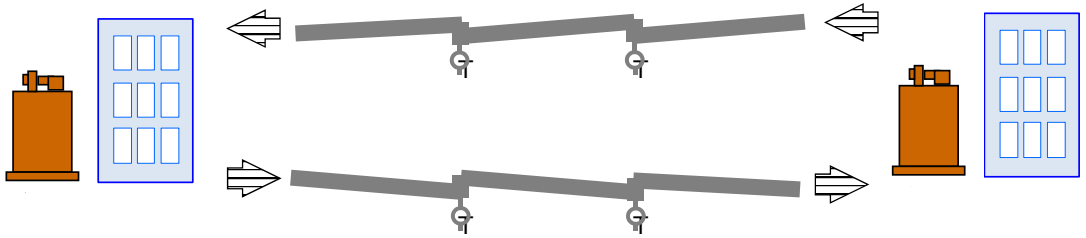
凝縮水と蒸気の流れの方向は、一致していることが必要



逆向きの蒸気流は、凝縮水の排出を妨げる



このため、双方向蒸気融通を行うためには、二本（往復）の蒸気管が必要



目標：単管で蒸気を両方向に送ることが可能なシステムの構築

実験・数値解析（大阪大学共同研究）

- 目的
  ・ハンマー現象を再現することで、ハンマー現象と配管内圧力や凝縮水の水位等との関連を明らかにし、ハンマー現象を回避する要件を確認する。
  ・実験や数値解析の結果から、ハンマー現象を定量化し、実証試験時のハンマー現象発生有無の判断基準値とする。

- 実験
  模擬配管で発生させたハンマー現象を観察した。

- 数値解析
  相変化を生じない「空気-水系」（非凝縮計算）についてモデル構築した後、相変化を伴う「蒸気-水系」（凝縮計算）についてモデル構築を行い、数値解析を実施した。

- 示唆された知見
  - ・凝縮水によって流路が閉塞されても、蒸気流速が速い場合は、凝縮水が吹き飛ばされ、ハンマー現象は発生しない。
  - ・水位が高く、流速が遅い場合、波立ちにより蒸気塊が形成され、凝縮起因ハンマーが発生しやすい。

⇩

- ・ハンマー現象回避の要件
  水位が高く、流速が遅い状況をつくらないこと

- 温度の低い蒸気配管に蒸気を送気し始める場合
  - ・急激に凝縮水が発生。
  - ・蒸気圧が低い間はトラップの排出量が少ない。
  - ・一時的に配管内の凝縮水の水位が上昇。
  - ・蒸気が配管の予熱に消費される間、蒸気流速が遅い。

水位上昇

流速が遅い

⇩

- ・蒸気の送気開始時にハンマー現象が発生しやすい。

⇩

- ・蒸気の送気開始時の凝縮水の水位上昇対策を行うことでハンマー現象を抑制する。

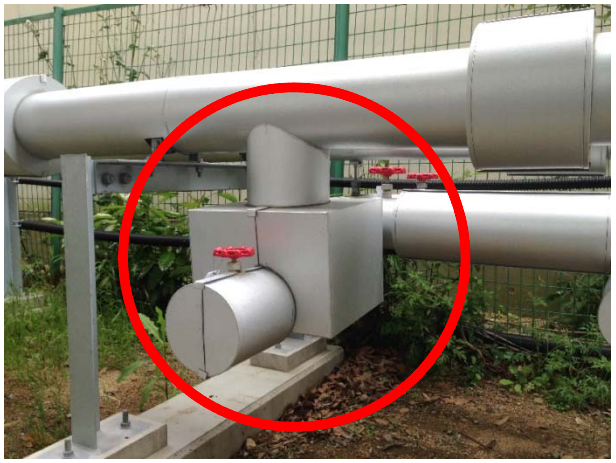
単管による双方向蒸気供給システム

蒸気の流れ方向の反転への対策、
送気開始時の凝縮水の水位上昇対策

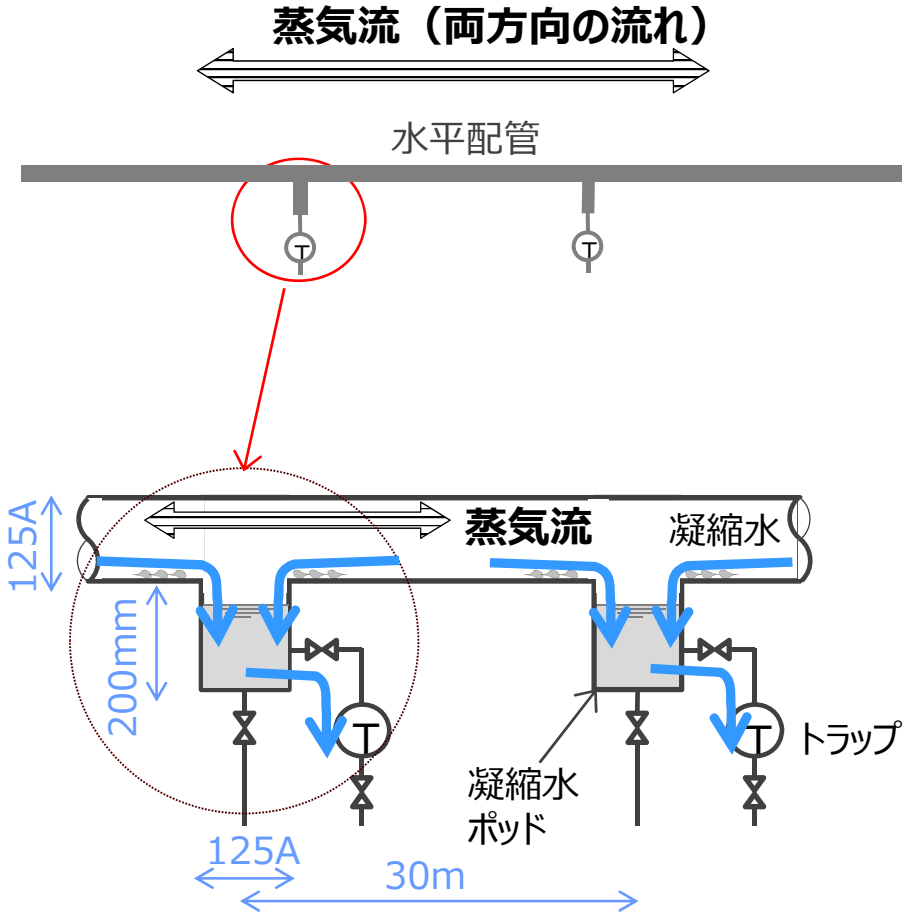
⇩

水平配管とし、凝縮水を一時的に貯留できる凝縮水溜り（ポッド）を設ける

ポッドの容量は、トラップが排水を始めるまでの間、発生する凝縮水を溜めることができる容量とする



エネルギーセンターに敷設の蒸気管　凝縮水ポッド



凝縮水ポッドに
凝縮水を溜めて排出

双方向蒸気融通システムの構築・実証

- 実証試験
  - ・凝縮水の水位上昇を抑制するため、水平配管に凝縮水溜り(ポッド)を設けた蒸気供給設備を建設した。
  - ・双方向に蒸気を供給する実証試験を行い、ハンマー現象の発生有無を確認した。
  - ・期間
    2018年2月21日~3月2日
  - ・蒸気供給
    - 順方向
      水素CGS（排熱回収ボイラ）側から市民病院へ蒸気を供給
    - 逆方向
      市民病院（蒸気ボイラ）側から水素CGS側（スポーツセンター）へ蒸気を供給（水素CGSは停止）

エネルギーセンターに敷設の蒸気管

2017 ZENRIN CO., LTD.(Z09KA第039号)

- 実証結果
  - ・順方向、逆方向いずれの場合も、瞬間的な圧力変動は計測されず、ハンマー現象は確認されなかった。
    ※ハンマー現象の観察：水平配管範囲を検証対象とする。
  - ・凝縮水溜りを設けた水平配管で双方向に蒸気を供給することが可能なことを確認した。

⇩

  - ・双方向蒸気融通システムを構築した。

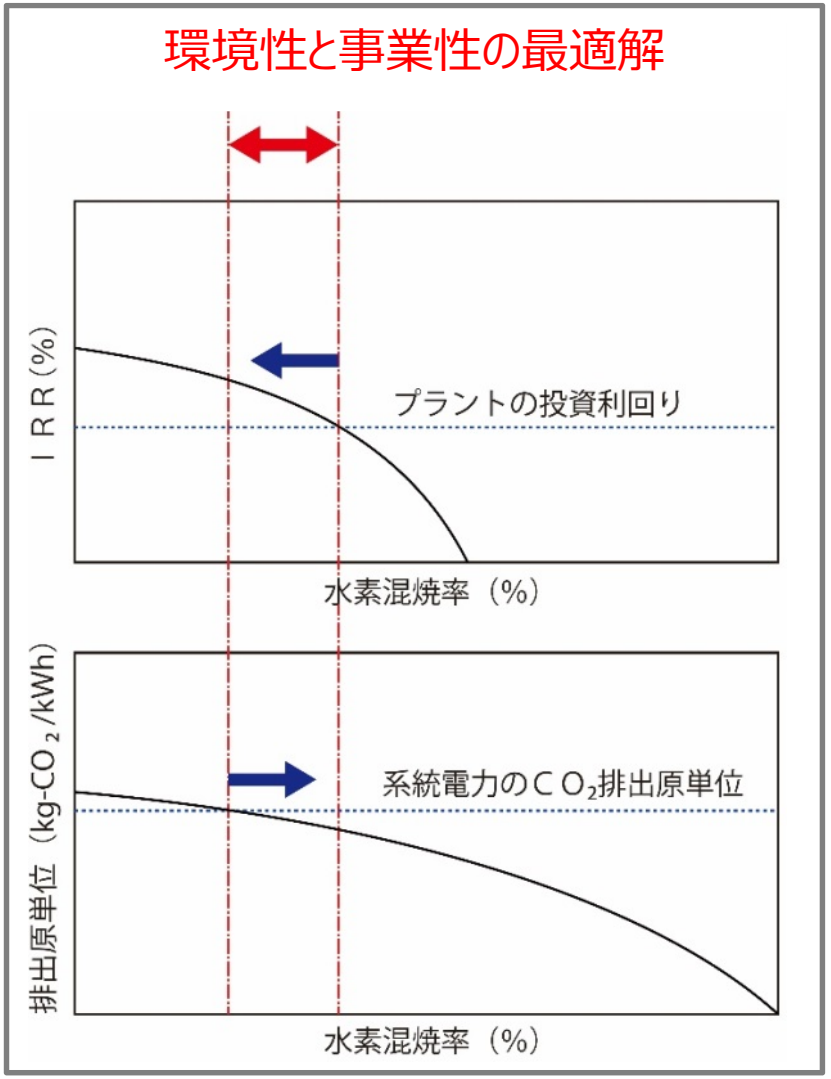
統合型EMSの目的

- 現状、水素は普及過渡期で高価なため、
  水素を使用するほど環境性は高まるが
  事業性は低下する

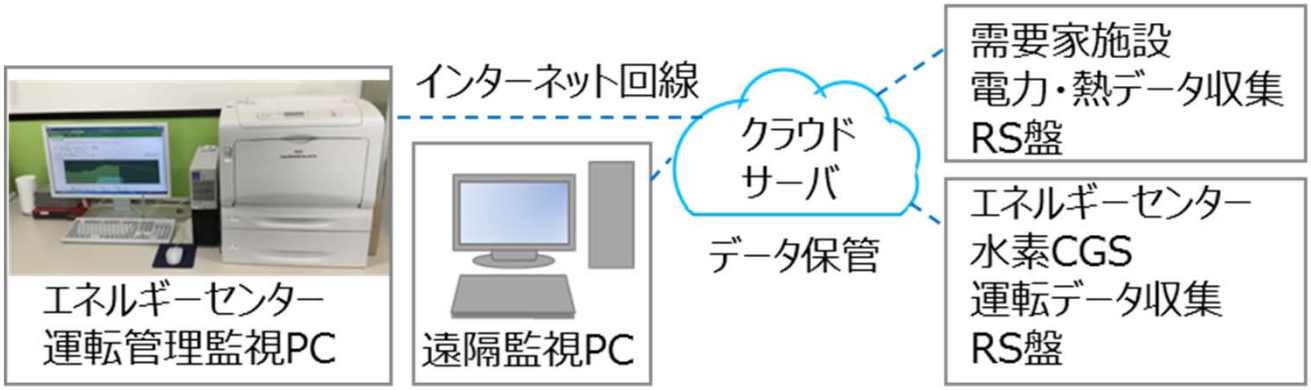
- 水素CGS（水素・天然ガスの混焼/専焼）の
  運転や今後の普及には、
  適切な量の水素投入（水素混焼率）が
  環境性と事業性のバランスの鍵となる

- 統合型EMSでは、
  需要量に応じた電気や熱の供給（需要予測）、
  事業性を損なうことなく環境性に配慮した最適解
  での運転（最適運転計画）が実現可能

- 統合型EMSとは、
  電気・熱・水素を総合管理し、
  環境性と事業性を確保した運用が実現可能な
  エネルギーマネジメントシステム

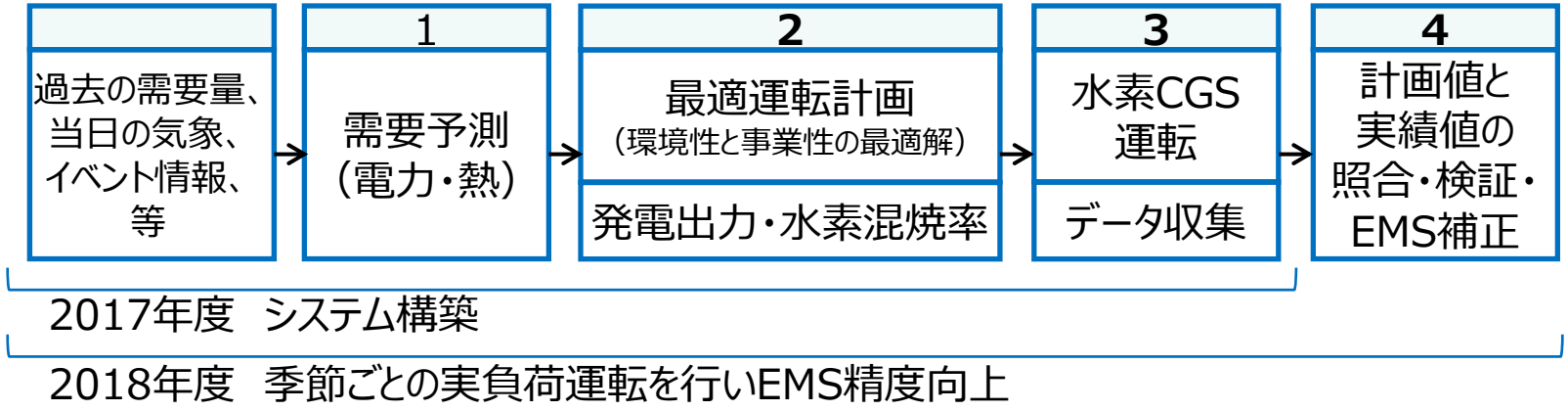


- EMSの構成



EMSの構成イメージ

- EMSの流れ



- 実証試験
  - ・1MW級水素CGSから近隣施設へ電力と熱を供給する実証試験設備を建設した。
  - ・電気・熱・水素を総合管理し、事業性と環境性を確保する統合型EMSを製作した。
  - ・需要予測より決定した発電出力において、想定した水素単価のもと環境性と事業性が最適となる運転パターンや水素混焼率を決定し（最適運転計画）、水素CGSから近隣施設への電力と熱供給の実負荷運転を行った。

・期間

システム構築

2018年4月19日、4月20日、計2日間

季節ごとの実負荷運転を行いEMS精度向上

春季	2018年5月21日～6月1日、	平日	計10日間
夏季	2018年7月23日～8月3日、	平日	計10日間
秋季	2018年11月5日～11月16日、	平日	計10日間
冬季	2019年1月14日～1月25日、	平日	計10日間

※2018年4月時点
電力は、2019年5月まで「中央市民病院」へ供給、
11月から「神戸新交通」へ供給

- 実証結果
  - ・実負荷運転時の運転実績値を収集し、事業性（光熱水費）と環境性（CO_2排出量）について、計画値を運転実績値と照合し、乖離していないことを確認した（誤差率10%以内）。

⇩

  - ・電気・熱・水素を総合管理し、事業性と環境性を確保する統合型EMSを構築した。

①「水素社会構築技術開発事業
大規模水素エネルギー利用技術開発
水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」

まとめ

- 2018年度までの実証運転を以て、開発目標は全て達成

  <水素CGSの開発実証>

  ・実負荷運転における水素専焼／混焼運転時、および水素混焼割合切替え時の燃焼安定性の検証

  ⇒ コジェネ分野で普及が期待される1MW級水素CGSに使用する、水素専焼/混焼対応ガスタービン(水噴射方式)について開発を完了

  <統合型EMSの開発実証>

  ・電気・熱・水素を総合管理し、事業性と環境性を確保する統合型EMSの構築

  ・双方向蒸気融通システムの構築

  ⇒ 水素CGSの「環境性と事業性を確保した運用に欠かせない技術」として統合型EMSおよび双方向蒸気融通技術の開発を完了

- 『NEDO「水素社会構築技術開発事業」基本計画』の最終目標と意義に応じた成果を得た

成果公表実績

2019年2月末までの成果公表実績は以下の通り。
水素エネルギー活用の普及啓発、社会受容性の向上に向けて積極的に発信・展開した。

[件]

	大林組	川崎重工業	合計（※1）
展示会への出展	6	13	19
講演会での発表	15	77	93
論文（学会）	2	4	6
新聞・雑誌等への投稿（※2）	3	31	34
プレスリリース	2	1	3
現地視察（※3）	172		172

※1　2019年2月末まで
※2　取材は受けたが、記事化されていない件数は含まない。
※3　2018年1月以降、2019年2月末まで

②「水素利用等先導研究開発事業
大規模水素利用技術の研究開発
水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」

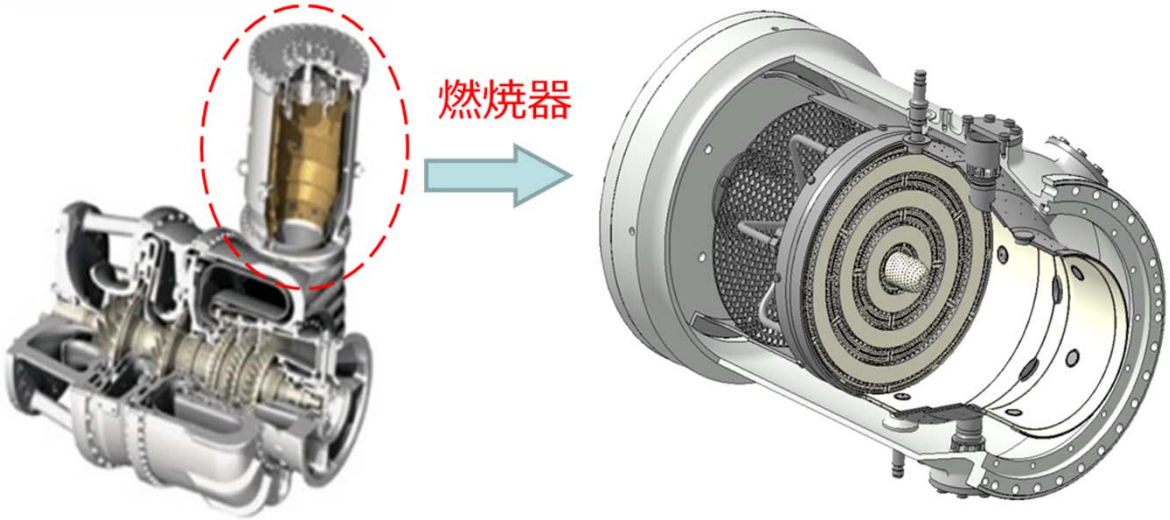
川崎重工業株式会社

研究目的

- 水素エネルギー市場の形成に向けて、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術に着手
- 環境負荷が低く、かつ大量の水素利用につながる基盤技術の開発

開発目標

- １ＭＷ級ガスタービンの５０％負荷から定格１００％負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、ＮＯｘ ３５ｐｐｍ（残存酸素１６％換算値）以下の達成
- 着火、エンジンの回転数上昇時を想定した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火が生じず、５００℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼の達成



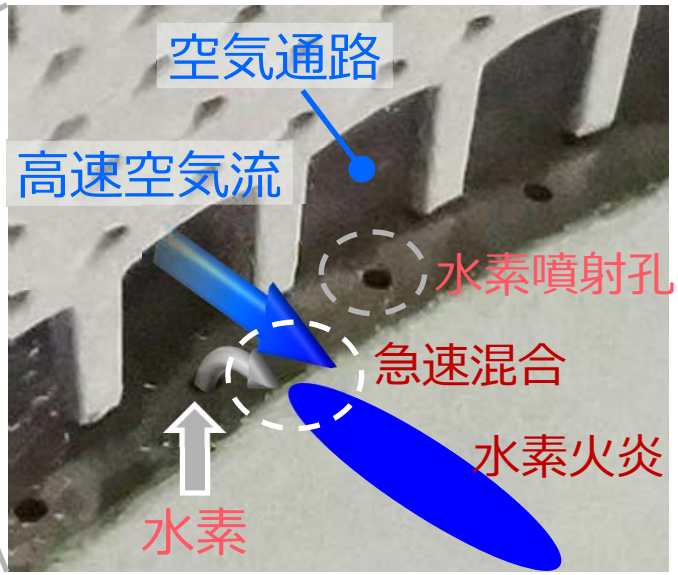
従来のNOx低減方式における水素燃焼での課題

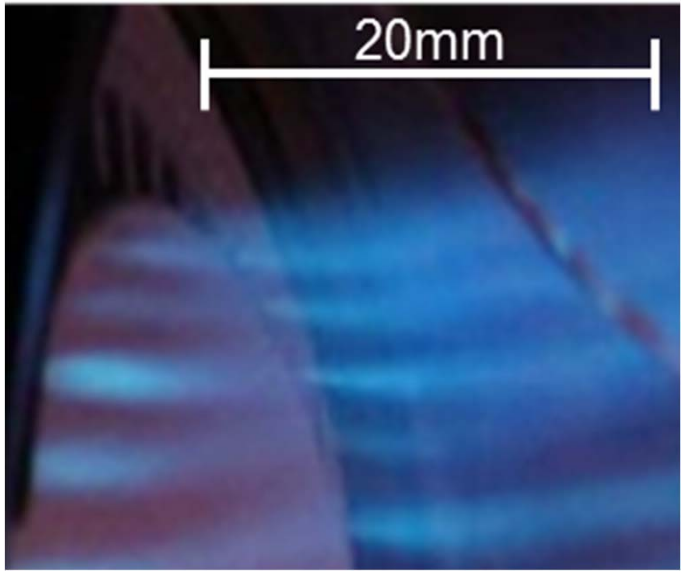
- 水噴射方式 ⇨ NOx低減に限界あり、かつ効率向上が困難
- 希薄予混合ドライ方式 ⇨ 逆火が発生し、安定燃焼が困難

課題解決のための方策

水を使用せずに低NOxを実現する、新方式の「微小な水素火炎を用いた水素ドライ低NOx燃焼技術」を適用

低NOx水素バーナ





水を使わず低NOx安定燃焼で逆火の発生なし

⇩

効率の向上と高い環境性能（低NOx）を同時に実現

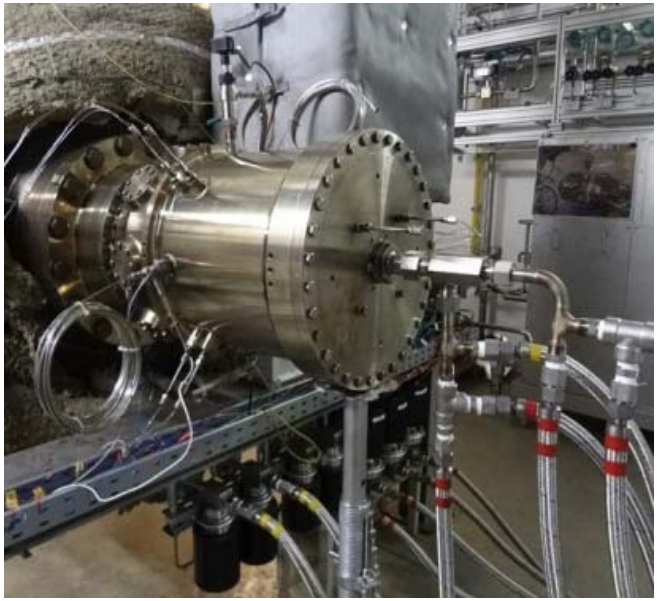
エンジン運転条件に相当する高圧・高温条件下での水素燃焼試験を実施

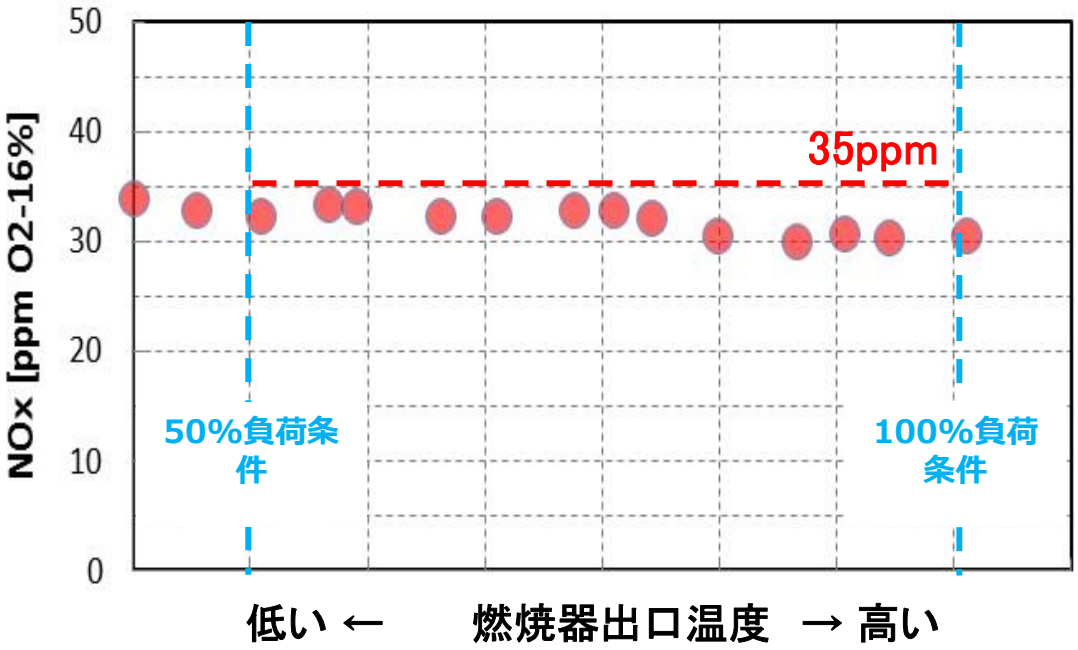
①５０%から定格１００%負荷運転に相当する条件で，ＮＯｘ 35ｐｐｍ※以下

②定格１００%に相当する条件で2時間の耐久，試験後の燃焼器に焼損等なし

※残存酸素16%換算

燃焼器のみの要素試験

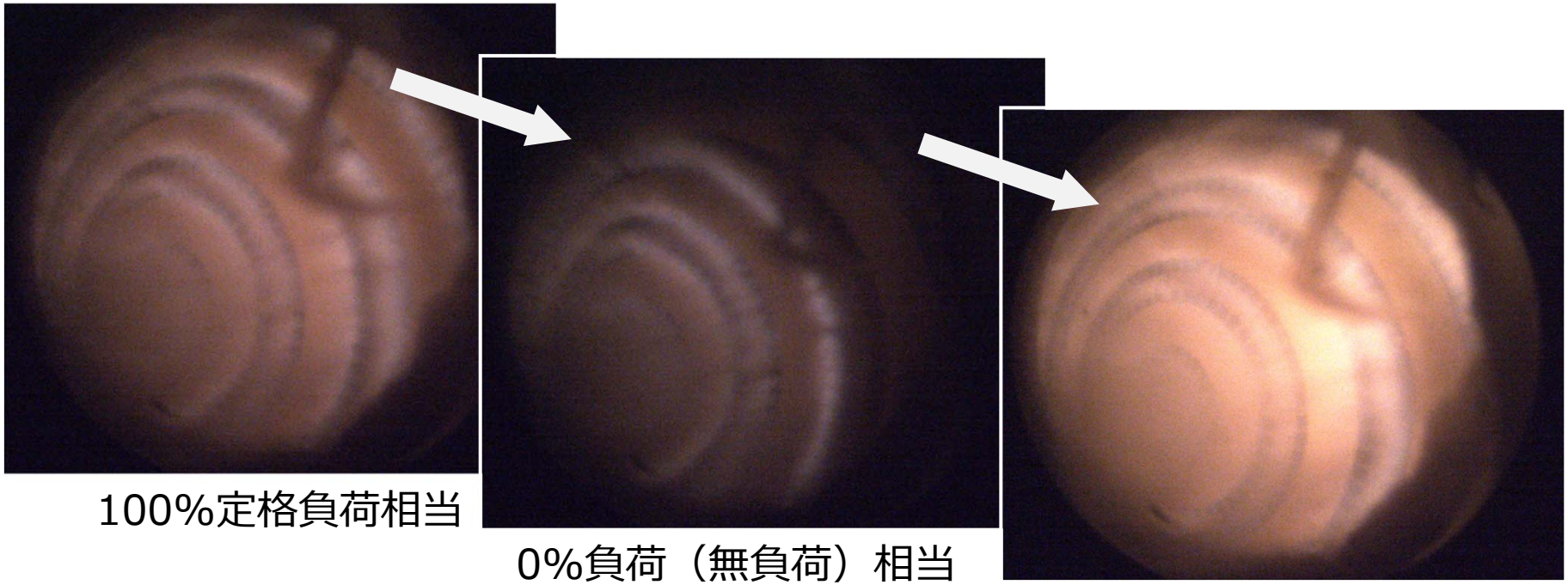




エンジン運転条件に相当する高圧・高温条件下での水素燃焼試験を実施

③定格１００%に相当する条件で，燃料流量変動付加/燃料遮断試験を実施.

異常燃焼の発生無し



100%定格負荷相当

0%負荷（無負荷）相当

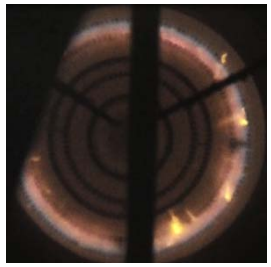
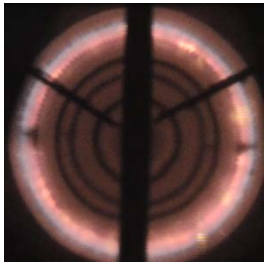
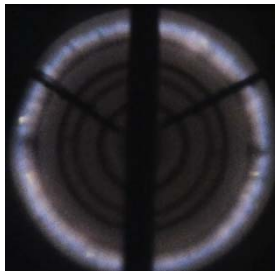
100%定格負荷相当

エンジンの着火・起動に相当する条件で燃焼安定性確認試験を実施

④エンジン起動・回転数上昇を想定した種々の条件※で水素安定燃焼を確認

※圧力は0.2MPa以下

保炎確認試験時の火炎写真と燃焼安定性の判定

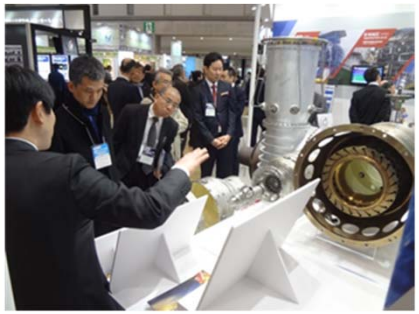
エンジン %回転数相当	20	40	60	80
燃焼安定性の判定	○	○	○	○
火炎写真				

※燃焼器のみの要素試験

- 開発目標である「５０%から１００%負荷運転に相当する条件でＮＯｘ３５ｐｐｍ(残存酸素１６%換算値)以下」を達成

成果の普及

	FY2016	FY2017	FY2018	合計
特許出願			1	1
展示会への出展	1	1	1	3
講演会での発表	2	8	17	27
論文（学会）	1			1
新聞・雑誌等の取材・掲載		7	4	13
Web掲載等		1		1



次世代火力発電EXPOでの展示