

水素エネルギー社会形成研究会
平成30年度第4回セミナー ～水素発電・ガスタービン編～
2019年2月6日

発電用大型ガスタービンにおける水素利用



三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部
ガスタービン技術総括部 大型ガスタービン技術部
ガスタービン燃焼器グループ
宮本 健司

目次

- 1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介
- 2.カーボンフリー社会を目指して
- 3.大型ガスタービン燃焼器について
- 4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術
- 5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術
- 6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開
- 7.その他の取り組み

1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

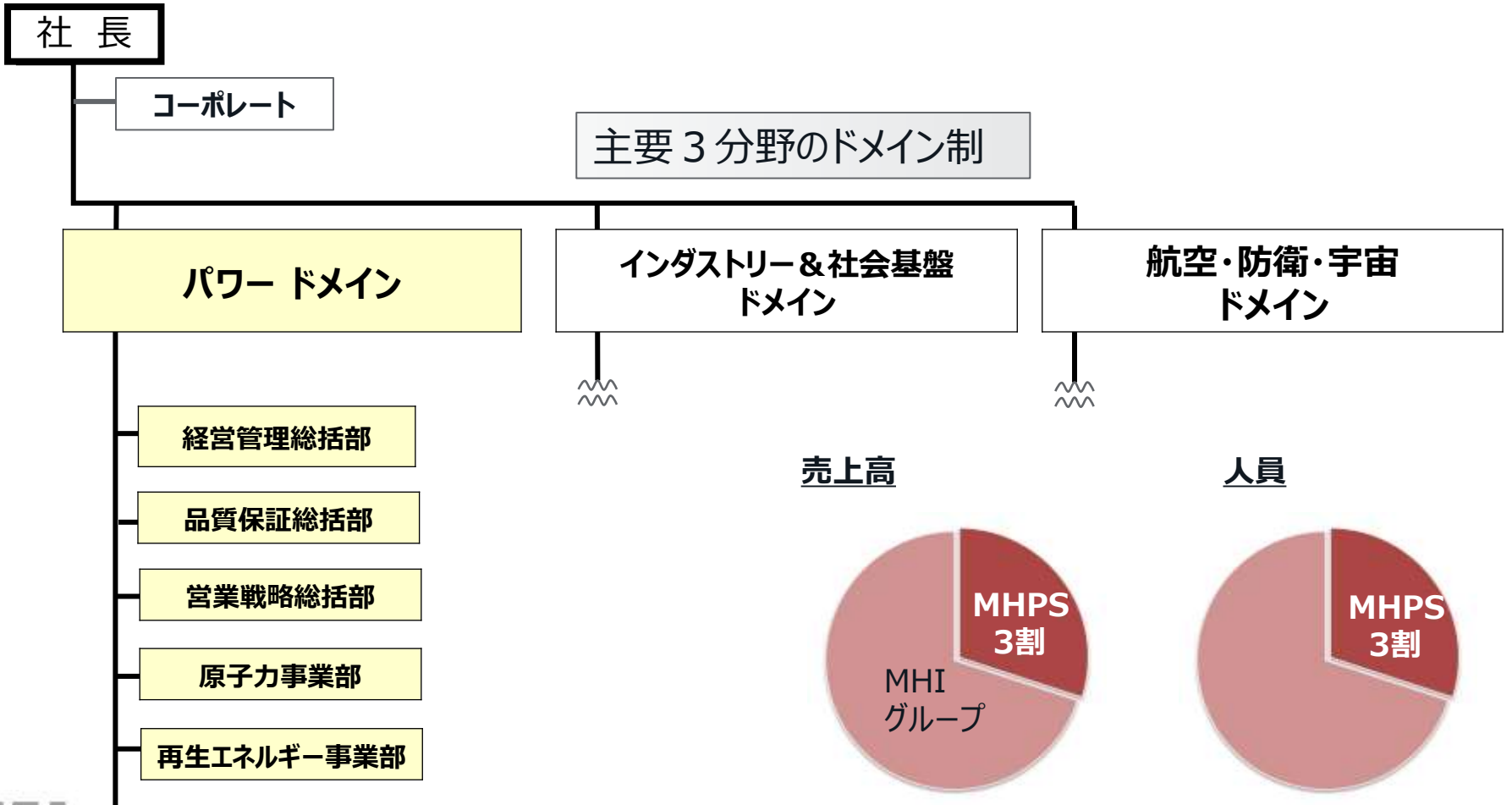
6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

7.その他の取り組み

1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介

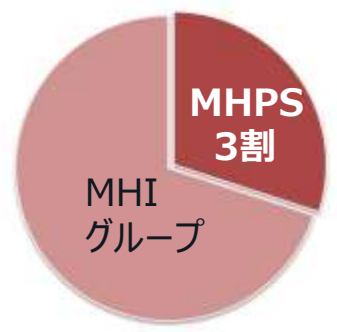
～三菱重工(MHI)との関係～

三菱重工グループ組織図

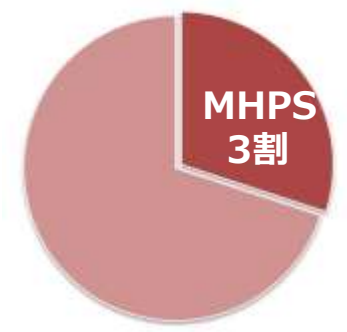


三菱日立パワーシステムズ(株)

売上高



人員



MHPSは売上・人員ともMHIグループの約3割を占める中核企業



1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介

～国内拠点について～

高砂工場



3,593人

ガスタービン



主要な国内拠点

本社 : 1,195
 各支社 : 122
 各工場 : 9,083
 計 : 10,400



日立工場



1,922人

蒸気タービン・発電機



長崎工場



2,202人

ボイラー



蒸気タービン



呉工場



1,108人

ボイラー



石炭ガス化複合発電
ガス化炉



本社・本牧地区

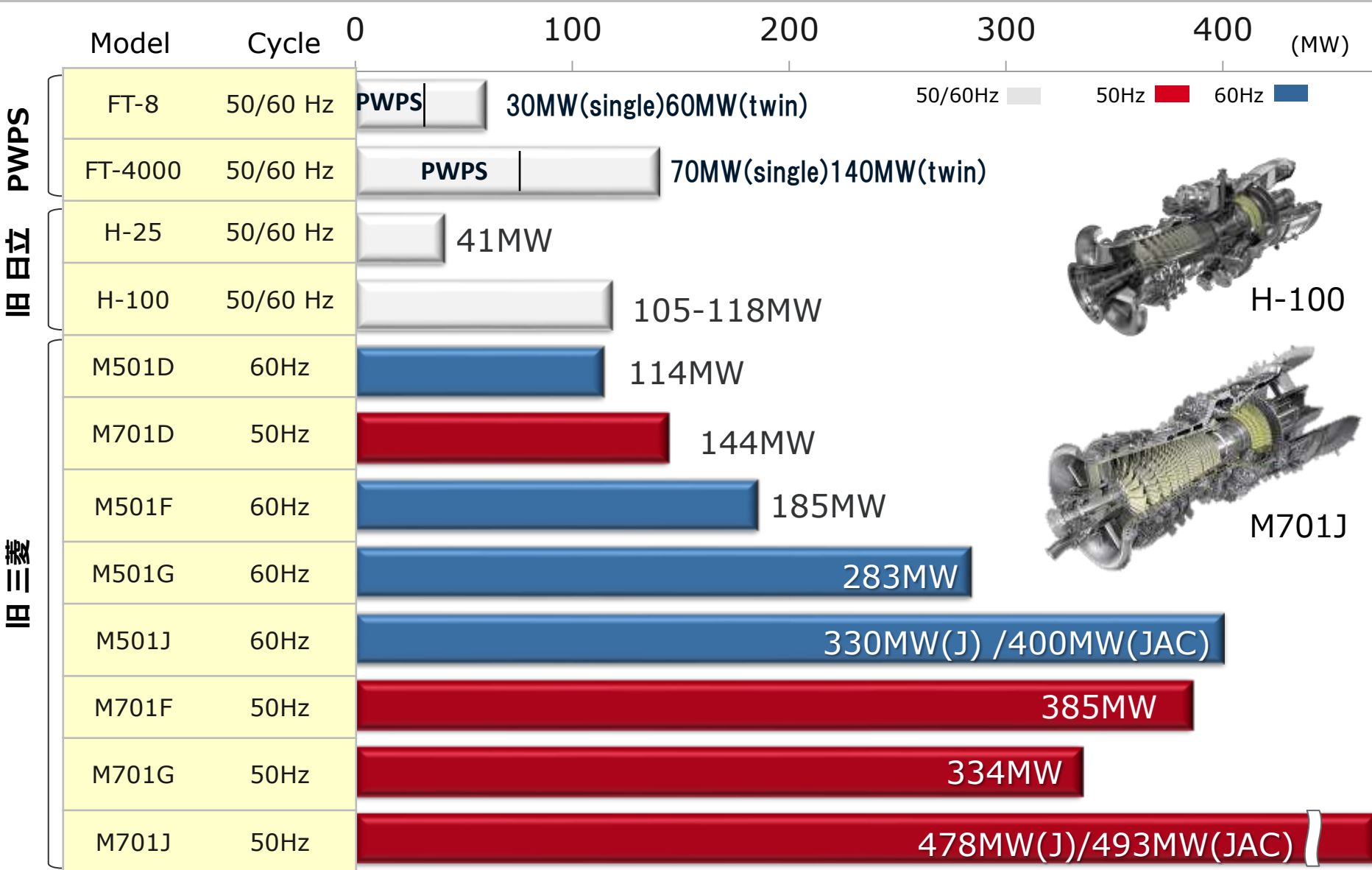


1,453人

合計 10,400人(支社含む)
 ※2018年4月1日時点実在社員数

1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介

～ガスタービンラインナップ～



*All ratings are at the generator terminals.

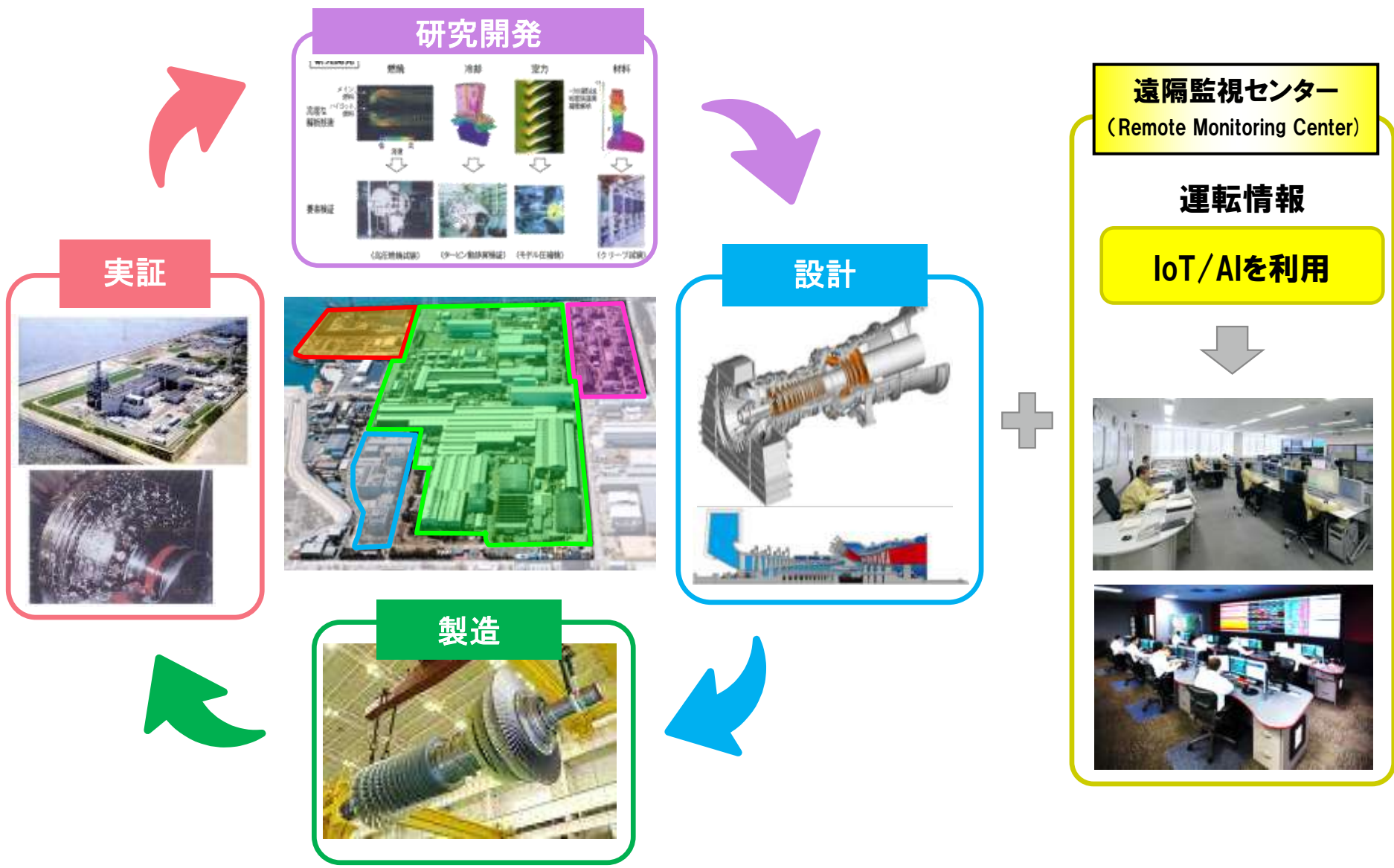
1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介 ～大型ガスタービン市場におけるMHPSのシェア～

大型ガスタービンの設計～製造まで行える企業は、世界でも3社のみ。



1.三菱日立パワーシステムズ(MHPS)の紹介

～同一敷地で開発・設計・製造・実証を行える世界唯一の工場(高砂工場)～



1.MHPSの紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

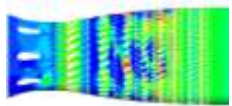
7.その他の取り組み

2.カーボンフリー社会を目指して ～ガスタービン技術開発動向～

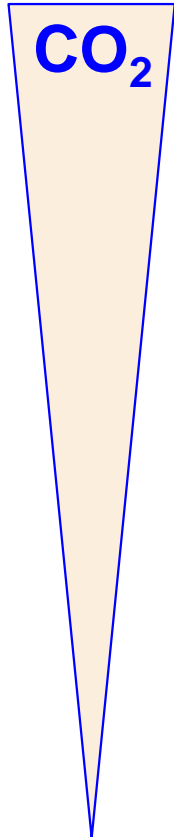
超高効率GTCC



急速起動ガスタービン



水素/アンモニア燃焼ガスタービン

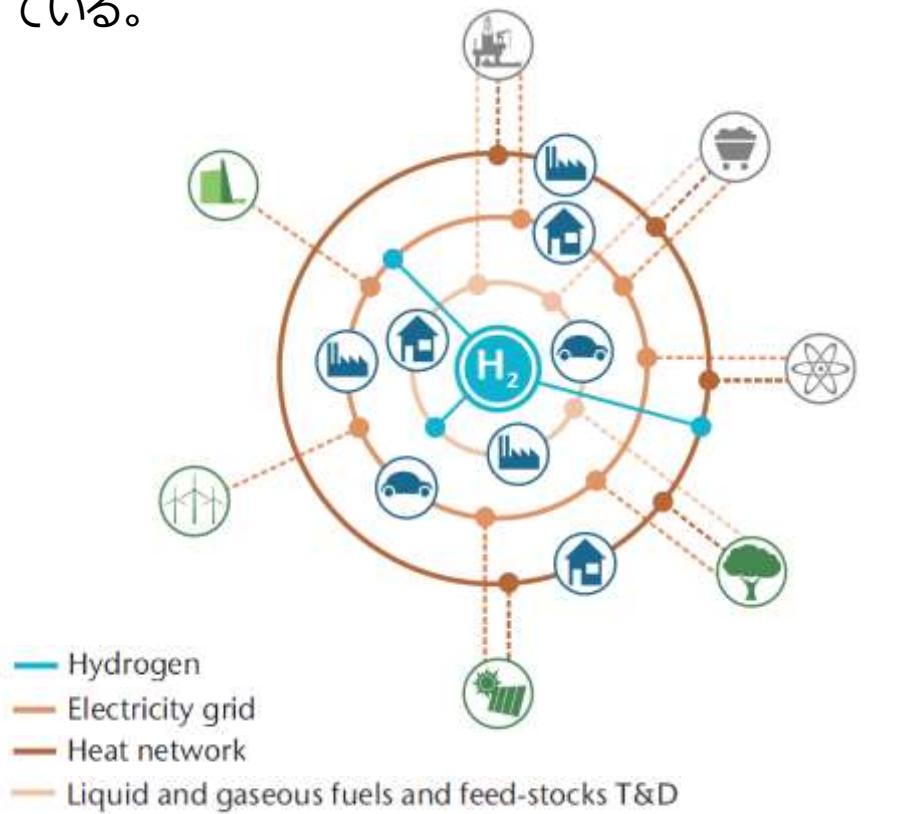


CO₂ Zero

2.カーボンフリー社会を目指して ～サプライチェーン①～

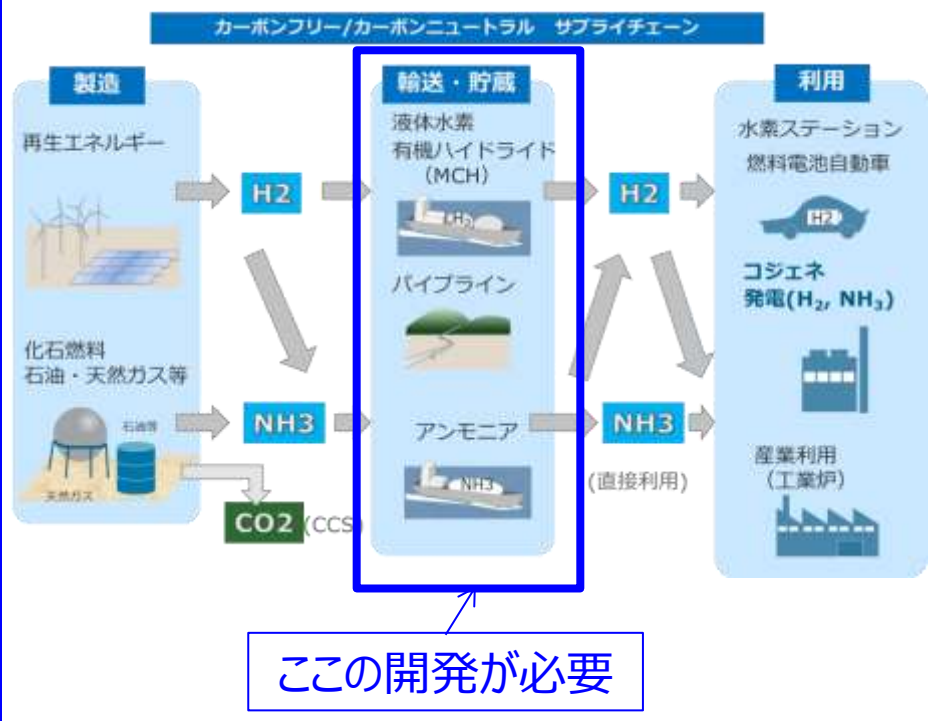
海外

- ・「再生可能エネルギー」および「化石燃料+CCS」を利用した水素製造が想定されている。
- ・既存天然ガスパイプラインが発達しているため、水素の輸送ラインとして活用することを検討されている。



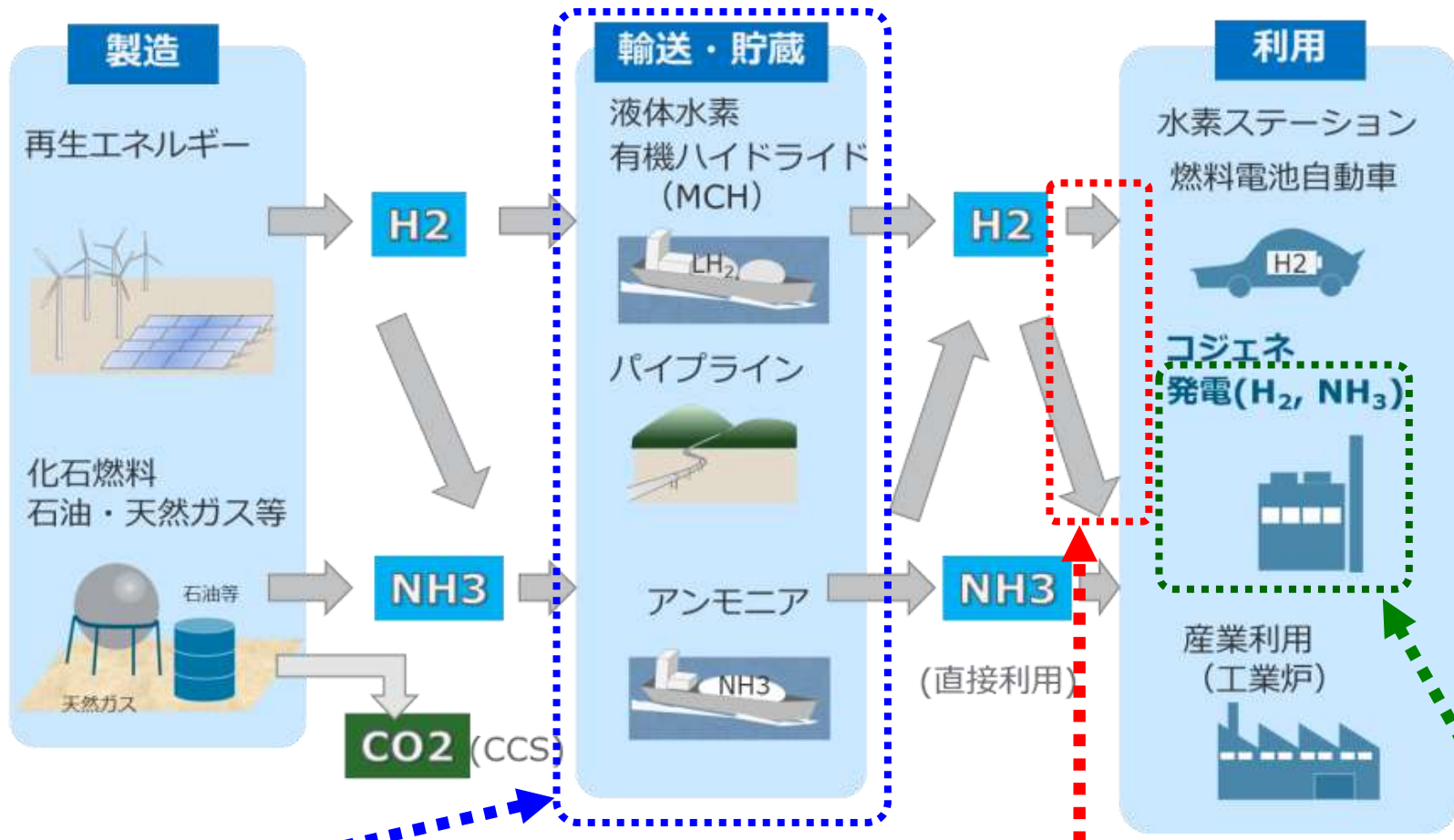
国内

- ・「再生可能エネルギー」および「化石燃料+CCS」を利用した水素製造には限界があることから、海外から水素を輸入することが想定されている。
- ・LH2、MCH、アンモニア等を利用したエネルギーキャリアの開発が必要。



2.カーボンフリー社会を目指して ～サプライチェーン②～

カーボンフリー/カーボンニュートラル サプライチェーン



低純度水素への適合

- ・サプライチェーン選択肢拡大
- ・供給コスト低減

大規模水素需要創出

- ・物量効果による水素インフラの拡大
- ・供給コスト低減

高効率な発電

- ・発電コストの低下

2.カーボンフリー社会を目指して

～水素ガスタービンのメリット①～ 安定かつ大量な水素消費の創出

- 水素焼きガスタービンにより消費される燃料水素は大規模かつ安定。
- 水素インフラ導入期においては、水素供給事業への参入リスクを下げ、インフラの拡充への波及効果が期待される。

GT 出力500MW 効率60%
20vol%水素混焼プラント 1基
水素消費量：1.4t/h



燃料電池自動車
10～13万台





100,000～130,000

2.カーボンフリー社会を目指して

～水素ガスタービンのメリット②～ 低純度水素への適用

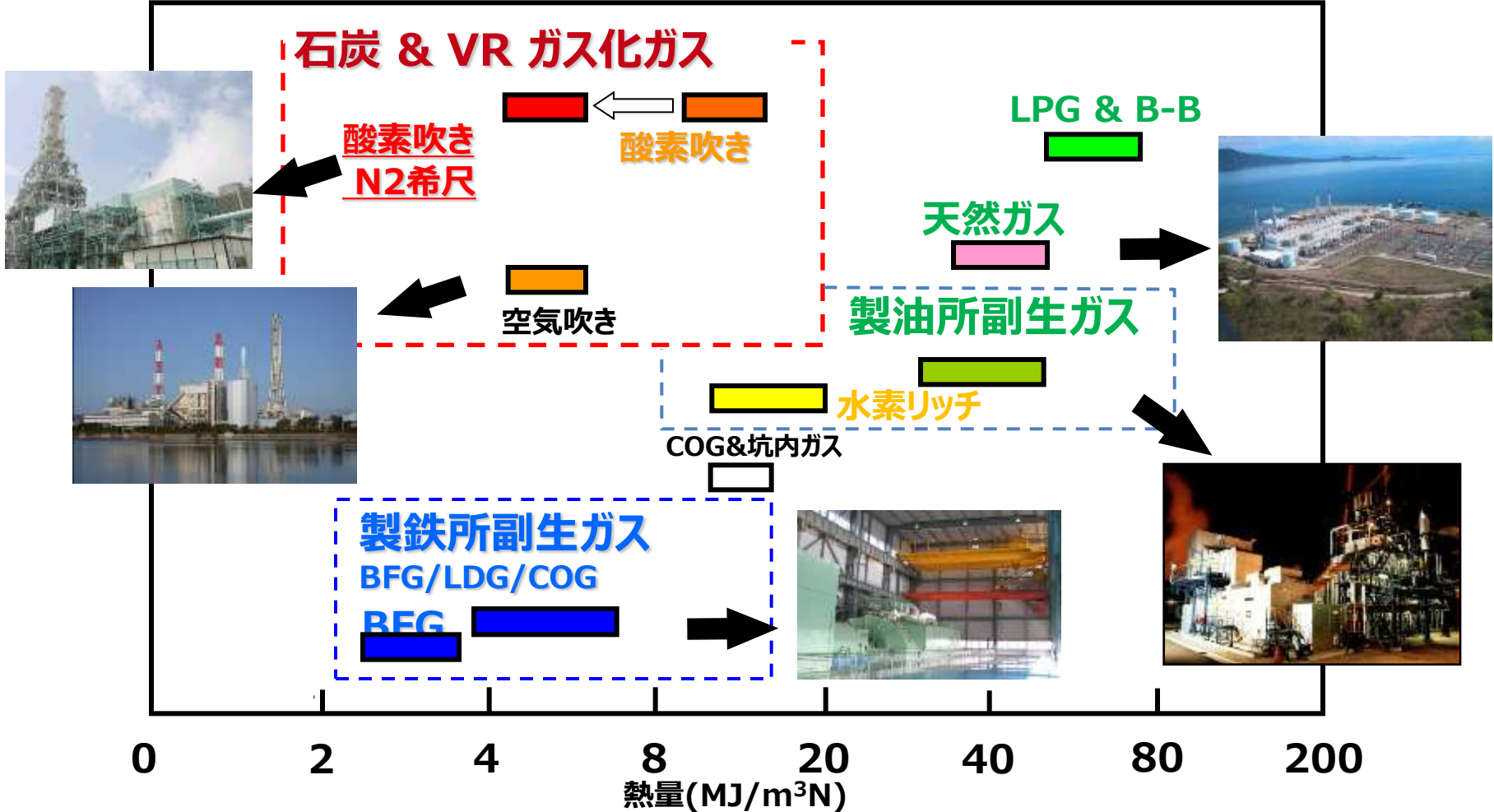
- ガスタービンは燃料電池と比較して、不純物に対する適合性が高い事が特徴。
- 水素改質に必要なコストを低減できる可能性がある。

	当社GT燃料標準規格	水素燃料規格 ISO-14687-2 から抜粋
		
総HC(炭化水素)	上限なし	2ppm
二酸化炭素	4%(40,000ppm)	2ppm
硫黄化合物	0.5%(5,000ppm)	0.004ppm
ホルムアルデヒド	規定なし(※)	0.01ppm
ギ酸	規定なし(※)	0.2ppm
アンモニア	規定なし(※)	0.1ppm

※規定はないが、燃焼する成分である為、運用可能

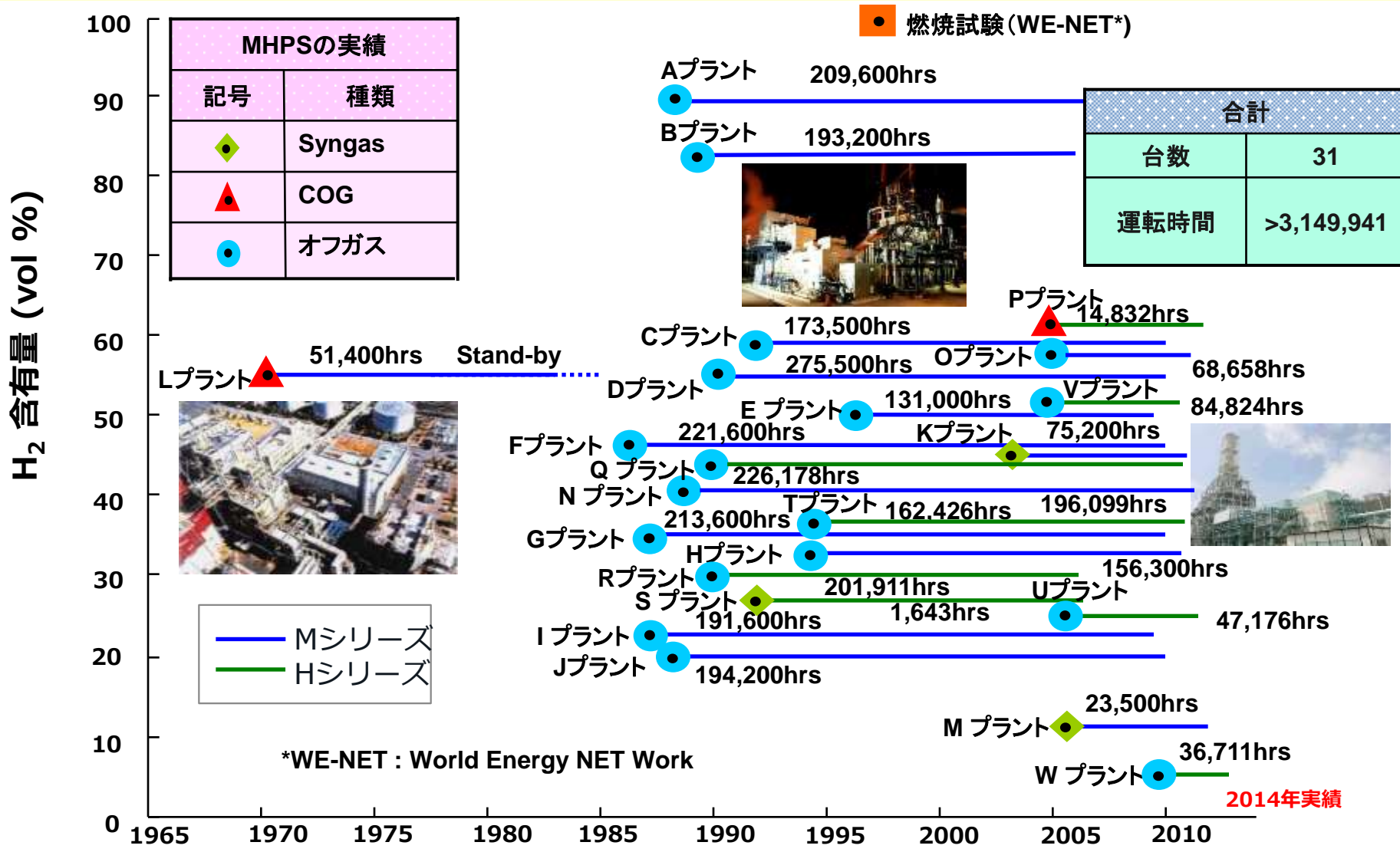
2.カーボンフリー社会を目指して ～ガスタービンにおける水素リッチ燃料の適用実績～

- 幅広い発熱量の燃料に対応実績を持つ
- 水素リッチ燃料についても実績有(次項)



2.カーボンフリー社会を目指して ～ガスタービンにおける水素リッチ燃料の適用実績～

- 水素含有割合の幅広い実績を持つが、いずれも小規模発電が対象



1.MHPSの紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

6.その他の取り組み

3.大型ガスタービン燃焼器について

～大型ガスタービンと小型ガスタービンとの比較～

		大型・高効率GT	小型GT
システム	☒	<p>コンバインドシステム</p>	<p>コジェネシステム</p>
	特徴	<p>GT/STのコンバインドで発電効率63%と高い。 STに高温・高圧の蒸気を供給するため GT排ガス温度が高く、タービン入口温度も高い。</p>	<p>発電効率は39%と低いが、総合効率(電気+蒸気)は83%と高い。低温の蒸気を供給するため GT排ガス温度が低く、タービン入口温度も低い。</p>
発電出力		500MW級	30MW級
発電効率		63%	39% (総合効率83%)
年間CO2削減量		145万ton	13万ton
年間水素消費量		22万ton	2万ton
タービン入口温度(T1T)		1600℃級	1250℃級
燃焼器		<p>タービン入口温度が高いため低NOx、逆火設計,燃焼振動対策に高度な燃焼技術を要する</p>	<p>タービン入口温度が低いためNOxは低く、燃焼技術も確立済み</p>

3.大型ガスタービン燃焼器について ～コンバインドサイクルの規模と効率～

コンバインドサイクルの規模を大型化すると、CC熱効率が上昇（改善）する。

①回転機械の規模の効果（GT/ST共通）

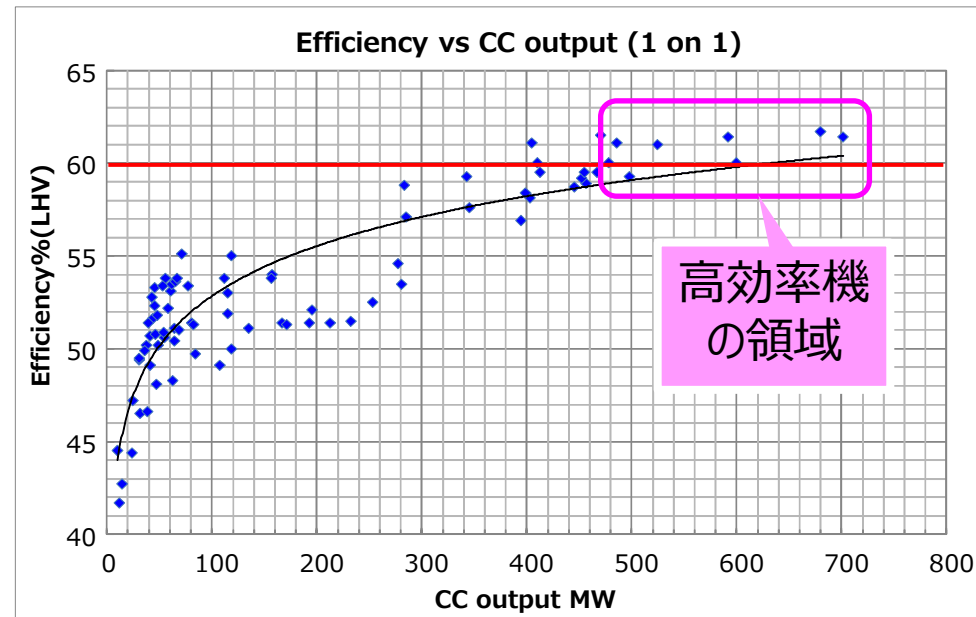
- ・レイノルズ数が大きくなる効果により、粘性壁の影響が薄まる
- ・チップクリアランス、洩れなどセカンダリロスの減少

⇒GTの圧縮機・タービンおよびSTタービンの空力性能が向上

②蒸気タービン単体効率（ST）

- ・規模が大きくなることにより高温化、高圧力化が可能となる。

⇒熱力学的にサイクル効率が上昇

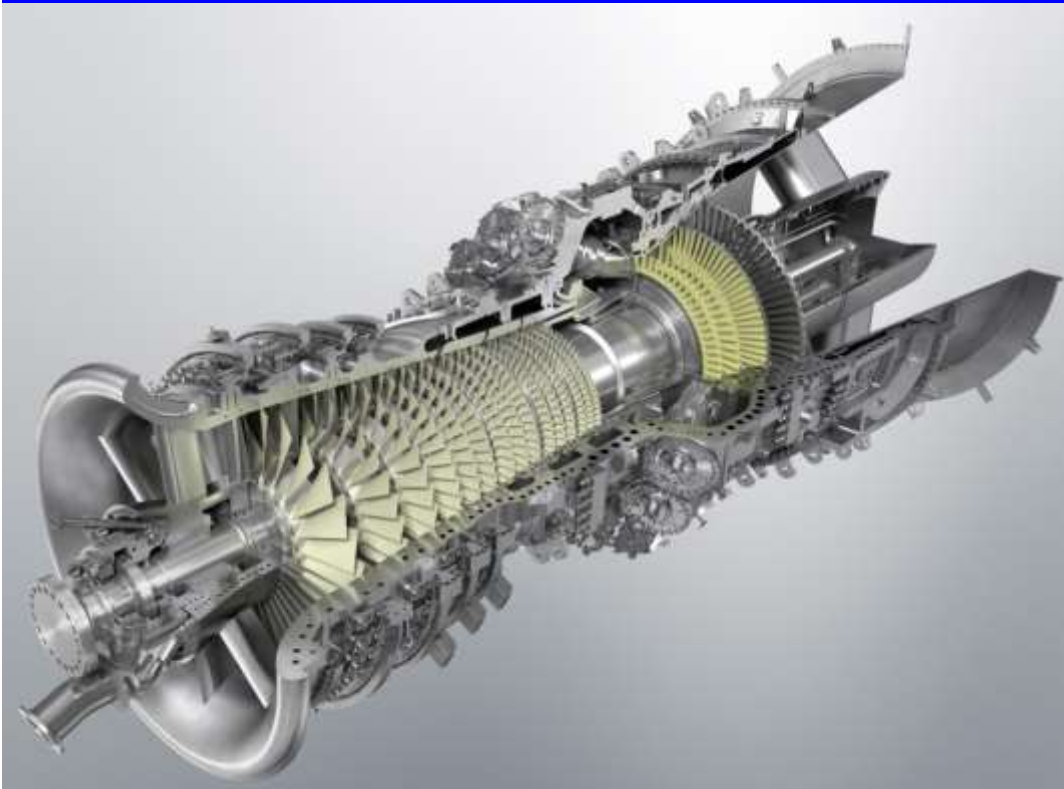


コンバインドサイクルプラント効率と出力の関係

出典：GTW 2014 Gas Turbine Handbookデータより作成

3.大型ガスタービン燃焼器について ～最新大型ガスタービン～

MHPS "JAC" Gas Turbine



■ High Efficiency

- ・501H形技術高圧力比圧縮機 (25:1)
- ・性能・運用性に優れた強制空冷燃焼器
- ・先進TBCの超厚膜化

■ High Reliability

- ・運転実績豊富なJ形をベースに開発
- ・J形ガスタービンの実績
 - Reliability at 99.5%
 - 累積運転時間 55 万時間超

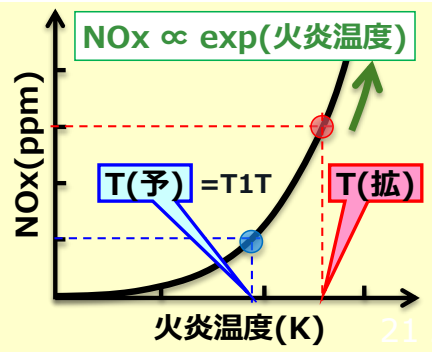
	GT / CC	CC効率
M701JAC (50Hz)	493MW/717MW	63.1%
M501JAC (60Hz)	400MW/575MW	64.0%

3.大型ガスタービン燃焼器について

～低NOx化技術(拡散方式と予混合方式)～

予混合方式 ... 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、**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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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: フラッシュバックリスク
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> CO2削減(高効率)と低NOx化を両立 燃料系統が複雑



1.MHPSの紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

7.その他の取り組み

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

～水素ガスタービン燃焼器開発への要求～

- トレードオフ関係にある多種性能を全て満足する技術開発が必要
- 技術課題への対応と商品としてのバランスを取ることが重要

技術課題への対応



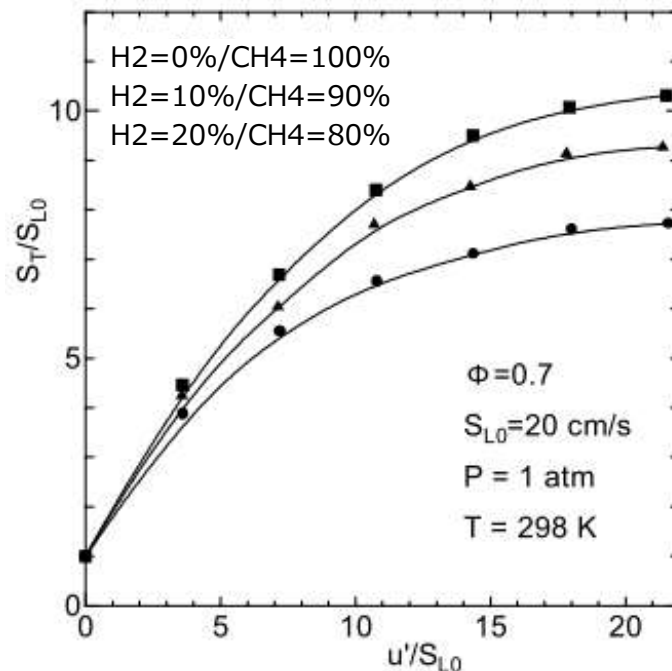
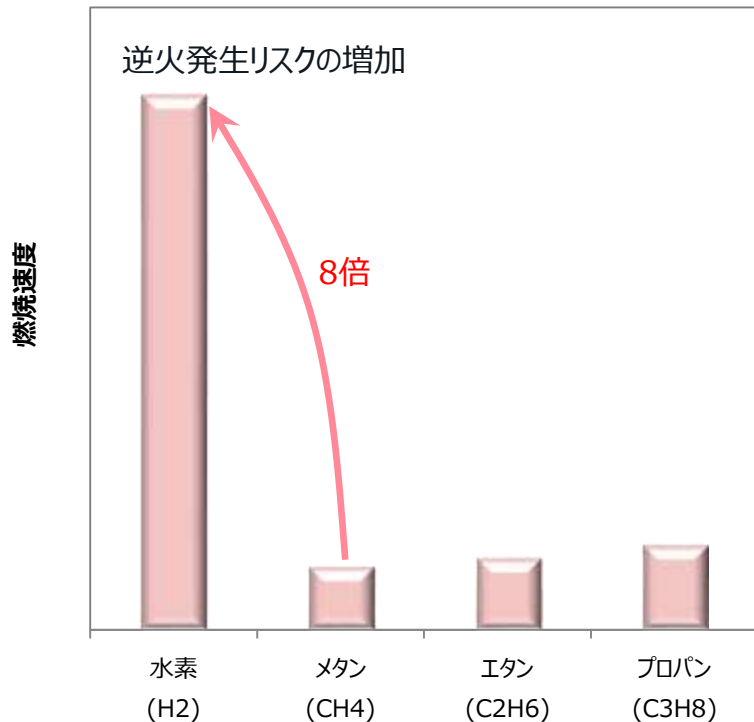
商品性（ユーザ視点）



4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

～水素焚きは何か難しいのか？～

水素は“燃えやすい”燃料で、天然ガスより燃焼速度が上昇するため**フラッシュバックリスクが増加**する。水素混焼割合が増えると、燃焼速度は増加する。



水素/メタン混合気の燃焼速度計測結果例

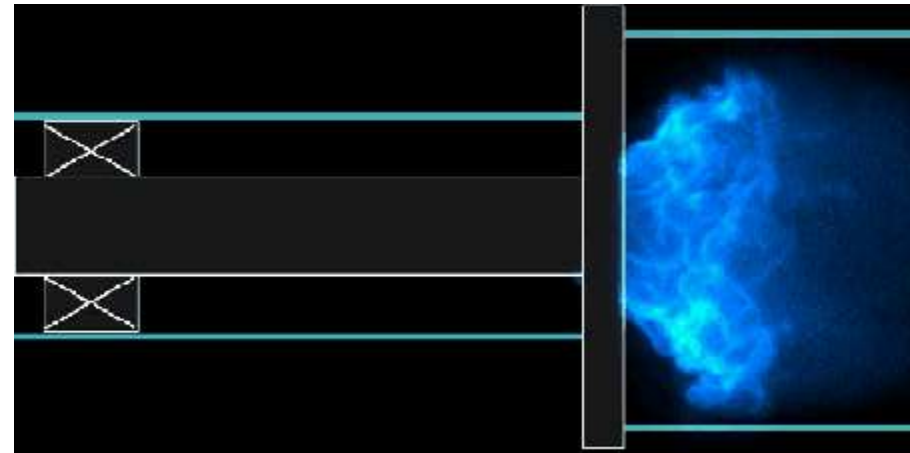
出典:

Improving the turbulent combustion performance of lean methane mixture by hydrogen addition, Kido Hiroyuki, Kyusyu University

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

～フラッシュバック(逆火)とは？～

フラッシュバック(逆火)とは、火炎が本来の安定保炎位置から上流に遡上することで、燃焼速度が燃焼器内空気流速より速いと発生し、部品損傷に至る

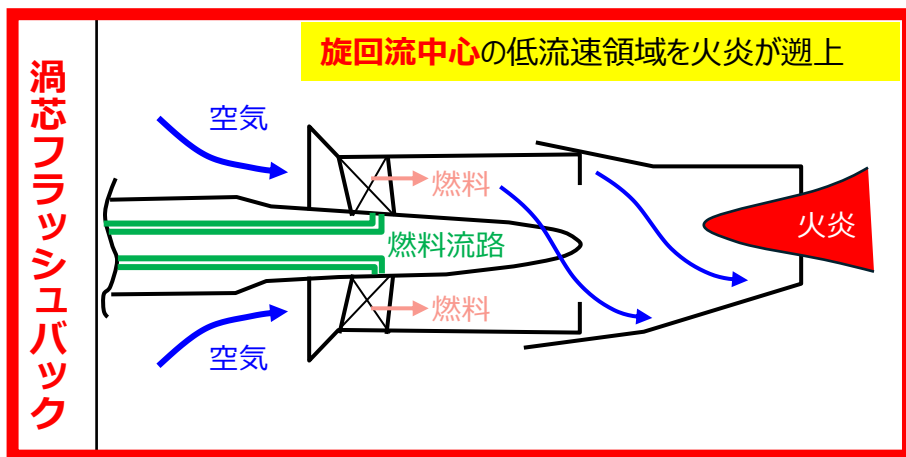


出典：テキサス大Flowfield Imaging Laboratoryのサイト
<http://research.ae.utexas.edu/FloImLab/boundarylayerflashback.php>

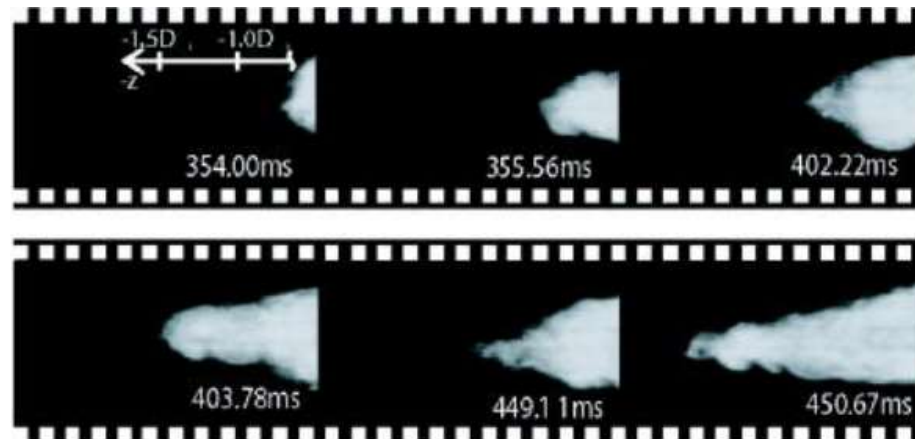
4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

～当社DLN燃焼器での逆火リスク～

旋回流(燃料混合に利用)を伴う燃焼におけるフラッシュバックは、旋回中心を火炎が遡上する“渦芯フラッシュバック”であり、水素混焼時において最も高リスクになる。



モデルバーナによる渦芯フラッシュバックの様子

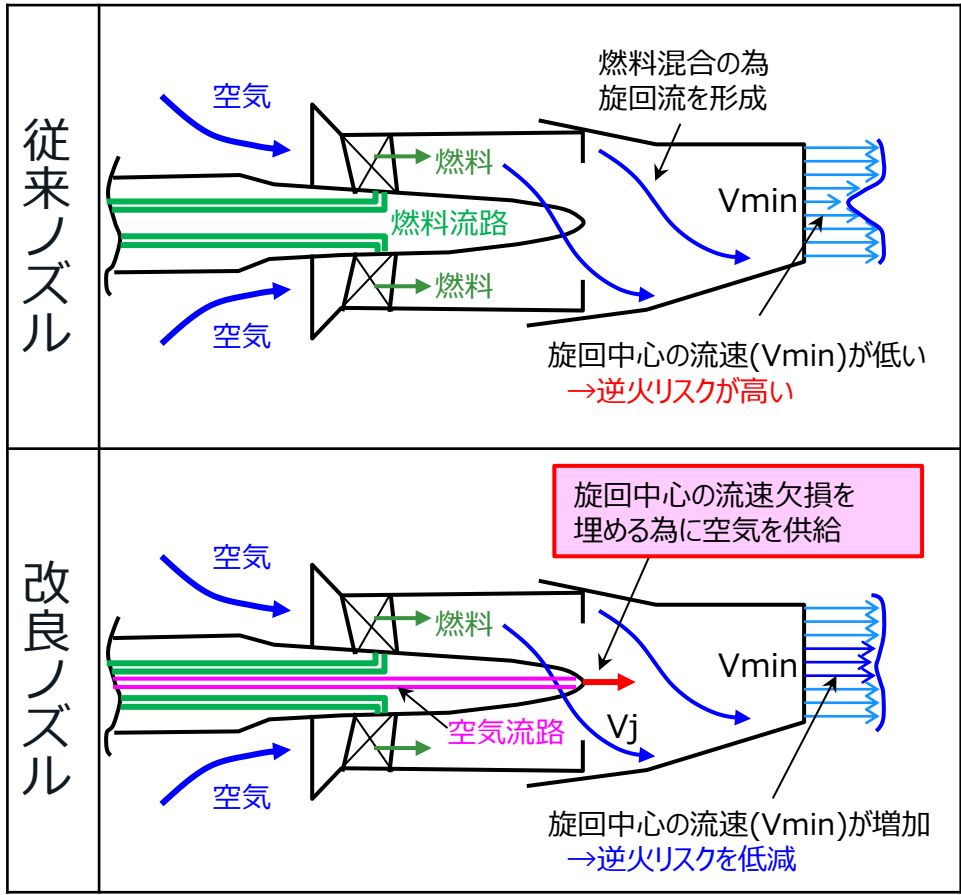


参考文献

Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner With Cylindrical Mixing Zone
F. Kieseewetter, M. Konle and T. Sattelmayer
J. Eng. Gas Turbines Power 129(4) (Apr 03, 2007)

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術 ～旋回中心フラッシュバック対策～

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



改良ノズルの概要図

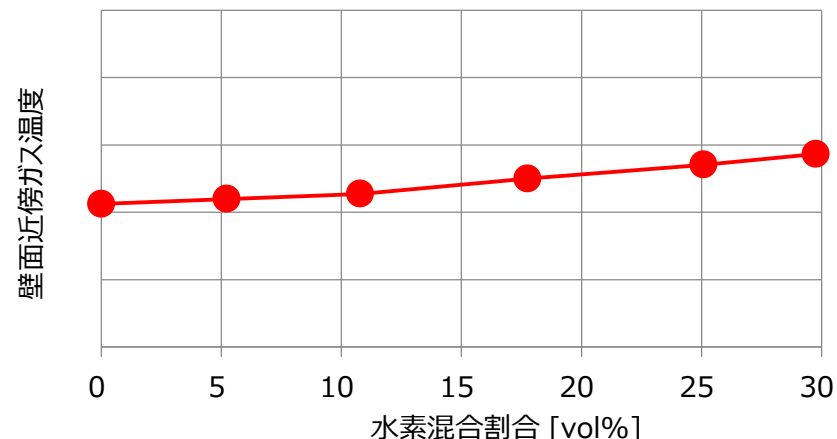
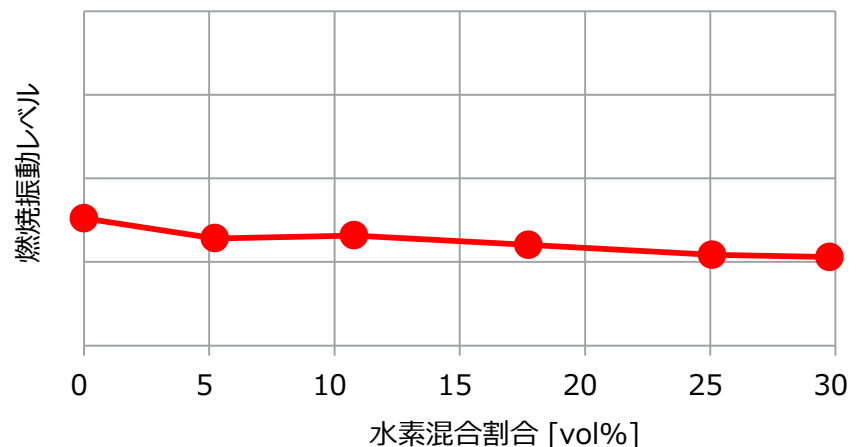
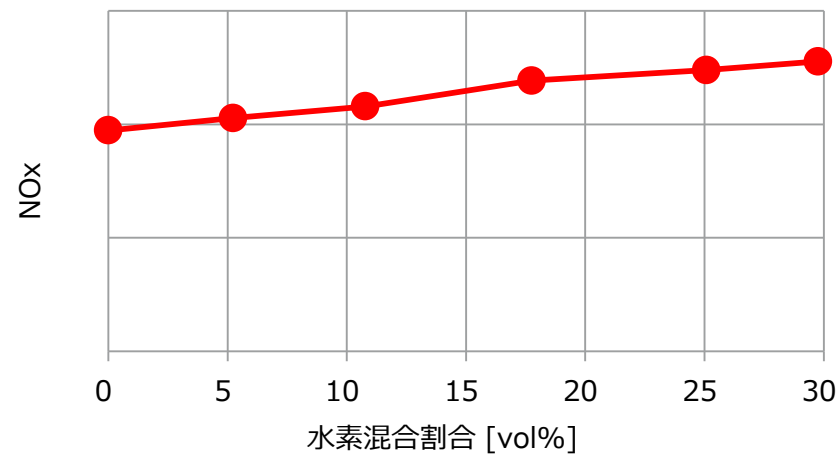
4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

～実機圧力燃焼試験結果～

- 実燃焼試験にて、渦芯フラッシュバック防止ノズルに関する燃焼特性を検証
- **水素混合割合30%条件において、フラッシュバック発生の兆候無く、安定運用が可能な事を確認した。**
- NOx、燃焼振動は共に運用が可能な範囲にあることが確認された。



タービン入口温度=1600℃条件



4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術 ～水素30%混焼試験に成功～ 水素ガスタービンプレスリリース①



<https://www.mhps.com/jp/news/20180119.html>

大型高効率ガスタービンで水素30%混焼試験に成功 発電時のCO₂排出削減に貢献

- ◆ 従来の天然ガス火力発電所に比べてCO₂排出量を10%低減
- ◆ NEDO助成事業により開発した燃焼器などで安定的な燃焼およびNOx低減を実現

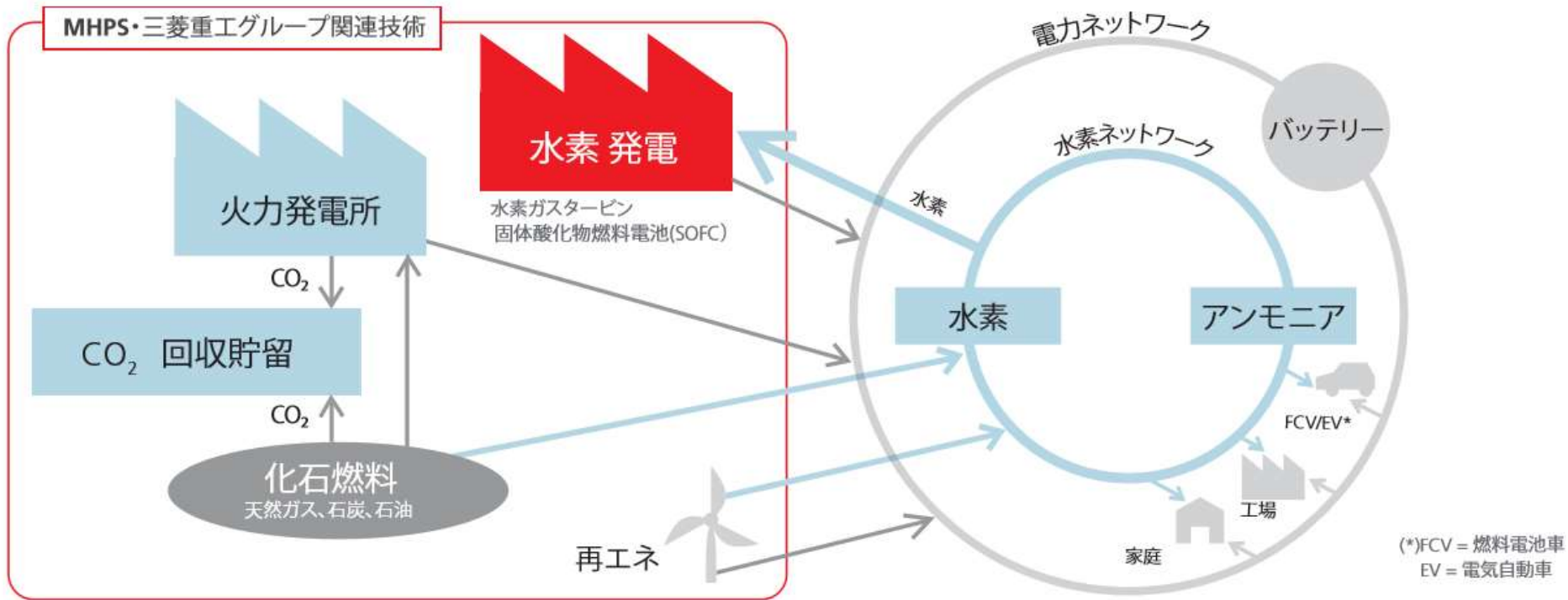
2018年1月19日発行 第190号

三菱日立パワーシステムズ（MHPS）は、発電用大型ガスタービンの開発において30%の水素混焼試験（注1）に成功しました。水素燃焼用に新たに開発した燃焼器（バーナー）などにより、天然ガスに水素を混ぜた場合でも安定的に燃焼できることを確認したもので、水素30%混焼により従来の天然ガス火力発電と比べて発電時のCO₂排出量を10%低減することが可能となります。

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術 ~水素30%混焼試験に成功~ 水素ガスタービンプレスリリース②

MHPSの水素発電技術と水素ネットワークの関係図

- 水素30%混焼の実証^(※)に成功(70万kWの出力に相当するタービン入口温度1,600℃の条件)
 (※)NEDOの助成事業である「水素社会構築技術開発」の一環
- 従来の天然ガス火力発電所に比べてCO2排出量を10%低減
- 大量かつ安定的な水素需要を生む水素発電で、国際的な水素サプライチェーンの構築を牽引



1.MHPSの紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

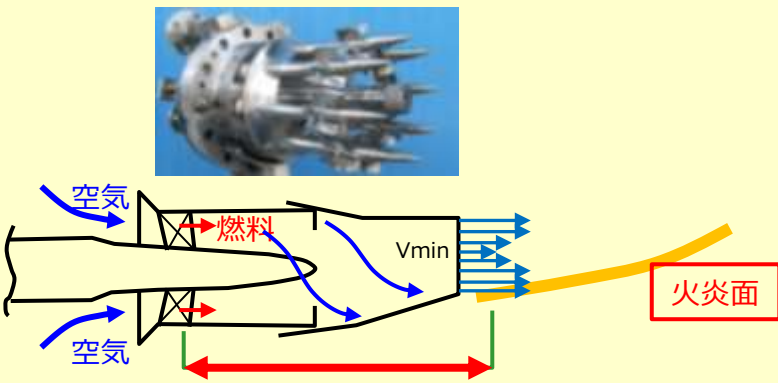
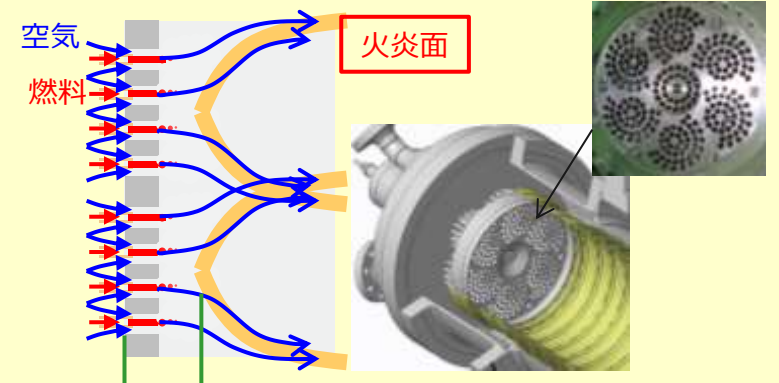
5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

7.その他の取り組み

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術
 ～水素専焼クラスタ燃焼器の開発～

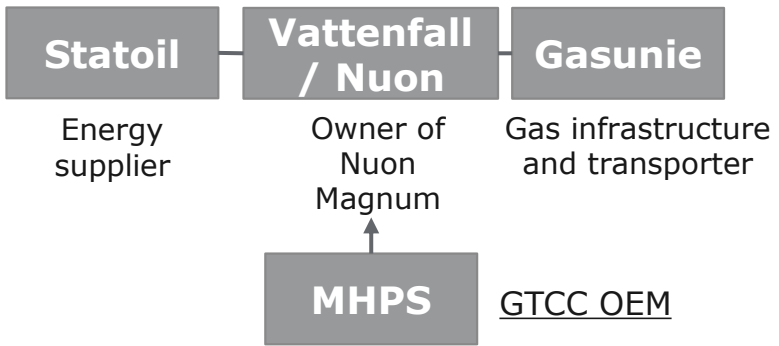
- 水素が更に高濃度含有されると、フラッシュバックリスクが高まる
- 水素専焼燃焼器として、フラッシュバック耐性の高いマルチクラスタを開発中

形式	混焼GT向け燃焼器 (マルチノズル)	専焼GT向け燃焼器 (マルチクラスタ)
構造	 <p>燃料噴射孔から火炎面までの距離が長い →火炎伝播可能な領域が広い</p>	 <p>燃料噴射孔から火炎面までの距離が短い →火炎伝播可能な領域が狭い</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 火炎伝播可能な領域が広く、専焼(100%)においては、適さない。 	<ul style="list-style-type: none"> 旋回混合を用いず、火炎伝播可能な領域が狭いため、フラッシュバックに対する耐性が高い

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術 ~オランダNUON 大型ガスタービンでの水素専焼プロジェクト~

オランダNUONで天然ガス焚きGTCC発電所の水素焚き転換プロジェクトに参画。

PJ 体制



Gas Turbine Combined Cycle(GTCC):440MW×3台



Vattenfall's gas power plant Magnum. (Photo: Koos Boertjens / Vattenfall)

スケジュール



5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術 ～オランダNUON 大型ガスタービンでの水素専焼プロジェクト～



三菱日立パワーシステムズ

<http://www.mhps.com/jp/news/20180308.html>

オランダで天然ガス焚きGTCC発電所の水素焚き転換プロジェクトに参画 年間130万トンのCO₂排出削減に向けてFS（実現可能性調査）を実施

- ◆ 出力132万kW級（3系列合計）のヌオン・マグナム発電所（フローニンゲン州）が対象
- ◆ 2023年までに3系列のうち1系列を100%水素専焼へと切り替え

2018年3月8日発行 第201号



Vattenfall's gas power plant Magnum. (Photo: Koos Boertjens / Vattenfall)

発電所運営	Nuon(Vattenfall) オランダ
水素供給・CCS	Statoil ノルウェー
オランダ国内 ガス配送	Gasunie オランダ
GT改造・機器供給	MHPS

Statoil社 HPより

～大型ガスタービン 水素混焼および水素専焼 発電～

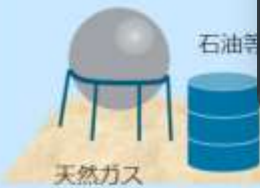
サプライチェーン

製造

再生エネルギー



化石燃料
石油・天然ガス



Step 1 (開発終了)

水素混焼 $\sim 30\% H_2$

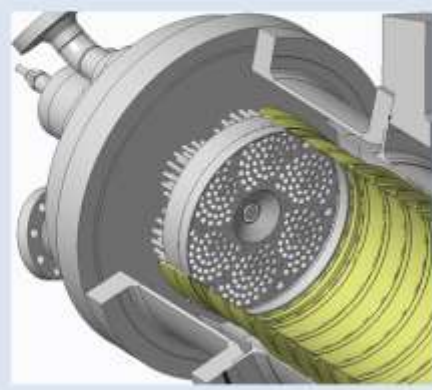
LNG 適用 拡張

Step 2 (~ 2024)

Step 3 (~ 2030)

水素専焼, $100\% H_2$

マルチクラスタ燃焼器をベースに
 $1600^{\circ}C$ 以上の高温化にむけ開発中



NEDO : 水素利用等先導研究開発事業

利用

水素ステーション
燃料電池自動車



ロジエネ
発電(H_2, NH_3)



産業利用
(工業炉)



1.MHPSの紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

7.その他の取り組み

6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

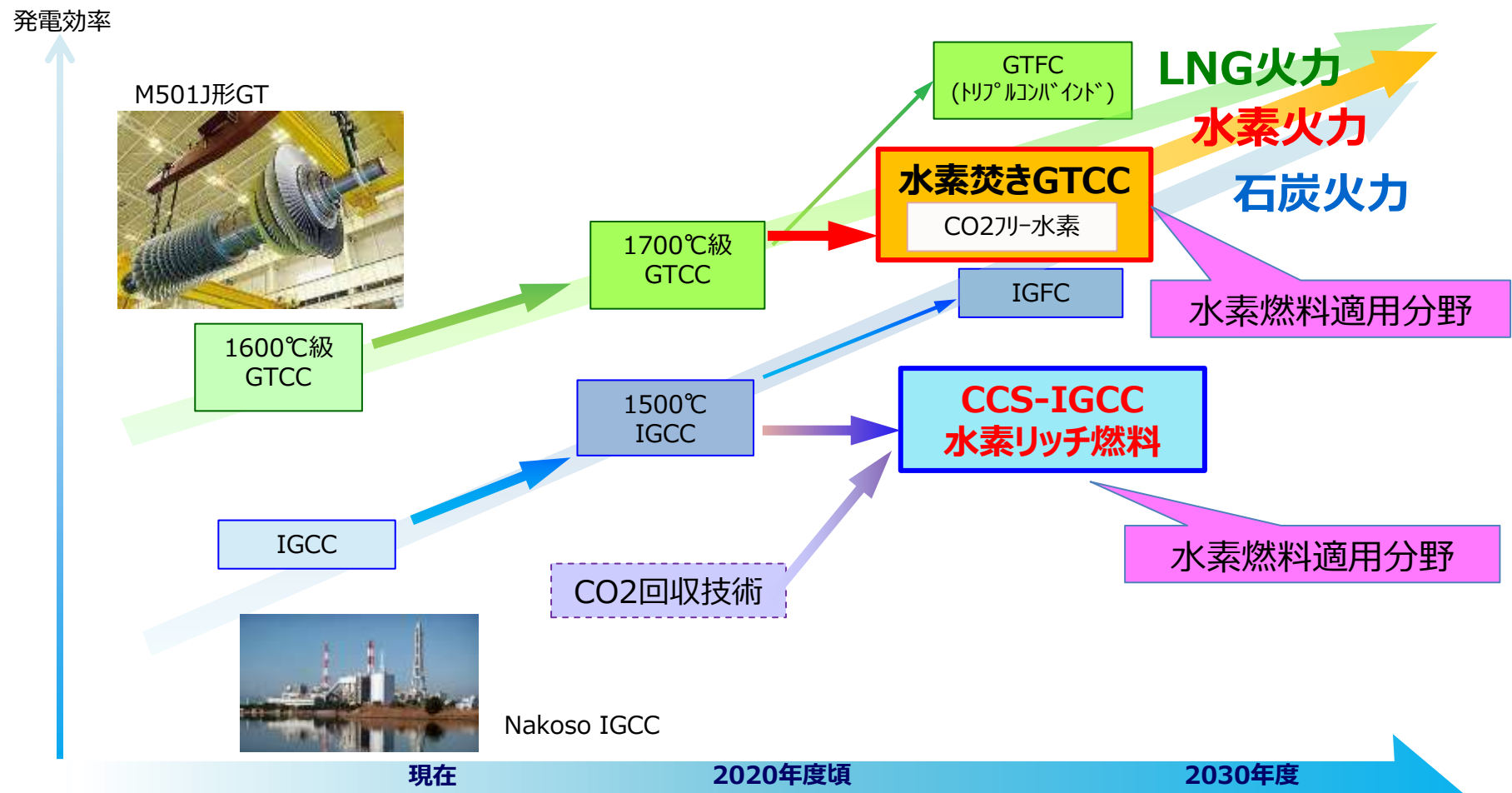
～IGCCの実績～

これまでにIGCCプラントの多くの実績があり、福島IGCCプロジェクト(500MW×2plant)にも参画。



6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開 ～IGCC-CCS～

石炭ガス化複合発電(IGCC)はCCSとの組み合わせによりCO2フリーとなる。

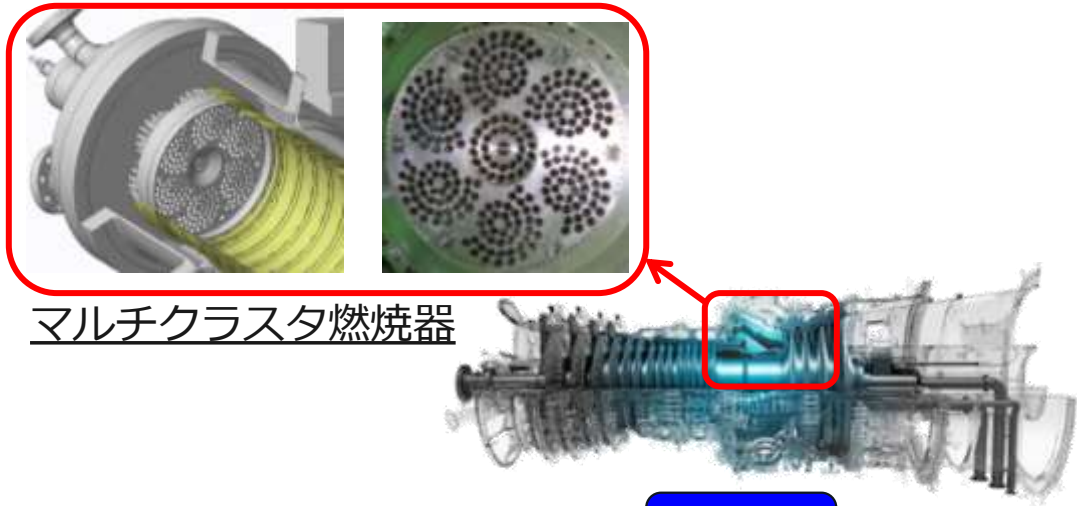


* IGCC(Integrated coal Gasification Combined Cycle) : 石炭ガス化複合発電
* CCS(Carbon-dioxide Capture and Storage):CO2回収・貯蔵

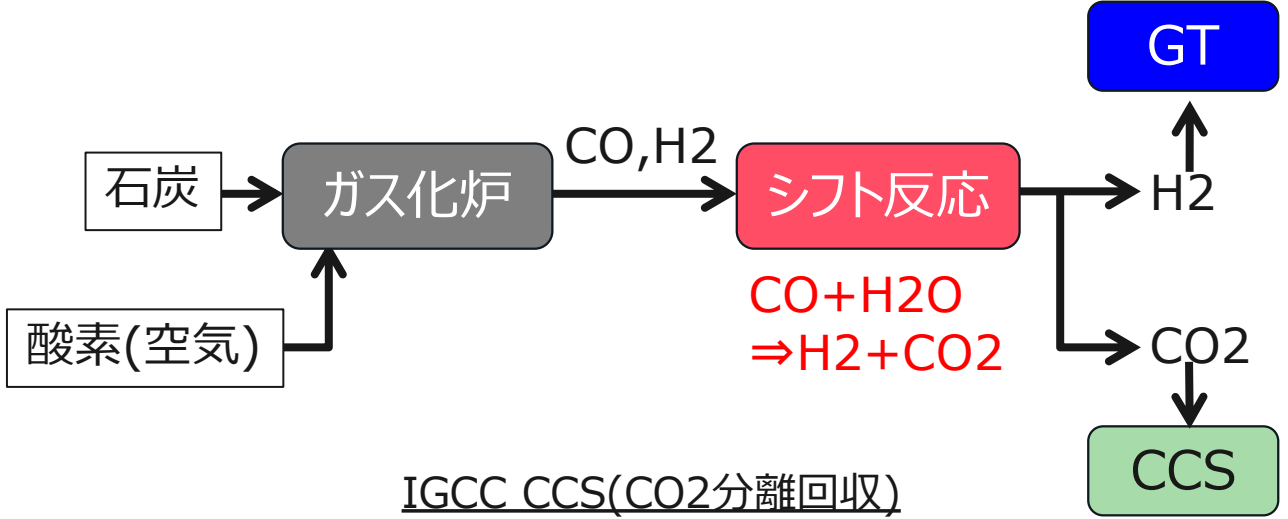
6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

～IGCC-CCS～

IGCC CCS比率が高くなると水素リッチとなるが、水素専焼マルチクラスタが適用可能。



マルチクラスタ燃焼器



IGCC CCS(CO2分離回収)

1.MHPSの紹介

2.カーボンフリー社会を目指して

3.大型ガスタービン燃焼器について

4.大型ガスタービン燃焼器 水素混焼燃焼向け技術

5.大型ガスタービン燃焼器 水素専焼燃焼向け技術

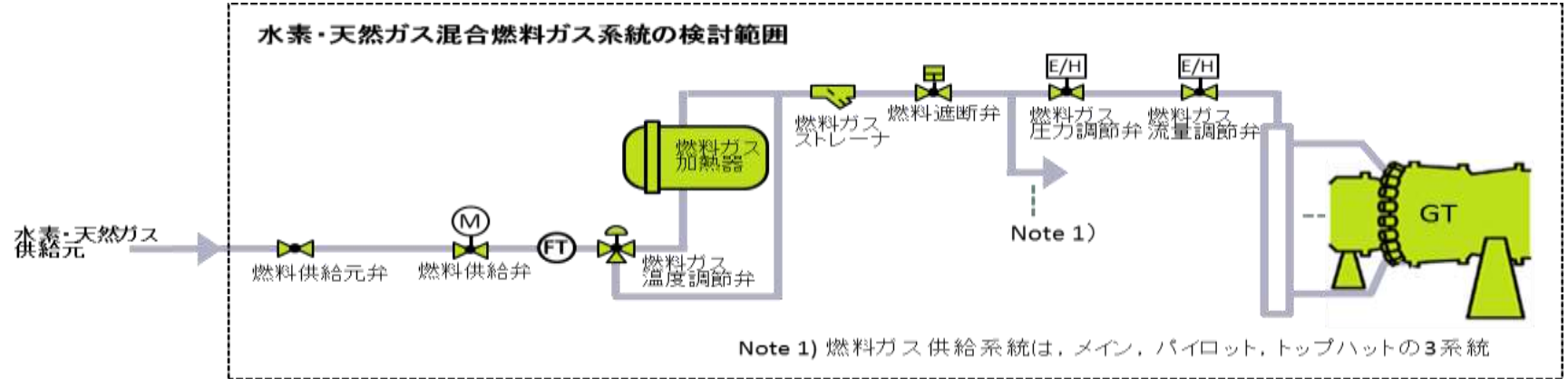
6.石炭ガス化複合発電(IGCC)への展開

7.その他の取り組み

7.その他の取り組み

～水素発電事業Feasibility Study～

- 我が国における水素発電導入可能性に関する調査 (NEDOプロ事業 2018-2019)
 - －既設火力発電設備を対象とし、水素天然ガス混焼発電実現可能性について、調査



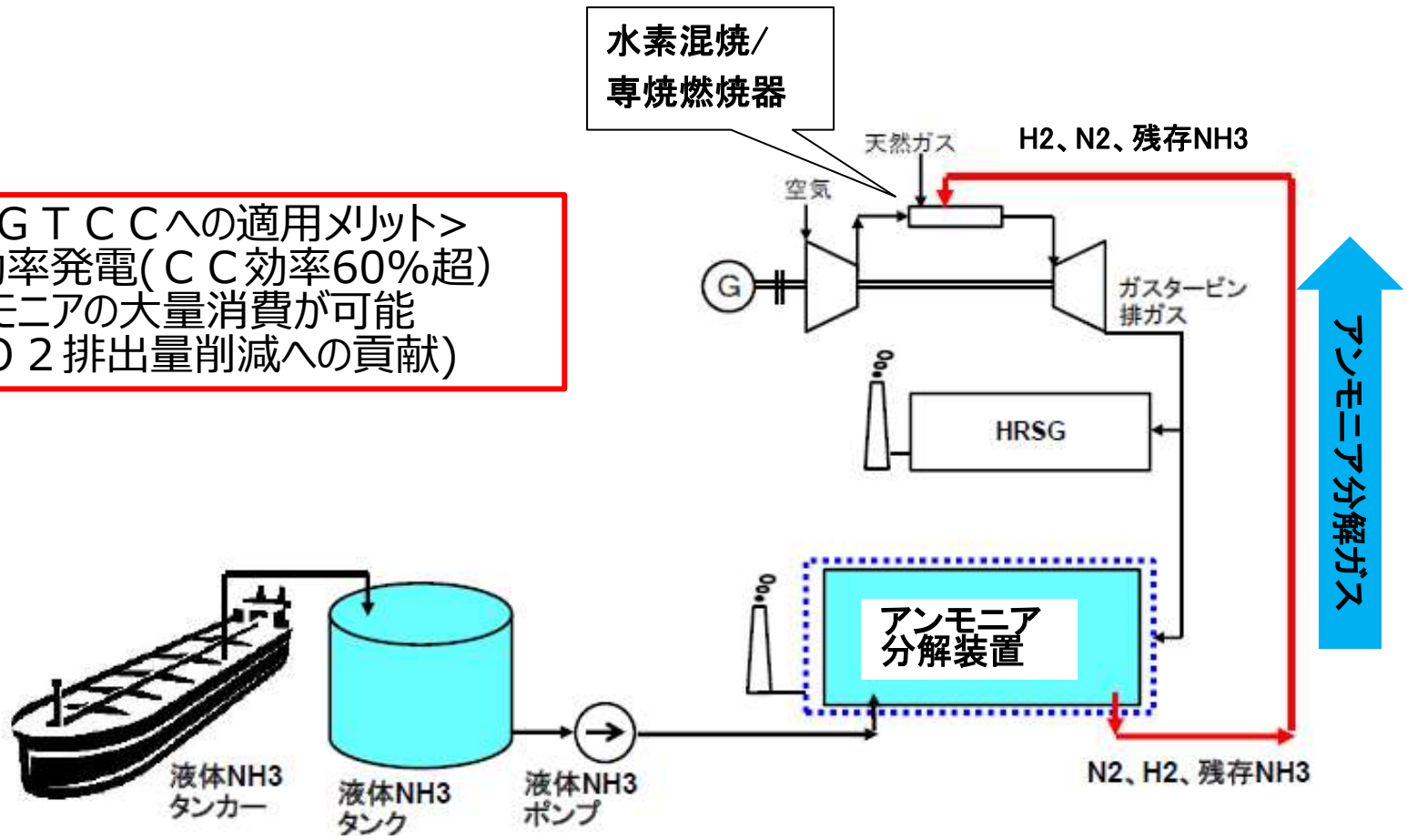
7.その他の取り組み ～SIP アンモニア事業～

- 既存ガスタービンシステムに必要最小限の改造を加えアンモニアを利用可能とするシステム
- ガスタービンの排熱を利用してアンモニアを水素と窒素に分解し、水素混焼ガスタービンへの適用
- 将来的には水素専焼ガスタービンを適用し、燃料全てをアンモニア分解水素とすることも可能

SIP「アンモニア利用ガスタービン技術開発」

<大型GTCCへの適用メリット>

- ・高効率発電(CC効率60%超)
- ・アンモニアの大量消費が可能(CO2排出量削減への貢献)

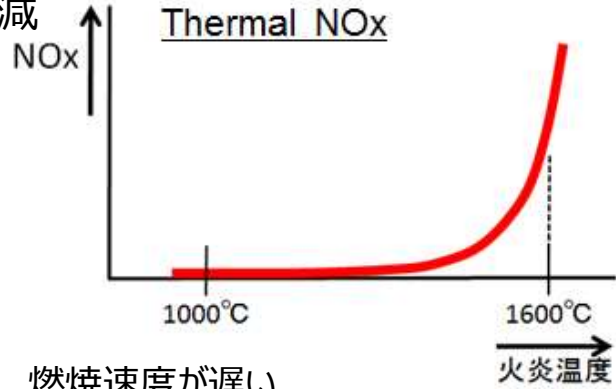
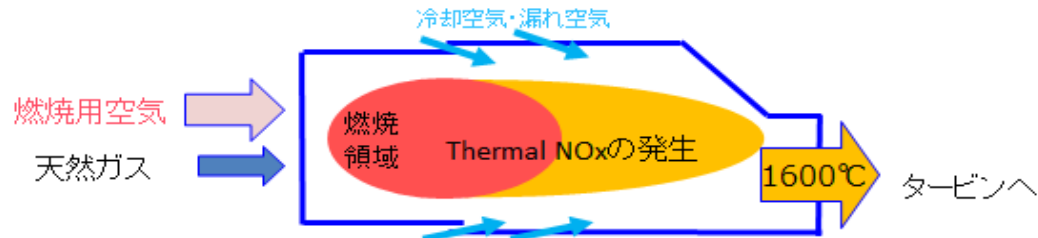


7.その他の取り組み

～大型ガスタービン燃焼器でのアンモニア燃焼～

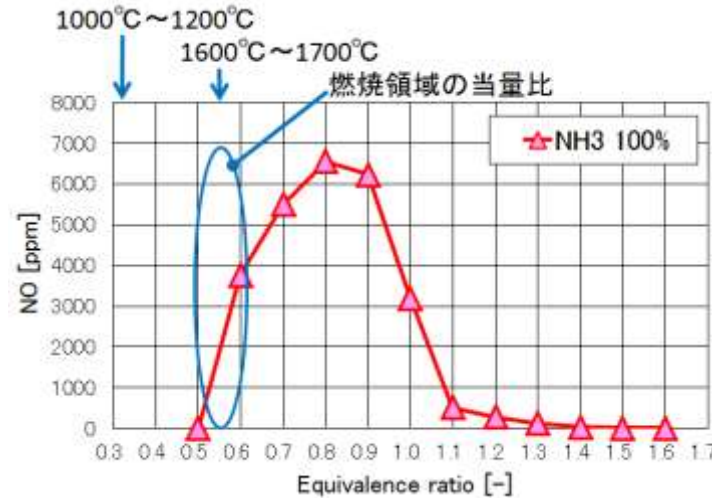
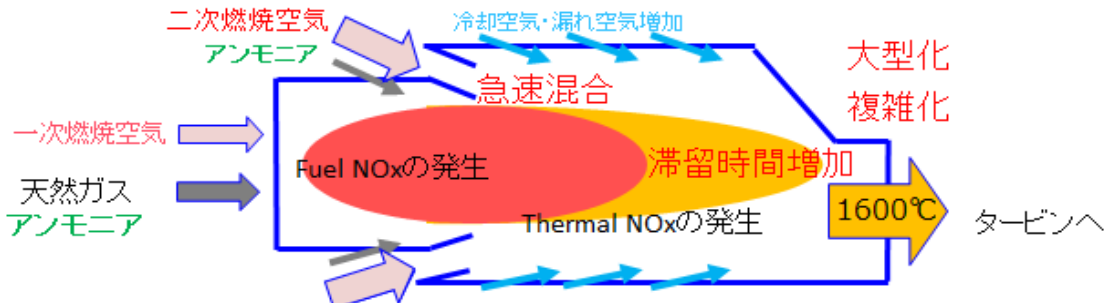
大型・高効率ガスタービン燃焼器でのアンモニアの直接燃焼は技術課題が多い

- 大型ガスタービンの燃焼器(天然ガス焚き)
燃焼温度の高温化による Thermal NOx増加, 燃焼振動の抑制がキーポイント
- 希薄予混合燃焼方式を採用 → 希薄化、均一混合、滞留時間削減



- 大型ガスタービン燃焼器でのアンモニアの燃焼・・・Fuel NOxの発生, 燃焼速度が遅い。



- Thermal NOxとFuel NOx双方の抑制が必要
- 燃焼器の大型化・複雑化 (二段燃焼等)
 - 冷却空気の増加や, 二段燃焼用の空気が必要
 - 滞留時間の増加 / 急速混合の技術

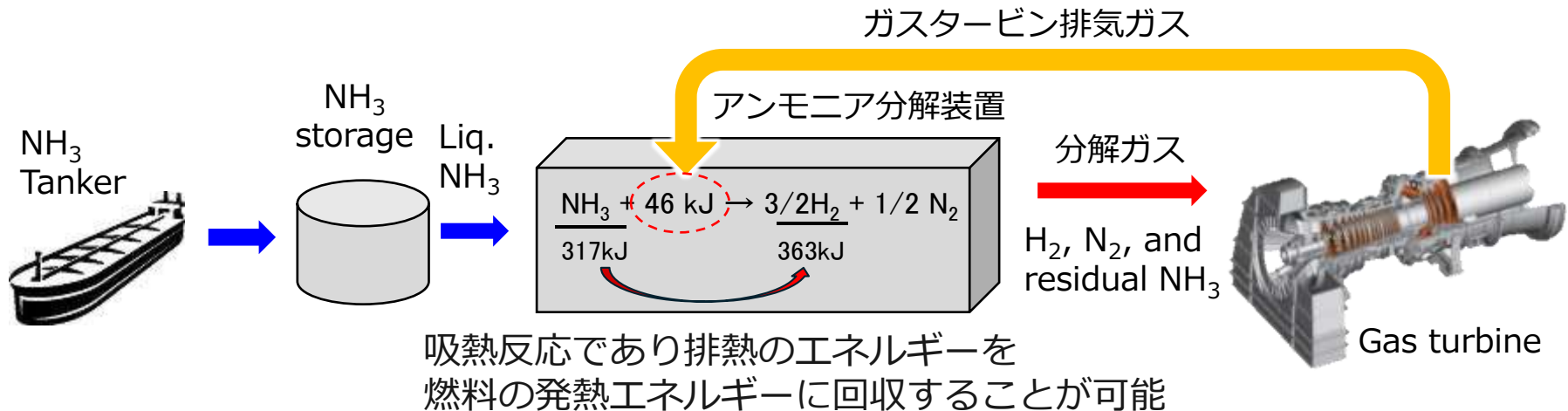


アンモニア燃焼時のNOx発生量(圧力20ata)

7.その他の取り組み ～SIP アンモニア事業～

- ガスタービンの排ガスの熱を利用してアンモニアを水素と窒素に分解し、既に実用化されている水素混焼のガスタービン燃焼器により燃焼させる
- 将来に水素専焼燃焼器が実用化されれば、燃料の全てをアンモニア分解水素とすることも可能

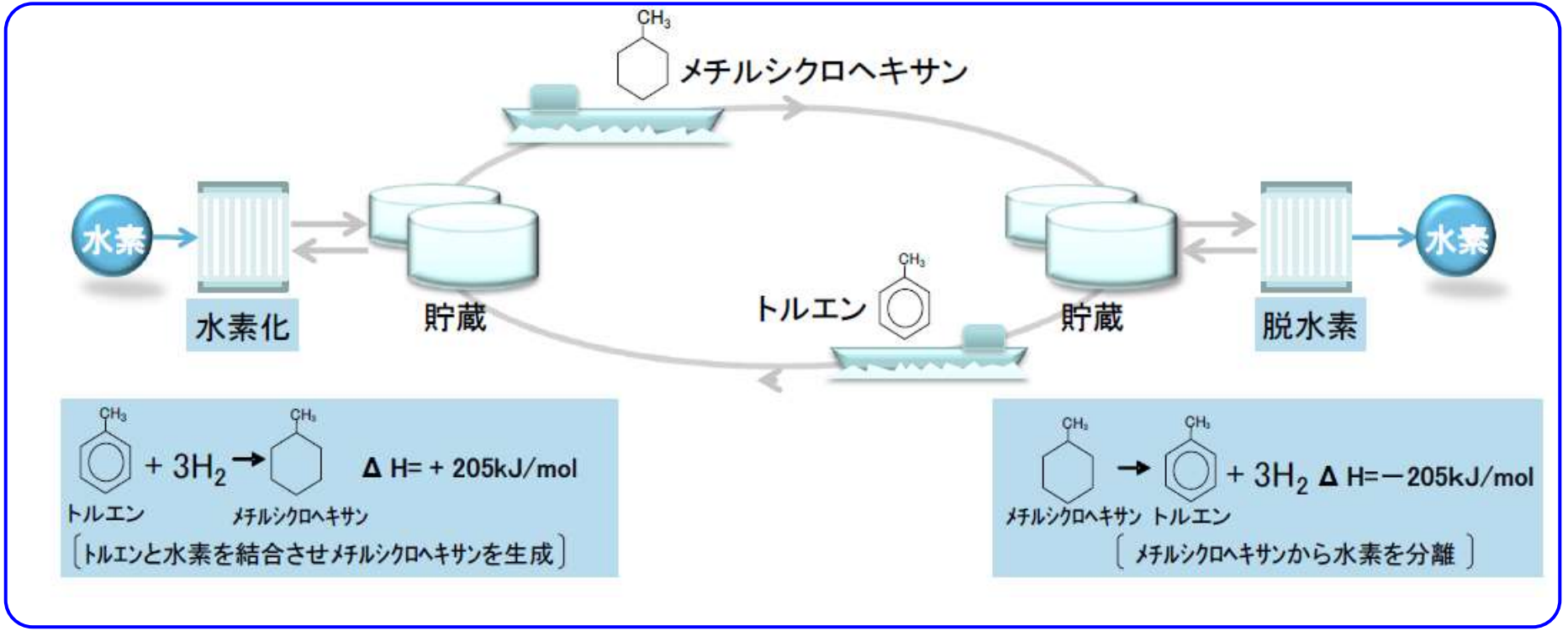
	Pre-mix combustor (H ₂ & LNG Co-firing)	Multi Cluster burner (100% H ₂ firing)
燃焼器 タイプ		



7.その他の取り組み

～水素サプライチェーン構築へも参画～

- MCH(メチルシクロヘキサン)を用いた水素サプライチェーンの構築 (NEDOプロ実証事業 2015-2020)
 - 助成先 千代田化工建設
 - 共同研究先 三菱商事 三井物産
 - 研究協力先 日本郵船、三菱日立パワーシステムズ、日本政策投資銀行

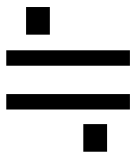


7. その他の取り組み

～水素ガスタービンの低純度水素への適用～

- ガスタービンは、不純物に対する適合性が高い
- 水素焼きガスタービンにより消費される燃料水素は大規模かつ安定

GT 出力500MW 効率60%
 20vol%水素混焼プラント 1基
 水素消費量：1.4t/h



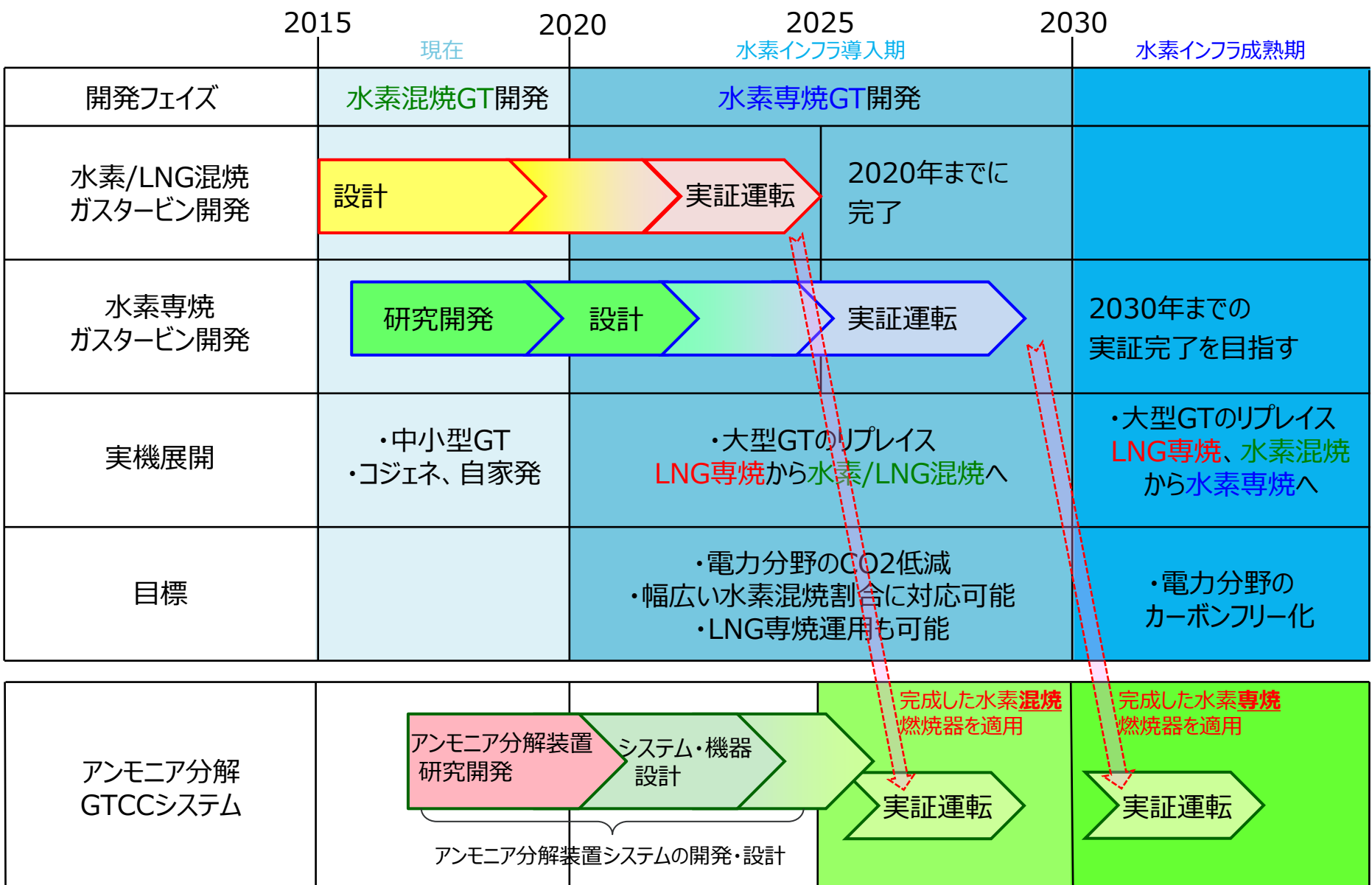
燃料電池自動車
 10～13万台



	当社GT燃料標準規格	燃料電池水素規格(ISO-14687-2より)
総HC(炭化水素)	上限なし	2ppm
二酸化炭素	4%(40,000ppm)	2ppm
硫黄化合物	0.5%(5,000ppm)	0.004ppm
ホルムアルデヒド	規定なし(※)	0.01ppm
ギ酸	規定なし(※)	0.2ppm
アンモニア	規定なし(※)	0.1ppm

※規定はないが、燃焼する成分である為、運用可能

～大型ガスタービンにおける水素混焼・専焼の開発実証スケジュール～



ご清聴ありがとうございました

