

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～

水素焼きガスタービン開発の取組

2019年2月6日

川崎重工業株式会社

技術開発本部 技術研究所

柏原 宏行



Powering your potential

ご説明の構成

1. 水素利用への動き
2. 水素サプライチェーンのコンセプトと水素インフラ技術展開
3. 水素ガスタービンの開発
4. まとめ

ご説明の構成

1. 水素利用への動き

2. 水素サプライチェーンのコンセプトと 水素インフラ技術展開

3. 水素ガスタービンの開発

4. まとめ

水素利用が国の成長戦略に

- 2014年4月、「エネルギー基本計画」が閣議決定
水素利用が初めて大きく記載
→2018年7月の第5次基本計画ではより具体化
- 2014年6月、経産省は水素・燃料電池戦略ロードマップを策定。「未利用資源褐炭からの水素製造」、「水素発電」が明記
- 2016年3月、経産省は水素・燃料電池戦略ロードマップを改訂。→燃料電池自動車/水素ステーションの普及目標の明確化、水素発電の取組の具体化 等

水素基本戦略（省庁連携**共通シナリオ**）

2017/12/26 **第2回再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議**にて決定 ⇒ 水素利用において、世界をリードしていくため国を挙げて取り組む



首相官邸ホームページより

- 水素を再エネと並ぶ選択肢と位置付け
- 安価な原料から大量製造：褐炭や海外再エネを活用
国際的な液化水素サプライチェーン開発は、**2030年頃の商用化に向けて2020年代半ばまでに商用化実証を実施**
- 燃料電池車・バス・水素ステーションの普及加速
- 水素発電の商用化・大量消費
(水素消費量1,000万トン、発電容量3,000万kW)

ご説明の構成

1. 水素利用への動き

2. 水素サプライチェーンのコンセプトと
水素インフラ技術展開

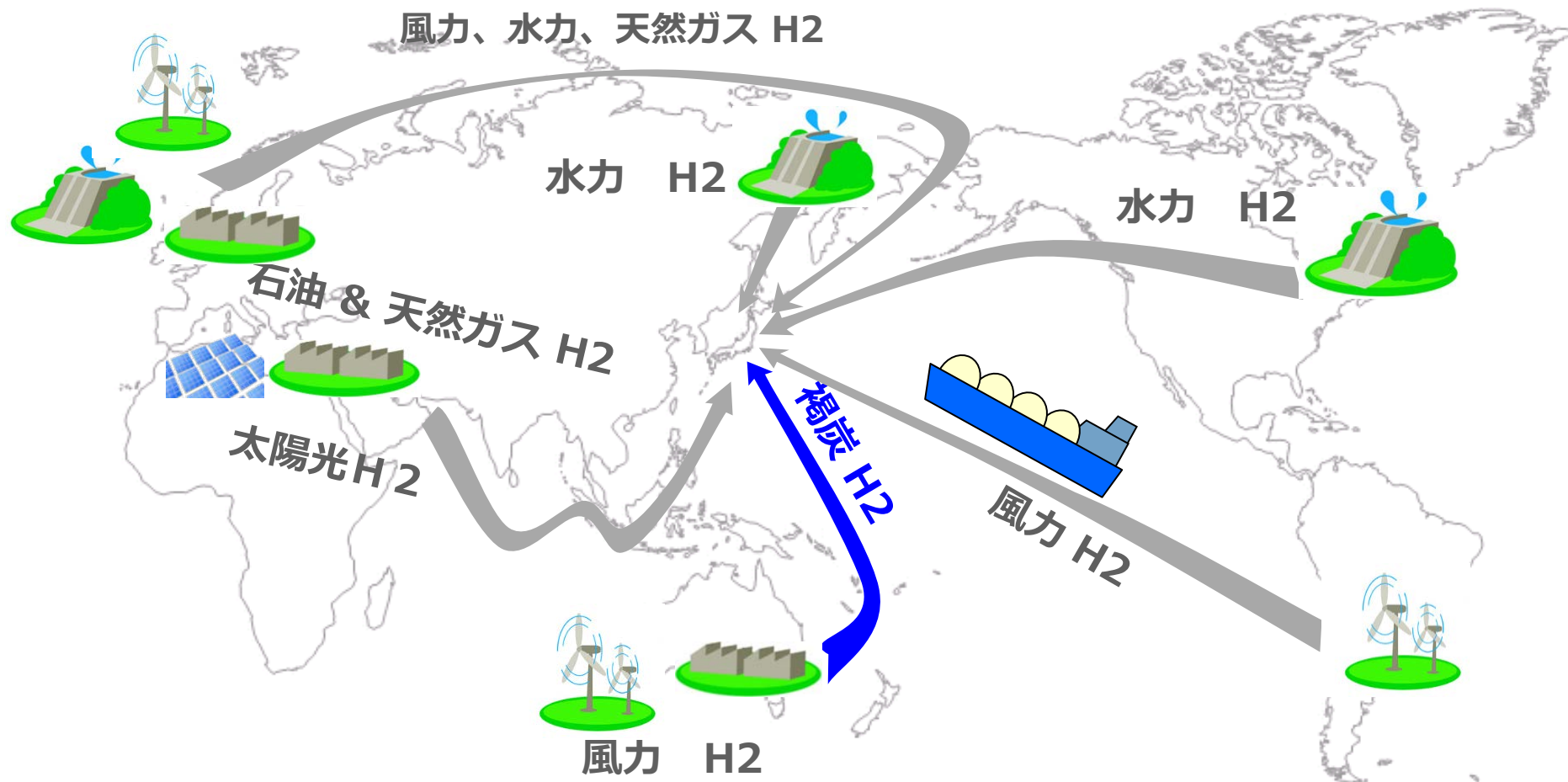
3. 水素ガスタービンの開発

4. まとめ

検討されている海外CO₂フリー水素

水素は様々な資源から製造・調達が可能

電気と比較して、大量、長距離、長期さらにセクター間の融通が可能



CO₂フリー水素チェーンのコンセプト

CO₂の排出を抑制しながらエネルギーを安定供給



CO₂フリー水素チェーンの意義と効用

1 供給安定性

- 褐炭：世界に広く分布、莫大な埋蔵量
現状価格がなく、自主権益の獲得が容易
→ エネルギーセキュリティに貢献（豪州だけで240年分）

2 環境性

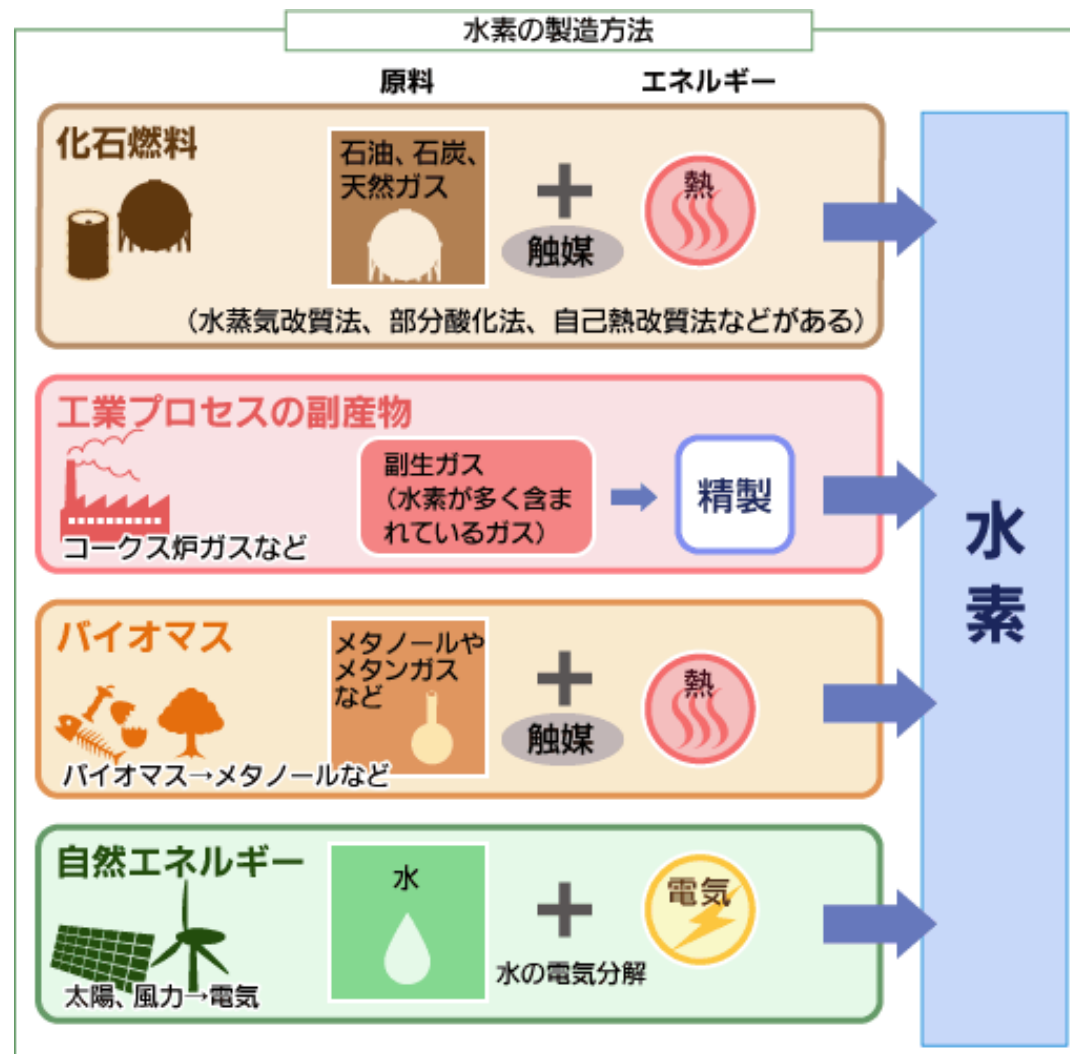
- 使用時にCO₂排出なし（排出は水だけ）
→ “究極のクリーンエネルギー”

3 産業競争力向上

- 日本の技術・製品でエネルギー確保 → 国富流出を抑制
- 水素の普及により、関連産業が成長 → 成長戦略へ貢献
インフラ輸出へ展開

水素の製造

- ◆ 石油、石炭、天然ガスなどさまざまな原料から作ることができる。
- ◆ 再生可能エネルギーからの電力を利用すれば、CO₂を排出することなく、水の電気分解により水素を作ることができる。そのため、化石燃料のように産出国頼みになることなく、エネルギーの安定供給の面でも安心、無くなる心配も無。



出典:NEDO水素エネルギー白書2014

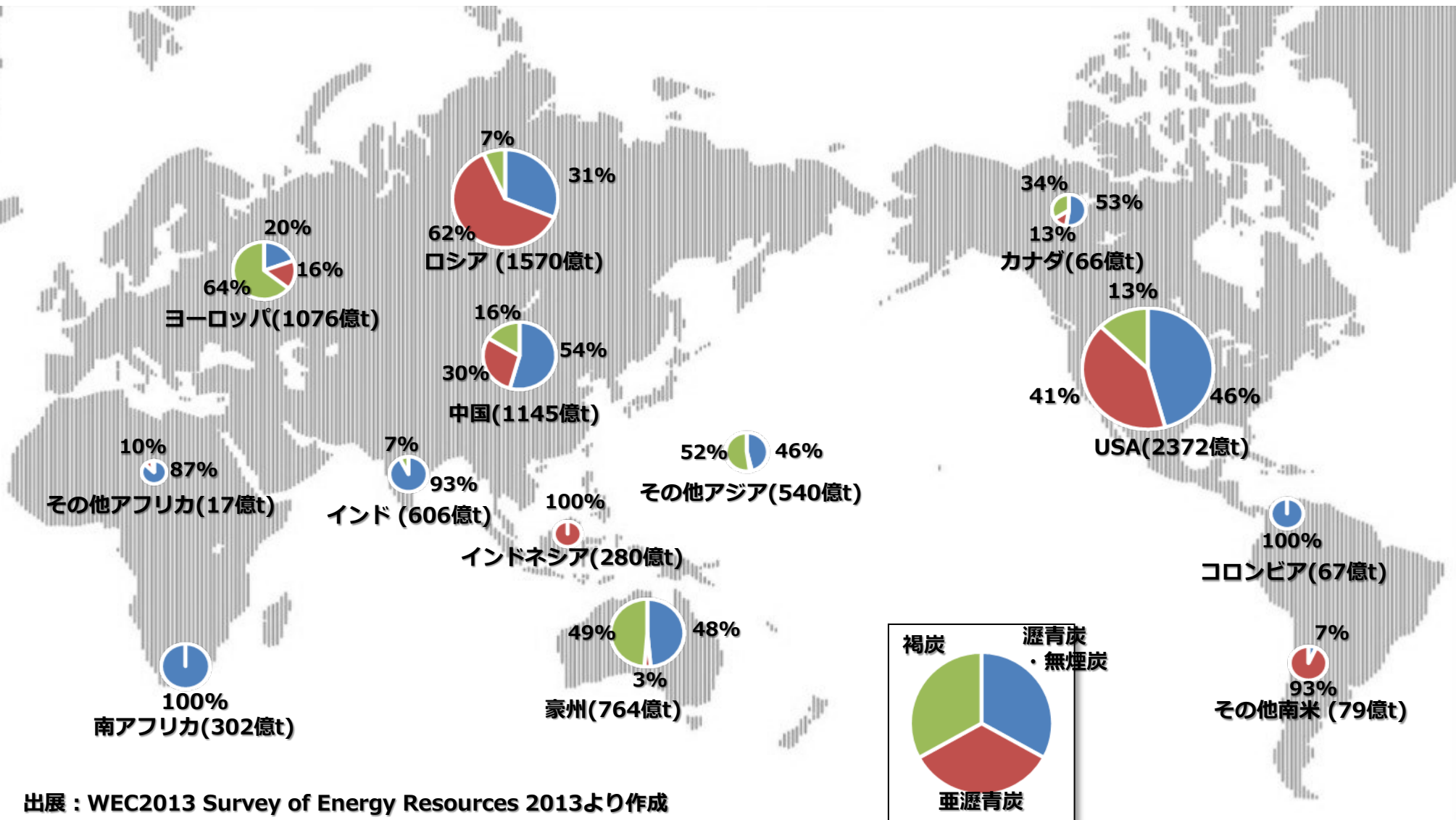
褐炭とは

- 若い石炭で**大量**、また**世界に広く分布**
- 水分量が**50～60%**と多い
- 乾燥すると**自然発火しやすい**ため、**輸送が困難**で、**現地の発電**でしか**利用されていない**



- **輸送できない**ため、**海外取引は皆無**で、**採掘権のみ**の「未利用資源」 = 「安価」、 「権益取得容易」
- **多くの水素の製造方法中**でも、**褐炭からの水素製造**は**最も経済的な方法**の一つ

世界の褐炭の分布



豪州の褐炭



地平線まで褐炭層あり
地表から深さ250mまで一つの層
さらに、その下にもあり
(日本の総発電量の240年分に
相当する褐炭が賦存)

液化水素・水素の大量輸送手段

- ・ 極低温（ -253°C ）で液化 \Rightarrow 気体の**1/800**の体積
 - ・ 高性能断熱技術（二重殻真空断熱）の採用で、LNGと同等の長期貯蔵を実現
 - ・ 高純度=**精製不要**（蒸発させるだけで燃料電池に供給可能）
液化水素は**高純度（99.999%以上）**であり、純度を要求されるFCV用燃料（99.97%以上*）に適している
- *ISO14687-2 FCV用水素燃料規格
- ・ 毒性無し、無臭、温室効果無し



国内最大 液化水素タンク（種子島ロケット基地）



LNG船（エネルギー大量輸送）

水素インフラ技術展開

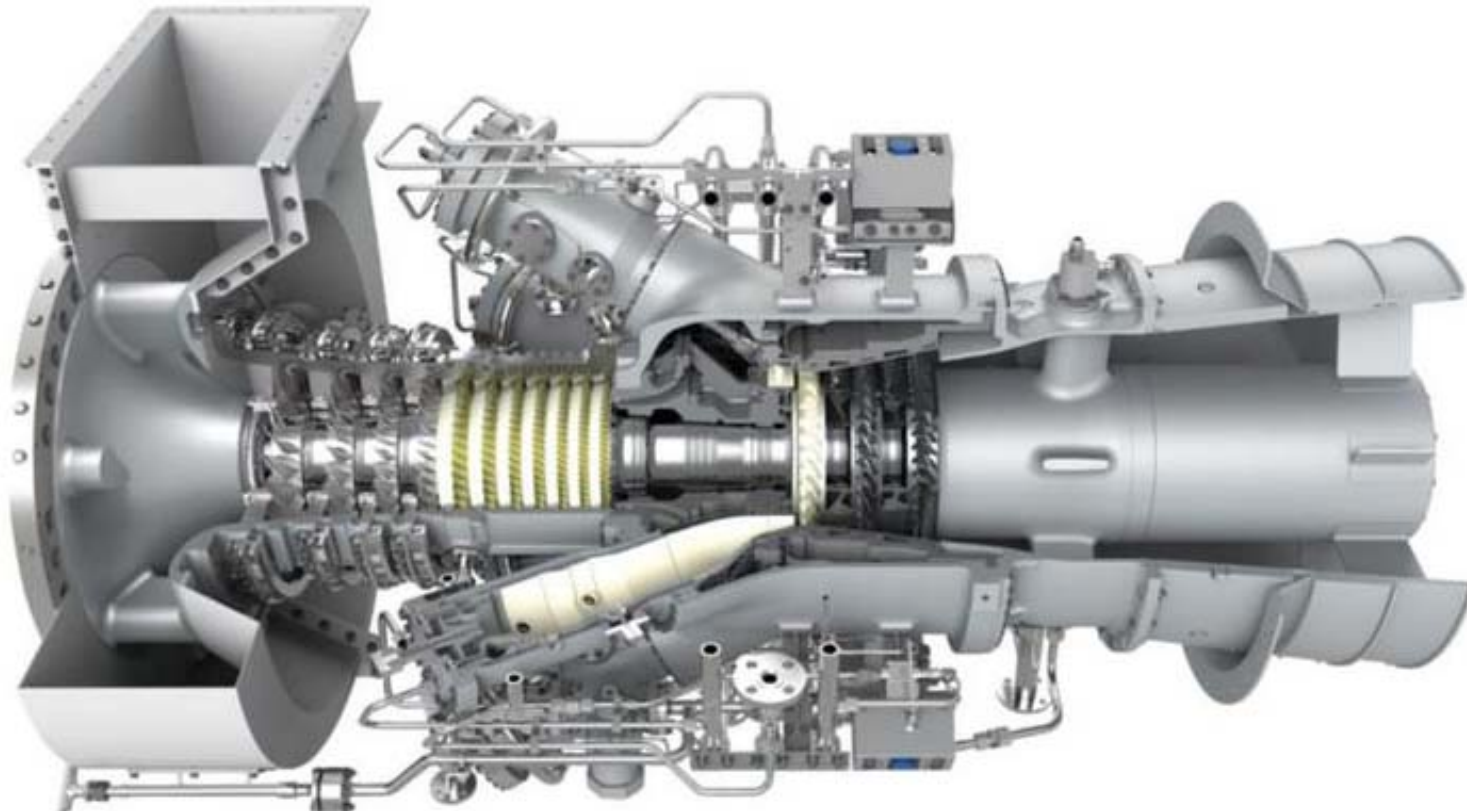


ご説明の構成

1. 水素利用への動き
2. 水素サプライチェーンのコンセプトと
水素インフラ技術展開
3. 水素ガスタービンの開発
4. まとめ

水素ガスタービンの技術課題

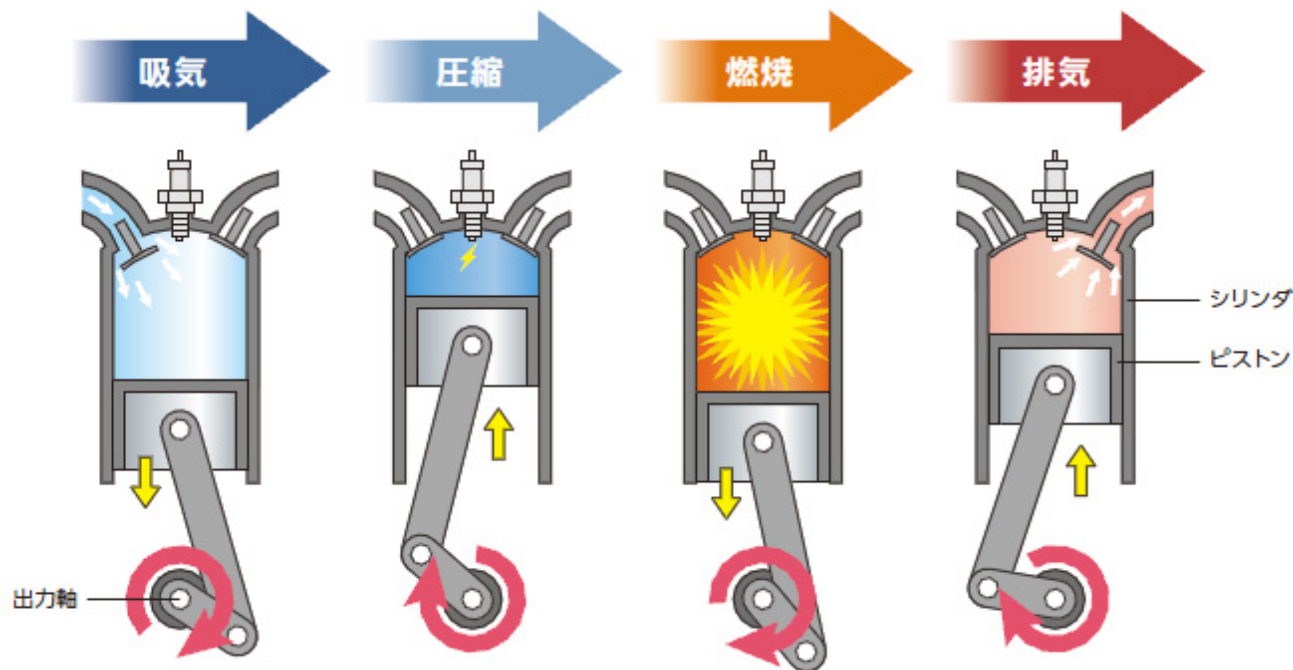
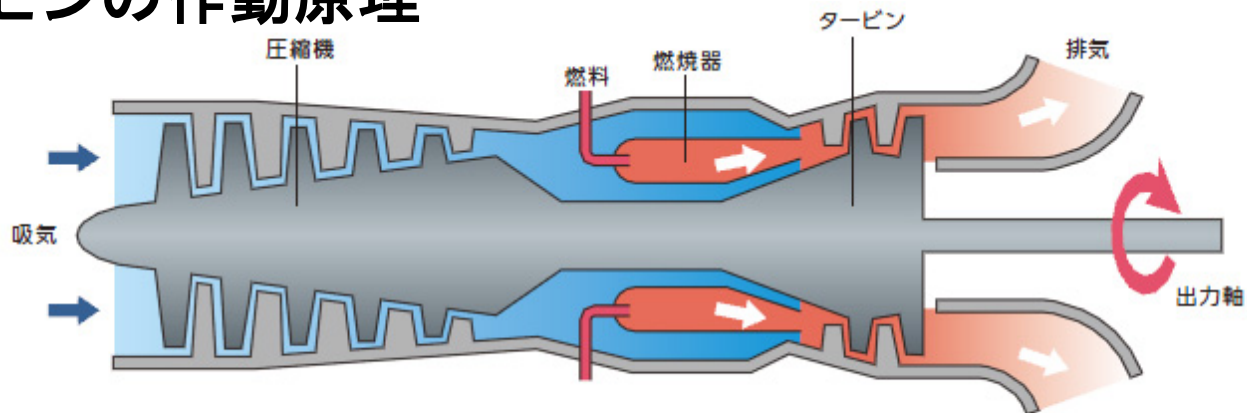
ガスタービンとは？



M5A ガスタービン(5MW級)

水素ガスタービンの技術課題

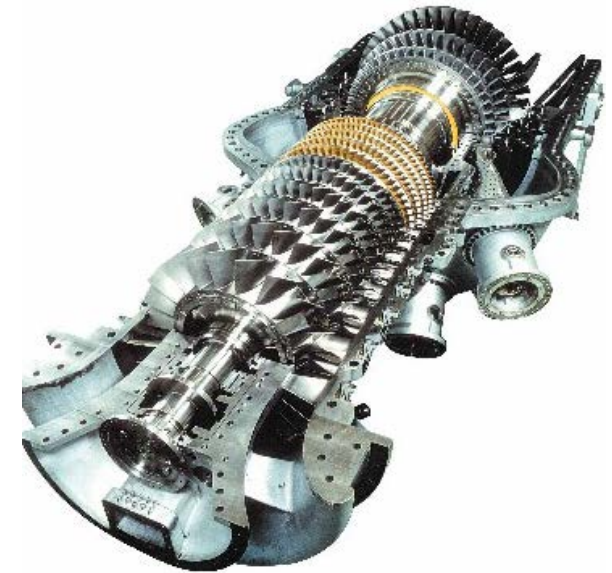
ガスタービンの作動原理



水素ガスタービンの技術課題

ガスタービンの性能向上には、
タービンに入る燃焼ガスの
高温化 & 高圧力化
が寄与する。

ただし、高温化に伴い、燃焼器や
タービン翼の耐熱や燃焼過程で
生成される**NO_x**が問題となる。



水素ガスタービンの技術課題

NO 生成速度は

- O原子濃度及びN₂濃度に比例
- 反応速度定数は火炎温度の増加に伴い著しく増加

サーマルNO_x 低減の基本原理は以下の通りとなる

- 温度を下げる.
- 酸素濃度を下げる.
- 高温燃焼帯での滞留時間を短くする

水素ガスタービンの技術課題

サーマルNOx 低減のための具体的手法は？

・温度を下げる.

→

- ・火炎内部に水もしくは蒸気を噴く
- ・希薄予混合燃焼 (Dry Low Emission)

・酸素濃度を下げる.

→

- ・排ガス再循環

・高温燃焼帯での滞留時間を短くする

→

- ・急速冷却(クイック クエンチ)

水素ガスタービンの技術課題

主なガス燃料と水素の燃焼特性比較

	可燃範囲 (vol%)	最大層流燃焼速度 (cm/s)	低発熱量 (MJ/kg)	最小着火エネルギー (mJ)	消炎距離 (mm)
水素 H ₂	4.0~75.0	291.2	120.0	0.02	0.6
メタン CH ₄	5.0~15.0	37.0	50.01	0.28	2.0
プロパン C ₃ H ₈	2.1~9.5	43.0	46.34	0.25	1.7

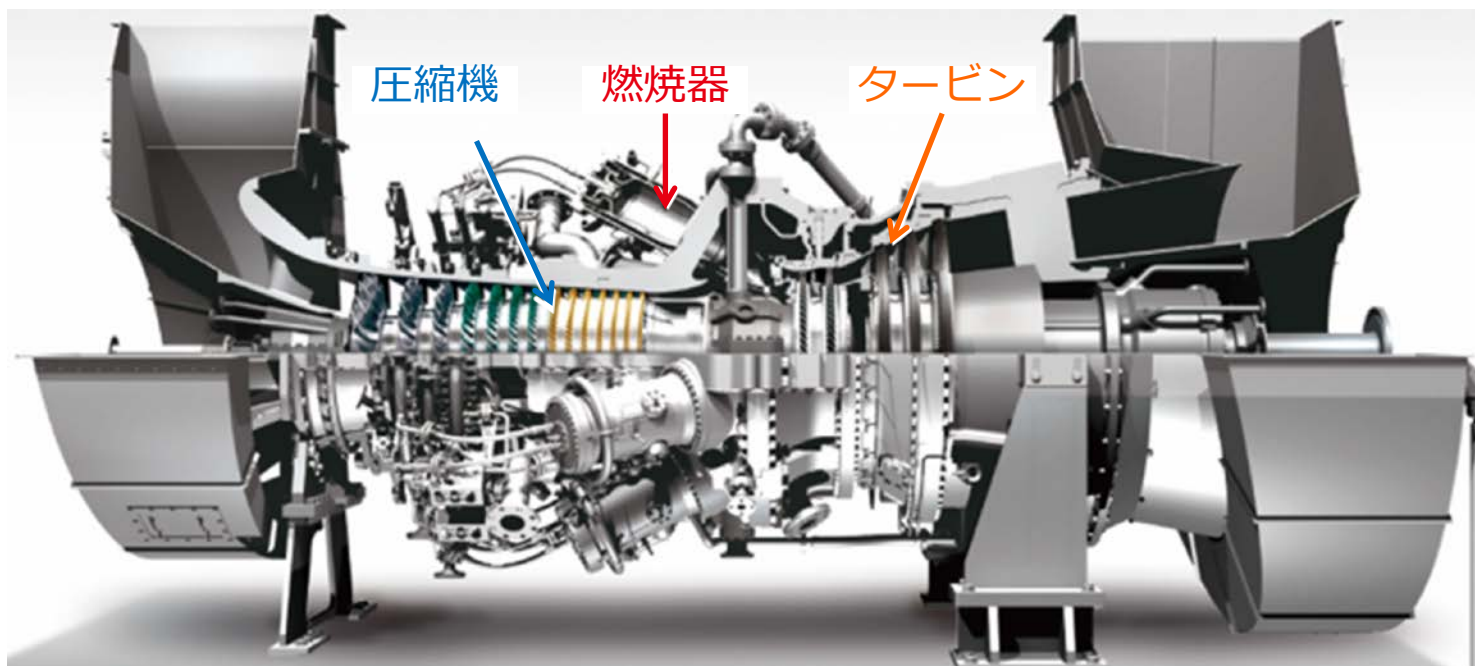
燃焼速度が速く、消炎距離が短い

水素ガスタービンの技術課題

天然ガス用ガスタービンの**燃焼器**だけを交換し水素燃焼へ対応
(圧縮機とタービンは変更無し)

キーハードは、水素バーナと燃焼器

課題は、安定燃焼と低NOx化



ガスタービン発電装置

環境性能と経済性を両立させた
高性能コージェネレーションシステム

PUC17D

PUC17Dの特長

1 高性能

1～2MWクラスで世界最高レベルの定格発電効率
26.5%を達成

2 低エミッション

DLE (Dry Low Emission: ドライ低NOx燃焼方式) の
採用により同クラスで世界最高レベルのNOx35ppm
(O₂=0%) を達成*

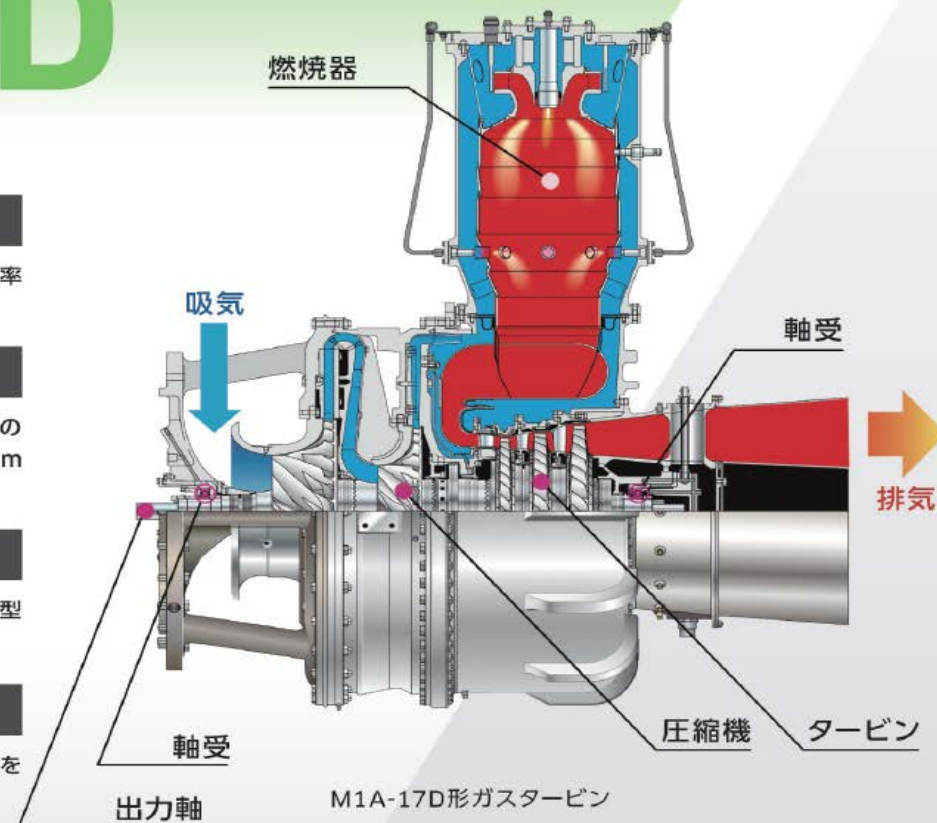
3 高信頼性

実績豊富なM1A-13ガスタービンをベースに、大型
機種で実績のある最新の高性能化技術を適用

4 高経済性

排熱ボイラとの組み合わせで、定格総合効率84.0%を
達成*

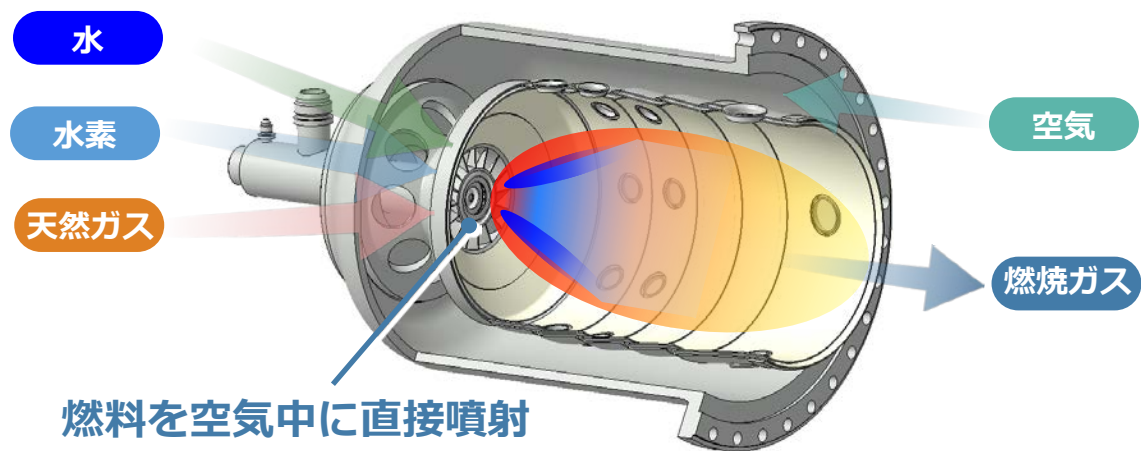
※常用機の場合



ガスタービン燃焼器の種類

拡散燃焼器

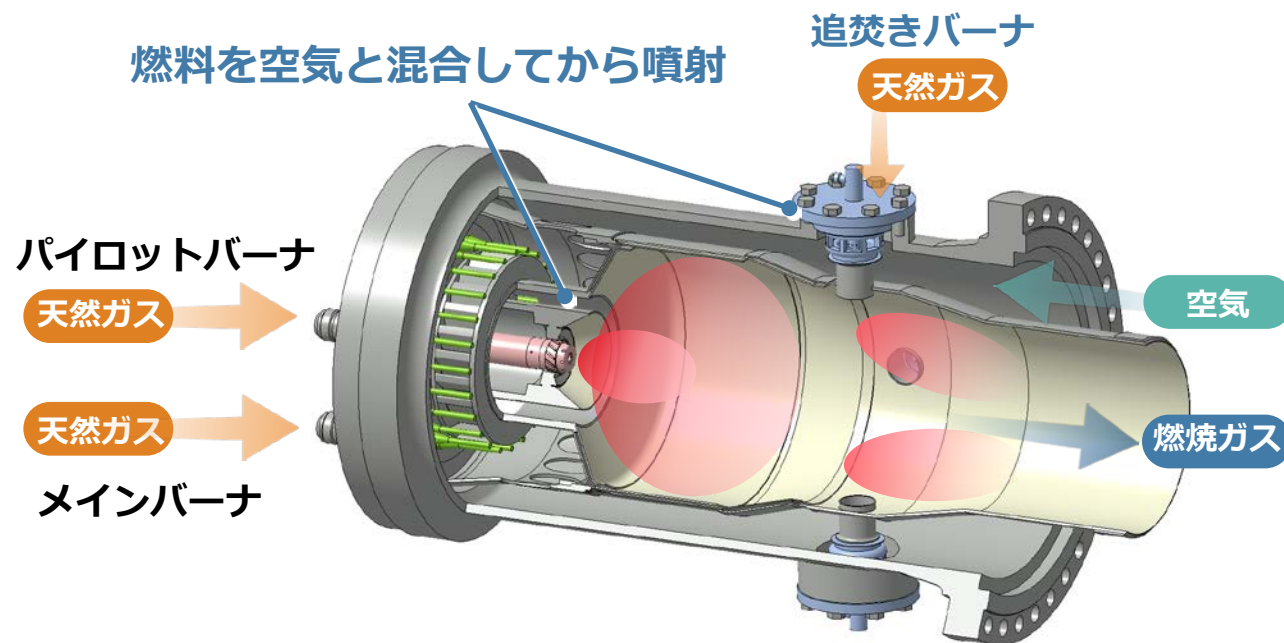
- ・ 燃焼が安定
 - ・ 多様な燃料に対応可能
 - ・ NOxが多い
- 水, 水蒸気による低NOx化



DLE燃焼器

Dry Low Emission

- ・ 希薄予混合低NOx燃焼
 - ・ 追焚き低NOx燃焼
 - ・ 安定燃焼条件が限定される
- 逆火, 振動, 吹き消え



水素燃焼時の高温化とNOx増加

- ・ 天然ガスに比べ燃焼速度が速い
- ・ 消炎距離が小さい



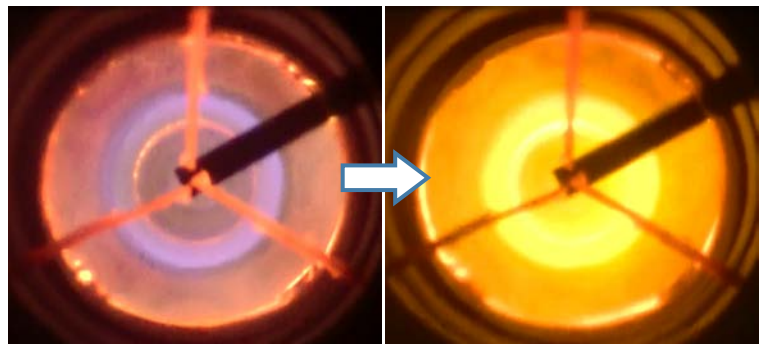
燃焼器部品の高温度化, 逆火



水素燃焼時



試験後の燃料噴射弁

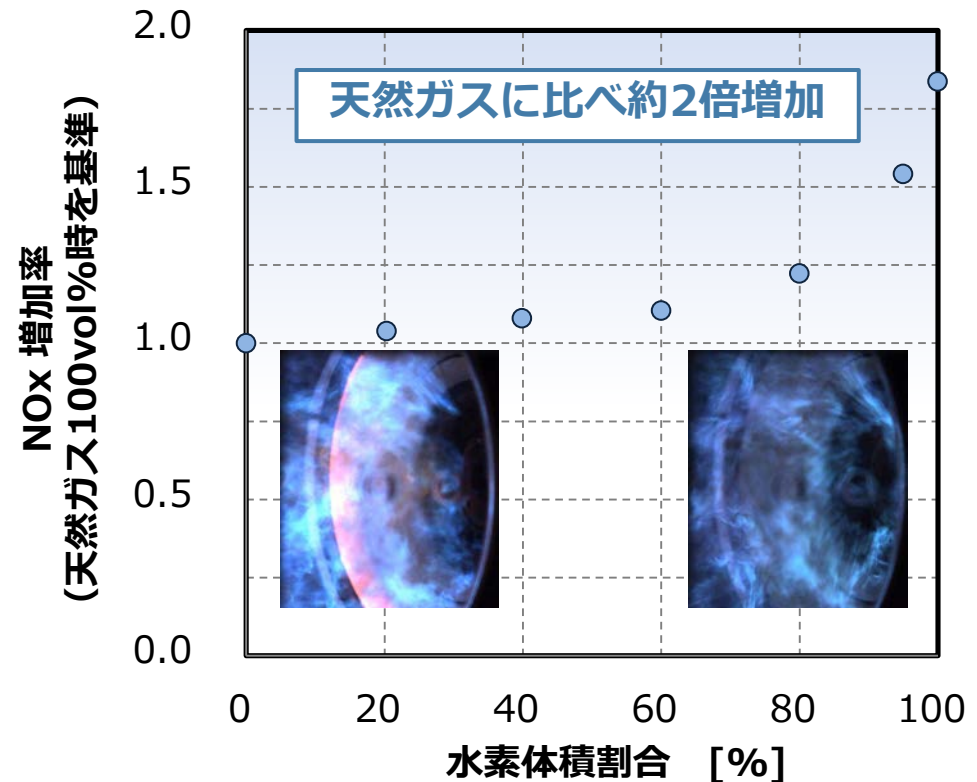


DLE燃焼器での逆火 (天然ガス・水素混焼時)

- ・ 天然ガスに比べ燃焼温度が高い
(燃焼器内の局所的な温度)



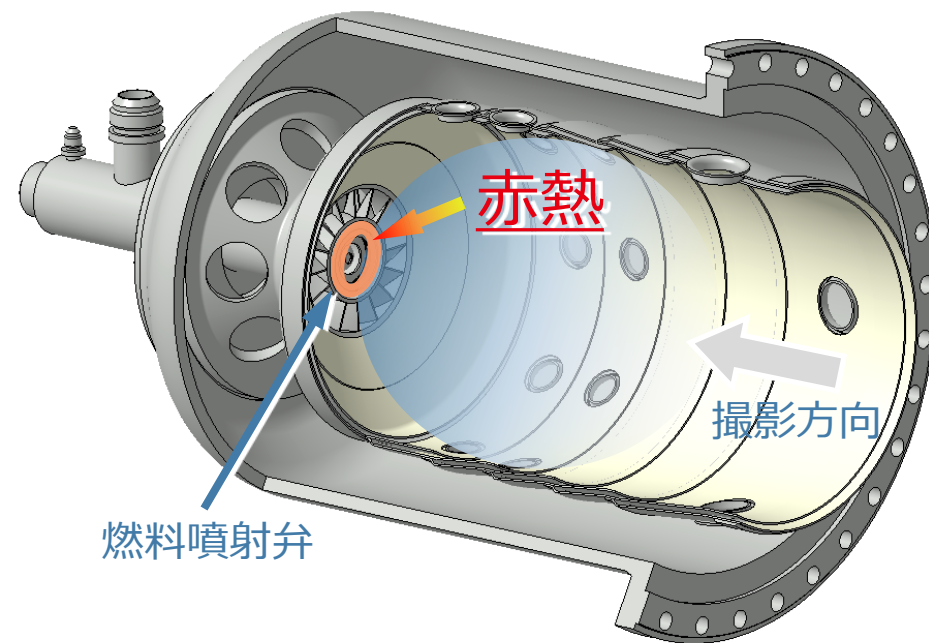
NOx増加 (NOx排出が温度の指数関数)



水素燃焼時の焼損とNOx排出

拡散型燃焼器の燃料噴射弁の赤熱発生例

燃料器リグ試験

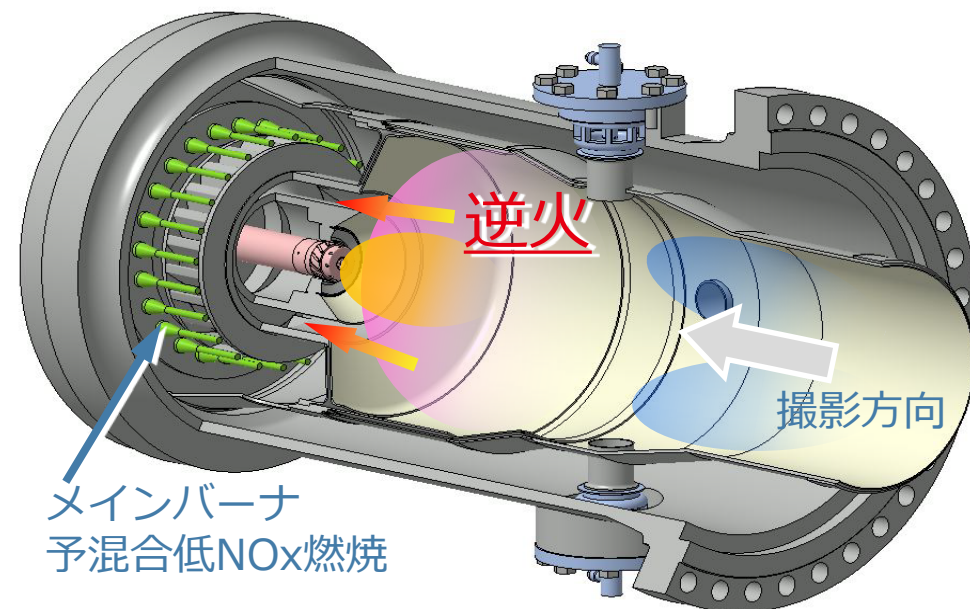
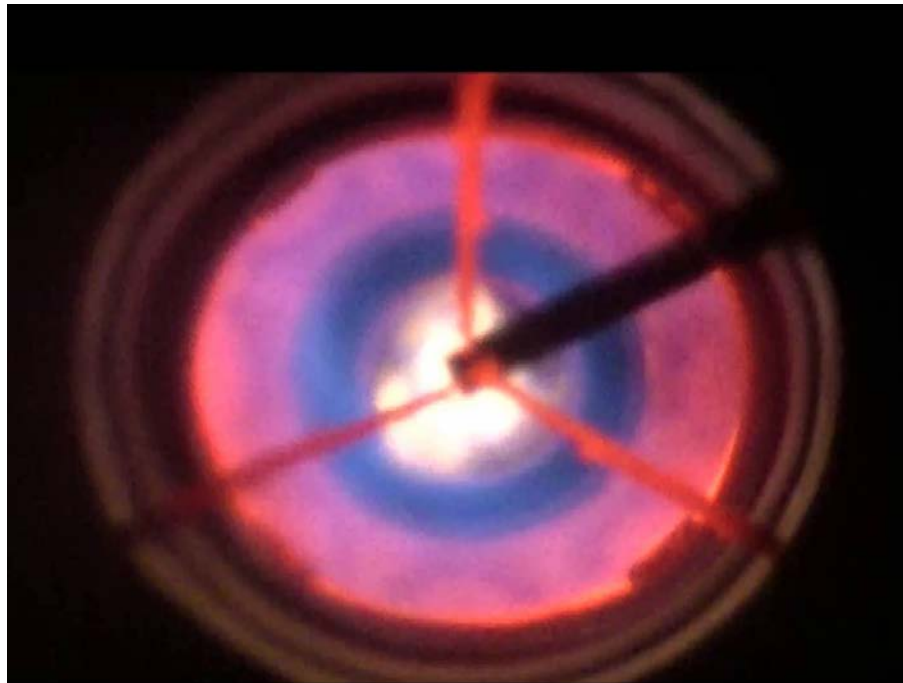


- ✓ 水素火炎を燃料噴射弁および燃焼器部品から離すこと
- ✓ 燃焼器部品の冷却改良が必要

水素燃焼時の焼損とNOx排出

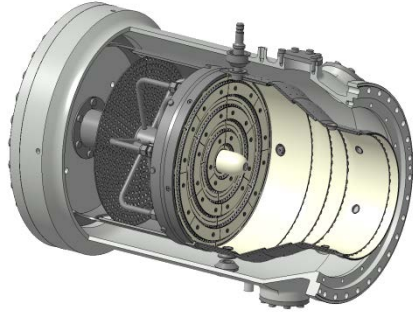

従来型DLE燃焼器での逆火発生例（予混合通路への逆火）

燃料器リグ試験



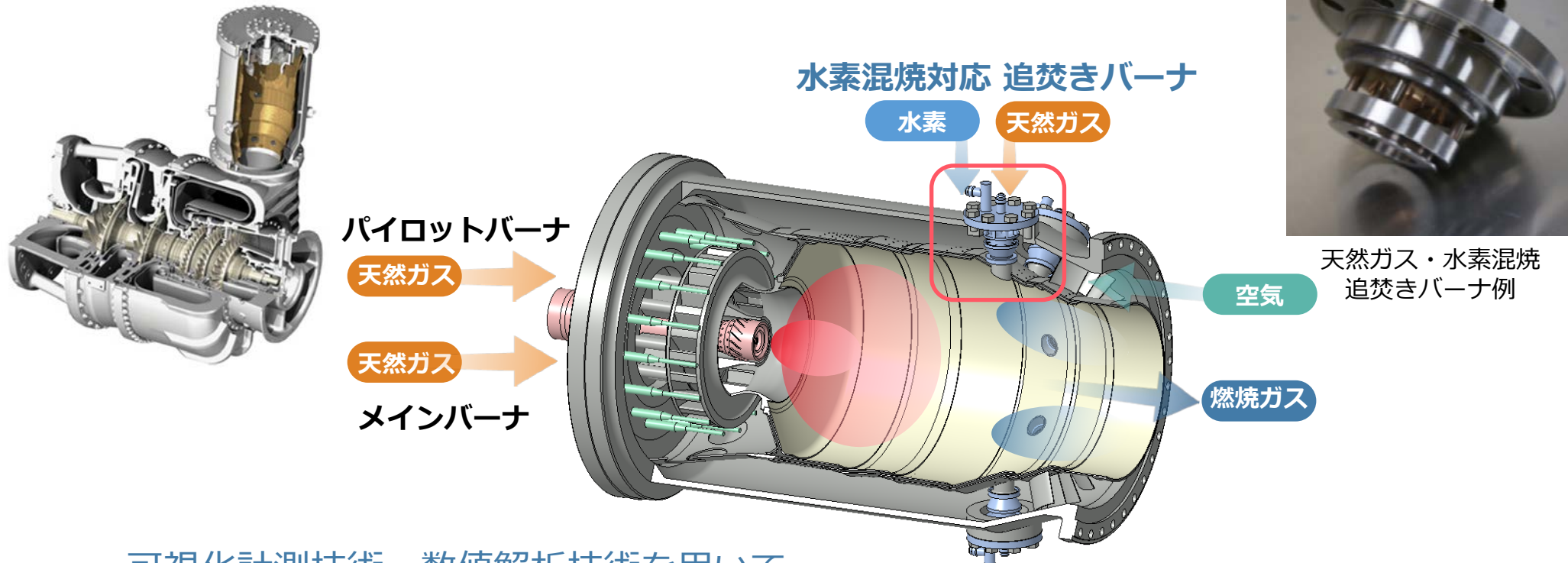
✓ 水素の燃焼特性に適合する新たな低NOx燃焼方式が必要

水素ガスタービン開発状況の概要

水素燃焼方式	水素混焼追焚き	拡散燃焼	水素専焼ドライ低NOx micro-mix水素燃焼
NOx低減	ドライ	水噴射	ドライ
燃焼器形状			
最大水素量	50vol% (機種：PUC17DLHの場合)	100vol%	100vol%
開発状況	実用化済み (社内実証継続中) 	神戸実証プラント 運転中 	燃焼器開発中 

水素混焼追焚き技術

天然ガス・水素混焼 追焚きバーナ



可視化計測技術，数値解析技術を用いて，
追焚きバーナ周りの流動，水素ガス分布の最適化

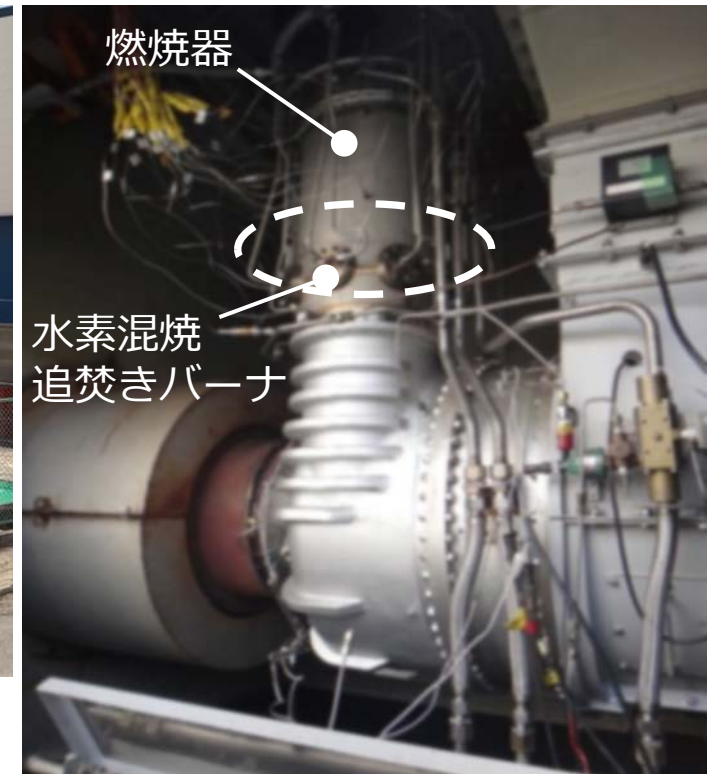
- 耐逆火性に優れる天然ガス・水素用追焚きバーナを開発

水素混焼追焚き発電実証

エンジン実証運転



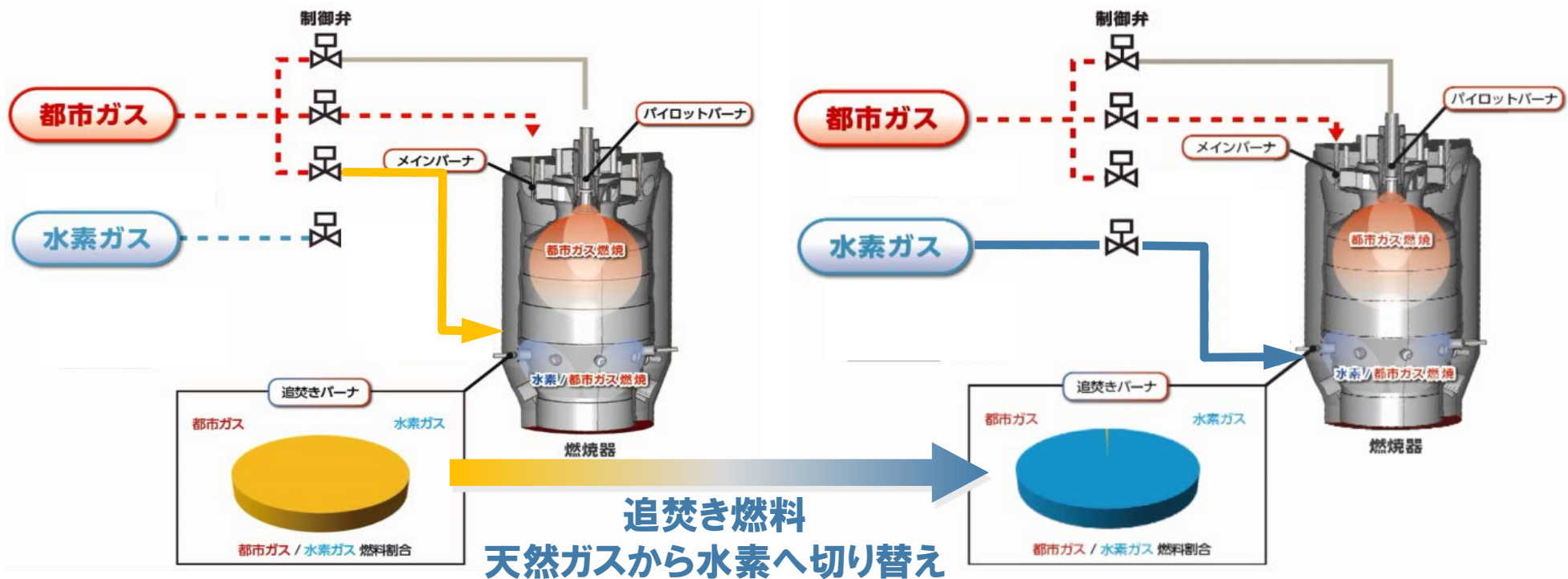
川崎重工 明石工場 自家発電設備



- M1A-17用水素混焼追焚きバーナを開発
- 明石工場内 自家発電設備で実証運用開始

水素混焼追焚き発電実証

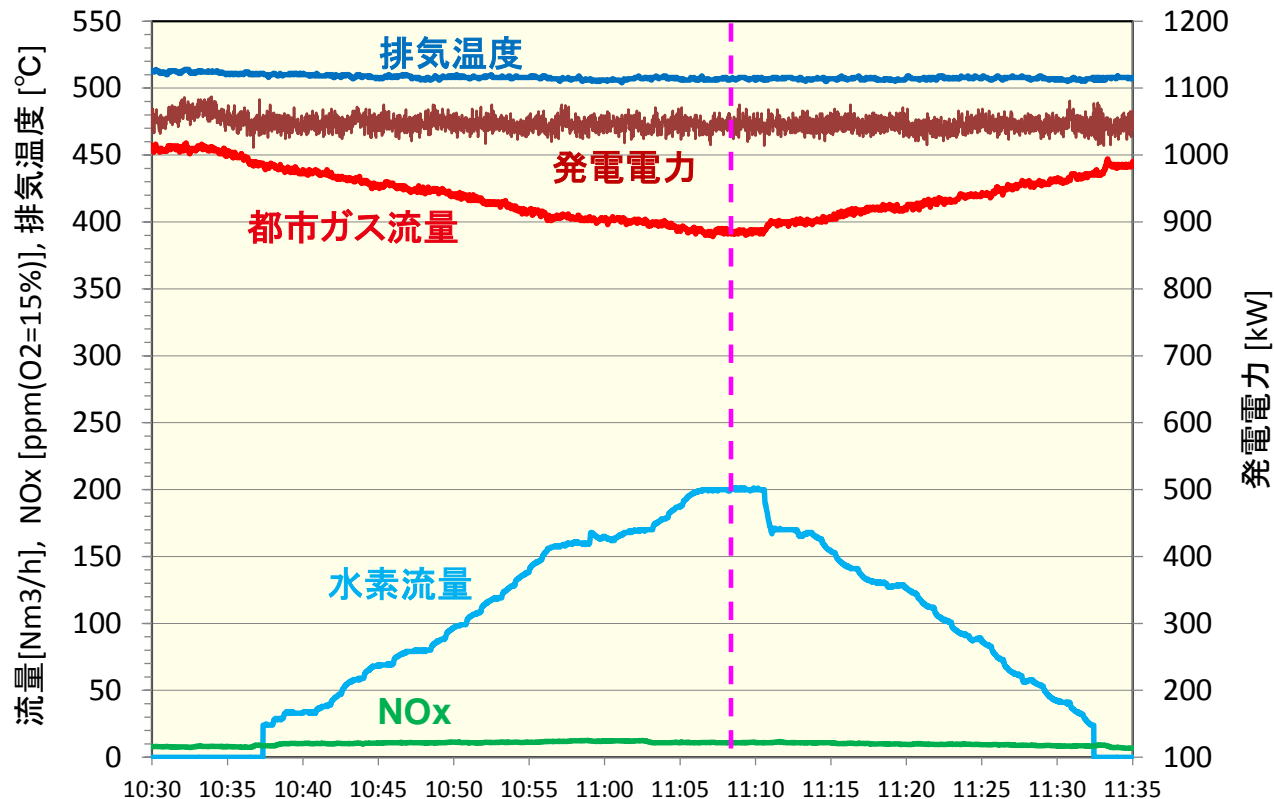
エンジン実証運転



- 着火／始動および低負荷運転は都市ガス
- 負荷がDLE運転範囲に到達後，追焚きバーナに燃料供給
追焚き燃料を天然ガスから水素に切替

水素混焼追焚き発電実証

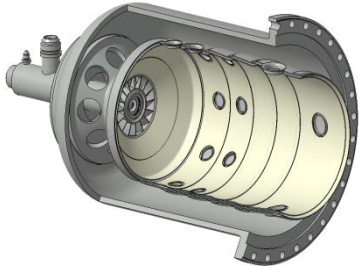
エンジン実証運転



- ✓ 水素を約200Nm³/hまで投入
- ✓ 電力および排気ガス温度は安定
- ✓ NO排出量は15ppm(O₂=15%)
- ✓ 燃焼器部品の温度は許容値以下
- ✓ 燃焼振動無し

● 水素燃焼追焚き 天然ガスと同等の安定燃焼と低NOxを達成

水素ガスタービン開発状況の概要

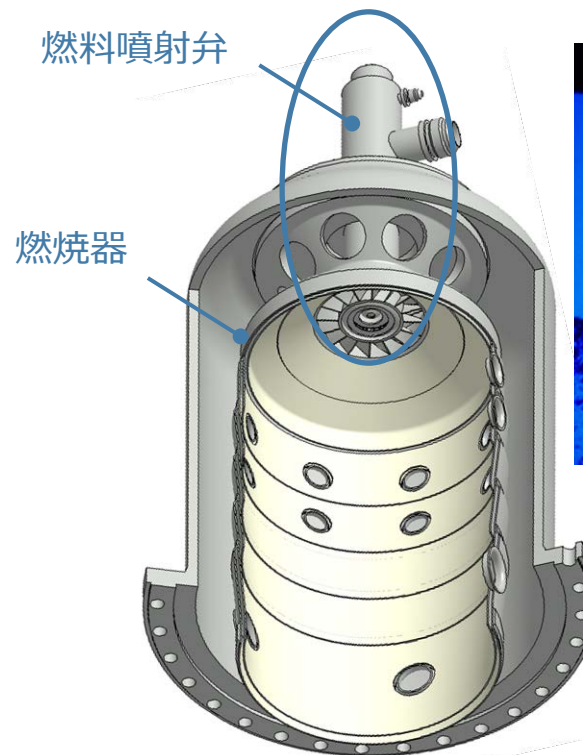
水素燃焼方式	水素混焼追焚き	拡散燃焼	水素専焼ドライ低NOx micro-mix水素燃焼
NOx低減	ドライ	水噴射	ドライ
燃焼器形状			
最大水素量	50vol% (機種：PUC17DLHの場合)	100vol%	100vol%
開発状況	実用化済み (社内実証継続中) 	神戸実証プラント 運転中 	燃焼器開発中 

水素専焼/混焼発電（ウエット方式）

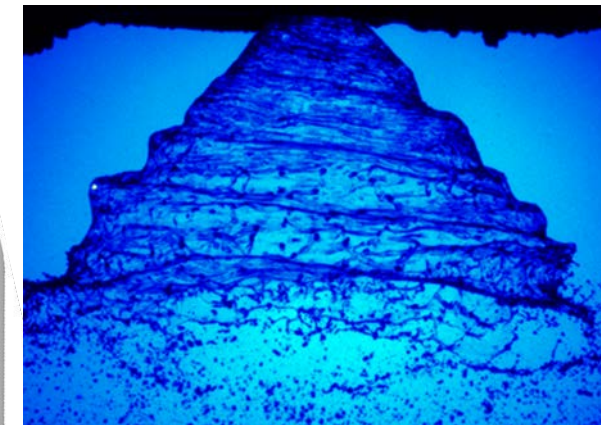
拡散燃焼器と燃料噴射弁



M1ガスタービン



燃焼器と燃料噴射弁



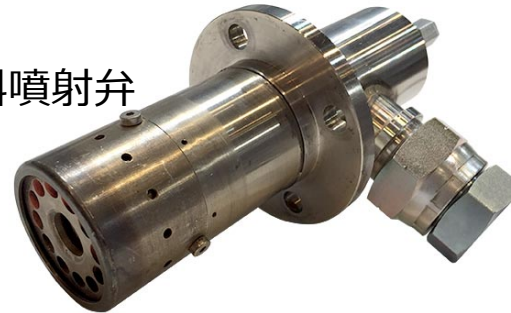
燃料噴射弁中央から
噴射される水と
形成される水噴霧

- 燃料噴射弁を天然ガス・水素混焼対応に変更するのみ
(別途、水素供給インフラは必要)
- 水/水蒸気噴射にてNOxを低減

水素専焼/混焼燃料噴射弁（ウエット方式）

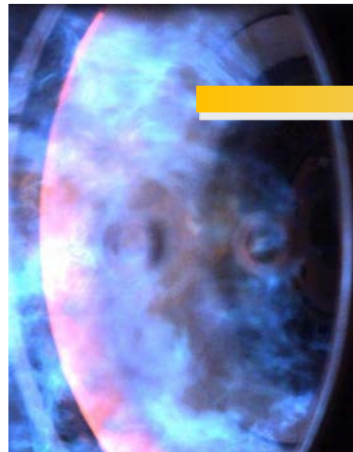
水素専焼/混焼燃料噴射弁の開発

水素専焼/混焼 試作燃料噴射弁

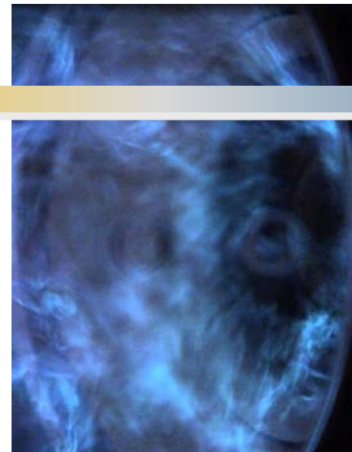


燃料ガスの
自在な切り替え

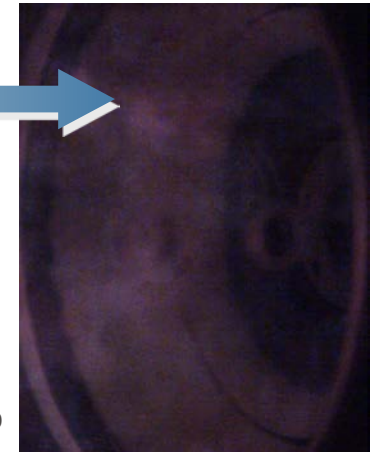
天然ガス：80%
水素：20%



20%
80%



-
100%



- 燃料噴射弁および燃焼器部品の高温度化，焼損の防止
- 天然ガスから水素100%まで任意の水素濃度で安定燃焼

水素専焼/混焼燃料噴射弁（ウエット方式）

水噴射によるNOx低減

燃焼器リグ試験



M1A-17 拡散燃焼器
水素専焼/混焼，水噴射試験
(アーヘン工科大学)

エンジン実証機搭載形状



https://www.khi.co.jp/stories/project_voice/vol08/



試験後の燃料噴射弁

- 水素専焼および混焼，各負荷条件で水噴射によるNOx性能を評価
- 大気汚染防止法を十分に下回ることを確認

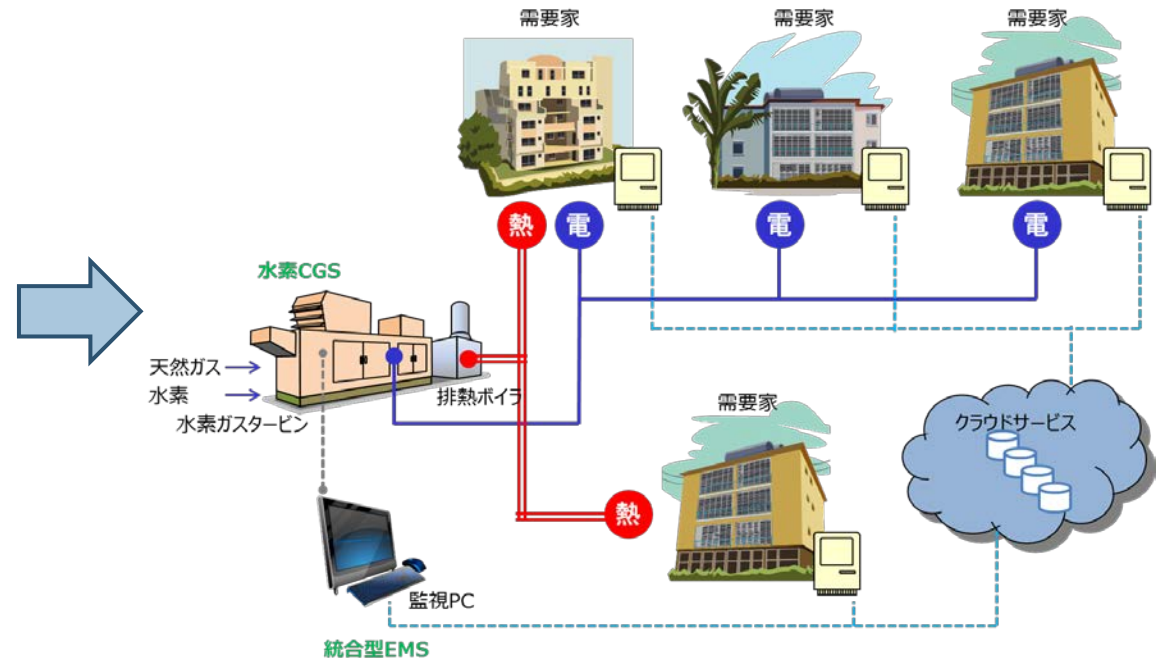
水素専焼/混焼発電実証

NEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」で実施中

NEDO助成事業 「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」

実施事業者：大林組(幹事)、KHI 協力企業など：神戸市、関西電力、岩谷産業、他

水素専焼/混焼 燃焼器



- 水素を燃料とするガスタービンコージェネ設備“水素CGS”を用いた地域レベルでの「電気」「熱」「水素」エネルギーの効率的な利用
- エネルギーマネジメントシステムの技術開発・実証（大林組所掌）

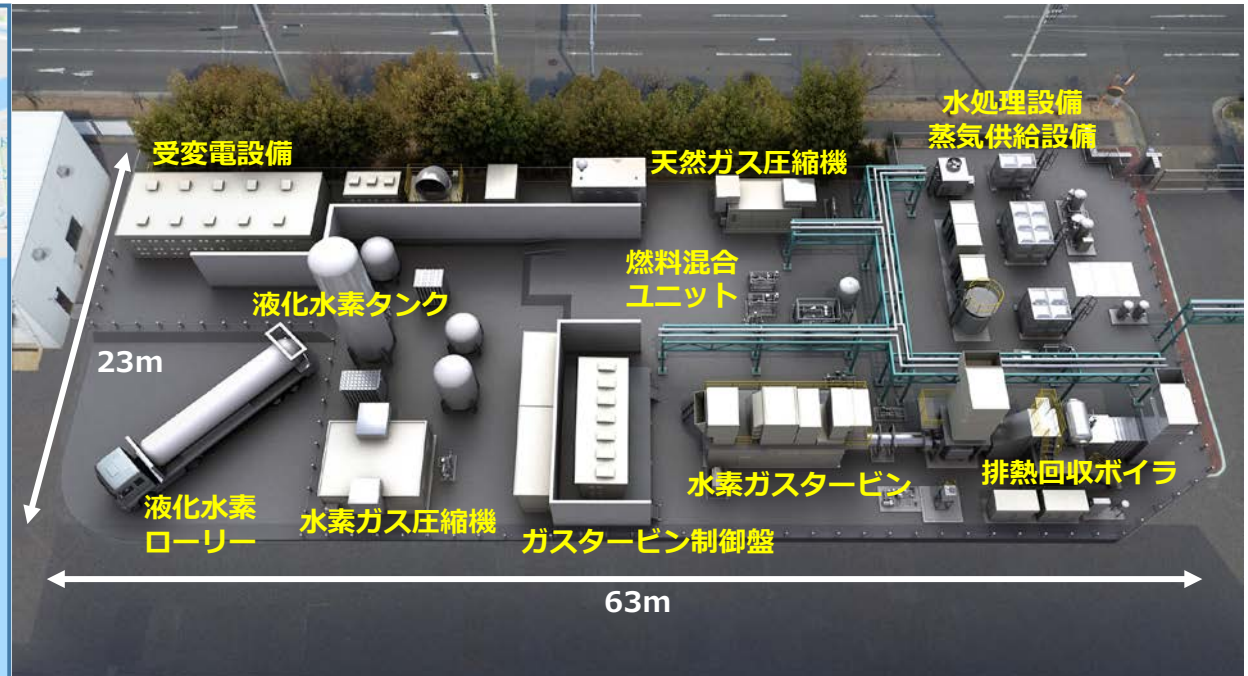
水素専焼/混焼発電実証

NEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」で実施中

水素CGS設置場所



神戸市ポートアイランド



水素CGSレイアウト図

世界初の試み

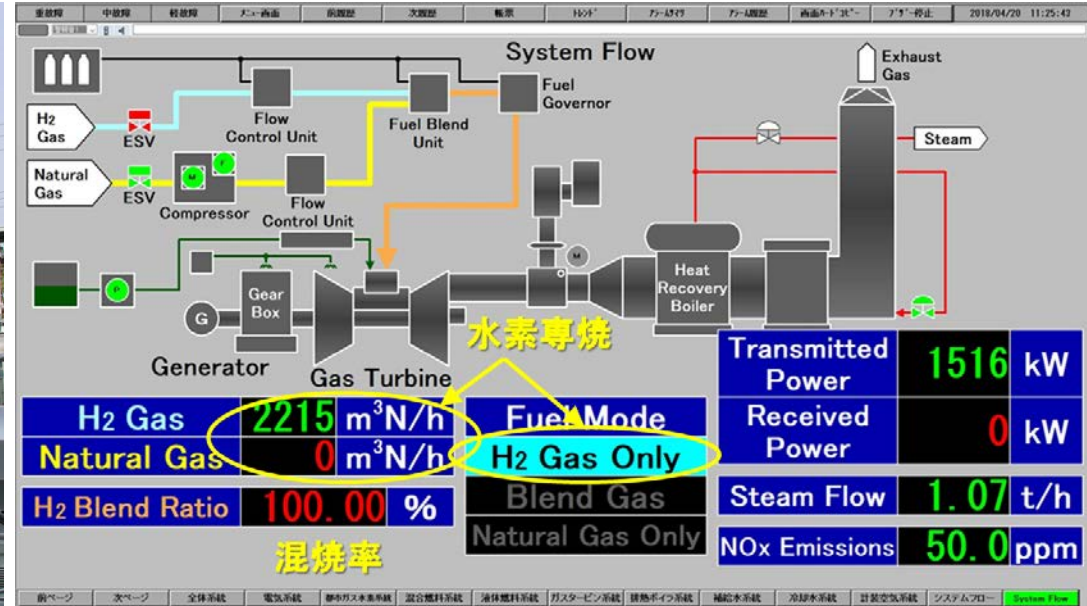
- 市街地でのガスタービンによる水素発電
- 周辺施設へのCO₂フリーの電力・熱供給

水素専焼/混焼発電実証

NEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」で実施中

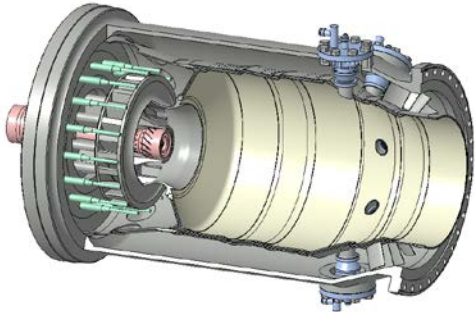
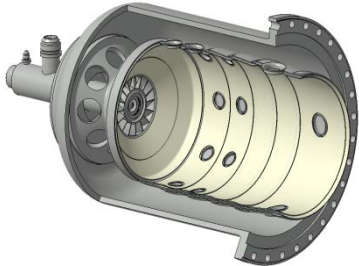
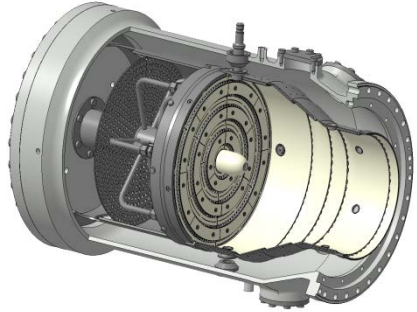



水素100% 熱電供給

NEDO様HPより http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html



- 2018年4月19日と20日，水素のみを燃料として，近隣の4施設へ熱電の同時供給を実現
- 市街地にて水素専焼のガスタービン発電による熱電供給を世界で初めて達成

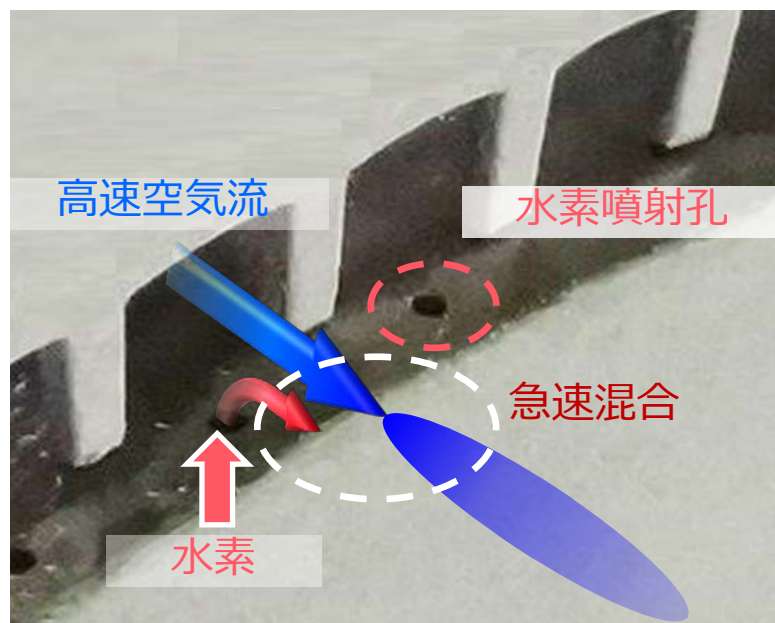
水素ガスタービン開発状況の概要

水素燃焼方式	水素混焼追焚き	拡散燃焼	水素専焼ドライ低NOx micro-mix水素燃焼
NOx低減	ドライ	水噴射	ドライ
燃焼器形状			
最大水素量	50vol% (機種：PUC17DLHの場合)	100vol%	100vol%
開発状況	実用化済み (社内実証継続中) 	神戸実証プラント 運転中 	燃焼器開発中 

水素専焼ドライ低NOx燃焼技術

微小な水素火炎を用いた低NOx燃焼技術：micro-mix

- ✓ NOxの発生源：火炎中のホットスポットを抑制
- ✓ 高温ガス中の滞留時間を低減



微小な水素火炎を形成



小型試験バーナを用いた水素燃焼試験
(FHアーヘン大学)



残存酸素15%換算値

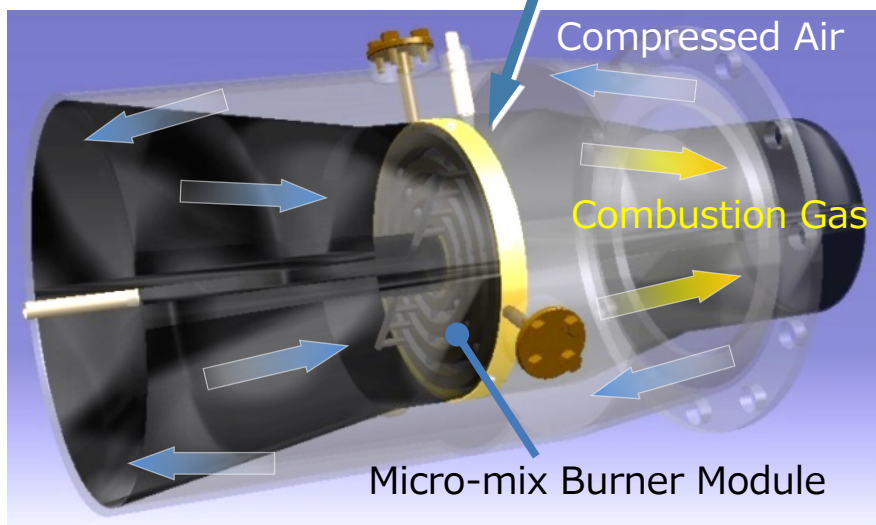
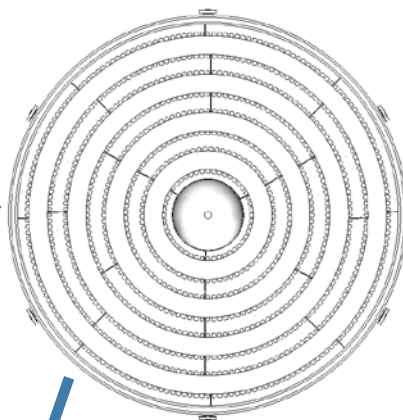
- 大気解放場での水素燃焼試験 NOx 10ppm以下を確認

水素専焼ドライ低NOx燃焼器

micro-mix燃焼技術を用いたガスタービン燃焼器

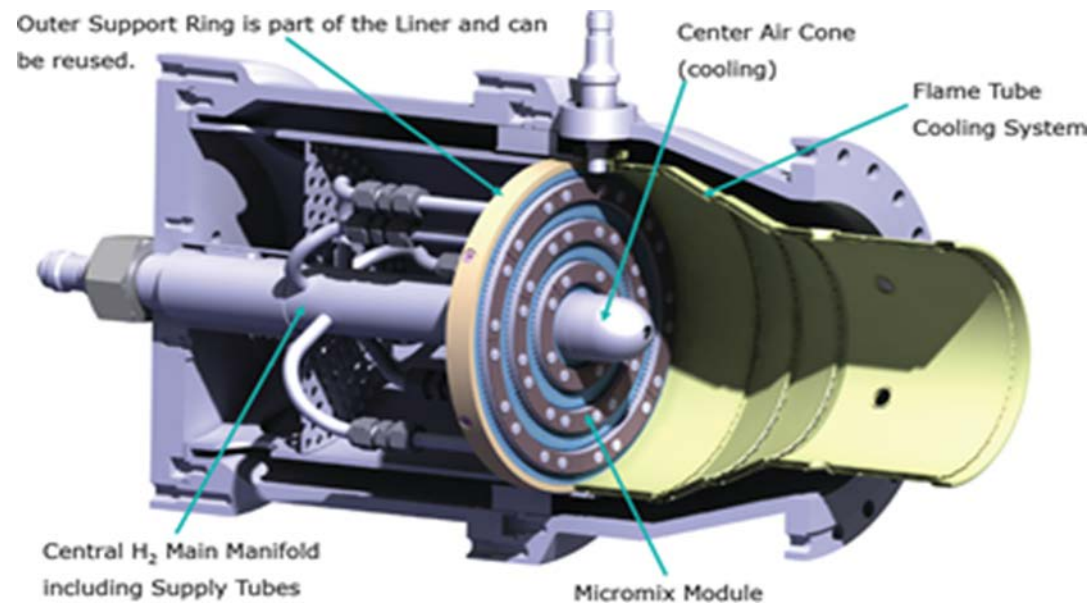


小型試験バーナ



Micro-mix Burner Module

初期概念設計



- リング状の水素バーナを有する燃焼器形状

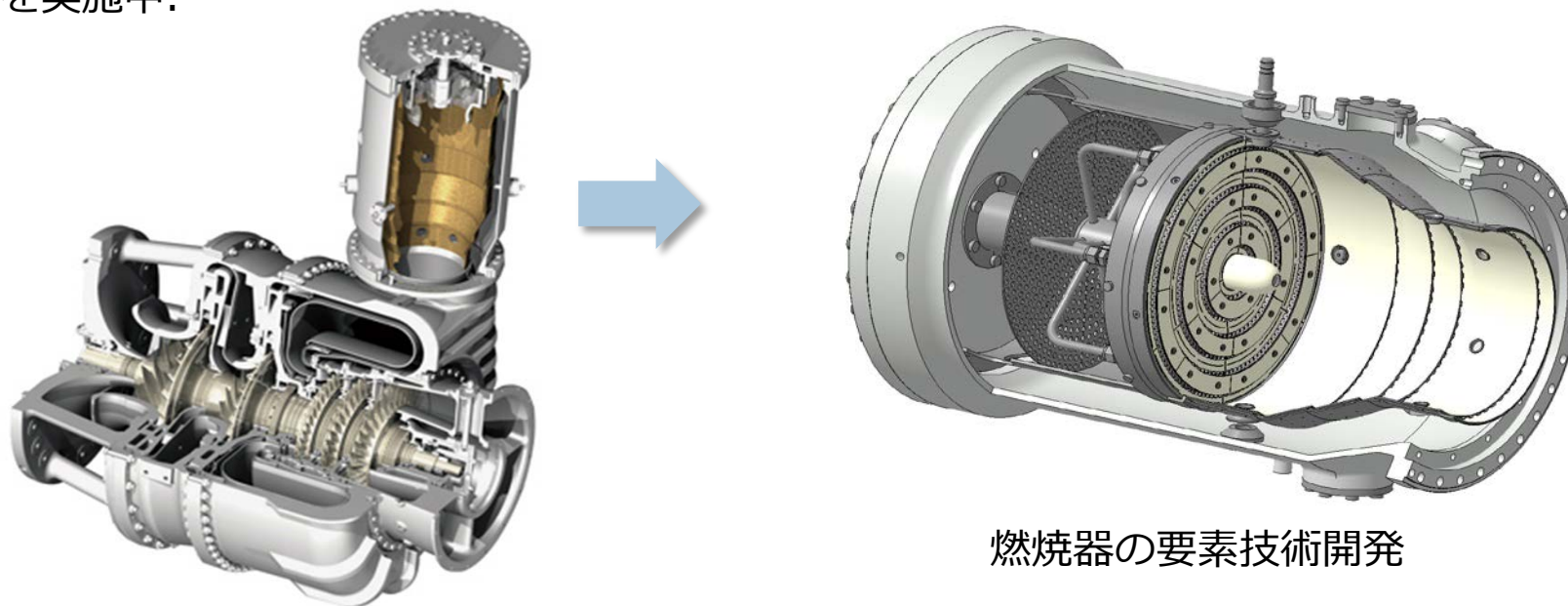
水素専焼ドライ低NO_x燃焼器の研究開発

2MW級ガスタービン用燃焼器の研究開発

2014・2015年度 SIPエネルギーキャリア「水素燃焼技術開発」

微小水素火炎を用いたドライ低NO_x方式の産業用ガスタービン燃焼器への適用研究を実施。
低NO_x燃焼が可能である目途を得た。

2016年度よりNEDO委託研究事業「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」
更なる低NO_x化に取り組むと共に、エンジンでの運用を想定した燃焼器要素技術確立に向け、
研究開発を実施中。



燃焼器の要素技術開発

水素燃焼試験による性能評価

ガスタービン実機条件（高温・高圧環境下）での性能確認試験

燃焼器リグ試験



水素専焼ドライ低NOx燃焼器試験
(アーヘン工科大学)



定格条件相当での水素燃焼状態



2時間の試験後の燃焼器内部

* 残存酸素16%換算値

- 50%から定格100%負荷運転に相当する条件で, NOx 40ppm*レベル
- 定格100%に相当する条件で2時間保持, 試験後の燃焼器に焼損等なし

本研究の成果は, 2014・2015年度, 総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「エネルギーキャリア」(管理人: JST)にて実施し, 2016年度より, 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)の委託業務, 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」にて実施して得られたものです。

まとめ

■水素燃料に対応する燃焼技術とガスタービン開発状況

以上、川崎重工で取り組む水素燃焼技術の開発ならびにエンジン実証状況について概説した。

ご清聴、ありがとうございました。