2019年度NEDO次世代電池・水素成果報告会

発表No. H2-9

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
低炭素社会実現に向けた
水素・天然ガス混焼ガスタービン発電設備の研究開発

谷村 聡
三菱日立パワーシステムズ株式会社
三菱重工業株式会社
2019年7月19日

連絡先
・三菱日立パワーシステムズ株式会社
URL: https://www.mhps.com/jp
・三菱重工業株式会社
URL: https://www.mhi.com/jp/

事業概要

1. 期間

開始　　：平成２７年８月
終了（予定）：平成３１年３月

2. 最終目標

実施項目	最終目標
A.燃焼器内部温度分布を予測する技術	A-1 高圧条件において水素混合割合が燃焼速度に与える影響を明らかにする。 A-2 実燃焼器において燃料中の水素混合割合の変化影響をシミュレーションにより予測する。 A-3 ガスタービン内部での自己着火による焼損リスクを評価する。
B.燃料成分の変化に対する安定運用範囲を拡大する技術	水素混焼割合20%の条件において天然ガス焚GTと同等の性能を有する燃焼器を開発する。
C.水素・天然ガス混焼プラントの設計技術	本事業成果の商品化にむけた基本設計(商品パッケージ化)を完了する。

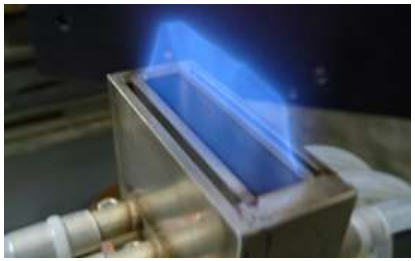
3.成果・進捗概要

①水素が燃焼器内部温度分布に与える影響を精度よく予測するために、基礎データ取得とシミュレーションの高度化を行い、設計ツールとして活用可能にした。
②フラッシュバックに対し高い耐性を有する改良燃焼器を開発し、水素混合割合30%条件において、安定燃焼が可能なことを実圧燃焼試験により確認した。
③実在するプラントをベースに、プラント建設計画を策定し、本事業成果の商品化にむけた基本設計(商品パッケージ化)を完了した。

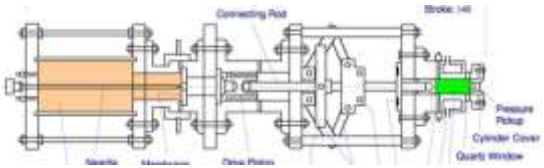
研究開発の実施体制

研究開発項目（A-1）（A-3）

火炎伝播速度計測
(大阪大学)



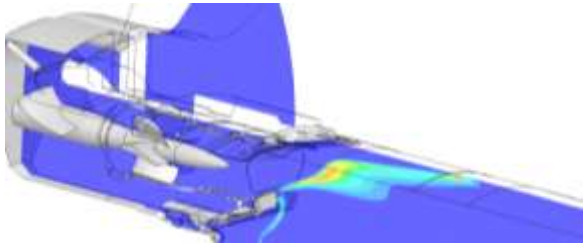
着火遅れ時間計測
(名古屋工業大学)



検証データ

研究開発項目（A-2）

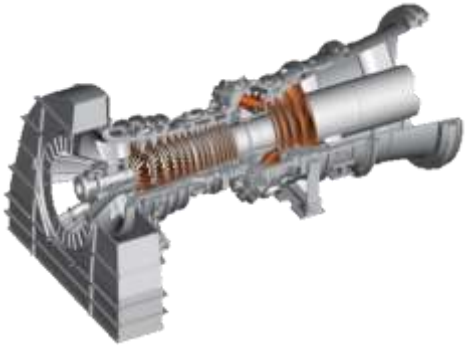
数値解析の高度化
(京都大学)



設計ツール

研究開発項目（B）（C）

ガスタービンの設計
および検証
(MHPS/MHI)



© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

水素・燃料電池ロードマップ

MHPS

水素・燃料電池ロードマップでは2030年時点30万t/年、将来的には500～1000万t/年の水素を発電利用する戦略が示されている。

アクションプランのポイント③ <その他水素利用・グローバルな水素社会実現>

赤字は新規目標等

水素利用先の拡大のため、市場の開拓・深掘り／グローバルな水素社会実現のため、日本リードの国際連携

		目指すべきターゲット	ターゲット達成に向けた取組
水素利用	発電	● 2030年頃の水素発電の商用化に向けた技術の確立 ✓ 既設火力発電での水素混焼発電の導入条件明確化 ✓ 2020年までに水素専焼発電での発電効率向上（26%→27%） ※1MW級ガスタービン	・限界混焼率、事業性等に関するFS調査の実施 ・高効率な燃焼器等の開発
	産業	● 将来的なCO2フリー水素の活用 ● 経済合理性の見通しが得られたプロセスから順次CO2フリー水素の利用を検討	・各産業プロセスにおけるCO2フリー水素の活用・供給ポテンシャル調査の実施 ・カーボンリサイクル技術の実用化に向けた検討
	定置用燃料電池	エネファーム ● 2020年頃の自立化、2030年までに530万台 ● 2020年頃までにPEFC型80万円、SOFC型100万円を実現 ● 2030年頃までに投資回収年数を5年とする 業務・産業用燃料電池 ● 2025年頃に排熱利用も含めたグリッドパリティの実現 （低圧：機器50万円/kW、発電コスト25円/kWh 高圧：機器30万円/kW、発電コスト17円/kWh） ● 発電効率、耐久性の向上 （2025年頃に55%超→将来的には65%超 9万時間→2025年頃に13万時間）	・既築・集合住宅などの市場の開拓 ・電気工事の簡素化に向けた規程整備の検討 ・セルスタックの高効率化・高出力密度化等の技術開発 ・セルスタック等の劣化原因の解消に向けた技術開発
グローバル水素社会実現・国民理解等		● 水素閣僚会議で発表した東京宣言の実現を図る ✓ 基準や規制の標準化やハーモナイゼーションの促進 ✓ 国際的な共同研究開発の推進 ✓ 水素利用のポテンシャル調査 ✓ 水素受容性向上のための教育・広報活動の推進	・米・独・仏等との規制の比較、事故情報の共有 ・日本のサプライチェーン実証の成果共有による資源国の巻き込み ・2020年オリパラ、2025年大阪万博等のあらゆる機会を捉え、最先端水素技術を発信 ・革新的な技術開発の実施

【水素基本戦略における記載（抄）】

- 実際の社会実装に当たっては、水素は天然ガス火力での混焼も可能であることから、導入初期は既設の天然ガス火力における混焼発電を中心に、小規模なコージェネレーションシステム等における水素混焼も含め、導入拡大を図っていく。
- また、特に水素の燃焼特性に応じた燃焼器の開発が不可欠である、拡散燃焼方式や予混合燃焼方式など、従来の火力発電で実績のある燃焼器を水素混焼発電に転用するための研究開発や技術実証については、既に一定の取組が進められている一方、NOx の低減や発電効率の向上といった技術課題に対応していく。更に、将来的に水素専焼発電を実現するためには、NOx 値の低減、高い発電効率、高濃度な水素混焼などを同時に達成可能とする新たな燃焼技術の早期の実用化を目指す
- 水素発電については、国際的な水素サプライチェーンとともに 2030 年頃の商用化を実現し、その段階で 17 円/kWh のコストを目指す。そのために必要となる水素調達量として、年間 30 万ｔ程度を目安とする（発電容量で 1GW 程度に相当）。更に、将来的には環境価値も含め、既存の LNG 火力発電と同等のコスト競争力の実現を目指す。そのために必要となる水素調達量として、年間 500 万～1,000 万ｔ程度を目安とする（発電容量で 15～30GW 程度に相当）。
- 水素発電の導入に当たっては、電力システム改革が進展する中での経済性確立に向けた制度設計等の検討を進める。また、水素発電が有する環境価値を顕在化し、評価・認定、取引可能にしていくことが重要であり、他の制度設計に係る議論を注視しつつ、省エネ法における水素利用の位置づけを明確化する、あるいは高度化法における非化石電源として水素発電を位置づけるといったことを含め、実態も踏まえながら検討を進める。

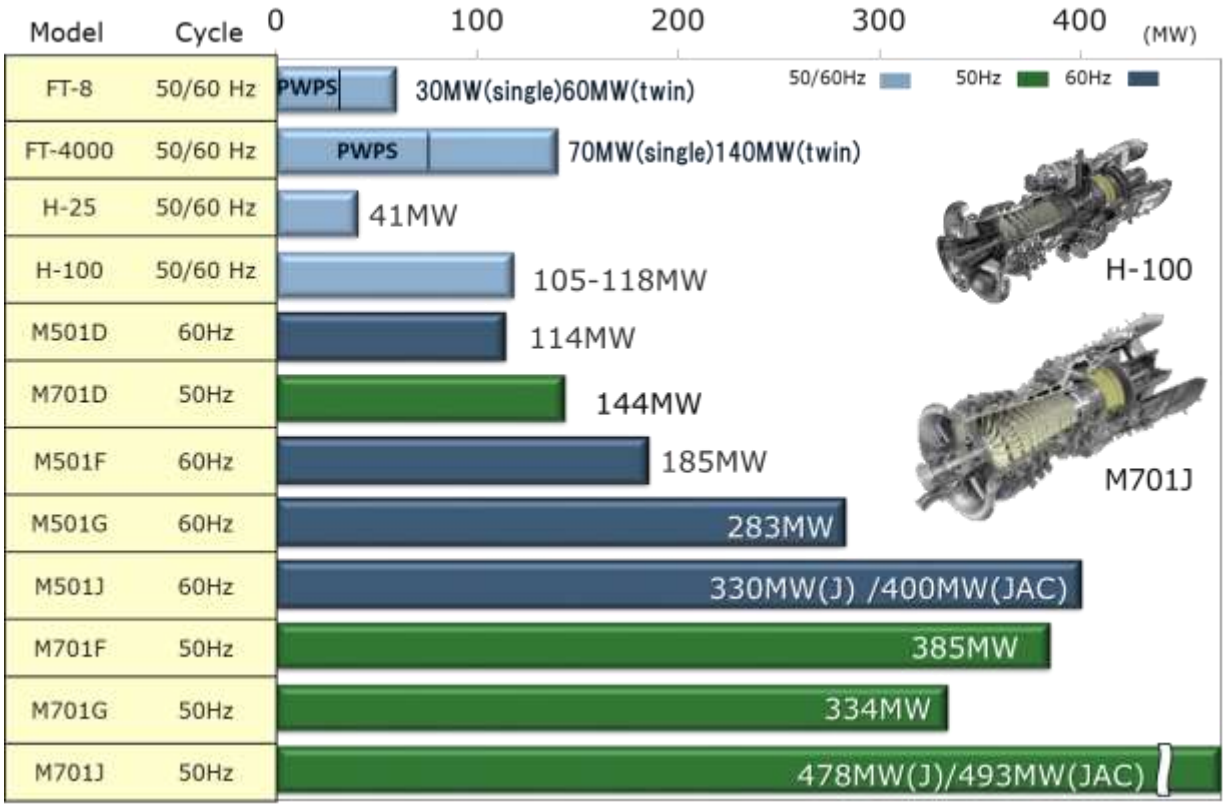
出典：経済産業省、水素・燃料電池ロードマップ、2019年3月

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

事業の目的

国内の天然ガス焚き発電所の水素焚き混焼転換により、2030年時点の水素消費量目標を、更に水素サプライチェーンの構築に応じて専焼に転換していくことで将来目標の達成が可能。

MHPSガスタービンラインナップ



M501J型 (60Hz) GTCC 580MW級の水素消費量での試算

水素20vol.%混焼	1.4t/時間	11,900t/年	×31台* →	37万t/年≒2030年時点目標
水素100vol.%専焼	21.7t/時間	190,400t/年		590万t/年≒将来目標

*MHPS 国内納入GTCC（G/J/F型, 効率60%級）31台試算

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

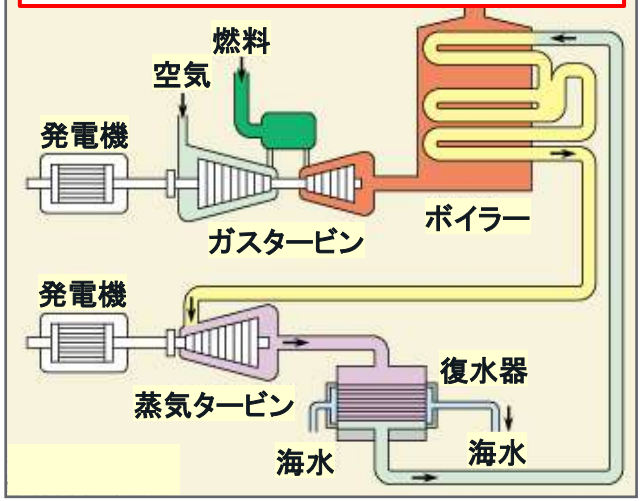
水素発電の利点

MHPS

①. 高効率・大量利用（需要喚起）

-大型GTCCは水素を効率よく発電利用することが可能
-大容量の需要を喚起することで、インフラ構築に貢献

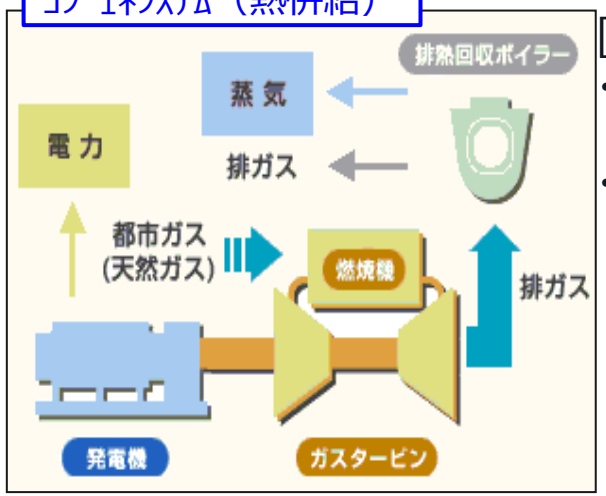
ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝｺﾝﾊﾞｲﾝﾄﾞｻｲｸﾙ（発電用）



[GT]
・燃焼温度
1600℃級主流
・出力
500MWクラス

燃料エネルギーの
60%を電気に変換

ｺｼﾞｪﾈｼｽﾃﾑ（熱併給）



[GT]
・燃焼温度
1200℃級主流
・出力
1～20MWクラス

燃料エネルギーの
30%を電気に変換
(+50%を蒸気利用)

②. 低純度水素への適合

- GTは燃料電池車と比べ、低純度な水素（不純物）への適合性が高く燃料コスト低減に貢献可能

	当社GT燃料標準規格	水素燃料規格(ISO-14687-2より)
総HC	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

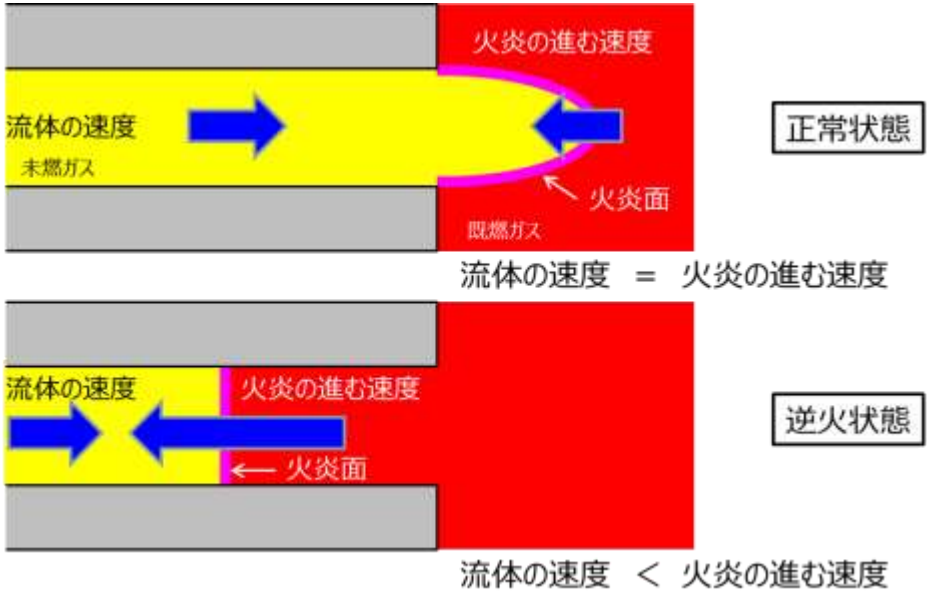
※規定ないが燃焼する成分である為、運用可能

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

火炎伝播速度計測(大阪大学)

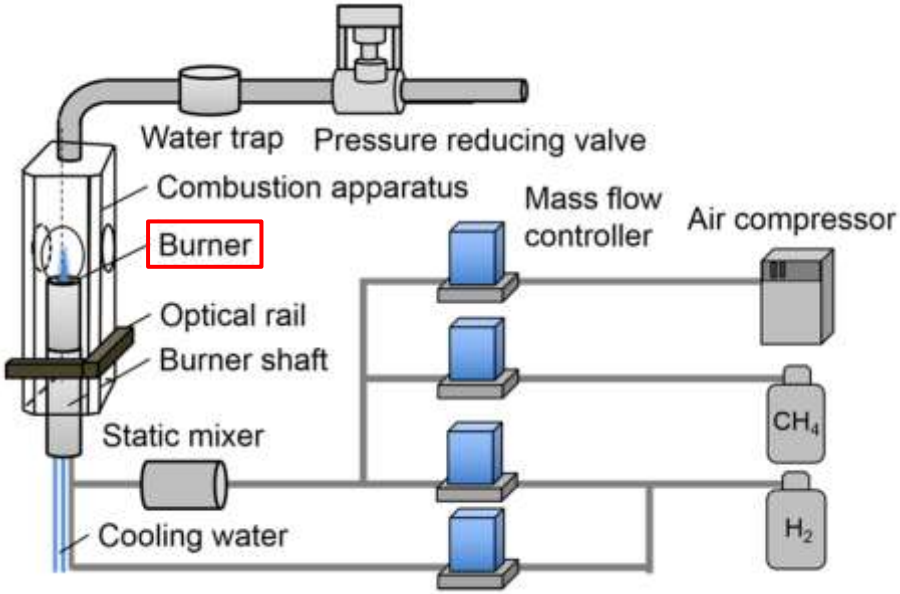
MHPS

- 水素は天然ガス(メタンが主成分)と比較して燃焼速度が高い為、逆火の発生リスクが高くなる。
- 一方で、ガスタービンのような高圧条件では、水素・天然ガス混焼に関するデータは公表されていない。
- 2017年度に製作した試験装置を用いて、高圧条件での燃焼速度計測を実施した。



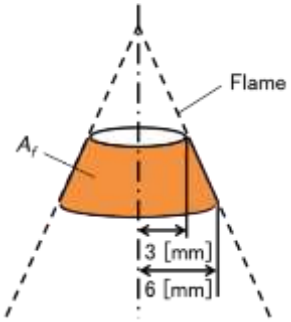
流体の速度 ＜ 火炎の進む速度(燃焼速度)
では火炎が流体中を遡上する
⇒逆火（フラッシュバック）現象の発生

図：逆火発生のメカニズム



図：試験装置概要

図:バーナ



乱流燃焼速度

$$S_T = \frac{V_u}{A_f}$$

Vu ：体積流量

Af ：火炎面積

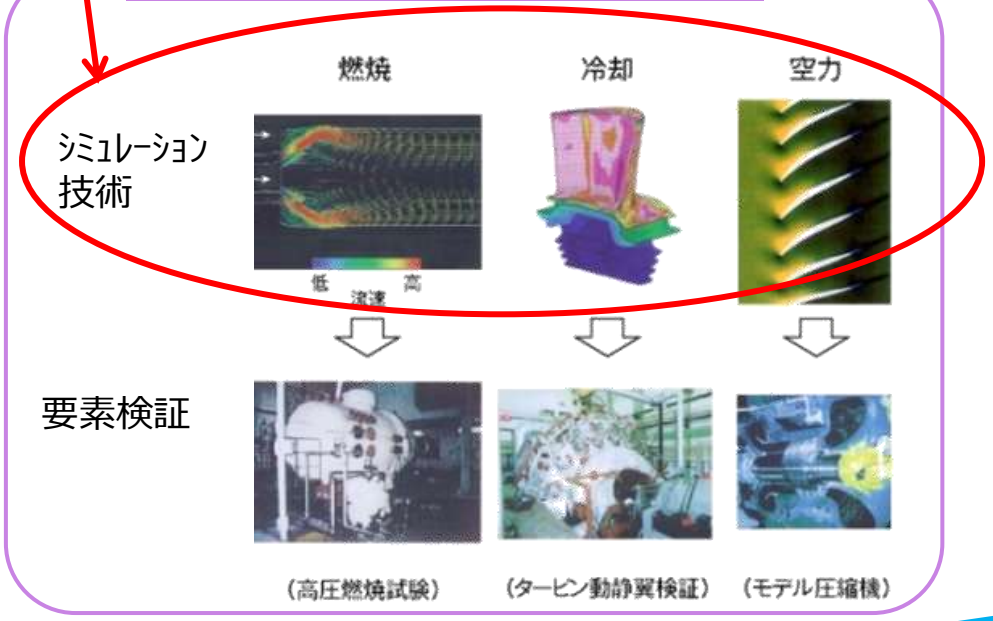
© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

数値シミュレーションの活用

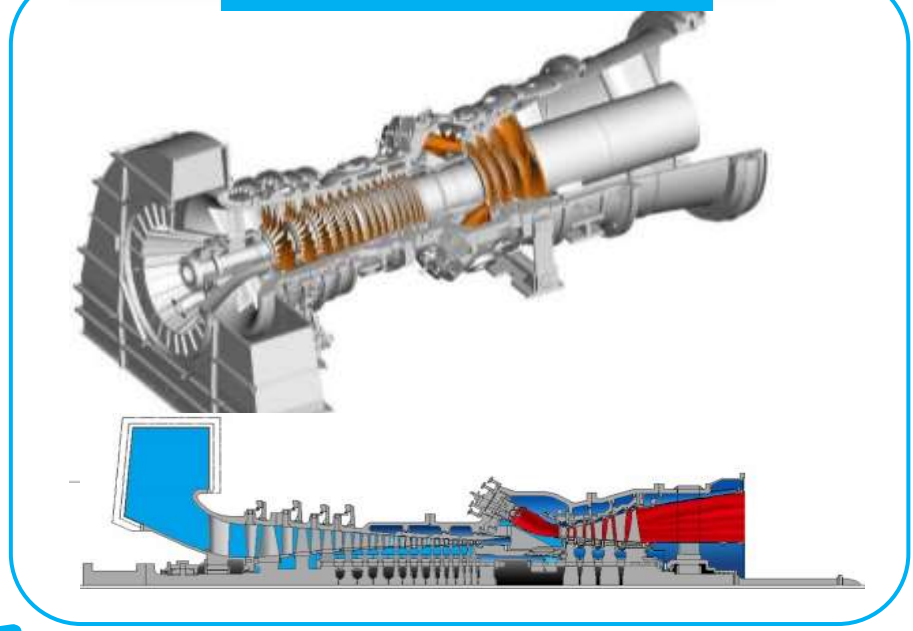
- GTの開発では、コストの低減と、期間短縮のために数値シミュレーションが活用されている。
- しかし、天然ガス中に水素を混合した際の影響を調査した研究は殆ど無く、
  数値シミュレーションの精度検証と、必要に応じたモデルの改良を進める必要がある。

シミュレーション技術
を積極的に活用

研究開発



設計



© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

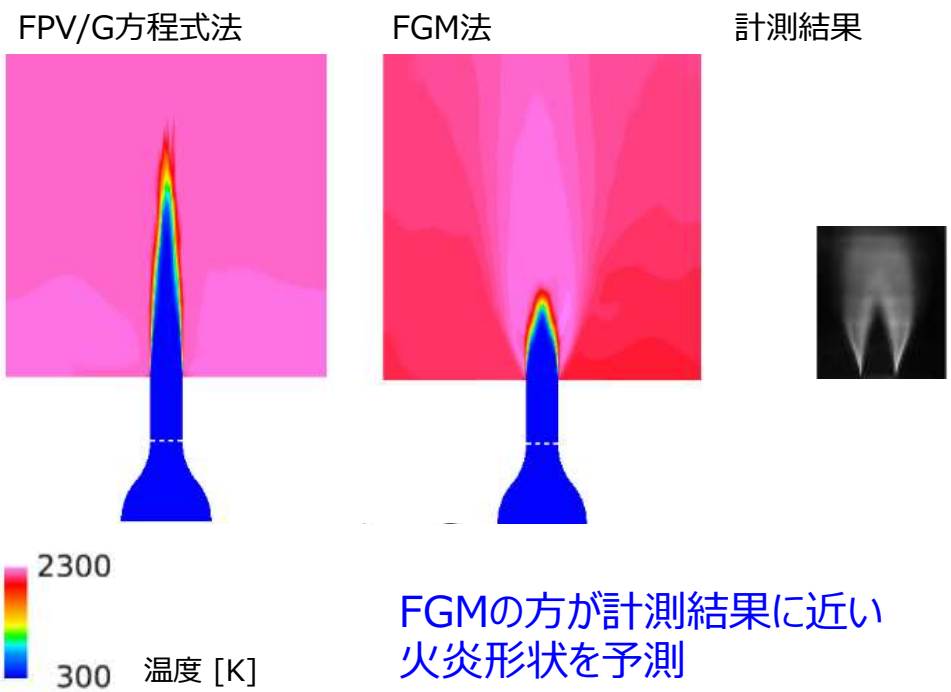
数値解析の高度化(京都大学)

- 2つの燃焼モデルを用いて、実験による燃焼速度を再現できるモデルを検証。
- FGM法による火炎分布から乱流燃焼速度STを算出した場合、実験値と概ね一致することを確認。

■燃焼モデル

燃焼モデル	データベースの火炎形態	火炎の追従方法
Flamelet Progress Variable(FPV)/G方程式法	拡散燃焼	燃焼速度から決定
Flamelet Generated Manifold(FGM)法	予混合燃焼	化学種濃度から決定

■阪大乱流バーナのLES解析

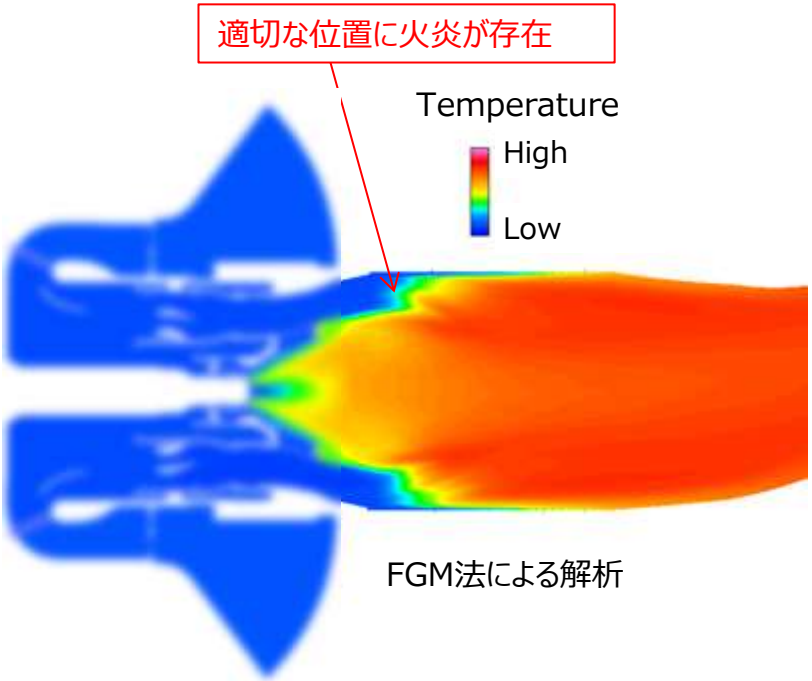


FGMの方が計測結果に近い
火炎形状を予測

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

数値シミュレーション手法

- GT燃焼器を対象に乱流バーナで良い一致を得られたFGM法で解析を実施した。
- GT燃焼器においても適切な位置に火炎位置が存在していることを確認した。



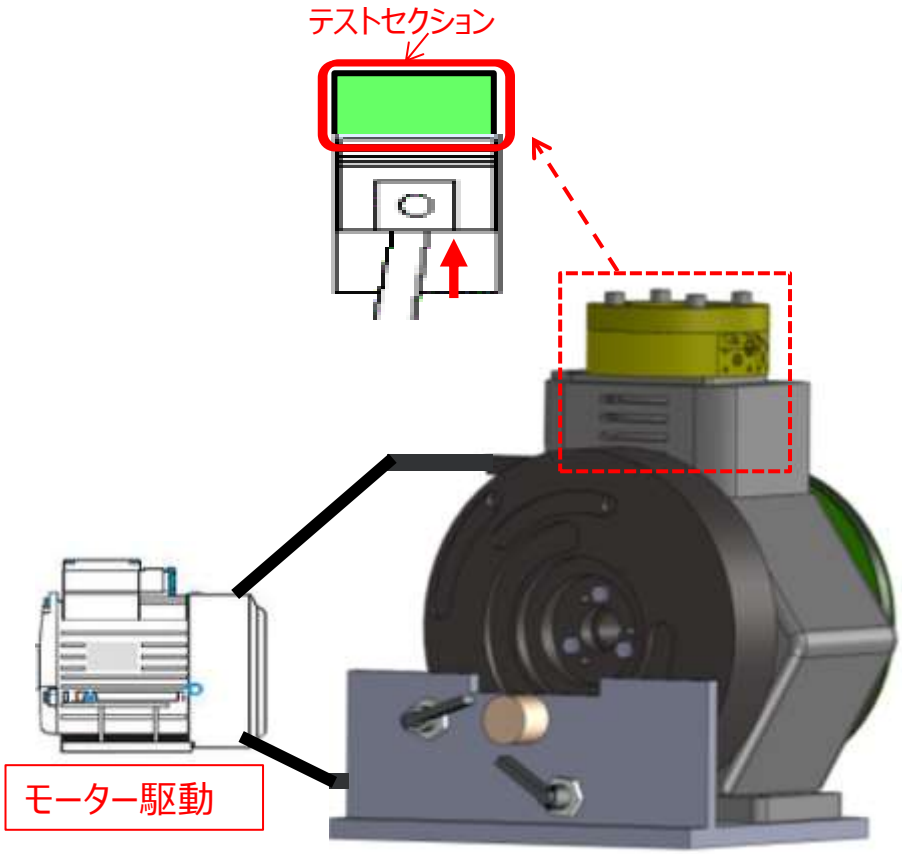
項目	設定
定常／非定常	非定常解析
圧縮／非圧縮	圧縮
燃焼／非燃焼	燃焼
乱流モデル	LES SGS: Dynamic SGS
乱流Sc／Pr	0.4／0.4
燃焼モデル	FGM

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

着火遅れ時間計測(名古屋工業大学)

- 水素は天然ガスに比べて着火遅れ時間が短いことが知られており、自己着火のリスクが増加する。
- 2017年度に製作した急速圧縮装置の適用により、実際のガスタービン燃焼器内部と同等の圧力条件において、着火遅れ時間の計測が可能となった。

モータリング機関をモータ駆動に改造して、高圧の急速圧縮装置を製作。燃焼室内圧は最大で2MPa以上を達成する事が可能。



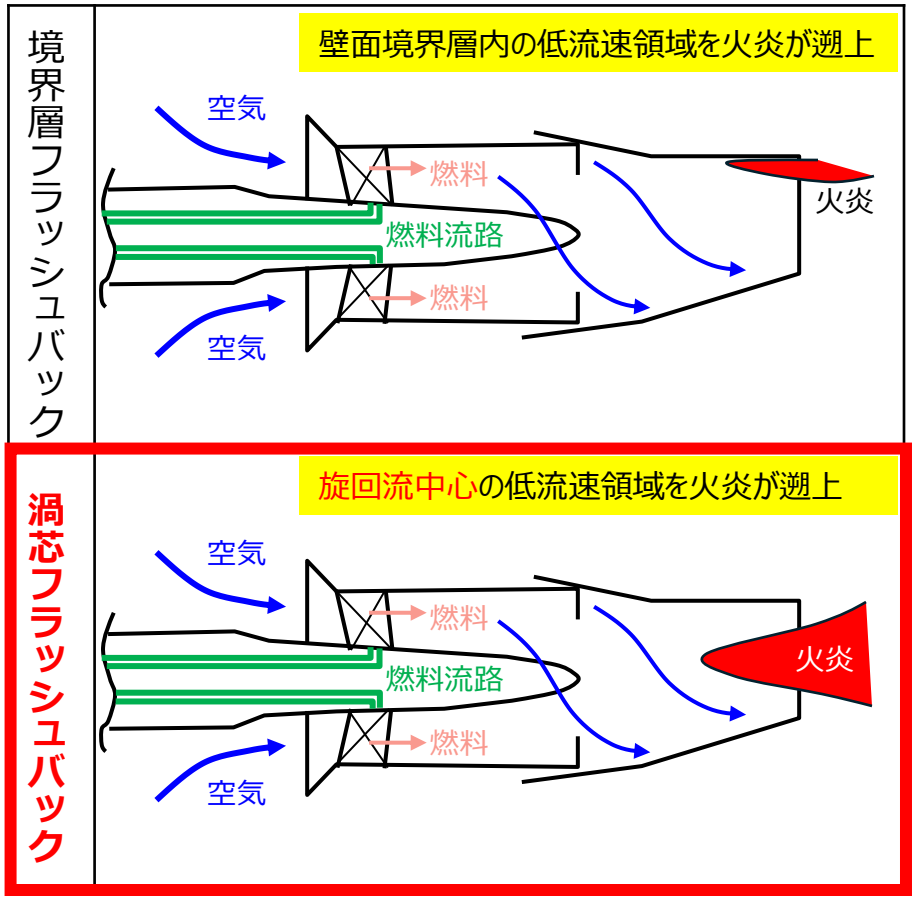
© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

水素混焼ガスタービン燃焼器の設計および検証 (MHPS/MHI)

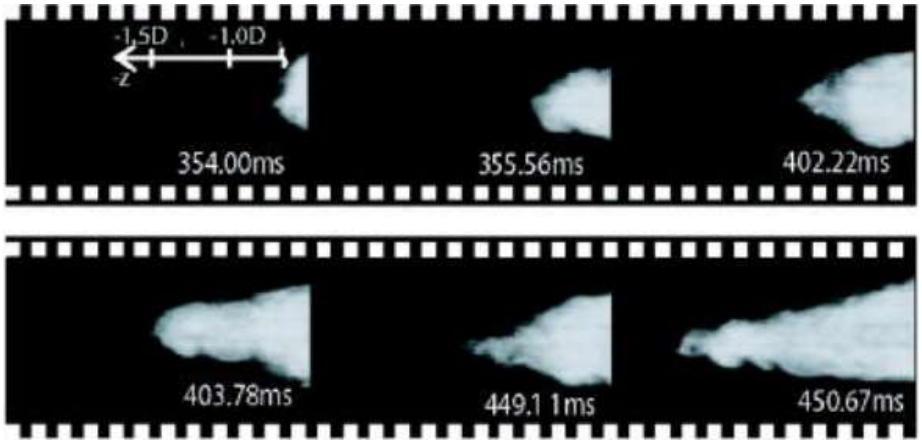
MHPS

- 旋回流(燃料混合に利用)を伴う燃焼における、逆火発生メカニズムについて文献および自社試験データにより調査・検討を実施。
- 旋回中心を火炎が遡上する“渦芯フラッシュバック”の発生が最も高リスクである事を確認した。

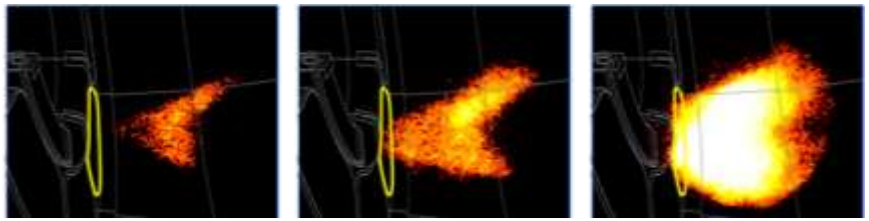
フラッシュバックの分類



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. Kiesewetter, M. Konle and T. Sattelmayer
J. Eng. Gas Turbines Power 129(4) (Apr 03, 2007)

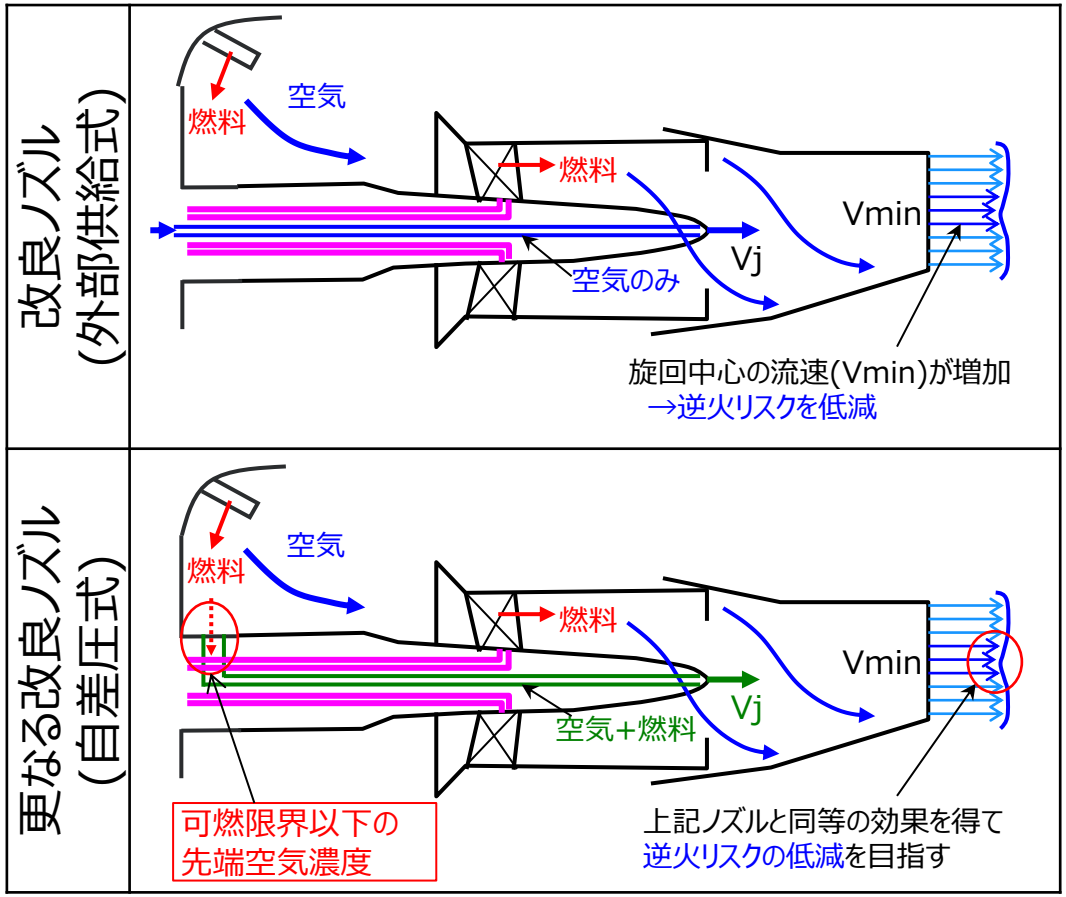


渦芯部を火炎が遡上 → 時間経過

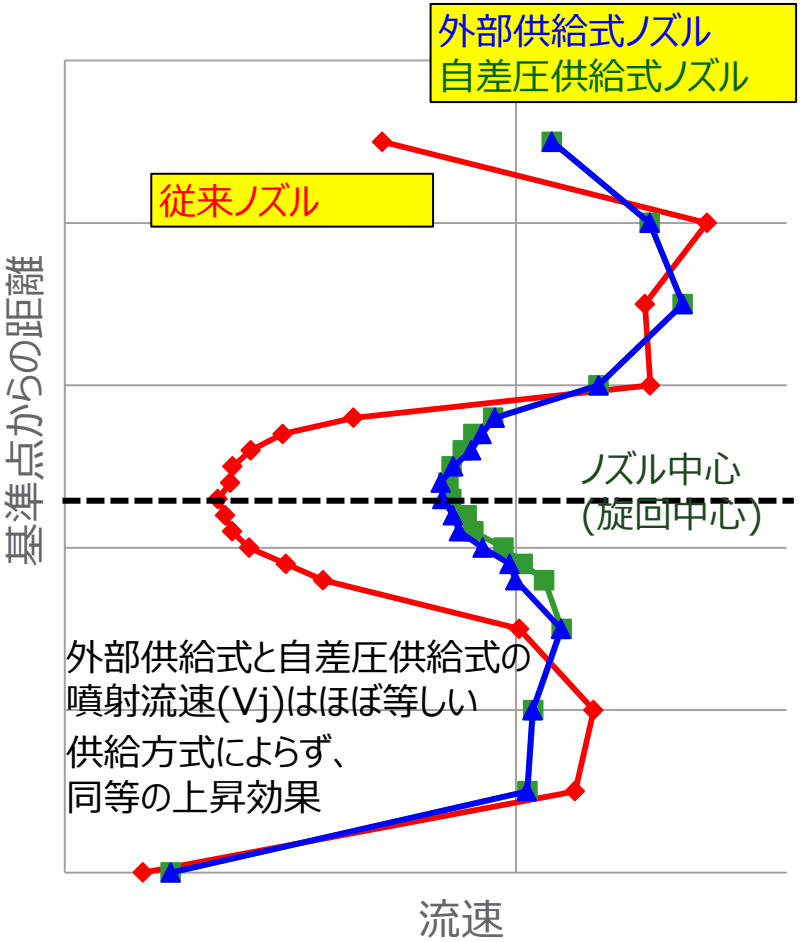
© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

水素混焼用改良ノズル

- 噴射空気供給系統を削除することで、燃焼器ノズル改造だけで適用可能なノズル構造を検討した。
- 本構造を採用する事により、大幅なコストの削減が可能。
- 気流試験により、自差圧構造に変更しても旋回中心の流速上昇に十分な効果があることが確認された。



図：2017年度のノズル改良内容



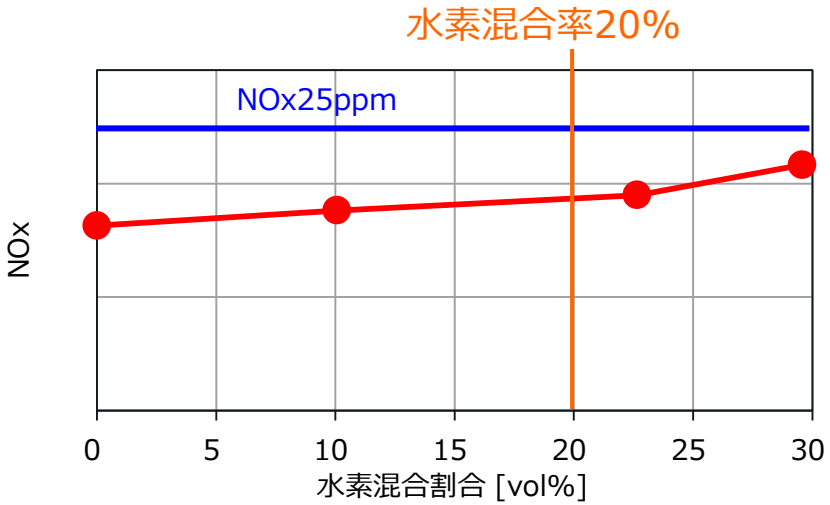
図：旋回流中心近傍の流速分布

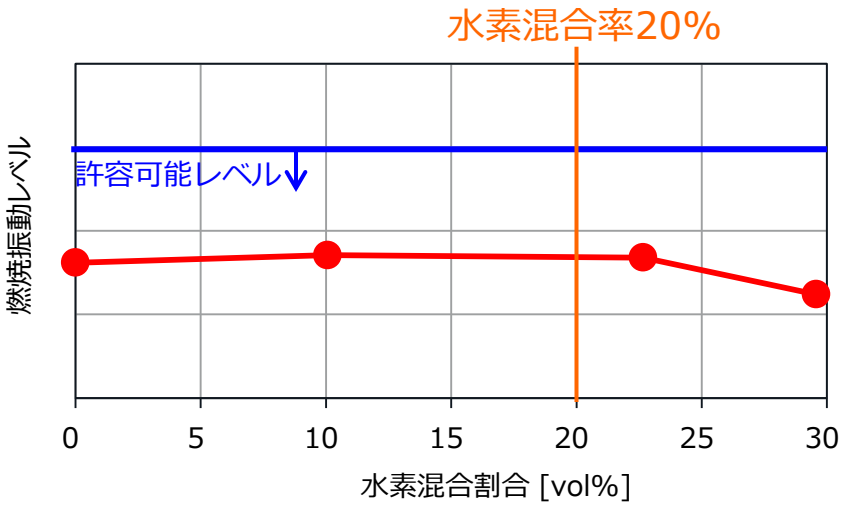
© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

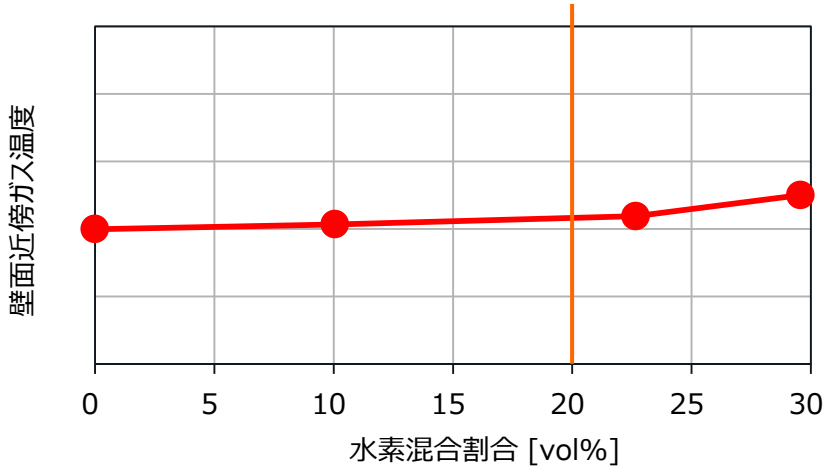
実圧燃焼試験結果

- 実圧燃焼試験により、自差圧方式の渦芯逆火防止ノズルに関する燃焼特性を検証した。
- 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した。

※T1T1600℃運転







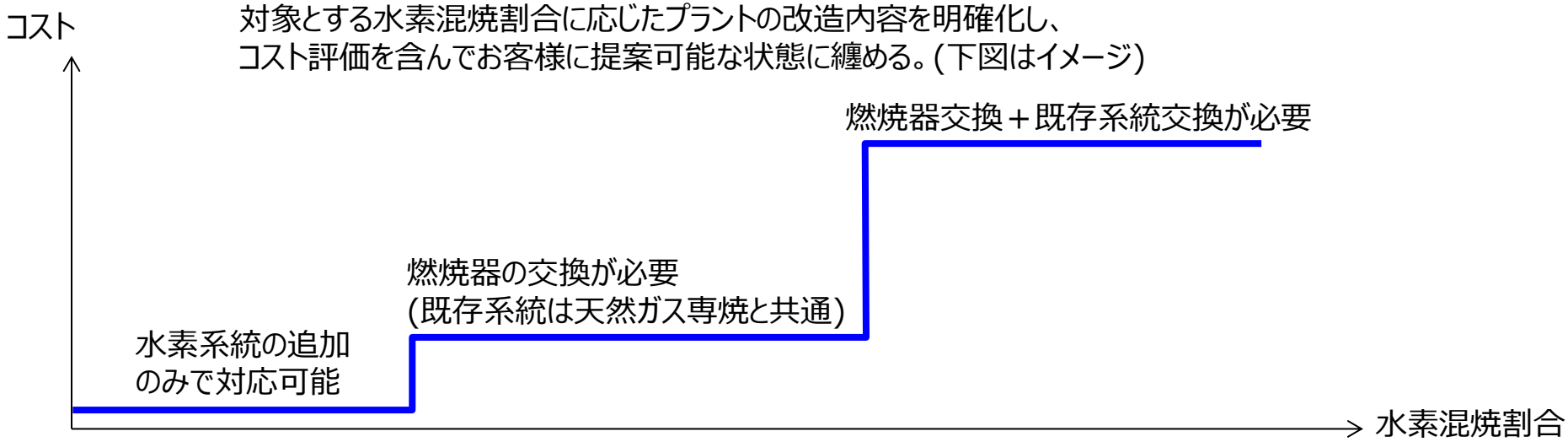
© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

プラント基本設計

- お客様の希望する水素混合割合に応じたプラント改造計画を提案可能なように、基本設計の完成を目指す。

No.	検討課題	項目	内容
①	従来システム範囲	**1.** 各機器の体格検討	制御弁，熱交換器の水素混合による体格見直し
②	水素混焼に伴う新規追加システム	**1.** 水素影響範囲	水素ガスの影響範囲の明確化
		2. 水素・天然ガスの混合	水素と天然ガスの均一混合のための系統構成検討
		3. 水素ガス供給条件安定化	想定される供給元の水素供給条件の確認と必要システムの確認
		4. 水素ガス供給量制御方針	ガスタービン（GT)制御とマッチングした水素供給量（混合率）の検討

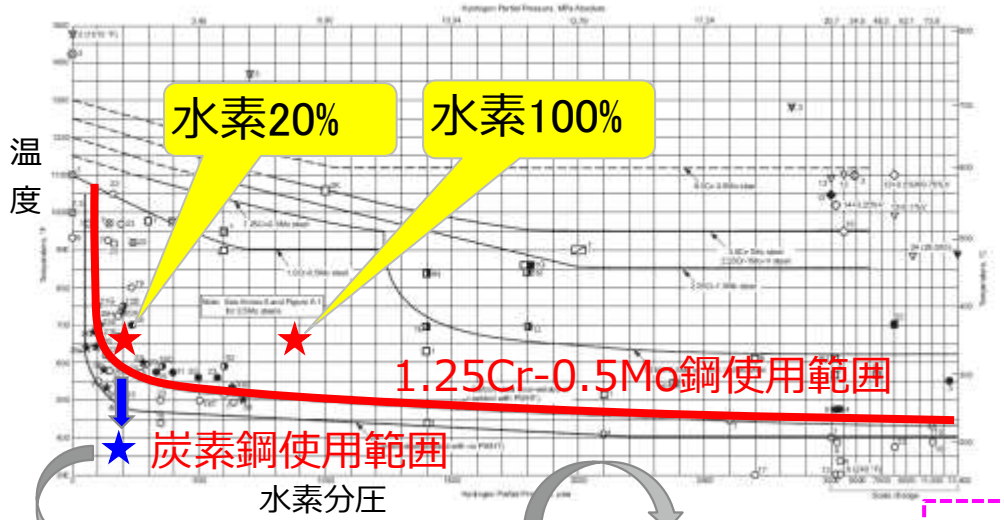
対象とする水素混焼割合に応じたプラントの改造内容を明確化し、
コスト評価を含んでお客様に提案可能な状態に纏める。(下図はイメージ)



© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

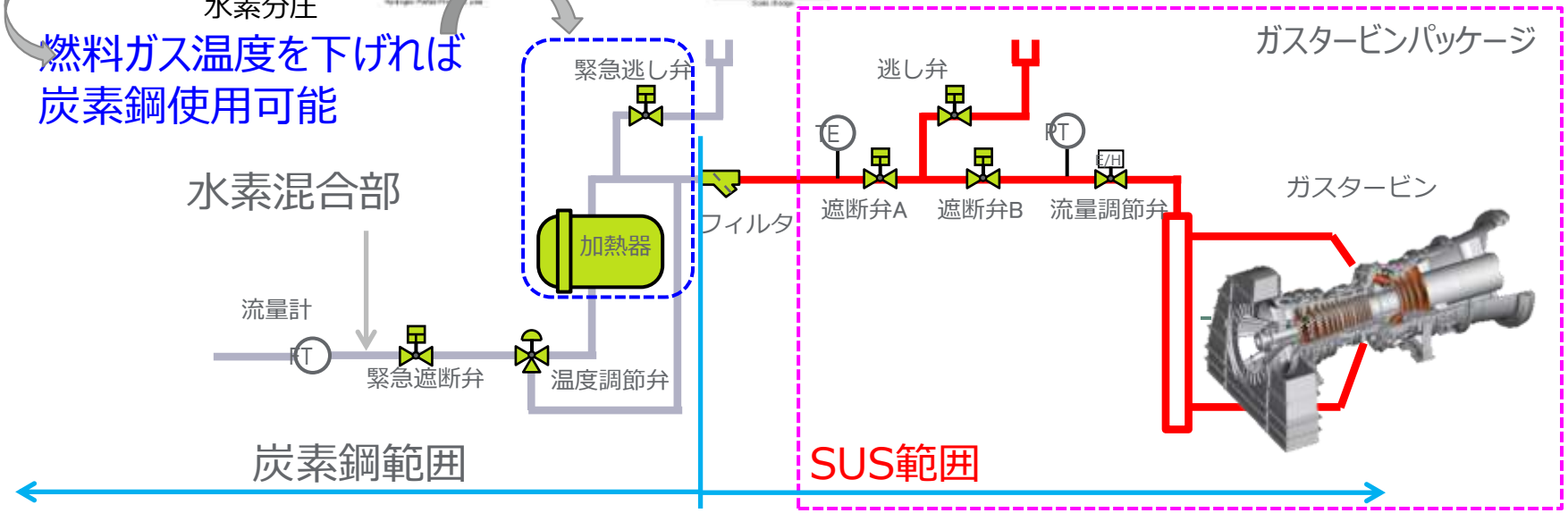
水素混焼燃料系統の材質検討

- API RP 941 8th Edition(2016)に従うと、1.25Cr-0.5Mo鋼もしくはSUSを選定する必要あり。
- ガスタービンパッケージ内は標準設計でSUS材を使用しているため、標準設計からの変更なし。
- ガスタービンパッケージ外は燃料ガス温度を下げれば標準設計からの変更なし。



API RP 941 8th Edition(2016)
ネルソンカーブ

燃料ガス温度を下げれば
炭素鋼使用可能

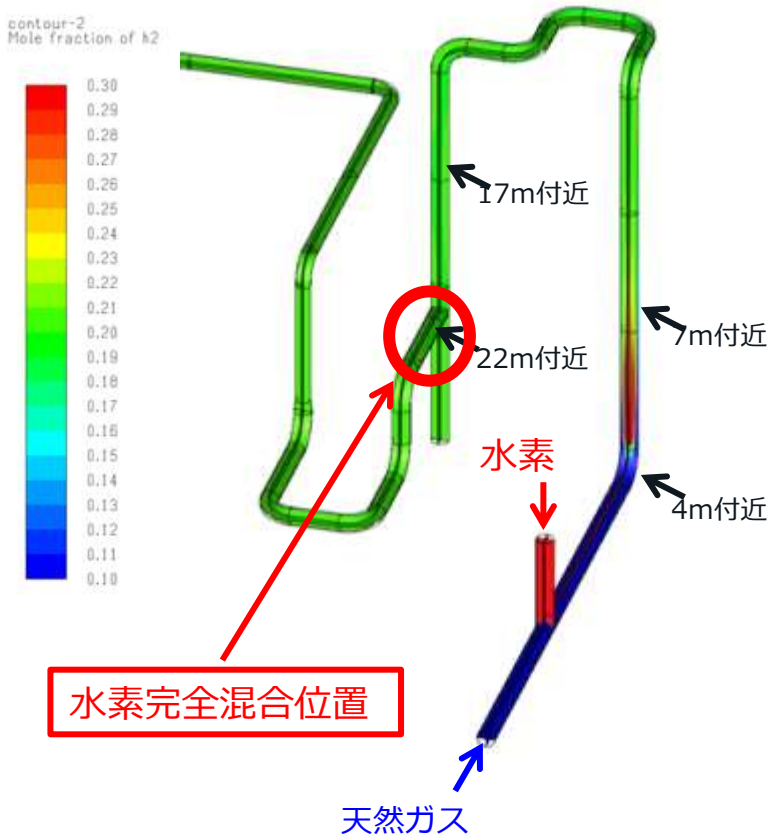


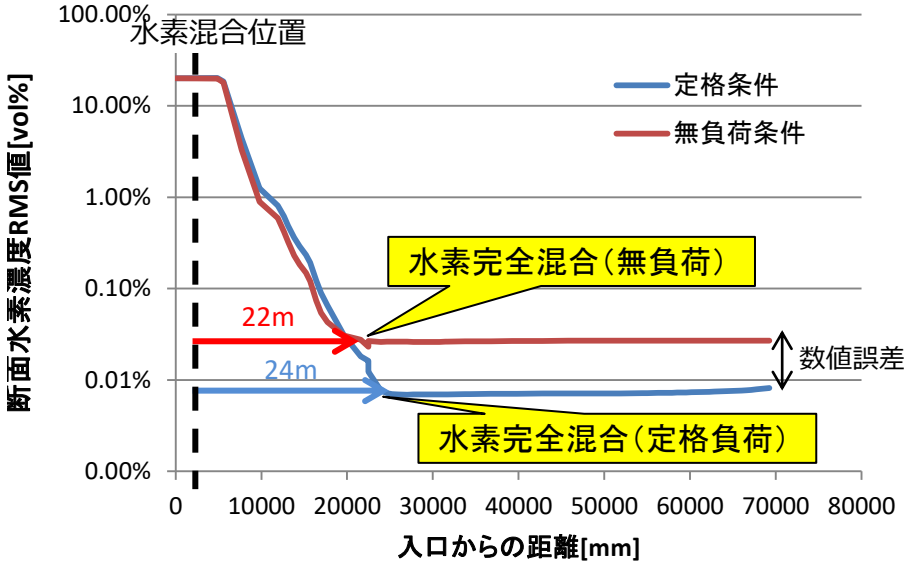
© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

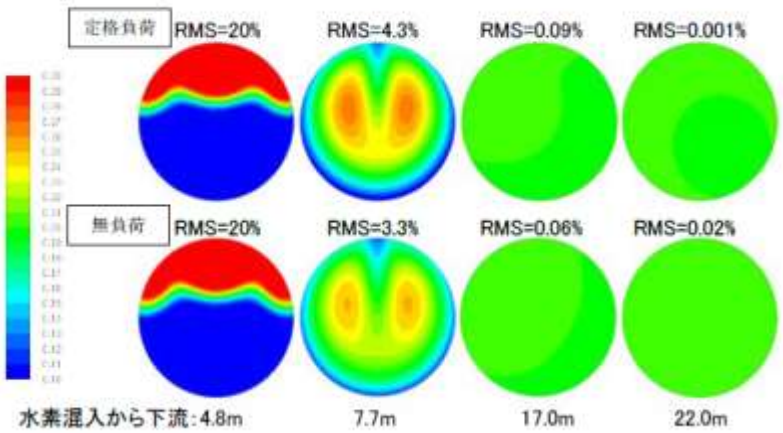
天然ガス・水素の混合配管

- 混合器を設置しない場合に配管の曲りのみで天然ガスと水素が混合するかCFDを実施し、水素混合部から24m下流で完全混合となることを確認できた。
- 通常Unitでは24m以上確保されており、問題なし(万一確保できない場合は混合器を設置)。

＜モデル＞（定格負荷）







© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

水素混焼プラント設計

＜まとめ＞

・水素供給系統を含め、水素混焼焚きにおけるプラントの基本設計を完了した。

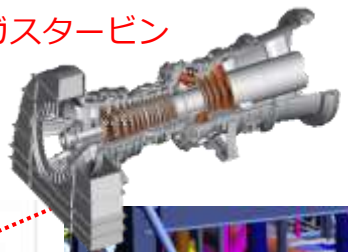
・発電設備敷地内で水素混合させる場合においても混合器等の追加設備は不要であること確認した。

・水素濃度20%においては既存の発電設備に水素系統を追加することで対応できることを確認した。

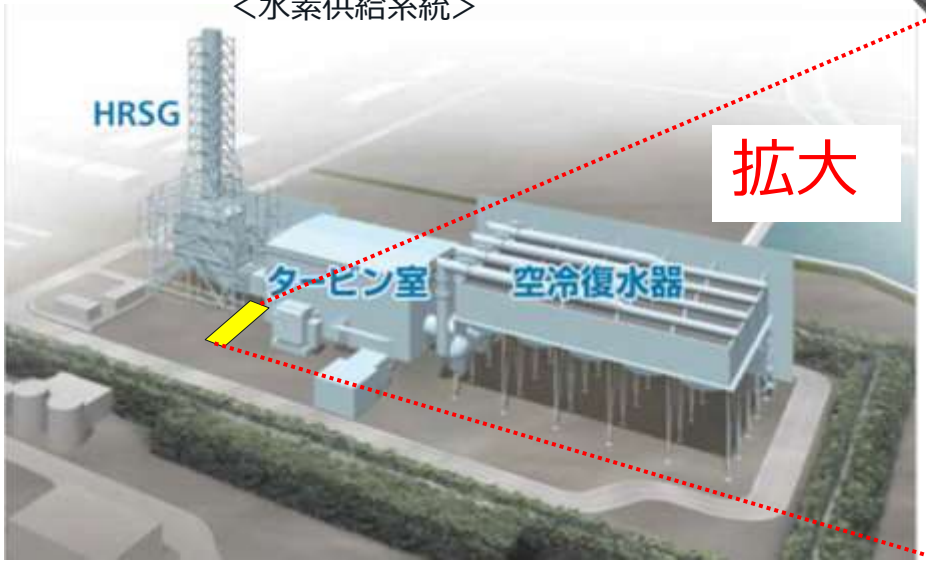
・燃料ガス管についてはガスタービンパッケージ内はSUSを使用しているため、標準設計を採用できること確認した。

・弊社実証設備へ水素系統を付加するシミュレーションを実施している。

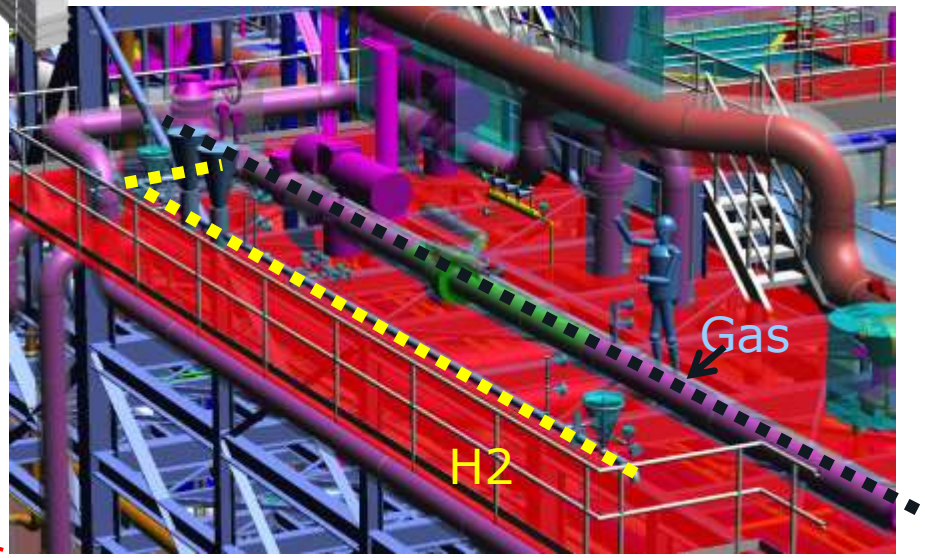
ガスタービン



＜水素供給系統＞



＜水素混焼焚き発電プラント＞



＜配管計画＞

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

成果・進捗まとめ

MHPS

実施項目	最終目標	成果内容	自己評価
A.燃焼器内部温度分布の予測技術	A-1 高圧条件において水素混合割合が燃焼速度に与える影響の明確化 A-2 実燃焼器において燃料中の水素混合割合の変化影響のシミュレーションによる予測 A-3 ガスタービン内部での自己着火による焼損リスクの評価	A-1 高圧条件下の燃焼速度を計測し、水素混焼の有無に係らず、層流燃焼速度で無次元化することで変動速度と乱流燃焼速度の関係を整理可能を明確化。 A-2 燃焼モデルとしてFGMモデルを適用し、解析により低空気量、高燃空比条件の逆火現象の再現可能を確認。 A-3 ガスタービン燃焼器内部と同等条件で着火遅れ時間を計測し、水素混焼運用時の自己着火発生による焼損のリスクが極めて低いことを確認	○
B.燃料成分の変化に対する安定運用範囲拡大技術	水素混焼割合20%の条件において天然ガス焚GTと同等の性能を有する燃焼器の開発	・渦芯フラッシュバックに対し高い耐性を有する改良燃焼器を開発。水素混合割合30%条件にて、安定燃焼が可能なことを実圧燃焼試験で確認 ・メインフィルム構造、上流ノズル構造を改良し、従来燃焼器の構造に対し、高いパージアウト耐性を有していることを確認	○
C.水素・天然ガス混焼プラントの設計技術	本事業成果の商品化に向けた基本設計(商品パッケージ化)の完了	・水素混焼焚きにおけるプラントの基本設計が完了 ・混合器等の追加設備は不要で、既存の発電設備への水素系統の追加で対応可能を確認	○

◎：大幅達成、○：達成、△：一部達成、×：未達

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

進捗管理および知的財産権の戦略

MHPS

◆研究開発の進捗管理

	2015年度		2016年度		2017年度		2018年度	
	完了数	設定件数	完了数	設定件数	完了数	設定件数	完了見込数	設定件数
年度課題数	8	8	7	8	7	7	6	5
累計課題数	8	8	15	16	22	23	28	28
完了率(年度)(%)	100%		88%		100%		120%	
完了率(累計)(%)	100%		94%		96%		100%	

◆知的財産権の戦略

	出願日	出願番号	発明の名称	出願人
①	2016年3月30日	特願2016-068018	ガスタービン	三菱重工業株式会社 三菱日立パワーシステムズ株式会社
②	2016年3月30日	特願2016-069384	燃焼器、及びガスタービン	三菱重工業株式会社 三菱日立パワーシステムズ株式会社
③	2016年3月30日	特願2016-067125	燃焼器、及びガスタービン	三菱重工業株式会社 三菱日立パワーシステムズ株式会社
④	2017年4月28日	特願2017-090792	燃焼器ノズル、燃焼器およびガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
⑤	2017年10月27日	特願2017-208504	ガスタービン燃焼器予混合ノズル	三菱日立パワーシステムズ株式会社

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

実用化・事業化の見通し

・NEDO「我が国における水素発電導入可能性に関する調査」に代表されるように、国内の電力会社における検討が開始されています。

・海外においても水素の発電利用は再生可能エネルギーの利用拡大に伴うエネルギー貯蔵ニーズとして関心が高まっており、複数の発電所で検討が開始されています。

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.

Power for a Brighter Future

© 2019 Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. All Rights Reserved.