

終 了 報 告 書

S I P（戦略的イノベーション創造プログラム）

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名

「水素燃焼技術の開発」（2014/9/1-2016/3/31）

「水素エンジン技術開発」（2016/4/1-2018/3/31）

研究題目

「水素ガスタービン燃焼技術」（2014/9/1-2016/3/31）

「水素エンジンシステム性能評価技術」（2016/4/1-2018/3/31）

研究開発期間： 平成26年9月1日～平成30年3月31日
研究担当者： 饒 雅英
所属研究機関： 川崎重工業株式会社

1. 本研究の目的
 - 1-1. 水素ガスタービン
 - 1-2. 水素ガスエンジン
2. マイルストーン
 - 2-1. 水素ガスタービン
 - 2-2. 水素ガスエンジン
3. 研究実施内容
 - 3-1. 水素ガスタービン
 - 3-1-1. 水素ドライ低 NO_x 燃焼器の開発
 - 3-1-1-1. 2MW 級ガスタービン用プロトタイプ的设计製作と低圧燃焼試験
 - 3-1-1-1-1. プロトタイプ燃焼器的设计製作
 - 3-1-1-1-2. 低圧燃焼試験と改良
 - 3-1-1-2. 高圧燃焼試験による燃焼特性の取得
 - 3-1-1-2-1. 高圧燃焼試験設備
 - 3-1-1-2-2. 高圧燃焼試験の試験結果と評価
 - 3-1-1-3. プロトタイプ燃焼器の改良
 - 3-1-1-3-1. 更なる低 NO_x 化の検討
 - 3-1-1-4. 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器的设计
 - 3-1-1-4-1. 2MW 級ガスタービンと 7MW 級ガスタービンの比較
 - 3-1-1-4-2. 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器的设计
 - 3-1-2. 2MW 級ガスタービンエンジン実証試験設備の基本設計
 - 3-1-2-1. 2MW 級ガスタービンエンジン試験設備の概要
 - 3-1-2-1-1. 設備概要
 - 3-1-2-1-2. 設備機能
 - 3-1-2-1-3. 建設予定地
 - 3-1-2-2. 2MW 級ガスタービンエンジン試験設備の基本設計
 - 3-1-2-2-1. 設備イメージ図
 - 3-1-2-2-2. 設備全体フロー
 - 3-1-2-2-3. 全体配置計画図
 - 3-1-3. まとめ
 - 3-1-4. 今後の課題
 - 3-2. 水素ガスエンジン
 - 3-2-1. 給気冷却によるエンジン高熱効率化検討
 - 3-2-1-1. 給気冷却によるエンジン高熱効率化検討の流れ
 - 3-2-1-2. 液体水素冷熱利用による熱効率向上の仕組み
 - 3-2-1-3. 東京都市大学 小型試験エンジンでのエンジンモデルと給気冷却効果試算
 - 3-2-1-4. 大型実機エンジン仕様検討

- 3-2-1-5. まとめと今後の課題
- 3-2-2. エンジン排熱回収による効率向上
 - 3-2-2-1. 排熱回収システム
 - 3-2-2-2. 飽和蒸気での検討
 - 3-2-2-3. 過熱蒸気での検討
 - 3-2-2-4. まとめと今後の課題
- 3-2-3. 小型試験エンジン仕様最適化
 - 3-2-3-1. シミュレーションによる試験エンジン仕様最適化
 - 3-2-3-2. エンジンモデル作成と合わせ込み
 - 3-2-3-3. 最適化結果
 - 3-2-3-4. まとめと今後の課題
- 4. 外部発表実績
 - 4-1. 論文発表
 - 4-2. 学会、展示会等発表
 - 4-3. プレス発表
 - 4-4. マスメディア等取材による公表
- 5. 特許出願実績
- 6. 参考文献

図表一覧

- 図 1-2-1. 水素ガスエンジン開発の概要
- 図 3-1-1. 2MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の全体図
- 図 3-1-2. CFD 数値解析の結果例
- 図 3-1-3. 試作したプロトタイプ燃焼器
- 図 3-1-4. 川崎重工明石工場内の低圧環境燃焼試験設備に設置したプロトタイプ燃焼器
- 図 3-1-5. 燃料ステージング
- 図 3-1-6. 着火時の燃焼器内部
- 図 3-1-7. 水素燃焼試験時の NO_x 排出特性
- 図 3-1-8. 燃料の急遮断試験時における火炎の安定性確認
- 図 3-1-9. 定格負荷相当条件時の燃焼器内部
- 図 3-1-10. サーモペイント試験による高温箇所の特定
- 図 3-1-11. 冷却改良後の水素バーナモジュール
- 図 3-1-12. 高圧燃焼試験設備（ドイツ RWTH アーヘン大学）
- 図 3-1-13. 高圧燃焼試験設備に設置した燃焼器
- 図 3-1-14. プロトタイプ燃焼器の高圧水素試験の試験結果（NO_x 排出特性）
- 図 3-1-15. 水素バーナのエッジ部
- 図 3-1-16. 水素バーナのエッジ部形状の違いによる高温場形成の違い（CFD 燃焼解析結果例）
- 図 3-1-17. 時系列 PIV 計測システムと計測結果例
- 図 3-1-18. 2MW 級ガスタービンと 7MW 級ガスタービンの比較
- 図 3-1-19. 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の全体図
- 図 3-1-20. エンジン実証試験設備フロー（初期検討）
- 図 3-1-21. 実証試験設備イメージ

- 図 3-2-1. 液体水素の冷熱を利用したエンジンの高効率化手法イメージ
- 図 3-2-2. 東京都市大学 小型試験エンジン
- 図 3-2-3. 小型試験エンジン シミュレーションモデル
- 図 3-2-4. 筒内圧力シミュレーション結果（合せ込み後）
- 図 3-2-5. 小型試験エンジン 給気冷却システム構成
- 図 3-2-6. 当社天然ガスエンジン
- 図 3-2-7. 筒内圧力シミュレーション結果（最適化後）
- 図 3-2-8. 大型実機エンジン 給気冷却システム
- 図 3-2-9. 大型実機エンジン 給気冷却試算結果
- 図 3-2-10. 産総研 小型試験エンジン
- 図 3-2-11. 試験エンジンシミュレーションモデル
- 図 3-2-12. 筒内圧力シミュレーション結果（合せ込み後）
- 図 3-2-13. 小型試験エンジン 最適化結果

表 2-1-1. 水素ガスタービン開発スケジュール

表 2-2-1. 本研究の技術目標を達成するための全体マイルストーン

表 3-1-1. 低圧燃焼試験条件

表 3-1-2. エンジン実証試験設備概要

表 3-2-1. 小型試験エンジン 給気冷却シミュレーション結果

表 3-2-2. 大型実機エンジンシミュレーション結果

表 3-2-3. 大型実機エンジン給気冷却仕様・試算結果比較

表 3-2-4. 飽和蒸気ボイラ試算結果

表 3-2-5. 飽和蒸気による発電量の試算結果

表 3-2-6. 過熱蒸気ボイラでの試算結果

表 3-2-7. 最適化パラメータ

表 3-2-8. 出力パラメータ

1. 本研究の目的

1-1. 水素ガスタービン

現在、需要が顕在化している副生水素を燃料としたガスタービン発電においては、排気ガスを低NO_x化するために蒸気噴射型の低NO_x燃焼器が用いられている。蒸気噴射型の場合、ガスタービン発電プラント全体としての効率低下が生じる。

本研究では、蒸気噴射による低NO_x化の代わりに、ドライ型低NO_x 水素燃焼技術を開発することにより、ガスタービン発電プラント全体としての効率を低下させることなく排気ガス中のNO_x低減を可能とし、水素混焼から水素専焼までのあらゆる濃度に対応可能なガスタービン開発確立により、水素ガスタービン市場の拡大により水素需要量の増大に貢献することを目的とする。

水素ガスタービンのキーコンポーネントは、水素を空気と混合し燃焼させる燃焼器であり、技術課題はこの燃焼器で天然ガスと比較して燃焼速度が速く、火炎温度が高い水素を燃料として燃焼させる際に、燃焼器部品を焼損させず、かつ、大量に発生する窒素酸化物 NO_x 低減する技術を開発する事である。

社会導入において水素ガスタービンの排ガス中の NO_x 発生量は大気汚染防止法で定められた 70ppm(残存酸素 16%換算値)を下回り、実際の製品化ではガスタービン運転状態の変化や製品のバラツキを考慮しても、この規制値を十分に下回ることが可能な目標として燃焼器の出口における NO_x 値は 35ppm(残存酸素 16%換算値)を目標とした。

1-2. 水素ガスエンジン

水素ガスエンジンでは、研究目標として、オープンサイクル型直噴水素エンジンにより、エンジン単体熱効率が 50%を超えつつ NO_x を 200ppm (O₂=0%換算) に抑える高効率・クリーン燃焼技術を実証することを目指した。これらの研究開発目標は MW 級ガスエンジンとして何れも世界最高水準であり、高効率・クリーンな水素燃焼を実現するための液体水素昇圧ポンプおよび高圧水素インジェクタの技術開発も並行して行い、長期使用に耐えうる高い信頼性技術を構築し、実用システムにおいても十分に高いパフォーマンスを発揮することを目指す。研究開発体制と役割を図 1-1 に示す。

また、エンジンシステム全体の総合効率を向上させるために、水素の冷熱やエンジンの排熱の利用、発電・推進プラント全体を見たシステム検討を行い、使用用途に合った最適なシステムの提案を行うことも目標とした。

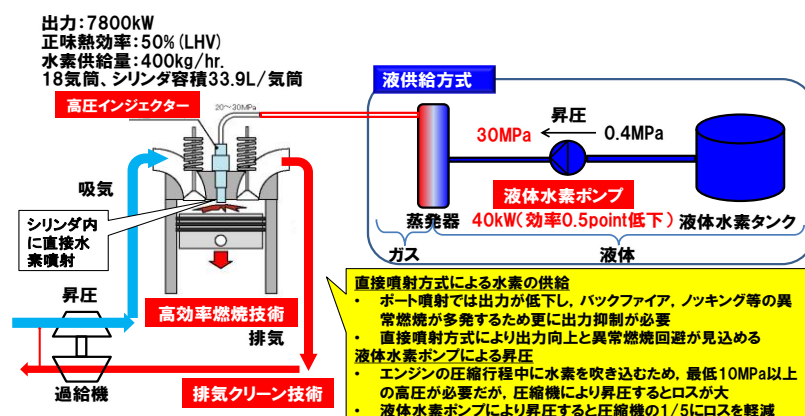


図 1-2-1. 水素ガスエンジン開発の概要

2. マイルストーン

2-1. 水素ガスタービン

全体スケジュールを表 2-1-1 に示す。

表 2-1-1. 水素ガスタービン開発スケジュール

SIP 水素DLE燃焼器開発	FY H	2014 26	2015 27	2016 28	2017 29	2018 30
各年のアウトプット		2MW級GT用 ドライ低NOx燃焼器設計完了	2MW級GT用 ドライ低NOx燃焼器 高圧試験で50ppm以下	・2MW級GT用 ドライ低NOx燃焼器 完成 高圧試験で35ppm以下 ・7MW級GT用 ドライ低NOx燃焼器 高圧試験で50ppm以下	・2MW級GT用 実条件試験設備完成 ・7MW級GT用 ドライ低NOx燃焼器 完成 高圧試験で35ppm以下	2MW級GT用燃焼器 実条件試験完了
2MW級GT用ドライ低NOx燃焼器 基本設計 燃焼器製作 低圧試験 可視化試験 高圧試験および改良		(2.5)	(1.0) (2.5) (0.5) (1.5)	(0.5) (1.0)	燃焼器完成	
実条件(エンジン)試験装置 検討・設計 製作・設置 実条件試験			(0.5)	(1.0)	(1.0) 試験装置完成 (3.0)	(5.0) 実条件試験完了
7MW級GT用ドライ低NOx燃焼器 基本設計 燃焼器製作 低圧試験 可視化試験 高圧試験および改良			(0.5)	(0.5) (0.5) (0.5) (1.0) (0.5)	(1.0) 燃焼器完成	

特に重要なマイルストーン

初年度：2MW 級 GT 用ドライ低 NOx 燃焼器 設計完了

2 年度：2MW 級 GT 用ドライ低 NOx 燃焼器 高圧試験で NOx50ppm 以下達成、実条件試験設備設計完了

3 年度：2MW 級 GT 用ドライ低 NOx 燃焼器 完成 高圧試験で NOx35ppm 以下

4 年度：7MW 級 GT 用ドライ低 NOx 燃焼器 完成 高圧試験で NOx35ppm 以下、実条件試験設備完成

5 年度：2MW 級 GT 用ドライ低 NOx 燃焼器 実条件（エンジン）試験完了

※H27 年度までの研究開発により、2MW 級ガスタービン用のドライ型低 NOx 水素燃焼器の性能試験において 40ppm(残存酸素 16%換算値)を下回る性能を達成することが出来、ドライ型低 NOx 水素燃焼の基礎技術は確立した。よって、H27 年度をもって水素ガスタービン燃焼技術は SIP での開発を終了した。

2-2. 水素ガスエンジン

本研究全体の目標（表 2-1）はエンジン単体熱効率 50%、NOx200ppm 以下（酸素 0%換算）である。熱効率に関しては、エンジンの水素噴流・燃焼火炎制御などによるエンジンサイクル効率向上や冷却損失低減等、内部的な手段で行う計画である。一方、当社では、熱効率・排ガス性能を更に向上させる一つの技術として、外部的な手段である給気冷却/排ガスエネルギー回収の検討も行う。

表 2-2-1. 本研究の技術目標を達成するための全体マイルストーン

技術目標値	H26	H27	H28	H29	H30
		* 7MW級エンジン単体の正味熱効率(LHV) ** O ₂ =0%換算			
サイクル理論・システム検討  	熱効率* NOx**	45% ▼	50% ▼	50% ▼ 400ppm	50% ▼ 200ppm
オープンサイクルエンジン    	オープンサイクルエンジン における技術課題を導出 (東京都市大)	水素当量比センシング（火花放電ブレイク ダウン分光法（Spark Induced Breakdown Spectroscopy, SIBS）の要素 技術開発（岡山大）			
		水素噴流の過濃混合気塊への点火・燃焼室壁面に付 着しない混合気塊の形成等（東京都市大、岡山大）			
		水素噴流燃焼制御（可視化、シミュレーション） （東京都市大、岡山大、産総研）			
東京都市大所有の 小型単気筒オープンサイクル エンジンで実現		冷却損失 低減	空気導入 改善	オープンサイクル モデル試験実証	
	サイクルシミュレーションシステム検証：作動ガス組成、圧縮比 レーション検討 等の最適化により高効率化および低NOx化を、 数値シミュレーションやモデル試験により検証				
高圧水素噴射弁  		単体試験 装置によ り実現			
液体水素昇圧ポンプ 		試設計、試作、課題抽出・解決、実装 （噴射弁）、噴射弁・ポンプの効率化			

※H29年度までの研究開発により、熱効率 50% (7MW 級実機換算)、NOx200ppm (酸素濃度 0%換算) が達成できたため、本研究開発は終了した。

当社における研究開発のマイルストーンとしては、以下のように設定した。

- ・ H 2 8 年度：
 - － 産総研・東京都市大などと連携して、水素燃料供給システムとして検討されている液体水素の強制気化過程で発生する冷熱を利用したエンジンの高効率化について、一次元のシミュレーションツールを使用して効果を検討する。
- ・ H 2 9 年度：
 - － エンジン排気中の排熱を回収し、エンジンの全体熱効率を向上させる手段を検討し、その効果を確認する。
 - － 小型試験エンジンでの試験を効率的に行うために、一次元シミュレーションツールを用いて、最適なエンジン仕様を検討する。

3. 研究実施内容

3-1. 水素ガスタービン

3-1-1. 水素ドライ低 NOx 燃焼器の開発

3-1-1-1. 2MW 級ガスタービン用プロトタイプ的设计製作と低圧燃焼試験

3-1-1-1-1. プロトタイプ燃焼器的设计製作

2014年度、プロトタイプ燃焼器の全体設計を行った。図3-1-1にプロトタイプ燃焼器の全体図を示す。

図 3-1-2 に燃焼器設計時に活用した CFD 数値解析の結果例を示す。ケーシングと燃焼器の隙間を通過した高温、高圧の空気は、整流板により一様化され micro-mix バーナに供給される。micro-mix バーナの水素供給リングの背後に循環域が形成され、水素火炎を安定化させる役割を果たす。水素火炎の形状およびサイズは小さく、燃焼反応は短い時間と距離で完結される。

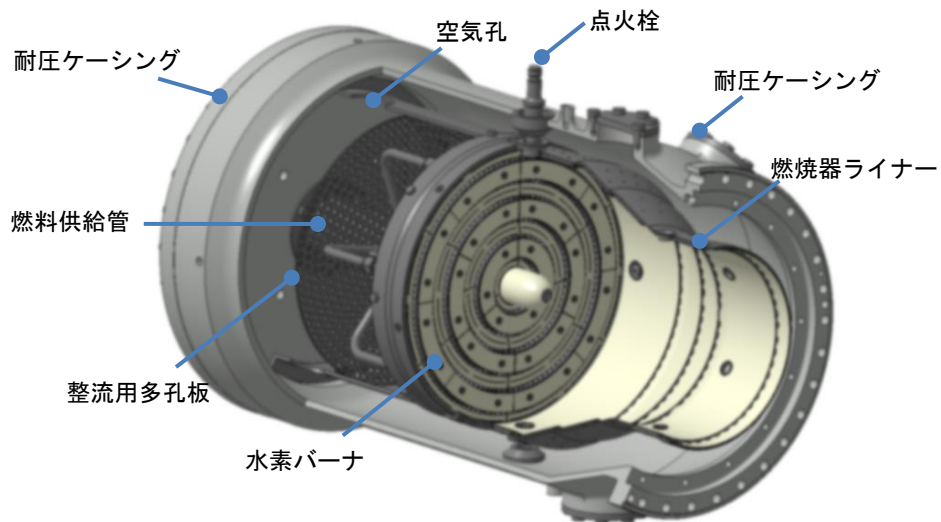


図 3-1-1. 2MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の全体図

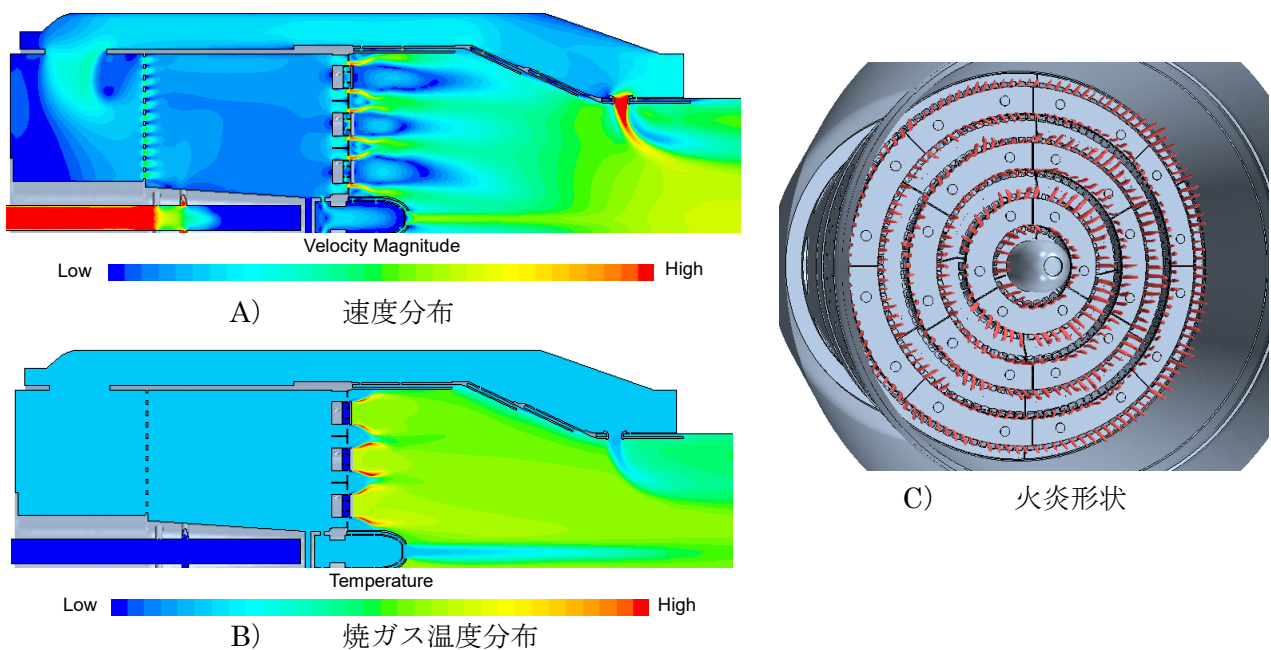
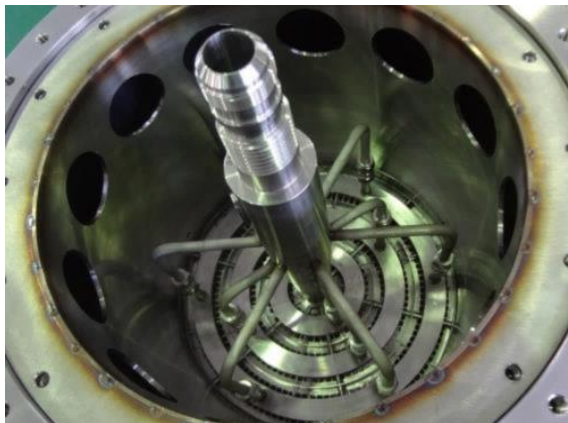


図 3-1-2. CFD 数値解析の結果例

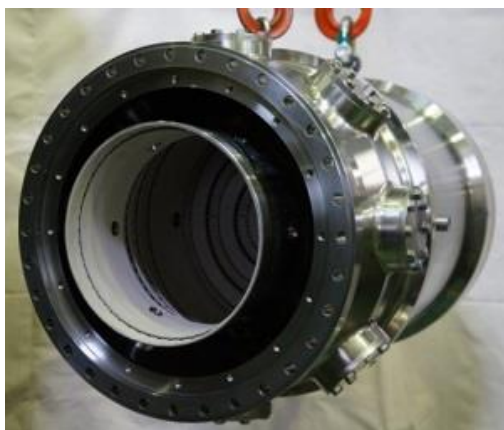
図 3-1-3 に試作したプロトタイプ燃焼器を示す。この写真では、水素は 1 つの水素供給口から供給され、3 つの水素供給リングに均等に分配される。燃焼器の内部は、水素火炎からの高温ガスに晒されるため、セラミックコーティングを施してある。



A) micro-mix バーナ部



B) 水素供給部



C) 試作燃焼器組立て状態



D) 燃焼器内部

図 3-1-3. 試作したプロトタイプ燃焼器

3-1-1-1-2. 低圧燃焼試験と改良

試作燃焼器を用いて水素燃焼特性および低 NO_x 性能を確認するための予備試験を川崎重工明石工場内の低圧環境燃焼試験設備にて実施した。約 2 気圧に加圧された空気は、ヒータにより加温され燃焼器に送られる。水素は試験条件により調整される。燃焼特性を把握するための燃焼ガス温度、燃焼ガス組成等を計測した。図 3-1-4 に試験設備に設置された試作燃焼器を示す。

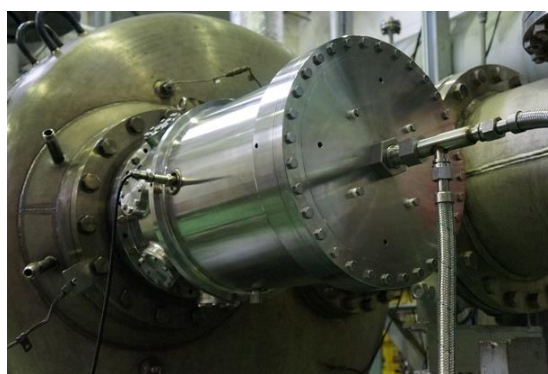


図 3-1-4. 川崎重工明石工場内の低圧環境燃焼試験設備に設置したプロトタイプ燃焼器

表 3-1-1 に予備試験時の条件を示す。全圧損失率は式（１）にて定める。

表 3-1-1. 低圧燃焼試験条件

項目	単位	値
入口空気温度	K	2MW級ガスタービンに同じ
入口空気圧力	MPa	0.2
全圧損失率	%	2.5

$$\text{全圧損失率} = \frac{\Delta P}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (1)$$

P_{in} : 燃焼器入口圧力, P_{out} : C 燃焼器出口圧力 (燃焼時)

試験では、燃料ステージングを用いた。燃料ステージングとは、図 3-1-5 に示す様に、アイドルから 30% 負荷相当条件（低負荷条件）までは、内側 2 つの水素供給リングより水素を供給、30% 負荷相当条件から定格負荷相当条件（高負荷条件）までは 3 つのすべての水素供給リングから水素を供給する。

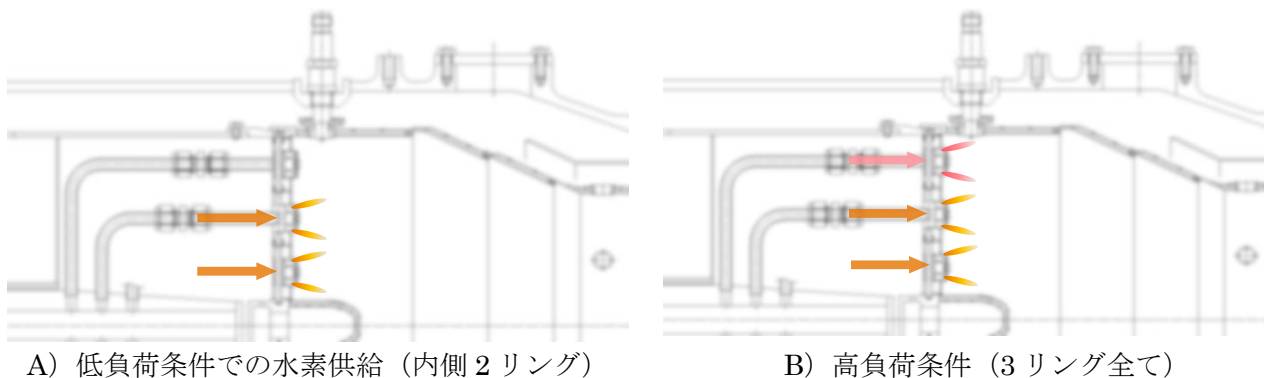


図 3-1-5. 燃料ステージング

着火は、安全のために天然ガスにて行い、火炎が安定したのちに水素に切り替えた。図 3-1-6 に着火時の燃焼器内部の様子を示す。

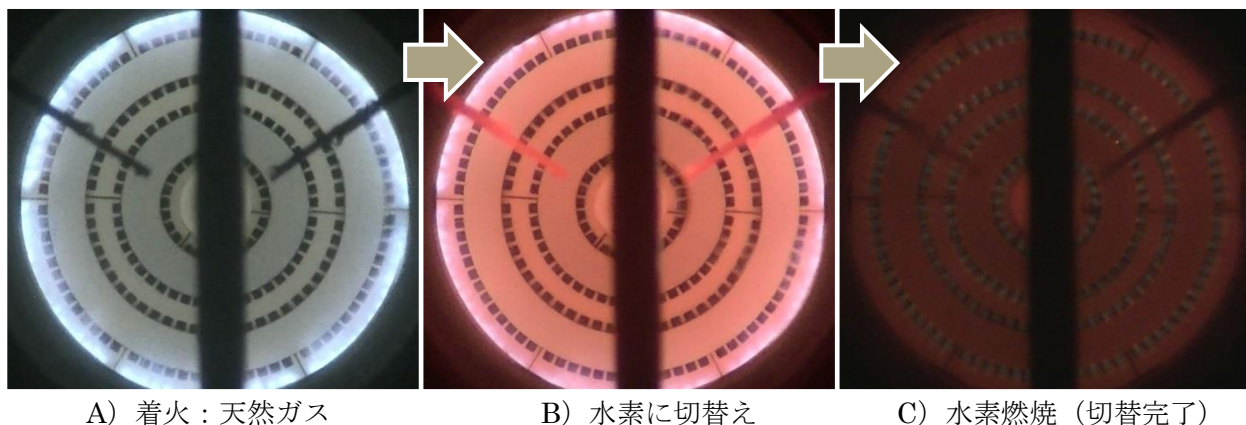


図 3-1-6. 着火時の燃焼器内部

将来の水素社会に向けては、水素での安全な着火、信頼性の向上が重要な課題となる。

図 3-1-7 に NOx 排出特性（NOx 値：残存酸素 15%換算値）を示す。横軸は熱量割合を示し、100% 負荷が定格負荷（設計点）条件、0%負荷がアイドル条件をそれぞれ示す。（図中、△と○プロットは、それぞれ水素バーナ部のヒートシールド形状等が異なる。図 3-1-9 参照）2 気圧条件下の試験では、すべての負荷条件において NOx 排出を 20ppm 以下となることを確認した。

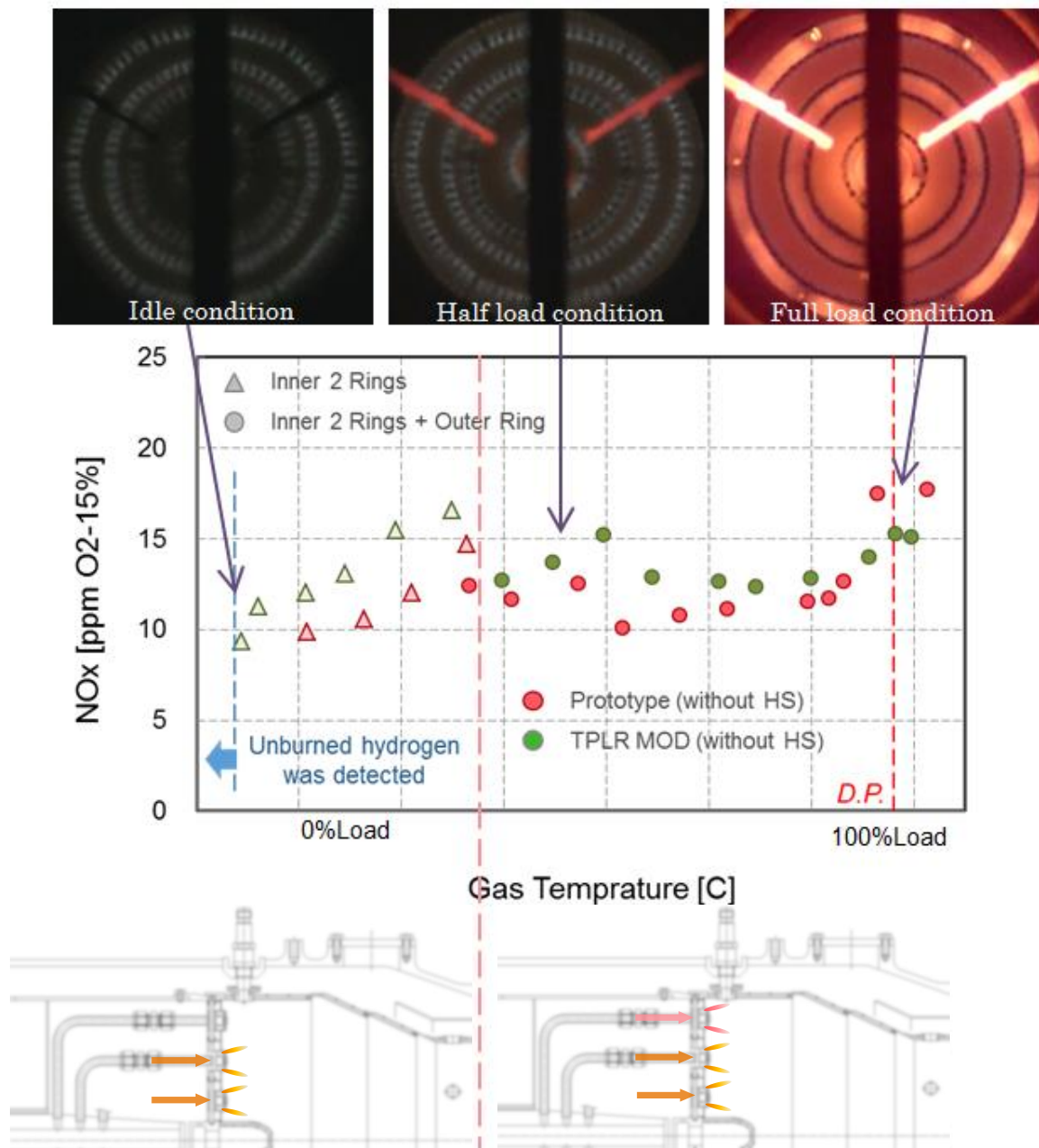


図 3-1-7. 水素燃焼試験時の NOx 排出特性

図 3-1-8 に定格負荷相当条件から水素量を 70%遮断した際の時系列データを示す。燃料を急遮断しても火炎消失は起きず、未燃水素も検知されなかった。急激な燃料の変動に対しても火炎の安定性に優れることを確かめた。

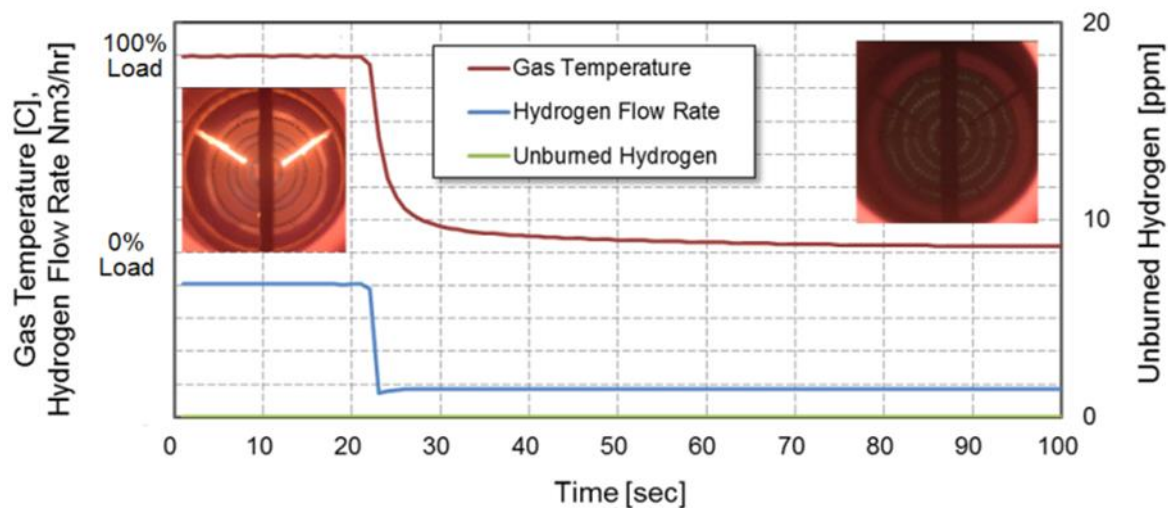


図 3-1-8. 燃料の急遮断試験時における火炎の安定性確認

図 3-1-9 に水素燃焼時の燃焼器内部の様子を示す。定格負荷相当条件において、バーナ部品の一部に赤熱が生じた。また、図 3-1-10 に示すサーモペイント試験結果（高温部の特定）でも高温箇所が確認されたため、形状および冷却の改良により改善を図った。

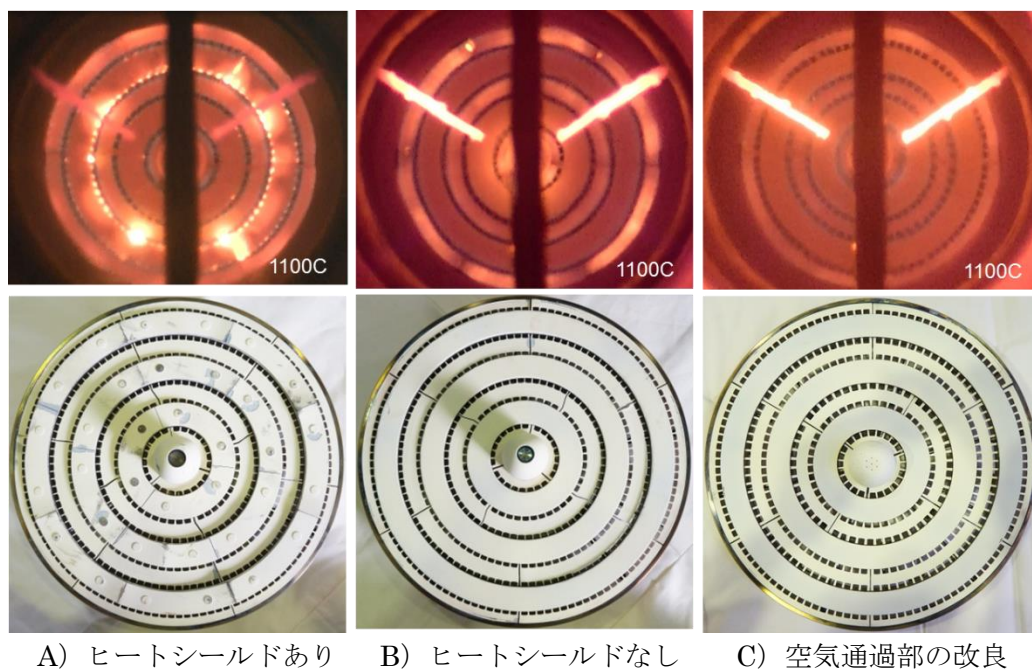


図 3-1-9. 定格負荷相当条件時の燃焼器内部



図 3-1-10. サーモペイント試験による高温箇所の特定

図 3-1-11 に冷却改良後の水素バーナ部を示す。サーモペイント試験にて、高温と特定された空気通過部（通称：AGP Air Guiding Panel）と中央部のフローガイド（通称：センターコーン）にエフェュージョン冷却を追加し、高温化の抑制を図った。

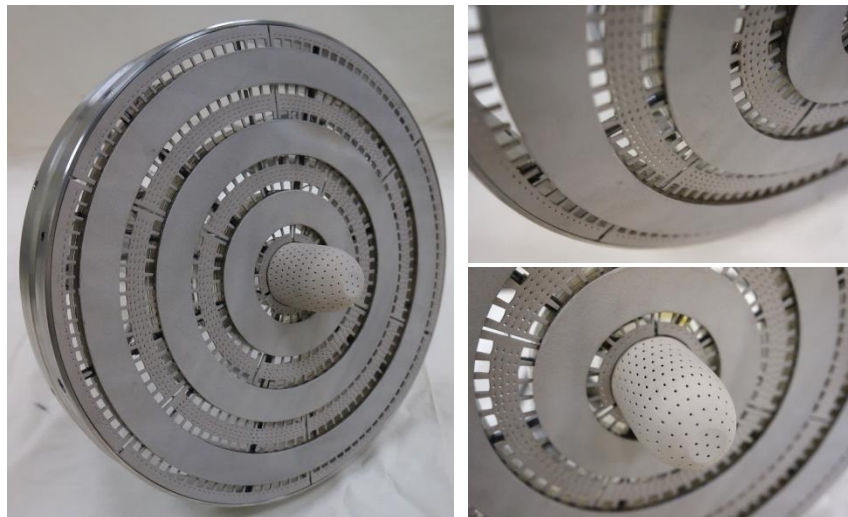


図 3-1-11. 冷却改良後の水素バーナモジュール

3-1-1-2. 高圧燃焼試験による燃焼特性の取得

3-1-1-2-1. 高圧燃焼試験設備

エンジン実機条件、高圧・高温環境下での水素燃焼試験を実施したドイツ RWTH アーヘン大学 産業用 GT・蒸気タービン・プラントの研究所にあるガスタービン燃焼器試験設備について簡単に紹介する。図 3-1-12 に高圧燃焼試験設備を示す。

当社と共同で産業用ガスタービン燃焼器試験設備ならびに水素供給設備・制御設備を整備、構築し、当社の水素ガスタービン用の燃焼器開発に特化した試験設備となっており、技術的包括提携により、当社が優先的かつ排他的に試験設備を利用でき、効率的かつ経済的に安価に試験が実施できるようになっている。また、ドイツ国内における水素の供給会社も豊富で、長時間の水素燃焼試験で必要となる多量の水素の調達が可能である。



A) 燃焼器試験ライン



B) 水素供給用トレーラ

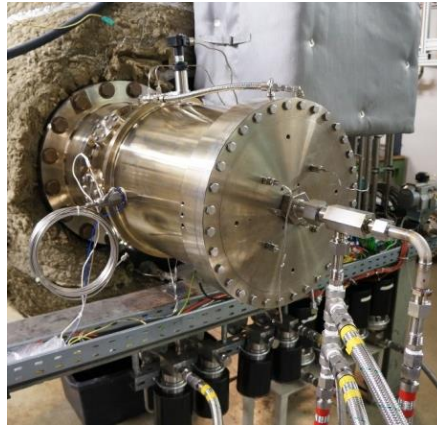


C) 燃料ガス制御ユニット

図 3-1-12. 高圧燃焼試験設備（ドイツ RWTH アーヘン大学）

3-1-1-2-2. 高圧燃焼試験の試験結果と評価

2015 年 10 月、RWTH アーヘン大学にて高圧水素燃焼試験を実施し、プロトタイプ燃焼器の性能評価を実施した。図 3-1-13 に燃焼器を試験設備に設置した様子を示す。また、2MW 級ガスタービンの燃焼器入口空気条件（温度・圧力）および燃料流量を試験条件とした。



プロトタイプ燃焼器

図 3-1-13. 高圧燃焼試験設備に設置した燃焼器

図 3-1-14 にプロトタイプ燃焼器の 1 回目の試験結果（NO_x 排出特性）を示す。燃焼ガス温度が 50% 負荷℃から 80%負荷付近で NO_x が上昇する特異な挙動を示したが（図中、赤丸部）、設計点である 100% 負荷条件相当で NO_x 排出量が約 33ppm（残存酸素 15%換算）、アイドル条件から設計点までの全域で NO_x50ppm 以下となり、2015 年度のマイルストーン、目標を達成した。低圧燃焼試験時に比べ、NO_x が約 15ppm から約 33ppm に増加しているが、これは NO_x の生成が圧力に依存し増加するためである。

また、水素燃焼試験中の水素バーナ部品の温度は、概ね 500℃以下を保っており問題ないレベルである。燃焼ガス温度が 50%負荷℃から 80%負荷付近でセンターコーンの温度も NO_x 排出と同様に増加していることから、この領域で何らかの特異な燃焼状態が生じた可能性が高い。

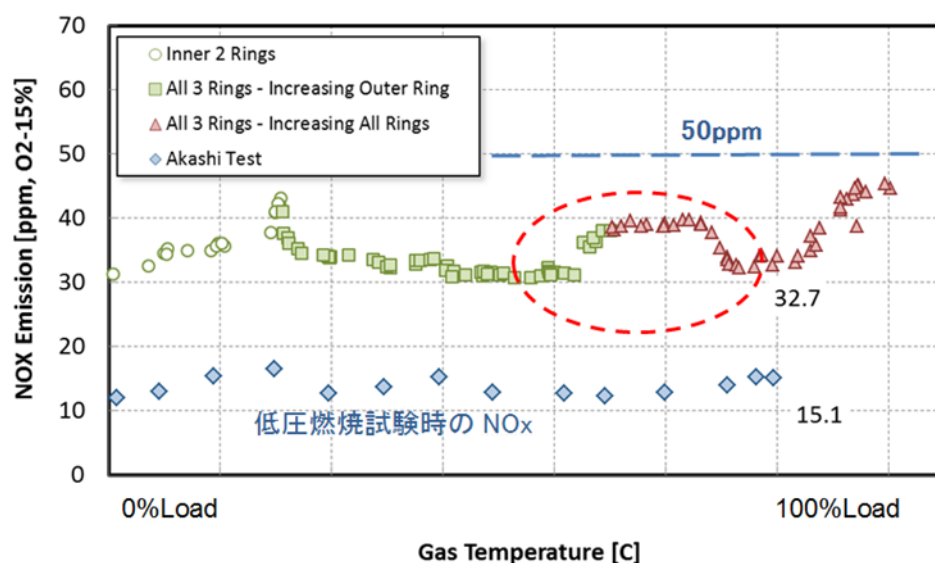


図 3-1-14. プロトタイプ燃焼器の高圧水素試験の試験結果（NO_x 排出特性）

【評価】 水素ドライ低 NO_x 燃焼器にて水素燃焼試験を実施し、以下を得た。

①2MW 級ガスタービン定格運転条件にて NO_x=50ppm 以下（残存酸素 15%換算）※

※NO_x=42ppm 以下（残存酸素 16%換算）

3-1-1-3. プロトタイプ燃焼器の改良

3-1-3-1. 更なる低 NOx 化の検討

開発目標の 35ppm 以下の達成には、更なる低 NOx 化検討が必要である。水素火炎の局所的な火炎温度が NOx 生成に影響を与える。特に、水素バーナ部のエッジ部形状により、水素火炎形状が変化し、NOx 生成量を左右する可能性がある。図 3-1-15 に水素バーナのエッジ部を示す。

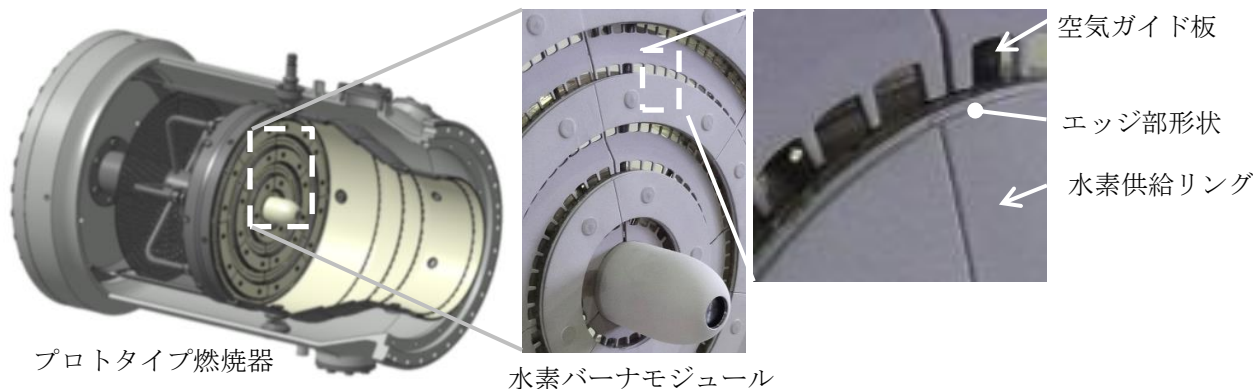


図 3-1-15. 水素バーナのエッジ部

このエッジ部の形状による水素火炎への影響を燃焼 CFD 解析により検討した。図 3-1-16 に CFD 燃焼解析結果例を示す。CFD 燃焼解析では、最も簡易的な EBU 燃焼モデルを用いた。エッジ部の段差形状の有無により、火炎帯の厚みや最高温度に差が生じ、NOx の排出量に影響を与えることが分かった。段差を付けた形状では、段差なしに比べて NOx 予測値が半減する結果となった。この結果をもとに、新たにエッジ部に段差形状を付けたバーナ部品を製作した。

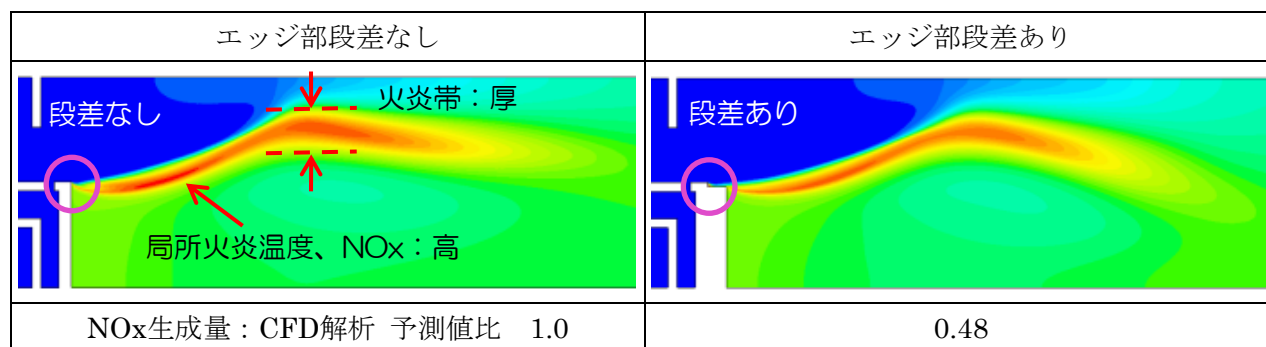


図 3-1-16. 水素バーナのエッジ部形状の違いによる高温場形成の違い（CFD 燃焼解析結果例）

新たに導入を図った時系列 PIV 計測システムを構築し、エッジ部から周期的に発生する渦流れの可視化も実施した。図 3-1-17 に時系列 PIV 計測システムと計測結果例を示す。また、ガス濃度分布（水素ガスを模擬した気体）を計測できるように高出力 LIF レーザを選定し、導入を図った。

燃焼 CFD 解析の高度化、流動計測技術およびガス濃度分布計測技術と組み合わせ、更なる NOx 低減が可能な部品形状設計、ならびに低 NOx 化の達成に努めた。

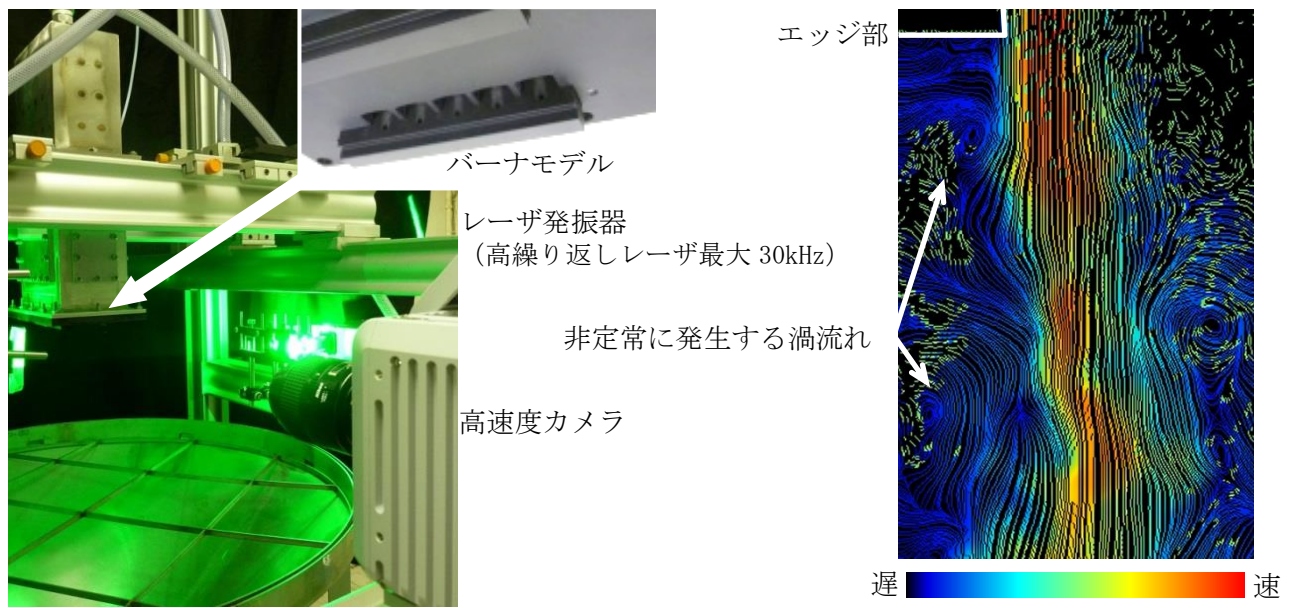


図 3-1-17. 時系列 PIV 計測システムと計測結果例

3-1-1-4. 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の設計

3-1-1-4-1. 2MW 級ガスタービンと 7MW 級ガスタービンの比較

図 3-1-18 に 2MW 級ガスタービンと 7MW 級ガスタービンの比較を示す。7MW 級ガスタービンでは、発電効率が高く、燃焼器も 6 缶となるため、燃焼器 1 缶あたりの燃焼量（焚き量）が 2MW 級ガスタービンに比べ小さくなる。このため、燃焼器サイズも小さくなる。

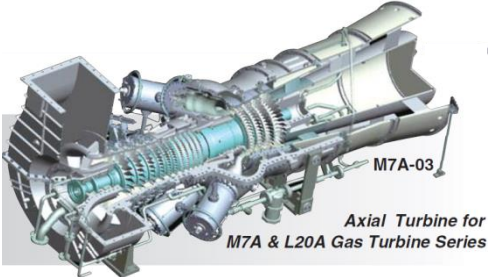
	2MW級ガスタービン	7MW級ガスタービン
全体図		
発電単効率	26.5%	33.5%
燃焼器个数	1缶	6缶

図 3-1-18. 2MW 級ガスタービンと 7MW 級ガスタービンの比較

3-1-1-4-2. 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の設計

2MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の基本設計思想を踏襲し、7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の設計を完了した。図 3-1-19 に 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器を示す。燃焼量が小さくなるため、水素供給リングは二つとしている。その他の構造は、基本的に同じである。

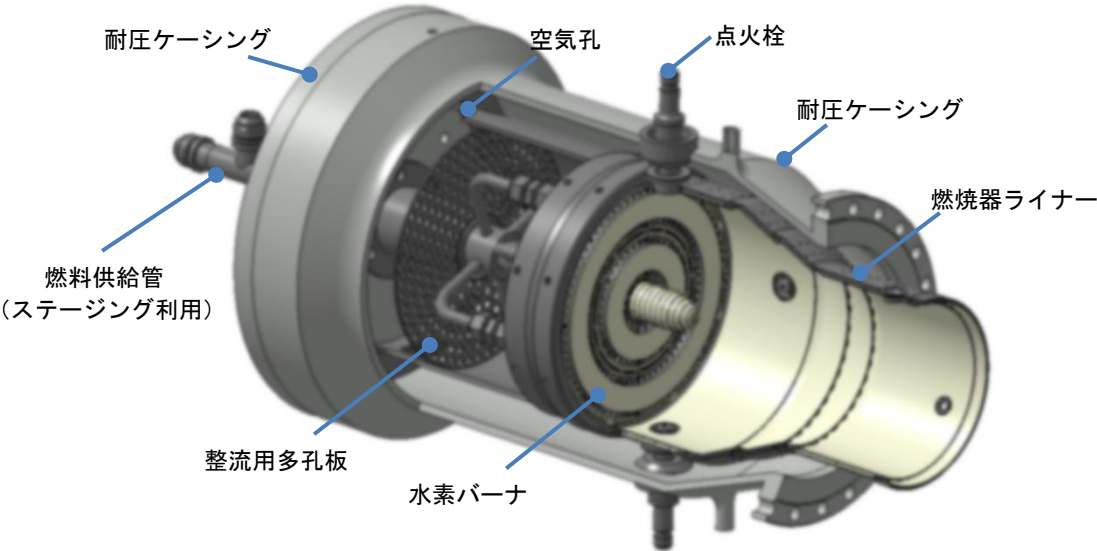


図 3-1-19. 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の全体図

3-1-2. 2MW 級ガスタービンエンジン実証試験設備の基本設計

3-1-2-1. 2MW 級ガスタービンエンジン試験設備の概要

2MW 級ガスタービンを用いたエンジン実証試験設備の初期検討（図 3-1-20）に基づき、試験設備建設のための具体的な基本設計を行った。

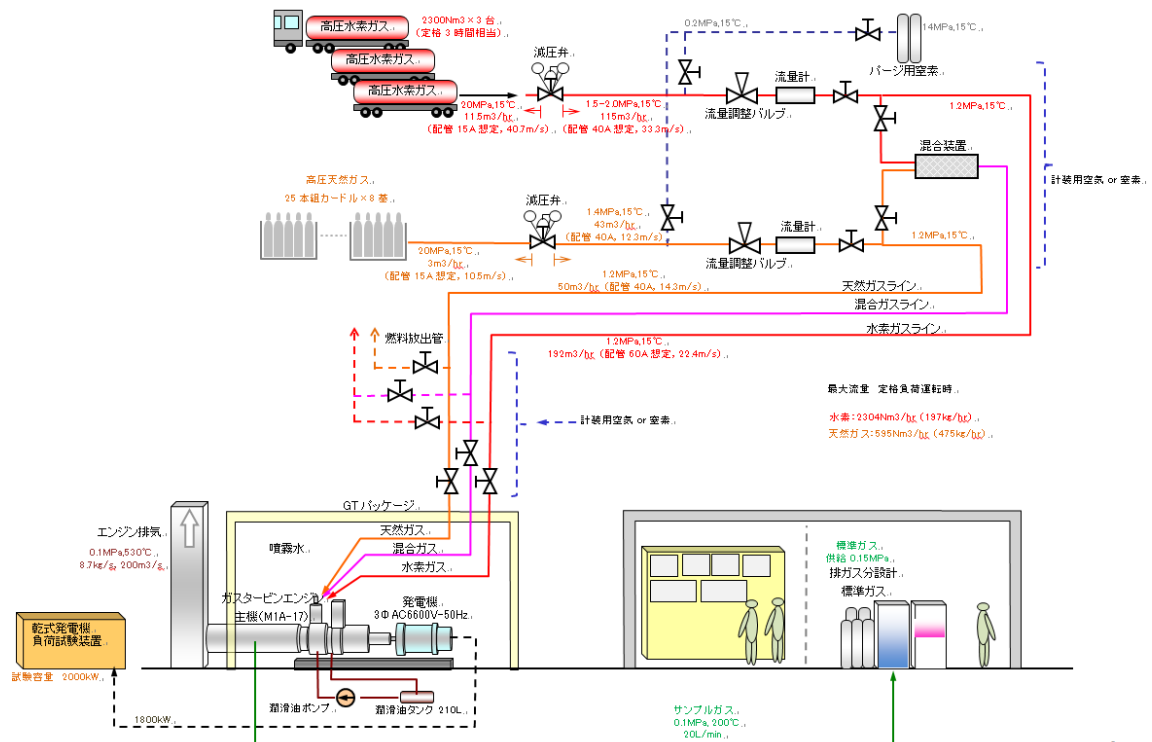


図 3-1-20. エンジン実証試験設備フロー（初期検討）

3-1-2-1-1. 設備概要

初期検討では、水素および天然ガスともに高圧ガストレーラもしくは高圧ガスポンプによるガス供給・ガス貯蔵を予定していたが、2MW 級ガスタービンエンジンの水素運転実証に必要な運転試験内容、確認項目等を詳細に検討したところ、定格条件で最大 4 時間の連続運転が必要と判断した。この連続運転を実施するのに必要な多量の燃料ガスを高圧ガスで供給することが困難であることが分かり、水素および天然ガスの供給・貯蔵は液体水素（LH2）および液化天然ガス（LNG）に変更した。

LH2 および LNG で供給・貯蔵することにより燃料貯蔵量が大きくなり、燃料の補給による時間的損失が低減するため試験効率の大幅な向上が見込める。ただし LH2 を気化するための蒸発器を 1 系列とするため、霜付き解氷の関係から水素専焼での定格負荷における連続運転時間は 4~5 時間とした。エンジン実証試験設備の概要を表 3-1-2 に示す。

表 3-1-2. エンジン実証試験設備概要

要目	仕様
適用ガスタービン	M1A-17（発電出力：1,660kW）
適用燃焼器	水素ドライ低 NOx 燃焼器
設備構成	燃料貯蔵・供給設備、ガスタービン発電装置、乾式負荷吸収装置、窒素供給設備、防消火設備、計装空気供給設備
連続運転可能時間	4 時間（@ 定格負荷）
適用法規	高圧ガス保安法（第 1 種製造設備、特定高圧ガス消費設備）

3-1-2-1-2. 設備機能

エンジン実証試験設備のシステム制御上の機能として、以下の条件を設定した。

- － 起動、停止、定常発電、発電負荷変動、発電負荷緊急遮断といった様々な模擬運転が可能な設備とする。
- － 発電した電力は負荷吸収器により熱に変換し破棄し、所内電力等には利用しない（系統連携なし）。

3-1-2-1-3. 建設予定地

エンジン実証試験設備の建設予定地として、兵庫県加古郡播磨町にある当社の播磨工場構内を選定し、建設のための事前調整を行った。

3-1-2-2. 2MW 級ガスタービンエンジン試験設備の基本設計

試験設備の運転に必要な燃料や圧縮空気等の流量に基づき、設備全体フローおよび構成機器を計画した。法令（高圧ガス保安法および消防法）等に規定された設備間の離隔距離および水素漏洩時の安全（電気品の防爆等）を考慮し各設備および機器の配置を計画した。これらの種々の計画より、2MW 級ガスタービンエンジン試験設備の基本設計を完了し、設備建設計画に必要な各種基本設計図書の作成を完了した。

3-1-2-2-1. 設備イメージ図

実証試験設備のイメージを図 3-1-21 に示す。

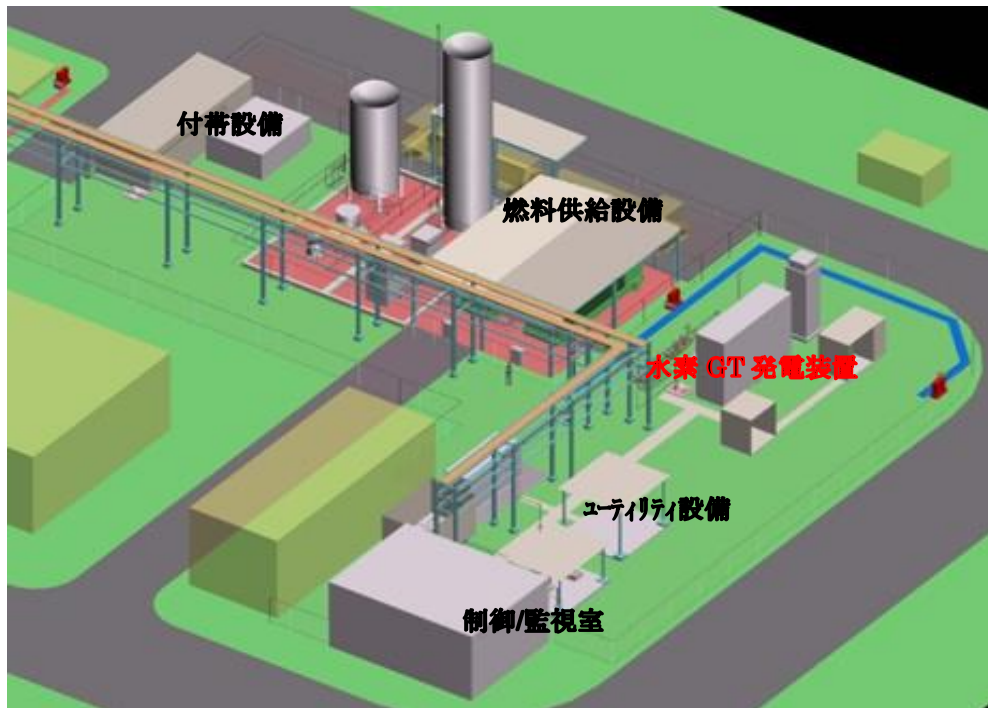


図 3-1-21. 実証試験設備イメージ

3-1-3. まとめ

2MW 級 GT 用ドライ低 NO_x 燃焼器 高圧試験で 50ppm 以下達成を目標に作業を進めた。当初計画通りに以下の成果を得た。

- ① 2MW 級 GT 用ドライ低 NO_x 燃焼器の高圧水素燃焼試験を実施し、定格運転条件にて NO_x=50ppm 以下（残存酸素 15%換算）※を達成した。 ※NO_x=42ppm 以下（残存酸素 16%換算）
- ② 7MW 級ガスタービン用プロトタイプ燃焼器の設計を完了した。
- ③ 2MW 級ガスタービン試験設備の概念設計ならびに基設計を完了した。

3-1-4. 今後の課題

- ① 開発目標の 35ppm 以下（残存酸素 16%換算）を達成すべく、更なる低 NO_x 化が必要である。

3-2. 水素ガスエンジン

3-2-1. 給気冷却によるエンジン高熱効率化検討

3-2-1-1. 給気冷却によるエンジン高熱効率化検討の流れ

液体水素はマイナス 253℃と非常に低温であり、本研究のエンジンでは、その水素を液体のまま圧縮（昇圧）し、その後蒸発器で加熱する（冷熱を奪う）ことで気化させてエンジンへ供給するシステムを採用している。水素を液体から気体へ蒸発させる過程で回収した冷熱エネルギーを用いて給気を冷却すれば、燃焼温度の低減による冷却損失低減、給気密度増大によるミラーサイクル化等を行い、熱効率・排ガス性能を向上することができる。イメージを図 3-2-1 に示す。

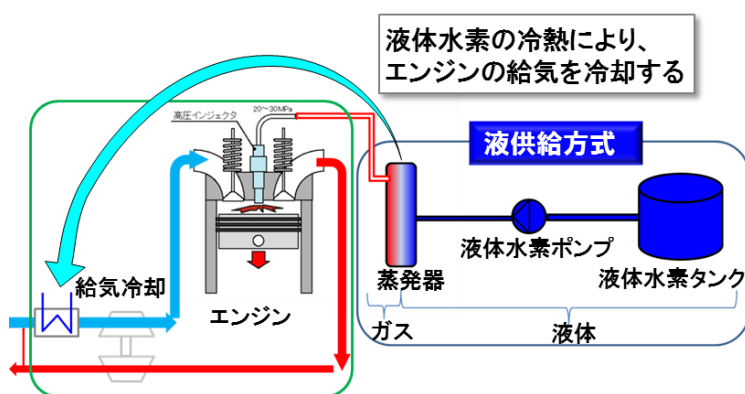


図 3-2-1. 液体水素の冷熱を利用したエンジンの高効率化手法イメージ

検討は以下の手順で実施した。

- ①東京都市大学の小型試験エンジンの実測結果を参考に、エンジンシリンダ内での水素燃焼パラメータの決定と小型エンジンでの給気冷却効果の試算
- ②当社大型ガスエンジンと①での決定パラメータを参考にした、水素燃焼大型ガスエンジンのシミュレーション（エンジン単体シミュレーション）
- ③大型ガスエンジンの給気冷却システム構成の検討と、大型ガスエンジンに給気冷却システムを適用した場合のエンジン性能試算

各フェーズにおけるエンジン性能の試算には、当社を含めたエンジンメーカーで実績が多い市販の 1 次元エンジンサイクルシミュレーションソフト GT-Power を用いた。なお、NOx 生成量に関しては、燃焼火炎状態への依存性が高く、空間分布を扱わない 1 次元でのシミュレーションで解析することは困難であるため、今回報告の値は参考値（※印を付記）である。

3-2-1-2. 液体水素冷熱利用による熱効率向上の仕組み

エンジンの給気を冷却することによる熱効率向上の原理は、エンジンサイクル改善と冷却損失低減に大別できる。

・エンジンサイクルの改善

エンジンの熱効率は以下の式で表すことができる。

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad \left[\begin{array}{l} \eta: \text{理論熱効率} \\ \varepsilon: \text{圧縮比} \\ \kappa: \text{比熱比} \end{array} \right]$$

この式から、圧縮比（膨張比）を大きくすると熱効率を上げることができることがわかる。しかし、圧縮比を上げると、圧縮圧力、ひいては燃焼圧力（筒内最高圧力、 P_{max} ）が高くなる。通常、エンジンでは、燃焼圧力を運転限界圧力としていることが多く、燃焼圧力が高くなると、エンジン構造や強度の見直しが必要になる。そこで、燃焼圧力を許容値内に抑えつつ、膨張比を上げる手段として、A. 圧縮比を上げると同時に給気圧力を下げる、B. 圧縮比を上げると同時に給気バルブタイミングを変更して実際に圧縮を開始するタイミングを遅らせる、等の手法で圧縮圧力や燃焼圧力を下げることができるが、いずれも空気量（≒出力）が減少する。これを給気冷却による密度増加で補うことで、燃焼圧力の増加を防ぎつつ、熱効率を上げることができる。

一方、ガスエンジンのような予混合燃焼エンジンでは、燃焼時の等容度を高めることも熱効率の向上に寄与する。等容度を高くするには、燃焼時期をピストンスピードが遅い上死点付近へ近づけることが効果的だが、燃焼圧力が高くなりやすい。この場合も、前述の A や B の手法を用いることにより、等容度を高くしても、燃焼圧力の増加を抑えつつ熱効率を上げることができる。

・冷却損失の低減

給気冷却を行うことで、圧縮温度や燃焼温度を低減し、燃料の燃焼によって発生した熱がエンジンシリンダからライナ壁を通過して冷却水に逃げる（冷却損失）を低減する。

また、給気を冷却すると燃焼温度も低下するため、温度と相関が高い NOx 生成の低減も期待できる。

3-2-1-3. 東京都市大学 小型試験エンジンでのエンジンモデルと給気冷却効果試算

まずは水素燃料での運転実績が豊富な東京都市大学の小型試験エンジン（単気筒）の運転データをもとに、水素燃焼時の燃焼モデルパラメータの決定を行った。

東京都市大学のエンジンを図 3-2-2 に、それをもとにした解析モデルを図 3-2-3 に示す。解析は、大気からシリンダを通過して、圧力・温度がほぼ一定に保たれている排気ダクトまでをモデル化して行った。図 3-2-4 に実際のエンジン運転データと合わせ込みを行った後の筒内圧力シミュレーション結果を示す。燃焼パラメータ等の調整により、良好に合せ込むことができています。



図3-2-2. 東京都市大学
小型試験エンジン

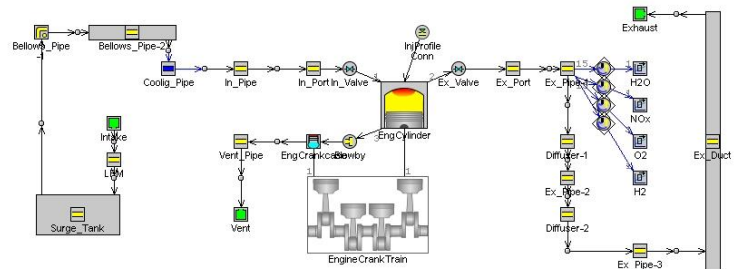


図3-2-3. 小型試験エンジン シミュレーションモデル

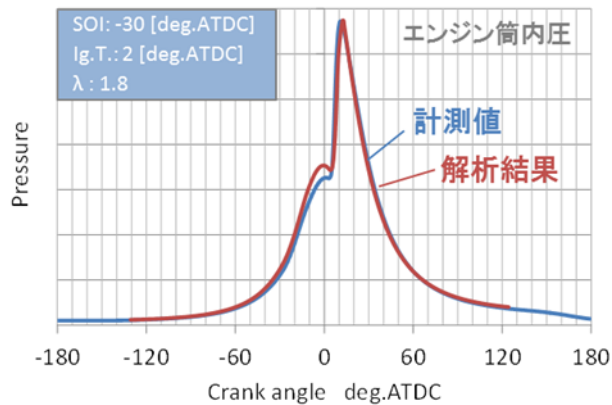


図3-2-4. 筒内圧力シミュレーション結果（合せ込み後）

このエンジンモデルを用いて、小型エンジン向けの給気冷却システム構築の検討を行った。給気冷却システムは昇圧した液体水素を蒸発させる蒸発器の冷媒を液体水素で冷却後、それをエンジンの給気エアクーラーの冷媒とすることで給気を冷却するシステムである。冷媒としては、系内で相変化しないものが取扱いが容易と考え、液体水素（大気圧下で約-253℃）から常温で気体であるヘリウムを一次冷媒とし、二次媒体として低温冷媒であるハイドロフルオロエーテル（例えば、3M 社ノベック）を選定した。システム構成を図 3-2-5 に示す。

この給気冷却システムを先述のエンジンモデルに適用し、通常 40℃程度の給気を 10℃まで低下させた場合のシミュレーションを行った。結果を表 3-2-1 に示す。小型エンジンでは、エンジン仕様変更なく給気を 30℃冷却することで、熱効率を 0.8 pt 向上、NOx を約 5%低減できる見込みであるとわかった。

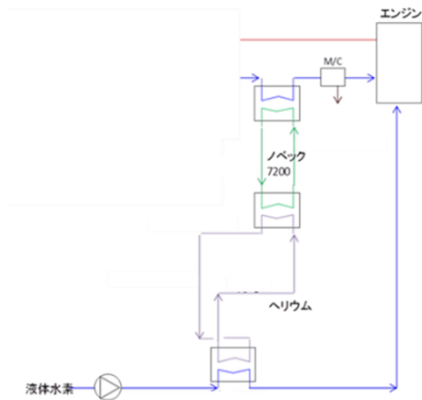


表3-2-1. 小型試験エンジン

給気冷却シミュレーション結果

		吸気冷却 なし	吸気冷却 あり	変化量
給気温度	[℃]	39.0	10.0	-29 ℃
熱効率	[%]	43.3	44.1	+0.8 pt
排気NOx※	[ppm]	3749	3549	-5.3 %

図3-2-5. 小型試験エンジン 給気冷却システム構成

3-2-1-4. 大型実機エンジン仕様検討

次に、7MW 級大型実機水素ガスエンジンでの給気冷却の効果を検証した。まず、現在の当社製天然ガスエンジン（図 3-2-6, 18 気筒）の仕様をベースとして、給気冷却検討に用いる大型水素ガスエンジンの仕様を決定した。なお、エンジン単体での熱効率を向上させる手段として、等容度向上（排気再循環（EGR）+点火進角）や高膨張比化（二段過給+ミラーサイクル化）なども採用することを想定している。エンジン単体で効率が高くなるよう最適化した仕様でシミュレーションを行った結果を表 3-2-2 に、筒内圧力の結果を図 3-2-7 に示す。



図3-2-6. 当社天然ガスエンジン

表3-2-2. 大型実機エンジンシミュレーション結果

		最適化仕様
軸出力	[kW/cyl.]	441
熱効率(正味)	[%]	49.9
熱効率(図示)	[%]	53.0
給排気仕事	[%]	1.1
冷却損失	[%]	8.0
Pmax	[barA]	180
NOx-dry (O2ゼロ換算)※	[ppm]	560

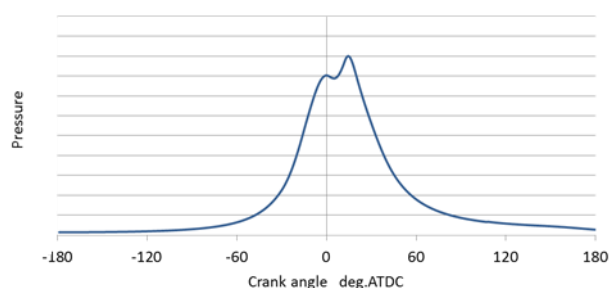


図3-2-7. 筒内圧力シミュレーション結果（最適化後）

次に、7MW 級大型エンジンにおける給気冷却仕様の検討を行った。給気を氷点下とすると、エアクーラーの伝熱フィンに霜付きを生じ、熱伝達が阻害されるが、現在想定している給気量、燃料（液体水素）量では、冷却後の給気温度は10℃程度であり、霜付きを生じないレベルであることがわかった。給気冷却システムの構成を図3-2-8に示す。

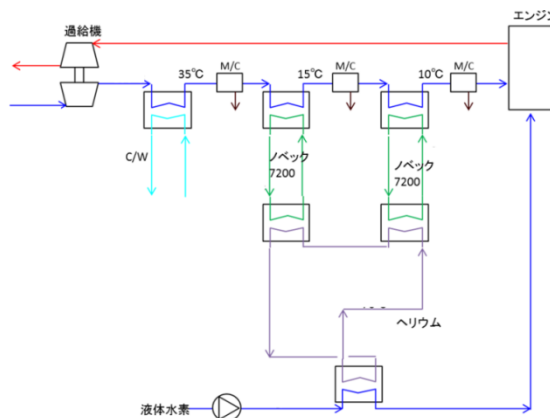


図3-2-8. 大型実機エンジン 給気冷却システム

この給気冷却システムを3-2-4のエンジンモデルに組み込んでシミュレーションを行った。解析結果を表3-2-3に、筒内圧力の結果を図3-2-9に示す。解析結果は給気冷却なしのものと比較している。なお、給気冷却の効果を最大限発揮させるため、等容度向上や高膨張比化等の最適化（給排気バルブタイミング、点火タイミング、過給圧などをパラメータとした）を行った。熱効率は50.6%となり、給気冷却なしに比べて、0.7pt 向上している。また、NOxは560ppmから404ppmへと約27%低減している。

表3-2-3. 大型実機エンジン給気冷却仕様

・試算結果比較

		給気冷却 なし	給気冷却 あり
機械圧縮比	[-]	17.0	18.2
給気圧	[barA]	3.82	3.65
給気温度(A/C出口)	[°C]	43.8	10.0
EGR率(O ₂ 濃度)	[%]	36 (15.0)	←
点火タイミング変化量	[deg.]	0	←
過給機効率	[%]	75	←
給気弁タイミング変化量	[deg.]	0	-7.5
排気弁タイミング変化量	[deg.]	0	-3
軸出力	[kW/cyl.]	441	447
熱効率(正味)	[%]	49.9	50.6
熱効率(図示)	[%]	53.0	53.7
給排気仕事	[%]	1.1	1.4
冷却損失	[%]	8.0	7.9
Pmax	[barA]	180	180
NOx-dry (O ₂ ゼロ換算) ※	[ppm]	560	404

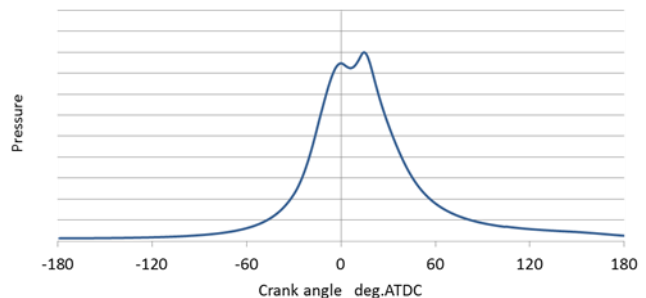


図3-2-9. 大型実機エンジン 給気冷却試算結果

3-2-1-5. まとめと今後の課題

- ・液体水素の冷熱を利用することで、通常 40℃程度の給気を 10℃程度まで冷却することができる。
- ・7MW 級大型エンジンへ給気冷却を適用すると、熱効率約 0.7pt 向上、NOx 約 27%低減が可能な見込である。

一般に現在の中・大型天然ガスエンジンは概ね 49%程度の熱効率であり、技術革新に伴って 2020 年に 1pt 向上（熱効率 50%）、2030 年にさらに 1pt 向上（熱効率 51%）するとされており⁽¹⁾、効率を 1pt 向上させるのに約 10 年を要する。しかし、本研究の成果によると、液体水素の冷熱を利用してエンジンの給気を冷却するという簡便な手法で、熱効率約 1pt 向上を達成しており、熱効率向上の手段として給気冷却の意義は大きいと考える。

本年度は、エンジンの燃焼状態の予測に 1 次元シミュレーションを使用しているが、水素燃焼、とりわけ本研究で採用しているような空間的に均一でない、部分成層燃焼方式の排ガス性能の定量予測は精度が高くない。排ガス性能を定量的に評価する場合には、3 次元解析等の使用が必要である。

また、本年度の検討では、冷媒循環用の補機類の動力を考慮していないが、実設計においては潤滑油・冷却水等の補機類動力と合わせて、エンジンプラントシステム全体での効率・排ガス性能を向上させることを検討する必要がある。

3-2-2. エンジン排熱回収による効率向上

3-2-2-1. 排熱回収システム

次に、エンジン排熱を利用して、蒸気生成/発電を行うことで、エンジンシステム全体として効率を向上させるシステムの検討を行った。システムは排気をボイラに導き蒸気を発生させ、その蒸気でタービン/発電機を回転させるものである。排ガスは 3-2-1 で検討した実機エンジン一次元解析の結果をもとに、過給器出口で排ガス温度 360℃、排ガス量 4.2t/h とした。

3-2-2-2. 飽和蒸気での検討

飽和蒸気ボイラでの蒸気発生量の試算結果を表3-2-4に示す。エンジン排ガス出口からボイラまでの間に排ガス温度が下がることを想定して、2ケース試算を行った。

表3-2-4. 飽和蒸気ボイラ試算結果

			Case1	Case2
エンジン	排ガス温度	℃	360	
	排ガス量	t/h	4.2	
ボイラ	ボイラ入口排ガス温度	℃	300	330
	ボイラ入口排ガス量	t/h	4.2	
	給水温度	℃	60	
	蒸気圧力	MPa	0.98	
	蒸気温度	℃	183	
	蒸気流量	t/h	2.3	3.0

この蒸気を復水器で大気圧まで減圧するとして、タービン（スクリュース式）発電機に導入した場合の発電量の試算を表3-2-5に示す。試算から、エンジン単体での発電出力の約1～1.7%の電力が得られることがわかった。

表3-2-5. 飽和蒸気による発電量の試算結果

			Case1	Case2
ボイラ	蒸気圧力	MPa	0.98	
	蒸気温度	℃	183	
	蒸気流量	t/h	2.3	3.0
復水器	圧力	kPa-G	0	
	温度	℃	100	
発電機	理論発電量	kW	262	336
	型式	-	スクリュース	
	実発電量	kW	93	137
	比エンジン出力	%	1.2	1.7

3-2-2-3. 過熱蒸気での検討

飽和蒸気をさらに加熱して、過熱蒸気とした場合の蒸気量の試算結果を表3-2-6に示す。蒸気流量は減少するものの、蒸気温度を上げることができる。

表3-2-6. 過熱蒸気ボイラでの試算結果

			Case1	Case2
エンジン	排ガス温度	℃	360	
	排ガス量	t/h	4.2	
ボイラ	ボイラ入口排ガス温度	℃	300	330
	ボイラ入口排ガス量	t/h	4.2	
	給水温度	℃	60	
	蒸気圧力	MPa	0.98	
	蒸気温度	℃	250	
	蒸気流量	t/h	2.1	2.8

3-2-2-4. まとめと今後の課題

- ・7MW 級水素ガスエンジンの推定排気データ（排気温度、排気量）をベースに、生成できる蒸気量、蒸気温度の見積、またその蒸気でタービンを回転させて発電するシステムの検討を行った。

- ・エンジン排ガスから 10barA、180℃程度の飽和蒸気 2～3t/h が生成可能で、この蒸気によりスクリー式発電機で、90～135kW 程度の電力（エンジン発電量の約 1.1～1.7%）が得られる見込みとなった。過熱蒸気を生成した場合には、10barA、250℃程度の過熱蒸気 2～3t/h が生成可能であることがわかった。

本検討では、ボイラでの回収エネルギーに焦点を当てたが、実発電量はタービンも含めた発電機の効率で大きく異なるため、実設計においては適切な発電機（タービン）の選定も重要になる。また実際には、エンジンシステム以外にボイラ、タービン、復水器、ポンプ等の設備が追加で必要になるため、初期コスト/メンテナンスコストの試算等を行い、エネルギー回収量によるメリットとのバランスを確認する必要がある。

3-2-3. 小型試験エンジン仕様最適化

3-2-3-1. シミュレーションによる試験エンジン仕様最適化

水素エンジンの研究開発のため、産総研や東京都市大で単気筒エンジンを製作して様々な条件で試験を行い、エンジン性能の向上（熱効率の向上、排ガス（NOx）の低減）を目指しているが、給排気バルブタイミングや過給圧、燃料噴射タイミング等、実験のパラメータの組み合わせ範囲が非常に多岐にわたる。したがって、試験でそのすべてを網羅し、最適なパラメータを決定することは非常に多くの労力が必要である。そこで、給気冷却検討の際に使用したエンジンシミュレーションを使用することで、エンジン試験に先立ってパラメータの絞り込みを行った。

3-2-3-2. エンジンモデル作成と合わせ込み

産総研の小型試験エンジン（単気筒）を模擬するシミュレーションモデルを作成し、実際の運転データをもとに、水素燃焼時の燃焼モデルの合せ込みを行った。

産総研のエンジンを図 3-2-10 に、それをもとにした解析モデルを図 3-2-11 に示す。解析は、機械式過給機からシリンダを通して排気ダクトまでをモデル化して行った。図 3-2-12 に過給圧や燃料噴射/点火タイミングを様々に変化させた 5 ケースのエンジン運転データと、合わせ込みを行った後のシミュレーション結果を示す。燃焼パラメータ等の調整により、熱発生に多少の差は見られるものの、比較的良好に合せ込むことができている。



図3-2-10. 産総研 小型試験エンジン

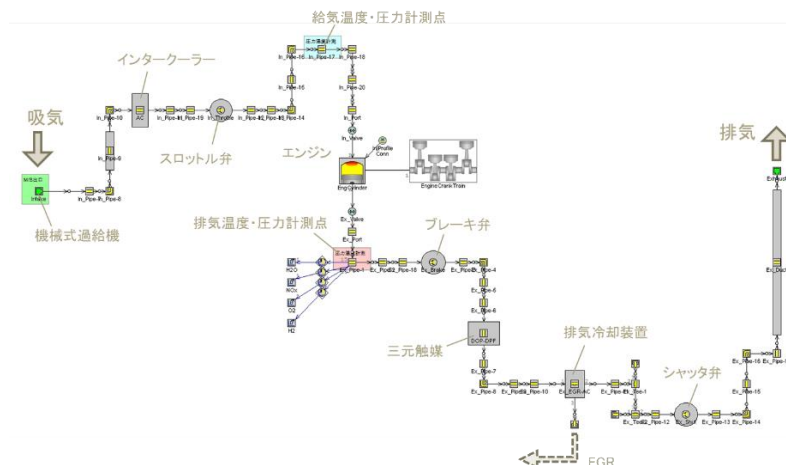


図3-2-11. 試験エンジンシミュレーションモデル

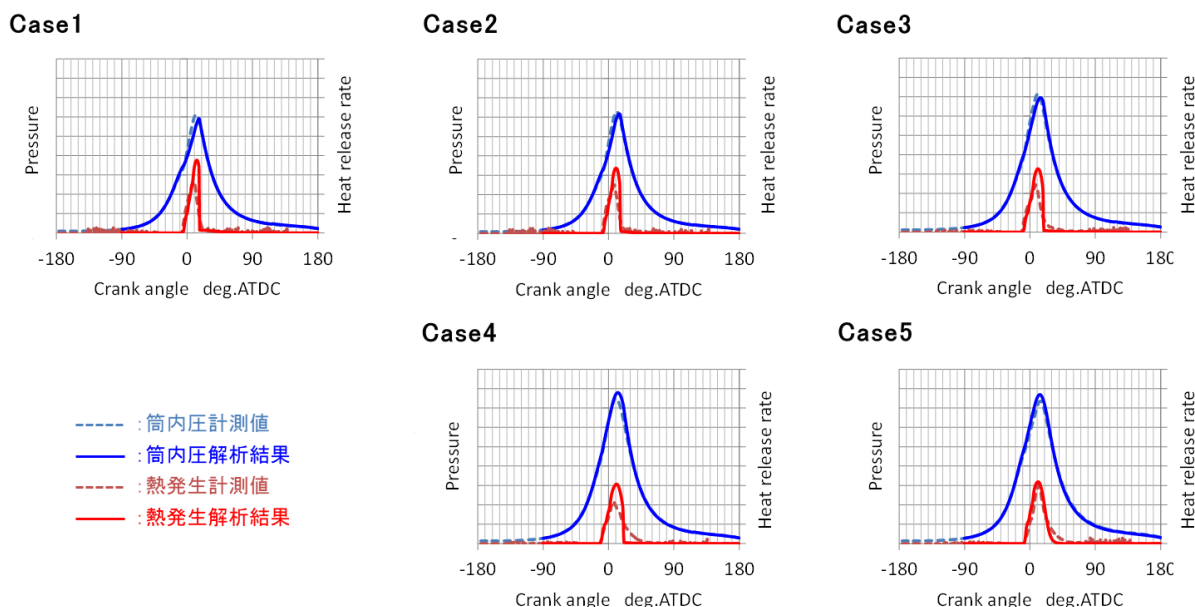


図3-2-12. 筒内圧力シミュレーション結果（合せ込み後）

3-2-3-3. 最適化結果

作成したエンジンシミュレーションモデルを用いて、パラメータの最適化を行った。この小型試験エンジンでは、給排気バルブタイミング、エンジンヘッドガスケット厚さ（機械圧縮比）、過給圧、EGR 率、燃料噴射タイミング、点火タイミングを変更することができる。給排気バルブタイミングは機械式カムによって決まっており、予め準備した4種類のカムの中から選択することとした。燃料量は熱効率の目標値 52%において図示平均有効圧 13bar となるように量を設定した。また、エンジンの破損を防ぐため、有効圧縮比は 10.3 以下、筒内燃焼最高圧（Pmax）は 130bar 以下に制限されている。なお、EGR は模擬排ガスを給気に導入している。最適化を行ったパラメータの範囲（表 3-2-7）と、出力パラメータ範囲（表 3-2-8）を示す。

表3-2-7. 最適化パラメータ

項目	単位	設定レンジ
点火タイミング	[deg.ATDC]	-30 ~ 0
過給圧	[barA]	1.0 ~ 3.0
給気O2濃度	[%]	20.8 ~ 9.6
バルブタイミング(有効圧縮比/膨張比)	[-]	純正 / 1800 / 6600 / 7500 の4ケース
ガスケット厚さ(機械圧縮比)	[-]	1.5 / 2.0 / 2.5 / 2.9 / 3.5 / 4.4 の6ケース

表3-2-8. 出力パラメータ

項目	単位	設定レンジ
図示熱効率	[%]	なるべく高く(目標:52以上)
IMEP	[bar]	13以上
Pmax	[barA]	130以下
有効圧縮比	[-]	10.3以下

最適化を行った中で、最も図示熱効率が高かった計算結果を図 3-2-13 に示す。給気バルブが閉じるタイミングを遅くし、かつ機械圧縮比を高くしたミラーサイクルと、それによる空気量の減少を補うための過給圧の最適化が行われた結果となった。また、燃焼を緩慢にして Pmax を低くするため、O2 濃度が低く（EGR 率が高く）なっていることがわかる。この最適化により、図示熱効率は約 54%（小型試験エンジンでの値）となった。

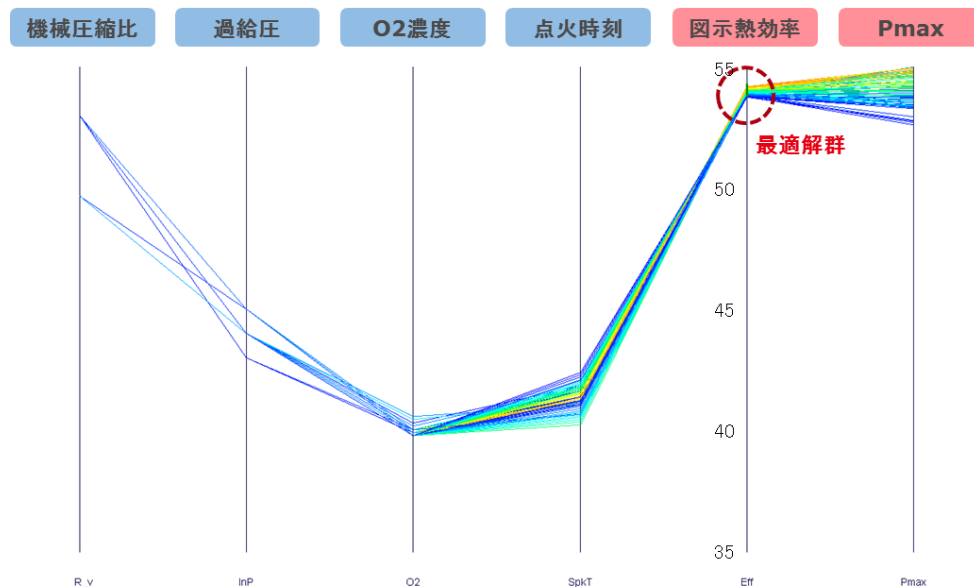


図3-2-13. 小型試験エンジン 最適化結果

3-2-3-4. まとめと今後の課題

- 産総研の小型試験エンジン1次元シミュレーションモデルの実験結果との合せ込みを実施し、様々な運転条件（過給圧、EGR 率、水素噴射・点火タイミングを変更）で、筒内圧、排気温度、熱効率等の実験結果をバランスよく再現できるモデルを構築した。
- 作成したシミュレーションモデルを使用して、運転での制限（シリンダ内最高圧や噴射タイミング等）を加味したうえで仕様最適化を行い、熱効率約 54%（小型試験エンジン）となる仕様を決定した。

今回の最適化では、事前に試験エンジン実測値との合せ込みを行い、モデルの精度向上に努めた。ただし、合せ込みに使用したパラメータ範囲外の計算に関しての精度が未知数であり、今後は試験でのパラメータ変更範囲の拡大が望まれる。

4. 外部発表実績

4-1. 論文発表

<査読付き>なし。

<査読なし>

・日本ガスタービン学会 学会誌 Vol. 44, No.4

“水素サプライチェーンと水素発電” 西村 元彦

・川崎重工業株式会社の事業報告書「Kawasaki Report 2016 統合報告書」

“水素社会の実現に向けた取組 水素を使う 水素 100%による発電”

・日本機械学会第 83 号ニュースレター

“ドライ低 NOx 水素専焼燃焼器の開発” 岡田 邦夫

・VGB Powertech Journal

“Enhancement of Fuel Flexibility of Industrial Gas Turbines by Development of innovative Combustion Systems” Dr. Nurettin Tekin (Kawasaki Gas Turbine Europe 社員)

・川崎重工業株式会社ホームページ

“近い将来, CO2 削減の切り札になる水素発電”

4-2. 学会、展示会等発表

<口頭発表> 国内 17 件、海外 3 件

・日本ガスタービン学会 第 43 回日本ガスタービン学会定期講演会 (米子)

“ドライ水素低 NOx 燃焼技術の開発” 発表：堀川 敦史

・日本ガスタービン学会 国際ガスタービン会議 2015 東京大会 (IGTC2015 Tokyo)

“Application of Low NOx Micro-mix Hydrogen Combustion to Industrial Gas Turbine Combustor and Conceptual Design” 発表：堀川 敦史

・東海圏新プロジェクト開発分科会

“水素エネルギーサプライチェーンの実現に向けた川崎重工の取り組み” 発表：山本 滋

・神戸市環境局 水素エネルギー講演会

“水素をつくる・はこぶ・ためる・つかう～水素エネルギーが普及する未来の社会～”

発表：西村 元彦

・日本ガスタービン学会 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会 (酒田)

“2MW 級ガスタービンにおけるドライ低 NOx 水素専焼燃焼器の開発” 発表：岡田 邦夫

・日本機械学会主催 2016 年度年次大会 (九州大学)

“川崎重工における水素ガスタービンの開発 -水素燃焼技術の紹介-” 発表：堀川 敦史

・10th VDI-Symposium Stationary Gas Turbine

“Changes to increase the flexibility of Industrial gas turbines” 発表：Adjili Shahard*

・自動車技術会 関東支部講演・講習会 2016 年度 第 5 回 講演会「FCV 関連の水素製造技術」

“水素エネルギーサプライチェーン実現への取り組み” 発表：西村 元彦

・東北大学大学院工学研究科主催 第五回電力エネルギー未来技術シンポジウム

“高効率分散型発電システムと水素ガスタービン発電に向けた開発動向” 発表：合田 真琴

- ・長岡技術科学大学主催 第8回メタン高度利用技術シンポジウム
“分散型発電システムの開発動向：川崎重工の活動を例にとり” 発表：合田 真琴
- ・日本ガスタービン学会 第45回日本ガスタービン学会定期講演会（松山）
“2MW 級ガスタービン用ドライ水素専焼低 NOx 燃焼器の開発” 発表：古賀 和樹
- ・International VDI Conference, Strategies in Times of Renewable Energy
“Enhancement of Fuel Flexibility of Industrial Gas Turbine by Development of Innovative Combustion Systems” 発表：Dr. Nurettin Tekin*
- ・第37回水素エネルギー協会大会
“川崎重工における水素ガスタービンの開発” 発表：堀川 敦史
- ・一般社団法人 日本産業機械工業会 環境ビジネス委員会 有望ビジネス分科会&講演会
“川崎重工における水素専焼・混焼タービンの開発状況について” 発表：堀川 敦史
- ・平成29年度 日本船舶機関士協会 技術講演会
“液化水素運搬船の開発および燃料電池推進船の技術動向について” 発表：稲津 晶平
- ・H29年度千葉県水素エネルギー関連産業振興プラットフォーム第1回会議
“水素ガスタービン発電最前線” 発表：西村 元彦
- ・THE 7th WORLD HYDROGEN TECHNOLOGY CONVENTION , 平成29年7月
“Low NOx hydrogen combustion technology for gas turbine “ 発表：飴 雅英
- ・第15回関西伝熱セミナー2017, 平成29年9月
“水素ガスタービン・水素エンジンの開発” 発表：飴 雅英
- ・日本太陽エネルギー学会関西支部2017年度シンポジウム, 平成29年11月
“水素ガスタービン発電の最新動向” 発表：飴 雅英
- ・日本化学会第98春季年会, 平成30年3月
“CO2 フリー水素サプライチェーンでの水素燃焼技術の開発” 発表：飴 雅英

4－3．プレス発表

- ・2015年12月21日 川崎重工業ホームページ技術情報にて10月に実施した高圧水素燃焼試験を発表。
http://www.khi.co.jp/rd/news/detail/20151221_1.html
また、表4-3-1の新聞各社およびWEBメディアに掲載された。

4－4．マスメディア等取材による公表

なし。

表 4-3-1. プレスリリース「低 NOx 水素専焼ガスタービンの燃焼技術を開発」の掲載状況

【新聞各社】

媒体名	日付	面数	見出し
日経産業新聞	12/22	13面	発電用バーナー、川崎重工、水素100%活用
日刊工業新聞	12/22	7面	川崎重工業 ガスタービン向け 燃焼技術を開発 NOx発生量40ppm以下
化学工業日報	12/22	11面	川崎重工業 ガスタービン 水素専焼技術を開発 安定性高く低NOx
神戸新聞 (朝刊)	12/22	6面	水素だけの発電システム 川重が燃焼実験成功 20年の実用化目指す
電気新聞	12/22	4面	水素燃焼技術を開発 ガスタービンNOx削減
新エネルギー 新聞	12/28	8面	水素100%DLE型ガスタービン燃焼器で低NOx確認

【Web メディア】

媒体名	URL
日経BPネット	http://www.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/12/22/01232/?rt=nocnt http://www.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/12/23/01324/
日経テクノロジーオンライン	http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/122101652/
日経BP環境経営フォーラム	http://business.nikkeibp.co.jp/atclefm/15/238719/122200669/?bpnet
マイナビニュース	http://news.mynavi.jp/news/2015/12/21/240/
省エネ最新ニュース	http://www.energy-saving-news.jp/news_altKogxPiU.html
スマートジャパン (ITメディア)	http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1512/24/news035.html
EICネット	http://www.eic.or.jp/news/?act=view&serial=36065
ASCII. JP	http://ascii.jp/elemp/000/001/095/1095285/

5. 特許出願実績

- ・特願 2016-224776「水素エンジンシステム」(2016/11/18)
川崎重工業株式会社
産業技術総合研究所
- ・特願 2017-096984「ガスタービン燃焼器の燃料制御」(2017/5/16)
川崎重工業株式会社

6. 参考文献

- 1) 燃焼工学、水谷幸夫 著、森北出版、
- 2) 浅井 智広、百々 聡、小泉 浩美、高橋 宏和、吉田 正平、井上 洋、水素リッチ燃焼焚き多孔同軸噴流バーナの大気圧燃焼試験特性 (第 2 報)、第 38 回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集、2010
- 3) 浅井 智広、百々 聡、小泉 浩美、吉田 正平、井上 洋、水素リッチ燃焼焚き多孔同軸噴流バーナの火炎構造検討、第 39 回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集、2011
- 4) 小田 剛生、櫻澤 俊明、木下 康裕、水素混焼技術の開発、第 42 回日本ガスタービン学会定期講演会 (熊本) 講演論文集、2014
- 5) GE、US Patent US 2013/0104556 A1
- 6) H. H.-W. Funke、S. Boerner、J. Keinz、K. Kusterer、D. Kronier、J. Kitajima、M. Kazari、A. Horikawa、 Numerical and experimental characterization of low NO_x Micromix combustion principle for industrial hydrogen gas turbine applications、 ASME Turbo Expo 2012、 GT2012-69421
- 7) H. H.-W. Funke、S. Boerner、J. Keinz、K. Kusterer、A. Haj Ayed、N. Tekin、M. Kazari、J. Kitajima、A. Horikawa、K. Okada、 Numerical and experimental characterization of the Dry Low NO_x Micromix hydrogen combustion principle at increasing energy density for industrial hydrogen gas turbine applications、 ASME Turbo Expo 2013、 GT2013-94771
- 8) A. Haj Ayed、K. Kusterer、H. H.-W. Funke、J. Keinz、M. Kazari、J. Kitajima、A. Horikawa、K. Okada、D. Bohn、 Numerical study on increasing energy density for the DLN Micromix hydrogen combustion principle、 ASME Turbo Expo 2014、 GT2014-25848
- 9) 経産省 (総合資源エネルギー調査会)、“長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告 (案)” (2015/4)