技術論文

2 MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器の開発とエンジン実証試験

100% Hydrogen Dry Low NOx Combustor Developments for 2MW Class Gas Turbine and Engine Demonstration Test

堀川 敦史[*1] HORIKAWA Atsushi　山口 正人[*1] YAMAGUCHI Masato　青木 茂樹[*1] AOKI Shigeki

Harald H.-W. Funke[*2]　Karsten Kusterer[*3]　Manfred Wirsum[*4]

ABSTRACT

Kawasaki Heavy Industries, LTD. (KHI) has research and development projects for a future hydrogen society. These projects comprise the complete hydrogen cycle, including the production of hydrogen gas, the refinement and liquefaction for transportation and storage, and finally the utilization in a gas turbine for electricity and heat supply. Within the development of the hydrogen gas turbine, the key technology is stable and low NOx hydrogen combustion, namely the Dry Low NOx (DLN) hydrogen combustion. KHI, Aachen University of Applied Science, and B&B-AGEMA have investigated the possibility of low NOx micro-mix hydrogen combustion and its application to an industrial gas turbine combustor. From 2014 to 2018, KHI developed a DLN hydrogen combustor for a 2MW class industrial gas turbine with the micro-mix technology. Thereby, the ignition performance, the flame stability for equivalent rotational speed, and higher load conditions were investigated. NOx emission values were kept about half of the Air Pollution Control Law in Japan: 70ppm (O2-16%). From May 2020, KHI started the engine demonstration operation by using an M1A-17 gas turbine with a co-generation system located in the hydrogen-fueled power generation plant in Kobe City, Japan. During the first engine demonstration tests, adjustments of engine starting and load control with fuel staging were investigated. On 21st May, the electrical power output reached 1,635 kW, which corresponds to 100 % load (ambient temperature 20 ˚C), and thereby NOx emissions of 55 ppm (O2-16%, 60 RH%) were verified. And finally, power output reached to 1800kW and NOx emissions were 60 ppm (O2-16%, 60 RH%) . Here, for the first time, a DLN hydrogen-fueled gas turbine successfully generated the electricity and heat.

キーワード：ガスタービン，水素，燃焼器，ドライ低NOx，発電

Key words：Gas Turbine, Hydrogen, Combustor, Dry Low NOx, Power Generation

1．はじめに

2018年７月，第五次エネルギー基本計画が閣議決定された[(1)]。その中で，国際的な水素サプライチェーンの構築と共に，安定的かつ大量に水素を消費する水素発電の開発を進めることが重要と記載されている。また，2019年３月，水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～[(2)]の中で，2020年までに水素専焼発電での発電効率向上（１MW級ガスタービンにおいて，水噴射NOx低減方式の26%→ドライ低NOx方式の27%）の記載がある。当社では，Fig. 1に示す液化水素サプライチェーンならびに水素発電を実現するための各種技術開発と実証を進めている[(3)]。

水素利用技術開発の中では，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以後，NEDOと記す）課題設定型産業技術開発費助成事業「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／ドライ低NOx水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」において，ドライ低NOx燃焼器を実装し，水素専焼ガスタービンの技術確立に向けた各種の技術試験を実施した[(4)]。

原稿受付　2020年12月25日
査読完了　2021年６月８日

＊１　川崎重工業㈱
〒673-86663　明石市川崎町１番１号
E-mail: horikawa_a@khi.co.jp
＊２　Aachen University Applied Science
Hohenstaufenallee 6, 52064 aachen, Germany
＊３　B&B-AGEMA GmbH
Jülicher Strasse 338, D-52040 Aachen
＊４　RWTH Aachen University
Mathieustrasse 9, 52074 Aachen

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

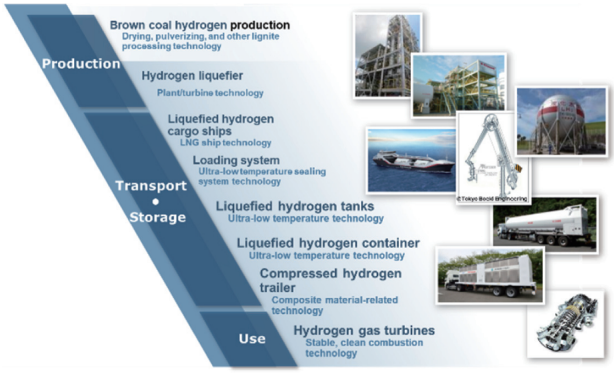


Fig. 1　Technology developments for Hydrogen Society in Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

本論では，２MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器の開発とエンジン実証試験について述べる。

2．水素専焼ドライ低NOx燃焼器の開発

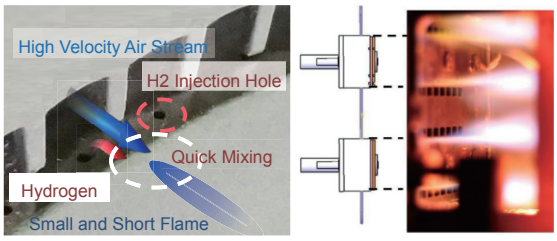
ガスタービンは燃料多様性に優れることから，水素ガスを燃料とすることは十分可能である。しかしながら，水素特有の燃焼特性に適合する燃焼技術が必要であり，逆火や燃焼振動が発生しない水素の安定燃焼と低NOx性を兼ね備えた燃焼器の開発，ならびにエンジン運転技術の開発が鍵となる[5]。

2.1　Micro-mix水素専焼ドライ低NOx燃焼技術の産業用ガスタービンへの適用

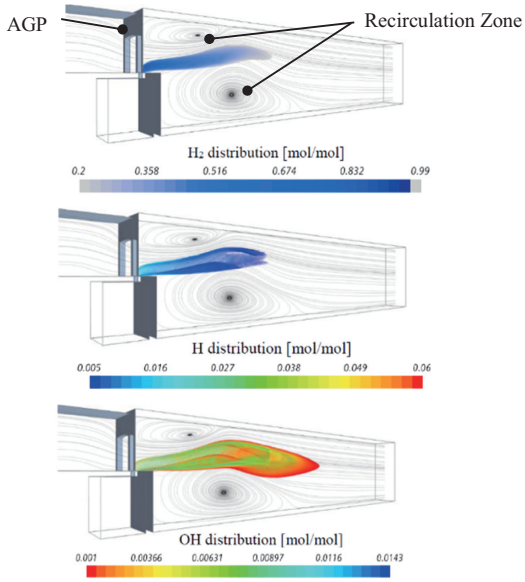
当社では，ドイツ・アーヘンにあるAcUAS（Aachen University Applied Science）が保有する微小な水素火炎を用いたmicro-mix水素専焼ドライ低NOx燃焼技術に着目し，B&B-AGEMA 社と共同で，産業用ガスタービン燃焼器への適用検討ならびに燃焼器の概念設計を実施した[6],[7],[8]。

Fig. 2にmicro-mix水素専焼ドライ低NOx燃焼技術の概念図ならびに燃焼CFD解析結果例を示す[9]。微小な水素噴射孔（直径１mm以下）から水素を噴射し，直交する空気噴流と急速に混合，水素火炎を形成する。微小な水素火炎を形成することで，局所的な高温域の発生を無くし，反応時間を短くしてNOxの発生を抑制する。また，水素噴射孔背後ならびに空気通過部AGP（Air Guiding Panel）と水素供給リングの背後に形成される循環域の間のせん断域にて，活性化学種であるOHラジカルやH原子が生成され水素火炎が保持される。このため，水素供給リング内への水素火炎の侵入ならびにAGP上流側への遡上，いわゆる逆火は発生しない。

Fig. 3にmicro-mixバーナモジュールを搭載した燃焼器の形状図（初期構想段階）を示す[10]。当社の産業用ガスタービンでは，逆流缶型燃焼器を用いている。このため，AcUASでの水素燃焼試験で用いていた矩形micro-mixバーナを缶型燃焼器形状に合うようにリング形状とした。水素供給リングを複数にすることにより，水素の焚き量（運転負荷）に応じて使用するリング数を変更する。エンジン起動時から低負荷時には，使用する水素供給リング数を１または２とし，希薄状態による吹き消えや燃料噴射差圧が低いことに起因する燃料噴射の不均一と未燃ガスの発生を抑制し，安定した保炎と高い燃焼効率を維持する．また，高負荷時においては，各水素供給リングからの燃料流量を運転状態に応じて最適化することにより低NOx燃焼の両立が可能となる。



a）micro-mix hydrogen flame



b）Structure of hydrogen flame and flame holding
（Examples of CFD analysis）

Fig. 2　Micro-mix hydrogen dry low NOx combustion principle

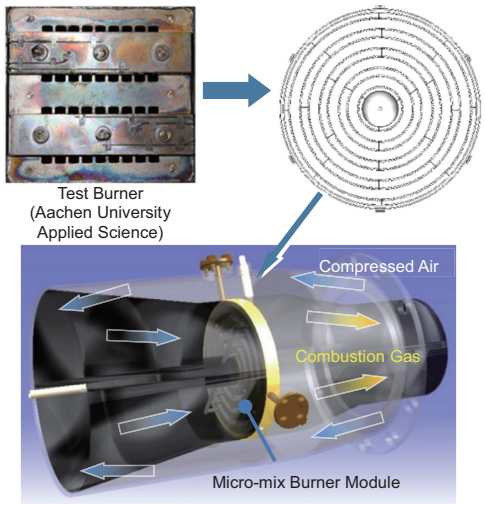


Fig. 3　Schematic view of the first conceptual design of hydrogen DLE combustor with micro-mix burner module

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

2.2　2 MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器の開発

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／水素燃焼技術の開発」（管理法人：国立研究開発法人 科学技術振興機構　以後，JSTと記す）において，概念設計をベースに2 MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器の試作と水素燃焼試験を実施した[11],[12],[13]。Fig. 4にM1A-17ガスタービンと試作燃焼器を示す。また，Fig. 5に燃料ステージングのコンセプトを示す。着火用燃料ガスにより着火し（Fig. 5 (A)），回転数上昇時に水素に火移りさせる（Fig. 5 (B)）。無負荷運転時（Fig. 5 (C)）には水素100%に切り替わっており，負荷条件によって利用する水素供給リングの数を変更する（Fig. 5 (D)，(E)）。

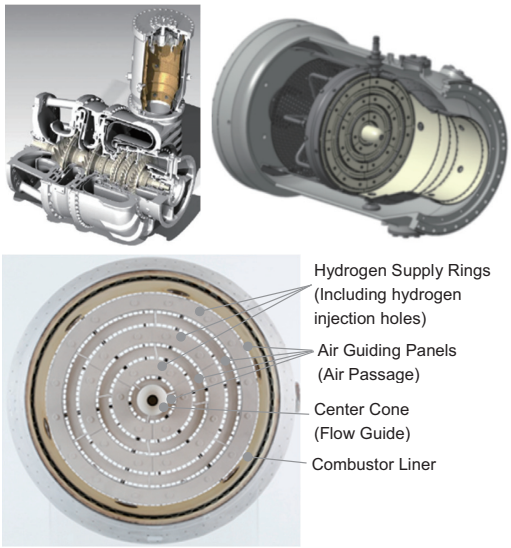


Fig. 4　Schematic view of Kawasaki M1A-17 gas turbine,prototype hydrogen DLE combustor and micro-mix burner module

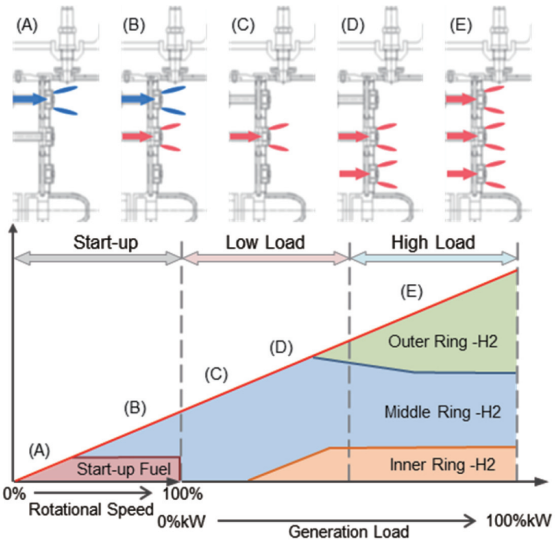


Fig. 5　Hydrogen supply in the engine start-up and power generation conditions

2015年，試作燃焼器を用いた実機条件に相当する燃焼器入口・出口条件での水素燃焼試験をRWTHアーヘン大学IKDG（Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf und Gasturbinen）にて実施した。Fig. 6にRWTHアーヘン大学IKDGでの燃焼器試験と100%負荷条件相当時の水素燃焼状態を示す。この試験では，NOx値は35 ～ 40ppm（残存酸素16%換算値）となり国内の大気汚染防止法を十分に下回ることを確認した[12]。しかしながら，NOx値とトレードオフの関係にある燃焼器圧力損失率が拡散燃焼器（天然ガス燃焼時）よりも1 %高く，圧力損失率を下げ，かつNOx値を維持する課題が残った。Fig. 7に燃焼器出口ガス温度一定の下，燃焼器空気流量を変化させた際の燃焼器圧力損失とNOx値の関係を示す．燃焼器圧力損失率1 %の増減によりNOx値が約5 ～ 10ppm変わる．また，条件によっては高周波の燃焼振動が発生し，燃焼器部品に損傷が生じた。

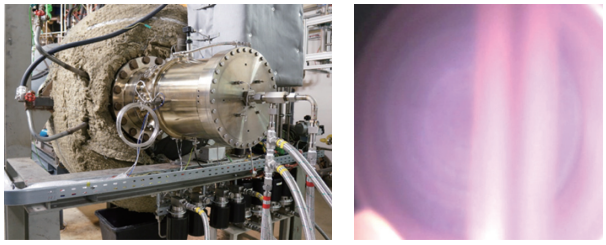


Fig. 6　Prototype combustor installed to the high pressure test facility at RWTH Aachen University, IKDG（left）and inside MMX combustor at design conditions（right）

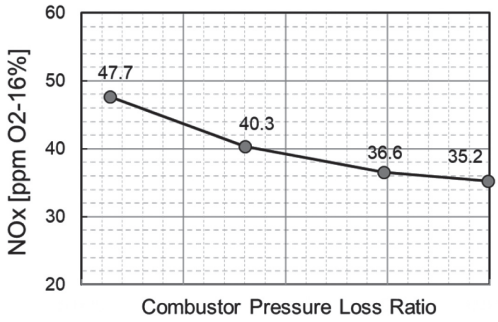


Fig. 7　The relationship between combustor pressure loss ratio and NOx emission

2016年度から2018年度にNEDO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」において，実用化に向けたさらなる改良を実施すべく，以下の2点を開発目標とし，燃焼器要素開発を実施した[14]。

①50%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。

②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。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

NOx値低減と燃焼器圧力損失率のバランスを図るべく，micro-mixバーナモジュール形状の改良を実施した。Fig. 8に２つのmicro-mixバーナモジュール形状を示す。

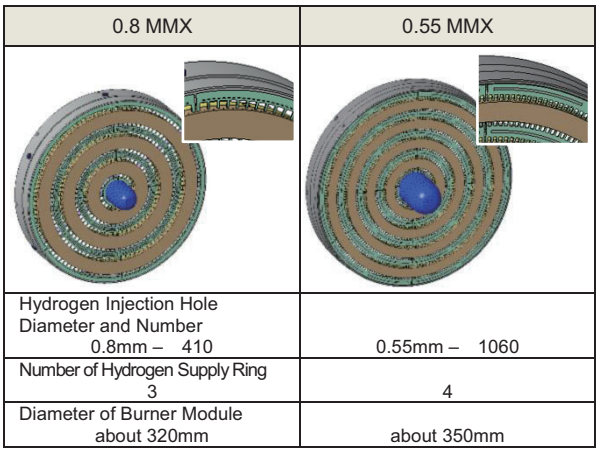


Fig. 8 Schematic view of improved MMX burner geometries; 0.8 MMX（left）and 0.55 MMX（right）

0.8MMXは，３つの水素供給リングに0.8mmの水素噴射孔がトータルで410個，バーナ直径は約320mmであり，初期の試作MMXバーナ形状に近い。一方の0.55MMXは，４つの水素供給リングに0.55mmの水素噴射孔がトータルで1064個，バーナ直径および燃焼器ライナー最大径は約350mmとなっている（燃焼器出口径は0.8MMXに同じ）。水素噴射孔を小さくすることにより水素火炎サイズを小さく，高温燃焼ガスの滞留時間を短くすることで，NOx低減を狙った形状とした。

0.8MMXと0.55MMXについて，水素燃焼試験を実施し，NOx排出特性，燃焼安定性等を評価した。Table 1に評価項目と試験実施設備を記す。

Table 1 Evaluation Item and Test Facility

Evaluation Item	Test Facility
Ignition Performance	KHI Akashi Works
Flame Stability for Engine Start-up Conditions	KHI Akashi Works
NOx Emissions	RWTH Aachen University, IKDG
Combustion Instability	RWTH Aachen University, IKDG
Combustor Parts Temperature	RWTH Aachen University, IKDG
Combustor Outlet Gas Temperature Profile	KHI Akashi Works
Flame Stability in High Load Conditions	RWTH Aachen University, IKDG
Endurance of Combustor Parts	RWTH Aachen University, IKDG

着火性能の確認

Fig. 5 (A)に示す様に外側の水素供給リングに着火用燃料ガス，ここでは天然ガスと水素を供給し，それぞれ着火性能を確認した。Fig. 9に着火試験時の火炎の様子をそれぞれ示す。Fig. 9には，0.55MMXの結果を示すが，0.8MMXおよび0.55MMXのそれぞれで，回転数５％～20%に相当する空気流量条件，天然ガスおよび水素で拡散燃焼器と同等の安定した着火性能を確認した。

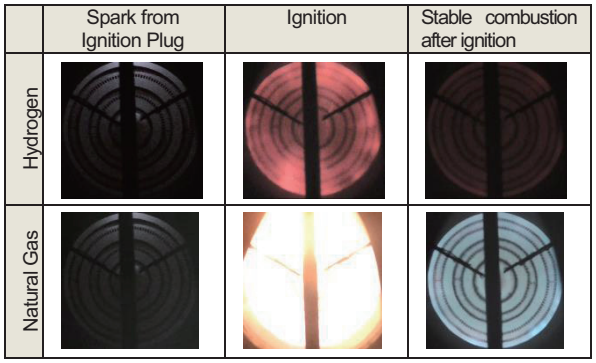


Fig. 9 Pictures of ignition performance investigation test（0.55 MMX）

回転数上昇を想定した条件での保炎性

着火後，Fig. 5 (B)およびFig. 5 (C)に示す様に中央の水素供給リングに水素を供給し，回転数を上昇（加速）させる。中央の水素供給リングのみに水素を供給し，保炎性の確認試験を実施した。Fig. 10に回転数上昇を想定した空気流量および水素流量条件での保炎試験時の水素火炎の様子を示す。Fig. 10には，0.55MMXの結果を示すが，0.8MMXおよび0.55MMXのそれぞれで，水素火炎は非常に安定しており，110％回転数に相当する空気流量条件でも吹き消えは生じなかった。

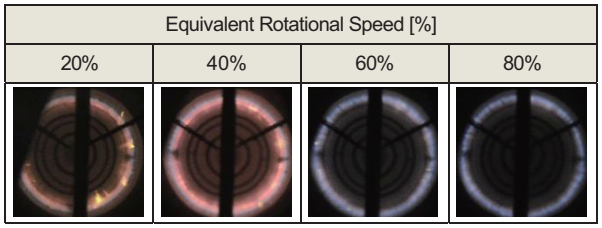
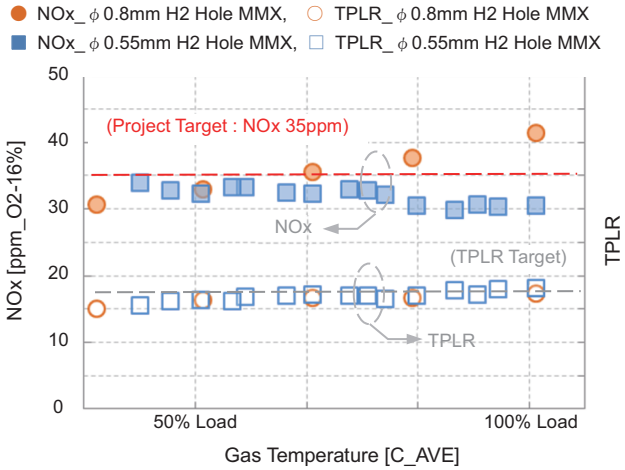


Fig. 10 Pictures of hydrogen flame for each rotational speed equivalent conditions.（0.55 MMX）

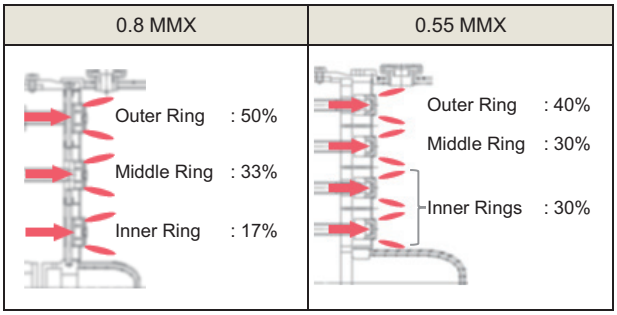
高負荷時のNOx特性

Fig. 11にNOx特性と水素供給リングへの水素流量割合を示す。横軸に負荷率に相当する燃焼器出口ガス温度，縦軸にNOx値と燃焼器圧力損失率を示している。燃焼器圧力損失率（TPLR: Total Pressure Loss Raito）は，0.8MMX（Fig. 11○），0.55MMX（Fig. 11□）とも拡散燃焼器と同じ値に調整した。0.8MMXでは，負荷率の増加と共にNOxも増加し，100%負荷条件相当で40ppmとなった。0.55MMXでは，50%から100%負荷条件相当の範囲で35ppmを下回る結果を得た。0.55MMXでは，水素火炎をより微細にしたことによる水素火炎中の局所的な高温領域と高温燃焼ガス滞留時間の低減，ならびに各水素供給リングへの水素供給量バランスの最適化によりNOxの低減が図ることができたと考えている。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.



a）NOx emission results



b）Hydrogen flow rate ratio

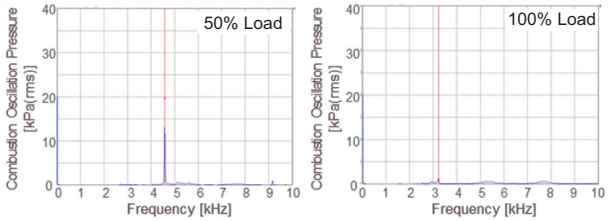
Fig. 11　NOx emission（O_2-16% corrected values）results and hydrogen flow rate ratio for each hydrogen supply rings

燃焼振動

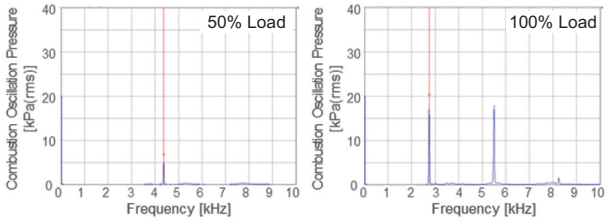
Fig. 12に0.8MMXおよび0.55MMXで見られた特徴的な燃焼振動の計測結果を示す。横軸に周波数，縦軸に振幅の強さ（RMS値）を示している。0.8MMXでは，50%負荷付近で4.6kHzの燃焼振動が計測され，90%負荷以上では完全に無くなった。0.55MMXでは，50%から60%負荷付近で4.4kHzの燃焼振動が計測され，80%負荷付近からは2.7kHzと5.4kHzの燃焼振動が計測された。RWTHアーヘン大学IKDGの試験設備では，ガスタービン実機のノズルに相当する絞りダクトを設置していないため，燃焼器下流でのチョーク条件を再現できていない。燃焼振動は，燃焼器の境界条件によっても変化することから，エンジン実証試験時には燃焼振動の出方に十分留意することとした。

燃焼器部品温度

各燃焼器部品の温度をK型シース熱電対で計測した。Fig. 13に熱電対挿入位置，Fig. 14に100%負荷条件相当時の温度計測結果を示す。Fig. 14には，0.8 MMXの結果を示すが，0.8MMXおよび0.55MMXのそれぞれで各燃焼器部品ともインピンジ冷却およびフィルム冷却を適用したことにより社内設計基準を十分に満たし，500℃以下となった。（Fig. 14のカラーコンターはCFD解析結果の流体温度分布を示している）



a）0.8 MMX oscillation results: 50% load（left），100% load（right）



b）0.55 MMX oscillation results: 50% load（left），100% load（right）

Fig. 12　Combustion oscillation frequency and pressure amplitude of 0.8 MMX and 0.55 MMX

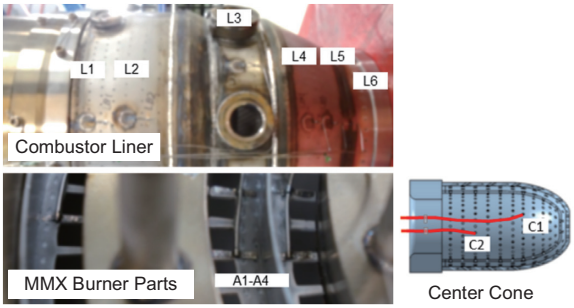


Fig. 13　Thermocouples position installed on the combustor part

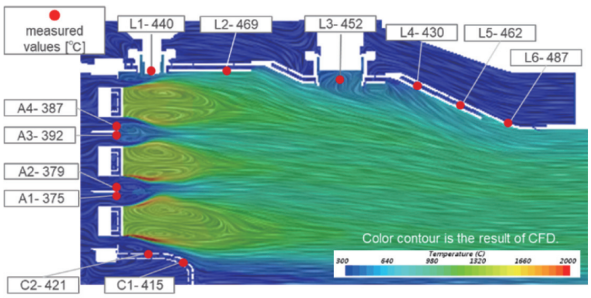


Fig. 14　Combustor parts temperature at 100% load conditions（0.8 MMX）

燃焼器出口温度分布

燃焼器出口での燃焼ガス温度分布を5点式櫛型全温計測プローブで計測した。Fig. 15にプローブ位置と100%負荷条件相当における0.8MMX（Fig. 15●）と拡散燃焼器（Fig. 15▲）の温度プロファイルを示す。両者ともほぼ同じ温度プロファイルであることを確認した。パターンファクタとしても概ね等値であり，燃焼器出口温度分布に起因する燃焼器下流のダクト部品，タービンへの熱的影響は小さいと判断した。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

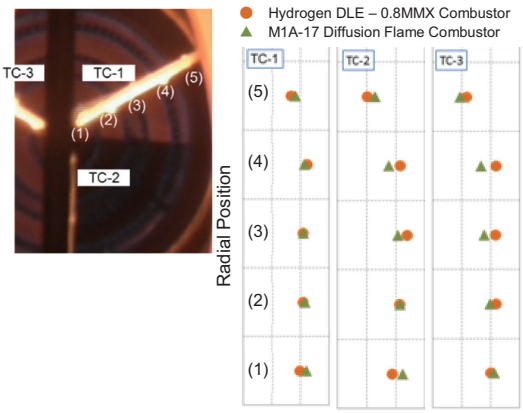


Fig. 15 Gas temperature measurement probe position and comparison of gas temperature profile

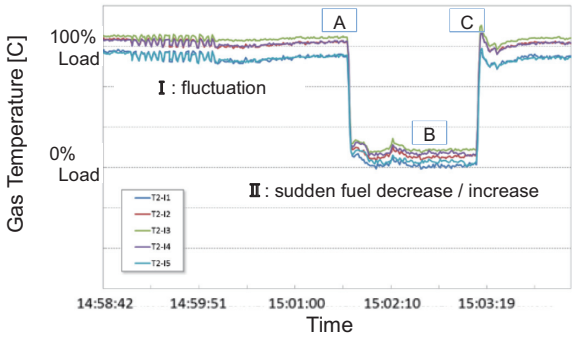
燃料流量変動時の燃焼安定性

中小型ガスタービンでは，負荷変動に応じて時々刻々と燃料流量が変化する。また，急負荷遮断の様な100%負荷条件相当から無負荷条件相当まで燃料を急減させることもある。その様な燃料操作に対しても異常な燃焼状態への遷移や，失火が起きないことを確認する試験を実施した。

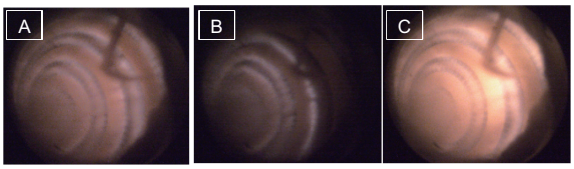
燃焼器内部での水素火炎挙動を把握すべく，B&B-AGEMA社が保有する高温場の可視化計測を可能とするBoroscope（borescope）技術をmicro-mix燃焼器に適用した[15]。Fig. 16にBoroscope本体とmicro-mix燃焼器の圧力ケーシングに装着した状態を示す。

Fig. 16 Pictures of Boroscope body and Boroscope assembly together with CCD camera, installed on MMX pressure casing

Fig. 17に燃焼安定性を確認した試験時の燃焼器出口ガス温度の時系列データと燃焼器内部の燃焼状態をそれぞれ示す。（それぞれのラインはRWTHアーヘン大学IKDGの試験設備で用いた５点式全温計の温度を示す）Fig. 17 (a) Ⅰ：100%負荷条件相当から±2.5%の燃料流量変動を付加する操作を実施し，異常な燃焼状態に遷移しないことを確認した。Fig. 17 (a) Ⅱ：100%負荷条件相当から無負荷条件相当まで燃料の急減と無負荷条件相当から100%負荷条件相当まで燃料を急増する操作を実施し，失火やmicro-mixバーナ部の焼損が発生しないことを確認した。



a）Combustor outlet gas temperature



b）Pictures of hydrogen flame

Fig. 17 Time series data of combustor outlet gas temperature and pictures of hydrogen flame（0.8 MMX）

燃焼器部品の健全性

燃焼器部品の健全性を確認するため，100%負荷条件相当を２時間保持する試験を実施した。Fig.12に示した燃焼振動に起因する高サイクル疲労の有無を判断するためには，繰り返し数（燃焼振動の周波数）の10^7回に到達するする約１時間（2.8kHzの場合）で十分であるが，ここではRWTHアーヘン大学IKDGの試験設備の水素貯蔵能力を活用し，100%負荷条件相当を２時間保持とした。Fig. 18に0.55MMXを用いた試験時の時系列データを示す。２時間の間，NOxは35ppm以下，燃焼器圧力損失率も安定していた。

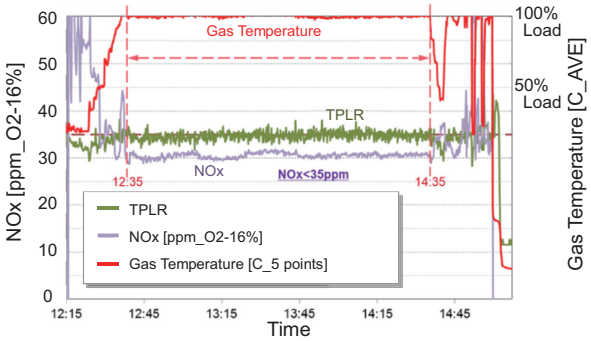


Fig. 18 Time series data of the 2 hours 100% load conditions hold test（0.55MMX）

Fig. 19に試験後の燃焼器部品を示す。Fig. 19には，0.55MMXの結果を示すが，0.8MMXおよび0.55MMXのそれぞれで，100%負荷条件相当を２時間保持する試験を実施し，目視確認で焼損や変形が無いことを確認した。また，全ての燃焼器部品に浸透探傷検査を実施し，クラック等が生じていないことを確認した。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

Fig. 19 Pictures of combustor parts after the test（0.55 MMX）

3．水素ガスタービンエンジン実証試験

3.1　水素CGS実証プラントと水噴射NOx低減方式を用いた水素100%発電実証

2015年度から2018年度で実施したNEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「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」において，当社は，水素専焼/混焼ガスタービン開発を核とした水素コージェネレーションシステムを担当した[(3),(5)]。

この事業では，当社のPUC17型常用発電装置（定格発電出力１MW級）を使用し，拡散燃焼器をベースとした水素燃料対応燃焼器を搭載したM1A-17型ガスタービンエンジンを装備した。燃料ガスの組成変化に柔軟に対応し，水素ガス専焼（純水素100%），都市ガス専焼，水素と都市ガスを任意の割合で混合した混合ガスによる混焼運転が可能なことを特徴としており，NOx低減には水噴射を用いた。

Fig. 20に神戸市のポートアイランドに設置した水素コージェネレーション実証設備の全景と本実証で用いた拡散燃焼器を示す。2017年12月の設備完成以降，ガスタービン発電装置単独での試運転や，天然ガスによる運転試験を経たうえで，水素と天然ガスの混焼および水素専焼による熱電供給の実証試験を実施した。

2018年４月19日と20日に実施した実証試験において，水素のみを燃料として，近隣の４施設への熱電の同時供給を実現し，市街地における水素ガス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した[(16)]。Fig. 21にその際の運転監視装置のモニタ表示を示す。水素ガス流量が約2,200Nm^3/h，水噴射によりNOx値約50ppm（残存酸素16%換算値）となった。

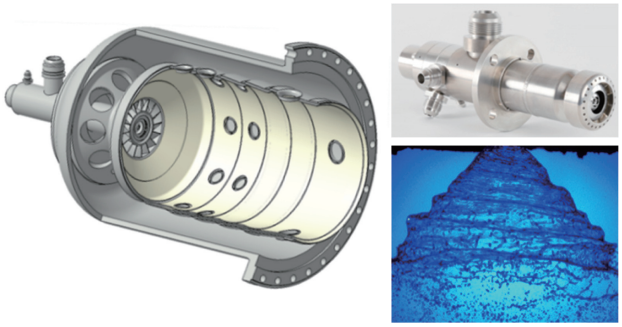
3.2　水素専焼ドライ低NOx発電実証

2019年度からNEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「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／ドライ低NOx水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」において，２章で紹介したドライ低NOx燃焼器を用いた水素専焼ガスタービン技術の開発を実施した。

設備改修とドライ低NOx燃焼器の実装

2019年度は，ドライ低NOx燃焼器の実装に向けた設備改修を実施した。拡散燃焼器では，燃料供給ラインは１ラインであったが，Fig. 5に示した燃料ステージングによる安定したエンジン運転を可能とするため，燃料ラインの増設や制御システムの改修を行った。2020年3月にドライ低NOx燃焼器をエンジンに搭載し，周辺機器の設置を完了した。Fig. 22にエンジンに搭載状態の拡散燃焼器とドライ低NOx燃焼器の比較を示す。

a）Hydrogen fueled power generation plant



b）Diffusion flame combustor, fuel injector and image of water injection

Fig. 20 Picture of hydrogen fuelled gas turbine cogeneration power plant and diffusion flame combustor

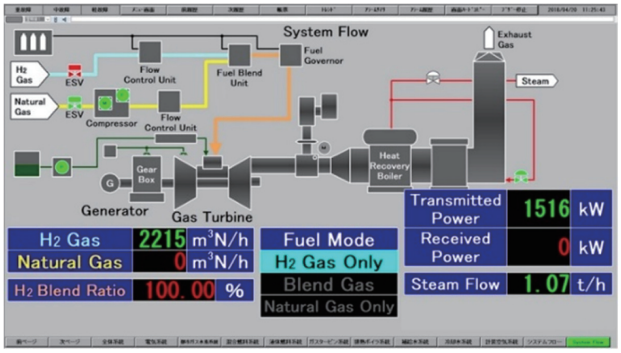


Fig. 21 Picture of control monitor at 100% hydrogen operation

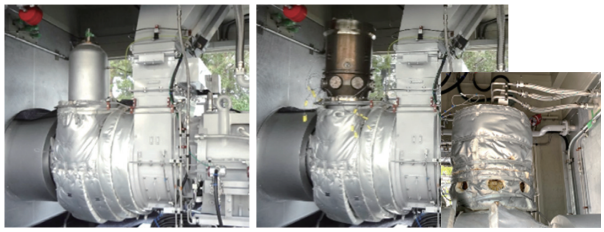


Fig. 22 Pictures of diffusion flame combustor（left）and dry low NOx combustor（right）, and after piping of gas supply

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

2020年５月よりエンジン運転技術を確立するための技術試験を実施した。技術試験の間は，負荷抵抗器にて発電した電力を吸収した。Fig. 23に技術試験の様子を示す。

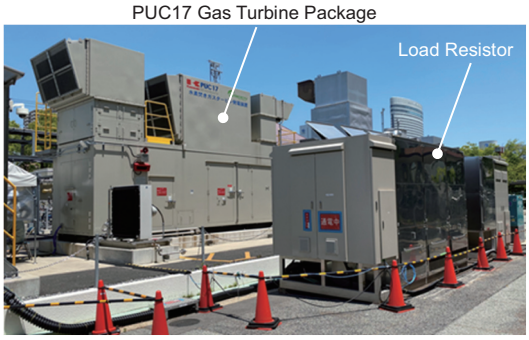


Fig. 23　Picture of technology verification test with dry low NOx combustor

初回のエンジン試験では，Fig. 8に示した0.8MMXを実装した。本燃焼器でのエンジン試験を事故やエンジントリップ等が無く，安全に運転技術を確立し，運転ノウハウを習得することを優先させるため，燃焼器要素試験において100%負荷条件相当で燃焼振動の無い0.8MMXを選択した。

エンジン起動調整試験

2020年５月12日よりエンジン起動調整試験を実施した。起動用燃料ガスである天然ガス流量ならびに起動途中の水素投入のタイミングと流量を調整し，無負荷運転に到達した。Fig. 24に起動時の時系列データを示す。横軸に時間，縦軸に回転数と燃料ガス流量をそれぞれ示している。プレパージ後，回転数約5%で天然ガスに着火，起動途中から水素を投入し回転数を上昇させ，着火後，約40秒で100%回転数に到達させた。

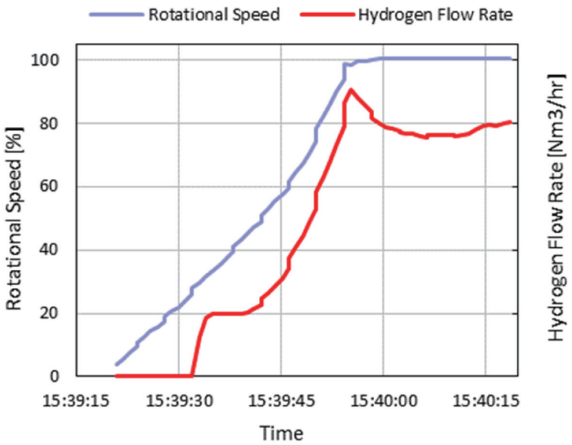


Fig. 24　Time series data of the engine start test on 12th May, 2020

負荷試験

2020年５月18日から負荷試験を実施した。５月19日，吸気温度25℃における100%負荷-1530kWに到達した。Fig. 25に５月21日の試験時の時系列データを示す。21日には吸気温度20℃における100%負荷-1635kWに到達した。このときのNOx値は約55ppm（残存酸素16%，相対湿度60%換算値）となり，燃焼振動の振幅の強さ（RMS値）は3kPa未満の安定した運転状態であった。

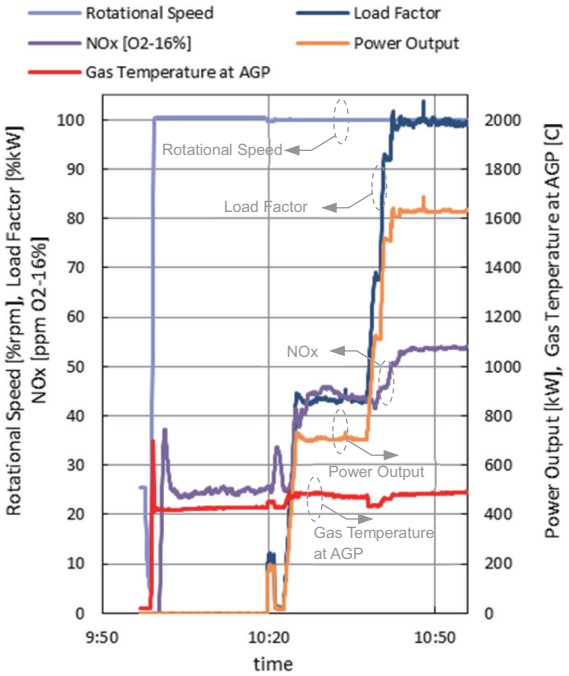


Fig. 25　Time series data of the engine loading test on 21st May, 2020

また，負荷移行速度も現天然ガスDLE燃焼器並みの速さに設定し，負荷の上げ下げに対して，燃料ステージングおよび追従性に問題がないことを確認した。

初回エンジン試験後，燃焼器部品を取り外し，目視確認により燃焼器内部およびトランジションダクト等に異常がないことを確認した。Fig. 26に燃焼器内部の様子とAGP近傍のガス温度計測するための熱電対（先端部）を示す。色あいはサーモペイントの結果を示す。オレンジ色：温度 低，黒色：温度 高。Fig.25中の赤線（Gas Temperature at AGP）が熱電対での温度計測値を示している。着火時，瞬間的に800から900℃に達するが，無負荷運転から100%負荷においては500℃以下となった。

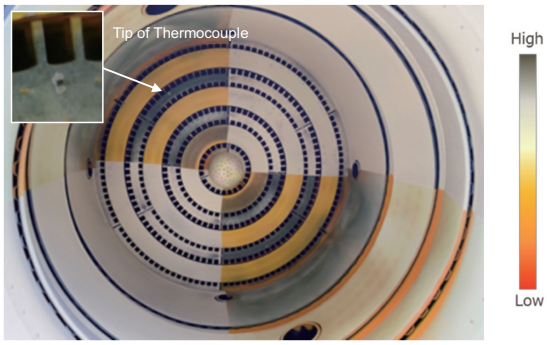


Fig. 26　Pictures of inside combustor parts after 1st engine test and tip of thermocouple for gas temperature measurement at AGP

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

Table 2に初回エンジン試験の運転履歴を示す。エンジン起動16回，トータル運転時間35.9時間，そのうち100%負荷運転時間10時間。燃焼器部品周囲ならびに設備に異状の発生無く，初回エンジン試験を終えた。

Table 2　Summary of 1st engine test: from 12th May to 2nd June

Test Period	12th May to 2nd June
Operation Day	14 days
Number of Engine Starting	16 times
GT Operation Time	35.9 hours
100%Load Operation Time	10 hours
More than 1000kW Operation Time	14.8 hours

熱電供給実証

初回エンジン試験に引き続き，各種の運転制御パラメータの調整を実施した。2020年９月にFig. 23に示した負荷抵抗器を取り外し，10月から系統連系試験ならびに熱電供給実証試験を実施した。2020年11月４日に本水素専焼ドライ低NOx燃焼技術を用いた熱電供給に成功した。Fig. 27にその際の運転監視装置のモニタ表示を示す。1700kW発電出力時のNOx値約55ppm（残存酸素16%，相対湿度60%換算値）となった。

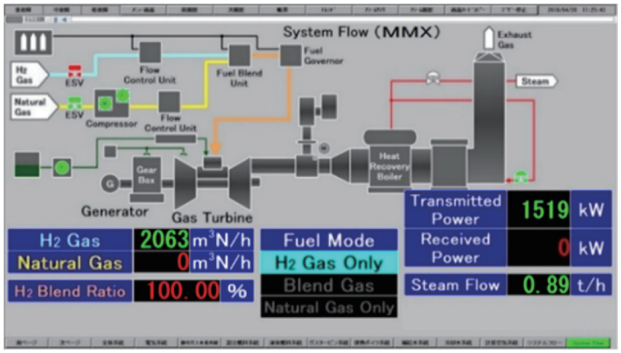
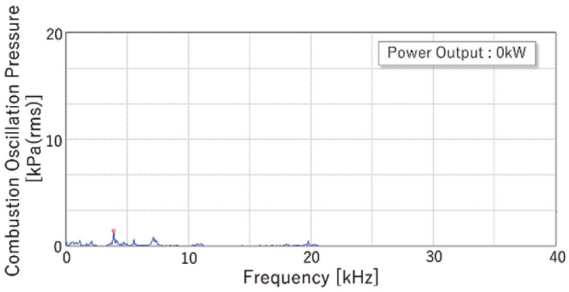


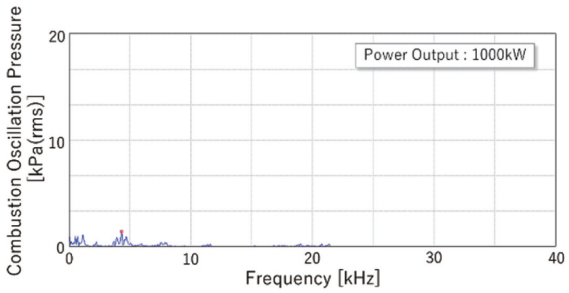
Fig. 27　Picture of control monitor at 100% hydrogen operation, heat and power supply with 0.8MMX combustor technology on 4th November, 2020

2021年１月18日には定格出力100%負荷-1800kWにおいて，NOx値は約60ppm（残存酸素16%，相対湿度60%換算値），エンジン効率は水噴射によるNOx低減方式にくらべ，約１%改善し，27%となった。NOx値はFig.11に示した燃焼器要素試験時より高い値を示したが，これは燃焼器要素試験とエンジン実機での燃焼器境界条件の差異（空気流量，温度，流れの均一度等）ならびに安定燃焼を重視した各水素供給リングへの燃料配分設定によるものと考えている。Fig. 28に１月18日試験時の燃焼振動の計測結果を示す．無負荷から100%負荷の全域で燃焼振動の振幅の強さ（RMS値）は3kPa 未満となった。

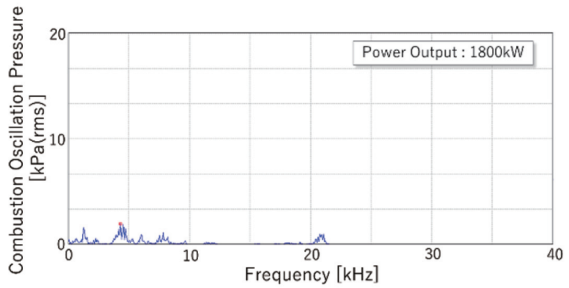
2021年1月末，NEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発／ドライ低NOx水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」におけるエンジン実証運転を終了した。本実証運転期間（2020年10月から2021年１月）において，起動回数：55回，運転時間：254時間，等価運転時間：800時間となった。エンジン実証試験終了後，燃焼器部品を分解点検，浸透探傷検査を実施し，クラック等が生じていないことを確認した。Fig. 29にエンジン実証試験終了後の0.8MMXバーナモジュールを示す。



a）0%Load - 0kW



b）About 55%Load - 1000kW



c）100%Load - 1800kW

Fig. 28　Combustion oscillation frequency and pressure amplitude in the heat and power supply test on 18th January, 2021

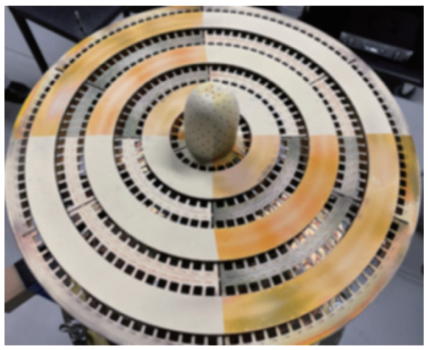


Fig. 29　0.8MMX burner module after engine demonstration tests

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

まとめ

水素専焼ドライ低NOx燃焼器の開発ならびにエンジン実証試験を実施し，以下を得た。

燃焼器要素開発

・Micro-mix水素専焼ドライ低NOx燃焼技術を適用した産業用ガスタービン燃焼器の概念設計を実施した。

・２MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器を試作し，水素燃焼試験により，50%から100%負荷相当条件でNOx値35ppm以下（残存酸素16%換算値）を得た。

・NOx値を大気汚染防止法の半分に抑制し，実際のガスタービンエンジン運転においても規制値を十分に下回る見通しを得た。

・着火から各回転数条件，低負荷から高負荷での燃焼安定性を確認し，エンジン運転時の燃料制御の方針，制御機器構成の検討が可能となった。

エンジン技術試験と熱電供給実証

・神戸市のポートアイランドに設置した水素コージェネレーション実証設備において，水素専焼ドライ低NOx燃焼器での運転を可能にする設備改修を行った。

・エンジン起動調整試験を実施し，起動用燃料ガス流量ならびに起動途中の水素投入のタイミングと流量の調整を行い，安定した起動が可能となった。

・2020年５月21日，吸気温度20℃における100%負荷-1635kWに到達した。このときのNOx値は約55ppm（残存酸素16%，相対湿度60%換算値）となり，燃焼振動も無く安定した運転状態であった。

・2020年11月４日，本水素専焼ドライ低NOx燃焼技術を用いて熱電供給を達成した。

・定格出力100%負荷-1800kWにおいて，NOx値は約60ppm（残存酸素16%，相対湿度60%換算値），エンジン効率は27%となった。

謝　辞

本内容の一部は，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／水素燃焼技術の開発」（管理法人：JST）ならびにNEDO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」，NEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「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」および「ドライ低NOx水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」にご支援を頂き得られた成果です。

参考文献

(1) 経済産業省 ニュースリリース ウェッブサイト; 新しいエネルギー基本計画が閣議決定されました，https://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001.html（アクセス日2018年7月5日）.

(2) 経済産業省 ニュースリリース ウェッブサイト; 水素・燃料電池戦略ロードマップを策定しました～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～ , https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001.html（アクセス日2019年3月13日）.

(3) 西村元彦,水向健太郎,洲河誠一; 国際液化水素サプライチェーンの技術構築の現状, エネルギー・資源学会誌, 通巻229号,Vol. 39 No. 3, (2018), pp. 153-157.

(4) NEDO News Release ウェッブサイト; 世界初，ドライ低NOx水素専焼ガスタービンの技術実証試験に成功, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html（アクセス日2020年7月21日）.

(5) 堀川敦史,川崎重工における水素焚きガスタービンの開発状況, 火力原子力発電協会, 会誌「火力原子力発電」10月号, Vol. 70, No. 757, (2019).

(6) Funke, H., et al; Numerical and Experimental Characterization of Low NOx Micromix Principle for Industrial Hydrogen Gas Turbine Applications, Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, GT2012-69421.

(7) Funke, H., et al; Experimental and Numerical Characterization of the Dry Low NOx Micromix Hydrogen Combustion Principle at Increased Energy Density for Industrial Hydrogen Gas Turbine Applications, Proceedings of ASME Turbo Expo 2013, San Antonio, Texas, GT2013-94771.

(8) Haj Ayed, A., et al; Numerical Study on Increased Energy Density for the DLN Micromix Hydrogen Combustion Principle, Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, Dusseldorf, Germany, GT2014-25848.

(9) Kroniger, D.他; Numerical Study of Hydrogen-fueled Micromix Combustion and Experimental Validation of NOx Emissions, 第48回ガスタービン学会定期講演会（オンライン開催）, 講演論文集A-14, (2020).

(10) 堀川敦史,他; ドライ水素低NOx燃焼技術の開発, 第43回ガスタービン学会定期講演会（米子）, 講演論文集A-7, (2015).

(11) Horikawa, A., et al; Application of Low NOx Micro-Mix Hydrogen Combustion to Industrial Gas Turbine Combustor and Conceptual Design, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015, Toyko, pp. 141-146

(12) 岡田邦夫,他; 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, 第44回ガスタービン学会定期講演会（酒田）, 講演論文集C-3, (2016).

(13) 古賀和樹,他; 2MW級ガスタービン用ドライ水素専焼低NOx燃焼器の開発, 第45回ガスタービン学会定期講演会（松山）, 講演論文集B-7, (2017).

(14) Horikawa, A., et al; Application of Low NOx Micro-Mix Hydrogen Combustion to 2MW Class Industrial Gas Turbine Combustor, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2019, Toyko, IGTC-2019-129.

(15) Dickhoff, J., et al; Development of an Air Cooled Borescope for Infrared Thermal Load Monitoring in Industrial Gas Turbine Combustors and Operational Experience, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2019, Toyko, IGTC-2019-155.

(16) NEDO News Release ウェッブサイト;世界初，市街地での水素100%による熱電供給を達成, http://www. nedo. go. jp/news/press/AA5_100945. html（アクセス日2018年4月25日）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.