

TED Plaza

ドライ低 NOx 水素専焼燃焼器の開発



岡田 邦夫

川崎重工業株式会社  
 技術開発本部技術研究所熱システム研究部研究一課  
 okada\_kunio@khi.co.jp

1. はじめに

当社は、将来の低炭素・水素社会を睨み、水素の製造、液化、輸送・貯蔵、利用を一体とした「CO<sub>2</sub>フリー水素チェーン（図 1）」を提唱している。資源国の未利用資源や余剰・安価な再生可能エネルギーから低コストに水素ガスを製造、資源国の港湾にて水素ガスを液化、液体水素運搬船にて海上輸送し、利用国にて二次エネルギーとして利用するコンセプトである。現在、製造から輸送、利用に至る各要素技術の開発および製品化に取り組んでいる。本報では、水素ガスタービン発電のうち、最も重要な開発課題であるドライ低 NOx（窒素酸化物）水素専焼燃焼器の開発状況について紹介する。

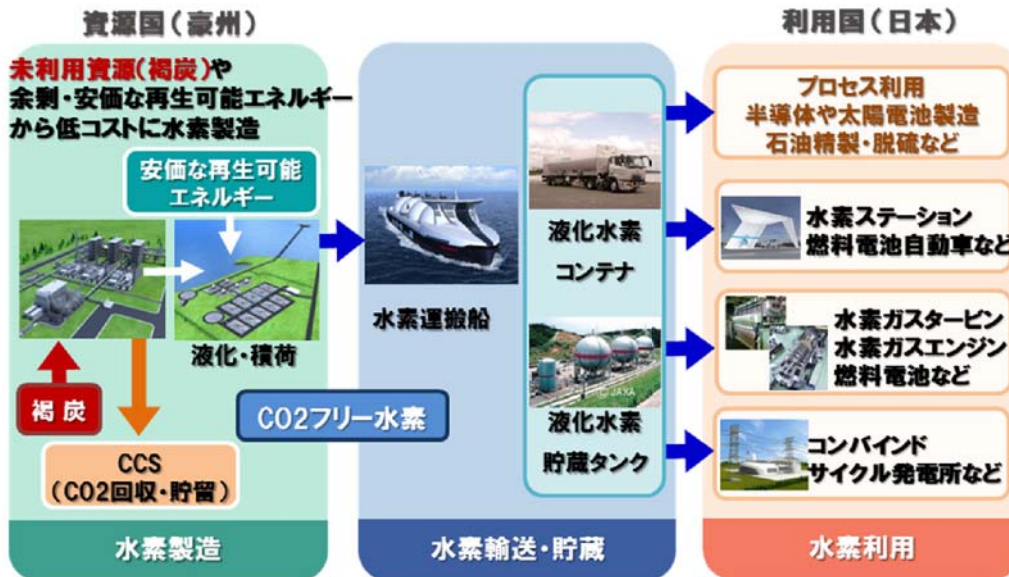


Fig. 1 Concept of CO<sub>2</sub> free hydrogen supply chain in Kawasaki

2. 川崎重工業における水素ガスタービンの開発

ガスタービンは、燃料多様性に優れることから水素を燃料ガスとすることは十分可能である。しかしながら、水素に特有の燃焼特性に適合する燃焼技術が必要であり、水素の安定燃焼と低 NOx（窒素酸化物）性を兼ね備えた燃焼器の開発が鍵となる。水素は、燃焼速度が速いことから、希薄予混合燃焼では逆火が生じる。このため、水素の低 NOx 燃焼の研究・開発では、多点噴射方式により小さな水素火炎を用いる手法（Cerutti, et al., 2014, Funke, et al., 2012, 2013, Haj Ayed, et al., 2014, Hollon, et al., 2011, Marek, et al., 2005, Weiland, et al., 2011, York, et al., 2012）と急速混合および

吹き上がり火炎を用いる手法 (Asai, et al., 2011, 2014, Beerer, et al., 2012, Dodo, et al., 2011) がある。当社では、二種類のドライ水素低 NOx 燃焼技術の開発に取り組んでいる。一つは、現行の天然ガス燃焼 DLE 燃焼器の追焚きバーナから水素を投入し、天然ガスと水素を混焼させる方式である (小田他, 2014)。図 2 に当社ガスタービンの DLE 燃焼器構造を示す。拡散燃焼方式のパイロットバーナ、予混合燃焼方式のメインバーナおよび追焚きバーナの三つのバーナで構成する。エンジン起動時には安定性に優れるパイロットバーナ、高負荷時にはメインバーナおよび追焚きバーナにて低 NOx 運転を行う。

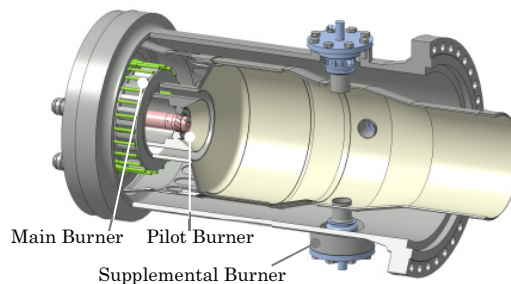


Fig. 2 DLE combustor geometry of Kawasaki gas turbine

燃焼器上流側のメインバーナで天然ガスを燃焼させているため、追焚きバーナの予混合燃料は、高温・低酸素な燃焼ガス中に投入される。このため、追焚き燃料ガスの燃焼反応が緩やかとなり、広い運転範囲で低 NOx 燃焼が可能である。水素投入時も同様に燃焼反応が緩やかになり、天然ガス同様に低 NOx 燃焼が可能である。

追焚きバーナからの水素投入量が燃料ガス全体の 60vol% (熱量ベースで約 30%) で、NOx 排出 25ppm (残存酸素 15%換算) 保証が可能レベルを達成している。

もう一つは、燃料の全量を純水素燃焼でドライ低 NOx 燃焼を目指すものである。2010 年よりドイツ アーヘンにある AcUAS (Aachen University Applied Science) および B&B-AGEMA 社と共同で、micro-mix 水素低 NOx 燃焼技術の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進めてきた。

次章では、micro-mix 水素低 NOx 燃焼技術と micro-mix バーナを適用した燃焼器の設計および低圧燃焼試験結果について紹介する。

### 3. ドライ低 NOx 水素専焼燃焼器の開発

#### 3-1 micro-mix 低 NOx 水素燃焼技術

micro-mix 水素低 NOx 燃焼技術は、AcUAS にて 1980 年代から今日にかけ研究されている燃焼技術であり、小型バーナを用いた水素の燃焼特性の取得や APU (航空機用補助動力装置) の水素による運転試験が行われている。図 3 に micro-mix バーナの拡大図を示す。微小な水素噴射孔 (直径 0.3mm 程度) から水素を噴射し、直行する空気噴流と急速混合し、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。

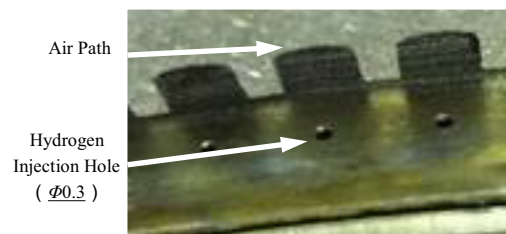


Fig. 3 Micro-mix burner geometry

#### 3-2 ドライ低 NOx 水素専焼燃焼器の設計

図 4 に 2MW 級ガスタービン M1A-17D の断面図を示す。本ガスタービンエンジンは同クラスでは世界最高レベルの発電効率を誇り、都市ガス燃焼では NOx 排出量 35ppm (O<sub>2</sub> = 0%) を達成している。今回設計したドライ低 NOx 水素専焼燃焼器は M1A-17 の仕様と合致するように設計を行った。

図5にドライ低NO<sub>x</sub>水素専焼燃焼器の形状を示す。圧縮空気は、圧力ケーシングと燃焼器ライナの間を通り、燃焼器ライナ保持管の空気孔により折り返す。整流板により流れを均一かつ一様流にし、micro-mixバーナモジュールに供給する。水素が各リングに供給され、微小な水素火炎をmicro-mixバーナモジュール下流に形成する。水素噴射孔径については、試験用小型バーナにて噴射孔1mmでも低NO<sub>x</sub>燃焼が保たれることが確認された(堀川他, 2015)ことから、噴射孔1mmでの設計とした。

図6にmicro-mixバーナモジュールと形成される火炎を示す。水素供給部は、リング形状としており、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。これにより、エンジン起動時から低負荷時における高い燃焼効率と高負荷時の低NO<sub>x</sub>燃焼の両立が可能となる。

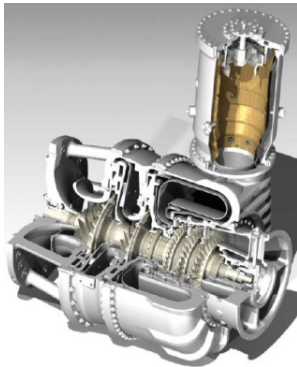


Fig. 4 Kawasaki M1A-17

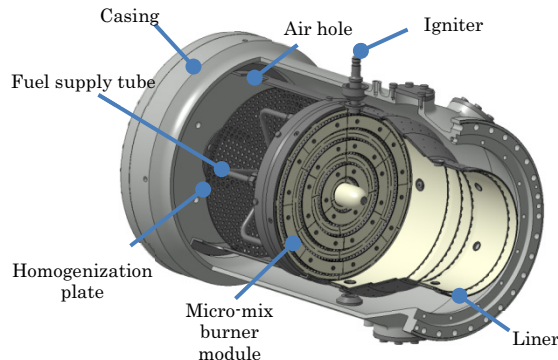


Fig. 5 Final conceptual design

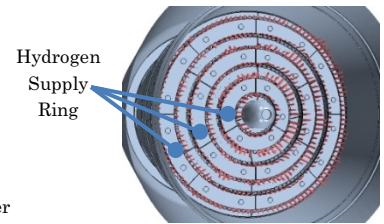
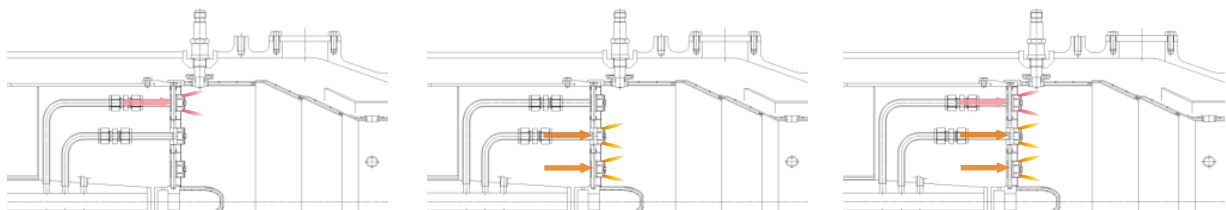


Fig. 6 Micro-mix flame

本燃焼器では、燃料を段階的に水素供給リングから供給する、燃料ステージング方式を採用している。図7に負荷に応じた水素の噴射状態を表す。着火からアイドル条件までは、外側の水素供給リングのみ水素を噴射し、点火栓から発生する火花が可燃混合気に届きやすい設計としている。アイドルから40%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、40%負荷相当条件から定格負荷相当条件(高負荷条件)まではすべての水素供給リングから水素を供給する方式とした。



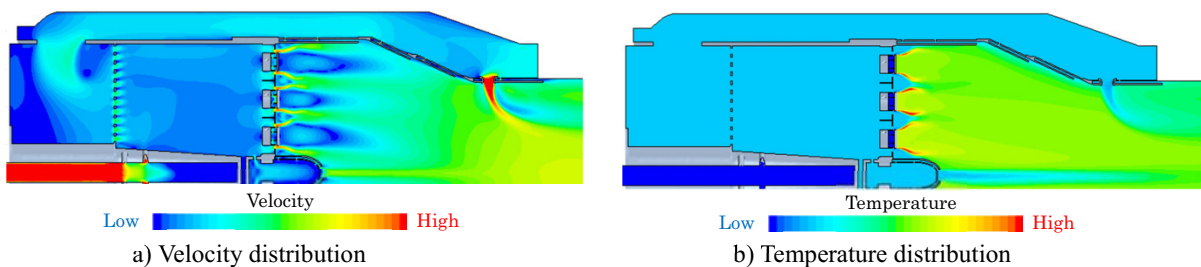
a) Ignition condition

b) Low load condition

c) High load condition

Fig. 7 Schematic view of fuel staging

以上の設計理念に基づき、燃焼器の設計を行った。図8に燃焼器設計に活用したCFD数値解析の結果例を示す。圧力損失が設計点付近となること、反応時間が小さくなることを確認した。



a) Velocity distribution

b) Temperature distribution

Fig. 8 CFD results of micro-mix combustor



### 3・3 ドライ低 NOx 水素専焼燃焼器低圧燃焼試験結果

本設計に基づき、燃焼器の試作を行った。試作バーナモジュールおよび試作燃焼器を図 9 に示す。バーナモジュール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た。本試作燃焼器にて、水素燃焼特性および低 NOx 性能を確認するための燃焼試験を実施した。本試験では、高圧試験の前段階の試験として、低圧試験条件 (0.2MPa) にて行った。試験条件を表 1 に示す。

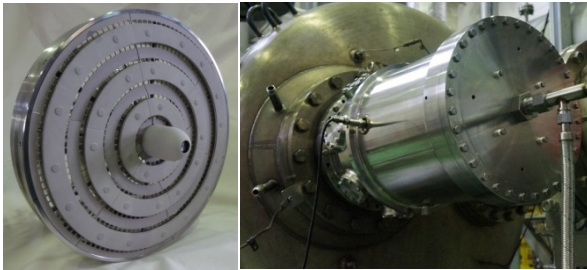


Fig. 9 Micro-mix burner module and combustor

Table 1 Test condition

項目	単位	値
入口空気温度	K	620
入口空気圧力	MPa	0.2

図 10 に天然ガスを用いた着火から、水素へ切り替えが完了するまでの燃焼器内の様子を示す。着火には安全のために天然ガスを用いることとし、火炎が安定した後に水素への切り替えを実施する運用とした。

本低圧試験結果での燃焼画像を図 11, NOx 排出特性 (NOx 値: 残存酸素 15%換算値) を図 12 に示す。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。2気圧条件下の試験では、すべての負荷条件において NOx 排出が 25ppm 以下となることを確認した。

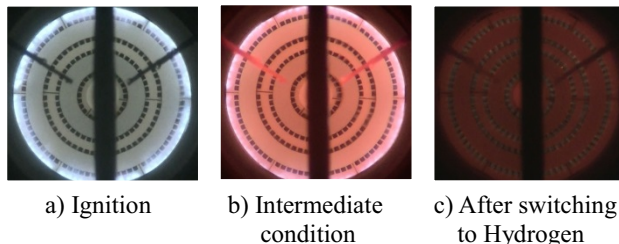


Fig. 10 Combustion image after ignition

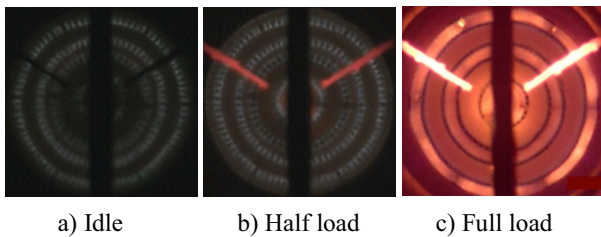


Fig. 11 Combustion image

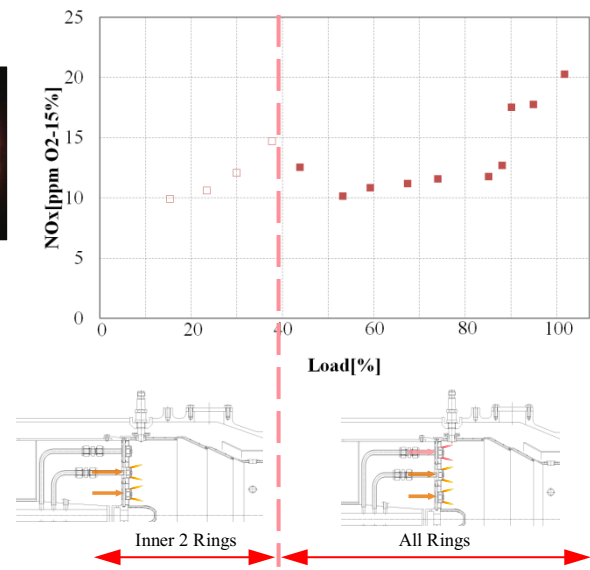


Fig. 12 NOx emission results

本試験において、バーナモジュールの一部に赤熱が生じた。図 13 にバーナモジュールのサーモペイント試験結果を示す。サーモペイントには紙面左上に KN3 (Thermal Paint Services, Inc.製), 右下に KN8 (Thermal Paint Services, Inc.製) を使用した。その結果、水素供給リング, Air Guiding Panel (空気流路の開口面積を決定する環状部品), Center Cone (燃焼器中央部の整流部品) の高温化が確認された。本部品の冷却効率の向上について、次節にて改良を行った。

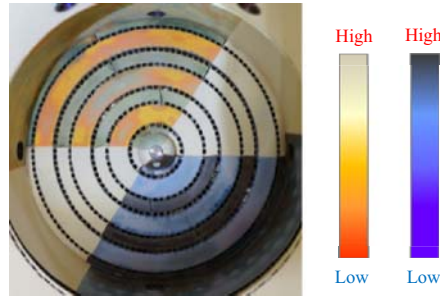
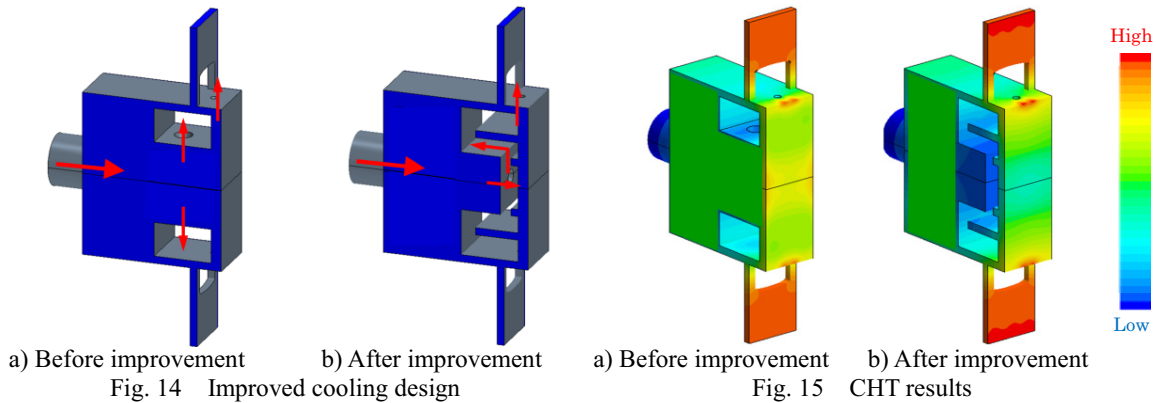


Fig. 13 Thermal paint results

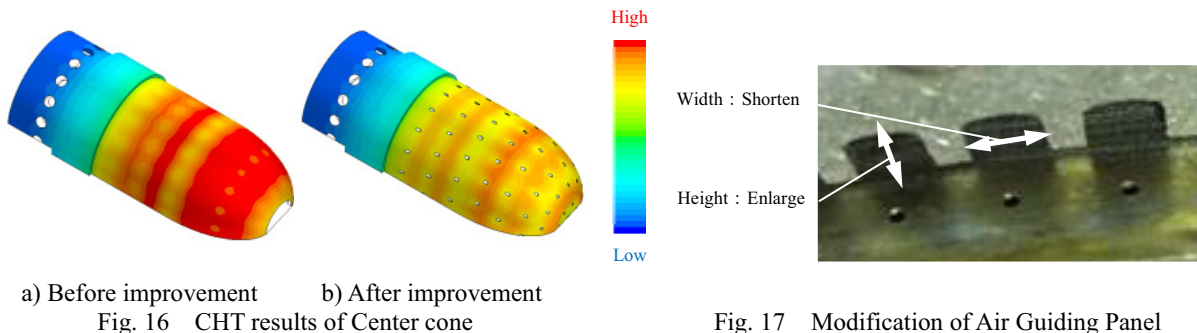
### 3・4 バーナモジュール冷却性能の改良

低圧試験により、高温化が確認された水素供給リング、Center Cone, Air Guiding Panel の冷却性能の改良を図った。インピンジメント冷却構造を施したバーナモジュールの内部構造を図 14 に示す。水素供給リングの冷却性能向上のため、水素供給リング内部での水素噴流により燃焼面側の壁面をインピンジメント冷却する構造とした。本バーナ構造による伝熱性能の評価を CHT 解析により行った。CHT 解析結果を図 15 に示す。水素供給リング中心部の温度が低減できることを確認できた。



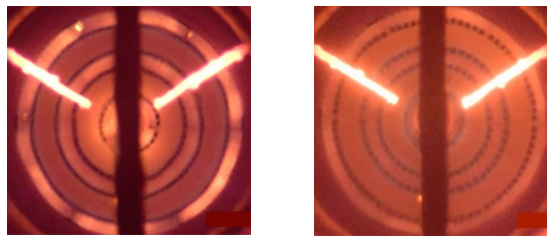
初期形状の Center cone は内部から空気の噴流を壁面に衝突させるインピンジメント冷却構造を採用していた。今回の高温化を受けて、Center cone にエフュージョン冷却構造を併用し、冷却効率の向上を図った。図 16 に初期構造の Center cone, エフュージョン冷却を併用した Center cone におけるそれぞれの CHT 解析結果を示す。設計変更により、Center cone の温度を低減できることが確認された。

Air Guiding Panel について、図 17 に示す寸法変更を施した。Air Guiding Panel の中央部に流れがよどむ領域が広いことから、図 17 に示す Air Guiding Panel の幅を縮小し、高さを拡大した。これにより、Air Guiding Panel 上での流れがよどむ領域を狭め、Air Guiding Panel への入熱の低減を図った。

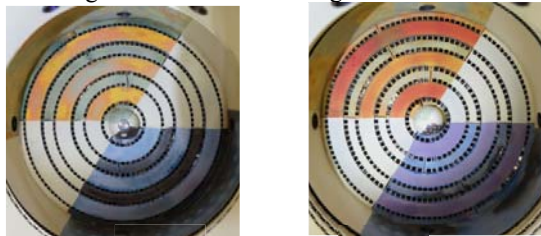


以上、水素供給リング、Center cone、Air Guiding Panel の形状変更を施した燃焼器における低圧試験結果での燃焼画像を図 18、NOx 排出特性 (NOx 値：残存酸素 15%換算値) を図 19 に示す。横軸は熱量割合を示し、100%負荷が定格負荷 (設計点) 条件、0%負荷がアイドル条件をそれぞれ示す。水素供給リング、Center cone、Air Guiding Panel の形状変更を施しても NOx 排出量は概ね変化なく、25ppm 以下となることを確認した。

図 20 にバーナモジュールのサーモペイント試験結果を示す。水素供給リング、Center Cone、Air Guiding Panel の温度が低減できており、冷却効率の向上が確認された。



a) Before improvement b) After improvement  
Fig. 18 Combustion image at full load



a) Before improvement b) After improvement  
Fig. 20 Thermal Paint results

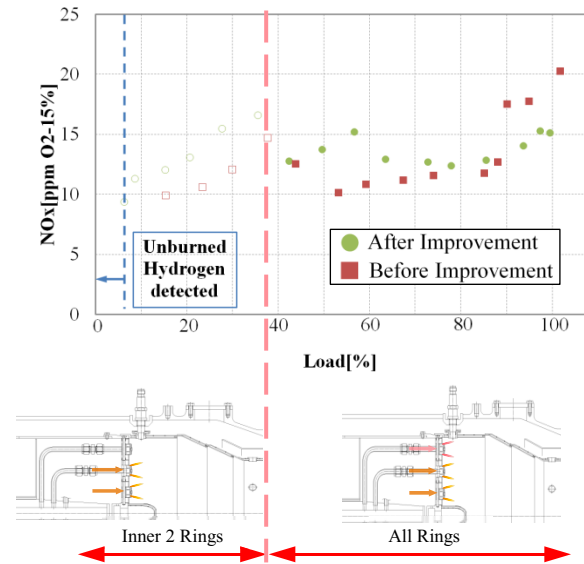


Fig. 19 NOx emission results

### 3・5 水素専焼低 NOx 燃焼器負荷遮断試験結果

負荷遮断を想定した、燃料遮断試験結果を図 21 に示す。負荷遮断は最も外側の水素供給リングの燃料供給を遮断することを想定し、実施した。この結果、最も外側の水素供給リングの燃料を遮断しても、未燃水素の排出や失火することなく、燃焼安定性を確保できることを確認した。

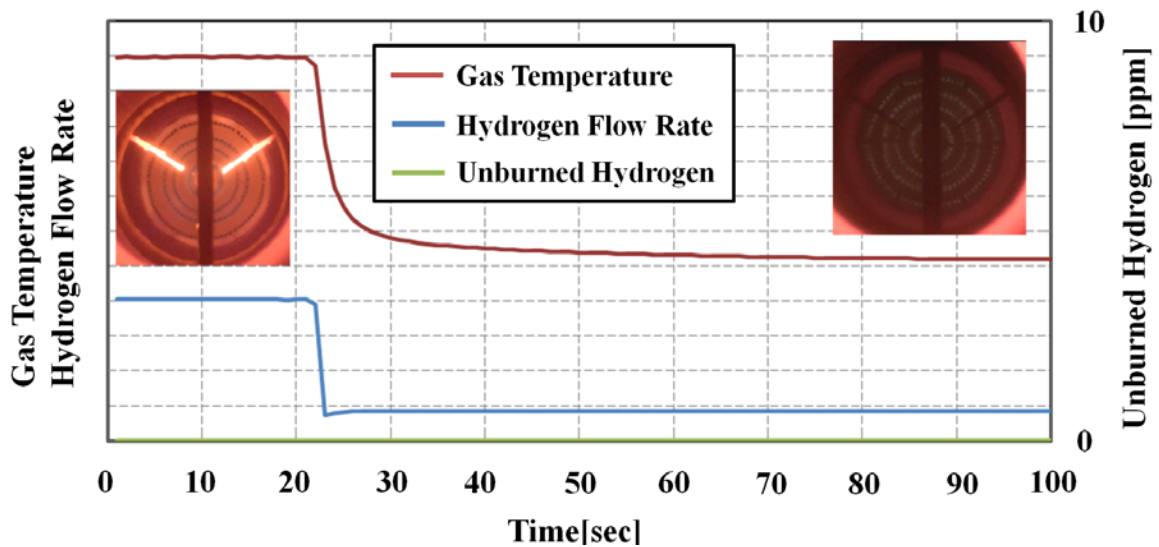


Fig. 21 Fuel cut-off test results

## 4. おわりに

当社で実施しているドライ低 NOx 水素専焼燃焼器における低圧燃焼試験結果から以下の成果を得た。

- 0%負荷から 100%負荷に相当する条件において、NOx25ppm 以下の低 NOx 特性を確認した。
- バーナモジュールの冷却改良により、水素火炎による部品の高温化を抑制した。
- ガスタービン運転中の負荷遮断を想定した燃料遮断試験で、失火および未燃水素を発生させることなく、安定した保炎性を確認した。

次の段階として、ガスタービンの実運転圧力条件に相当する高圧燃焼試験を実施し、NOx 排出特性やバーナモジュールの冷却特性などの評価を引き続き行う。

すでに需要のある副生水素利用および将来の低炭素・水素社会の早期実現に貢献できるように今後も技術開発を進めていく。

## 謝辞

本研究は総合科学技術・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」(管理人: JST) によって実施されました。関係各位に深く謝意を表します。

## References

- (1) Asai, T., Dodo, S., Koizumi, H., Takahashi, H., Yoshida, S. and Inoue, H., Effects of Multiple-Injection-Burner Configurations on Combustion Characteristics for Dry Low-NOx Combustion of Hydrogen-Rich Fuels, Proceedings of ASME Turbo Expo (2011), GT2011-45295.
- (2) Asai, T., Dodo, S., Karishuku, M., Yagi, N., Akiyama, Y. and Hayashi, A., Performance of Multiple-Injection Dry Low-NOx Combustor on Hydrogen-Rich Fuel in an IGCC Pilot Plant, Proceedings of ASME Turbo Expo (2014), GT2014-25298.
- (3) Beerer, D., McDonell, V., Therkelsen, P. and K. Cheng, R., Flashback, Blow out, Emissions, and Turbulent Displacement Flame Speed Measurements in Hydrogen and Methane Fired Low-Swirl Injector at Elevated Pressures and Temperatures, Proceedings of ASME Turbo Expo (2012), GT2012-68216.
- (4) Cerutti, M., Cocchi, S., Modi, R., Sigali, S. and Bruti, G., Hydrogen Fueled Dry Low NOx Gas Turbine Combustor Conceptual Design, Proceedings of ASME Turbo Expo (2014), GT2014-26136.
- (5) D. York, W., S. Ziminsky, W. and Yilmaz, E., Development and Testing of a Low NOx Hydrogen Combustion System for Heavy Duty Gas Turbine, Proceedings of ASME Turbo Expo (2012), GT2012-69913.
- (6) Dodo, S., Asai, T., Koizumi, H., Takahashi, H., Yoshida, S. and Inoue, H., Combustion Characteristics of Multiple-Injection Combustor for Dry Low-NOx Combustion of Hydrogen-Rich Fuels under Medium Pressure, Proceedings of ASME Turbo Expo (2011), GT2011-45459.
- (7) Funke, H., Boerner, S., Keinz, J., Kusterer, K., Haj Ayed, A., Tekin, N., Kazari, M., Kitajima, J., Horikawa, A. and Okada, K., 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), GT2013-94771.
- (8) Funke, H., Boerner, S., Keinz, J., Kusterer, K., Kroniger, D., Kitajima, J., Kazari, M. and Horikawa, A., Numerical and Experimental Characterization of Low NOx Micromix Principle for Industrial Hydrogen Gas Turbine Applications, Proceedings of ASME Turbo Expo (2012), GT2012-69421.
- (9) Haj Ayed, A., Kusterer, K., Funke, H., Keinz, J., Kazari, M., Kitajima, J., Horikawa, A., Okada, K. and Bohn, D., Numerical Study on Increased Energy Density for the DLN Micromix Hydrogen Combustion Principle, Proceedings of ASME Turbo Expo (2014), GT2014-25848.
- (10) Hollon, B., Steinthorsson, E., Mansour, A., McDonell, V. and Lee, H., Ultra-Low Hydrogen/Syngas Combustion with 1.3MW Injector using a Micro-Mixing Lean-Premix System, Proceedings of ASME Turbo Expo (2011), GT2011-45929.
- (11) 堀川 敦史, 饒 雅英, 岡田 邦夫, Harald H.-W. Funke, Jan Keinz, Karsten Kusterer, Anis Haj Ayed, ドライ水素低NOx燃焼技術の開発, 第43回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集(2015), A-7, pp.53-57.
- (12) Marek, C. J., D. Smith, T. and Kundu, K., Low Emission Hydrogen Combustion for Gas Turbines Using Lean Direct Injection, 41s AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (2005), AIAA-2005-3776.
- (13) 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講演論文集 (2014), pp.11-14.
- (14) T. Weiland, N., G. Sidwell, T. and A. Strakey, P., Testing of a Hydrogen Dilute Diffusion Array Injector at Gas Turbine Conditions, Proceedings of ASME Turbo Expo (2011), GT2011-46596.