

水素をつかう – 水素発電技術の開発 –

Hydrogen Utilization – Development of Hydrogen Fueled Power Generation Technologies



Hydrogen is used as fuel for transport machinery such as rockets and FCV (fuel cell vehicles/buses).

To realize low carbonization and a future hydrogen-based society, Kawasaki is developing hydrogen combustion technology and power generation technologies for gas turbine engine, which is excellent in fuel flexibility. In 2018, we successfully operated the world's first hydrogen fueled power generation in an urban area, and we have been improving such technologies to achieve higher performance and cleaner power generation.

堀川 敦 史①	Atsushi Horikawa
岡田 邦 夫②	Kunio Okada
足利 貢③	Mitsugu Ashikaga
山口 正 人④	Masato Yamaguchi
堂浦 康 司⑤	Yasushi Douura
明日 芳 浩⑥	Yoshihiro Akebi

水素は、ロケットやFCV（燃料電池自動車・バス）などの輸送機器の燃料として利用されている。

当社は、低炭素化ならびに将来の水素社会の実現に向け、燃料多様性に優れたガスタービンエンジンの特長を生かし、純水素に対応する燃焼技術や発電技術の開発を進めている。2018年に世界で初めて市街地での水素発電に成功し、さらなる高性能・クリーン発電を目指して改良を重ねている。

まえがき

水素サプライチェーンの実現には、水素をより安く、現在の石油や天然ガスなどの化石燃料と同程度のコストにしていくことが重要である。そのためには、水素の需要を大幅に増加させて、スケールメリットにより水素のコストを削減する必要がある。

1 背景

従来より、水素はロケットの推進用燃料やFCV（燃料電池自動車・バス）の燃料あるいはガスタービン発電装置やボイラの燃料として利用されている。水素・燃料電池戦略ロードマップでは、2030年ごろから本格的な水素発電が始まるとされており、水素を天然ガスに替わる発電用燃料として活用できれば、水素の大量利用により水素サプライチェーンの実現に大きく貢献できる。

各ガスタービンメーカーとも水素の利用推進に対応するため、燃料多様性に優れたガスタービンエンジンの特長を生かし、天然ガスと水素の混合燃料および純水素燃料に対応する燃焼技術の開発やガスタービン発電装置の実用化に向けたプロジェクトを推進している。

当社では、中小型ガスタービン発電装置による純水素発電に向け、クリーンな水素燃焼技術の開発や水素発電実証

を進めている。

2 ガスタービンでの水素利用と課題

小型ガスタービンの構造を図1に示す。圧縮機で高圧にした空気に燃焼器で燃料を投入して高温・高圧の燃焼ガスを生成する。この燃焼ガスの流れによりタービンを回転させて出力を取り出す。燃焼器は、金属部品の融点を超える燃焼ガスを安定かつクリーンに生成する役割を担う。

ガスタービンは多様な燃料に対応できることから水素を燃料ガスとすることが可能であるが、水素特有の燃焼特性に適合する燃焼技術が必要となる。水素の安定燃焼と大気汚染物質である窒素酸化物NO_xの低排出性を兼ね備えた燃焼技術と燃焼器部品の開発が水素発電を実現するための鍵となる¹⁾。

(1) 水素の安定燃焼

水素は天然ガスに比べて反応性が高く、燃焼時の火炎が燃焼器部品に接近するため、部品の高温化や燃焼不安定を起こす可能性が高くなる。天然ガス焼き用の燃料ノズルで天然ガスと水素を燃焼試験した際の、燃焼器内部での火炎の状態を図2に示す。水素燃焼時には、燃料ノズル部品に水素の火炎や燃焼ガスが近づき、温度が非常に高いことを示す赤熱を起こしている。

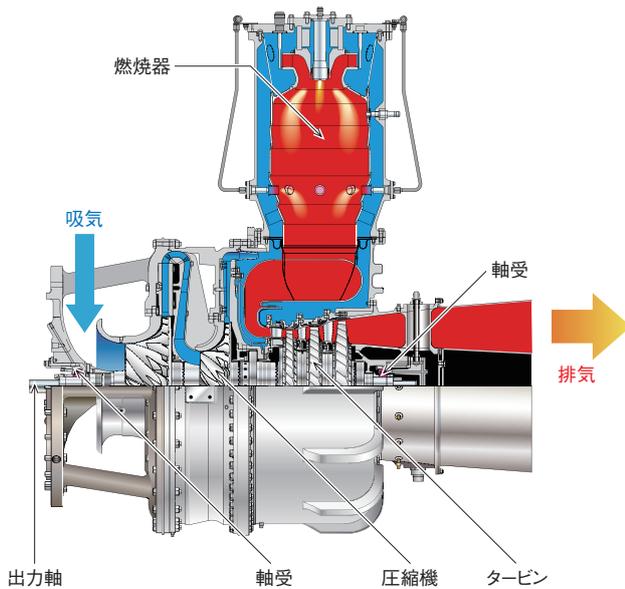


図1 小型ガスタービン「M1A-17D」
Fig. 1 Small-scale gas turbine (M1A-17D)

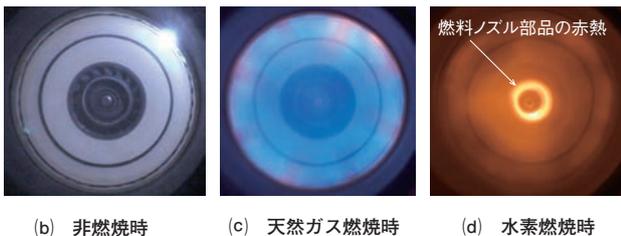
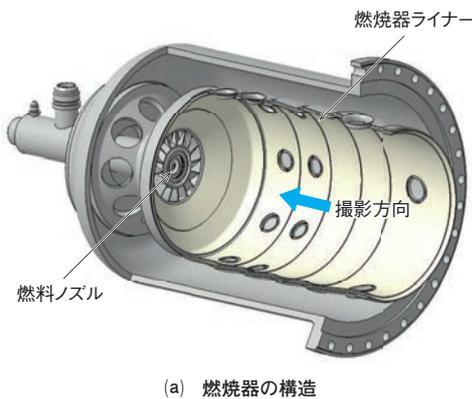
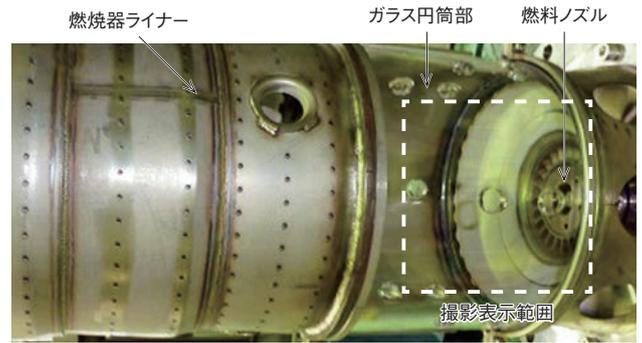


図2 燃焼器の構造と燃焼状態
Fig. 2 Combustor structure and combustion state

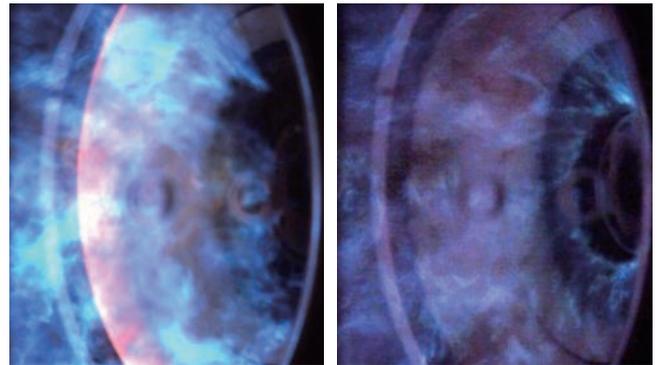
ガスタービンでは燃焼器の後段に高速で回転するタービンがあることから、燃焼器部品が下流へ脱落するような損傷が生じるとタービン部品を破壊してエンジンを停止させる事態となる。このため、水素でも異常な燃焼状態を発生させず安定した燃焼状態を維持できるように、燃焼器の部品形状などを工夫することが重要となる。

(2) 窒素酸化物の抑制

燃焼器内で形成される天然ガスと水素の混合気の火炎を調査するため、燃焼器部品の一部をガラス円筒に置き換え



(a) 可視化燃焼器



(b) 天然ガス 80vol%-水素 20vol% (c) 天然ガス 5vol%-水素 95vol%

図3 可視化燃焼器と火炎の様子
Fig. 3 Visualization combustor and flame behavior

た可視化燃焼器と高速度カメラを用いて撮影した火炎の様子を図3に示す。同図(b)のように天然ガスの割合が多いときは火炎が燃料ノズルから離れた場所で形成されるのに対し、同図(c)のように水素の割合が多いと燃料ノズルの直近で火炎が形成されるようになる。このような反応域の変化および局所的な火炎温度の上昇により、ガスタービン燃焼器条件における水素燃焼時には、NO_xの発生量が天然ガスに比べて2から2.5倍近くになることから、その発生量抑制も大きな課題である。

3 水素焚きガスタービンの開発状況

ガスタービンで用いられる燃焼方式およびNO_x抑制方式には、燃焼安定性に優れた拡散燃焼に水や蒸気を燃焼器内に噴射してNO_xを抑制する「ウエット方式」と、空気と燃料の混合方法などを工夫することによりNO_xを抑制する「ドライ低NO_x方式」がある。

空気内に燃料ガスを送り込んで燃やす拡散燃焼では、燃焼器部品の高温化への対策により水素燃焼にも対応できる。当社は水素ガスタービン発電装置全体の技術の確立のためにこのウエット方式を採用した。

しかしながら、ウエット方式では、水や蒸気を供給する純水製造設備の導入が必要になるとともにランニングコストが増加する。このため、水素の燃焼特性に適合する新た

なドライ低NO_x方式を採用した燃焼器についても研究開発を実施している。

(1) 水素ガスタービン発電技術の実証

新エネルギー・産業技術総合開発機構 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」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^{1),2)}。

本事業では、水素燃料対応燃焼器を搭載した当社製「M1A-17型ガスタービンエンジン」を装備する定格発電出力1 MW級の「PUC17型常用発電装置」を使用した。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を可能としている。

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システム実証設備の全景を図4に示す。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、流量約2,200Nm³/hの水素のみを燃料として、近隣の2施設に2,800kWの熱（蒸気）と4施設に1,100kWの電力を同時に供給し、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。その際の運転監視装置のモニタ画像を図5に示す。また、水噴射により

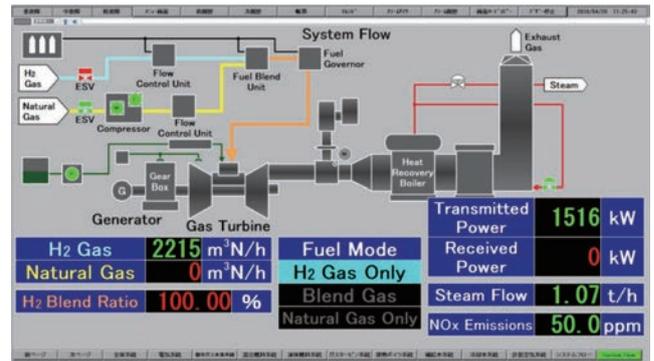


図5 運転監視装置（水素ガス専焼運転時）
Fig. 5 Operation monitoring system (when operating on 100% hydrogen gas)

NO_x値を50ppm（O₂=16%換算）とし、国内の大気汚染防止用で定められているNO_x規制値70ppm（O₂=16%換算）を満足した。

(2) 水素専焼ドライ低NO_x燃焼技術の開発

天然ガスでは、空気と天然ガスを予め混合してから燃焼させる希薄予混合燃焼によりドライ低NO_x燃焼を達成している。一方、水素は反応性が高く逆火などの燃焼不安定が生じるため、ドライ低NO_x燃焼は非常に難しい。

そこで、微小な水素火炎を用いた水素専焼ドライ低NO_x燃焼方式であるマイクロミックス水素燃焼技術の産業用ガスタービンへの適用について研究してきた。図6に示すように、直径1 mm以下の微小な水素噴射孔から水素を噴射し、直行する空気噴流と急速に混合することで、燃焼安定に優れる微小な水素火炎を形成し、かつ反応時間を短くすることでNO_xの発生を抑制している。

2 MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NO_x燃焼器を図7に示す。水素バーナ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^{3),4)}。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_x燃焼の両立を可能としている。



(a) 設備外観



(b) 「PUC17型常用発電装置」

図4 水素コージェネレーションシステム実証設備
Fig. 4 Hydrogen gas turbine co-generation system demonstration plant

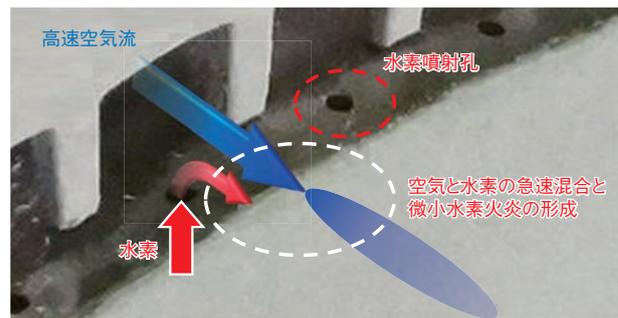


図6 マイクロミックス水素燃焼技術
Fig. 6 Micro-mix hydrogen combustion technology

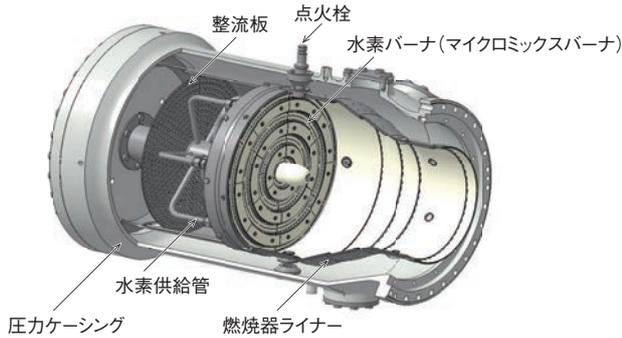


図7 2MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器
Fig.7 Hydrogen dry low NOx combustor for 2MW class gas turbine



(a) 試作燃焼器 (b) 定格条件相当時の燃焼器内部

図8 水素専焼燃焼器試験
Fig.8 Tests of hydrogen combustor

試作燃焼器部品を用いて、着火・保炎性能や高負荷燃焼状態でのNOx性能などを取得した。ガスタービンと同様の高温・高圧環境を再現できる試験設備に搭載した試作燃焼器ならびに100%定格負荷相当時の燃焼器内部での水素火炎の様子をそれぞれ図8(a),(b)に示す。

本試験により、安定した水素の燃焼を確認するとともに、50%負荷から定格100%負荷相当の範囲で、規制値の半分となるNOx値 35ppm (O₂=16%換算) 以下を得た。

2020年5月より図4に示した水素コージェネレーションシステム実証設備にて、この燃焼器を実装したエンジン実証運転を開始し、水素専焼ドライ低NOx発電に世界で初めて成功した。

今後、この水素発電の安定運用・発電効率・環境負荷低減効果などの性能を検証を進めていく。

あ と が き

水素サプライチェーン実現の一環として、水素燃焼技術の開発ならびに水素燃焼ガスタービンを開発している。これらの技術により水素を天然ガスと同様にガスタービンの燃料として使用することが可能となり、将来の低炭素社会および水素社会の実現に大きく貢献できるものと考えます。

本内容の一部は、NEDO助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」、 「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」およびNEDO委託事業「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」にてご支援を頂き、その成果を得たものであり、深く謝意を示す。

参 考 文 献

- 堀川敦史：川崎重工における水素焼きガスタービンの開発状況，火力原子力発電，Vol.70，No.757（2019）
- NEDOホームページ https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html
- 特許 第6285081号，“ガスタービンエンジンの燃焼装置”
- A. Horikawa, K. Okada, M. Wirsum, H. Funke, K. Kusterer：“Application of Low NOx Micro-Mix Hydrogen Combustion to 2MW Class Industrial Gas Turbine Combustor”，IGTC2019 Tokyo（2019）



堀川 敦史



岡田 邦夫



足利 貢



山口 正人



堂浦 康司



明日 芳浩