

水素燃焼ガスタービン開発における水素濃度計測

Hydrogen Concentration Measurement in Hydrogen Combustion Gas Turbine Development



都留 智子

TSURU Tomoko

川崎重工業株式会社 航空宇宙システムカンパニー
航空エンジンディビジョン エンジン技術開発部 エンジン熱技術課 課長
Manager
Engine Thermal Engineering Section
Engine Technology Development Department,
Aero Engine Business Division, Aerospace Systems Company
Kawasaki Heavy Industries, Ltd.



堀川 敦史

HORIKAWA Atsushi

川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所
エネルギーシステム研究部 研究一課 課長
Manager
Section 1, Energy System Research Department
Technical Institute, Corporate Technology Division
Kawasaki Heavy Industries, Ltd.



内山 悠太

UCHIYAMA Yuta

川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所
エネルギーシステム研究部 研究一課 主事
Section 1, Energy System Research Department
Technical Institute, Corporate Technology Division
Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

近年機運が高まってきている脱炭素社会の実現に向けた、産業用ガスタービンや航空エンジンの水素対応化に対する当社の取り組みを紹介し、水素燃焼器の開発における水素ガス濃度計測に期待する役割について述べた。また、航空機エンジン向け水素燃焼器の開発において水素濃度を計測するため、HORIBA HyEVO-1000を導入する計画だが、デモ機による試計測では精度よくリアルタイム計測できることを確認できた。

キーワード：水素ガスタービン、NOx、未燃水素

This report introduces the efforts of Kawasaki Heavy Industries for developments of hydrogen-fueled industrial gas turbines and aircraft engines toward the realization of a decarbonized society. In the hydrogen-fueled combustor development, accurate measurement of hydrogen concentration in the exhaust gas will play more important role. Trial measurement results of hydrogen concentration using HORIBA HyEVO-1000, performed in KHI Akashi works, demonstrated favorable accuracy and time response.

Keywords: Hydrogen gas turbine, NOx, unburned hydrogen

はじめに

2018年7月の第五次エネルギー基本計画^[1]では、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た。また、2021年10月の第六次エネルギー基本計画^[2]では、2050年カーボンニュートラル実現に向け、火力発電の脱炭素化として、水素・アンモニアを燃料とした発電は有力な選択肢の一つと記され、水素およびアンモニア発電については、2050年には電力システムの中の主要な供給力・調整力として機能すべく、技術的な課題の克服を進めると記載された。加えて、航空機分野においては、2035年以降

の水素航空機の実現に必要な水素燃焼器などのコア技術の開発を推進していくことが記された。

当社では、Figure 1に示す国際水素サプライチェーンを構築するための水素の製造・輸送・貯蔵・利用の各種技術開発と実証を進めている^[3]。具体的には、褐炭や再生可能エネルギーから水素を製造し、液化して輸送・貯蔵し、炭化水素系燃料に代わる燃料として利用するまでの一貫通貫の開発・実証である。

本稿では、産業用ガスタービンや航空エンジンに用いられる水素燃焼器の開発における当社の取り組みを紹介し、こ

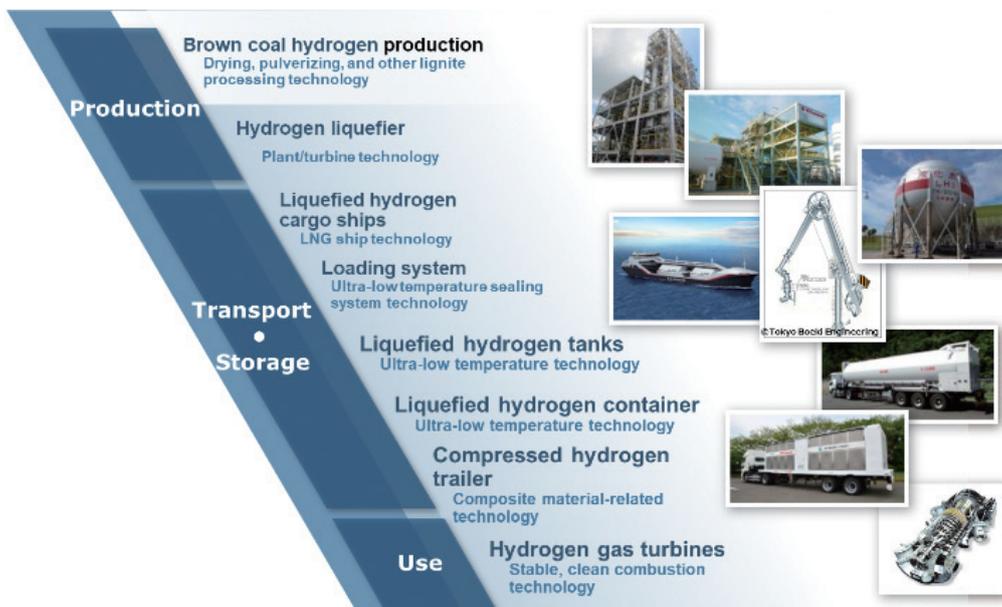


Figure 1 Technology developments for Hydrogen Society in Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

これらの開発に必要な水素ガス濃度計測について述べる。最後に、航空機エンジン向け水素燃焼器の開発における水素濃度計測の事例として、水素ガス測定装置 HORIBA HyEVO-1000の活用事例を紹介する。

水素燃焼の課題

水素と天然ガスの主成分であるメタンとの燃焼特性の比較や、燃焼時の水素特有の問題をTable 1に示す。水素はメタンに比べ、最大燃焼速度が速く、消炎距離も小さいことから燃焼器部品に水素火炎が近づき、金属部品の高温化や酸化、焼損を起こす可能性が高い。また、水素では可燃範囲も広がることから、予混合燃焼は逆火の発生リスクが高まる。加えて、水素の燃焼速度の速さや火炎温度の高さは局所的な高温の燃焼ガスの発生を招くため、NO_x (窒素酸化物)の増大につながる。これらの水素特有の燃焼特性を考慮し、水素の安定燃焼と低NO_x性を兼ね備えた燃焼器の開発が求められる。一方で、従来の炭化水素系燃料に比べ反応性の高い水素は、未燃焼のまま排出されることが極め

て少ないというメリットがある。ガスタービンの安定した燃焼状態では未燃水素が発生しないことを当社の燃焼試験において確認している。しかしながら、不安定な燃焼状態や、過濃条件、負荷変化や着火や消炎などの過渡条件においては未燃水素が発生する。燃焼器よりも下流に未燃水素が堆積し、意図しない燃焼や爆発に至ることは避けねばならぬため、開発の過程で未燃水素の発生有無や濃度を把握することが重要である。

Micro-mix水素燃焼技術と産業用ガスタービン実証試験

当社では、ドイツ・アーヘンにあるAcUAS (Aachen University Applied Sciences)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NO_x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^[4-6]。

Figure 2(a)にmicro-mix水素専焼ドライ低NO_x燃焼技術の概念図ならびにFigure 2(b)に燃焼数値流体解析結果例を示す^[7]。微小な水素噴射孔から水素を噴射し、直交する空気噴流と急速に混合させ、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NO_x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 (Air Guiding Panel : AGP) と水素供給部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、水素供給部内への水素火炎の侵入ならびにAGP上流側への逆火は発生しない。

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

Table 1 Combustion characteristics of methane and hydrogen and problems with hydrogen combustion

燃焼特性	メタン	水素	水素燃焼における問題
燃焼速度 [m/s] (量論混合比, 0.1 MPa)	0.4	2.65	異常燃焼 (逆火, 燃焼振動)
消炎距離 [mm]	2.2	0.64	金属部品の高温化による、酸化や焼損
可燃限界 [Vol%]	5~15	4~75	異常燃焼 (逆火)
火炎温度 [degC] (空气中)	1875	2045	サーマルNO _x 増大

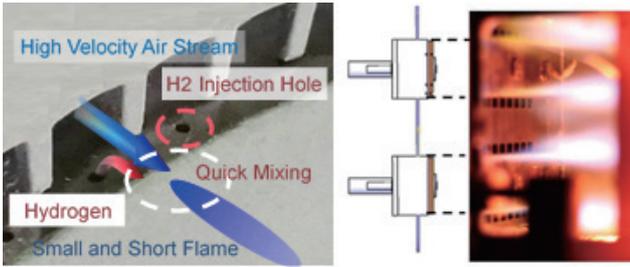


Figure 2(a) Micro-mix hydrogen flame.

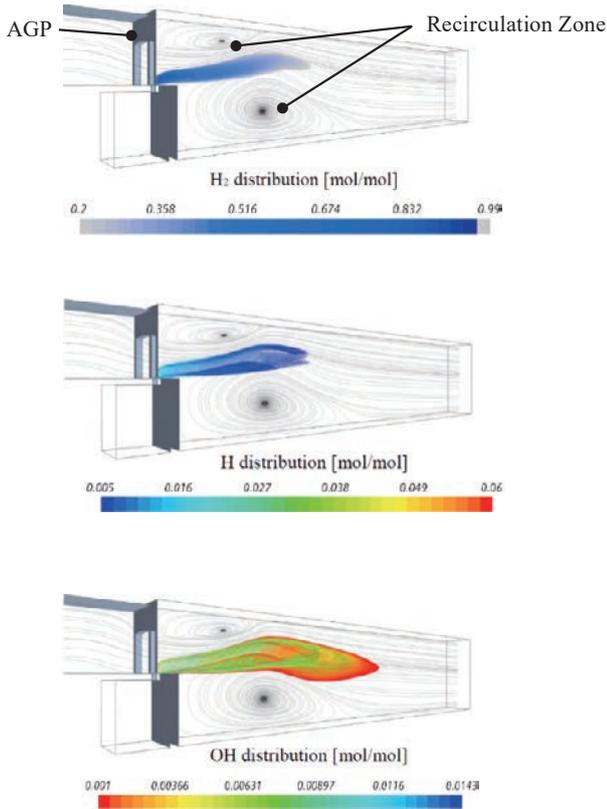


Figure 2(b) Structure of hydrogen flame and flame holding (Examples of CFD analysis).

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。Figure 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^[8]。

当社は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization)の助成事業において、本micro-mix水素専焼ドライ低NO_x燃焼技術を用いた1MW級水素ガスタービン発電設備での水素発電、および地域社会への熱電供給実証を2020年に成功している^[9]。

航空エンジンの脱炭素化に向けた動き

近年、航空業界でのカーボンニュートラル実現に向けて、燃料電池や代替航空燃料(SAF: Sustainable Aviation Fuel)に加え、水素燃料への対応についても機運が高まっている。2020年に仏エアバス社が2035年の運行開始を目指した水素航空機開発プロジェクトをスタートさせた^[10]のをきっかけに、エンジンや装備品、空港でのインフラ整備など様々な分野で水素対応化に対する取り組みが活発化している。

当社においても、脱炭素化に大きく寄与すると想定される路線距離2,000~3,000 km、乗客数200人程度をターゲットとした水素航空機向けのコア技術開発を2021年度にNEDOの委託を受けて開始した^[11]。航空エンジン用燃焼器及びエンジンシステム、液化水素燃料タンク及び装備システム、機体の構造検討をコア技術と設定し、2028年度まで各構成品の開発を推進する。2029~2030年度にはそれらを統合した一気通貫の統合システム地上試験を行い、水素航空機を社会実装するための主要技術を実証することを目指す。

航空エンジン用燃焼器の開発においても、産業用ガスタービンと同様高い環境適合性が求められ、ICAO(International Civil Aviation Organization)で厳しい規制が設けられている。航空エンジンを脱炭素化することによりCO₂やスモークという観点では環境負荷低減に大きく寄与できるが、NO_xや水蒸気の発生は避けることができない。

特に、航空エンジンの内部は産業用ガスタービンと比較して圧力が高く、NO_xを低減させることが難しいとされてい

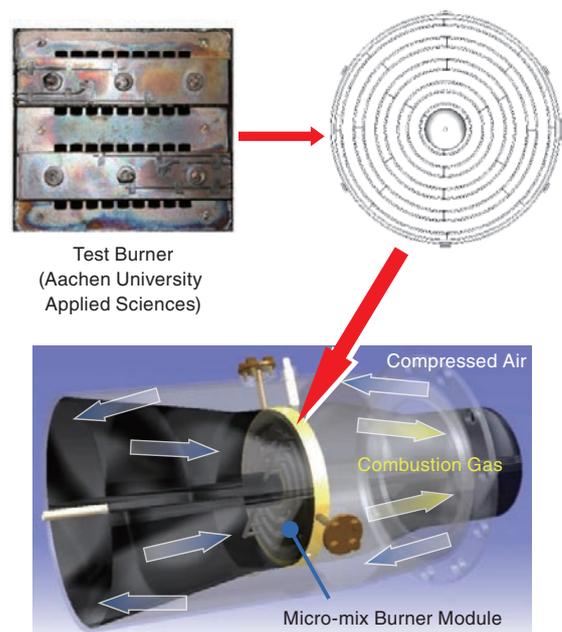


Figure 3 Schematic view of the first conceptual design of hydrogen Dry Low Emission combustor with micro-mix burner module.

る。さらに、運転中の出力変動が大きく急速であることから、燃焼条件の変化に追従しながら有害物の排出を低減できる燃焼器の開発が、水素航空機の実用化に向けて非常に重要となると考えられる。

ガスタービン燃焼器開発における未燃水素濃度計測

冒頭で述べた通り、水素は可燃範囲が広く安定燃焼していれば未燃水素はほとんど発生しない。しかし、エンジンの低負荷時、過渡状態(起動, 出力変動時)は燃焼が不安定になりやすく、未燃水素の発生要因となる。特に航空エンジンは産業用ガスタービンと比べて空気流量, 圧力, 空気過剰率が短時間で大きく変化するので、一時的に多くの未燃水素が発生するリスクがある。

水素燃焼器の開発においては、前述した安定燃焼時のNO_x排出量の低減だけでなく、低負荷時や過渡運転時でも一定以上の燃焼効率を確保しなければならず、開発試験用の計測機器としては応答性(0.5秒程度)と精度(数ppmオーダの解像度)の両方に対応できるものが求められる。

HyEVO-1000を用いた未燃水素濃度計測事例の紹介

当社では、航空エンジン用燃焼器向けにリアルタイムで精度の高い水素濃度計測ができる機器として2023年度に販売開始予定のHORIBA HyEVO-1000を導入することを計画している。導入に向けて、2022年12月にデモ機での試計測を実施したので、その事例を紹介する。

Figure 4に試験装置外観を示す。水素ガス燃料は燃料マニホールドを介して燃焼器ケーシング内に配置された燃料ノズルから噴射され、ライナと呼ばれる円環状の内筒の中で火炎を形成する。排ガスは燃焼器出口からサンプリングし、加熱フィルタを通して濃度計本体へ供給される。計測データの検証のため、ガスクロマトグラフィによる水素濃度計測も並行して実施した。

Figure 5に、HyEVO-1000とガスクロマトグラフィで計測した水素濃度の比較を示す。一連の空燃比条件において両者は良い一致を示し、水素濃度を精度良く計測できていることを確認した。また、連続計測における応答性も良く、スムーズに燃焼試験を実施することができた。

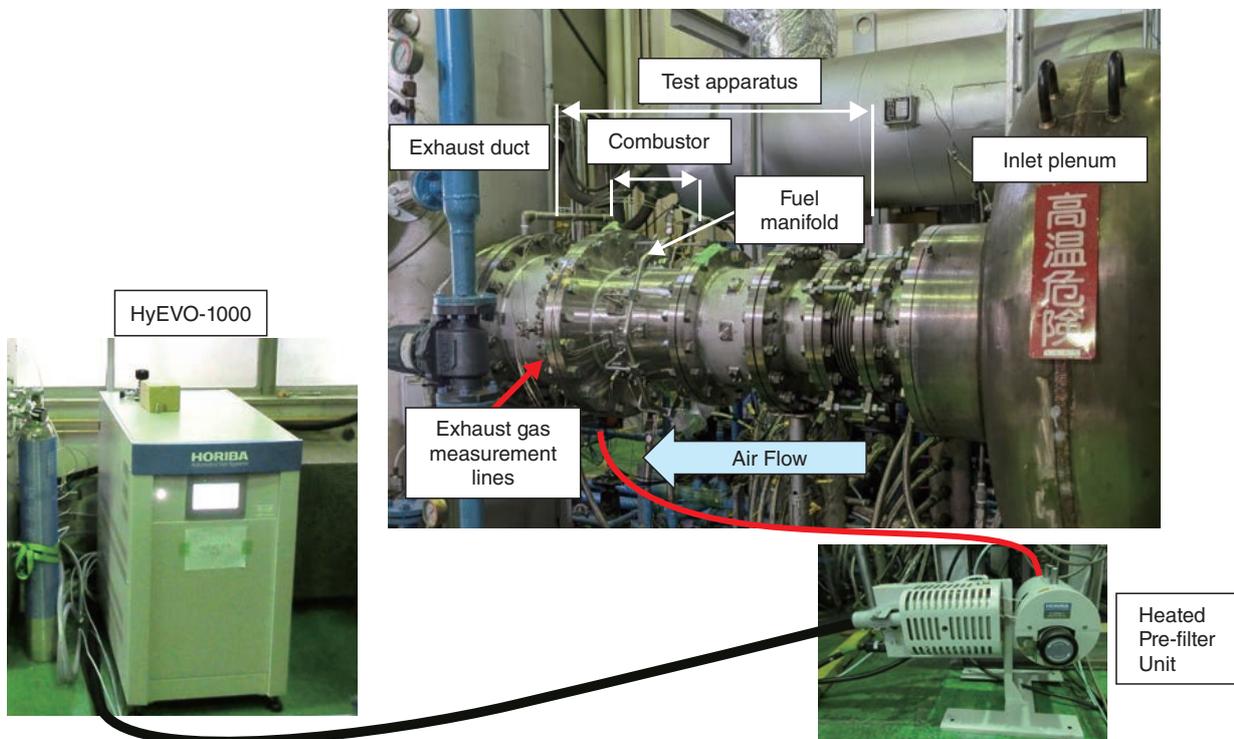


Figure 4 Test apparatus of hydrogen combustor for aeroengine.

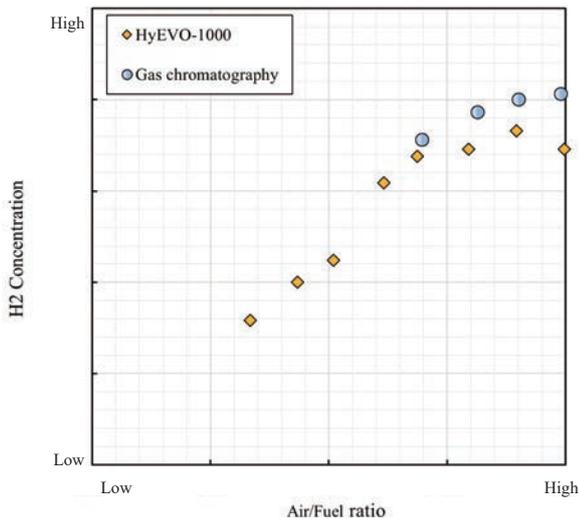


Figure 5 Comparison of hydrogen concentration between HyEVO-1000 and gas chromatography.

おわりに

産業用・航空用ガスタービン向け水素燃焼器の開発における当社の取り組みを紹介し、燃焼器開発のための水素濃度計測の位置づけについてHyEVO-1000を用いた水素濃度計測事例紹介を交えて述べた。従来の水素濃度計にはなかった高い計測能力を有効に活用することで、水素燃焼器の開発促進につなげられるものと期待している。水素利活用による脱炭素化がこれからさらに活発化するであろうことを考えると、水素濃度計測に対して様々な分野で需要が高まると予想される。ユーザの立場としては、計測能力もさることながら、機器の扱いやすさやコストも重要なポイントであり、更なるコンパクト化、静音構造、柔軟な作動レンジへの対応など、期待する部分が多い。メーカーとユーザが互いに協力しながら、より高度で使いやすい計測機器を実現できれば将来の環境負荷低減技術の実証に大きく寄与できるものと期待している。

謝辞

水素専焼ドライ低NO_x燃焼技術を用いた水素発電、熱電供給実証においては、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NO_x水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」にご支援をいただきました。また、水素濃度計の導入および燃焼試験は、NEDOグリーンイノベーション基金事業「次世代航空機の開発プロジェクト／水素航空機向けコア技術の開発」における航空機エンジン向け水素燃焼器の研究の一部として、NEDOの委託を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 国立国会図書館 インターネット資料収集保存事業, 経済産業省 ニュースリリース ウェブサイト; 新しいエネルギー基本計画が閣議決定されました, <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11126101/www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001.html> (アクセス日2022年2月20日)
- 経済産業省 ニュースリリース ウェブサイト; 第6次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/2021/10/20211022005/20211022005.html> (アクセス日2021年10月25日)
- 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), 153-157.
- Funke, H., et al; Numerical and Experimental Characterization of Low NO_x Micromix Principle for Industrial Hydrogen Gas Turbine Applications, Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, GT2012-69421.
- Funke, H., et al; Experimental and Numerical Characterization of the Dry Low NO_x 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.
- 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.
- Kroniger, D., et al; Numerical Study of Hydrogen-fueled Micromix Combustion and Experimental Validation of NO_x 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)
- 堀川敦史, 他; ドライ水素低NO_x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)
- NEDO ニュースリリース ウェブサイト; 世界初, ドライ低NO_x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2023年2月20日)
- <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe> (アクセス日: 2023年2月27日)
- NEDO ニュースリリース ウェブサイト; グリーンイノベーション基金事業で、次世代航空機に関する研究開発事業に着手—水素航空機向けコア技術の確立と、主要構造部品の飛躍的軽量化を目指す— https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101488.html (アクセス日2023年2月27日)