

大型ガスタービン燃焼器向けブローダウン燃焼試験設備の開発

Development of a Blow-down Combustion Test Facility
for Large-Frame Gas Turbine Combustors浅井 智広*¹
ASAI Tomohiro多田 勝義*¹
TADA Katsuyoshi盛重大*¹
MORISHIGE Dai椎屋 孝之*¹
SHIYA Takayuki森田 諭*¹
MORITA Satoshi齋藤 敏彦*²
SAITO Toshihiko斉藤 圭司郎*¹
SAITO Keijiro

ABSTRACT

The Research & Innovation Center at Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) has developed a blow-down combustion test facility for large-frame gas turbine combustors to enable screening of combustor performance with reduced test operating costs. This paper aims to describe the facility's key features and demonstrate its capabilities through trial runs. This facility allows single-can combustor testing at 1650°C-class combustor exit temperatures and actual gas-turbine operating pressures, burning blended hydrogen-natural-gas fuels with hydrogen contents of 0-100 vol.%. Trial results indicate that single-can tests achieved the target rated conditions and hydrogen contents of that range, and that the measured NO_x and combustion oscillations agreed with those observed in actual gas turbines. The results further indicate that an acoustic boundary adjustable device reproduced combustion oscillations in actual gas turbines. These findings demonstrate that this facility is capable of screening combustor performance under actual gas-turbine operating conditions with reduced test operating costs.

キーワード：ガスタービン，燃焼器，燃焼試験設備，ブローダウン，天然ガス，水素，
燃焼振動，音響境界可変装置，火炎可視化，急速昇負荷

Key words : Gas Turbine, Combustor, Combustion Test Facility, Blow-down, Natural Gas, Hydrogen,
Combustion Oscillation, Acoustic Boundary Adjustable Device, Flame Visualization, Rapid Ramp-up

1. はじめに

2025年2月に閣議決定された第7次エネルギー基本計画¹⁾では、火力全体で安定供給に必要な発電容量(kW)を維持・確保しつつ、非効率な石炭火力を中心に発電量(kWh)を減らしていくとの方針が示された。そして、トランジション手段としてのLNG火力の確保や水素・アンモニア、二酸化炭素(CO₂)回収・有効利用・貯留(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, CCUS)などを活用した火力の脱炭素化を進めるとしている。火力発電は、CO₂をはじめとする温室効果ガスを排出するという課題がある。一方で、現在の日本の電源構成の7割を占めるなど電力需要を満たす供給力や、再生可能エネルギーなどによる出力変動や周波数変動を補う調整力、さらにシステムの安定性を保つ慣性力・同期化力

などを有する重要な役割と位置付けられている。

三菱重工業株式会社(以下、当社)は、2040年カーボンニュートラル“MISSION NET ZERO”を宣言し、当社グループのCO₂排出量を2040年までに正味ゼロの実現を目指している²⁾。この方針のもと、火力発電の脱炭素化に向けたエネルギー・産業技術総合開発機構(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)の支援を受け、CO₂分離・回収の負荷変動に対応するガスタービン燃焼技術の開発も進めている⁴⁾。

燃焼器開発は、多缶式燃焼器の場合、次のステップで進められる。はじめに燃焼・冷却方式などの燃焼器コンセプトを構築し、数値シミュレーションやモデルバーナの要素燃焼試験でコンセプトの妥当性を検証する。次に、このコンセプトを実現する実機スケールの燃焼器単缶を設計・製作し、単缶燃焼試験でその燃焼性能や運用性を確認する。この単缶燃焼試験では、複数の燃焼器供試体から、最終ステップである実機ガスタービン(燃焼器：

原稿受付 2025年9月1日

査読完了 2026年3月17日

*1 三菱重工業(株) 総合研究所

〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1

E-mail: tomohiro.asai.sh@mhi.com

*2 京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

三菱重工 革新的燃焼ダイナミクス講座

〒615-8540 京都市西京区 京都大学 桂C3棟

多缶配置)での検証に向けて目標性能を満足し、性能が最良のものを選定する。最後に、この選定した燃焼器供試体を実機ガスタービンにて燃焼性能や運用性を検証する。これらのステップの中で単缶燃焼試験は、実機ガスタービンで検証する供試体を選定する重要なステップであり、ガスタービン実機条件の試験ができ、実機燃焼特性の検証が可能であることが求められる。また、単缶燃焼試験は一般に試験費用が高コストとなるため、供試体を選定するための試験の回数が限られる。その結果、供試体選定に時間を要し、燃焼器の開発期間の長期化を招く一因となる。そこで、試験費用を削減することで、試験回数を確保し、燃焼器の開発期間の短縮化を図るためには、低コストで燃焼器スクリーニング試験が可能なのも求められる。

そこで、当社総合研究所は、大型ガスタービン燃焼器向けに、ガスタービン実機条件の試験ができ、低コストで燃焼器スクリーニング試験が可能な単缶燃焼試験設備として、ブローダウン燃焼試験設備を開発した⁽⁵⁾。本論文では、本試験設備の特長・構成を含む詳細を説明し、試運転により設備の妥当性を検証する。そして最後に、燃焼器開発への本試験設備の活用事例を示す。

2. ブローダウン燃焼試験設備

本章では、本試験設備の特長、構成、計測の詳細を説明する。

2.1 本設備の特長

大型ガスタービン燃焼器向けに、ガスタービン実機条件の試験ができ、低コストで燃焼器スクリーニング試験が可能なブローダウン燃焼試験設備を開発した。本試験設備の主な特長を以下にまとめる。

[特長]

- ・低コストで大型ガスタービン燃焼器（単缶）のスクリーニング試験が可能
- ・世界最高水準の燃焼器出口温度1650℃級の実温かつ実圧の大型ガスタービン燃焼器の単缶燃焼試験が可能
- ・本設備の熱出力は65 MW相当
- ・燃料の水素濃度を0 vol.%（天然ガス）から100 vol.%（水素専焼）の間で任意に設定でき、天然ガス～水素混焼・専焼の試験が可能
- ・水素濃度の変化速度はガスタービン高速起動に十分対応できる50 vol.%/minが可能
- ・音響境界可変装置により、実機で発生しうる多缶連成の燃焼振動を模擬でき、単缶燃焼試験で実機燃焼振動の評価が可能

2.2 空気供給方式の選定

ガスタービン燃焼器の燃焼現象は圧力依存性が高いため、燃焼性能の検証には、実機と同じ圧力下で試験することが求められる。従来、大型ガスタービン向けの実圧の燃焼試験設備では、燃焼器単缶の試験に必要な大容量の空気を圧縮機から供給し、この圧縮機は別途、駆動用のガスタービン（GT）で駆動していた。この圧縮機駆動式の試験では、試験時間を長く確保でき、多数の条件のデータを取得できるが、試験費用が高コストとなる課題があった。そこで、試験費用を削減することで、供試体選定のための試験回数を確保し、燃焼器開発期間の短縮化を図るため、ブローダウン方式を採用した。この方式では、事前に貯気タンクに貯めた高压の空気を供給するため、駆動用GTは不要となり、従来の圧縮機駆動式試験に比べて試験費用を削減できる。それにより、試験回数を確保し、燃焼器の開発期間の短縮化を図ることができる。また、試験時間は貯気タンクに貯めた空気量に依存し、数分～10分程度と限られるが、空気・燃料供

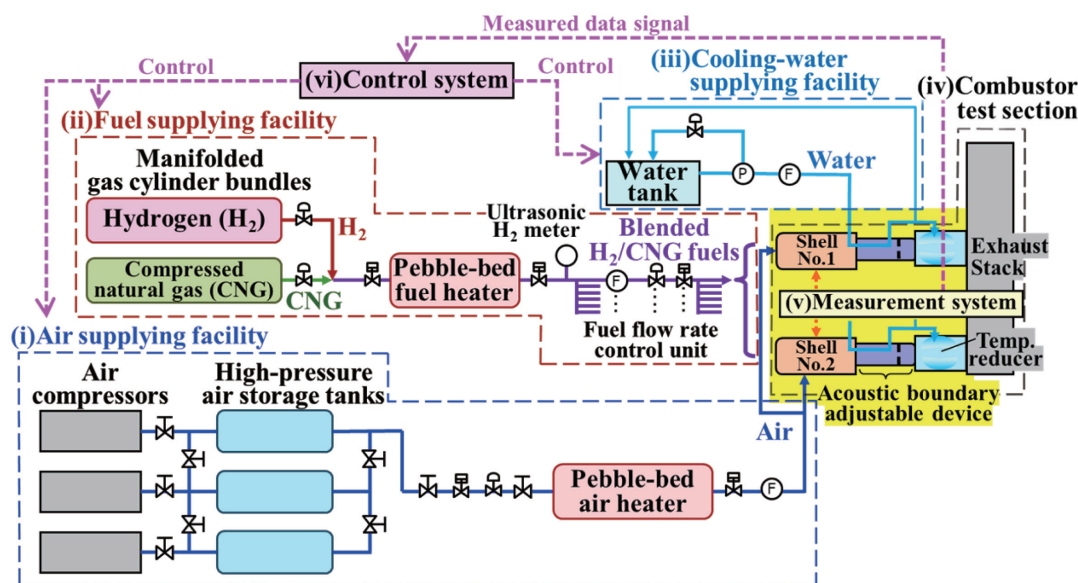


Fig. 1 Schematic diagram of blow-down combustion test facility

給の制御弁の高速制御技術の開発により、短時間で高速昇負荷して定格整定時間を確保することで、複数条件のデータを取得できる。

2.3 ブローダウン燃焼試験設備構成

本節では、本ブローダウン燃焼試験設備の構成、および各構成要素の詳細を説明する。Fig. 1に本試験設備の構成と概略システムを示す。また、Fig. 2に各構成要素の完成写真とともに本試験設備の全景図を示す。本試験設備は、主に (i) 空気供給装置、(ii) 燃料供給装置、(iii) 冷却水供給装置、(iv) 燃焼器試験部、(v) 計測システム、(vi) 制御システムの6つの基本要素から構成される。以下、各構成要素を説明する。

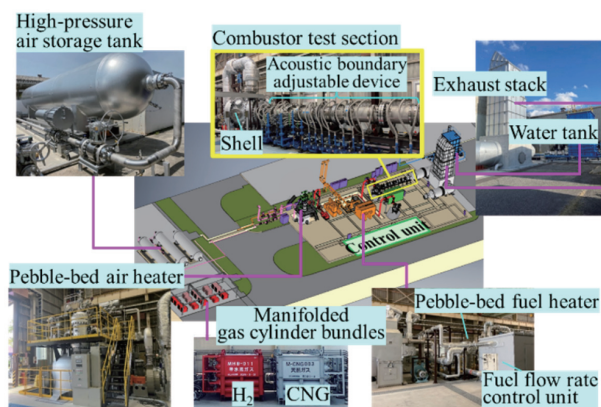


Fig. 2 Panoramic view of blow-down combustion test facility with photos of each component

2.3.1 空気供給装置 空気供給装置 (Fig. 1 (i)) は、燃焼器試験部 (Fig. 1 (iv)) に燃焼用空気を供給する。大型ガスタービン実機条件の試験に対応するため、空気の圧力、温度、流量が実機条件を実現する装置仕様とし、産業用ガスタービン向けの燃焼試験設備としては国内・外で最大レベルの仕様となっている。空気は、試験開始までに事前に、空気圧縮機により高圧の空気貯気タンクに約19 MPaまで貯気される。試験が開始すると、空気タンクに貯気された高圧空気が、下流の流調弁により減圧・流調され、さらにその下流の空気加熱装置により、大型ガスタービン実機の燃焼器入口温度まで加熱されて、燃焼器試験部に供給される。本空気加熱装置はペブル式を採用し、事前に加熱したペブル（“小石”の意味）と流通する空気との間で熱交換することで空気を加熱した。大型ガスタービン実機の大容量の空気を加熱するのに十分な熱容量を確保するため、本加熱装置は直径約3 m、高さ約6 mの大型の円筒形圧力容器となっており、この容器の内部に約50トン分のセラミック製球状ペブルを敷き詰めた。

2.3.2 燃料供給装置 燃料供給装置 (Fig. 1 (ii)) は、燃焼器試験部 (Fig. 1 (iv)) に水素と天然ガスの混合燃料を供給する。大型ガスタービン実機条件の試験に対応するため、燃料の圧力、温度、流量が実機条件を実現す

る装置仕様とした。燃料の成分である水素と天然ガス（圧縮天然ガス、Compressed Natural Gas, CNG）は複数のポンペを連結したカードルからそれぞれ別々に供給される。水素と天然ガスはそれぞれの系統の下流の流調弁により流調され、系統の途中で合流して混合ガス燃料となる。この流調により燃料の水素濃度を0 vol.%（天然ガス）～100 vol.%（純水素）の間で任意に設定できる。混合ガス燃料の水素濃度は下流に設置した超音波式水素濃度計⁶⁾で計測した。混合ガスは、燃料加熱装置により、大型ガスタービン実機の燃料温度まで加熱され、燃焼器試験部に供給される。本燃料加熱装置も、空気加熱装置と同様にペブル式を採用し、事前に加熱したペブルと流通する燃料ガスとの間で熱交換することで燃料を加熱した。加熱後の燃料は流量調整ユニットにて複数の系統に分岐する。各分岐系統はそれぞれ流調弁と流量計を備え、各系統の流量を流調弁で制御する。この流量制御により、各燃料系統間の流量比率を制御して安定燃焼を図る燃料ステージングの試験が可能である。

2.3.3 冷却水供給装置 冷却水供給装置 (Fig. 1 (iii)) は、主に燃焼器試験部 (Fig. 1 (iv)) の装置構造の冷却、および燃焼器で生成される燃焼ガスの減温のため、冷却水を供給する。冷却水は事前に貯水された水槽から供給される。燃焼器試験部の中で高温の燃焼ガスが通過する箇所は、その構造部材を冷却するため、二重壁の水冷構造とした。冷却水はこの装置を冷却した後、その一部は水槽に戻り再利用され、残りは減温器にて燃焼ガスを減温するスプレー水として再利用される。減温された燃焼ガスは排気塔から大気に放出される。水槽の容量には制限があるため、このように冷却水をスプレー水として再利用することで、冷却水ポンプの吐出量を低減し、水槽の冷却水使用量の節約を図った。

2.3.4 燃焼器試験部 燃焼器試験部 (Fig. 1 (iv)) は、この部分に検証対象の燃焼器を設置し、前述の空気、燃料、冷却水を供給して燃焼試験をする。燃焼器試験部は、主にシェル、音響境界可変装置、減温器、排気塔の4要素から構成される。シェル内には試験対象の燃焼器が設置され、試験効率化のため、本設備は第1シェルと第2シェルのシェルの2つ備える。事前に両シェルに供試体を組み込んでおき、試験対象ごとに空気、燃料、冷却水の配管系統を切り替えることで速やかに試験対象を切り替え、試験の効率化を図った。シェルの下流には音響境界可変装置が設置され、この装置は単缶燃焼試験にて実機で発生しうる多缶連成の燃焼振動を模擬するためのものである。この装置の詳細は2.4節で後述する。この下流の減温器では、スプレー水により高温の燃焼ガスが減温される。減温された燃焼ガスは排気塔から大気に放出される。排気塔からは大型ガスタービン燃焼器の大容量の排気ガスが放出され、その排気騒音が大きくなる可能性があるため、排気塔にはセル型の消音装置を設置し騒音対策した。

2.3.5 計測システム 計測システム (Fig. 1 (v)) は、燃焼性能の評価項目として、主に排ガス濃度、燃焼振動に起因する圧力変動、そして燃焼器供試体のメタル温度を計測し、さらに火災評価のため光学計測をする。排ガス濃度は、燃焼後の排ガスをプローブでサンプリングし、排ガス中の窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、未燃炭化水素 (Total Hydrocarbon, THC)、酸素 (O₂)、二酸化炭素 (CO₂) の濃度を総合排ガス計にて計測した。Fig. 3に排ガス計測システムの概略図を示す。燃焼器出口にて、燃焼器軸方向に垂直な断面内に設置した6本のサンプリングプローブ (各7点) と計測ダクト壁面に設置した4本のサンプリングプローブ (各1点) からのサンプリング計46点により計測した。この多点のサンプリングガスは、サンプリング切替器にてニードル弁で流量調整し、各計測点の対応する面積に応じた吸引量を集合計測することで、その面積平均値を連続計測した。また、試験中の任意の時刻で各計測点のガスを分岐して46個の採集容器にそれぞれ貯気し、試験後に1点ずつガス分析することで燃焼器出口の排ガス濃度分布を計測した。燃焼振動は、実機と同様に燃焼器壁に取り付けた圧力センサで計測した⁽⁷⁾。また、圧力センサをバーナ、燃焼筒、音響境界可変装置のダクトに軸方向にわたって複数取り付け、振動モード分布を計測した。燃焼器供試体のメタル温度は、一般的なK型の熱電対で計測した。火災評価のため、光電子増倍管 (Photomultiplier tube, PMT) を用いた高感度紫外光検出装置により、火炎からの放射

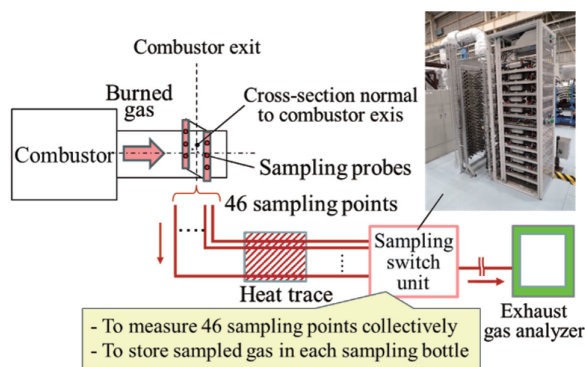


Fig. 3 Exhaust gas emissions measurement system

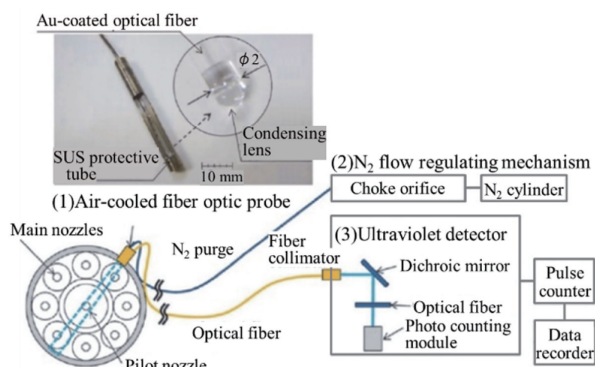


Fig. 4 Highly-sensitive ultraviolet photodetector

光を計測した (Fig. 4)⁽⁸⁾。本計測手法により、着火・失火を高速検知でき、さらに火災による発熱変動を評価できる。

2.3.6 制御システム 制御システム (Fig. 1 (vi)) は、空気、燃料、冷却水系統 (Fig. 1 (i), (ii), (iii)) の制御弁を一括で制御し、さらに計測システム (Fig. 1 (v)) からの計測データの信号を受信してインターロックなども制御する。制御システムとして、ガスタービンを含む火力発電プラント実機にも使用されている制御システム DIASYS Netmation[®](9) を使用した。本システムでは、試験前の燃料系統のパージャ燃料充填、そして着火、昇負荷から定格条件のデータ取得、停止までの一連の運転シーケンスを予め設定値として入力しておくことで、試験は自動で進行する。ブローダウン試験は試験時間が数分~10分程度と短いため、試験運転員による手動では瞬時操作は困難であり、人為操作ミスや時間ロスを誘発するリスクがある。そこで、このように試験操作を全自動とすることで、人為操作ミスや時間ロスの防止を図った。

2.4 実機燃焼振動の模擬

実機ガスタービンでは多缶の燃焼器が連成する多缶連成燃焼振動が発生⁽⁷⁾し、単缶燃焼器とは異なった周波数の燃焼振動が発生しうる。そこで、単缶燃焼器のブローダウン燃焼試験で実機の燃焼振動を模擬するため、音響境界可変装置を開発した。Fig. 5にコンセプトを示す。この装置は燃焼器の下流に設置され、長尺のダクト、およびこの内部に含まれるオリフィスから構成される。オリフィスは流路断面を縮小させる絞り構造となっており、

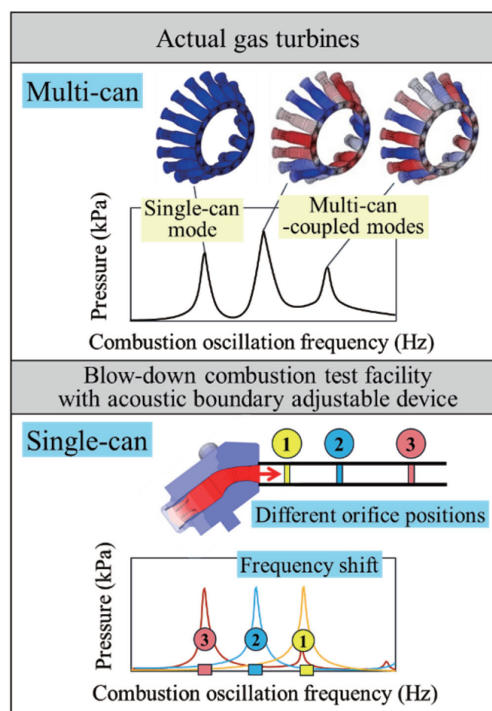


Fig. 5 Concept of simulated combustion oscillation in multi-can combustor with acoustic boundary adjustable device

この構造の冷却のため、その内部に冷却水流路を備える。オリフィスは軸方向位置に固定され、この位置で燃焼振動の音響境界が定義される。試験中はオリフィス位置は変更できず、試験ごとにその位置を変更する。

この装置により、燃焼器下流にてオリフィスの設置位置を調整することで、発生する燃焼振動の周波数と振動モードの調整を図る。これにより、単缶燃焼試験ながら実機の燃焼振動を模擬し、燃焼振動に関するスクリーニング試験が可能である。

3. 試運転による試験設備妥当性の検証

本章では、試運転により本ブローダウン燃焼試験設備の妥当性を検証する。はじめに天然ガス焚きの大型ガスタービン燃焼器を対象に試運転し、ブローダウン運転シーケンスの動作や空気・燃料・燃焼器出口温度の定格条件の実現可否を確認する。次に、実機とNOx、燃焼振動特性を比較し、実機燃焼特性の再現性を検証する。さらに本設備の音響境界可変装置による実機の燃焼振動周波数の再現性を検証する。最後に、燃料を天然ガスから水素100 vol.%に水素濃度を変化させる試験をし、水素濃度の実現可否、および変化速度を確認する。

3.1 天然ガス焚き燃焼器を用いた設備検証試運転

本節では、ブローダウン運転シーケンスの動作や空気・燃料・燃焼器出口温度の定格条件実現可否を確認するため、比較データが豊富な天然ガス焚きの大型ガスタービン燃焼器を対象に試運転した結果を説明する。

はじめに空気の流量、温度、圧力、および燃焼器出口温度のトレンドをそれぞれFig. 6, Fig. 7, Fig. 8, およびFig. 9に示す。いずれの図も横軸は昇負荷開始時刻を0秒とした時間、縦軸は目標の定格値で規格化した値を表す。図にはブローダウン運転シーケンスも示す。ブローダウン試験では、一連の運転シーケンスを予め設定値として入力しておき、試験は自動で進行する。空気流量 (Fig. 6)、および燃焼器出口温度 (Fig. 9) のトレンドにはこれらの設定値 (点線で図示) も示す。

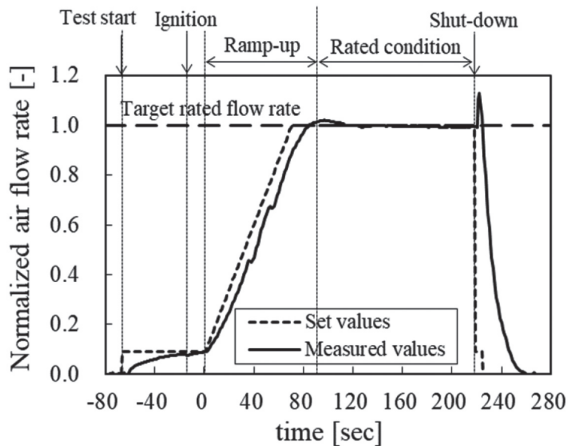


Fig. 6 Trend of normalized air flow rate for trial runs with natural gas-firing gas turbine combustor

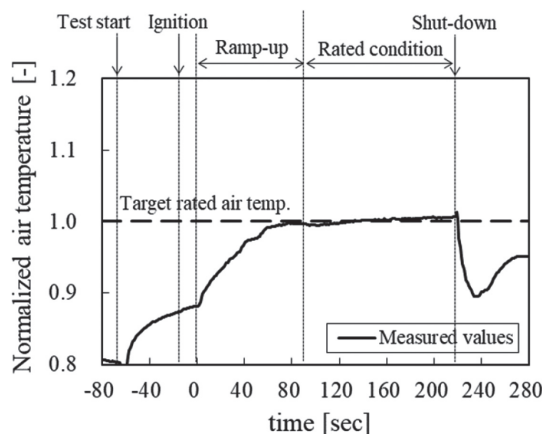


Fig. 7 Trend of normalized air temperature for trial runs with natural gas-firing gas turbine combustor

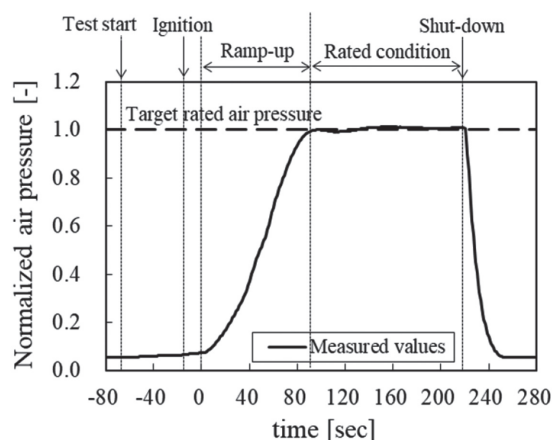


Fig. 8 Trend of normalized air pressure for trial runs with natural gas-firing gas turbine combustor

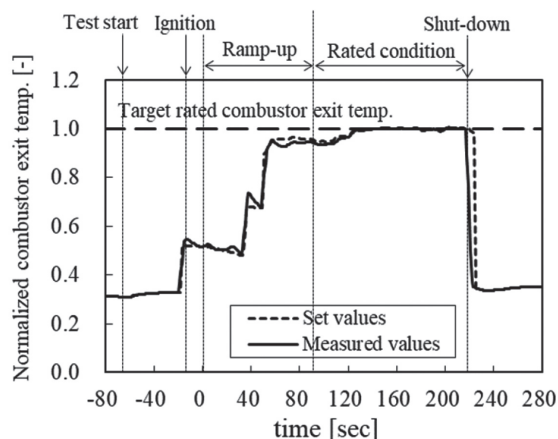


Fig. 9 Trend of normalized combustor exit temperature for trial runs with natural gas-firing gas turbine combustor

試験開始から停止まで以下の運転シーケンスが進行する。試験が開始 (-70秒辺り) すると、着火に向けて初期の空気流量が設定され、空気流量がこの設定値になるように空気流調弁が徐々に開いていく。計測値の実空気流量がこの初期設定流量に到達したら、燃料を供給し着火する (-15秒辺り)。着火後、安定燃焼を確認したら、昇負荷を開始する (0秒)。昇負荷では空気流量の

設定値を一定の速度で上昇させる。目標の定格空気流量に到達したら、この定格条件にて、燃焼器出口温度や各燃料系統間の流量比率などをパラメータとして変化させ、排ガス濃度や燃焼振動などの燃焼特性を計測し、データを取得する。そして、空気貯気タンクの空気残量（空気残圧）が制限に達したら、試験停止の指令が発出し、空気・燃料の流調弁・遮断弁が全閉となり、試験が停止する。

Fig. 6～Fig. 9の空気の各量、および燃焼器出口温度について、設定値・目標値と計測値を比較して、定格条件の実現可否を確認する。空気流量トレンド（Fig. 6）から、昇負荷中（0秒～）、計測値は、設定値の増加に対して追従していき、約90秒の短時間で定格条件に到達した。このように短時間で昇負荷する高速制御を実現するため、空気・燃料系統の動特性を再現できる動特性解析シミュレータ¹⁰を用いて、事前に制御パラメータをチューニングし、制御の追従性と安定性の両立を図った。定格条件に到達後は、空気流量は定格流量一定に維持できた。次に、空気温度トレンド（Fig. 7）を説明する。空気は、空気加熱装置にてペブルとの熱交換により加熱され、その温度上昇量は空気流量により変化する。試験開始後、初期設定流量に向けて空気流量が増加するのに伴い、空気温度は上昇する（-70～0秒）。次に、昇負荷にて空気流量が増加していく（0～90秒）と、空気温度はさらに上昇し、空気流量が定格条件に到達する（90秒～）と、空気温度は目標の定格空気温度に到達した。定格到達後は、空気温度は目標定格温度一定に維持できた。次に、空気圧力トレンド（Fig. 8）を説明する。空気圧力は、空気流量や燃焼器出口温度により変化する。昇負荷に伴い、空気圧力は増加し、定格条件にて目標の定格圧力に到達した。定格到達後は、空気圧力は目標定格圧力一定に維持できた。最後に、燃焼器出口温度トレンド（Fig. 9）を説明する。昇負荷中、各燃料系統間の流量比率を制御する燃料ステージングにより燃焼器出口温度を上昇させる。計測値はほぼ設定値通りに変化しており、高速制御可能なことを確認した。定格空気流量に到達（90秒辺り）後、さらに燃焼器出口温度を上昇させ、目標の定格燃焼器出口温度に到達した。その後、定格燃焼器出口温度一定に維持できた。

以上の結果から、本ブローダウン燃焼試験で、大型ガスタービン実機の定格燃焼器出口温度、定格圧力条件を実現でき、実機条件の単缶燃焼試験が可能なことを確認した。

3.2 実機との比較

本節では、実機とブローダウン試験でNO_x排出量と燃焼振動を比較し、実機燃焼特性の再現性を検証する。はじめに比較する条件を燃料流量のトレンド図で説明する。Fig. 10は複数の燃料系統のうちの2系統（系統(1)、(2)）の燃料流量のそれぞれのトレンドであり、比較する条件Run A, B, C, Dの位置を示す。図の縦軸は

定格条件でのそれぞれの設定流量で規格化した値を表し、特に定格条件付近を拡大して示す。Run AとRun Bは燃焼器出口温度が異なる条件であり、Run AからRun Bの変化で燃焼器出口温度は上昇する。Run AとBの比較により、燃焼器出口温度がNO_xに与える影響を確認する。Run CとRun Dは燃焼器出口温度は同一で燃料比率が異なる条件であり、Run CからRun Dの変化で燃料系統(1)の燃料比率は減少する。Run CとDの比較により、同一燃焼器出口温度にて燃料比率が燃焼振動に与える影響を確認する。

Run AとBにて、実機とブローダウンのNO_x排出量を比較した結果をFig. 11に示す。NO_xは実機のRun Aの値で規格化した値を表す。ブローダウンのNO_xはRun A, Bともに実機値とほぼ等しく、またRun AからRun Bへの燃焼器出口温度の上昇に伴うNO_x増加量もほぼ等しくなっており、ブローダウンはNO_x値、および燃焼器出口温度上昇に伴うNO_x増加傾向ともに実機特性を再現した。なお、ブローダウンのNO_xは実機とは完全には一致しないが、この差は、ブローダウン単缶では実機多缶の燃焼器入口部の車室流れを完全には再現しきれないため、この流動差による燃料・空気の混合の違いが一因と考える。

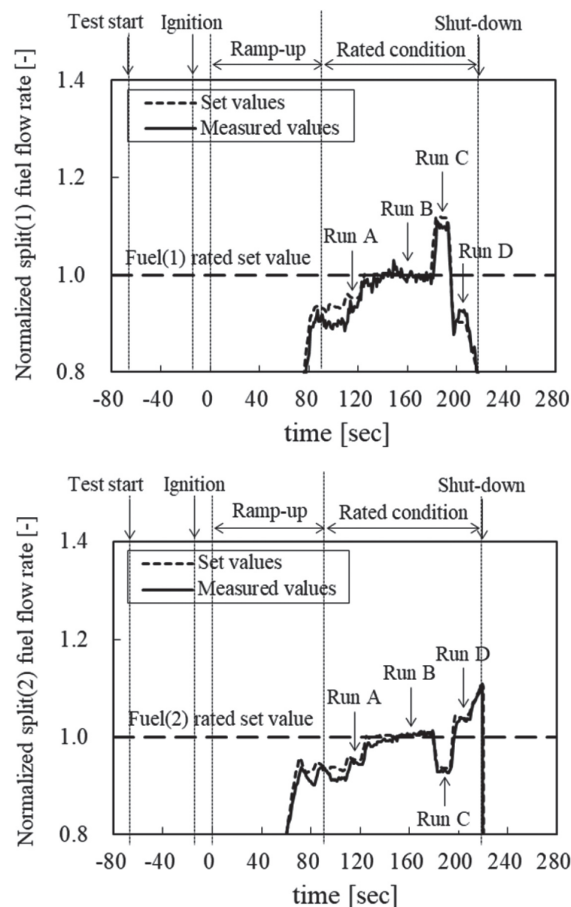


Fig. 10 Trend of normalized split fuel flow rate for trial runs with natural gas-firing gas turbine combustor

次に、Run CとDにて、実機とブローダウンの燃焼振動の周波数と振幅を比較した結果をFig. 12に示す。ブローダウンでは、燃焼振動周波数を調整する音響境界可変装置のオリフィスは固定され、試験中に連続的にその位置を変更できないため、実機周波数に完全に一致させることは難しい。そこで、本図には実機に最も近い周波数を与えるオリフィス位置のデータを示した。本図の振動周波数は実機のRun Cの値で規格化した値を表す。また、振動振幅は実機、ブローダウンのそれぞれでRun Cの値で規格化した値を表す。振動周波数について、ブローダウンはRun C、Dともに実機値とほぼ等しく、ま

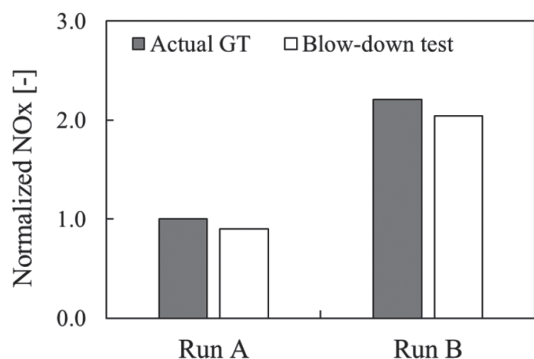


Fig. 11 Comparison of NOx emissions between actual gas turbine and blow-down combustion test

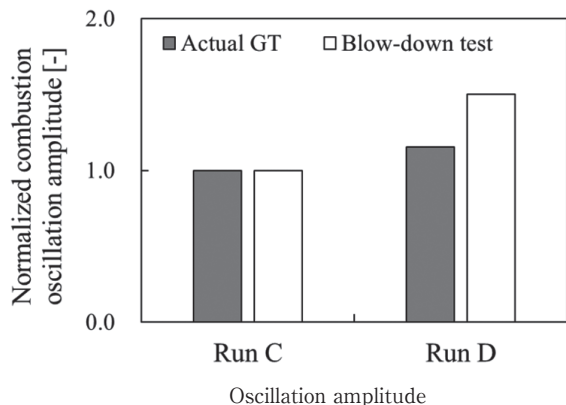
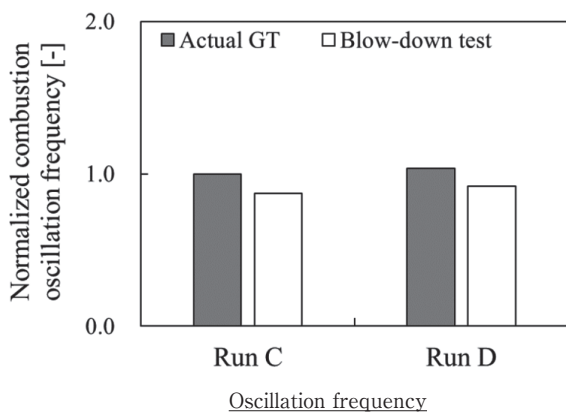


Fig. 12 Comparison of combustion oscillation frequency and amplitude between actual gas turbine and blow-down combustion test

た実機、ブローダウンともに、Run CからRun Dに燃料系統(1)の燃料比率が変化しても、振動周波数は変化せず、実機特性を再現した。次に、振動振幅について、実機、ブローダウンともに、Run CからRun Dに燃料系統(1)の燃料比率の減少に伴い、振動振幅は増加傾向となり、実機特性を再現した。

以上の結果から、ブローダウン単缶燃焼試験は、NOx、燃焼振動ともに実機特性を再現し、スクリーニング試験設備として有効であることを確認した。

3.3 音響境界可変装置による実機燃焼振動周波数の模擬

本設備に設置した音響境界可変装置は、単缶燃焼試験で実機の燃焼振動を模擬するため、燃焼器下流のオリフィスの設置位置を調整することで、発生する燃焼振動の周波数と振動モードの調整を図っている。そこで、本節では、オリフィス設置位置を2ケース変え、実機の燃焼振動の再現性を検証した。

この評価対象の2ケースは、前節で説明したRun D条件を試験した時のオリフィス位置（オリフィス位置1と称する）と、もうひとつはこのオリフィス位置1よりもさらに下流の位置（オリフィス位置2と称する）とした。

Fig. 13にオリフィス位置1、2でのそれぞれの燃焼振動周波数のブローダウン結果を実機と比較して示す。振動周波数は実機のRun Dの値で規格化した値を表す。ブローダウンでは、オリフィス位置により振動周波数が異なり、より下流に設置したオリフィス位置2の方が周波数は低下する。この結果から、オリフィス位置の調整により、発生する燃焼振動の周波数の調整が可能であることを確認した。一方、実機では本図中の2種類の周波数の燃焼振動が発生し、これらの実機周波数に対して、ブローダウンでオリフィス位置1、2によりほぼ再現した。また、振動モードについて実機と同じ軸方向モードを再現した。

以上の結果から、音響境界可変装置により、単缶燃焼試験で実機の燃焼振動を模擬できることを確認した。これにより、燃焼振動に関するスクリーニング試験が可能である。

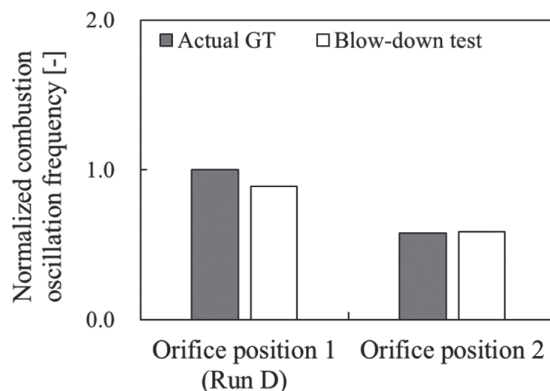


Fig. 13 Simulated combustion oscillation frequencies in actual gas turbine with acoustic boundary adjustable device in blow-down combustion test facility

3.4 水素濃度変化試験

本節では、燃料を天然ガスから水素100 vol.%に水素濃度を変化させた試験をし、水素濃度の実現可否、および変化速度を確認する。Fig. 14に水素濃度（左縦軸）、および空気流量、燃焼器出口温度（ともに右縦軸）のトレンドを示す。本図の横軸は着火時刻を0秒とした時間を表し、図にはブローダウン運転シーケンスも示す。

本試験は、以下の運転シーケンスで進めた。はじめに低空気流量にて天然ガス（水素濃度0 vol.%）で着火（時間0秒）し、その後、燃料ステージングにより燃焼器出口温度を上昇させた（時間20～100秒）。次に、200秒辺りから燃料の水素濃度を増加させ始め、350秒辺りで水素濃度60 vol.%, 420秒辺りで水素濃度80 vol.%と水素濃度を段階的に変化させた。この状態で空気流量を増加させて昇負荷（420～500秒）し、昇負荷後に水素濃度を80 vol.%から100 vol.%に向けて増加させていき、570秒辺りで100 vol.%（水素専焼）に到達した。以上から、天然ガスから水素濃度100 vol.%まで任意の比率に設定でき、天然ガス～水素混焼・専焼の試験が可能であることを確認した。また、水素濃度の変化速度は、最速で550～570秒の時間帯にて50 vol.%/minを実現した。この変化速度はガスタービン高速起動に十分対応できる速度である。

本ブローダウン設備・運用の開発の中で、水素濃度の高速制御の実現が技術課題のひとつとなった。その実現には、 H_2/CNG のそれぞれを流調する上流の流調弁と混合ガスを流調する下流の流調弁を連動させて高速に制御する必要がある。これらの弁の連動操作に遅れが生じると、両弁間の配管内の混合ガス圧力が突変して、水素濃度の高速制御が困難となり、水素濃度が設定値よりも急増・急減する事象や、弁開度や流量が周期的に増減を繰り返すハンチング現象が発生しうる。そこで、この問題に対処するため、まず動特性解析シミュレータ¹⁰⁾を用いて、弁の制御性を検討した。本研究では、動特性解析モデルを組み込んだ汎用解析ツールMATLAB/Simulinkと、本設備の制御システムDIASYS Netmation[®]のシミュレータを連成し動作させるSoftware-in-the-Loop Simulation (SILS) 環境を用いて検証した。続いて、このシミュレーション結果に基づき、試験で実際の弁の制御性を検証した。制御弁は弁固有の流量特性をもつため、実際の弁を用いて検証する必要がある。そこで、可燃性混合ガスの代わりに不活性ガスを使用した模擬ガス試験により、弁運用範囲を燃焼試験に合わせて弁の制御性を実験的に検証し、その上で燃焼試験に臨んだ。このアプローチにより、燃焼試験で水素濃度を高速に制御することが可能になった。

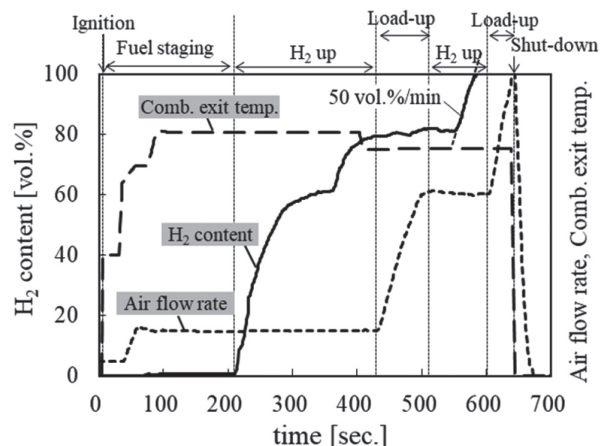


Fig. 14 Blow-down combustion test results for H_2 content changing from 0 vol.% to 100 vol.%

4. 燃焼器開発への本試験設備の活用事例

当社は、本ブローダウン燃焼試験設備を活用し、 CO_2 分離・回収の負荷変動に対応するガスタービン燃焼技術として、水素混焼から専焼が可能ながスタービン燃焼器の開発を進めている⁴⁾。本章では、この燃焼器の開発への本試験設備の活用事例を示す³⁾。

水素混焼から専焼に燃料の水素濃度が増加すると、逆火が発生するリスクが高くなる課題がある。そこで、当社は、水素含有燃料に対して逆火耐性があるマルチクラスタ燃焼器の開発を進めている。Fig. 15にこのマルチクラスタ燃焼器の概略構造とコンセプトを示す。この燃焼器は多数の孔（予混合管（ノズル））を備え、そこで空気と燃料を急速混合することで、混合距離を短縮し、逆火耐性の向上を図る。また、燃料を分散し、火炎を多数に分散することで NO_x 低減を図る。多数の予混合管は、複数の系統に分割し、系統間の燃料流量比率を制御する燃料ステージングにより、安定燃焼を図る。

本ブローダウン試験設備を活用して、このマルチクラスタ燃焼器の単台燃焼試験をした。Fig. 16にブローダウン燃焼試験結果（燃料の水素濃度、排ガスの CO_2 濃度、燃焼振動振幅）を示す。試験では、はじめに天然ガスで着火し、部分負荷にて水素濃度を増加させ、天然ガスから水素に燃料を切り替えた。燃料切替途中は、燃料ステージングにより、燃焼振動や逆火を回避して安定燃焼を図った。本図から、燃焼振動の振幅を制限値よりも低く保って安定燃焼を確保しつつ、水素濃度を増加させて水素100 vol.%に到達し、水素専焼を実現した。今後も、引き続き、本ブローダウン試験設備を活用して、大型ガスタービン燃焼器の開発を進める。

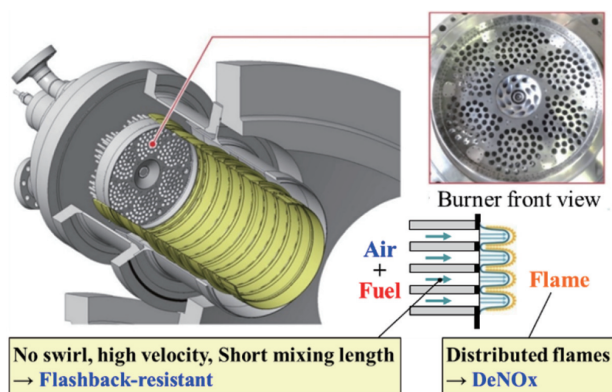


Fig. 15 Multi-cluster combustor and its concept for hydrogen content fuels

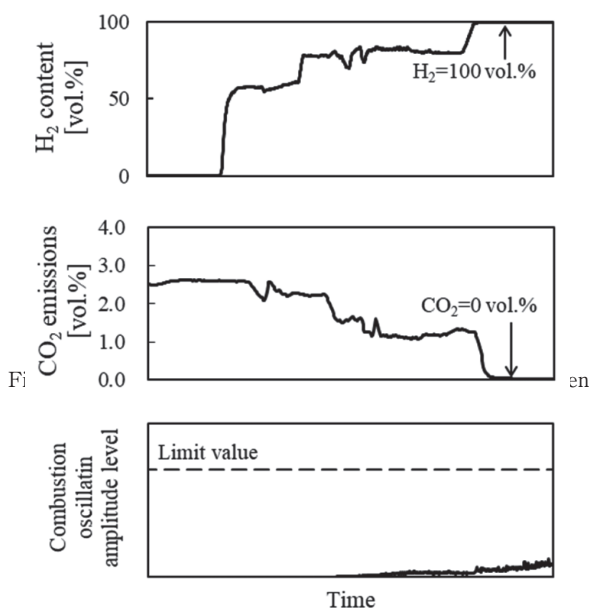


Fig. 16 Blow-down combustion test results for multi-cluster combustor burning hydrogen-content fuels

5. まとめ

本論文では、大型ガスタービン燃焼器向けに、ガスタービン実機条件の試験ができ、低コストで燃焼器スクリーニング試験が可能な単缶燃焼試験設備として、ブローダウン燃焼試験設備を開発し、試運転により設備妥当性を検証した。得られた結果を以下にまとめる。

- ・世界最高水準の燃焼器出口温度1650℃級の実温かつ実圧の大型ガスタービン燃焼器の単缶燃焼試験が可能
- ・本設備の熱出力は65 MW相当
- ・燃料の水素濃度を0 vol.%（天然ガス）から100 vol.%（水素専焼）の間で任意に設定でき、天然ガス～水素混焼・専焼の試験が可能
- ・水素濃度の変化速度はガスタービン高速起動に十分対応できる50 vol.%/minが可能
- ・音響境界可変装置により、実機で発生しうる多缶連成の燃焼振動の周波数を模擬でき、単缶燃焼試験で実機燃焼振動の評価が可能

- ・ブローダウン単缶燃焼試験は、NO_x、燃焼振動ともに実機特性を再現し、スクリーニング試験設備として有効

謝辞

本論文の成果の一部は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成事業（JPNP16002）の結果得られたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 第7次エネルギー基本計画（経済産業省 資源エネルギー庁、2025年2月）<https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf>（参照日 2026年2月9日）。
- (2) 三菱重工業株式会社、2040年カーボンニュートラル宣言 <<https://www.mhi.com/jp/company/overview/carbon-neutral>>（参照日 2026年2月9日）。
- (3) 江川拓，安部直樹，盛下光寛，武石裕行，磯部知昭，川上朋，水素・アンモニア焼きガスタービンの商用化に向けた開発と検証状況，三菱重工技報，Vol. 62, No. 3（2025），pp. 1-12。
- (4) 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），「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／①石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」事業原簿：CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発 <<https://www.nedo.go.jp/content/100967763.pdf>>（参照日 2026年2月9日）。
- (5) 齋藤敏彦，多田勝義，盛重大，椎屋孝之，森田諭，佐藤賢治，ガスタービンの脱炭素燃料化を支えるブローダウン燃焼試験設備，三菱重工技報，Vol. 62, No. 1（2025），pp. 1-6。
- (6) 三好麻子，小西良平，松田正誉，高倉裕也，超音波式水素流量濃度計，計測技術，Vol. 51, No. 9（2023），pp. 48-52。
- (7) 甲田貴也，中森友仁，松山敬介，小山敦史，松村嘉和，中村聡介，高効率ガスタービンの安定運転を実現する振動抑制技術・予兆検知技術の開発，三菱重工技報，Vol. 58, No. 1（2021），pp. 1-6。
- (8) Miyazaki, K., Noda, J., Kimura, Y., and Saito, T., Flame Diagnostics Method for Oil Fired Industrial Gas Turbine Combustors under High Pressure Conditions, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, IGTC-2019-233（2019）。
- (9) 三菱重工業株式会社 パワー事業，制御システムDIASYS Netmation® <<https://power.mhi.com/jp/products/control-systems/diasys/spec/diasys-netmation>>（参照日 2026年2月9日）。
- (10) 岸真人，竹中竜児，羽賀僚一，高木一茂，戸田修平，福本皓士郎，安定燃焼と高負荷変化率を実現する次世代ガスタービン制御，三菱重工技報，Vol. 60, No. 1（2023），pp. 1-7。