

# 脱炭素社会に向けた 水素焼きガスタービンの開発



## 井上 慶

三菱重工業株式会社 総合研究所  
燃焼研究部 燃焼第二研究室長

### 要旨

脱炭素社会に向けた動きが世界で加速する中、三菱重工株式会社（以下、当社）は、水素焼きのガスタービン複合発電（GTCC）の開発に取り組んでいる。現在、大型ガスタービンで天然ガスに水素を30vol.%混ぜて燃焼させるガスタービン燃焼器の開発を完了し、引き続き、水素専焼（水素100vol.%）に対応できる燃焼器の開発を進めている。当社はヨーロッパ、北米での水素焼きGTCCプロジェクトに参画し、2020年代半ばからの実用化を目指している。大容量・高効率GTCCによる大規模な水素需要を喚起することで、当社は国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し、脱炭素社会の実現に貢献していく。本報では、脱炭素社会の実現に向けて、水素を利用した当社の発電用ガスタービンの検討開発状況、および世界の水素発電プロジェクトへの参画状況を中心に脱炭素社会実現に向けた取り組みを紹介する。

### 1. はじめに

2015年、第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21：21st Conference Of the Parties）で採択された地球温暖化防止の国際的枠組み“パリ協定”により、世界各国の政府や金融機関、投資家、企業が脱炭素化への取り組みを表明している。2020年からは協定の実運用が始まり、CO<sub>2</sub>排出量の削減目標達成に向けた動きが活発になっている。北欧の環境先進地域を含むEUは、2050年のカーボンニュートラルに向けた指針を表明し、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量世界第1位の中国、2位のアメリカの両国が温暖化対策で協力していく共同声明を発表した。エネルギーの消費大国であり、その大部分を輸入に依存する日本も、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。

日本の一次エネルギーの変換先は主に電力であり、全体の

44%を占める。その中でCO<sub>2</sub>を発生する火力発電は約8割を占め<sup>1)</sup>、その依存度は依然として高い。脱炭素社会の実現に向けて、火力発電設備の中でCO<sub>2</sub>排出量が最も少なく、かつ高効率な発電方式であるカスタービンコンバインドサイクル（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle）は、今後も旺盛なエネルギー需要に対応することに加えて、導入が進む再生可能エネルギーの発電量変動に対応できる高い運用性や、環境負荷に配慮した化石燃料の有効活用が求められている。

当社は、火力発電の脱炭素化技術に取り組んでいる。その中でGTCC発電設備については、その特徴を活かし、①燃焼ガス温度の高温化<sup>2)</sup>をはじめとする更なる高効率化・大容量化を進めてCO<sub>2</sub>削減を図ること、②増大する再生可能エネルギーによる発電量の変動に迅速・柔軟に対応できるようにガスタービンの運用性を高める技術開発<sup>3)</sup>を進めること、さらに、③燃焼してもCO<sub>2</sub>を排出しない水素（H<sub>2</sub>）や、アンモニア（NH<sub>3</sub>）を燃料とするガスタービンの技術開発を進めることで、2050年の脱炭素社会の実現を目指している。日本では脱炭素社会に向けた水素基本戦略<sup>4)</sup>として2030年頃に水素発電の商用化を目指すことを掲げており、技術開発・商品化から電力事業者への設備導入を進める必要がある。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）にご支援を頂き、発電用大型ガスタービンにおいて、燃料の天然ガスに水素を体積比で30%混ぜて燃焼できる燃焼器の開発に成功した<sup>5)</sup>。これにより水素社会へのスムーズな移行を促すことが期待される。また、当社はNEDOのご支援により、水素100%専焼に対応する燃焼器の開発を進めている。当社と同様に、他のガスタービンメーカーも水素焼き燃焼器の開発を進めており<sup>6)・9)</sup>、世界的に水素焼き燃焼器の開発が活発化している。

本報では、脱炭素社会の実現に向けて、水素を利用した当社の発電用ガスタービンの開発状況、および世界の水素発電プロジェクトへの参画状況を紹介する。

## 2. 脱炭素社会と発電用ガスタービン

脱炭素社会実現のため風力発電や太陽光発電に代表される再エネ発電の普及・拡大が今後も世界的に進むと見られる。2060年には再エネ利用によるCO<sub>2</sub>削減が全体量の約3割になる試算<sup>10)</sup>がある。気候や気象条件による出力変動が大きい再エネ発電は、余剰電力の有効利用が課題であり、蓄電池や水素等への変換によるエネルギー貯蔵が必要とされる。特に、変動周期が長く、大きいエネルギー容量が必要とされる場合は、水素等に変換して利用することが有効である。GTCC発電は、再エネの急激な出力変動に追従する高い運用性を有し、電力需要と再エネのギャップを柔軟に埋めることが可能である。また、水素を燃料とすることで大量かつ安定な水素需要を生むため、その期待はますます高まっている。

将来の脱炭素化に向けた当社のシナリオを図1に示す。中期的には、CO<sub>2</sub>回収 (CCUS : Carbon dioxide Capture, Utilization

and Storage) を活用した化石燃料由来の水素 (ブルー水素) の普及が見込まれる。GTCCは、これまでの安価で、安全で、安定的な化石燃料による発電を続けながら、発電効率を高めてCO<sub>2</sub>排出量を減らすこと、また、ブルー水素の利用を推進し、CO<sub>2</sub>を発生しない水素燃料やアンモニア燃料の混焼により発電するシナリオが考えられる。更に長期的には、コスト削減と技術革新により再生可能エネルギー由来の水素 (グリーン水素) が主流となり、これを利用した水素専焼発電により、CO<sub>2</sub>排出ゼロを達成するシナリオが考えられる。

大容量・高効率の発電用ガスタービンにおける水素利用には次の環境的・経済的メリットがある (図2)。

まず、既設のガスタービン設備の最小限の改造で、低炭素化あるいは脱炭素化が可能なことである。ガスタービン燃焼器と燃料供給系統以外の大規模な改造が不要なため投資コストを抑制でき、水素転換へのコストを下げ水素社会へのスムーズなシフトを促すことが期待される。

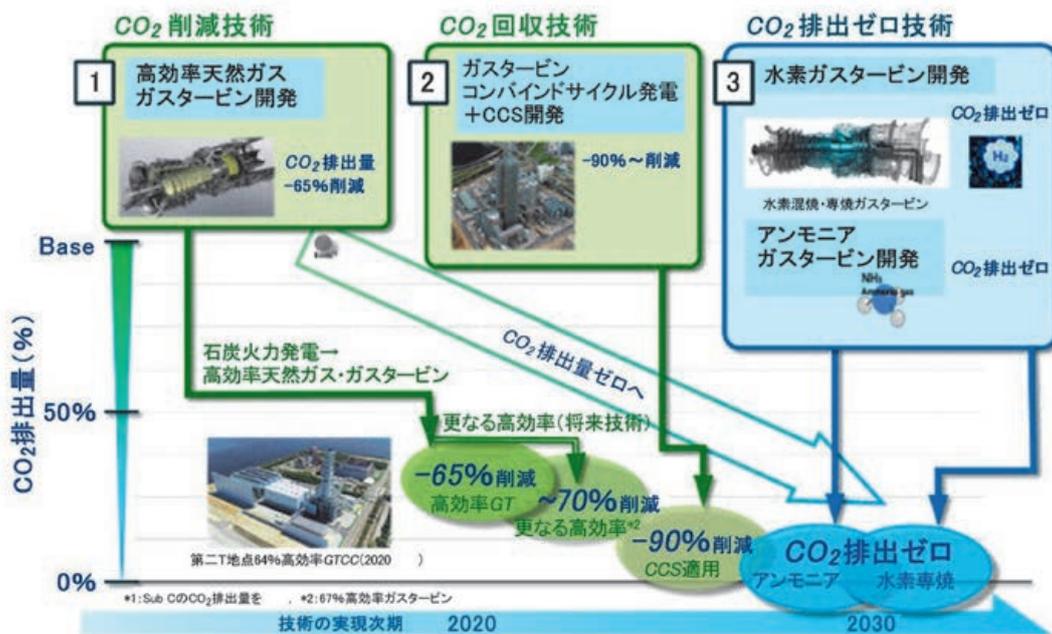


図1 脱炭素化に向けた当社のシナリオ



図2 水素燃焼ガスタービンにおける環境的、経済的メリット

次に、液体水素のみの利用にとどまらず、メチルシクロヘキサンやアンモニアといった水素キャリアで輸送されたものを水素化し、燃料として利用できるため、キャリアへの柔軟性が向上することや、燃料電池車等に比べて、低純度な水素を利用でき、水素コストの低減に貢献できる。

最後に、水素焚きガスタービンは1つの発電設備で燃料電池車200万台相当の水素を消費するため、大規模な水素需要が喚起され、サプライチェーンの拡大、水素コストの削減を促進することが期待される。

以上から、大容量・高効率の発電用ガスタービンにおける水素利用には脱炭素社会を実現するために、欠かすことのできない重要な役割があると考えられる。

### 3. 水素焚きガスタービン

水素焚きガスタービンの開発における重要な要素は、水素を燃焼させる燃焼器、燃焼技術の開発である。発電用大型ガスタービンの高効率化に伴うタービン入口温度（燃焼温度）の上昇によりNOx排出量は指数関数的に増加する。このため、当社の大型ガスタービン用燃焼器は、燃料と空気を予め混合して燃焼器内に投入する予混合燃焼方式として、ドライ低NOx (DLN : Dry Low NOx) 燃焼器を採用し、NOx排出量の低減を図っている。この方式は、従来の拡散燃焼方式に比べて燃焼器内の局所的な高温領域を低減できるため、拡散燃焼方式で採用される蒸気・水噴射によるNOx低減手法が不要で、サイクル効率の低下はない。一方、安定燃焼範囲が狭く、燃焼振動や逆火（フラッシュバック）の発生リスクがあり、未燃分が排出しやすい傾向がある。

水素は天然ガスと比較して燃焼速度が速い。そのため、予混合燃焼器で天然ガスと水素を混焼、あるいは水素専焼させた場合、天然ガスのみを燃焼させた場合よりも火災が燃焼器の上流に遡上する逆火が発生するリスクが高くなる。逆火により、当該部が焼損する可能性があるため、水素焚きガスター

ビン燃焼器は逆火発生の防止とともに、低NOx化と安定燃焼を図る必要がある。図3に、当社の水素混焼・専焼に対応する水素ガスタービン燃焼器の概要を示し、次項に開発状況を述べる。

#### (1) 水素混焼 Dry Low NOx (DLN) マルチノズル燃焼器

水素混焼による逆火発生リスクの上昇を防止することを目的として、従来のDLN燃焼器をベースに開発した水素混焼燃焼器を図4に示す。空気は圧縮機から燃焼器に供給され、旋回翼（スワラー）を通過して、旋回流となる。燃料はスワラー面に設けられた微小な孔から供給され、旋回流により周囲の空気と急速に混合する。一方、旋回流の中心部（以下、渦芯）には、低流速の領域が存在し、ここを火災が遡上することで逆火が発生すると考えられる。そこで、水素混焼燃焼器ではノズルの先端から空気を噴射して渦芯の流速を増加させ、渦芯の低流速領

		燃焼方式	低NOx技術	水素含有量 (Vol%)
大型 ガスタービン	既存技術	Type 1: 拡散燃焼器	N <sub>2</sub> 希釈 水/水蒸気添加	100%
	開発中	Type 2: 予混合燃焼器 (DLN)	ドライ	30%
	開発中	Type 3: マルチクラスター (DLN)	ドライ	100% (目標)
中小型 ガスタービン	既存技術	H-25 拡散燃焼器	水/蒸気噴射	100%
	開発中	H-25 マルチクラスター (DLN)	ドライ	30%
	開発中	H-25 マルチクラスター (DLN)	ドライ	100% (目標)
	既存技術	H-100 予混合燃焼器 (DLN)	ドライ	30%
開発中	H-100 マルチクラスター (DLN)	ドライ	100% (目標)	

図3 水素ガスタービン燃焼器

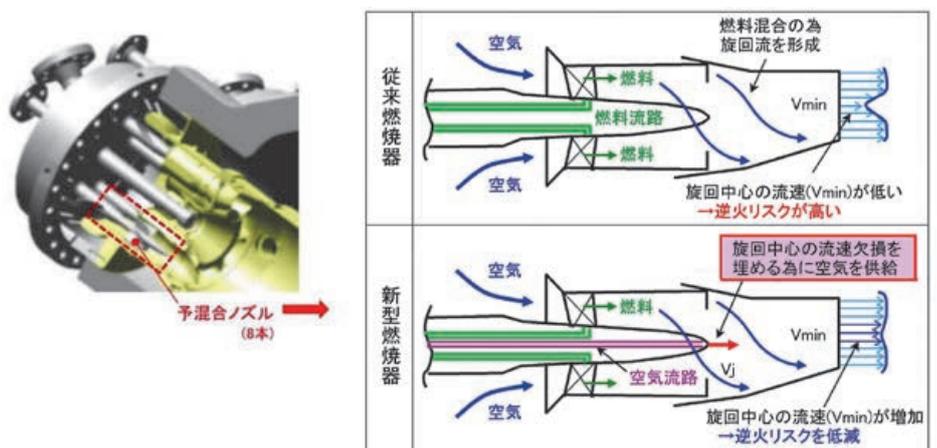


図4 水素混焼燃焼器

域を排除することで逆火発生の防止を図っている。

ガスタービン燃焼器の代表的な燃焼特性として、NO<sub>x</sub>と燃焼振動が挙げられる。これらの特性は燃焼圧力の影響を受けるため、実機相当の圧力条件での検証が必要となる。そこで、フルスケールの水素混焼燃焼器1本（実機では16本ないし20本の燃焼器を配置）を使用した実機圧力燃焼試験（以下、実圧燃焼試験）により、水素混焼の燃焼特性を評価した。試験の空気及び燃料条件として、タービン入口温度1600°C級ガスタービンの定格負荷相当条件における、水素混合割合に対するNO<sub>x</sub>の変化を図5に示す。水素混合割合の増加に伴って、NO<sub>x</sub>が上昇する傾向となった。これは、燃料中の水素割合が増加することにより、燃焼速度が上昇して燃焼器内に形成される火炎の位置が上流へ移動し、燃料と空気の混合が不十分な状態で燃焼するためと考えられる。しかし、水素30vol.%を混合した条件においても、天然ガスでの運転時（＝水素0vol.%）とほぼ同等であり、運用可能な範囲内であることを確認した。同条件での燃焼振動の圧力レベルの変化を図6に示す。燃焼振動圧力レベルについても、天然ガスでの運転時と比較して同等以下であり、水素混合割合の変化に対して感度が小さいこと確認した。また、水素30vol.%混焼において逆火は発生しなかった。以上の結果から、逆火の発生や燃焼振動レベルの上昇を伴わずに運用できる目途を得た。

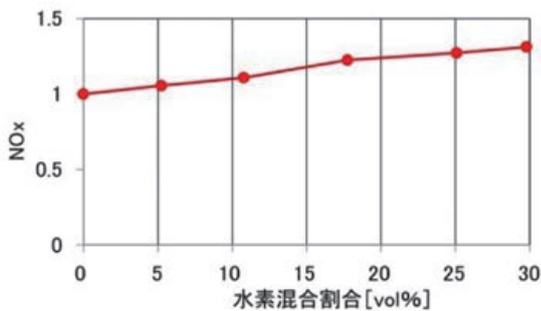


図5 水素混合割合に対するNO<sub>x</sub>変化  
（水素0%時のNO<sub>x</sub>を1とする）

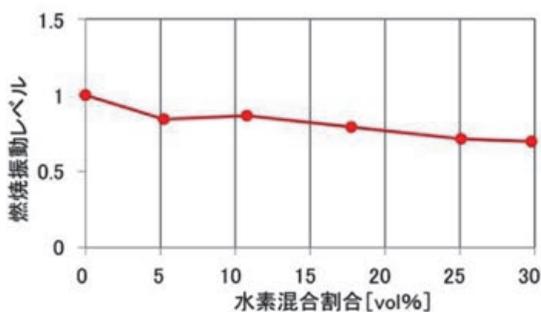


図6 水素混合割合に対する燃焼振動レベル変化  
（水素0%時の燃焼振動を1とする）

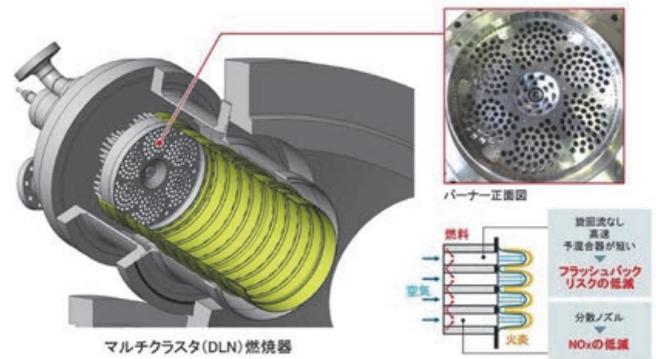


図7 マルチクラスタ燃焼器

## (2) 水素専焼マルチクラスタ燃焼器（図7）

水素が更に高濃度になると、前項の水素混焼燃焼器に採用した旋回流による燃料と空気の混合方式では、渦芯部の低流速域で逆火の発生リスクが高くなる。そこで旋回流を利用せず、より微小なスケールで空気と水素を混合できる混合方式の方が逆火耐性が高いと考えられる。水素専焼燃焼器は、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す実証試験発電所である大崎クールジェンに適用中の石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）用マルチクラスタ燃焼器<sup>11)</sup>をベースとして開発を進めている。上述の水素混焼燃焼器の燃料供給ノズル（8本）に対して、より数多くのノズルを有し、1本のノズルの孔を小さくし、空気を供給するとともに、そこに水素を噴射して小さなスケールで混合させ、火炎を分散することで、高い逆火耐性と低NO<sub>x</sub>燃焼を両立できる可能性を有する。

## (3) 拡散燃焼器

拡散燃焼器は、燃料と燃焼用空気を別々に燃焼室内に噴射する。予混合燃焼方式に比べて火炎温度が高くNO<sub>x</sub>排出量が増加するため、蒸気・水噴射によるNO<sub>x</sub>低減対策が必要になる。一方、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料組成変動への許容範囲も広い。

当社の拡散燃焼器を図8に示す。これまで、小型から中型のガスタービン発電設備においてオフガス（製油プラント等で



図8 拡散燃焼器

発生する副生ガス)の燃料利用により幅広い水素含有割合(～90vol.%)の燃料に関する実績を有するとともに、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発(WE-NET: World Energy NETwork)プロジェクトへの参画<sup>12)</sup>の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。後述のとおり、本拡散燃焼器をオランダのバッテンフォール・マグナム発電所の水素焚き転換プロジェクトに適用することを検討している。

#### 4. 海外での脱炭素に向けた ガスタービンプロジェクト

海外では、水素の製造、輸送、貯蔵、そして利用までを視野に入れた包括的な水素利用プランが多く示されている。例えば、大規模な再エネ由来のグリーン水素の生産から利用までのシステム、あるいは、化石燃料由来のブルー水素の生産・利用において水素製造時に発生するCO<sub>2</sub>をCCSで処理することも含めたシステムなどの開発が進められている。水素の利活用を通して、雇用を創出するとともに、既存インフラの再利用、複数の産業セクターにおける燃料多様化など様々な効果が期待され、国、自治体、企業の連携によりプロジェクトが進められている。ここでは、その中で、当社が参画する欧州、及び米国での水素ガスタービンプロジェクトを3件紹介する。1件目は、スウェーデンのエネルギー企業であるバッテンフォール社(Vattenfall)が運営する出力132万kW級の天然ガス焚きGTCCを水素焚きに転換するプロジェクトである。同プロジェクトは、図9に示すオランダ最北部のフローニンゲン(Groningen)州に位置するバッテンフォール・マグナム(Vattenfall Magnum)発電所に、当社が納入したM701F形ガスタービンを中核とする発電設備3系列のうち1系列を2027年までに100%水素専焼の発電設備へと切り替えるものであり、これまでに初期フェーズスタディー(FS:実

現可能性調査)を実施した。既存技術である拡散燃焼器の適用を検討し、水素燃焼への転換が可能であることを確認した。天然ガス焚きでは44万kWのGTCC発電設備1系列につき年間約130万トンのCO<sub>2</sub>を排出するが、水素焚きへの転換によりそのほとんどを削減できる。当社はガスタービンに関する具体的な改造範囲の計画、設計等、同プロジェクトの実現に向けて検討を継続中である。

2件目は、イギリス東海岸のハンバー川流域の三角州地帯における同国内最大規模の産業クラスター(Humber Cluster)の脱炭素化事業のプロジェクトである。ここでは、グローバルに事業展開する脱炭素化関連産業の企業・機関が連携し、天然ガスから製造した水素(ブルー水素)の活用や、CO<sub>2</sub>の回収・除去技術を適用し、2040年までにCO<sub>2</sub>排出実質ゼロ達成を目指す。当社は、このプロジェクトにおいて、産業クラスターにあるソルトエンド(Saltend)発電所(図10)に納入した天然ガス焚きGTCC発電設備のM701F形ガスタービンを水素焚きに転換する技術検討・フェーズスタディーに着手し、水素混焼率30vol.%から始め、将来的に水素専焼を視野に入れて検討を進めている。

3件目は、米国ユタ州のインターマウンテン電力が計画する水素を利用したGTCC発電プロジェクトである。当社は84万kW級のM501JAC形ガスタービン2基を中核とするGTCC発電設備を受注し、2025年に30vol.%の水素混焼、2045年までに水素専焼での発電を目指す。本プロジェクトは、石炭火力発電設備更新により建設されるもので、水素混焼率30vol.%GTCCへの更新により、最大で年間460万トンのCO<sub>2</sub>排出量削減に寄与できる見込みである。燃料の水素は、当社が参画するユタ州内の再エネ由来電力によるエネルギー貯蔵事業からの活用が期待されており、発電した電力は、インターマウンテン発電所からロッキー山脈をまたいで、カリフォルニア州、及び



図9 オランダのバッテンフォール・マグナム発電所



図10 イギリスのソルトエンド発電所



図11 実用化に向けたスケジュール

ユタ州に供給される。

当社は、これらを含めた国内外での水素利用発電のプロジェクト参画を通じて、当社が掲げるエナジートランジション（低環境負荷エネルギーへの転換）を進め、火力発電への水素利活用の需要を喚起していくとともに、水素の供給・輸送・貯蔵に関する国際的な水素バリューチェーンの構築にも関わることで、脱炭素社会の実現に貢献していく。

## 5. 実用化に向けたスケジュール

2020年代半ばからの水素発電の具体的な導入時期に向けて、これまでの要素技術開発の成果をもとに実機ガスタービンを用いた実証を進める。当社ガスタービン開発は、基本設計の段階で各要素の検証試験をして、その成果を詳細設計に反映し、最終的に実機を用いて実証する。この開発サイクルを同一の工場内で実施することで、より迅速かつ確実な開発・製品化を進めている。水素ガスタービンについても実用化に向けて図11に示すとおり、大型ガスタービン水素混焼（30vol.%）を実証し、商用化を開始する。その後、大型ガスタービン水素専焼の米国ユタ州プロジェクトでの商用化を目指す。中小型ガスタービン水素専焼についても、H-25ガスタービンを用いて実証を予定している。

## 6. まとめ

本報では、水素を利用した当社の発電用ガスタービンの開発状況、および世界の水素発電プロジェクトへの参画状況を紹介した。本報で紹介した水素焼きガスタービンの開発内容は、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（水素社会構築技術開発事業：プロジェクトコードP14026）の成果の一部である。同助成事業において水素・天然ガス混焼方式のガスタービンの燃焼器の開発に取り組み、30vol.%の混焼条件においてガスタービンの運転が可能な目途を得た。また、同助成事業のもと、水素専焼燃焼器の開発を進めている。

当社は、2020年半ば頃から開始が期待されるCCSを組み合わせた化石燃料由来の水素利用、2050年の再エネ由来の水素利用が主流になる社会に向けて、当社の開発する水素焼きガスタービンを通して、国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し、脱炭素社会の実現に貢献していく。

## 謝辞

本報で紹介した水素混焼燃焼器、水素専焼燃焼器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）のご支援により研究開発したものである。ここに感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁, 令和元年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2020) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/index.html>
- 2) 石坂浩一ほか, 1700°C級超高温ガスタービンの要素技術の開発, 三菱重工技報, Vol. 54, No.3, pp.23-31 (2017)
- 3) 松見勇ほか, 負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol.47, No.1, pp.14-20 (2019)
- 4) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略, (2017) <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>
- 5) 井上慶ほか, 水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発, 三菱重工技報, Vol.55, No.2, pp.1-5 (2018)
- 6) York, et al., Development and Testing of a Low NOx Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines., ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. Vol.135, No.2, 022001 (2013)
- 7) Magnusson, et al., Operation of SGT-600 (24 MW) DLE Gas Turbine with Over 60% H2 in Natural Gas., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020, GT2020-16332 (2020)
- 8) Ciani, et al., Sequential Combustion in Ansaldo Energia Gas Turbines: The Technology Enabler for CO2-Free, Highly Efficient Power Production Based on Hydrogen., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020, GT2020-14794 (2020)
- 9) 堀川敦史ほか, 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, 日本ガスタービン学会誌, Vol.49, No.4, pp.284-293 (2021)
- 10) 経済産業省, CCSを取り巻く状況 CCSの実証および調査事業の在り方に向けた有識者検討会, [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs\\_jissho/pdf/001\\_05\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_jissho/pdf/001_05_00.pdf)
- 11) 遠山克己, 大崎クールジェンプロジェクトの進捗状況, 日本ガスタービン学会誌, Vol.47, No.4, (2019), pp.223-230
- 12) 久留正敏ほか, 水素利用国際クリーンエネルギーシステム(WE-NET)用主機の開発, 三菱重工技報, Vol.35, No.1, pp.56-59 (1998)