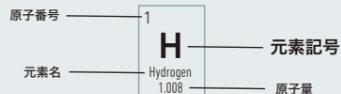


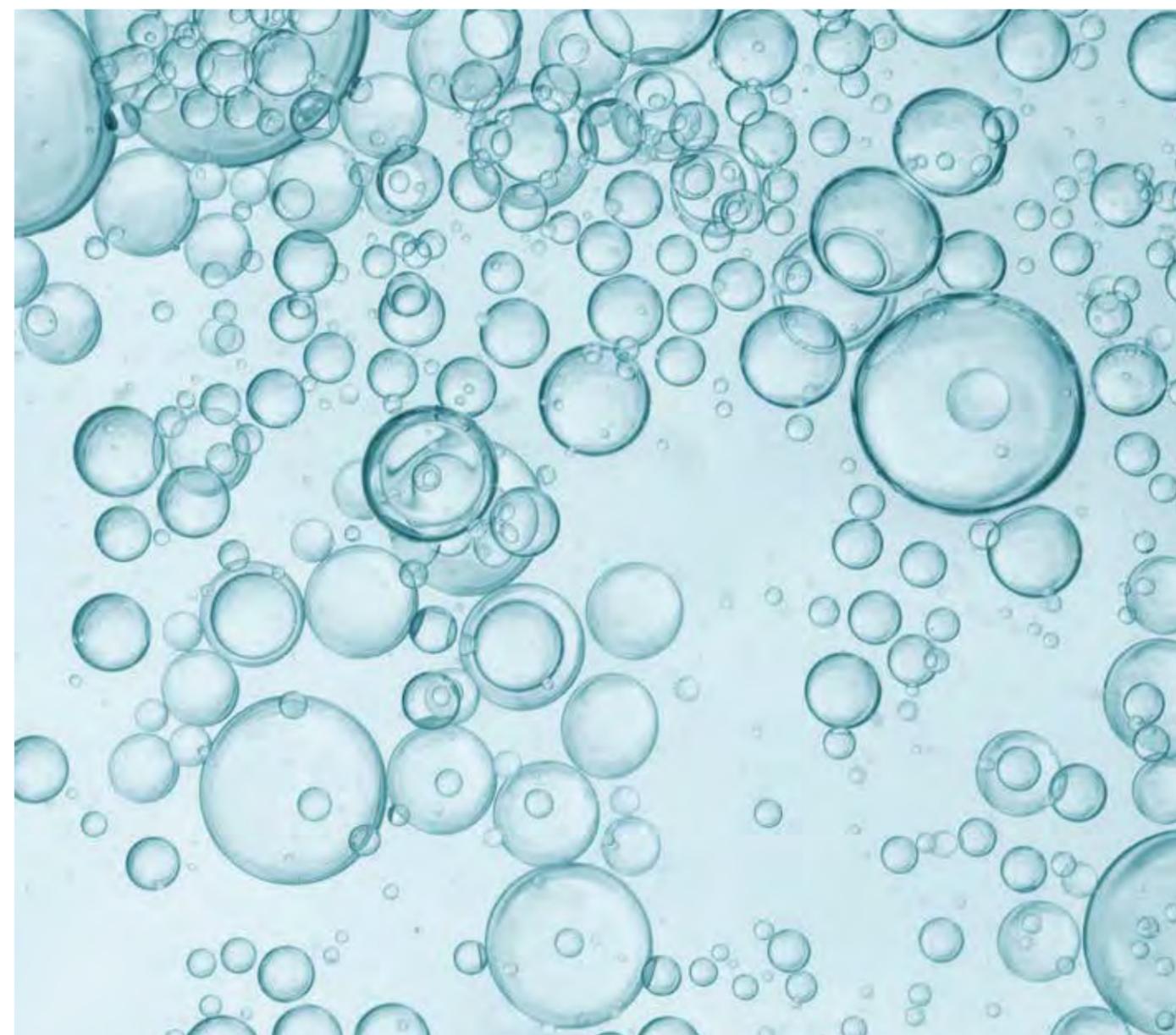
元素周期表

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 H Hydrogen 1.008 | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 He Helium 4.003 |
| 3 Li Lithium 6.941 | 4 Be Beryllium 9.012 | | | | | | | | | | | 13 B Boron 10.81 | 14 C Carbon 12.01 | 15 N Nitrogen 14.01 | 16 O Oxygen 16.00 | 17 F Fluorine 19.00 | 10 Ne Neon 20.18 |
| 11 Na Sodium 22.99 | 12 Mg Magnesium 24.31 | | | | | | | | | | | 13 Al Aluminum 26.98 | 14 Si Silicon 28.09 | 15 P Phosphorus 30.97 | 16 S Sulfur 32.07 | 17 Cl Chlorine 35.45 | 18 Ar Argon 39.95 |
| 19 K Potassium 39.10 | 20 Ca Calcium 40.08 | 21 Sc Scandium 44.96 | 22 Ti Titanium 47.87 | 23 V Vanadium 50.94 | 24 Cr Chromium 52.00 | 25 Mn Manganese 54.94 | 26 Fe Iron 55.85 | 27 Co Cobalt 58.93 | 28 Ni Nickel 58.69 | 29 Cu Copper 63.55 | 30 Zn Zinc 65.38 | 31 Ga Gallium 69.72 | 32 Ge Germanium 72.63 | 33 As Arsenic 74.92 | 34 Se Selenium 78.97 | 35 Br Bromine 79.90 | 36 Kr Krypton 83.80 |
| 37 Rb Rubidium 85.47 | 38 Sr Strontium 87.62 | 39 Y Yttrium 88.91 | 40 Zr Zirconium 91.22 | 41 Nb Niobium 92.91 | 42 Mo Molybdenum 95.95 | 43 Tc Technetium (99) | 44 Ru Ruthenium 101.1 | 45 Rh Rhodium 102.9 | 46 Pd Palladium 106.4 | 47 Ag Silver 107.9 | 48 Cd Cadmium 112.4 | 49 In Indium 114.8 | 50 Sn Tin 118.7 | 51 Sb Antimony 121.8 | 52 Te Tellurium 127.6 | 53 I Iodine 126.9 | 54 Xe Xenon 131.3 |
| 55 Cs Cesium 132.9 | 56 Ba Barium 137.3 | 57-71 Lanthanoid | 72 Hf Hafnium 178.5 | 73 Ta Tantalum 180.9 | 74 W Tungsten 183.8 | 75 Re Rhenium 186.2 | 76 Os Osmium 190.2 | 77 Ir Iridium 192.2 | 78 Pt Platinum 195.1 | 79 Au Gold 197.0 | 80 Hg Mercury 200.6 | 81 Tl Thallium 204.4 | 82 Pb Lead 207.2 | 83 Bi Bismuth 209.0 | 84 Po Polonium (210) | 85 At Astatine (210) | 86 Rn Radon (222) |
| 87 Fr Francium (223) | 88 Ra Radium (226) | 89-103 Actinoid | 104 Rf Rutherfordium (267) | 105 Db Dubnium (268) | 106 Sg Seaborgium (271) | 107 Bh Bohrium (272) | 108 Hs Hassium (277) | 109 Mt Meitnerium (276) | 110 Ds Darmstadtium (281) | 111 Rg Roentgenium (280) | 112 Cn Copernicium (285) | 113 Nh Nihonium (278) | 114 Fl Flerovium (289) | 115 Mc Moscovium (289) | 116 Lv Livermorium (293) | 117 Ts Tennessine (293) | 118 Og Oganesson (294) |
| 57 La Lanthanum 138.9 | 58 Ce Cerium 140.1 | 59 Pr Praseodymium 140.9 | 60 Nd Neodymium 144.2 | 61 Pm Promethium (145) | 62 Sm Samarium 150.4 | 63 Eu Europium 152.0 | 64 Gd Gadolinium 157.3 | 65 Tb Terbium 158.9 | 66 Dy Dysprosium 162.5 | 67 Ho Holmium 164.9 | 68 Er Erbium 167.3 | 69 Tm Thulium 168.9 | 70 Yb Ytterbium 173.0 | 71 Lu Lutetium 175.0 | | | |
| 89 Ac Actinium (227) | 90 Th Thorium 232.0 | 91 Pa Protactinium 231.0 | 92 U Uranium 238.0 | 93 Np Neptunium (237) | 94 Pu Plutonium (239) | 95 Am Americium (243) | 96 Cm Curium (247) | 97 Bk Berkelium (247) | 98 Cf Californium (252) | 99 Es Einsteinium (252) | 100 Fm Fermium (257) | 101 Md Mendelevium (258) | 102 No Nobelium (259) | 103 Lr Lawrencium (262) | | | |



出典：「科学技術週聞」(文部科学省) <https://stw.mext.go.jp>

水素発電 ハンドブック



三菱パワー株式会社

〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-3-1

TEL 045-200-6100 FAX 045-200-7989

power.mhi.com/jp

MP43-00GT02J1-B-0,(1.0),21-03, ZEG

INTRODUCTION

水素。

原子番号 1。

誰もが最初に覚える元素。

水の惑星 地球において、生物に不可欠な水を構成し、宇宙でもっとも豊富に存在し、もっとも軽く、速く拡散し、そして燃える。

「燃える」は文明の基である。エネルギーを生み出す根源となるからだ。

エネルギーは人々の生活に密接に関わり、国や国際社会の中でも最重要課題である。

同時に、CO₂削減方針は国際的に明確に示されている。

それゆえ、エネルギーの世界は今、大きな転換期を迎えている。

再生可能エネルギーなどのエネルギーソースの多様化と新時代のベストミックス。

水素は燃焼においてCO₂を排出しない、クリーンなエネルギーである。

IT化の加速、途上国の経済発展と、今後、さらに増加が見込まれる世界の電力需要で水素発電は、そのクリーンさと豊富な存在ゆえ、有力な選択肢である。

激しく燃える水素をコントロールし、最大限に活用する水素発電。

技術開発は国家レベルで開発競争が行われ、多くの課題に技術者達が挑む。

INDEX

3 MESSAGE FROM CEO

5 脱炭素へ急加速 水素発電の最前線を守る

9 水素ガスタービン30%混焼技術が完成 CO₂フリーへの道のり

<技術論文>

16 水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発

21 CO₂フリー社会の実現に向けた水素燃焼ガスタービン

28 1650°C級JAC形ガスタービンを中核とする第二T地点実証発電設備での検証結果

38 水素社会へ向けた次世代大型燃料電池SOFCの展開

44 SOFC-MGT ハイブリッドシステムの市場導入に向けた取り組みについて

48 便覧

「水素発電ハンドブック」改訂版(第2版)発行にあたって

2019年6月に三菱パワーが「水素発電ハンドブック」初版を発行してから、およそ1年半の歳月が経過いたしました。この間にカーボンニュートラル社会や、その実現への貢献が期待される水素エネルギーに関する動きは日増しに大きくなっています。

本改訂版(第2版)では、新たな動向を紹介するとともに、巻末には水素関連の工学的な知識をまとめ、便覧として掲載いたしました。皆さまのお役に立つ一冊となれば幸いです。

MESSAGE FROM CEO

カーボンニュートラル社会の実現に向けて

CO₂を排出しない発電技術で、脱炭素化に貢献します。



世界はいま、「脱炭素革命」ともいえる大きな変化に直面しています。世界のエネルギーを取り巻くビジネス全体が脱炭素へ向けて大きく舵を切り、各国のリーダーによるカーボンニュートラルへの決意表明が相次いでいます。

一方で、人口増加や経済発展による電力需要の増大、風力発電、太陽光発電など、その出力を自然条件に依存する再生可能エネルギーの普及拡大により、安定的な電力供給に対するニーズは、いっそう高まりを見せています。

三菱パワーは、三菱重工グループ各社との連携のもと、「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）という再生可能エネルギー拡大と経済性の両立に向けたソリューションの道筋を示し、また、この実現に向けた技術開発の方向性を定めて

きました。発電技術・ソリューションを提供する三菱重工グループの中核をなす事業会社として、これまで培った高効率な発電技術・環境技術の開発により「火力発電の脱炭素化によるCO₂削減」に向け、水素・アンモニアなどといったCO₂を排出しない燃料の発電利用に取り組んでいます。

このハンドブックで紹介する水素発電技術は、火力発電のなかで現在もっともCO₂排出量の少ないガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)の燃料を、天然ガスから燃焼時にCO₂を排出しない水素へと転換するもので、世界規模での脱炭素化に大きく貢献する技術です。三菱パワーの水素発電技術は、既存の設備を最大限利用し、水素発電に転換することにより、導入コストの抑制を可能にします。

火力発電においてCO₂を排出しない水素発電は重要な役割を担うこととなります。大型火力発電の水素利用量は、40万kW級のGTCC発電所で、燃料電池自動車約200万台分に相当します。三菱パワーは、水素発電技術の開発により、大規模な水素利用と、これによるコスト低減の好循環を生み出し、水素社会の実現に貢献することを目指します。

また、電力市場における需要の多様化に対応するため、三菱パワーは固体酸化物形燃料電池(SOFC)の開発も進めており、大型GTCCによる集中型電源とSOFCによる分散型電源の双方において取り組みを進めています。

三菱パワーを含む三菱重工グループは、液体燃料として水素を利用するロケットエンジンや水素製造設備など、様々な水素関連製品の製造・納入実績を有し、発電利用においても1970年頃から現在まで、約50年にわたり水素を含有する副生ガス利用の豊富な実績を有しています。また、機器供給だけでなくカーボンフリー水素やアンモニアの製造、輸送、貯蔵から利用に至るまでの燃料バリューチェーン全体についても取り組んでいます。私たちは、確かな技術力で、カーボンニュートラル社会の実現に向けエネルギーの脱炭素化を促進することで地球環境の保全に貢献していきます。

取締役社長
河相 健

脱炭素へ急加速 水素発電の最前線を走る



加速する水素社会実現に向けた取り組み

2020年10月14日、水素の利活用をグローバルな規模で推進すべく関係各国が歩調を合わせ一層の連携を図る場として、「水素閣僚会議特別イベント」がオンライン開催された。23の国・地域・国際機関等の代表者、企業の代表者が参加。水素発電の実用化に取り組む三菱パワーからは六山（むやま）社長付執行役員兼CTOが出席。「Beyond Zero Societyに向けた水素発電」として、水素発電の重要性、および三菱パワーの世界での活動について講演した。



社長付執行役員兼CTO 六山亮昌

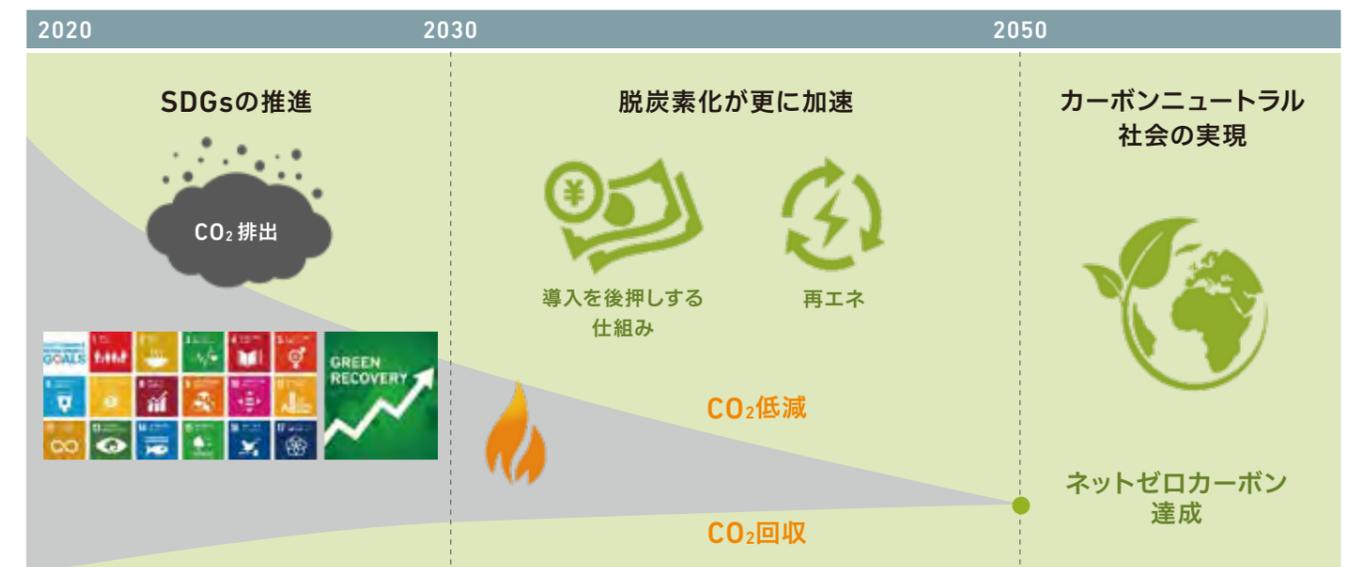
欧州でも水素活用の動きが広がっている。2017年1月、水素を利用した新エネルギー移行に向けたグローバルなイニシアチブである水素協議会 (Hydrogen Council) が発足。エネルギー・運輸・製造業の世界的なリーディングカンパニー13社で発足したが、年々加盟社が増加し、2021年1月現在109社がメンバーとなっている。三菱重工もサポーターメンバーとして加盟、三菱パワーは三菱重工グループの中核企業として活動に参画している。

水素社会へ、世界の足並みは揃った

菅首相は、2020年10月26日の所信表明演説で、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した。また、その前月には中国の習近平国家主席が2060年までにカーボンニュートラルを目指すとしている。EUは既に2019年までに、2050年カーボンニュートラル目標の実現方法を発表。そして2021年1月、アメリカではジョー・バイデン氏が新大統領に就任し、パリ協定への復帰に向けた文書に署名した。このように、世界はカーボンニュートラルの実現に向けて力強く動き始めた。そこでますます期待が高まっているのが、燃焼時にCO₂を排出しない水素の発電利用である。

カーボンニュートラル社会へのロードマップ

現在、世界の電力の多くは、安価で、安全で、安定的な化石燃料による火力発電で賄われている。カーボンニュートラル社会の実現にはこれまでの発電を続けながら、まずはCO₂の排出量を減らす、CO₂を回収する。この2つを推進する一方で、再生可能エネルギーの利用を増やし、燃やしてもCO₂を発生しない水素燃料やアンモニア燃料の混焼による発電を行う。さらに、水素を混焼から専焼へと燃やす比率を増やしていくことで、全体として排出されるCO₂をゼロにするというロードマップが現実的だ。

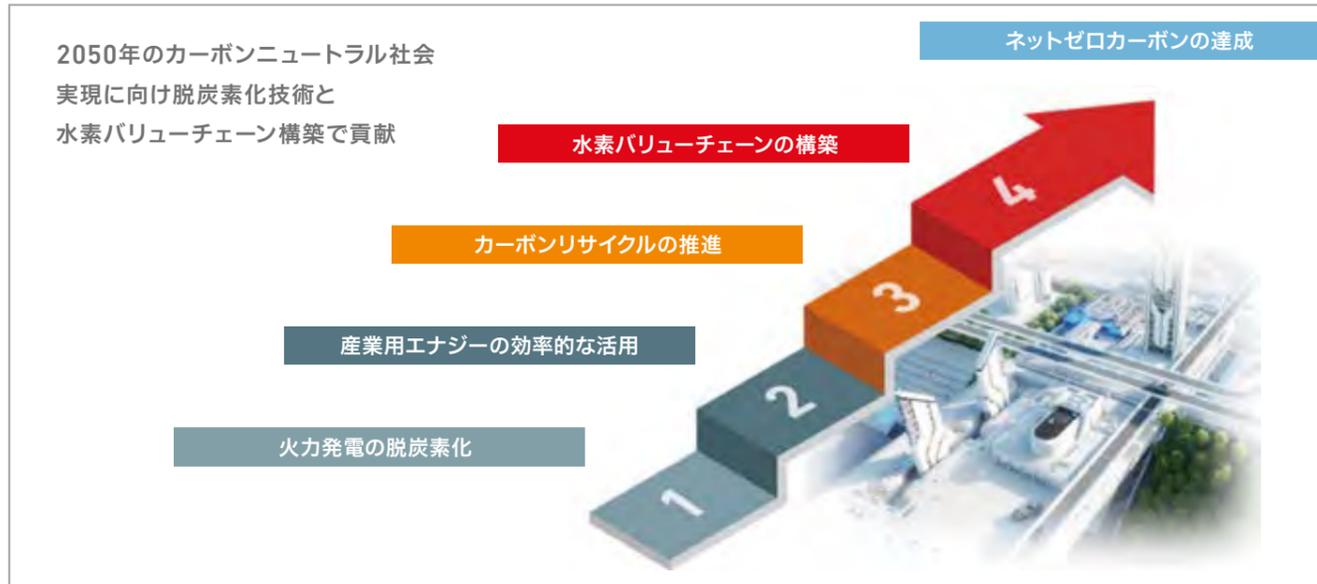


世界はカーボンニュートラル社会へ移行。CO₂低減・回収を推進し、2050年までに達成。

エナジートランジションとソリューション

三菱重工グループは、カーボンニュートラル社会の実現に必要な取り組みを「火力発電の脱炭素化」「産業用エネルギーの効率的な活用」「カーボンリサイクルの推進」「水素バリューチェーンの構築」

と段階的に整理しており、各段階でソリューションを提供していく。既に世界の大型プロジェクトに参画して、その成功を支援している。



三菱パワーの水素プロジェクト

天然ガス焚きタービンを水素専焼へ

三菱パワーは、オランダのマグナム発電所における天然ガス焚きガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)発電所を水素焚きに転換するプロジェクトに参画している。三菱パワーの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100%水素専焼に切り替えるというものだ。このプロジェクトを通じて、火力発電事業者の水素利活用に向けた需要を喚起していく。また、三菱重工グループはカーボンフリーな水素供給のために欠かせない回収・貯留(CCS:Carbon dioxide Capture and Storage)技術を有しており、水素の供給・輸送・貯蔵に関する国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し、水素社会の実現に貢献している。

官民による地域のグリーン水素戦略

アメリカ西部では三菱パワーの協力により、ウエスタン グリーンハイドロジェン イニシアティブ(WGHI)が始動。WGHIは、大規模なグリーン水素ベースで再生可能エネルギーの貯蔵を含む、地域のグリーン水素戦略の開発を支援する取り組みで、カナダの2つの州も参画している。グリーン水素の活用によりアメリカ西部のエネルギーの信頼性と独立性を高め、地域の雇用を創出するとともに、不経済なグリッド構築の回避、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の多様化など、様々な効果が期待されている。

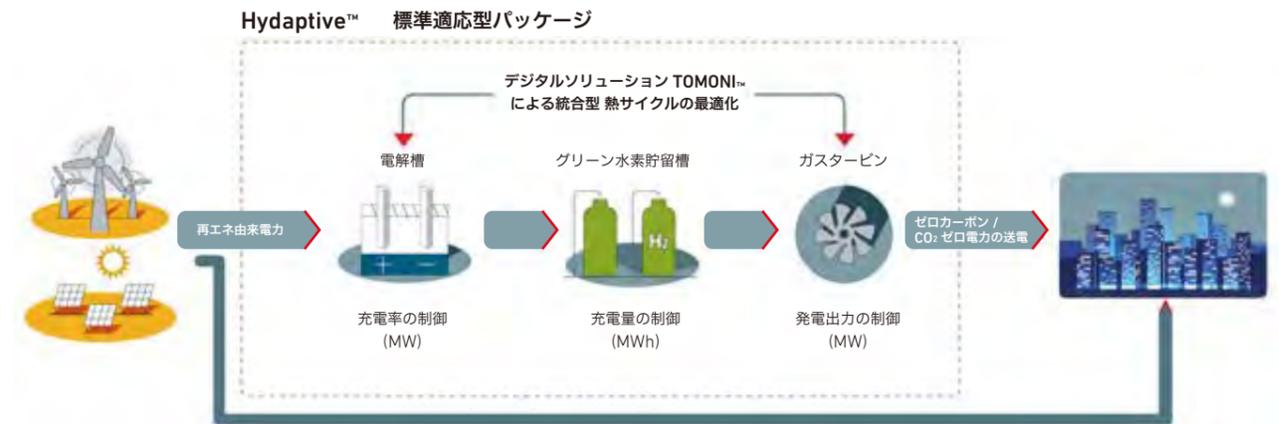


Vattenfall社のマグナムGTCC発電所

世界初の統合グリーン水素ソリューション

三菱パワーは、電力バランスの調整や燃料貯蔵などに関する世界初の統合グリーン水素ソリューションを、アメリカで複数のプロジェクトに対して提供し始めている。このソリューションは、Hydaptive™パッケージとHystore™パッケージからなる。Hydaptive™パッケージは、オンサイトで製造・貯蔵されたグリーン水素をガスタービンの燃料とし、ほぼ瞬時の電力調整を可能にする。そして、Hystore™パッ

ッケージは、Hydaptive™パッケージと大規模なオフサイト水素製造・貯蔵インフラをつなぎ、電力需要のピークにもカーボンフリー燃料である水素を提供する。これらにより、再生可能エネルギー、ガスタービン、グリーン水素、燃料貯蔵技術などを統合する際に発電及び送電事業者が直面する課題を解消し、100%カーボンフリーへの流れを加速する。

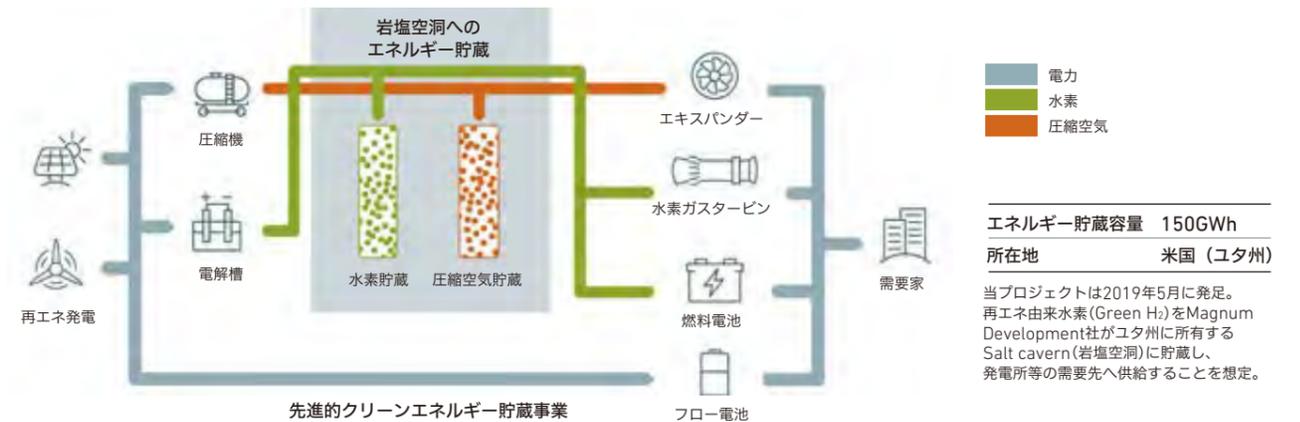


- Hydaptive™パッケージが100%カーボンフリー発電を加速させる
- 電力需要に適合させた、大容量のエネルギー貯留技術
 - 脱炭素化とコストの低減を両立する標準パッケージ
 - 既存の負荷制御可能な発電に柔軟性を追加する統合型テクノロジー

岩塩空洞へのグリーン水素貯蔵

三菱パワーは、米国のマグナムデベロップメント社とユタ州とともに、先進的クリーンエネルギー貯蔵事業(Advanced Clean Energy Storage Project)を推進している。風や太陽光による発電で水の電気

分解を行い、製造されたグリーン水素を、マグナムデベロップメント社がユタ州に所有する岩塩空洞に貯蔵。それを発電所などに供給するというものだ。このエネルギー貯蔵容量は、150GWhにもなる。



三菱パワーは、世界最先端の水素燃焼技術を持っている。その水素ガスタービンは、既存の発電所設備に対して、最小限の改造で適用が可能となる。2018年には既に水素30%混焼を達成しており、2025年までに水素100%専焼を目指している。温暖化ガスの問題が指摘されるようになって久しいが、いよいよその出口が近づいてきた。世界全体をサステナブルな社会へと変革するためには、大型

水素発電を欠かすことはできない。技術開発も着々と進展している。大きな障壁であるグリーン水素の製造・調達コストも、やがて下げることができるだろう。三菱パワーは、カーボンフリーな水素社会の実現のために、あらゆる角度から技術を提供できる企業として、世界の期待を背負い、その使命を果たしていく。

水素ガスタービン 30%混焼技術が完成 CO₂フリーへの道のり



水素エネルギーへの期待と技術

旺盛なエネルギー需要と世界的な脱炭素化という、アンビバレントに挑む

「電力は産業の要。需要があれば供給するのが電力会社であり、電気を作るために必要となるのが発電設備である。一方、CO₂を排出する発電に対する社会の目は年々厳しくなっている。電力はほしい、しかしCO₂は出したくない。ならば、CO₂ゼロの火力発電に挑戦するのが、技術者の使命」

こう語るのは、三菱パワーターボマシナリー本部 ガスタービン技術総括部 副総括部長、谷村聡。燃焼時にCO₂を排出しない、水素を燃料としたガスタービン開発の先頭に立つ人物だ。

日本の一次エネルギーの主な変換先は電力で、実に全体の46%を占める。そして、電力の燃料別供給量割合は、LNG38%、石油等7%、石炭32%と、火力発電が77%を占めている(2018年現在)。

エネルギーの選択肢が着実に増える中で、今なお、その多くを担っているのが火力発電だ。

「従来から化石燃料を使用する火力発電は、技術革新による高効率化などによってCO₂削減の努力を続けてきました。最新のガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)のCO₂排出量は、石炭火力の半分以下。しかしガス火力もCO₂を排出していることには変わりはない。その事実から目を背けることはできないのです。技術者だからこそ、世界の課題、そして期待には敏感です。旺盛なエネルギー需要とCO₂削減。このアンビバレントで高い要求に、技術者は応えなければならない」

水素社会実現への確かなロードマップ

「私たちが取り組んでいるのが、水素ガスタービンの開発です」
谷村が注力するのは、火力発電でありながら発電時にCO₂を排出しない水素発電。

国の水素基本戦略では、2030年頃に水素発電の商用化を目指すことが掲げられている。

だが、この先10年余りで、水素発電の商用化は可能であろうか。技術開発に成功しても、発電所のリニューアルを実施できる事業者がどれだけ存在するのか。

これに対して谷村は、「リニューアルの予定があるところから水素発電設備を入れたとしても、たったの10年では、水素発電への転換は進まない。そこでわれわれは、既存のガスタービン設備を使って水素発電ができるシステムを考えたのです」と答える。

谷村らは、ガス火力の燃料であるLNGに水素を30%混ぜ使用することができるガスタービン用燃焼器の開発に成功。水素の燃焼により懸念されるNO_xの排出も、既存のガス火力レベルに抑制。70万kW相当(タービン入り口の温度1,600°C)の出力に対応できる技術で、従来のガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)と比較し、発電時のCO₂排出を約10%削減できる。

この技術は、燃焼器以外の発電設備の大規模なリニューアルを必要としない。水素転換へのコストとハードルを下げ、水素社会へのスムーズなシフトを促すという戦略である。

しかし、既存の設備に水素を混ぜることは簡単なことなのだろうか？ 混合、燃焼、水素の性質と挙動。それらに起因するLNGとは異なる条件があるはずだ。谷村が実現した水素混焼技術とはどのようなものなのだろうか。技術的ブレークスルーは？ そしてその次の一手は？ ここで、谷村の、水素との戦いの軌跡を紹介する。



水素30%混焼の成功が、水素社会への大きな扉を開く

燃えやすい水素と、「安全性」との戦い

原子番号1。誰もが最初に覚え、もっとも軽い元素である水素。燃えるときに出るのは水だけ、というクリーンさ。だが、クリーンであるという利点とは裏腹に、扱いにくい物質でもある。激しく燃えることから、爆発のイメージが付きまとう。燃焼性が高く静電気程度のエネルギーが加わると着火する、燃焼範囲も広い。燃焼性が高い水素ならではの難しさがあるというわけだ。そのため、水素30%混焼を実現するためには、技術者は多くの課題をクリアしなければならない。

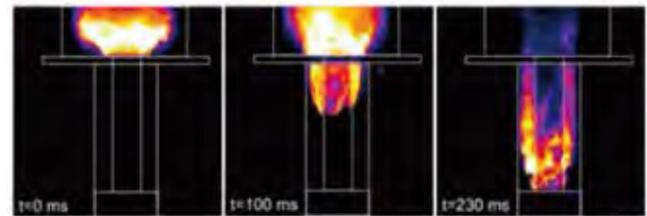
「水素20%混焼ならば、既存のガスタービンをそのまま使うことが可能です。しかし、30%混焼は、ガスタービン設計者にとっては、大きなチャレンジです。燃焼特性を理解し、空気との混合、そのときの挙動などをコントロールしなければなりません」
優れた物質であっても、それをコントロールし、設備には耐久性を持たせ、品質の高い成果を継続的に得ることができなければ、それは技術とは言えない。その課題を解決するのが技術者である。

逆火。燃焼振動。そして、NOx。これらが、水素30%混焼実現に立ちはだかる壁だ。

水素の特性と、水素と空気の混合に由来する、「逆火」。逆火とは、燃焼器内の火炎が、投入される燃料を伝って逆戻りしてしまう現象のことである。水素は速く燃えるため、逆火が起こりやすい。

さらに燃料の混合方式も、逆火防止にとっての難題を与えることになる。三菱パワーには、「拡散燃焼」という燃料と空気を別々に燃焼器に投入する方式で、既に水素100%を適用した実績があるが、この技術ではNOx値が高くなる。一方で、燃料と空気をあらかじめ混合して燃焼器内に投入する「予混合燃焼」という方式では、低NOx燃焼が可能なのだが、水素を含有した燃料は逆火を起こしやすい。距離を十分に取ればより十分に混合することができるうえ、低NOxにもつながるが、それは逆火のリスクを高めることにつながってしまう。そこで、スワラノズル(先の尖ったノズル)を改良。ノズル中心部にてできる低流速部分を消滅させることに成功し、逆火耐性を大きく向上させた。

燃焼器以外の場所で燃料が燃えることは絶対に避けなければならない。逆火を防止できなければ、水素ガスタービンの成功はない。



出典: University of Michigan at the 2014 University Turbine Systems Research Workshop

燃焼器を破壊する燃焼振動を制御する驚くべき技術

さらに立ちはだかるのは「燃焼振動」である。燃焼器内は1,600°Cの高温になるが、非常に高い熱負荷を与えられた燃焼器の筒は、自身を持つ特定の音響固有値によって非常に大きい音を発することが分かっている。これが燃焼振動という現象である。

音の振動が燃焼により生じる火炎の振動と一致すると、増幅して非常に大きな力が発生する。特に短い区間で燃焼する水素では、炎と振動が一致しやすくなり、燃焼振動を起こしやすい。
かなりの音なのだろうか――？
「『うるさい』なんてものではない。ひとたび燃焼振動が起こったら、燃焼器が一気に破壊されます」
ごう音とともに燃焼器を破壊する、燃焼振動。「これを避けるため、燃料の燃える位置、燃やし方を工夫するほか、吸音装置を設置するなどの工夫を重ねています」

これら、ひとつひとつの現象を抑え、条件を満たしながら、メンテナンス性能を上げ、設備全体の性能を向上させつつ、設備の寿命をも長くすることが求められている。燃料供給のためのノズルの形状と材質の最適化、燃焼器の素材と形状、遮熱セラミックスコーティングの材質や粒径の工夫など、最良の素材、最良の形状、最良の組み合わせを見つけ、それらを積み重ねていく試行錯誤こそが、CO₂フリーの発電システム、そしてカーボンフリー社会の実現を着実に手繰り寄せる。

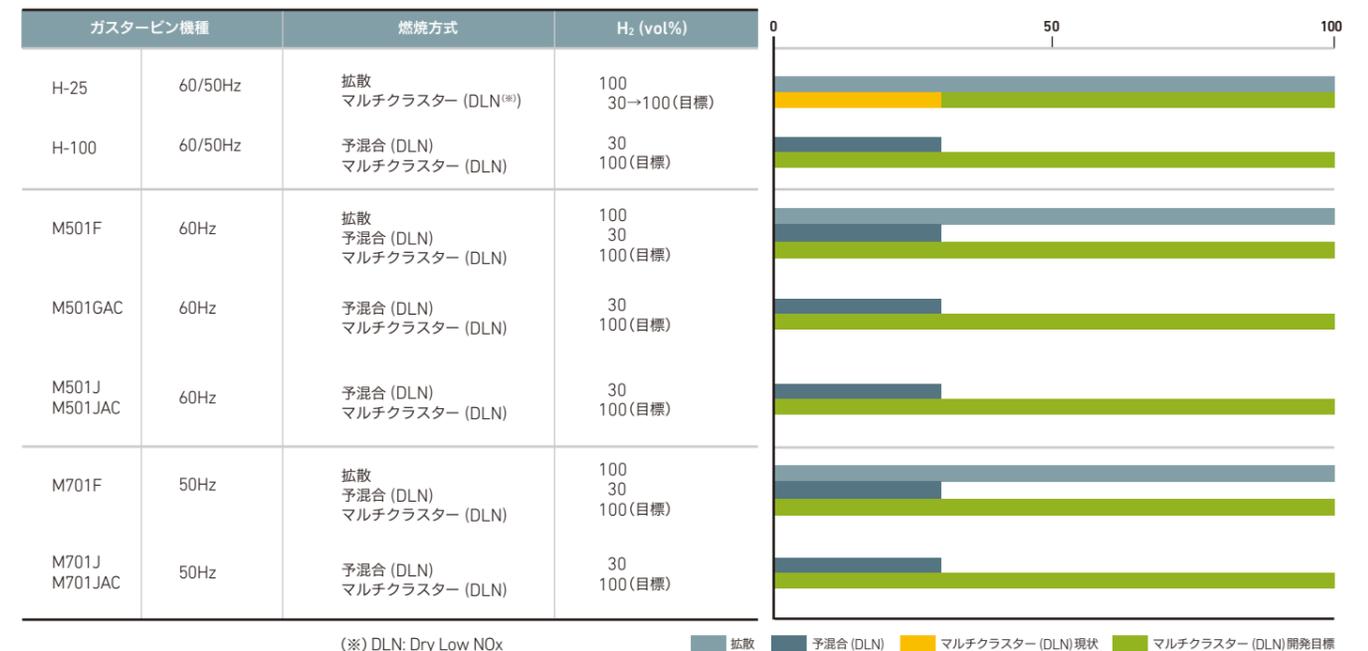
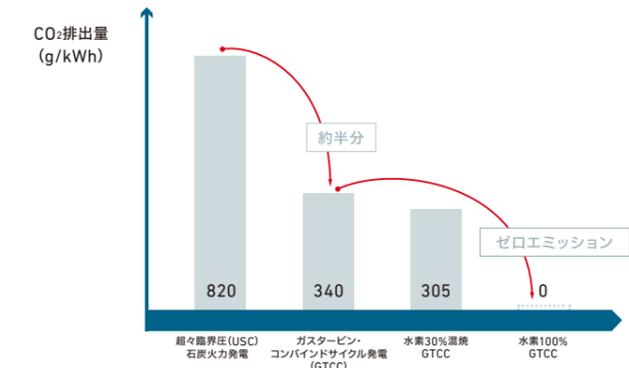
ガスタービンユーザーである発電事業者にとって大切なのは、安全、安定供給、そしてコスト。燃料が安定的に供給されることはもちろん、故障が起こらないこと、定期点検のインターバルが長いこと、運転コストが低いことは、電力安定供給の必須条件だ。
「分速3,600回もの高速回転を、年間8,000時間以上連続するという過酷な条件下で3年間運転させ、故障を起こさないという強靭さが求められるガスタービン。LNGのみでも発電が可能で一時的に水素の供給が途絶えても発電を継続するフレキシビリティが、お客様にとって大きなメリットであることに間違いはありません」
燃料供給や価格の変動にも対応でき、減肉、摩耗、振動に強い水素ガスタービンは、多くの技術の結集によって、その回転から輝きを放つ。

100%水素燃料による発電、水素専焼ガスタービンを実現する

夢のCO₂フリー火力発電—水素100%

1kWhの電気を発電したときのCO₂排出量を示す排出原単位は次のような値である。

一般的な石炭火力発電: 863g-CO₂ /kWh
超々臨界圧(USC)石炭火力発電: 820g-CO₂ /kWh
ガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)発電: 340g-CO₂ /kWh
水素30%混焼ガスタービン: 305g-CO₂ /kWh
そして、0 へ。



(※) DLN: Dry Low NOx

水素燃焼技術の開発状況

水素30%混焼ガスタービン開発に成功した今、谷村が挑むのは、CO₂ゼロの火力発電、水素100%専焼技術だ。

だが、水素が高濃度になれば、逆火の危険度は高まる。さらにNOxも増えてしまう。水素専焼向け燃焼器は、水素と空気を効率よく混ぜ、安定的に燃焼させる技術が不可欠となる。

「水素と空気の混合にも、重要な条件があります」と谷村の語りにも熱がこもる。「水素、空気は広い空間では混ぜりにくい。旋回流を使ってよく混ぜようとすると、比較的大きな空間を要するのです。このことが、逆火の危険度を高めてしまう。短い時間で混合するためには、できるだけ狭い空間で混ぜなければなりません。しかしこれでもまた、燃料の吹き出し口と、火炎の距離がより近くなり、逆火が起こりやすくなってしまいます。さて、どうするか。そこで考えたのが、火炎を分散し、より細かく、小さく燃料を吹き出す方法です。

そのカギとなる技術が、燃料供給ノズルです。通常8本のところを、より数多くのノズルのついたマルチクラスター燃焼器を改良設計。1本のノズルの孔を小さくし、空気を送るとともに、そこに水素を吹いて混合するという方法を採用しました。この方法だと旋回流を利用しないため、より小さなスケールで混合でき、低NOx燃焼も実現できます」
まさに優秀だが扱いにくい水素。ノズルの改良による混合方式に関する発想の転換。厳しい条件と戦う技術者の現場である。

水素燃料供給とサプライチェーンの構築 — そして未来へ向けて

水素100%専焼技術を実現するために求められるのは、ガスタービンだけではなく、水素の供給源の吟味、パイプラインを持たない日本への運搬の方法、原料物質から水素を取り出す技術の開発、その際に出るCO₂を回収・貯留する技術。水素ネットワーク、電力ネットワーク。水素燃焼技術とともに水素インフラの成熟が待たれる。

「ガスタービンの効率を上げたからといって、全体の効率がよくなるわけではない」と谷村は水素活用の全体像を見据える。「国内では、海外で生産した水素を運び、燃料電池車や産業に利用することが想定されています。一方、海外では製造時のCO₂をCCSによって処理するシステムなど、水素供給の段階から、利用までの青写真が示されています。欧州は、既存の天然ガスパイプラインが発達しているというアドバンテージもあり、供給までを視野に入れた総合インフラとして、水素活用を進めています」ガスタービンを開発する技術者だからこそ、包括的な水素利用プランの必要性をビビッドに捉えている。「パイプラインが発達していないわが国においては、水素運搬は大きな課題であることは間違いありません。再生可能エネルギーや石油、天然ガスから水素を取り出す構想があります。不安定とされる再生可能エネルギーを水素に変換しておけば、エネルギーの貯蔵・

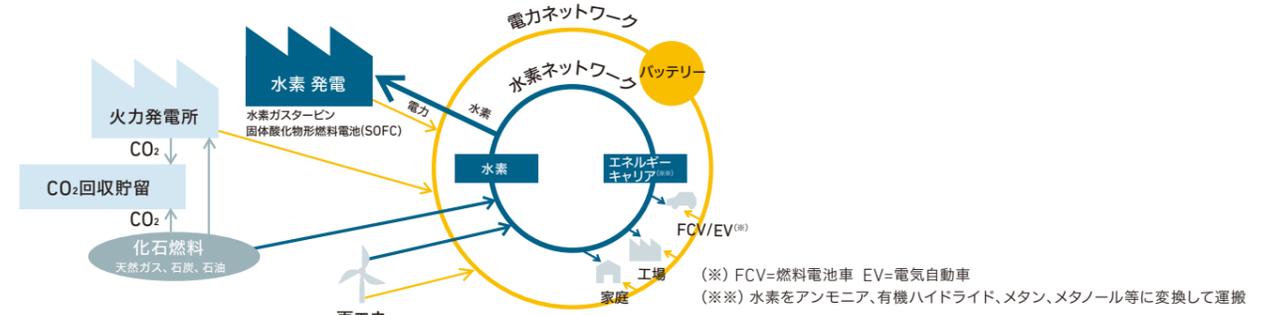
運搬ができるというメリットも大きい。今のところ、液体水素、メチルシクロヘキサン(MCH)またはアンモニア(NH₃)の形で運ぶことが有力視されていますが、需要をさらに増やすことで、運搬のスケールメリットも出てくるはず」

ガスタービンの技術者は、生産から消費までを見据える。「インフラ整備、多様な利用方法を含んだ水素利用ビジョンが必要です。例えば、技術的改良の必要がない水素20%混焼、出力50万kW、効率60%のガスタービンで使用される水素の量は、1.4t/hです。これは、燃料電池車10~13万台の水素使用量にあたる数字。水素利用を本気で進めるのであれば、水素を使用するタービンを積極的に増やすなど、スピード感を持って水素インフラを拡充させることが絶対に必要。そのためには、水素ガスタービンは、来る水素社会を牽引するはず」

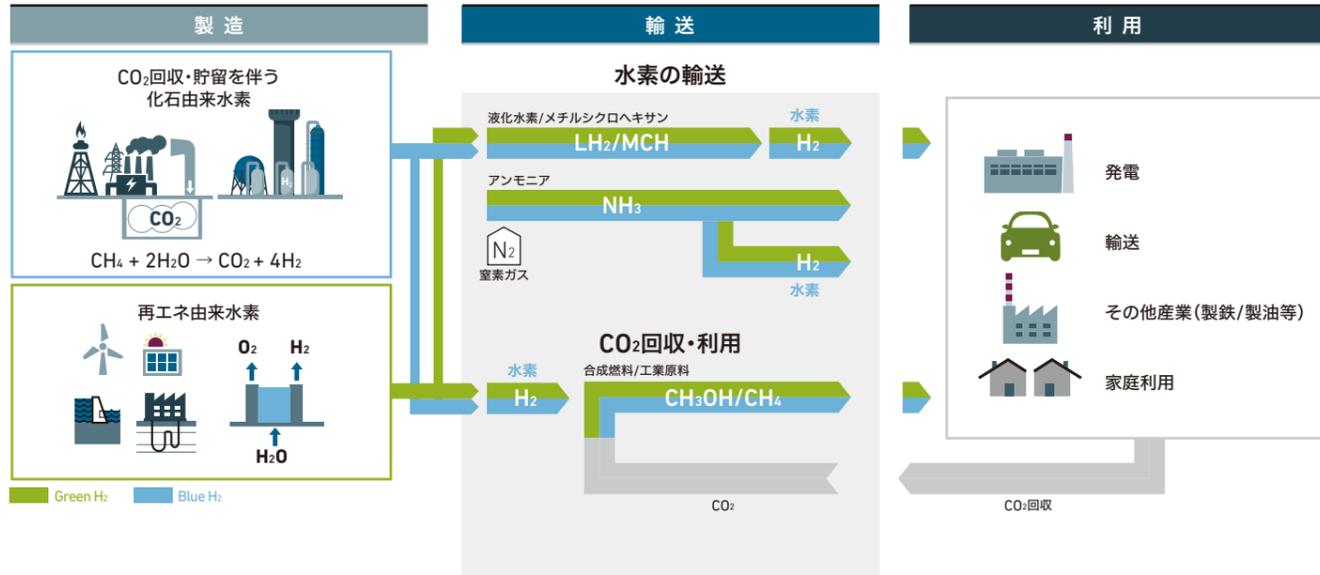
人類が「火」を手にし、意識的に使用してからすでに50万年の時を経た。ついに、CO₂フリーの燃焼を手に入れ、社会を支えるエネルギーとする時が来る。

2025年 水素100%専焼技術 完成へ—————。

三菱パワーの水素発電技術と水素ネットワークの関係



世界の水素サプライチェーン例



三菱パワー株式会社
ターボマシナリー本部 ガスタービン技術総括部
副総括部長 谷村 聡

1986年三菱重工業入社。ガスタービン技術部に所属し、以降大型ガスタービン燃焼器の開発と共に技術者人生を歩む。1300°C級ガスタービン燃焼器の開発をはじめ、1500°C級、1600°C級という高火炎温度燃焼器の低NO_x化技術開発におけるキーパーソンとして全体を取りまとめる。基礎設計から、現地での燃焼調整までガスタービン燃焼器開発に関わる全分野に精通する燃焼器のエキスパート。

TECHNICAL REVIEW

技術論文



三菱パワーは、火力発電・環境技術の中核を担う会社として、高効率な発電技術の開発をしている。その開発の1つである最新鋭のガスタービン発電技術において、水素「混焼」はすでに可能となり、更に次のステップを目指している。また、電力市場のニーズは多様化しており、分散化ニーズへの対応も進めている。ここからは、水素の大量消費ポテンシャルのある大型水素ガスタービンと分散電源として水素を含む多様な燃料を有効活用できる燃料電池について三菱重工技報を通して紹介する。

水素ガスタービン

- 水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発
高効率ガスタービンでの水素「混焼」技術。従来の天然ガス火力発電と比較して、発電時のCO₂排出量を約10%低減することが可能。
- CO₂フリー社会の実現に向けた水素燃焼ガスタービン
高効率ガスタービンでの水素「専焼」技術。国際的な水素サプライチェーンの構築を牽引し、CO₂フリーの水素社会に貢献。
- 1650°C級JAC形ガスタービンを中核とする第二T地点
実証発電設備での検証結果
燃焼器強制空冷システム、超厚膜TBC、高圧力比圧縮機を中核技術として適用した、次世代1650°C級JAC形ガスタービンの検証結果。

燃料電池

- 水素社会へ向けた次世代大型燃料電池SOFCの展開
分散電源ニーズに対応する三菱パワーの燃料電池発電技術。
“安全で持続可能なエネルギー環境社会”の構築に貢献。
- SOFC-MGT ハイブリッドシステムの市場導入に向けた取り組みについて
低炭素社会へ向けての開発。250kW級は実証済み、更に1MW級の検証を開始。

出典：三菱重工技報
著者所属名は作成時のものです

水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発

Research and Development on Gas Turbine Capable of Hydrogen Co-firing



| | |
|-------------------------------------|--|
| 井上 慶* ¹ Kei Inoue | 宮本 健司* ² Kenji Miyamoto |
| 道免 昌平* ² Shohei Domen | 田村 一生* ³ Issei Tamura |
| 川上 朋* ⁴ Tomo Kawakami | 谷村 聡* ⁵ Satoshi Tanimura |

水素エネルギーの導入による脱化石燃料化は、経済活動の持続的な発展のために欠かせない有力な選択肢である。そこで、三菱重工グループ(以下当社)では、天然ガスと水素の混合燃料を適用可能な大型ガスタービンの研究開発を、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)のご支援を頂きながら進めている。現在、新たに開発した燃焼器(バーナー)などにより、水素30vol%の混焼試験に成功した。水素30vol%の混焼により、従来の天然ガス火力発電と比較して、発電時のCO₂排出量を約10%低減することが可能となる。

1. はじめに

経済活動を持続的に継続する為には、安定的かつ環境負荷の低いエネルギーを確保・供給することが不可欠である。地球温暖化、また化石燃料の枯渇等の課題に対し、再生可能エネルギーの導入・普及に対する最大限の加速と、環境負荷に最大限配慮した化石燃料の有効活用等が求められている。また、将来の二次エネルギーとして、電気、熱に加え、水素が中心的役割を担うことが期待されており、当社ではこのような水素を本格的に利活用する技術の開発を進めている。

再生可能エネルギーの導入については、例えば、風力発電の導入量は、世界では2011年以降40.5GW/年のペースで増加しており、2030年には最大2500GW程度まで拡大するとの予測もある。再生可能エネルギーは出力変動が大きいと、再生可能エネルギー発電設備の増大とともに、余剰電力量の活用が一つの課題となると考えられる。このような余剰電力量の有効利用には、蓄電池あるいは水素等への変換によるエネルギー貯蔵技術が必要であり、特に変動周期が長く、多くの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と考えられる。

水素燃料による有望な発電方式の一つに、ガスタービンによる発電があげられる。現在のガスタービンは、一般に汎用品として流通している天然ガスを燃料に使用している。天然ガスの燃焼時に発生するCO₂は、地球温暖化の要因の一つと考えられているため、世界的にその排出量を規制する動きがある。水素の燃焼はCO₂の発生を伴わないため、燃料中の炭化水素成分の一部を水素に置き換えることにより、発電に伴って発生するCO₂の量を低減することができる。

*1 総合研究所 燃焼研究部 工博

*2 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部

*3 総合研究所 燃焼研究部

*4 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 主席チーム統括

*5 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 主幹技師

当社における水素含有燃料に関する適用実績を図1に示す。オフガス(製油プラント等で発生する排ガス)の燃料利用により幅広い水素含有割合の燃料に関する実績を有するとともに、World Energy NET WORK への参画の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。しかし、これらはいずれも小規模な発電設備での実績であり、発電分野における水素の本格導入を実現するためには、現在の天然ガス程度に、大規模かつ高効率なエネルギーへの変換手段が必要となる。

そこで当社では、水素インフラ導入期の天然ガスと水素を混焼可能な大型ガスタービンの開発を推進中である。本稿では、水素混焼を可能とする技術開発の概要および今後の展望について述べる。

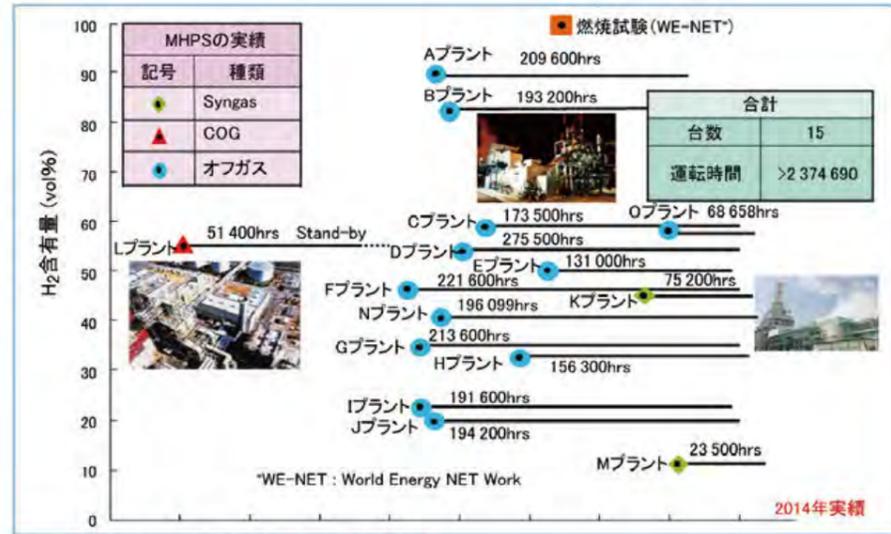


図1 当社における水素含有燃料の適用実績

2. 水素混焼の課題

当社の大型ガスタービンに搭載されている Dry Low NOx (DLN) 燃焼器では、NOx(酸性雨の原因となる窒素酸化物)を低減する為に予混合燃焼方式を採用している。予混合燃焼器と、拡散燃焼器の比較を図2に示す。予混合燃焼は拡散燃焼に比べて火炎温度を低減できるため、蒸気・水噴霧なしで NOx の低減が可能であり、現在、低 NOx 燃焼器に広く適用されている技術である。一方で、従来の拡散燃焼器に比べて安定燃焼範囲が狭く、逆火(フラッシュバック)現象が発生し易い傾向がある。逆火とは、流体の速度(以下流速)よりも火炎の進む速度(以下燃焼速度)が高い際に、流体中を火炎が遡上する現象であり、ガスタービン燃焼器の内部で発生した場合は、上流の無冷却部を焼損する可能性があるため、その発生を防止する事が重要である。逆火現象の概要を図3に示す。

| 形式 | 拡散燃焼方式 | 予混合燃焼方式 |
|------|---|--|
| 構造 | 燃料と空気が別々に噴射され、拡散して燃焼する。 | 燃料と空気が予混合ノズルで事前に混合された後、噴射される。 |
| 燃焼特性 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料と燃焼用空気を別々に噴射 高温ホットスポットが生じやすい (NOx高) 火炎の位置が不安定 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料は空気と混合され噴射 高温ホットスポットが生じにくい (NOx低) 火炎の位置が安定: フラッシュバック |
| 特徴 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料性状変動への許容範囲が大きい 燃料系統が簡素 NOx対策(蒸気/水噴射)による性能低下 | <ul style="list-style-type: none"> 高効率と低NOx化を両立 燃料系統が複雑 |

図2 拡散燃焼方式と予混合燃焼方式の比較

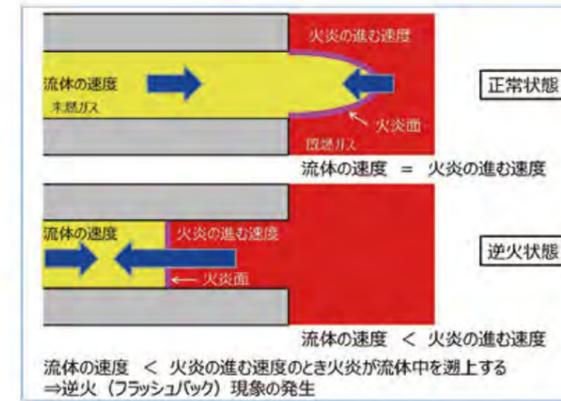


図3 逆火現象の概要

天然ガスと水素を混焼させた場合、燃料成分の変化により火炎の性質が変化する。特に、ガスタービンを安定的に運転する為には、燃焼速度の変化に対応する技術の開発が必要となる。水素は天然ガスと比較して燃焼速度が高いことが確認されている。このため、水素を混焼させた場合は、天然ガスのみを燃焼させた場合と比較して、逆火現象の発生リスクが高くなると考えられる。したがって、水素混焼ガスタービンの開発においては、逆火発生防止に向けた燃焼器の改良が課題となる。

当社の DLN 燃焼器内部では、燃料と空気の混合を促進する為に旋回流が形成されている。このような旋回流中において逆火の発生を防止する為には、火炎の進む速度の上昇分以上に旋回流の中心部における流速を上昇させる必要があることが、複数の論文⁽¹⁾⁽²⁾において報告されている。

3. 逆火防止技術の概要

3.1 新型燃焼器のコンセプト

水素混焼による逆火発生リスクの上昇を防ぐことを目的として、新たに開発した燃焼器の概要を図4に示す。燃焼器内部に圧縮器から供給された空気は、旋回翼(スワラー)を通過することで、旋回流となる。燃料は、スワラーの翼面に設けられた小さな孔より供給され、旋回流の効果で急速に周囲の空気と混合される。一方で、旋回流の中心部(以下渦芯)には、流速の低い領域が存在することが明らかとなっている。旋回流中での逆火現象は、この渦芯に存在する流速の遅い部分を火炎が遡上する事で発生すると考えられる。新型燃焼器では渦芯の流速を上昇させる為、ノズルの先端から空気を噴射する事を特徴としている。噴射された空気は、渦芯の低流速領域を補い、逆火の発生を防止する。

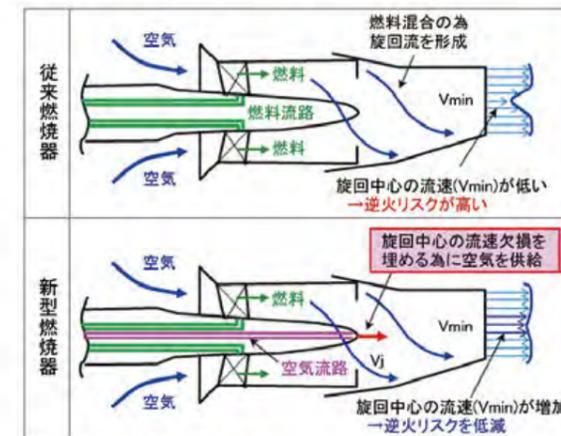


図4 新型燃焼器の概要

3.2 非燃焼試験による検証

新型燃焼器の効果を確認する為、気流試験による流速分布計測を実施した。気流試験に使用した装置写真を図5に示す。渦芯は定常的に同じ位置に存在する事は無く、時々刻々とその位置が変化する。このため、流速計測では各計測点を渦芯が通過する際に現れる流速の遅い瞬間を捕らえる必要がある。そこで流速計測に、熱線流速計(カノマックス7000Serおよび5μφタングステン製I型直線プローブ)を適用し、高い時間分解能を実現する事で、各計測位置での瞬時最低流速を評価する事を可能とした。渦芯に近い領域における従来燃焼器と新型燃焼器の流速分布の比較を図6に示す。逆火現象の発生を支配すると考えられる最低流速に注目すると、新型燃焼器は従来燃焼器の2.5倍以上の流速を実現している事が確認された。また、新型燃焼器ではノズル先端に設けた小さい孔から極少量の空気を噴射する為、渦芯近傍以外の領域はほとんど影響を受けず、従来燃焼器と同等の流速分布となる。



図5 気流試験装置の写真

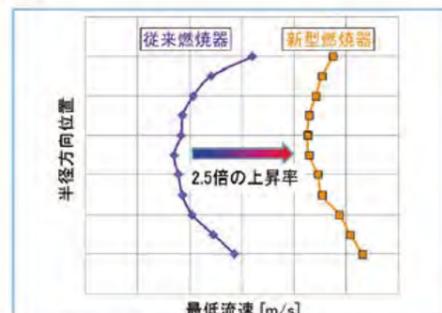


図6 渦芯領域における流速分布の比較

3.3 実圧燃焼試験による燃焼特性の確認

ガスタービン燃焼器の燃焼特性に関する代表的な項目として、NO_x、燃焼振動があげられる。NO_xは酸性雨の要因物質である為、環境側面から排出量に対する規制値が存在する。一方、燃焼振動はガスタービンを安定的に運用する上で、一定レベル以下に抑える必要がある。NO_x、燃焼振動はともに燃焼圧力条件の影響を受ける為、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)を実施し、水素混焼が燃焼特性に与える影響を確認した。実圧燃焼試験には、三菱日立パワーシステムズ(株)高砂工場に保有する実圧燃焼試験設備を使用した。実圧燃焼試験装置の設備構成を図7に示す。燃焼試験装置で使用される高圧・高温の空気は二軸ガスタービンにより供給され、燃焼試験耐圧容器内に設置されたガスタービンのケーシング形状(燃焼器1本分)を模擬した試験セクタへ導かれる。燃焼後の排ガスは、圧縮機駆動用ガスタービンの排ガスと共に排気塔から排出される。実機プラントの燃料を模擬するために、天然ガス供給ラインの上流部において水素を添加して実圧燃焼試験設備へ供給する。水素は、試験設備の十分な上流側で添加される為、燃焼器に到達するまでに天然ガスと均一に混合される。

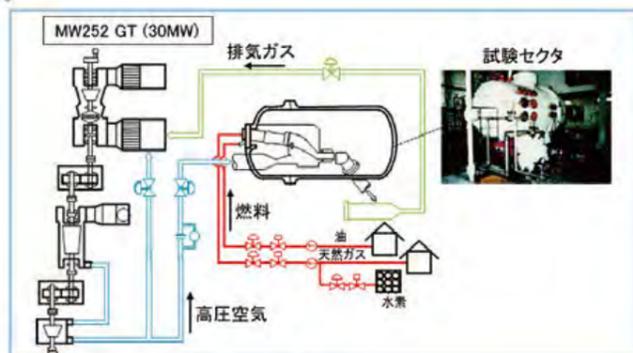


図7 実圧燃焼試験装置の構成

タービン入口温度 1600 度級ガスタービンの定格相当条件における、水素混合割合に対するNO_xの変化を図8に示す。水素混合割合の増加に伴って、NO_xが僅かに上昇する傾向が確認された。これは、燃料中に水素が混合する事により、燃焼速度が上昇し、燃焼器中の火炎位置が上流へ移動する為と考える。しかしながら、水素 30vol%を混合した条件においても、NO_xは運用可能な範囲内にある事が確認された。同じ条件における燃焼振動圧力レベルの変化を図9に示す。燃焼振動圧力レベルは水素混合割合の変化に対して、あまり影響をうけない事が確認された。以上の結果より、水素混合割合の増加に伴いNO_xの上昇が確認されたものの、新型燃焼器を適用する事で、水素 30vol%までの混焼条件において、逆火の発生、内圧変動の著しい上昇を伴わず、ガスタービンの運用が可能であると考えられる。

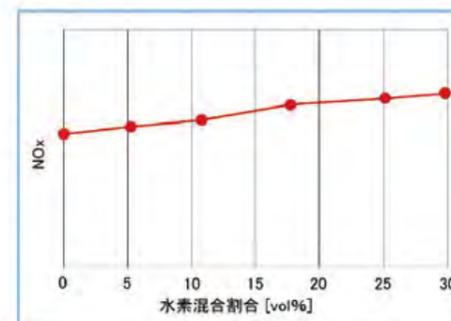


図8 水素混合割合に対するNO_xの変化

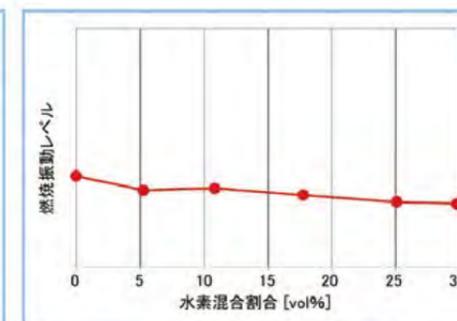


図9 水素混合割合に対する内圧変動レベルの変化

4. 今後の展望

水素・天然ガス混焼ガスタービンプラントを実現にむけて、燃焼器開発と並行してプラントに付随するその他補機、および運用方法の検討を進める必要がある。現在のガスタービンは主として汎用品として流通している天然ガスを燃料としている為、配管材料および、プラントの補機は天然ガスの使用を前提として選定されている。水素は天然ガスと比較して漏洩しやすく、また拡散し易い特性を有する為、その特性に適した安全対策を策定し、各部仕様を再選定する必要がある。また、実際のプラントの運用においては、水素の含有割合が安定しない可能性がある為、非定常的な水素混合割合の変化に対応可能なプラント運用技術の開発を併せて進めていく。

5. まとめ

当社では、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、火力発電分野でのCO₂排出量削減を目的とした水素燃料の利用に対応する為、水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発に取り組んでいる。水素混焼による逆火現象の発生を防止する為、渦芯領域の低流速発生を抑制する新型燃焼器を開発し、水素 30vol%の混焼条件においてガスタービンの運転が可能な目処を得た。今後、プラント運用技術の開発を併せて進めるとともに、2025年度を目標としたプラント実証運転にむけて、更に高濃度での水素混焼を可能とするガスタービンの開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) M.Kroner, T.Sattelmayer, J.Fritz, F.Kiesewetter, and C.Hirsch, "Flame Propagation in Swirling Flows - Effect of Local Extinction on the Combustion Induced Vortex Breakdown", Combust. Sci. and Tech., vol.179, pp.1385-1416, 2007
- (2) B.Dam, G.Corona, M.Hayder, A.Choudhuri, "Effects of syngas composition on combustion induced vortex breakdown (CIVB) flashback in a swirl stabilized combustor", Fuel, vol.90, pp.3274-3284, 2011

CO₂フリー社会の実現に向けた水素燃焼ガスタービン

Hydrogen Fired Gas Turbine for the Realization of a CO₂-free Society



野 勢 正 和*¹
Masakazu Nose
川 上 朋*²
Tomo Kawakami
荒 木 秀 文*³
Hidefumi Araki
仙 波 範 明*⁴
Noriaki Senba
谷 村 聡*⁵
Satoshi Tanimura

ガスタービン複合発電(以下、GTCC)はそのクリーンかつ高効率な特性から、現在、発電に占める割合が大きくなっている。そのため CO₂ フリー社会の実現には、発電用大型ガスタービンにおける水素の大規模利用が重要である。三菱重工グループでは、天然ガスと水素の混焼方式と水素専焼方式の大型ガスタービンの開発を進めており、現在、水素 30vol%の混焼試験に成功している。さらに、水素のエネルギーキャリアの一つとして有望なアンモニアの GTCC での利用についても研究を開始した。また、ヨーロッパにおける GTCC プラントの水素燃焼プロジェクトにも参画している。これらの活動を通して、三菱日立パワーシステムズ(株)(以下、当社)は水素の供給・輸送・貯蔵に関する国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し、水素社会の実現に貢献していく。

1. はじめに

1980 年代からの電力需要の急激な増加に対応するために、燃料に天然ガス/LNG(Liquefied Natural Gas:液化天然ガス)を用いた GTCC が注目され、これまで大容量・高効率化が進められてきた。GTCCは化石燃料を使用する火力発電方式の中で最もクリーン、かつ高効率な設備である。日本の一次エネルギーの主な変換先は電力で、全体の実に 43%を占める。その中で、火力発電による電力供給割合は85%にも及ぶ(2015年現在)。このため GTCC は、今後も旺盛なエネルギー需要に対応する一方で、資源の有効利用や低炭素社会の実現のために、より一層の CO₂ 削減が求められている。

日本では低炭素社会に向けた水素基本戦略として、2030 年頃に水素発電の商用化を目指すことを掲げている。この先 10 年余りの短期間での商用化(技術開発から電力事業者への設備導入)をより現実的に進めるため、当社では、既存のガスタービン設備を使い水素発電ができるシステムを考案した。このシステムは、ガスタービン用燃焼器以外の発電設備の大規模なリニューアルを必要としない。そのため、水素転換へのコストのハードルを下げ、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。現在、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)にご支援をいただき、発電用大型ガスタービンにおいて、燃料の LNG に水素を 30%混せて使用することができる燃焼器の開発に成功した。水素の燃焼により懸念される NO_x の排出も、従来レベルに抑制できる。70 万 kW 相当(タービン入口の温度 1600℃の GTCC)の出力に対

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 首席技師 博士 工学
*2 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 首席チーム統括
*3 三菱日立パワーシステムズ(株) エンジニアリング本部プロジェクト総括部電力計画部 首席技師 博士 工学
*4 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 グループ長
*5 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 主幹技師

応できる技術で、従来の GTCC と比較し、発電時の CO₂ 排出を約 10%削減できる。これは、水素社会構築のための大きな一歩である。本報では、水素燃焼ガスタービンを軸とした、当社の水素社会実現に向けた取組みを紹介する。

2. 発電用大型ガスタービンと水素社会

国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)で採択された“パリ協定”の温室効果ガス削減目標達成に向けた取組みが世界各国で始まり、再生可能エネルギー(以下、再エネ)の導入が加速している。図1⁽¹⁾に IEA(国際エネルギー機関)の報告書における、現在から 2060 年までの世界の累計 CO₂ 削減量の見通しを示す。再エネの利用による CO₂ 削減量を全体の約3割と見込んでいる。

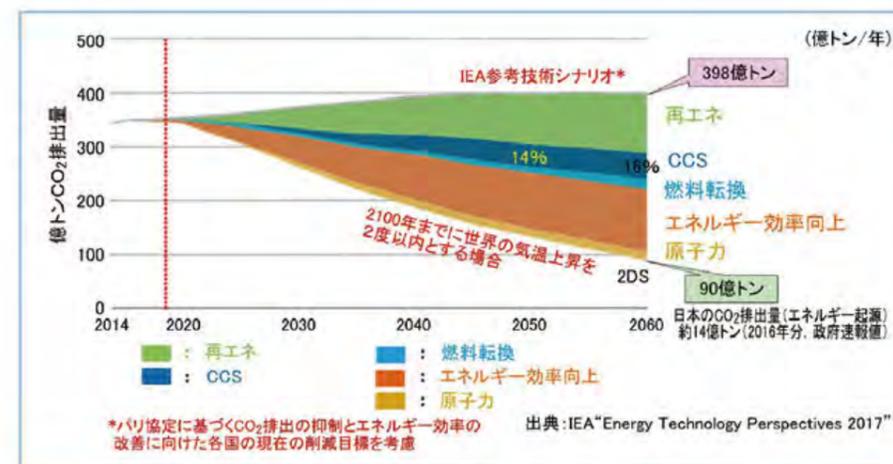


図1 2060 年までの世界の累計 CO₂削減量の見通し⁽¹⁾

風力、太陽光、水力などの再エネによる発電は、気候・気象条件、昼夜などの時間帯によって発電量が変動することや、世界の各地域で発電量が偏在していることから、効率よく電力を利用するために送電システムの柔軟性と安定性が求められる。一方で、再エネを水素に変換し貯蔵・輸送して利用することが、エネルギーの変動に対して有効であると考えられており、再エネの大規模発電地域から離れた日本においても水素のサプライチェーンの構築とそれに関わる技術開発が重要かつ、急務とされる。

また、先の報告書⁽¹⁾では、天然ガスをはじめとする化石燃料の改質により製造される水素の利用が 2030 年頃から増え始め、2050 年までの累積 CO₂ 削減量の 14%を担うことが見込まれている。製造時に大量に発生する CO₂ を回収して地中に貯留する Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)と合わせて、再エネ主体に移行する過渡期においては、化石燃料の改質と CCS との組み合わせから製造される水素の利用技術も必要となる。

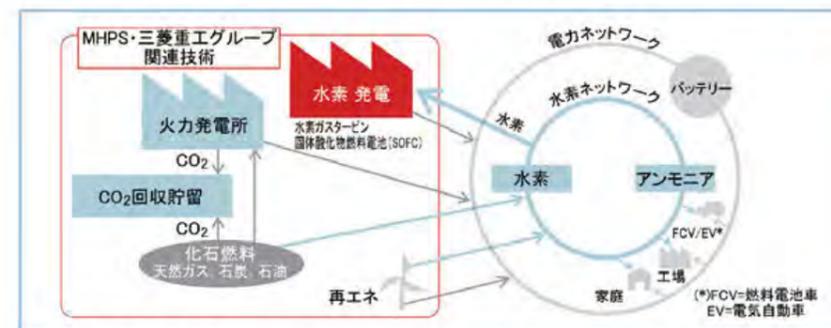


図2 当社の水素発電技術と水素ネットワークの関係

当社は、図2に示すように、これら再エネ由来/化石燃料由来の水素を最大活用し、強みの発電製品を水素バリューチェーンに適用することに取り組んでいる。その中で発電用大型ガスタービンは、高効率で発電できるだけでなく、低純度な水素（製造コスト・技術のハードルが比較的低い）が利用可能であり、大量かつ安定的な水素需要を生む。水素社会に向けて、インフラの拡充、多様な利用方法を含んだ水素利用ビジョンが示される中で当社の発電用大型ガスタービンの果たす役割は、今後より一層大きくなるものと考えられる。

3. 水素ガスタービン用燃焼器

発電用大型ガスタービンは、これまで高効率化を図るために、タービン入口温度（燃焼温度）を上昇させながら開発が進められた。燃焼温度の上昇により指数関数的に増加するNOx排出量に対応するため、当社の発電用大型ガスタービンに搭載されるDry Low NOx(DLN)燃焼器は予混合燃焼方式が採用されている。

予混合燃焼方式では燃料と空気をあらかじめ混合して燃焼器内に投入する。従来の拡散燃焼方式に比べて火炎温度を均一にできるため、NOx低減用の蒸気や水噴射が不要で、サイクル効率の低下も生じない。一方で、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、未燃分も排出しやすい傾向がある。

天然ガスと水素を混焼、あるいは水素専焼させた場合、燃料成分の変化により火炎の性質が変化する。水素は天然ガスと比較して燃焼速度が高いため、天然ガスのみを燃焼させた場合と比較して、逆火現象の発生リスクが高くなる。したがって、水素ガスタービン用の燃焼器は逆火発生の防止に向けた改良を中心に、低NOx化や安定燃焼化を図り、商品性の向上（低コスト、長寿命等）と合わせて開発・実用化する必要がある。

以下に、当社の水素混焼・専焼に対応する水素ガスタービン用燃焼器の開発状況について述べるとともに、図3にそれらの概要を示す。

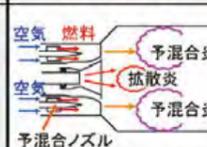
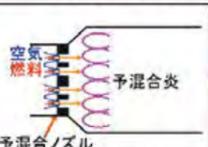
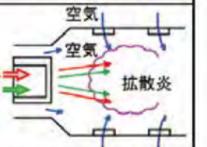
| 燃焼器 | マルチノズル燃焼器 | マルチクラスタ燃焼器 | 拡散燃焼器 |
|----------|---|---|--|
| 燃焼方式 | 予混合燃焼方式 | 予混合燃焼方式 | 拡散燃焼方式 |
| 構造 |  |  |  |
| NOx | 予混合ノズルにより火炎温度は均一にできるため、NOxは低い | 小さな予混合ノズルにより火炎温度を均一にできるため、NOxは低い | 燃料と空気を別々に噴射する。火炎温度が高い領域ができ、NOxが高くなる |
| フラッシュバック | 火炎伝播可能な領域が広く、水素専焼時にリスクが高くなる | 火炎伝播可能な領域が狭く、リスクは少ない | 予混合方式のような予混合部を持たないためリスクはない |
| サイクル効率 | 蒸気・水噴射しないため効率低下なし | 蒸気・水噴射しないため効率低下なし | NOx低減のため、蒸気・水を噴射し、効率が低下する |
| 水素混焼比率 | ～ 30 vol% | ～ 100 vol% (開発中) | ～ 100 vol% |

図3 当社の水素ガスタービン用燃焼器

(1) 水素混焼用 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ぐことを目的として、従来のDLN燃焼器をベースとして新たに開発した水素混焼用燃焼器の概要を図4に示す。燃焼器内部に圧縮器から供給された空気は、旋回翼（スワラー）を通過することで、旋回流となる。燃料は、スワラーの翼表面に設けられた小さな孔より供給され、旋回流の効果で急速に周囲の空気と混合される。一方、旋回流の中心部（以下渦芯）には、流速の低い領域が存在することが明らかとなっている。旋

回流中での逆火現象は、この渦芯に存在する流速の遅い部分を火炎が遡上することで発生すると考えられる。新型燃焼器では渦芯の流速を上昇させるため、ノズルの先端から空気を噴射することを特徴としている。噴射された空気は、渦芯の低流速領域を補い、逆火の発生を防止する。

フルスケールの新型燃焼器1缶を使用した実機圧力下での燃焼試験を実施した結果、水素30vol%を混合した条件においてもNOxは運用可能な範囲内にあり、逆火の発生や燃焼振動の著しい上昇を伴わずに運用できる目途を得た。

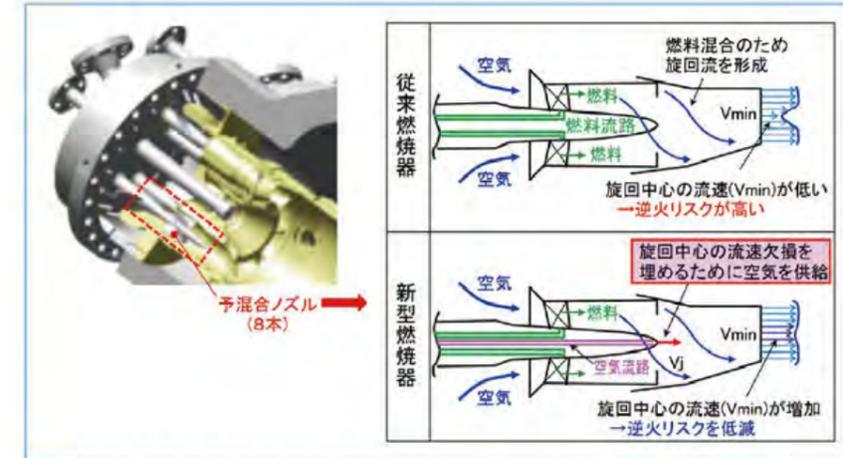


図4 水素混焼用新型燃焼器の概要

(2) 水素専焼用マルチクラスタ燃焼器（図5）

水素がさらに高濃度になれば、逆火のリスクは高まる。水素混焼DLN燃焼器のように旋回流を使って燃料と空気を混合させるには比較的大きな空間が必要であり、逆火のリスクが高くなるため、狭い空間で短時間に混合させる必要がある。そこで、火炎を分散し、より細かく、小さく燃料を吹き出す混合方式を考えた。従来のDLN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する図5のマルチクラスタ燃焼器をベースとして、1本のノズルの孔を小さくし、空気を送るとともに、そこに水素を吹いて混合させる方式を採用した。旋回流を利用せず、より小さなスケールで空気と水素を混合でき、高い逆火耐性と低NOx燃焼が両立する可能性を有しており、現在、燃料ノズル構造の基礎検討を進めている。



図5 マルチクラスタ燃焼器（開発中）



図6 拡散燃焼器

(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器内に噴射する。予混合燃焼方式に比べて火炎温度が高い領域ができやすくNOx発生量が増えるため、蒸気・水噴射によるNOx低減対策が必要になる。一方で、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料性状変動への許容範囲も大

きい。

当社の拡散燃焼器を図6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(製油プラント等で発生する排ガス)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(World Energy NET WORK(WE-NET))プロジェクトへの参画の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。

4. アンモニア分解 GTCC

発電用大型ガスタービンで必要となる大量の水素を安定に利用可能とするためには、水素の製造・運搬・貯蔵等を担うサプライチェーンが構築されることが前提になる。水素の運搬・貯蔵に関しては、水素を液化して運搬・貯蔵する方法だけでなく、アンモニアや有機ハイドライド等のエネルギーキャリアを活用することが水素基本戦略⁽²⁾で提示されている。

当社は、2017年度から内閣府SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)に参画して、アンモニアをエネルギーキャリアとしたガスタービンシステムの検討を実施している。アンモニアは、液化水素の1.5倍の体積水素密度を有しており、液化石油ガスなどの既存の運搬・貯蔵インフラを転用可能である等の特徴がある。同プログラムでは、アンモニアを燃料としてマイクロガスタービン⁽³⁾及び小型ガスタービンで直接燃焼させる研究がなされているが、大型ガスタービンに適用するには表1に示す課題がある。そこで当社では、図7に示すように、アンモニアを熱分解して水素に変換し、ガスタービンで燃焼させるシステムを検討している。分解反応を起こすためには、アンモニアを触媒接触下で高温に加熱しつつ、原料アンモニア1モルあたり46 kJ/molの反応熱の投入が必要となるが、この反応熱は生成する水素の発熱量増加(化学再生)になるため、原理的な効率低下はない。原料アンモニアを分解させる際に残留する微量の残留アンモニアが燃焼器でのNOx生成の原因となるため、残留アンモニアの量を低減できる分解装置の機器構成、分解触媒の選定等を同プログラムで進めている。

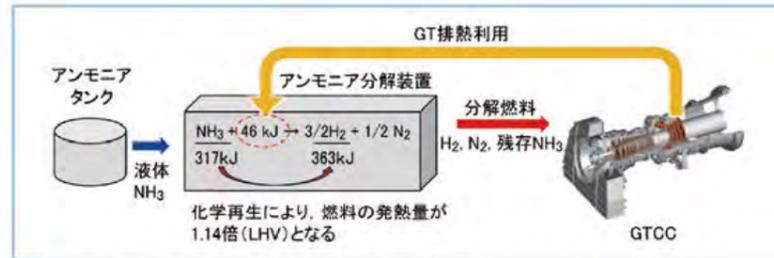


図7 アンモニア分解ガスタービンサイクルの概念

表1 アンモニア燃焼の特徴と大型ガスタービンにおける考慮事項

| アンモニア燃焼の特徴 | 大型ガスタービンにおける考慮事項 |
|-----------------------------------|---|
| 燃焼速度が遅い(メタンの約1/5 ⁽⁴⁾) | <ul style="list-style-type: none"> 燃焼完了に必要な時間を確保するため、燃焼器のサイズが大きくなる。 大型ガスタービンは多缶式燃焼器のため燃焼器のサイズ拡大に制約あり。 |
| 燃料中に窒素を含む | <ul style="list-style-type: none"> Fuel NOxが発生するが、大型ガスタービンはThermal NOxが許容する範囲で燃焼ガス温度を高温化しており、Fuel NOxを許容する余地は少ない。 二段燃焼による低NOx化が考えられるが、大型ガスタービンの場合、燃焼器の大型化や複雑化など技術課題が多い。 |

本システムには表2に示すように、高効率かつ大容量なGTCCシステムに対して比較的少ない改造で適用できる特徴があり、CO₂フリーアンモニアを用いることにより、大量のCO₂削減に寄与することができる。本システムを適用することにより、現在開発中のガスタービン用水素燃焼器を

活用できるだけでなく、開発したアンモニア分解装置は汎用的な水素サプライチェーンの構成機器として活用することが可能となる。

表2 アンモニア分解ガスタービンシステムの特徴

| 項目 | 特徴 |
|----------------------|---|
| 高効率 | <ul style="list-style-type: none"> アンモニア分解反応に必要な熱は、生成する水素の発熱量増加(化学再生)に使われるため、原理的な効率低下は無い。 高効率のGTCCとの組み合わせにより全体効率が高いシステムを構築可能。 |
| 導入性 | 主要な開発機器はアンモニア分解装置であり、ガスタービン側は水素燃焼器など比較的少ない改造で適用可能。 |
| 柔軟性 | アンモニア分解水素の専焼、天然ガスとの混焼など、水素燃焼器の仕様の変更により、インフラの構築状況、立地条件に応じたシステム構築が可能。 |
| CO ₂ 削減効果 | GTCC 出力 500MW、設備利用率 70%、アンモニア分解燃料 100%利用の場合、年間80万トンのCO ₂ 排出削減可能。 |
| 発展性 | アンモニア分解装置で必要となる熱源はガスタービン排熱に限定されるものでなく、汎用的な水素サプライチェーンの構成機器として活用可能。 |

5. 海外プロジェクトにおける取組み

海外では、例えば、化石燃料由来の水素製造時に発生するCO₂をCCSによって処理するシステムなど、水素供給の段階から輸送、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示されている。特にヨーロッパでは既存の天然ガスパイプラインが発達しているという利点もあり、国境を越えた総合インフラとして、水素活用のプロジェクトが進められている。

当社は、その中で、オランダのエネルギー企業であるヌオン社(N.V. Nuon)が運営する出力132万kW級の天然ガス焼きガスタービン複合発電(GTCC)を水素焼きに転換するプロジェクトに参画している。同プロジェクトは、図8に示すオランダ最北部のフローニンゲン(Groningen)州に位置するヌオン・マグナム(Nuon 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2023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ビリティスタディー(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。天然ガス焼きでは44万kWのGTCC発電設備1系列につき年間約130万トンのCO₂を排出するが、水素焼きへの転換によりそのほとんどを削減することができる。当社は引き続きガスタービン技術領域でのFSを担当し、具体的な改造範囲の計画等、同プロジェクトの実現に向けて協力を続ける。



図8 オランダのヌオン・マグナム発電所

6. まとめ

本報の第3章に記載した内容は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の“水素社会構築技術開発事業”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る目途を得た。引き続き、水素専焼方式の開発を進めている。

また、本報の第4章に記載した内容は、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)“エネルギーキャリア”(管理法人:JST)の成果の一部である。同研究により、水素のエネルギーキャリアの一つとして有望なアンモニアを利用したアンモニア分解 GTCC システムの開発を開始した。

2050年の再エネによる世界的なCO₂フリーの水素社会に向けて、また、その移行期におけるCCSを組み合わせた化石燃料由来の水素利用において、当社の水素燃焼ガスタービンの果たす役割は大きい。今後も、大量かつ安定的な水素需要を生む水素発電で、国際的な水素サプライチェーンの構築を牽引し、CO₂フリーの水素社会に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 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
- (2) 再生可能エネルギー・水素等関係関係会議, 水素基本戦略, (2017)
<http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>
- (3) 壹岐典彦ほか, ガスタービンにおけるアンモニア燃焼利用, 第44回日本ガスタービン学会定期講演会(酒田)講演論文集 C-12 (2016.10) p.259~264

1650°C級 JAC 形ガスタービンを中核とする 第二T地点実証発電設備での検証結果

Validation Result of 1650°C Class JAC Gas Turbine on New T-point Demonstration Plant



| | |
|---|--|
| 森本 一毅* ¹ Kazuki Morimoto | 松村 嘉和* ² Yoshikazu Matsumura |
| 飯島 高善* ¹ Takayoshi Iijima | 若園 進* ³ Susumu Wakazono |
| 片岡 正人* ⁴ Masahito Kataoka | 由里 雅則* ⁵ Masanori Yuri |

近年、再生可能エネルギー(以下、再エネ)の普及が進んでいる一方で、その電源供給能力の不安定性等から、ガスタービン・コンバインドサイクル(以下、GTCC)の重要性がより高まっている。GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要であり、三菱パワー株式会社(以下、当社)は2004年から参画した国家プロジェクト“1700°C級超高温ガスタービン要素技術開発”の開発成果を活用して、世界初のタービン入口温度1600°Cの高効率機M501J形を開発、その運転実績を着実に積み重ねてきた。実績あるJ形をベースに、個々の要素としては既設T地点で検証を完了した、燃焼器強制空冷システム/超厚膜TBC(Thermal Barrier Coating)/高圧力比圧縮機といった中核技術を適用した、次世代1650°C級JAC形ガスタービンの試運転を2020年1月から第二T地点で開始し、機器信頼性、性能等の健全性の最終確認が完了したため、本報ではその実証結果について紹介する。

1. はじめに

昨今、CO₂排出量削減の重要性の高さから、風力発電や太陽光発電などの再エネによる電力供給が計画・実行されているが、自然変動の避けられない不安定電源であり、電力系統に急激な周波数変動や負荷変動が生じる等の懸念もある。その中で地球環境保全及びエネルギー安定供給の観点から、従来火力と比べ高効率かつ運用性に優れるGTCCの重要性がより高まってきている。GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており、当社は、1980年代に1150°C級大容量ガスタービンM701D形を開発後、タービン入口温度1350°CのM501F形、蒸気冷却式燃焼器を採用したタービン入口温度1500°CのM501G形を開発し(図1)、高いプラント熱効率と信頼性及び低公害性を実証してきた。高温・高効率化に欠かせない最新技術の研究開発に取り組むため、2004年からは国家プロジェクト“1700°C級超高温ガスタービン要素技術開発”に参画、その開発成果を活用して世界初のタービン入口温度1600°Cとなる高効率機M501J形ガスタービンを開発した。当社高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備(以下、既設T地点)にて2011年から実証運転を開始し、M501J形GTCCの運転実績を着実に積み重ねてきた。

J形ガスタービンは燃焼器の冷却に蒸気冷却方式を採用しているが、高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば、GTCCの更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため、当社では高温ガスタービンの空冷化を実現する次世代GTCCの開発に取り組み、その中核技術

*1 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部
*2 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部 首席技師
*3 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部 グループ長
*4 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部 部長
*5 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部 総括部長

である強制空冷システムを考案した。2015 年春にT地点にてシステム全体の検証試験を完了し、その後、10000 時間以上の長期運用を実施してきた。この中核技術はタービン入口温度 1650°C の高温化を達成した次世代高効率ガスタービン JAC 形(J-Air-Cooled)に適用されている。JAC 形ガスタービンの長期実機検証に向け、高砂工場内に複合サイクル発電所第2号発電設備(以下第二T地点)の建設を進めてきた。この度、第二T地点は 1650°C 次世代高効率ガスタービン JAC 形と新開発の高効率蒸気タービンを組み合わせた出力 566MW の最新鋭 GTCC 設備として、昨年 2020 年1月から試運転を開始し、4月2日にコンバインド定格出力 566MW 到達後、発電プラント運用に必要な諸試験・調整を実施し、発電設備としての機能確認を全て完了した後、7月1日より商業運転を開始している。また、JAC 形ガスタービンの採用により GTCC としての発電効率は64%に達するが、その根幹となる技術実証のために試運転中は通常の計器による計測以外に数千点にも及ぶ大規模な特殊計測を実施しオンラインで監視、評価を実施した。本報では、最新鋭の高効率ガスタービンである JAC 形の開発コンセプトと第二T地点実証発電設備における、JAC 形の検証結果について紹介する。

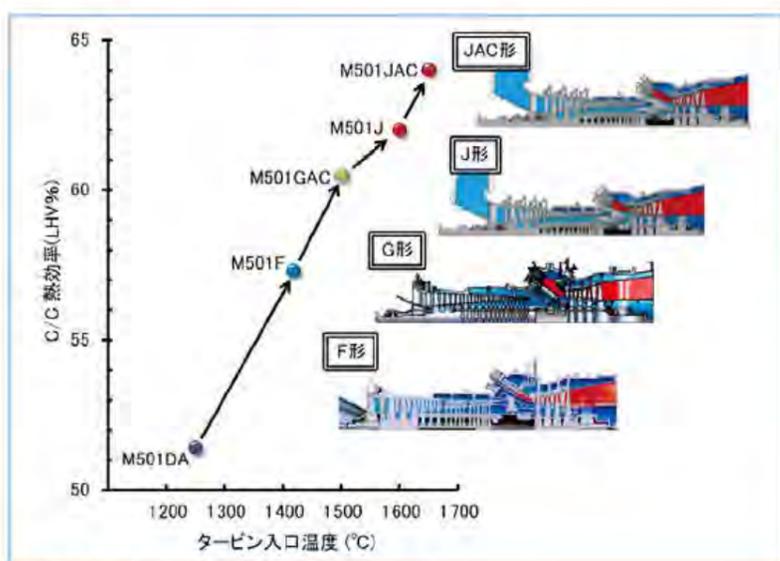


図1 大型ガスタービンの機種開発変遷

2. M501J 形ガスタービンの開発と実績

M501J 形では、豊富な運転実績のあるタービン入口温度 1400°C級F形、1500°C級G形・H形で実証済の要素技術を基盤とし、国家プロジェクトで開発された 1700°C級の最先端の技術開発成果を適用することにより、タービン入口温度 1600°Cを達成した。タービン入口温度の上昇及び最新の要素技術の採用により、GTCC 発電端熱効率は従来機と比べて大きく上昇した。CO₂ 排出量は、従来型石炭焼き火力発電所を天然ガス焼きJ形コンバインドサイクル発電所に置き換えた場合、約6割の削減が可能となる。図2に M501J 形の技術的特徴について示す。

M501J 形ガスタービンの開発は、基本設計の段階で各要素の検証試験を実施し、その結果を詳細設計に反映、最終的に実証発電設備にてガスタービン全体の実機検証を実施するサイクルを踏んできた。図3に当社高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備(既設T地点)の外観を示す。M501J 形初号機は、2011 年の試運転中に2300 点に及ぶ特殊計測を実施し、性能、機械特性、燃焼特性が目標値を満足することを実証し、商用機を出荷している。J形シリーズは国内外合計 76 台受注、順次出荷しており、現在まで 45 台が商用運転に入っており、累計 116 万時間以上の運転時間を達成している(図4)。

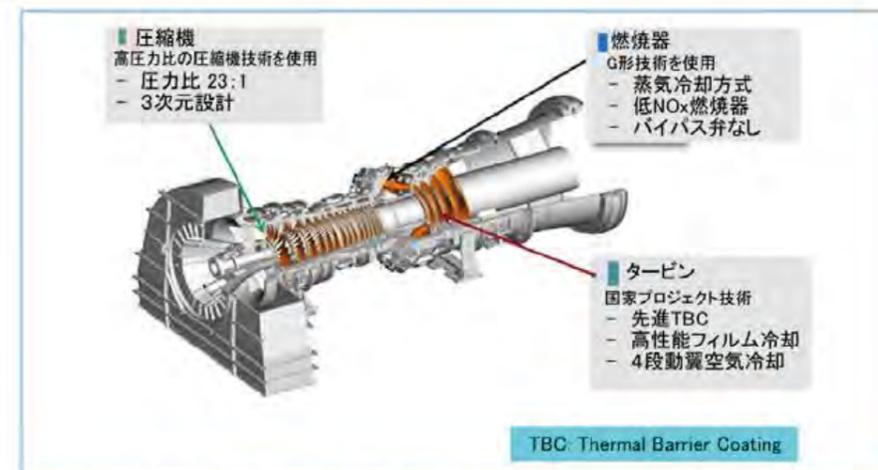


図2 M501J 形ガスタービンの各構成要素の技術的特徴



図3 三菱パワー高砂工場 ガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備(既設T地点)

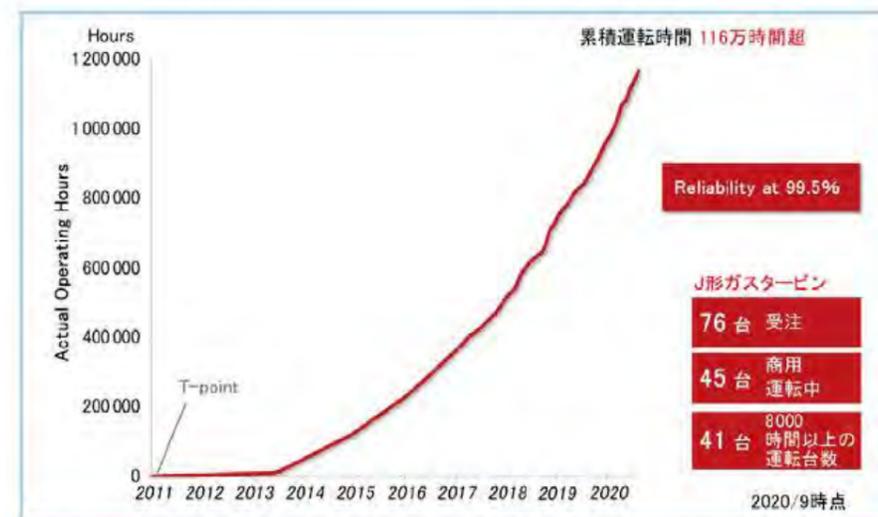


図4 M501J 形ガスタービンの運転実績(50Hz 機含む)

3. 1650°C級 M501JAC 形ガスタービンの開発コンセプト

当社では、実績のある M501J 形をベースとして、検証済の要素技術:①燃焼器強制空冷システム、②超厚膜化 TBC、③高圧力比圧縮機を適用することで、更なる高効率化、運用性改善を狙い 1650°C級次世代 JAC 形ガスタービンの開発を進めてきた。

本ガスタービンの基本コンセプトは以下であり(図5, 6), 個々の要素技術自体は既設T地点での検証を完了し, 1650°C JAC 形への適用を進めた(表1)。

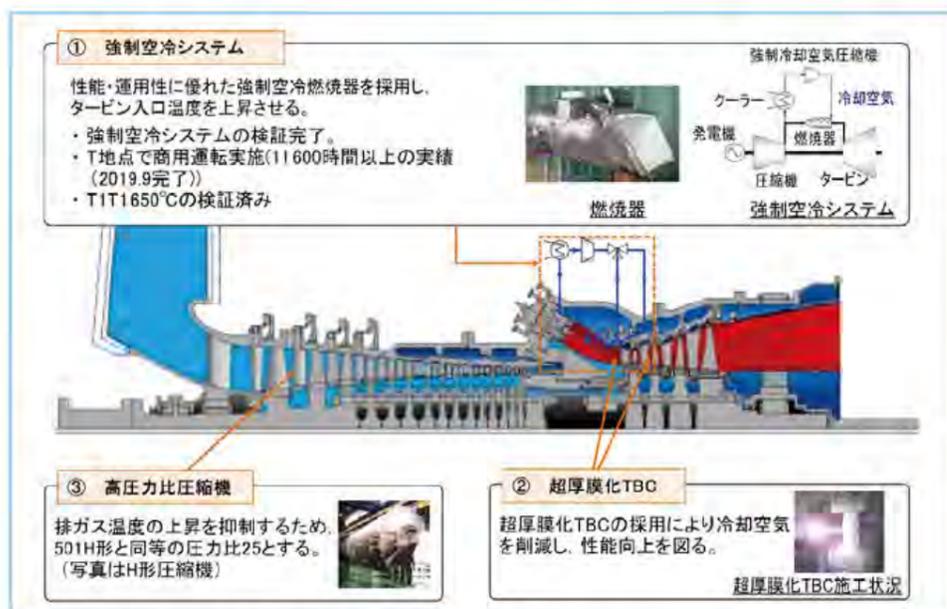


図5 1650°C級 JAC 形ガスタービンの開発コンセプト

| | 2013年度 | 2014年度 | 2015年度 | 2016年度 | 2017年度 | 2018年度 | 2019年度 | 2020年度 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|--------|--------------------------|--------|
| 1650°C級 M501JAC (高砂工場内 実証設備) | | | | | | | 1650°C級 実機検証 試運転 | 第二T地点 |
| ① 強制空冷システム (強制空冷燃焼器) | | | | | 強制空冷システムの長期検証 (T地点給電運転) | | | |
| | | | | | 強制空冷システム、燃焼器 (T地点、~1620°C) | | | |
| | | | | | 強制空冷システム、燃焼器 (T地点、~1650°C) | | | |
| | | | | | 低NOx燃焼器開発 | | | |
| ② 超厚膜化TBC | | | | | 超厚膜TBC検証 (T地点) | | | |
| ③ 高圧力比圧縮機 | | | | | | | 高圧力比圧縮機 実機検証 (T地点、圧力比25) | |
| ・圧力比25は501H形と同等で実績あり | | | | | モデル圧縮機試験 (STEP1:原点確認) (STEP2:起動特性確認) (STEP3:最終確認) | | | |

図6 要素技術の1650°C級 JAC 形ガスタービンへの適用の流れ

表1 ガスタービン性能比較(ISO, 標準条件)

| | M501J 形 | M501JAC 形 |
|---------------------|---------|-----------|
| 周波数(Hz) | 60 | 60 |
| 圧力比(-) | 23 | 25 |
| ガスタービン出力(MW) | 330 | 435 |
| ガスタービン効率(%-LHV) | 42 | 44 |
| コンバインドサイクル出力(MW) | 484 | 630 |
| コンバインドサイクル効率(%-LHV) | 62 | >64 |

- ① 強制空冷システム採用により、運用性を向上させるとともにJ形からタービン入口温度を上昇させる。
- ② 国家プロジェクト技術をベースに開発された超厚膜化 TBC の採用により、タービン入口

温度上昇に対し、高性能化と信頼性を両立させる。

- ③ H形と同等の高圧力比設計圧縮機を採用することにより、ガスタービン出口排気ガス温度の上昇を抑制する。

4. 1650°C級 M501JAC 形ガスタービンに適用の中核技術検証

JAC 形ガスタービンに適用した中核要素技術及び、その長期実証結果を示す。

4.1 燃焼器 強制空冷システム

システム概要

J形ガスタービンは燃焼器の冷却に蒸気冷却方式を採用しているが、高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば、GTCC の更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため、高温ガスタービンの空冷化を実現する技術として、強制空冷システムを考案した。強制空冷システムの採用により、タービン入口温度 1650°C級であっても空冷化を実現でき、高い複合発電効率の達成とともに、プラント全体の運用性改善が可能となる。本システムは2015年春に、既設T地点においてシステム全体の実機検証試験を完了しており、その概要を紹介する。

強制空冷システムは圧縮機出口(燃焼器車室)から抽気した空気を強制冷却空気冷却器(クーラ)にて冷却し、その後強制冷却空気圧縮機で昇圧して燃焼器の冷却に用いたのちに燃焼器内部の燃焼領域に戻す系統としている(図7)。

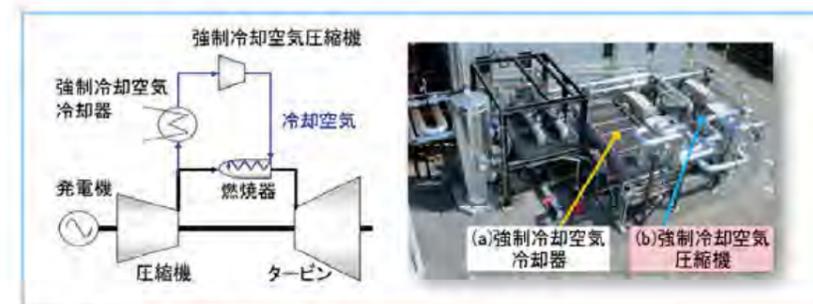


図7 強制空冷システム概略図と既設T地点検証設備

次に、強制空冷システムの特徴について以下に述べる。

- (1) 従来の蒸気冷却は排熱を全てボトム側で回収するのに対し、強制冷却空気システムでは一部の排熱をトップ側で回収させることでより効率のよいシステムとすることが可能
- (2) 燃焼器冷却構造を最適化することで既存の蒸気冷却と同等以上の冷却性能達成が可能
- (3) 蒸気冷却に比べ GTCC 全体の起動時間短縮が可能

強制空冷システムを採用した次世代 GTCC の効率向上には、少ない冷却空気量で効率的に冷却可能な燃焼器を開発し、強制冷却空気冷却器の排熱低減と回収効率向上、強制冷却空気圧縮機の動力を低減していくことが重要となる。

強制空冷システムの実機検証

2015年春、既設T地点にて強制空冷システムの実プラントにて要求される運用性、すなわち起動停止、負荷変化、負荷遮断といった過渡的な変化に対する追従性を検証し、全て問題ないことを確認した。ガスタービントリップ試験時の強制冷却空気圧縮機運転点挙動についても試験実施し、ガスタービン 100%負荷からのトリップにおいて、強制冷却空気圧縮機がサージに入ることなく、安全に停止できることを確認した。

この強制空冷システムは既設T地点にて運転、長期検証を実施し 10000 時間以上の運転実績を積み上げた。

4.2 超厚膜化 TBC

1650°C級 JAC 形ガスタービンは、J形タービン入口温度に対し+50°Cとなるが、超厚膜化

TBCの採用により、高性能化と信頼性を両立させている。一般的にTBCを厚くすると耐久性が低下するが、国家プロジェクト技術をベースに開発されたTBCは従来以上の耐久性を有し、超厚膜化が可能となった。なお、超厚膜化TBCの検証は、施工検証としてクーボン試験片を採取し、ミクロ組織、気孔率を確認したのち、熱サイクル試験を実施して耐久性に問題ないことを実機適用前に確認した。実機検証では燃焼器、タービン1～3段動静翼、分割環に超厚膜化TBCを施工し、長期検証によって信頼性を確認した。図8にタービン1段静翼にて実施した超厚膜化TBCを示す。



図8 タービン1段静翼 超厚膜 TBC の既設T地点での検証結果

4.3 高圧力比圧縮機

1650℃級 JAC 形ガスタービンの圧縮機は、当社運転実績のあるH形と同等の高圧力比設計を採用し、圧力比をJ形の23から25へ上昇させることにより、ガスタービン入口温度上昇に伴う排気ガス温度の上昇を抑制させる仕様とした。圧力比25の大風量圧縮機自体は2001年に既設T地点で、同じく圧力比25のH形圧縮機にて検証済である。これに加え2018年5月には、既設T地点にてJ形ベース、圧力比25として設計した圧縮機の実機検証を実施し、起動特性及び空力性能が良好であることを確認した。

5. 1650℃級 M501JAC 形ガスタービンの第二T地点における実証結果

第二T地点は1650℃次世代高効率ガスタービン JAC 形と新開発の高効率蒸気タービンを組み合わせた出力566MWの最新鋭GTCC設備であり、M501JAC形ガスタービンは2019年春に工場出荷/オンベースし、2020年1月から第二T地点での試運転を開始した。試運転はガスタービン単体での運転から開始し、初回着火から10回の起動でガスタービン定格負荷に到達、その後蒸気通気しCC(Combined Cycle)運転で運用性確認試験を実施し7月1日より商業運転を開始している(図9、10)。試運転ではガスタービン起動昇速から無負荷定格速度、部分負荷、定格負荷運転中の状態量を常時監視しながら、機器の信頼性、実力性能、排ガスエミッション等を最終確認し、その後商用実プラントで求められる機能試験/特殊試験を完了させた。



図9 第二T地点の試運転工程

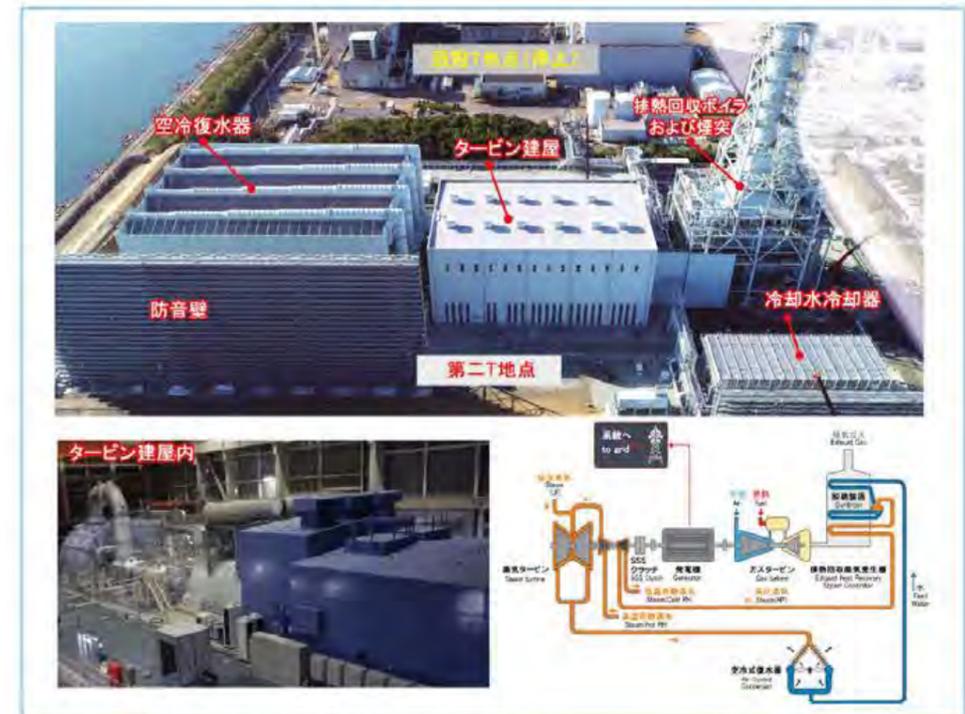


図10 第二T地点 コンバインドサイクルプラント概要

JAC 形ガスタービンの根幹となる技術実証のために試運転中には約2800点を超える大規模の特殊計測を実施し、健全性評価を行った。回転部については、約100点に及ぶ大規模テレメータ計測も実施し、圧縮機ロータ、タービン翼のメタル温度や振動応力健全性を確認した。本章では各要素の健全性について最終確認した結果を紹介する(図11)。

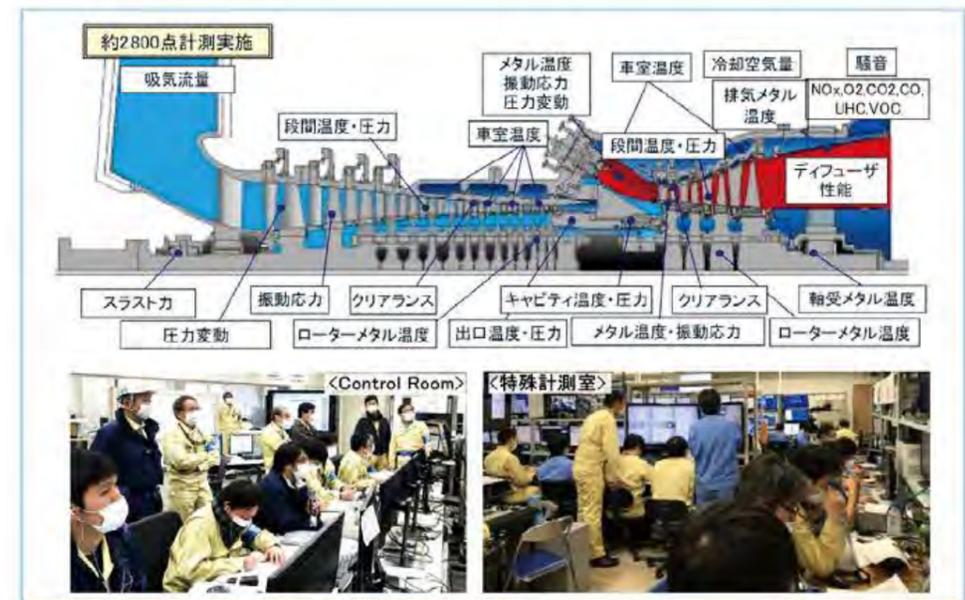


図11 試運転及び特殊計測実施状況

5.1 強制空冷燃焼器及び強制空冷システム

強制空冷システムについては既設T地点にて過渡的な変化に対する追従性を含め検証済であるが、本試運転にて強制空冷燃焼器のメタル温度を計測し、実機における冷却性能について最終検証し、燃焼筒メタル温度分布は設計許容値より低く、冷却性能に問題ないことを確認した。

(図 12)。また、燃焼振動特性や排ガスエミッションについても特に問題なく、部分負荷から全負荷まで安定運用可能であることを確認した。

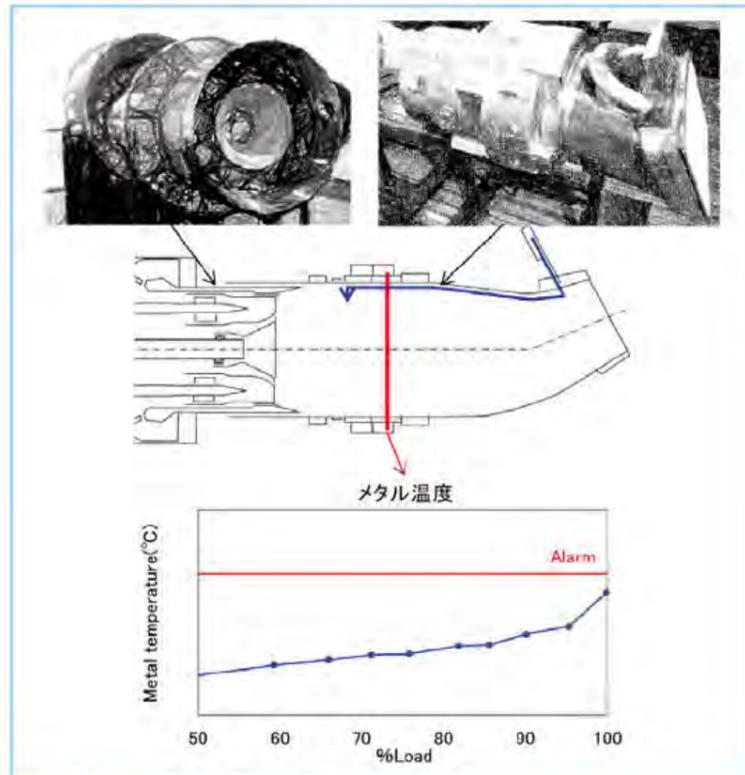


図 12 強制空冷燃焼器のメタル温度計測結果

JAC 形ガスタービンでは強制空冷システムをベースとし、負荷運転時のクリアランスコントロールを可能とするシステムを採用している。本システムでは、冷却空気をタービン翼環パイパスさせて直接燃焼器へ導入する供給方法と、負荷運転中のタービンクリアランスを低減することで性能を最大化するため、タービン翼環に通気した後に供給する方法の2系統があり、負荷運転中でも切り換え(三方弁)にて切り換え可能である。前者では、クリアランスを開けておくことで大きな負荷変化運転に対応可能である(Flexible Mode)。一方後者では負荷ホールド運転中にクリアランスを詰めることができ、定常運転時の性能を最大化できる(Performance Mode)。図 13 に負荷運転時の三方弁切り換えによるクリアランス挙動を示す。本システムにより性能を最大化したまま従来以上の運用性向上が可能であることを最終確認した。

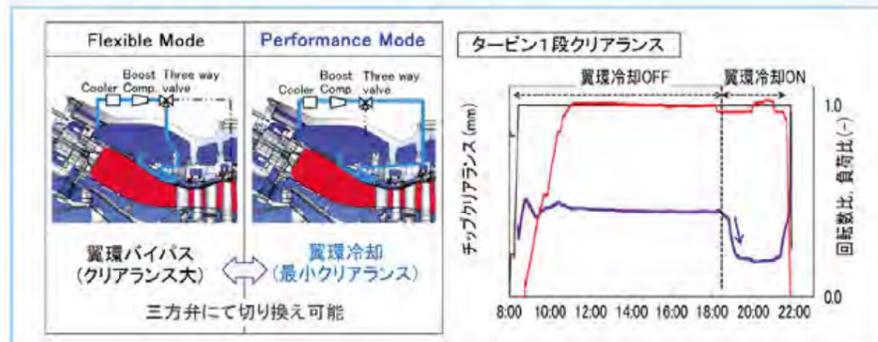


図 13 強制空冷システムによるタービンクリアランス制御

5.2 タービン翼メタル温度

1650℃級 JAC 形ガスタービンは、J形タービン入口温度に対し+50℃となるが、高性能化と信頼性を両立させるために超厚膜化 TBC を採用している。前述の通り、超厚膜化 TBC はT地点で長期検証し健全性を実施確認済であるが、その TBC を適用し冷却設計を最適化した JAC 形タービン1段静翼の特殊計測メタル温度分布を図 14 に示す。1段静翼は最も熱負荷の厳しい翼となり冷却構造も複雑となるが、局所的な高温部もなく、いずれの部位も設計許容温度以下であり、入口ガス温度 1650℃条件での健全性を確認し、約 2000 時間運転後の点検でも健全であることを確認した。

タービン1段動翼についてはテレメータ計測による翼面メタル温度/振動応力の確認に加え、T地点で導入実績のあるパイロメータ計測を実施した。燃焼器車室及びタービン1段静翼に挿入孔を設け、計測時にパイロメータを待機ポジションからガスパス内に挿入することで特に熱負荷の高くなる翼面前縁周囲の翼表面温度分布の健全性を確認し、約 2000 時間運転後の点検でも健全であることを確認した(図 15)。

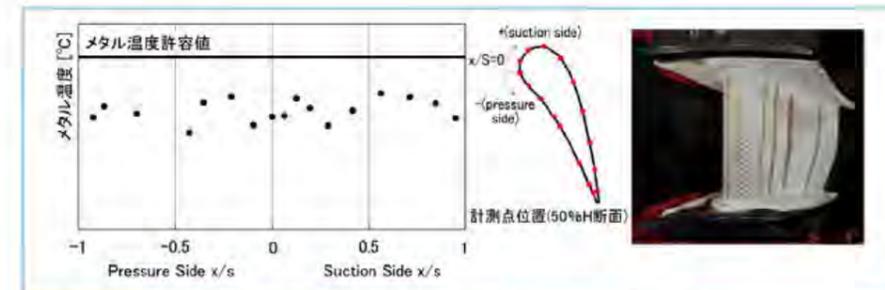


図 14 タービン1段静翼メタル温度分布計測結果と運転後点検結果

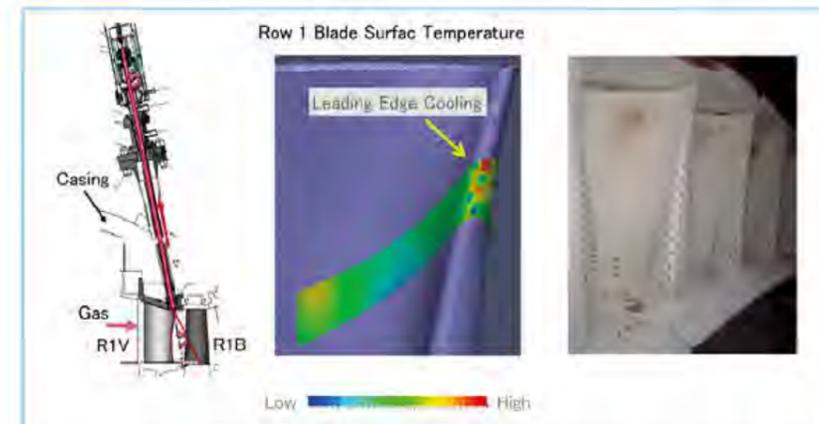


図 15 タービン1段動翼表面温度分布計測結果と運転後点検結果

5.3 高圧力比圧縮機

1650℃級 JAC 形ガスタービンの圧縮機は、圧力比をJ形 23 から 25 へ上昇させているが、高圧力比圧縮機は出口流路面積を相対的に絞った設計とすることから、圧力比の低い起動中には流量が低下し、回転失速が相対的に悪化する懸念がある。前述の通り、同様に圧力比 25 のH形圧縮機、及び、2018 年5月には、J形ベースで圧力比 25 として設計した圧縮機をT地点にて検証したが、JAC 形でも詳細な特殊計測を実施し、起動特性、翼の振動応力や空力性能が良好であることを最終確認した。(図 16)。

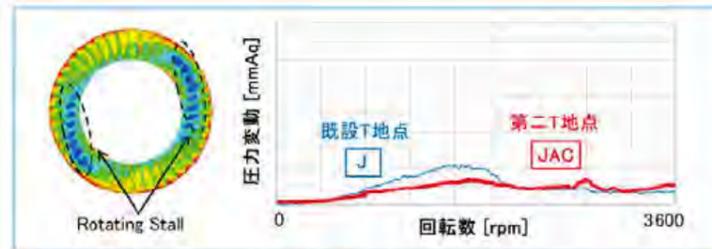


図16 JAC形ガスタービン高圧力比圧縮機実証結果

6. まとめ

GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており、当社は2004年から参画した国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”の開発成果を活用して、世界初のタービン入口温度1600℃の高効率機M501J形を開発、その運転実績を着実に積み重ねてきている。GTCCの更なる高効率化と運用性改善のため、実績あるJ形をベースに、燃焼器強制空冷システム、超厚膜TBC、高圧力比圧縮機を中核技術として適用した、次世代1650℃級JAC形ガスタービンを開発、個々の要素としては既設T地点で検証完了した。

JAC形ガスタービン長期実証に向け、高砂工場内に複合サイクル発電所第2号発電設備(第二T地点)の建設を進めてきたが、昨年2020年1月から試運転を開始、約2800点にも及ぶ大規模の特殊計測を実施し、1650℃運転でのJAC形機器信頼性、性能等の健全性を最終確認した。第二T地点では4月2日にコンバインド定格出力566MW到達、発電設備としての機能確認を全て完了した後、7月1日より商業運転を開始し現在も運転時間/起動回数を積み重ねている。

また、実証済のJAC形ガスタービンは北米等の商用機向けにも順次出荷を開始している。米国ユタ州で計画されているGTCC発電プロジェクト向けに水素混焼も計画されており、独自開発した燃焼器技術を組み込むことで、水素混焼率30%でJAC形ガスタービンを運転開始し、将来的には水素100%での運転を目指している。

第二T地点の長期実証運転は、遠隔監視センター(RMC:Remote Monitoring Center)から行われ、ガスタービンなどの主要機器のみならず、補機を含めたプラント全体の信頼性向上、起動時間短縮や運転パラメータの自動最適化など、デジタルソリューション“TOMONI”に搭載された各種アプリケーションの検証を行い、将来的には自動自律運転の実現も目指していく予定である。

参考文献

- (1) 若岡, 由里他, 最新鋭1650℃級JAC形ガスタービンの実機実証, GTSJ Vol.48 No.6 (2020.11)
- (2) 高村, 若岡, 由里ほか, J形ガスタービンの運転実績踏まえた1650℃級JACガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.3 (2019)
- (3) 松見, 川村ほか, 負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術, GTSJ Vol.47 No.1 (2019.1)
- (4) Hada, S., Masada, J., Ito, E. and Tsukagoshi, K., Evolution and Future Trend of Large Frame Gas Turbine for Power Generation - A new 1600 degree C J class gas turbine -, ASME Turbo Expo, GT2012-68574
- (5) 羽田, 由里ほか, 発電用高効率ガスタービンとその運転実績, 三菱重工技報 Vol.52 No.2 (2015)
- (6) 塚越, 発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望, GTSJ Vol.41 No.1 (2013-1)
- (7) 高田, 次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備の開発, GTSJ 第43回ガスタービン学会定期講演回(米子)講演論文集 (2015-9)
- (8) 山崎ほか, 次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備開発への取り組み, 『火力原子力発電』別冊(CD-ROM) (2013年2月発刊)
- (9) 若岡, 由里, 正田ほか, J形ガスタービンの運転実績とJACの開発, 三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)

水素社会へ向けた次世代大型燃料電池 SOFC の展開

Development of the Next-Generation Large-Scale SOFC
toward Realization of Hydrogen Society



| | |
|--|--|
| 小林 由則* ¹ Yoshinori Kobayashi | 富田 和男* ² Kazuo Tomida |
| 西浦 雅則* ³ Masanori Nishiura | 樋渡 研一* ³ Kenichi Hiwatashi |
| 岸沢 浩* ³ Hiroshi Kishizawa | 武信 弘一* ⁴ Koichi Takenobu |

三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)では、高温作動の燃料電池である固体酸化物形燃料電池(SOFC)をガスタービンなどの他の発電システムと組み合わせた複合発電システムの開発を進めており、その内の一つであるSOFCとマイクロガスタービン(MGT)を組み合わせたハイブリッドシステムの実用化に向け、東京ガス(株)千住テクノステーションにて実証試験を進めてきた。2013年3月より運転を開始し、200kW級のSOFCとマイクロガスタービン(MGT)を組み合わせた加圧型SOFC-MGTハイブリッドシステムで、世界初となる4100時間の長時間連続運転を達成し、夏場の重負荷期を含め安定な運転状態を示した。その成果を基に新たなコンパクト型の実証機の設計を進め、2015年3月に国立大学法人九州大学に設置した。今後実証研究や基盤研究に活用される予定である。

1. はじめに

地球温暖化問題、エネルギー問題、そして経済問題を同時に解決するためには、エネルギー源の低炭素化とエネルギー利用の高効率化が必須である。従って、主要な温室効果ガスの一つであるCO₂排出量の削減には、高効率の火力発電等の集中電源により構築された現状の電力基盤インフラをベースとして、分散電源を地点・容量に応じて合理的に組み合わせ、その上で再生可能エネルギー等の新エネルギーを経済的・合理的に最大限導入していく必要がある。また、地球規模でのエネルギー資源の保全のためにも、高効率発電システムを開発し、早期普及させることにより、化石燃料を徹底して有効活用することが急務の課題となっている。本稿では、MHPSのこれまでのSOFCの開発状況、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)事業にて取り組んでいるSOFCとMGTを組み合わせた複合発電システムである、SOFC-MGTハイブリッドシステムの実証状況、及び今後の展開について紹介する。

2. SOFC 複合発電システムの構成

2.1 セルスタック

MHPSの円筒形SOFCセルスタックの構造を図1に示す。構造部材である基体管の外表面に発電反応を行う電池(燃料極/電解質/空気極の積層体)を形成し、インターコネクタと呼ぶ電子導電性セラミックスで電池間を直列に接続している。熱膨張係数の近い構成部材を選定するとともに製造技術の改良により一体焼結を採用することで、製造コストを削減し、さらには構成材料間の接着強度を向上させ、性能・耐久性の向上を図っている。

- *1 三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室 主幹・技監 工学博士
- *2 三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室 次長 工学博士
- *3 三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室 グループ長
- *4 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部 主席技師 工学博士

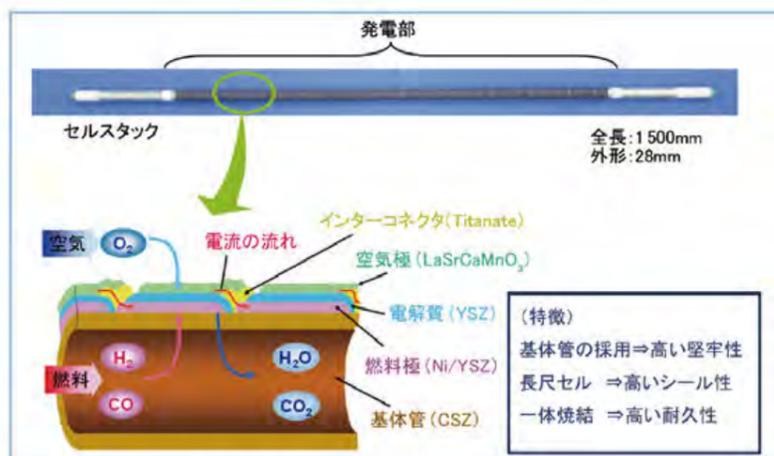


図1 円筒形 SOFC セルスタックの構造

MHPS では、独自に高性能のセルスタックの開発を行ってきた。10 式と称するセルスタックではセル数を 85 まで増加させ、かつ、インターコネクタの組成の最適化や空気極の調整等を行い、セルスタックあたりの出力を30%向上させている。また、更なる高性能化に取り組んでいる15式のセルスタックでは、電極と電解質の界面等を改良し、10 式に比べ更に 50%の出力密度の向上を図っている(図2)。

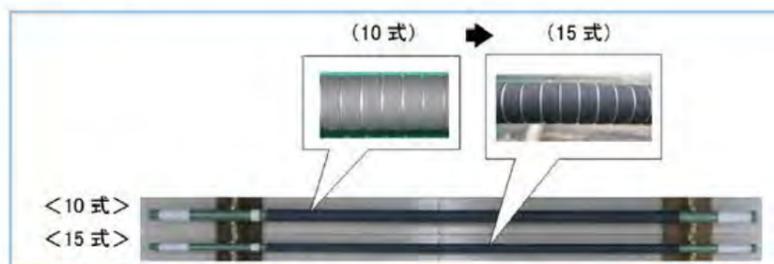


図2 円筒形 SOFC セルスタック

2.2 カートリッジ

セルスタックを束ねて数十 kW の電気を出力するカートリッジを形成し、このカートリッジを必要な容量だけまとめて圧力容器の中に格納しモジュールを構成している(図3)。

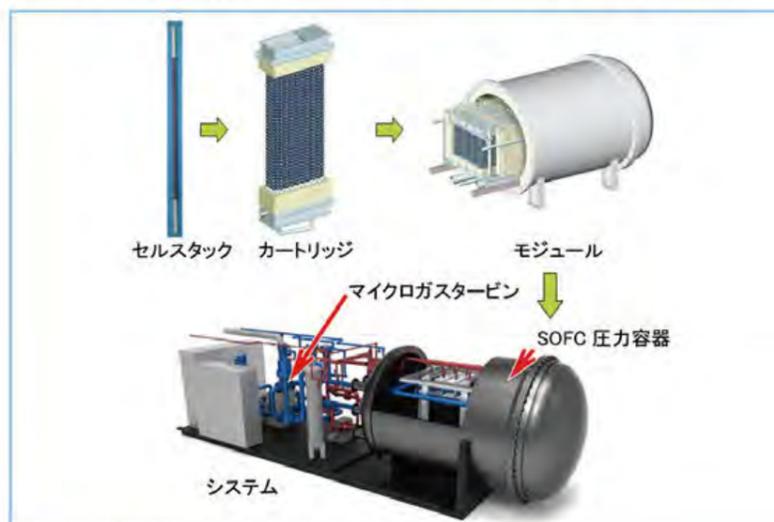


図3 SOFC-MGT ハイブリッドシステムの構成

このような階層構造を取ることで、据付けやメンテナンス性まで考慮したシステム化を図っている。また、カートリッジの数、あるいはモジュールの数により、電気出力を調整できるため、必要とされる幅広い電気出力に対応することが可能である。

カートリッジでは、単位体積当たりの出力密度の向上及びコンパクト化を指向している。充填密度が高まると発熱密度が増加するが、カートリッジの伝熱・冷却設計を行い、伝熱特性を制御し発電部及び発電部前後での熱交換部で従来どおりの伝熱量を確保している。15 式では、セルスタックを小径長尺化することで、体積当たりの出力密度を増加させ、システム設置面積をコンパクトにすることが可能である(図4)。

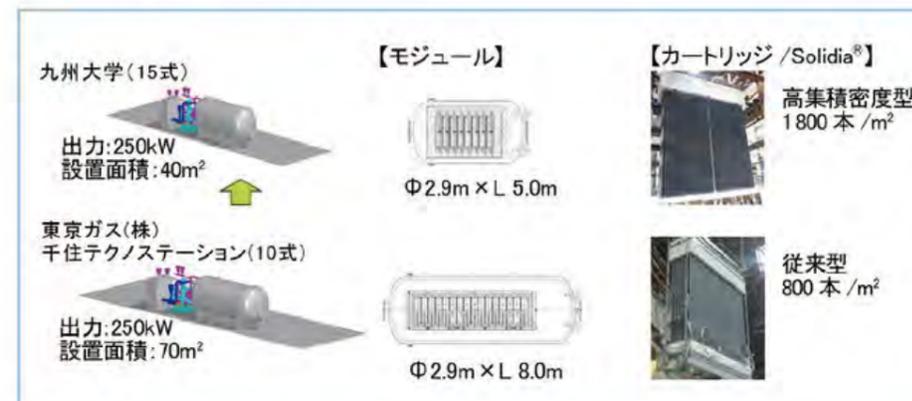


図4 低コスト量産用セルスタック・カートリッジの開発

2.3 システム

図5に示すハイブリッドシステムは、SOFCとマイクロガスタービン(MGT)の2段階にて発電するシステムであり、排ガス系統に排熱回収装置を設置することで、蒸気、温水を同時に供給するコージェネレーションシステムとすることが可能である。

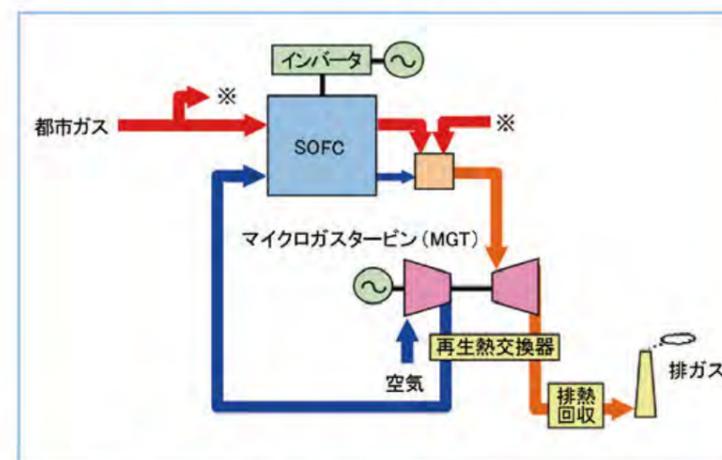


図5 SOFC-MGT ハイブリッドシステムの系統

3. ハイブリッドシステムの市場導入計画

3.1 東京ガス(株)での実証試験(10 式実証機)

これまでの成果を踏まえ、2011~2014年度には、NEDO 事業にて10式250kW級SOFC-MGTハイブリッド実証機の開発・評価を東京ガス(株)千住テクノステーションにて行った。MGT には、(株)トヨタタービンアンドシステム製のものを採用した(図6)。

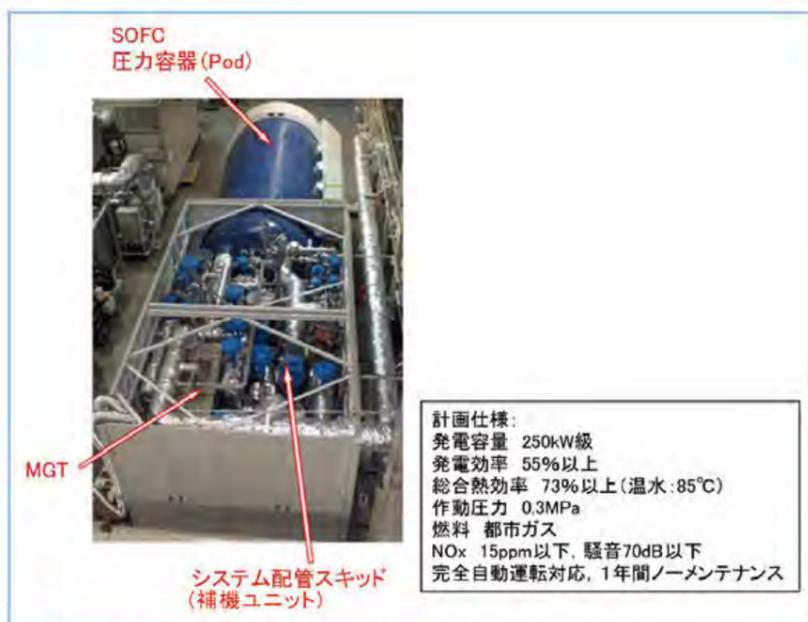


図6 10式 SOFC-MGT ハイブリッドシステム実証機

この実証機において、SOFC-MGT ハイブリッドシステムの初期導入促進に向けた課題抽出と導入促進のための規制緩和の検討を行った。特に、現時点では SOFC-MGT ハイブリッドシステムは、燃料ガス圧力が 100kPa 以上の加圧システムであるため常時監視を必要とする発電システムとして位置付けられており、本格普及のためには常時監視の規制を見直す必要があると考えている。そのため、規制緩和に必要な技術データとして、システム安全性の設計根拠やシステム長期耐久性試験の他に、起動停止、負荷変化、システムの異常時を想定した緊急時の対応等の運転データを取得し、システムの信頼性・安全性を実証した。

これらの各種検討・試験データの評価、及び規制緩和の活動は、(一社)日本ガス協会、燃料電池実用化推進協議会、(一社)日本電機工業会等のご協力を得ながら進めた。

システム長期耐久性としては、計画停止までの間、4100 時間超の連続運転を行い、定格負荷一定条件において経時劣化は見られず、電圧低下率 0%/1000h で安定していることを確認している(図7)。

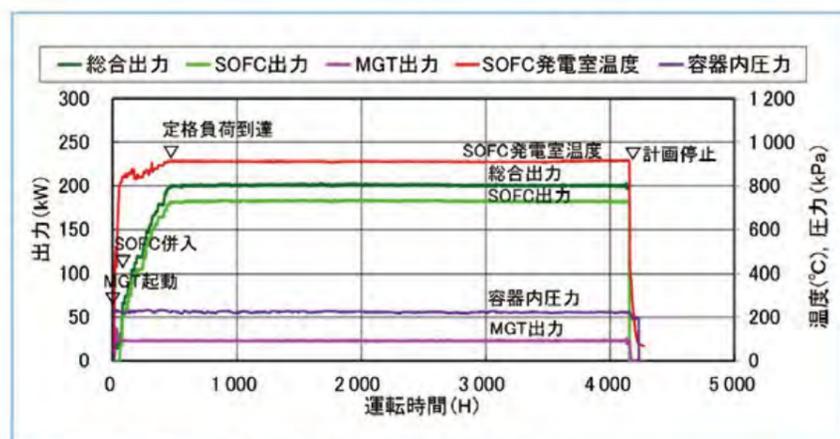


図7 SOFC-MGT ハイブリッドシステム耐久性試験状況

3.2 九州大学での実証試験(15式実証機)

10式実証機の成果を基に15式実証機の設計を進め、2015年3月、九州大学の伊都キャンパス(福岡市西区)に設置した。今後、本実証機は、次世代燃料電池産学連携研究センター(NEXT-FC)^{注)}における、グリーンアジア国際戦略総合特区“スマート燃料電池社会実証”での実証研究や関連するSOFCの性能・耐久性・信頼性の向上のための基盤研究に活用される予定である(図8)。

注)次世代燃料電池産学連携研究センター:SOFCの本格普及につなげる産学連携の推進を目的に設立された。



図8 九州大学での15式 SOFC-MGT ハイブリッドシステム実証機

3.3 市場導入計画

今後、SOFC-MGT ハイブリッドシステムの高効率・コージェネレーション、静粛性・環境性等の優れた特長を活かし、病院やホテル、銀行、データセンターなどの業務用・産業用分野へ分散型電源として導入を図りたいと考えている。システム仕様を表1に示す。2015年度からはサンプル機という位置付けで、先行的に市場へ投入しお客様の評価を受けていきたいと考えている。そして、2017年以降の本格的な市場投入に向けて、サンプル機で得られた評価・知見を活かして耐久性及び可搬性等の向上に取組み、より商品力を持つシステム仕様へ改良し、更に低コスト化を図っていく。

表1 システム仕様

| 250kW SOFC-MGT ハイブリッドシステム | |
|---------------------------|---|
| 外観 |  |
| 定格出力 | kW 250 |
| 送電端効率 | %-LHV 55 |
| 総合効率 | %-LHV 73(温水) 65(蒸気) |
| ユニット寸法 | m 12.0×3.2×3.2 |
| 運用 | コージェネレーション運用 |

本仕様は計画値である。

4. 水素社会へ向けた展開

4.1 マルチエネルギーステーション(クアトロジェン[®])

今後の低炭素社会・水素社会へ向け、ハイブリッド機を用いた以下の取り組みを検討中である。SOFCは図9(a)の通り、都市ガスの内部改質により生じる水素及び一酸化炭素を用いて電気及び熱を発生する。ここで、図9(b)の通り内部改質により生じる水素の一部を発電に回さず直接取り出して利用することも可能であるため電気・熱・水素の同時供給が可能であり、更に燃料である都市ガスも併せて供給するクアトロジェンが可能となる。この仕組みを水素ステーションへ応用

すれば、FCV(燃料電池車)のみならず EV(電気自動車)及び CNGV(圧縮天然ガス自動車)等の低炭素自動車へ燃料を同時供給できるため、ステーション収益性の向上が見込まれる(図9(c))。

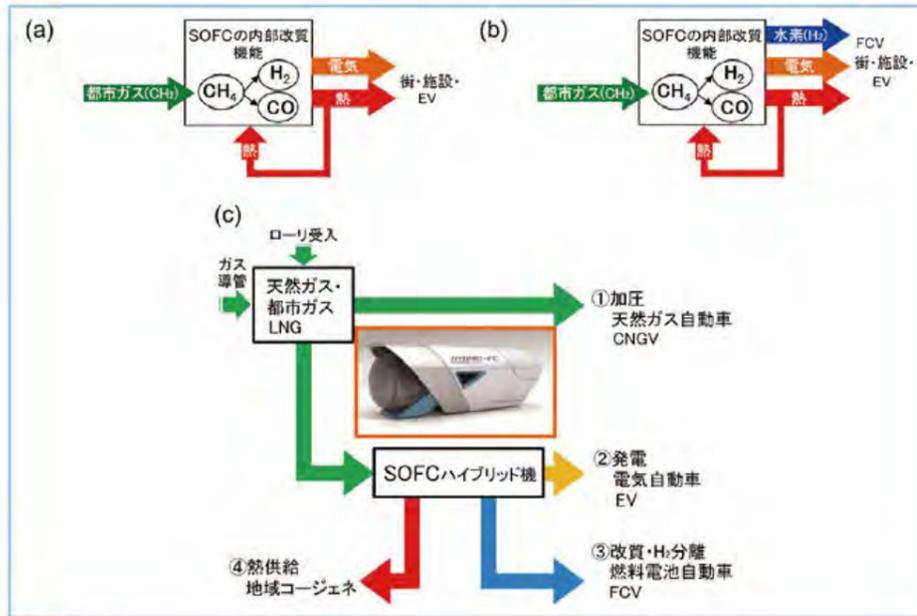


図9 クアトロジェンのイメージ
(a)従来SOFCによる電気及び熱供給, (b)内部改質機能を利用した水素製造, (c)水素ステーションへの応用例

4.2 エネルギーの地産地消(再生可能エネルギー利用)

都市部の下水処理場にて発生する消化ガスを用いても発電できるものと考えている。更に消化ガスは通常60%程度のメタンであるため、CO₂分離の技術を利用すれば高純度メタンを燃料として高効率消化ガス発電も可能と考える。上述のクアトロジェンを適用すれば消化ガス由来の「都市産水素」の生産も可能となり、「都市部で出来るエネルギーの地産地消」が期待できる(図10)。

これらハイブリッドシステムによる付加価値の創出により SOFC の市場導入を加速させていきたい。



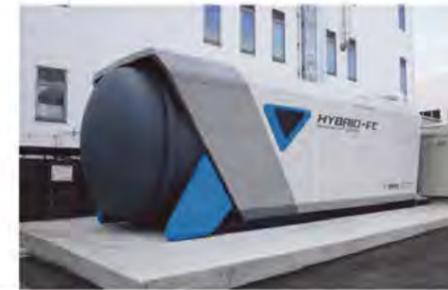
図10 消化ガス発電のイメージ

5. まとめ

経済産業省の水素・燃料電池戦略ロードマップが2014年6月に策定され、その中で、業務用・産業用燃料電池の2017年度の市場導入も明言された。MHPSにおいても、SOFC-MGTハイブリッドシステムを着実に確立するとともに早期実用化を進め、「安全で持続可能なエネルギー環境社会」の構築に大きく貢献していきたいと考えている。

SOFC-MGT ハイブリッドシステムの市場導入に向けた取り組みについて

Development of SOFC-Micro Gas Turbine (MGT) Hybrid Systems for Commercialization



| | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 富田 和男* Kazuo Tomida | 河戸 希美* Kimi Kodo |
| 小林 大悟* Daigo Kobayashi | 加藤 芳樹* Yoshiki Kato |
| 末森 重徳* Shigenori Suemori | 浦下 靖崇* Yasutaka Urashita |

将来の低炭素社会に向けて、高効率な発電が可能な固体酸化物形燃料電池(SOFC)をガスタービンと組み合わせたSOFC-MGTハイブリッドシステムの開発を進めている。250kW級機においては、2015年度より、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)の助成事業にて、国内4か所にて実証機を設置し、耐久性の検証、実負荷環境での起動停止試験や負荷変化試験などの市場投入に向けた実証を実施し、安定して稼働できることを確認した。その結果を受け、2017年より250kW級機の市場投入を開始している。更に、2016年度よりNEDO委託事業にて、従来から大容量化した1MW級機の検証を開始しており、現在三菱日立パワーシステムズ(株)(以下、MHPS)長崎工場にて実証試験を実施中である。

1. はじめに

昨今、日本のエネルギー情勢は大きな転換期を迎え、高効率発電、電源セキュリティに対する意識が高まったと感じられる。地球温暖化抑制のためのCO₂排出量削減と、現代社会に不可欠な電力の安定供給を両立させていくためには、火力発電等の集中電源により構築された高度な電力網に、高効率な分散電源や再生可能エネルギー等の新エネルギーを、質・量ともにベストミックスで組み合わせていくことが重要である。また、地球規模でのエネルギー資源の保全のためにも、高効率発電システムを開発し、早期普及させることにより、化石燃料を徹底して有効活用することが必須かつ急務の課題となっている。日本における最終エネルギー消費は、産業部門が全体の40%を超え、更に民生用の業務分野を加えると60%強を占めていることになり、業務産業分野の燃料電池の普及は、日本のエネルギー事情を改善させる大きな手段の一つと考えられる。

MHPSでは、250kW級の中容量分散型電源から、経済産業省主催の次世代火力発電の早期実現に向けた協議会で示された大規模集中電源用のガスタービン燃料電池複合発電(GTFC)や石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)に及ぶまで、非常に広い出力レンジで高効率が期待できるSOFC複合発電システムに着目し開発を進めている。

2. SOFC-MGT ハイブリッドシステムの構成

円筒形SOFCの発電要素であるセルスタックの構造を図1に示す。セラミックス製の構造部材である基体管の外表面に、発電反応を行う素子(燃料極/電解質/空気極の積層体)を形成し、電子導電性セラミックスのインターコネクタで素子間を直列に接続している。このセルスタックを数百本束ねカートリッジを構成し、カートリッジを圧力容器の中に格納したものをSOFCモジュールと呼んでいる(図2)。

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) 燃料電池事業室 グループ長 *2 三菱日立パワーシステムズ(株) 燃料電池事業室
*3 総合研究所化学研究部 *4 総合研究所伝熱研究部

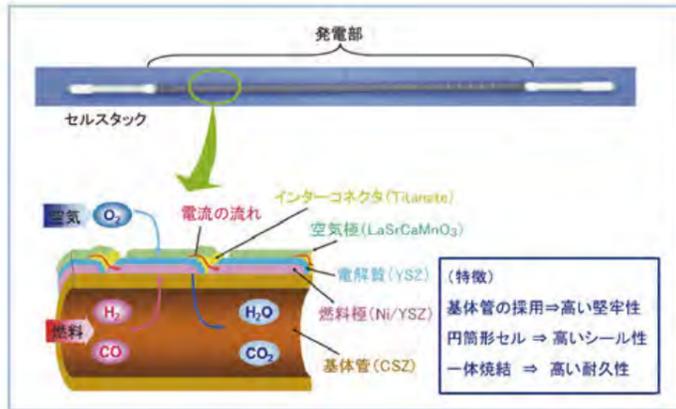


図1 セルスタックの構造



図2 ハイブリッドシステムの構成

本システムは、SOFC、マイクロガスタービン(MGT)や再循環プロワ等から構成される。SOFCとMGTの2段階にて発電し、更に排ガス系統に排熱回収装置を設置することで、蒸気、或いは温水を同時に供給するコージェネレーションシステムとすることが可能である(図3)。

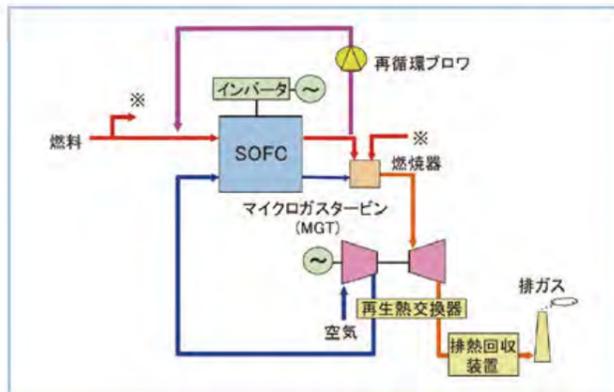


図3 ハイブリッドシステムの系統

3. 250kW 級での取り組み

2015年度よりNEDOの助成事業“固体酸化物形燃料電池を用いた業務用システムの技術実証”にて、市場投入に向けた実負荷環境での実証試験を実施した。

実証サイトは、トヨタ自動車(株)・元町工場、日本特殊陶業(株)・小牧工場、東京ガス(株)・千住テクノステーション、大成建設(株)・技術センターの4地点となる(図4)。



図4 燃料電池 SOFC の運転・計画状況

なお、本助成事業は課題設定型事業で、各サイトにてそれぞれ主となる課題・検証項目を設定し、実証試験を行っている。各サイトでの実証内容は以下の通りである。各サイトで電力需要の変化や起動停止による性能・耐久性への影響を評価している。

- ・トヨタ自動車向け実証機: 起動停止試験(1回/月)継続中。
- ・日本特殊陶業向け実証機: 連続耐久試験継続中。
- ・東京ガス向け実証機: 起動停止試験(1回/週)を31回実施。
- ・大成建設向け実証機: 自立運転機能検証試験済。

その結果を受け、2017年より250kW級機の市場投入を開始している。市場投入するモデルは4サイトでの実証結果を反映したモデルとなる。商用機第1号を三菱地所(株)丸の内ビルディングに納めており、今年度中に運転を開始する予定である。2018年8月現在、本体の据付工事まで完了している。

電源開発(株)が実施しているNEDO研究開発“燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究”用に、2017年度に電源開発(株)若松研究所に250kW級機を納めている。

4. 1MW 級 SOFC-MGT ハイブリッドシステム実証状況

SOFCとガスタービンとを組み合わせたGTFCについては、平成27年7月に官民協議会により策定された“次世代火力発電に係る技術ロードマップ”において、小型GTFC(1MW級)の商用化、量産化を進め、SOFCのコスト低減を図り、中小型GTFC(10万kW級)の実証事業を経て、2025年頃に技術確立をすることが示されている。

2016年度より、NEDO委託事業の“ガスタービン燃料電池複合発電技術開発”にて、従来(出力250kW級、運転圧力0.2MPa級)に比べ、中小型GTFC(出力10万kW級、運転圧力1.0~1.5MPa級)により近い容量・圧力条件の小型GTFC(出力1MW級、運転圧力0.6MPa級)の市場投入に向けた検証をMHPS長崎工場にて開始している。1MW級実機はSOFCモジュール容器を2基設置する計画であるが、本研究開発では1MW級に必要な半分のSOFCモジュール容器1基のみで試験を行っており、これをハーフモジュールと称している(図5)。

2018年9月現在、ハーフモジュール実証機の据付けが完了し、発電前の試運転調整中である

(図6)。今後、ハーフモジュールとしての実証運転を行い、1MW 級実機とした場合の商品性を見据えたシステム仕様を検討していく。

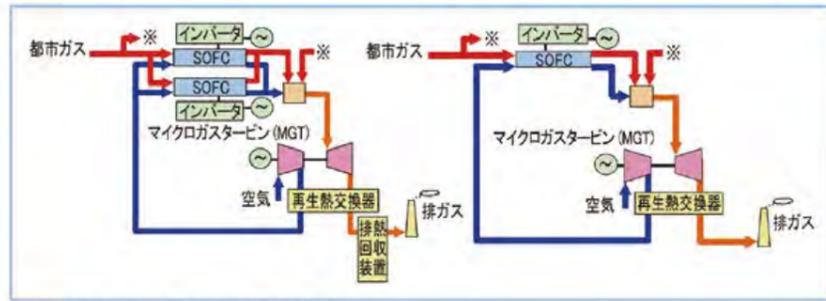


図5 1MW 級実機と実証機の構成

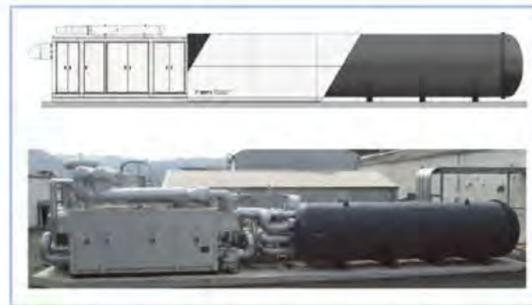


図6 1MW 級ハーフモジュール実証機据付状況

5. まとめ

MHPS では、CO₂ 排出量削減と電力の安定供給を両立させていくための実効性のある技術として、SOFC 複合発電システムを切り札と位置付けている。

250kW 級機においては、2015 年度より、国内4か所に実証機を設置しており、市場投入に向けた実証を実施し、安定して稼働できることを確認している。その結果を受け、2017 年度より、市場投入を開始している。現在、商用機第1号を三菱地所(株)丸の内ビルディングに納めており、今年度中に運転を開始する予定である。

更に、2016 年度より 250kW 級機から大容量化した 1MW 級機の検証を開始しており、現在 MHPS 長崎工場にて実証試験を実施中である。この実証試験で着実に技術を確認するとともに早期実用化を進め、“安全で持続可能なエネルギー環境社会”の構築に大きく貢献していきたいと考えている。

(謝辞)

本論文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)の共同研究等の成果を含んでおり、御指導、御助言を賜っております大学、研究機関、並びに開発・検証に御指導頂いております電力会社、ガス事業者、メーカー等、全ての関係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 小林由則ほか、水素社会へ向けた次世代大型燃料電池 SOFC の展開、三菱重工技報 Vol.52 No.2 (2015) p.115~120
- (2) 安藤喜昌ほか、SOFC-マイクロガスタービン (MGT) ハイブリッドシステム九州大学向け実証機の運転状況 Vol.52 No.4 (2015) p.48~53

便覧

ここからは、水素の特性や工学的な情報を掲載しましたのでぜひご活用ください。
また、水素エネルギーキャリアとして期待されているアンモニアに関し、三菱重工技報を通してご紹介いたします。

CONTENTS

1. 基礎データ
2. 輸送時の特性
3. 燃焼時の特性
4. 水素1mol 生成に必要な熱量比較

5. 換算表

- 5-1. 単位換算表
- 5-2. 水素コスト 簡易換算表

6. ガスタービンラインアップ

性能

- ・ガスタービン単体性能
- ・機械駆動性能
- ・航空転用型
- ・コンバインドサイクル性能

7. ガスタービン機種別の燃料消費量

8. 水素と天然ガスの混焼：体積割合と熱量割合の関係
9. 水素製造プロセス

10. 技術論文:CO₂を排出しないエネルギー(アンモニア)

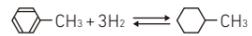
1. 基礎データ

| | 水素 H ₂ | メタン CH ₄ | アンモニア NH ₃ | 空気 | 窒素 N ₂ | 二酸化炭素 CO ₂ |
|------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|--------|-------------------|-----------------------|
| 分子量 | 2.016 | 16.04 | 17.03 | 28.97 | 28.02 | 44.01 |
| 密度(ガス) kg/Nm ³ | 0.08987 | 0.717 | 0.771 | 1.2932 | 1.2506 | 1.977 |
| 比熱 Cp kJ/(kg・K) [25°C, 1atm] | 14.306 | 2.2317 | 2.1645 | 1.0063 | 1.0413 | 0.85085 |
| 比熱比 K(-) [25°C, 1atm] | 1.4054 | 1.3062 | 1.316 | 1.4018 | 1.4013 | 1.2941 |
| ガス定数 R J/(kg・K) | 4124.3 | 518.4 | 488.2 | 287.0 | 296.7 | 188.9 |
| 凝固点 °C [1気圧] | -259.14 | -182.76 | -77.7 | - | -209.86 | -56.6 |
| 沸点 °C [1気圧] | -252.87 | -161.49 | -33.4 | - | -195.8 | -78.5 (昇) |

2. 輸送時の特性

| | 液体水素 H ₂ | 圧縮水素 H ₂ (350気圧) | 圧縮水素 H ₂ (700気圧) | メタン CH ₄ (液体) | アンモニア NH ₃ (液体) | 天然ガス (LNG 13A) | プロパン C ₃ H ₈ (液体) | メチルシクロヘキサン C ₇ H ₁₄ (MCH ^(M)) |
|--|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| 分子量 | 2.016 | 2.016 | 2.016 | 16.04 | 17.03 | 18.36 | 44.1 | 98.18 |
| 水素含有率 (重量%) | 100 | 100 | 100 | 25.13 | 17.76 | 23.77 | 18.29 | 6.16 |
| 水素密度 (kg-H ₂ /m ³) | 70.8 | 23 | 39 | 108.1 | 120.0 | 103.0 | 107.0 | 47 |
| 沸点 (°C) | -252.87 | - | - | -161.49 | -33.4 | -161.49 (メタン) 組成により異なる | -42.07 | 101.05 |
| その他特性 | 水素密度高 リサイクル不要 高純度 | 強引火性 強可燃性 爆発性 | | - | 水素密度高 リサイクル不要 直接利用も可 | 組成(%) メタン CH ₄ : 89.60 エタン C ₂ H ₆ : 5.62 プロパン C ₃ H ₈ : 3.43 ブタン C ₄ H ₁₀ : 1.35 | - | 常温・常圧 石油インフラ 利用可 |

(※) MCH トルエン(C₇H₈) (分子量92)とMCH(C₇H₁₄) (分子量98)の水素の差により水素を選ぶ



3. 燃焼時の特性

| 燃料名 | 水素 H ₂ | メタン CH ₄ | アンモニア NH ₃ | プロパン C ₃ H ₈ |
|------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 密度 [kg/Nm ³] | 0.08987 | 0.717 | 0.771 | 2.02 |
| 沸点(@大気圧) [°C] | -252.87 | -161.49 | -33.4 | -42.1 |
| 低位発熱量 ^(※) [MJ/kg] | 120.4 | 50.2 | 18.6 | 46.6 |
| 低位発熱量 [MJ/Nm ³] | 10.82 | 35.99 | 14.34 | 93.67 |
| 可燃当量比 ^(※) [-] | 0.10~7.17 | 0.50~1.69 | 0.63~1.40 | 0.51~2.51 |
| 最大燃焼速度 ^(※) [m/s] | 2.91 | 0.37 | 0.07 | 0.43 |
| 最低自着火温度 ^(※) [°C] | 500 | 537 | 651 | 432 |
| 発生CO ₂ [g/MJ] | 0 | 54.8 | 0 | 64.4 |
| 発生H ₂ O [g/MJ] | 74.8 | 44.8 | 85.4 | 35.1 |

(※) 出典: 日本燃焼学会誌 第58巻,183号,(2016年), 41-48

4. 水素1mol生成に必要な熱量比較

| 方法 | 熱化学方程式 | 水素1mol生成に必要な熱量 |
|-------------|--|----------------|
| (1) メタン熱分解 | CH ₄ (g) + 74.4kJ = 2H ₂ (g) + C | 37.2kJ/mol |
| (2) メタン改質 | ① CH ₄ (g) + H ₂ O (g) + 205.7kJ = CO (g) + 3H ₂ (g) ② CO (g) + H ₂ O (g) = H ₂ (g) + CO ₂ (g) + 41.2kJ ⇒ CH ₄ (g) + 2H ₂ O (g) = CO ₂ (g) + 4H ₂ (g) - 164.5kJ (=①+②) | 41.1kJ/mol |
| (3) アンモニア分解 | NH ₃ (g) + 46.1kJ = 3/2H ₂ (g) + 1/2N ₂ (g) | 30.7kJ/mol |
| (4) MCH脱水素 | C ₆ H ₁₁ CH ₃ + 202.5kJ = C ₆ H ₅ CH ₃ + 3H ₂ (g) | 67.5kJ/mol |

5. 換算表

5-1. 単位換算表

熱量・仕事 (Energy)

| | 百万英国熱量単位 (MmBtu) | 英国熱量単位 (Btu) | キロワット時 (kWh) | メガジュール (MJ) | キロカロリー (kcal) | 石油換算トン (toe) |
|------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 百万英国熱量単位 (MmBtu) | 1 | 1.000 x 10 ⁶ | 2.931 x 10 ² | 1.055 x 10 ³ | 2.519 x 10 ⁵ | 2.519 x 10 ⁻² |
| 英国熱量単位 (Btu) | 1.000 x 10 ⁻⁶ | 1 | 2.930 x 10 ⁻⁴ | 1.055 x 10 ⁻³ | 2.519 x 10 ⁻¹ | 2.519 x 10 ⁻⁸ |
| キロワット時 (kWh) | 3.412 x 10 ⁻³ | 3.412 x 10 ³ | 1 | 3.6 | 8.598 x 10 ² | 8.598 x 10 ⁻⁵ |
| メガジュール (MJ) | 9.478 x 10 ⁻⁴ | 9.478 x 10 ² | 2.777 x 10 ⁻¹ | 1 | 2.388 x 10 ² | 2.388 x 10 ⁻⁵ |
| キロカロリー (kcal) | 3.968 x 10 ⁻⁶ | 3.968 | 1.163 x 10 ⁻³ | 4.186 x 10 ⁻³ | 1 | 1.000 x 10 ⁻⁷ |
| 石油換算トン (toe) | 3.968 x 10 ¹ | 3.968 x 10 ⁷ | 1.163 x 10 ⁴ | 4.186 x 10 ⁴ | 1.000 x 10 ⁷ | 1 |

体積 (Volume)

| | 立方メートル (m ³) | 立方フィート (cf) | 米ガロン (US gal) | 米バレル (bbl) | リットル (litre) |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 立方メートル (m ³) | 1 | 3.531 x 10 ¹ | 2.641 x 10 ² | 6.29 | 1 x 10 ³ |
| 立方フィート (cf) | 2.831 x 10 ⁻² | 1 | 7.480 | 1.781 x 10 ⁻¹ | 2.831 x 10 ¹ |
| 米ガロン (US gal) | 3.785 x 10 ⁻³ | 1.336 x 10 ⁻¹ | 1 | 2.38 x 10 ⁻² | 3.785 |
| 米バレル (bbl) | 1.589 x 10 ⁻¹ | 5.614 | 42 | 1 | 1.589 x 10 ² |
| リットル (litre) | 1 x 10 ⁻³ | 3.531 x 10 ⁻² | 2.641 x 10 ⁻¹ | 6.289 x 10 ⁻³ | 1 |

質量 (Mass)

| | キログラム (kg) | トン (t) | 英トン (UK ton) | 米トン (US ton) | ポンド (lb) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| キログラム (kg) | 1 | 1.000 x 10 ⁻³ | 9.842 x 10 ⁻⁴ | 1.102 x 10 ⁻³ | 2.204 |
| トン (t) | 1 x 10 ³ | 1 | 9.842 x 10 ⁻¹ | 1.102 | 2.20462 x 10 ³ |
| 英トン (UK ton) | 1.016 x 10 ³ | 1.016 | 1 | 1.120 | 2.240 x 10 ³ |
| 米トン (US ton) | 9.071 x 10 ² | 9.071 x 10 ⁻¹ | 8.928 x 10 ⁻¹ | 1 | 2 x 10 ³ |
| ポンド (lb) | 4.535 x 10 ⁻¹ | 4.535 x 10 ⁻⁴ | 4.464 x 10 ⁻⁴ | 5 x 10 ⁻⁴ | 1 |

5-2. 水素コスト 簡易換算表

| H ₂ コスト | \$/Nm ³ | €/Nm ³ | 円/kg | \$/kg | €/kg | 円/MmBtu | \$/MmBtu | €/MmBtu | 円/MJ | \$/MJ | €/MJ | 円/kWh-th | \$/kWh-th | €/kWh-th | |
|--------------------|--------------------|-------------------|-------|-------|------|---------|----------|---------|------|-------|--------|----------|-----------|----------|--------|
| 30.00 | 円/Nm ³ | 0.286 | 0.240 | 336 | 3.20 | 2.69 | 2,480 | 23.6 | 19.8 | 2.35 | 0.0224 | 0.0188 | 8.5 | 0.0805 | 0.0677 |

・日本政府が2030年頃までの目標として掲げている30円/Nm³を基準に、以下の前提条件を適用して換算表を作成しています。

0.08932 kg/Nm³ 1,055 MJ/MmBtu

12.77 MJ – HHV/Nm³ 3.6 MJ/kWh-th

・為替レート: 105円/US\$ 125円/€

6. ガスタービンラインアップ

最先端技術の粋が集結した 三菱パワーのガスタービン

発電事業用・産業用中小型ガスタービン(4万~12万kWクラス)

H-25 シリーズ
H-100 シリーズ

発電事業用大型ガスタービン(12万~57万kWクラス)

- 60ヘルツ用
- M501J シリーズ
 - M501G シリーズ
 - M501F シリーズ
 - M501D シリーズ

- 50ヘルツ用
- M701J シリーズ
 - M701F シリーズ
 - M701G シリーズ
 - M701D シリーズ

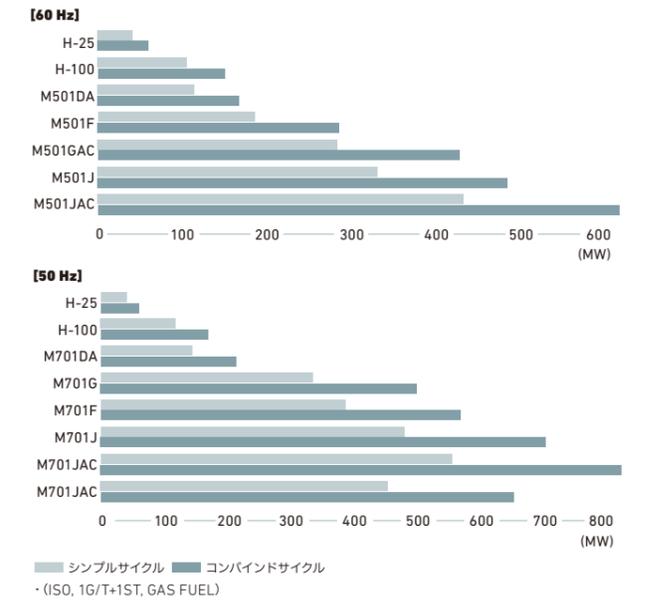
航空転用型ガスタービン(3万~14万kWクラス)

- FT8[®] MOBILEPAC[®]
- FT8[®] SWIFTPAC[®]
- FT4000[®] SWIFTPAC[®]

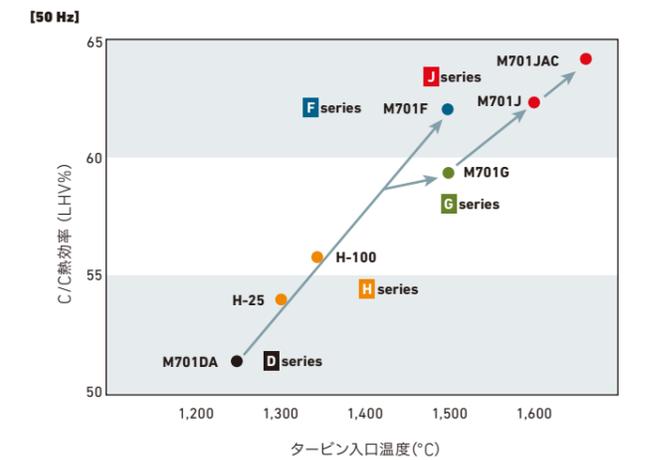
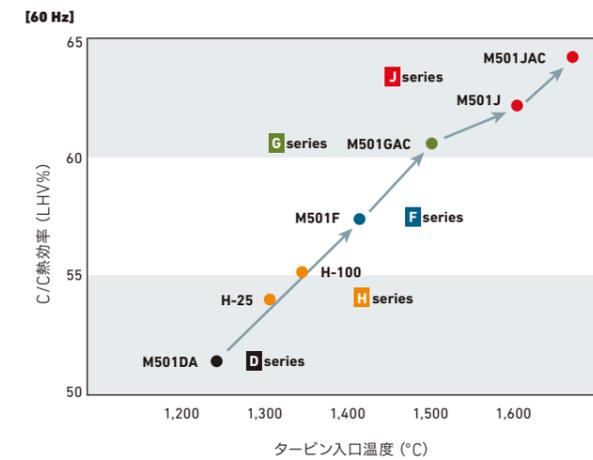
幅広いラインアップのガスタービンで 世界に電力を

三菱パワーは、世界中の幅広いニーズに応えられるよう、発電事業用・産業用ガスタービンとして、3万kW級から57万kW級まで幅広い範囲のガスタービンを揃えています。これまで全世界で50か国以上、1,500台以上のガスタービンを納入しており、世界各地域で高効率かつクリーンなエネルギー供給に貢献しています。

GT&C/C出力



C/C熱効率



性能

ガスタービン単体性能

| | ISO 定格出力 (kW) | 熱消費率 (LHV 基準) | | 熱効率 (%-LHV) | 圧力比 | 回転速度 (rpm) | 排ガス流量 (kg/s) | 排ガス温度 (°C) |
|----------------------------|------------------|---------------|-----------|----------------|------|---------------|-----------------|---------------|
| | | (kJ/kWh) | (Btu/kWh) | | | | | |
| 50Hz / 60Hz | | | | | | | | |
| H-25^(※) | 41,030 | 9,949 | 9,432 | 36.2 | 17.9 | 7,280 | 114 | 569 |
| 50Hz | | | | | | | | |
| H-100^(※) | 116,450 | 9,400 | 8,909 | 38.3 | 18 | 3,000 | 296 | 586 |
| M701DA | 144,090 | 10,350 | 9,810 | 34.8 | 14 | 3,000 | 453 | 542 |
| M701G | 334,000 | 9,110 | 8,630 | 39.5 | 21 | 3,000 | 755 | 587 |
| M701F | 385,000 | 8,592 | 8,144 | 41.9 | 21 | 3,000 | 748 | 630 |
| M701J | 478,000 | 8,511 | 8,067 | 42.3 | 23 | 3,000 | 896 | 630 |
| M701JAC | 448,000 | 8,182 | 7,755 | 44.0 | 25 | 3,000 | 765 | 663 |
| M701JAC | 574,000 | 8,295 | 7,826 | 43.4 | 25 | 3,000 | 1,024 | 646 |
| 60Hz | | | | | | | | |
| H-100^(※) | 105,780 | 9,421 | 8,930 | 38.2 | 18.4 | 3,600 | 293 | 534 |
| M501DA | 113,950 | 10,320 | 9,780 | 34.9 | 14 | 3,600 | 354 | 543 |
| M501F | 185,400 | 9,740 | 9,230 | 37.0 | 16 | 3,600 | 468 | 613 |
| M501G | 267,500 | 9,211 | 8,730 | 39.1 | 20 | 3,600 | 612 | 601 |
| M501GAC | 283,000 | 9,000 | 8,531 | 40.0 | 20 | 3,600 | 618 | 617 |
| M501J | 330,000 | 8,552 | 8,105 | 42.1 | 23 | 3,600 | 620 | 635 |
| M501JAC | 435,000 | 8,182 | 7,755 | 44.0 | 25 | 3,600 | 764 | 645 |

機械駆動性能

| | ISO 定格出力 | | 熱消費率 (LHV 基準) | | 熱効率 (%-LHV) | 圧力比 | 回転速度 (rpm) | 排ガス流量 (kg/s) | 排ガス温度 (°C) |
|----------------------------|----------|---------|---------------|-------------|----------------|------|---------------|-----------------|---------------|
| | (hp) | (kW) | (kJ/kWh) | (Btu/hp-hr) | | | | | |
| H-100^(※) | 144,350 | 107,650 | 9,256 | 6,542 | 38.9 | 18.4 | 3,600 | 293 | 534 |
| H-100^(※) | 160,780 | 119,900 | 9,266 | 6,549 | 38.9 | 20.1 | 3,000 | 315 | 552 |

航空転用型

| | ISO 定格出力 (kW) | 熱消費率 (LHV 基準) | | 熱効率 (%-LHV) | 回転速度 (rpm) | 排ガス流量 (kg/s) | 排ガス温度 (°C) |
|---------------------------|------------------|---------------|-----------|----------------|---------------|-----------------|---------------|
| | | (kJ/kWh) | (Btu/kWh) | | | | |
| 50Hz | | | | | | | |
| FT8[*] | 28,528 | 10,376 | 9,834 | 34.7 | 3,000 | 92 | 496 |
| FT4000[*] | 70,154 | 8,812 | 8,352 | 40.9 | 3,000 | 182 | 423 |
| FT4000[*] | 140,376 | 8,808 | 8,348 | 40.9 | 3,000 | 364 | 423 |
| 60Hz | | | | | | | |
| FT8[*] | 30,941 | 9,825 | 9,312 | 36.7 | 3,600 | 92 | 491 |
| FT4000[*] | 70,836 | 8,725 | 8,269 | 41.3 | 3,600 | 182 | 418 |
| FT4000[*] | 141,567 | 8,702 | 8,248 | 41.4 | 3,600 | 364 | 418 |

・性能は、ISO標準大気条件(101.3kPa、大気温度15°C、相対湿度60%)で燃料として天然ガスを使用した場合の発電端の値
 (※)吸排気口は含まない

コンバインドサイクル性能

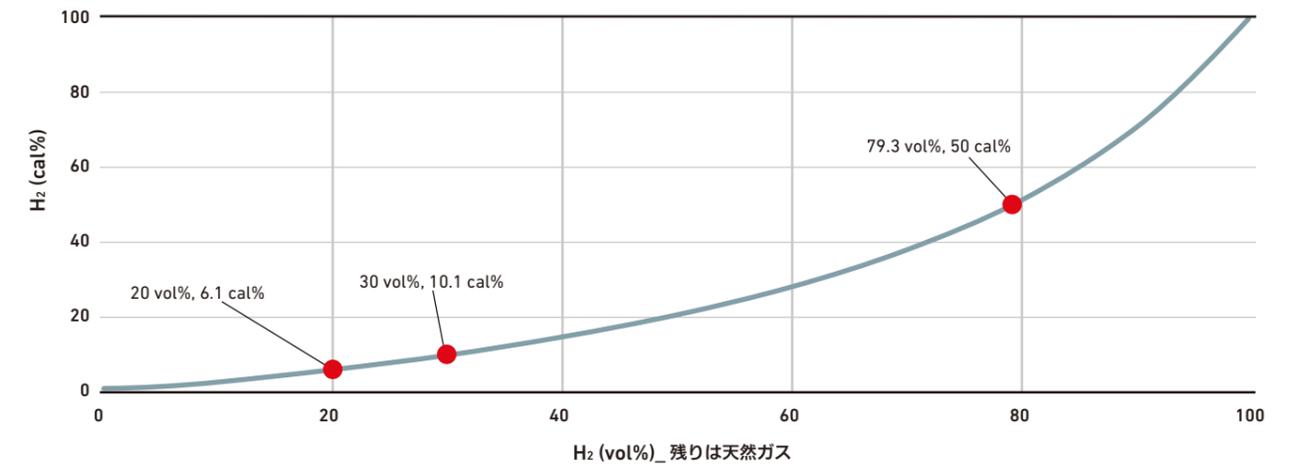
| | プラント出力 (kW) | 熱消費率 (LHV 基準) | | プラント熱効率 (%) | ガスタービン出力 (kW) | 蒸気タービン出力 (kW) | 台数と ガスタービンの形式 |
|-----------------------|----------------|---------------|-----------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| | | (kJ/kWh) | (Btu/kWh) | | | | |
| 50Hz / 60Hz | | | | | | | |
| MPCP1(H-25) | 60,100 | 6,667 | 6,319 | 54.0 | 39,600 | 20,500 | 1×H-25 |
| MPCP2(H-25) | 121,400 | 6,606 | 6,261 | 54.5 | 79,200 | 42,200 | 2×H-25 |
| 50Hz | | | | | | | |
| MPCP1(H-100) | 171,000 | 6,272 | 5,945 | 57.4 | 112,700 | 58,300 | 1×H-100 |
| MPCP2(H-100) | 346,000 | 6,207 | 5,884 | 58.0 | 225,400 | 120,600 | 2×H-100 |
| MPCP1(M701DA) | 212,500 | 7,000 | 6,635 | 51.4 | 142,100 | 70,400 | 1×M701DA |
| MPCP2(M701DA) | 426,600 | 6,974 | 6,610 | 51.6 | 284,200 | 142,400 | 2×M701DA |
| MPCP3(M701DA) | 645,000 | 6,947 | 6,585 | 51.8 | 426,300 | 218,700 | 3×M701DA |
| MPCP1(M701F) | 566,000 | 5,807 | 5,504 | 62.0 | 379,300 | 186,700 | 1×M701F |
| MPCP2(M701F) | 1,135,000 | 5,788 | 5,486 | 62.2 | 758,600 | 376,400 | 2×M701F |
| MPCP1(M701G) | 498,000 | 6,071 | 5,755 | 59.3 | 325,700 | 172,300 | 1×M701G |
| MPCP2(M701G) | 999,400 | 6,051 | 5,735 | 59.5 | 651,400 | 348,000 | 2×M701G |
| MPCP1(M701J) | 701,000 | 5,779 | 5,477 | 62.3 | 472,300 | 228,700 | 1×M701J |
| MPCP1(M701JAC) | 650,000 | <5,625 | <5,332 | >64.0 | 441,700 | 208,300 | 1×M701JAC |
| MPCP1(M701JAC) | 840,000 | <5,625 | <5,332 | >64.0 | 570,900 | 269,100 | 1×M701JAC |
| 60Hz | | | | | | | |
| MPCP1(H-100) | 150,000 | 6,534 | 6,193 | 55.1 | 102,500 | 47,500 | 1×H-100 |
| MPCP2(H-100) | 305,700 | 6,418 | 6,083 | 56.1 | 205,000 | 100,700 | 2×H-100 |
| MPCP1(M501DA) | 167,400 | 7,000 | 6,635 | 51.4 | 112,100 | 55,300 | 1×M501DA |
| MPCP2(M501DA) | 336,200 | 6,974 | 6,610 | 51.6 | 224,200 | 112,000 | 2×M501DA |
| MPCP3(M501DA) | 506,200 | 6,947 | 6,585 | 51.8 | 336,300 | 169,900 | 3×M501DA |
| MPCP1(M501F) | 285,100 | 6,305 | 5,976 | 57.1 | 182,700 | 102,400 | 1×M501F |
| MPCP2(M501F) | 572,200 | 6,283 | 5,955 | 57.3 | 365,400 | 206,800 | 2×M501F |
| MPCP1(M501G) | 398,900 | 6,165 | 5,843 | 58.4 | 264,400 | 134,500 | 1×M501G |
| MPCP2(M501G) | 800,500 | 6,144 | 5,823 | 58.6 | 528,800 | 271,700 | 2×M501G |
| MPCP1(M501GAC) | 427,000 | 5,951 | 5,640 | 60.5 | 280,800 | 146,200 | 1×M501GAC |
| MPCP2(M501GAC) | 856,000 | 5,931 | 5,622 | 60.7 | 561,600 | 294,400 | 2×M501GAC |
| MPCP3(M501GAC) | 1,285,000 | 5,931 | 5,622 | 60.7 | 842,400 | 442,600 | 3×M501GAC |
| MPCP1(M501J) | 484,000 | 5,807 | 5,504 | 62.0 | 326,200 | 157,800 | 1×M501J |
| MPCP2(M501J) | 971,000 | 5,788 | 5,486 | 62.2 | 652,400 | 318,600 | 2×M501J |
| MPCP1(M501JAC) | 630,000 | <5,625 | <5,332 | >64.0 | 431,900 | 198,100 | 1×M501JAC |
| MPCP2(M501JAC) | 1,263,000 | <5,608 | <5,315 | >64.2 | 863,800 | 399,200 | 2×M501JAC |

7. ガスタービン機種別の燃料消費量

| GT 機種 | カタログ性能 | | 水素 | | 天然ガス | |
|--------------------|---------------|-----------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| | ISO 定格出力 (kW) | 熱効率 %-LHV | 単位:ton/hour | 単位:Nm ³ /hour | 単位:ton/hour | 単位:Nm ³ /hour |
| 50Hz / 60Hz | | | | | | |
| H-25 | 41,030 | 36.2 | 4 | 45,000 | 9 | 12,000 |
| 50Hz | | | | | | |
| H-100 | 116,450 | 38.3 | 10 | 112,000 | 24 | 30,000 |
| M701F | 385,000 | 41.9 | 28 | 312,000 | 72 | 90,000 |
| M701J | 478,000 | 42.3 | 34 | 379,000 | 88 | 110,000 |
| M701JAC | 448,000 | 44.0 | 31 | 345,000 | 79 | 99,000 |
| M701JAC | 574,000 | 43.4 | 40 | 445,000 | 103 | 128,000 |
| 60Hz | | | | | | |
| H-100 | 105,780 | 38.2 | 9 | 101,000 | 22 | 28,000 |
| M501F | 185,400 | 37.0 | 16 | 178,000 | 39 | 49,000 |
| M501J | 330,000 | 42.1 | 24 | 267,000 | 61 | 76,000 |
| M501GAC | 283,000 | 40.0 | 22 | 245,000 | 55 | 69,000 |
| M501JAC | 435,000 | 44.0 | 30 | 334,000 | 77 | 96,000 |

・大気温度15度ベース(ISO標準)
 ・水素100%燃焼時の燃料消費量は天然ガス燃焼時の性能をベースに試算しております。

8. 水素と天然ガスの混焼：体積割合と熱量割合の関係

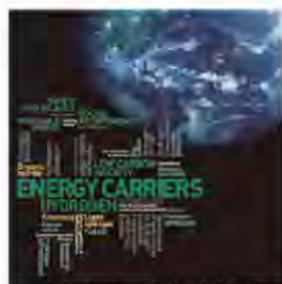


9. 水素製造プロセス

| | 水素の俗称 | 起源・製造方法 | 三菱重工グループ関連製品・技術 |
|----------------------------|---------|--|--|
| カーボンフリー水素 | ■ グリーン | 再生電力 → 電解 $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$ | 風車 水電解装置 |
| | ■ ピンク | 核熱 → 熱分解・電解 $CH_4 \rightarrow 2H_2 + C$ | 高温ガス炉 |
| | ■ ターコイズ | 化石燃料 → 熱分解 $CH_4 \rightarrow 2H_2 + C$ | メタン熱分解技術 |
| | ■ ブルー | 化石燃料 → 改質 & CO ₂ 回収 $CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$ | 天然ガス改質装置 石炭ガス化炉 CO ₂ 回収装置 |
| 旧来型水素 (CO ₂ 排出) | ■ グレー | 化石燃料 → 改質 (CO ₂ 大気放出) $CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$ | 天然ガス改質装置 石炭ガス化炉 |

CO₂を排出しないエネルギー(アンモニア)

CO₂ Free Energy (Ammonia)



戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)エネルギーキャリア⁽¹⁾

飯嶋 正樹*1
Masaki Iijima

洲崎 誠*2
Makoto Susaki

古市 裕之*3
Hiroyuki Furuichi

米川 隆仁*4
Takahito Yonekawa

仙波 範明*4
Noriaki Senba

長安 弘賢*5
Hiromitsu Nagayasu

パリ協定を守るためには今世紀後半には CO₂ の排出をゼロ化することが求められており、言い換えると CO₂ を排出しない燃料(CO₂ フリー燃料)が必要になると考えられる。その中でアンモニアはポータブルな燃料として運びやすく天然ガスから容易に製造できるとともに製造の際排出する CO₂ を回収貯留することで CO₂ フリー化を達成できる。アンモニアの製造の歴史は長く、現在世界的に比較的安価で流通しており、その直接燃焼による利用も戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)エネルギーキャリアの研究で可能となりつつある。CO₂ フリー燃料が使用されるような制度が整備され温暖化対策として利用されることを期待したい。

1. はじめに

1) パリ協定と CO₂ 排出ゼロ目標

2015年12月にパリ協定が採択された。パリ協定全体の目的として、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して2℃未満に抑えることが掲げられた。そして、特に気候変動に脆弱な国々への配慮から、1.5℃以内に抑えることを目指すとしている。

そのための長期目標として、今世紀後半に、世界全体の温室効果ガス排出量を、生態系が吸収できる範囲に納める目標が掲げられた。これは、人間活動による温室効果ガスの排出量を実質的にゼロにしていく目標である。

パリ協定を守るためにはいずれにしてもあらゆる分野における CO₂ 排出削減や今世紀後半には CO₂ 排出量ゼロ化、さらにはネガティブエミッションと呼ばれる大気中の CO₂ を削減する手法の導入も必要になるとされている。

2) CO₂ フリー燃料の必要性

近年太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が進み、今後さらに電力の分野において再生可能エネルギーの比率は増加することになるが、将来的には再生可能エネルギーで賄えない時間帯での対応や電力の負荷調整機能、また再生可能エネルギーの利用が難しい一般産業の熱源や、輸送用途など CO₂ 回収貯留で対応できない分野において CO₂ を排出しない燃料のニーズは多岐にわたる。

我が国では WE-NET 計画以来水素エネルギーの利用の研究が推進されてきたが、最近ではエネルギーセキュリティの目的よりはむしろ温暖化対策の目的で水素利用が検討されている。

水素の運搬手段として、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアが検討され CO₂ を排出せず

*1 三菱重工エンジニアリング(株) CO₂・環境事業推進室 技師長

*2 三菱重工エンジニアリング(株) CO₂・環境事業推進室 室長

*3 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 部長

*4 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 グループ長

*5 総合研究所 主席プロジェクト統括

水素製造ができればあとはいかに経済的に水素を運搬し利用するかである。

いずれにしても、今後あらゆる分野で CO₂ を排出しない安価な燃料を提供することが求められるだろう。

3) SIP エネルギーキャリア

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の中の“エネルギーキャリア”として研究開発に取り組んでいるのは、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアの3方式である。その生産(石油・天然ガス・石炭からの生産と再生可能エネルギーからの生産)、輸送及び利用(水素としての利用とアンモニアの場合直接利用)について研究開発が2014年度から5年計画で進められて来た。化石燃料である石油、天然ガス、石炭から水素やアンモニアなどの CO₂ フリー燃料を生産する場合 CO₂ 回収貯留(CCS)が不可欠となる。一方再生可能エネルギーにより生産した電力や高温の熱を用い水の電気分解により水素の安価な製造についても試験研究が行われた。

図1⁽¹⁾にエネルギーキャリアにおいて行われている試験研究の全体像を示す。

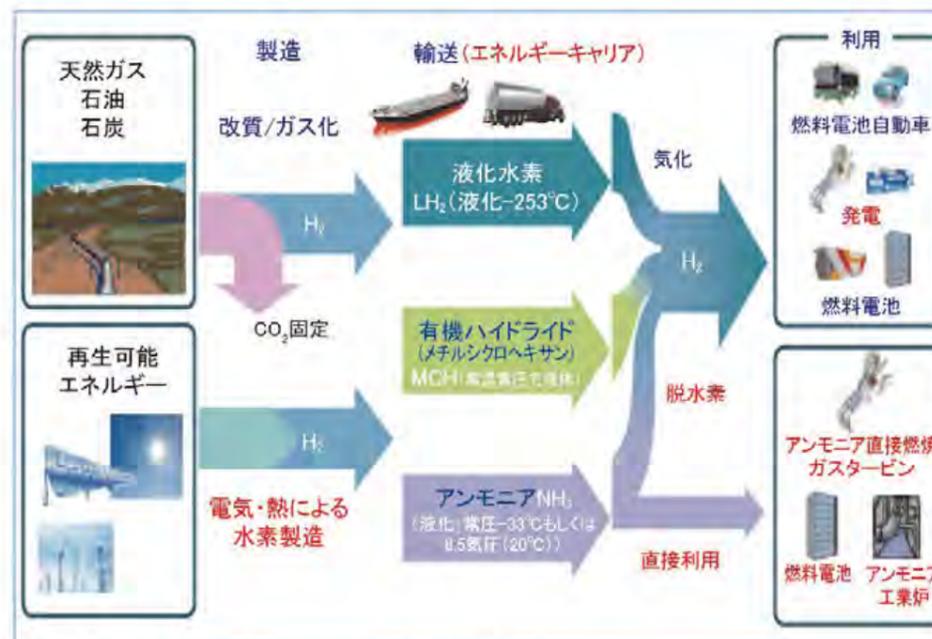


図1 エネルギーキャリアで行なわれている試験研究

2. SIP エネルギーキャリアの取り組み

1) 燃料としての試験研究

エネルギーキャリアの試験研究⁽¹⁾は2014年度から2018年度までの5年計画で下記の試験研究を行うとともに、水素を運ぶ3方式の評価を行っている。

- a. 高温太陽熱供給システム
- b. 熱利用水素製造
- c. CO₂フリー水素利用アンモニア合成システム開発
- d. アンモニア水素ステーション基盤技術
- e. アンモニア燃料電池
- f. アンモニア直接燃焼
- g. 有機ハイドライドを用いた水素供給技術開発
- h. 液体水素用ローディングアームシステム開発とルールの整備
- i. 水素エンジン技術開発
- j. エネルギーキャリアの安全性評価

これらの水素製造や水素、アンモニアの利用研究を行うことで、水素の輸送方式も含めどのような方式が好ましいかを評価すること、また我が国が世界に先駆け、利用技術開発を行うことを目指して行われた。これらの試験研究の中で5年間の研究の後半ではアンモニアの直接利用研究に力をいれ、アンモニア直接燃焼としてガスタービン、レシプロエンジン、ボイラ、工業用炉及びアンモニアの固体酸化燃料電池(SOFC)における直接利用などの試験研究が行われた。2017年7月には中国電力の石炭火力発電所においてアンモニアの混焼試験が行われた。これらの試験研究において、アンモニアの直接燃焼において実用化の見通しが得られたことはエネルギーキャリアの試験研究の大きな成果であった。

2) 3方式の評価

我が国の場合、従来燃料である石油・天然ガス・石炭資源に乏しく、再生可能エネルギーを最大限導入しても、我が国のエネルギー全てをまかなうことは不可能とされており、どうしても海外のエネルギー源からCO₂フリー燃料を生産し輸入する必要がある。燃料のような大量の物質を輸送する場合、液体又はガス体の場合ではパイプラインが最も経済的であるが、長距離や海洋をまたいで輸送する場合液化して船輸送することになる。

水素の場合その液化温度が-253℃と極低温となるため、水素の液化動力が非常に大きく、また-253℃を保つのも容易ではない。

アンモニアの場合-33℃常圧下で液体となる。一方8.5気圧に加圧すれば常温でも液体であり取扱いがしやすく、直接燃料として利用できる利点がある。有機ハイドライドはトルエンに水素を添加してメチルシクロヘキサンとし常温、常圧下で輸送できるがメチルシクロヘキサンから水素を取り出す際に多大なエネルギーを必要とする。

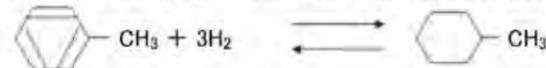
これら理・化学的性質と現在世界的に流通している事からSIPの“エネルギーキャリア”においては、アンモニアがCO₂フリー燃料として重要な役割を果たすことが可能との結論になった。

表1^①に圧縮水素、液体水素、有機ハイドライドとアンモニアの物理的性質を比較している。

表1 NH₃の物性と主なエネルギーキャリア

| | 水素含有率 (重量%) | 水素密度 (kg・H ₂ /m ³) | 沸点 (℃) | 水素放出 エンタルピー 変化* (kJ/molH ₂) | その他の特性** |
|---------------------|----------------|--|-----------|--|---------------|
| アンモニア | 17.8 | 121 | -33.4 | 30.6 | 急性毒性、腐食性 |
| メチルシクロヘキサン (MCH) | 6.16 | 47.3 | 101 | 67.5 | 引火性、刺激性 |
| 液化水素 | 100 | 70.8 | -253 | 0.899 | 強引火性、強可燃性、爆発性 |
| 圧縮水素 (350気圧) | 100 | 23.2 | - | - | |
| 圧縮水素 (700気圧) | 100 | 39.6 | - | - | |

*:MCHトルエン(C₇H₈) (分子量92)とMCH(C₇H₁₄) (分子量98)の水素の差により水素を運ぶ



+ 水素放出エンタルピー変化:水素を取り出す際に必要となるエネルギー。

** “その他の特性”の記載事項は、MSDSの“危険有害性情報”のサマリーから引用。各物質の正確な特性については、それぞれの物質のMSDSを参照のこと。

3) アンモニアの有効性

アンモニアはその物理的性質がLPGとほぼ同じことから、LPG船を用いても輸送することが可能である。現在世界のアンモニア生産量は1.8億トン/年で、その80%程度が尿素等の肥料として用いられているが、約10%の1,800万トン/年が国際的に流通している。

アンモニアの現時点(2018年10月)の米国メキシコ湾岸の価格はFOBベースで250US\$/Tとなっている。この価格は1ミリオンBTU(MMBTU)換算で14.3US\$となり、原油価格

70US\$/BBL(13.5US\$/MMBTU)(WTI価格)と比較しても発熱量当たり同等かやや高い程度の価格となっている。

アンモニアは常温で加圧すればLPGと同じように液体となることから、ポータブルとなる燃料としてその最終利用の際に使いやすい。

特に輸送用燃料として使用する場合、常温での運搬が容易であることは非常に大きなメリットとなる。しかしながらアンモニアの毒性や漏れた場合の臭いの問題から一般家庭の近くでの使用には問題があると考えられ、発電所や工場及び貨物船等管理された場所での利用が中心となるのではないかとと思われる。

3. CO₂フリーアンモニアの製造方法

現在アンモニアの製造方法としては、ドイツ人のハーバーとボッシュが1913年に実用化した鉄触媒を用い水素と窒素からの合成方法が現在でも使用されており、三菱重工エンジニアリング(株)(以下、当社)は1958年以降数多くのアンモニアプラントを世界各国に納入している。このアンモニア合成は現在では天然ガスを原料に用いる方法が一般的である。

天然ガスをスチームとともにスチームリフォーマで加熱しながら触媒を通すことで水素とCOに変換しそのあと空気を注入し、さらに空気中の酸素で燃焼させながらメタン分の残りを水素とCOに変換し同時に窒素を供給する。COは触媒を用い水蒸気を添加してCO₂と水素に変換し、その後CO₂を分離することで水素と窒素を生成し、この水素と窒素とからアンモニアを合成する。

図2は標準的アンモニアプラントである2000T/D規模のプラントにおけるCO₂のバランスを示す。アンモニアプラントにおいて約2/3のCO₂がプロセス系から分離されており、スチームリフォーマや補助ボイラの排ガスから約1/3のCO₂が排出されているが、この燃焼排ガスからCO₂を回収しプロセス系からのCO₂と共に地中貯留またはEnhanced Oil Recovery (EOR)に利用すればこのアンモニアプラントはCO₂フリーとなり、CO₂を排出しないアンモニア燃料システムを構築することができる。

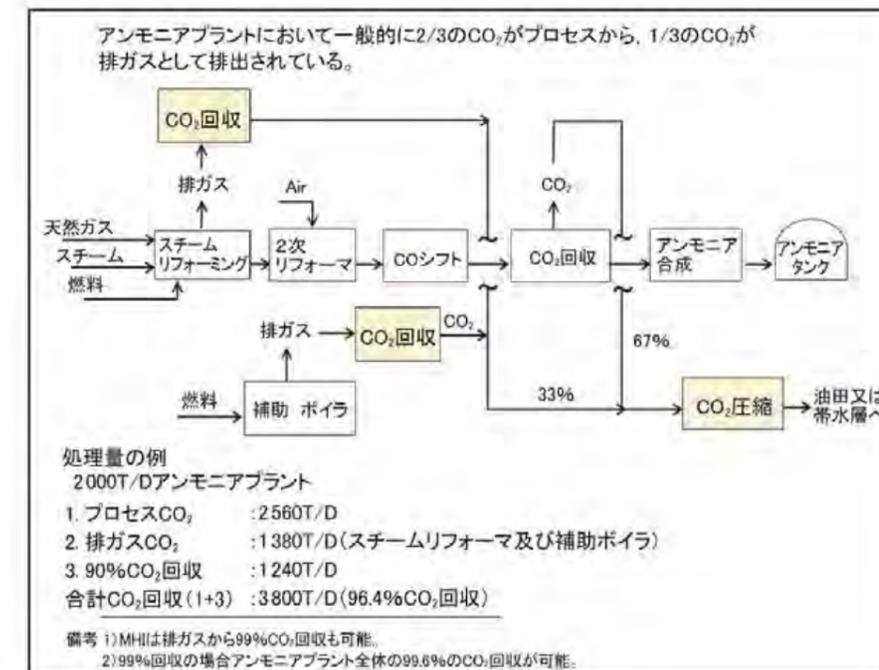


図2 アンモニアプラントのCO₂バランス

当社は米国テキサス州の石炭火力に世界最大のCO₂回収装置を2017年1月に納入し、回収したCO₂はウエストランチ油田においてEOR用に用いられ、原油の回収と共にCO₂は油層に貯

留されている。図3は石炭火力からのCO₂回収装置の全景を示す。



NRG Energy, Inc. 及び JX Nippon Oil & Gas Exploration Corporation 社 Petra Nova プロジェクトの写真

図3 石炭火力からのCO₂回収装置

また同じく米国アラバマ州において Southern Company と共同して実施している石炭火力からのCO₂回収と回収したCO₂の帯水層貯留実証試験 (SECARB^{※1}による実施)を2011年から行っている。図4はCO₂回収貯留プロジェクトの全体構成図を示す。このようにCO₂の回収貯留は商用ベースで行われており、アンモニアプラント排ガスからのCO₂回収と合わせCO₂フリーアンモニアの製造に関する技術は既に確立されている。

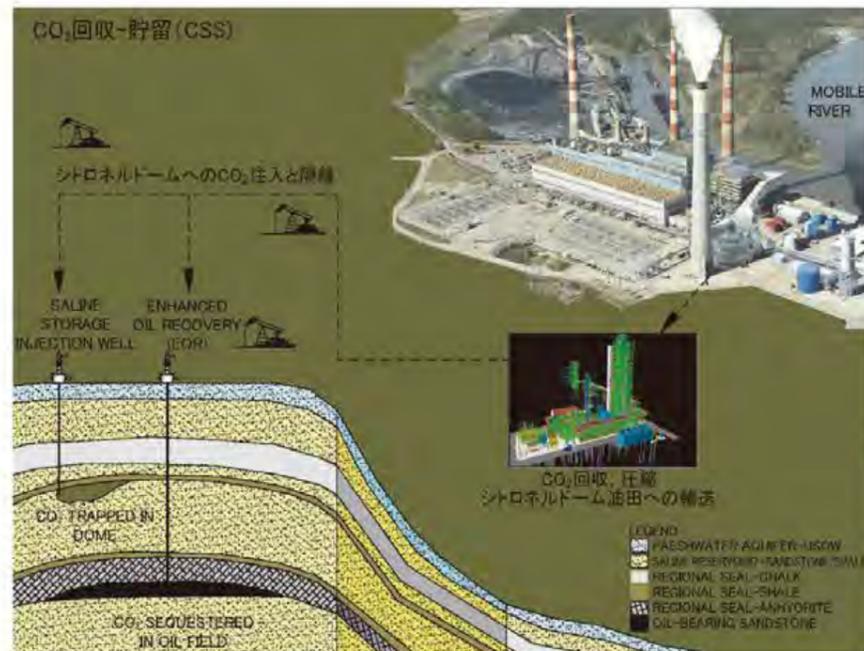


図4 CO₂回収・貯留プロジェクト全体像

プロセス系からのCO₂はそのまま貯留でき、また当社が実績の多い燃焼排ガスからのCO₂回収技術(関西電力(株)との共同開発によるKM CDR Process^{※2})を用い燃焼排ガスからのCO₂を90%回収し、プロセス系からのCO₂と合わせ貯留することでアンモニアを製造する際に発生する96%のCO₂を貯留することができる。もし排ガスから99%回収した場合99.6%のCO₂が貯留でき、ほぼ完全にCO₂を大気に排出せずアンモニアが製造できることになる。

この方法とは別に再生可能エネルギーから製造した電力を用い、水の電気分解と空気中の窒

素を分離してアンモニアを合成する方法もCO₂を排出しないアンモニア合成法である。現在世界各地で安価な天然ガスが多量に生産されているため天然ガスから合成されるアンモニアの方が再生可能エネルギーから生産する方式よりはるかに安価に生産できる。

※1 米国 Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership

※2 KM CDR Process[®]は、三菱重工エンジニアリング(株)の日本、米国、欧州連合(EUTM)、ノルウェー、オーストラリア及び中国における登録商標です。

4. アンモニアの燃料としての利用の歴史

アンモニアを燃料として使用することに違和感を覚える方もおられると思うが、第2次世界大戦中にベルギーにおいて100台のアンモニアバスが使われていた。

ディーゼル燃料が手に入らないため、必要に迫られてアンモニアを燃料として使用していたのである。

また、1959年～1968年にかけて米国空軍のX-15 有人ジェット戦闘機がアンモニアを燃料として高度107960m マッハ6.7を記録している。10万メートルの高度では気温が非常に低く低温でも固まらないアンモニアが燃料として選ばれたものと考えられる。

5. まとめ

CO₂フリー燃料の目的はあくまでも温暖化対策であり、パリ協定に基づく+2℃目標またはそれ以下を目指す場合、2050年時点で世界のCO₂排出量を1/2に、また先進国は80%削減しなければならず、そのためにはあらゆるところで使えるCO₂フリー燃料の重要性が増してくると考えられる。当社はCO₂フリーアンモニアの製造技術を既に商用的に確立しており、いつでも供給できる状態にある。

しかしながらアンモニアは発熱量ベースで石炭やLNGより高く、原油と比較しても高いが、アンモニアをCO₂フリー燃料として広く用いられるためには、導入の初期には何がしかの政策的インセンティブが不可欠になると思われる。

本報の作成に当たって“エネルギーキャリア”の研究開発を推進されて来られた戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の中の“エネルギーキャリア”の関係者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)パンフレット, エネルギーキャリア 内閣府, 国立研究開発法人 科学技術振興機構
http://www.jst.go.jp/sip/pdf/SIP_energycarriers2016.pdf
- (2) アンモニア:エネルギーキャリアとしての可能性(その1)(その2) 塩沢文朗 国際環境経済研究所 主席研究員“水素エネルギーシステム”一般財団法人 水素エネルギー協会 2017年 Vol.42
<http://ieei.or.jp/2017/05/expl170523/>
<http://ieei.or.jp/2017/05/expl170525/>