

水素発電 ハンドブック (第4版)

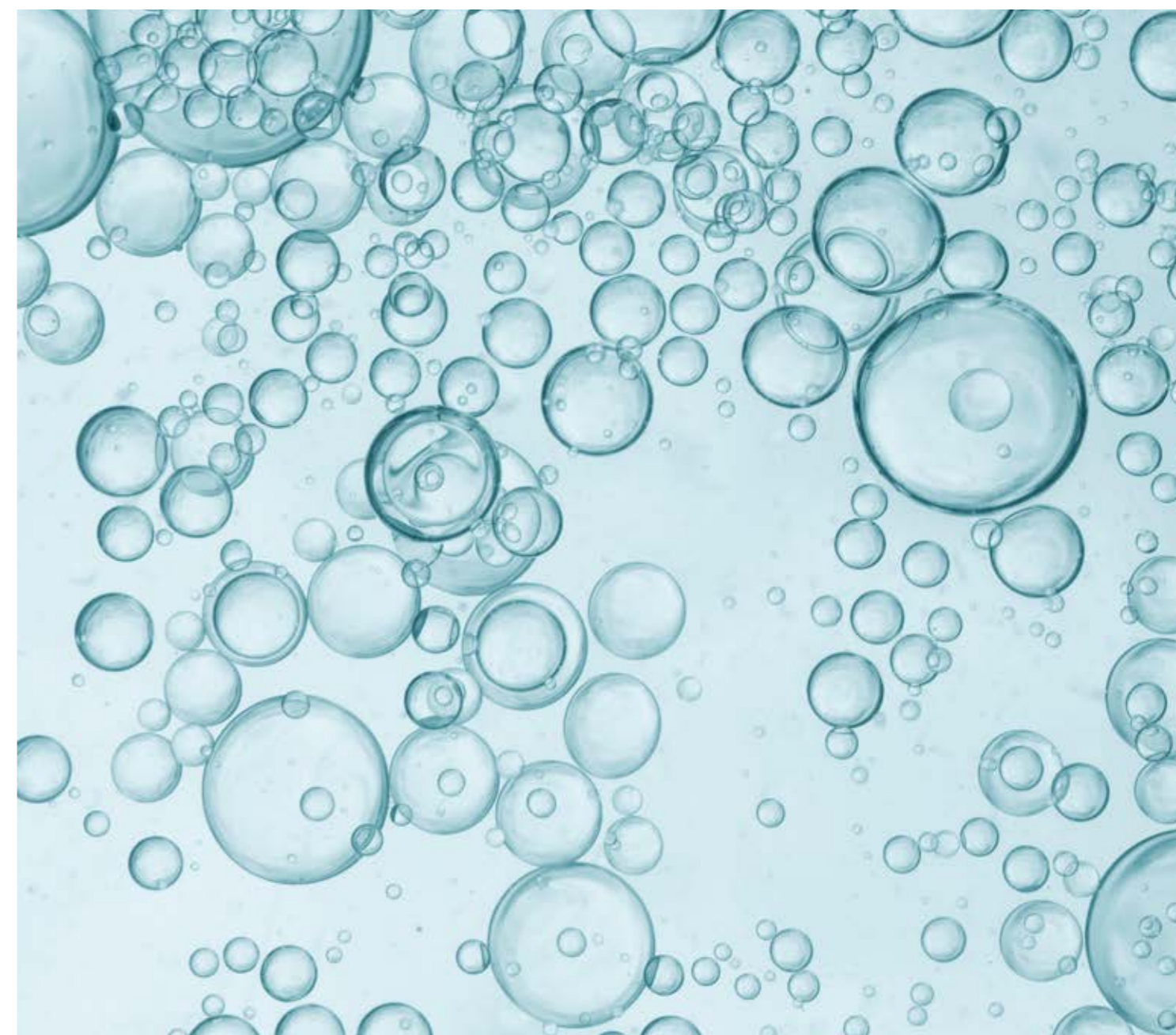
製造から発電にわたる一貫した水素技術の実現に向けて

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)			

原子番号 — 1 — 元素記号 — H — 元素名 — Hydrogen — 原子量 — 1.008

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



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、国や国際社会のなか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 カーボンニュートラル社会の実現に向けて

5 脱炭素へ急加速 水素発電の最前線を守る

10 水素ガスタービン30%混焼技術の実証開始へ

<技術論文>

17 1650°C級M501JAC形ガスタービンを有する第二T地点実証発電設備での運転状況

26 カーボンニュートラルの達成に向けた水素・アンモニア焼きガスタービンの取組み

37 脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク”“長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み

48 便覧

「水素発電ハンドブック」改訂版(第4版)発行にあたって

本改訂では、水素エネルギーに関する新たな動向や当社の取組み、開発者による技術論文の紹介について内容を更新しました。

この度、水素製造技術についても検証・実証を開始したことにあわせ、誌面にて紹介しております。

皆さまのお役に立つ一冊となれば幸いです。

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。

そのようななか、三菱重工グループは、2021年10月に2040年カーボンニュートラル宣言「MISSION NET ZERO」を発表しました。カーボンニュートラル社会の実現は地球規模の課題であり、三菱重工は、脱炭素分野での実績を誇るリーダーとして、気候変動対策をリードしていく責任があると考えています。CO₂削減を推進できる製品・技術・サービスを通して、世界中のパートナーと協調し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していきます。以前より三菱重工は、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」という再生可能エネルギー拡大と経済性、安定供給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。三菱重工は、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、化石燃料を用いた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。三菱重工の水素発電技術は、既存の火力発電設備を最大限利用し、水素へ燃料転換することにより、導入コストの抑制を可能にします。

現時点で世界の電力供給の大半を占めている火力発電の脱炭素化において水素発電は重要な役割を担うこととなります。また、水素コストの低減が課題とされるなか、三菱重工グループは、水素製造・発電技術をはじめとする多岐にわたるソリューションの提供により、水素バリューチェーンの発展と、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。

三菱重工は、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CO₂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。

📖 世界最高速マッハ6.7で飛んだX-15の燃料はアンモニアだった！

カーボンフリーで期待のアンモニア燃焼は実は古い技術で、アンモニアエンジン搭載の高高度極超音速実験機ノースアメリカンX-15は1961年に飛行を開始し、1967年にマッハ6.7の世界最高速記録を樹立しています。有人有翼動力機としてのこの記録は、今でも破られていません。アンモニアは、人類に夢を与えてくれる燃料なのですね。

📖 なぜロケットの燃料に液体酸素・液体水素が使われているの？

ロケットエンジンから噴出される燃焼ガスの速度が早いほど、推進力が大きな良いエンジンと言えます。そして燃焼ガスが軽い物質ほど加速しやすいため、噴出速度は高速になります。つまり酸素と水素が燃焼して発生するH₂Oを主とした燃焼ガスが、他の燃料を用いた場合の燃焼ガスより軽い物質だからなのです。

脱炭素へ急加速 水素発電の最前線を走る



水素社会へ、世界の足並みは揃った

菅元首相は、2020年10月の所信表明演説で、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・バイデン大統領が、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。

現在の各国の水素政策動向を見ると、アメリカは10年以内にクリーン水素の製造コストを1ドル/kg以下とすることを目指すほか、現状の

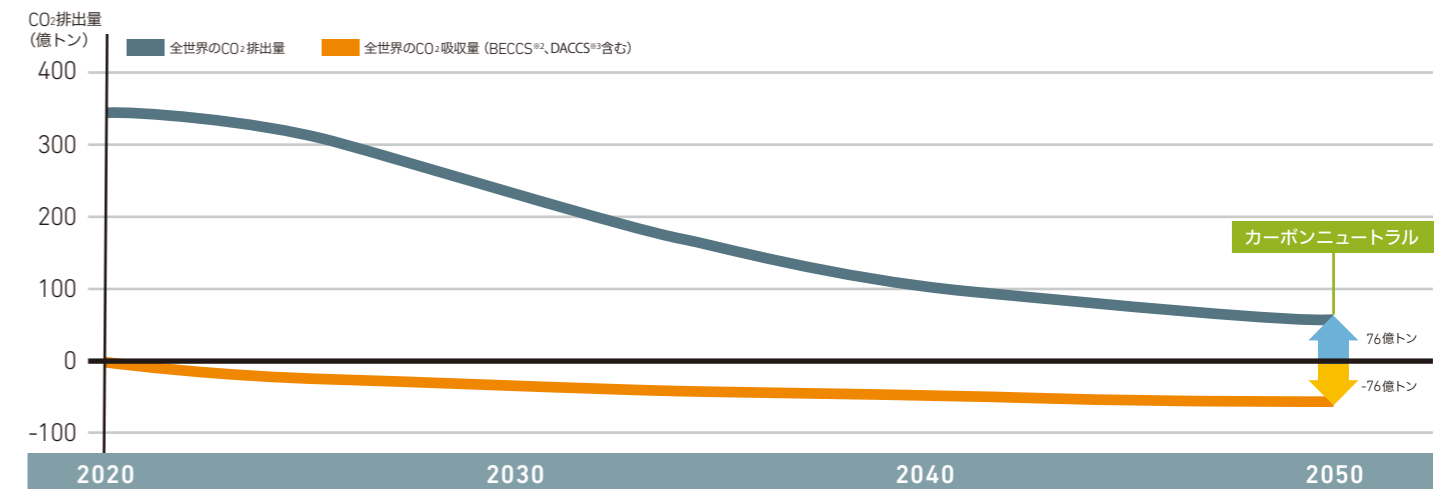
グレー水素1,000万吨/年を2030年にはクリーン水素1,000万吨/年とする等の目標を掲げている。一方、EUは2024年までに最低6GWの再エネ水電解装置を導入し、2040年までに最低40GWの再エネ水電解装置の導入を掲げている。また、シンガポールは2050年には水素発電により国内の電力需要の最大5割を賄うことが可能としており、低炭素水素の導入とインフラ整備を進めることとしている。そして中東のUAEはクリーンで持続可能なエネルギーの供給能力強化を目指し、2030年までに1,500億~2,000億ディルハム(約400億~545億ドル)を投資して、再生可能エネルギーの容量を3倍にするるとともに、2031年までにエネルギーミックス全体に占めるクリーンエネルギーの割合を30%まで引き上げるとしている。

グローバルでのエナジートランジションの加速

エナジートランジションの加速には3つの要因が挙げられる。一つ目として、ウクライナ侵攻に伴うエネルギー危機が起こり、鈍化と思われたエナジートランジションの動きが欧州を中心に加速。輸入に頼る燃料と異なり、再生可能エネルギーは地域ごとの自立した電源であるため、積極的に開発していく機運が高まった。二つ目として、2022年8月アメリカでIRA(Inflation Reduction Act)が成立

し、多くのインセンティブが10年以上にわたって保障されることになり、さまざまなプロジェクトが活発化した。そして、三つ目は、アジア太平洋地域でもエナジートランジションの動きが旺盛になった。国として脱炭素戦略を推進するシンガポールや、クリーンエネルギーの輸出国を目指すオーストラリアなどで、当社の脱炭素技術への関心が高まりつつある状況である。

主要レポートに基づく当社予測^{※1}



※1: 主要レポート(McKinsey 1.5°Cシナリオ、IEA Net Zero by 2050、IEA SDS、IPCC等)を元にした当社まとめ
 ※2: Bio Energy with Carbon Capture and Storageの略、バイオマス由来の排ガスからのCO₂回収・貯留
 ※3: Direct Air Carbon Capture and Storageの略、大気中からのCO₂回収・貯留

三菱重エグループの「MISSION NET ZERO」

「MISSION NET ZERO」とは、三菱重エグループが掲げる2040年カーボンニュートラル宣言である。第1の目標は、当社グループのCO₂排出量を2030年までに50%削減(2014年比)、2040年までにNet Zeroにすること。第2の目標は、バリューチェーン全体からのCO₂排出量を、2040年までにNet Zeroにすること。中間目標として2030年までに50%削減(2019年比)する(当社製品の使用による

お客様のCO₂排出量削減に、CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)による削減貢献分を加味したもの)。革新的な技術を導入し経済性と信頼性を両立するソリューションを提供することでトランジションコストを低減し、持続可能な社会の実現に貢献する。

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向けたエナジートランジションを推進するうえで「既存インフラの脱炭素化」「水素エコシステムの実現」「CO₂エコシステムの実現」を3つの柱として掲げ、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、支援している。



三菱重工の水素プロジェクト

M701F形ガスタービンの水素焼き転換に向けて

三菱重工は、英国東海岸にあるハンバー川流域の三角州地帯において進行中の同国内最大規模を誇る産業クラスター (Humber Cluster) の脱炭素化事業計画に参画している。このプロジェクトは、ノルウェーに本拠を置く大手エネルギー企業エクイノール社 (Equinor ASA) など、グローバルに事業を展開する脱炭素化関連産業の12企業・機関が、「ゼロ・カーボン・ハンバー・パートナーシップ (Zero Carbon Humber Partnership: ZCH)」のもとに連携。天然ガスから製造した水素の活用やCO₂の回収・除去技術を駆使することにより、2040年までに同産業クラスターにおけるCO₂排出実質ゼロ達成を目指すものだ。このなかで三菱重工は、北部の



ゼロ・カーボン・ハンバー・パートナーシップ (Zero Carbon Humber Partnership: ZCH)
出典: <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/>

岩塩空洞へのグリーン水素貯蔵

三菱重工のグループ会社である三菱パワーアメリカは、シェブロン U.S.A. 社の New Energies Company (旧マグナムデベロップメント社) と共同で、米国ユタ州で Advanced Clean Energy Storage Hub (ACES Delta Hub) プロジェクトを推進している。風や太陽光などの再生エネルギーで水の電気分解を行い、製造されたグリーン

産業クラスター、ソルトエンド (Saltend Chemicals Park) にある天然ガス焼き120万kW級GTCC発電所で稼働している、自社製 M701F形ガスタービン3基の燃料を水素に転換する技術検討とフィージビリティ・スタディー (事業化調査、FS) を手掛けていく。このプロジェクト参画を三菱重工グループの戦略的的事业であるエナジートランジションにおける弾みとして、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、これらの技術と密接に連携しながら、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構築にも関わることで、脱炭素社会の実現に貢献する。

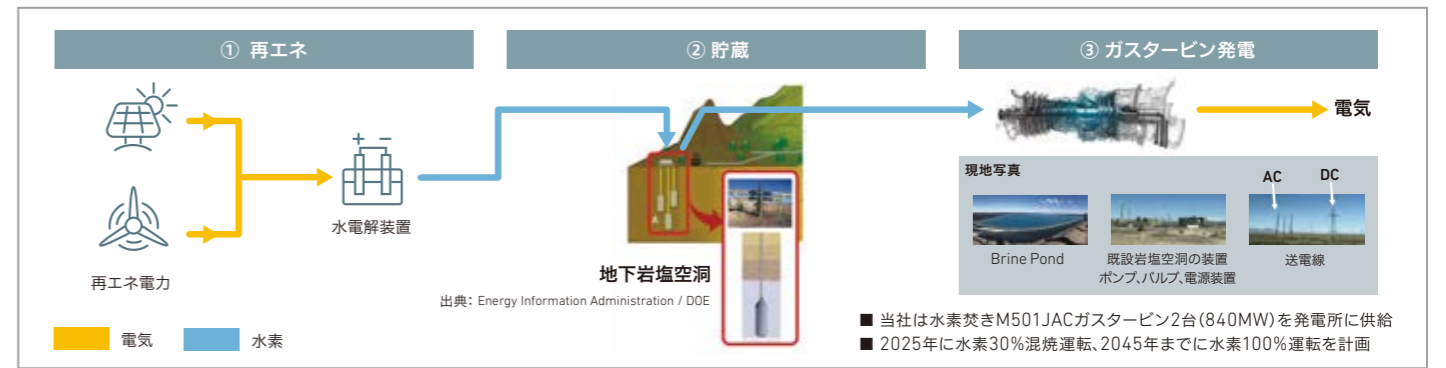


ソルトエンドGTCC発電所

水素を、各5,500トン以上の水素貯蔵量を有する2つの巨大な岩塩空洞に貯蔵。それを発電所などに供給するというものだ。この発電電力量は、各150GWh規模にもなる。2022年6月、米国エネルギー省より融資保証の供与を受け、世界最大のグリーン水素Hubプロジェクトは実行段階に入った。

三菱重工は、世界最先端の水素燃焼技術を有している。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。燃焼試験では、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、大型水素発電は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大量製造および調達コストも、やがて下げることができるだろう。三菱重工は、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、世界中の期待を背負い、その使命を果たしていく。



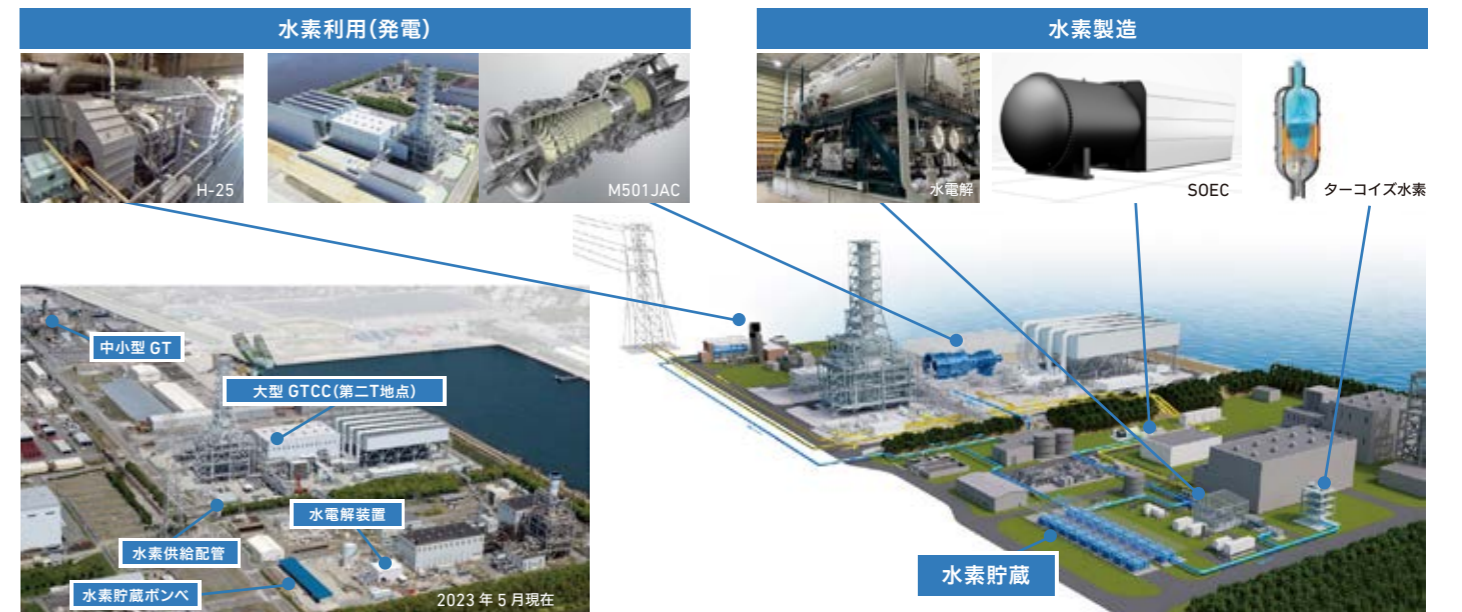
三菱重工の脱炭素化技術開発の拠点とその取組み

世界初の水素製造・発電実証設備「高砂水素パーク」が本格稼働 水電解装置による水素製造を開始

三菱重工は、水素ガスタービンの早期商用化に向け、水素の製造から発電まで世界で初めて一貫して技術検証できる「高砂水素パーク」(兵庫県高砂市) を本格稼働させた。技術検証を通して製品の信頼性向上を図るとともに、水素発電・製造技術の社会実装に貢献することが主眼。水電解装置による水素製造に加え、今後は次世代水素製造技術の導入を順次拡充し、ガスタービン実機での水素混焼・専焼(100%水素)の実証を行う。同パーク内は水素の製造・貯蔵・利用の3エリアに分かれ、2023年「製造」エリアに、世界最大級の水素製造能力1,100Nm³/hを持つ、ノルウェーのハイドロジェンプロ社製アルカリ水電解装置を設置、稼働を開始した。同設備で製造した水素は、「貯蔵」エリア設置した総容量3万9,000Nm³の水素貯蔵設備に貯蔵。また、水素燃焼の実機検証

は、「利用」エリアにある実証設備複合サイクル発電所で大型のJAC形ガスタービン(45万kWクラス)、および燃焼試験設備で圧縮機駆動用に設置された中小型のH-25形ガスタービン(4万kWクラス)を使って実施される。水素製造では、自社技術により開発を進めている固体酸化物形電解セル(SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell)、次世代低温水電解(AEM: Anion Exchange Membrane)、メタンを水素と固体炭素に熱分解することでCO₂を出さずに水素を得るターコイズ水素製造技術についても、長崎カーボンニュートラルパークで要素技術を開発したうえで、統合的に実際の運転条件で長期実証を順次行う。高砂水素パークは、「作る」「貯める」「運ぶ」バリューチェーンを構築して、水素エコシステムを実現する重要な拠点となる。

HYDROGEN PARK TAKASAGO



「長崎カーボンニュートラルパーク」が運用を開始
エネルギー脱炭素化のキーテクノロジーの開発を推進

三菱重工は、エネルギー脱炭素化に関する技術開発の中心拠点として「長崎カーボンニュートラルパーク」を長崎市内に整備し、運用を開始。研究開発・設計・製造部門が一体となって、製品技術の実用化に向けて取り組んでいる。なかでも総合研究所長崎地区は当拠点の象徴ともいべき研究施設で、水素製造、バイオマス合成燃料製造、アンモニア燃焼、CO₂回収に関する要素技術開発をはじめとする研究開発が行われている。

さらに、長崎造船所においては、設計・製造を担う長崎工場と、製造を担う香焼工場で培った各種熱エネルギー機器の設計・製造の機能を活用しながら、製品化や事業化に向けた研究開発を加速させていく。こうして、長崎カーボンニュートラルパークでキーテクノロジーを開発した後、水素製造・発電実証設備である「高砂水素パーク」で水素製造実証運転、水素ガスタービンと連携した発電実証を実施する。

CARBON NEUTRAL PARK NAGASAKI

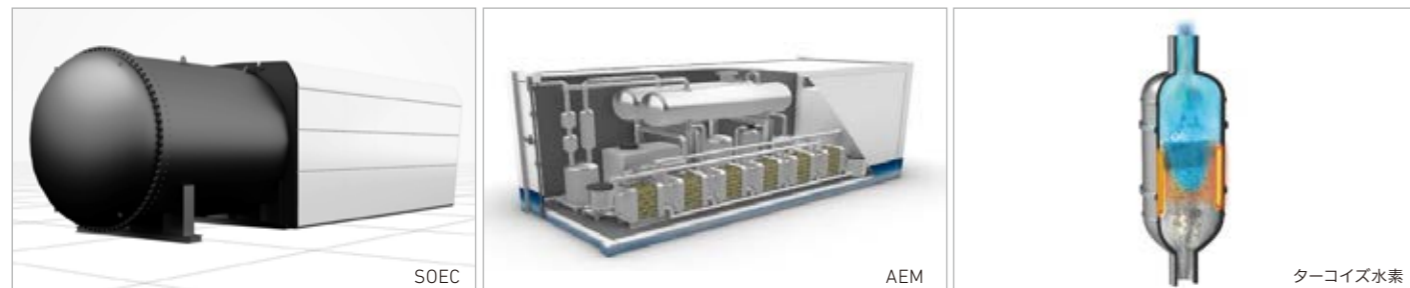


水素製造技術開発の紹介

三菱重工は、水素製造の次世代技術である固体酸化物形電解セル (SOEC)、次世代低温水電解 (AEM)、ターコイズ水素製造技術の開発を進めている。

SOECは開発済のSOFC技術を応用したもので、高効率かつ大容量の水素製造が可能。スチームパワー発電における高温高圧の蒸気・ガスのハンドリング技術と組み合わせて、大型SOECプラントの

実現を目指す。AEMは固体高分子電解質膜を使った電解技術による水素製造技術で、高電流密度運転によって電解槽の小型化と低コスト化が可能となる。そして、ターコイズ水素はメタン熱分解反応を利用して水素と固体炭素に分解する技術で、効率的な水素生産を可能とする。天然ガス焚きの火力発電設備にターコイズ水素製造設備を追設し、ガスタービンの燃焼器を水素用に交換することで、脱炭素化が達成可能となる。



水素ガスタービン
30%混焼技術の実証開始へ



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。電力は欲しい、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、三菱重工 エナジードメイン GTCC事業部 ガスタービン技術部 技監・技師長、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、実に全体の約48%を占める。そして、発電の燃料別電力量割合は、LNG34.4%、石油等7.4%、石炭31.0%と火力発電が72.8%を占めている。(2021年度現在)。出典:https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/2_1.pdf

エネルギーの選択肢が着実に増えるなかで、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。

日本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、この先の約7年で、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。また、燃料となる大量の水素はどうやって確保するのか。

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7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、ガス火力の燃料でなるLNGに水素30%を混ぜ安定的に使用することができるガスタービン用燃焼器を開発。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。84万kW相当の出力に対応できる技術で、従来のGTCCと比較し、発電時のCO₂排出を約12%削減できる見通しである。

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%混焼の商用化が、水素社会への大きな扉を開く

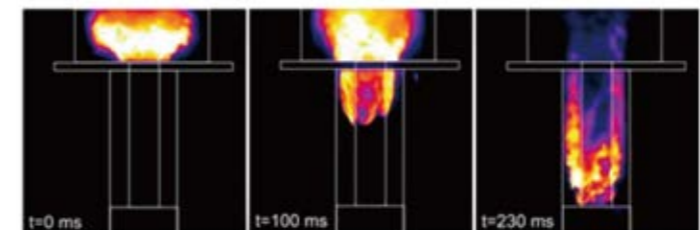
燃えやすい水素と、「安全性」との戦い

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、爆発のイメージがつきまとう。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%混焼は、既存のガスタービンで対応可能なことを社内の燃焼試験によって、既に確認していました。そして2022年6月、米国の電力会社ジョージア・パワー(Georgia Power)および電力研究所(The Electric Power Research Institute:EPRI)とともに臨んだ、米国の大型プラントであるマクドノフ・アトキンソン(McDonough-Atkinson)発電所での燃焼実証試験に成功したことによって、水素20%混焼の道のりは確立しました。これは同時にガスタービン設計者が、それまで大きなチャレンジだった30%混焼に対してもかなりの自信を持てるようになった出来事です。今後は燃焼特性への理解をさらに高め、空気との混合、そのときの挙動などをより一層コントロールしていく必要があります」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、NO_x。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。



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

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。現在、三菱重工社内の燃焼試験では水素30%混焼の開発は完了し、水素50%混焼の燃焼にも成功している。

燃焼器を破壊する燃焼振動を制御する驚くべき技術

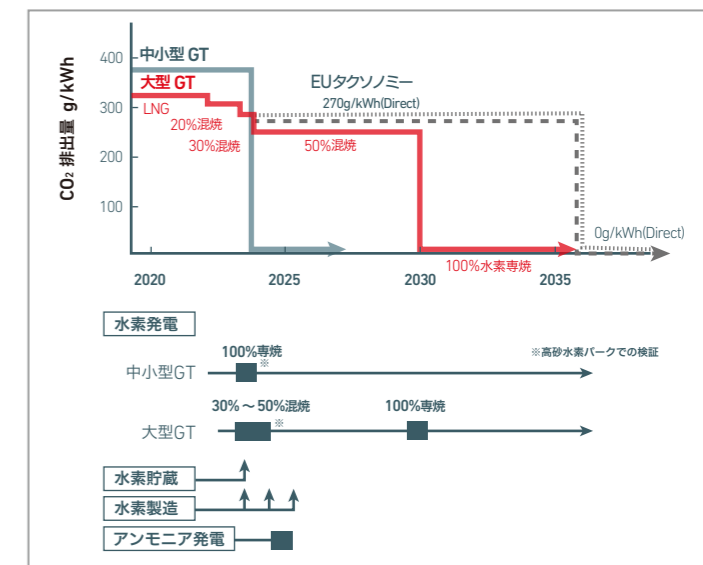
さらに立ちはだかるのは「燃焼振動」である。燃焼器内は1,650°Cの高温になるが、非常に高い熱負荷を与えられた燃焼器の筒は、自身が持つ特定の音響固有値によって非常に大きい音を発することが分かっている。これが燃焼振動という現象である。

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。

欧州のCO₂排出規制と水素・アンモニアガスタービン開発スケジュール

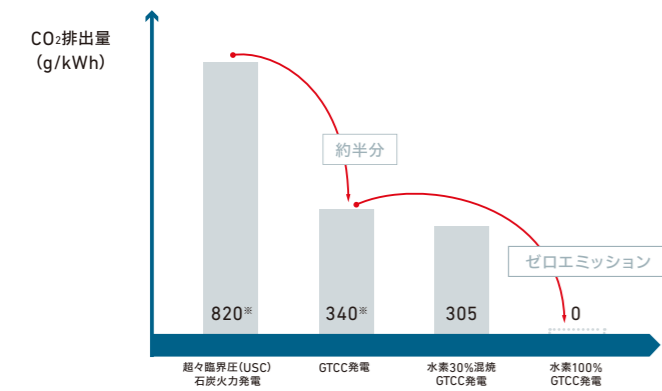


100%水素燃料による発電、水素専焼ガスタービンを実現する

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
- GTCC発電: 340g-CO₂ /kWh
- 水素30%混焼ガスタービン: 305g-CO₂ /kWh
- そして、ゼロへ。



※出典: 経済産業省ウェブサイト
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402477/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/001_01_00.pdf

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NO_x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ざりにくい。旋回流を使ってよく混ぜようとする、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NO_x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。

水素ガスタービン燃焼器 開発状況

	燃焼方式	低NO _x 技術	性能	水素含有量	開発・運用状況
Type 1	拡散燃焼	N ₂ 希釈 水/水蒸気添加	燃焼温度 1200°C~1400°C級	100%	開発完了
Type 2	予混合燃焼	ドライ式 低NO _x	燃焼温度 1650°C級	30%	開発完了
				50%	2022年燃焼試験成功
Type 3	マルチクラスター	ドライ式 低NO _x	燃焼温度 1650°C級	100%	2025年以降 開発完了予定

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い。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ありません」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

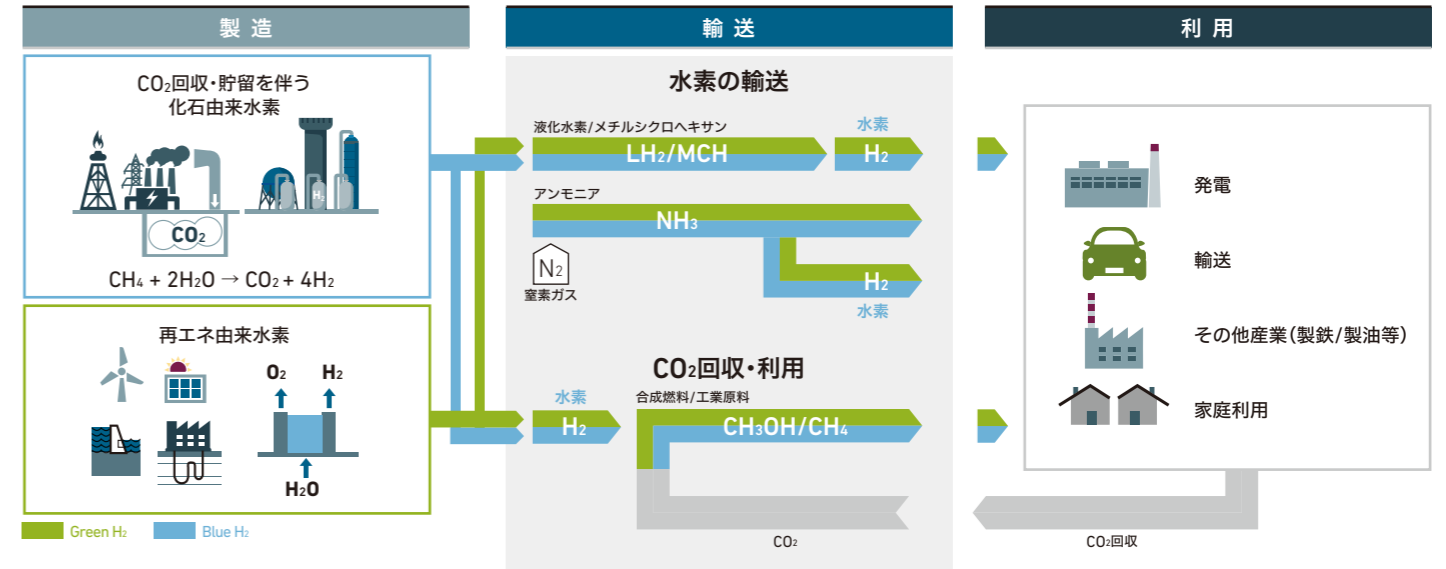
ルシクロヘキサン(MCH)またはアンモニア(NH₃)の形で運ぶことが有力視されていますが、需要をさらに増やすことで、運搬のスケールメリットも出てくるはず。当社は、燃料としてアンモニアを100%直接利用する4万kW級ガスタービンシステムの開発にも着手し、2025年以降の実機運転、商用化に向けて検証中です」

ガスタービンの技術者は水素製造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。そのためにも、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既に50万年の時を経た。ついに、CO₂フリーの燃焼を手に入れ、カーボンニュートラル社会を支えるエネルギーに目途が立ちつつある。

2025年 水素100%専焼技術 完成へ—————。

世界の水素サプライチェーン例





三菱重工業株式会社
エナジードメイン
GTCC事業部 ガスタービン技術部

技監・技師長 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とも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、1650°C級という高火炎温度燃焼器の低NOx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



三菱重工は、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」は既に可能となり、さら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、エナジートランジションに貢献する技術開発を進めている。ここからは、既存インフラの脱炭素化において重要な役割が期待される大型水素ガスタービン、燃料として直接燃焼できるアンモニア焼きガスタービン、水素製造技術およびその開発・実証設備について三菱重工技報を通して紹介する。

■ 1650°C級M501JAC形ガスタービンを有する第二T地点実証発電設備での運転状況

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、1650°C級M501JAC形ガスタービンの検証結果と運転状況。

■ 脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク”“長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み

2023年より部分運用を開始した高砂水素パークでの水素焼きガスタービンの開発状況と、長崎カーボンニュートラルパークで進める水素製造を含む脱炭素技術の取組み。

■ カーボンニュートラルの達成に向けた水素・アンモニア焼きガスタービンの取組み

カーボンニュートラルの早期達成に向けて取り組み続ける水素・アンモニア焼きガスタービン燃焼器・燃焼技術の開発状況と、今後の実証スケジュール。

出典：三菱重工技報
著者所属名は作成時のものです

1650°C級 M501JAC 形ガスタービンをもつ 第二T地点実証発電設備での運転状況

Operation Status of 1650°C Class M501JAC Gas Turbine at New T-point 2 Demonstration Plant



森本 一毅* ¹ Kazuki Morimoto	松村 嘉和* ² Yoshikazu Matsumura
鈴木 健太郎* ¹ Kentaro Suzuki	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を実施の上、2020 年7月より商業運転を開始した。本報では、試運転検証結果、及びその後の運転状況について紹介する。

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た 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 の開発に取り組む、その中核

*1 三菱パワー株式会社 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 ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部 主席技師
 *3 三菱パワー株式会社 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 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 ガスタービン技術総括部 総括部長

技術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。このたび、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合せた出力 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 形の検証結果と、その後約1年間の商業運転を踏まえた運転状況について紹介する。

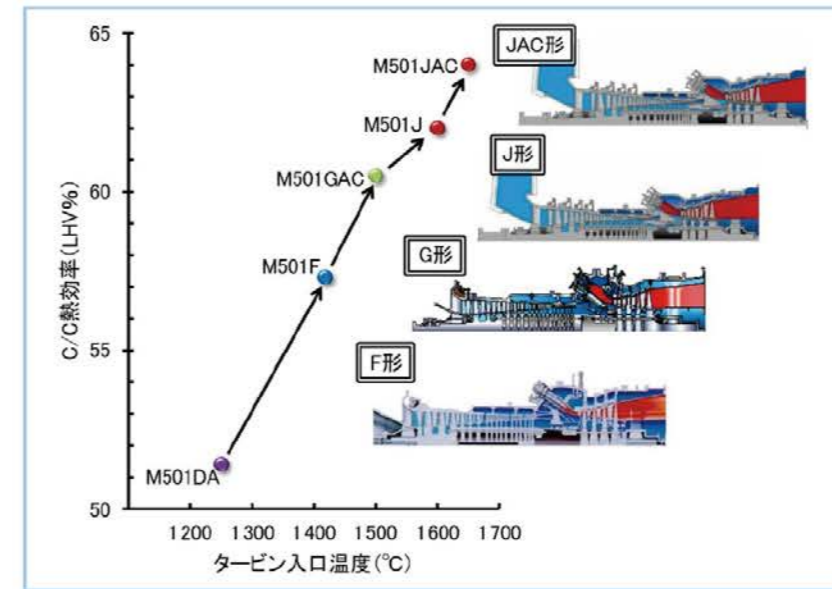


図1 大型ガスタービンの機種開発変遷

2. 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2, 3)、個々の要素技術自体は既設T地点での検証を完了し、1650°CJAC 形への適用を進めた(表1)。

- 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 M501H形(1999-2000 年に検証済、以下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。

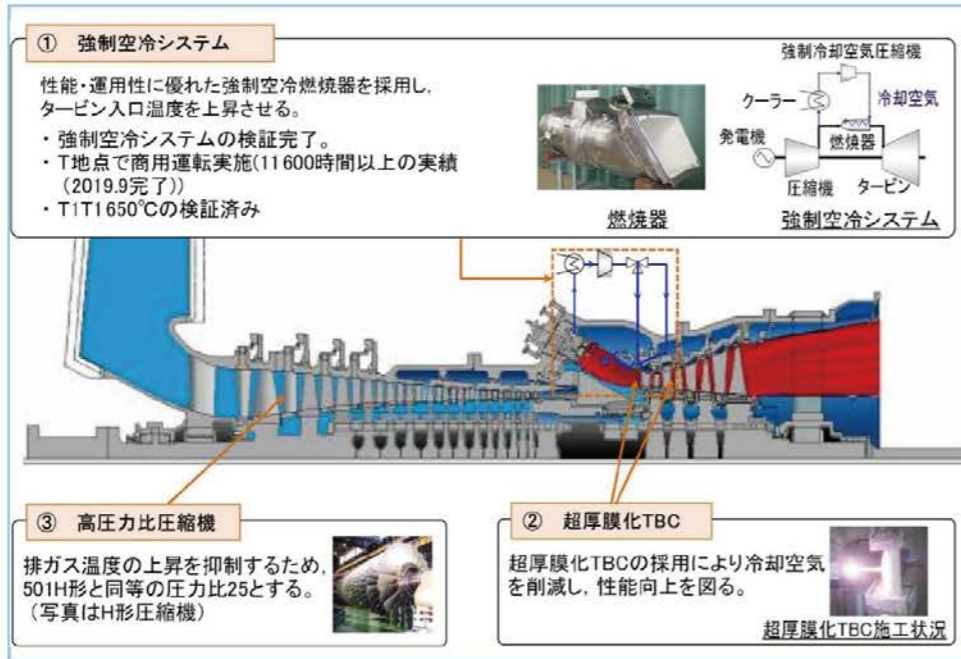


図2 1650°C級 JAC 形ガスタービンの開発コンセプト



図3 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

3. 1650°C級 M501JAC 形ガスタービンの第二T地点における検証結果と運転状況

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合せた出力 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4, 5)。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。

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6)。また、その後約1年間の商業運転、及び検証試運転を実施し 2021 年3月休転時に点検した状況について紹介する。



図4 第二T地点の試運転工程

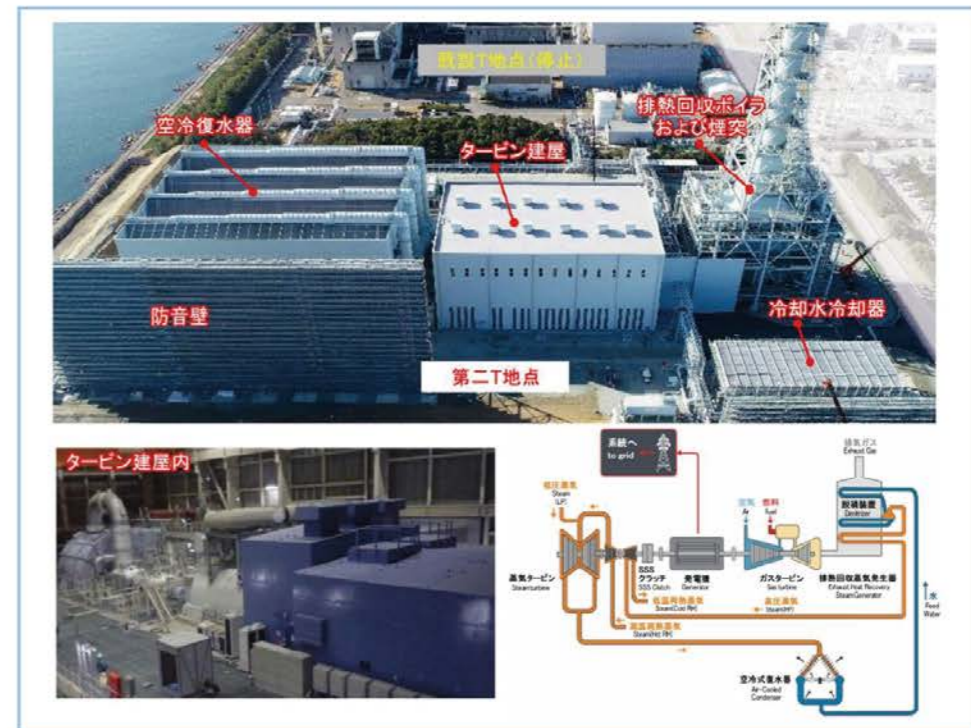


図5 第二T地点 コンバインドサイクルプラント概要

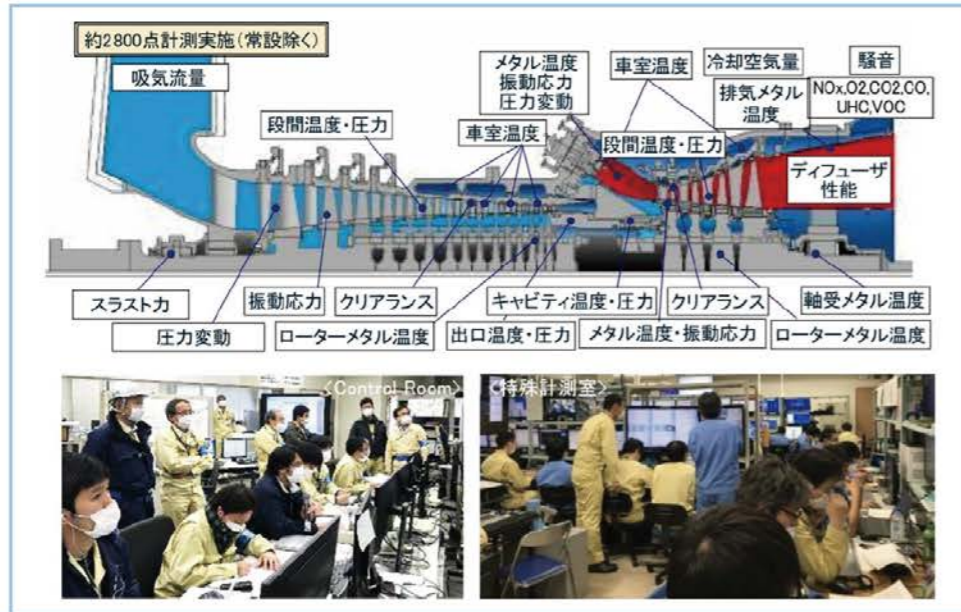


図6 試運転及び特殊計測実施状況

3.1 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7)。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。

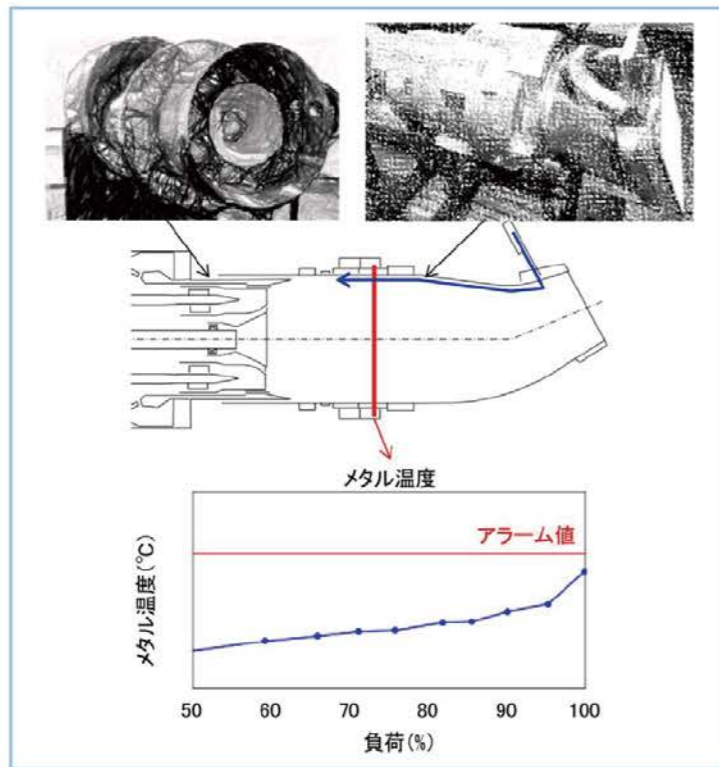


図7 強制空冷燃焼器のメタル温度計測結果

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バ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、負荷運転中でも切換弁(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8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。

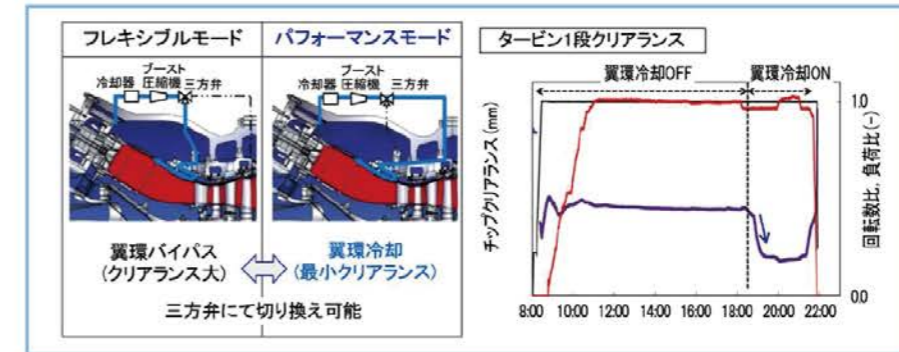


図8 強制空冷システムによるタービンクリアランス制御

3.2 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9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、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、運転後の点検でも健全であることを確認した(図10)。

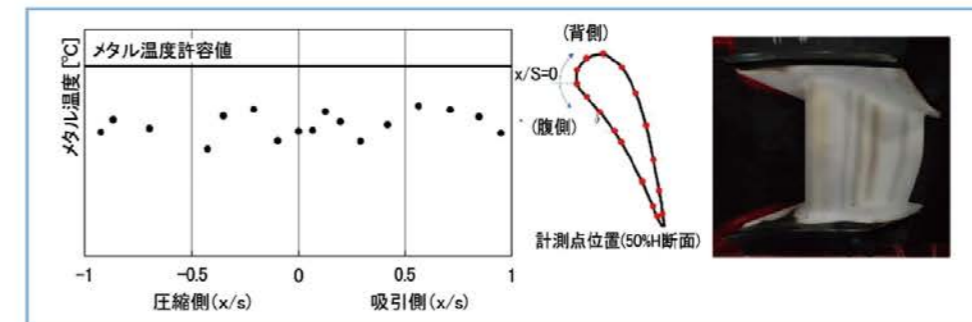


図9 タービン1段静翼メタル温度分布計測結果と運転後点検結果

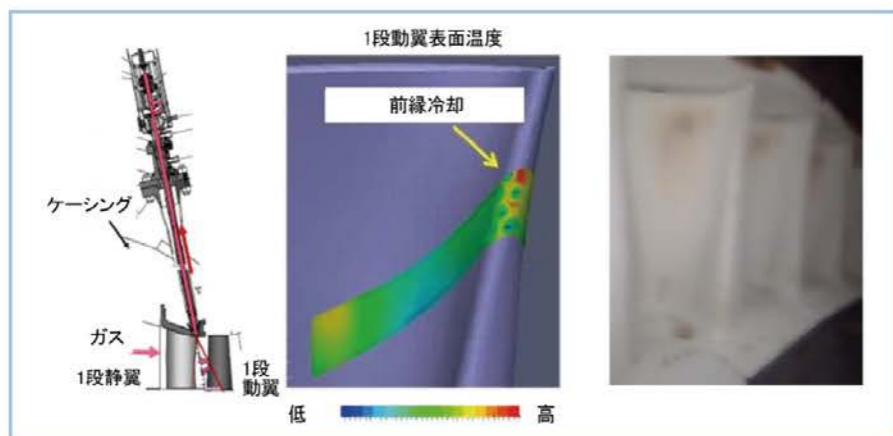


図10 タービン1段動翼表面温度分布計測結果と運転後点検結果

3.3 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、旋回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11)。

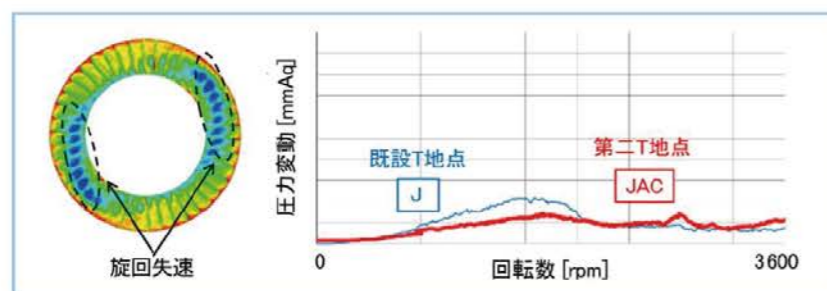


図11 JAC形ガスタービン高圧力比圧縮機実証結果

3.4 1年間運転後のガスタービンの状況

2020年1月より試運転を開始し、同年7月1日に商業運転を開始してから、約1年間の給電運転及び検証試運転を実施し、2021年3月にガスタービン各部の点検を実施し、圧縮機、燃焼器、タービン、吸排気構造など機器として健全であり長期信頼性に問題ないことを確認した(図12)。

2021年春の検証試運転完了後は、再び給電運転を継続し、運転時間/起動回数を重ねるとともに、長期信頼性の継続確認を実施していく。

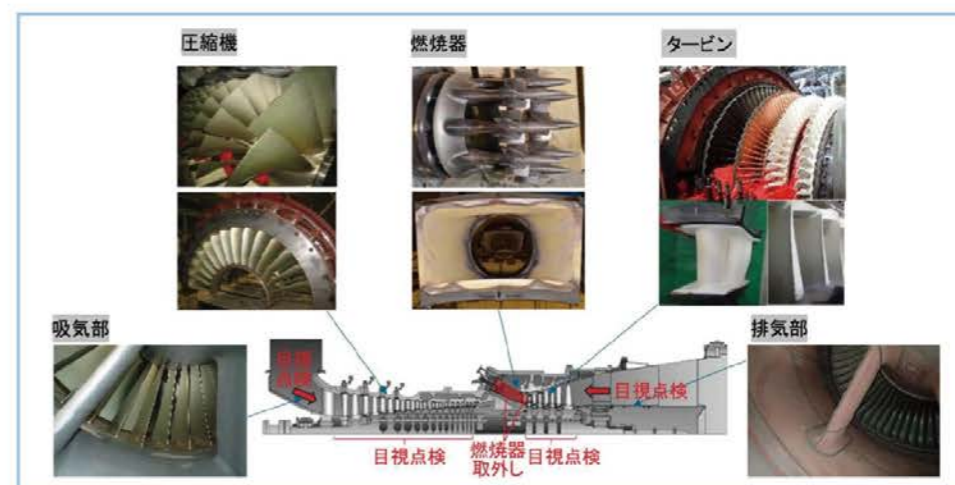


図12 JAC形ガスタービン2021年3月点検結果概要

3.5 JAC形ガスタービンの今後の展開

以上のように、第二T地点実証発電設備にて実証され、長期信頼性を有することを確認されたJAC形ガスタービンは、以下に示す通り、顧客向け商用機の建設及び運転が開始されており、世界の更なる安定エネルギー供給に向け着実に邁進している。60Hz M501JAC形ガスタービンについては北米などの商用機向けに2020年9月から順次出荷を開始しており、各地で現地据付工事を進めているところである(図13)。また、タイ向けに受注した50Hz M701JAC形ガスタービン8基のうちの初号機が、コロナ禍の中であったもののスケジュール通り2021年3月31日に運転開始を迎えている。引き続き、2024年の全号機運転開始に向けて、残りの号機の建設工事を進めているところである(図14)。



図13 M501JAC形ガスタービン商用機の出荷の様子(60Hz)



図14 M701JAC形ガスタービン商用機 運転開始(50Hz)

4. 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°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°C 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二号発電設備(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°C 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、その後、需給要求に従い運用して運転時間/起動回数を積み重ねている。約一年間の運転後の各構成要素は健全であり、長期高信頼性を有することを確認している。

また、実証済の M501JAC 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、50Hz の M701JAC 形ガスタービンについても、コロナ禍の中スケジュール通り 2021 年 3 月にタイにて運転開始している。今後、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) 若園, 由里他, 最新鋭 1650°C 級 JAC 形ガスタービンの実機実証, GTSJ Vol.48 No.6 (2020.11)
- (2) 高村, 若園, 由里ほか, J 形ガスタービンの運転実績踏まえた 1650°C 級 JAC ガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.3 (2019)
- (3) 森本, 若園, 由里ほか, 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, 三菱重工技報 Vol.58 No.1 (2021)
- (4) 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)
- (5) 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
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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 月発行)
- (10) 若園, 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)

カーボンニュートラルの達成に向けた 水素・アンモニア燃焼ガスタービンの取組み

Hydrogen/Ammonia-fired Gas Turbine Initiatives for Carbon Neutrality



江川 拓*1 Taku Egawa	長橋 裕明*1 Hiroaki Nagahashi
林 明典*2 Akinori Hayashi	福場 信一*3 Shinichi Fukuba
佐藤 賢治*4 Kenji Sato	中村 聡介*5 Sosuke Nakamura

三菱重工業株式会社(以下、当社)は、2050 年カーボンニュートラルに向けてカーボンフリー発電システムのラインアップの拡充を進めている。水素利用のガスタービンは、天然ガスに水素を 30vol% 混ぜて使用できるガスタービン燃焼器の開発を完了し、水素 100% 専焼(ドライ)の燃焼器についても燃焼試験を実施して実用化に向けた開発を進めている。さらにアンモニア利用のガスタービンでは、中小型ガスタービンにてアンモニア 100% 専焼の燃焼システムを鋭意開発中である。今後 2025 年にかけて、これら発電システムの実機実証試験を順次実施し、早期の実用化を目指す。

1. はじめに

世界では二酸化炭素(CO₂)の排出量を 2050 年前後にネットゼロにする共通目標が共有されつつあり、各国が高い目標を掲げるだけでなく、目標達成に向けた実行段階に入っている。日本では温室効果ガス排出の 8 割以上を占めるエネルギー分野の取組みとして、一次エネルギーの主な変換先である電力については、第 6 次エネルギー基本計画の中で 2030 年度に電源構成の 1% を水素・アンモニア発電でまかなう目標が設定された⁽¹⁾。

当社は、“MISSION NET ZERO”を宣言し、カーボンニュートラルの達成に向け、エナジートランジションと、社会インフラのスマート化の両面において脱炭素化を推進している。図 1 に示すようにエナジートランジションにおける脱炭素化では、火力発電で排出される CO₂ を“減らす”・“回収する”・“出さない”取組みを進めている。即ち、①石炭火力から低炭素・高効率であるガス火力(ガスタービン複合発電(以下、GTCC: Gas Turbine Combined Cycle))への置換え、ならびにガスタービンでの水素混焼、石炭火力でのアンモニア、バイオマス混焼を進めて CO₂ を減らす。②GTCC と CO₂ 回収装置を備えた発電所の全体最適化による、CO₂ の回収・貯留・有効利用(CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)を進める。そして、③CO₂ を排出しない水素(H₂)専焼やアンモニア(NH₃) 専焼へのガスタービン導入燃料への転換を進める。これまで、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)のご支援のもと、大型ガスタービンにおいて燃料の天然ガスに水素を 30vol% 混ぜて使用する水素混焼燃焼器の開発、及び、水素専焼(ドライ)燃焼器の開発を進めてきている。さらにアンモニア利用 GTCC システムの開発にも着手して、表 1 に示すカーボンフリーガスタービンシステムのラインアップを拡充してきている。これら発電システムにて 2030 年のエナジートランジションによる脱炭素化を目指している。

*1 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部

*2 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部 主席技師

*3 総合研究所 燃焼研究部

*4 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部 グループ長

*5 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部 次長

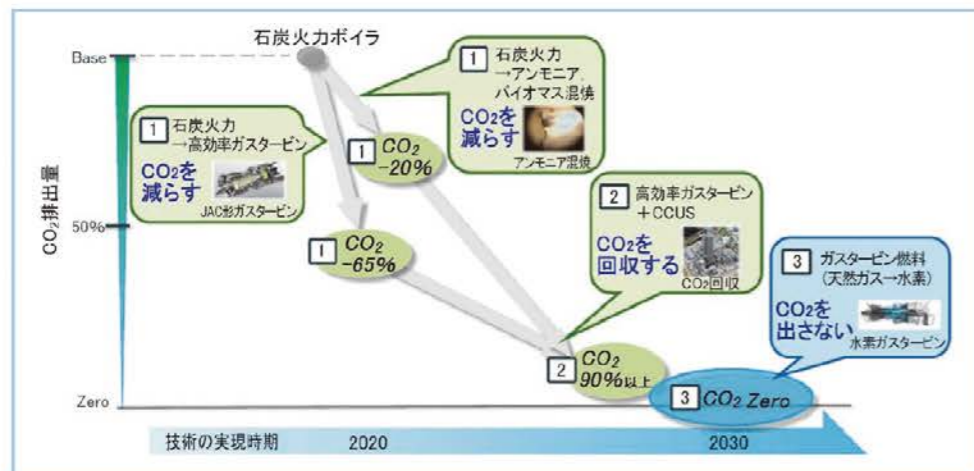


図1 火力発電インフラの脱炭素化に向けた当社の取組み

表1 当社のカーボンフリーガスタービンシステムのラインアップ

機器	概要	適用時期
水素ガスタービン	30%混焼 天然ガス燃焼低 NOx 燃焼器に 30vol%の水素混合天然ガスを供給するもの。既設ガスタービンをそのまま、あるいは最小の改造で適用可能。	2018年 開発完了
	専焼 マルチクラスター燃焼器による水素専焼燃焼器を開発中。	開発完了予定 大型機:2025年 小型機:2023年
アンモニア分解 GTCC	ガスタービンの排熱を利用しアンモニアを H ₂ +N ₂ に分解し、それをガスタービンの燃料とする。 天然ガスとアンモニア分解ガス(H ₂ +N ₂)の混焼、アンモニア分解ガスの専焼に対応し、排ガス温度の高い大型機に向く。	開発中
アンモニア直接燃焼 GTCC	分解装置が不要でありシステムが簡素になる。 アンモニア燃焼に伴う NOx の発生量が多く、専用燃焼器の開発が必要。また、排ガス脱硝装置も必須となる。	2024年に開発を完了し、実証を目指す。

水素はカーボンフリーな燃料として、化石燃料を代替あるいは補完するために最も有効であると考えられる。それは、現在化石燃料を利用している分野で使われている設備やシステムを活用しながらカーボンフリーに転換できる可能性が高いからである。大容量・高効率の水素燃焼のガスタービンには、水素の製造から輸送・貯蔵・利用も含めたバリューチェーンにおいて、①既設のガスタービン設備を最小限の改造で、低炭素化あるいは脱炭素化することができ投資コストを抑制できること、②出力50万kWクラスの大型水素燃焼ガスタービン(水素専焼)は、1つの発電設備で燃料電池車 200万台相当の水素を必要とするため、大規模な水素需要が喚起され水素コスト低減が期待されること、③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多様な水素キャリアに対応可能なこと、④再生可能エネルギーの急激な供給力変動(気象・季節)に追従できるガスタービンの高い起動・負荷変化特性を生かし、電力需要と再生可能エネルギーのギャップを柔軟に埋めることが可能なこと、といったカーボンニュートラル社会の達成に向けて大きなメリットがある。

一方、水素の大量輸送・貯蔵には課題があり、エネルギーの大部分を輸入に頼る日本で水素社会を実現するためには、アンモニアの活用も有効な手段と考えられる。水素を運搬・貯蔵するためのキャリアの中で、アンモニアは液体水素やメチルシクロヘキサンに比べて体積あたりの水素密度が大きく、水素を効率良く運搬・貯蔵できる。また、既存の運搬・貯蔵インフラの転用が可能でありハンドリングに優位な点がある。更に、カーボンフリーな燃料として直接燃焼することも可能であることから、GTCCへ早期に導入することにより将来のカーボンフリー燃料としての活用が期待される。

本報では、これらカーボンニュートラル達成に向けた当社取組みの中で、水素・アンモニア燃焼

ガスタービンに焦点をあて、主な開発項目となるガスタービン燃焼器、燃焼技術の開発状況と、今後の検証スケジュールについて紹介する。

2. 水素・アンモニア燃焼ガスタービンの開発状況

2.1 水素燃焼・アンモニア燃焼の課題

天然ガス燃焼ガスタービンから水素・アンモニア燃焼ガスタービンへの改造は、燃焼器、燃料供給システムの追加で対応可能であり、本体は流用できるため改造範囲が最小限にとどまることが特徴である。従って、水素・アンモニア燃焼ガスタービンの開発におけるキーポイントは、ガスタービン燃焼器、燃焼技術の開発である。

図2に当社ガスタービン用燃焼器に採用される燃焼方式と特徴を示す。拡散燃焼方式は、燃料と燃焼用の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、燃焼器内の火炎温度が局所的に高くなり窒素酸化物(NOx)排出量が増えるため、蒸気・水噴射による NOx 低減対策が必要になる。一方、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料性状変動への許容範囲は大きい。

予混合燃焼方式は、燃料と空気を予め混合して燃焼器内に投入する。この方式は、拡散燃焼方式に比べて、燃焼器内の局所火炎温度を低減できるため、蒸気・水噴射による NOx 低減手法を用いる必要が無く、サイクル効率の低下もない。低 NOx 化と CO₂ 削減(高効率)を両立できるため、燃焼器開発のペースとなる。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。

形式	拡散燃焼方式	予混合燃焼方式
構造		
燃焼特性	<ul style="list-style-type: none"> 燃料と燃焼用空気を別々に噴射 高温スポットが生じやすい(NOx高) 火炎が安定 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料は空気と混合され噴射 高温スポットが生じにくい(NOx低) 火炎が不安定:燃焼振動、フラッシュバックリスク
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"> CO₂削減(高効率)と低NOx化を両立 燃料系統が複雑
燃焼器	拡散燃焼器	マルチノズル燃焼器 マルチクラスター燃焼器

図2 拡散燃焼方式と予混合燃焼方式

ガスタービン燃料として主に使用される天然ガス(主成分:メタン(CH₄))と、水素、アンモニアの低位発熱量、燃焼速度の比較を図3に示す。水素は、メタンに比べて発熱量、燃焼速度ともに高く、燃焼速度は約7倍である。そのため、予混合燃焼器にて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炎位置が上流に移動し、空気と十分に混合する前に高い火炎温度で燃焼するため、NOxが増加する。また火炎が燃焼器の上流に遡上し当該部が焼損する逆火(フラッシュバック)の発生リスクが高くなる。そのため、水素燃焼ガスタービン燃焼器は、逆火発生防止に向けた改良を中心に、低 NOx 化や安定燃焼化を図る必要がある。

一方、アンモニアはメタンに比べて発熱量が1/3、燃焼速度が1/5程度と低いため燃焼が不安定になりやすく、火炎を安定に保持することが課題となる。また、表2に示すようにアンモニアは窒素分(N)を含んでいるため、燃焼の過程で大量のFuel NOxが生成される。これは、天然ガス等の燃焼時に生成されるサーマル NOx と比較して桁違いに多い。NOx の発生メカニズムが異なるため、これまでの NOx 低減手法とは異なるアプローチが必要となる。

これら異なる特徴を有する水素、アンモニア燃料に対応する当社ガスタービン燃焼器および燃

焼技術の開発状況について、次節に紹介する。

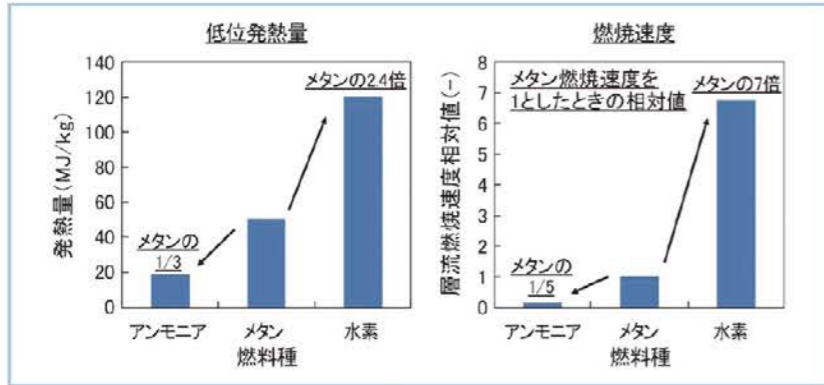


図3 メタン、水素、アンモニアの低位発熱量、燃焼速度の比較

表2 NOx 発生メカニズム

燃料	NOx 発生メカニズム	NOx 発生量 (未対策時)
通常燃料 (LNG 等)	高温燃焼場にて空気中の窒素が酸化反応することで窒素酸化物が生成 (Thermal-NOx) $N_2(\text{空気}) + O_2 \rightarrow NOx$ ※NOx 発生要因は N_2 の熱分解	数百 ppm オーダー
アンモニア (NH_3)	燃料の酸化反応により窒素酸化物が生成 (Fuel-NOx) $NH_3(\text{燃料}) + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O + NOx$ ※NOx 発生要因は燃料の化学反応	数千 ppm オーダー

2.2 水素共燃焼器の開発

(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 マルチノズル燃焼器をベースとして、新たに開発された水素混焼燃焼器の概要を図4に示す。マルチノズルタイプの予混合燃焼器は、予混合方式の燃料ノズルと8本と、それらの中心に燃焼の安定化を図るパイロット火炎用の燃料ノズル1本を有する。ノズル部には旋回翼(スワラー)が設置され、スワラーを通過した空気とノズルから噴射された燃料がより均一に混合される。旋回流の中心部には、流速の低い領域(以下、渦芯)が存在し、ここを火炎が遡上することで逆火が発生すると考えられる。そこで新型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上昇させ、渦芯の低流速領域を補うことで逆火の発生を防止している。

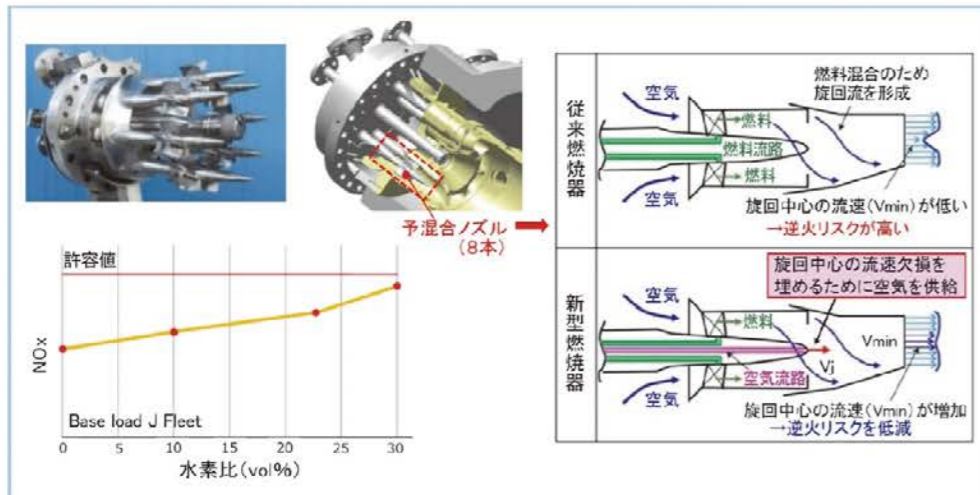


図4 水素混焼燃焼器と水素 30vol%混焼試験時の NOx

この燃焼器1本を使用して、タービン入口温度 1600℃級の大型ガスタービン相当の運転条件(圧力、温度)で、燃焼試験(以下、実圧試験)を実施した(図4左下)。定格負荷にて水素 30vol%まで天然ガスに混ぜて燃焼させても課題である逆火の発生はなかった。燃焼振動の著しい上昇も無く安定に燃焼し、また NOx 排出量も許容値以下であり、実機運用が可能である用途が得られた。

さらに、水素混焼率を増加させるための施策の一つとして図5に示すように、燃焼器中央に配置されたパイロット火炎用の燃料ノズルを、フラッシュバックのリスクを伴わない拡散燃焼方式とし、そこから水素 100vol%を投入する方式の検討を進めている。予混合ノズル(8本)からは水素 30vol%の燃料を投入して、燃焼器全体で合わせて 50vol%水素まで水素混焼率を増加させることが可能になる。また、拡散燃焼部分での NOx 生成量の増加は、当該部に水を噴射することで抑制可能である。実圧試験では、この方式にて NOx が許容値以下で運用可能な範囲内であり、逆火の発生や燃焼振動の著しい上昇を伴わずに安定に運用できることが確認された。水素混焼率を増加させる施策は今後も引き続き検討が必要であり、実機検証に向けて開発を進める。

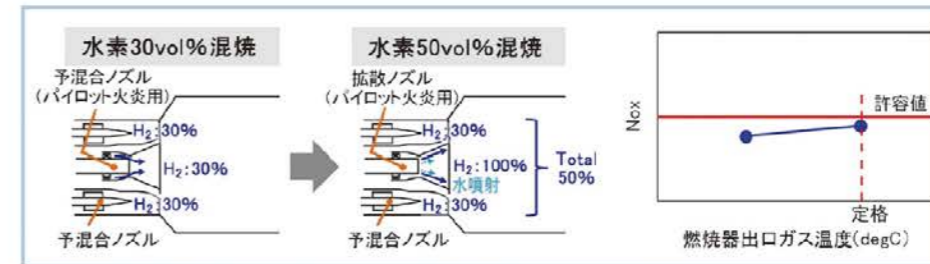


図5 水素混焼率を増加させるための施策と、水素 50vol%混焼時の NOx

(2) 水素専焼用マルチクラスタ燃焼器

水素が更に高濃度になると、逆火発生リスクは更に高くなる。前項のマルチノズルにおける旋回流を用いた比較的低流速かつ大きな空間で空気と水素の混合させる方式と較べて、より高流速で小さなスケールで空気と水素を混合させる方が混合距離の短縮が可能であり、逆火への耐性が高いと考えられる。図6に、現在開発中の水素専焼用マルチクラスタ燃焼器を示す。燃焼器に多数の孔(予混合管)が設けられており、そこで空気と燃料が急速混合される。また、火炎が多数に分散されることで NOx 低減が図られる。

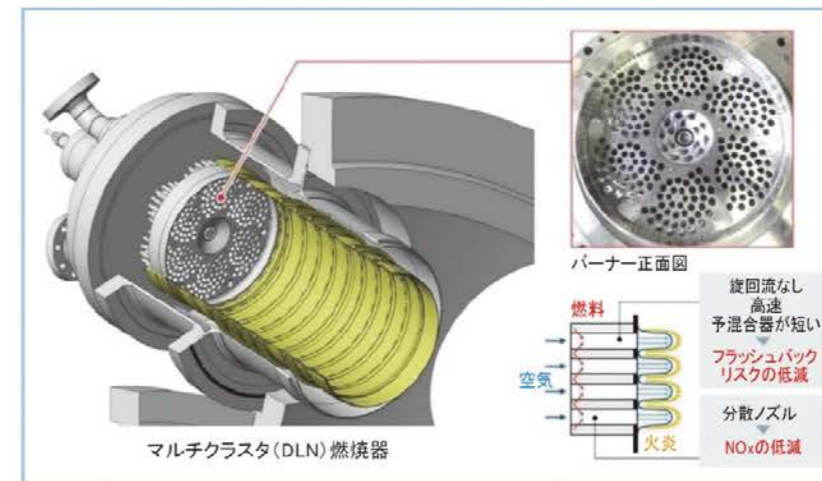


図6 水素専焼用マルチクラスタ燃焼器

上述の燃焼コンセプト、ならびに燃焼性を確認する目的のため、マルチクラスターノズルの一部分を取り出した試験用モデルバーナにて実機相当圧力の燃焼試験を実施した。図7に燃焼試験装置と燃焼時の火炎の画像を示す。水素火炎は人間の目に見える可視領域の発光が殆ど無く、紫外領域に特有の発光が見られる。紫外光を映した画像では、バーナの単孔ノズル出口から少し離れた位置に火炎が均一に安定して存在する。試験では計画された条件にてフラッシュバックの発生が無く、安定燃焼することが確認された。

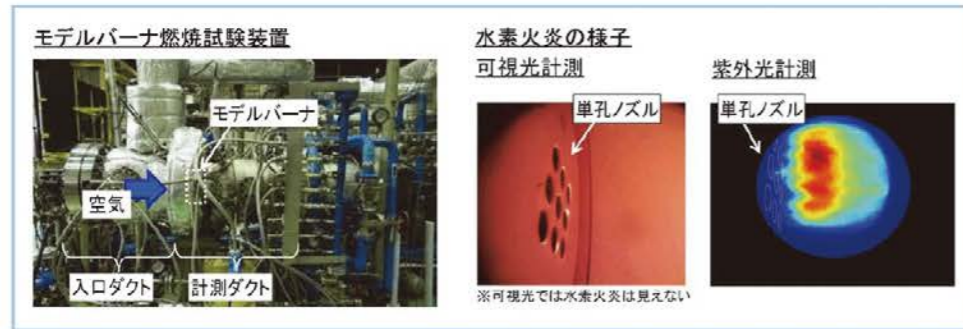


図7 マルチクラスター燃焼器のモデルバーナ燃焼試験装置と水素火炎の様子

さらに、中小型H-25ガスタービン向けに、開発中の水素専焼用マルチクラスター燃焼器1本を用いたフルスケールの実圧試験を実施し、水素専焼で実機運転を模擬した温度・流量条件のもと負荷を上昇させたところ、逆火の発生や、燃焼振動レベルの急激な上昇も無く、実機定格負荷相当の燃焼温度に到達した。図8に負荷上昇時のNOx計測値を示す。引き続き、更なるNOx低減を図りつつ実機検証に向けて開発を進める。

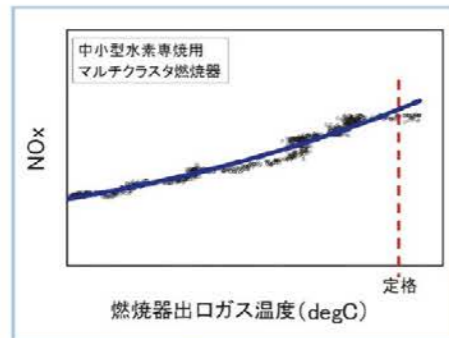


図8 水素専焼時のNOx

これら得られた知見は、大型ガスタービン向けマルチクラスター燃焼器にも展開中であり、現在、実機検証に向けてフルスケール燃焼器1本を用いた実圧燃焼試験を実施している。試験は、水素混焼の試験と同様に図9に示す当社高砂工場の実圧燃焼試験設備で実施する。水素専焼の試験では、大容量の水素燃料が必要であり、同工場内の高砂水素パーク(後述)に新たに設置された水素貯蔵設備から供給を受ける。また、実圧燃焼試験では、燃焼試験用空気を空気圧縮機から供給しており、その駆動源として中小型H-25ガスタービンを使用している。中小型ガスタービンの水素専焼実証時には、本機が試験機として使用される。

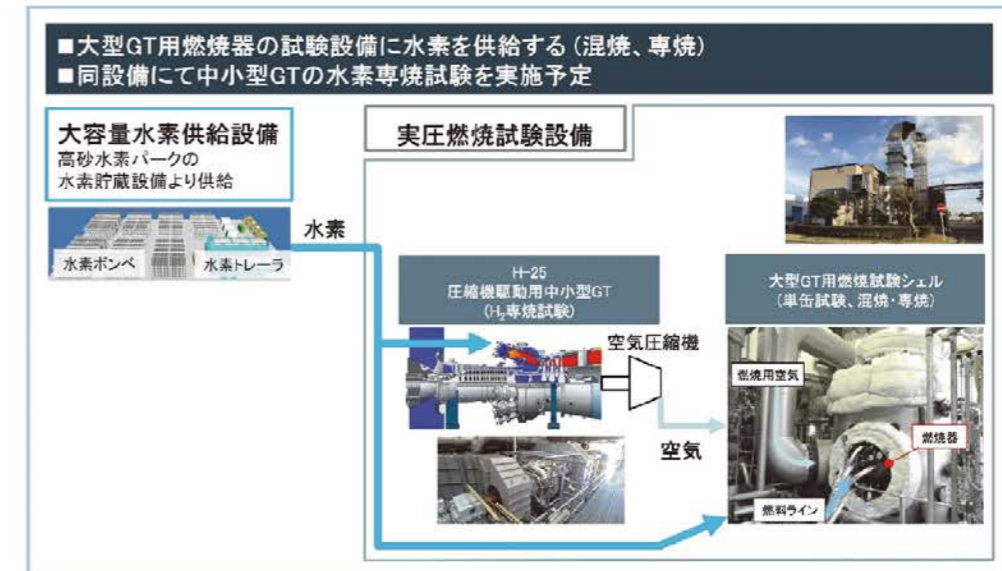


図9 水素専焼試験が実施される実圧燃焼試験設備

2.3 アンモニア焼き燃焼システムの開発状況

アンモニアをガスタービン燃料として燃焼させる際は、先述2.1節のとおり、燃焼器内で火炎を安定保炎させること、Fuel NOx(アンモニア燃料中の窒素が酸化して発生するNOx)の排出量をコントロールすることが課題となる。そこで当社では、アンモニアを利用するGTCCシステムとして、図10に示す2つの方式を検討している。

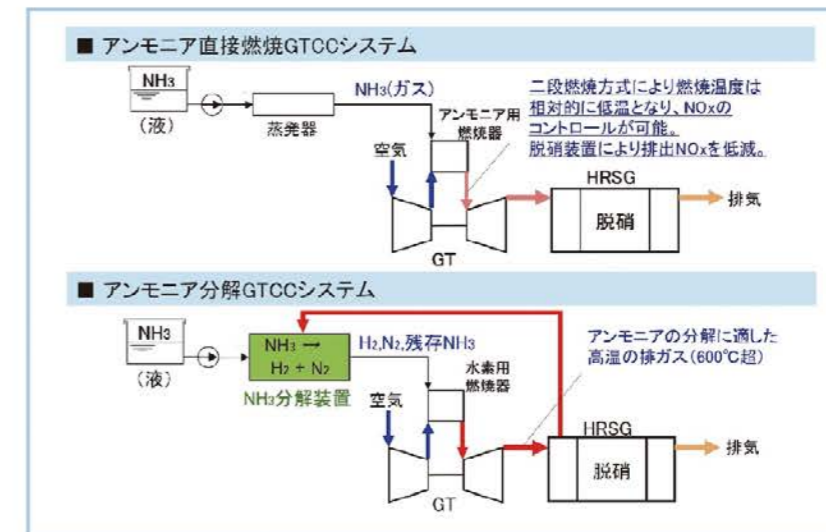


図10 アンモニア焼き燃焼システム

(1) アンモニア直接燃焼GTCCシステム

NOx排出量を低減するアンモニア用燃焼器と高効率の脱硝装置を組み合わせたガスタービンシステムであり、燃焼器は、図11に示す拡散燃焼器をベースとしたリッチ・リーン二段燃焼方式の検討を進めている。図12にはアンモニア燃焼時のFuel NOxの排出特性イメージを示す。当量比 $\phi = 1$ (化学量論:アンモニアと空気が過不足なく完全燃焼する)に近い領域でFuel NOx発生量のピークがあるが、リッチ・リーン二段燃焼方式では、燃焼器の上流域で燃料アンモニアと空気(一次燃焼空気)を当量比 $\phi = 1$ 以上の燃料過濃の状態(Rich Zone)で燃焼させた後、二次燃焼空気との混合により希薄燃焼の状態(Lean Zone)に移行させてNOxの発生を抑える。

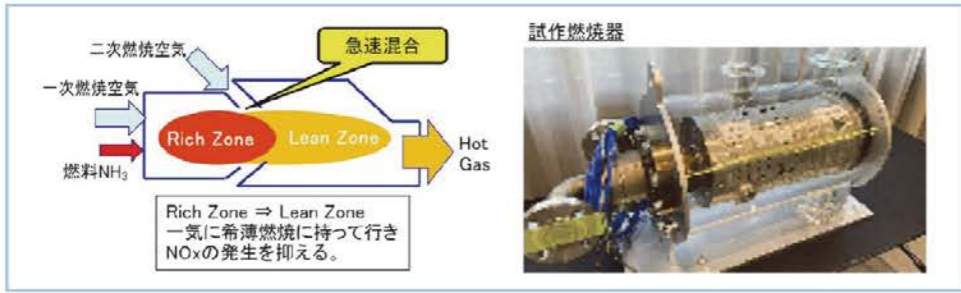


図 11 アンモニア二段燃焼方式の燃焼器

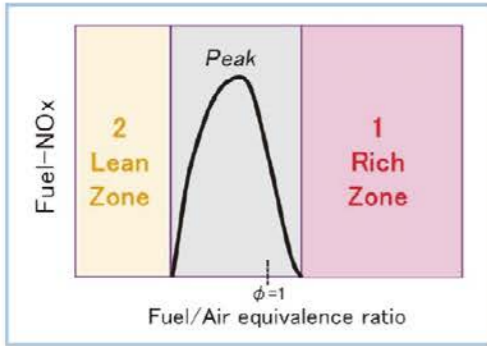


図 12 アンモニア燃焼時の Fuel NOx 排出特性

本システムの開発は、中小型H-25形ガスタービンを対象にしたものから進められる。当社総合研究所長崎地区に設置されたアンモニアの燃焼試験設備にて、フルスケールの試作燃焼器(1本)の大気圧燃焼試験を実施し、保安性、NOx 排出量、炭化水素燃料からアンモニア燃料切替時の特性などが確認される。図 13 に炭化水素燃料とアンモニア燃料燃焼時の燃焼器内の可視化画像を示す。炭化水素燃焼時の青色炎に対して、アンモニア燃焼特有のオレンジ色の火炎が観察される。今後は、高圧のアンモニア供給設備を有する当社日立工場(勝田)の実圧燃焼試験設備にて、実機圧力相当の燃焼試験を実施し、2025 年以降の実機運転、商用化を目指し、開発を進める。

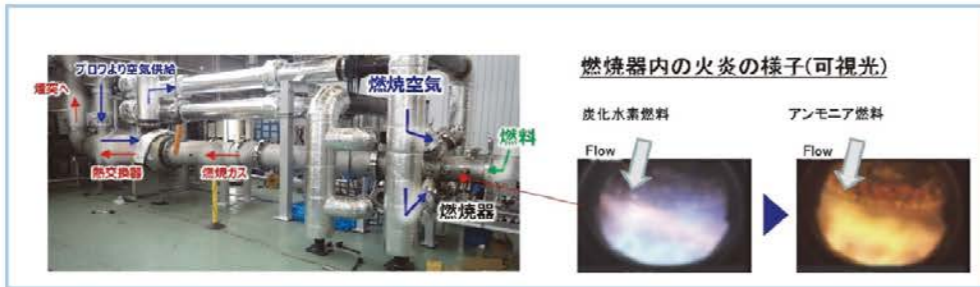


図 13 アンモニア大気圧燃焼試験装置と燃焼器内の火炎の様子

(2) アンモニア分解 GTCC システム

アンモニア分解 GTCC は、ガスタービンから排出される高温の排熱を利用してアンモニアを水素と窒素に分解したものを水素混焼用燃焼器(2.2 節(1)), 又は、開発中の水素専焼燃焼器(2.2 節(2))により燃焼させるシステムである。本システムの主要機器であるアンモニア分解装置は、水素キャリアとして輸送されたアンモニアから水素を取り出して他の水素利用設備や機器に供給するシステムとしての利用も考えられ、実用化に向けて、発電システムとの熱の授受やシステム全体の運用性と合わせて引き続き検討が進められる。

3. 実証スケジュール

水素・アンモニア焚きガスタービンの早期商用化に向けて、今後は実機ガスタービンを用いた実証が進められる。当社は自社設備での実証を通じて製品の信頼性を向上させるため、高砂工場に水素製造から発電までの技術を世界で初めて一貫して検証できる“高砂水素パーク”(図 14)を整備し、2023 年から順次運用を開始している。



図 14 高砂水素パーク

図 15 に実機検証スケジュールをガスタービンから排出される CO₂ の削減スケジュールとともに示す。これまで大型ガスタービン向けに開発した水素混焼用マルチノズル燃焼器を用いた燃焼器一缶試験では水素混焼(〜50vol%)運転を確認しており、欧州の CO₂ 排出規制(EU タクソミーで設定されている '2030 年末までに建設が認められたガス火力発電事業について CO₂ 排出量 270[g/kWh]を超えない' という審査基準⁽²⁾)の達成目途を得ている。2023 年より高砂水素パーク内の水素供給設備を利用して水素混焼の実機検証を行い、製品化に向けて信頼性を確認する。また、マルチクラスター燃焼器を用いた中小型ガスタービン水素専焼の実機検証も行う。試験機として図9に記載した実圧試験設備の H-25 ガスタービンを使用する。2025 年には、後述の米国プロジェクトを含めた水素混焼(30vol%)の実用化を開始し、更に大型ガスタービンは 2030 年の水素専焼の実証を目指す。アンモニア焚きについても、同様に中小型 H-25 ガスタービンで実証を行い、実用化を目指す。

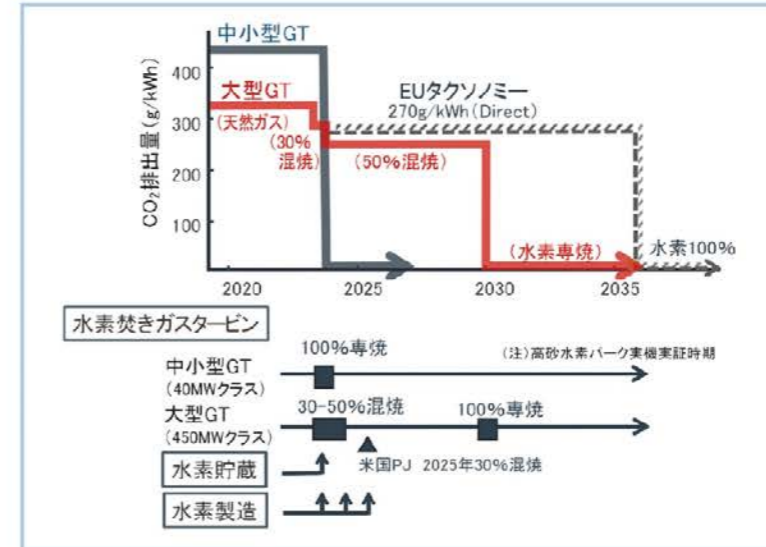


図 15 実機検証スケジュール

4. 海外での水素・アンモニア焼きガスタービンプロジェクト

前章の実機検証スケジュールと並行し、当社は国内外の水素・アンモニアの利活用が先行する地域での事業開発などに参画し、社外との協業を推進しながら製品の実用化を目指している。以下にその一例を紹介する。

4.1 米国ユタ州の Advanced Clean Energy Storage プロジェクト

アメリカ西海岸の豊富な再生電力からグリーン水素を製造し、地下岩塩空洞にそのグリーン水素を貯蔵、電力必要時にグリーン水素を取り出してガスタービンで発電する。電力は、カリフォルニア州、及びユタ州に幅広く供給され、この地域における中長期間の電力需給安定化を図る。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%水素混焼、2045年までに水素専焼での発電が計画されている。30vol%水素混焼による発電で最大で年間460万トンのCO₂排出量削減に寄与できる見込みである。

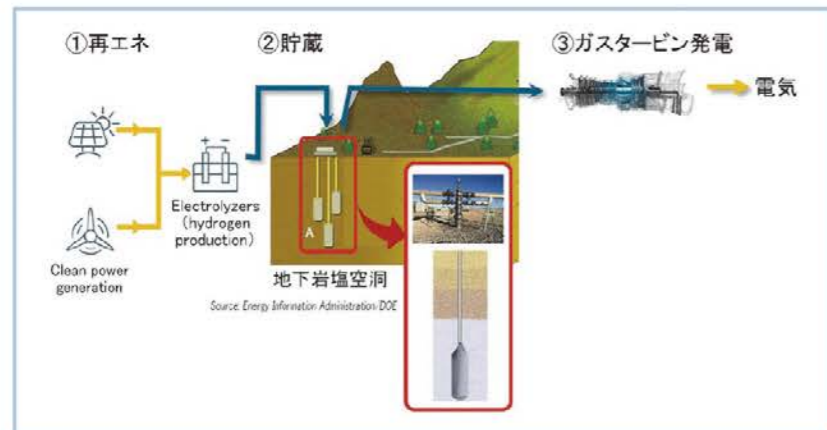


図16 米国ユタ州の Advanced Clean Energy Storage プロジェクト

4.2 米国マクドノフ・アトキンソン発電所での水素燃料混焼実証プロジェクト

既設ガスタービン発電プラントにおける水素混焼の実証プロジェクトとして、当社グループは、2022年に米国電力会社ジョージア・パワー (Georgia Power) 及び電力研究所 (The Electric Power Research Institute: EPRI) とともに、図17に示すジョージア州のマクドノフ・アトキンソン発電所で、当社納入のM501G形天然ガス焼きガスタービン（燃焼器はDLNマルチノズル燃焼器）を使い、水素と天然ガスの混合燃料による燃焼実証試験に成功した⁽³⁾。高効率・大型GTCC発電設備では、世界で初めて行われた20vol%の水素混合燃料による燃焼実証であり、この種の試験としては史上最大規模のものである。天然ガス燃焼時に比べて、タービン入口温度・エミッション・メンテナンス間隔の影響を及ぼさずにCO₂排出量は約7%削減される。全負荷領域で水素混合比率20vol%の運転を達成し、天然ガスの運転と同じNO_xレベルを維持できること、また、水素混焼により部分負荷で発生する一酸化炭素(CO)の排出量が低減され燃焼効率が改善して、エミッション規定を遵守しつつ運転できる最低負荷を10%(絶対値)下げる効果が確認された。

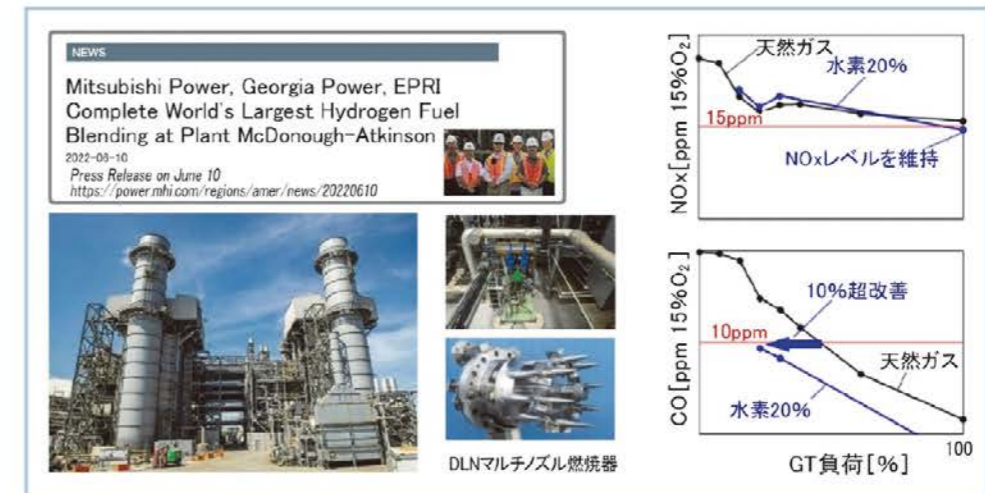


図17 米国マクドノフ・アトキンソン発電所と水素混合燃料による燃焼実証試験結果

4.3 アンモニア焼きガスタービンの実装計画

既設火力発電所にアンモニアを導入する計画が各国で進められている。石炭焼きボイラでの混焼利用計画が先行しているが、GTCCについても事業化調査(Feasibility Study:FS)が実施されるなどアンモニア焼きガスタービンのニーズは世界各国で高まっており、当社も参画している。

5. まとめ

本報では、当社がカーボンニュートラルの達成に向けて取組み中の水素・アンモニア焼きガスタービンに焦点をあて、主な開発項目となるガスタービン燃焼器の開発状況と、今後の検証スケジュールについて紹介した。

水素・天然ガス混焼方式では一缶燃焼試験にて、水素30~50vol%の混焼条件において運転が可能な目途を得ており、今後の開発は実用化に向けた実機検証の段階に進む。水素専焼方式についても、まず中小型ガスタービンから実機検証を開始する。また、アンモニアを利用したガスタービンシステムについても引き続き実用化に向けた開発を進め、これらカーボンフリー発電システムのラインアップを拡充して2030年のエネルギー転換による脱炭素化を目指す。

当社はCO₂削減に貢献できる水素・アンモニア焼きGTCCの開発・実用化を通して世界中のパートナーと協調し、カーボンニュートラルの早期達成に向けて今後も取組みを続ける。

(謝辞)

本報の第2章2.2節に記載された水素混焼燃焼器、水素専焼燃焼器の内容は、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)の助成事業(水素社会構築技術開発事業: JPNP14026)の成果の一部です。また、2.3節に記載したアンモニア分解GTCCシステムの開発は、NEDOの助成事業(水素社会構築技術開発事業: JPNP14026)により進められました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁、2030年度におけるエネルギー需給の見通し(関連資料)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_03.pdf
- (2) EU taxonomy: Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation
https://finance.ec.europa.eu/publications/eu-taxonomy-complementary-climate-delegated-act-accelerate-decarbonisation_en
- (3) 三菱重工業株式会社、プレスリリース、三菱重工、ジョージア・パワー、米国電力研究所が世界最大の水素燃料混焼実証 マクドノフ・アトキンソン発電所のGTCC発電設備で成功、(2022)
<https://www.mhi.com/jp/news/220615.html>

脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク” “長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み “Takasago Hydrogen Park” & “Nagasaki Carbon Neutral Park” Initiative to Create Decarbonized World



正田 淳一郎*1 Junichiro Masada
寺内 方志*2 Masashi Terauchi
石井 弘実*3 Hiromi Ishii
堂本 和宏*4 Kazuhiro Domoto
中馬 康晴*5 Yasuharu Chuman
小阪 健一郎*6 Kenichiro Kosaka

エナジートランジションがグローバルに加速する中で、三菱重工業株式会社(以下、当社)の主力製品であるガスタービンコンバインドサイクル(GTCC:Gas Turbine Combined Cycle)・汽力発電のカーボンニュートラルへの対応も急務とされている。これら火力発電における脱炭素化技術のキー技術開発は、当社の工場と研究所がある高砂地区と長崎地区で進めており、高砂地区の高砂水素パークでは、要素技術を統合的に実際の運転条件で長期実証していく環境を整備している。一方で、要素技術開発の要衝である長崎地区は長崎カーボンニュートラルパークと称しており、開発中の水素製造技術を含む技術開発の概要とともに本報にて紹介する。

1. はじめに

地球温暖化問題解決は現在人類の重要な課題であり、2020年10月、政府は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、“カーボンニュートラル”を目指すことを宣言した。“排出を全体としてゼロ”とは、二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスの“(人為的な)排出量”から、植林、森林管理などによる“(人為的な)吸収量”を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味する。このカーボンニュートラルの達成のためには、再生可能エネルギーの大幅な普及拡大が不可欠である。また、それと並行して、経済性やエネルギーの安定供給を維持することもまた重要である。当社は、既存の火力発電設備のエナジートランジションを進めることにより、社会コストを最小化しながら、現実的かつスピーディにカーボンニュートラル社会を達成することを目指している。

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーはカーボンニュートラル社会の達成に大きく貢献するものであるが、天候に左右されやすいという特性から、出力の変動が大きく刻々と変化する需要への対応に難がある。このため再生可能エネルギーの変動を吸収し需要変動にも対応する手段として、火力発電の中でCO₂排出量が最も少ない天然ガス燃焼 GTCC は、柔軟性や信頼性も高く、今後も重要な電力供給源としての役割を果たすことが期待されている。さらに、天然ガス燃料にCO₂を排出しない水素を混合、更には水素やアンモニア燃料に代替えることにより、系統の安定化とともに、安定化のために運転される火力発電からのCO₂排出量も大幅に減少することができる。図1に水素・アンモニア利用の背景を示す。世界的には太陽光発電・風力発電に代表される再生エネルギーの普及が進んでいる。これらの電源は時間・天候・季節による変動が大きく、利用拡大には蓄エネルギー技術の導入が必要である。図1左は蓄エネルギー技術の年間の放電回数と放電時間で得失を示したものである。短時間ではリチウム電池が有利である

*1 エナジードメイン 副ドメイン長
*2 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 室長
*3 エナジードメイン SPMI 事業部 計画部 部長
*4 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 主幹技師
*5 総合研究所 主幹研究員
*6 エナジードメイン 技術戦略室 技監・主幹技師 工博

が、数日・数十回/年の蓄電に対しては水素など化学エネルギーへの変換が有利である。図1右は再生可能エネルギー賦存の地域性を示したものである。世界の多くの地域では再生可能エネルギーの普及が進み、再生可能エネルギーの余剰電力による水電解により製造される水素の普及が進むと予想される。一方で、日本・韓国等の再生可能エネルギー資源に恵まれない地域では、輸送効率が高いアンモニア利用の普及とともに、既存 LNG インフラを活かしたメタンの水素と固体炭素への熱分解による水素製造であるターコイズ水素の期待が高い。また東南アジアなど安価な化石燃料資源に頼らざるを得ない地域でも CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)に必要なコスト等の課題からターコイズ水素への期待が大きくなっており、各ニーズに沿った脱炭素技術の実証・社会実装が急がれる。

本報では、高砂水素パークで進める水素燃焼ガスタービンの開発状況を概観するとともに、長崎カーボンニュートラルパークで進めている、これらの水素製造を含む、脱炭素技術の開発状況について述べる。

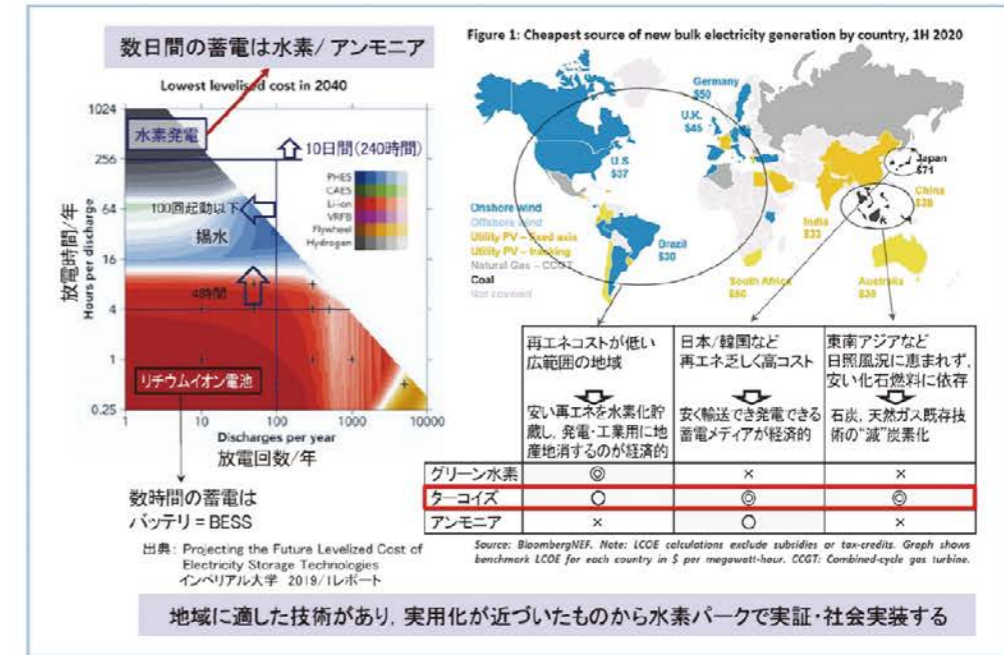


図1 水素・アンモニア利用の背景

2. 三菱重工のゼロエミッション発電 ロードマップ

三菱重工グループでは、“MISSION NET ZERO”を宣言し、当社が2040年までにカーボンニュートラルを達成することで、お客様が2050年までに目指すCarbon Neutrality化を実現可能な製品、技術を提供する。主な取組みとして、エナジートランジションによる事業・製品の低・脱炭素化を図り、加えてCO₂回収事業を含めたCCUS事業の拡大を進める目論みである。本報ではこれらのうち、発電事業者及び産業用向けの取組みについて述べる。

エナジードメインは、具体的には2040年のカーボンニュートラルに向けた“火力発電のエナジートランジション”“産業用エネルギーの効率的な活用”“水素バリューチェーンの構築”に取り組んでいる。この中でも、非化石燃料への転換による火力発電におけるカーボンニュートラルの推進は極めて重要である。図2に発電技術開発のロードマップを示す。

火力発電は大きく分けて汽力発電とGTCCに分けることができる。汽力発電の主流であるボイラ・タービンからなる石炭燃焼火力発電では、技術が確立済みのバイオマス高混焼化によるCO₂削減が進行中である。続いて現在急速に開発・実証が進展しているアンモニアの混焼化・混

燃率の引き上げにより更なる CO₂ 排出量の削減を目指す。また、石炭焼き火力発電所を高効率 GTCC に置き換えることで、約 65% の CO₂ 排出量の低減が可能である。これらの火力発電は更なる CO₂ 排出量の削減が求められており、水素やアンモニアの混焼によって CO₂ 排出量の低減を行ってゆく。また CO₂ の回収により 90% レベルの低減を、更には水素やアンモニアなど専焼により CO₂ ゼロを目指す。

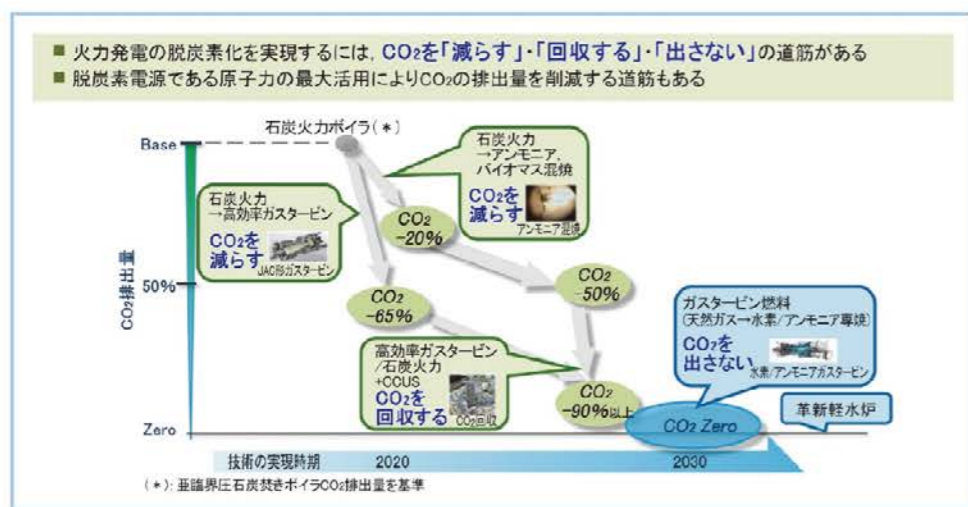


図2 発電技術開発ロードマップ

3. 水素燃焼ガスタービンの開発状況

当社の主力製品であるガスタービンは、世界で最も厳しい欧州の CO₂ 排出基準に適合するように、開発を進めている。図3に欧州の CO₂ 排出基準とガスタービン開発スケジュールを示す。図3左は水素燃焼のガスタービンの開発状況である。大型ガスタービンでは、2025 年の混焼での商用化に向け、従来型の燃焼器を使った燃焼試験において、既に 50% の水素混焼条件で安定燃焼を確認している。これは、270g/kWh という EU タクソミーの CO₂ 排出量の基準クリアを達成するものであり、今後は、新型燃焼器の開発を進め 2030 年中の大型ガスタービンでの水素 100% 専焼を目指して開発を進める。

中小型ガスタービンにおいても、水素やアンモニアといった脱炭素燃料へ対応する技術開発を進めており、2022 年に燃焼器単体での水素専焼試験を成功させている。これらの燃焼技術の実証は、実際の発電設備である高砂水素パークにおいて、今年度から開始する予定である。

また、同じく高砂水素パーク内において、アルカリ水電解に加えて、自社開発である SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell, 固体酸化物形電解セル) やメタン熱分解によるターコイズ水素 といった、当社が開発する水素製造技術の実機検証も順次始める予定である。

図4はアンモニア発電技術のロードマップである。アンモニアも水素同様、燃焼時に CO₂ を出さないクリーンな燃料として期待されている燃料である。また、液化に -253℃ までの冷却が必要な液体水素に比べて、アンモニアは -33.4℃ で液体アンモニアとして輸送可能で、輸送・貯蔵に適した水素キャリア・エネルギー源としても期待されている。ガスタービンにおいては 100% 専焼にて、2025 年以降に実証を目指して燃焼器の開発を行っている状況である。ボイラに関しては、2020 年代後半に 50% 以上の混焼の実機実証試験を目指している。

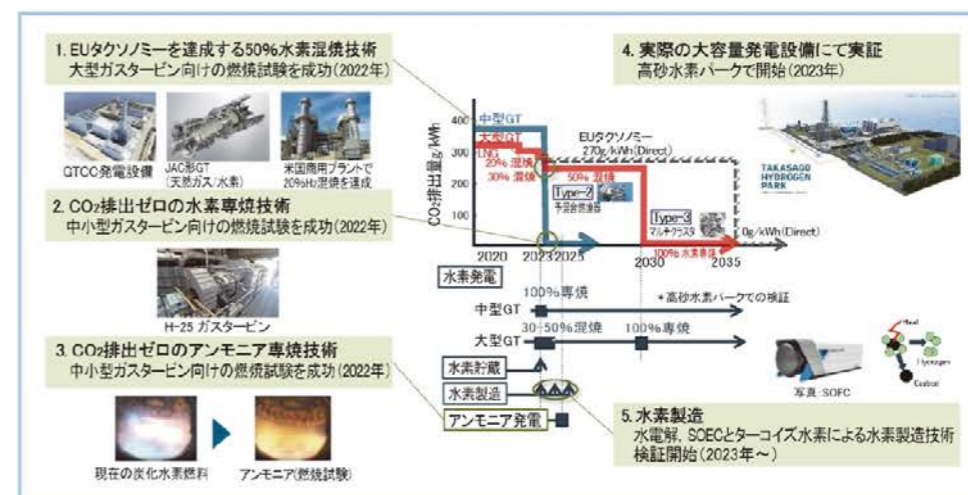


図3 欧州の CO₂ 排出規制とガスタービン開発スケジュール

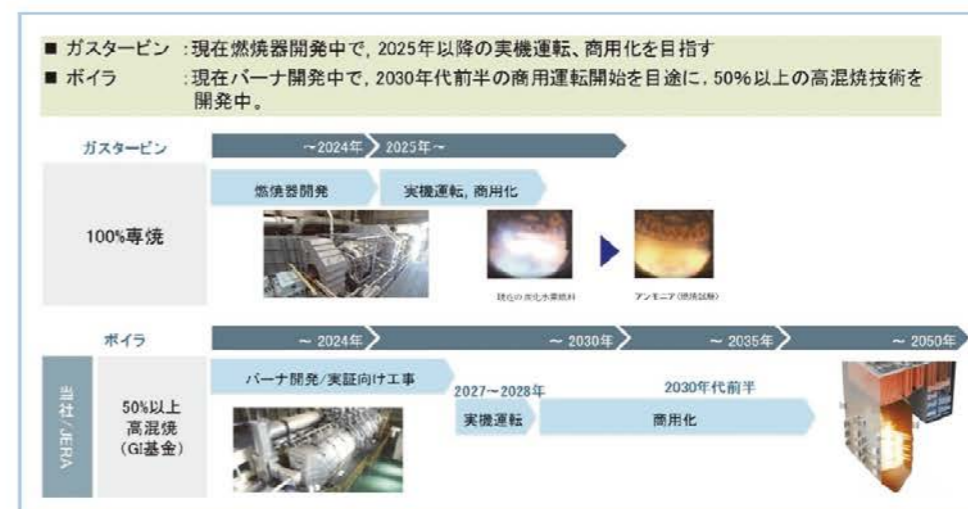


図4 アンモニア発電技術ロードマップ

4. 水素発電の実証“高砂水素パーク”

水素を燃料とする水素ガスタービンの早期商用化に向け、開発・設計・製造・実証拠点を置く高砂製作所に、水素製造から発電までにわたる技術を世界で初めて一貫して検証できる“高砂水素パーク”を整備している。2023 年5月現在、高砂水素パークの部分稼働を開始しており、本格稼働に向け準備を進めている。

水素製造設備は、水電解装置の採用に加え、メタンを水素と固体炭素に熱分解するターコイズ水素の製造など、次世代水素製造技術の試験・実証を順次行う予定である。図5に高砂水素パーク概要を示す。ガスタービン設備として中小型の H-25 及び大型の M501JAC が稼働済みである。アルカリ電解槽本体の設置が今春完了しており、今後は、SOEC 設備等の設置工事等が始まる。

図6は高砂水素パークの構成図である。再生可能エネルギー電力による水電解・水蒸気電解への適用を期待される電解装置及び、天然ガス(メタン)の熱分解を行うメタン熱分解装置にてそれぞれ製造した電解水素/ターコイズ水素を水素貯蔵設備に貯蓄し、各種実証試験設備で燃料として発電し、グリッドに供給する。水素製造から発電までの一貫実証のみならず、二次電池による電力貯蔵を組み合わせて、電解水素と二次電池による余剰電力貯蔵、高需要期に水素ガスタービンと二次電池からの電力供給を行うことができる、高度なエネルギーマネジメントを一貫実

証できる設備の構築を目指している。図7に最新(2023/5)の高砂水素パーク整備状況を示す。水素貯蔵設備の設置は完了し、部分稼働を開始した。この実証設備を活用することにより、水素の本格普及、水素発電の社会実装に大いに貢献すると期待している。



図5 高砂水素パーク概要

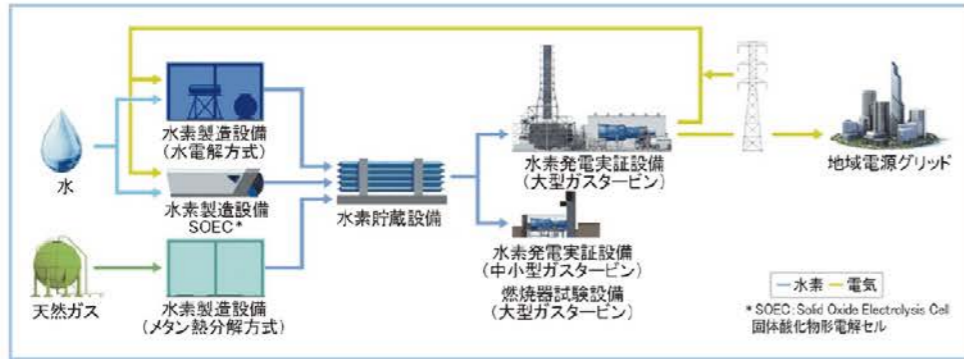


図6 高砂水素パーク構成図



図7 高砂水素パーク整備状況(2023/5)

図8は当社が参画中の水素プロジェクトの一例である。Advanced Clean Energy Storage は水素製造、貯蔵、利用を実現するアメリカでのプロジェクトであり、高砂水素パークでの水電解装置の実証を経て実機投入を図る。アメリカ西部は再生エネルギーの導入が進んでおり、電力需要の低い春には多量の再生可能エネルギー電力が余剰となっている。本プロジェクトではこの余剰となる再生可能エネルギー電力を利用し、季節をまたいだ電力の需給バランスの平準化を図る。

まず、グリッドからの再生エネルギーを使い、水電解でグリーン水素を製造し、その水素は地下にあ

る岩塩空洞に気体のまま貯蔵する。この水素はパイプラインで発電所に送られ当社が供給する840MWの水素燃焼GTCC発電所に送気される。このGTCC発電所は、30%のグリーン水素混焼で2025年に運転を開始し、段階的に水素の割合を拡大させ、2045年までにグリーン水素100%運転を達成する計画である。

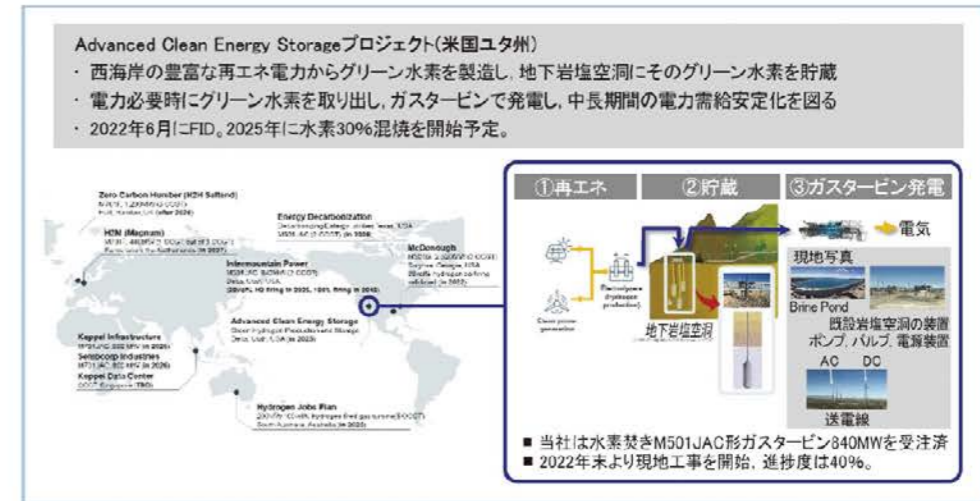


図8 米国における水素貯蔵・ガスタービンプロジェクトの例

5. キー技術開発の要衝“長崎カーボンニュートラルパーク”

長崎造船所及び総合研究所長崎地区においても、脱炭素関連の最先端の製品技術の実用化に向けて、設計・製造・開発部門が一体となって事業展開に取り組んでいる。これらの地区は図9に示すように“長崎カーボンニュートラルパーク”と称しており、高砂地区での実証試験に向けたキー技術の開発に取り組んでいる。中でも総合研究所長崎地区では、図10に示すように、エネルギーメインのエネルギー・トランジション戦略と密接に関係するキー技術開発設備を整備しており、前述の“長崎カーボンニュートラルパーク”の象徴となっている。



図9 長崎カーボンニュートラルパーク



図 10 長崎カーボンニュートラルパークの技術開発拠点(総合研究所長崎地区)

総合研究所長崎地区の研究施設ではターコイズ水素や SOEC, AEM (Anion Exchange Membrane, アニオン交換膜) 等の水素製造技術, ガスタービン・ボイラ・エンジンでのアンモニア燃焼技術, バイオマスからの航空機燃料(SAF: Sustainable Aviation Fuel) 製造等に取り組んでいる。また CO₂ 回収の要素技術開発もこの地区で行われている。

図 11 に水素製造関連評価設備の一例を示す。ここでは、長期間 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell, 固体酸化燃料電池) 等の開発によりメタンや水素を用いた試験環境が整っており、社会ニーズの急速な高まりに応じて、カーボンニュートラル技術へ設備を展開している。同じく、従来は天然ガスや石炭が燃焼試験の中心であったが、安全への配慮を十分に行いつつアンモニア供給設備も追設し、カーボンニュートラルに対応した燃焼試験も可能となっている。



図 11 SOEC・ターコイズ水素評価設備

6. 長崎カーボンニュートラルパークでの要素技術開発

本章では、エナジードメイン関連のカーボンニュートラル技術開発の一部を紹介する。

(1) ターコイズ水素製造技術

ターコイズ水素製造技術はメタン熱分解反応を利用した水素製造技術であり、天然ガスの主成分であるメタンを高温下で固体の炭素と水素に分解する技術で、従来は工業用材料であるカーボンブラック等、炭素素材の製造に使われてきた製法である。当社では同時に生成される水素に注目し、効率よく水素を生産できる反応形態を見出した。

図 12 にターコイズ水素製造技術の概要を示す。天然ガスのインフラは既に確立されており、天然ガス焚きの火力発電所が多数建設されている。この天然ガスインフラの供給ラインと火力

発電所等の間、または他の天然ガス発電事業者の発電設備の上流にターコイズ水素プラントを追設し、ガスタービンの燃焼器を水素用に換装するだけで既存火力の大幅な低炭素化、更には脱炭素化(CO₂ 排出ゼロ発電)が達成可能である。このときの副生カーボンも固体であるため、常温常圧で気体となる CO₂ よりも容易に固定化・貯蔵を行うことができる。高砂水素パークでの開発検証に向けて要素試験を進めている。大まかなロードマップを図 12 に示す。

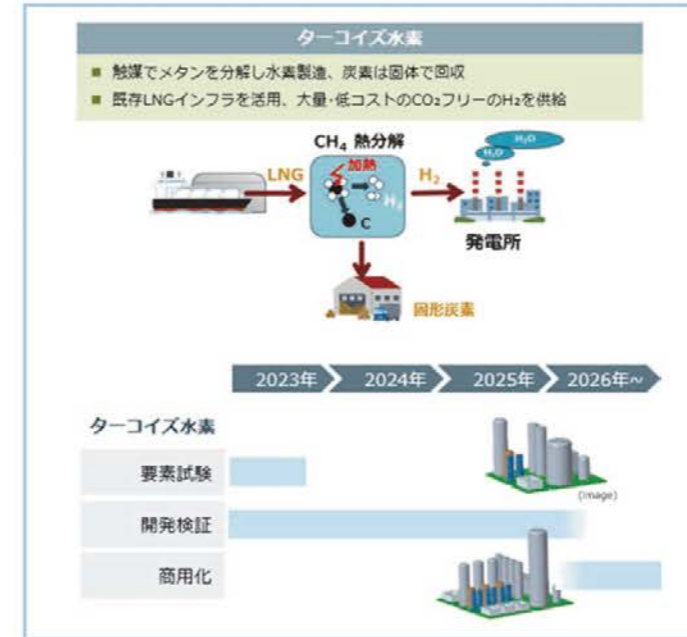


図 12 ターコイズ水素の開発状況

(2) SOEC 水素製造技術

SOEC は、当社開発済の SOFC の技術の応用が可能であり、高効率である利点、当社高圧 SOFC の経験を活かして大型プラントに適すると考えている。図 13 に SOEC の開発概要を示す。現在 SOEC に適した運転条件や仕様の適正化を実施している。図示するように 2024 年には数百 kW 級の SOEC モジュールで開発検証を開始する予定である。



図 13 SOEC の開発状況

図 14 に SOEC の開発目論みを示す。当社は逆反応である SOFC セルの開発・量産、更に多数のセルを纏め 200kW 級のモジュールを作り上げた実績がある。これと汽力発電における高温高压の蒸気・ガスのハンドリング技術を組み合わせて、大型 SOEC プラントを目指す。



図 14 SOEC の開発目論み

(3) AEM 水電解水素製造技術

固体高分子電解質膜を使った電解技術では、水素イオン透過膜を用いたプロトン交換膜 (PEM:Proton Exchange Membrane) 水電解技術が主流であるが、多く実装されているアルカリ電解に比べて高電流密度運転が可能で電解槽の小型化が可能。一方、水素イオンが多く含まれる PEM は強酸性であるため、その近傍に配置される触媒やその他接液部に貴金属や Ti 系部材を多用する必要があるほか、供給水の不純物による性能低下を抑制するため金属イオン除去の純度管理が必要である。AEM 水電解は、PEM 水電解と同様な高電流密度運転が可能でありながら、アルカリ水溶液中で電解可能でステンレス等が使用可能なため低コスト化が期待できる。

図 15 に AEM 水電解の開発状況を示す。現在、小型要素セルで特性を把握しながら、電極面積数百cm²級のスタック試作を実施、適切な製法の検討・運転条件の最適化などを行っている。小型要素セルの評価結果を示すが、一般的なアルカリ水電解に比べて大幅な電流密度増加が期待できることがわかる。今後は図 16 に示すように、開発を進め、数 MW クラスの高砂水素パークでの実証を経て、商用機への展開を目論んでいる。

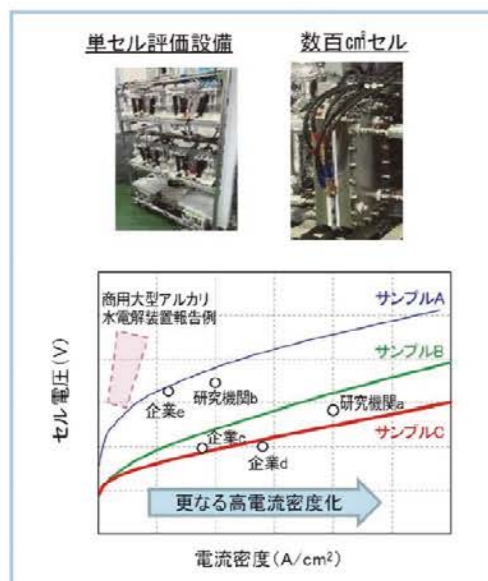


図 15 AEM 水電解開発状況

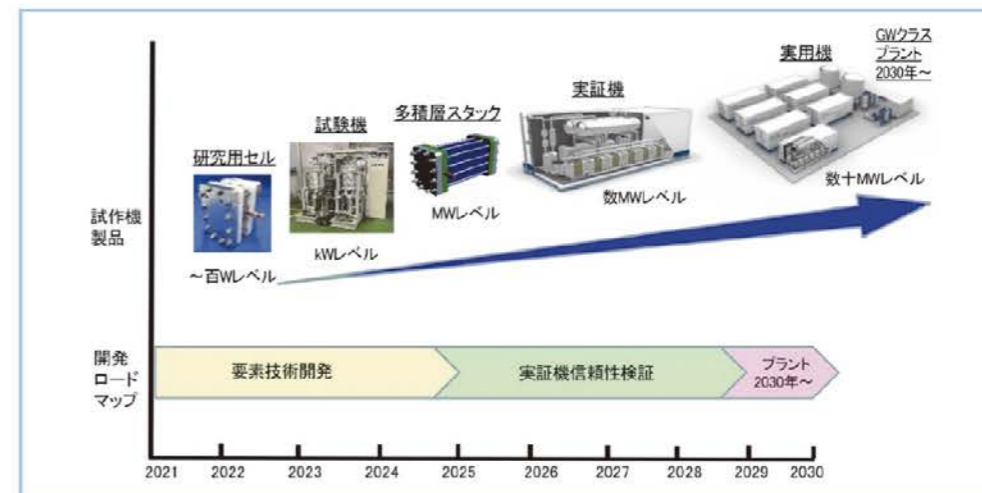


図 16 AEM 水電解ロードマップ

(4) バイオマスガス化 SAF 製造技術

SAF は、CO₂ 排出量削減に向けて導入が検討されているバイオマスなどから作る代替航空機用燃料である。当社は 2000 年頃からバイオマスからの液体燃料製造に取り組んでおり、バイオマスガス化の技術を用いた SAF 製造を 2012 年から開始、2016～2020 年にかけてパイロットプラント事業を、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 助成の下、株式会社 JERA、東洋エンジニアリング株式会社、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency, 宇宙航空研究開発機構) と共に取組み、JERA 新名古屋発電所内に設置されたパイロットプラントで製造された SAF を 2021 年 6 月に日本航空の定期便にて使用した。これらの開発状況を図 17 に示す。今後は、商用化に向けたスケールアップとともに、更なる高付加価値の SAF 製造に向けて取り組んでいる。この成果は、NEDO の委託業務(JPNP17005) の結果得られたものである。

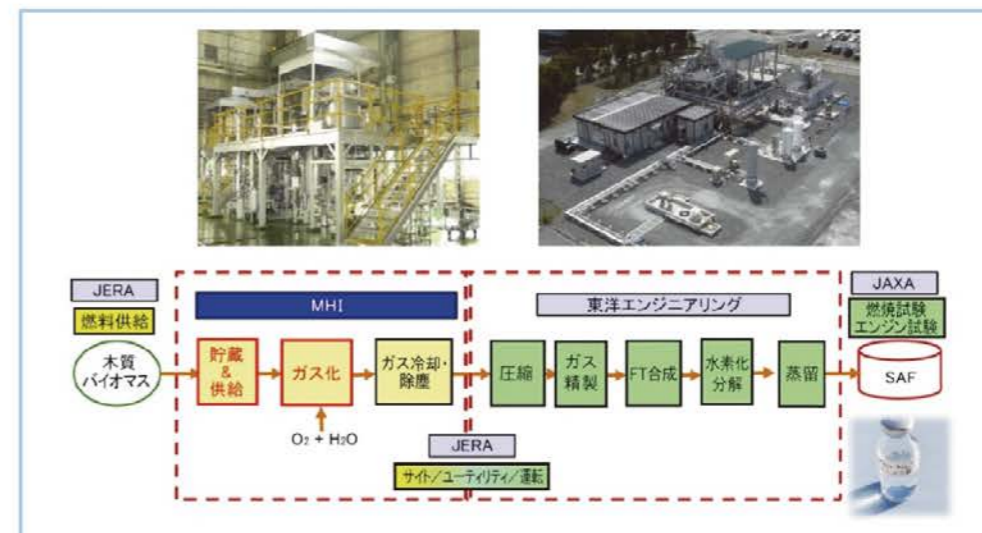


図 17 バイオマスガス化 SAF 製造技術

(5) 石炭燃ボイラにおけるアンモニア混焼技術

ボイラ・タービンプラントにおけるアンモニア利用については、微粉炭燃きボイラで高い混焼率を可能とするバーナの開発を進めている。アンモニアは、LPG 等の炭化水素燃料と比較して燃焼速度が遅いことからバーナにおける火炎の保持が難しいことに加え、N (窒素) 分量が多いため、適切な燃料濃度の燃焼でない場合は多量の NO_x が発生するという課題がある。当社

では、2021年に小規模の燃焼試験炉を利用してアンモニア混焼・専焼の燃焼試験を実施した。本試験は、国内外の事業用及び産業用ボイラへの専焼バーナの提供を念頭に、当社がこれまで蓄積した多様な燃料のバーナ設計経験と基礎燃焼試験結果を踏まえ、複数のバーナ型式を対象に実施した。燃焼時において極めて安定した火炎であることを確認するとともに、NO_x 排出量が事前に実施した基礎燃焼試験通りであることを確認するとともに、残留アンモニアがゼロであることを確認した。現在、アンモニア高混焼化を目指し、NEDOのグリーンイノベーション基金事業/燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクトにおいて、石炭燃ボイラにおけるアンモニア高混焼技術の開発・実証に取り組んでいる。図18に示すとおり、2024年度までに、実機同等スケールバーナでの燃焼試験により、アンモニア専焼バーナを開発する。図18(b)に外観写真を示す当社保有の0.5t/h炉を用いて燃焼試験を開始した。図18(c)はNEDO委託事業にて導入したアンモニア供給設備である。併せて、株式会社JERAと共同でアンモニア混焼ボイラとしての実機実証に向けた設備の基本計画、フィージビリティ・スタディにも取り組んでおり、実機での実証運転で旋回燃焼方式と対向燃焼方式の2つのユニットにおいて50%以上のアンモニア混焼の検証を目指している。

なお、本項に示す開発はNEDOの“JPNP21020 グリーンイノベーション基金事業/燃料アンモニアサプライチェーンの構築/アンモニアの発電利用における高混焼化・専焼化/石炭ボイラにおけるアンモニア高混焼技術(専焼技術含む)の開発・実証/アンモニア専焼バーナを活用した火力発電所における高混焼実機実証”にて実施しているものである。

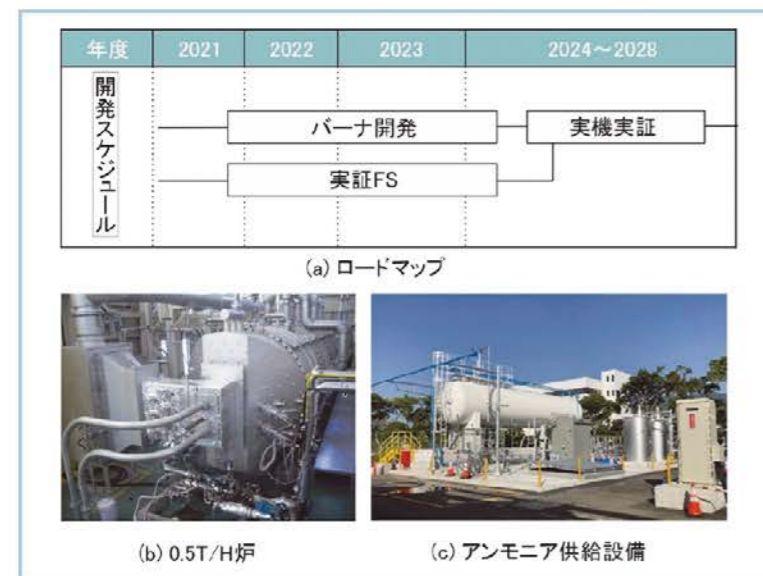


図18 グリーンイノベーション基金によるアンモニア高混焼技術開発の概要

7. まとめ

本報では、2023年より部分運用を開始した高砂水素パークで実証される技術を中心に、火力発電業界向けカーボンニュートラルへの取組みについて紹介した。また、今後実証に移っていくこれらの技術の、長崎カーボンニュートラルパークにおける要素開発状況について概要を説明した。

本報で紹介した、エナジートランジション技術を用いて、当社の2040年に向けた三菱重工グループの宣言“MISSION NET ZERO”の達成を目指すとともに、カーボンニュートラル社会の実現に貢献する所存である。

カーボンニュートラル社会は、未来の話ではありません。
もうはじまっているのです。

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
 - 5-3. アンモニアコスト 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
- ・航空転用ガスタービン性能
- ・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

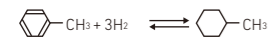
	水素 H ₂	メタン CH ₄	アンモニア NH ₃	空気	窒素 N ₂	二酸化炭素 CO ₂
分子量 ^{*1}	2.016	16.04	17.03	28.97	28.02	44.01
密度(ガス) ^{*2} kg/Nm ³	0.08987	0.717	0.771	1.2932	1.2506	1.977
密度(液体) ^{*3} kg/L	0.071 (-252.9°C, 0.1MPa)	0.427 (-165.0°C, 0.1MPa)	0.682 (-33.7°C, 0.1MPa)	0.898 (N ₂ :O ₂ =0.79:0.21) (-200.0°C, 0.1MPa)	0.807 (-196.0°C, 0.1MPa)	1.032 (-20.1°C, 2MPa)
比熱 ^{*4} Cp kJ/(kg・K) [25°C, 1atm]	14.306	2.2317	2.1645	1.0063	1.0413	0.85085
比熱比 ^{*4} 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 ^{*5} °C [1気圧]	-259.14	-182.76	-77.7	-	-209.86	-56.6
沸点 ^{*5} °C [1気圧]	-252.87	-161.49	-33.4	-	-195.8	-78.5 (昇)

出典: ※1: 14102の化学商品 (化学工業日報社) p.1, p.265, p.275, p.277, p.288 (除、空気) ※2: 改訂4版 化学便覧 基礎編 (丸善) I-28, II-3, 気体の密度および比重 (ヘイシンモノノボン) ※3: NIST Chemistry WebBook, SRD 69 (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)、Refprop_ver9.0で計算 (NISTによる標準参照データベースソフトウェア (NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database)) ※4: Refprop_ver9.0で計算 ※5: 改訂4版 化学便覧 基礎編 (丸善) I-28, I-409, I-176, I-131 (除、空気)

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 [®])
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運ぶ



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] ^{*1}	0.08987	0.717	0.771	2.02
沸点(@大気圧) [°C] ^{*2}	-252.87	-161.49	-33.4	-42.1
低位発熱量(LHV)	[MJ/kg] ^{*2}	120.4	50.2	18.6
	[MJ/Nm ³]	10.82	35.99	14.34
	[MJ/mol]	0.243	0.805	0.317
高位発熱量(HHV)	[MJ/kg]	141.77	55.5	22.5 ^{*3}
	[MJ/Nm ³]	12.75	39.72	17.1
	[MJ/mol]	0.286 ^{*4}	0.89 ^{*4}	0.383
可燃当量比 [-] ^{*2}	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}	2.91	0.37	0.07	0.43
最低自着火温度 [°C] ^{*2}	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: ※1: 理科年表2021物31(397) ※2: 日本燃焼学会誌 第58巻,183号,(2016年), 41-48 ※3: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/36/11/36_583/_pdf, https://www.jcme.or.jp/11/pdf/2021-06/josei01.pdf ※4: 日本機械学会編 燃焼工学ハンドブック 1995年 P285掲載数値より算出

水素可視化バーナーの秘密

三菱重工の総合研究所(高砂)では、見学者を対象に水素燃焼のデモを実施中です。実はその際使用しているバーナーは、水素100%専焼のマルチクラスター燃焼器を開発する際、金属3Dプリンターの製造限界を確認するために製作した数多くの試作品のうちの一つ。廃棄をまねがれて、第2の人生を送っています。

水素(H₂)、メタン(CH₄)、アンモニア(NH₃)の火炎の色は？

それぞれ、淡色半透明(不可視)、青、オレンジです。物質が燃える過程で、通常の状態では存在出来ないラジカルと呼ばれる中間生成物が発生します。ラジカルは発生・消滅の際に特定の波長の光を出しますが、燃焼物や燃焼方法によってラジカルの種類と割合が変わるため、色の違う火炎になるわけです。

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
(液体の水)水電解	H ₂ O (l) + 286kJ = H ₂ (g) + 1/2O ₂ (g)	0.079 [*] kWh/mol

※: 水電解では、電気エネルギーを投入して、水素を生成するので水素1mol生成に必要なエネルギーは、kWh換算して(1kWh=3600kJ) 0.079 kWh/molとここでは表記する。

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	0.216	0.216	334	2.41	2.40	2480	17.9	17.8	2.35	0.0169	0.0169	8.46	0.0610	0.0608

・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。
 ガス密度: 0.08987 kg/Nm³ 高位発熱量: 12.77 MJ/Nm³ - HHV 単位換算: 1,055 MJ/MmBtu
 為替レート: 138.63円/US \$, 139.03円/€ (2022.8月末TTMレート)

5-3. アンモニアコスト 簡易換算表

NH ₃ コスト	円/ton	€/ton	円/MmBtu	\$/MmBtu	€/MmBtu	円/MJ	\$/MJ	€/MJ	円/kWh-th	\$/kWh-th	€/kWh-th	円/Nm ³ H ₂	\$/Nm ³ H ₂	€/Nm ³ H ₂	
350.00	\$/ton	48500	351	2280	16.4	16.4	2.16	0.0156	0.0155	7.77	0.0561	0.0559	27.6	0.199	0.198

・CFAA(クリーン燃料アンモニア協会)が2030年頃までに実現可能としている350\$/ton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。
 為替レート2022(8月末TTMレート)
 ガス密度: 0.771 kg/Nm³ 高位発熱量: 22.47 MJ/kg - HHV 単位換算: 1,055 MJ/MmBtu
 為替レート: 138.63円/US \$, 139.03円/€ (2022.8月末TTMレート)
 ・水素とアンモニアの間の換算はそれぞれの高位発熱量にて行ったもので、相互の変換ロス等は考慮していません。
 ※: 350\$/tonの出典例: <https://www.mit.go.jp/kowan/content/001418024.pdf>

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 三菱重工のガスタービン

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(50ヘルツ/60ヘルツ)
- ・H-100 シリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)

発電事業用大型ガスタービン(12万~57万kWクラス)

- ・Jシリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)
- ・Gシリーズ(60ヘルツ)
- ・Fシリーズ(50ヘルツ)
- ・Dシリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)

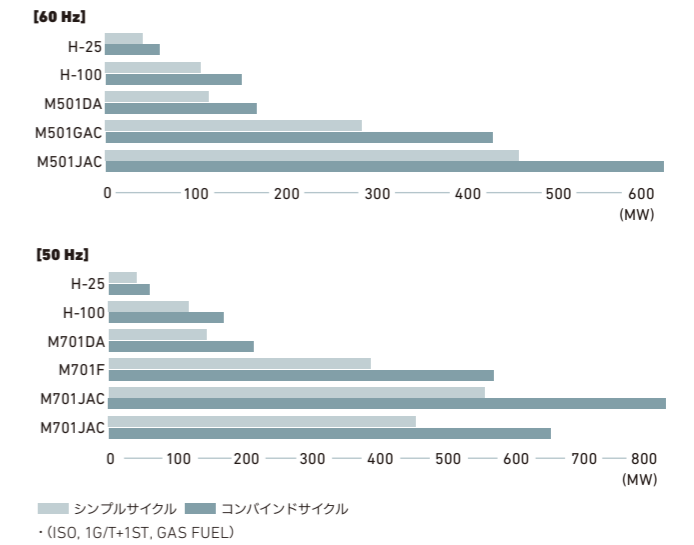
航空転用型ガスタービン(3万~14万kWクラス)

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

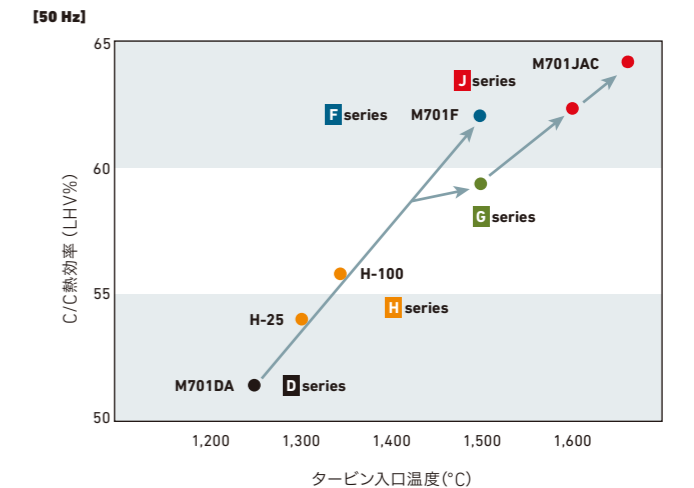
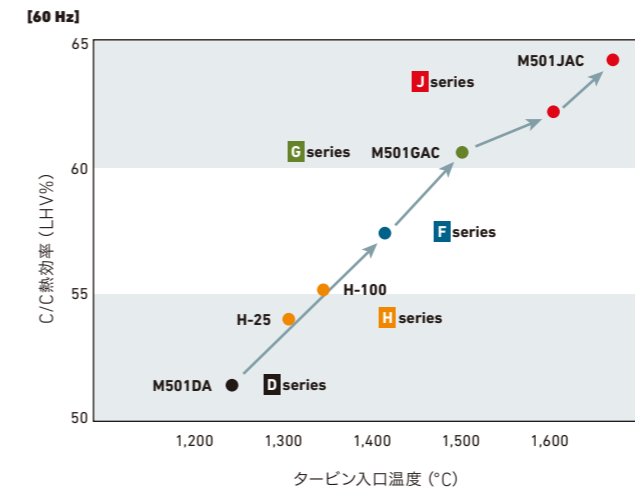
幅広いラインアップのガスタービンで 世界に電力を

三菱重工は、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、1,600台以上のガスタービンを納入しており、世界各地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
M701F	385,000	8,592	8,144	41.9	21	3,000	748	630
M701JAC	448,000	8,182	7,755	44.0	25	3,000	765	663
M701JAC	574,000	8,295	7,862	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
M501GAC	283,000	9,000	8,531	40.0	20	3,600	618	617
M501JAC	453,000	8,182	7,755	44.0	25	3,600	815	649

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

航空転用ガスタービン性能

	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	8,908	8,443	40.4	3,000	183	431
FT4000*	140,500	8,896	8,431	40.5	3,000	367	431
60Hz							
FT8*	30,941	9,825	9,312	36.7	3,600	92	491
FT4000*	71,928	8,686	8,232	41.5	3,600	183	422
FT4000*	144,243	8,661	8,209	41.6	3,600	367	422

*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

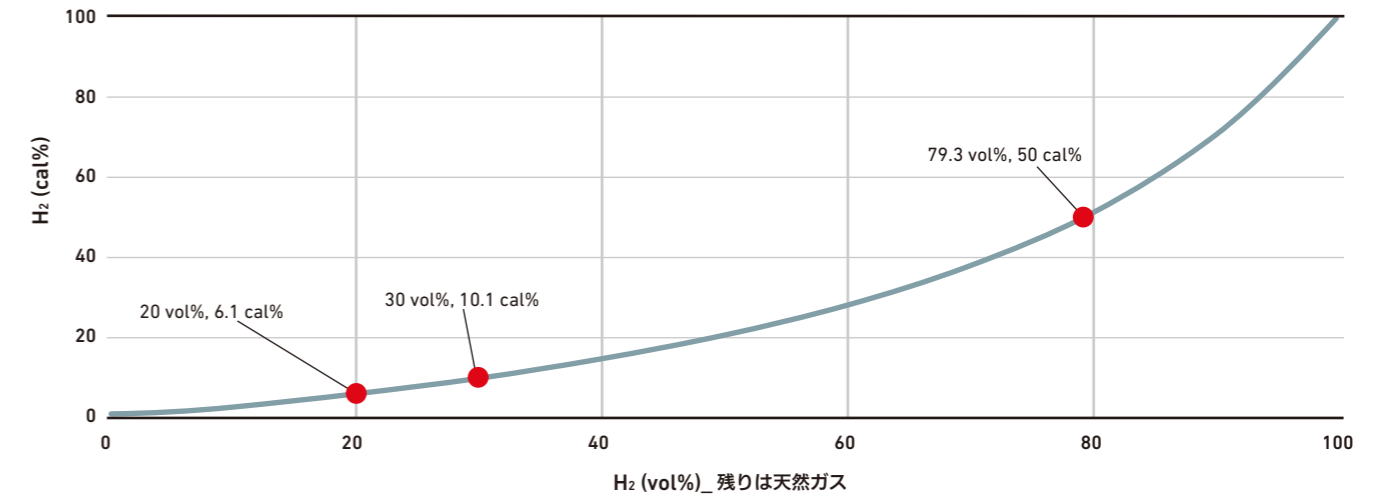
	プラント出力 (kW)	熱消費率 (LHV 基準)		プラント熱効率 (%)	ガスタービン出力 (kW)	蒸気タービン出力 (kW)	台数と ガスタービンの形式
		(kJ/kWh)	(Btu/kWh)				
50Hz / 60Hz							
MPCP1(H-25)	60,100	6,667	6,319	54.0	39,600	20,500	1×H-25
MPCP2(H-25)	121,400	6,606	6,261	54.5	79,200	42,200	2×H-25
50Hz							
MPCP1(H-100)	171,000	6,272	5,945	57.4	112,700	58,300	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(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(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(M501JAC)	664,000	<5,625	<5,332	>64.0	450,300	213,700	1×M501JAC
MPCP2(M501JAC)	1,332,000	<5,608	<5,315	>64.2	900,600	431,400	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		CO ₂ 排出量
	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	単位:g/kWh
50Hz / 60Hz							
H-25	41,030	36.2	4	45,000	9	12,000	550
50Hz							
H-100	116,450	38.3	10	112,000	24	30,000	520
M701F	385,000	41.9	28	312,000	72	90,000	470
M701JAC	448,000	44.0	31	345,000	79	99,000	460
M701JAC	574,000	43.4	40	445,000	103	128,000	450
60Hz							
H-100	105,780	38.2	9	101,000	22	28,000	520
M501GAC	283,000	40.0	22	245,000	55	69,000	500
M501JAC	453,000	44.0	31	345,000	80	100,000	450

・大気温度15度ベース(ISO標準)
 ・水素100%燃時の燃料消費量は天然ガス燃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 ₂ O → H ₂ + ½O ₂	風車 水電解装置 (SOEC, AEM) [※]
	ピンク	核熱 → 熱分解・電解 CH ₄ → 2H ₂ + C	高温ガス炉
	ターコイズ	化石燃料 → 熱分解 CH ₄ → 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 ₂ O → 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 ₂ O → 4H ₂ + CO ₂	天然ガス改質装置 石炭ガス化炉

※: SOEC = Solid Oxide Electrolysis Cell
 AEM = Anion Exchange Membrane

なぜ無色透明の水素がターコイズ？

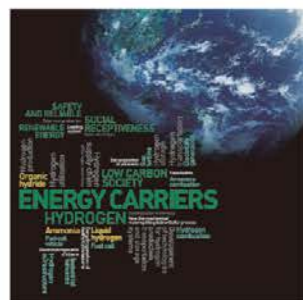
上記の表のとおりカーボンフリー水素は、その起源・製造方法によって色分けされて呼ばれています。ターコイズ水素は、化石燃料由来とはいえ製造過程で温暖化の原因となるCO₂を発生しないため、ブルーではあるけど、CO₂フリーのグリーンなので、間をとってターコイズと称しているわけです。今、注目のトレンドカラー！

どんな水素の輸送・貯蔵方法があるの？

主に、高圧圧縮(最も一般的)、金属を使用(輸送・貯蔵効率が高い)、他物質への変換(軽量・コンパクトに貯蔵可能)、パイプラインを利用(大量に安定輸送が可能)するという水素の輸送・貯蔵の方法があります。とは言え、それぞれ異なる課題を抱えているため、水素社会の早期実現に向けて鋭意研究中です。

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 弘貢^{*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こうとする目標である。

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。

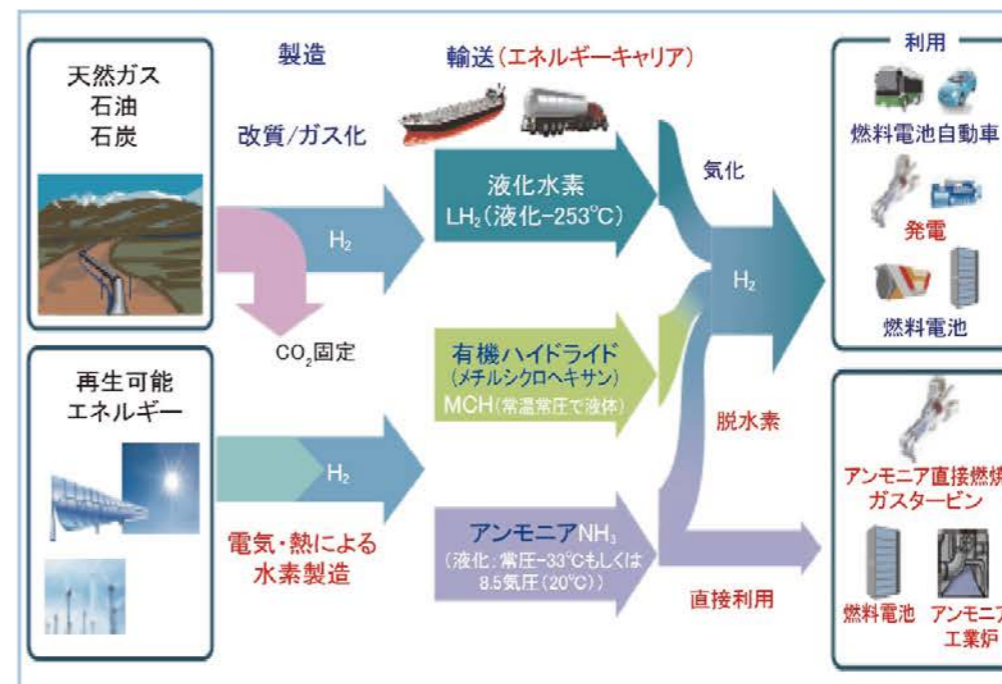


図1 エネルギーキャリアで行なわれている試験研究

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1^②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。

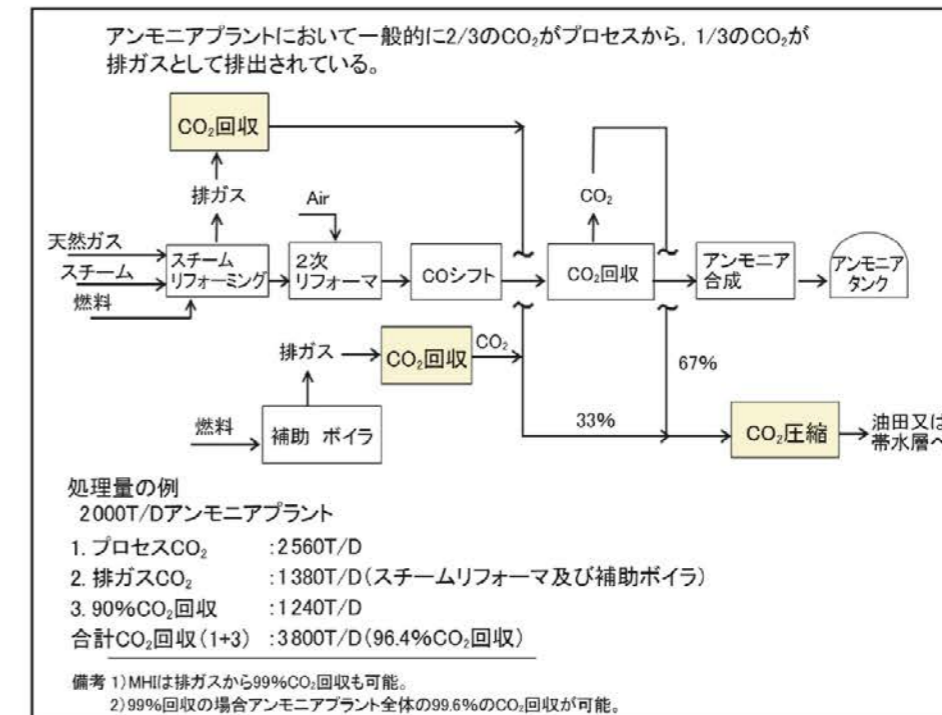


図2 アンモニアプラントのCO₂バランス

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。

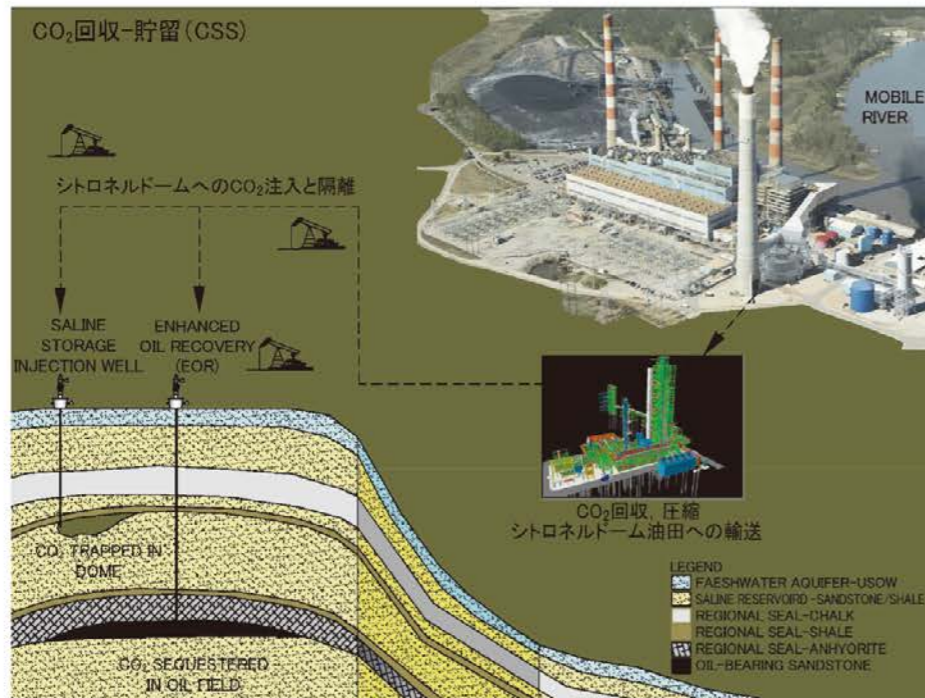


図4 CO₂回収・貯留プロジェクト全体像

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/>

活動紹介一覧

Nature

国際的な総合科学ジャーナル「Nature」に三菱重工の水素ガスタービンに関する記事が掲載されました。電子版も公開されていますので、是非、ご覧ください。



<https://www.nature.com/articles/d42473-020-00545-7>

学研 まんがでよくわかるシリーズ

三菱重工は、株式会社学研プラスが刊行する小学生向け学習まんが「学研 まんがでよくわかるシリーズ」の特別編「SDGsのひみつ 目標7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに」を同社と共同で制作しました。非売品のため電子版が無料公開されていますので、是非、ご覧ください。



学研まんがひみつ文庫
<https://bpub.jp/gakken-himitsu/item/51000003964>