

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”の取り組み

“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

エネルギー転換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ネルギー転換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焚き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

*3 エナジードメイン SPMI 事業部 計画部 部長

*5 総合研究所 主幹研究員

*2 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 室長

*4 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 主幹技師

*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焚き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。

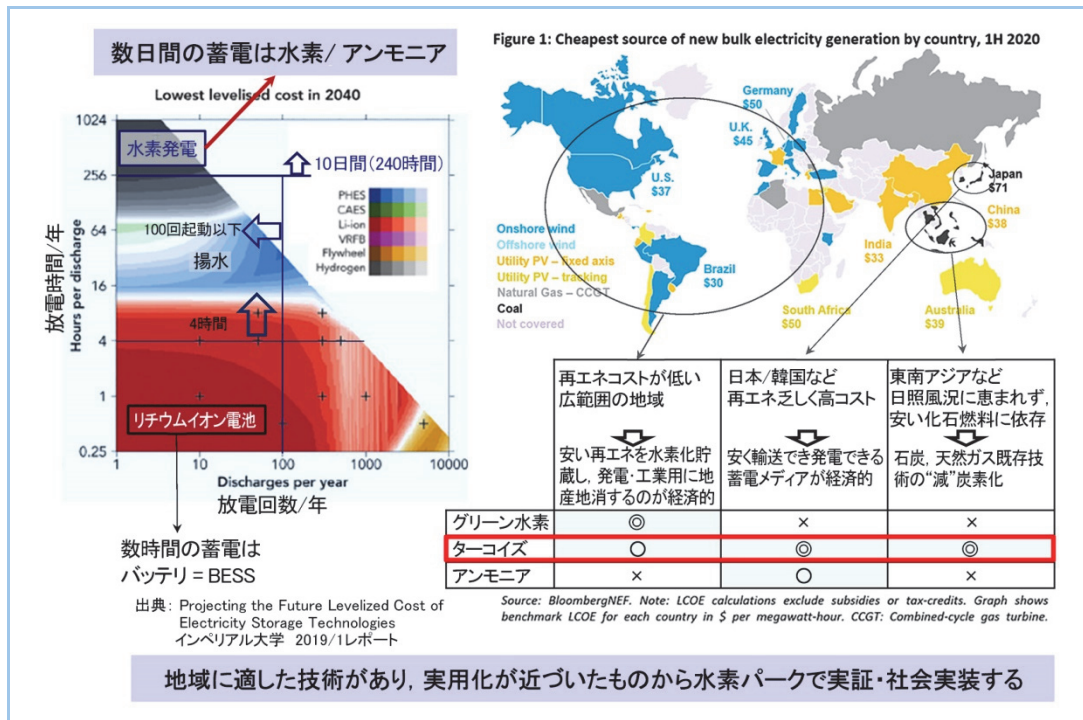


図1 水素・アンモニア利用の背景

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焚き火力発電では、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、石炭焚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。

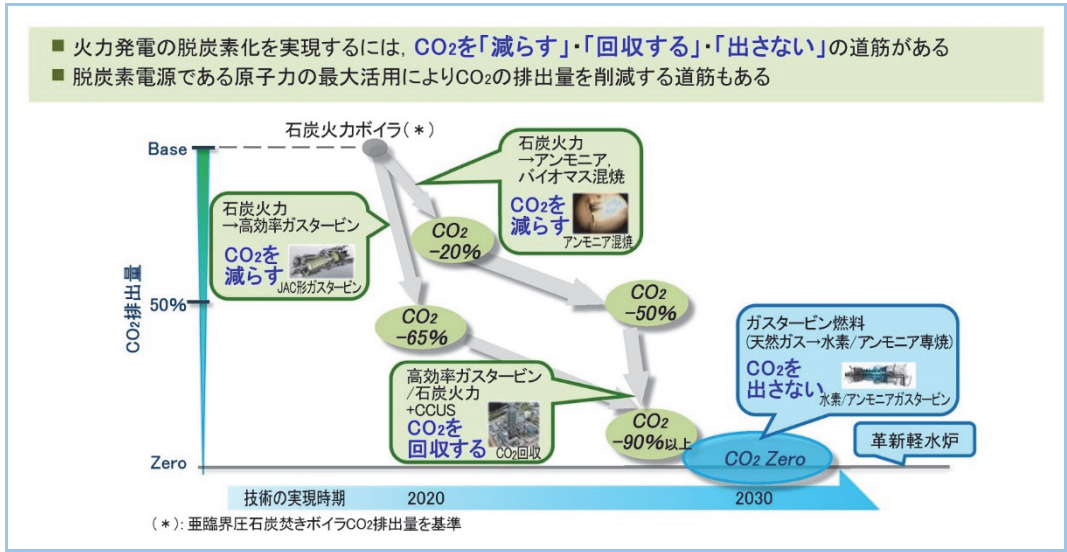


図2 発電技術開発ロードマップ

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左は水素焚き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。

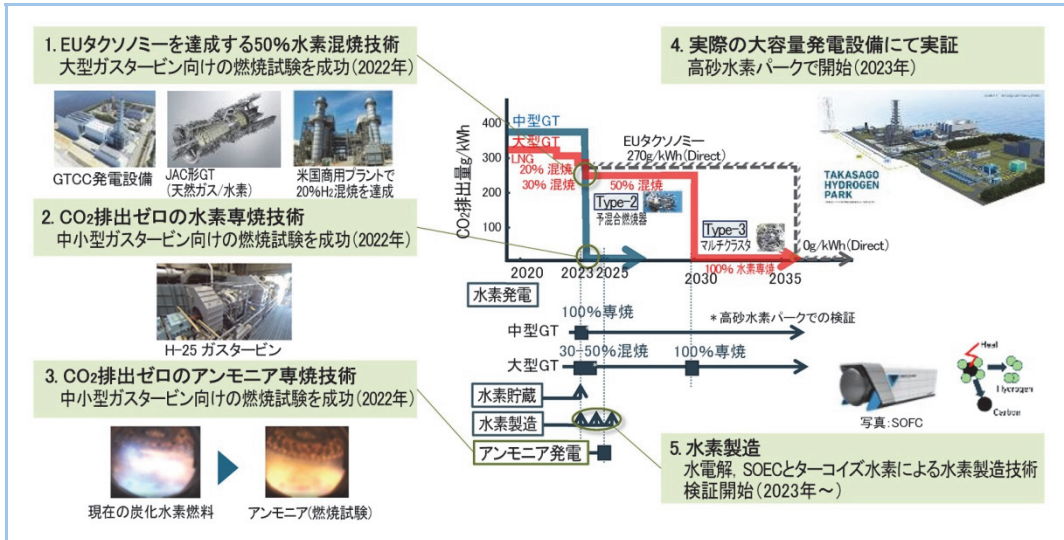


図3 欧州のCO₂排出規制とガスタービン開発スケジュール

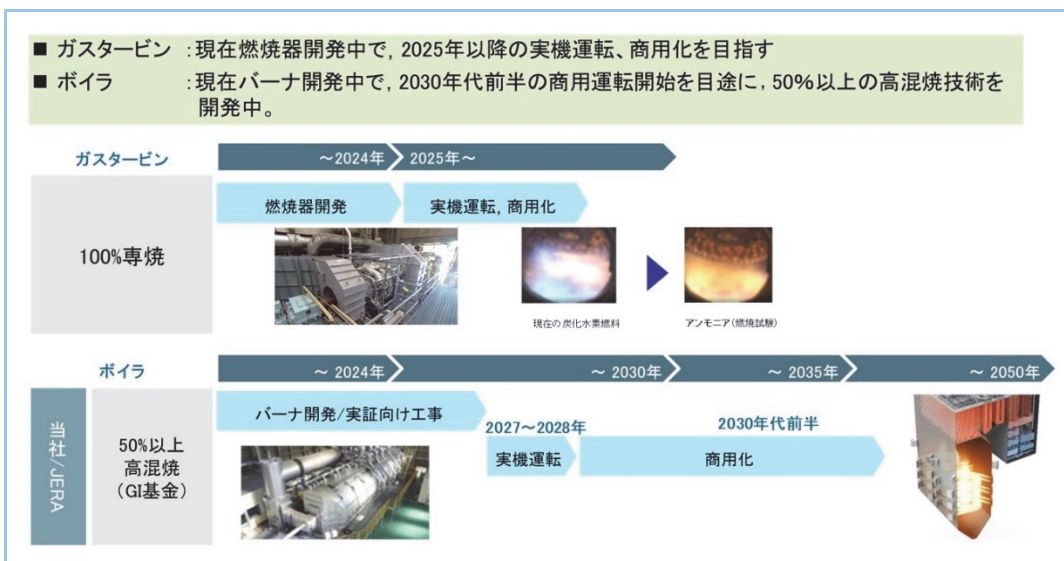


図4 アンモニア発電技術ロードマップ

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、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

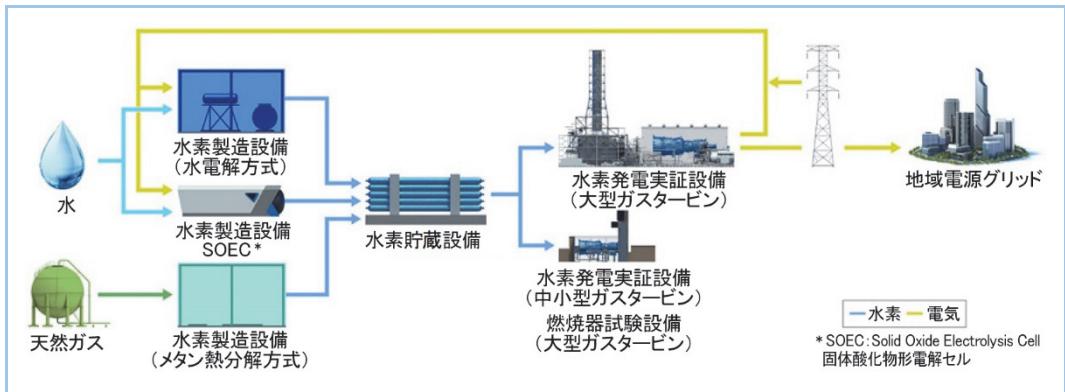


図6 高砂水素パーク構成図



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。アメリカ西部は再エネ電源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、グリッドからの再エネ電力を使い、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の水素焼き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。

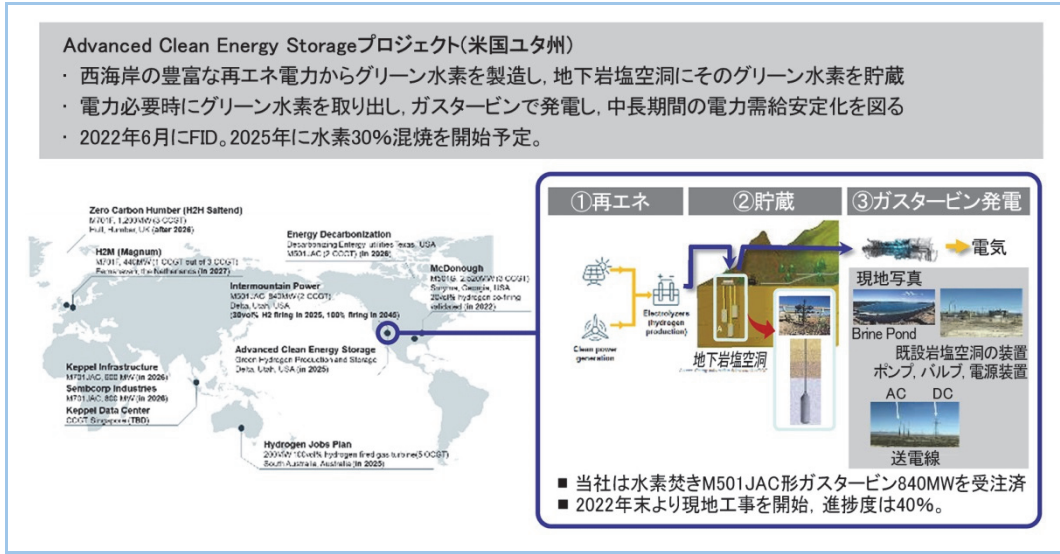


図8 米国における水素貯蔵・ガスタービンプロジェクトの例

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、エナジードメインのエナジ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は固体であるため、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。

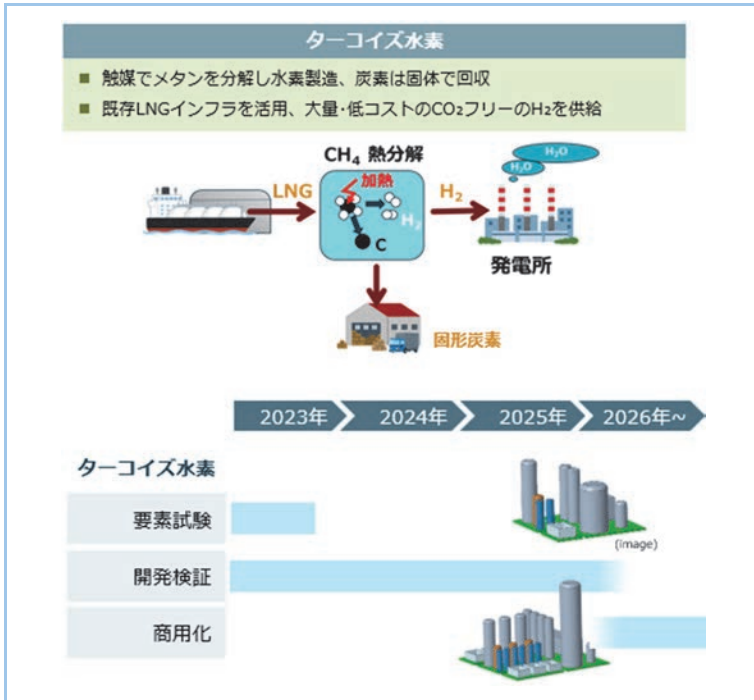


図 12 ターコイズ水素の開発状況

(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、当社高压 SOFC の経験を活かして大型プラントに適すと考えている。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。

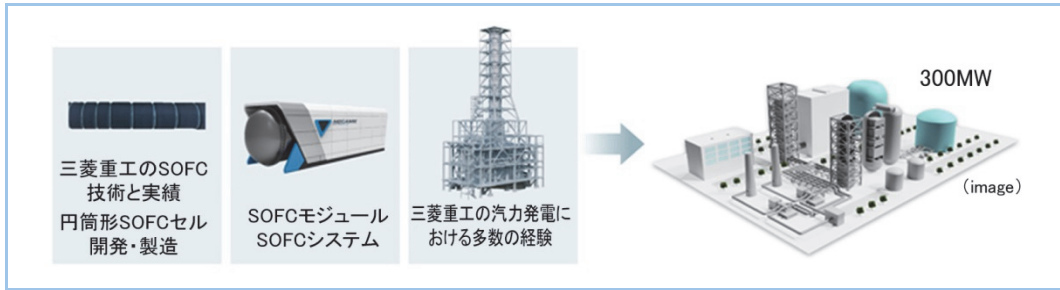


図 14 SOEC の開発目論み

(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な一方、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。

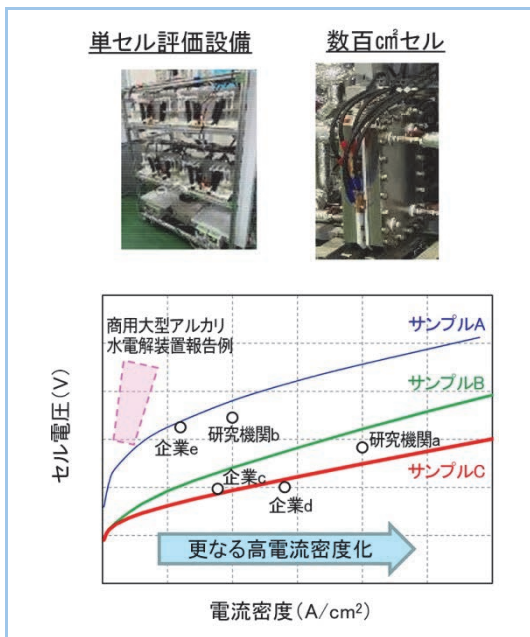


図 15 AEM 水電解開発状況

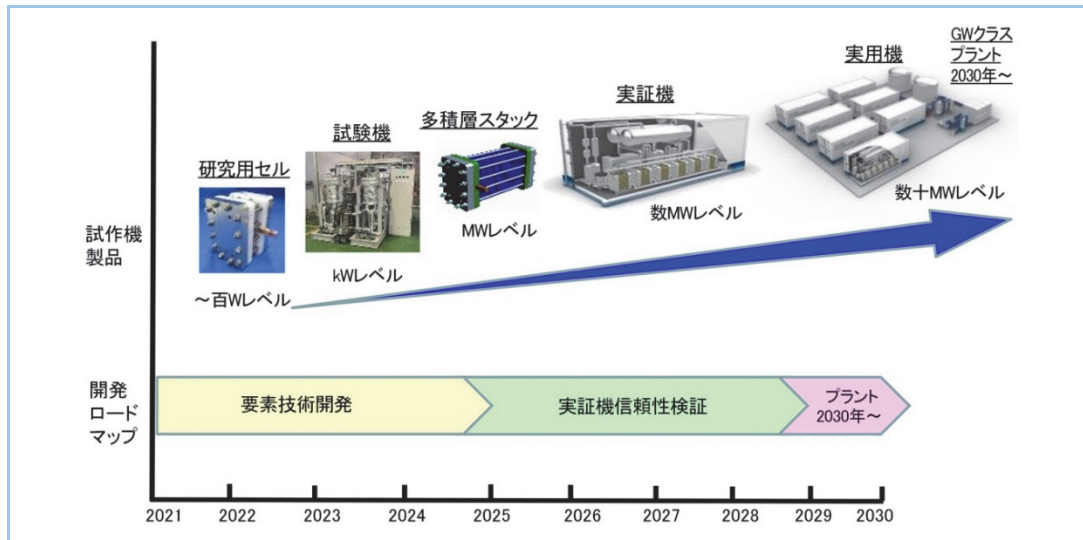


図 16 AEM 水電解ロードマップ

(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。

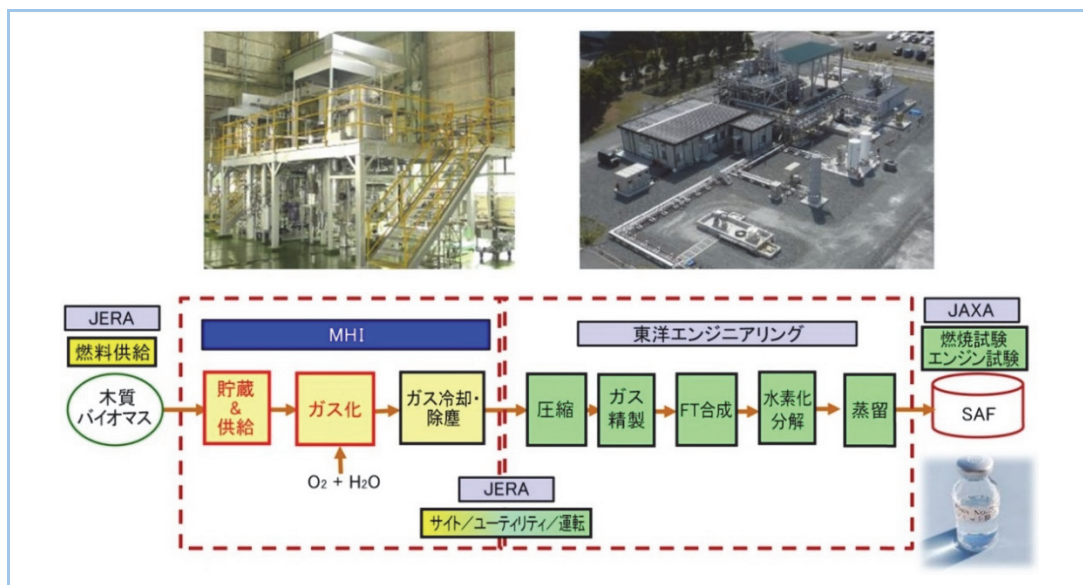


図 17 バイオマスガス化 SAF 製造技術

(5) 石炭焚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、微粉炭焼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、NOx 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、石炭焚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。

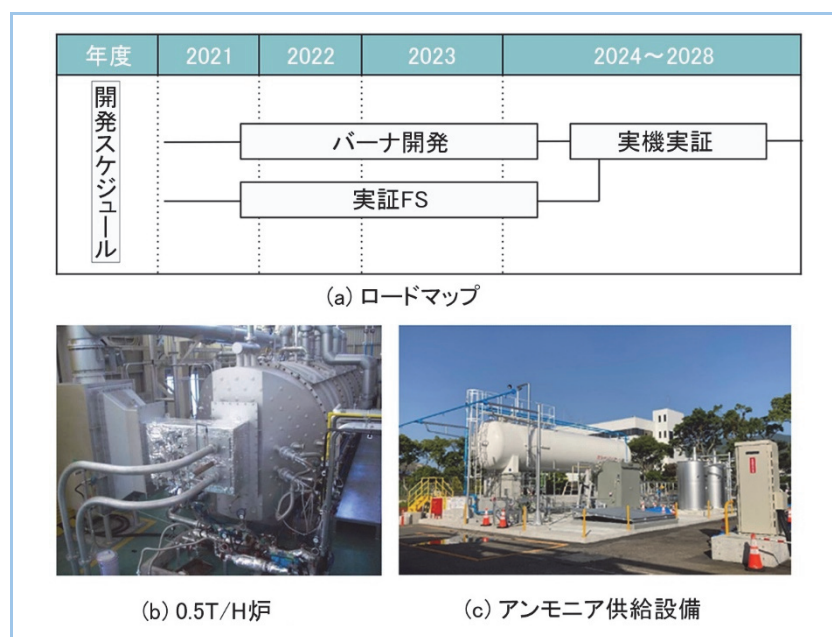


図 18 グリーンイノベーション基金によるアンモニア高混焼技術開発の概要

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。