

# 水素社会の実現に向けた“高砂水素パーク”の取り組み

## Initiatives “Takasago Hydrogen Park” to Create a Hydrogen Society



正田 淳一郎\*<sup>1</sup>  
Junichiro Masada

寺内 方志\*<sup>2</sup>  
Masashi Terauchi

由里 雅則\*<sup>3</sup>  
Masanori Yuri

北川 雄一郎\*<sup>4</sup>  
Yuichiro Kitagawa

小阪 健一郎\*<sup>5</sup>  
Kenichiro Kosaka

堂本 和宏\*<sup>6</sup>  
Kazuhiro Domoto

世界がカーボンニュートラルに進む中、三菱重工業株式会社(以下、当社)主力製品であるGTCC・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。このような環境において、水素ガスタービンの開発・製造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”を整備中である。本報では整備状況とともに、導入予定の水素製造技術について紹介する。尚、高砂水素パークは関連設備を順次拡充し、2025年に大型ガスタービンで30%混焼、中小型では100%水素専焼の製品を商用化する予定である。

### 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(CO<sub>2</sub>)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は不可欠である。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、既存のインフラ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実現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電力網としての信頼性が低下する。この信頼性低下を抑制する手段として、火力発電の中でCO<sub>2</sub>排出量が最も少ないGas Turbine Combined Cycle(GTCC/天然ガス燃焼火力発電設備)は、柔軟性や信頼性も高く、今後も重要な動力源としての役割を果たすことが期待されている。更に天然ガス燃料にCO<sub>2</sub>を排出しない水素またはアンモニアを混合、更には代替することにより、システムの安定化とともに、安定化のために運転される火力発電からのCO<sub>2</sub>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。世界的には太陽電池・風力発電に代表される再生可能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

\*1 パワードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 エナジートランジション総括部 総括部長

\*2 パワードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC 事業部 水素技術推進室 室長

\*3 パワードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC 事業部 ガスタービン技術部 部長

\*4 パワードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC 事業部 燃料電池事業室 室長

\*5 パワードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 エナジートランジション総括部 技術戦略室 主幹 工博

\*6 パワードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 SPMI 事業部 事業企画戦略部 主幹

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たグリーン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。

このように、水素を燃料とする水素焚きガスタービンの早期商用化が期待される中、水素は天然ガスに比較して火炎の伝搬速度が速く、燃焼器内の火炎が燃料の混合部に逆戻りする逆火が起りやすい等の課題があるが、当社でこれまでに培った燃焼技術により水素燃焼に適した燃焼器を開発し、水素焚きガスタービンの開発を進めている。合わせて既存の発電設備に対しても最小限の改造で水素燃焼が可能となるよう既存機に向けた開発も進めている。

このように水素利用技術の開発を進める中、発電に利用する水素を確保し、ガスタービンの運転実証を行う機会は少ない。そこで、当社はガスタービンの開発・製造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、同製作所構内の実証設備複合サイクル発電所(通称:第二 T 地点)に隣接させて整備中である。現在 2023 年度の稼働開始を目指し、同年度に水素製造・貯蔵及びガスタービンでの水素燃焼技術の試験・実証運転に着手できるよう準備中である。水素製造設備は、アルカリ水電解装置等による水素製造に加え、固体酸化物形電解セルによる高温水蒸気電解(Solid Oxide Electrolysis Cell: SOEC)、ターコイズ水素の製造と貯蔵・発電までの一貫実証など、次世代水素製造技術の試験・実証を順次行う予定である。本報では、水素・アンモニア発電開発状況とともに、その検証設備としての高砂水素パークの整備状況を紹介する共に、水素製造技術について述べる。

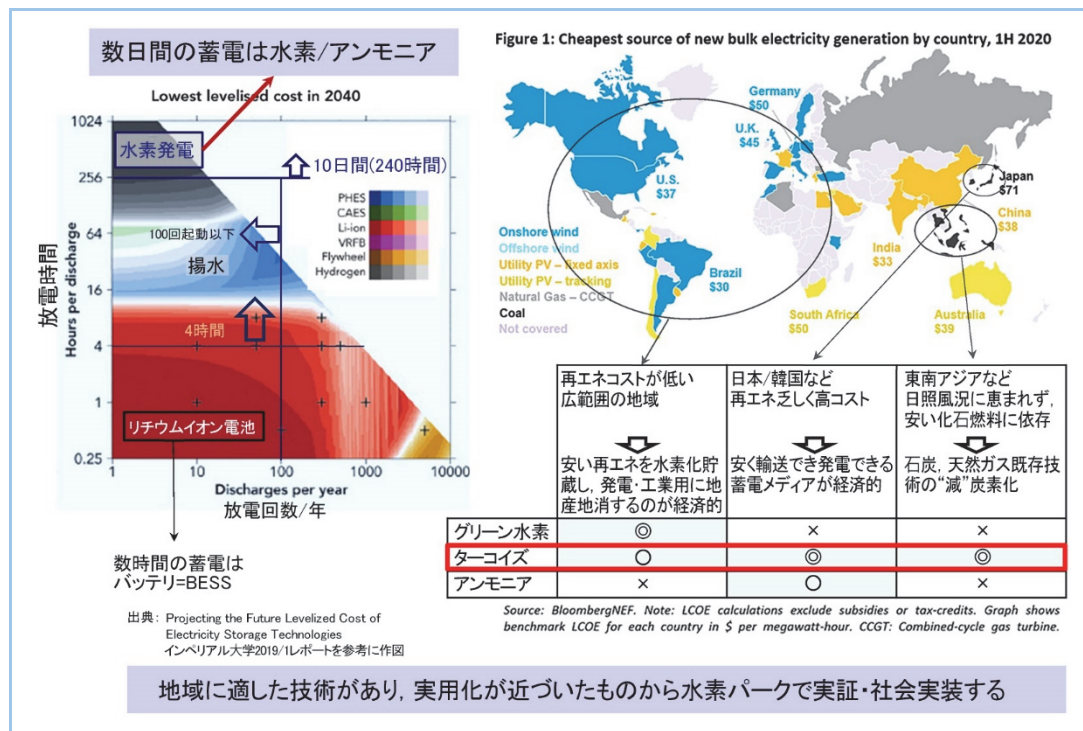


図1 水素・アンモニア利用の背景

## 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”を宣言し当社グループに加えて、当社グループの事業に関係するお客様、サプライヤーなどの CO<sub>2</sub> 直接・間接排出についても 2040 年までにカーボンニュートラルを実現することを目指している。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 CO<sub>2</sub> 回収事業を含めた CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) 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、火力発電業界向けの取組みについて述べる。

エナジートランジション&パワー事業本部は、具体的には 2050 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ガスタービン・コンバインドサイクルに分けることができる。汽力発電の主流であるボイラ・タービン等からなる既設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 CO<sub>2</sub> 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・混焼率の引き上げにより更なる CO<sub>2</sub> 排出量の削減を目指す。一方、ガスタービン・コンバインドサイクルについては石炭など固体燃料の利用はないものの、更なる CO<sub>2</sub> 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、そして将来的にはそれらの専焼により CO<sub>2</sub> ゼロを目指す。

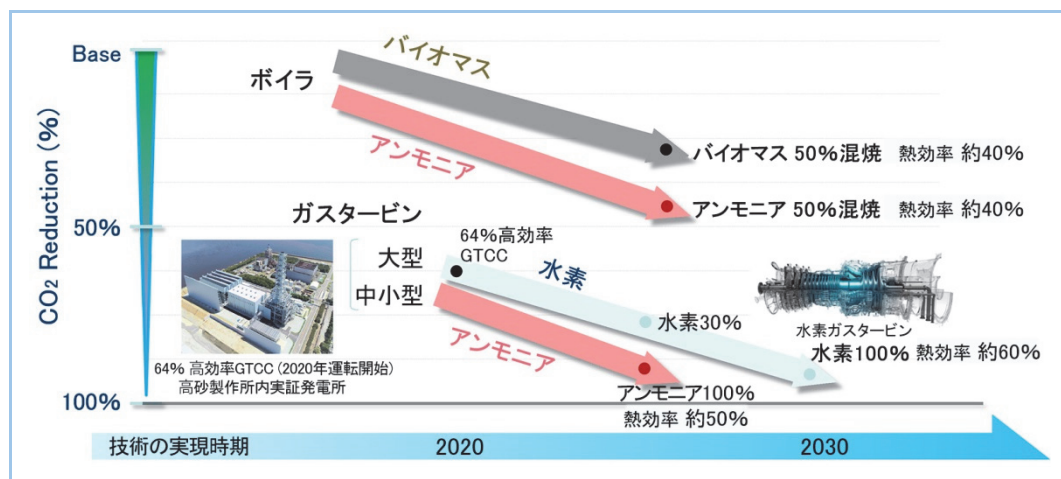


図2 発電技術開発ロードマップ

## 3. 水素燃焼ガスタービンの開発状況

カーボンニュートラルへの取組みが近年盛り上がりを見せている。発電用ガスタービンにおいては燃料を従来使用していた天然ガスから、水素や燃料アンモニアを活用し、CO<sub>2</sub> の排出を減らすまたは排出しないことで社会貢献を実現する動きが活発化している。

上記を実現するための水素混焼/専焼やアンモニア専焼のための各種燃焼器の実証及び商用化のロードマップを図3に示す。マルチノズル燃焼器(予混合)における 30%及び 50%混焼の燃焼試験は完了しており、また中小型向けの水素専焼のマルチクラスタ燃焼器(予混合)に関しては、開発の最終段階を迎えており、4章に示す高砂水素パークにて今後実機実証を経て、共に 2025 年までの商用化を目指している。

また 1650℃級のマルチクラスタ燃焼器(予混合)に関しては 2025 年までに燃焼試験を完了させ、水素が十分に供給されると期待されている 2030 年までの商用化を目指して開発を進めている。

商用化との具体例として、米国現地法人を通じて米国ユタ州に世界最大のグリーン水素の製造・貯蔵施設となる水素ハブ(Advanced Clean Energy Storage プロジェクト)を建設し当社が機器供給する最新の 840MW 級水素燃焼ガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)発電所へ、当該グリーン水素を供給するプロジェクトが既に遂行中である。このプロジェクトでは 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 100%のグリーン水素専焼での運転を達成する計画としている。

この商品化ロードマップを達成することにより、図4に示す EU Taxonomy で求められる CO<sub>2</sub> 排出原単位(2023 年～2035 年は 270g/kWh, 2035 年以降は 0g/kWh)を達成することになる。これらの世界動向、規準等も見ながら当社の技術開発を進め、世界のカーボンニュートラルに向けた取り組みに貢献していく。



図3 各種燃焼器における実証および商用化のロードマップ

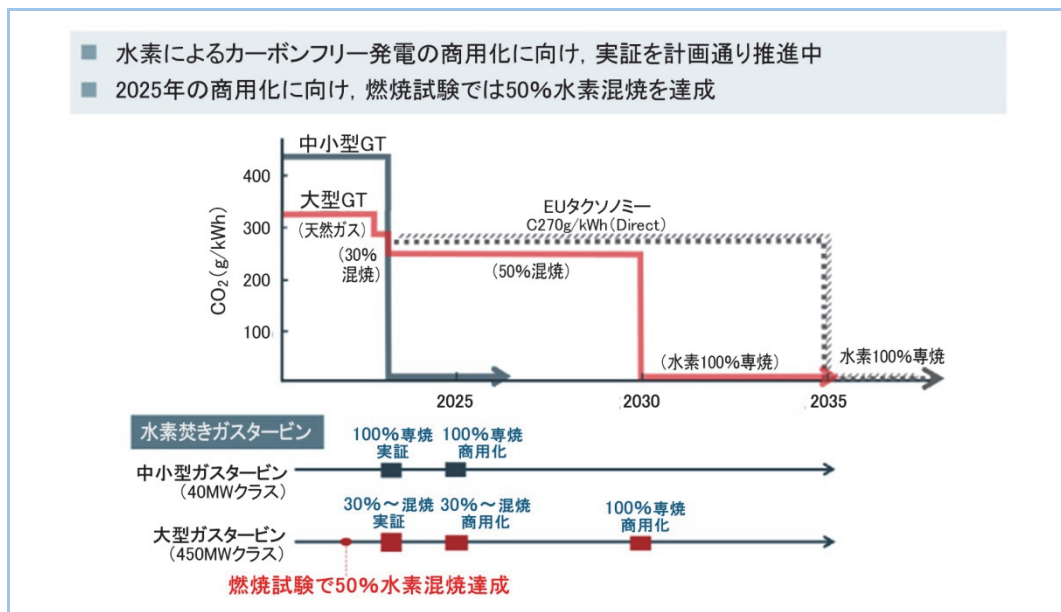


図4 EU タクソノミーとガスタービン開発スケジュール

#### 4. 水素発電の実証“高砂水素パーク”

当社では、ガスタービンの開発・製造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、同製作所構内の実証設備複合サイクル発電所(通称:第二 T 地点)に隣接させて整備中である。この“高砂水素パーク”の全体構想を図5に示す。M501JAC 形を適用する大型ガスタービンからなる水素発電実証設備、H25

形を適応する中小型ガスタービン及び燃焼試験設備に水素を供給するため隣接させて整備中である。

図6に“高砂水素パーク”の構成を示す。再生可能エネルギーによる水電解・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グリーン／ターコイズ水素を水素貯蓄設備に貯蓄し、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。グリーン／ターコイズ水素からの水素発電の一貫実証、更には二次電池による電力貯蔵と全体最適エネルギーマネジメントシステムを組み合わせた、電解水素と二次電池による余剰電力貯蔵、及び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で、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5 “高砂水素パーク”の概要

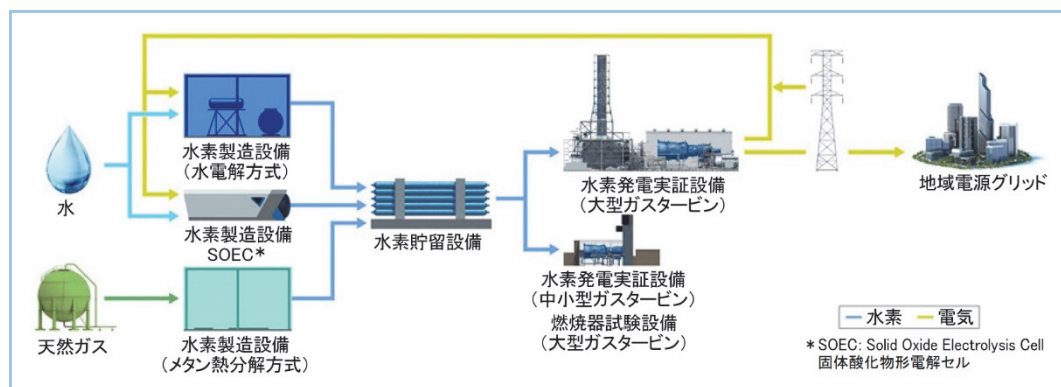


図6 高砂水素パーク構成図

現在、2022 年度の稼働開始に向けて貯蔵設備を建設中(図7)で、水素製造装置として 5.5MW アルカリ電解装置を Hydrogen-Pro 社から購入し 2023 年度運用開始に向け設置工事を進めている。工事完了後にガスタービンでの水素燃焼技術の試験・実証運転に着手する。

水素発電の一貫実証は、水電解装置として既に実用に供されているアルカリ水電解を導入して先行させるが、同パーク内に、開発中の高温型水電解装置として SOEC、低温型水電解装置としてアニオン交換膜(Anion Exchange Membrane: AEM)水電解装置、更にはターコイズ水素の製造などの実証機を設置して、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8は当社が参画中の水素プロジェクトの一例である。米国ユタ州の水素製造・貯蔵施設となる水素ハブ(Advanced Clean Energy Storage プロジェクト)では地下岩塩層に空洞を作り水素貯

蔵施設を整備して再生可能エネルギーによるグリーン水素を貯蔵し、水素ガスタービンで発電するプロジェクトである。このプロジェクトで採用される水素製造設備は、“高砂水素パーク”に設置する物と同じ Hydrogen-Pro 社製であり、“高砂水素パーク”が先行実証となる。英国では、Zero Carbon Humber として、既設発電所の天然ガス焚きから水素焚き転換プロジェクトが進行中である。



図7 高砂水素パーク整備状況(2022/8)

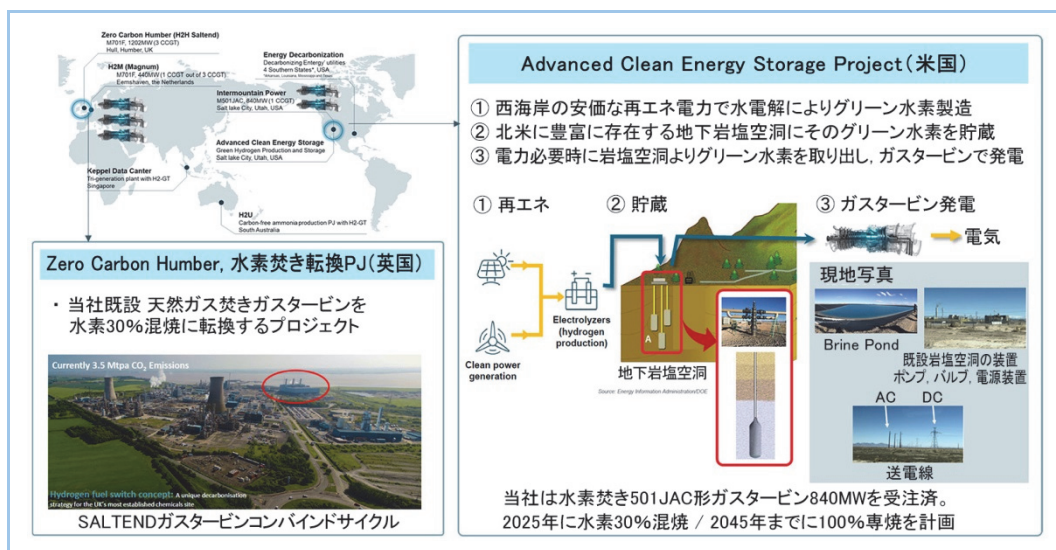


図8 低炭素プロジェクト

## 5. 水素製造技術開発状況

現在、当事業本部では複数の水素製造技術の開発を行っている。ここでは、その中から、ターコイズ水素の製造技術及び、次世代型低温型水電解である AEM の開発状況について述べる。

### (1) ターコイズ水素製造技術

前章でも述べたようにメタン熱分解は、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9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:CO<sub>2</sub> 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は固体であるため、常温常圧で気体となる CO<sub>2</sub> よりも容易に固定化・貯蔵を行うことができる。現在は、要素試験装置で反応状況や適正条件のスクリーニングを進めているが、当社製品群から図 10 に示すような反応炉を抽出し検討を進めており、これらから適切な反応器形態を選定して開発を加速させる計画である。大まかなロードマップを図 11 に示す。

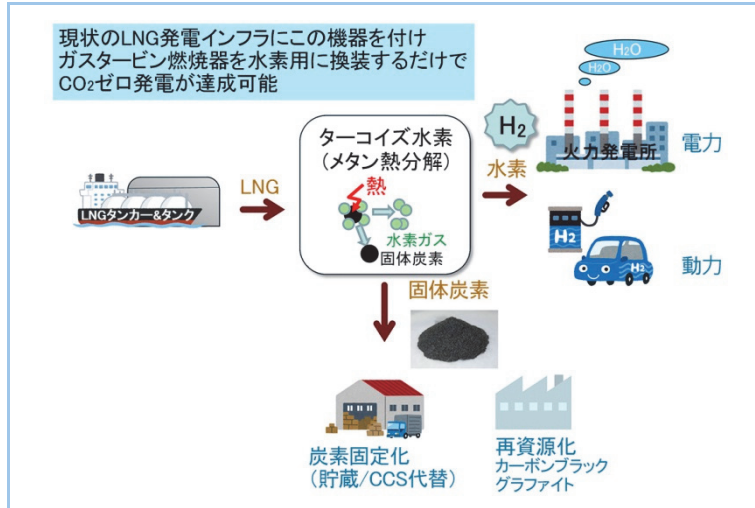


図9 ターコイズ水素製造技術の概要

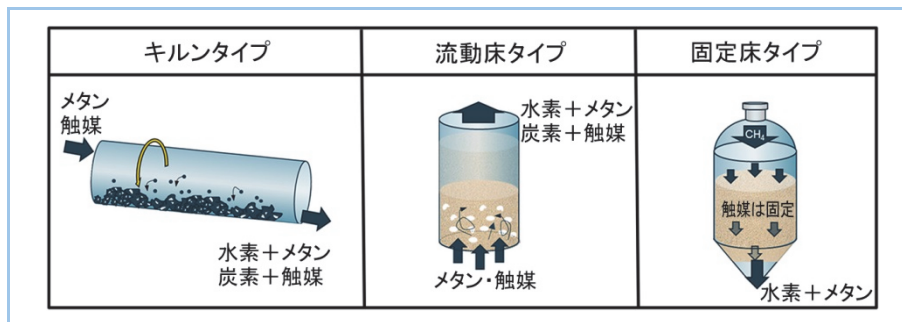


図10 開発中各種ターコイズ水素反応器

|                    | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026～ |
|--------------------|------|------|------|------|-------|
| 要素開発・反応器試験         |      |      |      |      |       |
| 開発設計・製造据付け<br>検証試験 |      |      |      |      |       |
| 実証・商用検討            |      |      |      |      |       |

図11 ターコイズ水素開発ロードマップ

## (2) アニオン交換膜 (AEM: Anion Exchange Membrane) 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: Polymer Electrolyte 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、高純度な純水が必要で酸性環境になるため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

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 12 に開発状況を示す。現在、小型要素セルを試作し、適切な製法の検討・運転条件の最適化などを行っている。サンプ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 13 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。

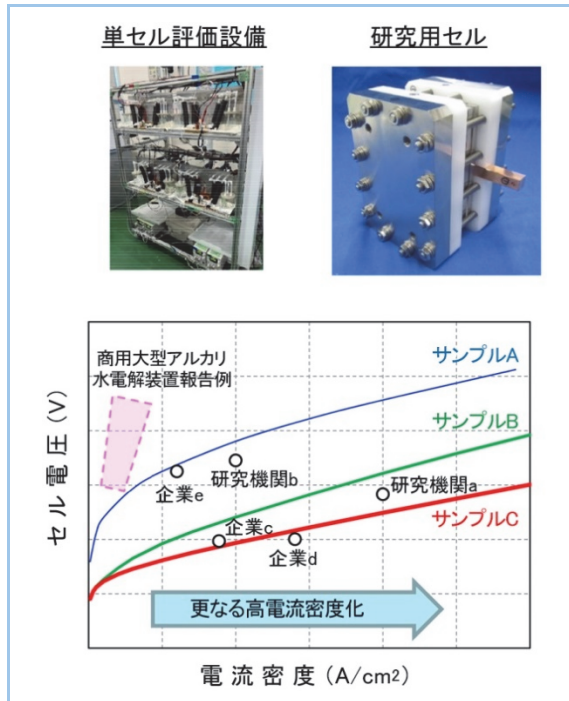


図 12 AEM 水電解開発状況

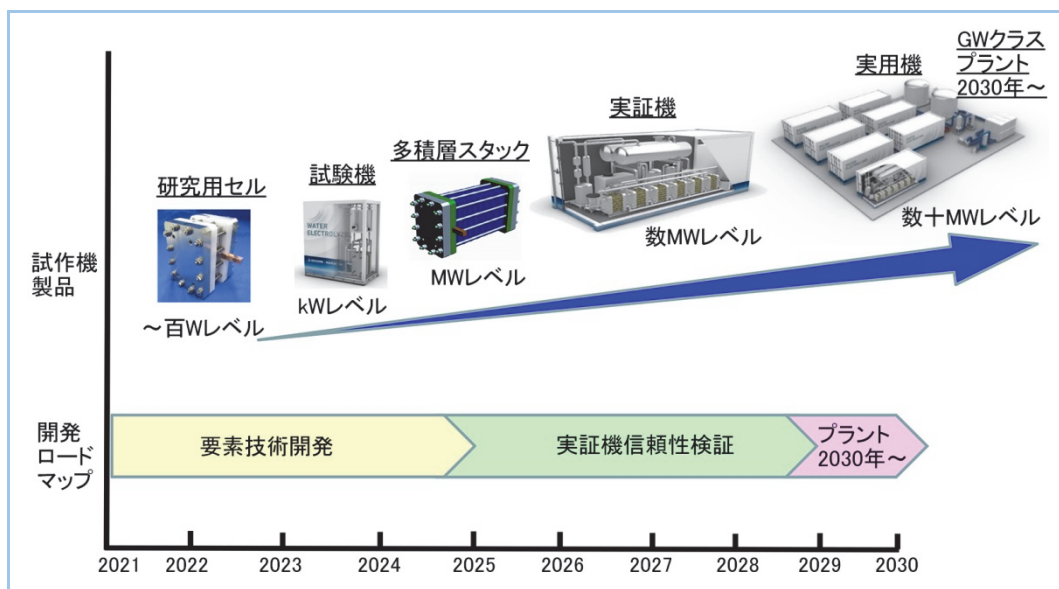


図 13 AEM 水電解ロードマップ

## 6. 燃料アンモニア利用技術の開発状況

最後に、水素とともに火力発電のエネルギー転ジションの一翼を担うアンモニア利用技術の開発状況について述べる。アンモニア燃焼による発電技術については、図 14 に総合研究所 長崎地区に集中的に試験装置が整備されており、“長崎カーボンニュートラルパーク”とも呼称しながら開発の加速を図っている。

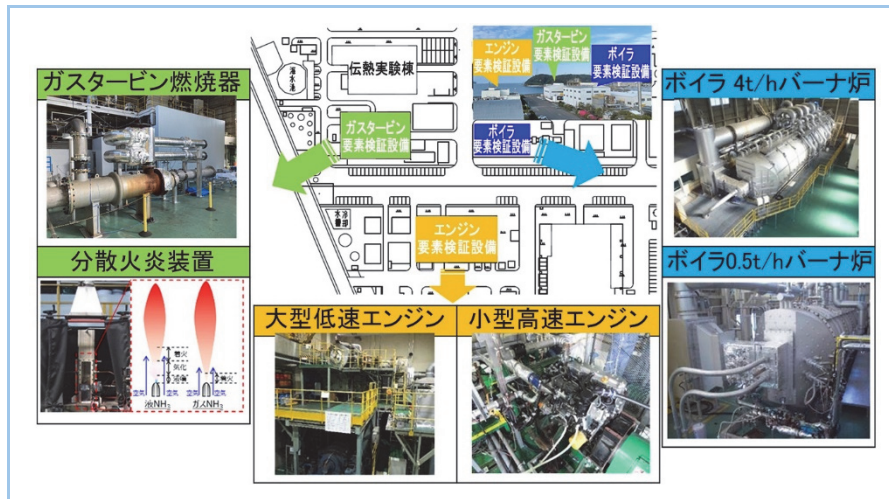


図 14 長崎カーボンニュートラルパーク(総合研究所 長崎地区)  
アンモニア関連設備

#### (1) アンモニア混焼ボイラ

アンモニアについては、微粉炭焚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<sub>x</sub>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<sub>x</sub> 排出量が事前に実施した基礎燃焼試験通りであること、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、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、石炭焚き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 15 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。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巡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“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。

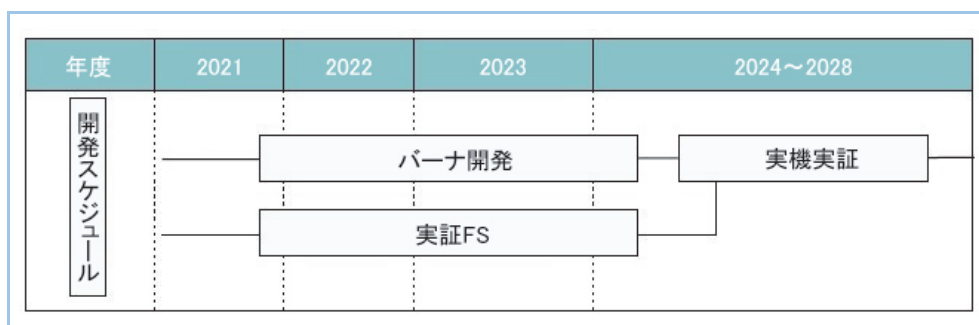


図 15 グリーンイノベーション基金によるアンモニア高混焼技術開発の概要

## (2) アンモニア利用ガスタービン

当社では、ガスタービン発電の燃料としてアンモニアを専焼できる燃焼器の開発にも着手している。アンモニアはその燃料中に窒素を含むため、燃焼時にフューエル NO<sub>x</sub> とよばれる NO<sub>x</sub> が大量に発生する。その原理を図 16(a)に示す。燃料過濃及び燃料希薄の状態では比較的 NO<sub>x</sub> を低く抑えることができることが知られている。図 16(b)に示すとおり、1本の燃焼器の空気配分を調整して、燃焼器上流は燃料過濃条件、下流燃料希薄条件を作り出す燃焼器の開発を実施中である。このアンモニア焚き燃焼器で極力 NO<sub>x</sub> 発生を抑制し、これに超高性能な脱硝を組み合わせることにより実機実証を進める計画であり、2025 年に実機での実証試験が実施できるように開発を進めている。

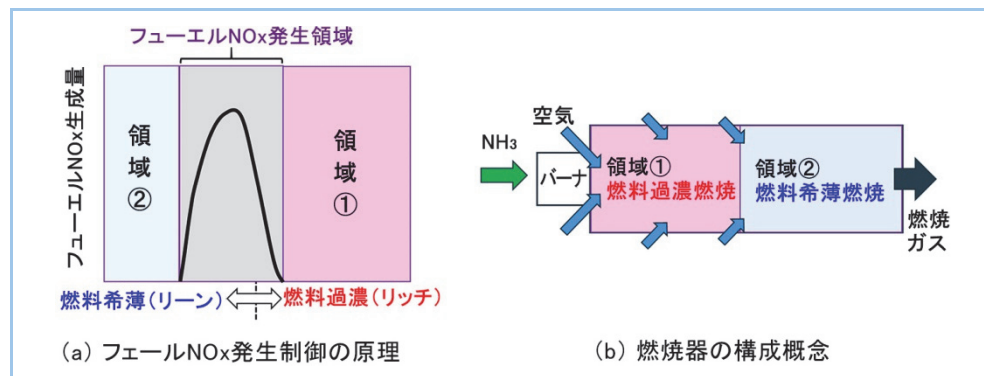


図 16 アンモニア用ガスタービン燃焼器の概要

## 7. まとめ

本報では、高砂水素パークを中心に、火力発電業界向けカーボンニュートラルへの取り組みについて紹介した。第二T地点に隣接して設置される高砂水素パークは、水素貯蔵設備など整備中で、まずは Hydrogen-Pro 社から導入するアルカリ電解水素製造装置を設置し、水素製造・発電の一環実証設備として 2023 年の稼働を目指している。

併せて、複数の水素製造技術開発を進めており、実証段階に入ったものから、高砂水素パークに実証機を設置し、実証運転を行っていく予定である。これらのうち、ターコイズ水素製造技術、AEM 水電解技術の紹介も併せて行った。

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。