

脱炭素社会の達成を目指す水素製造技術の開発

Development of Hydrogen Production Technology Initiative to Create Decarbonized World



鳥井 俊介*¹
Shunsuke Torii

加藤 雅之*²
Masayuki Kato

宮澤 敬之*³
Takeshi Miyazawa

飯島 高善*⁴
Takayoshi Iijima

菅原 啓法*⁵
Hironori Sugawara

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)・汽力発電のカーボンニュートラルへの対応が急務である。これら火力発電の脱炭素化には、発電設備の脱炭素化技術開発に加え、その燃料の一つと考えられている水素を大量に、かつ経済的に製造する設備の技術開発も求められている。

三菱重工業株式会社では、発電設備のみならず、水素製造装置についても開発に取り組んでおり、既報⁽¹⁾にて水素の製造技術に焦点を当て、技術の特徴や開発状況を紹介した。本報では、その後の進捗状況につき紹介する。

1. はじめに

地球温暖化問題の解決は人類の重要な課題であり、気候変動枠組条約締約国会議 (COP) をはじめとする、国際的な気候変動対策への気運の高まりを受けて、日本国政府は 2020 年 10 月、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。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とともに、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。三菱重工業株式会社 (以下、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、社会的負担を最小化しながら、現実的かつ早期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。

再生可能エネルギーの普及拡大に際しては、出力変動へ対応するための蓄エネルギー技術導入が不可欠となる。一般的に短時間の蓄エネルギーにはリチウム電池が有利とされ、数日・数週間単位の比較的長期間には、貯蔵・輸送が可能な水素など化学エネルギーへの変換が適するとされており、水素製造技術は重要な蓄エネルギー技術となる。

この水素製造というエネルギー変換技術は、発電用途における蓄エネルギーという観点のみならず、二酸化炭素を原料とした液体合成燃料製造へ展開することも可能である。液体燃料化することで輸送性を向上させることができ、航空機・船舶等の輸送分野へ適用することで社会全体のカーボンニュートラルにもつなげる可能性を持つ。水素をキーとしたバリューチェーンの例を図 1 に示す。

当社では、1980 年代より、固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell 以下、SOFC)、固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC)、プロトン交換膜 (Proton Exchange

*1 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 室長

*2 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 主席プロジェクト統括

*3 エナジードメイン 技術戦略室 主幹技師

*4 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 主席技師 技術士 (機械部門)

*5 GX セグメント GX 事業推進部 主席チーム統括

*6 エナジードメイン 技術戦略室 博士 (工学)

Membrane 以下, PEM) 水電解による水素製造, 流動層反応器によるカーボンナノチューブ製造等といった化学エネルギー変換技術を用いた製品開発に取り組んできた。それら技術の蓄積を活かし, 水素製造装置の開発を再開した。本報では, 脱炭素社会の実現に必要不可欠となる水素製造技術及び, 合成燃料製造技術の開発状況について解説する。

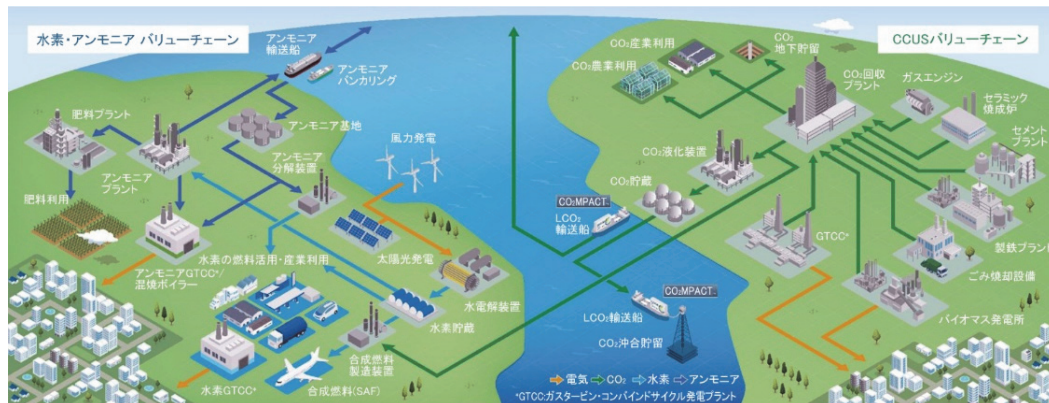


図1 水素・アンモニア/CCUS バリューチェーン

2. 当社の水素製造技術概要

当社グループでは, “MISSION NET ZERO”を宣言し, 生産活動及びバリューチェーン全体からの CO₂ 排出量 Net Zero を 2040 年までに実現し, お客様が 2050 年までにカーボンニュートラルを実現可能な製品, 技術を提供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 CO₂ 回収を含めた CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) の拡大を進め, カーボンニュートラル社会づくりに貢献する。

図 2 に水素・アンモニア利用の背景を示す。蓄エネルギー技術の導入の必要性及び各技術の得意な領域は前述のとおりであり, 短時間の蓄エネルギーには, リチウム電池が有利であるが, 数日・週間単位の比較的長期間の蓄エネルギーには, 水素など化学エネルギーへの変換が有利である。図 2 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, 既存の天然ガスインフラを活かして水素を生成できるターコイズ水素への期待が高い。ターコイズ水素は, 天然ガスを熱分解することで生成され, 炭素を固体で取り出すことができる特徴をもつ。一口に脱炭素と言っても, 各地域のニーズに沿った脱炭素技術の実証・社会実装が急がれる。

化石燃料からの脱却による社会的負担を軽減するためには, 安価な水素が必要となる。電解による水素製造コストは, その大部分が電気代であるため, 高効率なエネルギー転換技術が求められる。また, 水素利用は数 MPa の高圧になることが多く, 水素の圧縮動力は, システム全体の効率を大きく低下させる。通常, 気体を圧縮するよりも, 液体を加圧した方が消費エネルギーを抑制できるため, 高圧な水・水蒸気を電解可能な装置が望ましい。

当社エナジードメインでは, まず初めに発電用途での水素利用に焦点を当て, 高圧・高効率・大容量な高温水蒸気電解 (Solid Oxide Electrolysis Cell 以下, SOEC), アニオン交換膜 (Anion Exchange Membrane 以下, AEM) 水電解及び, メタン熱分解によるターコイズ水素製造の 3 種類の水素製造技術開発に取り組んでいる。また, これらの電解装置を用いる合成燃料製造技術開発にも取り組んでいる。図 2 右下に脱炭素発電へ向けた技術開発ロードマップを示す。これら要素技術の総合的長期実証は, 当社高砂地区の高砂水素パーク⁽²⁾にて, 要素技術開発は, 同長崎地区にある長崎カーボンニュートラルパーク⁽³⁾にて実施している。

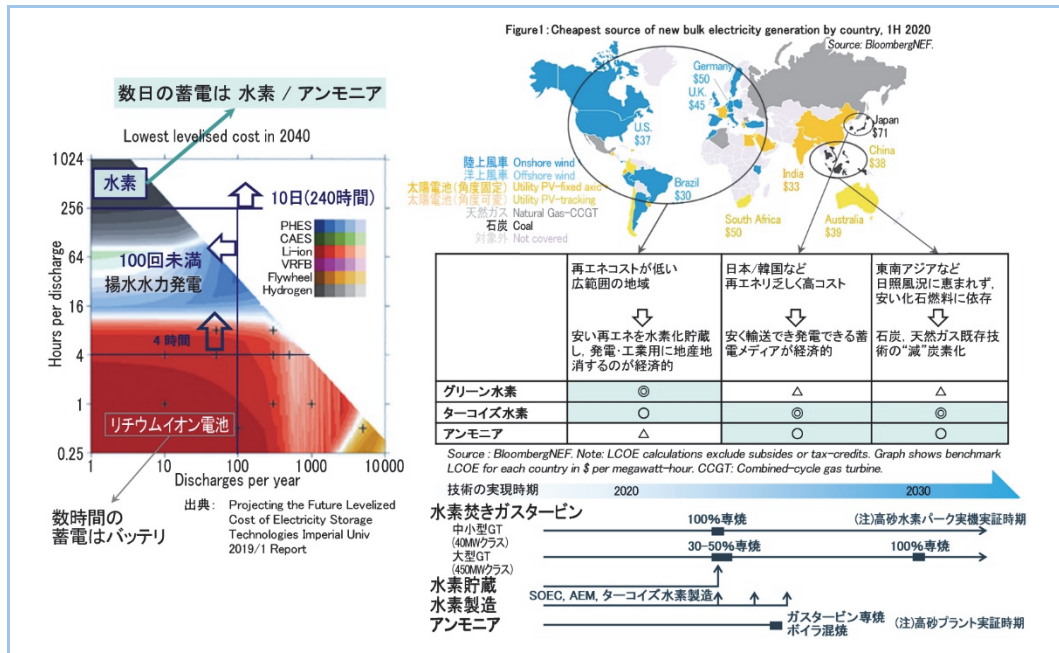


図2 水素利用の背景と脱炭素技術開発ロードマップ

3. SOEC の開発状況

SOEC は、高温の水蒸気を電気分解し、水素を製造するもので、水電解に比べて少量の電力で水素を製造できる高効率な電解水素製造方法である(図 3)。当社は独自技術の円筒横縞型 SOEC のセルスタックを使用している。(詳細については既報^{(1),(4)} 参照)

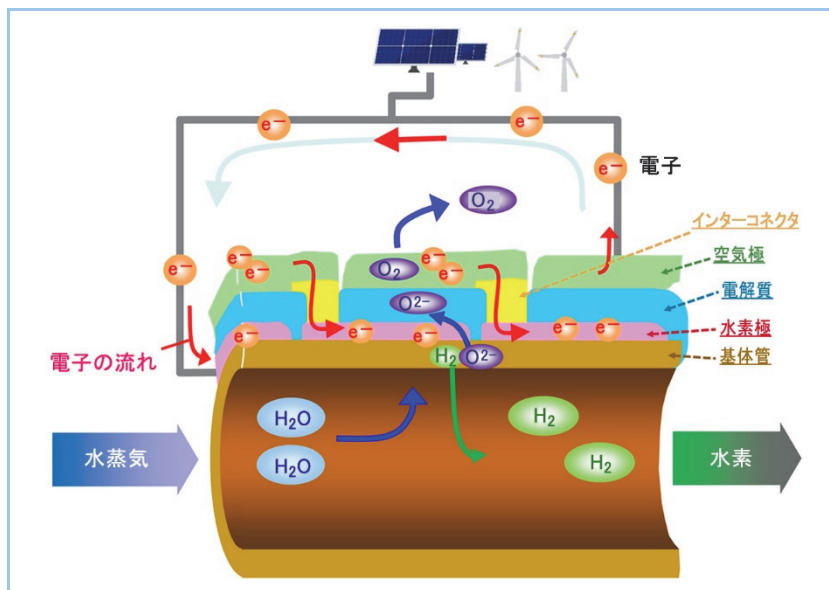


図3 SOEC の動作原理

SOEC の要素技術の開発状況については既報⁽⁴⁾のとおり、セルに高電流を印加することにより高出力化を目指している。セルスタックの長期耐久試験や、カートリッジ単位での電解試験を経て、SOFC に比べて高電流での運転に目途を立てつつある(図 4)。

高電流での SOEC のシステム化に先立ち、低電流 SOEC モジュールの運転検証を行うべく、400kW 級デモ機を高砂水素パークにて運転している。本設備はモジュール運転検証を主体としているため、システム構成は簡素なものとしているが、4 台のカートリッジを組み合わせたモジュールのデモ運転を約 3000 時間行った。本検証結果も踏まえ高電流の SOEC モジュールについても成立させる見通しを得た(図 5)。

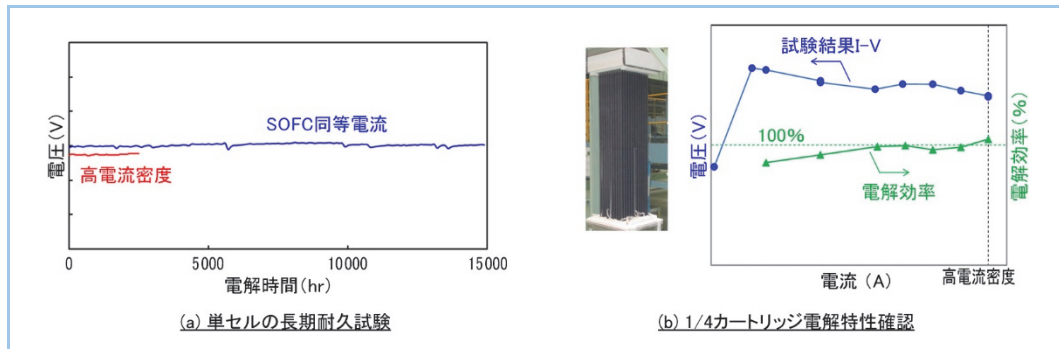


図4 要素試験結果

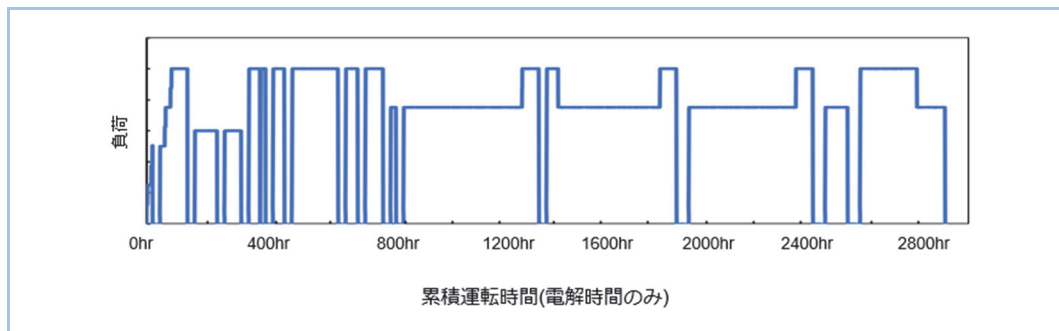


図5 400kW デモ機運転実績

これらの SOEC の要素技術開発の結果を活かして、システムとして、高効率な運転を経済的な構成で実現する MW 級の SOEC システム構成について、現在検討を進めている。

SOEC の特性を生かす高効率なシステムとしては、電解で発生するジュール熱を利用して水蒸気を生成し、水と電気を供給して水素が発生する“蒸気自給”を特徴とした構成(図 6)を検討している。具体的には、電解時のジュール熱により加熱された SOEC の生成水素や排空気の熱を活用して蒸気発生させることで、“蒸気自給”が可能となる。

また、工場排熱等の外部蒸気を利用可能な構成(図 7)についても検討を行っている。工場等の既存設備から蒸気を供給可能な場合には、その蒸気を有効利用することで簡易な SOEC システムとすることができる。

空気供給系にはコンプレッサを有するが、排空気のエネルギーをタービンで回収して動力回収による効率化も含め、総合効率 90%-HHV 以上の高効率なシステムを目指す。水素利用は高压が想定されるため、今後 SOEC の運転圧力がより高压となるシステムを志向するが、その場合もエネルギーのロスが発生しないようなシステムとする計画である。最終的には、数百 MW クラス(水素 10 万 Nm^3/h クラス)のプラントへ適用されることを目指していく。

今後これらの開発を進め、図 8 に示すロードマップのとおり、SOEC の開発を実施していく。

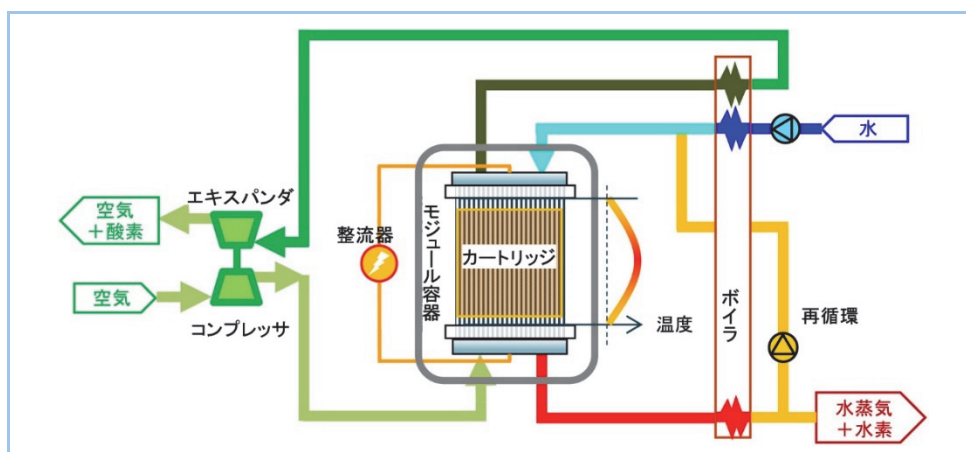


図6 蒸気自給 SOEC システムの構成

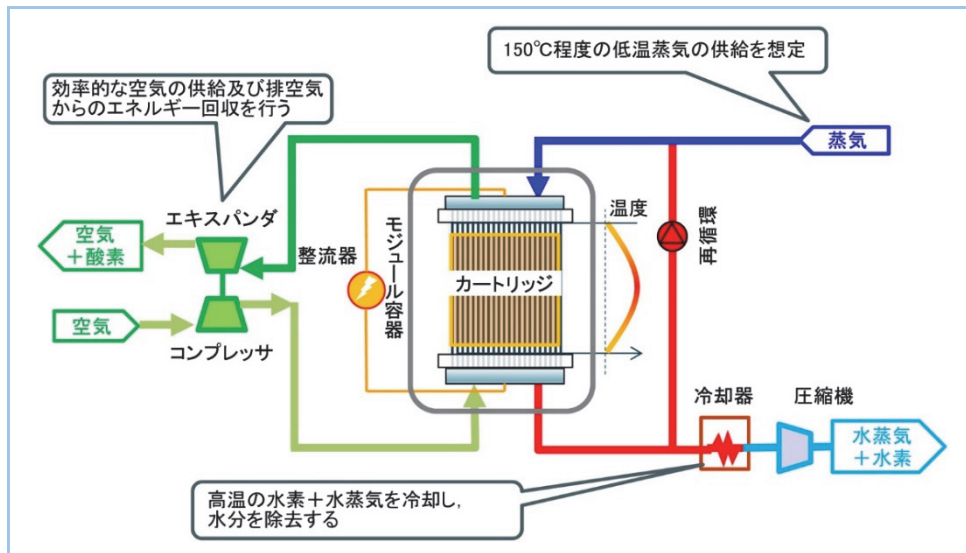


図7 外部蒸気利用 SOEC システムの構成

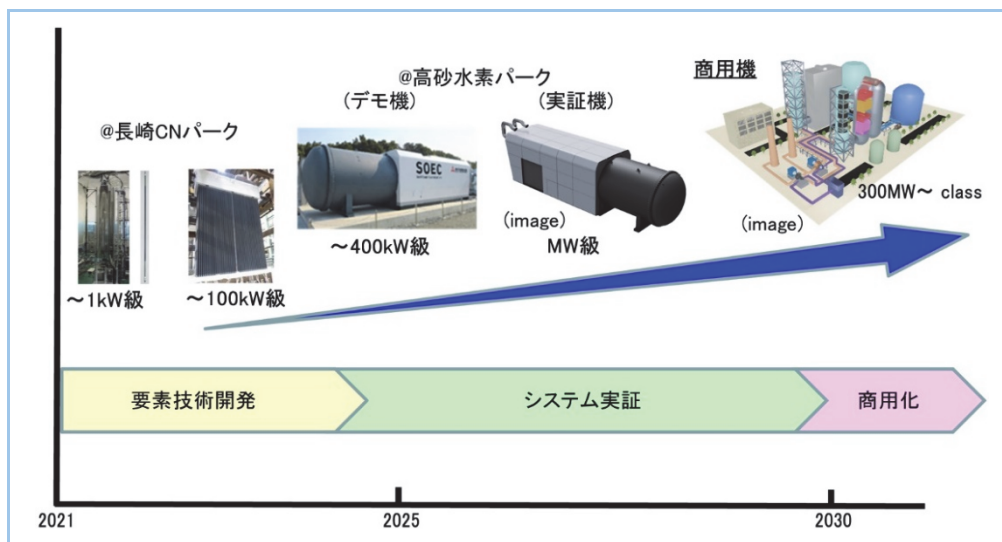


図8 SOEC 開発ロードマップ

4. AEM 水電解の開発状況

AEM 水電解は、水素イオン透過膜を用いた PEM 水電解と同様な高電流密度運転による電解槽の小型化が可能である。また、アルカリ環境のため安価なステンレス系部材等の使用による低コスト化が期待される技術である。当社では、AEM 水電解の技術開発を進めており、これまでの開発状況と得られた知見について報告する。

当社では、電極面積が数十 cm^2 級の小型要素セルによる初期特性や耐久性の把握、数百 cm^2 の大型セルスタックの試作・評価、スタック部材・組立に対する適切な製法の検討、kW 級試験設備を用いたシステム構成・運転条件の最適化などに継続して取り組んでいる。

図 9 に示す高圧セルスタックの試作・評価結果より、常圧試験の IV 特性と同等となることを確認した。

耐久性に関しては、要素セルにおいて長時間試験での電圧挙動を検証中であり、長時間試験後のセルの分解調査を実施して、電圧挙動変化に及ぼす影響因子やメカニズムの解明を実施していく予定である。

今後も、要素試験や長期試験による膜の耐久性評価を実施していく(図 10)。

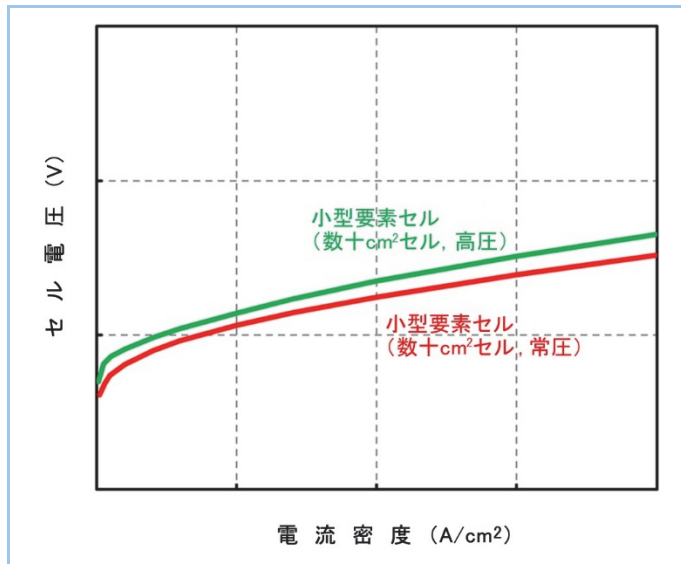


図9 高圧セルスタック試作評価結果

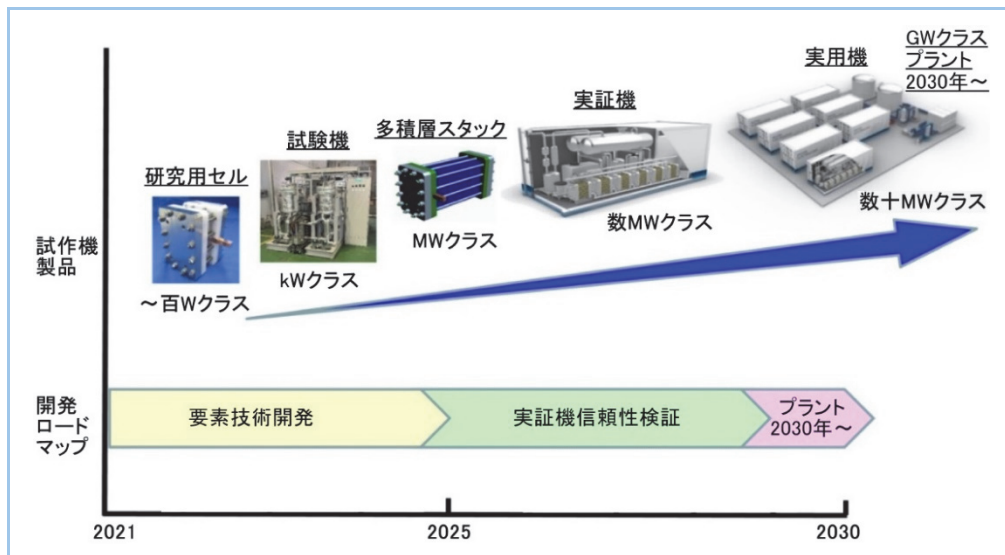


図10 AEM水電解ロードマップ

5. ターコイズ水素(メタン熱分解)の開発状況

メタン熱分解によるターコイズ水素製造技術は、天然ガスを高温下で固体の炭素と水素に分解する技術で、従来、工業用材料であるカーボンブラック等の炭素素材の製造に使われてきた技術である。当社では、同時に生成される水素に注目し、効率よく水素を製造できる反応形態を見出した。

図11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、この天然ガスインフラの供給ラインと需要家の間、または需要家の消費機器の上流にターコイズ水素製造プラントを追設することで脱炭素を実現する。天然ガス焚き火力発電所(Gas Turbine Combined Cycle, GTCC)を例にとると、主機となるガスタービンの燃焼器を水素用に換装するだけで、水素焚きへ更新することができる。また、副生炭素は固体であるため、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。このターコイズ水素との組合せにより、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。

メタン熱分解を行う反応器形態としては流動床を選定し、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。図12にバッチ式流動床試験装置と代表的な試験結果を示す。試験装置は、触媒を装荷した反応管内にメタンを通過させつつ反応管をヒータ加熱することでメタン熱分解反応を生じさせる装置である。

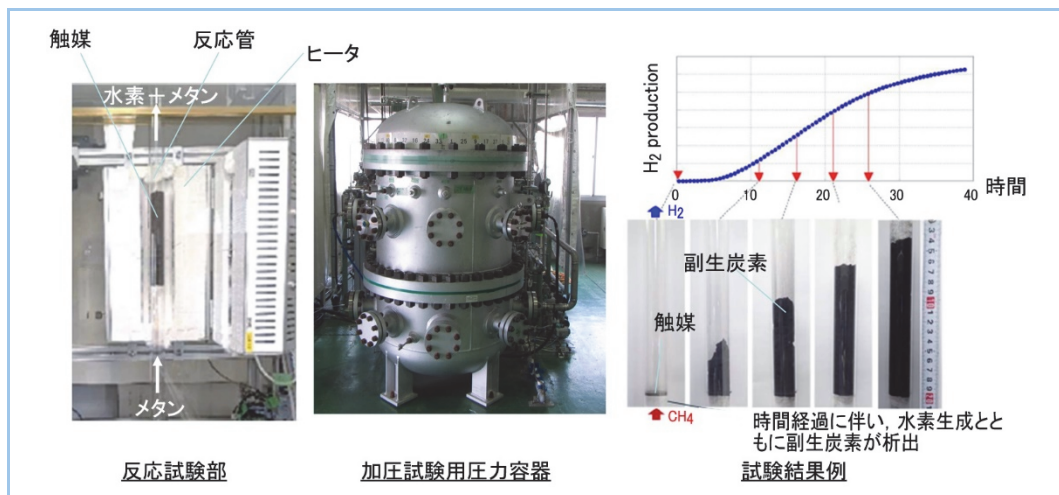
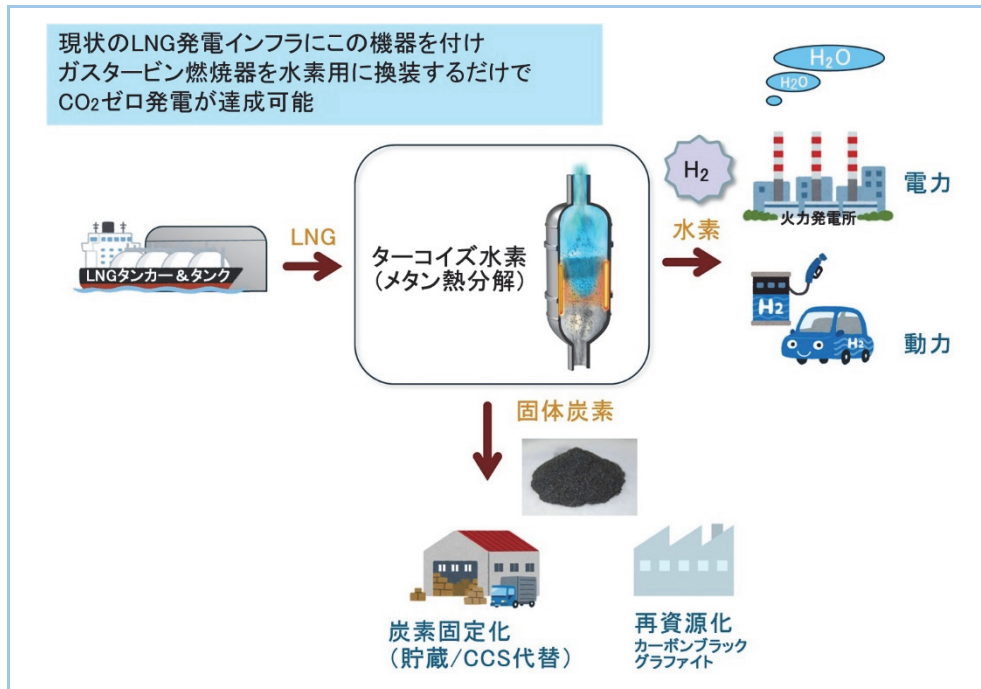


図 13 に連続式加圧流動床試験装置を示す。圧力容器の中に流動床反応器，加熱ヒータを設置するとともに，触媒供給及び副生炭素払出機構も備え，連続的なメタン熱分解反応試験を行うことができる。代表的な試験結果を図 14 に示す。高温加圧下で触媒供給と副生炭素払出を連続的に行い，流動層高を一定に保った定常状態にて連続運転を実施している。試験データの蓄積と運転条件の適正化を行うことで，2024 年度より安定性が大幅に改善され，200 時間以上の連続運転が可能である事を確認した。この連続試験の間に速度や温度などの条件を振り，安定運転の条件や，各種パラメータの感度を取得した。本データをもとに，触媒の連続供給，粉体の連続排出を模擬した反応モデルを開発した。このモデルをもとに商用化を念頭に置いたスケールアップによる反応予測を行うとともに，パラメータスタディによる設計最適化，及び，将来的な触媒性能を反映することでプラント効率改善につなげていく。

この安定的な連続試験成立により，粉体ハンドリングの検討に必要なデータを取得した。そして，各条件下で排出される粉体の成分や粒径など取得し，粉体搬送方法や，粉体回収機器の選定，粉体による摩耗などの各種寿命評価などに活用している。

開発ロードマップを図 15 に示す。現在は前述のバッチ式，連続式反応器試験で特性確認を実施しつつ，水素製造装置全体としてのプロセス検証機設計を実施している。

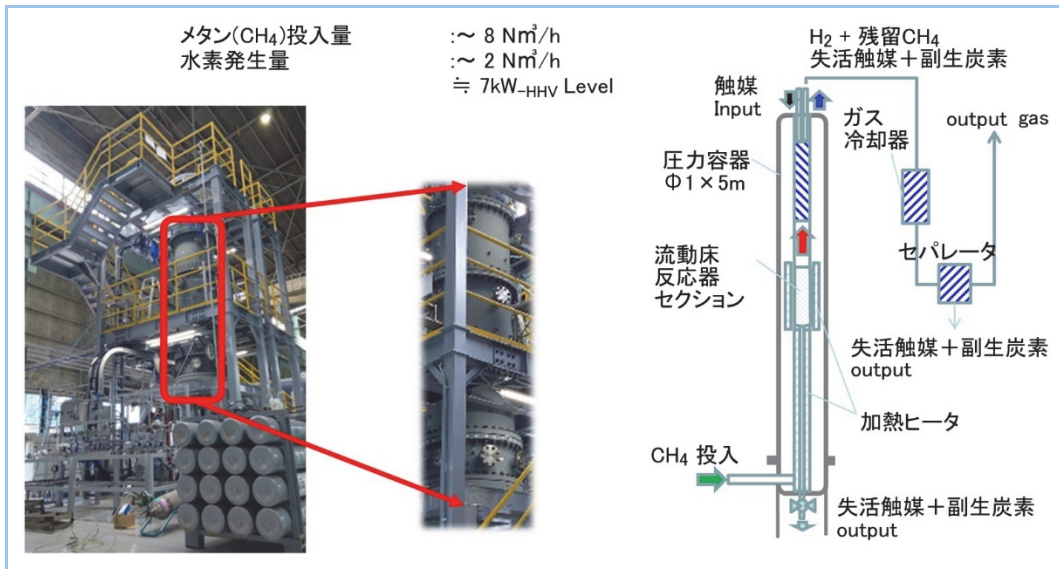


図 13 連続式加圧流動床試験装置

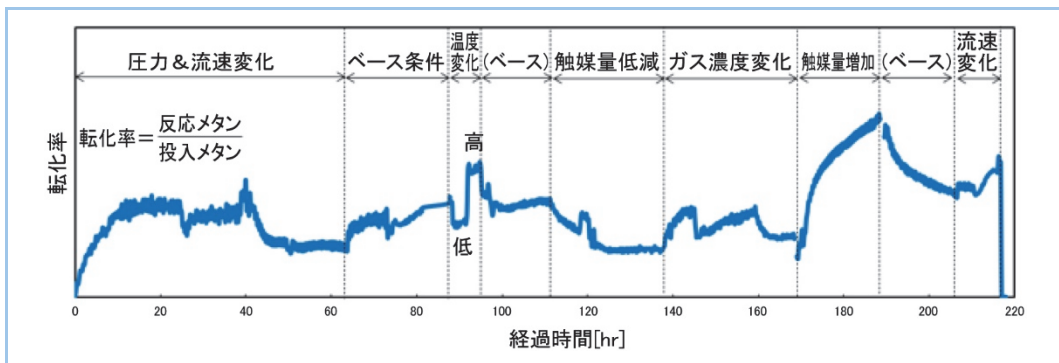


図 14 加圧流動床でのメタン熱分解試験結果

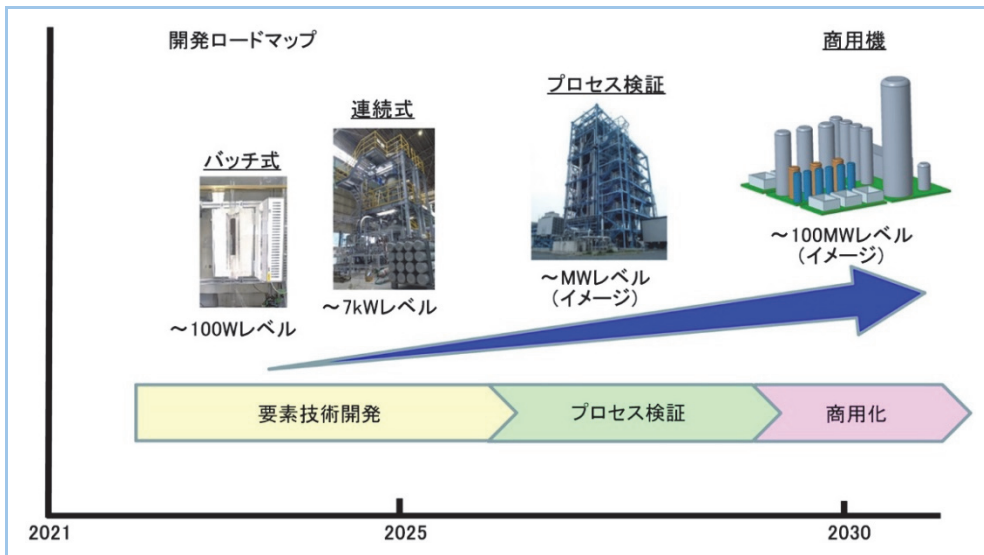


図 15 ターコイズ水素開発ロードマップ

6. 合成燃料製造技術の開発状況

前章までは当社における水素製造技術について概観した。その水素の利用方法の例としては、既報⁽¹⁾にてカーボンニュートラルな燃料(以下、CN 燃料)の位置付けや電解水素による液体合成燃料(以下、合成燃料)製造について紹介した。世界の主要な CO₂ 排出部門の 1 つである輸送部門において、電動化による脱炭素化が難しい大型の航空機や船舶では、利用しても CO₂ を増加させない CN 燃料の利用が有力な選択肢として期待されている。本章では合成燃料

製造技術に関する当社の開発状況について報告する。

SOEC では、水蒸気を電気分解して水素を製造する他に、水蒸気に二酸化炭素を混合して電気分解（共電解）することで、合成燃料の原料となる水素と一酸化炭素を生成できる⁽⁴⁾。この SOEC 共電解を用いることで合成燃料の原料を 1 つの機器で製造できるため、プロセスの簡素化と、高効率な SOEC の活用による経済性の高い合成燃料製造が可能となると考え、水素製造と並行して開発を進めている。

この共電解には当社の円筒型セルスタックの特長である内部改質機能を活用している。当社のセルスタックは、SOFC として使用する場合には燃料として天然ガス・都市ガスを改質器なしに直接 SOFC に供給することができる。すなわち、セルスタックの上部/下部のリード部にてセルスタック材料に含まれる触媒成分と、再循環によって供給される水蒸気を利用して、燃料ガスを水素と一酸化炭素に SOFC 内部で改質して発電に利用している。この内部改質機能も活用して共電解を行う。当社は、900 時間程度の比較的短時間の連続共電解試験を行い、セルの大きな劣化も観察されず、試験を完了した⁽⁴⁾。

共電解で生成されるガスへの要求事項として、FT (Fischer-Tropsch) 合成に適した水素と一酸化炭素の割合がある。一般に水素：一酸化炭素＝2：1 が適しているとされているが、SOEC 共電解では供給するガス組成や再循環率等のパラメータを適宜調整することで、FT 合成に適した比率に調整できることを要素試験で確認した(図 16(a))。また、合成プロセスで要求される水素と一酸化炭素の割合が変化した場合でも、供給する原料ガスの水蒸気と二酸化炭素の割合を調整することで水素と一酸化炭素の割合を調整できることを確認した(図 16(b))。

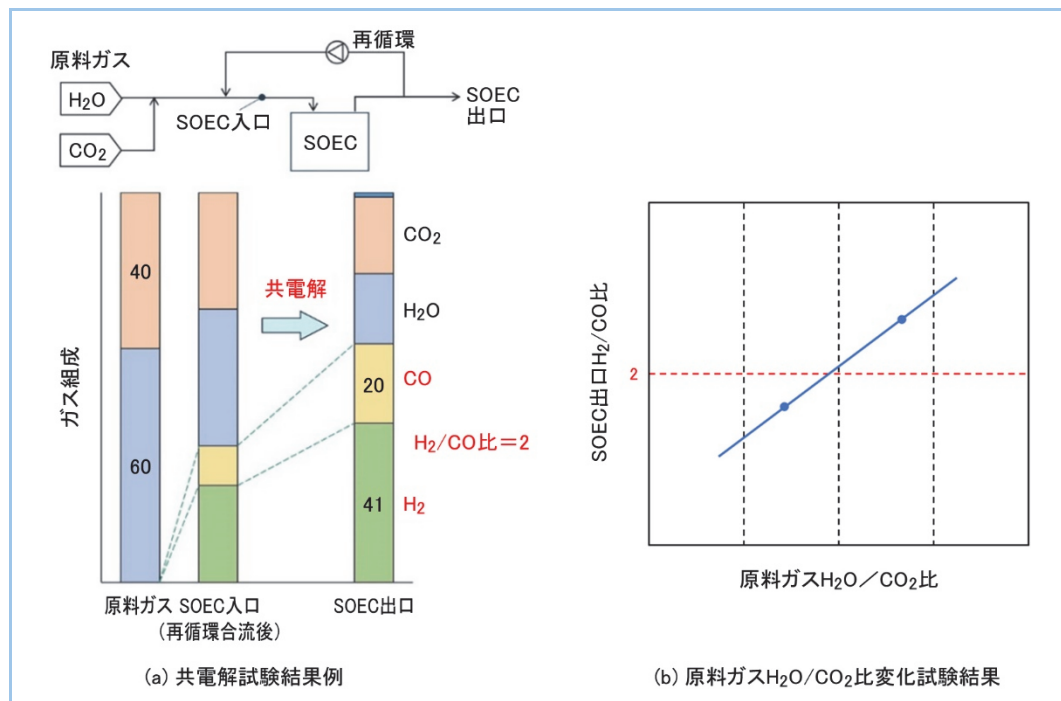


図 16 共電解試験結果

FT 合成を用いた合成燃料製造技術については上述のとおりであるが、共電解で生成される水素と一酸化炭素は、FT合成の他、メタノール合成等の原料にもなる(図 17)。共電解は汎用性が高い技術として有望であり、脱炭素社会の実現に向けて多様な選択肢を提供することが可能である。

開発ロードマップを図 18 に示す。共電解の要素試験やシミュレーション、プロセス検討に引き続き取り組み、合成燃料製造の一貫システム検証を経て、商用機へ展開する計画で開発を進めていく。

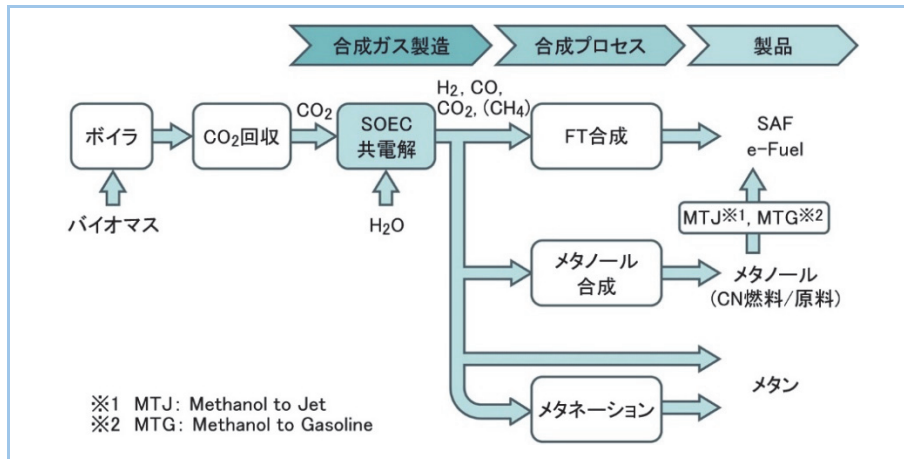


図 17 合成ガスからの派生プロセス及び製品

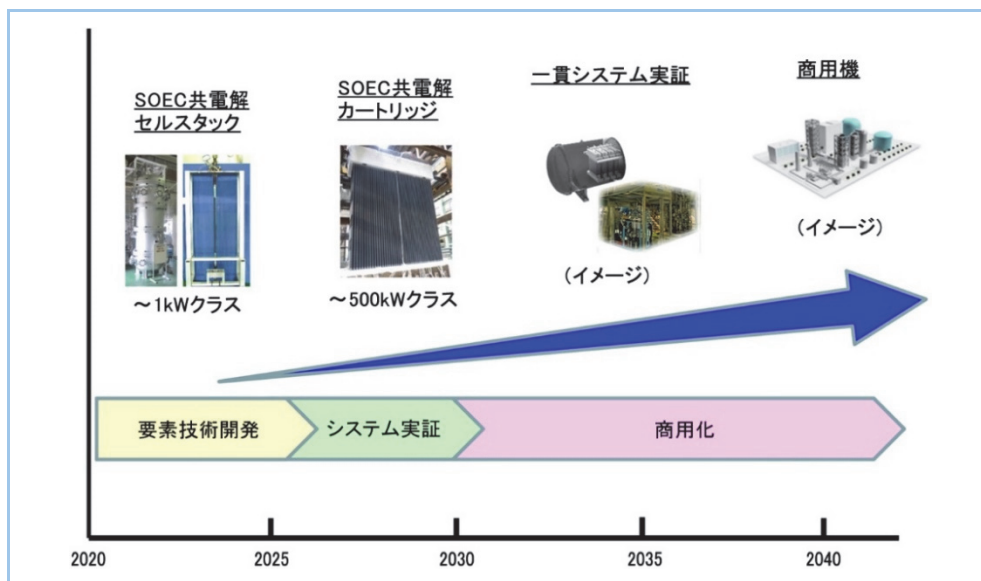


図 18 合成燃料製造技術(SOEC 共電解)開発ロードマップ

7. まとめ

本報では、発電用途での水素利用に焦点をあてた、高圧・高効率・大容量な、SOEC、AEM水電解、メタン熱分解の3種類の水素製造技術開発及び、これにより派生的に生まれる合成燃料製造技術開発についての進捗状況を紹介した。

本報で紹介した、エナジートランジション技術を用いて、当社グループの2040年に向けた宣言“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。

参考文献

- (1) 小阪健一郎ほか、脱炭素社会の達成を目指す水素製造技術の開発、三菱重工技報、Vol.61 No.1 (2024)
- (2) 正田淳一郎ほか、水素社会の実現に向けた“高砂水素パーク”の取組み、三菱重工技報、Vol.59 No.4 (2022)
- (3) 正田淳一郎ほか、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、三菱重工技報、Vol.60 No.3 (2023)
- (4) 金巻裕一ほか、高効率水素製造技術 SOEC (高温水蒸気電解) の要素技術開発状況、三菱重工技報、Vol.62 No.1 (2025)