

再生可能エネルギーと水素を利用した スマートエネルギー社会の構築への取り組み

島 潔・油 島 栄 蔵・伊 藤 剛

目下、近年のカーボンニュートラル政策に向けた研究開発テーマとして、再生可能エネルギー（再エネ）の媒体としての水素社会の構築に向け、水素サプライチェーンの構築に取り組んでいる。水素技術を活用した事業として、水素を作る（製造）、運ぶ・貯める（搬送）、使う（消費）に関する様々な実証試験を行いながら、その製造起源となる再エネ事業、とりわけ地熱発電事業と組み合わせた新しいビジネスにも取り組んでいる。本稿では、これまでの国内外における水素関連の取り組みを紹介するとともに、実証試験を通して培った技術、開発したマネジメントシステム、水素と天然ガスや地熱とのコラボレーション、可搬形 FC 発電機の建設工事への活用などについて紹介する。

キーワード：グリーン水素、エネルギーマネジメントシステム、地熱発電、可搬形 FC 発電機

1. はじめに

水素は、我が国の政策において、発電、産業、運輸などに幅広く活用できるカーボンニュートラルのキーテクノロジーと位置付けられ、様々な政策や支援が実施されている。そこで、新しいアイデアから新たな社会的価値を創造できるよう、水素に関するさまざまな実証に関係省庁とも連携しながら取り組んできた。本稿では、これまでに関わってきた水素関連の主な取り組みと技術について紹介する。

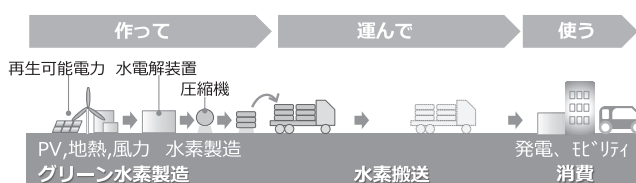
2. 取り組み内容の概要

(1) 背景

水素に本格的に取り組み始めたのは 2013 年で、当初は、水素社会の実現に対して、社内にも懐疑的な見方もあった。しかしながら、エネルギー自給率が低く、化石燃料への依存が高いという課題を抱えてきた日本が、原子力発電所の稼働率低下に直面したことで、多様なエネルギー源の活用がこれまで以上に求められることとなった。このような状況のなか、再エネと親和性の高い水素の本格利用に向け、インフラの構築企業として培ってきた知見やノウハウを活かしながら技術的課題を整理し、それらの課題解決に取り組む方向性に違和感はなかった。

(2) 方針

水素の本格利用に向け、水素を「作って」「運んで」「貯めて」「使う」を、水素サプライチェーンを最適化するためのマネジメント技術の研究開発や社会実証の中で取り組んでいる。図—1 に水素サプライチェーンのイメージを示す。



図—1 水素サプライチェーンのイメージ

これは、建設工事の設計施工一括請負で培ってきたプロダクトマネジメント能力を活かし、水素の製造、搬送から消費までの、サプライチェーンの最適化に貢献できると考えているからである。このため、都市のエネルギーとして水素を使うためのエネルギー・マネジメント・システム（EMS）や、水素を製造場所から利用先まで効率よく搬送するための水素最適搬送管理システムなど、いわば水素の利活用を促すためのプラットフォーム開発に注力している。プラットフォームを軸に、水素関連の技術を開発し、付加価値の高い製品を創出することで、これからの水素社会のインフラ構築に貢献していきたいと考えている。

3章以降で、取り組み事例をいくつか紹介する。

3. 水素コージェネレーションシステムの実証

(1) 実証概要

2017年12月に、神戸市のポートアイランドにおいて、世界で初めて、市街地で、水素による熱と電気を近隣の公共施設に供給する「水素コージェネレーションシステム」（水素CGS）の実証試験を開始した。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成で、川崎重工業との協働で事業を進めている。実施体制は、大林組が幹事を担い、インフラ整備、「統合型エネルギーマネジメントシステム」（統合型EMS）、双方向蒸気融通技術の開発を担当し、川崎重工業が水素CGS、水素貯蔵供給設備の設置を担当している。水素CGSは、水素だけを燃料とすること（専焼）も、水素と天然ガスを任意の割合で混ぜ合わせたものを燃料とすること（混焼）も可能で、実証試験を通じて、運用の安定性を検証している。

本実証では、神戸市が実証フィールドの提供、関西電力が送電、岩谷産業が液化水素の提供、関西電力エネルギーソリューションが実証設備の運転・維持管理、大阪大学が蒸気関連技術の検証を担当し、産官学が一体となって取り組んでいる。

写真－1に神戸ポートアイランドの実証プラントを示す。



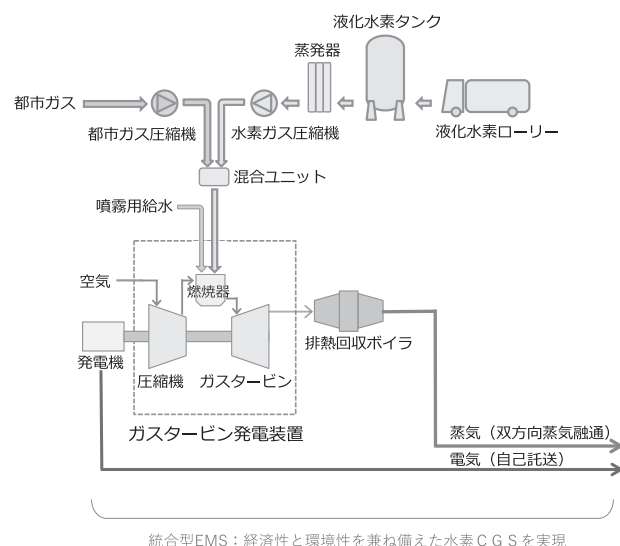
写真－1 神戸ポートアイランドの実証プラント（川崎重工業提供）

(2) システム概要

本システムでは、ローリーで搬入される液化水素は液化水素タンクに貯蔵される。タンクの液化水素は、蒸発器で気化され、水素ガス圧縮機で所定の圧力にして、混合ユニットで都市ガスと混合されたあと、ガスタービン発電装置に供給される。水素は、水素貯蔵供給設備で運ばれたあと、水素CGSで電気と熱に変えられ、統合型EMSによる需要量、環境性、経済性の最適計画のもと、供給されるのである。

電気については、自己託送制度により、関西電力の送配電網を使って、近隣の公共施設に供給している。熱については、排熱回収ボイラで圧力10 kg/cm²の蒸

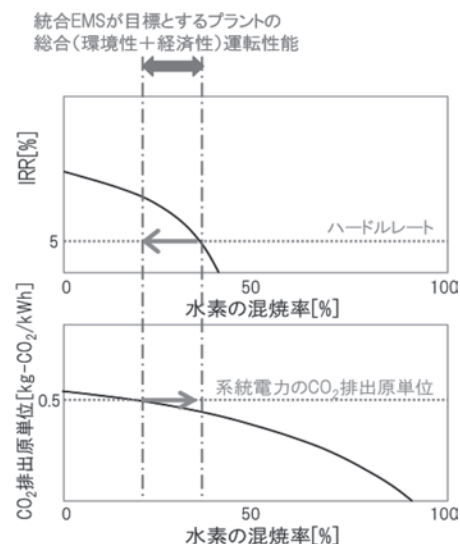
気を発生させ、実証で新たに設置した蒸気導管を使って、同じく近隣の公共施設に供給している。図－2に水素CGSの構成を示す。本システムには、約1,100 kWの電力、約2,800 kWの熱を供給する能力がある。



図－2 水素CGSの構成

(3) 統合型EMS

本実証では、これまでの電力と熱の利用状況や、水素と都市ガスの市場価格に基づき、プラントの環境性と経済性など、時々刻々と変化する運用条件を計算に入れ、水素CGSの最適運転パターンをオペレータに指示できる統合型EMSを開発した。統合型EMSの主な機能のうち、水素混焼率の最適化イメージを図－3に示す。環境性を優先するのであれば水素100%で運転すれば良いが、水素単価の高い普及開始時期においては、水素と天然ガスを混焼させて運転する方が経済性に有利な運転となる。図－3では、系統電力の



図－3 統合EMSによる水素混焼率の最適化イメージ

CO₂ 排出原単位を下回り、15 年の投資期間で IRR（内部収益率）がハードル・レートを上回る条件で運用する場合、水素の混焼率を $\leftrightarrow$ の範囲で決定すれば良いことを示している。

EMS の基本構成を図-4 に示す。クラウド上の EMS サーバーから、各建物について、将来の電力・熱需要量に関する予測値を受け取り、BEMS でガスタービンの負荷率や水素混焼率などの前提条件を少しずつ変化させながら、全てのパターンについて年間光熱費、年間 CO₂ 排出量を算出し、最適運転パターンをシミュレートしている。その後、結果を EMS サーバーに戻し、CGS のガスタービンに運転パターンを伝える仕組みになっている。シミュレーションプログラムは、使いやすく汎用性に富んだシステムにするため Excel で構築し、計算条件のパラメータや近似式などをユーザーで容易に書き換え可能なものになっている。

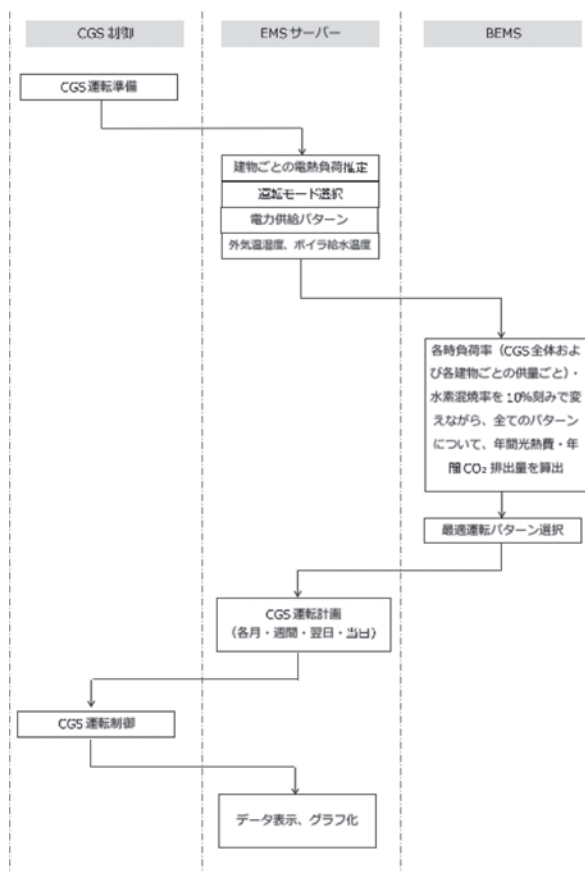


図-4 EMS の基本構成

(4) 今後の展開

実証では、液化水素を気化させて利用しているが、プロパンガスなどの中間熱媒体を用いて、極低温の液化水素から、熱交換部分の着霜を回避しながら、媒体を凍らせることなく、液化水素が気化する際の冷熱を取り出す技術も研究している。図-5 に冷熱取り出

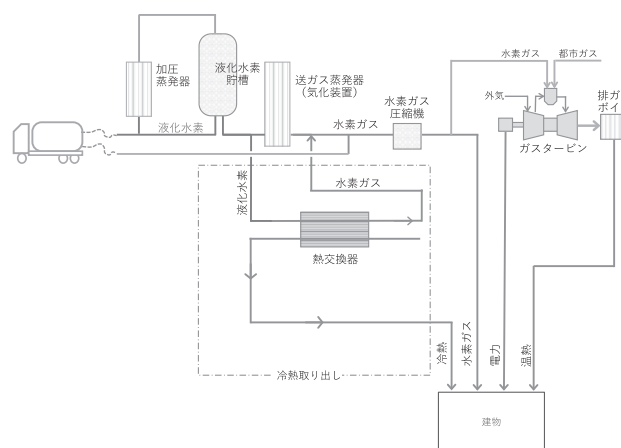


図-5 冷熱取り出しシステムの構成

しシステムの構成を示す。このシステムが実用化されれば、液化水素の冷熱を無駄なく活用して、水素 CGS 全体のさらなる高効率化につなげることが可能になる。また、液化水素を利用して、電力、温熱、冷熱、水素ガスを建物に供給することも可能になる。

4. 地熱発電によるグリーン水素サプライチェーン構築の実証

(1) 概要

地熱は、安定的な供給が可能な優れた再エネのひとつである。しかしながら、発電可能な場所が山間部に位置しているため送電網の容量が不十分であることや、開発期間が長いこと固定価格買取制度（FIT）を適用するための商用電力システムの容量が、開発期間が短い他の再エネによって先に埋まってしまう送電線への接続が困難になるといった課題があることから、事業化が遅れている。

そこで、地熱発電の開発と同時にグリーン水素の活用を促進することをめざし、大分県において地熱発電電力で製造した水素を九州各地へ陸送する実証を進めている。写真-2 に地熱発電電力を活用したグリーン水素製造プラントを示す。



写真-2 グリーン水素製造プラント

(2) 地熱発電を利用した水素製造

再エネからの水素製造は、太陽光発電や風力発電の安価な余剰電力を利用することで、経済性が高まるだけでなく、系統電力の安定化にもつながると期待される。しかしながら、余剰電力の価格は、各自治体の補助金制度などに依存するため不安定である。また、大量の余剰電力が安価に調達できる状況は、再エネ事業者の投資回収が上手く進んでいないことを意味し、必ずしもその状況が長続きするとは限らない。

一方、蓄電池の価格が国のロードマップ通りに下がるとすれば、強力なCO₂排出制約が制度設計されるなどの要件がないと、系統安定化対策としての水素製造は経済合理性の観点から難しい。

そこで、グリーン水素の経済合理性を向上させることを目的として、図—6に比べて地熱発電の変動量は小さいため、水素を安定的に製造し、遠隔地に搬送して利用することとした。図—7に地熱発電を利用

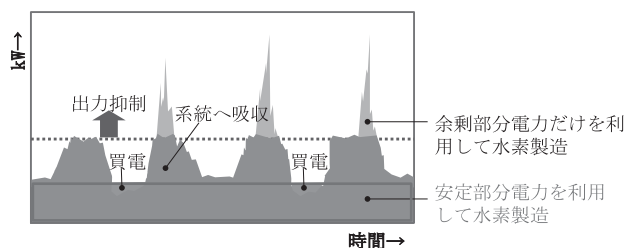
した水素製造システムの構成を示す。

(3) 複数の運転モード

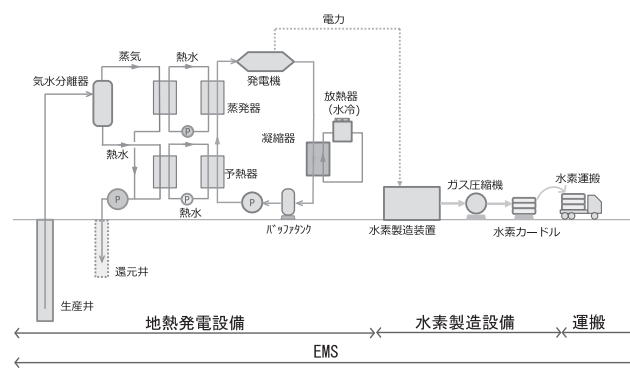
実証では、開発した複数の運転モードを備えた水素製造プラント向けEMSを利用し、水素製造を最適に行うための検証を行っている。水素製造プラント向けEMSの運転モードを表—1に示す。

(4) 水素搬送状況の考慮

EMSには、水素搬送車両に装着したGPS端末から搬送状況を把握し、車両の発着スケジュールに合わせてプラントを停止せずに効率よく連続運転できる制御機能も備えている。具体的には、年間の水素製造量が最大になる運転モード、水素製造単価が最安になる運



図—6 変動型再生可能エネルギーの発電量（太陽光発電）



図—7 地熱発電を利用した水素製造システムの構成

表—1 水素製造プラント向けEMSの運転モード

モード	運転概要
水素製造量最大モード 	- 年間水素製造量が最も多くなる運転モード（水素製造装置を負荷率および稼働率ともに100%で運転するモード） - CertifHy プロジェクトのグリーン水素の定義[*]に収まる範囲で買電量を調整。 - 水素製造装置は定格能力一定運転できるため製造効率および稼働率が向上。
水素製造単価最安モード 	- 水素の製造単価が最も安くなる運転モード（周辺機器を含めた水素製造装置の効率が最大となる運転モード） - 水素製造量最大モードや地熱発電電力で水素製造し、補機は買電でカバーするなど、様々な運転を検証し、最も安く水素製造できる運転パターンを探る。 - 水素製造単価は、ライフサイクル費用を、総発電量で除して算出する方法や運転費用（施設維持費+燃料費）だけを除して算出する方法など、パターン別に検証する。
水素製造グリーン度優先モード 	- 水素製造のための電力のうち地熱発電電力の割合が高くなる運転モード（できるだけ周辺機器動力+水素製造電力=地熱発電電力となるよう運転することで、系統電力からの買電電力を極力少なくする運転モード） - 逆潮流させることなく、地熱発電電力で、水素製造装置や補機をすべてまかなう運転（グリーン度100%）を目指す。

※グリーン水素

欧州燃料電池水素共同実施機構が資金拠出する CertifHy プロジェクトでは、天然ガス改質による水素製造時のCO₂排出量をベンチマークとして、60%以上低いものをプレミアム水素として認証、さらに再エネ由来のものをグリーン水素に分類している¹⁾。

転モード、再エネ電力の割合が高くなるグリーン度優先モードなど、複数のモードでのコントロールが可能であり、水素搬送状況も考慮しながら、水素製造を一時停止したり、搬送車両が水素カードル充填完了まで待機したりといった無駄な作業が発生しないよう、時々刻々と変化する状況を Excel で計算しながら、プラントの最適な運転パターンを決定する機能も有している。図-8に水素プラント向けEMSの運用イメージを示す。

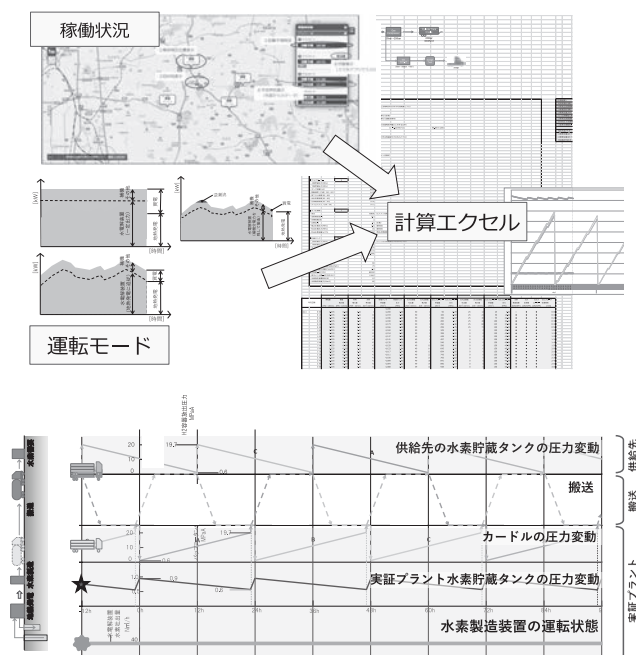


図-8 水素プラント向けEMSの運用イメージ

(5) 今後の展開

製造実証プラントでつくられたグリーン水素は、トヨタ自動車の水素エンジン車両の燃料とするなど、業界の枠を超えた供給先各社の協力のもと、比較的地熱資源量が多い地域の特性を活かした、地産地消のエネルギーとして、有効に活用されている。図-9にグリーン水素の供給先を示す。グリーン水素活用の選択肢を



図-9 グリーン水素の供給先

増やしていくことで、地域住民をはじめ、できるだけ多くの方に再エネの利用や水素社会の到来を身近に体感してもらえるよう取り組んでいく。

5. 福島県浪江町における水素利活用の実証 (環境省委託事業)

(1) 概要

水素をエネルギーキャリアとして活用するためのビジネス環境やインフラは未だ十分に整備されておらず、特にグリーン水素の商用化はほとんど進んでいない。高圧ガス保安法や建築基準法等の法規が、水素を都市のエネルギーキャリアとして活用することを想定していないことも、利活用が進まない一因となっている。このため、水素関連商品やシステムの開発に競争原理が働かず、水素利活用拡大に向けた技術開発が急ピッチで進んでいない。

福島県浪江町では、「福島水素エネルギー研究フィールド」に建設された10MWの太陽光発電設備から得られる水素を有効活用する仕組みをつくることを目的として、環境省の委託事業として、既設の太陽光発電所の電力でつくった水素を、地域で有効に活用する水素サプライチェーンの実証事業を進めている。具体的には、地域の複数施設に設置した燃料電池と燃料電池自動車（FCV）の水素ステーションをつなぐ水素サプライチェーンを最適化することを次のターゲットにしている。図-10に福島県浪江町における水素利活用実証の概要を示す。

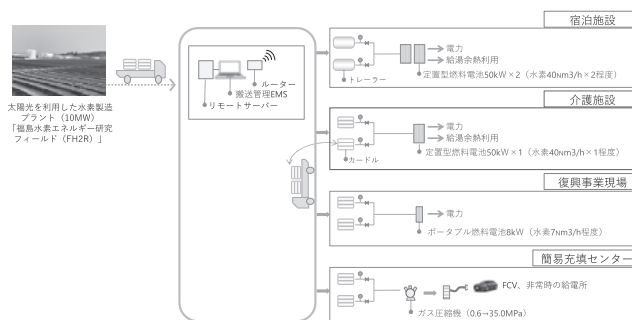


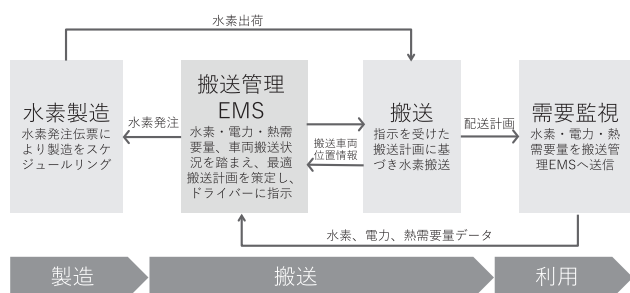
図-10 福島県浪江町における水素利活用実証の概要

(2) 最適搬送管理システム

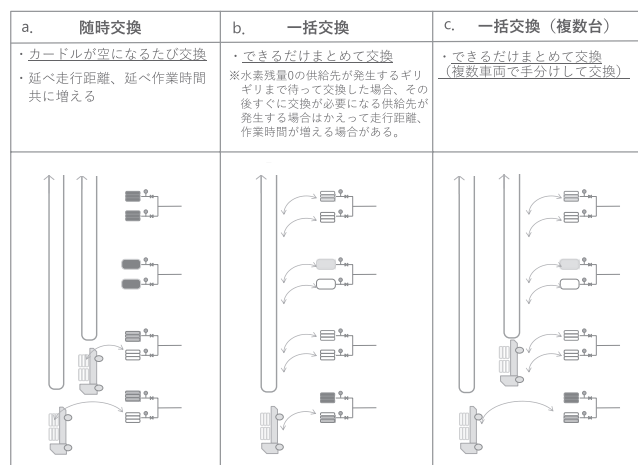
水素サプライチェーンを最適化する仕組みとして、水素の需給量、搬送状況を考慮した最適搬送管理システムを浪江町の水素事業プラットフォームとして構築し、水素サプライチェーン全体のマネジメント最適化を目指している。この最適搬送管理システムを活用して、効率的かつ効果的に搬送するためのダイアグラム

をつくり、人件費や燃料代など、搬送にかかる費用の削減を図るのが狙いである。図—11 に最適搬送管理システムの基本構成を示す。

カードルで水素を搬送する場合、供給先のカードルの水素残量が少なくなるたびに随時交換する方法、1台のトラックで複数のカードルをまとめて一括交換する方法、あるいは複数台のトラックで手分けして交換する方法など、様々な交換パターンがあり、供給先までの距離や供給量によっては、複数台での複雑な運用が必要となる場合もあり得る。図—12 に最適な搬送パターンの選択肢を示す。



図—11 最適搬送管理システムの基本構成



図—12 最適な搬送パターンの選択肢

このため、搬送を最適化するためには、下記の機能を備えることが必要と考えられる。

①水素残量予測機能

各拠点の電力需要、水素消費傾向を踏まえ、カードルの水素残量を予測できる機能

②最適デリバリー計画機能

各拠点での水素残量、水素カードルの位置情報、搬送経路を基に最適デリバリーを計画できる機能

③計画変更機能

需要先の状況により計画を変更できる機能

④リアルタイム伝達機能

搬送車両のドライバに計画変更をリアルタイムに伝

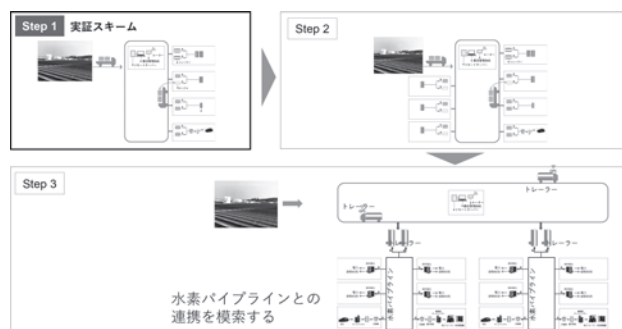
達できる機能

最適化の計算では、単位水素当りの搬送費を最小化（コスト・ミニマム）する評価関数と、CO₂の排出量を最小化（カーボン・ミニマム）する評価関数を組み合わせ、最適解を出し、最適な搬送パターンを導き出した。

水素カードルを積んだ車両の位置情報は、車両に搭載したポータブルなGPSトラッカーから送信される緯度経度の情報を車両マーカーとして確認できる仕組みになっている。

(3) 今後の展望

プラットフォームを利用しながら、小規模な水素利用から着手し、順次、サプライチェーンのネットワークを広げていく。搬送はカードルからトレーラーへと規模を拡大し、最終的にはパイプラインを敷設して効率良く水素供給することも視野に入れている。図—13 に搬送規模拡大のイメージを示す。



図—13 搬送規模拡大のイメージ

6. 海外における地熱電力によるグリーン水素製造事業

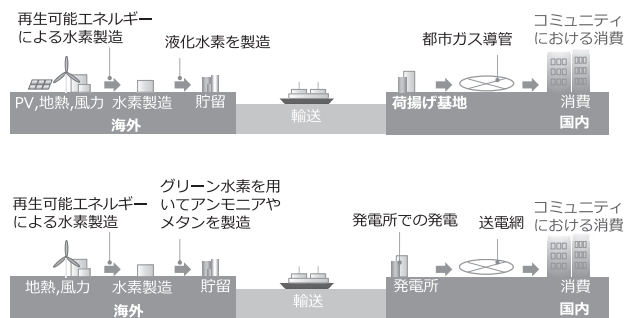
(1) 概要

国内の水素サプライチェーンだけでなく国際水素サプライチェーンを創出することが、我が国のカーボンニュートラル達成のためには、喫緊の課題となっている。図—14 に国際水素サプライチェーンのイメージを示す。

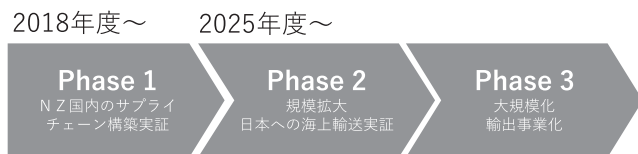
現在、ニュージーランドにおいて、地熱発電で得られた電力によるグリーン水素製造事業に取り組んでいる。図—15 に実証ロードマップを示す。

(2) 実証の計画

現在は、Phase1の段階で、ニュージーランド国内でのグリーン水素サプライチェーン構築を目指し、実証事業を進めている。2021年3月より、オークラン



図一 14 国際水素サプライチェーンのイメージ



図一 15 実証ロードマップ

ドとウェリントンの中間に位置するタウポのグリーン水素製造プラント（1.5 MW 規模）で水素製造を開始した。Phase2 では日本への海上輸送の実証，Phase3 では輸出の事業化を計画している。写真一 3 にタウポのグリーン実証プラントを示す。

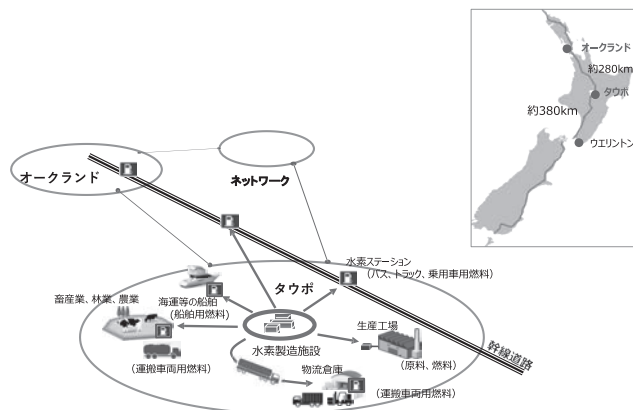
年間 100 t 程度のグリーン水素の製造からニュージーランド国内における流通まで、一連のサプライチェーン構築のための社会実装を実施し、各段階におけるノウハウを蓄積していく。また、この社会実装を通じて、サプライチェーンの経済面や環境面の評価を行うとともに、運用マネジメントシステムの開発を行いながら、将来の事業化の可能性を検討する。図一 16 にサプライチェーン構築のための社会実装イメージを示す。



写真一 3 タウポのグリーン水素製造プラント

(3) 今後の展望

ニュージーランドは、再エネのポテンシャルが高く、すでに国内電力需要の約 8 割が再エネ由来電力で賄われている。地熱発電による水素の製造コストも日本よりかなり低く、将来的には、Phase2 の段階で規



図一 16 サプライチェーン構築のための社会実装イメージ

模を拡大しタンカーによる海外輸送の実証に取り組みながら、Phase3 の段階で、タンカーで日本への輸出をすることも視野に入れている。

7. 可搬形 FC 発電機の実証

(1) 概要

燃料電池を使った発電装置は、様々なメーカーにより開発されているが、その大部分は建築設備の一部に設置して使用される定置式である。

これに対して、可搬形 FC 発電機は、エンジン式の発電機と同様、比較的移動が容易で、建設現場、被災地、イベント会場など、電気の供給が無い場所でも使用できるよう、コンパクトで機動性に優れた設計になっている。発電部には、FC フォークリフトの燃料電池システムを可搬形発電機用にカスタマイズしたシステムを搭載し、燃料電池から出力される直流電力は、新たに開発された燃料電池用パワコンで、交流電力に変換される。

この可搬形 FC 発電機は、環境省の委託事業^{*}で、デンヨーが技術開発を進められているもので、燃料電池システムは豊田自動織機が供給し、大林組は、燃料電池式可搬形発電装置の技術開発・実証の検討会の委員として連携・協働し、実証のサポートをしている。図一 17 に可搬形 FC 発電機の姿図を、表一 2 に可搬形 FC 発電機の基本スペックを示す。

(2) 実証試験

大林組では、工事現場における可搬形 FC 発電機の使用を具現化するため、東日本ロボティクスセンターで、実際の使用に近い状況をつくり、ベビーコンプレッサ、電動チェーンブロック、シリンダーライト、水銀灯、LED 投光器、ドリル、サンダー、扇風機、スポットクーラー、溶接機、水中ポンプ、エアコンなど、建



図—17 可搬形 FC 発電機姿図

表—2 可搬形 FC 発電機の基本スペック

発電出力	電力	7.0 kVA
	電圧	100/200 V
	電流	35.0 A×2/35.0 A
	周波数	50、60 Hz 切替
	力率	1.0
	相数	単相 3 線式
水素ガス	供給方法	発電装置本体とは別に用意する 14.7MPa または 19.6MPa の容器から減圧して供給する
	供給圧力	90 kPa
	純度	99.97 %
寸法・質量	外形寸法	L:1,800 mm、W:900 mm、H:1,500 mm
	整備質量	950 kg

※ CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業

設現場で一般的に使われる機器を動作させ、負荷機器への影響を検証している。実証を通じて、開発にあたっての課題を抽出し、関係者で整理しながら、開発の方向性を確認している。なお、福島県浪江町で環境省から受託している実証事業への寒冷地での採用に向けた検証も行っている。

(3) ゼロエミッションと作業環境の向上

低騒音で発電可能な可搬形 FC 発電機は、夜間工事あるいは住宅地、病院周辺等の工事に適している。また、発電時に CO₂ や有害物質を排出しないことから、作業環境が良く、屋内工事で排気ガスがこもることも無い。

先に説明した大分県九重町の地熱発電水素製造プラントの工事現場では、試運転調整段階で製造したグリーン水素を、少し離れた場所に水素ボンベで運搬し、現場事務所の電源を可搬形 FC 発電機で供給する実証も行った。それまで使用していたエンジン発電機に比べて環境良好性を実感したところである。

(4) 今後の展開

今後も、工事条件の整理をしながら、可搬形 FC 発電機の普及に向けた開発につながる実証も行っていきたい。

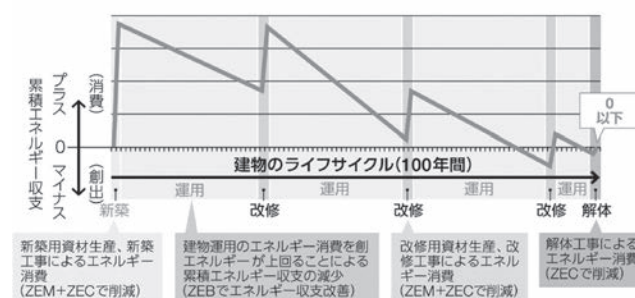
また、今後 FC 発電機を建設重機へ搭載するための技術的要件や法的要件を整理して、建設工事段階の CO₂ 排出量の削減に寄与する方策を検討していきたい。

8. 水素を活用した LCZ（ライフサイクル ZEB）に向けて

昨今、建物のエネルギー消費量を省エネで低減し、残りを太陽光発電等の再エネで相殺する ZEB（ゼロエネルギービル）への取り組みが活発化している。現在、材料調達のゼロエネルギー化「ZEM（ゼロ・エネルギー・マテリアル）」、工事段階のゼロエネルギー化「ZEC（ネット・ゼロ・エネルギー・コンストラクション）」を推進しており、2050 年の実現を目指し、図—18 に示す概念として、建物の材料調達から建設、運用、解体に至る生涯にわたるエネルギー収支をゼロにする「LCZ: ライフサイクル ZEB」を提案している。

これまで建設段階の ZEC は、省エネ施工やバイオ燃料の利用、またグリーン電力の購入等で進めてきたが、今後は工事現場の仮設電源の水素化、重機への FC 電源の搭載も選択肢として、グリーン水素の「使う」を拡大していきたい。

ライフサイクルにわたるエネルギー消費のイメージ



図—18 ライフサイクル ZEB

9. おわりに

水素は、液化天然ガス（LNG）より、解決すべき課題が多いにも関わらず、その商用化プロセスは、LNG と同様となるのではないかと考えられる。LNG は、当初、熱量あたりの価格が原油と比べて割高であったが、優遇措置や制度設計により単価を下げる努力を続ける中、石油危機により原油が高騰したこともあり、石油より環境性と経済性の両方で優位なエネルギーとなった。

水素も、税制優遇、カーボンプライシング、排出規制などによって、他のエネルギーに対して競争力が高まり、商業ベースに乗る可能性が高いと考えられる。再エネと親和性の高い水素の本格利用に向け、国内外において、今後も技術的課題、経済的課題の解決を目指していく。

《参考文献》

1) グリーン水素の定義

CertifHy 「CertifHy- Developing a European Framework for the generation of guarantees of origin for green hydrogen」

【筆者紹介】

島 潔 (しま きよし)

(株)大林組 技術本部

スマートエネルギー・ソリューション部
部長



油島 栄蔵 (ゆしま えいぞう)

(株)大林組 技術本部

技術ソリューション部
副部長



伊藤 剛 (いとう つよし)

(株)大林組 技術本部

統括部長

