

水素エネルギー関連技術の動向と東芝の取組み

Trends in Technologies Related to Hydrogen Energy and Toshiba's Approach

大田 裕之 中島 良

■ OTA Hiroyuki

■ NAKAJIMA Ryo

「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が2014年6月に策定され、水素社会の実現に向けたわが国の動きが加速している。

東芝はこれまで、1960年代初頭に研究開発に着手した燃料電池をはじめとして、水素製造・貯蔵技術や、水素を利活用するエネルギーマネジメントシステムH₂EMS™などを開発してきている。2015年にはこれらの技術を組み合わせて、再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）由来の水素（再エネ水素）を利活用する、地産地消型の自立型エネルギー供給システムH₂One™を製品化した。また、水素サプライチェーンの実証試験や、高温水蒸気電解（電気分解）による高効率の水素製造装置を利用する大容量の水素電力貯蔵システムH₂Omega™の開発を進めている。当社は、水素社会の実現に貢献するため、これらソリューションの市場展開を推進している。

A movement toward the realization of a hydrogen society has recently been progressing in Japan in line with the "Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells" compiled by the government in June 2014.

Toshiba has already developed various technologies for hydrogen energy. These include fuel cells, an area in which we have been conducting research and development since the early 1960s, hydrogen production and storage technologies, and a hydrogen energy management system for the effective utilization of hydrogen called H₂EMS™. Combining these technologies, we released H₂One™, a hydrogen-based autonomous energy supply system that produces hydrogen using renewable energy and utilizes the produced hydrogen as a fuel for power generation, in 2015. We are also promoting demonstration tests of the hydrogen supply chain and the development of H₂Omega™, a high-efficiency large-scale hydrogen energy storage system applying a high-temperature steam electrolysis technology. We are making efforts to contribute to the realization of a hydrogen society through the market deployment of these solutions.

水素社会に関する動向と課題

昨今、水素や燃料電池関係のニュースが連日のように報道され、水素社会に関する世間の注目度が高まっている。水素は、電力や、化石燃料などの一次エネルギー源から、各種の方式で製造でき、また貯蔵や輸送が可能である（[囲み記事参照](#)）。このため、発電や、モビリティ（自動車やフォークリフトなどの移動体）、エネルギー貯蔵、ヘルスケアなど様々な利活用に適した二次エネルギーである。クリーンなイメージや、新しさ、効率の高さなどへの期待が、注目度の高さに表れていると思われる。

水素社会への取組みは古くから世界各国で進められてきており、特にわが国では、世界に先駆けて2009年に商品化された家庭用燃料電池エネファームが既に国内で15万台以上普及していることや、2014年から一般用がリリースされ

た燃料電池自動車（FCV）とそれに合わせた水素ステーションの設置（2015年度末で約80か所）など、水素社会の形成に向けた動きが加速してきている。

政府の動きとしては、2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」（第四次）⁽¹⁾に、「“水素社会”の実現に向けた取組の加速」と明記し、同年6月には、経済産業省が「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定した。このロードマップでは、至近のエネファームやFCVの導入拡大（フェーズ1）に始まり、大規模な水素供給システムの確立（フェーズ2）、トータルでのCO₂（二酸化炭素）フリー水素供給システムの確立（フェーズ3）と、2040年頃までを見据えた長期の方向性が示された。その後、このロードマップは2016年3月に改訂され、FCVや水素ステーションの導入目標値が設定されている。改訂されたロードマップの概要を図1に示す⁽²⁾。また、環

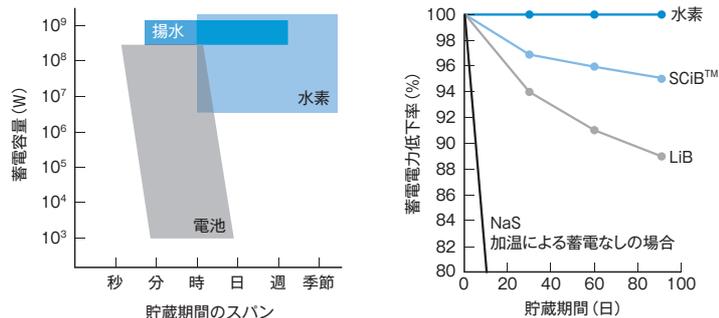
境省では2015年度から「地域連携・低炭素水素技術実証事業」がスタートし、五つのプロジェクトが採択されて水素技術の実証が全国各地で着手された。東京都では、2020年の東京オリンピック・パラリンピックをわが国の水素技術を世界に発信する場と捉え、街づくりや都市交通整備に水素を利活用する計画が「水素社会の実現に向けた東京推進会議」で進められている。更に、2015年にパリで開催されたCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）首脳会合における安倍内閣総理大臣のスピーチの中で、気候変動対策と経済成長を両立させる鍵は、革新的技術の開発であると述べられ、CO₂フリー社会に向けた水素の製造・貯蔵・輸送技術が挙げられた。

このように、国などが主導する形で水素社会の構築に向けた動きが活発であるが、水素が既存のエネルギーシステム

水素によるエネルギー貯蔵の可能性

電気はエネルギーとして便利に使えるが、需要と供給のバランスをとる必要があり、蓄電池のようなエネルギー貯蔵のための機器や装置が必要である。携帯電話やモバイルパソコンなど小規模の蓄電装置としてはリチウムイオン二次電池 (LiB, 当社は SCiB™ として商品化) が一般的であるが、自然放電してしまうため、長期間の蓄エネルギーには適さない。規模が大きい蓄エネルギー装置としては、例えば深夜電力で水をくみ上げておき、ためておいた水で昼間のピーク時に水力発電をする揚水発電システムがある。また、メガソーラー発電所などではナトリウム硫黄電池 (NaS 電池) といった蓄電装置が実用化されているが、いずれも長期間にわたってエネルギーを貯蔵することには適さない。水素は、タンクや吸蔵合金などで貯蔵する際、漏えいさえしなければ季節間をまたぐ長期であってもエネルギー貯蔵ができる媒体である。特に、再エネのように変動が大きい発電システムの電気を有効に使うには、水素を蓄エネルギー媒体とすると効率的な蓄電装置を実現できる (図 A)。

今後、わが国では再エネの全発電に占める割合を大幅に引き上げる計画が政府方針として示されている。2030年に全発電量の24%を再エネで賄うためには、太陽光発電や風力発電だけでも、59 GW 程度の



(a) エネルギー貯蔵システムに要求される能力* (b) 蓄電電力の低下
* International Energy Agency (IEA) 「Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells」⁹⁾に基づいて作成

図 A. 水素電力貯蔵の特長

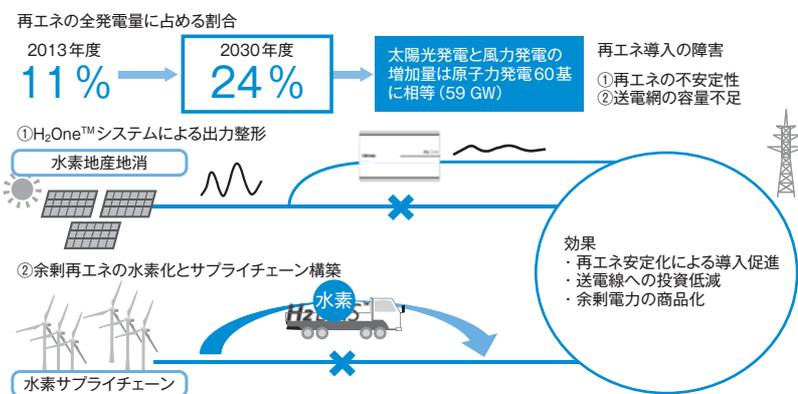
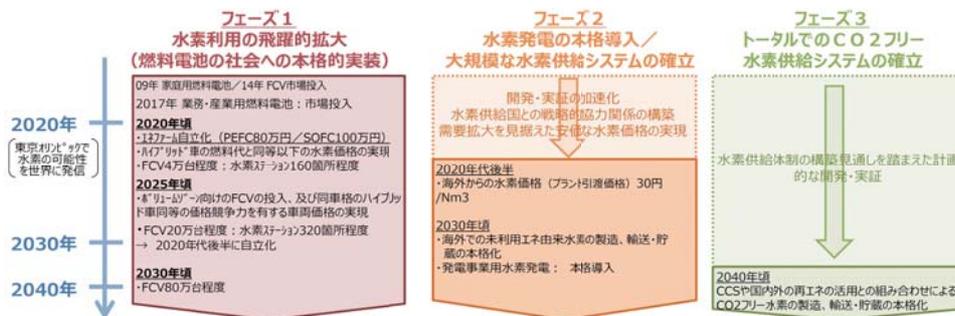


図 B. 再エネの導入を促進する水素ソリューション

設備導入が必要である。この際、再エネの不安定性の克服、更に送電網の増強に投資をしないと有効なエネルギーとしての活用が難しくなる。不安定な再エネを、いったん水電解で水素に変換し、出力電力を安定化して送電系統へ流す、又は、余剰電力で

製造した水素を需要地まで水素のまま運ぶサプライチェーンを構築することで、この課題解決に貢献できる。その結果、再エネ導入量の増大や、送電系統への投資削減などのメリットを得られる (図 B)。



出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略協議会「水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会の実現に向けた取組の加速～」¹⁰⁾

図 1. 経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」の概要 — 2014年6月に策定され2016年3月に改訂されたもので、2040年頃までを見据えた長期の方向性が示されている。

Outline of Japan's Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells

の中で利活用されるようになるためには、コストの面で十分な合理性を持つことが必要である。先行している燃料電池の技術でも、まだ本格的に大量生産される段階にはないため、低コスト化や高性能化などを進める必要がある。市場が拡大するにつれ量産効果でコスト低減は進むと期待されるが、逆に、先にコストが低減されなければ事業として量産するのは難しい。このような、新技術には付き物の、商品化へ向けたジレンマを克服していくことが、水素エネルギー関連技術についての大きな課題である。また、普及し始めたエネファームやFCVでも、燃料電池の燃料としては水素が使われるが、この水素を得るためには化石燃料が使われるケースが大半である。すなわち、エネファームの場合は天然ガス（メタンガスが主成分）か液化石油ガス（LPガス）を改質して水素を取り出す。水素ステーションの水素も、ソーダ産業での副生水素を用いたり、化石燃料の改質による水素を輸送したりするケースが多く、燃料電池の反応自体は水素と酸素だけによる水しか排出されないクリーンなエネルギーであるものの、水素を取り出す別の場所ではCO₂を排出している。経済産業省のフェーズ3で目指しているトータルでのCO₂フリー水素供給とは、例えば再エネの電力により水電解で水素を製造するようなケースを想定しており、これこそ真にクリーンな水素社会のエネルギーにふさわしいものである。コスト面でのハードルは高いものの、化石燃料の資源に乏しいわが国にとって、エネルギーセキュリティの確保や、CO₂排出量削減で目指すべき姿であると考えている。東芝は、このCO₂フリー水素を利活用するソリューションを早期に提供することを目指して、技術開発や商品開発に注力している。以下では、水素の利活用に関する当社のような取り組みについて述べる。

東芝の水素エネルギー関連技術

ここでは、当社が保有する水素エネルギー関連技術やソリューションの全体像について述べる。

水素をエネルギーとして活用する際には“製造（つくる）”、“貯蔵（ためる）”、“利活用（つかう）”、及びこれら全体を統合して“制御する”エネルギーマネジメントが重要と考えられる。それぞれについて当社が持つ関連技術（図2）を、以下に述べる。

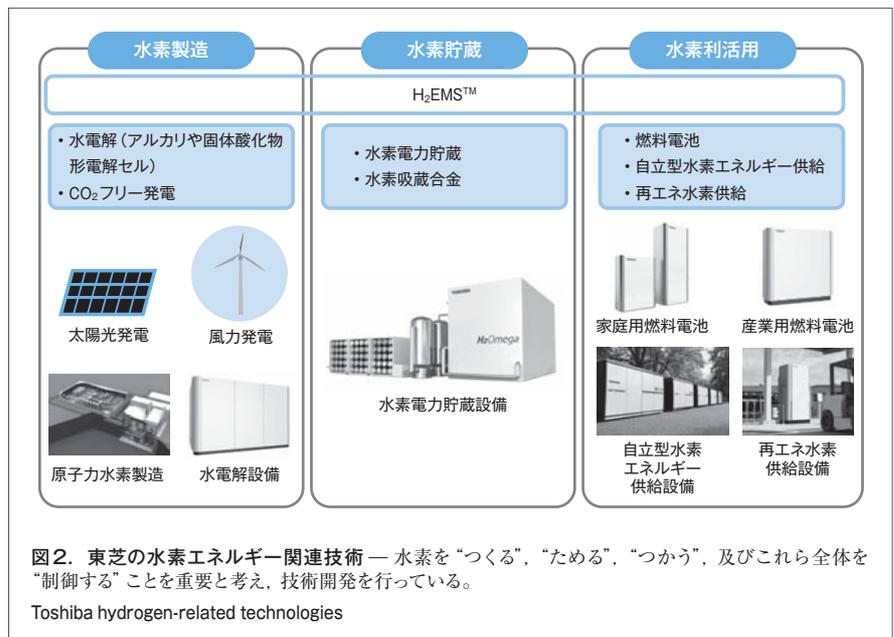
■水素製造（つくる）

水素は、鉄鋼や苛性ソーダなど他の製造プロセスからの副生や、化石燃料改質、水電解、バイオマス由来、熱分解、光触媒など、様々な手法で製造できる。当社は、CO₂フリーの水素製造技術で近い将来大きな市場があると考えられる電解に注目しており、中でも高効率化が期待できる固体酸化物形電解セルの開発に注力している。2013年度からは経済産業省の未来開拓研究制度の中で、固体酸化物形電解セル技術とそれ

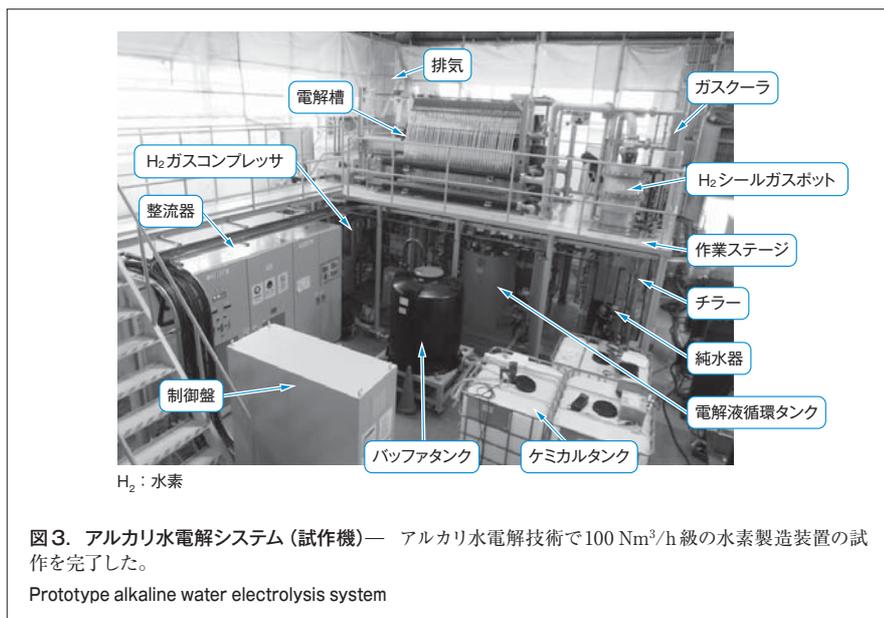
を応用した電池並みに高い充放電率が得られる水素電力貯蔵システムの開発を受託し^(注1)、研究開発を継続している⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。現在入力電力が10 kW級の固体酸化物形電解セルスタックによる実験で、スタックの水素製造原単位が3.1 kWh/Nm³^(注2)と高性能の結果を得ている（この特集のp.41-45参照）。

この他の電解の技術としてはアルカリ水電解や固体高分子形水電解装置（PEMEC）による水素製造技術が従来技術として知られているが、水素社会の構築に向けては大容量化や低コスト化が必要と考えられている。当社は、既にアルカリ水電解技術で100 Nm³/h級の試作を完了しており（図3）、フィールドでの実証試験の着手を計画している。

また、CO₂フリー水素の電力源となる再エネによる発電システムについては、メガソーラーシステムから家庭用までの幅広いラインアップの太陽光発電や風力発電、更には世界中で展開している水力発電や地熱発電など、幅広い技術と製品提供の実績を持っている。



(注1) 経済産業省「平成25年度再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」で受託。現在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）平成26年度委託事業「水素利用等先導研究開発事業」の「高効率水素製造技術の研究」に引き継がれ、当社は引き続き受託している。
 (注2) Nm³は0℃、1気圧の状態に換算した体積。



■水素貯蔵(ためる)

気体としては密度の低い水素を大量に貯蔵するためには、一般的にはFCVのように高圧ガス化することや、 -253°C の極低温で液化する方法などが採用されている。当社は水素を吸蔵する合金を開発しており、自立型のエネルギー供給システム $\text{H}_2\text{One}^{\text{TM}}$ で既に実用化している(同p.37-40参照)。当社における水素吸蔵合金の開発は古く、1980年代から水素吸蔵合金を電池として利用する研究を行い、2000年には超格子構造を持ったまったく新しい水素吸蔵合金であるLaMgNi(ランタン-マグネシウム-ニッケル)系“超格子合金”の合成に成功し、これは現在のニッケル水素電池に広く採用されている。電池以外の水素吸蔵合金の用途として、水素貯蔵タンクが有望である。水素吸蔵合金は体積当たりの水素貯蔵量が多く、また吸蔵後は水素化物へと変化するため、低圧においても水素を高密度で安全にためることができる魅力的な材料である。水素エネルギーシステムには非常に適していると言える。

その他水素をエネルギーとして大容量に貯蔵するシステムとして、高効率で水素を製造できる前述の固体酸化物形

電解セルと、その逆反応である固体酸化物形燃料電池の発電を組み合わせた水素電力貯蔵システムを開発している。電力をいったん水素に変換し、更に燃料電池で電気に戻すと、機器それぞれの損失の積で低効率となる懸念があるが、 700°C 以上の高温作動である固体酸化物形電解セルを用いると、発熱反応である発電によって固体酸化物形燃料電池から発生した熱を、吸熱反応である固体酸化物形電解セルでの電解に有効活用することで、高い充放電効率を達成できるポテンシャルを持っている(同p.41-45参照)。

■水素利活用(つかう)

水素利活用の代表的な技術は、エネファームやFCVで利用される燃料電池である。これは水素と酸素の電気化学反応により電気と熱を発生させる装置で、内燃機関などよりも小型で高い効率が得られる利点があり、様々な用途が考えられている。固体高分子形燃料電池(PEFC)は作動温度が比較的低く、FCV用やエネファームに適用されている。固体酸化物形燃料電池は作動温度が $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ 程度ともっとも高く、家庭用から大容量機まで様々な適用先がある。モビリティ用の燃料電池では、作動

温度が比較的低温のため起動性に優れた純水素燃料のPEFCシステムが使われるケースが多い。家庭用のコージェネレーションシステムであるエネファームはPEFC方式が2009年に最初に商品化され、次いで固体酸化物形燃料電池方式が2011年に商品化された。

当社は1960年代に燃料電池の技術開発に着手し、これまでも11 MWの大型燃料電池の製作や、200 kWのオンサイト型コージェネレーションシステムの商品化などを行ってきた。当社のPEFC方式のエネファームは2009年に商品化して以来、国内出荷台数が累積で7万台を超え、普及が更に拡大している。ここで培った高性能化、高耐久化、及び低コスト化の技術を、純水素燃料のPEFCシステムにも適用し、700 W、3.5 kW、及び100 kWの、家庭用から業務用、産業用までのラインアップとして商用化を進めている(同p.46-50参照)。

■水素エネルギーマネジメントシステム $\text{H}_2\text{EMS}^{\text{TM}}$

前章で述べた、製造から利活用に至る水素エネルギー関連技術全体を、システムとして適切に制御運用するには、高度なエネルギーマネジメントシステムが必要になる。一例として、再エネのように天候状況に伴い出力電力が大きく変動するエネルギーを水素のシステムで利用するには、その貯蔵・利用技術が鍵となっている。その利活用の仕方のイメージを図4に示す。例えば太陽光発電システムだけを装備した場合、電力需要と太陽光発電による発電量には不一致が生じるので、太陽光発電による電力をいったんエネルギー貯蔵する必要がある。一般には蓄電池が利用されているが、蓄電池の利用に加えて、水素に変換することで、1週間以上の長期にわたってもエネルギーを保存でき、かつ負荷に応じて出力することができる。水素としてエネルギーを貯蔵する大きなメリットは、蓄電池と異なり、省スペースでかつ大容量の電力をためることがで

き、更に水素の持つエネルギーは減衰しないことから、長期間にわたって貯蔵できる点にある。リゾートホテルに適用した例では、夏季の豊富な日照による太陽光発電のエネルギーを水素で貯蔵し、冬季に燃料電池で発電して利用する季節間の“エネルギータイムシフト™”を実現している。

当社が考える水素を用いたエネルギーの貯蔵及び利用のコンセプトは、次の三つの要素から構成されている。

- (1) 再エネの直接利用
- (2) 蓄電池による電力の貯蔵と利用
- (3) 水素による電力の貯蔵と利用

ここで蓄電池は、高い応答性と高出力という特長を生かし、水素貯蔵を補助する。これらの構成要素に対して、水素エネルギーマネジメントシステムが需要者の電力消費傾向や天気予報などを基に全体の最適制御を行う。

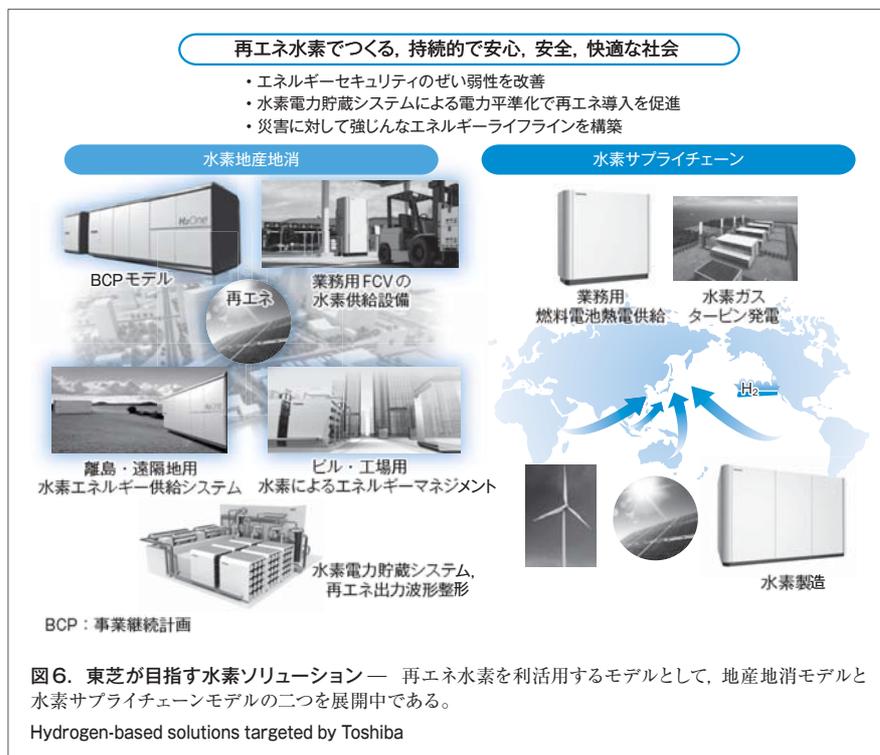
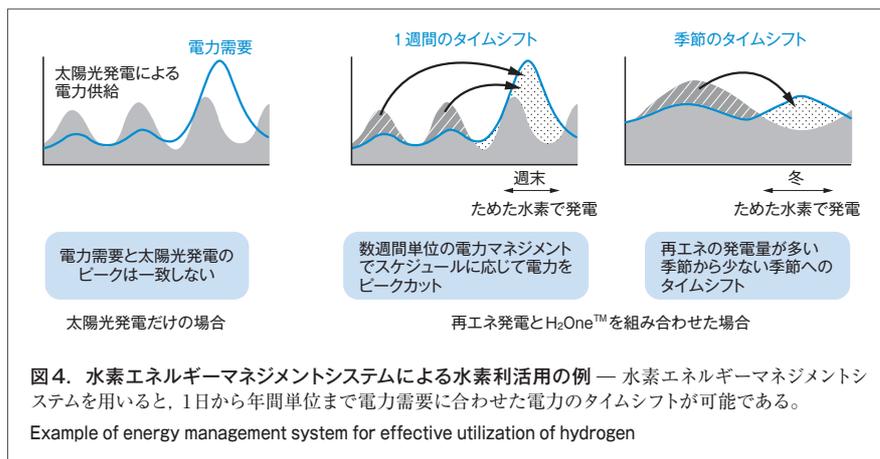
このような背景の下、当社は、2015年4月に府中事業所内に水素エネルギー研究開発センターを開所し(図5)、再エネを用いて水素を“つくる”、“ためる”、“つかう”という一連の機能を検証するとともに、再エネを計画的かつ効率的に運用する、当社の水素エネルギーマネジメントシステム H₂EMS™の開発と実証研究を行っている(同p.51-55参照)。

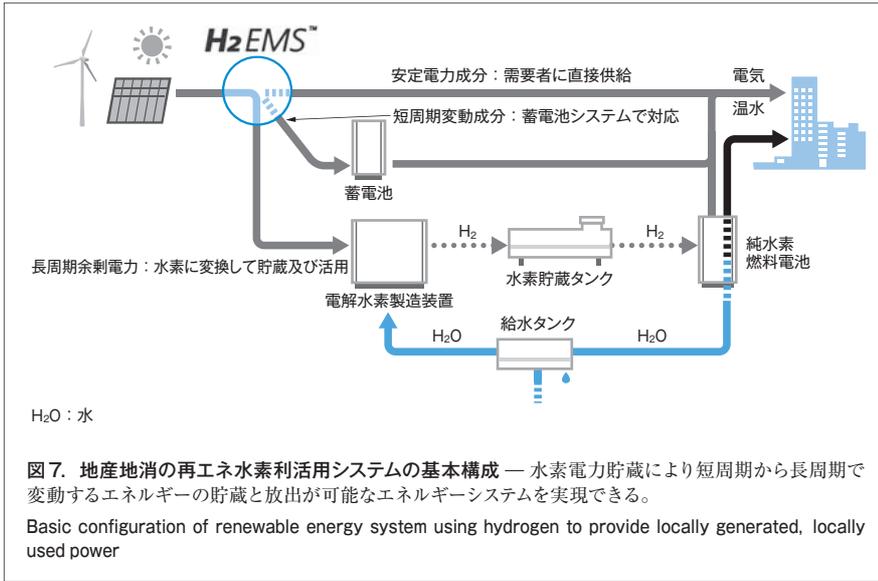
水素を利活用するソリューション

当社が保有する技術を統合し、再エネ水素を利活用するソリューションとして、地産地消モデルと水素サプライチェーンモデルの二つを展開中であり、一部は既に商品化したものや、地域連携による実証試験に着手したものがある(図6)。

■地産地消モデル

これは文字どおり、再エネをその場で水素に変換し、安定したエネルギーとしてその場で利活用する地産地消のソリューションである。2015年4月にはこの商品として自立型エネルギー供給システム H₂One™を商品化した⁽⁵⁾。その基





本構成を図7に示す。

再エネで発電した電気を直接利用するだけでなく、余剰の電力を蓄電池へ貯蔵したり、水電解で水素に変換したりする。その水素をタンクに貯蔵し、需要に応じて水素を燃料電池へ送り、電気と温水を供給できるシステムである。また、これら構成装置の仕様はユーザーごとの利用状況に応じたカスタマイズが可能である。

2015年4月に神奈川県川崎市臨海部の公共施設 川崎市港湾振興会館（川崎マリエン）及び東扇島中公園内にて実証運転を開始して以降、H₂One™は、神奈川県横浜市港湾局の横浜港流通センターや、長崎県佐世保市のハウステンボス^(注)の“変なホテル^(注)”に導入された。また東日本旅客鉄道(株)の南武線 武蔵溝ノ口駅にも2016年度中に設置されることが決定している。

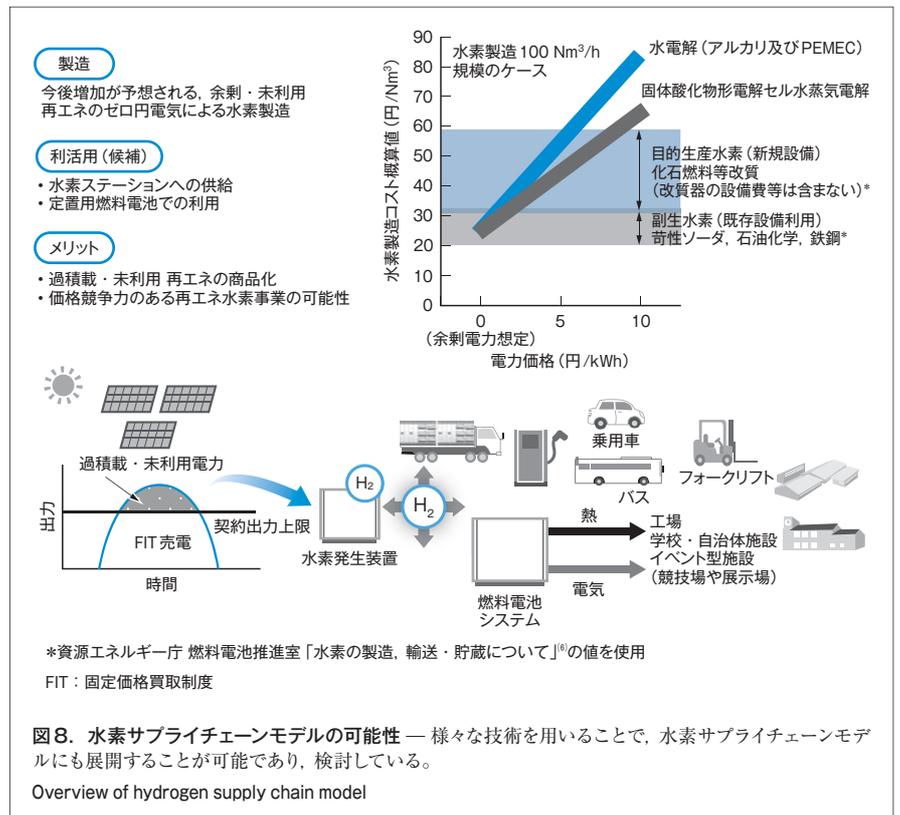
この地産地消モデルは、今後様々な適用先を検討しており、大容量化も進めている。事業所への適用を図ったモデルでは、再エネで得られたCO₂フリーの水素を、燃料電池フォークリフトなどのモビリティ用燃料として供給でき、自立型エネルギー供給システムとして工場や、港湾、空港などの様々な事業所に適用できる。離島への適用を図ったモデルでは、燃料油の輸送などのために高

いコストが掛かるディーゼル発電に依存している離島において、地産地消でエネルギー供給を自立させることができ、台風や地震などの災害時にも貯蔵した水素で対応できるようになる。その他にも、都市部のビルや工場のエネルギー効率化や、CO₂フリー化、緊急時のエネルギー供給源などとして、広く展開を進

めていく。

■水素サプライチェーンモデル

一方、当社は、エネルギーとしての水素を燃料として輸送することで、製造地とは別の場所で利活用する、水素サプライチェーンについても検討を進めている(図8)。これは地域に偏在する余剰及び未利用の再エネを、いったん水素の形に変換して需要地まで輸送し、FCVや定置用燃料電池などで利活用する形態である。電解による水素のコストは、電解装置の効率と電力の価格の積で決まるが、未利用の電気(ゼロ円電気)を水素として有効に活用できれば、コスト面での合理性が得られる。将来的には、再エネが豊富な海外で低コストの水素を大量に製造し、わが国に輸送して大型の水素発電システムで利用することも考えられる。これは、現在の天然ガスが、液化天然ガス(LNG)として中近東などからタンカーでわが国に運ばれて、大型火力発電所で燃料として使われている形態の水素版と言える。これ



を実現するには、水素製造から利活用に至る水素エネルギー関連技術のいっそうの大容量化、高効率化、及び低コスト化が必要になってくる。当社は環境省の「地域連携・低炭素水素技術実証事業」に参画し、例えば北海道 白糠群 白糠町の山間部にある庶路ダムに小水力発電所を設置し、ここで製造した水素を町なかの温水プールなど複数の業務用施設へ輸送して定置用の燃料電池で発電や温水供給に利用する5か年計画の実証事業を主導している。

今後の展望

当社は、再エネ由来によるCO₂フリーでクリーンな水素を利活用する各種の技術開発、実証試験、及び商品化を進めている。わが国がロードマップで描いている本格的な水素社会の実現に向けては、大規模な社会インフラの整備により、水素サプライチェーンを整備して、エネルギーコストを従来の化石燃料並みに引き下げていく取組みが必要と思われる。一方で、地産地消型で水素を利活用し、新たな付加価値を持つクリーンエネルギー源としての利用の可能性を今すぐに社会へ提供していくことも意義あるものと考えている。

当社は、太陽光発電や風力・水力発電など再エネを利用した発電システムや、水電解装置、燃料電池など、水素社会の実現に必要な技術を社内に併せ持つ企業として、これらの技術を融合していく。更に将来技術として、人工光合成の技術により、再エネ水素から燃料や化学原料を合成する技術開発にも取り組んでいる（この特集のp.56-59参照）。

今後も水素の製造から利活用までをワンストップで実現する水素ソリューションの事業を積極的に展開していく。

文 献

- (1) 経済産業省. エネルギー基本計画. 経済産業省, 2014-04, 77p. <<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf>>, (参照 2016-07-12).
- (2) 水素・燃料電池戦略協議会. 水素・燃料電池戦略ロードマップ ～水素社会の実現に向けた取組の加速～. 経済産業省, 2016-03, 69p. <<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>>, (参照 2016-07-12).
- (3) International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. IEA, 2015-06, 75p. <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>>, (accessed 2016-07-12).
- (4) 渡邊久夫 他. 再生可能エネルギーを活用する水素電力貯蔵システム. 東芝レビュー, **68**, 7, 2013, p.35-38.
- (5) 吉野正人 他. 高効率な水素電力貯蔵システム. 東芝レビュー, **70**, 5, 2015, p.8-11.

- (6) 資源エネルギー庁 燃料電池推進室. “水素の製造、輸送・貯蔵について”. 第5回 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ. 2014-04, 経済産業省. 2014, 資料2. <http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/005_02_00.pdf>, (参照 2016-07-12).

- ・ エネファームは、東京瓦斯(株)、大阪瓦斯(株)、及び新日本石油(株)の登録商標。
- ・ ハウステンボス、変なホテルは、ハウステンボス(株)の登録商標。



大田 裕之
OTA Hiroyuki

エネルギーシステムソリューション社 次世代エネルギー事業開発プロジェクトチームプロジェクトマネージャー。水素関連の事業開発に従事。日本原子力学会会員。

New Energy Solutions Project Team



中島 良
NAKAJIMA Ryo

エネルギーシステムソリューション社 次世代エネルギー事業開発プロジェクトチームサブプロジェクトマネージャー。水素、燃料電池の研究・開発及び事業開発に従事。日本機械学会、日本伝熱学会会員。

New Energy Solutions Project Team