

2014年7月14日 全10頁

# 水素社会の兆し 第5回

## 水素技術の現状と課題

環境調査部 主任研究員 大澤秀一

### [要約]

- 「水素」が新しいエネルギーとして一般市民に受け入れられるためには、基本的な水素の物性や燃料電池の発電原理、水素の供給連鎖（サプライチェーン）の各段階で使われる技術について、ある程度理解されることが必要だろう。また、国や事業者はそのことをできるだけ正確に伝える責任がある。
- 水素の安定供給（Energy Security）を第一とし、経済効率性（Economic Efficiency）の向上による低コストでの供給が可能と思われる方法は、今のところ、化石燃料を原料とする製造方法が多い。環境への適合（Environment）が図られる水素社会を実現するには、安価で高効率な水電解技術のイノベーションや、再生可能エネルギー及びCCSの導入拡大などが鍵になる。
- 我々は今、水素という新しいエネルギーを手に入れつつある。生活や産業活動で利用できるエネルギーの選択肢が広がり、これまで以上に効率的なエネルギー社会が構築されることに期待したい。

「水素」が新しいエネルギーとして一般市民に受け入れられるためには、基本的な水素の物性や燃料電池（以下、「FC」という。）の発電原理などについて、ある程度理解されることが必要であろう。また、国や事業者はそのことをできるだけ正確に伝える責任がある。本稿では、水素の供給連鎖（サプライチェーン）である、「製造」、「貯蔵・輸送」、「利用」の各段階で、押さえておくべき基本的な技術内容を紹介しながら、水素技術の現状と課題を考える。

### 1. そもそも水素とは

サプライチェーンに入る前に、そもそも水素とは何か、また人類がどのように利用してきたのかを簡単にまとめておく。水素は太陽系存在度（太陽系形成時の物質の元素存在度）がヘリウムとともに著しく大きい元素で、その大半は純粋な水素分子（ $H_2$ ）や水素原子（ $H$ ）あるいは水素イオン（ $H^+$ ）として存在する。地球上では水素分子（水素ガス）が安定な状態なのだが、比重が空気のおよそ1/14しかなく、また沸点が約 $-253^{\circ}C$ と極端に低いために大気上方に拡散してしま

い、自然界に純粋な状態では存在しない<sup>1</sup>。地球上では水素の結合性の高さからそのほとんどが酸素と結合して水(H<sub>2</sub>O)、あるいは炭素などと結びついた有機物として存在している。そのため、我々が水素ガスを純粋な状態で利用するときは、水や有機物などの化合物を、熱や触媒などを使って分解して取り出す必要がある。

純粋な水素ガスは無色、無臭の気体で人体に無害であるが可燃性ガスである。空気中の濃度が爆発限界（空気中、20℃、1気圧の条件で約4%）を超えると、酸素と結合して爆発的な燃焼が起きる。ただし、小さくて軽く化学物質の中でも最大の漏れやすさを持つため、開放空間に漏れた場合はすぐに拡散してしまう。また、自然発火温度（空気中、1気圧）は527℃で、同温度が500℃のガソリンよりは発火しにくい性質を持っている。一方、2011年3月に東京電力福島第一原子力発電所の複数の原子炉建屋で発生した水素爆発のように、密閉された空間に水素ガスが蓄積すれば、危険な事態に至ることは免れない<sup>2</sup>。

このような物性を持つ水素ガスの製造や供給等に携わる事業者が順守しなければならない法律は、高圧ガス保安法（所管省庁は経済産業省）である。さらに、一般高圧ガス保安規則、容器保安規則、特定設備検査規則、コンビナート等保安規則等が省令等で定められている。水素に関する設備の所有に関しては都道府県知事の許可や届出が必要となっている。

水素ガスは酸素、窒素、アルゴンなどの産業ガスの代表種の一つとして、鉄鋼、化学、発電、エレクトロニクス、油脂、金属、ガラス、食品、医療など広範な産業分野で使用されてきた。国内の石油業界や化学業界等で年間に生産される量は150億Nm<sup>3</sup>程度で（Nm<sup>3</sup>（ノルマル立米）は、0℃、1気圧の標準状態の体積単位（立方メートル））、大部分は工業原料として自家消費されている<sup>3</sup>。このように水素は大量に製造・消費されているが、ほとんどが工業地域の中で扱われるため、一般市民の目に触れることはほとんどない。また、外販されている水素ガスは約3億Nm<sup>3</sup>強で、一部は、一般道路上をローリーやトラックで運ばれている。水素ガスが充填されたボンベは、高圧ガス保安法で容器の表面積の半分以上を赤色塗装することになっているので、一般市民でも区別がつく。

<sup>1</sup> 比重および沸点の数値は、一般社団法人 水素エネルギー協会を参照。

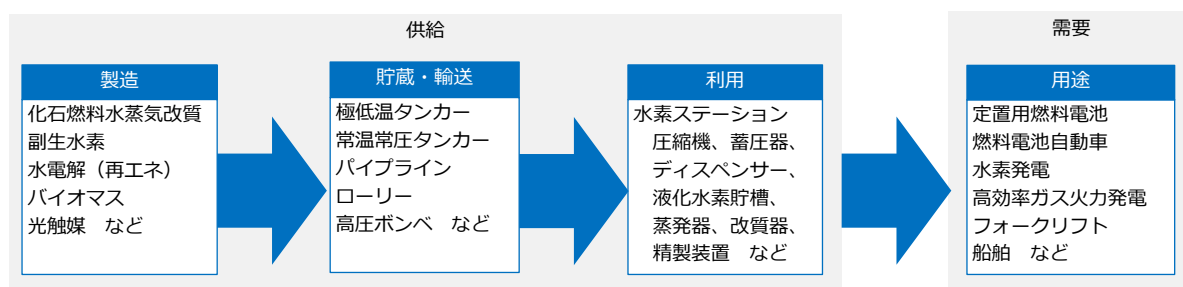
<sup>2</sup> 国会事故調 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会 報告書（平成24年7月5日）

<sup>3</sup> 経済産業省 水素・燃料電池協議会ワーキンググループ（第5回平成26年4月14日）の資料2 資源エネルギー庁「水素の製造、輸送・貯蔵について」

## 2. 「製造」の水素技術

水素のサプライチェーンは、「製造」、「貯蔵・輸送」、「利用」に分けられる（図表1）。本章から順に、基本的な技術内容を紹介しながら、水素技術の現状と課題を考えていく。

図表1 水素の供給連鎖（サプライチェーン）



（出所）大和総研作成

水や有機物などの化合物から水素を取り出す方法は何種類もある。この中から、水素の安定供給（Energy Security）を第一とし、経済効率性（Economic Efficiency）の向上による低コストでの供給が可能と思われる方法を紹介する。

家庭の定置用燃料電池（以下、「定置用FC」という。）や燃料電池自動車（以下、「FCV」という。）で利用されている水素は、天然ガス（主成分はメタンガス（ $\text{CH}_4$ ））や液化石油ガス（プロパン（ $\text{C}_3\text{H}_8$ ））やブタン（ $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ）等を圧縮した液）あるいはナフサ（粗製ガソリン）等から水素ガスを取り出して利用している。また一部、鉄鋼の製造過程で石炭を蒸し焼きにする際に発生する水素ガスを利用しているものもある。

メタンガスから水素ガスを取り出す主な方法は「水蒸気改質法」と呼ばれるもので、 $800^\circ\text{C}$ 前後に加熱した炉の中で、メタンガスと水蒸気をニッケル触媒に接触させて水素ガスを得る方法である。同時に二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）も発生する。メタンガスは全国の200以上の都市ガス事業者によって広範囲に安定供給されているため、家庭や事業所に水蒸気改質器を設置すれば、オンサイト（on site、現場）で簡単に水素ガスが調達できる方法である。

鉄（Fe）は鉄鉱石（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ や $\text{Fe}_3\text{O}_4$ など）から酸素を奪って作られる。酸素を奪うのはコークス（C）の役割だが、コークスは石炭を蒸し焼きにして作られる。蒸し焼きで発生するガス（コークス炉ガス）のおよそ55%は水素ガスで、残りはメタンガスや一酸化炭素（CO）などである<sup>4</sup>。水素ガスだけを選び分け、精製装置を通せば、純粋な水素ガスが得られる。製鉄所の目的は鉄を作ることなので、この水素ガスは「副生水素」などと呼ばれている。副生水素の総量は年間約70億 $\text{Nm}^3$ と推定されている。副生水素は捨てているわけではなく、鉄鉱石の還元材料や鉄鋼製品の加工原料に利用していたが、燃料電池の燃料として潜在需要が見込まれるので、有望な水素の供給源として注目されている。

<sup>4</sup> COGの構成比は、藤本 健一郎、鈴木 公仁、「製鉄副生ガスからの水素高度利用技術開発」、新日鉄技法 第391号、2011年、を参照。

安定供給力でみると、大規模な水素製造装置を持っている石油業界も有望視されている。精油所では原油の水素化精製や重油の水素化脱硫／水素化分解に大量の水素を使用しており、これらの需要をまかなうために、オフガス（精製装置等から発生する低沸点炭化水素、水素、硫化水素（ $H_2S$ ）等を含むガス）やプロパンガス、メタンガス等を原料に用いる水蒸気改質法による水素製造装置が設置されている。現在は自家需要分を製造しているが、稼働率を高めれば、年間約 64 億  $Nm^3$  を外部に供給することが可能と試算されている<sup>5</sup>。

以上の 3 つの製造方法に共通する課題は、製造時に  $CO_2$  を排出する環境性の低さである。国のエネルギー政策では環境への適合（Environment）を図らなければならいとされているため、対策が必要となる。一つの策として、発生する  $CO_2$  を回収して地中に貯留する  $CO_2$  回収・貯留技術（CCS） の開発が進められている。CCS は国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC） の報告書<sup>6</sup>でもその導入の重要性と必要性が認められている技術である。国内では 2020 年度までに実用化を検証するための実証試験が、日本に広く分布する新第三紀以降の帯水層を対象に苫小牧沖で実施されている<sup>7</sup>。ただし、 $CO_2$  を貯留するだけでは事業性が低く、貯留場所も限定されるため、本格導入には、長期にわたる野心的な  $CO_2$  削減目標が設定されることや、貯留した  $CO_2$  に経済価値を付けて取引する排出量取引制度等の政策の導入、実証試験で先行している欧米地域との連携などが必要とされよう。

水素の作り方としてよく知られている「水の電気分解（水電解）」はどうだろうか。電気に再生可能エネルギーを使えば、 $CO_2$  を出さないクリーンなエネルギーとなる。また、バイオマスから発生したメタノール（ $CH_3OH$ ）やメタンガスを、触媒で改質して水素を取り出してもゼロ・エミッションとなる。水やバイオマスはほぼ無尽蔵に存在し、国産エネルギーでもあることから期待は大きい。今のところ、安定供給が実現できないことと、経済効率性で他の方法に劣るため大規模に導入する動きは見られない。この他、未来技術として、太陽光を利用した光触媒による水分解水素製造法等が大学を中心とした研究機関で研究されている<sup>8</sup>。国は「水素・燃料電池戦略ロードマップ」において、2040 年頃に「 $CO_2$  フリーな水素供給システム」の確立を目指して、研究機関を中心に計画的な開発や実証を進めるとしている<sup>9</sup>。

### 3. 「運搬・貯蔵」の水素技術

メタンガスや副生水素から製造・精製される水素ガスは気体である。気体は軽い。運搬・貯蔵するには嵩張るので、体積を小さくするために、高压ガスや液化水素にする技術や、水素吸蔵合金などを利用する技術が使われている。実際には、製造側の供給能力と需要側のニーズにマッチした運搬・

<sup>5</sup> 試算値は、早内 義隆、石倉 雅裕「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置づけに関する調査」財団法人 石油産業活性化センター（2003 年）を参照。

<sup>6</sup> “Fifth Assessment Report (AR5), Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Summary for Policymakers”, Intergovernmental Panel on Climate Change.

<sup>7</sup> 経済産業省ニュースリリース「苫小牧地点における二酸化炭素回収・貯留（CCS）実証試験の開始について」（平成 24 年 2 月 8 日）

<sup>8</sup> 例えば、堂免一成・東京大学教授「[エネルギー変換型光触媒の開発](#)」（2014 年 6 月 20 日閲覧）

<sup>9</sup> 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](#)」（平成 26 年 6 月 23 日公表）

貯蔵技術が用いられる。供給能力は、供給量、運搬距離、運搬頻度等で、需要ニーズは、燃料の種類（水素ガス、メタン等）、購入量、価格等のことである。製造及び供給側は既に鉄鋼業や石油産業、ガス事業等で多くの実績があり、運搬・貯蔵に関する基盤技術は確立されている。現在は、これらの技術を水素社会で想定される需要ニーズに合わせる応用技術開発が行われている。本章では、大量運搬技術、大量供給技術、大量貯蔵技術の代表例を見ていく。

大量輸送技術の代表例は、原油や天然ガスの輸入で用いられているタンカーによる輸送技術を水素に応用する技術である。定置用 FC や FCV の普及初期段階であれば国内だけで水素の需給が成り立つと思われているが、国のロードマップでは、2030 年頃に大量の水素を消費する水素発電が本格的に導入される見込みになっており、その際に海外での未利用エネルギー由来の輸入が想定されている<sup>10</sup>。未利用エネルギーとは、副生水素や原油随伴ガス、褐炭などのことである。これらを地政学的リスクの低い豪州等から調達できれば、エネルギーセキュリティの向上に大きく貢献し得ると考えられている。

液化水素運搬船の開発には LNG タンカーで実績のある造船事業者等が取り組んでいる。常圧の水素ガスを $-253^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却すると体積が 800 分の 1 程度に小さくなるので、大量の水素を効率的に運ぶことができるようになる。タンク部分（容量 1,250 $\text{m}^3$ ）には真空断熱構造（いわゆる魔法瓶）を採用して液化水素の蒸発を最低限に抑え、外部からの侵入熱で気化してしまうガス（BOG : Boil Off Gas）は耐圧構造の容器内に閉じ込めてしまうなどの技術を採用している<sup>11</sup>。実証段階に入った技術もある。水素をトルエン（ $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH}_3$ ）など取扱いが容易な炭化水素に結合させて有機ヒドライド（たとえば、メチルシクロヘキサン（ $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{-CH}_3$ ））にして体積を圧縮する大量運搬技術である<sup>12</sup>。有機ヒドライドは常温・常圧の状態、ガス状態より約 500 分の 1 に圧縮することができるため、既存のタンカーがそのまま利用できる。冷却する必要はないが、水素を取り出すときに触媒を用いて加熱する必要がある。課題は、有機ヒドライドから水素を引き抜く反応器の小型化や、反応器を効率的に加熱する熱媒供給システムの確立などとされている。液化水素タンカーや有機ヒドライドによる水素の大量運搬技術は、国内の陸上での大規模貯蔵や輸送にも利用できる技術としてその実用化が期待されている。

大量供給技術の代表は、水素ガスパイプライン技術である。2011 年 1 月から、産官学連携組織の福岡水素エネルギー戦略会議<sup>13</sup>や民間事業者が参画する水素供給・利用技術研究組合（HySUT）<sup>14</sup>等が中心となり、北九州市で社会実証が行われている。「北九州水素タウン」と呼ばれる実証地域に、直径 10 cm（都市ガス管と同サイズ）の水素管を地下 1m、延長 1.2 km にわたって敷設し、隣接する製鉄所で発生した副生水素を、集合住宅や業務用施設等に設置された定置用 FC や低圧水素充填装置（FC フォークリフトや FC アシスト自転車向け）に供給している。水素ガスパイプラインの敷設に大きな投資

<sup>10</sup> 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（委託先 みずほ情報総研株式会社）、「平成 24 年度成果報告書 水素需給の現状と将来見通しに関する検討」平成 25 年 2 月

<sup>11</sup> 川崎重工業株式会社 プレスリリース「[液化水素運搬船用貨物格納設備の基本承認を日本海事協会より取得](#)」、2014 年 2 月 6 日

<sup>12</sup> 岡田 佳巳、安井 誠「水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術」『化学工学』VOL. 77（2013）No. 1、千代田化工建設株式会社

<sup>13</sup> [福岡水素エネルギー戦略会議ウェブサイト](#)

<sup>14</sup> [水素供給・利用技術研究組合（HySUT）ウェブサイト](#)



が必要となるが、ユーザーには改質器や精製装置の費用負担が発生しない。当該地域では、鉄鋼生産量の影響を受けて変動する水素供給量と地域の水素需要との一致を図るための管理システムの構築や、パイプラインの維持・管理面から技術的課題を抽出することなどが行われている。

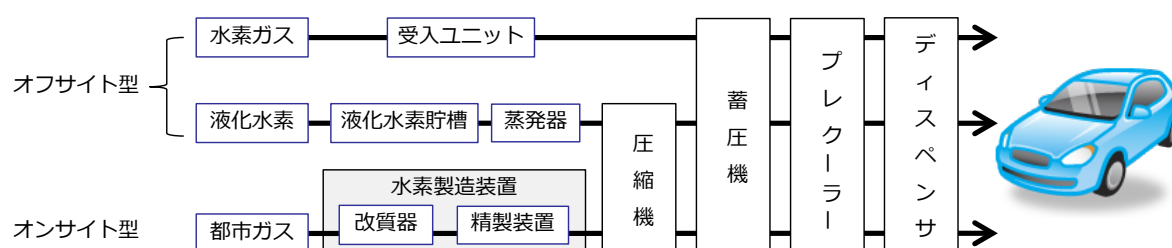
貯蔵技術の代表事例は、FCV に搭載される高圧水素タンクが挙げられる。一度に大量の水素ガスが充填できれば、航続距離が伸びて自動車としての利便性が高まる。現在は70MPa（約700気圧）の高圧水素タンクが開発されており、一般的な高圧ガスボンベ（14.7MPa）より約4.8倍、圧力が高い。水素分子はサイズが小さく透過能が高いため、漏出を防止するためにタンクの内側にポリアミド（ナイロンの一種）を敷き、外側に炭素樹脂を幾重にも巻くなどして、安全性と低コスト化の両立が図られている<sup>15</sup>。

#### 4. 「利用」に関する水素技術（水素ステーション）

サプライチェーンの最後に位置する「利用」とは、水素ガスを水素製品に充填する設備や施設のこと、FCV の場合は水素ステーションということになる。水素ステーションは、他の場所で製造された水素を水素ステーションに運搬・貯蔵しておいてからFCV に充填する「オフサイト型」と、水素ステーションで水素を製造して充填する「オンサイト型」の2つのタイプに分けられる。

オフサイト型では、既に産業利用されているローリーやトラック等で液化水素を水素ステーションに運搬し、一旦、液化水素貯槽に貯蔵する（図表2）。その後、蒸発器でガス化し、圧縮機で82MPa程度まで圧力を高めて蓄圧機に蓄える。FCV への充填時は、急速充填するとFCV の水素タンクの温度が上昇してしまうため、プレクーラーで-40℃程度に冷却してからディスペンサを通してFCV の水素タンクに充填される。オンサイト型では、都市ガスパイプライン等で供給されるメタンガス等を改質器と精製装置で水素ガスにする。その後の高圧ガス化から充填するまではオフサイト型と同一である。水素ステーションの整備費用はタイプや供給能力によって変わるが、これまでの実績は4億～5億円と高額である。

図表2 水素ステーションの構成例



（出所）大和総研作成

水素の供給場所が選べる、移動式水素ステーションの開発も進んでいる。設備に使用する材料や技術を工夫することで、トレーラーに載せられる省スペース、軽量、低コストを図り、複数設備を1つ

<sup>15</sup> 例えば、トヨタ自動車 テクノロジーファイル「[高圧水素タンク](#)」（2014年6月20日閲覧）

のパッケージにまとめることで、施工費等の削減も可能としている<sup>16</sup>。FCVの普及初期にあり、定置式水素ステーションの設置が進まない地域での活用が期待されている。

水素ステーションやFCVの普及を図る際の課題の一つに、設備等に関する規制の見直しがある。国は事業者が安全性を確保しつつ経済的に水素ステーションを設置し、またFCVを販売できるよう、立地、距離、材料、輸送、運営等の分野において高圧ガス保安法、建築基準法、消防法、都市計画法等の規制の見直しを進めてきた。

2002年に関係省庁は、燃料電池に係る規制について、政府全体として、安全性の確保を前提とした包括的な規制の再点検を実施し<sup>17</sup>、2004年度末までに6法律28項目に関する改正等を行って基本的な安全規制等を整備した。また、2010年には、2012年度までに16項目の規制の合理化を完了するための「燃料電池自動車・水素ステーション普及開始に向けた規制の再点検に係る工程表」を公表している。さらに2013年には「規制改革実施計画」で新たに9項目の規制見直しが追加された<sup>18</sup>(図表3)。

事業者等の強い要望で規制見直しは進んでおり、最近では、2014年5月30日に、FCVに使用される容器及びその附属品の「水素及び燃料電池の自動車に関する世界技術規則」(以下、「世界技術規則」という。)を国内に取り込むための規制緩和が実施された。世界技術規則は、2007年から国際連合欧州経済委員会自動車基準調査世界フォーラムにおいて作成が始まり、2013年6月に採択されたものである。今後、EUや米国等、いわゆる98協定<sup>19</sup>に加盟している世界31か国(日本を含む)への導入が進むことで、FCVの健全な普及に貢献することが期待されている。

水素ステーションに関しては、設置申請に係る法令の所管省庁が複数にまたがって調整に時間が必要なことや、立地開発と建設投資の課題もあり、2014年4月時点で20か所しかないのが実情である。国は2015年までに4大都市圏を中心に100か所程度の整備を目指しているが、達成時期には数年の猶予が必要かもしれない。また、4大都市圏に含まれない、北海道地方、東北地方、本州の日本海側地方、四国、沖縄等への政策的な展開は今後の課題といえよう。

<sup>16</sup> 例えば、太陽日酸株式会社ニュースリリース「低コスト・コンパクトなパッケージ型水素ステーションを開発(商品名:ハイドロ シャトル/Hydro Shuttle)」(2013年8月28日)

<sup>17</sup> 内閣官房 燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議「燃料電池の実用化に向けた包括的な規制の再点検の実施について」、2002年10月25日

<sup>18</sup> 経済産業省 産業構造審議会 保安分科会 高圧ガス小委員会(第4回、平成25年11月14日)の配布資料3-1「燃料電池自動車・水素ステーション等に関する規制見直しの進捗状況について」

<sup>19</sup> 「車両並びに車両への取付け又は車両における使用が可能な装置及び部品に係る世界技術規則の作成に関する協定」(平成12年外務省告示474号)

図表3 燃料電池自動車・水素ステーション普及開始に向けた規制見直し

規制分野	法令名	所管省庁	検討事項	見直し実施時期
立地の規制	高	経産省	70MPa水素スタンドに対応した技術上の基準や例示基準の整備	2012年12月
	建	国交	市街地における水素保有量の増加	2013年度結論、措置準備中
	建	国交	市街地における水素保有量の上限撤廃 (●)	2013年度結論、措置準備中
	高、消、 建	経産省、 国交省、 消防省	液化水素型水素スタンド規制・基準の整備 (●)	2014年度結論、結論を得次第措置
	高、建	経産省、 国交省	市街地に設置可能な小規模水素充填装置の基準整備 (●)	2014年度結論、結論を得次第措置
距離の規制	都	国交省	市街化調整区域への水素スタンド設置許可基準の設定 (●)	2013年6月
	高	経産省	CNGスタンドとの併設をより容易にするための設備間距離規制の緩和	2014年4月
	消	消防庁	水素ステーション併設に係る給油取扱所の規制の合理化	2014年5月
	高	経産省	公道とディスプレイとの距離に係る障壁等の代替措置の創設	2015年まで
	高	経産省	水素スタンド周辺防壁の防壁ゾーン基準の明確化	2013年3月
材料の規制	高	経産省	プレクーラーに供する冷凍設備の保安距離の合理化 (10m→8m) (●)	2013年度結論、措置準備中
	高	経産省	保安検査の簡略化に向けた保安検査基準の策定と保安検査方法告示での指定	2014年度中
	高	経産省	設計係数の低い特定設備、配管等の技術基準適合手続の簡略化	2015年まで
	高	経産省	例示基準に記載された使用可能鋼材の拡大	2015年まで
	高	経産省	使用可能鋼材に係る性能基準の整備 (●)	2014年4月
輸送の規制	高	経産省	水素スタンド蓄圧器への複合容器使用に向けた技術基準適合手続の簡略化	2013年度結論、措置準備中
	高	経産省	複合容器蓄圧器の使用 (●)	2015年まで
	高	経産省	圧縮水素運送自動車用複合容器の最高充填圧力引上げ (35MPa→45MPa程度) のための例示基準の改正	2014年3月
	高	経産省	圧縮水素運送自動車用複合容器の安全弁に熱作動式安全弁 (ガラス球式) を追加するための附属品の例示基準の改正	2015年まで
	高	経産省	圧縮水素運送自動車用複合容器・附属品に対する刻印方式の特例の創設	2012年3月
運営の規制	高	経産省	水素運送トレーラー容器の上限温度見直し (40℃⇒85℃) (●)	2014年度結論、結論を得次第措置
	高	経産省	セルフ充填式水素スタンド実現に向けた高圧ガス製造の許可を受けた者以外による水素の充填行為の許容	2013年2月
その他の規制	高	経産省	フル充填に向けた最高充填圧力の変更と例示基準の改正	2014年5月
	高	経産省	公道でのガス欠対応のための充填場所の確保	2015年まで
高	経産省	水電解機能を有する昇圧装置の定義 (●)	2014年3月	

(出所)「規制見直し16項目の工程表」、経済産業省、国土交通省、消防庁、2010年12月公表。●は、「規制改革実施計画」(2013年6月14日閣議決定)に基づく追加項目。法令名の、高は高圧ガス保安法、建は建築基準法、消は消防法、都は都市計画法。斜字は措置中、または近く対応予定、灰色背景は検討中。

## 5. 「用途」で利用される燃料電池技術

サプライチェーンで供給される水素は、様々な用途で、FCで電気に変換される。本章ではFCの発電原理の概略を説明する。FCは用途に応じて多くの種類がある。便宜上、FCに用いられている電解質膜の種類で分類することが多く、①固体高分子膜を使用する「固体高分子形」、②リン酸水溶液を使用する「リン酸形」、③Li-Na/K系炭酸塩を使用する「熔融炭酸塩形」、④ジルコニア系セラミックスを使う「固体酸化物形」などが開発されている。以下に、①固体高分子形(PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell)について説明する。PEFCはシステムが小型で室温～90℃の低温条件でも高効率に発電し、瞬時応答が可能なことが評価され、定置用FCやFCV、携帯機器、宇宙・軍用機器などで実用化されている。

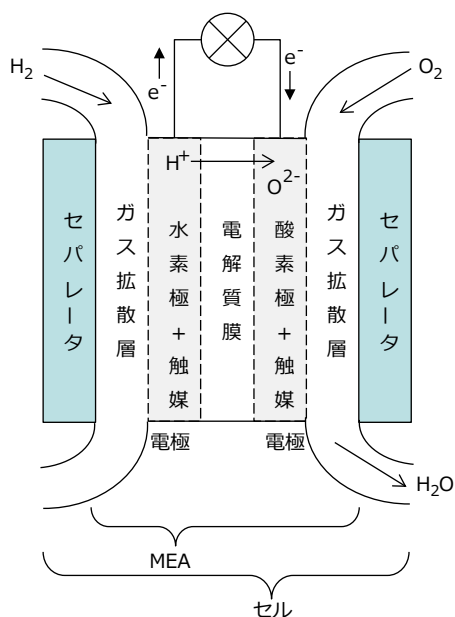
PEFCの基本構造は、2枚の電極がイオン導電性を有する電解質膜を挟み、それぞれの電極がリード線で外部負荷回路(電気製品や動力モーターなど)に接続されたものである(図表4)。電極に触媒をまぶして、燃料供給用のガス拡散層で挟んだものを「膜・電極接合体」(MEA: Membrane Electrode Assembly)と呼ぶ。動作原理は、ガス拡散層から負極(水素極)に水素が供給されると、白金(Pt)などの触媒存在下で酸化反応( $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ )が起こる。生成したプロトン( $H^+$ )と電子( $e^-$ )は、それぞれ電解質膜とリード線を通して正極(酸素極)に移動する。酸素極では、ガス拡散層を通して酸素が供給されると、触媒存在下で還元反応( $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ )が起こり、生成した水( $H_2O$ )は外部に排出される。

1体のMEAは限られた1ボルト以下の電圧しか発生しないので、複数のMEAをセパレータ(隔



壁板)で介して直列に積層(スタック)すれば高電圧が得られ、大面積化すれば高電流が得られる。家庭用FCは、スタックしたセル(MEAとセパレータ)に燃料処理機(改質器)、補機類、外装、制御システム、貯湯槽等を組み合わせて一つのセットにする。FCVは、スタックに水素タンク、バッテリー、モーター、パワーコントロールユニット、車体、タイヤ等を組み合わせて1台に自動車にする。

図表4 高分子形燃料電池(PEFC)の基本構造



(出所) 大和総研作成

FCが水素や酸素を外部から投入するのに対し、同じ化学電池(化学反応で生じる電気エネルギーを利用する電池)の一つである乾電池やリチウムイオン電池、鉛蓄電池は、二酸化マンガンを亜鉛、リチウムなどが電池活物質として最初から内蔵されているところが異なる。また、一般にFCや乾電池などの化学電池は、化学エネルギーを直接、電気エネルギーに変換するので、タービンを回転させるといった運動エネルギーを経由する火力発電などよりも高い変換効率が期待できるとされる。変換効率が高ければ消費する天然ガスなどの燃料が節約できるので環境負荷が少ないクリーンエネルギーとなる。さらに、家庭用FCは排熱を暖房や給湯などの熱エネルギーとして転用することで、またFCVは車の減速エネルギーを回生ブレーキで電気エネルギーとして回収することなどを通してエネルギーを効率利用している。

PEFCの技術上の課題は長寿命化と低コスト化である。PEFCの電圧が低下する代表的な要因は、電解質膜の劣化、水素極へのCO(一酸化炭素)の吸着、酸素極触媒のシンタリング、酸素極ガス拡散性低下などとされている<sup>20</sup>。電解質膜の劣化とは、本来、通過してはいけない水素ガスや酸素ガスが侵入してしまうことによる劣化である。また、化石燃料から作られる水素ガスの中に不純物としてCOが含まれていると、触媒表面がCOで覆われて反応ができなくなり電圧が低下してしまう。触媒のシンタリングとは、触媒粒子同士が焼結して大きくなり活性が低下することで

<sup>20</sup> 大阪ガス「技術開発情報」

ある。長寿命化は、今後、FCVの種類を路線バスやタクシー、トラックなどに拡大していく上で、克服しなければならない重要な課題である。低コスト化に関しては、生産量の増大に応じて量産効果が効いてくる電解質膜のような化学材料もあるが、高価な貴金属を使う触媒や加工プロセスが必要なセパレータなどでは、微細化や薄膜化によって使用量を減らす工夫や、代替品を探索する材料研究など、より基礎的な研究が行われている部材もある。

## 6. 今後について

これまで水素は、主に石油業界や鉄鋼業界、半導体業界などで産業利用されてきたが、定置用FCの普及やFCV一般販売を控え、一般向けの新しいエネルギーとして、広く社会で利用される見通しが立ってきたといえるだろう。

水素の原料を化石燃料に依存している現在の状態から脱却し、環境への適合が図られる水素社会を実現するため、国は2040年頃に「トータルでのCO<sub>2</sub>フリー水素供給システムの確立」に向けたビジョンを掲げている。実現するには、安価で高効率な水電解技術のイノベーションや、再生可能エネルギー及びCCSの導入拡大などが鍵になる。

因果関係が逆であるが、再生可能エネルギーの導入拡大に関しては、水素がその先導役になる事業が欧州で始まっている。系統連系（太陽光発電や風力発電などの設備を商用電力系統に接続すること）に課題を抱えるドイツなどでは、再生可能エネルギーの電力を水電解装置で水素ガスに変換して貯蔵したり、天然ガスに混入して火力発電に用いたりする事業が始まっている<sup>21</sup>。電力を一旦ガスに変える事業コンセプトは“Power to Gas (P2G)”と呼ばれる。国内でも、弘前市で災害時の電力自給に向けて、有機物が多く含まれる下水汚泥から水素を取り出して発電燃料として貯蔵する事業が始まっている<sup>22</sup>。緊急時のBLCP（Business and Living Continuity Plan、業務・生活継続計画）に役立つことが実証されれば、日本でも再生可能エネルギーと水素ガスを組み合わせた事業が広がる可能性があるだろう。

我々は今、水素という新しいエネルギーを手に入れつつある。生活や産業活動で利用できるエネルギーの選択肢が広がり、これまで以上に効率的なエネルギー社会が構築されることに期待したい。

以上

<sup>21</sup> E. ON Press Release “Power-to-gas unit injects hydrogen into natural gas system for first time” (06/13/13)

<sup>22</sup> 国土交通省「PPP/PFIの具体的な案件形成推進 調査・検討の概要」（平成25年度）、「下水道資源を活用した水素製造・販売・供給体制整備検討調査」