

水素ネットワークの夜明け



佐藤弘幸



金子哲也

CONTENTS

- I 国内における水素・燃料電池関連市場の変遷
- II 水素社会実現の見通し
- III 水素・燃料電池に関連したICTの活用
- IV ICTの活用に向けた課題

要約

- 1 2014年12月、燃料電池自動車（FCV）の一般販売が開始され、一般社会での水素利用が広がりを見せ始めた。従来の水素利用は工業用途が中心であった。しかし今後は、事業者向けの燃料電池フォークリフトなど特殊車両や一般消費者向けのFCVの普及、業務用の純水素型燃料電池の市場投入に伴い、運輸領域から電力領域にかけて、一般社会におけるエネルギー用途での水素利用が段階的に拡大する可能性がある。
- 2 水素・燃料電池関連の技術・製品は、2020年頃までは東京オリンピック・パラリンピックをショーケースとすべく導入が進むが、さまざまな課題もあり、本格的な水素社会の到来は2030年頃になるといわれている。それまでは、急速に普及するというよりも、徐々に導入・浸透が進む黎明期と考えられる。
- 3 水素社会の黎明期には、さまざまな水素製造設備・供給インフラ・利用機器が広域に分散して存在する状態になると想定される。この時期は、それらの拠点や機器を情報通信技術（ICT）でネットワーク化することが投資・運営効率を向上させ、経済性および利便性を改善する1つの手段になると考えられる。
- 4 水素社会の実現の一助として、ICTによるネットワーク化を推進するためには、ネットワーク事業者と自動車関連メーカー、水素インフラ事業者の連携強化が不可欠である。それらによって、今後、水素利用が拡大し、二酸化炭素排出量の削減やエネルギーセキュリティの向上など、日本が抱える複数のエネルギー問題の解決や産業振興、地域活性化が実現することを期待したい。

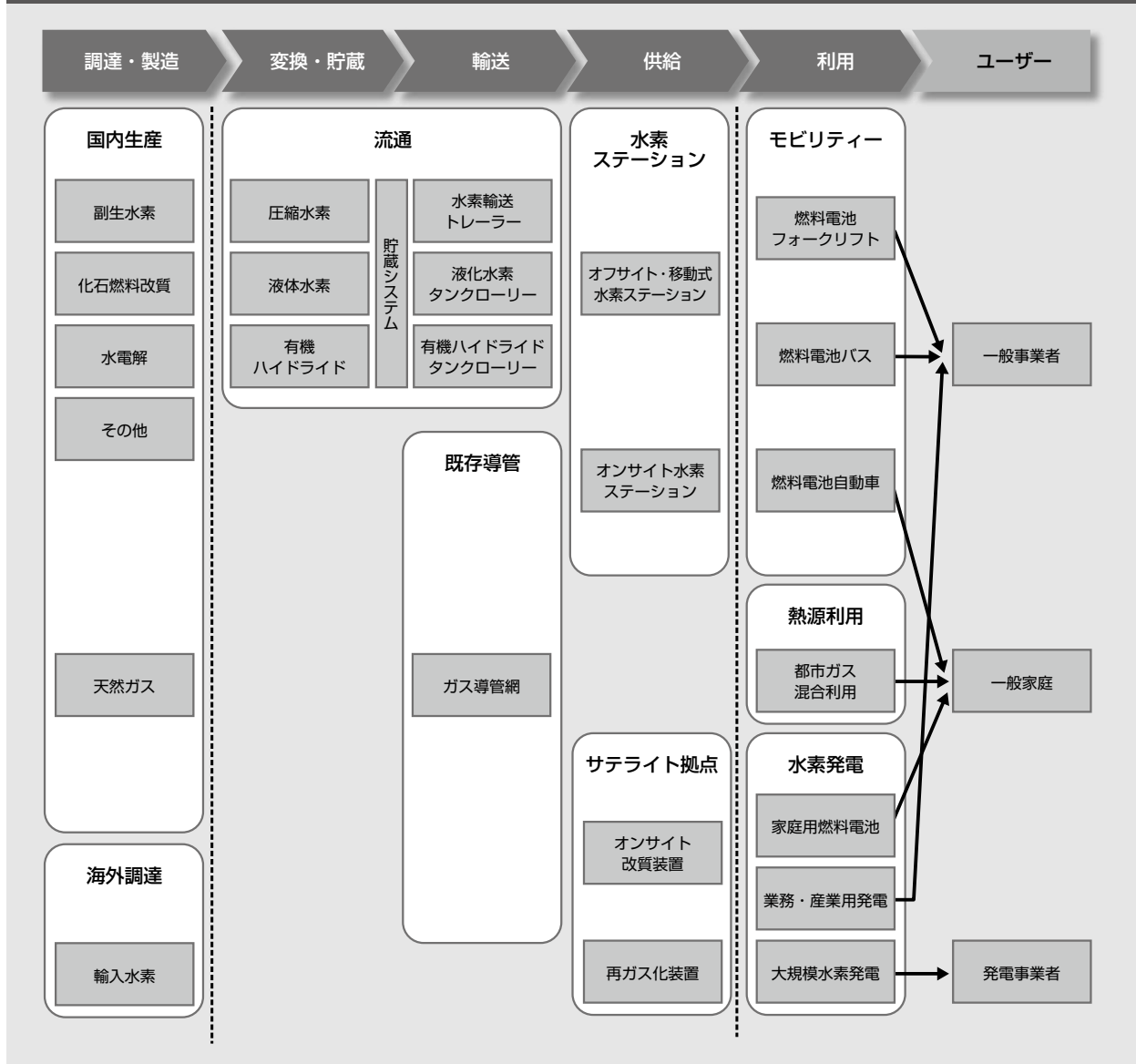
I 国内における水素・燃料電池関連市場の変遷

1 水素・燃料電池関連市場での昨今の動向

2014年12月、トヨタ自動車から世界初となる水素を燃料として二酸化炭素を排出せずに走行するFCV「MIRAI」の一般販売が開始

された。これにより、水素・燃料電池関連市場では、政府や事業者による取り組みがより活発化している。また、2009年に、機器内で都市ガスなどを改質して製造した水素を用いて発電・湯沸かしを行う家庭用燃料電池コージェネレーションシステム（通称エネファーム）が発売され、14年9月には累計販売台数10万台を突破した。このように、水素は、従

図1 水素・燃料電池関連バリューチェーン全体像



来の中心的用途であった石油精製や金属加工などの工業利用から、近年では燃料電池システムを用いてのエネルギー用途として一般利用されるという流れが進展している。

この中でも、燃料電池自動車の一般販売開始は、大衆向けの純水素利用（水素を輸送・貯蔵して利用すること）を具現化したという点で大きな意味がある。エネファームはそれ以前にも一般販売がされてはいたが、あくまでも家庭に供給される都市ガスから、機器稼働に必要な量の水素をその場で改質・製造して利用するシステムであり、水素の製造（調達）・輸送（供給）・利用というバリューチェーンの全体像の中に位置づけられるものではなかった。

FCVなど燃料電池システムをエネルギー用途として一般利用するという流れの中で、水素の製造・輸送・利用というバリューチェーンが多様化する可能性がある。現在ではその供給手段の主流は副生水素（各種工業製品の生産過程において副産物として生じる水素）や化石燃料改質水素（石炭や石油、天然ガスなど、化石燃料を改質することで精製される水素）であるが、将来に向け、それに加わる新たな製造方法の研究開発が進んでいる。たとえば、再生可能エネルギーから水素を製造する方法や、海外の未利用資源から製造した水素を大規模輸送・供給するための仕組みの検討が行われており、今後水素の供給手段も多様化すると見込まれている（図1）。

これらの取り組みを加速させる背景として、2014年には経済産業省の水素・燃料電池戦略協議会において水素・燃料電池戦略ロードマップ（以下、ロードマップ）が策定され、短期的視点では2015年時点での水素ステ

ーションの目標設置台数など、水素の需要サイドにおける具体的な目標が一部定められたほか、中長期的視点では供給サイドにおける検討の方向性が示された。2015年には、同ロードマップのさらなる具体化・見直しのため、野村総合研究所（NRI）による事務局支援のもと各種取り組みが産・官・学合同で行われている。まずは、2020年の東京オリンピック・パラリンピックをショーケースとすべく、水素・燃料電池関連事業者による取り組みを積極化し、技術・製品の開発や事業化を進展させていくと考えられる（図2）。

2 従来の水素・燃料電池関連市場の発展経緯

近年において、水素・燃料電池関連市場の動向が多く取り上げられているが、その活動自体は1970年代から存在していた。国内における最初の取り組みは、オイルショックの経験を踏まえ、石油代替・省エネルギー技術の開発を目指して1978年に始まった通商産業省の「ムーンライト計画」（93年以降は「ニューサンシャイン計画」として継続）であった。

同計画では、国内エネルギー資源に乏しい日本で省エネルギー政策を推進すべく、民間企業だけでは開発が困難な技術開発を推進することが目指された。ここでの開発対象として、現在の一般家庭に広く普及しつつあるヒートポンプの効率化や、高効率ガス・タービンに加え、燃料電池が組み込まれていたことがきっかけであった。

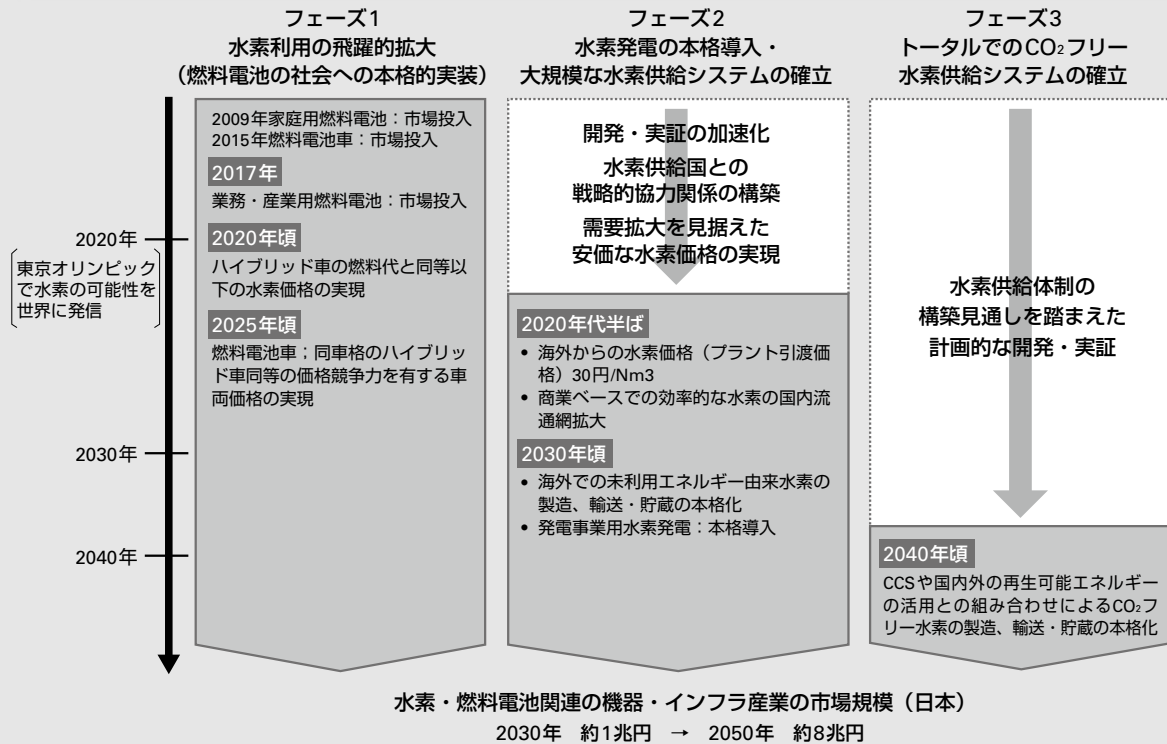
ニューサンシャイン計画は2000年に終了したものの、燃料電池の開発は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のもとで、

図2 水素社会実現に向けた対応の方向性

■水素社会の実現に向けて、社会構造の変化を伴うような大規模な体制整備と長期の継続的な取り組みを実施。また、さまざまな局面で、水素の需要側と供給側の双方の事業者の立場の違いを乗り越えつつ、水素の活用に向けて産・学・官で協力して積極的に取り組んでいく

■このため、下記の通りステップバイステップで、水素社会の実現を目指す

- ・フェーズ1 (水素利用の飛躍的拡大)：足元で実現しつつある、定置用燃料電池や燃料電池自動車の活用を大きく広げ、わが国が世界に先行する水素・燃料電池分野の世界市場を獲得する
- ・フェーズ2 (水素発電の本格導入／大規模な水素供給システムの確立)：水素需要をさらに拡大しつつ、水素源を未利用エネルギーに広げ、従来の「電気・熱」に「水素」を加えた新たな二次エネルギー構造を確立する
- ・フェーズ3 (トータルでのCO₂フリー水素供給システムの確立)：水素製造にCCSを組み合わせ、または再生可能エネルギー由来水素を活用し、トータルでのCO₂フリー水素供給システムを確立する



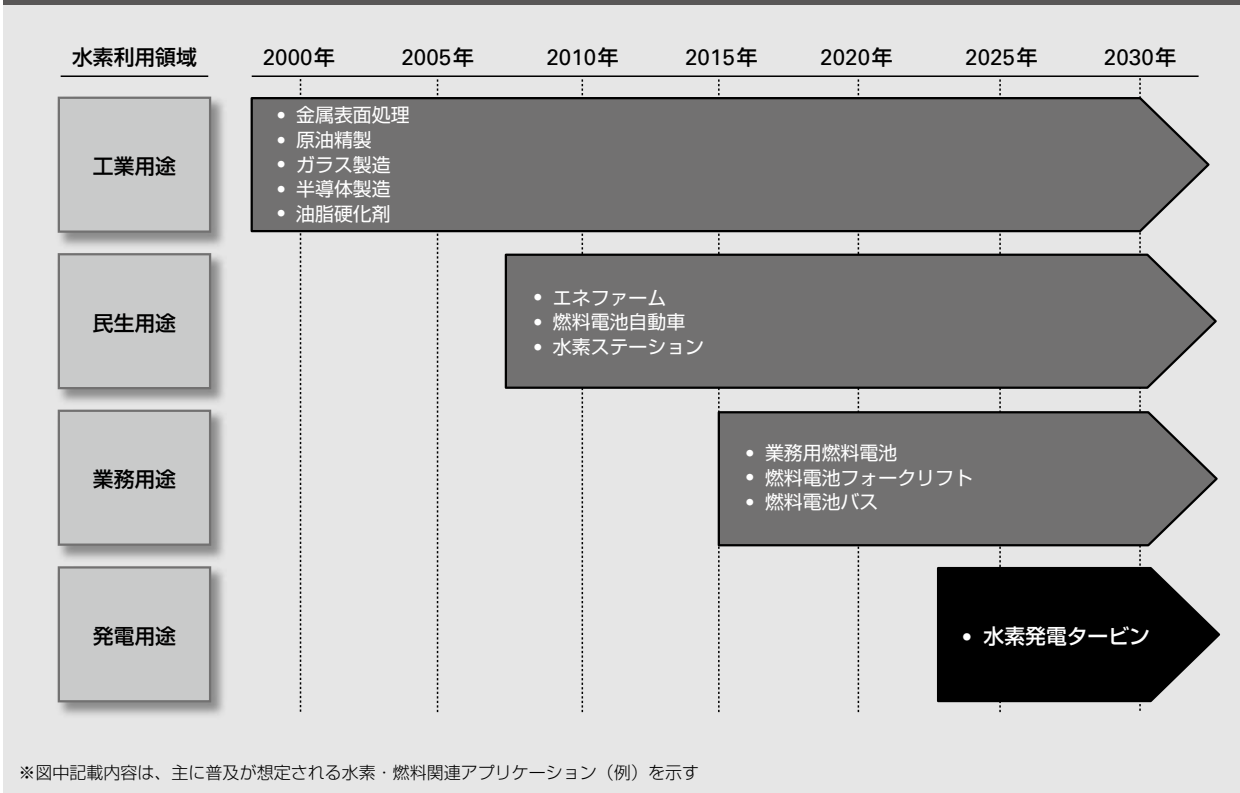
出所) 経済産業省 水素・燃料電池戦略協議会資料「水素・燃料電池戦略ロードマップ概要」より作成

定置用燃料電池大規模実証研究事業として引き継がれた。一般家庭などを巻き込んだ実証実験により取得されたデータを素にした製品改良が行われ、2009年には「エネファーム」を統一名称として一般販売が開始されるに至った。

FCVについては、2000年代前半に業務・産業利用を前提としたリース販売が各社によ

て開始されたほか、一般販売を目指して経済産業省のもとで水素・燃料電池実証プロジェクト (JHFC) が組成され、本格的量産と普及の道筋を整えるべく水素の製造方法を含めた研究・活動が進捗した。2009年以降は水素供給・利用技術研究組合 (以下、HySUT) に引き継がれ、15年の一般ユーザーへの普及開始を目標とし、水素供給インフラの社会的

図3 水素用途および利用アプリケーションの段階的拡大



受容性と事業成立性の課題の検証・解決のためのさらなる実証研究が進められている。

2014年には、HySUTの目標を1年前倒しにする形でFCVの一般販売が開始されたことにより、一般社会における水素利用が広がりを見せ始めた。また、これまで天然ガスを利用して燃料電池についても、機器内で都市ガスを改質せず、水素を直接利用する純水素型の市場投入に向けた取り組みが進んでいることから、今後は一般家庭や事業者などによる水素需要が増加していくことが見込まれる。また、これらに対応する形で、水素製造・供給手段に関する研究開発も進むと考えられている。

以上のように、これまでの水素・燃料電池に関する取り組みは、試験的位置づけ、ない

しは産業用途に限定されていたが、今後、事業者向けの燃料電池フォークリフトなど特殊車両や、一般消費者向けのFCVの普及、業務用の純水素型燃料電池の市場投入に伴い、運輸領域から電力領域にかけて、一般社会におけるエネルギー用途での水素利用が段階的に拡大する可能性がある（図3）。

II 水素社会実現の見通し

1 水素社会実現の難しさ

いかなる市場の成り立ちにおいても共通していえることであるが、市場黎明期においてはデスバレー（死の谷）^{注1}が存在する。水素・燃料電池関連市場に関しても、2020年頃までは東京オリンピック・パラリンピックを

ショーケースとすることを目指し、政策面の応援もあり拡大すると考えられるが、その後はデスバレーを越えることができず、一過性のブームとして縮小してしまう可能性が一部から指摘されている。

たとえば、各社が2020年の東京オリンピック・パラリンピックをショーケースとすべく、地球温暖化対策やエネルギーセキュリティ向上への貢献というような企業の社会的責任を重視し、経済性をあまり考慮しない形で技術実証が進んでいるといったケースが存在している。そのほかでも、現状では採算性の確保が困難といわれている水素ステーションについてもクリティカルマス^{注2}が存在しており、顧客として一定のFCVが普及すれば、収益の確保に伴い加速度的に整備が進む可能性があるが、そうでない場合には整備が進まないことも考えられる。

2 水素関連のアプリケーション および供給インフラの普及に 向けた多くの課題

水素はエネルギーとして利用する際に、もともと取り扱いが困難な物質である。ここでは、製造・調達、輸送、供給、利用というそれぞれのシーンから、水素の特性を起因として多方面で言及されている水素・燃料電池関連の技術・製品の課題を整理する。

(1) 製造・調達

製造については、CO₂の排出、供給可能量、コストなどの問題がある。現在、水素はほとんどが化石燃料改質、そうでない場合は苛性ソーダなどを製造する際に生じる副生水素が供給源となっている。これらの場合には

水素製造は容易であるが、化石燃料改質では二酸化炭素を排出するという点、副生水素については主産物の製造に伴って発生するため供給可能量が制約されるという点でそれぞれデメリットを持っており、新たな製造方法として再生可能エネルギーなどを起源とした電力を用いる水電解や、豪州における褐炭などの海外の未利用資源を活用、二酸化炭素貯留技術を併用して水素を大量に製造・輸送するという方法が中長期的に検討されている。

コストに関しては、従来の水素製造方法での製造コストが20~58円/Nm³であるのに対し、水電解は76~136円/Nm³と高コストであり、再生可能エネルギーの余剰電力などを活用しない限り利用者に受け入れられる価格帯とはならないことが考えられる^{注3}。一方、大規模輸入水素はロードマップにて2020年代半ばをターゲットに、30円/Nm³程度の水素製造コストを目標としているが、その実現には、FCVの爆発的普及または発電事業用など国内で大規模な水素需要を伴う必要性がある。

(2) 輸送

輸送については、コストや技術的難易度といった問題がある。水素は常温・常圧下で気体であるが、体積エネルギー密度が約3 kcal/Lと非常に低く、天然ガスの約3分の1、ガソリンの約2900分の1であり、そのままの状態では貯蔵・輸送が非効率になる^{注4}。そこで、水素を効率的に輸送・貯蔵するため圧縮または液化することが考えられるが、圧縮する場合は高圧ガス保安法において最大45MPa、すなわち約450分の1までの圧縮圧と規定されている。

FCVで利用されている水素タンクではMIRAI搭載のタンクで70MPa²⁵、今後はより高圧なタンクの実用化に向けた開発が行われているが、そのような高圧タンクは技術的に大型化が困難であり、大規模輸送には不向きである。また、水素圧縮機が必要であるだけでなく、特に前述の高圧タンクにおいては炭素繊維強化プラスチックなど高価格素材を利用せねばならないため、高コストになってしまう。

一方、天然ガスと同様に液化する場合は、その体積を気体状態と比べて約800分の1に圧縮することが可能であるが、零下約253度の超低温に冷却しなければならない。また、液化には水素が持つエネルギー量の約3分の1を使用する必要がある。当然ながら、液化状態では温度の上昇に伴い、液化水素が一部気化することによるボイル・オフ・ガス（BOG）が生じるため、その対策も求められる。結果として、液化装置はもちろん、その貯蔵タンクも超低温を保持することができ、かつBOGにも配慮した機能を持つ技術的難易度が高い製品でなければ対応することはできない。

(3) 供給

供給についても、FCVの普及台数やコストなどが原因で、収益性確保が困難であるという問題がある。現時点での主な水素供給拠点としては、FCV向けの水素ステーションが挙げられる。現在、政府や業界団体による支援を背景に、2015年に100カ所という目標の達成に向けた整備が進んでいる。

しかし、水素ステーションはFCVの普及台数が限定的であるため十分な集客ができ

ず、また、固定費である水素ステーション関連設備価格や変動費である水素調達価格が高額のため、利益を生む事業として成立する状況には至っていない。

これらの背景として、水素は爆発範囲が広く着火エネルギーが極めて小さく、火炎は無色で着火しても見えないという危険性があるため、安全・確実に水素を充填する丁寧なオペレーションが求められることや、ステーション関連機器は水素が金属を腐食する「水素脆性」にも対応できる製品でなければならず、また定期点検の際にはすべての部品を分解する必要があるため、営業不能期間が一定程度生じるといった課題が存在している。

FCV 1台当たりの必要対応時間については、水素充填だけであれば3分程度であるものの、その前後の作業も含めると実際には1時間当たり最大で6台、すなわち1台当たり10分程度必要といわれている。また、水素ステーションの定期点検については、一度に約半月の期間を要することが指摘されている。

(4) 利用

利用については、FCVの販売価格や供給制約といった問題がある。前述の通り、現状での主な水素利用アプリケーションとしてはFCVが想定されるが、（補助金を除く）販売価格が約700万円と高級車並みである。また、その製造が熟練工による手作業で行われているため生産能力が限定的で、現時点では一日に数台程度しか生産できないといわれている。

そのため、必然的に工数がかかりコストが高くなってしまいうほか、一定規模のFCVの需要が存在していたとしても供給制約が生じ

るという課題が存在している。

以上のように、水素・燃料電池関連の技術・製品は、水素固有の特性とそれにより生じる課題からいずれのシーンでも高コストになりがちである。それらを解決するための研究・技術開発は進められているものの、まだもう少し時間を要する様子である。このため、2030年頃までは、水素・燃料電池関連の技術・製品が急速に普及するというよりも、徐々に導入・浸透が進む段階と考えられる。

3 海外での取り組み

一方で、海外に目を向けると、社会環境や政策の違いからわが国よりも早く水素社会の実現する可能性がある地域も存在する。

たとえば、原子力発電の廃止を決めたドイツでは、その代替手段として太陽光発電など再生可能エネルギーの導入が急速に進んでいるが、再生可能エネルギー由来の電力は日照時間など自然条件に発電出力が左右され、コントロールが困難であるというデメリットが存在している。このデメリットを起因とする余剰電力の調整手段として、水電解による水素製造方法（通称Power to Gas）が注目され、電力大手であるRWE社などが実証事業として展開している。

また、米国では、特にカリフォルニア州において導入されている各種公害対策規制への対応手段として、燃料電池やFCV、燃料電池フォークリフトなど、公害物質を排出しない水素・燃料電池関連製品・技術の導入が広がっている。

同様に日本においても、再生可能エネルギーからの余剰電力の増加や水素のエネルギー

政策上の位置づけがより鮮明になるといったことがきっかけとなり、水素の利用が急速に拡大する可能性があるため、水素社会の黎明期から、動向を注視しておく必要がある。

III 水素・燃料電池に関連したICTの活用

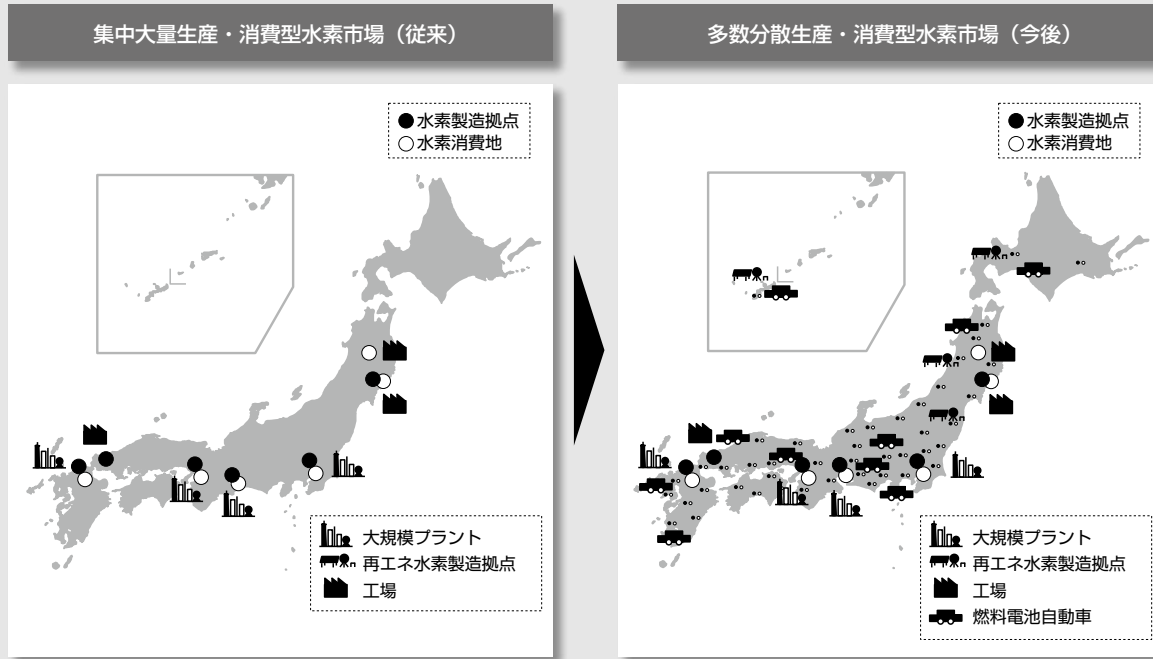
前述のように、これまでの工業用水素市場では、水素は工業地帯など「ごく限られた地域で集中的に大量生産・消費」されていた。一方で、今後はFCVをはじめとした一般向けの水素機器の導入により、さまざまな水素製造設備・供給インフラ・利用機器が、「広域に分散して存在する状態」になると想定される（図4）。

このような水素社会の黎明期においては、点在するそれぞれの設備や機器をネットワーク化することで、投資・運営効率を向上させ、経済性および利便性を改善し、デスバレーを越える一助に位置づけることができる可能性がある。

1 既存の水素ステーションの空き状況を勘案したFCVへの最適水素ステーション案内および水素ステーションごとの最適水素価格設定

現時点では、FCVの都市圏限定販売に合わせて、水素ステーションも都市圏での整備が中心となっているが、2015年時点で100カ所の設置が目標とされており、将来は都市部から地方部へとその整備範囲を拡張していくことが予想される。一方で、その高額な設置・運営コストのため、FCVユーザーにとっての必要数の設置が進まない懸念がある。

図4 水素社会構造の変革（イメージ）



※円の大きさは水素製造・消費規模を表す。図はあくまでもイメージであり、現状や将来における国内の水素・燃料電池関連技術や機器の普及状況または見通しを示すものではない

図5 電気自動車向けの充電スポット案内サービス



出所) 日本ユニシス社電気自動車 (EV) 充電インフラシステムサービス「smart oasis」より

また、水素ステーションでは、水素の貯蔵量が限られているため、常に水素を供給できないことも考えられる。

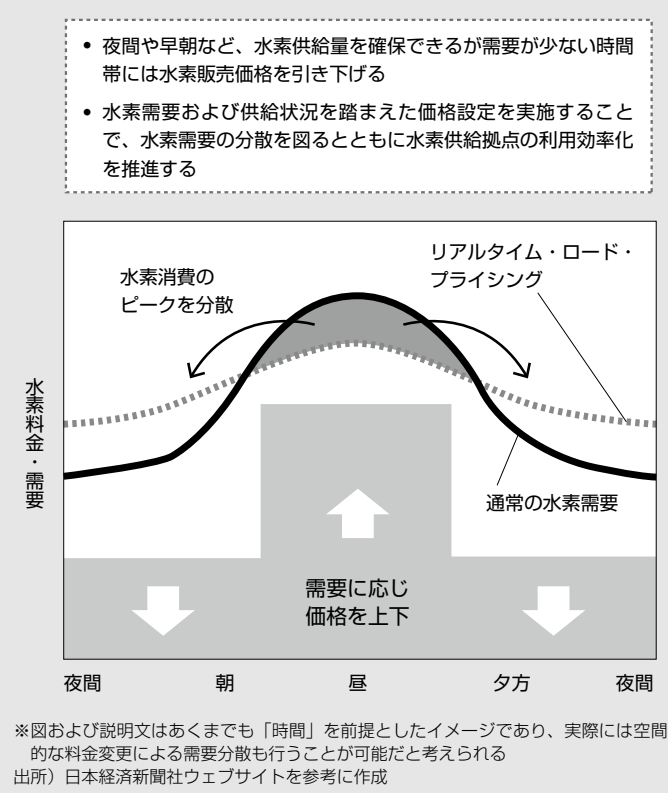
このような状況においては、ICTにて水素ステーションの運用状況（営業状況・満空情報・水素販売可能量など）を一括管理し、それらを走行中のFCVへ提供して最適水素ステーションを案内する、といったニーズが生じる可能性がある。類似のサービスが電気自動車の充電ステーションで展開されており、充電に時間がかかるという電気自動車のデメリットの克服に寄与している（図5）。

また、水素ステーション運営事業者の観点では、水素ステーションの運用効率向上を目的に、水素需要、水素残量を考慮して、たとえば需要が集中するエリアや時間帯に対して、需要が低いエリアや時間帯の価格を引き下げるといった、価格設定も考えられる。いわゆるリアルタイム・ロード・プライシングの概念を水素ステーションに導入するイメージである（図6）。この場合、FCVの走行状況や、水素ステーションの運用状況などから水素販売価格を総合的に判断するため、ICTの活用が必要となる。

2 FCVの位置情報、走行・水素充填履歴などを考慮した水素ステーションの効果的設置・運営

水素ステーションの設置コストは将来的に低下する見込みであるものの、それでも数億円規模であると考えられる。これは、一般的なガソリンスタンドの数倍、電気自動車の急速充電ステーションと比べると数百倍近いコストであり、簡単に普及させることは困難である。そのため、水素ステーションの設置場

図6 リアルタイム・ロード・プライシングの水素ステーションへの適応方法



所については綿密な検討が必要である。

現状では、水素ステーションには3つのタイプが存在する。まず、固定式（水素供給場所に貯蔵設備や供給設備を常設する形式）のオフサイト型水素ステーション（水素ステーション設置場所とは異なる地点で製造した水素を輸送・貯蔵・供給する運営形式の水素ステーション）、そして、オンサイト型水素ステーション（水素ステーションで水素を製造・貯蔵・供給する運営形式の水素ステーション）があり、さらに、地方部などでまとまった需要が見込めない地域での水素供給拠点、またはオンサイト型の補完的水素充填拠点として、移動式水素ステーション（水素の供給場所のみをあらかじめ確保しておき、同

供給・貯蔵・輸送設備が一体化したコンテナ型の水素供給車が営業日に往来する形式)がある。

供給能力は、オンサイト型ステーション、オフサイト型ステーション、移動式ステーションの順に高いが、同じ順に投資コストも高いため、事業性の確保には水素需要見込みとそれに応じたステーションタイプ選択が重要となる。また、オフサイト型ステーションの場合、水素需要量に応じた水素輸送が求められる。

ここにおいて、ICTを用いて各FCVの走行履歴や水素残量に関する情報を収集・分析することで、最適な水素ステーションタイプの選択や効率的な運営が実現される可能性がある。つまり、水素ステーションの新設にあたっては水素需要量に応じた最適なタイプの選択を、その運営にあたっては各水素ステーション周辺地域での水素需要量に応じて水素輸送量や回数を調整することで、水素物流の最適化による運営コストの低下を図れると考えられる。

さらに、現在では1カ所でしか運営されていない移動式ステーションについても、FCVの走行履歴や水素残量から想定される日ごとの水素需要予測が行えれば、コンテナ型の水素供給車の設営場所のみを複数確保し、幅広いエリアの水素需要に対応できるようになる見込みがある。

IV ICTの活用に向けた課題

第Ⅲ章で述べたように、特に水素社会黎明期は、分散している水素製造・供給・利用機器をネットワーク化し、それらを相互に効率

的に利用することで、デスバレーを越える一助になると想定される。ネットワーク化と安易に述べたが、実際には水素製造・供給・利用機器のメーカーおよびユーザーが連携して情報を一元化する難しさが存在する。

たとえば、FCVへの最適水素給水ステーション案内や水素ステーションごとの最適水素価格設定、水素ステーションの効果的設置・運営には、多くのFCVの位置情報、走行・水素充填履歴、水素ステーションの利用情報・水素残量、水素サプライチェーンの生産・物流情報が、場合によってはリアルタイムで集約されることが必要となる。つまり、これらを実現するためには、関係者の理解と協力が不可欠である。

水素は、二酸化炭素排出量の削減やエネルギーセキュリティの向上など、日本が抱える複数のエネルギー問題が解決される可能性がある、高いポテンシャルを秘めたエネルギーである。また、日本の水素・燃料電池関連分野での特許出願件数は世界で第1位と、国際的に強い競争力を持っており、産業振興や地域活性化といったメリットをもたらすとも考えられる。

そこで、今後はその水素社会の実現に一步近づくために、ネットワーク事業者と自動車関連メーカー、水素インフラ事業者といった異なる分野の事業者間でのより一層の連携が進み、水素社会の実現可能性がさらに高まることを期待する。

注

- 1 研究戦略、技術経営、プロジェクトマネジメントなどにおいて、研究開発が、次の段階に発展しない状況や、その難関・障壁となっている事

柄を意味する。水素社会においては、燃料電池自動車や水素ステーションなどが量産化に至るまでに、製品コストが高すぎたり技術的不備があったりすることで、技術・製品の導入・普及が進まないステージを意味する

- 2 ある製品やサービスの普及率が急速に上昇する分岐点となる普及率を指す
- 3 経済産業省資源エネルギー庁燃料電池推進室の資料「水素の製造・輸送・貯蔵について」(2014年4月14日)に基づく。過去の各種調査より抜粋されたものであり、必ずしも同じ前提に従って計算されたものではない。また、各エネルギー価格の変動に伴い、コストが変化しているものもあると想定される
- 4 各物質の熱量は、水素および天然ガスについては気体状態を、ガソリンについては液体状態を前提としている
- 5 高圧ガスの形態で水素を貯蔵・輸送する場合には高圧ガス保安法により45Mpaが最高圧となっ

MIRAIは「低充填サイクル国際圧縮水素自動車燃料装置用容器特例」として、充填圧が最大70MPaの水素タンクの搭載を認められている

著者

佐藤弘幸 (さとうひろゆき)

グローバルインフラコンサルティング部電力・ガス・石油グループコンサルタント

専門はエネルギーなどインフラ関連分野における経営戦略、事業戦略策定、海外展開支援など

金子哲也 (かねこてつや)

グローバルインフラコンサルティング部電力・ガス・石油グループグループマネージャー

専門はエネルギーなどインフラ関連分野および自動車分野における経営戦略、事業戦略策定、政策立案、海外展開支援など