

## 次世代エネルギーシステムの展望（水素エネルギーを中心に）

山地憲治（東京大学）

今日の文明社会は、化石資源にそのほとんどを依存する安定で低廉なエネルギー供給の上に築かれている。しかし、現在のエネルギーの主力である在来型の石油資源には供給力にピークが見え始めている。また、環境面からは、地球温暖化対策のために低炭素社会の実現が求められている。現在はエネルギーシステムの大きな転換点である。この中で、電気と同様にクリーンな二次エネルギーである水素に大きな期待が寄せられている。水素エネルギー社会の構想は30年以上前に提起され、その実現にむけて様々な努力が行われてきた。そして今や、燃料電池は商用化の直前にあり、水素エネルギー社会は現実のものとなりつつある。

しかし、厳しい競争にさらされる実用化という現実直面して、定置用にしても自動車用にしても、水素利用に伴う様々な障壁が明確になりつつある。水素エネルギーに関する今までの技術開発は、水素利用技術としては燃料電池がリードしているが、燃料電池に供給する水素製造については様々な技術開発が行われている段階で、将来に期待されている水素エネルギー社会において主力となる技術はいまだ絞り込まれていない。水素の輸送や貯蔵に関する技術についても様々な提案が並立している状況である。現在最も実用化に近いと考えられる家庭用燃料電池システムでも、現在見通せる性能ではそれほど大きな市場は望めないし、化石燃料から製造する水素を利用している場合はCO<sub>2</sub>削減効果も限られたものになる。水素エネルギーに対する期待と現実のギャップは、今はまだ極めて大きいといわざるを得ない。

しかし、新しい技術システムの展開には時間がかかる。中でも、エネルギー供給技術の場合、特に長い時間がかかることが歴史的にも示されている。20世紀に大きく花開いた電力システムも、エジソンの白熱灯がガス灯を凌駕する市場を獲得するまでには事業開始後30年以上かかっている。その間に交流と直流の争いがあり、今日の大規模な電力システムが形成されるまでには長い年月がかかっている。原子力の場合も同様で、開発当初は発電だけでなく、熱供給はもちろん、機関車や航空機、船舶など様々な応用が追及された。発電技術にしても、種々の形式の原子炉が開発され、現在の軽水炉が実用炉として定着するまでには長い年月を要した。

水素エネルギー社会の実現にいたる道程においても、現実社会での技術の選択は長期間を要し、その道筋を具体的な展開シナリオとして現時点で予測することは不可能であろう。ここでは、個々の技術ではなく、エネルギーシステムの歴史的な構造変化に着目して水素エネルギー社会のゴールへの道筋を提示したい。

18世紀の動力革命以降のエネルギー資源の歴史的変遷を振り返れば、薪炭から石炭、そ

して石油から天然ガスへと炭化水素資源の中で水素比率の高い燃料へとシフトしていることが分かる。IIASA（国際応用システム分析研究所）の N. Nakicenovic は、世界で消費される一次エネルギー単位量あたりの炭素比率（炭素強度）は百年以上の長期的傾向として年率 0.3% で減少していることを見出している。このようにエネルギーは歴史的傾向としても低炭素化に向かっており、水素エネルギー社会もその傾向の中に位置づけられる。もちろん水素は二次エネルギーであるから、水素製造においても低炭素であることが必要であり、究極的なゴールは CO<sub>2</sub> 排出ゼロの水素製造である。また、二次エネルギーの形態としても歴史的に固体から液体、さらに気体あるいは電気や熱のような無形のものへと変遷しており、この過程の中で二次エネルギーの利用効率と環境特性が大きく改善されてきている。水素はこのような 2 次エネルギーの歴史的傾向の下でも電気とともに将来の主力エネルギー形態として期待される。

純粋の水素がエネルギーとして最初に利用されたのは 1920 年代の飛行船の燃料である。当時の飛行船の主燃料はガソリンであったが浮力維持用の水素も補助燃料として使うようになっていた。現在の水素利用のほとんどは化学工業原料としてであるが、前記のように 1970 年代に水素エネルギー社会構想が提起され、固体高分子形燃料電池が注目を集めるようになった 1990 年代に再び水素エネルギー社会の具体的な展開が始まった。1999 年にはアイスランドが世界初の水素エネルギー国家を目指す長期計画を発表して注目を集めた。アイスランドの一次エネルギー資源はほとんどが地熱と水力であり、これら再生可能エネルギーから水の電気分解で製造する水素はまさしく水素エネルギー社会のゴールに一致するものである。

しかし、現在の水素製造の主流は化石燃料、特に天然ガスによるものであり、化石燃料からの水素製造プロセスでの CO<sub>2</sub> 排出を回避するためには CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術と組み合わせねばならず、このシステムの実用化にはまだかなりの年月が必要になる。また、原子力や太陽熱等を利用する集中的な大規模水素製造の場合は、生産技術自体の開発に加えて、生産した水素の配送・貯蔵が必要になる。水素は電気と違って化学物質であるから輸送・貯蔵で有利な面もあるが、本書第 3 章で詳しく説明したように、その具体的な技術についてどれが主流になるかまだ将来が明確に描けていない。なお、液体水素の冷熱を利用してマグネシウム・ホウ素合金の超電導材料を用いて電力と水素の双方を輸送するスーパーエネルギーパイプラインというユニークな技術提案もある。

一方、バイオマスを含めて分散型の再生可能エネルギーから、水の電気分解などによって水素を製造する方法は経済性に問題がある。また、再生可能エネルギーによる電気が経済的に生産できるとした場合でも、電気を更に水素に変換することのエネルギーシステム上のメリットが明確ではない。水素に変換することで間歇的な自然エネルギーの平滑化が可能になることや、水素を長距離輸送することで僻地の再生可能資源の利用が可能になるというメリットが注目されるが、その場合には集中的な水素製造の場合と同様に、水素の輸送・貯蔵技術の実用化が前提になる。結局、アイスランドのように安定的な再生可能エ

エネルギー資源に恵まれた地域以外では、現状の技術水準ではこのような分散型の水素利用についても多くの障壁がある。

ただし、低炭素社会の実現を目指すこれからのエネルギーシステムにおいて、水素エネルギー社会の実現に追い風となる重要な傾向を指摘することが出来る。それは、分散型エネルギーシステムの展開である。分散する需要を統合することで 20 世紀の電力システムは大きく発展して文明社会の基盤を提供したが、発電技術における規模の経済は既に飽和する一方で、コージェネレーション発電の高効率化技術や風力発電をはじめとする各種自然エネルギー技術、さらにはバッテリーなど小規模エネルギー貯蔵技術が急速に進展してきている。水素を燃料とする燃料電池はそのもっとも有力な技術である。このような分散型エネルギーシステムは、電力系統の発達していない地域に電力供給の恩恵をもたらすだけでなく、従来の大規模電力系統と連系することで経済性や環境特性上の利点を更に大きく実現することが可能になる。これは電力系統を公共インフラとして成立するエネルギーシステムの大きな変革であり、低炭素社会の実現に大きな寄与が期待されている。

極端なケースであるが、「エントロピーの法則」という著書で知られるジェレミー・リフキンは水素エネルギーウェブ (HEW) を提唱している。HEW は燃料電池による分散電源が IT 革命と融合して作り出す新しいエネルギーシステムである。HEW では、自動車用を含めてすべての燃料電池が電力系統に連系されるとともに、インターネットで情報的にも接続され、エネルギー貯蔵システムを含めて高度な電子制御を通して運用される。このようにして何万台もの燃料電池がヴァーチャル発電所として運用され需給調整が図られるというわけである。これは現在の系統技術の下では夢物語であるが、情報通信技術の発展が電力系統と融合するとともに、FACTS(Flexible AC Transmission System)のようなパワーエレクトロニクスの応用によって電力系統制御の範囲が大幅に拡大すれば現実に近づいてくる。ただし、HEW のような燃料電池による未来型のエネルギーシステムが実現した場合の水素供給について、リフキンは燃料電池自動車への水素供給ステーションの活用に触れているだけで具体的な詳細は述べていない。HEW においても、CO<sub>2</sub> を発生しない水素の製造技術と経済的な水素の輸送・貯蔵技術の開発が課題であることに変わりはない。

リフキンの提唱する HEW はインターネット時代の水素エネルギーシステムとして魅力的に思われるが、良く考えてみれば、ここにも二次エネルギーとしての電気と水素の競合がある。燃料電池に代えて安価な蓄電池の実用化を前提とすれば、HEW で想定されたような分散制御による需給調整が可能な電力システムによって電源をすべて間歇的な再生可能電源とすることが原理的に可能であり、自動車の駆動源も電池にすることによって電気と自動車の双方を再生可能電源でまかなえることになる。これも究極的な低炭素社会のエネルギーシステムとなりうる。

このように具体的に水素エネルギー社会への道筋を考えることで、水素エネルギー社会実現のために基本的に必要な課題が浮かび上がってくる。水素エネルギーシステムは低炭素社会を支える重要な基盤になりうるが、それが唯一の解であるわけではない。全電力シ

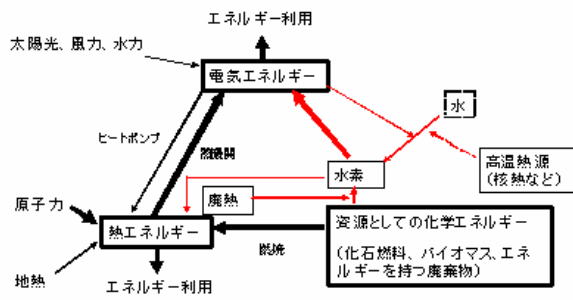
システムとの比較、特に蓄電池開発との比較評価を常に意識し、水素の製造と利用だけでなく輸送・貯蔵技術の開発の重要性を十分に認識し、長期的には CO<sub>2</sub> を排出しない水素製造の実現を目指す必要がある。

(山地憲治編著：「水素エネルギー社会」、エネルギー・資源学会、2008年より)

#### **参考：水素エネルギーに期待されるメリット**（「水素エネルギー社会」1.4節より）

資源と環境の両面から持続可能なエネルギーシステムという視点から見た水素に期待されるメリットは以下のように様々に考えられる：1) 燃料として利用時点でクリーン（生成物が水）であること、2) 多様なエネルギー資源から製造できるため特定資源の供給制約を避けられること、3) 小規模でも高効率で電気に変換されること、4) 原子力や各種再生可能エネルギーからも生産できるため製造時にも CO<sub>2</sub> 排出を避けられること、5) CO<sub>2</sub> 回収貯留(CCS: CO<sub>2</sub> Capture and Storage)と組み合わせれば大量に貯蔵する石炭資源からも CO<sub>2</sub> 排出を伴わずに水素を製造できること、6) 製鉄や石油精製、ソーダ工業など種々の産業プロセスで副生される水素を有効利用できること、7) 長距離大量輸送が可能であるため僻地の自然エネルギー資源を水素に変換して利用できること、8) 廃アルミなどエネルギーを含む廃棄物を利用して製造できるため循環型社会形成に寄与できること、9) 低温廃熱を利用して必ずしもクリーンでない他の化学物質から製造できること、10) 水素の電気化学特性を利用した蓄電池やヒートポンプなどを通してエネルギーシステムの効率化に寄与できること。

なお、以上のような水素の特徴をエネルギー変換の視点から整理すると下図のようになる。従来のエネルギーシステムでは、化石燃料と原子力を熱エネルギーに変換し、それを熱機関によって電気エネルギーに変換するという図中では時計回りで示されるエネルギー変換が主流である。しかし、水素の導入によりエネルギー変換経路は多様化し、中でも、燃料電池によって化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換する経路が開かれ、エネルギー変換の向きを逆転する可能性が生まれる。



水素によって利用可能になる新たなエネルギー変換経路