

米国水素エネルギーロードマップについて

—米国のより確実にクリーンな将来のエネルギーに向けて—

原田 亮

東芝インターナショナルフュエルセルズ株式会社

〒210-0862 川崎市川崎区浮島町 4-1

National Hydrogen Energy Roadmap

— Toward a more secure and cleaner energy future for America —

This Roadmap provides a blueprint for the coordinated, long-term, public and private effects required for hydrogen energy development. Hydrogen provides high efficiency, can be produced from a variety of domestically available resources, and offers near-zero emissions of pollutants and greenhouse gases.

The first step in that process resulted in publication of the National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy. This Roadmap represents the next step in that process.

Hydrogen has the potential to play a major role in future energy system. This Roadmap outlines key issues and challenges in hydrogen energy development and industry can take to expand use of hydrogen-based energy.

はじめに

本ロードマップの目的は、水素エネルギーを開発するために、米国全体の英知を一同に集結し、同じ方向に向かわせるためのガイドラインとして作成した。今後10年の間に、米国は、電力と輸送燃料の需要拡大に対応するため、新しいエネルギー供給源と、より高度なエネルギー基盤設備が必要になると考えられる。

水素というエネルギー源は、効率が高く、国内で調達できる様々な資源から生産することが可能であり、また、環境性の高いエネルギー源でもある。しかし、水素をエネルギー媒体として供給するには、技術的な、そして生産的な点から、あるいは法的な、あるいは経済的な点から多くの問題が横たわっており、解決していかなければならない課題がいくつもある。

国家エネルギー政策の勧告に従い、米国エネルギー省は水素エネルギー政策活動に着手した。この政策活動は、米国のエネルギー供給の多様性を高めるとともに、現状のエネルギー政策から脱皮し、新しいエネルギー源を求めるために次世代技術に焦点をあてた政策活動である。

本ロードマップは、研究開発計画でもなければ商業化

計画でもない。このロードマップは、国民に対し、水素エネルギーを導入することが米国のエネルギー需給や環境問題を解決できる鍵を握っていることを理解してもらうために作成したものである。このロードマップを理解することにより水素エネルギーシステムを正しく認識することができ、米国国民および産業界は、水素エネルギー開発活動に投資を行うことで、水素エネルギー開発に参加できることを理解できるであろう。

1. 緒言

水素をエネルギー媒体とした水素エネルギーシステムの普及は、省エネルギー、地球規模の気候変化、大気汚染など、現在米国が抱えている諸問題を解決する可能性を有している。水素は国内で調達できる化石燃料、再生可能資源、原子力など、様々な1次エネルギーを利用して生産できるという利点を持っている。水素のもう一つの利点は、水素をエネルギー源として用いれば、環境に対して影響を及ぼさないと点である。

表1. 水素エネルギー開発に影響を与える因子

促進要因	阻止要因	促進・阻止要因
○米国の安全保障 石油輸入量を低減する必要がある。 ○地球温暖化阻止 温室効果ガスの排出量を削減する必要がある。 ○世界人口と経済の成長 ○適正な価格のクリーンエネルギー源の必要性 ○大気環境保全 自動車排ガスと発電所から大気汚染ガスの排出量を削減する必要がある。	○長期エネルギー政策の優先事項として水素エネルギー開発を推進することについて、国民の合意を形成・維持することの難しさ。 ○水素基盤設備の欠如とその建設費用の捻出。 ○低コスト水素製造・貯蔵技術、及び変換装置の欠如。 ○水素の安全性の確立 ○水素分離技術の低コスト化。	○水素及びその他のエネルギー技術の急速な進歩。 ○石油に代表される利便性のある低コスト燃料の世界的な普及と、不可避な枯渇問題。 ○環境負荷低減のためクリーンなエネルギーと安価なエネルギーを同時に求める消費者の意識。

このような利点があるにもかかわらず、水素をエネルギー媒体として利用するためには問題が山積している。例えば、エネルギー媒体として水素を考えた場合、現在の化学プラントで製造している価格では見合わない。また、現行の法規制のため、一般社会への普及は難しい。このような状況を打破しない限り水素エネルギー社会の実現は難しい。表1は、水素エネルギー開発に影響を与える促進および阻止要因についてまとめたものである。促進要因に対し阻止要因は現在顕在化している課題を示しており、今後解決すべき社会的、ないしは技術的項目について示している。

米国エネルギー省は、水素経済社会の実現に関して利害が生じる関係者の意見を公聴するために、これまでに2回の会議を開催している。その一つが水素展望会議であり、もう一つが水素エネルギーロードマップワークショップである。

水素展望会議は2001年11月15,16日に開催され、50人以上の企業経営者と米国議会議員や環境団体の代表が参加し、以下の知見を得ている。

- (1) 水素エネルギー社会の実現は、石油の輸入依存率を低下させるとともに、温室ガスの排出を低減する可能性がある。
- (2) 水素経済社会への移行は始まっているものの、その移行には数十年かかる。
- (3) 水素に関する技術開発を全面的に推進する必要がある。

- (4) 水素の需要供給システムを確立する必要があるが、この問題は「ニワトリと卵」的な問題と認識する。
- (5) 米国政府および州政府は、水素エネルギー開発を促進する政策を実施する必要がある。
- (6) 水素エネルギーの開発と利用に関する新しい枠組みを作り出すために、官民一体となった緊密な連携が必要である。
- (7) 水素エネルギーロードマップの作成にあたっては、製造、貯蔵、供給および利用方法に関し重点的に検討する必要がある。また、啓蒙活動としての教育や広報、さらには標準化を含めた法整備についても取り組む必要がある。

これらの知見をもとに、米国水素エネルギーロードマップワークショップを2002年4月2,3日に開催している。

米国水素エネルギーロードマップワークショップでは、官民あわせ約220人の専門家集団が参加し、計画を実現化するための議論を行っている。本ロードマップは、このワークショップの成果である。なお、このロードマップは米国エネルギー省が作成する「輸送、携帯型電源、および定置分散型電源の用途において2012年までに燃料電池を商用化することの技術的および経済的障壁」という燃料電池に関する報告書と相互補完的關係にあり、本報告書は、ワークショップ参加者が提起した考えと優先事項を反映したものである。(筆者注：米国エネルギー省が2002年2月に発表し

た「国家展望書」および4月に発表した「議会への燃料電池報告書：中間評価」は、web site (www.eren.doe.gov/hydrogen) からダウンロードできる。また2003年度に公表されたその他の報告書もダウンロードできる。)

2. 水素エネルギーシステム

水素エネルギーシステムとは、水素をエネルギー媒体として利用する社会システムであり、経済的側面も含んでいる。水素の需要と供給が整わなければ、水素をエネルギー媒体として利用する社会の実現はありえない。水素をエネルギー媒体として利用するには、既存エネルギーである石油などと同様の、利便性の高い経済的なシステムの構築が必要である。

これまで、水素はエネルギー媒体として利用されなかったが、これは石油などと比較して利用しにくいエネルギー源だからである。石油と同様に扱うためのシステムを確立するには、以下の7つの項目を達成する必要があり、これらの項目を開発または達成することで、水素を媒体としたエネルギーシステム社会が確立できる。

- (1) 水素利用に関する国際的な規格標準の作成。
- (2) 水素の安全性の確立。
- (3) 水素の経済的な価格の実現。
- (4) 水素全般に関する基礎的な研究開発の推進。
- (5) 官民一体となった組織的な技術の実証活動。
- (6) 競合エネルギーシステムとの経済的および技術的側面からの比較の実施。
- (7) 水素エネルギーに関する一般への情報公開。

水素エネルギーシステム社会は、技術を十分に開発し、かつ経済的に確立し、社会が享受しない限り現実化することはない。もしこの社会が現実化すれば、水素エネルギーシステムが最適になるように需要と供給の均整が図られるようになり、システムの進化が起これと考えられる。

水素がエネルギー媒体として認知され普及するためには、一般社会に受け入れられる土壌が必要であり、これを確立するには、政府の長期的永続的な指導を必要とする。

(訳者注：以下の3節に示す水素の生産方法から、7節の水素エネルギーの応用に至るまでの各節のそれぞ

れの関係は、図1に示した通りであり、読者はこの図を参照して読んで頂きたい。)

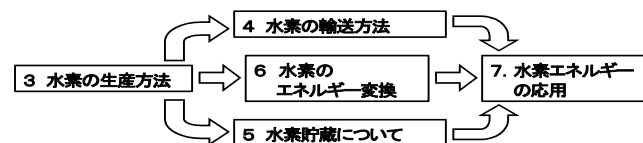


図1 3節から7節の関係

3. 水素の生産方法

米国の現在の水素生産量は年間900万tonである。水素生産の主目的は、化学薬品の原料、石油精製、金属処理、および発電機器に利用するためである。ごく僅かであるが、アメリカ宇宙局(NASA)により、ロケットエンジン燃料として利用されている。

年間900万tonという水素生産量は、水素燃料自動車の2000~3000万台に供給できる量であり、家庭に供給する電力に換算すると500~800万軒に供給できる生産量と推算される。

エネルギー担体として水素が利用されると仮定した場合には、全米で年間4000万tonの水素が必要となり、現在の約4.5倍の生産を行うことができる水素生産設備が必要となる。この年間4000万tonの水素を生産するための計画として、分散型生産方式と集中型生産方式に分け、各々の水素生産設備の建設を推進する予定である。また、4000万tonの水素生産方法のシナリオも検討しており、これを表2に示す。現在開発中の方法および研究されている方法については以下に示したとおりであり、今後、各生産方法の研究開発を促進させる計画である。

3.1 メタンの水蒸気改質方式について

この方法は最も一般的に使われている方法であり、現在の、水素の生産の95%を占めている。現在利用で

表2. 生産方式と4000万tonの水素生産方法のシナリオ

分散型生産方式	分散型電気分解装置を100台建設し、自動車および電気のエネルギー源として用いる。また、既存のガソリンスタンドの約1/3にあたる67000ヶ所に小型改質装置を建設する。
集中型生産方式	大型石炭火力発電所を同規模のプラントを140ヶ所建設する。 水素生産専用原子力発電所を100ヶ所建設する。 石油と天然ガスプラント小型石油精製スケールプラントを20ヶ所建設する。
4000万ton 水素製造シナリオ	10万台の小型電気分解装置により400万ton製造 スタンド補給所設置の15000台の小型改質装置により800万ton製造 30ヶ所の石炭・バイオマスガス化プラントにて800万ton製造 10箇所の原子力発電水分解プラントにて400万ton製造 石油・ガス用のメタン水蒸気改質・ガス化装置を用いた7箇所の大型精製所にて1600万ton製造

きる最もエネルギー効率の高い技術である。大規模な、かつ一定の生産量を得る場合には有効な方法である。しかし、二酸化炭素が生成してしまい、地球温暖化ガスの排出を避けることができない。また、二酸化炭素の分離を行わなければ水素の純度を上げることができないという欠点を持っている。

水蒸気改質反応を水素生産方法として選択した場合には、水素製造コストを下げ、効率を高めるといった技術の改良が必要であり、また、小型改質装置の開発を行い、貯蔵システムと燃料電池との統合を図るために、技術を洗練させるという課題を有している。

3.2 部分酸化反応方式について

大規模石油精製プラントで行われている方法である。メタン、重油、石油、石炭など多数の燃料を使用できる特徴を持つ。水蒸気改質反応方式と同様に、水素を取り出す分離方法に関して開発する必要がある。高効率で大規模な二酸化炭素分離法が開発されれば、この方式は有望であると考えられる。

3.3 新しい水素製造方法について

現行の技術は、二酸化炭素の排出を伴うため、温室ガスによる地球温暖化を避けることができない。新手法は、風力、太陽、地熱といった自然エネルギーを利用した電気分解による方法である。特に二酸化炭素を排出しない光水分解システムの開発は、光エネルギー

を利用して水を分解し水素を発生させるのであるが、この方法は将来効率が高まれば最も有望な方法である。水の分解効率を高めることにより、これまでの方法を凌駕する可能性がある。この方法はまだ研究の段階であるが、将来的には有望な方法であると思う。

また、微生物による水素製造も再生可能資源を用いているという利点があり注目されている。この方法もまだ開発の初歩段階であるが、省エネルギー的な方法であり、魅力的である。しかし、大規模に継続的に水素を発生させる装置としては、まだ、技術的に未熟であり商用化の道のりは遠いと考えられる。

水素の製造に関しては、経済的に水素を生産する方法を研究、開発、実証する必要がある。水素製造コストを下げ、効率を高め、水素純度を向上する技術を開発する必要がある。

4. 水素の輸送方法

水素エネルギーの基盤設備全体に影響を及ぼす可能性がある重要要素の一つとして、水素の輸送方法があげられる。水素輸送は、安全に確実に供給するシステムを確立しなければならないという大きな開発課題がある。

現状の水素の輸送方法は様々であるが、実際に水素エネルギー社会を形成するためには多くの課題を抱えている。この課題を表3に示す。課題点は多岐にわた

表3. 水素供給に関する課題

工学的側面	環境と社会的側面	市場経済的側面
<ul style="list-style-type: none"> ○安全に水素を輸送のために水素含有化物にした水素キャリアーから、水素を取り出す経済的な方法がない。 ○セルフサービスで燃料を補給する設備での水素供給の安全性を保障する技術解決策について、さらなる実証と開発が求められている。 ○設計に必要な物性値が公表されていない。 ○燃料電池へ導入する水素の純度が明確化していない。 ○多種のガスが使用できるガスパイプラインの設計基準がない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○水素の規格・標準がない。 ○国際的に整合性のある規格がない。 ○水素製造に関し、環境的な要素を考慮した原価計算が行われていない。 ○種々の水素製造に対する環境負荷特性の評価が行われていない。 ○水素の液化は、エネルギー消費が多く、結果として温暖化ガスを排出する。 ○州と国との利害関係の対立は、水素を受け入れる上で障害となる。 ○化石燃料を用いて水素製造を行うことは、大気環境汚染や地球温暖化ガスの排出に繋がる。 ○これまでに水素の取り扱いや安全性に関する経験と知識が不足している。 ○政策として国民に理解を求めることが難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> ○既存燃料から将来燃料である水素へ移行するための経済的戦力の欠如。 ○水素燃料技術のコストダウン戦略の欠如。 ○現在の水素供給システムは消費者ニーズに合わず、コストと利便性に問題。 ○水素燃料の価格調整機能が欠如。 ○現在行っているチューブトレーラ重量と容積の不経済性の問題。 ○圧縮水素の低エネルギー密度に起因する、輸送コストの低減方法の欠如。 ○気体水素の長距離輸送の不経済性。

表4. 水素供給に関する今後の課題

要求事項	関係者
建設法規と機器の標準の作成	産業界が主導の下、政府機関が支援と資金援助を行う
州をまたがる水素配給の実験的実証	産業界が中心となって、政府と州が出資
水素製造原料価格に依存しない水素の価格調整の実施	政府の主導と出資に対し国立研究所と大学が支援
水素の市場を形成するための経済保護政策の実施	政府と州が主導
水素輸送コストを数値化した指標と目標で技術開発していく戦略	産業界と政府が主導し国立研究所と大学が支援

っており、重点施策が見つからないのが輸送方法の課題の特徴である。

水素パイプラインはテキサス州などにあるが、これは大型石油精製所や化学プラントが集中している地域という背景があるからである。全米から見ると、一部の限定された地域しかこのインフラは存在しない。こ

のため、内陸部では小規模の水蒸気改質反応方式のプラントにより水素が製造されており、大規模な輸送は行われていない。都市ガスと同様に扱いやすいインフラであるパイプラインを消費者は求めると思われるが、この最も扱いやすいインフラは地域が限定されてしまうという欠点を持っている。 高圧タンクによる気相

の水素輸送は200マイルまでであり、この輸送に関する法的な規制が今後問題となると考えられる。また、1000マイルまでの長距離輸送は、液体水素で輸送されている。液体水素は、超断熱低温タンカー車、鉄道車両、船などにより輸送され消費地で気化して用いられている。現行の水素輸送システムは、決して実用的ではない。他のエネルギー燃料と同様に、水素も消費者が扱いやすいエネルギー燃料にするべきである。また、輸送コストの低減や安全性の確保を求められるだろう。

水素輸送は、現在行われている方法以外にはほとんど検討されていないのが実情である。今後の方策を表4に示したが、政府の支援が重要と考える。また、これまで開発されていなかった新規技術を開発する必要があると考えられる分野であり、次節で述べる水素吸蔵合金、カーボンナノチューブ、水素化物を利用した輸送技術の開発を促進させなければならない分野であると思われる。

5. 水素貯蔵について

水素貯蔵は、前節の水素輸送とともに、開発要素の大きい分野である。水素を扱いやすくすることで、水素エネルギー社会が実現化する時期が大きく変化する可能性のある分野である。この水素貯蔵技術の開発が進行すると大きな発展に繋がる。

5.1 水素貯蔵方法

(1) 気体水素の貯蔵

最も一般的な水素貯蔵方法であり、圧縮水素ガスボンベは世界的に見ても一般的に普及している方法である。水素密度が低いという欠点があり、ボンベによる貯蔵はエネルギー輸送の観点からも効率の悪い方法である。この効率を上げる唯一の方法は、圧縮率を高めることであり、70MPa程度の圧力に高める必要がある。しかし、この高圧技術の開発は長らく行われてきた技術であり、今後も続くと考えられる。

(2) 液体水素の貯蔵

液体水素は、貯蔵容積を小さくできるという利点があるものの、極低温コンテナを必要とする。また、水素の液化はエネルギーを多く必要とするプロセスであり、エネルギー消費の多いプロセスである。最大の欠点は蒸発により多くの損失を伴うことであり、水素に

含まれるエネルギーの約1/3が失われる。この欠点を克服することが現在の課題である。

(3) 水素貯蔵合金、カーボンナノチューブ、アルカリハライド

水素は、金属水素化物として高密度で貯蔵できる。また、最近では炭素構造中にも貯蔵できるようになった。水素が必要なときは、温度と圧力のある条件に設定することにより取り出すことができる。近年、錯体化合物が水素を貯蔵できることが判明し、優れた重量特性を持つことが確認されている。

現時点で最も有望と考えられているものはカーボンナノチューブである。現在も開発が続けられており、その完成が待たれている。

また、アルカリハライドも水素貯蔵に適しているということが判明している。アルカリハライドはアルカリ溶液として溶液中に貯蔵できる化合物である。水素は、このアルカリハライドに可逆的に貯蔵と放出が行われることが判明しており、ガソリンに代表される可燃揮発性燃料の貯蔵に比べ安全性が高い方法として注目を浴びている。今後、アルカリハライドプロセスのコスト低減が最も注目を浴びることとなるであろう。アルカリハライドを実用化するには生産、供給、リサイクルプロセスの整備が課題となる。

5.2 貯蔵における消費者のニーズ

自動車用水素貯蔵タンクは、一般消費者が最も気にする点になると思われる。水素の貯蔵タンクはガソリンタンクと同様に簡便で、かつ数分のうちに満たすことができなくては、普及はありえないと思われる。また、一回の給水素で、300から400マイルの走行が可能でなければ消費者は満足しない。

一般消費者はガソリンと同等のコスト、利便性、および走行距離を期待する。燃料電池自動車は、現在、水素3kgで100から150マイルの距離を走行できるが、一般に普及させるためには300から400マイルの走行距離が必要である。これには、おおよそ5kgの水素を搭載できるようにしなくてはならないが、この目標を達成するにはどのような方法が適しているかが今後の研究開発のポイントとなるであろう。ガスの圧縮貯蔵、極低温液体貯蔵、アルカリハライド、吸蔵合金、カーボンナノチューブなど、候補となるオプションは様々であるが、最終的には安全性が高く、かつ利便性がよ

いという観点から水素貯蔵の方法は解決されると思われる。

6. 水素のエネルギー変換

ここでいう変換とは、水素を燃焼ないしは酸化することにより電気、機械、および熱エネルギーに変換することを意味する。つまり、水素を原料とした、エンジン、タービンまたは燃料電池をさしている。ここでは、これらの機器の概要について述べる。

6.1 エンジンおよびタービンについて

水素エンジンは、米国においては詳細に研究開発を行った技術と位置付けている。これまでに米国ではNASAと国防省が宇宙開発、特に無人ロケットメインエンジンとスペースシャトルエンジンに利用しており、米国で開発されてきた技術でほぼ十分であるという認識に立っている。

しかし、水素タービンは燃焼器などの開発が必要であり、この技術を確立するためには材料の開発が重要であるという認識に立っている。

既存の水素エンジンとタービンは、技術上完成の域に近いと位置付けているが、さらに長期間の運転を保障できる耐久性が要求されており、これを満足するためには飛躍的に耐久性のある材料開発を行なわねばならない。

6.2 燃料電池について

燃料電池は、各種の燃料電池が開発されているが、どれも開発途上にあると位置付けている。燃料電池はコジェネ的な利用法である電気と熱を併給する場合には最大で80%の効率を得ることが報告されていて、期待の高いエネルギー機器である。これまでに5種類の燃料電池が開発されているが、これらの概要について述べることにする。

リン酸形燃料電池は、実用という観点からは、最も開発の進んでいる燃料電池である。分散型電源ないしはバックアップ電源として実用化されており、定置用電源として多数設置されている。

固体高分子形燃料電池は自動車エンジン代替、定置用および携帯用電源として研究開発の段階にある。特に自動車エンジン代替として、過去数年間にほとんど

すべての自動車会社が開発に乗り出している。

アルカリ形燃料電池は宇宙開発用燃料電池として実績があるが、現在、自動車代替エンジンとしての応用が期待され研究開発が行われている。

熔融炭酸塩形と固体酸化物形燃料電池は高温作動形燃料電池であり、この特徴を生かすためには定置形コンパインド形サイクル発電に適用することが最もよいとされ、現在開発段階にある。

以上の、燃料電池用の水素の原料は化石燃料が適しており、実際に化石燃料を原料としたプラントが多数開発されている。既存技術が完成の域に近い水素エンジンやタービンに対し、燃料電池は開発すべき課題が多い。主な技術上の課題点は

- (1)電極触媒の改良によるカソードにおける過電圧の低減とアノードの一酸化炭素被毒耐性の向上
 - (2)卑金属電極触媒の開発による大幅なコスト削減
 - (3)固体高分子形燃料電池本体の高温型高分子膜の開発による電池本体の作動温度高温化とプラントシステム効率の向上
 - (4)低温作動型固体酸化物形燃料電池の開発とシステムコストの低減
- である。

このような課題を解決するためには、産業界が中心となり、政府および大学との連携をとりながら研究を進めるのがよい方法であり、今後政府が主体となって指導していく点であろう。また、将来的には燃料電池の生産性を高め、燃料電池の新市場を開拓していくという課題もある。燃料電池の運転データを集めることによりプラントの信頼性が向上すると考えられ、様々な環境下での試験運転を行うことにより、燃料電池の技術課題を克服でき、かつ市場開拓も可能となる。

6.3 市場化への導入課題

水素エンジンとタービンおよび燃料電池の将来性は高く、広く商用化されると推測している。表5に示したように、各水素利用エネルギー機器はさまざまな分野に応用が可能である。水素エンジンとタービンに対して燃料電池の技術は成熟していないが、今後、技術開発を行うことにより、適切なエネルギーサービスが提供できる可能性を持っていると考えている。

既存のエネルギー機器に対抗してコスト競争力のある水素エネルギー機器を市場に送り出すことが最終的

表5. 水素エネルギー変換の課題

工学基礎	エネルギー変換機器	市場と経済	政策
<p>○材料科学及び材料工学と電気化学の専門性の相違を補完する。</p> <p>○エンジン設計とタービン設計との専門性の相違による水素燃焼の技術的扱いの相違を補完する。</p>	<p>○燃料電池の性能と耐久性を向上する。</p> <p>○燃料電池プラントのコストダウン。</p> <p>○水素エンジンと水素タービンの効率の実証。</p> <p>○エンジン及びタービンへの水素燃焼が及ぼす影響のデータ開示または実証。</p>	<p>○化石燃料に対する水素燃料の付加価値の明確化。</p> <p>○分散型コジェネレーションシステムを幅広く導入するための収益性の高いビジネスモデルの構築。</p> <p>○競合技術の凌駕による経済的リスクの回避</p>	<p>○水素エネルギーに関する機器の製品安全規格の欠如。</p> <p>○移動用及び定置用の水素エネルギー変換装置の導入安全規格と運転安全基準の欠如。</p> <p>○水素エネルギー変換装置の利用拡大のための政府及び州の一貫した政策の欠如。</p>

表6. 水素エネルギー変換に関する技術と市場導入への課題

燃料電池	水素燃焼	実証試験	標準と規格	分析
<p>新規材料の開発とプラント機器の制御開発及び電気化学における基礎研究計画の拡大</p>	<p>低コスト、高効率エンジン及びタービンの設計</p> <p>水素燃焼最適化制御装置の設計</p>	<p>多岐に及ぶ技術内容を含んだ、様々な環境下での実証試験プラントサイト数を増大させる</p>	<p>製品安全規格の作成</p> <p>防火、安全、配管工事などの建築法規の見直し</p>	<p>より信頼性の高い市場の分析</p> <p>既存の研究成果を整理し、一般に公開する</p>
<p>コストダウン設計</p> <p>製造能力の強化</p> <p>プラント構成機器のコストダウン</p>	<p>環境負荷低減のための水素・天然ガス混合燃料の検討</p>	<p>実証試験データの情報公開</p> <p>水素燃焼試験設備数を増大させる</p>	<p>水素車両標準の作成</p> <p>電力会社の系統連携基準の作成</p>	<p>衝突シミュレーションを行い、燃料電池本体の設計を強化する</p>

には最も大きな課題である。現状の開発状況を考慮した場合、水素エネルギー機器の導入を促進する政府の働きかけがない限り、現在のエネルギー機器に代わって水素エネルギー機器が市場を席卷するまでには時間を要すであろうと推測され、数年後に水素エネルギー社会が訪れるという可能性は低いと思われる。また、

革新的な安全技術を確立することなしに、水素エネルギー機器を市場に出すことは、危険物を社会に分散させることとなり、新たな社会的問題を引き起こす可能性がある。水素に関する安全技術の確立が市場への導入の推進となる可能性が高い。今後の技術および市場導入への課題については表6にまとめて示したので参

照して頂きたい。

水素エンジン、水素タービン、燃料電池は、水素エネルギーを利用しやすい電気エネルギーに変換できる発電機器であるが、コストが障害となっているので、応用開発部門はコストを低減する開発に専念するべきとの意見もある。

産業界は、分散型発電システムのための収益性の高いビジネスモデルの開発に重点を置き、政府は、エンジンとタービンの分野に対しては水素燃焼の基礎研究を、燃料電池に対しては材料開発や電気化学の基礎研究の支援を行うことが重要であると考ええる。

7. 水素エネルギーの応用

この節では燃料電池を中心に水素エネルギーの応用について展望する。水素をエネルギー媒体とした機器は、エネルギー機器として最終的な機器になると推測されており、もし開発が完成すれば、乗用車、輸送、発電、工業用機器などすべての動力源として使用されるようになる。コンピュータ、移動電話、インターネット接続装置電源およびほかの携帯型電子機器など、期待の高い応用がいくつもある。

水素は、家庭や事務所や工場に電気と熱エネルギーを供給するために、タービンやエンジン、あるいは燃料電池で利用されることとなる。

7.1 定置形発電装置

ガスタービンやエンジンなどのような燃焼プロセスを有している発電装置は、水素のみならず、他の例えば天然ガスなどとの混合燃料が使用できるように設計されている。水素を中心とした燃料多様化技術を推進することにより、高出力が得やすく、大型発電に応用できる可能性が高い。

一方、燃料電池発電はコジェネレーションシステムにより、高効率な発電システムとして技術が確立されているものの、業界は未成熟であり今後市場開拓を行う必要があると考えられている。現在商用化されている燃料電池プラントは、ほとんどが天然ガスを原料として改質技術を利用しているが、この天然ガスに代わり水素供給インフラが整い、水素が供給されるようになれば、低コスト化が実現できると考えられ、現在までに商用化されている燃料電池技術応用することによ

り、コストを低くすることが可能と推測され、今後この分野は期待ができると思われる。

7.2 携帯形発電装置

携帯用燃料電池の開発は、現在、産業界が最も盛んに開発している分野である。この応用は、民生用電子機器電源、業務用機会装置電源、さらには娯楽用の機器電源にまで及び、出力も 25W から 10kW まで幅広い出力が求められている。この携帯用燃料電池装置は、一部水素も用いられているが、メタノールを原料としたものが多く、今後、メタノール直接発電形燃料電池の開発も重要な開発となる。なお、特殊用途として、出力の比較的大きい燃料電池は軍用補助電源としても検討されている。

7.3 移動用燃料電池の応用

自動車メーカーは、水素燃料自動車の計画に従い、2003年から 2006 年の間にかけてさまざまなパイロットプラント的な自動車を公表する。初期の計画では 10～100 台程度の車両が評価のために公道を試験走行することになっている。

この自動車は、燃料電池自動車もあれば水素エンジン自動車もある。水素エンジン自動車は、これまでの自動車同様の技術水準で製造できるので、需要が保証されれば大量生産を行うことは非常に容易である。

一方、燃料電池自動車は、下記の課題を克服しない限り、実用化の道のは険しいと考えられている。特に、一般消費者のニーズに即した対応が必要であるので、以下の技術開発は必ず達成されなければならないと考えられている。

- (1) 燃料電池本体の高温膜の開発
- (2) 低電力消費センサーと制御装置の開発
- (3) 圧縮機、ポンプなどの機器の低重量化と低コスト化
- (4) 自動車用軽量二次電池と高容量キャパシタの開発

当面の課題は、耐久性、燃料電池スタックのコスト、システムの簡素化であり、改質装置などの部品についても研究開発に取り組み必要がある。これらの課題を達成するためには、政府の強力な援助が必要と考えられており、産業化と国立研究所、大学などが一体化した研究を行なわせるように指導を行うべきである。

表7. 移動用及び定置用燃料電池の仕様の比較

項目	移動用燃料電池	定置用燃料電池
最大出力	50～100kW	2～200kW
設計寿命	5000時間	50000時間
コスト	50～100\$/kW	300～1000\$/kW
本体出力	高電圧交流または直流	48VDC 220VAC
効率	高効率	高効率
出力密度 (容積基準)	高出力密度	通常出力密度
出力密度 (重量基準)	高出力密度	通常出力密度
運転モード	断続的	連続的
エネルギー貯蔵	可能性あり	可能性あり
過度応答時間	1/10秒	1/1000秒
燃料 (導入期)	ガソリンとディーゼル	天然ガス/プロパン
燃料 (普及期)	水素	水素

表8. 水素エネルギーの応用に関する要求と活動

要求	活動	実施団体
技術に基づく規格と標準に関する合意	標準化委員会を開設し、規格と標準の制定	政府及び州
官民連携によるシステム実証	カリフォルニア州燃料電池パートナーシップ計画など	政府及び州 地方政府機関
政府による初期採用	実証試験計画に着手	政府
基盤施設の整備と市場開拓のための水素エネルギー実証技術	軍部の購入による市場の開拓	政府
水素搭載自動車の開発研究	タンク重量の6,7,8重量%の水素を貯蔵する車載用タンクの開発研究	政府、国立研究所、産業界
水素エネルギー模擬社会の実証試験	提案募集、提案選定	政府、州、地方政府、産業界がコスト分担

表7に移動用燃料電池と定置用燃料電池の要求されている仕様の比較を示した。最終的な仕様は、現在のところ決定していないが、製品が消費者の手にするところとなれば、市場経済がその仕様を決定していくものと思われる。

7.4 今後の課題

究極の目的は、燃料電池を代表とする電気供給装置を一般の消費者が使えるようにすることである。水素エネルギーシステムのコストと性能の問題が解決できたときにはじめて消費者はこのシステムを認知し、受容すると考えられるからである。消費者が求めるもの

は、水素を安全に扱え、電源として確実に使用できるものである。この要求が満たされるように、政府はどのような水素システムが好ましいかを明確にすることが必要である。表 8 には、政府が中心となって活動を行う項目についてまとめた。

8. 教育広報などによる啓蒙活動

水素をエネルギー媒体として利用することを現実化するには、教育あるいは広報などによる啓蒙活動も、他の開発項目などと同様に重要である。米国が理想とする水素エネルギー社会を国民に理解させるためには、啓蒙的な活動は必要不可欠な活動である。

教育活動は、幼稚園から大学院まで幅広く実施すべきであり、取り組みやすい教育課程を開発し、広く一般に公開する形式で行う方法が効果的である。現在、水素エネルギーが直面している問題は、研究開発が進むにつれて解決していくため、問題となるポイントが替わっていくので、水素エネルギーの問題を正しく理解させるためには、公開という形式がふさわしい方法といえよう。

水素エネルギー教育の導入段階では、再生可能エネルギーであること、水素エネルギーの環境特性が他のエネルギーと比べ格段に良い事などを示し、順次、教育が進んでいく過程で、現在水素エネルギー開発が抱えている克服すべき開発項目について学んでいき、その後、水素製造インフラ、水素の取り扱い上の問題点、コストパフォーマンスの改善、安全性などについて勉強していくカリキュラムを作成すべきである。水素エネルギー社会を実現化する若い人たちに、現実的な価値判断と問題意識が身につくようにしていくことは米国の将来を占う意味でも重要なことと判断する。

教育活動は教育に関係する全ての部門の協力と実施を行うことにより、水素エネルギー社会への移行を速やかに、かつ着実に行うことができる。

広報活動は、水素がもたらす多くの恩恵に関する情報を公開することにより、国民に水素エネルギーの利点を十分に理解させ、水素エネルギー社会を実現化するために重要な活動である。ただし、水素の優れた特性を様々な人たちに効果的に正しく伝えていくためには、長期的な取り組みが必要となる。このためには米国政府が援助を行うとともに、政府からの政策を水素

エネルギー専門の広報を通して幅広く国民に伝えるという仕組み作りが必要である。この組織は早急に作り、機能させなければならない。水素エネルギー社会に関する情報を流すことにより、国民意識や産業界の動向、ひいては研究開発などの方向も揃いやすくなり、この広報活動を効果的に用いることによって、現在問題となっている技術的な問題も短期に解決できる可能性も出てくると考えられ、水素エネルギー社会の実現化を促進する活動として広報活動は重要である。

9. 結 言

水素エネルギー技術の開発は米国にとって莫大な利益を生み、長期にわたりエネルギー問題を解決する技術になる可能性がある。しかし、水素エネルギー社会へ移行するためには数十年を必要とすると推測され、この移行のためには政府の強力な政策と指導が必要である。

前節までに紹介した技術分野の問題点を克服するためには、各技術分野の詳細な研究開発計画の策定が必要である。特に以下の4分野についての策定が必要である

9.1 基礎科学について

材料科学、電気化学、生物学、工学的基礎分野に大学・国立研究所の研究者の支援を行い、基礎的研究を推進する必要がある。この活動により、水素の製造、貯蔵、およびエネルギー変換技術が変革され、水素がコストの低い扱いやすいエネルギー媒体になると考えられる。また、成果の普及と民間への技術移転はこれまで以上に、迅速に、かつ効果的に行う必要がある。

9.2 技術開発について

産業界、政府、大学、国立研究所の間で強力な連携の下に共同研究を行う必要がある。研究項目は水素製造、貯蔵、および変換の分野に重点を置き、政府と産業界から資金を募り、技術的可能性を追求する。また、開発を一般に公開するためにも、このロードマップを下地として、より具体的な技術ロードマップを作成する必要がある。米国政府は、エネルギー省、運輸省、商務省、国防総省などに働きかけ、技術開発を推進させる必要がある。

表9 ロードマップリーダー一覧

リーダー	所属	ロードマップ区分
Frank Balog	フォード自動車工業	応用
Mike Davis	アビスタ・ラブズ社	エネルギー変換
Art Katsaros	エアプロダクツ&ケミカルズ社	水素供給
Gene Nemanich	シェブロン テキサコテクノロジー社	水素生産
Alan niedzwiecki	クオンタムテクノロジー社	水素貯蔵
Joan Ogden	プリンストン大学	水素システム
Jeff Serfass	全米水素協会	教育広報

9.3 実証試験について

政府と産業界は連携して、技術的問題点および可能性を調査する目的で、定置形、移動形、携帯形にわたる水素エネルギー機器の一つである燃料電池の実証運転を行うことが重要と考える。基盤設備のコストおよび利便性をより正確に評価するために、パイロットプラントの運転プロジェクトを行い、問題点を明らかにし、経験的なデータを集積する必要がある。この運転プロジェクトでは、環境の異なる条件の下に、運転を行うことによってより確度の高いデータが得られる。また、この結果を一般に公表することによって、国民への理解を深めさせることができる。

9.4 水素エネルギーを普及させる法整備について

水素エネルギー社会を実現するためには、現行の法規制を撤廃、ないしは改正する必要があるが、政府は水素エネルギー開発に対して法的な緩和政策を実施する必要がある。この法的側面による規制は開発の障害であり、かつ一般社会への普及を阻む温床である。また、経済的な側面からは、水素エネルギー開発に関する収益性の高いモデルを構築し、経営分析を行うという戦略を立てるべきである。このモデルを公開することにより、水素エネルギー開発への投資は一段と高まると予想される。

以上、水素エネルギーを社会へ普及させるには、水素に関する技術の推進が必要であり、政府、産業界、大学、国立研究所、環境団体などが一体となった活動を行うことによって、はじめて成果が得られるものとする。

水素は、米国の経済、環境、および安全保障を向上

させるエネルギー供給源になる可能性がある。水素を安全に取り扱う技術が確立され、経済的な価格になり、容易に入手することが可能になれば、水素というエネルギー源は米国が必要としているエネルギーの解決策となる可能性が高い。

この水素エネルギー社会を実現するには、かなりの時間と投資が必要である。しかし、今始める必要がある。

10. 筆者より

本米国ロードマップは、冒頭に紹介したとおり、2002年の4月に米国ワシントンで開催された水素エネルギーロードマップワークショップでの成果をまとめたものである。このロードマップの作成では、7人のリーダーが携わっている。彼らの役割は表9に示したとおりであるが、その役割は、2002年11月に開催された米国水素展望会議での内容を踏まえて区分されている。この水素展望会議の結論は下記の3項目に集約される。

(結論1) 米国政府および州政府は、水素を優先事項に掲げて一貫性のあるエネルギー政策を実施および維持する必要がある。

(結論2) 水素エネルギーの開発と利用に関する新しい枠組み、すなわち官民一体となった体制作りが必要である。

(結論3) 次の段階では、米国水素エネルギーロードマップの作成を行い、そこでは、水素の生産、供給、貯蔵、および利用に関する研究、開発、教育および広報活動を含めた啓蒙活動と、規格・標準の各項目が必要である。

一番目の結論は、現在の米国の政策を如実に表しており、水素エネルギー経済の主導を米国が維持することを主張している。二番目の結論は本ロードマップにも記述されている米国の今後の開発体制について提言している。三番目の結論はこのロードマップを作成することと、その項目を示したものであり、まさにこの米国水素展望会議の結論がこのロードマップの下敷きとなっていることを示すものである。米国の特徴として興味深いことは、このロードマップに、啓蒙活動と規格・標準の項目を入れていることである。

啓蒙活動は、具体的には教育と広報活動である。水素エネルギーは将来的なエネルギーであり、その意味では、水素エネルギー社会の実現を目指すことの意義を学校教育において学ばせることから、米国の将来エネルギー像を創造するという意識を子供たちに与え、よりよい未来を生み出そうとする動機付けを意図していると考えられる。また、一般社会に対して広報活動を積極的に行うことの意義は、水素エネルギーというキーワードを軸として今後のよりよいエネルギーとはどのような形態となるかを考えさせ、将来のエネルギー供給と需要の安定化を図るという狙いがあると考えられる。

水素エネルギーに関連する規格・標準化は、米国が世界をリードするために、是非とも抑えるべき項目と考えられるが、2003年11月には、燃料電池自動車の標準化会議が開催される予定であり、米国は水素エネルギー社会に向けて着々と準備している状況が伺える。規格・標準化はその分野の普及と発展には必須の要件であるが、米国は戦略的に水素エネルギー社会の実現を推し進めているように思われる。日本をはじめヨーロッパ諸国も参加する予定であり、米国の今後の動向は、世界の水素エネルギーの動向となる日が近いように思われる。

本ロードマップは、これまでに得られた水素エネルギーに関する問題点をまとめたものである。ロードマップとはいえ、開発の期間やどの分野に集中して開発を実施するかなどの具体性については色濃く出てはいない。むしろ、これまで行ってきた水素を媒体としたエネルギー開発について、項目別に一般者に紹介し、今後の展望を示すためにまとめられたもののように推測され、水素エネルギーという将来のエネルギーを社会に喚起するという意図のもとに作成したものと考え

られる。

水素エネルギーの専門家からは、やや物足りない内容に感じるであろうが、これまでの水素エネルギー開発の問題点と、今後の課題について展望するには格好の材料であり、米国エネルギー省から出ている燃料電池報告書と併読することにより、各分野での水素エネルギーの将来像や開発のためのアクションアイテムを発掘することができると思う。

最後に、本解説文は、本学会副会長でありエネルギー総合工学研究所の福田健三博士からの薦めに応じ、浅学非才の身を省みず翻訳作業に着手したもののまとめである。博士のご協力なしには本解説文はできない作業であった。改めてここに感謝申し上げる次第である。なお、本作業は、筆者には過分な仕事であったため、不案内な分野の充実、あるいは現在の動向を若干付け加えたが、決して十分ではないと思われる。本文の内容を含め、新たな情報やご指摘などを読者の方々から頂ければ幸いである。