

原子力と水素

堀 雅夫

原子力システム研究懇話会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-7-6

Nuclear Energy and Hydrogen

Masao Hori

Nuclear Systems Association, Japan
1-7-6 Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001 JAPAN

Nuclear hydrogen production will become important in the future by such features of nuclear energy as no CO₂ emission, bulk supply capability and high energy density. The technologies of nuclear hydrogen production currently developed are reviewed, and the perspectives for future utilization of nuclear hydrogen in various sectors, such as automobile, airplane, oil and coal industries, are examined. Long-term global energy supply structures featuring nuclear hydrogen are also discussed.

Keywords: nuclear, energy, hydrogen, transportation,

1. 原子力水素製造の特長・方法・コスト

1.1 特長

原子力から水素を製造する特長としては

- ◆ CO₂を排出しないので環境保全に優れている
- ◆ 長期・大量の持続的供給が可能である
- ◆ エネルギー密度が高いため、エネルギー貯蔵・自給に優れている

などが挙げられる。

持続的供給とCO₂排出抑制が可能な水素の製造手段としては原子力と再生可能エネルギーがあるが、エネルギー密度の点から原子力は大量供給に向いている。

原子力による水素製造は、運輸用や工業用など将来想定される大規模な水素需要に対する大量・基幹的な供給に適しており、現在原子力発電が電力の基底負荷供給を担っているのと同様な役割を、将来原子力水素製造が担うと期待される。

エネルギー用の水素を原子力から製造する構想は1970年頃より提唱され、第1次石油ショックの後に多くの製造プロセスが研究された。これらの研究は原子炉による高温を利用することから、製造プロセスとしては高温利用の「熱化学分解法」に関するものが多く研究され、高温ガス炉と組み合わせる方法が検討された。

2000年頃から地球環境保全のためにCO₂を排出しない一次エネルギーの重要性が認識されてくるとともに、原子力による水素製造への関心が再び高まり、その研究が世界的に活発になっている。

1.2 製造方法

原子力利用の水素製造の主な方法としては、表1に示すように、(1)原子力電力による水の電気分解法、(2)原子力の電力と熱による水蒸気電気分解法、(3)原子炉熱による水の熱化学分解法、(4)水の熱化学分解と電気分解を組み合わせるハイブリッド法、(5)原子炉熱による化石燃料の水蒸気改質法、がある。[1]

(1) 電気分解法

原子力発電と水の電気分解を組み合わせる「電気分解法」は、発電と電気分解の両方とも技術的に実用レベルにあるので、この組み合わせによる水素製造は現状技術で可能である。原子炉からの熱量と生成した水素の熱量の比で表わした原子炉熱の水素熱への転換率は、この場合、発電効率(軽水炉では約32%)と電解効率(固体高分子型電解では約80%)を総合して現在は25%程度と見込まれている。将来、高温炉による50%程度の高効率発電を利用すると40%程度の高転換率が期待される。(転換率は低位発熱量LHV基準、以下同) 方式として、電気分解水素製造を水素の需要地で需要に合わせた規模で行わせるオンサイ

ト型と、需要地と離れた原子力発電所近接などの大規模電気分解プラントで行わせるオフサイト型がある。

(2) 水蒸気電気分解法

原子力発電と原子炉熱によって水蒸気を電気分解する方法は、高温水蒸気の電気分解により理論分解電圧が低くなり、過電圧が低下して電流密度が増加するため、電気分解法よりさらに効率が数%向上し、45%程度の転換率が期待される。米国のアイダホ国立研究所、東芝などで試験が行われている。

(3) 熱化学分解法

2500°C以上の高温による水の熱分解は理論的には考えられるが、幾つかの化学反応を組み合わせたサイクルによって1000°C以下の温度で水の分解を行わせる「熱化学分解法」が熱による水の分解の実用的方法と考えられている。水の熱化学分解では、原子炉の熱を分解に直接利用するので原子炉熱の水素熱への転換率として50%以上が期待され、原子力水素製造の究極的な方法とされている。

熱化学分解法についてはこれまで多くの研究が行われ100以上のサイクルが提案されている。この中で現在最も有力と考えられているのは、ヨウ素、硫酸などを使用するIS (Iodine-Sulfur) プロセスである。このほかに、カルシウム・臭素・鉄を使用するサイクル (UT-3法) など異なる熱化学分解プロセスの研究も行われている。

熱化学分解の反応サイクルでは、高熱源と低熱源の間で熱力学的サイクルを行っているため、高温ガス炉などの高温熱源を使用する方が効率的に有利になる。

日本原子力研究開発機構は、日本原子力研究所時代から高温ガス炉とISプロセスの両方の開発を進めてきており、原子力水素製造技術では世界最高の水準にある。2010年代半ば頃には原子炉利用の水素製造実証を行うべく、その前段階のパイロット試験の準備を行っている。米国、仏国なども、この高温ガス炉とISプロセスを組み合わせるシステムを原子力水素製造の本命と位置づけて開発を進めている。

(4) ハイブリッド法

熱化学分解と電気分解を組合せてより低い温度で熱化学分解を行わせるハイブリッド法(例えば、HyS法)も研究されている。このプロセスの中には、高温ガス炉より低い温度 (600~500°C) のナトリウム冷却高速炉や超臨界水炉での水素製造を目的としている方法 (例えば、HHLT法) もある。

(5) 原子力加熱化石燃料水蒸気改質法

吸熱反応である天然ガスの水蒸気改質に必要な反応熱を原子炉から供給する方法は、加熱に必要な化石燃料の燃焼が不要になる分、天然ガス使用量を節減できる特長がある。

水のみを原料とする他の原子力水素製造法と異なり、この場合は化石燃料も使用するが、その使用量を30%程度節減できるので、その分環境と資源の保全に効果がある。この方法では、水素と共に生成されるCO₂はプロセスの中で分離されるので、将来のCO₂固定による排出抑制の際に有利になる。

通常の天然ガス水蒸気改質反応には、800°C程度の熱が必要だが、反応域に水素透過性の良いパラジウム合金などの膜を置いて水素を分離する膜分離改質 (メンブレンリフォーマー) 方式により600°C以下の温度で水素を製造する方法も開発されている。

この方式は、水蒸気改質プロセスが実用技術として確立しており、原子炉との結合においても技術的に大きな障害がないので、早い時期の導入が可能と考えられる。

原子力加熱の方法では、供給する原子炉熱が生成する水素の熱量の一部に転換する。この場合の転換率として原子炉熱量と天然ガスの合計熱量に対する生成水素の熱量の割合をとると、85%程度の高い値になる。

表1. 原子力による水素の製造方法

水素製造方法	原料	供給原子力エネルギー		製造プロセス (代表的)
		エネルギー形態	原子炉 (代表的)	
電気分解法	水	電気	軽水炉	アルカリ 固体高分子膜
水蒸気 電気分解法	水	電気 + 熱	高温ガス炉	固体酸化物
熱化学分解法	水	熱	高温ガス炉	ISプロセス UT-3プロセス
ハイブリッド法	水	熱 + 電気	高温ガス炉 ナトリウム炉	HySプロセス HHLTプロセス
原子力加熱 化石燃料 水蒸気改質法	化石燃料 (天然ガス) + 水	熱	高温ガス炉 ナトリウム炉	高温プロセス 中温プロセス (透過膜改質)

1.3 製造コスト

原子力による水素製造は未だ研究開発段階であるが、製造コストの試算は幾つか発表されている。

① 米国工学アカデミーは、2004年に出した報告書「水素経済：機会・コスト・障害・R&D必要性」の中で、将来技術による水素コストを推算・比較している。[2] それによると、石炭や天然ガスなどの化石燃料水素は、製造コ

ストが6~9円/Nm³、輸送費・ステーション費を含む供給コストでは16~18円/Nm³なのに対して、IS法原子力水素は、製造コストが15円/Nm³、供給コストでは22円/Nm³となっている。ガソリン車燃費の水素供給コスト相当額は19円/Nm³なので原子力水素は競合範囲に入っている。なお、再生可能エネルギー水素の供給コストは33~40円/Nm³となっている。

② 日本原子力産業会議の「2050年の原子力-ビジョンとロードマップ」報告書の中では、ISプロセスの熱化学分解法水素と原子力加熱（核熱）および天然ガス燃焼（自然）の天然ガス水蒸気改質水素のコストを、天然ガスの価格（2000年は4\$/GJ、2050年はその1.5倍と想定）をパラメーターとして評価している。[3] 図1に示す範囲では原子力加熱・天然ガス水蒸気改質水素が最も低コストで、熱化学分解法水素は天然ガスの価格が上昇すれば相対的に有利になってくる。（1.5円/MJは19円/Nm³に相当）

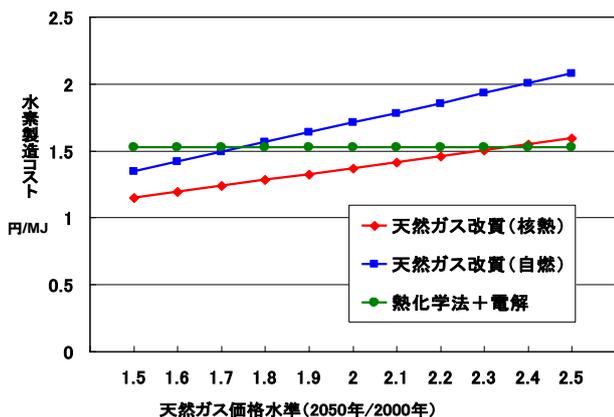


図1. 天然ガス価格と水素製造コスト

2. 原子力水素の利用分野・用途

原子力による水素は、CO₂排出抑制、持続的的大量供給などの特長から、表2に示す多くの分野での利用が期待される。

2.1 運輸部門における水素利用

燃料電池自動車は、水素エネルギーの最も期待されている利用の一つである。同じく自動車の脱炭素・脱石油の方法として、電気自動車やプラグインハイブリッド自動車などの電動推進方式も有望視されている。原子炉をエネルギー源とする場合の水素燃料電池車と電動推進車の総合エネルギー効率の比較を表3に示す。[4]

表2. 原子力水素の利用分野・用途

利用分野	用途
自動車・輸送	<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池 エンジン
家庭・業務・地域	<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池 都市ガス混合
石油工業	<ul style="list-style-type: none"> 石油・重質油の精製・軽質化 超重質油・オイルサンドの改質精製 石炭のガス化・液化
鉄鋼・化学工業	<ul style="list-style-type: none"> 水素製鉄 アンモニア合成 メタノール製造
電力	<ul style="list-style-type: none"> ピーク電力供給

原子炉熱を電気および水素に転換する燃料効率では両転換プロセスとも熱機関サイクルを経るのでその効率制限を受けるため、軽水炉による発電と電気分解水素製造および高温炉による発電と熱化学水素製造の何れの比較でも、車両効率の良い電動推進車の方が燃料電池車より総合効率が高くなる。一般に、原子力ベースでは、発電・電動推進車の方が水素製造・燃料電池車より、エネルギー利用の総合効率が高いと言える。

ただし、ナトリウム炉での比較の例のように、原子力加熱天然ガス水蒸気改質法による水素製造では自然の天然ガス水蒸気改質法の場合と同様に熱機関サイクルを経ないため燃料効率が高くなり、この場合は燃料電池車の方が電動推進車より総合効率が高くなる。

表3. 原子力ベースの自動車の総合エネルギー効率

	発電/水素製造方法 自動車駆動方式	燃料効率 原子炉→ 電池・タンク	車両効率 電池・タンク →車輪	総合効率 原子炉 →車輪
軽水炉	発電 電動推進車	30%	70%	21%
	発電→電解水素製造 燃料電池車	23%	50~60%	12~14%
ナトリウム炉	発電 電動推進車	39%	70%	27%
	原子力熱・天然ガス 水蒸気改質水素製造 燃料電池車	77%*	50~60%	38~46%*
高温炉	発電 電動推進車	45%	70%	31%
	熱化学水素製造 燃料電池車	45%	50~60%	23~27%

◆ 発電効率：軽水炉 32%、ナトリウム炉41%、高温炉 47%
 ◆ 水素製造効率(LHV基準)：電気分解法 80%(電気から)、熱化学法 50%、
 * 原子力加熱・天然ガス水蒸気改質法85%(同一エネルギーの合計基準)
 ◆ 電力送配電ロス：5%、水素圧縮送配電ロス：10%

水素の自動車以外の運輸利用では、鉄道・船舶・航空の推進・電源のための燃料電池用燃料のほか、航空機のジェットエンジン用燃料がある。

航空機の排出ガスによる温暖化影響は現在は全排出の

3%程度であるが、航空輸送量は増大傾向にあり、その環境影響に対する懸念が出てきている。そのため、航空機のエネルギー効率の改善努力が進められる一方で、水素の航空燃料としての利用可能性が欧州共同体・エアバスによって「Cryoplane」プロジェクトとして検討されている。[5]

液体水素は航空燃料のケロシンに比べて同じ重量で熱量が約2.8倍と大きく、離陸重量を減らし最大積載量を大きくできる。しかし燃料搭載のスペースを設けたり、その他構造的には相当な変更が必要なためその実用化には早くても15~20年かかるとしている。水素の燃焼で排出するH₂Oも温暖化ガスだが、CO₂に比べて滞留する時間が格段に短く、その他の効果も含めてケロシンから水素燃料に変えることは環境上のメリットが大きい。

水素の航空機燃料としての利用が実現すると、その目的がCO₂排出削減にあるので水素の製造においてもできるだけCO₂を排出しない方法が好ましく、ハブ空港が要求するような大量の水素需要に対して原子力はその特性から最も適した供給源になると考えられる。

2.2 合成燃料などの原料としての利用

原子力によりCO₂排出を抑制した水素製造が経済的にできるならば、石油工業や化学工業など産業用の水素供給源として多くの利用が考えられる。

石油を精製してできるガソリン、軽油などの液体燃料は、水素よりも運搬・貯蔵が楽で、輸送用としては扱いやすい。このような液体燃料は利用段階ではCO₂を排出するが、製造段階での排出を減らすことにより走行距離当たりのCO₂排出を減らす方策として、精製・合成・転換プロセスで必要な水素や熱を非化石エネルギー源から供給することが検討されている。

例えば、水素分が少なく炭素分の多い重質の石油を原料とする場合には水素添加プロセスが必要で、現在の天然ガスなどの化石燃料からの水素に代って原子力水素の利用もコスト次第で可能性がある。また、オイルサンドなどの超重質油を合成原油にアップグレードする際にも水素が必要でこれを原子力から供給するプロセスも検討されている。

石炭をガス化して生成するCOとH₂から、フィッシャー・トロプシュ（FT）合成でディーゼル用などのFT油を製造する石炭液化プロセスにも、図2に示すように原子力による水素・熱の利用が検討されている。

このような化石燃料と原子力の両方を使用する「協働的」プロセスにおける原子力の寄与はエネルギー量として

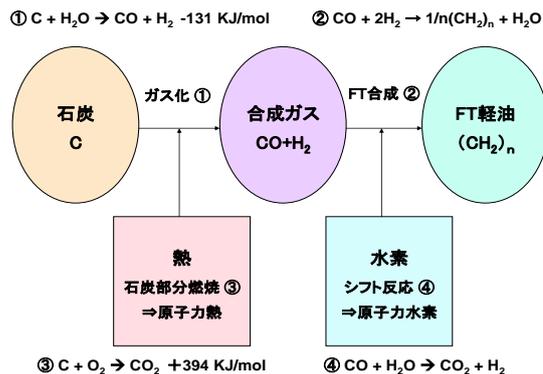


図2. 石炭ガス化・FT合成プロセスへの原子力供給

は補助的であるが、原子力からの水素供給・熱供給により、化石燃料燃焼不要によるCO₂排出量低減、両エネルギーの高効率利用による資源節約、相対的に安価な原子炉熱による経済性、などの効果がある。[6] バイオマスと原子力の協働についても検討が行われており、バイオ燃料製造においても同様の効果が狙える。

表4. 原子力による輸送用エネルギー
水素・電気・合成燃料 3経路の見通し

一次エネルギー	エネルギーキャリアー	技術の現状		実用化への期待・見通し
		原子力利用の転換技術	自動車での利用技術	
原子力 (化石燃料 バイオマス と協働)	水素	研究・開発段階	燃料電池のブレークスルー必要	長期的導入 輸送用燃料の本命
	電気	実用段階	プラグインハイブリッド車 数年内	短期的導入 他キャリアー組合せて継続利用
	合成燃料 バイオ燃料	提案・研究段階	内燃機関で利用可能	中期的導入 環境条件下で継続利用

2.3 原子力による輸送用エネルギーの見通し

水素、電気、合成燃料などのエネルギーキャリアー（エネルギーを運ぶ媒体）を原子力から製造し、これまでの石油ベースのガソリンなどに替わって自動車で利用する際の技術の現状・課題を総括して、実用化への期待・見通しを纏めると、表4のようになる。[7]

最も早く導入が可能なのは、プラグインハイブリッド車などの電動推進自動車で、水素、バイオ/合成燃料などと組み合わせて継続利用されていく可能性がある。

中期的に導入が可能なのは、バイオ合成燃料によるエンジン車で、環境条件が許す範囲で使用される。

水素による燃料電池車は、燃料電池などのブレークスルーが必要だが運輸用燃料の本命として長期的に導入が期待される。

水素は合成燃料製造の原料としても必要なので、とくに原子力起源の水素は最終製品として使用される以前に、原子炉熱とともに、運輸用エネルギーの転換の上流の方で燃料製造プロセスの原料・熱として使用される可能性がある。

3. 原子力水素 — 需要への対応、技術の方向

原子力による水素の需要への対応可能性、各種技術の今後の方向を考察する。

電気分解

電気分解による水素製造は実用技術なので、オンサイトの小規模水素ステーションなどは需要に応じて現段階でも設置可能である。ただし、水素製造コストは従来法の天然ガス改質水素より一般的に高い。日本の電力の中では原子力が最も低コストで、しかも発電コストに占める燃料費の割合が小さいので、今後原子力発電比率が向上してオフピーク時に原子力の余剰電力が出てくるようになれば、料金体系次第でオンサイト型の小規模電気分解のコスト競争力は向上すると考えられる。また、原子力発電プラント併設のオフサイト型の集中型電気分解も、化石燃料の価格によっては実用性が出てくると考えられる。

水蒸気改質

原子力加熱の天然ガス水蒸気改質法は、CO₂排出ゼロではないが、技術的な問題がなく、低コストの水素を供給できるので、早い時期の大きい需要（例えば、航空燃料）に対して応じることが可能である。

熱化学分解

原子力による水素製造の中で水の熱化学分解法は、CO₂の排出がゼロで、原子炉熱の水素熱量への高転換率が期待でき、製造プラントのスケールメリットが大きいなどの特長から、将来の本格的な水素利用期の究極的・基幹的な方法と期待されている。その中でも現在最有望な方法と目されているのは、ISプロセスと高温ガス炉の組み合わせで、日、米、仏など各国がこの開発を進めている。

探査的研究

熱化学分解法ではこれまで数多くのプロセスが研究されており、その他の方法も含めて原子力利用の新しい水素

製造プロセスが提案・発表されている。市場が要求する水素供給の規模・時期・コストや資源・環境制約に応え得る原子力利用方式の幅広い探査的研究は今後も継続されると考える。

配送網の整備

原子力による水素は供給規模が大きく基底負荷の役割を担うことになるので、パイプラインなどの水素配送網の整備は必須と考える。

4. 原子力水素を利用した将来のエネルギー供給構造

21世紀中葉以降のエネルギー供給には、現在の化石燃料を主とする供給構造に代わる、地球環境と供給持続性で最適化した構造を考える必要がある。原子力がこのような将来のエネルギー供給の基幹的な部分を担うという観点から、原子力水素を利用したエネルギー供給構想が発表されている。その代表的なものを以下紹介する。

4.1 IASA・Marchettiによるエネルギーアイランド構想

国際応用システム解析研究所（IASA）のCesare Marchettiは、1970年代から「エネルギーアイランド」構想を提唱している。[8] 太平洋上の小さな島を想定し、ここに高温ガス炉と高速増殖炉を組み合わせた全熱出力1TW t（10億キロワット）の原子力施設を設置し、熱化学法により水素を製造して、この水素を液化して周りの消費地に海上輸送する。1TW tの熱出力は現在の全世界の原子力設備容量の8割、その熱量は中東の産油量の7割に相当する。原子力の規模のメリットを生かした集中生産方式である。

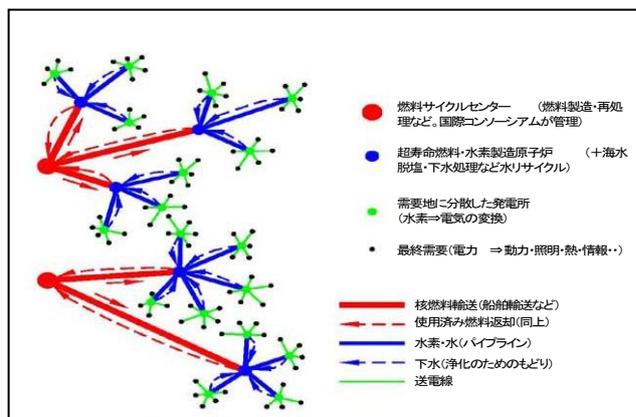


図3 エネルギー供給の階層的ハブ・スポーク構造

4.2 ANL・Wadelによる階層的ハブ・スポーク構想

米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）のDave Wadelは2003

年から分散生産方式の「階層的ハブ・スポーク」構想を提唱している。[9]

核燃料→水素→電力の階層構造

エネルギーキャリアーとして核燃料、水素、電力の三つを評価した時に、これらを、船、パイプライン、送電線などにより輸送する時の現実的なエネルギー量から、運べる距離と量の大きい方から、核燃料→水素→電力の順の階層構造が考えられる。

ハブ・スポーク構造とは、図3に示すようにエネルギーキャリアーを変換・送出するセンターをハブとし、各方向に配送するルートスポークに見立てたもので、各エネルギーキャリアーが階層的なネットワークを通して変換・配送される構造である。

三つのハブ

核燃料の製造・再処理などフロントエンドとバックエンドを担う燃料サイクルセンターが第1のハブで、ここから核燃料を各所に長距離輸送する。この核燃料を使用して水素を作る原子力プラントが第2のハブ、ここで原子炉の熱で水を熱化学分解して水素を生産し、この水素を消費地にある第3のハブにパイプラインなどで数百マイル程度の中距離輸送をする。この運ばれた水素の1/3は燃料電池などの輸送用に、1/3は家庭用や業務用の熱需要に、1/3は燃料電池やマイクロタービンなどによる発電用に使用される。この最後のハブから末端需要まで、水素はパイプラインなどにより、電力は送電線により運ばれる。

頑強で効率的なエネルギー供給

このハブ・スポーク構造にクロス連結のネットワークと核燃料および水素のエネルギー貯蔵バッファ効果を加えて、頑強な安定供給と独占的価格の防止に役立たせる。水素と電力のほか、原子力プラントでは海水脱塩で上水を作ることができ、またその戻りの下水の処理には水素製造の際の副産物の酸素を利用する。

この場合の原子炉熱→水素→電力の変換効率は36%程度で軽水炉による発電効率より良い。これに温水供給も含めると45%、さらに上水供給を行わせると85%のエネルギー利用効率になる。

燃料リサイクルと長寿命炉心

第1のハブの燃料サイクルセンターは、その燃料の利用者（複数国）のコンソーシアムが所有・管理し、プルトニウムなどの超ウラン元素は全量のリサイクルを行うので、エネルギーセキュリティの保証と燃料・施設の軍事転用防止が図られる。世界の核燃料の供給処理は10余のセンター

で可能で、これが現在の油田に代わるエネルギー供給源になる。

第2のハブの水素生産原子炉は、20年寿命の炉心燃料をカセット式で交換する。このような長寿命燃料ならば、21世紀末の世界の全エネルギー需要約50TWhの半分を原子力で供給するとして25隻の核燃料輸送船で足りる。

5. おわりに

エネルギーの脱炭素化を達成し、低炭素社会へ移行するには、エネルギーキャリアーとしての水素をCO₂排出を抑制しつつ製造・使用していく「水素社会」の実現が必要と考えられている。

水素社会によって達成し得ることに、エネルギー利用端での排出が水のみというクリーン性、燃料電池による動力への変換の高効率性、などがある。これと同じ目的のことが、例えば、高密度・軽量の電池などの電力貯蔵方法がもし開発できたら、オール電化の社会によって達成できる。さらに、水素エネルギーの実用化までに、製造・輸送・貯蔵・利用の各段階で多くの技術改良が必要であり、このような対抗技術の可能性と水素実用化までの障壁から、水素社会の実現に懐疑的な見方も出ている。

エネルギーキャリアーとして、電力+化石燃料製品（ガソリン、軽油、灯油、都市ガスなどの炭化水素）を主に使用する現在の社会から、将来は電力+水素を主に使う水素社会になるか、あるいは電力を主に使う電化社会になるか、または電力+合成燃料（炭化水素、バイオ燃料など）を主に使う社会になるか、関係するエネルギー技術の今後の進展・ブレイクスルーに懸かっている。

将来の社会がいずれの方向に向かうにしても、これらのエネルギーキャリアーを製造する一次エネルギーは、持続的供給・CO₂排出抑制が可能な特性を有する必要がある。

原子力は、現時点での水素の需要に対しては原子力電力（深夜時間帯は大部分が原子力電力）による水の電気分解で対応でき、将来の水素社会が要求する大量の水素需要に対しては開発中の原子炉熱による水の熱化学分解での対応が期待される。また、近未来に大きな水素の需要が生じた場合は、天然ガス水蒸気改質への原子炉熱供給方式が、従来の天然ガス燃焼（自燃）方式より資源節減・CO₂排出削減、製造コストなどで優位となる。

このように、原子力は単独で、あるいは化石燃料やバイオマスなどの炭素資源との協働のプロセスによって、水素

などエネルギーキャリアー製造の基幹的な役割を担っていくと考えられる。

参考文献

- 1 原子力水素研究会編・著「原子力による水素エネルギー」(180ページ、2002年6月、原子力システム研究懇話会発行 konwakai@syskon.jp)
- 2 Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council, National Academy of Engineering, "The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs", 256 pages (National Academy Press, 2004)
- 3 日本原子力産業会議・原子力開発利用委員会「2050年の原子力 - ビジョンとロードマップ」(日本原子力産業会議、2004)
- 4 堀 雅夫「プラグインハイブリッド車導入の環境・エネルギーへの効果」自動車技術会論文集、Vol.38, No.2, p.265-269 (March 2007)
- 5 Airbus Deutschland GmbH, "Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft CRYOPLANE - System Analysis. Final Technical Report of the Project Funded by the European Community", 80 pages (AirBus Industries, 2003)
- 6 堀 雅夫「化石燃料による協働的エネルギー転換プロセス」日本原子力学会誌、Vol.49, No.5, p.359-364 (2007)
- 7 エネルギー高度利用研究会他編・著「原子力による運輸用エネルギー」(174ページ、2007年6月、原子力システム研究懇話会発行 konwakai@syskon.jp)
- 8 C. Marchetti, "Energy Islands in the Final Configuration of the H₂ Economy", Plenary Lecture at the World Hydrogen Conference BsAs 21-26 (June 1998)
- 9 D.C. Wade, "The STAR Concept: a Hierarchical Hub-Spoke Nuclear Architecture Based on Long-Refueling-Interval Battery Reactors and Regional Fuel Cycle Centers" IAEA-TECDOC-1451, pages 171-191 (May 2005)