

原子力からの水素

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

Hydrogen Produced by Nuclear Energy

Masao Hori

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

Features and technologies to produce hydrogen using nuclear energy are reviewed. For the world under constraint of environment and resource, the sustainable bulk supply capability is one of the important features of producing hydrogen as well as generating electricity from nuclear energy. Production technologies, such as the electrolysis of water by nuclear electricity, thermochemical decomposition of water by nuclear heat, and nuclear-heated steam reforming of natural gas, are under development in Japan and other countries. Cost competitiveness of nuclear production is one of the issues to be solved for commercialization, although nuclear-produced hydrogen is economically advantageous to fossil-derived hydrogen when compared by the total cost incorporating the green house gas effect by carbon dioxide emission. These hydrogen production technologies and also the nuclear reactors to supply energy to them are in differing stages of development. It is technologically possible to produce hydrogen at present using the nuclear electricity from Light-Water Reactors and the conventional electrolysis. Hydrogen production through nuclear-heated steam reforming of natural gas is viewed as an intermediate step to the ultimate target of clean and efficient hydrogen production by thermochemical decomposition of water by nuclear heat.

Key words : hydrogen production, nuclear energy, electrolysis, thermochemical, steam reforming

1、緒 言

一次エネルギーに占める電力生産の割合は現在、世界全体で約 30%、将来は約 50%が見込まれているが、残りは非電力の用途である。この非電力のエネルギー・キャリアーとして理想的な水素の生産にも、原子力エネルギーの利用が検討され、各国で研究開発が始まっている。

原子力を水素生産に利用する特長は次の 3 点である。

- ①持続的大量供給可能性
- ②二酸化炭素排出抑制可能性
- ③エネルギー・セキュリティ

持続的供給と排出抑制を満たす電力・水素の生産手段は原子力と再生可能エネルギーであるが、多くの国・地域が必要とするエネルギー密度を考慮すると原子力は再生可能エネルギーより優れている。米国エネルギー省 (DOE) の写真 (図 1) に示すように、原子力は密度の高いエネルギー源であり、水素の大量・基幹的供給に適している。エネルギー目的の水素の生産には、将来、原子力発電に匹敵する量の原子力利用が期待される。



図 1. 水素：輸送のための原子力 (米 DOE 資料から)
「1 ポンドの原子燃料はガソリン 25 万ガロン相当の水素を炭酸ガス排出なしで生産する」

2、原子力による電力・水素の持続的大量供給の可能性

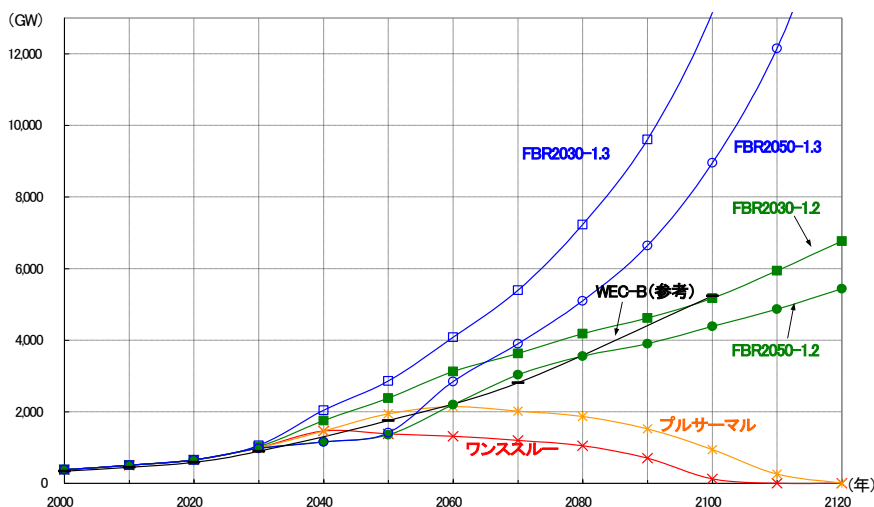
世界エネルギー協議会 (WEC) の予測によると、世界の一次エネルギー需要は、中庸的な Middle course の場合、2100 年には 1990 年の約 4 倍に増加し、そのうちの 24%を

原子力による電力生産に期待している [1]。これは設備容量にすると、100 万 kW プラント約 5,200 基に相当する。原子力によるエネルギー供給可能量の評価ではこの発電用燃料の持続的供給は、図2に示すように、増殖率 1.2 ~ 1.3 の高速増殖炉 (FBR) によるプルトニウム・リサイクル利用を 2030~2050 年に導入すれば、陸上ウランの究極資源 16.3 Mton (OECD/IAEA, 1997) の範囲内で可能である [2]。

地球規模の経済・エネルギー・環境総合解析モデルによる計算では、例えば FBR と化石燃料の組合せの水蒸気改質法による水素生産を想定した場合に、二酸化炭素濃度の安定化の条件下では 21 世紀後半には原子力による水素が最終エネルギーの約 1/4 を占める結果が出されている [3]。このようなケース、すなわち原子力により電力・水素の両方を持続的・大量供給するケースは、FBR によるプルトニウム・リサイクル利用を最適化することにより、原子力によるエネルギー供給量を 2050 年に WEC の 1.7 倍、2100 年には同 2.5 倍まで増加できるので (図 2)、この増加分を水素生産に当てることで可能と考えられる。

現在の化石燃料ベースの流体燃料を原子力による水素に転換することは、後述するいずれの生産方法を使用しても二酸化炭素の排出を大幅に抑制することができ、地球環境への効果は大きい。

図 2. 原子力によるエネルギー供給量
 パラメーター (例) FBR2030-1.3 = FBR 導入 2030 年・増殖率 1.3
 WEC-B (参考) = WEC の原子力供給予測値 (Middle course)



3、原子力による水素—これまでの研究・経緯

エネルギー・キャリアーとしての水素を原子力により製造する構想は 1970 年代より提唱され、石油ショックの後に熱化学法を中心に多くの製造プロセスが検討された。この方法が原子炉による高温を利用することから、研究は主として高温ガス冷却炉の利用の一環として行われてきた。初期の頃の原子力利用の研究としては、日本では 1973~80 年の「原子力製鉄プロジェクト」の中で、西独では 1972~86 年の「原子力エネルギー長距離輸送プロジェクト」の中で、メタンを原子力熱で水蒸気改質して水素を製造する研究が行われた。これらの研究はその後終息したが、日本では原研が高温ガス炉利用の現在のプロジェクトへと継続的に研究を実施している。これらの成果や技術の展望は、IAEA から 1999 年に刊行された報告書「エネルギー・キャリアーとしての水素とその原子力による生産」 [4] に詳述されている。

炭酸ガスを排出しない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生産への関心が高まり、2000 年には経済協力開発機構・原子力機関 (OECD/NEA) が原子力水素生産に関する第 1 回の情報交換会議を開催した。この会議には 9 ヶ国、3 国際機関が参加し、21 世紀のエネルギー展望における水素エネルギー、原子力による水素生産の技術、研究開発の状況などについて情報交換を行った [5]。

日本では、「原子力水素研究会」(事務局:エネルギー総合工学研究所) が 2001 年に設立され、国内の原子力、電機、化学、石油、電力、ガス、鉄鋼、建設などの企業のほか、研究所、大学など 30 機関から 40 名が参加して、情報交流・技術現状評価を行っている。同研究会は、この分野の展望・解説書「原子力による水素エネルギー」を 2002 年に刊行した [6]。現在、研究会参加機関などにおいて、原子力水素生産に関する研究・開発・設計などが開始されている。日本における原子力水素関係の主な機関とその研究を表 1 に示す。

学会関係では、日本原子力学会が 2001 年および 2002 年の年会で

原子力による水素生産に関わる世界のエネルギー展望、国内の研究開発について総合報告セッションを開催した。また、2002年12月には日刊工業新聞、原子力産業会議、日本原子力研究所などの主催で「クリーン&クリーン：水素エネルギー社会と原子力」シンポジウムが開催され、政・産・学の各界代表による講演・討論が行われた[7]。

表1. 原子力水素関連研究を実施している主な機関

原研
高温工学試験炉(高温ガス炉)建設・運転
水蒸気改質水素製造装置炉外試験
IS熱化学法水素製造実験
サイクル機構
硫酸ハイブリッド水素製造実験
東工大
多目的高速炉水素製造プラント設計
電中研
放射線機能触媒ハイブリッド水素製造実験
三菱重工・新型炉開発・ほか
メンブレンリフォーマー・プロセス開発
高速炉・メンブレンリフォーマー・プラント設計
東芝
軽水炉加熱・DME水蒸気改質水素製造研究

2002年に成立した「エネルギー政策基本法」の第12条の規定に基づく「エネルギー基本計画」は、経済産業省の総合資源エネルギー調査会基本計画部会で審議され、パブリックコメントを経て、2003年10月に閣議決定・国会報告・公表された。この中で、水素供給における原子力の位置づけについて、「水素エネルギー社会の実現に向けた取り組み」の節に次のように示されている。

「水素は利用段階ではゼロエミッションのエネルギー媒体であるものの、化石燃料から水素を製造する場合には二酸化炭素等が排出されることとなるため、化石燃料の改質による水素製造技術の改善を進める。また、製鉄所の副生ガス等の副生水素の活用、将来的には、二酸化炭素を極力排出しない手段、例えば、原子力や太陽光、バイオマスを活用した水素の製造等、化石燃料に依存しない水素の製造が実用化されることが期待される。」

米国では、DOEが2000年に「原子力研究イニシャティブ」(NERI)に3件の原子力水素関係のテーマを採択しており、この頃から大学、研究所ではこの分野の研究が活発化していた。米国原子力学会も2001年の年会では、プレナリー講演、会長特別セッション、パネル討論などで原子力水素生産のテーマを取り上げて集中討議をしている。

DOEでは原子力による水素生産は原子力部門が担当し

ており、一方、水素生産利用の研究・開発・実証全般はエネルギー効率・再生可能エネルギー部門が管轄している。DOEは2002年に化石エネルギー部門などが行っているものも含めて水素関係の研究・開発・実証を一体化し、水素の生産から利用までを含めた統合水素計画として強力な推進体制を構築した。この計画では、水素の生産(化石燃料、原子力、再生可能エネルギー)、配送、貯蔵、変換、利用、規格・基準のそれぞれにマイルストーン年次の達成目標を設定し、ロードマップを作成して推進している。

この統合水素計画のもと、「原子力水素イニシャティブ」(Nuclear Hydrogen Initiative)が2002年11月から開始された。その目標として、水素生産・改良型発電コジェネプラントNGNP(Next Generation Nuclear Plant)を建設して、2016年に原子力起源の水素の商用規模生産の実証を計画している。このための予算として、2004年度には15M\$を計上している。

このような米国の原子力利用水素計画は、国家戦略として輸入石油依存から脱却し水素を輸送用燃料などに使用する「水素エネルギー社会」実現への政府の取り組みを反映したものである。すなわち、2002年1月のDOE・ビッグスリー自動車メーカー共同の水素燃料電池車開発プロジェクト「フリーダム・カー計画」、2003年1月の大統領一般教書で発表した水素燃料生産プロジェクト「フリーダム・フューエル計画」に拠っている。この計画では、水素を国内の一次エネルギー資源から生産する方針で、先ず天然ガス、将来はバイオマス、石炭、原子力などを利用している。

なお、2003年3月にCraig上院議員が提案した「新型炉水素コジェネプロジェクト」(Advanced Reactor Hydrogen Co-Generation Project)は、上記のDOEの予定をさらに短縮するものとして、注目されている。これは、上院のエネルギー法案に含められたが7月に審議未了となり、その後上下両院の協議で作成されたエネルギー法案(Energy Policy Act of 2003)に含まれて、両院で審議が進められ、2003年11月末現在下院は可決したが上院では法案の他の条項に関わる論議から可決に至っていない。

Craig提案は、電力・水素のコジェネプラントを2010年までに開発・設計・建設・運転するもので、2010年時点では、電力または水素のどちらかを生産することとしている。プロジェクトの運営はDOE、サイト準備・実施はアイダホ国立工学環境研究所(INEEL)、プロジェクトの産業界のリードは米国ベースの会社としている。予算は2005

年から 2008 年までの R&D 費 600 M\$ (2008 年以降の R&D 費は必要額)、プラント建設費 500 M\$ など、合計 1135 M\$+ アルファの規模としている。

国際的な動きとしては、日、米、仏、英など 10 ヶ国による「第 4 世代原子力システム国際フォーラム」(GIF) の中で原子力水素に関する研究協力がある。GIF は次世代原子力システムの国際協力による研究開発計画で、先進国のみならず途上国への導入も視野に入れ、発電、水素生産、海水淡水化、熱利用などの用途を含んだものである。このシステムが持つべき特長として、持続可能性、経済性、安全性・信頼性、核拡散抵抗性を挙げており、これらの目標に合致した研究開発国際協力の対象システムとして、2002 年に 6 炉型を選んだ。その一つの超高温ガス炉は水素生産を主目的としており、その国際共同検討が進んでいる。GIF が選んだ 6 炉型のうち残りの 3 炉型(ガス高速炉、鉛高速炉、熔融塩炉)は発電および水素生産に利用、2 炉型(超臨界水炉、ナトリウム高速炉)は発電利用としてきたが、最近はこの 2 炉型でも水素生産を視野に入れており、選択された 6 炉型すべてで水素生産の検討が行われている。

2003 年に入ってから、原子力、機械工学、化学工学などの分野で原子力水素関係の国際会議、セッション、セミナーなどが多く企画・開催されている。主なものとしては、4 月のニューオーリンズでの米国化学工学学会年会、4 月の東京での日本機械学会 ICONE-11 国際会議、6 月のサンディエゴでの米国原子力学会年会、9 月の京都での地球環境・新型原子炉国際会議 GENES/ANP、9 月のボストンでの MIT「原子力と水素エネルギーに関するシンポジウム」、10 月のアルゴンヌでの OECD/NEA 第 2 回原子力水素生産情報交換会議、11 月のニューオーリンズでの GLOBAL-2003 国際会議などで、多くの研究発表、意見交換が行われている。

4、原子力による水素製造方法

原子力利用の水素製造の主な方法としては、(1) 原子

炉(発電)と水の電気分解法を組み合わせる「電解法」、(2) 原子炉(熱)と水の高温熱化学分解法を組み合わせる「熱化学法」、(3) 原子炉(熱)と化石燃料の水蒸気改質反応法を組み合わせる「原子力加熱・化石燃料水蒸気改質法」、が挙げられる。(図 3 および表 2)

図 3. 原子力から水素を製造する主な方法

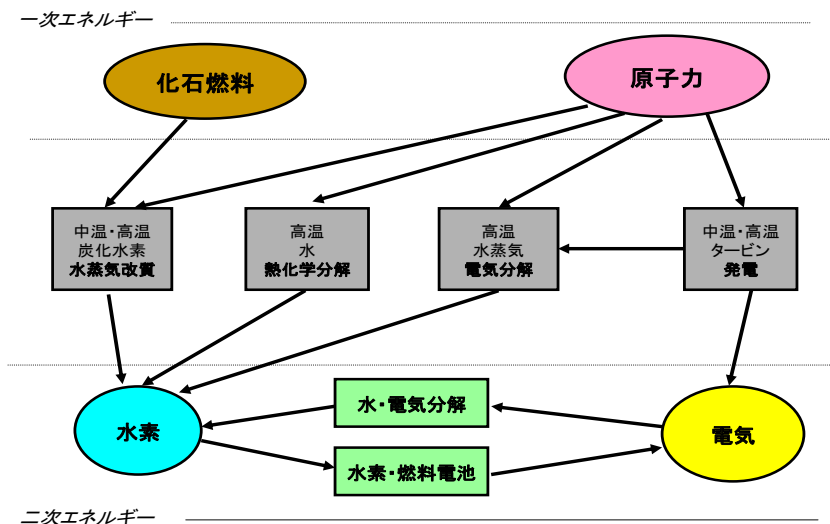


表 2. 原子力による主な水素製造方法

原料	エネルギー形態	水素製造方法	
水	電気	電気分解法	アルカリ 固体高分子
		高温水蒸気電解法	固体酸化物
	熱 高温	熱化学法	I-S プロセス UT-3 プロセス
熱 中温		水蒸気改質法	高温改質
	透過膜改質		
化石燃料 水			

(1) 電解法

原子炉(発電)と水の電気分解を組み合わせる電解法は、原子力発電と水の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。原子炉の発電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転換効率は、この場合、発電効率(軽水炉では約 32%)と電解効率(アルカリ水電解で

は約 80%) を総合して現在は 25%程度と見込まれている。将来、高温炉による発電効率の上昇と固体高分子水電解による電解効率の上昇により 40%以上の高効率も期待される。さらに、固体酸化物電解により高温水蒸気のエンタルピー利用の高温水蒸気電解法が実用化されるとさらに数%の効率向上が期待される。

原子力発電比率が高い場合、オフピークの電力を利用した電解法水素は化石燃料起源の水素とコスト的に競合の可能性がある。

(2) 熱化学法

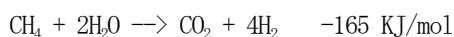
水の高温熱化学分解法は、原子炉の熱を直接的に水の熱化学分解に利用するので原子炉熱の水素熱転換効率として 50%以上が期待され、原子力水素製造の究極的な方法と考えられている。2500°C以上の高温における水の熱分解は理論的には考えられるが、実用的には幾つかの化学反応を組み合わせるサイクルにし 1000°C以下の温度で水の分解を行わせる熱化学法が用いられる。この熱化学法についてはこれまで多くの研究が行われ 100 以上のサイクルが提案されている[8]。この中で現在有力と考えられているのは、HI、硫酸などを使用する Iodine-Sulfur (IS) 法と、Ca、Br、Fe などを使用する UT-3 法およびその改良法で、いずれも 750 から 800°C以上の温度を必要とする。

この分野では、原研が高温ガス炉およびそれと組み合わせる IS 法の研究開発を実施してきており[9]、世界をリードしている。フランス、米国でも、高温ガス炉と熱化学法の組み合わせが研究されている。

最近では、高速炉による水素製造を目的とするナトリウム冷却材温度(600°C以下)での熱化学プロセスの研究が、サイクル機構[10]、米国 ANL[11]などで進められている。

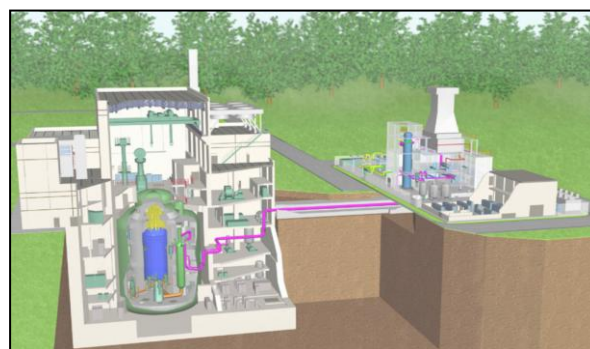
(3) 原子力加熱・化石燃料水蒸気改質法

これは、原子炉からの熱を天然ガスなどの化石燃料の水蒸気改質反応(吸熱反応)に与え、化石燃料の持つ化学結合エネルギーをフルに水素生成に利用する方法で、同一水素製造量で化石燃料の使用量を約 30%節減できる。化石燃料と原子力の両方を利用する方法なので、協働法(Synergistic method)または共生法(Symbiotic method)とも呼ばれている。例えば、天然ガスの水蒸気改質反応(下式)に必要な吸熱を原子炉から供給することにより、加熱のための燃料の燃焼分が節減できる。



この場合に水素と共に生成される炭酸ガスの分離は燃焼ガスからの分離より容易であり、将来の炭酸ガス固定による排出抑制にも有利になる。水のみを原料とする他の方法と異なり化石燃料を使用するが、その使用量を節減できるので化石燃料と原子力によるエネルギー供給が共存する時期には環境と資源の保全に効果的な方法と考えられる。

図4. 高温工学試験炉による水素製造実証
天然ガス水蒸気改質、2008年に試験予定[12]



水蒸気改質反応は通常、750°Cから 1000°Cの温度で行われる。原研では先ずこの方法で高温ガス冷却の原子力プラントと化学プラントの結合の技術実証をする予定で準備を進めている(図4)[12]。同じ水蒸気改質反応だが、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透過膜改質(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が開発されており[13]、東京ガスは2003年12月にこの方式の水素製造装置を東京千住の実証用水素ステーションに設置する。この膜改質方式と原子力との組み合わせには、三菱重工・新型炉技術開発などによるナトリウム冷却炉・天然ガス膜改質方式の設計研究がある(図5)[14]。

図5. 高速炉・天然ガス膜改質水素プラント概念[14]



これらの方法が実用化すると、600°C以下の中温を利用するのでFBRでの水素製造が可能になる。化石燃料として、天然ガスのみでなく、石油、石炭を使用する方法についても検討が行われている[15]。

以上の方法は、使用する原子力のエネルギー形態（電気、熱）、原子炉の温度レベル、炉型などが異なり、また実用化時期と実用化時のエネルギー利用率、製造コストなど、それぞれ特徴、得失がある。

表3に、これらの水素製造方法における原子炉熱量に対する生成する水素熱量の比（原子炉熱の水素熱転換効率、%）の概略値を示す。また、天然ガス水蒸気改質法に関しては、天然ガス燃焼加熱と原子炉加熱の場合について使用する天然ガス熱量に対する生成する水素熱量の比（天然ガス熱の水素熱転換効率、%）の概略値を示す。

表 3. 生成する水素の熱量と原子炉熱量および化石燃料熱量との比＝熱転換効率（%）
（*水素透過膜改質法、原子炉熱利用率60%の場合）

水素製造方法	エネルギー源	原子炉発電	原子炉発電・高温加熱	原子炉高温加熱	原子炉中温加熱*	天然ガス燃焼加熱
	原料	水	水	水	水	天然ガス・水
方法	電気分解	電気分解	電気分解	熱化学分解	水蒸気改質	水蒸気改質
熱転換効率 [%]	水素熱量 原子炉熱量	25～45 %	50 %	55 %	350 %	—
	水素熱量 天然ガス熱量	—	—	—	120 %	90 %

走行条件では、100万kWe発電プラントの電力から電解

5 原子力からの水素 — 今後の課題と対応

競合可能な実用性・経済性

原子力による水素の生産方法は他のエネルギーからの生産方法と競合可能な実用性、経済性を有する必要がある。このためには、生産プラントの信頼性、耐久性も重要である。

原子力による水素のコスト試算としては、原研が高温ガス炉利用の場合について各種方法を比較評価したものがあある[16]。それによると、通常の天然ガスの水蒸気改質法によるものを1として、原子力によるものは0.9から2.5の値になっており、協働法のみが競合可能な範囲に入っている。

原子力によるエネルギー供給では環境に対する影響が小さいので、二酸化炭素の影響を含めた全コストで比較すると上記と同じ比較で0.7から1.1となり、原子力による方法は通常の天然ガス水蒸気改質法と競合可能となる。

この分野では最近国内外での研究開発と技術協力・交流が加速されつつあるので、国内・国際間の協調と競争を通じた技術革新による経済性向上が期待できる。

表 4. 原子力水素の天然ガス水素とのコスト比較[16]

	内部コスト (相対値)	全コスト (相対値)
天然ガス燃焼水蒸気改質	1.0	1.0
水・電気分解	2.5	1.1
水・IS法熱化学分解	1.5	0.7
原子力加熱天然ガス水蒸気改質	0.9	0.8

高温ガス炉（50%熱効率）、全コスト＝内部コスト＋外部コスト、炭酸ガス処理費＝21円/Kg CO2

市場からの要請に応え得る生産規模

原子力による水素生産の規模は市場からの要請に応え得るものである必要がある。わが国の乗用車の燃費および

法で水素を生産すると、原子炉熱の水素熱転換効率＝25%として、平均的走行の燃料電池車（FCV）約180万台へ燃料供給ができる。わが国のFCVの2020年導入目標約500万台（乗用車）に対する必要水素燃料は100万kWeの原子力発電所3基により供給することができる。

熱化学法では水素製造効率がこの2倍の50%になるとして、電解法の半分の規模の原子炉からの熱により同量の水素生産が可能である。原子力と化石燃料による協働法による水素生産では、原子炉からの熱は補助的に使用されるので、電解法の場合より1桁小さい熱出力の原子力プラントで同量の水素の生産ができる。

水素エコノミーが成熟するまでの間は、末端需要への供給インフラの整備状況によもよるが、水素ステーションで電解する方法か、あるいは小型の原子力プラントの方が市場の要請に応じやすい。石油精製などの大口の水素需要に対しては、現在の大型原子力プラントの規模で対応できると考えられる。

水素のパイプラインなどの供給インフラが整備される

水素エネルギー実用時には、原子力はその大量エネルギー供給の特長を生かして、オフサイト（生産地）水素製造とオンサイト（需要地）電解のための発電の両方の供給役割を担うと考えられる。

持続的大量供給の条件

大量のエネルギーの持続的供給可能性は原子力の利点である。ただし、今後50年以上の期間を考えると、前述のように原子燃料のリサイクル利用が必要である。それ故、FBRによる燃料リサイクル方策の確立と、その核不拡散性との両立が原子力による持続的大量供給の前提条件となる。

生産プラントの安全性

原子力水素生産プラントの安全性は電解法のように原子炉プラントと水素プラントが分離したものでは、それぞれのプラントの安全を独立に確保する方策がとられる。

熱化学法や協働法のように原子炉プラントと化学プラントの複合プラントでは、連結部分に起因するエネルギー的、機械的、物質的事象の安全性への影響を検討しておく必要がある。基本的には中間システムを設けることにより、原子炉システムとの直接的な相互作用を分離し、原子炉プラント部分と化学プラント部分にこれまでの安全の考え方を適用することで対応する方向が検討されている。このような原子力・化学複合プラントを対象とした定量的安全評価にもとづく合理的な安全論理の構築は重要である。

社会的受容性

水素エネルギーが将来の輸送用エネルギー・キャリアとして受け入れられるとしても、原子力を利用するその生産手段が社会に受け入れられるためには、原子力利用が環境・資源などの面から社会にとってベネフィットがあることを理解される必要がある。

そのためには開発と並行して、生産から消費にわたる関係者が参画した評価・決定のプロセスをとるなどして進めることが重要である。すなわち、現段階から原子力・水素について、技術開発者、生産と利用に関係した業界、パブリック、国、地方自治体などの政策・行政レベルも含めて、リスク・コスト・ベネフィットを評価・検討し、意志決定していく段階的なプロセスにより進めることが必要であろう。

開発パートナー

石油精製における水素の需要増の見通し、原子力・化学複合プラントの技術開発などから、今後の原子力水素生産プラントの開発における原子力・電力・電機業界のパート

ナーとして、石油業界・ガス業界、化学業界などが考えられ、これらの業界との協働的、共生的な取り組みは重要である。

6、結 言

原子力による水素生産の実用化はどのように進められるであろうか？ 現時点（2000年代）では、軽水炉発電と水の電気分解の組み合わせが技術的に実用レベルにあるが現在の電力価格では割高なので、電力に余剰のあるオフピークの原子力電力の利用から始めることになる。中期的（2010年代）には、ナトリウム冷却FBRと透過膜水蒸気改質反応との組み合わせが技術的に可能となる。また、高温ガス炉と高温水蒸気電解法との組み合わせも有望である。長期的（2020年代）には、水を原料として炭酸ガス排出がなく効率的に水素製造が出来る熱化学法の実用化が期待される。

米国では原子力による水素生産を水素エネルギー開発利用の全体計画に統合し政策的に推進しつつある。我が国にとっても、原子力による水素供給は21世紀の環境対策を含めた国のエネルギー戦略として長期エネルギー政策上重要な選択である。これらの技術開発および産業化が、水素エネルギー社会の基盤、環境、インフラの整備とともに、国の長期エネルギー計画・政策に組み入れられて推進されることが望まれる。

参考文献

-
- [1] Nebojsa Nakicenovic, et.al., "Global Energy Perspectives -- A joint IIASA - WEC study", Cambridge University Press ISBN 0-521-64569-7
<http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book_dyn/bookcnt.py>
- [2] 小野、大滝、平尾、久保田、辺田、「世界における原子力エネルギー最大供給可能量の検討」JNC TN9400 2001-028 サイクル機構（2000年12月）
- M. Hori, "Role of Nuclear Energy in the Long-Term Global Energy Perspective" Proceedings of OECD/NEA First Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Paris, France, October 2-3, 2000, p.25 (2001)
- [3] S. Mori, "An Assessment of Hydrogen Production Process by a Long term Global Warming Integrated Assessment Model MARIA" IEW/IAE/EMF-19 Vienna, Austria (June,

2001)

[4] IAEA, "Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power" IAEA TECDOC-1085 IAEA (1999)
<http://www.iaea.org/inis/aws/htgr/abstracts/abst_30027279.html>

[5] OECD/NEA, "Proceedings of OECD/NEA First Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen", Paris, France, October 2-3, 2000, 240 pages (2001)

[6] 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@jaif.or.jp)

[7] 原子力 e y e 編 「"水素エネルギー社会と原子力"シンポジウムの要点」 原子力 e y e 2003 年 3 月号 p.50-69

[8] G.E. Besenbruch, et.al., "High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power", Proceedings of OECD/NEA First Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Paris, France, October 2-3, 2000, p.25 (2001)

[9] K. Onuki, et.al., "R&D On Thermo-chemical IS Process At JAERI", OECD/NEA Second Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne

[10] T. Nakagiri, et.al., "Investigation on a new hydrogen production process for FBR", OECD/NEA Second Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne

[11] M.Lewis, et.al., "Low Temperature Thermochemical Cycle Development", OECD/NEA Second Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne

[12] Y. Inagaki, et.al., "Present Status and Future Plan of HTTR Project" OECD/NEA Second Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne

[13] I. Yasuda, et. al., "Development of Membrane Reformer for Hydrogen Production from Natural Gas", 14th World Hydrogen Energy Conference, June 9-13, 2002, Montreal
Y. Shirasaki, et. al., "New Concept Hydrogen Production System Based on Membrane Reformer", 2002 Fuel Cell Seminar, November 18-21, 2002, Palm Springs

[14] M.Tashimo, et. al., "Concept of FR-MR", 11th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-11-36321, April 20-23, 2003, Tokyo

M.Tashimo, et. al., "Advanced Design of Fast Reactor-Membrane Reformer (FR-MR)" OECD/NEA Second Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne

[15] M.Hori, et.al., "Synergistic Production of Hydrogen Using Fossil Fuels and Nuclear Energy-- Application of Nuclear-Heated Membrane Reformer" OECD/NEA Second Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, October 2-3, 2003, Argonne

[16] S. Shiozawa, M. Ogawa, Y. Inagaki, et al., "Present Status of JAERI's R&D on Hydrogen Production Systems in HTGR" Proceedings of OECD/NEA First Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Paris, France, October 2-3, 2000, p.57 (2001)