

第 112 回定例研究会資料

原子力による水素生産

堀 雅夫

原子力水素研究会

105-0001 東京都港区虎ノ門 1-7-6 (原子力システム研究懇話会)

Hydrogen Production by Nuclear Energy

Masao Hori

Nuclear Hydrogen Society

Nuclear Systems Association, 1-7-6 Toranomom, 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. 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 the water splitting using nuclear heat and/or electricity.

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

1. 原子力による水素生産の位置付け

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 炭酸ガスを排出しないので環境保全に優れている
- ② 長期・大量の持続的供給が可能である
- ③ エネルギー密度が高く、エネルギーセキュリティに優れている

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、原子力は密度の高いエネルギー源で、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。

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、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炭酸ガス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、炭酸ガス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、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

一社会」実現への取り組み開始している。2002年1月に米国エネルギー省(DOE)と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」、そして2003年1月には大統領一般教書でそのための水素燃料生産プロジェクト「フリーダム・フューエル計画」を発表した。この中で、水素を国内の一次エネルギー資源から生産するとして、先ず天然ガス、将来はバイオマス、石炭、原子力などを利用するとしている。

2. 原子力水素研究の経緯

エネルギー・キャリアーとしての水素を再生可能エネルギーや原子力により生産する構想は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」[1]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10月には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。

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1月に設立され、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機関から約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」[2]を2002年6月に刊行した。現在、研究会参加機関などにおいて、原子力水素製造に関する研究・開発・設計などが開始されている。2002年12月には日刊工業、

原産、原研の主催で「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[3]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。

米国では、DOEが2000年にNERI(原子力研究イニシャティブ)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。

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きている。DOEは2002年半ばから、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ている。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て推進するもので、年次としては最長で2015年頃を考えている。

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・発電の次世代プラント 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。

米国では、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)が、DOEの予定をさらに短縮するものとして、注目されている。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。これは、上院のエネルギー法案に含められたが審議未了となり、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、2003年11月中旬以降両院で審議が進められ、下院は承認したが上院では法案の他の条項に関わる論議から承認に至らなかった。そのため、2004年2月に予算規模を縮小し、通過のための障害を取り除いた新しい法案が提出されて、審議が続いている。なお、Craig提案に関わる部分は、内容・予算とも変更さ

れてない。

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) は、2002 年に研究開発国際協力の対象として 6 炉型を選んだ。その一つの超高温ガス炉 (VHTR) 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 (GFR, LFR, MSR) は発電および水素生産に利用、2 炉型 (SCWR, SFR) 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た検討が行われている。

学会関係では、とくに 2003 年以降、国際会議で原子力水素関係のセッションや、この分野のセミナー、情報交換会議が、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 AIChE 年会、4 月の東京での ICON-11、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 GENES/ANP 国際会議、9 月の MIT での「原子力と水素エネルギーに関するシンポジウム」、10 月の ANL 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、など、多くの研究発表、意見交換が行われている。

3. 原子力による水素の生産方法

現在研究開発されている原子力利用の主な水素製造方法としては下記が挙げられる。これらの方法は、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効率、製造コストなど、それぞれ特徴、得失がある。

(1) 電気分解法

原子炉 (発電) と水の電気分解を組み合わせる電気分解法は、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 (約 80%) を総合して現在は 25% 程度である。将来、高温原子炉による発電効率の上昇により 40% 程度の効率が期待される。さらに、高温原子炉利用の高温水蒸気の固体酸化物電気分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気分解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) 熱化学分解法

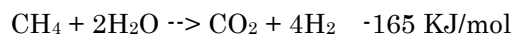
水の高温熱化学分解法は、原子炉の熱を直接的に水の熱化学分解に利用するので原子炉熱の水素熱への転換率として 50% 以上が期待され、原子力水素生産の究極的な方法と考えられている。この熱化学法についてはこれまで多くの研究が行われ 100 以上のサイクルが提案されている。この中で現在有力と考えられているのは、HI、硫酸などを使用する Iodine-Sulfur (IS) 法と、Ca、Br、Fe などを使用する UT-3 法およびその改良法で、何れも 750 から 800°C 以上の温度を必要とする。

この分野では、原研が高温ガス炉と組み合わせる IS 法の試験をしている。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、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、米国 ANL などで行われている。

(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) 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、水蒸気改質反応で生成する炭酸ガスはプロセスの中で分離され、そのほかに炭酸ガス発生を伴う加熱用天然ガスの燃焼がないので、将来の炭酸ガス固定の際には有利になる。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 30% 程度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。

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実証を2008年に行う予定で準備を進めている。

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膜改質（メンブレンリフォーマー）方式により600℃以下の温度で水素を製造する方法が開発されており、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水素ステーションに設置した。この膜改質方式と原子力を組み合わせたナトリウム冷却炉・膜改質方式の水素製造プラントの設計研究が三菱重工・新型炉技術開発などにより実施されている。600℃以下の中温を利用するこの方法が実用化すると、高速増殖炉での水素生産が可能になる。

4. 実用化の課題への対応

① 経済性

原子力水素の実用化のためには、経済性が大きな課題である。原子力による水素製造コストの見直しはこれまでに幾つか出されている。例えば、原研による高温ガス炉を利用した場合のコスト概算では、化石燃料を用いる天然ガス水蒸気改質法による水素製造コストと比較して、原子力利用は、電気分解法：2.5倍、熱化学分解法：1.5倍、協働法：0.9倍となっている。天然ガス水蒸気改質法などの化石燃料ベースの方法は炭酸ガスを排出するので、この処分費用を含めた比較では原子力利用の方法は化石燃料による方法と経済的に競合可能な範囲に入ると見られている。

② 製造規模

原子力による水素製造方法では、水素ステーションなどの利用端における電気分解法以外は中央集中型の生産方式になる。このため、パイプラインなどの利用端への水素供給インフラの整備が必要になる。これらの整備状況にもよるが、一般に小型の原子力プラントの方が市場の要請に対応できると考えられる。

③ 持続的供給

原子力による電力と水素の両方の供給を、長期・グローバルに持続的に行っていくには、将来、ウラン資源の制約から高速増殖炉による燃料リサイクルの導入が必要になると考えられる。

④ 安全性

原子力プラントと水素製造プラントが結合した原子力・化学複合プラントの合理的な安全論理の構築、安全ガイドラインの確立が重要である。

⑤ 社会の受容

原子力による水素生産を社会に受け入れてもらうには、開発段階からこの方法のベネフィット・リスク・コストに関する情報を提供して、関係者が参画した評価・決定のプロセスをとるなどしていく必要があると考えられる。

⑥ 開発パートナー

石油精製などの大口の水素需要、原子力・化学複合プラントの開発などから、これまでの原子力・電力・電機業界に加えて、今後は、化学、石油、ガス業界などとの協働的、共生的な取り組みが必要と考えられる。

5. 実用化への期待

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？短期的には、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ので、この方式の水素生産がオフピークの電力を利用して可能である。中期的（2010年代）には、高温ガス炉やナトリウム冷却炉と化石燃料水蒸気改質反応の組み合わせが技術的には可能となろう。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、熱化学法と高温ガス炉との組み合わせの実用化が期待される。

2020年以降と目される水素エネルギーの本格実用期には、原子力による水素が化石燃料など他のエネルギー起源の水素と競合しながら、水素の供給を行っていくことを期待したい。

[参考文献]

1. 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>
2. 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）
3. 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