特集

水素インフラと原子力による水素製造

日本原子力研究開発機構 塩沢周策, 原子力委員会 齋藤伸三,
水素エネルギー協会 岡野一清, 電力中央研究所 魚谷正樹,
日本原子力研究開発機構 小川益郎, 日野竜太郎

I. 緒言

現在の世界のエネルギー供給は化石燃料資源に大きく依存しており、このため様々な問題に直面しているといわれている。一つは化石燃料資源利用の結果として大量に放出される二酸化炭素(CO₂)の温室効果による地球温暖化の問題であり、もう一つは限りある化石燃料資源を求めての争奪合戦、それに伴う価格の高騰、供給の不安定性である。また、これらの問題を解決する有力な一つの手段として、化石燃料資源利用の社会から水素エネルギー利用社会への転換が期待されているが、解決すべき課題が多々存在している。今や、これらの問題、課題に真剣に取り込む必要性、緊急性は、世界の共通した認識となっている。すなわち、京都議定書で定められたように、温暖化の原因となっているCO₂の発生源である化石燃料資源の利用の削減、並びに、今後の人口増加、開発途上国の経済成長等による世界のエネルギー利用の増大を考慮した化石燃料資源に対する依存度を低減する新たなエネルギー利用システムの開発が急務と考えられている。

そこで、本特集では上記の認識に立って、将来のエネルギーとして大きな期待が寄せられている水素エネルギーについて、水素インフラと原子力による水素製造に関するテーマを取り上げ、技術的観点から論ずることとした。

はじめに第II章において、まず簡潔にエネルギーの需給の見通しと課題について定量的に述べ、原子力による水素製造の我が国の政策上の位置付けをまとめる。さらに我が国の原子力による水素製造研究の現状を踏まえ、水素製造およびその他の非電力分野への原子力利用の今後の期待、原子力利用のための技術開発およびその推進策を示す。

また、将来は水素社会の到来が叫ばれ、世の中の期待

は大きいものの、解決すべき課題も多いが、技術的な見地から総括的にまとめたものは少ない。そこで、第III章では、水素社会構築に必要なとされる主要技術に関し、水素製造、輸送、貯蔵、利用、材料の観点から、技術の現状と課題、および今後の見通しに関するレビューを総括的に行う。

原子力による水素製造については様々な提案、研究開発が行われている。しかし、それらの技術の現状と今後の見通しについて、個々の技術について述べたものはいくつかあるものの、総括的かつ定量的に論じた評価は少ない。そこで、第IV章では、現在検討されている原子力エネルギーを利用した水素製造技術の現状と将来を全般にわたりレビューする。その中で、1,000℃近い高温が取り出せる高温ガス炉を用いることにより、最も高い熱効率が期待でき、さらに水素の大量製造が可能な熱化学法ISプロセスが最も有力な原子力水素製造システムであることを示す。

このため、高温ガス炉を利用した熱化学法ISプロセスによる水素製造システムの実用化は国内外の期待を集めている。そこで、第V章では、高温ガス炉を利用した熱化学法ISプロセスによる水素製造技術の研究開発の状況と今後の展望について、現在、日本原子力研究開発機構が世界をリードして進めているHTTR計画を例にまとめる。本章では高温ガス炉および同炉を用いた熱化学法ISプロセスの特長について解説するとともに、HTTRからの熱を用いて水素を製造するHTTR水素製造実証試験計画を中心に、HTTR計画の全体概要について述べる。また、海外における高温ガス炉による水素製造システムの実用化の動向についてもレビューする。最後に、実用化に向けての想定されるシナリオを示す。

(塩沢周策)

II. 原子力水素への期待

1. はじめに一安い石油の時代が終わる

国際エネルギー機関(IEA)の2005年版 World Energy Outlook によれば、世界の1次エネルギー需要は第1図に示すように、今後も大幅に増大し、その約80%は石油、石炭、天然ガス等の化石燃料で賄われると予測されてい

Infrastructure for Future Hydrogen Economy and Nuclear Hydrogen Production : Shusaku SHIOZAWA, Shinzo SAITO, Kazukiyo OKANO, Masaki UOTANI, Masuro OGAWA, Ryutaro HINO.

(2006年 9月12日 受理)

第1図 世界の1次エネルギー需要の推移と予測

る(IEAは従来、脱原発姿勢をとってきたが、近年の国際的な原発推進政策などを考慮し、2006年度版では原子力の導入増加を予測したものとなる)。なかでも、アジアにおける1次エネルギー需要は、2000～2020年の20年間に石油換算で24～46億トンへと約2倍に増加すると見積もられている¹⁾。特に、中国は高い経済成長に伴い、世界規模での資源獲得を急速に強化してきており、2020年にはアジアに占めるエネルギー需要のシェアは45%まで拡大し、同様に、人口大国であるインドについても15%に増大すると予測されている。一方、2020年における日本のシェアは、経済の成熟化、人口減少に伴い2000年の22%から12%まで減少すると見積もられている。

一方、化石燃料資源の確認埋蔵量をBP統計2005(英国の石油会社BPが発行する1次エネルギーデータベースの2005年版)で見ると、石炭164年、石油41年、天然ガス67年となっている。石炭は比較的埋蔵量が多いが、中国などでは、その輸送のために延々と鉄道を敷設しなければならないという問題があるとともに、化石燃料の中でも地球温暖化問題に関わるCO₂を単位エネルギー発生量あたり最も大量に排出するので、その使用量を拡大するには、少なくとも先進国の間ではCO₂隔離技術の確

立が待たれている。無論、SO₂、NO_x、ばい塵の排出対策も重要である。石油については、米国や北海油田関係国など非OPEC諸国における供給能力は徐々に低下しており、今後の石油、天然ガスの供給は世界の石油埋蔵量の過半が集中している中東地域を中心にロシア、中央アジア等に依存する傾向が一層高まる見通しである。しかし、第2図に示すように、OPEC諸国においても石油供給余力は低下傾向にあり、石油の生産量は楽観的に見ても2030年代に、悲観的シナリオでは10年後にピークを迎えるのではないかと石油ピーク論も指摘されている。国際的な原油価格の指標であるWTI原油価格も2003年の1バレル当たり30ドル程度から現在では一気に2倍の60ドル/バレル以上で安定してしまっているかに見える。

このような化石燃料確保の先行きの不安と地球環境問題から、米国をはじめ、経済成長の著しい中国、インド、ロシア等、そしてこれまで脱原子力政策を進めてきた欧州各国において原子力発電の導入が一躍脚光を浴びてきている。我が国においても、現在、55基の原子力発電プラントにより全発電電力量の約1/3を賄っており、さらに、10数基の建設が予定されている。しかし、原子力発電をベースロードとして使う限り、全発電量の50%程度が限度であろうともいわれている。我が国では、エネルギー自給率が僅か4%であり、非電力分野の1次エネルギーに占める割合は約60%であるので、非電力分野へも原子力を活用しエネルギー自給率を上げることが望まれる。第3図には、各種産業における熱エネルギーの温度利用範囲を示しているが、1,000℃近い温度が得られる高温ガス炉を用いれば、直接還元法による製鉄、水の高温度熱化学分解法や炭化水素の水蒸気改質法による水素製造、エチレン、スチレンの製造、石油精製から海水の淡水化、地域暖房まで幅広い分野にプロセス熱の供給が可

第2図 OPEC諸国の余剰生産能力と原油価格の動向

原油価格(WTI): NYMEX(ニューヨークマーカンタイル取引所)公表の数値より

第3図 各種産業における熱エネルギーの温度利用範囲

第4図 エネルギー政策上の原子力水素の位置付け

能となる。

安い石油の時代が終わり、中国、インド等の開発途上国における猛烈な勢いでモータリゼーションが進むことを考えると、今後も一層の石油価格上昇も心配される中、この影響を直接的に受け、石油に代わる燃料への転換が最も求められるのが運輸部門であろう。このため、すでにいくつかの国ではサトウキビやとうもろこしから製造したエタノールを利用した混合ガソリンも話題になっているが、運輸部門における石油代替エネルギーの有力候補として挙げられているのが水素である。民間各社は燃料電池の開発にしのぎを削っているが、燃料電池車や内燃型水素エンジン車にせよコストはもとより、大

量の水素製造とインフラ整備の問題があり、この問題については、第Ⅲ章で詳述されている。その中で、環境に調和し水素を大量に安定に供給する手段として、原子力利用が考えられる。

2. 我が国の政策上の位置づけと現状

—高温ガス炉で水素を作る

我が国のエネルギー政策の方針を示すものとして、2002年に「エネルギー政策基本法」が設置され、それに基づいて3年ごとに「エネルギー基本計画」が策定されることになっている。第4図にエネルギー政策上の原子力水素の位置付けを示したが、現行の基本計画では、水素エ

エネルギー社会の実現に向けた取組みの中で、「原子力等には、水素製造の実用化を期待」と記述されている。また、昨年策定された「原子力政策大綱」においても、この実用化を目指す継続的な研究開発の重要性について「革新的な技術概念に基づく技術システムの実現可能性を探索する研究開発」の中で、「高温の熱源や経済性に優れた発電手段となり得る高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発等については、今後とも技術概念や基盤技術の成熟度等を考慮しつつ長期的視野に立って必要な取組を決め、推進していくことが重要である。」と謳われており、国、研究開発機関が大きな役割を果たすことを期待している。

翻って、第IV章で詳述されるが、原子力による水素製造法を整理すると概略、第5図に示す4つの方法となろう。原子力発電により得られた電気をを用いた水の電気分解による水素製造は直ちに可能な技術であるが経済性は低い。他の方法として、炭化水素の水蒸気改質法、水を高温で熱化学分解する方法、同じく高温の水蒸気を電気分解する方法等が考えられ、いずれも800～1,000℃の高温の熱を必要とする。ちなみに、炭化水素の水蒸気改質法は、化石燃料を用いて実用化されている。この場合、熱の供給過程と水素生成反応過程の双方においてCO₂を大量に排出することになるが、原子力を用いた場合は前者の過程ではCO₂を排出しない。このような800～1,000℃の高温核熱を取り出せる原子炉として、高温ガス炉の研究開発が進められてきた。日本原子力研究所(現日本原子力研究開発原子力機構。以降、原子力機構と呼ぶ)は、およそ1,000℃の高温核熱を利用して水素製造による還元製鉄、化学製品製造、発電等を行う多目的高温ガス炉計画を1970年以前から進めてきた。原子力製鉄計画は見送られたが、長年にわたる燃料、耐熱材料、黒鉛、ヘリウム機器等の要素技術の研究開発を積み重ねて、我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTTR)を大洗研究開発センターに完成させ、世界最高の950℃のヘリウムガスの原子炉外への取出しに成功している。

一方、高温ガス炉に接続する水素製造システムについては、原子力機構では、全くCO₂を排出しない方法として、ヨウ素(I)と硫黄(S)を用いるISプロセスと呼ばれ

る高温熱化学分解法による水素製造の研究開発を進めてきた。詳細は、第V章に述べられているように、毎時30 lの水素連続製造の工学基礎試験に成功し、1,000倍規模のパイロット試験を準備中であり、この分野でも世界の最先端を歩んでいる。

3. 今後の期待—鍵にぎる経済性と安全性

石油供給のピークに対応した2020～2030年頃に原子力水素を本格的に導入するためには、この分野で世界をリードしてきた我が国の技術を民間の多面的な協力も得て早期に実用化を見通せる段階に到達させることであろう。このためには、まず、第1に、化学反応器の材料にセラミックスや金属等の実用材料を用い、効率の高い実用化を見通せる熱化学法ISプロセスによる水素製造をパイロットプラント試験で速やかに実証することである。ISプロセスはCO₂を排出しない優れた方式であるが、実用規模で安価に水素を供給できなければならない。第2に、可能な限り早期にHTTRによる水素製造を実現することである。原子炉と化学プラントを接続して製品を作り出すのは、世界で初めての試みとなる。HTTRは、高温の配管を接続できるように設計されており(第6図)、ISプロセスが間に合えば、第1フェーズでは水蒸気改質法でもよいと個人的には思っている。原子力の非電力分野への利用に途を拓くためには、早期に原子炉と化学プラントを接続した実証試験を実施することが重要である。それは、原子炉と火災・爆発の可能性もある化学プラントを接続したシステムの安全規制方策を規制当局において議論すらされてなく、そのためには相応の時間も要するので、早期にその途を拓くだけでも大変価値のあることだと思われるからである。世界初の試みとなる原子炉と化学プラントを接続したシステムの安全規制方策について主要な議論として以下のような課題が考えられる。

- (1) 化学プラントにおける火災・爆発事故に対して原子炉の安全をいかに確保すべきか。防護壁と離隔距離で考えることになろうが、想定すべき火災、爆発の規模、圧力波の伝播の評価等々の課題がある。

第5図 原子力による水素製造法

第6図 HTTRを用いた原子力水素製造実証試験計画

第7図 高温ガス炉による熱のカスケード利用

- (2) 原子炉事故時に化学プラントおよびその従事者の安全をいかに確保すべきか。
- (3) 化学プラントに原子炉級の規制・基準を適用すべきか否か。適用しなくてもよい論理の構築。
- (4) 前項に関連して、化学プラントの事故・故障の場合における原子炉の最終熱除去法の確立、等々。

第3に、これらの試験と並行して、原子力水素の実用化に向け、水素製造コストの徹底した低減化方策を確立していく努力が不可欠である。これらの低減化に当たっては、高温の熱をカスケード式に利用し、高い熱利用率を実現することが有効と考えられる。ちなみに、第7図に示すように、高温ガス炉からの高温熱を水素製造、ガスタービン発電に利用するとともに、低温化した熱を海水淡水化などにカスケードに利用することにより、80%近い熱を有効に利用でき²⁾、これにより、水素製造コスト、発電コスト等の低減も図れることが期待される。

4. まとめ—非電力分野での原子力利用の突破口に

温暖化等の地球環境問題、化石燃料資源の急速な減少が憂慮される中、エネルギーの安定供給を確保する上で、資源小国の我が国においては、原子力発電の役割は極めて大きく、我が国のエネルギー諸政策でも取り上げられてきている。一方、石油資源の減少と高価格化により最も影響を受けるのは運輸部門となる可能性が高く、代替の有力な燃料として水素が考えられ、環境にも配慮した大量の水素製造の手段となりうるものとして、原子力が有望視されている。そこに、原子力水素への期待が大きい所以があり、また、原子力としても非電力分野への利用の展開を図ることが重要である。中でも、高温の利点を生かした「高温ガス炉による水素製造」は、原子力エネルギーの非電力分野への利用展開の突破口となるもので、原子炉の熱利用率の向上と併せて今後の積極的な国の関与と産業界の参画による技術開発の進展を期待したい。

(斎藤伸三)

—参考文献—

- 1) Material in 385th Regular Seminar of the Institute of Energy Economics, Japan, (2004).

- 2) S. Shiozawa, *et al.*, "Development status on hydrogen production technology using high-temperature gas-cooled reactor at JAEA, Japan", European Nuclear Conference 2005 (ENC 2005), Versailles, France, Dec. 11-14, 2005, Paper No. 225.

Ⅲ. 水素社会の構築に向かって：

水素・燃料電池技術の現状と課題

1. はじめに一水素社会構築の扉が開いた

化石燃料消費の増大に起因する地球環境問題とエネルギーの安定供給が世界共通の課題となり、国内資源で生産できるクリーンな水素エネルギー利用への期待が高まっている。米国、カナダ、ヨーロッパ、日本を中心に各国は水素インフラや水素を利用する燃料電池等の技術開発に対する取組みを強化し、燃料電池車や定置用燃料電池を実用的に使用する実証試験を行っている。また、欧米ではすでに水素インフラ整備に着手しており、水素ハイウエー計画が米国、カナダ、北欧などで推進されているほか、英国の石油会社 BP (British Petroleum) はスコットランドとカリフォルニアに大容量水素タービン発電所を2009年と2011年に建設する計画を発表するなど水素の大規模利用も実現させようとしている。水素社会を構築するために必要とされる水素インフラ構築と水素利用技術の実用化に関しては多くの課題解決が必要であり、一般の期待よりは長時間を要するが、世界は水素社会構築に向かって着実に動き始めた。

2. 水素社会構築のために解決すべき課題

—供給システムをどう作る

第8図に示すように、水素社会を構築するためには、短期には燃料電池や燃料電池自動車を商品化し水素を供給する水素ステーション網を構築すること、中長期には水素を大量に利用する燃料電池応用の交通機関や大容量水素タービンなど発電設備を開発することと、その運転に必要な大量の水素を供給する大規模な水素インフラを

第8図 水素社会構築のために解決すべき課題

構築することが必要となる。また、規制緩和と法整備、技術標準化、市民の理解など社会基盤の整備が必要となる。

3. 水素社会構築に必要とされる主要技術

—水素製造、輸送、貯蔵、利用、材料

水素利用と水素インフラ関連技術分野として水素製造、輸送、貯蔵、利用および材料技術がある。第1表に、各分野において必要とされる主要技術を示す。水素製造技術では安価な水素を製造するための低コスト、高効率の製造設備の開発と、CO₂フリーの石炭ガス化や原子力利用などの大規模水素製造技術、輸送技術では将来のパイプライン輸送や液体水素の大量輸送、貯蔵技術では5 kg以上の水素を搭載できる自動車用水素貯蔵タンク、水素利用技術では当面の中核となる燃料電池と自動車を含む燃料電池応用製品のほか、水素エンジン技術、水素タービンなどの大規模発電技術の開発が必要となる。さらにそれらの機器やプラントに使用される燃料電池の電極構成材料、水素吸蔵合金、耐水素脆性や耐高温材料など各種材料技術の開発も重要である。

4. 水素利用技術の現状と課題—耐久性とコスト

(1) 燃料電池技術の現状と課題

水素利用技術の中核となる固体高分子形燃料電池は、自動車用や家庭用の燃料電池として期待され実証試験段階を迎えているが、商品化に必要とされるセルスタックの耐久性とコスト高の課題は未解決である。それに対して我が国では、産・官・学が協力して燃料電池セルの劣化要因の究明、低コスト部品の開発、低コストの電池構

第1表 水素社会構築に必要とされる主要技術

技術分野	必要とされる技術
水素製造	・低価格、高効率水素製造設備(改質、電解、バイオマス) ・石炭ガス化とCO ₂ 固定化・原子力利用水素製造
水素輸送	・パイプライン配送(短、長距離パイプライン) ・大量輸送(液水タンカー、軽量容器トレーラ等)
水素貯蔵	・自動車用水素貯蔵タンク(液化、ガス、5～7 kg 搭載) ・水素吸蔵材料(6 wt%以上の合金、炭素系ほかの材料) ・大容量液体水素貯蔵タンク
水素利用	・燃料電池と燃料電池応用機器および各種交通機関 ・商業用水素ステーション(低コスト、小型設備) ・水素エンジン、タービン(MW級動力、大容量発電)
材料	・水素・燃料電池に関わる低価格、高性能材料

成材料の開発などの要素技術研究プロジェクトを大々的に展開し問題解決に注力している。現状では燃料電池の耐久性は自動車用で目標5,000時間に対して約2,000時間、定置用で目標40,000時間に対して約20,000時間といわれているが、セルの劣化現象の解明や耐久性が改善された新しい電解質膜の開発などが進展しているので早期解決が期待される。

一方、我が国において燃料電池のシステム開発は順調に進んでおり、燃料電池車や燃料電池バスの実証試験が3年以上行われているほか、家庭用燃料電池では大規模実証試験で2005年度は480台、2006年度は700台が実用的に運転される。そのほか燃料電池応用製品として、燃料電池駆動の車椅子、スクーター、自転車など小型移動体が開発され、2006年度から実証運転が行われている。このように固体高分子形燃料電池技術は数年前と比較して進歩しているが、今後さらにコストを低減して早期に商品化を達成することが望まれる。

(2) 燃料電池車と水素エンジン車の現状と課題

水素利用技術の中で最も期待されている燃料電池自動車については、世界各地で、乗用車、バスともに大規模な実証試験による市内走行が行われている。燃料電池自動車は一充填走行距離が現在約350 kmで短いことが問題で、70 MPa 高圧コンボジット容器や水素吸蔵材を入れた高圧複合容器により500 km 走行を可能にする技術開発が行われている。また、燃料電池車の商品化に関しては、搭載する燃料電池のコスト低減が最も難しい問題で、海外では燃料電池車の本格的普及は2020年頃としている。一方、欧米では水素インフラ構築にすでに着手しており、水素の導入を促進するために燃料電池車が導入されるまでのつなぎとして、走行距離は短いものの燃料電池車より安価で即実用可能な水素エンジン車を利用する動きが出てきた。

カリフォルニア州政府はQuantum社に委託してトヨタプリウスを水素エンジンハイブリッド車に改造(水素プリウスと呼ぶ)し、すでに30台を各市に配車している。ノルウエーのHyNorプロジェクトでも水素プリウス15台が導入される。そのほか水素エンジンバスの導入も開始され、ドイツのベルリン市交通局ではMAN製水素エンジンバス14台を2006年から2007年にかけて市内路線に投入し、さらに2009年までに250台を導入すると発表している。

上記のような海外の情勢に対して我が国では、マツダも水素ロータリーエンジン車の実証試験やリース販売を行っている。水素エンジン車は、上述したように、走行距離が短い問題があるが燃料電池車と比較して安価であるため、我が国でも燃料電池車が本格導入される2020年頃までのつなぎとして普及することが期待されている。

(3) 水素の大規模利用の現状と課題

水素の大規模利用に関して海外では、とくに、水素エ

エネルギー導入の主目的を脱輸入石油依存としている米国と、環境対策としている欧州では、ともに水素の早期導入を図るため、燃料電池に限らず、エンジンやタービンなどあらゆる分野に水素利用技術を活用しようとしている。

例えば、英国の石油会社 BP が CO₂フリーの大容量水素タービン発電所の建設計画を発表した。スコットランドに2009年までに350 MW、カリフォルニアに2011年までに500 MW の発電所を建設する。この500 MW の発電所では、同クラスの既存の天然ガス火力発電所から排出される車百万台分に相当する CO₂が削減できるとしている。BP は約10カ所の水素タービン発電所の建設を検討中とのことであるが、このように燃料電池以外の水素利用技術を早期に実用化して水素社会構築を目指す動きも注目に値する。BP の水素タービン発電所の概要を第2表に示す。この計画では、発電所は、水素源としての天然ガスやペトロコーク(石油精製後に出るスラッジカーボン)がその場で容易に得られ、CO₂を注入する海底油田の隣接地という最適地に設置される。それにより水素製造費や CO₂処理費を大幅に低減できるので、発電単価は風力発電並みとされている。

5. 水素インフラ技術およびインフラ構築の現状と課題—商業用ステーションが稼働開始

(1) 自動車用水素ステーション

我が国では、各種の水素源を使用する実証試験用水素ステーションが、国の JHFC 水素・燃料電池実証プロジェクトで約3年間運転されてきた。2006年度からスタートした第2期 JHFC プロジェクトでは、中部国際空港を中心とした燃料電池バスの運行が7月から開始さ

第2表 BP の水素タービン発電所

	英国スコットランド の発電所	米国カリフォルニア の発電所
設置場所	Scotland Aberdeenshire	California Carson
事業主	BP とエネルギー関 連企業3社	BP と電力会社 Edison International
発電設備	35万 kW 水素 タービン	50万 kW 水素 タービン
発電単価	風力発電単価と同等	風力発電単価と同等
投資額	6 億ドル	10億ドル
完成予定年	2009年	2011年
水素製造方法	天然ガス改質(190万 m ³ /日)	ペトロコークガス化 (5,000 t/日)
CO ₂ 処理方法	BP の海底油田へ注 入	オキシデンタル油田 へ注入
CO ₂ 削減効果	130万 t/年(車30万 台分)	400万 t/年
その他期待効 果	老朽油田の再生、石 油増産	老朽油田の再生、石 油増産

れ、また、関西地区では燃料電池車と水素ロータリーエンジン車の実証運転が行われるため、新しい水素ステーションが設置される予定である。

JHFC の水素ステーションは実証試験用であるため機能本位で設計されているが、海外では商業用を意図したガソリンスタンド併設や無人スタンド、および低コスト型ステーションが作られ始めた。第9図にカリフォルニア州バーバンク市に2006年に設置された1日10台充填できる低コストの水電解型無人ステーションを示す。このような商業用ステーションでは経済性が問題になるので、初期投資の低減のため水素配送型の簡素なステーションや徹底した設備コストの低減、ガソリンスタンドに併設するためのコンパクト化、セルフ充填を可能にする対策などの改良開発が必要となる。とくに我が国では、ステーションの立地が問題なので、ガソリンスタンドとの併設は重要な課題となる。

(2) 海外における水素インフラ構築の動向

カナダ、米国、ノルウェーでは燃料電池車の商品化が達成される前に、すでに水素ステーション網を幹線道路を中心に配置する水素ハイウエー計画をスタートさせている。

米国のカリフォルニア州では、南岸大気保全局(SCAQMD)が2002年から独自に水素ステーションを建設するプロジェクトを発足させて、2006年までに10カ所の水素ステーションを完成させている。その間、2004年4月に Schwarzenegger 知事が2010年までに50~100ヶ所、最終的には250ヶ所の水素ステーションを建設する水素ハイウエーネットワーク構想を発表し、水素ステーションの建設がスタートした。重要な課題である建設資金の調達には州政府の補助金と産業界の負担により対応しようとしている。カナダやノルウェーでも水素ハイウエーの構築に着手しており、このような動きはさらに米国北部や北欧諸国にも広がりを見せている。

(3) 米国における水素の大規模インフラに関する計画

米国は、国内資源を活用して水素を生産し輸入石油依存からの脱却を図るため、2003年に大統領が The

第9図 バーバンク市の無人水素ステーション

President Hydrogen Fuel Initiative を発表した。その中で、将来の大規模水素インフラ構築のために CO₂固定化を伴う石炭ガス化技術開発プロジェクト FutureGen を 2003 年から発足させた。2007 年に最初のプラントの設置場所を決定し、2012 年にプラントを稼働させる予定である。このように米国は、国内に豊富に埋蔵されている石炭を活用して水素タービン発電、燃料電池発電、水素自動車用などに必要となる大量の水素供給源を確保しようとしている。将来の大規模水素インフラに利用できる水素源としては次のものが考えられる。

- ・ 廃棄物や植物資源利用のバイオマス水素
- ・ CO₂固定化を伴う石炭ガス化による水素
- ・ 海外の水力、地熱、風力発電電力による液体水素
- ・ 原子力利用による水素

これらの大規模インフラ構築に当たっては、バイオマス水素以外はそれぞれ長期にわたる技術開発が必要で、経済性を満足する低コストの水素製造、長距離輸送、貯蔵技術を確認することは容易でないため早急に開発を進める必要がある。

6. 水素の需給—充分にはほど遠い供給能力

経済産業省の目標である 2030 年に 1,500 万台の燃料電池車を導入すると、水素の所要量が 170 億 m³/年となる。一方、我が国で CO₂削減のために化石燃料使用量の 10% を水素に転換しようとする、約 1,000 億 m³/年レベルの水素が必要となる。しかし、我が国ですぐに利用可能な副生水素と、製油所の水素製造プラントの生産余力による水素供給量は約 100 億 m³/年程度である。したがって、今後バイオマス、再生可能エネルギー利用、CO₂固定化を伴う石炭ガス化、原子力の核熱利用の水素製造、液体水素の大量輸入などによる大規模な水素インフラの構築が必要となる。

7. おわりに—商品化を見据えた技術開発を

水素社会のスタートは燃料電池自動車の導入から始まると目されているが、水素の利用技術である燃料電池応用の輸送機関、車椅子等の小型移動体、水素エンジン応用の自動車やコーゼネレーション、水素タービン発電などの技術の確立と商品化も併せて必要となるので、それらの導入時期を燃料電池、燃料電池自動車の導入時期とともに設定して技術開発を行うことが必要である。

それに合わせて水素インフラの整備が必要であるが、自動車用水素ステーションから始まって将来は大規模インフラを構築し、大量の水素を導入して化石燃料の使用量を少なくとも 10% 以上削減することが当面の目標となろう。そして、水素インフラの構築に当たっては、各種 CO₂フリーの水素製造技術の確立と大量の水素供給源の確保が重要な課題となる。

(岡野一清)

IV. 水素製造技術およびその評価

本章では、原子力エネルギー(核熱)を用いた水素製造技術のうち、まず、既存の水素製造法(メタン水蒸気改質法、水電気分解法)について紹介し、次に、研究開発段階にある新たな水素製造法(熱化学法、高温水蒸気電解)の概要と課題を示す。

1. 既存の水素製造法—水素の原料は天然ガスと水蒸気

本節では、既存の水素製造法としてメタン水蒸気改質法および水電気分解法を紹介し、核熱を用いた水素製造法としての両者の課題を挙げる。

メタン水蒸気改質法、水電気分解法等がすでに工業化された水素製造法である。世界の水素の約 9 割は、メタン水蒸気改質法で作られており、現時点で最も経済的な水素製造法である。水電気分解法は、電気が安価に手に入るところで工業化されている。カナダやエジプトなどの水力発電による安価な電気を使って、水電気分解で水素を製造している。

なお、水素を含む副生ガスは潜在的な水素の供給源である。製鉄所のコークスガスと呼ばれる副生ガス中には約 50% の水素が含まれている。この水素を分離・抽出してすでに利用している製鉄所もあるが、現時点では、製鉄所内で副生ガスを燃料等に再利用している。製鉄所のこの水素は、簡単には、空気を遮断して石炭を高温で熱分解(高温乾留)し、コークス(75~85%が炭素)、水素等に分解して得られる。

既存の方法で製造される水素は、エネルギーとしてはほとんど用いられておらず、アンモニア、エチレン等の化学製品の原料として用いられている。エネルギー用の水素に関しては、第 II 章でも述べられているように、2020 年に 500 万台、2030 年に 1,500 万台という水素燃料電池自動車の導入目標に対して必要な水素量は、それぞれ、約 60 億 m³/年、約 170 億 m³/年であり、現時点で利用可能な副生水素、製油所の水素製造プラントの生産余力による水素供給量は、合わせて 100 億 m³/年程度である。2030 年ごろには新たな水素製造プラントが必要となる。

(1) メタン水蒸気改質法

メタン水蒸気改質法では、主成分がメタン(CH₄)である天然ガスと水蒸気に 800~900℃ の熱を加えて、ニッケル等の触媒を用いて反応させ、水素(H₂)と二酸化炭素(CO₂)を得る。メタンを水素に「改質」したことになる。

実際には、上記化学反応式は総括反応式であり、(2)式の改質反応(吸熱)と(3)式のシフト反応(発熱)の 2 つの反応工程からなっている。

天然ガスに含まれる硫黄分は触媒を被毒するので、改質前に0.2 ppm 以下まで脱硫される。次に、(2)式の改質反応で改質されたガスは70～80%の水素と一酸化炭素(CO)を含み、(3)式のシフト反応によって改質ガス中の一酸化炭素がCO₂に変換され、変換後にガス中に残るCO₂は脱炭酸工程で除去される。製造された水素は工場内で使用されるため、水素の製造コストは必ずしも明らかではない。エネルギーとして水素を用いるために、20万m³/h(10万m³/hを2施設)、純度99.999%の水素製造能力を持つメタン水蒸気改質法で水素を製造した場合の水素製造コストは、13～14円/m³であると報告されている¹⁾。原料とエネルギーの関係から、メタン水蒸気改質法が安価な理由は、原料であるメタンの持つ化学エネルギーを使っているからという見方ができる。メタン水蒸気改質法では、メタンを原料とし、メタンと水蒸気の分解に外部から熱を加える。この熱量は、メタンと水蒸気を分解するために必要な全エネルギーの約2、3割であり、残りは、メタンの化学エネルギーが使われている。原料のメタンのコストを1とすると、2次エネルギーであるメタン等から作る熱の製造コストは約2程度である。

このように、メタン水蒸気改質法では天然ガスを原料として安価に、かつ大量に水素を作れるが、大きな問題点は、CO₂を排出することである。水素の製造時の核熱利用と化石燃料の燃焼熱利用におけるCO₂発生量が試算されたが、外部から加える熱として核熱を利用した場合と、化石燃料の燃焼熱を利用した場合の差はたかだか25%程度である²⁾。なお、発生するCO₂を処分する技術として、使用済みの油田等にCO₂を注入する技術などの開発が進められている。ただし、我が国では、近くに油田がほとんどないこと、また、これはCO₂の一時的貯蔵であり、最終的処分ではないため、問題を解決したことになっていないことに注意を要する。

(2) 水電気分解法

原子炉で発生した熱エネルギーをいったん電気に変換(発電)し、水の電気分解(電解)によって水素を製造する方法は、原理としては単純であるが発電時に大きな熱損失があり、製造コストが割高になる。電解プロセスには、商業用水電解槽として実用化しているアルカリ水電解(電解液に水酸化カリウム水溶液、電極にニッケルメッキした鉄を利用)、実証段階にある固体高分子電解(固体電解質としてフッ素樹脂系イオン交換膜、電極に白金または白金系合金を利用)がある。水の電気分解に必要な電圧(理論電解電圧)は1.23 V であるが、電極中を電流が流れる際の抵抗による電圧低下、また電極表面での反応時の抵抗による電圧低下(過電圧)のため、アルカリ水電解の電解電圧は1.9～2.6 V 程度になる。この電圧の理論電解電圧との差が、電気分解槽におけるエネルギー損失になる。固体高分子電解は、電解膜が固体であるの

オンサイト製造(300Nm³/h;乗用車240台/日相当)
送電コスト: 2円/kWh

第10図 夜間電力を用いた水電気分解法による水素製造コストの試算例

で高圧化、コンパクト化が可能であり、電極表面での反応時の抵抗が小さいなどの特徴がある。電解電圧は1.7 V 程度である³⁾。

電気分解法の課題である水素供給コストの試算が行われた¹⁾。街中で1日240台の自動車への供給を前提に、電力単価5円/kWh、10円/kWh、設備利用率40%、90%の条件における固体高分子電解法を用いた水素供給コストを第10図に示す。夜間電力の利用を想定したケース(電力単価5円/kWh、設備利用率40%)で、製造コストは52円/Nm³と試算され、供給に係わるコスト(ここでは15円/Nm³と想定)を加えると67円/Nm³になる。ベースロードを担う原子力発電所の効率的運用に、夜間電力利用による水素製造が寄与し得るが、コスト低減には、より安価な電力が長時間供給(設備利用率向上)される必要がある。また、利便性の良い電気から水素を製造することの意義について、水素社会構築に向けたシナリオ検討の中で整理しておく必要がある。

2. 新たな水素製造法—熱化学法と高温水蒸気電解法

本節では、既存の水素製造法の問題点を解決でき、核熱利用に適合する将来の水素製造法と期待される熱化学法、高温水蒸気電解法について述べる。

(1) 熱化学法

熱化学法の原理は、以下に示すように、元素Xを水に加え、酸素もしくは水素を発生させる発熱反応と、X化水素物もしくはX酸化物を分解して水素を発生させる吸熱反応を組み合わせ、水を順次分解していくというものである。(4)と(5)式もしくは(4')と(5')式を足し合わせると、水の分解式になっている。

熱化学法では、第11図に示すように、発電の理論効率を与えるカルノー効率と同様に、水素製造の理論熱効率

第11図 水から水素を作るときの理論熱効率

は、温度が高ければ高いほど高くなり、約4,000°Cで1となる。

(a) IS プロセス

構造材の温度制約から1,000°C程度での水素製造を考えると、(4)式もしくは(4')式に相当する反応については、電気を使わない場合には適当な反応が見つかっておらず、例えば(4)式を(7)、(8)式のように、2つの反応に分けなければならない。(8)式に相当する反応は、硫黄系反応であることが専門家の現在の共通認識である。

(5)式に相当する反応については、Xに相当する元素は、ハロゲン(フッ素、塩素、臭素、ヨウ素等)である。フッ素は暗闇でも水素と激しく反応し、塩素は光があれば水素と激しく反応する。逆に臭素は水素と結合し非常に安定となり、臭化水素は電気分解するしかない。電気をできる限り使わないとなれば、以上から、Xとしてヨウ素(I)、Yとして硫黄(S)系物質を用いるISプロセスにたどり着く。第12図にISプロセスの概要を示す。(7)、(8)、(5)式は、それぞれ、以下のようになる。

(9)式は発熱反応であり、この発熱分が損失であり、ISプロセスの理論熱効率は約67%となる。(9)~(11)式の反応の温度域は、それぞれ、100°C、400~900°C、400°Cである。(10)、(11)式は吸熱反応であり、(9)~

第12図 熱化学法 IS プロセスのブロックダイアグラム

第13図 熱化学法 UT-3プロセスのブロックダイアグラム

(11)式を加えると、(6)式の水の分解反応になる。

IS プロセスの課題については、次章で詳述される。

(b) UT-3プロセス

現在、水素を作ること成功した熱化学法としては、世界でもISプロセスと東京大学が開発したUT-3プロセスの2つだけである。第13図に示すように、UT-3プロセスは、750°C以下の熱で、4つの反応によって水を熱分解するものである。補助元素は、カルシウム、臭素、鉄の3元素である。UT-3プロセスでは、固体を移動させることなく反応器に充填したままで、気体のみをバルブ操作を用いて循環させる方式を採用している。4基の反応器を最小単位として、1つの反応器は、高温吸熱反応操作、熱回収操作、低温発熱操作、予熱操作の4つの操作を1単位としてこれを繰り返すことになる。

実用化に向けた技術課題には、反応固体の調整法の確立と反応試験、耐腐食性材料の開発、高温化での膜分離法の開発、熱力学平衡データの測定、ケミカルヒートポンプの開発などがある。さらに、各反応とも非定常の反応であり、閉ループの各操作を持続させるためには、高度な制御技術を要する。このため、プロセスの動特性を検討するためのダイナミックシミュレータの開発や、予測制御法(フィードフォワード)を確立するための研究開発が行われた⁵⁾。

(c) ハイブリッド法

熱化学法の中には、ハイブリッド法と呼ばれる一部電気を使う方法がある。1,000°C程度の熱の利用を考えた硫黄系のハイブリッド法には、第14図に示すウエスティングハウス(WH)プロセスがよく知られており、現在、英国BNFL、電中研で基礎的な研究開発が進められている。

第14図 ハイブリッド法 WH プロセスのブロックダイアグラム

(4)式に相当する反応が(12)式であり、ISプロセスの(9)と(11)式を合わせた反応であり、電気分解でこの反応を進めなければならない。実用化に向けたこの電気分解に係わる課題は、高性能触媒電極および分離壁材料の開発である。通常の水の電気分解では理論電解電圧が1.23 Vであるが、 SO_2 の水溶液(硫酸濃度38 wt%)では0.225 V(水の理論電解電圧の18%)と小さく、電解に係わるエネルギー消費の低減が期待できる。しかし、実際に必要な電解電圧は過電圧により、酸化パラジウム(PdOx)を触媒層とした電極で0.6~0.7 Vとなっている⁶⁾。反応数が少ないこのWHプロセスの特徴を活かして総合効率を高めるためには、濃度の濃い SO_2 電解液に対して耐食性があり、高性能(小さな過電圧)の触媒電極の開発が必要である。

他のハイブリッド法として、ISプロセスのヨウ素の代わりに臭素を用い、臭化水素を電気分解するイタリアのIspra研究所で考案されたIspra Mark-13プロセスがある⁷⁾。ハイブリッド法は、電力供給のための発電設備を必要とするとともに、スケールアップの際に電極の面積増加が必要であり、設備費が増大してスケールアップによって経済性が向上しない可能性が指摘されている

(d) 熱化学法の評価

1964年に、FunkとReinstromより最初の熱化学法が提案されて以来、1970~80年代に100以上の熱化学法が提案された⁷⁾。Brownら⁸⁾は、米国のGA社では、115の

熱化学法のうち、どの方法が良いかを評価した。反応の数、補助物質の数、腐食性、温度レベル、安全性・環境性、研究段階、取得されたデータ等10項目に関して評価した結果、WHプロセス、Ispra Mark-13プロセス、UT-3プロセス、ISプロセス等の25の熱化学法を選択した。いずれも1,000℃以下の温度域のものが選ばれている。25の熱化学法のうち、資本費、効率等の観点から、ISプロセスが最適であると結論付けている。

(2) 高温水蒸気電解法

水の電気分解では、前述のように、高温であればあるほど、効率が高くなるとともに、電気を熱で代替できる量が増える。また、高温になると、電極表面での反応時の抵抗が小さくなり、過電圧による電極表面でのエネルギー損失が小さくなる。この結果、水の電気分解時の電力消費を抑えることができる。このような高温で熱を併用し、使う電気の量を減らした水電気分解法は、高温水蒸気電解法と呼ばれている。第15図にその概要を示す。

高温水蒸気電解法では、効率は良くなるが、作動温度が約1,000℃と高温であるため、高温時に電気伝導性が良い安定化ジルコニア等の固体電解質を用いた電解槽が用いられている。また、陰極には金属ニッケル微粒子に酸化ジルコニウム粒子を混合したサーメットが、また、陽極にはペロブスカイト型複合酸化物が用いられる。Herringら⁹⁾により、高温水蒸気電解法の水素製造効率が試算されている。800~900℃の原子炉出口温度で、理論的には47~48%の製造効率が期待されるが、材料の耐

第15図 高温ガス炉を用いた高温水蒸気電解法のブロックダイアグラム

久性、耐熱性材料の熱膨張、ガスシールなど電解槽の構造にかかわる技術課題が残されているとのことである。

現時点で、高い効率を維持した状態での耐久性に問題があり、工業化の1段階前のパイロットプラントに向けた展望を示せる段階にはない。

3. まとめ—天然ガス利用は過渡的技術

核熱を用いた水素製造技術のうち、既存の水素製造法であるメタン水蒸気改質法、水電気分解法、さらに、研究開発段階にある新たな熱化学法、高温水蒸気電解法について製造技術の概要と課題を述べた。核熱を用いた水素製造の意義は第Ⅱ章で述べられているが、地球温暖化対策、エネルギー安定供給の確保への本質的な貢献である。この視点から、天然ガスの水蒸気改質は製造コストは低い、あくまでも過渡的な水素製造技術である。原子力発電所の夜間電力を利用した水電気分解は技術的な障壁は小さく、また原子力発電所の効率の運用に寄与するが、製造コストに課題が残る。これらの問題を解決できる将来の水素製造法として熱化学法の研究開発が進められている。熱化学法の中では、ISプロセスが最も高い評価を受けており、現在のところ研究開発が最も進んでいる。ISプロセスに関して世界をリードしている我が国において、早期のパイロットプラントの建設が期待される。

原子力は大規模な水素製造インフラとして、持続可能な社会を担うポテンシャルを持つ。社会的信頼の獲得を前提に、水素社会基盤の整備と整合を取りつつ研究開発を進めていく必要がある。(魚谷正樹)

—参考文献—

- 1) NEDO-WE-NET 平成9年度成果報告書；サブタスク3 全体システム概念設計，(1998)。
- 2) 原子力システム研究懇話会，原子力による水素エネルギー，(2002)。
- 3) NEDO-WE-NET 平成11年度成果報告書；タスク8 水素製造技術，(2000)。
- 4) 朝岡善幸，魚谷正樹，“余剰/深夜電力を利用した電解による水素製造の成立性—設備利用率と送電費用の影響評価”，電中研研究報告 T 02039，(2002)。
- 5) K. Yoshida, *et al.*, “A simulation study of the UT-3 thermo-chemical hydrogen production process”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 15, 171~178, (1990)。
- 6) P.W.T.Lu, R.L.Ammon, “Development status of electrolysis technology for the sulfur cycle hydrogen production process”, *Proc. 3rd World Hydrogen Energy Conf.*, Tokyo, (1980)。
- 7) J. E. Funk, “Thermochemical hydrogen production: past and present”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 26, 185~190, (2001)。

8) L. C. Brown, *et al.*, *High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Thermochemical Cycles and Nuclear Power*, AIChE, 139 b, New Orleans, U.S.A., (2002)。

9) S. Herring, *et al.*, “Development of a high temperature solid oxide electrolyzer system”, 2003 Hydrogen and Fuel Cells Merit Review Meeting, (2003)。

V. 世界最先端の水素製造技術

高温ガス炉 IS プロセス研究開発の現状

本章では、原子力水素に関する技術は、これまで何ができている、現時点での課題は何であるか、今後どんな目的地にいつごろ着くのか、また、世界の状況はどうなっているのかについて述べる。

1. まえがき—どこまで到達できたか

第Ⅳ章で述べられているように、原子力水素のなかで最も有望なシステムの一つは、高温ガス炉を用いた水素製造法である。本節では、高温ガス炉と熱化学法 IS プロセス技術に関し、これまでの経緯を以下に概説する。

熱中性子を用い、気体で冷却するガス冷却炉は、1956年に英国で運転が開始された Calder Hall 炉、日本原子力発電東海1号機を初めとするマグノックス炉、次の世代の改良型ガス冷却炉のように、黒鉛を減速材として、CO₂を冷却材としていた。より高温化を目指し、高温で黒鉛と反応する CO₂の代わりにヘリウムガスを冷却材とし、粒子状の燃料をセラミックスで多重に被覆した被覆粒子燃料を用いた、いわゆる高温ガス炉は、1960年代初頭に、3基の実験炉：Dragon(英国, OECD), AVR(ドイツ), Peach Bottom(米国), ついで、1970年前後から2基の原型炉：THTR-300(ドイツ), Fort Saint Vrain(米国)が建設された。これらは、原子炉出口温度が700℃台であり、蒸気タービンで発電を目指した。技術的・経済的観点から、1990年代、高温化による高効率化、機器・装置の簡素化、モジュール化等の新たな改善提案がなされた¹⁾。21世紀に入り、次世代原子力システムを国際共同研究で開発しようとする第四世代原子力システム国際フォーラム(Generation-IV International Forum: GIF)では、次世代の原子力システムを第四世代と定義し、超高温ガス炉(VHTR: Very High Temperature gas-cooled Reactor)をはじめとする6つの概念が選ばれた²⁾。この VHTR は、前記の1990年代の改善方策に基づいたシステムであり、発電および水素製造等の熱利用が考えられている。(第16図)

これまでの水素製造法については、第Ⅳ章で述べられたように、高温ガス炉を用いた多くの熱化学法等の研究開発が行われてきた。現在、熱化学法 IS プロセスは、我が国を含め、米国、フランス、韓国で研究開発が進められており、IS プロセスが最有力候補のひとつとなっ

第16図 世界の原子炉開発の進展のなかでの高温ガス炉開発の流れ

ている。

2. 高温ガス炉技術—商用化を目指す600 MW の VHTR

本節では、まず、高温ガス炉の特徴を述べ、これまでが開発された技術、将来の高温ガス炉システムに残された技術課題、高温ガス炉システムの経済的競争性、今後の展開について述べる。

高温ガス炉の特徴として、高温の熱を利用し、高効率発電、発電分野以外の水素製造や海水淡水化等の熱の直接利用が可能であること等が挙げられる。また、原子炉に要求される主な機能である「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」における特徴は以下の通りである。

「止める」：制御棒引き抜き、冷却材喪失等の異常事象が起きると、燃料・黒鉛減速材の温度上昇によって、いわゆる「負の反応度」が働き、核分裂反応が抑制され、低い出力状態に落ち着く。

「冷やす」：炉心から冷却材がなくなっても、冷却材を補填することなく、黒鉛の高い熱伝導率を利用して、熱出力が600 MW 程度以下の規模の原子炉では、原子炉圧力容器の外から冷やすことができる。

「閉じ込める」：高温ガス炉の燃料被覆材はセラミックスであるため、金属被覆材に比べ、高速中性子による損傷に強く、長期間にわたり1,600℃もの高温でも核分裂生成物を閉じ込めることができる。

次にこれまでに開発した技術について記す。燃料については、低破損率、高照射安定性を有した、SiC 等で二酸化ウラン燃料を4重に被覆した粒子状燃料(直径約1 mm)を開発した。非常に優れたこの燃料被覆技術によって、核分裂生成物の閉じ込め能力が、米国 FSV 炉、ドイツ AVR 炉に比べ、飛躍的に高くなった(第17図上段の図)。また、黒鉛については、高強度、高耐食性、高照射安定性、等方性を有した高品位黒鉛材を開発(第17図下段の図)するとともに、黒鉛構造設計方針を確立し、

第17図 高温ガス炉燃料・黒鉛の成果

金属材料については、1,000℃での耐熱性、耐食性を有する Hastelloy XR を開発した。高温機器については、作成した高温構造設計方針を原子炉压力容器および中間熱交換器に適用、並びに、未臨界実験装置 VHTRC、ヘリウム工学実証試験装置 HENDEL 等を用い、核計算コードを検証、ヘリウムガス取扱い技術等を確立した³⁾。

これらの技術により、日本原子力研究所(現原子力機構)は、1991年に茨城県大洗に、我が国初の高温ガス炉である HTTR(高温工学試験研究炉)の建設を開始し、1998年11月に初臨界を達成した。その後、2004年4月には世界で初めて原子炉压力容器外に950℃の冷却材(ヘリウムガス)を取り出すことに成功した。この成果により、高温ガス炉による水素製造への途を拓いた。現在、引き続き、HTTRにおける950℃長期運転等により、炉心の燃焼特性、ヘリウムの純度管理、高温機器の性能・健全性など、高温ガス炉の実用化に必要なデータを着実に取得・整備しているところである。

次に、残された原子炉技術開発課題について述べる。第3表に HTTR および商用を目指す VHTR の主要仕様を示す。商用の VHTR に向けて、HTTR で確立した技術に加え、HTTR を用いた FP 測定試験による FP 放出量の低減化、安全性試験による高い安全性の実証、燃料限界試験による燃料許容限界の高温化など、また、要素技術開発として、セラミックスによる制御棒被覆材の開発、黒鉛の高寿命化、燃料の高燃焼度化、再処理技術の開発、ガスタービン・圧縮機技術の開発、解析コード群の検証等が必要である。VHTR の実用化に向けては、商用の VHTR と熱出力が変わらない原型炉もしくは実証炉を建設・運転すれば、技術的・経済的には商用の VHTR に進むことができると考えられる。

最後に、商用高温ガス炉の経済的競合性について以下に述べる。

発電用の商用高温ガス炉に対する主要なユーザー要件として、優れた経済性(発電単価が4円/kWh)、受動的安全設備のみで構成、2年間の連続運転が可能なこと、国の燃料サイクルに従うこと等が産業界から挙げられた。これらのユーザー要件を満たすため、設計では、できる限り新たな研究開発を要しないことを設計の基本方針とし、压力容器冷却による温度低減、中間冷却器の削除、一体型燃料による燃料温度低減、シャッフリングによる高燃焼度化等の工夫を行った。主な仕様は、熱出力600 MW、電気出力約275 MW、1次系にヘリウムガス

第3表 HTTR および VHTR の主要な性能

	現状：HTTR	目標：VHTR
熱出力(MW)	30	600
発熱密度(W/cm ³)	2	6
燃焼度(GWd/t)	22	120
出口温度(℃)	950	950以上

タービンを設置、燃料平均濃縮度14%、耐圧機能を持たない格納施設の設置等である。これらの結果、発電単価は約4円/kWhとなった⁴⁾。発電単価の算出には、廃炉費、再処理費、定期検査30日等が含まれており、経済性の評価条件は、軽水炉と同じ評価方法を取った。

このように優れた特性を有する高温ガス炉を発電および水素製造等の熱利用に用いようとするのが VHTR である。GIF では、VHTR は、2020年ごろ実用化が可能な第四世代原子力システムとされている。第18図に VHTR の概要を示す。一般に熱出力が大きいほどスケールメリットにより安価となるが、VHTR の熱出力は最高600 MW となっている。これは、前述の「冷やす」において記したように、炉心冷却喪失時においても炉心を強制冷却せずに原子炉压力容器の外から冷やして原子炉の安全性を保つため、発熱量に比例する炉心体積と冷却量に比例する压力容器表面積との関係などから最高熱出力が決められている。自家発電、燃料電池自動車用の水素供給、電力需要の負荷変動吸収等の地域分散型のプラント、もちろん、発電、もしくは、水素製造専用プラント、さらに、ニーズがあれば、廃熱を用いた海水淡水化、地域暖房等が可能であることが、発電・水素製造コジェネレーション VHTR の大きな特徴である。水素の製造コストについて、約2ドル/kg(100円/ドル換算で約18円/m³)と報告されている⁵⁾。CO₂を排出する水素製造法の水素製造コストに CO₂の集積・輸送・処分コストを含めれば、高温ガス炉水素製造法は他の水素製造法とも十分競合可能である。

3. 熱化学法 IS プロセス技術—「材料」と「効率」の課題解決に向けて

本節では、熱化学法 IS プロセスによる水素製造技術に関し、まず、これまでに開発された技術、現在の研究開発課題、今後の展開について述べる。

新たな化学プロセスは、一般的に、4つの段階を経て商業化されるといわれている。日本原子力研究所(現原子力機構)では、1997年に、第1段階の IS プロセスの原

第18図 発電/水素製造コジェネレーション VHTR システムの概要

理の検証に世界で初めて成功した。この成果に刺激され、米国は1999年から開始した公募型の原子核エネルギー研究計画(NERI)の枠組みを用い、水素製造に関する研究を開始した。さらに、日本原子力研究開発機構では、高い熱効率を得るために必要な高濃度条件下で、ISプロセスの3つの化学反応を阻害する逆反応、副反応等による生成物質、反応後の分離物質等を抑制し、また、外乱が加わっても化学反応を維持できる独創的な制御方法を考案した。これによって、2004年6月に、第2段階の工学基礎試験装置(ガラス製、電気ヒータの熱を利用)により、世界で初めて、水素発生量毎時30l規模で約1週間の連続水素製造を達成した⁶⁾(第19図)。さらに、最も材料にとって厳しい腐食環境である硫酸蒸発・分解器には、SiCセラミックスを用い、ヘリウムガスとの熱交換器型化学反応器の試作に成功した。

現在の課題は、ヨウ化水素分解反応器の材料開発および効率の向上である。ヨウ化水素分解反応器用の材料開発では、すでに工業化されているガラスライニングに関し、230℃から350℃への高温化技術を開発中である。また、効率向上に関しては、最終的には50%の熱効率を目指し、水の蒸発に費やされる熱損失を低減するため、市販膜の約2倍の性能を有する日本原子力研究開発機構の高崎量子応用研究所で開発された水分離膜を用い、第1回目の試験では、40%弱の熱効率が得られている。さらに水分離膜の改良を行い、現在試験中である。

第3段階のパイロット試験装置では、ヘリウムガス熱交換器型の化学反応器の材料をセラミックスや金属等の

実用材料を用い、原子炉を模擬した電気ヒータで加熱した高圧のヘリウムガスにより熱を供給する。現在、パイロット試験装置の製作に必要な化学平衡等に関する設計データを取得している。このパイロット試験によって、ISプロセス技術の成立性を示し、あわせて、HTTRにISプロセスを接続する際の許認可に必要な信頼性、安全性に関するデータを集積する。

2010年代、第4段階のHTTR-IS接続試験によって、世界で初めての核熱利用による水素製造を実証し、水素需要が急増する2020～2030年ごろの水素社会に貢献したいと考えている。ちなみに、水素製造専用プラントとしてこのVHTRを用いれば、約80万台の水素燃料電池自動車に水素を供給することができる。我が国で2030年ごろ燃料電池自動車が計画通り1,500万台導入されていれば、水素の供給基盤もある程度確立していると考えられ、水素ローリーによってVHTRを中心に半径100 km圏内に水素を供給できる。県単位の分散システムの構築に貢献できる。

4. 世界の状況—野心的な米国のNGNP計画

最後に、高温ガス炉を用いた水素製造技術開発の世界の状況を概説する。(第20図)

いずれの国も、我が国における高温ガス炉を用いた水素製造技術の進捗に大いに刺激され、原子力水素を合言葉に、高温ガス炉水素製造システムの研究開発に取り組んでいる。高温ガス炉水素製造システムは、次世代原子力システムとして、一つの大きな流れになりつつある。

第19図 ISプロセスのこれまでの成果と今後の展開

第20図 世界における高温ガス炉開発状況

(1) 米 国

エネルギー政策法2005 (Energy Policy ACT 2005: EPACT 2005)に基づき、エネルギー省(DOE)が6民間会社に次世代原子力プラント (Next Generation Nuclear Plant: NGNP)として、水素製造、発電用の高温ガス炉システムの予備概念設計を2007年5月までに行うよう要請した。その後、評価が行われ、採択された概念に対し、アイダホ国立研究所が必要な研究開発を行い、2012年ごろから原型炉の設計、建設、試験を行うことになっている。なお、EPACT 2005では、2006～15年にDOEが最大12.5億ドルを要求できること、2016～21年は必要額に応じて決定されることが規定されている。DOEが挙げている4つの原子力主要予算のうち2つが、「原子力水素計画」と「第4世代原子力システム計画(NGNPを含む)」である。米国の今後の動向が注目されるところである。

(2) フランス

原子力庁(CEA)における第1優先課題は、高速炉開発であり、高温ガス炉および水素製造技術開発は第2優先課題と位置づけられている。AREVA社が高温ガス炉ANTARESを設計し、CEAが高温ガス炉および水素製造に関する研究開発を実施している。シラク大統領は、2020年に第4世代原子炉のうちのSFR, GFR, VHTRのどれかを建設すると宣言している。

(3) 韓 国

韓国原子力研究所(KAERI)では、米国NGNPと同様の計画である高温ガス炉を用いた「原子力水素開発実証プロジェクト」が第1優先課題とし、2021年までに約10億ドルの予算規模で、2014年頃からの建設を目指して、炉型等の選定を着実に進めている。

(4) 南 ア

2007年から商用高温ガス炉発電プラントPBMR(900℃、ヘリウムガスタービン、熱出力400 MW)を建設し、2011年に建設を完了し、2013年に発電を開始すべく、これまで少しずつ変えていた設計を固定し、安全審査を受審中である。PBMRの各部を外国メーカーにすでに発注している。また、発電炉の次に、高温化した水素製造用の高温ガス炉を提案している。

(5) 中 国

2006年までに、商用高温ガス炉発電プラントHTR-PM(750℃、蒸気タービン、熱出力458 MW)の建設準備を完了し、2010年に建設を完了するとしており、山東省の石島湾に建設場所を決定した。高温ガス炉試験炉HTR-10を有する清華大学では、水素製造に関する研究開発が行われている。

(6) GIF (Generation IV International Forum)

GIFにおけるVHTRに関する国際共同研究には、第4世代原子力システムのうちで最多の8ヵ国1機関(日、米、仏、英、加、韓、スイス、南ア、ユーラトム)が参加しており、水素製造等の研究分野において、2007年上旬の協定の締結を目指して、専門家による検討が行われている。

各国とも、原子力水素に積極的に取り組んでいるが、原子力水素の開発を最初から最後まで一貫して進めることは厳しい経済環境にあると認識している。そこで、VHTRの実用化に向けて、現在の第3世代と第4世代の中間に位置づけられている南アのPBMRが建設・運転に入ること、第4世代の試験研究炉であるHTTRで技術基盤を確立すること等を基礎に、GIFのVHTRに関する研究開発を国際協力で進めようとしている。高温ガス原型炉で水素を製造する米国のNGNP計画は、現時点では、

第21図 高温ガス炉水素製造プラントによる将来の水素社会

高温ガス炉水素製造の最も強力な牽引車となっている。

5. まとめ—原子力水素の国産を目指し

技術立国を目指す我が国では、その技術基盤となるエネルギー分野において、原子力水素システムは、地球環境保全およびエネルギー安定供給確保のためのCO₂低減、化石燃料からの依存度低減に貢献できるため、その研究開発に大きな期待が寄せられている。なかでも、高温ガス炉を用いた水素製造研究開発は、次世代の原子力分野を開拓する先導的研究開発として、世界的拡がりを見せている。

日本原子力研究開発機構における高温ガス炉を用いた熱化学法ISプロセスの研究開発は、HTTRにおける950℃の達成、連続水素製造の成功等のこれまでの成果を踏まえ、工業規模の水素製造技術を検討する段階に入っており、HTTRに接続した世界初の原子力水素製造の早期実現が望まれている。第Ⅱ章で期待された産業界等の参画についても、技術の一層の進展を図るため、産業界、大学などの研究機関等と連携の輪が広がっている。

以上のような高温ガス炉水素技術の進展状況を踏まえると、CO₂排出量低減、安定供給・高密度かつ大量生産、経済性の観点から、高温ガス炉を用いた水素製造は、他の水素製造システムと比べて、また、原子力水素システムとして最も有望なシステムであるといえる。VHTRの実用化に向けては、商用のVHTRと熱出力が変わらない原型炉もしくは実証炉を建設・運転すれば、技術的には商用のVHTRに進むことができると考えられる。

いま、最も現実的、効率的、迅速な実用化への道筋は、我が国の最先端技術を活かして米国も参加するGIF VHTRに関する国際協力研究を主導して原子力水素技術基盤を確立し、原型炉を建設する米国のNGNP計画による実証段階を経て、最終的に我が国でVHTRによる原子力水素が実現されることであろう。その結果として描ける高温ガス炉水素製造システムのある将来の水素社会を第21図に示す。(小川益郎, 日野竜太郎)

—参考文献—

- 1) 関本 博, 藤川正剛, 他, “実用化急がれる高温ガス炉—水素エネルギー社会に向けて世界に貢献”, 月刊エネルギー, 37[8], 100~122(2004).
- 2) 松井一秋, 岡 芳明, 他, “特集 第4世代原子力システム技術開発”, 日本原子力学会誌, 45[3], 161~172(2003).
- 3) *Present Status of HTGR Research & Development*, Japan Atomic Energy Research Institute, (March 2004).
- 4) 武井正信, 小杉山真一, 他, “高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR 300)の経済性評価”, 日本原子力学会誌, 5[2], 109~117(2006).
- 5) *H₂-MHR Pre-Conceptual Design Report: SI-Based Plant*, GA-A 25401, (2006).
- 6) S. Kubo, H. Nakajima, et al., “A bench scale hydrogen production test by the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process”, GLOBAL 2005, Oct. 9-13, 2005, Tsukuba, Japan, paper 474.

著 者 紹 介

塩沢周策(しおざわ・しゅうさく)

日本原子力研究開発機構 特別研究員
(専門分野/関心分野)原子炉燃料, 材料,
高温ガス炉設計。現在, 高温ガス炉による
水素製造システムの開発研究に従事。

齋藤伸三(さいとう・しんぞう)

原子力委員会委員長代理
(専門分野/関心分野)原子力政策, 原子炉
設計, 安全評価

岡野一清(おかの・かずきよ)

水素エネルギー協会 理事
(専門分野/関心分野)水素エネルギー技
術, 燃料電池技術

魚谷正樹(うおたに・まさき)

電力中央研究所 原子力技術研究所副所
長・研究参事
(専門分野/関心分野)液体金属伝熱流動,
新型原子炉システムと技術評価

小川益郎(おがわ・ますろう)

日本原子力研究開発機構 核熱応用工学ユ
ニット
(専門分野/関心分野)熱流体分野の研究開
発に従事。現在, 高温ガス炉技術, 熱利用
技術, 特に, 水素製造技術の研究開発に従
事。

日野竜太郎(ひの・りゅうたろう)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学
研究部門
(専門分野/関心分野)熱流動, プロセス工
学。水素製造プロセスの研究開発に従事。

From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌WEBアンケート

ご協力をお願い

○学会誌掲載の論文抄録の変更

— ホームページ更新情報 —

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/> (11/10 現在)

- ・来年4月号から学会誌表紙デザインを刷新します。学会誌に相応しい新名称を公募中です。応募方法は10月号78ページをご覧ください。(締め切りは11月末)
- ・英文論文誌・和文論文誌に投稿された論文の査読状況は下記にてご確認ください。

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/ronbunshi.htm>

— 最近の編集委員会の話題より —
(2006年11月10日 第5回幹事会)

【学会誌関係】

- ・鈴木篤之原子力安全委員長とのインタビューを実施しました。1月号に掲載予定です。
- ・学会誌 WEB アンケート結果を10月号より毎号掲載し

ますのでご覧ください。評価結果について著者の問い合わせがあれば、それに限定して開示することになりました。学会ホームページからアンケートページへリンクしていますので皆様のご協力をお願いします。

- ・「学会誌への投稿原稿不採用に関する編集委員会の判断」を本号に掲載しました。

- ・執筆者/編集者の作業の省力化・効率化を図るため、執筆者には「記事原稿執筆者チェックリスト」をご記入のうえ、提出いただくことにしました。

【論文誌関係】

- ・審査報告書の形式を、投稿者にも、査読者にもより明快となるよう改訂することとしました。
- ・英文・和文論文誌の表紙を2007年より刷新することとしました。
- ・国際化への取組みとして、外国人の編集委員追加を検討しています。
- ・これまで学会誌へ掲載していた論文誌の抄録を廃止し、本号からタイトル、著者名のみの掲載に変更しました。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp