

2003 年 11 月 11 日

## 高温ガス炉を利用した水素製造について

日本原子力研究所

### 1. 経緯

#### 1.1 将来の水素製造に向けて（図 1）

現在、エネルギー消費に関し、我々は以下のような世界規模の問題に直面している。

- ・化石燃料の大量消費による炭酸ガス等の排出により、地球温暖化、酸性雨等の地球環境への影響が問題となっている。
- ・発展途上国のエネルギー需要増加により、枯渇が懸念される石油の代替エネルギーが求められている。

このような、地球規模の問題に対し、水素は、その利用において酸素と反応して水になり、有害物質を排出しないゼロエミッションのエネルギー媒体であることから、水素社会の実現について世界的に議論され出した。

しかしながら、水素が単体で自然界にほとんど存在しないため、将来の水素社会の実現に向けて、環境保全性に優れかつ経済性の高い水素製造技術が必要である。

#### 1.2 水素製造に関する世界の動き（図 2）

##### （1）日本

我が国では、2002 年 12 月にトヨタ、ホンダが商用の燃料電池自動車を発売し、水素利用の社会基盤を整備するため、国内 8 箇所の水素供給ステーションが建設中、もしくは試験中である。2002 年 6 月に施行されたエネルギー政策基本法に基づくエネルギー基本計画が 2003 年 10 月 6 日に閣議決定された。このエネルギー基本計画において、エネルギー需給に関し、水素エネルギー社会の実現に向けた取組（第 2 章 第 6 節 3.）の中で、水素は、

「その利用段階で炭酸ガス等を排出しないゼロエミッションのエネルギー媒体」である、と記されており、長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策として、水素の製造については、

「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。」

と、述べられている。

## ( 2 ) 米国、欧州

米国では、ブッシュ政権が 2001 年に「国家エネルギー政策」を発表し、水素を 2020 年頃の主要なエネルギーと位置づけており、これを受けて、脱中東石油依存、環境負荷低減を目的とした「フリーダム・カー・イニシアティブ」及び「水素燃料イニシアティブ」が 2002～2003 年に発表された。2002 年 11 月に公表された「国家水素エネルギーロードマップ」では、原子力及び太陽熱による水の熱化学法、バイオマス熱分解法等の先進水素製造技術が開発されるべきであると言及している。エネルギー省（DOE）は「原子力水素イニシアティブ」を 2003 年 9 月に発表し、超高温ガス炉（VHTR）を用いて熱化学法、高温水蒸気電解法等で水素を製造する VHTR 実証プラントの建設・試験計画を作成した。また、第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF）では、水素製造を目的とする VHTR の国際協力が検討されている。

欧州では、欧州委員会が水素、燃料電池に関する閣僚級の「ハイレベルグループ」を結成し、2003 年 6 月に、今後 20 年間を見通すプログラムとして、欧州各国から約 400 名の参加を得て「水素経済 / 持続可能なエネルギーへの橋渡し」会合を開催した。この会合では、2050 年頃の水素社会実現に向けて、水素の重要性が強調され、「水素エネルギーと燃料電池 - 我々の将来ビジョン - 」なる報告書の案が検討されるとともに、主な技術的障害が確認され、水素社会へのロードマップを作成する新段階に入った、と締めくくられた。また、燃料電池バスの実証試験が欧州 7 カ国、9 都市で進められている。

フランス原子力庁（CEA）は、米国 GA 社及びサンディア国立研究所と分担して、I S プロセス研究開発を 2003 年から開始した。一方、アイスランドでは、水素を燃料として化石資源の輸入を完全になくそうという国家プロジェクトを推進している。

## 2 . 水素製造の現状と将来技術

### 2 . 1 将来の水素導入目標値（図 3）

現在、我が国で製造されている水素の 99% 以上（2000 年度；約 266 億  $\text{m}^3$ ）は産業部門で自家消費されており、市販されている水素は、約 1.5 億  $\text{m}^3$ /年とわずかである（水素技術の開発動向、電気評論 2001.10）。自家消費されている水素は、製鉄、石油精製、石油化学等の副生産物に含まれる水素と、化学肥料やエチレン等の化学製品の原料などとして製造されている水素とから成る。

将来の水素量に関しては、経済産業省資源エネルギー庁燃料電池実用化戦略研究会の報告書（2001 年 1 月）で、2010 年及び 2020 年にそれぞれ約 210 万 kW 及び約 1000 万 kW の発電能力を持つ定置型燃料電池を、また、それぞれ約 5 万台及び約 500 万台の燃料電池自動車を導入するという目標が示された。これらの燃料電池に必要な水素量は、

2010 年及び 2020 年にそれぞれ約 73 億  $\text{m}^3$ /年及び約 387 億  $\text{m}^3$ /年と算出されている( WE-NET、平成 12 年度成果報告書タスク 1、2001.3 )。

なお、石油の代わりに約 387 億  $\text{m}^3$  の水素を利用すると、約 3700 万トンの炭酸ガスを削減できる。2000 年度の炭酸ガス排出量は 1990 年度に比べ、3700 万トンの倍の約 7400 万トン増加した。また、約 387 億  $\text{m}^3$  の水素を製造するには、例えば、熱出力が 600MW の高温ガス炉が約 50 基必要となる。

## 2.2 水素製造法 (図 4)

水素は、単体では自然界にほとんど存在しないため、水素の化合物である石炭、石油、天然ガスといった化石資源 ( $\text{C}_k\text{H}_m$ )、バイオマス ( $\text{C}_k\text{H}_m\text{O}_n$ )、水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) を原料として、化石燃料、原子力、太陽、風力、水力、地熱、バイオマス等の自然エネルギーでこれら原料を分解して製造される。化石資源を原料及びエネルギーとして用いる場合には炭酸ガスを排出するが、施設の建設時等の排出量も含め、原子力や自然エネルギーの場合の炭酸ガス排出量は化石燃料を使う場合の十分の一から二十分の一とわずかである。

現在、商業化されている水素製造技術は、メタンと水を原料にして化石燃料をエネルギー源とする水蒸気改質法や水の電気分解法などがある。化学製品の原料用水素の約 9 割が水蒸気改質法で製造されている。水の電気分解法は、電力が安価なカナダ、エジプトなどで用いられているが、我が国ではその生産量は非常にわずかである。

原料用ではなくエネルギー媒体として、近未来に増加する水素需要に対しては、メタンを用いる水蒸気改質プラントの新設、副産物中の水素の分離・精製設備の追加建設などにより、短期間で応えることができる。例えば、製鉄のークスガス中に含まれる水素を分離・精製することは一部で既に行われており、水蒸気改質法の高度化、副産物中から水素分離・精製及びシステム最適化、といった技術開発がまず行われるであろう。

将来の大量水素需要に対しては、炭酸ガス処理処分技術を有した化石資源を用いるプラントで生産される水素と経済的に競合できる水素製造技術が求められる。炭酸ガスをほとんど排出しない原子力を用いた水の熱化学法、資源量を考えた場合、炭酸ガス処理処分技術を有した石炭のガス化法及び水蒸気改質法、水素需要密度が低い地域での自然エネルギーによる熱分解法及び電気分解法等が将来の有力な候補として挙げられている。

IS プロセスは、900 程度で水を熱分解する熱化学法の一つであり、エネルギー源として高温ガス炉の熱を利用しようとするものである。また、2000 程度の熱で水を熱分解する Zn プロセスの研究は、太陽光をエネルギー源としてスイスのポールシェラー研究所 (PSI) で行われている。水素製造効率を落とすことなく材料問題をいかに経済的に解決できるかがポイントである。自然エネルギー及びバイオマスから水素を製造する

方法では、エネルギー密度が低いため、いかにして必要な面積を少なくするかが課題となっている。

これらの水素製造法のコストの試算値( JAERI-Review 2001-006, 2001、A. Steinfeld, IEA Renewable Energy Working Party Seminar, 2003.3、WE-NET,平成 12 年度成果報告書タスク 1、2001.3 ) を図 4 に示す。水蒸気改質法により製造された水素のコストを 1 として、他のコスト試算値を示している。高温ガス炉 IS プロセスのコストは約 1.5 であるが、高温ガス炉システムの大きな特徴である排熱利用や副生成物である酸素の販売により水素コストの更なる低減が見込める。他方、メタンの水蒸気改質法により製造された水素のコストには、炭酸ガス処理処分費用が含まれておらず、炭酸ガス処理処分費用を含めると、水蒸気改質法により製造された水素のコストは約 2.2 となるため、炭酸ガスの排出のない IS プロセスよりも高コストとなる( JAERI-Review 2001-006, 2001. )。

### 3．高温ガス炉を利用した水素製造に関する研究開発

#### 3．1 世界の高温ガス炉開発と国際協力(図 5)

原子力を用いた水素製造では、高温ほど水素製造効率が高くなるため、高い経済性を有し、2020 年ごろに実現可能な革新的な原子炉である高温ガス炉が注目を集めている。

現在 2 基の高温ガス炉が世界で稼働している。1 基は 1998 年に初臨界を達成し、2001 年に全出力を達成した我が国の HTTR ( 高温工学試験研究炉 ) であり、もう 1 基は、中国の蒸気タービン発電用試験炉 HTR-10 である。また、商業用発電炉として、南アフリカの PBMR 計画、並びにロシアと米国による GT-MHR 計画が進められている。

水素製造を主目的とした高温ガス炉計画は、原研の HTTR 計画、米国の VHTR 実証プラント計画、第四世代原子力システム国際フォーラムにおける VHTR に関する国際協力研究開発計画がある。原研は、現在、中国、仏国、米国と国際協力を結んでいるが、今後は、高温ガス炉水素製造システムの実用化を目指す米国、仏国等との協力が重要になると考えられる。

#### 3．2 日本における高温ガス炉の技術開発(図 6)

固有の安全性を有し、950 の高温ヘリウムガスを供給できる世界初の高温ガス炉、HTTR を日本原子力研究所大洗研究所に建設した。1998 年 11 月 10 日に初臨界達成後、世界最高の冷却材出口温度 850 を 2001 年 12 月 7 日に達成した。各種特性試験に引き続き、2004 年には 950 での高温試験運転を行う計画である。高温ガス炉を用いた水素製造を早期に実証するため、水素製造施設を HTTR に接続し、2008 年頃に世界初の原子炉の熱を利用した水素製造の実現を目指している。

### 3.3 日本における高温ガス炉水素製造の技術開発（図7）

#### 3.3.1 水素製造施設の接続技術の開発

高温隔離弁等の原子炉と水素製造施設を隔離する要素技術開発、安全設計・評価手法の開発、水素製造施設の熱的変動が原子炉に影響を与えない熱的変動吸収技術等の開発を行い、原子炉に水素製造施設を安全に接続すること、並びに、水素製造施設を一般産業プラントとして建設することを目指している。

#### 3.3.2 水素製造技術の開発（図8）

ISプロセスでは、高温ガス炉からの900℃程度の熱を用いて、水を原料として大量かつ安定な水素製造が可能である。これまで原研では、1997年に実験室規模で、ISプロセスの水素製造理論を世界で初めて検証した。さらに、第2段階である工学基礎試験装置で毎時35リットル、6.5時間の連続水素製造運転に2003年8月世界で初めて成功した。2004年度まで特性試験、制御試験、長時間連続試験等を行う予定である。

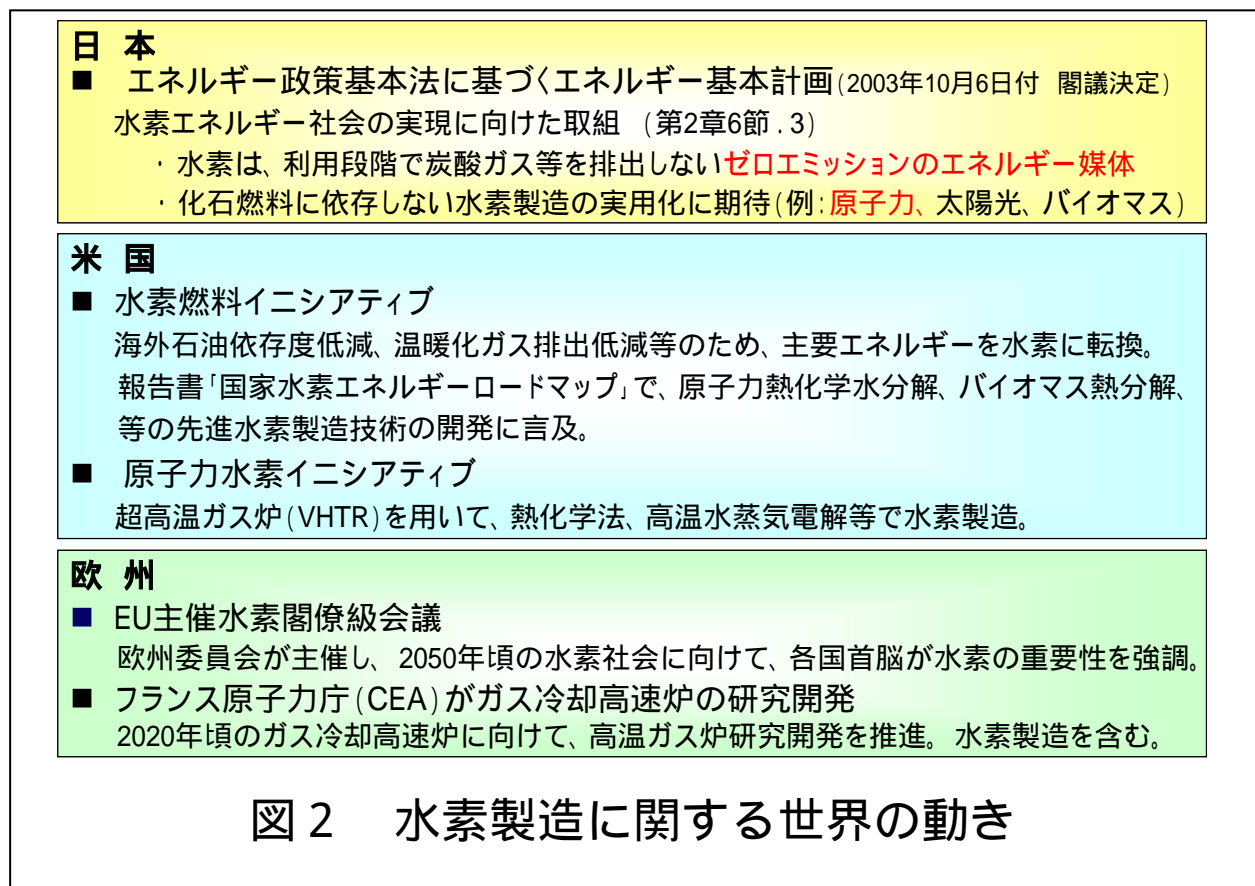
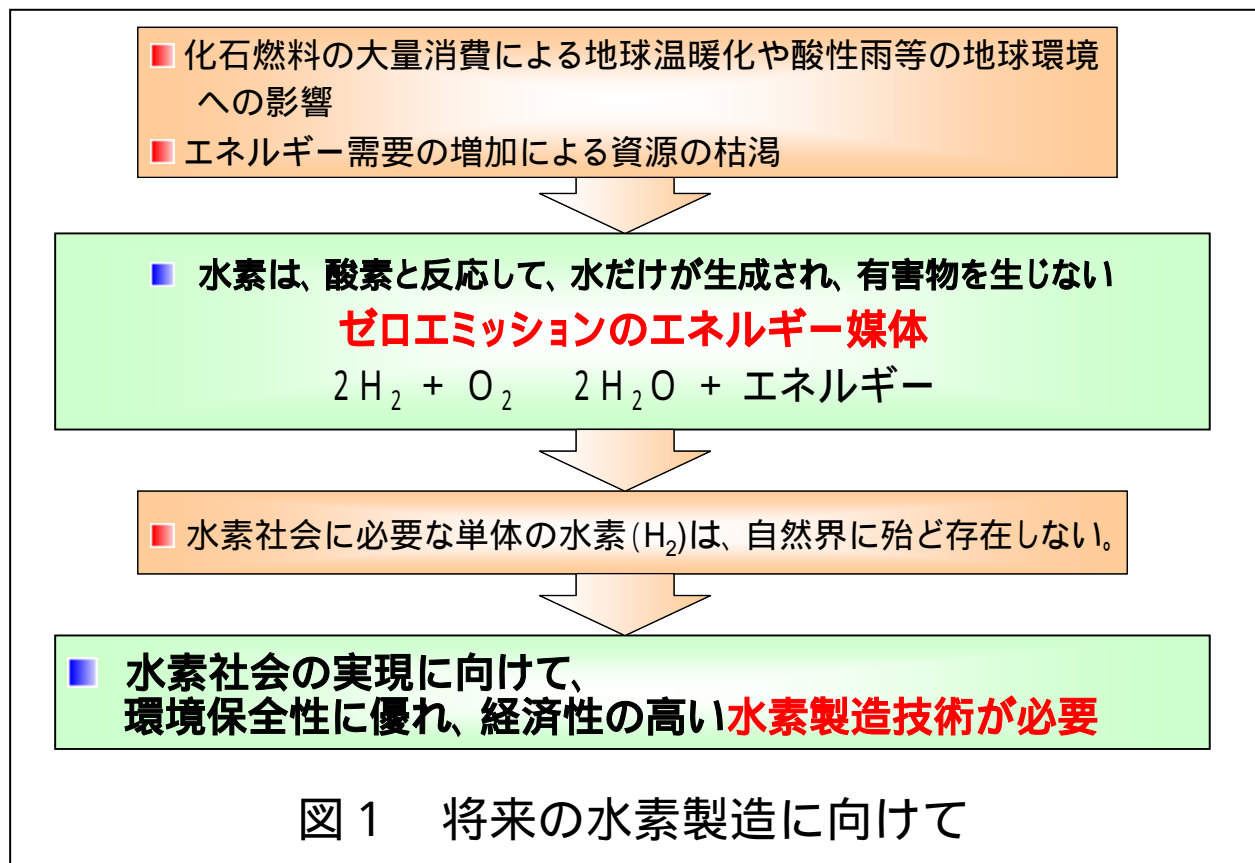
今後は、技術的成立性を確認するため及び実用化に向けた経済性評価に必要なデータを収集するための第3段階の30m<sup>3</sup>/h規模のパイロット試験、最終段階としてISプロセスを原子炉に接続し、高温ガス炉水素製造システムを実証する1000m<sup>3</sup>/h規模のHTTR接続試験へとスケールアップして、実用化につなげることを目指す。

### 3.4 日本における今後の展開（図9）

HTTR試験、HTTR水素製造施設接続試験、ISプロセスパイロット試験の完了により、実用炉のための基盤技術が確立し、その後は、技術は産業界に引き継がれ、産業界が主体となって、商用炉を目指した開発に移行すると期待できる。

## 4. まとめ

- ・ 水素エネルギー社会の実現には、大量かつ安定した水素製造法の開発が必要である。
- ・ 高温ガス炉を用いるISプロセスは、二酸化炭素を排出しないクリーンな、かつ将来の大量水素製造方法として、将来の最も有望な方法の一つである。
- ・ 原研のISプロセス水素製造連続運転の成功は、世界初の成果として、高温ガス炉による水素製造に明るい展望をもたらした。
- ・ HTTRによる水素製造の研究開発は、世界のトップランナーとしての地位を維持していく上で極めて重要な計画であり、国の重要なプロジェクトとして幅広く産業界と連携し、国際協力を有効に活用しつつ、進めていきたい。



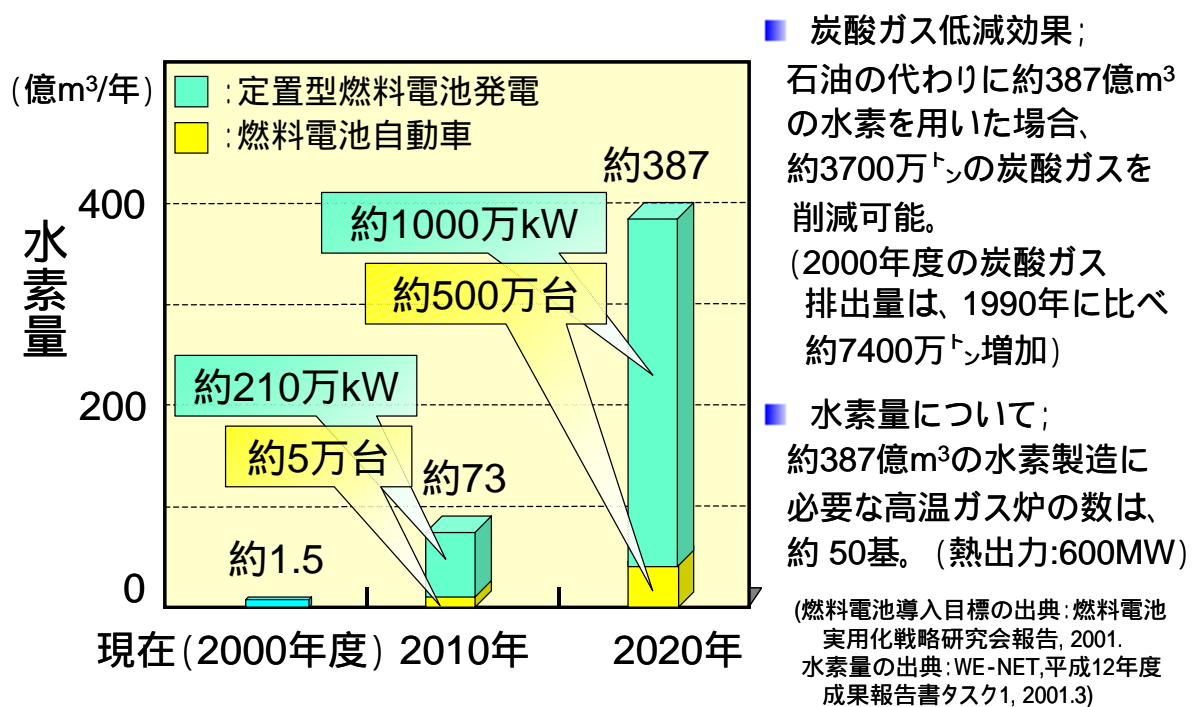


図3 将来の水素導入目標値

水素製造法	現状	原料/エネルギー源	特長	課題	コスト試算
水蒸気改質法	既存技術	[メタン+水]/化石燃料	大量・安定	CO <sub>2</sub> 処分、プロセス最適化	1
電気分解		水/電気	大量・安定	安価な電力、高効率化、小型化	約2.5 <sup>*</sup>
副産物中水素の分離・精製	既存	(水蒸気改質、電解等)	一部商用	CO <sub>2</sub> 処分、供給量に制限	~1 <sup>***</sup>
水蒸気改質法	将来技術	[石炭+水]/石炭	大量・安定	CO <sub>2</sub> 、灰等の処分	1.8~2.5 <sup>**</sup>
熱化学法ISプロセス		水/高温ガス炉	大量・安定	放射性廃棄物処理、高効率化	約1.5 <sup>*</sup>
熱化学法Znプロセス		水/太陽熱	約2000	耐熱材料、小型化	4~7 <sup>**</sup>
バイオマスガス化		[バイオマス+水]/バイオマス	CO <sub>2</sub> 循環	輸送密度向上	2.5~3 <sup>**</sup>

(出典: \*:JAERI-Review 2001-006 2001、\*:A. Steinfeld, IEA Renewable Energy Working Party seminar, 2003.3,  
\*\*\*:WE-NET,平成12年度成果報告書タスク1, 2001.3)

図4 水素製造法



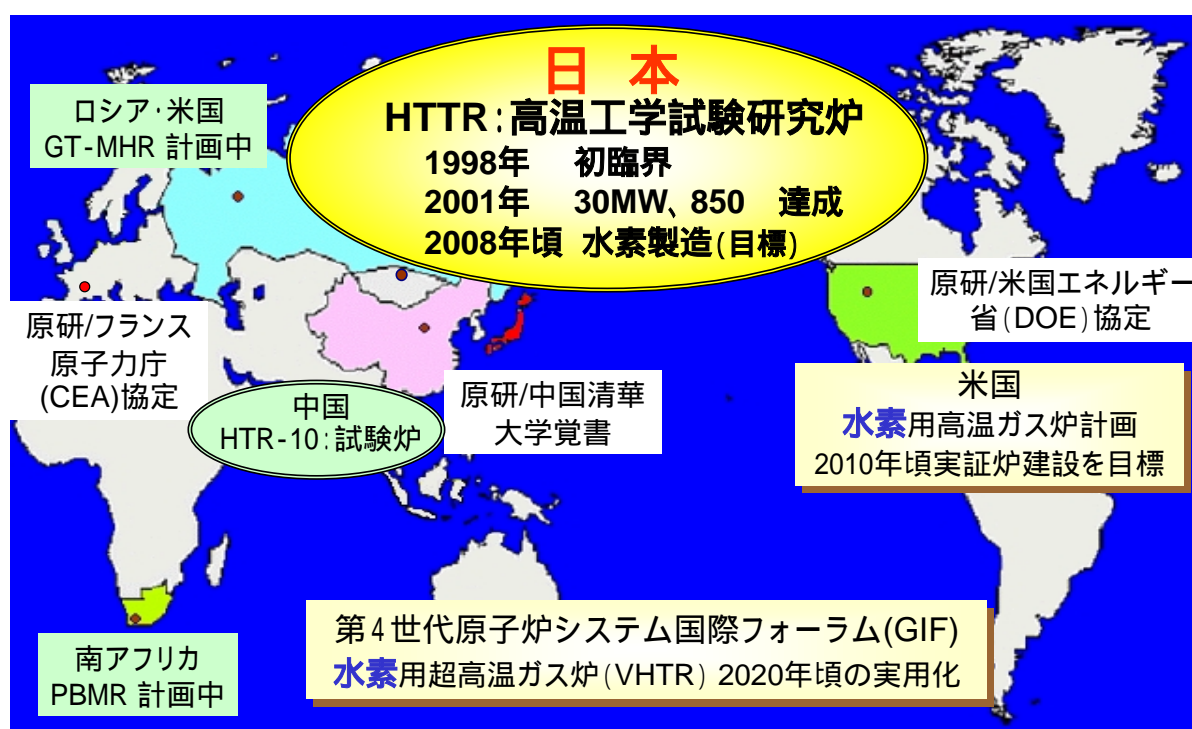
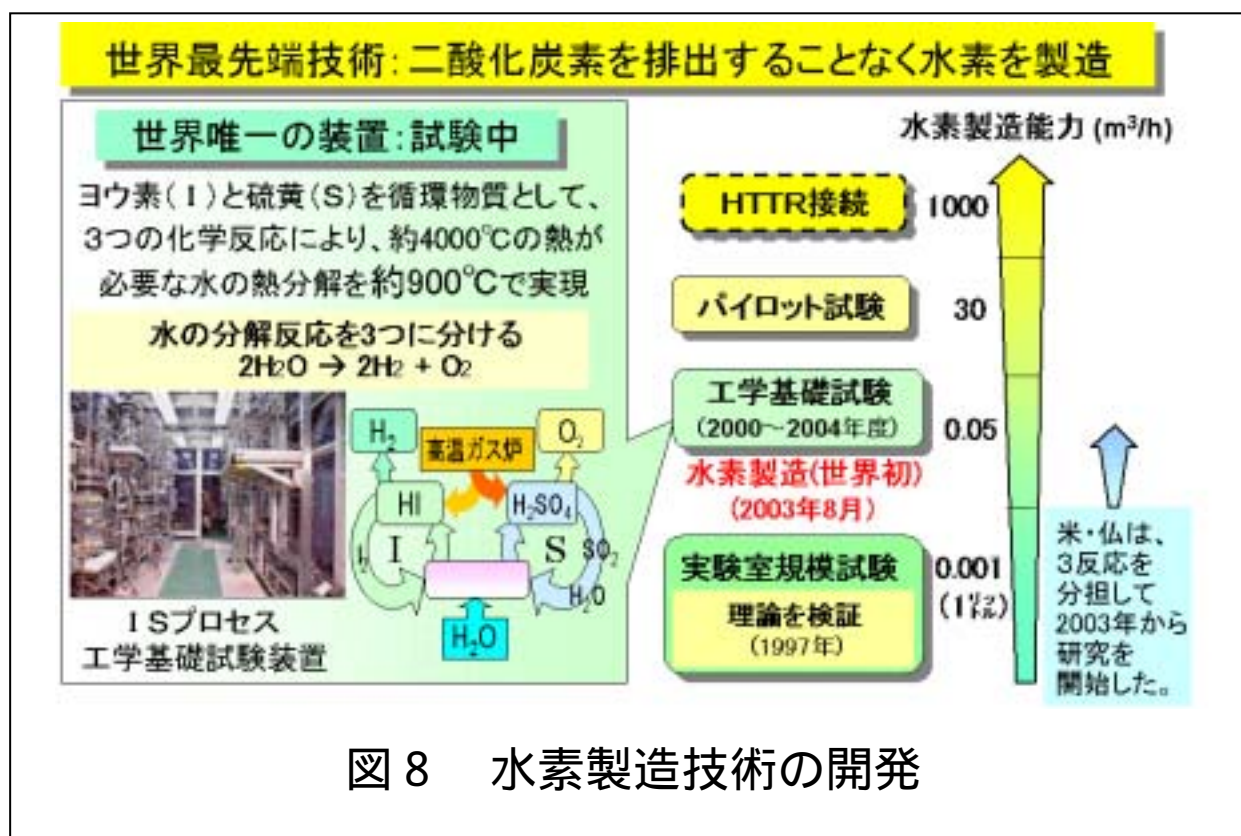
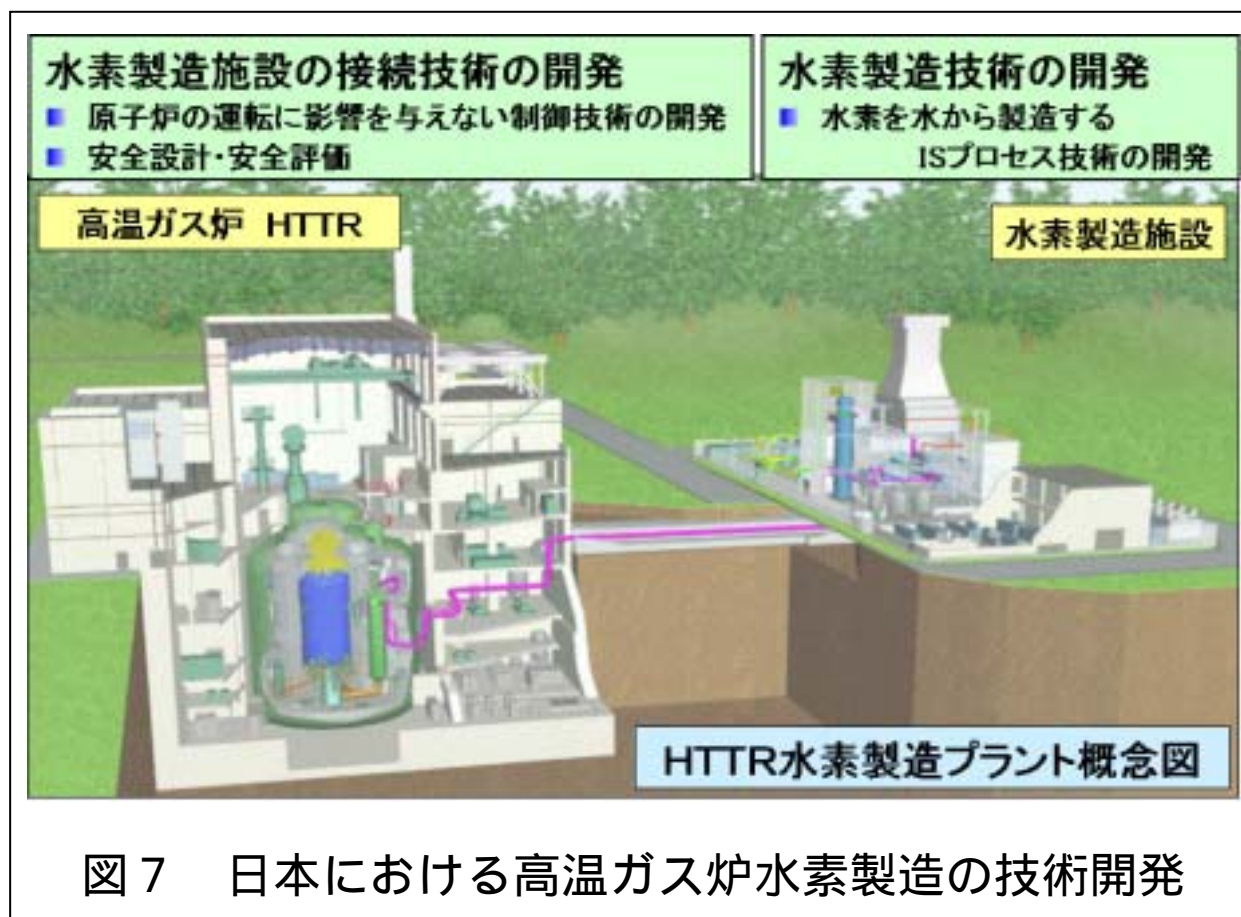


図5 世界の高温ガス炉開発と国際協力



図6 日本における高温ガス炉の技術開発





技術開発課題

進捗

原研

米、仏



高温ガス炉技術



水素製造施設  
接続技術



水素製造技術  
(ISプロセス)

実用化

2000

2003

2010

2020 年

図9 日本における今後の展開