

# 地球温暖化対策 CO<sub>2</sub> の大幅な削減に向けて — 高温ガス炉を水素製造などの熱利用に拡大を —

日本原子力産業協会「原子力熱利用検討会」

関本 博<sup>\*1</sup>、土江保男<sup>\*2</sup>、小川益郎<sup>\*3</sup>、福家 賢<sup>\*4</sup>、岡本太志<sup>\*5</sup>、皆月 功<sup>\*6</sup>、西郷正雄<sup>\*7</sup>



## 序

\*

### いま、なぜ高温ガス炉なのか

地球温暖化現象や異常気象が世界中で問題となっているが、大気中のCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）の濃度増加がその主要な原因ではないかと考えられている。さらに、最近の人口増加と個人消費増大に伴うエネルギー発生量の急激な増加による大量のCO<sub>2</sub>排出がその濃度増加の主要な原因と考えられ、CO<sub>2</sub>排出削減が大きな課題となっている。

国連の「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」と地球温暖化問題について世界的な啓発活動を行ったアル・ゴア前米副大統領にノーベル賞が授与（2007年）されたことは記憶に新しい。また08年夏の北海道洞爺湖サミット（主要国首脳会議）でも福田康夫首相（当時）は議長として本問題を最重要課題として取り組んだ。

エネルギーの利用方法として、電力と熱利用の割合は4：6程度であるが、CO<sub>2</sub>排出では3：7となっており、熱利用に伴うCO<sub>2</sub>排出削減が重要である。さらに熱利用のうちでは、運輸と産業利用が重要である。これらの分野では水素の利用が有望視されている。これらの水素の製造ではできるだけCO<sub>2</sub>排出を抑えなければならない。

原子力はCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギーとしてよく知られており、日本などいくつかの先進国で一定の使用が行われているが、発電に限られており、その寄与は小さい。

発電用原子炉は現在PWR（加圧水型軽水炉）や

BWR（沸騰水型軽水炉）といった軽水炉に集中してきており、特に日本ではこれだけである。軽水炉はそこで得られる蒸気の温度が水素製造や産業用熱として用いるには低い。さらに電気は遠隔地で作り電力網を使って日本中に送れるので、原子炉は大型になる。これに比べ、熱利用原子炉は消費地立地が普通となり小型が望まれる。このため管理運転が容易で、よりシンプルな形で安全を確保できる必要がある。

高温ガス炉は被覆燃料粒子が黒鉛の中に分散されていて、これをヘリウムで冷却する構造になっている。黒鉛が高温特性に優れることから、高温ガス炉では1000℃近い温度の熱を利用できる。しかも小型と相まって、特殊な安全装置なしで、高い安全性を確保できる。

現在、世界では日本のHTTR（High Temperature engineering Test Reactor=高温工学試験研究炉）と中国のHTR-10（High Temperature Gas-cooled Reactor Test Module=高温ガス実験炉、熱出力10MW=1万kW）が試験研究炉として運転されている。日本の原子力は軽水炉と高速増殖炉（FBR）に選択と集中を余儀なくされ、高温ガス炉への力の入れ方が今一つであるが、中国や南アでは発電用実証炉や実用炉の計画が進められており、米国でも水素製造や熱利用を目指した実証炉プロジェクトが積極的に進められている。

本特集は、これらをやさしく説明することにより、特に今まで関心の少なかった運輸や産業熱利用の関係者の方に高温ガス炉の理解を得たいということで企画された。このような企画は今までなかったのではないと思うが、趣旨が上手く生かされることを願っている。

※1 東京工業大学 原子炉工学研究所 ※2 工学院大学 ※3 日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター ※4 東芝電力システム社 原子力事業部 ※5 富士電機システムズ 発電プラント事業本部 原子力統括部 ※6 三菱重工業 原子力事業本部 原子力技術部 ※7 日本原子力産業協会 政策推進第2部

\* 地球の写真は、2005年の「愛・地球博」で日本政府が設けた「長久手日本館」の中にあつた「360度全地球型映像システム」





1

## 日本の2050年に向けた地球温暖化対策への取り組み

主要国首脳会議（G8=主要8カ国）が、2008年7月7日～9日に北海道洞爺湖にて、福田首相（当時）の議長のもと開催された。そこで、首相は環境・気候変動について、冒頭「化石燃料への依存を断ち切り、温暖化、資源枯渇などの課題に対処すべく、低炭素社会へ舵を切れるかどうかがかかった重要なサミットである」との趣旨を述べた。その会議では、削減の数値目標を決めるところまでには至らなかったが、長期目標としては、「2050年までに世界全体の排出量の少なくとも50%削減を達成する目標を、UNFCCC（国際連合気候変動枠組み条約）のすべての締約国と共有し、採択することを求めること」で合意した。

その後、7月29日には、「低炭素社会づくり行動計画について」が閣議決定された。その中では、「わが国は、2050年までの長期目標として現状から60～80%の削減を掲げて、世界に誇れるような低炭素社会の実現を目指すこと、そのような低炭素社会の実現に向けては総理の基本的な方針、政策項目ごとに具体的な施策を明らかにすること、本行動計画に盛り込まれた施策を着実に実施し、定期的に取り組状況のフォローアップを行うこと」とうたっている。

### 低炭素社会の実現を目指す

本行動計画に示された内容は、実現できれば素晴らしいことであるが、しかしその施策を目標通りに達成させるためにはきわめて厳しいハードルがあり、相当の覚悟で、各個人、各企業が各々の目標達成に向けてしっかりと取り組まなければならないであろう。

省エネを国が一丸となって進め、既存の先進技術を普及させることに加え、画期的な革新技术の開発が大きな鍵を握るものと考えられる。そのため、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーにおいては、飛躍的な効率向上と低コスト化を、原子力発電においては、安全を大前提に、高効率、高稼働率

を目指す必要がある。

さらに、原子力の熱利用への拡大が大きな役割を担うものと考えられる。すなわち、従来、化石燃料を使っていた化学プラントや鉄鋼に原子力の熱を直接利用すること、輸送燃料のガソリン車に代わっての燃料電池車（FCV）や還元製鉄などに利用可能な水素に対し、原子力の熱を利用した水素製造技術を確認することなどがあげられる。また、石炭のクリーン燃焼技術や発生した炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）を分離、回収、輸送、貯留する一環システム（CCS=Carbon dioxide Capture and Storage）の実証も大きな開発テーマになるであろう。

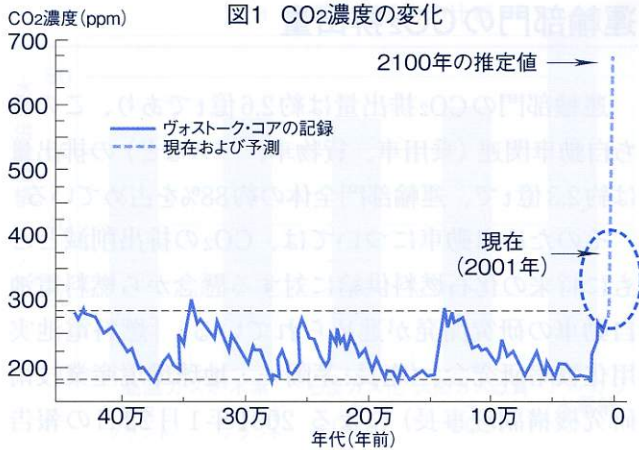
2050年に向けた低炭素社会実現には、約40年の期間が残されている。革新的な技術開発には、これだけの期間があれば相当期待することも可能であろうが、原子力の熱利用開拓には、必ずしもこの期間が長いとは言い難い。技術的課題をクリアにするだけでなく立地地域の問題がかかわってくる。地域住民の理解なくしては、その実現は不可能である。十分に安全な原子力施設であることの実証性を確認し、住民に安心して受け入れてもらうためには、今から本格的な取り組みをしなければ、その実現はないであろう。

### 地球温暖化の主要因は、CO<sub>2</sub>か

地球温暖化問題については、世界気象機関（WMO）および国連環境計画（UNEP）により、1988年に「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）が設立され、地球温暖化に関する科学的・技術的・社会経済的な評価を行っている。得られた知見を政策決定者はじめ広く一般に利用してもらうためにである。IPCCは、第27回総会（2007年11月12日～11月17日、スペイン・バレンシア）において、IPCC第4次評価報告書統合報告書本編を受諾した。IPCC総会の第一作業部会の報告書では、気候変化の人為起源および自然起源の要因を評価しており、「CO<sub>2</sub>が最も重要な人為起源の温室効果ガスである」とうたっている。

また、気候システムの温暖化は、大気や海洋の世界平均気温の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることなどが





(注)南極大陸のヴォストーク・コアにおける二酸化炭素測定値  
出所:Petit et al., Nature, 399, 1999, Watson et al. (Eds.), IPCC Third Assessment Report:Climate Change 2001.

ら疑う余地がないものとしている。

このIPCCの見解をもとに、わが国においても地球温暖化の主要因がCO<sub>2</sub>であるとの前提で、低炭素社会に向けた取り組みを取りあげている。

しかし、幾人かの研究者からは、「果たしてCO<sub>2</sub>が本当に地球温暖化の主要因であろうか」との疑義もあげられている。その根拠として、地球温暖化は人為要因による部分もあるが、大半は太陽活動のような自然現象による。また過去の温度変動とCO<sub>2</sub>濃度変動を詳細に調べてみると、温度上昇が先行し、CO<sub>2</sub>濃度がそれに追従しているともいえる。さらに20世紀より高温だった時期は歴史的に見れば何度もある。古代ローマ時代や中世期では現在より大分暖かった一などなどが挙げられる。これらの疑義については、環境研究者より反論もなされているが、十分解明されていない様々な要因があるために、必ずしも的確なものにはなっていない。しかし、産業革命以降のわれわれが使用した膨大な化石燃料により、明らかに図1に示すようにCO<sub>2</sub>濃度の変化は、従来の変化を逸脱した極端な増加である。また、それに合わせたごとく地球温暖化が進んでいることもIPCCの観測データなどによる評価から見ても明らかである。

最近の世界的な気候変動は、わが国においては、ゲリラ豪雨の頻繁な発生、従来になかった竜巻の発生、ここ数年の状況として夏には熱帯夜が当たり前になってきたことなどが挙げられる。一方、世界的には、熱帯低気圧(台風、サイクロン、ハリケーン)の大型化、特に中国の主要な河川は、ヒマラヤなどの氷河の水が流れ込んでいるが、水の重要な補給源



新潟県長岡市でゲリラ豪雨のため浸水した道路  
(出所:新潟県長岡地域振興局撮影、2004/7/13)

であるヒマラヤ氷河の後退が進んでいるために、例えば黄河では1990年代には、河口まで到達せずに流れが途絶えてしまう「断流」現象が、ほぼ毎年のように起こっている。同時に砂漠化の進行にも拍車がかかり、いまでは年間30万ha以上の草地が砂漠にのみこまれている。中国北部の水不足はきわめて深刻な状況である。

このように地球温暖化現象の影響については、着実にそれも確実にわれわれの身の回りに顕在化している。これを解決するためには、世界が一体となって真剣に取り組まなければならない。その要因の一つは、われわれ人間が無造作に排出したCO<sub>2</sub>であることも確かである。産業革命以降のCO<sub>2</sub>の濃度増加(1770年ごろの産業革命前280ppm、2005年379ppm)と地球温暖化(世界平均地上気温について、最近50年間の温度上昇の傾向は10年間に0.13℃であり、これは、過去100年間の傾向のほぼ2倍に相当)の関係からも、その影響の大きさは別としても明らかである。

そのCO<sub>2</sub>を低減させることは、われわれが努力すれば可能なテーマである。今の温暖化の兆候についてCO<sub>2</sub>濃度の増加が主要因であるとするならば、簡単には解決できるものではない。相当長期間にわたって徹底的に対策を講じなければ、地球温暖化はますます悪化の一途をたどることになる。そのCO<sub>2</sub>排出の大部分が化石燃料のエネルギー起源であるため、化石燃料を極力使わない方法でのエネルギー利用を世界規模で取り組むことが、今後の重要な課題と考える。





## 2

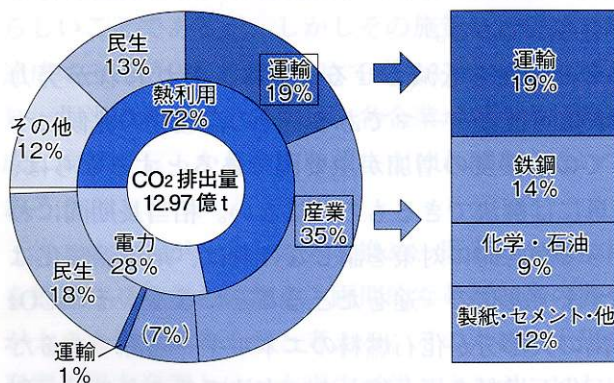
### 化石エネルギーに代わってCO<sub>2</sub>を排出しない原子力に

われわれの生活におけるエネルギーの利用形態は、大別して電力と熱利用に分けられ、熱利用には自動車や家庭・業務などの燃料、製鉄における還元剤などの工業原料などが含まれる。図2は、わが国の2005年度におけるCO<sub>2</sub>排出の状況<sup>1)</sup>を示したもので、わが国のCO<sub>2</sub>総排出量は約13億tで、これは化石エネルギーに起因している。

部門別のCO<sub>2</sub>排出量では運輸20%（うち熱利用19%）、産業35%（うち熱利用28%）、民生31%（家庭・業務、うち熱利用13%）、その他13%（工業プロセス、電力以外のエネルギー転換など）となっている。電力と熱利用の排出量の割合については、後者が全体の約70%を占めている。エネルギーの消費量については電力と熱利用の割合はほぼ4：6であるが、電力では原子力、水力、再生可能エネルギーが使用されており、その分CO<sub>2</sub>の排出量が小さくなっている。今後、大幅なCO<sub>2</sub>の排出削減を図るためには、電力における原子力や再生可能エネルギーの一層の利用促進を図るとともに、これまで原子力が利用されていなかった熱利用分野での原子力利用が不可欠となるであろう。

熱利用の分野で原子力をどのように利用するかを特に排出量が多い運輸、産業に焦点を当てて述べる。

図2 わが国におけるCO<sub>2</sub>排出の状況



出所：環境省、「温室効果ガス排出量について」  
 (<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/youin2-1.pdf>) から算出

### 運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量

運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量は約2.6億tであり、このうち自動車関連（乗用車、貨物車、バスなど）の排出量は約2.3億tで、運輸部門全体の約88%を占めている。

そのため自動車については、CO<sub>2</sub>の排出削減とともに将来の化石燃料供給に対する懸念から燃料電池自動車の研究開発が進められている。「燃料電池実用化戦略研究会」（座長：茅陽一・地球環境産業技術研究機構副理事長）による2001年1月22日の報告では、2030年の導入目標を現在の自動車総数の5分の1に相当する1500万台としている。それに要する水素量は約151億t（約170億m<sup>3</sup>）である<sup>2)</sup>。現在、工業界で水素を製造する一般的な方法である天然ガス（メタン）の水蒸気改質法では、水素1m<sup>3</sup>の製造に約0.9kgのCO<sub>2</sub>が発生する。したがって、燃料電池自動車1500万台では約0.5億tのCO<sub>2</sub>を削減できるが、水素製造の過程でCO<sub>2</sub>が0.2億t発生するため、差し引き0.3億tの削減に留まることになる。

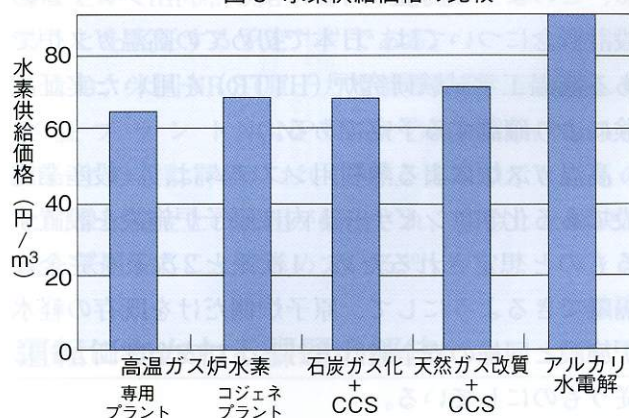
一方、高温ガス炉と水の熱化学分解で水素を製造するIS（Iodine-Sulfur）プロセス\*\*を利用すれば、水素の製造過程でCO<sub>2</sub>の発生をゼロにすることが可能である。また、高温ガス炉による水素製造コストは、既存の水素製造技術と比較して経済的に競合可能な状況にあると試算されている。図3は水素スタンドへの供給価格試算結果を比較したもので、高温ガス炉・ISプロセスによる水素製造コストは18.3円/m<sup>3</sup>、輸送コストを含む水素ステーションへの供給価格は約63.9円/m<sup>3</sup>としている<sup>3)</sup>。

本試算は、原油価格が30～40ドル/バレルの2006年時点のものであり、IEAの「エネルギー白書（Outlook）2008」では、2030年時点の原油価格は120ドル/バレル強と発表している。化石資源の価格は資源の枯渇問題などから長期的には漸増傾向を続けるものと考えれば、高温ガス炉・ISプロセスでの水素製造の経済的優位性はさらに高まるものと考えられる。高温ガス炉（熱出力600MW=60万kW）1基当たりの水素製造量は約633億m<sup>3</sup>/年（設備利用率85%、水素製造効率50%）であり、170億m<sup>3</sup>の水素製造に高温ガス炉が約30基必要とされる。

\*\* 水素をヨウ素 (I) に、酸素を硫黄 (S) に結合させることからISプロセスと呼ばれる。詳細は52ページの記述を参照。



図3 水素供給価格の比較



(注) 前提は2030年の輸送距離100km<sup>3</sup>

## 産業部門のCO<sub>2</sub>排出量

産業部門のCO<sub>2</sub>排出量は約4.6億tであり、このうち鉄鋼業が約1.8億tのCO<sub>2</sub>を排出しており、産業部門全体の約40%を占めている。鉄鋼業が排出するCO<sub>2</sub>のうち約1.4億tはコークス類に起因するもので、鉄鉱石の還元過程で発生する。CO<sub>2</sub>排出削減に向けて製鉄における水素利用の取り組みが始められており、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクトとして環境調和型製鉄プロセス技術開発(COURSE50)が開始された。本技術開発は、①コークス製造時に発生する高温の副生ガスを改質して、発生する水素を利用して鉄鉱石を還元する技術開発、並びに②高炉ガスからのCO<sub>2</sub>分離、回収する技術開発からなり、これによって約30%の排出削減を目指すとしている<sup>4)</sup>。

また、日本鉄鋼協会は、水素のみで還元を行うグリーンエネルギー製鉄の研究を開始している<sup>5)</sup>。将来、水素のみで還元を行う場合、粗鋼生産を約8400万tとして還元に必要な水素量は約500億m<sup>3</sup>で、高温ガス炉約80基に相当する。

鉄鋼業の次に排出量が多い業種は化学・石油工業であり、約1.2億tのCO<sub>2</sub>を排出している。これらの業種では、高温蒸気(約550℃)を製造して自家発電を行うとともに蒸気を熱源などとして利用している。日本原子力産業協会による化学・石油工業の自家発電の調査<sup>6)</sup>に基づき試算を行うと、高温蒸気製造に必要な高温ガス炉の基数は約30基で、重油換算に基づくCO<sub>2</sub>排出削減量は約0.3億tとなる。また、

製油、アンモニア製造などで年間約175億m<sup>3</sup>の水素が消費されており、高温ガス炉からこれらへ水素を供給することも可能である。

以上のように高温ガス炉の特長を生かして水素、高温蒸気などの製造を行い、運輸、産業へ適用することによりCO<sub>2</sub>を大幅に低減させることが可能になる。

近年、CO<sub>2</sub>排出削減技術としてCCS(Carbon dioxide Capture and Storage=CO<sub>2</sub>の回収・貯留)の開発が進められている。しかし、CCSは、発生したCO<sub>2</sub>を地中や海洋に貯蔵することにより、環境へ放出しない技術であるため、長期的な展望に立つと極力CO<sub>2</sub>を発生させない技術の導入、すなわち原子力利用の拡大が有望な選択である。また、CCSを使う限りにおいては化石エネルギーを消費することになり、わが国がエネルギーの大半を海外に依存しているという状況を脱却することはできない。

燃料サイクルを取り入れた原子力は準国産エネルギーと見なすことができ、原子力利用の拡大は、わが国のエネルギー安定供給の観点からも重要と考える。



### 3

## 高温ガス炉を化石燃料の代わりに使うとどのようになるのか

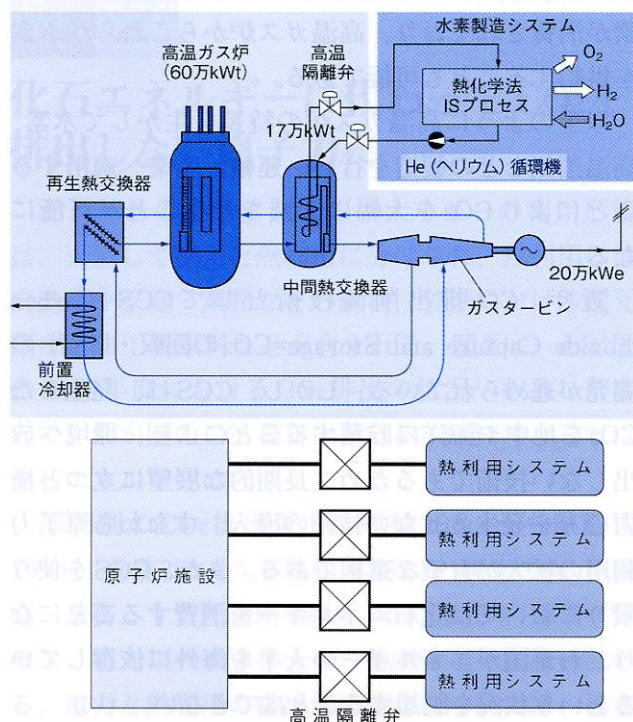
### 高温ガス炉に熱利用システムを結合

高温ガス炉により得られた高温の熱を化学プラントのような熱利用システムに供給する場合の概念について、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)がこれまで検討してきた基本構成例を図4に示す。原子炉1施設と熱利用システム1システムが本概念の最小構成であり、この図はコンビナートを構成する場合として、1つの原子炉施設に複数個の熱利用システムを接続したものである。

原子炉で発生した900℃前後の高温の熱は、ヘリウム(1次冷却材)により中間熱交換器に運ばれ、そこで2次ヘリウム(2次冷却材)に熱を伝える。放射化していないクリーンな高温の2次冷却材は、高温隔離弁を介して水素製造などの熱利用システムに



図4 高温ガス炉と熱利用システムの基本構成例



(注)Wtは原子炉からの熱出力、Weはタービンが回り発電機で発生する電気出力(eを省略して書くことが多い)。We=Wt×熱効率(約0.45—高温ガス炉のガスタービン発電の場合)

送られる。熱利用システムでの仕事を終えた2次冷却材は、高温隔離弁を介して中間熱交換器に戻り、さらに下流のガスタービンに導かれ、発電を行う。

このような高温ガス炉による熱利用システムにおいて、非常に重要な機器が高温隔離弁である。高温隔離弁により、熱利用システムを原子炉施設から切り離して原子力設備レベルから一般産業設備レベルとしての位置付けにすることが容易だからである。熱利用システムの経済性向上を図ることができることと、これらを運営することを想定している石油業界やガス業界といった電力会社以外の業種に対して原子力という障壁を低くすることで参入しやすくすることができる。

例えば熱利用システムが停止した場合、原子炉は中間熱交換器の伝熱管をバウンダリにして、放射化している1次系とクリーンな2次系とに分けて運転することができる。万一、熱利用システムに異常が発生した場合には、高温隔離弁を閉止して熱利用システムを原子炉から切り離すことができる。原子炉の運転の継続については、原子炉側の系統のみで維持できるようにしており、熱利用システム側の系統には期待しなくてよいようになっている<sup>7),8),9)</sup>。な

お、このような高温ガス炉による熱利用システムの設計概念については、日本で初めての高温ガス炉である高温工学試験研究炉 (HTTR) を用いた実証試験により確認する予定である。

高温ガス炉による熱利用システムは、一般産業施設である化学コンビナート内に原子炉施設を設置するものと想定されるため、1次系と2次系を完全に隔離できるようにして、原子炉側だけを既存の軽水炉施設と同様の安全設計方針および安全評価方針に従うものになっている。

## 安全上の課題の解決

これまで原子力機構は、高温ガス炉に水素製造施設を接続した場合を例として、安全上の主要な課題についての解決策を検討してきた。その結果、安全上の主要な課題は、①水素製造施設の異常による原子炉側への熱的な影響 ②水素製造施設での火災・爆発 ③水素製造施設で製造した水素の原子炉への進入 ④原子炉で発生した放射性物質 (トリチウム) の製品水素内への漏えい—などである<sup>8)</sup>。これらの課題についての解決方法を述べる。

課題①は、様々な利用目的のために複数の熱利用システムに熱供給を行う高温ガス炉において、1熱利用システムの熱的異常によって原子炉を停止させることは得策でない。そこで、例えば、原子力機構のHTTR-ISシステムの設計では、水素製造施設の下流側の2次ヘリウム系に蒸気発生器を設置して熱の影響を吸収し、原子炉側には影響を及ぼさないようにしている。また、電力水素併産型高温ガス炉 (GTHTTR300C) の設計では、熱的な影響については、1次冷却材の流量調整と原子炉出口温度の制御により、原子炉側には影響を及ぼさないようにしている。これらは、システムの動特性解析コードの検証も含めてHTTRを用いて実証する予定である。

課題②については、火災・爆発につながる水素の漏えい規模と位置、隔離壁の有無などが、原子炉側への影響を左右するために「原子炉と水素製造施設間の適切な離隔距離と隔離壁の適切な配置」により対応することができる。課題③および④は、冷却材中の不純物濃度を制御する冷却材純化設備で対応す



ることができる。現在、HTTRを用いて解決ができることを実証する予定<sup>7),9)</sup>である。

なお、米国NRC(原子力規制委員会)が実施した実証プラントNGNP(Next Generation Nuclear Plant)の設計評価においても、日本が示したものと同様な安全上の課題が摘出され、類似した解決方法を採用することで進めている<sup>10)</sup>。

### 運転にかかわる課題の解決

高温ガス炉に水素製造施設を接続する場合の水素・電力併給では、通常、原子炉出力一定(100%)のベースロード運転を想定している。この場合には運転上の大きな課題は特にない。

しかし、昼夜の電力需要変動の大きいわが国の電力事情では、昼間は水素と電力の併給運転をし、電力需要が減少する夜間には水素のみの供給運転に速やかに移行するという負荷変動の伴った運転が要求される。このような負荷追従運転方式が、運転上の課題としてあげられる。そのため、「1次冷却材の流量調整と燃料温度の負の反応度フィードバック効果により、原子炉の出口冷却材温度を高温に保った状態で、安定かつ速やかに負荷変動に追従できるかどうか」解析で確認した。その結果、1次冷却材の流量調整で十分に追従できることが分かった。現在、負荷変動については、HTTRを用いて実証試験を進めるところである。

### バックエンドについての対応

使用済み燃料については、高温ガス炉特有の被覆燃料粒子を機械的に破碎し、その後は軽水炉と同様の再処理方法で対応することができる。プラントの使用後の廃止措置については、軽水炉と同様に一定期間冷却した後に解体撤去する。



## 4 高温ガス炉の概要

高温ガス炉は、現在わが国の原子力発電を担っている軽水炉(約300℃)に比較して運転温度が高温(900℃前後)であることから、炉の形状、構成など大幅に異なっている。

本節では軽水炉との相違点、高温ガス炉の固有の安全特性、高温熱利用と経済性の特長について簡単に紹介する。

### 軽水炉とここが違う

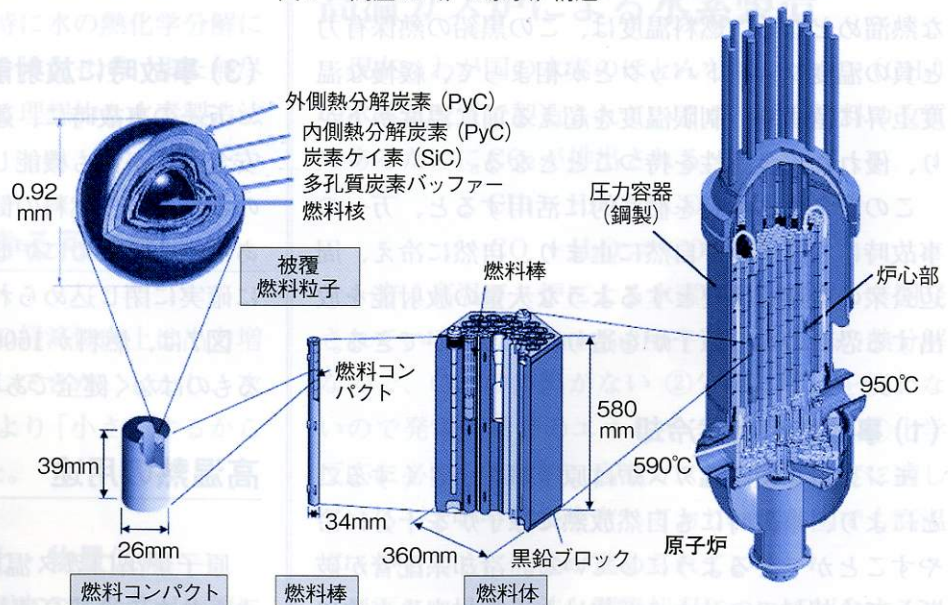
高温ガス炉の原子炉構造の例を図5に示す。

#### (1) 燃料の被覆がセラミック

軽水炉は金属で被覆した燃料を使用するのに対し、高温ガス炉はセラミックスで被覆した直径約1mmの被覆燃料粒子を用いる。この被覆が核分裂によって生まれる放射能を閉じ込める役割を果たす。

この被覆燃料粒子は耐熱性に優れ、金属製被覆燃料では保持できない1000℃を超える高温で長期運転しても、また、事故時に制限温度の1600℃という超高温になっても被覆の健全性を損なわずに、確実に放射能を燃料内に閉じ込めることができる。

図5 高温ガス炉の原子炉構造





## (2) 冷却材がヘリウム

冷却材は化学的に不活性なヘリウムガスを用いる。ヘリウムは高温でも燃料や構造材と化学反応を起こすことはない。

## (3) 減速材が黒鉛

減速材は中性子の吸収が少なく、放射線に強く、耐熱性に優れ、熱伝導性の良い黒鉛を用いる。ところで、この黒鉛は減速材と炉心構造材の機能を兼ねており、また、熱容量が大きいために、事故時の急激な温度上昇を抑える役割になっている。

## (4) 出力規模が小型

軽水炉は、スケールメリットを狙って150万kWeレベルに大型化しているが、高温ガス炉では、システムをシンプルにしても安全を確保できるように、大きくても熱出力60万kWt（電気出力だと、30万kWe弱）の小型にしている。

そのために、大出力を必要とする場合には、モジュール化した原子炉を複数基同じ区域に設置することで対応できるようになっている。すなわち、必要な規模に見合った取り組みを可能にしている。

## 安全性が高い3要素

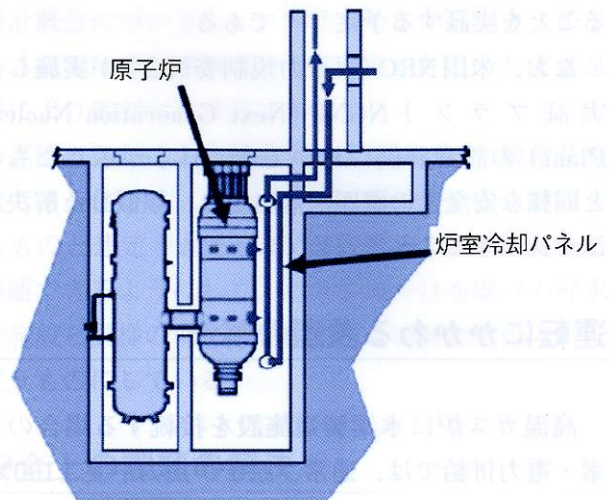
高温ガス炉は耐熱性の高い被覆燃料粒子を使用し、大きな熱容量を持つ減速材黒鉛が事故時の大きな熱溜めとなる。燃料温度は、この黒鉛の熱保有力と負の温度フィードバックとが相まって、緩やかな温度上昇に留まり、制限温度を超える前に温度が下がり、優れた安全特性を持つこととなる。

この安全上の特長を徹底的に活用すると、万一の事故時にも原子炉が自然に止まり、自然に冷え、周辺公衆の退避を必要とするような大量の放射能を放出する恐れのない原子炉を造り出すことができる。

### (1) 事故時の自然冷却

モジュール型高温ガス炉は原子炉を小さくすることにより、事故時にも自然放熱で原子炉を十分に冷やすことができるようにしている。冷却系配管が破断して冷却材のヘリウムが抜けた冷却材喪失事故に

図6 原子炉から炉室冷却パネルへの自然放熱



も、原子炉周囲の建物から土壌、大気などへの自然放熱によって、原子炉は十分に冷却でき、燃料が健全性を維持できる温度（制限温度）以下に保持される（図6参照）。

### (2) 事故時に自然に原子炉停止

一般に、低濃縮ウランを燃料とした原子炉では、炉心の温度が上昇すると負の反応度フィードバックが働き、自然に核反応が抑制されるという特性を持たせることができる。

高温ガス炉の通常運転時の燃料温度は、事故時の制限温度に対し十分な余裕を持っており、原子炉はこの負の反応度フィードバック特性により事故時においても自動的に停止する。

### (3) 事故時に放射能を燃料中に閉じ込め

万一の事故時に、運転員が何もしなくても、また安全設備が何も機能しなくても、自然界の物理現象のみによって燃料の健全性を維持することが可能である。そのために炉心内に蓄積した放射能は燃料中に確実に閉じ込められる。

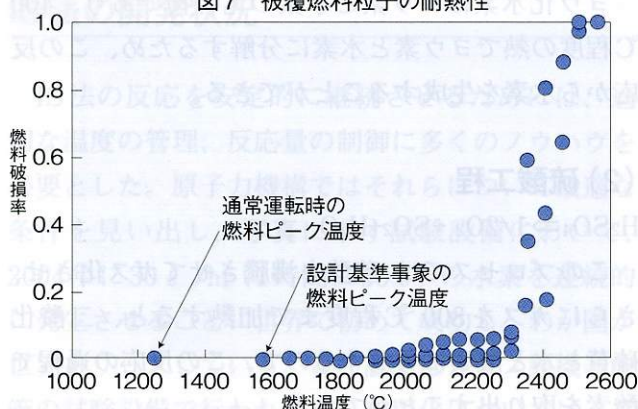
図7は、燃料が1600℃以下であれば、燃料破損するものではなく健全であることを示す実験データである。

## 高温熱の用途

原子炉出口ガス温度は、軽水炉で300～350℃、ナトリウム冷却高速炉で500～550℃であるのに対



図7 被覆燃料粒子の耐熱性



し、高温ガス炉ではそれより高い950℃に達した実績を持っている。このように高温ガス炉は高温の熱を供給できるため、発電効率向上による経済性向上や各種産業プロセスへ高温の熱エネルギーを供給するという原子力エネルギーの利用分野拡大に大いに役立つと期待されている。

発電分野では、850℃以上の高温ヘリウムによってガスタービンを直接駆動して高効率発電を行う高温ガス炉ガスタービン発電プラントが有望視されている。この発電プラントは、軽水炉の発電効率約35%に対し、45%以上を実現させることができる。

また、高温ガス炉によって得られる高温の熱は、発電以外の様々な産業分野の熱源として、特に800～1000℃の熱を利用している化学工業の分野に広く利用できる。

さらに、石炭の液化・ガス化、直接還元製鉄などにも利用することができる。特に水の熱化学分解による水素製造は、温暖化ガスを排出せず、また無尽蔵といえる水から水素ができる理想的な水素製造法として注目されている。

## 小さいからこそ安くできる可能性

軽水炉による原子力発電所の経済性向上は出力増大によるスケール効果を追求してきた。しかし、次に示す小型高温ガス炉概念により「小さくするから安くできる」可能性が出てきた。

### (1) 安全システムの簡素化・物量低減

原子炉を小さくすることで固有の安全性が大幅に

向上する。このため、事故時の安全性確保のために必要な設備が大幅に簡素化できる。

### (2) ガスタービン採用によるシステムの簡素化・物量低減

小さくすることで技術的に見通せるガスタービン出力と原子炉出力が良く適合する。蒸気タービンシステムに比べシステムが簡素化され、物量が大幅に低減する。

### (3) 標準設計小型モジュール化によるコスト低減

標準設計小型高温ガス炉を複数設置してプラントを構成すると、標準設計シリーズ生産による製造コスト、建設コストの低減、工場生産範囲の拡大による現地工事の簡素化などのコスト低減が図れる。

### (4) 需要地近接立地による送電コストの低減

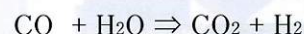
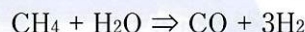
小型高温ガス炉は、炉心溶融の恐れがなく、周辺の人々の退避が必要としないなど、需要地近接立地に可能な安全性を持っている。ただし、周辺の人々の退避を必要としない区画にまで、近接立地させるためには、現法規の改正が必要になる。



## 5

## 高温ガス炉による水素製造

現在、わが国の水素のほとんどは、メタン(CH<sub>4</sub>)の水蒸気改質で製造されているが、化石燃料の改質であるためにCO<sub>2</sub>が排出される。



一方、高温ガス炉による水素製造方法として開発されているIS (Iodine-Sulfur) 法は、①水の熱分解なので、CO<sub>2</sub>の排出がない ②分解に電気を使わないので発電段階でのエネルギー損失がない ③化学反応に必要な温度が、高温ガス炉の運転温度に適している—という特長を有しており、諸外国でも高温ガス炉とともに開発が進められている。

以下に、その方法と開発状況について紹介する。



## IS法の概要

水の熱分解では、水素と酸素を切り離すのに約4000℃の熱が必要である(図8参照)。しかし、材料の耐熱性を考えると、1000℃以下の温度で分解できるプロセスが必要となる。

IS法は化学反応を利用することで、900℃前後の熱で水を分解できる画期的な水素製造方法であり、水素をヨウ素(I)に、酸素を硫黄(S)と結合させ、それぞれの化合物を熱で分解させるプロセスである。

このためIS法と呼ばれており、IS法は図9に示すように、次の3つの反応から成り立っている。

### (1) ヨウ化水素工程 (HI工程)



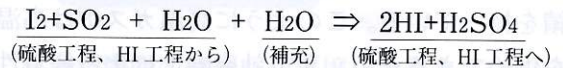
ヨウ化水素はヨウ素と水素の化合物であり、400℃程度の熱でヨウ素と水素に分解するため、この反応から水素を生成することができる。

### (2) 硫酸工程



このプロセスでは、硫酸を沸騰させてガス化させ、さらにガスを800℃程度まで加熱すると、二酸化硫黄と水と酸素に分解するので、この反応の過程で酸素を取り出すことができる。

### (3) ブンゼン工程



ヨウ化水素プロセスと硫酸プロセスから、水素と

酸素が取り出されると、残った物質は、ヨウ素、二酸化硫黄、水となり、これに水を補充すると、硫酸とヨウ化水素が生成される。この反応をブンゼン反応と呼んでいる。硫酸に比べてヨウ化水素は重いので、時間がたつとヨウ化水素は下に、硫酸は上に2層に分離するので、各々をヨウ化水素プロセス、硫酸プロセスに供給し、再び熱分解を行って水素と酸素を得る。したがって、IS法ではブンゼン反応で補充した水が、HI工程で水素として、硫酸工程で酸素として分解される。

熱の収支の観点では、原子炉から核熱として100 Jのエネルギーを与えたとすると、24 JはHI工程、76 Jは硫酸工程で使われ、67 Jに相当するエネルギーが水素として回収できる。水の電気分解では発電効率を45%、電気分解効率を90%と仮定すると、100 Jエネルギーに対して40 J程度の水素しか得られない。

図8 水の熱分解

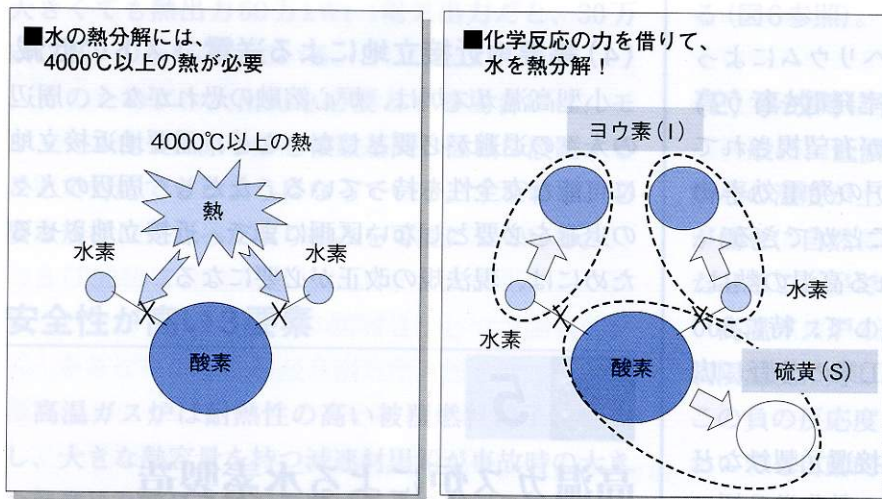
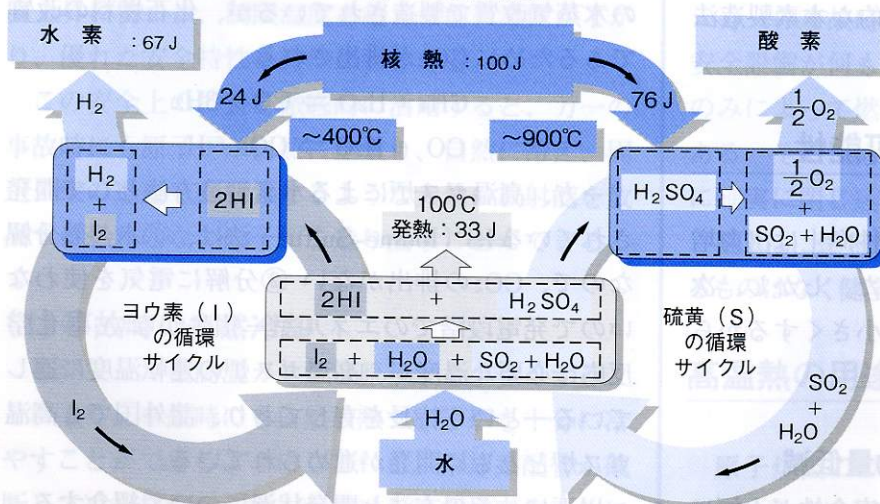


図9 IS法の概要





## IS法の開発状況

IS法の反応を安定的に継続させるためには、適切な温度の管理、反応量の制御に多くのノウハウを必要とした。原子力機構ではそれらについて最適な条件を見出し、写真に示す試験設備において、2004年に30ℓ/hr(1時間に30ℓ)の水素を連続的に発生させることに世界で初めて成功し、わが国が世界をリードしている。この試験はガラス製機器配管の試験設備で行われたが、実用化においては、この材料の使用でないために、材料腐食、効率向上という問題点を解決しなければならない。その開発状況について次に説明する。



IS法水素製造試験設備(30ℓ/hr)  
(注)原子力機構では、世界で初めて本設備で水素を連続で30ℓ/hr取り出すことに成功している

### (1) 耐腐食材料

硫酸やヨウ化水素は非常に強い酸であり、これを高温で沸騰させたり、配管で輸送したりする場合、多くの金属は溶融する。種々の材料を調査し、浸漬試験などで確認した結果、炭化珪素(SiC)が硫酸にとけず、耐腐食性に優れていることが分かった。

しかし、セラミックス材は、金属と異なり切削や溶接が困難なため、その材料の特性にあった機器設計を行い、試作をして製作性を確認した。

図10は試作した機器の一例で、硫酸を沸騰させる硫酸蒸発器である。直径約0.25m、長さ1.5mのSiCが原子炉からの熱で400℃以上に熱せられて硫酸を沸騰させる機器である。セラミックス製の機器では、いかに大型のSiCを欠陥なく製作するかが課題であったが、焼成温度と成分の管理により、構造欠陥のないSiCを得ることができた。

また、硫酸の沸騰挙動を評価するとともに、高温の硫酸中での配管などの健全性を確認するため、硫酸ループを使った実験が進められている。

### (2) 効率向上

材料腐食とともに課題となるのが、いかに少ない熱でより多くの水素が得られるかということである。IS法で使われるヨウ化水素は多量の水と混ざった状態で加熱しても、水の蒸発に多くのエネルギーを費やし、肝心のヨウ化水素が分解しないという難点がある。

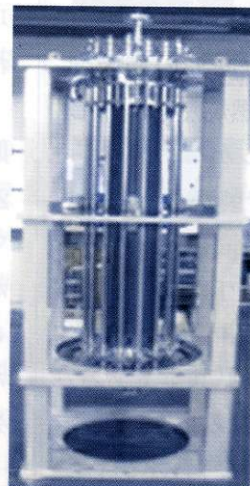
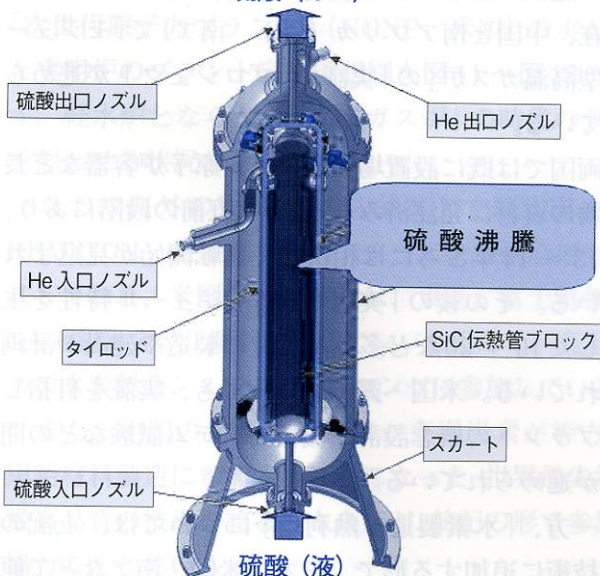
このため、あらかじめヨウ化水素を濃縮するなどの対策を講じて、分解効率を上げることが必要となってくる。

原子力機構では、イオンビームで作成した分離膜を使って余分な水を除去するという試みがなされ、従来の膜方式を上回る性能が得られるようになっており、膜の耐久性を含めた開発が行われている。

### (3) 海外でのIS法の開発状況

米国とフランスは国際協力

図10 硫酸蒸発器概念と蒸発部試作体(例)  
硫酸(ガス)





## 原子力発電の新時代

のもとで、温度、圧力、材料を実用プラントに合わせた試験装置を完成させており、その規模は日本の実績を上回る100ℓ/hrである。

硫酸工程は米サンディア国立研究所、ヨウ化水素工程は米国のジェネラルアトムクス社がエネルギー省の予算で製作し、ブンゼン工程はフランス原子力庁(CEA)が担当している。

今のところ、わが国のように連続運転には成功していないが、今後、開発に加速がかかるものと思われる。



## 6

## 高温ガス炉の海外状況

## 軽水炉・高速増殖炉と並んで開発、化石燃料とも協働・共生へ

先進国や中国、インドなどエネルギー大消費国は、今、改めて「原子力」の拡大開発・利用に取り組んでいる。それはエネルギーの再利用ができるために資源的に持続可能性があること、地球温暖化対策に貢献するのみならず、石炭など化石資源との間で地球環境に優しい形での協働(シナジー)・共生も期待できるからである。

主要国の最新の原子力開発戦略を見ると、まず共通認識としてエネルギーの安定確保と地球温暖化対策がその背景にある。しかし、米国、中国などでは、それらに加え石炭など化石資源を今後も最大限に生かしたいという思惑があると考えられる。

例えば、石炭については、火力発電などでそのまま燃やすと大量のCO<sub>2</sub>が発生する。原油の精製や重質油の改質にも現状は天然ガスの燃焼熱を利用しており、これもCO<sub>2</sub>が発生する。しかし、それらの部分を「原子力の熱」や「原子力で製造した水素」で置き換えて改質を行うと、CO<sub>2</sub>放出量をゼロにし、あるいはかなり減らしながら、発電や自動車・航空用の燃料が合成できる。これが最近国内外で提案されている「化石燃料」と「原子力」の協働・共生である。

主要国の原子力開発戦略を炉型別にみると、発電とエネルギーの持続性には主に新型の「軽水炉」と将来実用化する「高速増殖炉」でまかない、一方、

水素製造や1000℃程度の高温から中～低温に至る幅広い熱利用の需要には「高温ガス炉」で応えようとしている。

特に米国は最近、この高温ガス炉の位置づけを強化した。水素製造や高温熱利用のみでなく、高速増殖炉が実用化されるまでの間、軽水炉の使用済燃料から出てきて取り扱いに困っている大量のプルトニウム(Pu)や超ウラン元素(TRU)を超高燃焼度型(DB)の高温ガス炉で燃焼させると、発電や熱利用をしながら、効率よく焼却処理できることがわかってきたからである。軽水炉、高速増殖炉、高温ガス炉に役割分担、相互に補完させるという新しい考え方である。

アジア、アフリカなど開発途上国やカザフスタンなど資源国も、最近ではウラン、石炭、石油、天然ガスなど化石資源の輸出、新しい産業の育成・定着、外貨獲得、雇用確保などの視点から、国家エネルギー戦略としてこれらの原子力開発に取り組もうとしている。

## モジュール型の実証炉、いよいよ着工へ

世界の主要な高温ガス炉実用化プロジェクトの状況を表1に示す。狙いは発電と水素製造および各種熱利用である。「発電用」の高温ガス炉は、1970年代の欧州や米国において、実験炉、原型炉の設計、建設、さらに運転についての実績があり、また1990年代以降、日本や中国において、試験・研究炉の建設や運転の実績がある。それらを基にして、現在、中国と南アフリカ(以下、南ア)で「モジュール型高温ガス炉」の「実証炉」プロジェクトが進められている。

両国では既に設置場所も決め、原子炉容器など長期物の資材は発注済みなど、着工直前の段階にあり、2013～14年ごろには相次いで運転開始が見込まれている。その後の「実用炉」もモジュール特性を生かした10～20など多数基単位の製造や建設が計画されている。米国・露国、欧州でも、実証を目指したプラントの概念設計や機器システム試験などの開発が進められている。

一方、「水素製造・熱利用」については、上記の炉技術に追加する形で、日本、米国、南アなどで原



表1 世界の主要な高温ガス炉実用化開発プロジェクト状況

| プロジェクト名  | 開発の現状                      | 今後の計画                 |
|--|----------------------------|-----------------------|
| 試験/研究炉プロジェクト(運転中)  |                            |                       |
| HTRR<br>(日本)   | (発電なし)<br>安全性実証試験中         | 水素製造施設と<br>結合         |
| HTR-10<br>(中国)   | (蒸気タービン発電)<br>安全実証試験、発電実証中 | ガスタービン発電<br>へ転換       |
| 発電用実証炉/実用炉プロジェクト(設置場所が確定済み)  |                            |                       |
| HTR-PM<br>(中国)   | (実証炉)<br>着工準備、長期物資材発注中     | 2009年 着工、<br>2013年 運開 |
|  | (実用炉)<br>多数基設置を計画中         | 2020年 までに<br>計18基設置   |
| PBMR<br>(南ア)   | (実証炉)<br>長期物資材発注中          | 2010年 着工、<br>2014年 運開 |
|  | (実用炉)<br>多数基設置を計画中         | 2025年 までに<br>計24基設置   |
| 水素製造/熱利用実証炉プロジェクト(設置場所が確定済み)   |                            |                       |
| NGNP<br>(米国)   | 予備的概念設計中、許認可戦<br>略検討中      | 2017年 着工、<br>2021年 運開 |
| その他(概念提案、概念設計、機器開発中のもの)  |                            |                       |
| GTHTR300C(日)、PHP(南ア)、GT-MHR(米・露)、ANTARES(仏)、<br>NHDD(韓)、超高燃焼度型高温ガス炉(米)、高温熱利用国際実<br>証炉(欧)など |                            |                       |

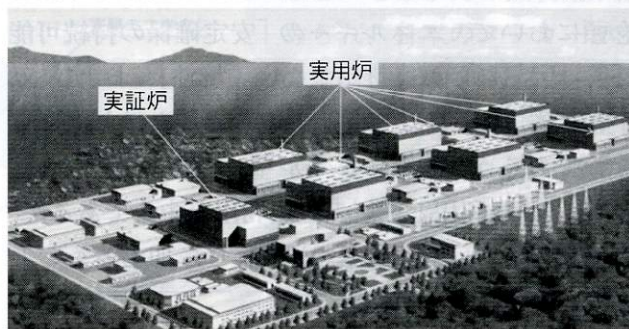
子力による水素製造の技術、高温プロセスへの熱利用の機器システム、市場の開発などが行われており、2015～2020年ごろにはシステムやプラント規模の実証が行われる見込みである。最近、欧州から原子力熱利用の潜在的な需要が多様なため、石炭の液化(CTL)など代表的なケースについてプラント規模で技術や運転性を総合実証する「高温熱利用国際実証炉プラント」の設置も提案された。

「高温炉ペブルベッドモジュール」(HTR-PM、中国)、「ペブルベッドモジュール炉」(PBMR、南ア)、「次世代原子力プラント」(NGNP、米国)の実証炉と実用炉のプラント完成予想図を図11～図13に示す。軽水炉とならんで「高温ガス炉」の時代の到来を想わせる状況となっている。

なお、海外の開発プロジェクトでは、南アのPBMRには、三菱重工がガスタービンと炉心槽を受注しており、米国のNGNPには、東芝、富士電機がGAと組んで、三菱重工は仏アレバと組んで、高温ガス炉水素製造システムの設計コンペに参加している。

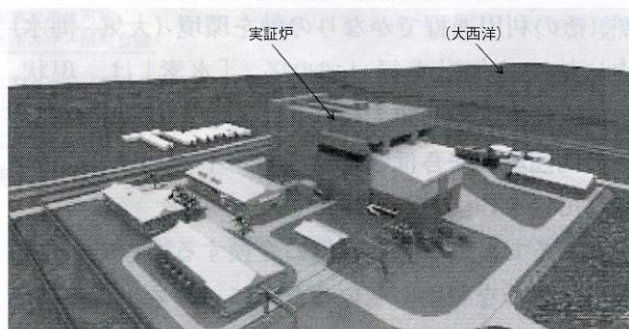
また、中国のHTR-PMには、東洋炭素が等方性黒鉛材料製造に参加することになった。世界最先端、最高品質の技術を誇る日本企業が、前記の形で参加、協力に応じている。

図11 中国HTR-PM実証炉と実用炉の完成予想図



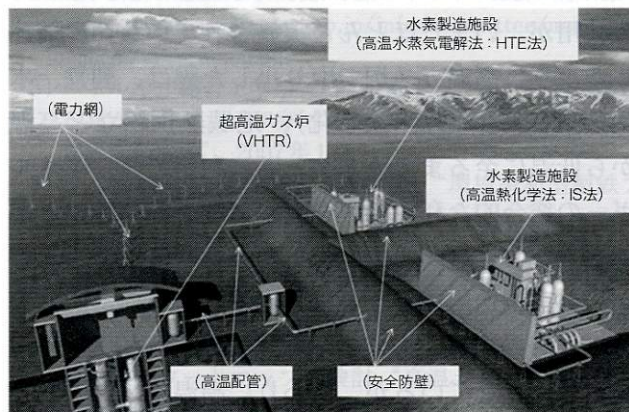
(注) 実証炉と実用炉が併設(山東省)  
出所: Jiang Shengyao (Tsinghua University), Mar.10, 2006,  
Osaka, Japan (説明加筆)

図12 南アPBMR実証炉完成予想図



(注) ケープタウン近郊  
出所: PBMR, World Nuclear News, Aug.2,2008 (説明加筆)

図13 米国NGNP実証炉プラント完成予想図



(注) 原子炉と水素製造施設で構成(アイダホ州)  
出所: DOE-NE, NGNP HP, 2007 (説明加筆)



## 「電気 / 水素 / 熱利用 / CO<sub>2</sub> リサイクル社会」がやってくる

人類が豊かな生活を将来に向けて求めていくためには、エネルギーの安定確保は必須である。同時に、化石燃料から発生するCO<sub>2</sub>による地球温暖化への影響を見過ごすことはできない。2030年～50年～



# 原子力発電の新時代

そして22世紀に向けて、われわれはこれらの点を念頭において、エネルギーの「安定確保の持続可能性」、「大気にCO<sub>2</sub>を排出しない環境性」、および「効率性・省エネ」に真っ向から取り組まなければならないであろう。現在のエネルギーの基本形態は「電気」としての利用と「熱」の直接利用が中心であるが、将来環境性のよい「水素」がそれらに加わるものと期待される。

「電気」はその利便性、安全性などより、今後ますますその需要量が増大するであろう。「熱」は、エネルギー利用として現在約6割を占めて最も多いが、その利用過程でかなりの熱を環境（大気、海水）中に捨てる無駄を行っている。「水素」は、現状、主に天然ガスの改質で製造しており、コスト、利便性の問題などからほとんどエネルギーとしては利用されていない。

ところで、これらの形態に変換する過程で、化石燃料の多くを利用しているために、エネルギー枯渇と地球温暖化の問題が、大きな課題として浮上した。「電気」については、すでに、原子力利用で対策が見出されてはいるが、「熱」や「水素」には、原子力の利用が、いまだほとんど実施されていない。前述したように高温ガス炉で取り出した熱は、製鉄、水素製造、海水脱塩（淡水化）、地域熱供給など高温から低温に至るまでカスケードに利用でき、エネルギーの総合的な利用効率を大幅に向上させることができる。

また、輸送用燃料などに利用するために、主に天然ガスの熱を利用して、石炭や重油を液化したり、改質したりしているが、代わりに高温ガス炉の熱を利用すれば、熱源がCO<sub>2</sub>を排出しないために、より環境性の良い状態で液化、あるいは改質することができる。

「水素」はエネルギー源として環境によいため、原子力の熱や原子力発電による電気から水素を製造すれば、製造時にもCO<sub>2</sub>の排出がなく、将来のエネルギー利用媒体の主要な柱となり得る。特に、高温ガス炉を活用したIS法での水素製造の場合、資源が無尽蔵な「水」を原料としているために、高温ガス炉をわが国の核燃料サイクルに組み込めば、その燃料供給は半永久的に途絶えないため、製造した

表2 高温ガス炉、原子力水素製造/熱利用の実用化への課題と見通し

| 項目         |           | 課題と見通し  |
|------------|-----------|---|
| 技術開発、実証    | 水素製造      | IS法などの実用規模実証、原子炉(高温ガス炉)との連結実証                     |
|            | 各種の熱利用    | 熱交換器などの高温機器システムの開発・実証、顧客の具体的要件の把握、代表的ケースのプラント規模実証 |
| 許認可        | 原子炉       | 南ア、中、米でのモジュール型実証炉の許認可に期待                          |
|            | 熱利用       | HTTR-IS(日)、NGNP(米)での許認可に期待                        |
| 需要、市場性、経済性 | 潜在的な需要、市場 | 先進国、途上国、資源国など世界規模で膨大(水素、製鉄、燃料電池、化石から燃料合成…)        |
|            | 経済性       | 上記技術(システム)実証による石油、天然ガス価格との経済的確証                   |
| インフラ整備     | 水素利用      | 米、欧、日など部分的に実証中。今後徐々に拡大                            |
|            | 各種の熱利用    | 需要地単位で今後徐々に拡大                                     |
| 理解、普及      |           | 政府、産業(非原子力産業を含む)、一般公衆への理解、普及                      |

「水素」というエネルギー媒体で、半永久的にエネルギーを確保することができる。

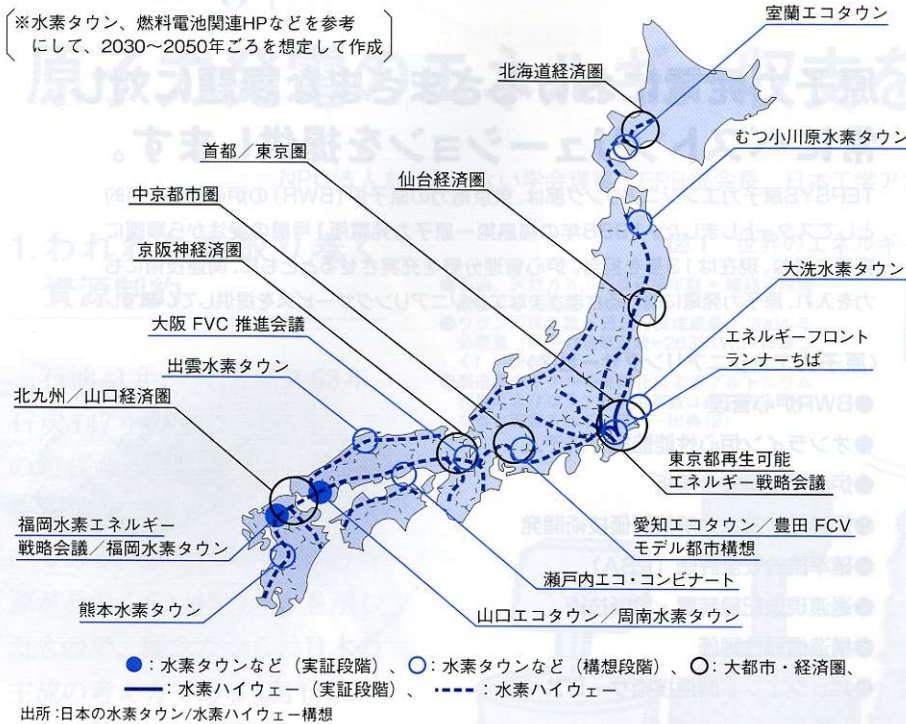
現在の高温ガス炉、原子力水素製造、熱利用の実用化への課題と見通しは、表2に示す通り技術実証、許認可、経済性などクリアすべき課題はいくつかあるが、その解決の見通しは十分にあると考えている。また、高温ガス炉の場合、軽水炉から出てくるTRU(低レベル長半減期放射性廃棄物)や埋蔵量がウランの約3倍とされる豊富なトリウムも燃料として使用でき、さらにその基本技術をガス冷却式の高速度増殖炉(GFR)につなぐこともできる。これらも持続可能性に大きく寄与するものと考えられる。

なお、化石エネルギーより発生するCO<sub>2</sub>を分離・貯蔵するシステム(CCS)が開発されつつあるが、CO<sub>2</sub>を単に「厄介もの」としてではなく「有用な原料」として積極的に利用すること、すなわちCO<sub>2</sub>に水素を添加するメタノール合成などといったシステム提案も国内外で始めている。この時に使用する水素の製造や合成時の熱源にも高温ガス炉の熱を利用することが可能である。

わが国の2030～50年ごろのエネルギー社会像の一部をなす「水素エネルギー社会」のイメージを図14に例示した。これは、経産省や福岡県など地方自治体が公表している燃料電池・水素タウン・エコ



図14 水素エネルギー社会 (2030~2050年ごろ)



タウンの構想、実証活動の現状、将来計画などを参考にして、想定したものである。

これによると、2050年ごろからは、化石燃料の利用は、その枯渇を懸念した高価格状態と地球環境保全のために大幅に低減している。高温ガス炉ならびに太陽熱、風力、バイオなどから製造、供給される「水素」が、産業や市民生活に定着し、電気のみならず水素と熱を集中的かつ有機的に利用する「水素タウン」、「エコタウン」が全国に分布し始めている。急激なエネルギーインフラ改革が進み、主要道路沿いには現在のガソリンスタンドに代わって「水素ステーション」が立ち並び、大都市や工業経済圏は「水素ハイウェイ」でつながっている。

そして路上では「水素燃料自動車」、「電気自動車」、「燃料電池自動車」、「合成燃料自動車」が、海や川では「水素燃料船」が走り始め、空には「水素ジェット機」が飛び交い出している。また、製鉄や石油からなるコンビナートは、「原子力製鉄」、「化石燃料と原子力熱によるナフサ合成工場」、「窒素と水素による肥料合成工場」、「CO<sub>2</sub>と水素によるメタノール合成工場」などからなるエココンビナートに姿を変えようとしている。

世界的には「海水脱塩(淡水化)」、「地域熱供給」

などにも原子力の熱利用が進められ、日本のメーカーがその主役を演じている。

以上のような社会が実現しているためには、国、産業界(電力、製鉄、自動車、石油化学など)、学界、一般市民、そして地球レベルによる理解と積極的な取り込みが不可欠である。

現在の地球レベルのエネルギーセキュリティ、環境問題の大きさ、解決の緊急性、そして人間の英知の無限の可能性を考え合わせると、それらは遠い夢の世界というよりは、案外早く到来するのではないかと期待している。

参考文献

- 1) 環境省、「温室効果ガス排出量について」、  
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/youin2-1.pdf>
- 2) 燃料電池実用化戦略研究会、「水素エネルギー社会の将来像」、  
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/nennryoudennchi/syouraizou.pdf>
- 3) エネルギー総合工学研究所「水素エネルギー社会における我が国の高温ガス炉水素生産の位置づけに関する調査研究報告書」、2007年1月
- 4) 日本鉄鋼連盟 COURSE50 委員会、「環境調和型製鉄プロセス技術開発」、  
<http://www.jisf.or.jp/news/topics/docs/0807302.pdf>
- 5) 日本鉄鋼協会、「[グリーンエネルギー製鉄]研究会の概要」、  
[http://www.isij.or.jp/Bukai/Gakujutsu/Eco/study\\_02.pdf](http://www.isij.or.jp/Bukai/Gakujutsu/Eco/study_02.pdf)
- 6) 日本原子力産業協会、「高温ガス炉の導入シナリオ及び研究開発ロードマップの検討-“高温ガス炉将来展開検討WG2報告書”」、2007年2月
- 7) 西原哲夫, 大橋一孝, 村上知行, 國富一彦, “電力水素併産型高温ガス炉 (GTHTR300C) の安全設計方針,” 日本原子力学会誌和文論文誌, 5, 325 (2006) .
- 8) 大橋一孝, 西原哲夫, 國富一彦, “HTTR-IS 水素製造システムにおける安全設計の考え方,” 日本原子力学会誌和文論文誌, 6, 46 (2007) .
- 9) N. Sakaba, H. Sato, H. Ohashi, T. Nishihara and K. Kunitomi, “Development Scenario of the Iodine-Sulphur Hydrogen Production Process to be Coupled with VHTR System as a Conventional Chemical Plant”, J. Nucl. Sci. Technol., 45, 962 (2008) .
- 10) U. S. NRC, “Next Generation Nuclear Plant Phenomena Identification and Ranking Tables (PIRTs), Volume 6: Process Heat and Hydrogen Co-Generation PIRTs”, NUREG/CR-6944, Vol.6 (2008) .