

— 報告書 —

原子力の利用拡大に向けた
高温ガス炉の実用化開発の重要性

平成 20 年 6 月

(社) 日本原子力産業協会

原子力熱利用検討会

[旧 高温ガス炉将来展開検討会]

目 次

はじめに.....	2
第1章 序論	
1.1 エネルギーセキュリティ、地球環境と原子力.....	3
1.2 諸課題の有力な解決策となり得る高温ガス炉.....	4
第2章 我が国における高温ガス炉実用化・導入の意義	
2.1 高温ガス炉が持つ多様な利用性	
2.1.1 高温性からくる多様な利用性.....	6
2.1.2 固有の安全性からくる多様な利用性.....	6
2.2 高温ガス炉開発の国際性	
2.2.1 高温ガス炉開発の意義.....	9
2.2.2 主要国における国家主導的な開発取組み.....	9
2.2.3 国際共同開発プログラム.....	10
2.2.4 途上国、資源国の動向.....	11
2.3 国家プロジェクトとしての高温ガス炉開発	
2.3.1 開発開始当初の目的.....	12
2.3.2 高温ガス炉開発への産業界の参画.....	12
2.3.3 技術開発リーダーシップの維持と技術継承.....	12
2.4 早期開発の必要性	
2.4.1 早期実現性と更なる発展性.....	13
2.4.2 世界的な潜在需要と輸出の可能性.....	13
第3章 高温ガス炉導入による温室効果ガス削減効果.....	16
第4章 我が国の高温ガス炉実用化戦略（案）	
4.1 戦略骨子.....	17
4.2 我が国における導入シナリオ.....	17
4.3 実用化ロードマップ.....	17
第5章 高温ガス炉実用化への課題	
5.1 高温ガス炉プラント（発電、熱利用）の実証.....	18
5.2 原子力水素製造技術の開発、実証、インフラ整備.....	18
5.3 開発推進体制の確立、開発費用の調達、市場の開拓.....	18
5.4 関連資源の確保.....	18
まとめ.....	19

はじめに

エネルギー資源の乏しい我が国におけるエネルギーの安定供給及び地球環境問題の解決のためには、発電分野のみならず、多くの分野で原子力エネルギーの利用を進めるのが得策である。高温ガス炉（超高温ガス炉を含む）は、1,000℃近くの高温度域から低温度域までの熱を効率的に利用することが可能であることから、原子力による水素製造やその他の産業へのエネルギー供給用として、他型式の原子炉には無い特性を有している。

当日本原子力産業協会は「高温ガス炉将来展開検討会」[2008年度より、「原子力熱利用検討会」と名称改変]（座長：関本博・東京工業大学教授）を設置し、その下に設けられたワーキンググループ1（WG1）及びワーキンググループ2（WG2）において、高温ガス炉の用途と導入シナリオの検討及び高温ガス炉の普及・促進活動を進めている。

本検討会は、その前身である「原子力熱利用に関する将来展開検討会」の時代から高温ガス炉による発電や水素製造等熱利用について、国や産業界に対し、国のエネルギー計画での位置付け評価や高温ガス炉が有するポテンシャルに関するフイージビリティスタディ(FS)の実施について提言・発信してきた。その結果、同炉による水素製造などについては、国のエネルギー開発計画において「長期の研究開発テーマ」として位置付けられ、CO₂の地球温暖化問題の重要性の認識から、その実用化開発についても漸く言及され始めた。しかし、高温ガス炉の有用性については、いまだ、原子力関係者を含め、社会に認識されていないのが現状である。

そこで本検討会は、高温ガス炉の特徴を、原子力関係者を含め広く社会に理解してもらうための普及・促進活動の材料として、高温ガス炉導入の意義を本報告書「**原子力の利用拡大に向けた高温ガス炉の実用化開発の重要性**」にまとめた。

本書が我が国における高温ガス炉実用化に向けて、その具体化への一助となれば幸甚である。

2008年6月

(社)日本原子力産業協会

原子力熱利用検討会

[旧 高温ガス炉将来展開検討会]

第1章 序論

世界は今まさに地球温暖化問題に直面しており、また今後は途上国の発展によりエネルギー需給の逼迫も懸念される。このため、省エネ、化石燃料への依存度低減やクリーン化をはじめ、原子力の利用拡大・高度化利用など革新的な技術開発により、これらを解決していく必要がある。

温室効果ガス(CO₂)の削減には原子力の発電利用は、非常に効果があるが、それだけでは導入に限界がある。発電以外の1次エネルギー利用は、ほぼすべて化石燃料により賄われているため、原子力の熱利用などへの拡大が効果的である。熱利用への原子力利用は開拓の余地があり、十分に期待できる。

軽水炉や高速炉によって供給される低、中温に比べ高温(1,000°C近く)の熱供給が可能な高温ガス炉は、発電はもとより、大量・高効率の水素製造等の幅広い熱利用が可能であることから、軽水炉や高速炉とは違った活用による共生が可能である。こうしたユニークな特徴を持つ高温ガス炉プラントを導入することにより、産業、運輸、民生で温室効果ガスを削減することが可能である。

高温ガス炉は燃料として、ウラン、プルトニウムに加えて、資源量豊富なトリウムにも利用することができ、利用燃料の点でも柔軟性があり、かつその開発においては、高速炉システム(増殖炉、燃焼炉など)の燃料サイクルにも繋ぎ得ることができる。

ちなみに米国、仏国、中国、南アフリカなどは2010~2020年代の実用化に向けて開発を進めており、途上国や資源国においてもモジュールタイプのこの中小型高温ガス炉技術に注目している。

1.1 エネルギーセキュリティ、地球環境と原子力

今、エネルギーセキュリティと深刻な地球温暖化の問題から、ハイリゲンダム主要国サミット(2007年6月、独国)において、「温暖化効果ガスを2050年までに世界で半減」が共同宣言として採択されている。我が国は、次回洞爺湖サミット(2008年7月、日本)に向けて、強力な具体策を提案していく必要がある。

これらの問題に対処するには、可能性ある全ての解決方策に向かって、市場任せや民間任せでなく「国家エネルギー・環境・経済総合戦略」として取り組んでいく必要がある。その有力な解決策として、持続性、クリーン性などの観点から今、世界的に原子力が見直されている。米国、欧州(EU、仏国)、中国などでは、国家戦略あるいは国際戦略として、大々的に開発しようとしている。

我が国首相は、2007年5月、アジアのリーダー達に向けて「温暖化効果ガスを2050年までに世界で半減」を提案し、そのためには「革新技術」の開発が必要とし、高温ガス炉、小型炉、次世代自動車、還元法製鉄などの技術開発を例示した。

1.2 諸課題の有力な解決策となり得る高温ガス炉

高温ガス炉は以下のような特長を持つ。

(1) 高温を供給することができる

燃焼時に二酸化炭素を排出しない水素を大規模に利用する社会が到来すれば、そこに供給するための大量の水素を製造しなければならない。水を原料として二酸化炭素を排出せずに大量の水素を製造できるIS法など高温熱化学法は軽水炉やNa高速炉では到達できないが、高温ガス炉は1,000°C近い高温を供給できるためにその熱源に利用することができる。電気を作る段階で既に効率を下げている電気分解による水素製造法に比べ、高温熱源を直接利用するプロセスであるので高効率である。また、高温の熱によってブレイトンサイクルを用いた高効率ガスタービン発電を行うことも可能である。そして水素製造とガスタービン発電を組み合わせた熱電併給システムは、コスト評価をしてみる必要があるが、変動する電力需要に柔軟に対応できるシステムとなり得る。

(2) 固有の安全性を備えている

高温ガス炉は熱容量の大きい黒鉛を減速材や構造材に使用し、出力密度を軽水炉の10分の1以下程度まで抑え、そのことにより炉心の反応度や温度応答を極めて緩やかにすることで、固有の安全性を確実化した設計にしている。

(3) 多様な発展性

高温ガス炉による熱供給は水素製造やガスタービン発電の他にも、石炭のガス化・液化(CTL)、天然ガスからの軽油製造(GTL)など、化石燃料改質にも利用することが出来るため、エネルギーの多様な利用を可能とする。

以上に述べたように、高温ガス炉は、軽水炉、高速炉にはない特長があり、かつ、高温ガス炉の基本的な炉システムはほぼ開発済みであるため、本格的に取り組むことができれば早期実用化も夢でなく、前述の世界規模の諸課題への有力な解決策の一つとなり得る。

我が国はこれまで、原子力熱利用開発や高温工学試験研究炉(HTR)開発を中心に当該炉の開発を続け、技術は世界の最先端にある。現在その実用化計画が漸く国に位置付けられた状況でその時期をいつ頃にするかまでは、明確には謳われていない。一方、米国、欧州、中国などの主要国は、軽水炉、高速炉と同様に国策として、2020～2030年頃に「高温ガス炉」の実用化を目指して開発を進めており、その実現のために日本にも協力を要請しているのが現状である。

我が国はそれらの国々からの要請に協力しながら、今後も研究・開発を緩めることなく、エネルギー、地球環境、経済および技術戦略の一環として推進し、技術の維持、発展に向けて取り組み、世界のトップランナーを維持しながら世界に貢献することを期待したい。

第1章に関連する図表

図表頁

図 1-1 温室効果ガス削減目標 (2008年1月現在)	2
図 1-2 主要国の「次世代炉」開発戦略一覧	3

第2章 我が国における高温ガス炉実用化・導入の意義

2.1 高温ガス炉が持つ多様な利用性

2.1.1 高温性からくる多様な利用性

高温ガス炉は高温の熱が供給可能なことから、産業用、運輸用、民生用において、発電はもとより、高～中～低温における幅広い熱利用が可能である。

(1) 高温 (700～950℃、将来目標は1000℃以上)

発電 (多様、高効率) (150～300MWe/モジュール)

- ①150～600～1,000～1,500MWe/プラントの多様な出力を構成できる。
- ②ガスタービン発電、ガスタービン/蒸気タービン複合発電、石炭ガス化発電、水素燃焼発電など、多様な発電方法が選択できる。

熱利用 (多様、化石燃料・再生可能エネルギーとの協働、クリーンエネルギー)

- ①水素製造 (多量、高効率) : 燃料 (発電、航空、船舶)、燃料電池 (自動車、定置型)、水素還元製鉄。
- ②重油改質、石炭液化 (CTL)、オイルサンド改質、天然ガス改質、バイオ改質・ (ガソリン代替燃料製造)。

(2) 中温 (600℃程度) ～低温 (100～300℃程度)

発電、熱利用

- ①蒸気タービン発電
- ②地域熱供給 (冷・暖房、融雪)
- ③海水淡水化

2.1.2 固有の安全性からくる多様な利用性

高温ガス炉の炉心は、下記の耐熱材料、耐食材料で構成されており、炉心の大半が熱容量の大きい黒鉛材料で構成されているために、熱応答も緩慢である。また反応度温度係数も負のために炉心溶融までの温度上昇に至らず、「固有の安全性」を有した極めて安全な原子炉である。

- ・燃料 (燃料核 (UO₂、PuO₂、ThC など)、被覆 (SiC、C))、減速材、炉内構造材 (黒鉛 (C))、冷却材 (He ガス) など

特に1980年代後半以降に開発されてきた「小型モジュール型高温ガス炉」は、前記を満たすために、次の設計を採用している。

① 炉心出力密度を極めて低く抑制した設計

- ・モジュール型高温ガス炉：3～6W/cm³（比較：軽水炉（PWR）：約90W/cm³）

② 冷却材喪失などの過酷な事故条件下においても、炉心燃料は破損や溶融に至る温度には、到達しない設計

既に、これらの安全性は先行試験炉など（独国、米国、日本、中国）で実証済みである。

上記の「固有の安全性」を持つ極めて安全な原子炉により、多様な利用の可能性を秘め、需要地近接や途上国、資源国への大量設置が可能である。

需要地近接(発電)

- ・遠隔地立地に比べて、送電による損失（電力、コスト）が低減できる。

需要地近接(熱利用)

- ・需要地近接はむしろ必須条件。各種原子力熱利用が、需要地近辺で実現できる。

途上国、資源国での設置(小型炉利用)

- ・原子力を地球規模で、多様に利用することが可能となる。特に電力網が整備されておらず小型炉を必要とする途上国、および石炭、天然ガス、オイルサンド、ウランなどを大量に埋蔵している資源国には適している。

第 2 章 2.1 高温ガス炉が持つ多様な利用性	に関連する図表	図表頁
図 2-1-1	我が国温室効果ガス排出量	4
図 2-1-2	各種原子炉と熱利用	5
図 2-1-3	高温ガス炉による運輸用エネルギー供給（可能性）	6
図 2-1-4	高温ガス炉による発電（直接サイクル）	7
図 2-1-5	モジュール建屋断面（南アフリカ PBMR）	8
図 2-1-6	マルチモジュールプラント構成（南アフリカ PBMR）	9
図 2-1-7-1	各種熱利用向け高温ガス炉プラント設計(1/2)	10
図 2-1-7-2	各種熱利用向け高温ガス炉プラント設計(2/2)	11
図 2-1-8	原子炉による水素製造(ヨウ素・硫黄(IS)法の例).....	12
図 2-1-9	なぜ水素製造に高温ガス炉を用いるのか.....	13
図 2-1-10	水素の利用（水素燃料自動車、航空機等の例）	14
図 2-1-11	1970 年代の日本における原子力製鉄概念	15
図 2-1-12	高温ガス炉による石炭ガス化	16
図 2-1-13	高温ガス炉による天然ガス改質(メタノール製造).....	17
図 2-1-14	高温ガス炉によるバイオから合成燃料製造	18
図 2-1-15	原子力による重油改質（合成燃料製造）	19
図 2-1-16	原子力プロセス熱の商業利用（重水製造、海水淡水化など）	20
図 2-1-17	負荷変動に対応した高温ガス炉システム(1/2).....	21
図 2-1-18	負荷変動に対応した高温ガス炉システム(2/2)	22
図 2-1-19	高温ガス炉による発電、水素製造、高温熱利用、Pu 燃焼	23

2.2 高温ガス炉開発の国際性—エネルギーセキュリティと地球環境への貢献—

2.2.1 高温ガス炉開発の意義

米国、仏国、南アフリカ、中国などは、現在、軽水炉や高速炉(南アフリカを除く)に高温ガス炉を加えた開発路線を採用しているが、それは下記に示す意義を高温ガス炉に見出しているからである。

(1) エネルギー総合利用効率の大幅向上

軽水炉や Na 高速炉による発電の場合には、熱利用効率は 33～35%(軽水炉)、40%(Na 高速炉)であるが、高温ガス炉の場合には、ガスタービン発電では、50%弱の効率を達成でき、さらに水素製造などの高温熱利用の他、低温熱を地域暖房や海水淡水化などに幅広く利用すると、70～80%以上となり、大幅に熱効率を向上させることができる。

(2) 炉型の多様化、充実化、エネルギーセキュリティの強靱化

発電だけでなく高温熱利用が可能であるということは、水素エネルギー社会への対応や化石燃料枯渇への対応が可能となるということである。我が国の現在の炉型開発戦略は、「軽水炉」→「高速炉」開発路線であるが、そこに高温ガス炉を加えることにより、原子力の熱利用への拡大が可能になり、地球環境対策として発電分野に加え、熱利用の分野でも大きく貢献することができる。

(3) 水素エネルギー/クリーンエネルギー社会への貢献、化石燃料との協働

高温ガス炉は大量かつ高効率の水素製造が得意であり、水素エネルギー社会への対応がスムーズで効率的である。また、石炭は資源量が膨大(産出国：米国、南アフリカ、中国、印度、豪州など)だが、当該炉の高温熱を使用すれば、温暖化効果ガス放出を低減化しつつ、ガス化/液化(CTL)(ガソリン代替燃料の製造)が可能であり、エネルギーセキュリティ、地球環境対策に大きく貢献できる。南アフリカ、米国(WH)などは既にその検討に取り組み始めている。

2.2.2 主要国における高温ガス炉、原子力水素製造への国家主導的な開発取組み

高温ガス炉を中心とする原子炉を用いた水素製造に対して、諸外国では以下のような国家主導的な開発が行われている。

(1) 米国：エネルギー省(DOE)

- ・次世代炉プラント(NGNP)プログラム(電力・水素併給炉プラント実証プログラム)
(アイダホプログラム)

- ・原子力水素開発イニシアティブ (NHI)
- (2) 欧州：欧州共同体 (EU)
 - ・高温ガス炉開発ネットワーク (HTR-T)
 - ・水素/天然ガス混合ガスパイプライン・ネットワーク (NATURALHY)
- (3) 仏国：原子力庁 (CEA)、国営メーカー (AREVA)
 - ・エネルギー供給用新型ガス冷却炉技術開発 (ANTARES) プログラム
- (4) 南アフリカ：鉱物エネルギー省 (DME)、国営電力 (ESKOM)
 - ・ペブルベッド型モジュール高温ガス炉 (PBMR) 開発プログラム
 - ・プロセス熱利用 PBMR (PHP) プログラム
- (5) 中国：国営電力 (華能集団)、国立大学 (清華大)
 - ・ペブルベッド型モジュール高温ガス炉 (発電用) (HTR-PM) プログラム
- (6) 韓国：国立原子力研究所 (KAERI)、国立技術研究所 (KAIST)
 - ・原子力水素開発・実証 (NHDD) プログラム

2.2.3 国際共同開発プログラム

高温ガス炉を巡っては、国際共同開発プログラムである「第4世代炉 (Gen.IV) 開発国際フォーラム (GIF)」において取り上げられ、米国・仏国・日本が共同議長となって開発を推進している。

- 目的
 - 2030年までに実用化できる次世代炉「第4世代炉」を国際協力で開発
- 参加国
 - 米国 (リーダー)、仏国、日本、中国、欧州 (EU)、韓国、南アフリカ他
- 「第4世代炉」要件
 - (基本) 安全性、経済性、持続性、核不拡散性、核物質防護性
 - (追加) 水素製造性、海水淡水化性
- 炉型 (現在、下記の6炉型が、開発検討対象として絞込まれている)
 - ① 超高温ガス炉 (VHTR) (高温ガス炉 (HTGR) をより高温化した炉)
 - ・米国、仏国、日本が共同議長となって開発推進中
 - ② ナトリウム冷却高速炉 (SFR)

- ③ ガス冷却高速炉（GFR）
- ④ 鉛冷却高速炉（LFR）
- ⑤ 超臨界圧軽水炉（SCWR）
- ⑥ 熔融塩炉（MSR）

2.2.4 途上国、資源国の動向

高温ガス炉は以下のように資源を持つ国や途上国にも注目されている。

■ 南アフリカ

- 石炭、ウラン、希少金属等が豊富
- 高温ガス炉実用化開発中（PBMR プロジェクト）（狙い：発電、石炭ガス化・液化等）

■ 中国

- 石炭、希少金属等が豊富
- 高温ガス炉実用化開発中（HTR-PM プロジェクト）（狙い：発電、石炭ガス化・液化、水素製造等）

■ 印度

- 石炭、鉄鉱石、トリウム等が豊富
- 高温炉（酸化ベリリウム減速、鉛冷却炉）研究開発中（CHR）（狙い：発電、石炭ガス化・液化、水素製造等； 石炭、トリウムの活用）

■ カザフスタン

- 石炭、天然ガス、鉄鉱石、ウラン等が豊富
- 高温ガス炉（プラント、技術）に興味（狙い： 小型原子炉、地域熱供給； ウラン等、資源輸出の代償としてエネルギー関連技術の入手、産業基盤確立等）

■ その他（インドネシア、トルコ、リビア、メキシコ、アルゼンチン、ブラジル、・・・）

- 高温ガス炉他に興味（狙い：発電、地域熱供給、資源採掘、海水脱塩、・・・）

第2章 2.2 高温ガス炉開発の国際性 に関連する図表

図表頁

図 2-2-1 主要国の高温ガス炉開発スケジュール	24
図 2-2-2 高温ガス炉の次世代炉要件適合性(1/2)	25
図 2-2-3 高温ガス炉の次世代炉要件適合性(2/2)	26

2.3 国家プロジェクトとして的高温ガス炉開発

我が国は長年に亘り高温ガス炉開発に力を入れてきた結果、技術開発で世界をリードする状況となった。現在までに投入してきたリソースを無駄にしないためにも、アドバンテージを活かしつつ、当初の目的を達成するために、実用化に向けた国の継続的な開発が望まれる。

2.3.1 開発開始当初の目的

我が国は日本原子力研究開発機構（旧原研）を主体として、1970年代以降長年に亘り、「エネルギー供給構造の改革」の一環として「原子力多目的利用（発電と熱利用）」に取り組んできた。

- 原子力多目的利用の一環として、原子力製鉄の検討
- 高温工学試験研究炉（HTTR）の設計、建設、運転、安全性実証、枢要技術の開発（枢要技術）
 - 被覆粒子燃料、高温機器、耐熱合金、高品質黒鉛、ヘリウムガスタービン、原子力水素製造

2.3.2 高温ガス炉開発への産業界の参画

産業界は国と同様に、原子力の熱利用可能性につき、長年追求している。原子力メーカーや電力をはじめとする産業界は HTTR プロジェクトへの参加、協力を通じて高温ガス炉の開発に加わると同時に、1969年に発足した「原子炉熱利用懇談会」を引き継いだ「高温ガス炉将来展開検討会（現 原子力熱利用検討会）」（機関：原産協会）、「高温ガス炉プラント研究会」（機関：エネ総研）などの場で実用化に向けた様々な調査検討を行ってきた。

今後も実用化に向け、理解促進活動をはじめとした推進活動を行い原子力の熱利用の可能性を追求していくことが重要である。

2.3.3 技術開発リーダーシップの維持と技術継承

我が国は、1970年代より巨額を投じて着実な研究開発を行ってきた結果として、高温ガス炉システムの枢要技術開発において現在、世界の最先端にいる。近年は原油高や地球温暖化問題対策の選択肢の一つである水素社会への期待も手伝い、世界中の幾つかの国では、国が主体となって高温ガス炉実用化の開発が進められている。先端的技術開発の継続は次世代への技術継承の観点からも重要であるため、今後も一貫性ある、積極的、継続的、国家戦略的な取り組みが必要である。

2.4 早期開発の必要性

2.4.1 早期実現性と更なる発展性

高温ガス炉は本格的な取組みを行えば、既に大半の課題が解決しているために早期の実現も夢でなく、また将来的に超高温ガス炉やガス冷却高速炉等の次世代炉への発展性の可能性を持っている。

- 高温ガス炉 (HTGR) : 750~950℃
 - 南アフリカ、中国 : 2015~2020年頃に実機プラント実証、実用化開始 (発電)
- 超高温ガス炉 (VHTR) : 950~1,000℃以上
 - 米国、仏国 : 2020~2025年頃に実機プラント実証 (発電/水素併給)
- 高速炉 (増殖炉、超ウラン元素 (TRU) 燃焼炉) へ繋ぐことが可能
 - ガス冷却高速炉 (GFR)、超高燃焼度型高温ガス炉 (Deep Burn HTGR)、・・・

2.4.2 世界的な潜在需要と輸出の可能性

高温ガス炉は様々な業種に応用が可能であること、設計を工夫することで固有の安全性を達成することが可能であることから、先進国はもとより途上国も含めた世界的な潜在需要が想定され、将来の輸出産業としても期待することができる。

(1) 用途別想定需要

- 電力：ガスタービン発電、蒸気タービン発電、複合発電、石炭ガス化発電、・・・
- 水素製造：水素燃料 (航空機、船舶、・・・)、燃料電池 (燃料電池自動車、定置型燃料電池)、水素還元製鉄、エチレン製造、肥料 (アンモニア) 製造、・・・
- 熱、蒸気、発電/熱併給 (コージェネ)：
 - 電力/蒸気/水素/酸素などの供給 (製鉄、コンビナート、・・・)
 - 石炭改質 (ガス化、液化)、オイルサンド改質、重油改質
 - 地域熱供給、融雪、海水淡水化 (飲料用、工業用、農業用) など

(2) 国、地域別想定需要

- 日本：電力/水素/蒸気供給 (燃料電池自動車、コンビナート、製鉄、水素タウンなど)
- 北米、欧州、ロシア：電力/水素 (航空機、燃料電池自動車など)、石炭改質、重油改質、オイルサンド回収・改質、海水淡水化、兵器解体 Pu 燃焼処理、・・・
- 南アフリカ、中国 (当面 20~30 基、その後さらに多数基設置 (国内)、数 100 基 (海外輸出向け) など) : 電力、石炭改質、水素製造、・・・、海水淡水化

- 途上国（アジア、アフリカ、地中海沿岸国、南米）：電力、地域熱供給、海水淡水化

(3) 業界別想定需要

- 国家：電力、熱供給、海水淡水化、石炭改質、・・・
- 地方自治体：電力、熱、水素供給、地場産業定着化、地域経済活性化、・・・
- 電力、ガス：電力、複合発電、水素供給、熱供給、原子炉運転ビジネス、・・・
- 鉄鋼：水素還元製鉄、水素供給パイプライン
- 自動車、電池：水素、電池（燃料電池自動車）
- 肥料、化学：アンモニア、エチレン、・・・
- エンジ、建設、商社他：設計ビジネス、技術・プラント・機器輸出ビジネス、・・・
- 研究機関：高度技術開発、新規システム提案、・・・

(4) 我が国における潜在的需要想定例（目的、概念、需要量、需要地）

- 燃料電池自動車
 - 水素 ⇒ 燃料電池（FC） ⇒ 燃料電池自動車（FCV）
 - 高温ガス炉（600MWt/基、稼働率85%） ⇒ FCV～70万台/年に水素供給
 - 日本全体 ⇒ 60～100基（1,000MWeの大型軽水炉12～20基相当）
 - （世界 ⇒ ～3,500基（1,000MWeの大型軽水炉～700基相当））
- 水素タウン
 - 地域におけるエネルギー的独立、環境に優しいエネルギー確保、地場産業育成
 - （太陽熱、風力、地熱、バイオ）、原子力 ⇒ 大量水素製造 ⇒ 地域に水素供給
 - 青森(むつ小川原水素タウン構想)、茨城(大洗水素タウン構想)、山口(周南水素タウン構想)、島根、熊本、・・・
- エコ・コンビナート
 - 目的、概念：コンビナート内の老朽石炭火力（石炭火力による代替は環境規制強化で困難）⇒ 高温ガス炉で代替 ⇒ 電力、熱、蒸気、水素、酸素等を製造、供給
 - 茨城、京浜・京葉、中部、関西、瀬戸内、山口・北九州・・・
- 水素還元製鉄
 - 高温ガス炉で還元材（CO+H₂又はH₂）を製造 ⇒ 鉄鉱石を還元 ⇒ 鉄鋼生産
 - 高温ガス炉（600MWt/基）が日本全体で30～90基、米国～30基、中国～120基必要

第2章 2.4 早期開発の必要性 に関連する図表	図表頁
図 2-4-1 いつごろ、どれくらいの水素が必要か?	27
図 2-4-2 我が国の水素タウン・エコタウン構想(例)	28
図 2-4-3 ボーダレス・エネルギーフロンティア、水素タウン(構想例)(青森県).....	29

第3章 高温ガス炉導入による温室効果ガス削減効果

主要国はハイリゲンダムサミット（2007年6月、独国）において、「温暖化効果ガスを2050年までに世界で半減」を共同宣言として採択した。また同会議で我が国首相は、「温暖化効果ガスを2050年までに世界で半減」を提案し、そのためには「革新技術」の開発が必要とし、高温ガス炉、小型炉、次世代自動車、還元法製鉄などの技術開発を例示した。

そこで、「高温ガス炉将来展開検討会（現 原子力熱利用検討会）」（主査：関本博 東京工業大学教授）において、高温ガス炉の導入による温暖化効果ガス削減効果についておおまかな検討を行った。ここでは、小型モジュール型高温ガス炉プラントを多量に導入し「水素製造」を行った場合を例にとり、幾つかのモデルケースにつき、幾つかの前提条件下で、2050年時点の削減率を試算し評価した。

- 適用モデル（高温ガス炉 ⇒ 水素製造 ⇒ 燃料電池自動車、水素還元製鉄）
 - 燃料電池自動車（国内、並びに国外）、水素還元製鉄（国内、並びに国外）
- 前提条件
 - 需要量（燃料電池自動車導入に関する国の想定シナリオ等をベース）
 - 高温ガス炉導入規模（考えられる最大値、並びにある程度現実的な目安値）

その結果、前提条件等に大きく依存するが、高温ガス炉による「水素製造」により、CO₂が、現在の日本や世界の総排出量に対し10%前後削減することができる（図3参照）。これらから、高温ガス炉による「各種発電」や「水素製造以外の各種熱利用」も含めると、さらに大きな削減効果が期待できると言える。

次年度以降に、各種熱利用について調査解析し総合的なCO₂低減効果を検討する予定である。

第3章 高温ガス炉導入による温室効果ガス削減効果 に関連する図表

図表頁

図3 高温ガス炉導入による温室効果ガス削減効果.....	30
------------------------------	----

第4章 我が国の高温ガス炉実用化戦略（案）

以下に、「我が国の高温ガス炉実用化戦略」についての骨子を示す。具体的な展開は、次年度以降に検討する。

4.1 戦略骨子

- 我が国の国家戦略
 - 技術立国、輸出立国、経済立国、環境立国、国際貢献
 - 資源（石油、ウラン、鉄鉱石、工業用希少金属、食料・・・）入手・確保
- 手順：
 - 国が高温ガス炉を評価し、その実用化を国家総合戦略計画に組み入れ
 - 産、官、学がこれに参加・協力・分担して、実施展開
 - 我が国単独で、あるいは海外と協力して、早期実用化、国際展開

4.2 我が国における導入シナリオ

- 最初は、下記例のように、国内の局所で導入して、実証
 - 水素タウン、エコ・コンビナート、燃料電池自動車
- 次いで、インフラを整備しながら、徐々に全国～国際展開

4.3 実用化ロードマップ

- 既存の高温工学試験研究炉（HTTR）を用いて、下記を実施
 - 安全性実証、高度化技術開発、HTTR-水素製造施設（IS法）連結実証
- 並行して、実用プラントを設計、許認可、設計認証
- 実証炉・実用1号炉の展開
 - 2030年頃運開、ただし地球温暖化対策の選択肢としての重要性が認識されれば、国際協力等により2020年代への前倒しが考えられる。
- 実用炉（発電並びに各種熱利用向け）の展開
 - 2040年頃以降、順次運開、ただし上記同様2030年代への前倒しが考えられる。

第4章 我が国の高温ガス炉実用化戦略（案）に関連する図表 図表頁

図4-1 日本エネルギー・環境・原子力開発戦略の望ましい姿（イメージ）	31
図4-2 我が国が必要とする各種資源と資源国	32
図4-3 我が国の高温ガス炉実用化ロードマップ	33

第5章 高温ガス炉実用化への課題

高温ガス炉の実用化に向けた課題は、短期～中期～長期を含め、下記の通りである。

5.1 高温ガス炉プラント（発電、熱利用）の実証

- ヘリウムガスタービン実証、熱交換器、熱利用（水素製造、石炭ガス化等）実証
- 燃料サイクルシナリオの確立
- 使用済み黒鉛の処理・処分法の確立
- 技術基準・安全基準の確立、米国原子力規制委（NRC）の設計認証（DC）取得

5.2 原子力水素製造技術の開発、実証、インフラ整備

- 水素製造施設と原子炉のシステム統合、実証
- 水素利用インフラ（製造、輸送、貯蔵、利用）の整備

5.3 開発推進体制の確立、開発費用の調達、市場の開拓

- 国家エネ計画（エネ基本計画、原子力政策大綱・・・）での明確な位置付け
- 実用化開発ロードマップの策定
- 国際的技術開発リード、国際協力・分担開発、
- 市場開拓（水素利用、各種熱利用）

5.4 関連資源の確保

- ウラン（U）（探鉱、海水ウラン回収技術の実用化）
- ヘリウム（He）（含有天然ガスの確保）
- トリウム（Th）

第5章 高温ガス炉実用化への課題 に関連する図表

図表頁

図5 各種熱交換器.....	34
----------------	----

第6章 まとめ

資源の大半を他国に依存している我が国では、熱利用分野への原子力の利用拡大を図ることによって、準国産エネルギーを増やし、エネルギーの安定確保を図ることやそこで培った技術を輸出立国として、他国に供給して経済の活性化を図ること、および地球温暖化防止への国際貢献に繋げることができる。すなわち、我が国がこの高温ガス炉を国家戦略の一環として実用化開発すれば、その技術で国際協力に貢献することができる。

官、産、学が下記を着実に進めることにより、高温ガス炉の実用化開発は着実に進展し、2050年には実用炉が日本の手で世界に建設されており、世界を先導しているであろう。

- 官（政府、原子力委、官庁、国立研究所）
 - 国家エネルギー・環境・経済総合評価の実施、国家戦略・計画への組入れ
 - プラント実証、実用化推進策（制度的、財政的手当、潜在ユーザーのガイド）
- 産（電力、熱利用企業、自動車、鉄鋼、化学、・・・）
 - 原子力拡大利用（各種発電と熱利用）の具体ニーズ提示やプロジェクト提案
 - 国家プロジェクトへの参加、協力、内・外での実用化推進
- 学（大学、研究所、学会、・・・）
 - 高度化研究、アイデアの提供、理解・広報・教育活動

第6章 まとめ に関連する図表

図表頁

図6 高温ガス炉の実用化（まとめ）	35
-------------------------	----