

原子炉熱利用に関する将来展開検討会

高温ガス炉の実用化開発に関する提言

—来るべき水素エネルギー社会への原子力の貢献に向けて—

2004年5月

日本原子力産業会議

目次

高温ガス炉の実用化開発に関する提言	1
1. 提言の背景	2
1) 高温ガス炉開発の国際的位置付け --- 発電と水素製造 ---	2
2) 我が国における高温ガス炉開発の状況と問題点への取組み	2
2. 提言の具体的内容	3
ステップ1	3
(評価の視点および項目)	3
(1) エネルギーセキュリティ上の意義	3
(2) 輸出産業戦略的な意義	4
(3) 地球環境負荷低減への意義	4
(4) 次世代、若い世代への意義	4
(5) 核拡散抵抗性への意義	4
ステップ2	4
ステップ3	4
(蓄積すべきデータ)	5
(1) 高燃焼度燃料・黒鉛材料照射データベースの構築・拡充、経験蓄積	5
(2) 再処理・リサイクル技術、廃棄物技術の検討・開発	5
(実用化技術の開発・実証すべき項目)	5
(1) 高温ガス炉実用化技術の開発・実証	5
(2) ガスタービン発電システムの総合実証	5
(3) 既に原研で開始されている水素製造技術の開発実証	5
ステップ4	5
<添付資料>	6
1) 世界のエネルギー状況、課題	6
2) 原子力開発の維持・拡大の必要性	6
3) 革新的中小型炉の開発	6
4) 一連の高温ガス炉の開発	7
5) 原産「原子炉熱利用に関する将来展開検討会」での高温ガス炉検討	9
6) 炉開発や原子力水素製造開発における「国」との係わり方	9
【1990年代以降の高温ガス炉開発状況】	10
【原子力水素製造開発状況】	10
<補足説明資料>	11
委員名簿	12

高温ガス炉の実用化開発に関する提言

日本原子力産業会議（原産）は、原子力利用において、発電と共に熱エネルギー供給の将来性に着目して、高温ガス炉の有する可能性を評価するとともに、その実用化に向けた検討を目的に「原子炉熱利用に関する将来展開検討会」（以下、本検討会）を設置し、関係者による検討審議を実施してきました。

本検討会では、高温ガス炉に関わる近年の諸外国の動向、高温工学試験研究炉を中心とした我が国における研究開発の具体的な進展等を踏まえた検討を行い審議しました。その結果、来るべき水素エネルギー社会における原子力の貢献を目指す中で、高効率発電および水素製造に適した高温ガス炉が我が国で実用化すべき炉として非常に優れたポテンシャルを有することが分かりました。産業界としても、将来に向けて着実にその開発に参加していきたいと考えます。そこで、今後の実用化に向けた具体的な展開を緊急に進めるために、次の提言を国に行います。

提言

提言Ⅰ

国は、原子力長計策定に当たり、原子力委員会研究開発専門部会に新たな検討会を設置して、高温ガス炉の実用化に対する総合戦略的評価を緊急に実施すべきである。

提言Ⅱ

国は、我が国のエネルギー開発計画における高温ガス炉の位置付けを明確化すると共に具体的な実用化開発計画を作成すべきである。

産業界は、**提言Ⅰ** のための検討会では、緊急に評価ができるようこれまでの検討結果を提供します。**提言Ⅱ** においては、具体的な実用化開発計画の作成に全面的に参加します。

以下に、「1. 提言の背景」、「2. 提言の具体的内容」を、添付資料には、背景の詳細を示します。

1. 提言の背景

1) 高温ガス炉開発の国際的位置付け ---- 発電と水素製造 ----

現在、アジア等の開発途上国における人口の急増と生活レベルの向上から、エネルギーの大規模開発と地球環境の保全が急務となっている。

そこで、大規模、持続的、かつ環境負荷が極めて小さいクリーンなエネルギー供給源として「原子力」の開発の必要性が再認識され始めている。

中でも、多様なニーズへの適合性、需要への対応の柔軟性などの観点から、大型軽水炉に加えて「中小型炉」が着目され、現在、革新的な炉概念や燃料サイクルが多数提案されている。

これらの中で、「発電」に加え、自動車や家庭用定置型等の燃料電池向けに大量の消費が予想されている「水素」の大規模かつ高効率の生産性から、「高温ガス炉 (HTGR)」(その発展型である「超高温ガス炉 (VHTR)」を含む) への期待が特に高い。

この高温ガス炉については、1990年代後半以降、南ア、米国・露国、中国などが、小型モジュール高温ガス炉の実用化開発を推進している。米国は2002年に主要国参加型の「第4世代炉プログラム」を発足させ、革新炉の中で幾つかの有望な概念に絞り込み、それらを今後、並行的、国際的に開発推進しようとしている。その米国自身は昨年、国内のエネルギー展開戦略として、「発電と水素製造のできる次世代原子力プラント」(実質的に超高温ガス炉ベース)を最優先の開発対象に定め、2010年代前半にも実現すべくアイダホ実証炉建設計画をエネルギー法案の形で提案している。また仏国は既にガス炉開発路線を採っており、欧州連合(EU)も高温ガス炉の開発を進めている。

なお、これらの開発プロジェクトは、「国主導」で進められている。

2) 我が国における高温ガス炉開発の状況と問題点への取組み

このようにエネルギー開発競争において高い潜在的ポテンシャルを有する高温ガス炉と水素製造システムについて、我が国は、これまで、原研の高温工学試験研究炉(HTR)の建設・運転を中心に同炉の基盤・システム研究を行い、炉技術、および枢要技術(被覆粒子燃料、高性能黒鉛材料、ヘリウムガスタービン、原子力水素製造等)について、産業の高度技術力を背景に、世界をリードしている。加えて、メーカーは独自に実用化に必要な技術開発を進め、その実用化への活用の道を求めて海外プロジェクトに部分的な技術提供の形で協力してきている。

しかしながら、この高温ガス炉の今後の本格的な「実用化」に向けて、我が国は、現状、「国」としてエネルギー基本計画や原子力長計で明確な位置付けや具体計画が示されておらず、産業界も開発の意志はあってもリスクが大きく取組みには限界がある。このままでは、これまで築いてきた貴重な技術は、海外に流出し、日本の技術的優位性の維持は困難な状況になる。

この状況を打開するためには、高温ガス炉について、緊急に、エネルギーセキュリティ、

地球環境、エネルギー産業戦略などの視点から、我が国における原子力政策への整合性を検討し、さらに他の炉システム・エネルギーとの比較優位性、我が国の技術優位性等の総合戦略的評価を実施する必要がある。その評価の結果、高温ガス炉の実用化開発を推進すべしとの結論が得られた場合には、国のエネルギー政策に明確に位置付け、実用化開発計画を進める必要がある。そして、経済性を含む技術実証がなされた後には、産業界が主体となって、エネルギーオプションの拡大、技術力拡充、事業拡大・発展等に向けて積極的に取り組むことにより、国際優位性を維持することができる。

来るべき水素エネルギー社会において、原子力による水素製造技術は、燃料電池などで化石燃料の代替機能を有するために、中近東から大半を輸入している石油を軽減させることができ、わが国のエネルギーセキュリティに果たす役割が極めて大きいこと、また、新型炉の実用化は市場性を含め開発リスクが大きいことから、経済性を含む技術実証までは国主導で進める必要がある。

2. 提言の具体的内容

「高温ガス炉」の評価、位置付けの明確化、実用化開発については、各ステップにおけるチェック・アンド・レビューを実施しつつ、以下に示す4つのステップにより推進する必要がある。ここでは、国の政策決定のために至急実施しなければならないステップ1、2について提言している。

ステップ1、2において、高温ガス炉の実用化開発が国策として位置付けられた後には、ステップ3に示す国主導、産、学参加による実用化のための実証炉建設に進み、その結果、技術的、経済的に実用化が実証され、かつその時のエネルギーを取り巻く環境が、実用炉建設の状況にあると判断された場合には、ステップ4に示す産業界主体の実用炉建設に取りかかる。

ステップ1

提言1 (国は、原子力長計策定に当たり、原子力委員会研究開発専門部会に新たな検討会を設置して、高温ガス炉の実用化に対する総合戦略的評価を緊急に実施すべきである。)に示す内容について、次の評価の視点、項目に基づいて、国主導のもとで、産、学が参加して至急実施する必要がある。評価のやり方としては、他の原子力エネルギーを含む各種エネルギーとの総合比較評価が、相応しいと考えている。なお、技術成立性、経済性、安全性、運転性については、原研において、既に検討、試験等を始めている。

(評価の視点および項目)

(1) エネルギーセキュリティ上の意義

(評価項目)

- ① エネルギー供給方法として、従来の電力に加えて高温～低温の幅広い核熱

利用、および持続性、安定生産性について

② エネルギー源としての「水素」の大量、安定、持続的入手について

③ エネルギー基本計画や原子力政策との整合性について

(燃料サイクルの技術・経済的可能性、現行の軽水炉→高速炉路線との整合性、共存性、柔軟性)

(2) 輸出産業戦略的な意義

(評価項目)

① 国際市場性、輸出性、産業・経済の発展性および活性化性について

(先進国+途上国(特にアジア)の潜在的巨大市場性、輸出性、国際協力、新規産業の創出、産業の活性化)

② 我が国の国際的技術優位性、開発リーダーシップの堅持について

(炉システム、燃料、黒鉛、ガスタービン、原子力水素製造の技術)

(3) 地球環境負荷低減への意義

(評価項目)

① 電気社会、水素社会(水素自動車、家庭用定置型電池の普及)について

(4) 次世代、若い世代への意義

(評価項目)

① 新規性、長期に亘る技術革新機会等の提供による夢の提供について

(水素関連技術、高温ガス炉→超高温ガス炉)

(5) 核拡散抵抗性への意義

(評価項目)

① 核燃料物質の盗取性について

② 核兵器用燃料製作の困難性について

ステップ2

提言Ⅱ (国は、我が国のエネルギー開発計画における高温ガス炉の位置付けを明確化すると共に具体的な実用化開発計画を作成すべきである。)に示すようにステップ1の結果を受けて、エネルギー基本計画、原子力長計での高温ガス炉の位置付けを明確化し、国主導の基で、産・学が参加して、実用化の基本計画策定、手順、スケジュール、海外との協力分担ならびに官・学・産の役割分担を明示した開発ロードマップの作成を実施する必要がある。

ステップ3

高温ガス炉の実用化開発計画を作成した後は、経済性を含む技術実証に移行し、以後、チェック&レビューにより適宜計画を見直しながら実証炉プラントの建設、運転に、国主導のもと、産、学が参加して実施する考えである。但し、海外との協力・分担を視野に入れて国内での実証を想定する。このステップ3では、次のデータを蓄積するとともに、次の実用化技術の開発・実証を行う。

(蓄積すべきデータ)

- (1) 高燃焼度燃料・黒鉛材料照射データベースの構築・拡充、経験蓄積
(原研 HTTR の有効活用、高燃焼度、超高温用被覆粒子燃料の開発等)
- (2) 再処理・リサイクル技術、廃棄物技術の検討・開発

(実用化技術の開発・実証すべき項目)

- (1) 高温ガス炉実用化技術の開発・実証
(高燃焼度・出力密度向上・高温化)
- (2) ガスタービン発電システムの総合実証
(実証プラントを非核熱により試験する等の方法でも可能)
- (3) 既に原研で開始されている水素製造技術の開発実証
(製造プロセス実証、耐食材料の開発、炉側とのシステム連結等)

ステップ4

実証炉プラントの建設・運転により技術的、経済的に実用化が実証され、かつその時のエネルギーを取り巻く環境が、実用炉建設の状況にあると判断された場合には、産業界は、実用炉プラントの建設・運転を国内外市場に向けて実現させるべく活動する。

以上

<添付資料>

1) 世界のエネルギー状況、課題

<状況>

- (先進国) 需要の停滞、電力の自由化
- (開発途上国) 需要の急増 [人口急増、生活レベル大幅向上]
- (世界全体) 需要の急増、多種多様なニーズ・要件 [規模、形態<電力、熱>、供給網の有無、地政学等]

<課題>

エネルギー安定供給確保 (セキュリティ)、地球環境保全

2) 原子力開発の維持・拡大の必要性

- ・持続的 (大量かつ安定) かつクリーンなエネルギーの確保、開拓
- ・エネルギー資源の利用効率の向上、多様かつ柔軟なエネルギー供給
 - 燃料サイクル、燃料資源の増殖 (Pu 利用)
 - 発電と幅広い熱利用 (水素製造、熱供給、海水淡水化等)
 - 利用効率の向上 (発電効率、熱利用効率、等)
- ・自由化環境下での原子力の維持・拡大
- ・そのためには、従来型の大型軽水炉 (発電用) に加えて、経済性のある革新的中小型炉 (発電、水素製造、熱供給用) の実用化が望まれる

3) 革新的中小型炉の開発

- ・世界の多様かつ大規模なニーズへの対応性
 - 安全性 (固有の安全性、安心できる安全性)
 - 経済性 (投資リスク・供給コストの低減、需要地近接立地、計画～運開リードタイムの短縮、エネルギー利用効率の向上、等)
 - 熱利用性 (特に水素製造への適用性)
 - 核燃料サイクルの柔軟性
 - 社会的受容性、核不拡散性
- ・各種革新炉
 - 米国主導「第4世代炉国際プログラム」(GIF)において、参加国は今後の国際共同開発対象炉として計6概念 (超高温ガス炉 (VHTR)、液体金属冷却高速炉 (SFR, LFR)、ガス冷却高速増殖炉 (GFR)、等) を選定
 - (米国自身は、その後、超高温ガス炉を最優先開発対象として選定)
 - 大型軽水炉発電のみでは今後の世界の多様ニーズ対応に限界あり

4) 一連の高温ガス炉の開発

上記の各種革新的中小型炉のうち、高温ガス炉 (HTGR)、特に小型モジュール高温ガス炉、並びにそれをベースとして、より高温、高効率を目指す超高温ガス炉 (VHTR) は、以下に示す固有の特長を有しており、今後 2010 年代後半～2030 年代にかけて実用化すべき炉として、現在、国際的に高い評価を得ている。しかしながら、実用化のためには、R&Dなどにより、それらを実証していく必要がある。

○ユニークな特徴

一固有の安全性

(固有の特性による、原子炉停止・安定化、熱除去、放射能閉じ込め)

<確認すべき項目>

- ・高温工学試験研究炉 (HTTR) による、優れた固有の安全性の総合実証

一柔軟な燃料サイクル

(U、Puに加えて Th も利用可能、中間貯蔵が容易)

<確認すべき項目>

- ・燃料サイクル像 (LWR、FBR との共存) の構築

一水素製造等幅広い用途、国際市場性

(ガスタービン直接サイクルによる高効率発電、大量・高効率水素製造、プロセス化学、地域熱供給、海水淡水化等)

<確認すべき項目>

- ・水素製造技術 (熱化学分解法) の技術的成立性の検証・実証、He ガスタービン技術の実証

一経済性

(優れた固有の安全性、高い熱効率、マルチモジュール方式 (小 [分散型] ～中～大規模需要や近接立地にも適す)、小型化、設計標準化、燃料・機器の大量安定工場生産、現地工事最小化、等)

<確認すべき項目>

- ・実証炉 (発電、水素製造) による総合的な経済性実証

等々

○開発状況

—高温ガス炉；実験炉、原型・実証炉；1960～1980年代

- ・小型→中型→大型（1～30～100万kWe級）、780℃（最高）（注、AVRは950℃であるが、研究炉であり、熱を原子炉容器外には取り出していない。）、蒸気タービン発電。
- ・欧米で基本実証済み
- ・但し大型実用炉については、経済的成立性の目途がたたず、建設計画の段階でキャンセル

—小型モジュール高温ガス炉；（実証・実用1号炉）；1990年代～

- ・モジュール当り10～30万kWe級、850～950℃
- ・優れた固有の安全性による安全システム・機器の簡素化、モジュール化、高温化、ガスタービン発電の採用により経済的な課題を解決。
- ・建設準備中（南アPBMR、中HTR-PM）
（発電用）
（運開；2010年代前半の見込み）
- ・設計開発中（米・露GT-MHR、日GTHTTR-300）
（発電用、又は核兵器解体Pu燃焼用）

—高温ガス炉；試験研究炉；1990年代～

- ・各種実証・開発・運転中（日HTTR、中HTR-10）
（基本特性実証、革新的材料開発、水素製造技術開発）
- ・今後の高温ガス炉開発における、世界の中核施設（日HTTR）

—超高温ガス炉；実証炉；2000年代～

- ・モジュール当り10～30万kWe級、～1,000℃以上
- ・建設計画を具体化中（米国アイダホプログラム）
（熱電併給炉＝発電＋水素製造）

（米国は、第4世代炉プログラムにおいて、前出の6概念候補から、原子力、水素エネルギーの両開発戦略を合わせて、「超高温ガス炉」を当面、唯一の最優先開発対象炉と評価し、その実用化に向けた具体的開発プログラムを国主導（但し、米国産業と外国機関の参加・協力が前提）で準備中）

- ・運開；2012～2015年頃（見込み）

（参考1）：「ガス炉開発路線（高温ガス炉→超高温ガス炉→高温ガス冷却高速炉）」を既に打ち出している仏国等、欧州連合もこの米国の戦略方針に追従する構えを見せている

（参考2）：「水素経済社会」の実現に向けた国際的インフラ整備促進作業等も最近、米国主導で開始された

5) 原産「原子炉熱利用に関する将来展開検討会」での高温ガス炉検討

- ・1997年～；内外動向調査・評価、実用化シナリオ検討、PA活動
- ・2000年3月；国への要望
 - 「国主導の下で高温ガス炉の実用化に向けた可能性評価（FS）の実施、およびそれに基づく高温ガス炉システム総合評価の実施」
 - （この要望を受けて、その後、国（原研）による予備的FSが実施された。但し、技術性と経済性についてのみであり、エネルギーセキュリティ、燃料サイクル、近隣諸国の需要等を含む総合的な評価は未実施）
- ・2003年；高温ガス炉の我が国での実用化に関するアンケート調査
 - <下記の反応あり>
 - 「エネルギーセキュリティ」と「地球環境」の観点から、クリーンなエネルギーの電気および水素を製造、供給できる「高温の原子力プラント」の早期実現に大きく期待
 - 具体的には、「小型モジュール高温ガス炉（電気出力換算で10～30万kWe程度）」によるガスタービン発電と水素製造の2015～2030年頃の実用化を期待
 - 同炉の実用化については、現状、研究開発段階にある原子炉システムであることから、「国主導」でエネルギー基本計画への組み入れ、政策上の整合、並びに安全性、経済性の実証を図りつつ、徐々に「産業界主体」に移行させるのが望ましい

6) 炉開発や原子力水素製造開発における「国」との係わり方

- ・世界の原子炉や原子力水素製造の開発において、基礎開発は国または一部産業界が行うが、実証開発は例外なく「国ベース」（国立研究所、国営電力、国主導により産業界、または一部国際協力）で戦略的に実施

【1990年代以降の高温ガス炉開発状況】

(斜太字：国)

開発プログラム	推進機関	協力、参加
南ア PBMR (実証・実用1炉)	ESKOM (国営電力)	原燃工、三菱重工
米・露 GT-MHR (実証炉)	米 DOE 露 Minatom	富士電
米国アイダホ* (実証炉)	米 DOE	富士電、東芝、三菱重工
日本原研 HTTR (試験炉)	原研	三菱重工、富士電、日立、東芝、原燃工、東炭、他
日本原研 GTHTTR-300 (実証炉)	原研	三菱重工、富士電、原燃工他
日本原研 GTHTTR-300C (実証炉)	原研	富士電
中国 HTR-10 (試験炉)	国、清華大	東炭
中国 HTR-PM (実証・実用1炉)	国、清華大、国営電力	

*米国議会で本計画を含むエネルギー法案を審議中。

【原子力水素製造開発状況】

(斜太字：国)

開発プログラム	推進機関	協力、参加
HTTR 水素製造システム IS プロセス	文科省-原研	三菱重工、東芝、他
INERI IS プロセス (基礎開発)	米 GA、米 SNL、 仏 CEA	
原子力水素イニシアティブ 高温水蒸気電解 (基礎開発)	米 INEEL	
WH法 (基礎開発)	米 WH	

註) 協力、参加とは、個々の形態は異なるが、資金、設計、製造等の協力または参加をあらわす。

<補足説明資料>

1. 「(原産) 原子炉熱利用に関する将来展開検討会」参加者名簿
(2004年(平成16年)3月現在)
2. 原産「原子炉熱利用に関する将来展開検討会」による前回の提案
(「高温ガス炉の展望と実用化に向けて」; 2000年(平成12年)3月)
3. 日本における革新的中小型炉の必要性、緊急性
4. 実用化が期待される革新的中小型炉としての高温ガス炉の適合性
5. 高温ガス炉の我が国での実用化に関するアンケート調査結果
6. 内外開発動向(日本の産業界による協力・貢献状況も含める)
 - 1) 革新的中小型炉
 - 2) 高温ガス炉、超高温ガス炉
 - 3) 原子力水素製造
 - 4) 「米国における第4世代炉開発実施戦略(The US Generation IV Implementation Strategy), Sep. 2003」
7. その他
(必要に応じて追加)

原子炉熱利用に関する将来展開検討会

委員名簿

平成16年4月現在
(社)日本原子力産業会議

- 主査 関本 博 東京工業大学 教授
- 主査代理 小川 益郎 日本原子力研究所 大洗研究所 核熱利用研究部

電力会社

- 委員 吉井 良介 東京電力(株) 原子力技術部
- 麻生 雅美 東京電力(株) 原子力技術部
- 嶋田 雅樹 中部電力(株) 原子力部
- 穂村 政道 関西電力(株) 原子力事業本部プラント技術グループ
- 土江 保男 日本原子力発電(株) 研究開発室
- 肥田 隆彦 日本原子力発電(株) 研究開発室
- 井上 淳 電源開発(株)原子力事業部技術開発グループ
- 福村 章 電気事業連合会 原子力部

メーカー

- 委員 菅 憲夫 石川島播磨重工業(株) 原子力事業部 プラント設計部
- 丸山 茂樹 (株)東芝 電力システム社 礫子エンジニアリングセンター
原子力開発設計部
- 竹内 健一 (株)日立製作所 原子力事業部企画本部
サイクルプロジェクト部
- 早川 均 富士電機システムズ(株)発電プラント本部 原子力統括部
- 岡本 太志 富士電機システムズ(株)発電プラント本部 原子力統括部
- 皆月 功 三菱重工業(株) 原子力事業本部 原子力技術部
- 大久保和俊 原子燃料工業(株) 新型炉燃料部
- 平野 隆久 (社)日本電機工業会 原子力部
- 島邊賢一郎 (株)間組 原子力部
- 岡本 修平 清水建設(株) 電力エネルギー本部 原子力技術部

熱利用企業

- 委員 栗間 昭典 千代田化工建設(株) 電力・原子力プロジェクト部
- 松永 久義 新日本製鉄(株) 技術開発企画部

伊藤 純雄 トヨタ自動車(株) 東京技術部
藤原 章男 東京ガス(株) 企画調査室

商社

●委員 清水 良雄 双日(株) 原燃サイクル部

研究所

●委員 国富 一彦 日本原子力研究所 大洗研究所 核熱利用研究部
松井 一秋 (財)エネルギー総合工学研究所
湯浅 俊昭 (財)日本エネルギー経済研究所 総合研究炉部
魚谷 正樹 (財)電力中央研究所 研究企画グループ
吉田 晴彦 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 石炭事業部
宮本 喜晟 原子力研究バックエンド推進センター(RANDEC)

大学

●委員 山地 憲治 東京大学大学院 工学系研究科教授
●アドバイザー 鈴木 弘茂 東京工業大学 名誉教授

原産

●事務局 宅間 正夫 日本原子力産業会議
石塚 昶雄 日本原子力産業会議
西郷 正雄 日本原子力産業会議

以上