

「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」研究専門委員会最終報告：
高温ガス炉の安全性について

Final report of Research Committee on Safety Design Process for Prismatic HTGRs;
Safety of High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

(2) 高温ガス炉の安全上の特長と安全要件の概要

(2) Safety characteristics and safety requirements for HTGR

*大橋 弘史¹

¹原子力機構

1. はじめに

高温ガス炉は安全性に優れ、1000°C近い高温の核熱を水素製造やガスタービン発電等に利用できることから、第4世代原子炉のひとつとして世界各国で実用化に向けた研究開発が実施されている。我が国では、我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉（HTTR）を用いて、高温ガス炉技術基盤の確立が進められている。また、平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」などにおいて、高温ガス炉など安全性の高度化に貢献する原子力技術の研究開発を国際協力の下で推進することが明記され、福島第一原発事故を踏まえて、原子力の安全性の高度化に対する高温ガス炉への期待が高まっている。日本原子力学会では、HTTR や実用高温ガス炉の設計研究等を通じて蓄積してきた我が国の高温ガス炉技術に基づく実用高温ガス炉の安全基準の国際標準化に資するため、「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会（平成25年度～26年度）において、実用高温ガス炉の安全基準のうち機能要求を規定する安全要件を作成した。これに引き続き、「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」研究専門委員会（平成27年度～28年度）において、実用高温ガス炉の安全要件（機能要求）と安全指針（性能水準要求）を繋ぐ考え方の構築を進めてきた。本講演では、高温ガス炉の安全上の特長及び安全要件の概要について報告する。

2. 高温ガス炉の安全上の特長

2-1. 高温ガス炉の原子炉基本構成

表1 原子炉の基本構成

(1) 燃料（被覆燃料粒子）

軽水炉では、金属材料で被覆した燃料を使用するが、高温ガス炉では、セラミックで被覆した三重等方性（TRISO）被覆燃料粒子を用いる（表1）。高温ガス炉燃料の一例として、プリズマティック型高温ガス炉であるHTTRの燃料を

	高温ガス炉	軽水炉
燃料	セラミック被覆 (被覆燃料粒子)	金属被覆
減速材	黒鉛	水
冷却材	ヘリウムガス	水

図1に示す。被覆燃料粒子は、燃料核（二酸化ウラン、ウランの炭化物と酸化物混合等）を熱分解炭素及び炭化ケイ素（SiC）で4重に被覆した直径約1mmの粒子型の燃料である。被覆燃料粒子の4重の被覆材は、内側から、①低密度の熱分解炭素（PyC）層（バッファー層）、②内側高密度PyC層、③SiC層、④外側高密度PyC層で構成されている。被覆燃料粒子は耐熱性に優れ、1600°C以上の高温においても被覆の健全性は損なわれず核分裂生成物（FP）を確実に燃料内に閉じ込め、2000°C以上にならなければ短時間うちにFP保持機能が失われることはない。被覆燃料粒子は、黒鉛マトリックスを用い燃料コンパクトとして成型され、燃料棒に装荷さえる。更に、六角柱の黒鉛ブロックの空孔に燃料棒が装荷され、燃料棒と黒鉛ブロック間の環状流路が冷却流路孔となる。炉心は、燃料ブロックを積層し外周を反射体ブロックで取り

囲むことにより形成される。

(2) 減速材 (黒鉛)

高温ガス炉では、減速材として黒鉛を用いる。黒鉛は減速能が水に比べて低いいため相対的に大きな質量、すなわち大きな体積を必要とする。このため、炉心出力密度は軽水炉の 1/10 以下になるが、炉心は発熱密度に比して大きな熱容量を持つことになる。これにより、出力の過渡変化や冷却能力の異常な低下に対する炉心構成要素の温度

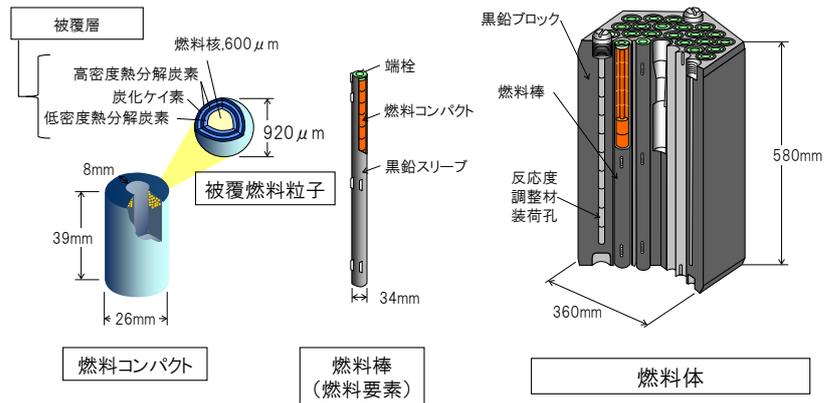


図1 高温ガス炉の燃料 (HTTR 燃料)

変化は小さく、かつ、緩慢となる。黒鉛は、耐熱性に優れ(昇華温度約 3000°C)、2500°C程度までは強度の低下がなく、燃料の制限温度よりも高温においても構造健全性を維持することができる¹⁾。また、黒鉛は熱伝導が高いことも特長であり、事故時における炉心径方向への熱輸送に大きく寄与する。更に、核分裂生成物を保持する能力も有しており、炉心からの放射性物質放出量の低減に寄与できる。なお、高度に構造化され、高密度、高純度で耐食性に優れた原子炉級黒鉛(graphite)は、石炭(coal)及び木炭(charcoal)とは別の材料であって自己燃焼しない²⁾。一方、黒鉛材料は空気や水蒸気と反応し酸化するため、高温ガス炉の安全評価では、1次系配管破断による炉心へ空気侵入事故や熱交換器伝熱管破断による炉心への水侵入事故を設計基準事故として選定し、黒鉛構造物の酸化量を評価し炉心の構造健全性を確認している³⁾。

(3) 冷却材 (ヘリウムガス)

高温ガス炉では、冷却材として4~7MPaに加圧したヘリウムガスを用いる。冷却材のヘリウムは原子炉の使用条件下では気体であり相変化がなく、また核的な効果(中性子の減速や吸収など)をほとんど持たないため、1次冷却系配管の破損などによりヘリウムガスが喪失しても、水・蒸気の二相流で生じるような相変化に起因する温度変化がなく、炉心の反応度にも影響を与えない。また、化学的に不活性で放射化しないため、燃料、構造材及び事故時に関与する可能性がある化学物質(酸素、水蒸気、水素、一酸化炭素、二酸化炭素)との化学反応や核反応を起こさず、材料腐食や腐食生成物の放射化の問題もない。

2-2. 高温ガス炉の固有の安全性

上記の原子炉基本構成要素の特長から得られる高温ガス炉の固有の安全性は、以下にまとめられる。

- 燃料の耐熱温度が高い
- 炉心構造物(黒鉛)の耐熱温度が高い。このため、炉心構造物の溶融のおそれがない
- 発熱密度に比して炉心の熱容量が大きいいため、出力の過渡変化や冷却能力の異常な低下に対する炉心構成要素の温度変化が小さく、かつ、緩慢
- 低出力密度、炉心の長尺設計により、原子炉圧力容器表面からの熱放射等により崩壊熱除去が可能
- 全運転状態を通じて、大きな負の反応度温度係数をもつ。このため、反応度温度フィードバックによる自然炉停止特性、出力自己制御性が得られる

3. 実用高温ガス炉の安全要件

3-1. 安全確保の考え方

安全要件の作成にあたり、前述の高温ガス炉の固有の特性を活かした、実用高温ガス炉における安全確保の基本的考え方を以下のように定めた。

- 放射性物質の重大な放出を招く可能性のある状況が実質的に排除されるようにする

- 被覆燃料粒子による放射性物質の閉じ込め機能を維持する
- 受動的な安全設備あるいは固有の特性に基づき、必要な安全機能を達成する

すなわち、実用高温ガス炉の安全設計では、多重故障を伴う事象に対しても設計で対処し、炉心の著しい損傷事故（被覆燃料粒子被覆層の損傷に伴う環境への著しい放射性物質の放出）が発生しないように設計することを要求することとした。

3-2. 実用高温ガス炉の安全要件の概要

上記の安全確保の考え方にに基づき、実用高温ガス炉の安全要件を作成した。このうち、原子炉の基本的な安全機能である「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」を中心に、軽水炉の安全要件⁴⁾との違いを含めながら以下に概説する（図1）。

(1) 放射性物質の閉じ込め

軽水炉の安全要件では、燃料要素及び燃料集合体に関して、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時にのみ、これらの健全性維持が要求されている。一方、実用高温ガス炉では、被覆燃料粒子の優れた放射性物質閉じ込め機能を活用し、原子炉格納施設への放射性物質閉じ込め機能要求を緩和すること、更に、究極の安全性を目指した高温ガス炉では、事故状態に被覆燃料粒子のみに放射性物質閉じ込め機能を期待することを目指している。そこで、運転状態及び事故状態のすべてにおいて、安全確保の観点から要求される放射性物質閉じ込め性能が維持されるように設計することを被覆燃料粒子に対する安全要件としている。また、軽水炉の安全要件では、事故時の放射性物質の閉じ込め機能要求を課す設備として「格納容器」の設置を規定しているが、実用高温ガス炉の安全要件では、燃料に対して事故時における放射性物質閉じ込め機能維持を要求することにより、気密性能の緩和（コンファイメントの適用）を容認している。

(2) 原子炉の停止

高温ガス炉では、原子炉停止系として制御棒系と後備停止系（制御棒系が何らかの原因で挿入できない場合のバックアップ）を設ける設計が一般的である。一方、HTTRを用いた安全性実証試験で確認されているように、高温ガス炉は優れた固有の炉停止特性を有し、燃料の高い耐熱性や出力の過渡変化や冷却能力の異常な低下に対して炉心の温度変化が小さくかつ緩慢である特性とあいまって、1次系の冷却機能が喪失し、かつ、原子炉スクラムに失敗したような場合でも、物理現象のみによって反応度が自然に低下し、燃料温度が制限温度以下に自然に静定する固有の安全性を有する⁵⁾。このような特長を考慮し、軽水炉の安全要件では原理の異なる独立2系統を要求しているのに対し、高温ガス炉の安全要件では原理の異なる2つの手段を要求することとし、固有の炉停止特性を1つの停止手段とみなす考え方としている。

(3) 炉心からの除熱

HTTRを用いた安全性実証試験によって、炉心の強制冷却を行わなくても、各種の制限値を上回ることなく、原子炉圧力容器の外面からの熱除去により炉心からの残留熱除去が可能であることの実証を進めている⁵⁾。すなわち、安全上、炉心の強制冷却は不要であり、原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性が維持されない事故時を含め残留熱の除去が必要なすべての状態において、炉室の自然対流及び原子炉圧力容器からの熱放射によって間接的に炉心を冷却できる可能性がある。このことから、実用高温ガス炉の安全要件では、軽水炉に要求されている非常用炉心冷却（能動的な炉心の強制冷却）を適用除外とし、原子炉圧力容器の外面からの受動的な残留熱除去（受動的な炉心の間接冷却）のみを要求する考え方としている。

また、外部電源喪失に対しては、受動的な設備と固有の安全性による安全確保を要求しているため、軽水炉で規定されている炉心の溶融の影響を緩和するために必要な設備への電源供給は不要であり、プラントパラメータ監視、放射線モニタリングへの電源供給のみを要求している。

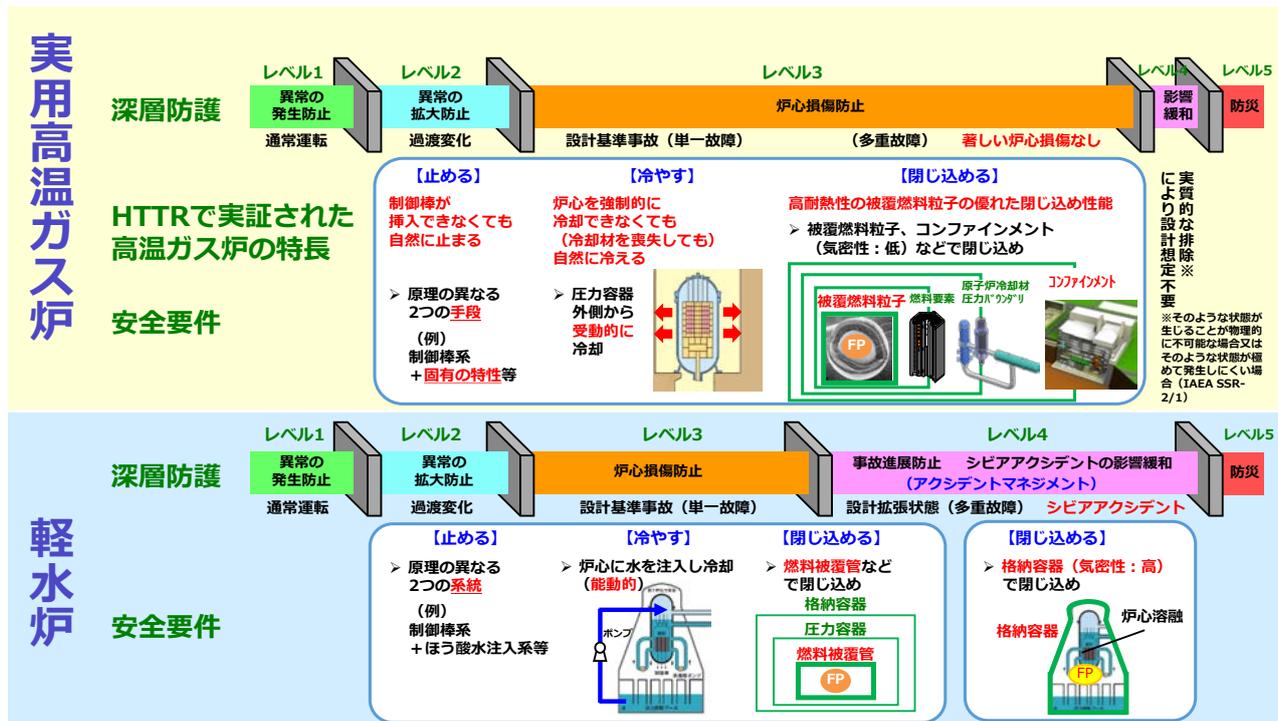


図2 実用高温ガス炉の安全要件の概要

3-3. IAEA CRP における安全要件の検討

国際原子力機関（IAEA）の高温ガス炉の安全設計に関する協力研究計画（CRP）において、高温ガス炉建設の実績を有する先進国や今後の導入を検討している新興国などの8カ国（日本（原子力機構）、中国、独国、インドネシア、カザフスタン、韓国、ウクライナ及び米国）が集い、平成26年12月から3年間の計画で、国際標準となる実用高温ガス炉安全要件案について検討を行っている。これまでの2回の研究調整会合（平成27年6月、平成28年6月）などを通じて、日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会で作成した安全要件や米国が提案する安全要件についてのレビューを進めている。今後、1つの安全要件にまとめ、NE シリーズ技術報告書として刊行する計画である。

4. まとめ

高温ガス炉の安全上の特長、IAEAにおける国際標準化を目指して日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会で作成した実用高温ガス炉の安全要件の概要について報告した。実用高温ガス炉の安全基準について、国際原子力機関（IAEA）等の下で国際標準化を目指す。

参考文献

- 1) 林君夫, 沢和弘, 塩沢周策, 福田幸朔, "高温工学試験研究炉用燃料の健全性の評価と許容設計限界," JAERI-M 89-162, Japan Atomic Energy Research Institute (1989).
- 2) D. G. Schweitzer, D. H. Gurinsky, E. Kaplan, C. Sastre, "A Safety Assessment of the Use of Graphite in Nuclear Reactors Licensed by the U.S. NRC," NUREG/CR-4981 (1987).
- 3) S. Katanishi, K. Kunitomi, "Safety Evaluation on the depressurization accident in the gas turbine high temperature reactor (GTHTR300)," NED, 237, pp. 1372-1380 (2007).
- 4) IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 Rev.1 (2016).
- 5) K. Takamatsu, D. Tochio, S. Nakagawa, et al., "Experiments and validation analyses of HTTR on loss of forced cooling under 30% reactor power," J. Nucl. Sci. Technol., 51 (11-12), pp. 1427-1443 (2014).

*Hirofumi Ohashi¹¹JAEA