JAEA-Technology 2017-022 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-022



# 実用高温ガス炉の安全要件を達成するための 燃料・炉心の設計事項

Evaluation Items to Attain Safety Requirements in Fuel and Core Designs for Commercial HTGRs

中川 繁昭 佐藤 博之 深谷 裕司 徳原 一実 大橋 弘史

Shigeaki NAKAGAWA, Hiroyuki SATO, Yuji FUKAYA, Kazumi TOKUHARA and Hirofumi OHASHI

原子力科学研究部門 高温ガス炉水素・熱利用研究センター 小型高温ガス炉研究開発ディビジョン

Small-sized HTGR Research and Development Division HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center Sector of Nuclear Science Research

日本原子力研究開発機構

September 2017

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

## 実用高温ガス炉の安全要件を達成するための燃料・炉心の設計事項

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 高温ガス炉水素・熱利用研究センター 小型高温ガス炉研究開発ディビジョン

中川 繁昭、佐藤 博之、深谷 裕司、徳原 一実\*1、大橋 弘史

## (2017年8月17日 受理)

実用高温ガス炉の設計において、燃料設計、炉心設計、原子炉冷却材系設計、2次冷却材系 設計、崩壊熱除去系設計、格納施設設計については、重要性が高く、かつ、その安全要件が軽 水炉のそれと大きく異なる。実用高温ガス炉の安全基準の策定に資するため、これらの設計項 目の中から、燃料及び炉心の安全要件を達成するための設計事項を検討した。検討に当たって は、受動的な安全性や固有の安全性に基づく高温ガス炉の特長を十分に反映させた。また、炉 心設計に関し、キセノン135の生成と消滅による空間出力振動に対する安定性を検討した。検 討の結果得られた燃料及び炉心の具体的な設計事項は、今後の実用高温ガス炉の設計に適用可 能であり、また、IAEA や国内規制当局における高温ガス炉の安全指針の策定に資することが 期待される。

# Evaluation Items to Attain Safety Requirements in Fuel and Core Designs for Commercial HTGRs

Shigeaki NAKAGAWA, Hiroyuki SATO, Yuji FUKAYA, Kazumi TOKUHARA<sup>%1</sup> and Hirofumi OHASHI

Small-sized HTGR Research and Development Division HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 17, 2017)

As for the design of commercial HTGRs, the fuel design, core design, reactor coolant system design, secondary helium system design, decay heat removal system design and confinement system design are very important and quite different from those of LWRs. To contribute the establishment of the safety standards for commercial HTGRs, the evaluation items to attain safety requirements in fuel and core designs were studied. In this study, the excellence features of HTGRs based on passive safety or inherent safety were fully reflected. Additionally, concerning the core design, the stability to spatial power oscillation in reactor core of HTGR was studied. The evaluation items as the result of the study are applicable to the safety design of commercial HTGRs in the future.

Keywords: Commercial HTGRs, Safety Requirements, Safety Design, Inherent Safety

<sup>\*1</sup> Collaborating Engineer

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	安全要件を達成するための設計事項の検討範囲	3
3.	燃料の設計事項	9
4.	炉心の設計事項	18
2	4.1 安全要件を達成するための設計事項	18
2	4.2 炉心の中性子束分布の安定性	19
5.	おわりに	31
謝	辞	31
参	考文献	31

## Contents

1.	Introduction	1
2.	Study Boundary of Evaluation Items to Attain Safety Requirements	3
3.	Evaluation Items for Fuel Design	9
4.	Evaluation Items for Core Design	- 18
Z	1.1 Evaluation Items to Attain Safety Requirements	- 18
Z	1.2 Stability of Neutron Flux Distributions in Reactor Core	- 19
5.	Concluding Remarks	- 31
Ac	knowledgements	- 31
Re	ferences	· 31

This is a blank page.

#### 1. はじめに

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、世界的に原子力の安全 性に対する希求が高まっている。我が国においては、東京電力福島第一原子力発電所の事故を 経験した国として、世界的な原子力安全に貢献する取り組みを進めていくことが重要である。

高温ガス炉は、燃料として耐熱性に優れ放射性物質の閉じ込め能力が高い被覆燃料粒子、減 速材及び炉心構造材として耐熱性が高い黒鉛、冷却材として化学的に安定なヘリウムガスを用 いており、その基本構成要素と炉心発熱密度が低いこと等から、優れた固有の安全性を有し、 また、1000℃近い高温の熱を取り出せることから、発電や水素製造等の多様な熱利用が可能で あるなど環境負荷低減に貢献しうる、第4世代原子力システムの一つとして位置づけられてい る原子力システムである<sup>1)</sup>。

我が国においては、1960年代末から高温ガス炉技術の研究開発が開始され、現在は、我が国 初の高温ガス炉の試験研究炉である高温工学試験研究炉(HTTR)<sup>2)</sup>(以下、「HTTR」という。) を用いた高温ガス炉の基盤技術の確立が、日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」とい う。)により進められている。2010年からは、全交流電源喪失事故時の高温ガス炉の安全性を HTTRにより実証する試験が、OECD/NEAの下の国際プロジェクトとして行われている。

2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、「水素製造を含めた多様 な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、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。」と明示されている。さらに、「未来投資戦略 2017-Society 5.0 の実現に向けた改革」(2017年6月閣議決定)においても、安全性向上の観 点から、国際協力を適切に進めながら原子力機構が所有する高温ガス炉等の試験研究炉を活用 するなど、将来に向けた研究開発を推進することが明記されており、東京電力福島第一原子力 発電所の事故を踏まえて、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状況で ある。

諸外国では、欧米において 1960 年代から高温ガス炉技術の研究開発が進められてきた。近 年では、米国、韓国において実証炉の概念設計、中国において実証炉の建設が進められている。 中国、ポーランド及びインドネシアは、商用炉の導入計画を有しており、特にポーランド及び やインドネシアでは諸外国から積極的な技術導入を図るなど、高温ガス炉に関する国際競争が 高まりつつある。

実用高温ガス炉の導入に際しては、安全基準の策定が不可欠である。我が国は試験研究炉で ある HTTR の安全基準を有するが、これは発電用軽水炉の安全基準を基に作成されているため、 能動的な安全性に基づくものである。本来、能動的な安全性に基づくことを必要とせず受動的 な安全性や固有の安全性に基づく高温ガス炉の特長を活かすためには、高温ガス炉の固有の特 性が十分に考慮された新たな安全基準が必要である。また、水素製造等の熱利用に関する安全 基準の整備も必要である。しかし、我が国をはじめ世界的に、このような高温ガス炉特有の安 全基準はいまだ策定されていない。

このような情勢の中、我が国の高温ガス炉技術の優位性を保ちつつ当該技術を海外へ積極的 に展開し、原子力安全についての国際貢献に資するため、国際原子力機関(IAEA)での国際 標準化を目標として、2013 年 4 月に日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門 委員会が設立され、2015 年 3 月までの 2 年間で、高温ガス炉の安全上の特長や HTTR の設計、 建設、運転・試験などを通じて蓄積した知見を反映した実用高温ガス炉の安全基準(安全要件) の原案<sup>3)</sup>の作成を行った。当該安全要件の原案は、IAEA が 2014 年 12 月に開始した「モジュ ラー型高温ガス炉の安全設計」協力研究計画(以下、CRP: Coordinated Research Program という。)において原子力機構によって提案され、国際標準の原案化を目指して参加各国(中国、 独国、インドネシア、カザフスタン共和国、韓国、ウクライナ、米国) との間で議論が進めら れている。

高温ガス炉の安全基準整備の一環として、「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会の検 討を経て作成された高温ガス炉における新たな安全確保方策に係る安全要件(機能要求)を具 体化し、安全指針(性能水準要求)へと繋ぐ考え方の構築を図ることを目的として、燃料や原 子炉を構成する構築物、系統及び機器(SSC: Structure, System and Component)の安全設 計において評価すべき事項(以下、「安全要件を達成するための設計事項」という。)の検討を 進めている。

本報告書は、燃料及び炉心の安全要件を達成するための設計事項についてまとめたものであ る。第2章には安全要件を達成するための設計事項の検討範囲、第3章には燃料の安全要件を 達成するための設計事項、第4章には炉心の安全要件を達成するための設計事項とこれを定め るに当たって検討した炉心安定性等の内容について示す。

-2-

2. 安全要件を達成するための設計事項の検討範囲

「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会において作成した設計上の安全要件ついて、 実際の実用高温ガス炉の設計への適用を図るため、機能要求である安全要件を具体的に展開す ることを目的として安全要件を達成するための設計事項を検討した。

安全要件を達成するための設計事項を検討するに当たっては、基本方針を以下のとおりとした。

- ✓ 実用高温ガス炉を構成する燃料やSSCの設計のうち、重要性が高く、かつ、安全要件が 軽水炉のそれと大きく異なるものを対象とする。
- ✓ 軽水炉などと共通で一般的な設計に関する安全要件は検討の対象外とする。
- ✓ HTTRや実用高温ガス炉の設計方針の考え方(設置許可申請書添付書類八など)を適宜、 参考とする。

実用高温ガス炉の設計の流れを Fig.2.1 に示す。上記の基本方針に従い、以下に示す燃料及び SSC の設計を検討範囲とした。

- ① 燃料設計
  - 要件 43:被覆燃料粒子の性能
  - 要件 44:燃料要素の性能
- ② 炉心設計(炉心、原子炉停止系)
  - ・ 要件 45:原子炉の炉心の構造上の能力
  - 要件 46:原子炉の炉心の制御
  - 要件 47:原子炉の停止
- ③ 原子炉冷却材系設計
  - 要件 48:原子炉冷却材系の設計
  - 要件 49: 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防護
  - 要件 50:原子炉冷却材の浄化
- ④ 2 次冷却材系設計
  - 要件 51:水又は水蒸気を用いた 2 次冷却材系の設計
- ⑤ 崩壊熱除去系設計
  - 要件 52: 原子炉の炉心から最終的な熱の逃し場への残留熱の輸送
- ⑥ 格納施設設計
  - 要件 53:原子炉の格納構築物
  - 要件 54:原子炉のコンファインメント
  - 要件 55: コンファインメントからの放射性物質の放出の管理
  - 要件 56: コンファインメントの隔離

- 要件 57: コンファインメントの立入り
- 要件 58: コンファインメントの状態の管理

本報告書では、燃料及び炉心の設計事項について示す。燃料及び炉心の設計に関連する安全要件(要件 43~47)を Table 2.1 及び Table 2.2 に示す。それぞれの安全要件中に括弧書きで示した記載は、本検討において各要件の機能要求を記したものである。

 Table 2.1
 Safety requirements for fuel design (1/2)

## 要件 43 : 被覆燃料粒子の性能

原子炉システムの被覆燃料粒子は、すべての原子炉システム状態で生じ得るすべての劣化プロセスとの組み合わせにおいて、その構造上の健全性を維持し、また、原子炉の炉心内で予想される放射線レベルとその他の条件に十分に耐えるように設計されなければならない。【被 覆燃料粒子の運転状態、事故状態及び燃料取扱時の構造健全性維持】

6.1. 考慮されるべき劣化プロセスは、次のものから生じるものを含まれなければならな い。すなわち、被覆燃料粒子内の核分裂生成物と遊離酸素の生成による内圧上昇、被覆 燃料粒子内の遊離酸素の生成及び温度勾配による燃料核の移動、被覆燃料粒子内の金属 核分裂生成物の化学的影響、照射、温度の変化、化学的影響、静的及び動的な荷重、で ある。データ、計算及び製造の不確かさに対する許容幅が考慮されなければならない。

6.2. 燃料の設計限度は、放射性物質の放出が容認限度以下に保たれるように、燃料製造時における被覆燃料粒子被覆層の破損率、製造工程で生じる被覆燃料粒子外面のウランによる汚染の割合、並びに、すべての原子炉システム状態における燃料からの核分裂生成物の許容漏えい、被覆燃料粒子被覆層の破損率などに関する限度を含めなければならない。

**6.3.** 被覆燃料粒子は、燃料取り扱いに伴う荷重及び応力に耐えるものでなければならない。

## Table 2.1Safety requirements for fuel design (2/2)

#### 要件 44 : 燃料要素の性能

原子炉システムの燃料要素は、運転状態において、その構造上の健全性を維持し【燃料要素の運転状態、燃料取扱時の構造健全性維持】、また、事故状態において、被覆燃料粒子に対して許容できない荷重を発生させないように設計されなければならない【燃料要素の事故状態の構造上の機能維持】。

Table 2.2Safety requirements for core design (1/3)

## 要件 45 : 原子炉の炉心の構造上の能力

原子炉の炉心は、当該原子炉の固有の特性を担保するように設計されなければならない【熱 的な固有の特性の担保】。原子炉の炉心及びその支持構造物は、運転状態において、その構 造上の健全性を維持できるように設計されなければならない【炉心及びその支持構造物の運 転状態、燃料取扱時の構造健全性維持】。また、原子炉の炉心及びその支持構造物は、事故 状態において、原子炉圧力容器表面からの自然対流と熱放射による残留熱除去、並びに原 子炉の停止状態への移行及び維持が妨げられないよう、また、被覆燃料粒子などに対して許 容できない荷重を発生させないように設計されなければならない【炉心及びその支持構造物の 事故状態の構造上の機能維持】。

6.4. 原子炉の炉心は、出力の過渡変化及び冷却能力の異常な低下に対して、炉心の温度 変化が少なく、かつ、緩慢である特性を有するために、発熱密度に比して大きな熱容量 を有するようにしなければならない。

6.5. 原子炉の炉心は、出力の過渡変化及び冷却能力の異常な低下に対する炉心の温度変化が少なく、かつ、緩慢である特性とあいまって、原子炉圧力容器表面からの自然対流と熱放射による残留熱除去が可能な発熱密度と伝熱特性を有するようにしなければならない。また、設計において、照射又は温度変化による変形及び物性値の変化による伝熱に関する性能の変化を考慮しなければならない。

## Table 2.2Safety requirements for core design (2/3)

## 要件 46 : 原子炉の炉心の制御

原子炉システムの原子炉の炉心のあらゆる状態で生じる中性子東分布は、原子炉の停止後に生じる状態、燃料の交換中又は交換後の状態並びに予想される運転時の事象及び事故状態を含めて、固有の安定性を持たなければならない【核的な固有の特性(自己制御性、安定性)の担保】。中性子東分布、レベル及び安定性をすべての運転状態において定められた設計限度内に維持するための制御系への要求は最小にされなければならない【出力分布の適正化】。

6.6. 原子炉の炉心内の中性子束分布とその変化を検出・制御する適切な手段が、設計限度を超えるような炉心領域がないことを確実なものとするために、必要に応じて設けられなければならない。

**6.7.** 反応度制御装置の設計では、摩耗並びに燃焼、物理的特性の変化及び気体の発生のような照射の影響について十分な考慮が払われなければならない。

6.8. 運転状態及び事故状態において正の最大投入反応度とその投入率は、冷却能力を維持するため、及び原子炉の炉心へのいかなる重大な損傷も防止するため、制限又は補償 されなければならない【反応度添加の抑制】。

## Table 2.2Safety requirements for core design (3/3)

## 要件 47 : 原子炉の停止

原子炉システムの原子炉を運転状態及び事故状態において停止する能力があること【固有の 炉停止特性による未臨界への移行】及び原子炉の炉心の最も反応度が高い状態に対してで も停止状態が維持されること【低温状態における未臨界への移行と未臨界の維持】を確実なも のとするために、手段が設けられなければならない。

**6.9**. 原子炉の停止手段の有効性、作動速度及び停止余裕は、燃料の設計限度を超えることのないものでなければならない。

6.10. 原子炉の停止手段の妥当性の判断では、停止手段の一部を操作不能とさせる(制御 棒1本の挿入失敗のような)可能性又は共通原因故障に至る可能性のある、原子炉システ ム内のあらゆる場所で発生する故障に対して考慮が払われなければならない。

6.11. 原子炉を停止するために、少なくとも2つの原理の異なるかつ独立した手段を設けなければならない。

6.12. 原子炉停止手段のうち少なくとも1つは、その1つだけで、最も反応度が高い原子 炉の炉心の状態であっても十分な余裕と高い信頼度で原子炉を未臨界に維持することが できるものであらねばならない。

6.13. 原子炉停止手段は、停止中又は燃料交換操作中若しくは停止状態における他の定常 操作中又は定常外の操作中に、意図しない臨界に達する、いかなる反応度の予見される 印加も防止するのに十分なものであらねばならない。

6.14. 原子炉停止手段が、対象とする原子炉システム状態に対して規定された状態に常に あることを確実なものとするために、計装設備が設けられなければならず、また試験が 規定されなければならない。

## JAEA-Technology 2017-022



Fig.2.1 Design flow of HTGR system

#### 3. 燃料の設計事項

プリズマティック型高温ガス炉の燃料の構造例として、HTTR燃料の構造をFig.3.1に示す。 ここでは、高温ガス炉燃料の構成要素である被覆燃料粒子及び燃料要素の安全要件を達成する ための設計事項について示す。なお、燃料体(黒鉛ブロック)については、炉心設計で示すこ ととする。

燃料設計の概要を Fig.3.2 に示す。燃料設計では、炉心設計側から与えられる通常運転時の 炉内環境条件下において、燃料に関連する通常運転時の設計限度(燃料からの核分裂生成物の 許容漏えい、被覆燃料粒子被覆層の破損率など)を満足できるように、被覆燃料粒子及び燃料 要素の仕様を決定する。さらに、運転時の異常な過渡変化時及び事故時において、燃料に関連 する設計限度(燃料からの核分裂生成物の許容漏えい、被覆燃料粒子被覆層の破損率など)を 満足できることを確認する。

Table 2.1 に示す高温ガス炉の燃料設計に対する安全要件では、被覆燃料粒子に対して放射性 物質の障壁として閉じ込め機能が要求されている。すなわち、機能要求として、「運転状態、事 故状態及び燃料取扱時の構造健全性維持」が要求されている。また、被覆燃料粒子を内包する 燃料要素については、被覆燃料粒子の閉じ込め機能の観点から、「運転状態及び燃料取扱時にお ける構造健全性の維持」、並びに、「事故状態における構造上の機能(被覆燃料粒子に対して許 容できない荷重を作用させないこと)維持」が要求されている。

被覆燃料粒子の構造健全性維持の機能要求について、被覆燃料粒子の損傷挙動を考慮し、具体的な安全要件を達成するための設計事項へ展開した。その結果を Table 3.1 に示す。また、 安全要件を達成するための設計事項に関連する設計パラメータやプラント挙動に関するパラメ ータなどを着目パラメータとして表中に示す。

被覆燃料粒子の損傷挙動は、Fig.3.3 に示すように原子炉の状態によって異なるため、「通常 運転時」、「運転時の異常な過渡変化及び事故時」、並びに、「燃料取扱時」に分類して整理した。 通常運転時は、被覆燃料粒子内の遊離酸素の生成及び温度勾配による燃料核の移動、被覆燃料 粒子内の金属核分裂生成物(パラジウム(Pd))による炭化ケイ素(SiC)層の腐食、被覆燃料 粒子内の核分裂生成物と遊離酸素の生成による内圧上昇が主要な破損挙動である。これらの主 要な破損挙動に影響を与える因子(燃料温度、燃料内温度勾配、燃焼度、照射量、照射時間) について、破損挙動との関係を Fig.3.4 に示す。また、異常時(運転時の異常な過渡変化時及 び事故時)は、異常昇温による SiC 層の熱的劣化・破損、反応度投入事象における内圧上昇に 起因する被覆層の破損、水・空気侵入事象における SiC 層の酸化反応による SiC 層の破損、が 主要な破損挙動である。これらの主要な破損挙動について、破損挙動に影響を与える条件や事 象を考慮して、被覆燃料粒子の健全性を評価する。

燃料要素についても同様に、運転状態における構造健全性維持の観点から運転状態における 燃料要素の破損要因、事故状態において求められる構造上の機能を整理し、安全要件を達成す るための設計事項へ展開した。運転状態の構造健全性維持では、熱的効果(主として熱応力) 及び照射効果(照射変形差による残留応力、被覆燃料粒子と素地との照射変形の差による相互 作用など)を考慮し、運転状態に影響を与えるような有意な破損を生じないこと、並びに、熱 膨張及び照射変形等による燃料コンパクトと黒鉛スリーブ、燃料要素と燃料体冷却孔内面との 機械的相互作用の影響がないことを評価する。事故時には、燃料要素の燃料部が黒鉛ブロック 内にとどまっていることを評価する。

なお、Table 3.1 中に記載した原子炉状態の定義は以下のとおりである。

運転状態 :通常運転、運転時の異常な過渡変化

事故状態 :設計基準事故

軽水炉の安全要件(IAEA SSR-2/1 Rev.1 4)では、「事故状態(Accident conditions)」を「設計基準事故(Design basis accidents)」と「設計拡張状態(Design extension conditions)」に 分類している。一方、「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会での検討により、実用高温 ガス炉では、Fig.3.5 に示すように軽水炉で定義する「設計拡張状態」の範囲も「設計基準事故」 に含め、「設計拡張状態」という表現は用いないこととした。このため、「事故状態」は「設計 基準事故」を意味する。また、同様に、実用高温ガス炉の安全要件及び本報告書中における「事 故時」は「設計基準事故時」を意味する。なお、この事故状態の定義に関する提案については、 IAEA CRP において議論中である。

燃料要素の運転状態における構造健全性維持の必要性について、高温ガス炉の崩壊熱及び残 留熱は熱伝導と熱放射で除熱可能であり、炉内の対流による除熱は不要であるため、除熱の観 点からは炉心の冷却形状の担保は不要である。このため、燃料取扱や燃料輸送時に落下などの 機械的損傷によって対流冷却が困難となることを危惧していないのであれば、燃料要素の構造 健全性維持に関する要求は不要ではないか、との指摘がある。しかし、これについては、以下 のように考え、本要求は必要と判断した。

深層防護の防護階層レベル1としての異常の発生防止の観点からの要求である。但し、 燃料要素の運転状態における構造健全性の維持が達成できなくても、異常な状態になら なければ、本要求は不要となる。ここで、「異常な状態」を以下で定義する。

異常な状態:何らかの外乱によって通常運転状態を逸脱すること、すなわち、運転状 態が所定の制限(安全評価や耐震設計などの前提条件)を超えること

しかし、通常運転時に燃料要素及びこれを構成する燃料コンパクトの構造上の健全性が 維持できない場合、所定の制限を満足できないおそれがある。このため、安全上、燃料 要素の運転状態における構造健全性維持の要求は必要と判断した。

さらに、安全設計を達成するための設計事項の要求内容については、例えば HTTR における 考え方のように、「破損(割れ、欠け等)の発生防止」を要求した場合、検査コストの増加や安 全上は問題ない状態の運転を制限してしまうことなどが危惧された。そこで、「所定の制限(安 全評価や耐震設計などの前提条件)を超える状態へ移行させるような有意な破損を生じないこ と」、すなわち、「運転状態に影響を与えるような有意な破損を生じさせない」とした。なお、 平成 21 年度に日本原子力学会「高温ガス炉黒鉛構造物規格化のための調査検討」特別専門委 員会で策定した「高温ガス炉黒鉛構造物規格原案<sup>5</sup>」の「高温ガス炉黒鉛構造物の材料規格・ 製品規格」では、「黒鉛の受入検査では設計上有害な欠陥は許容しないこととする」と規定している。ここで、「有害な」と「有意な」の記載は、同じ意味合いで用いられている。

	炉状態				運転時		
	)[[1]][[1]][[1]][[1]][[1]][[1]][[1]][[1		生成	<b>水</b>	業 第 し で 来 の 派 言	谷 鍛 距	
o fuel design (1/3)	着目パラメータ		燃料破損率等 ① 被覆燃料粒子内の核分裂生	物と遊離酸素の生成によ) 圧上昇:応力	<ol> <li>2) 被覆燃料粒子内の遊離酸</li> <li>4) 生成及び温度勾配による</li> <li>校の移動:燃料核移動距離</li> </ol>	<ol> <li>3 被覆燃料粒子内の金属核&lt;</li> <li>生成物の化学的影響:腐動</li> <li>離</li> </ol>	
ble 3.1 Evaluation items to attain safety requirements	安全要件を達成するための設計事項	通常運転時における燃料の設計限度(燃料からの核分裂 生成物の許容漏えい、被覆燃料粒子被覆層の破損率な ど)を超えることがないよう、被覆燃料粒子被覆層の仕様	(被覆層厚さなど)を適切に定め、被覆燃料粒子の健全性 に関する以下の事象を評価すべきである。	① 被覆燃料粒子内の核分裂生成物と遊離酸素の生成 による内圧上昇	<ul> <li>・ 考慮すべき条件:燃料温度、燃焼度、照射(中性子束、照射時間)の影響</li> <li>② 被覆燃料粒子内の遊離酸素の生成及び温度勾配に</li> </ul>	よる燃料核の移動 ・ 考慮すべき条件:燃料温度、燃料内温度勾配、 照射(中性子束、照射時間)の影響	<ul><li>③ 被覆燃料粒子内の金属核分裂生成物の化学的影響</li><li>・ 考慮すべき条件:燃料温度、燃焼度、照射(中</li></ul>
Table	機能要求				被覆燃料粒子の 通常運転時の構 造健全性維持		
	安全要件				要件 43: 被覆燃料粒子の 性能		

	Table	3.1 Evaluation items to attain safety requirements t	o fuel design (2/3)	
安全要件	機能要求	安全要件を達成するための設計事項	着目パラメータ	原子炉状態
要 神 を で で の 子 の	被	<ul> <li>運転時の異常な過渡変化及び事故時における燃料の設計</li> <li>限度(燃料からの核分裂生成物の許容漏えい、被覆燃料 粒子被覆層の破損率など)を超えないことの確認のため、</li> <li>被覆燃料粒子の健全性に関する以下の事象を評価すべき である。</li> <li>① 異常昇温による SiC 層の熱的劣化</li> <li>① 異常昇温による SiC 層の熱的劣化</li> <li>③ 異常昇温による NiC 層の熱的劣化</li> <li>③ 異常昇温による SiC 層の熱的劣化</li> <li>③ 異常昇温による SiC 層の熱的劣化</li> <li>③ 異常昇温による SiC 層の熱的劣化</li> <li>③ 異常昇温による SiC 層の熱的劣化</li> <li>③ 酸化性ガス(空気、水・蒸気)による酸化の影響</li> <li>• 評価事象の例: 空気侵入、水侵入</li> </ul>	燃料破損率等 ① 異常昇温による SiC 層の熱的 劣化・破損:燃料温度 ② 異常昇温による内圧上昇:応 力、エンタルピー ③ 酸化性ガス(空気、水・蒸気)に よる酸化の影響:腐食雰囲気 指標(酸素分圧及び温度など)	) 運 黒 転 都 た 市 御 御 ま 御 御
	被覆燃料粒子の 燃料取扱時の構 造健全性維持	燃料要素及び燃料体の輸送時及び取扱中に破損等を生じ ないよう、被覆燃料粒子の健全性に関する以下の事象を評 価すべきである。 ① 燃料取扱に伴う荷重及び応力 ・評価事象の例:燃料取扱、燃料取扱中に想定さ れる落下に際して加わる荷重	代动	燃料取扱時

- 13 -

## JAEA-Technology 2017-022

	原子炉状態	通常運転時、 運転時の異 常な過渡変 仕時	通常運転時、 運転時の異 常な過渡変 化時	事故時	燃料取扱時
o fuel design (3/3)	着目パラメータ	坛坊	燃料コンパクトと黒鉛スリーブとの ギャップ幅 燃料要素と燃料体冷却孔内面との ギャップ幅	燃料要素の下栓(又は底板)の残 存等価厚さ	応力
3.1 Evaluation items to attain safety requirements t	安全要件を達成するための設計事項	燃料要素及びこれを構成する燃料コンパクトは、運転状態において、熱的効果(主として熱応力)及び照射効果(照射変形差による残留応力、被覆燃料粒子と素地との照射変形の差による相互作用など)を考慮しても、運転状態に影響を与えるような有意な破損を生じないようにすべきである。	燃料要素は、熱膨張及び照射変形等による燃料コンパクト と黒鉛スリーブ、燃料要素と燃料体冷却孔内面との機械的 相互作用の影響がないようにすべきである。	燃料要素の燃料部は黒鉛ブロック内にとどまるようにすべき である。	燃料要素は、輸送及び取扱いに際して加わる荷重により、 運転状態に影響を与えるような有意な破損を生じないように すべきである。
Table	機能要求	燃料要素の運転 状態の構造健全	性維持	燃料要素の事故 状態の構造上の 機能維持	燃料要素の燃料 取扱時の構造健 全性維持
	安全要件		要件 44: 燃料要素の性能		



Fig.3.1 Example of fuel structure for prismatic typed HTGR (Example of HTTR)



Fig.3.2 Outline of fuel design



Fig.3.3 Failure behavior of coated fuel particle



(環境条件)			SiC層腐食
燃料温度	•	•	•
燃料内温度勾配	_	•	_
燃焼度	•	_	•
照射量	•	•	•
照射時間	•	•	•

Fig.3.4 Factors to affect failure behavior of coated fuel particle during normal operation



Fig.3.5 Philosophy for the safety of HTGR

#### 4. 炉心の設計事項

4.1 安全要件を達成するための設計事項

高温ガス炉の炉心設計の概要を Fig.4.1 に示す。炉心設計では、性能要求と安全性の制約条件の もとで炉心仕様を決定し、これらを設計条件の一部として燃料設計、原子炉冷却系などのプラン ト設計に受け渡す。炉心設計では、主に以下を実施する。

核設計	: 核的な設計と核特性の評価
炉内構造物設計	: 炉心構成要素(黒鉛ブロック)と炉内構造物の構造設計、
	構造物健全性の評価
熱流力設計	: 炉内冷却材流量配分の設計、炉内冷却材流量配分と燃料温度の評価
動特性解析	: 原子炉の動特性の評価

Table 2.2 に示す炉心の設計に関連する安全要件では、機能要求として、要件 45「原子炉の炉 心の構造上の能力」では「熱的な固有の特性の担保」、「運転状態、燃料取扱時の構造健全性維持」 及び「事故状態の構造上の機能維持」、要件 46「原子炉の炉心の制御」では、「核的な固有の特性 (自己制御性、安定性)の担保」、「出力分布の最適化」及び「反応度添加の抑制」、要件 47「原 子炉の停止」では「固有の炉停止特性による未臨界への移行」及び「低温状態における未臨界へ の移行と未臨界の維持」、が規定されている。これらについて検討を行い導出した、炉心設計の安 全要件を達成するための設計事項を Table 4.1 に示す。

要件 45「炉心の構造上の能力」の機能要求である、燃料体(黒鉛ブロック)及びその支持構造 物に対する運転状態の構造健全性維持については、第3章で示した燃料要素と同様に「運転状態 に影響を与えるような有意な破損を生じさせない」こととした。参考として、Fig.4.2のような具 体的な適用例における考え方を以下に示す。

- ・設計において、割れ、欠け等が生じないように設計する。
- ・製造検査において、設計上有害な割れ、欠け等が生じていないことの品質を保証する。
- 運転中の監視において、割れ、欠け等による影響と思われるような冷却材温度、FP 放 出量などの有意な変化が確認された場合、構造物の破損状態を観察の上、影響評価を 行い、継続使用の可否を判断する。

要件 46「原子炉の炉心の制御」のうち、「核的な固有の特性(自己制御性)の担保」について は、反応度出力係数がすべての運転範囲において負となるようにすべきことを定めた。「核的な固 有の特性(安定性)の担保」については、通常運転時に起こり得る出力変化及び外乱、並びに、 キセノンの生成による出力分布の空間振動に対して、出力振動が十分な減衰特性をもつようにす べきことを定めた。なお、キセノンの生成・消滅による出力分布の空間振動については、HTTR などの中実炉心の高温ガス炉では空間振動が生じても減衰特性を有していると評価されているが、 中央に黒鉛ブロックで構成された内側可動反射体領域を有するような環状炉心とした場合、想定 される設計範囲で必ず減衰特性を有していることが現時点では証明できないため、減衰特性を有 する設計を要求するとともに、解析評価等により必要と判断される場合は原子炉出力制御装置に より出力振動を抑制できるようにすることとした。これらの検討の経緯については、次節「4.2 炉 心の中性子束分布の安定性」において示す。

要件 46「原子炉の炉心の制御」の機能要求「出力分布の適正化」については、炉心が比較的小型(30MW)の HTTR では、通常運転時の燃料温度制限の観点から、燃料温度分布が平坦になる 出力分布を得るようにしているが、炉心が大型(600MW)の GTHTR300 の設計では、事故時の 燃料温度制限の観点から、最大出力密度を抑えるため出力分布を平坦化するようにしていた。こ のように最適化は設計に依存することから、ここでは「通常運転時に適切な出力分布とすべきで ある」という表現とした。

要件 46「原子炉の炉心の制御」の機能要求「反応度添加の抑制」については、運転時の異常な 過渡変化で想定される反応度投入事象、想定される反応度が投入される事故及び高温全出力運転 中において想定される制御棒の落下事象に対して、原子炉の緊急停止を行わなくても燃料などの 設計限度を超えることがないように、制御棒の反応度添加量などを制限することを定めた。

要件 47「原子炉の停止」の機能要求「固有の炉停止特性による未臨界への移行」については、 出力運転状態から未臨界へ移行することを要求するものであり、未臨界の維持は要求していない。 また、未臨界への移行について、温度条件は関係ないため、「高温停止」という用語は使用しない こととした。

4.2 炉心の中性子束分布の安定性

炉心設計に関する安全要件(Table 2.2 参照)に示すように、原子炉の炉心の制御の要件(要件 46)として「原子炉システムの原子炉の炉心のあらゆる状態で生じる中性子束分布は、原子炉の 停止後に生じる状態、燃料の交換中又は交換後の状態並びに予想される運転時の事象及び事故状 態を含めて、固有の安定性を持たなければならない。中性子束分布、レベル及び安定性をすべて の運転状態において定められた設計限度内に維持するための制御系への要求は最小にされなけれ ばならない。」ことが求められている。このため、高温ガス炉の運転中における炉心中性子束分布 の安定性について検討した。

炉心中性子束分布の安定性について考慮すべきこととして、核分裂生成物であるキセノン 135 (<sup>135</sup>Xe)に起因する炉心中性子束分布の空間的な振動(出力振動)が挙げられる。原子炉出力一 定運転時にはキセノン 135 の濃度は平衡状態にあるが、制御棒の動作等による炉心の局所的な反 応度外乱が発生すると、中性子吸収断面積の大きいキセノン 135 の生成と消滅の時間差から空間 的な出力振動を発生させる可能性がある。

軽水炉の安全設計指針においては、「炉心及びそれに関連する系統は、固有の出力抑制特性を有 し、また、出力振動が生じてもそれを容易に制御できる設計であること。」のと定められている。 これに基づく BWR 及び PWR の設計方針、設計内容及び出力振動への対応は、Table 4.2 に示す とおり<sup>7),8</sup>である。BWR については、固有の特性として出力振動に対して十分な減衰特性を有す るとしており、万一発生しても、出力分布の監視と反応度制御系により調整するとしている。PWR については、炉心軸方向における出力振動の発生の可能性に言及した上で、軸方向中性子束偏差 の監視、アキシャルオフセットに基づく制御棒クラスタ操作により出力振動を回避し、発生時に はそれを検知して調整するとしている。

炉心における出力振動に対する安定性を減じる要因としては、炉心寸法、中性子移動距離、負 の出力係数、熱中性子束レベル等が挙げられる。高温ガス炉については、Table 4.3<sup>2),7/~12)</sup>に示す ように炉心寸法は軽水炉と同程度であり、中性子移動距離は3倍程度あることから、出力振動が 生じないと評価されている BWR より更に振動が発生し難い特性を有していると考えられる。こ の特性については、BWR と同様に Randall のモード展開法を用いて数値計算による定量的な検 討を実施し、中実炉心に対しては、想定される炉心設計仕様の範囲の高温ガス炉において、出力 振動が発生し得ないとの評価を得ている<sup>13)</sup>。中性子移動距離に対する炉心半径又は炉心高さの比 を横軸とし、熱中性子束を縦軸として、キセノン 135 の生成と消滅の時間差による空間出力振動 に対する安定性を Fig.4.3 に示す。図中の安定領域と不安定領域の境界線については、Randall のモード展開法を用いた数値計算により求めたものである。図中には代表的な高温ガス炉につい て、半径方向及び高さ(軸)方向の安定性を示した。一般的に、高温ガス炉では、炉心の半径に 比較して高さが大きくなる(Table 4.3 参照)ので、安定性の観点からは、炉心高さ方向の出力振 動に注意しておく必要がある。また、中実炉心において発生の想定は必要ないが、炉心半径方向 より炉心角度方向の出力振動の方が相対的に発生しやすい傾向となる。なお、GTHTR300に代表 される環状炉心体系の高温ガス炉に対しては、定量的な評価結果が得られていない状況であり、 この炉心体系での出力振動発生の有無を定量的に確認することは今後の課題である。

前述の検討状況を踏まえて、要件46の追加要件として以下を記載した。

6.6. 原子炉の炉心内の中性子束分布とその変化を検出・制御する適切な手段が、設計限度 を超えるような炉心領域がないことを確実なものとするために、必要に応じて設けられな ければならない。

	原子炉状態	運転ない時代の時代の時代で、時代の時代で、時代で、時代で、時代時代時代時代、時代時代時代時代は、時代時代のの、時代は、一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個
to core design (1/5)	着目パラメータ	炉心の形状と寸法、発熱(出力) 密度 応力
4.1 Evaluation items to attain safety requirements	安全要件を達成するための設計事項	運転時の異常な過渡変化時及び事故時に、燃料、原子 炉冷却材圧力バウンダリ、燃料からの FP 放出などに関す る設計限度を超えることがないよう、炉心の熱容量と伝熱 特性に関わる炉心の形状と寸法に応じて、通常運転状態 における炉心の発熱(出力)密度を適切に制限すべきであ る。 ず心及びその支持構造物は、運転状態において加わる荷 重を考慮しても、運転状態に影響を与えるような有意な破 損を生じないようにすべきである。
Table 4	機能要求	<ul> <li>一番のな国有の特件の担保</li> <li>一番のありた</li> <li>一番ののなり</li> <li>一番</li>     &lt;</ul>
	安全要件	要件 45: 炉心の構造上の 能力

	原子炉状態	······	燃料取扱時
o core design (2/5)	着目パラメータ	炉心支持黒鉛構造物(サポートポ スト)が炉心を支持するのに必要 な強度を有していること	校动
1.1 Evaluation items to attain safety requirements t	安全要件を達成するための設計事項	「行心支持黒鉛構造物、「「小支持鋼構造物及び可動反射 体ブロックは、地震時及び事故状態において加わる荷重 や黒鉛の酸化などを考慮して、原子炉圧力容器表面から の残留熱除去及び中性子吸収材の炉心への挿入を妨げ るような、並びに、被覆燃料粒子やこれを内包する燃料要 素に対して許容できない荷重を作用させるような炉内黒鉛 構造物の変位や破壊を生じないようにすべきである。 制御棒案内ブロックは、地震時及び事故状態において加 わる荷重を考慮して、中性子吸収材の炉心への挿入を妨 げるような破壊を生じないようにすべきである。 燃料体(黒鉛ブロック)は、地震時及び事故状態において 加わる荷重や黒鉛の酸化などを考慮して、原子炉圧力容 器表面からの残留熱除去を妨げるような、並びに、被覆燃 料粒子やこれを内包する燃料要素に対して許容できない 荷重を作用させるような破壊を生じないようにすべきであ る。	燃料体(黒鉛ブロック)は、輸送及び取扱いに際して加わる荷重により、運転状態に影響を与えるような有意な破損を生じないようにすべきである。
Table 4	機能要求	市 本 本 本 初 る を る 本 市 を の が の が を を を を を を を を を を を を を で の の の の の の	「 「 小 の 然 巻 恵 御 御 御 御 御 一 御 一 の 参 本 助 の 初 市 の 御 志 の 御 志 の 備 一 の 御 志 の 備 一 の 備 一 一 の 晴 二 の 備 造 健 一 一 一 一 曲 一 備 一 一 一 金 一 一 一 一 一 一 一 の 一 一 一 一 の 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 の 一 一 一 一 一 一 の 一 一 一 一 の 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
	安全要件	要件 45: 河心の構造上の 能力	

	Table 4	1 Evaluation items to attain safety requirements t	o core design (3/5)	
安全要件	機能要求	安全要件を達成するための設計事項	着目パラメータ	原子炉状態
	核的な固有の特 性(自己制御 性)の担保	すべての運転範囲で炉心が負の反応度フィードバック特性をもつように、ドップラー効果に基づく負の反応度温度係数を有し、このドップラー効果と減速材温度効果等を総合した反応度出力係数はすべての運転範囲で負となるよ	反応度温度係数、 反応度出力係数	通常運転時
要件 46:	核的な固有の特	通常運転時に起こり得る出力変化及び外乱に対して、燃料に関する設計限度を超えることがないよう、固有の負の 反応度フィードバック特性と原子炉出力制御装置により、 炉心が十分な減衰特性をもつようにすべきである。	减衰性	通常運転時
気心の制御	性(安定性)の 担保	キセノンの生成による出力分布の空間振動に対して、燃料に関する設計限度を超えることがないよう、固有の負の反応度フィードバック特性と、解析評価等により必要と判断される場合は原子炉出力制御装置により、炉心が十分 な減衰特性をもつようにすべきである。	炉規模(大きさ、中性子東レベル)、 ル)、 減衰性	通常運転時
	出力分布の適正化	通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に、燃料、原子炉冷却材圧力バウンダリ、燃料からの FP放出などに関する設計限度を超えることがないよう、燃料の濃縮度、配置、反応度調整材の配置等を適切に定め、 通常運転時に適切な出力分布とすべきである。	燃料温度、 出力分布	通常運転時

	原子炉状態	運転時の異 常な過渡変 化時	事故時	事故時			
o core design (4/5)	着目パラメータ	反応度添加量、 反応度添加率	反応度添加量	反応度添加量			
1.1 Evaluation items to attain safety requirements t	安全要件を達成するための設計事項	運転時の異常な過渡変化で想定される反応度投入事象 に対して、原子炉の緊急停止を行わなくても、燃料の健全 性を確保できるよう、制御棒の反応度添加量と反応度添 加率を制限すべきである。	想定される反応度が投入される事故に対して、原子炉の 緊急停止を行わなくても、燃料や燃料からの FP 放出など に関する設計限度を超えることがないよう、制御棒の反応 度添加量を制限すべきである。	高温全出力運転中において想定される制御棒の落下事象に対して、原子炉の緊急停止を行わなくても、燃料や燃料からの FP 放出などに関する設計限度を超えることがないよう、制御棒が落下した場合の負の反応度添加量を制限すべきである。			
Table 4	機能要求	広却し、「「」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」					
	安全要件	展					

- 24 -

# JAEA-Technology 2017-022

	原子炉状態		
to core design (5/5)	着目パラメータ	実劾増倍率、 反応度温度係数、 反応度出力係数	原子炉停止余裕
1 Evaluation items to attain safety requirements 1	安全要件を達成するための設計事項	原子炉を緊急に停止できない場合においても、燃料の設計限度を超えることなく未臨界へ移行できるよう、固有の炉停止特性をもつようにすべきである。	最大反応度効果をもつ1組の制御棒が全引抜き位置のま ま挿入できない場合においても、燃料の設計限度を超え ることなく、原子炉を停止でき、かつ、最も反応度が高い炉 心の状態(低温状態)であっても未臨界に維持できるよう、 制御棒系は適切な反応度停止余裕をもつようにすべきで ある。
Table 4.	機能要求	固有の炉停止 特性による未 臨界への移行	伝 過 米 聽 に お け る 米 臨 界 く の 移 行 と 米 臨 界の維持
	安全要件		要件 47: 原子炉の停止

	Iable 4.2 Design guides, detailed design contents and counte	LITERSULES to Spartal power oscillation III LW IV (1/2)
	BWR (浜岡 5 号炉)	PWR (大飯 3 号炉)
安全	炉心及びそれに関連する系統は、固有の出力抑制特性を有し、また	:、出力振動が生じてもそれを容易に制御できる設計であること。
設計		
指針		
適合の	・・・・の諸特性により、原子炉は出力振動に対し、十分な減	原子炉に固有の負の反応度フィードバック特性を持たせるこ
ための	<b>衰特性を有している。また、たとえ出力振動が生じても、局部出</b>	とにより、キセノンによる原子炉出力分布の空間出力振動のうち
設計	力領域モニタ等の原子炉核計装系で出力分布を監視し、燃料の許	水平方向振動は減衰特性を有する設計とする。軸方向振動は、炉
方針	容設計限界を超えないように反応度制御系により調整すること	外核計装で軸方向中性子束偏差を計測することにより確実かつ
	ができる設計とする。	容易に検出でき、制御棒クラスタを操作して、アキシャルオフセ
		ットを適正な範囲に維持することによって出力振動を抑制でき
		る設計とする。
		また、アキシャルオフセットが運転目標値から大きく逸脱した
		場合には、原子炉制御設備又は原子炉保護設備が作動し、出力低
		下あるいは原子炉トリップを行うことにより、燃料の許容設計限
		界を超えない設計とする。
核設計	(b) キセノン空間出力振動	e. 安定性
方針	出力反応度係数は、空間出力振動を十分減衰できる大きさであ	出力分布の振動が生じないように、炉心に十分な減衰特性を持
	S L L 。	たせた設計とするか、又はたとえ振動が生じてもそれを検出し、
		容易に抑制できる設計とする。

nower oscillation in LWR (1/2) enstial 4 Ş 5 1 1 1 5 and Table 4.2 Design guides, detailed design contents

	Table 4.2 Design guides, detailed design contents and count	rmeasures to spatial power oscillation in LWR (2/2)
	BWR (浜岡 5 号炉)	PWR (大飯 3 号炉)
核設計	e. キセノン空間出力振動の安定性	3.3.5.4 安定性
内容	解析方法	・・・水平方向振動は、炉心寿命中十分な減衰性を有する。軸
	キセノン空間出力振動の安定性の解析は、Randall と St. John	方向振動に対しては、・・・サイクル末期では軸方向振動が起こ
	により開発されたモード展開法を用いる。・・・	る可能性があるが、この軸方向振動は、制御グループの制御棒ク
	解析結果	ラスタを操作して、アキシャルオフセットを適正な範囲に維持す
	キセノン空間出力振動に関するパラメータは、炉心の高さと直	ることにより、容易に避けることができるとともに、たとえ振動
	径の比 (T/D)、中性子束、出力反応度係数、炉心内出力の平坦化	が生じてもそれを検出し、制御グループの制御棒クラスタの操作
	割合等である。	によって容易に抑制可能である。・・・
	•	
	大型の沸騰水型原子炉では出力反応度係数が約 -0.01(Δ	
	k/k)/(Δρ/ρ)より負であれば、出力の振動は起こらないという	
	計算結果が得られている。沸騰水型原子炉では、定格出力時の出	
	力反応度係数は、空間出力振動を十分抑制することができる範囲	
	内にある。	
出力	● 諸特性により出力振動に対して十分な減衰特性を有する。	● 原子炉の固有の反応度フィードバック特性と制御系を期待
振動へ	● 出力振動を生じても出力分布の監視により反応度制御系で	✔ 水平方向振動:原子炉の固有の反応度フィードバック特性
の対応	調整	✓ 軸方向振動 : 軸方向中性子束偏差の監視
	【補足】 炉特性の観点からは、通常運転の範囲内で空間出力振	→ 制御棒クラスタ操作,制御設備・保護設備による出
	動が生じることはないが、指針に合致するように振動	力低下、原子炉トリップ
	発生時に対処する制御系を装備しているものと考えら	
	れる。	

	Table 4.3	Comparison of core physics par	ameters concerning stability t	o spatial power oscillati	on
	五 石 石	秩中で政	±(cm)	(****2)邪與当的快要為生。之一也作中	熱中性子東レベル
	<b>水</b> ナ 沙	表生生的	有効高さ	计性于小参到此商E(CIII)	$(n/cm^{2/s})$
	HTTR (30 MWt)	$120^{20}$	2902)		$2 imes 10^{13}$ (最大) $^{2)}$
HTGR	GTHTR300 (600 MWt)	280 <sup>10)</sup> (半径 190cm の内側反射体等領域を含 む)	840 <sup>10)</sup>	219)	7×10 <sup>12</sup> (平均) <sup>10)</sup> 2×10 <sup>13</sup> (最大) <sup>10)</sup>
	Fort St. Vrain 炉 (842 MWt)	30011)	47011)		5×10 <sup>13</sup> (本均) <sup>11)</sup>
	PBMR (400 MWt)	190 <sup>12)</sup> (半径 100cm の内側反射体領域を含む)	1100 <sup>12)</sup>		l
ΡW	R(大飯 3 号)	1708)	$370^{8)}$	6.69)	l
BW	R(浜岡 5 号)	$260^{7)}$	$370^{7)}$	(68.7	4×10 <sup>13</sup> (平均) 7)
GTHTR3(	<b>30:</b> 原子力機	構が設計検討を進めている実用高	温ガス炉		

- 28 -

Fort St. Vrain 炉: 米国の高温ガス炉原型炉(運転実績あり。廃炉)

南アフリカ共和国で検討された実用高温ガス炉

**PBMR**:

JAEA-Technology 2017-022



Fig.4.1 Outline of core design



Fig.4.2 Method for integrity assurance to HTGR graphite components



Fig.4.3 Stability to spatial power oscillation in cylindrical core configuration of HTGR

#### 5. おわりに

日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会において策定した安全要件を、 実用高温ガス炉を構成する構築物、系統及び機器の具体的な設計に展開することを目的とし、安 全要件を達成するために安全設計において評価すべき事項(安全要件を達成するための設計事項) として、実用高温ガス炉を構成する燃料やSSCの設計のうち、重要性が高く、かつ、安全要件が 軽水炉のそれと大きく異なる、燃料設計、炉心設計、原子炉冷却材系設計、2 次冷却材系設計、 崩壊熱除去系設計、格納施設設計を対象とし、その中から、燃料設計及び炉心設計について、安 全要件の機能要求ごとに、安全要件を達成するための設計事項を導出した。導出した設計事項は、 実用高温ガス炉の燃料及び炉心の設計に関する安全指針の基礎となるものであり、今後の IAEA や国内規制当局における安全指針の策定に資することが期待される。

#### 謝 辞

実用高温ガス炉の燃料及び炉心の安全要件を達成するための設計事項の導出、検討に当たって、 貴重なご意見を頂いた高温ガス炉水素・熱利用研究センター 國富一彦センター長、橘幸男ディ ビジョン長に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Yan, X. L., Hino, R., Nuclear Hydrogen Production Handbook, CRC Press, New York, 2011, p. 211.
- 2) Saito, S., et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), JAERI 1332, 1994, 247p.
- 3) 高温ガス炉の安全性について(「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会最終報告),日本 原子力学会,2015 年春の年会.
- IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev.1), 2016.
- 5) Shibata, T., et al., Draft of Standard for Graphite Core Components in High Temperature Gas-cooled Reactor, JAEA-Research 2009-042, 2010, 119p.
- 6) 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針について,原子力安全委員会,平成2年8 月.
- 7) 中部電力株式会社, 浜岡原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書, 平成9年4月.
- 8) 関西電力株式会社,大飯発電所 原子炉設置変更許可申請書,平成14年8月.
- 9) 成田正邦,藤田文行 共訳,原子炉の理論と解析,現代工学社,1981.
- 10) 中田哲夫他,高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の核熱流動設計,日本原

子力学会和文論文誌, Vol.2, No.4, 2003, pp.478-489.

- 11) Habush, A. L. and Harris, A. M., 330-MW(e) Fort St. Vrain high-temperature gas-cooled reactor, Nuclear Engineering and Design, Vol.7,1968, pp.312-321.
- 12) Strydom, G., Xenon-induced axial power oscillations in the 400MW PBMR, Nuclear Engineering and Design, Vol.238, 2008, pp.2960-2975.
- 深谷裕司他,高温ガス炉設計のための解析解によるキセノン安定性判別に関する研究, JAEA-Research 2016-008, 2016, 52p.

\_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例					
AI 立長 SI 組立単位					
名称	記号				
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>				
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$				
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m	
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$	
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>	
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>	
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>	
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd	
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>	
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$	
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol	

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с	
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m	
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ	
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р	
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а	
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z	
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

#### 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
3	名称		記号	SI 単位で表される数値	
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m	

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T			
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>			
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」					

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
/3	Ц		9			(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$