

「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)

(3) 安全要件を達成するための設計事項

(3) Safety design issues to meet the safety requirements

*大橋 一孝¹

¹富士電機

1. はじめに

日本原子力学会では実用高温ガス炉の安全基準作成や国際標準化に資するため、平成 27 年度から 2 年間、「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」研究専門委員会において、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）をつなぐ考え方の構築を進めてきた。具体的には、「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会（平成 25～26 年度）において作成した安全要件の実際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、安全要件を達成するために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。）を検討した。本講演では、この検討結果について報告する。

2. 検討範囲

検討にあたり、基本方針を以下のように定めた。

- 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。（例えば、要件：フェールセーフ設計、要件：安全上重要な設備の校正、試験、保守、修理、交換、検査及び監視、など）
- 高温工学試験研究炉（HTTR）や原子力機構が設計した実用高温ガス炉（GTHTTR300）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。

上記の検討方針に従い、全 82 の要件から構成させる実用高温ガス炉の安全要件のうち、燃料及び以下に示す SSC の設計に関する安全要件を検討範囲とした。

(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

3. 検討結果

上記検討範囲の安全要件について、各安全要件に規定されている機能要求を整理し、それら各機能要求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）へと展開した。ここでは、一例として、燃料設計のうち「被覆燃料粒子の性能」に関する安全要件（表1）及び炉心設計のうち「原子炉の炉心の制御」に関する安全要件（表2）についての検討結果を以下に示す。

3-1. 燃料設計

被覆燃料粒子の性能に対する安全要件（表1）では、下線付括弧書きで示すように、「運転状態、事故状態及び燃料取扱時の構造健全性維持」が機能要求として規定されている。この機能要求について、安全要件を達成するための設計事項へ展開した結果を表3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」及び「燃料取扱時」に分類して整理し、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ことを定めた。

3-2. 炉心設計

原子炉の炉心の制御に関する安全要件（表2）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」が機能要求として規定されている。この機能要求から安全要件を達成するための設計事項へと展開した結果を表4に示す。

「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。

また、「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、炉心を大型（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。このような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。

「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。

表 1 燃料設計（被覆燃料粒子の性能）に関する安全要件

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。【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。

表 2 炉心設計（原子炉の炉心の制御）に関する安全要件

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。【核的な固有の特性（自己制御性、安定性）の担保】。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。【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にものとするために、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】。

表 3 燃料設計（被覆燃料粒子の性能）に関する安全要件を達成するための設計事項

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
通常運転時の構造健全性維持	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 - 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 ② 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 - 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 ③ 被覆燃料粒子内の金属核分裂生成物の化学的影響 - 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	燃料破損率等 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：応力 ②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：燃料核移動距離 ③被覆燃料粒子内の金属核分裂生成物の化学的影響：腐食距離	通常運転時
運転時の異常な過渡変化時及び事故時の構造健全性維持	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、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 異常昇温による SiC 層の熱的劣化 - 評価事象の例：除熱異常、反応度投入 ② 異常昇温による内圧上昇 - 評価事象の例：除熱異常、反応度投入 ③ 酸化性ガス（空気、水・蒸気）による酸化の影響 - 評価事象の例：空気侵入、水侵入	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）	運転時時の異常な過渡変化時 事故時
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	応力	燃料取扱時

表 4 炉心設計（原子炉の炉心の制御）に関する安全要件を達成するための設計事項

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うにすべきである。	反応度温度係数、 反応度出力係数	通常運転時
核的な固有の特性（安定性）の担保	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。	減衰性	通常運転時
	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、 中性子束レベル）、 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
反応度添加の抑制	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。	反応度添加量、 反応度添加率	運転時の異常な過渡変化時
	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。	反応度添加量	事故時
	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。	反応度添加量	事故時

4. まとめ

原子力学会研究専門委員会「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」において検討した、安全要件を達成するための設計事項について報告した。当該設計事項は、燃料や原子炉を構成する SSC の設計において性能水準要求を定める安全指針の基本的考え方となるものである。今後、本検討結果を含め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。

*Kazutaka Ohashi¹

¹Fuji Electric