

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	効率的なPu燃焼特性を有する高温ガス炉システムの3S特性とシナジー効果
Title(English)	
著者(和文)	青木健
Author(English)	Takeshi Aoki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10809号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:相樂 洋,小原 徹,千葉 敏,木倉 宏成,林崎 規託
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10809号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	原子核工学	専攻	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	青木 健		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	相樂 洋	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor (sub)	小林 能直	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本研究では不活性母材燃料核を用いた多重被覆粒子炭化物燃料(以下不活性母材燃料と呼ぶ)を高温ガス炉炉心に導入する場合に、多重リサイクル不要で迅速な Pu 低減性能及び 3S (安全、核セキュリティ、核不拡散) 特性向上効果を定量的に評価し、3S 特性のシナジー効果を有する先進的高温ガス炉システム概念を提案した。

まず単離 Pu を高温ガス炉燃料として扱う上で、大きな余剰反応度と毒物として働く ^{240}Pu 割合増加による技術的、核不拡散上の課題を述べた上で、Pu を単離せず TRU と不活性母材を導入した新しい燃料核の効率的 Pu 燃焼への効果を明らかにし、核データ誤差による反応度への影響と Pu マスバランスを評価した。不活性母材による燃料核の希釈と中性子スペクトル調整を行い ^{240}Pu 自己遮蔽効果を低減することで、初期余剰反応度を 0.06、燃焼反応度変化($\Delta k_{\infty}/k_{\infty, \text{BOC}}$)を 6%にまで低減できる優れた制御性に加え、Pu 及び核分裂性 Pu をそれぞれ約 60wt.%、約 80wt.%もの大幅に低減できる Pu 燃焼特性と燃料設計条件を見出した。本不活性母材燃料の初期反応度に対する核データ誤差の影響は、初期余剰反応度の範囲内で収まることを明らかにした。約 47t の分離 Pu を本不活性母材燃料に導入し高温ガス炉で利用する燃料サイクルのマスバランスを評価した結果、Pu を 20t、核分裂性 Pu を 6t にまで低減でき、MOX 燃料として軽水炉で利用した場合と比べて、各々約 6 割、3 割まで大幅に低減できることを明らかにした。一方で膨大な使用済み黒鉛廃棄物の管理や地層処分場における安定性といった新たな課題を指摘した。

次に本高温ガス炉システムの安全性として基本的核的安全特性と事象に対する原子炉応答を評価した。本不活性母材燃料の核的安全特性としてウランフリー燃料で悪化が懸念されるドップラー係数、遅発中性子割合と減速材温度係数を評価した結果、遅発中性子割合が 0.26%(BOC)/0.44%(EOC)となりウラン酸化物燃料核を用いた場合より悪化したものの、ドップラー係数が自己遮蔽効果低減によって大きく改善し、減速材温度係数と合わせて標準的なウラン燃料装荷高温ガス炉と同等となる優れた核的安全特性を明らかにした。また発生頻度は低いが影響の大きい反応度挿入事故や減圧事故に対する燃料及び圧力容器温度を評価した。遅発中性子割合を考慮した制御棒引抜に伴う反応度挿入事故では燃料最高温度が設計温度 1600°Cを下回り、燃料の健全性を確認した。一方で減圧事象では使用済み不活性母材燃料の高い崩壊熱量により燃料及び圧力容器最高温度が設計温度を超過した。そこで炉心高さの伸長を採用した新たな炉心設計を提案し、燃料及び圧力容器最高温度が設計温度を下回り、原子炉健全性を担保できる条件を明らかにした。

次に本高温ガス炉システムの核セキュリティ性を物質的特性、技術的特性、妨害破壊行為に対

する原子炉応答の観点から包括的に評価した。本高温ガス炉システム中の核物質について、非国家主体による核爆発装置製造への不正利用価値を評価した結果、MOX 粉末に比べて多重被覆粒子燃料や不活性母材燃料核の化学的安定性が処理時間と複雑性を増大し、不正利用価値が低くなることを明らかにした。同システムの発電所の保管燃料に対する盗取や妨害破壊行為の阻止確率を評価し、湿式貯蔵 MOX 燃料集合体の場合と比較した結果、乾式燃料貯蔵ピットの物理的境界の違いによる遅延時間と阻止確率の増加及び重要検知点を一層分安全側に変動させる程の大きな影響を明らかにした。更に妨害破壊行為による SCRAM 失敗を伴う反応度挿入事故や炉容器冷却機能低下を伴う減圧事故といった安全—セキュリティ複合事象を新たに設定し評価した結果、いずれも燃料最高温度が設計温度を下回るものの、後者については 50%の炉容器冷却機能低下に対し、圧力容器最高温度が約 680°Cにまで著しく上昇する新たな技術課題を見出した。

次に本高温ガス炉システム中の核不拡散性について、核物質の不正利用価値、システム全体の核拡散抵抗性、計量管理に求められる Pu 量測定精度に基づき評価した。本高温ガス炉システム中の核物質について、国家による核爆発装置製造への不正利用価値を評価した結果、多重被覆粒子燃料や不活性母材燃料核は MOX 粉末に比べて化学的安定性により処理時間を増大し、照射の有無に関わらず燃料製造後の核物質は不正利用価値を使用済燃料と同等以下となる事を明らかにした。また本システム全体の核拡散抵抗性評価より、不活性母材燃料核の処理において低い Pu 抽出率を想定した場合、転用や輸送の対象核物質質量が増大し、核物質取扱困難性と輸送時の検知回避困難性が増し、核拡散抵抗性が向上することが分かった。また物質収支区域の設計と物質不明量の測定誤差に基づき、Pu 量測定精度要求を評価した結果、高い保障措置水準に対して新燃料で約 4%以下、使用済燃料で約 6%以下となり(棚卸し間隔：1 ヶ月、Pu スループット：約 27kg/年(高温ガス炉 1 基相当))、これを超える Pu スループットでは、ニア・リアルタイム計量管理の適用など頻度増加による保障措置目標達成の必要性を見出した。

最後に革新的高温ガス炉概念を提案し、効率的 Pu 燃焼と 3S 特性の向上やシナジー効果を総合評価し、MOX 燃料装荷軽水炉と比較し、核分裂反応による Pu 有効利用、Pu 低減性能及び 3S 特性の側面での優位性を明らかにした。また核物質の不正利用価値に基づく等級別扱いを導入することで、多重被覆粒子や不活性母材燃料に対する物理的防護措置や保障措置を合理化できる可能性があることを明らかにした。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	原子核工学	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名 : Student's Name	青木 健		指導教員 (主) : Academic Supervisor(main)	相樂 洋	
			指導教員 (副) : Academic Supervisor(sub)	小林 能直	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

The feasibility of the advanced high temperature gas cooled reactor (HTGR) featuring enhanced 3S (Safety, Security, Safeguards/non-proliferation) and their synergies were quantitatively evaluated, and the innovative reactor concept was proposed for rapid plutonium incineration fueled with tri-isotropic fuel particles (TRISO) using inert matrix fuel (IMF) kernel. By changing the fuel design with diluting fuel kernel by inert matrix and the fuel pin pitch in graphite fuel block for neutron spectrum adjustment, the remarkable controllability reducing initial excess reactivity to 0.06 and reactivity swing to 6% Δk_{∞} , and efficient plutonium incineration reducing about 60wt.% of initial plutonium loading in two reactor batch cycle were achieved. With the proposed HTGR for plutonium incineration in the fuel cycle in Japan, the stockpile of 47t of separated plutonium could be reduced to 20t. However new concerns on waste management of huge spent fuel blocks were pointed out. In the reactor response analysis assuming the reactivity insertion accident, the fuel temperature was evaluated as within the design value. In the depressurization accident, fuel and reactor pressure vessel (RPV) temperatures were revealed to exceed the design values. To overcome this problem, a new core design was proposed by expanding the core height and reducing the heat density. The material attractiveness of the TRISO and the IMF kernel for non-state actors were evaluated and revealed to be lower relative to MOX powder because their chemical stability increased processing time and complexity. In the reactivity insertion accidents without SCRAM and depressurization accidents with failure of RPV cooling, fuel temperature was evaluated as within the design value but technical problem of RPV temperature exceeding the design value were revealed in the latter accidents. The material attractiveness for states of the TRISO and the IMF kernel were evaluated and revealed to be equal or lower relative to irradiated uranium fuel because they need more processing time. The prospects of improving cost-effectiveness of physical protection systems and safeguards for them were indicated by introducing graded approach based on material attractiveness.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).