

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高い固有安全・核不拡散性を有する ケイ化物燃料装荷中小型軽水炉の研究
Title(English)	
著者(和文)	三星夏海
Author(English)	Natsumi Mitsuboshi
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12459号, 授与年月日:2023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,片淵 竜也,木倉 宏成
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12459号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

学位論文要約

融合理工学系 原子核工学コース

三星 夏海

指導教員：相樂 洋 准教授

論文題目：「高い固有安全・核不拡散性を有するケイ化物燃料装荷中小型軽水炉の研究」

要約：

本論文は「高い固有安全・核不拡散性を有するケイ化物燃料装荷中小型軽水炉の研究」と題し、6章から構成されている。

第1章「序論」では研究背景として、中小型炉は分散型かつ安定的なエネルギー源として期待されており、固有安全を積極的に取り入れた概念が多数提案されているが、固有安全と核不拡散性に基づいた等級別アプローチを取り入れることが規制上での課題であることを述べ、特に核不拡散上の具体的な研究がほとんどなされていない課題を指摘している。また、事故耐性燃料の候補材の一つであるケイ化物燃料に関する既往研究より明らかにされている固有安全性の強化に加え、化学的安定性による核不拡散性強化の可能性を指摘している。そこで本研究では、ケイ化物燃料を装荷した中小型軽水炉の炉心核熱特性および核不拡散性を定量的に明らかにし、それらを活用した高い固有安全と核不拡散性を有する中小型軽水炉システム概念を提案すると共に、技術及び規制上の課題を明らかにすることを目的とし、本研究の位置づけ、意義を述べた。

第2章「ケイ化物燃料の核熱特性」では最初に、典型的な PWR 燃料集合体仕様を基に作成した 2次元実効燃料ピンセルモデルに対する中性子輸送及び燃焼計算に基づき U ケイ化物燃料と U 酸化物燃料を比較した結果、ケイ素同位体の中性子捕獲断面積が酸素同位体に比べて非常に大きいものの、ケイ化物燃料の高い重金属密度により、同じウラン濃縮度の酸化物燃料よりも燃焼期間が 17%延長されることを明らかにした。U 燃料にマイナーアクチノイド (MA) を微量に添加した場合、初期余剰反応度及び燃焼反応度変化が大幅に抑制され、ケイ化物燃料に添加することでさらに燃焼可能期間が延長されることを明らかにした。次に、中小型軽水炉モデルとして熱出力 160 MW の一体型 PWR を参照し、オンサイト燃料交換型炉 (1 バッチ 2 年、3 バッチサイクル) として用いる場合、および可搬型炉 (1 バッチ 10 年) として用いる場合における燃料設計条件を導出し、ドップラー係数、減速材温度係数、実効遅発中性子割合の評価により核的安全性を確認した。最後に、定常時の安全性評価として燃料ピン内温度分布を核熱解析コードにより評価し、ケイ化物燃料内の最高温度は酸化物燃料よりも 500 K 以上低くなり、融点までの安全裕度が大きくなることを明らかにした。

第3章「核セキュリティ性」ではケイ化物燃料を装荷したオンサイト燃料交換型炉シス

テムおよび可搬型炉システム中の核物質に対して、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、酸化燃料に比べてケイ化物燃料の有する化学的安定性により、Pu 単離のための処理工程の複雑さを増大させることを明らかにした。さらに、MA や ^{241}Am , ^{237}Np を 0.3~1% 添加したケイ化物燃料の場合、原子炉内核変換により ^{238}Pu 等の偶数番号 Pu 同位体を生成し、崩壊熱を増大させるため、核爆発装置の使用をより困難とし不正利用価値を 1 段階下げることが明らかにした。また、同システムに対して、設計基準事故シナリオ及び設計基準外事故シナリオに基づき、妨害破壊行為に対する枢要設備を評価し、固有安全性強化による対象枢要設備の簡素化を明らかにすると共に、中小型炉固有の課題を指摘した。

第 4 章「核拡散抵抗性」ではオンサイト燃料交換型炉システムおよび可搬型炉システムに対して、施設の不正使用ならびに核物質の転用経路解析を行い、核拡散抵抗性を評価した。非核兵器保有国である先進工業国または開発途上国が申告施設から核物質を秘密裏に転用する脅威を定義した。評価指標の「核分裂性物質タイプ」については国家に対する不正利用価値を用いた。結果として、いずれのシステムにおいても、原子炉そのものを搬出する中小型炉特有の転用経路を明らかにした。可搬型炉システムにおいては、オンサイト燃料交換が不要であるため、想定される経路を限定できることを明らかにした。また、オンサイト燃料交換型炉では計量管理を燃料集合体単位で行うため、従来大型炉同様の検認が求められるのに対し、可搬型炉においては工場にて燃料装荷・封印後に原子炉単位で行うリバッチを仮定すると、実在庫検認は原子炉の ID 確認、員数検査のみとなり、複数原子炉を同時に行え、保障措置の合理化が可能であることを明らかにした。一方、可搬型炉システムにおいて長期運転期間に渡り保障措置を封じ込め監視 (C/S) に大きく依存することになり、直接核物質情報取得のための非破壊測定技術などの検認手法が今後の重要な技術課題を明らかにした。

第 5 章「高い固有安全および核不拡散性を有する中小型軽水炉システムの概念設計」では、第 2 章から第 4 章までの議論で得られた知見を基に、中小型軽水炉システム概念設計を設計し、反映すべき方策や検討すべき課題について議論した。まず、オンサイト燃料交換型炉システムと可搬型炉システムにおける炉心概念を、核特性および熱解析に基づき設計した。また、核セキュリティシステムとして、核物質および枢要設備を含む物理的防護の設計、並びに、保障措置設計を行い、等級別アプローチに基づく合理的な規制を提案した。さらに、ケイ化物燃料サイクルを提示し、安全性及び核不拡散性を向上させた新たな軽水炉利用のかたちを示した。最後に、技術及び規制上の課題として、商業レベルのケイ化物燃料の再処理技術開発や可搬型炉に対する直接検認手法の開発の必要性、および可搬型中小型炉輸送上の課題を明らかにした。

第 6 章「結論」では各章によって得られた結果を総括し、本論文の結論とした。