

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

## THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	三星 夏海		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	相楽 洋
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)	

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

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、世界で進められている中小型軽水炉研究開発を概観し、固有安全性の強化が図られる一方で、遠隔地など多様な立地における核不拡散上の実効性の課題を指摘し、高い重金属密度、熱伝導性、化学的安定性を有するケイ化物燃料を装荷した中小型軽水炉の核熱特性および核不拡散性を定量的に明らかにし、高い固有安全・核不拡散性を有する新しい中小型軽水炉システム概念を提案することを目的とし、本研究の位置づけ、意義を述べている。

第 2 章「ケイ化物燃料の核熱特性」では、ケイ化物燃料の中小型 PWR における基本的な核熱特性を、2 次元実効燃料ピンセルモデルを用いた核・熱解析により評価している。まず、典型的な PWR 燃料集合体仕様にに基づいた U ケイ化物燃料の中性子輸送・燃焼計算を行い、高い重金属密度により同じ U 濃縮度の酸化物燃料よりも燃焼可能期間が 17%増加すること、マイナーアクチノイド (MA) の微量添加により燃焼反応度変化の抑制および燃焼可能期間を増加することを明らかにした。次に一体型中小型 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)、およびオンサイト燃料交換を行わない可搬型炉 (1 バッチ 10 年) 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。定常運転時の安全性評価として燃料ビン内温度分布を核熱解析コードにより評価し、ケイ化物燃料ビン内の最高温度は酸化物燃料よりも 500 K 以上低く安全裕度大きい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および可搬型炉システムの核セキュリティ性を評価している。システム内の核物質の核爆発装置製造への不正利用価値を評価し、ケイ化物燃料からの Pu 単離においてケイ素の清澄工程を要し、酸化物に比べ処理の複雑さを増大させることを明らかにした。またケイ化物燃料に MA や <sup>241</sup>Am を 0.3 ~1%添加することにより、燃焼を通じて生成される Pu の不正利用価値を引き下げることが明らかにした。さらにケイ化物装荷中小型 PWR システムの設計基準事故シナリオおよび設計基準外事故シナリオに基づく安全-セキュリティ複合事象を想定し、妨害破壊行為に対する枢要設備評価を行い、固有安全性の強化が枢要設備の簡素化にも繋がる相乗効果を明らかにすると共に、複数原子炉ユニットを設置する原子炉プールが共通起因事象となり得る、モジュラー炉特有の新たな課題を見出した。

第 4 章「核拡散抵抗性」では、ケイ化物燃料を装荷しオンサイト燃料交換型炉および可搬型炉システムに対して、施設の不正使用および核物質の転用経路解析を行い、核拡散抵抗性を評価している。オンサイト燃料交換型炉では、従来の大型炉同様にプール貯蔵核燃料の転用経路が脆弱であり、単位出力当たりの査察業務量が大型炉に比べ大幅に増加する。一方、可搬型炉においては工場にて燃料装荷・封印し、使用済燃料への直接接近が困難になり、大型炉より少ない査察業務量にまで合理化可能であることを明らかにした。一方、長期運転期間に渡り保障措置を封じ込め・監視に依存するため、核物質や原子炉内情報の直接取得のための非破壊測定技術開発が今後の重要な課題となることを指摘した。

第 5 章「高い固有安全と核不拡散性を有するケイ化物燃料装荷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、ケイ化物燃料装荷中小型軽水炉システム概念設計を行った。まず、熱出力 160 MW の一体型 PWR であり、オンサイト燃料交換型炉システムと可搬型炉炉心概念を、ケイ化物燃料装荷炉心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、安全性およ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、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、本論文の結論としている。

これを要するに本論文は、ケイ化物燃料を装荷した中小型軽水炉は、中性子経済性、固有安全性および核不拡散性の同時強化が可能であり、合理的な安全、核セキュリティおよび保障措置を可能とし、多様な社会的要請に応える原子力の平和利用に対し技術的に資するものである。

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).

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学系 原子核工学	系 コース	申請学位(専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	三星 夏海		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	相楽 洋	
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨(英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this study, the feasibility of small and medium LWR system concept loaded with uranium silicide fuel with high inherent safety and non-proliferation features was evaluated, the conceptional system design was proposed, and technical and regulatory issues were revealed.

Firstly, the neutronics and the thermal hydraulics characteristics of uranium silicide fuel were evaluated. The higher heavy metal density of uranium silicide fuel results in 17% longer burnable period than uranium oxide fuel with the same uranium enrichment. Doping of trace amounts of minor actinides (MAs) to the fuel significantly suppressed the initial excess reactivity and burnup reactivity and extended the burnable period. Referring to the 160 MWth integrated PWR as a reference model, fuel performance on neutronics and thermal hydraulics were evaluated, and the fuel design specification was derived for the on-site refueling reactor and for the transportable reactor.

Nuclear security features were evaluated in the material attractiveness of silicide fuel for theft treats and vital equipment identification for sabotage by non-state actors. The chemical stability of silicide fuels increases the complexity of the processing steps for Pu separation compared to oxide fuels, and doping with 0.3~1% MA, even-numbered Pu isotopes are generated by fuel incineration and increases the amount of decay heat of Pu, the silicide fuel was evaluated as less attractive than oxide fuel. In addition, the vital equipment for the system were identified against sabotage threats, and issues specific to small and medium reactors were revealed.

Thirdly, proliferation resistance was evaluated, and a unique diversion path, such as illegal transfer of nuclear reactor itself, was identified for both systems. Due to no fuel exchanges are required with transportable reactors, much simpler and more efficient and safeguards verification were required for transportable reactors. On the other hand, since safeguards in transportable reactor systems will be heavily dependent on containment and surveillance(C/S) during long-term operation, direct verification methodology would be an important technology in the future.

Finally, the conceptual design of the small and medium LWR system with high inherent safety and nonproliferation was designed, and technical and regulatory issues were revealed.

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).