

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	軽水炉取り出しプルトニウムを起動炉心に用いたCANDLE燃焼高速炉
Title(English)	
著者(和文)	大里洋輝
Author(English)	Hiroki Osato
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11194号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小原 徹,千葉 敏,赤塚 洋,相樂 洋,片淵 竜也
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11194号, Conferred date:2019/3/26, 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	大里 洋輝		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	小原 徹 教授
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)	

### 要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

第 1 章「序論」では、本研究の背景および目的について述べた。エネルギー資源の乏しい日本にとって、長期的かつ安定的なエネルギー源となりうる高速炉の実用化は不可欠である。しかしながら、我が国の高速炉の研究開発および軽水炉核燃料サイクルは当初計画から遅延している。また、日本は原子力政策のプルトニウムに関する基本方針を、「利用目的のない余剰プルトニウムは持たない」としているが、2017 年末時点で国内外におよそ 211 t の軽水炉プルトニウムを保有している。そこで、高速炉研究開発の遅延および軽水炉プルトニウムの蓄積に関する課題の解決策として、軽水炉使用済燃料由来のプルトニウムを用いた CANDLE 燃焼高速炉の起動を提案する。以上の背景を踏まえ、本研究の目的は、軽水炉使用済燃料由来のプルトニウムを用いてより多くの CANDLE 燃焼高速炉を起動するため、初期装荷プルトニウム量が最小となる起動炉心の設計条件を明らかにすることとした。

第 2 章「解析方法」では、全炉心設計、燃料ピン格子設計および解析コードについて述べた。既往研究結果をもとに、金属燃料および鉛ビスマス冷却材を用いた熱出力 3000 MWth の CANDLE 燃焼高速炉を採用した。解析は決定論的手法を用いることとした。核計算コードは、日本原子力研究開発機構において開発された SRAC コードおよび COREBN コードを利用し、核断面積ライブラリには JENDL-4.0 を使用することとした。

第 3 章「軽水炉プルトニウムを用いた起動炉心設計」では、軽水炉取り出しプルトニウムを用いた CANDLE 燃焼高速炉の起動炉心設計を行った。まず、プルトニウム燃料を円盤状に装荷した起動炉心の設計を行った。設計条件は、初期装荷プルトニウム量が最小となり、かつ運転期間中に臨界となることとした。解析の結果、初期装荷プルトニウムの最小量は 3.58 t であり、そのときの起動炉心の設計条件は、プルトニウム燃料のプルトニウム富化度：13%、プルトニウム-ウラン燃料領域の厚さ：40 cm、炉心最上部の天然ウラン燃料領域の厚さ：5 cm であることが明らかとなった。次に、平衡状態のプルトニウム分布を模擬した起動炉心設計を行った。設計条件は、初期装荷プルトニウム量が最小となり、運転期間中の実効増倍率が常に 1 以上となり、かつ余剰反応度が 1%以下となることとした。解析の結果、初期装荷プルトニウムの最小量は 2.76 t であり、そのときの起動炉心の設計条件は、スタータ燃料厚さ 55 cm、スタータ燃料のプルトニウム富化度 11.2%、スタータ燃料とブースタ燃料の間の距離 20 cm、ブースタ燃料のプルトニウム富化度 1.4%、置換ブースタ燃料位置 25 cm、置換ブースタ燃料厚さ 5 cm であることが明らかとなった。

第 4 章「炉心特性評価」では、第 3 章で設計した CANDLE 燃焼高速炉の炉心特性評価を行った。まず初めに、だるま落とし式燃料交換法を適用することにより、平衡状態の炉心特性を解析した。解析の結果、平衡状態における燃焼波の移動速度は 3.7 cm/年であり、使用済燃料の平均燃焼度は 446 GWd/t であることが明らかとなった。次に、移行過程および平衡状態における温度係数を評価した。解析の結果、温度係数は運転初期においては負となったが、移行過程の中盤以降および平衡状態において正となることが明らかとなった。また、定常運転時における静的熱流動解析を COMSOL Multiphysics ソフトウェアを用いて行った。解析の結果、平衡状態においては原子炉は十分に冷却可能であることが明らかとなったが、初期炉心においては冷却能力が不足することが明らかとなった。この課題を解決するため、炉心全体の熱出力を低下させることで、初期炉心において熱出力が 700 MWth のとき原子炉は冷却可能であることが明らかとなった。次に、高速中性子の照射による燃料被覆管の損傷度の評価を行った。解析の結果、被覆管損傷度の最大値は 1390 dpa に達し、現在知見のある上限の 200 dpa を大きく超えることが明らかとなった。最後に、平衡状態における使用済燃料の崩壊熱評価、放射性毒性評価および核拡散抵抗性評価を行った。崩壊熱評価および放射性毒性評価は ORIGEN-2.2 コードを用いて行った。崩壊熱評価では、CANDLE 燃焼高速炉の使用済燃料の崩壊熱は、運転停止直後は加圧水型軽水炉よりも小さいが、その後は CANDLE 燃焼高速炉の方が大きくなることが明らかとなった。また、放射性毒性評価では、CANDLE 燃焼高速炉の使用済燃料の放射性毒性は、運転停止後 1000 万年において、加圧水型軽水炉の使用済燃料および天然ウラン燃料の放射性毒性と同程度になることが明らかとなった。最後に、核拡散抵抗性評価では、平衡状態における使用済燃料中の Pu240 同位体比は 27.3%であり、これはプルトニウム品位の分類においては原子炉級に該当するが、加圧水型軽水炉の使用済燃料の Pu240 同位体比よりは大きく、事実上兵器への利用が不可能である MOX 級の 30%に近い値となることが明らかとなった。

第 5 章「メルトリファイニング法の適用」では、第 3 章で設計した CANDLE 燃焼高速炉の初期炉心から平衡状態に至る移行過程における燃料被覆管の健全性の課題を解決するため、メルトリファイニング法を適用した移行過程の燃焼解析を行った。メルトリファイニング法を用いた燃焼計算の方法は、EBR-II におけるメルトリファイ

ニング工程を参考にした。解析では、燃料被覆管損傷度が 200 dpa を超える度にメルトリファイニング法を適用した。まず初めに均質化だけを適用した燃焼計算を行った。解析の結果、均質化だけでは原子炉は運転期間中に未臨界となることが明らかとなった。次に、特定元素の除去を追加適用した燃焼計算を行った。解析の結果、特定元素の除去により原子炉は運転期間中常に実効増倍率が 1 以上となることが明らかとなった。次に、冷却および待ち時間を追加適用した燃焼計算を行った。解析の結果、冷却および待ち時間を追加することにより実効増倍率は低下したものの、運転期間中常に臨界となることが明らかとなった。最後に、質量損失を追加適用した燃焼計算を行った。解析の結果、質量損失率が 1%より大きくなると原子炉は運転期間中に未臨界となることが明らかとなった。以上より、燃料被覆管の健全性の課題を解決するため、CANDLE 燃焼高速炉の移行過程に対してメルトリファイニング法を適用した場合、運転期間中に実効増倍率が常に 1 以上となる条件は、冷却時間 7 年、均質化、特定元素の除去、質量損失率 1%、待ち時間 1 年であることが明らかとなった。

以上より本研究では、最小量の軽水炉使用済燃料由来のプルトニウムを起動炉心に用いた CANDLE 燃焼高速炉の設計条件を明らかにするとともに、燃料被覆管損傷の課題を解決するためのメルトリファイニング法の CANDLE 燃焼高速炉の移行過程への適用条件を明らかにした。

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

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)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	大里 洋輝		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	小原 徹 教授	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

The purpose of this study was to determine the initial core design of the CANDLE burning fast reactor using the minimum amount of plutonium from LWR spent fuel, using the lowest number of fuel types, and having excess reactivity below 1% throughout its entire operating period. In the reactor design, metallic fuel, sodium bond, 9Cr-ODS cladding and lead-bismuth coolant were adopted. The calculations were performed by SRAC and COREBN code systems with JENDL-4.0 nuclear data library. An initial core was designed with a starter fuel to start up the reactor, and a booster fuel to increase the effective multiplication factor. This reactor could maintain both criticality and a maximum excess reactivity of less than 1% during the entire operating period. Characteristics of the designed reactor was evaluated. Temperature coefficient could be negative at the early stage of operation period, but positive afterward. In thermal hydraulic analysis, fuel could be cooled sufficiently in the equilibrium state, and could be cooled in the transition state with decreasing reactor power. In the spent fuel analysis, both decay heat and radiotoxicity of CANDLE spent fuel were smaller than that of PWR, and the nonproliferation resistance of CANDLE spent fuel was higher than that of PWR. In the fuel cladding integrity analysis, the cladding irradiation damage in the transition state exceeded the criteria of cladding damage of 200 dpa. Therefore, in order to solve the cladding irradiation issue at the high burnup condition, the melt-refining process was applied. The melt-refining process was applied to the reactor each time cladding damage approached the criteria. In the analysis, each process was applied step by step. First was the homogenization process, which only decreased the reactivity. Second, FP removing increased reactivity well. Third, waiting and cooling time decreased reactivity. Finally, mass loss decreased reactivity. It was shown that the reactor was able to maintain criticality during the transition period with the melt-refining process.

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).