

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	燃料連続移動シャッフリングを用いたブリードバーン型高速炉の設計研究
Title(English)	
著者(和文)	桑垣一紀
Author(English)	Kazuki Kuwagaki
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11518号, 授与年月日:2020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11518号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： 融合理工学 系
Department of Graduate major in 原子核工学 コース
学生氏名： 桑垣 一紀
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員(主)： 小原 徹
Academic Supervisor(main)
指導教員(副)：
Academic Supervisor(sub)

要旨(和文 2000 字程度)
Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

ブリードバーン型高速炉(B&B 炉)とは、燃料を再処理せずに高燃焼度まで燃焼させることのできる革新的な高速炉概念である。B&B 炉には、反応度の低い燃料が炉心に含まれ、炉心の臨界性が悪いという問題点がある。また、核分裂が活発な燃焼領域が移動し、運転中に炉心出力分布といった炉特性が変化してしまうという問題もある。この問題は、燃料要素を連続的に移動することで、燃焼領域をほぼ一定に保ち、かつ、中性子経済の良い燃料配置が常に維持されるようにすることで解決できると期待できる。本研究は、燃料を連続的に移動させてシャッフリングする燃料連続移動シャッフリングを用いることで、そのような B&B 炉が設計可能か、その成立性を数値解析によって明らかにすることを目的としている。

燃料連続移動シャッフリングを用いた原子炉の燃焼計算は、燃焼計算の後、燃料の移動パターンに沿って燃料集合体の組成を入れ替え、再び燃焼計算を行うことの繰り返しによって実現できる。本研究では、この計算を自動で行う数値解析ツールを、プログラミング言語 Python を用いて開発した。中性子輸送計算及び炉心燃焼計算は連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード MVP/MVP-BURN を使用して行った。核データライブラリには JENDL-4.0 を用いた。また、炉内の最高温度を計算するために、ソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いて、ホットチャンネルの燃料ピンの熱伝導計算用の入力データを作成した。

最初に、円周回転型に燃料集合体を移動させる方法(円周回転型炉心)を提案し、それによって燃焼領域が定在し、かつ中性子利用効率の良い B&B モード燃焼状態が実現可能か明らかにするための解析を行った。その結果、出力分布が安定し、かつ高反応度の燃料が中性子インポートランスの高い領域に常に維持され、中性子の利用効率が高い B&B モードの平衡状態を実現できることが示された。一方で、より現実的な設計に向けて、被覆管の最高温度が金属燃料との相互作用温度より高いこと、被覆管の照射損傷が高く基準値を超えていることといった点を解決する必要があることも確認された。

被覆管の最高温度は、炉心出力を下げることで、及び燃料ピンのピッチを広げることで下げることができる。被覆管の照射損傷は、燃料の取り出し燃焼度を下げ、蓄積される中性子フルエンスを小さくすることで低減できる。これらの点が解決されるように炉心の設計値を変更し、それに伴い燃料の移動パターンの最適化を行った。解析の

結果、燃料ピンのピッチを 1.08 cm から 1.20 cm へと広げ、炉心の出力を 800MWt から 450MWt に下げ、燃焼度を下げてスパイラル型の移動パターン（スパイラル型炉心）を用いることで、円周回転型炉心の問題点を解決できることが示された。

次に、B&B 炉の取り出し燃料の一般的な傾向を明らかにするため、円周回転型及びスパイラル型炉心の取り出し燃料について、核拡散抵抗性、崩壊熱、放射毒性といった観点から解析を行い、軽水炉や一般的な高速炉との比較を行った。B&B 炉では、天然ウランを再処理なしで高燃焼度まで燃焼させるため、取り出し燃料中に多くの核分裂生成物が蓄積され、崩壊熱が高くなってしまわないかという懸念がある。崩壊熱が高くなってしまえば、取り出し後の燃料処理が困難になってしまう。また、取り出し燃料には多くのプルトニウムが含まれるため、核拡散抵抗性が問題になってしまう可能性もある。それに加え、燃料の地層処分を考慮する場合、その毒性についても評価が必要である。核種崩壊計算コード ORIGEN を用いた解析の結果、B&B 炉の取り出し燃料は、核拡散抵抗性、崩壊熱、放射毒性といった観点から PWR の取り出し燃料と比較した場合、大きく問題となることがないことが示された。

最後に、炉内のスペクトルを軟化し、中性子から被覆材の原子に与えられる運動エネルギーを小さくすることで、被覆管の照射損傷を低減するという方法を考案し、解析を行った。炉内のスペクトルを軟化するために、スパイラル型炉心の 7 層目の集合体をグラファイトに置き換える方法を考案した。解析の結果、スパイラル型炉心と比較して、わずか 23.2 % の dpa 値の上昇で、燃焼度を 66.8 % 向上できることが明らかとなった。この効果について詳細に分析したところ、スペクトルを軟化したことによる効果に加え、炉心にグラファイト層を設置したことによる、中性子の吸収による損失数の増加の効果が大きく関与していることが明らかとなった。

本研究により、連続燃料移動法を用いたブリードバーン型高速炉の成立性が示され、また、その取り出し燃料の特性及び被覆管照射損傷低減のための知見を得ることができ、再処理工程を必要とせず、ウラン資源の高い利用効率と使用済み核燃料を低減できる高速炉の実現に資する知見を得ることができた。

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).

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	桑垣 一紀		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	小原 徹	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Breed and burn (B&B) reactor is an innovative fast reactor concept in which fuels can be burned to high burnup without reprocessing. There are two main obstacles to the viability of this concept. The first is that the burning region moves in the core during operation, which induces changes of reactor characteristics such as the power profile. This problem can be solved if the burning region is kept stably by shuffling fuels. The second is that the core consist of fuels in low reactivity such as natural uranium or high-burned fuel, and its criticality is worse compared to another type of reactor. To enhance neutron economy in the core, one method is to locate fuels in high reactivity in high-neutron-importance region continuously. The purpose of this study is to design a B&B core that has such features.

To achieve this, a continuous fuel shuffling method was proposed. As a result of numerical analysis, it was shown that the cores using this method can keep breed and burning regions stably. The change of power profile during operation was minimal. In addition, the fuels in high reactivity continuously located in a high neutron importance region during operation.

In the second half of this thesis, the characteristics of spent fuels from the proposed B&B cores were evaluated. It was shown that the spent fuels were not significantly worse than a PWR. Another issue of the B&B core concept is that irradiation damage on the cladding can be very high. In the final chapter, we proposed a method to reduce the irradiation damage using graphite, and its feasibility was investigated. As a result, it was shown that the method can reduce the irradiation damage per burnup.

Overall, this study demonstrated that the B&B cores using the continuous fuel shuffling method can solve the two problems in the B&B concept, and obtained the characteristics of the spent fuel and the knowledge for reducing the accumulated irradiation damage on the cladding.

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).