

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)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

氏名：桑垣 一紀

博士論文

論文題目：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

ブリードバーン型高速炉（以後、**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。本研究の目的は、燃料連続移動シャッフリングを用いることで、これらの課題を解決した **B&B** 炉を設計することである。

第 1 章“序論”では、**B&B** 炉の概要について述べた後、**B&B** 炉の現在の課題点を説明し、その解決策として燃料連続移動シャッフリングを用いた **B&B** 炉の概念を提案している。**B&B** 炉では、天然ウラン燃料領域や、核分裂生成物が多く含まれる燃焼済み領域といった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、その成立性を明らかにすることを目的としている。

第 2 章“解析方法”では、燃料連続移動シャッフリングを用いた **B&B** 炉の炉心解析に用いた計算コードについて述べている。炉心燃焼計算には、日本原子力開発機構で開発された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、核データライブラリには JENDL-4.0 を用いた。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。また、**B&B** 炉では、臨界を保ちながら **B&B** モードの運転を行うのに必要な最小の燃焼度が存在することが示されている。この必要最小燃焼度は、ニュートロンバランス

という概念によって求めることができる。本研究では、ニュートロンバランスを B&B 炉の燃焼特性の考察のために用いるため、本章でこの概念について説明している。また、燃料ピンの熱伝導計算を行うために使用したマルチフィジクスコード COMSOL についても述べている。

第 3 章“燃料集合体シャッフリングを用いた定在波型ブリードバーン高速炉の成立性”では、円周回転型に燃料集合体を移動させる方法を提案し、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。

第 4 章“必要最小燃焼度での定在波型ブリードバーン高速炉の設計”では、円周回転型燃料シャッフリング法によって、核分裂が活発な領域を一定領域に維持され、かつ、核分裂が活発な領域を中性子インポートランスの高い領域に常に配置するような平衡燃焼状態をもつ、B&B 炉の成立性が示された。しかし、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。被覆管の最高温度は、炉心出力を下げること、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。本章では、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を用いることで、第 3 章で設計した炉心の問題点を解決できることが示された。

第 5 章“ブリードバーン高速炉の取り出し燃料の特性”では、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、第 3,4 章で示した B&B 炉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うと、取り出し後の燃料処理が困難になってしまう。また、取り出し燃料にはプルトニウム核種が多く含まれるため、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。

第 6 章“被覆管照射損傷の低減方策”では、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、検討を行っている。炉内のスペクトルを軟化するために、第 4 章で設計した炉心の 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、第 4 章で設計した炉心と比較して、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。

第 7 章“結論”では、本研究を総括し結論を述べている。

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。