

## 軸方向非均質高速増殖炉の炉物理特性の研究

## 学位論文内容の要旨

軸方向非均質高速増殖炉は、炉心を非均質化することにより炉心性能の向上を図る新型の高速炉である。炉心の非均質化は、高速炉が高速中性子と原子核との核反応により核分裂連鎖反応を維持する原子炉であることと深い関わりがあり、非均質高速炉に関する研究は、世界各国が高速原型炉や実証炉の開発を競いあっていた 1970 年代から 1980 年代にかけて活発におこなわれた。これらの研究では内部ブランケットの配置を変えた数多くの炉型が提唱され、増殖性能の向上やナトリウムボイド反応度値の低減を中心課題として、原子炉の特性に関する様々な検討がなされた。日本では、軸方向非均質高速炉が高速実証炉の候補炉心となり、炉心設計がおこなわれた。その設計では、原子炉出力の平坦化やナトリウムボイド反応度値の低減などが、軸方向非均質高速炉のすぐれた性能として注目された。一方、炉心燃料が溶融し落下する事故を想定した場合、上部炉心の燃料が落下し下部炉心の燃料と合体するという事故シナリオが考えられ、炉心崩壊事故につながる危険があるとして、炉心概念の成立性を左右する重要な安全上の問題と考えられた。

本研究では、世界で最初の軸方向非均質高速炉模擬実験を日本原子力研究所・東海研究所の高速炉臨界実験装置 (FCA: Fast Critical Assembly) において実施し、軸方向非均質高速炉のすぐれた炉心性能や安全上の特性を実験データに基づき評価した。さらに、高速炉の炉心性能の向上に関する基礎的な研究として、炉心の非均質化が炉物理特性におよぼす影響を究明した。この研究では、軸方向非均質高速炉模擬実験と均質高速炉模擬実験の実験値を直接比較し、軸方向非均質高速炉の炉物理特性をさらに明確に評価した。また、軸方向非均質高速炉模擬実験および均質高速炉模擬実験の実験解析をおこない、両炉心の解析結果の比較をもとに、軸方向非均質高速炉の炉物理特性の計算精度を評価した。実験解析では、核データとして JENDL-3.2 を使用し、著者が開発した炉物理特性計算コードシステム “EXPARAM” を使用した計算をおこなった。以下に、各章の概要と主な成果について述べる。

第 2 章では、臨界実験をおこなった FCA の構造、実験体系の形状や燃料組成および実験体系の基本性能を確認する臨界特性試験について述べた。

第 3 章では、軸方向非均質高速炉模擬実験と均質高速炉模擬実験の実験結果を比較し、それを基に軸方向非均質高速炉の炉物理特性を評価した。軸方向非均質高速炉の中性子束空間分布は中性子エネルギーとともに変化する特徴をもち、このエネルギー依存中性子束空間分布を評価する方法として、様々な核種の反応率の測定値をもちいる新たな手法を提

案した。この手法により、軸方向非均質高速炉では、高いエネルギー領域の中性子束空間分布が、炉心から内部ブランケットにかけて急激に減衰することを確認した。そして、数 100 keV 以下のエネルギー領域では中性子束は均質高速炉と似た空間分布となり、さらに数 10 keV 以下のエネルギー領域では、中性子束は炉心で凹みをもつ空間分布となることを確認した。核分裂率分布を用いた出力分布平坦化の評価では、高エネルギー領域の出力成分により軸方向出力分布の平坦化および径方向出力分布の平坦化がもたらされることを明らかにした。随伴中性子束は、原子炉における中性子の生成や中性子の吸収が、原子炉の反応度変化に及ぼす割合を示す指標であるが、この随伴中性子束の特性をボロン反応度値およびプルトニウム反応度値を測定することにより評価した。軸方向非均質高速炉では、内部ブランケットのボロン反応度値（絶対値）が炉心の値の 80% まで低下することを確認し、随伴中性子束が炉心から内部ブランケットにかけて減少することによりボロン反応度値が低下することを明らかにした。軸方向非均質高速炉のナトリウムボイド反応度値の低減効果に関する実験では、内部ブランケットに隣接する炉心部においてナトリウムボイド反応度値が低減されることを確認した。そして、炉心でボイドが発生すると高エネルギー領域の中性子の炉心からの漏洩が増加し、これによる負の反応度効果によりナトリウムボイド反応度値が低減されることを明らかにした。さらに、炉心を非均質化したことによるナトリウムボイド反応度値の低減は、内部ブランケットに隣接する炉心部に限られるとの結論を得た。

第 4 章では燃料スランピング反応度効果模擬実験について述べた。軸方向非均質高速炉では、溶融した燃料が内部ブランケットの燃料と合体することにより反応度の上昇が抑制されることを実験により確認した。そして、軸方向非均質高速炉における燃料スランピングによる反応度の増加が、均質高速炉の値以上になる可能性は小さいことを明らかにした。

第 5 章では軸方向非均質高速炉模擬実験および均質高速炉模擬実験の実験解析について述べた。そして、軸方向非均質高速炉での炉心から内部ブランケットにかけて急激に減衰する高エネルギー領域の中性子束空間分布や内部ブランケットで減少する随伴中性子束の空間分布を、JENDL-3.2 および “EXPARAM” による計算では精度良く評価できないことを確認した。また、燃料スランピング反応度効果については、計算は燃料密度の増大による反応度効果を精度良く評価できていないことを確認し、軸方向非均質高速炉の炉心設計における今後の検討課題を明らかにした。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめた。本研究により、炉心の非均質化と炉物理特性および軸方向非均質高速増殖炉の炉心性能の関連性を、実験データに基づき系統的に評価することができた。これらの結果は、炉心を非均質化することによる高速炉の高性能化を検討する基礎データとして利用できるとともに、非均質炉心における炉心設計の計算精度を検証するデータとして利用できる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 成 田 正 邦  
副 査 教 授 大 橋 弘 士  
副 査 教 授 熊 田 俊 明  
副 査 教 授 板 垣 正 文  
副 査 助 教 授 澤 村 晃 子

## 学 位 論 文 題 名

### 軸方向非均質高速増殖炉の炉物理特性の研究

ナトリウム冷却型高速増殖炉の原子炉物理上の最も重要な問題の一つは、炉心中心に発生したナトリウム蒸発によるボイドがもたらす正の反応度の添加である。増殖性能を低下させないで、このナトリウムボイドによる正の反応度効果を軽減するために、多くの高速炉炉心の形状と組成が研究されてきた。

本研究で取り上げられた軸方向非均質高速増殖炉もその一つで我が国の高速実証炉の候補として取り上げられたものである。

軸方向非均質模擬炉心は、円柱形で軸方向の中心部に円盤上の内部ブランケットをもち、それを取り囲んで炉心が構成され、さらに外側に通常のブランケットをもっている。

本論文はこの炉心に対する申請者の研究成果を述べたもので、以下の5点に要約される。

- (1) ナトリウムボイド効果に直接影響を与えるエネルギー別の炉心中性子束を申請者の考案したいくつかの方法で測定し、均質炉心との比較を行った。また中性子束とともに基本的炉物理量である随伴中性子束の特性を反応度価値の測定から評価した。
- (2) 中性子束分布の測定結果から、非均質炉心では内部ブランケット近傍の炉心出力分布の平坦化が達成されることがわかった。この平坦化によりナトリウムボイド効果の低減が期待される。
- (3) 実際に実施した反応度価値の測定結果から、ボイド効果による正の反応度添加が低減されることが確認された。
- (4) 非均質炉心では、事故時に燃料が溶融して、炉心中央部で合体するいわゆる燃料スランピングにより、当初、大きな正の反応度添加が起こることが懸念されていた。これに対して軸方向非均質模擬炉心の実験では、内部ブ

ランケットと合体することにより、反応度添加が抑制されることを明らかにした。

- (5) 以上の模擬炉心に対し現在使われている解析法と核データの精度を評価し、今後の改善の課題を示した。

以上のように本論文は、軸方向非均質高速増殖炉の炉物理特性を実験により評価し、さらなる安全上重要な燃料スランピング実験では反応度添加が抑制されることを示したものであり原子炉物理学及び原子炉工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。