

臨界実験装置を用いた高速炉ドップラー効果の研究

学位論文内容の要旨

我が国では核燃料リサイクルを確立して将来のエネルギーセキュリティを確保するために、1960年代から高速増殖炉（FBR）の実用化を目指した研究開発が進められ、1980年代後半からはFBRの安全性、信頼性、経済性等の向上が求められてきた。FBRの安全性では事故防止及び緩和の点から、炉出力が異常な過渡変化する場合に即発的に出力上昇を抑制する効果として働く燃料中の ^{238}U ドップラー効果が重要視され、そのより精度の良い予測が求められている。これまでのFBRドップラー効果の予測精度は、特定炉心の典型的な中性子スペクトル場における800℃までの測定結果から評価されてきた。したがって、実際のFBR運転時の燃料平均温度（約1,200℃）及び燃料最高温度（約2,200℃）がドップラー効果測定温度より高いことから、炉心設計や安全解析では温度外挿による過度な誤差を見込んだ裕度が採用されてきた。また、事故防止の信頼性向上の点から、事故の進展に伴う炉内の中性子スペクトル変化に対応したドップラー効果の予測が求められている。

そこで、本研究では ^{238}U ドップラー効果の予測精度の評価と向上を目指して、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）を用いて ^{238}U ドップラー効果測定とその解析を行い、その一連の測定と解析から、

- ① 様々な炉心中性子スペクトルでの予測精度の向上
- ② 実験解析精度の向上
- ③ より高温域でのドップラー効果測定データの取得と計算精度評価
- ④ 燃料融点近傍までのドップラー効果予測精度の向上

について研究を行った。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、臨界集合体を用いたドップラー効果測定法とその測定原理についてまとめた。

第3章では、FCAにおいてこれまで実施されてきた800℃までの ^{238}U ドップラー効果測定についてまとめ、実験炉級から大型炉級までの広範な中性子エネルギースペクトルをカバーするデータベースを作成した。このデータベースをもとに、簡単な中性子スペクトル指標を考案し、 ^{238}U ドップラーワース（温度上昇によるサンプルの反応度価値変化）の中性子スペクトル依存性を見出した。この中性子スペクトル依存性から測定値に基づく炉心全体のドップラー係数の精度良い予測が可能となり、これまでの計算による全炉心ドップラー係数予測への傍証を与え、ドップラー係数の信頼性の向上に努めた。

第4章では、一連の800℃までの ^{238}U ドップラー効果測定の解析を通して、我が国における最新の核データライブラリー（JENDL-3.2）と標準的なFBR解析手法の解析精度を評価した。その結果、JENDL-3.2と標準的なFBR解析手法は、全体に約10%実験を過小評価するこ

とを示した。この過小評価の原因が、セル計算での炉心領域中の ^{238}U からサンプル内の ^{238}U への共鳴自己遮蔽効果の取扱い不可能によることを指摘した。そこで、この効果の考慮が可能な超詳細群セル計算コード(PEACO-X)を開発し、ドップラー実験解析に適用して、実験解析精度の向上を図った。その結果、計算の過小評価が解消でき、計算と実験はよい一致を示すようになった。

第5章では、800℃より高温領域でのドップラー効果の予測精度評価を目的として、1,500℃までのドップラー効果測定が可能なサンプル加熱・反応度価値測定法による測定装置の開発とその性能、及びそれを用いた原型炉級MOX燃料FBR模擬炉心での ^{238}U ドップラー効果測定とその実験解析について述べた。測定装置の完成により、ドップラー効果の測定温度範囲が800℃から1,500℃へ拡張でき、1,500℃までの ^{238}U ドップラー効果測定データが取得できるようになった。実験解析では、4章で開発したセル計算コード(PEACO-X)を用いて、ドップラーサンプル近傍の中性子束の凹み効果とサンプルの ^{238}U と測定装置構造材のタングステンとの共鳴の重なり効果によるドップラーワースへの影響を評価し、計算精度の向上を図った。計算結果を測定値と比較すると、両者はほぼよい一致を示し、1,500℃までの温度範囲では、ドップラーワースのC/E値について温度依存性が認められないことを示した。

第6章では、さらに高温領域でのドップラー効果の計算精度を評価するために、箔加熱・反応率測定法に基づく測定装置の開発とその性能、及びその装置を用いた原型炉級MOX燃料高速炉模擬炉心での測定結果と解析結果について示した。測定装置は、Nd-YAGレーザーによって UO_2 箔を加熱し、 ^{238}U ドップラー効果測定温度として世界最高の2,000℃を達成した。実験解析では、共鳴エネルギー範囲(<150keV)には4章で開発したPEACO-Xコードを、他のエネルギー範囲には従来のセル計算コード(SLAROM)を用いて、箔の σ_0^{238} を保存する1次元球モデルで箔の実効捕獲反応率を計算した。この計算手法によって、箔の熱膨張効果と測定装置構造材に使用したタングステンの干渉によるドップラー効果への影響も評価した。その結果、熱膨張効果によるドップラー効果への影響は2~3%、タングステンの干渉による影響は7%であった。これらの効果を考慮した後、2,000℃までの測定値と計算値を比較すると、両者は測定誤差内で一致した。以上から、2,000℃までの ^{238}U ドップラー効果の計算予測精度について、温度依存性は認められないことが分かった。

第7章では、5章及び6章で得た結果をもとに、MOX燃料融点近傍(~2,800℃)までのドップラー効果の推定精度について検討した。共鳴積分の温度依存性からドップラー効果の温度依存性を検討し、融点近傍までのドップラーワースを推定した。5章で得た1,500℃までの測定データによる推定は、従来の800℃までの測定データからの推定と比べて、約2倍の精度向上が図れた。さらに、実験値と計算値の比較及び推定値と計算値の比較から、室温から燃料融点近傍までのドップラー効果計算の予測精度は10%以内であることを示した。

本研究により、MOX燃料FBRのドップラー効果の予測精度について、事故の進展に伴う炉心中性子スペクトル変化に対応したドップラー効果予測へのデータの提供、解析精度の向上、MOX燃料融点まで高温域における予測精度の向上と評価を行うことができた。その結果、FBRに関する高度の安全性・信頼性の確保が図れ、設計裕度の見直しによるシステムの簡素化や高性能化による経済性の向上が図れると期待できる。ここで構築したドップラー効果のデータベースは新型FBRの設計においても重要なデータベースとして活用でき、開発したPEACO-Xコードも十分に利用できるものである。また、PEACO-Xコードは、ドップラー実験解析の共鳴干渉効果の解析だけに留まらず、原子炉の共鳴遮蔽解析に広く適用できる。

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	島津洋一郎
副査	助教授	澤村晃子

学位論文題名

臨界実験装置を用いた高速炉ドップラー効果の研究

ナトリウム冷却型高速増殖炉は、将来の発電用原子炉の本命である。しかし経済性、安全性、信頼性の観点から実用化はいまだ見通しが立っていない。高速炉炉心の原子炉物理学上の最も重要な課題は、正の反応度添加に伴う出力上昇後、直ちに負の反応度をもたらすドップラー効果の研究である。

本研究は、高速炉炉心のドップラー効果について、いくつかの新しい実験手法を開発し、高速炉臨界実験装置FCAを使用して、系統的に研究したものである。その結果は従来測定されていた温度範囲を超えた実験に成功し、核設計上の新しいデータと解析方法を提供している。

本論文は、申請者が行った高速炉炉心ドップラー効果予測精度向上の研究成果を述べたもので、以下の5項目に要約できる。

- (1) FCAにおいて従来行われたドップラー効果反応度係数を中性子スペクトル指標で整理して、スペクトルと反応度係数の関係を明らかにした。その結果スペクトル指標で反応度価値変化が精度良く推定できるようになった。
- (2) わが国の標準核データライブラリーJENDL3.2による核計算がドップラー反応度を約10%過小評価することを示し、新しいセル計算コードPEACO-Xを開発して過小評価を解消した。
- (3) 従来のドップラー効果測定装置の改良により800℃から1500℃へと測定温度の範囲を広げた。
- (4) レーザー加熱の新しい測定装置を製作し、ドップラー効果の測定では世界で初めて2000℃までの高温測定に成功した。
- (5) 混合酸化物燃料の融点である2800℃近くまでのドップラー反応度価値変化を10%以内の予測精度で推定できることを示し、さらに実験解析にPEACO-Xを使用して、800℃以上のドップラー効果の計算予測精度に温度依存性のな

いことを確かめた。

以上のように本論文は、高速炉臨界実験装置 F C A を使って、高速炉のドップラー反応度値を 2000℃まで測定し、さらに解析を行って燃料の融点近くまでの値を推定することを可能にして、高速炉の核設計に多くの知見を与え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。