

学 位 論 文 題 名

臨界実験装置による軽水減速燃料格子の核特性研究

学位論文内容の要旨

軽水炉時代の長期化に伴い、現在の軽水炉の安全性・経済性をより向上した改良型軽水炉や次世代軽水炉の開発が国内外で進められている。炉心経済性の向上のために、スペクトルシフトによる運転サイクルの長期化や稠密な燃料格子の採用による転換比の増大などが計画され、また、最近では、軽水炉による燃料の増殖を目的とした低減速軽水炉の提案も行われている。

このような新しい型の原子炉の炉心設計では、設計精度が炉心性能に直接影響を与えるため、精度の良い核計算手法が必要となる。この核計算手法の精度評価は、通常、計算対象炉心の中性子スペクトル場に近い中性子スペクトルを有している炉心の実験データをベンチマークデータとして使用した検証計算（ベンチマーク計算）をとおして行われる。将来の軽水炉の多様な中性子スペクトル場に対応し、精度の良い炉心設計を行うための核計算手法の検証には、広範囲の中性子スペクトル場における実験データが必要となる。

本研究は、このような核計算手法の検証に使用できるベンチマークデータを提供するために実施した、幅広い中性子スペクトル場における軽水減速燃料格子の核特性測定とその評価についてまとめたものである。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、本研究で使用した軽水臨界実験装置 TCA の概要と特徴について述べた。

第3章では、稠密度及び格子形状の異なる6種類の稠密ウラン格子炉心の核特性測定として、臨界量、出力分布、金線放射化率分布、核分裂率分布、反応率比($C8/F5$)の測定を行った。臨界量は、テスト領域燃料棒数本を B_4C 吸収棒あるいは水穴と置換した炉心を含む 18 の炉心について測定した。計算により求めた臨界炉心の中性子実効増倍率は、すべての炉心について 0.4~0.7% 程度過小評価ではあるが、実験値を良く再現した。炉心の水平方向出力分布の測定の結果、テスト領域が稠密になるにつれて、テスト領域の出力割合が減少する様子が明らかになった。また、 B_4C 吸収棒や水穴の存在によりテスト領域全体の出力が大きく変動するが、燃料棒間の出力変化（ピーキング）は高々 10% 程度であることがわかった。垂直方向の出力分布の測定結果から求めたテスト領域の垂直方向外挿距離は、稠密度とともに単調に増加し、稠密化に伴う中性子スペクトルの硬化の様子が示された。金線放射化率分布から求めたカドミウム比及び核分裂率分布から求めた核分裂率比は、テスト領域中心の $\pm 5\text{cm}$ の範囲で一定となっており、この領域ではテスト格子固有の中性子スペクトル（漸近スペクトル）場が成立していることが確認できた。そこで、漸近中性子スペクトルに関する情報を得るために、テスト領域中心の反応率比 $C8/F5$ (^{238}U 中性子捕獲反応率の ^{235}U 核分裂に対する比) を箔放射化法により測定した。 $C8/F5$ の格子計算結果は、稠密になるとともに測定値を過大評価する傾向を示した。感度解析では、 ^{238}U 中性子捕獲断面積の減少または ^{235}U 核分裂断面積の増加により、計算の過大評価が解消されることが示された。なお、第3章における計算では核データライブラリとして JENDL-3 を使用した。

第4章では、本研究において開発した転換比 $C8/F$ (^{238}U 捕獲反応率/全核分裂率)の非破壊測定手法の原理、その適用例として稠密ウラン格子及び MOX 燃料格子の測定について述べた。この手法では、反応によって燃料棒内に蓄積した核種のガンマ線を非破壊的に測定することにより、燃料棒内の反応率比を求める。測定した核種及びガンマ線エネルギーは、 $C8$ が ^{239}Np (277.6keV)、 F が ^{143}Ce (293.27keV) 及び ^{140}Ba (537.27keV) である。この手法は、燃料棒自身を放射化試料として用いるため、箔放射化法のように箔の設置により測定場に外乱を与えることが全くない。しかし、燃料棒自身によるガンマ線の遮蔽効果を補正する必要があり、これを計算により行った。 ^{239}Np と ^{143}Ce のガンマ線はエネルギーが近く同程度の遮蔽効果が生じるため、相対的な遮蔽効果の補正は高々数%であったが、 ^{140}Ba の場合は ^{239}Np とのガンマ線のエネルギー差が大きいために、100%以上の補正が必要であった。ウラン稠密格子の転換比の測定の結果では、ガンマ線エネルギーの大きく異なる2種類のFP核種を用いた測定結果は良い一致を示しており、ガンマ線遮蔽効果の補正が適切に行われていることが示された。また、箔放射化法により測定した反応率比と比較したところ、両者は実験誤差内で一致しており、今回開発した手法の妥当性が確認できた。そこで、この手法により MOX 燃料格子の転換比測定を試みた。MOX燃料の場合は、ウラン燃料に比べて核分裂する核種が多いため、FPの核分裂収率の評価も問題となるが、二つのFP核種の測定から求めた転換比は良く一致しており、本手法が MOX 燃料に対しても適用可能であることが確認できた。この方法は、これまでの箔放射化法に比べて簡便に測定を行えるため、広範囲の分野における今後の応用が期待できる。

第5章では、ベンチマーク計算で使用するための標準ウラン炉心の転換比の測定及びバックリングの評価について述べた。また、これまでの測定値を用いたベンチマーク計算結果についても述べた。転換比の測定は、前章で開発した非破壊測定手法により行った。これにより標準ウラン炉心の中性子スペクトルに関するデータをベンチマークデータとして使用できるようになった。また、格子計算で中性子実効増倍率を求める際に使用する材料バックリングの評価を装荷量変化法により行った。評価された材料バックリングは、従来の手法である束形状法により求めたバックリングに比べて精度が良く、このバックリングを用いた格子計算による中性子実効増倍率は、モンテカルロコードによる全炉心計算と良い一致を示した。さらに、転換比のベンチマーク計算において臨界格子モデルを使用することの妥当性を検証するために、全炉心モデルにより $C8/F$ 比を計算し、臨界格子モデルとの比較を行った。両モデルは、良い一致を示し、臨界格子モデルを用いた計算の妥当性が確認できた。また、最新の核データライブラリ JENDL-3.2 を用いた転換比 $C8/F$ 及び実効増倍率を計算し、JENDL-3 との比較を行った。両ライブラリ間で、転換比には有意な差は生じなかった。従って、稠密度の増加による計算値の過大評価の傾向は依然解消されていない。これについては、核データに関する微分実験と臨界実験による積分実験の両面からのアプローチが必要と思われる。一方、実効増倍率では約1%近く JENDL-3.2 の結果が増加した。これは、主に、低エネルギー領域における ^{235}U 中性子捕獲断面積の減少が原因といえる。

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、幅広い中性子スペクトル場を有する軽水減速格子の核特性についての情報が得られた。中性子スペクトルの硬化に伴う転換比の実験と計算との不一致は、最新の核データを用いた解析でも解消されていない。これについては、今後より多くの実験データの蓄積を行うとともに核データの評価方法を含めた詳細な検討が必要である。

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 助 教 授 澤 村 晃 子

学 位 論 文 題 名

臨界実験装置による軽水減速燃料格子の核特性研究

将来炉として注目されていた高速増殖炉の導入遅れ等から、現在の発電用原子炉の主流である軽水炉の使用が長期化する見通しである。このため核燃料転換比、安全性・経済性をより向上させた改良型軽水炉の開発が検討されている。

本論文はこのような改良を行う上で重要な炉心核特性を軽水臨界実験装置 T C A を使って系統的に研究し、その過程でいくつかの新しい実験手法を開発し核計算手法の検証に使用できるデータを提供しているものである。

本論文に示された主な成果は以下の 6 項目に要約できる。

- (1) 軽水炉燃料の転換特性を表す指標として修正転換比 $C8/F$ (^{238}U 中性子捕獲反応率の全核分裂に対する比) を導入し、従来の転換比に比べて定量的な評価が容易であることを示した
- (2) 本研究で導入した修正転換比 $C8/F$ を用いると、燃料体の転換比を非破壊的に測定できることを示した。この非破壊測定法は強い放射線によって従来取扱いが困難であった Pu の入った混合酸化物燃料 (MOX) にも適用できることを示した。
- (3) 格子形状・寸法の異なる 6 種類の稠密ウラン格子炉心 (ドライバ領域とテスト領域の 2 領域炉心で、同炉心に B_4C 吸収棒あるいは水穴を配置した炉心を含む総計 18 の炉心) を組み立て、臨界量、出力分布、金線放射化率分布、核分裂率分布、反応率比 $C8/F5$ (^{238}U 中性子捕獲反応率の ^{235}U 核分裂に対する比) 等の核特性量を系統的に測定した。
- (4) 炉心の材料バックリングを評価するために装荷量変化法を新しく開発した。評価された材料バックリングを用いて格子計算により求めた中性子実効増倍率は、モンテカルロ炉心計算結果とよく一致した。
- (5) モンテカルロ コードを用いた格子計算により、反応率比を求めるため新たな「格子モデル」を提案し、結果の妥当性を確認した。これにより反応率比を高精度で計算することが可能となった。

(6) 以上の実験方法、データ評価法を開発した結果、種々の中性子スペクトル場における軽水減速格子の臨界量、転換比等の核特性データを得ることが可能となり、核データのベンチマークに使用可能となった

以上のように本論文は、多様な中性子スペクトル場において軽水減速格子の臨界量、転換比等の核特性データを得て、核データ及び核計算手法の検証に利用できることを示したものであり、また本研究において開発された修正転換比を非破壊的に測定する手法は簡便に転換比を測定することを可能とし、接近不可能な燃料の転換比の測定を容易に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。