

論文内容の要旨

氏名	谷中裕			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	工第182号			
学位授与の日付	平成22年3月23日			
学位授与の要件	学位規程第4条第1項該当			
学位論文題目	未臨界原子炉体系に対する反応度測定の高度化に関する研究			
論文審査委員	(主査)	教授	大澤孝明	
	(副主査)	教授	橋本憲吾	
	(副主査)	教授	渥美寿雄	

起動時の原子炉や加速器駆動原子炉等の未臨界体系の反応度を精度よく迅速に評価しうることは、原子炉の運転管理上重要な事項である。従来の反応度測定手法は中性子源の無い臨界近傍の体系を対象としており、中性子源が存在する深い未臨界状態の反応度測定に適用するためには、測定手法の拡張や改良が必要である。本論文は、未臨界原子炉体系に対する反応度測定手法の高度化により、その適用性と信頼性の向上を図ることを目的とする。本論文は全6章で構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章(序論)では、本論文の研究の背景、目的及び論文構成について述べている。

第2章(未臨界炉体系に適用しうる制御棒落下法の開発)では、制御棒反応度値の測定法として幅広く使用されている制御棒落下法の、データ処理手法として用いられてきた積分法と外挿法を、未臨界状態にも適用できるように理論を拡張し、実験的検証を行なっている。新しく導いた拡張積分法と拡張外挿法は、炉心内の中性子源を考慮することにより未臨界状態における制御棒落下実験のデータ処理に適用が可能である。実験的検証として、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)と京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において制御棒落下実験を実施し、拡張積分法と拡張外挿法を用いたデータ処理を行い結果の妥当性を検討した。一部の検出器からの結果に空間依存性が見られたものの、これ以外の検出器については落下制御棒反応度値と実効中性子源強度を精度良く評価でき、本拡張手法の妥当性が確認できた。本拡張手法は、従来法の特徴である簡便さ、迅速さを失わずに未臨界状態への適用に成功しており、発電炉における制御棒反応度値測定試験や加速器駆動未臨界炉の中性子源強度測定に用いることが可能であることを示唆している。

第3章(最小自乗逆動特性法の信頼性向上のための改良)では、最小自乗逆動特性法が抱える問題を解決するためにデータ解析手法の改良を行い、UTR-KINKIとKUCAにおいて実施した制御棒落下実験データに適用することで、改良の有効性を示した。最小自乗逆動特性法は、統計的変動が大きい測定データに対する適用性の問題と、中性子検出器位置に依存した反応度や中性子源強度を算出するという空間依存性の問題を抱えていた。前者の問題には改良されたフィット関数を用いることで、同一検出器において反応度の評価が最大で0.52% $\Delta k/k$ 改善し、改善後の反応度は参照値とよい一致を示した。また、実効中性子源強度も改善しており、UTR-KINKIでの実験結果では未臨界状態の違いに関わらず一致するという結果を示している。後者の空間依存性の問題には、外乱投入後の一点炉近似モデルが破綻している一定時間を最小自乗フィットから除去するという空間依存性削減法を新たに提案した。この空間依存性削減法により、UTR-KINKIおよび、KUCAでの実験結果は検出器位置依存性が大幅に改善され、参照値とも統計誤差範囲内で一致した。従来の最小自乗逆動特性法は小型原子炉への適用に制限されていた。本改良法の導入により、最小自乗逆動特性法は適用の制約から解放され、発電用原子炉を含む大型炉に対しても適用されるものと期待される。

第4章(加速器駆動未臨界炉の起動時および停止時における反応度測定法の開発)では、研究開発が進んでいる加速器駆動未臨界炉(ADS)において安全管理上、非常に重要な要素となる未臨界体系の反応度を、加速器ビームの起動時と停止時に評価するための新たな測定手法を提案している。また、加速器駆動体系における実験に先立って、加速器ビームの起動時と停止時の過渡状態を固定中性子源の急速挿入と急速引抜によって模擬した予備実験をUTR-KINKIにおいて実施した。データ処理法として改良最小自乗逆動特性法(改良LSIKM)と従来法として積分法を採用している。予備実験において、設定された4種類の未臨界状態に対する改良LSIKMによる解析結果は積分法と比較して良好なものであり、実験手法間における差異も僅かなものであることを示している。次に、KUCAにおいて実施した加速器ビームの起動と停止実験の解析結果は、加速器ビームに近い位置の検出器を除き、参照値とよい一致を示した。以上から、改良LSIKMによりデータ処理を行うことで、加速器始動時と停止時において体系の反応度を評価しうることが示されている。

第5章(パルス中性子法による未臨界度測定の高度化)では、反応度測定手法の一つであるパルス中性子法の空間依存性の削減法と体系の安定度指標である固有値間隔の決定法を提案し、KUCAにおいて実施したパルス中性子実験のデータ解析を通して有効性を確認した。パルス中性子法では、中性子検出器には測定対象である核分裂中性子の基本モード成分以外に、高次モード成分やターゲットからの源中性子の成分も混入して測定されてしまう。本研究では、検出器位置とターゲットの位置の考察に基づき、測定時系列データから核分裂中性子の基本モード成分、高次モード成分、および源中性子の成分を分離し、それぞれのモードの固有値を推定するためのデータ処理手法を開発した。パルス中性子実験のデータ解析結果において、空間依存性は見事に解消しており、評価された反応度は参照値とよく一致している。また、国際的にも初めて小型の未臨界体系の固有値間隔の測定に成功した。

第6章(結論)において、本論文のまとめを述べている。

以上の結果より、積分法や外挿法といった既存反応度測定手法の未臨界炉体系への拡張、最小自乗逆動特性法の統計的ゆらぎを含んだ実験データへの適用性の実証、空間依存性削減法など、未臨界原子炉体系に対する反応度測定手法の高度化がなされた。また、開発が進んでいる加速器駆動未臨界炉の起動時、停止時において体系の反応度と実効中性子源強度を求める手法を新たに開発した。これらの成果は、発電炉を含む広範な原子炉の特性試験等の合理化や信頼性向上に資し、加速器駆動未臨界炉の炉心管理や運転管理技術の進展に資することが期待される。

論文審査結果の要旨

本研究の基本的問題意識は「中性子源を有する未臨界体系の大きな負の反応度（未臨界度）をいかに正確に測定するか」である。著者は、この問題を解決するための実験手法と、得られたデータを解析するための理論を考案している。この方法の適用可能性を検討するため、近畿大学原子炉（UTR-KINKI）の未臨界体系と京都大学臨界集合体装置（KUCA）の加速器駆動未臨界体系を用いて反応度測定実験を実施している。

以下に、本論文で提案された方法の評価を述べる。

（1）未臨界炉体系に適用できる制御棒落下法の開発

従来の制御棒落下法は、積分法も外挿法も未臨界体系には適用不可能であった。著者はこの二つの方法を拡張することを試みた。この拡張積分法と拡張外挿法は、制御棒落下後の反応だけでなく、実効中性子源強度と制御棒落下前の反応度も同時に求めることができるという特徴がある。近畿大学原子炉の未臨界体系と京都大学臨界集合体装置で制御棒落下実験を実際に行い、この拡張手法が適切な結果をもたらすことを確認している。この方法は研究用原子炉の運転管理に直ちに適用できるほか、発電用原子炉の特性試験を未臨界状態で実施できるので、試験期間短縮・コスト軽減に寄与するものと期待できる。

（2）最小自乗逆動特性法の信頼性向上

最小自乗逆動特性法は中性子データの統計誤差が大きくなる未臨界体系に適用すると非現実的な結果をもたらすことが知られている。著者は、遅発中性子生成率という積分量に対して最小自乗法を適用すればこの困難を解決できることに注目し、新たなデータ解析法を提案している。この方法をUTR-KINKIとKUCAの加速器駆動未臨界炉模擬体系に適用することにより、反応度と実効中性子強度を同時に求めることができた。さらに、検出器の位置により結果が異なるという空間依存性は高次モードによるものと考え、高次モードが影響している時間領域をマスクすることにより基本モードを分離することに成功した。これにより最小自乗逆動特性法の適用範囲が広がり、小型研究炉のみならず大型発電炉への応用も可能になった。

（3）加速器駆動未臨界炉（ADS）の起動時・停止時における反応度測定法の開発

ADSのビーム停止およびビーム再入射により体系に過渡状態を実現し、その時に得られる中性子の時系列データで最小自乗逆動特性法を適用することにより反応度を求める実験的方法を考案し、これをKUCAで模擬したADS体系に適用し、良好な結果を得た。昨年、KUCAに併設されたFFAG加速器で陽子入射ADSの世界初の実験が開始されたが、この研究の成果は今後、この新しい装置を用いた実験的研究を遂行する上で有用な手法となるであろう。

（4）パルス中性子法による未臨界度測定法の高度化

深い未臨界度を有する体系にパルス中性子を打ち込んだ際の中性子データには、基本モードの減衰のほか、高次モード成分やターゲットから直接検出器に飛び込む中性子線成分も混入することが避けられない。これが、非現実的な検出器位置依存性を発生させるといった困難を生んでいる。

著者は、パルス中性子打ち込み後の中性子減衰データに含まれる各モード成分を分離し、おのおのモードの固有値を推定する方法を開発している。この方法をKUCAで実施したパルス中性子実験データの解析に適用し、検出器位置依存性を解消することに成功した。さらに、分離された高次モードデータから各モードの固有値間隔を決定することにも成功している。深い未臨界度を有する体系での固有値間隔の測定は、世界的に見ても前例のない成果である。これは原子炉の出力分布安定性の指標となるものである。

以上のように、この研究で開発された実験法と解析理論は、従来、困難であった大きな負の反応度を有する体系の特性を正確に測定する手法を提供するものであり、学術的にも実際的にも大きな価値を有するものであると認められる。

よって、博士（工学）の学位論文として十分に価値があるものと認めた。