

原子力システム研究開発事業基盤技術開発分野
革新技術創出型 事後評価総合所見

評価の概略	
研究開発課題名（研究機関名）： 高速炉実機未臨界状態で行う反応度フィードバック精密測定技術の開発 （独立行政法人日本原子力研究開発機構） 研究期間及び予算額：平成19年度～平成22年度（4年計画） 248,169千円	
項目	要 約
1. 研究開発の概要	高速炉において、未臨界状態で、臨界法と同程度の精度で反応度特性を測定する技術を開発する。本開発によって、安全評価に重要な反応度フィードバック要因や安全性確保に重要な炉物理諸特性を、実機の起動前炉物理試験で広範囲に確認できるようになる。その結果、革新型高速炉の開発コストの削減を達成できる。
2. 総合評価	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px; text-align: center; width: 30px;">A</div> <div> <p>・高速炉実機の新たな安全評価技術として優れた成果が挙げられている。また、実規模炉心の未臨界状態の炉物理という学術的な観点からも興味深い多くの有益な知見が得られている。本研究で見出された課題については、解決のための研究を今後も是非継続してもらいたい。</p> </div> </div> <p>S) 極めて優れた成果を挙げ、今後の展開が大いに期待できる。 Ⓐ) 優れた成果を挙げ、今後の展開が期待できる。 B) 成果の一部は得られてないが、他は相応の成果を挙げている。 C) 成果の多くが得られておらず、一部についてのみ相応の成果を挙げている。 D) 成果がほとんど挙げられていない。</p>

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：
 高速炉実機未臨界状態で行う反応度フィードバック精密測定技術の開発
 （独立行政法人日本原子力研究開発機構）

研究開発の実施者

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構 代表者氏名：岡嶋成晃
 機関名：国立大学法人名古屋大学 代表者氏名：山根義宏
 機関名：公立大学法人会津大学 代表者氏名：兼本 茂

研究期間及び予算額：平成19年度～平成22年度（4年計画） 248,169千円

研究開発予算

平成19年度	88,347千円
平成20年度	80,643千円
平成21年度	51,000千円
平成22年度	28,179千円

項目	内容
<p>1. 目的・目標</p>	<p>高速炉において反応度フィードバック要因等の核的諸特性を把握することは、安全評価の要である。高速炉が大型化の傾向にある現在、その精密測定には、従来型の開発シナリオでは、実炉とは別に大型臨界実験装置によるフルスケール規模のモックアップ試験を必要とし、巨額の研究開発資金を必要とする。</p> <p>本研究では、実機初号機を用いて、未臨界状態において、臨界法と同程度の精度で反応度特性を把握する技術を開発することにより、この開発の隘路を解決しようとするものであり、大型高速炉の開発費の大幅な低減を図るものである。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 ・ 	<p>【研究開発項目(1) 大容量時系列データ高速処理システムの開発】 [得られた成果] 高速動作が可能なFIFOメモリ等の利用と高速データ処理CPU回路によるFIFOメモリへの一時蓄積によりデータ処理装置の高速化を目指し、電気信号処理部の回路を設計した。設計した回路で構成したボードを試作・試験を行い、その性能を確認した。その結果、電気信号処理の時間分解能20ns（市販装置の10倍の高速化）を達成した。この結果をもとに、高速炉用時系列パルスデータ収集装置を設計・製作した。製作したシステム単体の性能試験及び高速炉臨界実験装置(FCA)所有の放射線測定モジュールを用いた性能試験を実施し、(i)4入力のアナログ信号を時間分解能20nsで処理し、(ii)連続データ収集能力が100kcps以上であること、(iii)放射線測定モジュール間の電気信号伝送が設計どおりに適切に動作しており、かつ(iv)中性子検出信号の時系列データの取得が安定して行えることを確認し、目標とした機器仕様を達成した。</p> <p>【研究開発項目(2) 中性子検出器応答評価モデルの確立】 [得られた成果] 未臨界状態における炉の反応度、反応度変化と中性子検出器応答の関係（中性子検出器の応答評価モデル）として以下の①～③の項目について調べた。</p>

① 中性子検出器の応答評価モデルの検討

中性子束分布に重点を置いて、未臨界状態における反応度、反応度変化と中性子検出器応答の関係を調べた。

まず、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究の結果等を踏まえて、原子炉出力を指標に、4基の想定実機炉心(100MWe級、300MWe級、750MWe級、1500MWe級)を選定し、その炉心形状、炉内構造、炉心仕様等を決定するとともに、サイクル初期及び末期における核特性、炉内燃焼度分布、炉内の中性子源分布を計算した。

それらの計算結果から、制御棒挿入による炉心の反応度変化、温度変化幅が200℃～350℃の場合の反応度変化、燃料交換時の燃料とナトリウムフォロワー(燃料が装荷されていない状態)の置換反応度、制御棒交換時の制御棒とナトリウムフォロワーの置換反応度などについて、その変動範囲と炉心サイズ依存性(原子炉出力に対応)を調べ、未臨界状態で測定可能な特性としてこれらの反応度変化を把握した。

次に、この検討結果に基づき、「研究開発項目(3)FCA試験」において考慮すべき事項について検討した。その結果、体系内の中性子源分布と未臨界度との関係、中性子源分布や制御棒挿入による中性子束空間分布歪みの反応度測定値への影響について実験的知見が得られるように、体系および測定用中性子検出器位置の選定に対する考慮が必要であるとの結論を得た。

さらに、制御棒挿入等による未臨界状態において、挿入状態の変化による未臨界状態の変化と中性子検出器応答変化の関係について数値計算により調べた。その結果、径方向遮蔽体外側領域の検出器位置では、炉心内の制御棒や燃料の引抜による局所反応度の印加位置と検出器応答との空間的依存性が、炉心サイズが大きくなるにつれ、より強くなる傾向を示すことや、炉雑音測定用検出器の設置場所は、炉心と径方向ブランケット境界の近傍上部が有効であること、などの知見を得た。

② 中性子検出器の最適配置に関する検討

未臨界原子炉の検出器応答を予測する「中性子検出器応答関数理論」と高次モード中性子源増倍法を利用して、修正中性子源増倍法(MSM法)補正係数の特徴およびその適用限界の検討を目指した。しかし、詳細な検討の結果、(i)中性子輸送方程式の固有値問題に基づくMSM法と、未臨界定常中性子場のバランス方程式に基づく中性子検出器応答関数理論とを、直接結びつけることは困難であること、さらに(ii)高次モード中性子源増倍法では摂動論に基づいて未臨界度を定義するのに対して、MSM法では未臨界度の定義が異なるため、両者を関係づけることは困難なことが解った。そこで、検出器応答関数理論の中核をなす「検出器インポートランスで重みづけられた未臨界増倍率 k_{det} 」に着目し、実効増倍率 k_{eff} を再現する k_{det} を探索する方法で最適検出器配置の検討を行った。先行高速炉クラスの300MWe級想定実機炉心では、上部軸ブランケット領域に k_{det} が k_{eff} に近い値を示す検出器位置が存在することが分かった。この結果は、前項「中性子検出器の応答評価モデル」でパラメータ・サーベイに基づいて得られた結果と整合していることから、最適検出器配置を k_{det} に基づいて探索する手法が有効であることが明らかになった。

③ 不確かさ要因分析による精度評価

未臨界状態では燃料の線源強度を含めた中性子バランスを精度良く再現することが重要であることから、想定実機炉心の燃焼に伴う組成変化に起因する燃料マクロ断面積変化及び中性子発生源強度変化が検出

器応答へ及ぼす影響について、数値計算により調べた。さらに、検出器応答変化、反応度変化に大きく影響を及ぼすマクロ断面積を感度解析により抽出し、燃料組成変化に起因する不確かさが検出器応答へ与える影響評価の取り扱い方法について検討した。

その結果、(i) 検出器応答変化及び反応度変化に大きな影響を与えるマクロ断面積は中性子生成断面積($\nu \Sigma_f$)と中性子吸収断面積(Σ_a)であること、(ii) 燃料からの中性子発生に関しては発生強度の方が発生エネルギースペクトルの不確かさよりも大きく影響すること、(iii) これらが検出器応答変化へ与える効果は炉心の未臨界度には大きく依存しないことが、分かった。また、MSM法の適用では、運転にともなう燃料反応度変化の実績を補正係数に反映することが重要であり、その方策として $\nu \Sigma_f$ または Σ_a による燃焼度反応度変化を調整する手法を導入することが実用性にも優れ有効と判断できた。

これらの傾向は小型炉心から実用規模炉心までの広範囲に対し炉心サイズに拠らず共通であることを確認した。

【研究開発項目(3) FCAを用いた試験】

[得られた成果]

開発する測定技術の実機への適用性を実験的に調べるために、研究開発項目2の検討に基づき、以下の①及び②を実施した。

① 試験の準備

想定実機炉心の炉心組成をもとに、FCAが保有する核燃料量等の制約内で構築可能な試験体系の炉心組成、その組成から成る体系の臨界性、反応率等の基本的核特性について数値計算により調べた。その結果、5つの候補体系を選定し、それらがFCAにおいて構築できる見通しを得た。さらに研究開発項目2の①の検討結果及び基本的核特性計算結果とから抽出した測定項目とその測定方法の検討から実験期間の推定を行い、実験計画を立案した。また、パルス中性子源の整備として、中性子発生管のイオン源に高圧電源を供給するためのパルス電源とトリチウムターゲットを封入するための中性子発生管を製作した。いずれも機器仕様を十分に満足していることを確認し、実験で使用可能な状態となるように準備した。さらに、反応率分布測定装置について、基本設計、詳細設計を行い、詳細設計結果に基づいて同装置を製作し、実験において使用可能な状態にした。

② 実験と解析

試験の準備で選定した5つの候補体系から、FCA運転上の核的制限値を満たし、実験全体が支障なく遂行可能である体系として、300MWe級実機想定炉心の外側炉心模擬領域(以下、試験領域と呼ぶ)を炉心中央に設けた実験体系を選定し、FCAに構築した。まず、臨界点を確認し、実験炉心の特性試験を実施した。その後、試験領域の燃料引出や B_4C を装填して制御棒を模擬した引出(制御棒模擬引出)の装荷条件を変えることにより10% $\Delta k/kk'$ 程度までの未臨界状態を段階的に構築し、各段階における未臨界度と制御棒模擬引出の反応度価値(約1% $\Delta k/kk'$ 程度)を、MSM法、炉雑音法およびパルス中性子法を用いて測定した。また、MSM法補正係数の精度評価に必要な出力分布として反応率分布を測定した。さらに、炉雑音法を用いて体系を臨界に到達させずに未臨界度を導出する方法の適用性について実験的に調べた。その結果、MSM法では補正係数も含め、検出器位置に依存することなく未臨界度及び反応度価値測定の適用性が確認できた。また、予め体系を臨界に至らしめずに

臨界状態における未臨界度を導出する方法の適用性では、異なる未臨界状態の即発減衰定数から臨界状態の即発中性子減衰定数導出は妥当であるが、未臨界度に関して炉雑音法とパルス中性子法による測定結果は良く一致するものの、MSM法による測定結果と間に10%以上の相違傾向を示した。

実験解析では、未臨界度及び反応度値値に関して標準的な高速炉解析システムとモンテカルロ法による結果の比較から、両者に大きな差異がないことを確認し、中程度の未臨界状態(6% $\Delta k/kk'$ 程度)までの範囲では、中性子束空間分布を強く歪ませた場合も含め、解析値と実験値が良く一致することを確認し、MSM法の適用が有効であることを確認した。一方、10% $\Delta k/kk'$ 以上の深い未臨界状態に対して、未臨界度の解析値は実験値を過少評価する傾向があり、制御棒模擬引出の反応度値の解析値は実験値を20%程度過少評価する傾向があることが分かった。

【研究開発項目(4) 未臨界反応度計測システムの実機への適用】 [得られた成果]

開発する測定技術に基づく未臨界反応度計測システム概念を構築し、未臨界度と反応度測定精度との関係の定量的評価によって高速炉系への適用性を確認した。

① システム概念の構築

まず、MSM法の実機適用への課題抽出を目的として、「もんじゅ」初装荷炉心における炉物理試験時のMSM法による試験データの調査及び軽水炉(BWR)異常診断技術に関する調査を行った。また、数値実験によりプラントにおける炉雑音要因と応答周波数帯の関係を検討して、実機適用性のための試験計画へ反映すべき事項を抽出した。

次に、炉雑音法についてシミュレーション検討を行い、(i)従来法の計測精度は検出器の検出効率に大きく影響されること、(ii)計測に利用する周波数帯域は、従来の1kHz近傍の折点周波数に基づくだけでなく、より低周波の振幅情報まで含めると精度を向上できることなどの知見を明らかにした。また、想定実機炉心に対して炉雑音試験の数値実験を実施した結果、(i)炉雑音法の検出器位置に関して、炉心中央上部の炉外あるいは径ブランケット位置の上部炉外の遮蔽体の内側、また炉心中央高さでZrH遮蔽体内側が適当であること、(ii)高次モードの影響を避けた周波数帯域に着目し、2検出器法を適用することが望ましいこと、等の知見を得た。一方、MSM法について、「もんじゅ」初装荷炉心の試験データの解析から、較正用反応度測定時の未臨界度計算結果と実際の制御棒挿入深度に整合性を持たせ、中性子束の空間分布歪みが実際の歪みを再現するようにマクロ断面積を適切に調整すれば、MSM法による未臨界度と制御棒較正試験結果に基づく既往試験データとの一致が改善することが判った。

以上の結果に基づき、システムが有すべき基本性能及び仕様として、炉雑音法とMSM法の検出器に関する基本性能と仕様を定めた。

② 数値実験による適用性の検討及び総合評価

未臨界反応度計測システムとしての炉心周りの中性子検出器位置に関する要点の抽出を目的に、想定実機炉心に対して数値実験を実施した。その結果、炉雑音法については、(i)2検出器法による推定は1検出器法による推定より精度改善が期待できること、(ii)炉心全体を見込む軸方向上方の周方向3箇所を設置した検出器の信号を合算処理するシステムを2つ以上配置することにより、1検出器法では困難であった5~

10%程度の推定精度を達成できる見込みがあること、などの知見を明らかにした。一方、MSM 法については、周方向3箇所の検出器(約120度毎に配置)の信号を合算処理する系統を2つ以上配置することにより、MSM法の適用精度向上と信頼性向上を達成可能であることが分かった。

さらに、炉雑音法をFCA炉雑音計測試験データに適用して検討した結果、2検出器信号の相互相関関数(CCF)より得た周波数領域の相互パワースペクトル密度(CPSD)に対して、CPSD法とCCFより炉の特性方程式の固有値を得るARMA法との複数のアルゴリズムで処理した場合の未臨界度測定精度は共分散対平均法に対して同等以上の精度であり、複数のアルゴリズム処理の適用により測定結果の信頼性が向上する見通しを得た。

以上の結果を総合して、1500MWe級大型炉心を対象に計測システムを構築し、浅い未臨界状態から深い未臨界状態までの想定される測定範囲について未臨界度と反応度測定精度との関係を定量的に評価した。その結果、構築した計測システムにより、浅い未臨界度範囲では、炉雑音法による基準未臨界度は10%以内の精度で測定できる見通しを得た。さらに、深い未臨界度範囲ではMSM法により15%程度の精度で適用できる見込みが得られた。燃焼炉心についても、燃焼度増加に対して段階的に測定試験・分析評価・逐次反映することにより、同様な精度で各種反応度変化の測定による実証に役立つ見込みがあることが判った。

【論文、特許等】

- 1) 日本原子力学会秋の大会(2009年9/16~9/18、於 仙台)
高速炉実機未臨界状態で行う反応度フィードバック精密測定技術の開発(その1)
 - (1) 全体計画
 - (2) 大容量時系列データ高速処理システムの開発
 - (3) 中性子検出器応答評価モデルの検討
 - (4) k_{det} を用いた高速増殖炉の最適検出器位置の探索
 - (5) FCA実験計画
 - (6) 未臨界反応度計測システムの実機への適用性検討
- 2) 2009 ANS Winter Meeting (2009年11/15~11/19、Washington DC)
Subcriticality Estimation of Large FBR by Detectable Multiplication Factor k_{det}
- 3) 日本原子力学会秋の大会(2011年9/16~9/18、於 北九州)
高速炉実機未臨界状態で行う反応度フィードバック精密測定技術の開発(その2)
 - (1) 計画の概要
 - (2) 未臨界で測定する反応度項目と方法
 - (3) FCA実験 —修正中性子源増倍法—
 - (4) FCA実験 —炉雑音法—
 - (5) 未臨界反応度計測システムの実機への適用性検討
- 4) PHYSOR 2012 - Advances in Reactor Physics -(2012年4/15~20、Knoxville, TN USA)
Development of Reactivity Feedback Effect Measurement Techniques under Sub-critical Condition in Fast Reactors

<p>3. 事後評価</p> <p>1) 目標達成度</p> <p>2) 技術の革新性</p> <p>3) 研究開発効果</p> <p>4) 総合評価</p>	<p>【目標達成度】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・未臨界状態での反応度特性を測定する技術に関し、実際に検証された項目の一部において期待される精度を十分に満足していないものも見受けられたが、当初の目的は概ね達成されたと考えられる。 <p>【技術の革新性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実用システムの要件及び解決すべき課題が具体的かつ詳細に検討・評価され、提案技術の技術成立性ととも今後の開発の道筋が提示されており、優れた研究開発成果が得られている。 <p>【研究開発効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実機を対象に、未臨界状態を前提にした新規で汎用性の高い起動前炉物理試験法が提示されたことにより、今後の多種多様な燃料装荷が見込まれる高速炉核特性の実験的な安全評価への寄与が十分期待できる。
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・今後、本研究で得られた知見をもとに、開発された測定・評価技術の一層の高精度化に取り組み、本手法の実機炉心での早期活用を期待したい。