

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

(受託者) 独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 岡嶋成晃 原子力基礎工学研究部門

(再委託先) 国立大学法人名古屋大学、公立大学法人会津大学

(研究開発期間) 平成19年度～22年度

1. 研究開発の背景とねらい

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。そこで、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、大型高速炉開発費の大幅な低減を図り、開発の隘路の解決を目指す。具体的には、実機での原子炉起動前炉物理試験の「未臨界状態で実施できる反応度変化測定技術」として、修正中性子源増倍法 (Modified Source Multiplication 法、以下「MSM法」と記載) を基本に炉雑音計測法と複合 (シンセシス) し、かつ解析による斬新な補正方法を統合 (シンセシス) した中性子源増倍法 (「シンセシス中性子源増倍法」と呼ぶ) を開発し、高速炉臨界実験装置 (Fast Critical Assembly、以下「FCA」と記載) を用いてその技術の適用性を実証するとともに、その技術に基づく実機の計測システムを提案する。

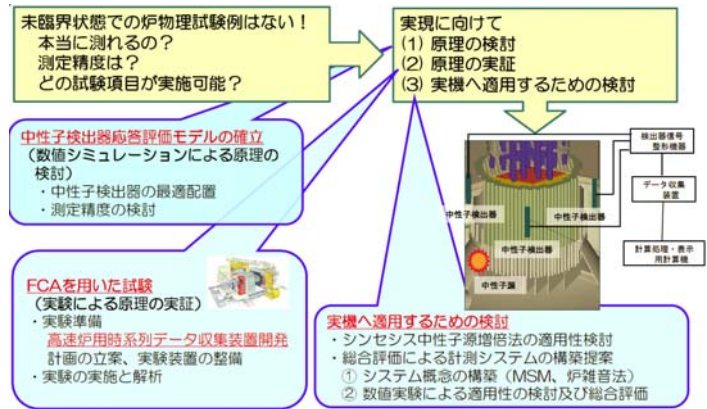


図1 主要な開発項目 (下線を施した項目)

2. 研究開発成果

2-1 大容量時系列データ高速処理システムの開発

高速炉系の即発中性子減衰定数は、熱中性子炉系のそれに比べて2~3桁大きいため、高速炉系において炉雑音測定を実施するには、測定システムの電気信号処理において、市販の時系列データ処理装置の10倍程度の高速化とそれに伴う記憶容量の大容量化が必要である。そのため、先ず、高速動作が可能なFirst-In First-Outメモリ (以下、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て、電気信号処理部の回路を設計した。設計した回路の試作・試験を行い、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、測定システムを設計・製作し、性能試験を実施した。その結果、システムが目標仕様を満足していることを確認し、本技術の主要な計測装置である当該システムの開発を達成した。

2-2 中性子検出器応答評価モデルの確立

高速炉実機において未臨界状態にて反応度、反応度変化を測定するため、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。

(1) 中性子検出器の応答評価モデルの検討

先ず、原子炉出力を指標に、手法適用を検討するための4基の想定実機炉心(100MWe級、300MWe級、750MWe級、1500MWe級)を、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究の結果等を参考に、選定した。選定した炉心について、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。

次に、それらの計算結果から、未臨界状態で測定可能な特性項目について調べた。すなわち、①制御棒挿入による炉心の反応度変化、②炉心温度200℃→350℃の場合の反応度変化、③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、④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項目と反応度変化を把握した。

また、この検討結果に基づいて、「2-3 FCAを用いた試験」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する必要が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的な反応度印加位置に依存して検出器応答特性が異なり、その相異は炉心サイズが大きくなるにつれて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、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、①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、②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} が得られる検出器位置を探索する方法で最適検出器配置の検討を行った。その結果、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、前節の「(1) 中性子検出器の応答評価モデル」で得られた結果と整合しており、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。その結果、①検出器応答変化及び反応度変化に大きな影響を与えるの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、②燃料からの中性子発生に関しては強度の方が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、③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法の適用において、運転に伴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が実用的であり、有効と判断できた。一連の傾向は小型炉心から実用規模炉心まで炉心サイズに拠らず共通であることを確認した。

2-3 FCAを用いた試験

提案するシンセシス中性子源増倍法の実機への適用性を実験的に調べるために、2-2(1)の検討に基づいてFCAを用いた試験を実施した。まず、試験の準備として、①実験計画の立案、②未臨界度の測定範囲が広いパルス中性子実験を実施するためのパルス中性子源の整備、③未臨界状態での中性子束分布を測定するための反応率分布測定装置の製作を実施した。これらの準備完了後、300MWe級想定実機炉心の外側炉心模擬領域を炉心中央に設けた実験体系をFCAに構築し、臨界点を確認した。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中性子減衰定数（ α_p ）から臨界状態の α_p 導出は妥当であるが、未臨界度に関して炉雑音法及びパルス中性子法による測定結果とMSM法による結果間に10%以上の相違傾向を示し、今後のさらに検討すべきことが分かった。

実験解析では、未臨界度及び反応度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は、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。

2-4 未臨界反応度計測システムの実機への適用

シンセシス中性子源増倍法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、実機への適用性の試験計画に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、①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、②計測に利用する周波数帯域は、従来の折点周波数だけでなく、より低周波の振幅情報を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、①炉雑音法の検出器位置に関しては、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、②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、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して補正係数計算を行うと、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。

一連の結果を基に、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

想定実機炉心に対して、数値実験により、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を摘出した。炉雑音法では、①2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、②炉心全体を見込む軸方向上方の周方向3 箇所に設置した検出器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、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等を明らかにした。MSM法では、周方向3 箇所の検出器センサー(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判った。さらに、炉雑音法を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、複数の測定法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%以内の精度で測定可能の見通しを得た。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。

以上から、平成 19 年度から 22 年度にかけて実施した高速炉システムを対象に実機での原子炉起動前炉物理試験の未臨界状態で実施できる反応度変化測定技術の開発は、当初の目標を達成した。

3. 今後の展望

本技術開発は、未臨界状態における高精度な反応度測定を実現する試みであり、実機初号機の初回炉物理試験に適用すると、未臨界状態で温度係数のような反応度特性試験が実施できるとともに、出力運転開始後での適用では、燃料交換時の置換反応度測定や燃料交換後の炉心核特性を把握することが可能になることに目処をつけた。本技術開発によって、「初号機」による炉物理特性評価を支える基盤実験技術を確立しただけではなく、将来のFBR 実用化炉では初号機をそのまま大規模モックアップ試験装置として利用可能とし、従来の大規模モックアップ試験に対する負担を軽減できることが期待できる。その測定精度については、臨界法による結果とほぼ比肩し得る程度で達成可能の目処があるものの、明確化された課題の解決、検出器開発などのさらなる発展的研究により、その達成が確固となると考えられる。