

## 課題目標・目的及び研究成果

1. 研究開発課題名及び研究開発分野
・研究開発課題名：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
・研究開発分野：基盤研究開発分野
2. 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(予定) 53,262 千円
平成 22 年度(予定) 29,000 千円
3. 研究開発期間
平成 19 年 6 月～平成 23 年 3 月（4 年計画） （当初は 3 年計画、実験許認可遅れにより 1 年延長）
4. H20 年度までの目標
<b>【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</b> 開発すべき未臨界状態で反応度変化を測定する方法（シンセシス法と名付ける）を構成する測定法の一つである炉雑音計測法において使用する大容量時系列データ高速処理システムの根幹である高速炉用時系列パルスデータ収集装置を開発する。
<b>【研究開発項目 2】中性子検出器応答評価モデルの確立</b> 未臨界状態での反応度測定は、従来の臨界状態での性能試験に比べて、制御棒位置の工夫によって、燃焼が進んだ状態の中性子束分布、局所的に歪んだ中性子束分布等、様々な中性子束分布を実現でき、かつ安全に測定できることが最大の特徴である。そこで、シンセシス法を適用するにあたって、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、反応度変化と検出器応答の関係を調べ、中性子検出器の応答評価モデルを確立するために、以下の項目を実施する。
① 中性子検出器の応答評価モデルの検討 実機での適用を想定して、炉心特性・燃焼度分布、中性子源分布等のモデル検討条件を設定する。次に、想定した体系に対して、臨界・未臨界状態の核特性を数値解析により求め、炉心状態と核特性の変化の関係を把握して、FCA 実験体系の選定に反映する。
② 中性子検出器の最適配置に関する検討 上記①において想定した体系に対して、中性子検出器の配置について検討し、シンセシス法に関する中性子検出器の最適配置を定めることができるようにする。
③ 不確かさ要因分析による精度評価 中性子検出器の応答評価モデルに対して、断面積・中性子源強度分布誤差の影響を定量化し、その取扱方法を検討する。
<b>【研究開発項目 3】臨界実験装置（FCA）を用いた試験</b> シンセシス法の実機への適用性を実証するために、FCA を用いた試験として、以下の項目を実施する。
① 実験計画の立案 FCA を用いて、反応度較正の精度、未臨界度と反応度変化の関係、中性子源等による中性子束空間分布の歪みが与える反応度測定結果への影響、炉心と炉心周辺中性子検出器配置に関するデータ取得が行えるように、実験体系を検討し、実験計画を立案する。
② パルス中性子源の整備 未臨界におけるシンセシス法による反応度測定精度を評価することを目的として、未臨界度の

測定範囲が広いパルス中性子源実験を実施する。その準備として、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するとともに、その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を製作する。

### ③ 反応率分布測定装置の製作

未臨界状態での中性子束分布に関する情報を得るために、反応率分布測定装置を製作する。

### ④ FCA を用いた実験と解析

中性子検出器応答評価モデルを含むシンセシス法の実機への適用性を実証するために、FCA において実施する実験の予備解析を実施する。

## 【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

実機への適用を目指した、シンセシス法に基づく未臨界反応度計測システムを構築し、提案する。提案に当たって、同システムは、未臨界状態から臨界に至る範囲を複数の中性子検出器の応答を用いて、様々な炉の反応度および反応度変化を求める汎用測定システムを目指すものとする。このため、以下の項目を実施する。

### ① システム概念の構築

「もんじゅ」での既往実験による知見を踏まえ、数値実験を実施して、システムが備えるべき性能及び仕様を定めるとともに、システム構築における課題について、FCA を用いた試験において解決を図るために抽出する。

## 5. これまでに得られた成果

### 【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

#### ① 電気信号処理設計のデータ取得

高速 FIFO メモリ等を用いて、検出器の番号、検出時刻等を記録し、その記録データを、データ処理 CPU 回路によって、一時、メモリに蓄積することにより、従来よりも優れた時間分解能を有する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し、模擬検出器信号等を用いて総合性能を調べた。その結果、電気信号処理の時間分解能が 20ns を達成し、従来の市販装置の時間分解能 200ns に比べて、当初目標である 10 倍の高速化を達成した。

#### ②大容量時系列データ高速処理システムの設計製作

電気信号処理設計のデータ取得の結果をもとに、高速炉用時系列パルスデータ収集装置を設計製作した。製作したシステムについて、試験信号を入力して性能試験を実施した。その結果、基本性能として、4 入力のアナログ信号を時間分解能 20ns で処理し、連続データ収集能力が 100kcps であることを確認し、それらが機器仕様を十分に満足していることを確認した。

次に、FCA が所有する放射線測定モジュールを用いて、4 本の中性子検出器を含む大容量時系列データ高速処理システム全体を構成した。その後、中性子検出信号の時系列データ取得試験を実施し、システム全体の性能確認を行った。その結果、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た。

### 【研究開発項目 2】中性子検出器応答評価モデルの確立

#### ① 中性子検出器の応答評価モデルの検討

##### A. モデル検討用想定実機炉心の選定とモデル検討条件の設定

##### A-1 モデル検討用想定実機炉心の選定

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、応答評価モデルの検討に必要な想定実機炉心 2 基（炉出力 300MWe 級と 750MWe 級）を選定し、炉心形状、炉内構造、炉心仕様等を決定した。

選定した両炉心の炉心形状は、典型的な高速増殖炉炉心である均質 2 領域炉心（Pu 富化度の異なる内側炉心と外側炉心の 2 領域構成）とし、炉心高さは、300MWe 級が 93cm、750MWe 級が 100cm とした。この炉心をブランケット領域が囲み、その外周部に中性子遮蔽体を配置し、さらにその

外側に炉心を支持する炉心槽と、これら全体を下部から支持する炉心支持板上を設け、これらを原子炉容器内に設置する構造とした。300MWe 級炉心の炉心燃料は、Pu/U 混合酸化物燃料とし、運転サイクル長さ 123 日、4 バッチ燃料交換、取出し平均燃焼度約 5 万 MWd/t とした。一方、750MWe 級炉心の炉心燃料は、MA (マイナーアクチノイド) を含む Pu/U 混合酸化物燃料を想定し、運転サイクル長さ約 27 ヶ月、4 バッチ燃料交換方式、燃料取り出し平均燃焼度約 15 万 MWd/t とした。

また、制御棒挿入引抜、燃料交換などによる炉心の反応度変化は、炉心外に設置した (半径方向中性子遮蔽体外側を代表位置とした) 中性子検出器により、中性子束の変動として検知することを想定した。

#### A-2 モデル検討条件の設定

想定実機炉心 2 基に対して、基本仕様をもとに、核特性、燃焼度分布、中性子源分布を計算により求め、炉心状態と核特性の変化の関係を調べた。

##### <核特性>

初装荷から平衡サイクルまでの燃焼計算を行い、同サイクル初期と末期の燃焼組成分布を求めた。この結果を利用して、それぞれの炉心のサイクル初期及び末期における炉心の実効増倍率を計算した。また、制御棒全引抜状態での超過臨界状態の実効増倍率と制御棒全挿入状態での深い未臨界状態の実効増倍率を計算し、両実効増倍率の差から制御棒反応度価値を求めた。さらに、炉心の等温温度変化に伴う実効増倍率の変化 (すなわち、反応度変化)、実効遅発中性子割合及び即発中性子寿命を計算した。計算結果から、未臨界状態において測定可能な反応度特性とその値の範囲について検討した。

その結果、制御棒挿入による炉心の反応度変化の範囲は、2 基の想定実機炉心でほぼ共通であり、サイクル初期と末期で大差なく、ほぼ  $10\sim 14\% \Delta k/kk'$  ( $\$30\sim \$40$ ) 程度であること、温度変化幅が  $200^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$  の場合の反応度変化範囲は、サイクル初期と末期を通じ  $0.2\sim 0.3\% \Delta k/kk'$  ( $\phi 60\sim \$1$ ) 程度となることが分かった。なお、実効遅発中性子割合は炉心状態によらず大きな違いは見られなかったが、即発中性子寿命は最大 30% 程度変動する結果となった。

##### <燃焼度分布>

燃焼サイクル初期と末期の炉内燃焼度分布を計算した。その結果から、代表的な位置における新燃料と取出し燃料の置換反応度価値を計算し、燃料交換時に測定する特性とその範囲について検討した。

新燃料と取出し燃料の置換反応度価値は、炉心中心近傍及び外側炉心第一層において、 $0.03\sim 0.05\% \Delta k/kk'$  ( $\phi 10\sim \phi 15$ ) 程度である。ただし、燃料交換過程において、旧燃料取出した後、新燃料を装荷する前のナトリウムフォロワー状態 (燃料が装荷されていない状態) では、 $0.2\sim 0.3\% \Delta k/kk'$  ( $\phi 60\sim \$1$ ) 程度の置換反応度価値となった。これらの置換反応度価値の範囲も 2 基の想定実機炉心でほぼ共通であることが分かった。さらに、制御棒交換のために制御棒を取り出した場合と交換用制御棒を装荷する前のナトリウムフォロワー状態との置換反応度価値の範囲は  $0.5\sim 0.9\% \Delta k/kk'$  ( $\$1.3\sim \$3$ ) 程度となること、炉心の温度変化に伴う反応度変化は、深い未臨界状態でも臨界状態の場合と同程度になること、などの結果を得た。

以上のことから、燃料交換時に未臨界状態で測定可能な特性としては、上記の各反応度変化が候補として考えられ、その反応度価値の変化範囲を把握した。

##### <中性子源分布>

想定実機炉心において、燃料からの中性子発生は、酸化物燃料における重核種 (U、Pu 及び MA) の自発核分裂と、同核種が放出する  $\alpha$  線とペレット内に存在する  $^{17}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}$  との ( $\alpha, n$ ) 反応に起因すると考えられる。そこで、これらの中性子放出量を求め、炉内の中性子源分布を計算した。その結果から、シンセシス法における外部中性子源利用の有無等について検討した。

計算結果から、300MWe 級炉心の場合、未燃焼の新燃料では中性子放出量が少ないが、燃焼炉心で最も燃焼の進んだ燃料では、未燃焼燃料の 50 倍から 100 倍の中性子放出量となり、新旧燃料の中性子放出量に大きな違いのあることが分かった。一方、MA 含有率が高い 750MWe 級炉心では、未燃焼燃料でも、燃焼の進んだ燃料と同程度の中性子放出率であること、この放出率は燃焼状態でも高々 20% 程度の増加に留まることが分かり、新旧燃料の中性子放出量の違いは小さいことが分

かった。

以上のことから、これらの結果を未臨界状態の炉心内外の中性子束分布計算の前提条件とすること、また燃料からの十分な中性子放出が期待できるので、それ以外の外部中性子源の利用・導入は想定しないものとした。

#### B. FCA 試験体系構築への反映事項の抽出

上記A-2の結果から、測定対象とする体系の未臨界度は制御棒挿入条件によって  $10\sim 14\% \Delta k/kk'$  ( $\$30\sim \$40$ ) 程度まで変化すること、測定すべき反応度値は  $0.03\sim 0.05\% \Delta k/kk'$  ( $\phi 10\sim \phi 15$ ) 程度から  $0.5\sim 0.9\% \Delta k/kk'$  ( $\$1.3\sim \$3$ ) 程度であることが分かった。そこで、これらの測定条件をもとに、測定手法と測定精度について検討し、FCA 試験への適用について検討した。

その結果、FCA において適用可能な測定手法を考慮すると、試験では、上記Aで検討した未臨界度の範囲全体をカバーすることはできないため、理論に基づく外挿的な推論をする必要がある。したがって、試験にあたっては、実際の測定可能範囲と測定精度を詳細に確認しながら、Aで検討された結果の特徴を調べることができるような工夫が必要である。また、体系内に存在する中性子源分布と測定を実施する体系の未臨界度との関係、測定値に対する中性子源分布の影響に対する補正、制御棒挿入の仕方による中性子束空間分布の歪みによる測定値への影響について、知見が得られるような体系および測定用検出器の位置等の考慮が必要であることが分かった。

以上のことから、試験体系の詳細な選定と実験計画の作成では、上記の点を考慮する必要がある。

### ② 中性子検出器の最適配置に関する検討

#### A. 数値解析による炉心状態の変化と検出器応答の関係の把握

中性子検出器の応答評価モデルを確立するために、2基の想定実機炉心を対象として、未臨界状態における制御棒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を行った。計算体系は、300MWe 級実機炉心想定炉心については遮蔽体としてステンレス鋼を想定し、750MWe 級実機炉心想定炉心については炉心上部方向遮蔽体として  $B_4C$  および径方向遮蔽体として  $ZrH$  を想定した。さらに、本課題で提案の測定法に関する測定条件を考慮し、浅い未臨界状態と深い未臨界状態の2ケースを想定した。これらの計算条件において、制御棒位置などにおける反応度変化と遮蔽体内外に想定した中性子検出器応答の変化を計算した。

その結果、修正中性子源増倍法の観点からは、遮蔽体材質の影響は遮蔽体の外に置いた検出器の応答に影響すること、一方、炉心内の反応度変化に伴う検出器応答レベルの変動割合への影響は軽微なことが分かった。

#### B. 検出器の配置に関する予備検討

2基の想定実機炉心に対して、代表的な未臨界炉心状態を対象に、中性子検出器設置代表位置における中性子束分布を計算した。その結果から、中性子束レベルの変動に着目して、修正中性子源増倍法における補正係数値の取り得る範囲について検討した。

いずれの想定実機炉心においても、燃料中の中性子源から直接放出される中性子（非増倍成分）と、それに誘起されて核分裂により増倍する中性子（増倍成分）の比率は、制御棒全挿入状態（深い未臨界状態）で増倍成分が非増倍成分の約10倍となる結果を得た。また、制御棒全挿入状態から一部の制御棒（後備炉停止系）のみを引抜状態へと変化（制御棒全挿入状態から  $4.5\sim 6\% \Delta k/kk'$  程度の反応度を印加）した場合、増倍成分が非増倍成分の20倍以上に増大する結果を得た。このことから、炉心状態の変化が中性子検出器位置での中性子束レベルの変化として十分検知できることの見通しを得た。

さらに、中性子束の空間分布の歪が大きくなる制御棒交換時（1本づつ交換）を想定し、炉内において検出器設置が想定可能な位置における全中性子束レベルと核分裂線源強度の比から中性子束の変動を、計算によって調べた。その結果、この変動幅の周方向位置依存性、すなわち修正

中性子源増倍法における補正係数の空間依存性が、最大数十%程度変化することが分かった。

### C. 修正中性子源増倍法の補正係数の理論的検討

修正中性子源増倍法の補正係数を理論的に検討する第一段階として、「中性子検出器応答関数の理論」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 $k_{det}$ 」を炉心-反射体からなる2領域体系に対してエネルギー2群1次元拡散近似で解析的に求め、実効増倍率 $k_{eff}$ および小林啓祐の提案した未臨界増倍率 $k_{sub}$ と比較した。

その結果、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 $k_{det}$ は、(i)中性子源の設置場所、(ii)核分連鎖反応を担う核燃料物質の存在する領域、および(iii)中性子検出器の設置位置の三者の相対的な位置関係に強く支配され、有意な空間依存性を示すことが明らかになった。しかし、中性子源増倍法の理論式に対して検出器インポートランスを陽に含む形式に書き下す手続きが見出せず、純理論的に補正係数を導き出すことは、困難なことが分かった。

そこで、修正中性子源増倍法の補正係数の理論的検討のもう一つの手段として、三澤らの提唱している高次モード中性子源増倍法の導出過程を検討し、修正中性子源増倍法との関係を調べた。その結果、高次モード中性子源増倍法と修正中性子源増倍法それぞれの手法の未臨界度の定義が異なるため、両手法間を関係付けることができないことが分かった。したがって、高次モード中性子源増倍法を修正中性子源増倍法の補正係数の理論的検討に役立てることは出来ないことが分かった。そこで、補正係数を純粋に理論的に検討する作業は断念して、 $k_{det}$ と $k_{eff}$ との比較に着目して、中性子検出器最適配置に関する数値シミュレーションに重点を置くことにした。

### D. 中性子検出器最適配置に関する検討

想定実機炉心における中性子検出器最適配置に関する検討では、300MWe級炉心を対象に9箇所の検出器位置について、中性子輸送理論に基づくENDOSNコードにより $k_{det}$ を求めて $k_{eff}$ と比較した。その結果、修正中性子源増倍法および炉雑音法を適用する場合、 $k_{det}$ から $k_{eff}$ を推定できる検出器位置が、上部軸ブランケット領域に存在することが分かった。もう一つの実機想定炉心である750MWe級炉心については、炉心が大型のため多くの空間メッシュを必要とし、現有のENDOSNコードでは収束解を得ることができなかつたが、300MWe級炉心と本質的に同じであることから、最適検出器配置の結果は定性的に300MWe級炉心と同様であろうと推測した。

以上から、数値シミュレーションに基づく検討により、 $k_{det}$ から $k_{eff}$ を推定できる検出器位置が、上部軸ブランケット領域に存在することが分かった。

## ③ 不確かさ要因分析による精度評価

### A. 不確かさ要因の分析

2基の想定実機炉心を対象として、燃焼に伴う組成の変化に起因する燃料マクロ断面積が変化した場合と中性子源強度・発生エネルギーが変化した場合の中性子検出器応答に関する感度係数をそれぞれ計算した。

計算結果の感度係数をもとに検出器応答変化及び反応度変化に大きな影響を与える要因について検討した結果、燃料マクロ断面積では、中性子生成断面積( $\nu \Sigma_f$ )と中性子吸収断面積( $\Sigma_a$ )が主たる要因であることが分かった。また、燃料自体からの中性子発生に関しては、発生強度の不確かさ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が分かった。さらに、これら不確かさの感度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、炉心燃料燃焼に伴う燃料組成の変化が修正中性子源増倍法の補正係数に及ぼす影響を評価し、その影響を小さくする方法について検討した。その結果、燃焼に伴う燃料組成変化に起因する不確かさによる補正係数への影響を小さくするためには、実機炉心の運転にともなう燃料反応度変化の実績を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 $\Sigma_a$ 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的であることが分かった。

### 【研究開発項目3】臨界実験装置（FCA）を用いた試験

#### ① 実験計画の立案

想定実機炉心の炉心組成をもとに、FCAの燃料板及び模擬物質板の種類範囲内で試験体系用の炉心燃料セルを検討し、各想定実機炉心について外側炉心と内側炉心を模擬した炉心燃料セルを決定した。これらの炉心燃料セルを用いて計10ケースの試験候補体系を選定し、標準的な高速炉解析システムを用いて臨界量等についてサーベイ計算を実施した。炉心中心での中性子スペクトルを想定実機炉心の中性子スペクトルと比較した結果、模擬性は良好であった。これらの結果を踏まえ、FCAで保有する燃料板等の物量の観点から実際に構築可能である5ケースの候補体系に絞り込んだ。

さらに、研究開発項目2の検討結果をもとに、測定すべき項目として、臨界性、反応率、未臨界度及び反応度価値を抽出した。また、検出器応答の変化など反応度の測定結果に影響を与える要因を考慮して、その測定方法（臨界法、修正中性子源増倍法、パルス中性子法、炉雑音法）と各項目の大凡の所要期間を検討し、実験計画を立案した。

以上の結果、FCAにおいて試験体系が構築できる見通しを得た。なお、下記の④により核的制限値等の原子炉の運転上の制約等の詳細検討を実施し、最終的に試験体系を確定する。

#### ② パルス中性子源の整備

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の製作と、トリチウムターゲットを封入するための中性子発生管の製作を実施した。

製作したパルス電源に対して、外観及び寸法検査を実施した後、既設機器（既設パルス中性子発生装置の電源・制御回路）と接続して機能試験を実施し、入力設定値に対して高圧出力パルスの電圧及び波形、ならびに各種モニター出力パルスの特性に関する基本性能は、機器仕様を十分に満足していることを確認した。

製作した中性子発生管について、材料、寸法、機能等に関する試験・検査を実施した。その結果、同発生管は、FCAを用いた試験で使用するために必要な仕様を十分に満足していることを確認し、平成21年度のトリチウム封入の準備を整えた。このトリチウム封入をもって、トリチウムターゲットを含む中性子発生管の交換が完了する。

#### ③ 反応率分布測定装置の製作

基本設計、詳細設計を行い、詳細設計結果に基づいて反応率分布測定装置を製作した。

基本設計では、FCA既存類似装置に反応率分布測定機能を製作するケースと新規製作するケースについて検討した。その結果、製作費用等の経済性、FCA施設の設置許可内容との整合性等の許認可要件を考慮して、垂直半径方向に新規製作するケースを選択した。

基本設計の結果をもとに装置の詳細仕様を定め、FCA既設設備との取合等を考慮して、詳細設計を実施した。

次に、詳細設計に基づいて、反応率分布測定装置を製作した。なお、装置製作の前に、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく同装置の「設計及び工事の方法の認可」の申請を平成20年8月6日付で行い、平成20年9月9日付で認可を受け、平成20年10月22日付で使用前検査申請を行った。その後、2回の使用前検査を受検し、合格した後、同装置の製作・組み立てを行った。平成21年2月27日に同装置の第3回使用前検査（外観検査及び据付検査）を受検し、合格した（合格証は、平成21年3月13日に交付）。

以上の結果、同装置は、平成21年度からの試験において使用可能な状態となった。

#### ④ FCAを用いた実験と解析

平成21年度から実施するFCAを用いた試験の準備として、実験計画の立案において候補とした5つの体系に対して、FCAの燃料板及び模擬物質板の保有量を超えずに臨界体系を構築でき、かつ制御棒及び安全棒の反応度価値が所定の制限値を満たすことを条件として、炉心形状やセル組成等を詳細に調整する予備解析を実施した。

その結果、炉心領域が炉出力 300MWe 級の外側炉心組成を模擬した燃料セルと体系の臨界を調整するためのドライバー領域から成り、その外を酸化ウラン及びナトリウムから成る SB 領域が取り囲み、さらにその外側に劣化ウランブロック領域が取り囲む体系を、最終的な試験体系とした。

次に、試験体系における制御棒及び安全棒の反応度値が FCA の核的制限値を満足することを確認し、想定する試験項目についての予備解析を行って、試験の実施に燃料板等の保有量の観点から支障がないことを確認した。さらに、試験体系に対して、燃料本数が所定の約半分の量を装荷した未臨界状態から徐々に燃料本数を増加して所定の燃料量に至るまでを 5 段階に分け、各段階の実効増倍率を求めて、平成 21 年度の試験体系構築のための臨界近接作業スケジュールを作成した。

#### 【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

##### ① システム概念の構築

###### A. 数値実験

「もんじゅ」初装荷炉心における炉物理試験時の制御棒反応度値測定に関連した既往試験データの検出器応答変化と炉内反応度変化の関係から、その代表例について予備計算を行って詳細数値実験用モデルを作成した。また、炉心状態と炉外検出器応答との関係の検討から、修正中性子源増倍法を実機に適用する際の課題を抽出した。

###### A-1 既往試験データの調査

「もんじゅ」初装荷炉心の性能試験における中性子源増倍法による制御棒反応度値測定に関する既往データに対して、測定時の中性子検出器応答と制御棒挿入状態の関係を整理した。次に、整理から得た制御棒挿入状態における炉心の未臨界度を、臨界法による制御棒較正試験結果から予測される未臨界度と比較した。

その結果、中性子源増倍法による測定では、炉心の未臨界度が \$1 程度より深くなると、炉心と半径方向ブランケット領域の境界に装荷された外部中性子源 ( $^{252}\text{Cf}$ ) から直接検出器に到達する中性子が中性子計数率に影響を与え、本来の増倍成分のバックグラウンドとして無視し得ないことが分かった。

###### A-2 修正中性子源増倍法を実機に適用する際の課題

上記 A-1 の比較結果をもとにその模擬計算を実施し、修正中性子源増倍法を実機に適用する際の課題を抽出した。

計算では、制御棒全挿入状態における炉内の中性子源分布を忠実に模擬し、これを線源とする中性子増倍計算が必要であり、そうすることによって、核分裂による増倍成分の中性子計数率への寄与は  $^{252}\text{Cf}$  外部中性子源から直接検出器へ到達する非増倍成分の 10%程度であることを確認した。また、修正中性子源増倍法において必要とする校正用反応度測定時の実効増倍率計算では、そ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すことによって、計算による中性子束の空間分布歪みが実際の歪みを再現する工夫が必要であることが分かった。

この中性子束の空間分布歪みの再現に関して、調整パラメータを導入した詳細数値実験用モデルを作成した。

###### A-3 数値実験による計測システムの基本アルゴリズムの検討

簡易モデルに基づくシミュレーションにより、未臨界度計測アルゴリズムに必要な性能（計測精度、計測時間）を検討した。さらに、中性子検出器応答の時系列模擬信号データを作成し、計測データ処理方法の検討を行った。

検討の結果、炉雑音法について、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、計測に利用する周波数帯域は、従来の 1 kHz 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ことによって、精度向上を望めることを明らかにした。さらに、炉内の自発核分裂などの中性子源を利用する炉雑音法の場合、外部中性子源を用いた人工外乱を加えることで、より計測精度を向上できることが分かった。

また、空間依存の炉雑音数値シミュレーションによって、空間高調波の存在のために、従来の炉雑音法では、未臨界度推定の誤差が大きくなることを明らかにし、推定精度改善に役立つ情報

として整理した。

さらに、計測時間については、同じ計測時間のデータを用いた場合、未臨界度が深くなると、推定値のばらつきが大きくなることを明らかにした。その結果、実際の測定では、未臨界度に応じて計測時間を変えることが望ましいことが分かった。

#### A-4 実機炉心での試験を想定した数値実験

上記A-3で検討した結果を基に、確率論的手法を用いて実機炉心での炉雑音試験を想定した数値実験を実施した。また、「もんじゅ」での既往試験で得られた浅い未臨界状態から深い未臨界状態までの範囲における代表的な5つの制御棒挿入状態に対する未臨界状態での検出器応答変化と炉内反応度変化の関係を選択し、実機炉心での修正中性子源増倍法による試験を想定した数値実験を実施した。

その結果、実機炉心での炉雑音法を用いた試験では、炉心外中央上部に検出器を置いた場合、あるいは径ブランケット位置の上部炉外で遮蔽体の内側に検出器を置いた場合、それら検出器を未臨界度測定に利用できる可能性が高いこと、空間依存性の影響を低減する可能性のある2検出器法を適用することが望ましい、等の知見を得た。

修正中性子源増倍法については、「もんじゅ」炉心における代表的な5つの制御棒挿入状態に対して、制御棒反応度値の測定結果と数値実験結果との比較から評価した。その結果、修正中性子源法の補正係数を用いて基準未臨界度の予測精度を向上させることは、広い範囲で未臨界度予測と制御棒値推定に有効であることが分かった。径方向ブランケットに配置された外部中性子源強度と炉心燃料自身からの中性子発生強度の比率に関する精度が補正係数に影響を与えることが分かった。

### B. システムが備えるべき性能及び仕様

数値実験による計測システムの基本アルゴリズムの検討及び実機炉心での試験を想定した数値実験の結果に基づき、炉雑音法と修正中性子源増倍法の検出器に関する基本性能と仕様を定めた。

その結果、炉雑音法のシステムでは、未臨界度\$0.5~\$2の範囲の浅い未臨界状態を測定対象とし、複数の検出器を炉心上部、ブランケット上部位置、炉心近傍のステンレス遮蔽体位置等の炉心からの中性子が直接観測可能な場所に設置し、検出器は複数使用し、それらの信号を同期処理する2検出器（複数）法の適用が有効である。

修正中性子源法のシステムでは、浅い未臨界状態から深い未臨界状態までの広い範囲（未臨界度：\$0.5~\$30程度）を対象とする。なお、本測定法において必要な基準反応度測定は、浅い未臨界状態において炉雑音法により実施し、その時の未臨界度測定結果と中性子検出器の応答の関係を基準状態として利用する。検出器は、炉心からの中性子が直接観測可能であり、炉心内の制御棒や燃料引抜による局所的な影響を直接受けず、炉心全体の変化として検出器応答が現れる炉心の周辺に複数配置する。また、必要な補正係数を精度よく算出するために、プラント運用実績データの反映を可能とする支援システムを必要とする。

これらのシステムで用いる検出器には、ガンマ線を遮蔽する工夫や検出感度を上げる工夫が必要である。その工夫には、検出器の大型化、複数の検出器をクラスタ状にして使用すること、高速中性子を熱中性子に減速すること等が考えられる。

### C. システム構築における課題の抽出

実機適用性のための試験計画へ反映すべき事項を抽出するために、先行高速炉での既往実験及び未臨界度測定、反応度測定に関する過去の文献の中で、炉雑音解析に関する知見を調査した。また、BWR異常診断技術に関する知見と、高速炉の代表例について計算を行った炉定数データ（動特性パラメータ）をもとに、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た。

文献調査の結果、先行高速炉での既往実験及び未臨界度測定、反応度測定に関する過去の23件の文献の内、高速炉の炉雑音解析に関するものが14件あり、それらを折点周波数法、極性相関法、APSD法、コヒーレンス法、2周波数点法、ミハルズ法、ゼロ交差相関法などの種々の測定方法について、整理してまとめた。また、BWR異常診断技術に関する知見と、300MWe級高速炉につ



いて炉定数データを作成し、プラントにおける炉雑音要因と応答周波数帯の関係について検討した。その結果、炉雑音の周波数帯域が 1.2~1.6kHz のオーダーとなること、この値は高速炉における炉雑音要因として観測される流動ノイズなどの周波数帯域より 2 桁以上高いこと、計測原理の異なる手法の組み合わせを検討する必要があることなど、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、FCA 試験によって解決すべき課題として以下を抽出した。炉雑音法に関しては、修正中性子源増倍法において必須の基準未臨界度の測定可能な範囲に関する実験的実証、未臨界度測定における検出器位置依存性と中性子遮蔽体や減速材による検出効率への影響に関することを抽出した。一方、修正中性子源増倍法に関しては、模擬制御棒反応度測定における中性子源配置と検出器位置依存性に関すること、中性子束空間分布歪を考慮した補正係数の検証に関すること、補正計算における中性子バランス調整の有効性に関する実験的検証を抽出した。また、実機炉心では試験時の炉の運用の観点から、基準未臨界度の測定には負のペリオド法、インバース・カイネティクス法などの測定手法も有効であると考えられるが、これら測定手法に関する試験を行うには、FCA 運転に関する制約等を考慮する必要があることがわかった。さらに、FCA 試験において外乱反応度を印加するには、外部中性子源からの中性子を炉心に与えることが考えられ、未臨界度の測定可能な範囲に関する実験的検証が必要であるものの、補正係数計算手法における断面積調整方策の検証が可能と期待できることが分かった。

## 6. 中間評価の過程における主な指摘事項

### 【技術開発の目的・目標の設定について】

- ・意欲的な目標であり、達成できた場合には大きな効果が期待できる。
- ・本研究は、高速炉実機をベースに、反応度特性の高精度な実験的評価を可能とする技術開発を目標としており、革新的高速炉開発にとって有益である。手法的には、必ずしも斬新とは言えないが、理論的考察から既往研究調査までしっかりなされており、技術改良に向けた創意工夫が見られる。

### 【技術開発の進捗状況について】

(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)

- ・システムの要求性能である、時間分解能 20[ns]、データサンプリング率 100[kcps]以上を満足する高速炉用時系列パルスデータ処理装置が完成した。

(研究開発項目 2 中性子検出器応答評価モデルの確立)

- ・FCA 試験計画等で留意すべき事項について有益な知見が得られている。

(研究開発項目 3 臨界実験装置 (FCA) を用いた試験)

- ・FCA を用いた模擬試験の準備は、途中、許認可による遅れがあったものの、反応率分布測定装置の製作、中性子発生管の製作も終了しており、順調に進んでいる。

(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)

- ・現在は概念構築の段階であるが、予定通り進められている。
- ・数値実験により得られた多くの知見が紹介されているが、本研究の目標達成にとって汎用性のある基盤的な成果と個別の具体的な成果を整理して示すことが望ましい。

### 【今後の研究開発計画について】

(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)

- ・計画通りに開発を進め、得られた成果を研究開発項目 3 「臨界実験装置 (FCA) を用いた試験」に適用してもらいたい。

(研究開発項目2 中性子検出器応答評価モデルの確立)

- ・空間的、時間的不確かさ要因分析結果の妥当性を実験的に検証してもらいたい。

(研究開発項目3 臨界実験装置(FCA)を用いた試験)

- ・FCAを用いた試験が重要となる。研究開発項目4で掲げられた、FCA試験で炉の規模を考慮に入れて解決すべき課題について具体的な実験計画・方法を示してもらいたい。計画通りの研究成果を期待する。

(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)

- ・FCA実験の結果をどのように実機へ適用していくかが重要である。実機への適用性検討にはFCA実験と数値実験において種々の炉心条件を考慮した評価が必要と思われるが、短い実施期間にできる範囲で資源に配慮して最善を尽くしてもらいたい。
- ・数値実験と具体例として「もんじゅ」から得られる結果との比較に期待する。

【研究開発の目的・目標の達成可能性について】

- ・今後のFCA実験が重要となる。FCA実験に十分に注力してもらいたい。
- ・高速炉実機の反応度特性を実験的に評価する技術改良に一定の成果が得られることが期待できるので、高精度な測定を実現するとともに、様々な炉にまで拡張できる汎用的手法の構築に繋げてもらいたい。

【革新的なブレークスルーについて】

- ・本研究で提案するシステム概念が実機に適用できるなら、革新的ブレークスルーといえる。シンプルな炉心体系でのケースと実機でのケースに分けて検討してもらいたい。その際、S/N比や不確定性要因の影響の定量的評価もあわせて検討してもらいたい。

【研究開発により得られた成果及び今後見込まれる発展性について】

- ・本研究開発の成果は、高速炉物理の新たな実験的研究手法を提供できる可能性があるとともに、先進的な核計装の要素技術としても有用と思われる。また、臨界安全管理や加速器駆動未臨界炉の研究開発にも大いに資するものと考えられる。

【研究開発の継続の是非について】

- ・FCA実験の実施により得られるデータには有用性があるので、実機への適用性を見据えながら継続すべきであると判断する。実機に適用した場合の精度を評価できるシステムの構築を目指してもらいたい。
- ・本研究提案の有用性を見極めるためには、研究の継続が必要となる。本研究により得られるであろう知見や技術成果は有意義で、本研究開発事業の研究費投資に値すると判断する。