



## 研究報告

# 未臨界度測定技術の開発

羽様 平\* 毛利 智聡\*<sup>1</sup> 相原 永史\*<sup>2</sup>

大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部

Development of Sub-Criticality Measurement Technique

Taira HAZAMA\* Tomoaki MOURI\*<sup>1</sup> Nagafumi AIHARA\*<sup>2</sup>

Experimental Reactor Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center

核燃料取扱施設において臨界安全の確保は極めて重要な命題であるが、経済性向上についても近年重要性が増している。安全性と経済性を両立できる臨界安全管理方法の構築に資するため、臨界までの余裕度（未臨界度）を定量的に監視するための未臨界度測定技術を開発した。

開発では、測定条件の厳しい高速炉燃料再処理施設でも適用可能な未臨界度測定技術として、炉雑音測定に基づく手法に焦点を当て、重水臨界実験装置（DCA）を利用して測定性能の把握と性能の改良による適用性の向上に取り組んだ。その結果、既存測定手法に比べて応答時間を1/10に短縮し、困難とされていた高中性子バックグラウンド下での適用性についても解決するなど、モニタとして実用的な未臨界度測定技術を開発することができた。

*In nuclear fuel processing facilities, prevention of criticality accidents is extremely important, while there is a growing demand to improve criticality safety control efficiency for economic reasons. As a solution to meet both demands, a sub-criticality measurement technique has been developed, which can monitor safety margin to criticality in the facilities in a quantitative way.*

*In the development, a measurement technique based on the reactor noise analysis was focused considering severe situations in FBR fuel reprocessing plants. The performance of the technique was investigated and improved through experiments in Deuterium Critical Assembly (DCA). With improvements, such as the reduction of response time by a factor of 10 and the settlement of the difficulty under a high neutron background situation, the technique was developed to be a practical technique as a sub-criticality monitor.*

### キーワード

臨界安全，未臨界度測定，炉雑音測定，高速炉燃料再処理施設，重水臨界実験装置，応答時間，高中性子バックグラウンド，不感時間，変動体系，未臨界度モニタ

*Criticality Safety, Sub-Criticality Measurement, Reactor Noise Analysis, FBR Fuel Reprocessing Plant, DCA, Response Time, High Neutron Background, Dead Time, Dynamic System, Sub-Criticality Monitor*



羽様 平

臨界工学試験室所属  
副主任研究員  
未臨界度測定技術開発にか  
かわる実験・解析業務，及  
びDCAの運転管理業務に  
従事



毛利 智聡

臨界工学試験室所属  
未臨界度測定技術開発にか  
かわる実験・解析業務，及  
びDCAの運転管理業務に  
従事



相原 永史

臨界工学試験室長  
未臨界度測定技術開発の総  
括 及びDCAの運転管理業  
務の総括に従事

\* 現在：大洗工学センター システム技術開発部 Presently, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center.

\*<sup>1</sup> 現在：川崎重工業株式会社 開発部 Presently, Research and Development Department, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

\*<sup>2</sup> 現在：大洗工学センター 安全管理部 Presently, Health and Safety Division, O-arai Engineering Center.

1. はじめに

核燃料の加工・貯蔵・再処理など反応度制御設備が備えられていない核燃料取扱施設では、いかなる状況でも臨界に達しないように核燃料の取扱量、濃度、取扱機器の形状や配置等を管理・制限（臨界安全管理）しなければならない。制限値は、軽水炉の燃料に比べて核分裂性核種の濃度が高い高速炉燃料を再処理する場合には特に厳しく、施設の経済性や保守性を損なわないためにも安全性を確保しつつ安全裕度を適正化することが強く求められている<sup>1)</sup>。

未臨界度測定技術の利用はそのための一方策であり、現場の未臨界度（臨界までの余裕度）を監視することによってより確実な安全管理を可能にするとともに、未臨界度実測値を設計や運転管理に反映することによって合理的な管理方法の構築に資することができる。

未臨界度測定技術は、表1のようにこれまで主

に原子炉の特性測定を目的として様々な測定手法が考案されている。本研究では、その中でも高速炉燃料再処理施設への適用可能性が高い測定手法として炉雑音測定法に着目し、その代表的な手法であるファインマン法とミハルソ法について未臨界度監視装置（未臨界度モニタ）としての適用性向上のための開発を実施した。

ファインマン法（図1）は、1956年にR.P. Feynmanらによって核分裂中性子放出数の分散測定のために考案された手法である<sup>2)</sup>。一定時間の検出器カウント数の分散と平均の比を解析するだけの簡単な方法であり、基本的な測定技術は既に確立されている。未臨界度測定への利用も検討され、固体ウラン燃料を用いた定常体系において実効増倍率0.8まで測定できることが確認されている。

ミハルソ法（正式名:Cf 252 ource Driven Noise Analysis Method）（図2）は、1972年に米国ORNL

表1 主な未臨界度測定技術と未臨界度モニタとしての適正評価

手 法	原 理	未臨界度モニタとしての適正評価
中性子数の減衰を利用する手法（例：パルス中性子法）	加速器でパルス状に発生させた中性子集団を増倍体系に打ち込み、その後の体系内における中性子密度の時間変化率より未臨界度を求める。	パルス中性子発生装置の設置、運転・維持管理が煩雑。体系が変動する場合には適さない。
中性子数そのものを利用する手法（例：中性子源増倍法）	中性子源強度が一定である場合の検出器の応答が実効増倍率に依存することを利用し、計数率より未臨界度を求める。	測定システムが非常に簡単で応答性も優れている。検出効率の評価が困難。体系内の中性子源強度が変動する場合には適さない。
中性子数の分布を利用する方法（例：指数実験法）	体系に中性子源を設置し、そこから指数関数的に減衰する中性子の空間分布を測定する。空間的な中性子の減衰率から未臨界度を求める。	強い中性子源と複数地点での中性子計数測定が必要。体系の形状が複雑な場合や体系が変動する場合には適さない。
中性子数の微小変動を利用する手法（例：ファインマン法、ミハルソ法）	中性子数の微小変動（炉雑音）について相関を抽出し、相関強度より未臨界度を求める。	測定システムが簡単で応答性も優れている。体系の形状や変動の影響を比較的受けにくい。

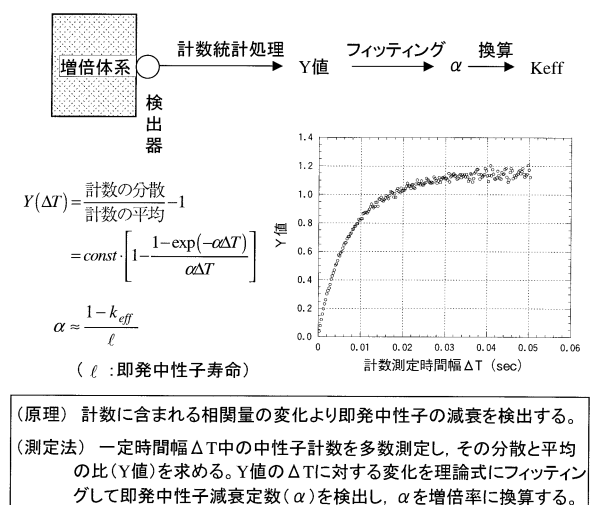


図1 ファインマン法の概要

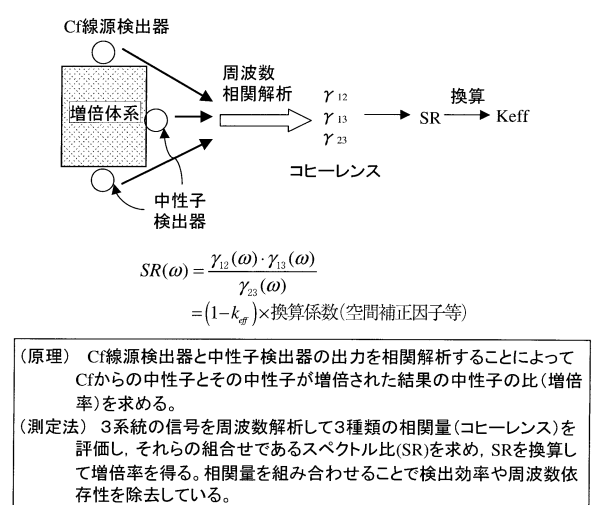


図2 ミハルソ法の概要

のJ. T. Mihalczoらによって提唱された未臨界度測定手法である<sup>3)</sup>。Cf線源検出器(Cf 252中性子源を内蔵した電離箱であり、Cfからの自発核分裂中性子の発生タイミングを核分裂片により検出する)と2個の中性子検出器の信号を周波数解析し、未臨界度を得る。高速炉再処理施設の安全性に関する研究開発を目的とした日米共同臨界実験<sup>1)</sup>でも取り上げられ、未臨界度モニタとして有望であるとの見通しが得られている。

上記未臨界度測定技術を未臨界度モニタとして実用化するためには、実際のプラントに近い試験設備における実証試験が必要であり、重水臨界実験装置(Deuterium Critical Assembly: 以下、DCA)の一部を多様な未臨界状態を模擬した試験体を利用できるように改造し、未臨界度測定技術の開発を実施した。本報告では、未臨界度測定技術開発の成果を報告する。

## 2. 開発目標

未臨界度モニタに必要な性能は、基本的には測定体系の状況(形状、時間的変動など)に関係なく所定の応答時間内で未臨界度(以下では実効増倍率で表す)を測定できることであるが、具体的な性能は用途や測定対象に依存する。高速炉燃料再処理施設を想定して表2のように開発目標を定めた。

実効増倍率( $K_{eff}$ )の測定範囲と精度については、施設の通常運転時から異常時に至る広範囲の状態について実効増倍率を安全上の重要性に応じた精度で測定できるように設定した。応答時間については、再処理工程で想定される変動に基づき10分以内としたが、系統操作上の異常により燃料

が核的に非安全な場所に移動する場合は、より短時間(10秒~1分程度)で測定する必要があるため、可能な限り短縮を図ることとした。

体系の変動への追従性について、並びに中性子バックグラウンド下及び複雑な体系に対する適用性については、いずれも測定を困難にする要因であり、適用範囲の拡張としてまとめた。ただし、具体的な適用範囲については、検出効率など測定体系に依存するため、定量的な目標は設定せず、影響の把握と対処法の確立を図ることとした。

## 3. DCAの改造

図3に改造後の炉心を示す。炉心タンク中央部(試験体領域)に未臨界の試験体を装荷する。試験体領域の外周部(ドライバ領域)は、改造前の炉心と同じであり、クラスタ型の燃料集合体を装荷し、減速材に重水を使用する。試験体には新型転換炉用あるいは高速炉用の燃料棒を装荷でき、減速材に軽水、重水、及びその混合液を使用することができる。試験体だけで達成可能な実効増倍率の上限値は0.9であり、より高い実効増倍率については、ドライバ領域を含めて達成する。

## 4. 研究開発<sup>2)</sup>

本節では、選定した2種類の測定技術(ファインマン法、ミハルソ法)について、既存技術の課題とその解決のために実施した改良について述べる。

### 4.1 ファインマン法

(1) 既存技術の測定性能と課題の把握  
定常状態におけるウラン燃料を用いた試験にお

表2 未臨界度モニターの開発目標

項目	目標性能
(1) 測定範囲と精度(応答時間)	測定範囲: 0.4 $K_{eff}$ 0.99 測定精度(応答時間10分以内): $\pm 0.003$ (0.95 $K_{eff}$ 0.99) $\pm 0.04$ (0.8 $K_{eff}$ < 0.95) $\pm 0.10$ (0.4 $K_{eff}$ < 0.8)
(2) 適用範囲の拡張	プロセス変動に追従して測定できること。中性子バックグラウンドの強弱に影響を受けないこと。多様な形状に対して正確に評価できること。
(3) 測定システム	コンパクトで維持管理が容易であること。

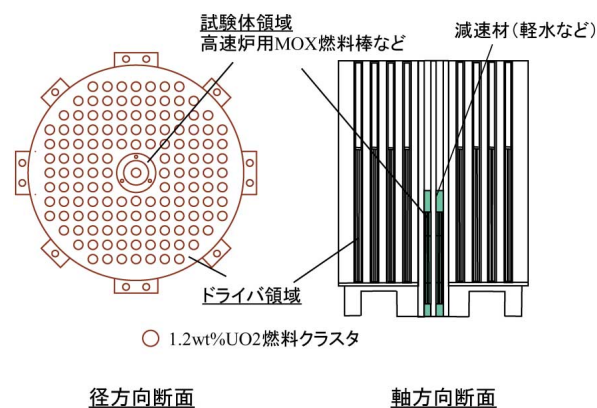


図3 DCA改造後の炉心構造

いて、実効増倍率を目標とした精度及び応答時間内で測定できることを確認した。

問題点として以下の項目を確認した。

変動体系（実効増倍率や体系内の中性子源強度の変化により中性子束レベルが時間的に変動する体系）では、計数の時間変動に即発中性子の減衰とは異なる成分が混入するためY値が理論式（図1参照）に従わず、値の検出が困難になる。

MOX燃料を用いた体系のように中性子束レベルが高い場合には、計測システムの不感時間の影響によりY値が理論式に従わず値の検出が困難になる。

測定で得た値を未臨界度に換算するための即発中性子寿命は計算で評価するが、複雑な体系に適用するためにはモンテカルロ計算による評価法の確立が必要である。

## (2) 未臨界度測定技術の改良

### 1) 変動体系に対する適用性の改善

変動体系に適用できるように以下の3種類の工夫をデータ処理に導入した。

#### 階差フィルタの適用

橋本らの考案した手法<sup>6)</sup>で時系列データの差分処理によって低周波数成分を除去する。

#### データ分割による変動の低減

対象データを変動の小さい時間範囲に分割して

評価し、その平均値より最終的な評価を行う。

#### 変動要素を考慮した評価式の利用

遅発中性子の寄与を補正する場合に従来用いられてきた手法で時間幅Tの1次の補正項をフィッティング解析式に追加する。

実効増倍率は一定であるが中性子束が時間的に変動する実験体系を実効増倍率が0.90の体系で中性子源を体系内外に移動することによって構成し、上記3種類のデータ処理法の適用性を確認した。一例として階差フィルタを適用した場合の結果を図4に示す。中性子計数率の変動時においても表2の目標精度 $\pm 0.04$ の範囲で測定できることが確認できる。各データ処理法は表3のように互いに異なる特徴を有しており、状況に応じて手法を選択することによって最適な評価結果を得ることができる。例えば、変動が緩やかな場合は統計誤差の優れたデータ分割法を、変動率が予測できない場合は適用範囲の広い階差フィルタ適用法又はパラメータ追加法を使用すれば良い。

#### 2) 不感時間の影響の除去

不感時間の影響の補正法は、計数の平均値については良く知られているが、分散については、計数間隔がポワソン分布に従う場合の補正法が考案されているだけで、計数間に相関が含まれる場合についてはその影響についてさえ説明されていなかった。計数間隔が相関強度に依存し、理論的な

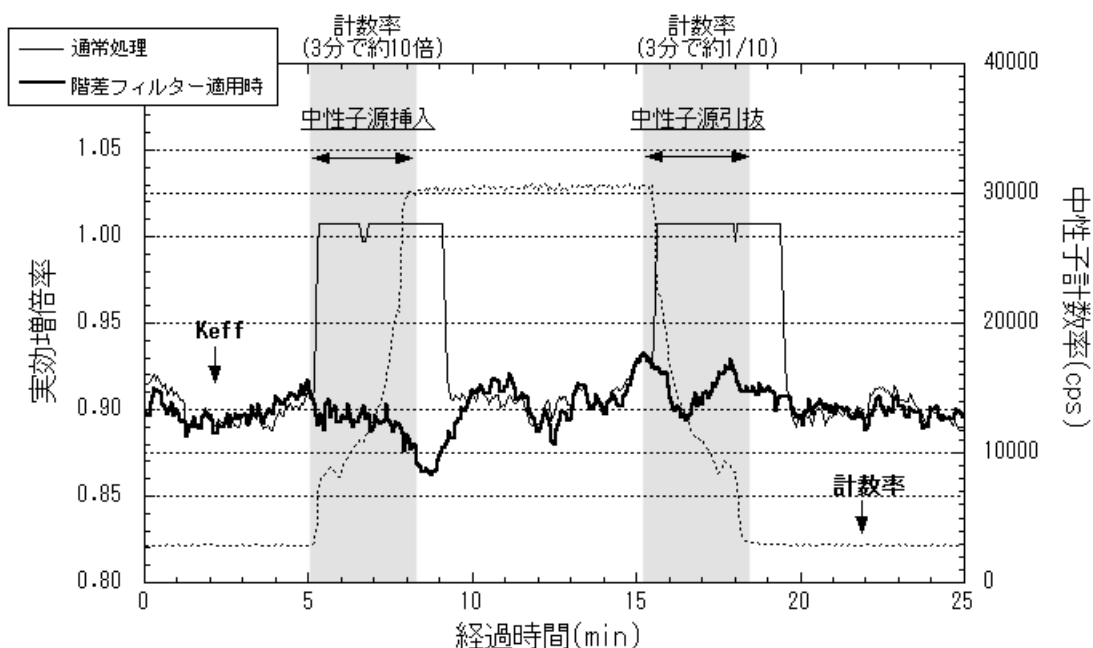


図4 中性子源移動時のファインマン法則定結果(階差フィルタの摘要効果)  
(執行増倍率は80秒分データを4秒ごとに処理して評価)

表3 変動体系におけるデータ処理法

手 法	適用範囲と結果の制度
(1)階差フィルタ適用法	適用できる変動の範囲が広いが、データ分割法に比べると結果の統計誤差が約2倍になる。他の手法と異なりパラメータ調整が不要。
(2)データ分割法	適用できる変動の範囲は、3手法の中では最も狭いが、結果の統計誤差は定常時における通常処理の場合と同程度である。変動率に応じてデータ分割数を調整する必要がある。
(3)パラメータ追加法	適用できる変動の範囲が広いが、データ分割法に比べると結果の統計誤差が約4倍となる。フィッティングパラメータの初期値設定に調整が必要。

評価が難しいためである。

本研究では、Y値に対する不感時間の影響を分析することにより、相関のある計数が不感時間で失われる確率は、相関強度にほとんど依存せず、単純に不感時間による計数まひ時間の割合で決まることを見出した。その考えに基づき、Y値に対する不感時間の影響について以下の関係式を導出した。

$$Y_0(T) = {}^3Y(T) + \lambda^2 - 1 \dots\dots(1)$$

ここで、

$Y_0$  : 不感時間の影響を受けたY値  
 $\lambda$  : 見かけの計数率 / 真の計数率

である。

(1)式において、右辺第1項が今回新たに導出した相関成分に対する不感時間の影響を表す項であり、第2項以下は既に解明されている相関に無関係な成分に相当する。右辺第1項の検証としてファインマン法の測定を模擬したモンテカルロ計算を行った。図5に不感時間によるY値の相関成分〔(1)式右辺第1項〕の変化を  $1-\lambda$  に対して示す。  $\lambda$  が0.4の場合でも正確に補正できることが確認できる。

### 3) 換算係数評価コードの整備

換算係数である即発中性子寿命の評価のため、既存モンテカルロ計算コードに機能追加を行った。2種類(直接及び間接)の評価法を整備した。

#### a) 直接評価法

連続エネルギーモンテカルロコードMCNP<sup>7)</sup>に

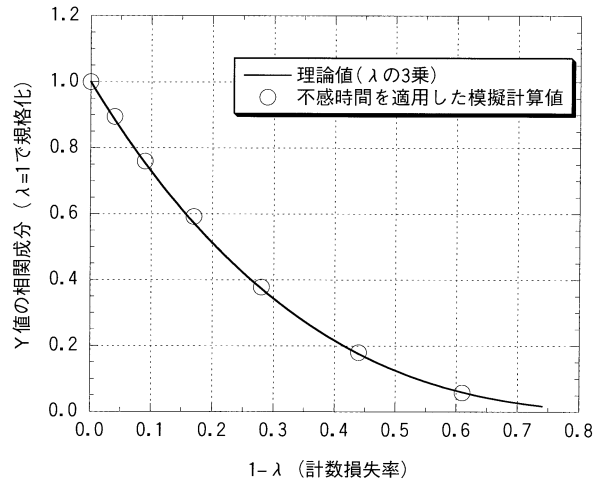


図5 模擬計算による不感時間の影響評価式の検証

中性子生成時間計算機能を新たに追加することによって未臨界度評価用の即発中性子寿命評価コードを作成した。同コードにより求めた即発中性子寿命と同コードの臨界計算により求めた実効増倍率を用いて算出した値は、測定値と約10%以内の精度で一致することを確認した。

#### b) 間接評価法

MCNPに未臨界度測定を模擬するための機能を追加した。模擬機能によりY値を求め、測定と同様な手順で値を評価し、別途評価した実効増倍率と値の関係より即発中性子寿命を間接的に得る。作成した模擬計算コードによって、値の測定値を10%以内の精度で模擬できることを確認した。

間接評価法は検出器配置を考慮することができるという点は優れているが、直接評価手法に比べて計算時間を要する。両評価コードを適切に組み合わせることによって、合理的な計算時間で信頼性の高い評価が可能になる。

## 4.2 ミハルゾ法

### (1) 既存技術の測定性能と課題の把握

定常状態におけるウラン燃料及びMOX燃料を用いた試験により、実効増倍率を目標精度内で測定できることを確認した。問題点として以下の項目を確認した。

応答時間が目標性能を満足しない。例えば、Keff0.96を±0.003以内、あるいはKeff0.4を±0.1以内で測定するための応答時間は10分以上となる。

固有中性子源（体系に含まれる Cm 244, Pu 240 など）の強度が Cf 線源強度に対して無視できない場合は、固有中性子源強度に応じた補正が必要になる。これは、ミハルゾ法が Cf 線源を起源とする中性子のみの増倍に着目する手法であるのに対し、増倍後の中性子検出結果からはその起源を特定することができないためである。

未臨界度と固有中性子源強度の同時測定は困難であり、モニタとして使用するためには高強度の Cf 線源を使用するなどの対策が必要となる。

測定結果が検出器配置により異なる。モンテカルロ計算による評価法の確立とともに補正の簡素化が必要である。

なお、の応答時間の問題に関して、日米共同臨界実験（ウラン硝酸溶液燃料）では、10秒以内で  $K_{eff} 0.95$  を  $\pm 0.002$  で  $K_{eff} 0.44$  を  $\pm 0.04$  で測定できることが報告されている<sup>9)</sup>。そこで、DCA 実験と日米共同臨界実験の差異を理論的に検討した結果、両者の応答時間の差は技術的な問題ではなく、測定体系の差異（中性子寿命、体系の体積）に起因することを確認した。しかしながら、目標性能に掲げた変動体系への適用性を評価するためには、DCA 体系であっても目標の応答時間内で測定できることが必要である。

(2) 未臨界度測定技術の改良

1) 応答時間の短縮

従来の周波数相関解析に基づく手法に替えて、時間相関解析による手法（以下、改良手法）を導入した。改良手法の測定概念を図6に示す。改良手法は過去に基礎実験により測定可能性が確認され<sup>9)</sup> 理論的考察によって応答時間短縮の可能性が

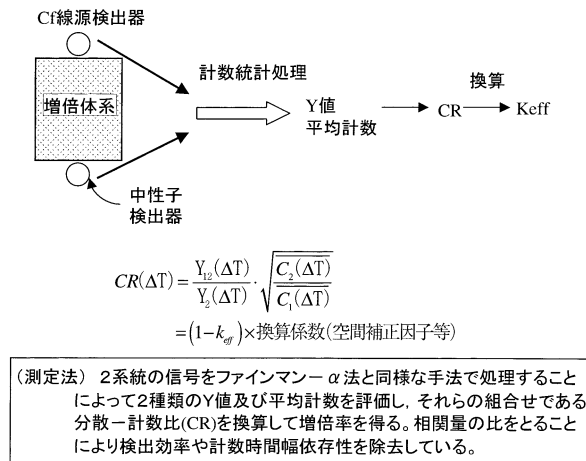


図6 ミハルゾの改良手法(時間相関解析手法)の概要

示唆されていたが<sup>10)</sup>、理論の詳細や手法の特徴及び有効性は把握されておらず、本研究において改めて基礎理論から検討を行った。その結果、改良手法は、応答時間の短縮だけでなく、及びの問題解決にもつながることを見いだした<sup>11)</sup>。

既存のファインマン法用の測定機器を利用して改良手法の測定システムを構築し、同手法の性能確認実験を実施した。試験の結果、図7に示すように従来の周波数相関解析による手法（以下、従来手法）に比べて実効増倍率を1/3以下の統計誤差で測定できることを確認した。統計誤差は応答時間の平方根に反比例するため、応答時間で比較すると1/10以下の短縮に相当する。

その結果、1分間で  $K_{eff} 0.95$  を  $\pm 0.003$ 、 $K_{eff} 0.90$  を  $\pm 0.01$ 、 $K_{eff} 0.70$  を  $\pm 0.04$ 、 $K_{eff} 0.40$  を  $\pm 0.10$  の統計精度で測定できるようになった。

2) 変動体系に対する適用性の改善

改良手法による応答時間短縮の結果、変動体系に対するミハルゾ法の適用性評価実験が可能となったが、改良手法は従来手法と異なり、相関の積分量を検出する手法であるため、変動の影響を受けやすいという欠点がある。そこで、ファインマン法用に開発した3種類のデータ処理法のうち、ミハルゾ法にも応用できる2種類のデータ処理法（階差フィルタ適用法とデータ分割法）の有効性を評価した。

実効増倍率が時間的に変化する実験体系（最大変化率 2% K/K/min）において上記2種類のデータ処理法の適用性を確認した。1例として図8にデータ分割法を適用した場合の測定結果を示す。実効増倍率の変動時においても表2に掲げた

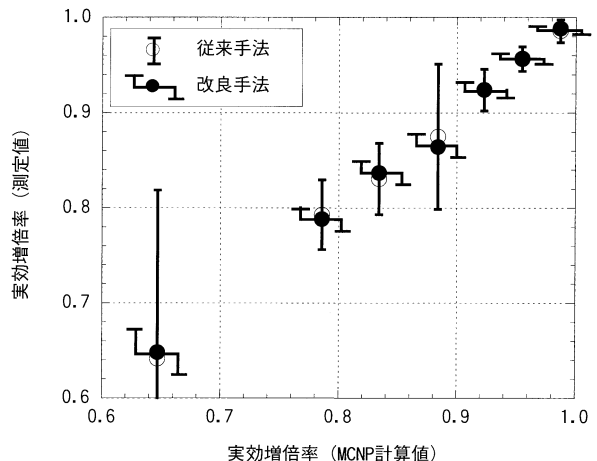


図7 ミハルゾ法の改良による統計誤差の低減



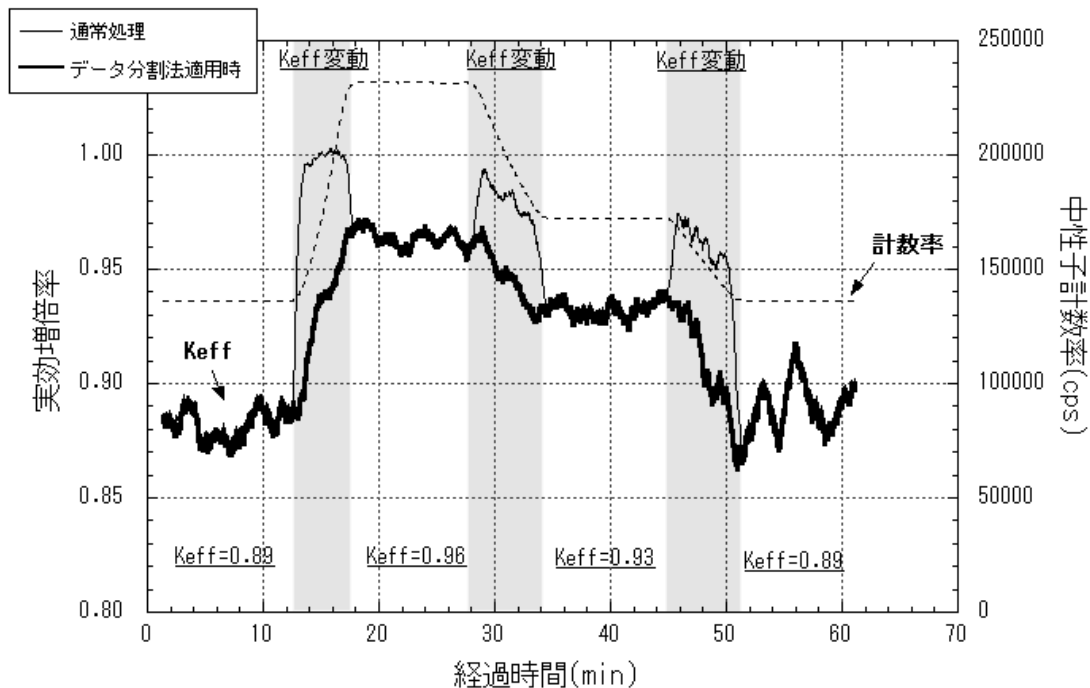


図8 実効増倍率変動時のミハルゾ法則定結果(データ分割法の適用効果)  
(実効増倍率は80秒分のデータを4秒ごとに処理して評価)

目標精度内で測定できることが確認できる。

### 3) 不感時間の影響

改良手法は従来手法(周波数解析手法)とは異なり、パルス信号のみしか利用できないため、不感時間の影響が避けられない。この問題についても、変動体系への適用の場合と同様にファインマン法について考案した技術が応用できる。模擬計算により不感時間の影響を評価した結果、不感時間による計数損失率が30%に達する場合まで、正確に補正できることを確認した。

### 4) 固有中性子源の影響

1)で理論的に予測した改良手法による固有中性子源の影響の低減効果を実験で確認した。

高速炉用MOX燃料を試験体に装荷した体系においてCf線源強度を変更して未臨界度測定を実施した。体系に存在する固有中性子源は一定であるので、相対強度(Cf線源に対する固有中性子源の強度)を変化させることに相当する。図9に測定結果を従来手法と比較して示す。相対強度が10の場合でも、その影響は目標精度の範囲内であり、補正を必要としないことが確認できる。理論的には、相対強度がより高くなる場合でも測定可能である。しかしながら、相対強度が増加すると、目標性能の一つである応答時間が影響を受ける。これは、相対強度の増加に応じてCf線源検出器と中

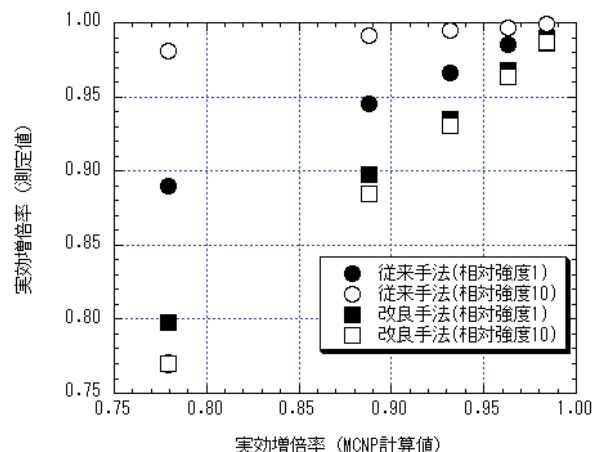


図9 ミハルゾ法の改良による固有中性子源の絵依拠の低減

性子検出器間の相関についての測定精度が悪化するためである。応答時間と相対強度は近似的に比例関係にあることを理論及び実験によって確認しており、測定に最低限必要なCf線源の強度は、要求される応答時間と体系の固有中性子源強度によって決定される。

### 5) 換算係数の評価法の改良

#### a) 評価の簡略化

換算係数の未臨界度に対する依存性については、依存性をあらかじめ多項式で近似する方法が適用できること、検出器配置依存性については、

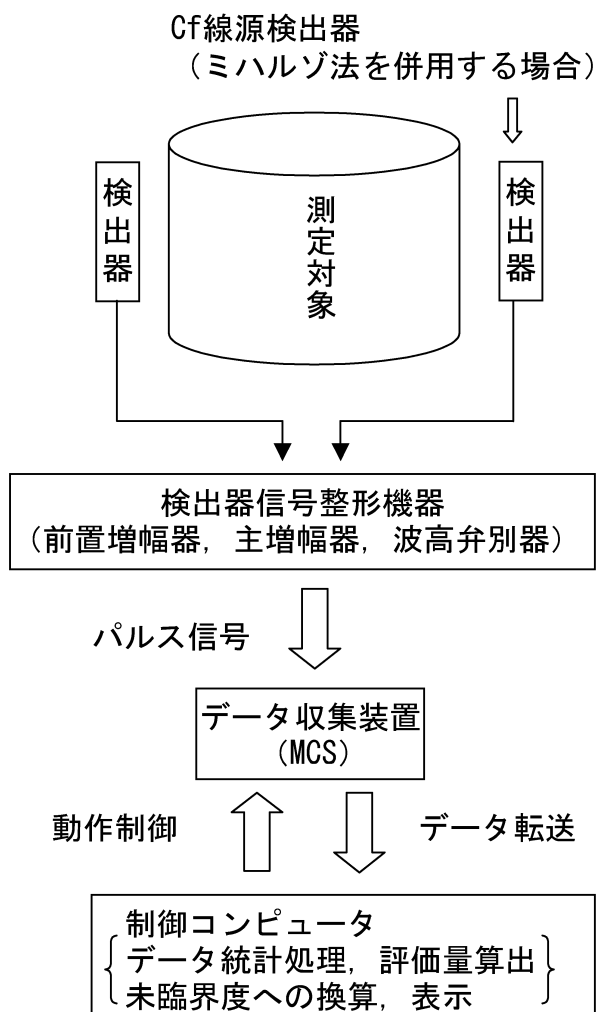


図10 未臨界度モニタシステム概念

Cf線源検出器と中性子検出器間の距離が最も大きい要因であることを明らかにした。

なお、改良手法では、中性子検出器数が2個から1個に削減されたため、従来手法に比べて、検出器配置の影響把握が容易である。

#### b) モンテカルロ計算による換算係数評価コードの整備

ファインマン法の測定模擬計算コードをミハルゾ法の改良手法にも適用できるように機能を拡張した。ファインマン法の場合と同様に換算係数を得る。改良手法において純粋な測定値として得られるCR値について模擬性能を検証し、模擬計算値は測定値と誤差の範囲で一致することを確認した。

### 4.3 未臨界度モニタシステム

以上に述べた改良によって、目標性能を満足する未臨界度測定技術を開発することができた。図

10にファインマン法及びミハルゾ法を使用した未臨界度モニタシステム概念を示す。ミハルゾ法とファインマン法は測定システムの大部分を共有できるため、ミハルゾ法の測定システムを構成すれば、ファインマン法の測定もできる。一方、未臨界度評価において重要な換算係数については、ファインマン法とミハルゾ法で大きく異なる。すなわち、ファインマン法の換算係数である中性子寿命の場合、中性子スペクトルの影響を受けやすいが検出器配置の影響は受けにくいことに対し、ミハルゾ法の換算係数は、逆の性質を有する。その結果、本モニタシステムは、異なる視点からの複合的な評価や状況に応じた測定法の選択ができる合理的で信頼性の高い未臨界度測定システムとなる。

### 5. 実用化への課題

開発した未臨界度測定技術のうち、データ処理上の工夫など基本的な技術は実体系に対して適用できる。しかしながら、応答時間など定量的な測定性能については測定対象に依存するため、DCAにおける性能評価結果だけでは測定技術の実体系への適用性を判断することはできない。未臨界度測定技術を実用化するためには、今後、より実機に近い体系における実証試験が必要である。

なお、本研究で開発した未臨界度測定の模擬計算コードを用いれば、換算係数の振る舞いや応答時間について予測することが可能であり、実証試験の見通しを得るために役立てることができる。

### 6. おわりに

本研究開発を通じて、実用性の高い未臨界度モニタシステムを開発することができた。従来全面的に計算に基づいていた臨界安全管理において、未臨界度の実測値を導入することによって、臨界安全管理の妥当性の確認や信頼性の向上に資することが期待できる。今後は、DCAにおいて開発された未臨界度モニタシステムが再処理施設等の複雑な条件を持つ実体系に適用され、実績を重ねて実用性と信頼性の高いシステムに発展していくことを期待する。

### 謝辞

愛知淑徳大学の仁科浩二郎氏にはミハルゾ法改良のきっかけとなる貴重な助言を頂き、今日の開



発成果に繋げることができました。

近畿大学の橋本憲吾氏には、変動体系でのデータ処理に不可欠な階差フィルタの適用に際して貴重な助言を頂きました。

この場を借りて両氏への謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 原子力安全研究協会編：実務テキストシリーズNo.2 核燃料の臨界安全（1974）。
- 2) R.P. Feynman, F. deHoffmann et al.: "Dispersion of the Neutron Emission in U 235 Fission", J. Nucl. Energy, **3**, 64 (1956).
- 3) J.T. Mihalczo, V.K. Pare et al.: "Determination of Reactivity from Power Spectral Density Measurements with Californium 252", Nucl. Sci. Eng., **66**, 29 (1978).
- 4) 松本忠邦, 清野英昭, 他: "日米共同臨界実験の成果Pu + U系臨界安全データの取得と未臨界度の測定", 日本原子力学会誌, **37**, 2, 89 (1995).
- 5) 羽様 平, 毛利 智聡, 他: "DCAにおける未臨界度測定技術の開発", JNC TN 9400 2001 044(2001).
- 6) K Hashimoto, H Ohsaki et al.: "Variance to mean Method Generalized by Linear Difference Filter Technique", Ann. Nucl. Energy., **25**, 9, 639 (1998).
- 7) J.F. Briesmeister, ed.: "Mcnp A General Monte Carlo N Particle Transport Code Version 4 B", LA 12625 M (1997).
- 8) J.T. Mihalczo, E.D. Blakeman et al.: "Dynamic Subcriticality Measurements Using the 252Cf Source Driven Noise Analysis Method", Nucl. Sci. Eng., **104**, 314 (1990).
- 9) K. Nishina, Y. Yamane et al.: "Subcriticality Determination by a New Time Domain Correlation Experiment with a Cf 252 Neutron Source", Proc. of Subcritical Reactivity Measurements Workshop, Albuquerque, New Mexico, Aug 26-29 (1985).
- 10) 古橋 晃: "Mihalczo法の2計数管化の検討", 日本原子力学会誌, **31**, 374 (1989).
- 11) T. Hazama: "Improved 252Cf Source Driven Noise Analysis Method Based on Time Domain Analysis", The Sixth International Conference on Nuclear Criticality Safety, Versailles, France, Vol. III, 1243 (1999).