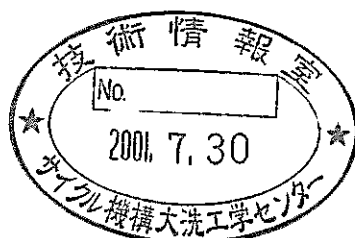


DCAにおける未臨界度測定技術の開発

(研究報告)



2001年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

DCAにおける未臨界度測定技術の開発

羽様平¹⁾、毛利智聡¹⁾、大谷暢夫²⁾、相原永史¹⁾、
八木昭¹⁾、吉田守³⁾、戸部賢治⁴⁾、有賀正訓⁵⁾

要旨

核燃料取扱施設の臨界安全管理技術の高度化及び設計の合理化に資するため、重水臨界実験装置（DCA）を使用して未臨界度モニターのための未臨界度測定技術の開発を実施した。

本開発では、臨界安全管理上の制限が最も厳しいとされる高速炉再処理施設への未臨界度測定技術の適用を想定し、予想される困難な状況下でも利用可能な測定技術として炉雑音測定に基づく2種類の手法（ミハルゾ法及びファインマン- α 法）を選定し、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。

DCAは新型転換炉の開発のために使用されてきた臨界実験装置であるが、高速炉再処理施設への模擬性が高い体系で未臨界度測定技術の開発を実施するため、炉心中央部に未臨界の試験体領域を設け、減速材に軽水を、燃料に高速炉燃料を使用できるように炉心を改造した。

開発した2種類の未臨界度測定手法は、いずれも応答時間10分以内で実効増倍率0.4まで測定可能であり、体系の変動や高中性子バックグラウンドに対する適用性にも優れている。さらに複雑な幾何形状に対しても未臨界度を評価することが可能であり、高速炉再処理施設だけでなく燃料加工施設等へも適用可能な測定技術である。また、両測定手法は測定システムの大部分を共有するが、その特徴は大きく異なっており、多面的な評価による信頼性の高い測定システムを合理的に構築できる。

本報告書は、DCAにおける未臨界度測定技術開発の経緯と成果についてまとめたものである。

1) 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部

2) 若狭湾エネルギー研究センター 研究部

3) 敦賀本部 技術企画部

4) 富士電機株式会社 茨城営業所

5) 原子力システム株式会社

Development of Subcriticality Measurement Technique in Deuterium Critical Assembly

Taira Hazama¹⁾, Tomoaki Mouri¹⁾, Nobuo Ohtani²⁾, Nagafumi Aihara¹⁾,
Akira Yagi¹⁾, Mamoru Yoshida³⁾, Kenzi Tobe⁴⁾ and Masanori Ariga⁵⁾

Abstract

A Subcriticality measurement technique was developed to improve safety and efficiency of criticality safety control in nuclear fuel processing facilities.

In the development, two measurement techniques based on reactor noise analysis were selected as candidates of subcriticality measurement technique applicable to severe situations in FBR fuel reprocessing plants.

The research activity was performed in Deuterium Critical Assembly (DCA) which was partly reconstructed from the original core of the advanced thermal reactor, so that light water and FBR type fuel could be used as in the FBR fuel reprocessing plants.

Through the research, each technique was improved to satisfy criteria for subcriticality monitoring technique in FBR fuel reprocessing plant. Since the two techniques have basically different features while using common devices, their combination would be a simple and reliable measurement system.

This report summarizes processes and results of the research activity in DCA.

-
- 1) Experimental Reactor Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center
 - 2) Research Division, The Wakasa Wan Energy Research Center
 - 3) Planning Division, Tsuruga Head Office
 - 4) Ibaraki Business Office, Fuji Electric Co.
 - 5) Nuclear Energy System Inc.

目次

1.	緒言	1
2.	未臨界度測定技術の開発経緯	2
2.1	未臨界度測定技術について	2
2.1.1	未臨界度測定技術の必要性	2
2.1.2	未臨界度測定装置の使用環境と必要な性能	3
2.1.3	未臨界度測定手法の選定	5
2.2	DCAを利用した開発計画	9
2.2.1	日米共同臨界実験	9
2.2.2	DCAの活用	9
2.2.3	当初のDCA改造計画	10
2.2.4	計画の変更	11
2.2.5	DCA改造	12
2.2.6	改造炉心の概要	12
2.2.7	研究開発	13
3.	未臨界度測定技術の開発	23
3.1	ファインマン- α 法	23
3.2	ミハルゾ法	30
3.3	未臨界度測定技術の開発成果	37
3.4	実用化への課題	45
4.	未臨界度測定技術の実体系への適用性評価	49
4.1	適用性評価の概要	49
4.2	体系の概要と評価条件	51
4.3	評価結果	54
5.	結言	66
	謝辞	68
	参考文献	69
	付録	75

付録目次

付録 1	ファインマン- α 法による未臨界度測定法	付-1
付録 2	ミハルゾ法による未臨界度測定法	付-5
付録 3	応答時間の体系依存性	付-12
付録 4	ファインマン- α 法の変動体系への適用	付-13
付録 5	ミハルゾ法の変動体系への適用	付-18
付録 6	ミハルゾ法における固有中性子源の影響	付-21
付録 7	不感時間の補正	付-23
付録 8	ファインマン- α 法における換算係数の評価法	付-26
付録 9	ミハルゾ法における換算係数の評価法	付-30
付録 10	ミハルゾ法における換算係数の特性	付-35
付録 11	C f 線源検出器	付-37
付録 12	パルス時系列直接測定装置	付-40
付録 13	モンテカルロ法による未臨界度測定の模擬計算	付-42
付録 14	DCA炉心の臨界基本特性	付-45
付録 15	未臨界度測定技術開発に関する報告書等	付-51

表リスト

- 表 2-1 未臨界度測定装置の目標性能
- 表 2-2 未臨界度測定技術の比較
- 表 2-3 未臨界度測定技術開発の経緯（昭和60年度～平成4年度）
- 表 2-4 未臨界度測定技術開発の経緯（平成5年度～平成12年度）
- 表 2-5 DCAの改造のための許認可手続きの経緯
- 表 2-6 原子力施設等安全研究年次計画（平成3年度～平成7年度）
- 表 2-7 原子力施設等安全研究年次計画（平成8年度～平成12年度）
- 表 3-1 ファインマン- α 法とミハルゾ法の開発経緯
- 表 3-2 未臨界度測定技術の性能
- 表 3-3 変動体系に適用するためのデータ処理法
- 表 4-1 実体系への適用性評価結果
-
- 付表 3-1 主要パラメータの統計誤差に与える影響 ($K_{\text{eff}} 0.9$ の体系で比較)
- 付表 15-1 未臨界度測定技術開発に関する報告書等

図リスト

- 図 2-1 DCA炉心本体改造の概要
- 図 2-2 DCA炉心部の改造前後の比較
- 図 2-3 試験体構成例（均一配列）と試験体の仕様
- 図 3-1 実効増倍率測定結果（上図：ファインマン- α 法、下図：ミハルゾ法）
- 図 3-2 未臨界度モニターシステムの概要
- 図 3-3 換算係数の特定範囲と実効増倍率測定結果の特定幅の関係
- 図 4-1 連続溶解槽計算モデル
- 図 4-2 プルトニウム溶液受槽計算モデル
- 図 4-3 使用済燃料貯蔵プール計算モデル
- 図 4-4 JCO沈殿槽計算モデル
- 図 4-5 ファインマン- α 法の模擬計算結果（連続溶解槽：溶液満水）
- 図 4-6 ミハルゾ法の模擬計算結果（連続溶解槽：溶液満水）
- 図 4-7 ファインマン- α 法の模擬計算結果（プルトニウム溶液受槽）
- 図 4-8 ミハルゾ法の模擬計算結果（プルトニウム溶液受槽）
- 図 4-9 ファインマン- α 法の模擬計算結果（使用済燃料貯蔵プール）
- 図 4-10 ミハルゾ法の模擬計算結果（使用済燃料貯蔵プール）
- 図 4-11 ファインマン- α 法の模擬計算結果（JCO沈殿槽：6バッチ）
- 図 4-12 ミハルゾ法の模擬計算結果（JCO沈殿槽：6バッチ）

- 付図 1-1 測定時間に対する実効増倍率の変化（ K_{eff} ：0.90以上）
- 付図 1-2 測定時間に対する実効増倍率の変化（ K_{eff} ：0.85以下）
- 付図 2-1 測定時間に対する実効増倍率の変化（ K_{eff} ：0.9以上）
- 付図 2-2 測定時間に対する実効増倍率の変化（ K_{eff} ：0.8以下）
- 付図 2-3 時間相関解析手法の利用による測定誤差の低減
- 付図 2-4 ミハルゾ法における固有中性子源の影響
- 付図 4-1 実効増倍率変動時の測定結果（階差フィルターの適用法）
- 付図 4-2 中性子源挿入及び引抜時の測定結果（階差フィルターの適用法）
- 付図 4-3 実効増倍率変動時の測定結果（ β - λ 分割法）
- 付図 4-4 中性子源挿入及び引抜時の測定結果（ β - λ 分割法）
- 付図 4-5 実効増倍率変動時の測定結果（パラメータ追加法）

- 付図 4-6 中性子源挿入及び引抜時の測定結果 (パラメータ追加法)
- 付図 5-1 実効増倍率変動時におけるミハルゾ法測定結果
(データ分割法を適用した場合)
- 付図 5-2 実効増倍率変動時におけるミハルゾ法測定結果
(階差フィルターを適用した場合)
- 付図 5-3 中性子源挿入時におけるミハルゾ法測定結果
(データ分割法を適用した場合)
- 付図 5-4 中性子源挿入時におけるミハルゾ法測定結果
(階差フィルターを適用した場合)
- 付図 6-1 未臨界度評価量に対する固有中性子源の影響
- 付図 8-1 即発中性子寿命評価法の比較
- 付図 10-1 検出器配置と未臨界度評価量の関係
- 付図 11-1 Cf線源検出器の構造
- 付図 11-2 Cf線源検出器の出力波高スペクトル
- 付図 12-1 計算機を用いたパルス時系列データ収集の概念
- 付図 13-1 未臨界度評価量に対する模擬計算値と測定値の比較 (ファインマン- α 法)
- 付図 13-2 未臨界度評価量に対する模擬計算値と測定値の比較 (ミハルゾ法)
- 付図 14-1 臨界特性測定 of 炉心種類
- 付図 14-2 試験体減速材水位に対する臨界重水水位の依存性
- 付図 14-3 臨界重水水位の測定値と解析値の比較

1. 緒言

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）する必要がある。制限値は主に解析値に基づいて十分安全が確保されるように定められるが、解析には多くの不確定要因が関与しているため、制限値には必要以上に安全裕度が見込まれているのが実状である。

この制限値は、高速炉燃料の再処理施設を対象とする場合は、取り扱うプルトニウムの濃度が軽水炉燃料を処理する場合に比べて約 10 倍高いため特に厳しく、所定の処理能力を満足するためには施設は複雑かつ非効率なものとなる。そのような施設は、経済性に劣るとともに維持管理も煩雑となるため、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¹⁾。

未臨界度測定技術の利用はそのための一方策であり、測定技術が実用化できれば未臨界度測定値を反映した、より確実な安全管理が可能になるとともに、実測値を設計や運転管理に反映することによって安全裕度の最適化に資することが期待できる。

未臨界度測定手法の開発は、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室の重水臨界実験装置（DCA）で実施した。DCA は新型転換炉（ATR）の開発のための重水減速圧力管型の臨界集合体であったが、プルトニウム燃料が使用できるなど炉内構造に関して極めて柔軟性が高いという特徴を有して要ることを利用して、多様な未臨界状態を模擬できるように炉心の一部を改造し、未臨界度測定技術の開発を行うこととなった。

未臨界度測定技術は、2 種類の技術で構成される。1 つは検出器信号から未臨界度の情報を短時間に正確に抽出するためのデータ処理技術であり、もう 1 つは抽出した未臨界度の情報から未臨界度を求めるための未臨界度評価技術である。データ処理技術については既存技術を基にした適用範囲の拡張などの性能改良に重点を置き、また、未臨界度評価技術については未臨界度評価に必要な換算係数の特性把握と評価コードの整備に重点を置き開発を実施した。

本報告書は、DCA における未臨界度測定技術について、開発経緯、開発成果をまとめたものである。第 2 章では未臨界度測定技術開発の背景や未臨界度測定技術の開発試験を実施した DCA 改造炉心の概要について述べている。技術開発の経緯や成果については第 3 章に記載し、第 4 章では開発した未臨界度測定手法の適用性について、評価例を挙げて述べている。

2. 未臨界度測定技術の開発経緯

本章では、未臨界度測定技術の開発経緯として、未臨界度測定技術の開発目標の設定やDCAを利用した開発計画の経緯等について述べる。

2.1 未臨界度測定技術について

未臨界度測定技術の必要性と測定技術に求められる性能を整理し、技術開発の具体的な目標を設定した。また、既存の未臨界度測定手法について整理し、目標達成の可能性の高い測定技術を選定した。

2.1.1 未臨界度測定技術の必要性

本研究における未臨界度測定技術の開発目的は、核燃料取扱設備の未臨界度を確認又は監視する装置を開発し、臨界安全管理の高度化に資することである。未臨界度測定装置の用途は、

- ① 現場の臨界安全管理への反映
- ② 臨界安全管理設計の合理化への反映

の2点に大別できる。

①現場の臨界安全管理への反映

現在の臨界安全管理は、まず、施設の設計段階において十分な安全裕度を考慮し、次に施設の運用段階において、燃料（組成、濃度、密度など）が計画どおりであることを運転記録や分析により確認することによって実施している[1][2][3]。

分析による燃料組成の確認は、核燃料の計量管理のためにも必要な作業であるが、臨界安全性の確認のためだけに実施する分析作業については未臨界度の直接測定によって代替することが可能であり、測定をオンライン化することによって施設稼働率を向上させることができる。

また、現状の臨界安全管理においても臨界管理上重要な施設には、異常を検知する警報装置として、臨界警報装置が設置されているが、臨界警報装置は中性子または γ 線の検出レベルが、あらかじめ想定した臨界事故時のレベルに到達した場合に警報を発するものであり、臨界事故を未然に防ぐものではない。未臨界度測定装置は、何らかの異常により非安全な状態へ移行したりする場合があっても、臨界警報装置とは異なり臨界になる前に異常を定量的に検知できるため、従事者の放射線被ばくの危険性を大幅に低減できる安全性の高い監視装置となる。

②臨界安全設計の合理化への反映

現在の臨界安全設計では、臨界安全基準量（寸法、容積、質量、濃度等）を臨界計算の信頼性を考慮して設定し、さらに工学的な不確定性を考慮して設備機器の仕様を決定している。

未臨界度を測定することによって、施設がどの程度安全側に設計されているかを確認することができる。さらに、様々な状態（燃料形態・濃度・組成、機器の形状）における未臨界度のデータを蓄積することによって、設計の過程で設けられる保守的な想定による安全裕度を検証し、設計の合理化に反映することができる。また、燃料の受入や工程の途中で未臨界度の確認を安全性の担保として組み入れることによって設計における不確定要素を削減することも考えられる。

2.1.2 未臨界度測定装置の使用環境と必要な性能

前述した未臨界度測定装置の用途において、①の用途は監視装置、すなわち未臨界度モニターとしての利用であり、部分的な確認でも構わない②の用途に比べると、体系の変動に対する追従性などより高い測定性能が求められる。

以下に未臨界度モニターの使用環境を検討し、装置に必要な性能について整理した。

未臨界度モニターに必要な性能は、基本的には測定体系の状況に関係なく所定の応答時間内で未臨界度が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の状況によって異なる。そこで、臨界管理の厳しさという点で未臨界度測定装置の設置意義が最も高いと考えられる高速炉燃料再処理施設を代表例として取り上げた。

高速炉燃料再処理施設では、以下のような状況が予想される^[1]。

- ①実効増倍率の推定値：0.95未満。通常運転時は0.6より低い。
- ②燃料の状態や放射線レベル：多様であり、変化する。
- ③応答時間：変動への追従が必要。
- ④機器・設備の構造：複雑であり、測定装置の設置場所も限定される。

①実効増倍率の推定値

実際の核燃料取扱施設では、臨界安全管理上の実効増倍率の上限（0.95）を異常時でも下回るように安全側（未臨界側）に設計するため、通常の運転状態における実効増倍率は上限値よりもかなり低いと考えられる。臨界安全上の制限が設備の処理能力を決定する要因となっている場合は、実効増倍率は0.6～0.9程度と予想されるが、処理

能力が他の要因により決定される場合は、実効増倍率はより低くなる。例えば、サイクル機構東海事業所で計画中の高速炉燃料を再処理するリサイクル機器試験施設（RETF）は再処理技術の成立性を確認する試験施設であり、処理量は最大 160kgHM/day（炉心集合体3体分）である。これは商業規模の軽水炉再処理施設の処理量（例えば、フランスのラ・アーク再処理工場では 4tHM/day）に比較して 1/20 以下であり、臨界安全上の制限は処理能力に対して支配的な要因ではない。簡易評価によると RETF 内の設備の実効増倍率は 0.4～0.7 程度である。

臨界安全上の観点からは 0.6 以下の実効増倍率を測定する重要性は小さいが、未臨界度測定装置を実用化するためには今後様々な体系で実績を積み重ねることが重要であり、そのような低い実効増倍率でも測定できることが必要である。

②燃料の状態や放射線レベル

再処理施設では、燃料は固体から一旦硝酸溶液となり、再度固形化されるなど様々な化学形態を取り、組成や濃度も変化する。γ線や中性子束のレベルも、未臨界度や体系に含まれる Pu, Cm などの量に応じて変動する。再処理施設の主要なプロセス機器を対象とし、高速原型炉「もんじゅ」の燃料を想定した場合の簡易評価によると、通常運転時において設備近傍の中性子束は約 $10^2 \sim 10^4$ n/cm²/sec、γ線は約 1～10⁵mR/h である。

③必要な応答時間

②の状況下で燃料の状態が大きく変動しない時間（定常状態においては滞留時間の 1/2 程度、過渡状態においては滞留時間の 1/50 程度）内に未臨界度を測定できることが必要と考えられる。RETF では処理工程における核燃料の滞留時間は約 10 時間であることから、未臨界度モニターに必要な応答性能は 10 分以内が目安となる。

④機器・設備の構造

高速炉燃料再処理施設の機器は、円筒形、平板形、円環形など多様で複雑な形状をしている。さらに、中性子相互干渉効果やコンクリート壁からの反射の効果も想定され、未臨界度測定装置を設置できる場所も制限される。そのため未臨界度測定装置には、機器形状や現場の測定システム（検出器など）の配置及び中性子の相互干渉効果などによる影響が小さく、装置の形状がコンパクトであることが求められる。さらに、測定システムを設置する場所は放射線レベルの高い区域であり、測定機器の修理や調整は容易には実施できないため、現場に設置する測定システムはメンテナンスフリーであることが望まれる。

以上の使用環境に未臨界度測定技術の一般的な特性を加味し、未臨界度測定装置に要求される性能を目標性能として表 2-1 にまとめた。

測定範囲については、一般に未臨界度測定では実効増倍率が低いほど測定が困難になるため、臨界安全上の重要性が低い実効増倍率 0.7 以下については ± 0.1 程度で測定できることを目標とした。

応答時間は、前述の考え方にに基づき 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したりする場合は、より短時間（10 秒～1 分程度）で測定できることが必要と考えられるため、その可能性についても検討することとした。

変動への追従性と、中性子バックグラウンドの影響、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の状況に依存するため、定量的な目標は設定せず、影響の有無の把握と対処法の確立を図ることとした。

表 2-1 未臨界度測定装置の目標性能

項目	必要な性能
(1) 測定範囲と応答時間	測定範囲： $0.4 \leq K_{eff} \leq 0.99$ 測定精度（応答時間 10 分以内）： ± 0.003 ($0.95 \leq K_{eff} \leq 0.99$) ± 0.04 ($0.8 \leq K_{eff} < 0.95$) ± 0.10 ($0.4 \leq K_{eff} < 0.8$)
(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。

2.1.3 未臨界度測定手法の選定

未臨界度測定技術については、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。既存の未臨界度測定手法について整理し、高速炉燃料再処理施設への適用可能性が高い測定手法を選定した。

既存の未臨界度測定手法は、中性子信号の利用方法によって以下のように分類できる。

①中性子数の減衰を利用する手法（代表例：パルス中性子法^{[4][5]}）

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。

②中性子数そのものを利用する手法（代表例：中性子源増倍法^{[5][6]}）

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。

③中性子数の分布を利用する方法（代表例：指数実験法^{[7][8]}）

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。中性子分布の減衰定数から未臨界度を求める。

④中性子数の微小変動を利用する手法（炉雑音測定法^{[9][10]}）

中性子数の微小変動（炉雑音）について相関を抽出し、相関量より体系の未臨界度を決定する。炉雑音の解析方法として時間領域で解析する方法と周波数領域で解析する方法の2種類がある。前者の代表的な方法にはファインマン- α 法、後者にはミハルゾ法がある。

2.1.2 節で定めた指標に基づき、上記未臨界度測定技術の適正を表 2-2 のように整理し、開発対象とする測定技術を選定した。

パルス中性子法は、他の手法に比べて装置の設置、運転・維持管理が煩雑、面積比法を利用する場合には高中性子バックグラウンドに弱いなどの欠点があり、未臨界度モニターには適さない。

中性子源増倍法は、測定システムが非常に簡便で応答性についても非常に優れているが、検出効率の評価が必要、中性子バックグラウンドの変化の影響を大きく受けるという欠点があり、未臨界度モニターには適さない。ただし、簡便さや応答性は未臨界度測定手法の中で最も優れており、他の未臨界度測定法に対する補完的な役割が期待できる。

指数実験法は、強い中性子源の設置と複数地点での測定が必要ではあるが、中性子源増倍法と同様に計数率を測定するだけの簡便な手法である。しかしながら、中性子の空間的な減衰を測定するため、形状が単純でかつ固定しており、燃料が均一に分布している場合には適しているが、再処理施設のような複雑な形状を有する体系への適用は困難である。

炉雑音測定法は、現場に設置する装置としては中性子源増倍法や指数実験法と同様に、中性子検出器だけであり、測定装置の簡便さの点で優れている。さらに他の手法と比較すると、中性子バックグラウンドに対しても影響を受けにくい。課題は、他の手法でも同様であるが、測定量を未臨界度に換算する際の換算係数（ファインマン- α 法の場合

は即発中性子寿命、ミハルゾ法の場合は中性子インポートランス)をあらかじめ解析によって評価しなければならないことであるが、これらの量は、一旦体系が定まると大きく変化するものではないため、適用対象をあらかじめ想定するなどによって解決できると考えられる。

以上の検討結果より、高速炉燃料再処理施設へ適用可能な未臨界度測定手法としては、炉雑音測定法が最も有望であり、その中で代表的な手法であるミハルゾ法とファインマン- α 法を開発対象として選定し、未臨界度モニターへ適用するための研究開発を実施することとした。

表 2-2 未臨界度測定技術の比較

比較項目		パルス中性子法		中性子源増倍法		指数実験法		原子炉雑音測定法			
								ファインマン・法		ミハルソ法	
① 測定範囲と応答時間	リアルタイムで未臨界度の変化を監視	パルスの連続発生が必要	△	リアルタイムで検出	○	多数の検出器の信号を同時に処理する必要あり	△	リアルタイムで検出	○	リアルタイムで検出	○
	未臨界度の測定範囲が広い	Keff=0.5 以上	△	Keff=0.8 以上	△	Keff=0.6 以上	△	Keff=0.6 以上	△	Keff=0.4 以上	○
② 適用範囲の拡張	中性子バックグラウンドの影響が小さい	測定不能になる場合あり	×	中性子バックグラウンドの変動時の適用は困難	×	高強度の中性子源が必要	△	原理的に強い	○	高強度の Cf 線源検出器が必要	△
	検出器配置、機器の形状、燃料形態に対する依存性が小さい	インポートランスの評価が必要なため、検出器配置の依存性が大きい	△	検出効率の評価が必要なため、依存性が大きい	△	空間的な減衰の評価であるため、依存性が非常に大きい	×	即発中性子寿命の評価が必要であるが、依存性は小さい	○	インポートランスの評価が必要なため、検出器配置の依存性が大きい	△
④ 測定システム	メンテナンスが容易である	パルス発生装置の維持管理が必要	×	現場設置は検出器のみ	○	現場設置は多数の検出器と高強度の中性子源	△	現場設置は検出器のみ	○	現場設置は検出器と高強度の Cf 線源検出器	△
	測定システムが簡単である	パルス発生装置と運転費用膨大	×	測定系が非常に簡単で安価	○	測定系が非常に簡単	○	測定系が非常に簡単で安価	○	測定系が非常に簡単	○

○：現状の技術で可能

△：技術開発によって可能

×：困難

2.2 DCA を利用した開発計画

本節では、DCA を利用した未臨界度測定技術開発の計画と実施状況について、当初の計画からの変遷を振り返って述べる。実施状況（昭和 60 年度～平成 12 年度）については、表 2-3～表 2-4 に DCA の改造と未臨界度測定技術開発それぞれに関する項目に整理して示す。

2.2.1 日米共同臨界実験^[11]

臨界工学試験室における未臨界度測定技術開発は、昭和 58 年から昭和 63 年にかけてサイクル機構（当時、動力炉・核燃料開発事業団）と米国エネルギー省との間で実施された日米共同臨界実験（高速炉再処理施設の安全性に関する研究開発）に始まる。共同実験では、臨界安全管理の合理化を目的として、高速炉燃料再処理に関わる臨界実験データの取得として Pu+U の溶液燃料および燃料ピンを用いた臨界実験、及び未臨界度測定技術の性能評価実験が実施された。実験はオークリッジ国立研究所（ORNL）とパシフィック・ノースウエスト研究所（PNL）において実施された。サイクル機構では本社核燃料部及び東海技術部が中心となって計画が進められ、炉物理を専門分野とする臨界工学試験室としても ORNL への駐在員の派遣や、実験計画の立案及び実験解析作業を通して関与した。

未臨界度測定技術の性能評価実験については、ORNL のミハルゾ氏らが開発していた未臨界度測定手法（Cf-252 Source Driven Noise Analysis Method, 日本での通称：ミハルゾ法）が未臨界度モニターへの適用が有望な測定法として採り上げられ、再処理施設を想定した溶液体系において性能評価試験が実施された。試験の結果、短時間（10 秒以内）で未臨界度を正確に検出可能で、液位の変化に対しても追従して検出可能であることが確認され、未臨界度を連続監視する装置（未臨界度モニター）としての成立性について見通しが得られた。

2.2.2 DCA の活用^[12]

日米共同臨界実験を受けて、サイクル機構における未臨界度測定技術の開発について具体的な検討を開始した。未臨界度測定装置を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いて未臨界度測定装置の実証と改良が必要であり、臨界工学試験室にある重水臨界実験装置（DCA）の利用可能性を検討した。

DCA は新型転換炉（ATR）の開発のために利用されてきた重水減速圧力管型の臨界集合体であるが、以下のように未臨界度測定試験設備として適した特徴を有しており、炉心の一部を改造して未臨界度測定試験設備を追加し、未臨界度測定技術の開発を実施することとなった。

- ①炉内構造に関して極めて柔軟性が高く、プルトニウム燃料も使用できるため、炉心中央部を改造して試験領域を設けることによって、高速炉再処理施設に近い未臨界状態を模擬することができる。
- ②2領域（測定対象となる炉心中央部の試験領域と周囲のドライバー領域）炉心の臨界特性を解析することによって、試験領域に装荷した試験体の反応度を精度良く評価することができる。
- ③中央部の容器と周囲のドライバー燃料を組み合わせることによって、再処理工程で想定される複雑な相互干渉を実現できる。
- ④既設の原子炉制御機能が利用できる
- ⑤既設のパルス中性子発生装置や中性子源が利用できる。

2.2.3 当初の DCA 改造計画^[12]

平成2年度までに未臨界度測定試験施設の基本設計を行い、施設の改造計画と試験計画を策定した。

施設の改造計画では、第1期改造として既設炉心中央部に試験体を装荷するための試験領域を設け、固体燃料棒及び軽水減速材を使用するための設備を追加し、第2期改造としてより実機に近いウラン溶液を試験体に利用できるように溶液取扱設備、溶液貯蔵設備等を追加することとした。なお、プルトニウム溶液の模擬については、固体状の試験体として準備されたプルトニウム燃料を濃縮ウラン溶液と混在させた試験体を構成することによって代替することとした。

試験計画は、「臨界安全評価解析手法の高度化」と「未臨界度測定技術の開発」の2項目に区分し、各項目の開発手順とスケジュールを以下のように整理した。

「臨界安全評価解析手法の高度化」については、次の手順によって解析システムの整備を進め、評価対象となる未臨界体系の解析手法の標準化及び精度向上を図ることとした。

- ①均一・不均一燃料体系における未臨界時の炉物理特性のデータライブラリーを作成・整備するとともに、特殊形状を取り扱える中性子輸送計算コードを整備する。
- ②同データライブラリーを基に、上述の解析手法の検証解析を行い、評価対象体系毎の最適解析手法を選定する。

「未臨界度測定技術の開発」については、次の手順により測定手法の標準化と未臨界度測定モニターの開発を実施することにした。

- ①固体燃料を利用した非均質な燃料体系での測定実験において、ファインマン- α 法、ミハルゾ法等の炉雑音測定法の他、パルス中性子源法、中性子源増倍法、2領域理論^[13]を応用した方法などの測定手法を用いて、基本的な特性データの他、PuO₂燃料の自発核分裂中性子による高バックグラウンド条件下でのデータを取得し、各測定手法の適応性を評価する。
- ②溶液燃料を利用した均質な燃料体系での測定実験から得られた特性データを基に各測定手法の検証評価を行い、評価対象となる体系毎に最適な測定手法を選定して、測定技術を標準化する。
- ③上述の開発成果を未臨界度測定モニターの開発に反映し、モニターシステムの確立を図る。

上記試験計画を遂行するためには、多様な未臨界度測定データが必要であり、DCAの炉心を改造し固体燃料実験及びウラン燃料溶液実験を段階的に試験を実施していくこととした。

2.2.4 計画の変更

技術的な詳細評価の結果、予算及び管理体制などの問題を考慮し、当初の計画を次のように変更した。

- ・原子炉本体設備の改造については、炉心中央タンク2基を1基とし、試験体容器も2種類から1種類とする。この結果、試験体だけで達成可能な実効増倍率の上限値が0.9以下に低下した。
- ・燃料取扱設備の新設については、燃料交換設備、移動台車、昇降機の設置を延期し、既設クレーンの改良で同等の安全性を確保することとした。この結果、炉心構成作業に要する手間や日数が新設した場合に比較して倍以上となり、実験の種類と規模が限定されることとなった。
- ・燃料貯蔵設備の新設では、燃料棒貯蔵棚2基の設置と試験体保管庫の設置を延期する。

その他、当初同時に実施することが計画されていた電気計装制御設備の新設・改修、放射線監視設備の更新、核計装設備の更新を延期し、順次実施することとした。さらに、DCA改造計画の主目的であったウラン溶液を用いた試験の中止を決定した。

2.2.5 DCA 改造

DCA 改造に伴う一連の作業（設置変更許可申請から改造工事まで）は要員及び予算上の制約から 2 期に分けて実施した。表 2-5 に DCA 改造のための許認可手続きの経緯を示す。

第 1 期改造として、平成 4 年 5 月に固体試験体実験のための原子炉本体及び附属設備改造に係る「未臨界度測定機能の追加」について設置変更許可申請を行い、安全審査を経て平成 5 年 4 月に設置変更が認可された。認可を受けて平成 5 年 9 月から平成 7 年 6 月にかけて改造工事を実施し、DCA 炉心中央部に試験体を装荷し、減速材を供給するための機能を追加した。

第 1 期の改造によって、炉心中央部の試験体領域には、ATR 規格のウラン及び MOX 燃料棒や高速炉規格の MOX 燃料棒を使用した試験体の装荷が可能となり、減速材にも軽水が利用できるようになった。計測制御系統施設及び重水系設備等の既設設備は改造前と同じであるが、原子炉停止系の安全棒は 4 本から 6 本に増設した。図 2-1 に DCA 炉心本体改造部の概要を、図 2-2 に改造前と改造後の炉心部構造を示す。

第 2 期改造では、平成 6 年 1 月に未臨界度測定実験範囲拡大のための設置変更許可申請を行い、平成 7 年 9 月に認可された。第 1 期の変更申請は炉心構造の変更を主眼としていたが、第 2 期の変更申請は試験範囲の拡張（試験体燃料棒のピッチ変更によって過減速から減速不足までの体系を構成できるようにすること）を目的とした。平成 7 年 10 月から工事を開始し、平成 8 年 1 月には試験体用燃料棒貯蔵棚の新設、平成 8 年 11 月には高速炉規格の MOX 燃料（高速実験炉「常陽」の MK-I 燃料）を使用するための試験体の製作を行った。

2.2.6 改造炉心の概要^{[14][15]}

図 2-2 に示すように、炉心タンク中央部に未臨界の試験体を装荷する試験体領域が設けられている。試験体領域の外周部は、臨界調整に用いるドライバー領域であるが、改造前の ATR 炉心と同様にクラスター型の燃料集合体を装荷し、減速材に重水を使用する。クラスター型燃料を収納する圧力管（厳密には ATR の圧力管を模擬するための管）には軽水を注水することが可能であり、軽水の有無によってドライバー領域の中性子の減速状態を変化させることができる。試験体には減速材供給設備が設置され、ドライバー領域の重水とは独立して減速材（軽水、重水、及びその混合液）を給排水することが可能

である。原子炉停止系の安全棒は、試験体領域の設置に伴い4本から6本に増設されたが、その他の計測制御系統設備及び重水系統設備等は、既設の設備を利用している。

また、改造当時の状況ではATR開発への活用も将来的に考えられたことから、原子炉上下部のグリッド板を交換することによって、改造前のATR実験用炉心に戻すことが可能な構造となっている。

試験体領域に装荷する未臨界の試験体は、核燃料施設における未臨界度（実効増倍率）の範囲を模擬するため、0.86を上限とする広範囲の実効増倍率を実現することが可能である。円筒形状の試験体容器には燃料棒を140本まで装荷でき、燃料棒の種類や配列ピッチ、配列形状を変更することができ、ATR規格及び高速炉規格の燃料棒の装荷が可能である。試験体容器に供給する減速材には、軽水、重水及びそれらの混合液が使用できる。燃料棒の種類、本数、配列ピッチ及び減速材水位等を変えることにより広範囲の実効増倍率の試験体を構成することができる。試験体の仕様及び試験体容器内に燃料棒を均一に配列した例を図2-3に示す。

試験体領域とドライバー領域から成るDCA改造炉心の炉心臨界特性については、代表的な炉心について付録14に示す^[16]。

2.2.7 研究開発

臨界工学試験室におけるDCA改造炉心を用いた未臨界度測定技術の研究開発は以下の項目に分類して段階的に実施した。

- (1)未臨界度測定技術の測定性能と問題点の確認
- (2)未臨界度測定技術の改良
- (3)未臨界度モニターシステムの構築
- (4)未臨界度測定技術の実体系への適用性評価

平成3年度から平成7年度の国の安全研究年次計画^[16]には「未臨界度測定システム開発に関する研究」として採り上げられている。その研究目的と研究内容を表2-6に示す。

平成3年度末から平成6年度の間には、施設の改造と並行して、測定システムの整備及び検出器の開発や、DCAの既存の炉心体系を利用したファインマン- α 法及びミハルソ法等による未臨界度測定の予備実験を実施し、未臨界度の検知や応答特性等に関する基礎データを取得した。

平成7年度には、DCAに未臨界度測定試験機能を追加する改造工事が完了し、本格的な試験研究を開始することになり、次の方針を決定した。

- ①未臨界度測定試験設備を用いて、測定精度の向上、時間的に変化する体系における測定方法の確立等、未臨界度測定技術の高度化や測定システムの開発を行う。
- ②実験は、試験環境の整備に伴って、ATR-U 燃料、ATR-MOX 燃料、「常陽」MK-I 燃料の順に試験体の種類を変更し、各試験体に対する測定手法の特性を確認する。
- ③平成 12 年度に未臨界度モニター開発について成果を総括する。
- ④モニターとしての成立性が見通しが得られた平成 13 年度以降は、実用化を目指した高度化研究をリサイクル機器試験施設 (RETF) を対象に検討する。

平成 8 年度以降の研究開発は平成 8 年度から平成 12 年度の国の安全研究年次計画⁽¹⁷⁾において「未臨界度測定システムの開発」として採り上げられ、「未臨界度測定技術の開発」を「未臨界度解析手法の開発」、「未臨界度測定技術の開発」、及び「未臨界度モニターの開発」の 3 項目に区分して実施することになった。その研究目的と研究内容は表 2-7 に示すとおりであり、ATR-U 燃料及び ATR-MOX 燃料、あるいは「常陽」MK-I 燃料で構成された試験体を装荷した未臨界度測定炉心を対象に、ミハルゾ法及びファインマン- α 法の測定性能の把握と改良を実施し、未臨界度モニターへの適用性を評価することとした。

以上のように、当初の開発計画と実際に実施された開発内容とは大きく異なる結果となった。当初は未臨界度モニターの性能検証を目的として、固体燃料を用いた試験に引き続き、実際の高速炉燃料再処理施設に近い燃料溶液を用いた体系で試験を行う予定であったが、計画の見直しにより固体燃料を対象とした研究開発に限定して未臨界度モニターの開発を実施することとなった。

表2-3 未臨界度測定技術開発の経緯（昭和60年度～平成4年度）

年度	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4
未臨界度測定試験施設建設(DCA改造)	設計研究	概念設計		調整設計	試験計画	計画調整		
						基本設計	詳細設計(固体燃料実験)	
						(炉心構造設計、核設計・安全設計、安全評価、地盤調査等)		
								安全審査
								(未臨界度測定機能の追加)
未臨界度測定技術開発		日米共同臨界実験(ミハルソ法の基本原理確認)						
					予備実験(既存施設使用)		予備実験(既存施設使用)	
					(2領域法による実験及び解析)		(ファインマン- α 法、ミハルソ法、2領域法等)	
					放射線測定器の購入・整備			
臨界安全解析手法の高度化						基本解析コードの整備、臨界安全解析		
安全研究年次計画						未臨界度測定システム開発に関する研究		

表2-4 未臨界度測定技術開発の経緯（平成5年度～平成12年度）

年度	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
未臨界度測定試験施設建設(DCA改造)	安全審査 ○	改造工事	安全審査(未臨界度測定実験範囲の拡大) ○	低反応度試験体実験機能の追加 ○	試験体用燃料棒貯蔵棚の新設 ○	Pu試験体の製作 ○		
未臨界度測定技術開発	予備実験(既存施設使用) (ファインマン- α 法、ミハルゾ法、2領域法等)				未臨界度測定試験機能を用いた実験と未臨界度モニターの開発 (ATR-U, ATR-Pu, 常陽MK-I試験体: ファインマン- α 法とミハルゾ法)			総合報告書の作成 ○
臨界安全解析手法の高度化	大学等との協力(京都大学、九州大学、名古屋大学、工業技術院電子技術総合研究所) (ファインマン- α 法の測定理論、測定技術の研究、Cf線源検出器の開発等)							
安全研究年次計画				基本的な解析コードの整備、臨界安全解析 ○				
			未臨界度測定システム開発に関する研究 ○			未臨界度測定システムの開発 ○		

表 2-5 DCA の改造のための許認可手続きの経緯

時期	項目	件名
平成 4 年 5 月	設置変更許可申請	未臨界度測定機能の追加
平成 5 年 4 月	同許可取得	
平成 5 年 9 月	設計及び工事の方法 の認可	未臨界度測定機能の追加 (原子炉本体の一部改造)
平成 5 年 11 月	設計及び工事の方法 の認可	未臨界度測定機能の追加 (試験燃料体組立装置の追加、 安全棒及び安全棒駆動装置の追加、 天井クレーンの改造、 計測制御設備の一部更新)
平成 6 年 1 月	設置変更許可申請	未臨界度測定実験範囲の拡大
平成 6 年 11 月	設計及び工事の方法 の認可	未臨界度測定機能の追加 (試験体減速材供給設備等の追加)
平成 7 年 2 月	設計及び工事の方法 の認可	未臨界度測定機能の追加 (試験体減速材供給設備等の追加)
平成 7 年 9 月	設置変更許可取得	未臨界度測定実験範囲の拡大
平成 7 年 10 月	設計及び工事の方法 の認可	低反応度試験体実験機能の追加
平成 8 年 1 月	設計及び工事の方法 の認可	試験体用燃料棒貯蔵棚の新設
平成 8 年 11 月	設計及び工事の方法 の認可	プルトニウム試験体の製作

表 2-6 原子力施設等安全研究年次計画（平成3年度～平成7年度）

[未臨界度測定システム開発に関する研究]

①研究目的

FBR燃料リサイクル試験施設等、今後の核燃料施設の臨界安全設計及び未臨界度測定システムを用いた臨界安全監視診断システムの開発に反映させるため、未臨界度測定試験施設を用い、未臨界度測定システム開発に関する研究を行う。

②研究内容

未臨界度測定試験施設等を用いて以下の研究を行う。

イ. 予備実験

固体燃料を用いて未臨界度測定を行う。

ロ. 基本実験

未臨界度基準値の測定及び未臨界度測定技術の実用化を目的し、ウラン燃料ピンを用いてFBR燃料サイクル行程の各種条件を模擬した系の未臨界度測定のための実験を行う。

ハ. 確証実験

未臨界度測定技術の実用化で重要となる溶液特有の効果の把握を目的とし、ウラン溶液を用いた未臨界度測定のための実験を行う。

③研究期間：平成3年度～平成7年度

④実施期間：動力炉・核燃料開発事業団

原子炉施設等安全研究年次計画より抜粋

表 2-7 原子力施設等安全研究年次計画（平成 8 年度～平成 1 2 年度）

[未臨界度測定システムの開発]

① 研究目的

未臨界度の解析手法の開発と未臨界度測定技術の開発を行い、未臨界度モニターを開発することによって、高速炉燃料の再処理施設等、核燃料取扱施設や核燃料輸送設備の臨界安全管理技術の向上及び臨界安全に係る設計の合理化に資する。

② 研究内容

イ. 未臨界度解析手法の開発

従来ほとんど検討されていない深い未臨界度について、炉物理的な定義と計算方法を検討する。

ロ. 未臨界度測定技術の開発

未臨界度測定試験施設を用いて、ウラン及びプルトニウム燃料を含む軽水減速体系について未臨界度測定実験を実施するとともに測定手法を確立する。

ハ. 未臨界度モニターの開発

ロ. で検証された未臨界度測定手法を用いた未臨界度モニターを開発する。

なお、上記研究項目のうちロ. 及びハ. については、大学における基礎研究の成果等も活用していくものとする。

③ 研究期間：平成 8 年度～平成 1 2 年度

④ 実施期間：動力炉・核燃料開発事業団

原子炉施設等安全研究年次計画より抜粋

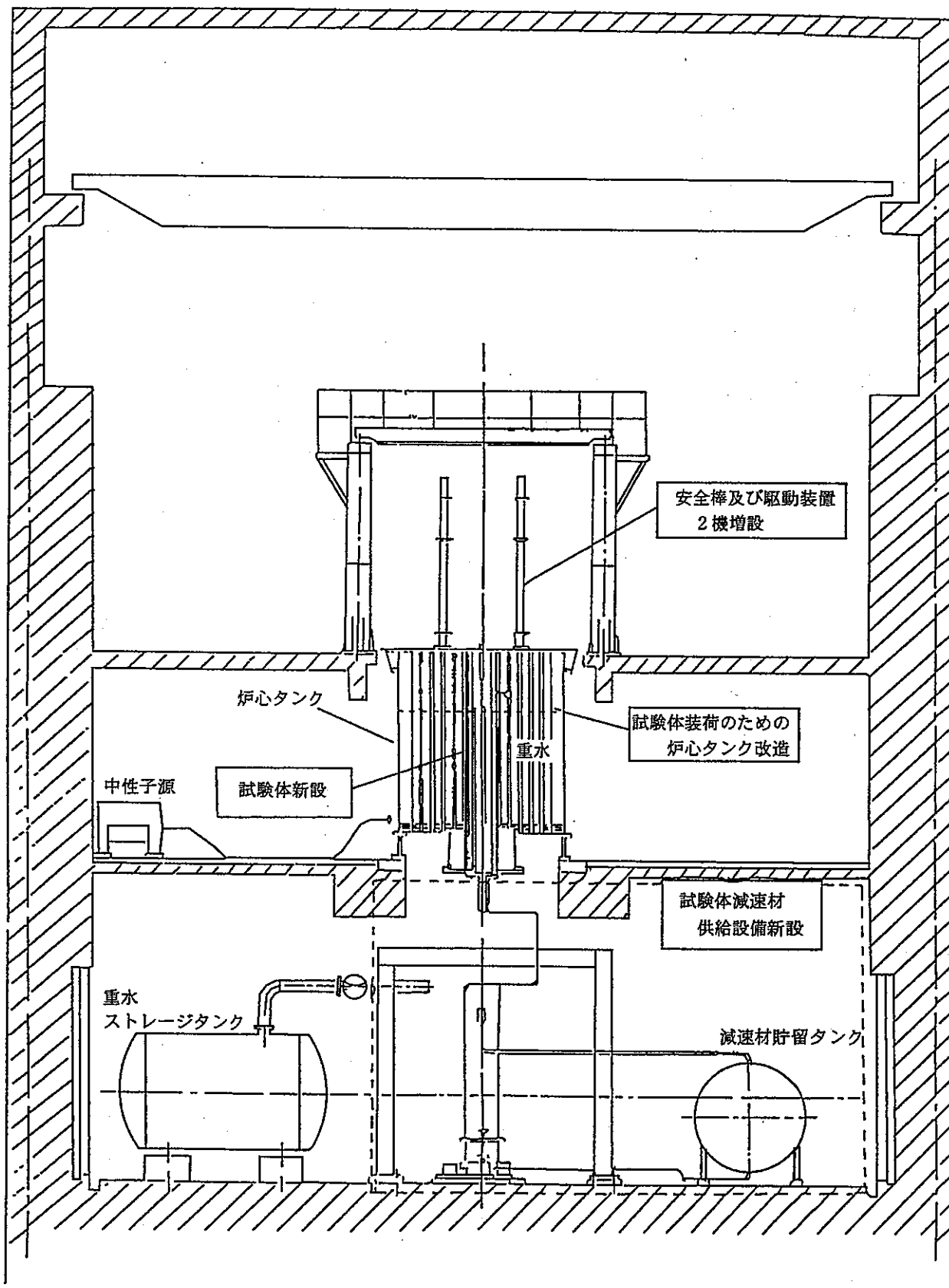
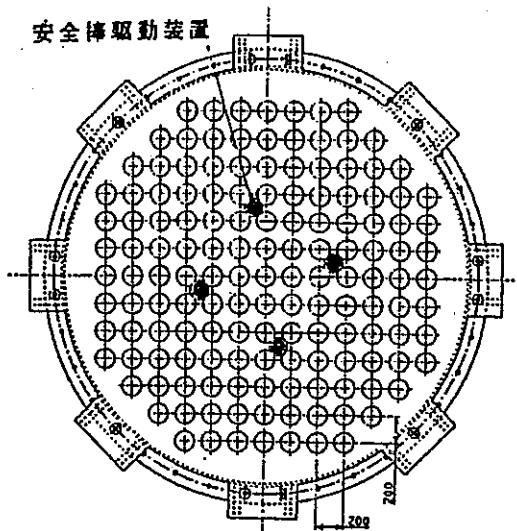
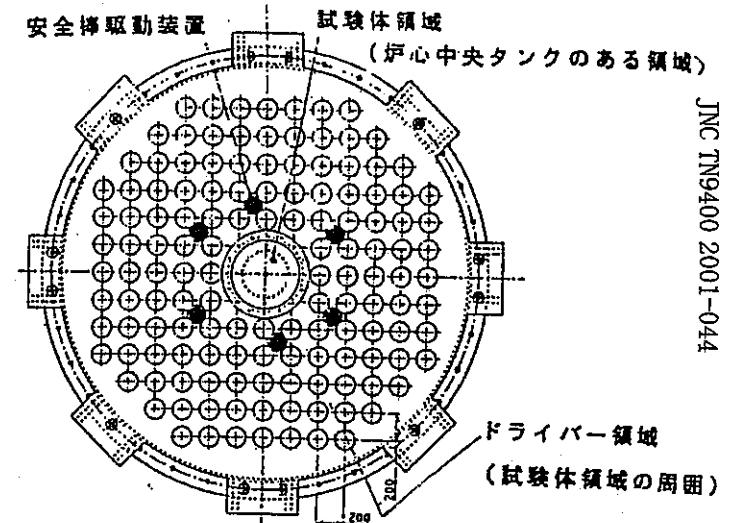


図2-1 DCA炉心本体改造の概要

改造前
ATR実験体系



改造後
未臨界度測定
実験体系



JNC TN9400 2001-044

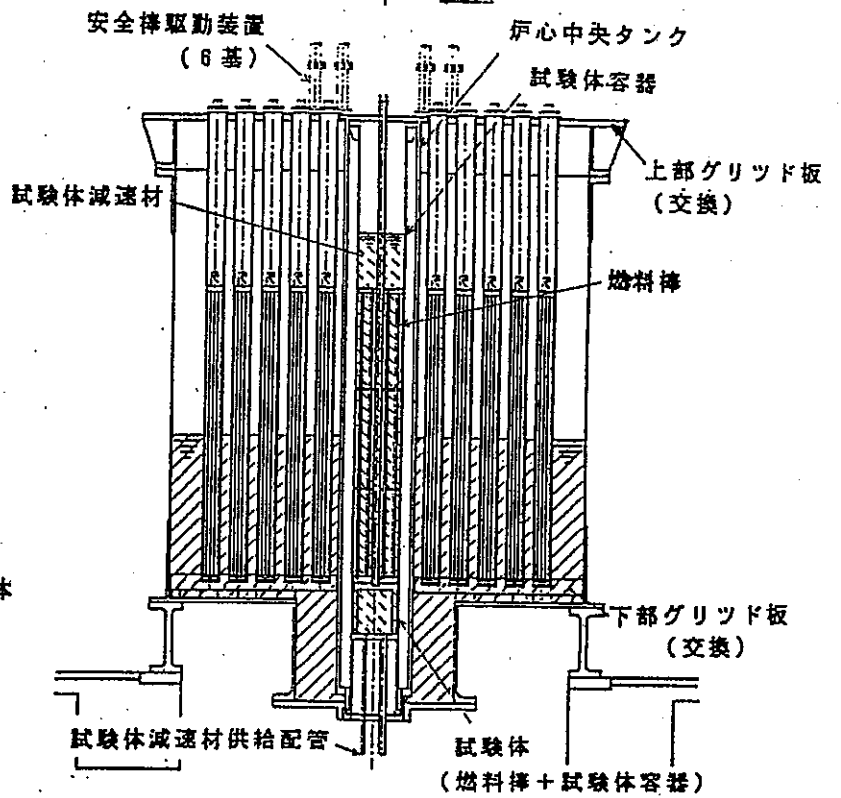
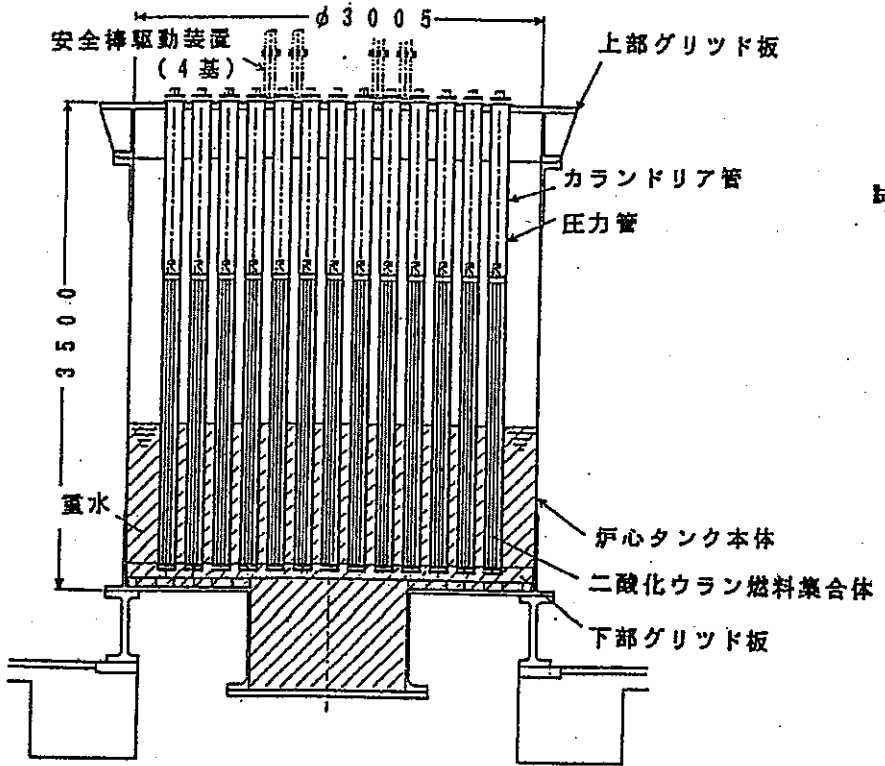
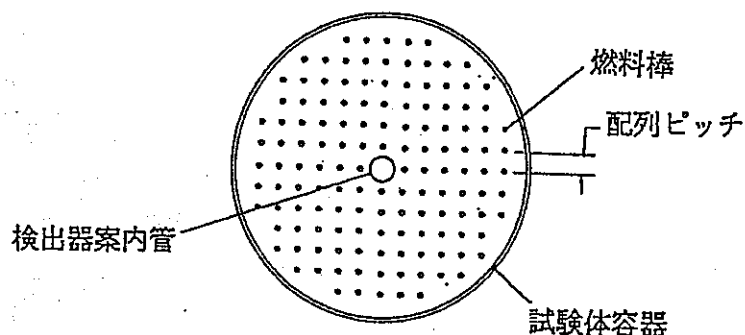


図2-2 DCA炉心部の改造前後の比較



試験体容器形状	円筒形 (直径 : 3.5 cm, 4.5 cm)
燃料棒本数	140本以下
燃料種類	U : 0.7%~2.7% EU Pu : 0.5%~24% Pu fiss.
燃料直径	0.6 cm~1.7 cm.
燃料配列	均一配列、円環状配列 U又はPuの一様配列 U/Puの混合配列
格子ピッチ	2.0 cm以上
減速材	軽水、軽水/重水混合液

図2-3 試験体構成例(均一配列)と試験体の仕様

3. 未臨界度測定技術の開発

本章では、第2章で選定した2種類の測定技術（ファインマン- α 法、ミハルソ法）について、臨界工学試験室における研究開発の経緯及び成果を第2章で設定した目標ごとに分類して述べる。なお、表3-1には開発スケジュールについて、付録15には研究開発における外部発表及び成果報告書等についてまとめている。

3.1 ファインマン- α 法

ファインマン- α 法は、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^[18]であり、その後、中性子寿命や炉停止余裕などの臨界近傍での炉物理量を測定するために利用されてきた^{[19][20]}。測定方法は一定時間の検出器カウント数の分散と平均の比を求めるだけの簡単なものであり、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^{[21][22]}。

以上を踏まえ、本研究では、より低い実効増倍率に対する適用性の確認や表2-1に掲げた未臨界度測定技術の目標性能を満足させるための適用範囲の拡張に焦点を当てて開発を実施した。以下に臨界工学試験室におけるファインマン- α 法の開発経緯を表2-1の目標性能ごとに分類して述べる。

(1) 測定範囲と応答時間

平成3年度にファインマン- α 法による未臨界度測定実験を開始した。マルチチャンネルスケーラー（以下、MCS という。）を用いたデータ収集システムを整備し、ATR 実験用炉心における測定によって、実効増倍率 (K_{eff}) 0.7~0.99 の変化をファインマン- α 法における相関量Y値によって検出できることを確認した^[23]。

平成4年度には、ATR 実験用炉心において実効増倍率を 0.9 から 0.3 まで 0.1 刻みで未臨界度を測定し、各実効増倍率の差異をY値で検出できること、応答時間が K_{eff} 0.7 を ± 0.1 の統計精度で求める場合で約5分、 K_{eff} 0.9 \pm 0.05 の場合で約2分であることを確認した^[24]。

DCA 改造工事（平成5年度～平成7年度）によって試験体の減速材に軽水を供給できるようになり、平成8年度には ATR 規格のウラン燃料及び MOX 燃料を装荷した軽水減速炉心において、平成9年度には新たに利用可能となった高富化

度 MOX 燃料（「常陽」MK-I 燃料、富化度 17.7wt%）を装荷した軽水減速炉心において未臨界度測定実験を実施した。その結果、いずれの体系でも実効増倍率の測定範囲と応答時間に著しい差は無く、 $K_{\text{eff}} 0.95 \pm 0.003$ を約 6 分で、 $K_{\text{eff}} 0.90 \pm 0.04$ を約 1 分で、 $K_{\text{eff}} 0.83 \pm 0.04$ を約 2 分で、 $K_{\text{eff}} 0.73 \pm 0.1$ を約 8 分で測定できることを確認した^{[25][26]}。

(2) 適用範囲の拡張

① 変動体系への適用

ファインマン- α 法では、時間幅 ΔT 中の計数を連続して多数サンプリングし、計数の平均値と分散の比（Y 値）より相関量を求め、相関量の時間減衰から即発中性子の減衰定数（ α 値）を検出するが、計数の時間変動に即発中性子の減衰による寄与とは異なる成分が含まれると、 α 値を正確に検出できなくなる。

平成 9 年度には、近畿大学の橋本氏が提唱した計数データ処理への階差フィルター^[27]の適用について、臨界近傍における未臨界度測定実験によって検証した。階差フィルターは隣り合う計数サンプル間の差のみを抽出することによってサンプル間では一定と見なせるようなゆっくりとした変動を除去するものである。臨界近傍では中性子束の変動に遅発中性子の寄与が顕著に現れるが、遅発中性子の寄与による変動成分は、目的量である即発中性子の寄与による変動成分と時間的振る舞いが異なるため、 α 値を正確に検出するためには即発中性子の寄与による変動成分を除去する必要がある。階差フィルターを適用して得られた α 値は、遅発中性子の影響を受けにくいパルス中性子法によって測定した α 値と誤差の範囲で一致し、階差フィルターの適用が目的量である即発中性子の減衰とは無関係な変動成分の除去に効果的であることを確認した^{[28][29][30]}。

平成 10 年度には、実効増倍率あるいは中性子源強度の変化によって中性子束が変動する体系に対して未臨界度測定を実施した。測定データの処理に前年度の階差フィルター適用法に加えてデータ分割法（対象データを分割して分割データ毎に Y 値を算出し、その平均値から α 値を評価する方法）を考案し、その適用性を評価した。いずれの手法を適用しても中性子束が変動する場合に α 値を正確に評価できることを確認した^{[26][31]}。

平成 12 年度には、中性子束変動体系における測定データ処理法として、パラメータ追加法（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

時間幅 ΔT の 1 次の補正項をフィッティング解析式に追加する方法) の適用性を評価し、その方法でも α 値を正確に評価できることを確認した。

以上のように、変動体系に対しては 3 種類のデータ処理法が適用可能である。各手法は互いに異なる特徴を有しており、状況に応じた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。

② 高中性子バックグラウンド体系への適用

未臨界度測定における中性子バックグラウンドの影響は 2 種類に分類できる。1 つは中性子バックグラウンドが変動することによって中性子計数が変動することの影響であり、もう 1 つは計数率の増加に伴い不感時間の影響が顕著になることである。前者については前述の「①変動体系への適用」における工夫を適用することができるため、後者についてのみ以下に経緯を述べる。

平成 5 年度に ATR 規格の MOX 燃料を装荷した体系に対し実効増倍率の測定を実施した。その結果、中性子束レベルがウラン燃料を使用した場合に比べて 10 倍程度高いため計測システムの不感時間の影響が顕著となり、通常の方法では正確に α 値を評価できないことが判明した^[32]。

そこで、平成 6 年度から平成 8 年度にかけて、検出器不感時間の影響について理論的な検討を行い、不感時間により Y 値が負側にシフトする分を定常項として考慮することによって正確に評価できることを確認した。^{[33][34]}。

(京都大学との共同研究)

なお、平成 11 年度にミハルゾ法における不感時間の影響を検討する過程で、より正確に不感時間の影響を評価する理論式を考案したが、その理論においても上記補正手法の妥当性が確認されている^[35]。

③ 換算係数の評価

ファインマン α 法では、直接の測定量である即発中性子減衰定数 α 値より未臨界度を求めるために、換算係数である即発中性子寿命を測定体系に応じてあらかじめ評価する必要がある (付録 1 参照)。即発中性子寿命はその定義で明らかのように中性子スペクトルや中性子吸収断面積に主に依存する量である。一旦体系が定まると大きく変化するものではないが、体系の変化に対する即発中性子寿命の変化を正確に把握することは、未臨界度評価結果の信頼性を把握するために不可欠である。

評価方法には、直接即発中性子寿命を計算する方法と、 α 値と実効増倍率を計算することによって間接的に評価する方法がある。

(i) 直接計算による評価

平成4年度に、決定論的計算手法及び確率論的計算手法、それぞれの手法によって即発中性子寿命を評価し、その妥当性を検討した。決定論的手法には臨界工学試験室において ATR の臨界実験解析に使用してきた即発中性子寿命評価コードシステム（格子定数計算コード WIMS と3次元拡散コード CITATION の組み合わせ）を、確率論的手法には即発中性子寿命の評価機能が標準的に備わっているモンテカルロ計算コード KENO を使用した。その結果、決定論的手法では約 20%、確率論的手法では 10%～50%即発中性子寿命を過小評価することを確認した^[24]。

平成5年度～平成6年度には、京都大学臨界集合体実験装置（KUCA）において炉心の中性子スペクトルを系統的に変えてファインマン- α 法の測定実験を行い、即発中性子寿命（正確には、遅発中性子割合と即発中性子寿命の比、 β/λ ）を測定し、決定論的手法及び KENO を用いた確率論的手法による計算結果と比較した。その結果、確率論的手法を使用した場合は、決定論的手法を使用した場合よりも即発中性子寿命を 20%程度大きく評価する傾向があることを確認した。また、決定論的手法で求めた即発中性子寿命は KENO に備わっている評価機能により求めた中性子生成時間 Λ にほぼ等しいという事実を確認した^[36]。（京都大学との共同研究）

平成8年度には、DCA 改造炉心に対する決定論的手法による即発中性子寿命の評価システム（SCALE コードシステムによる断面積作成と2次元輸送計算コード TWODANT の組み合わせ）を整備した。改造炉心は、炉心内部にボイド領域を含むため輸送計算コードを用いた即発中性子寿命の評価システムが不可欠であった。整備したシステムで求めた即発中性子寿命を用いて α 値を実効増倍率に換算した結果は、臨界計算より求めた実効増倍率と 7%以内で一致しており、DCA 実験体系に対する決定論的手法による即発中性子寿命の評価システムが確立できたことを確認した。

未臨界度測定技術の適用を想定している再処理施設は形状が複雑であり、モンテカルロ法による即発中性子寿命の評価手法の確立が不可欠である。平成6年度にモンテカルロ計算コード KENO で標準的に出力される中性子生成時間 Λ が即発中性子寿命 λ にほぼ等しいことを確認していたが、KENO で評価した Λ を用いて未臨界度評価量 α 値を実効増倍率に換算した未臨界度評価結果と未臨界度計算値との間には体系によっては、20%以上大きく評価する可能性があることが判明した。そこで DCA の体系に対して KENO より

優れた計算精度を有することが確認されていた連続エネルギーモンテカルロコード MCNP^[37]に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即発中性子寿命の評価コードを作成した。作成した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 α 値は、測定値と約 10%以下の精度で一致しており、確率論的手法による即発中性子寿命の評価システムが確立できたことを確認した。

(ii) モンテカルロ模擬計算による間接評価

モンテカルロ法による未臨界度測定の模擬計算コードとしては、平成2年度に名古屋大学のミハルゾ法研究グループがミハルゾ法の測定特性を把握するために作成した例^[38]が報告されているが、臨界解析等で一般的に広く利用されているモンテカルロコードと同等な機能を有した模擬計算コードとしては、平成6年度に米国ミシガン大のミハルゾ法研究グループが KENO を基に開発した KENO-NR^[39]が最初であり、その後、ORNL のミハルゾ法研究グループが MCNP を改造した MCNP-DSP^[40]を開発している。KENO-NR 及び MCNP-DSP も、共にミハルゾ法による未臨界度測定の模擬を目的としたものであるが、パルス中性子法など中性子計数の時間変動を利用する他の未臨界度測定手法にも適用可能としている。日本においても MCNP の機能追加によってファインマン- α 法やパルス中性子法の測定データを模擬できることが原研の研究者によって確認されている^[41]。

模擬計算コードを用いれば測定で得られる α 値を計算で直接評価することができ、評価した α 値と別途計算で求めた実効増倍率より即発中性子寿命を間接的に得ることができる。

臨界工学試験室では、当初上記模擬計算コードを利用することを検討したが、上記模擬計算コードはいずれも用途が限定されており、特に臨界工学試験室で開発していた時間相関解析によるミハルゾ法への利用ができないという問題があり、独自に開発することとした。

臨界工学試験室における模擬計算コードの開発は平成10年度に連続エネルギーモンテカルロ法計算コード MCNP4A への機能追加によって実施した。作成した模擬計算コードによって、ファインマン- α 法の α 値を5%以内の精度で模擬できることを確認した^{[26][42]}。

平成11年度には、MCNP の最新版である MCNP4B に模擬計算機能を移植し、平成10年度と平成11年度に実施された様々な燃料、減速材、及び実効増倍率の体系に対して未臨界度測定の模擬計算を実施し、実効増倍率

0.4～0.99 に対して 10%以内で α 値を模擬できることを確認した。

模擬計算コードで評価した即発中性子寿命は検出器配置を考慮することができるとい点が優れているが、直接評価する手法に比べると計算時間を要するという短所がある。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) 未臨界度モニターシステム

① MCS を利用したシステム

モニターシステムの応答時間を決定する要因は、評価に必要なデータ量を収集するためのデータ収集時間が主要なものであるが、その他にハードウェアの性能で決まるデータ処理時間とデータ転送時間にも依存している。

平成 3 年度に、制御及びデータ解析を行うパーソナルコンピュータ (PC) とデータ収集を行う MCS を専用ケーブルで接続した簡易モニターシステムを試作し、データ処理時間とデータ転送時間を評価した。その結果、データ処理時間については十分短く応答時間に影響を与えないが、データ転送についてはデータ収集と同時に実施できないうえに、約 4 秒のデータ収集に対して約 10 秒要するという問題があることが判明した。

平成 5 年度には、当時最新の MCS (LABORATORY EQUIPMENT 社製 LN6400) を導入し、データ転送時間をデータ収集時間の半分程度 (約 2 秒) に短縮することができた。さらに、導入した MCS にはエンジニアリングワークステーション (EWS) と LAN 回線で接続できる機能が備わっていることから、MCS の制御、収集データの解析及び結果表示を EWS 上で連続処理するプログラムを作成することによって、EWS 上で未臨界度の連続監視ができるモニターシステムを試作した。この試作モニターを用いて、実効増倍率 0.965、0.951、0.8、0.7 の差異を応答時間約 200 秒 (実測定時間約 120 秒) で検知できること、また、実効増倍率 0.965、0.951、0.8 の差異であれば応答時間約 50 秒 (実測定時間約 30 秒) で検知できることを確認した^{[43][44]}。

平成 11 年度には、データの連続収集が可能な MCS (LABORATORY EQUIPMENT 社製 NT2400m) を導入した。収集したデータを一時的に記録するバッファメモリを設けることによってデータ収集とデータ転送を並行して実施できる。前述の MCS と同様に、LAN 回線によって制御装置と接続可能であり、データ損失のない理想的なモニターシステムが構成できる。

② パルス時系列直接測定装置の開発^{[45][46][47]}

MCS 以外のデータ収集装置として、九州大学との共同研究により「中性子計測データの計算機直接入力に関する研究」を平成7年度から開始した。開発されたパルス時系列直接測定システムは、パルスの検出毎に検出時間を PC 上に記録するものであり、同一 PC 上でデータ処理を実施することができる。転送時間の削減につながるだけでなく、計数率の低い場合には MCS を利用する場合に比べて極めて合理的な測定システムとなる。DCA における測定試験により、測定システムが正しく機能すること、MCS を用いて収集した測定データと整合がとれていることを確認した。

平成8年度には九州大学において上記測定システムに FIFO (fast-in fast out)メモリーをバッファとして使用する改良が施され、システムの不感時間が $20\mu\text{sec}$ から $2\mu\text{sec}$ に短縮された。

本測定装置は、計数率が低いウラン体系においては効率的に測定できるため現在 KUCA において利用・改良がなされている。

3.2 ミハルゾ法

ミハルゾ法（日本における通称であり、海外では“Cf-252 SOURCE DRIVEN NOISE ANALYSIS METHOD”と称されている）は、1972年に米国 ORNL の J.T.Mihalczko らによって提唱された未臨界度測定手法であり^{[48][49][50][51]}、ファインマン- α 法と同様に、中性子計数率の揺らぎの相関を解析することによって実効増倍率を評価する炉雑音解析手法である。

ミハルゾ法が他の炉雑音解析手法と決定的に異なる点は、Cf 線源検出器と称する Cf-252 を内蔵した電離箱（電離箱の外に中性子を放出するとともに中性子発生信号として自発核分裂片を検出し、中性子放出のタイミングが把握できる中性子源）を使用することによって実効増倍率の絶対値の測定を可能にした点であり、体系を臨界にすることのできない核燃料取扱施設に対する未臨界度測定手法として期待されている。

ミハルゾ法の性能評価は、提唱者の Mihalczko らによって精力的に実施されており、第2章で述べたように日米共同臨界実験において未臨界度モニターに適した性能を有することが確認されている。

日本でのミハルゾ法の試験経験は Cf 線源検出器の特殊性により、1982年～1983年に日本原子力研究所で実施された例^[10]が唯一であり、ウラン燃料棒と軽水減速の定常体系において実効増倍率 0.9 まで測定できることが確認されている。その際 Cf 線源検出器（強度 7MBq）はフランスで製作されたが、数年で使用不能となり、その後日本においてミハルゾ法の試験は実施されていない。

以上の状況を踏まえ、本研究では当初、Cf 線源検出器を豊富な実績を有する米国 ORNL から入手し、ミハルゾ法の測定性能の確認後、実用化へ向けた研究開発を進めることを計画していたが、Cf 線源検出器の入手に当たっての契約上の位置付けや経費等の条件面で ORNL 側と合意に至らなかったため、Cf 線源検出器の開発から独自に実施することとした。

以下に臨界工学試験室におけるミハルゾ法の開発経緯を、表 2-1 に掲げた未臨界度測定技術の目標性能ごとに分類して述べる。

(1) 測定範囲と応答時間

Cf 線源検出器（強度 3.7MBq）が完成した平成6年度後半からミハルゾ法の測定試験を開始した。K_{eff} 0.7～0.95 についてミハルゾ法の直接の評価量であるスペクトル比（SR 値）が有意な変化を示すことを確認した。しかしながら、SR 値

を換算して得た実効増倍率には $K_{\text{eff}} 0.9$ を 0.8 と評価するなどの不一致があり、また、測定時間 10 分の場合で 1σ が 0.1 と統計精度に問題があることが判明した。換算方法、統計精度の両面に改善が必要であり、特に統計誤差については日米共同臨界実験の結果（約 4 分で $K_{\text{eff}} 0.90$ を ± 0.001 の統計精度で測定）と比較して、倍以上の測定時間を費やしているにも関わらず誤差は 100 倍以上も悪いという結果であり、測定システムの見直しを含めて検討することとした。

平成 7 年度には、統計精度の改善として DATA RECORDER の出力ファイルをワークステーションで処理するデータ処理システムを作成した。従来のデータ処理は、市販の FFT 解析装置（SM-2100C 岩崎通信製）で実施していたが、データ処理能力が低く、検出器配置を変更するたびにデータを取り直す必要性があった。新しいデータ処理システムによって検出器の設置場所等の検討が容易になり、測定時間 10 分の場合で統計誤差を $K_{\text{eff}} 0.90$ に対して 0.1 から 0.03 に低減することができた。しかしながら、依然として日米共同臨界実験の結果に比べると統計誤差は満足できるものではなかった。

平成 8 年度には、理論的な側面からの統計精度の改善として、統計誤差の従う誤差理論式を導出し、検出効率や中性子寿命等の体系に固有な条件に対する統計誤差の依存性を明らかにした^[52]。また、誤差理論を基に誤差を最適化する（信頼性を損なわない範囲で最小とする）ための解析パラメータ設定の指標を定め、その結果、 $K_{\text{eff}} 0.90$ を ± 0.01 の統計誤差（ 1σ ）で測定するための時間を 60 分から 10 分に短縮することができた。さらに、DCA における実験と日米共同臨界実験で実施された溶液燃料体系における実験について統計誤差を比較し、両者の応答時間の差が、技術的な問題ではなく、測定体系の差異に起因するものであることを明らかにした。

平成 9 年度にはミハルゾ法の開発において主たる成果となる時間相関解析によるミハルゾ法の開発に着手した。当時、検出器配置依存性の解明のために 2 本の検出器による測定手法^[53]を開発しており、その過程で過去の提案^{[54][55]}に着目したことがきっかけである。応答時間の短縮につながるものが示唆されていたが、その手法の特徴、有効性については未確認であり、本研究において改めて基礎理論の検討から取り組むこととした^[56]。時間相関解析による手法はファインマン- α 法とデータ処理手順に共通点が多く、ミハルゾ法と平行して開発が実施されていたファインマン- α 法の測定装置に複数信号の同期処理機能を追加することによって、時間相関解析手法によるミハルゾ法の測定システムを構築した。平成 9 年度末から本格的に試験を開始し、従来の周波数相関解析による手法における未

臨界度評価量 SR 値と同等な評価量 (CR 値と称する) を 1/3 以下の統計誤差で測定できることを確認した。これは測定時間を 1/10 以下に短縮できることに相当し、実効増倍率 0.90 を ± 0.01 の統計誤差 (1σ) で測定するための時間を 10 分から 1 分に短縮することに相当する [57][58][59]。なお、この測定法の改良による応答時間の短縮効果を日米共同臨界実験に当てはめると、数秒以内の極めて短い応答時間が期待できることになる。

平成 11 年度には、0.4~0.99 の実効増倍率に対して系統的にデータを収集し、約 1 分で $K_{\text{eff}} 0.95$ を ± 0.003 , $K_{\text{eff}} 0.90$ を ± 0.01 , $K_{\text{eff}} 0.70$ を ± 0.02 , $K_{\text{eff}} 0.40$ を ± 0.05 の統計精度で測定できることを確認した。

(2) 適用範囲の拡張

① 変動体系への適用

平成 9 年度に導入した時間相関解析手法によって測定時間を短縮することができ、ミハルゾ法の変動体系への適用性評価が可能となった。

時間相関解析手法はファインマン- α 法とデータ処理手順に共通点が多く、変動体系に対するファインマン- α 法用に開発されたデータ処理手法を利用することができる。ファインマン- α 法のために開発された 3 種類のデータ処理法のうち、2 種類のデータ処理法 (階差フィルター適用法とデータ分割法) が適用可能であることを確認した。

② 高中性子バックグラウンド体系への適用

平成 8 年度に強度 30MBq の Cf 線源検出器を製作したことにより、2 種類の強度 (3.9MBq と 30MBq) の Cf 線源検出器が利用できるようになった。

中性子バックグラウンドの低いウラン燃料の体系と、中性子バックグラウンドの高い MOX 燃料の体系において、各強度の Cf 線源を交互に使用して未臨界度測定を実施し、Cf 線源強度の未臨界度評価に与える影響を評価した。

その結果、中性子バックグラウンドが Cf 線源強度に対して無視できるほど小さい場合は、Cf 線源強度の影響は現れないが、無視できない場合は、別途中性子バックグラウンドの強度測定によって補正する必要が生じ、さらに測定結果の統計誤差も増加することを確認した。誤差の増加率は、中性子バックグラウンドが Cf 線源強度の約 7 倍になる場合で、中性子バックグラウンドの影響が無視できる場合に比べて統計誤差が約 2 倍である [59][60]。

なお、これら中性子バックグラウンドの影響のうち、補正の必要性については、平成 9 年度に導入した時間相関解析手法に基づくミハルゾ法によって

解消することができた（付録 2, 付録 6 参照）。

③ 不感時間の影響の補正

平成 9 年度に導入した時間相関解析によるミハルゾ法では、実効増倍率が高い場合に測定値に系統的なずれが生じることが判明した。不感時間の影響と考えられたが、当時の理論（「3.1.1 節(2)適用範囲の拡張」参照）では説明できない現象であり、新たな不感時間の補正評価式を考案した。実験や模擬計算コードで不感時間の影響を評価し、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^[35]。

③ 換算係数の評価

ミハルゾ法では、直接の測定量 CR 値を未臨界度に換算するため、換算係数を決定する因子である中性子インポートンス分布^[61]を測定体系に応じてあらかじめ評価する必要がある（付録 2 参照）。中性子インポートンス分布は中性子束分布に類しており、一旦体系が定まると大きく変化するものではないが、体系の変化に対する中性子インポートンス分布の変化を正確に把握することは、未臨界度評価結果の信頼性を把握するために不可欠である。

評価方法には、ファインマン- α 法の場合と同様、直接あるいは間接的に計算する方法がある。

(i) 換算係数の特性

平成 5 年度から平成 6 年度にかけて、換算係数における未臨界度や検出器配置に対する依存性の検討を実施した。簡単な矩形モデルに対し依存性の特性を評価し、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^[10]が適用できること、検出器配置依存性については、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。（名古屋大学との共同研究）

平成 9 年度には、検出器配置依存性の対策として、2 本の検出器による測定手法を考案した。検出器を 1 本減らすことにより、検出器配置の影響が単純化され、換算係数を詳細に評価することなく、安全側に評価するような配置を選択することが可能になった^[63]。

(ii) 直接計算による評価

ミハルゾ法の換算係数の算出には、従来、検出器配置の情報を含まないインポートンス（随伴中性子束）が利用されてきたが、 $K_{\text{eff}} 0.95$ 以下では検出器配置の影響が顕著になり、平成 6 年度に実施した試験では、 $K_{\text{eff}} 0.90$ を $K_{\text{eff}} 0.85$ と評価している。

平成7年度から8年度に、検出器配置を考慮したインポートランス分布評価システムを拡散計算コード CITATION を利用して作成し、 K_{eff} 0.85～0.98 の範囲で実効増倍率が正確に評価できることを確認した^[69]。

平成9年度には、適用対象の拡大を目的として、検出器配置を考慮したインポートランス分布をモンテカルロコードによって評価することを検討した。連続エネルギーモンテカルロコード MVP^[62]を利用して検討を行い、単純な体系に対しては利用できることを確認したが、DCA のような複雑な体系に適用した場合には計算が途中で異常終了する等の問題があり、モンテカルロ法による直接評価は断念することとした。

(iii) 模擬計算による評価

平成10年度に、ファインマン- α 法の測定模擬計算コードを時間相関解析によるミハルゾ法にも適用できるように機能を追加した。模擬計算で求めた CR 値は測定値と誤差の範囲で一致することを確認した^[42]。

平成12年度には、模擬計算コードを利用して、模擬計算結果からインポートランスを評価する方法を考案し、検出器配置や体系の形状を正確に考慮した換算係数の評価法として利用できることを確認した。

(4) モニターシステムの開発

時間相関解析手法によるミハルゾ法は、前節のファインマン- α 法とデータ収集装置が共通であるため、モニターシステムの開発経緯としては、ミハルゾ法固有の測定装置である Cf 線源検出器のみについて述べる。

平成5年度に、工業技術院電子技術総合研究所との共同研究によって数 10kBq の微弱な非密封線源を用いて Cf 線源検出器の性能評価を実施した。検出器出力の波高分布の形状が明確で、 α 成分の除去性能を基準として検出器の仕様を決定した^[69]（付録 1 1 参照）。また、Cf 線源検出器に関して、DCA における密封放射性同位元素の使用許可を取得した。

平成6年度には、未臨界度測定に実用的な強度（強度 3.9MBq）の Cf 線源検出器を製作した。非密封 Cf は米国 ORNL で製造されたもので、プラチナプレートに電着されており、日本アイソトープ協会（RI 協会）を通して入手した。非密封 Cf の密封作業はサイクル機構大洗工学センターの照射後試験室（AGF）のフード内で電離箱内への設置、電離ガスの封入、線源の密封からなる工程を経て実施され、RI 協会による密封性確認の後、DCA に搬入された。

平成8年度には、高強度（強度 30MBq）の Cf 線源検出器を製作した。Cf-252

の入手方法は同じであるが、Cf-252の密封作業を容易にするために、あらかじめ線源検出器の下部を日本からORNLに送り、現地にてあらかじめ線源を設置してもらうこととした。線源検出器上部の取付け及び検出器内の空気を電離ガスで置換し、線源検出器を密封化する作業は、3.9MBqのCf線源の場合と同様にAGFで実施した。線源強度が高いため、 β - γ セルにおけるマニピュレータ操作による作業となった。

完成した30MBqのCf線源検出器は、信号強度が強すぎて、完成後1年は、パルスではなく、電流モードで信号を処理して、ミハルゾ法の測定に使用した^[59]。その後、Cf-252の減衰により信号強度が30万cps程度になり、パルスモードで信号を処理できるようになり、時間相関測定によるミハルゾ法への利用できるようになった。

以上のように製作した2種類のCf線源検出器は、電離ガスを置換することなく、平成12年度末現在でも使用可能である。

表3-1 ファインマン- α 法とミハルゾ法の開発経緯

年度		H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	
試験体の種類		ATR-U $\xrightarrow{\hspace{10em}}$ ATR-Pu $\xrightarrow{\hspace{2em}}$ MK-I $\xrightarrow{\hspace{10em}}$ ATR-U $\xrightarrow{\hspace{10em}}$										
手法	主要検討項目											
ファインマン- α 法	測定範囲と応答時間	\longleftrightarrow						\longleftrightarrow	\longleftrightarrow		\longleftrightarrow	
	適用範囲の拡張	変動体系への適用							\longleftrightarrow	\longleftrightarrow		\longleftrightarrow
		高中性子バックグラウンド体系への適用			\longleftrightarrow			\longleftrightarrow			\longleftrightarrow	
		換算係数の評価		\longleftrightarrow				\longleftrightarrow		\longleftrightarrow	\longleftrightarrow	
	測定システム	\longleftrightarrow				\longleftrightarrow	\longleftrightarrow				\longleftrightarrow	
ミハルゾ法	測定範囲と応答時間				\longleftrightarrow						\longleftrightarrow	
	適用範囲の拡張	変動体系への適用									\longleftrightarrow	
		高中性子バックグラウンド体系への適用						\longleftrightarrow	\longleftrightarrow			
		不感時間の影響の補正									\longleftrightarrow	\longleftrightarrow
		換算係数の評価			\longleftrightarrow					\longleftrightarrow		\longleftrightarrow
測定システム			\longleftrightarrow	\longleftrightarrow			\longleftrightarrow					

3.3 未臨界度測定技術の開発成果

開発したファインマン- α 法及びミハルゾ法による未臨界度測定技術の性能を整理して表 3-2 に示す。両手法の測定性能は、表 2-1 で設定した目標性能を満足しており、高速炉再処理施設の未臨界度モニターとして高い適用性を有する測定技術を開発することに成功した。

ミハルゾ法とファインマン- α 法は、共に炉雑音解析に基づく手法であるが、着目している炉物理量（ミハルゾ法の場合は増倍前後の中性子数、ファインマン- α 法の場合は中性子の時間減衰率）が異なることにより特性は大きく異なる。一方、ハードウェアの面では、本研究で開発した時間相関解析手法を利用したミハルゾ法の測定システムは、ファインマン- α 法の測定システムと大部分が共通しているため、ミハルゾ法の測定システムを構成すれば、そのままの装置でファインマン- α 法の測定が可能であり、1つの測定システムによって、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が構築できる。

表 3-2 に関する補足説明を各手法の相違点や本研究を開始するきっかけとなった日米共同臨界実験の結果との比較を交えて以下に述べる。詳細については付録 1～付録 13 に記す。

(1) 実効増倍率の測定範囲と応答時間

ファインマン- α 法とミハルゾ法では、ミハルゾ法の方が低い実効増倍率をより短い応答時間で測定することができる。これは、直接の測定量（以下、未臨界度評価量と称する）を求めるために、ファインマン- α 法では、統計量である Y 値を理論曲線にフィッティングする必要があるのに対し、ミハルゾ法では、同じく統計量である CR 値を単純平均するだけであるためである。さらに、ファインマン- α 法では、測定時間が短く統計精度が十分でない場合には、Y 値が本来とるべき曲線から歪み、フィッティングで求めた評価量が大きく真値から外れることがある。その際、フィッティング誤差は真値からのずれを反映しない過小な値をとるため、正確な評価を期するには、統計誤差の確認だけでなく未臨界度評価量が測定時間に対して安定していることを確認すべきである（付録 1 参照）。なお、表 3-2 の誤差は真値からのずれを考慮したものである。一方、ミハルゾ法では、統計誤差は真値からのずれを反映しており、統計誤差をそのまま誤差として考えても良い（付録 2 参照）。

また、両手法に共通することであるが、応答時間は測定体系に固有の要因（実効増倍率、検出効率、即発中性子寿命）に依存している。例えば、DCA 体系に比べて再処理施設における溶液燃料体系では、体系が小さいために検出効率が高く、また、即発中性子寿命も短いため、応答時間は 50 分の 1 程度に短縮され、DCA の体系において 10 分で測定できれば、再処理施設のような溶液燃料体系では約 10 秒で測定できると推測される（付録 3 参照）。

(2) 適応範囲の拡張

① 変動体系への適用について

本研究では、実効増倍率で $2\% \Delta K/K/\text{min}$ 、中性子束レベルで $2 \text{ 倍}/\text{min}$ に達する場合でも測定できることを確認している（付録 4 及び付録 5 参照）。

② 中性子バックグラウンドの影響について

日米共同臨界実験で確認されたミハルゾ法では、中性子バックグラウンドの影響を補正するために中性子バックグラウンドの元である固有中性子源強度を別途評価する必要があったが、本研究により開発した時間相関解析を利用したミハルゾ法では、固有中性子源強度が Cf 中性子源の 10 倍になる場合でも、その影響は限定的であり、補正を必要としない（付録 6 参照）。模擬計算による評価では固有中性子源強度が Cf 中性子源の 100 倍になる場合にでも測定できることが確認されている。応答時間は、固有中性子源強度が Cf 中性子源の 10 倍になる場合で、固有中性子源強度が無視できる場合に比べて、約 4 倍、100 倍になる場合で約 10 倍になる。

③ 換算係数の特性について

ファインマン- α 法における換算係数では、即発中性子寿命が支配的な要因であるが、即発中性子寿命は中性子スペクトルや中性子吸収断面積に主に依存する。一方、中性子検出器の配置には依存しにくいいため、中性子検出器と測定対象の位置関係が大きく変化する場合にファインマン- α 法が有効である。

ミハルゾ法における換算係数では、中性子インポートランス比が支配的な要因である。中性子インポートランス比は、体系内で発生した中性子に対する検出しやすさと、Cf 線源検出器からの中性子に対する検出しやすさの比であり、体系と検出器の位置関係が変化しにくいことが未臨界度を正確に評価するために必要な条件となる。一方、ファインマン- α 法とは逆に、中性子スペクトルや中性子吸収断面積には依存しにくいいため、測定対象の組成や物質が大きく変化する場合にミハルゾ法が有効である。

(3) 未臨界度測定システム

未臨界度測定システムは、検出器、信号処理装置、データ収集装置、データ解析装置の4種類の装置で構成される。本研究で開発した未臨界度測定技術（ファインマン- α 法及びミハルゾ法）に基づく未臨界度モニターの構成を図 3-2 に示す。各構成部分についての特徴及び注意点を以下に述べる。

① 検出器（Cf線源検出器（ミハルゾ法のみ（付録 1 1 参照））、中性子検出器）

未臨界度の測定精度は中性子検出器の効率に大きく依存しており、可能な限り高い効率の検出器を使用することが望ましい。なお、中性子の代わりに γ 線を測定しても未臨界度を測定することが可能である[64]。

② 信号処理装置（高圧電源、増幅器、波高弁別器）

不感時間が無視できない場合は 30%まで正確に補正できるが、統計精度の悪化につながるため、できるだけ不感時間の短い測定システムが望ましい。

③ データ収集装置（マルチチャンネルスケーラー(MCS)）

本研究開発で着目した未臨界度測定技術（ミハルゾ法及びファインマン- α 法）ではデータ収集装置としてマルチチャンネルスケーラー(MCS)を使用する。ファインマン- α 法では1系統、ミハルゾ法では、2系統以上の MCS を使用する。

本研究開発で使用した MCS（LABORATORY EQUIPMENT 社製の NT-2400M）は、 $10\mu\text{sec}$ 以上の時間幅設定で連続してデータを収集できる性能を有し、モニターシステムに適している。

MCS の 1ch の時間幅設定 (ΔT)は、即発中性子減衰定数 (α 値) に応じてデータ解析上の最適値があり、DCA における経験では、 $\Delta T(\mu\text{sec}) \approx 70,000 / \alpha$ が最適である。 α 値は、中性子スペクトルが硬いほど、あるいは K_{eff} が小さいほど大きな値をとるため、中性子の減速が十分でない体系では、 ΔT を $10\mu\text{sec}$ より小さく設定する必要がある。

なお、検出器パルスが少ない場合は、データ収集装置に MCS ではなくパルス時系列直接測定装置（付録 1 2 参照）を利用した方がデータ処理量を低減できる。

④ データ解析装置（パーソナルコンピュータ）

データ収集装置の制御及び収集データを解析し、結果を表示する。

解析内容は、計数の分散、平均の算出による Y 値及び CR 値等の評価、Y 値の最小 2 乗フィッティングによる α 値の評価、CR 値や α 値の K_{eff} への換算、及び解析結果の表示である。

表 3-2 未臨界度測定技術の性能

項目		ファインマン- α 法	ミハルゾ法 (時間相関解析手法)
① 測定範囲と応答時間	測定範囲	0.4~0.99 但し、測定時間 10 分以内とした場合 (図 3-1)	0.4~0.99 但し、測定時間 10 分以内とした場合 (図 3-1)
	応答時間	$K_{\text{eff}} 0.95 \pm 0.003$ を 6 分 $K_{\text{eff}} 0.90 \pm 0.04$ を 1 分 $K_{\text{eff}} 0.80 \pm 0.04$ を 2 分 $K_{\text{eff}} 0.70 \pm 0.10$ を 8 分	$K_{\text{eff}} 0.95 \pm 0.003$ を 4 分 $K_{\text{eff}} 0.90 \pm 0.04$ を 20 秒 $K_{\text{eff}} 0.80 \pm 0.04$ を 20 秒 $K_{\text{eff}} 0.70 \pm 0.10$ を 1 分
② 適用範囲の拡張	体系の変動	3 種類のデータ処理法によって依存性を除去できる。(付録 4 参照)	2 種類のデータ処理法によって依存性を除去できる。(付録 5 参照)
	固有中性子源	直接的な影響はないが、検出器の計数率が高くなることにより不感時間の影響を受け、評価量 Y 値が負側にずれる。 ずれ分を正側にシフトすることによって従来の評価法が適用できる。	$K_{\text{eff}} 0.9$ 以上では、評価値自体には影響はないが、統計精度に影響がある。 $K_{\text{eff}} 0.9$ 以下では、評価値と統計精度の両方に影響が現れる。 K_{eff} が低いほど影響が大きくなり、実効増倍率を過小に評価する。(付録 6 参照) 不感時間の影響を受けるが、データ処理の工夫によって補正できる。 (付録 7 参照)
	換算係数の評価	即発中性子寿命が重要であり、モンテカルロ法に基づく中性子寿命計算コードや模擬計算コードによって評価できる。(付録 8 参照)	中性子インポートランス比が重要であり、直接あるいは間接的に計算によって評価できる。 (付録 9 参照)
	及び特性	即発中性子寿命は中性子スペクトル及び吸収断面積に依存する。 検出器配置には依存しにくい。	検出器の配置がポイントとなる。 (付録 10 参照)

(次項につづく)

表 3-2 未臨界度測定技術の性能 (つづき)

項目	ファインマン- α 法	ミハルゾ法 (時間相関解析手法)
③ 測定システム	装置と費用 中性子検出器 1ヶ 検出器信号処理機器 (増幅器等 1系統) データ収集装置: (マルチチャンネル scaler (MCS) 1系統) データ処理装置 (パーソナルコンピュータ 1台) ハードウェア費用概算 200万円	左記に加えて、Cf線源検出器が1ヶ、検出器信号処理機器とデータ収集装置は2系統必要。 ハードウェア費用概算 500万円
	性能	オンライン測定可能 (データ収集と解析を並行して自動的に実施) メンテナンス不要 (補給不要、動力部なし)

表 3-3 変動体系に適用するためのデータ処理法

手法	概要	適用範囲と結果の精度
A. 階差フィルター適用法	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フィルターをY値算出時の統計処理に適用する。	変動の適用範囲が広いが、データ分割法に比べると結果の統計精度が約2倍になる。
B. データ分割法	対象データ全体を統計処理して1つのY値を算出するのではなく、変動の小さい時間範囲ごとにY値を算出し、その平均値より最終的なY値を評価する。	結果の統計精度は最も優れているが、測定条件に応じてデータ分割数を調整する必要がある。変動の適用範囲は、3手法の中では最も狭い。
C. パラメータ追加法	Y値から α 値を求める際のフィッティング理論式に1次の補正項を追加する。	変動の適用範囲が広く、適用も容易であるが、データ分割法に比べると結果の統計精度が約4倍となる。フィッティングパラメータの設定に調整が必要。

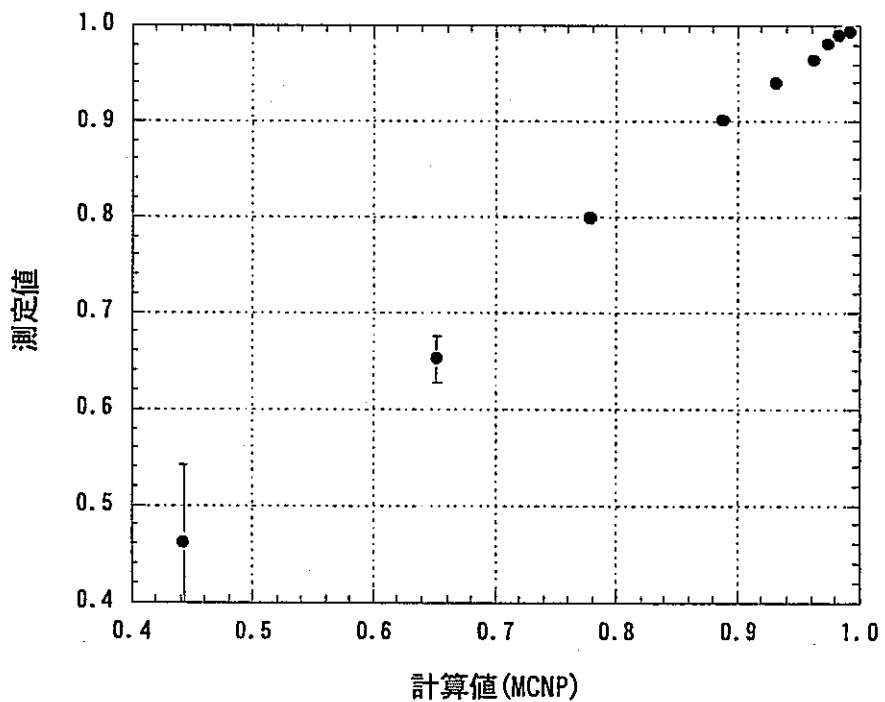
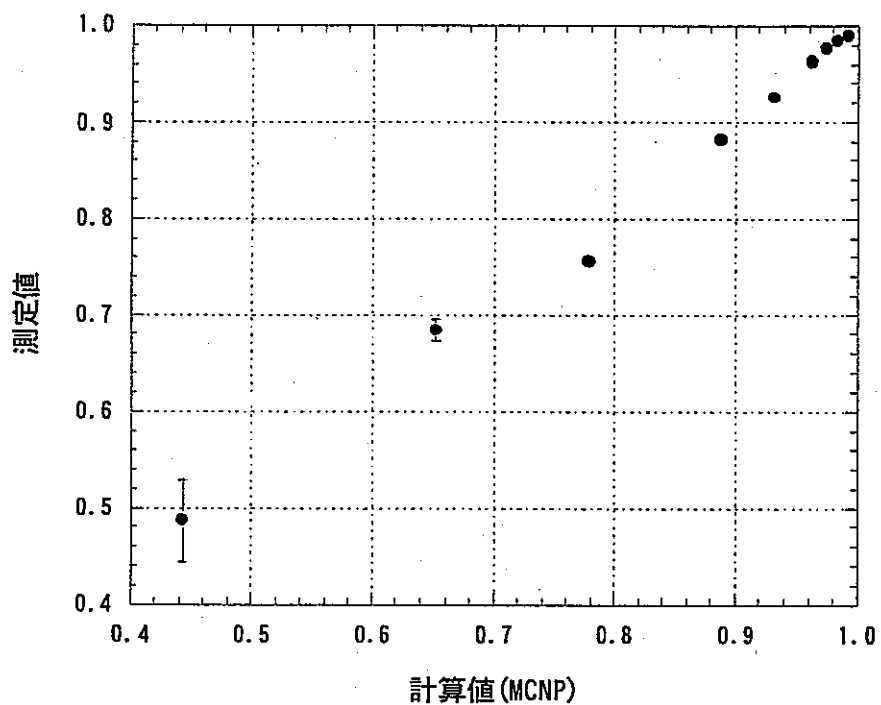


図 3-1 実効増倍率測定結果 (上図：ファインマン- α 法、下図：ミハルゾ法)

〔 検出器は 2"φ×50cm の He-3 検出器(効率 200cps/nv) 2 本を 1 系統にまとめて使用
換算係数は、模擬計算コードを使用した間接評価手法によって求めた値を使用 〕

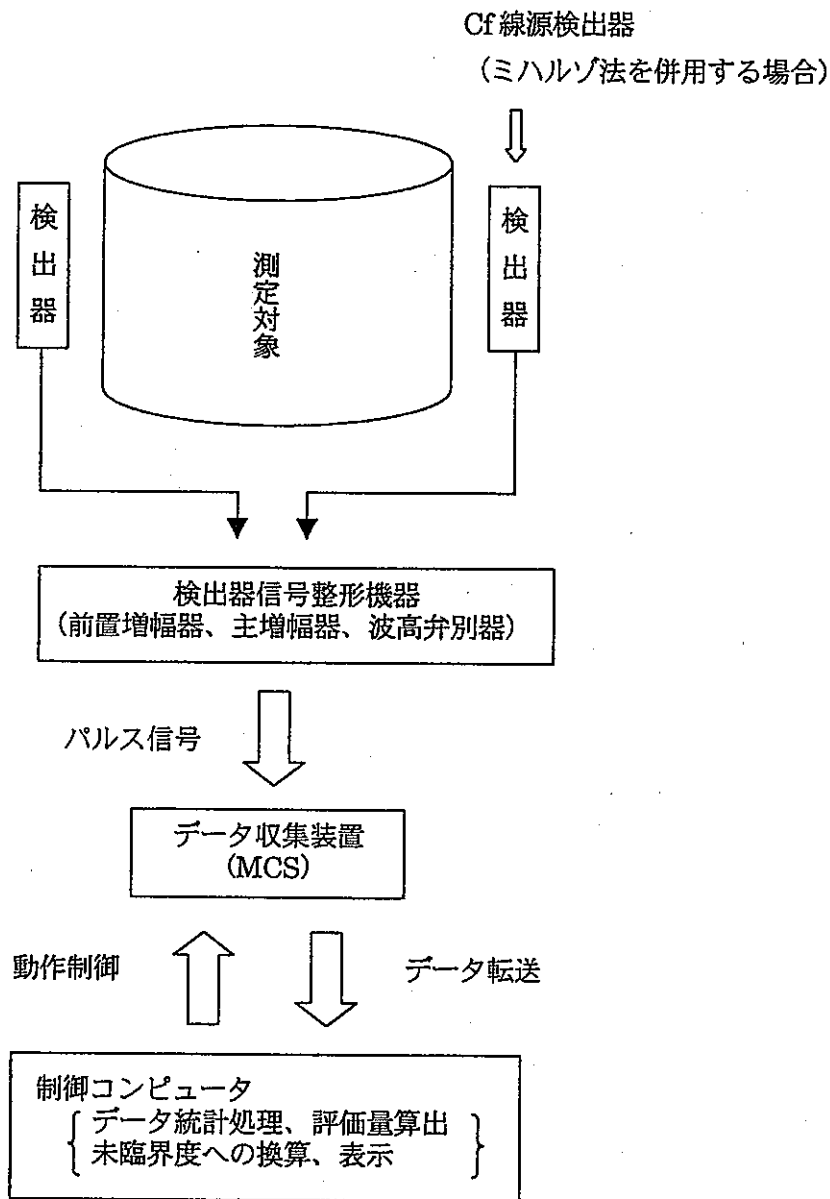


図 3-2 未臨界度モニターシステムの概要

3.4 実用化への課題

開発した未臨界度測定技術は、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。

その他の課題としては、以下のような項目がある。未臨界度評価量の測定上の課題（主にハードウェアの課題）と未臨界度評価量を未臨界度に換算する際の課題（ソフトウェアの課題）に分けて述べる。

(1) 未臨界度評価量の測定上の課題

① Cf線源検出器

ミハルゾ法で使用する Cf線源検出器（Cf-252を内蔵した電離箱）は、放射線障害防止法の規制では密封された放射性同位元素として扱われる。密封性能については、本研究で使用した検出器は、DCAの限定された使用環境において認められたものであるため、一般的な環境で使用されることを考慮すると、形状をより単純化する必要がある。なお、Cf-252の強度が放射線障害防止法の規制対象外の強度 3.7MBq未満であっても応答時間が満足できるものであるならば十分実用に供するため、密封性能が認められれば利用性が格段に向上する。

Cf線源自体は200万円程度で日本アイソトープ協会から入手可能で、検出器本体の製作についても特殊な技術は不要であるが、Cf線源の検出器本体への密封作業については、現段階では国内に商業ベースで実施できる機関がない。ただし、1997年にミハルゾ法の提唱者である米国ORNLのMihalczoから、20,000ドル程度で販売するとの申し出を受けたことがあるが、その場合でも密封性能の確認が必要と考えられる。

② 検出システム

中性子束レベルが高い場合は、不感時間の影響が問題になるが、計数損失率が30%までであれば正確に補正することができる。

計数損失率が補正範囲を超える場合は、不感時間の影響を低減することが必要になる。検出効率を低下させることが最も簡単な方法であるが、検出効率の低下は統計精度の悪化につながるため、不感時間の影響が大きくなる範囲

で検出効率の良い検出システムを選択することが必要である。不感時間が短い点では、シンチレーション検出器を使用した検出システムが最適であり、Mihalczko も使用実績を多数報告している[48][51]。ただし、検出効率の点では、He-3 検出器等の比例検出器の方が優れているため、測定環境に応じて最適な測定システムを選択する。

一方、Cf 線源検出器についても Cf の線源強度が高い場合 (30MBq 以上) は、核分裂信号の発生率が 10^6 回/sec 以上になるため、パルス信号として処理する場合には不感時間が μ sec オーダー以下の測定システムが必要となる。もっとも、本研究で開発した時間相関解析によるミハルゾ法では、必ずしも強い線源を必要とせず、測定精度に応じて最小限の線源強度を選択すればよい (付録 6 参照)。

③ γ 線に対する対策

γ 線レベルは、核燃料サイクル開発機構東海事業所で計画中の高速炉燃料を再処理するリサイクル機器試験施設 (RETF) に対する簡易評価によると装置近傍で 100R/h にも達する場合もある。一方、中性子検出器として広く利用されている比例計数管は照射線量率が 1R/h を越える場合には、 γ 線によるパルス信号のパイルアップにより中性子によるパルスを検出することが困難になるため、鉛で γ 線を遮へいする等の対策が必要となる。

なお、中性子を検出しない NaI シンチレーター等で γ 線のみによる測定を実施することも可能である[49][64]が、高い γ 線エリアにおける測定については例がなく、確認が必要である。

④ データ収集装置

(i) 基本性能の向上

MCS の 1ch に対する時間幅設定 (ΔT) は、即発中性子減衰定数 (α 値) に応じて最適値があり、DCA における経験では、 $\Delta T(\mu \text{ sec}) \approx 70,000 / \alpha$ が最適である。 α 値は、中性子スペクトルが硬いほど、あるいは K_{eff} が小さいほど大きな値をとるため、中性子の減速が十分でない体系では、 ΔT を $10 \mu \text{ sec}$ より小さく設定する必要性が生じると考えられる。しかしながら、現状の MCS の性能では、時間幅を $10 \mu \text{ sec}$ 以下に設定して連続的にデータを収集することができないため、装置の改良が必要となる。

(ii) オンライン化

本研究で使用した測定機器でも、制御プログラムを整備すれば容易にオンライン測定システムとなる。ただし、データ処理におけるいくつかのパラメ

一夕には、 α 値や変動の程度に応じた最適値が存在するため、最適値を自動的に設定するためのシステムを開発する必要がある。

(2) 未臨界度評価量を未臨界度に換算する際の課題

未臨界度評価量から未臨界度を求めるためには換算係数が必要である。

すなわち、未臨界度評価量 (α 値や CR 値)、換算係数及び未臨界度 ρ の関係は、

ファインマン- α 法の場合、

$$\rho = \Lambda \cdot \alpha - \beta \quad (3-1)$$

$$\approx \Lambda \cdot \alpha \quad (\rho \gg \beta) \quad (3-2)$$

ミハルゾ法の場合、

$$\rho = \frac{C_1 \cdot CR - \beta}{1 + C_2 \cdot CR} \quad (3-3)$$

$$\approx C_1 \cdot CR \quad (\rho \gg \beta, C_2 \cdot CR \ll 1) \quad (3-4)$$

と表され、近似的に未臨界度は未臨界度評価量に比例し、その比例係数が換算係数に相当する。ここで、

Λ : 中性子生成時間 (= 即発中性子寿命 l / K_{eff})

β : 遅発中性子割合

α : ファインマン- α 法における未臨界度評価量

CR : ミハルゾ法における未臨界度評価量

ρ : 未臨界度

である。

上記の換算係数は一般に一旦体系が定まれば大きく変化するものではない。例えば、DCA において、重水水位を 160cm から 40cm まで変化させても (実効増倍率 0.99 から 0.4 への変化に相当)、換算係数の変化は 20%程度である。

しかしながら、体系内の燃料の密度や分布が複雑に変化するような場合は、換算係数が大きく変化することも考えられる。そのような場合には未臨界度評価量を正確に測定できたとしても、使用する換算係数が定まらず、未臨界度のある範囲でしか特定することができない。上述の関係式で明らかのように、例えば、

換算係数を2倍大きく評価すると、未臨界度も2倍大きく評価することになる。

未臨界度ではなく実効増倍率で考えた場合は、換算係数の評価精度と実効増倍率のずれの関係は、実効増倍率によって異なる。例として、真値に対して1.2倍から5倍過大に評価した換算係数を用いた場合の実効増倍率評価結果の真値からのずれを図3-3に示す。

実効増倍率測定結果のずれは実効増倍率が0.5から0.8の間で最大となり、換算係数が真値の1.2倍の場合は、実効増倍率のずれは最大で0.05であるが、2倍の場合は最大0.17、5倍の場合には最大0.38にも達する。換算係数を真値の2倍以内に評価できない場合は、 $K_{eff} 0.80$ と $K_{eff} 0.95$ の区別が不可能になる。

以上のように、未臨界度の評価においては、換算係数の評価精度が極めて重要であり、想定される変化に対してその変動範囲をあらかじめ把握し、未臨界度の測定可能性を確認しておく必要がある。

なお、前節で述べたように、ファインマン- α 法の場合の換算係数は、中性子のスペクトルとマクロ吸収断面積に主に依存し、ミハルゾ法の場合は、検出器配置に主に依存するため、体系の状況に応じて両手法を使い分ける、両手法による複合的な評価を実施することなどによって、1つの手法だけで評価する場合に比べて信頼性を向上させることができる。

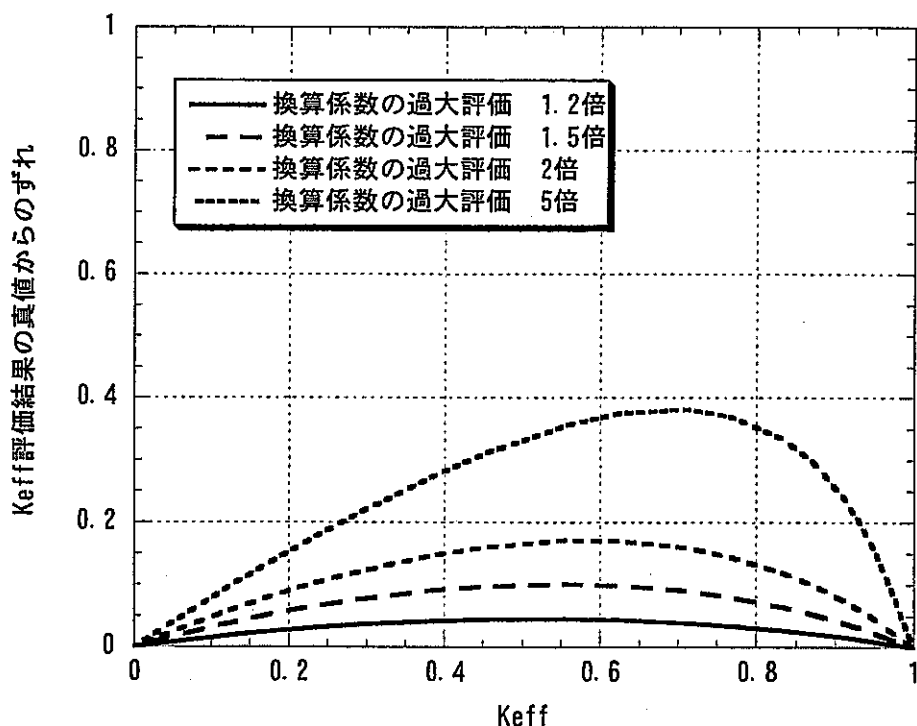


図3-3 換算係数の過大評価と実効増倍率評価結果の関係

4. 未臨界度測定技術の実体系への適用性評価

本研究で整備した模擬計算コードは、ファインマン- α 法の α 値やミハルゾ法のCR値という未臨界度評価量に加えて応答時間についての模擬も可能であることが確認されている（付録1 2参照）。応答時間は、換算係数の評価と並んで、実体系への適用可能性を判断する上での重要な基準の1つである。本章では、実体系に対する未臨界度測定技術の適用性評価として、応答時間10分以内での測定可能性を模擬計算コードによって評価した。

4.1 適用性評価の概要

評価対象には、未臨界度測定装置の利用が有効と考えられる核燃料取扱施設として、4種類の施設を採り上げた。ただし、本評価は測定可能性の見通しを得ることを目的とし、体系を厳密には模擬していない。

評価対象の施設は以下の通りである。

- (1) 高速炉燃料再処理施設の連続溶解槽
- (2) 高速炉燃料再処理施設のプルトニウム溶液受槽
- (3) 軽水炉使用済燃料貯蔵プール
- (4) JCOの沈殿槽

(1)及び(2)の設備は、本研究開発の当初から成果の反映先として位置付けている高速炉燃料再処理設備の一部である。(1)の連続溶解槽は、燃料の形状が固体から液体に変化する点で臨界安全管理が難しい設備であり、(2)のプルトニウム溶液受槽は、高濃度のプルトニウムが貯留される点で厳しい臨界安全管理が要求される設備である。

加えて、昨今の情勢を反映した施設として、軽水炉使用済燃料貯蔵プールとJCOの沈殿槽を未臨界度測定技術の適用性評価対象に採り上げた。(3)の軽水炉使用済燃料貯蔵プールは、将来予想される使用済燃料の大量蓄積に備えて貯蔵能力の増強が求められている施設であり、(4)のJCOの沈殿槽は臨界事故を起こした設備で、通常ではありえない体系ではあるが、未臨界度測定装置があれば事故防止に役立てることができたのかを確認するために評価対象に選定した。

評価条件のうち、中性子源強度と検出器配置が評価結果に大きく影響する。中性子源強度については、中性子レベルの低さが測定上の課題と考えられるJCO沈殿槽の体系だけは、体系内の自発核分裂物質の量から算出した値を基に線源強度を設定し、他の体系に

については、計算時間の都合上、実際に想定される線源強度よりも弱い線源強度に設定した。線源強度が弱い方が結果を厳しく評価することになる。検出器については実際に設置可能な場所で、測定上最適と考えられる場所に設置した。ミハルゾ法の場合は検出器配置が評価に大きく影響を与えるため複数の箇所に配置について評価を実施した。

4.2 体系の概要と評価条件

以下に各体系の概要と評価条件を述べる。

(1) 連続溶解槽^[65]

核燃料サイクル開発機構東海事業所で計画中の高速炉燃料を再処理するリサイクル機器試験施設 (RETF) の工程で、せん断された燃料を溶解するための連続溶解槽について模擬計算を実施した。

計算モデルを図 4-1 に示す。溶解槽はらせん構造をしているが、本計算ではらせんを円盤状にモデル化した。寸法は外径 23.5cm、軸長 213.5cm であり、円盤部分 (A-A 断面) と溶解槽部分 (B-B 断面) から構成される。中心軸付近には B_4C 吸収体が設置され、円盤部分は Ti-5Ta 金属が使用されている。外部境界条件は真空条件とした。燃料溶液は「もんじゅ」使用済み燃料を想定した硝酸・ウラン・プルトニウム均質溶液とした。溶解槽内の液位は通常運転時の 20% と異常時の 100% (満水) の 2 通りとした。推定実効増倍率は液位 20% の場合は 0.279、100% の場合は 0.587 である。

中性子源と検出器の設定は、ファインマン- α 法の場合は、強度 10 万 n/s (満水時において想定される Pu-240 の存在量から推定すると約 290 万 n/s、Cm を含めるとその 10 倍近くなる) の中性子を燃料全体から発生させ、He-3 中性子検出器 (ガス圧 4atm、直径 4inch、有効長 100cm) を図 4-1 に示すように溶解槽上部 (検出器 A) と溶解槽側面 (液位 20% の場合の液面と検出器上端が等しくなる位置) (検出器 B) の 2 箇所を設置した。なお、直径 4inch の He-3 検出器は一般に市販されていないため、2inch の検出器を 4 本束ねて使用することを想定している。この条件で計数率は 280cps (溶液高さ 100%) となった。

ミハルゾ法の場合には、Cf 線源検出器 (線源強度 10 万 fission/s 相当) を溶解槽下部に設置し、He-3 中性子検出器はファインマン- α 法の場合と同一の配置とした。計数率は 54cps (検出器 A)、880cps (検出器 B) となった。

(2) プルトニウム溶液受槽^[65]

RETF の工程で、抽出試験設備の試験で使用されたプルトニウム溶液を貯蔵するプルトニウム溶液受槽について模擬計算を実施した。

計算モデルを図 4-2 に示す。プルトニウム溶液受槽は中空円筒形であり、プルトニウム溶液は内部厚さ 8cm の二重円筒 (SUS 製、内側厚さ 2.5cm、外側厚さ 3.4cm) 内に充填される。円筒の内側には、中性子吸収材としてカドミウムが、中性子減速材として

厚さ 15cm のポリエチレンが設置されている。本計算の対象領域は半径 200cm、外部境界条件は真空条件とした。燃料は硝酸プルトニウム溶液で、液位は通常時の 100cm とした。推定実効増倍率は 0.554 である。

中性子源と検出器の設定は、ファインマン- α 法の場合は、強度 10 万 n/s (想定される Pu-240 存在量から推定すると約 430 万 n/s) の中性子を燃料全体から発生させ、He-3 中性子検出器(ガス圧 4atm、直径 4inch、有効長 100cm)をプルトニウム溶液受槽側面(検出器 C)に設置した。この条件で計数率は 70cps となった。

ミハルゾ法の場合には、図 4-2 に示すように Cf 線源検出器(線源強度 10 万 fission/s 相当)をプルトニウム溶液受槽側面に、He-3 中性子検出器をプルトニウム溶液とポリエチレンの間(検出器 A)、及びプルトニウム溶液受槽の中央部(検出器 B)に設置した。計数率は 2000cps (検出器 A)、60cps (検出器 B)となった。

(3) 使用済燃料貯蔵プール^[66]

PWR 使用済燃料プールについて模擬計算を実施した。

計算モデルを図 4-3 に示す。燃料貯蔵プールの形状は幅 100cm×奥行き 100cm×高さ 500cm、境界条件は真空とした。使用済燃料ラックは厚さ 2cm のボロン添加ステンレス鋼であり、幅 24cm×高さ 460cm である。

評価対象は、使用済燃料ラック 1 体とした(実効増倍率は 0.623)。これは、ボロン添加ステンレス鋼に隔てられた燃料集合体間を通り抜ける中性子がほとんどないことと、使用済燃料ラック 1 体でも実効増倍率が十分に高く、全体を含めた場合の実効増倍率との差は 13% $\Delta K/K$ 程度であることが、予備計算で判明したためである。

配置ラック内部には 17 ピン×17 ピンの燃料棒(264 本)、制御案内シンプル(24 本)、及び炉内計装案内シンプル(1 本)がピッチ 1.26cm で配置されている。燃料棒は燃料領域(直径 0.819cm)、ギャップ、及び被覆管(厚さ 0.057cm)で構成される。燃料領域の高さは 400cm であり、上下 30cm はボイドとした。燃料組成は 17×17 型 PWR 燃料に対して ORIGEN コードにより燃焼計算を実施し、平均取り出し燃焼度 49.0GWd/t の燃料を 10 年貯蔵した状態を基準とした。燃料の核種は、U-235,U-238,Pu-239, Pu-240,Pu-241,Pu-242 の 6 種類とし、その他の MA 及び FP は考慮に入れていない。制御棒案内シンプル、及び炉内計装案内シンプルの被覆管の内部は水とした。

中性子源と検出器の設定は、ファインマン- α 法の場合は、強度 1 万 n/s (想定される Pu-240 存在量から推定すると約 150 万 n/s、Cm を含めるとその 10 倍近くなる) の中性子を燃料全体から発生させ、He-3 中性子検出器(ガス圧 4atm、直径 4inch、有効

長 100cm)を燃料貯蔵ラックの側面(検出器 A)に設置した。この条件で計数率は 280cps となった。

ミハルゾ法の場合には、図 4-3 に示すように Cf 線源検出器(線源強度 1 万 fission/s 相当)を燃料貯蔵ラック側面に、He-3 中性子検出器を燃料ラックの側面に Cf 線源検出器から見て対面(検出器 A)と左側面(検出器 B)の 2 箇所配置した。計数率は 470cps (検出器 A)、890cps (検出器 B)となった。

(4) JCO 沈殿槽^{[67][68]}

臨界事故を起こした JCO の沈殿槽について、臨界到達前の未臨界状態について模擬計算を実施した。

沈殿槽は図 4-4 に示すように底部の形状と冷却水の高さを考慮してモデル化した。外部境界条件は真空条件とした。燃料溶液は硝酸-ウラン均質溶液であり、ウラン濃度は 370gU/l、硝酸濃度は 0.5N、溶液温度を 25 度とした。燃料溶液投入量は 5 バッチ(32.4 リットル)、6 バッチ(38.88 リットル)の 2 ケースとした。実効増倍率は 5 バッチの場合は 0.905、6 バッチの場合は 0.983 である。

中性子源と検出器の設定は、ファインマン- α 法の場合は溶液に含まれる U-238 からの自発核分裂中性子発生数に相当する 130n/s (5 バッチ)、160n/s (6 バッチ)の中性子を燃料全体から発生させ、He-3 中性子検出器(ガス圧 4atm、直径 4inch、有効長 50cm)を沈殿槽の側面と側面から 1m 離れた位置に設置した。この条件で計数率は 2cps (5 バッチ)、10cps (6 バッチ)、0.5cps (6 バッチで側部から 1m 離れた位置)となった。

ミハルゾ法の場合には、図 4-4 に示すように、Cf 線源検出器を沈殿槽の側部に、He-3 中性子検出器を Cf 線源検出器の対面(検出器 A)と 90° 方向(検出器 B)の 2 箇所、及び沈殿槽の側面から 1m 離れた位置に設置した。Cf 線源の強度はバッチで異なり、5 万 fission/s (5 バッチ)、1 万 7 千 fission/s (6 バッチ、6 バッチで側部から 1m 離れた位置)で、その場合の計数率は検出器 A の場合で 400cps (5 バッチ)、820cps (6 バッチ)、42cps (6 バッチで側部から 1m 離れた位置)、検出器 A の場合で 520cps (5 バッチ)、900cps (6 バッチ)、49cps (6 バッチで側部から 1m 離れた位置)となった。

4.3 評価結果

各体系について約 10 分相当の測定によって得られる未臨界度評価量 (α 値又は CR 値) の評価結果を以下に述べる。適用可能性の判断においては、表 2-1 に掲げた統計精度で実効増倍率を評価できる場合を適用可能とした。

(1) 連続溶解槽

ファインマン- α 法における Y 値と α 値の計算結果を図 4-5 に示す。液位が満水の場合には、約 4% (K_{eff} 換算では 1% ΔK) の精度で α 値を検出できることが確認でき、別途計算で直接評価した中性子寿命を用いて実効増倍率に換算した結果も表 2-1 に掲げた基準 $\Delta K \pm 0.1$ 以内に収まっている。液位 20% の場合は、測定時間 10 分では十分な計算精度を得ることができなかつた。この原因は液面高さ 20% 時の実効増倍率が 0.3 以下と極めて低いためであり、通常運転時においては、連続溶解槽に対してはファインマン- α 法の適用は困難であると予想される。

ミハルゾ法における CR 値の計算結果 (満水のケース) を図 4-6 に示す。ファインマン- α 法の場合と同様に液位が満水の場合には、検出器の配置に関わらず、6% (K_{eff} 換算では 3% ΔK) 以内の精度で CR 値を検出できることが確認できるが、液位 20% では、検出器 A を使用した場合は測定時間 10 分では統計的に有意な結果が得られないが、検出器 B を使用した場合には、精度が 16% (K_{eff} 換算では 11% ΔK) で評価することができた。通常運転時においては、ミハルゾ法の適用も容易ではないものの検出器配置を限定すれば測定可能であることが分かつた。

(2) プルトニウム溶液受槽

ファインマン- α 法における Y 値と α 値の計算結果を図 4-7 に示す。約 5% の精度 (K_{eff} 換算では 2% ΔK) で α 値を検出できることが確認でき、ファインマン- α 法はプルトニウム溶液受槽に適用可能であるといえる。

ミハルゾ法における CR 値の計算結果を図 4-8 に示す。検出器 A を使用した場合は、約 3% (K_{eff} 換算では 2% ΔK) の精度で CR 値を検出できることが確認できるが、検出器 B (中性子検出器を Cf 線源から離れた配置) を使用した場合は、統計的に有意な精度が得られず、測定に適さないことが分かつた。検出器の配置を限定すればミハルゾ法も適用可能であるといえる。

(3) 使用済燃料貯蔵プール

ファインマン- α 法におけるY値と α 値の計算結果を図4-9に示す。0.6%程度(K_{eff} 換算では0.2% ΔK)の統計精度(1σ)で α 値を検出できることが確認できる。しかしながら、検出器を燃料貯蔵ラックの側面から遠ざけると、燃料貯蔵ラックの側面での α 値9400sec⁻¹に対し、側面から5cm離れた位置では8100sec⁻¹、側面から10cm離れた位置では5600sec⁻¹のように、燃料貯蔵ラックから離れるにしたがって α 値が減少することが明らかになった。これは、本来検出すべき増倍系の中性子減衰に貯蔵ラック周囲の軽水による中性子減衰の効果が加わるためである。上記3つの α 値の中で最も小さい値(側面に検出器を設置した場合)を、直接評価法(付録8参照)によって求めた換算係数(中性子寿命)を用いて実効増倍率に換算した結果は、実効増倍率を直接計算した結果と0.1 ΔK の差異があり、検出器配置を考慮しない直接評価法では正確に換算係数を評価できないことが分かった。この結果から、燃料貯蔵ラックに対するファインマン- α 法の適用については、評価量の測定は可能ではあるが、換算係数の評価に注意を要することが分かった。

ミハルゾ法におけるCR値の計算結果を図4-10に示す。検出器の配置によらず0.8%程度(K_{eff} 換算では0.3% ΔK)の精度でCR値を検出できることが確認できる。ファインマン- α 法の場合とは異なり、検出器を燃料貯蔵ラックから遠ざけた場合でもファインマン- α 法の場合と異なり評価量CR値に変化は現れなかった。ミハルゾ法は使用済燃料貯蔵プールに適用可能であり、貯蔵ラック周囲の軽水の影響も受けにくいことが確認できた。なお、ミハルゾ法(周波数相関解析に基づく手法)の使用済燃料貯蔵機器への適用については、米国のMihalczらによって、1分以内で5%程度の統計精度でSR値(CR値に相当する量)を測定できることが実測によって確認されている^[69]。

(4) JCO沈殿槽

ファインマン- α 法におけるY値と α 値の計算結果(6バッチのケース)を図4-11に示す。0.8%(K_{eff} 換算では0.1% ΔK 以下)の精度で α 値を検出できることが確認できる。5バッチのケースでは2%の精度で α 値を検出できること、6バッチのケースで検出器の位置を沈殿槽側部から1m離れた場合には、 α 値の検出は可能であるが、十分な精度が得られないという結果が得られた。

体系に近接した検出器配置ではファインマン- α 法が適用可能であるといえる。

ミハルゾ法におけるCR値の計算結果を図4-12に示す。6バッチのケースにおいて、検出器配置に関わらず5%(K_{eff} 換算では0.1% ΔK 以下)の精度でCR値を検出できることが確認できる。前述の3つの体系に比べると実効増倍率が高いため検出器配置の影響(検出器Aを使用した場合と検出器Bを使用した場合の評価量CR値の差)が小さ

い。同様に、5バッチのケースでは、4% (K_{eff} 換算では $0.3\% \Delta K$)、6バッチで検出器の位置を沈殿槽側部から1 m離れたケースでは、約6% (K_{eff} 換算では $0.1\% \Delta K$) の精度でCR値を検出できることが確認できる。

ミハルゾ法では、体系に近接した検出器配置で適用可能なだけでなく、6バッチのケースで検出器を沈殿槽側部から1 m離れた場合でも測定可能である。

以上の結果を表4-1にまとめる。極端に低い実効増倍率の場合や検出効率の低くなる検出器配置を使用した場合を除き、10分という現実的な測定時間で精度よく評価できしており、応答時間の観点からはファインマン- α 法及びミハルゾ法は実体系に適用可能であると判断できる。

表 4-1 実体系への適用性評価結果

適用施設		推定 K_{eff}	ファインマン- α 法		ミハルゾ法	
			α 値の評価精度	評価結果*	CR値の評価精度	評価結果*
連続溶解槽	液位 100% (満水)	0.587	4% (K_{eff} 換算では1% ΔK)	適用可能	11% (K_{eff} 換算では7% ΔK)	適用可能
	液位 20%	0.279	実効増倍率が低く、測定時間 10分では、十分な精度が得 られない。	適用困難	16% (K_{eff} 換算では11% ΔK)	適用可能
プルトニウム溶液受槽		0.554	5% (K_{eff} 換算では2% ΔK)	適用可能	3% (K_{eff} 換算では2% ΔK)	適用可能
使用済み燃料貯蔵プール		0.623	0.6% (K_{eff} 換算では0.2% ΔK) 検出器の位置により値が変 化する(貯蔵ラック周囲の軽 水の影響)。	適用可能	0.8% (K_{eff} 換算では0.3% ΔK)	適用可能
JCO 沈殿槽	5バッチ	0.905	2% (K_{eff} 換算では0.2% ΔK)	適用可能	4% (K_{eff} 換算では0.3% ΔK)	適用可能
	6バッチ	0.983	0.8% (K_{eff} 換算では0.1% ΔK 以下)	適用可能	5% (K_{eff} 換算では0.1% ΔK 以下)	適用可能
	6バッチ (検出器位 置:沈殿槽側 部から1m)	0.983	検出効率が低く、測定時間 10分では、十分な精度が得 られない。	適用困難	6% (K_{eff} 換算では0.1% ΔK)	適用可能

* 10分以内で表 2-1 に示す精度で測定量が得られる場合を適用可能とした。

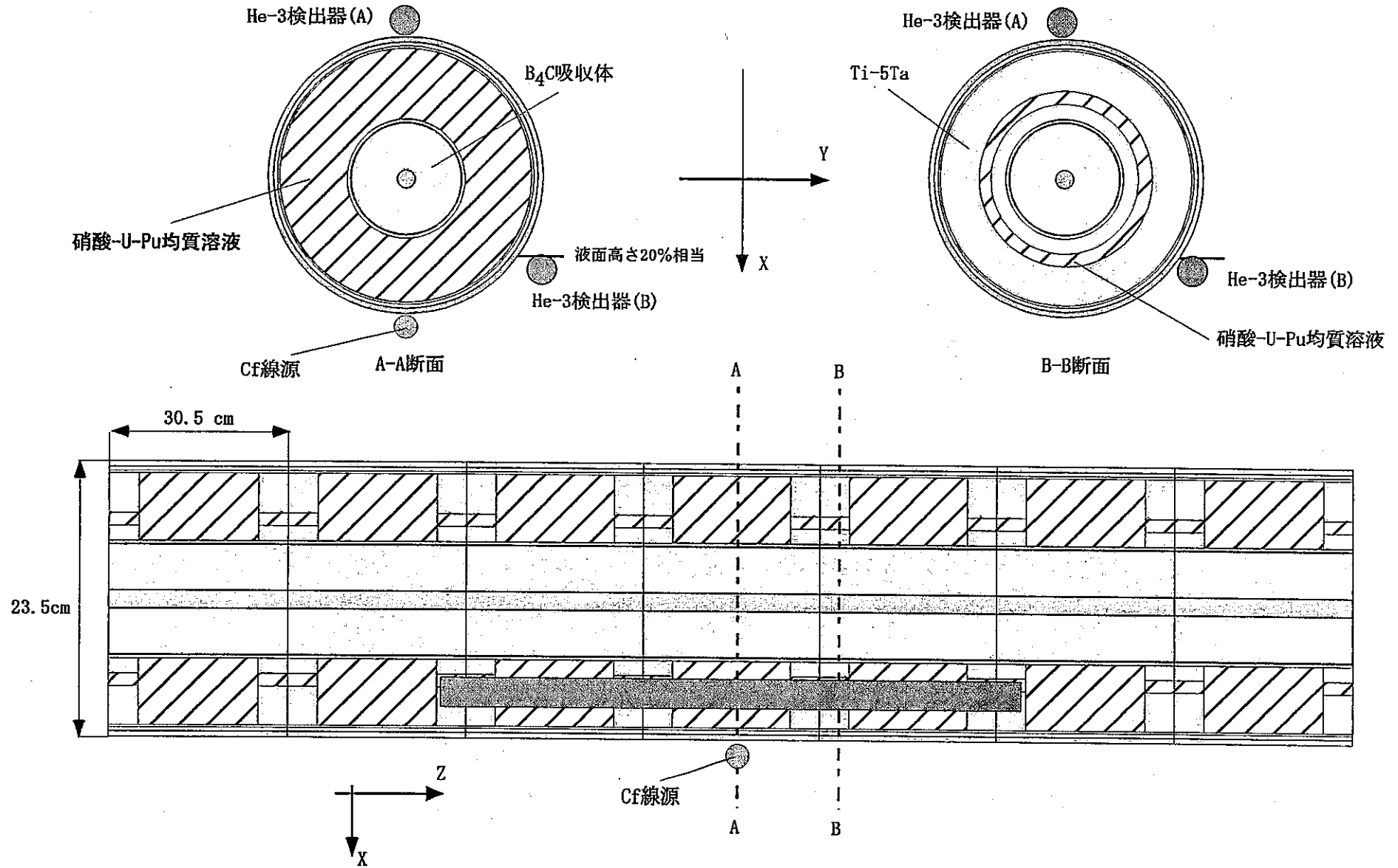


図4-1 連続溶解槽計算モデル

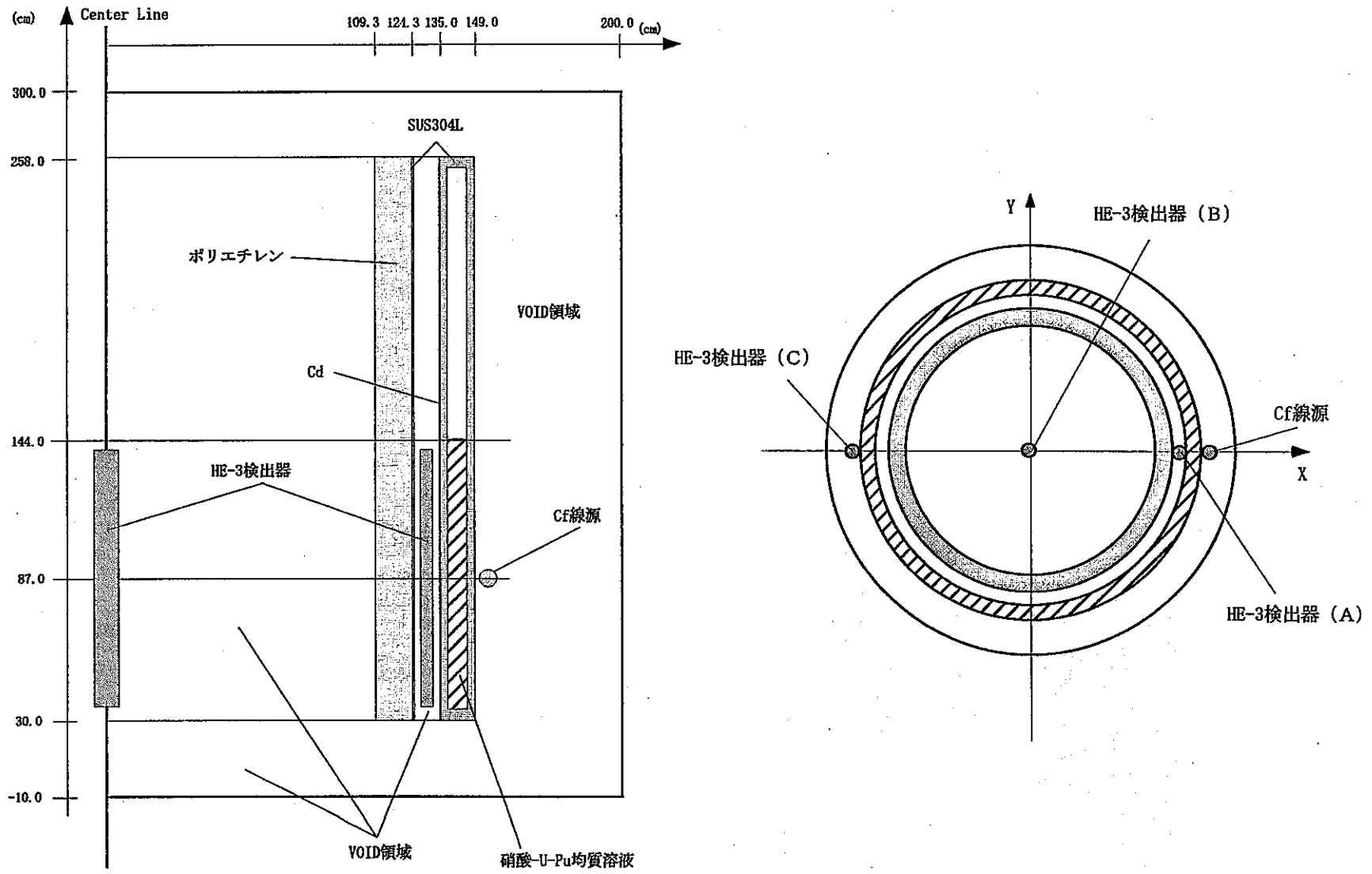
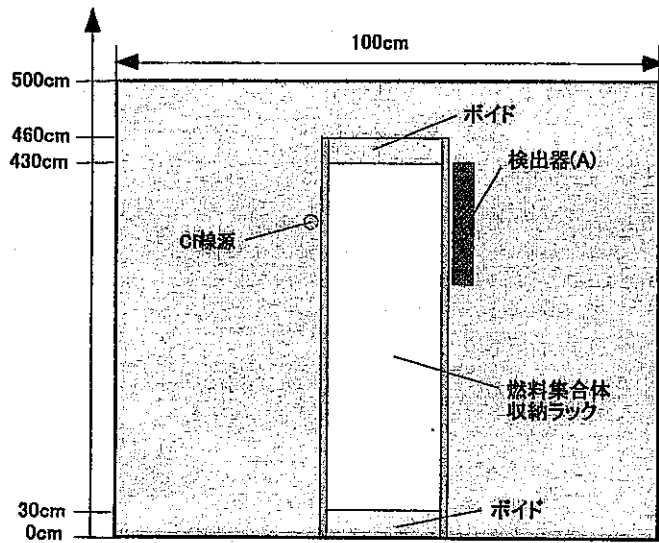
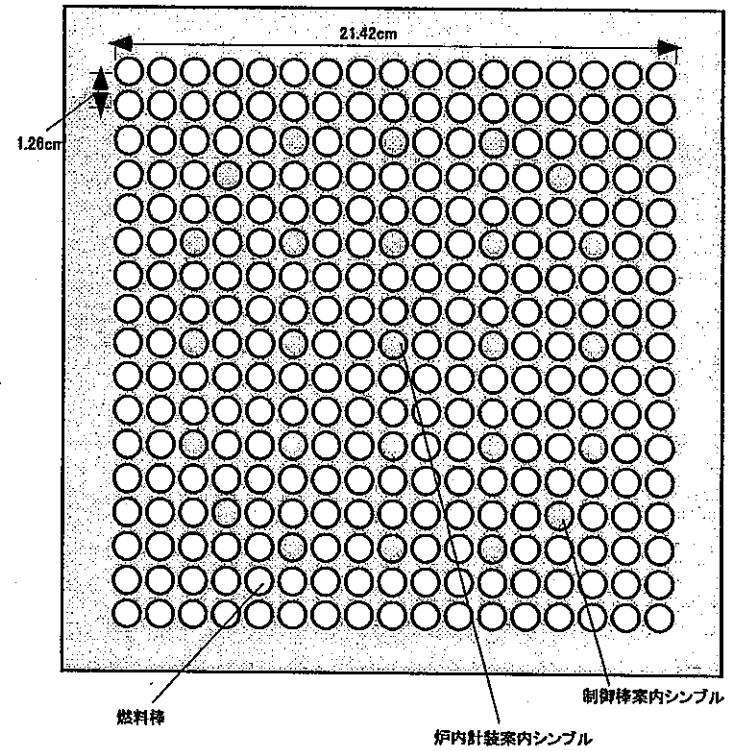


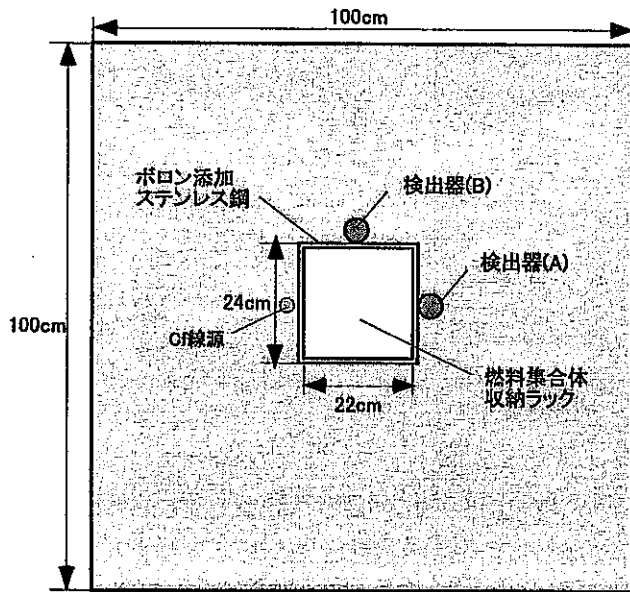
図4-2 プルトニウム溶液受槽計算モデル



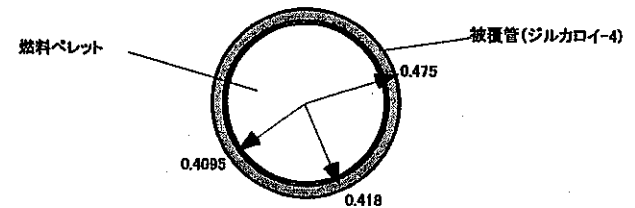
(貯蔵プール側面図)



(燃料集合体断面図)



(貯蔵プール断面図)



(燃料棒断面図)

図4-3 使用済燃料貯蔵プール計算モデル

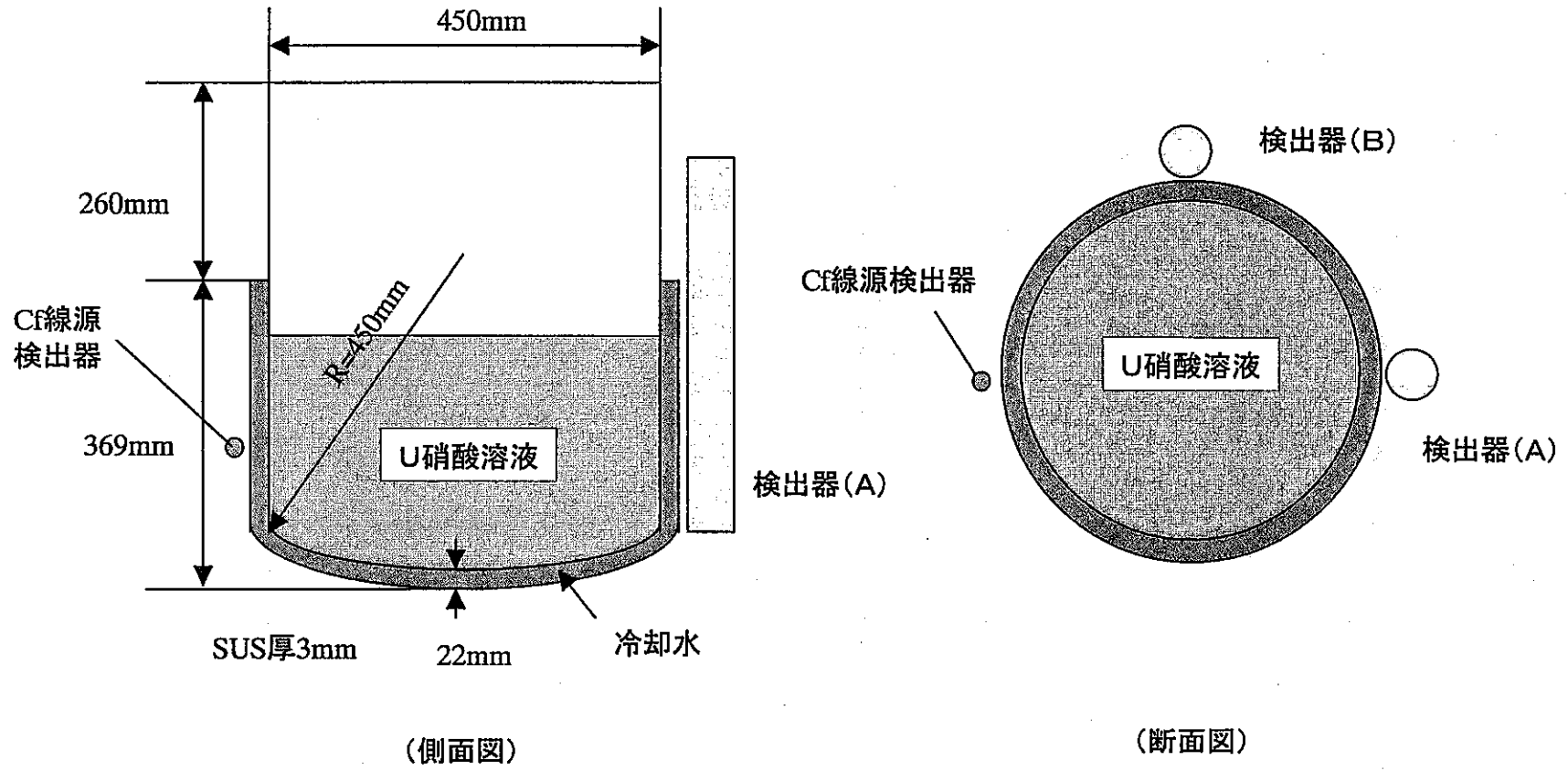


図4-4 JCO沈殿槽計算モデル

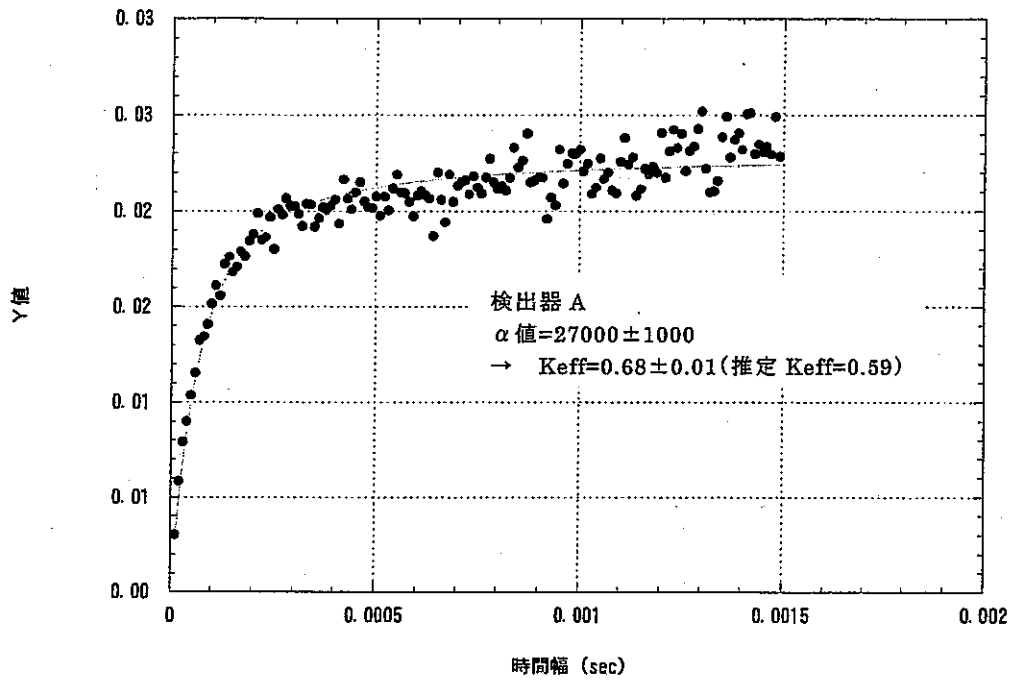


図4-5 ファインマン- α 法の模擬計算結果 (連続溶解槽：液位満水)
(K_{eff} の換算には直接評価による換算係数を使用)

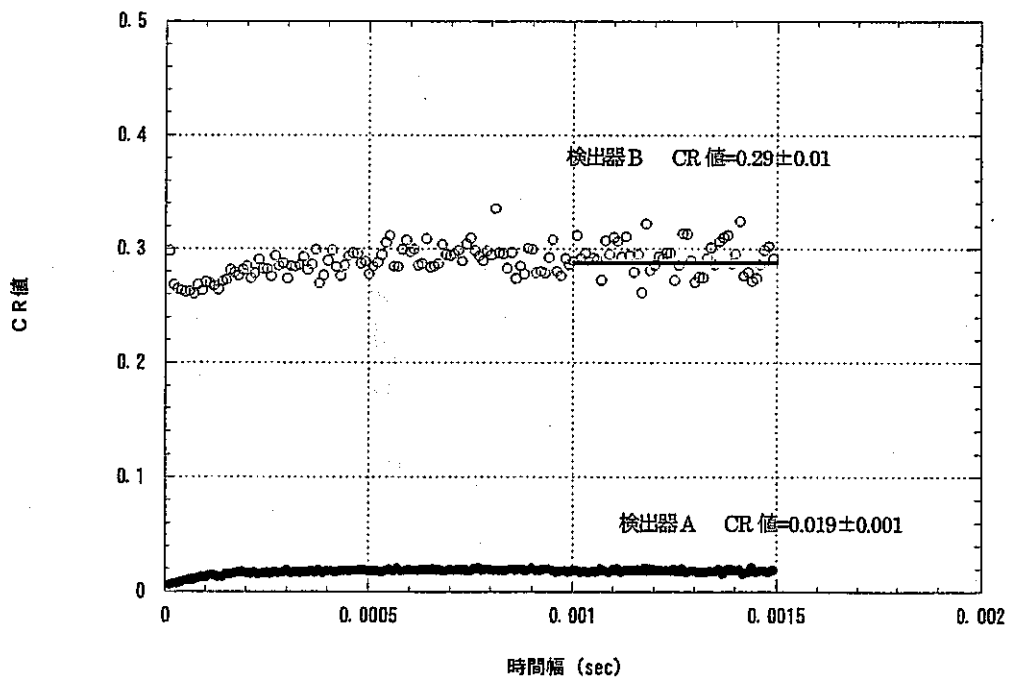


図4-6 ミハルゾ法の模擬計算結果 (連続溶解槽：液位満水)

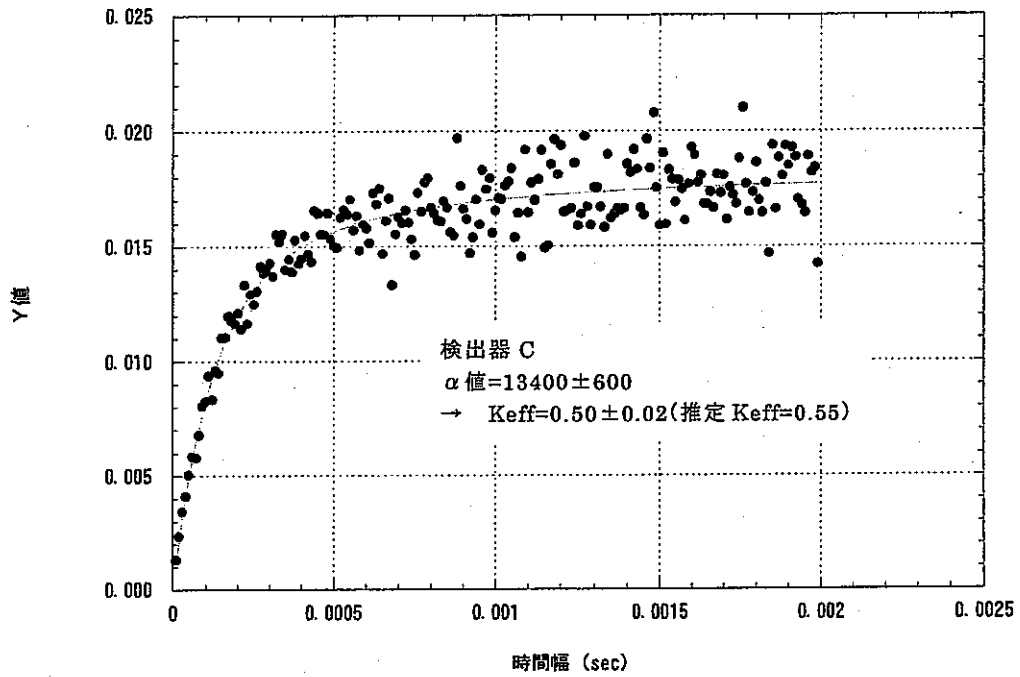


図4-7 ファインマン- α 法の模擬計算結果 (プルトニウム溶液受槽)
 (K_{eff} の換算には直接評価による換算係数を使用)

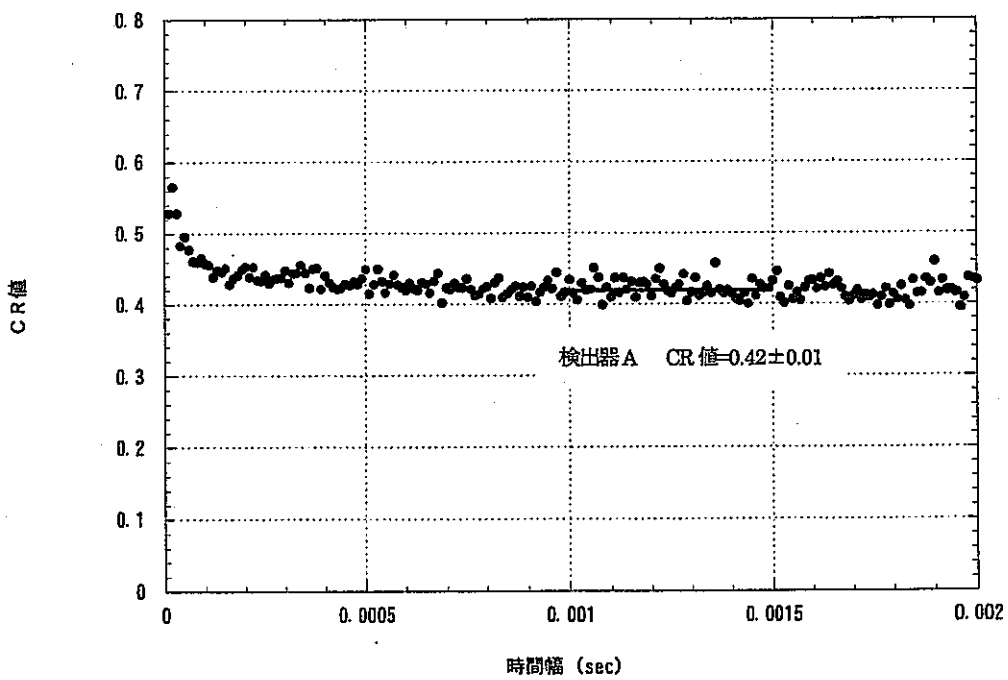


図4-8 ミハルソ法の模擬計算結果 (プルトニウム溶液受槽)

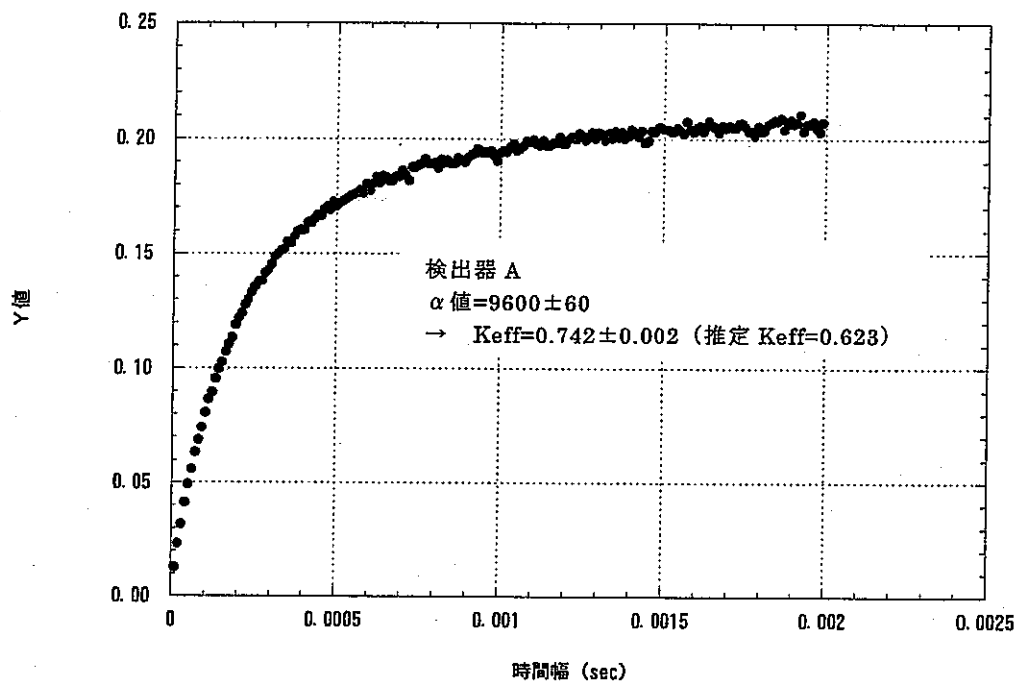


図4-9 ファインマン- α 法の模擬計算結果 (使用済燃料貯蔵プール)
 (K_{eff} の換算には直接評価による換算係数を使用)

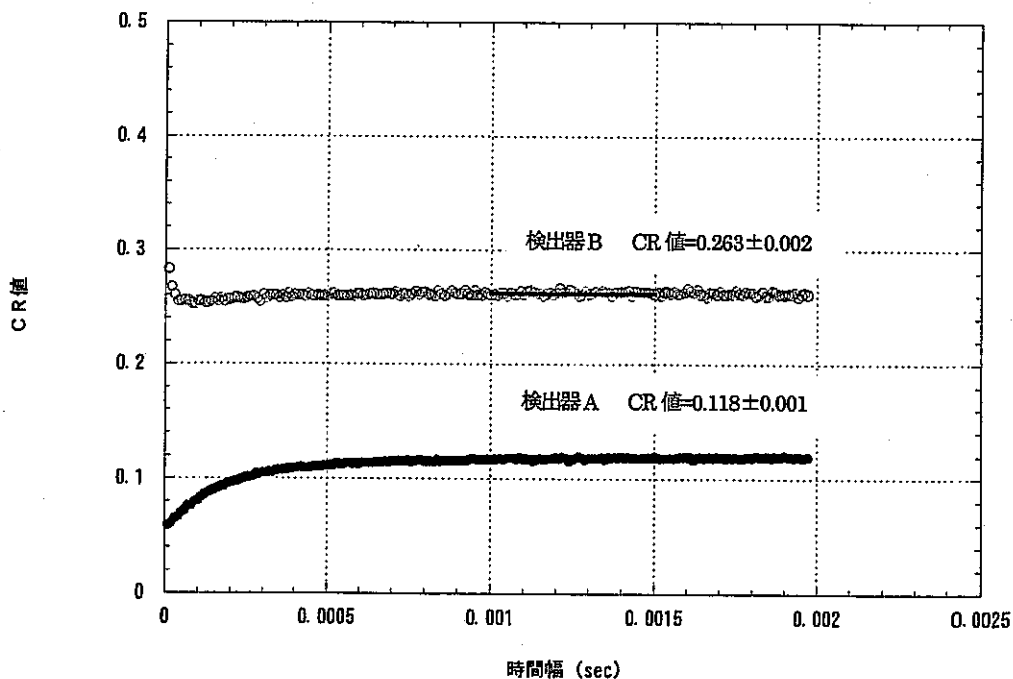


図4-10 ミハルゾ法の模擬計算結果 (使用済燃料貯蔵プール)

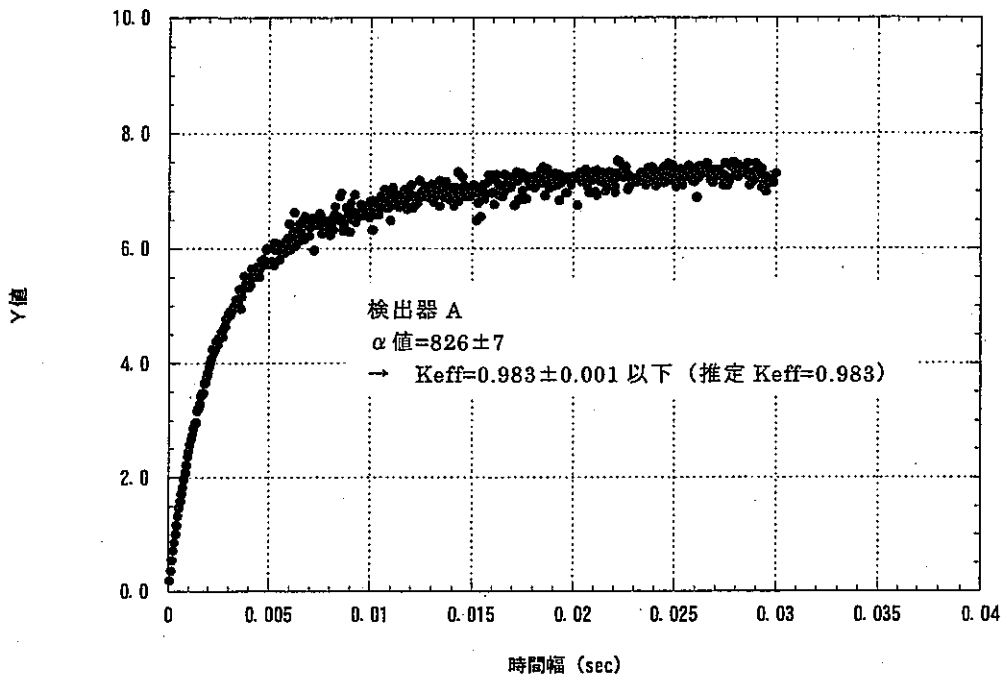


図4-11 ファインマン- α 法の模擬計算結果 (JCO沈殿槽：6バッチ)
 (K_{eff} の換算には直接評価による換算係数を使用)

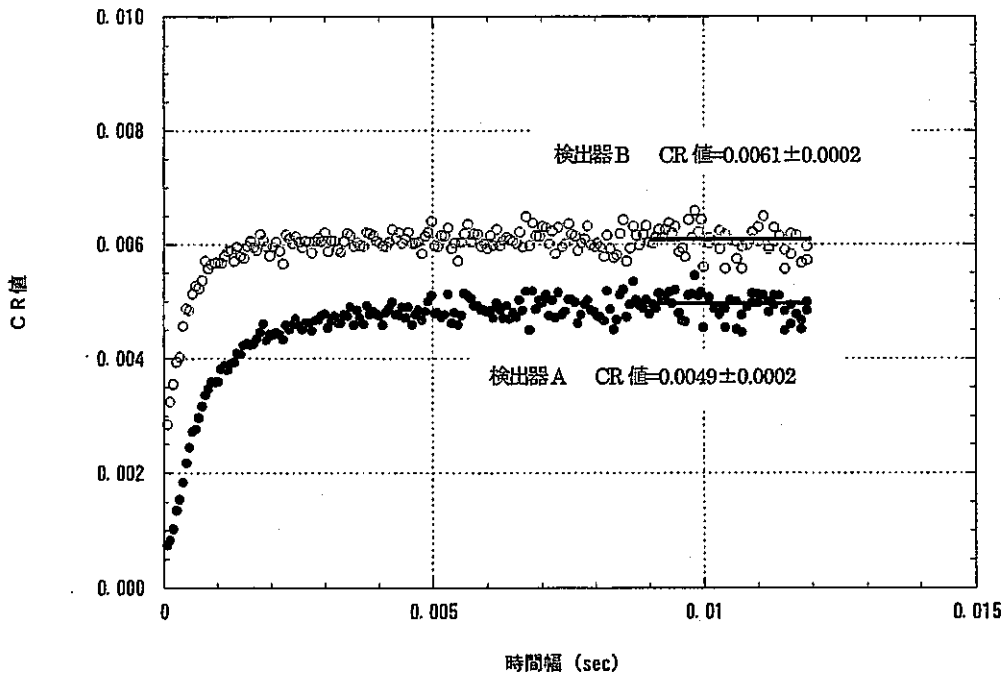


図4-12 ミハルゾ法の模擬計算結果 (JCO沈殿槽：6バッチ)

5. 結言

臨界安全管理の高度化に資するため、核燃料取扱施設の未臨界度モニターに適用可能な未臨界度測定技術の開発を実施した。

適用する未臨界度測定技術には、モニターの使用環境と目標性能からファインマン- α 法とミハルソ法を選定し、DCAを利用して各手法について未臨界度評価量の測定技術と未臨界度評価量を未臨界度に換算する評価技術の開発を実施した。

未臨界度評価量の測定技術の開発では、ファインマン- α 法とミハルソ法について既存技術を基に、応答時間、中性子バックグラウンドの影響、変動体系への適用性について改善を図り、モニターとして実用的な技術を開発することができた。特に、ミハルソ法については相関解析に従来の周波数解析による手法に替えて、ファインマン- α 法と同じ時間解析手法を導入することによって、応答時間や中性子バックグラウンドの影響を著しく改善することに成功した。ファインマン- α 法、ミハルソ法によって、ともに約10分以内の応答時間で実効増倍率0.6~0.95を ± 0.05 の精度で測定できることを確認した。体系の差異を考慮すると、DCAでの応答時間10分は再処理施設での約10秒に相当し、未臨界度モニターとして十分な性能を有するといえる。

未臨界度の評価技術についての開発では、換算係数の特性の把握と評価コードの開発を実施した。換算係数は体系の変化に敏感な量ではないが、あらかじめ変化の程度を正確に把握しておくことが信頼性の高い測定システムには重要である。未臨界度測定の模擬計算コードをモンテカルロ計算コードMCNPに機能を追加することによって作成し、模擬計算結果から換算係数を評価するシステムを開発した。

開発した未臨界度測定技術のうち、データ処理上の基本技術については任意の体系に対して適用できるが、定量的な測定性能は測定対象に依存するため、換算係数の評価のために整備した模擬計算コードを利用して任意の体系に対する未臨界度測定技術の適用性を予測評価する方法を開発した。

適用性評価の例として、開発当初からの適用対象である高速炉燃料の再処理施設や、近年、未臨界度測定装置の適用が期待されている使用済燃料貯蔵施設や臨界事故で問題となったJCOの沈殿槽を採り上げて簡易的な評価を実施し、開発した未臨界度測定技術が適用可能であることを確認した。

本研究開発を通じて、実用性の高い未臨界度モニター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、未臨界度評価量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ーシステムを再処理施設等の複雑な条件を持つ実体系に適用し、実績を重ねて実用性と信頼性の高いシステムに発展させることが望まれる。

謝辞

本研究開発を遂行できたのは、計画策定、DCA の炉心改造、及び開発試験の実施において、ひとえに実験炉部を始めとする多くの関係者の御協力並びに御支援を頂いたことによるものであります。

特に計画の立案段階では、八谷雄喜氏（元実験炉部長）及び福村信男氏（元臨界工学試験室長）に多大なる御尽力を頂きました。

未臨界度測定技術開発に係る炉心改造及び実験の遂行においては、臨界工学試験室の室員一同の協力によって計画どおり推進させることができました。

ミハルゾ法による未臨界度測定技術の開発では、照射燃料試験室の協力によって、試験に欠かすことのできない Cf 線源検出器の製作を実現することができました。

仁科浩二郎氏（愛知淑徳大学教授）には、囑託職員として研究の節目節目において貴重な助言を頂き、今日の開発成果に繋げることができました。

上記の方々に対しまして、この場を借りて深く感謝の意を表します。

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] 日本原子力研究所核燃料施設安全性研究委員会編：“臨界安全ハンドブック第2版”、JAERI 1340（1999）.
- [3] 「核燃料臨界安全技術」研究専門員会：“わが国における核燃料施設の臨界安全管理の現状と問題点”、日本原子力学会誌、15,2,102（1973）.
- [4] 武田充司、仁科浩二郎 共訳：原子炉の初等理論（下）、吉岡書店、544,861（1976）.
- [5] Y.KANEKO：“Integral-Versions of Some Kinetic Experiments for Determining Large Negative Reactivity of Reactor”, J.nucl.Sci.Technol., 12, 7, 402（1975）.
- [6] M.UEDA, et al.：“ACTIVE NEUTRON MULTIPLICATION METHOD FOR FUEL LATTICES IN WATER”, Nucl. Technol., 97, 131（1992）.
- [7] T.SUZAKI：“Subcriticality Determination of Low-Enriched UO_2 Lattices in Water by Exponential Experiment”, J.nucl.Sci.Technol., 28, 12, 1067（1991）.
- [8] 桜井淳、他：“指数実験およびモンテカルロ計算により評価された未臨界度の比較”、日本原子力学会誌、40,4,304（1998）.
- [9] 斉藤慶一、他 共訳：M.M.R.ウイリアムズ 原子炉の確率過程、みすず書房（1978）.
- [10] 山根義宏、他：“Mihalczo 法による核燃料体系未臨界度の決定”、日本原子力学会誌、28,9,850（1986）.
- [11] 松本忠邦、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）.
- [12] 奈良義彦、他：“重水臨界実験装置「DCA」20年間の成果と今後の展開（下）”、原子力工業、第34巻第11号（1988）.
- [13] K.Nishihara, et al.,：“Numerical Validation of the Theory of Coupled Reactors for the Heavy Water Critical Assembly DCA”, J.nucl.Sci.Technol., 36, 3, 265（1999）.
- [14] 相原永史、他：“DCA 未臨界度測定体系の炉心特性”、動燃技報、No.99、81（1996）
- [15] 羽様平：“DCA 未臨界度測定試験体系の炉心基本特性の評価”、PNC TN9410 97-088（1997）.
- [16] 相原永史、「臨界集合体の現状と将来利用」、日本原子力学会誌 40[4], 254（1998）
- [17] 原子力安全委員会：原子力施設等安全研究年次計画（平成3年度～平成7年度）、87（1990）.

- [18] 原子力安全委員会：原子力施設等安全研究年次計画（平成8年度～平成12年度）、82(1996)。
- [19] R.P.Feynman, et al. : "DISPERSION OF THE NEUTRON EMISSION IN U-235 FISSION", J.Nucl.Energy, 3, 64(1956)。
- [20] Y.GOTOH: "Measurement of Neutron Life in a D2O-System by Neutron Fluctuation", J.nucl.Sci.Technol, 1, 6, 193 (1964)。
- [21] N.MURATA, et al. : "DERIVATION OF PAL-BELL EQUATIONS FOR TWO-POINT REACTORS, AND ITS APPLICATION TO CORRELATION MEASUREMENTS", Ann.Nucl.Energy, 8, 407 (1981)。
- [22] M.M.EL-Zeftawy, L.RUBY : "Addendum to Note on Subcritical Reactivity from Reactor Noise", Nucl.Sci.Eng., 47, 370(1972)。
- [23] T.Misawa, et al. : "Measurement of Prompt Neutron Decay Constant and Large Subcriticality by the Feynman- α Method", Nucl.Sci.Eng., 104, 53(1990)。
- [24] 林津雄厚、他："ファインマン法による未臨界度測定の基礎検討"、日本原子力学会 1993 年春の年会要旨集、A16(1993)。
- [25] 大谷暢夫："ファインマン- α 法による低実効増倍率測定"、日本原子力学会 1993 年春の年会要旨集、A15(1993)。
- [26] 毛利智聡、大谷暢夫："ファインマン- α 法による実効増倍率測定(3)"、PNC TN9410 98-056 (1998)。
- [27] 毛利智聡、羽様平："ファインマン- α 法による実効増倍率測定(4)"、JNC TN9400 99-086 (1999)。
- [28] K.HASHIMOTO, et al. : "Variance-to-mean method generalized by linear difference filter technique", Ann.Nucl.Energy., 25, 9, 639 (1998)。
- [29] K.HASHIMOTO, et al. : "Reduction of Delayed-Neutron Contribution to Variance-to-Mean Ratio by Application of Difference Filter Technique", J.nucl.Sci.Technol., 36, 7, 555 (1999)。
- [30] 毛利智聡、大谷暢夫："ファインマン- α 法における階差フィルターの適用"、PNC TN9410 97-095 (1997)。
- [31] 毛利智聡、他："ファインマン- α 法における階差フィルターの適用"、日本原子力学会 1998 年春の年会要旨集、G40(1998)。
- [32] 毛利智聡、羽様平："ファインマン- α 法の中性子束変動体系への適用"、日本原子力学会 2000 年春の年会要旨集、G30(2000)。

- [33] 大谷暢夫：“ファインマン- α 法による低実効増倍率測定(2) 中性子バックグラウンドの影響”、日本原子力学会 1993 年秋の大会予稿集、E23(1993)。
- [34] Y.YAMANE, et al.：“FORMULATION OF DATA SYNTHESIS TECHNIQUE FOR FEYNMAN- α METHOD”, Ann. Nucl. Energy., 25, 1-3, 141 (1998)。
- [35] T.Misawa, et al.：“STUDY ON REACTIVITY MEASUREMENT BY THE FEYNMAN- α METHOD”, International Conference on the Physics of Reactors, Mito, Ibaraki, September 16-20, Volume 2, E-228(1996)。
- [36] 羽様平、毛利智聡：“未臨界度測定における不感時間の影響の補正”、日本原子力学会 2001 年春の年会要旨集、G36(2001)。
- [37] M.Hayashi：“Neutron Lifetime and Generation Time by KENO IV”, Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ. Vol. 24, 62-67 (1991)。
- [38] J.F.Briesmeister, editor：“Mcnp-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4B”, LA-12625-M, April 2000
- [39] 本山 聡、他：“Mihalczko 法におけるスペクトル比の ^{252}Cf 中性子源強度依存性”、日本原子力学会 1988 年秋の大会要旨集、C42(1988)。
- [40] Edward P.Ficaro and D.K.Wehe：“KENO-NR: A Monte Carlo Code for Simulating ^{252}Cf -Source-Driven Noise Analysis Measurements to Determine Subcriticality”, Nucl. Sci. Eng., 117, 158(1994)。
- [41] T.E.Valentine and J.T.Mihalczko：“MCNP-DSP: A neutron and gamma ray monte carlo calculation of Source-Driven Noise-Measured parameters”, Ann. Nucl. Energy, 23, 1271(1996)。
- [42] 山本俊弘、他：“MCNP4A による Feynman- α 法のシミュレーション”、日本原子力学会 1997 年春の年会要旨集、E8(1997)。
- [43] 毛利智聡、羽様平：“MCNPコードを用いたDCA炉雑音実験のシミュレーション”、日本原子力学会 1999 年春の年会要旨集、G31(1999)。
- [44] 大谷暢夫：“ファインマン-アルファ法による未臨界度モニターの開発”、日本原子力学会 1994 年秋の大会予稿集、G33(1994)。
- [45] N.Ohtani, T.Hazama：“SUBCRITICALITY MONITORING BY FEYNMAN- α METHOD”, THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON Nuclear Criticality Safety, Albuquerque, New Mexico, Aug 26-29, Volume II 11-43 (1995)。
- [46] 北村康則、他：“時系列データ直接処理による未臨界度モニターの開発(1)”、日本原子力学会 1996 年秋の大会予稿集、A20(1994)

- [47] 仁木直人、他：“FIFOを用いた時系列計算機直接測定法の開発”、日本原子力学会 1997年秋の大会予稿集、C54(1997)。
- [48] Y.KITAMURA, et al.：“Reactor Noise Experiments by Using Acquisition System for Time Series Data of Pulse Train”, J. nucl. Sci. Technol., 36, 8, 653 (1999).
- [49] J. T. Mihalcz, et al.：“Dynamic Subcriticality Measurements Using the ^{252}Cf -Source-Driven Noise Analysis Method”, Nucl. Sci. Eng., 104, 314 (1990).
- [50] J. T. Mihalcz, et al.：“Determination of Reactivity from Power Spectral Density Measurements with Californium-252”, Nucl. Sci. Eng., 66, 29 (1978).
- [51] J. T. Mihalcz, et al.：“ ^{252}Cf -Source-Driven Neutron Noise Measurements of Subcriticality for an Annular Tank Containing Aqueous Pu-U Nitrate”, Nucl. Technol., 94, 336 (1991).
- [52] J. T. Mihalcz：“The Use of Californium-252 as a Randomly Pulsed Neutron Source for Prompt-Neutron Decay Measurements”, Nucl. Sci. Eng., 53, 393 (1974).
- [53] 羽様平：“ミハルゾ法未臨界度測定における統計誤差の低減化”、PNC TN9410 98-073 (1998)。
- [54] 羽様平：“2本の検出器によるミハルゾ法測定”、日本原子力学会 1998年春の年会要旨集、G41 (1998)。
- [55] K. Nishina, 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).
- [56] 古橋晃：“Mihalcz法の2計数管化の検討”、日本原子力学会誌、31, 374 (1989)。
- [57] 羽様平：“時間相関解析によるミハルゾ法未臨界度測定—理論的検討—”、PNC TN9400 99-046 (1999)。
- [58] 羽様平、毛利智聡：“時間相関解析によるミハルゾ法未臨界度測定”、日本原子力学会 1999年秋の大会予稿集、E30 (1999)。
- [59] T. Hazama：“IMPROVED ^{252}CF -SOURCE-DRIVEN NOISE ANALYSIS METHOD BASED ON TIME DOMAIN ANALYSIS”, THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON Nuclear Criticality Safety, Versailles, France, Volume III, 1243 (1999).
- [60] 羽様、「ミハルゾ法の開発状況」、日本原子力学会「炉雑音計測の高度化と新しい応用」研究専門委員会報告書（平成13年度発行予定）
- [61] 羽様平：“ミハルゾ法未臨界度測定（II）”、PNC TN9410 97-093 (1997)。
- [62] 羽様平、大谷暢夫：“高バックグラウンド下でのミハルゾ法による未臨界度測定”、日本原子力学会 1997年春の年会要旨集、E4 (1997)。

- [63] 大塚益比古：原子炉物理 —中性子インポートランスと原子炉の理論—、共立物理学講座 24、共立出版(1972)。
- [64] 森貴正、中川正幸：“MVP/GMVP：連続エネルギー法および多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”、JAERI-Data/Code 94-007 (1994)。
- [65] 羽様平、他：“C f 線源検出器の開発”、日本原子力学会 1994 年秋の大会予稿集, E34(1994)。
- [66] K.HASHIMOTO, et al.：“FEYNMAN- α CORRELATION ANALYSIS BY PROMPT-PHOTON DETECTION”, Ann. Nucl. Energy, 25, 1-3, 13(1997)。
- [67] 小島久雄：“高速炉燃料の再処理技術開発リサイクル機器試験施設 (RETF) の建設”、日本原子力学会誌、36, 10, 911(1994)。
- [68] 鳥羽正男：“加圧水型軽水炉 (PWR) 燃料”、原子力工業、第 39 巻第 5 号(1993)。
- [69] 山本俊弘、他：“JCO 臨界事故の特性解析 (2) —沈殿槽の静特性解析に基づく反応度評価—”、日本原子力学会 2000 年春の年会要旨集, B36(2000)。
- [70] 住田健二、他：“ウラン燃料加工施設における臨界事故”、日本原子力学会誌、42, 8, 691(2000)。
- [71] J.T.Mihalcz, et al.：“Feasibility of Spent LWR Fuel Subcritical Measurements by the Californium Noise Method”, Trans. Am. Nucl. Soc., 62, 323(1990)。

付録

付録1 ファインマン- α 法による未臨界度測定法

(1) ファインマン- α 法の基礎式

Am-Be 中性子源など時間的に一様にランダムに発生する中性子を検出する場合は、ある時間間隔に検出される中性子数の時間分布はポワソン分布に従う。中性子増倍体系においては、核分裂による連鎖反応があるために、2つの異なる時間間隔において検出される中性子には、同一の連鎖反応に属するという相関が生じ、中性子数の時間分布はポワソン分布からずれる。このずれから最終的に実効増倍率をもとめる手法がファインマン- α 法である。

このずれを表す評価量Y値は、次式で表される。

$$Y(\Delta t) = \frac{\overline{n(\Delta t)^2} - \overline{n(\Delta t)}^2}{\overline{n(\Delta t)}} - 1 \quad (1-1)$$

ここで、

$\overline{n(\Delta t)}$: 時間幅 Δt の中性子計数の平均

$\overline{n(\Delta t)^2}$: 時間幅 Δt の中性子計数の自乗平均

非増倍系では、中性子計数はポワソン分布に従うため平均と分散の比は 1.0 となり、Y値は 0.0 となる。

遅発中性子の効果を無視すると、一点炉近似のY値の理論式は次のように表される。

$$Y(\Delta t) = \frac{\overline{\varepsilon\nu(\nu-1)}}{\alpha^2\tau^2} \left(1 - \frac{1-e^{-\alpha\Delta t}}{\alpha\Delta t}\right) \quad (1-2)$$

ここで、

ε : 検出器の計数効率

τ : 核分裂間の平均時間(sec)

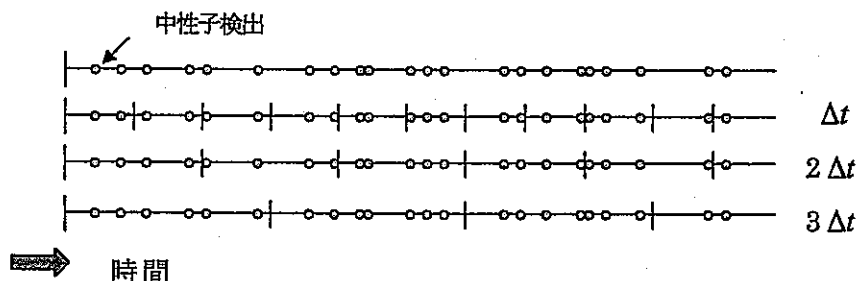
ν : 核分裂あたりに発生する中性子数

α : 即発中性子減衰定数(sec⁻¹)

(2) 測定方法

測定データから α 値を次の手順で評価する。以下の図に示すように時間幅 Δt に対する

中性子計数を測定し、時間幅 Δt と次の時間幅 Δt の中性子計数を足し合わせることによって、時間幅 $2\Delta t$ の中性子計数を求める。同様の方法で、時間幅 $3\Delta t$ 、 $4\Delta t$ … の中性子計数を求める。



式(1-1)に基づいて各時間幅に対する Y 値を求め、各時間幅と Y 値の関係を最小自乗法によって式(1-2)にフィッティングして α 値を求める。

精度良く評価するためには、Y 値の曲線に増加部分と一定値に収束する部分が明確に現れるように時間幅 ΔT を設定することが重要である。時間幅 ΔT が短すぎると、Y 値の増加部分が粗く評価され正確な評価ができず、時間幅 ΔT が長すぎるとサンプル数の不足により統計精度が不十分となる。DCA での評価経験では、時間幅 ΔT は $70000 / \alpha$ (sec) 程度に設定し、時間幅 ΔT の 100 倍から 300 倍の範囲で α 値を評価すれば適切となることが確認されている。

α 値と実効増倍率の関係は式(1-3)で表され、即発中性子寿命と実効遅発中性子割合をあらかじめ評価することによって α 値から実効増倍率を得る。

$$\alpha = \frac{1 - k_{eff}(1 - \beta_{eff})}{\ell} \quad (1-3)$$

ここで、

k_{eff} : 実効増倍率

β_{eff} : 実効遅発中性子割合

ℓ : 即発中性子寿命(sec)

(3) 測定時間と測定精度

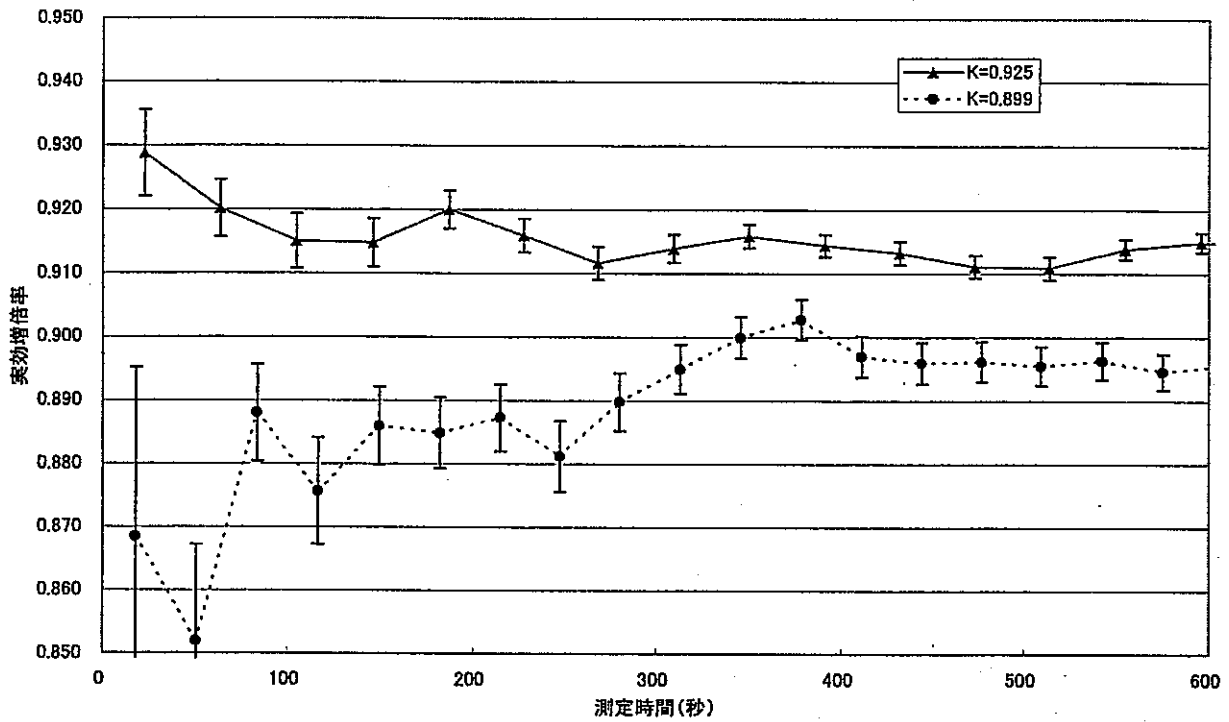
ウラン燃料重水減速体系の測定から得られた測定時間に対する実効増倍率の変化を付図 1-1～付図 1-2 に示している。実効増倍率の大きいほど、短い測定時間で実効増倍率の変動が小さくなることが確認できる。実効増倍率の精度を、Y 値曲線から α 値を求める

際に求まる最小自乗フィッティング誤差 (1σ) で評価すると、測定時間と実効増倍率の精度の関係は以下ようになる。

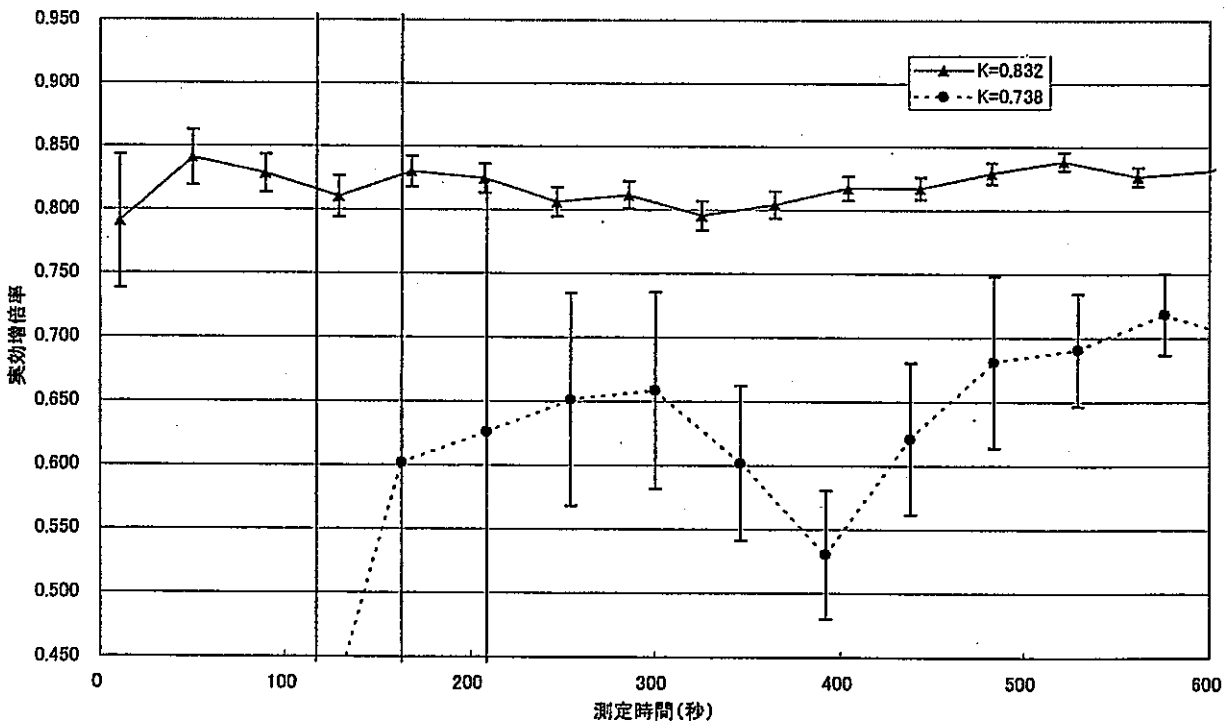
(実効増倍率)	(精度)	(測定時間)
0.73	± 0.1	138sec
0.83	± 0.04	28sec
0.90	± 0.01	66sec
	± 0.04	15sec
0.95	± 0.003	97sec
	± 0.005	14sec
0.99	± 0.001	2sec
	± 0.003	2sec 以下

ただし、付図から確認できるように上記の精度は測定時間の変化にともなう評価値の変動範囲を必ずしも反映していない。測定時間の変化にともなう評価値の変動を考慮するために、最大測定時間で得られる実効増倍率を真の値と仮定して、その値との差をもって実効増倍率の精度としたときの測定時間と実効増倍率の精度の関係を以下に示す。上記のフィッティング誤差による簡易評価誤差を用いた場合に比べると、同じ精度で評価するためには長い測定時間を要する。

(実効増倍率)	(精度)	(測定時間)
0.73	± 0.1	443sec
0.83	± 0.04	120sec
0.90	± 0.01	267sec
	± 0.04	61sec
0.95	± 0.003	367sec
	± 0.005	166sec
0.99	± 0.001	25sec
	± 0.003	2sec 以下



付図1-1 測定時間に対する実効増倍率の変化 (K_{eff}:0.90以上)



付図1-2 測定時間に対する実効増倍率の変化 (K_{eff}:0.85以下)

付録2 ミハルゾ法による未臨界度測定法

ミハルゾ法の基本原理は、中性子源（Cf線源検出器）からの中性子発生数と中性子が増倍される結果形成される体系全体の中性子発生数の比より、体系で中性子が増倍される程度（つまり、実効増倍率）を検出器信号の相関解析によって求めるものである。

ミハルゾ法には、開発当初からの手法である周波数相関解析を利用する手法と、本研究により開発された時間相関解析を利用する手法がある。各手法の概要について以下に述べる。

(1) 周波数相関解析によるミハルゾ法

周波数相関解析で得られる相関量はパワースペクトル密度と称され、次式で表される。

$$G_y(\omega) = \frac{2\pi}{T} \cdot E[X^*(\omega) \cdot Y(\omega)] \quad (2-1)$$

T：全記録時間、X,Y：信号 X 又は Y をフーリエ変換した量（ ω ：角周波数）

*は共役複素数を意味する。

周波数相関解析によるミハルゾ法では、4種類のパワースペクトル密度を求め、それらの比より未臨界度評価量スペクトル比（SR）を評価する。

$$SR_{123}(\omega) = \frac{G_{12}(\omega) \cdot G_{13}(\omega)}{G_{11}(\omega) \cdot G_{23}(\omega)} \quad (2-2)$$

ここで、

$G_{11}(\omega)$ ： Cf線源検出器（検出器系統番号#1）の自己パワースペクトル密度

$G_{12}(\omega)$ ： Cf線源検出器と中性子検出器#2の出力間の相互パワースペクトル密度

$G_{13}(\omega)$ ： Cf線源検出器と中性子検出器#3の出力間の相互パワースペクトル密度

$G_{23}(\omega)$ ： 中性子検出器#2,#3の出力間の相互パワースペクトル密度

であり、添え数字は使用した検出器系統の番号を示す。

未臨界度評価量 SR 値は理論的には次式

$$SR_{123} = \frac{\varepsilon_1 v_{cp} I_{2c} I_{3c} F_c}{v_p (v_p - 1) I_{23} F + v_{cp} (v_{cp} - 1) I_{23c} F_c + v_{fp} (v_{fp} - 1) I_{23f} F_f} \quad (2-3)$$

で表され、増倍前後の中性子発生数の比に相当する。角周波数 ω や核分裂世代時間、即発中性子減衰定数 α と無関係な量であり、次式により実効増倍率 K_{eff} または未臨界度 ρ に換算される。

$$keff = 1 - \frac{C_{a23} \cdot SR'_{123}}{1 + (C_{a23} - C_{b23}) \cdot SR'_{123}} \quad (2-4)$$

$$\rho = \frac{C_{a23} \cdot SR'_{123}}{1 - C_{b23} \cdot SR'_{123}} \quad (2-5)$$

ここで、

$$C_{a23} = \frac{(1-\beta)^2 \bar{\nu} X}{(1-\beta_c)^2 \bar{\nu}_c} \cdot R_{23} \cdot \sqrt{IR_2 \cdot IR_3} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{\rho_2 \cdot \rho_3}} \quad (2-6)$$

$$C_{b23} = \left\{ X_c + \frac{(1-\beta_i)^2 \bar{\nu}_i X_i}{(1-\beta_c)^2 \bar{\nu}_c} \cdot R_{23i} \cdot \sqrt{IR_2 \cdot IR_3} \cdot S_{ext23}' \right\} \cdot \frac{1}{S_{ext23} + 1} \quad (2-7)$$

$$SR'_{123} = \frac{SR_{123}}{\varepsilon_1} (S_{ext23} + 1) \quad (2-8)$$

である。

S_{ext23} は、検出器#2 と検出器#3 で観測できる固有中性子源の Cf に対する相対強度であり、未臨界度測定とは別に Cf 線源を体系に設置した場合としない場合の中性子計数率を測定することによって求められる。

換算係数 C_{a23} 及び C_{b23} をあらかじめ計算によって評価し、測定で得られる SR_{123} を換算して未臨界度を得る。

使用した記号の意味は以下のとおりである。添え字が追加される場合は、添え字 c が Cf 線源に、添え字 i が固有自発核分裂源に関する量、 p は即発中性子成分に関する量であることを、上部の $-$ は時間または位置についての平均値であることを意味する。

ε_1 : Cf 線源検出器の検出効率 (Cf-252 の単位核分裂あたりの計数出力)

ν : 1 回の核分裂あたりの中性子放出数

X : DIVEN 因子

β : 遅発中性子割合

F : 全誘導核分裂率

I_m : 空間的に分布する中性子が検出器# m に検出される程度を単位核分裂中性子あたりで表した量 (以下単に、中性子インポートンスという)

ρ_m : 中性子検出器# m で観測できる未臨界度

S_{extm} : 検出器# m で観測できる固有中性子源の Cf 線源に対する相対強度

S_{extm}' : S_{extm} の自発核分裂のみに関する成分

IR_m : インポートンス比 ($= \frac{\bar{I}_m}{I_{mc}}$)

R_{mn} : 検出器# m と検出器# n に関する R 因子 ($\frac{\bar{I}_m \cdot I_n}{I_m \cdot I_n}$)

(2)時間相関解析によるミハルゾ法

時間相関解析によるミハルゾ法ではファインマン- α 法の同様に計数の平均-分散比によって相関量を測定し、周波数相関解析で使用されるスペクトル比に相当する未臨界度評価量として CR (Count's Average-variance Ratio) を評価する。

$$CR_{122}(\Delta T) = \frac{C_2(\Delta T) \cdot C_{12}(\Delta T)}{C_1(\Delta T) \cdot (C_{22}(\Delta T) - C_2(\Delta T))} \quad (2-9)$$

ここで、

$C_1(\Delta T)$: Cf線源検出器による時間幅 ΔT あたりの平均計数

$C_{12}(\Delta T)$: Cf線源検出器と中性子検出器による時間幅 ΔT あたりの計数の共分散

$C_2(\Delta T)$: 中性子検出器による時間幅 ΔT あたりの平均計数

$C_{22}(\Delta T)$: 中性子検出器による時間幅 ΔT あたりの計数の共分散

である。

未臨界度評価量 CR 値は理論的には次式

$$CR_{122} = \frac{\overline{v_{cp}} \cdot \overline{v} \cdot \overline{I_{2c}} \cdot \overline{I_2} \cdot \overline{F}(\rho + \beta)}{v_p(v_p - 1)I_2^2 F + v_{cp}(v_{cp} - 1)I_{2c}^2 F_c + v_{ip}(v_{ip} - 1)I_{2i}^2 F_i} \quad (2-10)$$

で表され、周波数相関解析における未臨界度評価量 SR が中性子検出器の効率や周波数に依存しないのと同様、検出器の効率 ε やゲート時間幅 ΔT に無関係な量である。さらに、CR の場合は周波数相関解析の場合に依存していた Cf 線源検出器の効率 ε_1 にも無関係である。

未臨界度評価量 CR 値は次式により実効増倍率 K_{eff} または未臨界度 ρ に換算できる。

$$k_{eff} = 1 - \frac{C_{a2} \cdot CR_{122} - \frac{\beta}{1 - \beta_c}}{\frac{1 - \beta}{1 - \beta_c} + (C_{a2} - C_{b2}) \cdot CR_{122}} \quad (2-11)$$

$$\rho = \frac{C_{a2} \cdot CR_{122} - \frac{\beta}{1 - \beta_c}}{\frac{1}{1 - \beta_c} - C_{b2} \cdot CR_{122}} \quad (2-12)$$

ここで、

$$C_{a2} = \frac{(1 - \beta)^2 \overline{v} X}{(1 - \beta_c)^2 v_c} \cdot R_{22} \cdot IR_2 \quad (2-13)$$

$$C_{b2} = \left(X_c + \frac{(1 - \beta_i)^2 \overline{v}_i X_i}{(1 - \beta_c)^2 v_c} \cdot R_{22i} \cdot IR_{2i} \cdot S_{ext2} \right) \frac{\rho_2}{(S_{ext2} + 1)\rho} \quad (2-14)$$

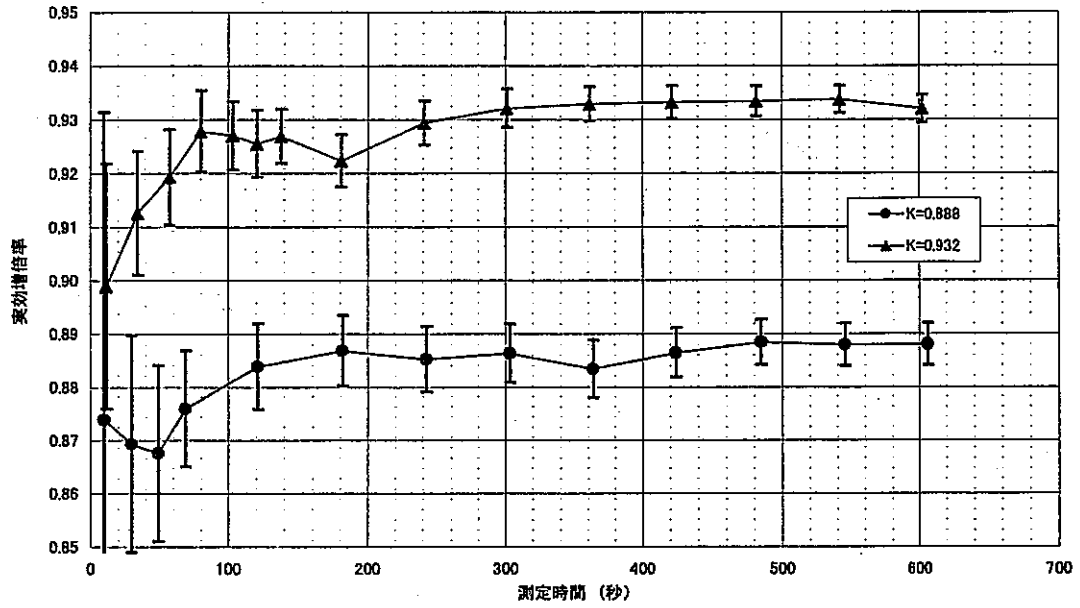
である。

換算係数 C_{a2}, C_{b2} をあらかじめ計算で評価し、測定で得られる CR_{122} を換算して未臨界度を得る。

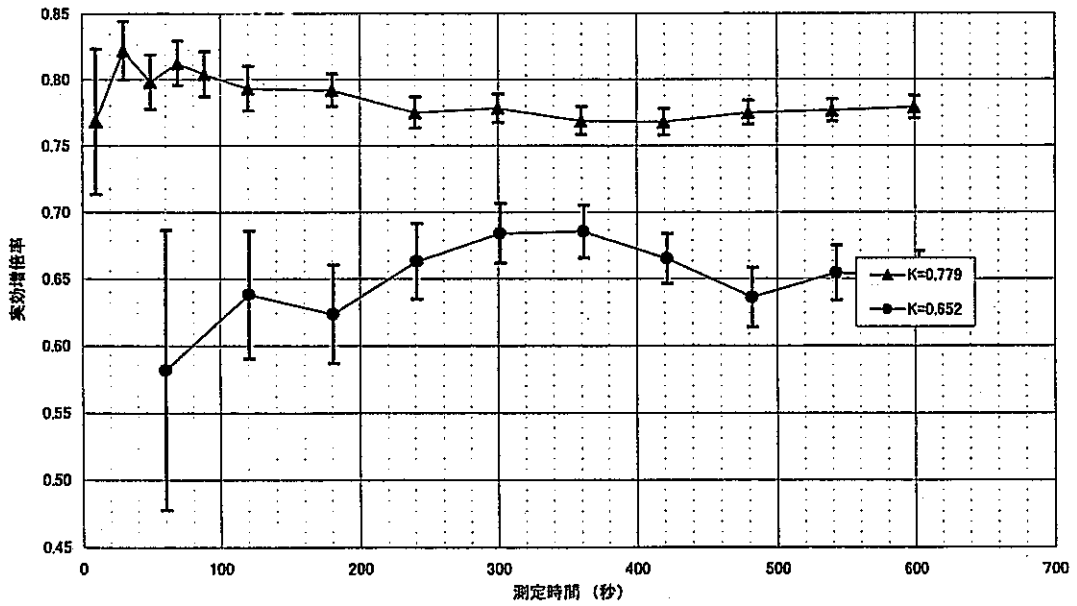
換算係数の評価において、核定数は燃料の種類で決まり、固有中性子源の強度を示す S_{ext2} の未臨界度換算結果に与える影響は、付録 6 に示すように限定的である。しかしながら、中性子インポートンス分布より算出するインポートンス比 IR_2 及び R 因子 R_{22} は、未臨界度や検出器配置によって変化するため、予備解析によって体系の変化に対する特性を把握しておく必要がある。

なお、時間相関解析を利用したミハルゾ法の測定方法は、ファインマン- α 法とほぼ同様であるが、CR 値の場合は、時間幅 ΔT によらず一定となる範囲の CR 値を平均して代表値を算出する。そのため、フィッティングが必要なファインマン- α 法に比べると時間幅 ΔT の設定の与える影響は小さい。

直径 5cm 長さ 50cm の He-3 検出器を 2 本束ねて 1 系統として測定したときの測定時間に対する実効増倍率の変化を付図 2-1 及び付図 2-2 に示す。実効増倍率が大きいほど、短い測定時間で安定した評価結果が得られることが確認できる。実効増倍率が 0.9 以上の場合は 1 分程度で実効増倍率が 0.6 以上の場合でも 3 分程度で安定した結果が得られる。また、測定誤差には CR 値を平均する際の標準偏差を用いているが、測定時間の変化にともなう評価値の変動範囲を反映しており、ミハルゾ法の場合は、標準偏差を測定結果の安定度を判断する指標として使用できることが分かる。



付図 2-1 測定時間に対する実効増倍率の変化 (K_{eff} : 0.9 以上)



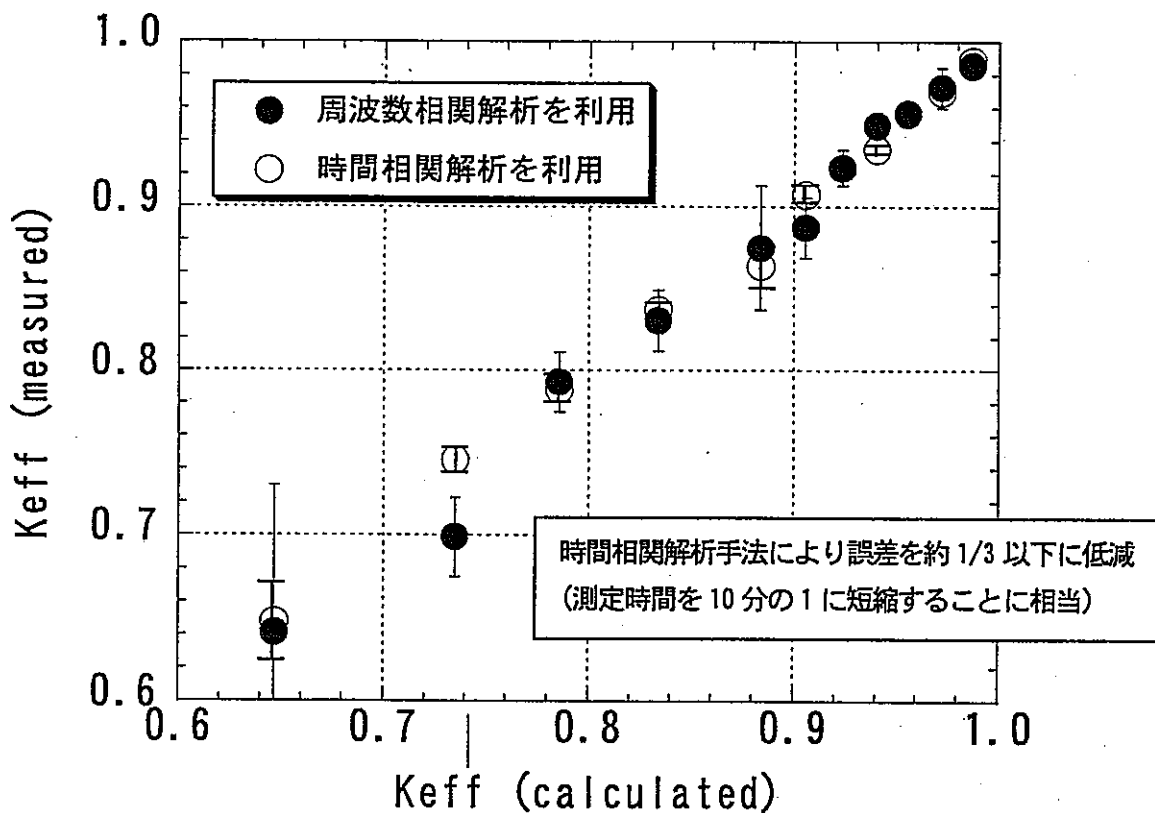
付図 2-2 測定時間に対する実効増倍率の変化 (K_{eff} : 0.8 以下)

(3)時間相関解析手法の採用による改良点

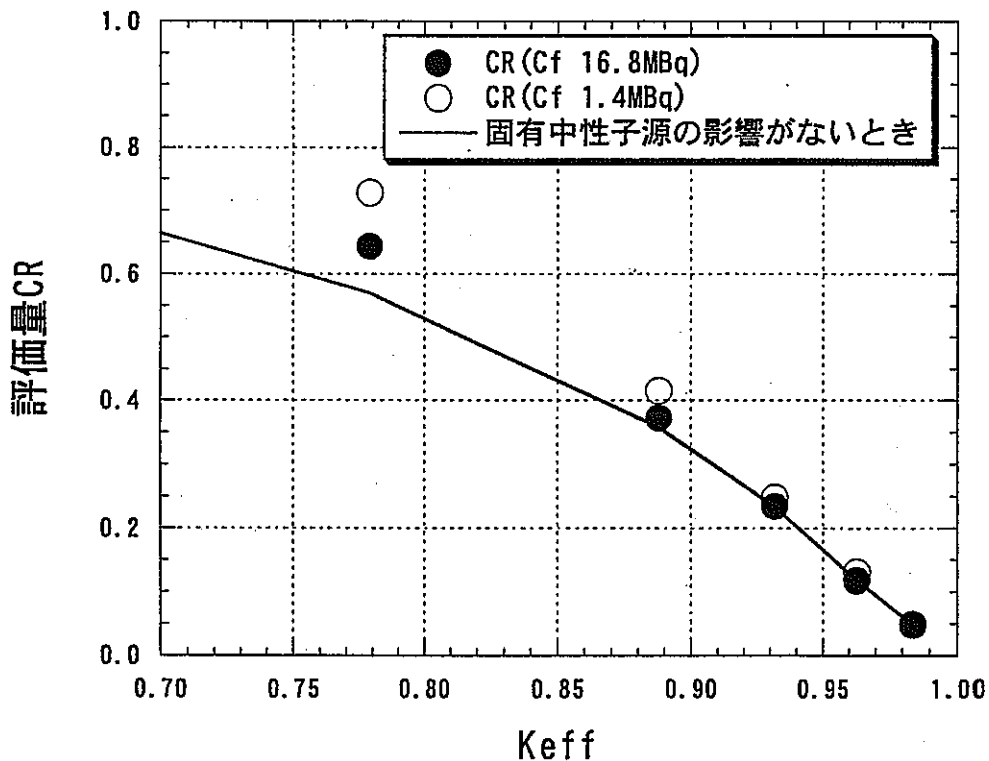
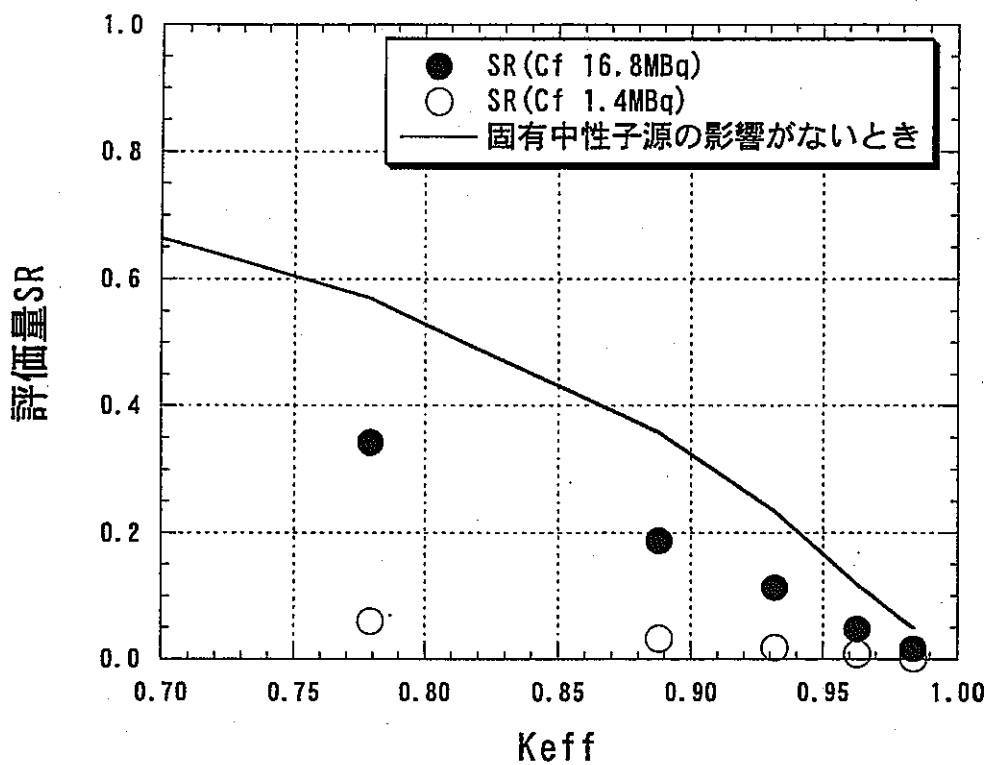
時間相関解析によるミハルゾ法は、周波数相関解析によるミハルゾ法に対して

- ①短時間（約 10 分の 1）で測定が可能である（付図 2-3）。
- ②固有中性子源の強度影響が小さく、実効増倍率が 0.9 以上では無視できる（付図 2-4、付図 2-5）。
- ③Cf 線源検出器の検出効率の情報が不要である。
- ④ファインマン- α 法と測定装置が共通であるため、ファインマン- α 法と組み合わせた多面的な測定システムが合理的に構築できる。

という優れた特徴を有している。



付図 2-3 時間相関解析手法の利用による測定誤差の低減
(1 分間の測定結果、中性子検出器は 2 系統使用)



付図2-4 ミハルゾ法における固有中性子源の影響 (上図：周波数相関解析、下図：時間相関解析)
 (固有中性子源の相対強度は、Cf1.4MBqの10倍、Cf16.8MBqの0.9倍)

付録 3 応答時間の体系依存性

周波数解析の誤差理論をミハルゾ法に適用することによって、未臨界度評価量 SR 値の統計誤差が従う誤差理論式を導出し、測定体系に固有のパラメータ（検出効率と中性子寿命）依存性を確認した。中性子寿命は核分裂発生間隔に対応しており、同じ実効増倍率では中性子寿命が短いほど核分裂反応率が高くなる。相関は核分裂により複数の中性子が同時に発生することに起因するので、測定時間が同じであれば、中性子寿命が短いほど相関源が多く存在することになり、測定が容易になる。

誤差理論式を基にミハルゾらが実施した溶液燃料体系で得られた SR 値の測定結果と DCA で得られた SR 値の測定結果を比較した。その結果、検出効率と中性子寿命によって両者の統計誤差の差を説明することができた（付表 3-1）。誤差は測定時間の平方根に反比例するため、DCA で得られた応答時間（実効増倍率 0.9 を 1%の統計精度で得るための測定時間）10 分は、溶液燃料体系では 50 分の 1 の 12 秒に相当することになる。

付表 3-1 主要パラメータの統計誤差に与える影響（ K_{eff} 0.9 の体系で比較）

パラメータの比較				誤差への影響
パラメータ	ミハルゾ文献値 (硝酸ウラン溶液体系)	DCA 実験値*1 (ウラン燃料格子体系)	DCA 実験値/ ミハルゾ文献値	DCA 実験値/ ミハルゾ文献値
中性子検出器の効率 (count/fission)	0.008	0.004	1/2	1.4 倍*2
中性子寿命(sec)	6.0E-6	2.3E-4	38 倍	6 倍*2
				上記の積 8 倍
SR 値の統計誤差 実測値を測定時間 10sec あたりに換算	5%	36%	7 倍	7 倍

*1) 周波数相関解析によるミハルゾ法で測定

*2) パラメータの差を誤差理論によって統計誤差の増加率（ミハルゾ文献値を基準）に換算した結果

上記は、周波数相関解析によって相関量を算出する場合についての評価であるが、ファインマン- α 法や時間相関解析によるミハルゾ法のように相関量を時間相関解析によって算出する場合でも、統計処理によって相関量を評価する点では同じであり、統計誤差の測定体系依存性は同様であると考えられる。

付録 4 ファインマン- α 法の変動体系への適用

ファインマン- α 法の評価量 Y 値は、未臨界定常体系では時間幅の増加とともに一定値に収束するが、平均の中性子束が時間的に変化している場合には、時間幅の増加とともに単調に増大していくため、付録 1 に述べたような通常のフィッティング方法では Y 値から α 値を正しく評価することができない。

平均的な中性子束が時間的に変動する体系において、正確な α 値を評価する方法として次の 3 種類の手法がある。

- ①階差フィルター適用法
- ②データ分割法
- ③パラメータ追加法

①は、時系列データの差分処理によって、統計的な変動に比べて緩やかな変動成分を低減する方法である。②は、測定時間分の計数データを変動の影響が無視できる短い時間（数秒間）のデータに分割して分割データごとに Y 値を算出し、その Y 値の平均値から α 値を評価する手法である。③は、通常の Y 値曲線から α 値を評価する最小自乗法のフィッティング式に、 Y 値の増加成分を表す時間幅の 1 次の補正項（パラメータ）を追加することによって、 Y 値曲線から Y 値の増加成分を分離する方法である。

以下に 2 種類の平均中性子束が変動する体系について上記 3 種類の評価手法を用いて、 α 値を評価した結果を示す。

- ①実効増倍率の変化にともない中性子束が変化する体系
- ②中性子源の挿入引抜によって中性子束が変化する体系

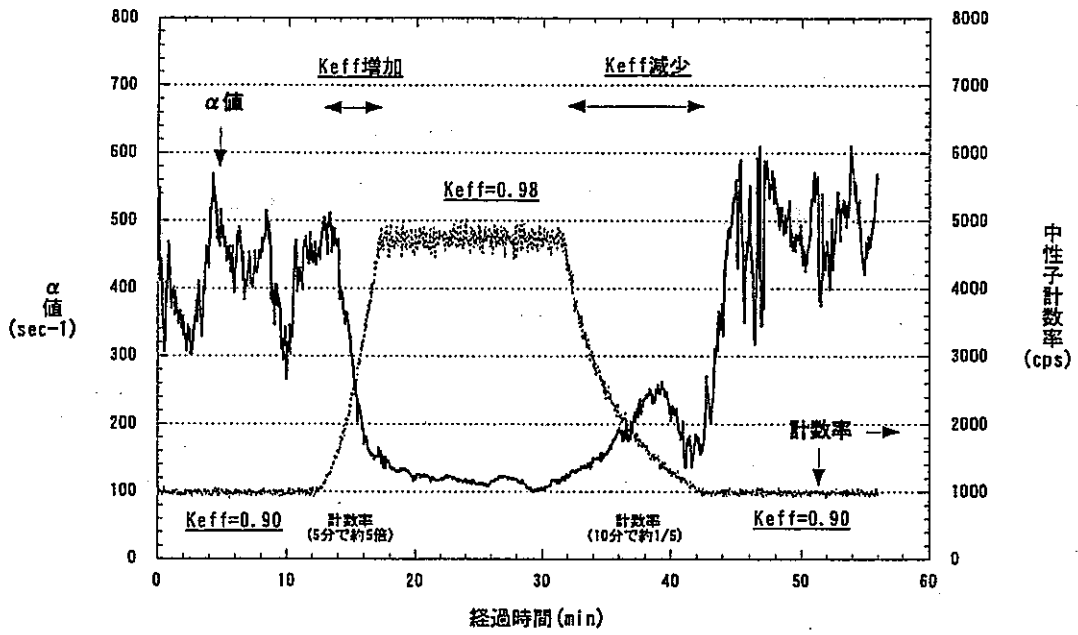
付図 4-1 に、実効増倍率の変動にともない中性子束が変動する体系について、階差フィルターを適用して得られた α 値の評価結果を示す。図中の α 値は、その時点より前のデータから指定した時間分（164sec）のデータを用いて評価している。例えば、経過時間 5 分の α 値は経過時間 136sec～300sec の間の 164sec のデータを用いている。実効増倍率の変化に伴い中性子束（中性子計数率）が変動している場合でも、その変化に追従して α 値が評価できることが確認できる。

付図 4-2 に、中性子源の挿入引抜にともない中性子束が変動する体系（実効増倍率は 0.90 で一定である）について、階差フィルターを適用して得られた α 値の評価結果を示している。図中の α 値は、その時点より前のデータから指定した時間分（82sec）のデータを用いて評価している。中性子源挿入時と引抜時の中性子計数率が変化する場合にお

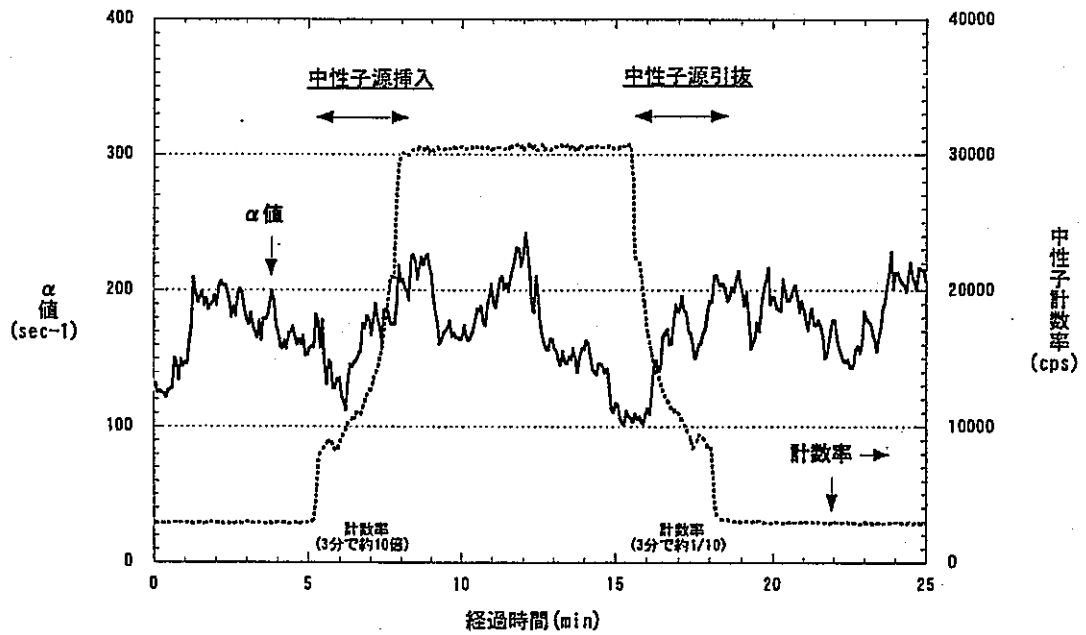
いても、変化前後と同一の α 値を評価できることが確認できる。

付図 4-3 と付図 4-4 に、データ分割法を用いて得られた評価結果を、付図 4-5 と付図 4-6 に、パラメータ追加法を用いて得られた評価結果を示している。いずれの方法についても、階差フィルターを適用した結果と同様の結果が得られている。

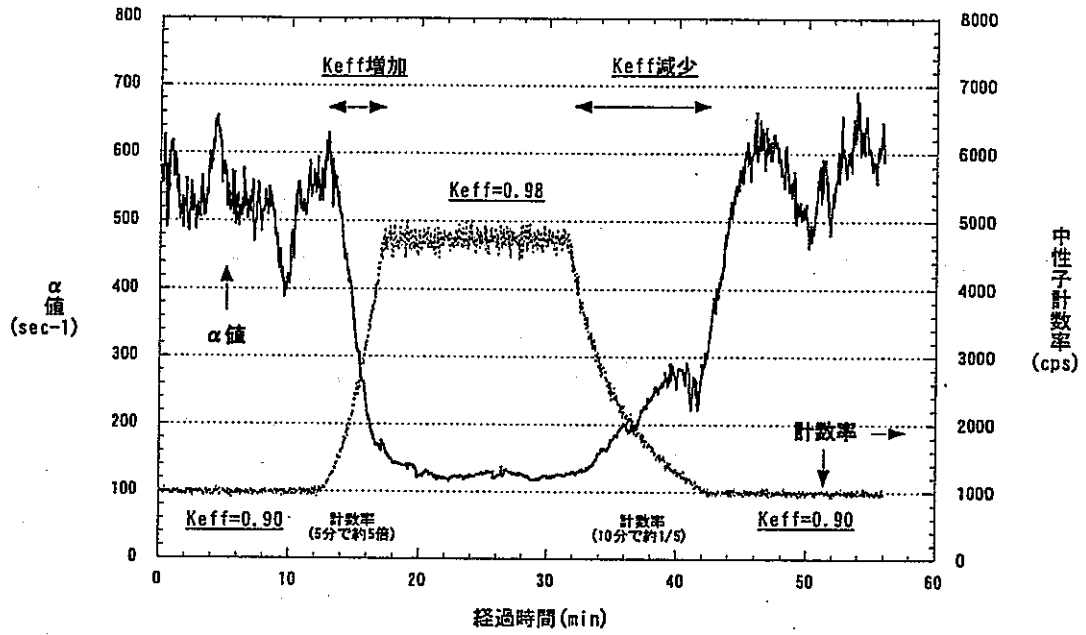
各手法を比較すると次のことがいえる。階差フィルター適用法は、変動の適用範囲は広いが、データ分割法に比べると α 値のばらつきは大きくなる。データ分割法は、中性子束変動時においても安定した値が得られるが、測定条件に応じて最適なデータ分割数などのデータ処理条件を設定しなければならないという欠点がある。パラメータ追加法は、最小自乗法のフィッティング時において、補正項の初期値の設定に注意が必要であるが、適用は簡単である。



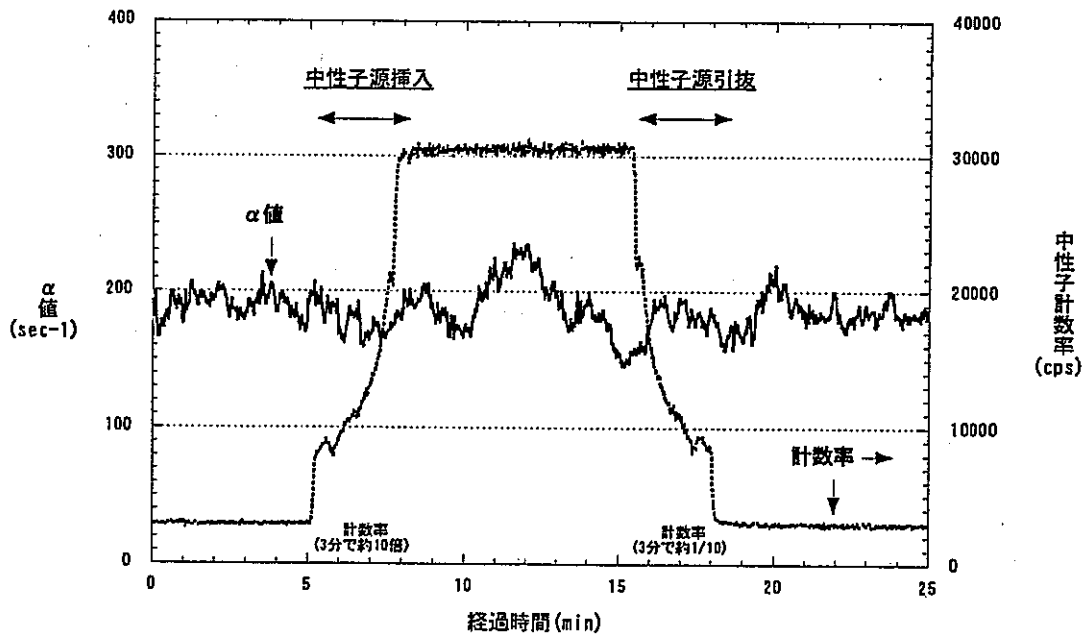
付図4-1 実効増倍率変動時の測定結果 (階差フィルターの適用法)



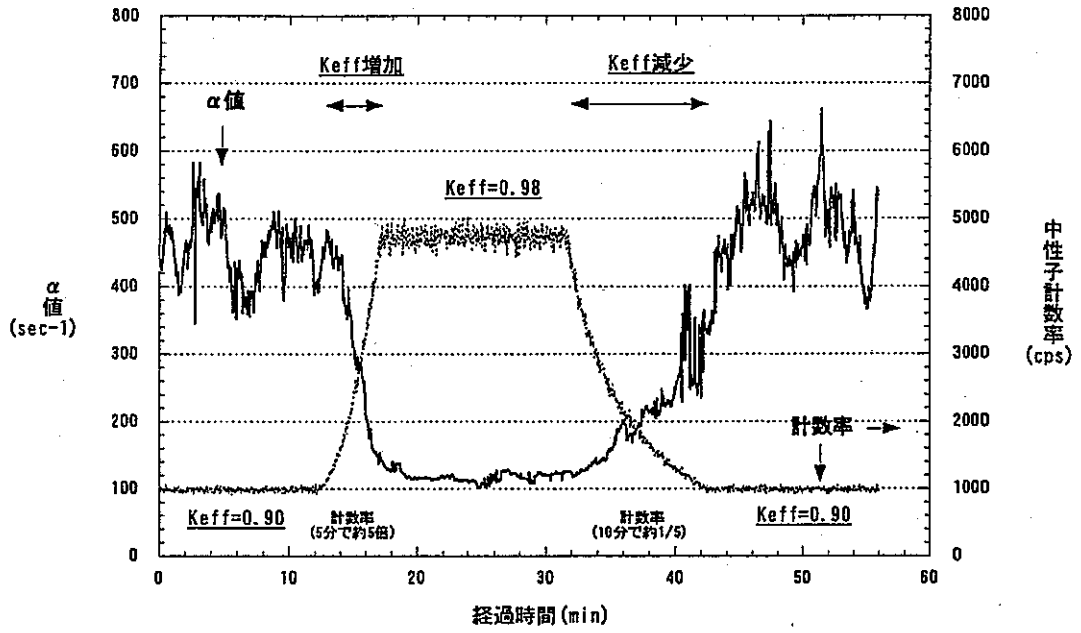
付図4-2 中性子源挿入及び引抜時の測定結果 (階差フィルターの適用法)



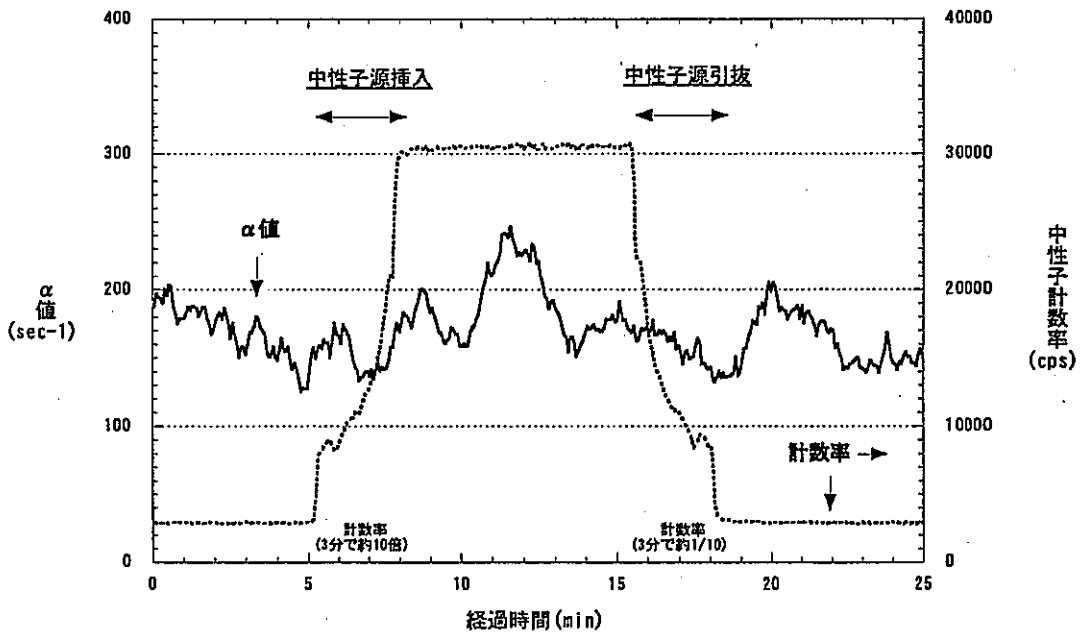
付図4-3 実効増倍率変動時の測定結果 (デ-タ分割法)



付図4-4 中性子源挿入及び引抜時の測定結果 (デ-タ分割法)



付図4-5 実効増倍率変動時の測定結果 (ハ⁺ラメック追加法)



付図4-6 中性子源挿入及び引抜時の測定結果 (ハ⁺ラメック追加法)

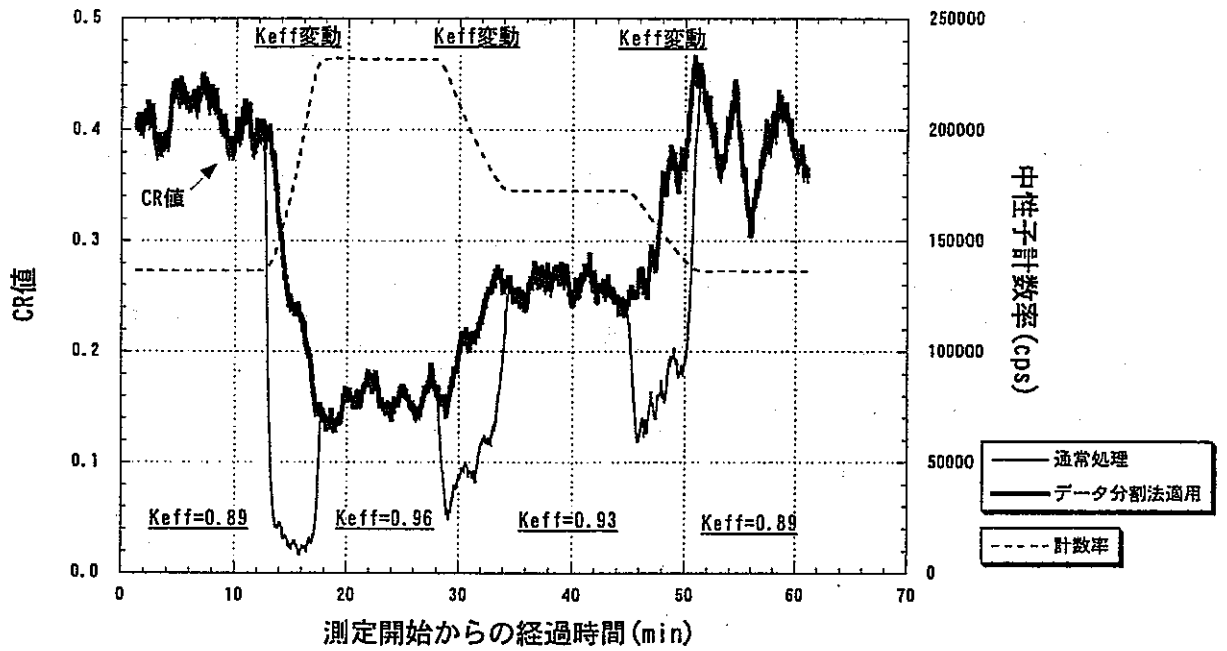
付録 5 ミハルゾ法の変動体系への適用

時間相関解析手法はファインマン- α 法とデータ処理手順に共通点が多いため、変動体系に対するファインマン- α 法用に開発されたデータ処理手法を利用できる。3種類の手法（付録4参照）うち、2種類のデータ処理法（階差フィルター適用法とデータ分割法）が適用可能である。

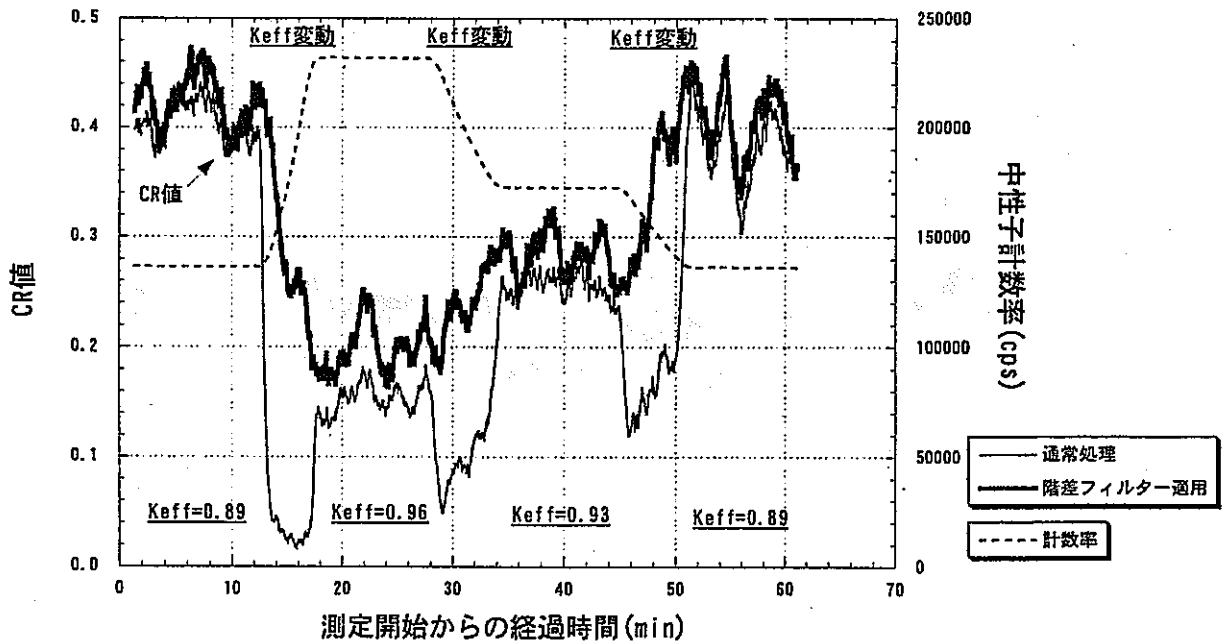
階差フィルター適用法又は分割評価法を用いて実効増倍率あるいは体系内の中性子源強度を変化させた中性子束変動体系について未臨界度評価量 CR 値の測定を実施、各手法の適用効果を確認した。

付図 5-1、付図 5-2 には、減速材である重水水位によって実効増倍率を 0.89 から 0.96 に変化させた場合の未臨界度評価量 CR 値の測定結果を示す。変化率の最大値は、反応度で $2\% \Delta K/K/\text{min}$ 、計数率の増加率で $40\%/\text{min}$ である。CR 値の評価には、80sec のデータを用いている。例えば、経過時間 600sec における CR 値は経過時間 520sec~600sec データを処理して評価している。付図 5-1 より、実効増倍率が変動中には通常の方法では正確に評価できないが、データ分割法を適用することによって実効増倍率の変化に追従した CR 値を測定できることが確認できる。付図 5-2 のように階差フィルターを適用した場合でも同様に実効増倍率の変化に追従した結果が得られるが、データ分割法を適用した場合に比べると結果のばらつきは大きい。

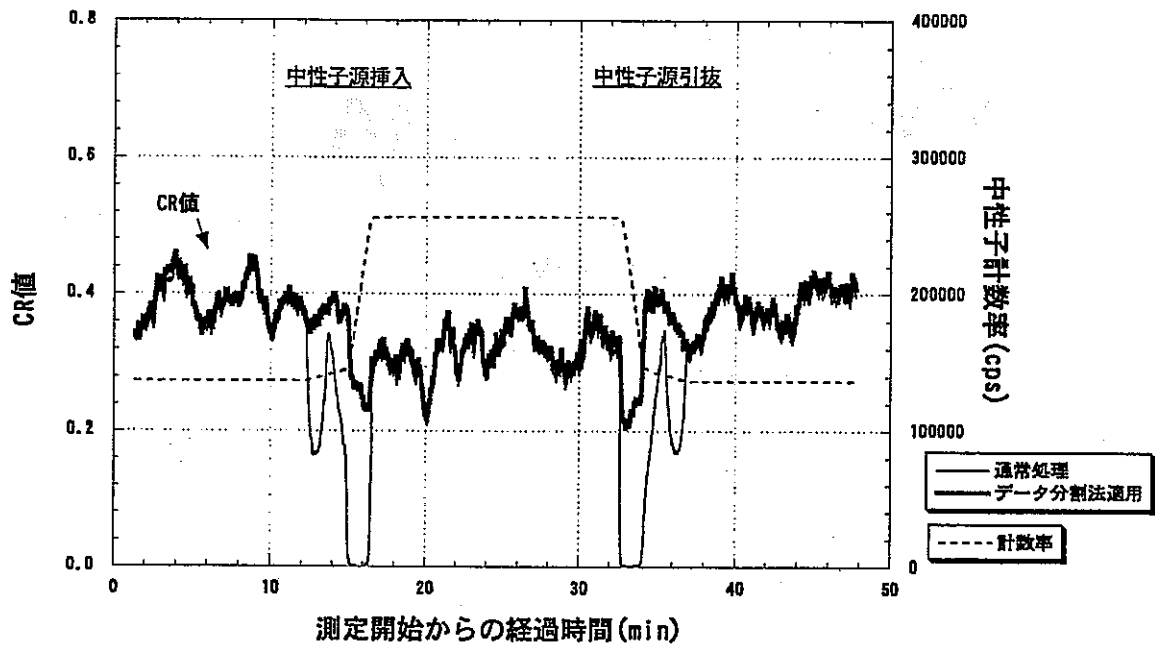
付図 5-3、付図 5-4 には、実効増倍率を 0.89 に固定した状態で、中性子源の挿入・引抜により中性子束レベルを変化させた場合の未臨界度評価量 CR 値の測定結果を示す。データ処理は前述の場合と同様な方法で行っている。変化率の最大値は、計数率の増加率で $44\%/\text{min}$ である。中性子源の挿入・引抜は、未臨界度に関係がないため、未臨界度評価量 CR 値も中性子源の挿入・引抜に関係なく、常に一定値となるべきである。付図 5-3 及び付図 5-4 より、通常の方法では中性子源の挿入・引抜中には CR 値を正確に評価できなくなるが、データ分割法あるいは階差フィルターの適用によって、中性子源挿入・引抜時であってもその前後と同じ評価結果が得られる。本評価では階差フィルター適用法の方が、中性子束の変動時でも安定した結果が得られている。



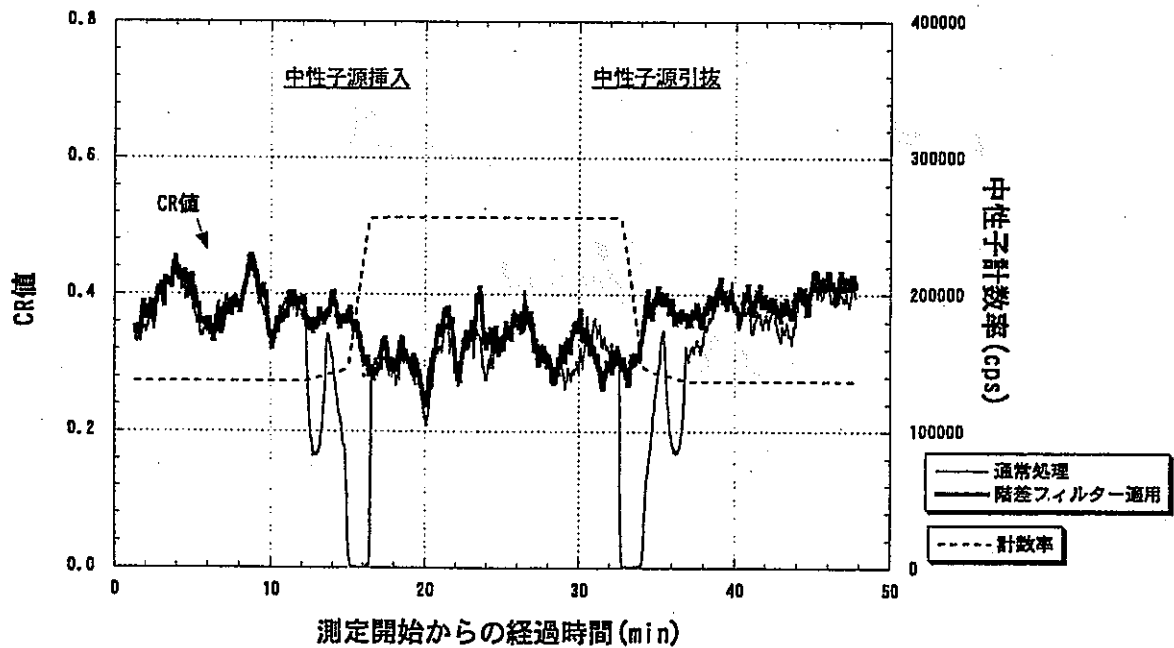
付図 5-1 実効増倍率変動時におけるミハルソ法測定結果 (データ分割法を適用した場合)



付図 5-2 実効増倍率変動時におけるミハルソ法測定結果 (階差フィルターを適用した場合)



付図 5-3 中性子源挿入時におけるミハルゾ法測定結果（データ分割法を適用した場合）



付図 5-4 中性子源挿入時におけるミハルゾ法測定結果（階差フィルターを適用した場合）

付録6 ミハルゾ法における固有中性子源の影響

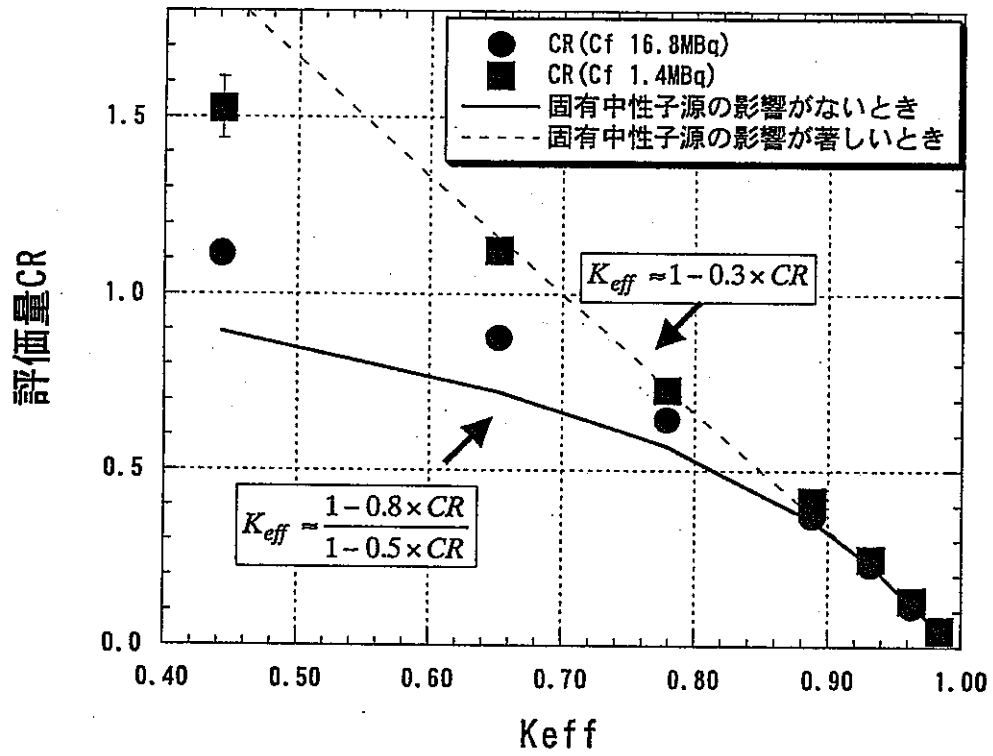
ミハルゾ法における固有中性子源強度（中性子バックグラウンド）の影響は、Cf線源の強度に対して固有中性子源の強度が無視できない場合に、未臨界度評価量とその統計精度の両方に現れる。

未臨界度評価量そのものに対する影響は実効増倍率が0.9以上であれば無視できるほど小さいが、実効増倍率がより小さくなると、実効増倍率の過小評価として影響が現れる。Cf線源の強度を変更することによって固有中性子源の相対強度を変化させた時の未臨界度評価量CR値の変化を付図6-1に示す。固有中性子源の相対強度がCf線源と同程度の場合、 K_{eff} 0.65を0.56と過小評価する。なお、固有中性子源の相対強度が十分大きい場合は、換算係数 C_{b2} は式(6-1)のように近似することが可能で、その結果、換算係数 C_{b2} は換算係数 C_{a2} と同程度の値となり、式(6-2)の未臨界度評価式が適用できる。

$$C_{b2} \approx \frac{(1-\beta_f)^2 \bar{\nu}_f X_f}{(1-\beta_c)^2 \bar{\nu}_c} \cdot R_{22} \cdot IR_{21} \quad (6-1)$$

$$k_{eff} \approx 1 - C_{a2} \cdot CR_{122} \quad (6-2)$$

未臨界度評価量の統計精度は、固有中性子源の相対強度が大きくなるほど悪化する。Cfとは無関係な中性子源を起源とする誘導核分裂の割合が大きくなり、Cf線源検出器と中性子検出器の相関量の検出精度が悪化するためである。付図6-1に示すDCAにおける測定結果の場合、固有中性子源の相対強度が10倍になると評価量に対する統計誤差の相対値が約2倍に増加する。



付図6-1 未臨界度評価量に対する固有中性子源の影響
 (固有中性子源の相対強度は、Cf1.4MBqの10倍、Cf16.8MBqの0.9倍)

付録7 不感時間の補正

検出器の不感時間 (dead time) は、検出器に連続して2個の放射線が入射した際に別々のパルスとして出力できる2個の放射線の到着時刻の最小時間差で定義される。

ファインマン- α 法及び時間相関解析によるミハルゾ法では、計数の平均値と分散の比 (Y値) を利用するが、以下に、平均値、分散に対する不感時間の影響を述べ、その補正方法を示す。

(1) 計数の平均値についての不感時間の影響

計数の平均値については、不感時間の影響の評価方法が確立されており、時間幅 ΔT あたりの計数の真の平均値を $\overline{C(\Delta T)}$ 、不感時間を t_d とすると、測定で得られる計数の平均値 $\overline{C_d(\Delta T)}$ は、

$$\overline{C_d(\Delta T)} = \lambda \cdot \overline{C(\Delta T)} \quad (7-1)$$

ただし、

$$\lambda = 1 - \frac{\overline{C_d(\Delta T)} \cdot t_d}{\Delta T} \quad (7-2)$$

となる。

(2) 計数率の分散についての不感時間の影響

計数率の分散については、補正方法は未だ確立されておらず、本研究において近似的な補正手法を考案した。分散には、1つの測定系で評価する分散 (以下、単に分散という) と、2つの測定系で評価する共分散の2種類がある。測定系 i, j について、分散 $C_{ii}(\Delta T)$ は、

$$C_{ii}(\Delta T) = \overline{C_i(\Delta T)^2} - \overline{C_i(\Delta T)}^2 \quad (7-3)$$

共分散 $C_{ij}(\Delta T)$ は、

$$C_{ij}(\Delta T) = \overline{C_i(\Delta T)C_j(\Delta T)} - \overline{C_i(\Delta T)} \cdot \overline{C_j(\Delta T)} \quad (7-4)$$

で評価される。ここで、 $\overline{\quad}$ は多数のサンプルについての平均値であることを、添字は関連する測定系を表す。真の分散及び共分散を $C_{ii}(\Delta T)$ 、 $C_{ij}(\Delta T)$ 、測定系 i, j につ

いての不感時間を t_{di}, t_{dj} 、とおくと、不感時間の影響を受けた分散及び共分散 $C_{iid}(\Delta T)$ 、 $C_{ija}(\Delta T)$ は、

$$C_{iid}(\Delta T) = \lambda_i^4 \cdot [C_{ii}(\Delta T) - \overline{C_i}(\Delta T)] + \lambda_i^3 \cdot \overline{C_i}(\Delta T) \quad (7-5)$$

$$C_{ija}(\Delta T) = \lambda_i^2 \cdot \lambda_j^2 \cdot C_{ij}(\Delta T) \quad (7-6)$$

と表される。

(3) Y 値についての不感時間の影響

1つの測定系及び2つの測定系についてのY値（それぞれ、 $Y_{ii}(\Delta T)$ 、 $Y_{ij}(\Delta T)$ と記す）は次式で表される。

$$Y_{ii}(\Delta T) = \frac{C_{ii}(\Delta T)}{C_i(\Delta T)} - 1 \quad (7-7)$$

$$Y_{ij}(\Delta T) = \frac{C_{ij}(\Delta T)}{\sqrt{C_i(\Delta T) \cdot C_j(\Delta T)}} \quad (7-8)$$

(1)、(2)に示した不感時間の影響を適用すると、不感時間の影響を受けたY値の測定値は、それぞれ

$$Y_{iid}(\Delta T) = \lambda_i^3 \cdot Y_{ii}(\Delta T) + \lambda_i^2 - 1 \quad (7-9)$$

$$Y_{ija}(\Delta T) = \sqrt{\lambda_i^3 \cdot \lambda_j^3} \cdot Y_{ij}(\Delta T) \quad (7-10)$$

と表される。

(4) 不感時間の影響の補正方法

ファインマン- α 法では、Y値の ΔT に対する変化に着目し、Y値を理論式にフィッティングして α 値を評価する。そのため、不感時間の影響を補正するためには、 $(\lambda^2 - 1)$ で表される項を定数項としてフィッティング理論式に追加するだけで良い。

ミハルゾ法では、Y値の値そのものを利用する。ミハルゾ法における未臨界度評価量CR値は、Y値を用いると次式で表現できる。

$$CR_{12}(\Delta T) = \frac{Y_{12}(\Delta T)}{Y_{22}(\Delta T)} \sqrt{\frac{C_2(\Delta T)}{C_1(\Delta T)}} \quad (7-11)$$

ただし、添え数字1はCf線源検出器を、2は中性子検出器の測定系を表す。

これまでに述べた不感時間の影響をそのまま適用しても、CR値の測定値に与える不感時間の影響を補正することが可能であるが、手順が複雑になる。そこで、不感時間の影響下でCR値を評価する場合は、評価手法を工夫し、 Y_{22d} の定数部分を先に補正し、得られた量 (Y_{22d}' と称する) を次式のようにCR値の評価に用いる。

$$CR_{12d}(\Delta T) = \frac{Y_{12d}(\Delta T)}{Y_{22d}'(\Delta T)} \sqrt{\frac{C_{2d}(\Delta T)}{C_{1d}(\Delta T)}} \quad (7-12)$$

このように評価したCR値は、不感時間の影響がない場合のCR値と次式の関係があり、

$$CR_{12d}(\Delta T) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} CR_{12}(\Delta T) \quad (7-13)$$

λ_1 、 λ_2 は、それぞれの測定系についてのY値の測定値から評価することによって、不感時間の影響を補正できる。

付録 8 ファインマン- α 法における換算係数の評価法

ファインマン- α 法では、測定で求めた α 値から実効増倍率を換算して求めるために、即発中性子寿命（以下、 ℓ という）と実効遅発中性子割合（以下、 β_{eff} という）の値が必要である。特に、 ℓ の評価は未臨界度の精度に大きく影響するため、精度の良い計算手法を確立する必要がある。

ℓ の評価手法として、2次元輸送計算コード TWODANT を用いる決定論的手法、3次元連続エネルギーモンテカルロ法コード MCNP4B を用いて確率論的手法に基づいて直接的に求める手法、測定の模擬計算から間接的に求める手法がある。これらの手法の概要と評価精度について述べる。

(1) 決定論的手法

2次元輸送計算コード TWODANT を用いる決定論的手法では、TWODANT で得られる中性子束および随伴中性子束を用いて、以下の摂動論の定義式(8-1)から中性子生成時間(以下、 Λ という)を計算し、式(8-2)から ℓ を求めた。なお、 β_{eff} は摂動論の定義式(8-3)から求めた値を各手法共通に用いた。

$$\Lambda = \frac{\int_{v,g} V(g)^{-1} \times \phi^+(g') \phi(g) dg dv}{\int_{v,g,g'} \chi_p(g') \phi^+(g') \times v \Sigma_f(g) \phi(g) dg dg' dv} \quad (8-1)$$

$$\ell = k_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (8-2)$$

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\int_{v,g,g'} \chi_d(g') \phi^+(g') \times \beta(g) v \Sigma_f(g) \phi(g) dg dg' dv}{\int_{v,g,g'} \chi_p(g') \phi^+(g') \times v \Sigma_f(g) \phi(g) dg dg' dv} \quad (8-3)$$

ここで、

$\phi(g)$: エネルギー g 群の中性子束

$\phi^+(g)$: エネルギー g 群の随伴中性子束

$V(g)$: エネルギー g 群の平均中性子速度

$\chi_p(g)$: エネルギー g 群の核分裂スペクトル

$\chi_d(g)$: エネルギー g 群の遅発中性子スペクトル

$\beta(g)$: エネルギー g 群の遅発中性子割合

(2) 確率論的手法による直接評価

MCNP4B コードを用いた直接評価では、式 (8-4) に基づいて ℓ を計算した。MCNP4B コードには、式 (8-4) に基づいて ℓ を計算する機能がないので、その機能を追加した。

$$\sum_i w_i \left(\frac{\sum_k f_k \bar{\nu}_k \sigma_{fk}}{\sum_k f_k \sigma_{Tk}} \right) T_i \bigg/ \sum_i w_i \left(\frac{\sum_k f_k \bar{\nu}_k \sigma_{fk}}{\sum_k f_k \sigma_{Tk}} \right) \quad (8-4)$$

ここで、

- w_i : 衝突中性子の重み
- T_i : 中性子の発生から衝突までの時間
- σ_{fk} : 核種 k のミクロ核分裂断面積
- σ_{Tk} : 核種 k のミクロ全断面積
- $\bar{\nu}_k$: 核種 k の核分裂で放出される中性子数
- f_k : 核種 k の原子数割合

(3) 確率論的手法による間接評価

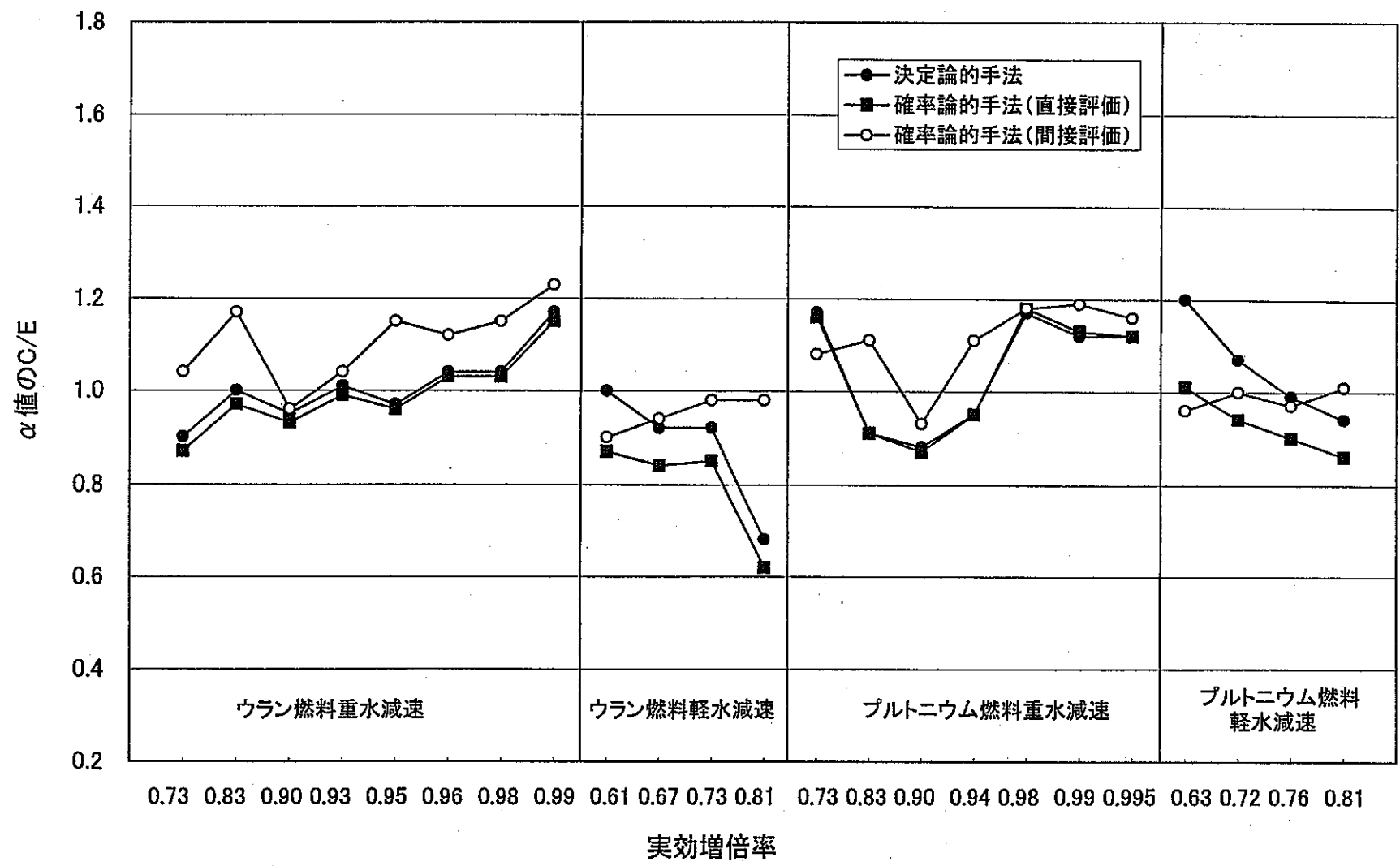
測定の模擬計算から求める間接評価では、付録 1 3 に示すように模擬計算機能を追加した MCNP4B コードによって α 値を評価し、その α 値と別途計算した実効増倍率の計算値と定義式(8-2)から計算した式 β_{eff} を用いて式 (8-6) に従って ℓ を評価する。

$$\ell = \frac{1 - k_{\text{eff}}(1 - \beta_{\text{eff}})}{\alpha} \quad (8-5)$$

(4) 評価精度

付図 8-1 に各手法によって評価した α 値の計算値と、 α 値の測定値の比較を示している。 α 値の計算値は、各手法から計算した ℓ と定義式(8-2)から求めた β_{eff} 、及び MCNP4B で評価した実効増倍率から式(8-5)により算出した。ウラン燃料軽水減速の実効増倍率 0.81 の結果（模擬計算手法以外の全手法の結果が過小評価となっており、今後検討が必要である）を除けば、各評価手法による α 値の計算値と測定値の比は以下のように、全ての計算手法において α 値を精度良く評価できている。

	計算値／測定値
決定論的手法	0.88～1.20
確率論的手法（直接評価）	0.84～1.18
確率論的手法（間接評価）	0.90～1.23



付図8-1 即発中性子寿命評価法の比較

付録9 ミハルゾ法における換算係数の評価法

ミハルゾ法では、測定で求めた未臨界度評価量 CR 値から実効増倍率を求めるために換算係数が必要である。付録2で触れたように、換算係数の評価においては体系の形状や検出器配置に依存するインポートランス比と R 因子が重要であるが、それらは次式のように中性子インポートランス分布を核分裂分布で重み付けして平均あるいは2乗平均して求められる。

インポートランス比 (IR_m):

$$IR_m = \frac{\int dr I_m(r) \cdot F(r)}{\int dr I_m(r) \cdot F_c(r)} \quad (9-1)$$

検出器#m と検出器#n に関する R 因子 (R_{mn}):

$$R_{mn} = \frac{\int dr I_m(r) \cdot I_m(r) \cdot F(r) \cdot \int dr F(r)}{\int dr I_m(r) \cdot F_c(r) \cdot \int dr I_n(r) \cdot F_c(r)} \quad (9-2)$$

実効増倍率が高い場合(目安として 0.95 以上)や検出器配置が特別な場合を除けば、中性子インポートランスには検出器配置を考慮したインポートランス(空間的に分布した核分裂中性子の検出への寄与の程度を表す指標)を使用することが正確に換算係数を評価するために必要である。

検出器の配置を考慮に入れた中性子インポートランス[1] [2][3][4]及び上記因子の評価方法を決定論的手法と確立論的手法それぞれを利用した場合について以下に示す。

(1) 決定論的手法による換算係数の評価方法

位置 r にあるエネルギー第 g 群の中性子インポートランス $I_g(r)$ は、周波数 $f(\text{Hz})$ が $\lambda \ll f \ll v_g \nu \Sigma_{f,g}$ の範囲では、周波数依存性が無視でき、式(9-3)で表される。

$$(D_g \nabla^2 - \Sigma_{a,g}) I_g + (1 - \beta) \nu_g \Sigma_{f,g}(r) \sum_p \chi_{p,g} I_g(r) + \sum_k \Sigma_{s,g \rightarrow k}(r) I_k(r) - \sum_k \Sigma_{s,g \leftarrow k}(r) I_g(r) + \Sigma_{d,g}(r) = 0 \quad (9-3)$$

ここで、

D_g : エネルギー第 g 群についての拡散係数

$\Sigma_{a,g}$: エネルギー第 g 群についての吸収断面積

$\Sigma_{s,g \rightarrow k}$: エネルギー第 g 群から第 k 群への散乱断面積

$\Sigma_{f,g}$: エネルギー第 g 群についての核分裂断面積

ν : 核分裂当たりの平均中性子放出数

β : 遅発中性子割合

$\chi_{p,g}$: エネルギー第 g 群についての即発中性子スペクトル

$\Sigma_{d,g}$: エネルギー第 g 群についての中性子検出断面積

である。

式(9-3)は、随伴中性子束が従う方程式に固定中性子源として中性子検出断面積を用いた場合に相当し、汎用の中性子束計算コードにおいて、固定中性子源として検出器の中性子検出断面積を入力し、かつ随伴計算を選択することによって計算できる。

計算コードによっては固定中性子源を含んだ随伴計算ができない場合があるが、HAGEN^[5]の手法に基づいてマクロ断面積データをあらかじめ随伴計算用に変換すれば上記方程式に基づく計算を実施できる。

(2) モンテカルロ模擬計算コードによる換算係数の評価方法

モンテカルロ法による模擬計算コードを用いてインポートランス比及びR因子を評価する方法を示す。使用した記号は付録2と同一である。

本研究で整備した模擬計算コードでは、Cf-252の代わりに固有中性子源としてPu-240などの自発核分裂源や核分裂線源ではない中性子源（非相関中性子源）を使用することができる。自発核分裂物質を使用した場合は、Cf線源を使用した場合と同様に中性子発生時間が記録できる。

まず、模擬計算コードで以下の量を求める。

- (a) Cf線源のみを中性子源とした模擬計算
- (b) 自発核分裂中性子源のみを中性子源とした模擬計算
- (c) 非相関中性子源のみを中性子源とした模擬計算

(b),(c)は固有中性子源の影響を考慮するためのものであり、固有中性子源強度がCf線源強度に対して無視できる場合や近似的な評価を行う場合は不要である。

次に、得られる検出器出力の分散及び平均を用いて以下の量を評価する。

$$Y_{12}'(\Delta T) = \frac{C_{12}(\Delta T)}{C_1(\Delta T) \cdot C_2(\Delta T)} \cdot \Delta T \quad (9-4)$$

$$Y_2'(\Delta T) = \frac{C_{22}(\Delta T) - C_2(\Delta T)}{C_2(\Delta T)^2} \cdot \Delta T \quad (9-5)$$

各量はそれぞれ理論的に次式で表される。

$$Y_{12}'(\Delta T) = \frac{\overline{v_c \cdot I_{2c}}}{\rho_p \cdot \overline{v_p} \cdot I_2 \cdot F} \left(1 - \frac{1 - \exp(-\alpha \Delta T)}{\alpha \Delta T} \right) \quad (9-6)$$

$$Y_2'(\Delta T) = \frac{\overline{v_p(v_p - 1) \cdot F \cdot I_2^2 + v_{cp}(v_{cp} - 1) \cdot F_c \cdot I_{2c}^2 + v_{ip}(v_{ip} - 1) \cdot F_i \cdot I_{2i}^2}}{\rho_p^2 \cdot \overline{v_p}^2 \cdot F^2 \cdot I_2^2} \left(1 - \frac{1 - \exp(-\alpha \Delta T)}{\alpha \Delta T} \right) \quad (9-7)$$

$\Delta T \rightarrow \infty$ における飽和値を評価すると次式となる。

$$Y_{12}'(\Delta T \rightarrow \infty) = \frac{\overline{v_c \cdot I_{2c}}}{\rho_p \cdot \overline{v_p} \cdot I_2 \cdot F} \quad (9-8)$$

$$Y_2'(\Delta T \rightarrow \infty) = \frac{\overline{v_p(v_p - 1) \cdot F \cdot I_2^2 + v_{cp}(v_{cp} - 1) \cdot F_c \cdot I_{2c}^2 + v_{ip}(v_{ip} - 1) \cdot F_i \cdot I_{2i}^2}}{\rho_p^2 \cdot \overline{v_p}^2 \cdot F^2 \cdot I_2^2} \quad (9-9)$$

式(9-8),(9-9)から以下のようにインポートランス比及びR因子を算出する。

① Cf線源検出器に関するインポートンス比の算出

式(9-8)において、 $\overline{\nu_c}, \overline{\nu_p}$ は核定数あるいは模擬計算結果から、 ρ_p は即発中性子のみによる実効増倍率計算値から、 \overline{F} は模擬計算結果からそれぞれ評価でき、インポートンス比が得られる。

② 固有中性子源に関するインポートンス比の算出

式(9-4)の算出において、線源発生信号として Cf線源の代わりに固有中性子源を用いて①と同様な手順に従うと、固有中性子源に対するインポートンス比が得られる。

③ Cf線源検出器に関する R 因子の算出

Cf線源は点線源であるので

$$\overline{I_{2c}^2} = \overline{I_{2c}}^2 \quad (9-10)$$

であり、Cf線源検出器に関する R 因子は常に 1 である。

④ 誘導核分裂に関する R 因子の算出

式(9-5)の算出において、固有中性子源として自発核分裂中性子源の代わりに等強度の非相関中性子源を使用する。その結果、式(9-9)は次式となる。

$$Y_2'(\Delta T \rightarrow \infty) = \frac{\overline{\nu_p(\nu_p - 1)} \cdot \overline{F} \cdot \overline{I_2^2} + \overline{\nu_{cp}(\nu_{cp} - 1)} \cdot \overline{F_c} \cdot \overline{I_{2c}^2}}{\rho_p^2 \cdot \overline{\nu_p}^2 \cdot \overline{F}^2 \cdot \overline{I_2^2}} \quad (9-11)$$

$\overline{\nu_p}, \overline{\nu_{cp}}, \overline{\nu_p(\nu_p - 1)}, \overline{\nu_{cp}(\nu_{cp} - 1)}$ は、核定数あるいは模擬計算結果から、 $\overline{F_c}$ 及び \overline{F} は模擬計算結果から、また、インポートンス比が①に示すとおりに得られるため、誘導核分裂に対する R 因子が評価できる。

⑤ 固有自発核分裂中性子源に関する R 因子の算出

核定数あるいは模擬計算結果、及び①～④の手順で求めた各因子を式(9-7)に代入することにより、固有自発核分裂中性子源に関する R 因子を算出できる。

付録 9 の参考文献

- [1] F.C.Difilippo: " Harmonic analysis of stochastic descriptors and the interpretation of ^{252}Cf Neutron Source Experiments, Nucl.Sci.Eng.,104, 123(1990).
- [2] 須田憲二,山根義宏,他,日本原子力学会「1990年年会」予稿集,B49
- [3] K. Suda, et al.: "Subcriticality Evaluation Formula with the Use of Detector Importance Function for the Cf-Driven Neutron Noise Measurement", THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON Nuclear Criticality Safety, Oxford, England, Volume VI,23(1991).
- [4] Hugo Van Dam: " A perturbation method for analysis of detector response to parametric fluctuations in reactors" , Atomkernenergie,Vol.25[1], pp70-71, (1975).
- [5] T.H.J.J.van der Hagen, et al.: " A Multidimensional Multigroup Diffusion Model for the Determination of the Frequency-Dependent Field of View of a Neutron Detector" , Nucl.Sci.Eng., 110,237(1991).

付録 1 0 ミハルゾ法における換算係数の特性

未臨界度評価量 CR 値から未臨界度 ρ を求める際に用いられる換算係数の評価においては、付録 2 で述べたようにインポートンス比と R 因子が支配的な要因である。以下にその特性を述べる。

R 因子は、

$$R \text{ 因子} = \frac{\overline{I_i^2}}{\overline{I_i}^2} \quad (11-1)$$

のように中性子インポートンスの 2 乗平均値と平均の 2 乗との比で表される。ある位置における中性子インポートンスは、その位置において発生する中性子が最終的に検出器に検出される程度を表す。一方、中性子間の相関は核分裂によって複数の中性子が同時に放出されることに起因するので、式(11-1) の分母が単なる「中性子の検出しやすさ」を表すのに対し、分子の 2 乗値は「相関を持つ中性子の検出しやすさ」を表すことになる。それらの比である R 因子は、「検出した中性子が相関を持つ可能性」を表す指標となる。R 因子は、中性子インポートンスの高い箇所では核分裂が多く発生している場合は 1 より大きくなり、逆の場合は 1 より小さくなる。なお、中性子インポートンスの空間分布は、臨界近傍では検出器の配置に関わらず中性子束の分布に類似するが、実効増倍率が低い場合には、検出器から離れるに従って急激に減少する分布となる。そのため、体系の変動による R 因子の変化を最小限に抑えるためには、核分裂が最も頻繁に発生している箇所（相関源）を効果的に監視できるような配置を選択することが重要である。

一方、インポートンス比は、

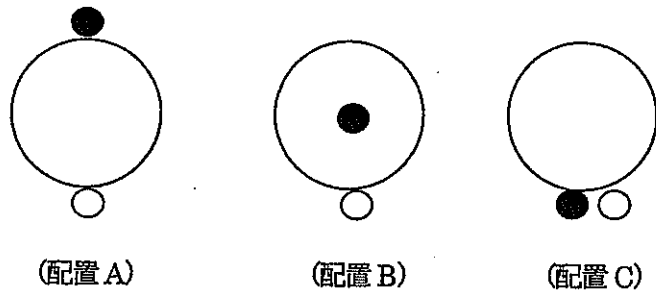
$$\text{インポートンス比} = \frac{\overline{I_i}}{I_{ic}} \quad (11-2)$$

で表される。分子は体系内の誘導核分裂で発生する中性子に対する中性子インポートンスの平均値を、分母は Cf 線源検出器から発生する中性子に対する中性子インポートンスを表す。それらの比であるインポートンス比は、「Cf 線源検出器から発生した中性子と体系内で誘導核分裂によって発生した中性子のどちらを検出しやすいか」を表す指標となる。

そのため、インポートンス比は検出器配置の影響を大きく受けやすい。例えば、付図 10-1 のように中性子検出器を固定し、配置 A → 配置 B → 配置 C のように Cf 線源検出器の

位置を変化させた場合、中性子検出器と Cf 線源検出器の距離が離れるほど Cf 線源検出器からの中性子に対する検出効率が体系内で発生した中性子に対する検出効率に比べて低下し、インポートランス比が大きくなる。

そのため、体系の変動によるインポートランス比の変化を最小限に抑えるためには、体系の変化によって、体系と2つの検出器配置の関係が変わらないような検出器配置を選択することが重要である。



付図 10-1 検出器配置と未臨界度評価量の関係

付録 1 1 Cf 線源検出器

ミハルゾ法では Cf-252 中性子源（半減期 2.645 年）を内蔵した電離箱が必要である。Cf 線源検出器は非密封 Cf-252 を内蔵した電離箱であり、Cf の自発核分裂による核分裂片を電離箱で検出することによって、自発核分裂で発生する中性子の放出タイミングを把握する機能を備えている。すなわち、発生タイミング出力機能付きの中性子源である。

Cf 線源検出器は、Cf を電離箱に内蔵する点が特殊であり、日本では製作経験がない。過去に日本原子力研究所でフランス製の Cf 線源検出器を使用した経験があるが、数年で使用できなくなったとのことである。

本研究開発では、試験用の弱強度（37kBq）の線源を使用して電極間距離やガス圧について仕様を検討し、2種類の強度（3.7MBq, 30MBq）の Cf 線源検出器を製作した（付図 11-1）。

電離ガスには、CO₂-Ar と PR ガス（10% CH₄ + Ar）を試験した。性能に差異はないものの、長期的には CH₄ ガスの分解により炭素が線源に付着する可能性が考えられるため、CO₂-Ar を選択した^[1]。

電極間距離とガス圧の設定値を決定するにおいては、自発核分裂の発生タイミングを検出するために、電離箱で検出される Cf-252 の α 粒子と核分裂片 (FP) から FP による信号 (FP 成分) のみを信号として取り出すため、 α 粒子による信号 (α 成分) の出力波高と FP 成分による出力波高 (付図 11-2) の差が最大となるような設定とした。ただし、 α 粒子と FP のエネルギー損失過程の差異 (α 粒子が飛程の最後にエネルギーを失うのに対し、FP は飛程の最初にエネルギーを失う特性) を利用し、電極間距離を 1mm 程度に短くしても α 成分と FP 成分の分離性能は確保することができるが、本研究では信号スペクトルの径時変化の観測によって性能劣化を予測するため、前述の指標に基づき電極間距離を約 10mm に決定した。

製作した線源検出器は、直径 10cm、高さ 3cm であるが、小型化も十分可能である。本手法を最も精力的に手掛けているミハルゾ氏らは多数の線源検出器を製作しており、直径 2cm、高さ 3cm 程度の小型の線源検出器を実用化している。

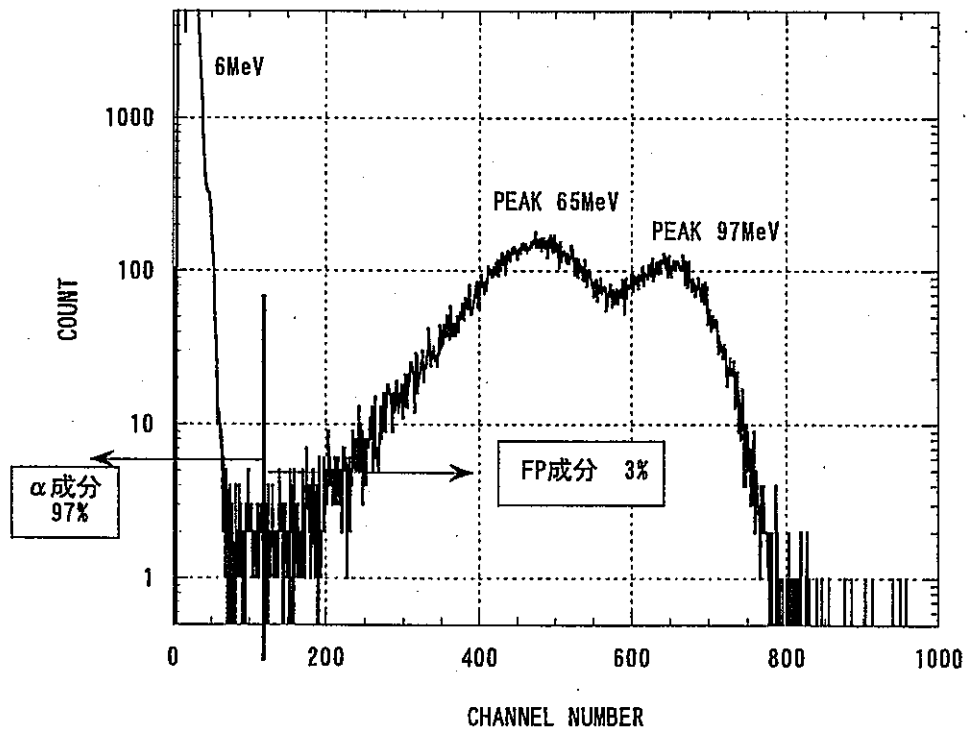
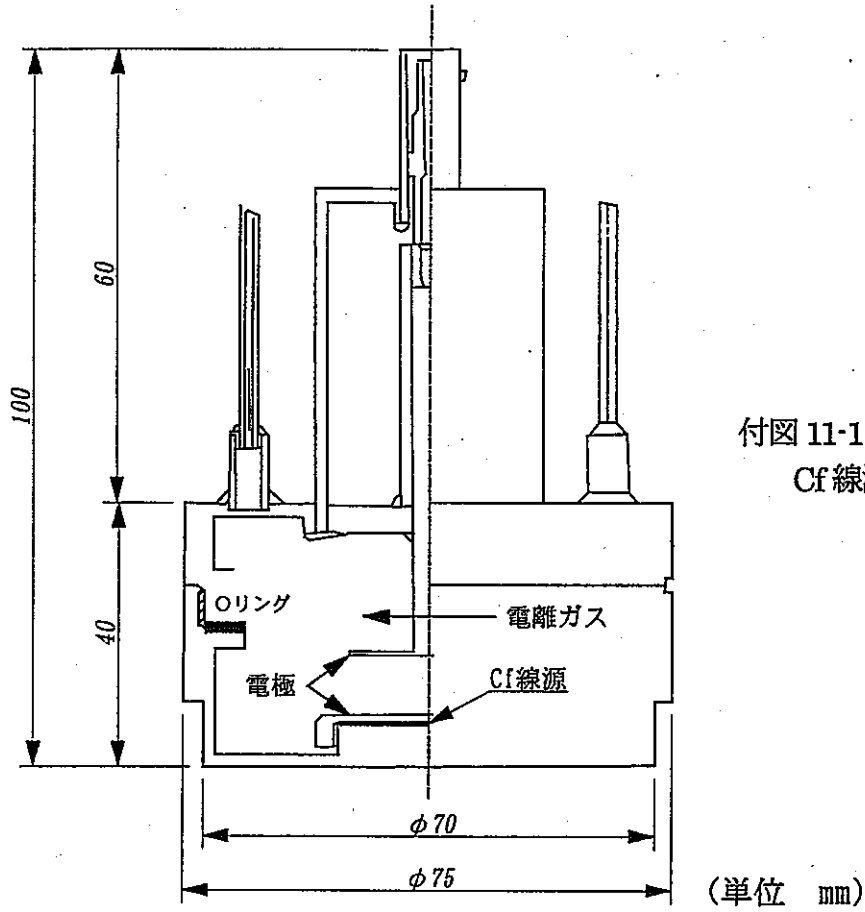
Cf 線源検出器は、放射線障害防止法の規制対象であり、密封放射性同位元素として扱われた。密封性能は (社) 日本アイソトープ協会によって実施された試験により確認し、日本工業規格 (JIS Z-4821 1988) の校正用線源 (1MBq を超えるもの) としての性能要件を満足している。密封されているため電離ガスの置換はできないが、製作した線源検出器はガス密封後 6 年経過した現在も性能を維持している。

Cf 線源自体は、200 万円程度で日本アイソトープ協会から入手可能であり、検出器本体の製作についても特別な技術は不要であるが、Cf 線源の検出器本体への密封作業については、現段階では国内に商業ベースの実施機関はない。なお、ミハルゾ法の提唱者である米国オークリッジ研究所のミハルゾ氏から、20,000 ドル程度で販売するとの申し出を受けたことがあり、現在でもミハルゾ氏を通じて入手可能と思われる。

また、線源強度については、DCA における測定試験において強度 3.7MBq に満たない Cf でも線源検出器として利用できることが確認されているが、強度 3.7MBq 未満の密封 Cf 線源は法規制対象ではない。将来的に 3.7MBq に満たない弱強度の Cf 線源検出器が密封線源として認知されれば、入手性が向上することが期待できる。

付録 11 の参考文献

- [1] J. T. Mihalcz, et al. : "Determination of Reactivity from Power Spectral Density Measurements with Californium-252", Nucl. Sci. Eng., 66, 29 (1978).

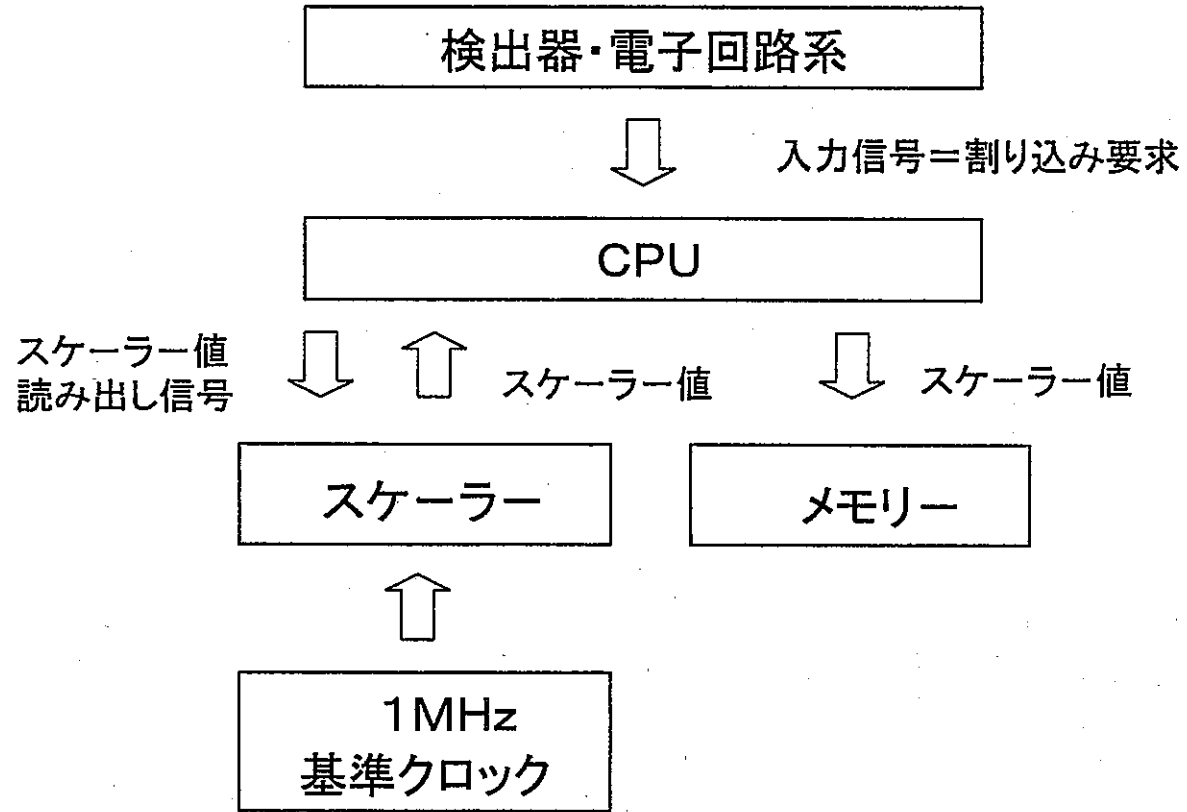


付図 11-2 Cf線源検出器の出力波高スペクトル

付録 1 2 パルス時系列直接測定装置

パルス時系列直接測定装置は、検出器信号の検出時刻を時刻データとして記録する装置であり、パーソナルコンピュータ（PC）上に信号入力を感じ取るためのゲート回路と時刻ユニットの機能を追加して構成される（付図 12-1）。ゲート回路はパルス信号の入力部を有し、パルス信号発生情報を計算機の CPU に渡す。時刻ユニットは基準クロックの信号をカウンタで時刻情報に変換する。ゲート回路に信号が入力されると、カウンタの時刻情報がメモリに送られ、PC のメモリに追加モードで書き込む。その結果、パルス入力時刻の情報がメモリに記録されることになる。

本装置では、測定データが解析を行う計算機のメモリ（容量 1Gbyte 以上も可能）に直接書き込まれるため、メモリ容量に起因するデータ長の制限が緩和され、データ処理を並行して実施すれば無限に連続測定ができる。また、装置により収集されるデータは中性子の検出時刻そのものであるため、MCS で必要とされるパルスを計数する時間幅 ΔT の設定はデータ収集後に最適値に調整することができる。さらに、MCS では設定時間幅内に計数が無くてもゼロのデータとして記録する必要があるが、本装置は計数する場合のみデータを記録するため、計数率が小さい場合には処理するデータ量を大幅に低減することができる合理的な装置である。



付図12-1 計算機を用いたパルス時系列データ収集の概念

付録 1 3

モンテカルロ法による未臨界度測定の実験計算

連続モンテカルロ法コード MCNP4B を基に、ファインマン- α 法およびミハルソ法による測定を模擬する計算コードを開発した。開発した模擬計算コードは、換算係数の評価や実体系に対する未臨界度測定技術の適用性評価のために利用できる。

(1) 模擬計算のための変更点

ファインマン- α 法およびミハルソ法による未臨界度測定を模擬するために、MCNP4B コードに以下の機能追加及び入力設定を行った [1] [2]。

- ①核分裂中性子発生数が式(13-1)の正規分布に従うように機能追加

$$\sum_{n=0}^{\infty} p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(n - \langle v_0 \rangle)^2 / \sigma^2} e^{-b n} dt \quad (13-1)$$

ここで、

- v_0 : 核分裂発生数
 $\langle v_0 \rangle$: 核分裂発生数の期待値
 σ : 1.08
 b : < 0.01 (v_0 が負にならないための補正因子)

である。

- ②核分裂中性子発生数の期待値は即発中性子のみを考慮 (入力設定)
 ③捕獲を扱う手法として analog capture 手法を選択 (入力設定)
 ④中性子発生時の時間分布をポワソン分布とする機能追加
 ⑤Cf線検出器を模擬するために、平均 3.757 個 (Cf線源の自発核分裂発生中性子数に相当) を同時刻に発生させ、発生時間を記録する機能追加
 ⑥固有中性子源の模擬として、⑤と同様に Pu-240 (平均 2.16 個) や U-238 (平均 1.96 個) による中性子発生機能を追加
 ⑦検出器内で吸収反応が発生した時に検出時間を記録する機能追加

(2) 模擬性能

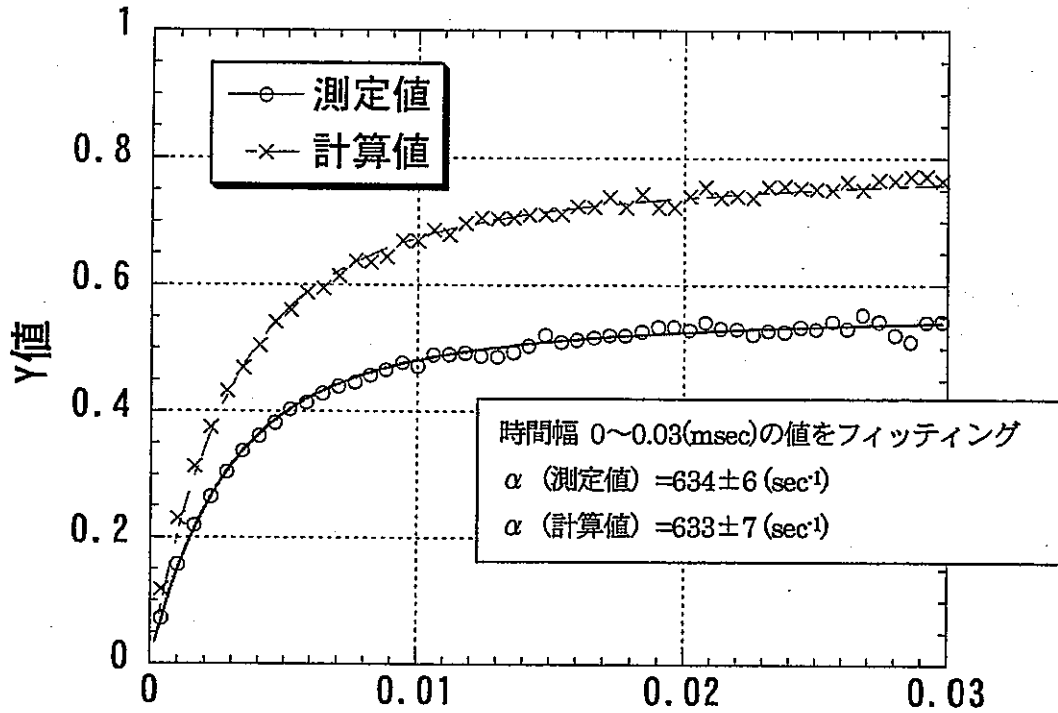
ファインマン- α 法及びミハルソ法による未臨界度測定の実験性能を DCA の実効増倍率が 0.9 の体系を測定対象として検証した。測定及び模擬計算の間で使用するデータ量を共通 (測定時間 600sec 相当のデータ量) とし、未臨界度評価量の絶対値に加えて誤差の模擬性能も検証した。

ファインマン- α 法では、相関量 Y 値、及び Y 値を理論式にフィッティングして得られる未臨界度評価量 α 値について模擬計算値と測定値を比較した(付図 13-1)。模擬計算によって求めた Y 値及び α 値は測定値とほぼ一致しており、模擬計算コードが評価量の模擬性能を有していることが確認できた。また、誤差(1 σ)についても模擬計算値は測定値と一致しており、測定時間と誤差の関係(すなわち、未臨界度測定装置の応答時間)についても模擬できることが確認できた。

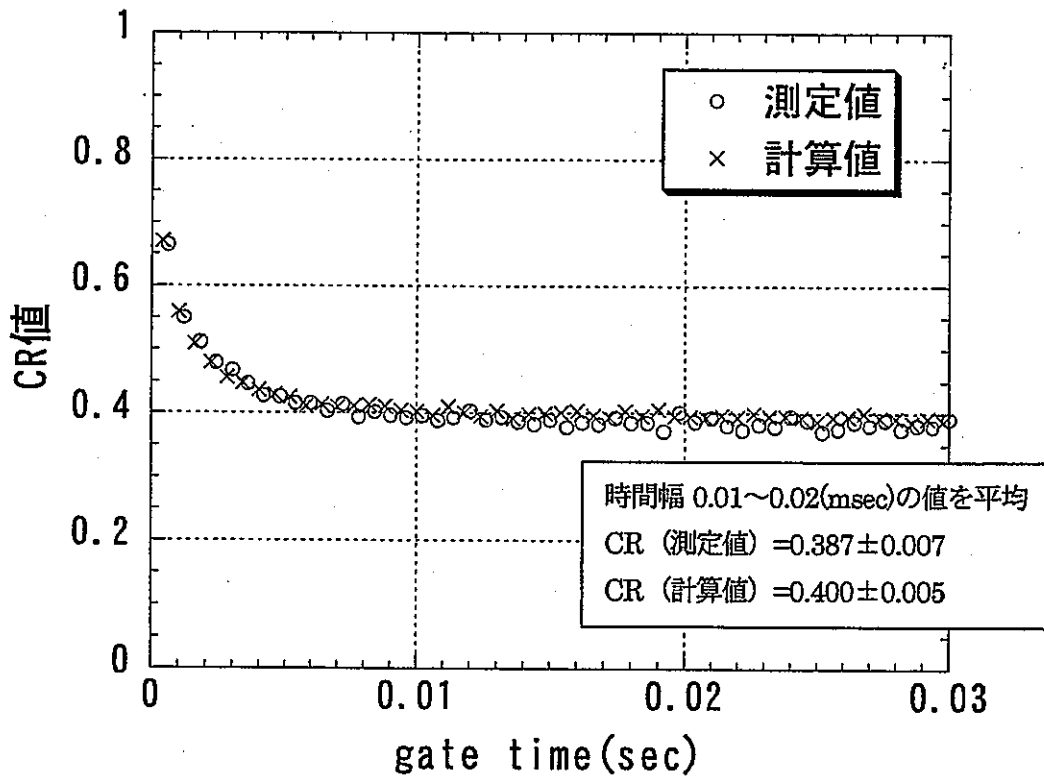
ミハルゾ法でも付図 13-2 に示すように模擬計算によって求めた未臨界度評価量 CR 値及びその誤差は、測定値と一致しており、評価量及び応答時間の模擬性能を有することが確認できた。

付録 1 3 の参考文献

- [1] 山本俊弘、他：“MCNP4A による Feynman- α 法のシミュレーション”、日本原子力学会 1997 年春の年会要旨集、E8(1997)。
- [2] 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション、培風館(1969)



付図 13-1 未臨界度評価量に対する模擬計算値と測定値の比較 (ファインマン- α 法)



付図 13-2 未臨界度評価量に対する模擬計算値と測定値の比較 (ミハイルノ法)

付録 1 4 DCA 炉心の臨界基本特性

試験体領域とドライバー領域から成る未臨界度測定実験用炉心の炉心特性として、代表的な 3 種類の炉心体系について実施した臨界特性測定結果について紹介する。

(1) 未臨界度測定実験用炉心の概要

3 種類の炉心について、ドライバー領域には 1.2%濃縮ウラン燃料棒が 28 本クラスター型の燃料集合体として 136 体装荷されており、試験体領域には 2.7%濃縮ウラン燃料棒が均一に 140 本配列されている。炉心体系を付図 14-1 に示す。

ドライバー領域の圧力管(136 体)のうち、136 体すべての圧力管内に軽水が注水されている体系 (A 炉心)、内側 36 体の圧力管内に軽水が注水され、外側 100 体の圧力管内がボイドである体系 (B 炉心) 及び 136 体すべての圧力管内がボイドである体系 (C 炉心) の 3 種類の炉心特性を測定した。

減速材は、試験体領域では軽水、ドライバー領域では重水のように、2 つの領域で異なっている。軸方向についても試験体領域の減速材水位とドライバー領域の重水水位が異なる凹凸の体系となっている。また、試験体領域とドライバー領域の境界部には空気層があり、炉心全体としては非均質性が強い体系である。

(2) 未臨界度測定実験用炉心の臨界特性測定

A 炉心、B 炉心及び C 炉心の 3 種類の炉心体系について、試験体領域の減速材水位の上昇に伴うドライバー領域の臨界重水水位の低下を測定した。付図 14-2 に臨界重水水位の測定結果を示す。

付図 14-2 に示すように、各炉心では共通して試験体領域の減速材水位の上昇 (実効増倍率の増大) に伴ってドライバー領域の臨界重水水位が低下する基本特性を示している。試験体領域の減速材水位の変化に対してドライバー領域の臨界重水水位は、A 炉心、B 炉心、C 炉心の順に変化が急であり、水位も高くなる。

A 炉心では、ドライバー領域のすべての圧力管内に軽水が注水されているため、他の炉心に比べるとドライバー領域において中性子の減速が進み熱中性子成分が多い。そのため、炉心全体のうちドライバー領域の占める反応度の割合が大きく、試験体領域の減速材水位に対するドライバー領域の臨界重水水位の変化が他の炉心に比べて小さい。

一方、C炉心では、圧力管内に軽水が全く注水されていない分、中性子の減速が進まないため、他の炉心に比べドライバー領域の熱中性子成分が少なく、ドライバー領域の占める反応度の割合は小さい。このため、試験体領域の減速材水位変化に対するドライバー領域の臨界重水水位変化が、他の炉心に比べて大きい。

ドライバー領域の内側の圧力管内にのみ軽水が注水されているB炉心の臨界重水水位は、A炉心とC炉心の中間的傾向を示す。

(3) 測定値と解析値の比較評価

3種類の炉心体系について、試験体領域の減速材水位変化に対するドライバー領域の臨界重水水位の測定値と解析値の比較を付図14-3に示す。解析には、2次元R-Z形状モデルによる輸送計算コードTWOTRAN^[1]と3次元モデルによる多群モンテカルロ法コードKENOを含むSCALEコードシステム^[2]を使用し、2種類の解析結果を測定値と比較した。

両コードを用いた解析は、ともにENDF-B/4ライブラリーを基に作成した27群の群定数を用いているが領域の均質化方法は異なる。TWOTRANによる解析では、試験体領域とドライバー領域をそれぞれ一様に均質化した格子平均の群定数を適用し、SCALEによる解析では、試験体領域については均質化領域として扱っているが、ドライバー領域については燃料クラスターを含む各圧力管内の燃料領域と重水領域を個別に扱い、領域別に群定数を作成した。

図3-4に示すように、TWOTRAN及びSCALEによる解析値は、ともに測定値の傾向を良く再現している。特に、SCALEによる解析値は、各炉心の測定値に対して非常に良い一致を示している。一方、TWOTRANによる解析値は、A炉心では臨界重水水位の測定値に対して過小評価（実効増倍率として過大評価）し、C炉心では逆に過大評価（実効増倍率として過小評価）している。B炉心の解析値は、A炉心とC炉心の中間値を示している。

前述のTWOTRANを用いたR-Z形状による均質化モデルの計算手法は、測定値の傾向を再現しているが、良好な解析精度を得るまでに至っていない。TWOTRANコードでは、非均質性の強い複雑な体系への適用に限界があるためと考えられる。

SCALEコードシステムは、核燃料施設の臨界安全解析には標準的なコードとして多用されているが、モンテカルロ法による計算結果には統計的誤差を伴うことが不可避であることから、炉心設計に適用することは、これまであまり検討されていない。近年、炉物理研究として、炉心核特性を連続エネルギーモンテカルロ法によって評価し

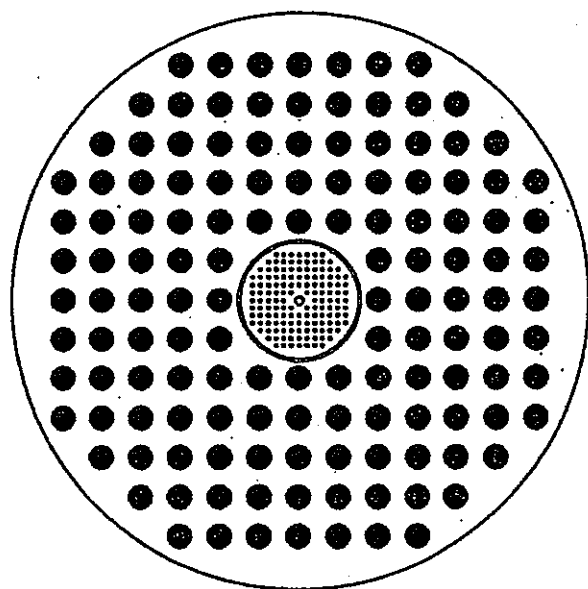
た例が多く報告されているが、本実験体系において計算時間が比較的短い多群モンテカルロ法による SCALE コードシステムを用いることによって良好な結果が得られたことは、非均質性の強い複雑な未臨界度測定実験用炉心に対して、多群モンテカルロ法による計算の適用性が高いことを示している。

付録 1 4 の参考文献

- [1] “TWODANT-SYS : One Dimensional, Multigroup, Discrete-Ordinates Transport Code System” , CCC-547 RSIC ORNL (1990)
- [2] “SCALE4.2 : Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation Vol. 0” CCC-545 RSIC ORNL (1993)

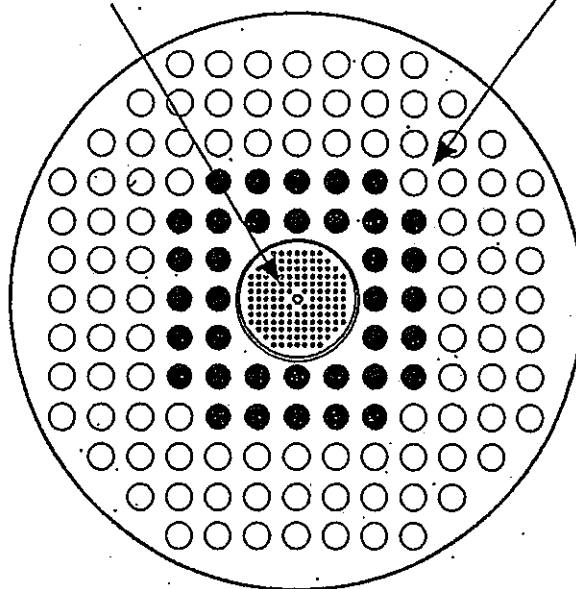
- 圧力管内が燃料及び軽水
- 圧力管内が燃料及びボイド

試験体領域 ドライバー領域



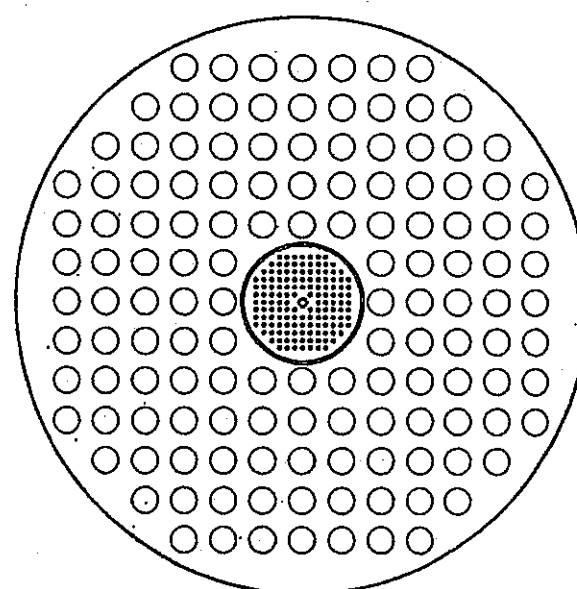
S2-3 炉心

● 136 体



S2-1 炉心

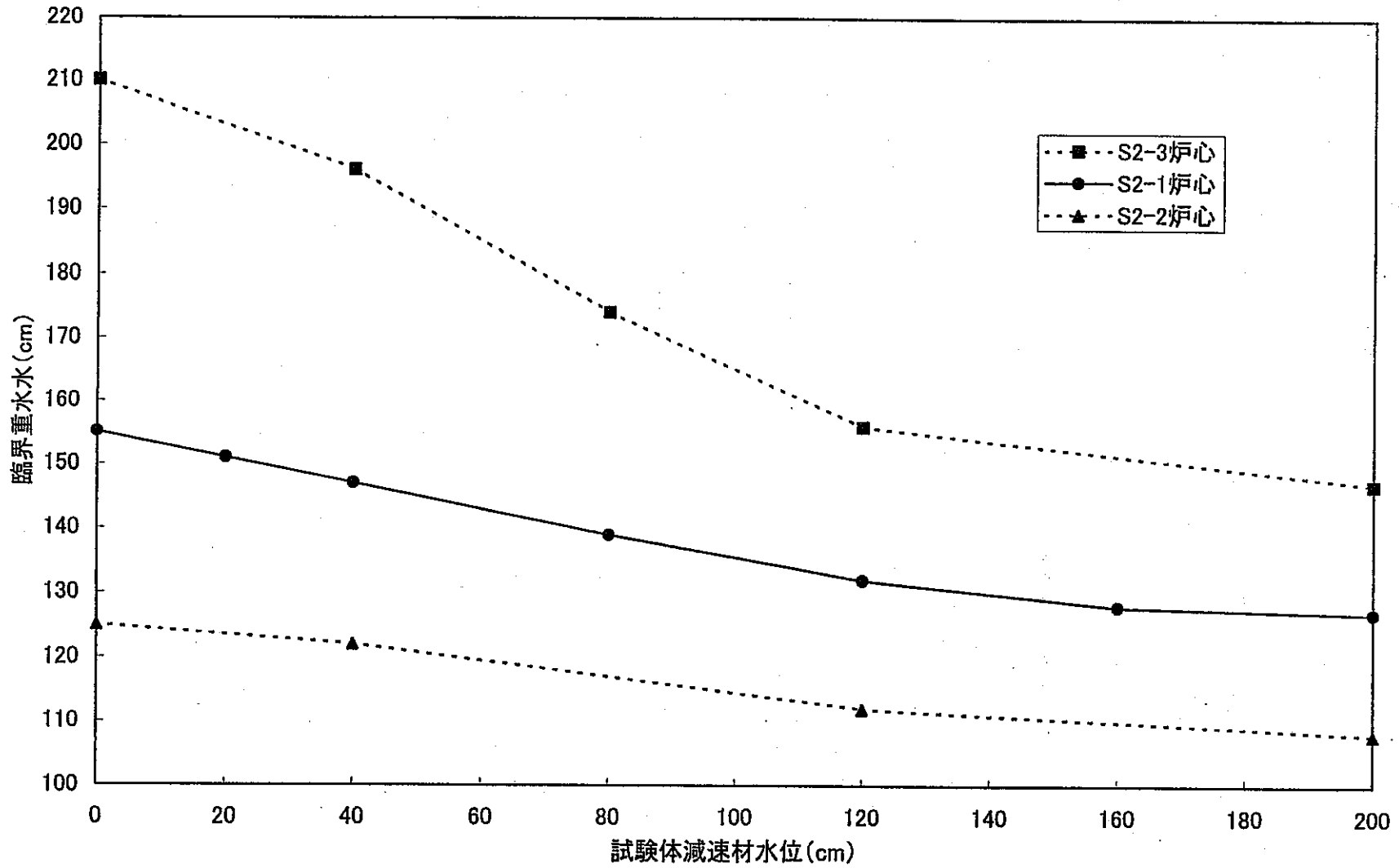
● 36 体 ○ 100 体



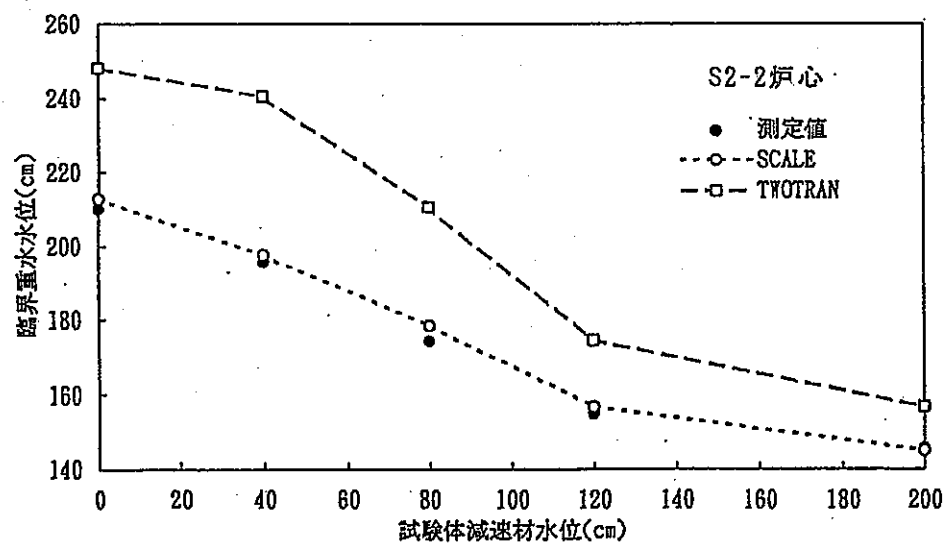
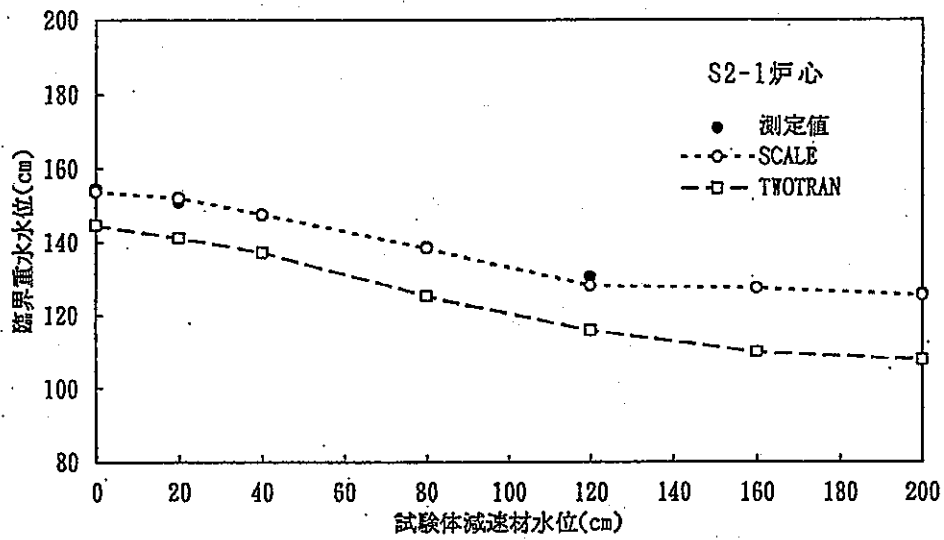
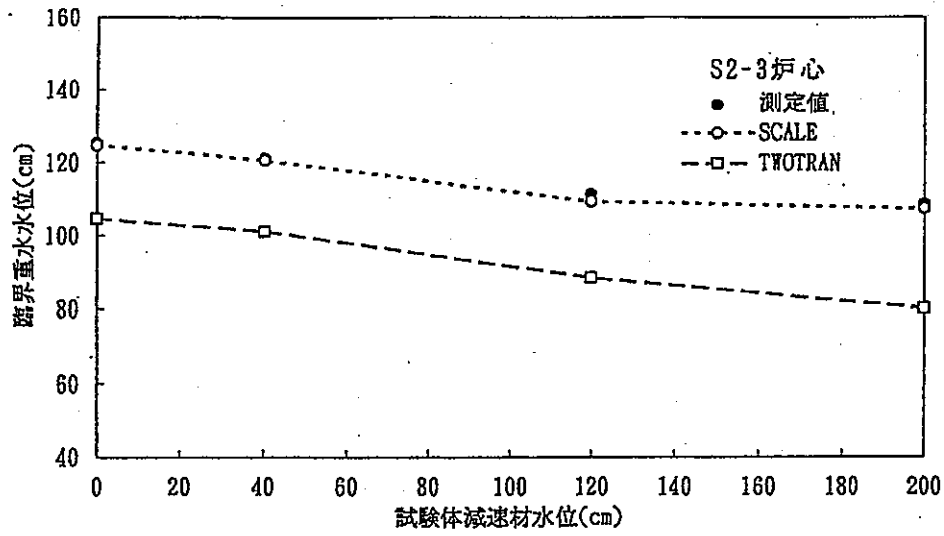
S2-2 炉心

○ 136 体

付図14-1 臨界特性測定のための炉心種類



付図14-2 試験体減速材水位に対する臨界重水水位の依存性



付図14-3 臨界重水水位の測定値と解析値の比較

付録 1 5

未臨界度測定技術開発に関する報告書等

未臨界度測定技術の研究開発に関する外部発表、成果報告等の一覧を以下の表に示す。

付表 15-1 未臨界度測定技術開発に関する報告書等

外部発表、投稿 計 22 件

No	年度	著者、題名、刊名
1	H4	大谷、「ファインマン- α 法による低実効増倍率測定」、 日本原子力学会 1993 年春の年会要旨集 A15
2		林津 他、「ファインマン- α 法による未臨界度測定の基礎検討」、 日本原子力学会 1993 年春の年会要旨集 A16
3	H5	大谷、「ファインマン- α 法による低実効増倍率測定(2)」、 日本原子力学会 1993 年秋の大会予稿集 E23
4		大谷、「重水臨界実験装置を用いた未臨界度測定研究の現状について」、 日本原子力学会 「システム安全工学実験設備」研究専門委員会
5	H6	大谷、「ファインマン-アルファ法による未臨界度モニターの開発」、 日本原子力学会 1994 年秋の大会予稿集 G33
6		羽様 他、「Cf線源検出器の開発」、 日本原子力学会 1994 年秋の大会要旨集 E34
7	H7	N.Ohtani, T.Hazama: "SUBCRITICALITY MONITORING BY FEYNMAN- α METHOD", THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON Nuclear Criticality Safety, Albuquerque, New Mexico, Aug 26-29, Volume II 11-43 (1995).
8		羽様 他、「ミハルゾ法における検出器特性の影響評価」、 日本原子力学会 1995 年秋の年会予稿集 A30
9	H8	相原 他、「DCA未臨界度測定体系の炉心特性」、 動燃技報 No.99 1996
10		大谷、「臨界近接警報の為の中性子雑音ウェーブレット解析」、 日本原子力学会 1996 年秋の大会予稿集 A21
11		羽様 他、「高バックグラウンド下でのミハルゾ法による未臨界度測 定」、日本原子力学会 1997 年春の年会要旨集 E4
12		相原、「臨界集合体の現状と将来利用」、 日本原子力学会誌 40[4],254(1998)
13	H9	毛利 他、「ファインマン- α 法における階差フィルターの適用」、 日本原子力学会 1998 年春の年会要旨集 G40
14		羽様、「2本の検出器によるミハルゾ法測定」、 日本原子力学会 1998 年春の年会要旨集 G41
15	H10	毛利 他、「MCNP コードを用いたDCA炉雑音実験のシミュレーシ ョン」、日本原子力学会 1999 年春の年会要旨集 G31

16	H11	K.HASHIMOTO, et al.: "Reduction of Delayed-Neutron Contribution to Variance-to-Mean Ratio by Application of Difference Filter Technique", J. nucl. Sci. Technol., 36, 7, 555 (1999).
17		K. Nishihara, et al.: "Numerical Validation of the Theory of Coupled Reactors for the Heavy Water Critical Assembly DCA", J. nucl. Sci. Technol., 36, 3, 265 (1999).
18		羽様 他、「時間相関解析によるミハルゾ法未臨界度測定」 日本原子力学会 1999年秋の大会予稿集 E30
19		T. Hazama: "IMPROVED ²⁵² Cf-SOURCE-DRIVEN NOISE ANALYSIS METHOD BASED ON TIME DOMAIN ANALYSIS", THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON Nuclear Criticality Safety, Versailles, France, Volume III, 1243 (1999).
20		毛利 他、「ファインマン- α 法の中性子束変動体系への適用」、 日本原子力学会 2000年春の年会要旨集 C30
21		羽様、「ミハルゾ法の開発状況」、日本原子力学会「炉雑音計測の高度化と新しい応用」研究専門委員会報告書(平成13年度中発行予定)
22	H12	羽様 他、「未臨界度測定における不感時間の影響の補正」、 日本原子力学会 2001年春の年会要旨集 G36

社内報告書 計23件

No	年度	著者、題名、報告書番号
1	H3	大谷 他、「未臨界試験体の実効増倍率評価」、PNC PN 9450 91-009
2		相原 他、「DCA 改造に関するドライバー領域炉心の核特性解析」、 PNC PN 9410 91-135
3	H4	大谷、「ファインマン-アルファ法による実効増倍率測定」、PNC ZN9410 92-334
4		林津 他、「ファインマン α 法の原理確証に係わる共同研究(中間報告)」、 PNC ZY9216 92-001
5	H5	大谷 他、「ファインマン-アルファ法による実効増倍率測定(2)」、 PNC ZN9410 93-195
6		加納 他、「SCALE-4 コードシステムによる臨界安全実験解析」、 PNC ZN9410 93-227
7	H6	相原、「臨界安全実験解析に基づく核データ評価」、PNC ZN9410 94-209
8		羽様 他、「Cf線源検出器の開発」、PNC ZY9518 94-001
9		大谷 他、「Cf線源検出器の開発(2)」、PNC ZY9518 95-001
10		大谷 他、「ファインマン-アルファ法による未臨界度モニターの試作」、 PNC ZN9410 94-257

11	H7	吉田、「2領域法による未臨界度測定技術の基礎的検討」、PNC ZN9410 95-280
12		相原、「DCA 臨界実験解析における輸送計算手法の検討」、PNC ZN9410 95-231
13		羽様、「ミハルゾ法による未臨界度測定実験」、PNC ZN9410 95-090
14	H8	大谷、「DCA 炉雑音データのウェーブレット解析」、PNC ZN9410 96-127
15		大谷、「ウェーブレット解析による臨界近接の検知法の開発」、PNC TN9410 97-011
16		毛利、「「常陽」MK-I 燃料試験体を装荷したDCA 2領域炉心の核特性評価」、PNC TN9410 96-293
17	H9	羽様、「DCA 未臨界度測定試験体系の炉心基本特性の評価」、PNC TN9410 97-088
18		毛利 他、「ファインマン- α 法における階差フィルターの適用」、PNC TN9410 97-095
19		羽様、「ミハルゾ法による未臨界度測定(II)」、PNC TN9410 97-093
20	H10	毛利 他、「ファインマン- α 法における実効増倍率測定(3)」、PNC TN9410 98-056
21		羽様、「ミハルゾ法未臨界度測定における統計誤差の低減化」、PNC TN9410 98-073
22	H11	羽様、「時間相関解析によるミハルゾ法未臨界度測定 -理論的検討-」、JNC TN9404 99-003
23		毛利 他、「ファインマン- α 法による実効増倍率測定(4)」、JNC TN9400 99-086