

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2007 ～ 2009  
 課題番号： 19360426  
 研究課題名（和文） ロッシ・アルファ法に基づく加速器駆動炉の未臨界度監視装置の開発  
 研究課題名（英文） Development of Subcriticality Monitor for Accelerator-Driven Subcritical System Based on Rossi-alpha Method

## 研究代表者

山根 義宏 (Yoshihiro Yamane)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号： 60115649

研究成果の概要（和文）：加速器駆動未臨界炉(ADS)の運転制御に必要な未臨界度監視装置の開発を目的として、関連のある中性子計数の減衰定数 $\alpha$ 値を測定するロッシ $\alpha$ 法に基づいて、実時間連続測定システムを整備した。また、検出器インポートランス理論を利用して、新たに導いたロッシ $\alpha$ 法の理論式によると、中性子増倍効果は低いが熱出力が高いADSの場合は、関連成分を効率よく収集するデータ処理法を、さらに工夫する必要がある。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a subcriticality monitor, which is necessary for safety operation of Accelerator-Driven Subcritical System (ADS), a real-time, continuous measuring system for alpha-value was developed based on Rossi-alpha method. Moreover, a new Rossi-alpha formula was derived based on detector-importance function theory. According to this new formula, a device for data-processing procedure accumulating correlation neutrons effectively is necessary to apply the measuring system proposed to ADS's that operate with low neutron multiplication and high reactor power.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	10,900,000	3,270,000	14,170,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子力エネルギー、放射線、加速器駆動炉、未臨界監視、中性子相関法、ロッシ・アルファ法

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 加速器駆動未臨界炉

加速器駆動未臨界炉 (Accelerator Driven Subcritical System: ADS) は、1 GeV の高エ

ネルギー、1 mA の大電流陽子加速器と未臨界原子炉を組み合わせた核変換装置である。未臨界原子炉では、核分裂連鎖反応が持続す

る臨界条件から意図的にずらして未臨界状態にしてある。しかし、タングステン、鉛などの重金属ターゲットを用いた核破碎反応利用の中性子源を設置し、未臨界炉ではあるが高い中性子密度の定常状態を達成できる。そこで、半減期が数千年を越すような超ウラン元素を核燃料と混ぜてこの原子炉に入ると、これを短寿命や安定な原子核に核変換できる。この核変換を目的とした新型炉として、世界的な規模で開発研究が進められている。国外ではフランスを中心とするヨーロッパ連合、韓国、及び中国、並びに国内では日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器機構の J-PARC 計画、及び京都大学原子炉実験所の固定磁場強集束型 (FFAG) 加速器開発を中心とする ADS 研究が進展している。

## (2) 未臨界度監視装置

ADS の未臨界の程度を定量化する指標に「未臨界度」がある。未臨界度が大きければ、異常時に炉は直ちに停止して安全である。しかし、これは核破碎反応で発生した中性子が、核燃料で増倍される程度も低いことを意味する。つまり、外部から供給する中性子の利用効率が落ちることになる。安全と中性子利用の両面を配慮すると、現実的には臨界にかなり近い未臨界状態での運転が望ましい。しかし、臨界に近い状態で運転する場合には、予期しない原子炉の特性変化にも、対処できるようにしておく必要がある。そこで、未臨界度を常時監視する「未臨界度監視装置」の開発に大きな期待が寄せられている。

## (3) 問題点

未臨界度監視装置の開発は、三澤（京都大学）らが中性子源増倍法、島津（北海道大学）が逆動特性手法に基づく手法で行っている。前者は中性子源の強度に関する情報を必要とする点、及び後者は校正実験を必要とする点で難点がある。これまで、未臨界度監

視技術が確立していない理由は、次の3種類の困難のためである。

①空間依存性：未臨界体系では、未臨界度が検出器の位置に依存する未臨界度の空間依存性が著しい。

②未臨界度の絶対値：未臨界度に比例する即発中性子減衰定数（以下  $\alpha$  値）の測定は比較的容易に行える。しかし、これと未臨界度の絶対値とを対応付ける手法が確立していない。

③実時間測定：実時間測定技術及びデータ処理法が確立していない。

## (4) 解決の方法

上記問題点①②は、著者らによって既に解決の見通しが立っている (Annals of Nucl. Energy, 33, p. 521 (2006).)。問題点①の空間依存性については、理論的に空間依存性を予測する新しい計算法を開発して解決した。また問題点②の未臨界度の絶対値についても、空間依存性とエネルギー依存性を考慮した3次中性子相関法を新たに開発して、実用的な条件下で未臨界度の絶対値が測定できる手法を手に入れた。

そこで著者らは、中性子源の強度に関する情報を必要とせず、未臨界度の絶対値と  $\alpha$  値との校正手法を内在している中性子相関法に着目して、未臨界度監視装置の開発を目指した。

## 2. 研究の目的

### (1) 実時間測定技術

本研究の目的は、問題点③の解決である。即ち、未臨界度若しくはそれに関連する物理量の実時間測定技術の開発である。中性子相関法として知られているロッシ  $\alpha$  法に基づく  $\alpha$  値の実時間測定技術の確立を研究目的とした。

### (2) ロッシ $\alpha$ 法

従来、ロッシ  $\alpha$  法はデータ収集に時間がか

かり、実時間の測定には不向きといわれていた。しかし、著者らが平成 14～16 年度文部科学省「革新的原子力システム技術開発公募事業」において行った研究は、ロッシ $\alpha$ 法の実時間測定法への拡張可能性を示唆していた。この研究成果を背景に、本研究では MeV～keV 領域の高速中性子を対象とする実時間測定技術へ拡張を目指す。これが達成されれば、高速中性子が主要な働きをする ADS の未臨界度監視技術として利用できる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 測定

①研究分担者・北村康則自身が約 10 年前に開発した放射線検出時刻データ収集システムの制御プログラムに、ロッシ $\alpha$ 法による $\alpha$ 値の実時間測定プログラムを組み込む。

②これを用いて、京都大学原子炉実験所の臨界集合体装置に熱中性子体系を構築して、 $\alpha$ 値実時間測定の原理的可能性を確認する。

③高速中性子体系へ適用するために、中性子 $\gamma$ 線弁別に工夫した高速中性子の測定系と、上記試作機をベースにした本格的な実時間測定装置を整備する。このシステムの動作確認を行う。

④京都大学原子炉実験所・臨界集合体装置に構築した未臨界体系と FFAG 加速器とを組み合わせ合わせた ADS 模擬体系で確認実験を行う。

#### (2) 理論

①著者らが 2 年前に開発した検出器インポートンス理論をベースに、検出器設置位置の情報を陽に含む、ロッシ $\alpha$ 法の理論式を新たに導く。

②これを用いて、熱出力 800MW の ADS を想定して、未臨界度監視装置に要求される $\alpha$ 値のデータ処理手法、及び最適な検出器配置について計算機シミュレーションで検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 測定

##### ①実時間測定システムの試作

放射線検出時刻データ収集システムの制御プログラムに、ロッシ $\alpha$ 法による $\alpha$ 値実時間測定プログラムを組み込んだ(図 1)。この測定プログラムは、二つの処理部で構成される。前段では、放射線検出時刻データ収集システムが時々刻々獲得する検出パルス時系列データから、検出時間間隔分布を更新する。後段では、フィッティング操作により、時間間隔分布から $\alpha$ 値を推定する。前段部では、頻度分布作成に用いる時間幅 $t_b$ と、検出時間間隔の最大幅 $t_{max}$ の二つのパラメータが重要である。これらは、解析に用いる検出データ数の多寡を介して、 $\alpha$ 値の推定精度に影響する。試行錯誤の結果、前者を 30 秒、後者を 20m秒と決めた。また後段部では、同じく試行錯誤により、応答性を支配するフィッティング周期、即ち、 $\alpha$ 値を推定する時間間隔を 100m秒と設定した。

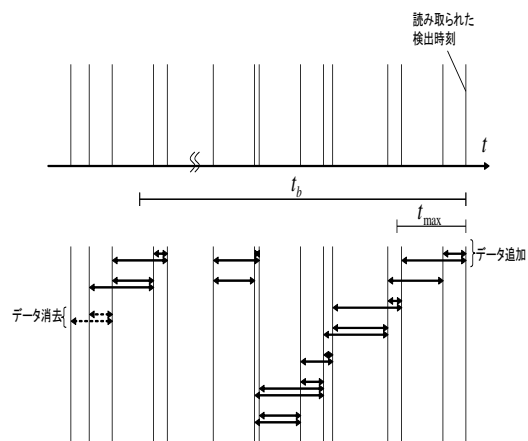


図 1 時系列データ処理の概念図

##### ② $\alpha$ 値実時間測定

京都大学原子炉実験所の臨界集合体装置に熱中性子体系(C35G0炉心)を構築して、実時間測定を実施した。この測定は、 $\alpha$ 値が一定値を取る定常状態と、数秒間の間に变化する過渡状態について行った。なお中性

子吸収体（制御棒）の炉心への挿入量を変えて  $\alpha$  値を変化させた。

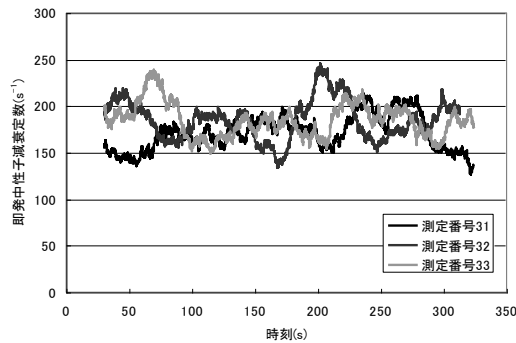


図2 定常状態における  $\alpha$  値の実時間測定

定常状態の測定例を図2に示す。これは  $\alpha$  値が 176 (1/秒) の状態を、100m 秒毎に実時間測定した結果を、3 回の試行についてまとめた図である。定常状態の場合は、開発した試作装置で、 $\alpha$  値を 5~10% の精度で測定できることが示された。

過渡測定の結果を図3に示す。これは、 $\alpha$  値が 418 (1/秒) の状態から 226 (1/秒) の状態へ変化させた場合の測定結果である。過渡状態の場合は、未臨界度を変化させる制御棒の動きに、 $\alpha$  値が追従して変化することは確認できた。しかし、図2の250秒以前のように計数値の統計量が少ない場合は、推定された  $\alpha$  値がばらつき、推定精度の悪いことが示された。

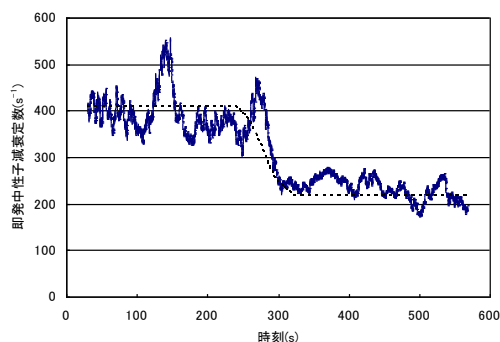


図3 過渡状態における  $\alpha$  値の実時間測定

以上の熱中性子体系での測定結果より、原

理的に  $\alpha$  値の実時間測定は可能であるとの結論を得た。しかし、過渡応答性を高めるには、検出器感度を上げるなど計数値の統計精度を高める工夫が必要な点も明らかとなった。

### ③測定系の整備

液体シンチレータを用いた高速中性子の測定で問題となる中性子-ガンマ線弁別について、従来の弁別回路よりも簡便な回路構成で、かつ微妙な信号タイミング調整を必要としない最新の測定機器を整備した。さらに、2 次元マルチパラメータ MCA に、MCA 開発メーカーと協力してロッシ  $\alpha$  法の実時間測定アルゴリズムを実装した。試作プログラムの冗長な部分を整理し、試作機より処理速度を上げることができた。定常中性子源を用いた測定により、整備した高速中性子体系用測定システムは、正常に動作することを確認した。

なお、中性子-ガンマ線弁別が十分で無い場合に、 $\alpha$  値推定に及ぼす影響を検討した。ガンマ線成分の混入は非相関成分の増加と同様の効果を引き起こし、相関成分の分離が悪くなる。その結果、 $\alpha$  値の推定が困難となる事が示された。

### ④ADS 模擬体系への適用

当初予定した京都大学原子炉実験所・臨界集合体装置 KUCA を用いた測定は、FFAG 加速器の整備が遅れたために実施できなかった。

### (2)理論

#### ①ロッシ $\alpha$ 法の理論式

検出器インポートンス理論をロッシ  $\alpha$  法に適用して、次に示す新しい理論式を導出した。この式は、ある中性子検出から  $\tau$  時間後に検出される中性子の検出頻度を表している。第1項が  $\alpha$  で減衰する相関成分を、第2項が非相関成分の定数項を表す。各係数に含まれる検出器インポートンス関数  $I_1, I_2$  を介してして、検出器位置依存性が現れる。

$$P(\tau)d\tau = \frac{\left( \int_{\vec{r}} d\vec{r} \int_0^\infty dE \left\{ \frac{I_2(\vec{r}, E)}{2} q_{\chi_s}(\vec{r}, E) S(\vec{r}) \right\} + \frac{q(q-1)}{2} \int_{\vec{r}} d\vec{r} \left[ \int_0^\infty dE I_1(\vec{r}, E) \chi_s(\vec{r}, E) \right]^2 S(\vec{r}) \right)}{\int_{\vec{r}} d\vec{r} \int_0^\infty dE I_1(\vec{r}, E) q_{\chi_s}(\vec{r}, E) S(\vec{r})} \alpha \exp(-\alpha\tau) d\tau + \int_{\vec{r}} d\vec{r} \int_0^\infty dE I_1(\vec{r}, E) q_{\chi_s}(\vec{r}, E) S(\vec{r}) d\tau$$

## ②熱出力 800MW の ADS

日本原子力研究開発機構で計画されている熱出力 800MW、未臨界度 5%  $\Delta k/k$  の ADS を模擬した体系を図 4 に示す。この体系では、半径約 2m の体系中央に鉛—ビスマス・ターゲットが設置されている。体系中央から 0.5、1.0、1.4m の位置に検出器を配置し、上式で非相関成分に対する相関成分の割合を求めた。その結果、相関成分の割合が高く、測定に最適な検出器位置は、ターゲットから遠い 1.4m の位置であることが分かった。これは、実機における検出器設定に対する有効な知見である。

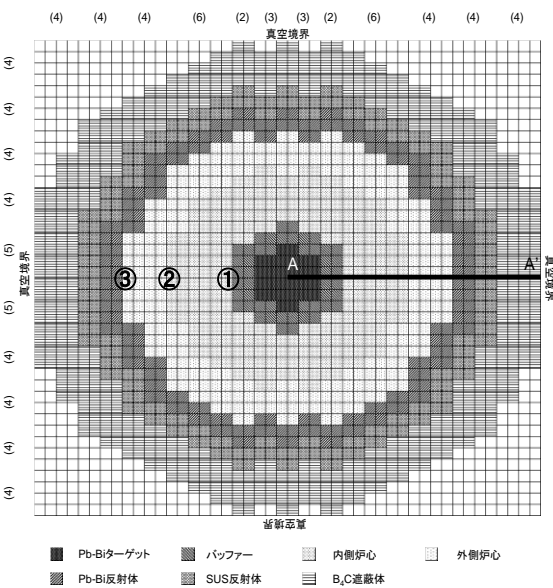


図 4 熱出力 800MW の ADS 模擬体系

一方、未臨界度が大きく、熱出力が高い ADS では、全中性子計数値に占める相関成分の割合が極端に小さい。相関成分と非相関成分を区別せずに直接フィッティングで  $\alpha$  値を求

める手法には適用限界があることも明らかとなった。従って、測定面で、中性子計数値を上げると共に、相関成分の検出確率を高める必要がある。またデータ処理の面では、予め非相関成分を推定して除去する等の新たな時系列データ処理法の工夫が必要である。そこで、ロッシ  $\alpha$  法に代わる手法の文献調査を行った。ロッシ  $\alpha$  法に相補的な測定手法としてファインマン  $\alpha$  法が既に知られているが、これ以外に有効な手法の提案は、最近の文献調査においても見出すことができなかった。

## (3)まとめ

当初予期した最も困難な問題点は、熱中性子体系で実証された実時間測定が、データ処理速度の点で高速中性子系に適用できない場合であった。しかし、この点は実装したデータ処理プログラムによれば、予備的ながら解決の見通しが得られた。

しかし、中性子増倍効果は低い熱出力が高い ADS の場合は、非相関成分の割合が極めて高く、予め非相関成分を推定して除去する等の時系列データ処理法の工夫が不可欠である点が明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

坪田 忍、山根義宏、菅原 慶、山本章夫、北村康則、「検出器インポートランスを用いた Rossi- $\alpha$  法の理論式の導出」、日本原子力学会 2008 年春の年会(2008 年 3 月 27 日) 大阪大学

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山根 義宏 (Yoshihiro Yamane)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60115649

(2)研究分担者

山本 章夫 (Akio Yamamoto)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：50362265  
(H20 → H21)

北村 康則 (Kitamura Yasunori)  
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学  
研究部門・副主任研究員  
研究者番号：60332706  
(H19)

(3)連携研究者

( )  
研究者番号：