

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05328

研究課題名(和文) 詳細不明な体系における未臨界測定技術の開発

研究課題名(英文) Development of subcritical measurement technique for unknown systems

研究代表者

遠藤 知弘 (Endo, Tomohiro)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50377876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：未臨界体系の炉雑音測定で得られた(n次中性子相関量)/(2次中性子相関量の(n-1)乗)の比が、臨界状態に近づくにつれ、体系の組成・幾何形状に依らず臨界固有の値 $(2n-3)!!$ となる性質を、中性子検出数の確率母関数に基づき理論的に解明した。また、反応度や外部中性子源強度の過渡変化時に測定した中性子計数率の時間変化から、ドル単位未臨界度を概算する手法として時間領域分割積分法を考案し、国内の実験施設にて提案手法を実証した。中性子検出器を複数配置したパルス中性子法やRossi-法の測定結果に対して動的モード分解を適用することで、基本モードの即発中性子減衰定数が頑健に推定可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

測定体系の詳細情報が不明であっても、定常状態における炉雑音測定結果から「中性子相関量の比と臨界固有の値 $(2n-3)!!$ の差」を調べることで、測定体系が深い未臨界状態にあるか否かの判定や、未臨界度の深さを概算できる可能性がある。また、本研究で新たに提案した時間領域分割積分法は、反応度だけでなく中性子源強度も同時に変化するような、燃料取出時の未臨界度測定技術として活用できる。動的モード分解を適用することで、即発中性子減衰定数の測定結果が検出器位置に依存する問題を解決できる。本研究成果は、体系固有の測定結果を活用したデータ同化による、評価済み核データや核特性予測結果の不確かさを低減に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Based on the probability generating function of neutron counts, this study theoretically clarified that the ratio of (the nth-order neutron correlation) to (the (n-1)th power of 2nd-order neutron correlation) in the reactor noise measured for a subcritical system converges to the unique combination number of double factorial  $(2n-3)!!$  without depending on nuclide compositions and geometry as the system becomes to be critical. To estimate the subcriticality in dollar units from the time variation in the neutron count rates measured in an arbitrary state-change such as the reactivity and neutron source intensity, the time-domain decomposition-based integral method was newly proposed and demonstrated through actual measurements conducted at Japanese experimental facilities. By applying the dynamic mode decomposition to the pulsed neutron source and Rossi- methods, this study demonstrated that the prompt neutron decay constant of the fundamental mode component can be estimated robustly.

研究分野：原子力工学

キーワード：未臨界原子炉雑音 確率母関数 動的モード分解 即発中性子減衰定数 データ同化 ブートストラップ法 一点炉動特性

## 1. 研究開始当初の背景

$^{235}\text{U}$  などの核燃料の安全な取り扱いには、核分裂連鎖反応が持続することなく終息する状態、すなわち未臨界状態を維持した形で取り扱う必要がある。核燃料が未臨界状態か判断する際には、連鎖反応における(世代間の中性子生成)÷(消滅)の比で定義される「実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ 」が重要となる。 $k_{\text{eff}}$ の値は、体系内における1世代前の親中性子が次世代でどれだけの子孫中性子数を生むかという増倍を表すパラメータであり、連鎖反応による中性子増倍を等比級数とみなした時の公比に相当する量である。あるいは、別の喩えとして、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)等の感染者数予測に用いられる SIR モデルにおける「実効再生産数」に対応する量とも言える。 $k_{\text{eff}}$ の値が1未満であれば連鎖反応が持続せず終息する「未臨界状態」となる。

図1は、国内教育用原子炉(UTR-KINKI)の未臨界状態において、時刻 $t_0 \leq t \leq t_1$ の間に“ある状態変化”を起こした際の中性子計数率の測定結果を示している。時刻 $t_0$ より以前、および $t_1$ 以降の十分時間が経過した後において中性子計数率は定常状態に達しているが、この状態は外部中性子源を種火とした未臨界増倍による定常状態、すなわち外部中性子源強度 $S$ に比例し等比級数の和 $(1 - k_{\text{eff}})$ に反比例する形で体系内の中性子数が一定値で維持されている状態である。時刻 $t_1$ 以降のほうが中性子計数率は高いため、より臨界状態に近づいた(核分裂連鎖反応が長続きしている)ように見えるかもしれない。

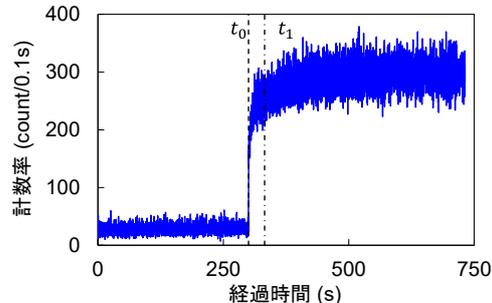


図1  $k_{\text{eff}}$ と $S$ 同時変化時の計数率変化

しかし、図1で例示した過渡変化実験において、実際に与えた状態変化は「外部中性子源と制御棒(中性子吸収材)の同時挿入」である。 $k_{\text{eff}}$ の減少効果よりも外部中性子源強度 $S$ の増加効果のほうが優越となったことで、状態変化後の中性子計数率が増加している。この例が示すように、測定で得られた中性子計数率の増減情報が必ずしも $k_{\text{eff}}$ の増減(臨界状態に近づいたのか、より深い未臨界状態となったのか)に対応していない場合もある点に注意せねばならない。すなわち、中性子計数の測定結果から $k_{\text{eff}}$ の情報を逆推定する未臨界度測定技術には、例えば、外部中性子源強度 $S$ の情報、もしくは、その代替情報が必要不可欠という本質的に大きな課題があった。

あるいは、 $k_{\text{eff}}$ の情報を監視する代わりに、未臨界体系においてパルス中性子法あるいは炉雑音解析法(Rossi- $\alpha$ 法)の実験を実施することで、核分裂連鎖反応による中性子増倍に関連した動特性パラメータとして、即発中性子減衰定数 $\alpha$ と呼ばれる時定数を直接測定することも可能である。ただし、測定対象の未臨界が深くなる( $k_{\text{eff}}$ が1より小さくなる)につれて、体系固有の基本モード成分以外の高次モード成分が大きく励起されるようになり、未臨界体系内で測定された中性子数には「空間高次モード成分」の影響が大きく現れることになる。この影響により、パルス中性子法や炉雑音測定結果を非線形最小二乗フィッティングにより分析した際に、体系内に配置した中性子検出器の位置に応じて、 $\alpha$ の分析結果に差異が生じてしまうという課題もあった。

## 2. 研究の目的

1節で述べた課題を解決するため、以下を目的として研究に取り組んだ。

中性子計数の増減に基づいた、従来の未臨界度測定手法の場合には、例えば、実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ が既知となっている「基準体系(通常は状態変化前の体系)」において測定した中性子計数率を用いて未知情報(例: 実効的な中性子源強度 $S$ )を校正する、あるいは事前の数値解析を活用して未臨界度への換算係数を求める、といった方法を用いる必要があった。これら方法の場合には、対象としている体系に関する情報(核種組成・幾何形状)が既知である必要があるが、詳細情報が不明あるいは不確かさが大きな場合、あるいは $k_{\text{eff}}$ だけでなく校正した未知情報も同時に変化する場合には適用し難い。そこで本研究では、通常の中性子測定回路系で測定しやすい①中性子計数率の時間変化や②原子炉雑音(中性子計数の統計的揺らぎ)の測定結果のみから、事前の数値解析に頼ることなく、詳細情報が不明な体系における未臨界度を推定する手法、あるいは体系が深い未臨界状態であるか判定する手法を新たに開発することを目的とした。また、国内原子炉実験施設における実際の炉物理実験を通じて、提案手法の有効性について実証することを目的とした。

また、未臨界体系における炉物理実験では、未臨界が深くなるにつれて高次モード成分の影響が大きくなることで、体系固有の基本モード成分に対応する核特性を正確に測定することが難しくならざるを得ないという大きな課題があった。既存研究では、事前の数値解析を活用することで、例えば、高次モード成分の影響が小さくなるような中性子検出器位置をサーベイしたり、基本モード成分のみを求めるための補正係数を計算したりすることで、空間高次モード成分によって生じた測定量の系統誤差を軽減する方法が提案されてきた。ただし、上述した方法についても、対象体系の詳細情報が不明あるいは不確かさが大きな場合には適用し難い。そこで本研究では、詳細情報が不明な測定体系において、複数の中性子検出器を配置することで得られた中性子検出信号の時空間行列データから、データ駆動型の方法論に基づくことで体系固有の基本モード成分に対応する核特性を頑健に抽出する手法の開発に取り組むことを目的とした。

### 3. 研究の方法

2節で述べた目的を達成するために、詳細な情報が不明あるいは不確かさが大きな核燃料を含んだ体系における未臨界度測定に関する研究について、以下の方法により取り組んだ。

#### (1) 逆動特性法に対する Unscented カルマンフィルタの応用

自発核分裂や $(\alpha, n)$ 反応等による中性子源を含んだ核燃料の取出を考えた場合には、実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ だけでなく、外部中性子源強度 $S$ 、中性子生成時間 $\Lambda$ や実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff}}$ といったパラメータも同時に変化し得る。例えば、東京電力福島第一原子力発電所 1~3 号機における燃料デブリ取出作業時を考えた場合、燃料デブリ内には  $^{235}\text{U}$  等の核分裂性核種だけでなく、中性子源核種( $^{244}\text{Cm}$  等)も含まれている。また、中性子減速材となる水分量( $^1\text{H}$ )が変化した場合には、体系内の中性子エネルギースペクトルが変化することで即発中性子寿命 $\ell$ も変化し、 $k_{\text{eff}}$ だけでなく $\Lambda = \ell/k_{\text{eff}}$ も同時に変化することとなる。そこで、不確かさが大きな体系において、体系の様々な核特性パラメータ( $k_{\text{eff}}, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )の時間変化が起こった場合を想定し、事前の数値解析(例：連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード MCNP6.2)により上記パラメータ不確かさを把握できたとする。以上のような体系において、複数位置に検出器を配置し、得られた中性子計数率の時系列データを用いてデータ同化することにより、実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ の時間変化を監視する方法について検討した。特に、実時間監視技術に応用することができるよう、より計算コストが少ない手法として Unscented カルマンフィルタに注目し、その適用可能性について検討した。

#### (2) 任意の状態変化に対して適用可能な未臨界度測定手法に関する検討

詳細な情報が不明あるいは不確かさが大きな体系において、ある時刻 $t_0 \leq t \leq t_1$ の間に任意の状態変化(例： $k_{\text{eff}}$ だけでなく $S$ も同時に変化する体系)が起こった場合を想定する。この場合、事前に数値解析を実施することによって、対象体系の核特性を評価する際に必要となる各パラメータ( $S, \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )を事前に推定することは容易ではなく、これらパラメータの推定結果には不確かさが必然的に生じることとなる。このような条件下において、事前の数値解析によるパラメータ( $S, \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )の推定結果に頼ること無く、中性子計数率の時系列データ測定結果を主に利用することで、ドル単位の未臨界度を測定する手法を考案することを試みた。また、国内の炉物理実験施設(近畿大学原子炉(UTR-KINKI)および京都大学臨界集合体実験装置(KUCA))において、 $k_{\text{eff}}$ と他パラメータ( $S, \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )が同時に変化するような未臨界過渡変化実験を実施することにより、考案した手法の適用可能性について検討した。

#### (3) 高次中性子相関量に潜んでいる臨界時固有の性質の解明

詳細な情報が不明あるいは不確かさが大きな未臨界増倍体系において、定常状態における中性子計数 $C$ の時間的な揺らぎ(炉雑音)を長時間にわたって測定できたとする。ここで、炉雑音測定結果に対して統計量( $n$ 次キュムラント)を分析することによって、 $n$ 次の中性子相関量 $\mathbf{y}_n$ (=同じ核分裂連鎖反応の家系に属することで、 $n$ 組の中性子に生じる相関の大きさ)を求めることができる。未臨界体系が臨界状態に近づくにつれて( $k_{\text{eff}} \rightarrow 1$ )、体系の核種組成や寸法に依ることなく $n$ 次の中性子相関量 $\mathbf{y}_n$ が臨界状態固有の性質を満足する点について、中性子検出確率が従う理論に基づいて解明することを試みた。また、得られた知見を活用することで、測定体系が深い未臨界状態なのか否か判定する方法論について考察した。ここで、実際の炉雑音測定における測定時間は限られるため、 $n$ 次の中性子相関量 $\mathbf{y}_n$ には統計誤差が生じることになるが、 $\mathbf{y}_n$ の統計誤差を評価手法として、bootstrap 法を応用することを試みた。理論的に導出した $\mathbf{y}_n$ の性質を実証するために、①核燃料を含まない中性子非増倍体系、および②核燃料を含んだ国内の実験施設(UTR-KINKI および KUCA)を対象として、長時間の炉雑音測定を実施し分析した。

#### (4) 動的モード分解の炉物理実験への応用

不確かさが大きな未臨界増倍体系において、複数の位置に中性子検出器を配置することができ、パルス中性子法あるいは炉雑音測定(Rossi- $\alpha$ 法)が実施できたとする。ここで、事前の数値解析に頼ることなく、体系固有の基本モード成分に対応する即発中性子減衰定数 $\alpha$ を、測定データのみに基づいて抽出することができれば、得られた $\alpha$ 測定値を用いてデータ同化することにより、①測定体系と核的類似性が高い別の体系における実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ 数値解析結果の不確かさを低減したり、②数値解析の入力データとなる評価済み核データの不確かさを低減したりすることが可能となる(DOI: 10.1080/00295639.2020.1720499)。一般的に、ある特定位置の検出器で測定されたパルス中性子法あるいは Rossi- $\alpha$ 法の時系列データは、基本モード成分だけでなく、高次モード成分も含んだ多数の指数関数項の和によって理論的に表現できる。そこで、測定された複数の時系列データに対して、動的モード分解を利用することによって、体系固有の基本モード成分に対応する即発中性子減衰定数 $\alpha$ を頑健に推定可能か検討した。また、臨界時における Rossi- $\alpha$ 法の測定結果の場合には、基本モードの即発中性子減衰定数 $\alpha_{\text{crit}}$ が $\alpha_{\text{crit}} = \beta_{\text{eff}}/\ell$ という核特性に対応する性質を利用して、動的モード分解を適用することで $\beta_{\text{eff}}/\ell$ 実験値を直接測定可能か検討した。さらに、パルス中性子法を実施できる場合であれば、周期的にパルス中性子を打ち込み続けることによって、即発中性子成分と遅発中性子成分の計数比(面積比)からドル単位の未臨界度を推定することもできる。面積比法に対して動的モード分解を適用することによって、面積比法において大きな課題となっていた空間高次モード成分の影響を低減可能か調査した。

#### 4. 研究成果

3節で述べた研究方法により、得られた成果は以下のとおりである。

##### (1) 逆動特性法に対する Unscented カルマンフィルタの応用

京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において実施された、加速器駆動未臨界過渡変化実験で測定された中性子計数率の時系列データを活用して、Unscented カルマンフィルタの有効性について調査した(DOI: 10.13182/T123-33367)。炉心周りのポリエチレン反射体領域および D-T 中性子源近傍に配置した2つの中性子検出器により測定した中性子計数率の時系列データを用いて、①粒子フィルタおよび②Unscented カルマンフィルタを適用することで未臨界度 $-\rho = (1 - k_{\text{eff}})/k_{\text{eff}}$ の時間変化をそれぞれ推定した。①粒子フィルタの場合には、各時間ステップにおいて事前共分散情報に基づいて核特性パラメータ $(-\rho, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}})$ をランダムサンプリングし一点炉動特性計算を実施し、計数率測定結果をデータ同化することで $(-\rho, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}})$ の事後推定値を得ることができるが、時間ステップ毎に100~1000回程度の動特性計算を実施する必要があった。一方、②Unscented カルマンフィルタを適用した場合、4つの核特性パラメータ $(-\rho, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}})$ と2つの計数率に対する事前共分散行列(6×6)のシグマ点 $13(=2 \times 6 + 1)$ を求め、各シグマ点に対応した一点炉動特性計算を実施しデータ同化することで、計算回数を削減しつつ粒子フィルタと同等の結果を推定できることを確認した。また、Unscented カルマンフィルタによる $-\rho$ 推定結果と、連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード MCNP6.2 により別途求めた $-\rho$ 計算結果が比較的良く一致することから、提案手法の妥当性も検証することができた。

##### (2) 任意の状態変化に対して適用可能な未臨界度測定手法に関する検討

時刻 $t_0 \leq t \leq t_1$ の間に生じた任意の状態変化 $(-\rho, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}})$ が生じた際に測定された中性子計数率の時系列データの測定結果 $n(t)$ から、状態変化後におけるドル単位の未臨界度 $-\rho_1/\beta_{\text{eff},1}$ を測定する手法として、一点炉動特性法式に基づくことで時間領域分割積分法(Time-Domain Decomposition-based Integral method, TDDI 法)を考案した(DOI: 10.1080/00223131.2019.1706658)。 $-\rho_1/\beta_{\text{eff},1}$ の具体的な評価式は以下のとおりである。

$$\frac{-\rho_1}{\beta_{\text{eff},1}} \approx \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\lambda_i} (n_0 e^{-\lambda_i(t_1-t_0)} - n_\infty + \lambda_i \int_{t_0}^{t_1} n(t) e^{-\lambda_i(t_1-t)} dt)}{\int_{t_1}^{\infty} (n(t) - n_\infty) dt} \quad (1)$$

$a_i$ :  $i$ 群の遅発中性子の相対収率 (-),  $\lambda_i$ :  $i$ 群の遅発中性子先行核の崩壊定数 (1/s),

$n_0$ : 状態変化前の中性子計数率 (count/s),  $n_\infty$ : 状態変化後の中性子計数率 (count/s)

TDDI 法では過渡変化前後の状態と、過渡変化が起こっている最中の時間領域を分割し、状態変化前と変化後の定常状態の中性子計数率 $n_0, n_\infty$ 、状態変化途中の中性子計数率の時間変化 $n(t)$ をそれぞれ測定する(図2)。その後、2つの時間領域(① $t_0 \leq t \leq t_1$ および② $t_1 < t$ )における中性子計数率の時間積分を求めることで、状態変化後のドル単位未臨界度 $-\rho_1/\beta_{\text{eff},1}$ を推定することができる。

以上で提案した TDDI 法の有効性を実証するために、①近畿大学原子炉(UTR-KINKI)において未臨界度と外部中性子源強度が同時に変化する過渡変化実験、②京都大学臨界集合体実験装置

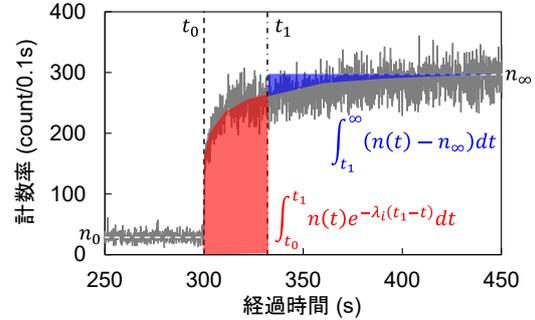


図2 TDDI 法による分析方法の概念図

(KUCA)において未臨界度と一点炉動特性パラメータが同時に変化する過渡変化実験(複数の燃料集合体およびポリエチレン反射体で構成された中心架台を、炉心から炉外に落下させる実験)をそれぞれ実施した。TDDI 法で得られた状態変化後のドル単位未臨界度は、①制御棒価値および余剰反応度の測定値から求めた参照値、あるいは②連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード MCNP6.2 による数値解析結果と統計誤差の範囲内でそれぞれ良く一致することが確認でき、TDDI の妥当性を検証することができた。

##### (3) 高次中性子相関量に潜んでいる臨界時固有の性質の解明

臨界近傍の未臨界体系を対象として、中性子検出確率 $P(C)$ が従う確率母関数 $G(Z) \equiv \sum_{C=0}^{\infty} Z^C P(C)$ が満足する微積分方程式を考えることにより、確率分布 $P(C)$ が「Pál-Mogil'ner-Zolotukhin-Bell-Babala (PMZBB)分布」と呼ばれる、核分裂連鎖反応が生じている体系固有の特徴的な分布に従うことが理論的に導出できる(DOI: 10.1080/00295639.2022.2049992)。この PMZBB 分布の確率母関数に基づいて、中性子検出時間幅 $T$ が即発中性子減衰定数の逆数 $1/\alpha$ より十分大きく、臨界状態に漸近する極限值を考えることによって、高次中性子相関量の比 $\mathcal{Y}_{n,\infty}/(Y_{\infty}^{n-1})$ が以下の関係式を満足することを理論的に解明した。

$$\lim_{-\rho \rightarrow +0} \mathcal{Y}_{n,\infty}/(Y_{\infty}^{n-1}) = (2n - 3)!! \quad (2)$$

(2)式は、「 $n$ 次中性子相関量の飽和値 $y_{n,\infty}$ と、従来の炉雑音解析(Feynman- $\alpha$ 法)における2次中性子相関量の飽和値 $Y_\infty$ を $(n-1)$ 乗した量の比」を調べた場合、体系の核種組成や幾何形状など詳細情報に依存することなく、その比 $y_{n,\infty}/(Y_\infty^{n-1})$ が臨界状態固有の数 $(2n-3)!!$ に収束することを示している。なお、この二重階乗 $(2n-3)!!$ が表す物理的な意味としては、臨界状態に近づくにつれて $n$ 次中性子相関量 $y_{n,\infty}$ の要因として、連鎖反応家系が2次に $(n-1)$ 回分岐する過程で生じる成分が支配的となる点に由来している。

以上のように導出した $n$ 次中性子相関量の比 $y_{n,\infty}/(Y_\infty^{n-1})$ が満足する性質を実証するために、以下で述べるような様々な測定体系において炉雑音測定実験を実施した(DOI: 10.1051/epjconf/202124709004, 10.1080/00295639.2022.2049992)。①まず、 $^{252}\text{Cf}$ 中性子源とポリエチレン減速材のみを用いた「核分裂連鎖反応の起こらない非増倍体系( $k_{\text{eff}} = 0$ )」において三次中性子相関法実験を実施し、非増倍体系において中性子相関量 $y_{3,\infty}/(Y_\infty^2)$ の比が臨界状態固有の数3とは有意に異なる値となることを実証した。②次に、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)と京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において、原子炉停止時に長時間測定した炉雑音測定結果に対して三次中性子相関法を適用し、中性子相関量の比が核燃料を一切含まない非増倍体系とは異なる点、未臨界度が深い場合には臨界状態固有の数3からの有意な差が観測でき $|y_{3,\infty}/(Y_\infty^2) - 3|$ の大きさが未臨界度 $(-\rho)$ に概ね相当することを実証した。③さらに、KUCAにおいて臨界状態に近い未臨界体系において炉雑音測定を実施し、 $3 \leq n \leq 6$ の次数における中性子相関量比 $y_{n,\infty}/(Y_\infty^{n-1})$ を分析することで、moving block bootstrap法で推定した $y_{n,\infty}/(Y_\infty^{n-1})$ の95%信頼区間範囲内に二重階乗 $(2n-3)!!$ が含まれることも実証した(図3)。以上の研究成果により、中性子相関量比 $y_{n,\infty}/(Y_\infty^{n-1})$ と臨界状態固有の数 $(2n-3)!!$ の間に有意な差があるか調べることで、測定体系の詳細情報が不明であったとしても、どれだけ未臨界未満の状態なのか把握可能であると考えられる。

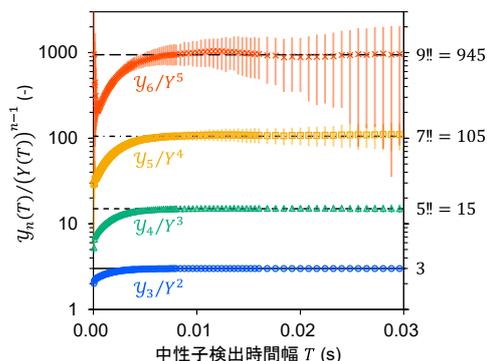


図3  $n$ 次中性子相関量比の実測結果

#### (4) 動的モード分解の炉物理実験への応用

京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において、空間高次モード成分の励起パターンが異なるように、測定体系の様々な位置に複数の中性子検出器を配置してパルス中性子法の実験を実施した。こうして測定された時系列データを纏めた行列に対して、動的モード分解を適用することで、基本モード成分に対応する即発中性子減衰定数 $\alpha$ が頑健に推定可能であることを確認した(DOI: 10.1080/00295639.2021.1968225)。なお、中性子計数の統計誤差に由来した $\alpha$ の不確かさ評価方法として、ランダムサンプリング法に基づいて時系列データを多数個サンプリングし動的モード分解を利用する方法論を採用した。さらに、動的モード分解で得られた基本モード成分の指数関数項と定常成分項を利用することで、面積比法で測定されたドル単位未臨界度における高次モード成分の影響も大きく軽減できる見込みも得ることができた。

同様に、炉雑音解析手法(Rossi- $\alpha$ 法)についても、複数の中性子検出器位置で分析した時系列データ行列に対して動的モード分解を適用することで、基本モード成分の $\alpha$ が頑健に推定可能であることを確認した(図4)。

さらに、KUCA 臨界炉心において複数の中性子検出器位置で分析した Rossi- $\alpha$ 法の結果に対して動的モード分解を適用することで、基本モードの $\alpha_{\text{crit}} = \beta_{\text{eff}}/\ell$ を実測することができ、2021年12月27日にリリースされた国内最新の評価済み核データ JENDL-5 を用いた MCNP6.2 コードによる $\beta_{\text{eff}}/\ell$ の数値解析結果の妥当性についても検証することができた(DOI: 10.1080/00223131.2022.2030260)。

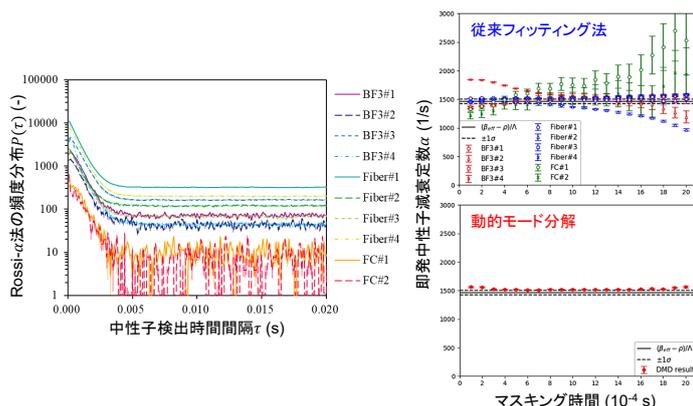


図4 Rossi- $\alpha$ 法に対する動的モード分解の適用例

以上で述べた研究成果(1)~(4)より、本研究の目的を達成することができた。本研究で得られた知見を活用することで、体系の詳細情報が不明あるいは不確かさが大きな体系における、臨界安全監視技術の発展に大きく貢献できると考えられる。また、未臨界測定において大きな問題となっていた高次モード成分の影響を、測定データを主としたデータ駆動型のアプローチにより軽減でき、未臨界体系を対象とした炉物理実験手法の高度化にも貢献できたと期待している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Endo Tomohiro, Yamamoto Akio	4. 巻 194
2. 論文標題 Data Assimilation Using Subcritical Measurement of Prompt Neutron Decay Constant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1089-1104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00295639.2020.1720499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Endo Tomohiro, Yamamoto Akio, Yamanaka Masao, Pyeon Cheol Ho	4. 巻 123
2. 論文標題 Subcriticality Estimation Using Unscented Kalman Filter for Reactivity- and Source-Transients	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the American Nuclear Society	6. 最初と最後の頁 841-844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13182/T123-33367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Endo Tomohiro, Nonaka Asahi, Imai Sho, Yamamoto Akio, Sakon Atsushi, Hashimoto Kengo	4. 巻 57
2. 論文標題 Subcriticality Measurement Using Time-Domain Decomposition-Based Integral Method for Simultaneous Reactivity and Source Changes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 607-616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2019.1706658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Endo Tomohiro, Imai Sho, Watanabe Kenichi, Yamamoto Akio, Sakon Atsushi, Hashimoto Kengo, Yamanaka Masao, Pyeon Cheol Ho	4. 巻 247
2. 論文標題 Experiment of Unique Combination Number due to the Third-Order Neutron-Correlation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 9004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202124709004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Takuto, Endo Tomohiro, Yamamoto Akio	4. 巻 58
2. 論文標題 Proposal and Applicability of Estimated Criticality Lower-Limit Multiplication Factor Using the Bootstrap Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1008-1017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2021.1902416	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishioka Fuga, Endo Tomohiro, Yamamoto Akio, Yamanaka Masao, Pyeon Cheol Ho	4. 巻 196
2. 論文標題 Applicability of Dynamic Mode Decomposition to Estimate Fundamental Mode Component of Prompt Neutron Decay Constant from Experimental Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 133-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00295639.2021.1968225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Endo Tomohiro, Nishioka Fuga, Yamamoto Akio, Watanabe Kenichi, Pyeon Cheol Ho	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of Dynamic Mode Decomposition to Rossi- Method in a Critical State Using File-by-File Moving Block Bootstrap Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2022.2030260	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Endo Tomohiro, Nishioka Fuga, Yamamoto Akio, Watanabe Kenichi, Pyeon Cheol Ho	4. 巻 -
2. 論文標題 Theoretical Derivation of a Unique Combination Number Hidden in the Higher-Order Neutron Correlation Factors Using the Pal-Bell Equation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00295639.2022.2049992	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 Data Assimilation Using Subcritical Measurement of Prompt Neutron Decay Constant
3. 学会等名 International Conference on Mathematics and Computational Methods applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 今井 頌, 渡辺 賢一, 山本 章夫
2. 発表標題 非増倍体系での三次中性子相関法実験
3. 学会等名 日本原子力学会 2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 Conversion from Prompt Neutron Decay Constant to Subcriticality Using Point Kinetics Parameters Based on $\beta$ - and $k_{eff}$ -Eigenfunctions
3. 学会等名 11th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野中 朝日, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 山中 正朗, 佐野 忠史, 卞 哲浩
2. 発表標題 Measurements of Subcriticality in Dollar Units Using Time-Domain Decomposition Based Integral Method
3. 学会等名 11th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 Effectiveness of Subcritical Measurement at Solid Moderated KUCA Core for Reducing Nuclear Data-Induced Uncertainties in Other Light Water Reactor Analysis
3. 学会等名 Reactor Physics Asia 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 山本 章夫, 山中 正朗, 卞 哲浩
2. 発表標題 Unscentedカルマンフィルタを用いた未臨界度逆推定
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野中 朝日, 遠藤 知弘, 今井 頌, 渡辺 賢一, 山本 章夫, 山中 正朗, 卞 哲浩
2. 発表標題 時間領域分割積分法によるドル単位未臨界度測定
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西岡 楓賀, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 山中 正朗, 卞 哲浩
2. 発表標題 Dynamic Mode Decompositionを用いた即発中性子減衰定数 測定手法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 光子-中性子結合確率母関数方程式に基づいたFeynman-法の理論式導出
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福井 悠平, 西岡 楓賀, 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 Dynamic Mode Decompositionによる即発中性子減衰定数の統計誤差評価手法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Endo Tomohiro, Yamamoto Akio, Yamanaka Masao, Pyeon Cheol Ho
2. 発表標題 Subcriticality Estimation Using Unscented Kalman Filter for Reactivity- and Source-Transients
3. 学会等名 2020 ANS Virtual Winter Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西岡 楓賀, 福井 悠平, 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 Dynamic Mode Decompositionを用いた即発中性子減衰定数 推定手法の開発
3. 学会等名 第8回炉物理専門研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 野口 晃広, 山本 章夫
2. 発表標題 軽水のみ体系に対する即発中性子減衰定数の核データ起因不確かさ評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 野口 晃広, 山本 章夫, 多田 健一
2. 発表標題 Perturbation-Theory-Based Sensitivity Analysis of Prompt Neutron Decay Constant for Water-Only System
3. 学会等名 2021 ANS Virtual Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡 楓賀, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 渡辺 賢一, 卞 哲浩
2. 発表標題 炉雑音解析手法への動的モード分解の適用: (1)Rossi-法に対する適用
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 西岡 楓賀, 山本 章夫, 渡辺 賢一, 卞 哲浩
2. 発表標題 炉雑音解析手法への動的モード分解の適用: (2)bootstrap法を用いた統計的不確かさ評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 山本 章夫
2. 発表標題 Theoretical Derivation of Unique Combination-Number for Higher Order Neutron Correlation Factors Based on PaI-Bell Equation
3. 学会等名 International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡 楓賀, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 山中 正朗, 卞 哲浩
2. 発表標題 Development of Estimation Method for Prompt Neutron Decay Constant Using Dynamic Mode Decomposition
3. 学会等名 International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡 楓賀, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 山中 正朗, 卞 哲浩
2. 発表標題 面積比法に対する動的モード分解の適用
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口 響, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 多田 健一
2. 発表標題 動的モード分解による即発中性子減衰定数 固有値計算の収束加速
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤 知弘, 西岡 楓賀, 山本 章夫, 山中 正朗, 卞 哲浩
2. 発表標題 Area Ratio Method Using Dynamic Mode Decomposition
3. 学会等名 International Conference on Physics of Reactors 2022 (PHYSOR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------