

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14909

研究課題名(和文) 臨界実験に頼らない臨界安全性の予測精度向上：未臨界実験を活用したデータ同化手法

研究課題名(英文) Data assimilation using subcritical measurement to reduce prediction uncertainty in criticality analysis

研究代表者

遠藤 知弘 (Endo, Tomohiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：50377876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：数値計算による臨界安全性(実効中性子増倍率 $k_{eff}$ )の予測精度を向上するため、本研究では未臨界体系の測定結果(即発中性子減衰定数、中性子計数率の時間変化)を活用したデータ同化手法について検討した。一次摂動論に基づき、効率的な感度係数評価手法を新たに考案した。運転停止中の京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)における炉雑音測定で得られた測定値を利用することで、 $k_{eff}$ 予測精度を改善しU235核データの不確かさを低減できることを確認した。近畿大学原子炉やKUCAで測定した中性子計数率の時系列データに対して粒子フィルタ法を適用し、制御棒操作等に起因した未臨界度変化を推定できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、数値計算により評価した実効中性子増倍率 $k_{eff}$ の予測精度を改善する際には、過去に実施された臨界実験データ(例えばICSBEP)が利用されてきた。この方法論の場合、 $k_{eff}$ 予測精度の更なる向上には、過去とは異なる別の臨界実験を新たに実施する必要がある。本研究の成果により、核燃料の臨界安全に関連する核設計を行う際に、 $k_{eff}$ 予測精度の改善に繋がる新たな追加測定として、臨界実験以外の測定結果も有効活用できることを明らかにした。すなわち、臨界実験のみに頼るのではなく、より容易に実施可能な未臨界体系における測定結果も活用することで、実効中性子増倍率 $k_{eff}$ の予測精度向上が可能である、と考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research investigated the data assimilation using subcritical measurement results (prompt neutron decay constant and time series data of neutron count rates) to reduce the prediction uncertainty of the effective neutron multiplication factor,  $k_{eff}$ . Based on the first order perturbation theory, the efficient calculation method for the sensitivity coefficients of with respect to arbitrary nuclear data was newly developed. Using the bias factor and cross section adjustment methods using measured by the reactor noise analysis at the Kyoto University Critical Assembly (KUCA) under the shutdown state, it was confirmed that (1) nuclear data-induced uncertainty of the predicted  $k_{eff}$  value and (2) uncertainties of U235- and - can be reduced. By applying the particle filter method to the time series data of neutron count rates measured at the Kindai University Reactor (UTR-KINKI) and KUCA, the inverse estimation for subcriticality change owing to control rods was demonstrated.

研究分野：原子炉物理学、臨界安全

キーワード：未臨界 実効中性子増倍率 即発中性子減衰定数 データ同化 ベイズ推定 摂動論 原子炉雑音 プートストラップ法

## 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(実効中性子増倍率 $k_{\text{eff}} < 1$ )を維持した形で取り扱うことが重要となる。東京電力 福島第一原子力発電所事故によって発生した燃料デブリや、現在日本国内に貯蔵されている使用済み核燃料を、未臨界状態を保って安全に管理・貯蔵するためには、事前の数値解析を活用して $k_{\text{eff}}$ の値を予測し、未臨界状態を保つことができるように設備の設計・管理を行う必要がある。ただし、数値解析コードの入力値の不確かさ(特に核データの共分散)や、使用する数値解析コードの解析手法に起因した手法起因誤差により、今現在の最新知見を用いて解析したとしても $k_{\text{eff}}$ の推定値にはバイアス・不確かさが生じざるを得ない。従って、数値解析により未臨界を判断するには、設計に使用する計算コードと核データを用いて、過去に実施された臨界実験の $k_{\text{eff}}$ 固有値計算を実施し、得られた $k_{\text{eff}}$ 計算値のバイアス・不確かさを把握しておく必要がある。その上で、十分に臨界未満となるよう裕度を設けた上で設計を行う必要があるが、核燃料の臨界安全性を担保しつつ合理的に管理・貯蔵するためには、数値解析による予測の信頼性を向上させることも重要となる。その方法として、①数値解析による $k_{\text{eff}}$ 予測結果と②臨界実験測定結果を組み合わせたデータ同化手法によって、 $k_{\text{eff}}$ 予測精度のバイアス・不確かさを低減する手法が挙げられる。このような取り組みとして、従来の臨界安全研究では、主に臨界実験を活用することに注力されてきた。これは、臨界実験であれば $k_{\text{eff}}$ 測定値が1に等しく、数値解析上も $k_{\text{eff}}$ 固有値方程式の基本モード固有値を求めるだけで済むためである。

一方、未臨界状態の体系を対象とした測定により、測定体系の $k_{\text{eff}}$ を間接的に測定しようとする研究も取り組まれてきた。ただし、未臨界実験の場合には、①未臨界状態で直接測定可能な量(即発中性子減衰定数 $\alpha$ 、中性子計数率の時間変化)から $k_{\text{eff}}$ 絶対値への換算方法や、②未臨界状態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、といった課題に直面していた。従って、 $k_{\text{eff}}$ 予測精度の改善のために未臨界実験結果を活用する方法論は十分に確立できていなかった。

## 2. 研究の目的

過去に実施した科研費研究(24561040)において、ランダムサンプリング法に基づいた炉定数調整法およびバイアス因子法を提案した。これら2つの手法では、(a)任意の種類の実験結果と(b)別の種類の数値解析結果の間の相関関係(例：図1)を利用し、測定結果を取り入れることで、数値解析による予測精度のバイアス・不確かさを低減することが可能である。本研究では、過去の研究で得られた知見を発展させ、(a)任意の実験結果として「未臨界状態で測定可能な量(即発中性子減衰定数 $\alpha$ 、中性子計数率の時間変化)」を有効活用し、(b)臨界安全の観点上、重要なパラメータである「実効中性子増倍率 $k_{\text{eff}}$ 」の数値計算による予測精度を改善可能かどうか明らかにすることを目的とした。

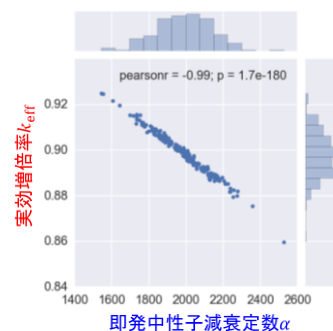


図1  $\alpha$ と $k_{\text{eff}}$ の相関関係の例

## 3. 研究の方法

2節で述べた目的を達成するために、本研究では以下の手順により検討を進めた。

### (1) Feynman- $\alpha$ 法による即発中性子減衰定数の測定誤差推定

即発中性子減衰定数 $\alpha$ については、外部中性子源としてパルス中性子源を活用したアクティブ法だけでなく、外部中性子源を利用しないパッシブ法により測定することも可能である。例えば、運転停止中の未臨界状態であったとしても、核燃料中に内在する中性子源(例:新燃料であれば $^{238}\text{U}$ 、照射燃料であれば $^{242}\text{Cm}$ 、 $^{244}\text{Cm}$ の自発核分裂)を種火とした終息性の核分裂連鎖反応が微弱ながらも生じているため、停止状態の炉心においても長時間の原子炉雑音(中性子計数の時間的揺らぎ)を測定することでFeynman- $\alpha$ 法によって $\alpha$ の測定が可能である。データ同化手法を活用するためには、 $\alpha$ の測定誤差を適切に評価する必要があるため、Feynman- $\alpha$ 法の測定誤差評価の改善に取り組んだ。

### (2) 1次摂動論に基づいた即発中性子減衰定数 $\alpha$ の感度係数評価手法

$\alpha$ を数値解析により予測するためには、中性子束時間変化の時定数に関連した「 $\omega$ モード固有値方程式」の即発中性子成分に対応した空間・エネルギー基本モードの固有値の数値解を求める必要がある。この計算手法としては、 $\alpha$ サーチ法( $\alpha$ - $k$ 反復法)が既に確立している。初期検討では、ランダムサンプリング法に基づいたベイズ推定によるデータ同化手法について取り組んだ<sup>11),12)</sup>。ランダムサンプリング法の全計算時間は、サンプルサイズ $N$ に比例することになる。例えば、 $N$ 個のデータから推定された不確かさ(標準偏差)の相対統計誤差 $1\sigma$ は約 $1/\sqrt{2(N-1)}$ と概算できる。従って、不確かさの相対統計誤差5%未満にするためには $N > 200$ ケースの $\omega$ モード固有値計算が必要となる。同様に、共分散や相関係数についても統計誤差が生じざるを得ないため、多くの計算コストを要する課題に直面することとなった。

一方、従来の $k_{\text{eff}}$ 不確かさ評価手法では、核データ微小変化に対する $k_{\text{eff}}$ の変化(感度係数)を利用した一次摂動論に基づいた不確かさ評価手法が既に確立しており、決定論的計算コードおよび連続エネルギーモンテカルロコードにおいて有効活用されている。そこで本研究では、効率的

な $\alpha$ の不確かさ評価手法を確立するため、一次摂動論に基づいた数値解析理論を考案し、提案手法の検証作業を実施した。

### (3) 即発中性子減衰定数 $\alpha$ を活用したデータ同化手法

運転停止中の京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)で測定された原子炉雑音から得られた「未臨界体系の即発中性子減衰定数 $\alpha$ の測定値」を活用し、バイアス因子法を適用することで、「臨界炉心の実効中性子増倍率 $k_{\text{eff}}$ の数値計算結果」の予測精度をどの程度改善することが可能か検討した。また、任意の核データに対する $\alpha$ の感度係数を一次摂動論により効率よく評価した上で、炉定数調整法を適用することにより、未臨界体系の即発中性子減衰定数 $\alpha$ の測定結果から、どのような種類の核データについて不確かさ低減が可能なのか調べた。

### (4) 粒子フィルタ法を用いた未臨界度逆推定

商業用軽水炉などで用いられる反応度計の測定原理として、逆動特性解析手法が活用されている。従来の逆動特性解析手法の場合には、測定された中性子計数率の時間変化を入力値として、実効中性子増倍率 $k_{\text{eff}}$ の逆推定を行う。ここで、 $k_{\text{eff}}$ 以外のパラメータ(外部中性子源強度 $S$ 、中性子生成時間 $\Lambda$ 、実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff}}$ )については、臨界状態近傍において一定であると近似している。しかし、より一般的な状況を考えて場合、ある体系で生じる過渡変化は、 $k_{\text{eff}}$ の時間変化だけでなく、 $S$ や一点炉動特性パラメータ $\Lambda$ 、 $\beta_{\text{eff}}$ の時間変化も同時に起こり得る。さらに、体系の不確かさが大きい場合には、逆推定したい $k_{\text{eff}}$ の不確かさだけでなく、 $S$ 、 $\Lambda$ 、 $\beta_{\text{eff}}$ にも不確かさがある状況となる。このような状況における $k_{\text{eff}}$ 逆推定方法について種々の検討<sup>(3),(7),(10),(13)</sup>を実施した上で、より高度な逆動特性解析手法として、粒子フィルタ法の適用について検討した。

## 4. 研究成果

### (1) Feynman- $\alpha$ 法による即発中性子減衰定数の測定誤差推定

科研費研究(15K18317)において、bootstrap法を活用することでFeynman- $\alpha$ 法による $\alpha$ 測定結果の誤差評価手法を考案した。ただし、推定された95%bootstrap信頼区間の被覆確率が真値の95%より若干低く、統計誤差を過小評価する傾向があった。Feynman- $\alpha$ 法では、①基本ゲート幅 $T_0$ の間の中性子計数を連続測定することで時系列データ $C_i(T_0)$ を取得し、②バンチング法によって連続する $k$ 個の時系列データを連結し、③検出時間幅 $T = kT_0$ に対する二次相関量 $Y(T) = \text{分散}/\text{平均} - 1$ の変化を求め、④解析式を非線形最小二乗フィッティングすることによって、即発中性子減衰定数 $\alpha$ を得る。以上で述べた手順のうち、手順②においてバンチング法により同一の時系列データを再利用しているため、異なる時間幅の $Y(kT_0)$ 、 $Y(k'T_0)$ の間に強い相関が生じることとなる。この相関が $\alpha$ フィッティング結果および統計誤差評価に影響を与えていると考えた。本研究ではmoving block bootstrap法(図2)を活用することで、 $Y(T)$ のbootstrap共分散を推定した上で、共分散を考慮した非線形最小二乗フィッティングにより $\alpha$ のbootstrap標本分布を求め、 $\alpha$ の統計誤差を評価する手法に改良した<sup>[2]</sup>。以上の改良により、bootstrap法で推定した $\alpha$ 統計誤差の被覆確率を改善できた(図3)。

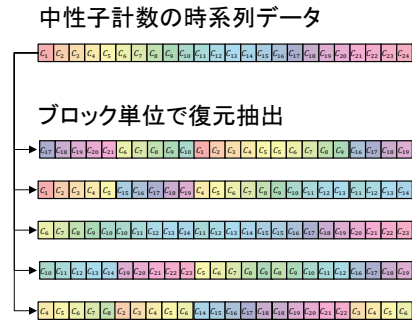


図2 moving block bootstrap 法

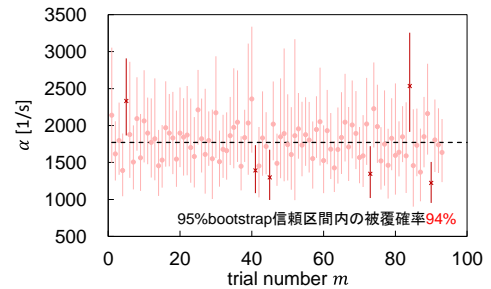


図3  $\alpha$ 統計誤差の評価例

### (2) 1次摂動論に基づいた即発中性子減衰定数 $\alpha$ の感度係数評価手法

まず、遅発中性子先行核の効果を陽に取り扱った $\omega$ モード固有値方程式に対して一次摂動論を適用することで、forwardおよびadjoint固有関数を用いた即発中性子減衰定数 $\alpha$ の感度係数評価手法を考案した<sup>(6),(8)</sup>。中性子エネルギー多群の輸送計算を考えた場合には、固有値 $\omega$ の相対感度係数は(1)式により推定することができる<sup>[3]</sup>。

$$\frac{\sigma}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \approx \frac{\sigma}{\omega} \frac{\langle \psi_g^\dagger \left( \frac{\partial \mathbf{B}_p}{\partial \sigma} + \frac{\omega}{v_g^2} \frac{\partial v_g}{\partial \sigma} \right) \psi_g \rangle + \langle \psi_g^\dagger \frac{\partial \left( \frac{\chi_{lg}}{4\pi} \lambda_i \right)}{\partial \sigma} C_i \rangle + \langle C_i^\dagger \frac{\partial (a_i v_d \Sigma_{f,g})}{\partial \sigma} \psi_g \rangle - \langle C_i^\dagger \frac{\partial \lambda_i}{\partial \sigma} C_i \rangle}{\langle \frac{\psi_g^\dagger \psi_g}{v_g} \rangle + \langle C_i^\dagger C_i \rangle} \quad (1)$$

$\sigma$ : 核データ,  $\mathbf{B}_p$ : 即発中性子のみのボルツマン演算子,  $v_g$ : 中性子速度,

$\psi_g$ : 角度中性子束,  $C_i$ :  $i$ 群の遅発中性子先行核数密度,  $\dagger$ : adjoint,

$\langle \rangle$ : 全位相空間での積分, その他記号は原子炉物理学における一般的な記法に則る



なお、即発中性子減衰定数 $\alpha$ は、1個の中性子を体系に投入した後の中性子束の指数関数的な減衰 $\exp(-\alpha t)$ の時定数に対応するため、(1)式中の $\omega$ 固有値(中性子束の指数関数的な増加 $\exp(\omega t)$ に対応)とは符号を反転させた対応関係がある( $\alpha = -\omega$ )。考案した $\alpha$ 感度係数評価手法については、①自作のエネルギー多群拡散計算コード<sup>6)</sup>、および② $S_N$ 法に基づく中性子輸送計算コードPARTISN<sup>[3]</sup>を用いて、直接摂動法(対象とする核データを $\Delta\sigma$ だけ微小変化させた際の $\alpha$ の微小変化量 $\Delta\alpha$ から感度を推定する手法)で推定された結果を参照解として比較することで妥当性確認を行った。本研究成果により、forward および adjoint 固有値計算を2回実施するだけで、 $\alpha$ 相対感度係数行列を効率よく推定することが可能となった(図4)。

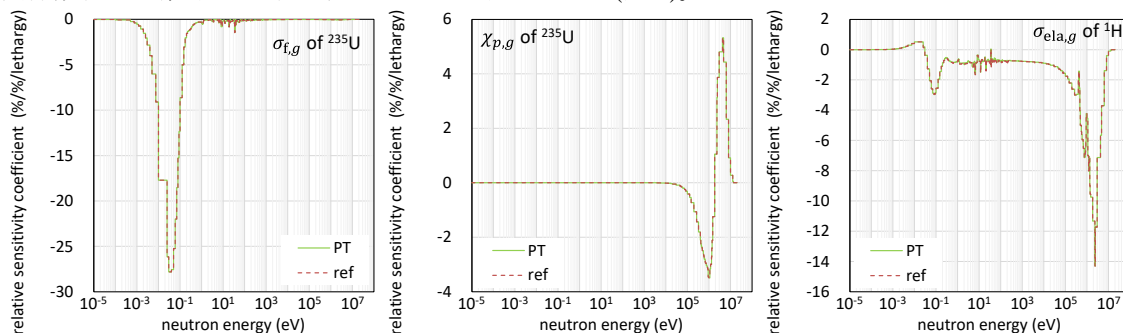


図4 直接摂動法(ref)と一次摂動論(PT)による感度係数の比較例 (ICSBEP, HEU-SOL-THERM-012 体系)

### (3) 即発中性子減衰定数 $\alpha$ を活用したデータ同化手法

運転停止状態における外部中性子源無しの KUCA 未臨界炉心(炉心平均濃縮度 5.4wt%)において、炉心周りのポリエチレン反射体領域の軸方向中央位置に配置された4本の $^3\text{He}$ 検出器で測定された、約15.6時間の原子炉雑音(中性子計数の時間的揺らぎ)に対して、moving block bootstrap法を活用したFeynman- $\alpha$ 法により $\alpha$ の測定結果および測定誤差を評価した(図5)<sup>[1]</sup>。

次に、 $S_N$ 法に基づく3次元中性子輸送計算コードPARTISNを活用して、①運転停止状態のKUCA未臨界炉心( $k_{\text{eff}} \approx 0.94$ )および②運転中のKUCA臨界炉心( $k_{\text{eff}} = 1$ )について、一次摂動論に基づき、核データ $\sigma$ に対する $\alpha$ および $k_{\text{eff}}$ の感度係数行列 $S_{\alpha,\sigma}$ 、 $S_{k,\sigma}$ を評価した。ここで、PARTISNの計算条件については、(a)単位セル内のウラン燃料板-ポリエチレン板の鉛直方向の非均質性を陽に取り扱った形で空間メッシュ離散化を行い、(b)中性子エネルギー群は $10^{-5}\text{eV} \leq E \leq 20\text{MeV}$ の範囲を56群に分割し、(c)中性子飛行方向の角度分点については、改良even-odd分点(図6、単位1/8球面上における角度求積を10次まで正確に計算可能)を使用した。

こうして得られた(i)運転停止状態の未臨界炉心における $\alpha$ 測定結果、(ii)感度係数行列 $S_{\alpha,\sigma}$ 、 $S_{k,\sigma}$ 、および(iii)核データ共分散行列を用いて、バイアス因子法により臨界炉心における核データ起因 $k_{\text{eff}}$ 予測結果の不確かさを低減を試みた<sup>1)</sup>。

SCALE6.2.3 付属の56群共分散データ(scale.rev08.56groupcov.7.1)に基づいた場合、データ同化前の核データ起因 $k_{\text{eff}}$ 相対不確かさは約0.8(% $\Delta k/k$ )であったが、 $\alpha$ 測定結果を活用したバイアス因子法を適用することで約0.1(% $\Delta k/k$ )まで低減できた。この理由は、未臨界炉心の $\alpha$ と臨界炉心の $k_{\text{eff}}$ との間に、核データ起因の非常に強い相関(-0.997)があるためである。さらに、 $\alpha$ 測定結果を活用した炉定数調整法により、本解析で用いたKUCA未臨界炉心における $\alpha$ 測定結果の場合には、核データとして $^{235}\text{U}$ の核分裂スペクトル $\chi$ および核分裂中性子数 $\nu$ の不確かさを低減できることを明らかにできた(図7)。

なお、本研究で実施した数値解析は決定論的手法に基づいており離散化誤差の影響があるため、今後検討すべき課題としては、より手法起因誤差の小さい連続エネルギーモンテカルロ法に基づいた $\alpha$ 感度係数評価手法の開発が挙げられる。

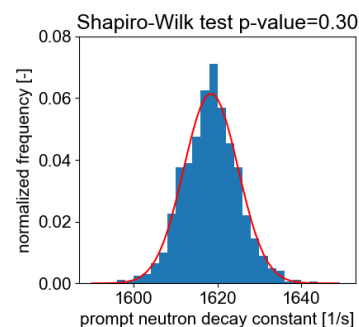


図5 運転停止時の $\alpha$ 測定結果

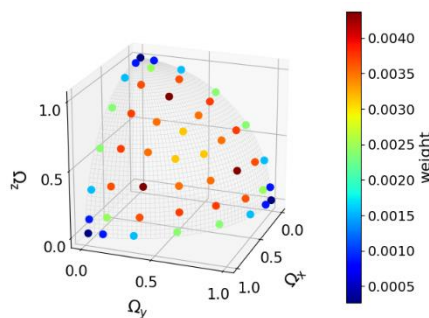


図6 改良 even-odd 分点

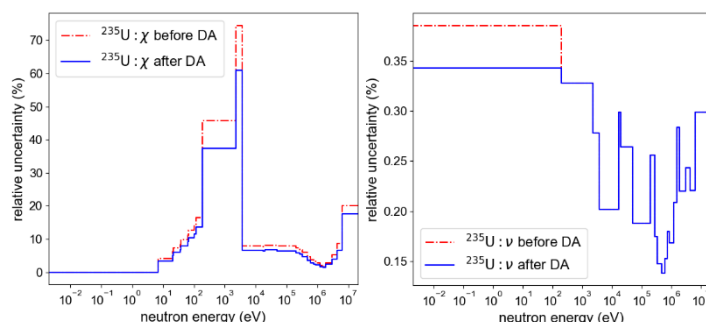


図7  $^{235}\text{U}$  核データ不確かさの低減結果

#### (4) 粒子フィルタ法を用いた未臨界度逆推定

粒子フィルタ法では、測定対象体系の状態変数(体系内の中性子数、遅発中性子先行核数、未臨界度 $-\rho = (1 - k_{\text{eff}})/k_{\text{eff}}$ 、外部中性子源強度 $S$ 、一点炉動特性パラメータ)を1組にまとめた「粒子」を考え、これら状態変数の確率分布を多数個の粒子による頻度分布で近似する。ここで、逆推定したい核特性パラメータについて、事前に想定される不確かさや変動量に応じたシステムノイズを与えることで、各粒子の時間発展を数値計算で予測する。得られた各粒子の予測結果に対して、測定体系における中性子計数率の計測結果を取り入れて、ベイズ推定により尤度の大きい(測定値との差が小さい)粒子を優先的に残すことで、逆推定したい推定パラメータの事後確率を随時更新していく。

本研究では、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)<sup>5),9)</sup>および KUCA<sup>2)</sup>で測定された中性子計数率の時間変化を活用して、粒子フィルタ法による未臨界度推定を実施した。一例として、KUCAで実施した未臨界過渡変化実験の結果を以下で示す。本実験では、炉心周りのポリエチレン反射体領域の軸方向中央位置にBF<sub>3</sub>検出器を配置し、①D-T中性子源のパルス周波数変更、②制御棒操作、③3×3集合体から成る中心架台落下に伴う中性子計数率 $C_{\text{core}}(t)$ の時間変化を測定した(図8)。ここで、粒子フィルタ法において外部中性子源強度 $S$ の逆推定を行うため、D-T中性子源のターゲット直上に中性子レムカウンターを設置し、その計数率 $C_s(t)$ をビームモニタとして活用した。また、事前の数値解析として、KUCA炉心の燃料集合体数および制御棒位置を様々に変化させた条件で、連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP6.2を用いて $k_{\text{eff}}$ および一点炉動特性パラメータの数値解析を実施することで、 $k_{\text{eff}}$ と中性子生成時間 $\Lambda$ との間の相関関係を1次線形モデルでフィッティングし、そのモデルによる予測誤差を $\Lambda$ のシステムノイズとして与えた。 $k_{\text{eff}}$ と $S$ のシステムノイズについては、計数率が急激に変化するほど $k_{\text{eff}}$ と $S$ の変動も大きいと考え、計数率の時間微分量の大きさに比例する形で経験的に設定した。以上のようなモデル化を行うことで、外部中性子源強度 $S$ の時間変化や、中性子生成時間の時間変化や不確かさがある場合についても、粒子フィルタ法により未臨界度の変化を逆推定できることを明らかにした(図9)。

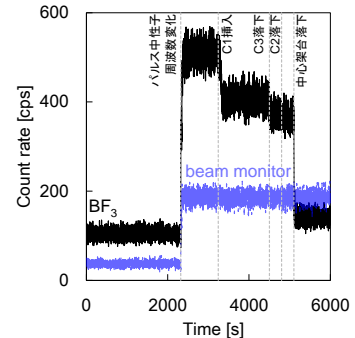


図8 計数率 $C_{\text{core}}(t)$ ,  $C_s(t)$ 測定結果

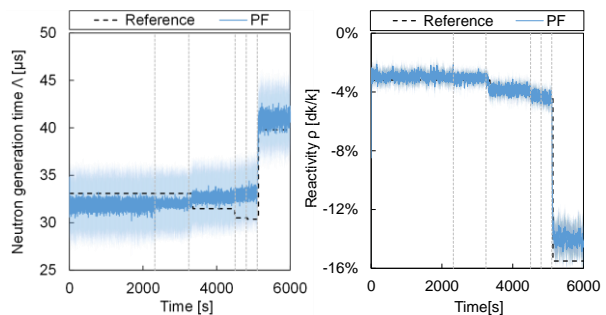


図9 粒子フィルタ法(PF)による $\Lambda$ ,  $-\rho$ の推定結果とMCNP6.2計算結果(Reference) $C$ の比較

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、核燃料の臨界安全性に係る予測および核設計を行う際に、必ずしも臨界実験に頼りきるのではなく、より容易に実施可能な未臨界実験の測定結果も活用することで、実効中性子増倍率 $k_{\text{eff}}$ の予測精度向上に資することができると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- [1] T. Endo, A. Yamamoto, M. Yamanaka, *et al.*, “Experimental validation of unique combination numbers for third- and fourth-order neutron correlation factors of zero-power reactor noise,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**(4), pp. 322–336 (2019), DOI: 10.1080/00223131.2019.1580625 <http://hdl.handle.net/2237/00029682> (査読有).
- [2] T. Endo, A. Yamamoto, “Comparison of theoretical formulae and bootstrap method for statistical error estimation of Feynman- $\alpha$  method,” **124**, pp. 606–615 (2019), DOI: 10.1016/j.anucene.2018.10.032 <http://hdl.handle.net/2237/00028772> (査読有).
- [3] T. Endo, A. Yamamoto, “Sensitivity analysis of prompt neutron decay constant using perturbation theory,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**(11), pp. 1245–1254 (2018), DOI: 10.1080/00223131.2018.1491902 <http://hdl.handle.net/2237/00028771> (査読有).

[学会発表] (計13件)

- 1) 遠藤 知弘, 山本 章夫, “即発中性子減衰定数を用いたバイアス因子法および炉定数調整法,” 日本原子力学会 2019年春の年会, 2J07, 2019年3月20日~22日, 茨城大学水戸キャンパス.

- 2) 池田 卓弥, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 他, “粒子フィルタ法を用いた未臨界度、中性子生成時間、外部中性子源強度の同時推定,” 日本原子力学会 2019 年春の年会, 2J05, 2019 年 3 月 20 日～22 日, 茨城大学水戸キャンパス.
- 3) A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of subcriticality in dollar units based on integral method for arbitrary state-change in subcritical system,” *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **119**, pp. 1112–1115, Orlando, FL, November 11–15, 2018.
- 4) 遠藤 知弘, 山本 章夫, “1 次摂動論に基づいた即発中性子減衰定数の核データ起因不確かさの定量評価,” 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 1M05, 2018 年 9 月 5 日～7 日, 岡山大学津島キャンパス.
- 5) T. Ikeda, T. Kimura, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of subcriticality using particle filter method,” *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **118**, pp. 851–854, Philadelphia, PA, June 17–21, 2018.
- 6) T. Endo, A. Yamamoto, “Sensitivity coefficient analysis of omega-eigenvalue based on first-order perturbation theory,” *Proc. PHYSOR2018*, pp. 1240–1253, Cancun, Mexico, Apr. 22–26, 2018.
- 7) A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of subcriticality in dollar units using integral method for subcritical system,” *Proc. PHYSOR2018*, pp. 3271–3282, Cancun, Mexico, Apr. 22–26, 2018.
- 8) 遠藤 知弘, 山本 章夫, “摂動論に基づいた即発中性子減衰定数の感度係数評価,” 日本原子力学会 2018 年春の年会, 1F14, 2018 年 3 月 26 日～28 日, 大阪大学吹田キャンパス.
- 9) 池田 卓弥, 木村 俊貴, 遠藤 知弘, 他, “粒子フィルタ法を用いた未臨界度推定,” 日本原子力学会 2018 年春の年会, 1F06, 2018 年 3 月 26 日～28 日, 大阪大学吹田キャンパス.
- 10) 野中 朝日, 遠藤 知弘, 山本 章夫, “未臨界体系における積分法を用いたドル単位未臨界度推定,” 日本原子力学会 2018 年春の年会, 1F05, 2018 年 3 月 26 日～28 日, 大阪大学吹田キャンパス.
- 11) 遠藤 知弘, 山本 章夫, “未臨界実験を活用したデータ同化手法に関する研究,” 日本原子力学会 2017 年秋の大会, 3G11, 2017 年 9 月 13 日～15 日, 北海道大学.
- 12) 木村 俊貴, 遠藤 知弘, 山本 章夫, “未臨界実験データを用いた実効遅発中性子割合に対するバイアス因子法の適用,” 日本原子力学会 2017 年秋の大会, 3G13, 2017 年 9 月 13 日～15 日, 北海道大学.
- 13) T. Ikeda, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of reactivity, neutron generation time, and effective delayed neutron fraction using extended Kalman filter,” *Proc. Reactor Physics Asia 2017 (RPHA17)*, Chengdu, China, Aug. 24–25, 2017.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者  
なし

(2)研究協力者  
なし