

一般セッション | III. 核分裂工学：301-1 炉物理，核データの利用，臨界安全

2024年9月11日(水) 11:05 ~ 11:55 D会場(講義棟A棟1F A106)

## [1D05-07] 不確かさ評価手法

座長:小池 啓基(MHI)

11:05 ~ 11:20

[1D05]

最大エントロピー法による軽水の熱中性子散乱則に起因した即発中性子減衰定数の不確かさ評価

\*原田 善成<sup>1</sup>、遠藤 知弘<sup>1</sup>、山本 章夫<sup>1</sup> (1. 名大)

11:20 ~ 11:35

[1D06]

ハイブリッドなデータ同化法の検討

\*丸山 修平<sup>1,2</sup>、山本 章夫<sup>2</sup>、遠藤 知弘<sup>2</sup> (1. JAEA、2. 名大)

11:35 ~ 11:50

[1D07]

ランダムサンプリング法に基づく不確かさ評価における多群核反応断面積摂動時の間接効果の影響

\*藤田 達也<sup>1</sup> (1. JAEA)

11:50 ~ 11:55

座長持ち時間

# 最大エントロピー法による軽水の熱中性子散乱則に起因した 即発中性子減衰定数の不確かさ評価

Uncertainty quantification of prompt neutron decay constant due to  
thermal neutron scattering law for light water using maximum entropy method

\*原田 善成<sup>1</sup>, 遠藤 知弘<sup>1</sup>, 山本 章夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学

最大エントロピー法に基づいたランダムサンプリングにより、軽水のフォノン状態密度のエネルギースペクトル形状が、軽水の熱中性子散乱則データに起因した即発中性子減衰定数の不確かさ評価結果に大きな影響を与えることが明らかとなった。

**キーワード**：軽水，熱中性子散乱則，即発中性子減衰定数，最大エントロピー法，フォノン状態密度

**1. 緒言** 軽水炉を対象とした核計算では、軽水の熱中性子散乱則(TSL)データに起因した不確かさが生じる。我々の過去研究[1]において、TENDL-2021にて公開されているランダムサンプリングされた LEAPR インプットファイルを 200 個用いて、軽水の TSL データに起因した水槽体系における即発中性子減衰定数 $\alpha$ の不確かさ評価およびベイジアンモンテカルロに基づき 6 つの LEAPR インプットパラメータ( $\Delta, \sigma_s, \omega_t, E_1, E_2, c$ )のデータ同化を実施した。結果として、LEAPR による軽水の TSL の評価で必要となるフォノン状態密度を構成するパラメータのうち、 $E_2$ (振動エネルギーの期待値)、 $\Delta$ (フォノン状態密度のエネルギースペクトル形状を保ったまま、エネルギー方向に伸縮させるパラメータ)が、 $\alpha$ 不確かさ評価結果に大きな影響を及ぼすことを確認した。ただし、フォノン状態密度のエネルギースペクトル形状の変化が、 $\alpha$ 計算結果に与える影響の大きさについては十分検討できていなかった。そこで本研究では、最大エントロピー法(MEM)に基づいて、フォノン状態密度のエネルギースペクトル形状を変化させることで、 $\alpha$ 不確かさ評価を実施することを目的とした。

**2. 計算条件** 軽水の CAB モデル(ENDF/B-VIII.0)では、分子間相関に由来した低エネルギー領域のフォノン状態密度のエネルギースペクトルが、混合ガウス分布でモデル化されている。このフォノン状態密度の平均値を相対標準偏差 10%だけ摂動する条件で、MEM とランダムサンプリング法に基づいて LEAPR インプットファイルを 200 個生成した。生成した 200 個の LEAPR インプットファイルを NJOY2016 の LEAPR モジュールと FRENDDY/MG により処理し、エネルギー172 群 XMAS 構造の巨視的多群断面積を処理した。得られた多群巨視的断面積を用いた  $S_N$  法による $\alpha$ 固有値計算(飛行方向 icosahedral 72 分点、非等方散乱次数  $P_3$ )[2]により、厚さ 1mm のアルミ容器の水槽体系(4.49 cm×4.51 cm×3.41 cm)を対象として $\alpha$ を計算した。ここで、 $^{1,2}\text{H}$ ,  $^{16-18}\text{O}$ ,  $^{27}\text{Al}$  の評価済み核データ、Al の TSL データについては JENDL-5 (upd-12)を使用した。得られた 200 個の $\alpha$ 計算値から平均値と共分散を求め、 $\alpha$ 不確かさ評価を実施した。

**3. 評価結果** 実験値 $44683 \pm 182$  (1/s)に対して、MEM による $\alpha$ 不確かさ評価結果は $47726 \pm 1748$  (1/s)となった(図 1)。本検討ではフォノン状態密度のエネルギースペクトル形状のみ変化させたにもかかわらず、先行研究[1]の $\alpha$ 不確かさ評価結果 $47700 \pm 1590$  (1/s)と同程度の結果となったことから、フォノン状態密度のエネルギースペクトル形状の変化が $\alpha$ 不確かさ評価結果に大きな影響を与えることが分かった。

**参考文献** [1] 原田 善成, 他, 日本原子力学会 2023 年春の大会, 2K03 (2023); [2] H. Yamaguchi *et al.*, *Proc. RPHA2023* (2023).

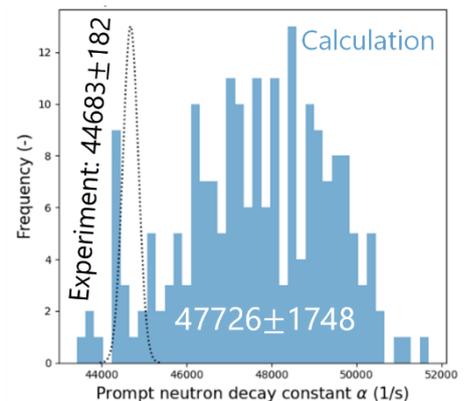


図 1  $\alpha$ 不確かさ評価結果

\*Yoshinari Harada<sup>1</sup>, Tomohiro Endo<sup>1</sup>, Akio Yamamoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nagoya Univ.

## ハイブリッドなデータ同化法の検討

Research on a hybrid data assimilation technique

\*丸山 修平<sup>1,2</sup>, 山本 章夫<sup>2</sup>, 遠藤 知弘<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>名大

本研究では、核データ起因不確かさに関して、従来の感度係数に基づいたデータ同化法と、ベイジアンモンテカルロ法(BMC)に基づく厳密なデータ同化法の理論的な統合を試み、互いに無矛盾かつ、計算コストの観点でも合理性を有すると考えられるハイブリッドな手法の理論について検討した。

**キーワード** ハイブリッドデータ同化法、ベイジアンモンテカルロ法、ランダムサンプリング、感度係数

**目的** これまで高速炉の炉心解析においては、一般化摂動論に基づく核データ感度係数と核データ共分散を利用した核データ起因不確かさ評価やデータ同化法の適用が行われてきており、利用する積分実験についても、それを前提とした整備が行われてきた。一方、近年では、厳密な輸送計算手法である連続エネルギー(CE)MC 輸送計算とランダムサンプリング法(RS)を用いた厳密なデータ同化法である BMC を組み合わせた手法(GEMC-BMC)の導入も可能になりつつある。GEMC-BMC は、従来の不確かさ評価手法における解析手法起因の系統誤差を排除することが可能というメリットがある一方で、MC 法起因の統計誤差が付随するデメリット、すなわち計算コスト上の課題が存在する。本研究では、感度係数と GEMC による直接摂動の結果の併用を可能にするデータ同化法の導出を行う。

**結果** 提案するデータ同化法は、BMC に基づき、target 特性のバイアス  $\mathbf{b}$ 、分散  $\mathbf{v}$  を次式で評価する：

$$\mathbf{b} = \sum_{s=1}^{N_{RS}} \left( \frac{r_c(\mathbf{T}(s)) - r_c(\mathbf{T}_0)}{r_c(\mathbf{T}_0)} \right) w(\mathbf{T}(s)) / \sum_{s=1}^{N_{RS}} w(\mathbf{T}(s)) \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = \sum_{s=1}^{N_{RS}} \left( \frac{r_c(\mathbf{T}(s)) - r_c(\mathbf{T}_0)}{r_c(\mathbf{T}_0)} - \mathbf{b} \right) \left( \frac{r_c(\mathbf{T}(s)) - r_c(\mathbf{T}_0)}{r_c(\mathbf{T}_0)} - \mathbf{b} \right)^T w(\mathbf{T}(s)) / \sum_{s=1}^{N_{RS}} w(\mathbf{T}(s)) \quad (2)$$

$$w(\mathbf{T}(s)) \equiv \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{R}_e - \mathbf{R}_c(\mathbf{T}(s))}{\mathbf{R}_c(\mathbf{T}(s))} \right)^T (\mathbf{V}_e + \mathbf{V}_m)^{-1} \left( \frac{\mathbf{R}_e - \mathbf{R}_c(\mathbf{T}(s))}{\mathbf{R}_c(\mathbf{T}(s))} \right) \right] \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{T}(s) (s = 1, 2, \dots, N_{RS})$  は、確率分布  $f(\mathbf{T}) = C \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{T} - \mathbf{T}_0}{\mathbf{T}_0} \right)^T \mathbf{M}^{-1} \left( \frac{\mathbf{T} - \mathbf{T}_0}{\mathbf{T}_0} \right) \right]$  ( $C$ : 規格化定数) から無作為抽出された摂動後の核データを表す。 $i$  番目の target 特性  $r_{c,i}(\mathbf{T}(s))$  および  $j$  番目の積分実験  $R_{c,j}(\mathbf{T}(s))$  は、GEMC による直接摂動計算、もしくは、感度係数を用いた以下の一次摂動計算で評価する。

$$\frac{r_{c,i}(\mathbf{T}(s)) - r_{c,i}(\mathbf{T}_0)}{r_{c,i}(\mathbf{T}_0)} = \mathbf{g}_i \cdot \frac{(\mathbf{T}(s) - \mathbf{T}_0)}{\mathbf{T}_0}, \quad \frac{R_{e,j} - R_{c,j}(\mathbf{T}(s))}{R_{c,j}(\mathbf{T}(s))} = \frac{R_{e,j} - R_{c,j}(\mathbf{T}_0)}{R_{c,j}(\mathbf{T}_0)} - \mathbf{G}_j \cdot \frac{(\mathbf{T}(s) - \mathbf{T}_0)}{\mathbf{T}_0}$$

これにより、感度係数で整理されたデータと GEMC による直接摂動計算に基づき整理されたデータを併用したハイブリッドなデータ同化が可能となる。なお、両方の摂動計算が(一部/全部)の特性に対して行われた場合、制御変数法を適用することで MC 積分の統計誤差を低減させて BMC の計算効率を向上させることが原理的に可能である。即ち(1), (2)式に代わり、以下の量を評価する。

$$\mathbf{b}_{\text{eff}} = \mathbf{b} + (\mathbf{b}_{0,\text{th}} - \mathbf{b}_{0,\text{MC}}) \quad (4), \quad \mathbf{v}_{\text{eff}} = \mathbf{v} + (\mathbf{v}_{0,\text{th}} - \mathbf{v}_{0,\text{MC}}) \quad (5)$$

ここで、添字の"0"は既に感度係数が整備されている既存データベースを用いてデータ同化を行った結果を表し、 $\mathbf{b}_{0,\text{th}}, \mathbf{v}_{0,\text{th}}$  はベイズ推定における核データ変数  $\mathbf{T}$  に関する積分を解析的に実行した結果(従来のデータ同化式)を、 $\mathbf{b}_{0,\text{MC}}, \mathbf{v}_{0,\text{MC}}$  は MC 積分で数值的に実行した結果をそれぞれ表している。 $\mathbf{b}_{\text{eff}}, \mathbf{v}_{\text{eff}}$  の MC 積分の統計誤差は(4), (5)式における第1項および第3項からの寄与によるが、これらに強い正の相関がある場合、 $\mathbf{b}, \mathbf{v}$  の統計誤差よりもそれを小さくすることができると考えられる。

**用語**  $\mathbf{T}_0$ : 基準の核データ,  $\mathbf{M}$ : 核データ共分散,  $\mathbf{V}_e$ : 実験不確かさ,  $\mathbf{V}_m$ : 解析モデル不確かさ,  $\mathbf{g}, \mathbf{G}$ : 感度係数(target 特性, 積分実験),  $r_c, \mathbf{R}_c$ : 解析値(target 特性, 積分実験),  $\mathbf{R}_e$ : 実験値

\*Shuhei Maruyama<sup>1,2</sup>, Akio Yamamoto<sup>2</sup> and Tomohiro Endo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>Nagoya Univ.

# ランダムサンプリング法に基づく不確かさ評価における 多群核反応断面積摂動時の間接効果の影響

Influence of implicit effect for multi-group cross-section perturbation  
on random-sampling-based uncertainty propagation

\*藤田 達也<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構

本研究では、ランダムサンプリング法に基づく不確かさ評価において、多群核反応断面積摂動時の間接効果が多群中性子輸送計算における無限増倍率の不確かさ評価結果に与える影響を定量的に確認した。

**キーワード:** ランダムサンプリング法, 間接効果, FRENDY, GENESIS, NJOY, JENDL-5, SERPENT

**1. 序論** 決定論的手法に基づく多群中性子輸送解析コードにおけるランダムサンプリング法において、核反応断面積（以下単に「断面積」という。）の摂動に伴う間接効果（断面積の摂動に伴う中性子束の変化による影響）の取扱方法が問題提起されている[1]。既往研究では、代表的な重核種及び核分裂生成核種に対して、無限増倍率に対する間接効果の影響を予備的に確認し、U、Pu、Am といった重核種の $(n,\gamma)$ 反応断面積で顕著であることや共分散行列のエネルギー群数によって影響度合いに違いがあることを確認した[2]。本研究では、FRENDY と GENESIS を結合した決定論的多群中性子輸送計算において、多群核反応断面積摂動時の間接効果が多群中性子輸送計算における無限増倍率の不確かさ評価結果に与える影響を確認した。

**2. 計算方法**  $\text{UO}_2$  及び MOX 燃料セル体系[3]において、FRENDY[4]で ACE 形式ファイルを入力として KRAM 形式ファイルを作成後、GENESIS[5,6]により無限増倍率を計算した。従来と同様に直接効果（断面積の摂動による影響）のみを考慮する場合は、FRENDY で KRAM 形式ファイルを作成後、NJOY2016[7]で作成された共分散行列に基づいて KRAM 形式ファイル中の多群断面積を直接的に摂動させた。直接効果と間接効果の両方を考慮する場合は、共分散行列に基づいて摂動 ACE 形式ファイルを FRENDY の ACE 形式ファイル摂動ツールで作成し、これを入力として多群断面積の KRAM 形式ファイルを作成した。本研究では、表 1 に示すとおり、SERPENT を用いた計算ケースを含めた 8 つの計算ケースに対してランダムサンプリング法により無限増倍率の相対標準偏差を評価した。上記において、断面積と共分散行列は JENDL-5 に基づいて作成した。

**3. 計算結果** 1000 回のサンプリング計算によって評価した無限増倍率の相対標準偏差について、ケース 0~6 と参照ケースの差異を図 1 に示す。図 1 から主に以下の 3 点が確認できた。①既往研究[1]のとおり間接効果の影響は  $\text{UO}_2$  燃料セル体系では小さいが MOX 燃料セル体系では顕著な影響が生じた。②MOX 燃料セル体系では間接効果の考慮の有無により 56 群計算で約 90 pcm（ケース 1 と 4）、252 群計算で約 20 pcm の差異が生じた（ケース 2 と 5、3 と 6）。③MOX 燃料セル体系では共分散行列のエネルギー群数の設定により約 70~80 pcm の差異が生じた（ケース 2 と 3、5 と 6）。④中性子輸送計算と共分散行列のエネルギー群数が最も詳細なケース 6 の不確かさ評価結果は参照ケースと同等であった。

**4. 結論** 間接効果が無限増倍率の不確かさ評価結果に与える影響を確認した。中性子輸送計算と共分散行列のエネルギー群数が詳細であれば、間接効果を明示的に考慮せず多群断面積を直接摂動させても間接効果の影響を低減可能であると考えられる。

**参考文献** [1] ANE, 138, 107178, (2020). [2] 日本原子力学会 2024 年春の年会, 1L16, (2024). [3] JNST, Vol. 39, 900, (2002). [4] JAEA-Data/Code 2022-009, (2022). [5] JNST, 45, 985, (2008). [6] NSE, 186, 1, (2017). [7] LA-UR-17-20093, (2019).

\*Tatsuya Fujita<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency

表1 計算条件

ケース	輸送計算コード	群数		摂動先	摂動成分	
		輸送	共分散		直接	間接
参照 0	SERPENT	連続	252	ACE 形式	○	○
		連続	56			
1	FRENDY/ GENESIS	56	56	KRAM 形式	○	○
2		252				
3		252	56	ACE 形式	○	○
4		56				
5		252	252			
6		252	252			

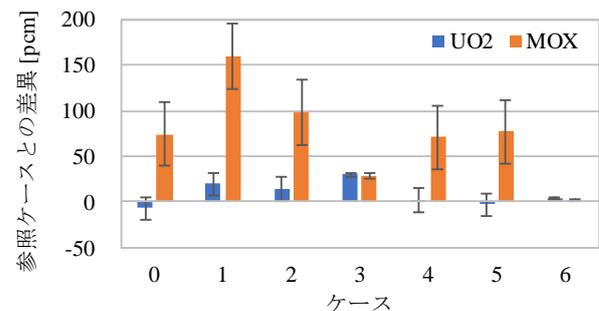


図1 無限増倍率の相対標準偏差の差異

※エラーバーはモンテカルロ計算(Serpent)及びランダムサンプリング法に起因する統計誤差を示す