

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12日(木) 17:45 ~ 18:30 D会場(講義棟A棟1F A106)

[2D21-23] モンテカルロ計算法

座長:方野 量太(JAEA)

17:45 ~ 18:00

[2D21]

べき乗法を利用した制御棒ステップ状挿入に対する動特性計算

*名内 泰志¹ (1. 電中研)

18:00 ~ 18:15

[2D22]

Circular block bootstrap法を用いた固有直交分解による中性子束分布タリーに対する統計的不確かさ評価

*近藤 諒一¹、山本 章夫²、遠藤 知弘² (1. JAEA、2. 名大)

18:15 ~ 18:30

[2D23]

Solomonコードにおける測定データ対応の乱雑化臨界計算

*植木 太郎¹ (1. JAEA)

べき乗法を利用した制御棒ステップ状挿入に対する動特性計算

Reactor kinetics calculation for step-wise insertion of control rod by way of power iteration

*名内 泰志¹

¹電力中央研究所

連続エネルギーモンテカルロ法中性子輸送計算コード MCNP-5 のべき乗法計算を利用し、臨界集合体の中で物質と密度が局所的に変化した際の出力の時間変化を計算した。計算で得た出力の時間減衰から得られる炉周期や、即発跳躍での出力変化は、反応度及び一点炉動特性パラメータの計算値とよく整合した。

キーワード：原子炉動特性、制御棒挿入、連続エネルギーモンテカルロ、べき乗法

1. 緒言 炉心安全性の解析の信頼性を高めるために、近似の少ない参照解提供手法の開発が求められる。当所では連続エネルギーモンテカルロ法中性子輸送計算コード MCNP-5[1]で核分裂連鎖反応での世代間中性子発生数比 k_i を求めるべき乗法計算機能に、中性子飛行時間と遅発中性子先行核崩壊時間を世代を超えて合算する機能と、世代 i 毎の時間依存中性子束 $\phi_i(t)$ を書き出す機能を追加し、時間依存中性子束を $\Sigma_i(\phi_i(t) \Pi_j^{-1} k_j)$ で評価する TDPI 法(Time Dependent neutron transport by way of Power Iteration)を考案した。これまで反応度が定常の条件では TDPI 法で炉周期を計算できること[2]や、一次元球形炉心で密度がステップ状に変化した場合の出力変化を計算できることを示した[3]。本研究では臨界集合体での制御棒挿入を想定した計算を行った。

2. 数値計算 京都大学臨界集合体実験装置の個体減速架台を模した三次元臨界炉心の計算モデルを構築した(図 1 参照)。燃料には 93%-²³⁵U 濃縮度 U-Al 合金を用い、減速材及び反射体はポリエチレンとした。MCNP-5 コードと AcelibJ40 ライブラリ[4]を用いた計算で、炉心の上部から B₄C 製の制御棒が一部挿入された状態で臨界(1.00002 ± 0.000026)となるように燃料枚数を調節した。第 1 世代に 400 万の初期源を与え、その後 400 秒後に空気から制御棒へ物質と密度が瞬時に置き換わるようコーディングした。制御棒挿入は部分挿入(-78.6pcm)と全挿入(-594pcm)の 2 種類とした。べき乗法計算は各世代の中性子が初期源投入から 1000 秒以上経過して発生するまで続けた。部分挿入では 25000 世代、全挿入で 50000 世代を要した。計算時間は 320 コアの並列 mpi 並列計算で各々 1.3, 2.5 日であった。

3. 結果 TDPI 法動特性計算による核分裂中性子発生数の時間変化を図 2 に示す。統計量のばらつきはあるが、臨界状態では出力が平坦化し、400 秒での制御棒挿入で出力が変化する。部分挿入では 500~600 秒の核分裂中性子発生数時間変化が単独の指数関数で Fitting できたので、炉周期を求め、別途 IFP 法[5]で計算した一点炉動特性パラメータを用い、逆時間方程式で反応度を求めた。これは -76.6pcm であり、設定値 -78.6 pcm と合致した。また反応度を ρ 、実効遅発中性子割合 β とした場合、制御棒落下時は出力が $\beta / (\beta - \rho)$ に即発跳躍することが知られるが、 k_{eff} 計算による ρ と IFP 法による β から予想される即発跳躍量と、TDPI 法動特性計算による即発跳躍が整合することが図 2(右)のように確認された。

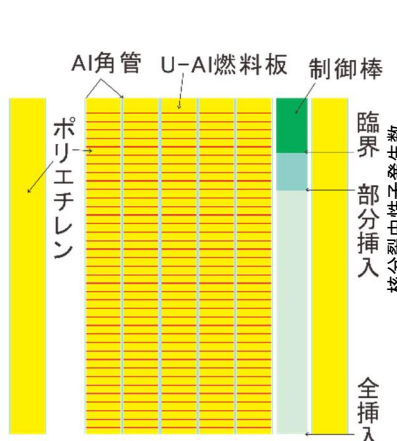


図 1 計算体系の模式図

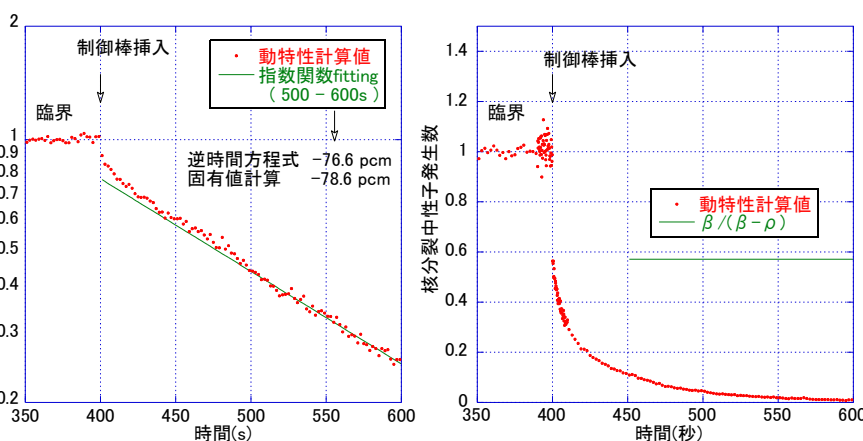


図 2 制御棒ステップ挿入時の動特性計算値、制御棒部分(左) / 全挿入(右)

参考文献

- [1] X-5 Monte Carlo Team, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (2003).
- [2] Y. Nauchi, JNST 56, 996-1005, 2019.
- [3] Y. Nauchi, "Step change in the fuel density during k-power iteration for time-dependent neutron transport", Proc. M&C 2021.
- [4] 羽倉, 奥村, 岩元介, 永瀬: JENDL-4.0 に基づく PHITS 用中性子・光子・電子ライブラリ, 日本原子力学会「2012 年秋の大会」要旨集 128, 広島大学 (2012).
- [5] Y. Nauchi & T. Kameyama, JNST 47(11) 977-990, 2010.

*Yasushi Nauchi¹

¹CRIEPI

Circular block bootstrap 法を用いた固有直交分解による 中性子束分布タリーに対する統計的不確かさ評価

Statistical uncertainty estimation by circular block bootstrap method
for flux distribution tallies using proper orthogonal decomposition

*近藤 諒一¹, 山本 章夫², 遠藤 知弘²

¹JAEA, ²名大

分布量に対する次元削減を目的として、固有直交分解を用いた中性子束分布タリー手法を開発している。本研究では、モンテカルロ固有値計算における世代間の相関を考慮した中性子束分布の統計的不確かさを評価するため、circular block bootstrap 法を適用した。一次元平板体系の検証計算を通じて、提案手法の有効性について検証した。

キーワード：circular block bootstrap 法，統計的不確かさ評価，固有直交分解，分布タリー，モンテカルロ法

1. 緒言 モンテカルロ固有値計算ではべき乗法に起因して世代間に相関が生じるため、これを適切に取り扱うことが統計的不確かさ評価の観点から重要である。そこで本研究では、時系列データに対する不偏推定法である circular block bootstrap(CBB)法[1]をべき乗法で得られる各世代の値に適用することで世代間の相関を考慮することを目的とした。さらに、分布量計算手法として開発している固有直交分解(POD)を用いた中性子束分布タリー手法[2]に CBB 法を適用し、中性子束分布の統計的不確かさを推定することも目的とした。

2. 計算手法 POD を用いた中性子束分布タリー手法では、 N 次で展開される中性子束の空間分布 $\vec{\phi} \in \mathbb{R}^{R \times 1}$ は直交基底ベクトル $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{R \times N}$ と展開係数 $\vec{a} = (a_1 \dots a_N)^T$ で表される: $\vec{\phi} = \mathbf{U}\vec{a}$ 。中性子束分布の平均値に対する共分散行列は直交基底ベクトルと展開係数の平均値に対する共分散行列から再構成される: $\text{cov}(\vec{\phi}, \vec{\phi}) = \mathbf{U}\text{cov}(\vec{a}, \vec{a})\mathbf{U}^T \dots (1)$ 。核分裂源分布の収束後にべき乗法で L 世代だけ計算する場合、次数 n の展開係数を世代ごとに並べた $\vec{A}_n = (a_{1,n} \dots a_{L,n})$ を時系列データとみなし CBB 法を適用する ($1 \leq n \leq N$)。再標本化によって B 個の展開係数データ $\vec{A}_n^{*b} = (a_{1,n}^{*b} \dots a_{L,n}^{*b})$ を作成する ($1 \leq b \leq B$)。べき乗法で得られる展開係数の平均値の bootstrap 標本は $\bar{a}_n^{*b} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L a_{l,n}^{*b}$ となる。この bootstrap 標本からべき乗法による世代間の相関を考慮した展開係数の平均値に対する共分散を算出し、式(1)から中性子束分布の平均値に対する共分散を再構成できる。

3. 計算結果 一群モンテカルロ固有値計算において POD を用いた中性子束分布タリーを行った。計算体系は 3.1 wt% UO_2 、 B_4C 、3.6 wt% UO_2 がそれぞれ 3 cm、3 cm、4 cm と順に並ぶ 10 cm の一次元平板体系である。展開次数は 7 次、メッシュ幅は 0.1 cm である。バッチあたりのヒストリー数 10,000、有効バッチ数 10,000、スキップバッチ数 200 とした。独立な 100 回のモンテカルロ計算ごとに、中心極限定理に基づく従来手法または CBB 法を用いて展開係数の共分散を計算し、中性子束分布の共分散を再構成した。CBB 法ではブロックサイズ 20、再標本化数 1,000 とした。独立な 100 個の展開係数の平均値で算出した共分散から再構成した中性子束の共分散を参照解とした。中性子束分布の共分散から得た標準偏差について参照値との比を計算した(図 1)。CBB 法では参照値との比が 1 に近く、統計的不確かさが推定できていることを確認できた。

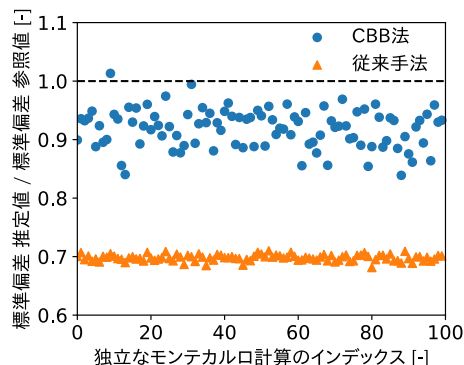


図 1 メッシュ 1.4–1.5 cm における
平均中性子束の標準偏差比

参考文献 [1] D. N. POLITIS and J. P. ROMANO, *In Exploring the Limits of*

Bootstrap, p. 263–270 (1992). [2] R. KONDO et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* (2024); <https://doi.org/10.1080/00223131.2024.2365445>.

*Ryoichi Kondo¹, Akio Yamamoto² and Tomohiro Endo²

¹JAEA, ²Nagoya Univ.

Solomon コードにおける測定データ対応の乱雑化臨界計算

Solomon's Capability of Random Media Criticality Calculation for Measured Data

*植木 太郎¹

¹JAEA

燃料デブリ臨界管理手法整備において開発中のモンテカルロ法ソルバーSolomonは、逆冪乗則パワースペクトルの乱雑化レプリカを生成し、質量偏差評価とデルタ追跡法による臨界計算を実施する機能を備えている。本予稿では、測定データの画像解析結果を入力として利用可能な乱雑化手法の現時点での活用例を報告する。

キーワード： Solomon、乱雑化、質量偏差、パワースペクトル、測定データ、臨界計算、モンテカルロ法

1. 緒言 燃料デブリ生成実験に関する限られた情報源からの詳細画像は、図1に示すように、パワースペクトルが、低波数領域において逆冪乗則から離れてフラットなホワイトノイズに近づくことを示唆している。このような任意形状のパワースペクトルを直接に入力できる乱雑化臨界計算手法が望まれている。

2. テーブル形式入力の乱雑化機能と臨界計算 Solomon に実装済の乱雑化関数[1]と類似の関数を考える。 $Z(x) = \sigma \sum_{j=m_1}^{m_2} B_j f(j\Delta k) \sin((j\Delta k)x + A_j)$ 、 σ ：振幅調整因子、 m_1 & m_2 ：整数、 B_j ：期待値0で分散1の独立な確率変数、 A_j ： $(0, 2\pi)$ において一様で独立な確率変数、 f ：実数を変数とする実数値関数、 Δk ：波数の差分。関数 $Z(x)$ の共分散は $E[Z(x)Z(x+u)] = 0.5\sigma^2 \sum_{j=m_1}^{m_2} (f(j\Delta k))^2 \cos((j\Delta k)u)$ と計算され、Wiener-Khinchin の定理により、 $Z(x)$ のパワースペクトルとして $0.5\pi\sigma^2 \sum_{j=m_1}^{m_2} (f(j\Delta k))^2 [\delta(k-j\Delta k) + \delta(k+j\Delta k)]$ を得る。この式は、波数 $j\Delta k$ でのスペクトル密度が $(f(j\Delta k))^2$ であるパワースペクトルの離散表現である。係数 $f(j\Delta k)$ の非整数型確率的乱雑化フーリエ級数が $(f(j\Delta k))^2$ のパワースペクトルを示すとも解釈される。関数 f は任意に選べるので、測定データの画像解析結果を線形テーブル形式入力として利用可能である。一方、Solomon に実装済の乱雑化関数においても、係数・位相等の関数データをテーブル化するクラスが用意されている。このため、関数 $Z(x)$ の Solomon への実装は容易で、図1に示されている低波数領域でのスペクトルフラット化の効果を調査することができる。本予稿では、スペクトル範囲が $0 < k \leq 2$ (単位： cm^{-1}) で波数差分を $\Delta k = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ とし、ベースケースを逆2乗則、追加3ケースとして $0 < k \leq k_{fl}$ 、 $k_{fl} = 0.1, 0.2, 0.3$ (単位： cm^{-1}) においてフラットで $k_{fl} < k \leq 2\text{cm}^{-1}$ で逆2乗則の場合の全4ケースを報告する。各ケースにおいては、100レプリカの臨界計算を、200 インアクティブ・サイクル、5000 アクティブ・サイクル、サイクル当たり粒子数 50000 の条件で Solomon により実施し、実効増倍率と質量偏差[2]を評価した。図2に示すように、低波数領域のスペクトルをフラット化すると実効増倍率の揺らぎと平均質量偏差の両方が減少することがわかった。

参考文献 [1] T. Ueki, Progress in Nuclear Energy, 144 February 2022. [2] 日本原子力研究開発機構 令和5年度原子力規制庁委託成果報告書 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ臨界評価手法の整備 令和6年3月31日提出。

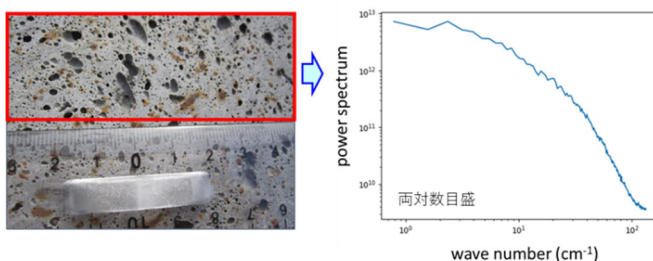


図1 デブリ模擬体の画像解析によるパワースペクトル (フォト、OpenCV & Python3、令和4年度原子力規制庁委託成果報告書より)

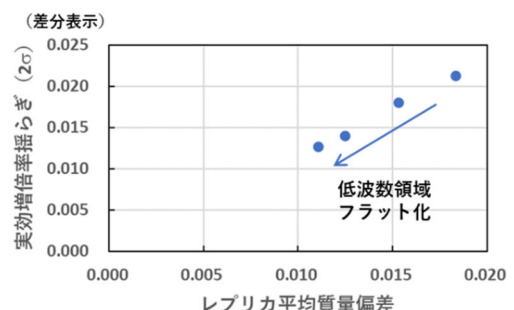


図2 パワースペクトル低波数領域フラット化の影響

*Taro Ueki

¹Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Safety Research Center, Criticality Safety Research Group