

多種物質系乱雑化モデルの開発とモンテカルロソルバーSolomonでの検証

Development of multi-species material randomization using Monte Carlo solver Solomon

*植木 太郎¹

¹ 日本原子力研究開発機構

分布不明の多種類の物質からなる系の臨界性評価に関して、各物質の平均体積割合の分割指定と異物質間の組み合わせペアから構成される乱雑化モデルを開発し、モンテカルロソルバーSolomonで検証した。

キーワード： 分布不明，多種物質系，臨界性，乱雑化，モンテカルロ，Solomon

1. 緒言 空間分布の不確定さを表現する確率的乱雑化ワイエルシュトラス関数[1]を、3種類以上の物質からなる系に適用することは、多くの燃焼度を取り扱い可能とする点で、1F デブリの臨界管理上、有用である。

2. 多種物質の乱雑化モデル 平均体積割合を、M種の物質からなる系に対して、 $V_n, n=1, \dots, M$ とする。これらの物質の混合を、 ${}_M C_2$ ペアの2種類物質混合の総体として表現することを考える。物質nのみからなる微小部

$$\begin{aligned} \text{平均体積割合 } V_n, n=1, \dots, M, V_1 + V_2 + \dots + V_M = 1 \\ V_{n,1} + \dots + V_{n,n-1} + V_{n,n+1} + \dots + V_{n,M} = V_n \\ V_{n,1} : \dots : V_{n,n-1} : V_{n,n+1} : \dots : V_{n,M} = V_1 : \dots : V_{n-1} : V_{n+1} : \dots : V_M \end{aligned}$$

平均体積割合 $V_{j,k}$ 相当の物質jと平均体積割合 $V_{k,j}$ 相当の物質kの組み合わせに確率的乱雑化を適用($j \neq k$)

図1 平均体積分割と異種物質部分体積組み合わせ

分は、他物質 $1, \dots, n-1, n+1, \dots, M$ と $V_1 : \dots : V_{n-1} : V_{n+1} : \dots : V_M$ の頻度比で遭遇する。そこで、平均体積割合 V_n を図1に示すように $V_{n,1}, \dots, V_{n,n-1}, V_{n,n+1}, \dots, V_{n,M}$ に分割し、 $V_{p,q}$ に相当する物質pと $V_{q,p}$ に相当する物質qの混合を考える。このペアに、確率的乱雑化ワイエルシュトラス関数 $W_{p,q}(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r}$ は位置座標)による空間分布不確定さモデルを適用する[1]。例えば、3種類の物質系の体積割合は、 $\hat{V}_1(\mathbf{r}) = V_{1,2} + V_{1,3} + W_{1,2}(\mathbf{r}) - W_{3,1}(\mathbf{r})$, $\hat{V}_2(\mathbf{r}) = V_{2,3} + V_{2,1} + W_{2,3}(\mathbf{r}) - W_{1,2}(\mathbf{r})$, $\hat{V}_3(\mathbf{r}) = V_{3,1} + V_{3,2} + W_{3,1}(\mathbf{r}) - W_{2,3}(\mathbf{r})$ となる。ここで、ハット (^) は $W_{1,2}(\mathbf{r}), W_{2,3}(\mathbf{r}), W_{3,1}(\mathbf{r})$ の実現に対応する乱雑化媒質のレプリカを意味し、 $\hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_3 = V_1 + V_2 + V_3 = 1$ である。

3. Solomonによる数値計算結果 上記乱雑化モデルの巨視的反応断面積 Σ は、3種類の物質系では、 $\Sigma(\mathbf{r}, E) = \hat{V}_1(\mathbf{r})\Sigma_1(E) + \hat{V}_2(\mathbf{r})\Sigma_2(E) + \hat{V}_3(\mathbf{r})\Sigma_3(E)$ (E はエネルギー)である。この断面積表現を、連続エネルギーモンテ

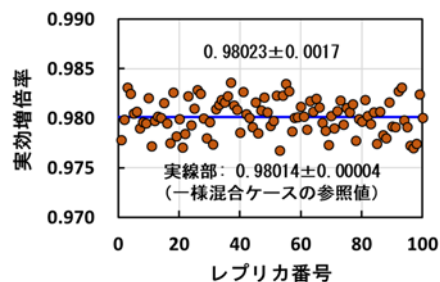


図2 BigTen乱雑化問題の臨界性評価

カルロソルバーSolomon[2]に組み込み、デルタ追跡法による臨界計算[3]を実施した。具体的には、国際臨界安全ベンチマーク実験プロジェクト識別番号IEU-MET-FAST-007のBigTen問題で、中央円筒の太径部分の周りの長方形断面トラス部を高濃縮ウラン50% ($V_1=0.5$), 10%濃縮ウラン40% ($V_2=0.4$), 天然ウラン10% ($V_3=0.1$)として上記乱雑化モデルを適用し、臨界性を評価した。図2に数値計算結果を示す。

レプリカ生成の不確かさに伴う実効増倍率の揺らぎが0.1%以上となっている。これは、原子炉物理・臨界安全の基準からみると、有意な揺らぎである。

4. 研究の意義と今後の方向性 本報の手法により、3時点以上の異なる燃焼度が、乱雑化モデルで取り扱い可能となった。一方、金属相の析出・分離等の不連続・断続的な物質分布変化に関しては、ボクセルモデルを開発済みである[4]。今後、これらのモデル機能を統合し、熱スペクトル体系の解析を実施する予定である。

参考文献

[1] 植木太郎, 2019年春の年会、講演番号 3J09 [2] 長家康展、羽倉洋行、2018年秋の大会、講演番号 2M18 [3] T. Ueki, JNST 2017, VOL. 54, NO. 3, 267–279 [4] T. Ueki, JNST 2018, VOL. 55, NO. 10, 1180–1192

本報の研究は、原子力規制庁の平成31年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備事業として行われた。

*Taro Ueki

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