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

京都大学臨界集合体実験装置 KUCA の炉雑音解析により得られた即発中性子減衰定数 α の測定値を活用し、バイアス因子法および炉定数調整法により、実効増倍率 $k_{\rm eff}$ の核データ起因不確かさ低減について検討した。 キーワード: 即発中性子減衰定数, 摂動論, 感度解析, バイアス因子法, 炉定数調整法

- 1. **緒言** 炉物理分野におけるデータ同化手法の活用として、パルス中性子法や炉雑音解析(例: Feynman- α 法)で測定可能な「即発中性子減衰定数 α 」に注目し研究を進めている。これまでの成果として、効率良い感度解析手法を確立するため、 ω 固有値方程式と一次摂動論に基づき α の感度係数評価式を導出し、 S_N 輸送計算(PARTISN)により直接摂動法で得られた感度係数参照値と比較することで妥当性を確認した[1]。また α の測定誤差評価手法として、bootstrap 法に基づく Feynman- α 法を考案した[2]。本発表では、①運転停止中の KUCA における Feynman- α 法の測定結果および②摂動論により推定した実効増倍率 $k_{\rm eff}$, α の相対感度係数 $S_{k_{\rm eff},\sigma}$, $S_{\alpha,\sigma}$ を活用し、 α を用いたバイアス因子法および炉定数調整法の試計算結果について報告を行う。
- 2. α を用いたデータ同化手法 ベイズ理論に基づくことで、① α の(測定値)/(計算値)比を要素としたベクトル \vec{f}_{α} 、②核データ σ に対する相対感度係数行列 $\mathbf{S}_{k_{\mathrm{eff}},\sigma}$, $\mathbf{S}_{\alpha,\sigma}$ 、③3 つの共分散(核データ起因 $\mathbf{\Sigma}_{\sigma}$,手法起因 $\mathbf{V}_{\mathrm{model}}$, 測定誤差起因 $\mathbf{V}_{\mathrm{exp},\alpha}$)より、 α 測定値を用いたバイアス因子法として(1)–(3)式を導出することができる。

$$\vec{f}_{k_{\text{eff}}} = \vec{1} + \mathbf{K}_{k_{\text{eff}}} (\vec{f}_{\alpha} - \vec{1}) \cdots (1), \mathbf{\Sigma}'_{k_{\text{eff}}} = \mathbf{S}_{k_{\text{eff}}, \sigma} \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \mathbf{S}_{k_{\text{eff}}, \sigma}^{T} + \mathbf{V}_{\text{model}, k_{\text{eff}}}^{T} - \mathbf{K}_{k_{\text{eff}}} (\mathbf{S}_{\alpha, \sigma} \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \mathbf{S}_{k_{\text{eff}}, \sigma}^{T} + \mathbf{V}_{\text{model}, (k_{\text{eff}}, \alpha)}^{T}) \cdots (2),$$

$$\mathbf{K}_{k_{\text{eff}}} \equiv (\mathbf{S}_{k_{\text{eff}}, \sigma} \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \mathbf{S}_{\alpha, \sigma}^{T} + \mathbf{V}_{\text{model}, (k_{\text{eff}}, \alpha)}) (\mathbf{S}_{\alpha, \sigma} \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \mathbf{S}_{\alpha, \sigma}^{T} + \mathbf{V}_{\text{exp}, \alpha} + \mathbf{V}_{\text{model}, \alpha})^{-1} \cdots (3)$$

設計体系の $k_{\rm eff}$ 計算値にバイアス因子 $\vec{f}_{k_{\rm eff}}$ を乗じることで、 $k_{\rm eff}$ 共分散は $\Sigma'_{k_{\rm eff}}$ に改善され、設計体系と α 測定体系との相関が強いほど $k_{\rm eff}$ 予測結果の系統誤差・不確かさ低減が期待できる。同様に、 α 測定値を用いた炉定数調整法(4)-(6)式も導出することができ、入力値である核データ σ とその共分散も更新可能である。

$$\vec{f}_{\sigma} = \vec{1} + \mathbf{K}_{\sigma}(\vec{f}_{\alpha} - \vec{1}) \cdots (4), \mathbf{\Sigma}_{\sigma}' = \mathbf{\Sigma}_{\sigma} - \mathbf{K}_{\sigma} \mathbf{S}_{\alpha, \sigma} \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \cdots (5), \mathbf{K}_{\sigma} \equiv \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \mathbf{S}_{\alpha, \sigma}^{T} \left(\mathbf{S}_{\alpha, \sigma} \mathbf{\Sigma}_{\sigma} \mathbf{S}_{\alpha, \sigma}^{T} + \mathbf{V}_{\text{exp}, \alpha} + \mathbf{V}_{\text{model}, \alpha} \right)^{-1} \cdots (6)$$

3. 結果 SCALE6.2.3/CENTRM により評価した 56 群実効断面積を利用して、運転停止中の KUCA-A 架台(α 測定値 1618.5 ± 6.5 [1/s], $k_{\rm eff}\approx0.937$)について PARTISN により非均質 $S_{\rm N}$ 輸送計算を実施し、相対感度係数行列を推定した。手法起因共分散 $V_{\rm model}$ をゼロと近似した試計算例として、別の KUCA 未臨界体系 $(k_{\rm eff}\approx0.982)$ の炉定数調整前後の核データ起因 $k_{\rm eff}$ 不確かさ寄与を図1示す。 α 測

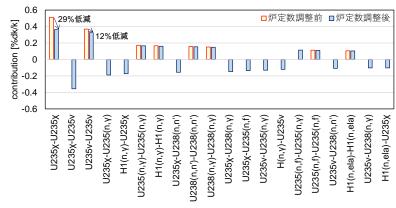


図1炉定数調整前後の核データ起因keff不確かさ寄与

定値を活用したデータ同化前後で、核データ起因の $k_{
m eff}$ 不確かさは約 1/10~(741
ightarrow63~[pcm])まで低減できた。

参考文献 [1] T. Endo, A. Yamamoto, J. Nucl. Sci. Technol., 55(11), pp. 1245–1254 (2018).

[2] T. Endo, A. Yamamoto, Ann. Nucl. Energy, 124, pp. 606–615 (2019).

謝辞 本研究は JSPS 科研費(17K14909)の助成による。

^{*} Tomohiro Endo¹ and Akio Yamamoto¹

¹Nagoya Univ.