

Bootstrap 法を用いた推定臨界下限増倍率の算出方法に関する研究

山本研究室 林卓人

1. 緒言

現在の未臨界判断基準は、臨界実験ベンチマーク解析によって得られた数多くの実効増倍率計算値 k_{eff} の平均と分散を算出し、その値から評価体系が未臨界であると判断できる上限の中性子増倍率である推定臨界下限増倍率(ECLLMF)を求め、この指標に安全裕度を持たせることで設定される[1]。しかし、従来の ECLLMF 算出方法は、 k_{eff} の頻度分布として正規分布を仮定しているため、正規分布と仮定できない時の ECLLMF 算出方法について改善の余地がある。そこで頻度分布を仮定しない不確かさ評価手法の一つである Bootstrap 法[2]を用いる方法について検討した。

2. 解析方法

従来の推定臨界下限増倍率 $k_{\text{sub,t}}$ は、臨界実験ベンチマーク解析によって得られた n 個の標本 $k_{\text{eff}} = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ の平均値 \bar{k} と不偏標準偏差 s から、非心 t 分布の性質に基づいて臨界超過確率 $p = 2.5\%$ 、ECLLMF 設定失敗確率 $\gamma = 2.5\%$ となるパラメータ α を決定し、 $k_{\text{sub,t}} = \bar{k} - \alpha s$ で算出される。Non-parametric bootstrap 法を用いた算出方法は、まず k_{eff} の頻度分布そのものから乱数を用い重複を許して B 回復元抽出を行いブートストラップ標本 $k^{*b} = \{k_1^{*b}, k_2^{*b}, \dots, k_n^{*b}\}$ を得る($b = 1, 2, \dots, B$)。次に得られたブートストラップ標本の平均値 $\hat{\mathbf{k}}^* = \{\hat{k}^{*1}, \hat{k}^{*2}, \dots, \hat{k}^{*B}\}$ と不偏標準偏差 $\hat{\mathbf{s}}^* = \{\hat{s}^{*1}, \hat{s}^{*2}, \dots, \hat{s}^{*B}\}$ から $\mathbf{k}_{\text{sub,non}} = \hat{\mathbf{k}}^* - \alpha_{\text{non}} \hat{\mathbf{s}}^*$ を算出する。 α_{non} は $p = 2.5\%$ 、 $\gamma = 2.5\%$ を満足するように反復法を用いて決定する。最後に、 $\mathbf{k}_{\text{sub,non}}$ の平均を Non-parametric bootstrap 法を用いた推定臨界下限増倍率 $k_{\text{sub,non}}$ とする。

3. 結果・考察

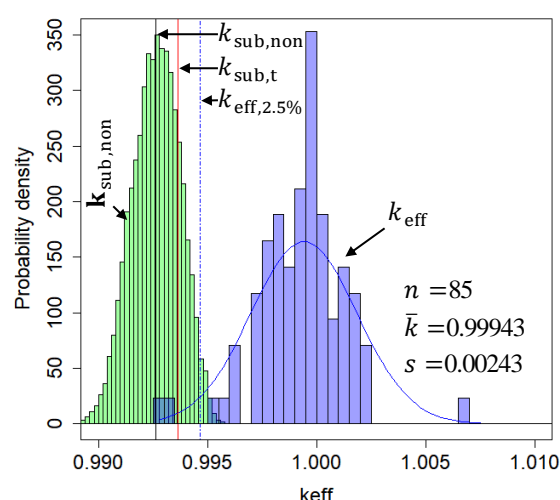
半径 1.0cm の UO_2 燃料球を想定し、最適減速となる燃料対水 体積比の条件で解析を行った。解析には、MCNP6.2 を用い、Whisper-1.1[3]によりこの体系と類似する臨界実験ベンチマークを選定して $k_{\text{sub,t}}$ と $k_{\text{sub,non}}$ の算出を行った。各算出法の α と ECLLMF を表 1 に、 k_{eff} 、 $\mathbf{k}_{\text{sub,non}}$ の相対度数分布を図 1 に示す。図 1 には $k_{\text{sub,t}}$ 、 $k_{\text{sub,non}}$ 及び $p = 2.5\%$ に対応する $k_{\text{eff},2.5\%}$ も示されている。 k_{eff} 頻度分布の Shapiro-Wilk 検定結果は、 p 値 $=3.0 \times 10^{-7}$ となり、有意水準 5%で正規分布に従うとは言えないと判断される。また、 $k_{\text{sub,non}}$ は $k_{\text{sub,t}}$ より約 0.1%低く、安全側に評価されている。これは、サンプルサイズが小さく、 k_{eff} 頻度分布が正規分布に従うとは言えないことを考慮して評価されていると考えられるため、提案手法の合理性が確認できた。今後は、臨界実験データ及び MCNP による k_{eff} の統計的不確かさ、評価体系とベンチマークとの類似性を考慮して ECLLMF の算出を試みる予定である。

参考文献

- [1] 臨界安全ハンドブック第 2 版, JAERI 1340 (1999).
 [2] B. Efron, *Ann. Stat.*, 7(1), pp.1–26 (1979).
 [3] B. C. Kiedrowski, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, 181(1), pp.17–47 (2015).

表 1 各算出法の α と ECLLMF

算出法	α	ECLLMF
非心 t 分布	2.379	0.9936
Non-parametric bootstrap 法	2.842	0.9925

図 1 k_{eff} 、 $\mathbf{k}_{\text{sub,non}}$ の相対度数分布

発表実績: 林卓人, 遠藤知弘, 山本章夫, 第 50 回日本原子力学会中部支部研究発表会, 東桜会館, 12 月 11-12 日, R10 (2018).

発表予定: T. Hayashi, T. Endo, A. Yamamoto, M&C 2019, Aug.25-29, Portland, USA (2019).