

Bootstrap 法を用いた推定臨界下限増倍率の算出方法

Calculation Method of Estimated Criticality Lower-Limit Multiplication Factor Using the Bootstrap Method

*林卓人, 遠藤知弘, 山本章夫
名古屋大学

従来、未臨界判断基準の指標である推定臨界下限増倍率(ECLLMF)は正規分布を仮定した統計理論に基づき評価されてきた。本研究では、任意の分布に対して適用可能な Bootstrap 法を用いた ECLLMF 算出法を考案した。

キーワード：未臨界判断基準, 推定臨界下限増倍率, Bootstrap 法

- 1. 緒言：**現在の未臨界判断基準は、数多くの臨界実験ベンチマーク解析によって得られた実効増倍率計算値 k_{eff} の平均と分散を算出し、その値からその体系が未臨界であると判断できる指標である 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、 k_{eff} 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 $\gamma = 2.5\%$ となる余裕幅 α を決定し、 $k_{\text{sub},t} = \bar{k} - \alpha s$ で算出される。Parametric bootstrap 法を用いた推定臨界下限増倍率 $k_{\text{sub},\text{para}}$ は、 k_{eff} を正規分布と仮定して B 回標本抽出を行い、得られたブートストラップ標本の平均値 $\bar{k}_{\text{para}}$ と不偏標準偏差 s_{para} から $k_{\text{sub},\text{para}} = \bar{k}_{\text{para}} - \alpha s_{\text{para}}$ を算出する。Non-parametric bootstrap 法を用いた推定臨界下限増倍率 $k_{\text{sub},\text{non}}$ は、 k_{eff} の頻度分布そのものから B 回復元抽出を行い、得られたブートストラップ標本の平均値 $\bar{k}_{\text{non}}$ と不偏標準偏差 s_{non} から $k_{\text{sub},\text{non}} = \bar{k}_{\text{non}} - \alpha s_{\text{non}}$ を算出する。なお、Bootstrap 法による計算手順では、 $p = 2.5\%$ 、 $\gamma = 2.5\%$ を満足するような α の値を反復法により決定し、 $k_{\text{sub},\text{para}}$ 及び $k_{\text{sub},\text{non}}$ を算出する。

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 を使い、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 $k_{\text{sub},\text{para}}$ 、 $k_{\text{sub},\text{non}}$ の算出を行った。 α の値と ECLLMF を表 1 に、 k_{eff} 、 $k_{\text{sub},\text{para}}$ 、 $k_{\text{sub},\text{non}}$ の相対度数分布を図 1 に示す。図 1 には $k_{\text{sub},t}$ 及び、 $p = 2.5\%$ に対応する $k_{\text{eff},2.5\%}$ も示されている。MCNP6.2 による実効増倍率計算値 k_{eff} の Shapiro-Wilk 検定結果は、 p 値 $= 2.3 \times 10^{-7}$ となり、正規分布に従うとは言えないと判断される。 $k_{\text{sub},\text{para}}$ は $k_{\text{sub},t}$ と統計誤差の範囲内で一致した。 $k_{\text{sub},\text{non}}$ は $k_{\text{sub},t}$ より約 0.1% 低く、安全側に評価されている。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.*, *Nuc. Sci. Eng.*, 181(1), pp.17–47 (2015).

*Takuto HAYASHI, Tomohiro ENDO, and Akio YAMAMOTO
Nagoya Univ.

表 1 各算出法の α と ECLLMF

算出法	α	ECLLMF
非心 t 分布	2.379	0.9936
Parametric bootstrap 法	2.380	0.9936
Non-parametric bootstrap 法	2.842	0.9925

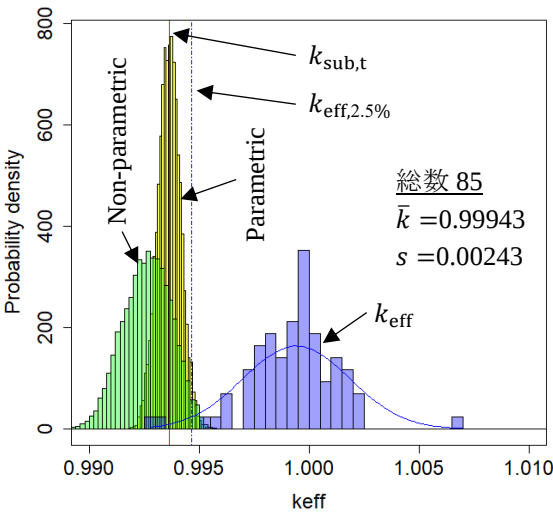


図 1 k_{eff} 、 $k_{\text{sub},\text{para}}$ 、 $k_{\text{sub},\text{non}}$ の相対度数分布