

# 時間領域分割積分法によるドル単位未臨界度測定

原子核エネルギー制御工学グループ 野中 朝日

**1. 緒言** 原子炉の燃料シャッフリングは深い未臨界度 $-\rho$ で実施されるが、原子炉の物理障壁が減少し、安全保護系が点検のため一部停止する。したがって、燃料の誤装荷や制御棒の誤操作が生じた際の影響は大きくなる可能性が高く、燃料シャッフリング時の未臨界度監視は非常に重要である。しかし、燃料の再配置・交換を考えた場合、未臨界度 $-\rho$ が変化するだけでなく同時に他のパラメータ( $\beta_{\text{eff}}, \Lambda, S$ )も変化し得るため、未臨界度を直接的に監視することは困難であった。そこで本研究では、未臨界度以外のパラメータも同時に変化する場合にも適用可能な未臨界度測定手法としてTDDI法を考案した。これまでに仮想数値実験による検証[1-3]および近畿大学原子炉において未臨界過渡変化実験を実施しており、未臨界度と中性子源強度 $S$ が同時変化する未臨界過渡変化に対するTDDI法の適用性を確認した[5]。さらなる検討として、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)において中心架台落下による未臨界過渡変化実験を実施した。中心架台落下実験の場合、炉心形状が変化するため、未臨界度だけでなく一点炉動特性パラメータ( $\beta_{\text{eff}}, \Lambda$ )も同時に変化する。本発表では、中心架台落下に対するTDDI法の適用結果について報告する。

$$\frac{-\rho_1}{\beta_{\text{eff},1}} \approx \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\alpha_i}{\lambda_i} (n_0 e^{-\lambda_i(t_1-t_0)} - n_\infty + \lambda_i \int_{t_0}^{t_1} n(t) e^{-\lambda_i(t_1-t)} dt)}{\int_{t_1}^{\infty} (n(t) - n_\infty) dt} \dots (1)$$

**2. 時間領域分割積分法** TDDI法の理論式を式(1)に示す。また、TDDI法を適用する未臨界過渡変化の例として、状態変化前後は未臨界状態で、時刻( $t_0 \leq t \leq t_1$ )にかけて、状態変化が発生した場合における中性子計数の時間変化 $n(t)$ の概念図を図1に示す。TDDI法は一点炉動特性方程式に基づいた手法であり、 $n(t)$ の時間変化と状態変化前後の中性子計数の定常値 $n_0, n_\infty$ データのみから、状態変化後のドル単位未臨界度 $-\rho/\beta_{\text{eff}}$ を概算可能な手法である。TDDI法の場合、状態変化前における未臨界度の基準値は不要で、状態変化前後および途中の一点炉動特性パラメータ( $\beta_{\text{eff}}, \Lambda$ )と中性子源強度 $S$ の時間変化に関する情報も不要である。

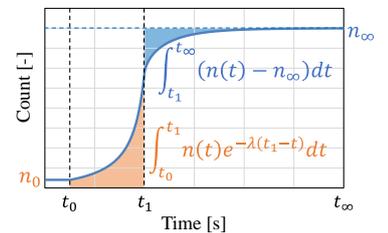


図1 TDDI法適用の概念図

**3. TDDI法の適用結果** 図2に示したKUCAのA架台において未臨界過渡変化実験を実施した。中性子源として加速器駆動パルス中性子源を利用し、未臨界状態における中心架台落下操作を行い、複数個の検出器によって中性子計数の時間変化 $n(t)$ を計測した。中心架台落下操作は落下開始から完了まで15秒を要しており、ランプ状の状態変化となっている。計測された $n(t)$ におけるTDDI法および従来積分法による未臨界度測定結果を図3に示す。なお、本実験における未臨界度の参照値として、連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP6.2による計算結果を参照値とした。図3より、TDDI法による未臨界度推定結果は統計誤差の範囲内に参照値を含んでおり、従来積分法と比べて参照値との系統誤差も小さい。本実験結果より、KUCA中心架台落下のような過渡変化に対しても、TDDI法により未臨界度を適切に測定できることが確認できた。また、TDDI法を適用する際には、統計誤差を減らせるよう可能な限り多くの中性子を計数できる条件とした上で、炉心の核分裂反応で発生した中性子を主に計数できる位置に検出器を配置することが重要であることが分かった。

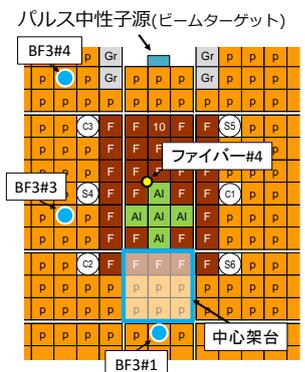


図2 KUCA実験体系

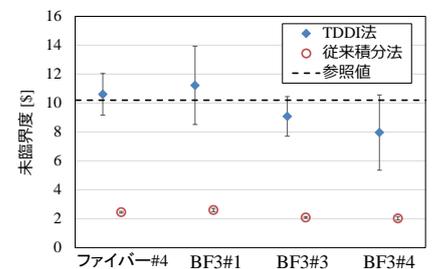


図3 未臨界度推定結果の比較

## 公刊論文

- [1] A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, *Proc. PHYSOR2018*, Cancun, Mexico, April 22-26 (2018).
- [2] 野中朝日, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会 2018年春の年会, 大阪大学, 3月26日-28日 (2018).
- [3] A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 119, pp.1112-1115 (2018).
- [4] A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, *et al.*, ICNC2019, Paris, France, September 15-20 (2019).
- [5] T. Endo, A. Nonaka, S. Imai, *et al.*, *J. Nucl. Soc. Technol.*, DOI: 10.1080/00223131.2019.1706658, (2020).