

# 未臨界体系における積分法を用いたドル単位未臨界度推定

名古屋大学工学部物理工学科 量子エネルギー工学コース 山本章夫研究室 野中朝日

**1. 緒言** 原子炉の燃料交換は深い未臨界度で実施されるが、物理障壁が少なくなっていることや安全保護系が一部バイパスされることから未臨界度の常時監視を行うことは安全性向上の観点から意義がある。また、現行規制基準の策定時には、反応度誤投入による臨界防止対策が議論され、対策として未臨界度の常時監視が挙げられているものの、現状の実機軽水炉では未臨界度の常時監視をするに至っていない。BWR 燃料シャッフルリング時(燃料の再配置・交換)を考えた場合、反応度が変化するだけでなく、検出器付近の中性子源強度も変化するのが特徴となっている。本研究では、反応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、積分法に基づいた手法を考案した。本発表では、LMW ベンチマーク問題の体系を用いた3次元動特性計算により、提案手法による3次元炉心体系への適用性について検証を実施した。

**2. 提案手法** 本研究では中性子源ありの一点炉動特性方程式に基づくことで、未臨界度推定手法を考案した。

$$\frac{-\rho_1}{\beta_{\text{eff},1}} = \frac{\frac{\Lambda_1}{\beta_{\text{eff},1}}(n_0 - n_\infty) + \frac{\Lambda_1 \beta_{\text{eff},0}}{\Lambda_0 \beta_{\text{eff},1}} n_0 \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\beta_{i,0}/\beta_{\text{eff},0}}{\lambda_i} \right) - n_\infty \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\beta_{i,1}/\beta_{\text{eff},1}}{\lambda_i} \right)}{\int_0^\infty (n(t) - n_\infty) dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^6 \left( \frac{a_i}{\lambda_i} \right) (n_0 - n_\infty)}{\int_0^\infty (n(t) - n_\infty) dt}$$

ここで  $\beta_{\text{eff}} \equiv \sum_{i=1}^6 \beta_i$  であり、下添え字の 0 は変化前、1 は変化後を意味する。この理論式に対して未臨界度推定に影響の小さい以下の条件で近似する。①状態変化前後の一点炉動特性パラメータ ( $\beta_{\text{eff}}, \Lambda$ ) の変化が小さいため  $\beta_{\text{eff},0} \approx \beta_{\text{eff},1}, \Lambda_0 \approx \Lambda_1$ 、②状態変化前後で実効遅発中性子割合  $\beta_{\text{eff}}$  に対する各遅発中性子先行核群が占める割合が変化しないため  $\sum_{i=1}^6 \left( \frac{\beta_{i,0}/\beta_{\text{eff},0}}{\lambda_i} \right) \approx \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\beta_{i,1}/\beta_{\text{eff},1}}{\lambda_i} \right) \approx \sum_{i=1}^6 \left( \frac{a_i}{\lambda_i} \right)$ 、③  $\frac{\Lambda_1}{\beta_{\text{eff},1}}(n_0 - n_\infty)$  が他の項に比べて非常に小さいため無視する。以上の近似によって概算式を得ることができる。提案手法の利点として、①未臨界体系においてステップ状に反応度  $\rho$  が変化した場合に、中性子源強度  $S$  や生成時間  $\Lambda$  が同時に変化しても適用可能、②状態変化後の中性子源強度  $S$  ・中性子生成時間  $\Lambda$  の情報が不明でも、初期中性子計数率  $n_0$ 、中性子計数率の時間変化  $n(t)$ 、中性子計数率の飽和値  $n_\infty$  のみからドル単位未臨界度を概算可能、という点が挙げられる。

**3. 計算条件** 図 1 に示された LMW ベンチマーク問題[1]の3次元炉心体系に対して本手法を適用し、未臨界度推定の検証を実施した。未臨界状態の炉心において制御棒の Rod Group 1, 2 の組み合わせによって、3 ケースの制御棒挿入パターンを想定し、これを初期状態とした。各ケースにおける初期状態から制御棒を瞬間的に全引抜することによって、正の反応度を添加し、体系内の未臨界度を変化させ、中性子束の時間変化を計算した。その後、得られた中性子束の時間変化に対して、本手法を用いてドル単位未臨界度を推定した。なお計測する中性子については、炉心全体の熱中性子束と、炉外検出器に相当する反射体の一部における熱中性子束を対象とした。

**4. 計算結果** 図 2 は、ある 1 ケースにおける、制御棒引抜後の炉心全体の平均熱中性子束に対して提案手法を適用した際の概略図である。同様に、他のケースに対しても手法を適用してドル単位未臨界度を推定する。表 1-(a)で示したように、炉心全体の平均熱中性子束の時間変化に対して積分法を適用した場合、未臨界度の理論値と計算結果の相対誤差は数%以内という結果となった。計算結果が理論値とほぼ一致することから、本手法が適切に未臨界度を推定できることを確認した。また表 1-(b)により、炉外検出器に相当する反射体領域の場合でも積分法による計算結果の相対誤差は数十%であり、本手法によってドル単位未臨界度のオーダー推定が可能であることを確認した。

**発表実績** : 野中朝日, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会中部支部第 49 回研究発表会, 名古屋大学, 12 月 14-15 日, (2017).

N. Asahi et al., PHYSOR2018, Apr.22-26 2018, Cancun, Mexico.[Accepted]

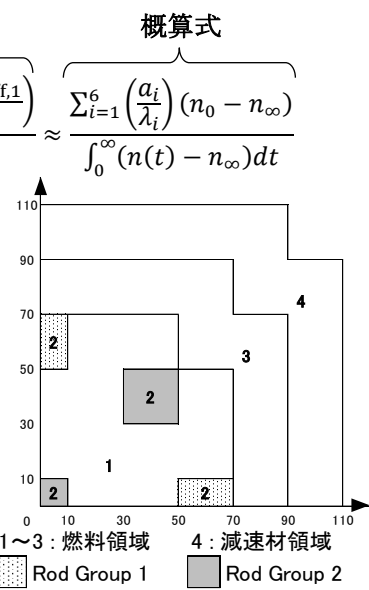


図 1 径方向炉心体系

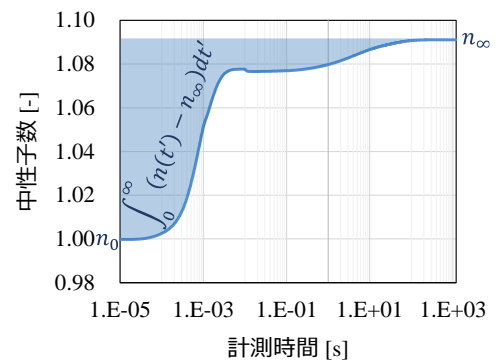


図 2 積分法による未臨界度推定の概略図

表 1 ドル単位未臨界度の推定結果

(a) 炉心全体の平均熱中性子束を用いた場合			
制御棒挿入パターン	Gr.1&2 Full in	Gr.1 Full in	Gr.1 Half in
理論値 [S]	6.81	7.64	7.87
計算結果 [S]	6.68	7.64	7.84
相対誤差	-1.97%	0.01%	-0.43%
(b) 反射体領域の熱中性子束を用いた場合			
制御棒挿入パターン	Gr.1&2 Full in	Gr.1 Full in	Gr.1 Half in
理論値 [S]	6.81	7.64	7.87
計算結果 [S]	5.29	5.29	5.38
相対誤差	-22.3%	-30.8%	-31.6%