

**1.緒言** 核燃料を大量に取り扱う施設では、設計段階で燃料の形状や濃度等に制限を設けることで運用中の臨界安全を十分に確保しているが、実際の運用中において臨界状態からどの程度深い未臨界状態にあるのか実測されていない。ここで、臨界からの余裕度を示す指標として未臨界度 $(-\rho)$ がある。もし $(-\rho)$ を上述の施設で測定可能になれば、現行の安全管理に対する信頼性・説明性の向上や適切な安全余裕の設定に資することができる。また近年では、福島第一原子力発電所の溶融デブリ取出作業における再臨界検知技術としても未臨界度測定が注目されている。体系の $(-\rho)$ を常時測定・監視する未臨界度モニターに用いる手法としては、測定システムが簡便な手法や、外部中性子源(Am-Be,Cf等)が不要で燃料内の固有中性子源(自発核分裂や $(\alpha,n)$ 反応等)のみで測定可能な手法が望ましい。これまで未臨界度測定法に関する研究は数多く実施されてきたが、固有中性子源のみを用いた研究については十分ではない。そこで本研究では、未臨界度モニターに適した手法として中性子源増倍法(NSM法)とFeynman- $\alpha$ 法に着目し、固有中性子源のみを用いた未臨界度測定実験を実施することで、検出器位置依存性や測定精度等、固有中性子源のみを用いた場合の特性を評価し、NSM法とFeynman- $\alpha$ 法を比較し両手法の利点・欠点を明らかにすることを目的とした。

**2.測定理論** NSM法は、計数率が体系の $(-\rho)$ に対して変化することを利用した手法である。未臨界度 $(-\rho)_{ref}$ が既知である基準体系において計数率 $CR_{ref}$ が測定され、未臨界度 $(-\rho)_{target}$

$$(-\rho)_{target} = (-\rho)_{ref} \times \frac{CR_{ref}}{CR_{target}} \quad (1)$$

$$Y(T) \approx Y_{\infty} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha T} \right) \quad (2) \quad (-\rho) \approx \frac{\alpha}{\alpha_0} - 1 \quad (3)$$

が未知の測定体系で計数率 $CR_{target}$ が測定されたとすると、未知の $(-\rho)_{target}$ は式(1)から求められる。NSM法では検出効率や中性子源強度等が一定であると近似している。一方、Feynman- $\alpha$ 法は、ある時間幅 $T$ における計数 $C(T)$ の相関を調べ、その相関量 $Y(T)$ から $(-\rho)$ を求める。 $Y(T)$ は $C(T)$ の分散対平均比から1を引いた値として定義され、測定した $Y(T)$ に1点炉近似を適用した式(2)をフィッティングすることで、即発中性子減衰定数 $\alpha$ を求める。最終的に、 $\alpha$ を式(3)に代入して $(-\rho)$ に変換する。なお、 $Y_{\infty}$ は $Y(T)$ の飽和値、 $\alpha_0$ は臨界時の $\alpha$ 値である。

**3.実験結果** 実験は京都大学臨界集合体実験装置で実施した。燃料は平均濃縮度5.4wt%のウラン燃料を用いており、 $^{238}\text{U}$ 自発核分裂を主とする固有中性子源のみで測定した。実験では、 $(-\rho)$ の異なる5体系で、炉心周りの反射体中に4つの $^3\text{He}$ 検出器を配置し中性子を検出した。最初に、統計誤差を排除するために長時間の測定を行った。各検出器の $(-\rho)$ 測定値の標準偏差を取り、体系毎に検出器位置による結果のばらつきを比較した。これを図1に示す。図1より、NSM法の方が、検出器位置依存性が大きいといえる。数値解析により、この原因は反射体や燃料の引抜による影響であることが判明した。続いて、測定時間を10分間に変更し、統計誤差の観点から測定精度を検証した。両手法の統計精度を比較したグラフを図2に示す。図2より統計精度はNSM法の方が良いことがわかる。統計誤差の寄与として、NSM法は $(-\rho)_{ref}$ の統計誤差が大きな割合を占めており、この精度向上により更なる短時間測定にも対応可能性がある。一方、Feynman- $\alpha$ 法は測定される $\alpha$ 値の統計誤差が支配的だが、これは体系の未臨界が深くなるにつれて必然的に増大するため、精度向上のためには測定時間や解析方法を工夫する必要がある。以上より、固有中性子源のみを用いた測定でも良好な統計精度を確保できるNSM法はモニターとして有利であるが、燃料移動により固有中性子源強度が変化する影響を排除する必要がある。従って、固有中性子源強度の変化や検出器位置依存性の影響が小さいFeynman- $\alpha$ 法と組み合わせた運用法を検討する必要があると考えられる。

**公刊論文**

- [1] T. Shiozawa, T. Endo, A. Yamamoto, C. H. Pyeon, T. Yagi, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **109**, pp. 826-829 (2013).
- [2] 塩澤武司, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会 2014年秋の大会, 京都大学, 9月8-10日, N52 (2014).
- [3] T. Shiozawa, T. Endo, A. Yamamoto, C. H. Pyeon, T. Yagi, *Proc. PHYSOR 2014*, Kyoto, Japan, Sep. 28 - Oct. 3 (2014).

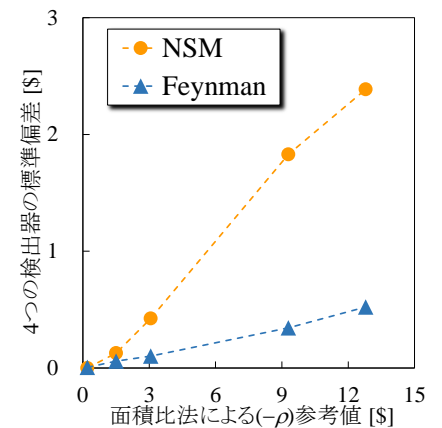


図1  $(-\rho)$ 検出器位置依存性

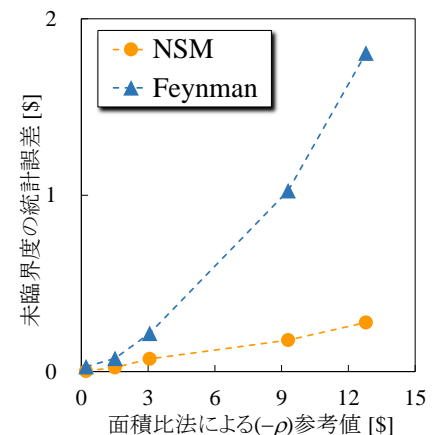


図2 10分間測定での $(-\rho)$ 誤差