

ウラン燃料に内在する固有中性子源を利用した未臨界度測定法に関する研究

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 塩澤武司

1. 緒言

核燃料貯蔵施設や再処理工場等の核分裂連鎖反応を制御する設備を持たない施設において、貯蔵する核燃料の臨界に対する余裕度を把握することは、安全管理に対する信頼性の向上という観点から重要である。そこで、体系が臨界状態からどれだけ離れているかを示す指標である未臨界度を、常時測定・監視する未臨界度モニターの導入が検討されている。未臨界度モニターとしての応用が期待される方法の一つに炉雑音解析法の一つである Feynman- α 法があるが、この方法により未臨界度を評価するためにはある程度の強度を有する中性子源が必要となるため、従来の方法では、体系に外部中性子源を配置することで測定を行ってきた。しかし、外部中性子源の使用は臨界安全が適用される体系では望ましくない場合も多い。そこで本研究では、ウラン燃料に内在する(α, n)反応や自発核分裂による固有中性子源に着目し、京都大学臨界集合体実験装置 KUCA の固体減速架台における実験を通して、外部中性子源を使用せずに未臨界度を測定する方法について検討した。

2. 実験

本研究では、体系内に内在する(α, n)反応と自発核分裂による中性子源に注目し、外部中性子源を使用することなく、従来の炉雑音解析法を適用した未臨界度測定が可能かどうか検討を実施する。本手法では、炉雑音解析法の一つである Feynman- α 法を用いる [1]。Feynman- α 法では、体系内においてある時間幅 T ごとの検出中性子数 $C(T)$ を測定することで、検出された中性子の相関を表す 2 次相関量 Y 値を求め、未臨界度($-\rho$)を推定する。 Y 値と($-\rho$)の理論式は以下のように表される。

$$Y(T) \equiv \frac{\langle C(T)^2 \rangle - \langle C(T) \rangle^2}{\langle C(T) \rangle} - 1 = Y_{\infty} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha T} \right) \quad (1)$$

$$(-\rho) = \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}} = \alpha \Lambda - \beta_{eff} \quad (2)$$

$\langle \rangle$: 真の平均
 α : 即発中性子減衰定数
 Λ : 中性子生成時間
 k_{eff} : 実効増倍率
 β_{eff} : 実効遅発中性子割合
 Y_{∞} : Y 値の飽和値

具体的な手順としては、複数の未臨界体系において測定した $C(T)$ の時系列データから Y 値の T 依存性を分析し、(1) 式をフィッティングして得られた α に対して(2) 式の関係を利用することで($-\rho$)を求めた。実験では、天然ウラン板と濃縮ウラン板を組み合わせた 3/8" P36EU-NU 炉心で炉雑音測定を実施した。なお、実験炉心の ^{235}U の炉心平均濃縮度は約 4% であった。体系内の固有中性子源強度は約 1000 [neutrons/sec] であり、そのうち 90% が天然ウラン板内の自発核分裂、残りの 10% が濃縮ウラン板内の(α, n)反応によるものであることが、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS により推定された。

3. 結果・考察

図に、複数の未臨界体系に対して、固有中性子源のみを用いた 10 分間測定により得られた Y 値のグラフを示す。なお、図中の凡例は体系の未臨界度の測定値を表している。図より、(1) 式で表される理論式に十分にフィッティング可能な Y 値が測定により得られているということが確認できる。実際に、得られた Y 値に対してフィッティングを行うことにより α 値を求めることができ、未臨界度が 0.23 ~ 1.86 [% $\Delta k/k$] の浅い未臨界体系において、 α が($-\rho$)に対して(2)式のように線形に変化することが確認できた。従って、測定時間が 10 分程度と比較的短い場合でも、外部中性子源を用いずに、固有中性子源のみで未臨界度を評価することは十分に可能であると考えられる。

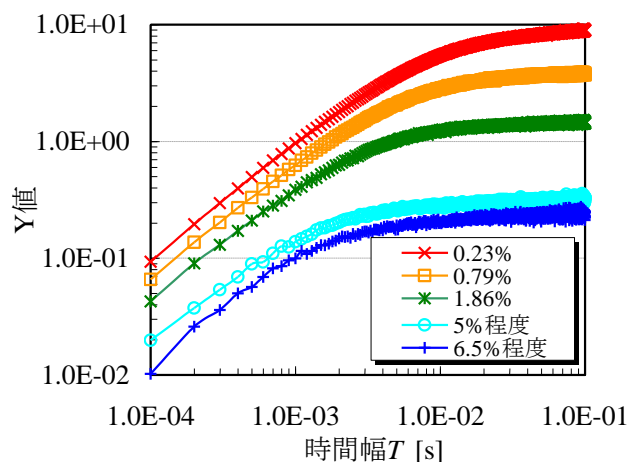


図 10 分間測定で得られた Y 値

[1] 羽様平, 毛利智聡, 相原永史, “未臨界度測定技術の開発”, 大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部, サイクル機構技報 No. 14, (2002), pp.115-123.