

(13) 未臨界度測定実験のための予備実験

名古屋大学大学院工学研科

遠藤 知弘

近畿大学原子力研究所

左近 敦士、橋本 憲吾

1. はじめに

本研究では、東京電力 福島第一原子力発電所における燃料デブリ取出し作業時や、停止中原子炉の燃料シャッフリング時などの状況において適用可能な未臨界度測定手法(核燃料を含んだ体系がどれだけ臨界未満か定量的に測定する手法)について研究開発に取り組んでいる。上述した体系において未臨界度測定を行うためには、以下のような点が課題となっている。

- ✓ 体系の詳細情報が不明、あるいは不確かさが大きい。従って、連続エネルギーモンテカルロ計算コード等による事前の数値解析により、未臨界度測定に必要な核特性パラメータ(中性子生成時間、実効遅発中性子割合など)を評価することが難しい。
- ✓ 大きな体系変化を伴う過渡変化の状況を考えた場合、炉心の実効増倍率だけが変化するとは限らず、一点炉動特性パラメータや外部中性子源強度も同時に変化し得る。

上述した課題を解決するために、以下で挙げる3つの手法について、現在検討を進めている。

- ① 時間領域分割に基づいた改良積分法^{2,4}
- ② 粒子フィルタによる逆動特性解析^{3,5}
- ③ 高度な炉雑音解析手法(三次中性子相関法)

当初の研究計画では、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)において「粒子フィルタを活用した未臨界度監視実験」を実施する予定であり、UTR-KINKIにおいて実際に測定された中性子計数率の時系列データを活用することで、粒子フィルタによる未臨界度測定の実証を行うことを目的としていた。しかし、平成30年度6月初旬に、UTR-KINKIにおいて原子炉出力微調整用の制御棒モーターにおける絶縁不良が確認され、その修理のため原子炉運転を伴う実験を実施することが困難となった。従って、平成30年度共同利用実験では、今後UTR-KINKIにて予定している未臨界度測定に向けた予備実験として、本施設内で利用可能な中性子線源を有効活用した事前検討を行うこととした。

2. 過渡変化状態を模擬した中性子計数率の時系列データ測定

現在検討中の未臨界度測定手法では、過渡変化時の原子炉における中性子計数率の時間変化を活用する。それに向けた予備実験として、Pu-Be中性子線源と検出器の距離を変化させることで過渡変化状態を模擬し、本施設内の測定回路系を利用して中性子検出時刻情報を取得し、計数率の時間変化を測定した。まず、BF₃中性子検出器の周りを複数個のポリエチレンブロック(5cm×10cm×20cm)で囲んだ体系を構築した。このように測定体系を構築した後、以下で述べるように時刻に応じて段階的にPu-Be中性子源と検出器間の距離を変化させることで、中性子計数率の時間変化を測定した。

1. 中性子源と検出器間の距離を近接(約15cm)させた定常状態において、約200秒間だけ中性子計数率を測定。
2. その後、中性子源と検出器間の距離を若干離れた後(約30cm)、約300秒間だけ中性子計数率を測定。
3. 中性子源と検出器間の距離をさらに遠くに離して(約70cm)、約300秒間だけ中性子計数率を測定。

以上の実験により得られた中性子計数率の時間変化を図1に示す。図1より、本施設内の測定回路系を用いることで、中性子計数率の時間変化の測定が可能であることを事前に確認することができた。ただし、今回の測定体系は、Pu-Be中性子源とポリエチレンブロックのみから成る体系であり、核分裂連鎖反応の無い非増倍体系(実効増倍率 $k_{\text{eff}} = 0$)である。従って、現在検討中の未臨界度測定手法(時間領域分割に基づいた改良積分法、あるいは粒子フィルタによる逆動特性解析)を適用したとしても、核分裂反応が起こる原子炉内で生じる「遅発中性子」による時間変化の成分が一切含まれていないため、未臨界度測定に関する検証として本実験の測定結果そのものを活用することはできない。仮に、図1に示された測定結果に対して積分法を適用したとすると、極めて深い未臨界度 $(\frac{1}{k_{\text{eff}}} - 1)/\beta_{\text{eff}}$ の値がおおよそ数百^{ドル}[\$]が得られることとなる。

今後の研究計画として、UTR-KINKIにおいて制御棒操作あるいは起動用中性子源の挿入/引抜によって、未臨界状態における過渡変化実験を実施し、図1に示されたような中性子計数率の時間変化を測定することで、現在検討中の未臨界度測定手法を適用することを試みる予定である。

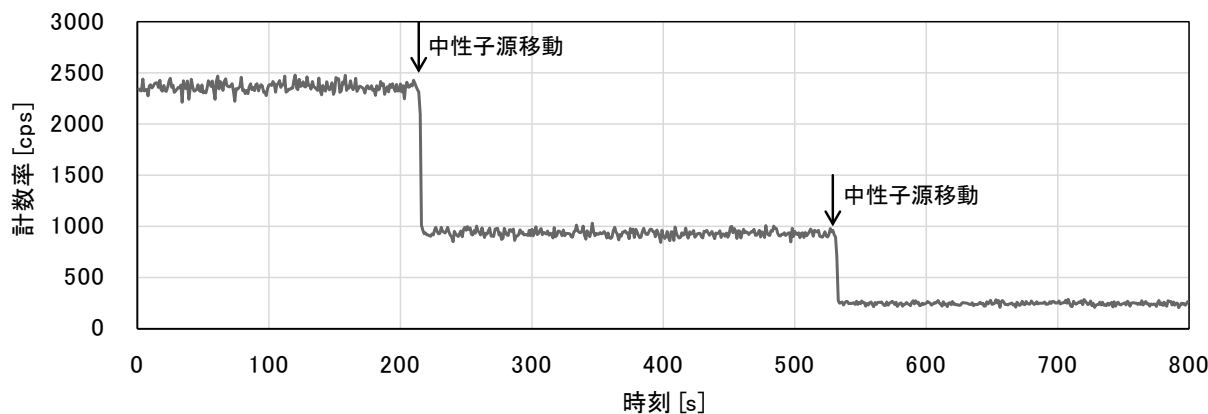


図1 中性子計数率時間変化の測定結果

3. 自発核分裂中性子線源のみを用いた炉雑音測定実験

カリフォルニウム(Cf)自発核分裂中性子線源およびBF₃中性子検出器を、複数個のポリエチレンブロック(5cm×10cm×20cm)で囲むことにより、炉雑音測定(定常状態における中性子検出数の時間的揺らぎの測定)の予備実験を実施した。構築した測定体系の写真を図2に示す。測定体系を構築する際には、Cfから放出される自発核分裂中性子を主に測定できるように、中性子線量率の値がバックグラウンドレベルとなっている地点を選定し測定を実施した。

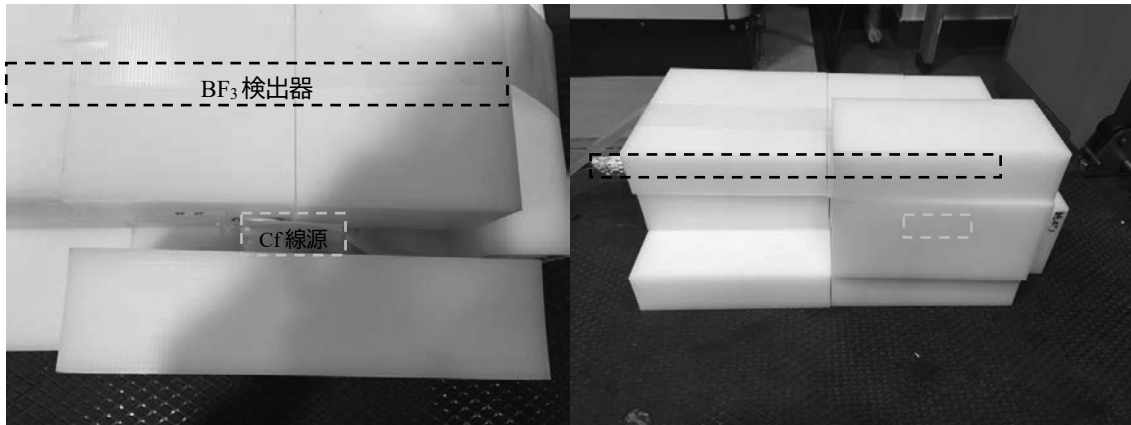


図2 Cf中性子線源のみを用いた炉雑音測定の実験体系

以上で述べた測定体系において、100秒間のリストモード測定を連続100回繰り返すことで炉雑音測定を実施した。全10,000秒間における中性子計数率 R は $R = 41.96 \pm 0.06$ [cps]であった。

まず、100秒間のリストモード測定で得られた炉雑音($1 \leq m \leq 100$)に対して再帰バンチング法を利用することで、検出時間幅 kT_0 に対する中性子計数 $C_m(kT_0)$ の平均 $\bar{C}_m(kT_0)$ 、分散 $v_m(kT_0)$ 、二次中性子相関量 Y 値 $Y_m(kT_0) = v_m(kT_0)/\bar{C}_m(kT_0) - 1$ を合計100セット分析した。ここで基本ゲート幅 T_0 は $T_0 = 10^{-4}$ [s]とした。こうして得られた100セットの $\bar{C}_m(kT_0)$ 、 $v_m(kT_0)$ 、 $Y_m(kT_0)$ について共分散行列を求め、バンチング法によって生じる異なるゲート幅 kT_0 および $k'T_0$ 間の相関係数を推定した。図3に $\bar{C}_m(kT_0)$ 、 $v_m(kT_0)$ 、 $Y_m(kT_0)$ の相関係数行列をそれぞれ図示する。

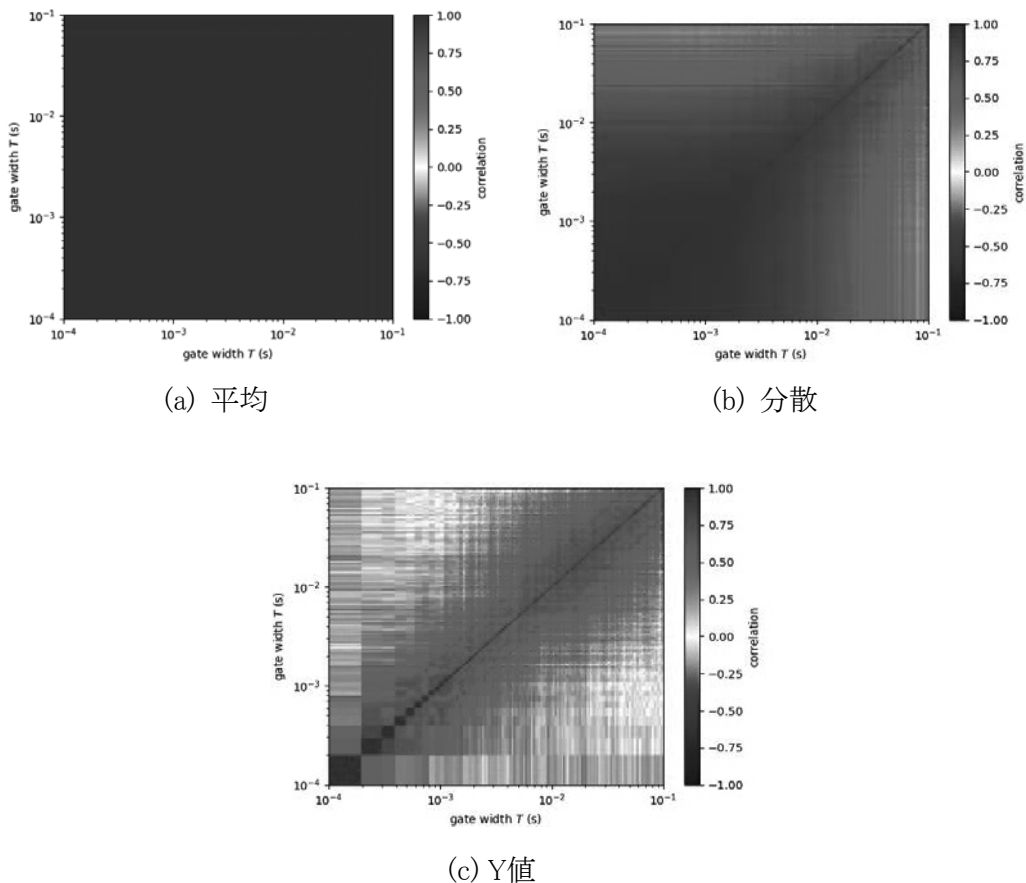


図3 バンチング法によって生じる平均・分散・Y値の相関係数行列

図3から分かるように、異なるゲート幅 kT_0 および $k'T_0$ 間の $\bar{C}_m(kT_0)$ 、 $v_m(kT_0)$ 、 $Y_m(kT_0)$ の間には、バンチング法を用いることで非常に強い正の相関があることを、炉雑音測定を100回繰り返すことで実際に確認することができた。なお、 $Y(kT_0)$ の相関については、時間間隔 $|k - k'|T_0$ が短い場合には非常に強い相関があるものの、時間間隔 $|k - k'|T_0$ が長くなるにつれて相関が弱くなることも確認できた。

次に、10,000秒間の測定結果に対してmoving block bootstrap法を適用することで、Y値のbootstrap 95%信頼区間を分析した¹。ここで、bootstrap法におけるサンプルサイズは $B=1000$ とした。得られたY値の測定結果をbootstrap 95%信頼区間と併せて図4に示す。

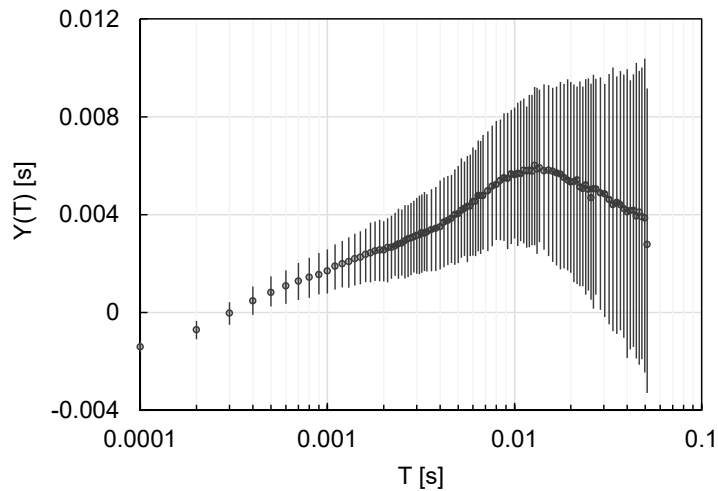


図4 二次中性子相関量 $Y(T)$ の測定結果(エラーバー:bootstrap 95%信頼区間)

Cf自発核分裂中性子源の場合、1回の核分裂反応あたりに平均で約4個の中性子が同時に放出されることで、中性子家系が分岐することとなる。従って、本実験体系で測定された中性子数の間には極僅かな中性子相関が存在することとなり、ポアソン分布の場合に比べて、中性子計数の分散 v が平均 \bar{C} よりも大きくなる、と期待できる。この場合、二次中性子相関量Y値は、検出時間幅 T に対して以下のような関数形で変化することが理論的に解明されている。

$$Y(T) = Y_{\infty} \left(1 - \frac{1 - \exp(-\alpha T)}{\alpha T} \right) - 2R\tau \quad (1)$$

(1)式において、 α は即発中性子減衰定数、 τ は検出回路系の不感時間、 Y_{∞} はY値の飽和値、をそれぞれ意味する。図4で示されているように、検出時間幅 T の増加に伴い $Y(T)$ が飽和する傾向を観察することができた。ただし、本実験体系の場合にはY値のオーダーが非常に小さく、ポアソン分布からの差異を統計的に精度良く観察し難い条件であったと言える。この測定精度を改善するためには、検出器の検出効率を向上するか、さらに長時間の炉雑音測定を実施する必要がある。また、図4において、 $T_0 = 10^{-4}$ [s]におけるY値の符号が負となっている。この理由は、(1)式で示されている、検出回路系の不感時間の影響 $-2R\tau$ によるものと考えられる。Cf中性子線源のみで核分裂連鎖反応による増倍が無い場合には飽和値 Y_{∞} が非常に小さいため、不感時間の項 $-2R\tau$ の影響が相対的に大きく現れた、と考えられる。

今後の研究計画として、原子炉停止中のUTR-KINKIにおいて長時間の原子炉雑音測定実験を実施することにより、できる限り統計精度の良い三次中性子相関法実験を行うことを計画している。

本研究に関連した平成 30 年度業績一覧

[学術論文]

1. T. Endo, A. Yamamoto, “Comparison of theoretical formulae and bootstrap method for statistical error estimation of Feynman- α method,” 124, pp. 606-615 (2019), DOI: 10.1016/j.anucene.2018.10.032

[口頭発表]

2. A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of subcriticality in dollar units using integral method for subcritical system,” Proc. PHYSOR2018, pp. 3271-3282, Cancun, Mexico, Apr. 22-26, 2018.
3. T. Ikeda, T. Kimura, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of subcriticality using particle filter method,” Trans. Am. Nucl. Soc., 118, pp. 851-854, Philadelphia, PA, June 17-21, 2018.
4. A. Nonaka, T. Endo, A. Yamamoto, “Estimation of subcriticality in dollar units based on integral method for arbitrary state-change in subcritical system,” Trans. Am. Nucl. Soc., 119, pp. 1112-1115, Orlando, FL, November 11-15, 2018.
5. 池田 卓弥, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 他, “粒子フィルタ法を用いた未臨界度、中性子生成時間、外部中性子源強度の同時推定,” 日本原子力学会 2019 年春の年会, 2J05, 2019 年 3 月 20 日～22 日, 茨城大学水戸キャンパス.

実験・測定補助者

野中 朝日 名古屋大学大学院工学研究科 博士前期課程 1 年

(計 1名)