

# 粒子フィルタ法を利用した未臨界度監視に関する研究

原子核エネルギー制御工学グループ 池田卓弥

**1. 緒言** 福島第一原子力発電所廃炉における燃料デブリ取出し時の未臨界監視において、中性子生成時間 $\Lambda$ および外部中性子源強度 $S$ に時間変化が生じ、またこれらの場合不確かさも大きいため、従来の逆動特性法では未臨界度 $(-\rho)$ を適切に推定できない可能性があり、解決すべき課題となっている。その問題を解決する手法として本研究では、パラメータ逆推定手法の一つである粒子フィルタ法[1]に着目した。粒子フィルタ法では、パラメータ(例: $-\rho, \Lambda, S$ )が従う確率分布を多数の“粒子”で近似する。個々の粒子に対する中性子数の時間変化を支配方程式(例:一点炉動特性方程式)に基づいて予測し、観測値(例:中性子計数率)との差異が小さい(尤度の値が大きい)粒子をベイズ推定により優先的に選択することで、パラメータの予測結果を動的に改善する。本発表では、粒子フィルタ法により $(-\rho)$ 、 $\Lambda$ 、 $S$ の同時推定を実施した結果を報告する。

**2. 実験解析** 京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)のA架台において、図1に示す加速器駆動未臨界炉心を用いて過渡変化実験を実施した。体系に与える過渡変化として、①DT 中性子源パルス周波数 20→100Hz へ上昇、制御棒挿入(②C1、③C3、④C2)、⑤中心架台落下を順次行った。図1に示した位置に設置された(i)BF<sub>3</sub>検出器と(ii)中性子レムカウンタ(トリチウムターゲット直上)により取得した2種類の中性子計数率時系列データを組み合わせ、粒子フィルタ法を適用した。粒子フィルタ法では一点炉動特性方程式に基づき中性子計数率の時間変化を予測し、 $(-\rho)$ 、 $\Lambda$ 、 $S$ の同時逆推定を行った。

**3. 推定結果** 粒子フィルタ法による未臨界度 $(-\rho)$ の推定結果として、符合を反転させた反応度 $\rho$ の時間変化を図2に示す。図2において、凡例“粒子フィルタ法”は $10^4$ 個の粒子から得られた平均値、エラーバーが $10^4$ 個の粒子の不偏標準偏差 $\pm 2\sigma$ である。凡例“参照値”は連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP6.2により計算した結果である。図2に示した数字①~⑤は2.実験解析の節に示した過渡変化を行ったタイミングに対応している。図2から、⑤以前の未臨界度が浅い場合には粒子フィルタ法による推定結果 $\pm 2\sigma$ の範囲内に参照値が含まれていることが確認できる。また、⑤以降の未臨界度が深い場合には参照値を含まないが、 $\pm 3\sigma$ の範囲内には参照値が収まることになる。中性子生成時間、外部中性子源強度の時間変化の推定結果については、発表当日に報告する。

図1に示す加速器駆動未臨界炉心を用いて過渡変化実験を実施した。体系に与える過渡変化として、①DT 中性子源パルス周波数 20→100Hz へ上昇、制御棒挿入(②C1、③C3、④C2)、⑤中心架台落下を順次行った。図1に示した位置に設置された(i)BF<sub>3</sub>検出器と(ii)中性子レムカウンタ(トリチウムターゲット直上)により取得した2種類の中性子計数率時系列データを組み合わせ、粒子フィルタ法を適用した。粒子フィルタ法では一点炉動特性方程式に基づき中性子計数率の時間変化を予測し、 $(-\rho)$ 、 $\Lambda$ 、 $S$ の同時逆推定を行った。

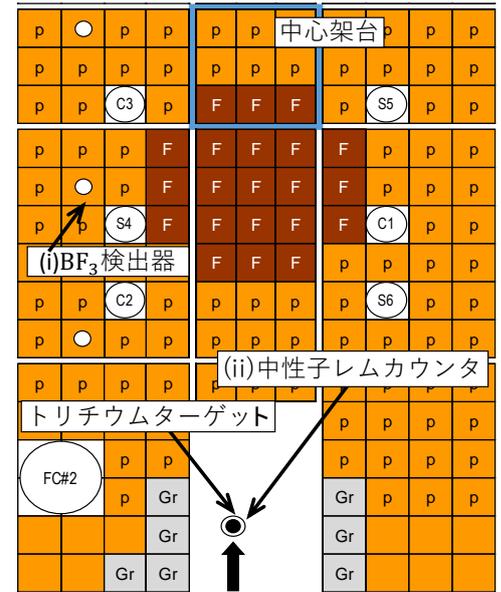


図1 実験体系模式図

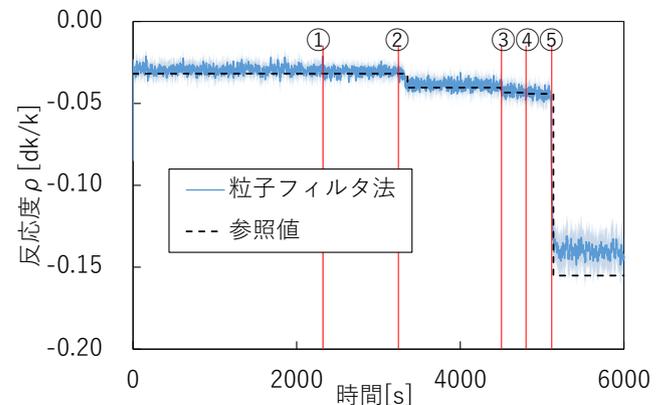


図2 粒子フィルタ法による未臨界度の推定結果

**参考文献** [1] G Kitagawa, *J Comput Graph Stati*, 5[1], pp.1-15, (1996).

## 公刊論文

[1] T. Ikeda, T. Endo, A. Yamamoto, *Proc. RPHA17*, Chengdu, Aug. 24-25, 2017, (2017).

[2] 池田卓弥, 木村俊貴, 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] T. Ikeda, T. Kimura, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 118, pp.851-854, (2018).

[4] 池田卓弥, 遠藤知弘, 山本章夫, *et al.*, 日本原子力学会 2019 年春の年会, 茨城大学, 3 月 20 日-22 日, (2019).[submitted]