

## Unscented カルマンフィルタを用いた未臨界度逆推定

Subcriticality Estimation using Unscented Kalman Filter

\*遠藤 知弘<sup>1</sup>, 山本 章夫<sup>1</sup>, 山中 正朗<sup>2</sup>, 卞 哲浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>京都大学複合原子力科学研究所

京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)の外部中性子源駆動の過渡変化実験で得られた中性子計数率の時系列データに対して、Unscented Kalman Filter (UKF)を適用し、未臨界度の逆推定を実施した。

**キーワード**：未臨界度、Unscented Kalman Filter、一点炉動特性方程式、京都大学臨界集合体実験装置

**1. 緒言** 一点炉動特性パラメータ( $\Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )や外部中性子源強度 $S$ に時間変化や不確かさが存在する場合には、従来の逆動特性法による未臨界度 $-\rho$ の推定は困難となる。その問題解決法として、先行研究では粒子フィルタに注目した。ただし、粒子フィルタの場合には、状態変数の頻度分布を数百~千個の粒子で表現するため、統計精度良い解を得るためには多くの一点動特性計算が必要となり計算コストが高くなる。そこで、実時間監視に向けた計算コスト低減手法として、本研究では UKF の適用可能性について検討を実施した。

**2. 理論** 各時間ステップにおいて、一点炉動特性計算における $M$ 個の入力パラメータ( $-\rho, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )の不確かさと $N$ 個の測定値(計数率 $n(t)$ )の統計誤差に関する共分散行列 $\Sigma$ を用意する。①前時間ステップの共分散行列 $\Sigma$ と②Unscented 変換に基づく $(2(M+N)+1)$ 個のシグマ点により変動させた入力パラメータと測定統計誤差を利用して、 $(2(M+N)+1)$ 回の一点炉動特性計算を実施し、次時間ステップの入力パラメータと測定値の事前期待値および事前共分散行列を評価する。実際に観測された測定値を用いてデータ同化を行い、入力パラメータの事後期待値および事後共分散行列を更新する。UKF では、以上の処理を繰り返すことで、計数率の時間変化の測定結果から( $-\rho, S, \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ )の時間発展および不確かさを推定することができる。

**3. 実験** KUCA-A 架台において、DT 中性子源駆動の未臨界炉心において過渡変化実験を実施した。①DT ビーム強度の上昇、制御棒挿入・落下(②C1, ③C3, ④C2)、⑤中心架台落下により体系に過渡変化を順次与えた。(i)炉心近傍に配置した BF3 検出器、および(ii)トリチウムターゲット直上に配置した中性子レムカウンタにより計数率時系列データ $n_{\text{core}}(t)$ ,  $n_{\text{src}}(t)$ を測定し、 $n_{\text{core}}(t)$ が炉心中性子束の基本モード成分、 $n_{\text{src}}(t)$ が外部中性子源強度 $S$ に比例すると仮定した。各時間ステップにおける $-\rho, S$ の不確かさの大きさは、前ステップからの計数率変化 $|n(t_i) - n(t_{i-1})|$ に比例させ動的に設定した。 $\Lambda, \beta_{\text{eff}}$ については、KUCA 炉心の状態を様々に変化させた事前数値解析結果から、 $-\rho$ に対する依存性を最小二乗法により 1 次式でフィッティングし、各時間ステップにおける $-\rho$ からフィッティング式により $\Lambda, \beta_{\text{eff}}$ を求め、それらの予測誤差を不確かさとして与えた。

**4. 結果** UKF による未臨界度 $-\rho$ の推定結果を図 1 に示す。図 1 において誤差バーは推定不確かさ( $1\sigma$ )、黒点線は MCNP6.2 による未臨界度の解析結果をそれぞれ示す。図 1 より、①ビーム強度変化や②中心架台落下による大きな負の反応度が添加された後でも、UKF による推定結果 $\pm 1\sigma$ の範囲内に MCNP6.2 解析結果が含まれており、本実験における提案手法の適用可能性を確認できた。

**謝辞** 本研究は KUCA 共同利用研究(CA3004)の成果であり、JSPS 科研費(19K05328)の助成による。

\* Tomohiro Endo<sup>1</sup>, Akio Yamamoto<sup>1</sup>, Masao Yamanaka<sup>2</sup>, and Cheol Ho Pyeon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nagoya University, <sup>2</sup>Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

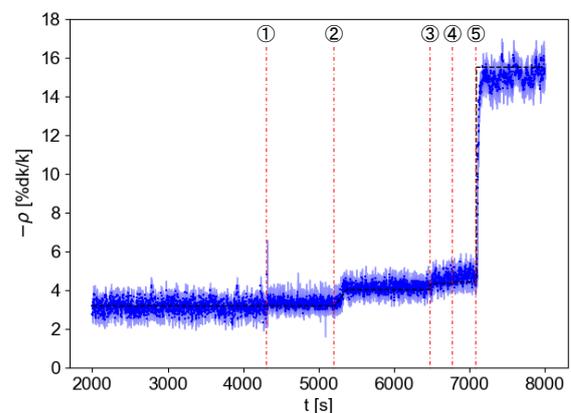


図 1 UKF による未臨界度 $-\rho$ の逆推定結果