加速器駆動システムにおける未臨界度測定の数値解析　38

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　前納健佑

1. 緒言　加速器駆動システム(ADS)は、大強度陽子加速器、未臨界炉心等を組み合わせた、現在注目されている新しいシステムである。ADS では未臨界に保った体系内に加速器により高エネルギーの陽子ビームを打ち込み、核破砕反応により中性子を発生させ、この中性子で未臨界に保った体系内で核分裂を起こし、エネルギーを得る。また、核変換を行える原子炉として、高速炉と ADS が考えられている。核変換とは、原子力発電所から発生する長寿命核分裂生成物(LLFP)およびマイナーアクチニド(MA)を毒性の低い核種や半減期の短い核種に変換することで、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度、地層処分期間･面積の低減が期待される技術である。また、ADS は未臨界炉心のため、陽子ビームを遮断すれば直ちに出力を下げることができることから高い安全性を持っている。加速器をパルスモードで運転する ADS の未臨界度測定手法としてパルス中性子法(面積法)がある。面積比法により未臨界度-ρ を測定すると、体系内の検出器を配置する位置によって測定結果に差異が生じることが分かっている。本研究では、ADS 実現のため未臨界度測定に注目して研究を進めた。まず、測定結果の補正に向け、連続エネルギーモンテカルロ計算によって、京都大学集合体実験装置(KUCA)で実施されたパルス中性子法の実験を忠実に模擬したシミュレーションを行う手法を提案し、未臨界度の計算結果を実験値と比較することで、数値計算の妥当性を検証した。次に、測定結果の検出器間のばらつきを低減するために、ベイズ理論に基づき未臨界度を推定する理論式を導出し、推定した未臨界度の検出器間のばらつきの低減効果を検討する。

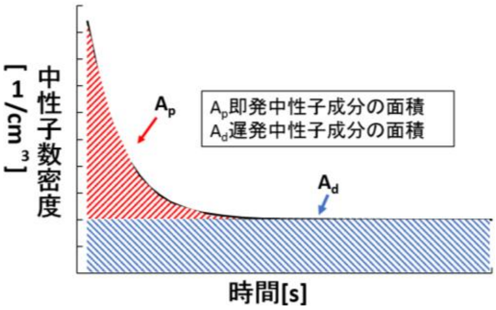

Figure 1 面積比法の概念図

2. ベイズ理論に基づく未臨界度推定　体系に一定間隔でパルス中性子を打ち込むと体系内の中性子密度は時間に対して Fig 1 のように減衰する。減衰曲線は即発中性子成分の面積 A_P と遅発中性子成分の面積 A_d に分けることができ、それぞれの成分の面積を計算し面積比を求めることで、未臨界度を(1)式により推定できる。しかし(1)式は一点炉近似に基づくため、測定した面積比の結果が検出器位置に依存してしまう。一方、数値計算を活用することで未臨界度を予測することができるが、入力値の不確かさ等により計算結果にも誤差が生じる。そこで、面積比と未臨界度の計算結果の相関を利用し、ベイズ理論[1]に基づいたデータ同化手法により、より確からしい未臨界度-ρ_{after} の推定を試みた。線形近似を仮定すると推定式は(2)式となり、実験･数値計算により求めた面積比の差異 ΔA に面積比に対する未臨界度の一階微分値 $d(-\rho)/dA$ を乗じ、数値計算による未臨界度の推定結果に足すことで補正することができる。ここで $d(-\rho)/dA$ の値は、次の 2 つの方法で計算の入力を変化させ、R^2 値が最も 1 に近くなる関数形をフィッティングし求めた:①制御棒や燃料引抜による計算体系の変化(未臨界が浅い順に C1-C3in, All-in, Shutdown, Shutdown+P)、②燃料中に占める ^{235}U の質量比の微小変化。以上により求められた $d(-\rho)/dA$ を用いて-ρ_{after} を推定し、検出器間における未臨界度測定値のばらつき(標準偏差)が補正前後でどれだけ低減されるのか比較した。

$$\frac{A_p}{A_d} \approx -\left(\frac{\rho}{\beta}\right) \qquad (1)$$

β : 実効遅発中性子割合

$$-\rho_{after} \approx -\rho_{MVP} + \frac{d(-\rho)}{dA}\Delta A \qquad (2)$$

$-\rho_{after}$:推定する未臨界度　ΔA :面積比の差異

$-\rho_{MVP}$:数値計算により求めた未臨界度

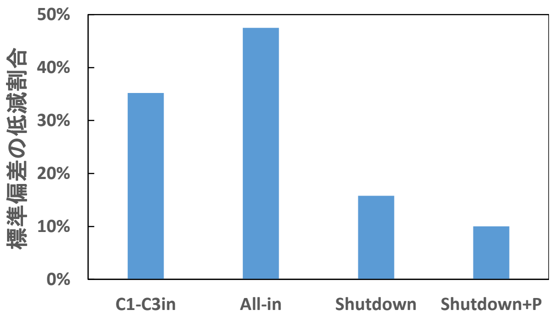

Figure 2 補正①による標準偏差低減割合

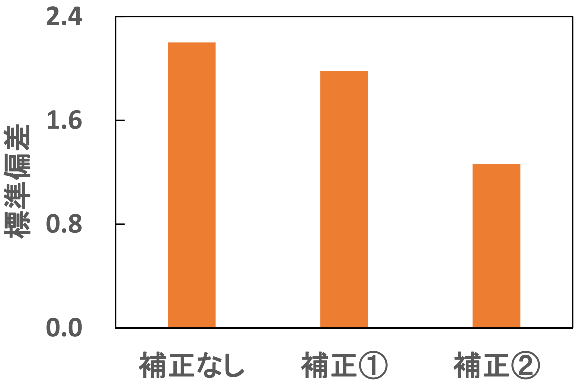

Figure 3 補正方法別標準偏差の比較

3. 結果・考察　Fig 2 に示すように、補正①を適用することで、全測定体系で検出器間のばらつきを低減することができた。特に未臨界が浅い状態においては未臨界が深い状態に比べて良くばらつきを低減できている。次に、補正①では 10%程度しかばらつきを低減することができなかった、深い未臨界状態(Shutdown+P 体系)に対して補正②を行うことで、さらに 50%程度検出器間のばらつきを低減することができた(Fig 3)。これは、^{235}U の微小変化を与えたほうが、測定体系近傍における微分係数 $d(-\rho)/dA$ をより良く近似できたためだと考察した。今後の課題として、関数フィッティングにおける $d(-\rho)/dA$ の誤差、補正後の未臨界度-ρ_{after} の誤差評価が挙げられる。

参考文献　[1] T, Bayes. et.al, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 53(0):370-418 (1763).