

未臨界実験データを用いたバイアス因子法

名古屋大学大学院工学研究科 木村俊貴

1. 背景

加速器駆動システム(ADS)の開発における課題の一つとして、炉心解析の不確かさ低減がある。これまでの高速増殖炉の開発において用いられてきた不確かさ低減手法として、設計体系と類似した実験体系において炉心解析と臨界実験を行い、その差を設計体系の解析に反映することでより確からしい値を得る、バイアス因子法という手法がある。本研究では、これまで困難とされてきた、未臨界実験によって得られるデータを用いた炉心解析精度改善手法の可能性について検討を行っている。

1.1. 未臨界実験

本研究では、未臨界実験のうちパルス中性子法による実験に着目した。この手法は、未臨界の体系に加速器駆動中性子源によって周期的に中性子を入射させ、このときの出力応答を測定する手法である。この手法の概念図を図 1.1 に示す。

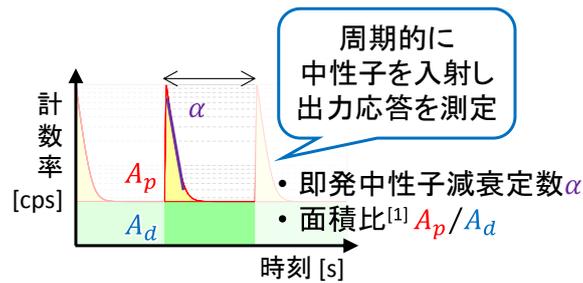


図 1.1 パルス中性子法による未臨界実験

この手法における測定値としては、計数率の即発中性子成分の減衰の時定数である即発中性子減衰定数 α や、計数の即発中性子成分と遅発中性子成分の比である面積比 $AR = A_p/A_d$ ^[1]が挙げられる。

1.2. バイアス因子法 の概念

本研究では、既存の未臨界実験解析手法を利用することができる、ランダムサンプリング法を用いたバイアス因子法^[2]に着目した。この手法の概念図を図 1.2 に示す。

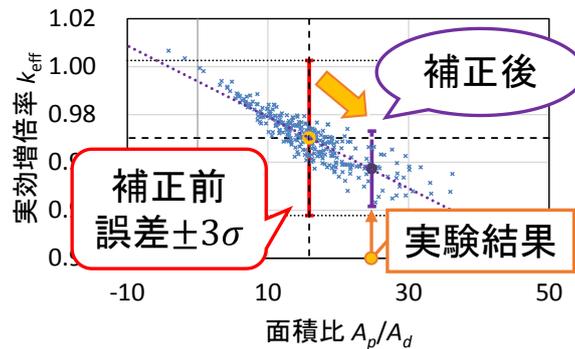


図 1.2 ランダムサンプリング法を用いたバイアス因子法

手順は以下の通りである。

- ① まず、ランダムサンプリング法による不確かさ評価を行い、不確かさ低減を行いたい解析対象と実験対象の数値解析結果の間の相関を求める。
- ② 次に、データ同化手法によって実験値を取り込み、より確からしい解析対象の値を得る。

2. 目的

本研究の目的は、ランダムサンプリング法を用いたバイアス因子法による、未臨界実験を利用した炉心解析精度改善の可能性を調べることである。

3. 方法

3.1. 双子実験

本研究では、双子実験という手法により、条件を絞って本手法の妥当性を調べることにした。これは、数値的に実験を模擬することで、仮想的な実験値と補正後の結果となるべき真値を得ることで、データ同化による補正の妥当性を評価する手法である。

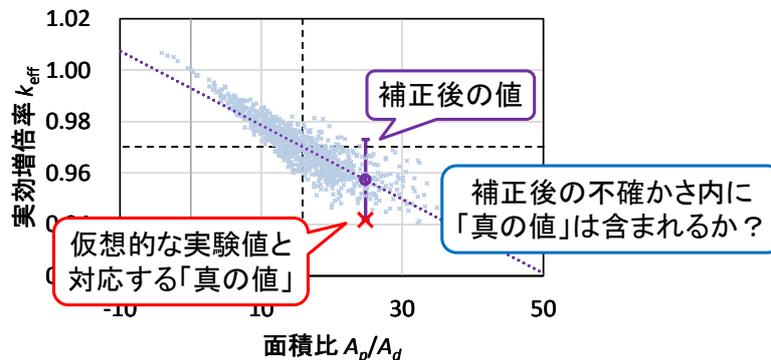


図 3.1 双子実験の概念図

- ① 初めに、不確かさを模擬する形で乱数によって実験値と真値の組を得る。

ランダムサンプリング法の要領で不確かさのもととなるパラメーターを摂動させ、数値解析によって実験値と真値を得る。

- ② 次に、得られた実験値を利用し、バイアス因子法を実行する。
- ③ バイアス因子法によって得られた補正後の値および不確かさと、真値の値を比較し、補正の妥当性を評価する。

3.2. 検証体系

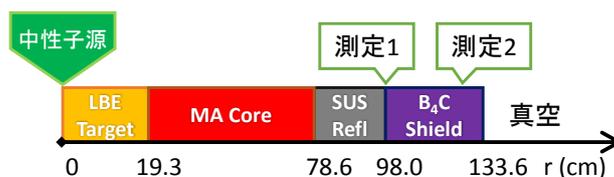


図 3.2 検証体系

今回の検証では、JAEAにより提案されている、MA装荷ADS炉心の2次元モデル³⁾を簡略化した、図3.2に示す1次元円柱体系を対象とする。この体系にて面積比 AR および即発中性子減衰定数 α の測定実験を行い、その結果を利用して中性子実効増倍率 k_{eff} の解析および k_{eff} に対するバイアス因子法の試行を行うことを想定した。検討を単純にするため、不確かさは核データに起因するもののみを考慮し、実験値の不確かさはないものとする。今回は、汎用炉心解析コードSCALE6.2.1⁴⁾による1000サンプルのランダムサンプリング結果を基に、自作拡散計算コードによる炉心解析・実験解析を行い、さらに別の自作計算コードによりバイアス因子法の適用を行う。使用した核データはENDF-B/VIIである。

未臨界実験の対象としては、図中の「測定1」および「測定2」の位置で測定した面積比の値と、体系の ω モード固有値として計算した即発中性子減衰定数の値を利用している。

4. 結果・考察

4.1. バイアス因子法の適用結果

まず、実験値を一つ仮定した際の不確かさの変化について結果を示す。即発中性子減衰定数と面積比の解析結果と、使用した実験値を図4.1に示す。

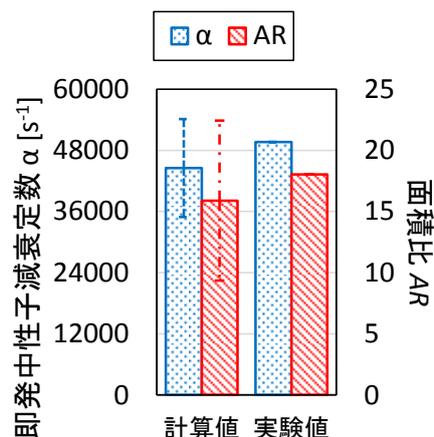


図 4.1 解析結果と仮定した実験値

即発中性子減衰定数の値は点で塗りつぶした棒で、その不確かさ $\pm 1\sigma$ の範囲を破線で示す。同様に、面積比とその不確かさは斜線で塗りつぶした棒と一点鎖線で示す。面積比の値は測定 2 の位置での値であるが、測定 1 の位置でもほぼ同じ値である。これらの値を用いた際の実効増倍率とその不確かさの変化を図 4.2 および図 4.3 に示す。

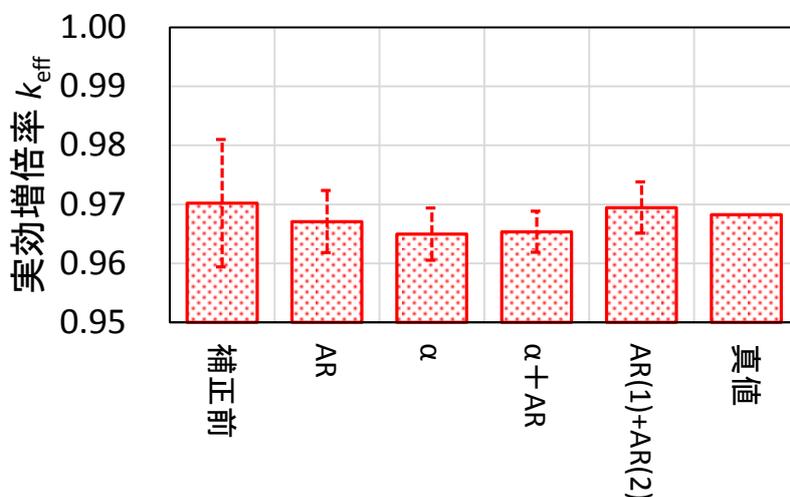


図 4.2 バイアス因子適用前後の実効増倍率の変化

図 4.2 では、横軸左端が修正前の値で、その次が順に面積比(測定 2 の位置)の測定値を利用した場合のバイアス因子法適用後、即発中性子減衰定数を利用した場合、双方を併用した場合、2 箇所での面積比測定値を利用した場合、そして実験値に対応する真値の値である。

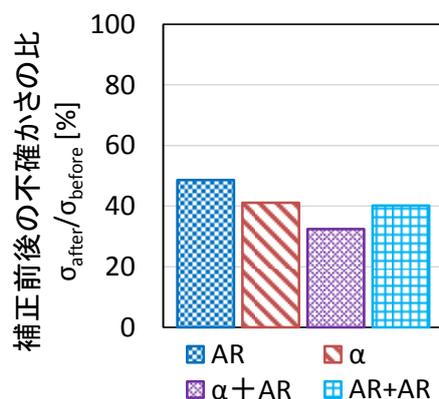


図 4.3 バイアス因子法適用前後の実効増倍率の不確かさの比

図 4.3 には、バイアス因子を適用した後の不確かさを、適用前の不確かさで割った値を%表示で示してある。左から順に、面積比(測定 2 の位置)の測定値を利用した場合のバイアス因子法適用後、即発中性子減衰定数を利用した場合、双方を併用した場合、2 箇所での面積比測定値を利用した場合の値である。

実効増倍率に対してバイアス因子法を適用する際には、面積比法の結果よりも即発中性子減衰定数の方が効果的であった。これは、即発中性子減衰定数と実効増倍率の相関が大きいためである。この原因としては、即発中性子減衰定数に対して遅発中性子割合の影響が比較的小さいことや、解析方法の都合上基本モード成分が大きいために考えられる。

また、即発中性子減衰定数と面積比の両者を併用した場合は、2 箇所の面積比を利用するよりも効果が高いことがわかった。これは、2 つの測定値間の相関が弱い、つまり独立性が高いためである。

4.2. 双子実験の結果

補正結果の妥当性を評価するため、実験値と真値の組を 1000 パターン用意し、それぞれの場合について補正結果の不確かさの範囲内に真値が入るかどうかを確認した。

その結果、不確かさ $\pm 1\sigma$ の範囲に真値が入る確率は、面積比を用いた場合 70.7%、即発中性子減衰定数を利用した場合は 78.2%、併用した場合は 75.0%となった。ランダムサンプリング法においては断面積を正規分布に従うように摂動させる。そこで正規分布に従うサンプルが $\pm 1\sigma$ の範囲に入る確率 68.3%と比較すると、特に即発中性子減衰定数を利用した際にはこの確率が大きくなっているが、これは後述する非線形性の影響が考えられる。1000 サンプルの正規分布乱数の標準偏差には、統計的不確かさが約 2%付くことを考えると、面積比を利用した場合の 70.7%は正規分布から大きく外れていないとみられる。また、全てのケースで $\pm 1\sigma$ の範囲に真値が入る確率がむしろ高く、これを正規分布とみなした場合でも、 $\pm 1\sigma$ の範囲については不確かさを過小評価することにはならないと考えられる。

4.3. 非線形性の影響

補正後不確かさ $\pm 1\sigma$ 内に真値が入る確率が正規分布よりも高めに起こることから、実験対象と補正対象の関係を確かめることとした。ここでは、不確かさ・相関の評価に利用したランダムサンプリングの結果を、図 4.4 には面積比と実効増倍率の関係、図 4.5 には即発中性子減衰定数と実効増倍率の関係をとり、グラフに示した。

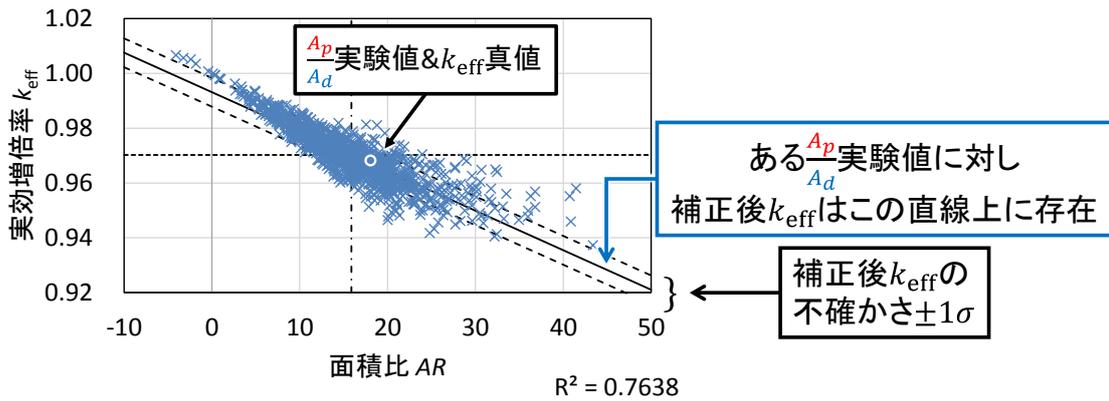


図 4.4 面積比と実効増倍率の関係

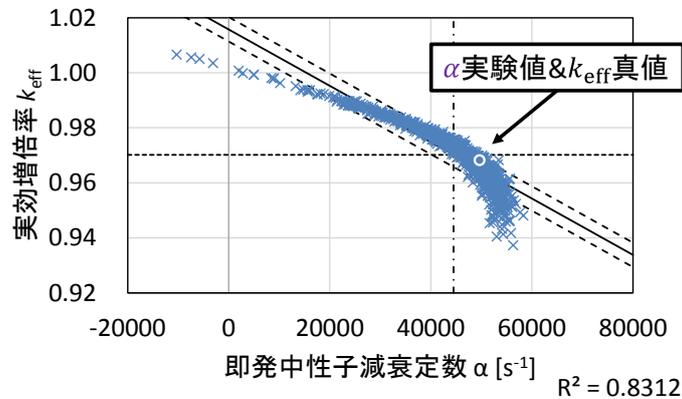


図 4.5 即発中性子減衰定数と実効増倍率の関係

これらの図中では、バツ印がランダムサンプリングの結果であり、白丸で 4.1 にて利用した実験値と真値の組を示している。また、バイアス因子法による補正後の値は斜めの直線上に現れ、その補正後不確かさは破線の範囲となる。

特に図 4.5 の即発中性子減衰定数と実効増倍率の関係からは、バイアス因子法の補正式から外れる曲線上に存在し、大きな非線形性が現れていることが分かる。この結果として、実験値に対応する範囲での実効増倍率の不確かさは偏りが生じ、不確かさ $\pm 1\sigma$ 内に真値が入る確率が正規分布よりも高めに出了のではないかと考えている。

また、面積比を利用した場合の補正後の値と真値の間の誤差と、補正後の不確かさを、横軸に面積比の実験値をとって図 4.6 に示す。

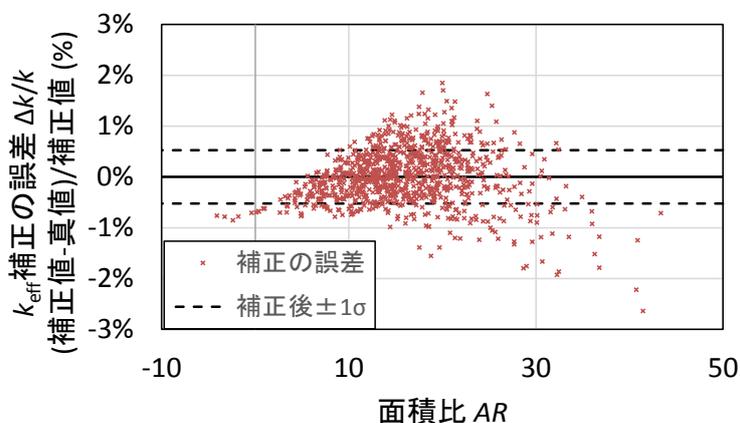


図 4.6 面積比を利用した場合の誤差と不確かさ

面積比の実験値が小さい、もしくは大きい方へ触れた場合、補正の誤差は補正後の標準偏差 $\pm 1\sigma$ の範囲から外れやすいことが分かる。

これらの結果を改善するためには、例えば実効増倍率を直接縦軸に取らず $1/k_{\text{eff}}$ などの形でとることで非線形性を改善したり、バイアス因子法自体を非線形の関数にフィッティングできるように改良したりする必要があると考えている。

4.4. 超臨界のサンプルについて

今回の検討では、ランダムサンプリング結果の 1000 サンプルのうち 5 サンプル前後が超臨界となっていた。未臨界実験ではこのような条件での測定はできないが、今回は負の中性子束を許した計算により、超臨界の場合についても面積比や即発中性子減衰定数の“もっともらしい値”を求め、これらの値の不確かさ評価・相関の評価に利用した。

これらの超臨界のサンプルの正しい取扱いについては、取り除くと乱数の分布が正規分布から外れる懸念がある他は、深く検討できていない。この問題について、何か適切な対処方法を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、ランダムサンプリング法を用いたバイアス因子法による未臨界実験を用いた炉心解析精度改善の可能性を確認した。今回の検証では、1次元体系にて、ADS を実効増倍率の核データに起因する不確かさを、面積比や即発中性子減衰定数の測定を利用し低減可能であることが示唆された。また、面積比と即発中性子減衰定数の測定を組み合わせることが効果的であることがわかった。

課題としては、超臨界のサンプルの取扱いや、非線形性の影響が挙げられる。また、実用上は実験の不確かさや解析の際の核データ以外の不確かさなど、今回考慮に入れていない他の不確かさの考慮が必要である。

6. 参考文献

- 1) N. G. SJÖSTRAND, *Arkiv för Fysik*, **11**(13), 233–246 (1956).
- 2) Tomohiro Endo et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **53**(10), 1494-1501 (2016).
- 3) H. IWAMOTO et al, JAEA-Research 2014-033, JAEA (2014).
- 4) ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, ORNL (2016).