

原子炉の反応度計に用いる実効遅発中性子割合の汎用かつ厳密な計算手法の開発と検証

背景

ウランやプルトニウムの核分裂にともない発生する核分裂片の一部は、核分裂から数秒～数十秒遅れて中性子(遅発中性子)を放出する。この遅発中性子の放出割合は原子炉の反応度制御にとって極めて重要であり、核分裂核種により大きく異なる。実際の原子炉の反応度計では、核分裂性核種 i と崩壊時間定数 λ に対応した群 j に分類した実効的な遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff},ij}$ が用いられている。今後、燃料の高燃焼度化、MOX 燃料の利用、運転サイクル長の延長などの高度な利用が進められ、これらにともない燃料組成が多様化し、炉内の燃料配置が複雑化するため、 $\beta_{\text{eff},ij}$ の変化が予測される。従来の $\beta_{\text{eff},ij}$ 導出法には中性子のエネルギーや散乱・吸収の処理などに近似を含むため、燃料の高度な利用にあたり反応度計の $\beta_{\text{eff},ij}$ の精度を確認しておく必要がある。これに対し、連続エネルギーモンテカルロ法を用いれば、中性子のエネルギーや散乱・吸収を厳密に処理し、従来法に対する広範な参照解を提供することが可能となるため、当所は独自に $\beta_{\text{eff},ij}$ の連続エネルギーモンテカルロ法による解法の開発に取り組んできた。

目的

連続エネルギーモンテカルロ法に基づき $\beta_{\text{eff},ij}$ を計算する汎用かつ厳密な手法を開発し、本手法の精度と適用性を検証する。

主な成果

1. 連続エネルギーモンテカルロ法に基づく $\beta_{\text{eff},ij}$ の計算手法の開発

遅発中性子の実効割合を計算するため、中性子がある核種に吸収され、その核種が核分裂を引き起こして発生する中性子数(次世代核分裂中性子数)を用いる方法を考案し(図 1)、その妥当性を、原子炉を 1 点で近似する動特性方程式^{*1} をもとに理論的に確認した。この方法を連続エネルギーモンテカルロ法の計算コードに導入し、実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff},ij}$ を直接計算することをはじめて可能とした。また、連続エネルギーモンテカルロ法は、複雑な形状の炉心に対しても計算入力の設定が容易で、汎用な核データライブラリのみを用いるため、従来法では不可欠であった炉心ごとの核データセットを作成する必要がないという特徴をもつ。

2. 本手法による $\beta_{\text{eff},ij}$ の精度と適用性の検証

ウラン燃料を装荷した日本原子力研究開発機構の臨界試験装置(TCA)で行われた反応度投入試験において、試験実施機関が従来法を用いて評価済の $\beta_{\text{eff},ij}$ と本手法で求めた $\beta_{\text{eff},ij}$ を比較し、2%以内の差でよく一致した(図 2)。さらに、日本およびスイスの臨界試験装置(TCA, STACY, CROCUS)で行われた多様な反応度投入試験において、測定された炉出力変化のデータ、炉周期ならびに本手法で求めた $\beta_{\text{eff},ij}$ を用い、原子炉の反応度と炉周期の関係を与える逆時間方程式^{*2} に従って反応度 ρ_{in} を導出した結果、この ρ_{in} は、連続エネルギーモンテカルロ法コードで直接計算した反応度 ρ_{dir} と 5%程度の差でよく整合した(図 3)。これらの結果から、本手法で導出した $\beta_{\text{eff},ij}$ を参照解として提供することにより、反応度計に用いる $\beta_{\text{eff},ij}$ の精度検証を容易にする見通しを得た。

今後の展開

現在、プルトニウムを含む試験炉の反応度試験データを用い、本手法および核データライブラリの精度検証、課題摘出を進めている。さらに、並列計算などの計算高速化により、本手法の商用炉への適用を図る。

主 担 当 者 原子力技術研究所 発電基盤技術領域 主任研究員 名内 泰志

関連報告書 「原子炉反応度計に用いる実効遅発中性子割合の計算法の開発と検証 —連続エネルギーモンテカルロ法に基づく汎用計算手法—」 電力中央研究所報告: L06002 (2007年1月)

*1 小林啓祐「原子炉物理」1996 コロナ社

*2 炉心出力変化を示す炉周期 T と反応度 ρ_{in} の関係を表す式。 $\rho_{\text{in}} = \beta_{\text{eff},ij} / (1 + \lambda_{ij} T)$ 。

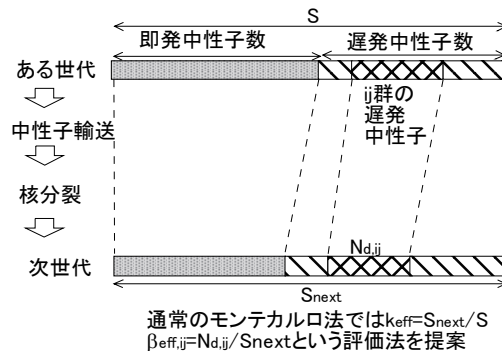


図1 $\beta_{eff,ij}$ 計算手法の概念図。ある世代に発生した ij 群の遅発中性子の生み出す核分裂中性子数に着目。

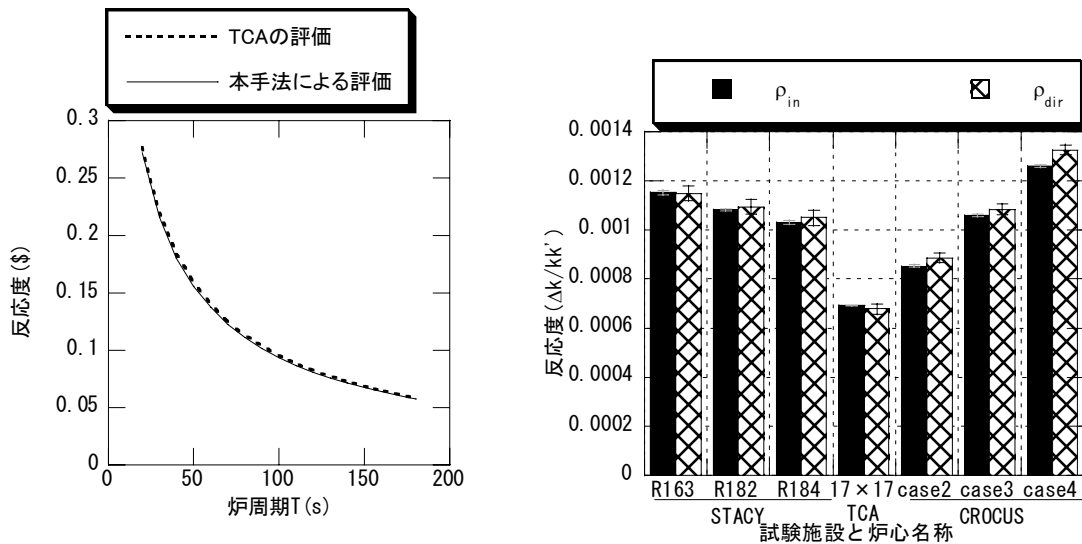


図2 本手法による $\beta_{eff,ij}$ と試験実施機関が評価した $\beta_{eff,ij}$ による炉周期-反応度曲線の比較(^{235}U の場合)。両値は 2%以内の差で一致。

図2 本手法による $\beta_{eff,ij}$ と試験実施機関が評価した $\beta_{eff,ij}$ による炉周期-反応度曲線の比較(^{235}U の場合)。両値は 2%以内の差で一致。