

大きな反応度を厳密に扱える原子炉動特性方程式

—核分裂連鎖反応の基本的概念に基づいた導出と検証計算—

Rigorous Reactor Kinetics Equations Applicable to Large Reactivities

—Derivation based on the concept of a fission chain reaction and Verification Calculations—

東海大学 *田原義壽、 亀山高範

核分裂連鎖反応の基本的な概念である、中性子サイクル、中性子寿命および中性子増倍率を基に微小な反応度から即発臨界以上の大きな反応度まで連続的に取り扱うことのできる厳密な動特性方程式を導出した。検証計算の結果、中性子密度の計算精度は1%以下であった。

キーワード：原子炉動特性、核分裂連鎖反応、中性子サイクル、中性子寿命、増倍率、軽水炉、高速炉

1. はじめに

原子炉の事故で最も厳しい条件は、全制御棒価値に相当する反応度が添加される様な過酷な事象である。このため、通常運転における小さな正の反応度から異常な過渡変化または事故時における即発臨界を大きく超えるような反応度まで連続的に取扱える動特性方程式を導出することおよびその精度を確認することが本研究の目的である。

2. 拡張された動特性方程式

中性子連鎖反応においては、ある時刻 t から中性子寿命だけ経過した後の中性子数は実効増倍率(k_{eff})で決まり、その偏差 $\Delta n = (k_{eff} - 1)n$ は、時刻 t における微分 $dn = (dn/dt)\Delta t$; $\Delta t = \ell$ とは異なる。これら Δn と dn の差は、 k_{eff} が1.0に近い場合は無視しうる量であり、従来の動特性方程式が成り立つ。しかし、大きな添加反応度を取扱う場合には、この差は k_{eff} とともに大きくなり無視できなくなる。体系の中性子数の変化率は dn/dt であることと有限の中性子寿命間での中性子数の増加量を両立させるためには動特性方程式の修正が必要となる。2階微分を用いて k_{eff} による中性子源項に修正項 W を導入することにより、ステップ状反応度添加に対し下記連立方程式を得た。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\rho - \beta_{eff})k_{eff} - W(\omega)}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t), \quad W(\omega) = e^{\ell\omega} - \{1 + (\ell\omega)\} \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_{i,eff}}{\ell} k_{eff} n(t) - \lambda C_i(t) \quad (2)$$

ただし、反応度の定義は $\rho = (k_{eff} - 1)/k_{eff}$ である。また、 ω は式(1)、(2)を常に同時に成立させる Self-consistent ω であり、添加反応度に対して繰り返し計算で求められる。

3. 計算精度の評価

検証計算をLWR ($\beta_{eff}=0.0065$)およびLMFBR ($\beta_{eff}=0.0042$)の両体系に対して遅発中性子6群で行った。遅発中性子定数はKeepinのデータを用い、中性子寿命は典型的な値としてLWRで15(μs)、LMFBRで0.4(μs)とした。事故時の中性子密度 n は初期値 n_0 の 10^{15} 倍までを考えれば十分である。ステップ状に正の反応度を添加後、参照解(動特性繰り返し計算)の n/n_0 がこの値をとる時点で、式(1)、(2)および従来の動特性方程式による計算結果の参照解に対する誤差を図1に示す。従来の動特性方程式は k_{eff} が即発臨界近傍までは精度良く成り立つが、即発臨界を超えると実効増倍率の増加に伴って誤差が増大し、 $k_{eff}=1.07$ では約200%に達する。これに対して式(1)、(2)の結果は即発臨界を超える大きな反応度添加に対しても1%以下の誤差であり、新たに導かれた動特性方程式は炉型によらず、任意の正の反応度添加に対して連続的に適用可能であることが示された。

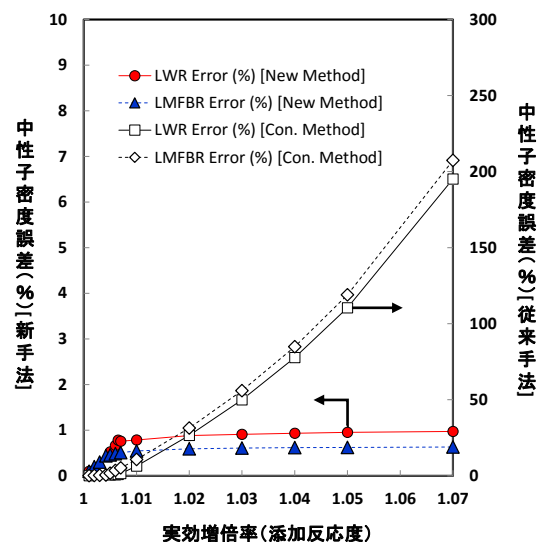


図1 中性子密度計算精度評価（正の反応度添加）

*Yoshihisa Tahara and Takanori Kameyama
Tokai Univ.