

原子炉理論 第9回（原子炉の動特性）
講義ノート

東京工業大学 小原 徹

8. 原子炉の動特性

8.1 即発中性子と遅発中性子

核分裂で発生する中性子には2種類ある。

- 即発中性子：核分裂の際に発生
- 遅発中性子：核分裂の後の核分裂生成物の崩壊の際に発生する中性子。
かなりの遅れをもって発生

遅発中性子先行核：崩壊によって中性子を発生する核分裂生成物。

通常崩壊定数によって6つのグループ（群）に分けて扱う。

λ_i : i 群の遅発中性子先行核の崩壊定数

β_i : 核分裂で発生する中性子のうち i 群の遅発中性子の割合

$$\beta = \sum_i \beta_i \quad \text{遅発中性子割合}$$

8.2 1点炉動特性方程式

原子炉の出力変化を表わす方程式には1点炉動特性方程式がよく用いられる。

2種類の方程式から成り立っている。

①炉内の中性子数の変化を表わす方程式（≡出力の変化）

即発中性子だけ考えると、

中性子（ n 個）＋核分裂性物質（U, Pu など）→即発中性子＋核分裂生成物

次の世代

即発中性子寿命 l

中性子（ n' 個）＋核分裂生成物→即発中性子＋核分裂生成物

$$\frac{n'}{n} = k_{\text{eff}}(1 - \beta)$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n' - n}{n} = k_{\text{eff}}(1 - \beta) - 1$$

単位時間当りの変化

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{k_{\text{eff}}(1 - \beta) - 1}{l}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{\text{eff}}(1 - \beta) - 1}{l} n$$

単位時間当りに遅発中性子先行核の崩壊で発生する遅発中性子

$$\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

よって,

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{\text{eff}}(1 - \beta) - 1}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

$$\rho \equiv \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \quad (\text{反応度})$$

$$\Lambda \equiv \frac{l}{k} \quad (\text{中性子世代時間})$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad \dots (1)$$

②遅発中性子先行核濃度の変化

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k_{\text{eff}}\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i C_i(t)$$

$$\therefore \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (i = 1, \dots, 6) \quad \dots (2)$$

(1), (2)をあわせて

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right) n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (i = 1, \dots, 6) \end{cases}$$

1 点炉動特性方程式

反応度 ρ が変化したとき炉内の中性子数（出力）がどのように変化するかを表している。（制御棒の操作，温度変化による反応度効果等）

8.3 1 点炉動特性方程式の解

一般的には数値解析を行って解く。

- 解析会の例：臨界状態の原子炉に，時刻 $t = 0$ でステップ状の反応度 ρ_0 が投入された場合の解

$$n(t) = \sum_{j=1}^7 n_j \exp(s_j t)$$

n_j は初期状態で決まる定数， s_j は以下の方程式の解

$$\text{逆時間方程式（反応度方程式） } \rho_0 = \frac{sl}{sl + 1} + \frac{1}{sl + 1} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{s\beta_i}{s + \lambda_i} \right) \equiv \rho(s)$$

十分時間がたつと

$$n(t) \cong n_1 \exp(s_1 t)$$

このとき

$$T = \frac{1}{s_1} : \text{安定ペリオド（出力が } e \text{ 倍になる時間）}$$

という。

8.4 即発臨界

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right) n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

もし $\rho = \beta$ であれば，即発中性子だけで臨界となる。（即発臨界という）

ドル単位の反応度

$\rho = \beta$ に相当する反応度を 1 ドルと定義

$\rho > \beta$ の反応度では原子炉の出力は急激に上昇する。(即発超臨界)

即発超臨界の際の出力変化： 遅発中性子の影響は小さいので無視できる。

8.5 実効遅発中性子割合 β_{eff}

遅発中性子のエネルギーは即発中性子のエネルギーに比べ低い。このため核分裂に寄与する確率が異なる。

この効果を補正した遅発中性子割合→実効遅発中性子割合 β_{eff}
(熱中性子炉では一般に $\beta_{\text{eff}} > \beta$)