原子炉理論　第 2 回（原子炉の動特性）
講義ノート

東京工業大学　小原　徹

2.　原子炉の動特性
2.1　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

　$\beta = \sum_i \beta_i$　遅発中性子割合

2.2　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

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　即発中性子寿命　l
　次の世代
　　　中性子（n'個）＋核分裂生成物→即発中性子＋核分裂生成物

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

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

単位時間当りの変化

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

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

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,

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

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

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

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

②遅発中性子先行核濃度の変化

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

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

(1), (2)をあわせて

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{dn(t)}}{\mathrm{dt}} = \left(\dfrac{\rho(\mathrm{t}) - \beta}{\Lambda}\right)\mathrm{n(t)} + \displaystyle\sum_{\mathrm{i}=1}^{6} \lambda_{\mathrm{i}} \mathrm{C}_{\mathrm{i}} \\ \dfrac{\mathrm{dC_i(t)}}{\mathrm{dt}} = \dfrac{\beta}{\Lambda}\mathrm{n(t)} - \lambda_{\mathrm{i}}\mathrm{C_i(t)} \qquad (\mathrm{i} = 1, \cdots, 6) \end{cases}$$

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）

2.3　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。

- 解析解の例：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

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

$\mathrm{n_j}$は初期状態で決まる定数，$\mathrm{s_j}$は以下の方程式の解

逆時間方程式（反応度方程式）$\rho_0 = \dfrac{sl}{sl+1} + \dfrac{1}{sl+1}\displaystyle\sum_{\mathrm{i}=1}^{6}\left(\dfrac{\mathrm{s}\beta_{\mathrm{i}}}{s+\lambda_{\mathrm{i}}}\right) \equiv \rho(\mathrm{s})$

十分時間がたつと

$$\mathrm{n(t)} \cong \mathrm{n_1} \exp(\mathrm{s_1 t})$$

このとき

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

という。

2.4　即発臨界

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

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。

2.5　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$\beta_{eff} > \beta$）