

原子炉の動特性と制御

目次

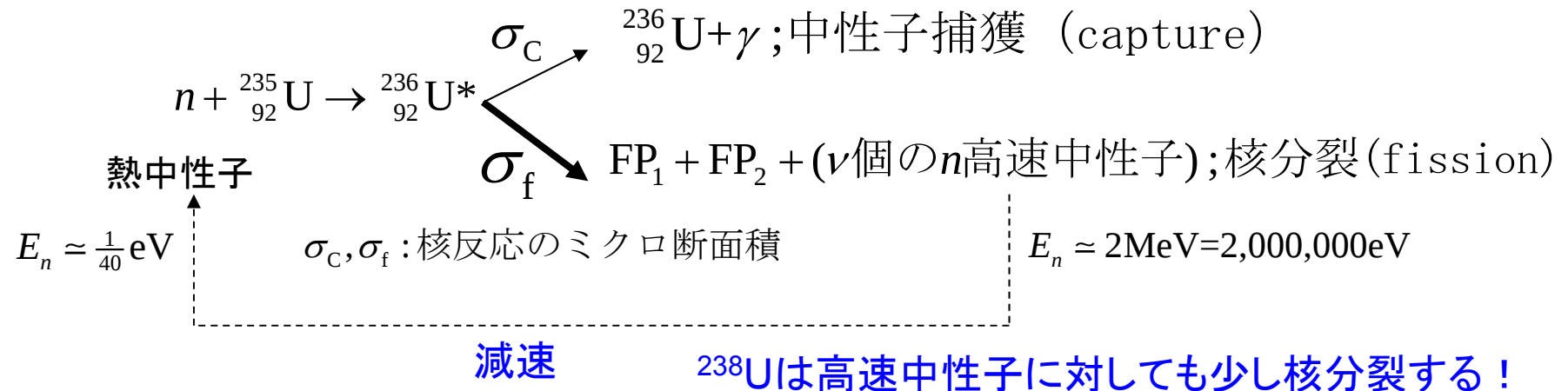
- 1.核分裂連鎖反応の1世代
- 2.中性子増倍率に対する4因子公式
- 3.反応度と原子炉の動特性
- 4.原子炉の時定数と即発臨界
- 5.反応度の変化とその原因
- 6.原子炉の制御

付録・ノート

参考文献

1. 核分裂連鎖反応の1世代

ウラン235に熱中性子が入射・吸収されて核分裂が起こる場合



原子炉内での発生 $\longleftrightarrow$ 原子炉内での吸収 + 原子炉外への漏洩

臨界状態

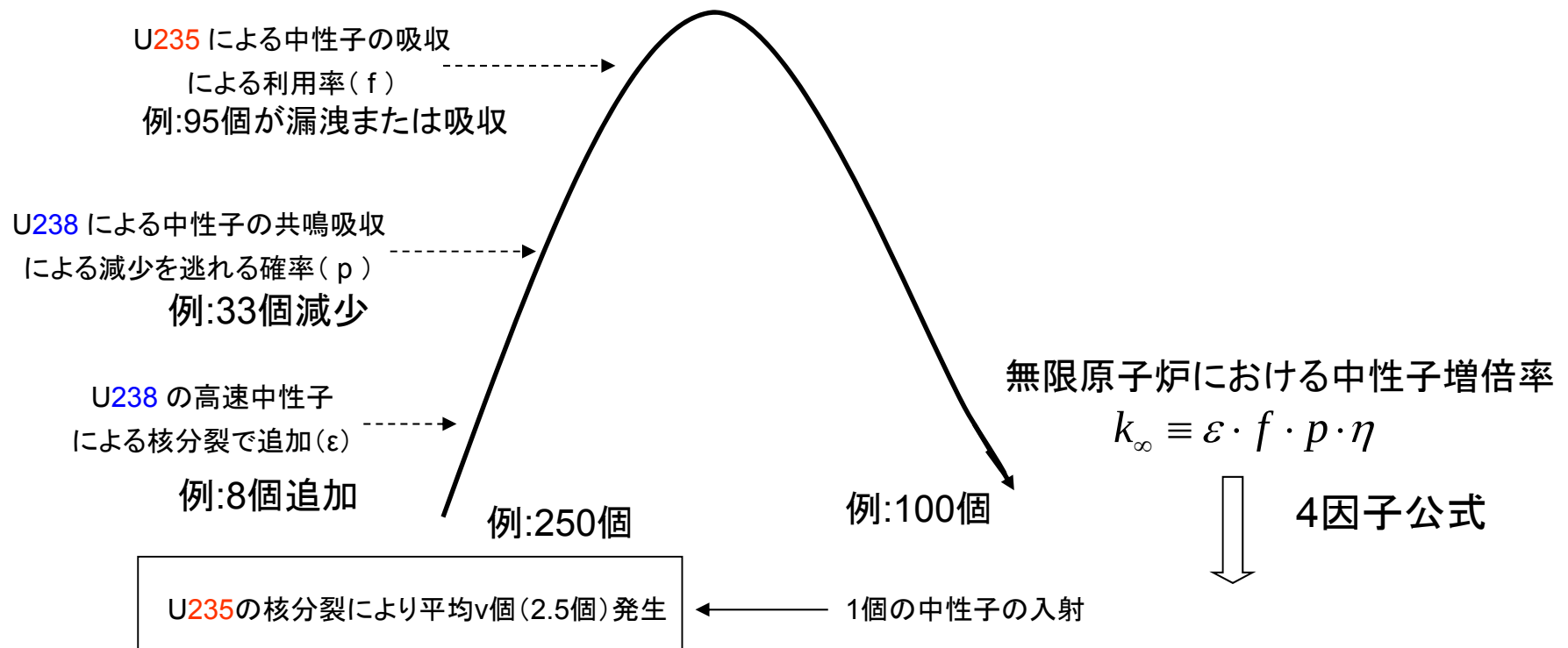
${}^{235}\text{U}$ 核に吸収される中性子1個あたり、核分裂により放出される中性子数 η (eta)

$$\eta \equiv \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} \quad (\nu \approx 2.5 - 3)$$

連鎖反応が成立するためには $\eta \geq 1$

2. 中性子増倍率に対する4因子公式

無限大の大きさをもつ原子炉における中性子の1世代



p_f : 高速中性子の漏れない確率³

p_t : 熱中性子の漏れない確率

3. 反応度と原子炉の動特性

反応度 (reactivity) $\rho \equiv \frac{k-1}{k} \dots (1)$ (通常運転時は $\rho \approx 0.015-0.001$)

(原子炉内の中性子の空間的分布は一様であると仮定する。) k : 中性子の実効増倍率
核分裂には、核分裂直後に発生する**即発中性子 (prompt neutron)**と、生成核の崩壊時(先行核)に発生する**遅発中性子 (delayed neutron)**の両方が関わる。

時刻 t における中性子数密度 (= 単位体積あたりの個数) を $n(t)$ とする。

即発中性子 による中性子数密度の時間変化を決める式

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{prompt}} = [k(1-\beta) - 1] \cdot \frac{n}{\ell} \dots (2) \quad \beta: \text{遅発中性子数の相対的割合} \quad \ell \approx \begin{cases} 10^{-4} \text{ sec (軽水炉)} \\ 10^{-7} \text{ sec (高速増殖炉)} \end{cases}$$

ℓ : 即発中性子の平均実効寿命

遅発中性子 による中性子数密度の時間変化を決める式

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{delayed}} \cong \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \dots (3) \quad \lambda_i: i \text{ 番目の先行核群の崩壊定数}$$

C_i : i 番目の先行核群の数密度

式(2)と(3)より

$$\left(\frac{dn}{dt} \right) \cong [k(1-\beta) - 1] \cdot \frac{n}{\ell} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \dots (4) \quad \beta_i: i \text{ 番目の先行核群における遅発中性子数の相対的な割合}$$

式(4)、(5)を原子炉の動特性方程式という。

7元連立微分方程式。

先行核群の数密度の時間変化率を決める式:

$$\frac{dC_i}{dt} = k\beta_i \frac{n}{\ell} - \lambda_i C_i \dots (5)$$

4. 原子炉の時定数と、遅発臨界、即発臨界

簡単のため、遅発中性子の存在を無視すると

$$\left(\frac{dn}{dt}\right) \cong [k-1] \cdot \frac{n}{\ell} \cdots (6)$$

$$\rightarrow n(t) \cong n_0 \exp\left(\frac{t}{T}\right), \quad T \equiv \frac{\ell}{k-1}; \text{原子炉時定数 (period)}$$

反応度の単位: 1ドル $\equiv \frac{\rho}{\beta}$, ($\frac{1}{100}$ ドル = 1 セント) $\leftarrow$ (2)式において微分係数ゼロにおく

$\rho < \beta$ (1ドル以下の反応度) の場合: 動特性は主として遅発中性子により決まる

通常運転では $\ell = 10^{-5}\text{s} \sim 10^{-3}\text{s}$

遅発臨界

$$\text{実例: 軽水炉の平均中性子寿命 } \bar{\ell} \approx 9.17\text{sec} \times 0.0065 + 10^{-4}\text{sec} \times 0.9935 = 0.0597\text{sec}$$

$$\text{印加反応度} = k-1$$

$$= 0.0001$$

$$\text{原子炉時定数 } T = 597\text{sec} = \text{約}10\text{min}$$

$\rho = \beta$ (1ドルの反応度) の場合: 即発臨界 (prompt critical)

$\rho > \beta$ (1ドル以上の反応度) の場合: 即発中性子のみでも臨界状態になり、

動特性はかなり速くなる

即発臨界

$\rho = \beta$, $\rho > \beta$ の場合、動特性は激しくなり、原子炉の制御は困難となる。

しかし、このように大きな反応度が急激に加わるのは事故の場合に限られる。

5. 反応度の変化とその原因

(1)核分裂生成核の有害効果: $\sigma(n, \gamma) = 3.5 \times 10^6 \text{ barn} (^{135}_{54}\text{Xe})$

熱中性子吸収断面積の大きい ^{135}Xe , ^{149}Sm の生成による熱中性子利用率の低下

→ この理由のためもあり、核燃料の燃焼度が3分の1程度で燃料を交換する。

(2)原子炉の温度Tの変化による反応度の変化:

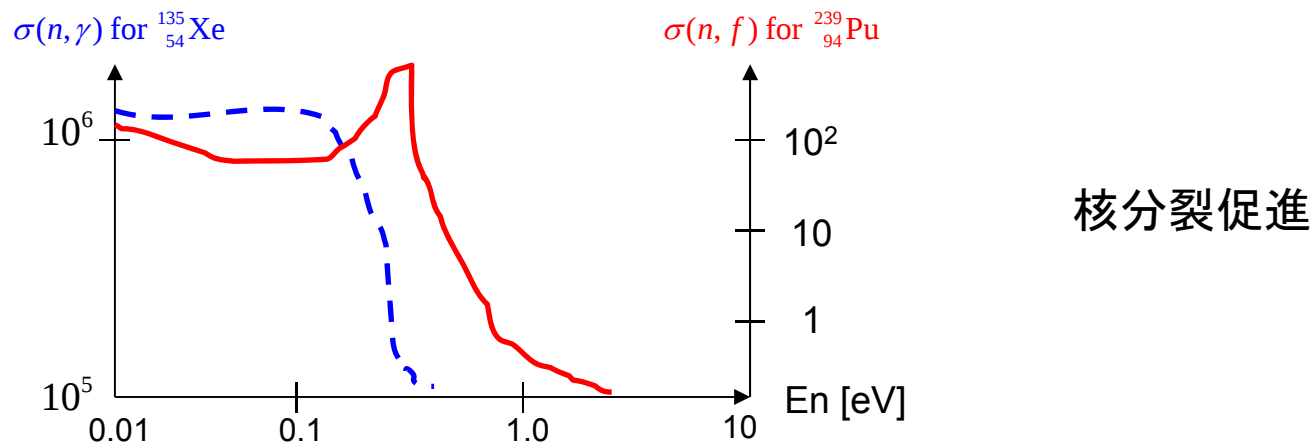
反応度 ρ は原子炉の密度 d 、熱中性子吸収のミクロ断面積 σ と原子炉の大きさ B の関数である。

反応度の温度係数 α

$$\alpha_T = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{\sigma, B} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{\sigma, d} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{d, B}$$

通常の場合、 $\alpha_T < 0$ 、 $|\alpha_T| = 10^{-5} \sim 10^{-4} / \text{degree}$ である: **原子炉の自己制御性**

(3) ^{239}Pu による中性子の共鳴吸収と ^{135}Xe の有害効果減少の相乗作用:



6. 原子炉の制御方法

1. 燃料の増減による制御

2. 中性子減速材による制御:

減速材を軽水と重水の混合物にして、その混合比を変化させる。

3. 中性子反射体による制御

4. 中性子吸収材による制御: 熱中性子吸収断面積の大きい ^{10}B , ^{113}Cd などから作られる

材料を制御棒という形で、炉心に出し入れて制御する。制御棒の反応度に及ぼす効果を評価、計算するのは容易ではない。その理由は、1本の制御棒を炉内に挿入する場合でも、炉内の中性子の分布は時間的にも空間的にも一様ではないからである。多数の制御棒を同時に使用すると、制御棒がお互いに影響しあって1本あたりの反応度への効果は、1本だけの場合よりも低下する。

微調整棒(または制御棒、regulating rod): 平常運転時における反応度の詳細な

動揺を補償する。一般には自動制御により動かされる。

粗調整棒(shim rod): 長時間にわたる反応度の大きな補償を行うもので、起動および停止

や出力レベルを変える場合などに使用される。

安全棒(safety rod): 事故や停電などの場合に、炉内に急速に落下させて瞬時的に原子炉を停止させる。

参考文献

- [1] 大山 彰、「現代原子力工学(2版)」、オーム社、1986年。
- [2] 山本賢三、石森富太郎、「原子力工学概論(上)」、培風館、1986年。
- [3] 成田正邦,澤村晃子、「原子炉物理の基礎」、現代工学社, 1998年。
- [4] J.R.ラマーシュ、A.J.バラッタ,「原子核工学入門(上)」、
ピアソン・エデュケーション社, 2005年。
- [5] <http://www.atomin.go.jp/atomin/popular/atomica/index.html>