

原子炉理論 第1回 (原子核反応と核反応断面積)

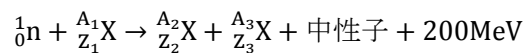
講義ノート

東京工業大学 小原 徹

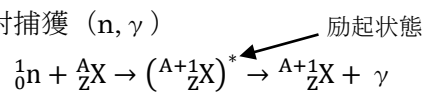
1. 原子核反応と核断面積

1.1 中性子と原子核の反応

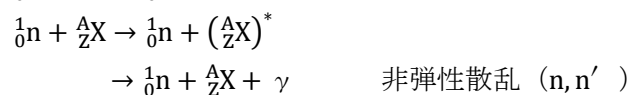
● 核分裂 (n, fission)



● 放射捕獲 (n, γ)



● 散乱 (n,n) または (n,n')



1.2 ミクロ断面積

中性子と原子核の反応が起こる確率は、核断面積と呼ばれる量で表わされる。

(1)定義

同じ速さで一定方向に流れる中性子ビームと非常に薄い (原子 1 個分くらいの厚さ) 物質の原子核との反応を考える。

単位面積あたりの反応率 $R[\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ は、

$$R = \sigma \cdot I \cdot N_A$$

と表わされる。ここで、

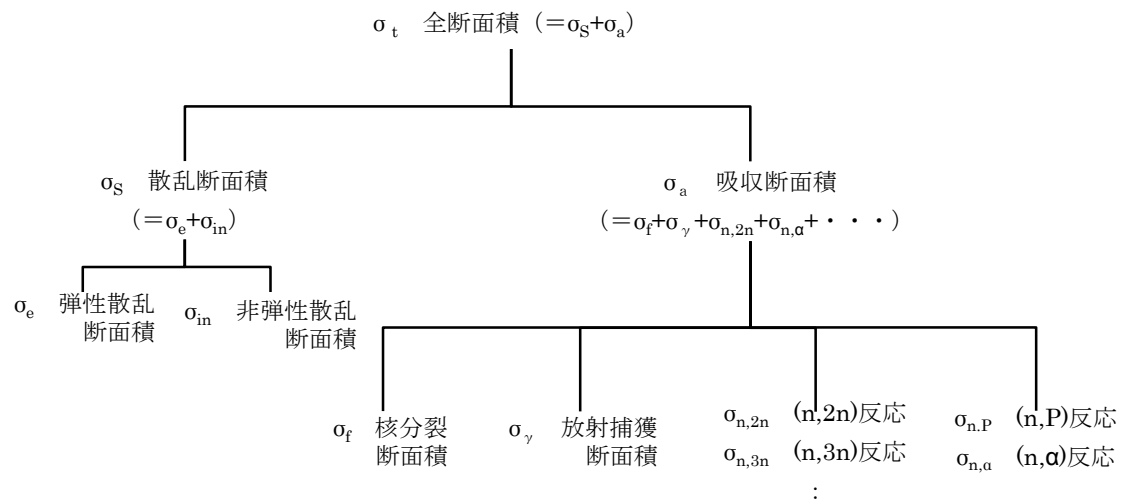
$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\left(\frac{R}{N_A}\right)}{I} [\text{cm}^2] \\ &= \frac{(\text{単位時間} \cdot \text{原子核 1 個あたりの反応率})}{(\text{単位時間} \cdot \text{単位面積あたりの入射中性子数})} \end{aligned}$$

をミクロ断面積と定義する。

一般には、マイクロ断面積の単位に b (バーン) が用いられる。

$$1b = 10^{-24} \text{cm}^2$$

(2) ミクロ断面積の種類



マイクロ断面積は、核種、反応によって異なる。また、入射中性子の速さ (エネルギー) によって変化する。

1.3 マクロ断面積

(1) 定義

厚い物質に垂直に入射した単一エネルギー中性子の減衰を考える。

dx 内での単位面積当たりの全反応率 dR は

$$dR = \sigma_t I N dx$$

dR は x と $x+dx$ の間の減衰に等しい (どんな型の相互作用も入射中性子をビームからそらすと仮定して)

$$-dI(x) = \sigma_t I N dx$$

$$\therefore \frac{dI}{dx} = -N\sigma_t I(x)$$

入射ビームの強さが $x=0$ で I_0 であるならば、

$$I(x) = I_0 \exp(-\sigma_t N x)$$

となる。ここで

$$\Sigma_t \equiv \sigma_t N [\text{cm}^{-1}]$$

を全マクロ断面積と定義する。

(2) 平均自由行程と衝突率

$$[\text{相互作用せずに中性子が距離 } x \text{ 進む確率}] = \frac{I_0 \exp(-\Sigma_t x)}{I_0} = \exp(-\Sigma_t x)$$

これから、

$$[dx \text{ の間で中性子が初めて原子核と衝突する確率}] = \exp(-\Sigma_t x) \cdot \Sigma_t dx \equiv p(x) dx$$

よって物質中の原子核と中性子が初めて衝突するまでの中性子の平均飛行距離（平均自由行程） $\bar{x}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \bar{x} &\equiv \int_0^\infty x p(x) dx = \Sigma_t \int_0^\infty x \exp(-\Sigma_t x) dx \\ &= \frac{1}{\Sigma_t} \quad (\text{平均自由行程}) \end{aligned}$$

Σ_t は単位飛行距離あたりの中性子の衝突する確率なので、中性子の速さを v とすると、衝突の起き起こる頻度（衝突率）は

$$v \Sigma_t [\text{S}^{-1}]$$

で表わされる。

(3) 反応毎のマクロ断面積

$$\begin{aligned} \text{例} \quad \text{マクロ核分裂断面積} \quad \Sigma_f &= \sigma_f N \\ \text{マクロ吸収断面積} \quad \Sigma_a &= \sigma_a N \end{aligned}$$

(4) 混合物のマクロ断面積

$$\begin{aligned} \text{例} \quad \text{原子核 } X, Y, Z \text{ からなる物質の全マクロ断面積} \\ \Sigma_t = N_X \sigma_t^X + N_Y \sigma_t^Y + N_Z \sigma_t^Z \end{aligned}$$