

Nuclear Reactor Theory (原子炉理論) 第4回 (中性子スペクトル(2)共鳴吸収)

講義ノート

東京工業大学 小原 徹

3.2 共鳴吸収

(1)共鳴を逃れる確率

共鳴を逃れる確率 p

核分裂で発生した高速中性子が減速過程で親物質等に共鳴吸収されことなく熱中性子になる確率

- 水素の無限媒質中に無限に重い吸収体原子核が一様に存在しているとする。また水素による吸収は無視できるとする。この媒質中にエネルギー E_s の中性子を放出する中性子源が一様に存在するとき、水素の弾性散乱によって中性子がエネルギー E まで減速するまでの間に中性子が吸収体に吸収されない確率 $p(E)$ は次のようになる。

$$p(E) = \exp \left[- \int_E^{E_s} \frac{dE' \Sigma_a(E')}{E' \Sigma_t(E')} \right] \quad \dots (1)$$

ここで、

$\Sigma_a(E')$: エネルギー E' でのマクロ吸収断面積

$\Sigma_t(E')$: エネルギー E' でのマクロ全断面積

(2)ブライト・ウィグナー公式とドップラー効果

(a)共鳴捕獲に対する単一準位ブライト・ウィグナー公式

(単一共鳴の捕獲断面積を表す関数として広く用いられている)

$$\sigma_\gamma(E_c) = \sigma_0 \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left[4 \left(\frac{E_c - E_0}{\Gamma} \right)^2 + 1 \right]^{-1} \quad \dots (2)$$

ここで、

E_0 : 共鳴エネルギー

Γ : 共鳴の全幅 (エネルギーレベルの幅と共鳴の半値幅を表す)

Γ_γ : 放射幅 (複合核が γ 線を放出して崩壊する確率に比例)

σ_0 : 共鳴エネルギー E_0 における全断面積 $\sigma_t(E)$ の値

E_c : 重心系の運動エネルギー ($E_c = \frac{M}{m+M} E$)

低いエネルギー($E \ll E_0$)では $\frac{1}{E^2}$ に比例 ($= \frac{1}{v}$ に比例)

高いエネルギー($E_0 \ll E$)では $\frac{1}{E^2}$ に比例

(b)温度上昇時の共鳴のドップラー広がり

共鳴吸収をする原子核は熱運動状態にあるので、中性子と原子核との相対速度は中性子の速度より大きくなる場合や小さくなる場合がある。

→見かけ上温度が高くなると、共鳴の幅が広がる。

ドップラー広がりを考慮したときのブライト・ウィグナーの式
(ベータ・プラツェック近似, $E \sim E_0$ のとき)

$$\sigma_Y(E) = \sigma_0 \frac{\Gamma_Y}{\Gamma} \psi(\zeta, \chi) \quad \dots (3)$$

$$\zeta = \Gamma \left(\frac{A}{4E_0 kT} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\chi = 2 \left(\frac{E - E_0}{\Gamma} \right) \quad T: \text{絶対温度}, k: \text{ボルツマン定数}$$

(3)無限希釈のときの共鳴を逃れる確率

水素の吸収と吸収体による散乱を無視した場合、吸収体の濃度が無限に希釈された場合の共鳴を逃れる確率 p

$$p^\infty = \exp \left[- \frac{\pi N_A \sigma_0 \Gamma_Y}{2 N_H \sigma_s^H E_0} \right] \quad \dots (4)$$

ここで,

N_A : 吸収体の数密度

N_H : 水素の数密度

σ_s^H : 水素のミクロ散乱断面積(一定と仮定)

p^∞ の式からわかること

- ・無限希釈の場合は温度が変化しても共鳴を逃れる確率は変化しない。
- ・減速材(この場合水素)の密度が小さくなると共鳴を逃れる確率が小さくなる。

例: 軽水炉の減速材ボイド

→減速材密度小

→共鳴を逃れる確率小

→負の反応度をもたらす作用

- ・ E_0 が小さいと共鳴を逃れる確率は小さくなる。

→低いエネルギーにある共鳴が反応度に大きな影響を与える

例： ^{238}U の6.67eVの共鳴