

原子炉理論 第5回

(中性子スペクトル(3) 非均質効果、中性子の減速と拡散, 熱中性子理論)

講義ノート

東京工業大学 小原 徹

3.3 有限希釈での共鳴吸収及び炉心非均質効果

(1)有限希釈での共鳴吸収

有限希釈の場合の共鳴を逃れる確率

共鳴吸収付近のエネルギー領域で中性子束がくぼむ

⇒ エネルギー自己しゃへい効果

ドップラー効果により共鳴を逃れる確率が変化する

理由：吸収体の温度が上り、ドップラー効果によって共鳴吸収のピークの高さが小さくなり幅が広がる。

⇒ 中性子束のくぼみが小さくなる（エネルギー自己しゃへい効果が小さくなる）

⇒ 共鳴によって吸収される中性子がふえる

⇒ 共鳴を逃れる確率が小さくなる

→ 燃料温度上昇による負の反応度効果

(2)炉心非均質効果

非均質格子体系での共鳴を逃れる確率

燃料を非均質格子（燃料と減速材を混合せずに分けて規則的に配置）にすると共鳴を逃れる確率を非常に大きくすることができる。

理由：減速途中で共鳴エネルギーまで減速された中性子が主に燃料要素の外側領域で吸収されるため

⇒ 空間自己しゃへい効果

3.4 中性子の減速と拡散の関係

中性子は散乱をくり返してエネルギーが減少する際、同時に空間的にも中性子源から拡がっていく。

(1) フェルミ年齢

以下の仮定をする。

- 中性子の1回の散乱によってレサジーが ξ だけ増加する
- 散乱回数を連続関数と考えて散乱によるレサジーの値が連続的

① 中性子の空間的な流れと減速密度の関係

$$\text{div} \mathbf{J}(\mathbf{r}, u) + \frac{\partial q(\mathbf{r}, u)}{\partial u} = 0 \quad \dots (1)$$

ここで,

$\mathbf{J}(\mathbf{r}, u)$: 中性子流

$q(\mathbf{r}, u)$: 中性子の減速密度

(位置 $\mathbf{r}$ で, 単位時間当たり単位体積当りにレサジー u を通過して減速していく中性子の数)

$$\text{定義} \quad q(\mathbf{r}, u) \equiv \int_0^u du' \int_u^\infty du'' \Sigma_s(u' \rightarrow u'') \phi(\mathbf{r}, u')$$

② 中性子の流れと中性子束の関係

拡散近似が成り立つと仮定する

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, u) = -D(u) \text{grad} \phi(\mathbf{r}, u) \quad \dots (2)$$

ここで,

$D(u)$: レサジー u での拡散定数

③ 減速密度と中性子束の関係

$$q(\mathbf{r}, u) = \xi \Sigma_s(u) \phi(\mathbf{r}, u) \quad \dots (3)$$

(1)~(3)式から次の関係が得られる。

$$\frac{D(u)}{\xi \Sigma_s(u)} \nabla^2 q(\mathbf{r}, u) = \frac{\partial q(\mathbf{r}, u)}{\partial u} \quad \dots (4)$$

(注 : はじめにおいた仮定から, この関係が正確に成り立つのは炭素のような質量数の大きい減速材のみ)

ここで,

$$\tau(u) = \int_0^u \frac{D(u')}{\xi \Sigma_s(u')} du' \quad \dots (5)$$

(フェルミ年齢)

を定義して、(4)式の変数変換をすると

$$\nabla^2 q(\mathbf{r}, \tau) = \frac{\partial q(\mathbf{r}, t)}{\partial \tau} \quad \dots (6)$$

(フェルミの年齢方程式)

が得られる。

フェルミ年齢の物理的意味

はじめレサジー0だった中性子が拡散しながらレサジーuまで減速したとき、その時の位置とはじめの位置の距離の2乗平均は $6\tau(u)$ になる。

例 τ_{th} : レサジー0の高速中性子が熱中性子の上限のレサジー u_{th} まで減速するときのフェルミ年齢 (単に τ と書くことも多い)
(高速中性子が熱中性子まで減速するときの拡散の目安になる)

(2)中性子移動面積

中性子移動面積

$$M^2 = L^2 + \tau$$

ここで、

$$L = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} \quad (\text{中性子拡散距離})$$

M^2 (移動面積) = 「中性子が高速核分裂中性子として生じた点から熱中性子になって吸収される点までの平均2乗距離の1/6」

3.5 熱中性子スペクトル

(1) 平衡熱中性子スペクトル

吸収，中性子源，もれなどのない場合，中性子の平衡エネルギー分布は，絶対温度 T で示されるマックスウェル分布になる。

(= 中性子は減速材の原子核と熱平衡状態になる。)

$$\phi(E) = \frac{2\pi n_0}{(\pi kT)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{2}{m}\right)^{\frac{1}{2}} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

n_0 : 媒質中での中性子の密度

k : ボルツマン定数

m : 中性子の質量

最確中性子エネルギー $E_T = kT$

対応する中性子の速さ $v_T = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$

(2) 非平衡熱中性子スペクトル

吸収，もれ，減速中性子源，熱中性子共鳴などがある場合は，平衡スペクトルからのずれが生じる。