

原子炉理論 第 14 回 (燃焼解析(1)核分裂生成物の毒作用)
講義ノート

東京工業大学 小原 徹

10. 燃焼解析

10.1 核分裂生成物の数密度変化

(1)核反応による燃料組成の変化

- 核分裂生成物 (FP) の生成

FP の中には熱中性子吸収断面積の大きいものがある

^{135}Xe , ^{149}Sm , その他の FP 中性子吸収作用 (毒作用)

- 核分裂性物質の減少

- 超ウラン元素 (TRU) の生成

⇒反応度の変化, 出力分布の変化, 取出し燃料の組成

(2) ^{135}Xe の濃度の変化

キセノン濃度大→負の反応度 (反応度調整の必要性)

^{135}I と ^{135}Xe の数密度変化の方程式

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \gamma_I \Sigma_f \phi(\mathbf{r}, t) - \lambda_I I(\mathbf{r}, t) \\ \frac{\partial X}{\partial t} = \gamma_X \Sigma_f \phi(\mathbf{r}, t) + \lambda_I I(\mathbf{r}, t) \\ \quad - \lambda_X X(\mathbf{r}, t) - \sigma_a^X \phi(\mathbf{r}, t) X(\mathbf{r}, t) \end{cases} \quad \dots (1)$$

但し,

$I(\mathbf{r}, t)$: I-135 の核種数密度 $X(\mathbf{r}, t)$: Xe-135 の核種数密度

γ_I : I-135 の核分裂収率 γ_X : Xe-135 の核分裂収率

λ_I : I-135 の崩壊定数 λ_X : Xe-135 の崩壊定数

σ_a^X : Xe-135 のミクロ吸収断面積

ϕ , Σ_f は 1 群平均値

$\phi(\mathbf{r}, t)$ がわかっているならば (1) 式を解くことが出来る

例 1, クリーン炉心 (FP の蓄積のない炉心) からの起動

停止状態 (中性子束 0, FP 密度 0) の原子炉が時刻 $t=0$ でステップ状に ϕ_0 になった場合

起動後長時間が経過した場合の Xe と I の平衡密度

(1)で $\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial I}{\partial t} = 0$ とおくと,

$$I_{\infty} = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I}$$

$$X_{\infty} = \frac{(\gamma_I + \gamma_X) \Sigma_f \phi_0}{\gamma_X + \sigma_a^X \phi_0}$$

例 2, 原子炉の停止

長時間一定出力レベルで運転した原子炉を突然停止 (ステップ状に $\phi=0$) した場合

Xe-135 の数密度 (=負の反応度) は, 停止前の中性子束に依存する。

停止後の Xe-135 の蓄積は,

$$\phi_0 > \frac{\gamma_X \lambda_X}{\gamma_I \sigma_a^X}$$

でなければ生じない。(U-235 燃料の原子炉では $\phi_0 > 4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

例 3, 原子炉の出力変化に伴うキセノン密度変化

原子炉の出力を $\phi_0 \rightarrow \phi_1$ (またはその逆) と変化させた場合

(3)¹⁴⁹Sm の数密度変化

¹⁴⁹Nd を経由せず核分裂で直接 ¹⁴⁹Pm が生成されるとすると,

$$\text{プロメチウム} : \frac{\partial P}{\partial t} = \gamma_P \Sigma_f \phi(\mathbf{r}, t) - \lambda_P P(\mathbf{r}, t)$$

$$\text{サマリウム} : \frac{\partial S}{\partial t} = \gamma_P P(\mathbf{r}, t) - \sigma_a^S \phi(\mathbf{r}, t) S(\mathbf{r}, t)$$

平衡数密度

$$P_{\infty} = \frac{\gamma_P \Sigma_f \phi_0(\mathbf{r})}{\lambda_P}$$

$$S_{\infty} = \frac{\gamma_P \Sigma_f}{\sigma_a^S}$$

平衡数密度の状態では原子炉を停止した場合

$$S(t) = S_{\infty} + P_{\infty}(1 - \exp(-\lambda_P t)) \quad \overrightarrow{t \rightarrow \infty} \quad S_{\infty} + P_{\infty}$$

^{149}Sm は ^{135}Xe に比べ吸収断面積や収量が小さいので ^{135}Xe に比べ反応度効果は小さい。

(4)他の FP の数密度

^{135}Xe , ^{149}Sm 以外は吸収断面積はあまり大きくない。

一般的には、反応度効果の大きいものを個々に計算し、残りをまとめて仮想的 FP として計算する。