

第一章

1. 某压水堆采用 UO_2 做燃料，其富集度为 2.43% (重量)，密度为 $1 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ ，试计算：当中子能量为 0.0253eV 时， UO_2 的宏观吸收截面和宏观裂变截面 (富集度表示 ^{235}U 在铀中所占的重量百分比)。

解：在中子能量为 0.0253eV 时，

$$\sigma_a(U5) = 680.9\text{b} \quad \sigma_f(U5) = 583.5\text{b} \quad \sigma_a(U8) = 2.7\text{b} \quad \sigma_a(O) = 0.00027\text{b}$$

以 c_5 表示富集铀内 U-235 与 U-238 核子数之比， ε 表示富集度，则有：

$$\frac{235c_5}{235c_5 + 238(1-c_5)} = \varepsilon$$

$$c_5 = \left\{ 1 + 0.9874 \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right\}^{-1} = 0.0246$$

$$M(UO_2) = 235c_5 + 238(1-c_5) + 16 \times 2 = 269.9$$

$$N(UO_2) = \frac{1000\rho(UO_2) \times N_A}{M(UO_2)} = 2.23 \times 10^{28} \text{ (m}^{-3}\text{)}$$

$$\text{所以, } N(U5) = c_5 N(UO_2) = 5.49 \times 10^{26} \text{ (m}^{-3}\text{)}$$

$$N(U8) = (1-c_5)N(UO_2) = 2.18 \times 10^{28} \text{ (m}^{-3}\text{)}$$

$$N(O) = 2N(UO_2) = 4.46 \times 10^{28} \text{ (m}^{-3}\text{)}$$

$$\begin{aligned} \Sigma_a(UO_2) &= N(U5)\sigma_a(U5) + N(U8)\sigma_a(U8) + N(O)\sigma_a(O) \\ &= 0.0549 \times 680.9 + 2.18 \times 2.7 + 4.46 \times 0.00027 = 43.2 \text{ (m}^{-3}\text{)} \end{aligned}$$

$$\Sigma_f(UO_2) = N(U5)\sigma_f(U5) = 0.0549 \times 583.5 = 32.0 \text{ (m}^{-3}\text{)}$$

2. 某反应堆堆芯由 U-235, H_2O 和 Al 组成，各元素所占体积比例分别为 0.002, 0.6 和 0.398，计算堆芯的总吸收截面 ($E=0.0253\text{eV}$)。

解：当中子能量为 0.0253eV 时，

$$\sigma_a = 680.9\text{b} \quad \Sigma_a(\text{Al}) = 1.5\text{m}^{-1}, \quad \Sigma_a(\text{H}_2\text{O}) = 2.2\text{m}^{-1}, \quad M(\text{U}) = 238.03$$

$$\rho(\text{U}) = 19.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^{-3}$$

易知, $\Sigma_a = \Sigma_{a,U} + \Sigma_{a,H_2O} + \Sigma_{a,Al}$

$$= \sigma_{a,U} \cdot N_U + \sigma_{a,H_2O} \cdot N_{H_2O} + \sigma_{a,Al} \cdot N_{Al}$$

$$= N_A \left[\sigma_{a,U} \times \frac{0.02 \times 10^6 \cdot \rho_U}{235} + \sigma_{a,H_2O} \times \frac{0.600 \times 10^6 \rho_{H_2O}}{18.016} + \sigma_{a,Al} \times \frac{0.398 \times 10^6 \cdot \rho_{Al}}{26.98} \right]$$

$$= 8.5\text{m}^{-1}$$

3. 求热中子 ($E = 0.0253\text{eV}$) 在 H_2O, D_2O 和 Cd 中运动时，被吸收前平均遭受散射碰撞次数。

解：热中子在介质中运动，

$$\text{吸收前的碰撞次数} = \frac{\text{从产生点到吸收点穿过的平均路程}}{\text{每两次散射穿过的平均路程}}$$

$$n = \frac{\lambda_a}{\lambda_s} = \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a} = \frac{N\sigma_s}{N\sigma_a} = \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$$

$$n_{H_2O} = \frac{103}{0.66} = 156$$

$$n_{D_2O} = \frac{13.6}{0.001} = 13600$$

$$n_{cd} = \frac{7}{2450} = 2.86 \times 10^{-3}$$

4. 试比较：将 2.0 MeV 的中子束强度减弱到 1/10 分别所需的 Al, Na 和 Pb 的厚度。

解：窄束衰减规律：

$$I = I_0 e^{-\Sigma_t d}$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{10}$$

$$d = \frac{\ln 10}{\Sigma_t}$$

在 10 MeV 以内，铝、钠、铅的吸收截面满足 1/V 定律

$$\Sigma_a = \Sigma_a (0.0253) \sqrt{\frac{0.0253}{E}}$$

与吸收截面不同的是，在 10 MeV 以内，散射截面基本不变

$$\Sigma_s \approx \Sigma_s (0.0253)$$

$$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$$

分别求的：

$$d_{Al} = 0.274 m$$

$$d_{Na} = 0.226 m$$

$$d_{Pb} = 0.0634 m$$

如果不考虑散射导致的束流损失，只考虑吸收损失：

$$d = \frac{\ln 10}{\Sigma_a}$$

$$d_{Al} = 1.36 \times 10^4 m$$

$$d_{Na} = 1.575 \times 10^4 m$$

$$d_{Pb} = 3.412 \times 10^4 m$$

这样的结果显然是低估了散射使得束流偏移导致的束流损失，同时也说明窄束束衰减中散射效应对束流损失的较大贡献。

5. 一个中子运动两个平均自由程以及 1/2 个平均自由程而不与介质发生作用的概率分别是多？少？

解：

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-\Sigma x}$$

$e^{-\Sigma x}$ 就是一个中子穿过 x 长的路程仍未发生核反应的概率
当 x 为两个平均自由程时

$$P_1 = e^{-\Sigma \cdot 2\lambda} = e^{-2} = 0.1353$$

当 x 为 1/2 个平均自由程时

$$P_2 = e^{-\Sigma \cdot \frac{1}{2}\lambda} = e^{-\frac{1}{2}} = 0.6065$$

6. 堆芯的宏观裂变截面为 $5m^{-1}$ ，功率密度为 $20 \times 10^6 W/m^{-3}$ ，求堆芯的平均热中子通量密度。

解： $\because PV = \phi V \Sigma \times 3.2 \times 10^{-11}$
 $\therefore \phi = \frac{P}{\Sigma \times 3.2 \times 10^{-11}} = \frac{2 \times 10^7}{5 \times 3.2 \times 10^{-11}} = 1.25 \times 10^{17} m^{-2}s^{-1}$

7. 有一座小型核电站，电功率为 $150 MW$ ，设电站的效率为 30% ，试估算该电站反应堆额定功率运行 $1h$ 所消耗的 ^{235}U 量。

解： 由题意可知： $P_{th} = \frac{P_0}{\eta} = \frac{150 \times 10^6}{30\%} = 5 \times 10^8 MW$

每个 ^{235}U 裂变所释放的能量为：

$$200MeV = 200 \times 10^6 \times 1.60 \times 10^{-19} = 3.2 \times 10^{-11} J$$

则 \Rightarrow 运行 $1h$ ，发生裂变的 ^{235}U 数为：

$$N = \frac{5 \times 10^8 \times 3600}{3.2 \times 10^{-11}} = 5.625 \times 10^{22}$$

对于 ^{235}U ，俘获裂变比为： $\alpha = 0.169$

$$m = \frac{N}{N_A} (1 + \alpha) \cdot M_{U-235} = 25.7g$$

8. 有一座热中子反应堆，无限增值因数为 1.10 ，快中子增值系数，逃脱共振俘获概率和热中子利用系数三者的乘积为 0.65 ，试确定该堆所用核燃料铀的富集度。

解： 由于 $K_{\infty} = \varepsilon pf \eta \Rightarrow \eta = \frac{K_{\infty}}{\varepsilon pf} = 1.6923$

又 $\because \eta = 2.416 \times \frac{\sum_{f,5}}{\sum_{a,5} + \sum_{a,8}} = 2.416 \times \frac{n_5 \cdot \sigma_{f,5}}{n_5 \cdot \sigma_{a,5} + n_8 \cdot \sigma_{a,8}}$

$$\frac{n_5}{n_8} = \frac{\eta \cdot \sigma_{a,8}}{2.416 \times 583.5 - 1.6923 \times 680.9} = 0.01775$$

$$c_5 = \frac{n_5}{n_5 + n_8} = \frac{\frac{n_5}{n_8}}{1 + \frac{n_5}{n_8}} = \left[1 + 0.9874 \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right]^{-1}$$

\Rightarrow 富集度： $\varepsilon = 1.723\%$

9. 设燃料中 ^{235}U 的富集度为： 3.2% （重量），试求其 ^{235}U 和 ^{238}U 的核子数之比。

解： $c_5 = \left[1 + 0.9874 \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right]^{-1} = 3.24\%$

$$c_5 = \frac{n_5}{n_5 + n_8} = \frac{\frac{n_5}{n_8}}{1 + \frac{n_5}{n_8}}$$

$$\frac{n_5}{n_8} = \frac{c_5}{1 - c_5} = 3.35 \times 10^{-2}$$

10. 为使铀的 $\eta = 1.7$ ，试求铀中 ^{235}U 的富集度应为多少？（设中子的能量为 0.0253eV ）。

解：

$$\because \eta = 2.416 \times \frac{\sum_{f,5}}{\sum_{a,5} + \sum_{a,8}} = 2.416 \times \frac{n_5 \cdot \sigma_{f,5}}{n_5 \cdot \sigma_{a,5} + n_8 \cdot \sigma_{a,8}}$$

$$\frac{n_5}{n_8} = \frac{\eta \cdot \sigma_{a,8}}{2.416 \times 583.5 - 1.6923 \times 680.9} = 0.0179$$

$$c_5 = \frac{n_5}{n_5 + n_8} = \frac{\frac{n_5}{n_8}}{1 + \frac{n_5}{n_8}} = 1.77\%$$

11. 为了得到 $1\text{KW} \cdot \text{h}$ 的能量，需要使多少 ^{235}U 发生裂变？

解：

$$1\text{KW} \cdot \text{h} = 1 \times 10^3 \times 3600 = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

单次 ^{235}U 所释放出来的能量为：

$$200\text{MeV} = 200 \times 10^6 \times 1.60 \times 10^{-19} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

则，发生裂变的 ^{235}U 的数目为：

$$N_0 = \frac{3.6 \times 10^6}{3.2 \times 10^{-11}} = 1.125 \times 10^{17}$$

质量为：

$$m_{U-235} = \frac{N_0}{N_A} \times M_{U-235} = 4.4 \times 10^{-5} \text{ g}$$

12. 反应堆的电功率为 1000MW ，设电站的效率为 32% ，试问每秒有多少个 ^{235}U 核发生裂变？运行一年共需要消耗多少易裂变物质？一座相同功率火电厂在同样时间需要多少燃料？已经标准煤的发热值为 $Q = 29\text{MJ} / \text{Kg}$ 。

解：

每秒钟发出的热量： $E = \frac{PT}{\eta} = \frac{1000 \times 10^6}{0.32} = 3.125 \times 10^6 \text{ J}$

每秒钟裂变的 ^{235}U ： $N = 3.125 \times 10^{10} \times 3.125 \times 10^9 = 9.7656 \times 10^{19}$

运行一年的裂变的 ^{235}U ：

$$N_1 = N \times T = 9.7656 \times 10^{19} \times 365 \times 24 \times 3600 = 3.0797 \times 10^{27}$$

消耗的 ^{235}U 质量：

$$m = \frac{(1 + \alpha) N_1}{N_A} \times A = \frac{(1 + 0.18) \times 3.0797 \times 10^{27} \times 235}{6.022 \times 10^{23}} = 1.4228 \times 10^6 = 1422.8\text{kg}$$

需要的煤：

$$m = \frac{E_1}{Q} = \frac{1 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 3600}{0.32 \times 2.9 \times 10^7} = 3.3983 \times 10^6 = 3.3983\text{t}$$