

第 65 回

原子炉主任技術者試験（筆記試験）

原 子 炉 理 論

6問中5問を選択して解答すること。（各問20点：100点満点）

（注意）（イ） 解答用紙には、問題番号のみを付して解答すること。

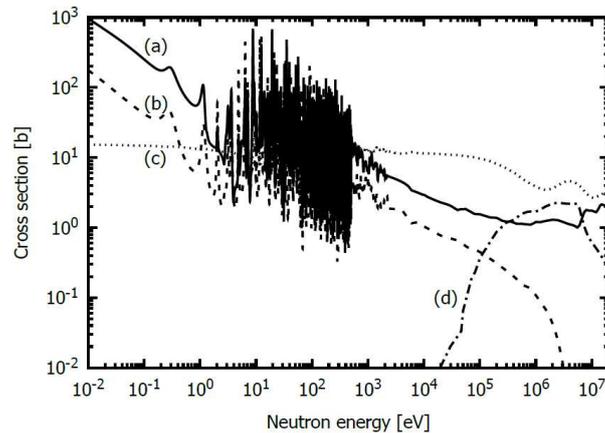
（指示がない限り問題を写し取る必要はない。）

（ロ） 1問題ごとに1枚の解答用紙を使用すること。

令和5年3月14日

第1問 中性子と原子核の反応について以下の問いに答えよ。

- (1) 下図に ^{235}U の代表的な反応断面積を示す。(a)、(b)、(c)、(d) は、それぞれ何の反応か答えよ。



- (2) (1) の (a)、(b)、(c) の反応の Q 値を、質量欠損を用いて表せ。ただし、原子核 X ($X = ^{235}\text{U}$ 等) の質量欠損を $\Delta m(X)$ 、中性子及び陽子の質量をそれぞれ m_n 、 m_p とし、電子の影響は無視する。また、光の速度を c とし、核分裂反応では、原子番号 Z_1 、質量数 A_1 を持つ原子核 X_1 及び原子番号 Z_2 、質量数 A_2 を持つ原子核 X_2 の 2 つの原子核と即発中性子を生成するものとする。
- (3) (d) はしきい反応であるが、この Q 値を Q_d とすると、反応のしきいエネルギー E_{th} を表す式を示せ。必要に応じて (2) の表式を用いよ。
- (4) ブライト・ウィグナーの一準位共鳴公式に基づき、中性子の捕獲断面積を次の式で表す。

$$\sigma_{\gamma}(E) = \frac{\pi}{k^2} \frac{\Gamma_n \Gamma_{\gamma}}{(E - E_1)^2 + \Gamma^2/4}$$

ここで、 E_1 は共鳴エネルギー、 E は中性子の運動エネルギー、 k は中性子の波数 (mv/\hbar) である (m は中性子の質量、 v は中性子の速度、 \hbar はプランク定数を 2π で割った数)。また、 Γ_n 及び Γ_{γ} はそれぞれ共鳴の中性子幅と放射幅を表す。 Γ は全共鳴幅であり、 $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_{\gamma}$ の関係がある。 Γ_n は中性子の波数 k に比例するものとし、 E_1 での値を Γ_{1n} とする。

$E \ll E_1$ 及び $\Gamma \ll E_1$ が成り立つとすると、断面積が $1/v$ に比例することを導出し、 $1/v$ 則が成り立つことを示せ。

第2問 一群拡散理論に基づいて以下の問いに答えよ。

- (1) 拡散係数 D 、巨視的吸収断面積 Σ_a をもつ無限平板状均質体系を考える。 $x = 0$ を中心に $y - z$ 平面に沿った幅 $2a$ の平板状の中性子源を置いたとする。 $x = 0$ を含む平板内 (領域 1) の中性子束を $\phi_1(x)$ 、外側 (領域 2) の中性子束を $\phi_2(x)$ とすると、それぞれの中性子束が満たす拡散方程式と境界条件を示せ。ただし、平板内の単位時間・単位体積当たりの中性子放出率を S とする。また、拡散距離を $L = \sqrt{D/\Sigma_a}$ とする。中性子束は $x = 0$ に対して対称とし、 $x \geq 0$ の場合についてのみ考えることとする。
- (2) (1) を解いて $\phi_1(x)$ 、 $\phi_2(x)$ を求めよ。
- (3) (1) の領域 1 及び領域 2 について、 $x \geq 0$ での $y - z$ 単位面積あたりの中性子吸収率 A_1 、 A_2 を求めよ。
- (4) (1) の $x = a$ の領域境界面における中性子流を求め、 $x \geq 0$ において、領域 1 での単位面積当たりの中性子発生率と (3) のそれぞれの領域での中性子吸収量との関係について説明せよ。
- (5) 拡散理論は近似的なものであるが、精度が悪くなる場合の代表的な例を挙げ、その理由を簡潔に述べよ。

第3問 均質な無限媒質中における中性子（質量数1）の減速を考える。媒質は単一の核種（質量数 A ）で構成されており、媒質における吸収はなく、散乱は重心系において等方的であると仮定する。このとき、エネルギー E の中性子が散乱によりエネルギー E' になる確率密度は次式で与えられる。

$$P(E \rightarrow E') = \begin{cases} \frac{1}{E(1-\alpha)}, & \alpha E \leq E' \leq E \\ 0, & E' < \alpha E, E < E' \end{cases}$$

ここで、 $\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$ である。

- (1) 1回の散乱による平均レサジー変化量 ξ を求めよ。導出過程も記述すること。
- (2) $A \gg 1$ であるとき、 ξ は次式で近似できることを示せ。

$$\xi \approx \frac{2}{A + 2/3}$$

ただし、以下に示す式を用いてもよい。

$$\ln(1 \pm x) = \pm x - \frac{x^2}{2} \pm \frac{x^3}{3} - \dots, \quad (|x| < 1 \text{ のとき})$$

及び

$$(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x, \quad (x \ll 1 \text{ のとき})$$

ここで、 x は変数、 α は任意の実数である。

- (3) 軽水、重水のそれぞれに対して以下の値を有効数字2桁で求めよ。

(a) ξ 、(b) 減速能、(c) 減速比

ただし、各媒質の密度は表1のもの、各核種のデータは表2のものを用い、アボガドロ数は 6×10^{23} とせよ。また、 $A > 1$ の単一核種に対する ξ の計算には(2)で示された近似式を用いよ。途中の導出過程も記述すること。

表 1 各媒質の密度

	密度 [kg/m ³]
軽水	1.0×10^3
重水	1.1×10^3

表 2 核種毎のデータ

	原子量	微視的散乱断面積 [b]	微視的吸収断面積 [b]
水素	1	20	3.0×10^{-1}
重水素	2	3.5	5.0×10^{-4}
酸素	16	4.0	2.0×10^{-4}

- (4) (3) の結果を踏まえて、原子炉の減速材として軽水、重水を用いたときの利点と欠点を述べよ。

第4問 熱中性子炉における中性子経済を考える。熱中性子炉は臨界状態であり、熱中性子による核分裂（熱核分裂）により、各サイクルの初期段階において1,000個の中性子が発生するものとする。この炉における、中性子の収支は図1のとおりであり、表1のパラメータがわかっているものとする。このとき、以下の問いに答えよ。

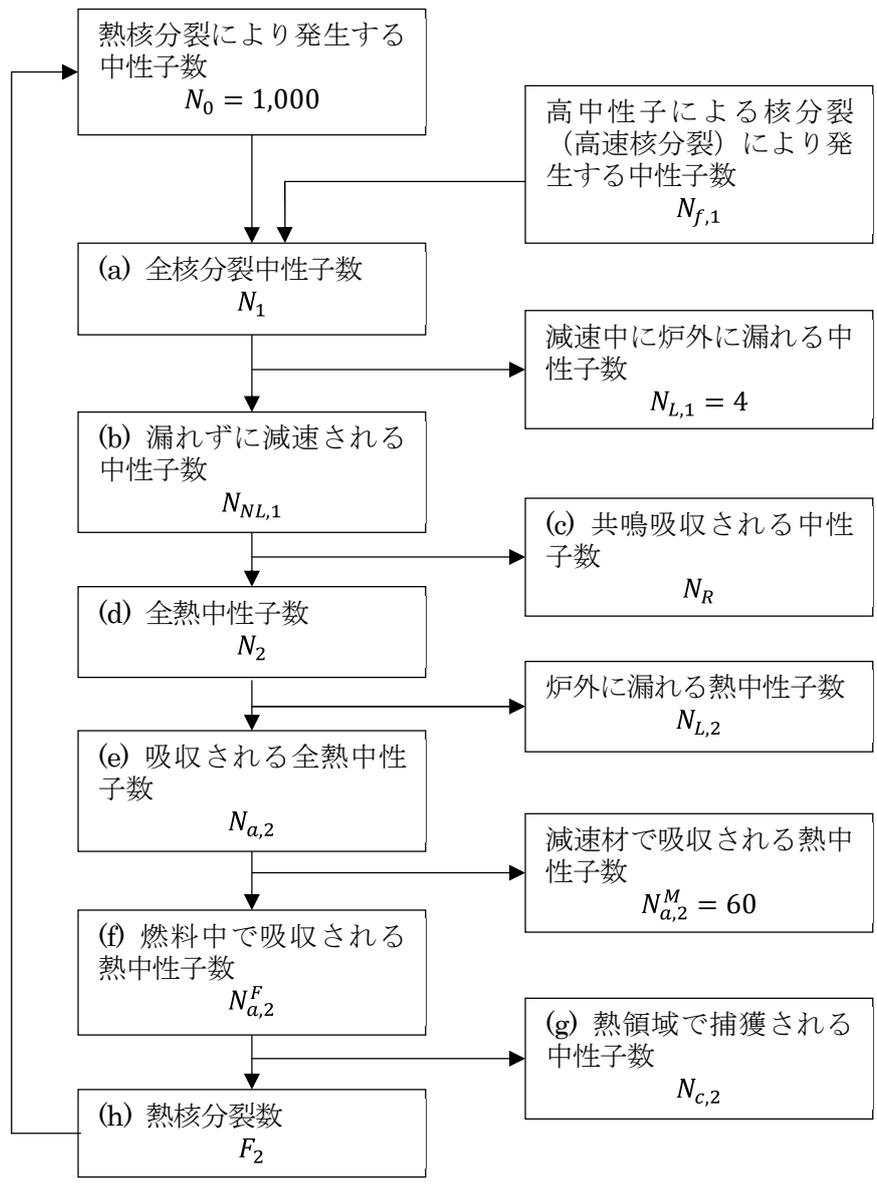


図1 熱中性子炉の中性子経済

表 1 既知のパラメータ

$N_0 = 1,000$	熱核分裂により発生する中性子数
$\nu_1 = 2.8$	高速核分裂 1 回に発生する核分裂中性子数
$\nu_2 = 2.5$	熱核分裂 1 回に発生する核分裂中性子数
$r_f = 0.025$	熱核分裂数に対する高速核分裂数の比 (=高速核分裂数/熱核分裂数)
$c = 1.25$	熱中性子領域における、核分裂反応数に対する捕獲反応数の比 (=熱捕獲数/熱核分裂数)
$r_L = 2$	減速中の中性子漏えい数に対する熱中性子漏えい数の比 (=熱中性子の漏えい数/減速中性子の漏えい数)
$N_{L,1} = 4$	減速中に炉外に漏れる中性子数
$N_{a,2}^M = 60$	減速材で吸収される熱中性子数

- (1) 図 1 中の (a) から (h) の数を求めよ。
- (2) 実効増倍率 k_{eff} は 6 因子公式により次式で表される。

$$k_{\text{eff}} = \epsilon p f \eta P_{NL,1} P_{NL,2}$$

6 因子公式の各因子について物理的な意味を説明するとともに、図 1 の状態で臨界状態が維持されているとき、図 1 と表 1 内にある記号を用いて各因子を表せ。

第5問 長い時間臨界状態にあった原子炉に、時刻 $t = 0$ でステップ状の反応度 ρ_0 を添加することで、原子炉の実効増倍率は k になったとする。このとき、以下の問いに答えよ。ただし、即発中性子寿命は ℓ 、中性子世代時間は Λ とする。また遅発中性子は 6 群で考え、第 i 群の遅発中性子先行核密度を $C_i(t)$ 、また第 i 群の遅発中性子先行核の崩壊定数及び遅発中性子割合はそれぞれ λ_i ($\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_6$)、 β_i ($\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$) とする。

- (1) 遅発中性子先行核の第 1 群 (半減期がもっとも長い群) に含まれる核種及び第 1 群のおおよその半減期 [秒] を記述せよ。
- (2) ρ_0 を、 k を用いて記述せよ。
- (3) 時刻 $t > 0$ における中性子数の時間変化 $n(t)$ が従う一点炉近似の動特性方程式を問題文の記号を用いて記述し、各項が表わしているものを説明せよ。ただし、反応度は ρ_0 で変化しないとする。
- (4) 原子炉が一点炉で近似でき、フィードバック反応度が無視できる場合、時刻 $t > 0$ における中性子数の時間変化 $n(t)$ は、以下の逆時間方程式 (反応度方程式) の 7 つの根 ω_j ($j = 1 \sim 7$, $\omega_1 > \omega_2 > \dots > \omega_7$) を用いて表現できる。

$$\rho_0 = \frac{\omega \ell}{(1 + \omega \ell)} + \frac{1}{(1 + \omega \ell)} \sum_{i=1}^6 \frac{\omega \beta_i}{\omega + \lambda_i}$$

- (i) 安定ペリオドについて簡潔に説明せよ。
- (ii) $0 < \rho_0 < 1$ 又は $\rho_0 < 0$ の、それぞれの場合における安定ペリオドを、逆時間方程式の根を用いて記述せよ。
- (iii) 添加する負の反応度の絶対値が大きくなるほど、安定ペリオドは“ある値”に漸近する。この“ある値”を問題文中の記号を用いて表せ。

第6問 原子炉内の様々な変化に伴い、原子炉に反応度が添加され、この反応度は正の反応度効果と負の反応度効果の総和で表わされる。以下に挙げる場合に添加される反応度について、正の反応度効果及び負の反応度効果を引き起こす現象両方を、それぞれその理由とあわせて簡潔に説明せよ。

- (1) 低濃縮ウランの固体燃料と軽水減速材を用いた熱中性子炉における、燃料温度の上昇による反応度添加。
- (2) 低濃縮ウランの固体燃料と軽水減速材を用いた熱中性子炉における、沸騰まで至らない減速材温度の上昇による反応度添加。
- (3) MOX 燃料とナトリウム冷却材を用いた高速炉における、沸騰まで至る冷却材温度の上昇による反応度添加。ただし(2)で説明した理由とは異なる理由の説明をすること。
- (4) 可燃性毒物を含む低濃縮ウラン燃料の燃焼による反応度添加。ただし正の効果と負の効果の両方について、それぞれ2つ挙げよ。

【メモ】

【メモ】