

第 60 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。

（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。

平成30年3月14日

第1問 ウランが中性子を吸収した際に起きる現象についての以下の問いに簡潔に答えよ。

- (1) ^{235}U が熱中性子を吸収して生成される ^{236}U のような、励起状態にある準安定な原子核を一般に何というか記せ。
- (2) ^{236}U の原子核の核分裂障壁の大きさは、(0.6MeV、6MeV、60MeV) のうちのどれに最も近いかを答えよ。
- (3) ^{235}U が熱中性子を吸収して起きる核分裂反応の Q 値は、(2MeV、20MeV、200MeV) のうちのどの値に最も近いかを答えよ。
- (4) 上記の Q 値が主として (中性子、ガンマ線、核分裂片) のうちのどれの運動エネルギーとして発生するかを答えよ。
- (5) ^{235}U が熱中性子を吸収して起きる核分裂で発生する中性子の平均個数を有効数値 2 桁以上で答えよ。
- (6) ^{235}U が熱中性子を吸収して起きる核分裂によって発生する中性子には即発中性子と遅発中性子がある。それぞれの発生過程について説明せよ。
- (7) 上記 2 種類の核分裂中性子が原子炉の制御特性に与える役割を説明せよ。
- (8) もし、 ^{235}U の熱中性子による核分裂で生成される核分裂生成物が放射能を持っていないければ原子炉の動特性制御にとってどのような影響があるかを説明せよ。
- (9) 天然ウランの大部分を占める ^{238}U が軽水炉において果たす役割を、原子炉の制御、核燃料の転換の 2 つの観点から説明せよ。
- (10) ^{235}U が熱中性子を吸収して核分裂するのに対して ^{238}U が熱中性子核分裂をしない理由を説明せよ。

第2問 減速材と燃料が均質に混合し、かつ無限大の炉心が定常状態にある場合の熱中性子束 ϕ を ϕ_0 (一様) とした場合の炉心から、図1のように厚さ $2d$ ($-d \leq x \leq d$) の平板状の部分から燃料だけを取り去り減速材のみとした場合の熱中性子束の分布を考える。ただし炉心も燃料を取り去った領域も、高速中性子は影響を受けず、高速群から熱群への減速密度 q が熱群に対する中性子源としての役割を果たすものとする。また、巨視的熱中性子吸収断面積は減速材領域ではゼロ、炉心部分では Σ_a とし、拡散係数は減速材領域と炉心領域で共通で D とする。体系の対称性から x が正の領域のみを考えることにする。 $\kappa^2 = \Sigma_a/D$ を用いてよい。以下の問いに答えよ。

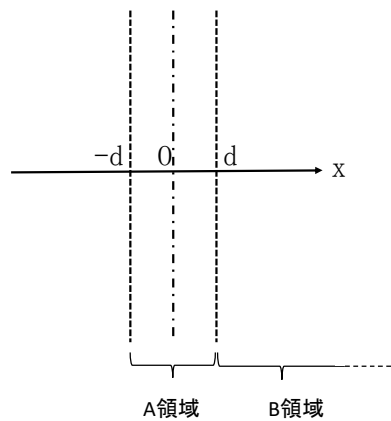


図1

- (1) 燃料を取り去る前の熱中性子束に対する拡散方程式を記し、その解 ϕ_0 を求めよ。
- (2) 燃料を取り去った領域 $0 \leq x \leq d$ 及び炉心 $d \leq x$ における熱中性子束に対する拡散方程式を記せ。
- (3) $x = 0$ および $x = d$ における中性子束に対する境界条件を記せ。
- (4) 考えている系の対称性から、中性子束が左右対称であることを用いて (2) 拡散方程式の解を求めよ。
- (5) 熱中性子束が最大になる位置とその値を与える式を求めよ。
- (6) $0 \leq x$ における熱中性子束の分布の概略図を、横軸を x 、縦軸を ϕ/ϕ_0 として描け。

第3問 説明文中の①から⑧に当てはまる数式あるいは数値を示し、単位が必要な場合は単位も明記せよ。また必要であれば $\ln 2=0.7$ 、 $\ln 3=1.1$ 、 $\ln 5=1.6$ 、アボガドロ数を $6 \times 10^{23} [\text{mol}^{-1}]$ として求めよ。

(1) 静止している単一核種（質量数 A とする）からなる媒質での中性子（質量数 1 とする）の減速過程について考える。あるエネルギー E を持つ中性子が散乱しエネルギー E' に減速する確率を表す確率密度関数は、重心系等方散乱の場合、

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

と書ける。ここで $\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$ である。

また中性子のエネルギーが E から E' に減速することによるレサジー増加は (②) と書けるため、1回の減速による平均レサジー増加 ξ は

- (i) 水素（質量数 1 とする）媒質の場合は (③)
(ii) 重水素（質量数 2 とする）媒質の場合は (④)

となる。これより、水素媒質の場合には、中性子のエネルギーが 10 [MeV] から 10 [eV] まで減速するに要する平均の衝突回数は (⑤) であることがわかる（ただし水素による中性子吸収は無視できるとする。）。

(2) 水素 (H、原子量を 1 とする)、重水素 (D、原子量を 2 とする)、酸素 (O、原子量を 16 とする) の ξ 、微視的散乱断面積 σ_s 、微視的吸収断面積 σ_a が下記の表のように与えられているとき、密度 1 [g/cc] である水 (H₂O) の ξ は (⑥)、減速能は (⑦)、減速比は (⑧) となる。

| | ξ | σ_s [b] | σ_a [b] |
|---|-------|----------------|----------------------|
| H | ③ | 21 | 3.0×10^{-1} |
| D | ④ | 3.4 | 5.0×10^{-4} |
| O | 0.12 | 3.9 | 1.8×10^{-4} |

- (3) 低濃縮ウラン燃料が、十分に減速できる量の減速材（軽水あるいは重水）中にある体系において、軽水（ H_2O ）の代わりに重水（ D_2O ）を用いた場合、体系中の熱中性子束の大きさ（中性子スペクトル）および臨界性（実効増倍率）はどのように考えられるか。設問（2）に示した数値を踏まえて説明せよ。

第4問 低濃縮ウラン燃料を含む一様な媒質で構成されている直方体体系について以下の設問に解答せよ。ただし、媒質の拡散係数は D 、巨視的吸収断面積は Σ_a 、巨視的核分裂断面積は Σ_f 、核分裂一回当たりに放出される中性子数は ν とする。直方体の各辺の長さは、 a 、 b 、 c であり、それぞれ x 方向、 y 方向、 z 方向とする。また外挿距離は方向によらず δ とする。

(1) この媒質の材料バックリング B_m^2 を表す式を示せ。また、燃料中の ^{235}U 濃縮度が大きくなると B_m^2 の大きさはどうなるか説明せよ。

(2) 体系内の中性子束分布 $\phi(x, y, z)$ が

$$\phi(x, y, z) = \phi_x(x)\phi_y(y)\phi_z(z)$$

と表現できるとき、形状バックリング（幾何学的バックリング） B_g^2 を表す式を求めよ。結果だけでなく求める過程も示すこと。

(3) $a = b = c (= \ell)$ で臨界となっているとき

(i) ℓ と B_m^2 の関係を示せ。

(ii) 体系を同体積の球形に変形した場合、体系の臨界性（実効増倍率）はどのように考えられるかを説明せよ。

(4) $a = b (= d)$ の時、 c がどれだけ大きくても臨界とならないための d が満たす条件式（ B_m^2 との関係式）を求めよ。

第5問 低出力で未臨界の原子炉内部において、周波数 f [Hz] のパルス状の中性子源が存在している (図2) 場合について、以下の問いに答えよ。ただし、パルス周期は中性子世代時間に比べて十分に大きいとする。

- (1) 表1の記号を用いて、一周期間の遅発一群の一点炉動特性方程式を記述せよ。
- (2) 運転開始後十分に時間が経過した後に、中性子個数の一周期間の時間平均が \bar{n} 、遅発中性子先行核個数の一周期間の時間平均が \bar{C} となった。(1) で得た方程式の時間微分項を無視することで、 \bar{n} 及び \bar{C} を求めよ。
- (3) 遅発中性子先行核個数を \bar{C} で一定と近似し、一周期間の中性子個数 n の時間変化を表す式を求めよ。
- (4) (3) の解のうち、定数部分と指数部分をそれぞれ一周期間で積分し、定数部分に対する指数部分の比を求めよ。

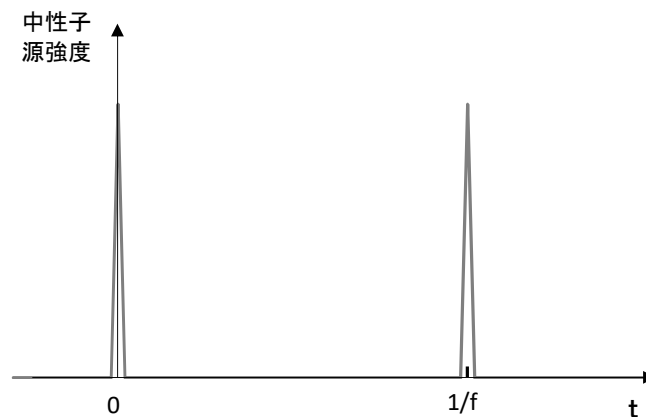


図2

| 用語 | 単位 | 記号 |
|--------------|-------|---------------|
| 時間 | 秒 | t |
| 反応度 | | ρ |
| 実効遅発中性子割合 | | β_{eff} |
| 中性子世代時間 | 秒 | Λ |
| 遅発中性子先行核崩壊定数 | 1/秒 | λ |
| 中性子個数 | 個 | n |
| 遅発中性子先行核個数 | 個 | C |
| パルス中性子源強度 | 個/パルス | S |
| パルスの時間形状 | | $\delta(t)$ |

$\delta(t)$ はディラックのデルタ関数であり、 $\int_{-0}^{+0} \delta(t) dt = 1$

表1

第6問 原子炉内部の ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射線について、以下の問いに答えよ。ただし、核分裂核種として ^{235}U のみ考慮し、そのほかの U、Pu の核分裂を考慮しない。原子炉の出力及び中性子束は時間的に連続で一定とする。また、 ^{133}Cs は安定同位体である。

- (1) 表2の記号を用いて、照射時間 t における ^{133}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の原子個数を求めるための微分方程式をそれぞれ記述せよ。ただし、核分裂による ^{235}U の減少および捕獲反応による Cs 核種の減少を無視し、核分裂による ^{133}Cs と ^{137}Cs の生成と、 ^{133}Cs の捕獲反応による ^{134}Cs の生成のみを考慮せよ。
- (2) (1) の方程式の解を求めよ。ただし、初期燃料に Cs は含まれていない。
- (3) 照射時間 t における ^{137}Cs に対する ^{134}Cs の放射能比を表す式を求めよ。
- (4) 表2の数値を用いて、2年間連続で一様に照射された時の ^{137}Cs に対する ^{134}Cs の放射能比を求めよ。ただし、1年を 3×10^7 秒とせよ。

| 意味 | 単位 | 記号 | 数値 |
|---------------------------|--------------------|-------------|----------------------|
| 照射時間 | 秒 | t | |
| ^{235}U の炉内原子個数 | 個 | N_U | 7×10^{27} |
| ^{133}Cs の炉内原子個数 | 個 | N_3 | |
| ^{134}Cs の炉内原子個数 | 個 | N_4 | |
| ^{137}Cs の炉内原子個数 | 個 | N_7 | |
| ^{134}Cs の崩壊定数 | /秒 | λ_4 | 1×10^{-8} |
| ^{137}Cs の崩壊定数 | /秒 | λ_7 | 7×10^{-10} |
| 炉内平均中性子束 | / cm^2 /秒 | ϕ | 2×10^{14} |
| ^{235}U の核分裂断面積 | cm^2 | σ_f | 40×10^{-24} |
| ^{133}Cs の捕獲断面積 | cm^2 | σ_3 | 10×10^{-24} |
| ^{133}Cs の核分裂収率 | | f_3 | 0.07 |
| ^{137}Cs の核分裂収率 | | f_7 | 0.06 |

表2