

第 62 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。

令和2年3月17日

第1問 以下の問いに答えよ。

- (1) ^{235}U が熱中性子を吸収して核分裂すると約 200MeV のエネルギーが発生するが、そのうち核分裂によって生成される 2 つの原子核 (核分裂片) の運動エネルギーが約 170MeV を占める。軽い核分裂片の質量数を 100、重い核分裂片の質量数を 136 とした場合に、軽い核分裂片と重い核分裂片がそれぞれ持つ運動エネルギーを計算せよ。ただし、核分裂片からの粒子の発生は無視でき、核分裂片の質量は質量数に比例し、核分裂片は互いに反対方向に運動するものとしてよい。
- (2) 核分裂でエネルギーが発生する理由が何であるか及びそれが核分裂片以外のどのような粒子等のエネルギーとして発現するかを説明せよ。
- (3) 熱出力 160 万 kW の熱中性子炉が毎秒消費する ^{235}U の数を有効数字 2 桁で計算せよ。ただし、発熱は全て ^{235}U の核分裂によるものとし、 ^{235}U の捕獲・核分裂比 $\alpha=0$ 、炉外へ持ち出されるエネルギーは無視できるとする。 1eV は $1.6\times 10^{-19}\text{J}$ とせよ。
- (4) 上記の ^{235}U の消費量に相当するウランの質量を有効数字 1 桁で求めよ。ただし、 ^{235}U の濃縮度を 5%、ウランの原子量を 238、アボガドロ数を 6.0×10^{23} とする。
- (5) (3) で $\alpha=0$ としない場合、消費される ^{235}U の量は何倍になるかを記せ。
- (6) 核分裂生成物の崩壊熱は核分裂で発生するエネルギーの約 7.5% である。上記 (3) の条件で定常的に運転されていた原子炉が停止直後に持つ崩壊熱を有効数字 2 桁で求めよ。

第2問 核分裂性物質を含む、外挿距離を含む厚さ $a(-\frac{1}{2}a \leq x \leq \frac{1}{2}a)$ の無限平板状均質体系(裸の原子炉)が真空中に置かれている。1群拡散理論において、この体系内の拡散係数を D 、巨視的吸収断面積を Σ_a 、巨視的核分裂断面積を Σ_f 、核分裂当たりの核分裂中性子数を ν 、 $\kappa \equiv \sqrt{\frac{\nu\Sigma_f - \Sigma_a}{D}}$ とする。この体系が定常臨界状態にあるとして、以下の問いに答えよ。

- (1) 中性子束を $\phi(x)$ として一群の中性子拡散方程式を記せ。
- (2) 中性子束を x の関数として κ を用いて表せ。ただし、中性子束の大きさは任意定数を用いてよい。
- (3) $x = \pm \frac{a}{2}$ における境界条件を記せ。
- (4) この体系の幾何学的(あるいは形状)バックリング B_g^2 及び材料バックリング B_m^2 を求め、それぞれが何によって決定されるかを簡潔に記せ。
- (5) この体系が臨界となる条件を幾何学的バックリング B_g^2 及び材料バックリング B_m^2 を用いて表せ。
- (6) 体系の大きさを変えず、材料バックリング B_m^2 を大きくするとどうなるかを理由とともに記せ。
- (7) 外挿距離とは何かを簡潔に説明せよ。

第3問 単一の核種（質量数 A とする）からなる、均質な無限媒質における中性子（質量数 1 とする）の減速を考える。弾性散乱による減速過程では、散乱前の中性子エネルギー E_0 と散乱後の中性子エネルギー E_1 の間には、重心系での中性子散乱角度 θ を用いて、以下の関係式が成り立つことが知られている。このとき、以下の問いに答えよ。

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{1}{2}(1 + \alpha) + \frac{1}{2}(1 - \alpha)\cos\theta, \quad \alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$$

- (1) 散乱反応には非弾性散乱と弾性散乱がある。非弾性散乱と弾性散乱の違いについて簡潔に説明せよ。
- (2) 重心系では中性子は等方散乱されると仮定して、 E_1 の確率分布を表す散乱カーネル $P(E_0 \rightarrow E_1)$ の式を導出せよ。また、散乱後の中性子エネルギー E_1 が取りうるエネルギー範囲をあわせて導出せよ。
- (3) 中性子エネルギーが弾性散乱によって E_0 から E_1 に変化するときのレサジー増加を示した上で、弾性散乱による平均レサジー増加 ξ を、 α を用いて示せ。
- (4) 中性子エネルギーが2MeVから1eVにまで減速されるのに必要な平均散乱回数 n を表す式を、平均レサジー増加 ξ を用いて示せ。
- (5) 減速の起こりやすさを表す指標に、減速比と減速能がある。減速比と減速能のそれぞれについて簡潔に説明せよ。ただし、減速比と減速能の違いが明確となるように記述すること。

第4問 以下の用語について説明せよ。

- (1) 核反応断面積の共鳴とドップラー効果
- (2) 拡散距離
- (3) 中性子温度
- (4) 反射体節約
- (5) 即発臨界と遅発臨界

第5問 ある時刻 t に原子炉に中性子が n 個存在する確率を $p(n, t)$ とする。原子炉には中性子源が含まれ、時間 dt の間に中性子が 1 個放出される確率は Sdt である。原子炉内の 1 個の中性子が dt の間に消滅する確率は $\frac{1}{l} dt$ である。消滅した 1 個の中性子が核分裂反応を起こし、 k 個の中性子を発生させる確率を $q(k)$ とする。このとき、 $p(n, t)$ は次の式に従う。

$$\frac{d}{dt} p(n, t) = -Sp(n, t) - \frac{n}{l} p(n, t) + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{n-k+1}{l} q(k) p(n-k+1, t) + Sp(n-1, t)$$

- (1) 上式の各項の意味を記述せよ。
- (2) n の平均値を $N_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} np(n, t)$ と定義する。この時、 $N_1(t)$ は次式に従うことを示せ。

$$\frac{d}{dt} N_1(t) = \frac{K_1 - 1}{l} N_1(t) + S$$

ただし、 $K_1 = \sum_{k=0}^{\infty} kq(k)$ とする。

- (3) (2) の方程式を解け。ただし、 $N_1(0) = 0$ とする。
- (4) n の分散を、 $V(t) = N_2(t) - N_1^2(t)$, $N_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} n^2 p(n, t)$ で定義する。このとき、 $V(t)$ は次式に従う。

$$\frac{d}{dt} V(t) = \frac{2(K_1 - 1)}{l} V(t) + \frac{K_2 - 2K_1 + 1}{l} N_1(t) + S$$

ただし、 $K_2 = \sum_{k=0}^{\infty} k^2 q(k)$ とする。

$K_1 < 1$ とし、時間が十分に経過した。このとき、分散 V の平均 N_1 に対する比を求めよ。

第6問 長さ x_2 の循環流路を水が速度 v で流れている。流れ方向の位置を x とする。 $0 \sim x_1$ の流路は中性子で照射されており、 $x_1 \sim x_2$ の流路は照射されていない。照射場では中性子束 ϕ により、微視的断面積 σ で $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ 反応が起こっている。 ^{16}N は崩壊定数 λ で ^{16}O に崩壊する。 ^{16}N の水中での拡散を無視できると仮定する。ただし、アボガドロ数を N_A 、水の密度を 1g/cm^3 、水の分子量を18とせよ。

- (1) $0 \sim x_1$ の流路が非常に長い場合に ^{16}N 濃度の最大値を示せ。
- (2) 照射開始から十分に時間が経過した。このとき、 ^{16}N の濃度分布が従う方程式と境界条件を示せ。ただし、 $0 \sim x_1$ における ^{16}N 濃度を n_1 、 $x_1 \sim x_2$ における ^{16}N 濃度を n_2 とせよ。
- (3) ^{16}N の濃度分布 ($n_1(x)$ 及び $n_2(x)$) を求めよ。
- (4) ^{16}N の濃度分布を(1)の値とともに図示せよ。