

第 66 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 6 年 3 月 13 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) 数密度 ρ をもつ単一種の原子核で作られた厚さ T の一様な平板に、速度 v をもつ N_0 個の中性子を入射したところ、 N_1 個の中性子が反応せずに透過したとする。この原子核の微視的な全断面積 σ を求めよ。

(2) 次の表は ^{235}U 及び ^{238}U の熱中性子に対する断面積を表す。①、②、③は何の断面積か記号で記せ。

[解答例] ④－(リ)

- (イ) 全断面積 (ロ) 弾性散乱断面積 (ハ) 非弾性散乱断面積
 (ニ) (n, γ) 反応断面積 (ホ) $(n, 2n)$ 反応断面積 (ヘ) (n, p) 反応断面積
 (ト) (n, α) 反応断面積 (チ) 核分裂反応断面積

	^{235}U	^{238}U
①	587 b	19 μb
②	99 b	2.6 b
③	14 b	9.2 b

(3) 次の表は ^{235}U の核分裂で発生する粒子（放射線）によって放出される平均的なエネルギーを表す。①、②、③の粒子（放射線）の種類を示せ。

粒子の種類	エネルギー
①	169 MeV
②	4.8 MeV (即発)、8.0 keV (遅発)
③	7.0 MeV (即発)、6.4 MeV (遅発)
ベータ線	6.5 MeV
ニュートリノ	8.8 MeV

(4) 次の語句を簡潔に説明せよ。

(a) 原子核反応の Q 値

(b) 原子核反応のしきいエネルギー

第2問 拡散係数 D 、巨視的中性子吸収断面積 Σ_a をもつ非核分裂性の一様な無限均質体系（拡散距離 $L = \sqrt{D/\Sigma_a}$ とする）における定常な中性子拡散に関して、一群拡散理論に基づき以下の問いに答えよ。

- (1) 原点からの距離を r としたとき中性子束が満たす拡散方程式を示せ。ここで、中性子束は球対称と仮定する。ただし、ラプラス演算子の動径方向成分は

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \frac{d}{dr}$$

である。

- (2) 座標原点に毎秒 S 個の中性子を放出する点状線源が置かれている場合の中性子束 $\phi(r)$ を求めよ。

- (3) y 軸上の 2 点 $(x = 0, y = a, z = 0)$ 及び $(x = 0, y = -a, z = 0)$ に (2) と同じ点線源が置かれている場合の x 軸上の中性子束 $\phi(x)$ を求めよ。

- (4) (3) において x 軸上の中性子流（正味の中性子の流れ）の x 成分 $J_x(x)$ 及び y 成分 $J_y(x)$ を求めよ。

- (5) (3) において中性子束と中性子流の大きさが最大となる x 軸上の点は一致するかどうか、根拠とともに答えよ。また、(3) の点線源の一つを取り除いた場合はどのようなか同様に答えよ。

第3問 質量 A の原子核と質量 1 の中性子が、重心系で等方な弾性散乱を行ったとする。弾性散乱する前は、中性子は実験室系で E の運動エネルギーをもち、弾性散乱した後は、中性子は実験室系で E' の運動エネルギーとなったとする。この時、以下の問いに答えよ。

- (1) エネルギー E からエネルギー E' に変化したときのレサジーの変化量 Δu を示せ。
- (2) 弾性散乱する前、原子核が静止していたとすると、一回の弾性散乱により、中性子の運動エネルギーが E から E' に変化する場合の確率分布 $P(E \rightarrow E')$ は以下の式で与えられる。この式をもとに、以下の問いに答えよ。

$$P(E \rightarrow E') = \begin{cases} \frac{1}{(1-\alpha)E} & (\alpha E \leq E' \leq E) \\ 0 & \text{上記以外の場合} \end{cases}$$

ただし

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

- (i) 原子核の質量 A の違いによる減速効果の違いを説明せよ。
- (ii) 一回の弾性散乱による、レサジーの変化量の平均（平均レサジー増加 ξ ）を α のみを用いて表す式を示せ。結果だけでなく導出の過程も示すこと。
- (3) 絶対零度でない限り原子核は静止しておらず、弾性散乱する前でも原子核は運動（熱振動）している。原子核が運動している場合、(2) で示した弾性散乱後の中性子の運動エネルギー E' の取りうる範囲（確率分布 $P(E \rightarrow E')$ がゼロでない値をとる範囲 $(\alpha E \leq E' \leq E)$ ）はどのように変化するかをその理由とあわせて説明せよ。
- (4) 減速比と減速能について、両者の違いを説明せよ。
- (5) 減速密度 $q(E)$ について、四因子公式で現れる「共鳴を逃れる確率」との関連を含めて説明せよ。ただし、共鳴は $E_0 \sim E_1$ ($E_1 < E_0$) のエネルギー範囲にあるとする。

第4問 反射体が無い場合の物質の臨界性を一群拡散理論で考える。補外（外挿）距離は無視できるものとして、以下の問いに答えよ。

- (1) 拡散係数 D 、巨視的核分裂断面積 Σ_f 、核分裂あたりの放出中性子数 ν 、巨視的中性子吸収断面積 Σ_a の物質があり、ちょうど臨界状態にある。この物質に対して成り立つ中性子のバランス方程式（臨界方程式）を示せ。中性子束は Φ で表すこととする。
- (2) 半径 R の円筒型の容器がある。(1) の物質をこの容器に保存する場合、どのような高さまで入れても未臨界であることが担保される R の条件を求めよ。
- (3) (1) と同じ物質を使い、球あるいは立方体を幾何形状を選んで臨界とすることを試みる。その場合の球の体積に対する立方体の体積の比はいくらになるかを示せ。得られた体積比を実数にするための数値計算は行わなくて良い。

第5問 未臨界体系での遅発中性子一群での一点炉近似動特性方程式は、以下の式で表すことができる。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda C(t) + S$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda C(t)$$

ここで、 $n(t)$ は時刻 t での中性子数、 $C(t)$ は時刻 t での遅発中性子先行核濃度、 ρ は反応度、 β は遅発中性子割合、 λ は遅発中性子先行核の崩壊定数、 Λ は中性子世代時間、 S は中性子源の強度である。

- (1) 体系の反応度が ρ_0 のとき、体系の中性子実効増倍率が k_0 であるとする。 ρ_0 を k_0 を用いて表わす式を示せ。
- (2) 体系の反応度 $\rho_0 (< 0)$ で、 $n(t) = n_0$ 、 $C(t) = C_0$ で一定であるとき、 n_0 を $\rho_0, \beta, \Lambda, \lambda, S$ のうち必要な記号を用いて示せ。
- (3) 中性子源 S を入れたまま、体系に正のステップ状反応度を添加した時を考える。添加後の体系の反応度を $\rho_1 (< 0)$ とした直後には即発跳躍にて $n(t) = n_1$ となり、その後しばらく $n(t)$ は上昇し、 $n(t) = n_2$ で一定となったとする。
 - (i) n_1 と n_2 のそれぞれを、 $\rho_0, \rho_1, \beta, \Lambda, \lambda, n_0$ のうち必要な記号を用いて示せ。
 - (ii) 同じ大きさの正の反応度を添加する場合、反応度を添加する前の体系の未臨界度 $|\rho_0|$ が小さいほど、 n_1 から n_2 に至るまでの時間が長くなり、 $\delta n = n_2 - n_1$ が大きくなる理由を説明せよ。
- (4) 中性子源 S を入れたまま、体系にさらに正のステップ状反応度を添加し、体系の反応度を $\rho_2 (= 0)$ にしたとする。反応度添加から十分に時間が経過した後、 $n(t)$ の時間依存性はどのように表現されるかを、理由とともに説明せよ。

第6問 軽水炉で使用する二酸化ウラン燃料の燃焼中及び冷却中の中性子増倍率(無限増倍率)変化に関して、以下の問いに答えよ。

- (1) Gd_2O_3 を可燃性毒物として使用している燃料棒を含む、軽水炉で使用される二酸化ウランを燃料とする未燃焼の燃料集合体を一定の比出力で使用済燃料となる程度の燃焼度に達するまで燃焼させる場合の中性子増倍率の変化の傾向を、横軸を燃焼度、縦軸を中性子増倍率とするグラフに示せ。燃焼度に対する中性子増倍率の変化の傾向が分かれば良く、燃焼度や中性子増倍率の定量的な正しさは問わない。
- (2) (1)のような変化を生じさせる理由を、その原因となる主要な核種を示しながら述べよ。
- (3) (1)の燃料を水中で安定して長期間貯蔵する状況を考える。冷却後5年程度から数百年程度の間冷却時間における中性子増倍率の変化の傾向を、横軸を冷却期間、縦軸を中性子増倍率とするグラフに示せ。冷却時間に対する中性子増倍率の変化の傾向が分かれば良く、冷却期間や中性子増倍率の定量的な正しさは問わない。
- (4) (3)のような変化を生じさせる理由を、その原因となる主要な核種を示しながら述べよ。

【メモ】

【メモ】

【メモ】

