

第 64 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4年3月15日

第1問 以下の問いに答えよ。

- (1) 核反応の Q 値とは何かを 30 字以内で簡潔に説明せよ。
- (2) Q 値が正の反応、負の反応を熱の問題に例えて何反応と呼ぶかを答えよ。
- (3) 熱中性子による ^{235}U の核分裂の Q 値を有効数字 1 桁で MeV の単位で答えよ。
- (4) ^{235}U を燃料とする定格熱出力 400 万キロワットの原子炉が定格運転をしている場合、発熱が全て核分裂によるものとし、1 秒あたりに起きている核分裂数を有効数字 1 桁で求めよ。ただし $1 \text{ eV} = 2 \times 10^{-19} \text{ J}$ とせよ。
- (5) ^{235}U が熱中性子を吸収して核分裂する場合、1 万分の 1 の確率で三重水素を生成する。定格熱出力 400 万キロワットの熱中性子炉が 1 年間運転を続けた場合、1 年間に生成する三重水素の量を放射能に換算し Bq 単位で有効数字 1 桁で答えよ。ただし、三重水素の半減期を 10 年 (実際には 12.3 年)、 $\ln 2 = 0.7$ とし、この 1 年間に生成された三重水素の崩壊は無視する。
- (6) 長寿命の放射性原子核に熱中性子を吸収させ、引き続く β -崩壊により短寿命または安定な原子核に壊変させる「核変換」は放射能低減の有効な手段である。三重水素の放射能をこの方法で低減可能かどうかを調べるために、三重水素の中性子捕獲反応の Q 値を有効数字 3 桁で計算し、熱中性子捕獲と β -崩壊による三重水素の核変換可能性について説明せよ。ただし、表 1 に示す原子核の結合エネルギーの値を用いよ。

表 1 原子核の結合エネルギー

原子核	中性子	^3H	^4H
結合エネルギー (MeV)	0	8.48	6.88

- (7) 核反応の断面積の単位として用いられる 1 バーンが何 cm^2 に相当するかを記せ。
- (8) ^{235}U の半径を 8.00 fm ($f=10^{-15}$) とする。 ^{235}U を球形とした場合の幾何学的断面積をバーンの単位で有効数字 2 桁で求めよ。

- (9) 幾何学的断面積は古典的な剛体球に対して予想される反応断面積である。一方、熱中性子に対する ^{235}U の核分裂断面積は 585 バーンである。この値と上記 (8) の幾何学的断面積を比較し、両者に顕著な違いがある場合、その理由を説明せよ。

第2問 拡散係数 D 、巨視的吸収断面積 Σ_a を有する定常的かつ一様な非核分裂性物質の中心に毎秒 S 個の中性子を等方的に放出する点状中性子源が置かれているとする。また、 $\kappa = \sqrt{\Sigma_a/D}$ とする。一群拡散理論に基づいて以下の問いに答えよ。

- (1) 体系の大きさが無限大の場合に、球対称性を用いて、体系中の原点を除く点における中性子束 $\phi(r)$ が満たす動径方向の拡散方程式を記せ。ただし、球座標系におけるラプラス演算子の動径方向の成分は

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

である。

- (2) 上記 (1) の方程式を解いて体系中の原点を除く点における中性子束 $\phi(r)$ を求めよ。
- (3) 上記 (1) の条件の下で中心から半径 R の球面内において中性子が吸収される割合を表す式を求めよ。
- (4) 体系の大きさが有限で半径 R 、外挿距離が d の球の場合に中性子束 $\phi(r)$ を表す式を求めよ。
- (5) 上記 (4) の条件の下で球の表面から漏れ出す中性子の割合を表す式を求めよ。

第3問 減速エネルギー領域における、質量数 A の単一の原子核からなる媒質での中性子（質量数 1 とする）の減速について考える。このエネルギー領域における、あるエネルギー E における中性子の全反応率は、散乱反応による中性子のエネルギー変化（ E' から E に変化）を表す散乱カーネル $P(E' \rightarrow E)$ を用いて次の減速方程式 (a) で表わされるとする。

$$\Sigma_t(E)\phi(E) = \int_E^\infty P(E' \rightarrow E)\Sigma_s(E')\phi(E')dE' \quad (\text{a})$$

ここで、 $\Sigma_t(E)$ はエネルギー E での全断面積、 $\Sigma_s(E')$ はエネルギー E' での散乱断面積、 $\phi(E)$ はエネルギー E での中性子束である。また、散乱が重心系で等方散乱である場合、重心系での散乱角度 θ を用いて、式 (b) の関係が成立することが知られている。

$$\frac{E}{E'} = \frac{1}{2}[(1 + \alpha) + (1 - \alpha)\cos\theta] , \quad \text{ただし } \alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \quad (\text{b})$$

このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 式 (b) の関係より、散乱後に E となる、散乱前の E' の最大値および最小値を求めよ。
- (2) 重心系等方散乱の場合の散乱カーネル $P(E' \rightarrow E)$ は、あるエネルギー範囲で有限の一定値をとり、その他のエネルギー範囲ではゼロとなる。この有限の一定値を表す式及びエネルギー範囲を示せ。
- (3) 媒質の原子核が水素（質量数 1 とする）とし、媒質による中性子の吸収が無視できる場合における中性子束 $\phi(E)$ のエネルギー依存性を表す式を求めよ。
- (4) 減速エネルギー領域よりもエネルギーが低い熱エネルギー領域について考える。
 - (i) 熱エネルギー領域においては、式 (a) ではエネルギー E での全反応率を正しく表すことができないことの原因を、式中の修正すべき点と合わせて説明せよ。
 - (ii) 熱エネルギー領域における水素の散乱断面積は、汎用ライブラリである JENDL には化学形態 (H_2O や ZrH など) により異なるデータとして格納されている。なぜ異なるデータとして格納する必要があるのかを、熱エネルギー領域での散乱反応の特徴を踏まえて説明せよ。

第4問 一様媒質の有限な円柱体系（半径 R 、高さ H とする）の裸の原子炉に対するエネルギー1群理論での拡散方程式について考える。媒質の拡散係数、吸収及び生成断面積をそれぞれ D 、 Σ_a 、 $\nu\Sigma_f$ として以下の問いに答えよ。

- (1) 中性子束 $\phi(r, z)$ 、実効増倍率 k を用いて、原子炉内の拡散方程式を記述せよ。
- (2) (i) 形状バックリング（幾何学的バックリング） B^2 を用いて、臨界方程式（臨界条件）を記述せよ。
(ii) 形状バックリングと材料バックリングの大きさの比較により、体系の臨界性（超過臨界、臨界、未臨界）が判断できる理由について、それぞれのバックリングの値が持つ意味を踏まえて説明せよ。
- (3) (i) この原子炉の形状バックリング B^2 を、 R と H を用いて記述せよ。ただし、外挿距離はゼロとする。
(ii) 最も小さい体積で臨界となるときの R と H の比 (R/H) を求めよ。ただし、外挿距離はゼロとする。
- (4) 反射体（軽水）付きの軽水炉においては、エネルギー1群理論では炉心特性の議論が困難になる（炉心特性が正しく求まらなくなる）理由について説明せよ。

第5問 臨界状態にある原子炉について反応度を添加したときの出力変化を考える。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 時刻 t における中性子密度 $n(t)$ に対する一点炉動特性方程式を記述せよ。ただし、遅発中性子先行核の群数は1群とし、遅発中性子先行核原子数密度を $C(t)$ 、反応度を ρ 、遅発中性子割合を β 、遅発中性子先行核の崩壊定数を λ 、中性子生成時間を Λ とする。
- (2) 上記(1)で記述した一点炉動特性方程式に対し、中性子密度の時間微分項は無視できるという近似(即発跳躍近似)を適用する。この近似はどの時間領域で中性子密度の時間変化を記述することができるのか、理由とともに述べよ。
- (3) 時刻 $t = 0$ においてステップ状の反応度 ρ_0 を原子炉に添加したとする。原子炉は $t < 0$ において $n(t) = n_0$ で臨界であるとし、反応度添加直後の中性子密度を n_0^+ とする。このとき中性子密度の変化(n_0^+/n_0)を即発跳躍近似によって求めよ。導出過程も記述せよ。
- (4) 即発跳躍近似で簡略化された一点炉動特性方程式を解き、時刻 t における中性子密度を求めよ。導出過程も記述せよ。
- (5) 上記(4)の結果を用いて、ステップ状の反応度 ρ_0 を原子炉に添加したときの原子炉周期(安定ペリオド)を求めよ。

第6問 ウランを燃料とする熱中性子炉において反応度変化を考える。以下の問いに答えよ。

- (1) 燃焼に伴う反応度変化として考慮しなければならない核種として ^{135}Xe がある。その理由を説明せよ。
- (2) 上記(1)の反応度に対する影響を何というか答えよ。また、 ^{135}Xe 以外に燃焼に伴う反応度変化として考慮しなければならない核種があれば答えよ。
- (3) ^{135}Xe の生成および崩壊過程は以下のように示される。

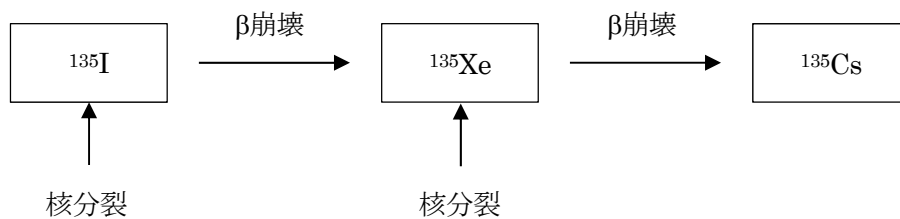


図1 ^{135}Xe の生成および崩壊過程

^{135}I はすべて核分裂によって生成するものとする。このとき、 ^{135}I と ^{135}Xe の原子数密度が満たす方程式を記述せよ。記号は、表2の中から必要なものを用いよ。

- (4) 原子炉が出力一定で平衡状態にあるとする。このときの ^{135}I と ^{135}Xe の原子数密度を求めよ。ただし、 ^{135}I の中性子吸収による寄与は無視できるものとする。記号は、表2の中から必要なものを用い、導出過程も記述せよ。
- (5) ^{135}Xe の蓄積は原子炉の無限増倍率 k_{∞} に影響を与える。
 - (ア) 無限増倍率を四因子公式で表したとき、影響を与えるパラメータをあげよ。
 - (イ) 平衡状態の ^{135}Xe による反応度変化 $\Delta\rho$ を求めよ。記号は、表2の中から必要なものを用い、導出過程も記述せよ。

表 2 使用する記号の一覧

核種に依存するパラメータ	^{135}I	^{135}Xe	^{135}Cs
時刻 t における原子数密度	$I(t)$	$X(t)$	$C(t)$
平衡状態での原子数密度	I_{∞}	X_{∞}	C_{∞}
崩壊定数	λ_I	λ_X	λ_C
核分裂収率	γ_I	γ_X	γ_C
微視的熱中性子吸収断面積 (平均)	σ_I	σ_X	σ_C
核種に依存しないパラメータ			
中性子束	ϕ		
巨視的熱中性子核分裂断面積 (平均)	Σ_f		
核分裂あたりの平均中性子発生数	ν		
再生率 (燃料に吸収された熱中性子 1 個あたりに発生する核分裂中性子数の平均値)	η		
熱中性子利用率	f		
共鳴を逃れる確率	p		
高速核分裂因子	ε		
高速中性子が体系から漏れない確率	P_F		
熱中性子が体系から漏れない確率	P_T		