

第 61 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 31 年 3 月 13 日

第1問 中性子と原子核の反応に関する以下の問いに答えよ。

- (1) 1種類の標的核からなる厚さ  $t$  の物質（以下、標的）に中性子が表面に対して垂直に入射するものとする。中性子と標的核の反応断面積が  $\sigma$ 、中性子の速度が  $v$ 、中性子束が  $\phi$ 、標的核の数密度が  $N$  で、標的の厚さ  $t$  が標的内での中性子の減衰が無視できるほど薄い場合、標的内で起きる単位面積かつ単位時間あたりの反応率を表す式を記し、正しい単位であることを示せ。
- (2) 上記（1）と同じ条件で標的が厚く標的内での中性子の減衰が無視できない場合、標的内の厚さ方向に積分した単位面積かつ単位時間あたりの反応率を表す式を求めよ。
- (3) 微視的断面積  $\sigma$  と巨視的断面積  $\Sigma$  の関係式を示せ。
- (4) 媒質内での中性子の平均自由行程を表す式を上記（1）で挙げた物理量を使って示せ。
- (5) 入射中性子のエネルギーに分布がある場合、その範囲内で断面積に幅の狭い共鳴があると媒質内での中性子エネルギースペクトルはどのようになるか、また、それが原子炉に対してどのような影響を与える可能性があるかを記せ。
- (6) 上記（5）の条件の下で媒質の温度が低い場合と高い場合では媒質内での全反応率はどのように変化するかを理由とともに記せ。
- (7) 軽水炉における中性子の減速が連続的でなく離散的なエネルギー遷移であることが  $U$  を燃料とする軽水炉の特性に与える影響を上記（6）との関連を含めて記せ。
- (8) 上記（6）、（7）の現象が軽水炉の温度係数に与える影響を  $^{238}\text{U}$  による共鳴吸収の観点から記せ。
- (9) 中性子と原子核の相互作用断面積は、発熱反応の場合、共鳴がなければ低エネルギーで  $1/v$  則を示す。その理由を説明せよ。

第2問 半径  $R$  の球状の媒質 I が無限の広がりを持つ媒質 II の中に置かれているものとする。媒質 I の中心には単位時間に  $S$  個の中性子を放出する点状の中性子源が置かれて定常状態になっている。拡散係数  $D$  は媒質 I と II で共通であり、巨視的吸収断面積は媒質 I では  $\Sigma$ 、媒質 II ではゼロとし、両媒質とも核分裂性物質ではないものとする。中性子源からの距離を  $r$  とし、 $\kappa = \sqrt{\Sigma/D}$  とする。以下の問いに答えよ。

- (1)  $r=0$  を除く媒質 I 及び II 内における一群の中性子拡散方程式をそれぞれ記せ。ただし媒質 I 及び II における中性子束をそれぞれ  $\phi_I$ 、 $\phi_{II}$  とする。
- (2) 点状中性子源の直近周囲における中性子数の保存則を表す式を記せ。
- (3)  $r=R$  における中性子束及び中性子の流れの連続性を表す式を記せ。
- (4) 媒質 I 及び II に対して、上記 (1) で求めた方程式の一般解を求めよ。ただし球座標系における演算子  $\nabla^2 - b^2$  が以下の関係を満たすことを用いてよい。ただし  $\nabla^2$  はラプラス演算子、 $b$  は定数である。

$$\left(\nabla^2 - b^2\right) \frac{e^{\pm br}}{r} = 0$$

- (5) 上記 (1) ~ (4) を満たす解が原点を除いて以下の式で与えられることを示せ。

$$\phi_I = \frac{S}{4\pi Dr} \cdot \frac{\cosh \kappa(R-r)}{\cosh(\kappa R)}$$

$$\phi_{II} = \frac{S}{4\pi Dr} \cdot \frac{1}{\cosh(\kappa R)}$$

- (6) 中性子源から放出された中性子が媒質 I の中で吸収される確率を求めよ。

第3問 以下の問いに答えよ。記号や文字を使用する場合には、その記号や文字が表す物理量や意味の説明をつけよ。

- (1) 均質な有限体系の原子炉におけるエネルギー2群の定常状態の中性子拡散方程式を記述し、その方程式の各項の表す物理量（物理的意味）について説明せよ。ただし、核分裂により生成する中性子は第1群（高速群）にのみ寄与し、第2群（熱群）から第1群への上方散乱は無いものとする。
- (2) 無限体系の場合には中性子増倍率は無限増倍率であり、4因子公式で表すことができる。上記(1)で記述した方程式から、4因子公式の各因子を表す式を導出せよ。
- (3) 有限体系の場合には中性子増倍率は実効増倍率であり、6因子公式で表すことができる。6因子公式で表れる6つの因子について説明せよ（導出しなくてよい）。
- (4) 以下に述べる実効増倍率の変化は、6因子公式の中のどの因子の変化が主に寄与しているかを、理由と共に説明せよ。
  - (a) 冷却水中のホウ素濃度減少に伴う実効増倍率の増加
  - (b) 燃料のウラン<sup>235</sup>濃縮度を下げることに伴う実効増倍率の減少
  - (c) 燃料と水を非均質に配置した体系を、均質な（平均の）組成とした体系に変換することによる実効増倍率の減少
  - (d) 均質な組成の立方体形状から、同じ体積の均質な組成の球形状に変換することによる実効増倍率の増加

第4問 熱中性子炉における中性子スペクトルを、核分裂エネルギー領域、減速（共鳴）エネルギー領域、熱エネルギー領域の3つの領域に分けて考える。このとき以下の問いに答えよ。記号や文字を使用する場合には、その記号や文字が表す物理量や意味の説明をつけよ。

- (1) 核分裂エネルギー領域での中性子スペクトルは、核分裂スペクトルで近似できる。ウラン 235 の核分裂スペクトルの、最も確率の高いエネルギー及び平均値は何 MeV 程度かを述べよ。
- (2) 熱エネルギー領域での中性子スペクトルは、マックスウェル・ボルツマン分布で近似できるが、中性子エネルギーの最確値は媒質温度から想定される温度よりも高い温度（中性子温度）に相当するエネルギーとなる理由を説明せよ。
- (3) 減速エネルギー領域での、あるエネルギー  $E$  での全反応率を表す減速方程式を記述せよ。ただし、散乱反応によって  $E'$  から  $E$  に変化する確率密度関数を表す散乱カーネルは  $P(E' \rightarrow E)$  とし、核分裂によって生成する中性子の寄与は無いものとする。
- (4) 水素媒質中での減速について考えると、減速エネルギー領域における散乱カーネルは次式で表現される。

$$P(E' \rightarrow E) = \frac{1}{E'}$$

また減速エネルギー領域では、水素の吸収断面積は小さく、全断面積と散乱断面積の大きさが同じと近似できるとする。

- (a) 上に示した散乱カーネルおよび近似を用いて、上記（3）で記述した減速方程式を解き、水素媒質中における減速エネルギー領域での中性子スペクトルのエネルギー依存性を表す式を求めよ。
- (b) (a) の結果を踏まえ、さらに減速エネルギー領域では水素の全断面積は一定であると近似する。このとき、エネルギーではなくレサジーで表現した中性子スペクトルは一定値となることを示せ。

第5問 原子炉の一点炉動特性方程式は以下で表されるものとする。

$$\frac{d}{dt}n(t) = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda}n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{d}{dt}C_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda}n(t) - \lambda_i C_i(t)$$

ただし、 $n(t)$ は時刻 $t$ における中性子密度、 $\rho$ は反応度、 $\Lambda$ は中性子世代時間、 $\lambda_i$ は $i$ 群の遅発中性子先行核の崩壊定数、 $C_i$ は $i$ 群の遅発中性子先行核密度、 $\beta_i$ は $i$ 群の実効遅発中性子割合、 $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$ である。

原子炉の出力が時刻 $t$ に対して次式のように変化したとする。

$$n(t) = \begin{cases} n_0 & , t < 0 \\ n_0(1 + at) & , t \geq 0 \end{cases}$$

このとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $C_i(t)$ を求めよ。ただし、 $C_i(t) = b_1 e^{-\lambda_i t} + b_2 t + b_3$ の関数形で表すことができる。
- (2) 反応度 $\rho(t)$ を求めよ。
- (3)  $\rho(0)$ と $\rho(\infty)$ を求めよ。
- (4)  $a = 0.1$ 、 $\Lambda = 10^{-4}$ 、 $\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} = 0.1$ の場合の反応度 $\rho(t)$ のグラフの形を示せ。

第6問 1リットルの密封された ${}^3\text{He}$ ガスを熱中性子で十分に長い時間照射した。 ${}^3\text{He}$ は中性子と反応して ${}^3\text{H}$ となり、 ${}^3\text{H}$ は崩壊して ${}^3\text{He}$ となるため、平衡状態に達する。

- (1)  ${}^3\text{He}$ と ${}^3\text{H}$ それぞれに対し、原子個数の時間変化を表す方程式を書け。変数名として、 ${}^3\text{He}$ の原子個数 $N_{\text{H}}$ 、 ${}^3\text{He}$ の初期原子個数 $N_{\text{H}0}$ 、 ${}^3\text{H}$ の原子個数 $N_{\text{T}}$ 、熱中性子束 $\phi$ 、生成断面積 $\sigma$ 、 ${}^3\text{H}$ の崩壊定数 $\lambda$ を用いよ。
- (2)  ${}^3\text{He}$ と ${}^3\text{H}$ の原子個数の和の時間変化を求めよ。
- (3)  ${}^3\text{He}$ と ${}^3\text{H}$ の原子個数の時間変化をそれぞれ求めよ。
- (4) 平衡状態における ${}^3\text{He}$ と ${}^3\text{H}$ の原子個数の比を数値で求めよ。ただし、1モルの ${}^3\text{He}$ ガスの体積を20リットル、アボガドロ数を $6 \times 10^{23}$ 、熱中性子束を $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2/\text{秒}$ 、 ${}^3\text{H}$ の生成断面積を5,400b、 ${}^3\text{H}$ の崩壊定数を $1.8 \times 10^{-9}/\text{秒}$ とする。
- (5) このときの ${}^3\text{H}$ の放射エネルギーを求めよ。