

## 第 67 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7年3月17日

第1問 中性子と原子核の反応について次の問いに答えよ。

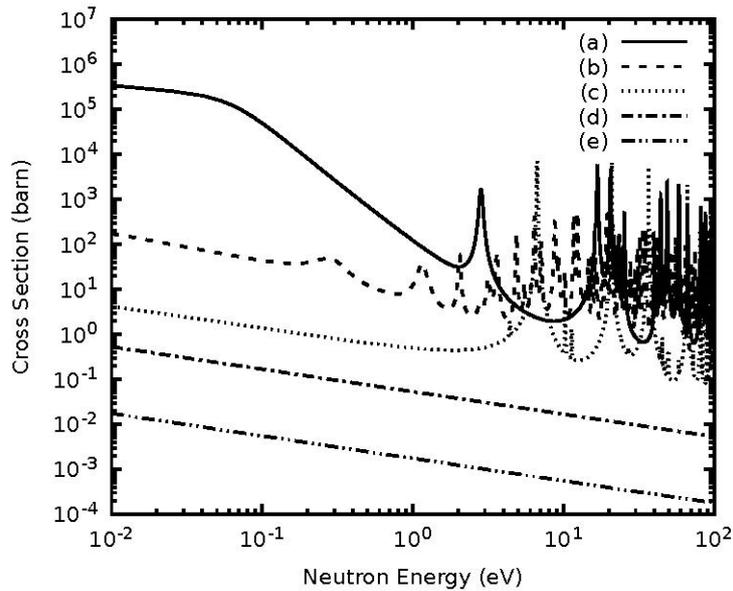
- (1) 原子核の半径 $R$ が下記の式に従うとする。 $a$ 及び $b$ の値を答えよ。ただし、 $A$ は原子核の質量数を表す。

$$R = 1.2 \times 10^a A^b \text{ (m)}$$

- (2) 下図に様々な原子核に対する中性子捕獲断面積を示す。(a)、(b)、(c)、(d)、(e)は何の原子核に対する断面積か、記号で記せ。

[回答例] (f) - (へ)

(イ)  $^1\text{H}$  (ロ)  $^{90}\text{Zr}$  (ハ)  $^{157}\text{Gd}$  (ニ)  $^{235}\text{U}$  (ホ)  $^{238}\text{U}$



- (3) (2)において(d)及び(e)は対数グラフ上で中性子エネルギーに対してほぼ直線的に変化している。中性子エネルギーの何乗に比例しているか答えよ。

(4) 熱中性子により  $^{235}\text{U}$  が核分裂を起こす場合に放出されるエネルギーはおよそどの程度か、記号で記せ。

(イ) 2 MeV (ロ) 20 MeV (ハ) 200 MeV (ニ) 2,000 MeV

(5) (4) で放出されるエネルギーはどの粒子 (線) によって最も多く放出されるか、記号で記せ。

(イ) アルファ線 (ロ) ベータ線 (ハ) ガンマ線 (ニ) 中性子 (ホ) 核分裂片

(6) 核分裂によって放出される遅発中性子と即発中性子について、それぞれの放出機構を述べよ。また、平均の中性子数およびエネルギーの大小関係を述べよ。

第2問 拡散係数 $D$ 、巨視的吸収断面積 $\Sigma_a$ をもつ核分裂物質を含まない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)  $x = 0$ に $y - z$ 平面に平行な単位時間、単位面積当たり  $S_0$ 個の中性子を等方に放出する厚さがゼロの無限平板中性子源があるとする。中性子束は $x$ のみに依存し、その中性子束を $\phi_0(x)$ とする。拡散方程式及び境界条件を示し、 $\phi_0(x)$ を求めよ。 $x = 0$ に対して対称とし、 $x \geq 0$ の場合について考えることとする。
- (2) (1)の中性子源を $x = 0$ を中心とする厚さ $2a$ の中性子源に変えたとする。中性子源は単位時間、単位体積当たり  $S$ 個の中性子を放出するものとする。領域1( $-a \leq x \leq a$ )の中性子束を $\phi_1(x)$ 、領域2( $x \geq a$ )の中性子束を $\phi_2(x)$ とする。拡散方程式及び境界条件を示し $\phi_1(x)$ 及び $\phi_2(x)$ を求めよ。 $x = 0$ に対して対称とし、 $x \geq 0$ の場合について考えることとする。
- (3) (1)の中性子源を $x = x'$ に移動し、単位時間、単位面積当たり 1個の中性子を放出する中性子源に変えたとする。 $x'$ の中性子源による座標 $x$ の中性子束  $G(x, x')$ を求めよ。  
(1)の結果を用いてよい。
- (4) (3)で求めた  $G(x, x')$ を用いて、(2)の場合の中性子束  $\phi_1(x)$ 及び $\phi_2(x)$ を求めよ。

第3問 原子炉及び核燃料の臨界性に関する以下の問いに答えよ。

- (1) 燃料棒を軽水の減速材中に規則正しく並べた PWR や BWR の様な軽水炉の臨界性について調べている。
- (i) 燃料棒の直径を一定として、規則正しく配列する燃料棒の間隔 $P$ を変化させた時の無限中性子増倍率 $k_{\infty}$  はどのような挙動を示すかを図示せよ。 $P$ に対する $k_{\infty}$ の変化の傾向がわかればよく、定量的な正しさは問わない。
- (ii) 安全性の観点から、どのような $P$ の条件で核燃料の設計をするべきかを、その理由とともに述べよ。
- (iii) (ii) に示した $P$ の条件は (i) で回答した図ではどこに該当するかを示せ。

- (2) 原子炉の臨界性に関する以下の説明において、に入る適切な語句を番号とともに記せ。なお、同じ番号のには同じ語句が入る。

〔解答例〕 ⑦－東京

イタリアの物理学者フェルミが率いたチームは、燃料に①、②に黒鉛を使用して世界初となる原子炉をシカゴ大学に建設した。①と黒鉛を均質にまぜても  $k_{\infty}$  は 0.9 程度にしかならないが、フェルミらは燃料を③に配列することで原子炉を臨界にすることに成功した。これは、②と燃料を空間的に分離することにより、熱中性子が促進されるとともに、共鳴中性子が燃料の④で優先的に吸収され、中性子の⑤確率が⑥なることを利用したものだ。この空間的自己遮蔽を利用して臨界性を高めるアイデアは低濃縮度ウランを使用した燃料設計の基礎である。

- (3) ナトリウム冷却高速炉で炉心溶融事故が起きて溶融した燃料が堆積すると再臨界を起こす可能性がある。一方、軽水炉燃料が溶融して堆積しても再臨界を起こす可能性は小さいと考えられる。この違いを両炉の核的な性質の違いに基づいて述べよ。

第4問 一般的な軽水炉に関する以下の問いに答えよ。

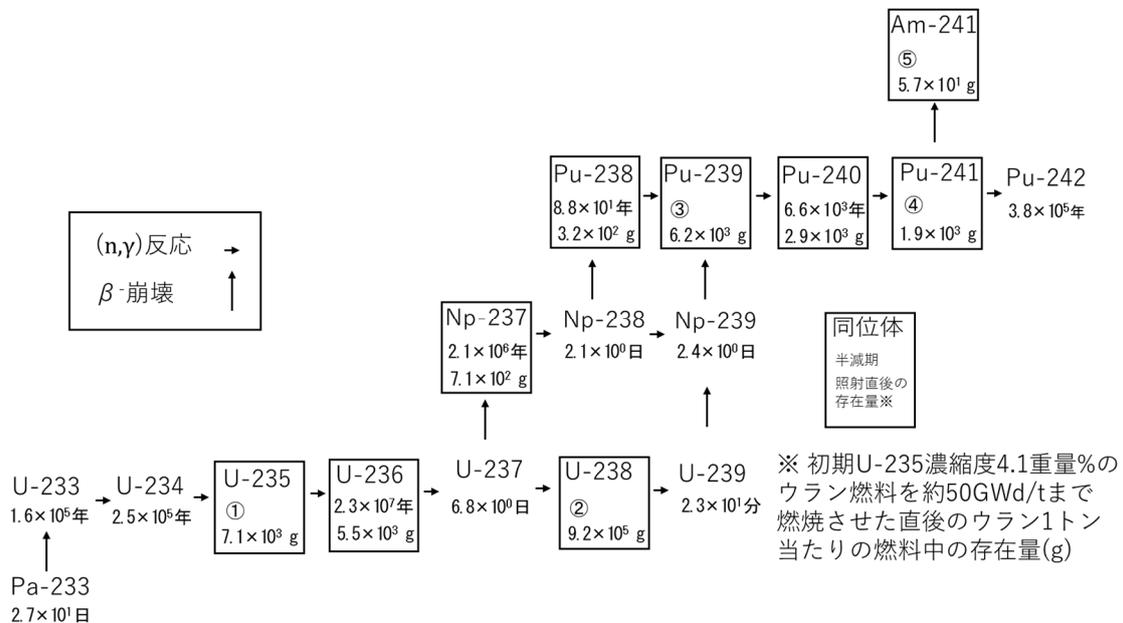
- (1) 原子炉を運転すると中性子捕獲断面積が大きな核分裂生成物が生成されることが知られている。その代表的な核種に  $^{135}\text{Xe}$  や  $^{149}\text{Sm}$  がある。これらの生成と消滅に関する以下の問いに答えよ。

巨視的核分裂断面積  $\Sigma_f$  を持つ物質からなる原子炉が、時刻  $t=0$  から一定の中性子束  $\phi$  で運転したとする。また、時間依存の  $^{135}\text{I}$  の原子数密度を  $I(t)$ 、核分裂により生成する割合を  $Y_i$ 、崩壊定数を  $\lambda_i$ 、時間依存の  $^{135}\text{Xe}$  の原子数密度を  $X(t)$ 、核分裂により生成する割合を  $Y_x$ 、崩壊定数を  $\lambda_x$ 、 $^{135}\text{Xe}$  の微視的中性子捕獲断面積を  $\sigma_x$  とする。なお、 $^{135}\text{I}$  の中性子反応断面積は無視できるとする。

- (i)  $I(t)$  の従う式を示せ。
- (ii)  $X(t)$  の従う式を示せ。
- (iii)  $^{135}\text{I}$  と  $^{135}\text{Xe}$  の運転中の平衡値を示せ。
- (iv)  $^{135}\text{Xe}$  と同様に大きな中性子捕獲反応を持つ核種に  $^{149}\text{Sm}$  がある。 $^{135}\text{Xe}$  は半減期が 9 時間程度と短いために、原子炉の出力上昇と運転停止に従ってその量が大きく変化する。初装荷炉心での運転開始時の  $^{149}\text{Sm}$  の蓄積は  $^{135}\text{Xe}$  の場合と違ってどのような特徴があるかを、生成に関与する核種に触れながら述べよ。

(2) 以下の図にウラン燃料が燃焼した時の燃料中の  $^{241}\text{Am}$  までの核種の組成の変化がどのように起こるかを、中性子捕獲反応による主要な生成経路、及び放射性崩壊とその半減期も含めて示した。特に重要な核種には燃焼計算の結果得られた組成(重量(g)/初期ウラン1トン)の例も示してある。使用済燃料を保管している間に半減期の違いによってそれぞれの核種の原子数密度が変化していき、それが燃料の反応度に影響を及ぼすことが予想される。それに関する以下の問いに答えよ。

(i) 基礎的データとして同位体名の下に半減期が示されているが、未記載の核種もある。記載されていない①から⑤に入る半減期を指数表示により有効数字2桁で時間単位も含めて示せ(例:⑥  $1.0 \times 10^7$ 年)。



(ii) 上の図にあるデータと (i) での回答を参考に、この使用済核燃料を 100 年程度保管する間に中性子増倍率はどのように変化するかを、その反応度変化を与える主要な同位体を 2 つ示して説明せよ。核分裂生成物や構造材の変化は考えない。

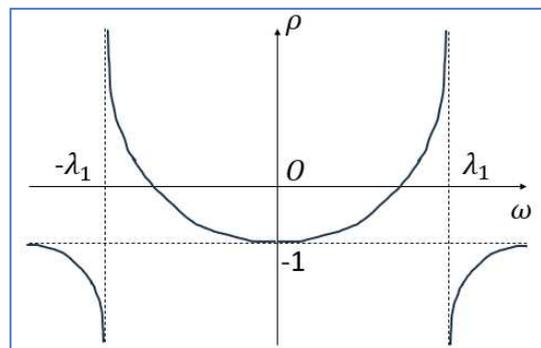
(iii) この使用済核燃料を数億年以上保管し、さらにそれ以上に長い時間が経過する状況を仮想的に考えてみる。燃料の組成はどのようになりそれに伴って中性子増倍率はどのように変化していくと考えられるかを、その理由とともに述べよ。上の図にある核種だけを考えることとする。

第5問 原子炉の動特性について以下の問いに答えよ。

- (1) 以下のパラメータについて、ウラン燃料を用いた一般的な軽水炉でのおおよその値を答えよ。
- 実効遅発中性子割合
  - 即発中性子寿命
  - 臨界状態の原子炉に対して大きな負の反応度が添加されたときの安定ペリオド
- (2) 臨界状態の原子炉に対して時刻 $t = 0$ で反応度をステップ状に添加したときの中性子密度の変化を、遅発中性子先行核 1 群の一点炉動特性方程式で考える。時刻 $t$ における中性子密度を $n(t)$ 、遅発中性子先行核密度を $C(t)$ 、中性子生成時間を $\Lambda$ 、遅発中性子割合を $\beta$ 、遅発中性子先行核の崩壊定数を $\lambda$ とする。なお、(ii)、(iii)の解答においては、適切な近似を導入してよいものとする。
- 反応度 $\rho$ を添加したときの $t > 0$ での動特性方程式を記述せよ。
  - 正の反応度 $\rho_1 > \beta$ を添加したときの安定ペリオドを導出せよ。なお、 $(\rho_1 - \beta)$ は零よりも十分に大きいものとする。
  - 正の反応度 $\rho_2 < \beta$ を添加したときの安定ペリオドを導出せよ。なお、 $(\beta - \rho_2)$ は零よりも十分に大きいものとする。
- (3) 遅発中性子先行核 6 群での逆時間方程式は、即発中性子寿命を $\ell$ 、反応度を $\rho$ 、遅発中性子先行核第 $i$ 群の崩壊定数と遅発中性子割合をそれぞれ $\lambda_i$  ( $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_6$ )、 $\beta_i$ としたとき、以下のように書ける。

$$\rho = \frac{\omega \ell}{1 + \omega \ell} + \frac{1}{1 + \omega \ell} \sum_{i=1}^6 \frac{\omega \beta_i}{\omega + \lambda_i}$$

これに基づいて、横軸を $\omega$ 、縦軸を $\rho$ とした図を書け。横軸、縦軸の範囲は正負ともに無限大までとする。横軸に平行な直線 $\rho = \hat{\rho}$ との交点位置がとりうる範囲、交点位置の $\hat{\rho}$ に対する依存性がわかるものであればよい (右に作図の例を示す)。



第6問 一般的な軽水炉における中性子の減速について以下の問いに答えよ。

- (1) 単位レサジー当たりの炉心の平均的中性子束を、エネルギーの対数値を横軸として図示した際に、一般的には高エネルギー領域、低エネルギー領域にピークが観察される。それぞれのピークに対応するエネルギーのおおよその値を答えよ。
- (2) (1)における高エネルギー領域の中性子は、原子核との相互作用により、運動エネルギーを低下させる。その相互作用のうち、弾性散乱反応以外のものを一つ挙げるとともに、弾性散乱反応に対する差異を述べよ。
- (3) 水素と吸収物質が一様に混合している無限に広い媒質中に中性子源が一様に分布しているモデルを考え、中性子源が単位体積当たり毎秒 $S$ 個の中性子をエネルギー $E_0$ で放出しているとする。吸収物質の散乱は無視するものとし、媒質の巨視的弾性散乱断面積、吸収断面積をそれぞれ $\Sigma_s$ 、 $\Sigma_a$ とする。さらに、水素の弾性散乱反応は重心系で等方であるとする。
- (i) エネルギー $E$ における区間 $dE$ について、そこで起こる中性子と原子核の相互作用の数とそこに入ってくる中性子の数が等しいことを踏まえ、衝突密度 $F(E)$ が満足する以下の方程式を導出せよ。なお、水素の弾性散乱による反応後の中性子エネルギーが従う確率密度関数（散乱カーネル）は既知のものであるとしてよい（導出する必要はない）。

$$F(E) = \frac{S}{E_0} + \int_E^{E_0} F(E') \frac{\Sigma_s(E')}{\Sigma_s(E') + \Sigma_a(E')} \frac{dE'}{E'}$$

- (ii) (i)で示された方程式を解き、以下が得られることを示せ。

$$F(E) = \frac{S}{E} \exp\left(-\int_E^{E_0} \frac{\Sigma_a(E')}{\Sigma_s(E') + \Sigma_a(E')} \frac{dE'}{E'}\right)$$

- (iii) エネルギー $E$ での減速密度 $q(E)$ が以下であることを示せ。

$$q(E) = S \exp\left(-\int_E^{E_0} \frac{\Sigma_a(E')}{\Sigma_s(E') + \Sigma_a(E')} \frac{dE'}{E'}\right)$$

- (iv) このモデルに基づき、四因子公式におけるいずれかの因子を得ることができる。いずれの因子がどのように得られるか答えよ。

- (4) (1)における低エネルギー領域の中性子束のエネルギー $E$ に対する依存性 $\phi(E)$ が以下で記述されるものとする。ここで $k$ はボルツマン定数、 $T$ は媒質の絶対温度を示す。

$$\phi(E) \propto E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

- (i)  $\phi(E)$ が最大値をとるエネルギーを $k$ 、 $T$ を用いて表せ。導出過程も記せ。
- (ii) 実際の軽水炉では、低エネルギー領域において $\phi(E)$ が最大値をとるエネルギーは(i)で得られたものよりも高い。その理由を述べよ。