

第 68 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 8 年 3 月 16 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) 原子番号 Z 、質量数 A を持つ原子核の質量を M としたとき、質量欠損 Δm の値を求めよ。ただし、陽子の質量を m_p 、中性子の質量を m_n とし、電子の結合エネルギーは無視するものとする。
- (2) 原子核 A と粒子 a が反応し、粒子 b と残留核 B を生成する反応 $A(a, b)B$ を考える。これらの原子核と粒子の質量を m_x (ここで $x=A, a, B, b$) としたとき、反応の Q 値を m_x を用いて表せ。ただし、光の速さを c とする。
- (3) (2) で Q 値が負の場合の反応のしきいエネルギー E_{th} を求めよ。
- (4) エネルギー E_n の中性子と原子核 A が中性子捕獲反応を起こし原子核 B を生成するとき、放出されるガンマ線の最大エネルギーを求めよ。ここで中性子の質量を m_n 、 A, B の質量は、(2) と同様とする。ただし、ガンマ線放出による原子核の反跳は無視するものとする。
- (5) 下図に ^{239}Pu の代表的な中性子反応断面積の入射中性子エネルギー依存性を示す。図(a)、図(b)、図(c)、図(d)は、それぞれ何の反応か答えよ。

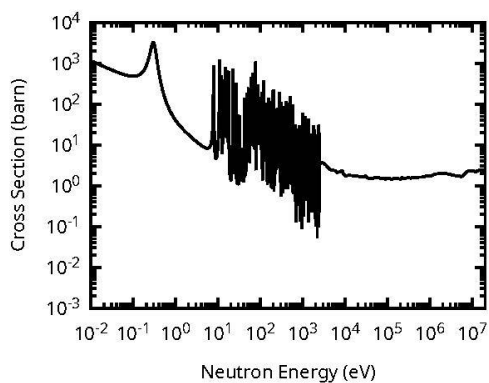


図 (a)

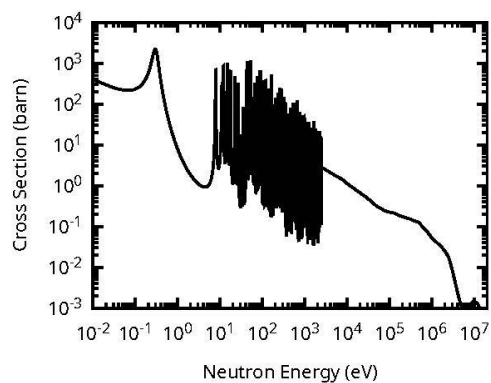


図 (b)

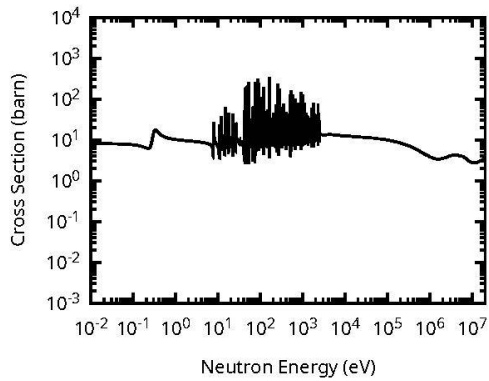


図 (c)

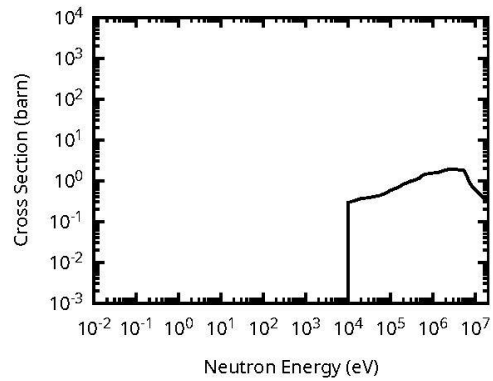


図 (d)

- (6) 中性子による ^{235}U の核分裂反応について、平均の即発中性子放出数と遅発中性子放出数の入射中性子エネルギー依存性をそれぞれ下図(e)、(f)に示す。即発中性子は入射中性子エネルギーに対して単調に増加しているが、遅発中性子の入射中性子エネルギー依存性は即発中性子の場合に比べて複雑である。これらの違いが生まれる主な理由について、それぞれの発生機構に基づき簡潔に説明せよ。

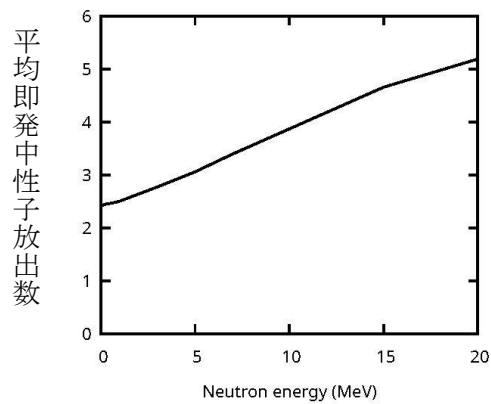


図 (e)

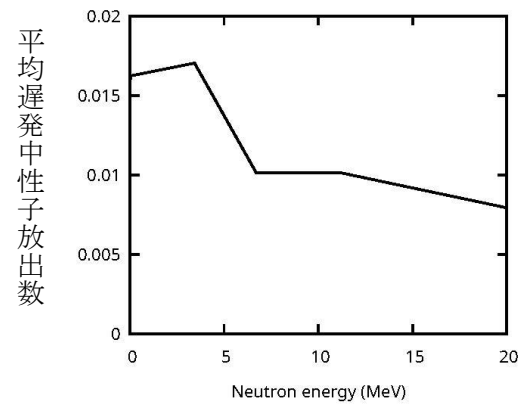
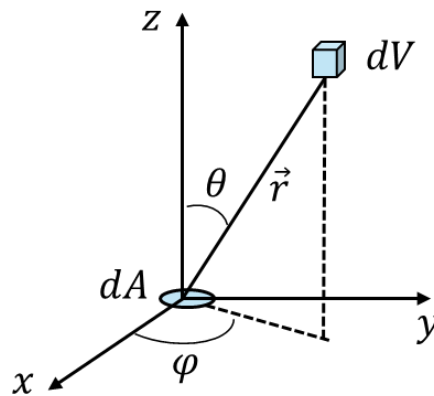


図 (f)

第2問 核分裂性物質を含まない巨視的散乱断面積 Σ_s を持つ一様な無限均質体系において、ある中性子束空間分布をもつ場合の中性子の拡散を考える。すべての中性子が同一の速さを持ち、散乱によって速さを変えず、等方に散乱されるものとする。中性子と原子核の反応は散乱のみ起こり吸収は無視できるものとする。下図の体系中の座標 \vec{r} における中性子束を $\phi(\vec{r})$ とし、 \vec{r} にある微小体積要素 dV で散乱された中性子が原点近傍を通過する場合を考える。原点の x - y 平面上にある微小面積要素 dA を z 軸のプラスからマイナスに横切る中性子数を $J_z^-(0)dA$ とするとき、以下の問いに答えよ。ここで、 \vec{r} のデカルト座標における表示を (x, y, z) 、極座標における表示を (r, θ, φ) とする。ただし、 $r = |\vec{r}|$ である。



- (1) \vec{r} において dV により dA を見込む立体角に散乱される単位時間あたりの中性子数を求めよ。
- (2) 中性子が相互作用せずに距離 r を飛行できる確率を示せ。
- (3) (1)、(2)の結果を用いて、寄与する全空間で積分することにより $J_z^-(0)$ を計算する式を極座標表示で求めよ。
- (4) 中性子束 $\phi(\vec{r})$ は \vec{r} に対して緩やかに変化するものとし、 $\phi(\vec{r})$ を原点においてデカルト座標上でテイラー展開した1次までの近似式を求めよ。
- (5) (3)において、(4)を用いた場合の $J_z^-(0)$ を求めよ。
- (6) (5)と同様にマイナスからプラス方向に横切る中性子密度 $J_z^+(0)$ を求めよ。
- (7) (5)、(6)の結果を用いた正味の中性子の流れ $\vec{J}(\vec{r})$ を求めよ。また、拡散係数を D としたときの拡散理論による定義 $\vec{J}(\vec{r}) = -D \text{grad } \phi(\vec{r})$ と比較し、 D と巨視的散乱断面積 Σ_s との関係を求めよ。

第3問 原子炉の一点炉動特性方程式が以下で表されるものとする。なお、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 $C(t)$ 、反応度を $\rho(t)$ とする。また、中性子生成時間を Λ 、遅発中性子割合を β 、遅発中性子先行核の崩壊定数を λ とし、これらは一般的な軽水炉での値をとるものとする。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda C(t) \quad \text{①}$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda C(t) \quad \text{②}$$

- (1) 微小時間幅 $t \sim t + \Delta t$ における、遅発中性子先行核の崩壊による中性子密度の変化量と、核分裂反応による遅発中性子先行核密度の変化量を、 $n(t)$ 、 $C(t)$ を用いて表せ。
- (2) $t < 0$ で臨界状態であった原子炉に対して $t = 0$ で正の反応度 ρ' をステップ状に添加したとする。なお、反応度添加後の原子炉は即発臨界を十分に下回っているものとする。反応度を添加する直前の中性子密度、遅発中性子先行核密度をそれぞれ n_0 、 C_0 としたとき、 C_0 を n_0 を用いて表せ。
- (3) (2)において、反応度を添加した直後の遅発中性子先行核密度の変化が無視できるほど小さいとしたときの、反応度を添加した直後の $n(t)$ が従う①式に相当する微分方程式を記述せよ。
- (4) (3)で得られた微分方程式を解くと以下が得られる。

$$n(t) = \frac{\rho' n_0}{\rho' - \beta} \exp\left(\frac{\rho' - \beta}{\Lambda} t\right) - \frac{\beta n_0}{\rho' - \beta}$$

この式に基づいて、(2)において、反応度を添加した直後の中性子密度が $\frac{\beta n_0}{\beta - \rho'}$ と得られることを示せ。

- (5) (2)において、反応度を添加した直後の短い時間での過渡変化以降の状態に対して、 $\left|\frac{dn(t)}{dt}\right| \ll \left|\frac{\rho' - \beta}{\Lambda} n(t)\right|$ 、すなわち①式の左辺をゼロとする近似を導入する。このとき $C(t)$ が従う微分方程式を導出せよ。また、導出した式を解くことにより、反応度を添加した直後の短い時間での過渡変化以降の状態における原子炉安定炉周期を導出せよ。

第4問 低濃縮ウランと軽水を含む無限均質媒質におけるエネルギー2群の中性子のバランス式を以下とする。

$$(\Sigma_{a,1} + \Sigma_{1 \rightarrow 2})\phi_1 = \frac{1}{k}(\nu\Sigma_{f,1}\phi_1 + \nu\Sigma_{f,2}\phi_2)$$

$$\Sigma_{a,2}\phi_2 = \Sigma_{1 \rightarrow 2}\phi_1$$

ここで、記号の下添え字の数字はエネルギー群を示し、1群が高速・熱外エネルギー領域、2群が熱エネルギー領域に対応するものとする。なお、 i 群の上限・下限エネルギーをそれぞれ E_i 、 E_{i+1} とする。また、 $\Sigma_{a,i}$ 、 $\Sigma_{f,i}$ 、 ϕ_i はそれぞれ i 群の巨視的中性子吸収断面積、巨視的核分裂断面積、中性子束、 ν 、 k は1回の核分裂反応あたりの平均中性子発生数、中性子無限増倍率とし、 $\Sigma_{1 \rightarrow 2}$ は1群から2群への巨視的散乱断面積とする。

- (1) エネルギー1、2群のレサジー幅を答えよ。また、熱中性子炉に対して一般的に用いられる E_2 の値として最も適切なものを、0.01 eV、1 eV、10 keV、10 MeVのうちから選べ。
- (2) このバランス式の導出において、核分裂反応により生成される中性子のエネルギーに対して導入されている仮定を答えよ。
- (3) 四因子公式により、中性子無限増倍率 k が、高速核分裂因子 ϵ 、共鳴を逃れる確率 p 、熱中性子利用率 f 、中性子再生率 η を用いて $k = \epsilon p f \eta$ とできるものとしたとき、 ϵ と p のそれぞれを $\Sigma_{a,i}$ 、 $\Sigma_{f,i}$ 、 ν 、 $\Sigma_{1 \rightarrow 2}$ で表せ。また、 $f\eta = \nu\Sigma_{f,2}/\Sigma_{a,2}$ と書けるが、 f と η のそれぞれを個別に評価するために必要とされるパラメータを答えよ。
- (4) $\Sigma_{a,i}$ が以下の式で定義されるものとする。ここで、 $\Sigma_a(E)$ はエネルギー E の中性子に対する巨視的中性子吸収断面積、 $\phi(E)$ はエネルギー E の中性子束を示す。

$$\Sigma_{a,i} = \frac{\int_{E_{i+1}}^{E_i} \Sigma_a(E)\phi(E)dE}{\int_{E_{i+1}}^{E_i} \phi(E)dE}$$

媒質の温度が増加したときに $\Sigma_{a,1}$ が増加、 $\Sigma_{a,2}$ が減少したものとする。このとき、これらの変化のそれぞれについて、その機構として考えられるものを説明せよ。なお、 $\Sigma_{a,1}$ については核反応断面積の共鳴構造に、 $\Sigma_{a,2}$ については核反応断面積の中性子速度に対する依存性について言及するものとする。

第5問 核燃料物質等の臨界性に関する以下の問いに答えよ。

- (1) 1970年代に ^{235}U の割合がそれまで知られていた値よりも著しく低いウランがウラン鉱山から発見されたことがあった。このとき鉱石に含まれるネオジム同位体の同位体比も通常測定される値とは異なり核分裂生成物の比率が高かった。これらの事象の原因の一つはウランの臨界性の時間変化に関係しているが、それを ^{235}U 及び ^{238}U の半減期を示しつつ200字程度で述べよ。ただし、 ^{235}U 及び ^{238}U の半減期は有効数字2桁の指数表示で表すこととする。
- (2) 未使用のウランを使った軽水炉燃料を仮想的に数億年の単位で長期間保管したとする。この軽水炉燃料の中性子増倍率の挙動を200字程度で述べよ。
- (3) MOX燃料を使った臨界実験を数年間にわたって行っている。全ての燃料棒を全く同じ位置に配置し体系の温度を同一にしたとしても、臨界となる水位が有意に増加していく現象が見られた。この現象の原因を200字程度で述べよ。数値を示す場合には、有効数字2桁の指数表示で表すこととする。
- (4) 可燃性毒物として使用されるガドリニウムの中で中性子吸収の断面積が特に大きい同位体が二つ知られている。一つは ^{157}Gd であるが、もう一つの同位体は何かを答えよ。
- (5) (4)で答えた同位体は使用済核燃料の中で核分裂生成物の β^- 崩壊によっても生成されることが知られている。その核分裂生成物とその半減期を記せ。半減期は有効数字2桁で表すこととする。

第6問 次の問いに答えよ。

1. 一般的な原子炉の反応度変化について記述した以下の文章の□□□□にあてはまる適切な語句を番号とともに答えよ。なお、同じ番号の□□□□には同じ語句が入る。

〔解答例〕⑨－東京

- (1) 臨界状態にある原子炉の反応度が何らかの原因で変化すると、核的な原子炉動特性に従って原子炉の出力が変化する。さらに、原子炉を構成する物質の温度、密度、寸法、形状などが変化し、これらの変化がさらなる反応度の変化を引き起こす。このような現象を□①□と呼び、原子炉出力の変化に対する反応度変化の方向と大きさを表すパラメータが□②□である。原子炉の出力暴走を起こさないようにするためには、□②□が□③□になるように原子炉を設計しなければならない。
- (2) 高速炉の場合、一般に冷却材中のボイドの発生は□④□の減少と高速中性子による核分裂の増加につながり、これは□①□に□⑤□の方向に寄与するが、安全上の観点でそうならない設計も検討されている。
- (3) 原子炉を運転し続けると、燃料中に含まれる□⑥□が核反応によって核分裂性核種に転換することもある。例えばトリウムの同位体である□⑦□の中性子吸収によって生成する核種の β^- 崩壊によって□⑧□が生成することが知られている。このような核分裂性核種の燃焼による減少と転換による生成、そして核分裂生成物が蓄積することでもたらされるバランスに従い、原子炉の反応度は緩やかに変化する。
2. 燃料が格子状に配置されて臨界になっている軽水減速臨界実験装置のような原子炉の燃料と減速材をその割合を変えないで均質に混合したと仮定した場合の反応度について、どのような変化がなぜ起こるかを200字程度で説明せよ。

【メモ】

【メモ】

【メモ】