第　63　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。

令和 3 年 3 月 17 日

第１問　以下の問いに答えよ。

（１）　図１は ^{235}U（黒線）と ^{238}U（灰色破線）の核分裂断面積が中性子エネルギーの関数としてどのように変化するかを示している。この図より、^{235}U の核分裂断面積は低エネルギーになるほど大きく、^{238}U の核分裂反応には数 100 keV を超えると断面積が急に大きくなる傾向があることが分かる。このような断面積のエネルギー依存性の違いはそれぞれの核のどのような性質の違いによるものかを説明せよ。

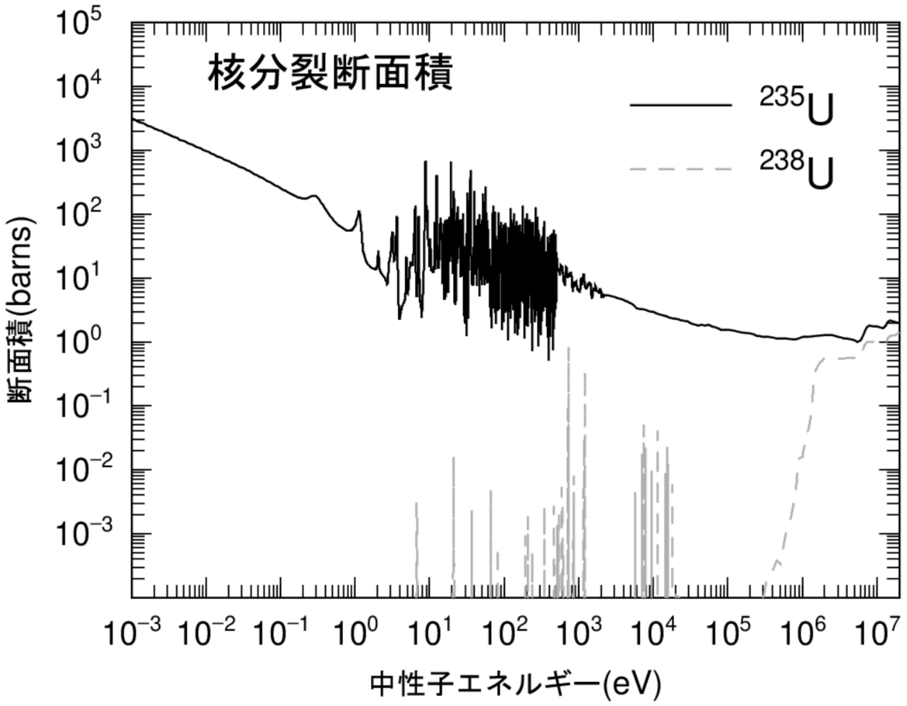

図１　^{235}U（黒線）と ^{238}U（灰色破線）の核分裂断面積

（２）　^{235}U の場合、核分裂断面積や中性子捕獲断面積は、共鳴の影響が無い低エネルギーではエネルギーが低くなるほど大きくなる傾向にある。そのエネルギー領域のことを、断面積の中性子速度(v)依存性に対応して何と呼ぶか記せ。

（３）　中性子断面積の共鳴が原子炉の特性に及ぼす影響を１つ取り上げて説明せよ。

（４）　透過率法により中性子全断面積σ_tの測定を行うことを考える。単一核種からなる原子数密度n、厚さtの標的を向きの揃った中性子が透過すると中性子束強度がT倍に変化す

るとする。この透過率Tをn、t、σ_tを用いて表せ。

（５）　測定によりTが求められた場合の中性子全断面積σ_tをT、n、tを用いて記せ。

（６）　共鳴領域においては、実験装置のエネルギー分解能に対応して、あるエネルギー間隔における透過率Tの平均値$\langle T\rangle$が測定されることが多い。ここで$\langle \mathrm{x}\rangle$は物理量 x のエネルギー平均を表す。この場合、$\langle T\rangle$と、同じエネルギー間隔における平均全断面積$\langle \sigma_t\rangle$との関係は上記（５）の結果より複雑になる。このエネルギー間隔における平均透過率を表す式を、平均全断面積$\langle \sigma_t\rangle$として、断面積の 2 次の中心モーメント$\sigma^2 \equiv \langle(\sigma_t - \langle\sigma_t\rangle)^2\rangle$までの精度で表す式を求めよ。

（７）　上記（６）の結果を用いて$\langle \sigma_t\rangle$を$\langle T\rangle$、n、t、σを用いて表す式を記せ。

（８）　上記（７）の結果より、共鳴領域における全断面積を平均透過率のみを用いて決定するとどのような系統誤差が導入されるかを考察せよ。

第２問　無限に広く定常的かつ一様な物質中での中性子の移動を考える。全ての中性子が同じ速さを持ち、かつ原子核との弾性散乱で速さを変えず、散乱は等方的と仮定する。また、起こりうる反応は弾性散乱又は吸収のみとする。図２のように、デカルト座標系の原点を含む x-y 平面上の微小面積要素dAを単位時間に上（+z 方向）及び下（-z 方向）から横切る中性子数の差を以下の手順に従って求め、拡散係数に対する近似式を導出せよ。なお、巨視的弾性散乱断面積をΣ_s、巨視的吸収断面積をΣ_a、巨視的全断面積を$\Sigma_t = \Sigma_s + \Sigma_a$とする。また、体系中の任意の点$\boldsymbol{r}$における定常的な中性子束を$\phi(\boldsymbol{r})$とする。このとき、以下の問いに答えよ。

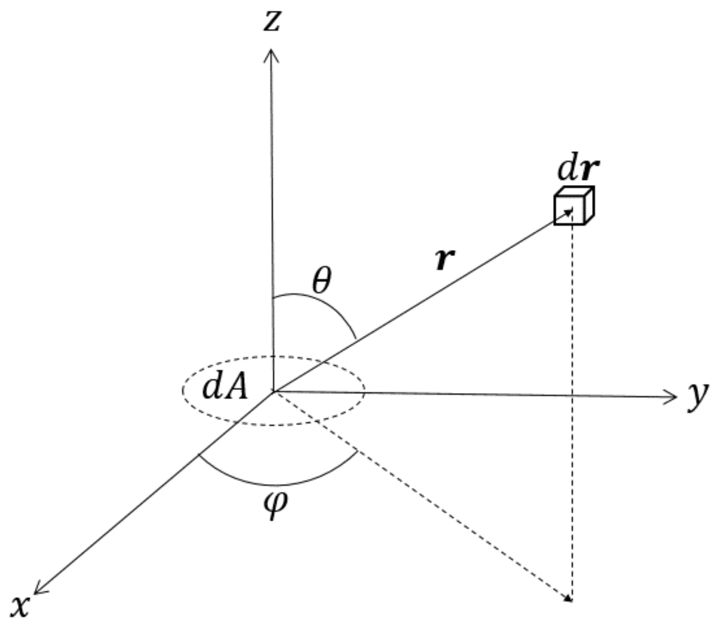

図２　拡散近似を考察する空間配位

（１）　体系中の点$\boldsymbol{r}$にある微小体積要素$d\boldsymbol{r}$で毎秒散乱される中性子数のうち、単位時間当たりに面積要素dAの張る立体角中に散乱される中性子数を求めよ。ただし、面積要素dAの法線方向と$d\boldsymbol{r}$方向のなす角をθとする。

（２）　点$\boldsymbol{r}$で散乱された中性子が反応を起こさず原点に到達する確率をΣ_tと$r \equiv |\boldsymbol{r}|$を用いて表せ。

（３）　点$\boldsymbol{r}$における中性子束$\phi(\boldsymbol{r})$を原点の周りでテイラー展開し、$\boldsymbol{r}$の１次の項まで求めた近似式を記せ。

（4）　面積要素dAを単位時間当たりに下向きに通過する中性子数（中性子の流れ）$J_-(0)dA$は、$z \geqq 0$からdAを下向きに通過する全ての中性子の総和である。すなわち

$$J_-(0)dA = \int_0^\infty r^2 dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta \ [\boldsymbol{r}\text{で散乱し単位時間に}dA\text{を通過する中性子数}]$$

と計算できる。中性子束に上記（3）の近似式を用い、x, y, zを球座標で表し、さらに上記（1）、（2）の結果を用いて $J_-(0) = \frac{1}{4}\frac{\Sigma_s}{\Sigma_t}\phi(0) + \frac{1}{6}\frac{\Sigma_s}{\Sigma_t^2}\frac{\partial\phi(0)}{\partial z}$となることを示せ。ただし、必要に応じて以下の公式を用いてよい。

$$\int \cos\theta \sin\theta d\theta = \frac{\sin^2\theta}{2}, \int \cos^2\theta \sin\theta d\theta = -\frac{\cos^3\theta}{3}, \int_0^\infty re^{-ar}dr = \frac{1}{a^2}$$

（5）　上記（4）と同様に、面積要素dAを単位時間当たりに上向きに通過する中性子数$J_+(0)dA$を求めよ。ただし、問題の対称性を用いて計算してよい。

（6）　上記（4）、（5）の結果から、面積要素dAをz軸の正の方向に通過する単位面積当たりの正味の流れを求めよ。

（7）　上記（6）の結果と、拡散係数の定義 $J = -D\nabla\phi$を比較して、拡散係数DをΣ_sとΣ_tを用いて表せ。

（8）　上記（7）の拡散近似が異なる媒質の境界面付近で精度が悪くなる理由を説明せよ。

第３問　ウランと水の均質な混合物質からなる無限に大きい原子炉の臨界性を考える。このとき、以下の問いに答えよ。

（１）　この原子炉の無限増倍率k_∞は４因子公式で表すことができる。それぞれの因子について説明せよ。

（２）　それぞれの因子はウラン割合が増加するにつれて図３のように変化する。xは水の分子数密度に対するウランの原子数密度の比である。それぞれの因子がどの関数に当てはまるのか答えよ。

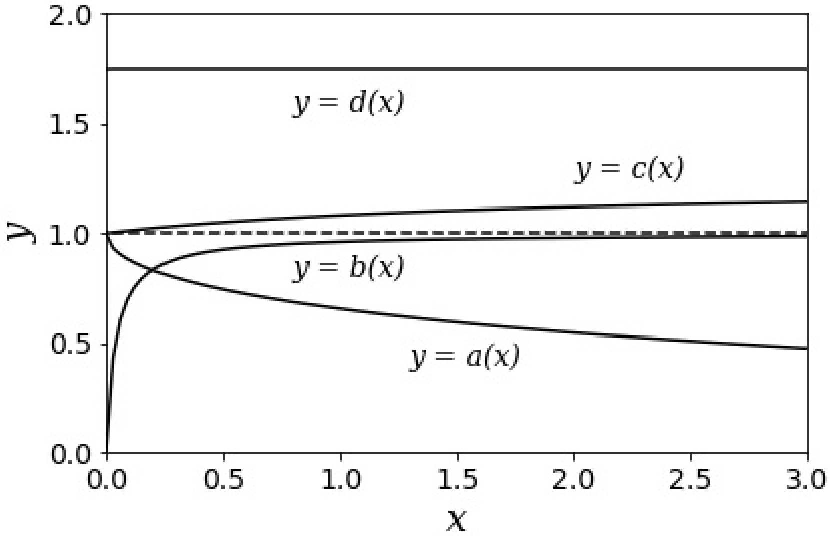

図３　ウラン割合に応じた因子の変化

（３）　xに対して無限増倍率k_∞がどのように変化するのかを図示せよ。横軸をx、縦軸をk_∞とし、実線で大まかな傾向がわかるように描けばよい。また、$k_\infty = 1$の線を点線で示せ。

（4）　それぞれの関数は以下のように近似されるものとする。

$$y = a(x) \approx 0.21\exp(-0.4x + 1.5)$$

$$y = b(x) \approx \frac{x}{x + 0.04}$$

$$y = c(x) \approx 1.0 \text{（一定）}$$

$$y = d(x) \approx 1.744 \text{（一定）}$$

（ア）　このとき、最適減速になるときのxの値を求めよ。また、導出過程も記述すること。なお、$\sqrt{0.1004} \approx 0.316$を用いてもよい。

（イ）　軽水炉の炉心設計では、減速不足、最適減速、過剰減速のうちどの状態に設定するのが適切であるか、理由とともに答えよ。

第４問　均質な無限媒質中において、中性子源から単位体積当たり毎秒S個の中性子がエネルギーE_0で放出されており、定常状態が成立しているものとする。この条件における中性子の減速を考える。媒質は単一の核種で構成されており、核種の質量数をAとする。中性子と媒質中の原子核との相互作用は弾性散乱のみとし、吸収はないものとする。また、弾性散乱は重心系において等方的であると仮定する。このとき、エネルギーEの中性子が弾性散乱によりエネルギーE'になる確率密度は次式で与えられる。

$$P(E \to E') = \begin{cases} \dfrac{1}{E(1-\alpha)}, & \alpha E \leqq E' \leqq E \\ 0, & E' < \alpha E, E < E' \end{cases}$$

ここで、$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$ である。このとき、以下の問いに答えよ。

（１）　中性子エネルギーEを用いてレサジーuを表せ。なお、対象とするエネルギーの上限をE_0とする。

（２）　原子核との１回の衝突による平均レサジー変化量ξを求めよ。

（３）　E_0からEに減速するまで１回だけ衝突を起こした中性子による衝突密度$F_1(E)$を求めよ。なお、中性子源から放出される中性子はエネルギーE_0で最初の衝突を起こすものとする。

（４）　漸近的エネルギー領域（E_0より十分低いエネルギー領域）の衝突密度$F(E)$が満たすべき方程式を記述せよ。また、導出過程も記述すること。なお、方程式を解く必要はない。

（５）　漸近的エネルギー領域では衝突密度が$F(E) = C/E$（Cは定数）の形で表されることが知られている。

（ア）　衝突密度$F(E)$を用いて、Eにおける減速密度$q(E)$を表せ。

（イ）　無限媒質中であることに対する条件式からCを決定し、平均レサジー変化量ξを用いて衝突密度$F(E)$を表せ。

第５問　強度Sの中性子源が体系内に存在する未臨界の原子炉を考える。このとき、以下の問いに答えよ。

（１）　（ア）　未臨界の原子炉に反応度を添加すると、中性子密度や遅発中性子先行核濃度は時間と共に変化する。このとき、原子炉内の中性子密度及び遅発中性子先行核濃度が従う動特性方程式を、一点炉近似、遅発中性子１群近似、ゼロ出力原子炉として記述せよ。ただし、中性子密度を$n(t)$、遅発中性子先行核濃度を$C(t)$とし、原子炉の反応度を$\rho_0 < 0$、遅発中性子割合をβ、即発中性子世代時間をΛ、遅発中性子先行核の崩壊定数をλとする。

（イ）　原子炉の反応度が$\rho_0 < 0$で、出力が一定となっている場合の中性子密度n_0及び遅発中性子先行核濃度C_0を、上記（ア）で示した式を元に、$\rho_0, \beta, \Lambda, \lambda, S$のうち必要な記号を用いて表せ。

（２）　（ア）　一点炉近似とは、何をどのように近似していることになるかを説明せよ。

（イ）　遅発中性子割合が、^{235}U と ^{239}Pu でどちらが大きい値であるかを、値が ^{235}U と ^{239}Pu で異なる理由と併せて説明せよ。

（ウ）　遅発中性子先行核となる主要な核種を２つ挙げよ。

（３）　原子炉の反応度が$\rho_0 < 0$で、出力が一定となっている状態（$n(t) = n_0$）から、原子炉に外乱を加えると中性子密度は即発跳躍により変化する。以下の外乱を加えたときの即発跳躍の大きさ（絶対値）を$\rho_0, \beta, \Lambda, \lambda, S$のうち必要な記号を用いて表せ。

（ア）　中性子源（強度S）を瞬時に取り除く。

（イ）　遅発臨界となるだけの反応度を瞬時に添加する。

第６問　以下の問いに答えよ。なお、エネルギー群をgとして、中性子束を$\phi^g(r)$、実効増倍率をk_{eff}、核分裂スペクトルをχ^g、拡散係数をD^g、吸収及び生成の断面積をそれぞれ$\Sigma_a^g, \nu\Sigma_f^g$とし、散乱断面積は$\Sigma_s^{g\to g'}$(エネルギー第$g$群からエネルギー第$g'$群に散乱する場合)のように表記すること。

（１）　均質な裸の原子炉を考える。

（ア）　エネルギー多群での、エネルギー第g群の中性子についてのバランス方程式（中性子拡散方程式）を記述せよ。

（イ）　上記（ア）の方程式に対する随伴中性子拡散方程式を記述し、エネルギー1群近似では随伴中性子束が自己随伴となることを説明せよ。ここで、エネルギー第g群の随伴中性子束は$\psi^g(r)$とすること。

（２）　一辺が$2a$の立方体形状の均質な原子炉（$-a \leqq x, y, z \leqq +a$）に対して、立方体の$z$軸方向に沿って十分に長い制御棒を挿入することを考える。ただし、中性子束の外挿距離はゼロとし、エネルギーは１群近似で考え、制御棒挿入による吸収断面積の変化以外は無視できるとする。

（ア）　制御棒を挿入する前の、原子炉内の中性子束分布を表す式を求めよ。

（イ）　同じ制御棒であっても制御棒価値は挿入される位置によって変わる。立方体の中心軸（$(x, y) = (0,0)$の位置）に沿って全挿入した場合に対して、同じ方向に$(x, y) = \left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}\right)$の位置で全挿入した場合では制御棒価値は何倍となるかを求めよ。

（ウ）　制御棒価値は挿入される距離が長くなるほど大きくなるが、挿入される原子炉内の距離に対する制御棒価値の分布（積分反応度曲線）はどのような分布関数で表現できるかを示せ。