第　56　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 26 年 3 月 12 日

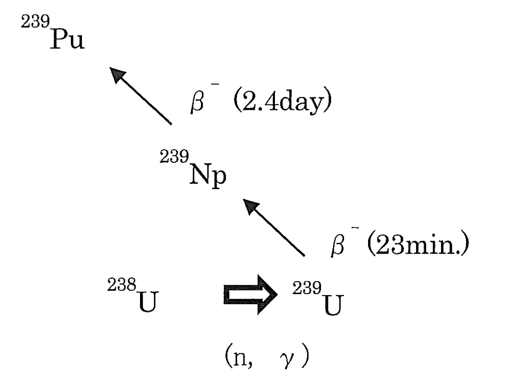
第１問　ウラン燃料原子炉を運転したところ、^{238}U が中性子を捕獲し ^{239}Pu が生成された。簡単のため以下を仮定し、次の問いに答えよ。

- ^{238}U の核分裂、および ^{239}U や ^{239}Np の核反応は無視し、中性子を吸収した ^{238}U は時間遅れなく全てが ^{239}Pu に変換する
- 燃焼期間中の ^{238}U、^{239}Pu の自然崩壊は無視する
- 燃焼期間中の中性子束 ϕ や微視的断面積 σ は一定とする

なお、^{238}U の中性子捕獲断面積 σ_c^8、^{239}Pu の中性子吸収断面積 σ_a^9、時刻 t=0 での ^{238}U 数密度 $N^8(0) = N_0^8$、^{239}Pu 数密度 $N^9(0) = N_0^9 = 0$ とする。

(1)　^{238}U と ^{239}Pu の二核種の数密度について燃焼方程式をたてて解け。必要に応じて下表のラプラス変換表を用いよ。

(2)　^{239}Pu の原子数密度が ^{238}U の 0.1%となる時刻 Tを求めよ。



核種燃焼チェーン

ラプラス変換表

$f(t)$	$F(s)$
1	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$

第２問　以下の問いに答えよ。

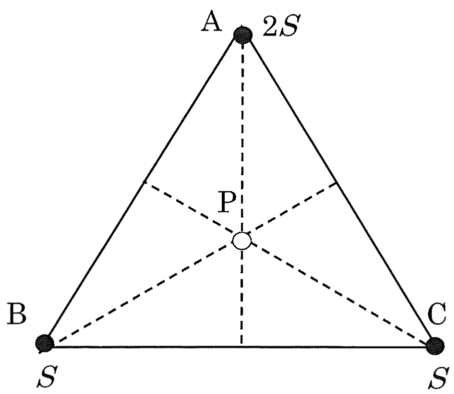
(1)　核燃料を含まない無限媒質中に毎秒 S 個の中性子を等方に放出する点状源が存在する。このとき、点状源から距離 r だけ離れた位置での中性子束 $\phi(r)$ と中性子流の大きさ $J(r)$ が、それぞれ以下の式で表されることを１群拡散理論により示せ。

$$\phi(r) = \frac{S}{4\pi D}\frac{e^{-\frac{r}{L}}}{r} \ ,$$

$$J(r) = \frac{S}{4\pi}\left(\frac{1}{rL}+\frac{1}{r^2}\right)e^{-\frac{r}{L}}$$

ここで、D 及び L は媒質の拡散係数と拡散距離である。

(2)　(1) と同じ無限媒質中に、下図に示すように１辺 a の正三角形 ABC があり、それらの頂点に、強度 $2S$、S、S ［個／秒］の等方中性子源が置かれている。正三角形の重心位置 P での中性子束と中性子流を求めよ。



(3)　真空中に (2) の配置で中性子源が存在する場合を考える。真空中では拡散理論が成立しないことがよく知られているが、この場合の点 P での中性子束と中性子流はどうなるか。

第３問　均質な無限媒質中での中性子の減速を考える。中性子のエネルギーを E、中性子束を $\phi(E)$、中性子源強度を $S(E)$、媒質中のマクロ散乱断面積を $\Sigma_s(E)$、媒質中のマクロ吸収断面積を $\Sigma_a(E)$、散乱によりエネルギーが E' から E に変化するマクロ微分散乱断面積を $\Sigma_s(E'\rightarrow E)$、としたとき以下の問いに答えよ。ただし散乱は重心系で等方的な弾性散乱のみで上方散乱はないとする。

(1)　媒質中での中性子減速方程式は、エネルギー E での中性子の散乱及び吸収、エネルギー E までの中性子の減速、エネルギー E での中性子源からの中性子の発生のバランスで表される。中性子減速方程式を記し、式の各項の物理的意味を簡潔に説明せよ。

(2)　媒質が水素でありかつその吸収が無視できるとした場合の減速方程式を求めよ。導出の過程も簡潔に説明せよ。

(3)　(2)の媒質中に単一の共鳴を持つ無限に重い吸収体が一様に分布し、中性子源 $S(E)$ が、

$$\mathrm{S}(E) = S_0\delta(E - E_0)$$

である場合を考える。ただし、S_0、E_0 は定数で、$E<E_0$ である。吸収体による散乱が無視できるとき、エネルギー E での共鳴を逃れる確率 $p(E)$ は、

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

であらわされる。このときの中性子の減速密度 $q(E)$ を求めよ。

(4)　(3)の場合、水素のミクロ散乱断面積 $\sigma_s{}^H$ がエネルギーによらず一定であるとすると、吸収体が無限に希釈された場合の共鳴を逃れる確率 p^∞ は、ヴライト・ウィグナー（Breit-Wigner）の一準位共鳴公式を用いると、

$$p^\infty = exp\left(-\frac{\pi N_A \sigma_0 \Gamma_\gamma}{2N_H \sigma_s^H E_0}\right)$$

とあらわされる。ただし、π は円周率、$\mathrm{N_A}$ はアボガドロ数、E_0 は共鳴エネルギー、σ_0 は共鳴のエネルギー E_0 における全断面積、Γ_γ は共鳴の放射幅、N_H は水素原子核の数密度である。この近似による共鳴を逃れる確率の特長が、実際の熱中性子炉での共鳴を逃れる確率が持つ特徴と一致する点及び一致しない点をひとつずつあげ、それぞれについて簡潔に説明せよ。

第４問　以下の問いに答えよ。

(1)　２群理論による均質で一様な燃料の無限増倍率（k_∞）が次式で与えられることを示せ。

$$k_\infty = \frac{\nu\Sigma_{f,1}\Sigma_{a,2} + \nu\Sigma_{f,2}\Sigma_{1\to2}}{(\Sigma_{a,1} + \Sigma_{1\to2})\Sigma_{a,2}}$$

なお、核分裂中性子はすべて高速群で発生するとし、以下の表記を用いること。

	高速群（第１群）	熱群（第２群）
拡散係数	D_1	D_2
核分裂断面積×(1 核分裂当りの平均放出中性子数)	$\nu\Sigma_{f,1}$	$\nu\Sigma_{f,2}$
吸収断面積	$\Sigma_{a,1}$	$\Sigma_{a,2}$
高速群から熱群への散乱断面積	$\Sigma_{1\to2}$	−
中性子束	ϕ_1	ϕ_2

(2)　均質で一様な燃料で構成される裸の原子炉を考える。この原子炉に対する臨界方程式は

$$\frac{k_\infty}{\left(1 + B_g^2 L_T^2\right)\left(1 + B_g^2 \tau_T\right)} = 1$$

で表わされることを、２群拡散理論を用いて示せ。ここで、B_g^2は幾何学的バックリング、L_Tは熱中性子拡散距離、τ_Tはフェルミ年齢である。すなわち$L_T = \sqrt{D_2/\Sigma_{a,2}}$、$\tau_T = D_1/(\Sigma_{a,1} + \Sigma_{1\to2})$である。中性子の外挿距離は無視できるものとし、臨界状態では、高速群及び熱群の中性子束は、ともに次式を満足する基本モード分布$\psi(\mathbf{r})$となることを利用すること。

$$\nabla^2\psi(\mathbf{r}) + B_g^2\psi(\mathbf{r}) = 0$$

また、熱群における炉心からの漏れが吸収と比較して小さいことから、高速群と熱群の中性子束の比は無限媒質中における値と変わらないとする。

第５問　１点炉動特性理論を用いて原子炉の動特性に関する以下の問いに答えよ。

(1)　即発跳躍近似を用いた１点炉動特性方程式を、導出方法を簡潔に説明した上で記せ。ただし、時刻を t、反応度を $\rho(t)$、原子炉の出力を $P(t)$、中性子世代時間を Λ、i 群の遅発中性子先行核の壊変定数を λ_i、i 群の遅発中性子先行核濃度を $C_i(t)$、i 群の遅発中性子割合を β_i とする。

(2)　出力 P_0 で臨界状態の原子炉にステップ状に即発臨界未満の正の反応度 ρ_1 を加えた直後の出力 P_1 を即発跳躍近似により求めよ。

(3)　臨界状態の原子炉に $-\rho_2$ $(\rho_2 > 0)$ の反応度を加え未臨界とし一定の強度Ｓの中性子源を挿入したところ、原子炉の出力が P_2 で一定となった。このときの i 群の遅発中性子先行核濃度が C_{i2} であるとき、P_2 を求めよ。

(4)　(3)の状態の原子炉の中性子源を炉内から急速に取り去ったところ、直後に出力が P_3 まで下がった。P_2 及び P_3 から ρ_2 を求める式を導出せよ。

第６問　無限の反射体に囲まれた半径Ｒの均質球形原子炉が臨界状態にある。以下の問いに答えよ。

(1)　炉心部における１群原子炉方程式および反射体部における１群拡散方程式を立て、炉心部中性子束 ϕ_c と反射体部中性子束 ϕ_r を求めよ。なお、任意定数はそのまま残して良い。ここでバックリングを B^2、炉心部の拡散面積を L_c^2、反射体部の拡散面積を L_r^2 とする。また、球座標系のラプラシアンは以下で表される。

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\phi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\phi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial^2\phi}{\partial\varphi^2}\right)$$

(2)　原子炉出力 P として ϕ_c の任意定数を定めた後、炉心と反射体間の境界条件を用いて反射体内中性子束 ϕ_r の任意定数を定め、ϕ_r を既知の量のみで表せ。ここで一回の核分裂で放出されるエネルギーは E_R とする。