

第 55 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 25 年 3 月 11 日

第1問 断面積と反応率（核種生成率、消滅率）について、次の問いに答えよ。

(1) 中性子束  $\phi$ 、巨視的核分裂断面積  $\Sigma_f$  の体系において、ある核分裂生成核種  $i$  の原子数密度  $N_i$ 、核分裂反応あたりの生成数  $\gamma_i$ 、巨視的中性子吸収断面積  $\Sigma_{ai} = \sigma_{ai} N_i$ 、崩壊定数  $\lambda_i$  とするとき、以下をこれらの記号で表わせ。

- a) 核種  $i$  の核分裂による単位体積あたりの生成率
- b) 核種  $i$  の単位体積あたりの中性子吸収反応率
- c) 核種  $i$  の単位体積あたりの崩壊率
- d) 核種  $i$  が核分裂のみによって生成し、吸収反応と崩壊により消滅する時、核種  $i$  の原子数密度  $N_i$  の時間変化  $dN_i/dt$  を表わす微分方程式

(2) 1200 日間の燃焼(全出力換算)で核燃料の燃焼度が 45,000MWd/t となる原子炉における、核分裂生成核種  $^{137}\text{Cs}$  の生成量を考える。

- a) この原子炉の核燃料  $1\text{ cm}^3$  あたりの全出力時平均出力密度  $[\text{W}/\text{cm}^3]$  を求めよ。ただし、核燃料中の核分裂核種（アクチニド核種）の密度を  $9.2\text{ g}/\text{cm}^3$  とする。
- b) この核燃料中で核分裂核種の核分裂 1 回あたりの回収可能エネルギーを  $200\text{ MeV}$  とするとき、核燃料中の核分裂反応率  $[\text{fission}/\text{cm}^3/\text{s}]$  を求めよ。ただし  $1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J}$  とする。
- c) 原子炉中での  $^{137}\text{Cs}$  生成と消滅は(1)d) の方程式に従う。 $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma_{\text{Cs}} = 6.3 \times 10^{-2}$  [個/fission]、 $\sigma_{\text{acs}} = 3.0 \times 10^{-2}$  [barn]、半減期 30 年 (=  $9.5 \times 10^8$  秒) とし、この原子炉の核燃料内の中性子束を  $2.0 \times 10^{14}$   $[\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}]$  とするとき、この方程式における  $^{137}\text{Cs}$  の核分裂による生成、中性子吸収による消滅、崩壊による消滅に関する各項を計算せよ。ただし、 $^{137}\text{Cs}$  の核燃料中の原子数密度は  $N_{\text{Cs}}$  で表わし、2 の自然対数を 0.69 とする。
- d) この原子炉において c) で計算した  $^{137}\text{Cs}$  の生成率と消滅率がつり合うために必要な  $^{137}\text{Cs}$  の原子数密度  $N_{\text{Cs}}$  を求めよ。
- e) 燃焼初期に核燃料中に  $^{137}\text{Cs}$  は存在しないとして  $^{137}\text{Cs}$  の原子数密度を生成率と消滅率を考慮した微分方程式を解いて求めると、得られた  $^{137}\text{Cs}$  原子数密度の時間変化は仮に十分長い燃焼期間を考えた場合、d) で計算した原子数密度とどのような関係にあるか。また、一般的な原子炉のように原子数密度が d) の値に比べはるかに少ない場合は、原子数密度は近似的に燃焼度とどのような関係にあるか。  
(実際に微分方程式を解く必要はない。)

**第2問** 図のように  $z$  軸の正の方向に無限に長い黒鉛角棒が真空中にあり、 $z=0$  面に垂直に中性子ビームが入射している。黒鉛中での中性子拡散距離を  $L$  とし、1群拡散理論を用いて、 $z=0$  面から十分離れた位置での黒鉛棒内での中性子束に関する次の問いに答えよ。ただし、外挿距離は無視できるものとする。

- (1) 黒鉛棒内の点  $(x, y, z)$  での中性子束  $\phi(x, y, z)$  が満たす拡散方程式を記せ。
- (2) 中性子束  $\phi(x, y, z)$  が、

$$\phi(x, y, z) = C \phi_x(x) \phi_y(y) \phi_z(z)$$

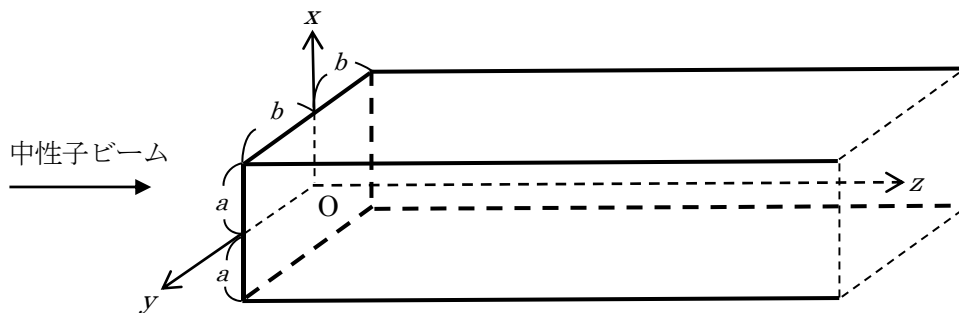
と表わされ (ただし、 $C$  は定数)、さらに

$$\phi_x(x) = \cos\left(\frac{\pi}{2a}x\right)$$

$$\phi_y(y) = \cos\left(\frac{\pi}{2b}y\right)$$

で表わされると仮定する。黒鉛棒内で  $\phi_z(z)$  が満たす方程式を求めよ。

- (3) 黒鉛棒内での中性子束  $\phi(x, y, z)$  を求めよ。
- (4)  $z$  軸上での中性子束が、それぞれ  $z = z_1$  で  $\phi_1$ 、 $z = z_2$  で  $\phi_2$  であるとき、この黒鉛の中性子拡散距離  $L$  を  $a$ 、 $b$ 、 $z_1$ 、 $z_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  から求める式を導出せよ。



**第3問** 無限に広い均質な水素媒質中に、エネルギー  $E_0$  の中性子を  $1 \text{ cm}^3$  当たり毎秒  $S_0$  個発生させる中性子源が均質に分布している。エネルギー  $E$  での媒質の巨視的散乱断面積が  $\Sigma_s(E)$  であるとき次の問いに答えよ。ただし、 $E < E_0$  として、散乱は弾性散乱のみで上方散乱はないとする。また、媒質による中性子吸収は無いとする。

- (1) エネルギー  $E$  での衝突密度  $F(E)$  が満たす積分方程式を求めよ。
- (2)  $F(E)$  を求めよ。
- (3) エネルギー  $E$  での中性子束  $\phi(E)$  を求めよ。
- (4) エネルギー  $E$  での減速密度  $q(E)$  を求めよ。

第4問 巨視的核分裂断面積 $\Sigma_f$ 、核分裂あたりの発生中性子数 $\nu$ 、巨視的吸収断面積 $\Sigma_a$ 、拡散係数 $D$ をもつ液体状の物質と、容器の厚さが無視でき中性子と反応しない円筒状の容器を考える。次の問いに答えよ。なお、外挿距離（補外距離）は $d$ とする。

- (1) 物質の無限増倍率 $k_\infty$ はいくらか。
- (2) 物質を、高さが $H$ となるまで一様に容器に満たしたところ、ちょうど臨界となった。容器の半径 $R$ はいくらか。なお、容器の外周には何も置かれていないものとする。
- (3) 半径が異なる別の容器を考え、その容器の外周に反射体節約 $\delta$ の反射体を置いて、先と同じく物質を一様に満たしたところ、同じ高さ $H$ で臨界となった。容器の半径 $R'$ はいくらか。

第5問 原子炉定格運転時の燃料および冷却材温度反応度係数は、典型的な軽水冷却型熱中性子炉とナトリウム冷却型高速中性子炉において、大まかに下表のようなオーダーの値をもつ。この表に関する次の問いに答えよ。

	温度反応度係数 ( $\Delta k/k$ ) / °C	
	燃料	冷却材
軽水冷却型熱中性子炉	$-1 \times 10^{-5}$	$-1 \times 10^{-4}$
ナトリウム冷却型高速中性子炉	$-1 \times 10^{-7}$	$-1 \times 10^{-6}$

- (1) 二つの原子炉とも、燃料温度反応度係数の絶対値は、冷却材温度反応度係数の絶対値より小さい。その理由を説明せよ。
- (2) 燃料および冷却材温度反応度係数とも、その絶対値はナトリウム冷却型高速中性子炉の方が軽水冷却型熱中性子炉より小さい。その理由を説明せよ。
- (3) 典型的な軽水冷却型熱中性子炉とナトリウム冷却型高速中性子炉において、炉中心部のボイド発生に対する冷却材ボイド反応度係数は、どのようなオーダーの値をもつか。

第6問 拡散方程式を用いた中性子束分布の数値解法に関する次の文について、以下の問いに答えよ。

1次元1群(単速)拡散方程式を $N$ 個の空間点に離散化し、各空間点 $i$ について空間微分を隣接する空間点間の差分で表わした式

$$-a_i \phi_{i-1} - b_i \phi_i - c_i \phi_{i+1} + \Sigma_{a_i} \phi_i = S_i \quad (1)$$

を考える。係数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は各空間点の拡散係数で決まる。中性子源 $S_i$ が与えられた場合にこの連立方程式を解く<sup>1</sup>ことができるが、2次元や3次元の体系では空間差分の項が増えるので、一般に反復計算<sup>2</sup>により $\phi_i$ を解く。

通常の原子炉では(1)式の右辺が核分裂中性子源 $\nu_i \Sigma_{f_i} \phi_i$ となる。数値計算の際は右辺に $1/k$ というパラメータをかけて、臨界状態にない場合でも常に等式が成立するようにする。右辺の中性子源に求めるべき $\phi_i$ が含まれているこの式を解く<sup>3</sup>ためには、右辺の $\phi_i$ を仮定して(1)式と同じ手順でこれを解き、求められた $\phi_i$ を新たな推定値とするという上記とは別の反復計算<sup>4</sup>を実施し、 $\phi_i$ を収束させる。

エネルギー依存の拡散方程式を $G$ 個のエネルギー範囲(群)に離散化する場合、 $\Sigma_{g'g}$ を $g'$ 群から $g$ 群への散乱断面積、吸収および散乱により $g$ 群から中性子がなくなる断面積(除去断面積)を $\Sigma_{rg}$ とすると、 $g$ 群に対する方程式(空間の離散化は省略)は次のようになる。

$$-\nabla D_g \nabla \phi_g + \Sigma_{rg} \phi_g - \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g'g} \phi_{g'} = \frac{\chi_g}{k} \sum_{g'=1}^G \nu_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} \quad (2)$$

熱エネルギー領域上限以上のエネルギー範囲では散乱により中性子のエネルギーが増加しないので、一番エネルギーの高い第1群に対する式は左辺の散乱の項はゼロであり1群(単速)の場合と同様に解くことができる。第2群の式は散乱項が $\Sigma_{12} \phi_1$ となり、 $\phi_1$ が既知なので右辺に移し同様に解ける。以下順次各群の中性子束を求めることができるが、熱エネルギー領域についてはエネルギー群のとり方によってはさらに別の反復計算<sup>5</sup>が必要になる。

(1) 上記下線部<sup>1</sup>から下線部<sup>5</sup>に対応する語を以下の(a)から(e)より選べ。

- |              |            |                    |
|--------------|------------|--------------------|
| (a) 固定中性子源問題 | (b) 固有値問題  | (c) 中性子源反復(外部反復)計算 |
| (d) 内部反復計算   | (e) 熱群反復計算 |                    |

(2) 下線部<sup>5</sup>の反復計算が必要となるのはどのような場合か、またそれはなぜか簡単に説明せよ。

(3) ある原子炉の2群中性子束分布を、(2)式を用いて計算するために下表のような断面積データを用意した。表中の値および第1群 (g=1) と第2群 (g=2) の中性子束  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  を用いて次の量を計算せよ。

(a) 第1群と第2群それぞれの除去断面積 [1/cm]

(b) 核分裂による第1群の中性子発生率 [n/cm<sup>3</sup>/s]

(c) 減速による第2群の中性子発生率 [n/cm<sup>3</sup>/s]

	$\phi_g$ [n/cm <sup>2</sup> /s]	$D_g$ [cm]	$\Sigma_{ag}$ [1/cm]	$\nu_g \Sigma_{fg}$ [1/cm]	$\chi_g$	$\Sigma_{gg'}$ [1/cm]
g=1	$\phi_1$	1.5	$7.7 \times 10^{-3}$	$4.1 \times 10^{-3}$	1.0	$\Sigma_{12}=1.8 \times 10^{-2}$
g=2	$\phi_2$	0.42	$4.8 \times 10^{-2}$	$6.1 \times 10^{-2}$	0.0	$\Sigma_{21}=0.0$

$\phi_g$  : g群の中性子束

$D_g$  : g群の拡散係数

$\Sigma_{ag}$  : g群の巨視的吸収断面積

$\nu_g$  : g群で起きた核分裂反応あたりの中性子発生数

$\Sigma_{fg}$  : g群の巨視的核分裂断面積

$\chi_g$  : 核分裂中性子がg群に発生する割合

$\Sigma_{gg'}$  : g群からg'群への巨視的散乱断面積