

第 57 回

原子炉主任技術者試験（筆記試験）

原 子 炉 の 設 計

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 27 年 3 月 19 日

第1問 図1に示されるように、斜線の断面を持つ流路を流量 $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]の冷却材が流れている。冷却材の密度は $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、比熱は $c$  [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]、熱伝導率は $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]、粘性係数は $\mu$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]である。流路の入口での冷却材の温度は $T_1$  [ $\text{K}$ ]である。流路には、円柱形状で、長さ $L$  [ $\text{m}$ ]の燃料棒が正方格子状にピッチ $P$  [ $\text{m}$ ]で並んでいる。図2に示されるように、燃料棒は、直径 $D$  [ $\text{m}$ ]のペレット、厚さ $H$  [ $\text{m}$ ]の被覆材から構成されている。ペレットと被覆材の間のギャップは無視し、ペレット表面温度と被覆材内面温度は等しいものとする。ペレットの発熱密度 $q'''$  [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]は、軸方向 $z$  [ $\text{m}$ ]に対しては分布

$$q''' = A \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right), \quad A \text{ [W/m}^3\text{]は定数}$$

を持ち、径方向 $r$  [ $\text{m}$ ]と周方向 $\theta$ に対しては一様である。ペレットの熱伝導率は $k_p$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]、被覆材の熱伝導率は $k_c$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]、ペレットの融点は $T_m$  [ $\text{K}$ ]、冷却材と被覆材の熱伝達率は $\alpha$  [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]である。燃料棒内部において $\theta$ 方向と $z$ 方向の熱移動は無視でき、各材料の物性値は一様であるとして、次の問いに答えよ。温度を $T$  [ $\text{K}$ ]、熱伝導率を $k$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] ( $k$ は一定) とすると、円柱座標系における定常熱伝導方程式は

$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q''' = 0$$

である。

- (1) ペレット中心温度 $T_0$  [ $\text{K}$ ]とペレット表面温度 (被覆材内面温度)  $T_p$  [ $\text{K}$ ]の差 $T_0 - T_p$ を求めよ。
- (2) ペレット表面温度 (被覆材内面温度)  $T_p$ と被覆材外面温度 $T_c$  [ $\text{K}$ ]の差 $T_p - T_c$ を求めよ。
- (3) 流路の熱等価直径 $D_c$  [ $\text{m}$ ]を求め、レイノルズ数 $\text{Re}$ およびヌセルト数 $\text{Nu}$ を求めよ。
- (4) 高さ $z$ での冷却材の温度 $T_1$  [ $\text{K}$ ]と流路の入口での冷却材の温度 $T_1$ との差 $T_1 - T_1$ を求めよ。
- (5)  $z = L/2$ でのペレット中心温度 $T_0$ と流路の入口での冷却材の温度 $T_1$ との差 $T_0 - T_1$ を求め、ペレット中心部が溶融しないための $A$ の条件を求めよ。

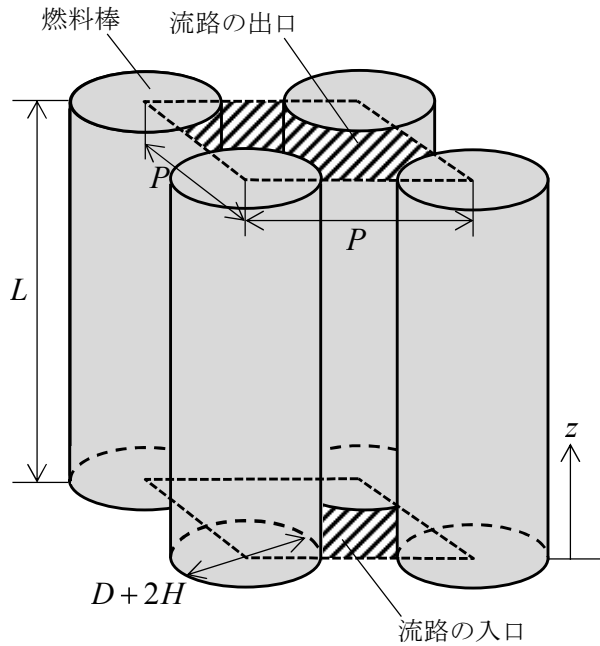


図1 燃料棒群と冷却材流路

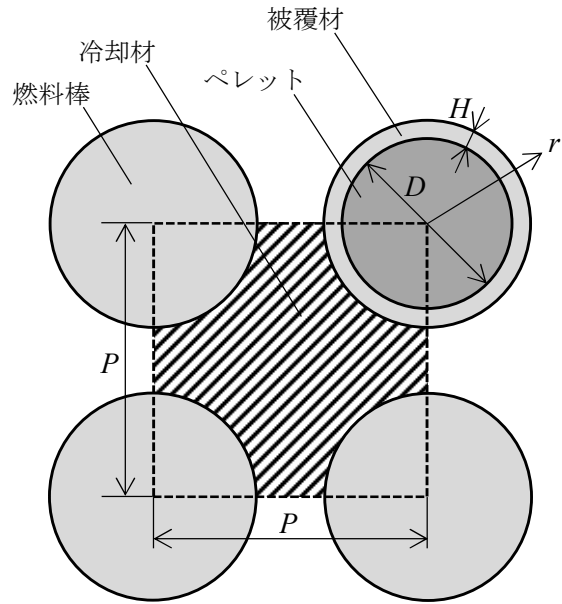


図2 燃料棒の断面図

第2問 下図の自然循環型軽水炉での給水停止事故を想定する。次の問いに答えよ。

- (1) 給水停止前の給水流量  $W_{FW}$  [kg/s] を、炉心出力  $Q_0$  [kW] が含まれる関係式で示せ。ただし、給水は飽和水で与えられるものとし、飽和水と飽和蒸気の比エンタルピーを各々、 $h_{FS}$ 、 $h_{GS}$  [kJ/kg] とする。
- (2) 給水停止後、炉心はスクラムし、出力は  $Q_1$  [kW] に低下して一定に保たれた。さらに、主蒸気隔離弁は閉止され、逃し弁を用いて圧力は一定に制御されたが、水位は低下し続けた。炉心側の二相混合水位がライザ上端 ( $z = H_C + H_R$  [m]) へ、更に炉心上端 ( $z = H_C$  [m]) へ低下したときのダウンカマの水位  $H_{DR}$  および  $H_{DC}$  を式で示せ。ただし、冷却水と飽和蒸気の密度を  $\rho_{FS}$  と  $\rho_{GS}$  [kg/m<sup>3</sup>]、ライザと炉心の平均ボイド率を  $\bar{\alpha}_R$  と  $\bar{\alpha}_C$ 、重力加速度を  $g$  [m/s<sup>2</sup>] とする。
- (3) 上記(2)の条件における炉心内の高さ方向のボイド率分布  $\alpha(z)$  を式で示せ。  
ただし、炉心の出力分布は一様、流路面積は  $A$  [m<sup>2</sup>] であり、生成された蒸気泡の上昇速度は  $U_G^{(*)} = \text{一定}$  [m/s]、液相の速度  $U_G^{(*)} = 0$  [m/s] とする。

(※)試験問題公表に際しての注

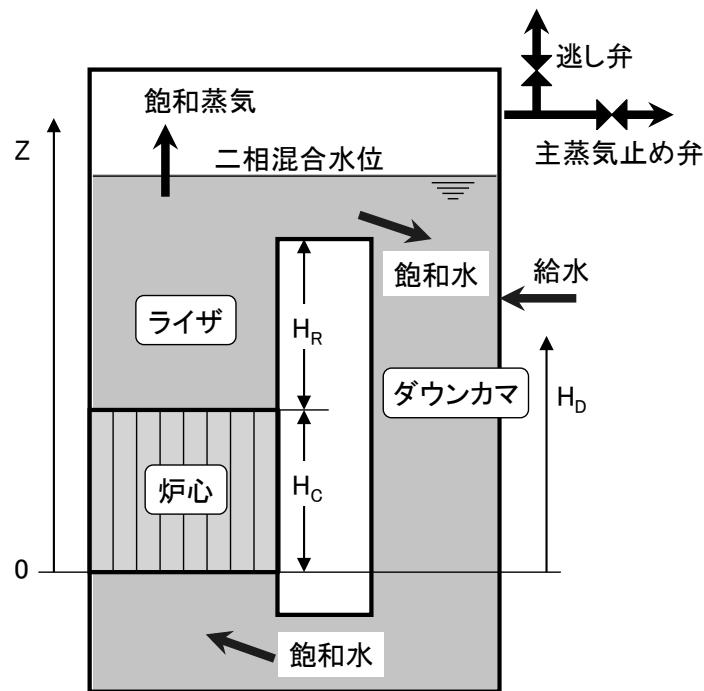
蒸気泡の上昇速度を一定とし、液相の速度を0とするというのが題意であり、異なる速度に同じ記号  $U_G$  が使用されているが、解答に影響を与えるものではないため、試験時において訂正等を行っていない。

- (4) 炉心内では典型的なプール沸騰熱伝達が生じたが、その特性の概略を両対数軸のグラフに図示し、以下の4領域の区分ならびに境界の点を記入せよ。

領域： 非沸騰、核沸騰、膜沸騰、遷移沸騰

点： 沸騰開始（飽和）、極小熱流束、限界熱流束（CHF）

- (5) 制御棒挿入によるスクラムの後、炉心で CHF が発生する可能性について 300 字以内で論ぜよ。



**第3問** PWRで炉心が溶融するシビアアクシデント（重大事故）が生じ、50,000 kg（50 t）の溶融物が 3025 °Cの温度で、原子炉圧力容器の底部から格納容器（温度：25 °C、圧力：100 kPa）へ落下した。次の問いに答えよ。

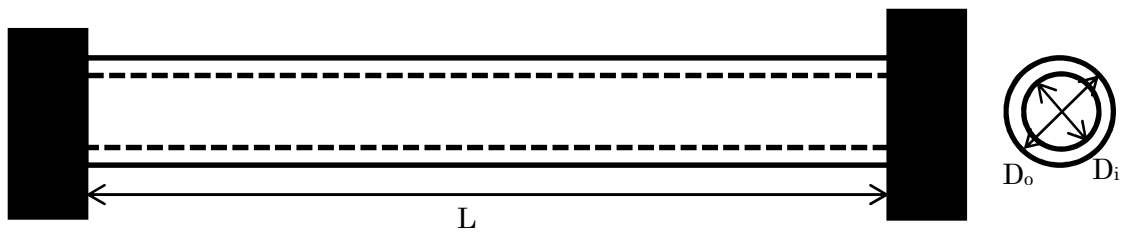
- (1) 溶融物は、高サブクール水で満たされたキャビティに落下して底面で水蒸気爆発を生じ、10tの水塊が上方へ飛ばされた。水塊の運動エネルギー $E_w$  [J]と上昇速度  $U_w$  [m/s]を計算せよ。ただし、溶融物の単位重量あたりの熱エネルギーは  $1.5 \times 10^9$  J/t (1.5 GJ/t) であり、その 2.4% が水塊の運動エネルギーへ変換されたと仮定する。
- (2) 原子炉圧力容器（質量：500 t）は床に固定されておらず、上記（1）の水塊が衝突して飛び上がったとすると、その初速度  $U_v$  [m/s]、初期の運動エネルギー $E_v$  [J]、最大高さ  $H_v$  [m]を

計算せよ。ただし、簡単のために、水塊は移動距離ゼロで衝突して速度を失ったと仮定し、重力加速度を  $10 \text{ m/s}^2$  とする。

- (3) 溶融物の実効的な比熱  $C_m [\text{J/kg/K}]$  を求めよ。ただし、溶融物の熱エネルギー  $1.5 \text{ GJ/t}$  は格納容器温度からの顕熱分  $3000 \text{ K}$  に相当し、相変化の潜熱は無視できるものとする。
- (4) 溶融物の  $10\%$  が格納容器へ飛散して気相部（空気）を加熱した。飛散した溶融物の熱容量  $C_D [\text{J/K}]$ 、加熱された気相部の温度  $T_{cv} [^\circ\text{C}]$ 、圧力  $P_{cv} [\text{Pa}]$  を求めよ。ただし、気相部の空気の重量を  $100 \text{ t}$ 、定積比熱  $C_v$  を  $720 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  とする。さらに、原子炉压力容器から冷却材は放出されず、格納容器の構造物は断熱とし、溶融物は格納容器の気相部へ均等に噴出・分散して一様な温度分布を生じたと仮定する。
- (5) 実ウラン酸化物の溶融物を用いた実験では、衝撃を伴う水蒸気爆発は観測されていない。水蒸気爆発の発生の可能性が低い理由を  $300$  字以内で説明せよ。

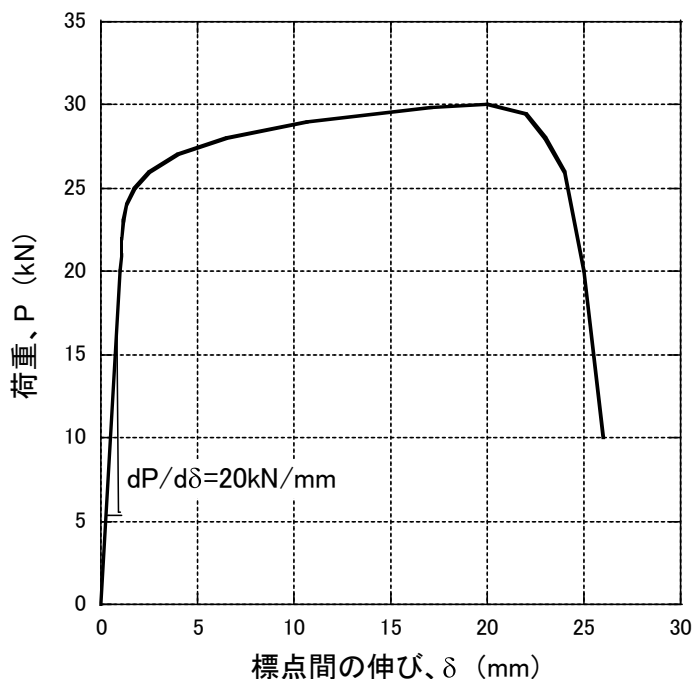
**第4問** 下図に示すように外径  $D_o(\text{mm})$ 、内径  $D_i(\text{mm})$ 、長さ  $L(\text{mm})$  で両端を拘束された配管について、次の問いに答えよ。配管の長さは径に比べて十分に大きく、端部の拘束の影響は無視できるものとする。また、材料のヤング率を  $E(\text{N/mm}^2)$ 、ポアソン比を  $\nu$ 、線膨張係数を  $\alpha(^\circ\text{C})$  とし、これらは温度に依存しないものとする。さらに、(1) から (3) の設問では、発生する応力が材料の降伏応力以下であり、塑性変形が生じないものとする。

- (1) 両端を固定された状態で配管全体の温度が  $\Delta T(^\circ\text{C})$  だけ上昇したときに発生する軸方向応力  $\sigma_z(\text{N/mm}^2)$  及び外径の変化量  $\Delta D(\text{mm})$  はどのように表わされるか記せ。
- (2) 両端間の距離が  $x(\text{mm})$  だけ広がったときに発生する軸方向応力  $\sigma_z(\text{N/mm}^2)$  及び外径の変化量  $\Delta D(\text{mm})$  はどのように表わされるか記せ。
- (3) 両端が固定された状態で配管に内圧  $p(\text{N/mm}^2)$  が負荷されたときに発生する周方向応力の管厚平均値  $\sigma_\theta(\text{N/mm}^2)$  及び外径の変化量  $\Delta D(\text{mm})$  はどのように表わされるか記せ。
- (4) 上記 (1)、(2)、(3) のうち、材料が降伏して塑性変形が発生しても、発生応力が上記で求められるものと変わらないものはどれか記せ。ただし、変形量は元の寸法に比べて十分小さく、形状変化の影響は無視できるものとする。



第5問 断面積が  $100\text{mm}^2$  で、伸び測定用の標点間距離が  $50\text{mm}$  の丸棒に引張荷重を負荷し、下図のように荷重と伸びの関係が得られたとしたとき、次の問いに答えよ。なお、自然対数関数の値が必要なときは、下表にある値を必要に応じて線形内挿して求めること。

- (1) 降伏後も荷重が伸びとともに増大する理由、及び最大値をとったあと、徐々に低下する理由を述べよ。
- (2) 標点間伸びが  $10\text{mm}$  のとき、荷重は  $28\text{kN}$  であった。材料の非圧縮性（変形しても体積が変化しない）を仮定して、この点における公称応力、真応力、公称ひずみ、真ひずみの値を求めよ（単位は  $\text{MPa}=\text{N}/\text{mm}^2$  または $\%$ ）。
- (3) 弾性範囲の勾配（ $20\text{kN}/\text{mm}$ ）から材料のヤング率を求めよ（単位は  $\text{MPa}=\text{N}/\text{mm}^2$ ）。
- (4) 最大荷重の値（ $30\text{kN}$ ）から材料の引張強さを求めよ（単位は  $\text{MPa}=\text{N}/\text{mm}^2$ ）。



自然対数関数の値

x	ln(x)
1.00	0.000
1.05	0.049
1.10	0.095
1.15	0.140
1.20	0.182
1.25	0.223
1.30	0.262
1.35	0.300
1.40	0.336

第6問 次の用語について簡潔に説明せよ。

- (1) ホットチャンネル係数
- (2) ドライアウト
- (3) 下限界応力拡大係数範囲
- (4) 塑性崩壊
- (5) ロックイン現象