

第 56 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 26 年 3 月 13 日

第1問 図1に示すように、直径 D (m)で長さ L (m)の円柱形状の燃料棒がピッチ P (m)で正方格子状に並んだ燃料集合体があり、一点鎖線の領域が無限に配置されている。燃料棒は周方向に一様に加熱されており、式(a)および図2に示すように軸方向に線出力密度 q' (W/m)の分布があるものとする。

$$q' = q'_0 \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad \dots \quad (a)$$

式(a)において、 z は燃料棒の底部から高さ $L/2$ を基準 O ($z=0$) として表した高さ方向の座標であり、 q'_0 は基準 O の位置 ($z=0$) における線出力密度である。燃料棒底部における冷却材の温度を T_a (K)、密度を R (kg/m³)、冷却材の比熱を C (J/(kg K))とし、燃料棒と冷却材の熱伝達率を H (W/(m² K))とする。冷却材は、相変化しないとともに、その物性値は温度に依存しない。燃料棒の周囲には冷却材が z 軸の正方向に流量 V (m³/s)で一様に流れており、冷却材の温度は z 軸と垂直な平面において一様とする。このような条件のもとで、燃料集合体が熱的に定常状態になっている。以下の問いに答えよ。

- (1) 水力学等価直径 D_e (m)および加熱等価直径 D_h (m)を求めよ。
- (2) 冷却材の質量流量 M (kg/s)を求めよ。
- (3) 燃料棒最上部の冷却材の温度を求めよ。
- (4) 燃料棒表面の軸方向温度分布を求めよ。
- (5) 燃料棒の表面温度が最高となる燃料棒の高さを求めよ。

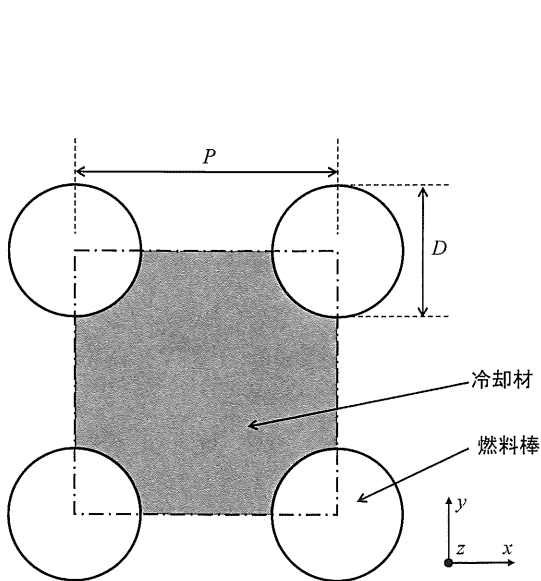


図1 燃料集合体の断面図

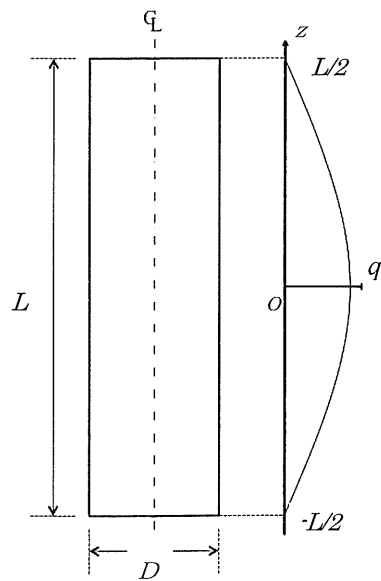
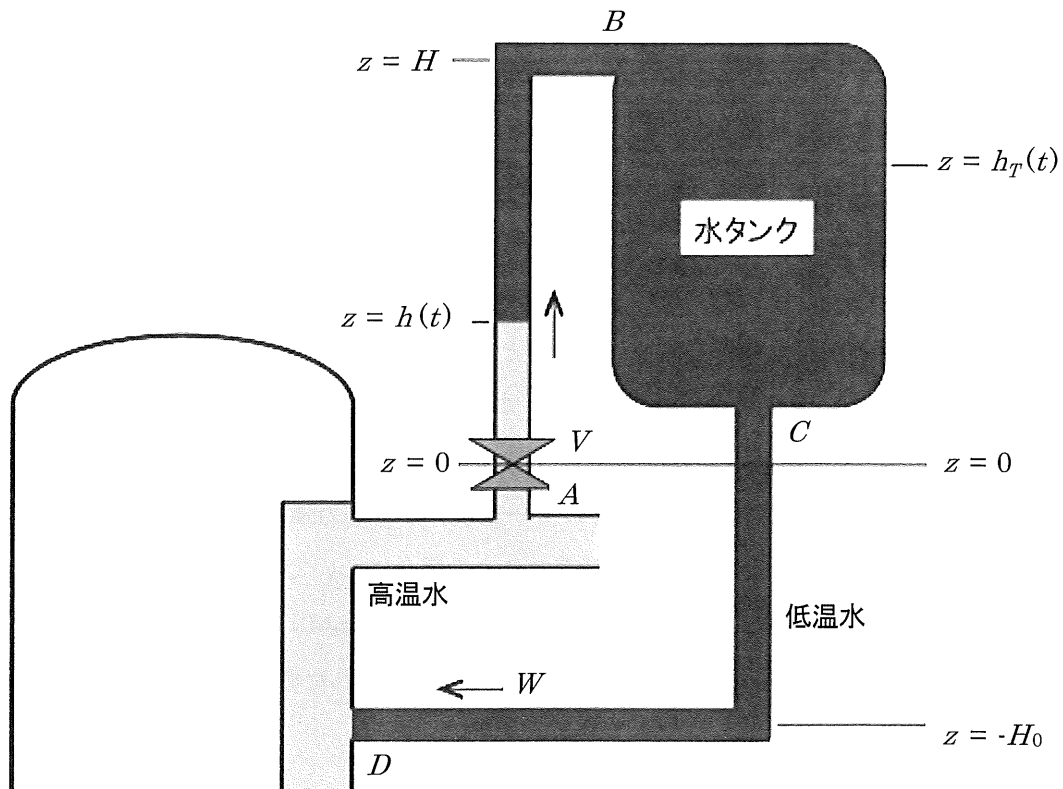


図2 燃料棒軸方向断面図と線出力密度

第2問 下図の静的注水系を有する軽水炉で時刻 $t=0$ [s]に事故が発生したため、弁 V を開いて低温水の重力注入を開始した。時刻 t_1 [s]に高温水の上端が $z = h(t_1)$ [m]を通過し、注水流量が $W(t_1)$ [kg/s]になるとき、以下の問いに答えよ。ただし、配管と水タンクの断面積は各々 A_P [m²]、 A_T [m²]、配管と水タンクの配置は図の通りであり、重力加速度は g [m/s²]とする。また、高温水と低温水の温度は各々一様で、密度は各々 ρ_H [kg/m³]、 ρ_L [kg/m³]とする。流れは1次元で、軽水炉内や主配管の流動による圧力損失は無視でき、配管や水タンクは断熱とする。

- (1) 注水流量 W を h の時間微分 dh/dt を含む式で表せ。
- (2) 時刻 t の注水の駆動力 $F(t)$ [N/m²]を、密度 ρ_H および ρ_L を含む式で表せ。
- (3) 注水流量 W によって冷却水の経路 A-V-B-C-D に圧力損失 ΔP [Pa]が生じるとき、 $h(t)$ に関する微分方程式を求めよ。ただし、 $\Delta P = KW$ (K は定数) と近似できるものとする。
- (4) (3)の微分方程式を解いて、 $h(t)$ を t の関数として求めよ。ただし、 $h(0) = 0$ である。
- (5) 高温水の上端が $z = H$ [m]に達して、タンクに入り始める時刻 t_T [s]を求めよ。
- (6) 時刻 t_T 以降、タンク内で徐々に低下していく低温水の上端の高さ $h_T(t)$ [m]を時間 t の関数として求めよ。



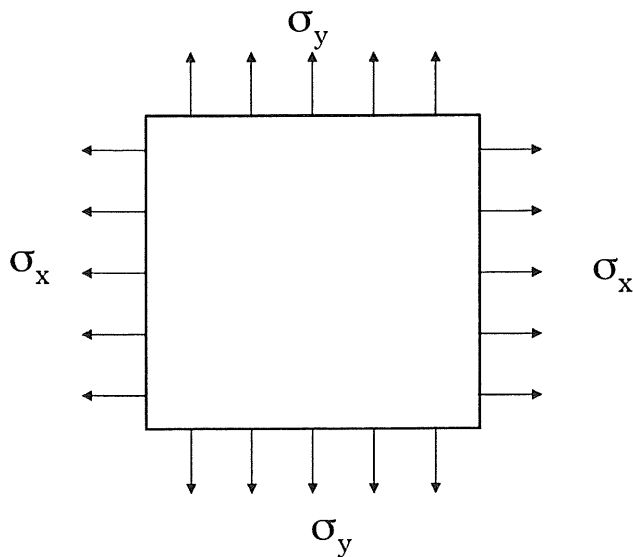
第3問 軽水炉でのシビアアクシデント（重大事故）の発生を想定し、以下の問いに答えよ。

- (1) 炉心の燃料被覆管等が酸化して 1,000 kg の水素が発生し、容積 80,000 m³ の格納容器に放出されたとする。このときの水素、酸素、窒素の各モル数を計算せよ。ただし、格納容器は当初、標準環境状態（SATP : 25 °C、100 kPa）の空気で満たされており、個々の気体の物性値は下表の値を近似的に一定値として用いることとする。1 モルの気体の SATP で の体積は約 0.025 m³、気体定数 R は 8.3 J/K/mol とする。
- (2) 放出された水素が一気に燃焼するとき、発生する熱量[kJ] および水蒸気のモル数を求めよ。ただし、1 モルの水素の燃焼熱を約 250 kJ/mol H₂ とする。
- (3) 水素燃焼後の格納容器内の気体の総熱容量[kJ/K] を求めよ。ただし、格納容器は断熱とし、水蒸気の凝縮は考えない。
- (4) 水素燃焼後の格納容器内の気体の温度[K] と圧力[kPa] を計算せよ。

物性値	分子量 M	比体積 v	定積比熱 C_v	
気体	単位	g/mol	m ³ /kg	kJ/(kg・K)
水素 (H ₂)		2.00	12.5	10.0
窒素 (N ₂)		28.0	0.893	0.74
酸素 (O ₂)		32.0	0.781	0.66
空気 (O ₂ 20%+N ₂ 80%)		29.0	0.871	0.72
水蒸気 (H ₂ O、400 K)		18.0	1.39	1.5

第4問 図のように x 方向の垂直応力 $\sigma_x=200\text{MPa}$ と y 方向の垂直応力 $\sigma_y=100\text{MPa}$ を一様に受ける平板がある。材料がヤング率 200,000MPa、ポアソン比 0.3 の線形弾性体としたとき、 x , y , z 方向の垂直ひずみ ε_x , ε_y , ε_z はそれぞれ何%になるか求めよ。また、材料の単位体積あたりに蓄積されるひずみエネルギー（ひずみエネルギー密度） W と応力強さ S （最大せん断応力の2倍）は何 MPa になるか求めよ。それぞれ以下の2つの場合について答えよ。

- (1) 板厚方向（紙面に垂直な方向）には拘束が無い場合（ $\sigma_z=0$ ）
- (2) 板厚方向（紙面に垂直な方向）の変形が完全に拘束された場合（ $\varepsilon_z=0$ ）



第5問 原子力発電プラント用の構造設計基準（日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」など）におけるクラス1機器の評価に関する以下の事項について知るところを述べよ。

- (1) 一次膜+曲げ応力に対する許容値が一次一般膜応力に対する許容値よりも大きく設定されている理由。
- (2) 一次+二次応力に対しては、一次応力単独よりも大きな範囲が許容されている理由。
- (3) 常用系機器に対する運転状態IVにおける一次応力の許容値が運転状態IIIにおける許容値よりも大きく設定されている理由。
- (4) 疲労評価においてピーク応力強さに必要に応じて割増係数を乗じることが規定されている理由。
- (5) 基本的に主応力ではなく、最大せん断応力基準に基づく応力強さで評価するように規定されている理由。

第6問 次の用語について簡潔に説明せよ。

- (1) 加速度応答スペクトル
- (2) 溶接継手効率
- (3) 核沸騰限界（DNB：Departure from Nucleate Boiling）
- (4) ギャップコンダクタンス
- (5) 形態係数