第　55　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 25 年 3 月 12 日

第１問　図のように正方形（W[m]×W[m]）の流路壁内に３×３本の燃料棒（直径D[m]、ピッチP[m]、長さL[m]）が設置された燃料集合体があり、燃料棒は全領域にわたり均一に発熱している。燃料棒の周りには冷却水が流れている。冷却水について、密度はρ [kg/m^3]であり、熱伝導率はλ [W/(mK)]であり、粘度はμ [Pa･s]であり、z 方向に一定流量m[kg/s]で流れている。流路壁で発熱しておらず、流路断面において熱伝達は一様であるものとする。

Wを 5.0×10^{-2}m、Dを 1.0×10^{-2}m、Pを 1.3×10^{-2}m、Lを 4.0m とする。ρを 1.0×10^{3}kg/m^3、λを 0.50W/(mK)、μを 1.0×10^{-3}Pa･s とし、mを 4.5kg/s とし、プラントル数Ｐｒを 0.80 とする。このとき、次の問いに答えよ。

(1) 熱的等価直径De [m]の値を求めよ。

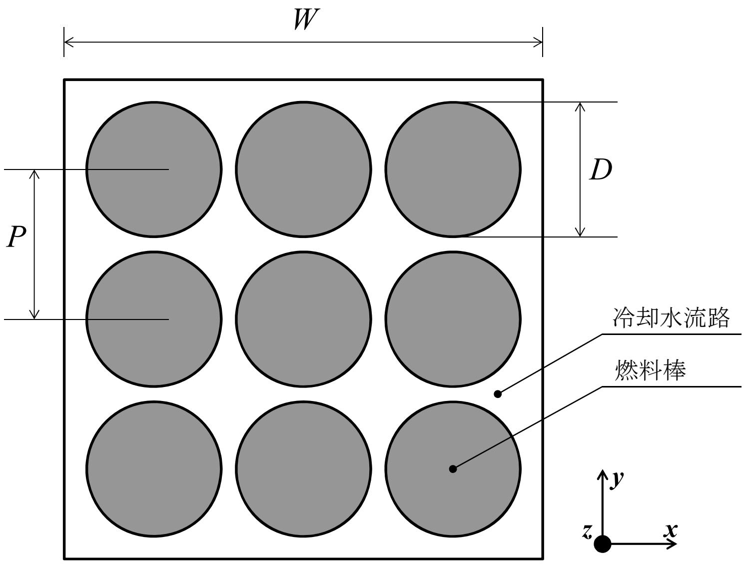
(2) 流路内におけるレイノルズ数Ｒｅの値を求め、その流れが層流か乱流かを判断せよ。

(3) z＝3.0[m]の高さにおいて、十分に発達した温度場と判断できるかどうかを示せ。

(4) z＝3.0[m]の高さにおいて、流路内の熱伝達率h [W/(m^{2}K)] の値を求めよ。ただし、ヌセルト数Nuは次式のように与えられる。

$$Nu=\begin{cases}4.36 & \text{（層流）}\\ 0.023\,F(\mathrm{Re})\,G(\mathrm{Pr}) & \text{（乱流）}\end{cases}$$

ここで、$F(x)$および$G(x)$は関数であり、$F(x)=-4.0\times10^{-8}x^2+8.9\times10^{-2}x+1.1\times10^3$、$G(x)=0.44x+0.56$ のように表される。



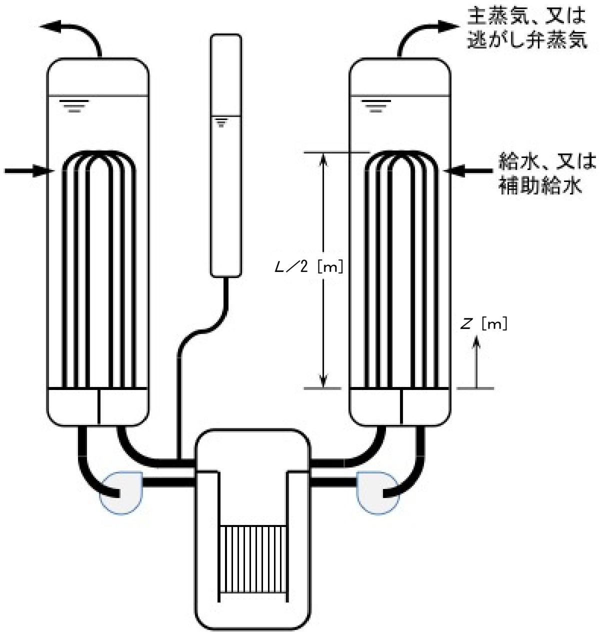
第２問　下図のような２ループ型ＰＷＲの通常運転時の流動と事故時の自然循環冷却を考える。次の問いに答えよ。ただし、伝熱管は内径 d [m]、平均長さ L [m]、平均高さは $L/2$ [m]であり、圧力損失係数は入口、出口、180 度ベンド部で各々 K_i、K_o、K_b、管摩擦係数は f、重力加速度は g [m/s^2]とする。

(1) 通常運転時に蒸気発生器（ＳＧ）伝熱管の入口−出口間に生じる圧力損失 ΔP [Pa]を表す式を求めよ。ただし、冷却水の密度 ρ_1 [kg/m^3]は水温に依存せず一定で、管内の平均流速は u [m/s]とする。

(2) 通常運転時に、ＳＧの伝熱管内に生じる温度分布および二次側冷却水の温度分布を、横軸を温度 T [K]、縦軸を高さ Z [m]としたグラフ上に比較して略示せよ。ただし、伝熱管の入口、頂部、出口の温度は各々 T_i、T_t、T_o [K]であり、二次側温度 T_2 [K]は一様とする。

(3) ＳＢＯが発生し、ＳＧにより水単相の自然循環冷却をするとき、一部の伝熱管に逆流を生じた。順流と逆流の伝熱管の入口−出口間に生じる圧力損失 ΔP_F 、ΔP_R [Pa]を表す式を求め、それらの関係を示せ。ただし、伝熱管の平均流速は順流と逆流で各々 u_F 、u_R [m/s]、冷却水密度は水温と共に変化し、順流伝熱管の入口、頂部、出口で各々 ρ_i、ρ_t 、ρ_o [kg/m^3]、上昇流側と下降流側の平均値を各々 $\overline{\rho_U}$，$\overline{\rho_D}$ [kg/m^3]、逆流伝熱管は水温が一様で冷却水密度は ρ_o に等しいとする。

(4) アクシデントマネジメント策としてＳＧの減圧操作を開始したとき、片側のＳＧが補助給水の機能を喪失したため、健全ＳＧのみ減圧を行い、異常ＳＧは隔離したままとした。このとき、健全、異常の両ＳＧに生じるうる自然循環の変化について 250 字以内で説明せよ。ただし、炉心の崩壊熱は一定であり、健全ＳＧでは逃がし弁を全開にして減圧し、水位は給水により保たれるとする。



第３問　下図のようなプール型の原子炉の定格運転時と異常過渡時（ポンプトリップ）の流動と炉心冷却を考える。次の問いに答えよ。ただし、炉心の流路面積はA[㎡]、高さはH[m]、出力はQ[W]で一様に分布し、冷却水は流量W [kg/s]で下降流、流速分布は一様とする。また、プール水の温度T_p[K]、比エンタルピーh_o[J/kg]、密度ρ_o[kg/m³]は一様であり、飽和水の比エンタルピーをh_s [J/kg]、重力加速度はg[m/s²]とする。

(1) 定格運転時の炉心内の冷却水の比エンタルピーの分布$h_c(z)$[J/kg]を表す式を求めよ。

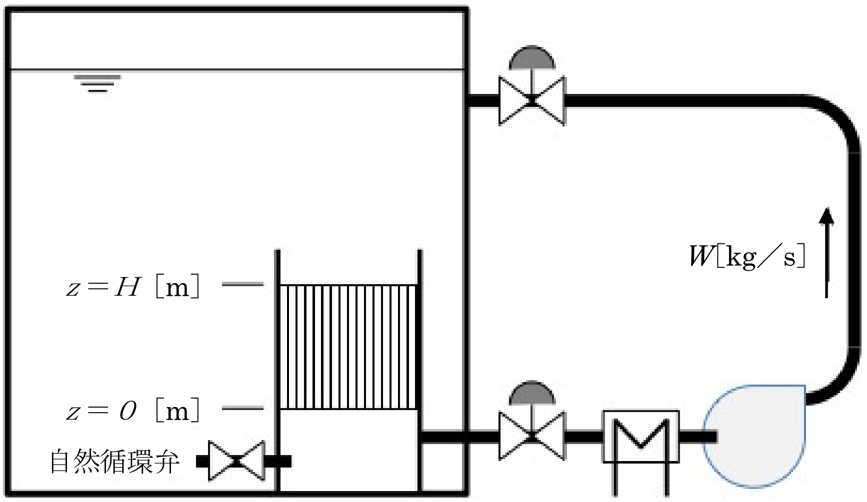
(2) ポンプトリップにより炉心流量が低下し始めた。炉心下端で沸騰が生じる直前にスクラムするとき、スクラム時の炉心流量の最小値W_{min}[kg/s]を求めよ。

(3) スクラムと同時に循環ループを隔離し、自然循環弁を開けて自然循環冷却へ移行し、炉心に流量W_{NC}[kg/s]の上昇流を生じた。このときの自然循環の駆動力F[Pa]を、W_{NC}を含む式で示せ。ただし、炉心出力はQ_{NC}[W]に低下し、冷却水の密度ρ [kg/m³]は比エンタルピーの関数として次式で近似できるとする。

$$\rho = -c_h(h_C(z) - h_o) + \rho_o$$

ここで、c_h [kg²/m³·J]は定数である。

(4) 自然循環流量W_{NC} [kg/s]を表す式を示せ。ただし、流動抵抗は自然循環弁で代表され、自然循環弁の圧力損失係数、流路面積、冷却水の流速は各々K_v 、A_v[㎡]、 u_v[m/s]である。



第４問　外径 500mm、内径 400mm の直管について次の問いに答えよ。材料は線形弾性体であるとする。

(1) 流量の関係から配管の内径を 500mm にする必要が生じた。この配管が元の配管と同じ内圧を受けるとき、発生する最大応力を同じにするためには、外径を何 mm にすればよいか。

(2) このように寸法を変更した配管に対して曲げモーメントが負荷されるときに発生する最大応力は、元の配管に対して同一の曲げモーメントが負荷されたときに発生する最大応力の何倍になるか。

(3) このように寸法を変更した配管に対して軸方向の引張荷重が負荷されるときに発生する応力は、元の配管に対して同一の引張荷重が負荷されたときに発生する応力の何倍になるか。

(4) 配管の外表面の温度が一定のまま、内表面の温度が変化したときに、寸法を変更した配管に発生する定常熱応力の最大値は、元の配管で発生するものの何倍になるか。なお、内表面温度の変化は両配管で変わらないものとする。

第５問　下図のように重量物を中央に有し、左右を固定されている配管系が地震を受けて左右に繰返し振動することを想定する。このときこの配管系が持つ固有振動数について次の問いに答えよ。ただし、配管は線形弾性理論に従い、固有振動数は配管の引張剛性を重量物の質量で割った値の平方根に比例するものとする。

(1) 重量物の質量が４倍になったとき、固有振動数はどのように変化するか。

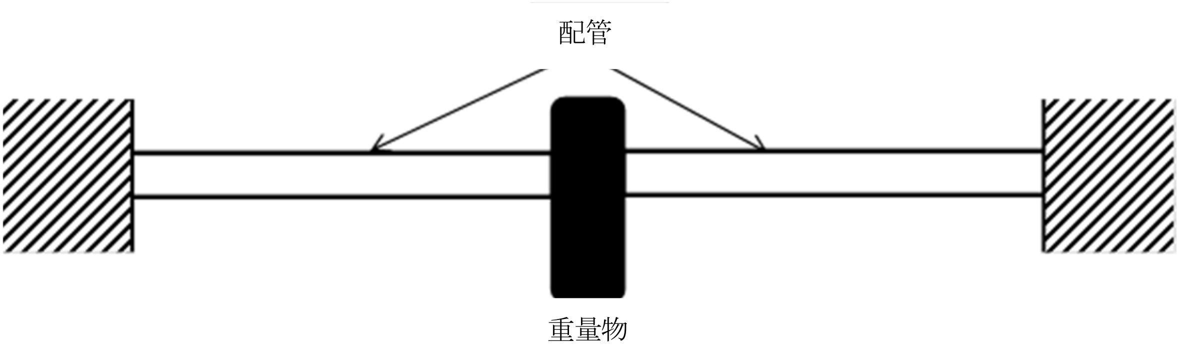
(2) ヤング率が２倍の材料を配管に採用したとき、固有振動数はどのように変化するか。

(3) 配管の肉厚と直径の比を保ったまま、直径を２倍にしたとき、固有振動数はどのように変化するか。

(4) 配管の長さを２倍にしたとき、固有振動数はどのように変化するか。

(5) 配管の外径を 500mm、内径を 400mm、全長を 20,000mm、配管材料のヤング率を 200,000MPa、重量物の質量を 10ton としたとき、固有振動数はいくらになるか。次のうちから最も近いものを選べ。

(a) 0.5Hz	(b) 5Hz	(c) 50Hz	(d) 500Hz



第６問　次の用語について簡潔に説明せよ。

(1) 応力強さ（stress intensity）

(2) 極限荷重

(3) サブクール沸騰

(4) クオリティとボイド率

(5) ＣＨＦ