

第 59 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 29 年 3 月 16 日

第1問 図に示されるように、長さ L [m] の流路内を流量 Q [m³/s] の冷却材が z [m] 方向に流れている。流路は一辺 W [m] の正方形であり、 4×4 本の円柱形状の燃料棒がある。流路入口での冷却材の温度は T_0 [K] である。冷却材の密度は ρ [kg/m³]、プラントル数は Pr 、比熱は c [J/(kg·K)]、熱伝導率は λ [W/(m·K)] であり、流路内で一定とする。燃料棒は、半径 R [m] のペレット、厚さ H [m] の被覆材から構成されているとする。ペレット表面と被覆材内面のギャップは無視でき、両者の温度は等しいとする。被覆材の熱伝導率は k [W/(m·K)] で一定であり、 r [m] 方向以外の熱移動は無視できる。被覆材外面と被覆材内面の温度差 ΔT [K] は

$$\Delta T(z) = A \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right)$$

で与えられる。ただし、 A [K] は $z = L/2$ での温度差である。以下の問いに答えよ。

- (1) 熱等価直径 D [m] および流路でのレイノルズ数 Re を求めよ。
- (2) 冷却材の流れは乱流状態であり、ヌセルト数 Nu が Dittus-Boelter の式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

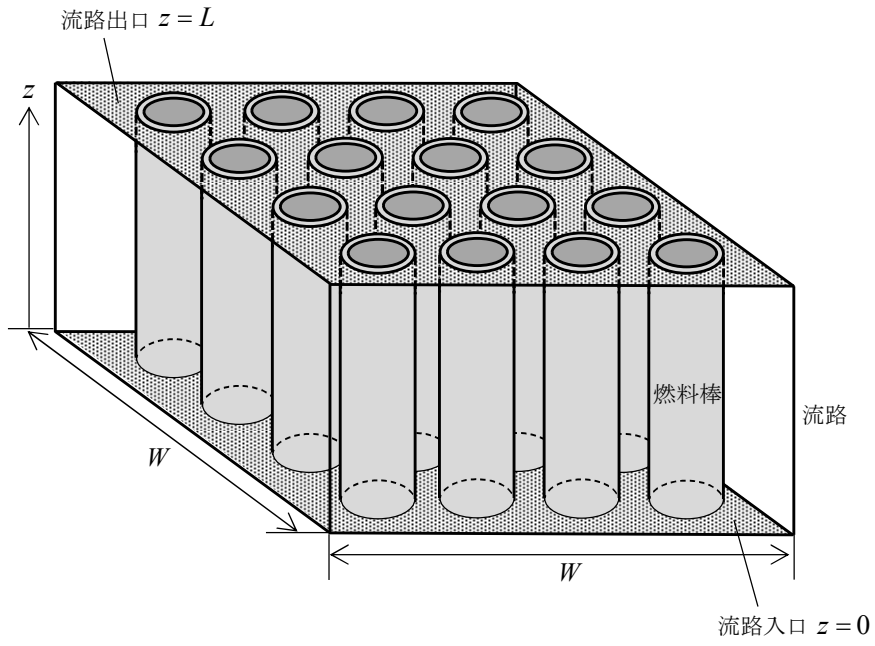
で与えられるとする。このとき、熱伝達率 h [W/(m²·K)] を求めよ。

- (3) 被覆材の温度 T [K] は、定常熱伝導方程式

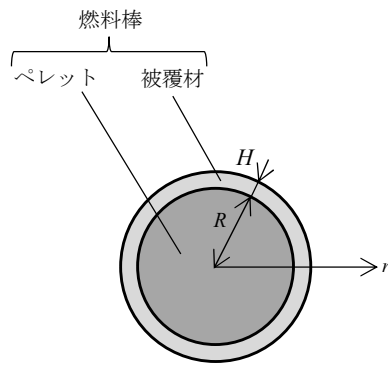
$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

によって支配されている。被覆材外面の r 方向の熱流束 $q_c''(z)$ [W/m²] を求めよ。また、被覆材外面の線出力密度 $q_c'(z)$ [W/m] を求めよ。

- (4) 流路での冷却材の温度は z 方向のみに分布する。流路での熱エネルギーの流入と流出を考え、冷却材の温度分布 $T_f(z)$ [K] を求めよ。
- (5) 問(2)、(3)、(4) の結果を用いて、被覆材外面の温度分布 $T_c(z)$ [K] を求めよ。



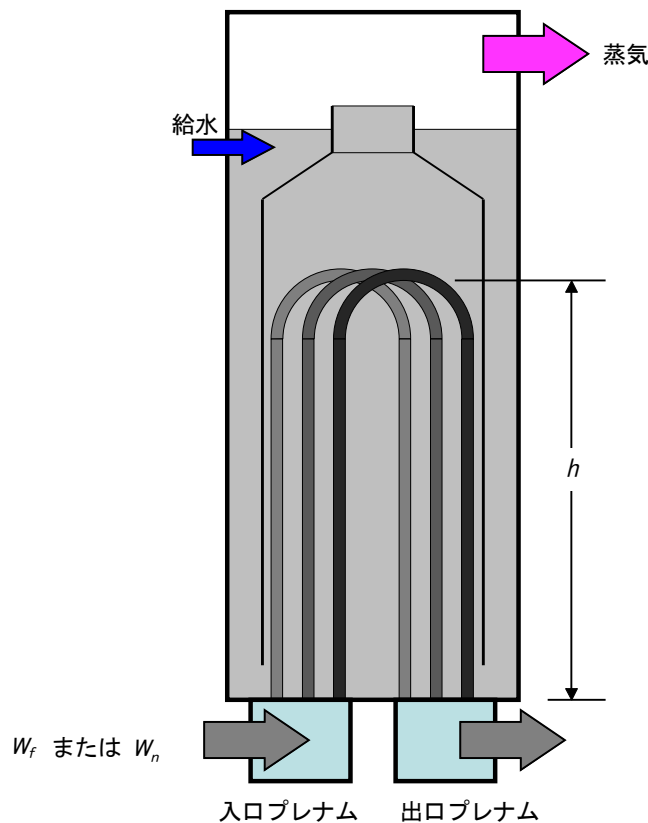
流路の全体図



燃料棒の断面図

第2問 下図の様な N 本の逆U字伝熱管群を有する蒸気発生器での伝熱流動を考える。

- (1) 一次側を流量 W_f [kg/s]で強制循環して密度 ρ [kg/m³]のサブクール水が伝熱管を均等に流れるとき、流動によって入口と出口のプレナム間に生じる差圧 ΔP_o [Pa]を表す式を示せ。ただし、伝熱管は内径 d [m]、平均高さ h [m]、平均長さ $2h$ [m]、伝熱管の入口と出口、バンド部での損失係数を k_i 、 k_e 、 k_b 、管摩擦係数を λ 、重力加速度を g [m/s²]とし、熱の影響は無視できるとする。
- (2) 一次側を自然循環運転としたとき流量は W_n ($\ll W_f$)へ低下し、伝熱管内の冷却材に温度分布が生じて、密度が入口から出口まで直線的に変化した。入口と出口のプレナムにおける冷却材密度を ρ_i 、 ρ_e とすると、伝熱管に生じる自然循環の駆動力を表す式を示せ。
- (3) (2)にて、 W_n が小さく流動による圧力損失は無視できるとき、入口と出口のプレナム間に生じる差圧 ΔP_{nc} を表す式を示し、(2)の駆動力との関係および、それらが伝熱管群の流動に及ぼす影響を簡潔に説明せよ。
- (4) (2)にて、一次系では圧力が低下して二次側とほぼ等しくなり、飽和温度となって入口プレナムに水蒸気泡が流入し始めた。このときの W_n の変化を入口プレナムのボイド率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)を横軸としたグラフに図示し、伝熱管群の流動が受ける影響を(3)で行った説明との関係が分かる様に簡潔に説明せよ。



第3問 軽水炉でのシビアアクシデント(重大事故)を考える。

- (1) シビアアクシデント時の炉心の燃料挙動に係る次の説明文に対し、に入る適切な語句又は数値を、番号と共に答えよ。ただし、同じ番号のには、同じ語句又は数値が入る。

[解答例] ㉑ 東京

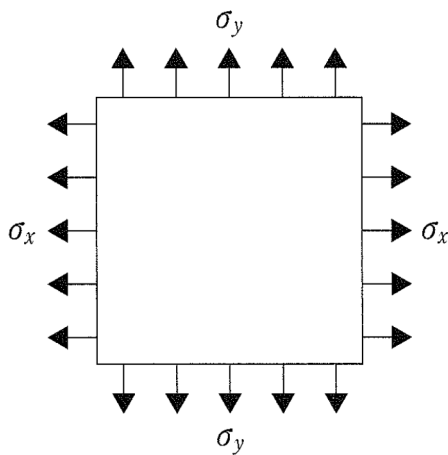
- (ア) 炉心では、①による②の停止後も③が発生し続けるため、冷却材による除熱が失われると、燃料棒は昇温・過熱する。
- (イ) ①直後の高発熱率条件下で冷却材の流速が急減したりすると、④により燃料棒表面が⑤に覆われ、大きく昇温する場合がある。③が低下しても、燃料棒が水面上に露出し続けると大きな昇温を生じる。
- (ウ) 炉心の健全性評価では、⑥の変化を調べる。その値が⑦を越えると、⑧などの損傷が発生しはじめ、⑨を超えると酸化・発熱する⑩が開始する。その結果、燃料棒の損傷は急速に進行する。
- (エ) 燃料棒は露出部の全域で昇温するが、局所の昇温率は③の⑪のほか、⑫、冷却材の有無や流量に依存して⑬に分布する。
- (オ) 炉心の溶融は材料の融点に対応して、概ね、⑭、⑮、⑯の順に進む。ただし、融点が高い材料でも、溶融した材料が接触すると、⑰によって融点が低下する場合がある。
- (カ) 炉心はその後、⑱として流下するが、冷却材との相互作用により、⑲を形成したり、⑳したりしつつ、原子炉容器下部ヘッドなどに堆積する。

- (2) (1)と関連して、事故時など緊急事態にて考慮される燃料被覆管障壁の喪失の判断指標と値について、PWR または BWR に対して 200 字以内で説明せよ。

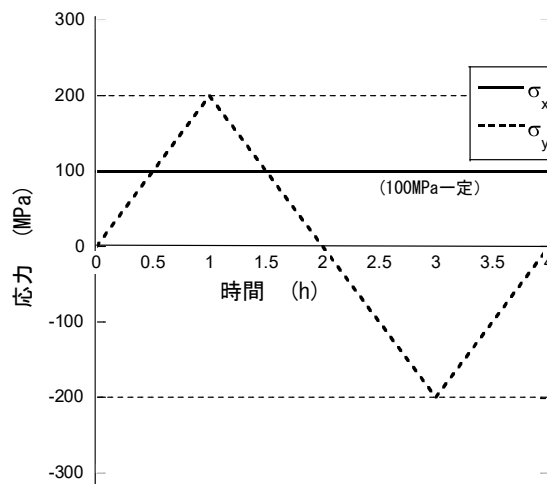
- (3) 原子炉の事故後の安定停止状態の確立について 300 字以内で説明せよ。

第4問 図(a)のように x 方向の垂直応力 σ_x と y 方向の垂直応力 σ_y を受ける平板がある。これらの応力が図(b)のように時間とともに変化するときのひずみや応力強さに関して以下の問いに答えよ。材料は線形弾性体でヤング率は 100,000MPa、ポアソン比は 0.3 であるとする。

- (1) 板厚方向の垂直応力がゼロに保たれるとしたとき、以下の値を求めよ。
- (a) x 方向の垂直ひずみの最大値と最小値
 - (b) y 方向の垂直ひずみの最大値と最小値
 - (c) 応力強さ（最大主応力と最小主応力の差）の最大値
- (2) 板厚方向の垂直ひずみがゼロに保たれるとしたとき、以下の値を求めよ。
- (a) x 方向の垂直ひずみの最大値と最小値
 - (b) y 方向の垂直ひずみの最大値と最小値
 - (c) 応力強さの最大値



図(a) 評価対象



図(b) 応力の時間的变化

第5問 以下に示すのは日本機械学会の「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」における「応力解析に関する用語」からの抜粋である。文章中の□に入る適切な語句を番号とともに答えよ。なお、同じ番号の□には、同じ語句が入るものとする。

〔解答例〕⑪ 東京

- (1) □①とは、断面の垂直応力の平均値に等しい当該断面に垂直な応力成分をいう。
- (2) □②とは、垂直成分の平均値からの変化成分をいう。
- (3) □③とは、外力、内力およびモーメントに対して単純な平衡の法則を満足する垂直応力または□④をいう。
- (4) □⑤とは、隣接部分の拘束、自己拘束により生じる垂直応力または□④をいう。
- (5) □⑥とは、応力集中または局部熱応力により、□③または□⑤に付加される応力の増加分をいう。
- (6) □⑦とは、圧力または機械的荷重によって生じる□①であって、構造上の不連続性および応力集中のない部分のものをいう。
- (7) □⑧とは、配管系において熱による自由変位が支持点などにより拘束されることより生じる応力をいう。
- (8) □⑨とは、□③、□⑤および□⑥を組み合わせることで求めた応力強さをいう。
- (9) □⑩とは、各応力サイクルにおける実際の繰返し回数と繰返し□⑨に対応する許容繰返し回数との比を全ての応力サイクルについて加えたものをいう。

第6問 次の用語について簡潔に説明せよ。

- (1) 渦励起振動とロックイン現象
- (2) 炉心内圧力損失
- (3) ギャップコンダクタンス (ギャップ熱伝達率) とスエリング現象
- (4) 熱応カラジェット
- (5) 相当応力と相当ひずみ