

第 66 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。

（指示がない限り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。

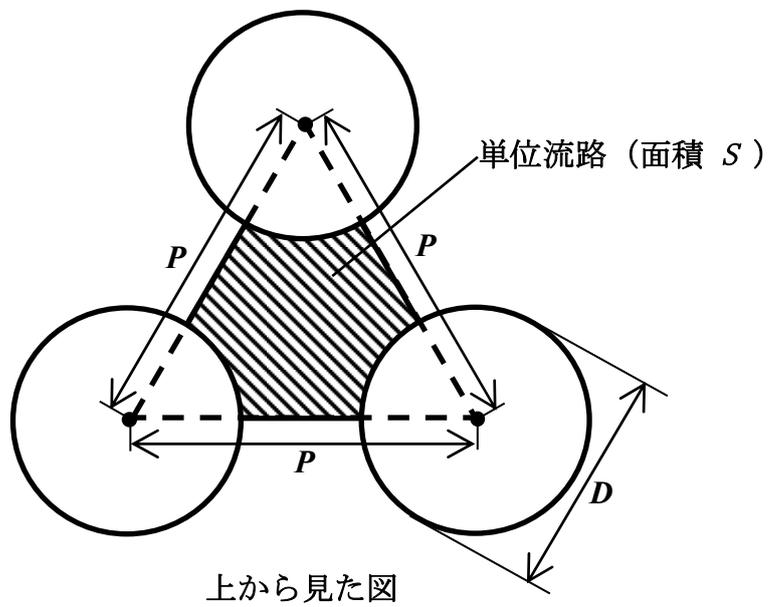
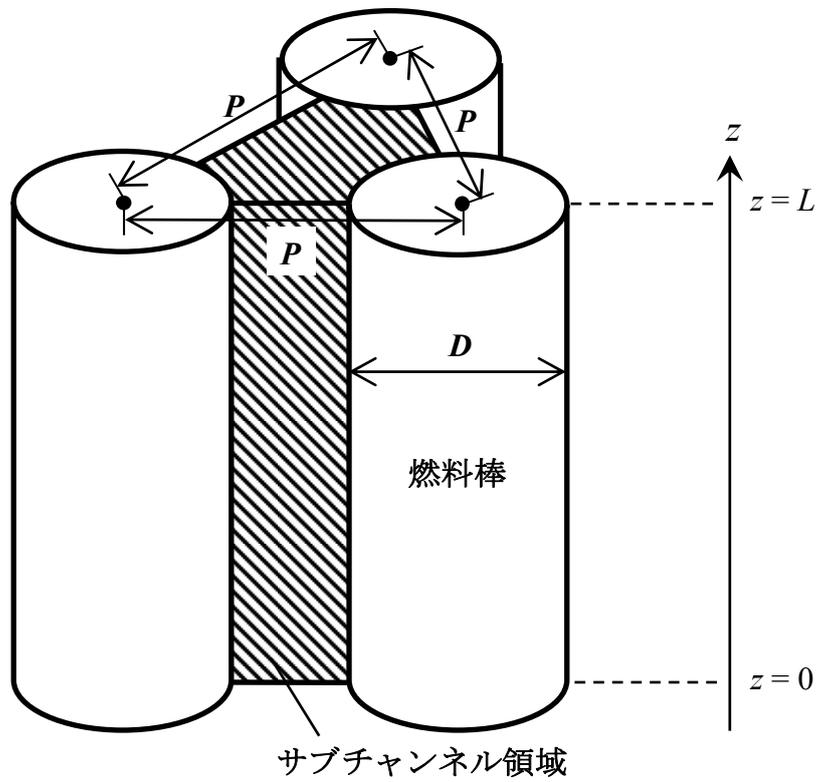
令和6年3月14日

第1問 図に示されるように、長さ L [m]、直径 D [m] の円柱形状の燃料棒が中心間距離（ピッチ） P [m] で三角配置された原子炉の炉心が定常状態にある。各燃料棒は、一様な線出力密度 q' [W/m] で発熱しているとする。また、冷却材は燃料棒間のサブチャンネル領域を一様な流速 U [m/s] で z 方向に流れており、密度は ρ [kg/m³]、比熱は C [J/kg K] である。サブチャンネル領域の入口 ($z=0$ [m]) における冷却材温度は T_0 [K] であり、単位流路（サブチャンネル領域の水平断面）内において冷却材温度は一様であるとする。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 単位流路の断面積 S [m²] 及び冷却材の質量流量 G [kg/s] を求めよ。
- (2) 燃料棒からサブチャンネル領域への入熱 Q [W] を求め、サブチャンネル出口 ($z=L$) における冷却材温度 T_L [K] を、 Q 及び G を用いて表せ。

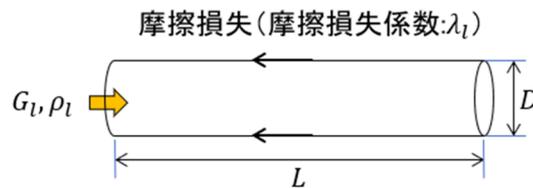
以下では、燃料棒の中心間距離（ピッチ） P および直径 D を変化させることを考える。ただし、 P や D が変化しても、流路内の冷却材流速 U 及び燃料棒の線出力密度 q' は変化しないものとする。

- (3) D を固定して P のみ変化させる場合、 P が増加すると T_L は増加するか、減少するか、理由とともに答えよ。
- (4) D と P を同時に変化させる場合、 T_L が変化しないためには D と P がどのような関係式を満たす必要があるか。ただし、 $P > D > 0$ とする。また、必要であれば基準となる値を適切に定義して解答せよ。
- (5) 上記 (4) の条件下において、熱的等価直径 De [m] と P の関係式のグラフの概形（横軸： P 、縦軸： De ）を描け。その際、必要であれば基準となる値を適切に定義し、グラフ中に値や漸近線を記載すること。

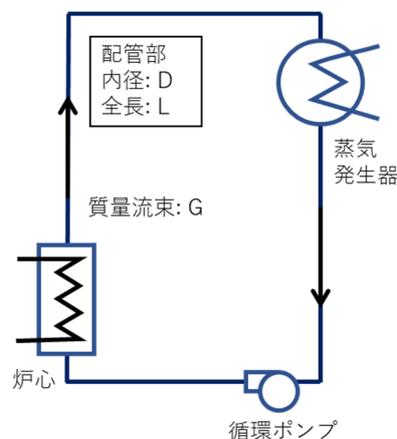


第2問 原子炉の主循環ポンプや事故時の注水系を設計するためには、一次系を構成する配管や流路の形状、流動様式によって決まる流れの圧力損失を見積もる必要がある。これらの簡易的な評価方法について、以下の問いに答えよ。配管内径を D (m)、配管全長を L (m)、冷却材密度を ρ (kg/m³)、冷却材の粘性係数を μ (Pa・s)、配管の摩擦係数を λ (—)、冷却材の質量流束を G (kg/(m² s))、配管内の流れの摩擦による圧力損失を ΔP_f (Pa)、ポンプ揚程を H (m)とし、各記号に付く添え字 l, g, m を液体単相、気体単相、気液二相とする。

- (1) 冷却材を液体単相として、全長 L の円管内の摩擦による圧力損失 ΔP_f を $\lambda_l, G_l, \rho_l, D, L$ を用いて表せ。流れは完全発達とし、流れ方向に配管径や流量は変わらないものとする。



- (2) 定格運転に必要な主循環ポンプの揚程 H は、系内循環ループで生じうる全圧力損失に釣り合うように設計される。 $\lambda_l = 0.01$ 、 $G_l = 7000$ (kg/(m² s))、 $\rho_l = 700$ (kg/m³)、 $D = 0.7$ (m)、 $L = 100$ (m) として、(1) で求めた摩擦圧力損失を計算せよ。また、配管摩擦損失以外で生じる形状等による圧力損失を 300 (kPa) としたとき、主循環ポンプの全揚程を求めよ。ポンプ全揚程は水頭 (m) で表し、重力加速度は 10 (m/s²) とする。



- (3) 冷却材が二相流の場合の摩擦損失は、配管内を液体単相又は気体単相としたときの摩擦損失に乗数をかけることで求められる。この乗数は二相増倍係数や二相摩擦係数などと呼ばれ、いくつかの定義がある。ここでは均質流を仮定し、二相増倍係数 ϕ_{l0}^2 を、二相流と同じ質量流束の液体単相が流れた場合の摩擦損失との比として、以下のように定義する。

$$\left(\frac{\partial P_f}{\partial z}\right)_m = \phi_{l0}^2 \left(\frac{\partial P_f}{\partial z}\right)_l \quad \text{①}$$

$\partial/\partial z$ は単位長さ当たりの損失を表し、添え字 0 は「同じ質量流束」という条件の基準を意味する。このとき、 ϕ_{l0}^2 を $\lambda_m, \rho_m, \lambda_l, \rho_l$ を用いて表せ。

- (4) (3) において、摩擦損失係数 $\lambda_k (k = m, l)$ を

$$\lambda_k = 0.3164 \left(\frac{G_k D}{\mu_k}\right)^{-0.25} \quad \text{②}$$

とし、二相流の粘性係数 μ_m と密度 ρ_m は蒸気クオリティ x を用いて

$$\frac{1}{\mu_m} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad \text{③}$$

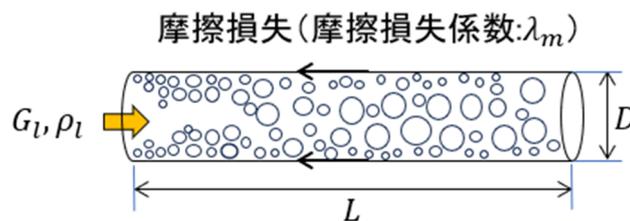
$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \quad \text{④}$$

で表せるとしたとき、 ϕ_{l0}^2 を求めよ。

- (5) (4) において、 $\mu_m = \mu_l$ とした場合、

$$\phi_{l0}^2 = 1 + \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} x \quad \text{⑤}$$

となる。これを用いて全長 L 、内径 D 、線出力密度 q (kW/m) の一様発熱管に飽和水が流入したときに全長で生じる摩擦圧力損失 ΔP_f を求めよ。蒸発潜熱を Δh_{fg} (kJ/kg) とし、摩擦損失係数には式②を用いる。

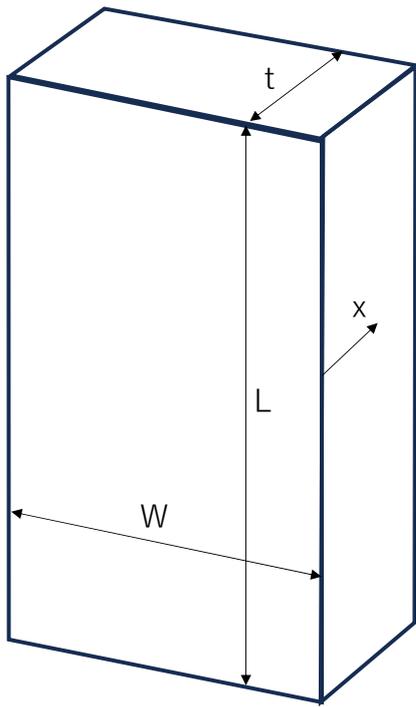


第3問 軽水炉での重大事故（シビアアクシデント）を考える。以下の問いに答えよ。

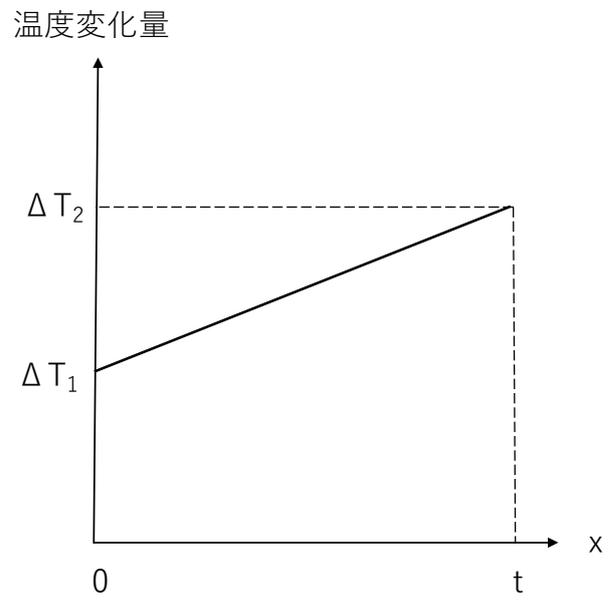
- (1) 炉心に大量の放射性物質を内蔵する原子力発電所は、人と環境に対して大きなリスク源であり、顕在化する可能性のあるリスクの不確かさも大きいため、確実にリスクの顕在化を防ぐために深層防護の考え方が適用されている。この深層防護（多重防護）の考え方について説明せよ。
- (2) 重大事故の対策として深層防護の考え方に沿って考えられるもののうち2つを挙げ、各々の対策の方針を簡潔に説明せよ。ただし、大規模損壊への対策は除外する。
- (3) 全交流電源喪失（SBO）に際して、何らかの要因によって設計基準事故対処設備に含まれる非常用ディーゼル発電機が利用できない場合には代替電源設備が利用される。その代替電源設備の設備と準備に際する特徴を、設計基準事故対処設備との関係を含めて説明せよ。
- (4) 大規模損壊の主要因を2件挙げよ。さらに、対応策の具体例を3つ述べよ。

第4問 図 (a) のような幅 W 、長さ L 、厚さ t の板状の部材が、以下のように様々な変形や温度変化を受けたときに部材に発生する応力や変形に関して、以下の問いに答えよ。材料はヤング率 E 、ポアソン比 ν 、線膨張係数 α の等方線形弾性体とし、これらの値は温度に依存しないものとする。また、部材の質量による応力は無視でき、微小変形理論が適用できるものとする。

- (1) 温度一定で幅方向、厚さ方向に拘束がない状態で、長さが ΔL だけ伸ばされたときに発生する長さ方向応力 σ と板幅の変化 ΔW を求めるための式を示せ。
- (2) 温度一定で幅方向には拘束がないが、厚さ方向の変形が拘束された状態で (1) と同じ長さの変化を受けたときに発生する長さ方向応力 σ と板幅の変化 ΔW を求めるための式を示せ。
- (3) いずれの方向にも拘束がない状態で、部材全体の温度が ΔT 変化したときの長さの変化 ΔL と板幅の変化 ΔW を求めるための式を示せ。
- (4) 幅方向、厚さ方向に拘束がなく、長さ方向の伸びが拘束された状態で、部材全体の温度が ΔT 変化したときの長さ方向応力 σ と板幅の変化 ΔW を求めるための式を示せ。
- (5) 板の表面と裏面が違った媒体に接し、それらの温度が別々に変化することで厚さ方向にのみ温度勾配が発生する状況を考える。幅方向、厚さ方向に変形の拘束がなく、長さ方向の伸びのみが完全に拘束された状態で図 (b) に示すような温度変化が生じたときに発生する長さ方向応力の断面平均成分 σ_m と曲げ成分 σ_b を求めるための式を示せ。



(a) 評価対象とする部材の形状



(b) (5) で考慮する温度変化の板厚方向分布

第5問 軽水炉の機器などに用いられている金属材料の塑性変形挙動とそのモデル化に関する以下の説明において、に入る適切な語句を番号とともに記せ。なお、同じ番号のには同じ語句が入る。

〔解答例〕 ㉑—東京

金属材料に応力を加えていくと、応力が小さい段階ではひずみと応力が比例する①挙動を示すが、ある値以上の応力になると非比例的な塑性変形が発生するようになる。単軸引張状態では、引張応力が②に達すると塑性変形が開始するが、複数の応力成分が0でない多軸応力状態では、等価な単軸応力状態に置き換えるための③が用いられ、それを用いて表される降伏条件を応力成分空間で表したものを④という。金属材料では、降伏条件は三つの⑤応力成分の平均値である⑥には依存しないとされ、⑤応力成分からこれを引いた⑦応力成分と⑧応力成分によって降伏条件が与えられるのが普通である。最大主応力と最小主応力の差が⑨の③で、弾性解析ベースの設計基準では⑩と呼ばれている。一方、有限要素法を用いた弾塑性解析では三つの主応力の差の二乗の和を基に計算される⑪の③が用いられるのが普通である。

その後、塑性変形が生じても応力点は降伏条件を満たし続けることが必要なため、塑性変形に応じて④を変化させるが、原点を変えずに拡大させる場合は⑫、大きさを変えずに原点を移動させる場合は⑬と呼ばれる。実際の挙動はこれらの中間的な挙動を示す場合が多いので、これらを組み合わせた⑭が適用されることも多い。塑性変形状態での塑性ひずみの各成分は⑦応力の比に比例することが仮定されるため、⑮に近い状態で変形が進行する。また、負荷応力の低下などによって応力点が④の内部に戻ったときには、塑性変形は生じず、純弾性的に振る舞うことで、⑯時の挙動が適切に表現される。

塑性変形量が大きくなって変形前と変形後の形状が大きく異なってきた場合には、変形前の形状に対して定義される⑰と変形後の形状に対して定義される⑱の差が大きくなる。また、ひずみに関しても初期の形状を基準に評価される⑲と各段階での形状を考慮して増分的に評価される⑳の差が大きくなり、力の釣り合いは⑱で考える必要があることなどから、⑰—⑲関係ではなく⑱—㉑関係を用いた有限変形解析がより実際の挙動に近い解を与えるようになる。

第6問 次の用語について、それぞれ200字以内で簡潔に説明せよ。

- (1) 層流と乱流（レイノルズ数に関する記述は必須）
- (2) DNBR と MCPR の違い
- (3) 応力拡大係数
- (4) 確率論的破壊力学
- (5) S-N 曲線

【メモ】

