

第 60 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30年3月15日

第1問 加圧水型原子炉において、円筒形炉心を考える。炉心の高さは L [m]であり、炉心の高さ方向の座標を z [m]とし、 $-L/2 \leq z \leq L/2$ である。図1に示されるように、燃料棒の単位長さ当たりの発熱量 (線出力密度) $q'(z)$ [W/m]は

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

で与えられる。ただし、 q'_0 は $z=0$ における線出力密度である。冷却材の密度を ρ [kg/m³]、冷却材の定圧比熱を c_p [J/(kg·K)]、燃料棒1本当たりの冷却材の流量を Q [m³/s]、炉心入口での冷却材温度を $T_{f,in}$ [K]、燃料棒表面の熱伝達率を h [W/(m²·K)]とする。図2に示されるように、燃料棒の半径 (外半径) を R_w [m]、ペレットの半径を R_p [m]とする。また、ペレットの中心の温度分布は $T_0(z)$ [K]、ペレットの熱伝導率は k [W/(m·K)]であり、ペレット内では r [m]方向以外の熱伝導は無視できる。

- (1) 炉心において、冷却材は燃料棒に沿って z 方向に上昇する。炉心の高さ位置 z における冷却材の温度 $T_f(z)$ [K]を求めよ。
- (2) 線出力密度と熱流束の関係から、高さ位置 z における燃料棒表面の熱流束 $q''(z)$ [W/m²]を求めよ。
- (3) 炉心の高さ位置 z における燃料棒表面の温度 $T_w(z)$ [K]を求めよ。また、燃料棒の表面温度が最大になる炉心の高さ位置 z_{\max} [m]を求めよ。
- (4) 線出力密度と発熱密度の関係から、高さ位置 z における燃料の発熱密度 $q'''(z)$ [W/m³]を求めよ。
- (5) ペレットの温度 $T(r, z)$ [K]は、定常熱伝導方程式

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

によって支配されている。境界条件を

$$r=0 \text{ で } T = T_0(z), \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

として、この微分方程式を解いて、ペレットの温度 $T(r, z)$ [K]を求めよ。また、ペレット表面と燃料棒表面の温度差 $\Delta T_1(z)$ [K]を求めよ。

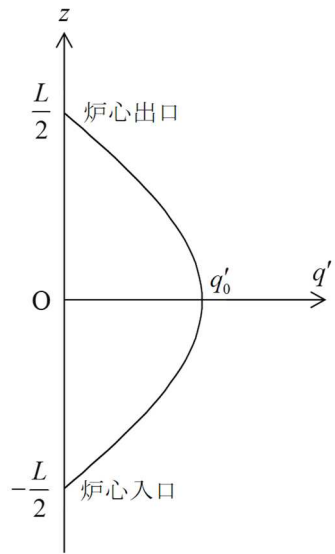


図1 線出力密度の分布

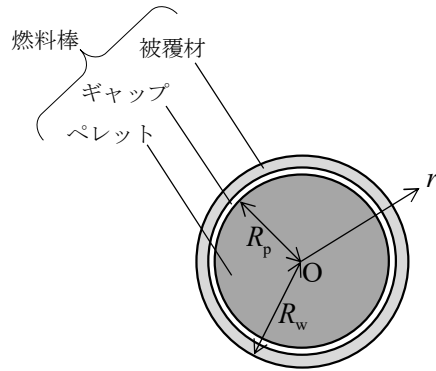


図2 燃料棒の断面図

第2問 図3のような2つの同一サイズの主循環ループを有するPWRでの異常な過渡変化を考える。

以下の問いに答えよ。

- (1) 定格運転時のループおよび圧力容器での圧力損失 ΔP_L [Pa]、 ΔP_{PV} [Pa] を表す式を示せ。ただし、圧力容器の圧力損失係数を k_{PV} [-] (ダウンコマや炉心などを含むが、圧力損失は炉心に代表される)、ループの圧力損失係数を k_L [-] (配管、ポンプ、蒸気発生器のプレナムと伝熱管を含み、両ループ同一)、代表流路面積 A [m²]、ループ流量 W_0 [m³/s] (両ループ同一)であり、冷却材の温度および密度 ρ [kg/m³]は一樣と仮定する。
- (2) 定格運転時のポンプ揚程 H_0 [Pa] は両ポンプ同一で、流路の圧力損失とつり合っているが、そのつり合いを表す式を示せ。ただし、解答は片側のループのみで良い。
- (3) 時刻 $t=0$ [s]にポンプ1の回転数が徐々に低下し始め、ループ1と2のループ流量は各々、 $W_1(t)$ 、 $W_2(t)$ へ変化した。事態が準定常的に推移すると仮定できるとき、ループ1と2、各々の圧力の釣り合いの式を示せ。ただし、ポンプ1の揚程 $H_1(t)$ [Pa]は、回転角速度 $\omega(t)$ [rad/s]と共に次式に従って低下するが、ポンプ2の揚程と回転角速度は各々、 H_0 [Pa]、 $\omega(0)$ [rad/s]のまま一定である。

$$H_1(t) = H_0 \left[\frac{\omega(t)}{\omega(0)} \right]^2$$

- (4) 各ループの流量[m³/s]が $W_1(t) = W_0 + \Delta W_1(t)$ 、 $W_2(t) = W_0 + \Delta W_2(t)$ の関係に従って変化するとき、 $\Delta W_1(t)/W_0$ および $\Delta W_2(t)/W_0$ を $\omega(t)/\omega(0)$ の関数として求めよ。ただし、 $\Delta W_1(t)/W_0$ および $\Delta W_2(t)/W_0$ は1より十分に小さく、2次以上の高次項は無視できる。
- (5) $W_1(t)$ および $W_2(t)$ の $t=0$ 付近の変化の概要を、横軸 t 、縦軸 W のグラフに図示せよ。

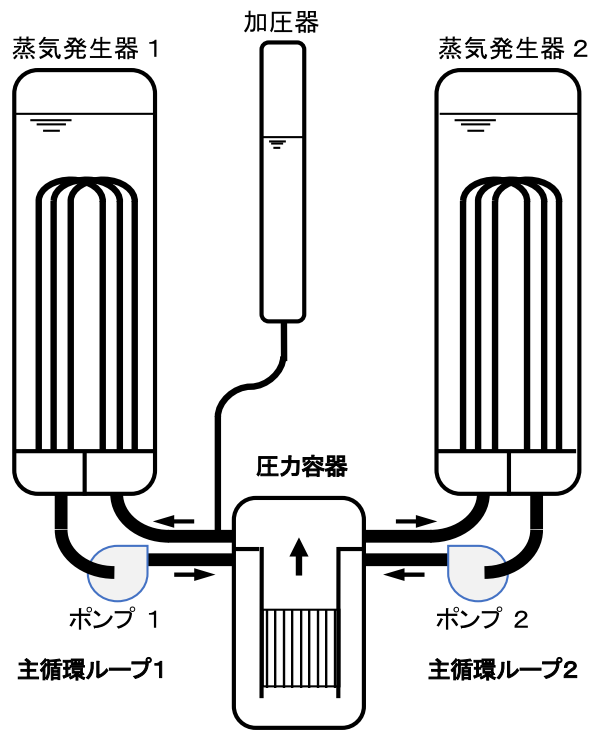


図 3

第3問 軽水炉での事故を考える。下記の問いに答えよ。

- (1) 深層防護（多重防護）の考え方について300字以内で説明せよ。
- (2) 深層防護の考え方に沿って、シビアアクシデント（重大事故）への対策として大まかに3つが考えられるが、そのうち2つについて、各々を150字以内で説明せよ。
- (3) 安全機能を有する系統が備えるべき「多重性」、「多様性」、「独立性」について、各々を150字以内で説明せよ。
- (4) (3)と関連して、安全評価に際して仮定する「単一故障の仮定」の考え方について、その仮定を行うことが必ずしも適切ではない例を含め、300字以内で説明せよ。
- (5) 炉心損傷防止対策の有効性評価に際して想定する「事故シーケンス」及び「事故シーケンスグループ」の意味について、各々、100字以内で説明せよ。
- (6) (5)と関連して、炉心損傷防止対策の有効性評価に際して定める「必ず想定する事故シーケンスグループ」の例を、PWRないしBWRのどちらかについて、4つ挙げよ。

第4問 図4のように一定の変位を生じるように拘束された状態で引張荷重や温度変化を受ける幅 W 、長さ L で一様厚さの平板を想定し、これ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、板幅方向や板厚方向には拘束がなく、引張方向の垂直応力以外の応力は発生しないものとする。

- (1) 温度一定状態で単位厚さあたり P の引張荷重が与えられたときに平板に生じる引張方向の応力 σ_y 、伸び δ 及び板幅の変化 ΔW を求めるための式を導け。
- (2) (1) の状態から、平板の温度が一様に ΔT だけ上昇した後の応力 σ_y 、伸び δ 及び初期状態からの板幅の変化 ΔW を求めるための式を導け。
- (3) (1) の状態から、図5のように、平板の左端面が一定温度に保たれたまま、右端面の温度が ΔT だけ上昇した後の応力 σ_y の分布を図4に示す座標 x の関数として表現するとともに、 x を横軸にとって模式的に図示せよ。また、このときの伸び δ と初期状態からの板幅の変化 ΔW を求めるための式を導け。

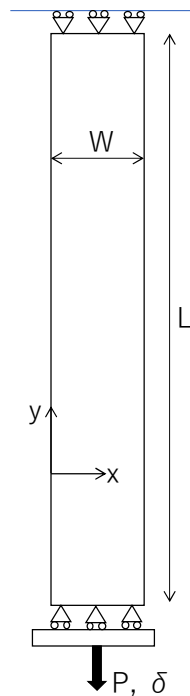


図4

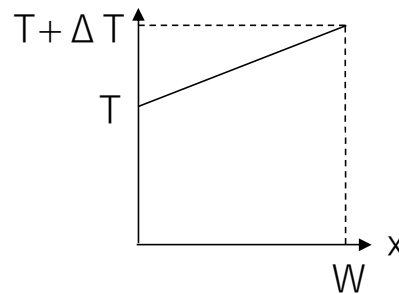


図5

第5問 軽水炉の機器などに用いられる構造材料の変形や破壊の挙動に関する以下の記述において、
□内に入れるのに適切な用語を答えよ。ただし、同じ番号の□には同じ用語が入るものとする。

金属材料は、加えられる応力が小さいときには、応力に比例して□1□的に変形し、応力が除かれると変形が元に戻るが、あるレベル以上の応力が負荷されると、応力が除かれても完全には元に戻らないようになる。このような変形を□2□と呼ぶ。単軸引張試験でこのような現象が起こり始める応力は□3□と呼ばれるが、複数の応力成分が0でなくなる多軸状態では、それぞれの成分を基に求められる□4□が□3□を超えるかどうかで□2□の生起が判定される。単軸引張試験でさらに変形を加えていくと、□5□によって荷重が増加するが、増加率は変形とともに減少し、最大値をとった後、荷重が低下していく。最大荷重を初期の試験片断面積で割った値を□6□といい、□3□とともに各材料の□7□を決めるものとなる。また、さらに変形を加えていくと、試験片は破断に至るが、そのときの伸びや断面減少率は□8□と呼ばれ、□2□開始後の裕度を表す指標として重視される。最大荷重到達点までの□5□は□4□と□9□の関係にしたがって進むと考えられることが多いが、それ以降では材料中の□10□などの発生や成長が進み、3つの□11□の平均として求められる□12□も大きく寄与してくるようになるため、□8□の評価ではその影響を考慮することも重要となる。また、□13□が生じるような環境下での引張試験を低ひずみ速度で行っても大気中より小さな変形で破損に至ることがあるので、□8□の値は□13□に対する材料の感受性を調べる上で有益な知見を与える。また、より小さい負荷でも一旦除荷さらには逆方向に負荷された後、再負荷されるのが繰り返されると、□14□が発生・進展し、破壊に至ることがある。この現象は□15□と呼ばれ、応力振幅または□16□と破損までの繰り返し数との関係を用いて評価されるが、最大応力と最小応力から求められる□17□の影響が加味されることも多い。また、繰り返しとともに一方に累積していく変形は□18□と呼ばれ、これが重畳することで□15□寿命が低下することも知られている。さらに、初期欠陥を想定した場合や□13□や□15□などで□14□状の欠陥が発生した状態での評価においては、その先端部に形成される特異応力場の想定に基づく□19□的手法を適用することが必要になる。大規模な□2□を伴う場合には、線形弾性論に基づく□20□は適用できず、J積分や塑性崩壊基準の適用が必要になる。

第6問 次の用語について簡潔に説明せよ。

- (1) 水力等価直径と熱等価直径 (加熱等価直径)
- (2) ステファン・ボルツマンの法則
- (3) 滴状凝縮と膜状凝縮
- (4) 設計疲労曲線
- (5) 二次応力