

第 64 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4年3月16日

第1問 単一の球形燃料粒子(半径 $R(\text{m})$)の冷却について考える。燃料粒子の密度は $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、比熱は $C(\text{J/kgK})$ 、融点は $T_m(\text{K})$ であり、燃料粒子内の温度 $T(\text{K})$ は一様と考えてよい。また、燃料粒子は、単位体積当たり $q(\text{W/m}^3)$ の崩壊熱を発生させている。このとき、以下の問いに答えよ。ただし、燃料粒子からの熱放射は無視できるものとする。

- (1) 燃料粒子の単位時間当たりの発熱量 $Q(\text{W})$ を求めよ。
- (2) 燃料粒子の周囲が真空(燃料粒子は断熱状態)である場合を考える。ある時刻 $0(\text{s})$ における燃料粒子の温度を $T_0(\text{K})$ ($T_m > T_0$) とするとき、以下の問いに答えよ。ただし、重力などによる燃料粒子の移動は無いものとする。
 - (i) 燃料粒子の温度 $T(\text{K})$ の時間変化を時刻 $t(\text{s})$ ($t \geq 0$) の関数として求めよ。
 - (ii) 燃料粒子の温度 $T(\text{K})$ が融点に達する時刻 $t_{m1}(\text{s})$ を求めよ。

(3) 燃料粒子の周囲を液体(沸点 $T_b(\text{K})$)が流れている状態を考える。このとき、以下の問いに答えよ。ただし、条件は以下のとおりとする。

- ・燃料粒子は液体の流れによって冷却されるが、周囲液体の温度は燃料粒子表面のごく近傍を除いて一定 ($T_f(\text{K})$) である。
- ・ある時刻 $0(\text{s})$ における燃料粒子の温度を $T_0(\text{K})$ ($T_m > T_0 > T_f$) とする。
- ・燃料粒子表面での熱流束 $F_s(\text{W/m}^2)$ は、燃料粒子の温度が $T(\text{K})$ のとき、熱伝達率を $h(\text{W/m}^2\text{K})$ として以下の式で表される。

$$F_s = h(T - T_f)$$

- ・熱伝達率 h の値は、燃料粒子表面の位置によらず一定である。
 - ・重力及び液体から受ける力などによる燃料粒子の移動は無いものとする。
- (i) $T_b > T_m$ のとき、燃料粒子温度が融点に達するまでに燃料粒子表面で液体の沸騰は生じないと考えられる。このとき、燃料粒子の温度が融点に達する条件を求めよ。また、その際に燃料粒子の温度が融点に達する時刻 $t_{m2}(\text{s})$ を求めよ。

- (ii) $T_m > T_b > T_0$ のとき、燃料粒子の温度が T_b に達した後は燃料粒子表面で液体の沸騰が生じ、燃料粒子は以下の式で表される沸騰熱伝達によって冷却される。ただし、 F_{sb} (W/m^2) は沸騰熱伝達による燃料粒子表面での熱流束、 a ($\text{W/m}^2\text{K}^3$) は係数 (燃料粒子表面の位置によらず一定) である。

$$F_{sb} = a(T - T_b)^3$$

このとき、燃料粒子の温度が融点に達する時刻 t_{m3} (s) を求めよ。

第2問 図1は原子炉（ボイラー）・蒸気タービン・復水器をランキンサイクルと見立てた模式図である。作動流体は水・蒸気とし、簡略化するため以下の仮定を設ける。

- ・復水器出口①では飽和水となる（蒸気クオリティ=0）。
- ・循環ポンプにより流体は断熱圧縮され、②ではサブクール水となる。
- ・原子炉（ボイラー）で加熱される過程において流体は飽和状態③に達する。
- ・原子炉（ボイラー）出口④では飽和蒸気となる（蒸気クオリティ=1）。
- ・タービン内④→⑤は断熱変化とし、圧力が①と等しくなる。

ここで、 h を比エンタルピ (kJ/kg)、 s を比エントロピ ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)、 T を流体温度 (K) とする。ボイラーで加熱される②→③→④は等圧変化と近似でき、②→③の加熱過程では等圧比熱 c ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) が一定、③→④の加熱過程では逐次蒸発し蒸発潜熱を Δh_{fg} (kJ/kg) とする。以下の問いに答えよ。

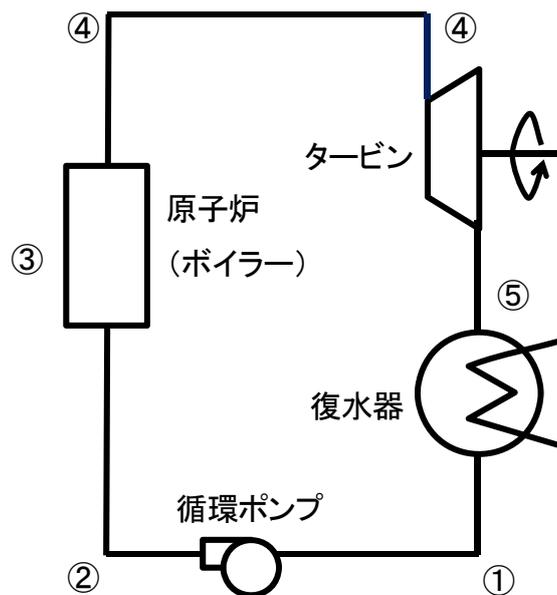


図1 原子炉～タービン模式図

- (1) 飽和水及び飽和蒸気線は図2の T - s 線図において点線のように表される。図1の熱機関サイクルの循環ポンプ出入口が図2の①→②のように転記されるとしたとき、残りの③～⑤に対応する点を同図内に示し各点を実線で結んでサイクルを完成させよ。このとき、循環ポンプ出入口及びボイラー内①、②、③の温度をそれぞれ T_1 、 T_2 、 T_3 として図2に示せ。解答用紙に図2を書き写した上で図示すること。

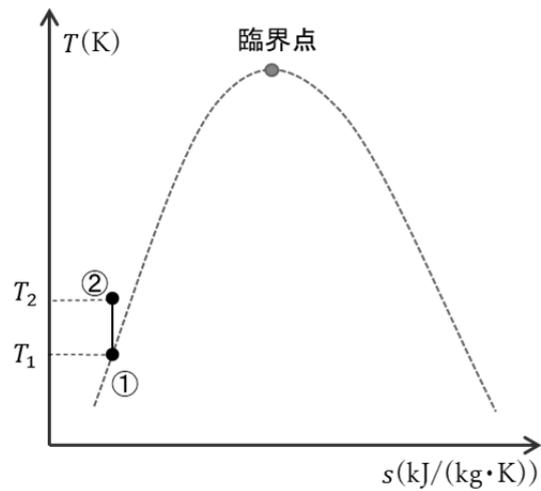


図 2 T-s 線図

- (2) 状態①における比エントロピを s_1 , 比エンタルピを h_1 とする。循環ポンプによる流体単位質量当たりの仕事を w (kJ/kg) とすると, 状態②における状態量は,

$$s_2 = s_1, \quad h_2 = h_1 + w$$

と表せる。続く③, ④, ⑤における比エントロピ s_3, s_4, s_5 と比エンタルピ h_3, h_4, h_5 を, $w, s_1, h_1, T_1, T_2, T_3, c, \Delta h_{fg}$ から必要な記号を用いて表せ。例えば, ②→③の等圧昇温過程では系に加えられる熱量 Δq が流動流体のエンタルピ変化 Δh に等しく, $\Delta h = c\Delta T$ で表せるものとする。

- (3) 上記(1)で示したランキンサイクルに対し, 系への入熱 $Q_{in} > 0$, 系から取り出す仕事 $L > 0$, 排熱 $Q_{ex} < 0$ としそれぞれ比エンタルピ $h_1 \sim h_5$ を用いて表せ。さらに, 熱サイクルの効率 η を $T_1, T_2, T_3, c, \Delta h_{fg}$ を用いて示せ。

第3問 軽水炉での事故を考える。以下の問いに答えよ。

- (1) 設計基準事象に際して用いられる設計基準対象施設について、その設計の妥当性を確認する安全評価では、解析条件の1つとして単一故障の仮定が要求される場合があるが、同仮定の考え方について述べよ。
- (2) 可搬型重大事故等対処設備として6種類が考えられている。そのうち任意の3種類について、求められる機能を挙げると共に、各々に対応する設備を例示せよ。
- (3) 事故が進展して、混合水位が炉心の上端付近へ低下した時点で注水及び冷却の手段が全て利用できなくなり、復旧の見込みが立たない事態となった。今後、炉心が水面上に露出し、過熱・破損に至る過程を、発生時間と共に手計算で概算推定したい。検討を進めるためにどのような情報を集めれば良いか、説明せよ。ただし、保守的な評価を行うため、水面上に露出した燃料棒は断熱状態と仮定する。
- (4) シビアアクシデント（重大事故）を想定し、格納容器の破損並びに放射性物質の異常な水準での敷地外放出を防止する対策について有効性評価を行いたい。その際、想定する格納容器破損モードの整理後に、どの様に有効性評価を進めれば良いか、その手順について述べよ。

第4問 軽水炉プラント機器の構造設計では、様々な負荷に対する健全性を評価するために以下に挙げるような様々な材料物性が使用される。

【材料物性】

比重、比熱、熱伝導率、線膨張係数、縦弾性係数（ヤング率）、降伏応力、加工硬化係数（応力-ひずみ関係の勾配）

これらに関して、以下の問いに答えよ。なお、(1)～(3)の問いでは、例として、比重を大きくした方がよい場合には「比重↑」、小さくした方がよい場合には「比重↓」のように回答すること。

- (1) 一定温度下で同一の引張荷重を受けたときに発生する塑性ひずみを小さくするためには、上記のうちどの物性に着目して、その値をどのようにすればよいかを答えよ。
- (2) 機器の表面温度が同一条件で変化するとき発生する過渡的熱応力を小さくするためには、上記のうちどの物性に着目して、その値をどのようにすればよいかを答えよ。発生する応力は降伏応力未満であるとする。
- (3) 耐震評価において重要な機器の固有振動数を大きくするためには、上記のうちどの物性に着目して、その値をどのようにすればよいかを答えよ。発生する応力は降伏応力未満であるとする。
- (4) 圧力容器で使用されている低合金鋼（JIS SQV2A）と配管系で使用されているオーステナイト系ステンレス鋼（JIS SUS304）の軽水炉運転温度における各物性に関して、SQV2Aの方が大きい値をとる傾向にあるもの、SUS304の方が大きい値をとる傾向にあるものあるいは同等と見なせる（20%程度以下の差）ものに分類せよ。なお、解答は「SQV2Aの方が大きい」、「SUS304の方が大きい」、「同等」に続けて該当する物性値を記載せよ。

第5問 構造物の一部で図3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 が発生する箇所があるとする。一定の $\sigma_x > 0$ に対して、 σ_y が $-\sigma_x \sim \sigma_x$ の範囲で変動するとき、発生するひずみや応力に関する以下の問いに答えよ。材料は一般化フックの法則にしたがう線形弾性体であるとし、すべてのせん断応力成分は0とする。さらに、(1)～(3)の設問では、紙面に垂直な方向の垂直応力も働いていないものとする。図示にあたっては、 $\sigma_y/\sigma_x = -1, 0, 1$ の点の値を明記すること。

- (1) x方向の垂直ひずみを ε_x としたとき、 $\varepsilon_x/\varepsilon_{x0}$ (ε_{x0} は $\sigma_y = 0$ のときのx方向の垂直ひずみ)を $k = \sigma_y/\sigma_x$ とポアソン比 ν の関数として式で表せ。さらに、 $\nu = 0.3$ とした場合の $\varepsilon_x/\varepsilon_{x0}$ の σ_y/σ_x にともなう変化を、横軸に σ_y/σ_x をとって、模式的に図示せよ。
- (2) y方向の垂直ひずみを ε_y としたとき、 $\varepsilon_y/\varepsilon_{y0}$ を $k = \sigma_y/\sigma_x$ とポアソン比 ν の関数として式で表せ。さらに、 $\nu = 0.3$ とした場合の $\varepsilon_y/\varepsilon_{y0}$ の σ_y/σ_x にともなう変化を、横軸に σ_y/σ_x をとって、模式的に図示せよ。
- (3) 降伏条件として最大せん断応力説 (Tresca の条件) を用いた場合に降伏に達するときの σ_x を $\overline{\sigma}_x$ 、 σ_0 を当該材料の降伏応力としたとき、 $\overline{\sigma}_x/\sigma_0$ を $k = \sigma_y/\sigma_x$ とポアソン比 ν の関数として表せ。さらに、 $\nu = 0.3$ とした場合の $\overline{\sigma}_x/\sigma_0$ の σ_y/σ_x にともなう変化を、横軸に σ_y/σ_x をとって、模式的に図示せよ。
- (4) 紙面に垂直なz方向の変形が拘束されたときにそちらの方向に発生する垂直応力を σ_z としたとき、 σ_z/σ_x を $k = \sigma_y/\sigma_x$ とポアソン比 ν の関数として式で表せ。さらに、 $\nu = 0.3$ とした場合の σ_z/σ_x の σ_y/σ_x にともなう変化を、横軸に σ_y/σ_x をとって、模式的に図示せよ。
- (5) 上記(4)の状態、x方向の垂直ひずみ ε_x は σ_y とともにどのように変化するか。 $\varepsilon_x/\varepsilon_{x0}$ (ε_{x0} は $\sigma_y = \sigma_z = 0$ のときのx方向の垂直ひずみ)を $k = \sigma_y/\sigma_x$ とポアソン比 ν の関数として式で表せ。さらに、 $\nu = 0.3$ とした場合の $\varepsilon_x/\varepsilon_{x0}$ の σ_y/σ_x にともなう変化を、横軸に σ_y/σ_x をとって、模式的に図示せよ。

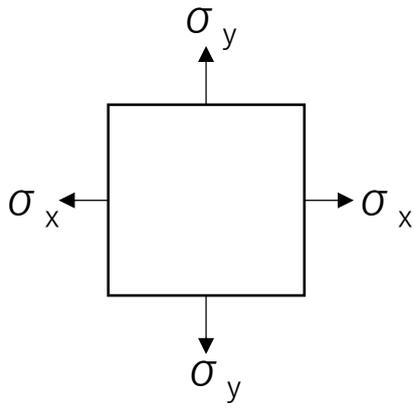


図3 想定する応力状態

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) ベルヌーイの定理
- (2) 熱電対による温度計測の原理
- (3) 小型モジュール炉の安全性
- (4) 引張強さ
- (5) 延性脆性遷移温度