

第 63 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。

令和3年3月18日

第1問 図1に示されるように、長さ L [m]、内径 D [m]の円管流路の中心に円柱形状の燃料棒（外径 d [m]）が存在し、燃料棒の周囲を冷却材が管軸方向（ z 方向）に流れている。ただし、燃料棒は一様の発熱密度 q''' [W/m³]で発熱している。また、冷却材温度は流路断面内において一様であり、 z のみの関数で表されるとし、円管流路壁面は一定温度 T_w [K]に保たれており、円管流路壁面と冷却材の間の熱伝達率を h [W/m²K]とする。冷却材の流量を G [kg/s]、比熱を C [J/kgK]とし、円管流路入り口（ $z = 0$ ）における冷却材温度を T_0 とするととき、以下の問いに答えよ。

- (1) 燃料棒の線出力密度 q'_f [W/m]を求めよ。
- (2) ある位置（ $z = z_1$ ）における冷却材温度を T_1 とするととき、この位置の円管内壁面における線出力密度 q'_w [W/m]を求めよ。
- (3) 上記（1）及び（2）を用いて、位置 z における冷却材温度 $T(z)$ に関する微分方程式を記述せよ。ただし、冷却材内の熱伝導は無視できるものとする。
- (4) 上記（3）で記述した微分方程式を解き、冷却材温度 $T(z)$ を z の関数で表せ。
- (5) 冷却材の沸点及び凝固点を T_b 及び T_s （ $T_s < T_0 < T_b$ ）とするととき、上記（4）の結果に基づき、冷却材が円管内で沸騰及び凝固しないための T_w の条件を求めよ。ただし、サブクール沸騰や過冷却は考えず、冷却材温度が沸点に達した場合に沸騰を開始し、冷却材温度が凝固点に達した場合に凝固を開始するものとする。また、以下の関係式が成り立つものとする。

$$\pi Dh = \frac{GC}{L} \ln 2$$

$$d^2 q''' = Dh T_0$$

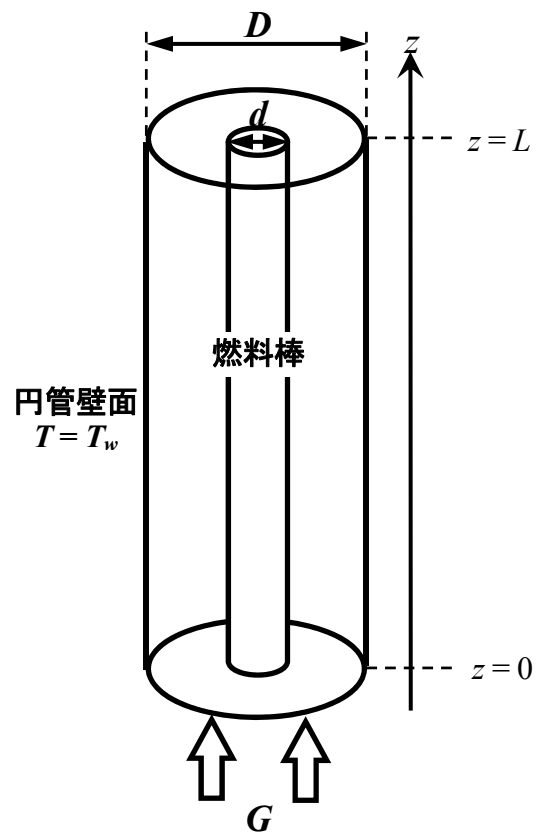


图 1

第2問 図2は原子炉の小破断 LOCA 時の様子を模式的に表したものである。系内の水と蒸気はいずれも飽和で熱平衡状態にあるものとし、以下に示す過渡変化も飽和熱平衡状態を保ったまま推移すると仮定する。典型的な場合として水の体積が1次系全体の半分程度を想定し、初期の容器内に流体質量 M (kg)、内部エネルギー E (kJ)、蒸気の熱平衡クオリティ x の二相状態が形成され、図のように系に対して加熱、除熱、流入、流出が時刻ゼロで同時に生じている状態を考える。このとき、以下の問いに答えよ。各記号、熱量 \dot{Q} 、質量流量 \dot{m} 、比エンタルピ h は以下のとおりとする。

- \dot{Q}_1 : 崩壊熱による加熱量 (kW)、 \dot{Q}_2 : 蒸気発生器 (SG) による除熱量 (kW)。
- \dot{m}_1 : ECCS による注入量 (kg/s)、 \dot{m}_2 : 破断による流出量 (kg/s)。
- h_1 : 流入流体の比エンタルピ (kJ/kg)、 h_2 : 流出流体の比エンタルピ (kJ/kg)。

なお、添え字 g, l は飽和蒸気と飽和水を表し、容器壁や内部構造物の熱容量は無視する。

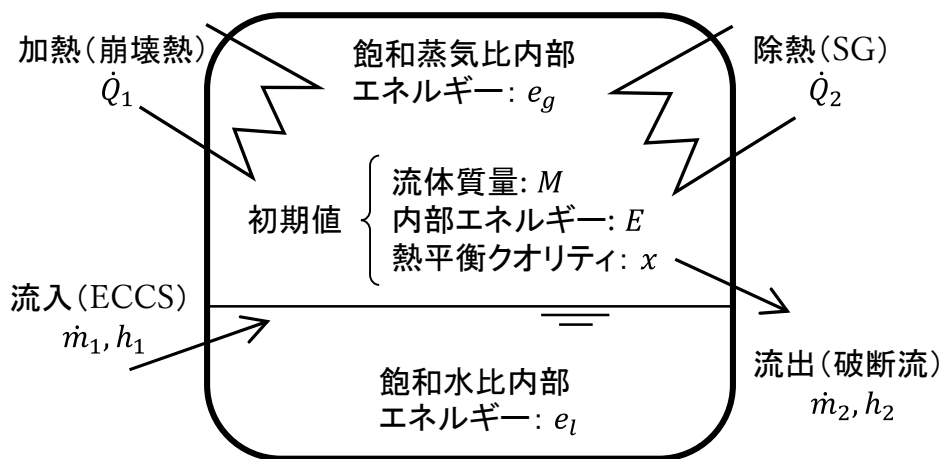


図2

- (1) 容器内の初期の比内部エネルギー $e = E/M$ を、熱平衡クオリティ x と飽和水及び飽和蒸気の比内部エネルギー e_l, e_g を用いて表せ。
- (2) 過渡変化開始後の容器内の質量変化 ΔM と内部エネルギー変化 ΔE の単位時間当たりの変化率 $\Delta M/\Delta t$ 及び $\Delta E/\Delta t$ を、それぞれ系への流入出及び加熱、除熱により表せ。

(3) 過渡変化開始後の系内の比内部エネルギーの変化量は次式で表せる。

$$\Delta e = \frac{E + \Delta E}{M + \Delta M} - \frac{E}{M}$$

これを式展開し、 ΔE と ΔM の1次式で表せ。ただし、変化量 Δ は初期値に対して微小として2次以上を省略し、微小量 Δx に対する次式を利用できる。

$$\frac{1}{1 + \Delta x} = 1 - \Delta x$$

(4) 上記(2)(3)の結果から、過渡変化開始後の系内の比内部エネルギーの変化率 $\Delta e/\Delta t$ を系内への流入出、加熱、除熱、初期質量 M 及び初期比内部エネルギー e を用いて表せ。

(5) 熱平衡飽和系においては、系内の比内部エネルギーは圧力のみ関数となるため、系の減圧条件は $\Delta e/\Delta t < 0$ で表せる。このとき、「SGによる除熱1MWと破断流による除熱1MWは減圧条件に対して等価か？」を上記(4)の結果から150～200文字程度で説明せよ。

(6) 上記(4)の結果から、SG除熱とECCS注水をゼロとした条件で、初期比内部エネルギーを $e \approx e_l \approx h_l$ 、破断流を飽和蒸気としたときの減圧条件を数式で示せ。また、その結果から数式の物理的な意味を50～100文字程度で説明せよ。

第3問 図3に示す内径 1,000mm、長さ 5,000mm の中空円筒が様々な負荷を受けたときの評価に関する以下の問いに有効数字二桁で答えよ。材料はヤング率 200,000MPa、ポアソン比 0.3 の線形弾性体とし、微小変形理論が成立するものとする。円周率は 3 として計算してもよい。なお、上下端部も含めて円筒の径方向変位は拘束されないものとする。

- (1) 図4のように円筒の端部に 33MN の引張力が与えられたときに発生する軸方向応力を許容値 100MPa 以下に制限するためには、円筒の厚さをいくら以上にすればよいか。
- (2) 図5のように 10MPa の内圧が与えられたときに発生する周方向応力の平均値を許容値 100MPa 以下に制限するためには、円筒の厚さをいくら以上にすればよいか。
- (3) 図6のように 10MPa の外圧が与えられたときに発生する圧縮周方向応力の平均値を許容値 100MPa 以下に制限するためには、円筒の厚さをいくら以上にすればよいか。
- (4) 円筒の下端部が固定された状態で上端部に一様な軸方向変位が与えられたときに発生する軸方向応力を許容値 100MPa 以下に制限するためには、軸方向変位をいくら以下にすればよいか。
- (5) 上下方向への変形が完全に拘束された状態で円筒全体の温度が上昇して、円筒に 100MPa の軸方向圧縮応力が発生したとする。このとき、円筒の内径はいくら増加していると推定されるか。

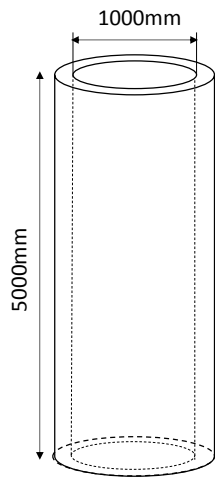


图 3

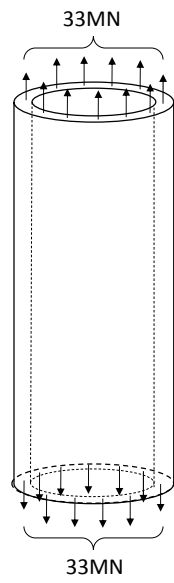


图 4

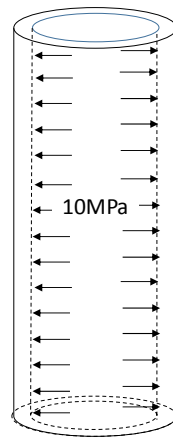


图 5

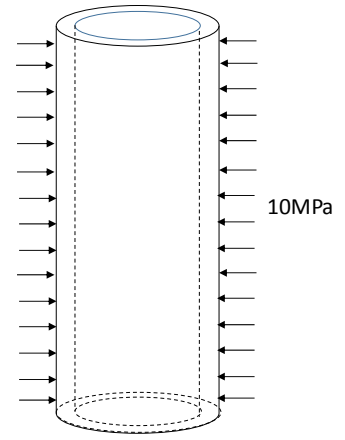


图 6

第4問 軽水炉での事故（シビアアクシデント（重大事故）を含む）への対処の考え方等について、以下の問いに答えよ。

- (1) 深層防護は安全設計の基本的な考え方であり、これに基づく安全機能の重要なものには最高度の信頼性を担保するため、独立性、多様性、多重性の確保が要求されている。これら3要件の各々の内容を説明せよ。
- (2) 事故に備えて設置される設計基準事故対処設備が持つべき機能には多様な特徴があるが、そのうち2つを挙げ、各々について具体的な設備を1つずつ挙げよ。
- (3) 重大事故等対処施設には大まかに重大事故防止設備と重大事故緩和設備があるが、各々の機能上の特徴を説明せよ。
- (4) 特定重大事故等対処施設の特徴を説明し、具体的な設備を PWR 又は BWR について2つ挙げよ。
- (5) 炉心燃料の過熱と損傷による重大事故の発生を運転員が判断するとき、用いる計測パラメーターと判断条件を、PWR 又は BWR について1つ述べよ。

第5問 熱応力の評価に関する以下の記述について、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〕⑳－東京

熱応力の評価を行うためには、物体内の温度分布を評価する必要がある。そのためには、熱伝導解析を実施する必要がある。一般に熱伝導解析のための基礎式は①の法則で与えられるが、温度勾配に対する温度変化率の割合を表す温度伝導率によって、熱伝導の速さが決まる。温度伝導率は、②を材料の③と④の積で除すことで求められるので、これらの物性値が重要である。さらに、境界条件としては、その表面で全く熱のやりとりがないとする⑤条件のほか、物体が接する流体の温度と物体表面温度の差に⑥を乗じた速度で熱流束が与えられるという条件がよく使用される。その他、Stefan-Boltzmann 則に基づいて空間を介した⑦が考慮されることもある。なお、熱伝導解析には、温度分布の時間的変化を追う⑧熱伝導解析と時間微分項を無視した⑨熱伝導解析があるが、温度変化の速度が大ききときには、前者を使用しなければ適切な評価ができない。

このようにして得られた温度分布を用いて弾性的に熱応力を評価するときには、全ひずみから熱ひずみを引いて得られる⑩と⑪との間に一般化された⑫の法則が成り立つことを仮定した計算が行われる。また、⑬が材料の⑭を超えて塑性変形が生じたときにも、同様に全ひずみ増分から熱ひずみ増分を引いて得られる⑮増分と⑪増分の間関係を満たすものが解とされる。熱ひずみは温度差に⑯を乗じて求められるが、ある基準温度からの温度差に基づいて熱ひずみを求めるための⑰と温度変化率に応じて熱ひずみ変化率を与えるための⑱が存在し、一般に後者の方が前者より⑲ため、解析方法によって使い分ける必要がある。

材料面から軽水炉に多用されているオーステナイト系ステンレス鋼とフェライト鋼の特性を比較すると、③はさほど変わらないものの、前者が後者に比べて②が小さく、④が大きいため、熱伝導は遅く、過渡的に大きな温度差が形成されることになる。さらに、⑯に関しても前者の方が後者より大きいため、同じ温度分布に対しても熱ひずみを介して、熱応力が高くなる傾向がある。このために、前者の方が後者に比較して、熱サイクルの繰返しによる⑳などの損傷の可能性が高くなることに留意すべきである。

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) ボイド率と熱平衡クオリティ
- (2) 速度境界層と温度境界層 (プラントル数に関する記述は必須)
- (3) TWR (進行波炉)
- (4) 二次応力
- (5) 崩壊荷重