

第 68 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 8 年 3 月 17 日

第1問 図1のように、周囲から一様に加熱されている内径 D [m]の円管内を上向き (z 軸正方向) に流れる定常状態の環状流について考える。壁面上には液膜が形成され、流路中央は液滴を含む蒸気が流れている。このとき、液膜の質量速度 G_f [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] (単位時間・単位面積を通過する液膜の質量) は座標 z [m]の常微分方程式として以下のように表される。

$$\frac{dG_f}{dz} = \frac{4}{D}(m_d - m_e - m_v)$$

ここで、 m_d 、 m_e 、 m_v はそれぞれ、蒸気中の液滴の液膜への付着率(液滴付着率)、液膜からの液滴発生率、液膜蒸発率を表し、単位は全て [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]である。ただし、 m_v は(液膜が存在する領域において)座標 z [m]によらず一定とする。また、気相(蒸気)および液相(液膜・液滴)の密度は常に一定とし、 $z = 0$ m (基準位置)における液膜の質量速度を G_{f0} [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]、蒸気の質量速度を G_{g0} [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]とする。

まず、液滴付着率と液滴発生率が等しい(平衡状態にある)場合 ($m_d - m_e = 0$) を考える。以下の問い(1)および(2)に答えよ。

- (1) 液膜の質量速度 G_f を、液膜の質量流量 M_f [kg/s]を用いて表せ。
- (2) 液膜がドライアウトする(液膜の質量速度が0となる) z 座標を求めよ。

次に、液滴付着率と液滴発生率が異なり(非平衡状態にあり)、両者の関係が、蒸気の質量速度 G_g [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]を用いて、以下の式で表される場合を考える。

$$m_d - m_e = \alpha G_{g0} - \beta G_g$$

ここで、 α と β は正の定数(無次元)である。また、液滴の蒸発および蒸気の凝縮の影響は無視できるとし、蒸気の質量速度は液膜の蒸発のみによって変化すると考える。このとき、以下の問い(3)および(4)に答えよ。

- (3) 蒸気の質量速度 G_g を、 z の関数で表せ。
- (4) 液膜がドライアウトする z 座標を求めよ。

- (5) 上記(2)および(4)の結果に基づき、液滴付着および液滴発生が非平衡状態にある場合に、液膜ドライアウトの発生点は平衡状態の場合と比較して上流側・下流側のどちらに位置するか考察せよ。ただし、液滴付着および液滴発生は平衡状態からのズレは小さく、以下の式が成立するものとする。

$$G_{f0} \gg \frac{2|\alpha - \beta|}{\beta} G_{g0}$$

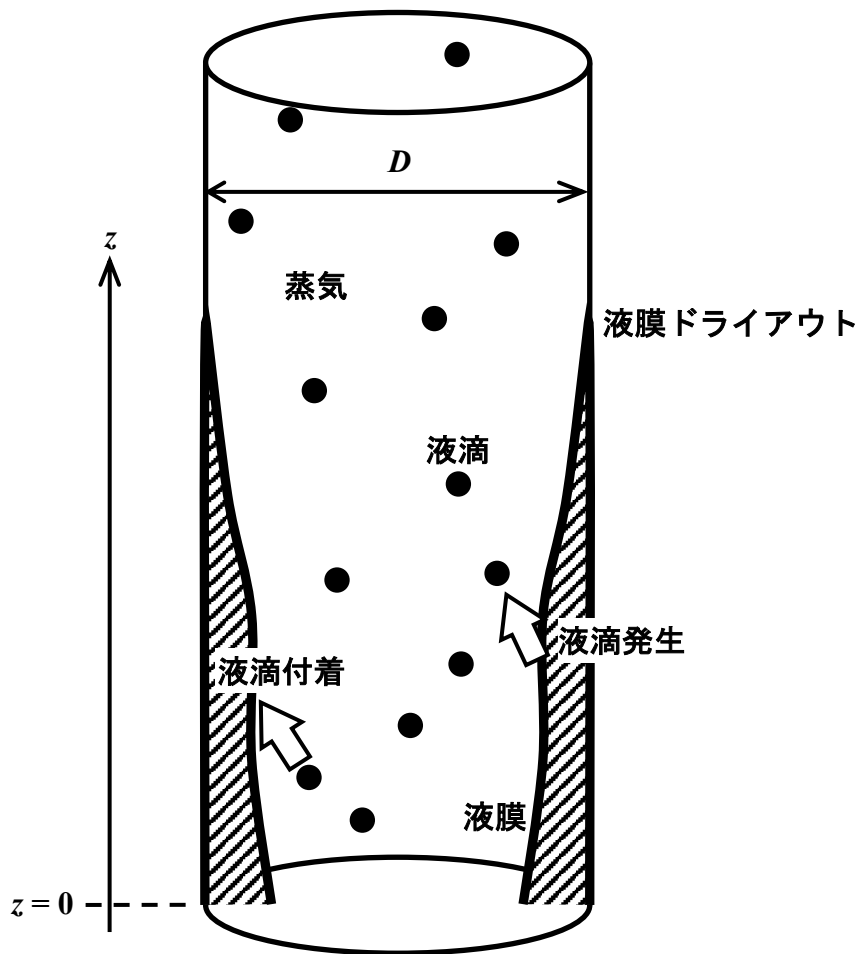


図1 円管内の環状流

第2問 原子炉の事故時には炉心での加熱によって冷却水が沸騰する二相流状態となり、その伝熱様式は冷却材流量や熱流束、蒸気クオリティ（以下、クオリティ）によって変化する。図1は、そのような垂直蒸発円管内上昇流における伝熱様式の存在領域を熱流束とクオリティの座標上に定性的に表したものであり「コリエの伝熱様式線図」と呼ばれる。図中の(a)～(d)は壁面熱流束一定のラインを表し、(a)(b)は比較的低熱流束、(c)(d)は高熱流束の伝熱様式の変化を見ることができる。また、図2は、(a)の条件での管内の流れの様子を、流動様式と伝熱様式を対応させて模式的に表したものである。

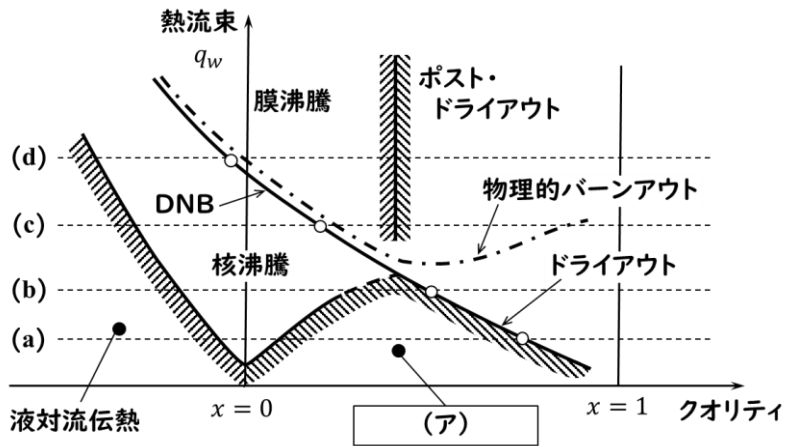


図1 コリエ (Collier) の伝熱様式線図

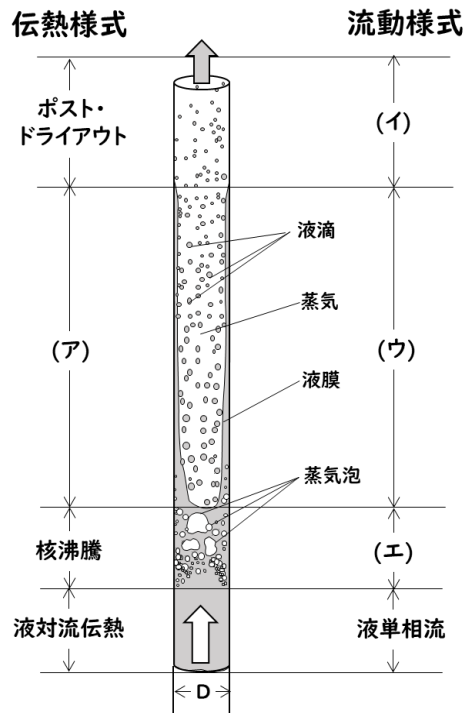


図2 垂直蒸発管内の伝熱様式と流動様式

- (1) 図1及び図2に示した(ア)に当てはまる伝熱様式の名称と、図2に示した各伝熱様式に対応する流動様式の名称(イ)～(エ)を答えよ。また(ア)の伝熱様式の特徴を述べよ。
- (2) 図1において、DNBとドライアウトはいずれも沸騰遷移(BT)として扱われる。ドライアウトは高クオリティ条件において壁面に付着する液膜の消失によって生じるのに対し、DNBの発生メカニズムの違いを述べよ。また、BT後の伝熱面の温度上昇は一般にどちらの方が急激かつ過大か答えよ。
- (3) 垂直加熱管の熱流束 q'' [kW/m²]が一定の場合、蒸発管入口からの距離 z [m]とその点での水蒸気の熱平衡クオリティ x の関係式を導出せよ。質量流量を \dot{m} [kg/s]、入口サブクール度を Δh_{sub} [kJ/kg]、蒸発潜熱を Δh_{fg} [kJ/kg]、円管流路の直径を D [m]とする。
- (4) 図3は、(3)で議論した沸騰遷移が生じるクオリティを限界クオリティ x_{BT} として沸騰長さ L_B [m]に対してプロットした模式図である。沸騰長さとは沸騰が生じている区間の長さで、本件の場合、沸騰開始点からの沸騰遷移を生じた位置までの距離である。沸騰長さが大きい時は限界クオリティが一定値に近づくドライアウト型を示す一方で、沸騰長さが短い領域(沸騰開始位置に近い位置)では傾きが一定に近く、低クオリティ条件でのDNB型の沸騰遷移となるのがわかる。DNB型BTは熱流束がある一定の値で沸騰遷移すること(限界熱流束という)を(3)の結果を使って説明せよ。

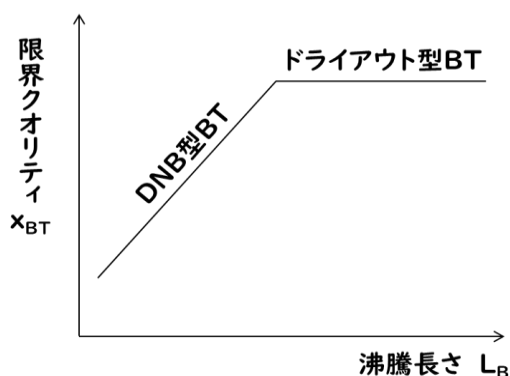


図3 クオリティと沸騰長さで整理したBT条件の模式図

- (5) 内径 10 mm、長さ 2 m の垂直加熱管に、サブクール水が圧力 7 MPa、流量 0.3 kg/s で流入しているとする。入口温度は飽和温度より 20 °C 低い 265 °C とし、管壁に一樣熱流束 q'' を加えた結果、管出口における流体の熱平衡クオリティが 0.2 になった。この時の熱流束を求めよ。入口サブクール度は 100 kJ/kg、蒸発潜熱を 1500 kJ/kg とする。円周率には 3 を用いてよい。

第3問 原子力プラントの水・蒸気系の容器内水位計測には図1のような差圧式水位計が利用される。測定対象の容器のU側とL側のタップに導圧管を介して差圧計を接続し、導圧管内には水を満たし、U側導圧管には凝縮槽を設け基準高さまで冠水する。測定原理に関する以下の問いに答えよ。重力加速度を $g[\text{m/s}^2]$ とする。

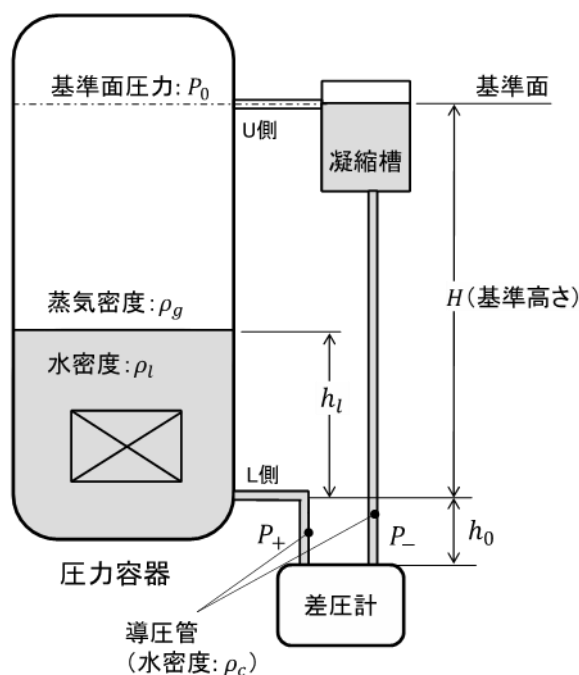


図1 差圧計測を利用した水位計

- (1) 容器内には熱平衡状態で飽和水と飽和水蒸気が満たされ、水密度を $\rho_l [\text{kg/m}^3]$ 、蒸気密度を $\rho_g [\text{kg/m}^3]$ 、導圧管内の水密度を $\rho_c [\text{kg/m}^3]$ としたとき、差圧計のマイナス側（U側）とプラス側（L側）にかかる圧力 [Pa]を図内の記号を用いてそれぞれ表せ。また、その差圧計測結果（ $\Delta P = P_+ - P_-$ ）及び基準高さ $H [\text{m}]$ から水位 $h_l [\text{m}]$ を ΔP 、 H 、 ρ_l 、 ρ_g 、 ρ_c 、 g を用いて表せ。ただし、容器内の流体は停滞し、流れによる摩擦損失は無視できるとする。
- (2) 水・蒸気系の水位測定に用いられる凝縮槽（コンデンスポット）の役目を（1）で導出した水位の測定原理に従い、導圧管内に満たすドレン水の特徴や導圧管の保温の有無などとともに説明せよ。
- (3) 福島第一原発の事故では原子炉格納容器の温度とともに導圧管の温度も上昇し、正確な水位が計測できなくなったことが指摘されている。図2のように、容器内の水位は図1と変わらずに、導圧管内のドレン水が飽和状態（水密度 ρ_l 、蒸気密度 ρ_g ）とな

って蒸発し、基準高さが設定値の半分になってしまったときの差圧計の測定値を導き、それによって水位がどのように誤指示され、誤判断につながったかを説明せよ。

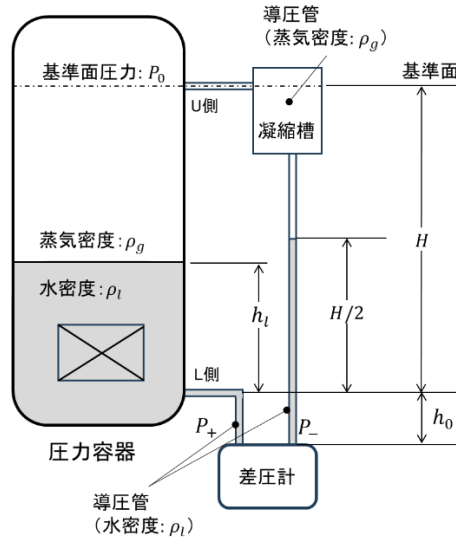


図2 基準高さが半分になってしまった状態

- (4) 図3に示されるように容器内の液体が二相流になると気相の比容積の増加によって水位が上昇し、差圧計測による水頭だけでは水位が特定できず、気相の体積率（ボイド率 α ）の計測が必要になる。二相／单相を問わず（1）で求めた差圧 ΔP だけから見積もられる水位と実際の二相流状態の水位をそれぞれ何というか。また、後者を差圧 $\Delta P (= P_+ - P_-)$ 、平均ボイド率 α 、及び ρ_l 、 ρ_g 、 ρ_c 、 g を用いて表せ。ただし、容器内の流体は停滞し、流れによる摩擦損失は無視できるとする。

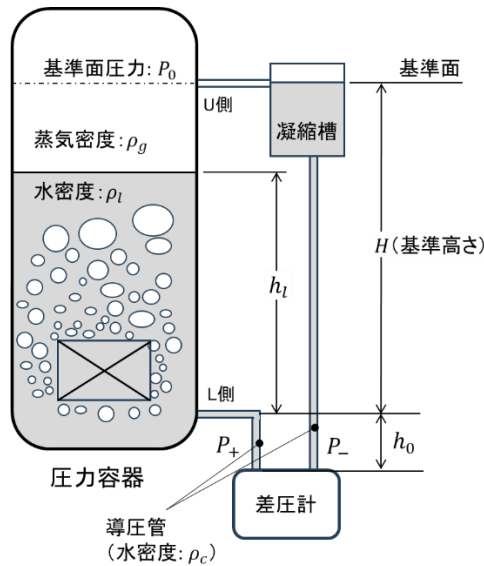


図3 二相状態の水位

第4問 一様な大きさの正方形断面を持った角棒に様々な荷重を与えたときの变形や応力に関する以下の問いに答えよ。材料は等方的な線形弾性体とし、微小変形理論が成立するものとする。

- (1) 一辺が 10 mm の正方形断面を持った長さ 50 mm の角棒の軸方向に 10,000 N の引張力を加えたときに長さが 0.1 mm 伸びるとともに、正方形の一辺の長さが 0.004 mm 縮んだ。この材料の縦弾性係数（ヤング率） E [MPa]とポアソン比 ν の値を求めよ。
- (2) 同じ材料から製作した一辺が 5 mm の正方形断面を持った長さ 25 mm の角棒の軸方向に（1）と同じ引張力を加えたときの伸び ΔL [mm]と正方形の一辺の変化量 Δa [mm]を推定せよ。
- (3) 軸方向には拘束がない条件で（1）の角棒の全側面に 100 MPa の圧力を与えたときに生じる正方形断面内の応力 σ [MPa]と軸方向の伸び ΔL [mm] を推定せよ。
- (4) 外部から力を加えない状態で（1）の角棒全体の温度を 100 °C上げたときに軸方向に 0.1 mm 伸びた。この材料の線膨張係数 α [°C⁻¹] を求めるとともに、正方形の一辺の長さの変化量 Δa [mm]を推定せよ。
- (5) （1）の角棒を図1のように下端部を固定し、上端部に軸の方向と正方形の一辺に垂直な方向に 10,000 N の力を加えたときに角棒の軸方向中央の正方形断面に作用する曲げモーメント M [N・mm] はいくらか。また、その正方形断面に発生する最大応力 σ [MPa]はいくらと推定されるか。

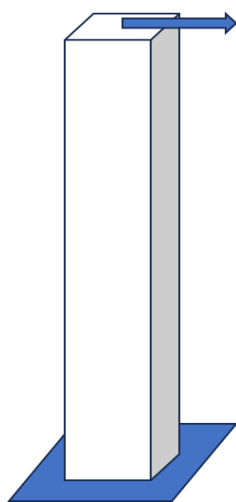


図1 横方向荷重を受ける角棒の模式図

第5問 原子力プラント機器の構造設計においては、部材に働く応力をいくつかのカテゴリに分類し、それぞれの特性に依じた評価が行われるのが普通である。日本機械学会発行の「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」において使用されている用語やその評価に関する以下の問いに答えよ。(1)～(6)に関しては、「応力」を含む用語で解答し、(7)～(10)に関しては、(1)～(5)から選択(複数可)して解答せよ。

- (1) 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何と言うか。
- (2) 垂直応力の平均値からの変化成分を何と言うか。
- (3) 外力、内力及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せん断応力を何と言うか。
- (4) 隣接部分の拘束、自己拘束により生じる垂直応力またはせん断応力を何と言うか。
- (5) 応力集中または局部熱応力により、(3)または(4)の応力に付加される応力の増加分を何と言うか。
- (6) 与えられた点で発生している最大主応力と最小主応力の代数的な差を何と言うか。
- (7) 上記(1)～(5)のなかで、原子炉压力容器の円筒部において内圧によって発生する応力が分類されるカテゴリーを挙げよ。
- (8) 上記(1)～(5)のなかで、一次冷却系配管の厚さ方向の温度勾配によって発生する応力が分類されるカテゴリーを挙げよ。
- (9) 上記(1)～(5)のなかで、塑性崩壊の可能性に対する評価を行うときに考慮すべきものをすべて挙げよ。
- (10) 上記(1)～(5)のなかで、疲労による破壊の可能性に対する評価を行うときに考慮すべきものをすべて挙げよ。

第6問 次の用語について、それぞれ200字程度で簡潔に説明せよ。

- (1) 二流体モデル
- (2) サブクール沸騰と飽和沸騰の違い
- (3) 高温ガス炉の固有安全性
- (4) 熱成層化（温度成層化）とその構造材への影響
- (5) 損傷許容設計