

第 67 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 7 年 3 月 18 日

第1問 図1のようなベンチュリ管内における、密度 ρ [kg/m³]の非圧縮性流体の流れを考える。

ただし、摩擦等による損失と重力の影響は無視できるものとし、断面1および断面2（のど部）において、断面内の流速と圧力は一様であると考えてよい。このとき、以下の問い（1）および（2）に答えよ。

- （1） 断面1における流速を v_1 [m/s]、圧力を p_1 [Pa]、断面2における流速を v_2 [m/s]、圧力を p_2 [Pa]とすると、これらの値の関係を表すベルヌーイの式を記述せよ。
- （2） ベンチュリ管を流れる流量 Q [m³/s]を表す式を、断面1および2における流速 v_1 [m/s] および v_2 [m/s]を用いずに記述する場合、以下のような式が得られる。このとき、式中の空欄 $\boxed{\text{i}}$ ～ $\boxed{\text{iii}}$ に当てはまる式を、①～⑨からそれぞれ選択せよ。ただし、断面1の流路断面積を A [m²]、断面2の流路断面積を A' [m²]とする。

$$Q = \frac{\boxed{\text{i}}}{\sqrt{1-\boxed{\text{ii}}}} \sqrt{\frac{\boxed{\text{iii}}}{\rho}}$$

- ① $p_1 - p_2$ ② $p_2 - p_1$ ③ $2(p_1 - p_2)$ ④ $2(p_2 - p_1)$ ⑤ A' ⑥ $\frac{A}{A'}$ ⑦ $\frac{A'}{A}$
- ⑧ $\left(\frac{A}{A'}\right)^2$ ⑨ $\left(\frac{A'}{A}\right)^2$

次に、図2に示すような円管内に設置した（シャープエッジ）オリフィスを通る、密度 ρ [kg/m³]の非圧縮性流体の流れを考える。重力による影響は無視できるが、摩擦等による損失は無視できないものとする。また、断面1において断面内の流速と圧力は一様、断面2においては断面内の圧力のみ一様であると考えてよい。断面1の流路断面積を A [m²]、オリフィス前縁開口部の流路断面積を A' [m²]とし、オリフィス上流（断面1）における圧力を p_1 [Pa]、オリフィス下流（断面2）における圧力を p_2 [Pa]とすると、以下の問い（3）～（5）に答えよ。

- (3) 一般的に、オリフィスを流れる流量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ の計算において、(2) に示したような損失を無視した理想的な状態に基づく式を用いることはできず、以下のような式が用いられる。ただし、空欄 i および iii には (2) における i および iii と同じ式が入る。ここで、右辺の係数 C は流量係数と呼ばれ、実験などによって決定される係数である。一般的に、流量係数は速度係数および収縮係数を用いて表されることを踏まえ、どのような現象を考慮するために流量係数を用いる必要があるのか、簡潔に記せ。

$$Q = C \text{ i } \sqrt{\frac{\text{ iii }}{\rho}}$$

- (4) 流量係数は、レイノルズ数が十分に大きい場合はオリフィスの開孔比 (A'/A) のみの関数となることが知られている。ここで、流量係数が以下の式で近似できるとき、式中の定数 a および b の値の正負について考察し、理由とともに記せ。

$$C = a + b(A'/A)^2$$

- (5) オリフィス上流・下流間の圧力差を計測し、オリフィスを通る流量を求めたい。圧力差の計測に使用する差圧計の計測可能範囲が $\delta p_{\min} \sim \delta p_{\max} [\text{Pa}]$ であるとき、オリフィスの開孔比 (A'/A) が満たすべき条件を求めよ。ただし、オリフィスを流れる流量は $Q [\text{m}^3/\text{s}]$ であり、オリフィスの流量係数は (4) の式で与えられる。また、 q, r を正の実数とすると、3 次方程式 $x^3 + qx - r = 0$ の唯一の実数解は以下の式で与えられることを用いてよい。

$$x = \sqrt[3]{\frac{r}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{3}\right)^3 + \left(\frac{r}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{r}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{3}\right)^3 + \left(\frac{r}{2}\right)^2}}$$

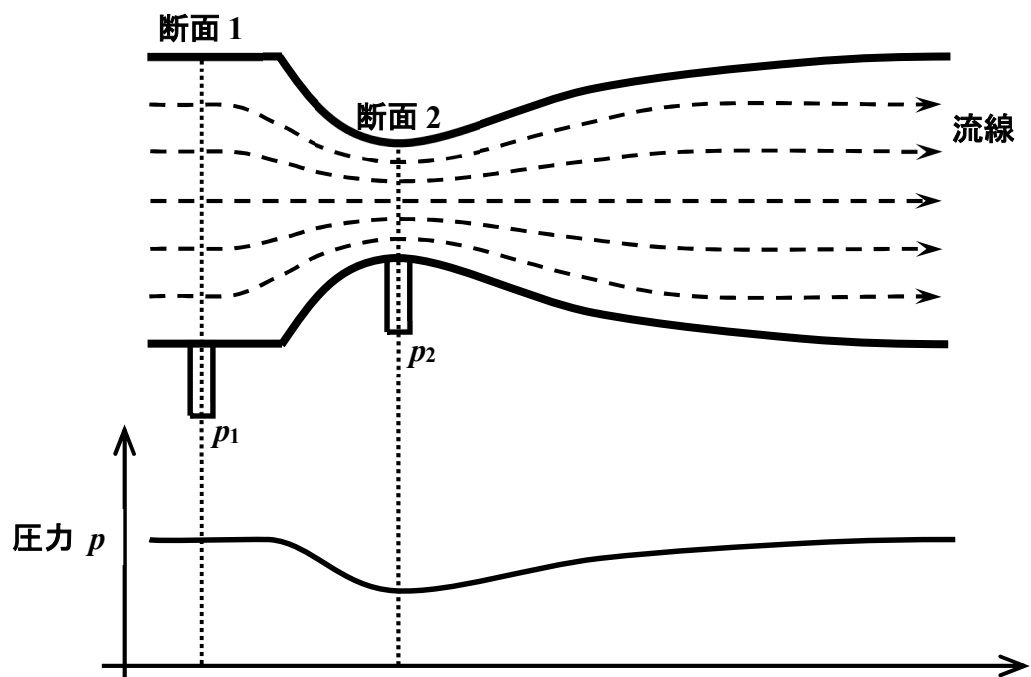


図1 ベンチュリ管

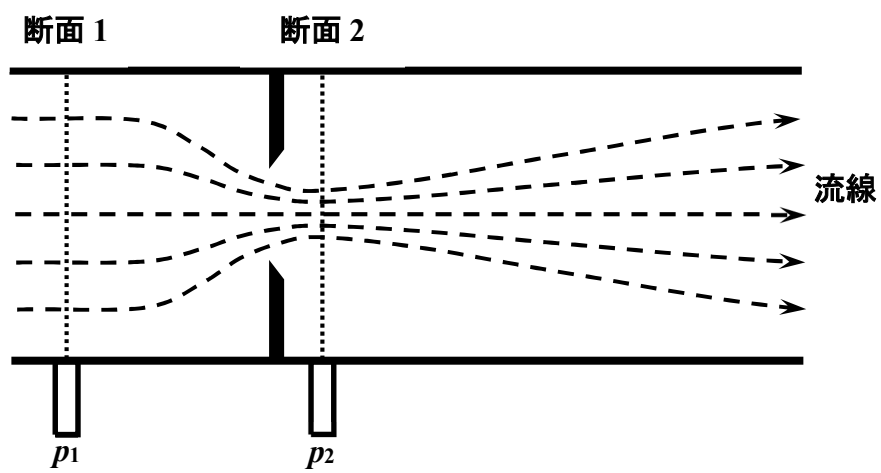
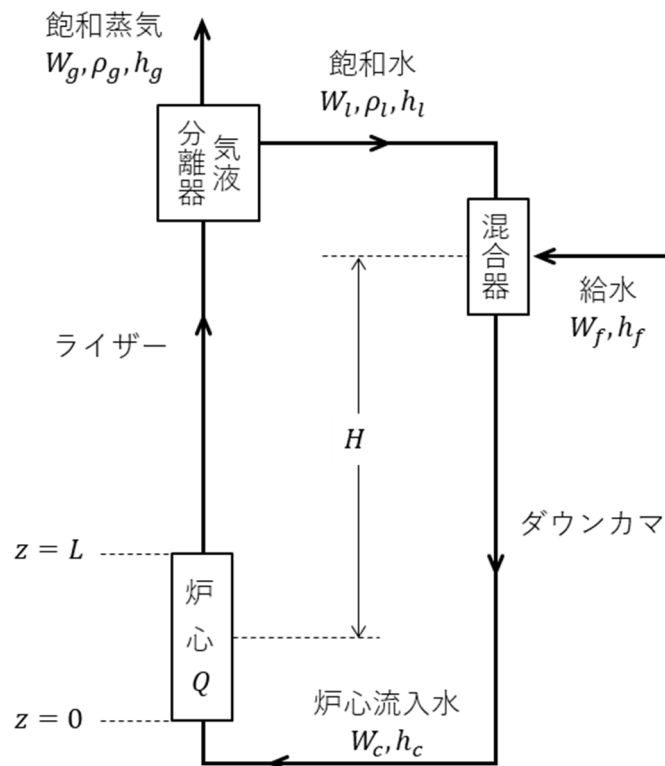


図2 オリフィス

第2問 下図のような定常運転される自然循環型 BWR を考える。流れを1次元とし、炉心で生成した飽和蒸気は系外へ排出され、未飽和水が系内に給水されるとし、ライザー及びダウンカマ部に熱損失は無く、流れ方向の密度やエンタルピ等の物性値は一定とする。以下に与える表1の記号を用いて問題を解け。

表1：解答に用いてよい記号

Q (kW)	炉心熱出力（流れ方向に線出力密度は一定）
z (m)	炉心内流れ方向の距離 $z = 0$ を炉心入口、 $z = L$ を炉心出口とする
H (m)	炉心と混合器間の実効高さ
W_g (kg/s)	炉心出口の飽和蒸気の質量流量
ρ_g (kg/m ³)	炉心出口の飽和蒸気の密度
h_g (kJ/kg)	炉心出口の飽和蒸気の比エンタルピ
W_l (kg/s)	炉心出口の飽和水の質量流量
ρ_l (kg/m ³)	炉心出口の飽和水の密度
h_l (kJ/kg)	炉心出口の飽和水の比エンタルピ



- (1) 系を定常に保つために必要な給水の質量流量 W_f (kg/s)と比エンタルピー h_f (kJ/kg)を表1の記号を用いて示せ。
- (2) 炉心入口の比エンタルピー h_c (kJ/kg)を表1の記号を用いて示せ。
- (3) 炉心入口下端を $z = 0$ 、上端出口を $z = L$ としたとき、炉心内の任意の高さ z における流路断面平均の蒸気クオリティ x (熱平衡を仮定した全流量に対する蒸気質量流量割合。サブクールを表すマイナスの値を含む。)を炉心内の熱バランスから求めよ (表1の記号を用いて表せ)。さらに、炉心内の正味の沸騰開始点 ($x = 0$ となる z)を求めよ。
- (4) 蒸気クオリティ x は局所ボイド率 α と次の関係にある。

$$x = \frac{\alpha u_g \rho_g}{\alpha u_g \rho_g + (1 - \alpha) u_l \rho_l}$$

ここで、 u_g と u_l は気相と液相の流速である。この関係と(3)の結果を用いて炉心出口 ($z = L$)におけるボイド率 α_e を求めよ。解答には表1の記号と炉心出口における気液の流速比 (スリップ比) $s = u_g/u_l$ を用いてよい。

- (5) (4)から、炉心出口の飽和二相流の密度を表1の記号と s を用いて表せ。
- (6) 定常状態の自然循環の駆動力は、炉心出入口の密度差 $\Delta\rho$ 、重力加速度 g 及び加熱源と冷却源の実効高さ H を用いて $\Delta\rho g H$ と表すことができる。これがループ全体の壁面摩擦や形状損失を損失係数 K で代表させたときの全圧力損失

$$\Delta P_f = \frac{1}{2} K \rho U^2$$

と釣り合うとき、自然循環の時間スケール T は H の平方根に比例することを示せ。なお、 ρ と U は流路を流れる流体の代表密度と代表速度である。

第3問 以下の問いに答えよ。

- (1) 現行の規制基準における重大事故の対策では、熱流動解析に基づく事故進展解析の結果から、設備や手順及び対策の有効性を評価することが要求されており、設計基準の安全評価に対し有効性評価と呼ばれている。これに関し、以下の問いに答えよ。

- (i) 重大事故等対策の有効性評価において想定する事故シーケンスグループの選定方法に関する以下の説明について、に入る適切な語句等を番号とともに記せ。なお、同じ番号のには同じ語句等が入る。

〔解答例〕⑩ー東京

- 炉心損傷防止対策、①防止対策及び運転停止中原子炉内の燃料損傷防止対策の有効性は、炉心の著しい損傷や①に至る可能性があるとして想定する次の事故シーケンスグループを評価対象とする。

(a) 必ず想定する事故シーケンスグループ

(b) 個別プラント評価により抽出した事故シーケンスグループ

- 個別プラント評価により抽出する事故シーケンスグループは、内部事象PRA及び②PRA又はそれに代わる方法で評価する。

- (ii) 上記 (i) (a) の必ず想定する事故シーケンスグループは炉心損傷防止対策について、BWRで7件、PWRで8件が指定されている。それぞれ3件ずつ挙げよ。

- (iii) 同様に①防止対策についても、必ず想定する事故シーケンスグループが、BWRとPWR共通で6件が指定されている。このうち3件を挙げよ。なお、①には (i) の①と同じ語句が入る。

- (iv) 有効性評価を実施する事故シーケンスグループの抽出を目的として実施するPRAのうち、内部事象PRAで行う機器のランダム故障を想定したPRAの種類について出力運転時レベル1 PRA以外のものを1つ示せ。また、②PRAで実施するレベル1 PRAのうちその対象とする事象を1つ示せ。なお、②には (i) の②と同じ語句が入る。

- (2) 重大事故等対処設備やそれらを用いた対策に関する以下の説明について、に入る適切な語句等を番号とともに記せ。なお、同じ番号のには、同じ語句等が入る。
- また、①には(1)の①と同じ語句が入る。

〔解答例〕⑩－東京

- 重大事故等対処設備とは、設計基準事故対処設備の機能が喪失した場合においても、炉心の著しい損傷を防止、①を防止、又は③を抑制するための設備をいう。これらの設備は常設の設備や④の設備を組み合わせ、⑤を考慮した配置を図ること等により信頼性を確保する。
- BWR の重大事故において、残留熱除去系による最終ヒートシンクへの熱輸送が残留熱除去系ポンプの故障により実施できないときに、その代替として⑥ポンプを使用した熱輸送を⑦という。
- PWR の重大事故において、余熱除去系による最終ヒートシンクへの熱輸送ができないときの格納容器冷却手段のひとつとして、移動式大容量ポンプ車を用いて⑧に海水を注水することにより格納容器内を⑨冷却する対策がある。

第4問 下図のような断面積 $A=100\text{ mm}^2$ 、長さ $L=100\text{ mm}$ の中実丸棒に対して様々な荷重や温度変化等を与えたときに発生する変形や応力に関して以下の問いに答えよ。なお、材料は温度に依存せず、ヤング率 $200,000\text{ MPa}$ 、ポアソン比 0.3 、線膨張係数 $10^{-5}/\text{K}$ の線形弾性体であり、微小変形理論が成立するものとする。また、上下面での径方向変位は拘束されておらず、丸棒全体で応力やひずみが一様であるものとする。

- (1) 軸方向に $20,000\text{ N}$ の引張荷重を与えたときの丸棒の伸び δ (mm) 及び断面積の変化 ΔA (mm^2) を求めよ。
- (2) 上下面の軸方向変位を拘束した状態で丸棒全体の温度が 100 K 上がったときに発生する軸方向応力 σ_z (MPa) と断面積の変化 ΔA (mm^2) を求めよ。
- (3) 上下面の軸方向変位を拘束した状態で丸棒の側面に 100 N/mm^2 の外圧を与えたときに発生する軸方向応力 σ_z (MPa) と断面積の変化 ΔA (mm^2) を求めよ。
- (4) (2) と (3) が同時に働いたときに発生する軸方向応力 σ_z (MPa) と断面積の変化 ΔA (mm^2) を求めよ。
- (5) (4) の状態での最大主応力 $\sigma_{\max}$ (MPa) と最大せん断応力 $\tau_{\max}$ (MPa) を求めよ。

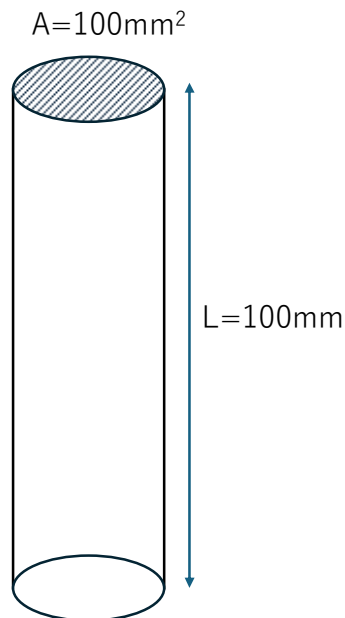


図 評価対象とする中実丸棒の形状

第5問 丸棒試験片を用いた引張試験は構造設計に用いる許容応力の決定や製造された材料の確認のために広く実施される最も基本的な強度試験である。その結果から様々な値を得る方法などに関する以下の問いに答えよ。必要に応じて応力とひずみの関係を表す図などを参考図として用いてもよい。

- (1) 上降伏点の求め方を示せ。
- (2) 下降伏点の求め方を示せ。
- (3) 耐力の求め方を示せ。
- (4) 引張強さの求め方を示せ。
- (5) 破断伸びの求め方を示せ。
- (6) 絞りの求め方を示せ。
- (7) 一様伸びの求め方を示せ。
- (8) 材料の確認のため、引張試験以外にも、フェライト鋼やマルテンサイト系ステンレス鋼に対して要求されている試験の種類を記せ。
- (9) (8) の試験の結果として受け入れ性の判定に用いられる2つの特性を記せ。

第6問 次の用語について、それぞれ200字以内を目安に簡潔に説明せよ。

- (1) 自然対流 (グラスホフ数に関する記述は必須)
- (2) 熱伝達率 (ヌッセルト数に関する記述は必須)
- (3) 圧力逃がし弁、安全弁、逃がし安全弁
- (4) 一次応力
- (5) 監視試験片