

## 第 65 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5年3月15日

第1問 図1に示す断面形状を有する円管（内径  $D_1$  (m)、外径  $D_2$  (m)）を用いた、並流式の単管熱交換器内の定常流について考える。ただし、円管の熱伝導率は  $\lambda$  (W/mK)、円管の内側壁面における熱伝達率を  $\alpha_1$  (W/m<sup>2</sup>K)、外側壁面における熱伝達率を  $\alpha_2$  (W/m<sup>2</sup>K)、円管内側を流れる流体の比熱を  $C_1$  (J/kgK)、円管外側を流れる流体の比熱を  $C_2$  (J/kgK)とし、これらの値は温度や位置によって変化しないものとする。また、円管壁面における汚れの影響などは無視できるものとする。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 円管のある断面において、円管を通過する熱量（円管の単位長さ当たりの熱通過量） $q$  (W/m)について考える。このとき、以下の小問に答えよ。
- (i) 円管内の温度分布  $T(r)$  (K)が与えられているとき、 $q$ を $T$ の $r$ 方向微分 ( $\partial T/\partial r$ )を用いて表せ。ただし、 $r$  (m)は円管中心を原点とする半径方向座標であり、円管内の温度分布（図1の網掛け部分）は円管の中心軸に関して対称であるとする。
- (ii) 円管の内側壁面温度が  $T_{w1}$  (K)、外側壁面温度が  $T_{w2}$  (K)であるとき、 $q$ を  $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $\lambda$ を用いた式で表せ。
- (iii) 円管内側を流れる流体の温度が  $T_{f1}$  (K)、円管外側を流れる流体の温度が  $T_{f2}$  (K)であるとき、 $q$ を円管の単位長さ当たりの熱通過率（もしくは総括熱伝達率） $K$  (W/mK)を用いて以下の式で表す。

$$q = K(T_{f2} - T_{f1})$$

このとき、 $K$ を  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $\lambda$ を用いた式で表せ。

- (2) 図2に示すように、並流式の単管熱交換器において、円管の内側に低温流体、外側に高温流体を流す場合を考える。ただし、低温流体の質量流量を  $W_1$  (kg/s)、高温流体の質量流量を  $W_2$  (kg/s)とし、高温側の入口温度を  $T_{f2}^{in}$  (K)、出口温度を  $T_{f2}^{out}$  (K)、低温側の入口温度を  $T_{f1}^{in}$  (K)、出口温度を  $T_{f1}^{out}$  (K)とする。また、熱交換器外部への熱の漏れなどは無視できるものとする。このとき、以下の小問に答えよ。

- (i) この熱交換器における総交換熱量  $Q$  (W)は、(1)における  $K$ を用いて、以下の式で表すことができる。ただし、 $L$  (m)は有効伝熱長、 $\Delta T_{LMTD}$  (K)は一般に対数平均温度差と呼ばれるものである。

$$Q = KL\Delta T_{LMTD}$$

このとき、 $\Delta T_{LMTD}$ を  $T_{f1}^{in}$ ,  $T_{f1}^{out}$ ,  $T_{f2}^{in}$ ,  $T_{f2}^{out}$ を用いた式で表せ。

- (ii) 熱交換器出口側の（高温・低温流体間）温度差  $(T_{f2}^{out} - T_{f1}^{out})$  が  $\Delta T_E$  (K) となると  
 き、高温流体の出口温度  $T_{f2}^{out}$  を、低温流体の入口温度  $T_{f1}^{in}$  及び温度差  $\Delta T_E$  を用いた式  
 で表せ。ただし、熱交換器入口側の温度差  $(T_{f2}^{in} - T_{f1}^{in})$  は出口側温度差の  $p$  倍 ( $p > 1$ )  
 であるとして計算せよ。

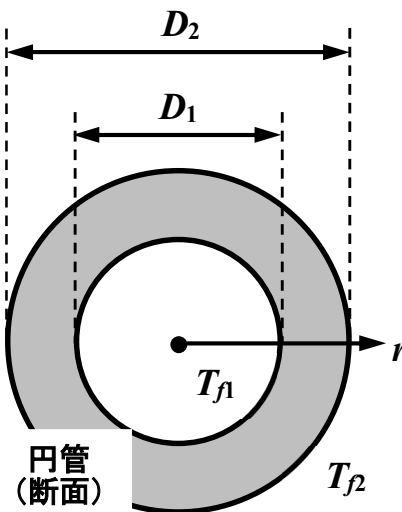


図1 単管熱交換器の円管 (断面)

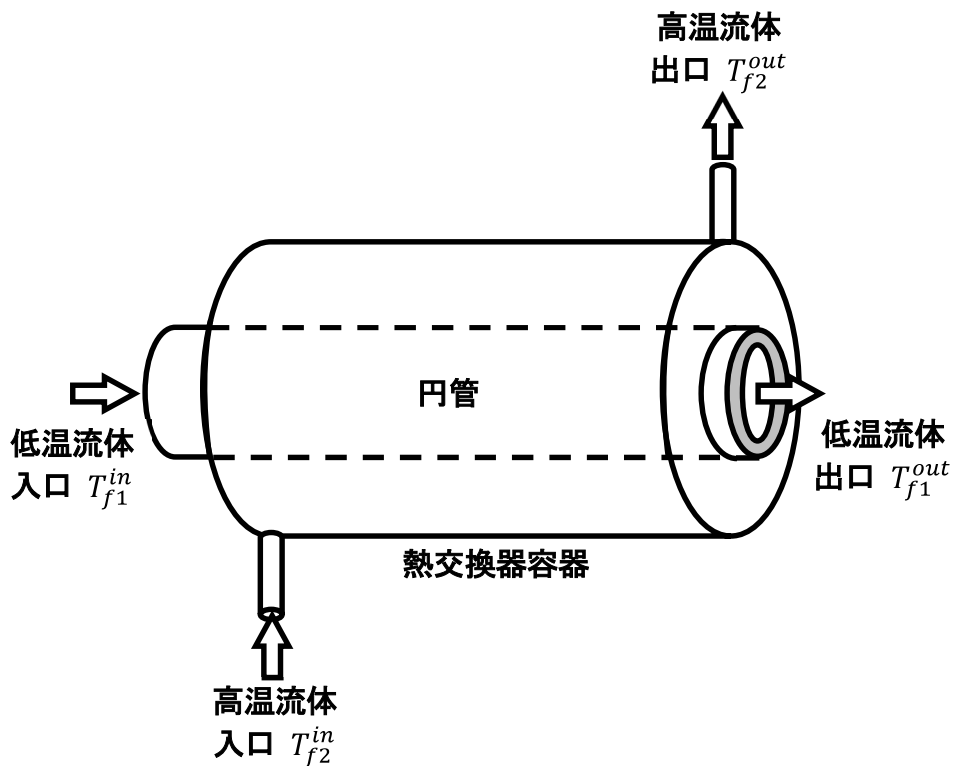


図2 並流式の単管熱交換器

第2問 軽水炉の小破断冷却材喪失事故では、破断口から冷却材が流出し系内の冷却材が有する質量とエネルギーを失う。このような流出現象は一般に二相流状態で推移するが、ここでは簡単のため单相流についての簡易モデルを考察する。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 図1のような、非圧縮性流体が配管内の小孔（オリフィス）を通過する体系を考える。配管上流とオリフィスを通過する断面をそれぞれ添字 1、2 で表し、断面積  $A$  ( $\text{m}^2$ )、流速  $u$  ( $\text{m/s}$ )、圧力  $p$  ( $\text{Pa}$ )とする。また流体密度を  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ )とする。定常非圧縮性完全流体の連続の式とベルヌーイの式、

$$A\rho u = \text{const.} \quad (1)$$

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}u^2 = \text{const.} \quad (2)$$

を用いて、断面 2 における流速  $u_2$  を  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\rho$  を用いて表せ。ただし、流体の摩擦や縮流は考慮しない。

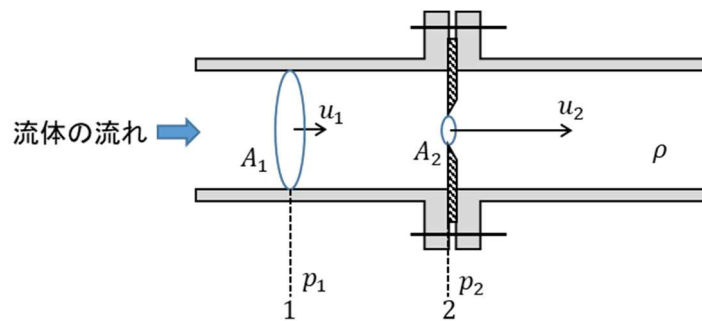


図1 オリフィスを通過する非圧縮性流体

- (2) 次に図2のように、圧力変化が無視できる巨大な容器の小孔から圧縮性理想気体が流出する体系を考える。容器内を 1、小孔を 2 とし、それぞれ記号や添字の意味は (1) と同じとする。

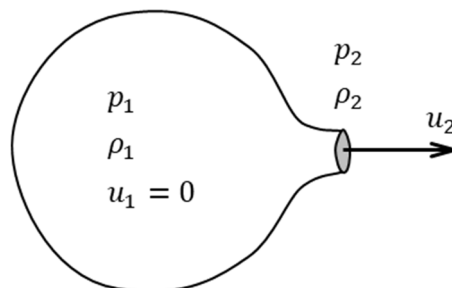


図2 小孔から流出する圧縮性理想気体

- ①  $p_1 > p_2$ の圧力差による流体噴出が摩擦の無い断熱過程に従うとき、

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = \text{const.} \quad (3)$$

となることを、単位質量当たりの熱力学の第一法則と理想気体の状態方程式、

$$dq = de + pdv \quad (4)$$

$$pv = RT \quad (5)$$

から導け。ここで、 $dq$  (J/kg)は系に与える熱量、 $v$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )は比容積 ( $v = 1/\rho$ )、 $R$  (J/kgK)は気体定数である。また、 $c_p$ を定圧比熱 (J/kgK)、 $c_v$ を定積比熱 (J/kgK)、比熱比  $\kappa = c_p/c_v$ とし、内部エネルギー変化  $de = c_v dT$ 、 $R = c_p - c_v$ の関係式を使用して良い。

- ② ①の断熱過程の結果と一般化されたベルヌーイの式、

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{u^2}{2}\right) = 0 \quad (6)$$

を用い、上流の流速  $u_1 = 0$ とすると、小孔断面 2 を流出する質量流束 ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ) は以下で表すことができる。

$$\rho_2 u_2 = \tau \sqrt{2p_1 \rho_1}, \quad \tau = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left( p_r^\kappa - p_r^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)} \quad (7)$$

ここで、 $p_r = p_2/p_1 < 1$ であり、 $\tau$ を流量係数と呼ぶ。圧力比  $p_r$ の減少(圧力差の増加)と共に噴出流量は増大するが、関数  $\tau$ は  $p_r$ に対して極大値を取るため、 $p_r$ がある値以下になると流量が頭打ちとなり、これを臨界状態(臨界流)という。そのときの臨界圧力比  $p_r = p_{rc}$ を  $\kappa$ の関数として表せ。

- ③ 臨界状態の流出速度  $u_2 = u_{2c}$ は、式(7)に②の結果を代入し、式(3)、(5)を用いて  $u_{2c}$ を位置 2 での物性値で表すと次のようになる。

$$u_{2c} = \sqrt{\frac{\kappa p_{2c}}{\rho_{2c}}} = \sqrt{\kappa RT_{2c}} \quad (8)$$

添え字  $c$ は臨界状態を表す。一方、理想気体の音速  $a$  (m/s)は圧力の微小擾乱が気体中を伝播する速度として次式で定義される。

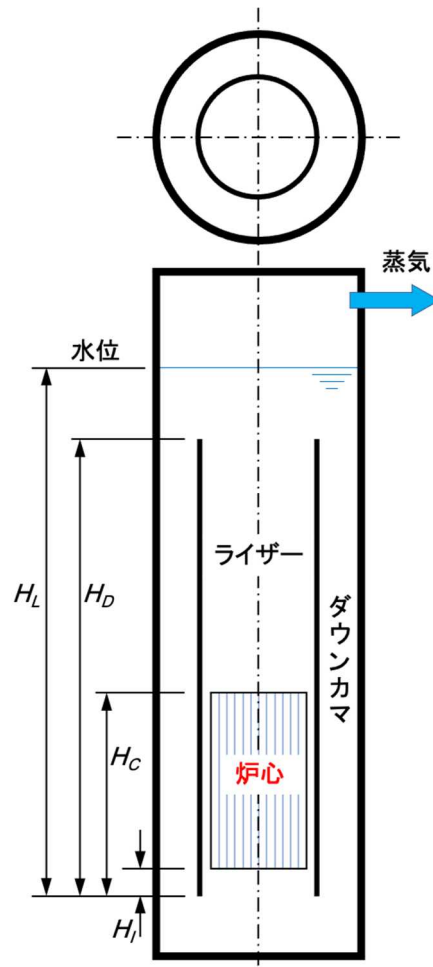
$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\text{エントロピー定}}} \quad (9)$$

式(9)から音速を  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ 等で表し、式(8)の臨界状態の流速と等しくなることを示せ。

- ④ 臨界状態では流速が音速と等しくなる物理的意味を説明せよ。

第3問 軽水炉での重大事故を考える。以下の問いに答えよ。

- (1) 下図の炉において、米国 TMI 事故を契機に重要性が確認された炉心の自然循環冷却を考える。ただし、炉容器は断熱、圧力は一定、流体密度は炉心とライザー、ダウンカマの2つの領域毎に一樣、ライザー上端では気液分離がなされ、蒸気はダウンカマへ混入しないことを、各々仮定する。



- (a) 炉心で冷却材が沸騰して水位  $H_L$  が低下していくときの、自然循環の駆動力を説明せよ。ただし、図中の記号を用いるほか、必要と思われる記号を追加定義した上で、式の形で説明せよ。
- (b) 自然循環が成立する条件を、(a) で用いた式を利用して説明せよ。さらに、自然循環が成立しなくなった後の、炉心の冷却状態の変化について説明せよ。

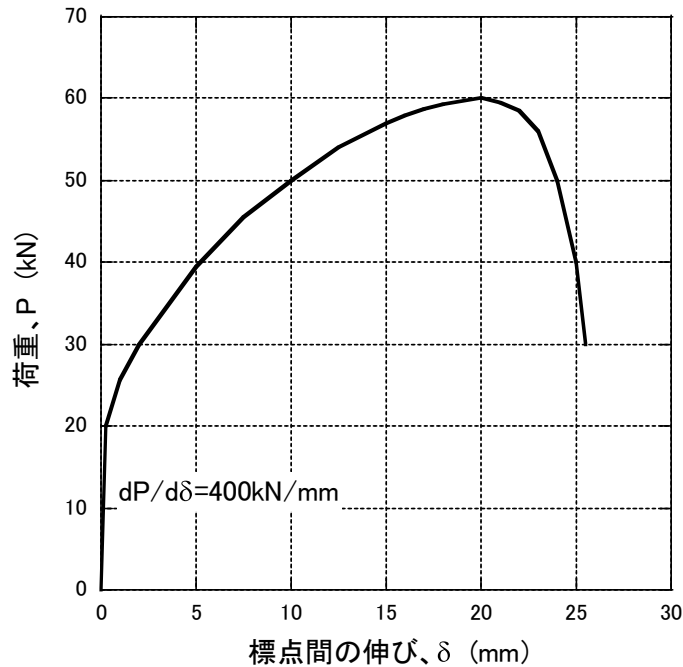
- (2) 重大事故等対処設備には、常設と可搬の2種類がある。事故が重大事故へ進展する時、より確実に機能を発揮すると考えられているのはどちらか、その理由と共に説明せよ。
- (3) 炉心の燃料が溶融し、原子炉容器から格納容器へ落下した。規制基準で定められる「必ず想定すべき格納容器破損モード」のうち関連するものを1つ挙げ、格納容器の健全性に及ぼす影響を説明せよ。ただし、格納容器に水プールは形成されておらず、原子炉容器は事前に十分減圧できたと仮定する。
- (4) 炉心損傷などに伴って多量の水素が発生し、格納容器や原子炉建屋において空気と混合したとき急速に燃焼する形態として、爆燃（デフラグレーション）と爆ごう（デトネーション）がある。これら2つ現象の特徴を、相互の関係、燃焼空間のサイズの影響と共に説明せよ。

第4問 直径  $D$ 、高さ  $H$  の円柱が側面からの圧力や温度変化を受けるときの変形や応力について、以下の問いに答えよ。円柱を構成する材料はヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、線膨張係数  $\alpha$  の等方線形弾性体とし、これらの値は温度に依存しないものとするとともに、微小変形理論が成立するものとする。このような物体では、円柱の軸に垂直な平面内ではいずれの方向の応力も等しい等 2 軸応力状態になることに留意すること。また、すべての変数は同一の単位系で表現され、単位換算のための係数は不要であるものとする。

- (1) 上下面での拘束や摩擦がない状態で側面から均一な圧力  $p$  を受けたときの直径の変化  $\Delta D$  と高さの変化  $\Delta H$  を、上記パラメータを用いて表せ。
- (2) 高さ方向の変形が拘束された状態で側面から圧力  $p$  を受けたときに発生する軸方向応力  $\sigma_z$  と直径の変化  $\Delta D$  を、上記パラメータを用いて表せ。
- (3) 全表面で拘束や摩擦がない状態で円柱全体が一様に  $\Delta T$  の温度変化を受けたときの直径の変化  $\Delta D$  と高さの変化  $\Delta H$  を、上記パラメータを用いて表せ。
- (4) 上下面での拘束や摩擦がない状態で円柱全体が一様に  $\Delta T$  の温度変化を受けても直径の変化がないようにするためには、側面からどれだけの圧力  $p$  を負荷すればよいか。このときの高さの変化  $\Delta H$  とともに、上記パラメータを用いて表せ。
- (5) 高さ方向の変形が拘束された状態で円柱全体が  $\Delta T$  の温度変化を受けたときに発生する軸方向応力  $\sigma_z$  と直径の変化  $\Delta D$  を、上記パラメータを用いて表せ。



第5問 断面積が  $100 \text{ mm}^2$  で伸び測定用の標点間距離が  $50 \text{ mm}$  の丸棒に引張荷重を負荷し、  
 下図のように荷重と伸びの関係が得られたとしたとき、以下の問いに答えよ。なお、自然対数関数の値が必要なときは、下表にある値を必要に応じて内挿して求めること。



自然対数関数の値

x	$\ln(x)$
1.00	0.000
1.05	0.049
1.10	0.095
1.15	0.140
1.20	0.182
1.25	0.223
1.30	0.262
1.35	0.300
1.40	0.336

- (1) 試験開始直後の弾性範囲の荷重－変位関係の勾配 ( $400 \text{ kN/mm}$ ) から、材料のヤング率を求めよ (単位は  $\text{MPa} (= \text{N/mm}^2)$  で表示せよ)。
- (2) 明瞭な上降伏点や下降伏点が見られない材料では、一定の塑性ひずみが発生したときの応力が降伏応力かわりに耐力として用いられるが、許容応力の算定などで採用される耐力は、いくら塑性ひずみのときの値か (% で表示せよ)。
- (3) 標点間伸びが  $10 \text{ mm}$  のとき、荷重は  $50 \text{ kN}$  であった。材料の非圧縮性 (変形しても体積が変化しない) を仮定して、この時点における公称ひずみ、真ひずみ、公称応力、真応力の値を求めよ (ひずみは無単位、応力は  $\text{MPa} (= \text{N/mm}^2)$  で表示せよ)。
- (4) 荷重が伸びとともに初期に増大する理由、及び最大値をとったあと低下していく理由を述べよ。

- (5) 荷重は標点間伸びが 20 mm のとき、最大荷重 (60 kN) をとった後、減少し始めた。これから材料の引張強さを求めよ (単位は MPa (=N/mm<sup>2</sup>)で表示せよ)。
- (6) 荷重が低下する領域では、荷重と変位のデータのみから真応力や真ひずみの値を得るのが難しい理由を述べよ。
- (7) その後、試験片は 30 kN まで荷重が下がった時点で完全破壊した。その後の測定によれば破断部の断面積は 30 mm<sup>2</sup> であった。これから真破断応力を求めよ (単位は MPa (=N/mm<sup>2</sup>)で表示せよ)。

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) 渦粘性係数
- (2) カルノーサイクル
- (3) ザポリージャ原発について（出力や炉の特徴（他のPWRとの違い）など）
- (4) 線形破壊力学
- (5) 疲労限度