

令和 2 年度高圧ガス製造保安責任者試験（記述式）の解答例
（甲種機械・学識）

【問 1 の解答例】

(1) 内管の内径 d_1 [m]および内管の平均径 d_{av} [m]は、

$$d_1 = d_2 - 2x = 50 - 2 \times 2 = 46 \text{ mm} = 0.046 \text{ m}$$

$$d_{av} = (d_1 + d_2) / 2 = (46 + 50) / 2 = 48 \text{ mm} = 0.048 \text{ m}$$

汚れ付着前の総括伝熱係数（熱貫流率）は U [W/(m²・K)]は下式で表される

$$\begin{aligned} 1/U &= d_{av} \left\{ 1/(h_1 d_1) + x/(\lambda d_{av}) + 1/(h_2 d_2) \right\} \\ &= 0.048 \times \left\{ 1/(500 \times 0.046) + 0.002/(50 \times 0.048) + 1/(900 \times 0.050) \right\} \\ &= 0.048 \times (0.0435 + 0.0008 + 0.0222) \\ &= 0.048 \times 0.0665 = 0.00319 \\ U &= 313 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

(2) 管の汚れ付着前後の流量、比熱は変化しないので、伝熱速度の比は油と冷却水の出入口の温度差で表される。

$$\begin{aligned} Q/Q_s &= (T_1 - T_2)/(T_1 - T_{s2}) = (t_2 - t_1)/(t_{s2} - t_1) \\ &= (420 - 380)/(420 - 385) = (303 - 290)/(t_{s2} - 290) \\ &= 40/35 = 13/(t_{s2} - 290) \end{aligned}$$

$$(t_{s2} - 290) = 13 \times 35 / 40$$

$$t_{s2} = 290 + 13 \times 35 / 40 = 301 \text{ K}$$

(3) ここで、汚れ付着前後の算術平均温度差は、

$$\Delta T = \frac{(T_2 - t_1) + (T_1 - t_2)}{2} = \frac{(380 - 290) + (420 - 303)}{2} = 103.5 \text{ K}$$

$$\Delta T_s = \frac{(T_{s2} - t_1) + (T_1 - t_{s2})}{2} = \frac{(385 - 290) + (420 - 301)}{2} = 107 \text{ K}$$

汚れ付着前の伝熱速度 $Q = U A \Delta T$

汚れ付着後の伝熱速度 $Q_s = U_s A \Delta T_s$

$$\frac{Q}{Q_s} = \frac{U A \Delta T}{U_s A \Delta T_s} = \frac{U \Delta T}{U_s \Delta T_s}$$

$$U_s = U \frac{\Delta T}{\Delta T_s} \frac{Q_s}{Q}$$

(1)より $U = 313 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

(2)より $Q/Q_s = 40/35$ から

$$U_s = 313 \times \frac{103.5}{107} \times \frac{35}{40} = 265 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

【問2の解答例】

(1) ベルヌーイの定理より以下が得られる。

$$(u_1^2/2) + gh_1 + p_1/\rho = (u_2^2/2) + gh_2 + p_2/\rho \quad [\text{J/kg}] \quad \dots (1)$$

$$\text{または、} \quad (\rho u_1^2/2) + \rho gh_1 + p_1 = (\rho u_2^2/2) + \rho gh_2 + p_2 \quad [\text{Pa}] \quad \dots (2)$$

$$\text{または、} \quad (u_1^2/2g) + h_1 + p_1/\rho g = (u_2^2/2g) + h_2 + p_2/\rho g \quad [\text{m}] \quad \dots (3)$$

ただし①の高さ h_1 、②の高さ h_2 とする。

ここで、 $h_1 = h_2$ とすると以下となる。

$$(u_1^2/2) + p_1/\rho = (u_2^2/2) + p_2/\rho \quad [\text{J/kg}] \quad \dots (1)'$$

$$\text{または、} \quad (\rho u_1^2/2) + p_1 = (\rho u_2^2/2) + p_2 \quad [\text{Pa}] \quad \dots (2)'$$

$$\text{または、} \quad (u_1^2/2g) + p_1/\rho g = (u_2^2/2g) + p_2/\rho g \quad [\text{m}] \quad \dots (3)'$$

$$(2) \quad u_1 = \sqrt{2(p_2 - p_1)/\rho} \quad \dots (4)$$

(3) a-a面における左右の封液の液柱にかかる圧力は等しいので以下の式が成り立つ。

$$p_3 + \rho_s gh_s = p_2 + \rho gh_s \quad \dots (5)$$

ここで、 $p_3 = p_1$ であり、 $p_2 - p_1 = gh_s(\rho_s - \rho)$ $\dots (6)$

(4)式と(6)式から以下の式が得られる。

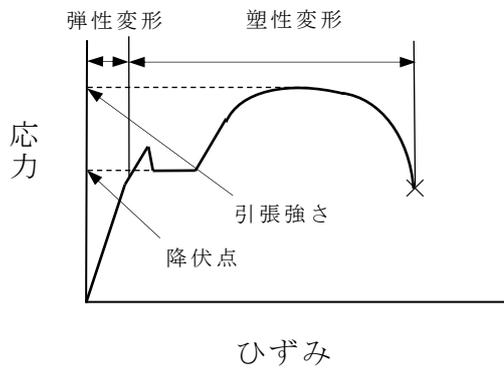
$$u_1 = \sqrt{2gh_s(\rho_s - \rho)/\rho} \quad \dots (7)$$

(4) $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_s = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $h_s = 0.01 \text{ m}$ を(7)式に代入して計算すれば

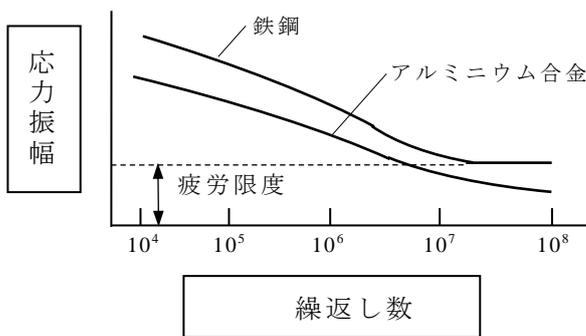
$$u_1 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.01 \times (1000 - 1.2)/1.2} = 12.77 \text{ m/s}$$

【問3の解答例】

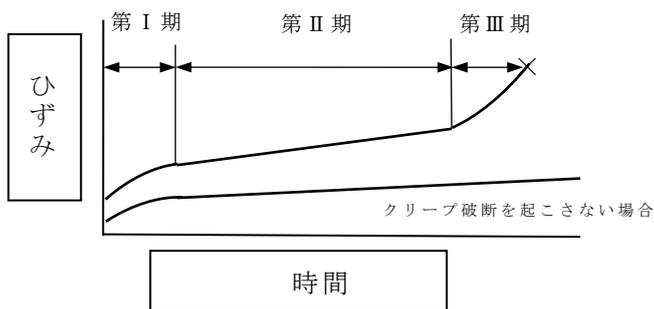
(1) 応力-ひずみ線図



(2) S-N 曲線



(3) クリープ曲線



【問 4 の解答例】

- (1) 内圧 p の作用面積は、直径 D の円の面積であるから、 $\pi D^2 / 4$ と表せる。
(2) 接線応力 σ_θ の作用面積は、直径 $D + 2t$ の円の面積から直径 D の円の面積を差し引いて求められる。

$$\frac{\pi(D + 2t)^2}{4} - \frac{\pi D^2}{4} = \pi Dt + \pi t^2$$

薄肉の仮定により πt^2 は πDt に比べて十分小さく無視できるので、接線応力 σ_θ の作用面積は近似的に πDt と表せる。

- (3) (1)より内圧 p の作用面積は $\pi D^2 / 4$ であり、(2)より接線応力 σ_θ の作用面積は πDt である。それぞれの合力が釣合うので、次式が得られる。

$$p \frac{\pi D^2}{4} = \sigma_\theta \pi Dt$$

- (4) (3)の結果を整理すると、次式が得られる。

$$\sigma_\theta = p \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{\pi Dt} = \frac{Dp}{4t}$$

- (5) 変形前の円周長さは πD であり、変形後の円周長さは $\pi(D + \Delta D)$ であるから、円周の伸びは次のように求められる。

$$\pi(D + \Delta D) - \pi D = \pi \Delta D$$

円周の伸びを元の長さ πD で除せば、接線ひずみ ε_θ は次式のように求められる。

$$\varepsilon_\theta = \frac{\pi \Delta D}{\pi D} = \frac{\Delta D}{D}$$

- (6) (4)で求めた接線応力 σ_θ と(5)で求めた接線ひずみ ε_θ を与えられた関係式に代入すれば、

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1 - \nu}{E} \frac{Dp}{4t}$$

となるので、 ΔD について整理すれば、次式が得られる。

$$\Delta D = \frac{1 - \nu}{4E} \frac{D^2 p}{t}$$

【問5の解答例】

(1) 混合ガスのモル質量は、各成分のモル質量にモル分率を乗じたものの総和より求まる。

$$M = M_{\text{O}_2} x_{\text{O}_2} + M_{\text{Ar}} x_{\text{Ar}} = 32.0 \times 10^{-3} \times \frac{1}{5} + 40.0 \times 10^{-3} \times \frac{4}{5} = 38.4 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

(2) 定容比熱容量 c_v と定圧比熱容量 c_p は、比熱比と平均モル質量が与えられているので

$$c_v = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{R}{M} = \frac{1}{1.59 - 1} \times \frac{8.314}{38.4 \times 10^{-3}} = 3.669 \times 10^2 \rightarrow 367 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$c_p = \gamma c_v = 1.59 \times 3.669 \times 10^2 = 5.834 \times 10^2 \rightarrow 583 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

(3) 断熱圧縮後の温度 T_2 は、

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 300 \times \left(\frac{0.9}{0.1} \right)^{\frac{1.59-1}{1.59}} = 300 \times 9^{0.371} = 300 \times 2.26 = 678 \text{ K}$$

(4) 質量 m の気体の断熱圧縮に要する絶対仕事 W_{12} は、内部エネルギーの増加量に等しいので

$$W_{12} = mc_v(T_2 - T_1)$$

となる。断熱圧縮の工業仕事は絶対仕事の γ 倍であるので、圧縮に要する動力 W_{11} は

$$W_{11} = \gamma W_{12} = \gamma mc_v(T_2 - T_1) = mc_p(T_2 - T_1) = 1.0 \times 583.4 \times (678 - 300) = 2.205 \times 10^5 \rightarrow 221 \text{ kW}$$

(5) 1段圧縮後の温度 T'_2 は

$$T'_2 = T_1 \left(\frac{p_m}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 300 \times \left(\frac{0.3}{0.1} \right)^{\frac{1.59-1}{1.59}} = 300 \times 3^{0.371} = 300 \times 1.50 = 450 \text{ K}$$

中間冷却は等圧過程なので、単位時間当たりの除熱量 Q は

$$Q = mc_p(T_2 - T_m) = 1.0 \times 583.4 \times (450 - 300) = 8.751 \times 10^4 \rightarrow 87.5 \text{ kW}$$

1段目と2段目の圧力比はともに $p_m/p_1 = p_2/p_m = 3$ であり、圧縮開始の温度も $T_1 = T_m = 300 \text{ K}$

と等しいので、圧縮後の温度も等しくなる。したがって、2段目の圧縮に必要な動力は

1段目の圧縮に必要な動力 W_{11} と等しい。よって2段圧縮に必要な動力 W_{12} は

$$W_{12} = 2W_{11} = 2\gamma mc_v(T'_2 - T_1) = 2mc_p(T'_2 - T_1) = 2.0 \times 1.0 \times 583.4 \times (450 - 300)$$

$$= 1.750 \times 10^5 \rightarrow 175 \text{ kW}$$