

令和4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) 内管の外径 d_o [m]および内管の平均径 d_{av} [m]は、
内管の外径

$$d_o = d_i + 2x = 56 + 2 \times 2 = 60 \text{ mm} = 0.06 \text{ m}$$

内管の平均径

$$d_{av} = (d_i + d_o) / 2 = (56 + 60) / 2 = 58 \text{ mm} = 0.058 \text{ m}$$

総括伝熱係数(熱貫流率) U [W/(m²·K)] (内管平均径基準)は下式で表される。

$$\begin{aligned} 1/U &= d_{av} \{ 1/(h_o d_i) + x/(\lambda d_{av}) + 1/(h_c d_o) \} \\ &= 0.058 \{ 1/(400 \times 0.056) + 0.002/(50 \times 0.058) + 1/(700 \times 0.060) \} \\ &= 0.058 \times 0.0691 = 0.00401 \\ U &= 249 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

- (2) 図2の夏季の運転条件と、図1の通常の運転条件の平均温度差を一定と考えれば、

$$\begin{aligned} \frac{(T_0 - t_0) + (T_0' - t_0')}{2} &= \frac{(T_1 - t_1) + (T_1' - t_1')}{2} \\ \frac{(390 - 298) + (360 - 310)}{2} &= \frac{(390 - 301) + (360 - t_1')}{2} \\ 92 + 50 &= 89 + (360 - t_1') \\ t_1' &= 307 \text{ K} \end{aligned}$$

図2の夏季の油の運転条件は、図1の通常の油の運転条件と変わらないことから、図2の夏季の冷却水の伝熱速度(伝熱量)は図1の通常の冷却水の伝熱速度(伝熱量)と同じである。

したがって、伝熱速度(伝熱量) $Q_1 = Q_0$ より

$$\begin{aligned} Q_1 &= w_1 c_p (t_1' - t_1) = w_0 c_p (t_0' - t_0) \\ w_1 / w_0 &= c_p (t_0' - t_0) / c_p (t_1' - t_1) \\ &= (310 - 298) / (307 - 301) \\ &= 2 \end{aligned}$$

よって、冷却水出口温度は 307 K、又、冷却水の流量は通常の運転条件の 2 倍となる。

- (3) 図3の能力増強後の油の伝熱速度(伝熱量)と図1の通常の油の伝熱速度(伝熱量)との比は

$$\begin{aligned} Q_2 / Q_0 &= W_2 C_p (T_2 - T_2') / \{ W_0 C_p (T_0 - T_0') \} \\ &= 1.2 W_0 C_p (390 - 360) / \{ W_0 C_p (390 - 360) \} \\ &= 1.2 \end{aligned}$$

また、能力増強後の冷却水の伝熱速度(伝熱量)と通常の冷却水の伝熱速度(伝熱量)との比は

$$\begin{aligned} Q_2 / Q_0 &= w_2 c_p (t_2' - t_2) / \{ w_0 c_p (t_0' - t_0) \} \\ &= 1.3 w_0 c_p (t_2' - 298) / \{ w_0 c_p (310 - 298) \} \\ &= 1.3 (t_2' - 298) / 12 \\ 1.2 &= 1.3 (t_2' - 298) / 12 \\ t_2' &= 309 \text{ K} \end{aligned}$$

伝熱面積と所要伝熱管長さの関係 $A=\pi d_{av}L$ より

$$Q_0 = UA_0\Delta T_{0av} = U\pi d_{av}L_0\Delta T_{0av}$$

$$Q_2 = UA_2\Delta T_{2av} = U\pi d_{av}L_2\Delta T_{2av}$$

ここで、

$$\begin{aligned}\Delta T_{0av} &= \frac{(T_0 - t_0) + (T'_0 - t'_0)}{2} \\ &= \frac{(390 - 298) + (360 - 310)}{2} \\ &= \frac{92 + 50}{2} = 71\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta T_{2av} &= \frac{(T_2 - t_2) + (T'_2 - t'_2)}{2} \\ &= \frac{(390 - 298) + (360 - 309)}{2} \\ &= \frac{92 + 51}{2} = 71.5\end{aligned}$$

したがって、

$$\begin{aligned}L_2 / L_0 &= Q_2 / (U\pi d_{av}\Delta T_{2av}) \times U\pi d_{av}\Delta T_{0av} / Q_0 \\ &= Q_2 / Q_0 \times (\Delta T_{0av} / \Delta T_{2av}) \\ &= 1.2 \times 71 / 71.5 \\ &= 1.192\end{aligned}$$

よって、冷却水出口温度は 309 K となり、所要伝熱管長さは通常の運転条件の 1.19 倍が必要となる。

【問 2 の解答例】

- (1) 液面 A と C 点間の圧力 p_0 、放出先 C 点から貯槽の液面 A までの高さ H 、平均流速 u 、配管の圧力損失 Δp の関係をベルヌーイの定理を使って、

$$u_A^2/2 + p_0/\rho + gH = u_C^2/2 + p_0/\rho + \Delta p/\rho \quad [\text{J/kg}]$$

ここで、 $u_A = 0$ 、 $u_C = u$ 、両辺の p_0 を打ち消すと以下の式が得られる

$$H = u^2/2g + \Delta p/\rho g \quad [\text{m}]$$

- (2) レイノルズ数 Re は以下の式で求められ、配管の平均流速 $u = 7 \text{ m/s}$ を代入する。

$$Re = d \times u \times \rho/\mu = 0.05 \times 7 \times 1000 / (1 \times 10^{-3}) = 3.5 \times 10^5$$

- (3) (2)より $Re > 4000$ なので、貯槽の B 点から放出先 C 点の配管の圧力損失 Δp [Pa] は、乱流におけるファニングの式を適用して求める。

$$\begin{aligned} \Delta p &= 4f(\rho u^2/2)(L_e/d) = 4 \times 0.005 \times (1000 \times 7^2/2) \times (10/0.05) \\ &= 98.0 \text{ kPa} \end{aligned}$$

- (4) 上記より、 $H = u^2/2g + \Delta p/\rho g$
- $$\begin{aligned} &= 7^2/(2 \times 9.8) + 98000/(1000 \times 9.8) \\ &= 12.5 \text{ m} \end{aligned}$$

- (5) レイノルズ数 $Re = 0.05 \times 1 \times 1400 / 1.3 = 53.8$

$Re < 2100$ なので層流である。

ゆえに、ファニングの式で、 $f = 16/Re$ として

$$\begin{aligned} \Delta p_h &= 4 \times (16/Re) \times (\rho_h u_h^2/2)(L_e/d) \\ &= 4 \times (16/53.8) \times (1400 \times 1^2/2) \times 10/0.05 = 166543 \text{ Pa} \\ &\doteq 167 \text{ kPa} \end{aligned}$$

【問3の解答例】

(1)

- ① 水素が鋼中に侵入し、鋼中の炭化物と反応して鋼を脱炭させるとともに、メタンガスを生成する。メタンガスは結晶粒界に蓄積し、その圧力が高いために多数の微細な亀裂が生じる。
- ② Cr、Moを添加することにより安定な炭化物を作り、侵入した水素と炭化物との反応を抑制する。
- ③ ネルソン線図は、炭素鋼及びクロムモリブデン鋼の高温高圧の水素環境下での損傷事例を集積し、横軸に水素分圧、縦軸に温度で整理して、水素侵食を起こさない限界を示したものである。
- ④ 装置設計時に使用材料の限界値が、運転条件以上の値をもつ材料を選定することで、水素侵食を防ぐ。

(2)

- ① 拡散性水素が溶接金属中に拡散し、ある場所に凝集して残留応力により割れが発生する。
- ② 溶接直後または溶接後ある時間経過してから発生するので、割れをすべて検出するには通常施工後24～48時間が必要である。
- ③ 低水素系溶接棒を採用、溶接棒の乾燥、適正な予熱・後熱、適正な溶接順序の選択を行う。

【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) 胴に生じる最大主応力は接線応力 σ_θ であるので、 $\sigma_{max} = Dp/(4t)$ となる。
- (6) 変形前の円周の長さは πD であり、変形後の円周の長さは $\pi(D + \Delta D)$ 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。

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

- (7) 球形胴は等二軸応力状態であって、 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_\theta$ 、 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_\theta$ と考えればよいので、次式を得る。

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu \sigma_\theta) = \frac{1 - \nu}{E} \sigma_\theta$$

- (8) (4)で求めた接線応力 σ_θ と(6)で求めた接線ひずみ ε_θ を(7)で求め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) 混合ガスの質量基準の状態方程式は

$$P_1 V_1 = m \frac{R}{M} T_1$$

となるので

$$M = \frac{mRT_1}{P_1 V_1} = \frac{0.882 \times 8.314 \times 300}{0.1 \times 10^6 \times 1} = 2.20 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$$

また、ヘリウムのもル分率 x を用いて

$$M = M_{\text{He}} x + M_{\text{N}_2} (1 - x)$$

$$x = \frac{M_{\text{N}_2} - M}{M_{\text{N}_2} - M_{\text{He}}} = \frac{2.80 \times 10^{-2} - 2.20 \times 10^{-2}}{2.80 \times 10^{-2} - 4.0 \times 10^{-3}} = 0.25$$

(2) 混合ガスの定容比熱容量 c_v を用いると

$$Q = mc_v (T_2 - T_1)$$

$$c_v = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} = \frac{511 \times 10^3}{2 \times (600 - 300)} = 852 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \rightarrow 0.852 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

定容比熱容量 c_v と比熱容量の比 γ の関係から

$$c_v = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{R}{M}$$

$$\gamma = \frac{R}{c_v M} + 1 = \frac{8.314}{852 \times 2.20 \times 10^{-2}} + 1 = 1.44$$

(3) 断熱圧縮後の温度 T_3 は

$$T_3 = T_1 \left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 300 \times \left(\frac{1.2}{0.1} \right)^{\frac{1.44-1}{1.44}} = 300 \times (12)^{0.306} = 300 \times 2.14 = 642 \text{ K}$$

(4) 理想気体の断熱圧縮に要する絶対仕事 W は気体の内部エネルギーの増加量に等しいので

$$W = mc_v (T_3 - T_1)$$

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_t は

$$W_t = \gamma W = \gamma mc_v (T_3 - T_1) = 1.44 \times 0.5 \times 852 \times (642 - 300) = 2.10 \times 10^5 \text{ W} \rightarrow 210 \text{ kW}$$