

令和3年度高圧ガス製造保安責任者試験（記述式）の解答例
（第一種冷凍機械・学識）

【問1の解答例】

(1) コンパウンド圧縮機の低段側と高段側との気筒数比は、低段側とのピストン押しのけ量の比に等しい。低段側の冷媒循環量を q_{mL} 、高段側の冷媒循環量を q_{mH} とすると、

$$\text{それぞれのピストン押しのけ量は、 } V_L = \frac{v_1 q_{mL}}{\eta_v}, \quad V_H = \frac{v_3 q_{mH}}{\eta_v}$$

$$\text{と表せることから、気筒数比は、 } \frac{V_L}{V_H} = \frac{\frac{v_1 q_{mL}}{\eta_v}}{\frac{v_3 q_{mH}}{\eta_v}} = \frac{v_1 q_{mL}}{v_3 q_{mH}} \quad \text{と表すことができる。}$$

$$\text{また、} q_{mH} \text{ と } q_{mL} \text{ との関係は、 } \frac{q_{mH}}{q_{mL}} = \frac{h_2' - h_7}{h_3 - h_5} \text{ である。}$$

ここで、圧縮機の機械的摩擦損失仕事は吐出しガスに熱として加わることから、

$$h_2' = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_c \eta_m} = 348 + \frac{375 - 348}{0.75 \times 0.90} = 388 \text{ kJ/kg}$$

となる。これを用いて、

$$\frac{q_{mH}}{q_{mL}} = \frac{h_2' - h_7}{h_3 - h_5} = \frac{388 - 242}{366 - 260} = 1.377$$

となり、押しのけ量の比は、

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{v_1 q_{mL}}{v_3 q_{mH}} = \frac{0.17}{0.041 \times 1.377} = 3.011$$

であるから、気筒数比は 3 である。

気筒数比 3

低段側ピストン押しのけ量が $60 \text{ m}^3/\text{h}$ であるから、高段側ピストン押しのけ量は、 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ であることがわかる。圧縮機駆動の総軸動力 P は、低段圧縮機の軸動力を P_L 、高段圧縮機の軸動力を P_H とすると、

$$P = P_L + P_H = q_{mL} (h_2' - h_1) + q_{mH} (h_4' - h_1)$$

ここで、

$$q_{mL} = \frac{V_L \eta_v}{3600 v_1} = \frac{60 \times 0.80}{3600 \times 0.17} = 0.0784 \text{ kg/s}$$

$$q_{mH} = \frac{V_H \eta_v}{3600 v_3} = \frac{20 \times 0.80}{3600 \times 0.041} = 0.1084 \text{ kg/s}$$

$$h_4' = h_3 + \frac{h_4 - h_3}{\eta_c \eta_m} = 366 + \frac{395 - 366}{0.75 \times 0.90} = 408.96 \text{ kJ/kg}$$

であるから、

$$\begin{aligned} P &= P_L + P_H = q_{mL}(h_2' - h_1) + q_{mH}(h_4' - h_3) \\ &= 0.0784(388 - 348) + 0.1084(409 - 366) = 7.797 \text{ kW} \end{aligned}$$

実際の圧縮機駆動の総軸動力 7.80kW

(2) 実際の冷凍装置の成績係数(COP)_R は、

$$(COP)_R = \frac{h_1 - h_7}{\frac{h_2 - h_1}{\eta_c \eta_m} + \frac{h_2' - h_7}{h_3 - h_5} \times \frac{h_4 - h_3}{\eta_c \eta_m}}$$

で求めることができることから、運転条件を代入すると、

$$(COP)_R = \frac{348 - 242}{\frac{375 - 348}{0.75 \times 0.90} + \frac{388 - 242}{366 - 260} \times \frac{395 - 366}{0.75 \times 0.90}} = 1.069$$

実際の成績係数 1.07

(別解)

$$(COP)_R = \frac{q_{mL}(h_1 - h_7)}{P} = \frac{0.0784 \times (348 - 242)}{7.797} = 1.0658$$

【問2の解答例】

- (1) 凝縮器の凝縮負荷 Φ_k は、冷媒循環量を q_{mr} 、実際の吐出しガスの比エンタルピーを h_2' とすると以下の式で求められる。

$$\Phi_k = q_{mr} (h_2' - h_3)$$

ここで、

$$h_2' = h_1 + \frac{(h_2 - h_1)}{\eta_c \eta_m} = 426 + \frac{(470 - 426)}{(0.85 \times 0.90)} = 483.51 \approx 484 \text{ kJ/kg}$$

また、冷媒循環量 q_{mr} は以下の式で求められる。

$$q_{mr} = \frac{V \rho_1 \eta_v}{3600} = \frac{70 \times 30 \times 0.85}{3600} = 0.495 \approx 0.50 \text{ kg/s}$$

したがって、

$$\Phi_k = q_{mr} (h_2' - h_3) = 0.50 \times (484 - 266) = 109 \text{ kW}$$

- (2) 蒸発器出口の冷媒の比エンタルピー h_6 は、次式で求められる。

$$h_6 = h_1 - (h_3 - h_4) = 426 - (266 - 240) = 400 \text{ kJ/kg}$$

蒸発圧力における飽和蒸気の比エンタルピー h_D は、次式で求められる。

$$h_D = \frac{h_6 - (1 - x_6) h_B}{x_6} = \frac{400 - (1 - 0.90) \times 200}{0.90} = 422.2 \approx 422 \text{ kJ/kg}$$

- (3) 実際の成績係数 $(COP)_R$ は次式で求められる。

$$(COP)_R = \Phi_o / P$$

ここで、 $\Phi_o = q_{mr} (h_6 - h_5)$

$$P = \frac{q_{mr} (h_2 - h_1)}{\eta_c \eta_m}$$

したがって、

$$(COP)_R = \Phi_o / P = \frac{q_{mr} (h_6 - h_5) \eta_c \eta_m}{q_{mr} (h_2 - h_1)} = \frac{(h_6 - h_5) \eta_c \eta_m}{h_2 - h_1} = \frac{(400 - 240) \times 0.85 \times 0.90}{470 - 426} = 2.781$$

$$\approx 2.78$$

【問3の解答例】

断熱材を通過する伝熱量を Φ [W] とし、長さ L [m] あたりで考えると、ニュートンの冷却則より、

$$\Phi = \alpha_a (\pi D_2 L) (t_a - t_2) \quad (1)$$

となる。

また、断熱材は円筒形なので、断熱材の内表面、外表面の半径を r_1 、 r_2 とすると、

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{D_2}{D_1}$$

なので、円筒の伝熱式より

$$\Phi = 2\pi L \lambda_p \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 2\pi L \lambda_p \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (2)$$

となる。

式(1)、(2)より、

$$\alpha_a D_2 (t_a - t_2) = 2\lambda_p \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{D_2}{D_1}}$$

$$t_1 = t_2 - \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\lambda_p} \alpha_a D_2 (t_a - t_2)$$

$$t_1 = 25.2 - \frac{\ln 5}{2 \times 0.030} \times 10 \times 30 \times 10^{-3} \times (30.2 - 25.2) = -15.03$$

$$\doteq -15.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

【問4の解答例】

イ.

- ① 飽和液 _____
- ② 飽和蒸気 _____
- ③ 低 _____
- ④ 体積能力 _____
- ⑤ 高 _____
- ⑥ 高 _____

ロ.

- ⑦ 臭気 _____
- ⑧ 溶解度 _____
- ⑨ 冷媒 _____
- ⑩ 凝固点 _____
- ⑪ 閉塞 _____

ハ.

- ⑫ 等圧 _____
- ⑬ 等圧 _____
- ⑭ 沸点 _____
- ⑮ 露点 _____
- ⑯ 低下 _____

ニ.

- ⑰ 無機 _____
- ⑱ 有機 _____
- ⑲ 酸素 _____
- ⑳ 水分 _____

※①と②は入れ替えても正解である.

【問5の解答例】

屋外設置の圧力容器であるから、腐れしろ α は1mmとする。また、SM400Bの許容引張応力 σ_a は100 N/mm²であるから、円筒胴の内径 D_i (mm)は、

$$\begin{aligned} D_i &= (t_{a1} - \alpha) \frac{2\sigma_a \eta - 1.2P}{P} \\ &= (7 - 1) \times \frac{2 \times 100 \times 0.70 - 1.2 \times 2.11}{2.11} = 390.90 \text{ mm} \end{aligned}$$

したがって、設計可能な最大の円筒胴の外径 D_o (mm)は、mm単位の整数値で求めて

$$D_o = D_i + 2t_{a1} = 390 + 2 \times 7 = 404 \text{ mm} \quad (\text{小数点以下を切り下げ})$$

半球形鏡板の接線方向に誘起される引張応力 σ_t (N/mm²)は、

$$\sigma_t = \frac{PRW}{2t_{a2}}$$

であり、ここで、設計圧力 $P = 2.11$ MPa、半球形鏡板の形状に関する係数 $W = 1$ であるから、半球形鏡板の内面の半径 R (mm)は、

$$\begin{aligned} 2R &= D_i = D_o - 2t_{a2} \\ R &= \frac{D_o - 2t_{a2}}{2} = \frac{404 - 2 \times 7}{2} = 195 \text{ mm} \end{aligned}$$

したがって、半球形鏡板の接線方向に誘起される引張応力 σ_t (N/mm²)は、

$$\sigma_t = \frac{2.11 \times 195 \times 1}{2 \times 7} = 29.4 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{小数点以下 2桁目を四捨五入})$$