

# NO5 語句解説 — 熱工学の基礎 —

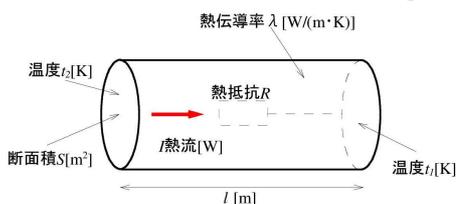
1. 電気加熱に関する量と記号を示してある。それらの単位を書け。

| 量の名称 | 記号       | 単位  |
|------|----------|-----|
| 温度   | $t$      | (1) |
| 温度差  | $\theta$ | (2) |
| 熱流   | $I$      | (3) |
| 熱抵抗  | $R$      | (4) |
| 熱量   | $Q$      | (5) |

| 量の名称  | 記号        | 単位   |
|-------|-----------|------|
| 熱容量   | $C$       | (6)  |
| 比熱    | $c$       | (7)  |
| 潜熱    | $\beta$   | (8)  |
| 熱伝導率  | $\lambda$ | (9)  |
| 熱伝達係数 | $h$       | (10) |

- (1) <sup>ケルビン</sup> K (2) K (3) <sup>ワット</sup> W (4) <sup>ケルビン毎ワット</sup> K / W (5) <sup>ジュール</sup> J (6) J/K (7) kJ/(kg·K)  
 (8) kJ/kg (9) W/(m·K) (10) W/(m<sup>2</sup>·K)

2. 電気炉の壁の外面に垂直に小穴をあけ、温度計を挿入して壁の外面から 10cm と 30cm の箇所で壁の内部温度を測定したところ、それぞれ 72°C と 142°C の値が得られた。炉壁の熱伝導率  $\lambda$  を 0.94 としたときの、この炉壁からの単位面積当たりの熱損失 [W/m<sup>2</sup>] を求めよ。ただし、壁面の垂直な方向の温度勾配は一定とする。



$$\text{電流 } I = \frac{Q[C]}{t[s]}, \text{ 電位差 } E = IR$$

$$\text{熱流 } I = \frac{Q[J]}{t[s]}, \text{ 温度差 } \theta = IR$$

熱エネルギーは、壁内を伝導によって伝わるため、壁面 1m<sup>2</sup> 当たりの熱流を計算する。熱流は熱の移動量、方向を示すもので、単位時間・単位面積当たりを通過するエネルギー (W/m<sup>2</sup>) のこと。

温度差  $\theta = t_2 - t_1 [K] = IR [K]$ ,  $t_2 > t_1$

伝導による熱回路の温度差は  $\theta = t_2 - t_1 = I \left( \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \right) = IR [K]$

題意より、単位面積当たりの熱損失 (熱流) は

$$\frac{I}{S} = \lambda \cdot \frac{1}{l} (t_2 - t_1) = 0.94 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \cdot \frac{1}{(0.3 - 0.1) \text{ m}} \cdot (142 - 72) \text{ K} = 329 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

3. 直径 20cm, 長さ 3m の円柱状の物体がある。その一端の温度を 200°C とするとき、他端は温度 100°C となった。これは 1 時間につき 200kJ の熱が伝わったと考えたとき、この物体の熱伝導率  $\lambda$  を求めよ。ただし、この物体の側面からの熱放散はないものとする。

$$\text{熱流 } I = \frac{Q[J]}{t[s]} = \frac{200 \times 10^3 \text{ J}}{60 \times 60 \text{ s}} = \frac{500}{9} [W] \quad \text{熱伝導率 } \lambda = \frac{l}{S} \cdot \frac{I}{\theta} = \frac{3}{\pi \times 0.1^2} \cdot \frac{1}{200 - 100} \cdot \frac{500}{9} \approx 53.1 [W/(m \cdot K)]$$

4. 直径 0.5mm, 長さ 3m, 抵抗率  $1.1 \mu\Omega \cdot m$  のニクロム線に 100V を加えたとき、このニクロム線の抵抗値を求め、1 分当たりの発熱量 Q [kJ/min] を求めよ。ただし、温度による抵抗率の変化は無視するものとする。

$$\text{ニクロム線の抵抗値は } R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 1.1 \times 10^{-6} \times \frac{3}{\pi (0.25 \times 10^{-3})^2} \approx 16.8 [\Omega]$$

$$100\text{V を加えたときの消費電力 } P = \frac{V^2}{R} = \frac{100^2}{16.8} \approx 595 [W]$$

通電時間 60 秒を乗ずれば、1 分間当たりの発熱量  $Q = Pt = 595 \text{ W} \times 60 \text{ s} = 35700 [J]$  故に 35.7kJ

5. 電熱器の電熱線が経年により、新品時に比べ、その長さが  $a[\%]$ , 直径が  $b[\%]$  減少した。電熱器の消費電力は新品時のおよそ何倍になるか。

電熱線の抵抗率を  $\rho$ , 直径を  $d[m]$ , 断面積  $S[m^2]$  とすると、新品時  $P = \frac{V^2}{R} = V^2 \cdot \frac{\pi}{\rho l} \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{\pi V^2}{4\rho} \cdot \frac{d^2}{l}$

経年時は  $P' = \frac{\pi V^2}{4\rho} \cdot \frac{[d(1 - \frac{b}{100})]^2}{l(1 - \frac{a}{100})} = \frac{\pi V^2}{4\rho} \cdot \frac{d^2}{l} \cdot \frac{(1 - \frac{b}{100})^2}{(1 - \frac{a}{100})}$   
 故に  $\frac{(1 - \frac{b}{100})^2}{(1 - \frac{a}{100})}$  倍

6. 毎分  $3 \times 10^3 \text{kJ}$  の熱量を排出するための換気扇の容量  $[\text{m}^3/\text{min}]$  を求めよ。ただし、吸排気の温度差は  $5^\circ\text{C}$  とし、空気の密度は  $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 、比熱は  $1 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  とする。

$w$ : 変圧器などの損失  $[\text{W}]$ ,  $c$ : 空気の比熱  $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,  $m$ : 空気の密度  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $V$ : 換気扇容量  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ,  $t_1, t_2$ : 吸気, 排気の温度  $[\text{K}$  または  $^\circ\text{C}]$

$$w = cmV(t_2 - t_1) [W \rightarrow J/s]$$

$$V = \frac{w}{cm(t_2 - t_1)} = \frac{3 \times 10^3}{60} \cdot \frac{1}{1 \times 1.2 \times 5} = \frac{50}{6} [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{よって、毎分に換算すると } \frac{50}{6} \times 60 = 500 [\text{m}^3/\text{min}]$$

7. 電気炉により、質量  $500 \text{kg}$  の鋳鋼を加熱し、20 分間で完全に溶解させるのに必要な電力  $[\text{kW}]$  を求めよ。ただし、鋳鋼の加熱前の温度は  $15^\circ\text{C}$ 、融解潜熱は  $314 \text{kJ}/\text{kg}$ 、比熱は  $0.67 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  および融点は  $1535^\circ\text{C}$  であり、電気炉の効率は  $80\%$  とする。

$P$ : 電力  $[\text{kW}]$ ,  $T$ : 加熱時間  $[\text{h}]$ ,  $\eta$ : 効率,  $c$ : 金属の比熱  $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,  $\beta$ : 融解潜熱  $[\text{kJ}/\text{kg}]$ ,  $m$ : 質量  $[\text{kg}]$ ,  $t_1$ : 初期温度  $[\text{C}$  or  $\text{K}]$ ,  $t_2$ : 融点  $[\text{C}$  or  $\text{K}]$ ,  $Q$ : 加熱有効熱量  $[\text{kJ}]$ ,  $Q_1$ : 昇温に要する熱量  $[\text{kJ}]$ ,

(潜熱: 物質が温度を変えないで、その状態 (気体, 液体, 固体) を変えるために吸収または発生する熱。)

$Q_2$ : 融解に要する熱量  $[\text{kJ}]$ , よって  $Q = Q_1 + Q_2 [\text{kJ}]$  が成り立つ。  $3600PT\eta = cm(t_2 - t_1) + \beta m [\text{kJ}]$

$$P = \frac{cm(t_2 - t_1) + \beta m}{3600T\eta} = \frac{0.67 \times 500(1535 - 15) + 314 \times 500}{3600 \times (20/60) \times (80/100)} \doteq 694 [\text{kW}]$$

8. 鋳鋼  $1 \text{t}$  を 40 分で融解する電気炉がある。鋳鋼の初期温度は  $20^\circ\text{C}$ 、融点は  $1535^\circ\text{C}$ 、比熱は  $0.67 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、融解潜熱は  $314 \text{kJ}/\text{kg}$ 、炉の効率は  $75\%$  とする。鋳鋼の融解に要する理論熱量  $[\text{MJ}]$  を求め、電気炉の所要電力  $[\text{kW}]$  を求めよ。

加熱有効熱量は  $Q = cm(t_2 - t_1) + \beta m = 0.67 \times 1000 \times (1535 - 20) + 314 \times 1000 = 1329050 [\text{kJ}] \doteq 1329 [\text{MJ}]$

所要電力は  $P = \frac{Q}{3600T\eta} = \frac{1329 \times 10^3}{3600 \times (40/60) \times (75/100)} \doteq 738 [\text{kW}]$

9. 1 気圧で  $20^\circ\text{C}$  の水  $5.6 \text{L}$  を一定割合で加熱し、4 時間ですべての水を蒸発させるのに要する電熱装置の容量  $[\text{kW}]$  を求めよ。ただし、水の比熱を  $4.186 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、蒸発潜熱を  $2260 \text{kJ}/\text{kg}$  とし、電熱装置の効率を  $70\%$  とする。

$$P = \frac{cm(t_2 - t_1) + \beta m}{3600T\eta} = \frac{4.186 \times 5.6(100 - 20) + 2260 \times 5.6}{3600 \times 4 \times (70/100)} \doteq 1.44 [\text{kW}]$$

10.  $15^\circ\text{C}$  の水  $2 \text{t}$  を  $-10^\circ\text{C}$  の氷にするために必要な取り去る熱量  $[\text{MJ}]$  を求めよ。ただし、水の凝固潜熱は  $334 \text{kJ}/\text{kg}$ 、氷の比熱は  $2.09 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  とする。

常温  $t_1$  の水を冷却する (熱を取り去る) と、 $0^\circ\text{C}$  で氷となる。常温の水を凍らせ、さらに氷点下まで冷却するために必要な取り去る熱量  $Q$  は

$$Q = c_1 m(t_1 - 0) + \beta m + c_2 m(0 - t_2)$$

で表される。水を  $0^\circ\text{C}$  まで冷却:  $c_1 m(t_1 - 0)$ ,  $0^\circ\text{C}$  の水を氷にする:  $\beta m$ ,  $0^\circ\text{C}$  の氷を  $t_2$  まで冷却:  $c_2 m(0 - t_2)$ , 厳密な値として、水の比熱  $c_1$ :  $4.186 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 氷の比熱  $c_2$ :  $2.093 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 凝固潜熱  $\beta$ :  $333.6 \text{kJ}/\text{kg}$ , 水の質量  $m$   $[\text{kg}]$  (水  $1 \text{m}^3 = 1000 \text{kg}$ ,  $1 \text{L} = 1 \text{kg}$ ), 初期温度  $t_1$   $[\text{C}]$ , 氷の最終温度  $t_2$   $[\text{C}]$ , 蛇足だが  $0^\circ\text{C}$  の水  $1 \text{t}$  を 24 時間で  $0^\circ\text{C}$  の氷にする能力を「1 日本冷凍トン」という。

$$Q = c_1 m(t_1 - 0) + \beta m + c_2 m(0 - t_2) = 4.186 \times 2000(15 - 0) + 334 \times 2000 + 2.09 \times 2000 \times (0 - (-10)) = 835380 [\text{kJ}]$$

故に  $835 [\text{MJ}]$