

断熱性・保温性

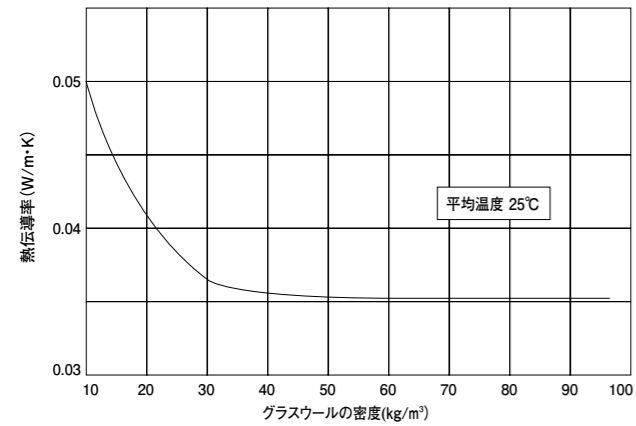
[グラスウールの熱特性]

グラスウールは、細いガラスの繊維の間に多くの動かない空気を含み、これにより優れた断熱性能があります。

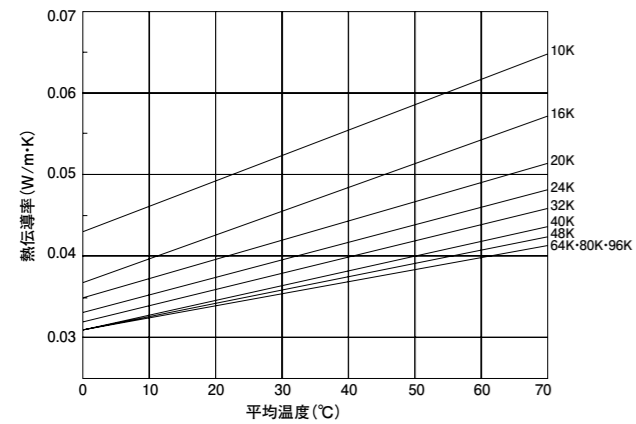
● 密度と熱伝導率

密度が増すにしたがいグラスウール中の空気が細分化されるので、熱伝導率は、小さくなります。

密度10～20kg/m³では、低下率が大きく、それ以上では低下率が小さくなります。さらに高密度になると、ガラス繊維の占める割合が大きくなり、やや熱伝導率が大きくなります。



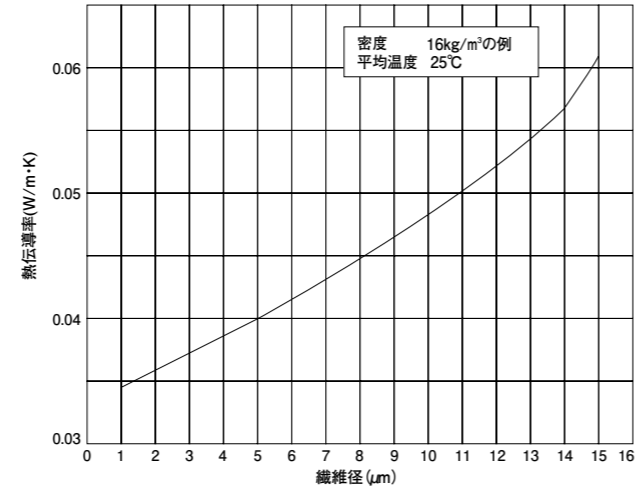
● 温度と熱伝導率



呼び厚さによる密度 kg/m	熱伝導率 W/m・K	呼び厚さによる密度 kg/m	熱伝導率 W/m・K
10	0.043+0.000315θ	40	0.031+0.000183θ
16	0.037+0.000281θ	48	0.031+0.000166θ
20	0.035+0.000233θ	64、80、96	0.031+0.000150θ
24	0.033+0.000216θ		
32	0.032+0.000199θ		

● 繊維径と熱伝導率

密度が同じであっても、繊維径によって熱伝導率は変わります。通常のグラスウールは繊維径が7ミクロン程度ですが、高性能グラスウールは4ミクロン程度です。



[保温・保冷計算]

● 平面の保温・保冷

平らな面を貫通して定常的に熱が流れる場合は、次の式によって“貫流熱量”、“必要な保温厚さ”、“表面温度”等を知ることができます。

1. 貫流熱量(熱損失量、侵入熱量): q (W/m²)

$$q = \frac{\theta_o - \theta_s}{\frac{x}{\lambda}} = \frac{\theta_o - \theta_r}{\frac{1}{\alpha} + \frac{x}{\lambda}} = \frac{\theta_o - \theta_r}{R} = \alpha(\theta_s - \theta_r) \quad \dots\dots (1)$$

- θ_o : GWの内側の温度 (°C)
- θ_s : GWの外側の表面温度 (°C)
- θ_r : GWの外側の気温 (°C)
- x : GWの厚さ (m)
- λ : GWの熱伝導率 (W/m・K)
- α : GWの表面熱伝達率 (W/m²・K)
(保温の場合 α=12、保冷の場合 α=8を使います)
- R : GWを含むパネル等の熱抵抗 (m²・K/W)

2. 必要な保温厚さ: x (m) [表面温度 θ_sを設定する場合]

$$x = \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \frac{\theta_o - \theta_s}{\theta_s - \theta_r} \quad \dots\dots (2)$$

3. GWの外側の表面温度: θ_s (°C)

$$\theta_s = \frac{q}{\alpha} + \theta_r \quad \dots\dots (3)$$

4. GWの熱伝導率: λ θ (W/m・K)

$$\lambda \theta = \lambda_o + \beta \bar{\theta} \quad \dots\dots (4)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_o + \theta_s}{2} = \frac{\theta_o + \theta_r}{2} \quad \dots\dots (5)$$

θ_sがわからないときはθ_sの代わりにθ_rを用いて計算し、θ_sを算出後、再確認する。

Q₁: 内部温度100°C、外気温度20°Cのとき、平板をマグボード32K50mmで保温した時の貫流熱量と表面温度は、どのようになるか?

A₁: (4) (5)式より $\theta = \frac{100+20}{2} = 60$

$$\lambda_{60} = 0.032 + 0.000199 \times 60 = 0.044 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$$

貫流熱量q (W/m²)は、(1)式より $q = \frac{100-20}{\frac{1}{12} + \frac{0.05}{0.044}} = 65.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$

表面温度θ_sは、(3)式より $\theta_s = \frac{65.6}{12} + 20 = 25.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$

Q₂: 外気温度θ_r=30°C、相対湿度85%のとき24kg/m³のGWを使って内部温度θ_o=-20°Cの平面を保冷するのに必要な保冷厚さはどれだけか?

A₂: 保冷の場合は保冷材の外表面で結露しない程度以上の保冷厚さが必要である。

30°Cの飽和水蒸気は4.2467kPaとなり(P.106参照)、この値を飽和水蒸気とする温度=露点温度は27.2°C。従って保冷表面の温度が27.2°C以上となる様な保冷厚さが必要である。

(4) (5)式より $\theta = \frac{-20+27.2}{2} = 3.6$

$$\lambda_{3.6} = 0.033 + 0.000216 \times 3.6 = 0.034 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$$

(2)式より $x = \frac{0.034}{8} \times \frac{-20-27.2}{27.2-30} = 0.072 \text{ (m)}$

厚さ72mmは保冷材の表面で結露しないぎりぎりの厚さであるから、安全側をみて厚さ75mm以上を選択すればよい。

Q₃: この場合の貫流熱量(侵入熱量)を求め、表面温度を再確認せよ。

A₃: (1)式より $q = \frac{-20-30}{\frac{1}{8} + \frac{0.075}{0.034}} = 21.5 \text{ (W/m}^2\text{)}$

(3)式より $\theta_s = \frac{-21.5}{8} + 30 = 27.3 \text{ (}^\circ\text{C)}$

表面温度27.3°Cならθ_r=30°C、相対湿度85%では表面結露は起らない。ただし、GWの内部はそれ以下の低温となるので、外部の湿気が侵入すると内部結露を起こすことになる。内部結露を防ぐためには、保冷材の表面に必ずアルミ箔やポリエチレンシートなどの防湿層を設けなければならない。

[パイプの保温・保冷]

パイプの場合は、次の計算式によります。

1. 貫流熱量(熱損失量、侵入熱量) : q (W/m)

$$q = \frac{\pi(\theta_o - \theta_r)}{\frac{1}{\alpha d_1} + \frac{1}{2\lambda} \times \ln \frac{d_1}{d_o}} = \frac{2\pi\lambda(\theta_o - \theta_s)}{\ln \frac{d_1}{d_o}} = \frac{\theta_o - \theta_r}{R} \quad \dots\dots (6)$$

2. 保温保冷の厚さ : x (m)

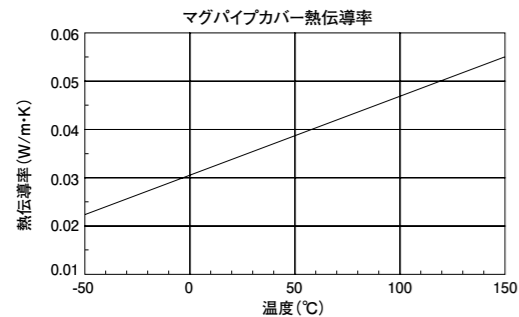
$$d_1 \ln \frac{d_1}{d_o} = \frac{2\lambda}{\alpha} \cdot \frac{(\theta_o - \theta_s)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad \dots\dots (7)$$

$$x = \frac{d_1 - d_o}{2} \quad \dots\dots (8)$$

3. 保温保冷後のPCの表面温度 : θ_s (°C)

$$\theta_s = \frac{q}{\pi\alpha d_1} + \theta_r \quad \dots\dots (9)$$

- π : 円周率=3.14
- d_1 : 保温外径 (m)
- d_o : 配管外径(保温筒内径) (m)
- λ : PCの熱伝導率 (W/m·K)
- $\lambda_{\hat{\theta}} = 0.031 + 0.000166\hat{\theta}$ $\dots\dots (10)$
- \ln : 自然対数 $\ln d = 2.3 \log_{10} d$



Q4 : 内部温度100°C、外気温度20°Cのとき、鋼管をマグPC100A40で保温した時の貫流熱量と表面温度は、どのようになるか?

A4: (4) (5) 式より $\theta = \frac{100+20}{2} = 60$

$$\lambda_{60} = 0.031 + 0.000166 \times 60 = 0.041 \text{ (W/m·K)}$$

貫流熱量 q (W/m) は、(6) 式より

$$q = \frac{3.14 \times (100 - 20)}{\frac{1}{12 \times 0.194} + \frac{1}{2 \times 0.041} \times \ln \frac{0.194}{0.114}} = 36.3 \text{ (W/m)}$$

表面温度 θ_s は、(9) 式より

$$\theta_s = \frac{36.3}{3.14 \times 12 \times 0.194} + 20 = 25.0 \text{ (°C)}$$

Q5: 外気温度 $\theta_r = 30^\circ\text{C}$ 、相対湿度85%のとき、内部温度 $\theta_o = -20^\circ\text{C}$ の冷媒管 1B=25A ($d_o = 0.034\text{m}$) に、PCを被覆して、表面結露を防止するための保冷厚さはどれだけか?

A5: 30°C の飽和水蒸気は 31.824mmHg 。相対湿度85%のときは、 $31.824 \times 0.85 = 27.050\text{mmHg}$ となり、この値を飽和水蒸気圧とする温度=露点温度は 27.2°C 。従って保冷表面の温度が 27.2°C 以上となる様な保冷厚さが必要である。よって $\theta_s = 27.2^\circ\text{C}$ とし、保温材の熱伝導率 λ を求める。

$$\lambda = 0.031 + 0.000166 \times (-20 + 27.2) / 2 = 0.0316 \text{ (W/m·K) とすれば}$$

$$d_1 \ln \frac{d_1}{d_o} = \frac{2\lambda}{\alpha} \cdot \frac{(\theta_o - \theta_s)}{(\theta_s - \theta_r)}$$

$$= \frac{2 \times 0.0316 \times (-20 - 27.2)}{8 \times (27.2 - 30)}$$

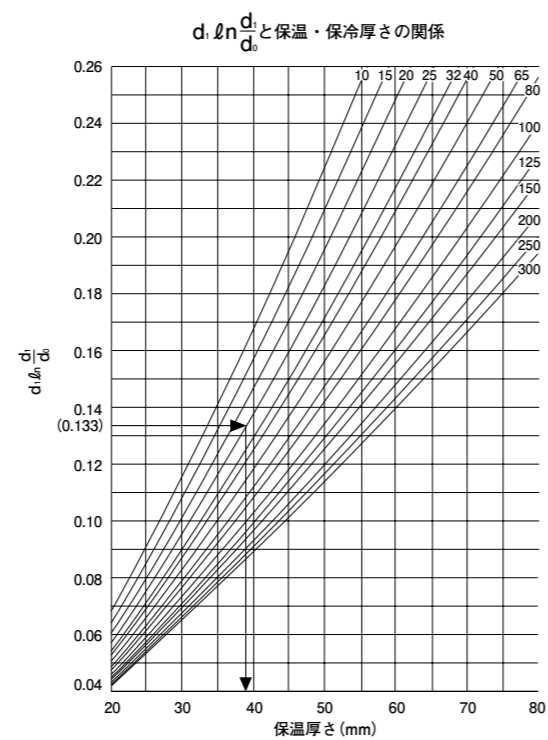
$$= 0.133$$

下記関係図より該当する t を求める。
 $t = 39\text{mm}$ よって 25A40mm 以上を使用する。
 この場合の放散熱量を求めると

$$q = \frac{\pi \times (\theta_o - \theta_r)}{\frac{1}{\alpha d_1} + \frac{1}{2\lambda} \times \ln \frac{d_1}{d_o}}$$

$$= \frac{3.14 \times (-20 - 30)}{\frac{1}{8 \times 0.114} + \frac{1}{2 \times 0.0316} \times \ln \frac{0.114}{0.034}}$$

$$= -7.76 \text{ (W/m)}$$



● 輸送管の温度変化

輸送管入口における温度 θ °C の流体が、距離 L m を流下した後の、出口温度を θ' °C に保温するのに必要な PC の厚さは、次の式によります。

(1) 必要な熱抵抗値

$$R = \frac{-3.6L}{C \cdot W} \times \frac{1}{\ln \frac{\theta' - \theta_r}{\theta - \theta_r}}$$

(2) PCの厚さ

$$\frac{\theta' - \theta_r}{\theta - \theta_r} = e^{-\left(\frac{L}{\alpha W R}\right)}$$

$$d_1 = d_o \times e^{\frac{2\pi\lambda R}{\alpha}}$$

$$x = \frac{d_1 - d_o}{2}$$

- θ : 輸送管入口における温度 (°C)
- θ' : 輸送管出口における温度 (°C)
- L : 輸送管の距離 (m)
- R : 輸送管 1m 当りの熱抵抗値 (m·K/W)
- C : 流体の比熱 (kJ/kg·K)
- W : 流体の流量 (kg/h)

● 静止流体(槽内)の温度変化

槽内に静止している温度 θ °C の流体を h 時間経過後に θ' °C に保温するのに必要な GW の厚さは、次の式によります。

(1) 必要な熱抵抗値

$$R = \frac{-3.6A \cdot h}{C \cdot W} \times \frac{1}{\ln \frac{\theta' - \theta_r}{\theta - \theta_r}}$$

(2) GWの厚さ

$$x = \lambda \left(R - \frac{1}{\alpha} \right)$$

- A : 槽の表面積 (m²)
- h : 経過時間 (h)

● 飽和水蒸気による結露温度の求め方

下記の表を使用して結露温度(露点)が求められます。

〈例〉

外気温度 $\theta_r=30^\circ\text{C}$ 、相対湿度85%の時、結露を起こす温度は？

表から 30°C の時の飽和水蒸気圧は、4.2467(kPa)

相対湿度85%だから

$$4.2467 \times 0.85 = 3.6097 \text{ (kPa)} \leftarrow \text{この条件の時の水蒸気圧}$$

結露を起こす温度は3.6097の値を表の内から読みとれます。

表では、 $27.0^\circ\text{C} \rightarrow 3.5679 \text{ kPa}$ 、 $27.5^\circ\text{C} \rightarrow 3.6740 \text{ kPa}$ ですので、

結露を起こす温度は $27.0 \sim 27.5^\circ\text{C}$ であることがわかります。

結露を起こす温度を計算で求めると、

$$\frac{27.5 - 27.0}{3.6740 - 3.5679} = 4.713 \text{ }^\circ\text{C/kPa}$$

結露を起こす温度

$$= 4.713 \text{ }^\circ\text{C/kPa} \times (3.6097 \text{ kPa} - 3.5679 \text{ kPa}) + 27^\circ\text{C}$$

$$= 27.2^\circ\text{C} \text{ となります。}$$

水の飽和蒸気圧の表

温度(°C)	0.0	0.5	温度(°C)	0.0	0.5
0	0.6113	0.6338	25	3.1698	3.2655
1	0.6571	0.6812	26	3.3637	3.4645
2	0.7060	0.7317	27	3.5679	3.6740
3	0.7581	0.7854	28	3.7829	3.8945
4	0.8136	0.8427	29	4.0090	4.1264
5	0.8726	0.9035	30	4.2467	4.3702
6	0.9354	0.9683	31	4.4967	4.6264
7	1.0021	1.0371	32	4.7593	4.8955
8	1.0730	1.1101	33	5.0351	5.1782
9	1.1483	1.1877	34	5.3247	5.4749
10	1.2282	1.2700	35	5.6287	5.7862
11	1.3130	1.3573	36	5.9475	6.1127
12	1.4029	1.4498	37	6.2819	6.4551
13	1.4981	1.5478	38	6.6324	6.8139
14	1.5990	1.6516	39	6.9997	7.1899
15	1.7058	1.7615	40	7.3845	7.5836
16	1.8188	1.8777	41	7.7874	7.9958
17	1.9383	2.0006	42	8.2091	8.4272
18	2.0647	2.1306	43	8.6503	8.8785
19	2.1982	2.2678	44	9.1119	9.3505
20	2.3393	2.4127	45	9.5944	9.8439
21	2.4882	2.5657	46	10.0989	10.3595
22	2.6453	2.7270	47	10.6259	10.8982
23	2.8110	2.8972	48	11.1764	11.4608
24	2.9857	3.0765	49	11.7513	12.0481

