

JAERI - M
91-061

放射性物質輸送容器熱解析ハンドブック

1991年4月

幾島 毅

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319 11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

JAERI-M 91-061

放射性物質輸送容器熱解析ハンドブック

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

幾島 毅

(1991年3月5日受理)

本報告書は、放射性物質輸送容器の安全解析の一部である熱解析に関して、解析法、伝熱計算式、輻射形態係数、解析条件、計算コードおよび伝熱計算に必要なデータから構成されている。

Handbook for Thermal Analysis of
Radioactive Material Transport Casks

Takeshi IKUSHIMA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 5, 1991)

This paper described thermal analysis method of Radioactive Material transport casks for use of a handbook of safety analysis and evaluation. Formulus of heat transfer and radiation view factor, safety analysis conditions, computer codes and data for heat transfer calculations are also involved in the handbook.

Keywords: Handbook, Thermal Analysis, Heat Transfer, Cask, Package, Packaging, Heat Conduction, Safety Analysis, Safety Evaluation, Shipping Cask, Transport Cask, Radioactive Material

目 次

1. ま え が き	1
2. 熱解析法	2
2.1 一般的な取扱い	2
2.2 有限差分法	5
2.3 有限要素法	8
3. 伝熱計算式	13
3.1 伝熱計算用無次元数	13
3.2 外表面熱伝達率	14
3.3 内表面熱伝達率	14
4. 輻射形態係数	15
4.1 形態係数	15
4.2 面積積分法	15
4.3 Mitalas-Stephenson 法	16
4.4 クロスストリング法	16
4.5 モンテカルロ法	17
4.6 輻射形状係数	20
5. 解析条件	21
6. 計算コード	22
7. 伝熱計算データ	23
7.1 材料の熱的性質 (SI 単位系)	23
7.2 材料の熱的性質 (CGS - cal - °C 単位系)	62
7.3 熱輻射計算データ	100
7.4 形態係数	102
7.5 安全解析に必要なデータ	115
8. あとがき	116
謝 辞	116
参考文献	117

Contents

1. Introduction	1
2. Thermal analysis	2
2.1 General	2
2.2 Finite difference method	5
2.3 Finite element method	8
3. Formulus of heat transfer	13
3.1 Non-dimensional numbers for heat transfer	13
3.2 Heat transfer equations for outer surface	14
3.3 Heat transfer equations for inner surface	14
4. Radiation view factor	15
4.1 View factor	15
4.2 Area integration method	15
4.3 Mitalas-Stephenson method	16
4.4 Cross string method	16
4.5 Monte Carlo method	17
4.6 Radiation view factor	20
5. Safety analysis conditions	21
6. Computer codes	22
7. Data for heat transfer analysis	23
7.1 Data for heat conduction (SI unit)	23
7.2 Data for heat conduction (CGS-cal-°C unit)	62
7.3 Data for thermal radiation analysis	100
7.4 View factor	102
7.5 Data for safety analysis	115
8. Concluding remarks	116
Acknowledgements	116
References	117

1. ま え が き

放射性物質輸送容器の一般の試験条件あるいは特別の試験条件における健全性あるいは安全性の解析評価には、IAEA¹⁾および国内の安全輸送規則に従って、実験あるいは解析、または実験と解析によって実施されている。解析によって輸送容器の健全性あるいは安全性の解析評価を行う場合の標準的な手法やデータを収めたハンドブックの必要性が、輸送容器が規則に適合することを容易に評価できるようにするために、安全解析評価および設計をする人達の間で認識されてきている。

輸送容器のハンドブックは、米国の幾つかの原子力関連研究所において、それぞれ固有のものを所有している。その中でも、よく引用されるものは、オークリッジ国立研究所の設計ガイドがある。これは Shappert ら²⁾によって1970年作成されたものであり、この中には、構造、材料、熱、ガスケット、臨界、遮蔽および製造に関して、解析法、データなど多岐にわたる記載があり、我が国では、現在に至るまで広く利用されている。

しかしながら、この設計ガイドは、1970年初頭に出版されたものであり、その後の20年間に於いて、研究者および設計者の努力によって、解析手法ならびにデータが整備されてきた。また、電子計算機の長足の進歩により、計算コードによる計算が増加してきた。このような背景のもとで、解析手法、データおよび計算コードに関する最近の成果を取り入れた輸送容器の熱解析ハンドブックの作成を行い、熱解析法に関する整理を行うこととした。

この熱解析ハンドブックは熱解析に関して標準的な解析法、伝熱計算式、輻射形態係数、解析条件、計算コードおよび伝熱計算に必要なデータをまとめたもので、輸送容器の安全解析評価および設計を行う人達に標準的な参考資料を提供しようとしたものである。

2. 熱解析法

2.1 一般的な取扱い

2.1.1 熱解析法の現状

現在の輸送容器の熱解析では、流動と熱伝達は個別に取扱っている。すなわち、流体境界面の熱伝達計算では、境界熱伝達係数を用い熱移動量は計算するが、流動については計算しない。これによって、熱解析を簡単化できる。解析条件は安全側に設定するので、現実のものよりも高い温度となり、制限条件に対して十分余裕のある設計となる。最近、熱と流体の連成解析も試みられているが、ここでは、現在の熱解析法について記述する。

熱解析は、ほとんど計算コードを用いて行っている。使用されている計算コードはほとんど有限差分法または有限要素法に基づいている。

2.1.2 熱伝導方程式^{(3)~(5)}

3次元直交座標系における固体の熱伝導方程式は、領域 Ω において次式で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_s \quad (2.1.1)$$

境界条件は境界 Γ 領域において次式で与えられる。

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q_b \quad (2.1.2)$$

初期条件は時刻 $t = t_0$ において次式とする。

$$T = T(x, y, z) \quad (2.1.3)$$

ここで、 x : x 座標

y : y 座標

z : z 座標

T : 温度

t : 時間

q : 熱量

λ_x : x 方向熱伝導率

λ_y : y 方向熱伝導率

λ_z : z 方向熱伝導率

n_x : x 方向のベクトル

n_y : y 方向のベクトル

n_z : z 方向のベクトル

q_g : 発熱量

q_b : 境界の熱流束

である。(2.1.1) ~ (2.1.3) 式を解いて固体内の温度分布を求める。

境界の熱流束は次のように表わすことができる。

(1) 熱流束境界条件

$$q_b = -q_f \quad (2.1.4)$$

ここで, q_f : 境界の熱流束である。

(2) 対流境界条件

$$q_b = h_c (T - T_c) \quad (2.1.5)$$

ここで, h_c : 対流熱伝達率

T_c : 境界まわりの温度

である。

(3) 輻射境界条件

$$q_b = \sigma \mathcal{F} (T^4 - T_r^4) = h_r (T - T_r) \quad (2.1.6)$$

ここで, h_r : 輻射熱伝達率

σ : ステファン・ボルツマン定数

\mathcal{F} : 総括形態係数

T_r : 境界まわりの温度

である。

熱伝導率が等方性であれば, (2.1.1) および (2.1.2) 式はそれぞれ次のようになる。

$$\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$$

$$\left. \begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_g \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \nabla^2 T + q_g \end{aligned} \right\} \quad (2.1.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) &= q_b \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= q_b \end{aligned} \right\} \quad (2.1.8)$$

(2.1.8) 式へ (2.1.4) ~ (2.1.6) 式を代入して整理すると次式となる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q_f$$

または,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q_f + h_c (T - T_c) + \sigma \mathcal{F} (T^4 - T_c^4) \quad (2.1.9)$$

である。 $T_c = T_r = T_a$ ならば, (2.1.9) 式は次式となる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_a (T - T_a) \quad (2.1.10)$$

ここで,

$$h_a = h_f + h_c (T - T_c)^m + \sigma \mathcal{F} \{ (T + T_r) (T^2 + T_r^2) \} \quad (2.1.11)$$

ここで h_a : 境界面の熱伝達率

である。境界面コンダクタンス h_o を仮定すると (2.1.10) 式は次式となる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_s (T - T_a) \quad (2.1.12)$$

ここで

$$h_s = h_o + h_v (T - T_c)^m + \sigma \mathcal{F} \{ (T + T_r) (T^2 + T_r^2) \} \quad (2.1.13)$$

$$h_o = - \frac{q_f}{T - T_a}$$

である。

2.2 有限差分法

2.2.1 基本式

熱伝導の基本式は次式のようにまとめることができる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + q_g \quad (2.2.1)$$

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h_a (T - T_a) \quad (2.2.2)$$

$$T = T(x, y, z) ; t = t. \quad (2.2.3)$$

2.2.2 差分式

第2.2.1図に示す3次元六面体を考える。ノードOには周辺の6ノード1から6から熱が流入する。ノードOの立方体は図に示すように体積は V_o である。(2.2.1)式を差分式で

$$\rho_o c_o V_o \frac{\Delta T_o^{n+1}}{\Delta t} = \sum_m U_{mo} (T_m - T_o) + \sum_b U_{bo} (T_b - T_o) + q_g V_o \quad (2.2.4)$$

$$\Delta T_o^{n+1} = T_o^{n+1} - T_o^n \quad (2.2.5)$$

ここで、 V_o : ノードO点の体積

U_{mo} : 周辺ノードとノードO点間の熱コンダクタンス

U_{bo} : 境界ノードとノードO点間の熱コンダクタンス

T_o^{n+1} : ステップにおけるO点の温度

T_o^n : $n+1$ ステップにおけるO点の温度

T_m : 周辺ノードの温度

T_b : 境界温度

であり、熱コンダクタンスは U_m および U_b はそれぞれ次式となる。

$$U_{mo} = \frac{A_{mo}}{\frac{\ell_m}{\lambda_m} + \frac{\ell_o}{\lambda_o} + \frac{1}{h_{mo}}} \quad (2.2.6)$$

$$U_{bo} = h_{bo} + h_{co} (T_o - T_o)^m + \sigma \mathcal{F}_b (T_s + T_o) (T_s^2 + T_o^2) \quad (2.2.7)$$

ここで、 A_{mo} : ノードm点とO点間の熱の流れに直角な断面積

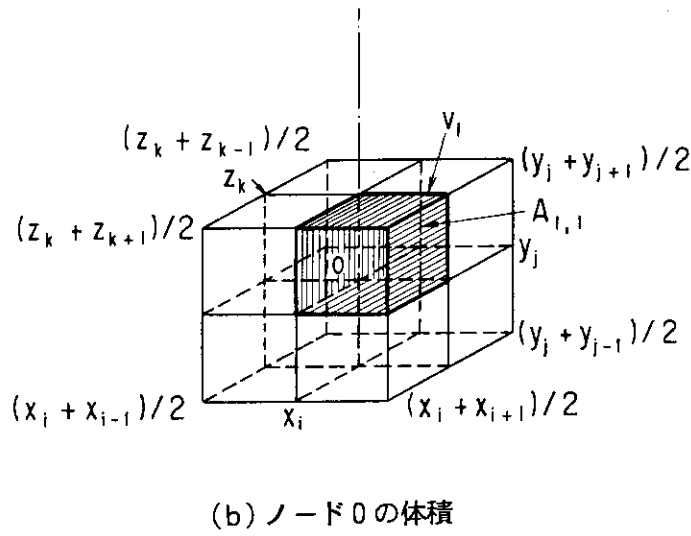
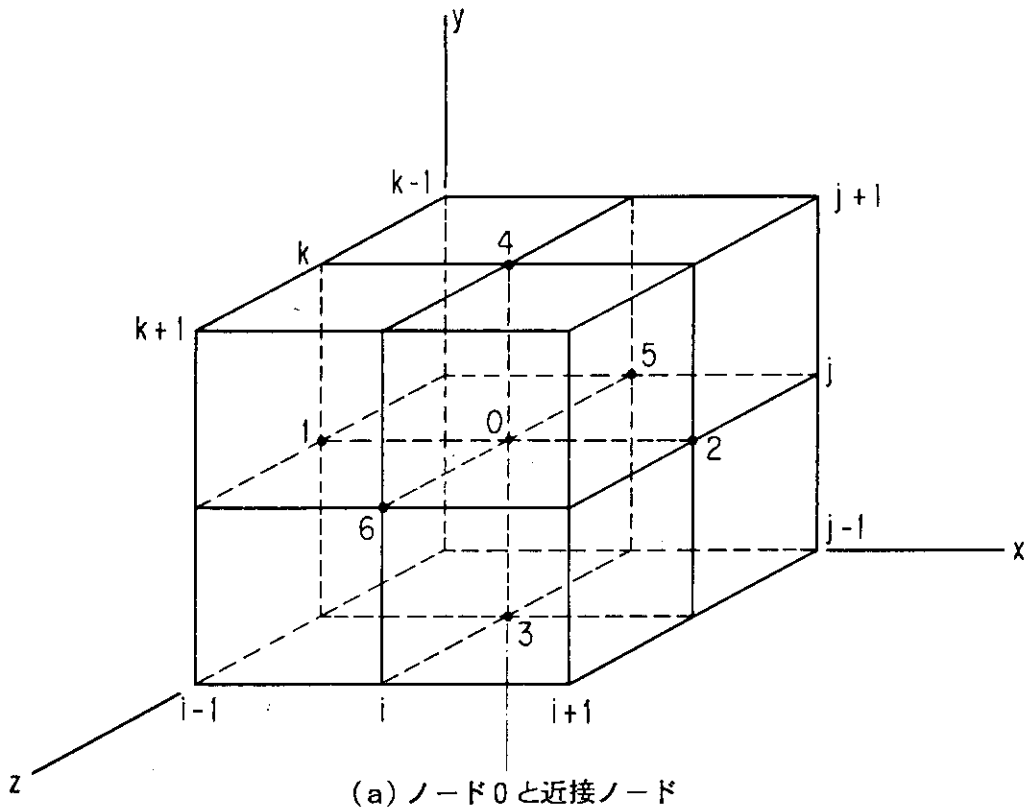
h_{mo} : ノードm点とO点が接触している場合の接触熱コンダクタンス

第2.2.1図の体系におけるノードOの体積、熱通過断面積、熱コンダクタンスおよび熱通過距離は次式となる。

$$\left. \begin{aligned}
 V_o &= \frac{1}{8} (x_{i+1} - x_i) (y_{j+1} - y_j) (z_{k+1} - z_k) \\
 A_{10} &= \frac{1}{4} (y_{j+1} - y_j) (z_{k+1} - z_k) \\
 U_{10} &= \frac{A_{10}}{\frac{L_1}{\lambda_o}} \\
 L_1 &= x_i - x_{i-1}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.2.8)$$

(2.2.4) 式を 2.3.3 で述べる時間積分法によって解きある時間の温度を求める。定常解析では (2.2.4) 式は次式となる。

$$\sum_m U_{m0} (T_m - T_o) + \sum_b U_{b0} (T_b - T_o) = -q_s V_o \quad (2.2.9)$$



第 2.2.1 図 3次元体系とノード

2.3 有限要素法

2.3.1 基本式

熱伝導の基本式は次式のようにまとめることができる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + q_g \quad (2.3.1)$$

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h_a (T - T_a) \quad (2.3.2)$$

$$T = T(x, y, z) ; t = t_0 \quad (2.3.3)$$

2.3.2 離散化

(2.3.1) 式を積分すると次式となる。

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz &= \iiint_{\Omega} W \left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad dx dy dz + \iiint_{\Omega} W q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

ここで、 W : 重み関数

である。(2.3.4) 式右辺第1項を部分とすると次式となる。

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz &= - \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad dx dy dz + \iint_{\Gamma} W \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \\ &\quad + \iiint_{\Omega} W q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

(2.3.2) および (2.1.10) 式を (2.3.5) 式へ代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz &= - \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad dx dy dz - \iint_{\Gamma_f} W q_f d\Gamma_f + \iint_{\Gamma_a} W h_a T d\Gamma_a \\ &\quad - \iint_{\Gamma_a} W h_a T_a d\Gamma_a + \iiint_{\Omega} W q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

ここで、 Γ_f : 熱流束境界面

Γ_a : 対流・輻射境界面

である。

ガラーキンの方法により (2.3.6) 式の近似解を求める。

温度 T の形状関数は次式で与える。

$$T = \sum_{i=1}^n N_i T_i = NT \quad (2.3.7)$$

重み関数は次式となる。

$$W = N_i \quad (2.3.8)$$

(2.3.7) および (2.3.8) 式を (2.3.6) 式へ代入して一つの要素に対して次式を得る。

$$\begin{aligned} & \left[\iiint_{\Omega} N_i \rho c N_i dx dy dz \right] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \left[- \iiint_{\Omega} \nabla^T N_i \lambda \nabla N_i dx dy dz \right] \{T\} \\ & - \iint_{\Gamma_f} N_i q_f d\Gamma_f + \iint_{\Gamma_a} N_i h_a T_c d\Gamma_a - \left[\iint_{\Gamma_a} N_i h_a N_i d\Gamma_a \right] \{T\} \\ & + \iiint_{\Omega} N_i q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

または

$$[C] \{\dot{T}\} + [H] \{T\} = \{F\} \quad (2.3.10)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} [C_{ij}] &= \iiint_{\Omega} N_i \rho c N_j dx dy dz \\ [H_{ij}] &= \iiint_{\Omega} \nabla^T N_i \lambda \nabla N_j dx dy dz + \iint_{\Gamma_a} N_i h_a N_j d\Gamma_a \\ [F_i] &= \iiint_{\Omega} N_i q_g dx dy dz - \iint_{\Gamma_f} N_i q_f d\Gamma_f + \iint_{\Gamma_a} N_i h_a T_c d\Gamma_a \end{aligned} \right\} \quad (2.3.11)$$

である。系全体に対しては次式となる。

$$\left. \begin{aligned} [C] &= \sum_e [C^e] \\ [H] &= \sum_e [H^e] \\ \{F\} &= \sum_e \{F^e\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.12)$$

形状関数は第 2.3.1 図に示すように六面立方体 8 節点要素に対して 2 次要素で近似すると次式となる。

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i) \quad (2.3.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで, } -1 \leq \xi \leq 1 \\ -1 \leq \eta \leq 1 \\ -1 \leq \zeta \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.14)$$

である。積分点の値と節点の値の関係は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x(\xi, \eta, \zeta) &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) x_i^e \\ y(\xi, \eta, \zeta) &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) y_i^e \\ z(\xi, \eta, \zeta) &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) z_i^e \end{aligned} \right\} \quad (2.3.15)$$

$$T(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) T_i^e \quad (2.3.16)$$

積分は次式となる。

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{-1-1-1}^{1-1-1} f[x(\xi, \eta, \zeta), y(\xi, \eta, \zeta), z(\xi, \eta, \zeta)] J d\xi d\eta d\zeta \quad (2.3.17)$$

ここで、J: ヤコビアン

であり次式となる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (2.3.18)$$

(2.3.11) 式はガウス積分によって求めることができる。

2次の8点積分の一般式は次式となる。

$$\iiint_{-1-1-1}^{1-1-1} g(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta = \sum_{e=1}^8 g(\xi_e, \eta_e, \zeta_e) W_e \quad (2.3.19)$$

ここで、 ξ_e, η_e, ζ_e および W_e は第2.3.1表ようになる。

第2.3.1表 $\xi_\ell, \eta_\ell, \zeta_\ell, W_\ell$ の表

ℓ	ξ_ℓ	η_ℓ	ζ_ℓ	W_ℓ
1	$-1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	1
2	$-1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1
3	$1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1
4	$1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	1
5	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	1
6	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1
7	$-1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1
8	$-1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$-1/\sqrt{3}$	1

2.3.3 時間積分法

(2.3.10) 式は差分法によって時間積分できる。

$$[C] \{\dot{T}\} + [H] \{T\} = \{F\}$$

$$[C_{n+a}] \{\dot{T}_{n+a}\} + [H_{n+a}] \{T_{n+a}\} = \{F_{n+a}\} \quad (2.3.20)$$

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + \Delta t \{\dot{T}_{n+a}\} \quad (2.3.21)$$

$$\{T_0\} = T \quad (2.3.22)$$

ここで,

$$[C_{n+a}] = [C(T_{n+a}, t_{n+a})] \quad (2.3.23)$$

$$[H_{n+a}] = [H(T_{n+a}, t_{n+a})] \quad (2.3.24)$$

$$\{T_{n+a}\} = (1-a) \{T_n\} + a \{T_{n+1}\} \quad (2.3.25)$$

$$\{F_{n+a}\} = (1-a) \{T_n\} + a \{T_{n+1}\} \quad (2.3.26)$$

$$\{\dot{T}_{n+a}\} = (1-a) \{\dot{T}_n\} + a \{\dot{T}_{n+1}\} \quad (2.3.27)$$

$$t_{n+a} = (n+a) \Delta t \quad (2.3.28)$$

(2.3.21) および (2.3.25) 式を書き直して, それぞれ次式を得る。

$$\{\dot{T}_{n+\alpha}\} = \frac{1}{\Delta t} \{ \{T_{n+1}\} - \{T_n\} \} \quad (2.3.29)$$

$$\{T_{n+\alpha}\} = \{T_n\} + \alpha \{ \{T_{n+1}\} - \{T_n\} \} \quad (2.3.30)$$

(2.3.29) および (2.3.30) 式を (2.3.20) 式へ代入して次式を得る。

$$\left[\frac{[C_{n+\alpha}]}{\Delta t} + \alpha [H_{n+\alpha}] \right] \{ \{T_{n+1}\} - \{T_n\} \} = \{ \{F_{n+\alpha}\} - [H_{n+\alpha}] \{T_n\} \} \quad (2.3.31)$$

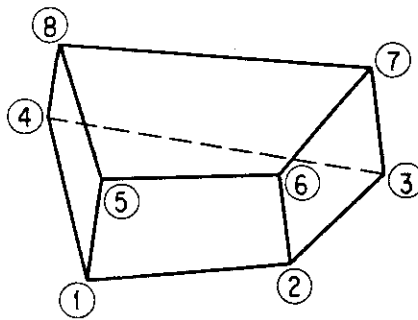
上式を各時刻ごとに数値積分して温度を得る。 α はその値によって第 2.3.2 表のように呼ばれている。

第 2.3.2 表 α の値と解法

α	解 法
0	前進差分法, 前進オイラー法
1/2	中央差分法, クランク・ニコルソン法
2/3	ガラーキン法
1	後退差分法, 後退オイラー法

また $\alpha = 0$ は陽解法である。定常解析では (2.3.10) 式は次式となる。

$$[H] \{T\} = \{F\} \quad (2.3.32)$$



第 2.3.1 図 六面体 8 節点要素

3. 伝熱計算式^{(3)~(5)}

3.1 伝熱計算用無次元数

この節では伝熱計算に必要な無次元数を以下に示す。

(1) ヌッセルト数

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (3.1.1)$$

(2) プラントル数

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.1.2)$$

(3) レイリー数

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T D^3}{a \nu} \quad (3.1.3)$$

(4) グラフホフ数

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu^2} \quad (3.1.4)$$

(5) レイリー数, グラフホフ数, プラントル数の関係

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.1.5)$$

ここで, a : 温度伝導率

D : 流体層厚さ

g : 重力加速度

h : 熱伝達係数

λ : 流体の熱伝導率

L : 垂直接流体層高さ

ΔT : 平行二平面間温度差

β : 流体の体膨張係数

ν : 動粘度

である。

3.2 外表面熱伝達率

この節では、輸送容器外表面の熱通過計算に必要な熱伝達率の計算を示す。

(1) 垂直平板の自然対流熱伝達率

$$\left. \begin{aligned} N_u &= 0.555 R_a^{1/4} \quad (10^4 < R_a < 10^8) \\ N_u &= 0.129 R_a^{1/3} \quad (10^8 < R_a < 10^{12}) \end{aligned} \right\} \quad (3.2.1)$$

(2) 上向き熱面の自然対流熱伝達率

$$\left. \begin{aligned} N_u &= 0.54 R_a^{1/4} \quad (10^5 < R_a < 2 \times 10^7) \\ N_u &= 0.14 R_a^{1/3} \quad (2 \times 10^7 < R_a < 3 \times 10^{10}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.2)$$

(3) 上向き冷面の自然対流熱伝達率

$$N_u = 0.27 R_a^{1/4} \quad (3 \times 10^5 < R_a < 3 \times 10^{10}) \quad (3.2.3)$$

(4) 下向き熱面の自然対流熱伝達率

$$N_u = 0.27 R_a^{1/4} \quad (3 \times 10^5 < R_a < 3 \times 10^{10}) \quad (3.2.4)$$

(5) 下向き冷面の自然対流熱伝達率

$$\left. \begin{aligned} N_u &= 0.54 R_a^{1/4} \quad (10^5 < R_a < 2 \times 10^7) \\ N_u &= 0.14 R_a^{1/3} \quad (2 \times 10^7 < R_a < 3 \times 10^{10}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.5)$$

3.3 内表面熱伝達率

この節では、輸送容器内表面の熱通過計算に必要な熱伝達の計算式を示す。

密閉垂直平板間の自然対流熱伝達率

垂直層の熱伝達に対しては、Emery-Chu^⑧が次式を与えている。

$$N_u = 1 \quad (R_a < 10^3) \quad (3.3.1)$$

$$N_u = 0.28 R_a^{1/4} (L/D)^{-1/4} \quad (10^3 < R_a < 10^7) \quad (3.3.2)$$

Nagendra-Tirunarayanan^⑨は次式を与えている。

$$N_u = 0.34 R_a^{1/4} (L/D)^{-1/4} \quad (3.3.3)$$

R_a が高い領域の熱伝達は、 L/D に関係なく、次式^⑩であらわされる。

$$N_u = 0.0516 R_a^{1/3} \quad (10^6 < R_a) \quad (3.3.4)$$

4. 輻射形態係数

4.1 形態係数^{(6), (7)}

輻射熱伝達の計算には、物体間の形態係数を求める必要がある。形態係数は、輻射体から放射された全輻射線のうち被輻射体に到達する比率である。第 4.1.1 図に示すような体系において、表面 I から表面 J へ到達する熱輻射エネルギーの割合、すなわち形態係数 F_{IJ} は、表面の放射と反射は一樣、黒体、等温、表面間は真空とすると次式で表わされる。

$$F_{IJ} = \frac{1}{A_I} \int_{A_I} \int_{A_J} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j dA_i dA_j}{\pi r_{ij}^2} \quad (4.1.1)$$

ここで、 β : 表面の法線となす角度

r : 表面間距離

A : 表面積

である。

単純な形状の表面間の形態係数については厳密解が求められている。一般に、形態係数を求める方法には、面積積分法、Mitalas-Stephenson 法⁽⁸⁾、Hottel のクロスストリング法⁽⁹⁾およびモンテカルロ法がある。

4.2 面積積分法⁽¹⁰⁾

表面積 A_I および A_J のいずれも n 個に分割すると、(4.1.1) 式は次のように二重面積積分となる。

$$F_{IJ} = \frac{1}{A_I} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j \Delta A_i \Delta A_j}{\pi r_{ij}^2} \quad (4.2.1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} A_I &= \sum_{i=1}^n \Delta A_i \\ A_J &= \sum_{j=1}^n \Delta A_j \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2)$$

である。

(4.1.1) 式の面積積分は Stokes の法則を用いて線積分に変換することができ、次式となる。

$$F_{IJ} = \frac{1}{2\pi A_I} \oint_{C_I} \oint_{C_J} (\ell_n r dx_I dx_J + \ell_n r dy_I dy_J + \ell_n r dz_J) \quad (4.2.3)$$

ここで、等高線 C_I および C_J が n 個の直線 \hat{v}_i および \hat{v}_j に分割できるならば (4.2.3) 式は次式となる。

$$F_{IJ} = \frac{1}{2\pi A_I} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \ell_n r_{ij} \hat{v}_i \cdot \hat{v}_j \quad (4.2.4)$$

ここで、

$$\left. \begin{array}{l} \hat{v}_i : i = 1, 2, \dots, n \\ \hat{v}_j : j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (4.2.5)$$

である。

4.3 Mitalas-Stephenson 法

Mitalas-Stephenson 法は、第 4.3.1 図に示すように表面 I と表面 J は四辺形とすると (4.1.1) 式は次式となる。

$$F_{IJ} = \frac{1}{2\pi A_I} \sum_{p=1}^4 \sum_{q=1}^4 \phi(p, q) \oint_{C_p} \{ (T \cos \phi \ell_n T + S \cos \theta \ell_n S + U_\omega - R) dv \}_{p, q} \quad (4.3.1)$$

ここで、 S, T, U, ϕ および ω は第 4.3.1 図に示すものであり v の関数である。また ϕ は次式で表わされる。

$$\phi(p, q) = \ell_p \ell_q + m_p m_q + n_p n_q \quad (4.3.2)$$

4 つの線で囲まれた分割 C_p を n 個の線分 \hat{v}_j に分割すると (4.3.1) 式は次式で近似できる。

$$F_{IJ} = \frac{1}{2\pi A_I} \sum_{p=1}^4 \sum_{q=1}^4 \phi(p, q) \sum_{j=1}^n \{ (T \cos \phi \ell_n T + S \cos \theta \ell_n S + U_\omega - R) | \hat{v}_j | \}_{p, q} \quad (4.3.3)$$

ここで、

$$\hat{v}_j : j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3.4)$$

4.4 クロストリング法

2次元平面形状における形態係数は Hottel のクロストリング法によって求めることができる。第 4.4.1 図の 2 つの表面 L_1 および L_2 の形態係数は次式で表わされる。

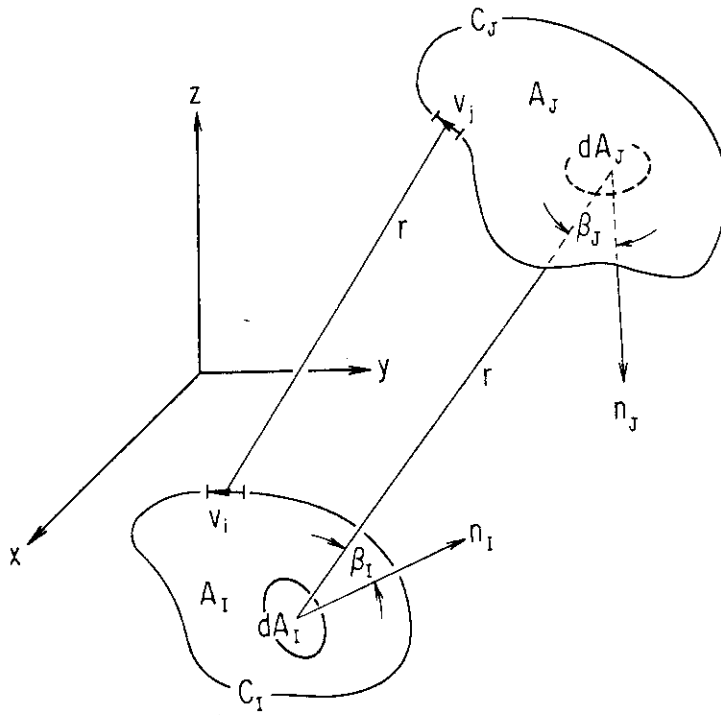
$$F_{12} = \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2L_1} \quad (4.4.1)$$

ここで、 $L_1 \sim L_6$ はそれぞれ線分の長さである。

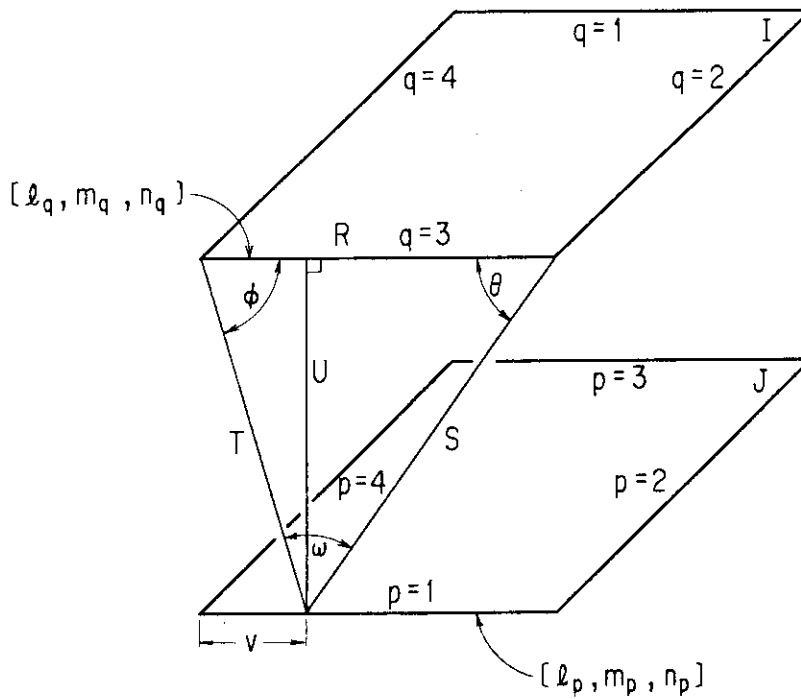
4.5 モンテカルロ法^{①②③}

モンテカルロ法による形態係数を求める方法について第4.5.1図に従って説明する。物体Iの表面から放射された粒子が他の物体および体系の境界の表面に到着する。物体Iの表面から n_I 個の粒子が放出され、物体Jの表面で n_J 個吸収されたとすると、形態係数 F_{IJ} は次式で表わされる。

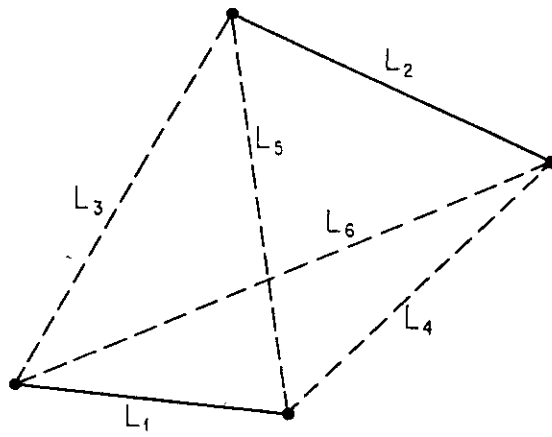
$$F_{IJ} = \frac{n_J}{n_I} \quad (4.5.1)$$



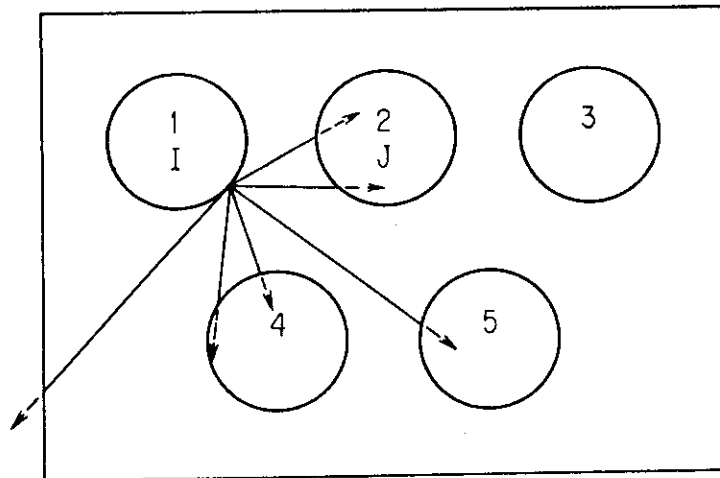
第 4.1.1 図 形態係数の計算



第 4.3.1 図 Mitsos-Stephenson 法



第4.4.1図 クローストリング法



第4.5.1図 モンテカルロ法

4.6 輻射形状係数

輻射伝熱計算に用いる輻射形状係数は次式によって求めることができる。

$$\mathcal{G}_{12} = \frac{F_{12}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.6.1)$$

ここで、 \mathcal{G}_{12} : 面1から面2への形状係数

F_{12} : 面1から面2への形態係数

ε_1 : 面1の輻射率

ε_2 : 面2の輻射率

である。

5. 解析条件

通常の輸送における環境条件および火災による条件は IAEA および国内の安全輸送規則に規定されている。これをまとめて、第 5.1 および 5.2 表に示す。

第 5.1 表 熱解析条件

項目	条件	特別の試験条件					
	一般の試験条件	火災前	火災時	火災後	火災後		
環境条件	太陽熱入射	第 5.2 表					
	周囲温度	静止空気 38℃	静止空気 -40℃	静止空気 38℃	静止空気 800℃	静止空気 38℃	静止空気 -40℃
	太陽熱輻射	あり	なし	あり	なし	あり	なし
	周囲輻射率	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
容器表面輻射率	(e)	(d)	(a)	(b) 0.8	(c)	(d)	

- (a) 火災にさらされない輸送容器の表面輻射率
 (b) 火災にさらされている輸送容器の表面輻射率
 (c) 火災にさらされた後の輸送容器の表面輻射率
 (d) 輸送容器の表面輻射率
 (e) 輸送容器の表面輻射率

第 5.2 表 太陽輻射入熱データ

表面の形状および位置	1日あたり12時間の輻射入熱 (W/m ²)
水平に輸送される平面	
- 底面	なし
- その他の表面	800
水平に輸送されない平面	200 (a)
曲面	400 (a)

- (a) この数値の代わりに、吸収係数を採用し、付近の物体からの反射効果は無視して、三角関数を用いることができる。

6. 計算コード

輸送容器の熱解析に使用されている計算コード^{(4)~(8)}の概要は第6.1表に示す。形態係数解析用計算コードは第6.2表に示す。

第6.1表 輸送容器熱解析用計算コード

計算コード	空間離散化	主 要 な 特 徴
ABAQUS	有限要素法	<ul style="list-style-type: none"> ◦ギャップ熱伝達計算が優れている。 ◦熱応力計算容易 ◦温度-応力連成解析
ADINA	有限要素法	◦熱応力計算容易
ANSYS	有限要素法	◦熱応力計算容易
COBRA-SFS	有限差分法	<ul style="list-style-type: none"> ◦熱流体結合解析 ◦貯蔵容器の熱解析
HEATING-5 HEATING-6	有限差分法	<ul style="list-style-type: none"> ◦計算体系の入力が簡単 ◦放熱フィン体系の取扱容易
MARC	有限要素法	◦熱応力計算容易
NASTRAN	有限要素法	◦熱応力計算容易
PHOENICS	有限差分法	◦熱流体結合解析
TOPAZ2D TOPAZ3D	有限要素法	◦ギャップ熱伝達計算が優れている。
TRUMP	有限差分法	◦計算体系の組立が自由

第6.2表 形態係数解析用計算コード

計算コード	計 算 法	主 要 な 特 徴
FACET	面積積分法 線積分 M-S法	問題に応じて計算法を選択
MCVIEW	モンテカルロ法	任意形状
COVUFAC	面積積分法	一般用
VIEWPIN	面積積分法	燃料ピン

(注) M-S法 : Mitalas-Stephenson 法

7. 伝熱計算データ^{(31)~(42)}

代表的な輸送容器構成材料について、伝熱計算に使用するデータをSI単位系およびCGS-cal-°C単位系のそれぞれに分けて以下に示す。なお、比熱は定圧比熱を示している。

7.1 材料の熱的性質 (SI 単位系)

(1) ステンレス鋼 (SUS304)	
ステンレス鋼の熱的性質	第7.1.1表
ステンレス鋼の比熱	第7.1.1(a)図
ステンレス鋼の熱伝導率	第7.1.1(b)図
(2) 構造用炭素鋼	
構造用炭素鋼の熱的性質	第7.1.2表
構造用炭素鋼の比熱	第7.1.2(a)図
構造用炭素鋼の熱伝導率	第7.1.2(b)図
(3) 軟鋼	
軟鋼の熱的性質	第7.1.3表
軟鋼の比熱	第7.1.3(a)図
軟鋼の熱伝導率	第7.1.3(b)図
(4) 球状黒鉛鑄鉄	
球状黒鉛鑄鉄の熱的性質	第7.1.4表
球状黒鉛鑄鉄の比熱	第7.1.4(a)図
球状黒鉛鑄鉄の熱伝導率	第7.1.4(b)図
(5) 鉛	
鉛の熱的性質	第7.1.5表
鉛の比熱	第7.1.5(a)図
鉛の熱伝導率	第7.1.5(b)図
(6) 銅	
銅の熱的性質	第7.1.6表
銅の比熱	第7.1.6(a)図
銅の熱伝導率	第7.1.6(b)図
(7) アルミニウム	
アルミニウムの熱的性質	第7.1.7表
アルミニウムの比熱	第7.1.7(a)図
アルミニウムの熱伝導率	第7.1.7(b)図

- (8) ジルカロイ-2, -4
 ジルカロイ-2, -4の熱的性質 第7.1.8表
 ジルカロイ-2, -4の比熱 第7.1.8(a)図
 ジルカロイ-2, -4の熱伝導率 第7.1.8(b)図
- (9) 二酸化ウラン
 二酸化ウランの熱的性質 第7.1.9表
 二酸化ウランの比熱 第7.1.9(a)図
 二酸化ウランの熱伝導率 第7.1.9(b)図
- (10) シリコンゴム
 シリコンゴムの熱的性質 第7.1.10表
 シリコンゴムの比熱 第7.1.10(a)図
 シリコンゴムの熱伝導率 第7.1.10(b)図
- (11) ファプライウッド
 ファプライウッドの熱的性質 第7.1.11表
 ファプライウッドの比熱 第7.1.11(a)図
 ファプライウッドの熱伝導率 第7.1.11(b)図
- (12) バルサウッド
 バルサウッドの熱的性質 第7.1.12表
 バルサウッドの比熱 第7.1.12(a)図
 バルサウッドの熱伝導率 第7.1.12(b)図
- (13) 硬質ポリウレタンホーム
 硬質ポリウレタンホームの熱的性質 第7.1.13表
 硬質ポリウレタンホームの比熱 第7.1.13(a)図
 硬質ポリウレタンホームの熱伝導率 第7.1.13(b)図
- (14) 空気
 空気の熱的性質 第7.1.14表
 空気の比熱 第7.1.14(a)図
 空気の熱伝導率 第7.1.14(b)図
- (15) 水
 水の熱的性質 第7.1.15表
 水の比熱 第7.1.15(a)図
 水の熱伝導率 第7.1.15(b)図
- (16) ヘリウム
 ヘリウムの熱的性質 第7.1.16表
 ヘリウムの比熱 第7.1.16(a)図
 ヘリウムの熱伝導率 第7.1.16(b)図
- (17) 六フッ化ウラン
 六フッ化ウランの熱的性質 第7.1.17表

六フッ化ウランの蒸気圧	第 7.1.17 (a) 図
液体六フッ化ウランの密度	第 7.1.17 (b) 図
気体六フッ化ウランの密度	第 7.1.17 (c) 図

第7.1.1表 ステンレス鋼 (SUS 304) の熱的性質

密度	7880	(kg/m ³)
遷移温度	1673	(K)
潜熱	272	(kJ/kg·K)

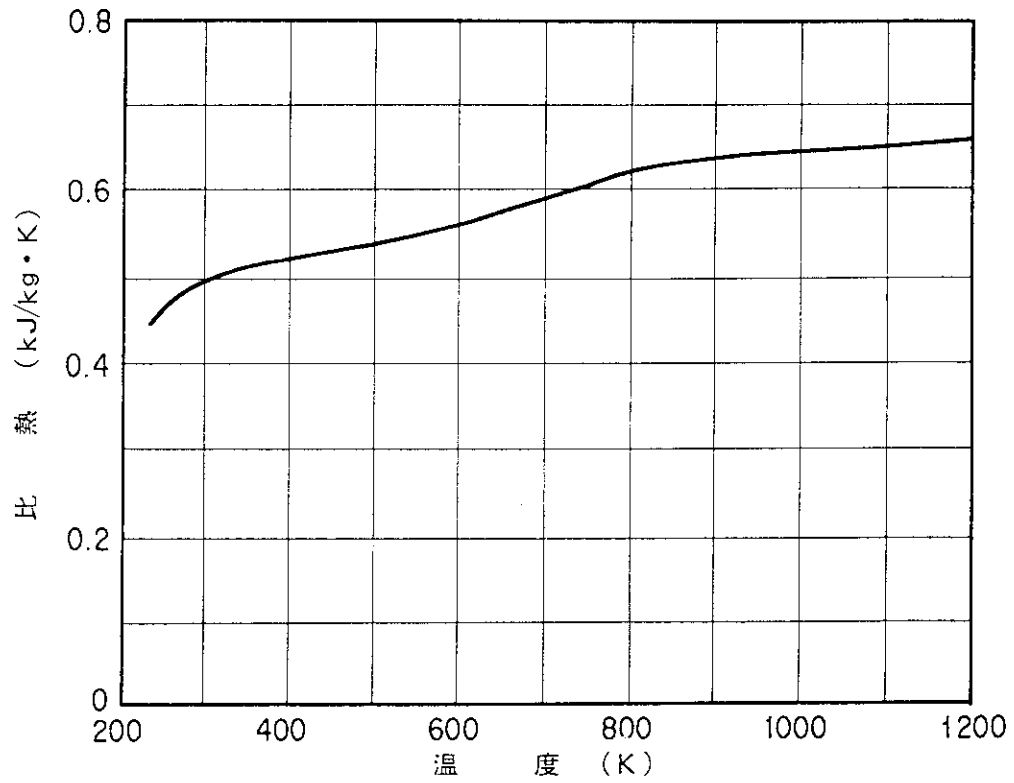
比 熱

温度 (K)	比 熱 (kJ/kg·K)
233	0.440
300	0.499
400	0.511
600	0.556
800	0.620
1000	0.644
1166	0.633

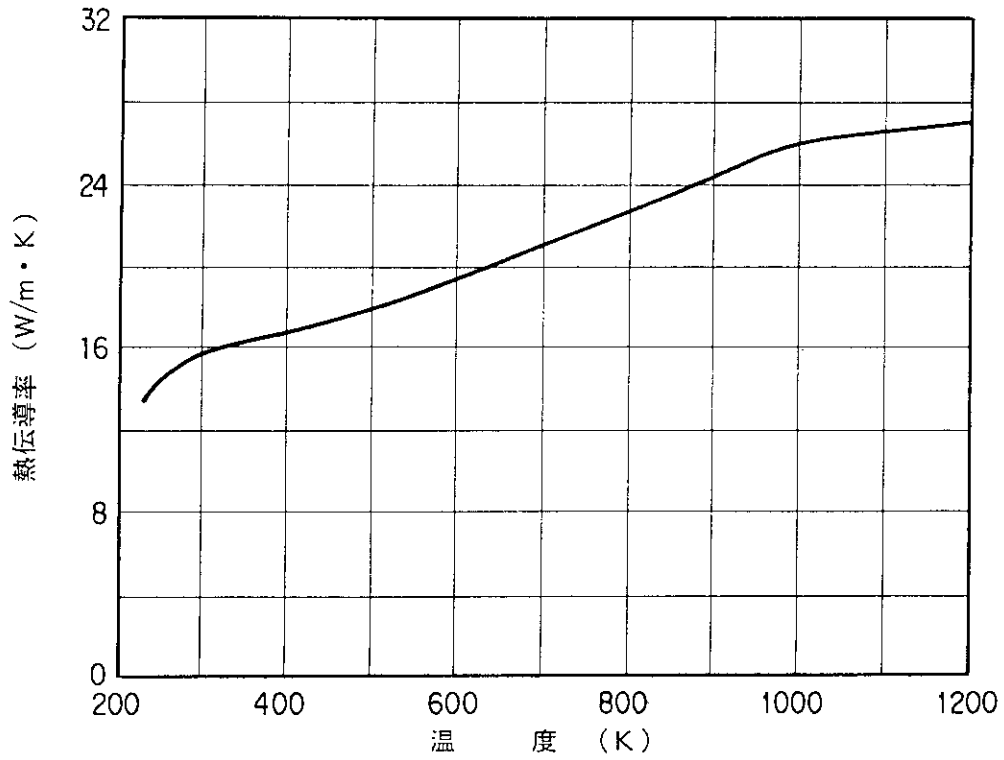
熱 伝 導 率

温度 (K)	熱伝導率 (W/m·K)
233	13.4
300	16.0
400	16.5
600	19.0
800	22.5
1000	25.9
1166	27.0

SI 単位系



第 7. 1. 1(a)図 ステンレス鋼 (SUS 304) の比熱



第 7. 1. 1(b)図 ステンレス鋼 (SUS 304) の熱伝導率

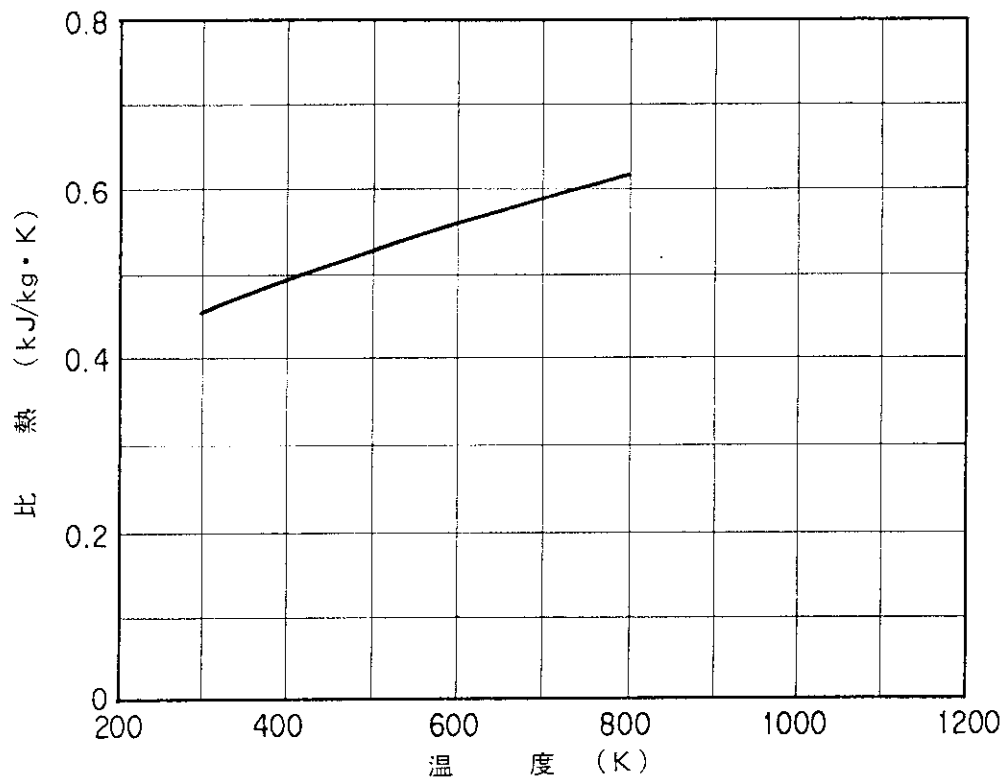
第 7.1.2 表 構造用炭素鋼の熱的性質

密 度	7850	(kg/m ³)
遷移温度	1809	(K)
潜 熱	272	(kJ/kg·K)

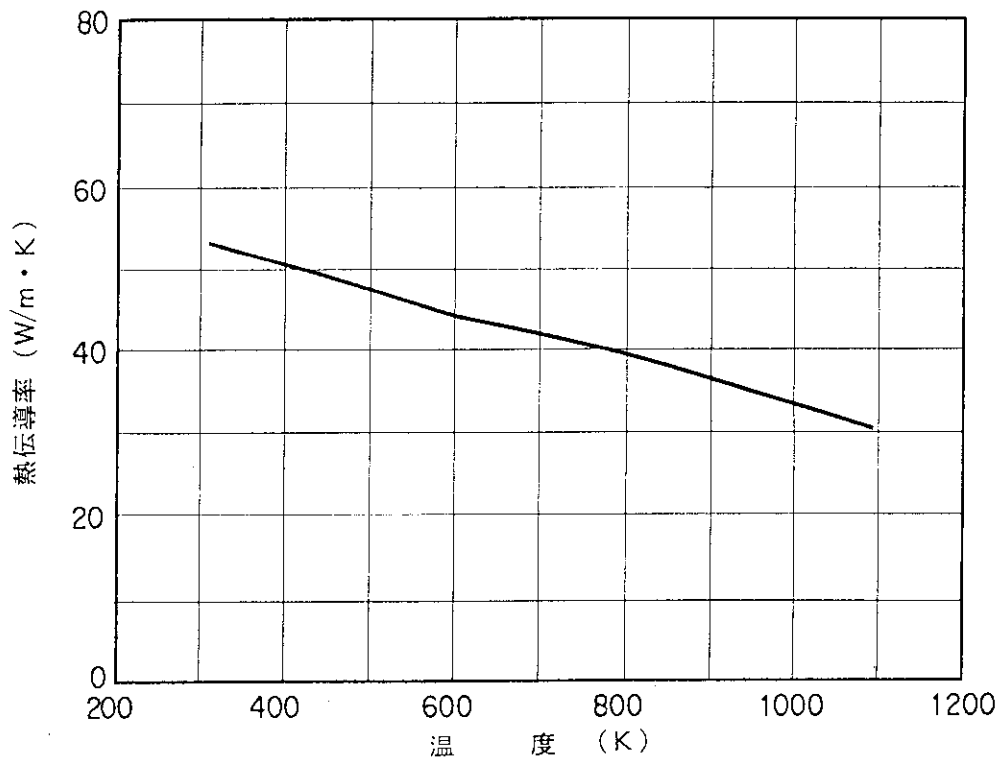
比 熱	
温 度 (K)	比 熱 (kJ/kg·K)
300	0.465
500	0.528
800	0.622

熱 伝 導 率	
温 度 (K)	熱伝導率 (W/m·K)
311	53.6
422	50.2
589	45.2
755	40.6
922	35.5
1089	30.6

SI 単位系



第 7. 1. 2(a) 図 構造用炭素鋼の比熱



第 7. 1. 2(b) 図 構造用炭素鋼の熱伝導率

第7.1.3表 軟鋼の熱的性質

密度	7860	(kg/m ³)
遷移温度	1723	(K)
潜熱	272	(kJ/kg·K)

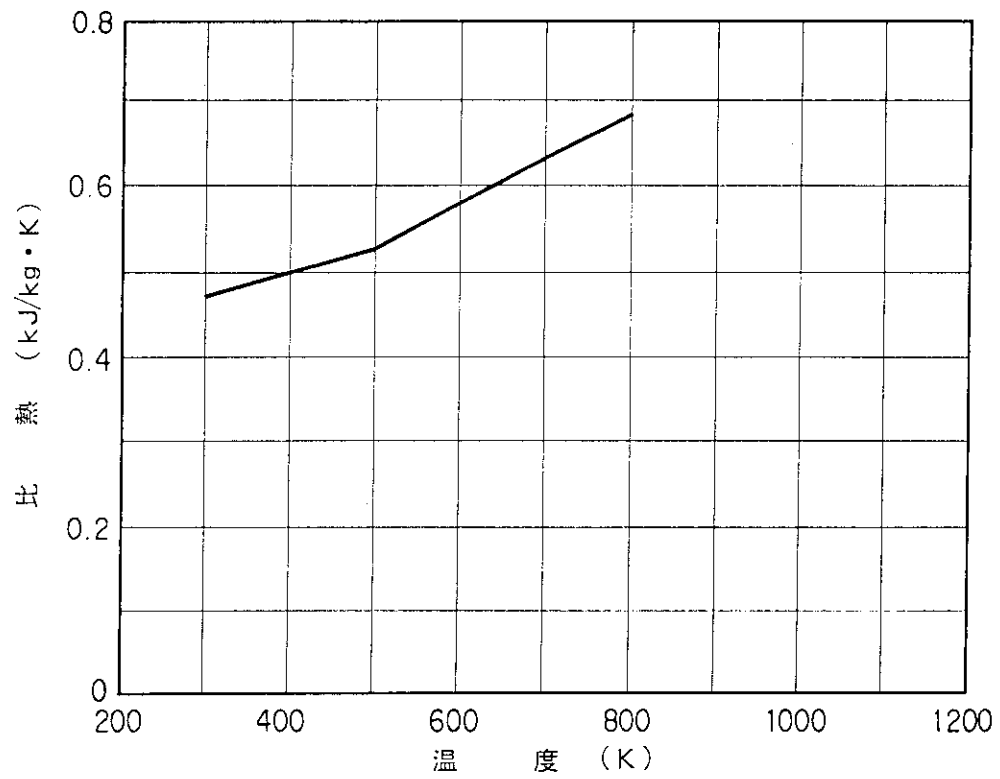
比 熱

温度 (K)	比 熱 (kJ/kg·K)
300	0.473
500	0.529
800	0.690

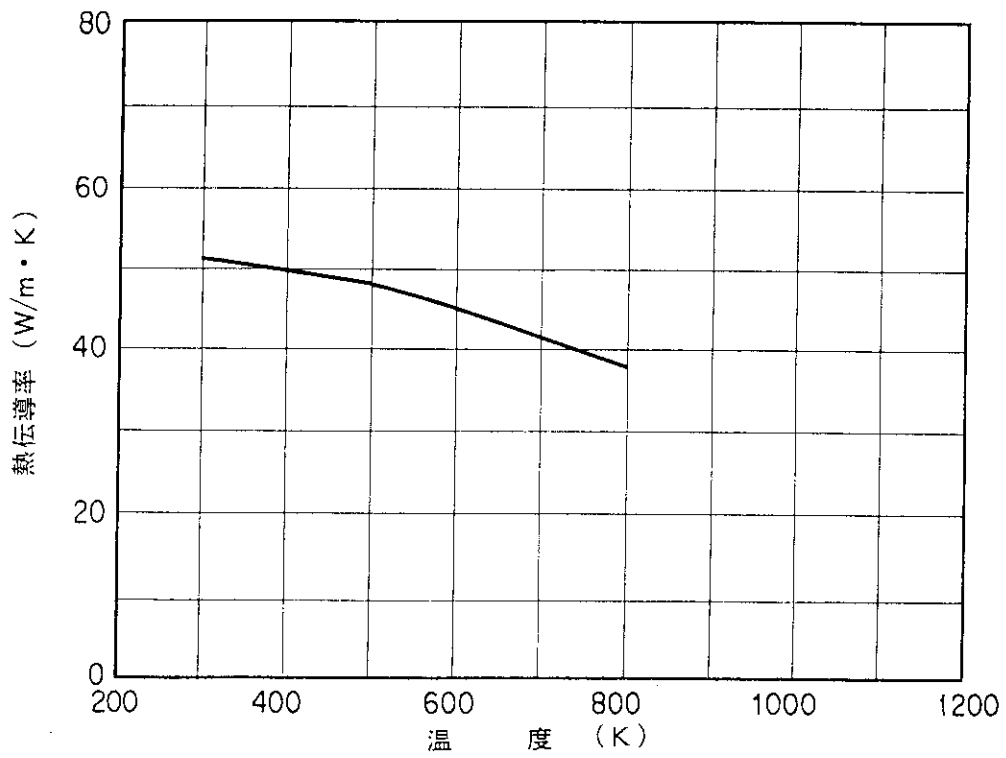
熱伝導率

温度 (K)	熱伝導率 (W/m·K)
300	51.6
500	47.8
800	38.2

SI 単位系



第7.1.3(a)図 軟鋼の比熱



第7.1.3(b)図 軟鋼の熱伝導率

第7.1.4表 球状黒鉛鑄鉄の熱的性質

密 度	7000	(kg/m ³)
遷移温度	1723	(K)
潜 熱	272	(kJ/kg·K)

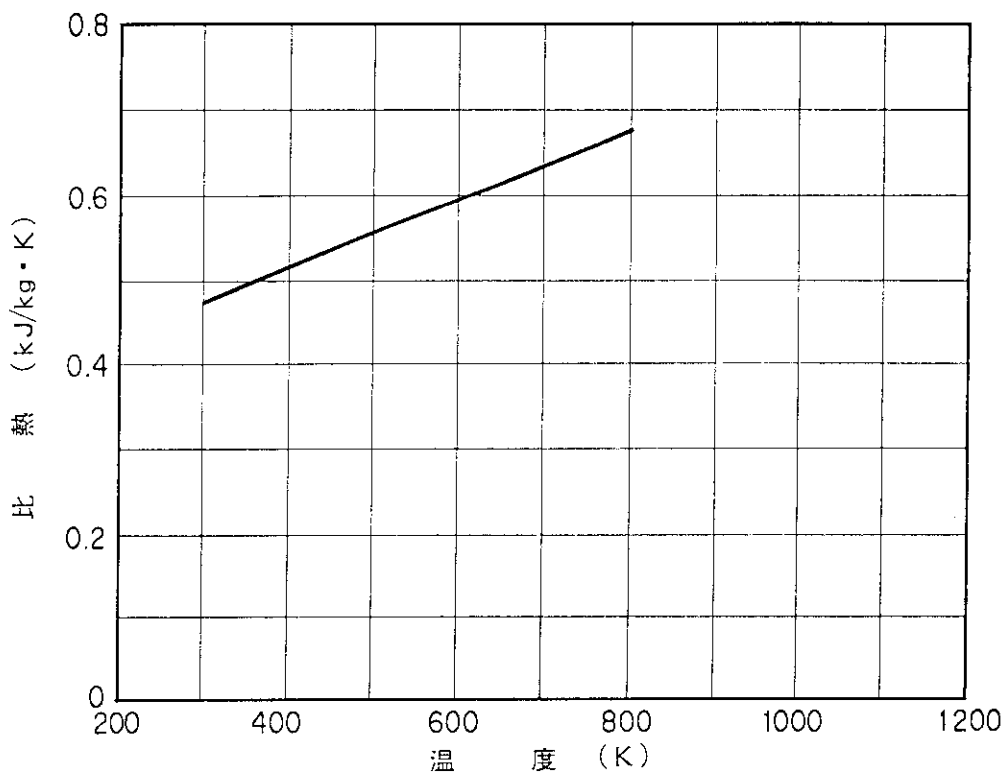
比 熱

温 度 (K)	比 熱 (kJ/kg·K)
300	0.483
500	0.566
800	0.680

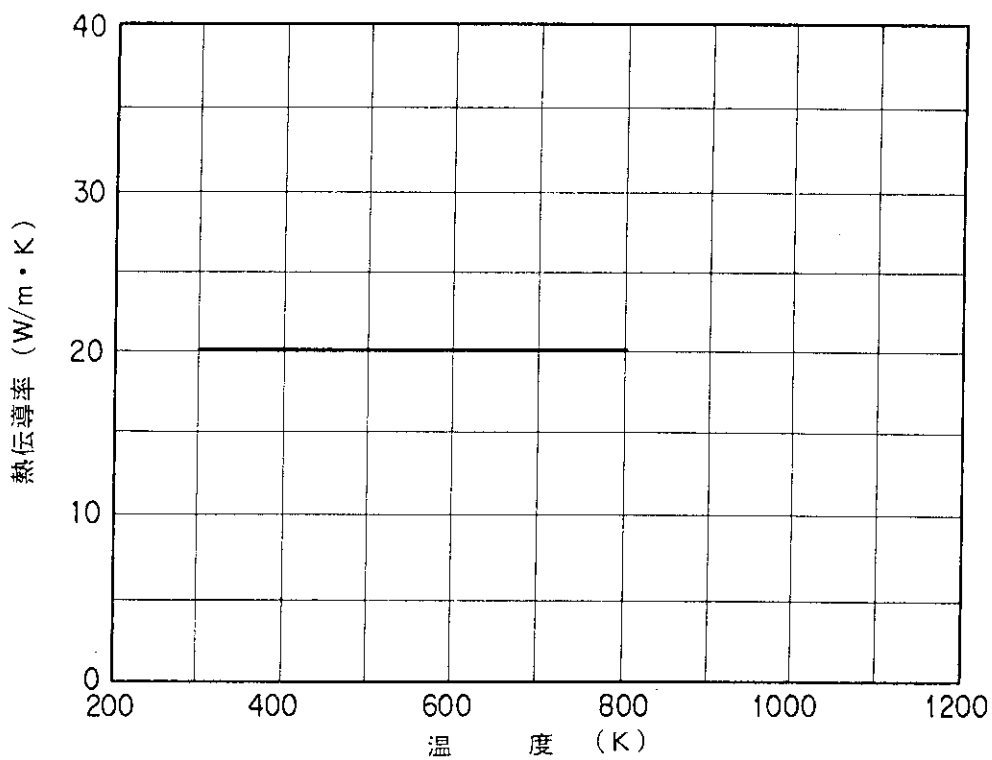
熱 伝 導 率

温 度 (K)	熱伝導率 (W/m·K)
300	20.1
500	20.1
800	20.5

SI 単位系



第 7. 1. 4(a)図 球状黒鉛鑄鉄の比熱



第 7. 1. 4(b)図 球状黒鉛鑄鉄の熱伝導率

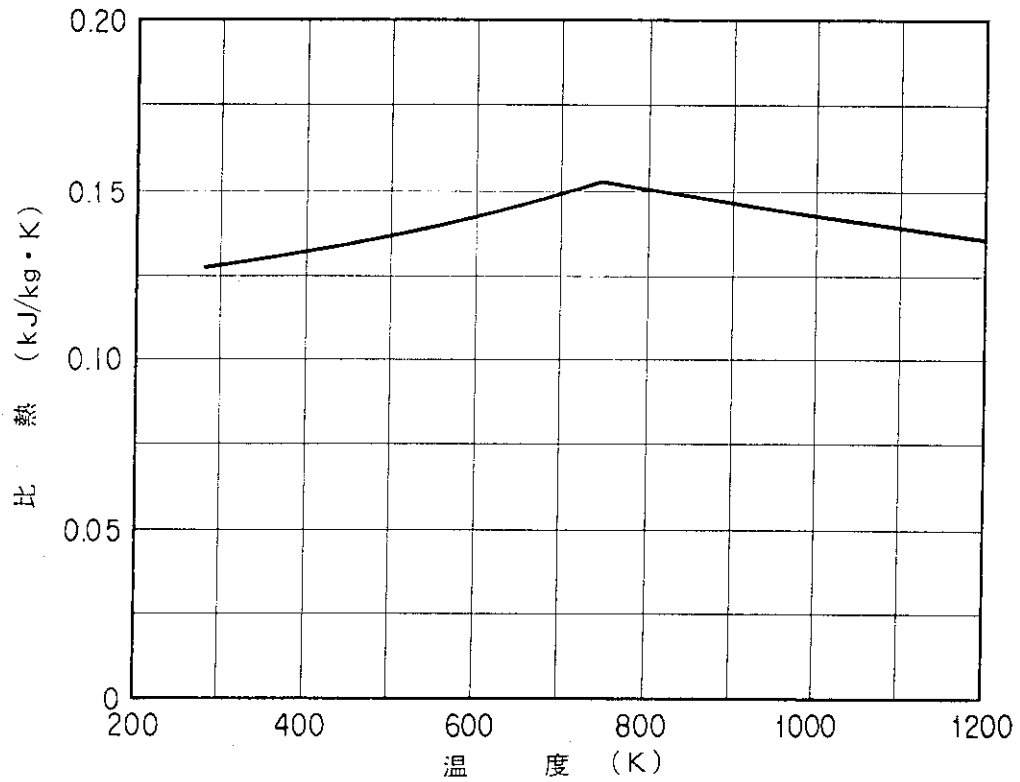
第7.1.5表 鉛の熱的性質

密度	11400	(kg/m^3)
遷移温度	600.5	(K)
潜熱	24	($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

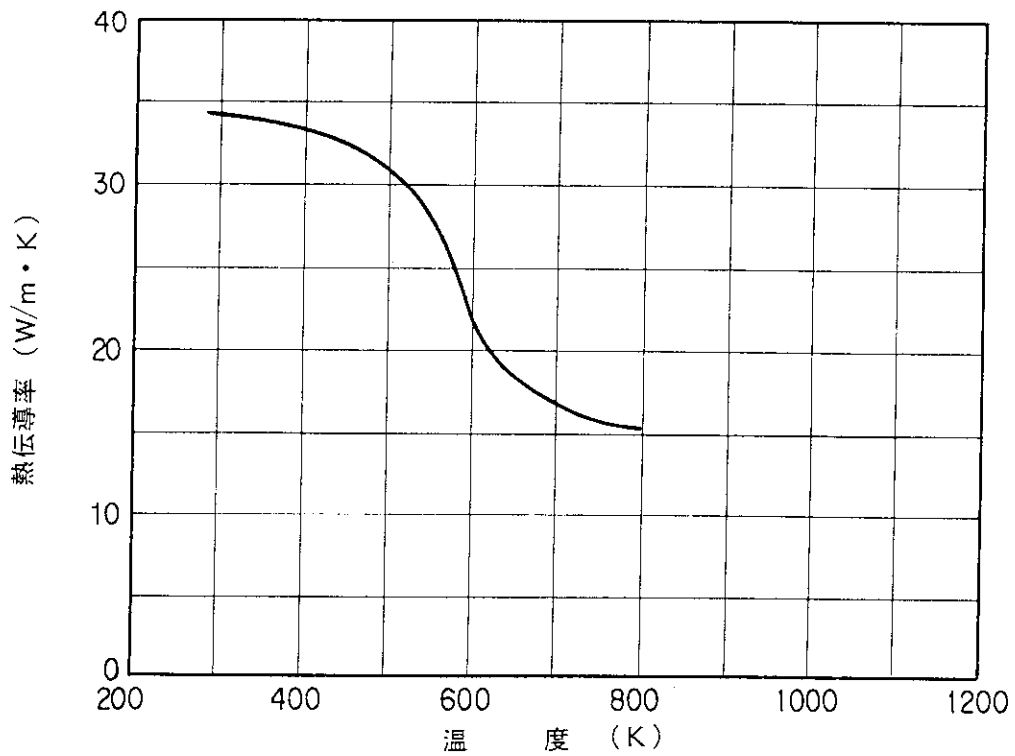
比 熱	
温度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
273	0.128
373	0.132
600.5	0.142
755	0.155
1273	0.137

熱伝導率	
温度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
293	34.6
371.3	33.9
533	29.3
605	20.9
800	15.1

SI 単位系



第 7. 1. 5(a) 図 鉛 の 比 熱



第 7. 1. 5(b) 図 鉛 の 熱 伝 導 率

第7.1.6表 銅の熱的性質

密度	8960	(kg/m^3)
遷移温度	1356	(K)
潜熱	134	($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

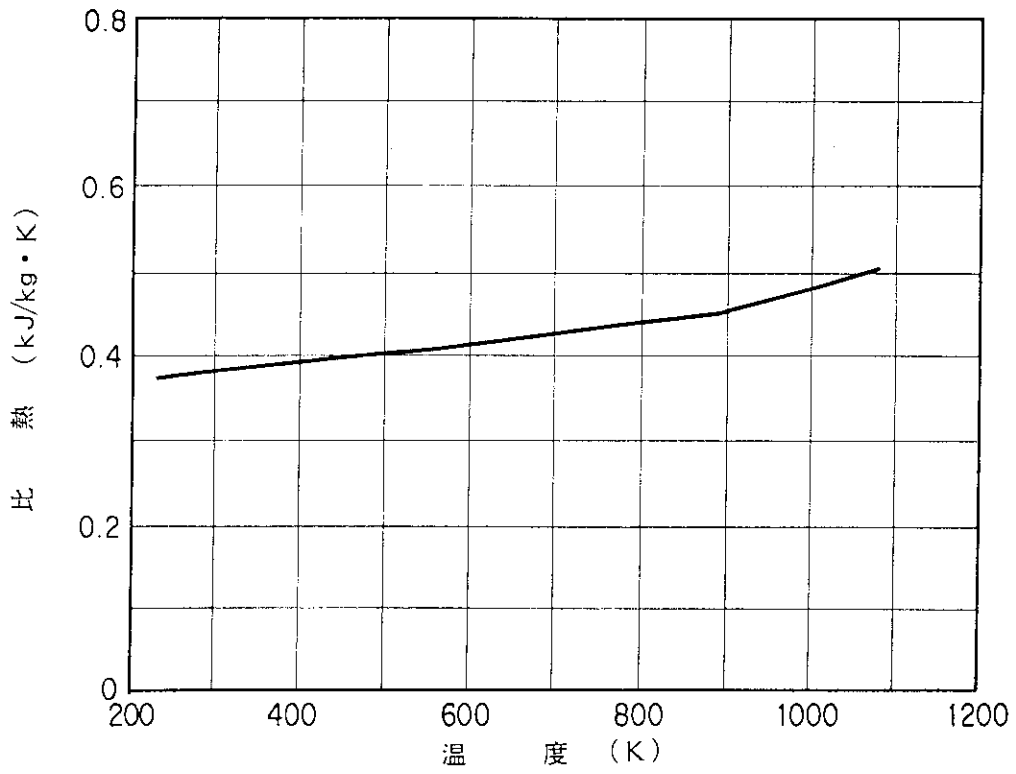
比 熱

温度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
223	0.373
323	0.389
473	0.402
673	0.423
873	0.452
1073	0.502

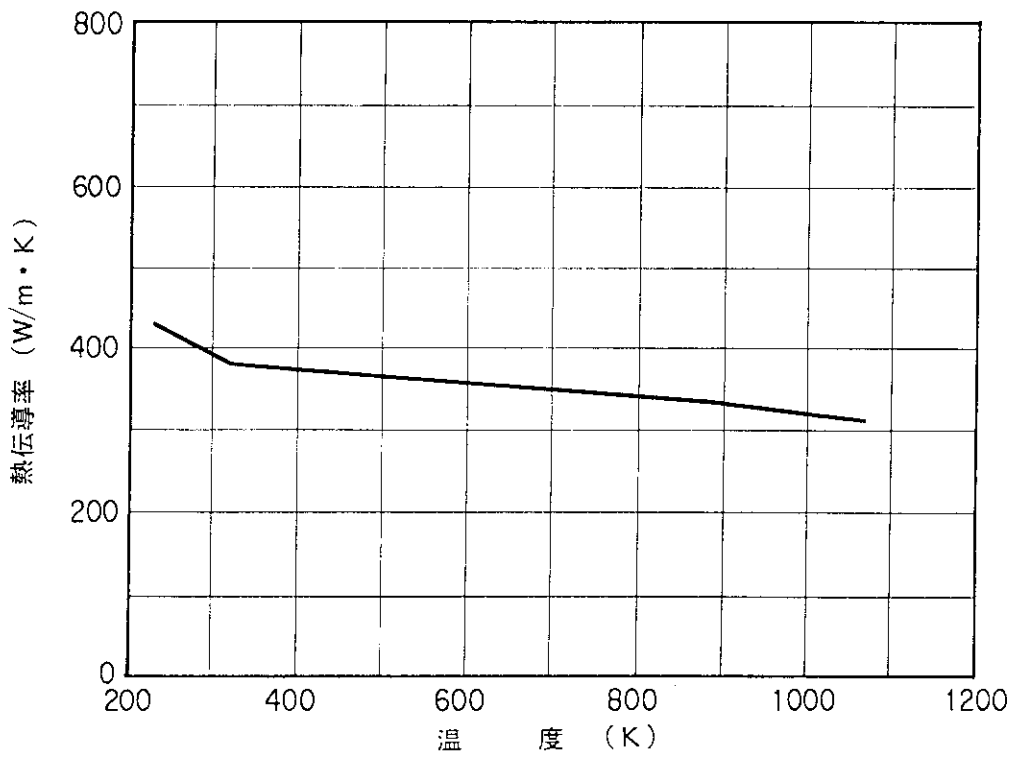
熱 伝 導 率

温度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
223	423
323	381
473	372
673	355
873	338
1073	317

SI 単位系



第 7. 1. 6(a) 図 銅 の 比 熱



第 7. 1. 6(b) 図 銅 の 熱 伝 導 率

第7.1.7表 アルミニウムの熱的性質

密度	2700	(kg/m^3)
遷移温度	933	(K)
潜熱	398	($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

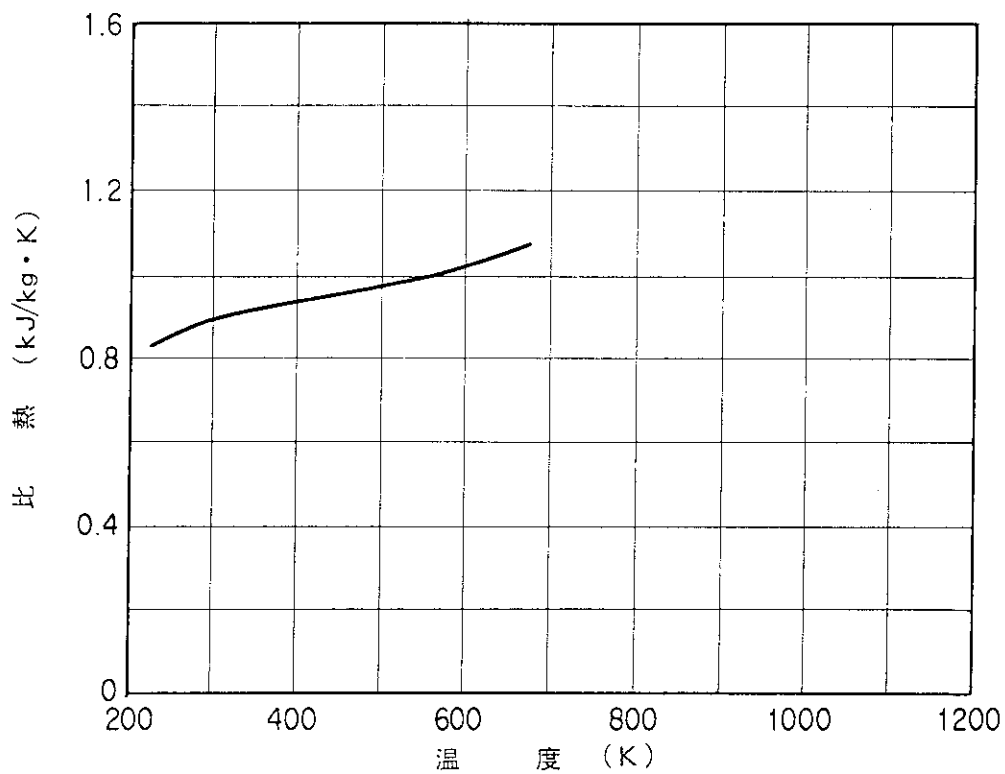
比 熱

温度 (K)	比熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
233	0.837
293	0.900
373	0.934
573	1.03
673	1.08

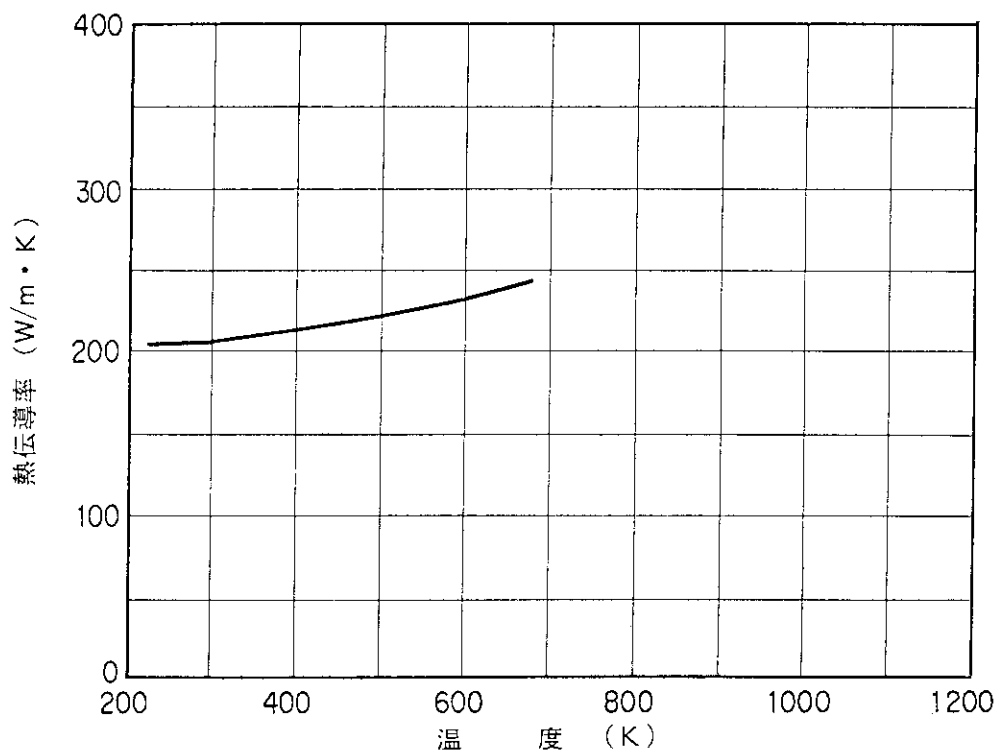
熱伝導率

温度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
233	203
293	203
393	206
573	230
673	249

SI 単位系



第 7. 1. 7(a)図 アルミニウムの比熱



第 7. 1. 7(b)図 アルミニウムの熱伝導率

第7.1.8表 ジルカロイ-2, -4の熱的性質

密 度	6550	(kg/m^3)
遷移温度	2125	(K)
潜 熱	230	($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

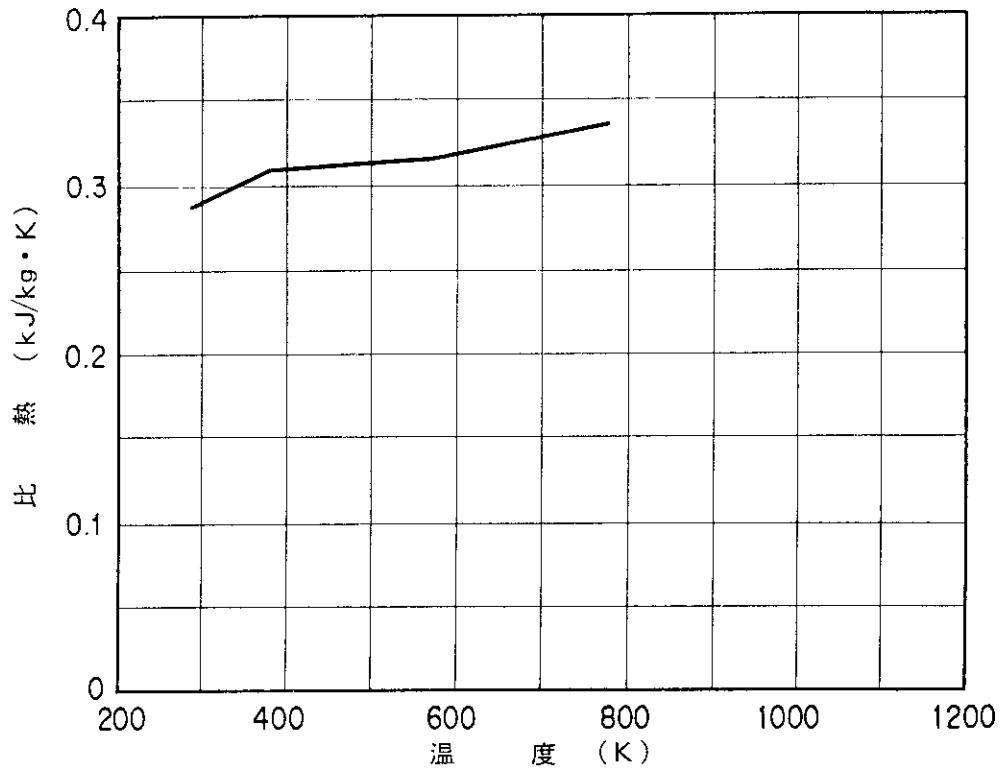
比 熱

温 度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
293	0.287
373	0.310
573	0.315
773	0.335

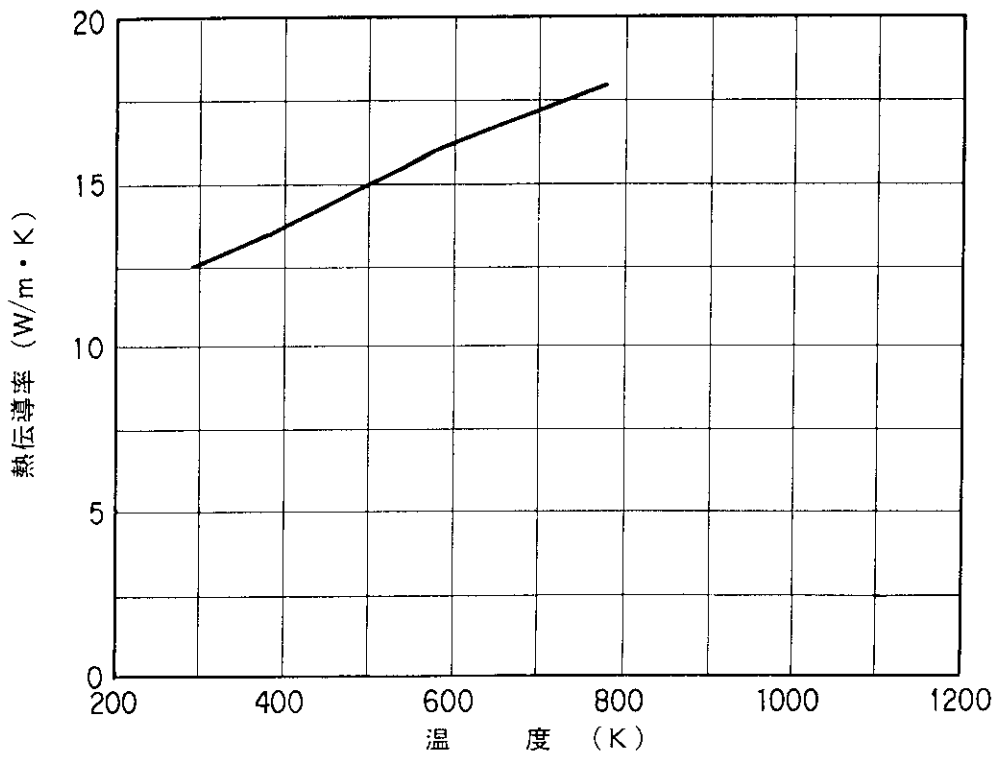
熱 伝 導 率

温 度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
293	12.5
373	13.5
573	16.1
773	18.6

SI 単 位 系



第 7.1.8(a)図 ジルカロイ-2, -4 の比熱



第 7.1.8(b)図 ジルカロイ-2, -4 の熱伝導率

第 7.1.9 表 二酸化ウランの熱的性質

密 度	10960	(kg/m^3)
遷移温度	3153	(K)
潜 熱		($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

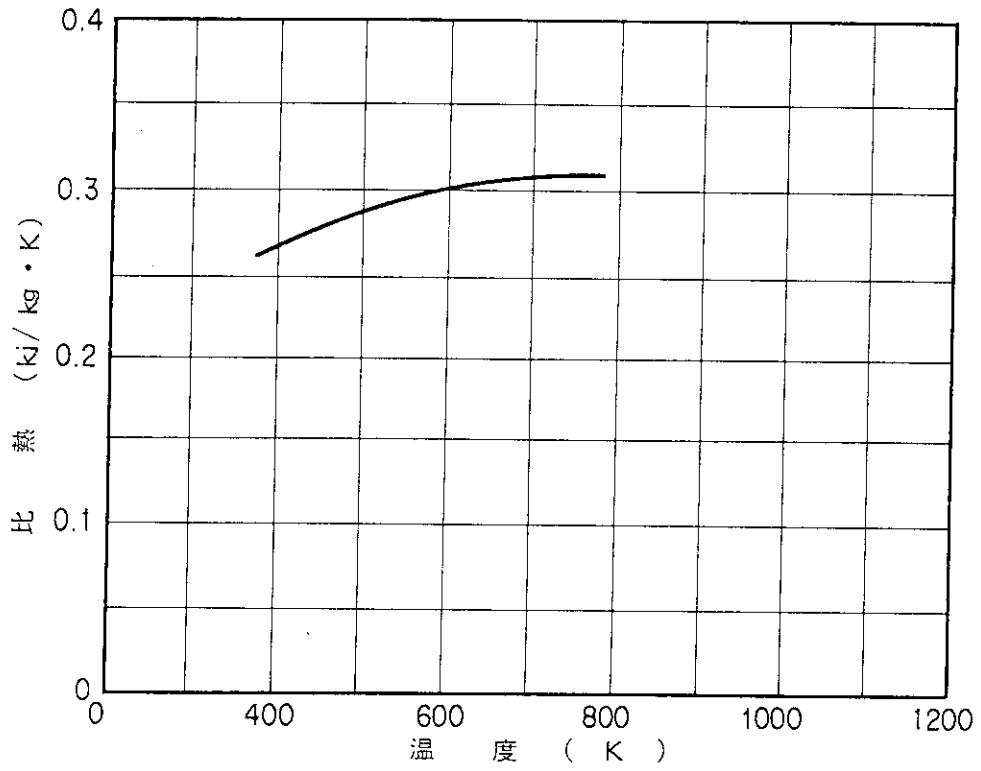
比 熱

温 度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
373	0.275
473	0.288
573	0.331
673	0.304
773	0.309

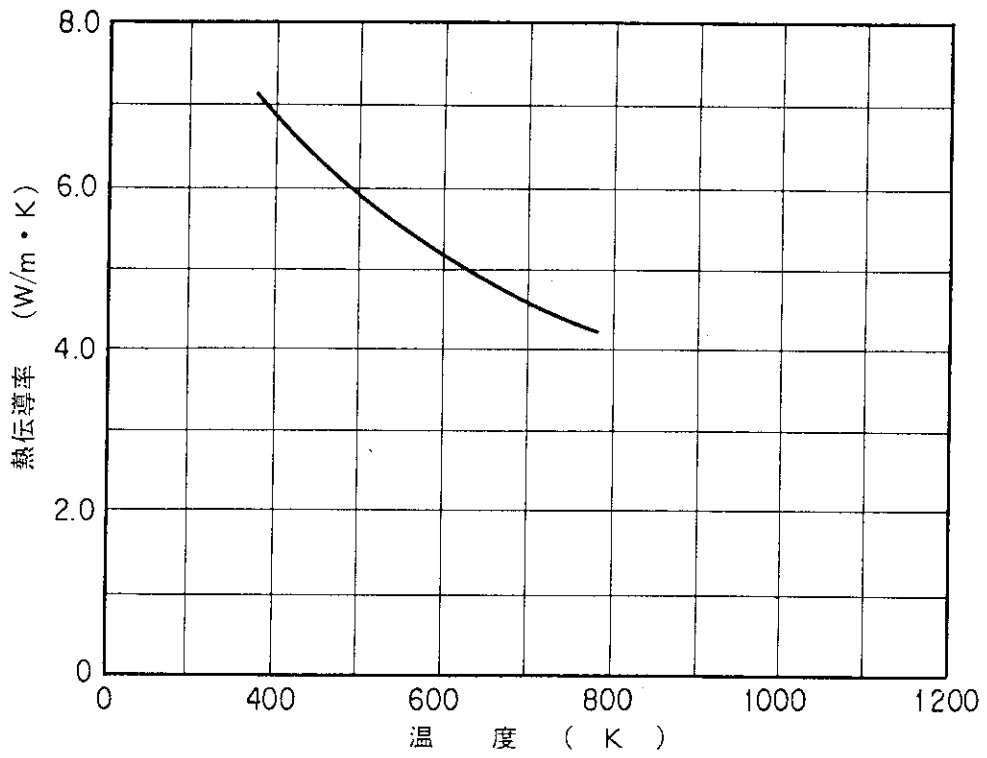
熱 伝 導 率

温 度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
373	7.06
473	6.03
573	5.36
673	4.77
773	4.31

SI 単 位 系



第 7. 1. 9(a) 図 二酸化ウランの比熱



第 7. 1. 9(b) 図 二酸化ウランの熱伝導率

第 7.1.10 表 シリコンゴムの熱的性質

密 度	1300	(kg/m^3)
遷移温度		(K)
潜 熱		($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

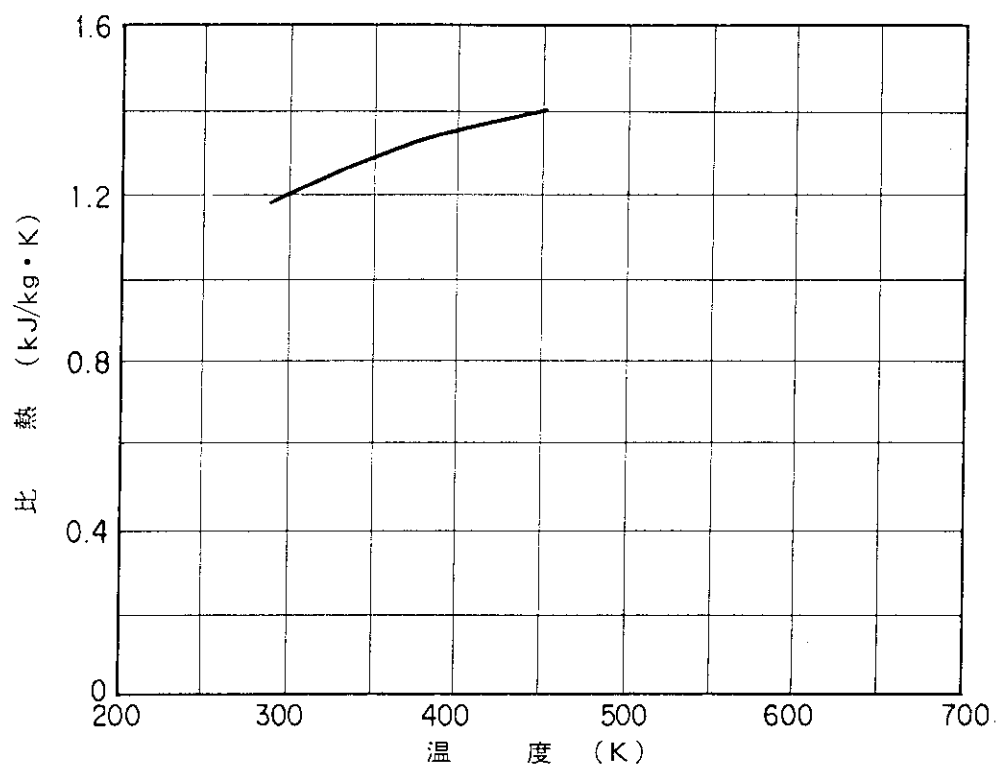
比 熱

温 度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
293	1.19
373	1.32
453	1.40

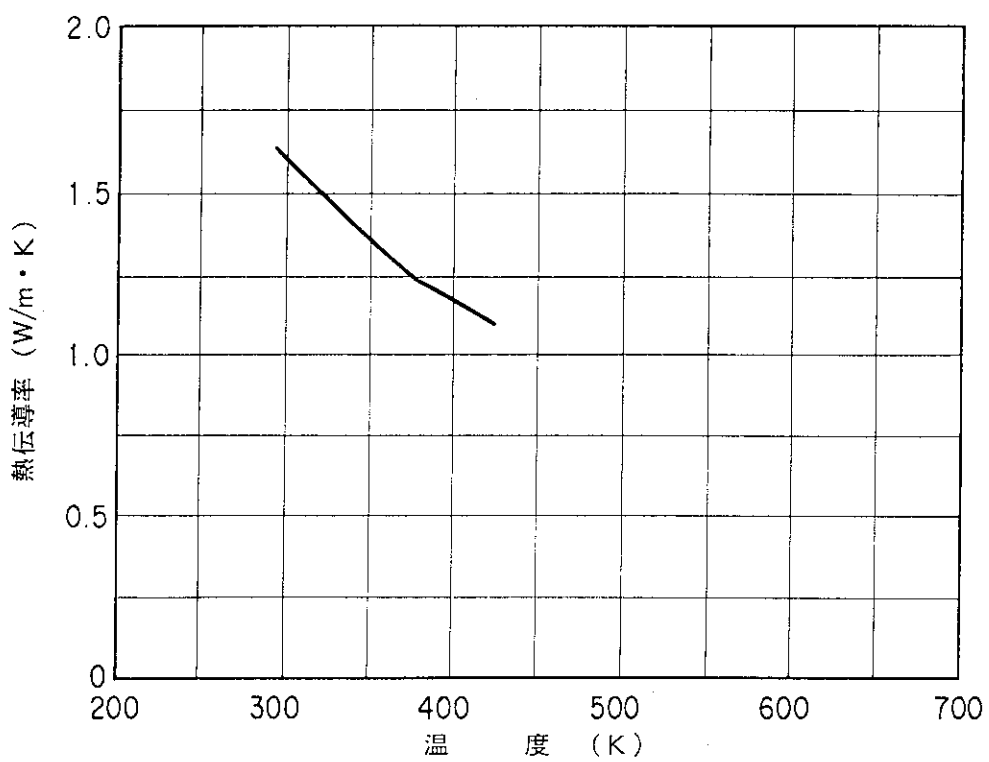
熱 伝 導 率

温 度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
298	1.63
373	1.26
423	1.21

SI 単位系



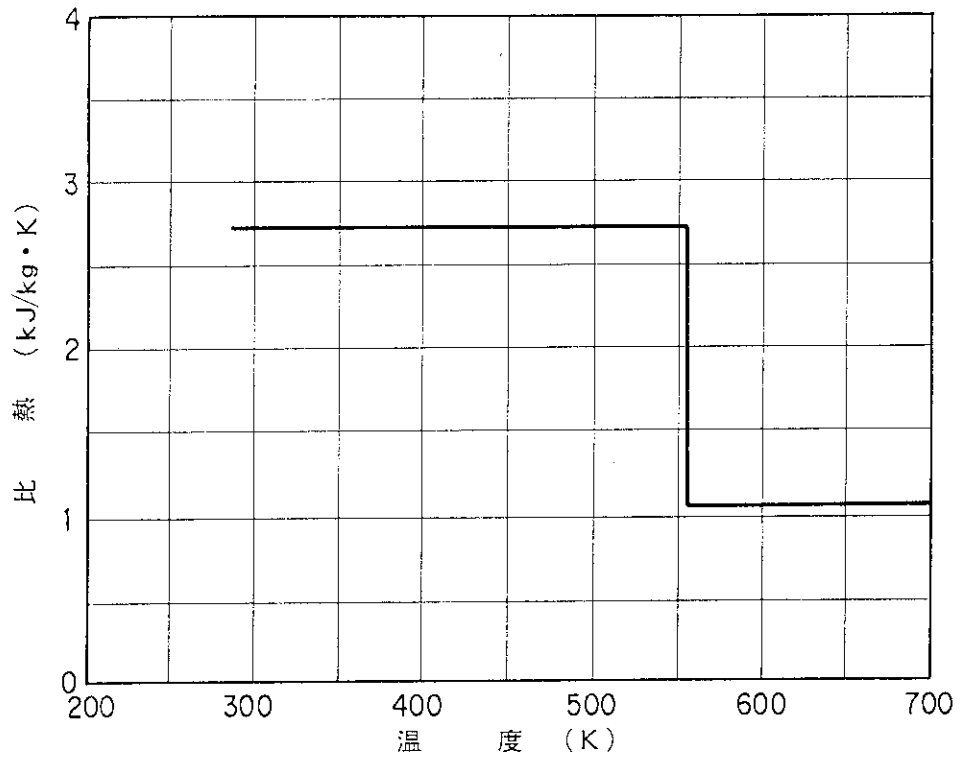
第 7. 1.10(a) 図 シリコンゴムの比熱



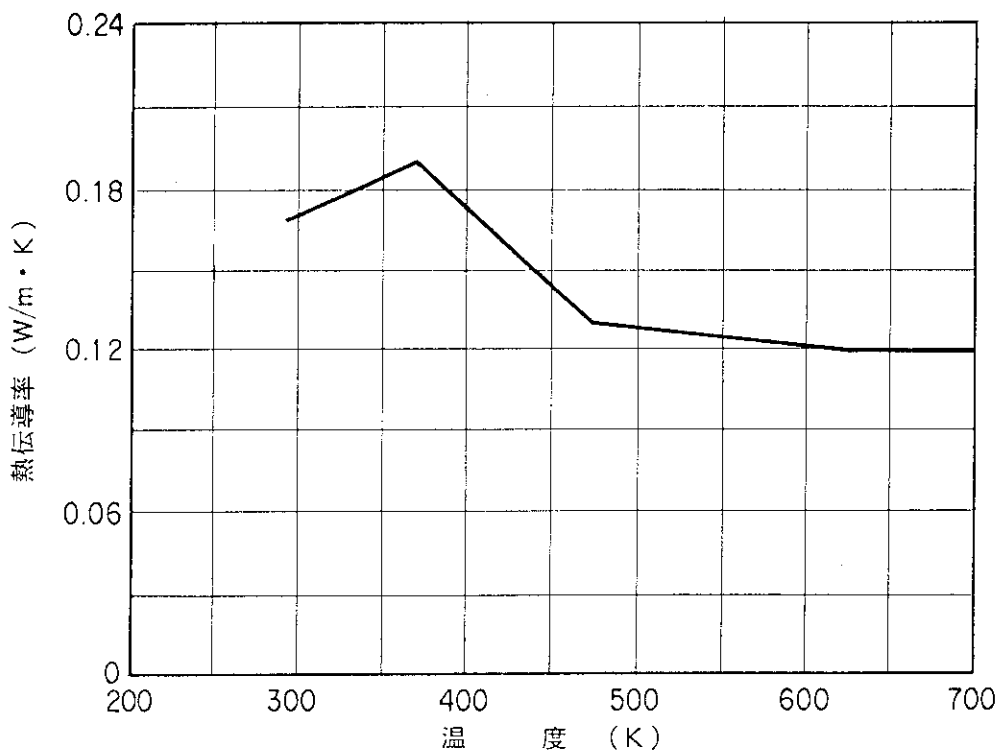
第 7. 1.10(b) 図 シリコンゴムの熱伝導率

第7.1.11表 ファブライウツドの熱的性質

密度	560	(kg/m ³)
遷移温度		(K)
潜熱		(kJ/kg·K)
比 熱		
温度 (K)	比 熱 (kJ/kg·K)	
558 未満	2.72	
558 以上	1.05	
熱 伝 導 率		
温度 (K)	熱伝導率 (W/m·K)	
293	0.17	
373	0.19	
473	0.13	
628	0.12	
628 以上	0.12	
SI 単位系		



第 7. 1.11(a) 図 ファプライウッドの比熱



第 7. 1.11(b) 図 ファプライウッドの熱伝導率

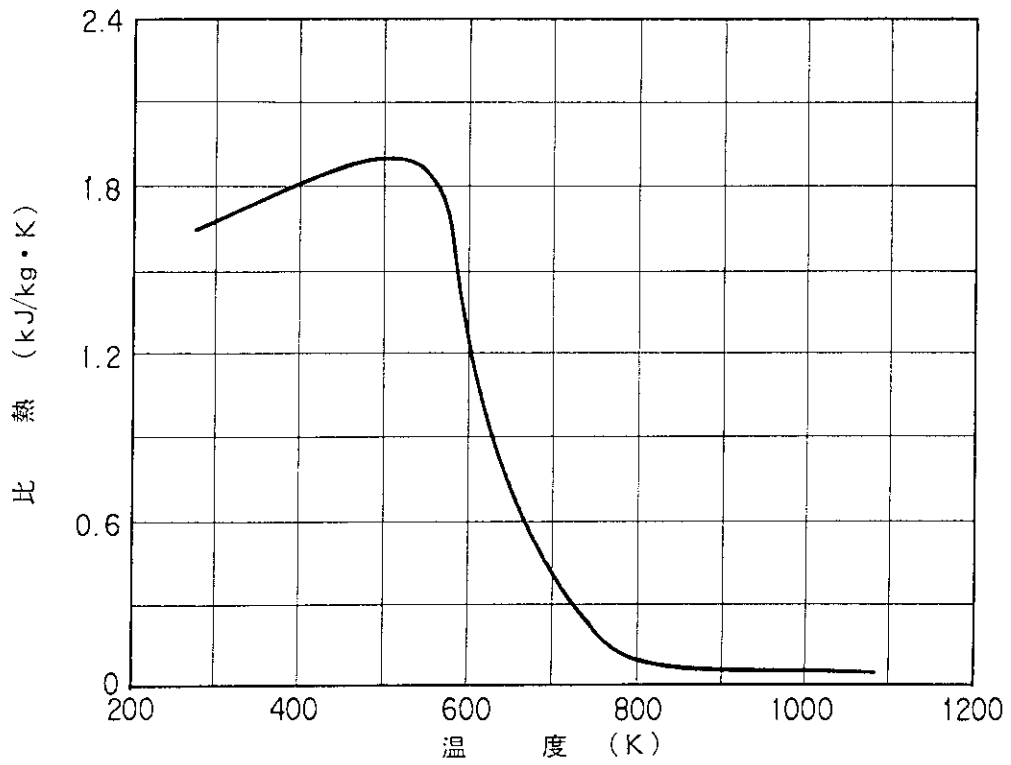
第 7.1.12 表 バルサウツドの熱的性質

密 度	160	(kg/m^3)
遷移温度		(K)
潜 熱		($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

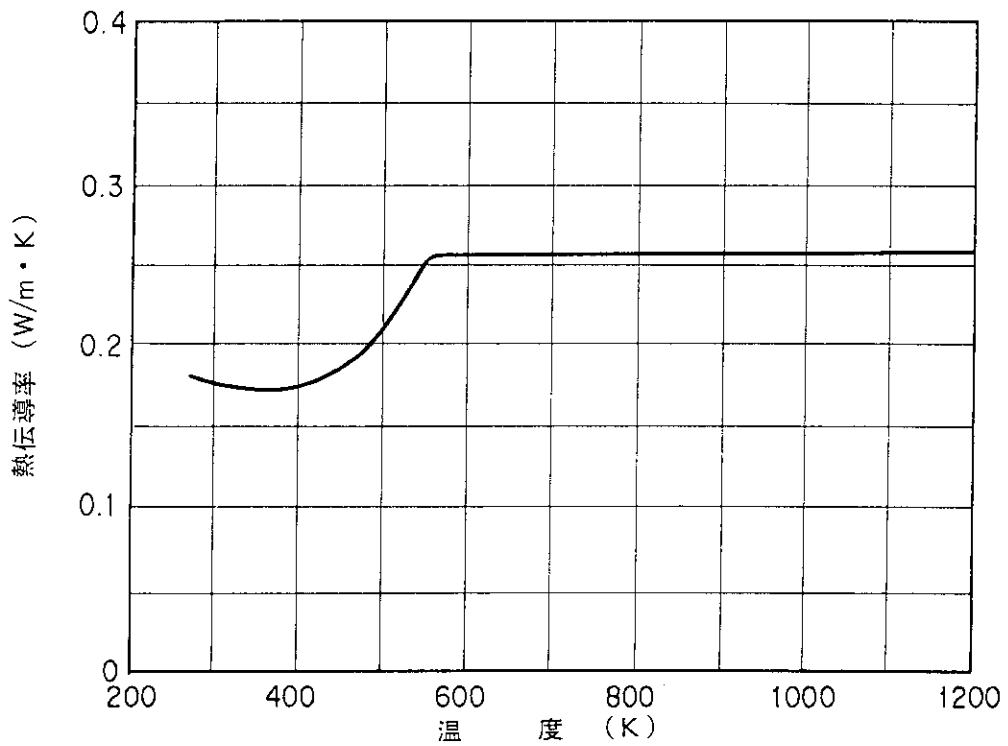
比 熱	
温 度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
273	1.75
373	1.80
473	1.91
558	1.87
593	1.45
623	0.917
773	0.130
1173	0.071

熱 伝 導 率	
温 度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
273	0.187
373	0.176
473	0.196
558	0.256
593	0.256
623	0.256
773	0.256
1173	0.256

SI 単位系



第 7. 1.12(a) 図 バルサウツの比熱



第 7. 1.12(b) 図 バルサウツの熱伝導率

第7.1.13表 硬質ポリウレタンホームの熱的性質

密 度	40	(kg/m^3)
遷移温度	478	(K)
潜 熱	1.7	($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

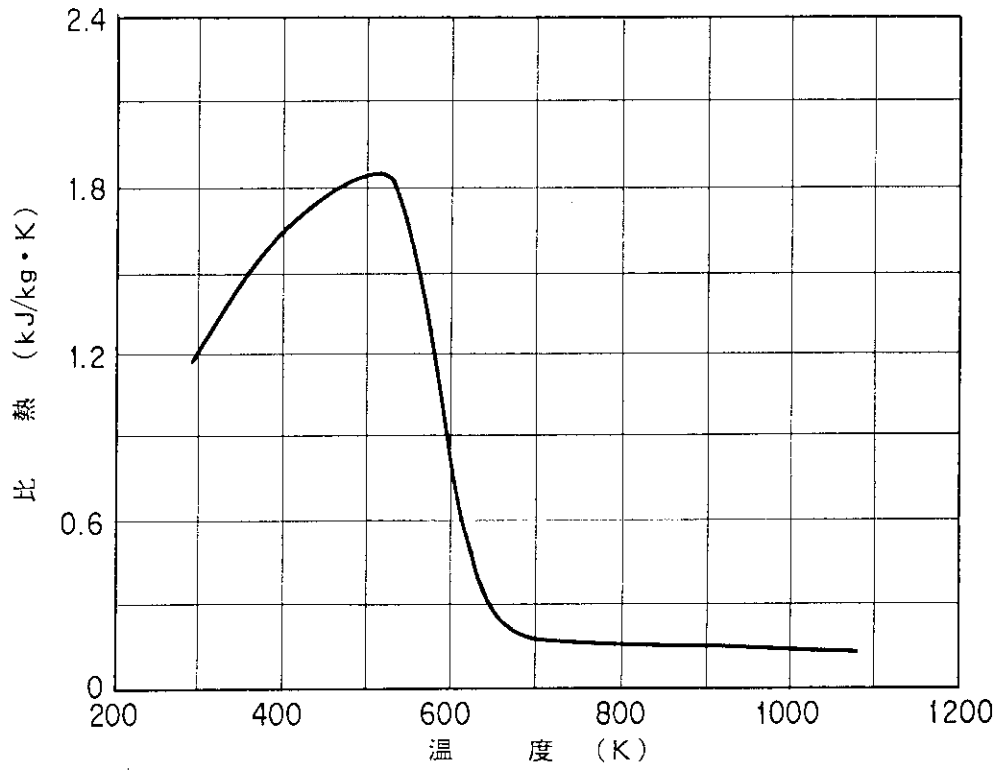
比 熱

温 度 (K)	比 熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
293	1.19
323	1.40
373	1.65
523	1.86
573	1.34
773	0.193
1073	0.151

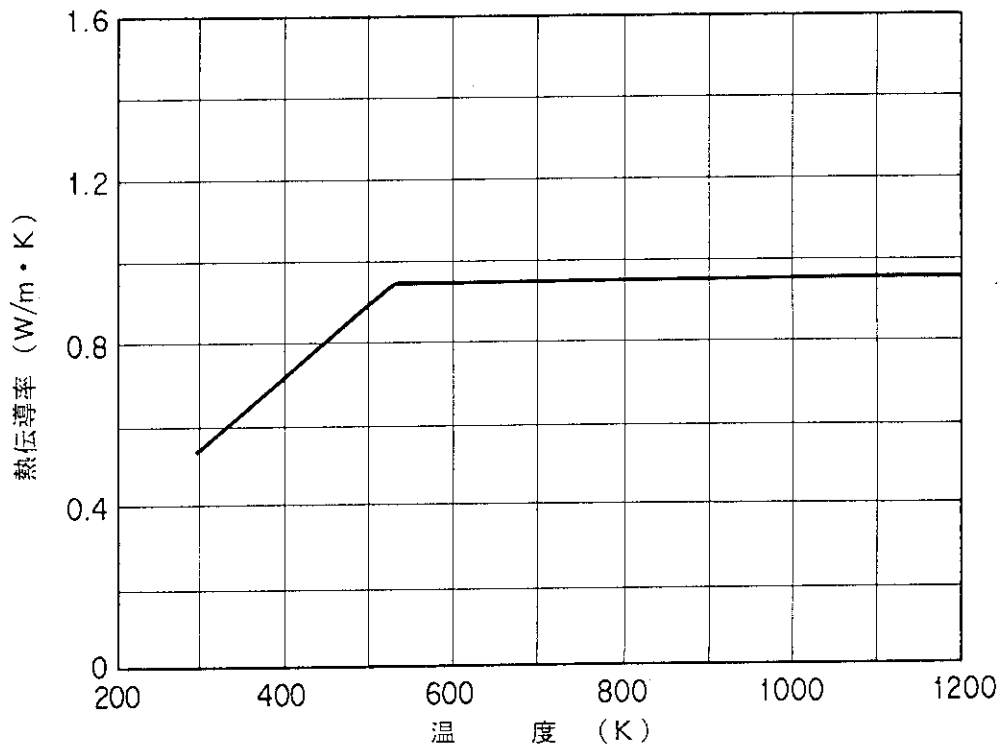
熱 伝 導 率

温 度 (K)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
293	0.535
323	0.581
373	0.675
523	0.937
573	0.937
773	0.937
1073	0.937

SI 単位系



第 7. 1.13(a)図 硬質ポリウレタンホームの比熱

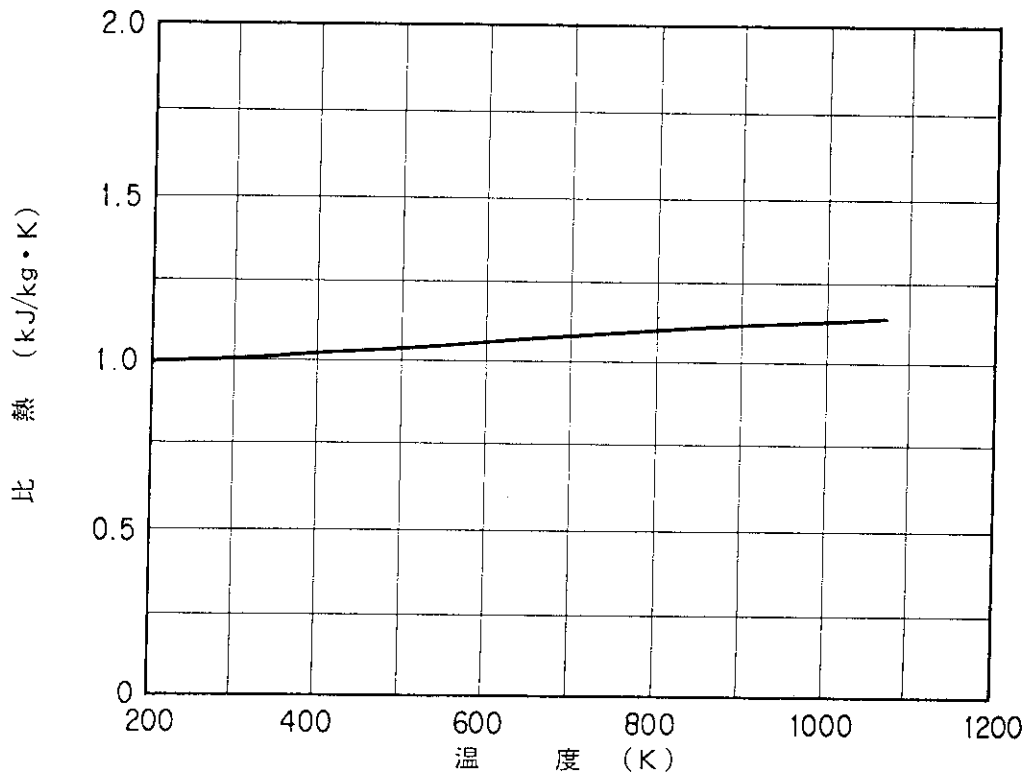


第 7. 1.13(b)図 硬質ポリウレタンホームの熱伝導率

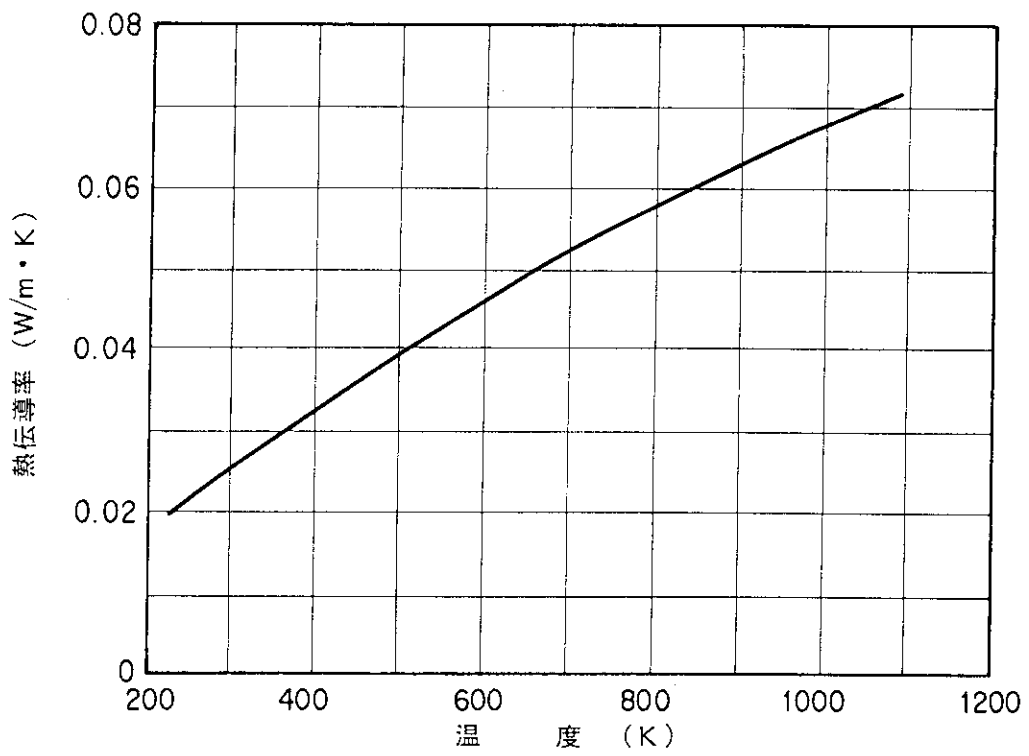
第7.1.14表 空気の熱的性質

温度 (K)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)
223	1.53	1.00	0.0200	0.095×10^{-4}	0.73
273	1.25	1.00	0.0241	0.138×10^{-4}	0.72
333	1.03	1.01	0.0287	0.196×10^{-4}	0.71
373	0.916	1.01	0.0316	0.239×10^{-4}	0.70
473	0.722	1.03	0.0386	0.358×10^{-4}	0.69
673	0.508	1.07	0.0508	0.645×10^{-4}	0.69
873	0.391	1.12	0.0613	0.989×10^{-4}	0.70
1073	0.319	1.16	0.0709	1.37×10^{-4}	0.71

S I 単 位 系



第 7. 1.14(a) 図 空 気 の 比 熱

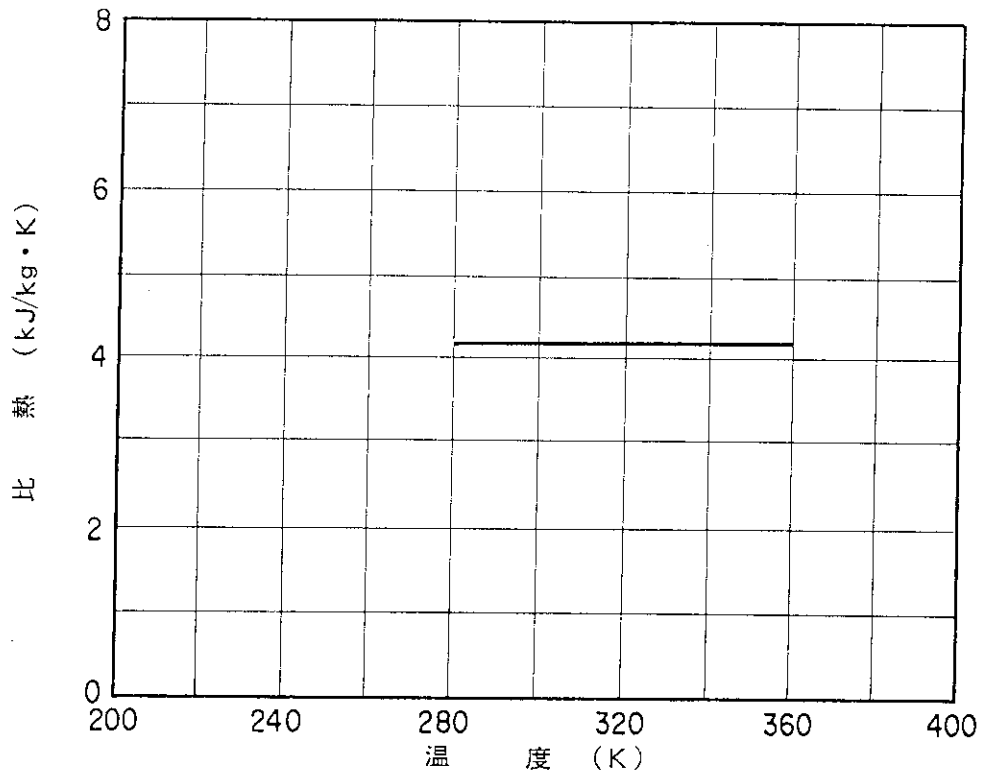


第 7. 1.14(b) 図 空 気 の 熱 伝 導 率

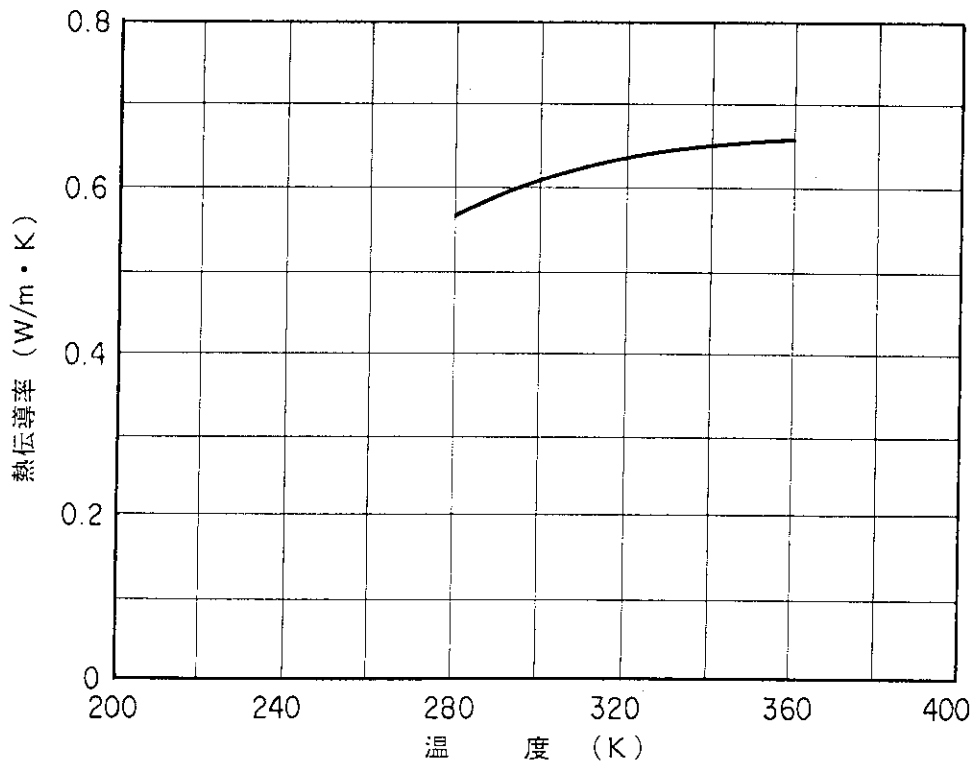
第7.1.15表 水の熱的性質

温度 (K)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)
280	999.9	4.20	0.576	1.44×10^{-6}	10.5
300	996.6	4.18	0.610	0.857×10^{-6}	5.85
320	989.4	4.18	0.637	0.583×10^{-6}	3.79
340	979.4	4.19	0.657	0.431×10^{-6}	2.69
360	967.2	4.20	0.671	0.338×10^{-6}	2.06

S I 単 位 系



第 7.1.15(a) 図 水の比熱

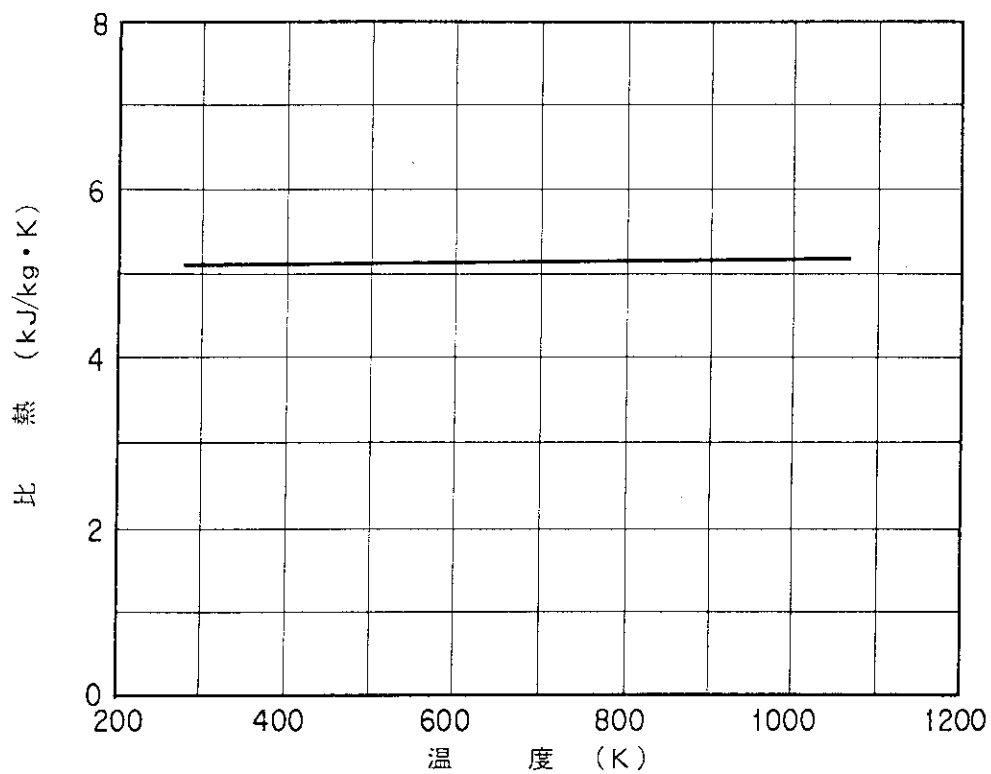


第 7.1.15(b) 図 水の熱伝導率

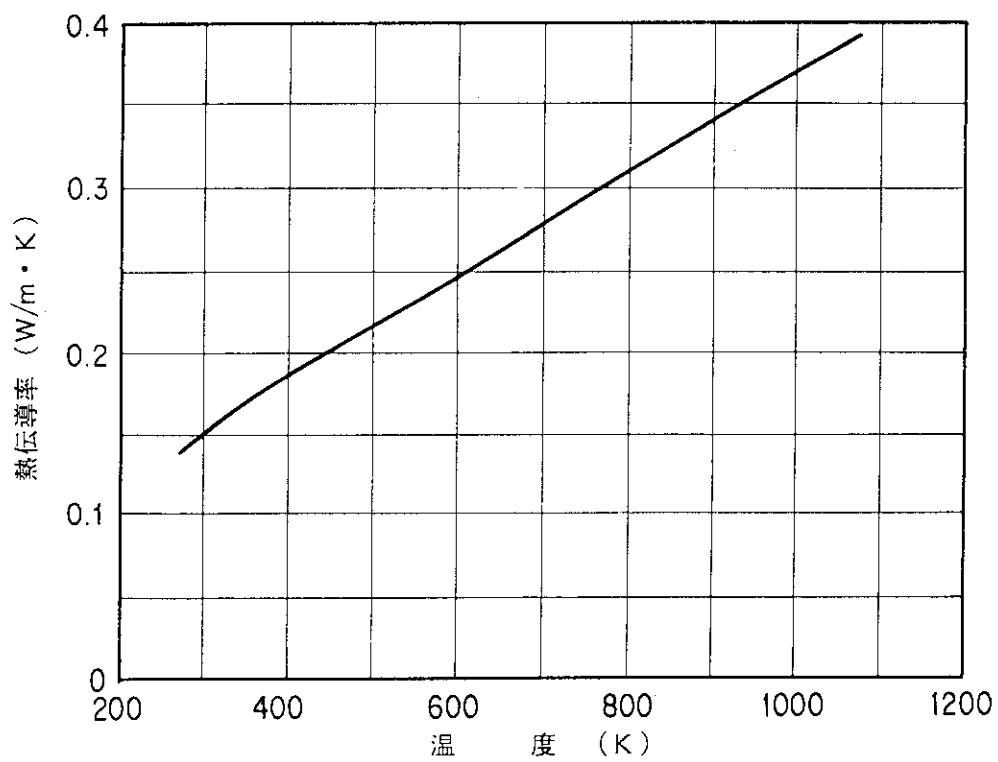
第 7.1.16 表 ヘリウムの熱的性質

温度 (K)	比重量 (kg/m ³)	比 熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)	膨張率 (1/K)
273	0.1762	5.19	0.143	1.061×10 ⁻⁴	0.6806	3.663×10 ⁻³
313	0.1539	5.19	0.157	1.481	0.6767	3.195
373	0.1291	5.19	0.179	1.794	0.6718	2.681
413	0.1166	5.19	0.193	2.131	0.6694	2.421
473	0.1018	5.19	0.213	2.683	0.6667	2.114
773	0.06233	5.19	0.304	6.185	0.6602	1.294
1073	0.04494	5.19	0.393	10.82	0.6554	0.932

S I 単 位 系



第7.1.16(a)図 ヘリウムの比熱

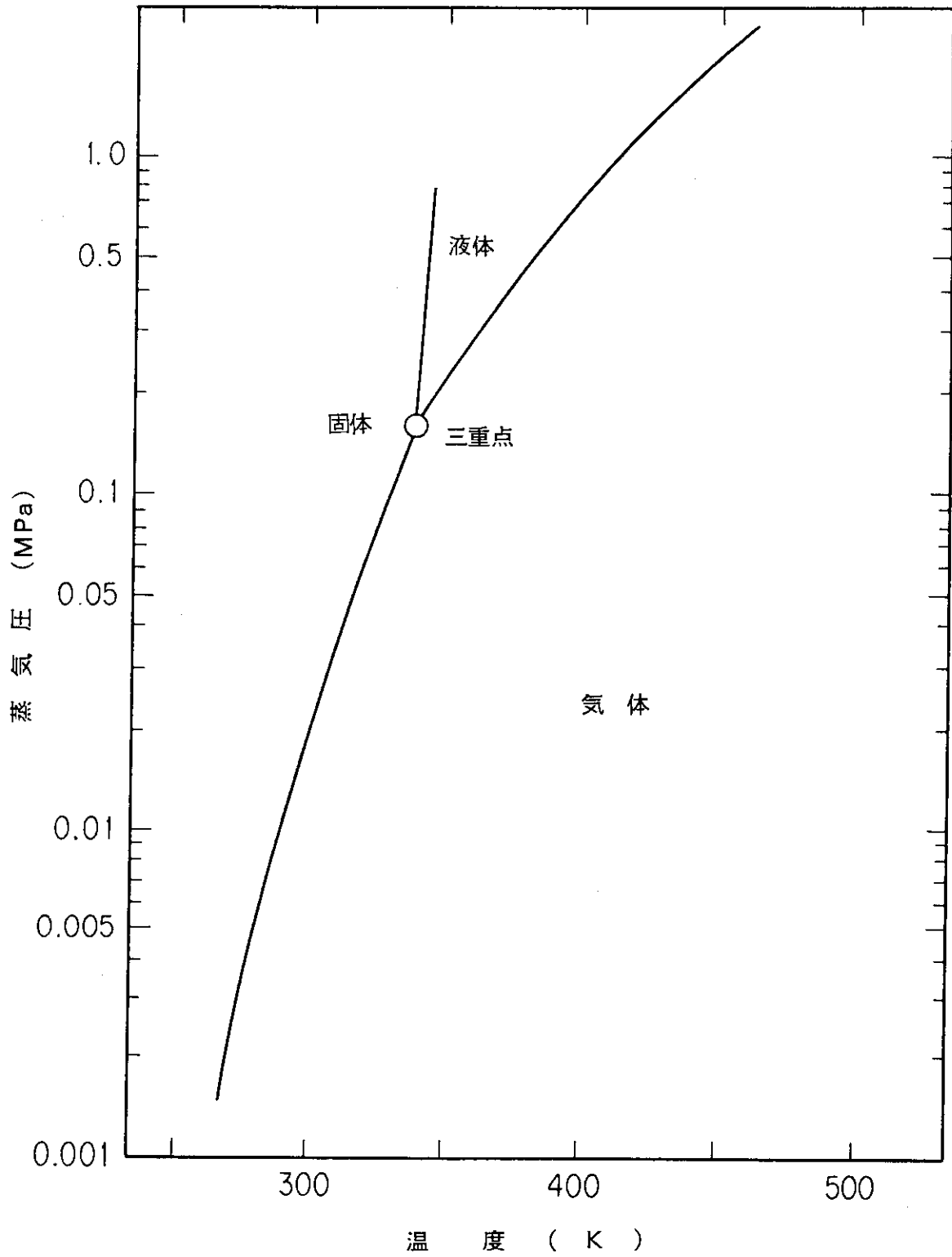


第7.1.16(b)図 ヘリウムの熱伝導率

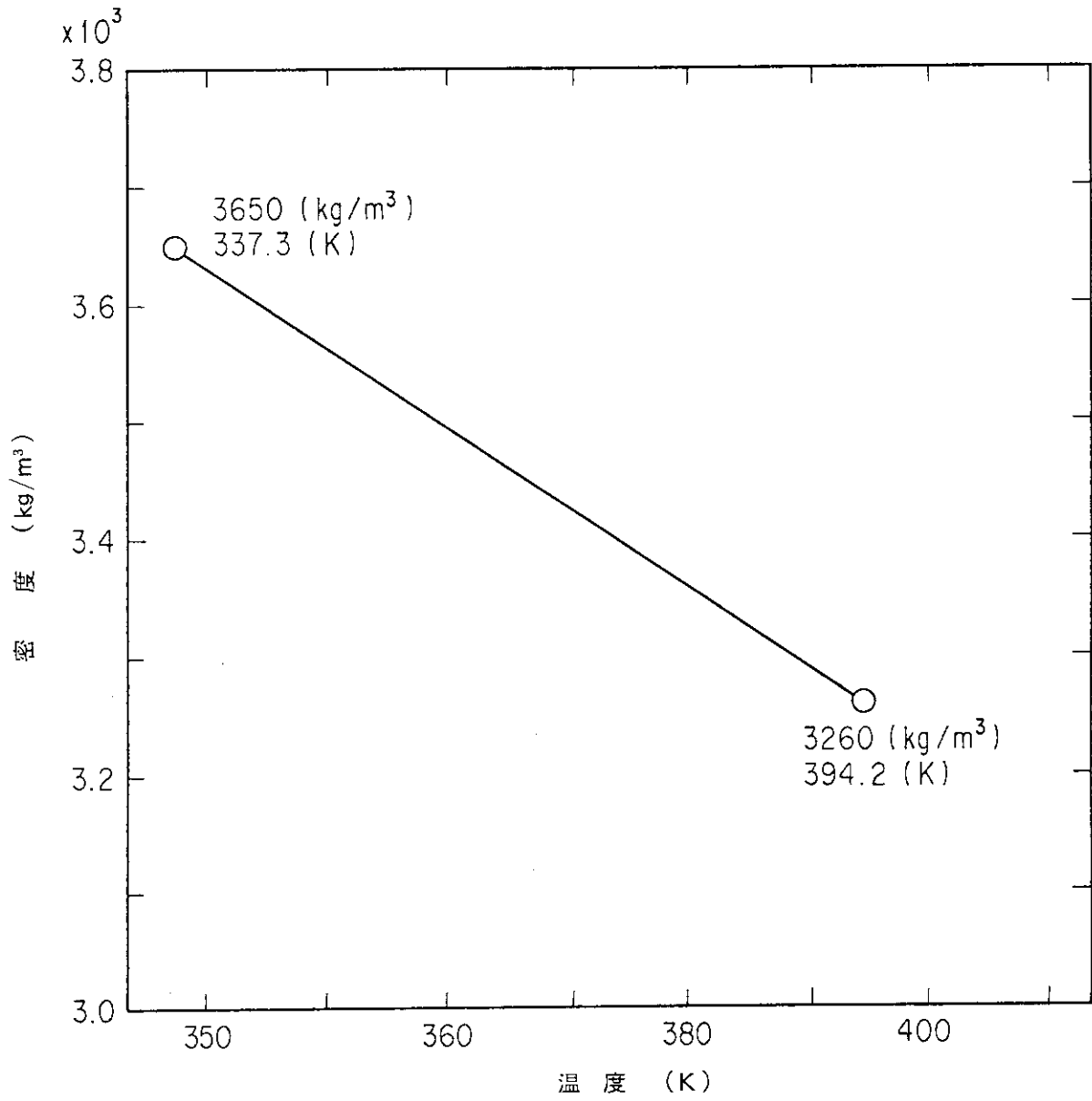
第 7.1.17 表 六フッ化ウランの熱的性質

昇華温度 (1.01×10^5 Pa)	329.8 K	
三重点	337.3 K	
密度 {	固体 (293.2 K)	5090 kg/cm ³
	液体 (337.3 K)	3650 kg/cm ³
	液体 (394.2 K)	3260 kg/cm ³
昇華潜熱 (337.1 K)	135 kJ/kg	
融解潜熱 (337.1 K)	54.8 kJ/kg	
蒸発潜熱 (337.1 K)	81.6 kJ/kg	
臨界圧	4.61 MPa	
臨界温度	503.4 K	

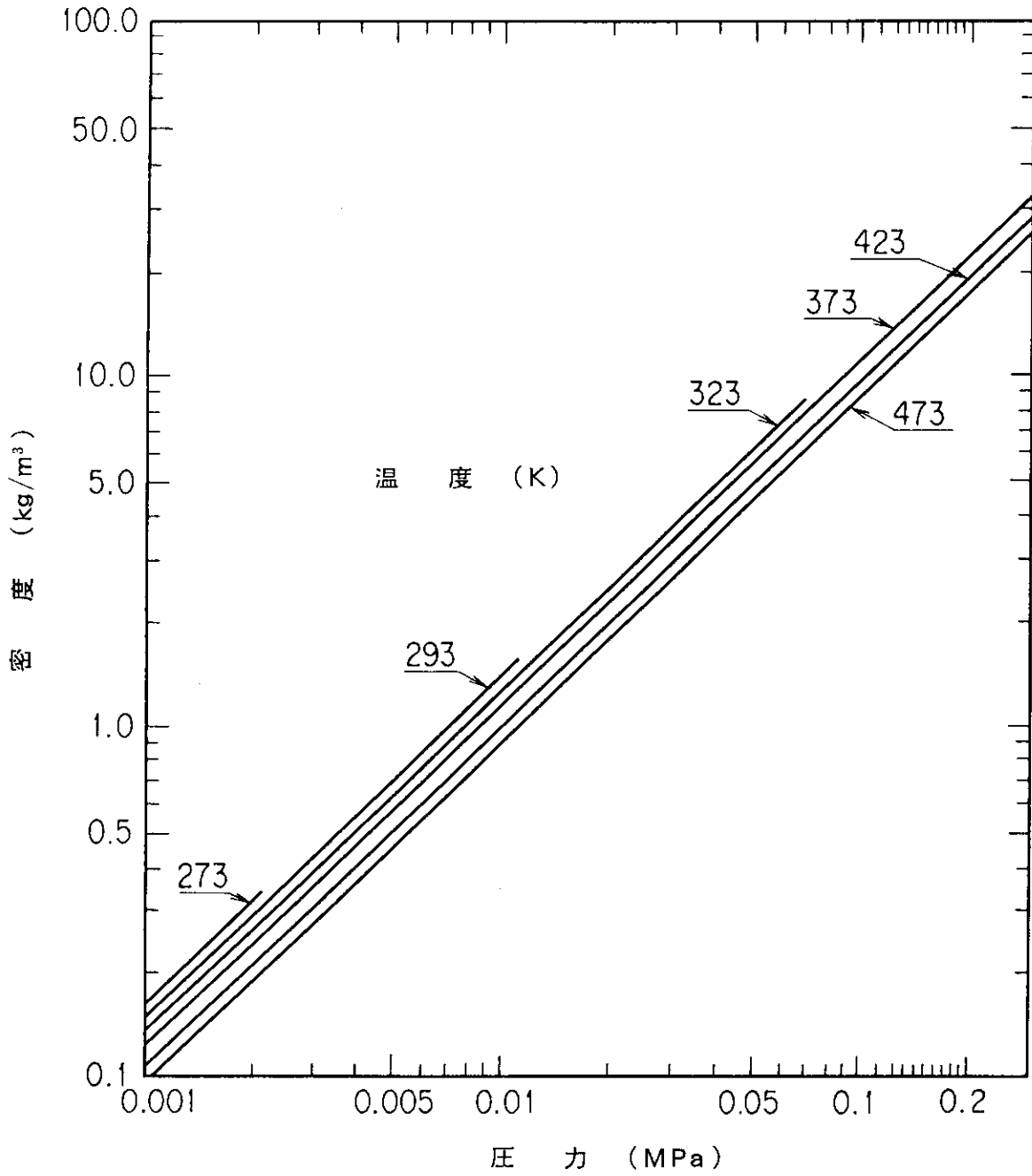
SI 単位計



第7.1.17(a)図 六フッ化ウラン蒸気圧



第7.1.17(b)図 液体六フッ化ウランの密度



第7.1.17(c)図 気体六フッ化ウランの密度

7.2 材料の熱的性質 (CGS-cal-°C 単位系)

(1) ステンレス鋼 (SUS304)	
ステンレス鋼の熱的性質	第 7.2.1 表
ステンレス鋼の比熱	第 7.2.1 (a) 図
ステンレス鋼の熱伝導率	第 7.2.1 (b) 図
(2) 構造用炭素鋼	
構造用炭素鋼の熱的性質	第 7.2.2 表
構造用炭素鋼の比熱	第 7.2.2 (a) 図
構造用炭素鋼の熱伝導率	第 7.2.2 (b) 図
(3) 軟鋼	
軟鋼の熱的性質	第 7.2.3 表
軟鋼の比熱	第 7.2.3 (a) 図
軟鋼の熱伝導率	第 7.2.3 (b) 図
(4) 球状黒鉛鑄鉄	
球状黒鉛鑄鉄の熱的性質	第 7.2.4 表
球状黒鉛鑄鉄の比熱	第 7.2.4 (a) 図
球状黒鉛鑄鉄の熱伝導率	第 7.2.4 (b) 図
(5) 鉛	
鉛の熱的性質	第 7.2.5 表
鉛の比熱	第 7.2.5 (a) 図
鉛の熱伝導率	第 7.2.5 (b) 図
(6) 銅	
銅の熱的性質	第 7.2.6 表
銅の比熱	第 7.2.6 (a) 図
銅の熱伝導率	第 7.2.6 (b) 図
(7) アルミニウム	
アルミニウムの熱的性質	第 7.2.7 表
アルミニウムの比熱	第 7.2.7 (a) 図
アルミニウムの熱伝導率	第 7.2.7 (b) 図
(8) ジルカロイ-2, -4	
ジルカロイ-2, -4 の熱的性質	第 7.2.8 表
ジルカロイ-2, -4 の比熱	第 7.2.8 (a) 図
ジルカロイ-2, -4 の熱伝導率	第 7.2.8 (b) 図
(9) 二酸化ウラン	
二酸化ウランの熱的性質	第 7.2.9 表
二酸化ウランの比熱	第 7.2.9 (a) 図
二酸化ウランの熱伝導率	第 7.2.9 (b) 図

(10) シリコンゴム	
シリコンゴムの熱的性質	第 7.2.10 表
シリコンゴムの比熱	第 7.2.10 (a) 図
シリコンゴムの熱伝導率	第 7.2.10 (b) 図
(11) フェブライウッド	
フェブライウッドの熱的性質	第 7.2.11 表
フェブライウッドの比熱	第 7.2.11 (a) 図
フェブライウッドの熱伝導率	第 7.2.11 (b) 図
(12) バルサウッド	
バルサウッドの熱的性質	第 7.2.12 表
バルサウッドの比熱	第 7.2.12 (a) 図
バルサウッドの熱伝導率	第 7.2.12 (b) 図
(13) 硬質ポリウレタンホーム	
硬質ポリウレタンホームの熱的性質	第 7.2.13 表
硬質ポリウレタンホームの比熱	第 7.2.13 (a) 図
硬質ポリウレタンホームの熱伝導率	第 7.2.13 (b) 図
(14) 空気	
空気の熱的性質	第 7.2.14 表
空気の比熱	第 7.2.14 (a) 図
空気の熱伝導率	第 7.2.14 (b) 図
(15) 水	
水の熱的性質	第 7.2.15 表
水の比熱	第 7.2.15 (a) 図
水の熱伝導率	第 7.2.15 (b) 図
(16) ヘリウム	
ヘリウムの熱的性質	第 7.2.16 表
ヘリウムの比熱	第 7.2.16 (a) 図
ヘリウムの熱伝導率	第 7.2.16 (b) 図
(17) 六フッ化ウラン	
六フッ化ウランの熱的性質	第 7.2.17 表
六フッ化ウランの蒸気圧	第 7.2.17 (a) 図
液体六フッ化ウランの密度	第 7.2.17 (b) 図
気体六フッ化ウランの密度	第 7.2.17 (c) 図

第 7.2.1 表 ステンレス鋼 (SUS 304) の熱的性質

比重量	7.88	(g/cm^3)
遷移温度	1400	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	65	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

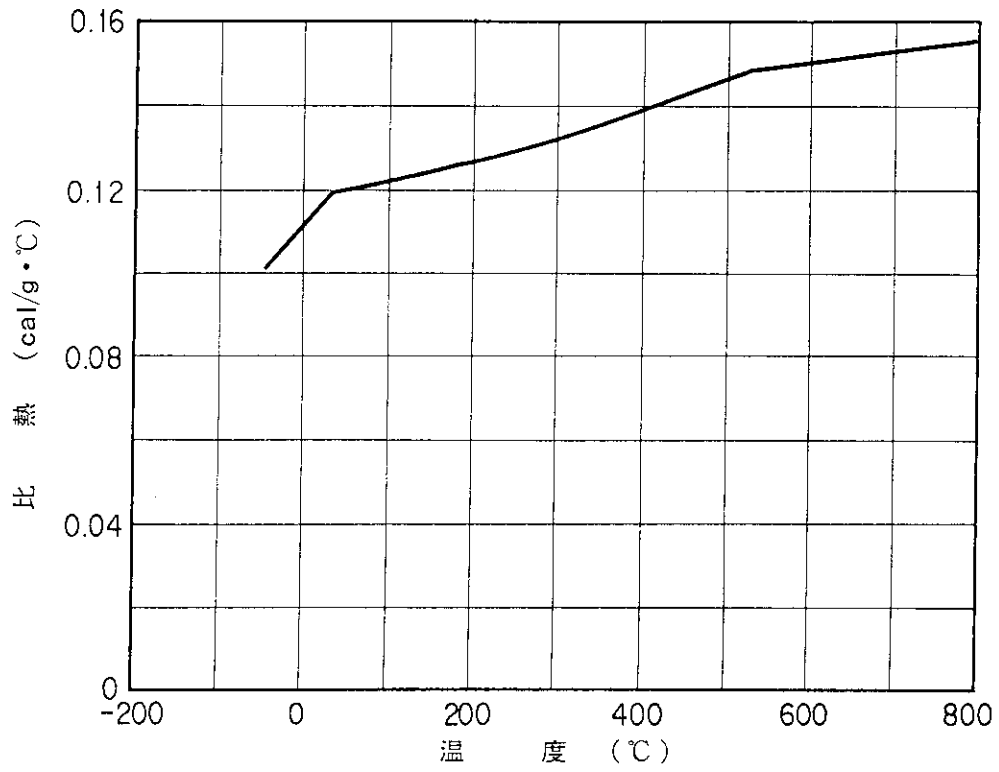
比 熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-40	0.105
27	0.119
127	0.120
327	0.133
527	0.149
727	0.154
893	0.156

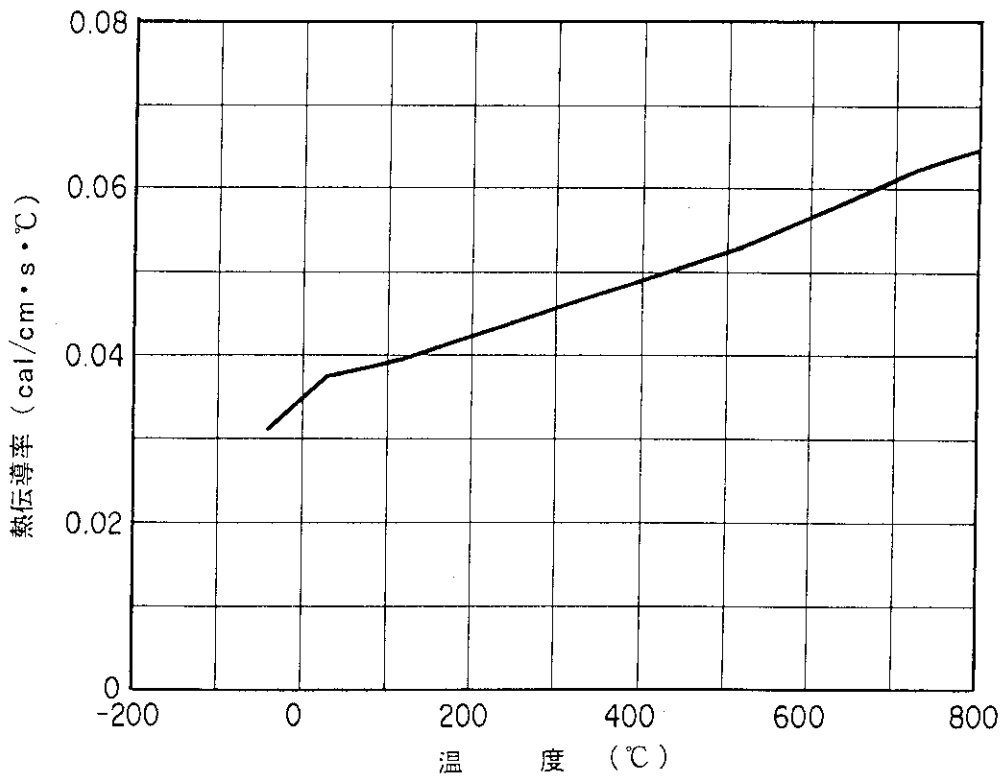
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-40	0.0320
27	0.0382
127	0.0394
227	0.0454
527	0.0537
727	0.0619
893	0.0644

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第 7. 2. 1(a)図 ステンレス鋼 (SUS 304) の比熱



第 7. 2. 1(b)図 ステンレス鋼 (SUS 304) の熱伝導率

第 7.2.2 表 構造用炭素鋼の熱的性質

比重量	7.86	(g/cm^3)
遷移温度	1536	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	65	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

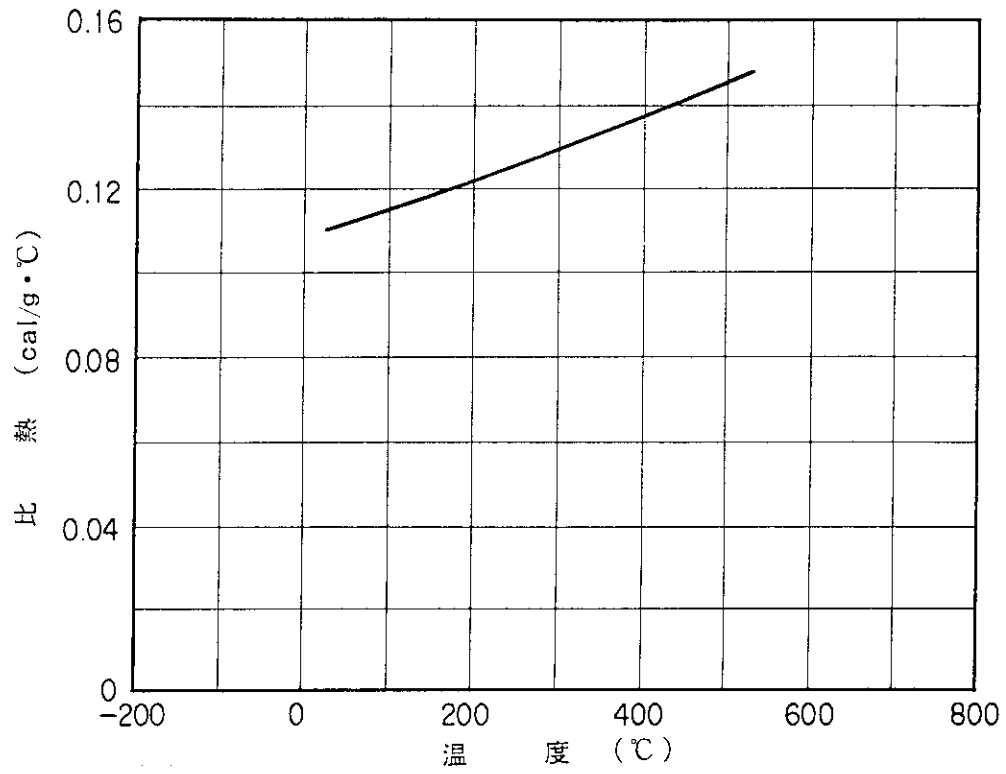
比 熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
27	0.111
227	0.125
527	0.148

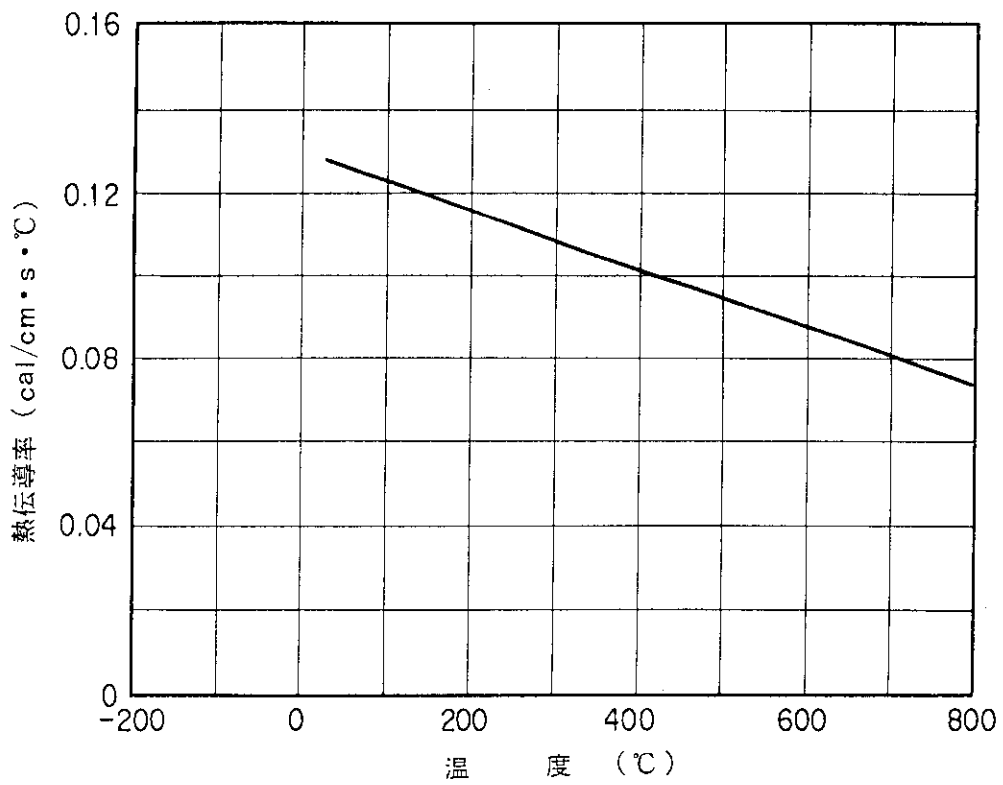
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
38	0.128
149	0.120
316	0.108
482	0.0967
649	0.0847
816	0.0732

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第 7. 2. 2(a) 図 構造用炭素鋼の比熱



第 7. 2. 2(b) 図 構造用炭素鋼の熱伝導率

第7.2.3表 軟鋼の熱的性質

比重量	7.75	(g/cm^3)
遷移温度	1450	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	65	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

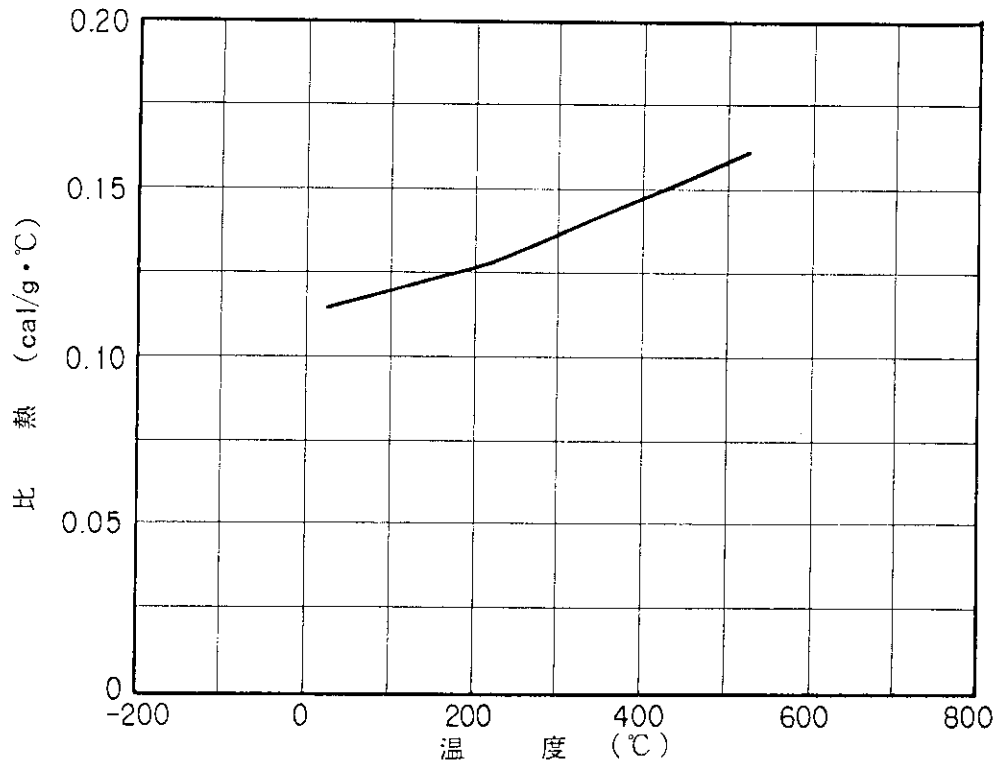
比熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
27	0.113
227	0.126
527	0.165

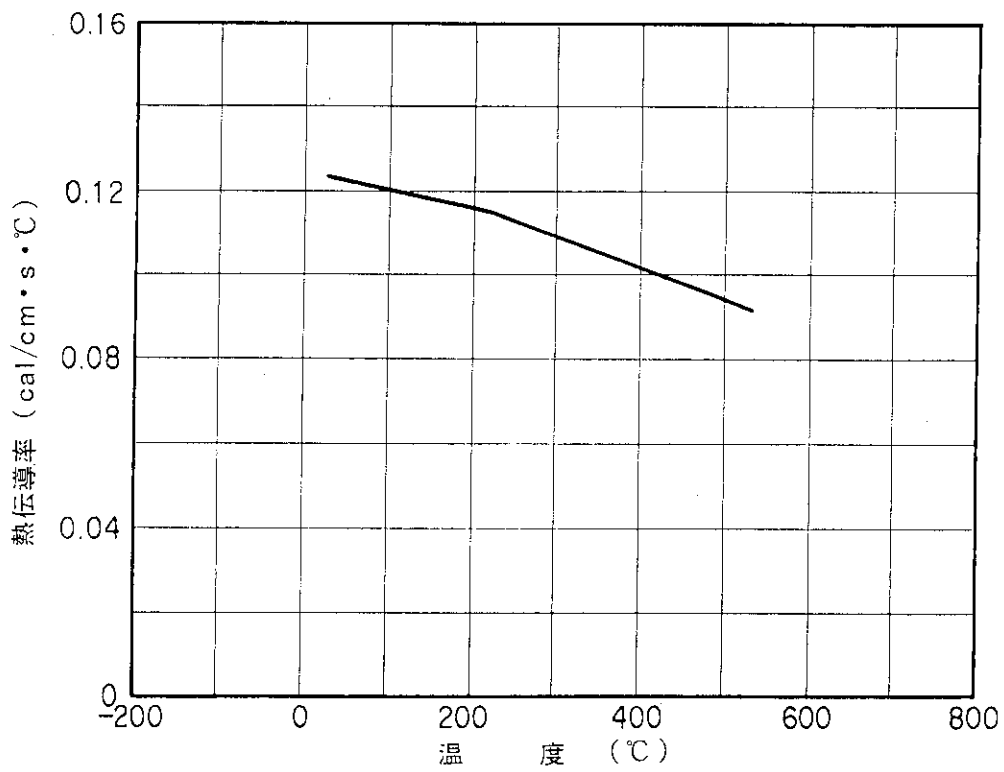
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
27	0.123
227	0.114
527	0.0912

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第7.2.3(a)図 軟鋼の比熱



第7.2.3(b)図 軟鋼の熱伝導率

第7.2.4表 球状黒鉛鑄鉄の熱的性質

比重量	7.83	(g/cm^3)
遷移温度	1450	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	65	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

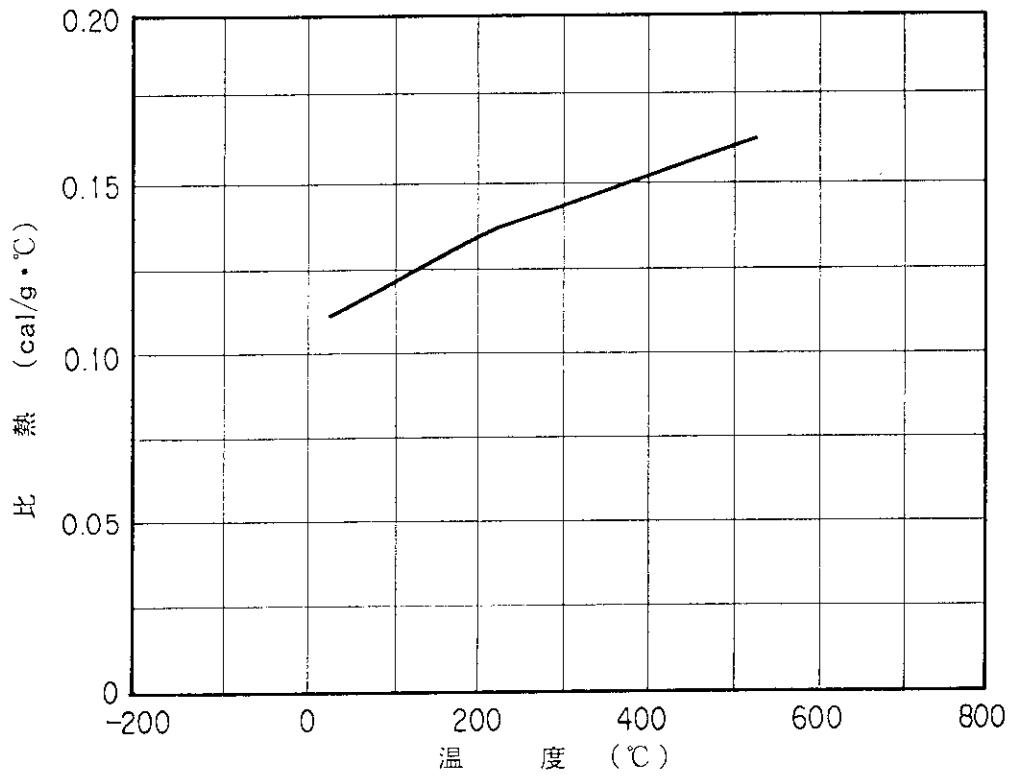
比 熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
27	0.115
227	0.135
527	0.162

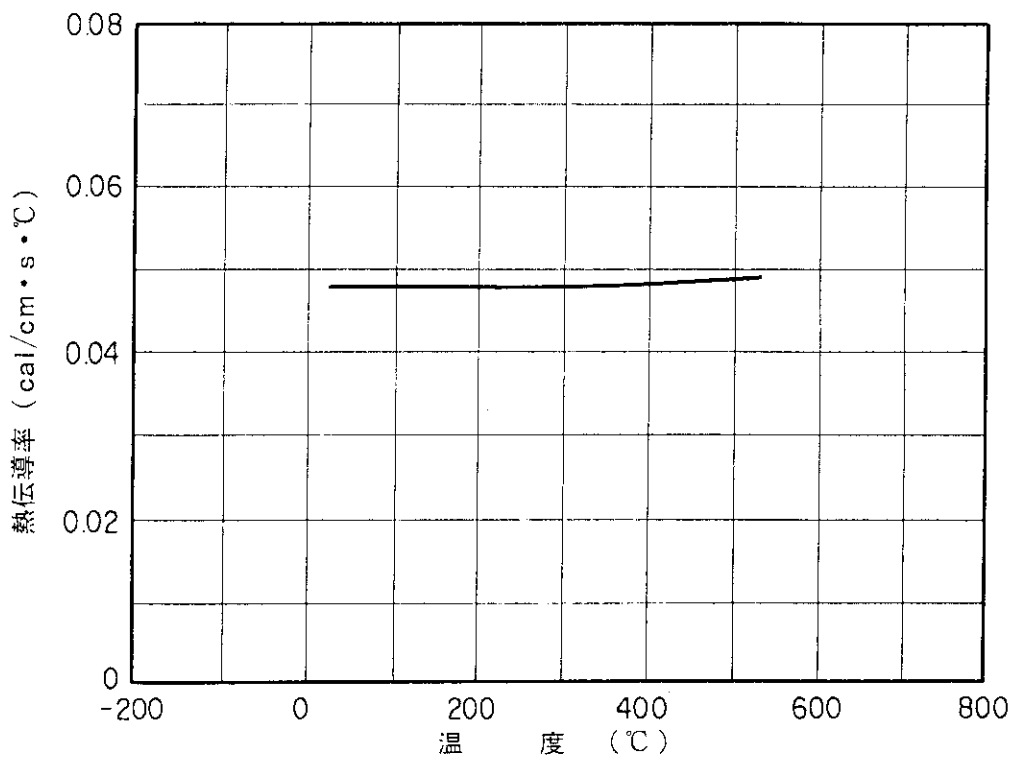
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
27	0.0480
227	0.0480
527	0.0490

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第 7. 2. 4(a) 図 球状黒鉛鑄鉄の比熱



第 7. 2. 4(b) 図 球状黒鉛鑄鉄の熱伝導率

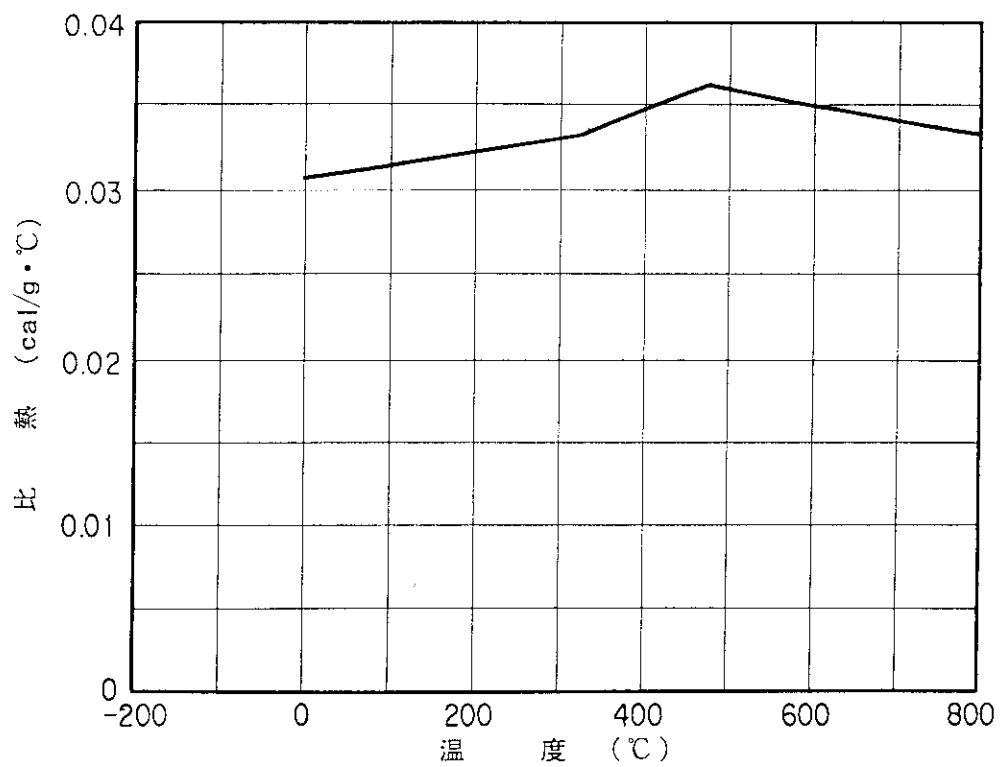
第7.2.5表 鉛の熱的性質

比重量	11.4	(g/cm^3)
遷移温度	327.5	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	5.7	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

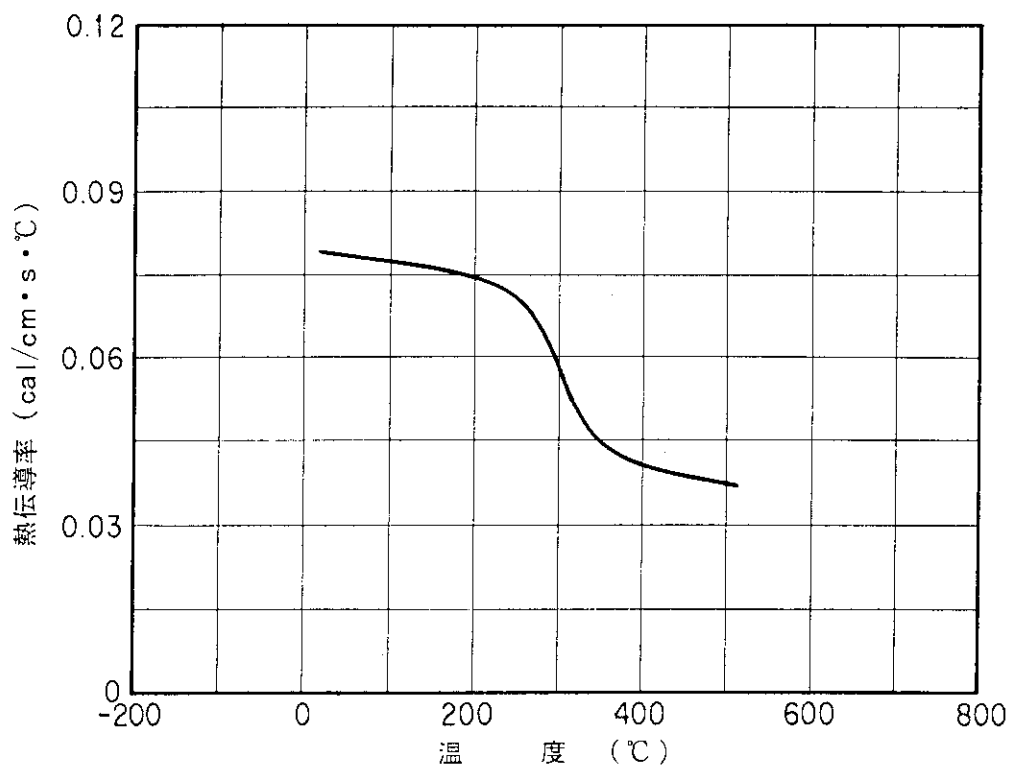
比 熱	
温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	比 熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
0	0.0305
100	0.0315
327.5	0.0338
482	0.037
1000	0.0328

熱 伝 導 率	
温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
20	0.0826
98.3	0.0809
260	0.070
332	0.050
527	0.036

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第7.2.5(a)図 鉛の比熱



第7.2.5(b)図 鉛の熱伝導率

第7.2.6表 銅の熱的性質

比重量	8.96	(g/cm^3)
遷移温度	1083	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	32.0	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

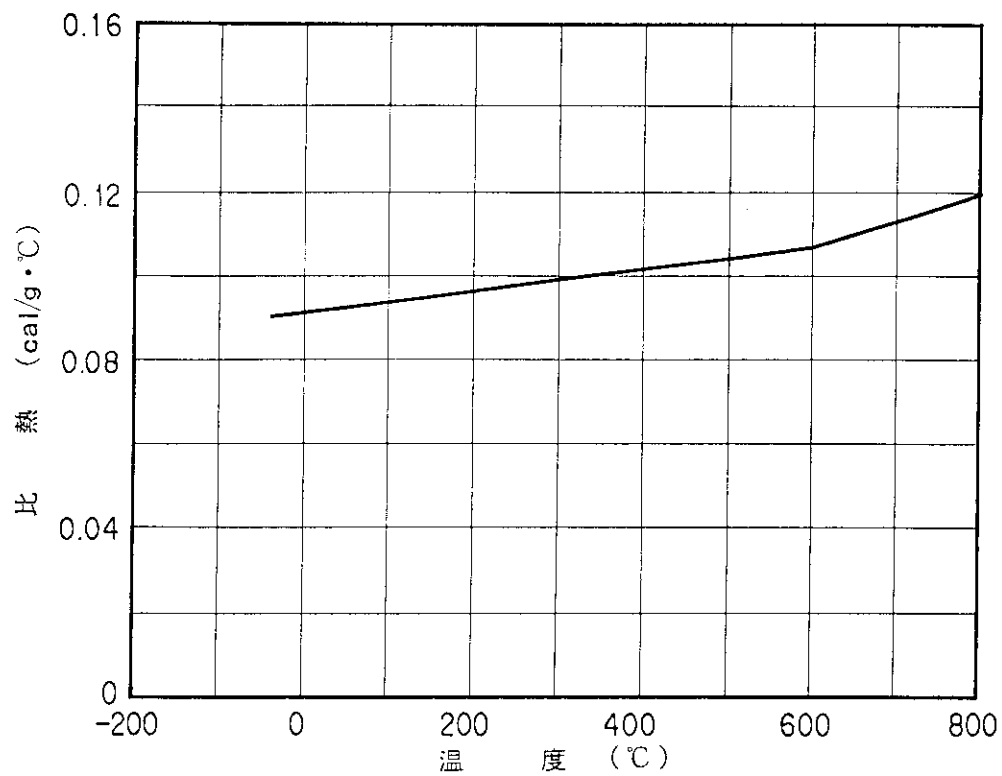
比熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-50	0.089
50	0.093
200	0.096
400	0.101
600	0.108
800	0.120

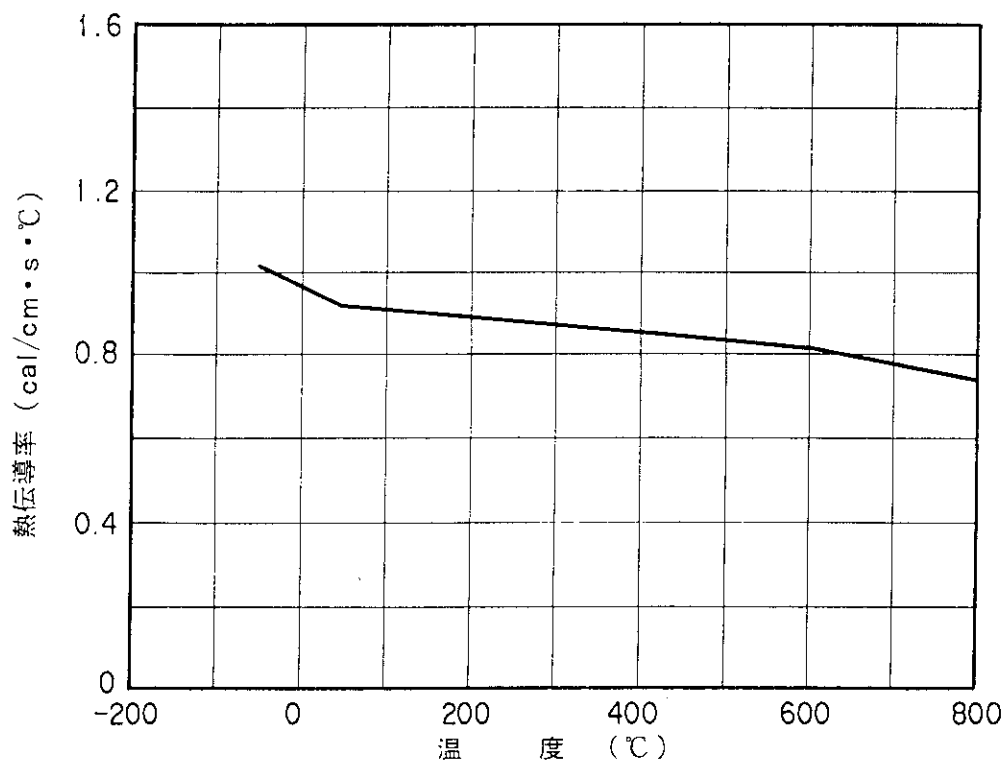
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-50	1.01
50	0.911
200	0.889
400	0.847
600	0.806
800	0.758

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第7.2.6(a)図 銅の比熱



第7.2.6(b)図 銅の熱伝導率

第7.2.7表 アルミニウムの熱的性質

比重量	2.70	(g/cm^3)
遷移温度	600	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	95	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

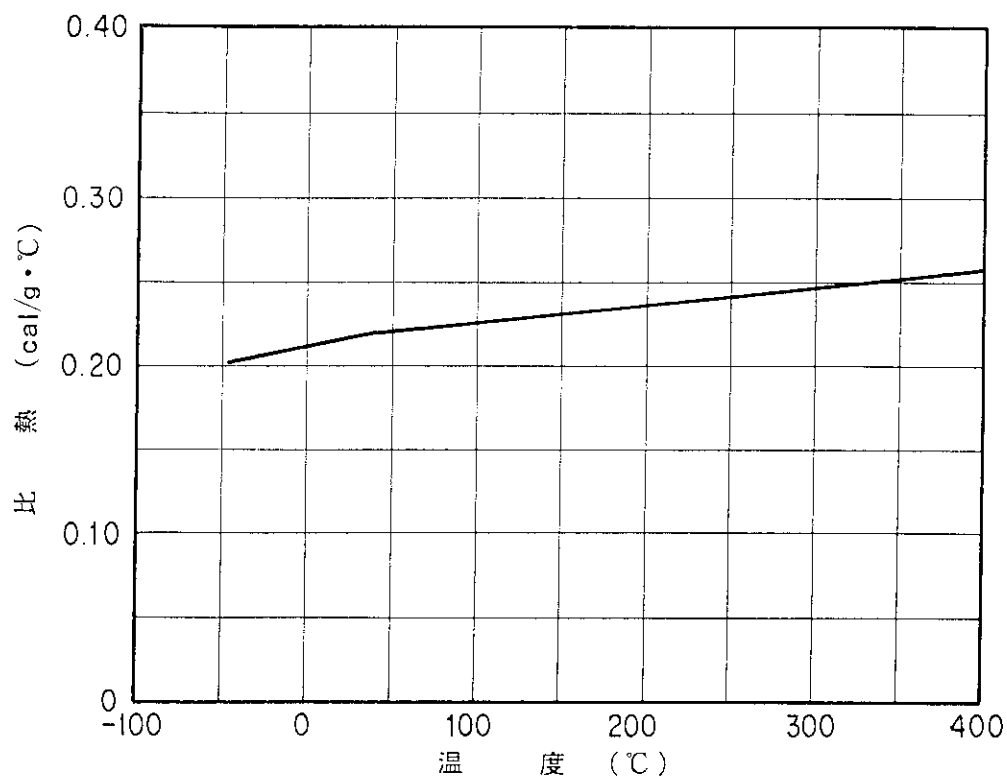
比熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-40	0.200
20	0.215
100	0.223
200	0.246
400	0.258

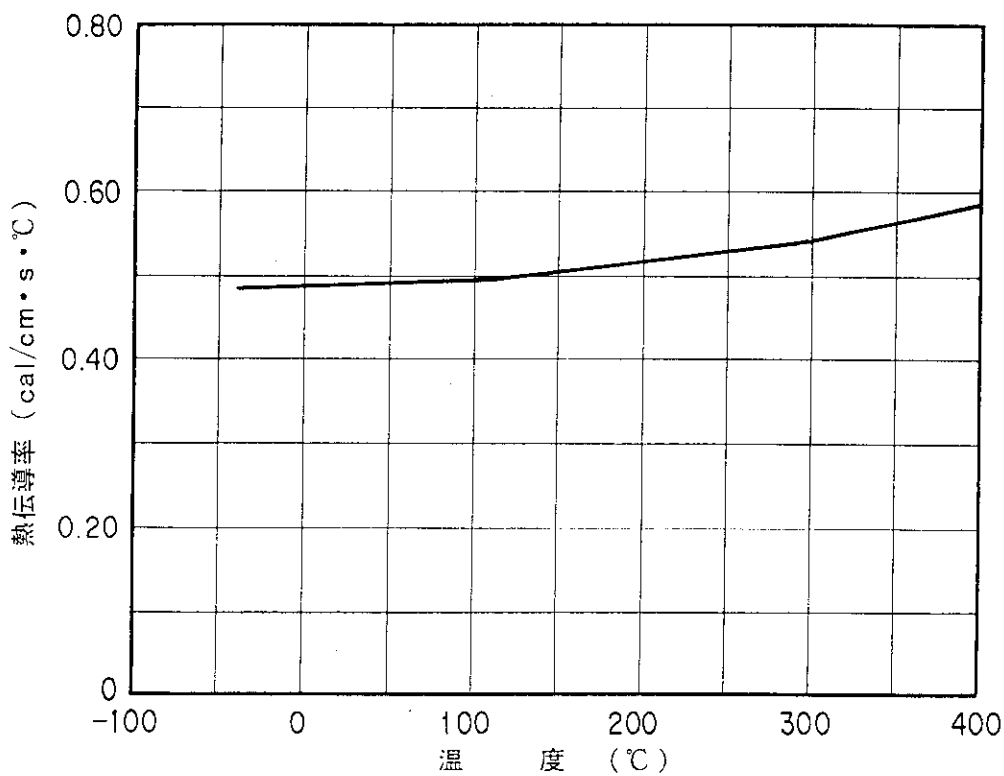
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-40	0.486
20	0.486
100	0.492
300	0.550
400	0.594

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第 7.2.7(a) 図 アルミニウムの比熱



第 7.2.7(b) 図 アルミニウムの熱伝導率

第7.2.8表 ジルカロイ-2, -4の熱的性質

比重量	6.55	(g/cm^3)
遷移温度	1852	($^{\circ}\text{C}$)
潜熱	55	($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)

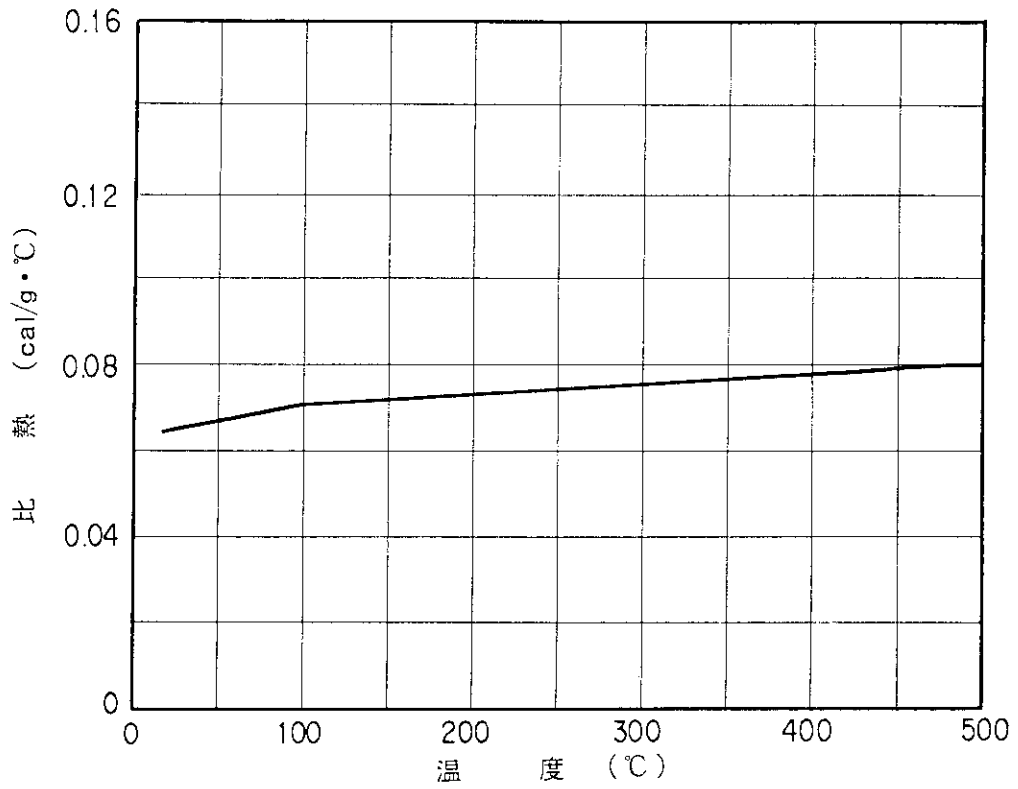
比 熱

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
20	0.0685
100	0.0704
300	0.0752
500	0.0800

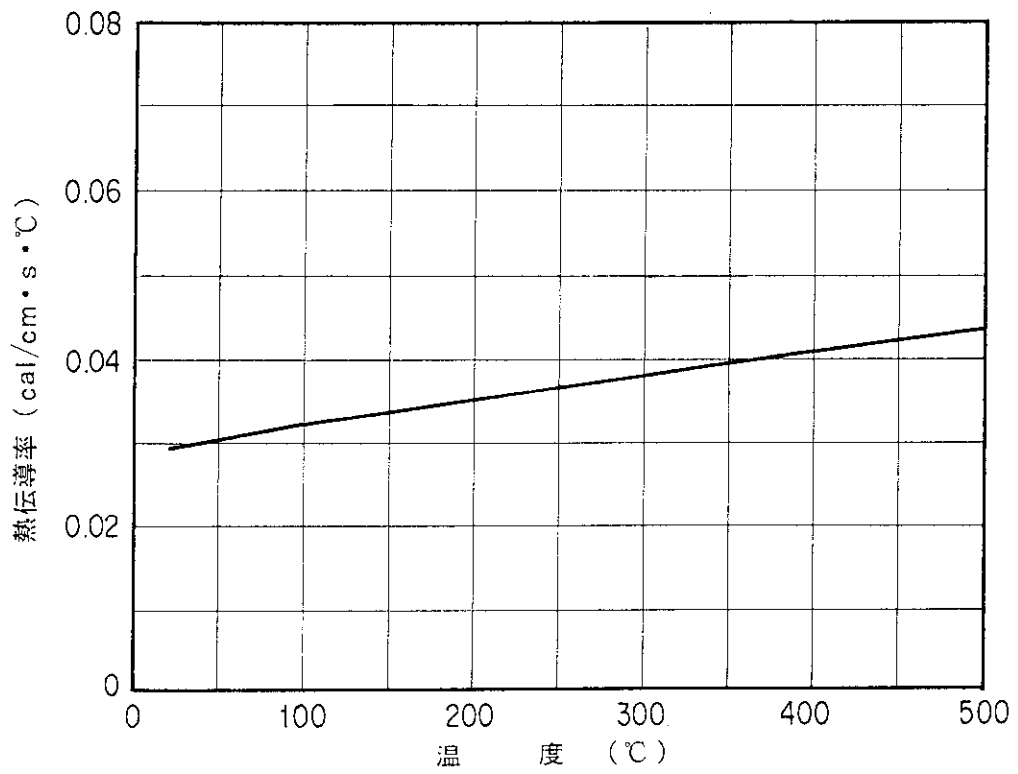
熱伝導率

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)
20	0.0299
100	0.0323
300	0.0384
500	0.0445

CGS - cal - $^{\circ}\text{C}$ 単位系



第 7.2.8(a)図 ジルカロイ-2, -4 の比熱



第 7.2.8(b)図 ジルカロイ-2, -4 の熱伝導率

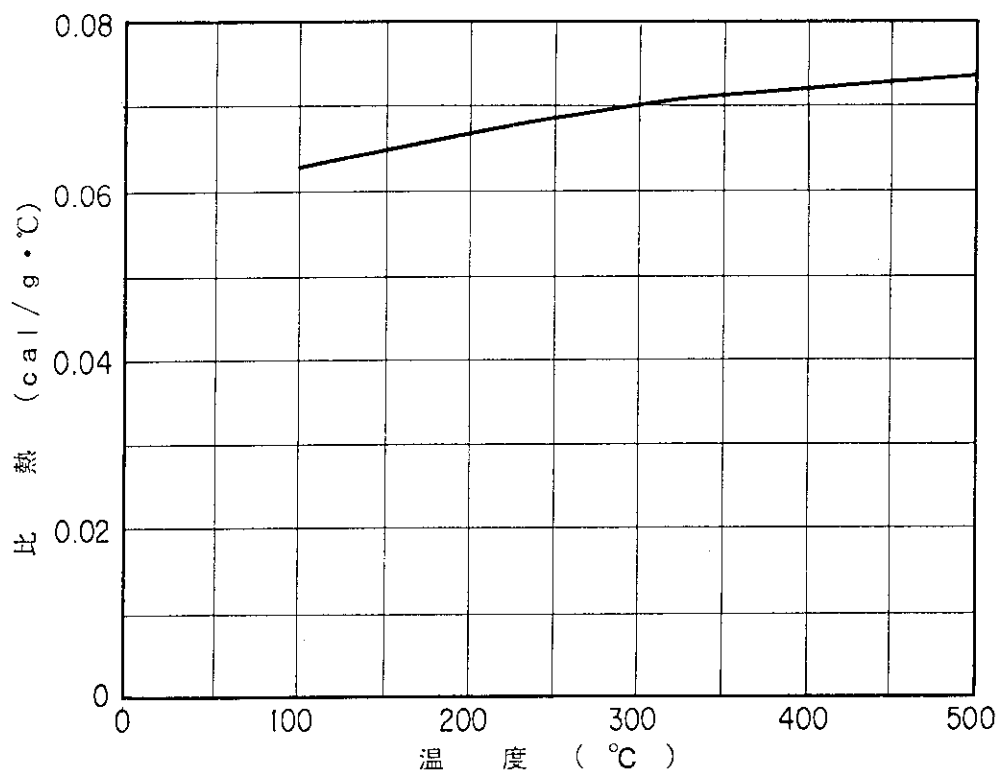
第7.2.9表 二酸化ウランの熱的性質

比重量	10.96	(g/cm ³)
遷移温度	2880	(°C)
潜熱		(cal/g·°C)

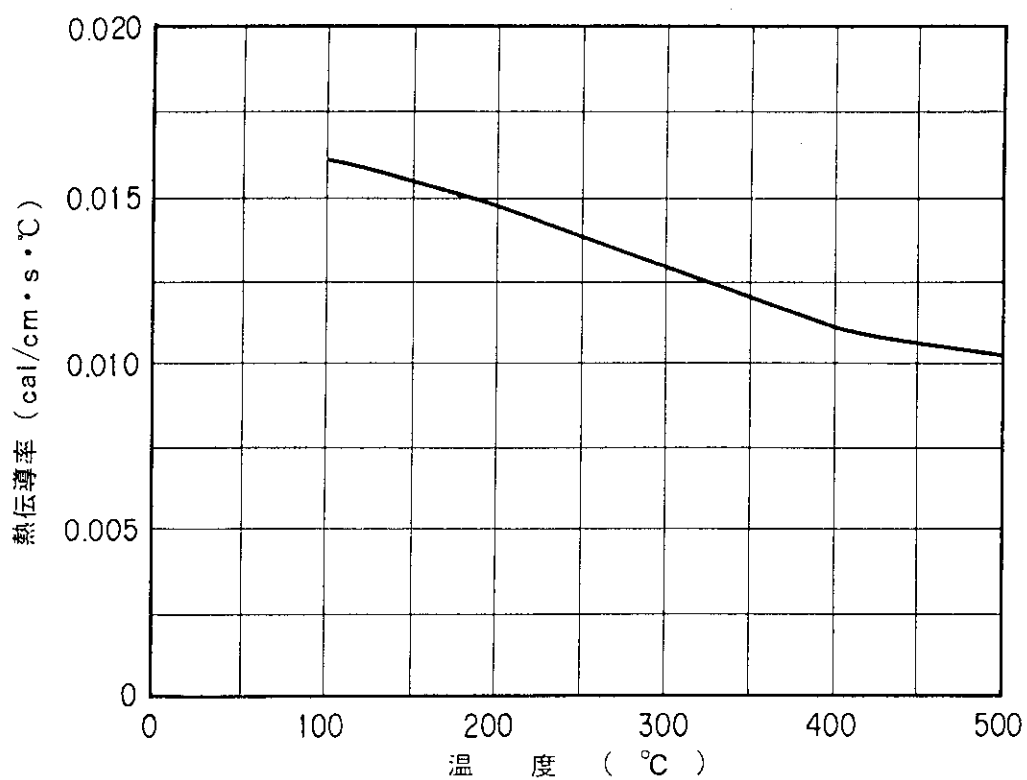
比 熱	
温 度 (°C)	比 熱 (cal/g·°C)
100	0.0657
200	0.0688
300	0.0791
400	0.0726
500	0.0738

熱 伝 導 率	
温 度 (°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)
100	0.0169
200	0.0144
300	0.0128
400	0.0114
500	0.0103

CGS - cal - °C 単位系



第 7.2.9(a) 図 二酸化ウランの比熱



第 7.2.9(b) 図 二酸化ウランの熱伝導率

第 7.2.10 表 シリコンゴムの熱的性質

比重量	1.3	(g/cm ³)
遷移温度		(°C)
潜熱		(cal/g·°C)

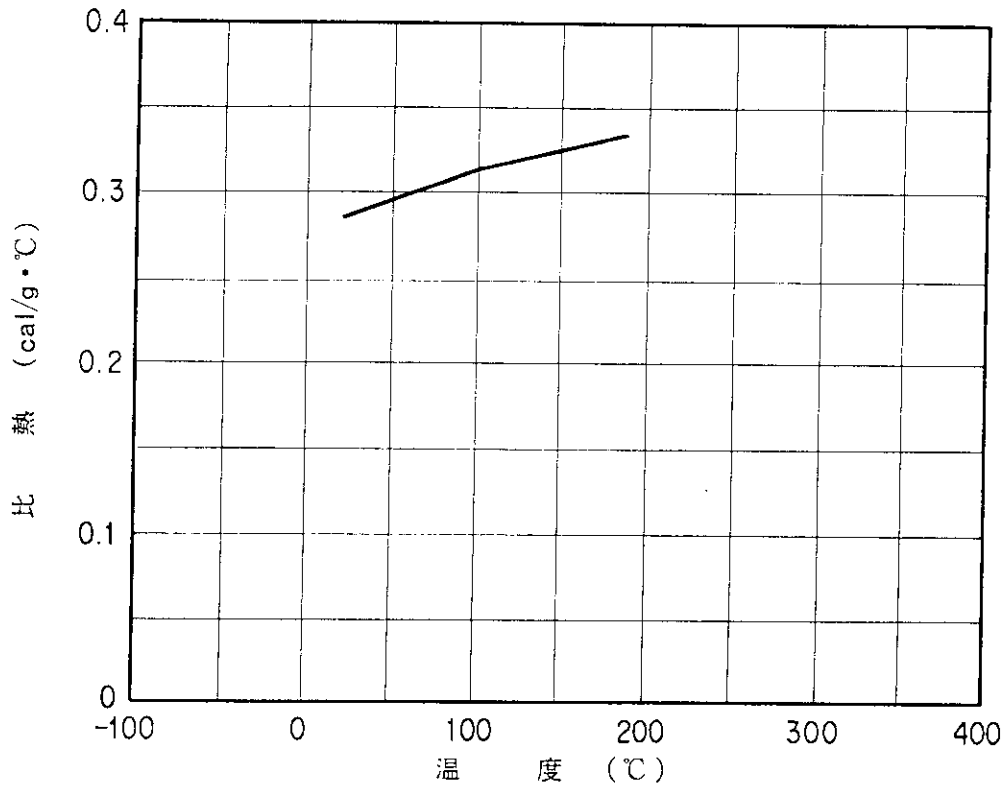
比 熱

温度 (°C)	比熱 (cal/g·°C)
20	0.284
100	0.314
180	0.334

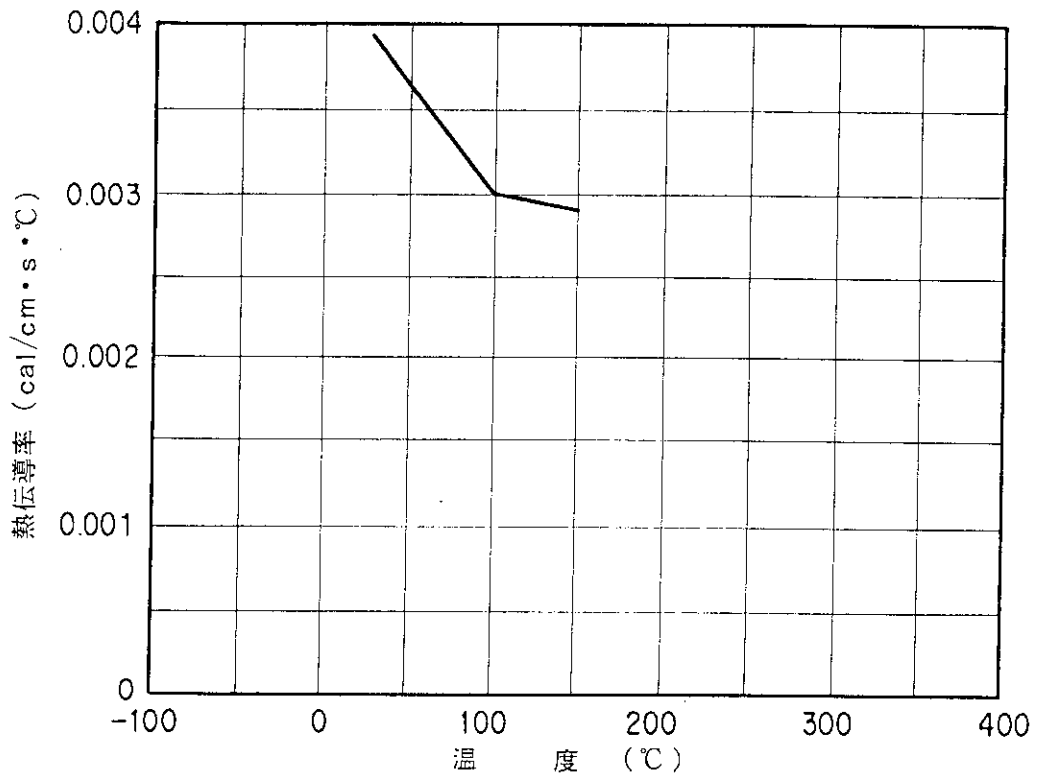
熱伝導率

温度 (°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)
25	0.0039
100	0.0030
150	0.0029

CGS - cal - °C 単位系



第 7. 2.10(a) 図 シリコンゴムの比熱

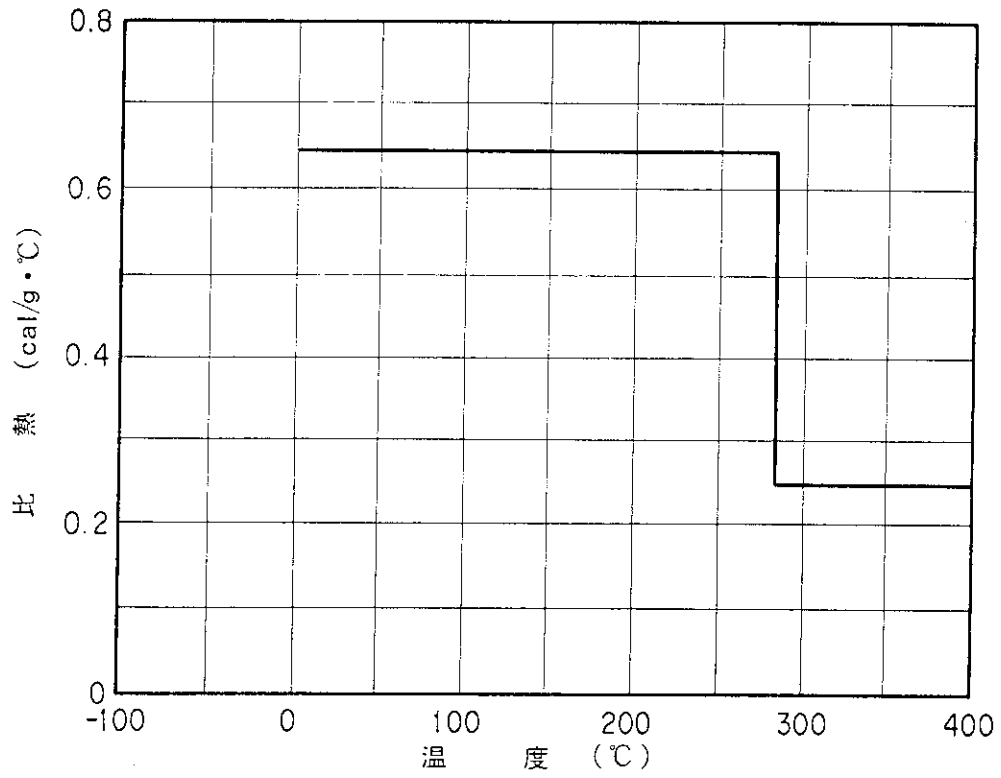


第 7. 2.10(b) 図 シリコンゴムの熱伝導率

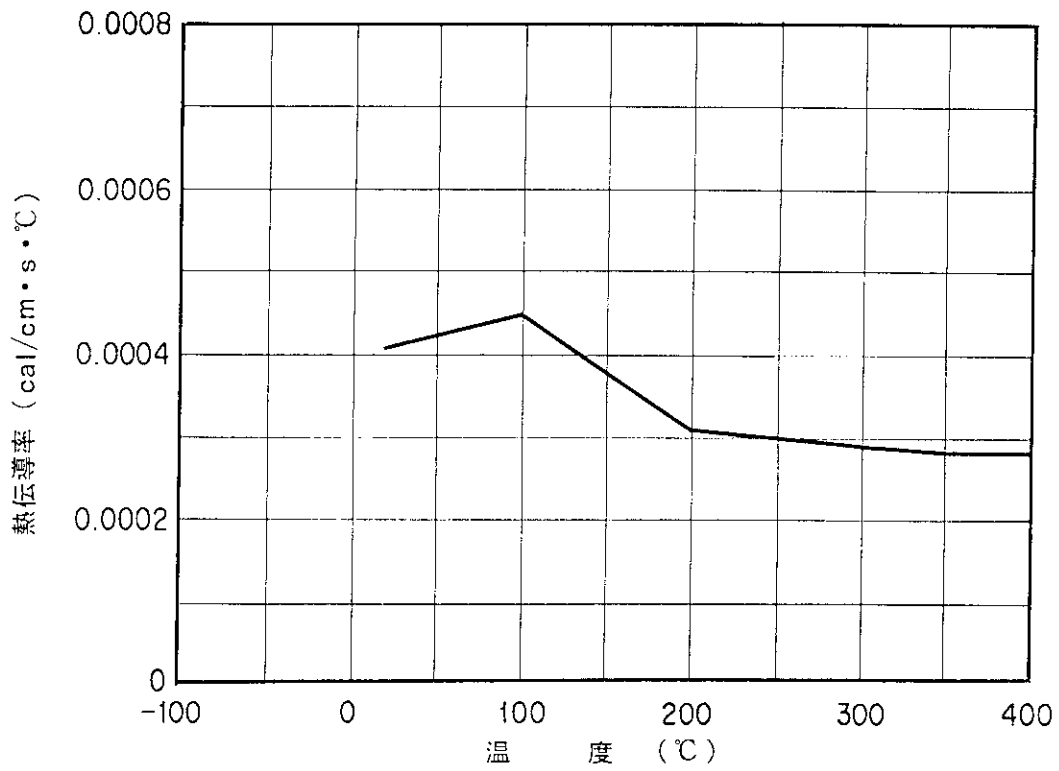
第7.2.11表 ファプライウッドの熱的性質

比重量	0.56	(g/cm ³)
遷移温度		(°C)
潜熱		(cal/g·°C)
比 熱		
温度 (°C)	比 熱 (cal/g·°C)	
285 未満	0.62	
285 以上	0.25	
熱 伝 導 率		
温度 (°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)	
20	4.06 × 10 ⁻⁴	
100	4.53 × 10 ⁻⁴	
200	3.11 × 10 ⁻⁴	
355	2.86 × 10 ⁻⁴	
355 以上	2.86 × 10 ⁻⁴	

CGS - cal - °C 単位系



第7.2.11(a)図 ファプライウッドの比熱



第7.2.11(b)図 ファプライウッドの熱伝導率

第 7.2.12 表 バルサウツの熱的性質

比重量	0.16	(g/cm ³)
遷移温度		(°C)
潜熱		(cal/g·°C)

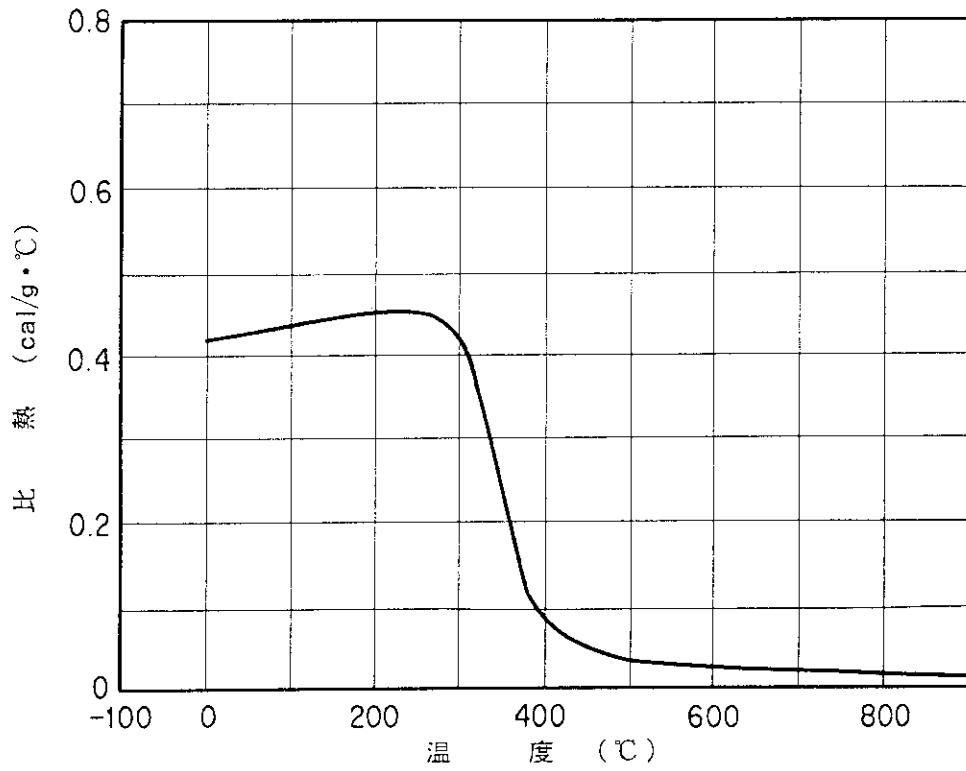
比 熱

温度 (°C)	比熱 (cal/g·°C)
0	0.417
100	0.429
200	0.455
285	0.446
320	0.346
350	0.219
500	0.031
900	0.017

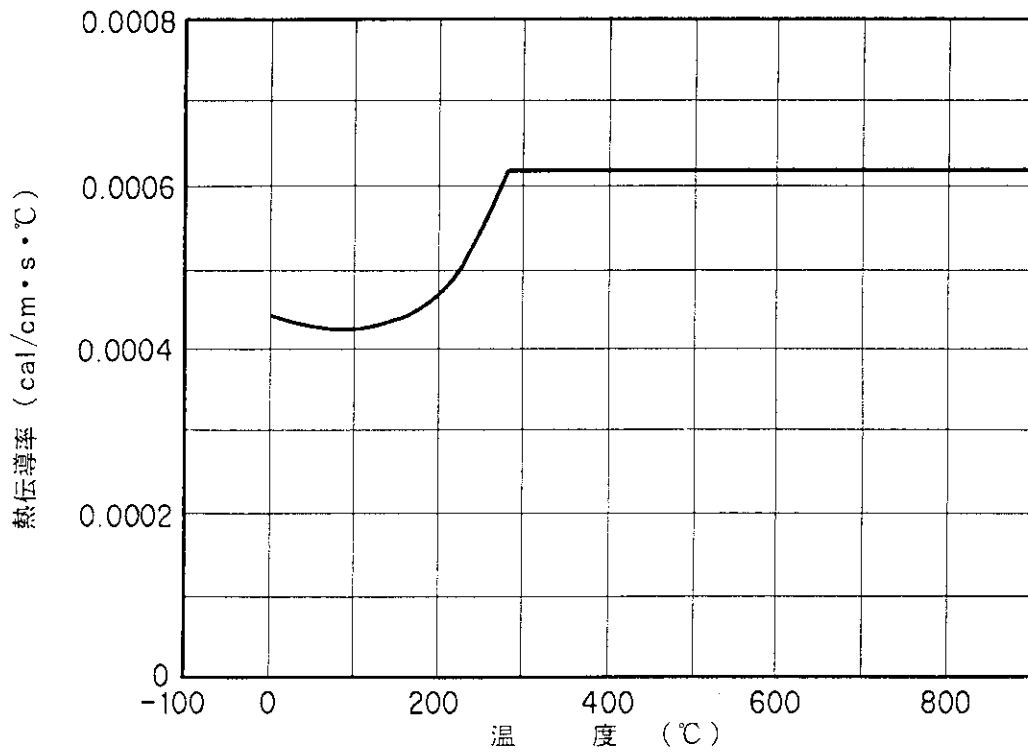
熱伝導率

温度 (°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)
0	4.47×10^{-4}
100	4.20×10^{-4}
200	4.68×10^{-4}
285	6.11×10^{-4}
320	6.11×10^{-4}
350	6.11×10^{-4}
500	6.11×10^{-4}
900	6.11×10^{-4}

CGS - cal - °C 単位系



第 7. 2.12(a) 図 バルサウツドの比熱



第 7. 2.12(b) 図 バルサウツドの熱伝導率

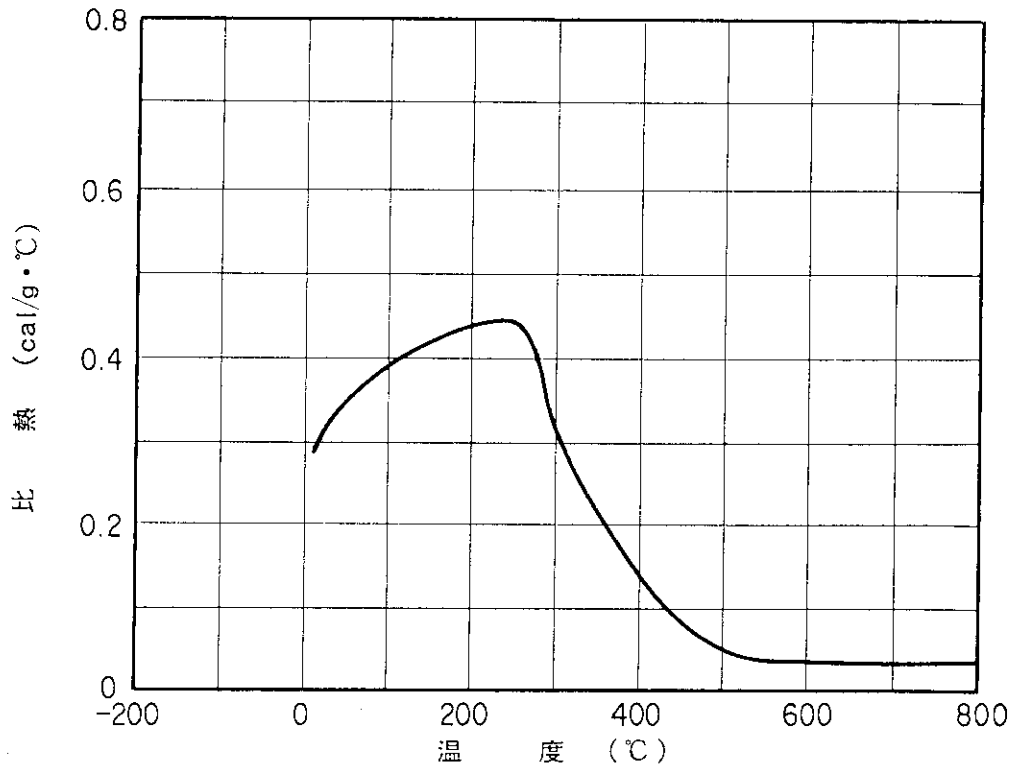
第7.2.13表 硬質ポリウレタンホームの熱的性質

比重量	0.04	(g/cm ³)
遷移温度	205	(°C)
潜熱	0.4	(cal/g·°C)

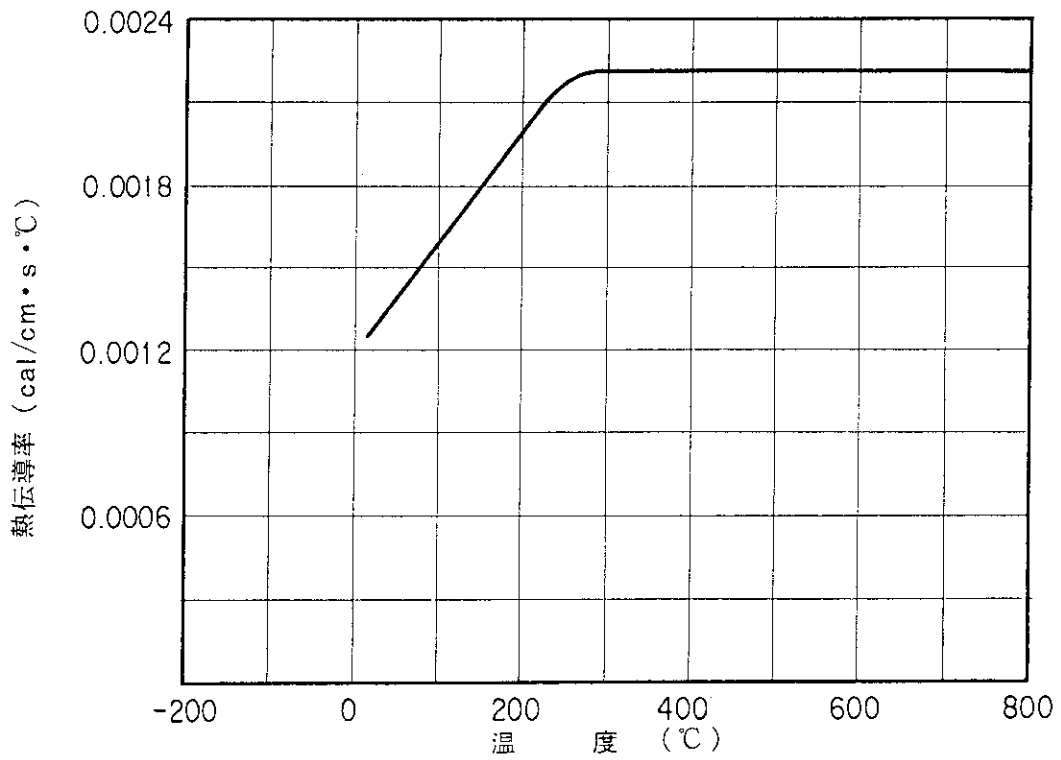
比 熱	
温 度 (°C)	比 熱 (cal/g·°C)
20	0.284
50	0.334
100	0.393
250	0.444
300	0.320
500	0.046
800	0.036

熱 伝 導 率	
温 度 (°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)
20	1.28×10^{-3}
50	1.39×10^{-3}
100	1.61×10^{-3}
250	2.24×10^{-3}
300	2.24×10^{-3}
500	2.24×10^{-3}
800	2.24×10^{-3}

CGS - cal - °C 単位系



第 7. 2.13(a) 図 硬質ポリウレタンホムの比熱

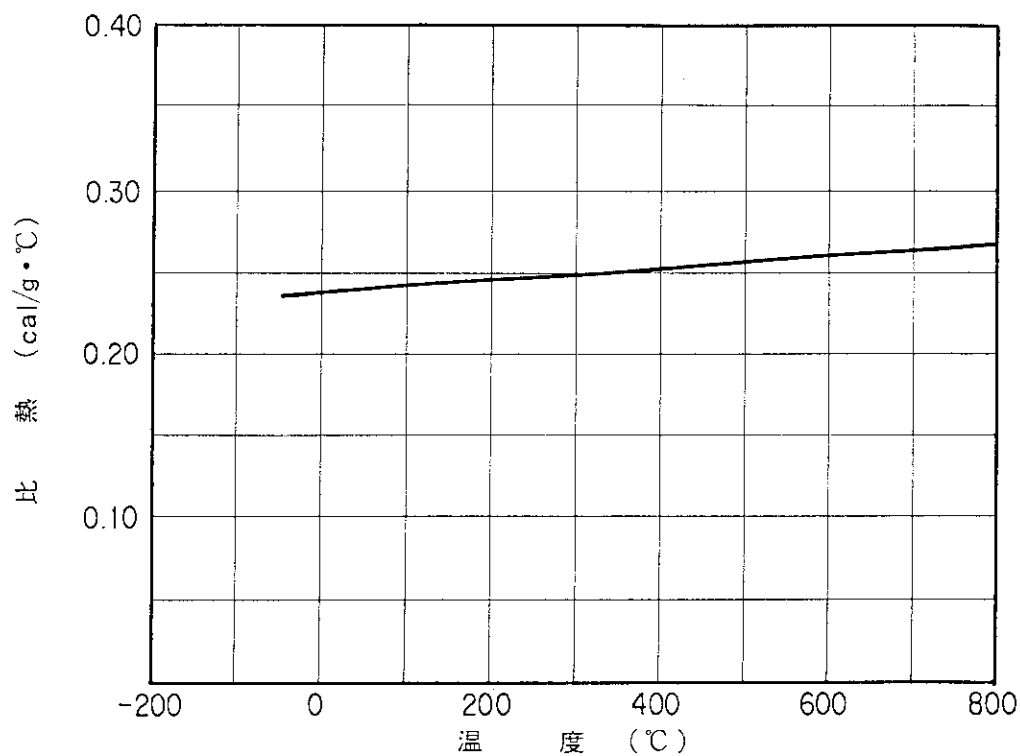


第 7. 2.13(b) 図 硬質ポリウレタンホムの熱伝導率

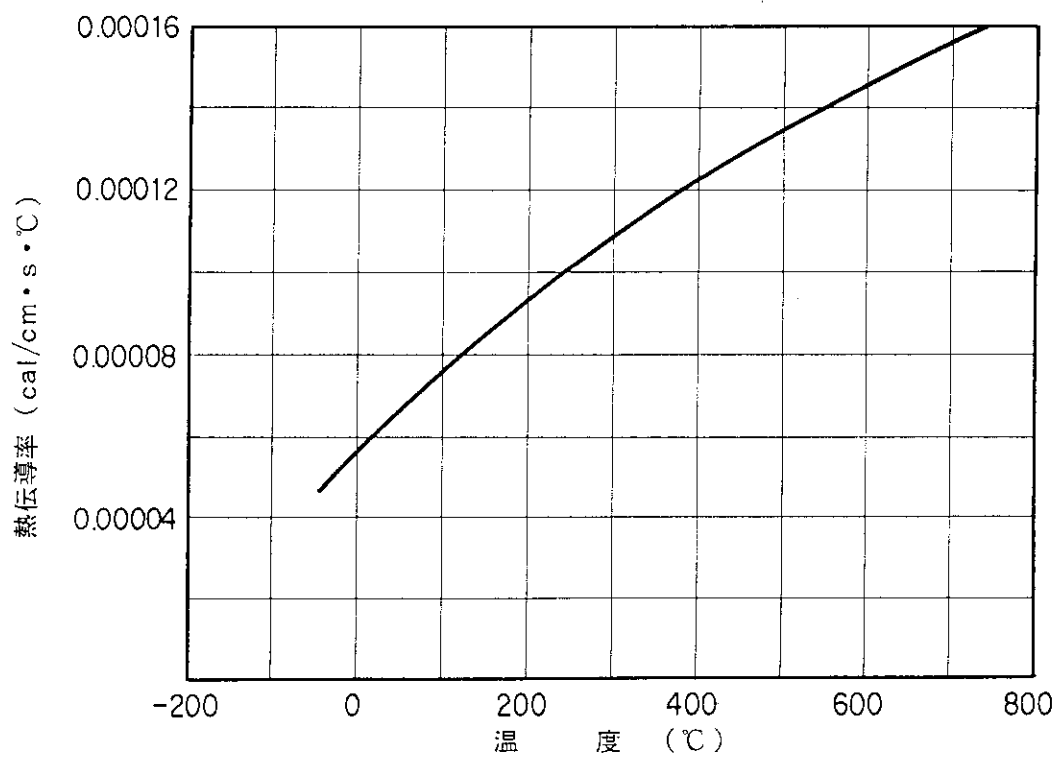
第7.2.14表 空気の熱的性質

温度 (°C)	密度 (g/cm ³)	比熱 (cal/g·°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)
-50	0.00153	0.240	4.78×10^{-5}	0.095×10^{-4}	0.73
0	0.00125	0.240	5.75×10^{-5}	0.138×10^{-4}	0.72
60	0.00103	0.241	6.86×10^{-5}	0.196×10^{-4}	0.71
100	0.000916	0.242	7.56×10^{-5}	0.239×10^{-4}	0.70
200	0.000722	0.245	9.22×10^{-5}	0.358×10^{-4}	0.69
400	0.000508	0.255	12.1×10^{-5}	0.645×10^{-4}	0.69
600	0.000391	0.267	14.6×10^{-5}	0.989×10^{-4}	0.70
800	0.000319	0.276	16.9×10^{-5}	0.37×10^{-4}	0.71

CGS - cal - °C 単位系



第 7. 2.14(a) 図 空 気 の 比 熱

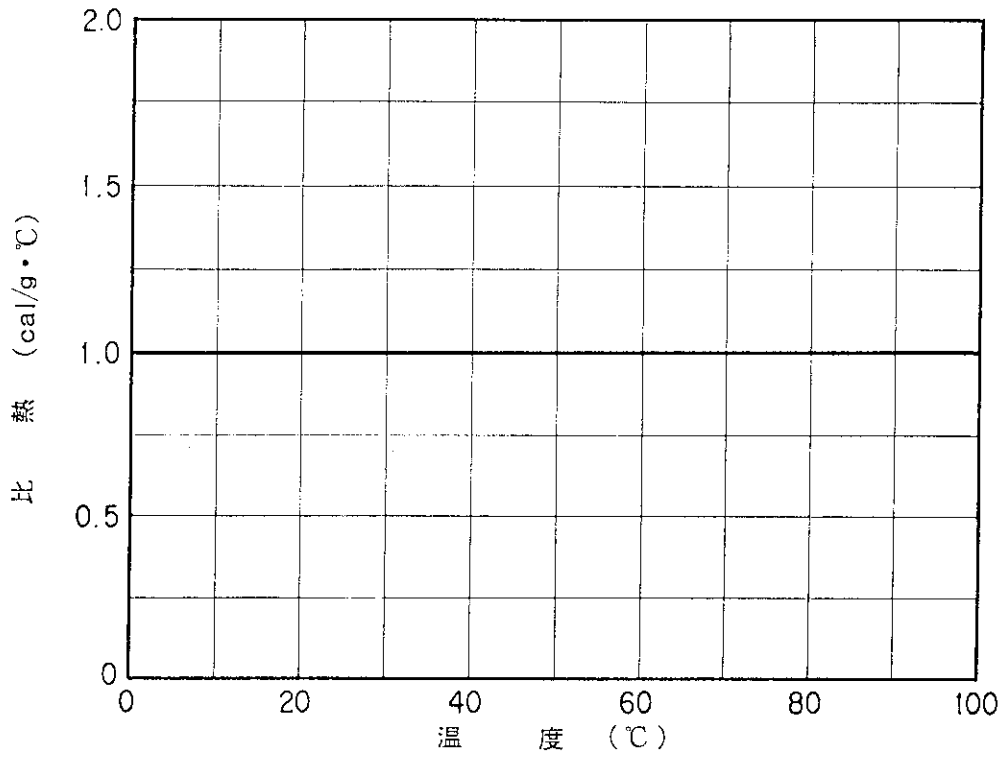


第 7. 2.14(b) 図 空 気 の 熱 伝 導 率

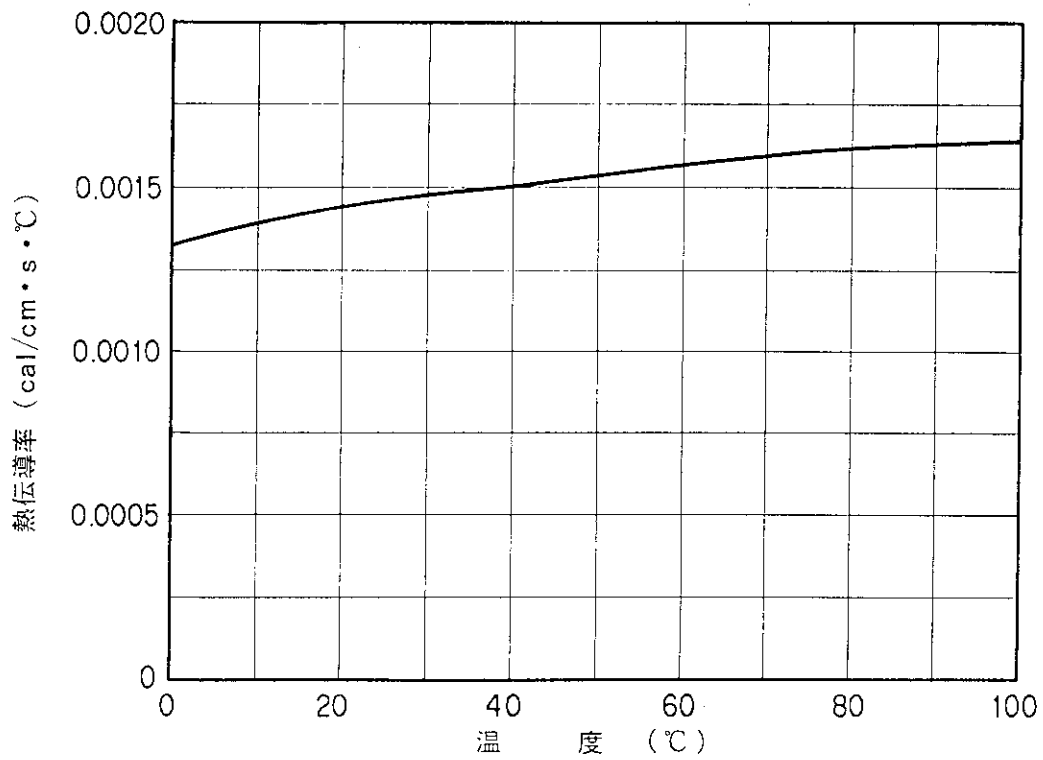
第7.2.15表 水の熱的性質

温度 (°C)	密度 (g/cm ³)	比熱 (cal/g·°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)
0	999.9	1.01	1.32×10^{-3}	1.79×10^{-6}	13.6
20	998.2	0.999	1.42×10^{-3}	1.01×10^{-6}	7.11
40	992.3	0.998	1.50×10^{-3}	0.668×10^{-6}	4.41
60	983.4	1.00	1.56×10^{-3}	0.480×10^{-6}	3.02
80	971.8	1.00	1.61×10^{-3}	0.368×10^{-6}	2.23
100	958.4	1.01	1.63×10^{-3}	0.297×10^{-6}	1.76

CGS - cal - °C 単位系



第7.2.15(a)図 水の比熱



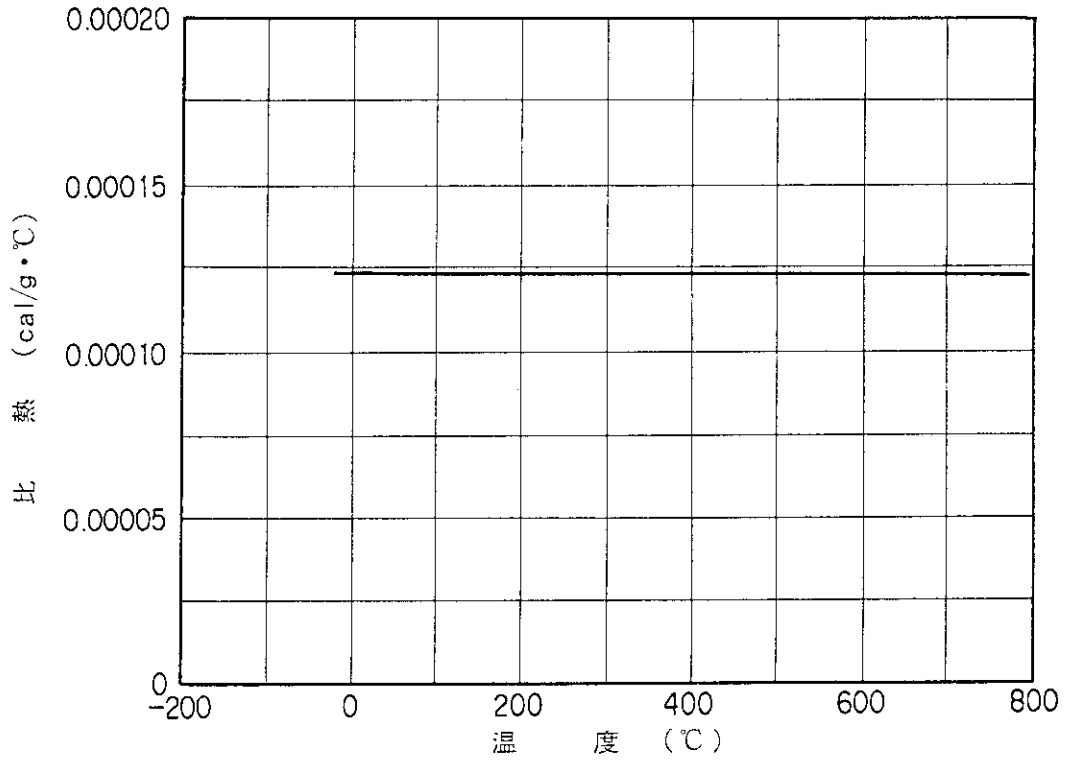
第7.2.15(b)図 水の熱伝導率

第7.2.16表 ヘリウムの熱的性質

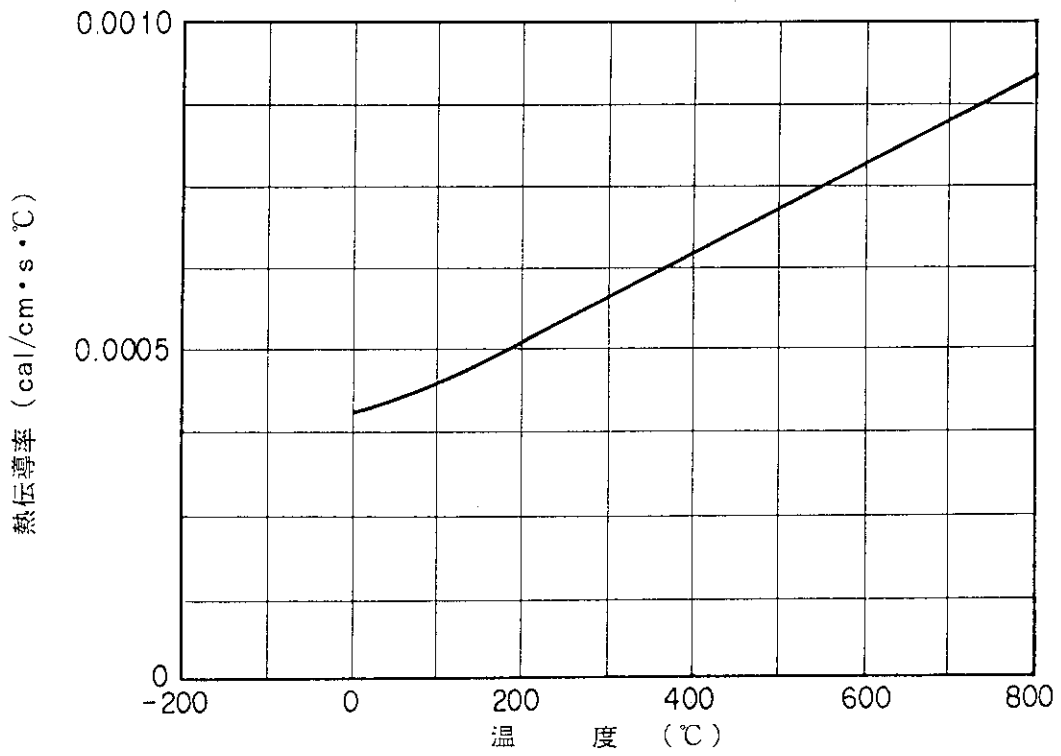
温度 (°C)	比重量 (g/cm ³)	比熱 (cal/g·°C)	熱伝導率 (cal/cm·s·°C)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)	膨張率 (1/°C)
0	1.76×10^{-4}	1.24	3.41×10^{-4}	1.061×10^{-4}	0.6806	3.663×10^{-3}
40	1.54×10^{-4}	1.24	3.76×10^{-4}	1.481×10^{-4}	0.6767	3.195
100	1.29×10^{-4}	1.24	4.27×10^{-4}	1.794×10^{-4}	0.6718	2.681
140	1.17×10^{-4}	1.24	4.60×10^{-4}	2.131×10^{-4}	0.6694	2.421
200	1.02×10^{-4}	1.24	5.08×10^{-4}	2.683×10^{-4}	0.6667	2.114
500	0.623×10^{-4}	1.24	7.26×10^{-4}	6.185×10^{-4}	0.6602	1.294
800	0.449×10^{-4}	1.24	9.39×10^{-4}	10.82×10^{-4}	0.6554	0.932

* 膨張率 = $1 / (\text{絶対温度})$ での計算値。

CGS - cal - °C 単位系



第 7. 2.16(a) 図 ヘリウムの比熱

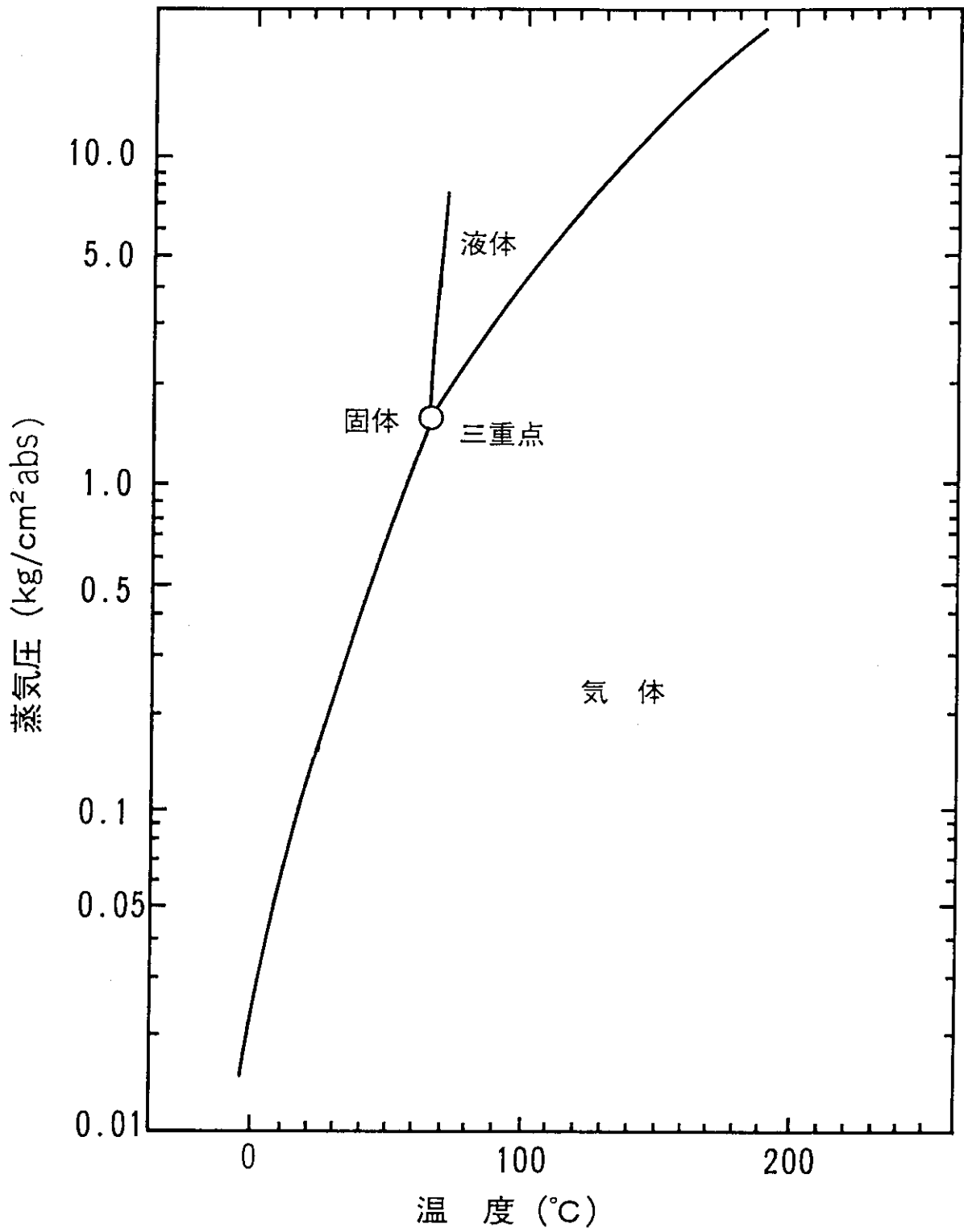


第 7. 2.16(b) 図 ヘリウムの熱伝導率

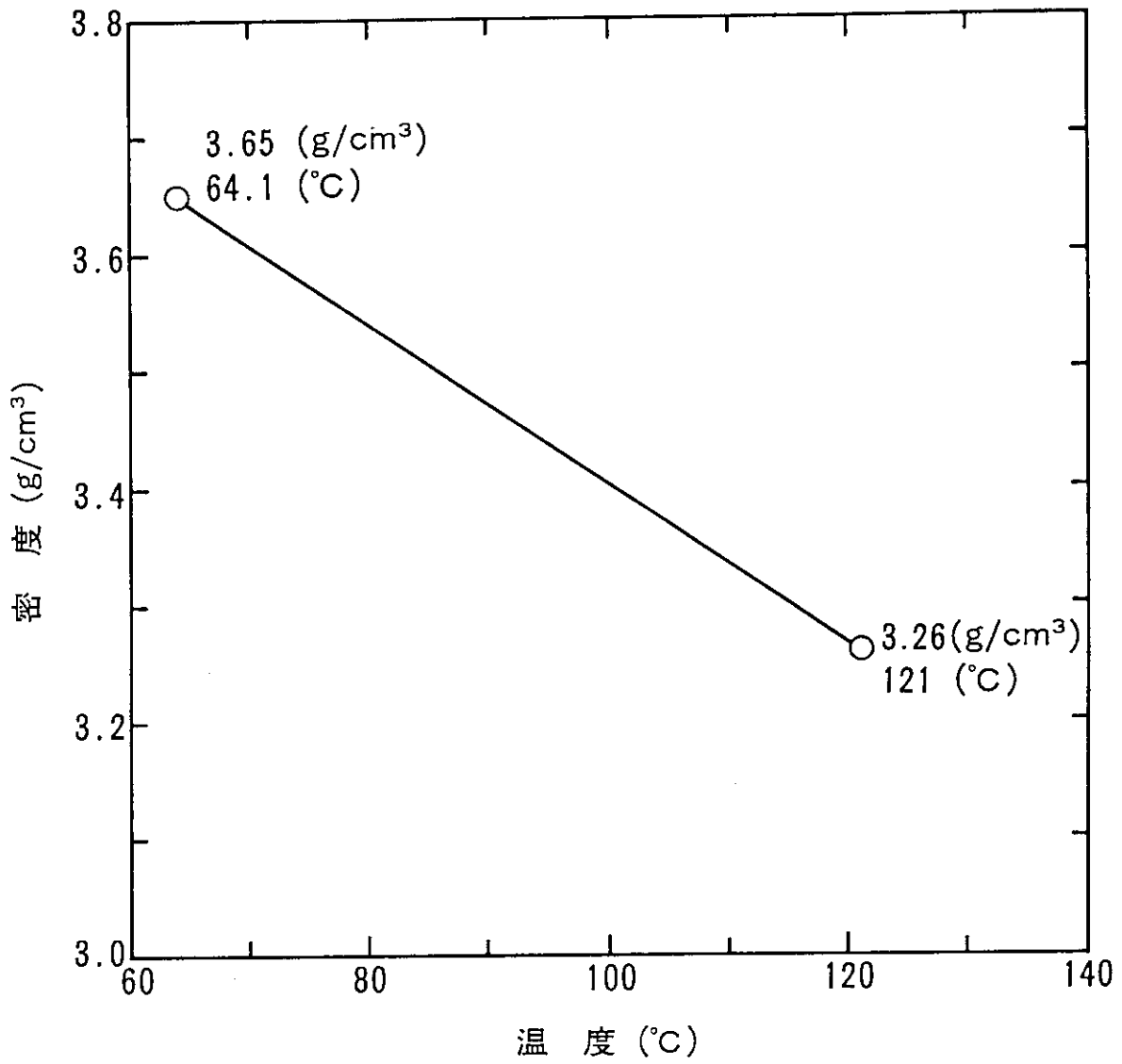
第7.2.17表 六フッ化ウランの熱的性質

昇華温度 (1.03 kgf/cm ² abs)	56.6 °C	
三重点	64.1 °C	
密度 {	固体(20 °C)	5.09 g/cm ³
	液体(64.1 °C)	3.65 g/cm ³
	液体(121 °C)	3.26 g/cm ³
昇華潜熱 (63.9 °C)	32.3 cal/g	
融解潜熱 (63.9 °C)	13.1 cal/g	
蒸発潜熱 (63.9 °C)	19.5 cal/g	
臨界圧	47.02 kgf/cm ² abs	
臨界温度	230.2 °C	

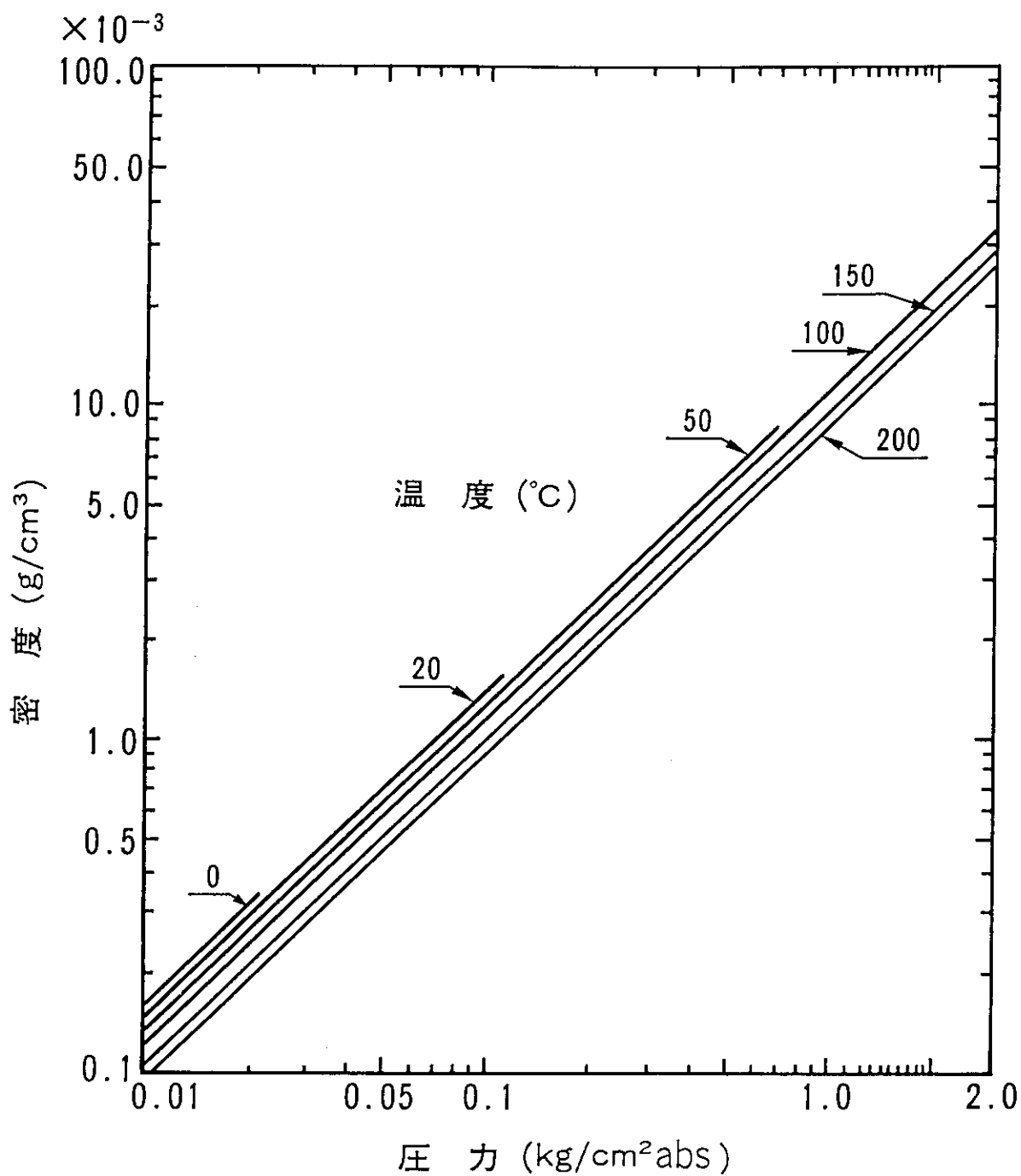
CGS - cal - °C 単位系



第7.2.17(a)図 六フッ化ウラン蒸気圧



第 7. 2.17(b) 図 液体六フッ化ウランの密度



第 7. 2.17(c) 図 気体六フッ化ウランの密度

7.3 熱輻射計算データ

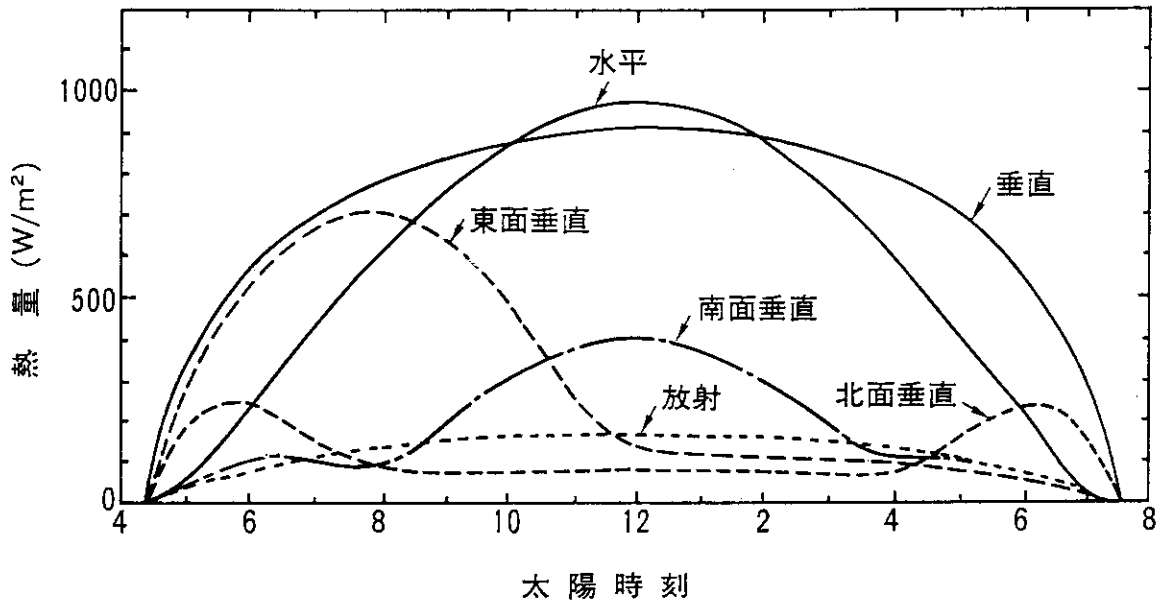
太陽熱輻射および火災条件下における熱輻射計算に必要なデータを第7.3.1および7.3.2表に示す。太陽熱の入熱データの参考データを第7.3.1および7.3.2図に示す。

第7.3.1表 種々の表面の放射率

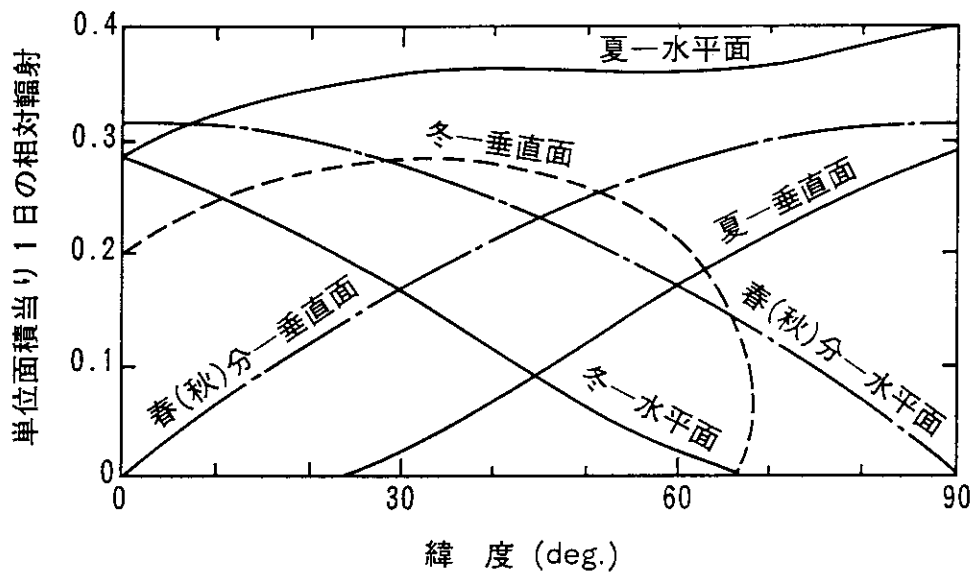
物 質	熱 放 射 率	温 度 (°C)
アスベスト, スレート	0.96	20
圧延鋼板	0.56	50
圧延ステンレス鋼	0.45	700
鑄鉄, 黒皮	0.61 ~ 0.85	20
塗料, 黒	0.90	常温
青	0.84	常温
緑	0.85	常温
赤	0.76	常温
白	0.7 ~ 0.9	常温
黄	0.72	常温
ラッカー	0.8 ~ 0.98	20 ~ 100

第7.3.2表 太陽熱の吸収率と放射率

表 面	吸 収 率	放 射 率
陽極酸化 SUS304		
a. 茶色	0.79	0.096
b. 紫色	0.80	0.086
c. 薄灰色	0.86	0.089
d. 濃灰色	0.83	0.089
e. 青	0.82	0.088
ブラッククロム		
a. SUS基板	0.87 (0.96)	0.088 (0.09)
合顔料塗膜		
PbS 顔料塗膜	0.93	0.13



第 7.3.1 図 晴天の日の太陽エネルギー
(北緯 42° , 6月21日)

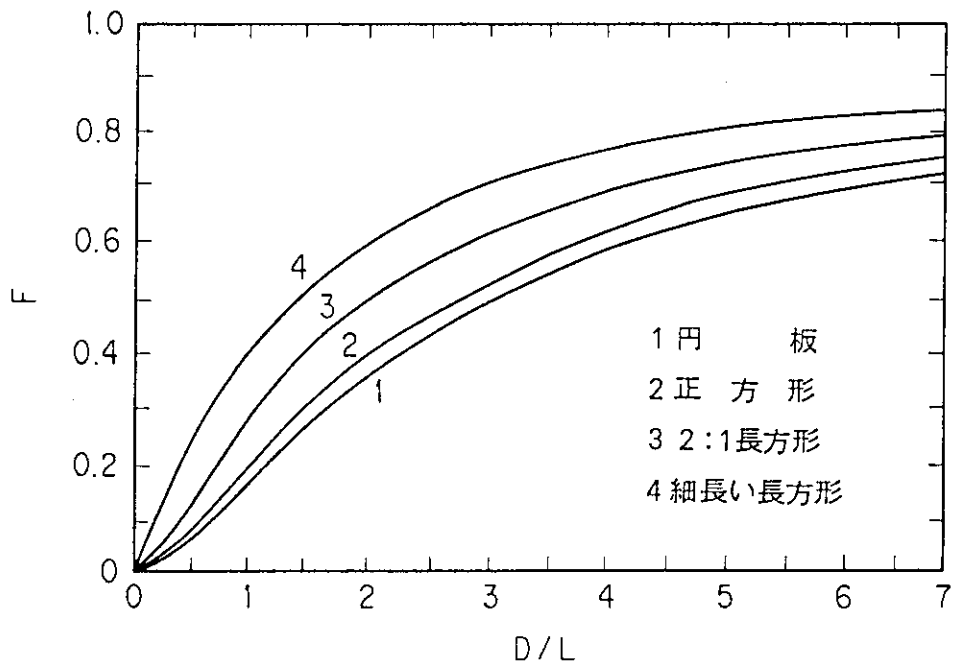
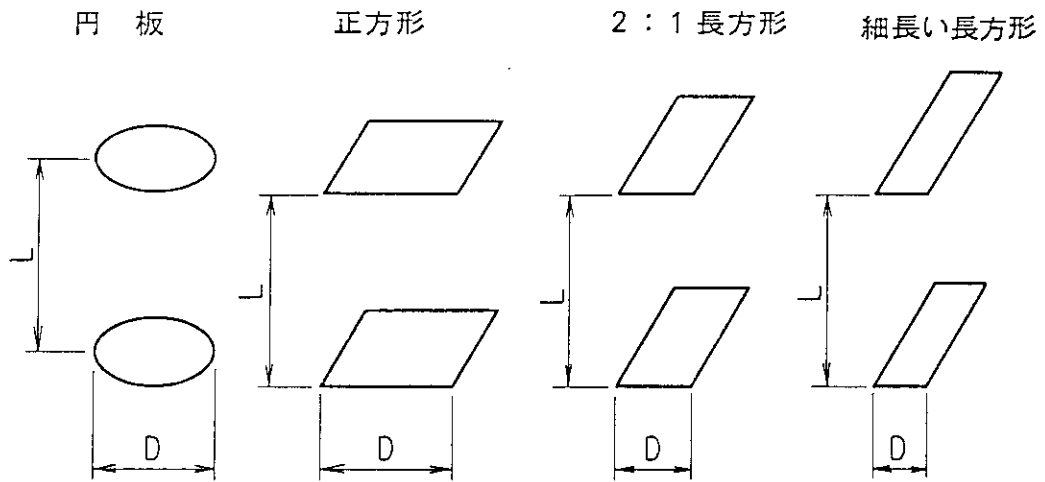


第 7.3.2 図 緯度による水平面および南側に面した
垂直面の1日の全輻射の相対値

7.4 形態係数

種々の形状の組合せによる形態係数のうち、輸送容器の熱解析に必要とされる典型的な形状の組合せによるものを第7.4.1から7.4.12表に示す。

第 7.4.1 表 相対する二平行面の形態係数

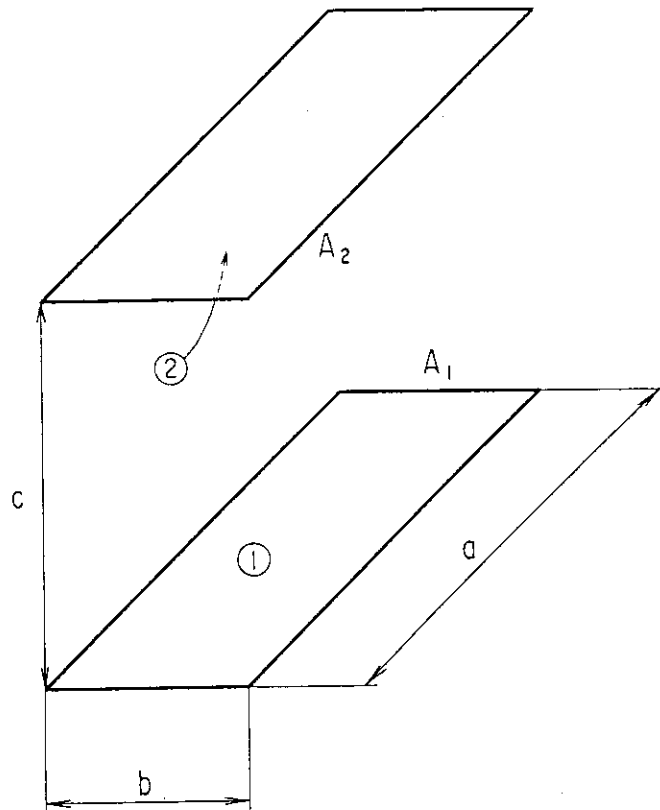


第 7.4.2 表 平行二平板の形態係数(I)

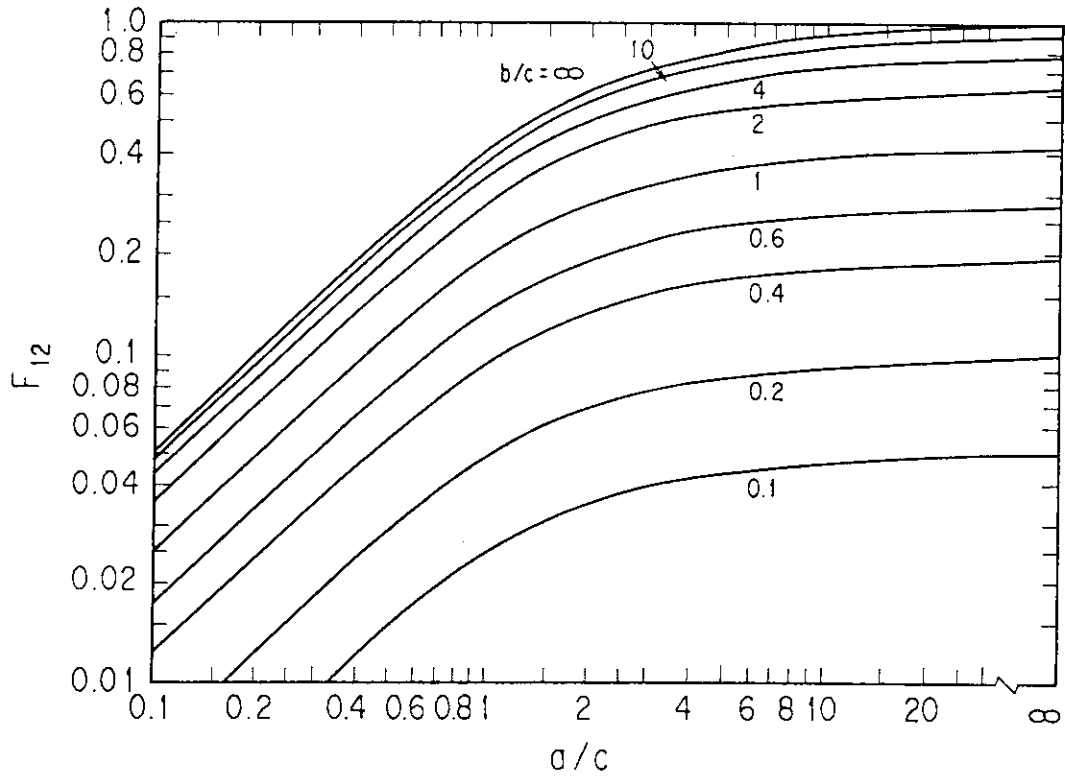
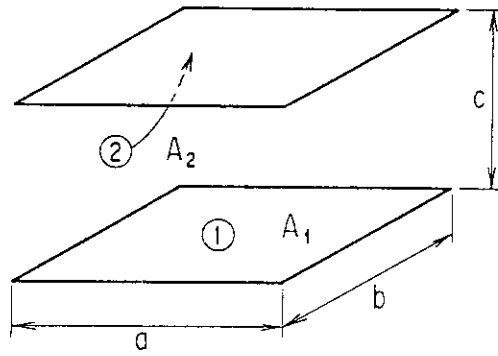
$$F_{12} = \frac{2}{\pi X Y} \left\{ \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} \right. \\ \left. + Y \sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) \right. \\ \left. + X \sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right. \\ \left. - Y \tan^{-1} Y - X \tan^{-1} X \right\}$$

$$X = \frac{a}{c}$$

$$Y = \frac{b}{c}$$



第 7.4.3 表 平行二平板の形態係数(II)

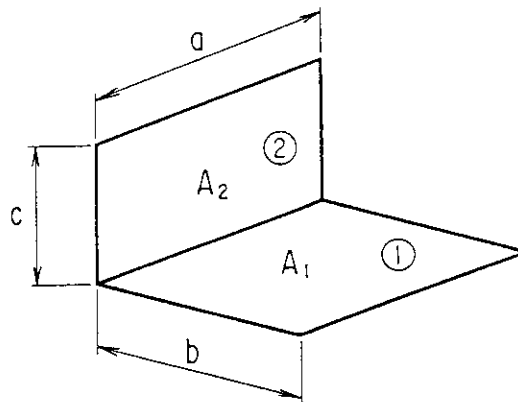


第 7.4.4 表 直交二平面の形態係数(I)

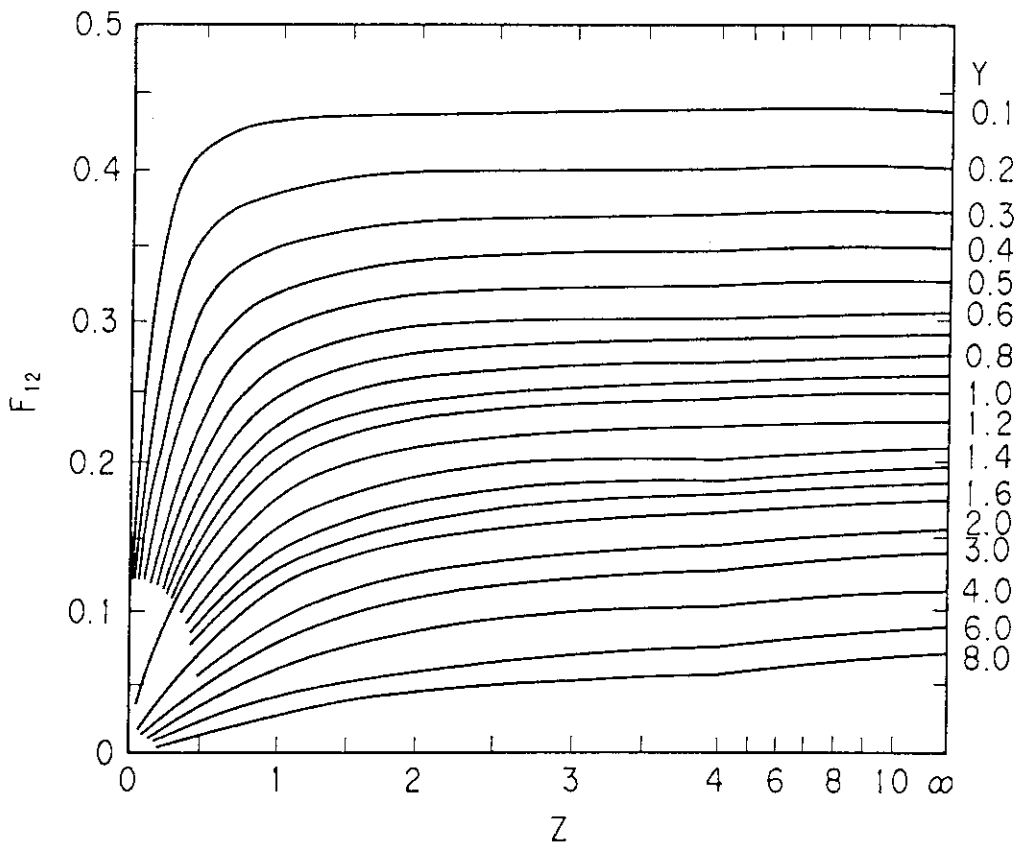
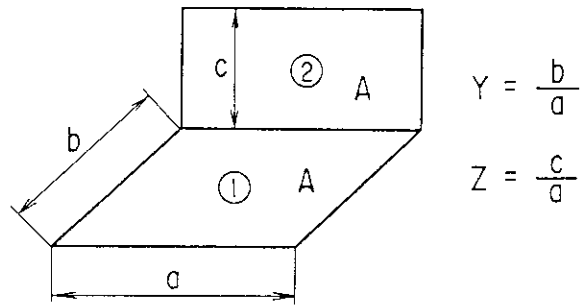
$$F_{12} = \frac{1}{\pi \cdot W} \left(W \cdot \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \cdot \tan^{-1} \frac{1}{H} - \sqrt{H^2 + W^2} \times \right. \\ \left. \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{H^2 + W^2}} + \frac{1}{4} \ln \left\{ \left[\frac{(1+W^2)(1+H^2)}{1+W^2+H^2} \right] \left[\frac{W^2(1+W^2+H^2)}{(1+W^2)(W^2+H^2)} \right] W^2 \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{H^2 \cdot (1+H^2+W^2)}{(1+H^2)(H^2+W^2)} \right] H^2 \right\} \right)$$

$$W = \frac{b}{a}$$

$$H = \frac{c}{a}$$

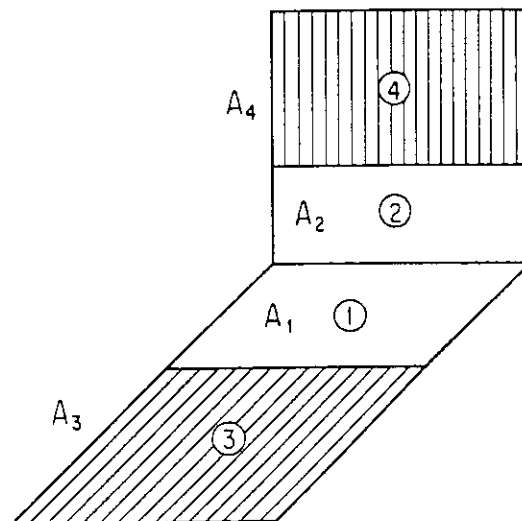


第 7.4.5 表 直交する二平面の形態係数(II)



第 7.4.6 表 離れた直交二平面の形態係数

$$F_{34} = \frac{A_1 + A_3}{A_3} \left\{ F_{(1+3)(2+4)} - F_{(1+3)2} \right\} + \frac{A_1}{A_3} \left\{ F_{12} - F_{1(2+4)} \right\}$$



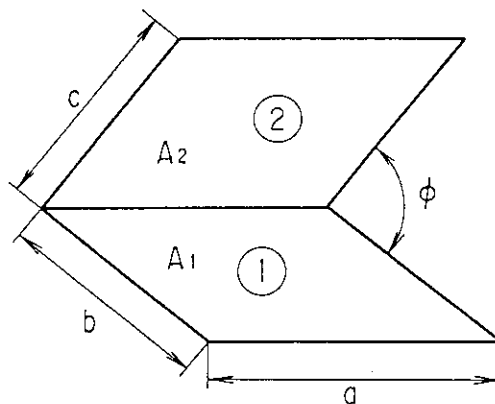
第 7.4.7 表 傾斜交叉する二平面の形態係数(I)

$$\begin{aligned}
 F_{12} = & \frac{1}{\pi Y} \left\{ -\frac{\sin 2\phi}{4} \left[XY \sin \phi + \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) (X^2 + Y^2) \right. \right. \\
 & + Y^2 \tan^{-1} \left(\frac{X - Y \cos \phi}{Y \sin \phi} \right) \\
 & \left. \left. + X^2 \tan^{-1} \left(\frac{Y - X \cos \phi}{X \sin \phi} \right) \right] \right. \\
 & + \frac{\sin^2 \phi}{4} \left\{ \left(\frac{2}{\sin^2 \phi} - 1 \right) \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+Z} \right] \right. \\
 & \left. + Y^2 \ln \left[\frac{Y^2(1+Z)}{(1+Y^2)Z} \right] + X^2 \ln \left[\frac{X(1+X^2) \cos 2\phi}{Z(1+Z) \cos 2\phi} \right] \right\} \\
 & + Y \tan^{-1} \left(\frac{1}{Y} \right) + X \tan^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - \sqrt{Z} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{Z}} \right) \\
 & + \frac{\sin \phi \sin 2\phi}{2} X \sqrt{1 + X^2 \sin^2 \phi} \\
 & \times \left[\tan^{-1} \left(\frac{X \cos \phi}{\sqrt{1 + X^2 \sin^2 \phi}} \right) \right. \\
 & \left. + \tan^{-1} \left(\frac{Y - X \cos \phi}{\sqrt{1 + X^2 \sin^2 \phi}} \right) \right] \\
 & + \cos \phi \int_0^Y \sqrt{1 + \xi^2 \sin^2 \phi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{X - \xi \cos \phi}{\sqrt{1 + \xi^2 \sin^2 \phi}} \right) \right. \\
 & \left. + \tan^{-1} \left(\frac{\xi \cos \phi}{\sqrt{1 + \xi^2 \sin^2 \phi}} \right) \right] d\xi \left. \right\}
 \end{aligned}$$

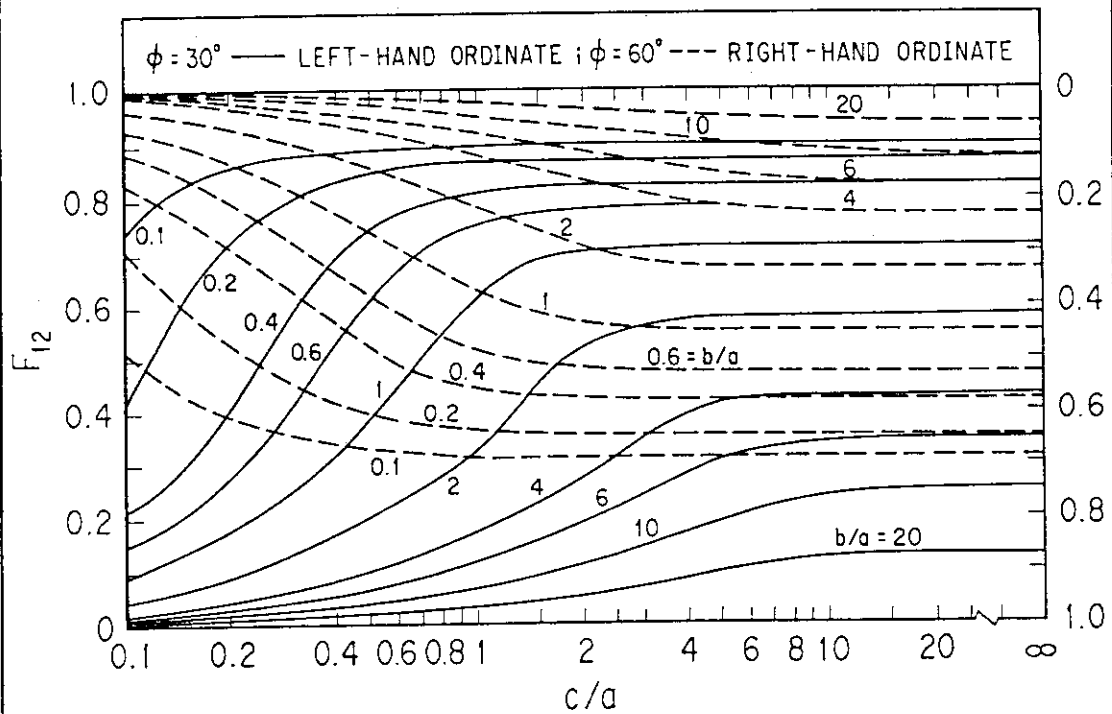
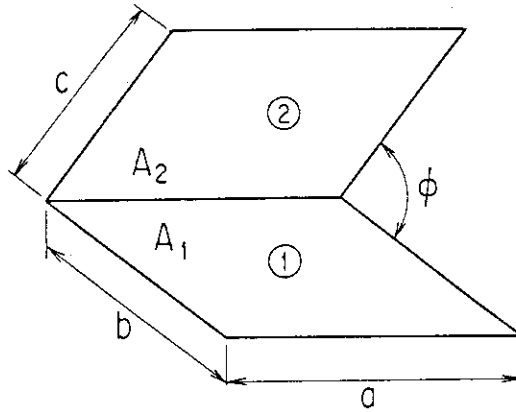
$$X = \frac{c}{a}$$

$$Y = \frac{b}{a}$$

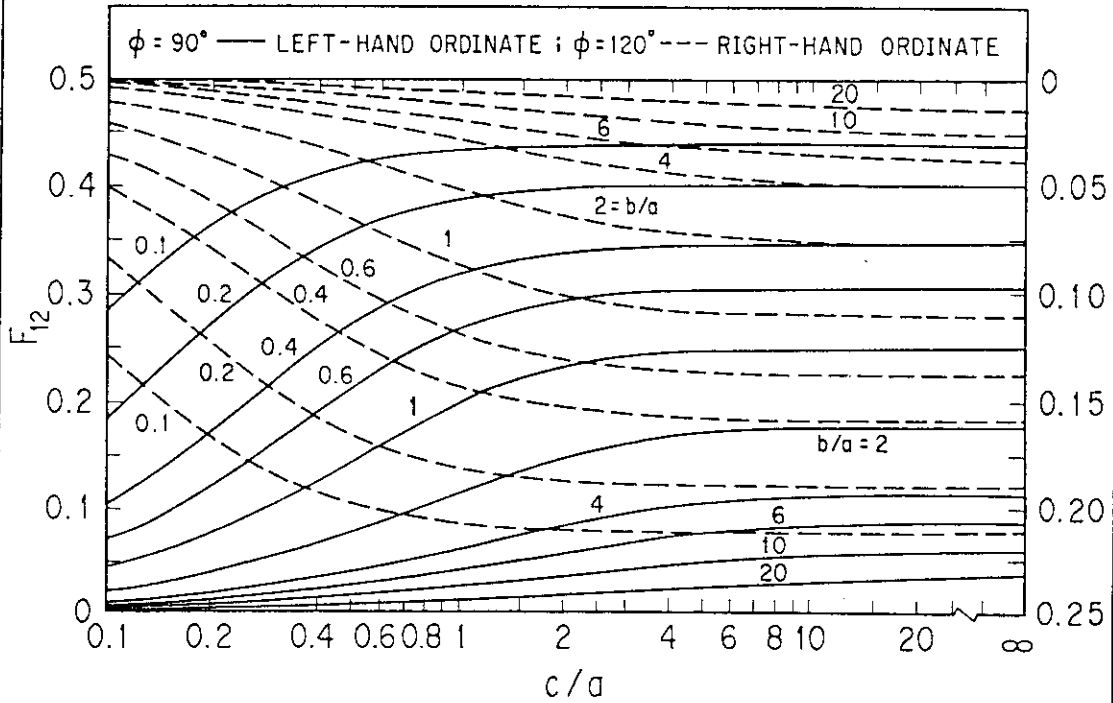
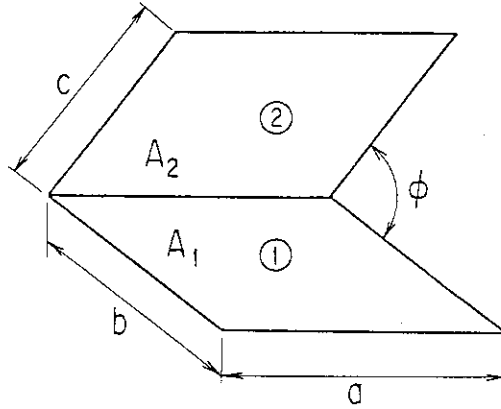
$$Z = X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi$$



第 7.4.8 表 傾斜交叉する二平面の形態係数(II)



第 7.4.9 表 傾斜交叉する二平面の形態係数(Ⅲ)



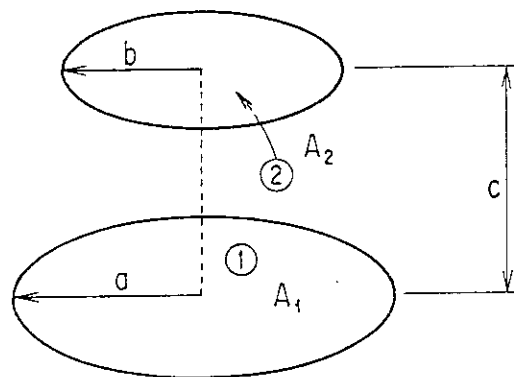
第 7. 4.10 表 平行二円板の形態係数(I)

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left(Z - \sqrt{Z^2 - 4X^2 Y^2} \right)$$

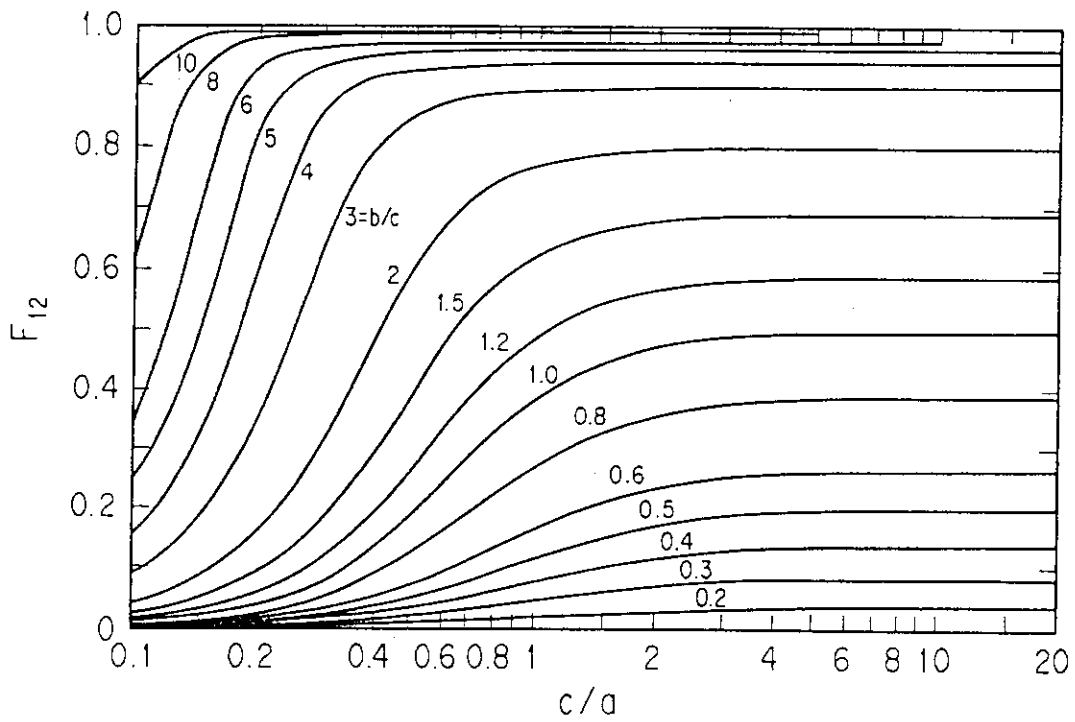
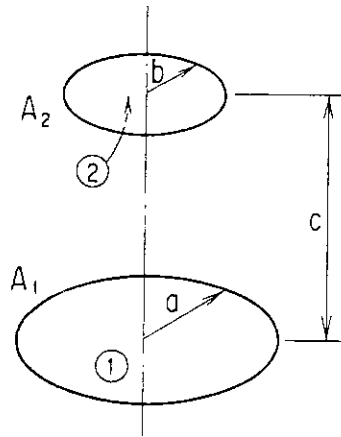
$$X = \frac{b}{c}$$

$$Y = \frac{c}{a}$$

$$Z = 1 + (1 + X^2) Y^2$$



第 7. 4.11 表 平行二円板の形態係数(Ⅱ)



第 7. 4.12 表 円心円筒の形態係数

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left[\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} + B \sin^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left(\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left\{ \frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left[\frac{4(X^2-1) + \frac{Y^2}{X^2}(X^2-2)}{Y^2+4(X^2-1)} \right] - \sin^{-1} \left(\frac{X^2-2}{X^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} - 1 \right) \right\}$$

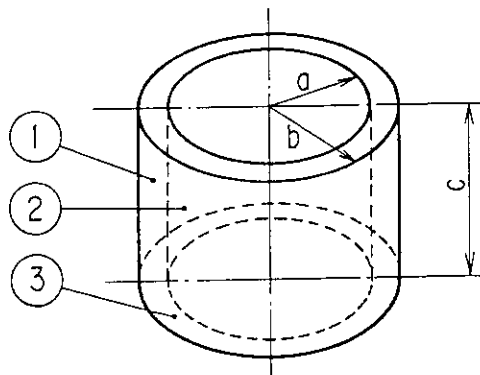
$$X = \frac{b}{a}, \quad Y = \frac{c}{a}$$

$$A = Y^2 + X^2 - 1, \quad B = Y^2 - X^2 + 1$$

$$F_{13} = \frac{1}{2} (1 - F_{12} - F_{13})$$

$$F_{31} = \frac{A_1}{A_3} F_{13}$$

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} F_{12}$$



a : 内半径

b : 外半径

c : 長さ

面 1 : 外表面 : A_1

面 2 : 内表面 : A_2

面 3 : 側面 : A_3

7.5 安全解析に必要なデータ

安全解析に必要なデータを第7.5.1表に示す。

第7.5.1表 安全解析に必要なデータ	
(1) ステファン-ボルツマン定数	
	5.670×10^{-8} (W/m ² ・K ⁴)
	1.355×10^{-12} (cal/cm ² ・s・K ⁴)
(2) はんだの熔融温度 (JIS Z 3282H63A)	
	183~184℃
(3) 緩衝体ファープライウッドの炭化層厚さと発熱量	
炭化層厚さ	50~63mm (1時間の耐火試験)
発熱量	3000~4000 cal/g

8. あとがき

輸送容器の熱解析を行う上で必要とされる解析法，計算式，計算コードおよびデータについてまとめた。本資料が輸送容器の安全解析評価および設計を行う人達に役立つものであることを希望する。

謝 辞

本文をまとめるに際して，種々のご支援を戴いた日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室 内藤倣孝室長に感謝します。ご協力を戴いた，三菱重工業(株) 大橋正雄，浅田和男，甫出 秀，(株)神戸製鋼所 横山博臣，日立造船(株) 小野寺 朗，三井造船(株) 秋山秀夫，木村化工機(株) 山本範夫，(株)日本製鋼所 本間亮介の各氏に心から感謝します。

8. あとがき

輸送容器の熱解析を行う上で必要とされる解析法，計算式，計算コードおよびデータについてまとめた。本資料が輸送容器の安全解析評価および設計を行う人達に役立つものであることを希望する。

謝 辞

本文をまとめるに際して，種々のご支援を戴いた日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室 内藤倣孝室長に感謝します。ご協力を戴いた，三菱重工業(株) 大橋正雄，浅田和男，甫出 秀，(株)神戸製鋼所 横山博臣，日立造船(株) 小野寺 朗，三井造船(株) 秋山秀夫，木村化工機(株) 山本範夫，(株)日本製鋼所 本間亮介の各氏に心から感謝します。

参 考 文 献

- (1) IAEA, "Regulations for Safety Transport of Radioactive Material", Safety Series No. 6, 1985 ed., IAEA, Vienna, (1985).
- (2) Shappert, L. B., et al., "A Guide for the Design, Fabrication and Operation of Shipping Casks for Nuclear Applications", ORNL-NSIC-68, (1970).
- (3) 日本機械学会編, "伝熱工学資料(第3版)", 日本機械学会(1975).
- (4) 日本機械学会編, "伝熱工学資料(第4版)", 日本機械学会(1986).
- (5) McAdams, W. H., "Heat Transmission, third ed.", McGraw-Hill (1954).
- (6) Howell, J. R., "A Catalog of Radiation Configuration Factors", McGraw-Hill (1982).
- (7) Sparrow, E. M. and Cess, R. D., "Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill (1978).
- (8) Mitalas, G. P. and Stephenson, D. G., "FORTRAN IV Program Calculate Radiant Interchange Factors", DRD-25 (1966).
- (9) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., "Radiative Transfer", McGraw-Hill (1967).
- (10) Shapiro, A. B., "FACET - A Radiation View Computer Code for Axisymmetric, 2D Planar and 3D Geometries with Shadowing" UCID-19887 (1983).
- (11) Ikushima, T., "MCVIEW" A Radiation View Factor Computer Program for Three Dimensional Geometries Using Monte Carlo Method" JAERI-M 86-177 (1986).
- (12) 幾島 毅, 鈴木邦彦, 吉田 一, "モンテカルロ法による熱輻射形態係数の算出-計算精度および計算時間について面積積分法との比較", 日本原子力学会誌, Vol. 30, No. 6, pp. 548 ~ 566 (1988).
- (13) Ikushima, T., "Thermal Radiation View Factor Calculation Using Monte Carlo Method", JAERI-M 88-104 (1988).
- (14) Edwards, A. L., "TRUMP - Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional System", UCRL-14754 (1972).
- (15) 幾島 毅, "TRUMP3 - JR : 有限差分法による非線形熱伝導計算プログラム", JAERI-M 84-017 (1984).
- (16) Turner, W. D., Elrod, D. C. and Siman-Toy, I. I., "HEATING 5 - An IBM 360 Heat Conduction Program", ORNL-CSD/TM-15 (1977).
- (17) 幾島 毅, 中里 力, "HEATING 5 - JR : 有限差分法による非線形熱伝導計算プログラム", JAERI-M 83-184 (1983).
- (18) Diod, D. C., Giles, G. E. and Turner, W. D., "HEATING 6 - A Multidimensional Heat Conduction Analysis with the Finite - Difference Formulation", ORNL/NUREG

- /CSD-2/V2 (1981).
- (19) 幾島 毅, "HEATING 6 - JR : 有限差分法による非線形熱伝導計算プログラム", JAERI-memo 63-433 (1988).
 - (20) 幾島 毅, "CASKETSS - HEAT 核燃料輸送容器熱伝導計算用有限差分法計算プログラム", JAERI-M 88-235 (1988).
 - (21) "ABAQUS User's Manual", (1982). Hibbitt, Kalsson and Sorenson.
 - (22) Pilkey, W., et al. (ed.) "Structural Mechanics Computer Programs Programs", (1974), Univ. Press of Virginia.
 - (23) Rector, D. R., Wheeler, C. L., and Lombardo, N. J., "COBRA - SFS : A Thermal - Hydraulic Analysis Computer Code, Volume I : Mathematical Models and Solution Method", Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, PNL-6049 (1986).
 - (24) Rector, D. R., Cuta, J. M., Lombardo, N. J., Michener, T. E., and Wheeler, C. L., "COBRA - SFS : A Thermal - Hydraulic Analysis Computer Code, Volume II : User's Manual", Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, PNL-6049 (1986).
 - (25) Lombardo, N. J., Cuta, J. M., Michener, T. E., Rector, D. R., and Wheeler, C. L., "COBRA - SFS : A Thermal - Hydraulic Analysis Computer Code, Volume III : Validation Assessments", Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, PNL-6049 (1986).
 - (26) Rosten HI, Spalding DB. "The PHOENICS Beginners Guide and User Manual", CHAM Limited, Londo, England. CHAM TR/100, (1987).
 - (27) Shapiro, A. B., "TOPAZ 2 D - A Two - Dimensional Finite Element Code for Heat Transfer Analysis, Elestrostatic, and Magnetostatic Problems, UCID - 20824 (1986).
 - (28) Shapiro, A. B., "TOPAZ 3 D - A Three - Dimensional Finite Element Heat Transfer Code, " UCID - 20481 (1985).
 - (29) Wong, R. L., "User's Manual for COVUFAC, The General Dynamics Heat Transfer Radiation View Factor Program", UCID - 17275 (1976).
 - (30) Singer G. L., "VIEWPIN A FORTRAN Program to Calculate View Factor for Cylindrical Pins", ANCR - 1054 (1972).
 - (31) LLNL, "A Compilation of Thermal Property Data for Computer Heat - Conduction Calculations", UCID - 50589 (1968).
 - (32) 森島淳好, 他, "第1集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表 (改訂 第2版)", JAERI-M 4881 (1972).
 - (33) 幾島 毅, "熱伝導計算用材料データ集 (1/10), 第1編 : データライブラリーおよび図形作成プログラム", JAERI-memo 61-431 (1987).
 - (34) 幾島 毅, "熱伝導計算用材料データ集 (2/10), 第2編 : 元素", JAERI-memo 61-

- 432 (1987).
- (35) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (3/10), 第3編:合金(その1)”, JAERI-memo 61-433 (1987).
- (36) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (4/10), 第4編:合金(その2)”, JAERI-memo 61-434 (1987).
- (37) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (5/10), 第5編:合金(その3)”, JAERI-memo 61-435 (1987).
- (38) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (6/10), 第6編:無機化合物(その1)”, JAERI-memo 61-436 (1987).
- (39) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (7/10), 第7編:無機化合物(その2)”, JAERI-memo 61-437 (1987).
- (40) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (8/10), 第8編:無機混合物”, JAERI-memo 61-438 (1987).
- (41) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (9/10), 第9編:無機複合材料, 有機複合材料, 天然材料, 仮想材料”, JAERI-memo 61-439 (1987).
- (42) 幾島 毅, “熱伝導計算用材料データ集 (10/10), 第10編:有機化合物, 有機混合物”, JAERI-memo 61-440 (1987).
- (43) 幾島 毅, 他, “核燃料輸送容器の熱・構造計算コードの比較検討”, 日本原子力学会誌, Vol. 26, No. 9, pp. 781~792 (1984).
- (44) JIS Z 3282 はんだ.