

# 断熱材の熱特性 ～熱伝導率および比熱測定～

ニチアス(株) 浜松研究所  
大村 高弘

# HII-Aロケットで活躍!

トンボブランド

## 発泡断熱材

【製品名：フォームナート断熱】

液体原料の発泡法による原料オンクワ、ロックアップ後の乾燥・硬化時に断熱材は発泡して使用される断熱材 (IPF) の断熱材です。工業部工業規格との材料規格があり、検査を原料とし、施工後の断熱材は高断熱で高耐久です。



## ふっ素樹脂製ホース

【製品名：ナフロンPFA樹脂ホース】

ロケット燃料を射出するノズルヘッドに流すために使用される、ふっ素樹脂製ホースです。ナフロン (PFA) ホースは耐熱性・耐酸性に優れており、燃料も高く、燃焼時に発生している高圧でも耐圧し、燃焼後の残渣にさらされても劣化しにくいため、燃焼後も安心して使用できます。



## 新製式フレキシブル断熱材

【製品名：エネサーモ】

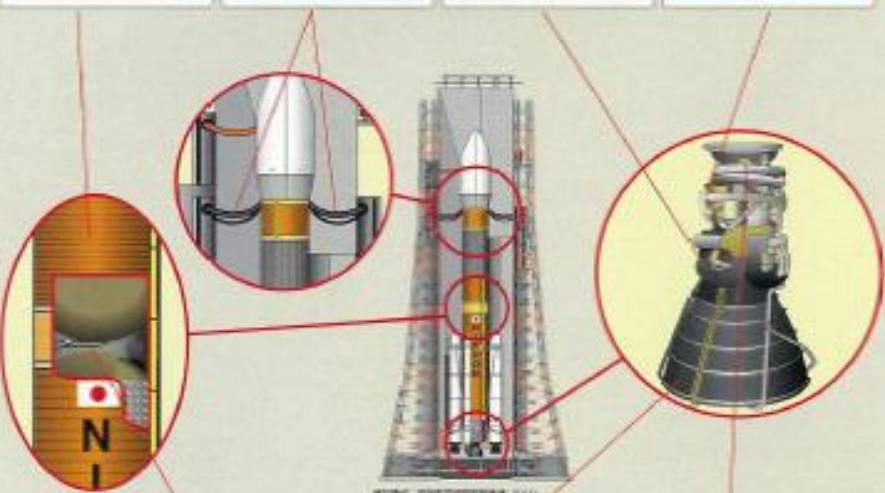
エンジン室に設置されるIPF断熱材のIPFとして使用される、新製式の断熱材です。ガス漏れ防止に優れており、燃料も高く、燃焼時に発生している高圧でも耐圧し、燃焼後の残渣にさらされても劣化しにくいため、燃焼後も安心して使用できます。



## ふっ素樹脂加工品

【製品名：ナフロンPFA樹脂加工品】

ロケットエンジンの燃料供給管などの部品に使用される、ふっ素樹脂加工品です。耐熱性・耐酸性に優れており、燃料も高く、燃焼時に発生している高圧でも耐圧し、燃焼後の残渣にさらされても劣化しにくいため、燃焼後も安心して使用できます。



## 発泡断熱材

【製品名：フォームナート加工品】

発泡法による原料オンクワ断熱材の断熱材やロックアップ後の乾燥・硬化時に断熱材は発泡して使用される断熱材 (IPF) の断熱材です。工業部工業規格との材料規格があり、検査を原料とし、施工後の断熱材は高断熱で高耐久です。



## 耐熱クロス

【製品名：ルビロシクロス】

ロケットエンジンのノズルヘッド部分の断熱材として使用される、耐熱性・耐酸性に優れており、燃料も高く、燃焼時に発生している高圧でも耐圧し、燃焼後の残渣にさらされても劣化しにくいため、燃焼後も安心して使用できます。



## メタル中空リング

【製品名：メタルシール】

ロケットエンジンの燃料供給管などの部品に使用される、メタルシールです。耐熱性・耐酸性に優れており、燃料も高く、燃焼時に発生している高圧でも耐圧し、燃焼後の残渣にさらされても劣化しにくいため、燃焼後も安心して使用できます。



# 高層ビルで活躍!

トンボブランド

## うす巻き形ガスケット

【製品名：グナール細径ガスケット】

ビルの各種設備のアップグレードや修繕などに使用される、薄型ガスケットです。高層ビルでの使用に適した薄型ガスケットの断熱材です。高層ビルでの使用に適した薄型ガスケットの断熱材です。高層ビルでの使用に適した薄型ガスケットの断熱材です。



## 巻き付け断熱断熱材

【製品名：マキベエ】

ビル内の各種設備の断熱材として使用される、巻き付け断熱材です。高層ビルでの使用に適した巻き付け断熱材の断熱材です。高層ビルでの使用に適した巻き付け断熱材の断熱材です。



## 不燃内装化粧板

【製品名：アスロックシリーズ】

オフィス、会議室、展示場などの内装、トイレ・洗面所などの水廻りなどの内装などに使用される、不燃・耐火・防音・防湿・防臭・防カビ・防汚・防汚染などの機能を備えた化粧板です。高層ビルでの使用に適した化粧板の断熱材です。



## OAフロア

【製品名：ニチアスシングフロア】

インテリジェントビルなどのオフィス、コンピュータールームなどの業務用途に使用される、防湿・防カビ・防汚・防汚染などの機能を備えたフロアです。高層ビルでの使用に適したフロアの断熱材です。



## ロックワール断熱材

【製品名：MGマイティカバー】

各種ビル設備の断熱材として使用される、ロックワール断熱材です。高層ビルでの使用に適したロックワール断熱材の断熱材です。高層ビルでの使用に適したロックワール断熱材の断熱材です。



## 異種管交差用ライニング材

【製品名：カネスタックスーパー】

ビルの各種設備の断熱材として使用される、カネスタックスーパー断熱材です。高層ビルでの使用に適したカネスタックスーパー断熱材の断熱材です。高層ビルでの使用に適したカネスタックスーパー断熱材の断熱材です。



## 新製式フレキシブル断熱材

【製品名：エネサーモ】

エンジン室に設置されるIPF断熱材のIPFとして使用される、新製式の断熱材です。ガス漏れ防止に優れており、燃料も高く、燃焼時に発生している高圧でも耐圧し、燃焼後の残渣にさらされても劣化しにくいため、燃焼後も安心して使用できます。



## 免震断熱断熱材

【製品名：メンシಂಗガードB】

地震時の揺れを吸収する断熱材として使用される、免震断熱断熱材の断熱材です。高層ビルでの使用に適した免震断熱断熱材の断熱材です。高層ビルでの使用に適した免震断熱断熱材の断熱材です。



# ゴミ焼却炉で活躍!

トンボブランド

## けい酸カルシウム保温材

【製品名: ケイカルエース・スーパーシリカ】  
高断熱・ダクトに使用されるけい酸カルシウム保温材です。施工の簡便で経年の経緯が少なく長寿命に優れており、伊豆半島のバックアップ材として採用されています。



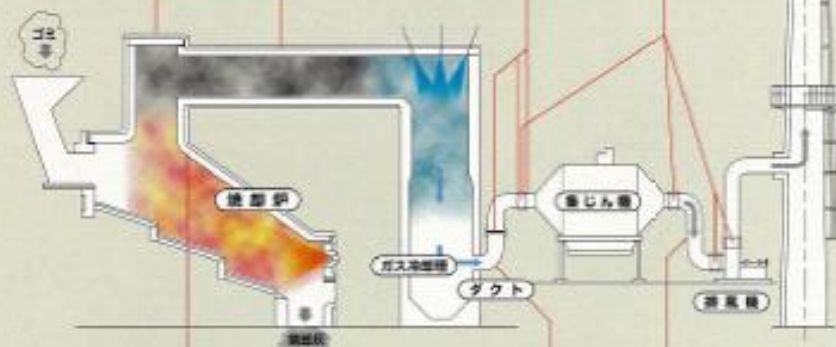
## 繊維ガスケット

【製品名: マンホールガスケット】  
伝圧直線、換気ガス、換気などのマンホールや丸口排水フランジに使用される繊維ガスケットです。フランジの口径が大きく、歪みがあったり、高い締め付け強度が求められる箇所に適してあり、伊豆半島の排水ガスと汚濁防止の要件に合っています。



## 非金属材料縮径棒

【製品名: ベロ-Q】  
各種配管やダクトなどの縮径棒に使用される非金属材料縮径棒です。大口径ダクト配管の熱膨張、凍結、圧力等による伸縮変位等を抑制する製品です。



## 耐火工事

不法投棄大物や燃焼炉の排煙管、伊豆燃大工事



## 保温工事

ロックウール保温材とけい酸カルシウム保温材を使った配管、ダクトの保温材貼り

## 不定形耐火物

【製品名: トンボ耐火キャスター】  
燃焼炉のバックアップ材やコーラス排出口の耐火物として使用される不定形耐火物です。耐火度が高く熱膨張が少なく、伊豆燃、天井、道路で採用されています。



## ロックウール保温材

【製品名: MGフェルト】  
ダクトの保護・断熱・防振効果、セラミックファイバー伊豆燃のバックアップ材として使用されるロックウール保温材です。ボイラー本体、ダクト、集じん機などの断熱、防振効果として採用されています。



## けい酸カルシウム保温材

【製品名: ケイカルエース・スーパーシリカ】  
高断熱・ダクトに使用されるけい酸カルシウム保温材です。施工の簡便で経年の経緯が少なく長寿命に優れており、伊豆半島の排水ガスと汚濁防止の要件に合っています。



# 住宅で活躍! ①

トンボブランド

## のせ天材

【製品名: ニチアス防火軒天】  
屋根の軒先に使用されるけい酸カルシウム製の防火のせ天材です。火災のときに燃焼しにくい特性の「のせ」の層が火炎から屋根を保護します。



## 断熱脱臭フィルター

【製品名: ハニールONE】  
トイレ、換気、空調換気装置、その他一般換気装置等に適用した断熱フィルターです。アンモニアを分解する能力が高いため、トイレの脱臭に使用されます。



## 住宅用ロックウール断熱材

【製品名: ホームマット】  
床下・壁・天井断熱材として使用される住宅用断熱材です。室内からの熱の出入りを抑制、室温をムラムラに保ちます。



## PTFE未焼成テープ

【製品名: ナフロンシールテープ】  
水、油、塩、化学薬品、酸等の腐食に耐性があり、断熱効果も高いPTFE未焼成テープです。水漏れを防ぐことができ、断熱効果も高い断熱材です。



## 排水管用遮音材

【製品名: バイブレーションシート】  
排水管用遮音材。排水管の振動を吸収し、騒音を低減させる効果があります。



## 化粧けい酸カルシウム板

【製品名: アスラックス2000】  
キッチン、バス、洗面台の壁面に使用される化粧けい酸カルシウム板です。汚れが落ちやすく、美観を保つことができます。



## 真鍮ガスシール材

【製品名: ネオサーム、ファインプレックス1300ペーパー、ソフレックス】  
配管のガスシール材。高圧ガスに耐性があり、断熱効果も高い断熱材です。



# 講演内容

- 熱伝導率測定における問題点とそれに対する取り組み
- 各種熱伝導率測定方法と測定結果の比較
- 熱伝導率の推定式
- 断熱材の比熱測定

## 断熱材の熱伝導率測定に関する問題点

- 標準物質がない→装置間の誤差  
精度確認ができない。
- 広い温度領域における断熱材の熱伝導率や  
比熱が正確に示されていない。  
特に800°C以上の高温や真空下のデータ。

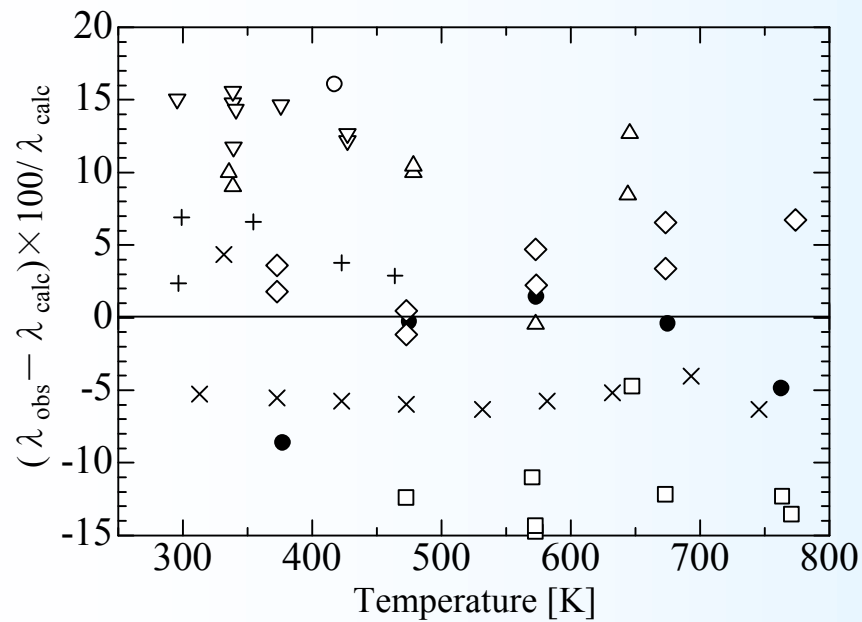


Fig. 1 Deviations of thermal conductivity round-robin test results from values calculated with the corrected equation for fibrous almina-silica.

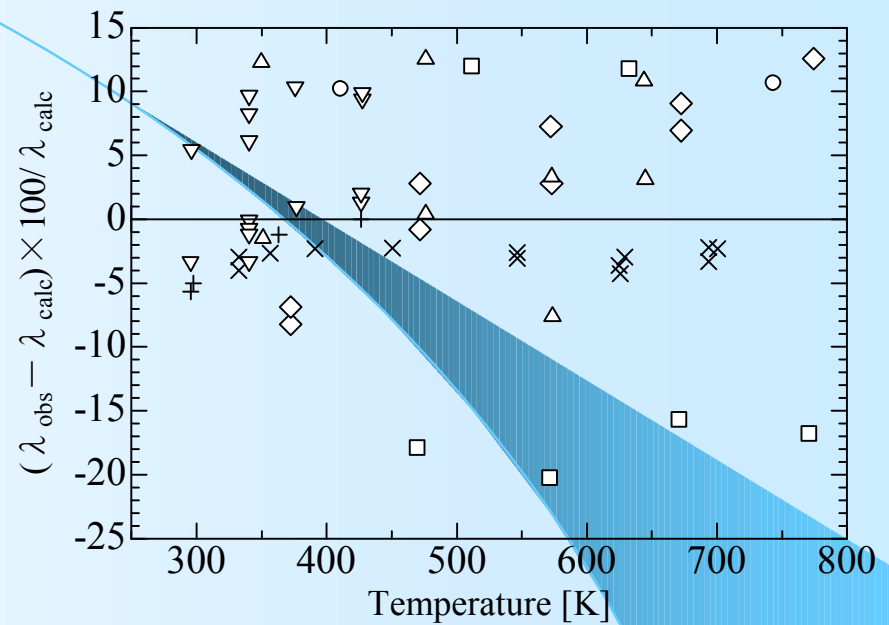
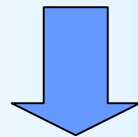


Fig. 2 Deviations of thermal conductivity round-robin test results from values calculated with the corrected equation for calcium silicate.

# 熱伝導率の測定精度向上に向けた取り組み

1. 異種測定法による結果を比較
2. 測定結果と推定式による結果との比較



1. 各種測定法が可能な装置の開発: 定常法と非定常法の比較  
定常法: **保護熱板法**  
非定常法: **非定常熱線法、周期加熱法、ホットディスク法**
2. 精度の高い推定式の提案: 温度と嵩密度の関数

間接加熱法

定常法

軸方向定常熱流

絶対法

縦型絶対法

平板絶対法

可動間隙法

比較法

縦型比較法

平板比較法

経方向定常熱流

絶対法

同心円筒法

同心球法

比較法

同心円筒法

非定常法

軸方向非定常熱流

パルス状加熱法

ステップ状加熱法

波面分割干渉法

周期加熱法

光音響法

強制レーリ-散乱法 (パルス状加熱)

ラプラス変換法 (平板) (任意加熱)

経方向非定常熱流

定速昇温法

熱線法 (ステップ状加熱)

ラプラス変換法 (円筒)

直接加熱法

定常法

軸方向熱流

(Kohlrausch法, 積分法)

径方向熱流

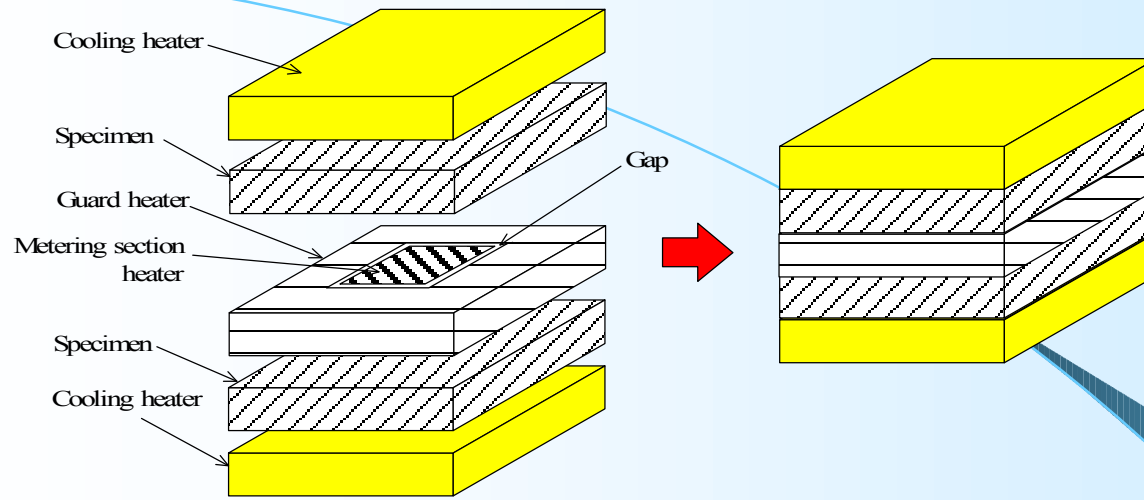
(Angell法)

非定常法

軸方向熱流

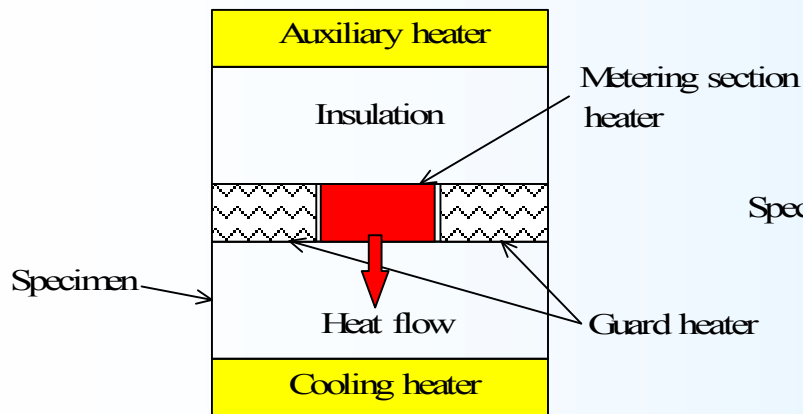
(物性値同時測定法)



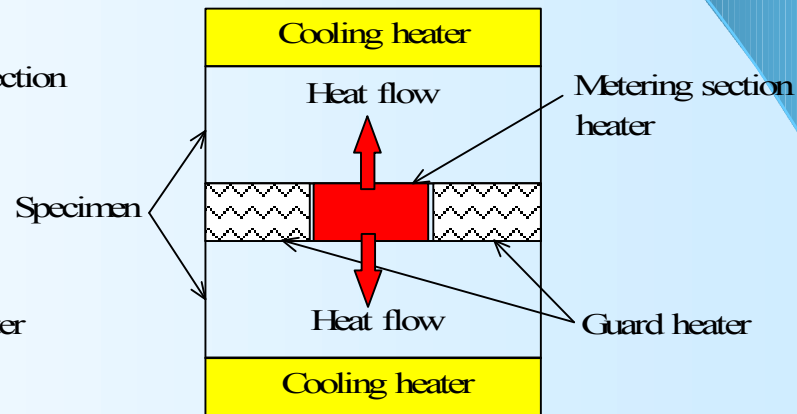


$$Q = \frac{\lambda (\theta_1 - \theta_2)}{d}$$

(a) Solid figure of Double-side mode of operation

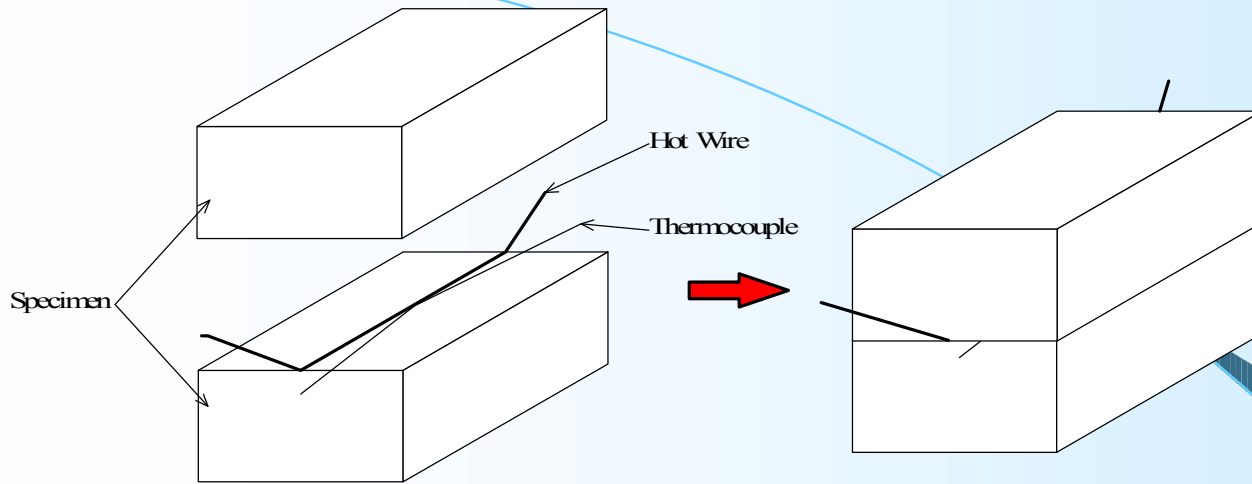


(b) Single-side mode of operation



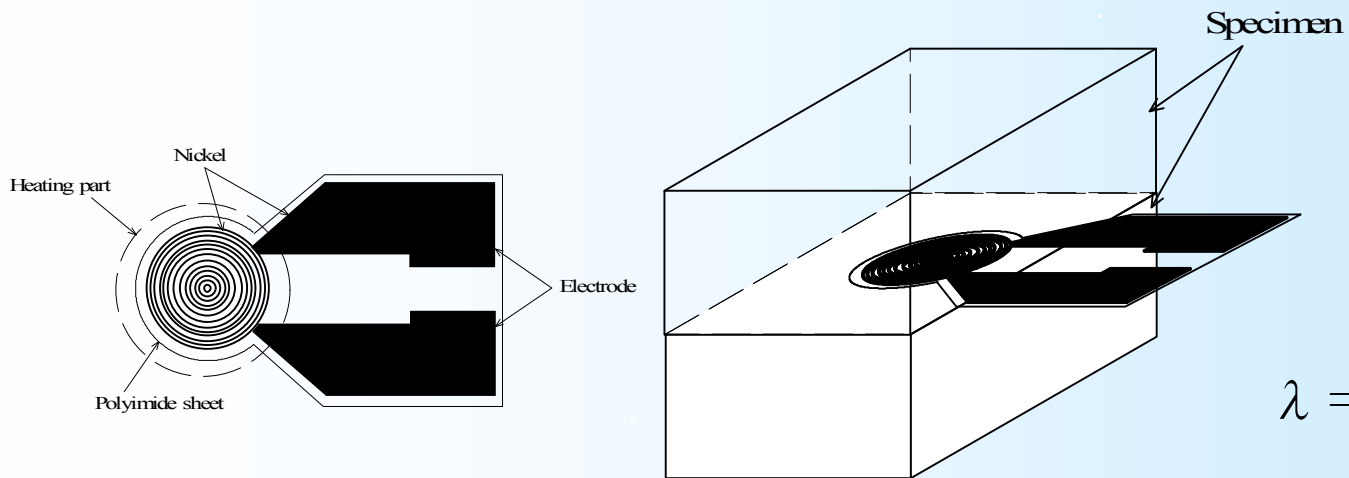
(c) Double-side mode of operation

Fig. 3 Schematic of the Guarded Hot Plate method (GHP method)



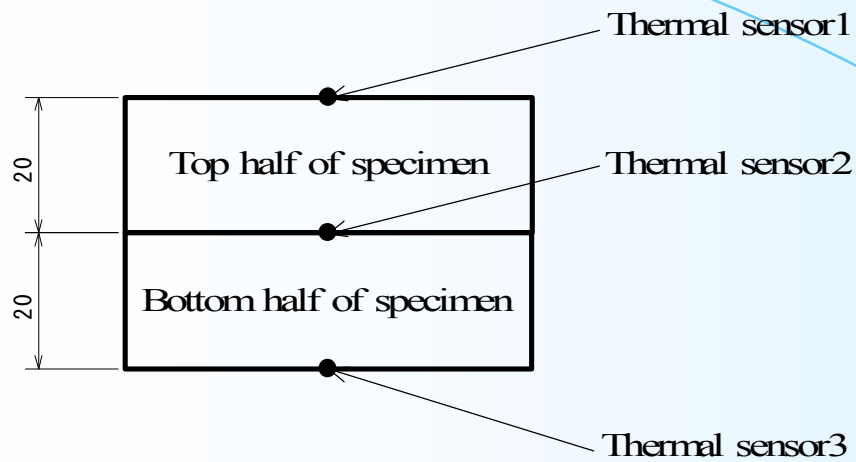
$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \frac{\ln(t_2/t_1)}{\theta_2 - \theta_1}$$

Fig. 4 Schematic of the Hot Wire method



$$\lambda = \frac{Q}{\pi^{3/2} a} \frac{D(\tau)}{\Delta T(\tau)}$$

Fig. 5 Schematic of sensor in Hot Disk method.

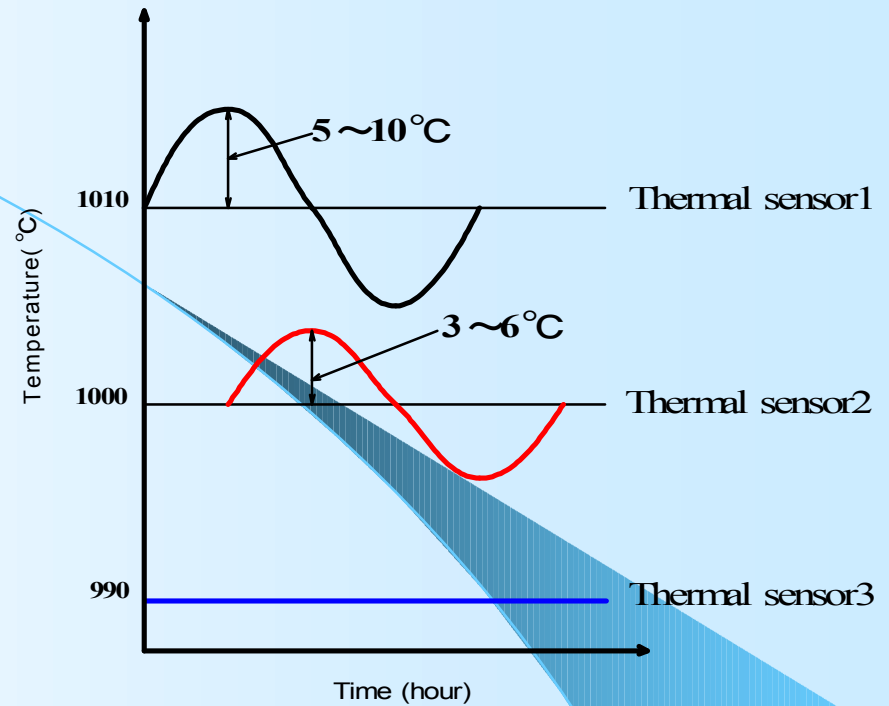


Specimen cross section

$$\phi = \arg \left\{ \frac{\sinh kx(1+i)}{\sinh kL(1+i)} \right\}$$

$$A = \frac{A_j}{A_s} = \sqrt{\frac{\cosh 2kx - \cos 2kx}{\cosh 2kL - \cos 2kL}}$$

$\phi$  : time lag,  
 $\kappa$  : thermal diffusivity,  
 $\lambda$  : thermal conductivity.



Heat waves

$$\kappa = \frac{\omega}{2k^2}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

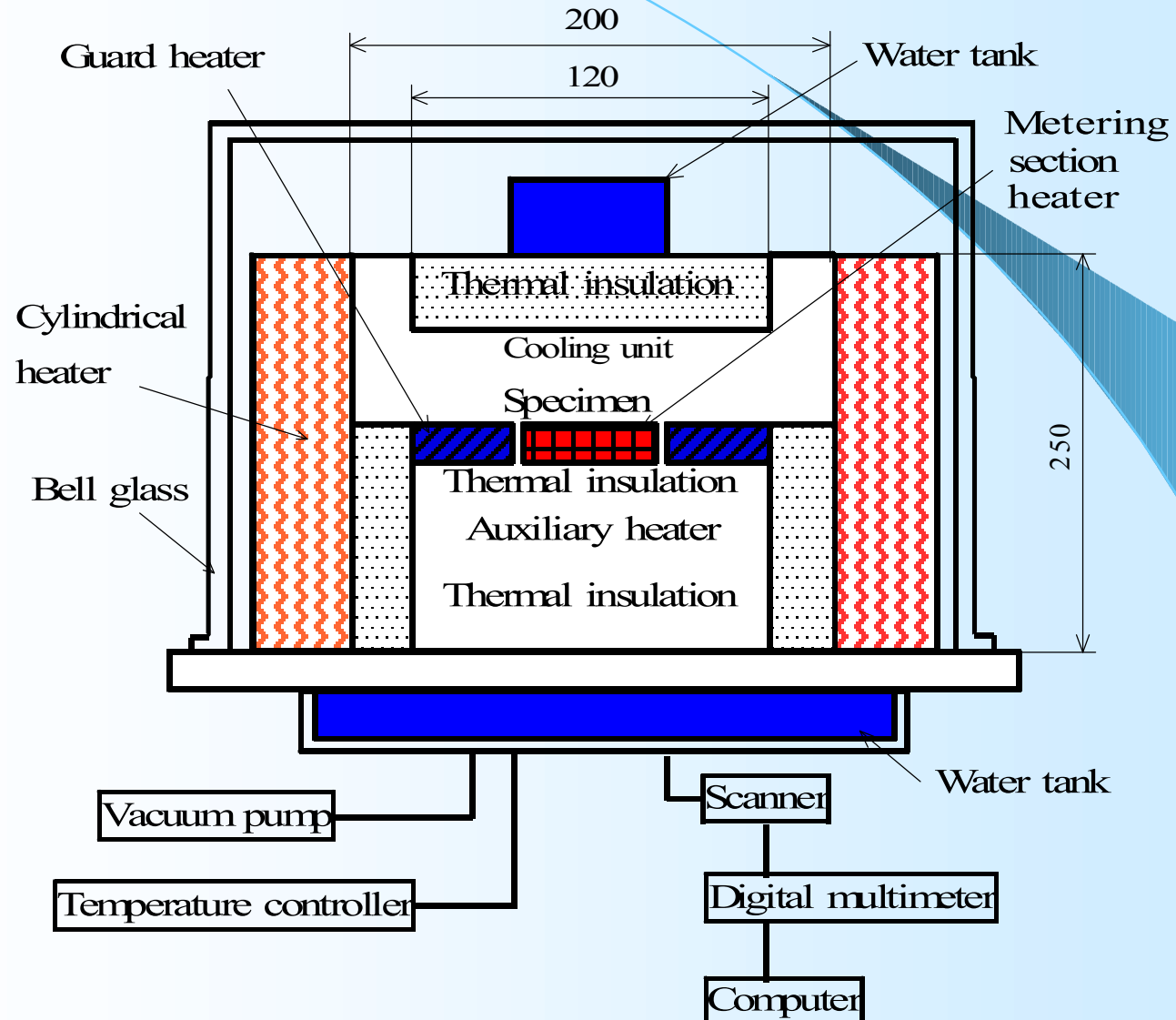
$$\lambda = \rho c \kappa$$

T : period,  
 $\rho$  : density

# 熱伝導率測定装置



# 測定装置 (GHP法)



# 測定装置(周期加熱法、非定常熱線法)

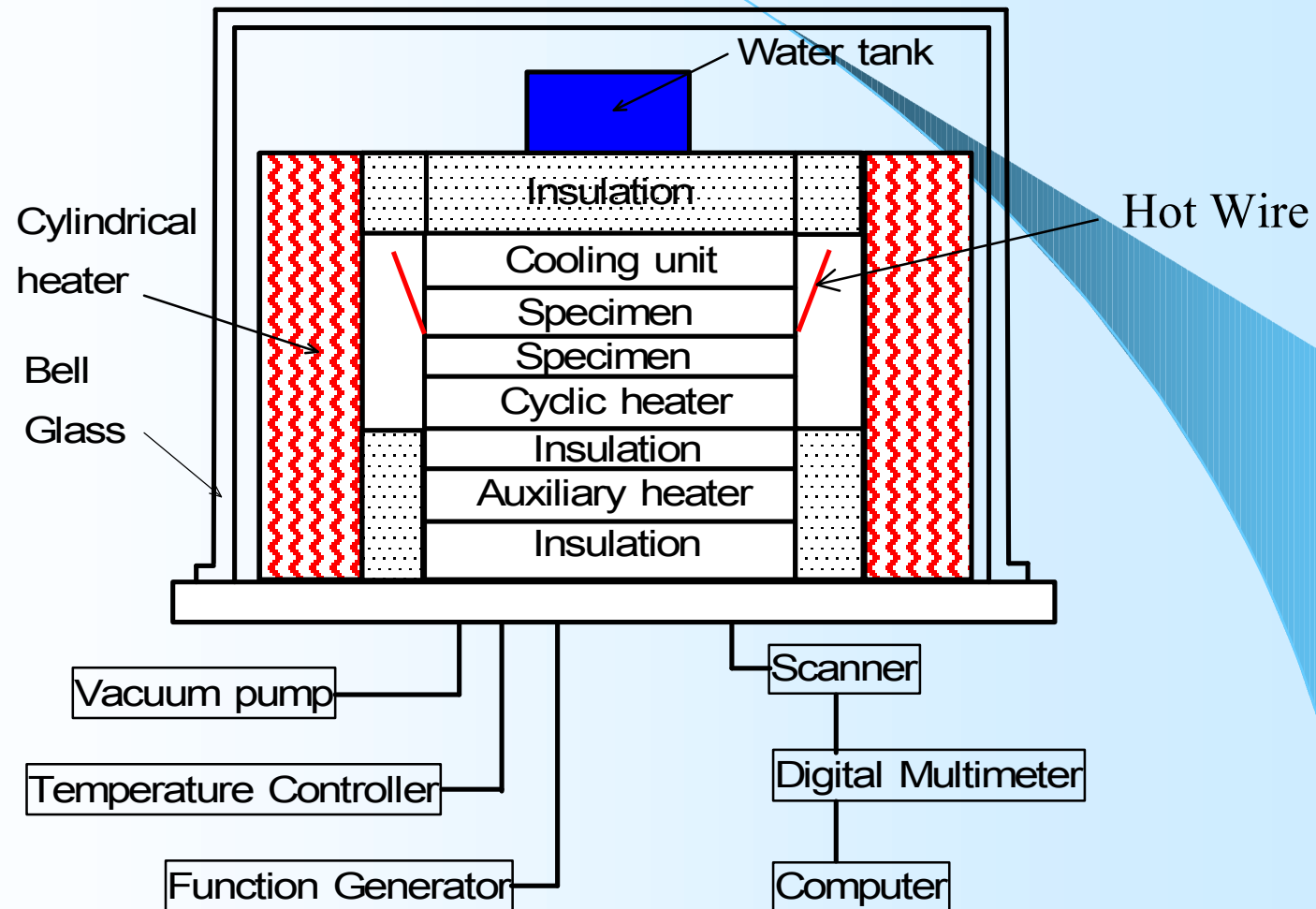


Table 2-3 Developed measuring apparatus.

Apparatus	Property	Principle of measurement	Temperature range [°C]
C 170	Thermal conductivity Thermal diffusivity Specific heat	Transient hot-wire method Cyclic heat method Hot Disk method	-170~40
H1000	Thermal conductivity Thermal diffusivity	Transient hot-wire method Cyclic heat method	100~1000
HV1000	Thermal conductivity Thermal diffusivity	Transient hot-wire method Cyclic heat method	100~1000
H1300	Thermal conductivity Thermal diffusivity	Guarded hot plate method Cyclic heat method	100~1300
S1000	Specific heat	Drop calorimeter method	100~1000

Table 2-4 Measurement error of each method

Method of measurement	Error [%]
Guarded hot plate method	6
Transient hot-wire method	5
Cyclic heat method	Under 10 (depending on specimen)
Hot Disk method	Thermal conductivity : 3 Thermal diffusivity : 7 Specific heat : 3
Drop calorimeter method	8

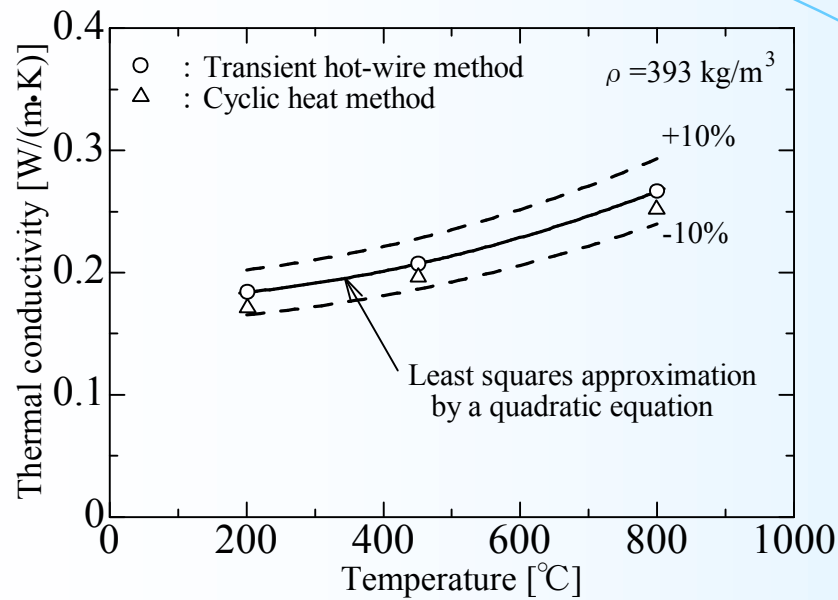


Fig. 6 Thermal conductivity of lightweight insulation with bulk density  $\rho = 393 \text{ kg/m}^3$ .

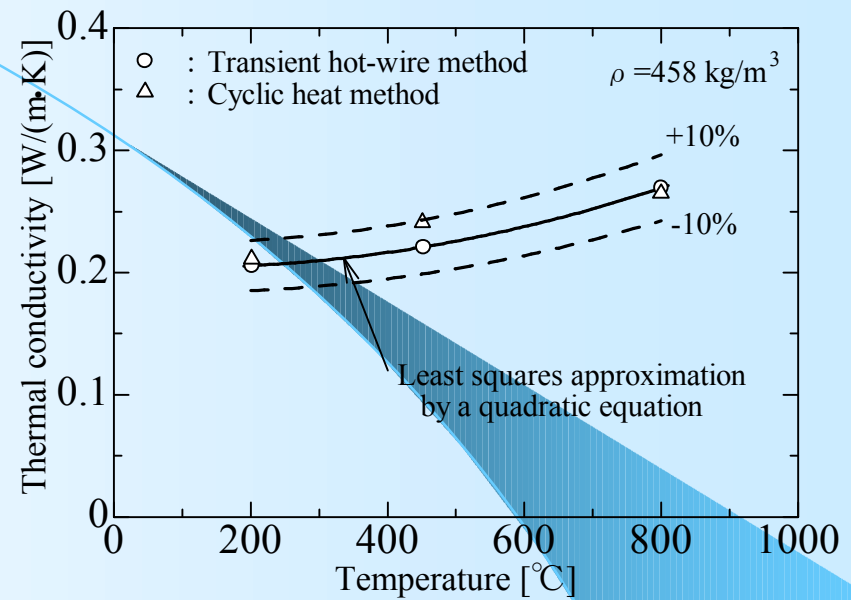


Fig. 7 Thermal conductivity of lightweight insulation with bulk density  $\rho = 458 \text{ kg/m}^3$ .





# H1300を使った測定比較

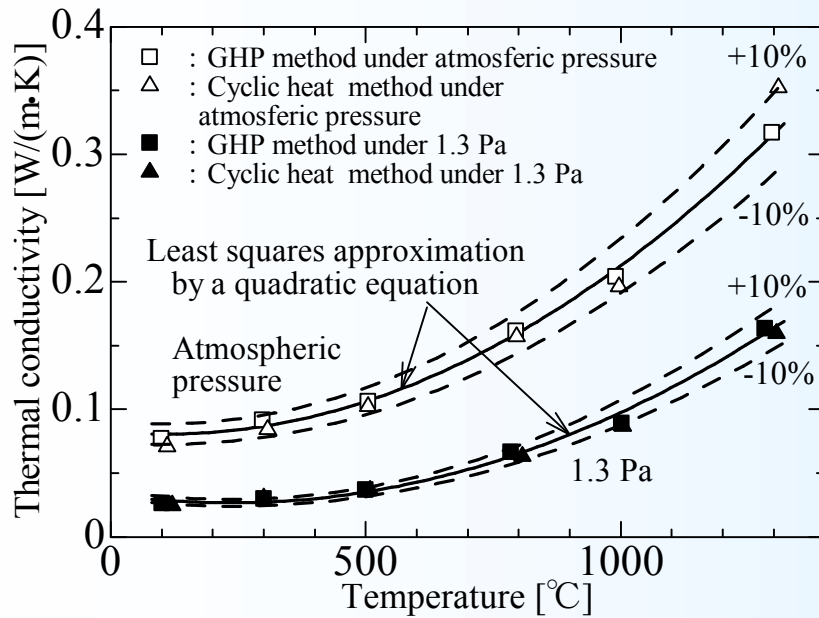


Fig. 8 Thermal conductivity of alumina fiber insulation with bulk density  $\rho = 205 \text{ kg/m}^3$ .

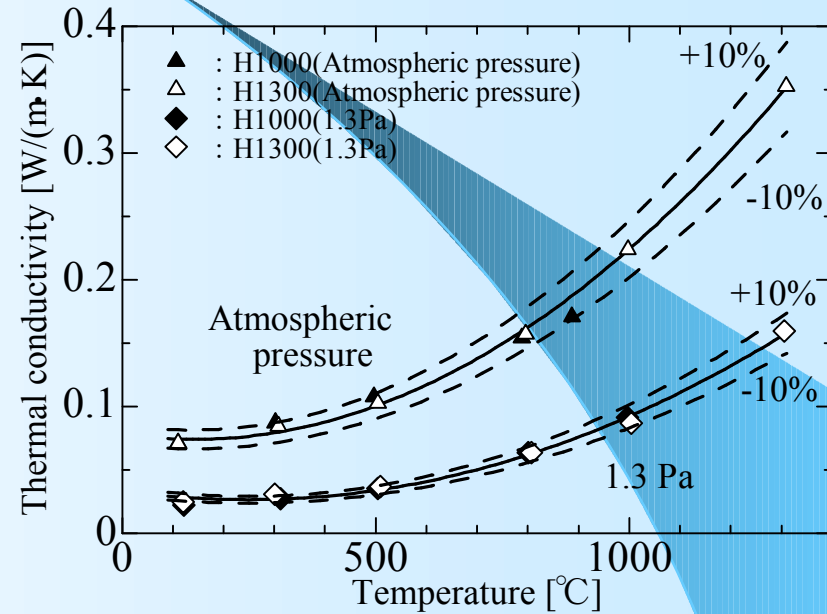
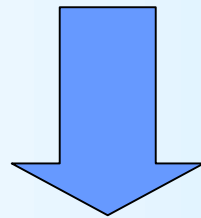


Fig. 9 Comparison thermal conductivity of alumina fiber insulation ( $\rho = 205 \text{ kg/m}^3$ ) by H1000 with H1300 using cyclic heat method.

# 異種測定法間の差

- 保護熱板法、非定常熱線法、周期加熱法、ホットディスク法に関して、同一試験体であれば、測定結果は±10%以内で一致する。



未知の材料に適用可能

# 推定式の結果と測定結果の比較による精度向上

## なぜ推定式が必要か？

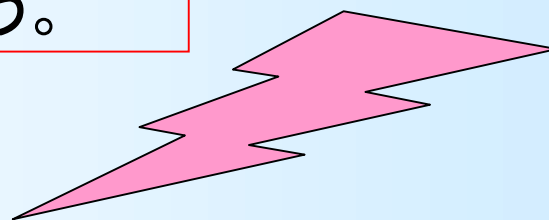
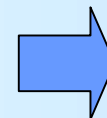
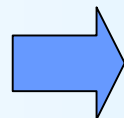
低嵩密度 ( $20\text{kg/m}^3$ 以下)断熱材は、ふく射エネルギーを透過させてしまうため、測定誤差が大きい。装置に依存してしまう。

異種測定法によるチェックが難しい

測定精度の高い高嵩密度断熱材のデータから推定式を作成

測定結果と推定結果を比較

精度向上



# 従来の推定式と問題点

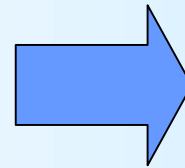
最も実用的な式

$$\lambda = a\rho + \frac{b}{\rho} + c$$

$a, b, c$ は係数  
 $\rho$ は嵩密度

## \* その他の数多くの推定式

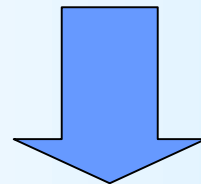
箇々の素材の熱物  
性値や素材同士の  
接触熱抵抗を必要  
としている



開発スピードにつ  
いて行けず、実用  
性に欠ける

# 従来の推定式の問題点

1. 温度の関数になっていない
2. 嵩密度のみの関数: 他の情報(固体、ふく射、気体による伝熱効果)が得られない
3. 高嵩密度試験体で推定式を作成すると、低嵩密度側は外挿になるため、推定精度が悪い



## 根本的な原因

試験体ごとに、最小自乗法を使って係数 $a, b, c$ を導出しているため

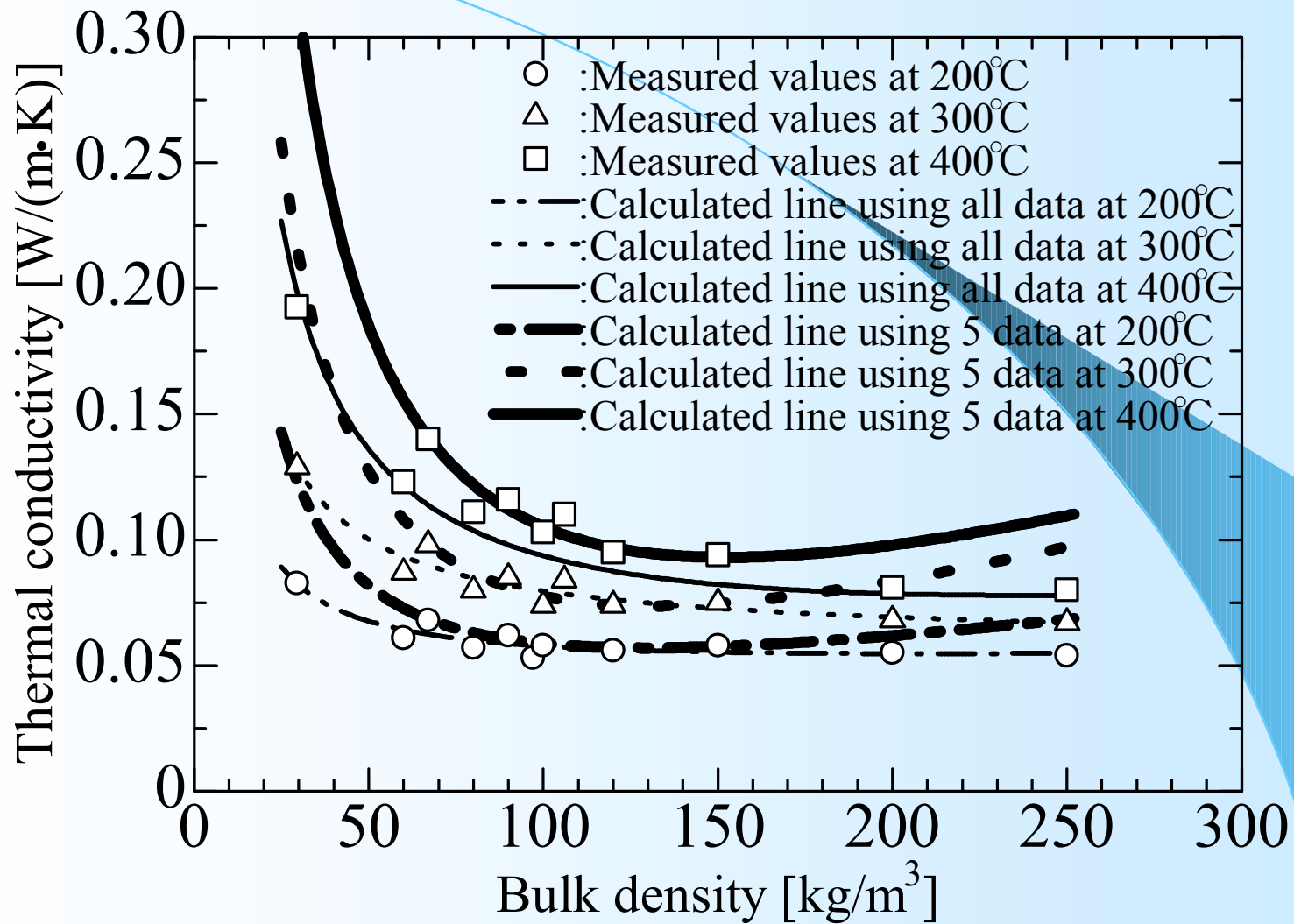
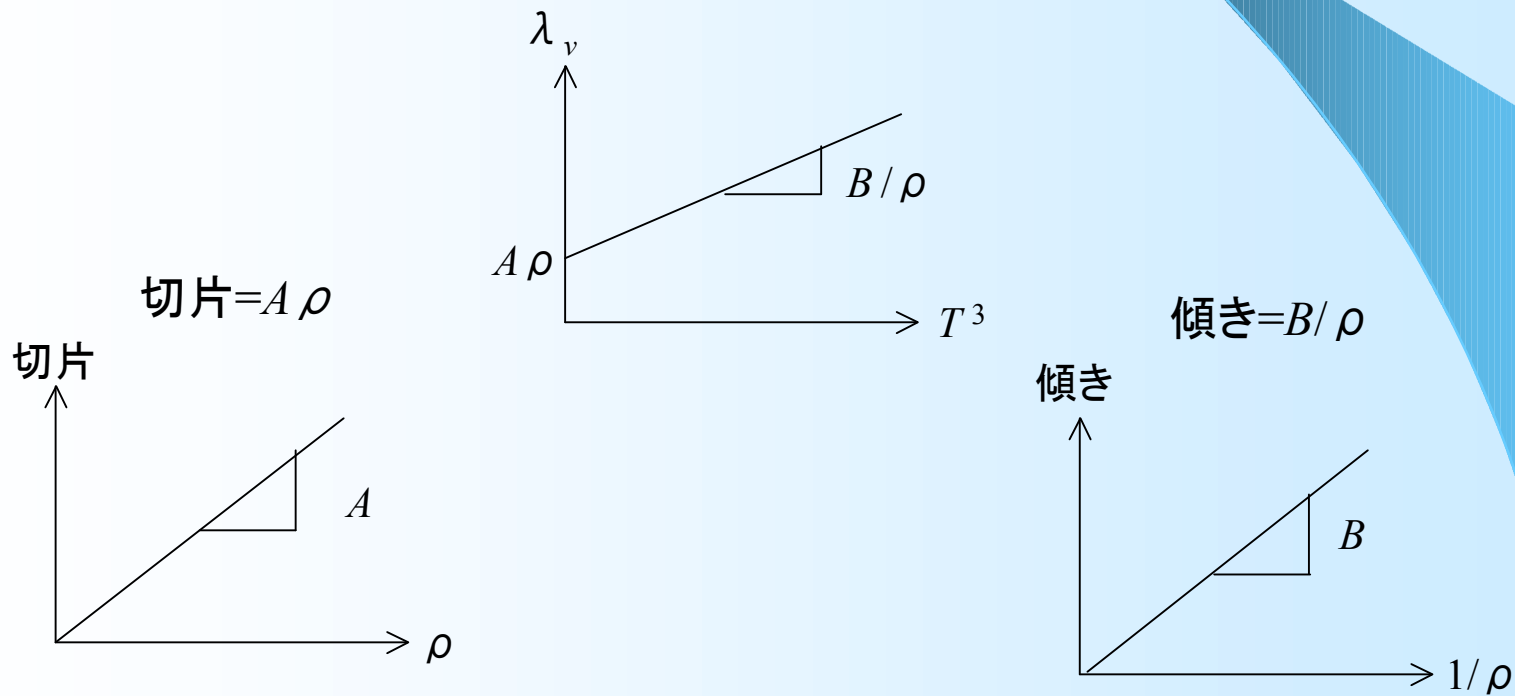


Fig. 10 Calculated results by least square method.

# 係数UおよびV<sub>0</sub>の決定

真空下の熱伝導率  $\lambda_v$ : 
$$\lambda_v = A\rho + \frac{B}{\rho} T^3$$



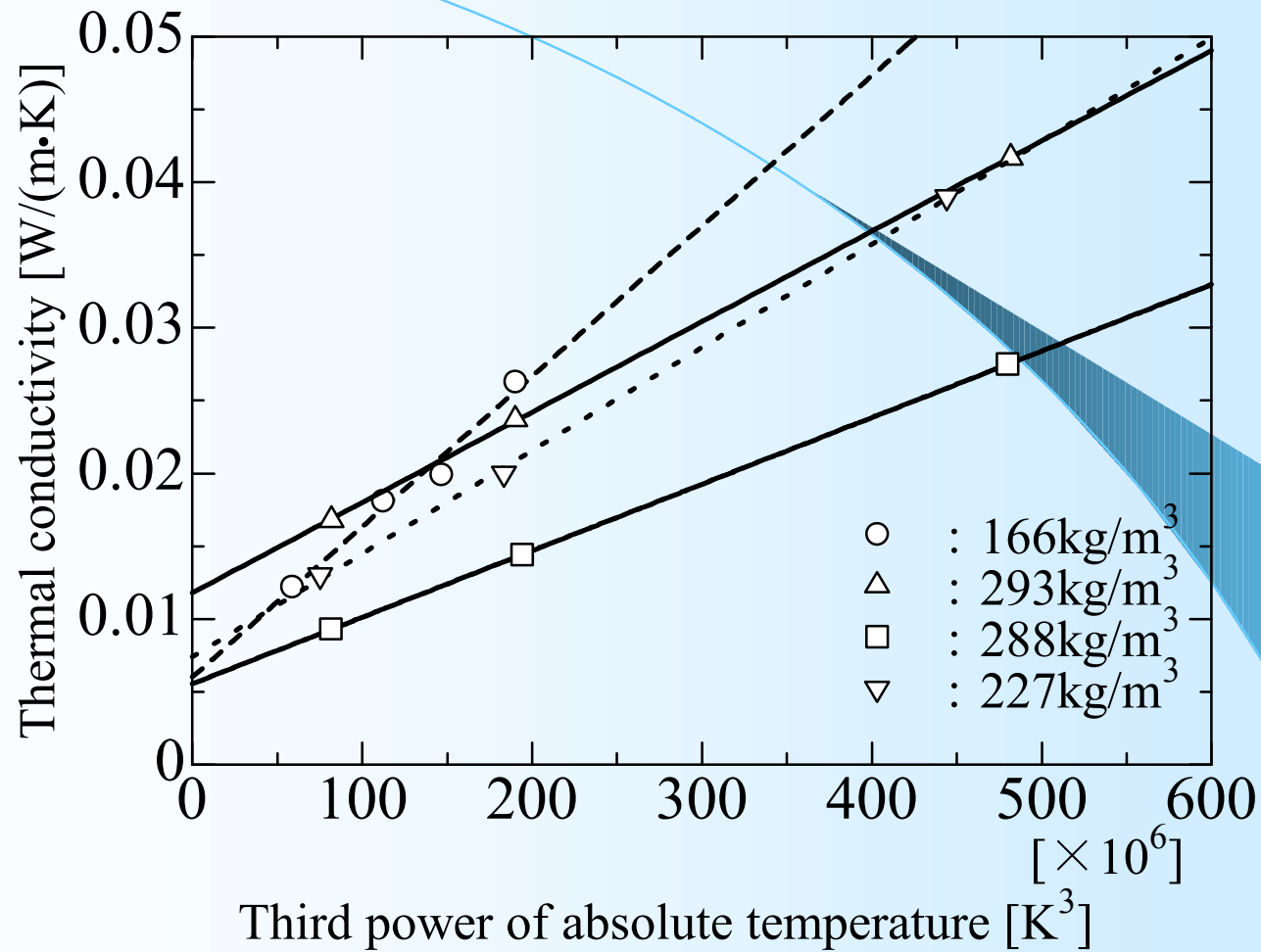


Fig. 11 Thermal conductivity of rock wool with four kinds of bulk density under evacuated condition (2 Pa).



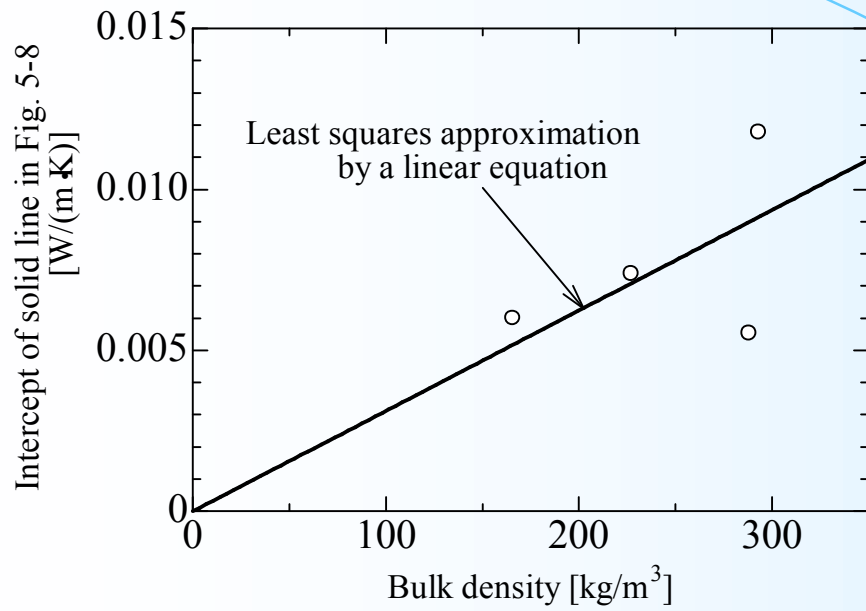


Fig. 12 Intercepts of each line in Fig. 11 vs. bulk density.

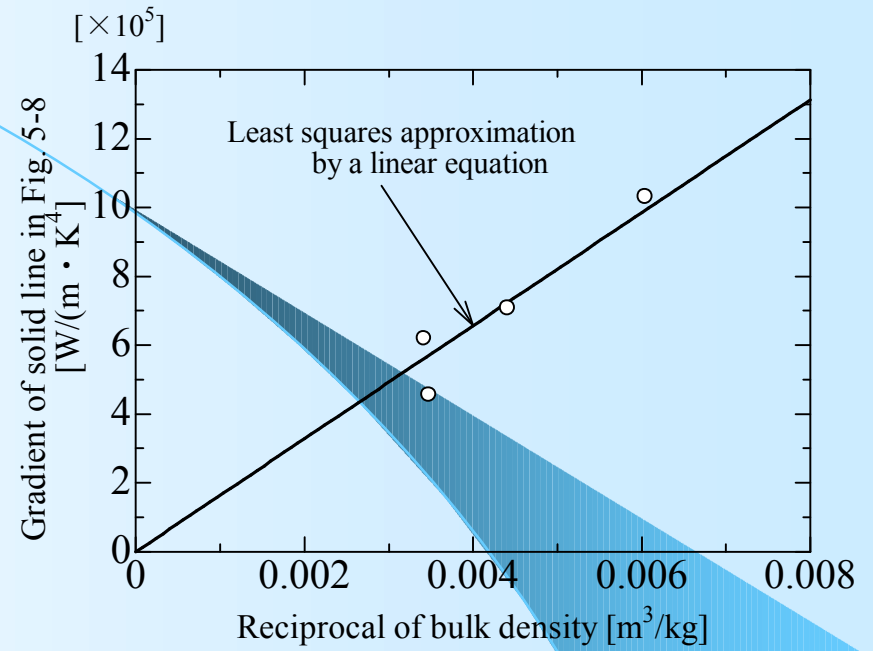


Fig. 13 Gradients of each line in Fig. 11 vs. reciprocal of bulk density.

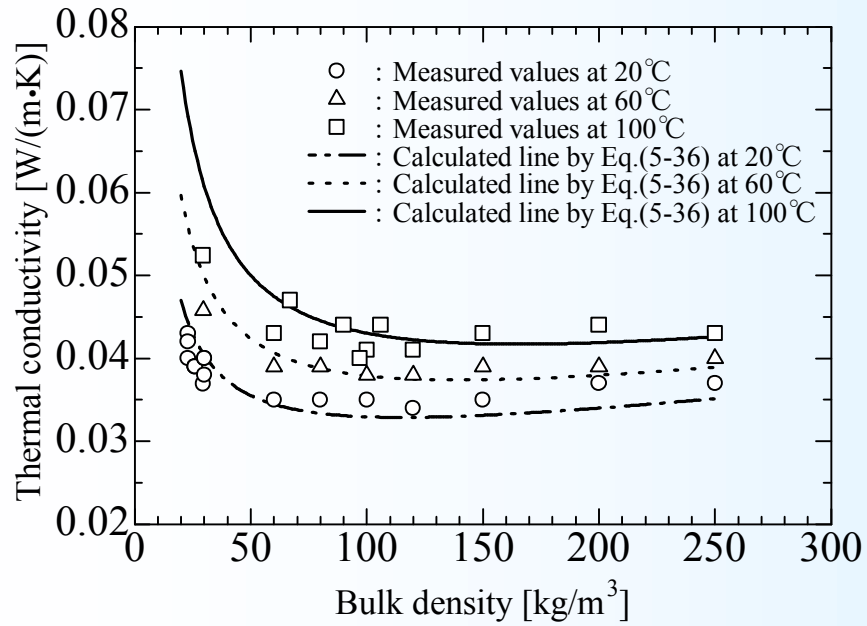


Fig. 14 Thermal conductivity of rock wool.

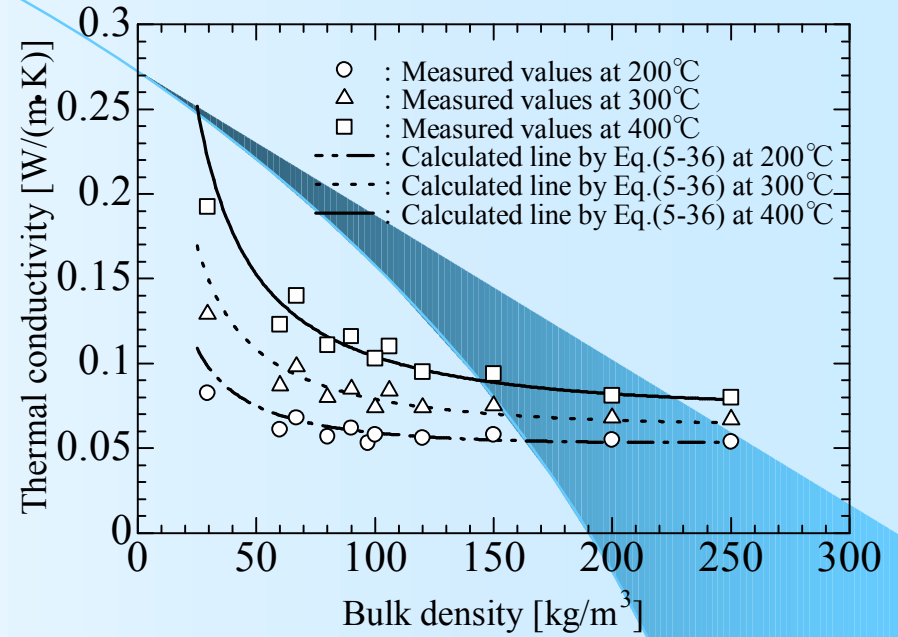


Fig. 15 Thermal conductivity of rock wool.

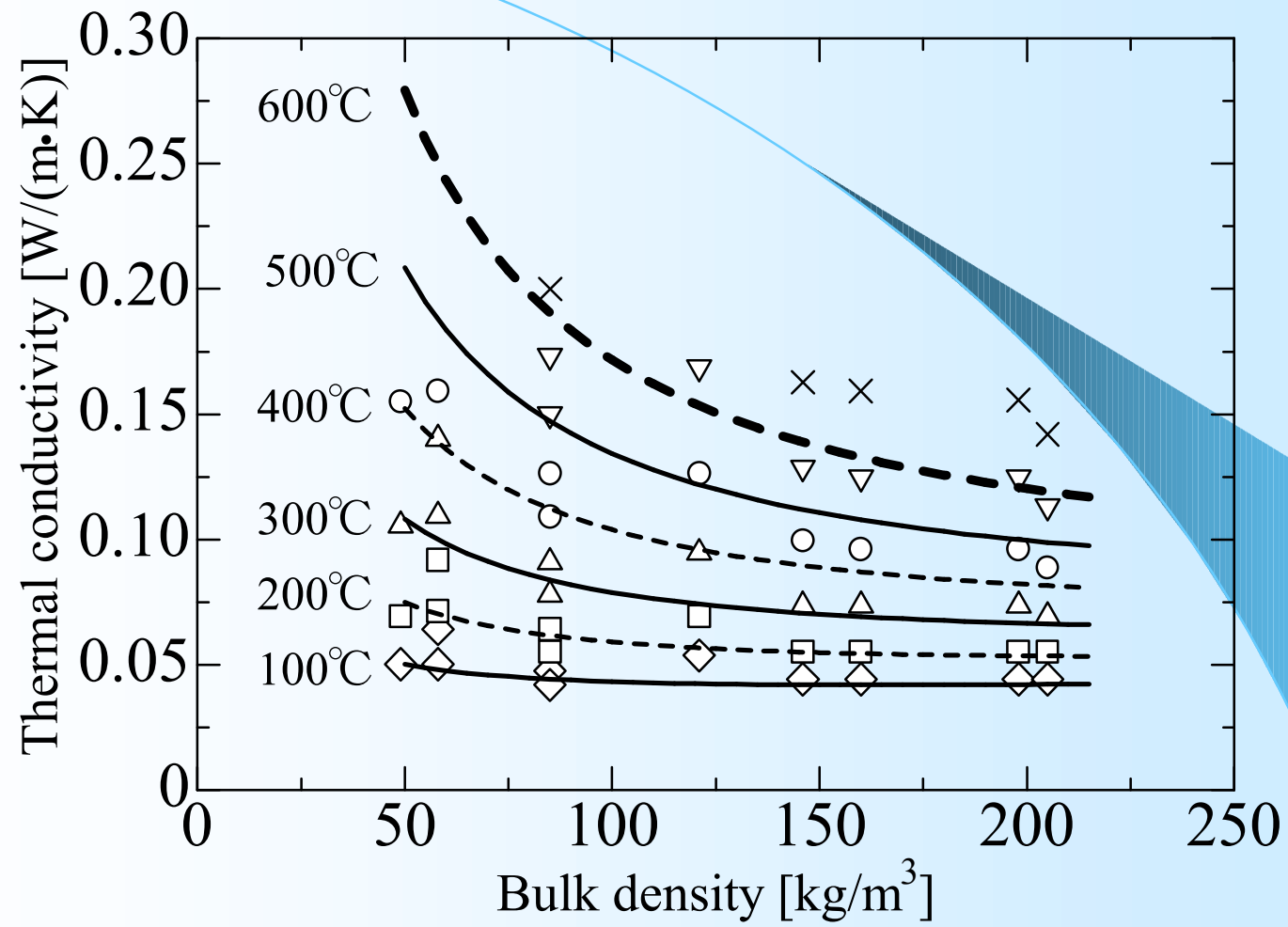


Fig. 16 Comparison of reference data with calculated results.

# 真比熱と平均比熱

真比熱

$$c_{st} = \frac{1}{m_s} \frac{d}{d\theta_{s1}} (H_{s1} - H_{base})$$

平均比熱

$$c_{sm} = \frac{1}{m_s} \frac{H_{s1} - H_{s2}}{\theta_{s1} - \theta_{s2}}$$

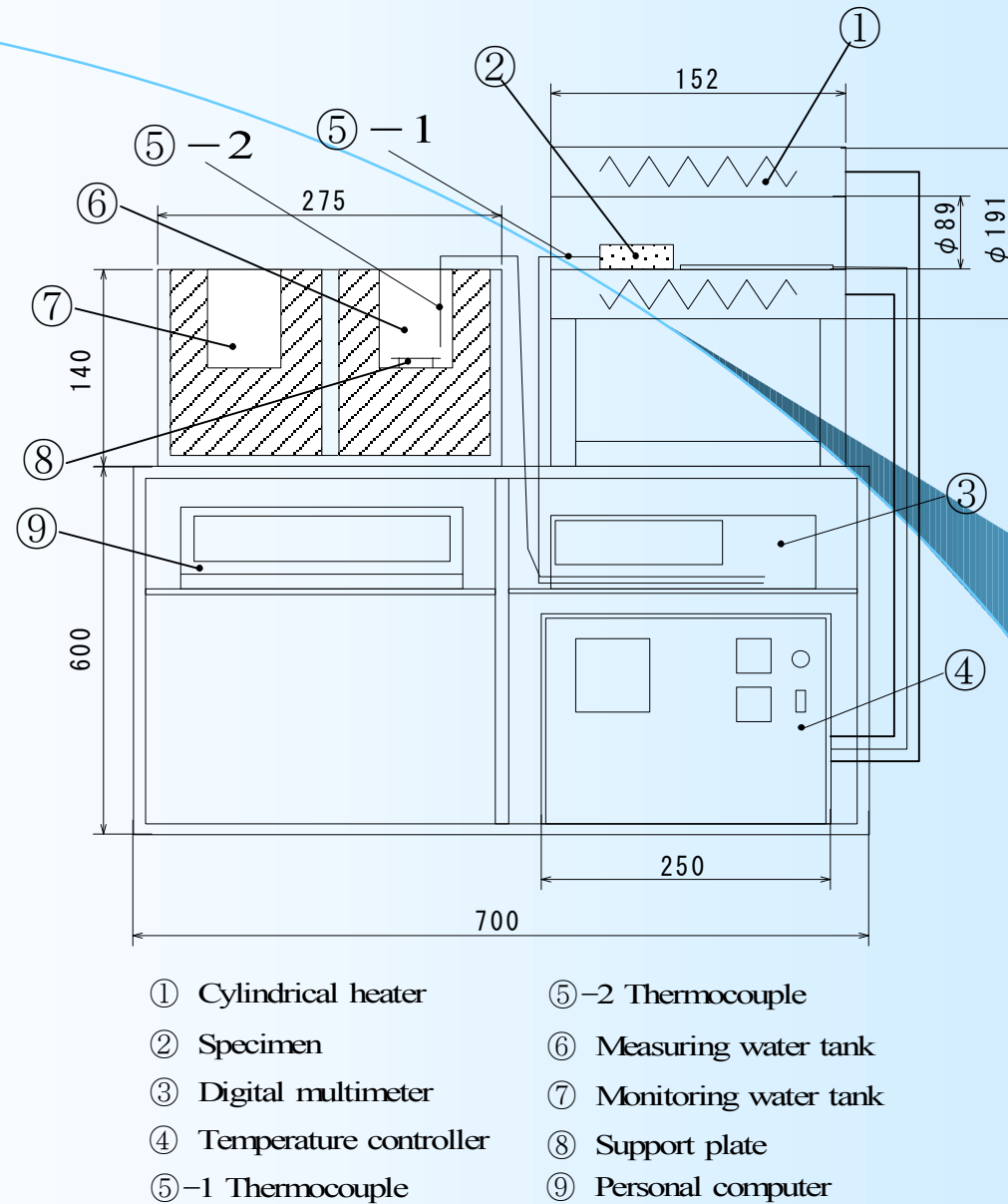


Fig. 17 Schematic of specific heat measuring apparatus  
(Type: S1000)

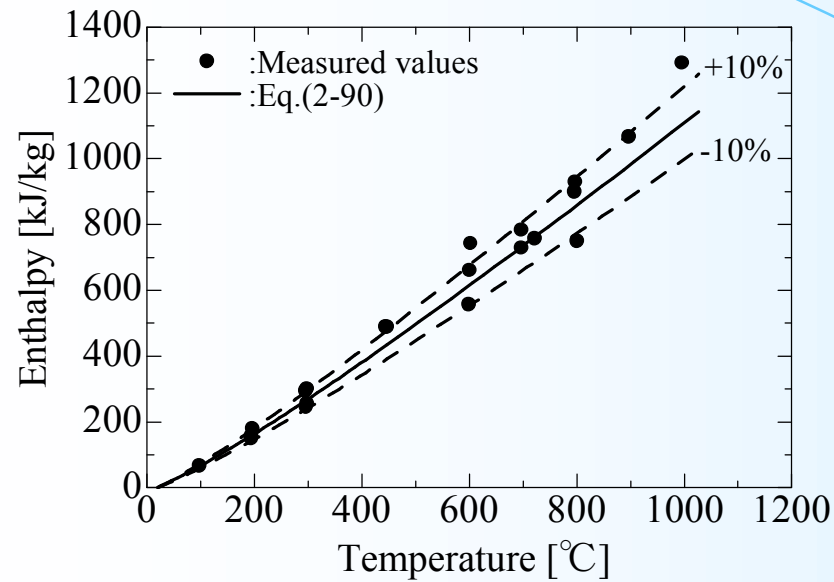


Fig. 18 Enthalpy of the standard specimen SRM720 Synthetic Sapphire ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

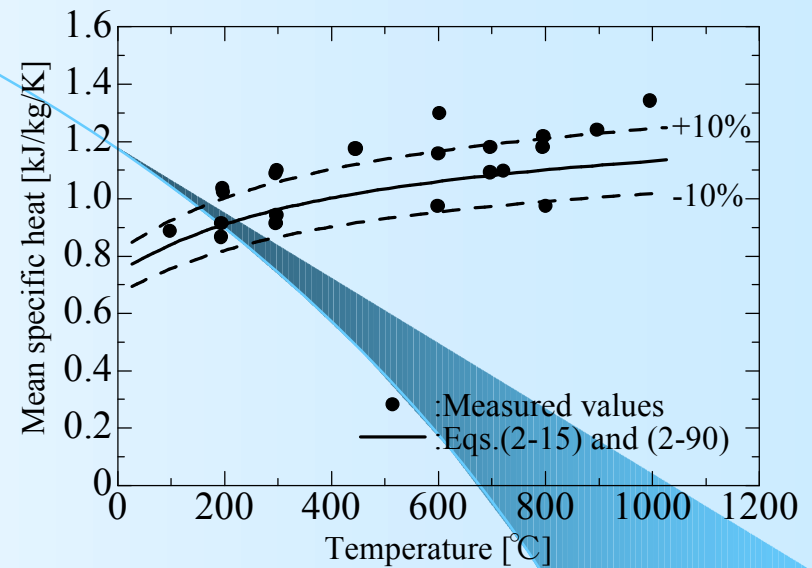


Fig. 19 Mean specific heat of the standard specimen SRM720 Synthetic Sapphire ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

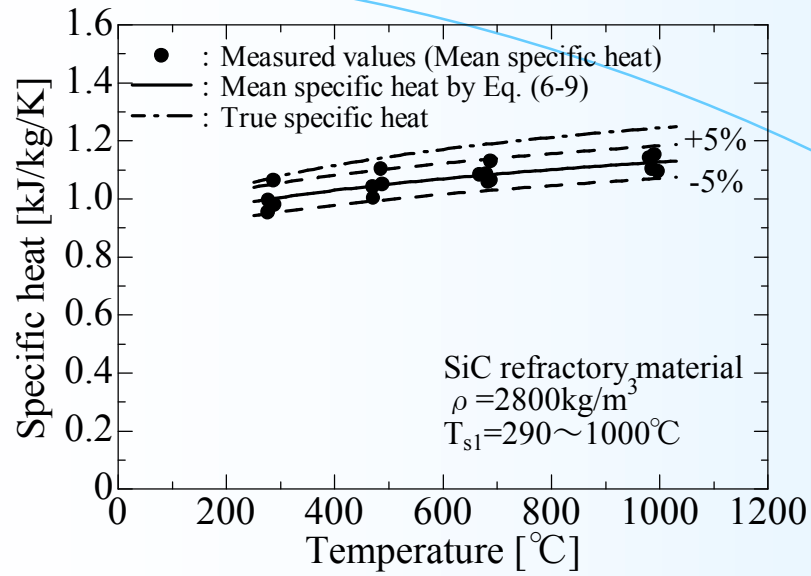


Fig. 20 Mean and true specific heats of SiC refractory.

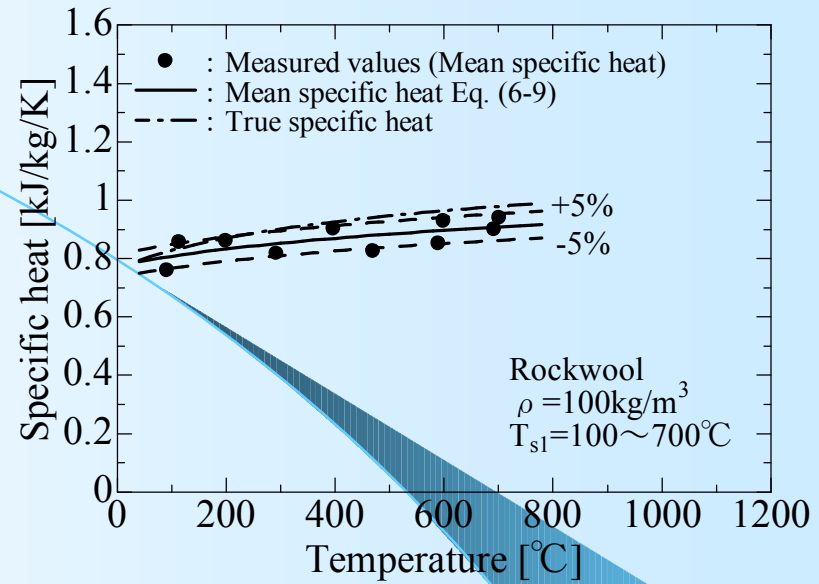


Fig. 21 Mean and true specific heats of rock wool.

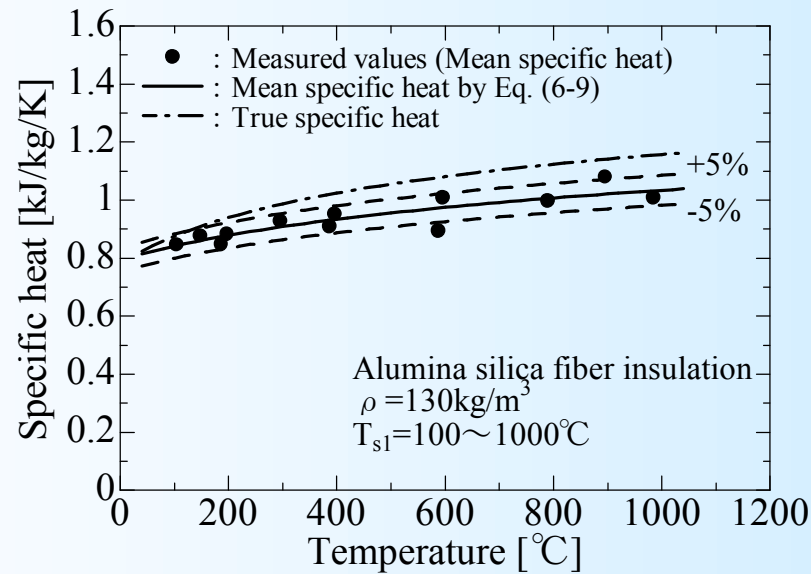


Fig. 22 Mean and true specific heats of alumina silica fiber.

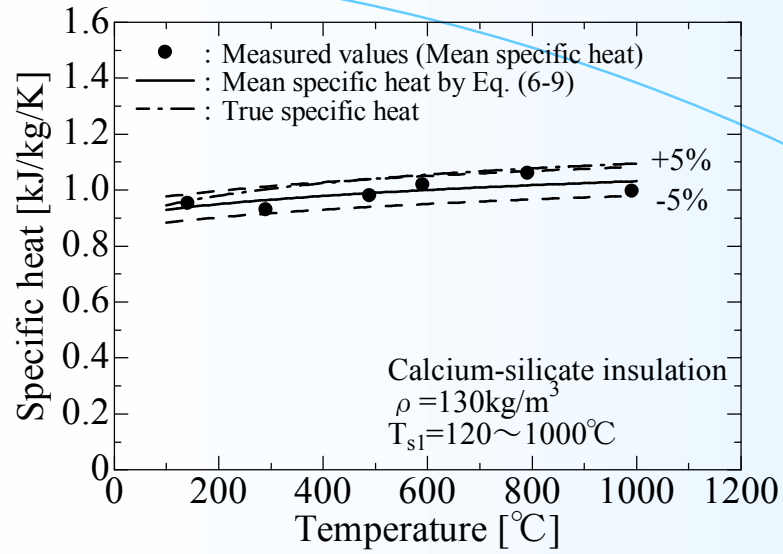


Fig. 23 Mean and true specific heats of calcium-silicate insulation.

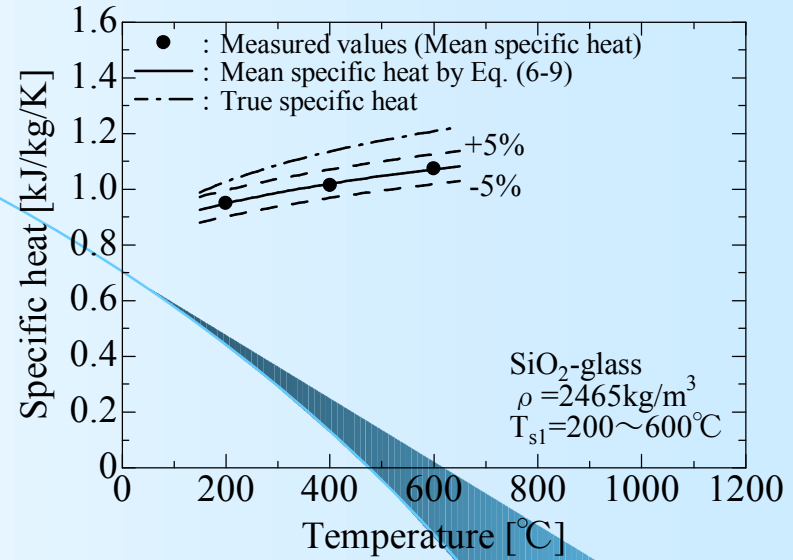


Fig. 24 Mean and true specific heats of SiO<sub>2</sub>-glass.

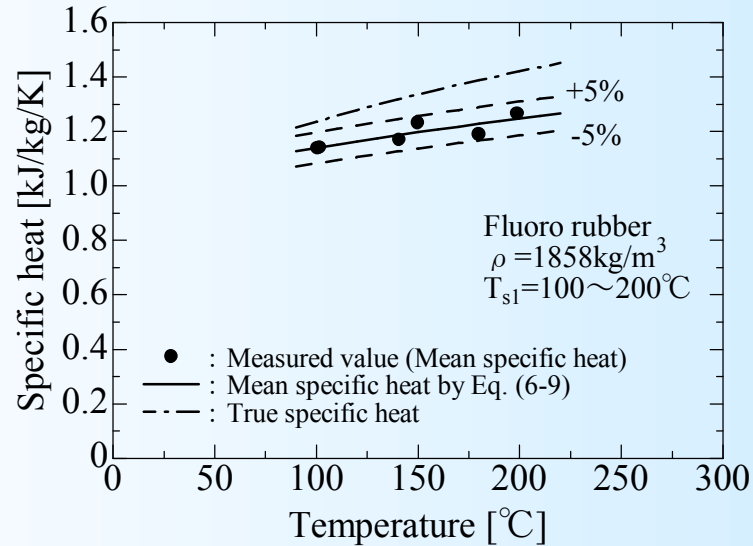


Fig. 25 Mean and true specific heats of Fluoro rubber.