

ODSフェライト鋼の 設計評価用物性式の策定

(研究 報 告)



2001年12月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

ODS フェライト鋼の設計評価用物性式の策定 (研究報告)

畠山 耕一* 鵜飼 重治*

要旨

酸化物分散強化型 (Oxide Dispersion Strengthened ; ODS) フェライト鋼は、優れた耐スエリング特性と高いクリープ強度が期待されることから、将来の高速炉用燃料被覆管材料として有望視されている。本研究では、サイクル機構にて試作した ODS フェライト鋼被覆管及び被覆管相当丸棒を用い、ODS フェライト鋼の機械的・物理的性質を把握するために、下記項目についての物性値測定試験を実施し、設計評価用物性式として策定した。

- ・ 密度
- ・ 比熱
- ・ 熱伝導率
- ・ 平均熱膨張率
- ・ ヤング率
- ・ ポアソン比
- ・ 変態点

*)大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ

The physical property equations for the design evaluation of ODS ferritic steels
(Research Report)

Koichi HATAKEYAMA* Shigeharu UKAI*

Abstract

Oxide Dispersion Strengthened(ODS) ferritic steels are expected for fast reactor cladding materials, because they are more swelling resistance than austenitic steels and have excellent creep strength at elevated temperature. In this report, various physical properties of cladding tubes and extruded bar manufactured by JNC were measured for understanding of the mechanical and physical properties of ODS ferritic steel, and the equations of physical property for the design and evaluation was constructed. Evaluated physical properties are as follows:

- Density
- Specific heat
- Thermal conductivity
- Thermal expansion coefficient
- Young's modulus
- Poisson's ratio
- Transformation temperature

*)Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

目次

1. はじめに	1
2. 物性値測定	
2.1 試験方法	2
2.2 試験結果	3
3. 設計評価用物性式の策定	
3.1 密度	5
3.2 比熱	5
3.3 熱伝導率	6
3.4 平均熱膨張率	6
3.5 ヤング率	6
3.6 ポアソン比	7
3.7 マルテンサイト系 ODS 鋼の変態点	7
4. まとめ	8
5. 参考文献	8

表目次

表 2.1	押出素管の成分分析結果	9
表 2.2	密度測定結果	10
表 2.3	比熱・熱伝導率測定結果	11
表 2.4	熱膨張率測定結果	12
表 2.5	ヤング率、剛性率及びポアソン比測定結果	13

図目次

図 2.1-1	マルテンサイト系 ODS 鋼被覆管 M11 の製造工程	14
図 2.1-2	フェライト系 ODS 鋼被覆管 F11 の製造工程	15
図 2.2-1	マルテンサイト系 ODS 鋼丸棒の製造工程	16
図 2.2-2	フェライト系 ODS 鋼丸棒の製造工程	17
図 2.3	比熱・熱伝導率測定原理模式図	18
図 2.4	熱膨張率測定原理模式図	18
図 2.5	ヤング率、ポアソン比測定原理模式図	19
図 2.6	変態点測定原理模式図	19
図 2.7	比熱	20
図 2.8	熱伝導率	20
図 2.9	平均熱膨張率の測定値と計算値の比較	21
図 2.10-1	温度－熱膨張曲線(PM12)	22
図 2.10-2	温度－熱膨張曲線(PF12)	22
図 2.11	ヤング率	23
図 2.12	ポアソン比	23
図 2.13-1	PM12 の変態点測定結果	24
図 2.13-2	PF12 の変態点測定結果	24
図 3.1	比熱の実測値と計算値の比較	25
図 3.2	熱伝導率の測定値と計算値の比較	25
図 3.3	平均熱膨張率	26
図 3.4	ヤング率の実測値と計算値の比較	26
図 3.5	ポアソン比の実測値と計算値の比較	27

1. はじめに

実用化段階の高速炉燃料の目標燃焼度は、取出平均燃焼度で 15 万 MWd/t 以上であり、この燃焼度に相当する高速中性子照射量は約 $50 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) に達する。サイクル機構では、このような高照射量でも照射変形抵抗性に優れることが期待されるフェライト鋼をベースに、高温プラントへの適用を目指して高温クリープ強度改善のためイットリア酸化物を微細分散した酸化物分散強化型(Oxide Dispersion Strengthened ; ODS)フェライト鋼の開発を行ってきた^{1)~6)}。

ODS フェライト鋼の物性値については、これまでに開発初期の試作被覆管であり、現在の ODS フェライト鋼被覆管の合金・製管設計とは異なる材料である 1DS(0.12C-11Cr-3W-0.5Ti-0.5Y₂O₃)についてその取得がなされたのみである。

これまで、マルテンサイト系については徐冷による加工組織の軟化および α/γ 変態による結晶粒の等軸化、フェライト系については回復/再結晶による加工組織の軟化および再結晶による結晶粒の等軸化を行い、さらに、2 ロール型ピルガー圧延機の適用により 316 ステンレス鋼と同様の冷間圧延プロセスで長尺被覆管の製造を行った。本報告では、これら最新の ODS フェライト鋼 M11 (マルテンサイト系) と F11 (フェライト系) について、機械的・物理的性質を把握するために物性値取得試験を実施し、設計評価用物性式として策定した。

2. 物性値測定

2.1 試験方法

2.1.1 供試材

供試材には、マルテンサイト系 ODS 鋼として被覆管(M11; $\phi 8.5 \times 0.5t$)及び丸棒(PM12; $\phi 10$)を、フェライト系 ODS 鋼として被覆管(F11; $\phi 8.5 \times 0.5t$)及び丸棒(PF12; $\phi 10$)を用いた。これらの化学成分を表 2.1 に示す。ODS 鋼は、合金粉末に Y_2O_3 粉末を混合してアトライターを用いたメカニカルアロイング法により製造されている。供試材の製造工程を図 2.1 (被覆管) 及び図 2.2 (丸棒) に示す。

2.1.2 試験方法

代表的物性値として、密度、比熱・熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率及びポアソン比の測定を行った。測定方法を以下に示す。

(1) 密度

JIS Z 8807 固体比重法に準じ室温 (20°C 近傍) における密度測定を行った。

(2) 比熱・熱伝導率

丸棒試料の直径中央より $\phi 10 \times 1.5t$ の円盤状試料を採取し、理学電気機製 LF/TCM-FA8510B 型熱定数測定装置を使用して、レーザーフラッシュ法により各温度(室温、100,200,300,400,500,600,700,750,800,850,900°C)での比熱・熱伝導率の測定を行った。測定試料は熱電対を溶接後、両面に白金ペーストを塗布し、白金ペーストの均質化及び測定中のガス発生等の防止のために、測定最高温度まで真空中で熱処理後、炉冷した。測定原理模式図を図 2.3 に示す。まず、試料を電気炉内に設置し、真空雰囲気です定の温度に保持する。この状態で試料表面にレーザー光を瞬間的(1msec 以下)に照射して熱エネルギーを与える。これと同時に試料裏面の非定常温度変化を熱電対($\phi 0.1mm$)および InSb 赤外線検出器で測定し、それぞれ零点外挿法により比熱、 $t/2$ 法により熱拡散率を算出する。熱伝導率 λ は、比熱 C_p 、熱拡散率 α 、密度 ρ から(1)式により求める。ただし、密度は試料寸法及び質量より求めたかさ密度を用いた。

$$\lambda = C_p \cdot \alpha \cdot \rho \quad \dots \dots (1)$$

(3) 平均熱膨張率

丸棒試料の直径中央より $\phi 3.5 \times 20t$ の円柱状試料を採取し、理学電気機製 TMA8140 型 (示差膨張方式) を使用して、熱機械分析(TMA)により昇温速度 5°C/min で室温から各温度(50,100,150,200,250,300,350,400,450,500,550,600,650,700,750,800,850,900,950,1000°C)間の平均線膨張係数を測定した。測定原理模式図を図 2.4 に示す。不活性ガス中にて、天秤をテコとして使用し、分銅荷重により検出棒を介して測定試料及び標準試料が支持管に押付けられる。この状態で試料部を加熱すると、検出棒の伸縮量はキャンセルされ、試料間の伸縮の差が作動トランスで検出される。この伸縮差を L 、試料の室温での長さを d_L 、室温を T_0 としたとき、温度 T における線膨張係数 α は(2)式により

求められる。

$$\alpha = L/dL / (T-T_0) \quad \dots \dots (2)$$

(4) ヤング率・ポアソン比

丸棒試料の直径中央より 60mm×10mm×1.5mm の短冊上試料を採取し、日本テクノプラス(株)製 EG-HT 型高温弾性率測定装置を使用して、固有振動共振法により室温及び 50～950℃までを 50℃間隔にてヤング率、ポアソン比を測定・算出した。測定原理模式図を図 2.5 に示す。片持ちした試料に電磁コイルによる曲げ及びうねり変形を与え、駆動周波数が試料の固有周波数と一致したときに振幅が最大となる。このときの周波数から(3)式によりヤング率が求められる。

$$E = \omega^2 \rho A / \lambda^4 \quad \dots \dots (3)$$

ここで、E:ヤング率、 ω :角振動数、 ρ :密度、A:断面積、I:慣性モーメント、 λ :無次元数

同様にしてうねり共振周波数から剛性率:G が測定され、(4)式によりポアソン比: ν が算出される。(二次元弾性等方体を仮定)

$$\nu = E/2G - 1.00 \quad \dots \dots (4)$$

(5) 変態点

丸棒試験片の直径中央より ϕ 8mm×12mm の円柱状試験片を採取し、富士電波工機(株)製 サーメックマスターZ (加工フォーマスター試験機) を使用し、Ac₁、Ac₃ 点測定を行った。変位は非接触式のレーザー式膨張測定機構を使用し、昇温速度:5℃/min、到達温度:1000℃、保持時間:5min、冷却速度:5℃/min とした。測定原理模式図を図 2.6 に示す。試料を不活性ガス中において高周波誘導加熱により昇温・冷却し、温度変化による変位量(膨張・収縮)をレーザー光の遮光時間を電圧変換し外径値を測定する。温度を横軸、変位量を縦軸にとりグラフを作成することにより変態点が確認できる。

2.2 試験結果

今回の試験結果を、すでに得られている開発初期材の ODS 鋼(1DS;マルテンサイト組織になる成分系であるが、Ti と C が結合してマトリックス中のオーステナイト生成元素である C 濃度が低下したため、フェライト単相の組織になっている)及び高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS 鋼)と比較して述べる。

(1) 密度

固体比重法による各試料の密度測定結果を表 2.2 に示す。マルテンサイト系 ODS 鋼 M11 の密度は、7.830g/cm³、フェライト系 ODS 鋼 F11 の密度は、7.808g/cm³であった。これは、1DS の密度 7.87g/cm³、PNC-FMS 鋼の密度 7.865g/cm³ とほぼ同じである。

(2) 比熱・熱伝導率

比熱及び熱伝導率測定結果を表 2.3、図 2.7、図 2.8 に示す。室温から 600℃までの

比熱は、マルテンサイト系 ODS 鋼 PM12、フェライト系 ODS 鋼 PF12 とともに PNC-FMS 鋼とほぼ同じであるが、強磁性から常磁性に磁気変態するために生じると考えられている 700°C 近傍における比熱のピークは PM12 に比べ PF12 はかなり大きい。また、PNC-FMS 鋼で見られた A_{C1} 変態点での比熱のピークは、今回の試験温度範囲では観察されなかった（マルテンサイト系の PM12 は、884°C の A_{C1} 変態点で比熱のピークが生じるはずであるが、50°C 間隔で測定しているためこの温度域は測定されなかったと考えられる。一方、フェライト系の PF12 は相変態しない）。

1 DS、PNC-FMS 鋼の熱伝導率が温度の上昇と共に上昇するのに比べ PM12 の熱伝導率は、室温から 800°C までは非常にゆるやかに減少し 800°C から再び上昇する傾向が認められる。一方 PF12 は温度の上昇と共に非常にゆるやかに上昇している。

(3) 平均熱膨張率

TMA による平均熱膨張率の測定結果を表 2.4、図 2.9 に、測定時の温度－熱膨張曲線を図 2.10 に示す。室温から 800°C の範囲においてマルテンサイト組織の PM12 の平均熱膨張率は、同じマルテンサイト組織である PNC-FMS 鋼とほぼ同じで、フェライト組織である PF12 の平均熱膨張率は、同じフェライト組織である 1DS と同じ挙動を示している。また、PM12 は変態による収縮が 885°C 付近で確認された。

(4) ヤング率・ポアソン比

高温弾性率測定装置によるヤング率、剛性率及びポアソン比の測定結果を表 2.5 に示す。PF12 は、組織が高アスペクト比の結晶粒であり、二次元弾性等方体と仮定できないので剛性率の取得は行わなかった。図 2.11 にヤング率を、図 2.12 にポアソン比を示す。PM12 のヤング率は、PF12 のヤング率より若干小さく、PF12 のヤング率は、1DS、PNC-FMS 鋼とほぼ同じである。また、PM12 のポアソン比は、室温から 700°C の範囲において 1DS、PNC-FMS とほぼ同じであった。

(5) 変態点

PM12、PF12 の変態点測定結果を図 2.13 に示す。測定結果より PM12 の A_{C1} 点は 884°C、 A_{C3} 点は 960°C であった。PF12 については変態点が確認されなかった。

3. 設計評価用物性式の策定

3.1 密度

20°Cにおける密度測定値 ρ_{RT} はマルテンサイト系で 7.830g/cm³、フェライト系で 7.808g/cm³ である。高温 T(°C)における密度は、平均熱膨張率 α (10⁻⁶/°C)を用いて以下のよう
に計算により求めることができる。

$$\rho = \rho_{RT} / [1 + 3\alpha(T-20)]$$

$$\cong \rho_{RT} [1 - 3\alpha(T-20)]$$

(1)マルテンサイト系

$$\rho = \rho_{RT} / [1 + 3\alpha(T-20)]$$

$$\cong \rho_{RT} [1 - 3\alpha(T-20)]$$

$$= 7.830 [1 - 3(9.843 + 1.030 \times 10^{-2}T - 2.036 \times 10^{-5}T^2 + 2.508 \times 10^{-8}T^3 - 1.191 \times 10^{-11}T^4)(T-20) \times 10^{-6}] \quad (\text{後述する平均熱膨張率 } \alpha \text{ より})$$

ここで、 ρ : 密度(g/cm³)、T : 温度(°C)

(2)フェライト系

$$\rho = \rho_{RT} / [1 + 3\alpha(T-20)]$$

$$\cong \rho_{RT} [1 - 3\alpha(T-20)]$$

$$= 7.808 [1 - 3(9.571 + 7.926 \times 10^{-3}T - 8.886 \times 10^{-6}T^2 + 3.948 \times 10^{-9}T^3 - 6.975 \times 10^{-13}T^4)(T-20) \times 10^{-6}] \quad (\text{後述する平均熱膨張率 } \alpha \text{ より})$$

ここで、 ρ : 密度(g/cm³)、T : 温度(°C)

3.2 比熱

図 3.1 に比熱の実測値と計算値の比較を示す。マルテンサイト系の比熱は温度上昇と共に増加するが、750°C付近でピークを持つ。このため、室温から 750°Cまでを温度の 4 次式で回帰して比熱を求めた。一方、フェライト系の比熱は 700°C付近でピークを持つため、室温から 700°Cまでを温度の 4 次式で回帰して求めた。

(1)マルテンサイト系

【室温 ≤ T ≤ 750°C】

$$C = 0.1072 + 1.087 \times 10^{-4}T - 3.648 \times 10^{-7}T^2 + 8.637 \times 10^{-10}T^3 - 4.486 \times 10^{-13}T^4$$

ここで、C : 比熱(cal/g · °C)、T : 温度(°C)

(2)フェライト系

【室温 ≤ T ≤ 700°C】

$$C = 0.1100 + 2.342 \times 10^{-5}T + 6.297 \times 10^{-7}T^2 - 2.168 \times 10^{-9}T^3 + 2.388 \times 10^{-12}T^4$$

ここで、C : 比熱(cal/g · °C)、T : 温度(°C)

3.3 熱伝導率

図 3.2 に熱伝導率の実測値と計算値の比較を示す。熱伝導率は、室温から 850°C までのデータを温度の 4 次式で回帰して求めた。

(1) マルテンサイト系

【室温 ≤ T ≤ 850°C】

$$K = 28.47 - 1.244 \times 10^{-2}T + 8.483 \times 10^{-5}T^2 \\ - 1.911 \times 10^{-7}T^3 + 1.216 \times 10^{-10}T^4$$

ここで、K：熱伝導率(W/m・°C)、T：温度(°C)

(2) フェライト系

【室温 ≤ T ≤ 850°C】

$$K = 24.81 + 1.213 \times 10^{-2}T - 3.554 \times 10^{-5}T^2 \\ + 5.137 \times 10^{-8}T^3 - 2.567 \times 10^{-11}T^4$$

ここで、K：熱伝導率(W/m・°C)、T：温度(°C)

3.4 平均熱膨張率

図 3.3 に平均熱膨張率の実測値と計算値の比較を示す。マルテンサイト系の熱膨張率は、900°C 付近で相変態によるものと考えられる熱膨張率の低下が起こる。このため、室温から 850°C までの温度の 4 次式で回帰して熱膨張率を求めた。フェライト系は、相変態がないので室温から 1000°C までの温度の 4 次式で回帰して熱膨張率を求めた。

(1) マルテンサイト系

【室温 ≤ T ≤ 850°C】

$$\alpha_m = 9.843 + 1.030 \times 10^{-2}T - 2.036 \times 10^{-5}T^2 \\ + 2.508 \times 10^{-8}T^3 - 1.191 \times 10^{-11}T^4$$

ここで、 α_m ：熱膨張率($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、T：温度(°C)

(2) フェライト系

【室温 ≤ T ≤ 1000°C】

$$\alpha_m = 9.571 + 7.926 \times 10^{-3}T - 8.886 \times 10^{-6}T^2 \\ + 3.948 \times 10^{-9}T^3 + 6.975 \times 10^{-13}T^4$$

ここで、 α_m ：熱膨張率($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、T：温度(°C)

3.5 ヤング率

図 3.4 にヤング率の実測値と計算値の比較を示す。マルテンサイト系のヤング率は、850°C 付近で相変態によるものと考えられる上昇が起こる。このため、室温から 800°C までの温度の 4 次式で回帰してヤング率を求めた。フェライト系は、相変態がないので室温から 950°C までの温度の 4 次式で回帰してヤング率を求めた。

(1) マルテンサイト系

【室温 ≤ T ≤ 800°C】

$$E=212.4-0.1482T+6.628 \times 10^{-4}T^2 \\ -1.412 \times 10^{-6}T^3+7.324 \times 10^{-10}T^4$$

ここで、E：ヤング率(GPa)、T：温度(°C)

(2)フェライト系

【室温 $\leq T \leq 950^\circ\text{C}$ 】

$$E=225.4-0.1380T+5.701 \times 10^{-4}T^2 \\ -1.245 \times 10^{-6}T^3+6.954 \times 10^{-10}T^4$$

ここで、E：ヤング率(GPa)、T：温度(°C)

3.6 ポアソン比

図 3.5 にポアソン比の実測値と計算値の比較を示す。マルテンサイト系のポアソン比は、室温から 600°Cまでを温度の 4 次式で回帰し、600°Cから 800°Cまでを温度の 1 次式で回帰して求めた。フェライト系のポアソン比は、暫定的にマルテンサイト系と同様とする。

(1)マルテンサイト系

【室温 $\leq T \leq 600^\circ\text{C}$ 】

$$\nu=0.2814+8.593 \times 10^{-5}T-6.800 \times 10^{-7}T^2 \\ +2.090 \times 10^{-9}T^3-1.786 \times 10^{-12}T^4$$

【600°C $< T \leq 800^\circ\text{C}$ 】

$$\nu=-0.0526+5.98 \times 10^{-4}T$$

ここで、 ν ：ポアソン比、T：温度(°C)

(2)フェライト系 (暫定)

【室温 $\leq T \leq 600^\circ\text{C}$ 】

$$\nu=0.2814+8.593 \times 10^{-5}T-6.800 \times 10^{-7}T^2 \\ +2.090 \times 10^{-9}T^3-1.786 \times 10^{-12}T^4$$

【600°C $< T \leq 800^\circ\text{C}$ 】

$$\nu=-0.0526+5.98 \times 10^{-4}T$$

ここで、 ν ：ポアソン比、T：温度(°C)

3.7 マルテンサイト系 ODS 鋼の変態点

図 2.13 に示す加工フォーマスターによる測定結果より、 A_{c1} 点は 884°C、 A_{c3} 点は 960°Cとする。

4. まとめ

マルテンサイト系及びフェライト系 ODS 鋼の各種物性値（密度、比熱・熱伝導率、平均熱膨張率、ヤング率・ポアソン比、変態点）を測定し、設計用物性式として策定した。

5. 参考文献

- 1) S.Ukai et al.,"Alloying design of oxide dispersion strengthened ferritic steel for long life FBRs core materials",J.Nucl.Mater.204,pp65-73,1993.
- 2) S.Ukai et al.,"Tube manufacturing and mechanical properties of oxide dispersion strengthened ferritic steel",J.Nucl.Mater.204,pp74-80,1993.
- 3) S.Ukai et al.,"Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for FBR core application,(I)Improvement of mechanical properties by re-crystallization processing", J.Nucl.Sci.and Tech.,Vol.34,No.3,pp256-263,1997.
- 4) S.Ukai et al.,"Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for FBR core application,(II)Morphology improvement by martensitic transformation",J.Nucl.Sci.and Tech.,Vol.35,No.4,pp294-300,1998.
- 5) S.Ukai et al.,"R & D of oxide dispersion strengthened ferritic martensitic steels for FBR",J.Nucl.Mater.258-263,pp1745-1749,1998.
- 6) S.Ukai et al.,"Tube manufacturing and characterization of oxide dispersion strengthened ferritic steels",J.Nucl.Mater.283-287,pp702-706,2000.

表 2.1 押出素管の成分分析結果

(wt%)

区分	符号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y	Y ₂ O ₃ ¹⁾	O	Ex. O ²⁾	N	Ar
マルテンサイト系	M11	0.12	0.05	0.044	0.002	0.002	0.023	9.02	1.94	0.21	0.27	0.34	0.17	0.10	0.011	0.0026
	PM11	0.13	—	—	—	—	—	9.06	1.92	0.21	0.28	0.36	0.15	0.07	—	0.0054
フェライト系	F11	0.026	0.05	0.046	0.002	0.003	0.032	11.92	2.00	0.30	0.19	0.24	0.12	0.07	0.010	0.0025
	PF12	0.037	—	—	—	—	—	11.72	1.99	0.29	0.18	0.23	0.12	0.07	—	0.0058

1) Y₂O₃=1.27Y

2) Ex. O (Excessive Oxygen Content) =Total O-0.27Y

表 2.2 密度測定結果

鋼種	密度 (g/cm ³)	密度計算用データ		体積計算用データ				
		重量 (g)	体積 (cm ³)	水温 (°C)	水の密度 (g/cm ³)	天秤上の試 料重量(g)	純水中の試 料重量(g)	
M11	①	7.829	5.2636	0.672	20.8	0.998035	5.266	4.595
	②	7.825	5.2687	0.673	20.9	0.998013	5.267	4.595
	③	7.836	5.2686	0.672	21.0	0.997992	5.267	4.596
	平均	7.830	5.2670	0.673	20.9	0.998013	5.267	4.595
F11	①	7.832	5.1634	0.659	20.8	0.998035	5.163	4.505
	②	7.820	5.1639	0.660	20.9	0.998013	5.163	4.504
	③	7.772	5.1635	0.664	21.0	0.997992	5.165	4.502
	平均	7.808	5.1636	0.661	20.9	0.998013	5.164	4.504

体積 = (天秤上の試料重量 - 純水中の試料重量) / 水の密度

密度 = 重量 / 体積

表 2.3 比熱・熱伝導率測定結果

鋼種	温度 (°C)	比熱 (cal/g·°C)	熱伝導率 (W/m·K)
PM12	20	0.110	28.2
	100	0.114	28.0
	200	0.120	28.1
	300	0.128	28.1
	400	0.138	27.7
	500	0.149	27.5
	600	0.165	26.2
	700	0.201	24.8
	750	0.202	24.6
	800	0.161	24.6
	850	0.156	25.9
	900	0.141	26.3
	PF12	20	0.110
100		0.119	26.0
200		0.124	26.0
300		0.135	26.6
400		0.143	26.4
500		0.158	26.5
600		0.191	27.4
700		0.265	28.0
750		0.191	27.0
800		0.174	27.3
850		0.163	27.4
900		0.157	27.8

表 2.4 熱膨張率測定結果

温度(°C)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
	PM12	PF12
50	10.3	9.9
100	10.7	10.3
150	11.0	10.6
200	11.3	10.9
250	11.5	11.1
300	11.7	11.2
350	11.8	11.4
400	12.0	11.5
450	12.1	11.7
500	12.3	11.9
550	12.5	12.0
600	12.6	12.1
650	12.7	12.2
700	12.8	12.3
750	12.9	12.4
800	13.0	12.5
850	13.1	12.7
900	12.7	12.8
950	12.5	13.0
1000	13.0	13.3

表 2.5 ヤング率、剛性率及びポアソン比測定結果

温度 (°C)	PM12			PF12
	ヤング率 (GPa)	剛性率 (GPa)	ポアソン比	ヤング率 (GPa)
29	207.4	80.8	0.284	220.7
50	206.2	80.3	0.284	219.4
100	204.5	79.6	0.284	217.6
150	202.4	78.7	0.285	215.2
200	199.9	77.7	0.286	212.5
250	197.1	76.6	0.287	209.6
300	193.8	75.2	0.289	206.3
350	190.0	73.7	0.289	202.2
400	186.1	72.0	0.293	197.9
450	181.4	69.6	0.302	192.8
500	174.5	66.9	0.304	186.8
550	167.1	63.9	0.307	180.7
600	154.0	58.9	0.308	172.0
650	139.2	52.2	0.334	161.9
700	121.1	44.3	0.367	144.8
750	107.3	38.5	0.393	134.0
800	98.0	34.3	0.428	125.9
850	109.8	39.5	0.389	118.9
900	112.2	40.1	0.398	113.2
950	109.6	38.8	0.414	106.7

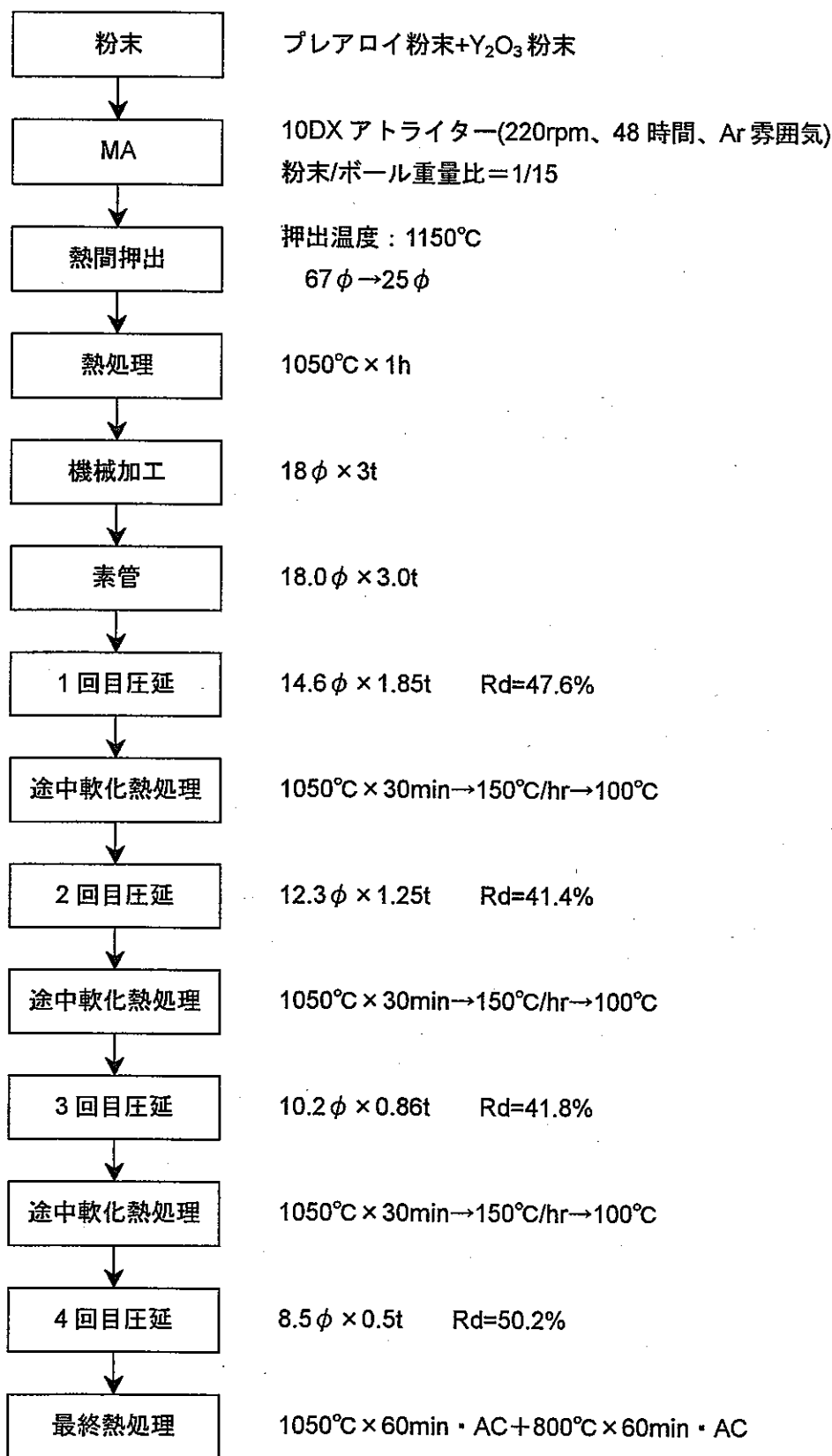


図 2.1-1 マルテンサイト系 ODS 鋼被覆管 M11 の製造工程

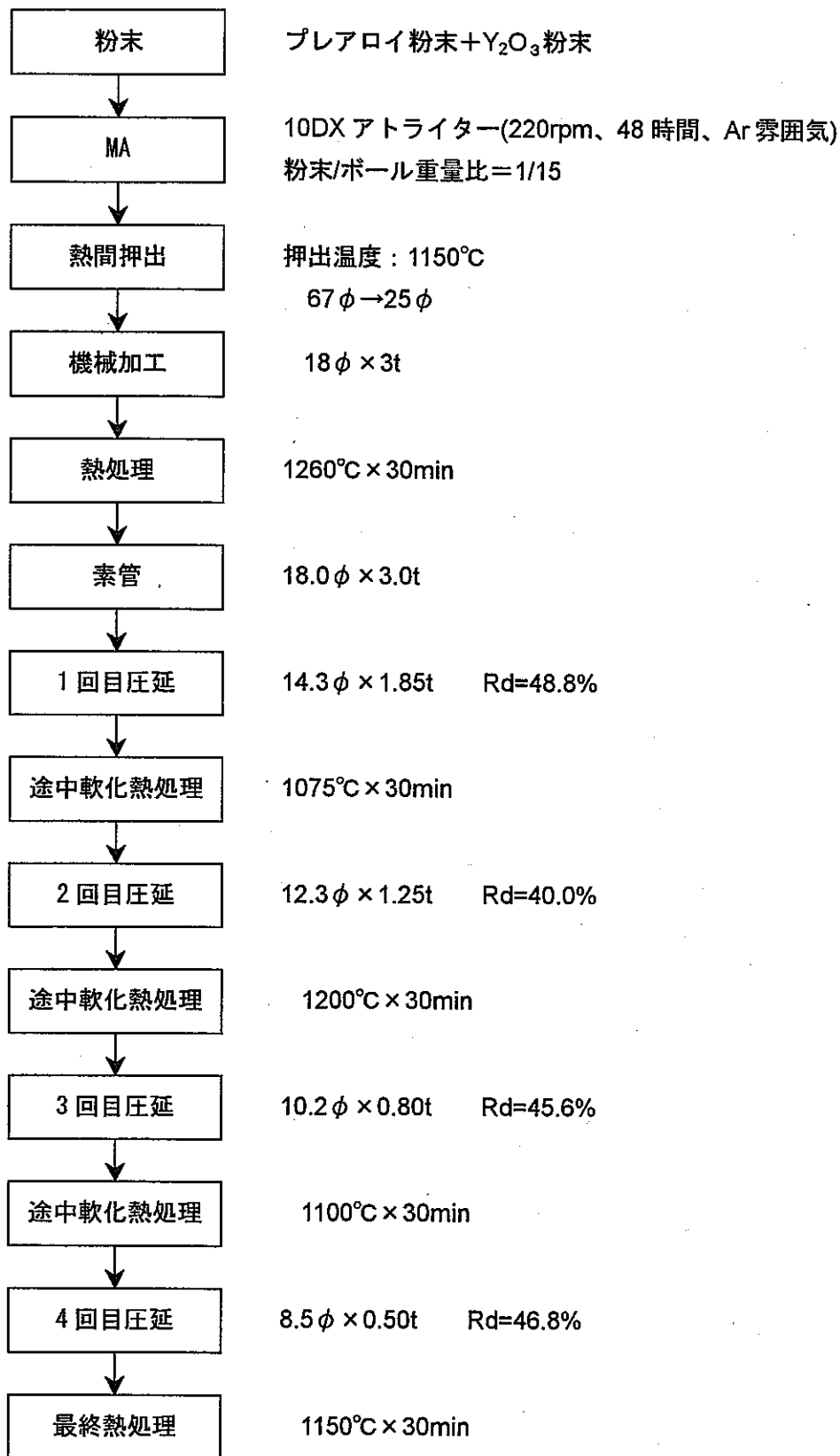


図 2.1-2 フェライト系 ODS 鋼被覆管 F11 の製造工程

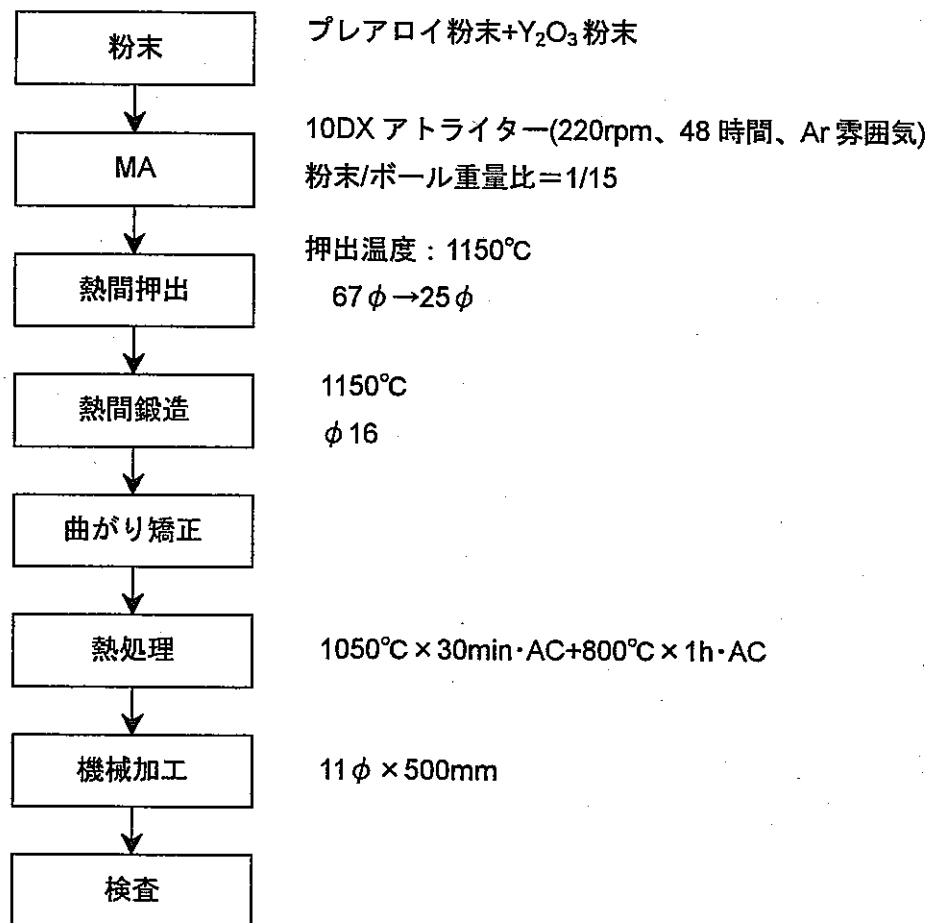


図 2.2-1 マルテンサイト系 ODS 鋼丸棒の製造工程

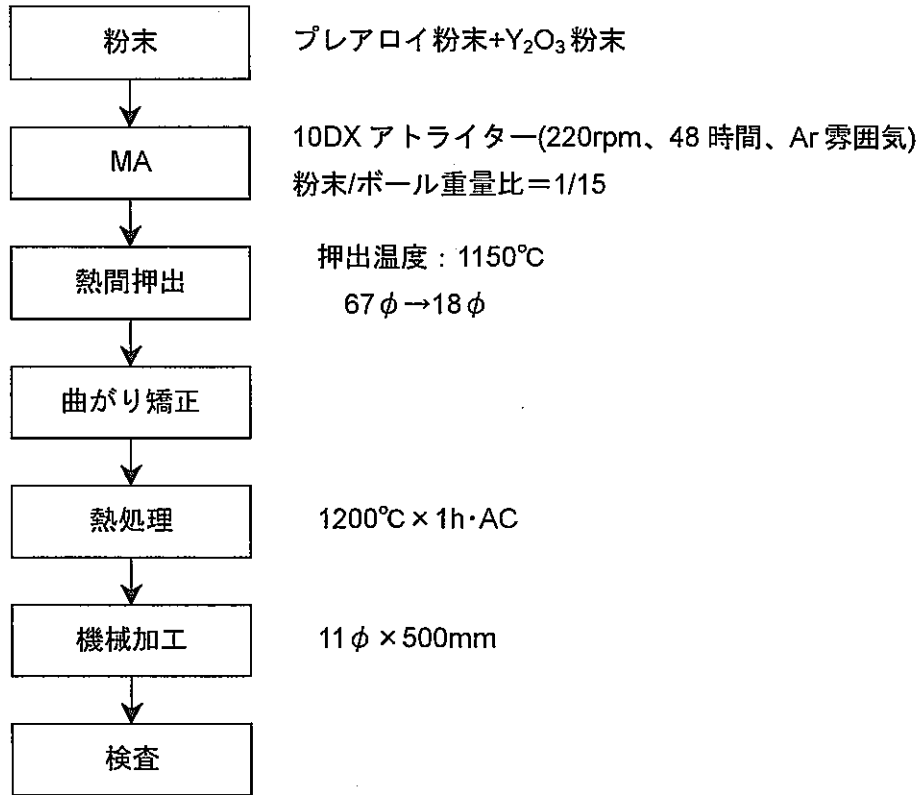


図 2.2-2 フェライト系 ODS 鋼丸棒の製造工程

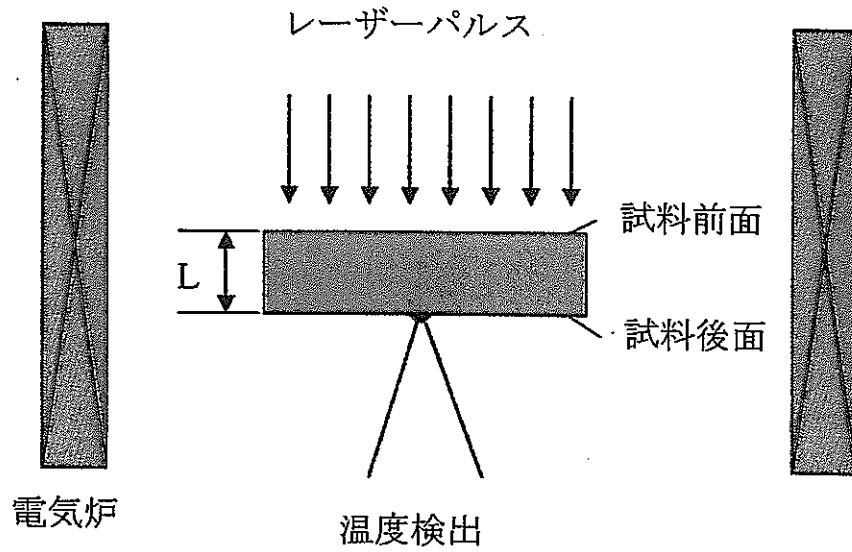


図 2.3 比熱・熱伝導率測定原理模式図

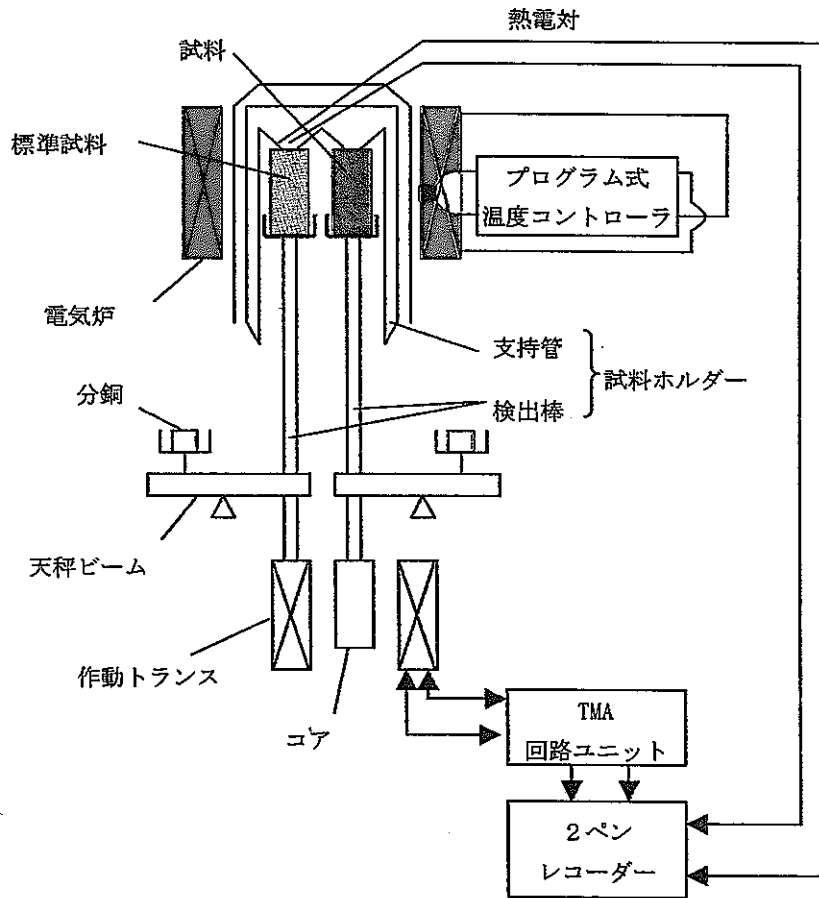


図 2.4 熱膨張率測定原理模式図

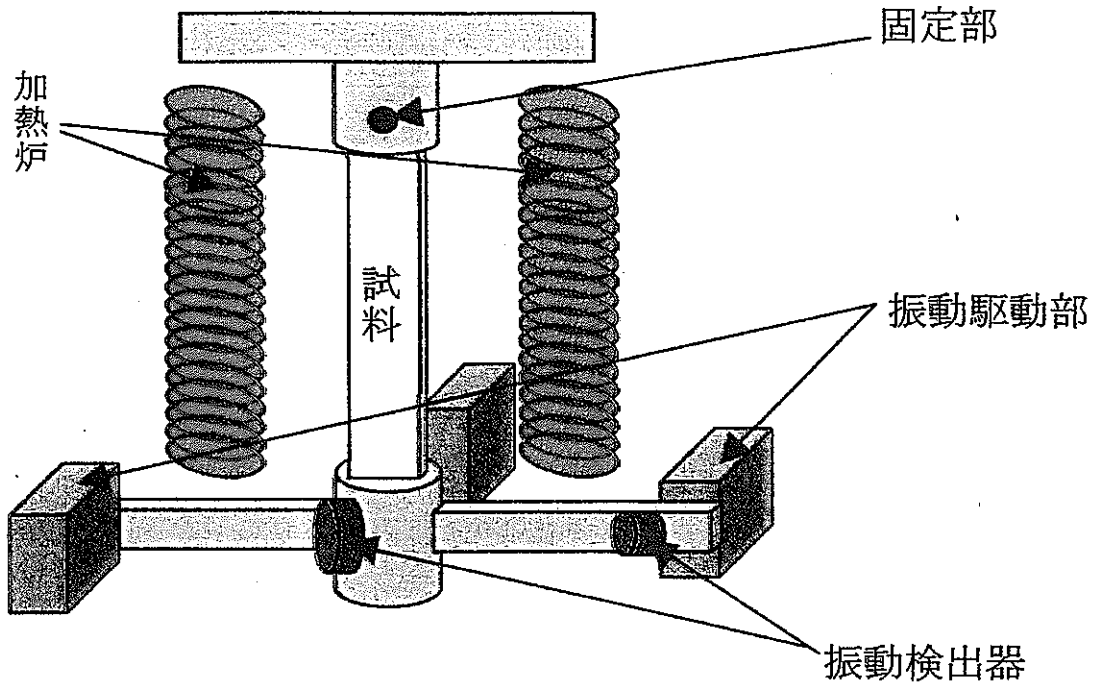


図 2.5 ヤング率、ポアソン比測定原理模式図

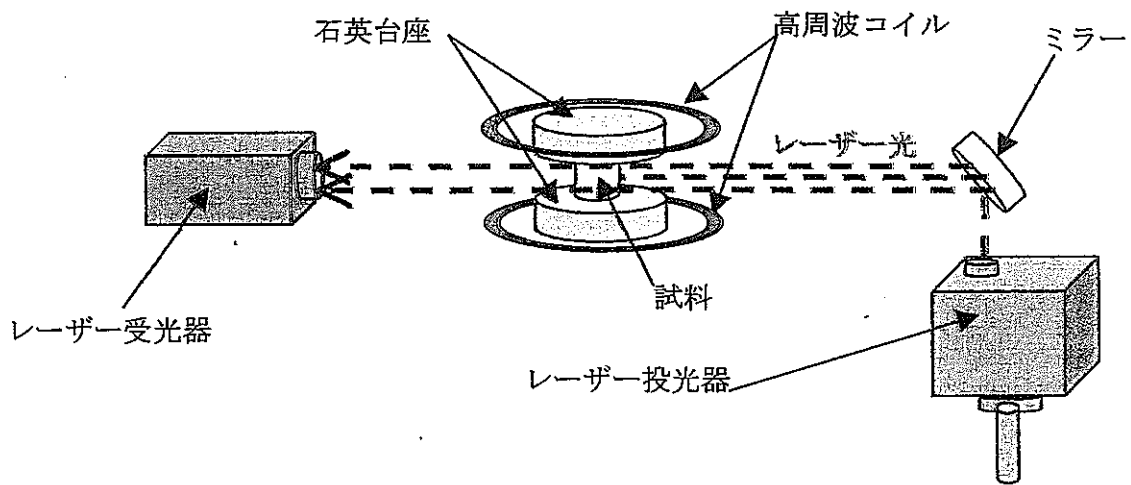


図 2.6 変態点測定原理模式図

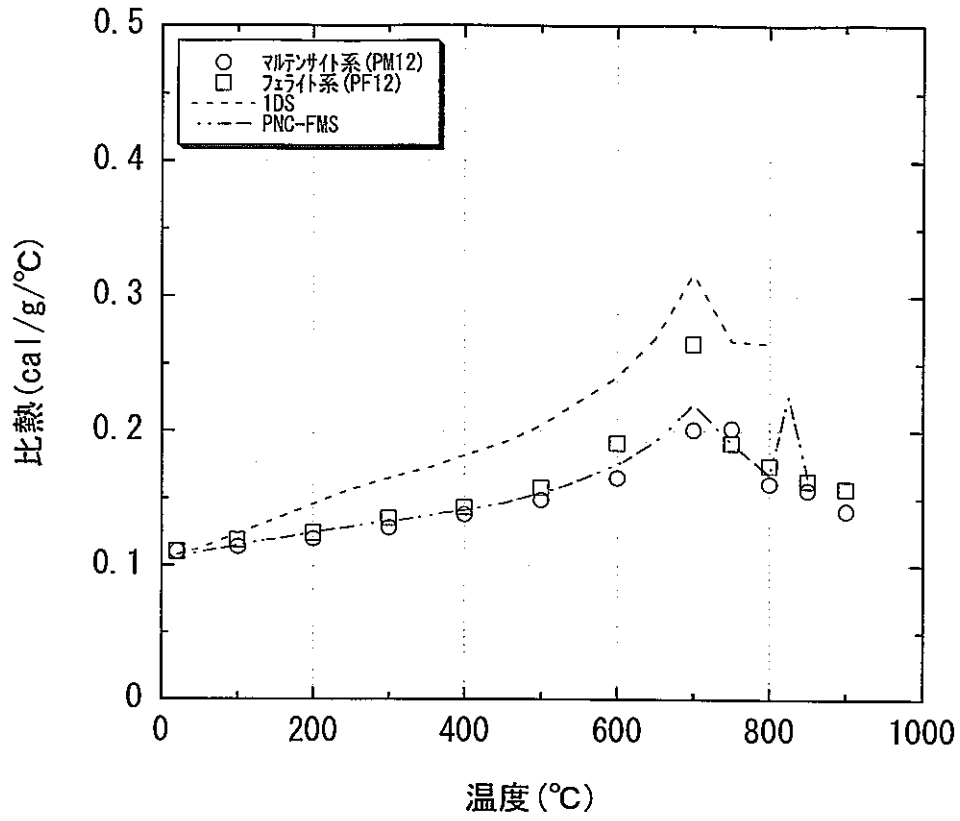


図 2.7 比熱

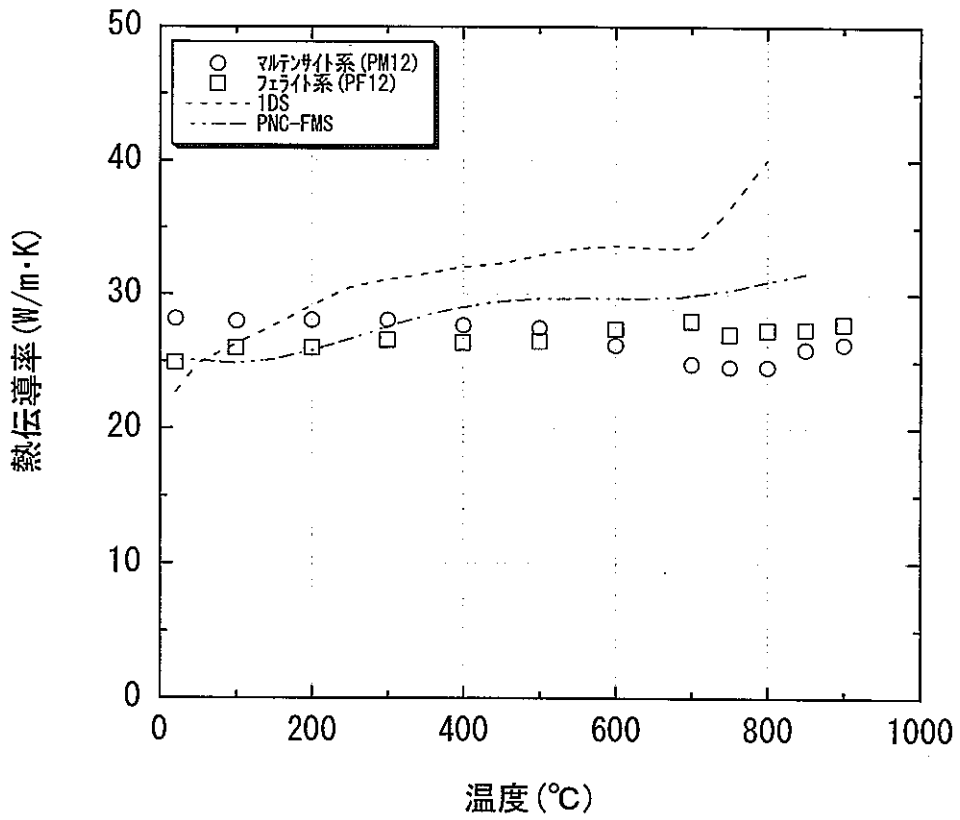


図 2.8 熱伝導率

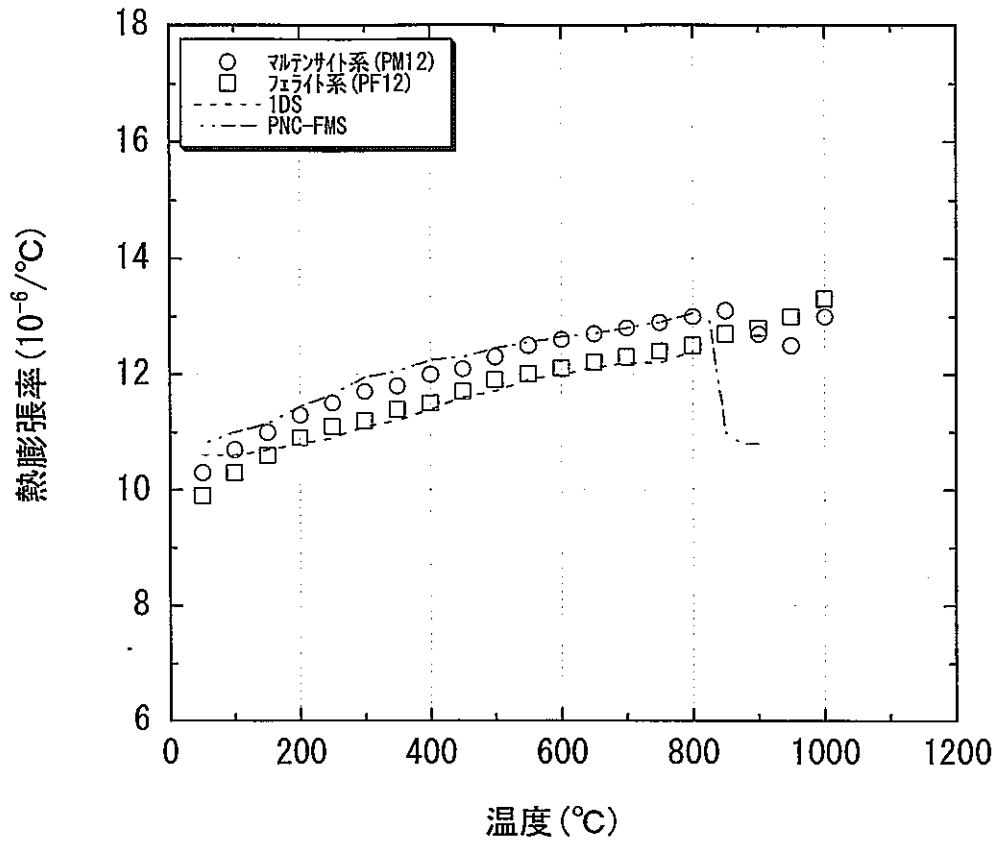


図 2.9 平均熱膨張率の測定値と計算値の比較

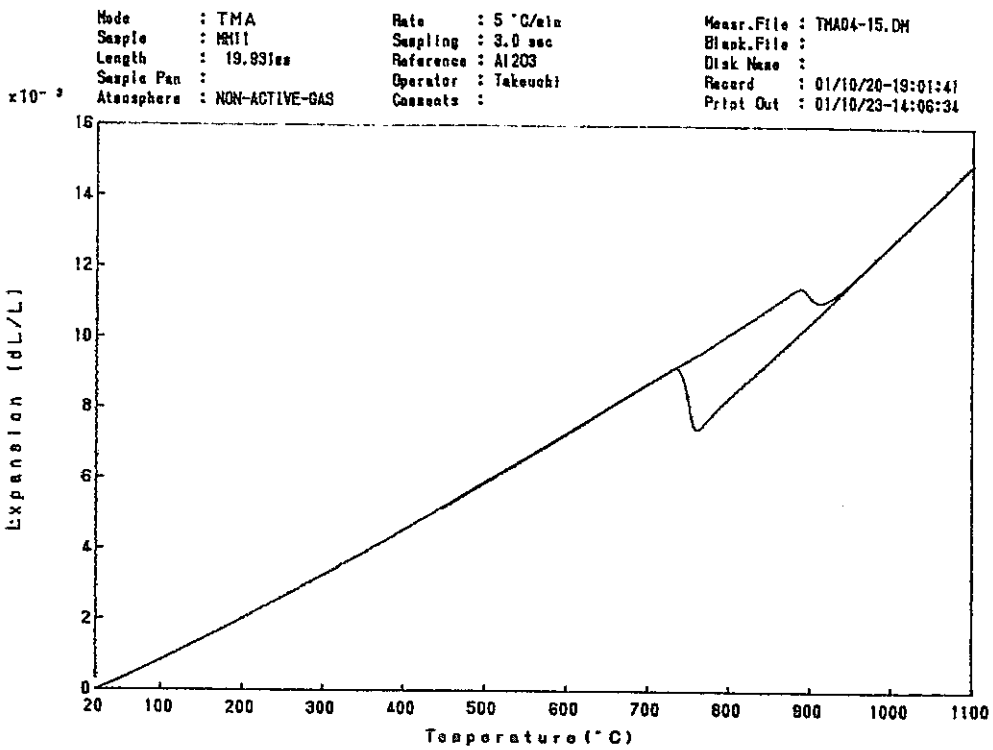


图 2.10-1 温度—熱膨張曲線 (PM12)

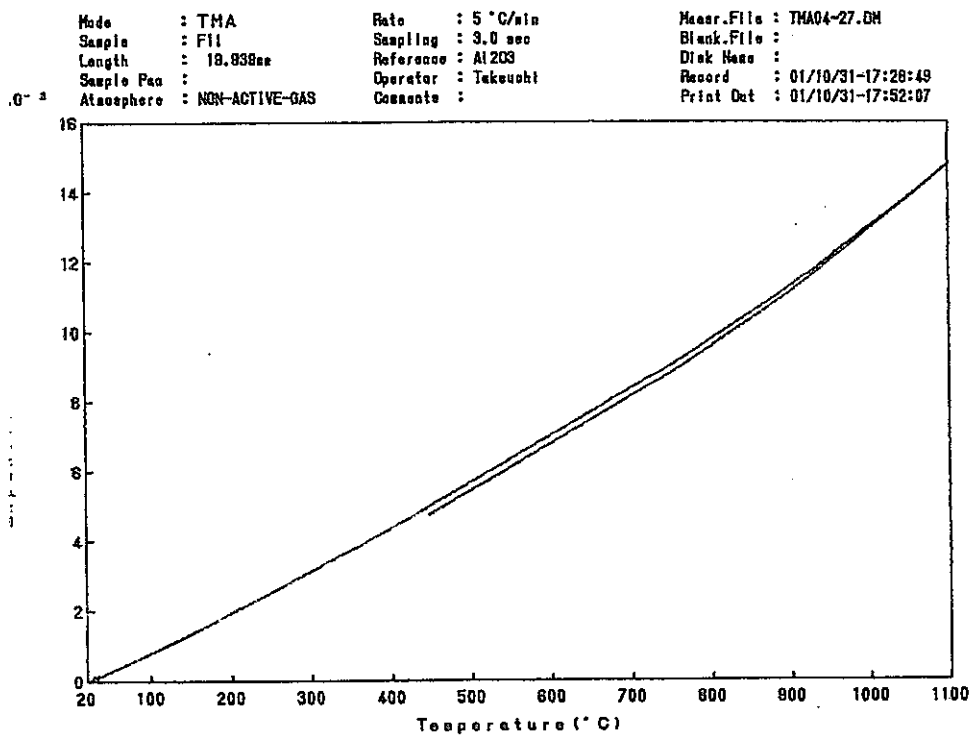


图 2.10-2 温度—熱膨張曲線 (PF12)

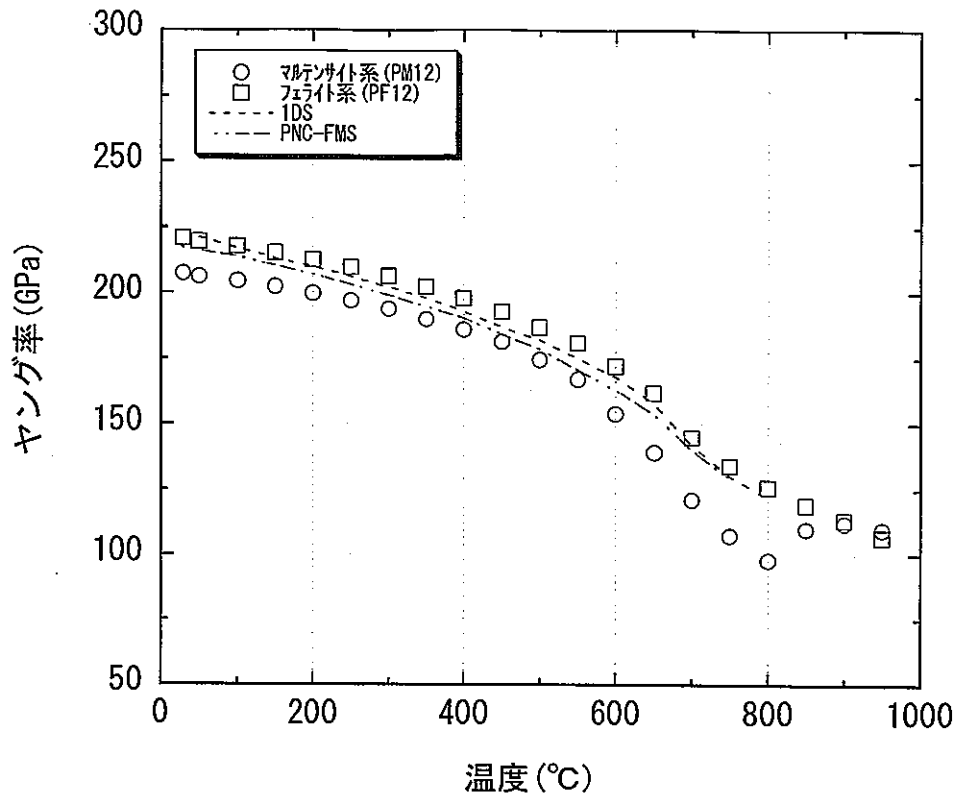


図 2.11 ヤング率

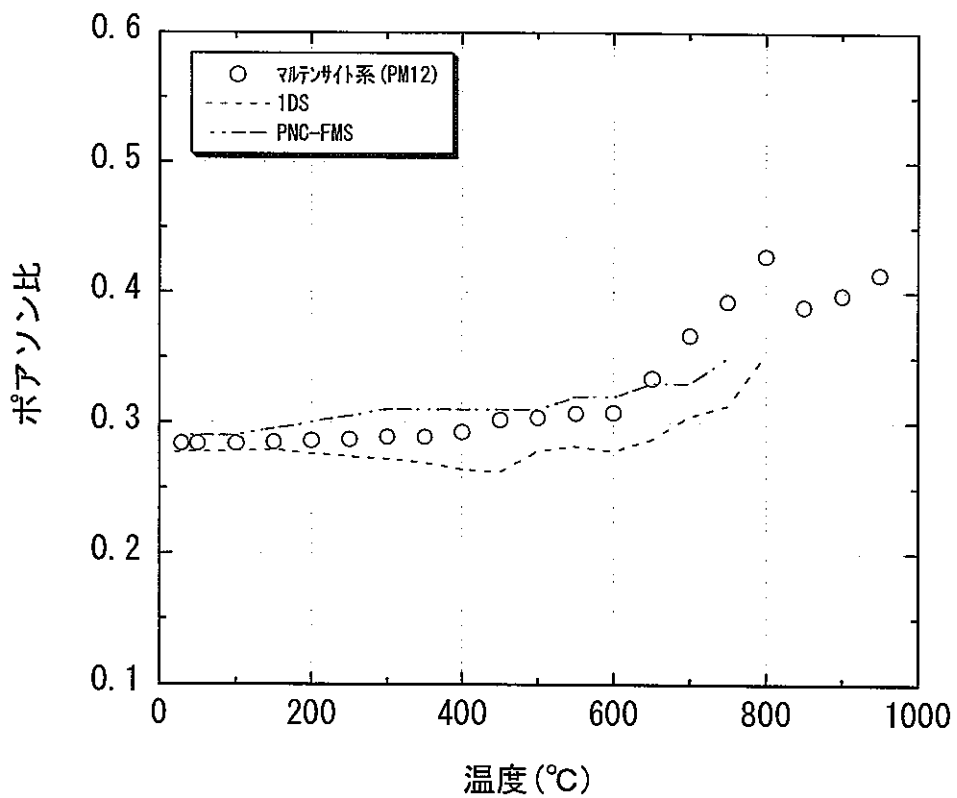


図 2.12 ポアソン比

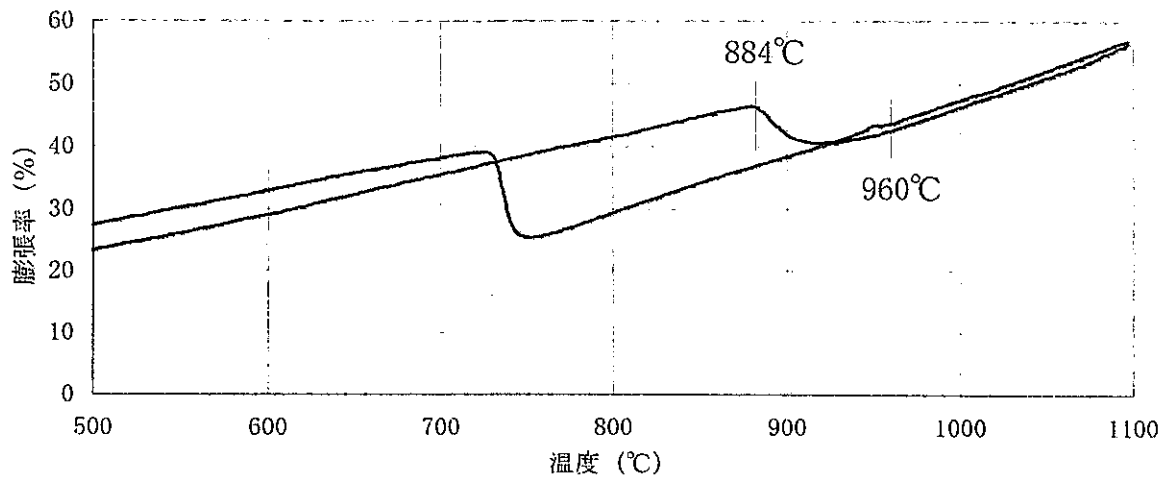


図 2.13-1 PM12 の変態点測定結果

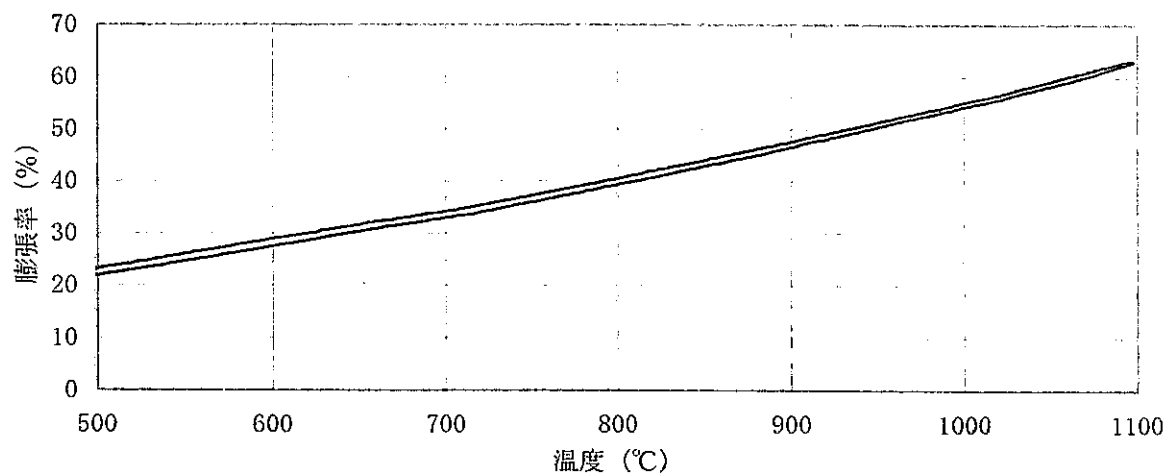


図 2.13-2 PF12 の変態点測定結果

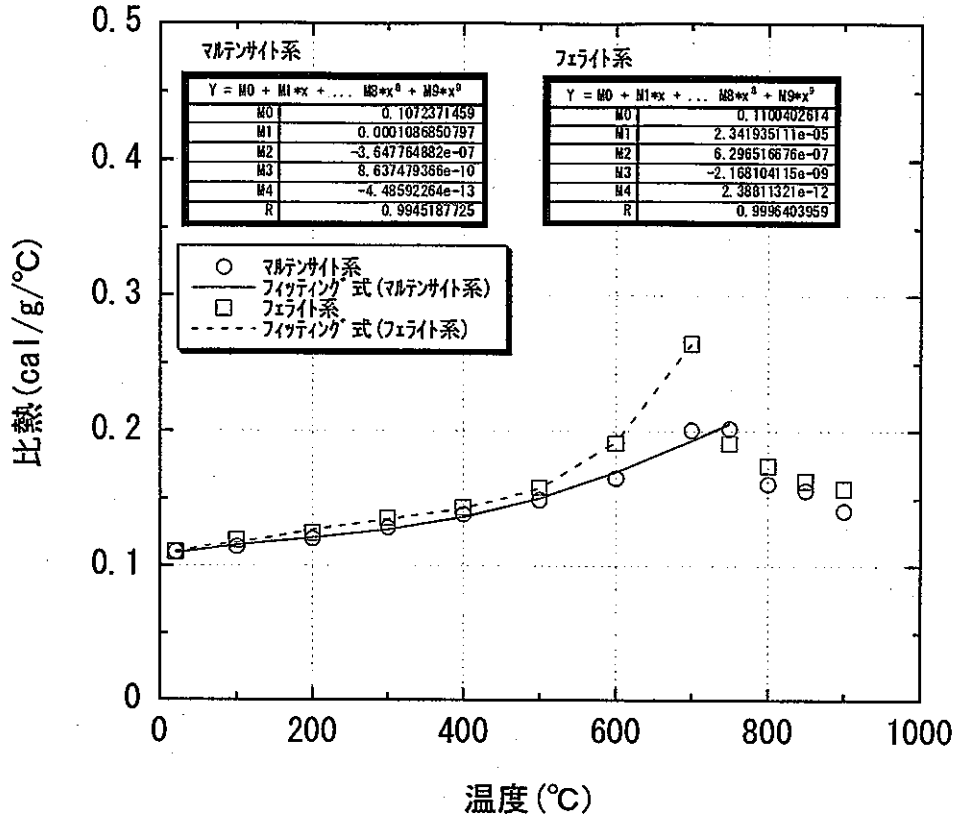


図 3.1 比熱の実測値と計算値の比較

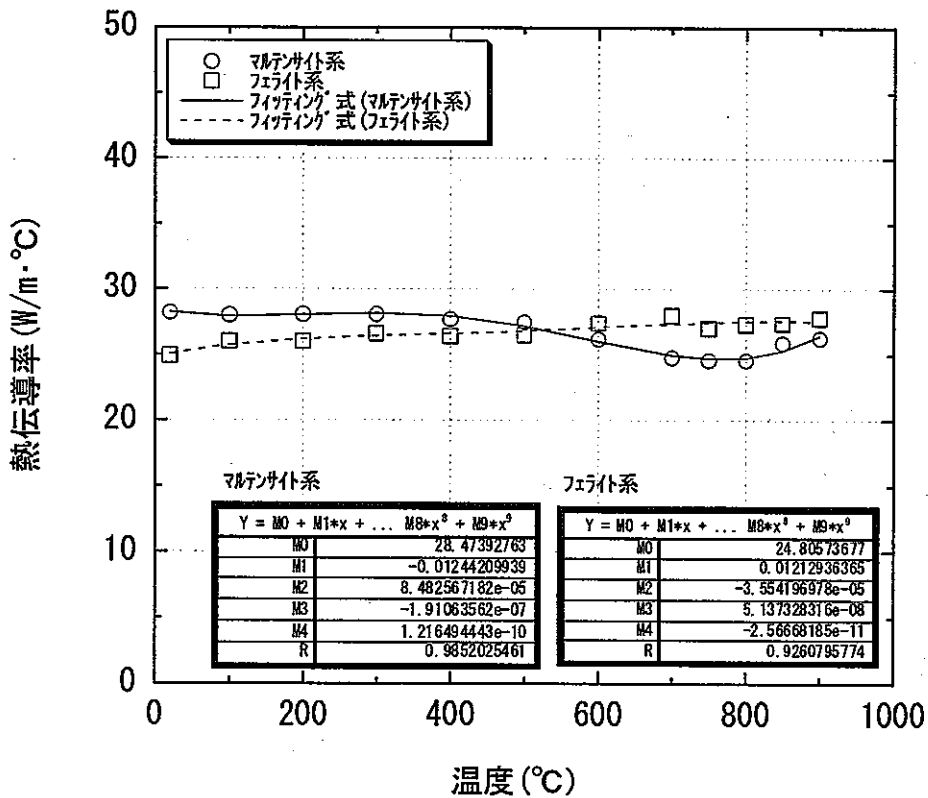


図 3.2 熱伝導率の測定値と計算値の比較

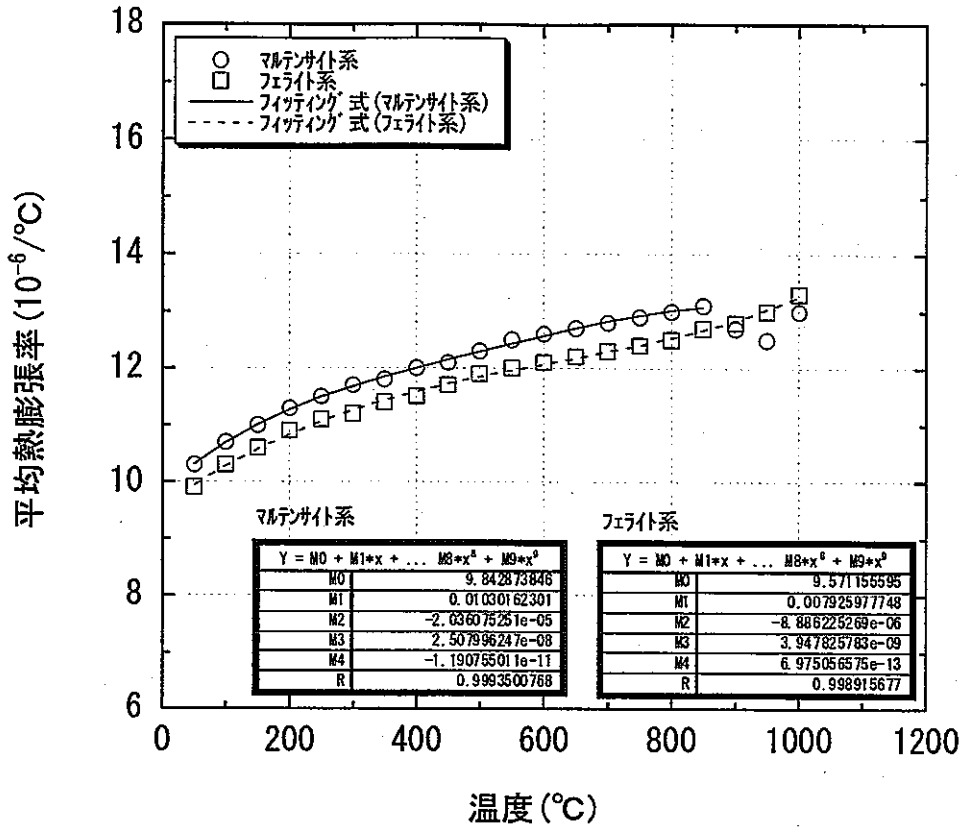


図 3.3 平均熱膨張率

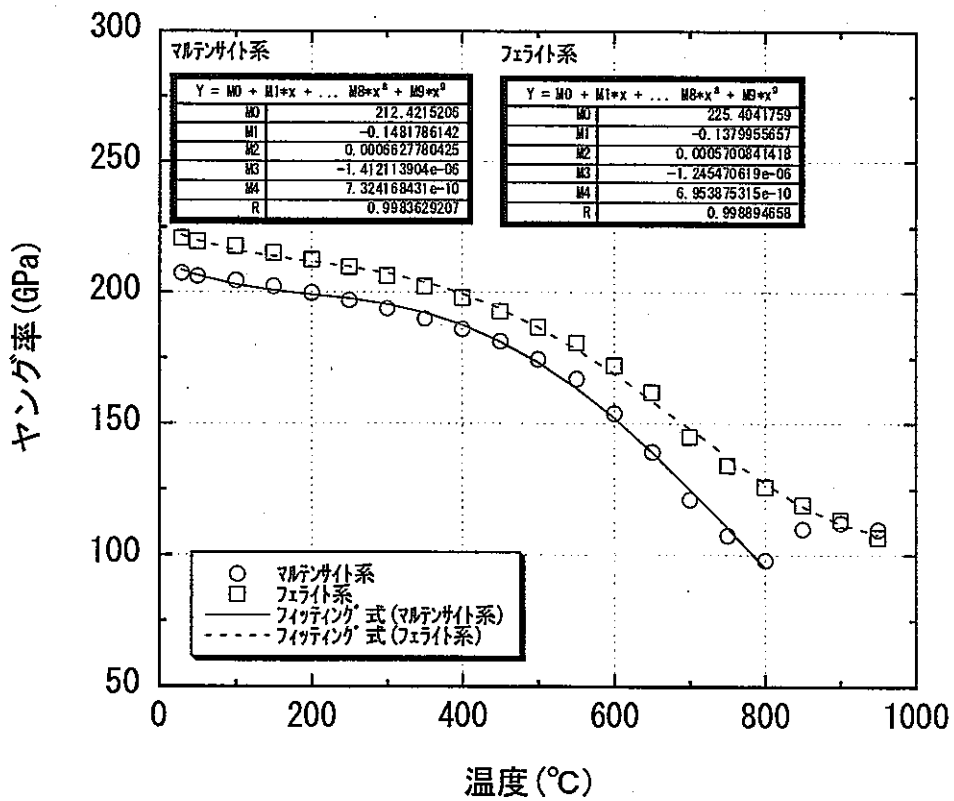
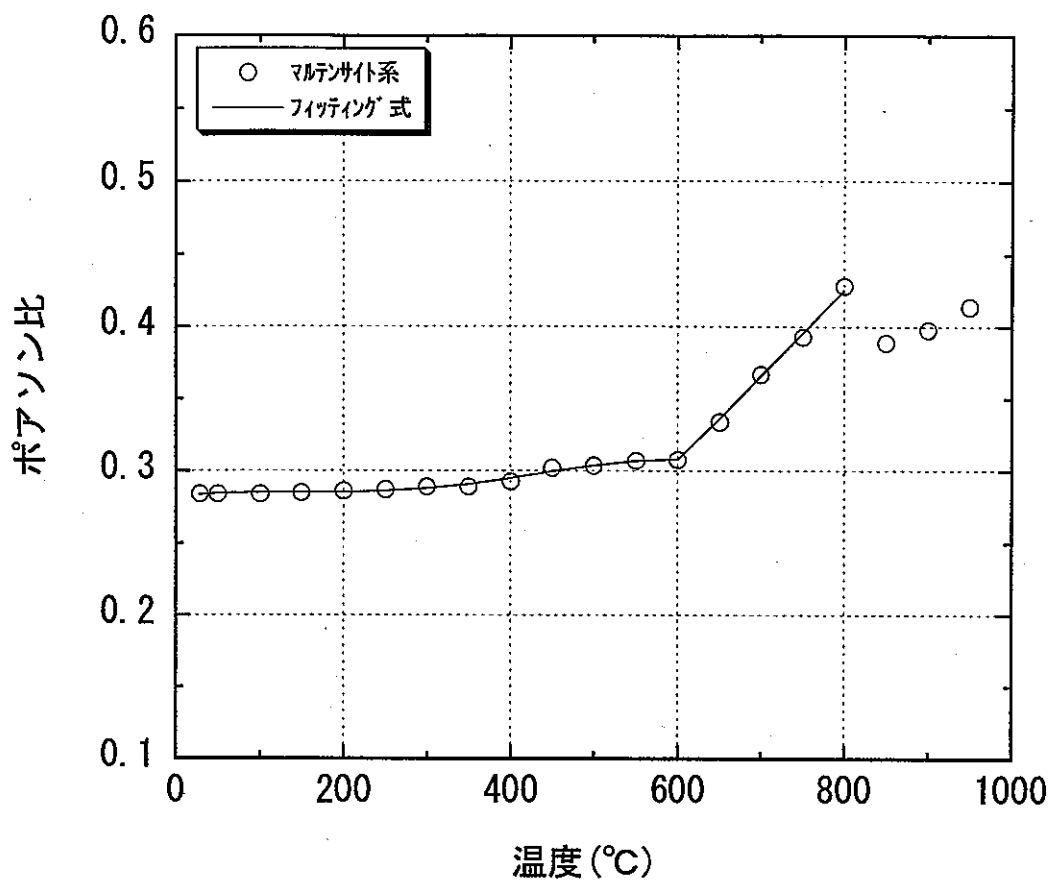


図 3.4 ヤング率の実測値と計算値の比較



マルテンサイト系

【室温 ≤ T ≤ 600°C】

Y = M0 + M1*x + ... M8*x ⁸ + M9*x ⁹	
M0	0.2814057798
M1	8.592932897e-05
M2	-6.800012035e-07
M3	2.089873138e-09
M4	-1.786106582e-12
R	0.9912589537

【600°C < T ≤ 800°C】

Y = M0 + M1*X	
M0	-0.05260003209
M1	0.0005980000496
R	0.9987774256

図 3.5 ポアソン比の実測値と計算値の比較