

16/12/11

# 高クロムフェライト系鋼の材料物性に及ぼすCr量の影響

(研究報告)

2003年4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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)

2003

## 高クロムフェライト系鋼の材料物性に及ぼす Cr 量の影響

安藤勝訓\* 若井隆純\* 青砥紀身\*

## 要旨

高速増殖炉(以下、FBR)の特徴(高温・低圧等)を反映し、熱的特性と高温強度がバランスよく優れる高クロム(以下、Cr)フェライト系鋼のFBR構造材料への適用が検討されている。そこで本調査では、FBR構造材料に最適な高Crフェライト鋼選定の方向性判断に資することを目的として12Cr系鋼および高純度Fe-Cr合金の材料物性値を測定し、これらの結果と2.25Cr-1Mo鋼およびMod.9Cr-1Mo鋼の文献データ<sup>(1)</sup>をあわせて、Cr量と材料物性値の間に以下の関係があることを見出した。

- (1)熱伝導率は、Cr量の増加とともに小さくなる。ただし、高温になると、Cr量の相違に伴う熱伝導率の差は小さくなる。
- (2)熱膨張率は、Cr量の増加とともに小さくなる。ただし、Cr量が、30mass%以上ではCr量の増加に伴う熱膨張率の低減効果は小さくなる。
- (3)ヤング率は、Cr量の増加とともに大きくなる。
- (4)今回測定を行った12Cr系鋼において、材料物性値に及ぼすW含有量の影響は見られなかった。
- (5)Cr量の増加による、耐熱応力特性の改善は、Cr量が少ない時にのみ効果が見込まれる。
- (6)上記より、Cr量の増加によって、FBRに最適な材料物性値を持つ高クロムフェライト鋼を開発するには限界がある。

---

\*大洗工学センター 要素技術開発部 新材料研究グループ

## Effect of chromium contents on material properties of high chromium ferritic steel

Masanori Ando\* Takashi Wakai\* Kazumi Aoto\*

### Abstract

High chromium ferritic steel, having both advanced thermal properties and high temperature strength, is a candidate for the structural material of the future Japanese Fast Breeder Reactor (FBR). In this study, material physical properties of several kinds of 12Cr steels and high purity Fe-Cr alloys are measured to suggest the adequate high chromium steel for the structural material of FBR. The following conclusions are obtained from measured data and the literature data of 2.25Cr-1Mo and Mod.9Cr-1Mo steels.

- (1) Thermal conductivity decrease with Cr contents increase. However, the difference of the thermal conductivity caused by Cr contents becomes not so significant in high temperature.
- (2) Thermal expansion decreases with Cr contents increase. However, Cr dope in the iron more than 30mass% is not so efficient to suppress the thermal expansion.
- (3) Young's modulus increase with Cr contents increase.
- (4) In this study, the effect of W contents on the 12Cr steels is insignificant.
- (5) Improving the performance against thermal stress by doping Cr is expected as far as the iron contains low Cr.
- (6) Above results suggest that there is limited utility to improve the physical properties of high Cr ferritic steel for FBR by control of Cr contents.

---

\*Advanced Technology Division, Advance Material Research Group

目次

1.	はじめに	1
2.	供試材および測定項目	1
2.1	供試材	1
2.2	測定項目	1
2.3	試験片形状・寸法	2
3.	測定方法	2
3.1	比重	2
3.2	比熱および熱伝導率	3
3.3	熱膨張率および熱膨張係数	3
3.4	ヤング率およびポアソン比	4
4.	測定結果	7
4.1	比重	7
4.2	比熱	7
4.3	熱伝導率	7
4.4	熱膨張率および熱膨張係数	8
4.5	ヤング率	8
5.	考察	8
5.1	材料物性値と Cr 量の関係	8
5.1.1	熱伝導率と Cr 量	9
5.1.2	熱膨張率と Cr 量	10
5.1.3	ヤング率と Cr 量	11
5.2	材料物性値と W 量の関係	11
5.3	材料物性値特性からみた FBR 最適高 Cr 鋼	12
6.	まとめ	14
	謝辞	16
	参考文献	17

## List of table

Table 1	Chemical composition of the 12Cr steels used in this study.	19
Table 2	Heat treatment of 12Cr steels.	19
Table 3	Experimental method used to measure the physical properties in this study.	20
Table 4	Measurement result of density.	20
Table 5	Measurement result of specific heat in 12Cr steels.	21
Table 6	Measurement result of specific heat in Fe-Cr alloy.	21
Table 7	Measurement result of thermal conductivity in 12Cr steels.	22
Table 8	Measurement result of thermal conductivity in Fe-Cr alloy.	22
Table 9	Measurement result of thermal expansion coefficient in 12Cr steels.	23
Table 10	Measurement result of thermal expansion coefficient in Fe-Cr alloy.	23
Table 11	Measurement result of coefficient of thermal expansion in 12Cr steels.	24
Table 12	Measurement result of coefficient of thermal expansion in Fe-Cr alloy.	25
Table 13	Measurement result of Young's modulus and Poisson's ratio in 12Cr steel.	26
Table 14	Measurement result of Young's modulus and Poisson's ratio in Fe-Cr alloy.	26

## List of figure

Fig.1	Shape and dimensions of the specimens to measure.	27
Fig.2	Measurement method of thermal conductivity.	27
Fig.3	Measurement method of thermal expansion.	28
Fig.4	Measurement method of Young's modulus using free vibration method.	28
Fig.5	Measurement method of Young's modulus and rigidity using forced vibration method.	29
Fig.6	Measurement results of specific gravity.	29
Fig.7	Relationships between specific heat and temperature.	30
Fig.8	Relationships between thermal conductivity and temperature.	31
Fig.9	Relationships between thermal expansion coefficient and temperature.	32
Fig.10	Relationships between mean coefficient of thermal expansion and temperature.	33
Fig.11	Relationships between instantaneous coefficient of thermal expansion and temperature.	34
Fig.12	Relationships between Young's modulus and temperature.	35
Fig.13	Relationships between thermal conductivity and Cr content at room temperature.	36
Fig.14	Relationships between thermal conductivity and Cr content at 500°C.	36
Fig.15	The thermal conductivity verses absolute temperature for the binary Fe-Cr alloys with various concentrations of Cr between $\chi=0\sim 20\text{at}\%$ obtained by Terada <sup>(12)</sup> .	37
Fig.16	Temperature dependence of the thermal diffusivity and thermal conductivity obtained by Holzwarth.	37
Fig.17	Relationships between thermal expansion coefficient and Cr content at various temperatures.	38
Fig.18	Relationships between Young's modulus and Cr content at room temperature, 500°C and 600°C.	38
Fig.19	Relationships between thermal conductivity and W content at various temperatures.	39
Fig.20	Relationship between thermal expansion coefficient and W content at various temperatures.	39
Fig.21	Relationships between Young's modulus and W content at various temperatures.	40
Fig.22	Simple thermal stress calculated by $\sigma_T=E\alpha\Delta T$ at 550°C.	41
Fig.23	Relationship between thermal shock parameter to Cr contents at 550°C.	41

## 1. はじめに

高速増殖炉(以下、FBR) サイクルの実用化に向けては、安全性の向上や軽水炉と比肩する経済性の達成などの要求がある。そのなかで、構造材料に対しては、FBR の特徴(高温・低圧等)を的確に反映した新材料の開発あるいは選択による経済性向上への寄与が期待されている。すなわち、FBR 構造材料における主要な負荷が熱過渡・温度変動に起因するひずみ制御型負荷であることから、温度変動の影響を抑制する熱的特性および高温下での負荷に対する強度に優れた材料を開発・採用することにより、機器・構造物のコンパクト設計が可能となり、材料の大幅な減容が図れるとともに、設計選択肢の広がりや安全裕度の増加も期待されている。

このような背景の下で、熱的特性と高温強度特性がバランスよく優れる高クロム(以下、Cr) フェライト鋼の FBR 構造材料への適用が検討されている。そこで、本調査では、FBR 構造材料に最適な高 Cr フェライト鋼選定の方向性判断に資することを目的として、火力発電プラントで、構造材料として使用実績のある 12Cr 系鋼とその成分調整材、および高純度 Fe-Cr 合金を対象に材料物性値を測定し、2.25Cr-1Mo 鋼、Mod.9Cr-1Mo 鋼の文献データ<sup>(1)</sup>とあわせて、Cr 量が熱的特性に及ぼす影響について考察した。また、同時に、主要な合金元素のひとつであるタングステン(以下、W)についても、その添加量が材料物性値に及ぼす影響について考察した。

## 2. 供試材および測定項目

### 2.1 供試材

本調査においては、材料物性値に及ぼす Cr 量および W 量の影響を明らかにするために、次期 FBR 構造材料の候補として検討が進められている 3 種類の 12Cr 系鋼、すなわち、

11Cr-0.4Mo-2W  
10.2Cr-1.2Mo-0.35W  
10.5Cr-1.5Mo-0W

および Cr 量を変化させた高純度 Fe-Cr 合金、すなわち、

Fe-30Cr  
Fe-35Cr  
Fe-50Cr  
Fe-60Cr

に対する以下の材料物性値の測定を行った。



比重  
比熱  
熱伝導率  
熱膨張率  
ヤング率  
ポアソン比 (Fe-50Cr, Fe-60Cr 除く)

本調査で用いた今回測定した 12Cr 系鋼の素材形状、化学成分を Table 1 に、12Cr 系鋼の熱処理条件を Table 2 にそれぞれ示す。

Table 1 に示されるように、本調査に用いた 12Cr 鋼 3 鋼種における W および Mo 添加量は、クリープ特性が最も優れているとされている Mo 当量 ( $Mo + 1/2W$ ) が、1.5mass% 程度となるよう調整した<sup>(2)</sup>。

また Fe-30Cr、Fe-35Cr、Fe-50Cr および Fe-60Cr は、東北大学金属材料研究所が溶製した超高純度二元系合金である<sup>(3)</sup>。なお Fe-50Cr および Fe-60Cr については、資材上の都合から、他の今回測定した 12Cr 系鋼および Fe-Cr 合金に比較して小型の試験片を用いている。特に Fe-60Cr においては、材料物性値に及ぼす熱履歴の影響はほとんどないと仮定し、クリープ試験後の試験片の肩部からネジ部より試験片を採取することとなった。

## 2.2 測定項目および試験片寸法

測定項目および測定範囲の一覧を Table 4 に示す。測定した材料物性値は、比重、比熱、熱伝導率、熱膨張率およびヤング率である。比重は室温の値のみを測定した。他の材料物性値における測定温度は、FBR における構造材料の使用温度を考慮し、室温から 600°C までとした。各種試験における試験片形状を Fig.1 に示す。熱膨張率およびヤング率の測定試験においては、長手方向にそれぞれの性質を測定することとなるため、これらの試験片においては L 方向が長手方向（長手方向が圧延方向）となるように試験片を採取した。また比熱と熱伝導率においては試験片の平面部が L 方向と垂直になるように採取した。すべての試験片の採取位置は  $1/2t$  (板厚中心) より採取することとした。

## 3. 測定方法

### 3.1 比重

比重は、ザルトリウス社製 BP210D 型精密天びんによりアルキメデス法 (JIS Z8807) を用いて室温の値を測定した。

測定手順：

- ①試験片をよく乾燥し秤量する。(W<sub>1</sub>)
  - ②容器に純水を用意し、試験片が水中に完全に没するよう吊り線で吊り下げ秤量する。(W<sub>2</sub>)この時の水温°Cを記録しておく。(T°C)
  - ③吊り線の重さを量る。(W<sub>3</sub>)
- これらの操作により、次式から比重を求める。

$$\rho = [W_1 / \{W_1 - (W_2 - W_3)\}] \times s \quad \dots (1)$$

$\rho$  : T°Cにおける比重

W<sub>1</sub> : 空気中の試験片の重さ (g)

W<sub>2</sub> : 吊り線で吊るした試験片の水中での重さ (g)

W<sub>3</sub> : 吊り線の重さ (g)

s : T°Cにおける純水の比重

### 3.2 比熱および熱伝導率

比熱および熱伝導率は真空理工株式会社製 TC-7000 型を用いてレーザーフラッシュ法(JIS R1611)により測定を行った。レーザーフラッシュ法は、厚さ一定の平板試験片の片面にレーザー光を瞬時照射し、もう一方の面の温度応答を測定することで熱定数(熱拡散率、比熱容量、熱伝導率)を測定するというものである。レーザーフラッシュ法の測定原理を Fig.2 に示す。なお比熱および熱伝導率における測定精度は、それぞれ±7%、±10%である<sup>(4)</sup>。

測定手順：

- ①試験片厚みと重量を測定。
- ②カーボンプレーを試験片両面に塗布し、ドライヤーで乾燥し定着。
- ③装置治具に試験片をセットし、保護管を被せ測定雰囲気を Ar ガスとするためガス置換。
- ④測定雰囲気は、室温から 600°Cまで Ar ガス雰囲気とした。
- ⑤熱拡散率 $\alpha$ の測定は、In-Sb 赤外線センサーで行った。
- ⑥比熱の温度係数測定は、試験片裏面にスポット溶接した R 熱電対の最大温度上昇から求めた。
- ⑦高温での測定は、試験片が規定温度に達していることを試験片に取り付けられた熱電対の起電力で確認した後実施した。測定繰り返し数は熱拡散率・比熱(温度係数)、各々5回を基準とし、得られたデータを平均して結果に記した。
- ⑧室温の比熱測定は、シリコングリスでグラッシーカーボンを接着させたサファイア標準試験片および未知試験片の最大温度上昇を測定し、その比率より求めた。

⑨各温度の比熱は、⑧で求めた室温での比熱の値に各温度での温度係数を乗じた値を用いた。

上記⑦の操作において熱拡散率  $\alpha$  (cm<sup>2</sup>/sec) は、熱伝導方程式に基づき次式により算出する。

$$\alpha = (1.37 \cdot L^2) / (\pi^2 \cdot t_{1/2}) \quad \dots(2)$$

L : 試験片の厚さ(cm)

$t_{1/2}$  : 試験片の裏面の最高上昇温度  $\Delta T_m$  の 1/2 の温度に達するまでの時間(sec)、  
(Fig.2 参照)

また、熱伝導率  $\lambda$  (W/m·K) は上記⑦および⑧で得られた定圧比熱容量  $c$  (J/g·K) および別途測定された密度  $d$  (g/cm<sup>3</sup>) により(3)式より求まる。

$$\lambda = \alpha \cdot c \cdot d \quad \dots(3)$$

### 3.3 熱膨張率および熱膨張係数

熱膨張率および熱膨張係数は、真空理工株式会社製 DL-7000 型を用いて押棒式変位検出法(ASTM E228-85)により測定を行った。押棒式変位検出法は、棒状試験片を検出器に取り付け、電気炉により試験片を昇温した時の棒状試験片の伸びの変化を、検出棒により作動変圧器で計測するものである。測定原理を Fig.3 に示す。

測定手順：

- ①試験片長さ重量を測定し、試験片側面に熱電対をスポット溶接する。
- ②装置治具に試験片をセットし、保護管を被せ測定雰囲気 Ar ガスでガス置換する。
- ③測定雰囲気は、室温から 600°C まで Ar ガス雰囲気とした。また昇温速度は、5°C/min とした。

上記の測定手順に従い測定された伸びの変化より、以下の計算を用いて熱膨張率および熱膨張係数が算出できる。

$$L_T = L_0(1 + \beta T) \quad \dots(4)$$

$$L'_T = L_0(1 + \beta' T) \quad \dots(5)$$

$L_0$  ;  $T_0$ °C における試験片の長さ

$L_T$ ;  $T^\circ\text{C}$ における試験片の長さ  
 $\beta$ ;  $T_0^\circ\text{C} \sim T^\circ\text{C}$ 間の試験片の平均熱膨張係数  
 $\beta'$ ;  $T_0^\circ\text{C} \sim T^\circ\text{C}$ 間の支持管の平均熱膨張係数  
 $L'_t$ ; 支持管の  $T^\circ\text{C}$ の長さ

観測している伸び変化( $\Delta L_{\text{obs}}$ )は、

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{obs}} &= (L_T - L_0) - (L'_T - L_0) \\ &= \Delta L - \Delta L' = L_0 T (\beta - \beta') \quad \dots(6) \end{aligned}$$

$\Delta L$ 、 $L_0$ 、 $T$ はデータより測定できることから

$$\text{熱膨張率} = \Delta L / L_0 = (L_T - L_0) / L_0 = (\Delta L_{\text{obs}} / L_0) + \beta' T \quad \dots(7)$$

$$\text{熱膨張係数 } \beta = (\Delta L_{\text{obs}} / L_0 T) + \beta' \quad \dots(8)$$

通常は支持管に石英ガラスを用いる。石英ガラスの熱膨張係数 $\beta'$ は $5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ であることから(7)式、(8)式により熱膨張率および熱膨張係数が求まる。

### 3.4 ヤング率およびポアソン比

ヤング率は、日本テクノプラス株式会社製 JE-HT 型を用いて、室温の値を自由共振法により測定した(JIS Z 2280)。自由共振法は高温領域では複雑な振動を生じ易いことから、高温でのヤング率測定は、横振動法を採用することとした。横振動法は、同社 EG-HT 型を用いて、自由共振法と横振動法の室温での測定差が $\pm 3\%$ であることを確認し行った。また、ポアソン比は、ねじり振動法を用いて求められた剛性率から算出した。ただし Fe-50Cr、Fe-60Cr はすべての試験に自由共振法を用いてヤング率の測定のみを行った。

自由共振法によるヤング率測定は、Fig.4 に示されるような装置を用いて、共振周波数をよりヤング率を求める。真空中の試験片に強制振動を与え、共振周波数を電気的に検出した値を  $f$  とすると、

$$f = \frac{m^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{S\rho}} \quad \dots(8)$$

が成り立つ。ここで、 $m$ : 定数(試験機、振動の次数による。基準振動の場合は 4.730)、 $l$ : 試験片長さ、 $E$ : ヤング率、 $I$ : 横断面の慣性能、 $S$ : 断面積、 $\rho$ : 密度である。

このことから、a：厚さ、b：幅、M：質量を測定することで、次式から、E が求められる。

$$E=0.96535 \times 10^{-8}(l/a)^3 \cdot Mf^2/b \quad \dots(9)$$

横振動法によるヤング率測定においては、まず短冊状の試験片に振動駆動部よりごく微少な力を短冊面と垂直方向に加え周波数を変化させる。周波数を変化させると試験片の固有振動と一致したときに試験片は共鳴し振動が大きくなる。その共鳴振動数からヤング率を計算できる。また剛性率はヤング率とは異なり、試験片にねじりを加え、同様にその共鳴振動を求め、その振動数からねじり剛性率を算出する。測定原理を Fig.5 に示す。

測定手順（横振動法）：

- ①試験片を振動駆動部および上方固定部の溝部分に押さえ板とネジで固定する。
- ②試験片高さ、センサー位置を調整ツマミ等で調整し、室温での共振周波数を計測し、ヤング率、剛性率、ポアソン比を求める
- ③あらかじめ自由共振法で測定した、ヤング率、剛性率、ポアソン比と対比で、±3%以内であることを確認し、高温測定に移行する。
- ④ヒータカバーを閉じ、アルゴン置換のためのベルジャーで測定系を覆い、自動測定にはいる。

ヤング率と剛性率は上記のような測定手順により、(10)式、(11)式よりそれぞれ求められる。またヤング率と剛性率より(12)式を用いてポアソン比を算出することができる。

$$E=\omega \rho A / (I \cdot \lambda^4) \quad \dots(10)$$

E：ヤング率 (Pa)

$\omega$ ：曲げ共振周波数 (Hz)

$\rho$ ：密度 (kg/m<sup>3</sup>)

A：断面積 (m<sup>2</sup>)

I：慣性モーメント (kgm<sup>2</sup>)

$\lambda$ ：試料と駆動部の重さに起因する無次元変数

$$G = K \frac{Lf^2}{(1 - \alpha t/w)wt^3} \quad \dots(11)$$

- G : 剛性率 (Pa)  
 K : 装置常数  
 $\alpha$  : 定数  
 L : 試験片長さ (m)  
 t : 試験片厚み (m)  
 w : 試験片幅 (m)  
 f : ねじり共振周波数(Hz)

上記(10)、(11)式より求まるヤング率と剛性率から、材料が等方性であるという前提で(12)式を用いてポアソン比を算出することができる。

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \dots(12)$$

- $\nu$  : ポアソン比  
 E : ヤング率 (MPa)  
 G : 剛性率 (MPa)

## 4. 測定結果

### 4.1 比重

Table 5 および Fig.6 に今回測定した 12Cr 系鋼および Fe-Cr 合金の比重を示す。Fig.6 には 2.25Cr-1Mo 鋼、Mod.9Cr-1Mo 鋼の文献データ<sup>(4)</sup>を併せて示す。Fig.6 に示されるように Fe-Cr 合金は Cr 量が増加するにつれ小さくなっていく。これは、純金属での密度が、Fe : 7.87g/cm<sup>3</sup>、Cr : 7.19g/cm<sup>3</sup> <sup>(6)</sup>であることから、その添加量に従ったものと考えられる。

### 4.2 比熱

今回測定した 12Cr 系鋼の比熱を、Table 6 に、Fe-Cr 合金の比熱を Table 7 にそれぞれ示す。また、Fig.7 に今回測定した比熱と温度の関係を 2.25Cr-1Mo 鋼、Mod.9Cr-1Mo 鋼の文献データ<sup>(4)</sup>と併せて示す。今回測定した温度範囲内において、比熱は、温度とともに単純に大きくなる。

### 4.3 熱伝導率

今回測定した 12Cr 系鋼の熱伝導率測定結果を Table 8 に、Fe-Cr 合金の熱伝導率を Table 9 にそれぞれ示す。また、Fig.8 に今回測定した熱伝導率と温度の関係を

2.25Cr-1Mo鋼、Mod.9Cr-1Mo鋼の文献データ<sup>(1)</sup>と併せて示す。熱伝導率は2.25Cr-1Mo鋼では、値が最大となる温度(200°C~300°C)があり、その温度以上では温度の上昇とともに熱伝導率は小さくなっていく。Mod.9Cr-1Mo鋼では温度の上昇とともに熱伝導率はわずかに減少し、12Cr系鋼およびFe-Cr合金においては、温度の上昇とともに熱伝導率は大きくなる。しかしながらFig.8より明らかなように、温度の上昇とともに熱伝導率の鋼種間差は減少し、すべての鋼種の熱伝導率は約25~30W/m・K程度に収束していく傾向を示す。

#### 4.4 熱膨張率および熱膨張係数

今回測定した12Cr系鋼およびFe-Cr合金の熱膨張率および熱膨張係数をTable 10~13にそれぞれ示す。また、Fig.9に今回測定した熱膨張率と温度の関係を、2.25Cr-1Mo鋼、Mod.9Cr-1Mo鋼の文献データ<sup>(1)</sup>と併せて示す。2.25Cr-1Mo鋼が、最も熱膨張率は大きく、Cr量が多くなるにしたがって熱膨張率が小さくなる傾向が見られる。Fig.10、Fig.11には、熱膨張率より求められた平均熱膨張係数および瞬間熱膨張係数と温度の関係をそれぞれ示す。なお、瞬間熱膨張係数は、600°Cまでの熱膨張率と温度の関係を、最小二乗法を用いて温度の3次関数とし、その微分から算出した。2.25Cr-1Mo鋼およびMod.9Cr-1Mo鋼においても600°Cまでの文献データをもとに同様に算出した。

#### 4.5 ヤング率

今回測定した12Cr系鋼のヤング率をTable 14に、Fe-Cr合金のヤング率をTable 15にそれぞれ示す。また、Fig.12に今回測定したヤング率と温度の関係を、2.25Cr-1Mo鋼、Mod.9Cr-1Mo鋼の文献データ<sup>(1)</sup>と併せて示す。2.25Cr-1Mo鋼、Mod.9Cr-1Mo鋼、12Cr系鋼およびFe-Cr合金、すべてにおいてヤング率は温度の上昇とともに同様の低下傾向を示す。しかしながら、Fig.12において示されるように、Fe-60Cr鋼のみ特に高いヤング率を示す。

### 5. 考察

#### 5.1 材料物性値とCr量の関係

一般に高Cr鋼においてCr量を多くすることは耐腐食性の向上に寄与することが知られているが、過剰なCrは $\delta$ フェライトを生成して靱性を低下させるため、Cr量は $\delta$ フェライトの生成しないCr量とすべきとされてきた。通常、鉄鋼材料においてはCr量がある値以上となると $\delta$ フェライトが生成すると言われている<sup>(6)(7)</sup>。Cr量と $\delta$ フェライトの生成、硬度、クリープ特性の関係は調査されているものの<sup>(8)(9)(10)</sup>、高温構造材料において重要となる材料物性値、特に熱的特性に関する調査は、精力的に行われているとはいえない。したがって本調査では、熱的特性に及ぼすCr量の影響について着

目することとした。

### 5.1.1 熱伝導率と Cr 量

Fig.13 および Fig.14 に、室温および 500°Cにおける熱伝導率と Cr 量の関係を示す。Cr 量が増加するにつれて熱伝導率は小さくなる傾向が見られるが、500°Cにおいては Cr 量の増加に伴う熱伝導率の低下は室温ほどではない。Cr の熱伝導率は 600°Cで 80.5W/m・°Cであり、Fe の熱伝導率は 54.7W/m・°Cであるが<sup>(11)</sup>、今回の測定においては、Fig.13 および Fig.14 に示されるように、Fe よりも熱伝導率の大きい Cr 量を増加しているにもかかわらず、熱伝導率は小さくなるという傾向が示された。

Terada らは、Fe における熱伝導率と合金元素の関係について系統的に調査し、今回の調査結果とほぼ同様の結果を報告している<sup>(12)</sup>。彼らの調査した各種 Fe-Cr 合金の熱伝導率と温度の関係を Fig.15 に示す。Fig.15 に示されるように、Fe-Cr 合金において、Fig.8 で示される今回の測定結果と同様の熱伝導率と温度の関係が示される。すなわち、Cr 量が 2at%では、温度の上昇とともに熱伝導率は小さくなるが、10at%では、温度と無関係にほぼ一定の値となり、15at%では、熱伝導率は温度とともに大きくなる。さらには温度の上昇とともに Cr 量による熱伝導率の相違は減少し、約 35W/m・K に収束していく傾向を見せることも、今回の測定結果と良く一致する。また Fig.15 からわかるように、Fig.13、Fig.14 と同様に Cr 量の増加とともに熱伝導率は小さくなる。

さらに Cr 量の多い Fe-Cr 合金においては、H.Stamm<sup>(13)</sup>や Holzwarth<sup>(14)</sup>らが核融合炉用材料として研究開発が進められている Fe-Cr 合金(焼結材)の熱的特性を調査し、熱的特性は純度影響を強く受けることを報告している。彼らの報告によると 99.7%Cr から 93.4%Cr(-5%Fe)に Cr 量が約 6%少なくなることで、熱伝導率と温度の関係は大きく異なる。彼らの調査した、Fe-Cr 合金の熱伝導率と温度の関係を Fig.16 に示す。Fig.16 に示されるように、99.7%Cr においては温度の上昇とともに熱伝導率は小さくなっていくのに対し、93.4%Cr(-5%Fe)では温度の上昇とともに熱伝導率は大きくなる。室温において、99.7%Cr は、93.4%Cr(-5%Fe)の 2 倍以上(90.0W/m・K : 36.4W/m・K)の熱伝導率を持つが、温度の上昇とともにその差は小さくなる。このように低合金域においては Cr 量の違いで大きく熱伝導率の値や温度依存性が異なる。

このような熱伝導率と Cr 量の関係について Holzwarth<sup>(14)</sup>らは、Matrix と固溶元素の関係が寄与しているとしている。すなわち Fe-Cr 合金において固溶元素である Cr の増加は、格子の対称性を減少させ、フォノンと自由電子の分散頻度を増加させることから、結果として熱伝導率は低下するとしている。

一般的に金属における熱伝導は、大部分を自由電子が担うが、その自由電子は合



金元素の添加によって散乱を受け、熱伝導率は低下する<sup>(15)</sup>。そのため、熱伝導率と合金元素の関係は、添加量の増加に伴い小さくなる“bath tub”形状となることが知られており<sup>(16)</sup>、今回の測定結果および Fe-Cr 合金に関する報告もそれに準じたものとなっている。

熱処理においては、Mod.9Cr-1Mo 鋼において通常の熱処理を行った場合と、さらに S.R.処理（残留応力除去を目的とした熱処理）を行った場合の熱伝導率の比較を行った報告があり、S.R.処理によって、数%熱伝導率が向上したとしている<sup>(1)(17)</sup>。これは S.R.処理により、残留応力によるひずみの緩和や、格子欠陥の減少、微細析出物の凝集粗大化が起こることによるものと考えられる。

このように熱伝導率は、内部組織や純度の影響を受けるものの、今回の測定結果からは Cr 量の増加に伴い小さくなる傾向が示された。FBR においては、熱交換器等に熱伝導率が高い材料を採用することで、伝熱面積の削減が見込めることや、機器・配管での温度勾配が小さくなることから熱伝導率は大きいほうが良い。このことから熱伝導率のみを考慮するのであれば、今回の結果より FBR 構造材料適用の観点からは Cr の増加は好ましいとはいえない。

### 5.1.2 熱膨張率と Cr 量

Fig.17 に各温度における熱膨張率と Cr 量の関係を示す。高温ほど Cr 量の増加にともなう熱膨張率の減少が著しい。しかし、Fig.17 からわかるように熱膨張率と Cr 量の関係は線形ではなく、Cr 量が少ない領域では Cr 量の増加に伴い熱膨張率は小さくなるが、Cr 量が多い領域では Cr 量の増加に伴う熱膨張率の減少は飽和する傾向が見られる。すなわち 12Cr 系鋼においては、Mod.9Cr-1Mo 鋼から約 1.4~1.7%の Cr 量の増加によって、500°Cでの熱膨張率が約 3%小さくなるのに対して、Fe-30Cr、Fe-35Cr においては Mod.9Cr-1Mo 鋼に比べ Cr 量が 20%以上多いにもかかわらず、熱膨張率は 11~13%小さいにすぎない。

松井らによる高純度 Fe-Cr 合金(焼結材)の諸特性の調査においても、今回の結果と同様の傾向が認められる<sup>(8)</sup>。彼らの一連の Cr 量を変化させた Fe-Cr 合金における報告においても、Fe-Cr 合金では、Cr 量の増加に伴い熱膨張率は低下するものの、Cr 量が多い領域では Cr 量の増加に伴う熱膨張率の減少は飽和する。したがって Fe-Cr 合金では、36~46mass%Cr が効果的に熱膨張を小さくできる量としている。このような傾向は今回の Fe-50Cr および Fe-60Cr における 600°Cの熱膨張係数が、Holzwarth らの測定した 93.4Cr-5Fe とほぼ同等の値 $(10.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ <sup>(14)</sup>であることと対応している。また Fe-Ni-Cr 合金において各相組織にまたがって Ni(6~26wt%)、Cr(0~18wt.%)の熱膨張率に与える影響を調査した報告によると<sup>(18)</sup>、オーステナイト、マルテンサイト、フェライト-マルテンサイト組織では、相変化を起こさなければ、Cr 量の増加に伴い熱膨張率は小さくなる。

大内らは Fe-Mn-Cr 鋼において、Mn、Cr 量が熱膨張に与える影響を調査し、Mn、Cr が熱膨張率を小さくすることを報告している<sup>(19)</sup>。Cr が熱膨張率を小さくする要因として、格子定数の変化が考えられる。格子定数は、Cr、Mn、Mo などの添加により増加する<sup>(19)</sup>。格子定数の増加は、単位体積当たりの原子数の減少を招き、その結果、単位体積あたりの熱膨張率は減少することとなる。このことより今回の調査においても、Cr 量の増加により、熱膨張率が小さくなったのは格子定数の増加によるものと考えられる。

熱膨張率が小さい構造材料を採用することは、二次応力が主となる FBR において非常に有効である。低熱膨張率は、二次応力の抑制につながり、FBR において冷却系配管の簡素化や、機器のコンパクト化がはかれる。機器のコンパクト化は、実用化 FBR の最大の懸案事項の一つである、コスト低減につながる。このことから熱膨張率のみを考慮するのであれば、今回の結果より、FBR 構造材料への適用の観点からは、Cr 量の増加は好ましいといえる。

### 5.1.3 ヤング率と Cr 量

Fig.18 に各温度におけるヤング率と Cr 量の関係を示す。Cr の増加に伴ってヤング率が大きくなる傾向が認められる。これは固体状態で完全に溶け合う金属では、その成分の変化に伴ってヤング率は変化することに対応している<sup>(20)</sup>。なお Fe-50Cr だけが、この関係から大きく外れているが、これは室温における Fe-50Cr のヤング率の測定結果は 236GPa であるとの報告もある<sup>(21)</sup>。このことから何らかの測定上の問題が生じていたと推測される。

## 5.2 材料物性値と W 量の関係

タングステンは融点が約 3400°C と金属中で最も高く、電気伝導率や熱伝導率が極めて良好であること、熱膨張率が純金属中で最も小さいこと、高温強度が大きいことなど、多くの優れた特性を有している高融点金属である。12Cr 系鋼においても高温強度の向上を目的に添加されているが、その材料物性値に与える影響はほとんど考慮されていないのが現状である。そこで今回は W 量を調整した 3 種類の 12Cr 系鋼において、W 量の違いによる、材料物性値、特に熱的特性の差異を調査した。一連の材料物性値と W 量の関係を、Fig.19~21 にそれぞれ示す。

Fig.19 に示される 12Cr 系鋼の熱伝導率と W 量の関係においては、W 量が熱伝導率に及ぼす影響は見られず、室温において 11Cr-0.4Mo-2W が、他の 12Cr 鋼に比較して、小さい熱伝導率を示すものの、400°C 以上の高温域においては W 量が熱伝導率に及ぼす影響はほとんど認められない。また Fig.20 に示される 12Cr 系鋼の熱膨張率と W 量の関係においても W 量が熱膨張率に及ぼす影響は見られなかった。さらには Fig.21 に示される 12Cr 系鋼のヤング率と W 量の関係においても、W 量ヤング率に及ぼす影響

は見られなかった。

Wについては、Wは金属中でも多くの優れた特性をもつことから、その含有量により材料物性値と温度の関係に何らかの影響を与えられたと思われたが、W量の異なる12Cr鋼の3鋼種間に有意な材料物性値の差が見られなかった。これはWが真に0mass%～2mass%程度の含有量の違いによつては材料物性値に影響を与えなかった他に、次のような可能性が考えられる。すなわち今回、調査に用いた12Cr系鋼においては、W量の相違に伴い、Mo当量に基づいたMoの調整を行っている。Moは、Wと同じく高融点金属で良熱伝導性を持ち、金属中ではWについて熱膨張率の小さい金属である。このことより、今回の結果は、MoによるWの代替が、材料物性値に及ぼす影響は小さい、すなわちWの減少による材料物性値の変化がMoの増加による材料物性値の変化に相殺され、結果的にWが材料物性値に及ぼす影響が小さくみられたということを示唆している可能性もある。

### 5.3 材料物性値特性からみたFBR最適高Cr鋼

FBR構造材料に生じる応力では、相対的に熱応力が主体的となる。そこで今回の測定結果をもとに、種々の材料物性値から予測される熱応力についての調査を行った。

Fig.22に、次式(13)で表される、最も単純な拘束場での、550°Cにおける $\Delta T$ が100°Cの熱応力とCr量の関係を示す。ただしここでは弾性範囲内での変形を仮定している。

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T \quad \dots(13)$$

$\sigma_T$  : 発生する熱応力

E : ヤング率(550°C)

$\alpha$  : 瞬間熱膨張係数(550°C)

$\Delta T$  : 温度変化 (=100°C)

Fig.22に示されるように、Fe-30Crまでは、Cr量が大きくなるほど、熱応力は小さくなるのがわかる。しかしながら、それ以上のCr量になると逆にCr量の増加に伴い、発生する熱応力は大きくなる。これはCr量の増加に伴い熱膨張率の低下が飽和する傾向にあることと、ヤング率が大きくなるためと考えられる。したがって熱応力の低減という観点からは、30%以上Cr量を増やすことは熱的特性からは有意義ではないと考えられる。

材料の耐熱応力特性についてはいくつかの評価手法が提案されている<sup>(22)(23)</sup>。そのなかの指標の一つに熱衝撃抵抗がある。

引張強さ $\sigma_B$ である材料において、厚さhの板に片側急激加熱により破壊に至る温度変化 $(T_f - T_0)c$ は熱衝撃抵抗と呼ばれ、

$$K_{t1} = \lambda \sigma_B / E\alpha \quad K_{t2} = \sigma_B / E\alpha$$

$\lambda$  : 熱伝導率

$E$  : ヤング率

$\alpha$  : 瞬間熱膨張係数

$m$  : 機械的応力

$a$  : 熱伝達率

とおくと

$$(T_f - T_0)_c = \left\{ 1 - (1/m) \right\} \left\{ 1.5K_{t2} + (3.25/a)K_{t1} \right\} \quad \dots(14)$$

で近似的に表現される<sup>(24)</sup>。ここで  $K_{t1}$ 、 $K_{t2}$  は第一および第二の熱衝撃係数と呼ばれ、それらが大きい材料ほど耐熱衝撃性がある。そこでこの  $K_{t1}$  を用いて 550°C における熱衝撃係数と Cr 量の関係を Fig.23 に示す。なおここで用いた引張強度等は各種文献データ等を用いた<sup>(25)(26)</sup>。

第一熱衝撃係数は熱過渡に対する指数とも考えられ、この値が小さいほど耐熱応力性が高いと考えられる。Fig.23 より明らかなように、この熱応力指数は引張強度の影響を強く受ける事がわかる。このことより、第一熱衝撃係数は、Cr 量の増加による材料物性値の改善よりもむしろ熱処理等による機械的強度の改善のほうが有効であることが示される。また Fig.22 および Fig.23 に示されるように、12Cr 系鋼においては W 量の増加とともに熱応力特性は良くなっているように見受けられる。ただし同じ 12Cr 系鋼において、W 量の違いに伴う材料物性値(熱伝導率、熱膨張率、ヤング率)の有意な差はほとんど認められなかったことから、これは 550°C における引張強度の相違が、そのまま熱応力特性に反映されたものであると考えられる。

今回測定に用いた超高純度 Fe-Cr 合金は、国内でも最高水準の高純度材料であり、通常の高純度 Fe-Cr 合金で見られるような、高温における  $\sigma$  相の生成がほとんど見られず、また Fe-50mass%Cr においても 20%以上の室温破断伸びを持つという優れた機械的性質を持つ<sup>(27)</sup>。しかし、超高純度化によりこれらの Cr 量の増加による問題点が解消されたとしても、今回の調査により、Cr 量の増加によりそれほど材料物性値は、ほとんど改善されない。すなわち、Fig.13 および Fig.14 に示されるように、Cr 量の増加により熱伝導率は小さくなり、また、Cr 量の増加により熱膨張率の低減が期待できるのは約 30mass%以下であることが示唆された。また Fig.22、Fig.23 に示されるように、熱膨張率の低減を行っても、熱応力に対しての効果はそれほど期待できないと考えられる。

橋詰らは高 Cr マルテンサイト鋼において今回の調査と同様に、Cr および W の含有量が、クリープ強度に及ぼす影響についての調査を行っている<sup>(9)</sup>。彼らによると 650°C でのクリープ特性と Cr 量の関係においては、高応力短時間クリープは、Cr 量の多いほうが有利であるが、低応力長時間クリープは、逆に Cr 量の少ない方が長寿命を示すとしている。彼らは高 Cr マルテンサイト鋼の基本構成元素である Cr は高温クリープ強さを向上させる固溶強化機構を有するとともに、高温下でのマルテンサイト組織変化を促進し、低応力・長時間側でのクリープ強さを低下させる作用を併せ持つとしている。したがって、650°Cにおける長時間寿命の向上を目標とした高 Cr マルテンサイト鋼の Cr 量最適値は 9.0mass%近傍にあると報告している。

FBR に最適な高 Cr フェライト鋼を設計するためには、機械的性質や材料物性値が優れていることはもちろんのこと、その材料組織の時間変化やコストも含めた各種合金量の設定が重要となる。しかしながら材料物性値と Cr 量に関してのみ考えるならば、Cr 量の増加により、熱膨張率を小さくすることができるが、同時に熱伝導率も小さくなってしまふことから、Cr 量の増加により FBR に有効な材料物性値が得るのには限界があることが示された。

## 6. まとめ

本調査においては

11Cr-0.4Mo-2W

10.2Cr-1.2Mo-0.35W

10.5Cr-1.5Mo-0W

Fe-30Cr

Fe-35Cr

Fe-50Cr

Fe-60Cr

の計 7 種の今回測定した 12Cr 系鋼および Fe-Cr 合金と、これまでに得られている 2.25Cr-1Mo 鋼、Mod.9Cr-1Mo 鋼の文献データを用いて Cr 量が物性値に及ぼす影響を調査した。

- (1) 熱伝導率は、Cr 量の増加に伴い小さくなる傾向があるが、高温になるにしたがって Cr 量による違いは小さくなっていく。
- (2) 熱膨張率は、Cr 量の増加に伴い小さくなる傾向があるが、その傾向は Cr 量の多い領域において飽和する。
- (3) ヤング率は、Cr 量の増加に伴い大きくなる。

(4) 今回測定を行った 12Cr 系鋼において、材料物性値に及ぼす W 含有量の影響は見られなかった。

(5) Cr 量の増加による、耐熱応力特性の改善は、Cr 量が少ない時にのみ効果が見込まれる。

(6) Cr 量の増加による材料物性値の改善を指向した FBR に最適な高クロムフェライト鋼の開発には限界があり、強化機構、材料組織の安定性、製造コスト等、他の要因についての精査が必要であるが、単純に Cr 量の増加による材料物性値の改善のみを考えれば、30mass%以上の Cr の添加は有効でないことが示された。

**謝辞**

本研究を進めるにあたり、素材のご提供を頂きました東北大学金属材料研究所の安彦兼次助教授および高木清一助手にはここに感謝の意を表します。新技術開発試験グループの加藤章一 副主任技術員には、多大な御協力および助言を頂きありがとうございました。また、一部データの提供を頂いた、(株)日立製作所 祐川正之氏、後藤仁一郎氏、三菱重工業(株) 伊達新吾氏、大谷知未氏に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 木村英隆、他「FBR 構造材料の物性値測定」PNC TN9410 90-094、(1990)
- (2) 例えば、藤田俊夫「発電プラント用高クロムフェライト系耐熱鋼の開発」火力原子力発電、Vol.42、No.11、(1991)、1485-1496
- (3) 技術展開部 技術協力課編集「先行基礎工学研究に関する平成 13 年度研究概要報告」JNC TN1400 2002-005、(2002)
- (4) 真空理工株式会社 TC-3000 型 カタログ
- (5) 長谷川正義 監修「ステンレス鋼便覧」、日刊工業新聞社、(1973)、p1427
- (6) 岩淵義孝、他「超超臨界火カタービン用 12Cr 铸鋼ケーシングの開発」鉄と鋼、Vol.76、No.7、(1990)、1060-1067
- (7) 榎木義淳、他「12Cr 系高強度ボイラ用鋼管(HCM12A)の開発」住友金属、Vol.47、No.4、(1995)、29-38
- (8) 松井則男、他「MA-SPS プロセスで作成した Fe-Cr 合金の諸特性におよぼす Cr 量の影響」粉体および粉末冶金、Vol.47、No.3、(2000)、332-336
- (9) 橋詰良吉、他「高 Cr フェライト系耐熱鋼における長時間クリープ強度に着目した Cr 含有量の最適化」鉄と鋼、Vol.88、No.11、(2002)、91-98
- (10) M.Asahina、他「High-Temperature Mechanical Properties of High-Purity 70 mass% Cr-Fe Alloy」Phys.Stat.Sol.(a)、189、No.1、87-96
- (11) (社)日本機械学会「伝熱工学試資料 改訂第 4 版」(社)日本機械学会、(1986)
- (12) Yoshihiro Terada、他「Effects of alloying additions on thermal conductivity of ferritic iron」ISIJ International、Vol.42、No.3、(2002)、pp322-324
- (13) H.Stamm、他「Thermomechanical characteristics of low activation chromium and chromium alloys」J.Nucl.Mater.、No.258-263、(1998)、1756-1761
- (14) Uwe Holzwarth、他「Mechanical and thermomechanical properties of commercially pure chromium and chromium alloy」J. Nucl. Mater.、No.300、(2002)、161-177
- (15) R.K.Williams、他「Experimental determination of the phonon and electron components of the thermal conductivity of bcc iron」J.Appl.Phys.、Vol.52、No8、(1981)、5167-5175
- (16) N.Sunders、他「Modelling of the Thermo-Physical and physical properties relevant to solidification」Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes X、Sandestin、Florida、May 25-30、(2003)
- (17) 上野文義、他「FBR 構造材料の物性値測定」PNC ZN9410 93-027
- (18) 加藤浩久、他「Fe-Ni-Cr 系合金の熱膨張特性に及ぼす Ni、Cr の影響」CAMP-ISIJ、Vol.3、(1990)、1851
- (19) 大内千秋、他「高 Mn 系非磁性鋼の物理的性質に及ぼす成分と製造条件の検討」鉄と鋼、Vol.69、No.6、(1983)、694-702
- (20) W.Martin、他「金属科学入門」共立出版株式会社、(1974)
- (21) K.Abiko、他「Properties of High-Purity Fe-50mass% Cr alloy」Phys.stat.sol.(a)、Vol.167、(1998)、449-461
- (22) 平修二、他「材料の高温強度論」オーム社、(1980)
- (23) Shen-Chih Lee et al「Thermal shock resistance of austenitic cast iron」、Metallurgical Transaction A、Vol.22A、(1991)、1821-1831
- (24) (社)日本機械学会「伝熱工学試資料 改訂第 2 版」(社)日本機械学会、(1969)
- (25) 動力炉核燃料開発事業団、解説 高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等 (1984)
- (26) 日本原子力発電株式会社、解説 高速増殖炉実証炉高温構造設計指針 材料強度基準等 (案)、(1999)



---

(27) A.Hishinuma、他「Recent progress and future R&D for high-Chromium iron-base and Chromium-base alloy」 Phys.stat.sol.(a)、Vol.189、No.1、(2002)、69-78

Table 1 Chemical composition of the 12Cr steels used in this study (mass%)

Material	Shape	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Cu	V	Nb	N	B
11Cr-0.4Mo-2W	Plate (30t)	0.11	0.28	0.62	0.015	0.002	10.54	0.39	0.32	1.82	0.98	0.19	0.054	0.063	0.0032
	Plate (30t)	0.12	<0.01	0.48	0.005	0.005	10.2	0.71	1.2	0.35	0.02	0.2	0.058	0.027	—
10.5Cr-1.5Mo-0W	Plate (30t)	0.14	0.07	0.51	0.009	0.001	10.3	0.6	1.45	<0.01	—	0.17	0.05	0.04	—

Table 2 Heat treatment of the 12Cr steels

Materials	Normalizing	Tempering	Tempering 2	Tempering 3	Tempering 4
11Cr-0.4Mo-2W	1050°C×1h AC	718°C×1h AC			
10.2Cr-1.2Mo-0.35W	1050°C×1h AC	720°C×2h AC			
10.5Cr-1.5Mo-0W	1090°C×34h OQ	550°C×37h FC	665°C×47h FC	700°C×30h FC	740°C×4h FC

Table 3 Experimental method used to measure the physical properties in this study.

Physical properties	Measurement	Test Temperature
Density	Archimedes' principle	Room Temperature
Specific heat	Laser flash method	Room Temperature, 100~600°C
Thermal conductivity	Laser flash method	Room Temperature, 100~600°C
Thermal expansion coefficient	Displacement detecting method with quartz push bar	Room temperature~600°C
Young's modulus	Vibration method	Room temperature~600°C
Poisson's ratio	Vibration method	Room temperature~600°C

Table 4 Measurement result of density.

	11Cr-0.4Mo-2W	10.2Cr-1.2Mo-0.35W	10.5Cr-1.5Mo-0W	Fe-30Cr	Fe-35Cr	Fe-50Cr	Fe-60Cr
1 st	7.800	7.731	7.749	7.582	7.551	7.435	7.435
2 nd	7.795	7.729	7.75	7.582	7.558	7.433	7.433
3 rd	7.791	7.735	7.748	7.589	7.555	7.433	7.433
Mean	7.795	7.732	7.749	7.584	7.555	7.434	7.434

Table 5 Measurement result of specific heat in 12Cr steels.

Temperature °C	Specific heat J/g·K		
	11Cr-0.4Mo-2W	10.2Cr-1.2Mo-0.35W	10.5Cr-1.5Mo-0W
25	0.452	0.452	0.454
100	0.482	0.478	0.487
200	0.527	0.517	0.525
300	0.567	0.560	0.573
400	0.616	0.598	0.613
500	0.691	0.700	0.692
600	0.807	0.803	0.802

Table 6 Measurement result of specific heat in Fe-Cr alloy.

Temperature °C	Specific heat J/g·K			
	Fe-30Cr	Fe-35Cr	Fe-50Cr	Fe-60Cr
25	0.458	0.462	0.452	0.464
100	0.483	0.490	0.489	0.500
200	0.529	0.529	0.520	0.522
300	0.594	0.581	0.573	0.559
400	0.625	0.630	0.583	0.568
500	0.674	0.688	0.599	0.578
600	0.769	0.734	0.608	0.613

Table 7 Measurement result of thermal conductivity in 12Cr steels.

Temperature °C	Thermal conductivity W/m·K		
	11Cr-0.4Mo-2W	10.2Cr-1.2Mo-0.35W	10.5Cr-1.5Mo-0W
25	21.4	26.4	26.5
100	23.0	26.8	27.9
200	25.0	27.6	28.1
300	25.9	28.6	29.3
400	26.7	28.3	29.0
500	27.4	29.9	29.2
600	27.9	29.7	28.8

Table 8 Measurement result of thermal conductivity in Fe-Cr alloy.

Temperature °C	Thermal conductivity W/m·K			
	Fe-30Cr	Fe-35Cr	Fe-50Cr	Fe-60Cr
25	23.7	21.7	18.4	17.7
100	23.5	22.4	19.4	18.6
200	23.9	22.3	19.5	19.6
300	25.0	23.0	21.2	21.2
400	24.6	23.4	22.8	22.3
500	25.2	24.3	23.4	24.4
600	27.8	27.4	25.4	26.7

Table 9 Measurement result of thermal expansion coefficient in 12Cr steels.

Temperature °C	Thermal expansion coefficient %		
	11Cr-0.4Mo-2W	10.2Cr-1.2Mo-0.35W	10.5Cr-1.5Mo-0W
20	0.000	0.000	0.000
50	0.031	0.030	0.030
100	0.085	0.085	0.083
150	0.141	0.143	0.143
200	0.197	0.200	0.201
250	0.253	0.255	0.255
300	0.316	0.317	0.315
350	0.378	0.375	0.376
400	0.440	0.440	0.440
450	0.503	0.503	0.506
500	0.566	0.568	0.569
550	0.637	0.636	0.638
600	0.702	0.706	0.709

Table 10 Measurement result of thermal expansion coefficient in Fe-Cr alloy.

Temperature °C	Thermal expansion coefficient %			
	Fe-30Cr	Fe-35Cr	Fe-50Cr	Fe-60Cr
20	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.025	0.029	0.025	0.024
100	0.076	0.078	0.069	0.070
150	0.127	0.128	0.113	0.116
200	0.178	0.177	0.156	0.163
250	0.228	0.226	0.201	0.211
300	0.281	0.282	0.244	0.261
350	0.334	0.337	0.307	0.313
400	0.396	0.390	0.360	0.370
450	0.454	0.446	0.417	0.428
500	0.515	0.505	0.477	0.482
550	0.574	0.569	0.544	0.547
600	0.631	0.626	0.606	0.610

Table 11 Measurement result of coefficient of thermal expansion in 12Cr steels.

Temperature °C	Coefficient of thermal expansion ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )					
	11Cr-0.4Mo-2W		10.2Cr-1.2Mo-0.35W		10.5Cr-1.5Mo-0W	
	Instant.	Mean (20°C~)	Instant.	Mean (20°C~)	Instant.	Mean (20°C~)
20	10.3		10.8		10.8	
50	10.6	10.3	10.8	10.0	10.9	10.0
100	10.9	10.6	11.0	10.6	11.1	10.4
150	11.2	10.8	11.2	11.0	11.3	11.0
200	11.5	10.9	11.4	11.1	11.5	11.2
250	11.8	11.0	11.7	11.1	11.8	11.1
300	12.1	11.3	12.0	11.3	12.1	11.3
350	12.4	11.5	12.3	11.4	12.4	11.4
400	12.7	11.6	12.6	11.6	12.8	11.6
450	12.9	11.7	12.9	11.7	13.1	11.8
500	13.2	11.8	13.3	11.8	13.5	11.9
550	13.4	12.0	13.7	12.0	13.9	12.0
600	13.6	12.1	14.1	12.2	14.3	12.2

Table 12 Measurement result of coefficient of thermal expansion in Fe-Cr alloy.

Temperature °C	Coefficient of thermal expansion ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )							
	Fe-30Cr		Fe-35Cr		Fe-50Cr		Fe-60Cr	
	Instant.	Mean (20°C~)	Instant.	Mean (20°C~)	Instant.	Mean (20°C~)	Instant.	Mean (20°C~)
20	9.1		9.5		7.9		8.58	
50	9.4	8.3	9.6	9.7	8.1	8.3	8.73	8.0
100	9.7	9.5	9.8	9.8	8.4	8.6	8.99	8.8
150	10.1	9.8	10.0	9.8	8.8	8.7	9.28	8.9
200	10.4	9.9	10.2	9.8	9.2	8.7	9.59	9.1
250	10.7	9.9	10.4	9.8	9.7	8.7	9.93	9.2
300	11.0	10.0	10.7	10.1	10.2	8.7	10.30	9.3
350	11.2	10.1	10.9	10.2	10.7	9.3	10.69	9.5
400	11.5	10.4	11.2	10.3	11.2	9.5	11.12	9.7
450	11.7	10.6	11.5	10.4	11.8	9.7	11.56	10.0
500	11.9	10.7	11.8	10.5	12.5	9.9	12.04	10.0
550	12.1	10.8	12.2	10.7	13.1	10.3	12.54	10.3
600	12.3	10.9	12.5	10.8	13.8	10.4	13.07	10.5

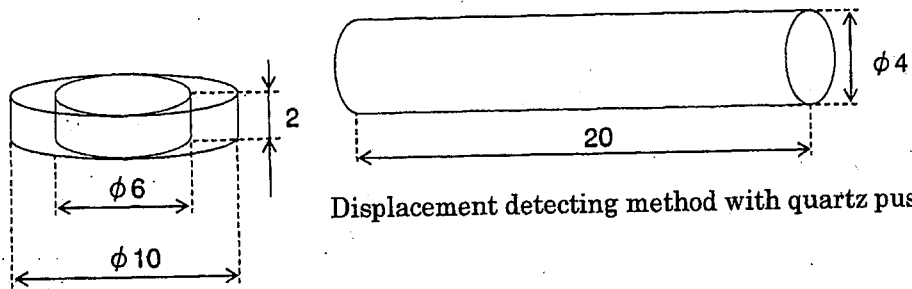


Table 13 Measurement result of Young's modulus and Poisson's ratio in 12Cr steel.

Temp. (°C)	11Cr-0.4Mo-2W		10.2Cr-1.2Mo-0.35W		10.5Cr-1.5Mo-0W	
	E (GPa)	$\mu$	E (GPa)	$\mu$	E (GPa)	$\mu$
20	215.1	0.304	214.7	0.299	216.0	0.285
50	213.6	0.304	213.1	0.297	214.5	0.285
100	211.6	0.305	211.3	0.298	212.5	0.285
150	209.0	0.306	208.8	0.299	210.0	0.286
200	206.1	0.308	206.1	0.301	207.2	0.287
250	202.6	0.312	203.0	0.303	203.9	0.288
300	199.2	0.314	199.6	0.306	200.7	0.29
350	195.1	0.316	195.7	0.308	196.7	0.292
400	190.2	0.321	190.9	0.312	192.0	0.295
450	184.1	0.327	185.0	0.315	186.1	0.3
500	177.2	0.335	178.3	0.322	179.6	0.304
550	170.3	0.339	170.1	0.322	172.4	0.31
600	159.4	0.344	160.7	0.328	162.1	0.311

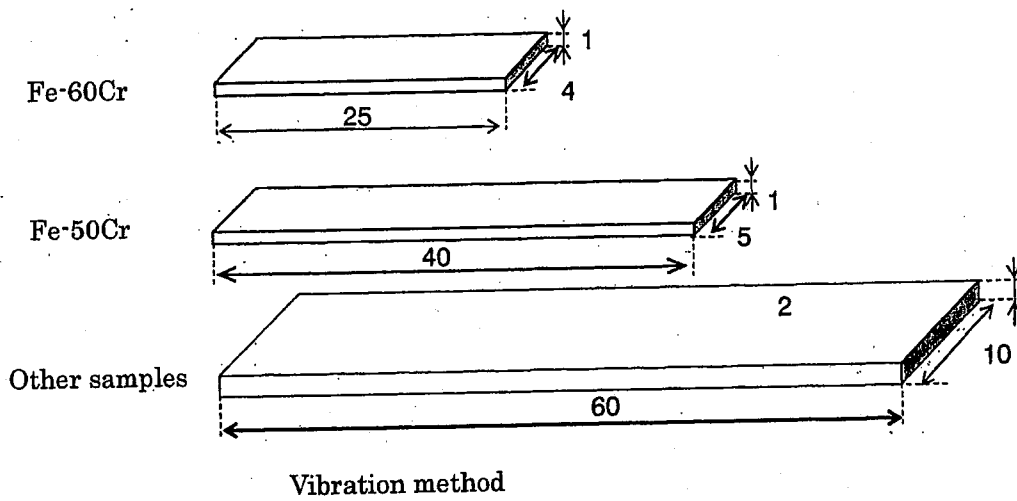
Table 14 Measurement result of Young's modulus and Poisson's ratio in Fe-Cr alloy.

Temp. °C	Fe-30Cr		Fe-35Cr		Fe-50Cr		Fe-60Cr	
	E (GPa)	$\mu$	E (GPa)	$\mu$	E (GPa)	$\mu$	E (GPa)	$\mu$
20	216.6	0.277	220.1	0.307	209.0		233.4	
50	214.8	0.274	217.9	0.304	207.6			
100	212.6	0.273	215.7	0.306	204.7		229.7	
150	209.8	0.274	212.7	0.308	201.7			
200	206.5	0.275	209.1	0.31	197.9		224.2	
250	202.9	0.272	204.7	0.313	193.7			
300	199.0	0.277	200.1	0.318	189.7		218.2	
350	194.2	0.279	195.5	0.321	186.5			
400	189.1	0.278	190.6	0.323	181.8		210.3	
450	183.6	0.279	185.7	0.323	178.4			
500	177.6	0.279	180.6	0.324	174.5		201.9	
550	167.5	0.277	171.6	0.328	169.2			
600	157.0	0.276	162.5	0.332	163.3		192.2	



Displacement detecting method with quartz push bar.

Laser flash method and Archimedean balance method  
(Small one is for Fe-50Cr and Fe-60Cr)



Vibration method

Fig.1 Shape and size of the specimens to measure.

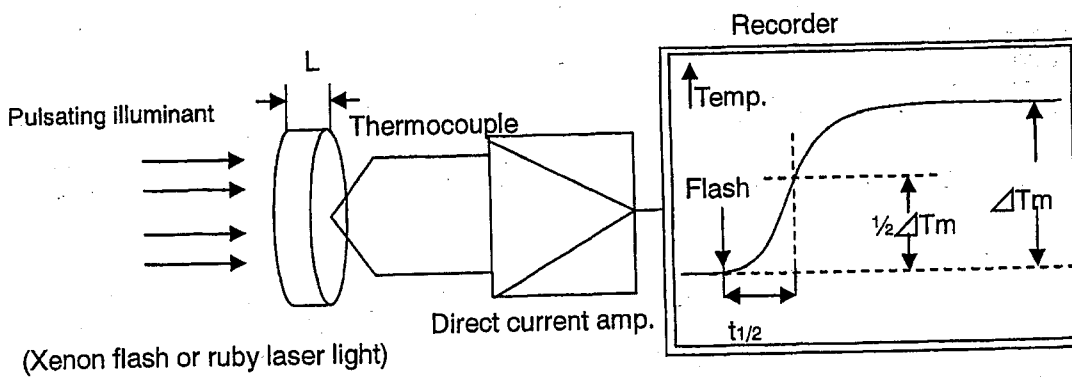


Fig.2 Measurement method of thermal conductivity.

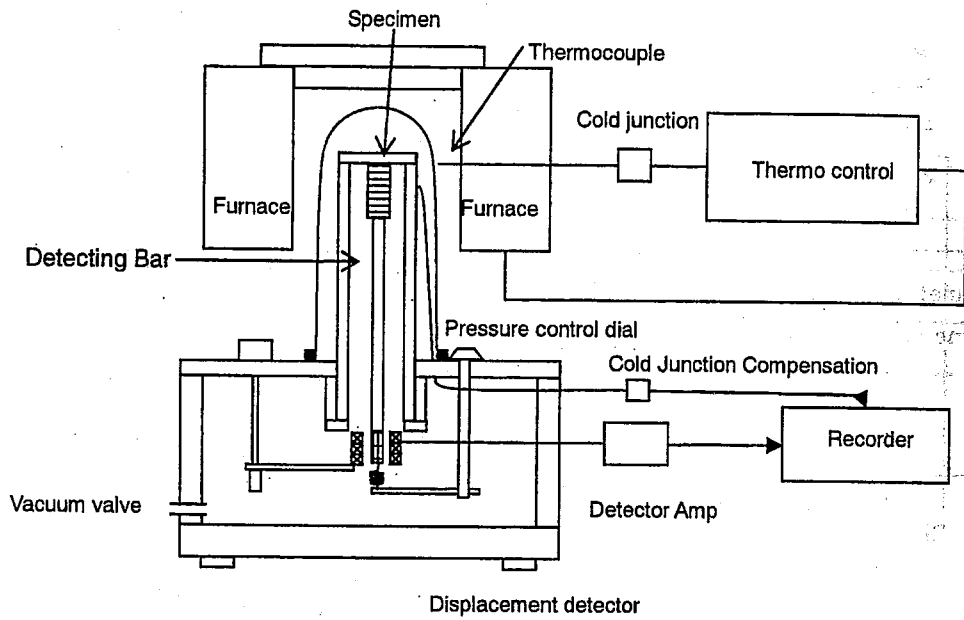


Fig.3 Measurement method of thermal expansion.

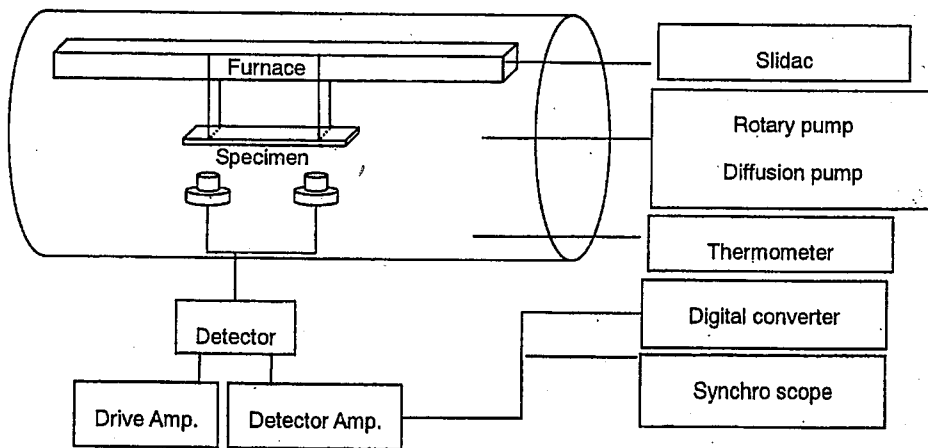


Fig.4 Measurement method of Young's modulus using free vibration method.

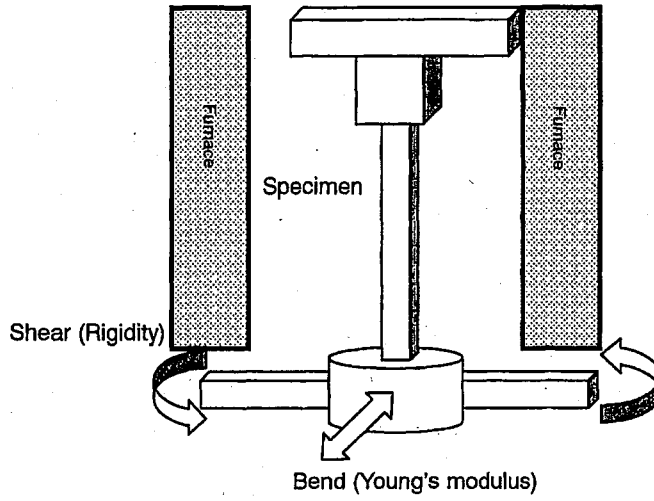


Fig.5 Measurement method of Young's modulus and Rigidity using forced vibration method.

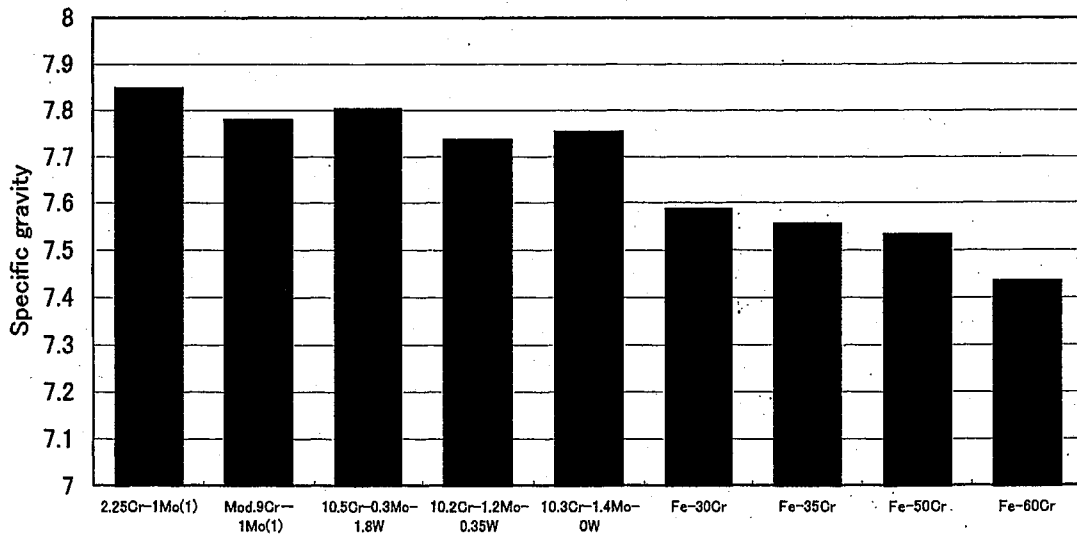


Fig.6 Measurement results of specific gravity.

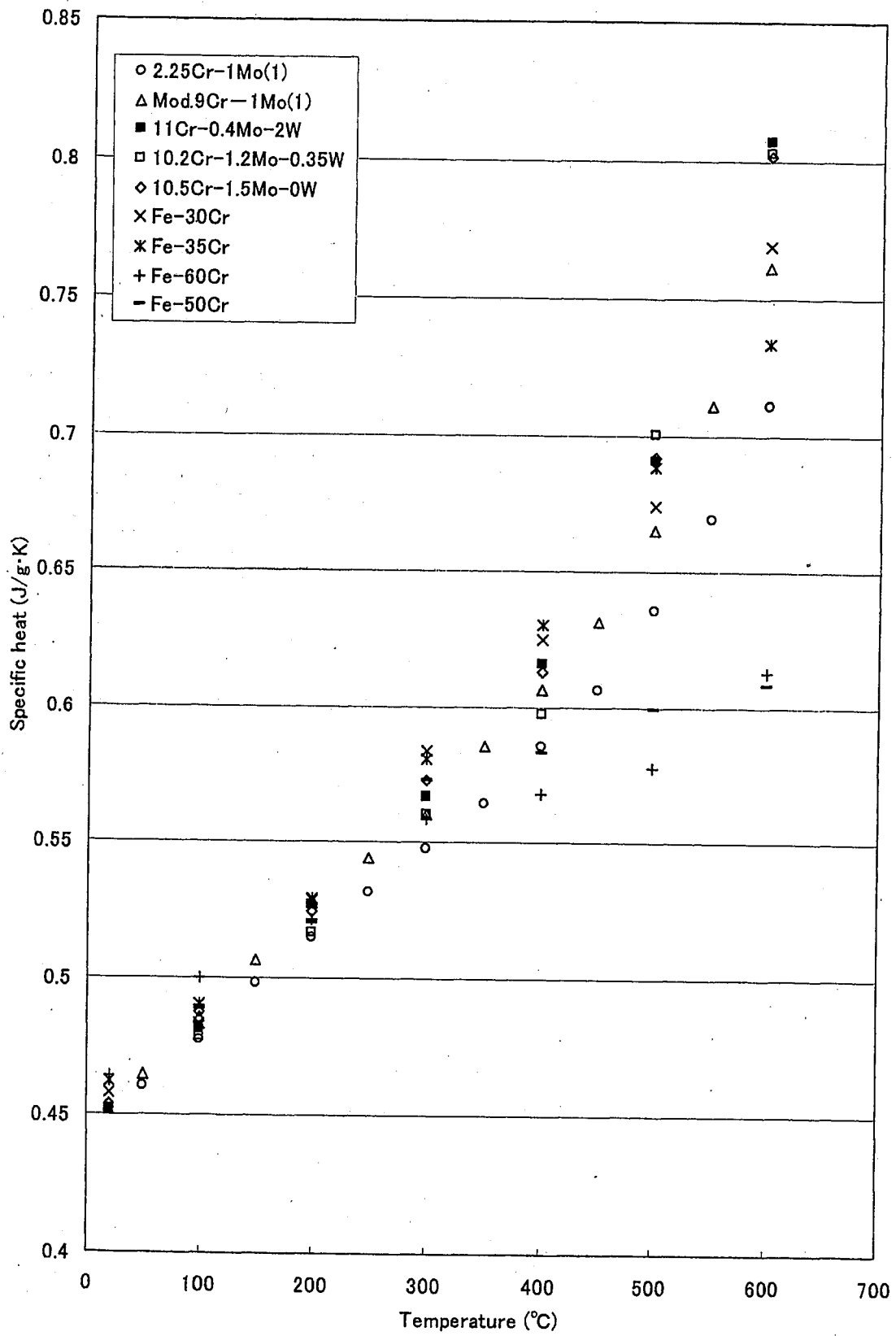


Fig.7 Relationships between specific heat and temperature.

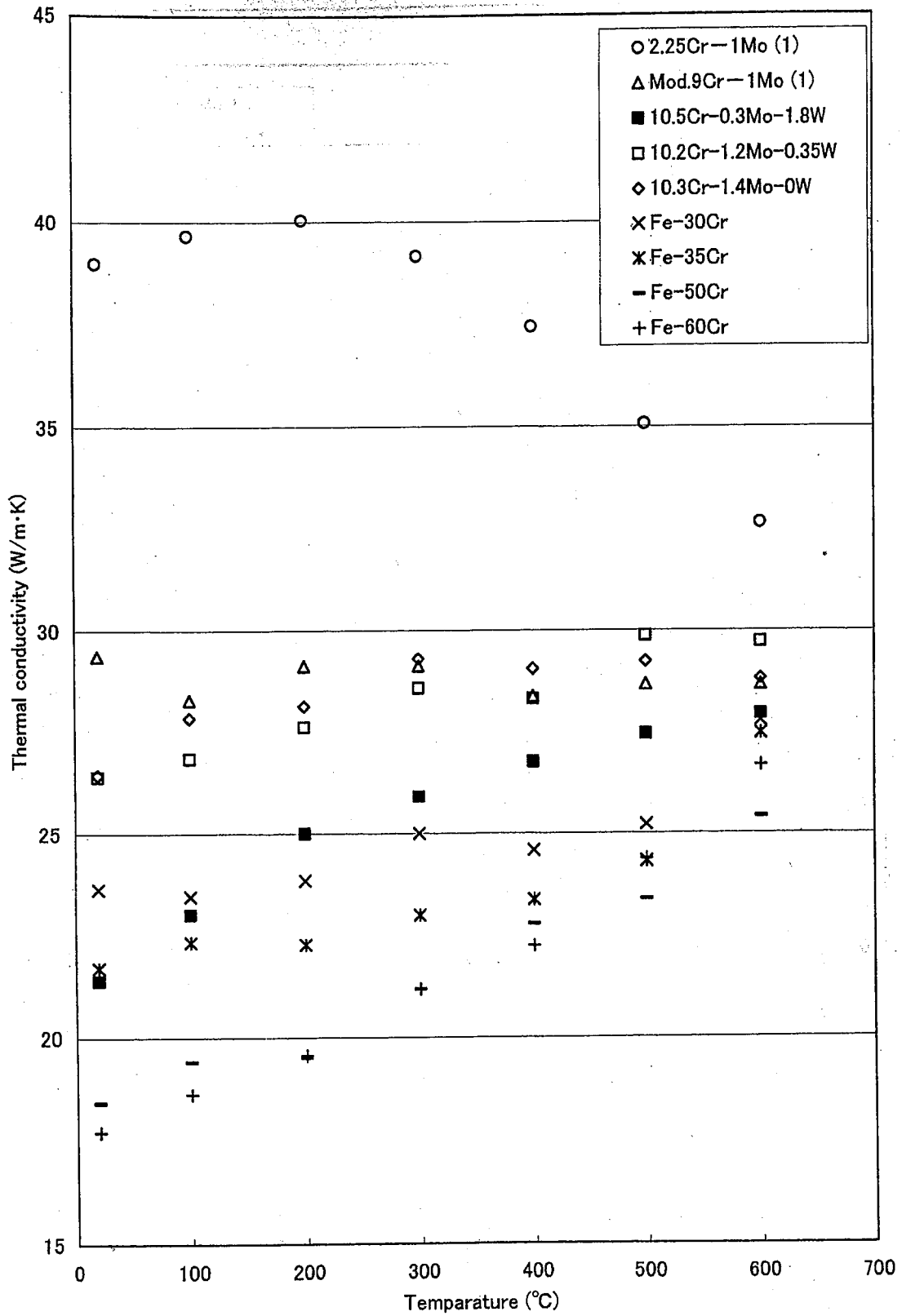


Fig.8 Relationships between thermal conductivity and temperature.

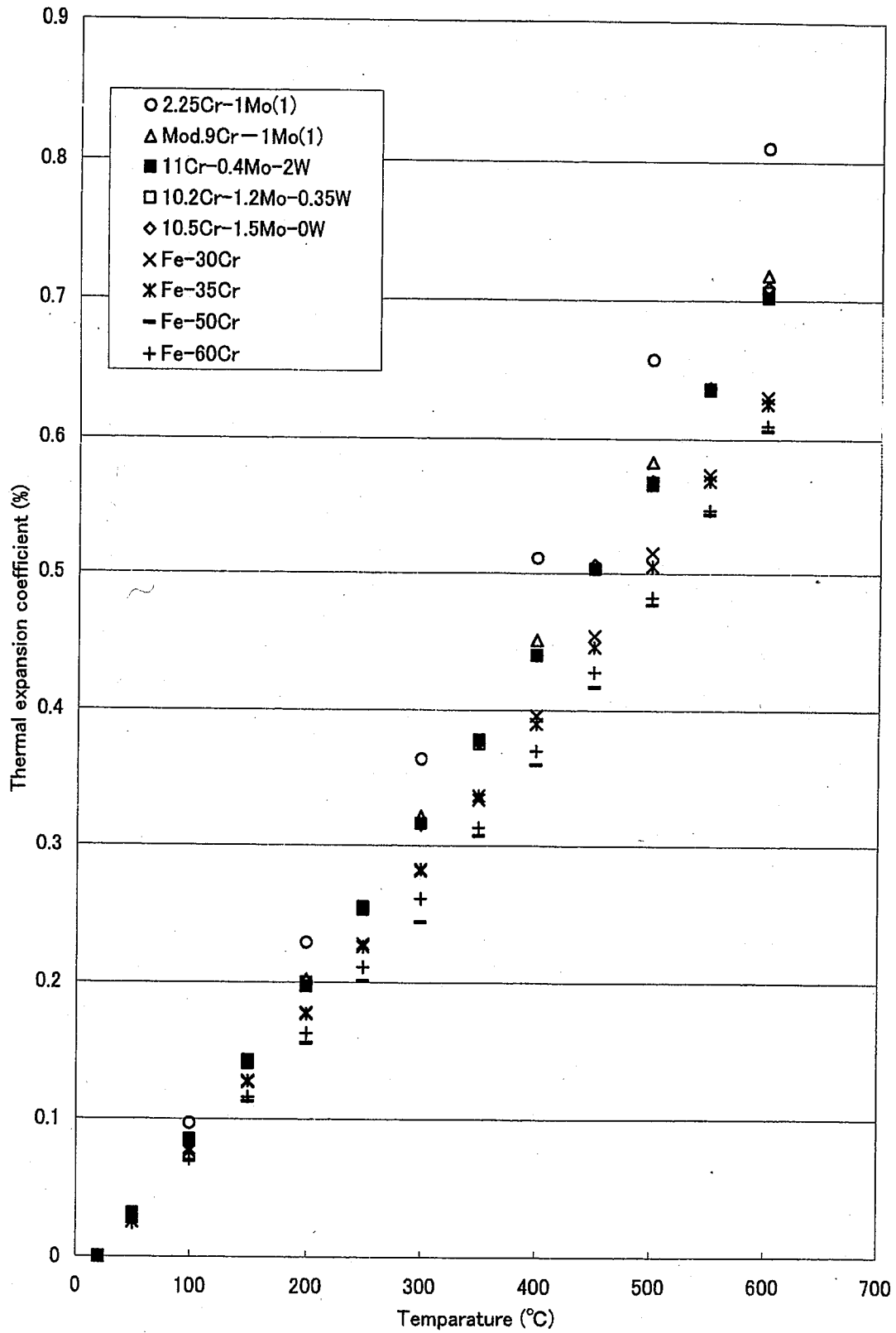


Fig.9 Relationships between thermal expansion coefficient and temperature.

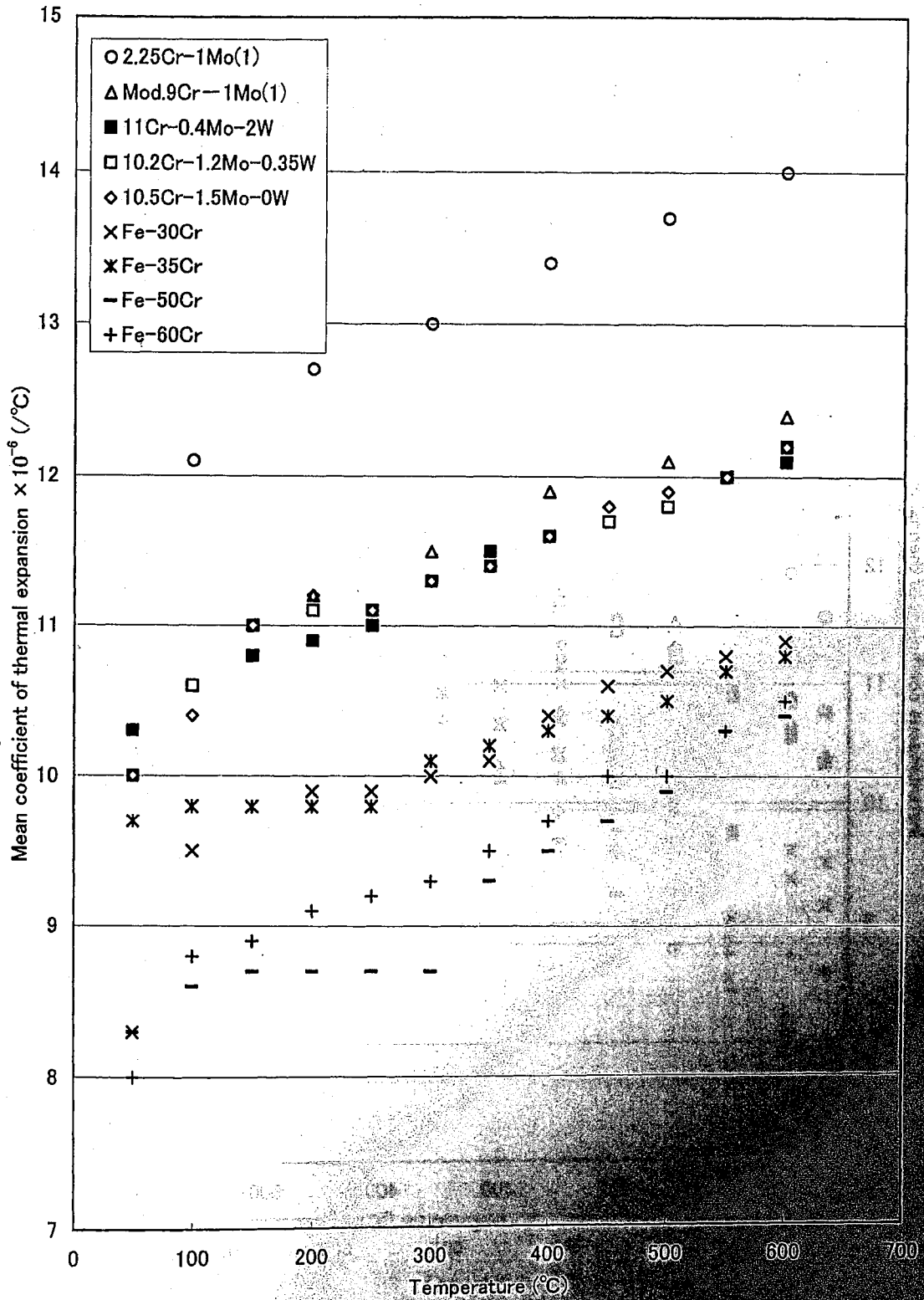


Fig.10 Relationships between mean coefficient of thermal expansion and temperature.



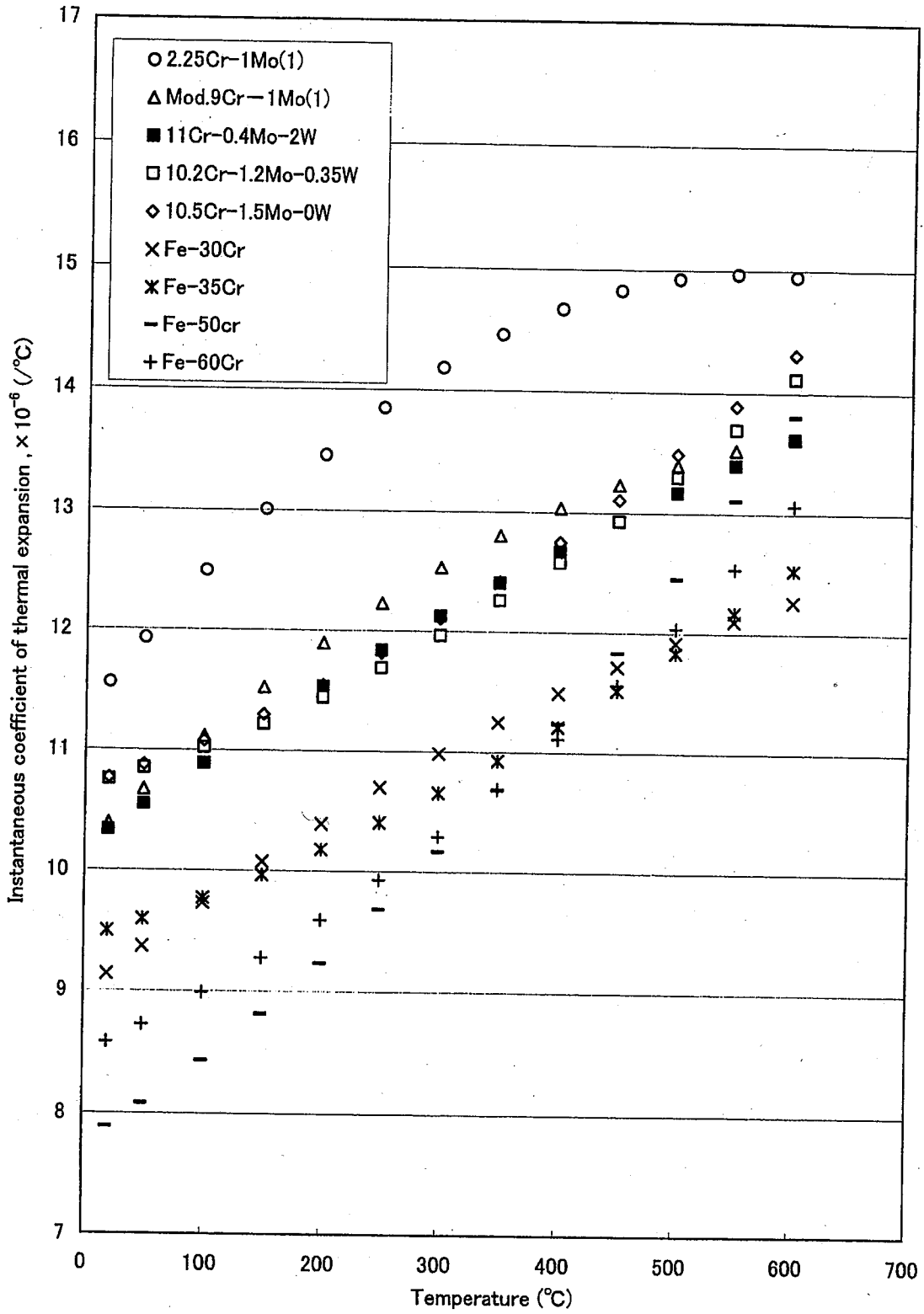


Fig.11 Relationships between instantaneous coefficient of thermal expansion and temperature.

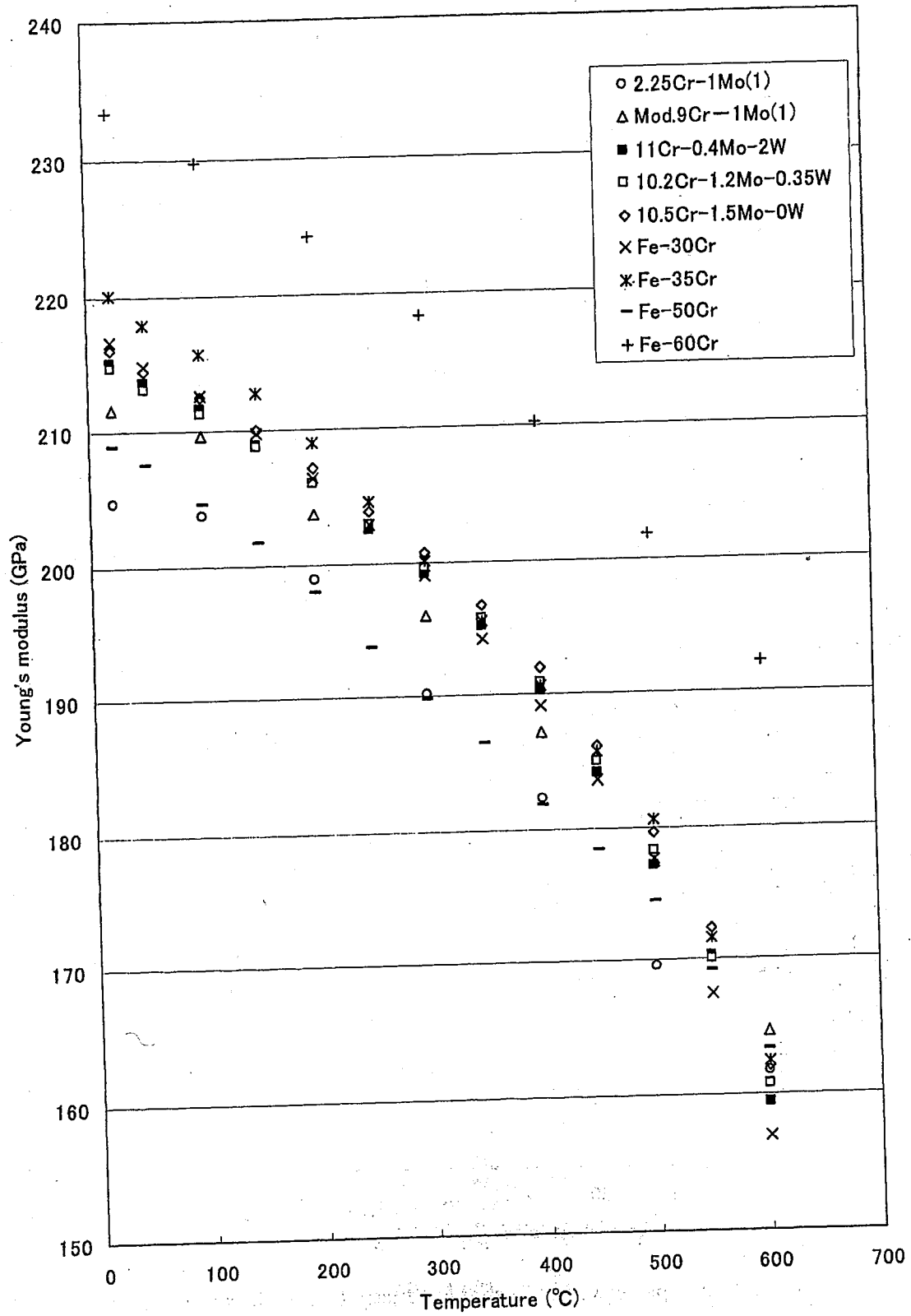


Fig.12 Relationships between Young's modulus and temperature.

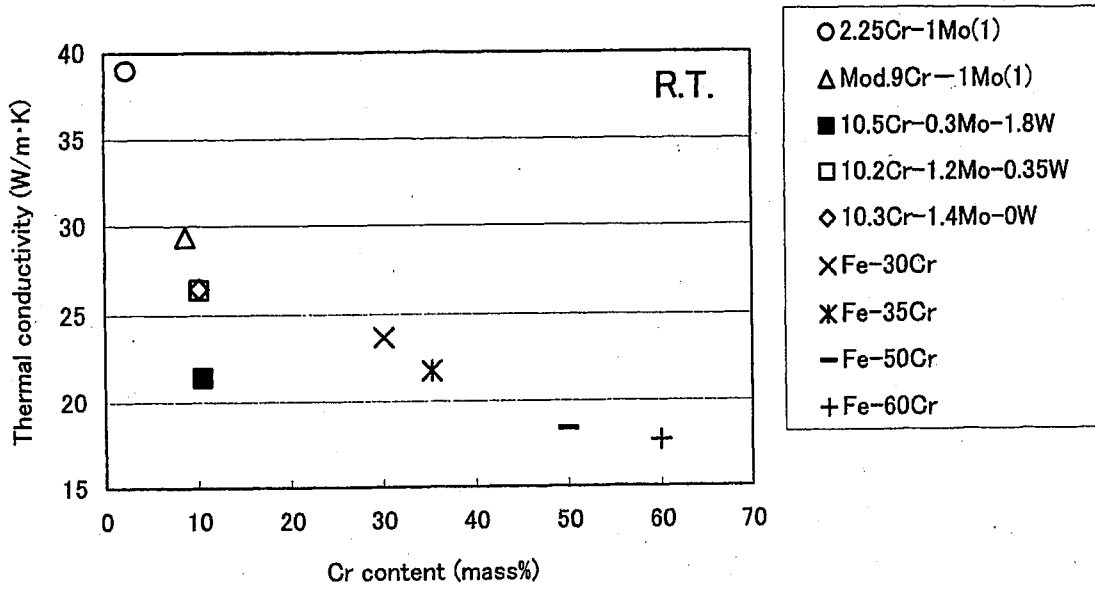


Fig.13 Relationships between thermal conductivity and Cr content at room temperature.

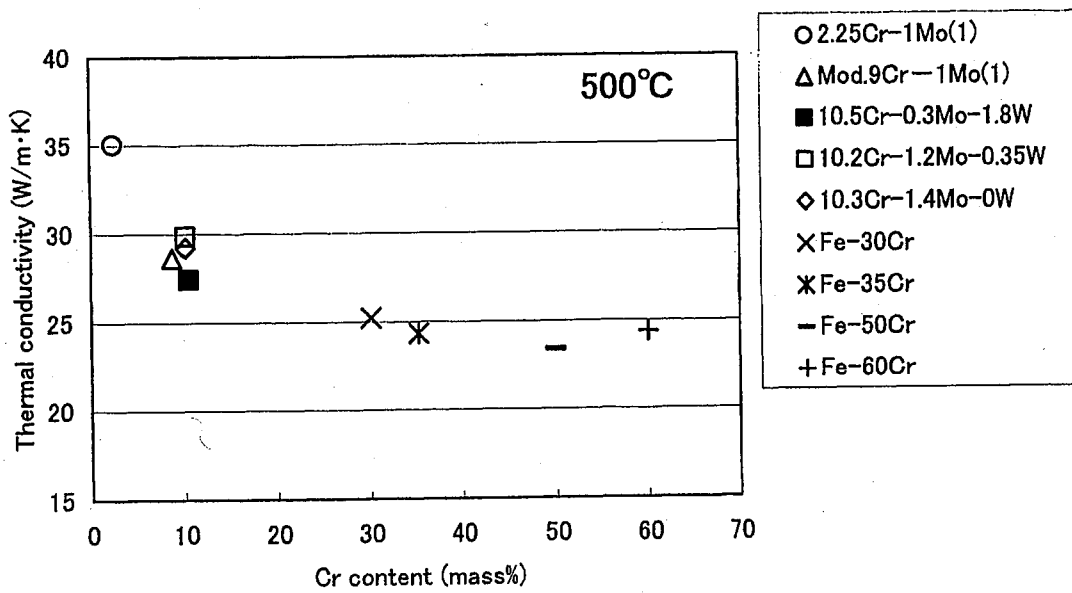


Fig.14 Relationships between thermal conductivity and Cr content at 500°C.

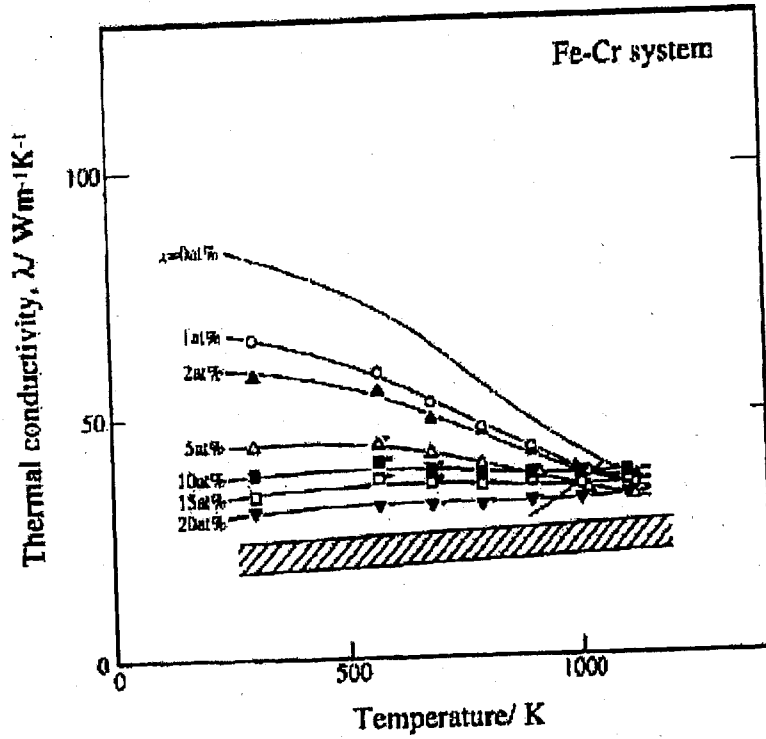


Fig.15 The thermal conductivity versus absolute temperature for the binary Fe-Cr alloys with various concentrations of Cr between  $\chi=0\sim 20\text{at}\%$  obtained by Terada<sup>(12)</sup>. (The Curie temperature is showed dashed curve. A hatched area indicates the experimental results for commercial ferrite steels of AISI 405,409,434 and 446) .

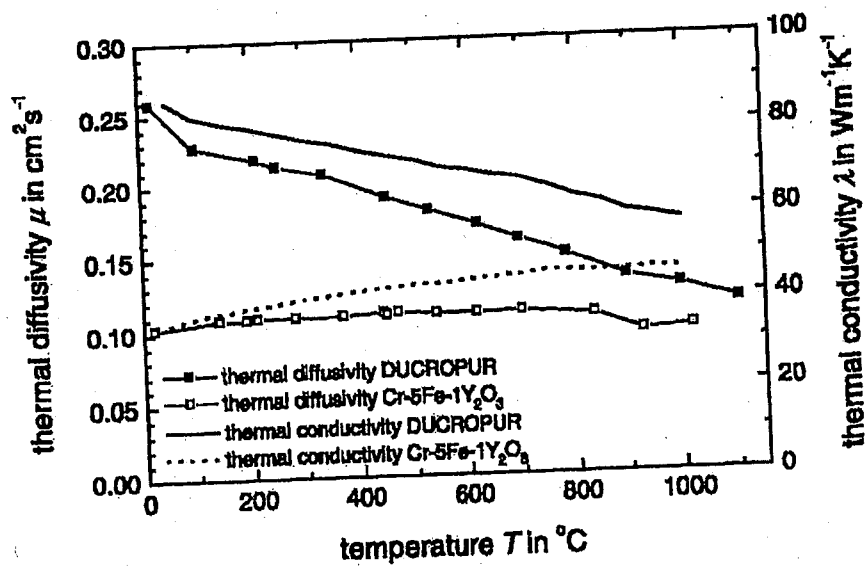


Fig.16 Temperature dependence of the thermal diffusivity and thermal conductivity obtained by Holzwarth<sup>(14)</sup>. (Ducropur<sup>TM</sup> is 99.7% commercially pure chromium)

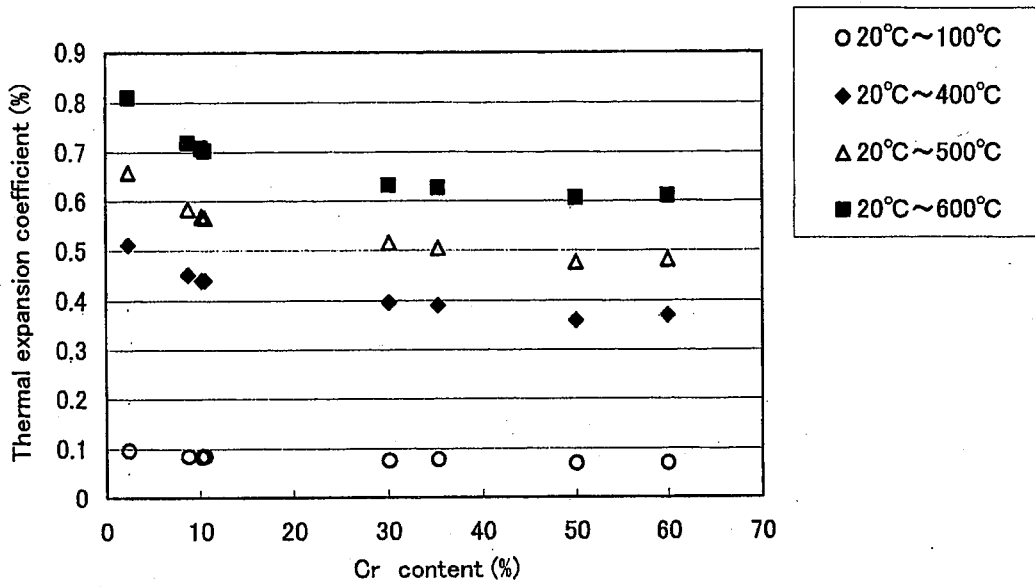


Fig.17 Relationships between thermal expansion coefficient and Cr content at various temperatures.

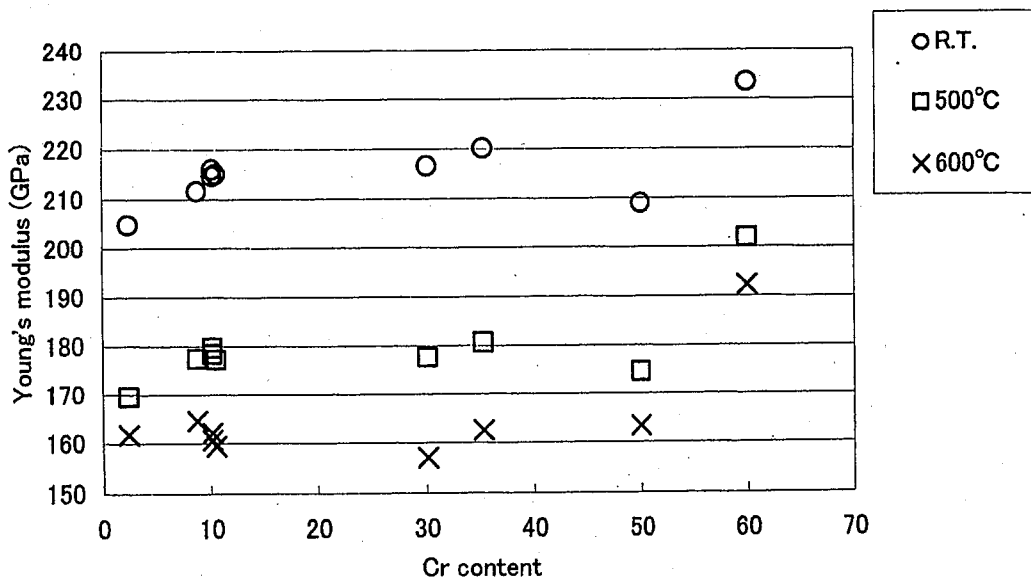


Fig.18 Relationships between Young's modulus and Cr content at room temperature, 500°C and 600°C.

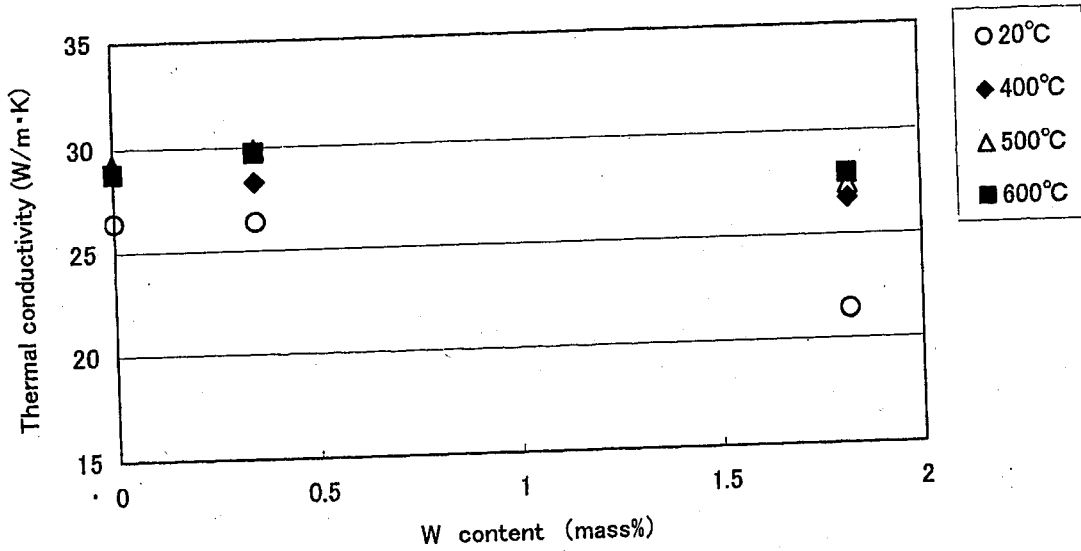


Fig.19 Relationships between thermal conductivity and W content at various temperatures.

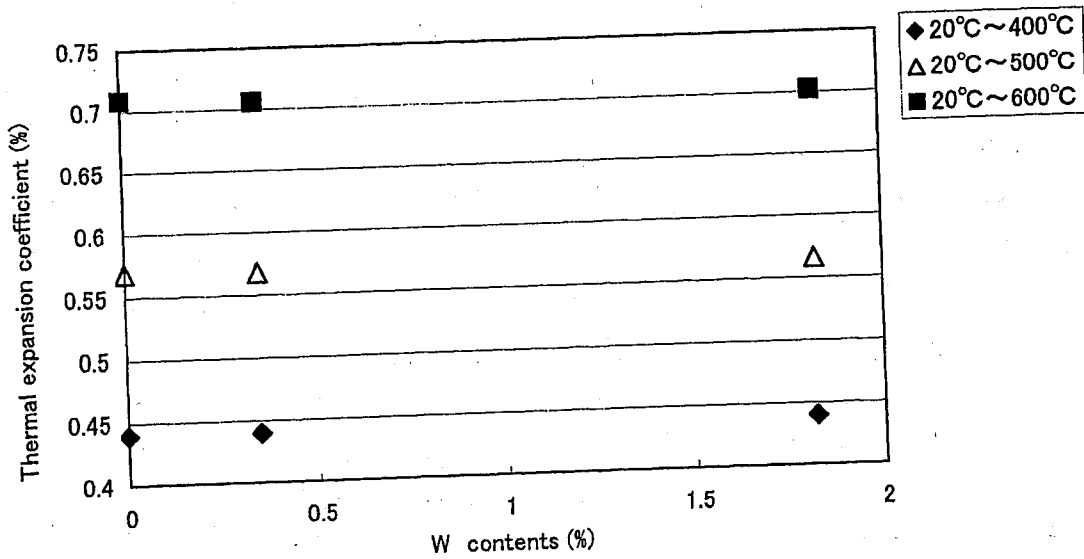


Fig.20 Relationship between thermal expansion coefficient and W content at various temperatures.

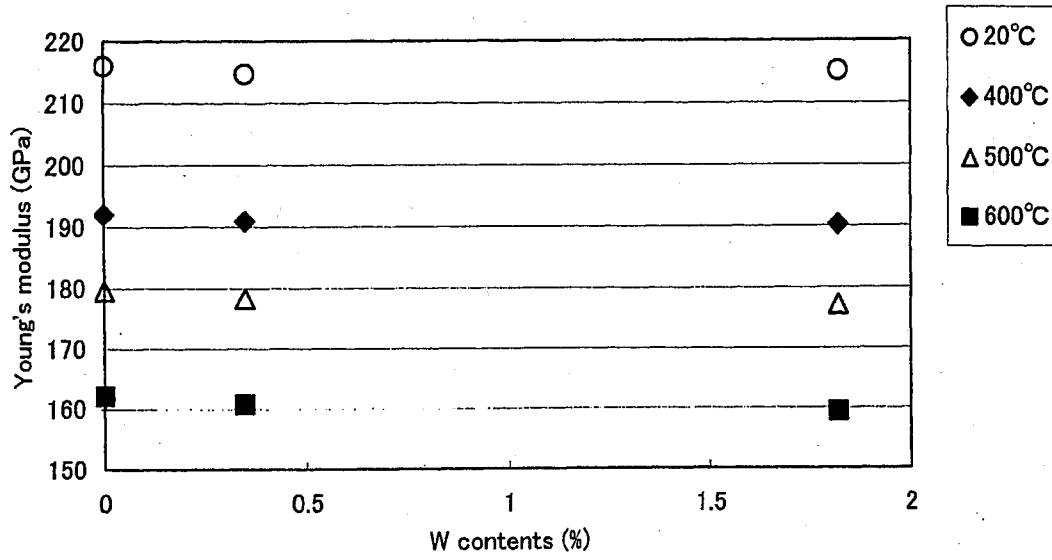


Fig.21 Relationships between Young's modulus and W content at various temperatures.

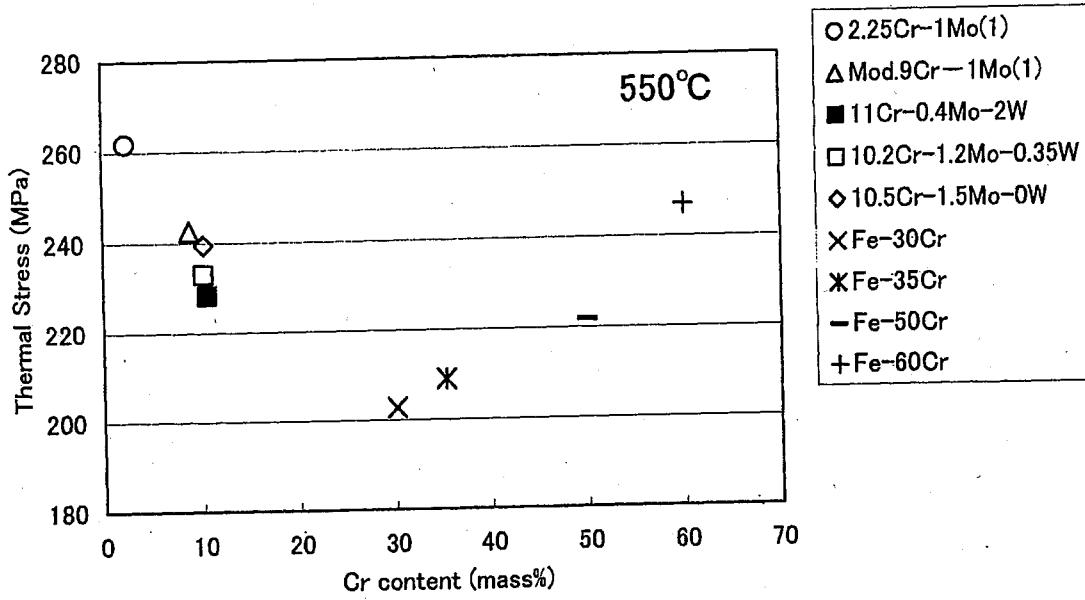


Fig.22 Simple thermal stress calculated by  $\sigma_T = E\alpha \Delta T$  at 550°C.

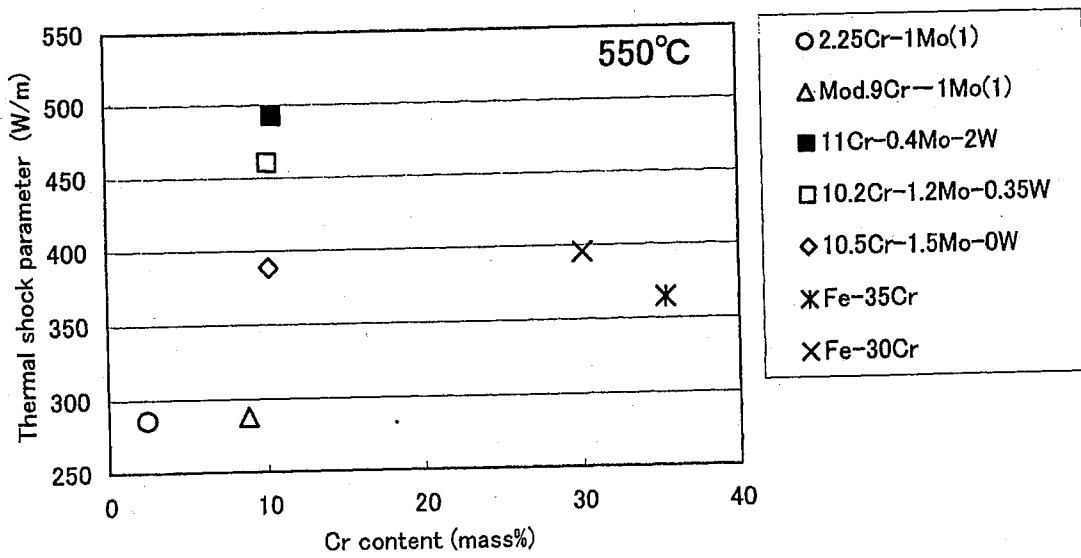


Fig.23 Relationship between thermal shock parameter to Cr content at 550°C.