

# 9Cr系鋼の高温破壊靱性試験 (第1報)

1989年5月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 9Cr系鋼の高温破壊靱性試験 (第1報)

斎藤正雄\* , 香川裕之\* , 加納茂機,

和田雄作\* , 二瓶 勲\*

永田三郎\*\*, 長嶺多加志\*\*\*

### 要 旨

高速大型炉2次系,特に一体型貫流蒸気発生器の構造材料の候補として9Cr系鋼が有望視されている。このため,クリープ試験や疲労試験などの材料強度試験が実施され,9Cr系鋼のデータの拡充が図られてきた。しかしながら,高速炉蒸気発生器の構造健全性を評価する上で必要不可欠な破壊靱性に関するデータは極めて少ない。そこで,本研究では9Cr系鋼の高温での破壊靱性試験を行い,設計および健全性評価に反映することを目的とした。

本研究は,9Cr系鋼であるMod.9Cr-1Mo鋼,9Cr-2Mo鋼,TEMPALLOY SW-9鋼(9Cr-1Mo-Nb-V鋼)の3種の鋼の母材(受入材,SR処理材,時効材)および溶接部(溶金,HAZ)について引張試験,破壊靱性試験( $J_{ic}$ 試験およびシャルピー衝撃試験)を3ヶ年計画で行うもので,初年度にはMod.9Cr-1Mo鋼の母材(受入材,SR処理材)について室温,400℃,500℃,550℃および600℃での引張試験,破壊靱性試験を実施した。本報では,初年度実施分の成果を報告する。

引張試験結果は耐力,引張強さともPNC材料強度基準暫定値を満足し,またシャルピー衝撃試験結果も良好であった。 $J_{ic}$ 試験はASTM E813規格に準拠して,R曲線法と除荷コンプライアンス法の2通りの方法で行った。サイドグループ付CT試験片(試験片板厚20mm)

---

\* 大洗工学センター 機器構造開発部・材料開発室

\*\* 住友金属工業(株) 原子力材料技術室

\*\*\* (株)NKK 鋼材技術部

を用いてSR処理材について室温から600℃の範囲で試験した結果、400℃で最も低い靱性値を示すが、400℃においても延性き裂発生の限界を表すJ積分 $J_a$ は350kJ/m<sup>2</sup>以上の十分な靱性を示すことが明らかとなった。また $J_{ic}$ 試験では、J積分のほかに、不安定延性破壊発生の評価パラメータの一つであるティアリングモデュラス $T_{mat}$ の値も同時に求めた。

# Fracture Toughness Test of 9Cr type Steel at Elevated Temperature (No.1)

Masao Saito\*, Hiroyuki Kagawa\*, Shigeki Kano\*

Yusaku Wada\*, Isao Nihei\*

Saburou Nagata\*\*, Takashi Nagamine\*\*\*

## Abstract

A series of high temperature fracture toughness tests of 9Cr type steel was put in practice on a three-year scheme in 1988. In this experimental study, Mod.9Cr-1Mo steel, 9Cr-2Mo steel and TEMPALOY SW-9 (9Cr-1Mo-Nb-V) steel are tested, and fracture toughness ( $J_{\alpha}$ ) of base metal (As-received, SR-treated, Aged) and weldment (weld metal, HAZ) of these three types of steel are investigated. In a first year, fracture toughness tests of base metal (As-received, SR-treated) of Mod.9Cr-1Mo steel were carried out at RT, 400°C, 500°C, 550°C and 600°C, respectively. In this report, the test results in the first year are shown.

Fracture toughness tests were performed using R-curve method and unloading compliance method according to ASTM E813. The fracture toughness value was the lowest at 400°C. Even at 400°C, however, Mod.9Cr-1Mo steel showed enough high fracture toughness ( $J_c > 350 \text{kJ/m}^2$ ). In the fracture toughness test, tearing modulus  $T_{mat}$  was also measured.

---

\* Material Development Section, Systems and Components Division, OEC/PNC

\*\* Nuclear Materials Technology, Sumitomo Metal Industries, LTD.

\*\*\* Plate, Section and Bar Technology Dept., NKK

## 目 次

1. まえがき .....	1
1.1 試験の目的 .....	1
1.2 試験の概要 .....	1
2. 試験内容 .....	2
2.1 供試材 .....	2
2.2 試験片の形状・寸法 .....	2
2.2.1 引張試験片 .....	2
2.2.2 シャルピー衝撃試験片 .....	2
2.2.3 ヤング率測定試験片 .....	2
2.2.4 破壊靱性試験片 .....	3
2.3 試験条件 .....	3
2.3.1 引張試験 .....	3
2.3.2 シャルピー衝撃試験 .....	3
2.3.3 破壊靱性予備試験 .....	3
2.3.4 破壊靱性試験 .....	3
3. 試験方法 .....	4
3.1 引張試験 .....	4
3.2 シャルピー衝撃試験 .....	4
3.3 ヤング率測定 .....	4
3.4 破壊靱性試験 .....	4
3.4.1 疲労予き裂導入 .....	4
3.4.2 除荷コンプライアンス法における除荷方法 .....	5
3.4.3 試験過程中におけるCT試験片のき裂長さ算出 .....	5
3.4.4 J値の算出方法 .....	6
3.4.5 実測値からのき裂長さの換算式 .....	6
3.4.6 R曲線の近似方法 .....	6

3.4.7 ティアリングモジュラス $T_{mat}$ の算出方法	6
4. 試験結果および考察	8
4.1 引張試験結果	8
4.2 シャルピー衝撃試験結果	8
4.3 破壊靱性試験結果	9
4.3.1 破壊靱性予備試験結果	9
4.3.2 破壊靱性本試験結果	10
5. まとめ	13
参考文献	14

**List of tables**

Table 1	Test Plan .....	15
Table 2	Chemical Compositions .....	16
Table 3	Tensile test conditon .....	17
Table 4	Charpy impact test condition .....	17
Table 5	Fracture toughness pre-test condition .....	18
Table 6	Fracture toughness test condition .....	18
Table 7	J value .....	19
Table 8	J value calculated from fractgraph .....	19



## List of figures

Fig. 1.1	High temperature tensile test specimen (N. Co. Ltd) .....	20
Fig. 1.2	High temperature tensile test specimen (S. Co. Ltd) .....	20
Fig. 2.1	Charpy impact test specimen (N. Co. Ltd) .....	21
Fig. 2.2	Charpy impact test specimen (S. Co. Ltd) .....	21
Fig. 3	Test specimen of Young's modulus measurement (S. Co. Ltd) .....	22
Fig. 4.1	Fracture toughness test specimen (N. Co. Ltd) .....	23
Fig. 4.2	Fracture toughness test specimen (side grooved) (S. Co. Ltd) ....	24
Fig. 4.3	Fracture toughness test specimen (not side grooved) (S. Co. Ltd) .....	25
Fig. 5.1	Yield strength of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	26
Fig. 5.2	Ultimate strength of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	27
Fig. 5.3	Fracture elongation of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	28
Fig. 5.4	Reduction of area of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	29
Fig. 6.1	Appearances of post-tensioned tensile test specimen (SR material) .....	30
Fig. 6.2	Appearances of post-tensioned tensile test specimen (SR material) .....	31
Fig. 7.1	Absorbed energy of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	32
Fig. 7.2	Brittle fracture of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	33
Fig. 7.3	Lateral expansion of Mod. 9Cr-1Mo steel .....	34
Fig. 8	Appearances of test specimen after Charpy impact test (SR material) .....	35
Fig. 9.1	Relationships between J value of $\Delta a$ (t=5mm, 550°C, R-curve method) .....	36
Fig. 9.2	Relationships between J value of $\Delta a$ (t=5mm, 550°C, unloading compliance method) .....	37

Fig. 10.1	Relationships between $J$ value of $\Delta a$ ( $t=5, 20\text{mm}, 550^\circ\text{C}$ , R-curve method) .....	38
Fig. 10.2	Relationships between $J$ value of $\Delta a$ ( $t=5, 20\text{mm}, 550^\circ\text{C}$ , unloading compliance method) .....	39
Fig. 11	Relationships between $J$ value of $\Delta a$ ( $t=5\text{mm}, 400^\circ\text{C}$ , unloading compliance method) .....	40
Fig. 12	Relationships between $J_a$ value and thickness ( $t=5, 20\text{mm}, 400^\circ\text{C}$ , R-curve & unloading compliance method) .....	41
Fig. 13.1	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 25^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved) .....	42
Fig. 13.2	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 400^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved) .....	43
Fig. 13.3	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 500^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved) .....	44
Fig. 13.4	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 550^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved) .....	45
Fig. 13.5	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved) .....	46
Fig. 14.1	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 25^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved) .....	47
Fig. 14.2	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 400^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved) .....	48
Fig. 14.3	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 500^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved) .....	49
Fig. 14.4	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 550^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved) .....	50
Fig. 14.5	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}, 600^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved) .....	51

Fig. 15	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $25\sim 600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved & side grooved) .....	52
Fig. 16	Relationships between $J_a$ value and temperature .....	53
Fig. 17	Appearances of CT specimen ( $t=20\text{mm}$ , $25\sim 600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved) ....	54
Fig. 18	Appearances of CT specimen ( $t=20\text{mm}$ , $25\sim 600^\circ\text{C}$ , As received material side-grooved) .....	55
Fig. 19.1	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $28^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve) .....	56
Fig. 19.2	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $400^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve) .....	57
Fig. 19.3	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $500^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve) .....	58
Fig. 19.4	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $550^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve) .....	59
Fig. 19.5	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve) .....	60
Fig. 20.1	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $28^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, unloading compliance) .....	61

Fig. 20. 2	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $400^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, unloading compliance) .....	62
Fig. 20. 3	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $500^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, unloading compliance) .....	63
Fig. 20. 4	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $550^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, unloading compliance) .....	64
Fig. 20. 5	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, unloading compliance) .....	65
Fig. 21	Relationships between $J_a$ value and temperature ( $t=20\text{mm}$ , As received material, not side-grooved) .....	66
Fig. 22	J value calculated from fracture ( $t=20\text{mm}$ , As received material, not side-grooved) .....	67
Fig. 23. 1	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve) .....	68
Fig. 23. 2	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve) .....	69
Fig. 23. 3	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $500^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve) .....	70
Fig. 23. 4	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve) .....	71
Fig. 23. 5	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve) .....	72
Fig. 23. 6	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $25\sim 600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve) .....	73

Fig. 24.1(a)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	74
Fig. 24.1(b)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	75
Fig. 24.1(c)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	76
Fig. 24.2(a)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	77
Fig. 24.2(b)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	78
Fig. 24.2(c)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	79
Fig. 24.3(a)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $500^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	80
Fig. 24.3(b)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $500^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	81
Fig. 24.3(c)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $500^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	82

Fig. 24. 4(a)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	83
Fig. 24. 4(b)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	84
Fig. 24. 4(c)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	85
Fig. 24. 5(a)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	86
Fig. 24. 5(b)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	87
Fig. 24. 5(c)	Relationships between $J_a$ value and $\Delta a$ ( $t=20\text{mm}$ , $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	88
Fig. 24. 6	Relationships between $J_a$ value and temperature ( $t=20\text{mm}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance) .....	89
Fig. 25	Appearances of CT specimen ( $t=20\text{mm}$ , $25\sim 600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved) .....	90
Fig. 26	Relationships between $T_{mat}$ and temperature .....	91

## 1. まえがき

### 1.1 試験の目的

高速大型炉の蒸気発生器の候補材である9Cr系鋼について、母材ならびに溶接継手の高温破壊靱性試験を行い、高温での破壊靱性値を調査しデータの蓄積をはかり、設計および健全性評価に反映することを目的とする。

### 1.2 試験の概要

Mod. 9Cr-1Mo鋼，9Cr-2Mo鋼ならびにTEMPALLOY SW-9鋼について，R.T.～600℃までの温度範囲における，引張試験，シャルピー衝撃試験ならびに破壊靱性試験（以下，本報告では， $J_{ic}$ 試験を破壊靱性試験と呼ぶ）を行う。また，比較材として，SUS304， $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼についても若干の試験を実施する。以上の試験を，動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター材料開発室より，住友金属工業(株)および(株)NKKに発注し，昭和62年度より平成元年度までの3ヶ年計画で行う。試験計画をTable 1に示す。本報では，初年度に実施された試験結果について報告する。

## 2. 試験内容

### 2.1 供試材

本報（本研究の初年度）で用いた供試材は住友金属㈱（以下「S社」と記す。）製のMod.9Cr-1Mo鋼ならびに㈱NKK（以下「N社」と記す。）製のMod.9 Cr-1Mo鋼の2種類であり、いずれも板厚25mmの圧延材である。両材の化学成分をTable 2に示す。熱処理条件は、S社製については、焼ならし：1050℃×10分間、焼戻：770℃ 1.0時間以内、N社製については、焼ならし：1050℃×2時間、焼戻、750℃ 1.5時間とした。

### 2.2 試験片の形状・寸法

Mod.9Cr-1Mo鋼板の受入材およびSR処理材より試験片を採取した。

#### 2.2.1 引張試験片

引張試験片はJIS G0567-1976に準拠したツバ付きの丸棒で、平行部直径は10φ、平行部長さは5Dである。試験片形状、寸法をFig. 1.1~1.2に示す。

Fig. 1.1に示す試験片の採取方向は試験片長手方向が素材圧延方向に対し直角になるよう、またFig. 1.2に示す試験片の採取方向は長手方向が素材圧延方向になるよう採取した。いずれも、採取位置は1/2tである。

#### 2.2.2 シャルピー衝撃試験片

シャルピー衝撃試験片はJIS Z2202に基づき作製した。試験片形状、寸法をFig. 2.1~2.2に示す。

Fig. 2.1~2.2に示す試験片は試験片長手方向が素材圧延方向になるよう、採取した。採取位置は1/2tとした。

#### 2.2.3 ヤング率測定試験片

破壊靱性試験の除荷コンプライアンス法による試験のデータ処理に必要なヤング率を求めるために作製した。試験片形状、寸法をFig. 3に示す。

Fig. 3に示す試験片は試験片長手方向が素材圧延方向に一致するよう採取した。採取位置は1/2tとした。



## 2.2.4 破壊靱性試験片

破壊靱性試験片はASTM E813に準拠したCT試験片である。サイドグループ無しとサイドグループ有りの試験片とした。試験片形状、寸法をFig. 4.1~4.3に示す。Fig. 4.1に示す試験片の採取方向は試験片のノッチ方向が素材圧延方向に一致するよう、またFig. 4.2~4.3示す試験片の採取方向は試験片のノッチ方向が素材圧延方向に直角になるよう採取した。いずれも、採取位置は $1/2t$ である。

## 2.3 試験条件

### 2.3.1 引張試験

引張試験条件をTable 3に示す。

### 2.3.2 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験条件をTable 4に示す。

### 2.3.3 破壊靱性予備試験

破壊靱性予備試験条件をTable 5に示す。

### 2.3.4 破壊靱性試験

破壊靱性試験条件をTable 6に示す。

### 3. 試験方法

#### 3.1 引張試験

引張試験についてはS社は島津製オートグラフDCS-10T高温引張試験を用い、またN社はインストロン型引張試験機（荷重容量10ton）を用い、JIS Z 2201もしくはJIS G 0567に準拠して行った。試験温度はRT, 400℃, 500℃, 550℃, 600℃とし、各温度において2本ずつ供試した。測定項目は、降伏点（0.2%耐力）、引張強さ、破断伸び、破断位置、絞りとした。

#### 3.2 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験については、S社は東京衝機製30kgハンマーを用い、N社は前川試験機社製30kg・mシャルピー衝撃試験機を用いJIS Z2242に準拠して行い、0℃および20℃を含む遷移カーブを求めた。

#### 3.3 ヤング率測定

ヤング率測定については、S社はテレマックス製静電駆動式YOUNG率測定装置により縦固有振動数を求め、次式により算出した。一方、N社は引張試験よりヤング率を求めた。

$$E = 4 \rho \ell^2 f^2$$

$E$  : ヤング率             $\rho$  : 見掛け比重  
 $\ell$  : 試験片長さ         $f$  : 固有振動数

#### 3.4 破壊靱性試験

破壊靱性試験については、ASTM E813に準拠して実施した。試験はRカーブ法と除荷コンプライアンス法の2通りの方法で行った。

##### 3.4.1 疲労予き裂導入

疲労予き裂はASTM E813に準拠し、以下の式に従って導入した。

$$P_L = [B b_0^2 \sigma_y / (2W + a)]$$

$$P \leq 0.4 P_L$$

o r

$$(\Delta K / E) \leq 0.005 \text{mm}^{1/2}$$

(for the final 0.64mm)

$$\sigma_y = (\sigma_{0.2} + \sigma_{ult}) / 2$$

## 3.4.2 除荷コンプライアンス法における除荷方法

除荷コンプライアンス法における除荷レベルは原則的には10%とし、荷重変位ともに10倍の拡大を行いコンプライアンスを算出した。高温環境における変位制御試験では、コンプライアンス算出のための変位停止から除荷開始までの間で応力緩和が生じるが、本試験では、この応力緩和速度が5-10kgf/minになった状態で除荷を開始した。

## 3.4.3 試験過程中におけるCT試験片のき裂長さ算出

CT試験片の除荷コンプライアンス試験過程中におけるき裂長さ算出に関しては、以下の式を使用した。

$$a/W = C_0 + C_1 \cdot U + C_2 \cdot U^2 + C_3 \cdot U^3 + C_4 \cdot U^4 + C_5 \cdot U^5$$

ただし、

$$U = 1 / (1 + (B_e E \lambda)^{1/2})$$

ここで、 $C_0 \sim C_5$  は定数

$$C_0 = 1.00196$$

$$C_1 = -4.0631$$

$$C_2 = 11.242$$

$$C_3 = -106.043$$

$$C_4 = 464.335$$

$$C_5 = -650.677$$

a : き裂長さ

W : 試験片幅

B<sub>e</sub> : 試験片有効厚さ

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B$$

ただし、Bは試験片厚さ、B<sub>N</sub>はサイドグループ部分の底厚

E : ヤング率

λ : 荷重線弾性コンプライアンス (Δ変位/Δ荷重)

## 3.4.4 J値の算出方法

J値の算出は、次式に基づいて求めた。

$$J = A / (B \cdot b) \cdot f(a_0 / W)$$

$$f(a_0 / W) = 2(1 + \alpha) / (1 + \alpha^2)$$

$$\alpha = \left[ (2a_0 / b)^2 + 2(2a_0 / b) + 2 \right]^{1/2} \\ - \left[ (2a_0 / b) + 1 \right] \quad b = W - a_0$$

J : J値

A : 荷重-荷重線変位曲線の下部面積

$a_0$  : 疲労き裂を含む初期き裂長さ

b : リガメント ( $b = W - a$ )

## 3.4.5 実測値からのき裂長さの換算式

除荷コンプライアンス法により計測したき裂長さは、試験片破面から実測した初期および最終き裂長さをもちいて、以下の式で補正した。

$$a_i = a_{mr} - \left\{ (a_{mr} - a_{mn}) / (a_{cr} - a_{cn}) \right\} \cdot (a_{cr} - a_{ci})$$

$a_i$  : i番目の除荷点におけるき裂長さの置き換え値

$a_{mr}$  : 実測して入力した最終き裂長さ (全き裂長さ)

$a_{mn}$  : 実測して入力した初期き裂長さ (疲労き裂長さ)

$a_{cr}$  : コンプライアンスから算出した最終き裂長さ

$a_{cn}$  : コンプライアンスから算出した初期き裂長さ

$a_{ci}$  : コンプライアンスから算出したi番目の除荷点におけるき裂長さ

## 3.4.6 R曲線の近似方法

R曲線の近似方法はASTM E813にもとずいて、最小二乗法を用いた直線近似とした。

3.4.7 ティアリングモジュラス $T_{mat}$ の算出方法

不安定破壊の評価パラメータとしてParis等<sup>1)2)</sup>によって提案されたティアリングモジュラスを、本破壊靱性試験で得られるJ-a関係から計算した。ティアリングモジュラス $T_{mat}$ は、R曲線の傾きを一定と仮定して次式に従い算出した。

$$T_{mat} = d J_{mat} / d a \times E / \sigma_y^2$$

ここで、 $J_{mat}$  = 材料のき裂進展抵抗

$$\sigma_y = (\sigma_{0.2} + \sigma_{ult}) / 2$$

E : 当該温度におけるヤング率

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 引張試験結果

Mod.9Cr-1Mo鋼の引張試験結果をFig. 5.1~5.4に示す。図にはORNLの平均値および最小値<sup>3)</sup>についても示した。また、0.2%耐力、引張強さについてはPNC材料強度基準暫定値<sup>4)</sup>を示した。0.2%耐力、引張強さは温度上昇とともに低下した。またS社とN社の受入材はほぼ耐力および引張強さが同等であった。SR処理材は耐力および引張強さとも受入材より若干低下するが、ORNL最低値ならびにPNC材料強度基準暫定値を満足している。伸びは400℃において室温より低い値を示し、500℃~600℃において再び増加する傾向を示し、ORNL最低値と平均値ではさまれるバンドの下限付近にプロットされた。絞りは400℃において室温と変わらない値を示すが500℃~600℃においては温度上昇とともに著しく増加する傾向を示し、ORNL平均値を上回っていた。伸び、絞りとも、SR材は受入材とほぼ同等の値を示した。

Fig. 6.1~6.2に試験後の破断状況と破面状況の一例を示す。破断位置はいずれも試験片中央部（A位置）であった。

### 4.2 シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験は0℃および20℃を含むフルカーブが得られるように試験温度を設定した。Fig. 7.1~7.3にはSR処理材および受入材のシャルピー吸収エネルギー、脆性破面率および横膨出量と温度の関係を示す。SR処理材のエネルギー遷移温度  $TrE: -63$  (℃)、破面遷移温度  $Trs: -51$ ℃であった。一方、受入材は $TrE: -77$ ℃、 $Trs: -69$ ℃であり、SR処理に伴う遷移温度の増加即ち、SR脆化を示した。また、横膨出量2mmの遷移温度はSR材で-40℃、受入材で-53℃であった。受入材、SR材とも、-40から-70℃程度の十分低い遷移温度を示しており、FBR温度範囲内においては十分な靱性を有していると判断される。

Fig. 8に試験後の破面状況の一例を示す。

### 4.3 破壊靱性試験結果

#### 4.3.1 破壊靱性予備試験結果

破壊靱性は一般に板厚の影響を受け、試験片板厚が厚くなると破壊靱性値は低下する傾向が認められる。そこで、高温破壊靱性値に対する板厚効果をみるために、受入材（N社）でサイドグループ無しの板厚5mmと20mmのCT試験片を用いて破壊靱性試験を実施した。試験温度は550℃と400℃の2条件とした。

Fig. 9.1~9.2に、550℃、板厚5mmにおけるR曲線法、除荷コンプライアンス法による結果を、またFig. 10.1~10.2には板厚20mmの結果をオーバープロットした結果を示す。データ点は鈍化直線上に位置しており、5mm、20mm材とも550℃でサイドグループ無しの条件では靱性値を決定することが出来なかった。

Fig. 11には400℃における結果を示す。同結果とFig. 19.2およびFig. 20.2に示す板厚20mmの結果を比較すると、得られる $J_a$ 値は板厚20mmに対し412~551kJ/m<sup>2</sup>（除荷コンプライアンス法）、513kJ/m<sup>2</sup>（R曲線法）、板厚5mmに対して530kJ/m<sup>2</sup>（除荷コンプライアンス法）となり板厚の増大とともに $J_a$ 値が低下し、やや板厚効果が認められた（Fig. 12参照）。これは主として、板厚5mmの平面応力状態と板厚20mmの平面ひずみ状態の差に起因していると考えられる。

次の予備試験として、サイドグループ効果を調べるためにサイドグループ無しの試験片とサイドグループ付き試験片を用いてR曲線法による破壊靱性試験を行い、試験結果を比較した。供試材は受入材（S社）である。Fig. 13.1~13.5はサイドグループ無しのもののR曲線を示す。Fig. 14.1~14.5はサイドグループ付のもののR曲線と鈍化直線をまとめたものを示す。Fig. 15にFig. 13とFig. 14の結果をまとめて比較する。またFig. 16にサイドグループ無しと有りのものの $J$ 値と温度との関係を示す。500℃~600℃では、サイドグループ無しでは、R曲線や $J_a$ 値を決定することができなかった。サイドグループ無しでもR曲線を決定することのできたRTと400℃のデータと比較すると、サイドグループ無しのものはサイドグループ有りに比較してR曲線の勾配が大きく、また $J_a$ 値も高くなる傾向を示している。Fig. 17にサイドグループ無しの、またFig. 18にサイドグループ有りの試験片破面の一例を示す。サイドグループ付の試験片では、き裂は板厚方向にほぼ均一に進展しているのに対しサイドグループ無

しの試験片でのき裂の進展は板厚中央部で著しく優先しており試験片表面の平面応力の影響を大きく受けていることがわかる。

以上の予備試験結果から、①サイドグループ無しでは5-20mmの板厚では破壊靱性が板厚に依存しており、平面ひずみ破壊靱性 $J_{Ic}$ をサイドグループ無しで得るためには、20mm以上の板厚の試験片が必要である。②板厚20mm、サイドグループ無しの条件ではR曲線を決定できない場合がある。③板厚20mmであっても、サイドグループ有りでは試験した全ての温度でR曲線および $J_a$ 値を決定することができる。④破面観察の結果、サイドグループ有りではき裂は板厚方向に均一に進展しており、平面ひずみ状態に近い応力-ひずみ状態を示していることがわかった。以上に示した予備的検討および次節に示す初年度の本試験結果から、2年度以降の破壊靱性試験は全てサイドグループ有りの試験片を用いて行うこととした。

#### 4.3.2 破壊靱性本試験結果

受入材(N社)の板厚20mm、サイドグループ無しのCT試験片の破壊靱性本試験結果をR曲線法で行ったものをFig. 19.1~19.5に除荷コンプライアンス法で行ったものをFig. 20.1~20.5に示す。 $J_a$ 値を求める方法として、ASTM E813では $\Delta a = 0.15, 1.5$ mmを通りかつ鈍化直線に平行なオフセットラインに挟まれる領域に含まれるデータ点を直線近似し、その近似した線と鈍化直線との交点の値を $J_a$ 値としている。今回の試験材料をサイドグループ無しの試験片を用いて試験した場合、400℃でR曲線法を用いた場合を除くと、ASTM E813にもとずいてR曲線を決定することはできなかった(Fig. 19, Fig. 20中の一部には、ASTM E813中のオフセットライン及びデータ点数に関する制約を無視して強引にR曲線をひいた結果を示している)。R曲線を正式に決定できなかった原因は、板厚の不足にあると考えられる。ASTM E813の制約を無視して求めたデータ点をも含め、 $J_a$ と温度との関係をFig. 21に示す。

試験後の破面観察を行ったところ、 $J$ 値が鈍化直線上に位置する場合にも、破面上に安定き裂の成長が認められる場合があった。そこで、破面上に安定き裂が観察されなかった試験片から計算される $J$ 値と安定き裂が観察された試験片から計算される $J$ 値との間に安定き裂発生点に相当する $J$ 値が存在すると仮定して $J_a$ 値を求めた結果をTable 8に示す。また破面観察より求めた $J$ 値と温度との関係をFig. 22に示す。求



められた  $J_a$  値の温度依存性の傾向は R 曲線法、除荷コンプライアンス法で得られた結果 (Fig. 21) と類似しているが、値はかなり低めに示されている。

SR 処理材 (S 社) の板厚 20mm のサイドグループ付 CT 試験片の破壊靱性本試験を R 曲線法で行い、ASTM E813-81 にもとずいて整理した結果を Fig. 23.1~23.5 に、各温度の鈍化直線と得られた R 直線をまとめたものを Fig. 23.6 に示す。また、除荷コンプライアンス法で行った結果を Fig. 24.1~24.5 に、R 曲線法で求めた  $J_a$  値と除荷コンプライアンス法で求めた  $J_a$  値と温度との関係を Fig. 24.6 に示す。試験を行った 4 温度の中では  $J_a$  値は 400℃ で最低値を示した。これは、靱脆性に起因すると考えられる。400℃ 以上では温度上昇とともに  $J_a$  値が高くなる傾向がみられた。得られた  $J_a$  値が  $J_{Ic}$  として有効かどうか判定した結果、全ての  $J_a$  値は  $J_{Ic}$  としての判定条件を満足しなかった。有効性の判定式は次の式により判定した。

$$b_0 \geq 25 \cdot J_a / \sigma_{rs}$$

$$B, B(\text{net}) \geq 25 \cdot J_a / \sigma_{rs}$$

$$dJ / da \leq \sigma_{rs}$$

$$K_r \geq 0.6 \{ E \cdot J_a / (1 - r^2) \times (\sigma_{rs1} / \sigma_{rs2}) \}^{0.5}$$

Fig. 25 に試験片の破面状況を示す。サイドグループを付けるとき裂は板厚方向にほぼ均一に進展しており、試験片表面域の平面応力の影響がかなり少なくなっていると判断される。

除荷コンプライアンス法による試験では、Fig. 24.3(c) や Fig. 24.4(c) に見られるように、負荷荷重の増加に伴ってき裂長さが減少する測定結果が一部に見られた。この原因として、応力緩和、平面応力の影響 (板厚方向収縮)、試験機の剛性低下、変位計のナイフエッジの接触状態等が考えられる。著しくマイナスに移行した測定点については削除してデータ処理を行い  $J - \Delta a$  曲線を求めた。応力緩和は温度が高くなる程著しく 600℃ では除荷荷重点到達後、除荷を開始するまでの 30 秒間に荷重が 10% 以上低下した。そのため除荷量を通常 10% 程度であるのに対し 20%~25% に設定して試験を行った。今回の実験により、試験片形状寸法、応力緩和、負荷繰返し等が除荷コンプライアンス法に及ぼす影響を今後把握していく必要のあることが明らかとなった。

4.3.2で求められた $dJ/da$ に基づき受入材（N社）とSR材（S社）のティアリングモジュラス（ $T_{mat}$ ）を求めた。 $T_{mat}$ と温度との関係をFig. 26に示す。受入材ではサイドグループ無しで試験したため、Fig. 19—Fig. 20からもわかるように、R曲線が正確に決定できておらず、従って図中白抜のプロットで示す受入材のティアリングモジュラスはいささか信頼性に欠けると考えられる。一方比較的信頼性が高いと考えられるSR材（サイドグループ有り）では、室温から400℃に温度が上がるといったんティアリングモジュラスが低下するが、更に500—600℃に温度が上昇するに従ってティアリングモジュラスが再び増加する傾向を示している。

## 5. まとめ

Mod. 9Cr-1Mo鋼の受入材およびSR処理材について高温引張試験、シャルピー衝撃試験、高温破壊靱性試験を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 引張特性については、0.2%耐力および引張強さともPNC材料強度基準暫定値ならびにORNL最低値を満足しており、またORNL平均値とほぼ同等とみなせ、所定の強度を有することがわかった。
- (2) 衝撃特性については、受入材、SR材とも-40℃から-70℃程度の十分低い遷移温度を示しており、FBR温度範囲内においては十分な靱性を有していると判断される。
- (3) 本試験で用いたMod. 9Cr-1Moの破壊靱性試験を板厚20mmで実施する場合には、サイドグループ付き試験片を使用する必要があることが明らかとなった。
- (4) SR材の破壊靱性試験を室温から600℃の範囲で試験した結果、400℃で最も低い靱性値を示すが、400℃においても延性き裂の発生限界を表すJ積分J<sub>0</sub>値は350 J/m<sup>2</sup>以上と十分高い靱性を示すことが分かった。

## 参考文献

- 1) P. C. Paris, H. Tada, A. Zahoor and H. Ernst, "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth", ASTM STP 668, J. D. Landes, J. A. Begley and G. A. Clarke, Eds., American Society for Testing and Materials, 1979, pp5-36.
- 2) J. W. Hutchinson and P. C. Paris, "Stability Analysis of J-controlled Crack Growth", ASTM STP 668, J. D. Landes, J. A. Begley and G. A. Clarke, Eds., American Society for Testing and Materials, 1979, pp37-64.
- 3) "Modified 9Cr-1Mo steel : Technical Program and Data Package for Use in ASME Sections I and VIII Design Analysis", ORNL Technology Transfer Meeting : A New Chromium-Molybdenum Steel for Commercial Applications, 1982.
- 4) 高速増殖炉高温構造設計基準材料強度基準等の高度化に関する検討報告 ( I ) , 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SN9410 88-105, 1988.

Table 1 Test Plan

鋼種	試験 (℃) 温度	引 張					合計	シャルピー RT	破 壊 靱 性					合計	
		RT	400	500	550	600			RT	400	500	550	600		
Mod. 9Cr-1Mo鋼 S社	SR	2	2	2	2	2	10	15	12	12	12	12	12	12	60
	時効	2	-	-	2	-	4	15	12	-	-	12	-	24	
	溶金	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
	HAZ	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
Mod. 9Cr-1Mo鋼 N社	SR	2	2	2	2	2	10	15	12	12	12	12	12	60	
	時効	2	-	-	2	-	4	15	12	-	-	12	-	24	
	溶金	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
	HAZ	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
9Cr-2Mo鋼 S社	SR	2	2	2	2	2	10	15	12	12	12	12	12	60	
	時効	2	-	-	2	-	4	15	12	-	-	12	-	24	
	溶金	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
	HAZ	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
9Cr-2Mo鋼 N社	SR	2	2	2	2	2	10	15	12	12	12	12	12	60	
	時効	2	-	-	2	-	4	15	12	-	-	12	-	24	
	溶金	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
	HAZ	(2)	-	-	(2)	-	(4)	(15)	(12)	-	-	(12)	-	(24)	
SUS304鋼 N社	受け入れまま	2	-	-	2	-	4	15	12	-	-	12	-	24	
2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> Cr-1Mo N社	SR	2	-	2	-	-	4	15	12	-	12	-	-	24	

表内の数字は試験片本数を示す。

初年度   
  2年度   
  3年度

Table 2 Chemical Compositions (cal%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Al	N
ASTM · A387 規格値	0.08 / 0.12	0.20 / 0.50	0.30 / 0.60	≤ 0.020	≤ 0.010	8.00 / 9.50	≤ 0.40	0.85 / 1.05	0.18 / 0.25	0.06 / 0.10	≤ 0.04	0.030 / 0.070
N社製	0.09	0.24	0.44	0.016	0.001	8.15	0.14	0.93	0.21	0.06	0.019	0.033
S社製	0.09	0.34	0.46	0.005	0.004	8.43	0.09	0.90	0.20	0.079	0.010	0.062

Table 3 Tensile test condition

鋼種	温度 (℃)				
	RT	400	500	550	600
S社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	2	2	2	2	2
N社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	2	2	2	2	2

(表内数字は本数)

試験片本数

2鋼種×5条件×各2本=20本

Table 4 Charpy impact test condition

S社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	15
N社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	15

(表内数字は本数)

Table 5 Fracture toughness pre-test condition

鋼 種	温 度	板 厚
N社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	1条件	2条件

試験片本数

1条件当りの試験片使用内訳

R曲線法 8本

除荷コンプライアンス法 2本

計 10本

2条件×10本=20本

Table 6 Fracture toughness test condition

鋼 種	温度 (°C)	RT	400	500	550	600
	S社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	10	10	10	10	10
N社製 Mod. 9Cr-1Mo鋼	10	10	10	10	10	

(表内数字は本数)

試験片本数

1条件当りの試験片使用内訳

R曲線法 8本

除荷コンプライアンス法 2本

計 10本

2鋼種×5条件×10本=100本



Table 7 J value

温度 (℃)	方法	J 値 (K J/m <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (MPa)	25 J / $\sigma_y$ (mm)	dJ/da (MPa)	判定
28	Rカーブ法	965	629.1	38.3	541.2	J <sub>a</sub>
	コンプライアンス法	1156		45.9	218.1	J <sub>a</sub>
		1156		45.9	237.5	J <sub>a</sub>
		1106		44.0	130.7	J <sub>a</sub>
		448		19.4	943.5	J <sub>a</sub> *
400	Rカーブ法	513	519.8	24.7	442.4	J <sub>a</sub>
	コンプライアンス法	551		26.5	435.7	J <sub>a</sub>
		460		22.1	633.8	J <sub>a</sub>
		412		19.8	411.1	J <sub>a</sub>
500	Rカーブ法	717	459.9	39.0	728.5	J <sub>a</sub>
	コンプライアンス法	832		45.2	475.8	J <sub>a</sub>
		548		29.8	787.9	J <sub>a</sub>
550	Rカーブ法	—	409.9	—	—	—
	コンプライアンス法	—		—	—	—
600	Rカーブ法	—	327.5	—	—	—
	コンプライアンス法	—		—	—	—

\* J<sub>ic</sub>値と判断するにはデータ点が不十分

Table 8 J value calculated from fractgraph

温度 (℃)	破面観察から求めた J 値 (K Joules/m <sup>2</sup> )
28	130.4以上 350.7未満
400	110.1 285.0
500	92.8 249.5
550	188.9 319.2
600	207.7 395.3

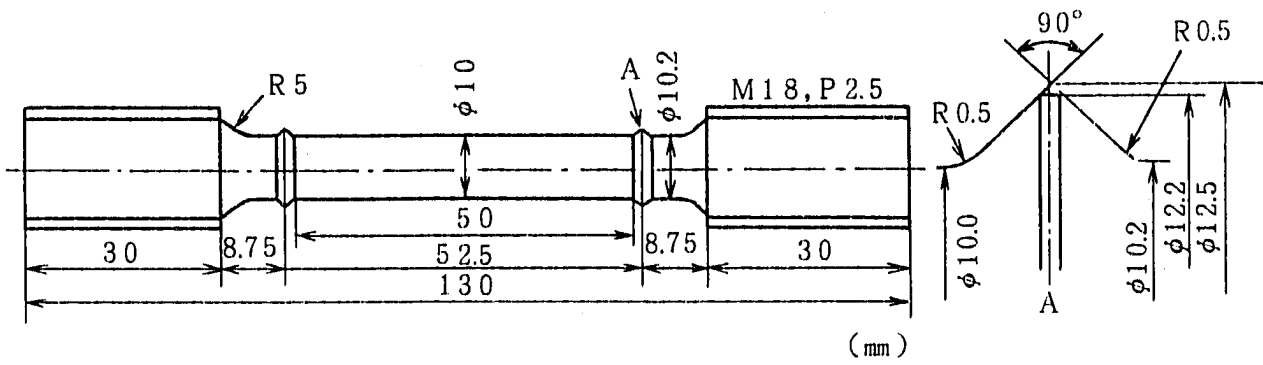


Fig. 1.1 High temperature tensile test specimen (N.Co.Ltd)

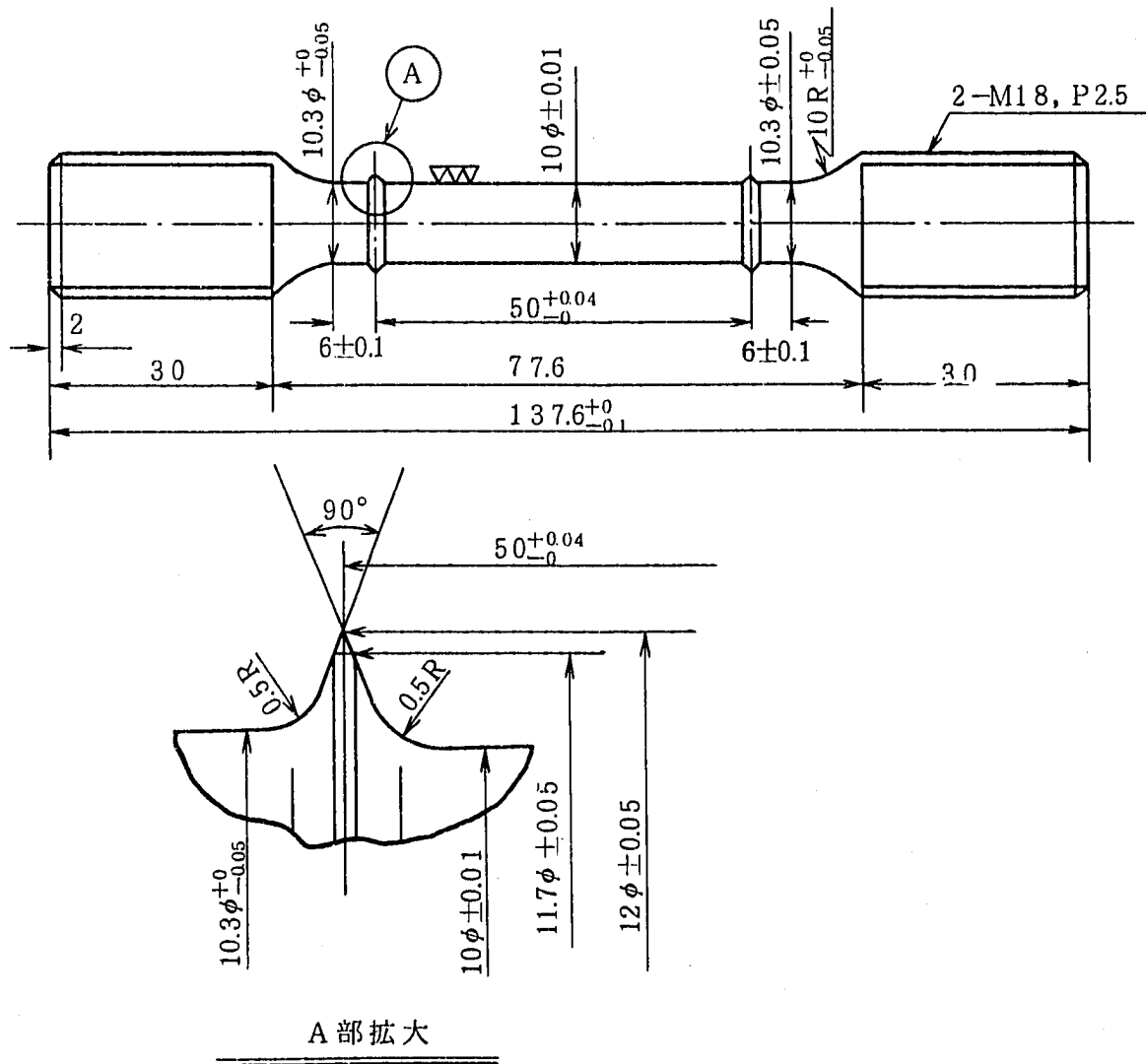


Fig. 1.2 High temperature tensile test specimen (S.Co.Ltd)

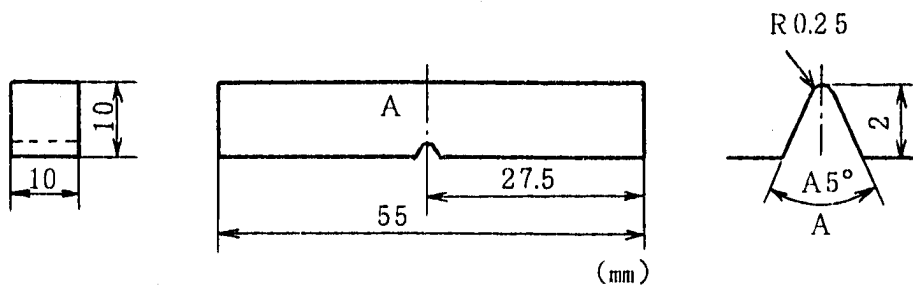


Fig. 2.1 Charpy impact test specimen (N. Co. Ltd)

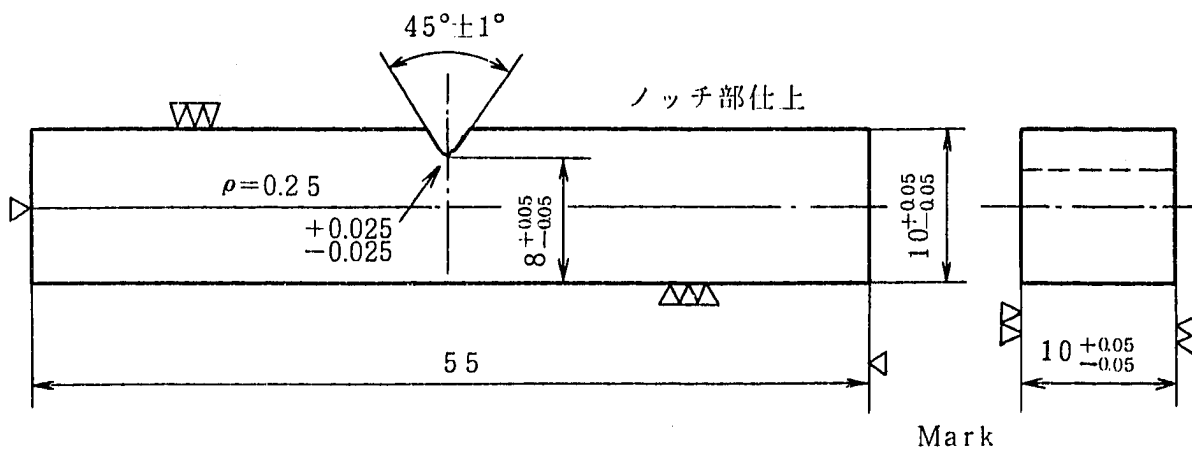


Fig. 2.2 Charpy impact test specimen (S. Co. Ltd)

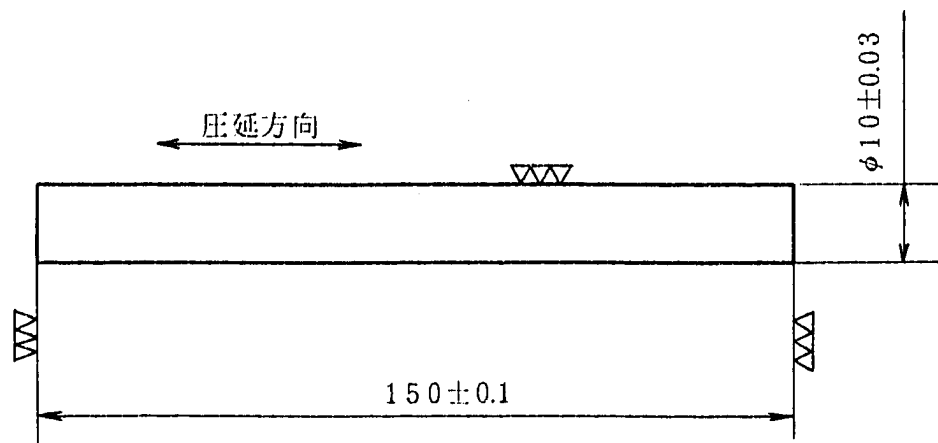


Fig.3 Test specimen of Young's modulus measurement (S.Co.Ltd)

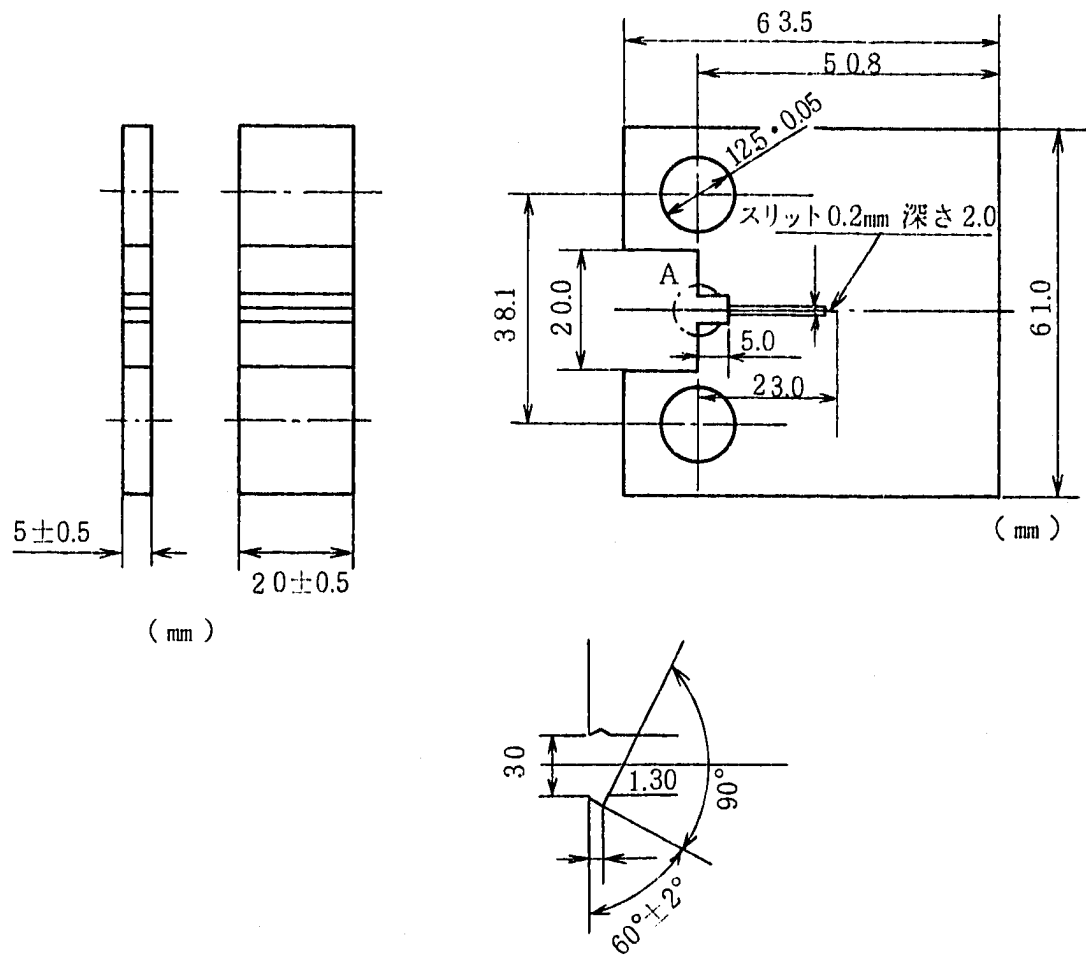


Fig. 4.1 Fracture toughness test specimen (N.Co.Ltd)

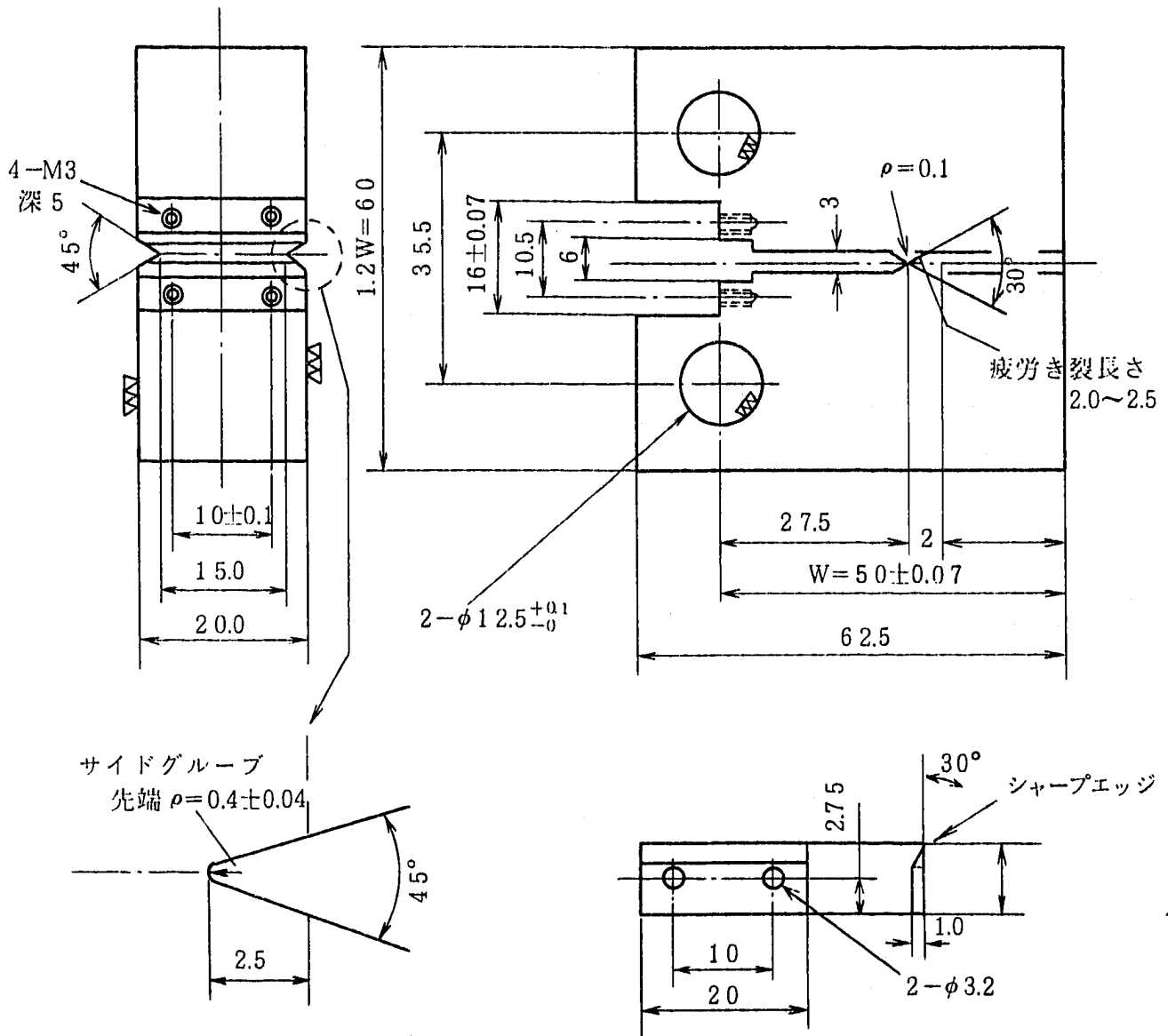


Fig. 4.2 Fracture toughness test specimen (side grooved) (S. Co. Ltd)

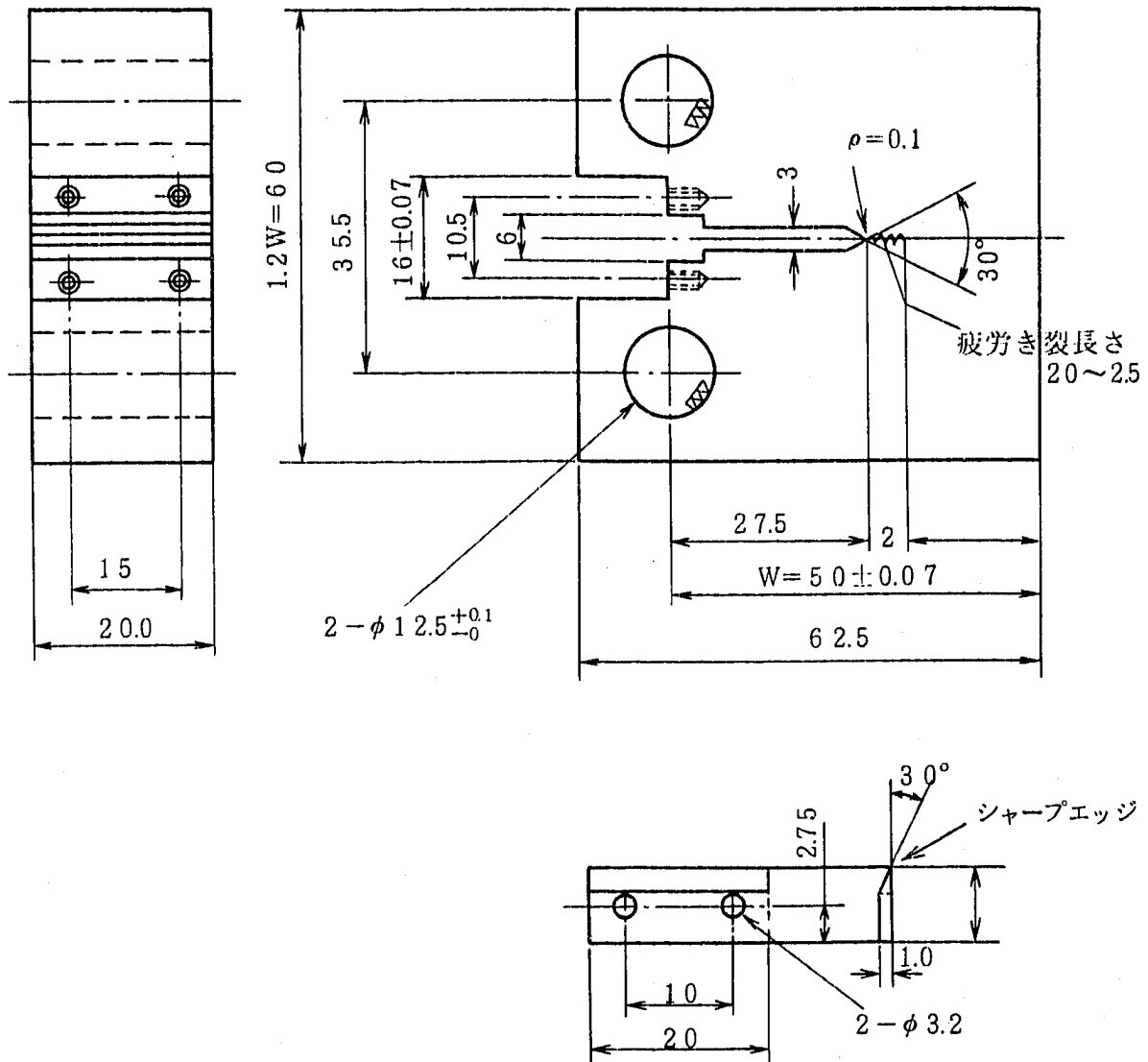


Fig. 4.3 Fracture toughness test specimen (not side grooved) (S.Co.Ltd)

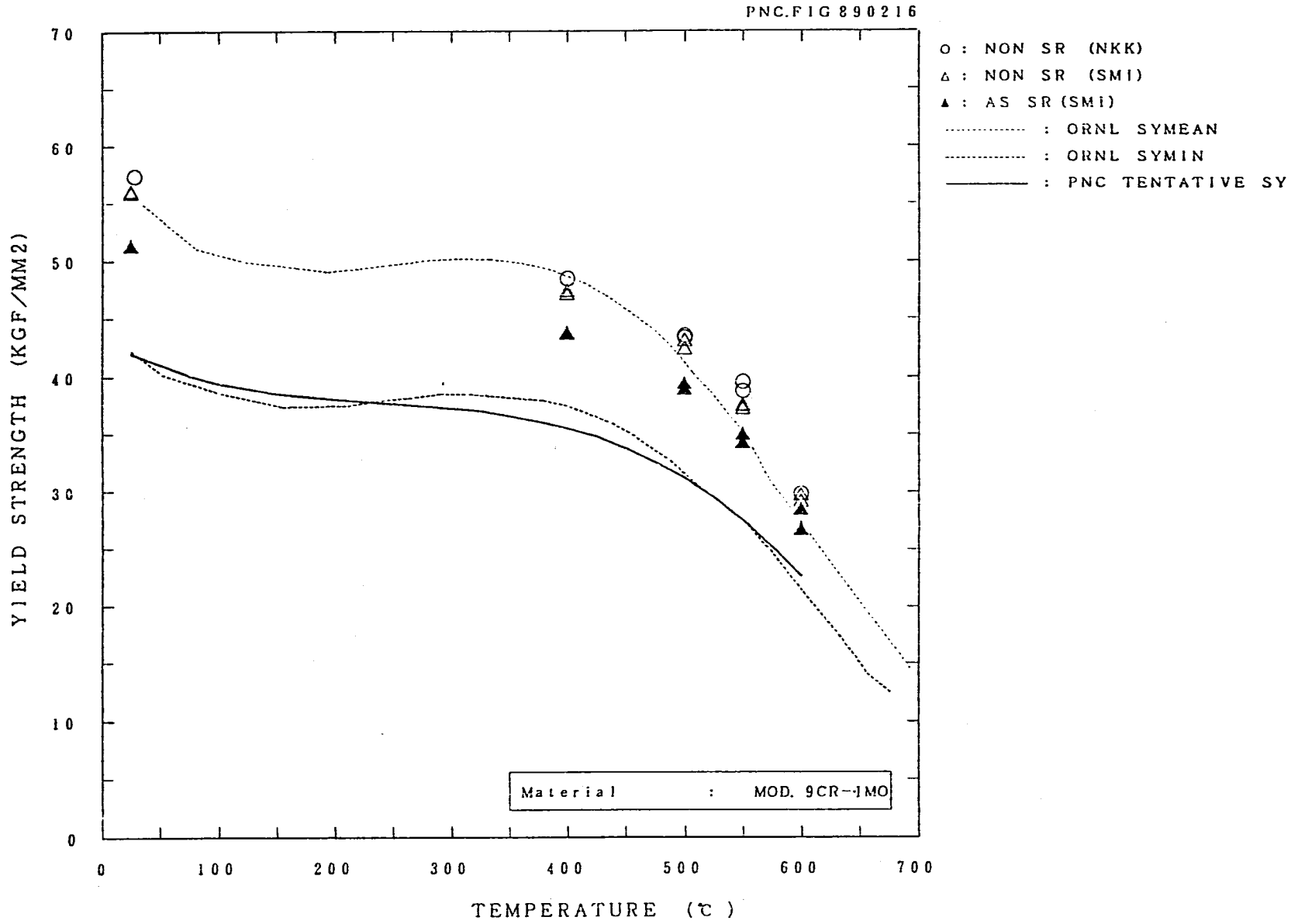


Fig.5.1 Yield strength of Mod.9Cr-1Mo steel



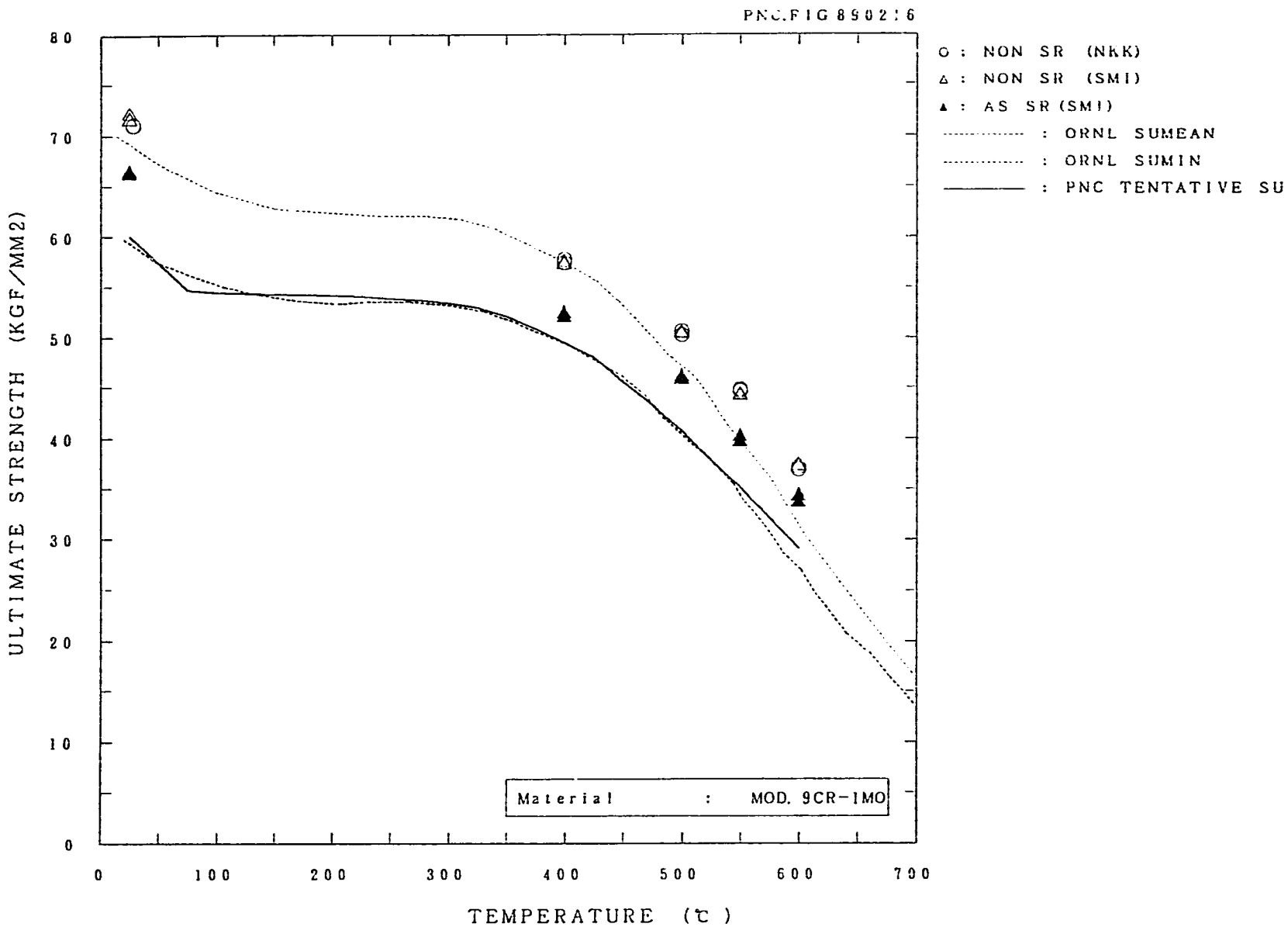


Fig. 5.2 Ultimate strength of Mod. 9Cr-1Mo steel

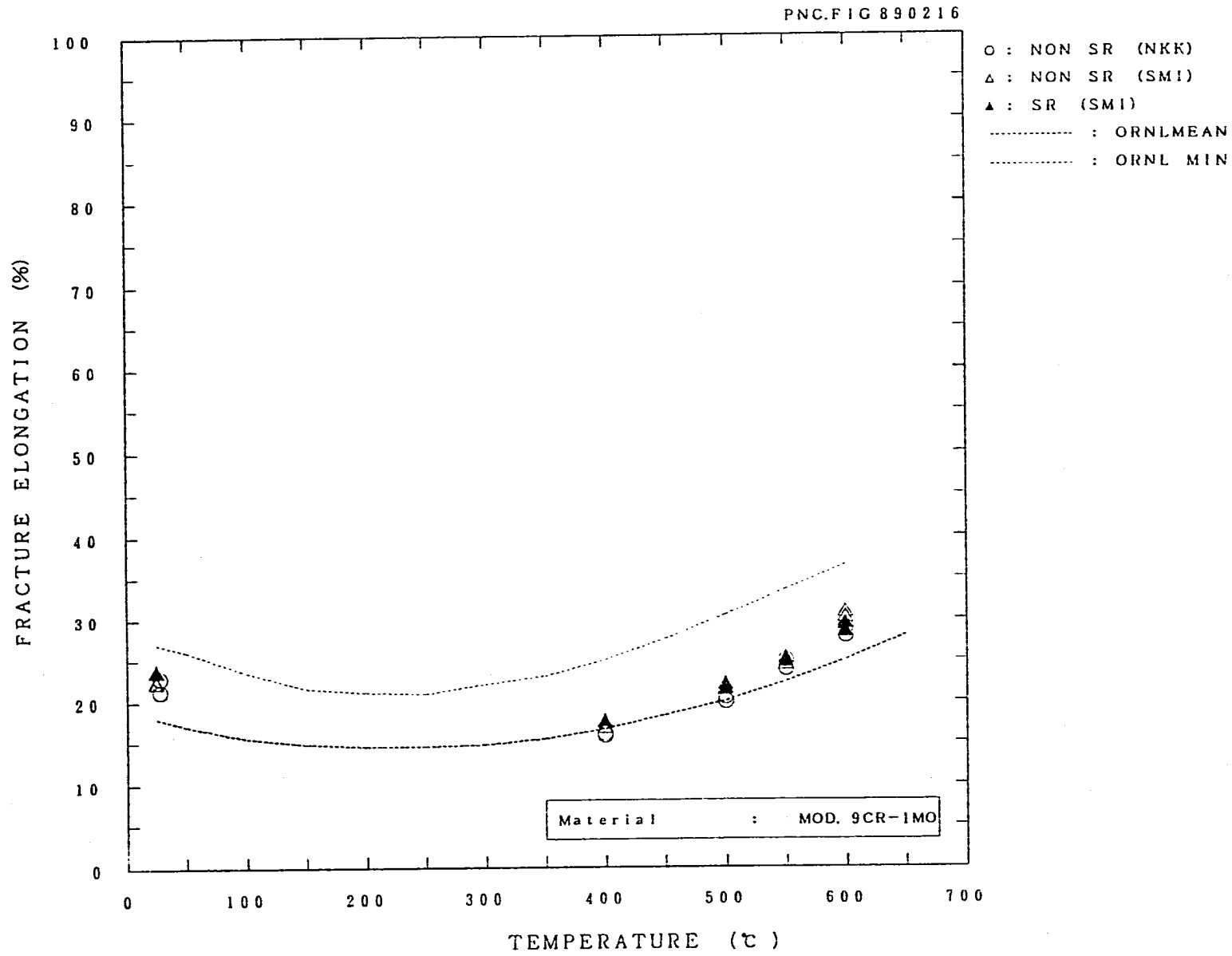


Fig. 5.3 Fracture elongation of Mod. 9Cr-1Mo steel

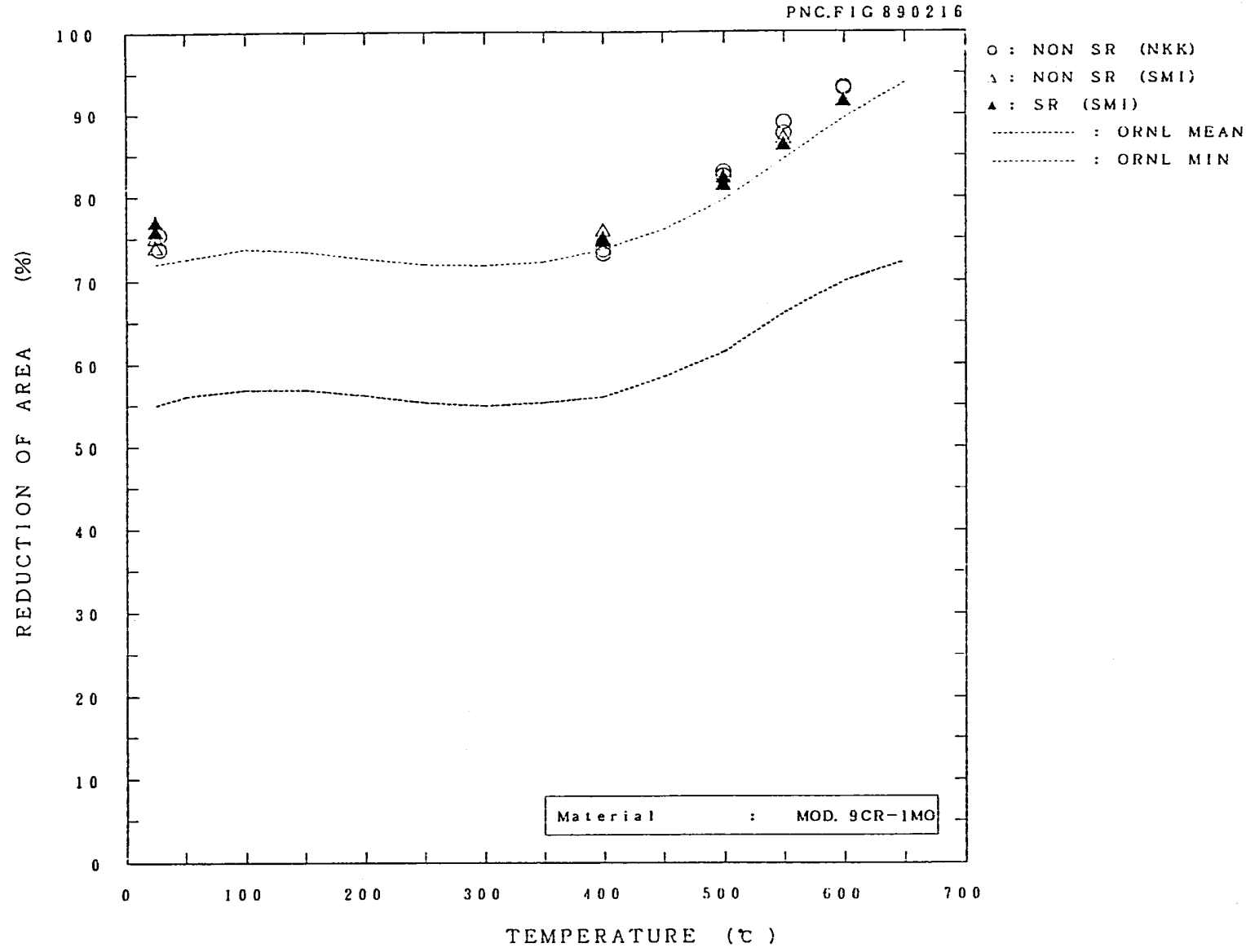


Fig. 5.4 Reduction of area of Mod. 9Cr 1Mo steel

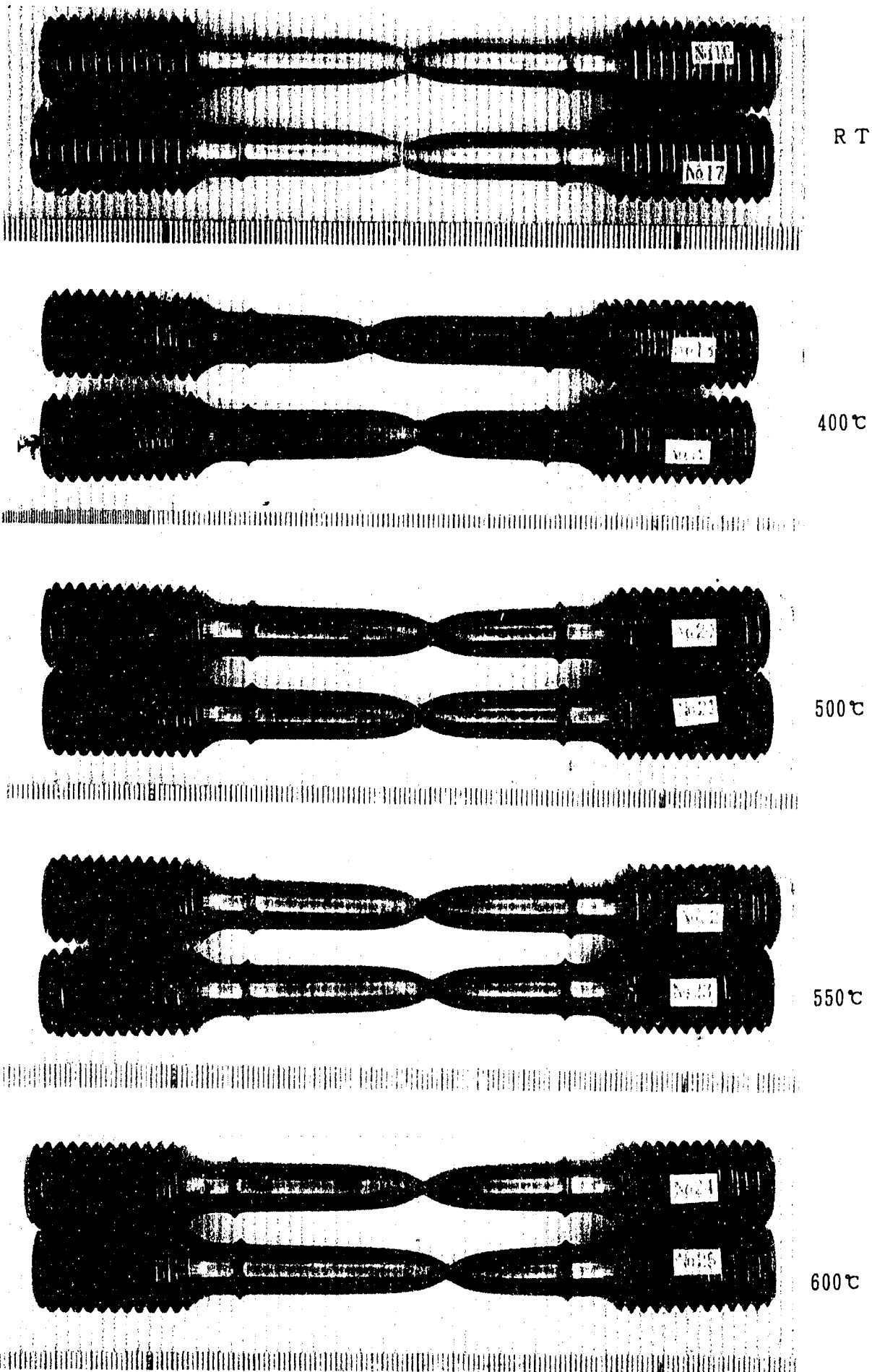


Fig. 6.1 Appearances of post-tensioned tensile test specimen (SR material)

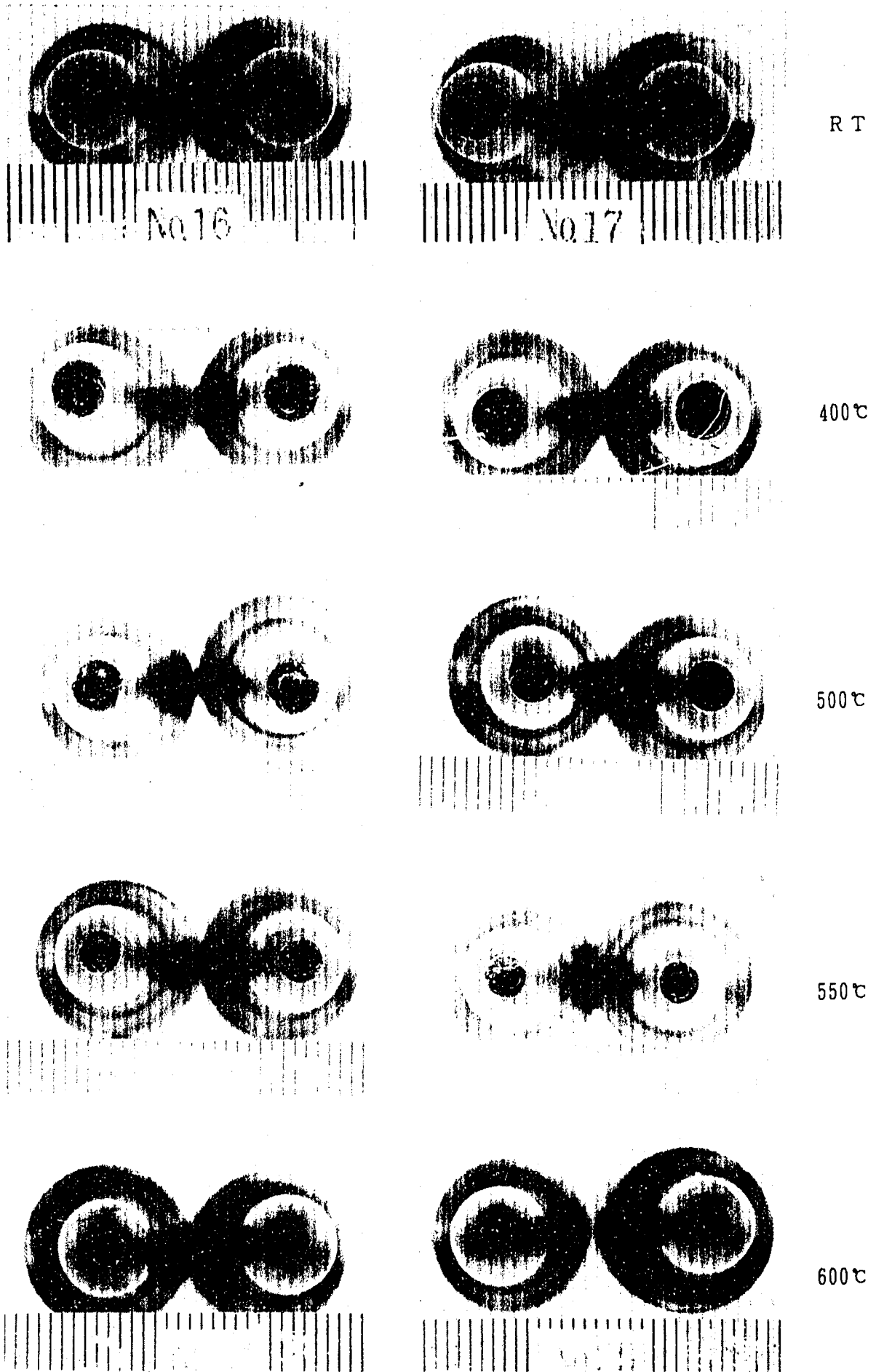


Fig.6.2 Appearances of post-tensioned tensile test specimen (SR material)

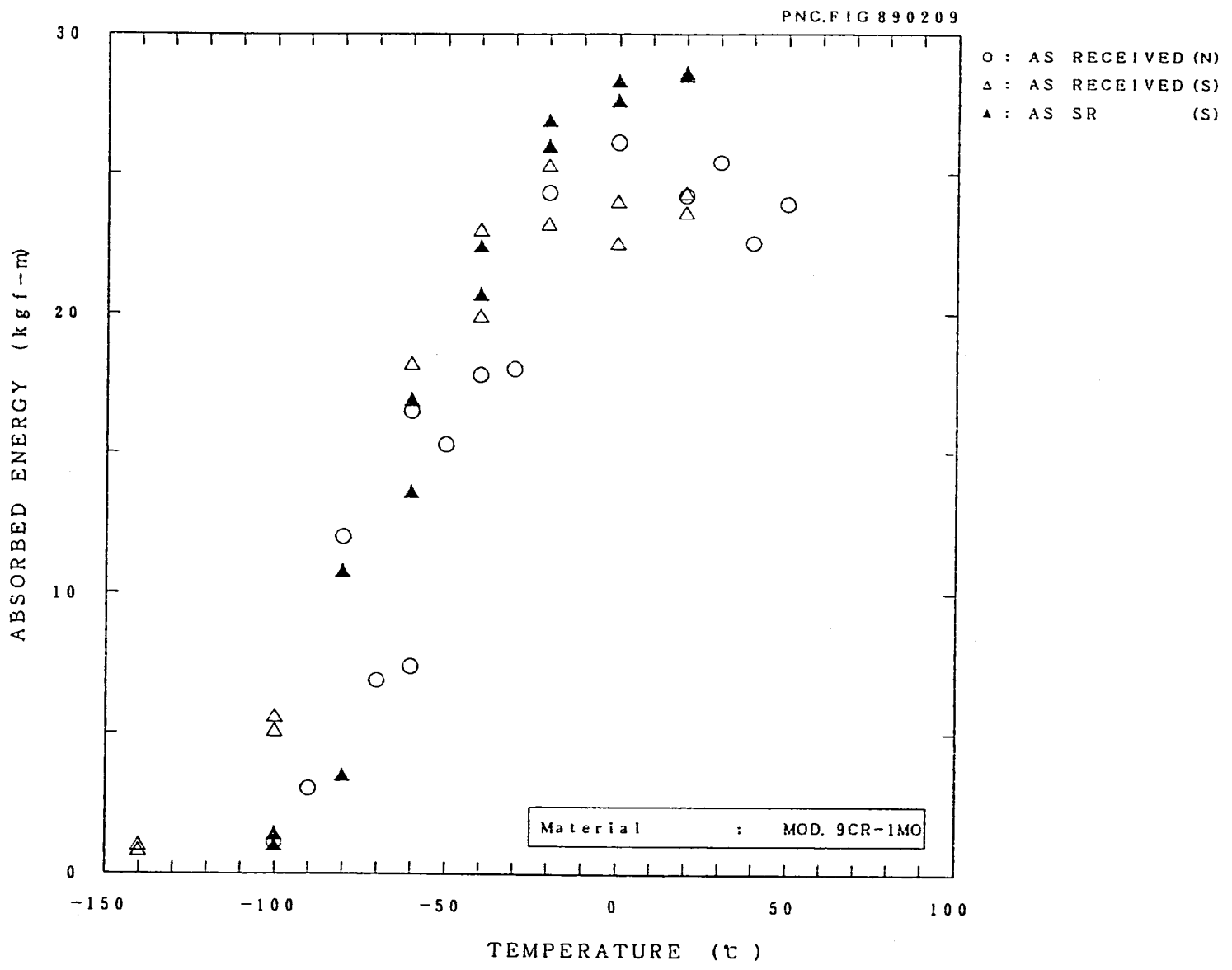


Fig. 7.1 Absorbed energy of Mod. 9Cr-1Mo steel

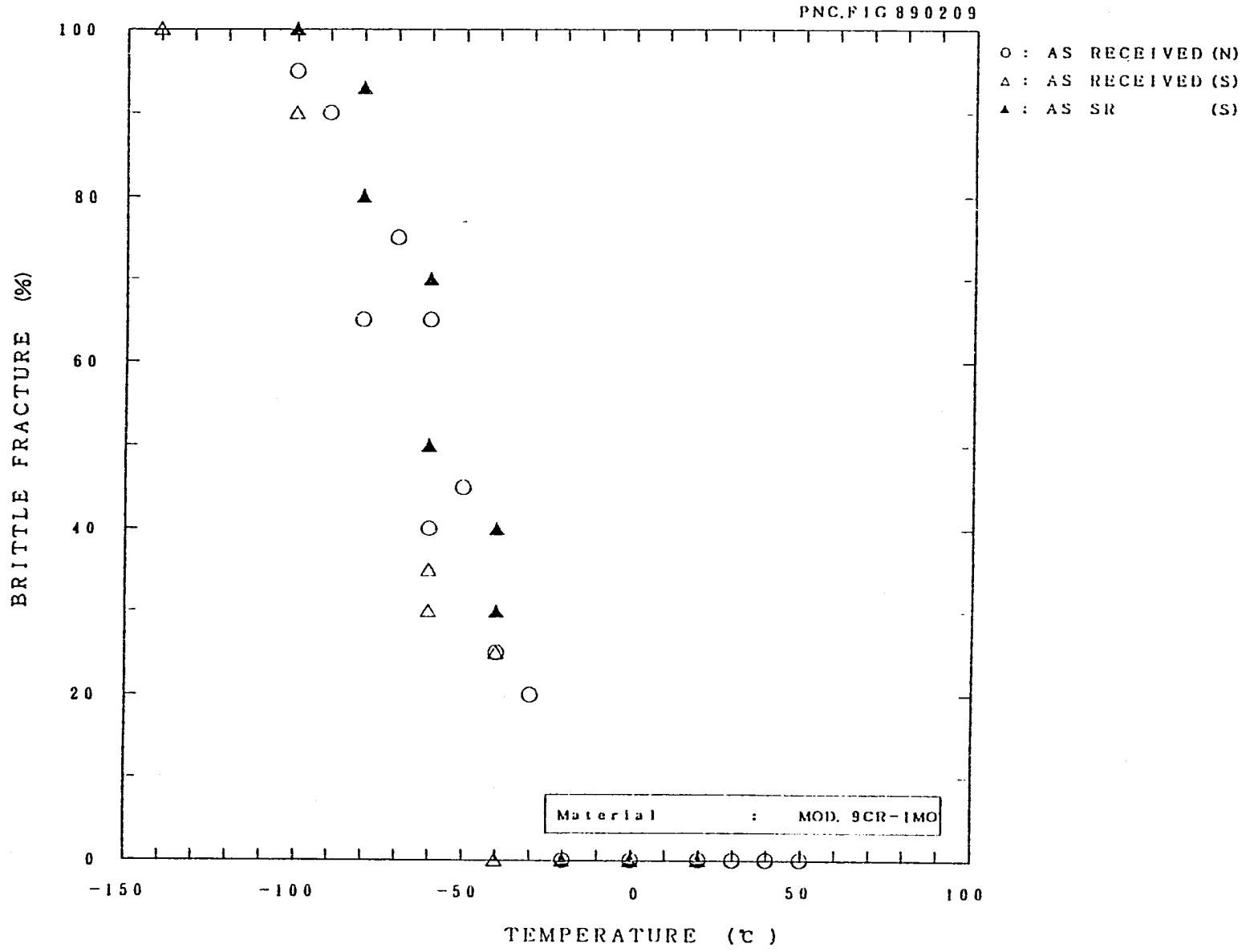


Fig. 7.2 Brittle fracture of Mod. 9Cr-1Mo steel

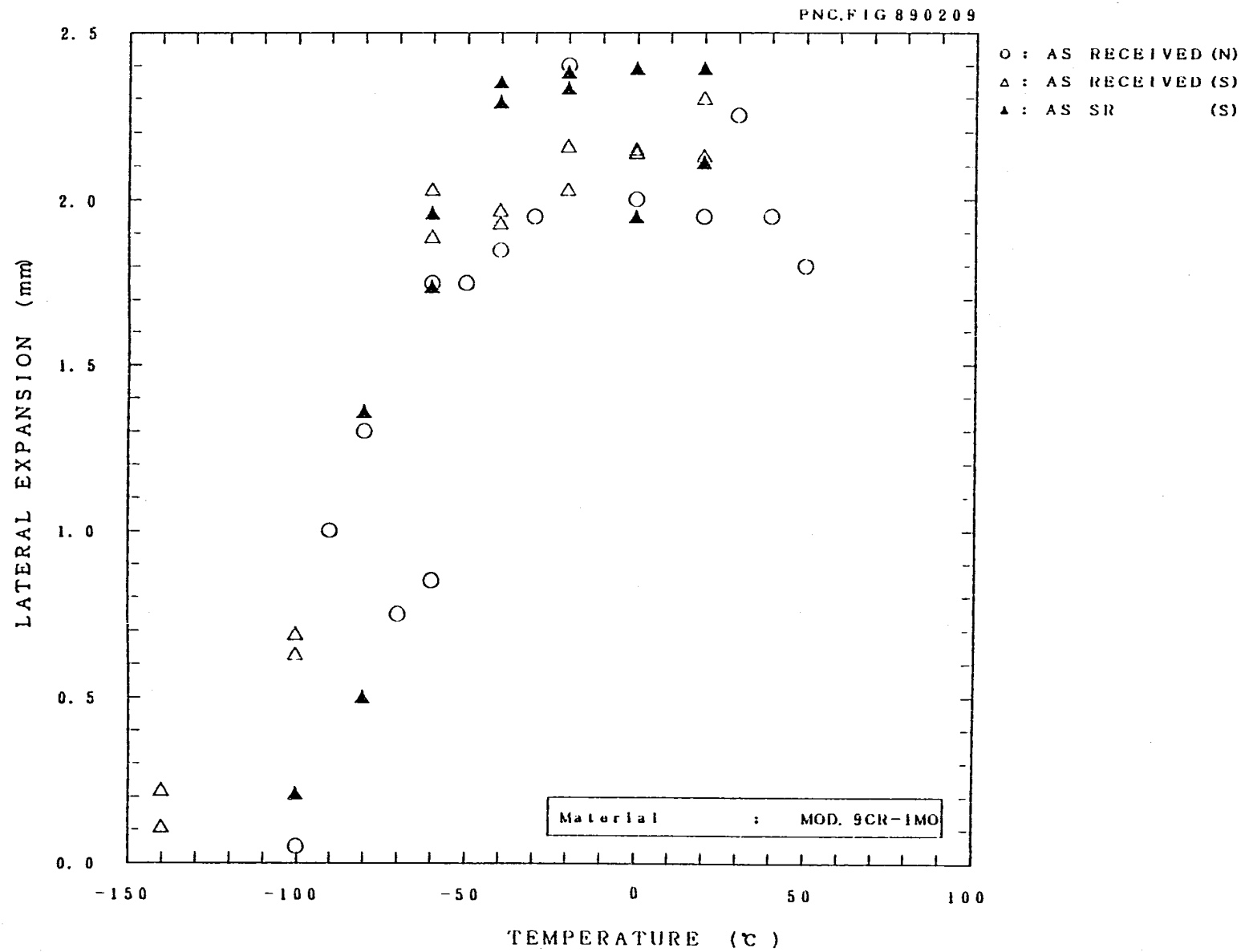


Fig. 7.3 Lateral expansion of Mod.9Cr-1Mo steel



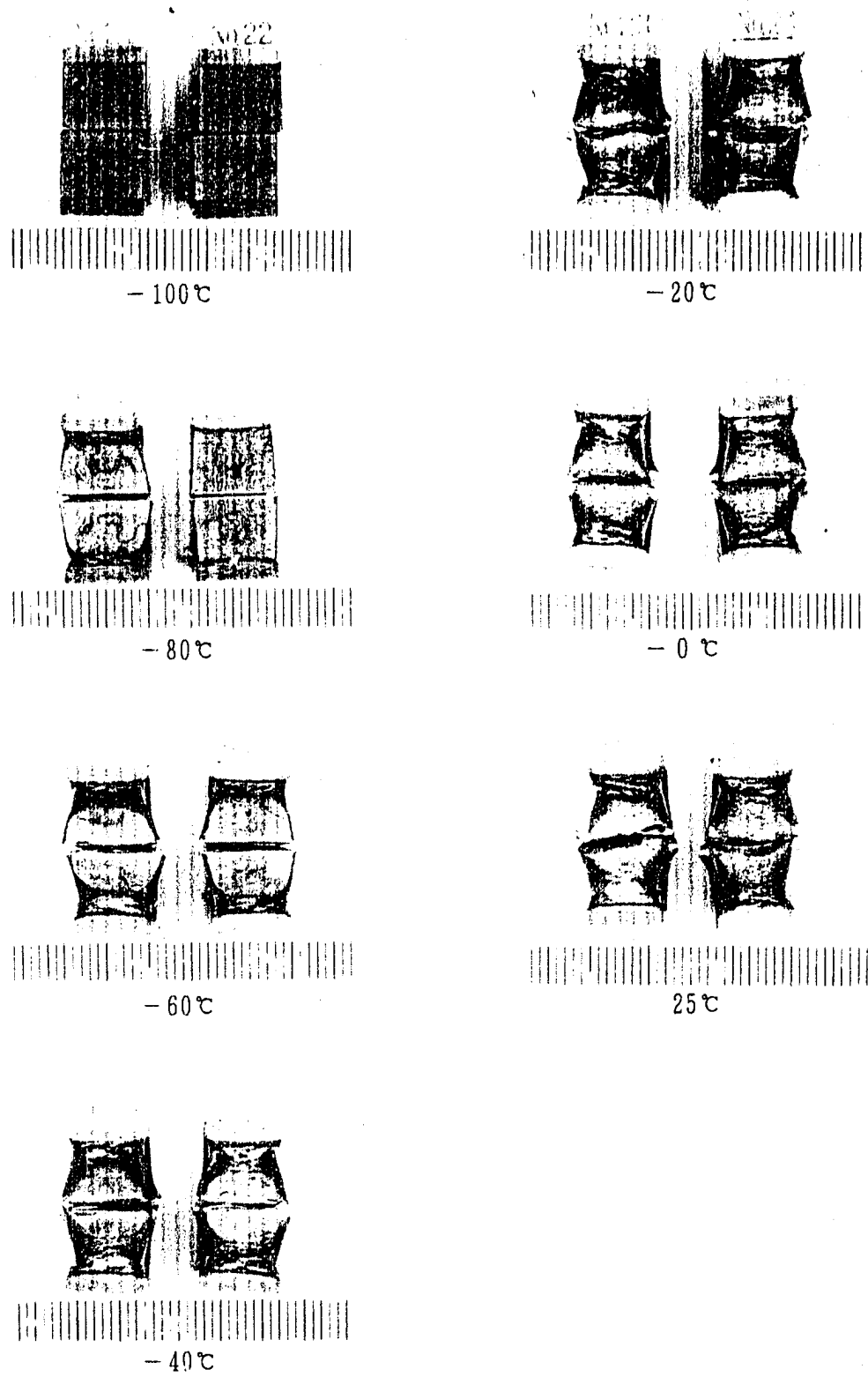


Fig. 8 Appearances of test specimen after Charpy impact test (SR material)

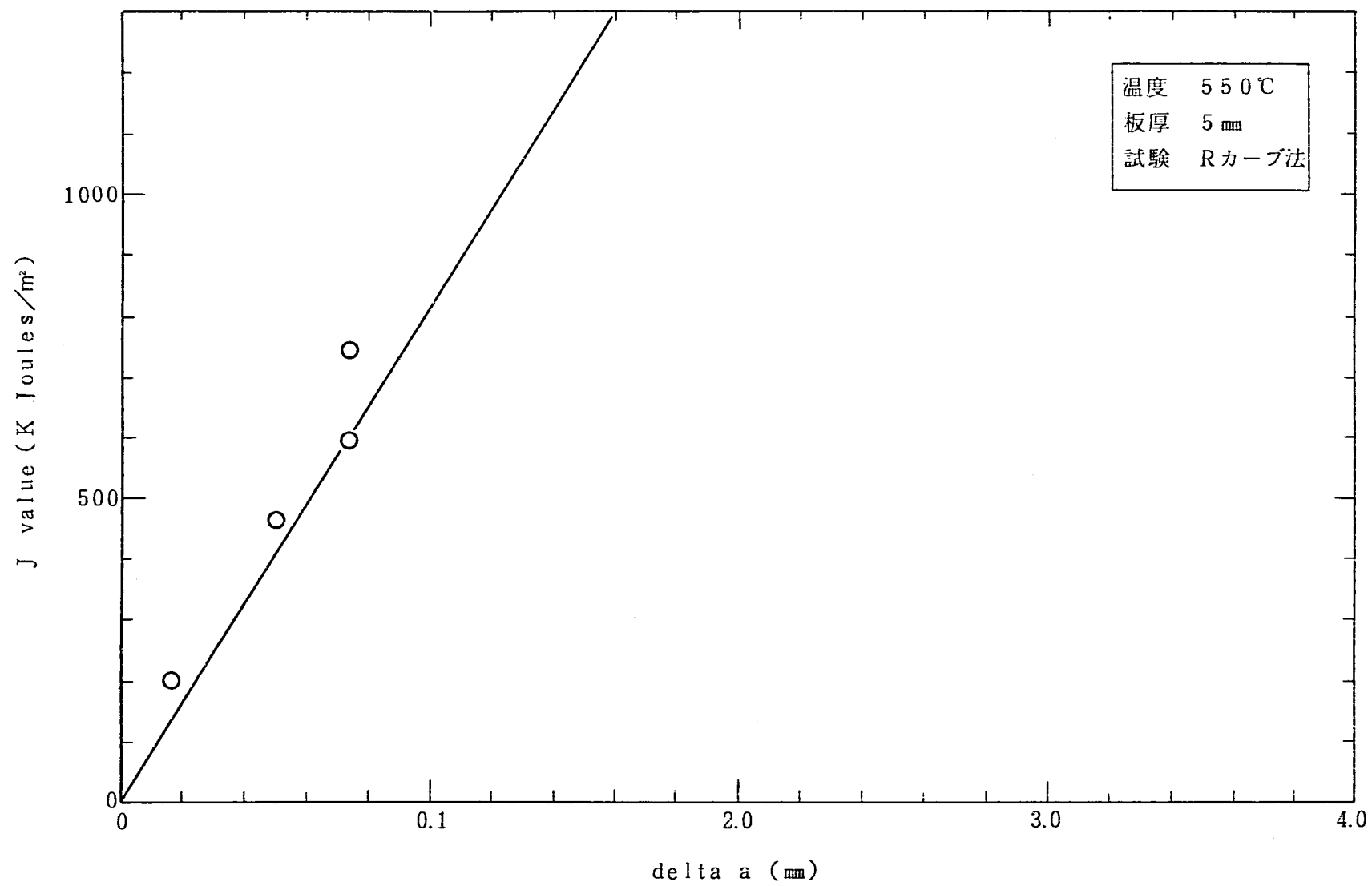


Fig.9.1 Relationships between J value of  $\Delta a$   
( $t = 5 \text{ mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , R-curve method)

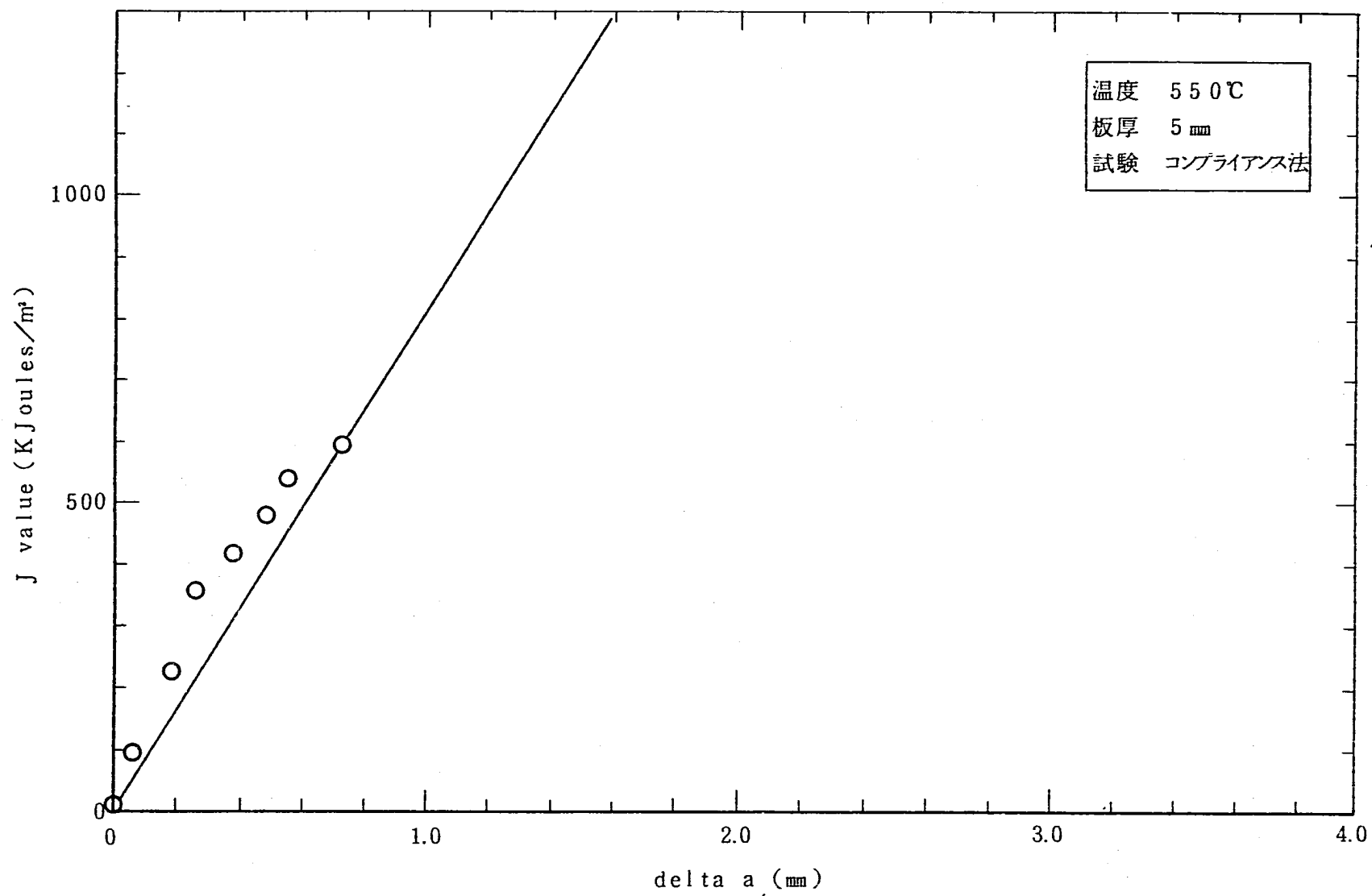


Fig.9.2 Relationships between J value of  $\Delta a$   
( $t = 5 \text{ mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , unloading compliance method)

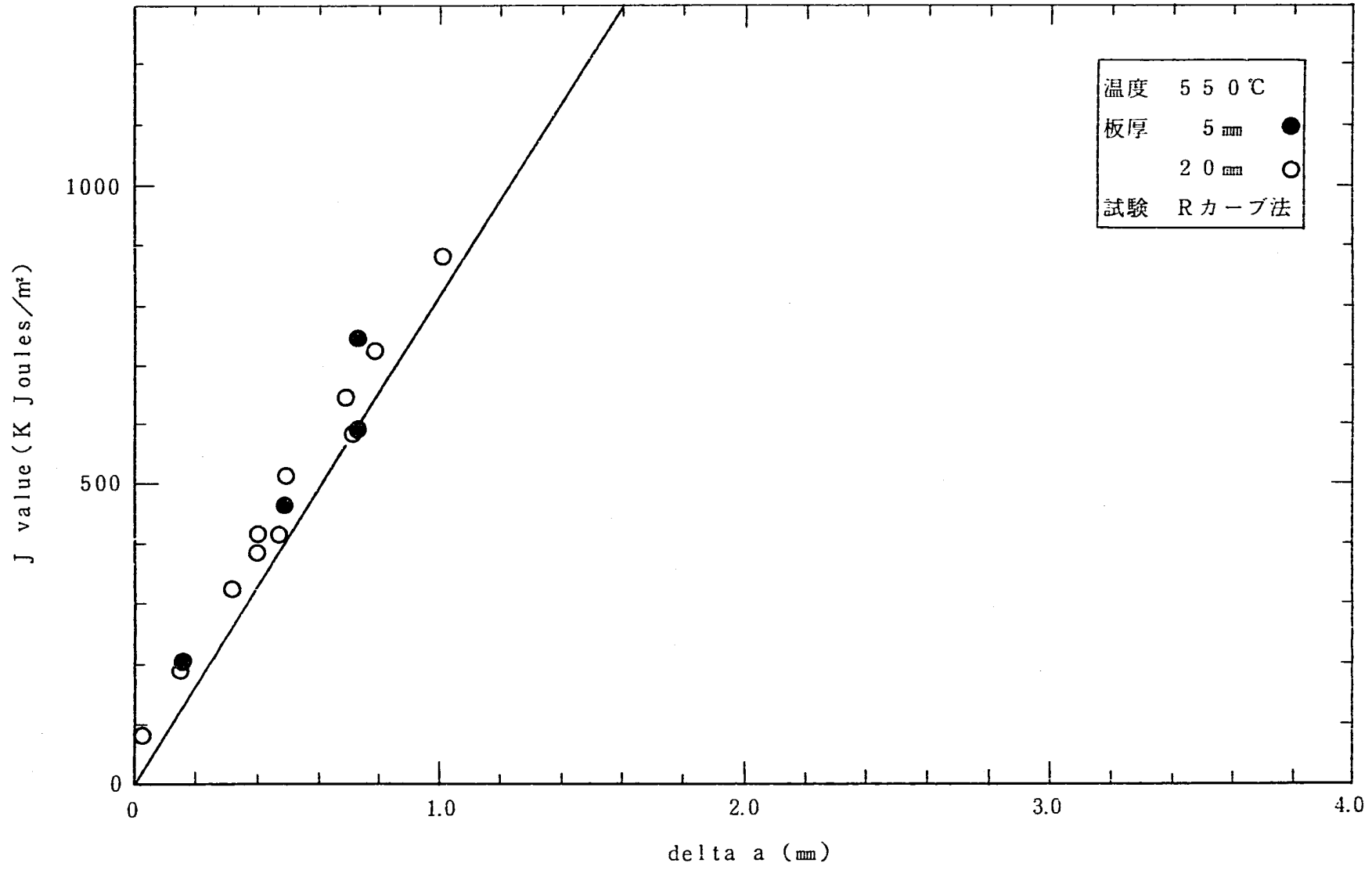


Fig.10.1 Relationships between J value of  $\Delta a$   
( $t = 5, 20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , R-curve method)

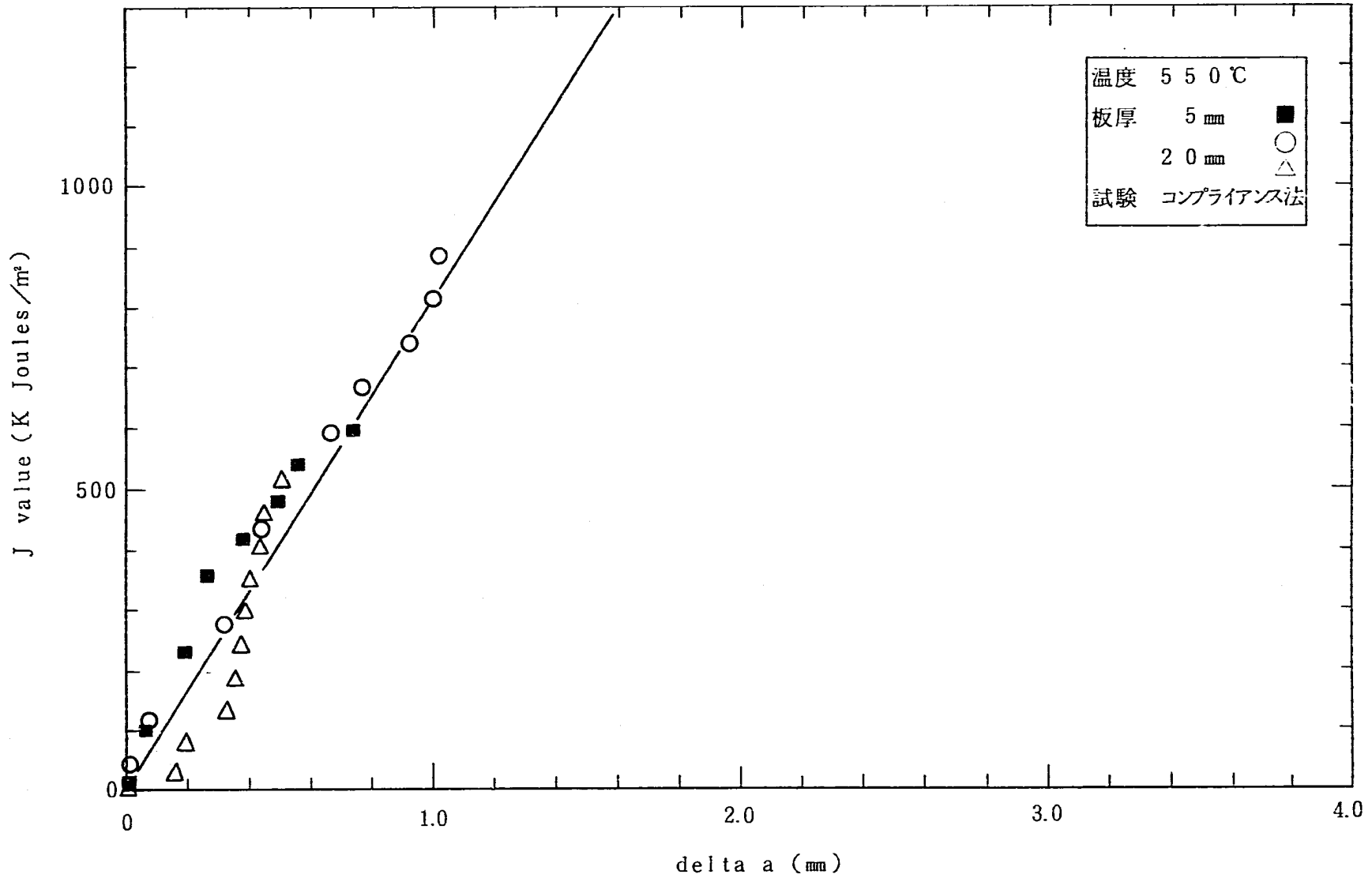


Fig.10.2 Relationships between J value of  $\Delta a$   
 (t = 5, 20mm, 550°C, unloading compliance method)

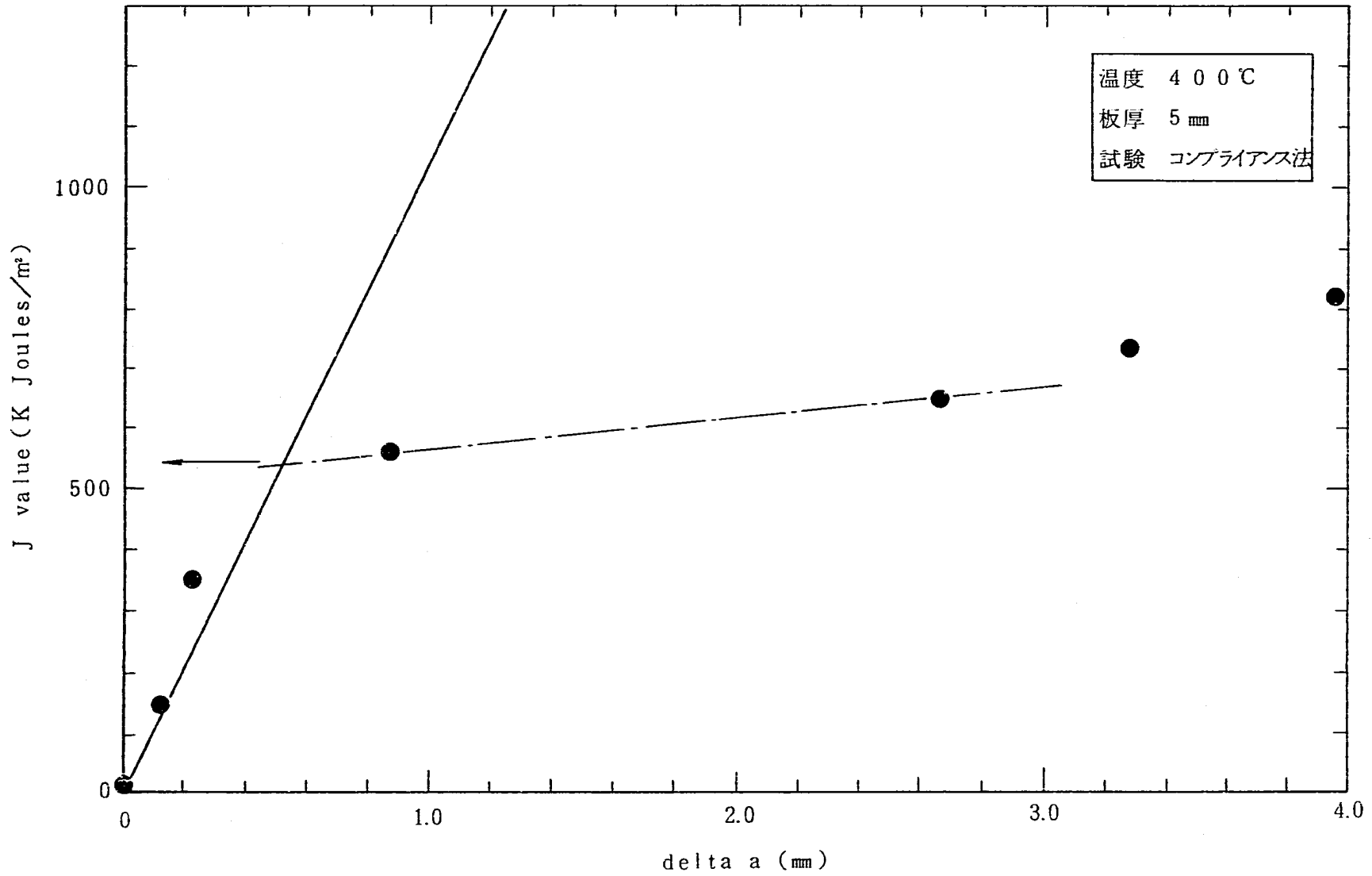


Fig.11 Relationships between J value of  $\Delta a$   
 (t = 5 mm, 400°C, unloading compliance method)

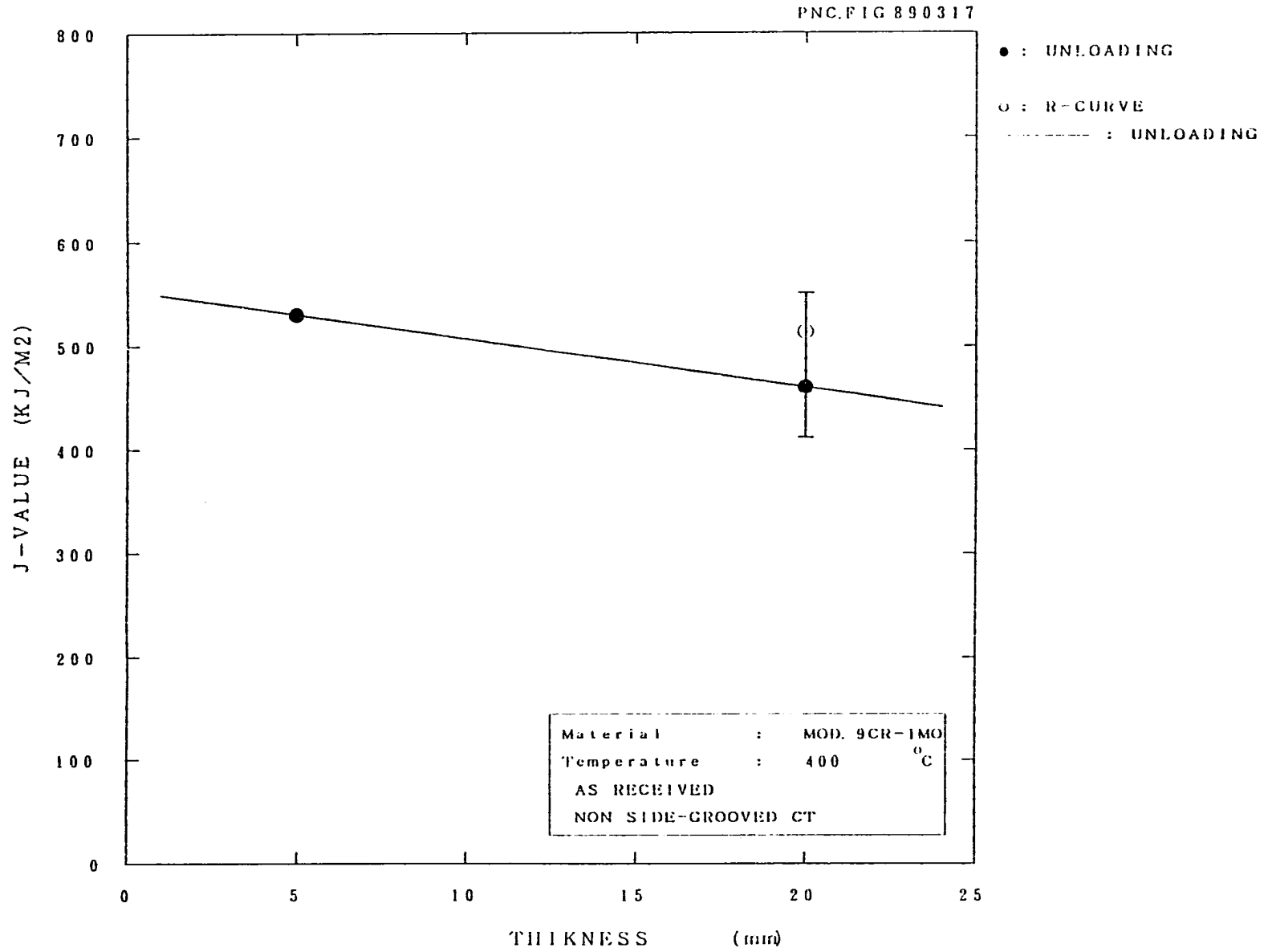


Fig.12 Relationships between  $J_a$  value and thickness  
 (  $t = 5, 20\text{mm}, 400^\circ\text{C}$ , R-curve & unloading compliance method)

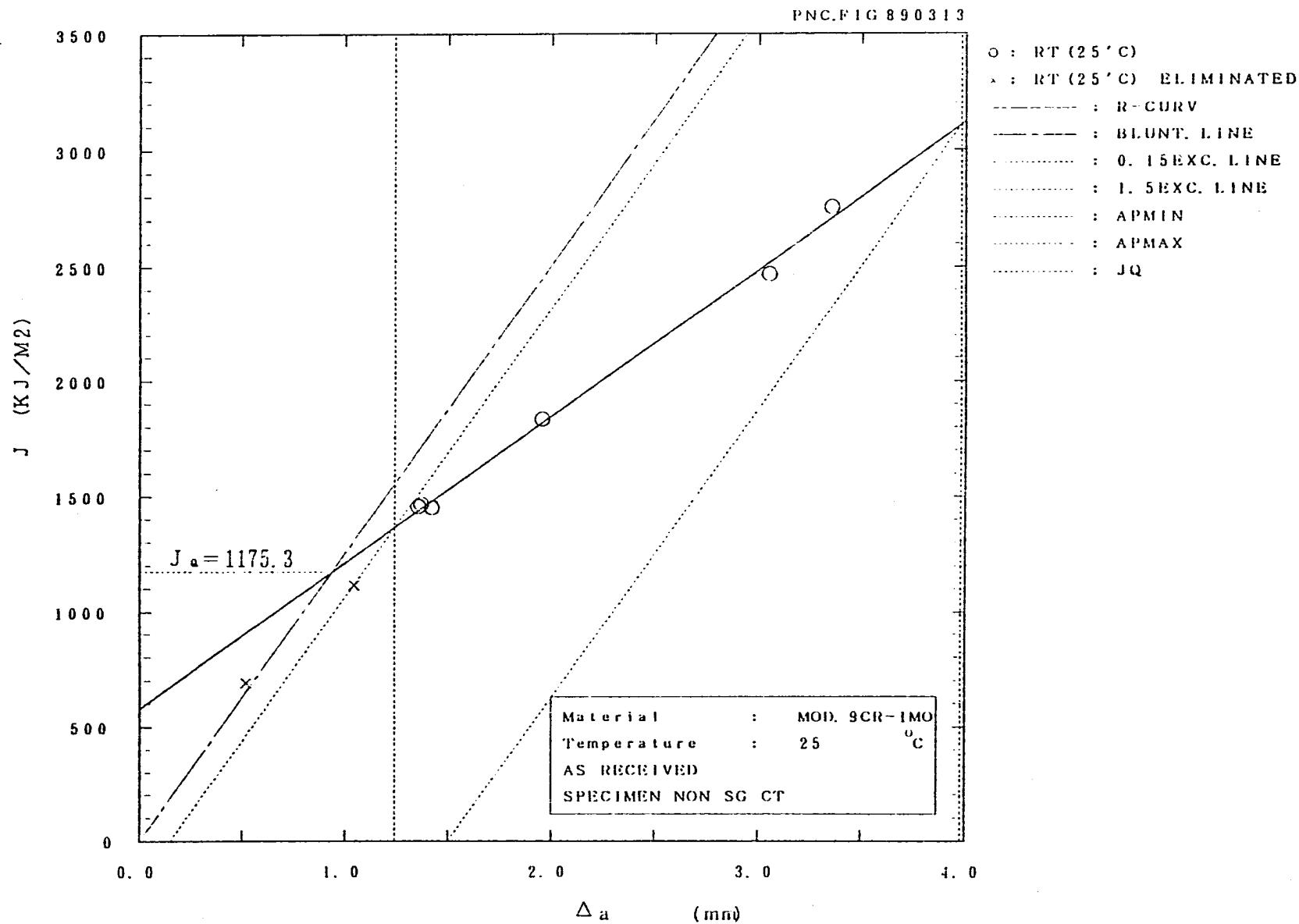


Fig.13.1 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved)



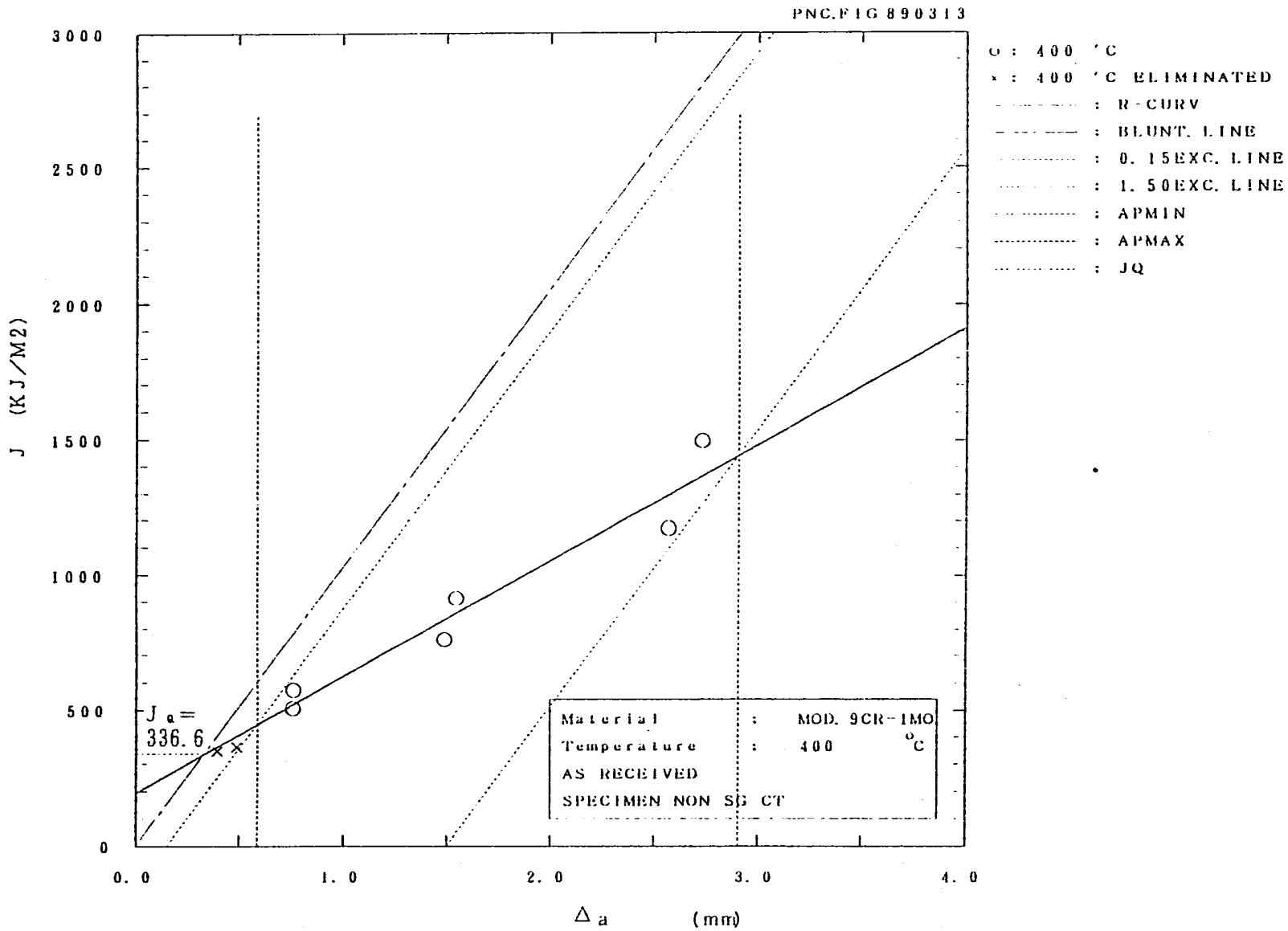


Fig.13.2 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved)

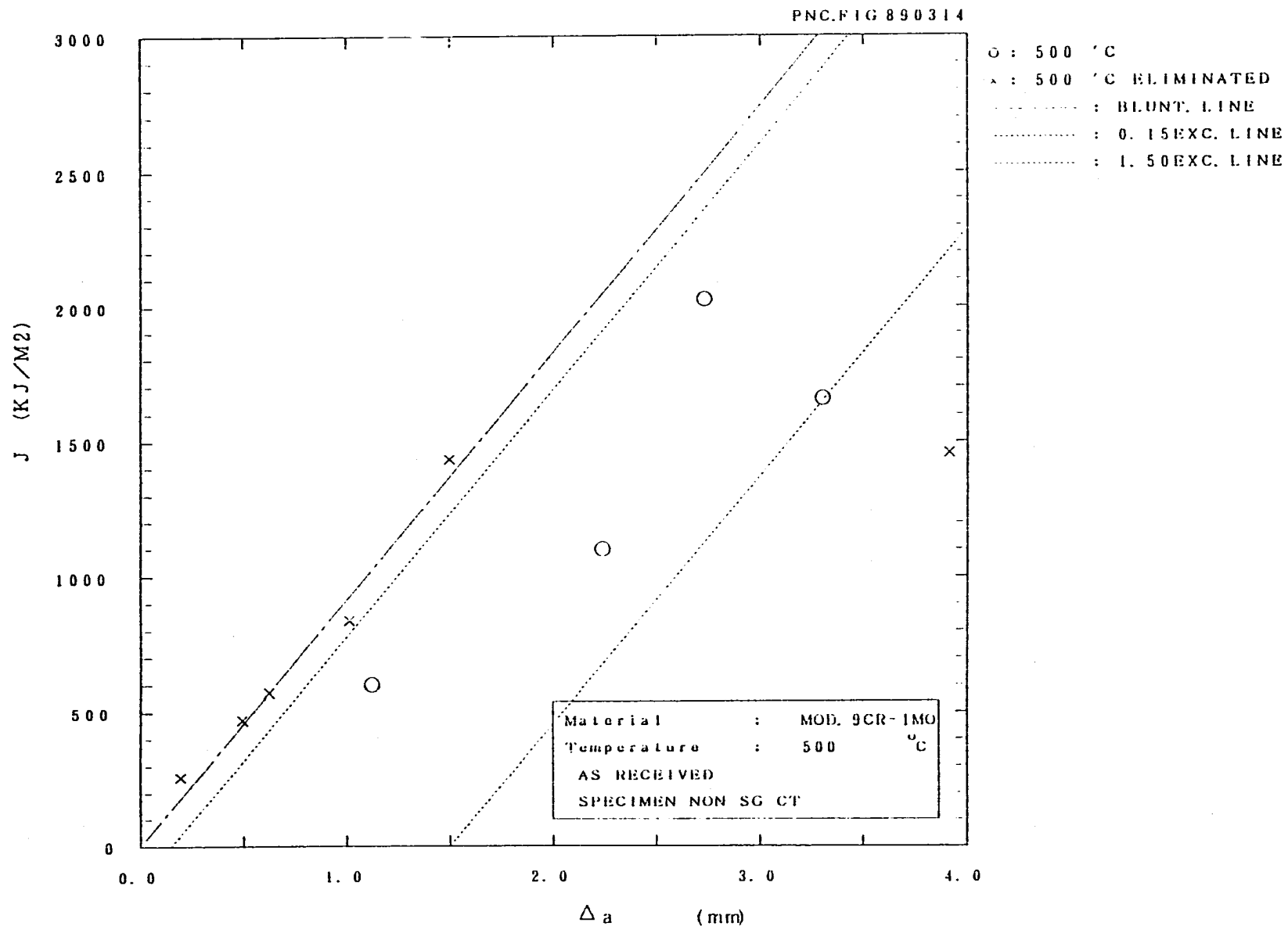


Fig.13.3 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , As received material, not side grooved)

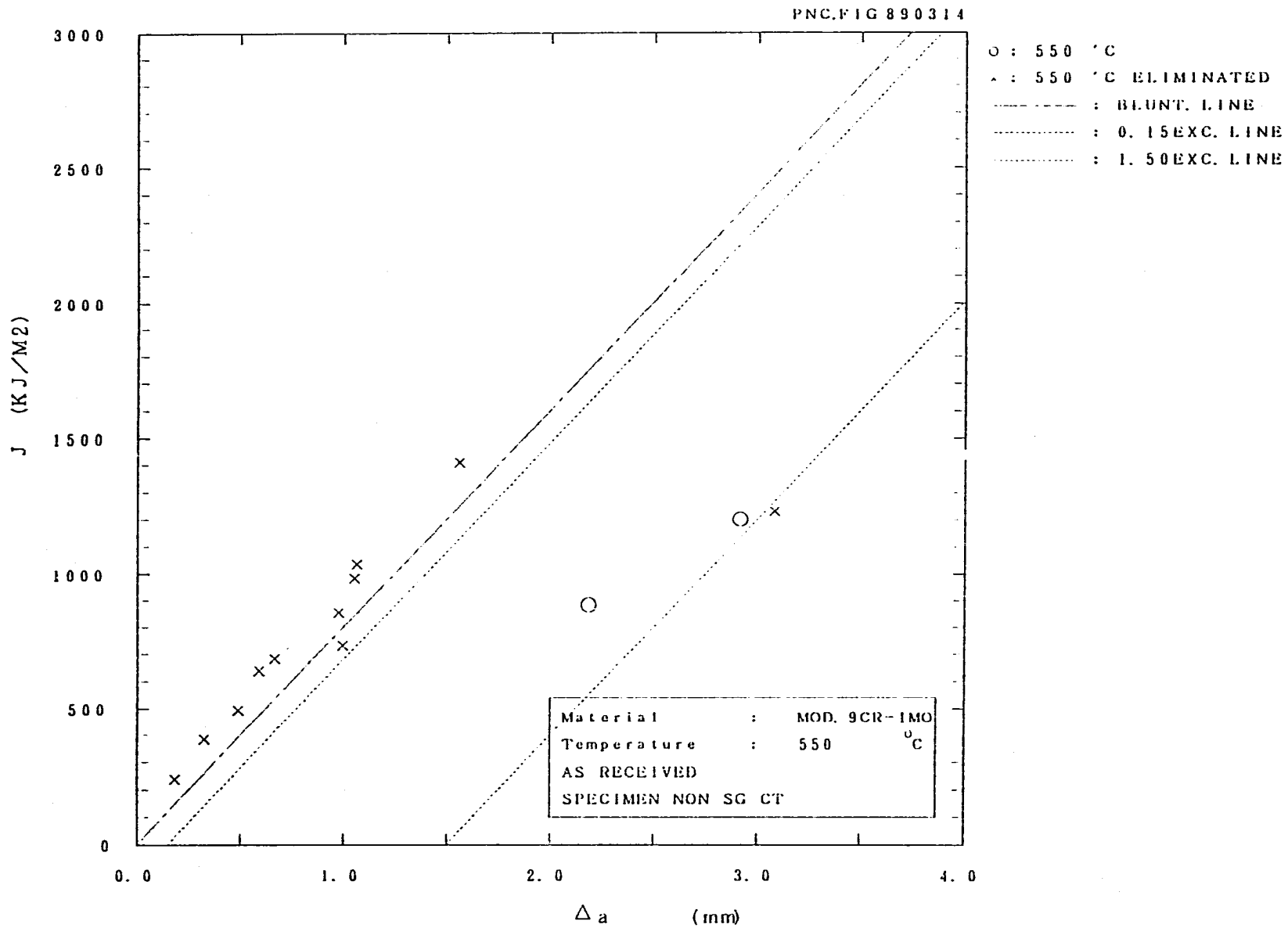


Fig.13.4 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved)

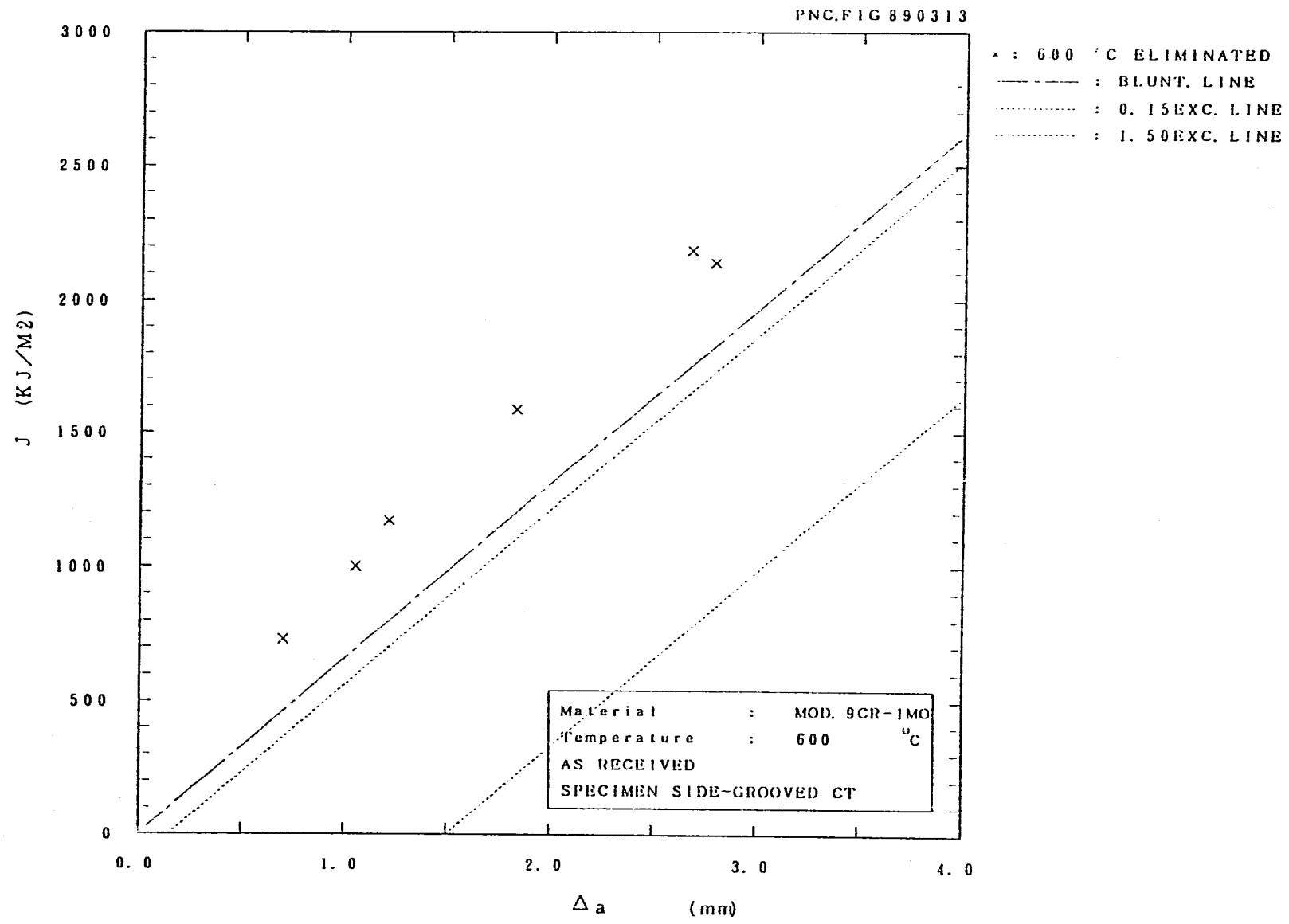


Fig.13.5 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved)

PNC.FIG 890314

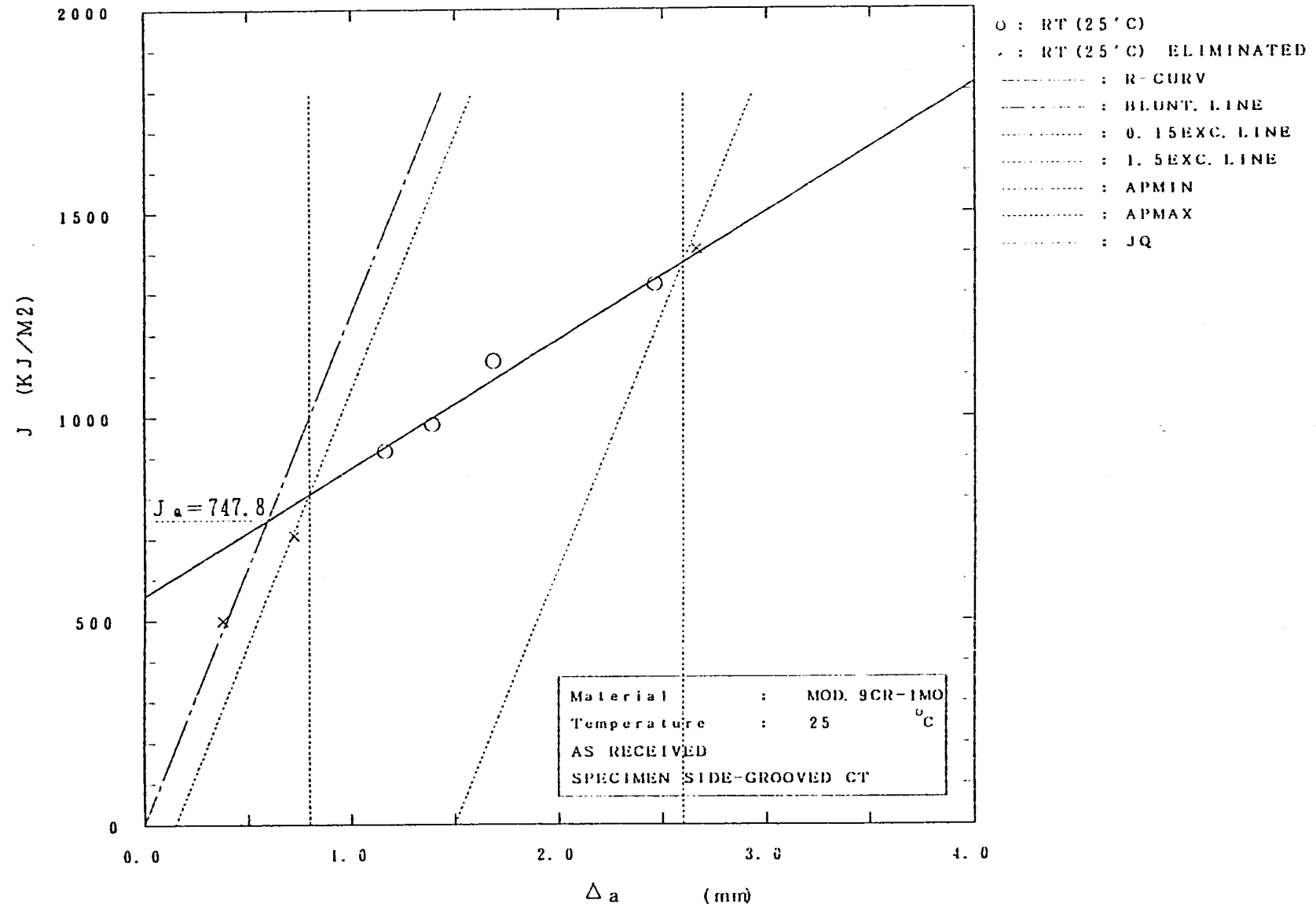


Fig.14.1 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 (t = 20mm, 25°C, As received material, side-grooved)

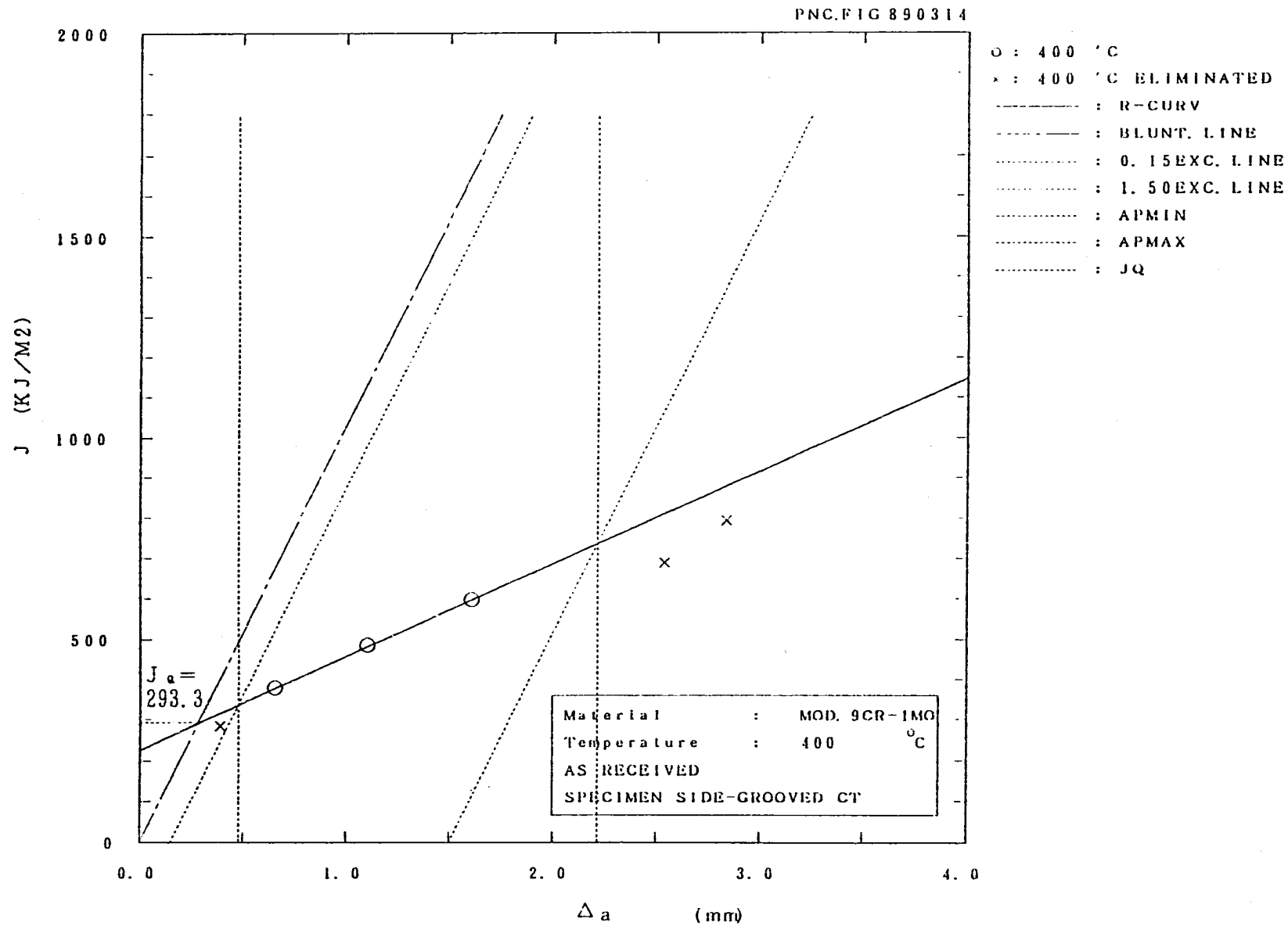


Fig.14.2 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved)

PNC.FIG 890314

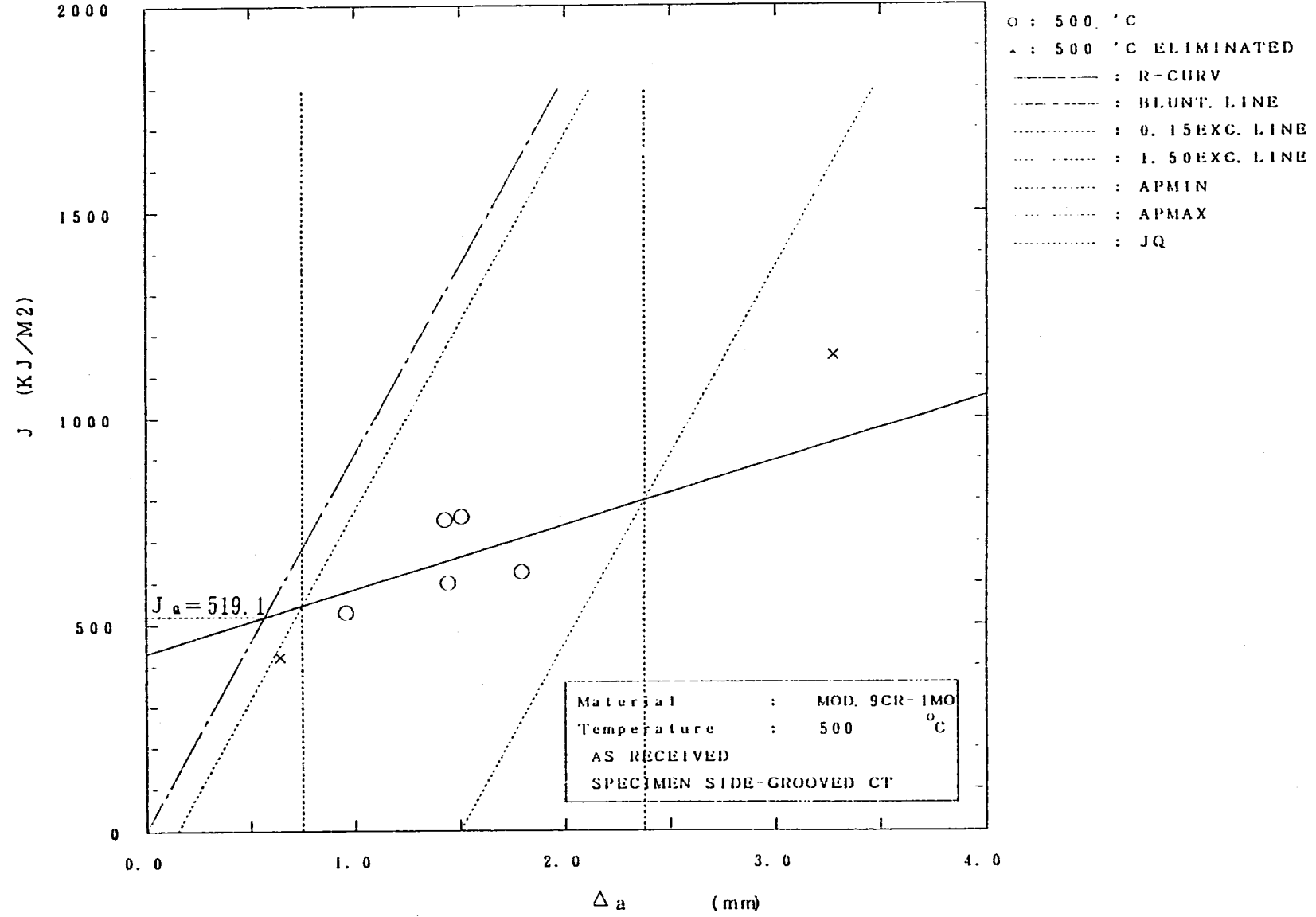


Fig. 14.3 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 (t = 20mm, 500°C, As received material, side-grooved)

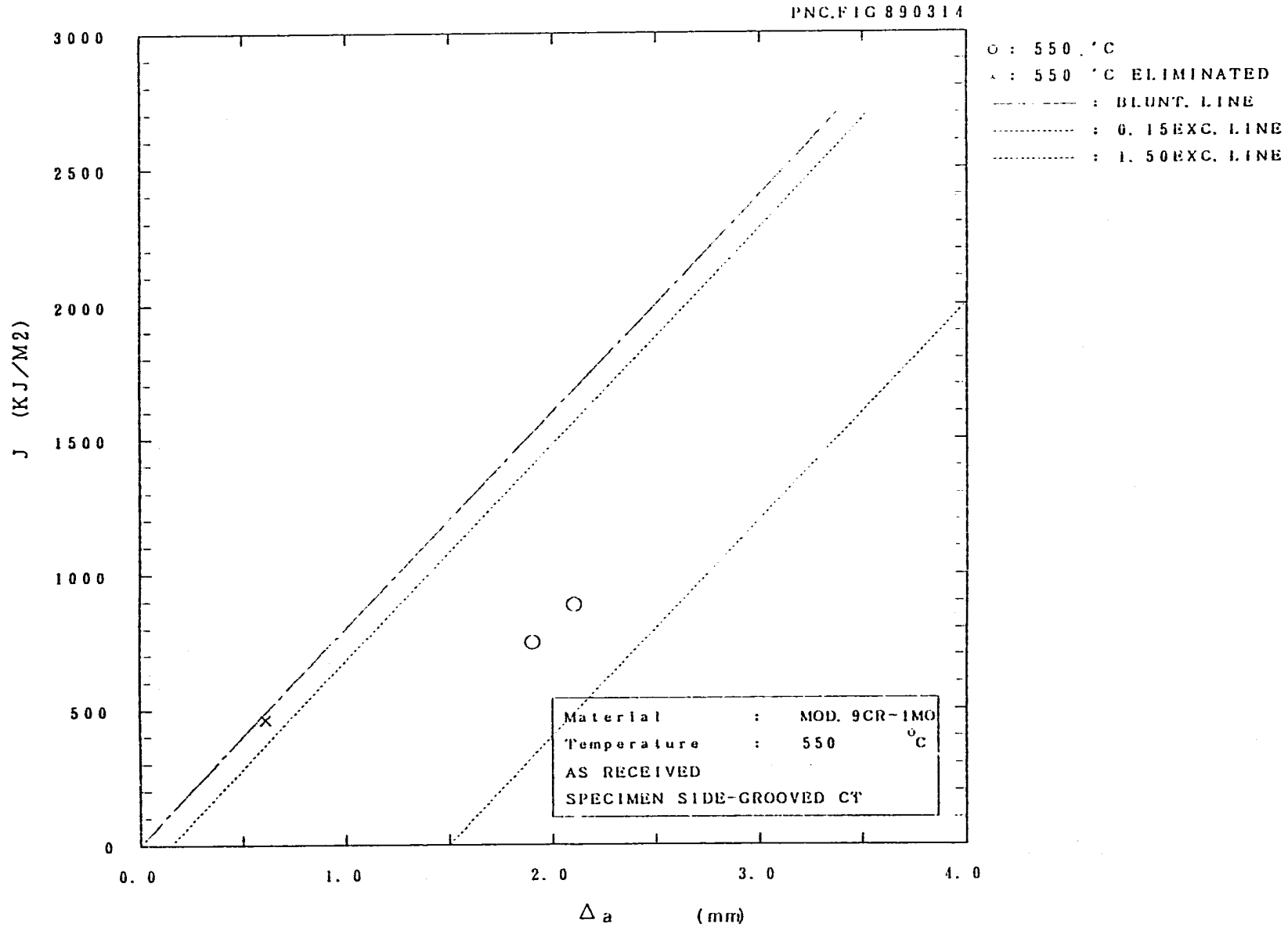


Fig. 14.4 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved)



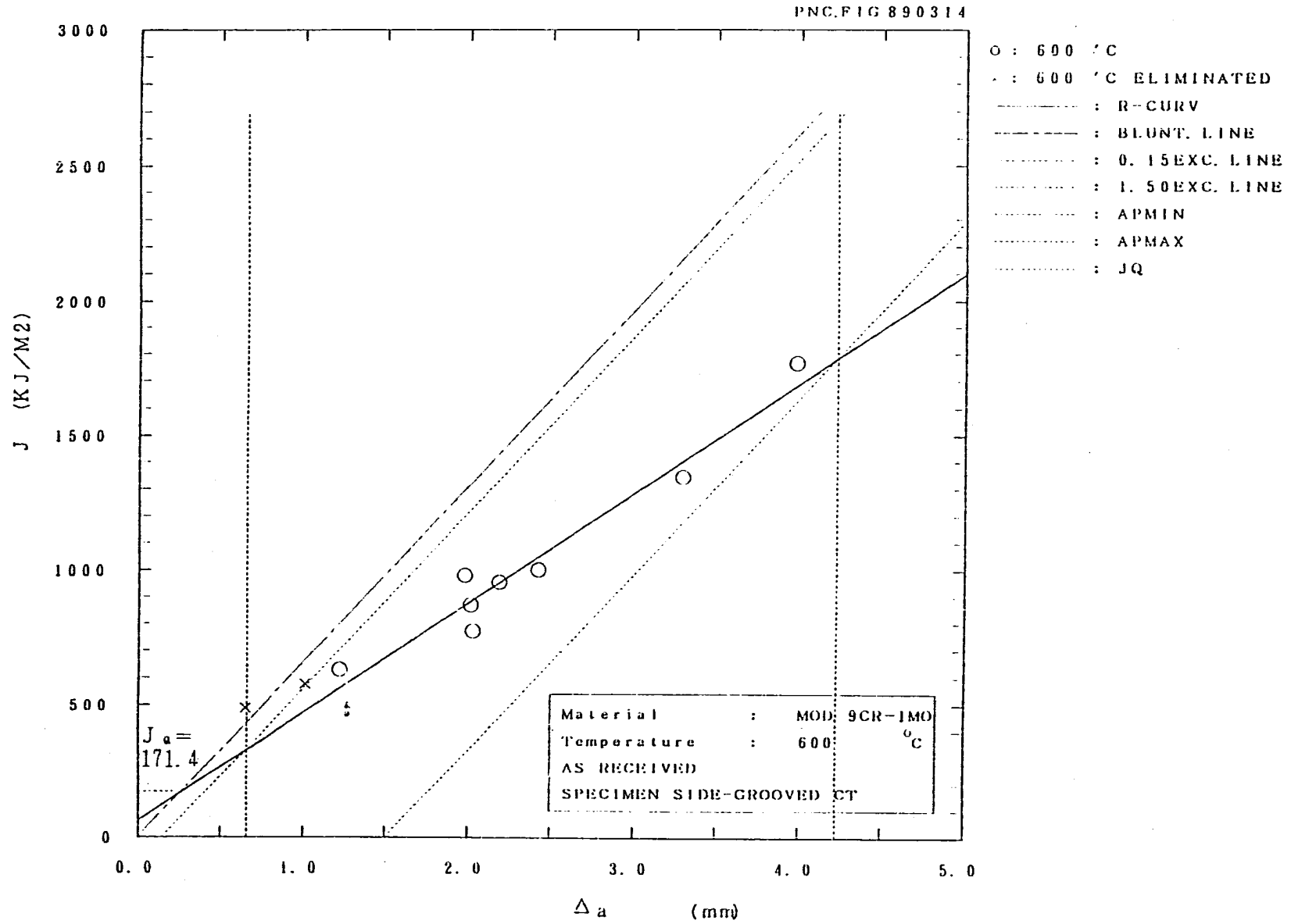


Fig.14.5 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , As received material, side-grooved)

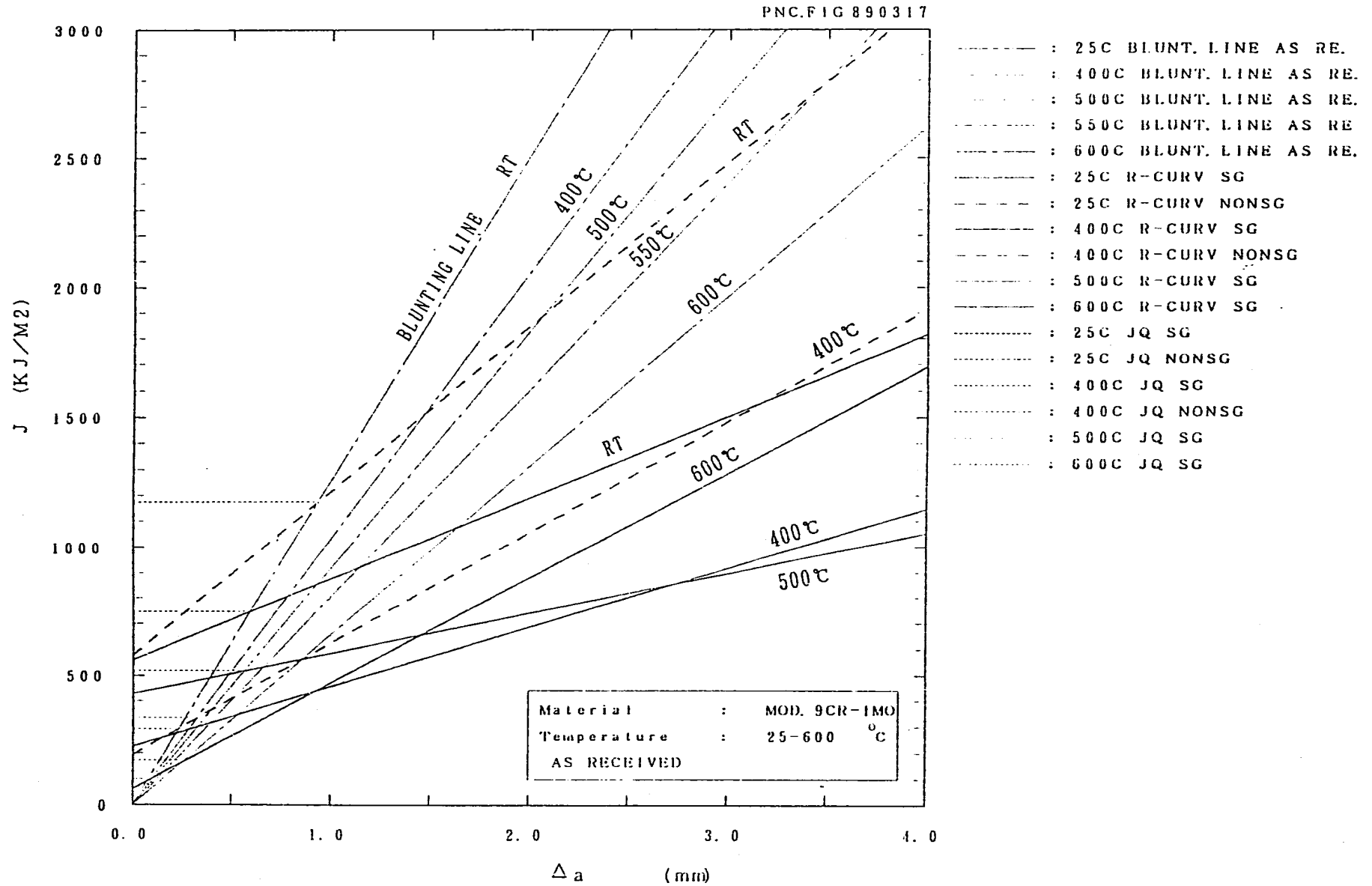


Fig.15 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ , 25~600°C, As received material,  
 not side-grooved & side-grooved)

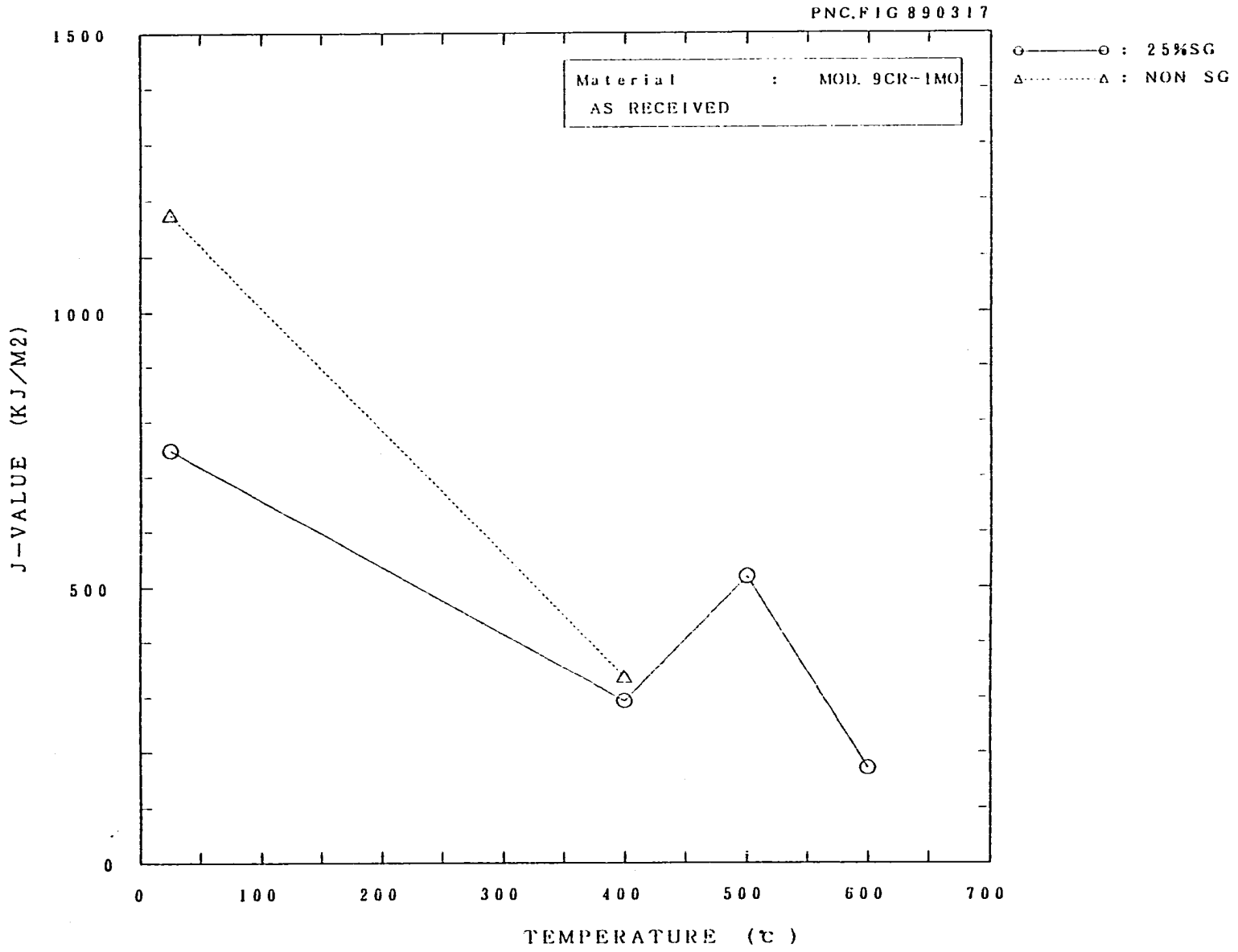
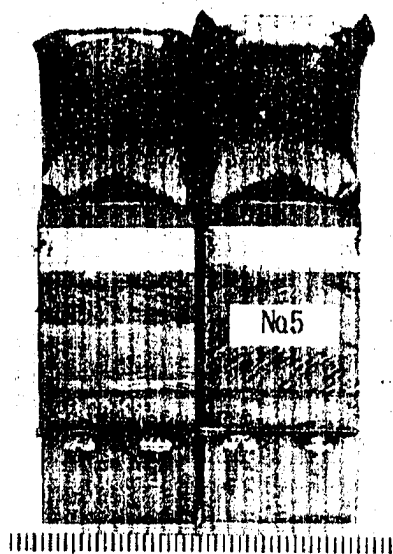
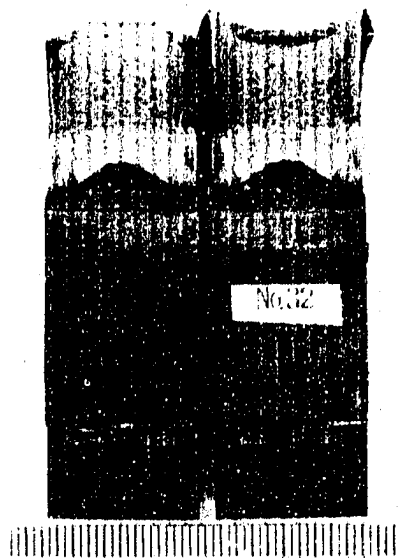


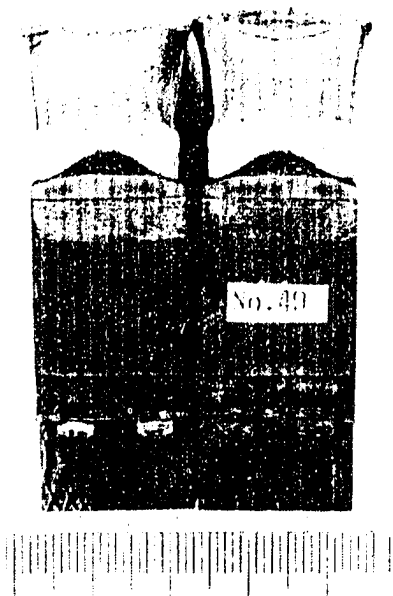
Fig.16 Relationships between  $J_a$  value and temperature



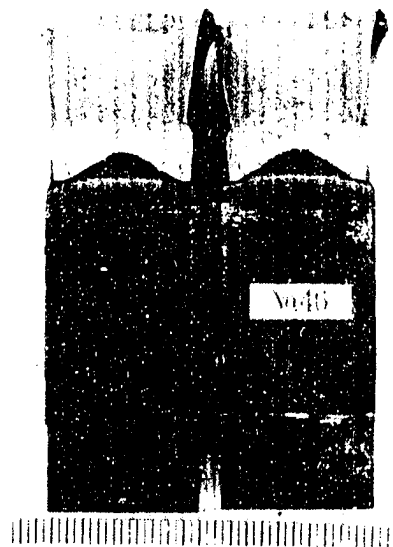
$\Delta a$  : 1.421mm  
R T (25℃)



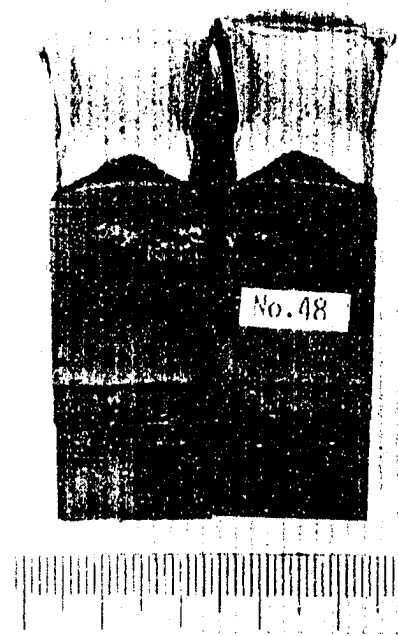
$\Delta a$  : 1.550mm  
400℃



$\Delta a$  : 1.502mm  
500℃

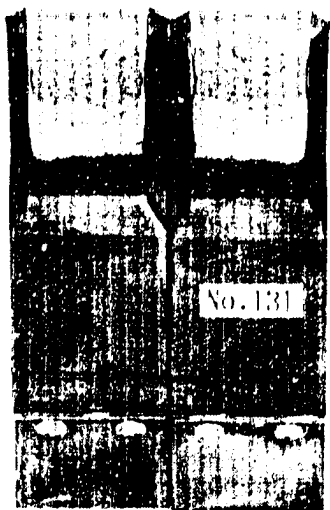


$\Delta a$  : 1.065mm  
550℃

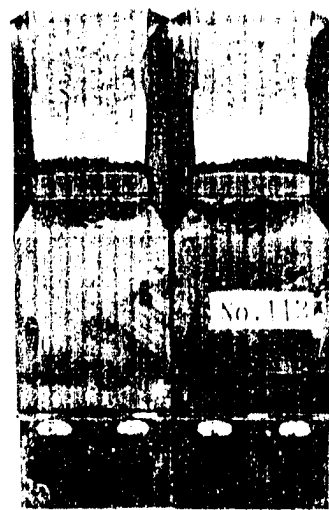


$\Delta a$  : 1.830mm  
600℃

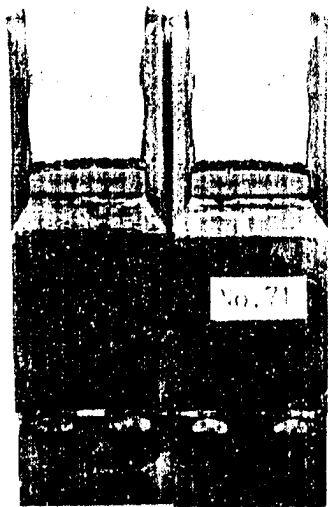
Fig. 17 Appearances of CT specimen  
( $t = 20\text{mm}$ , 25~600℃, As received material,  
not side-grooved)



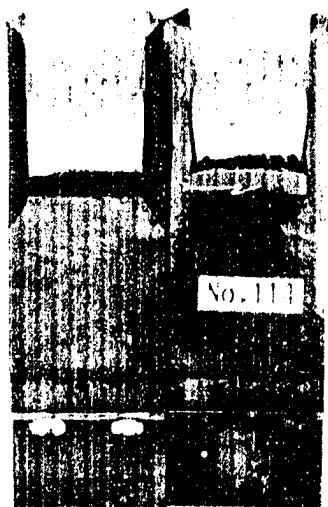
$\Delta a$  : 1.687mm  
R T



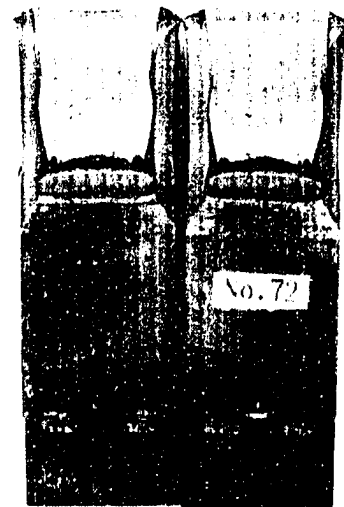
$\Delta a$  : 1.611mm  
400℃



$\Delta a$  : 1.507mm  
500℃



$\Delta a$  : 1.904mm  
550℃



$\Delta a$  : 1.981mm  
600℃

Fig. 18 Appearances of CT specimen  
( $t = 20\text{mm}$ , 25~600℃, As received material,  
side-grooved)

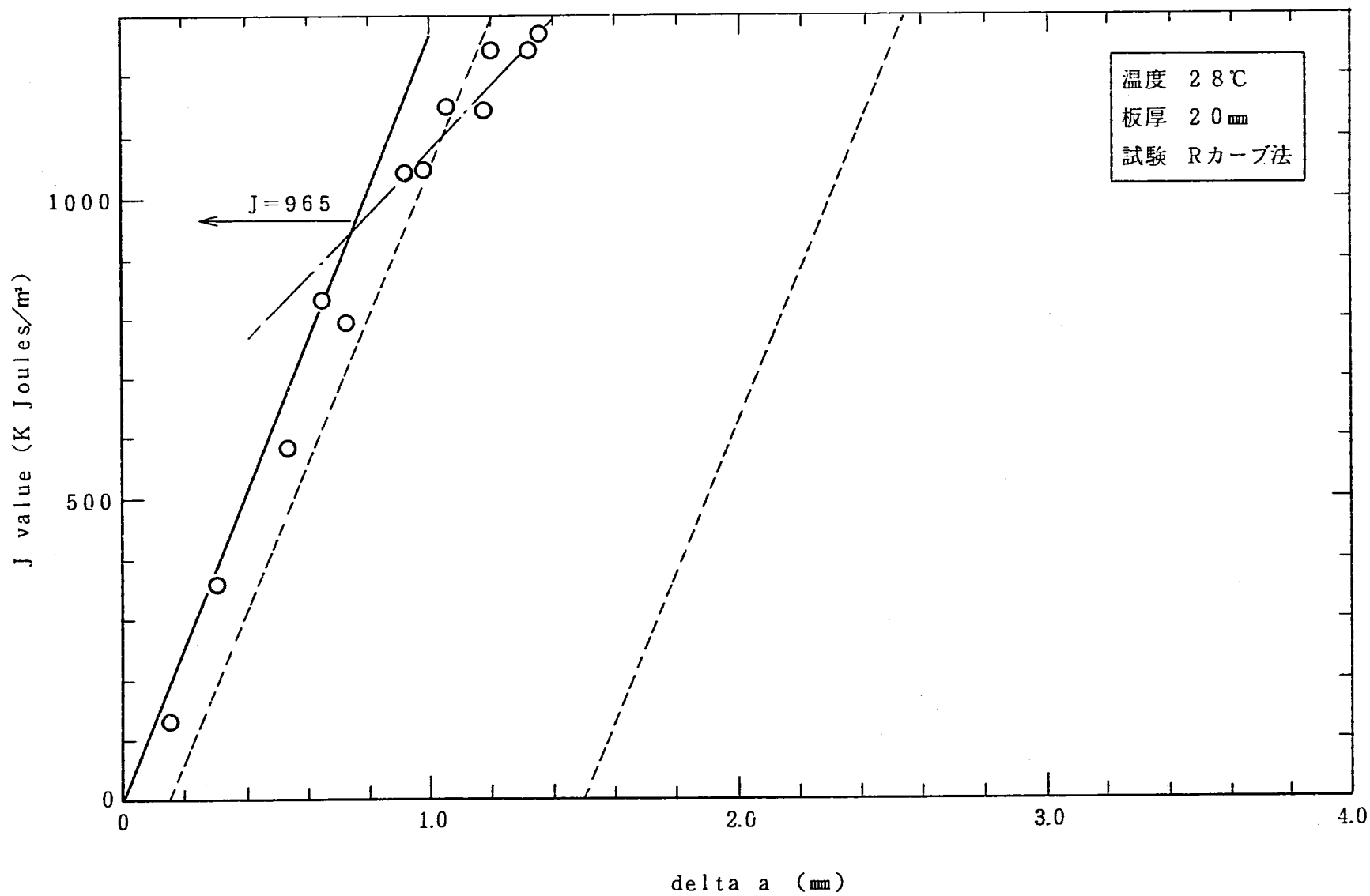


Fig.19.1 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $28^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve)

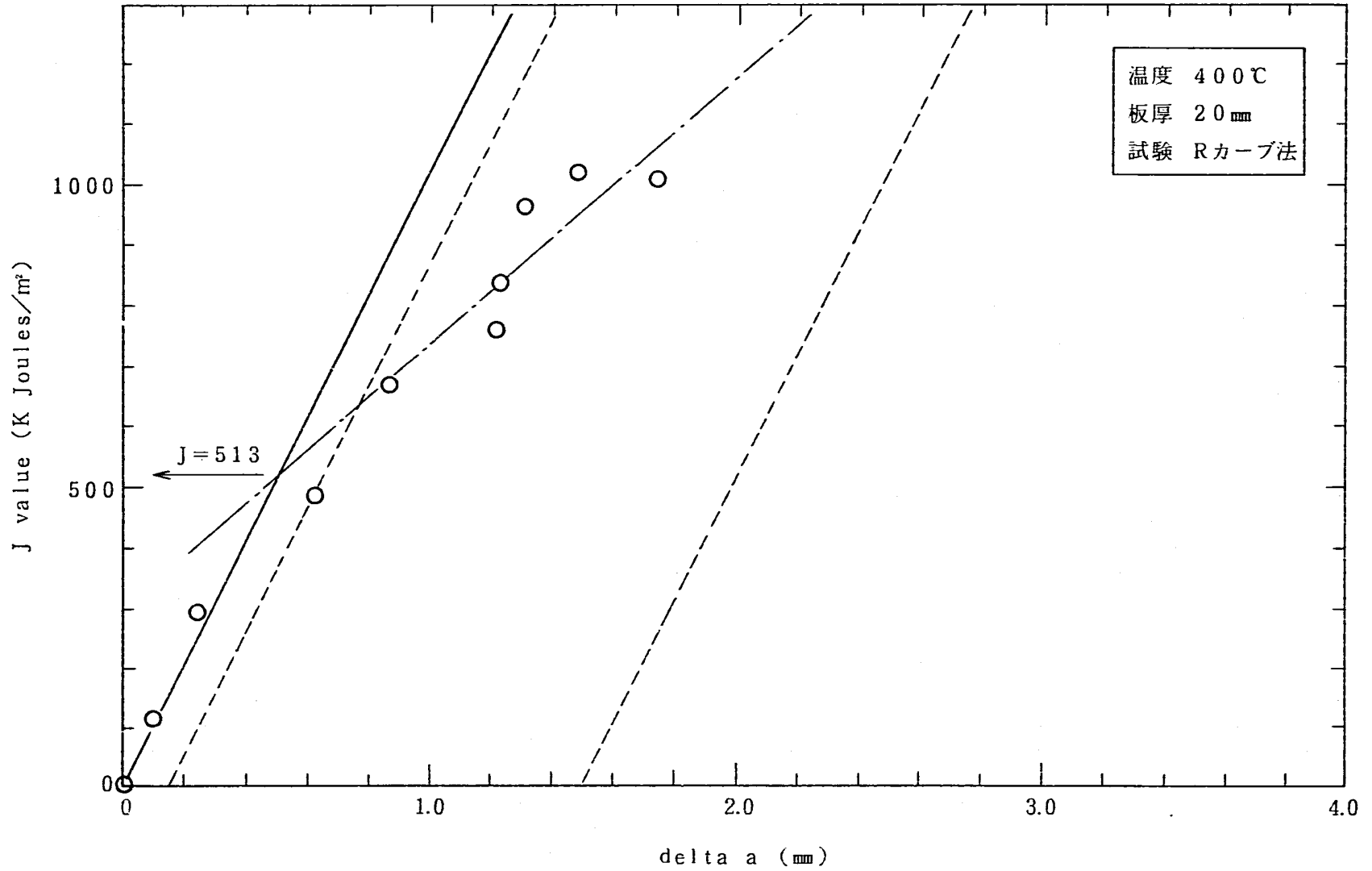


Fig.19.2 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve)

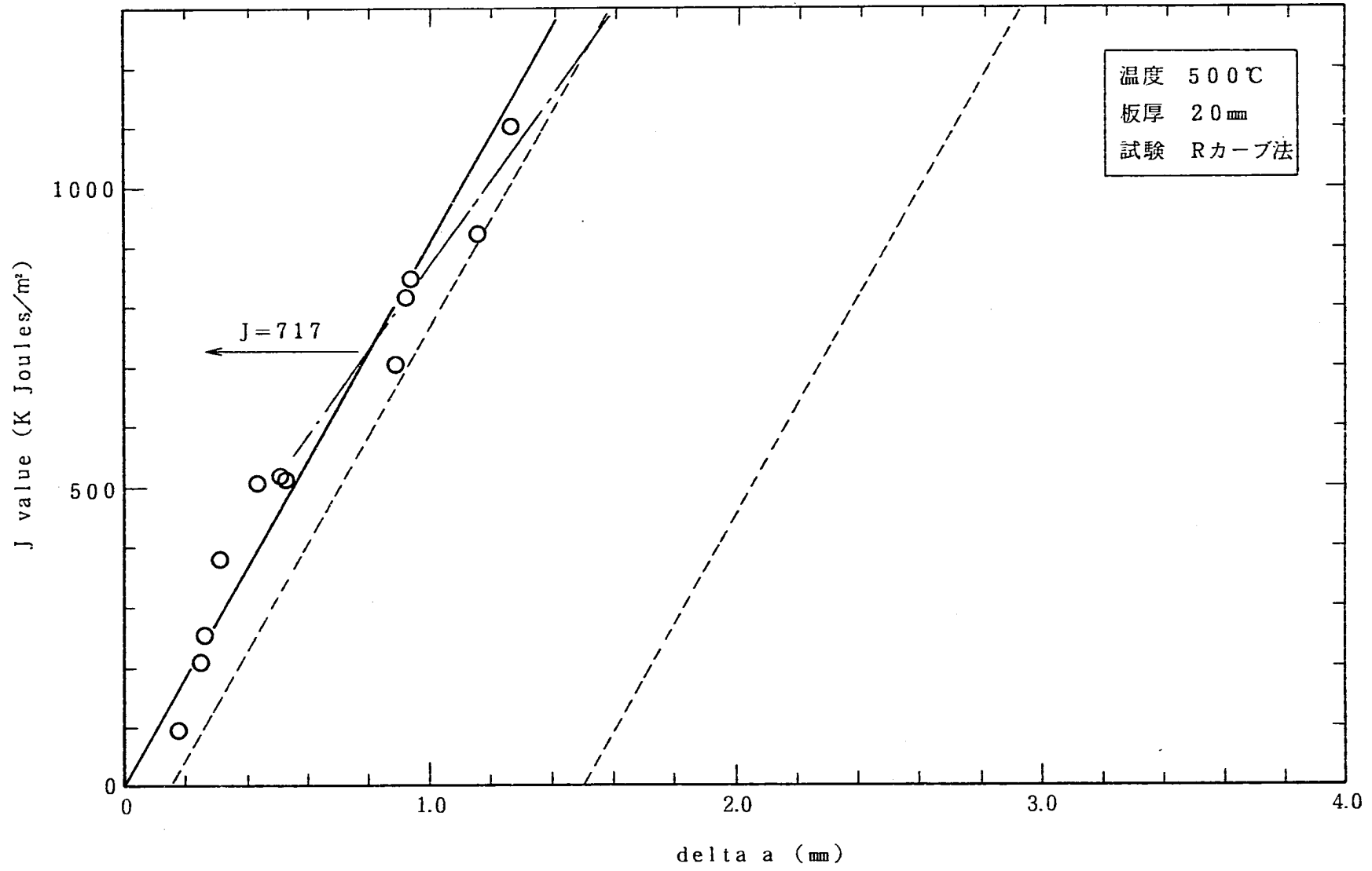


Fig.19.3 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve)



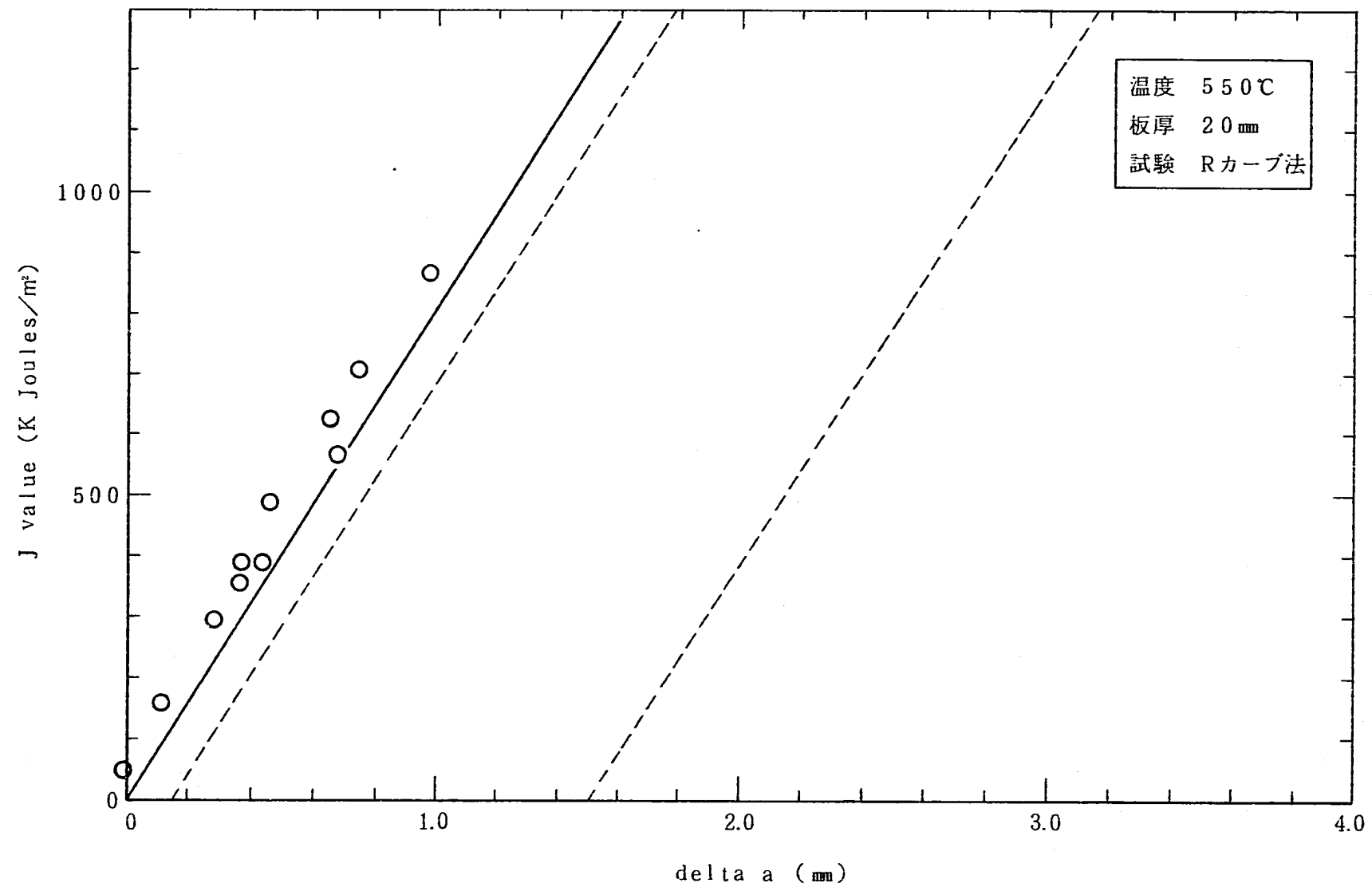


Fig.19.4 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 (  $t = 20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve)

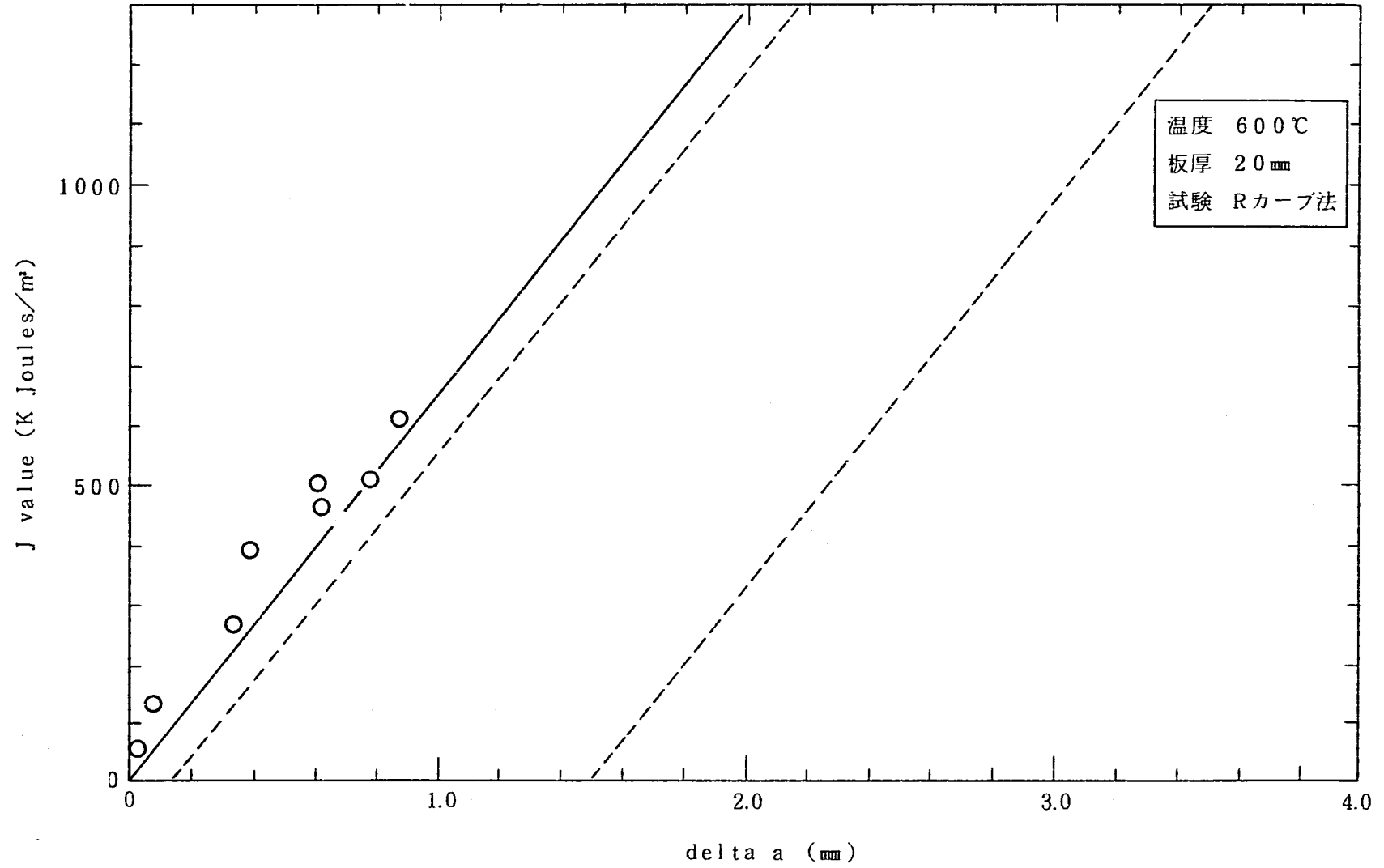


Fig.19.5 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t=20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , As received material, not side-grooved, R-curve)

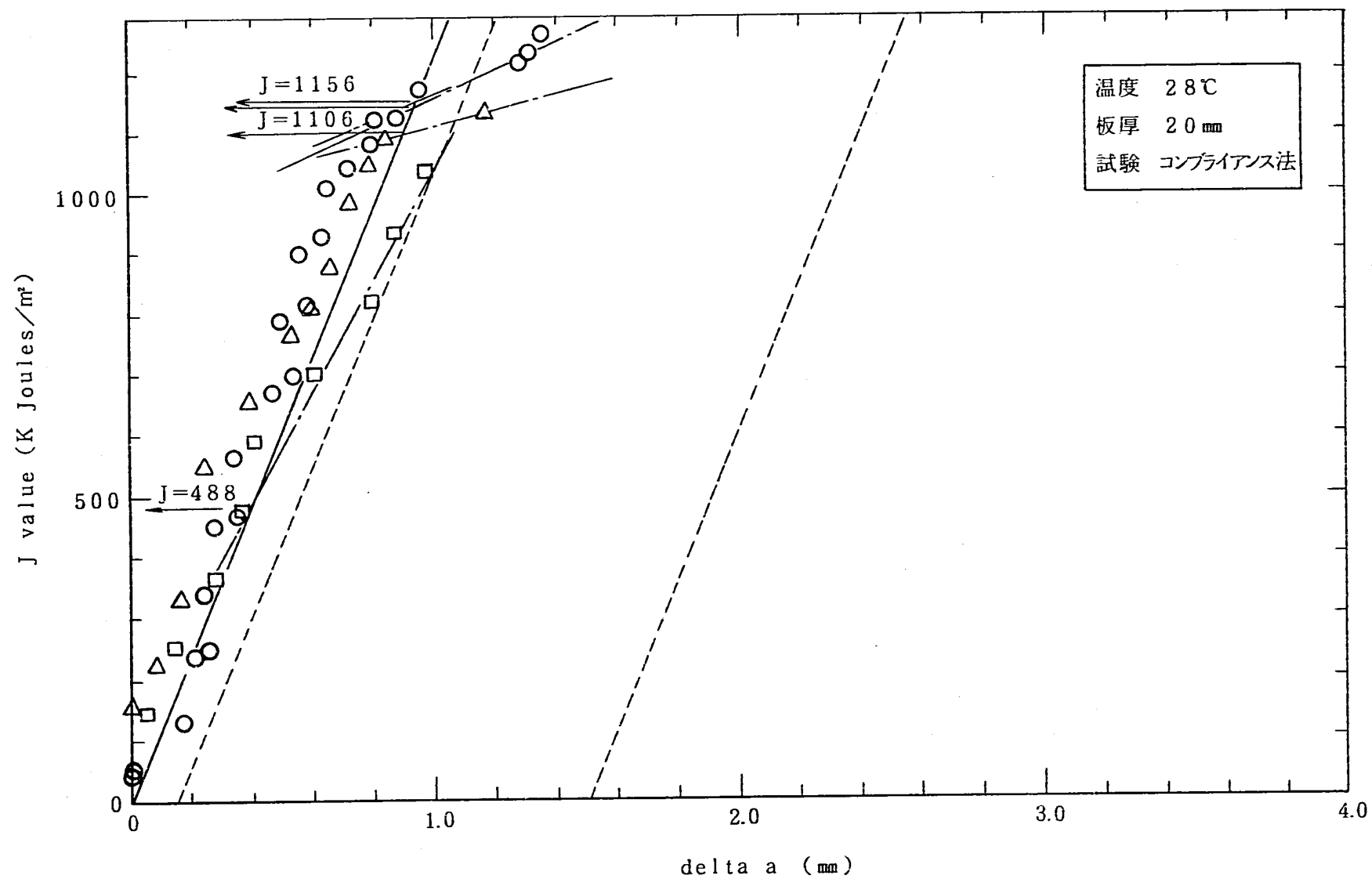


Fig. 20.1 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $28^\circ\text{C}$ , As received material,  
 not side-grooved, unloading compliance)

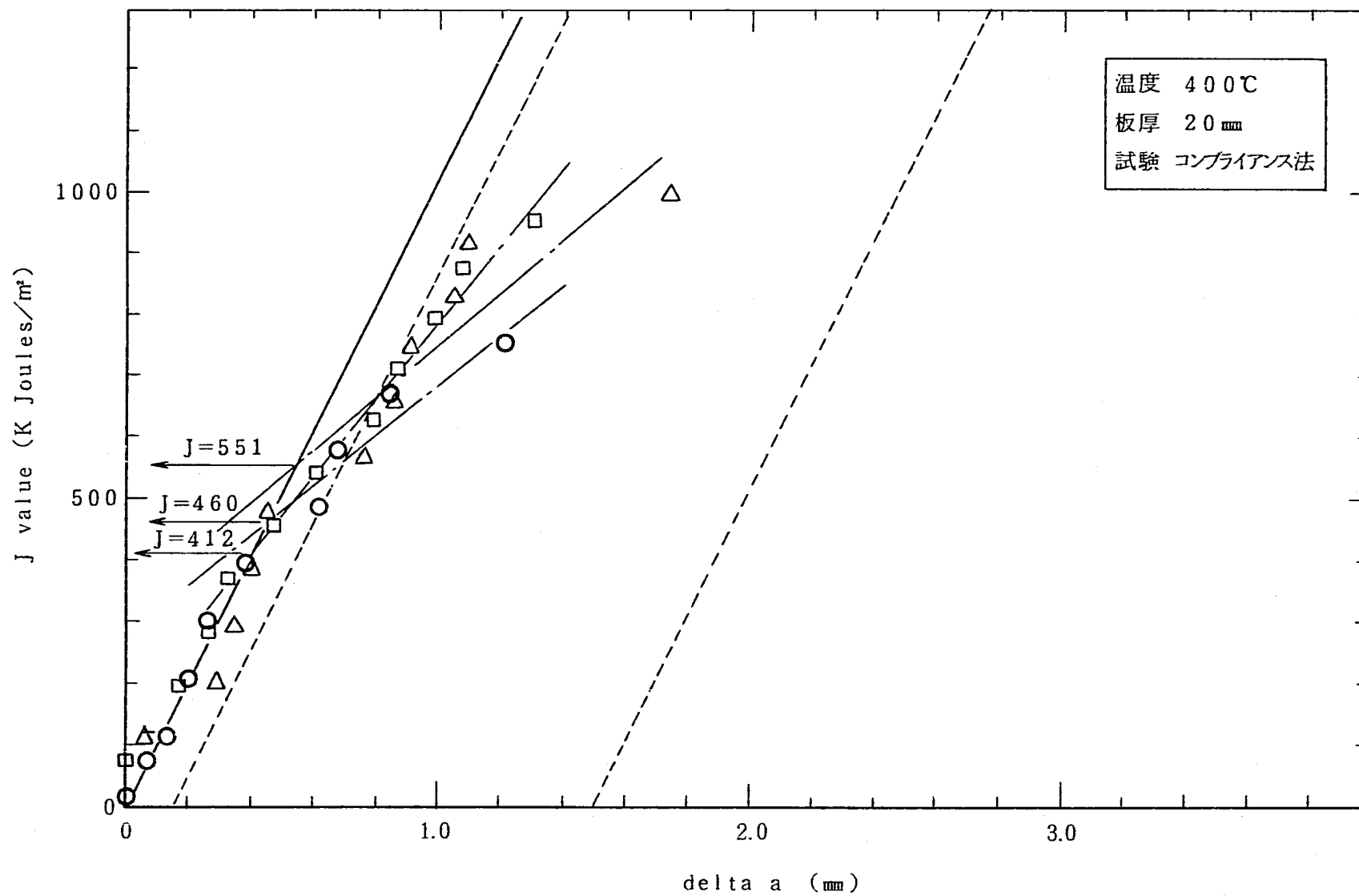


Fig. 20.2 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t = 20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , As received material,  
not side-grooved, unloading compliance)

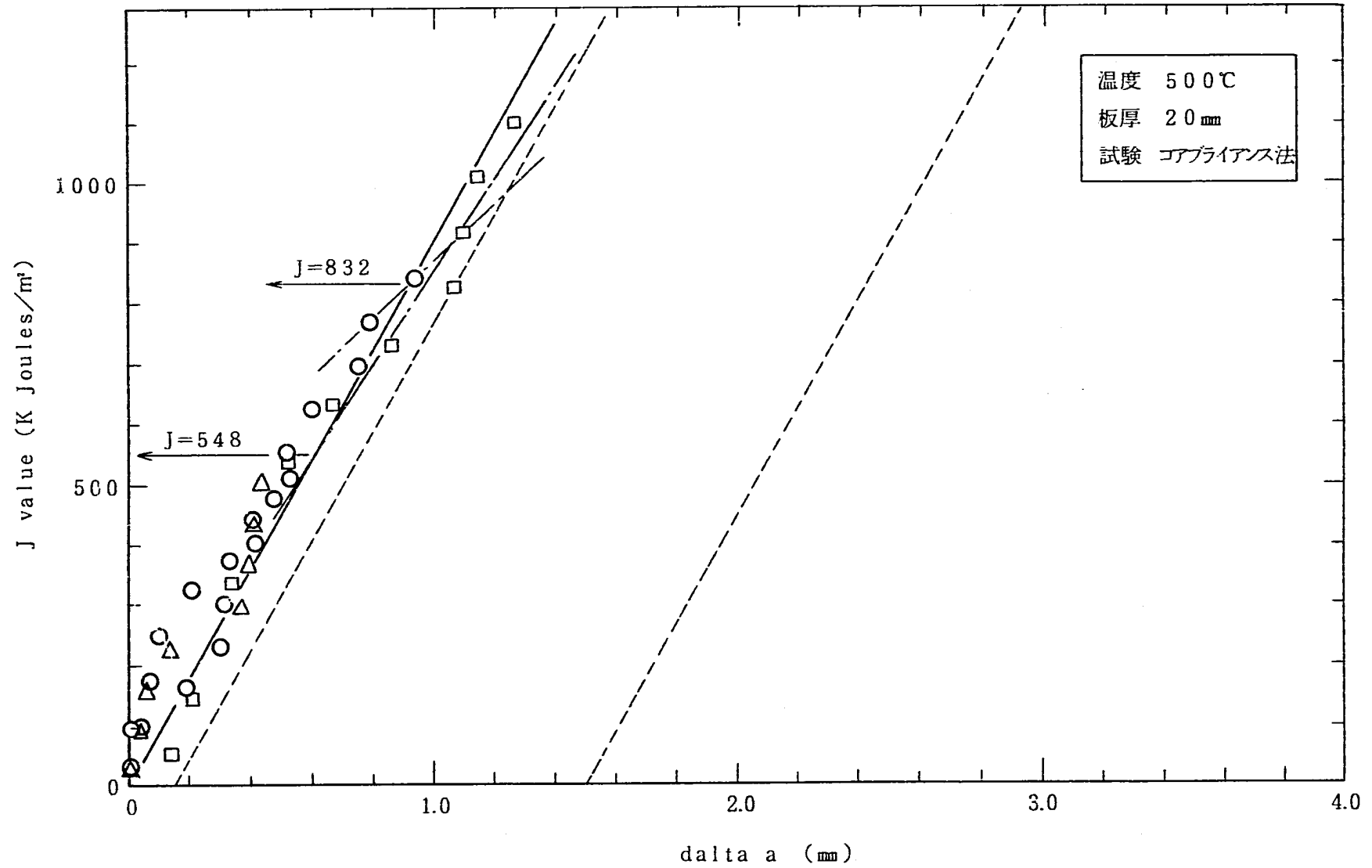


Fig. 20.3 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t=20\text{mm}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , As received material,  
not side-grooved, unloading compliance)

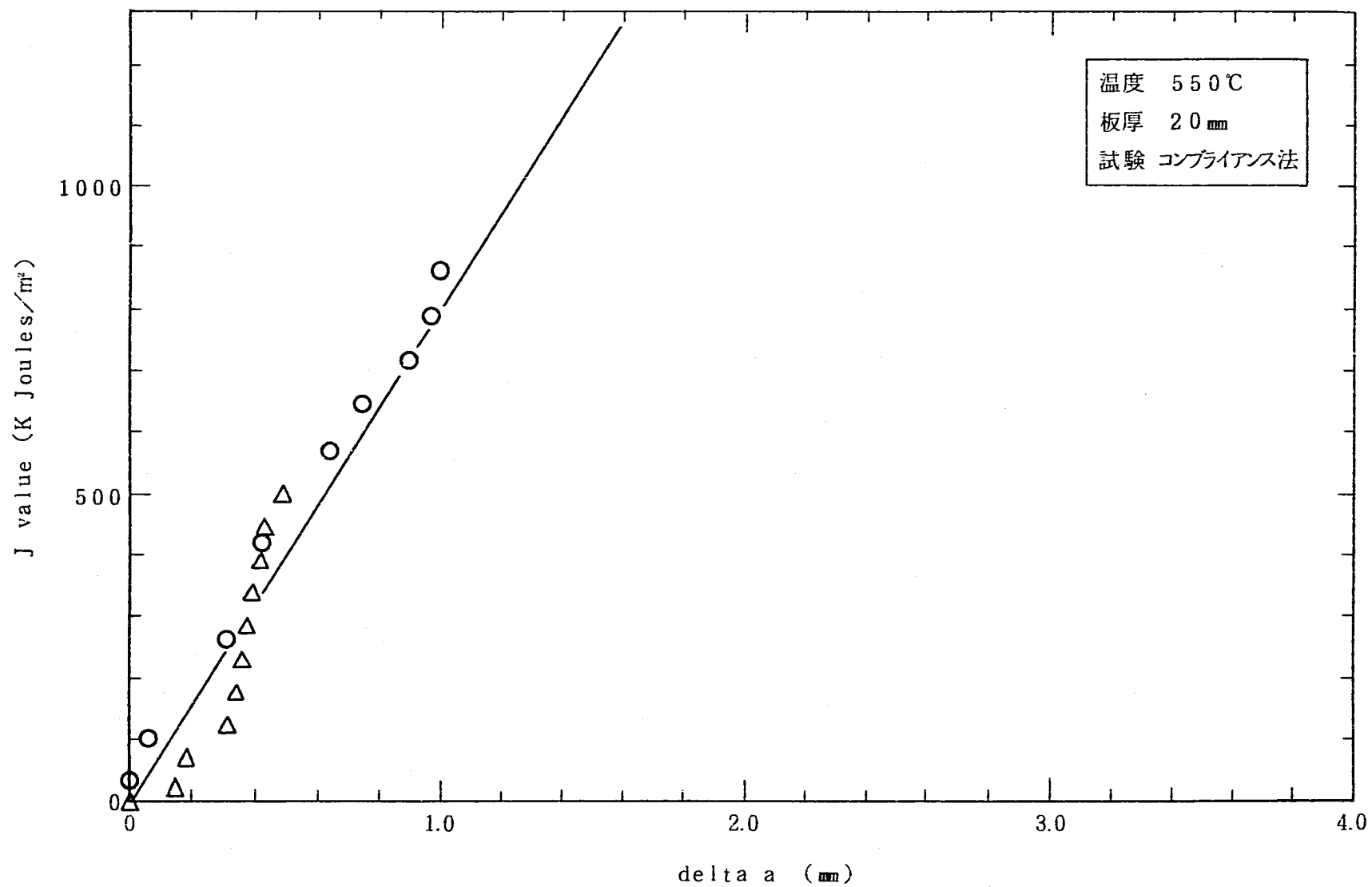


Fig. 20.4 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t=20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , As received material,  
not side-grooved, unloading compliance)

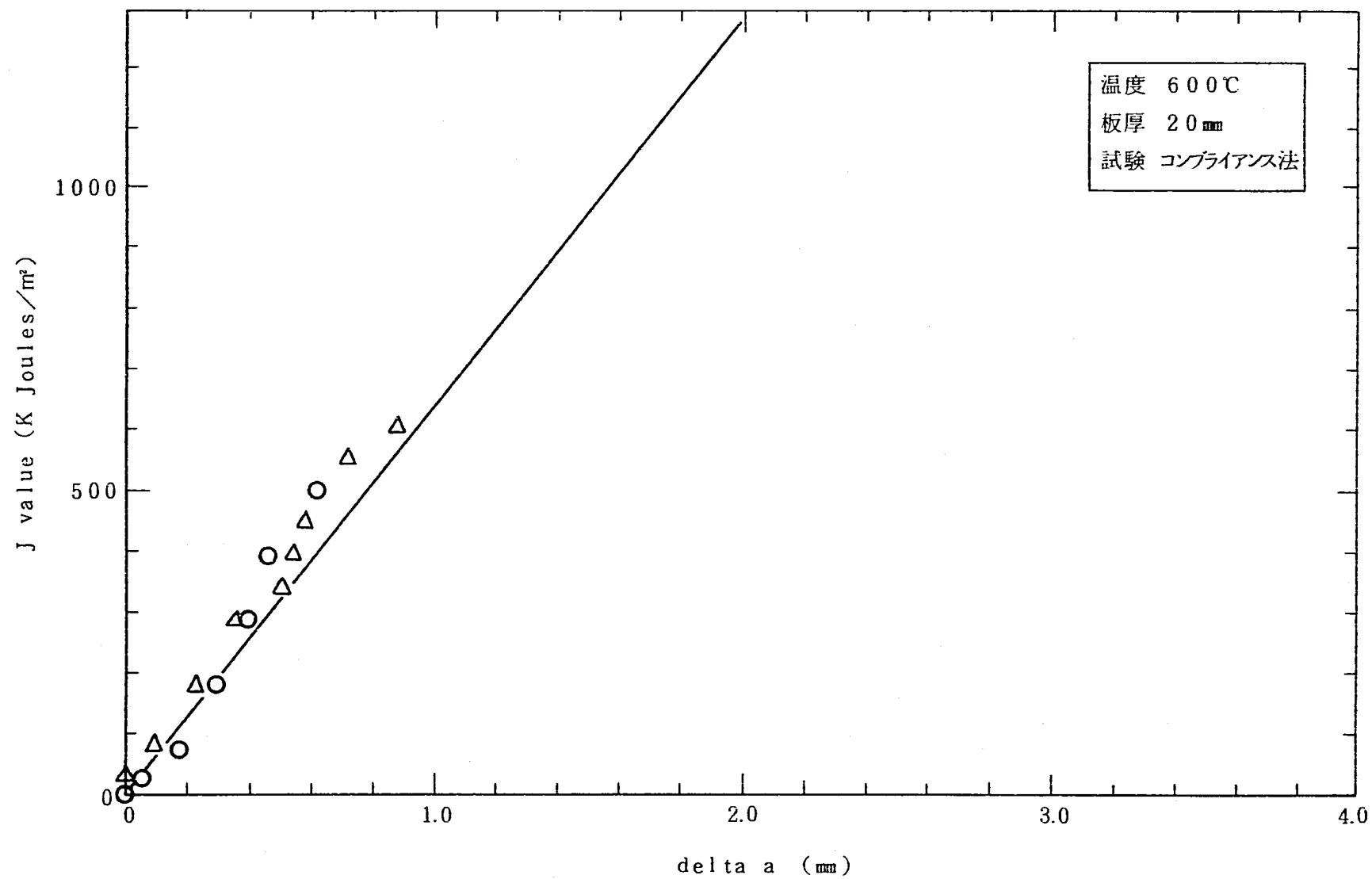


Fig.20.5 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t=20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , As received material,  
not side-grooved, unloading compliance)

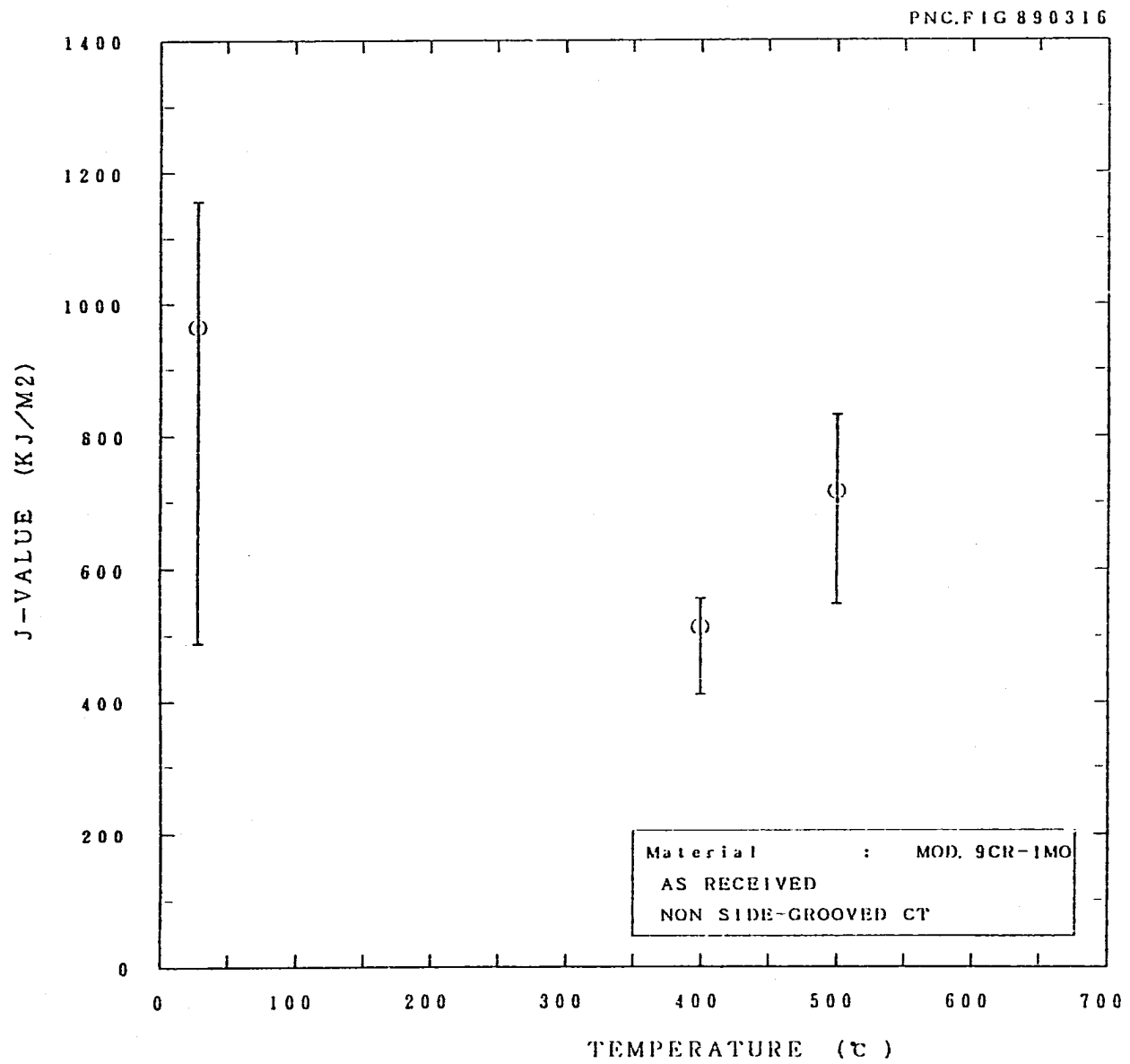


Fig.21 Relationships between  $J_a$  value and temperature  
( $t = 20\text{mm}$ , As received material, not side-grooved)



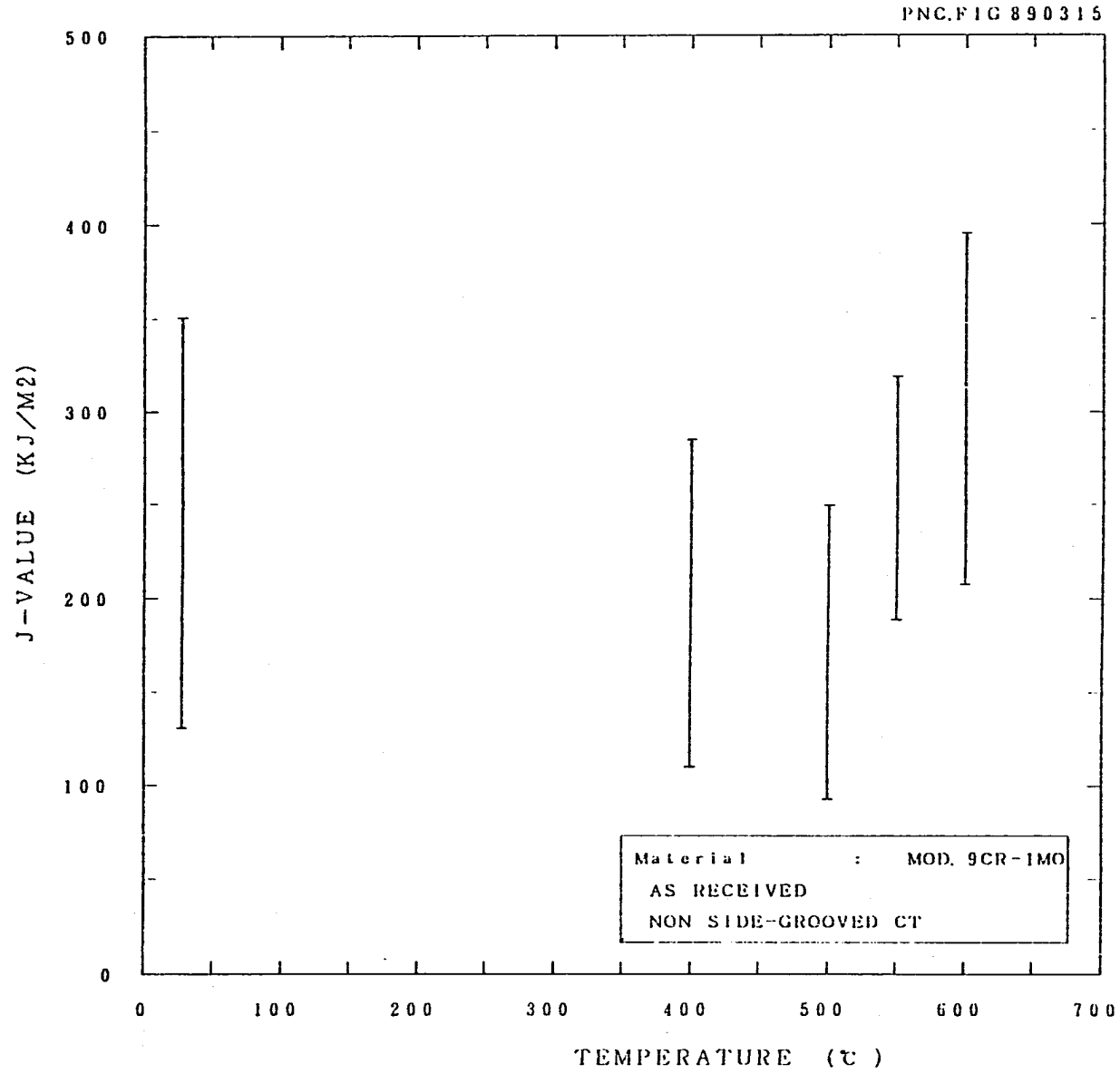


Fig.22 J value calculated from fracture  
( t =20mm, As received material, not side-grooved)

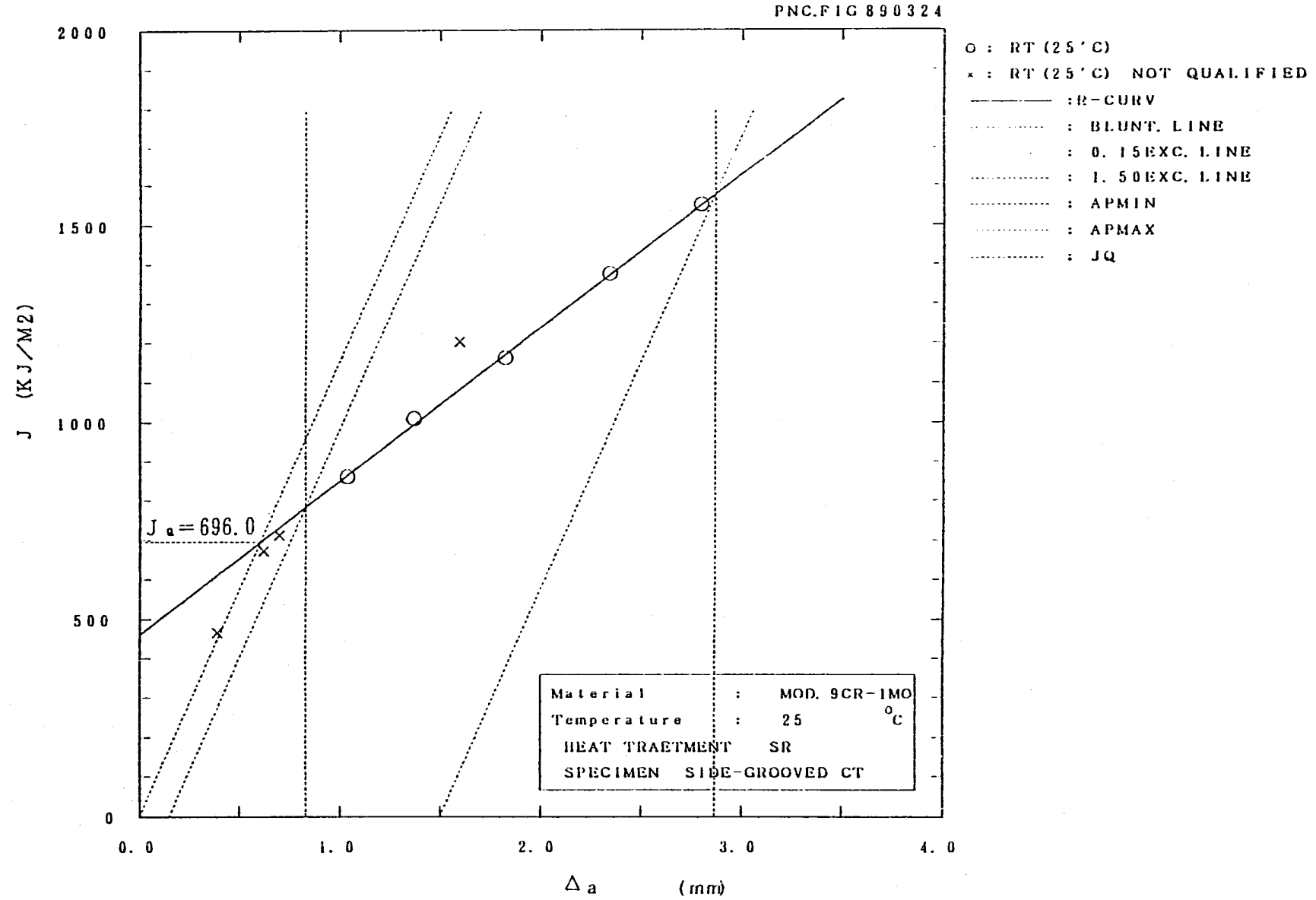


Fig. 23.1 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t = 20\text{mm}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve)

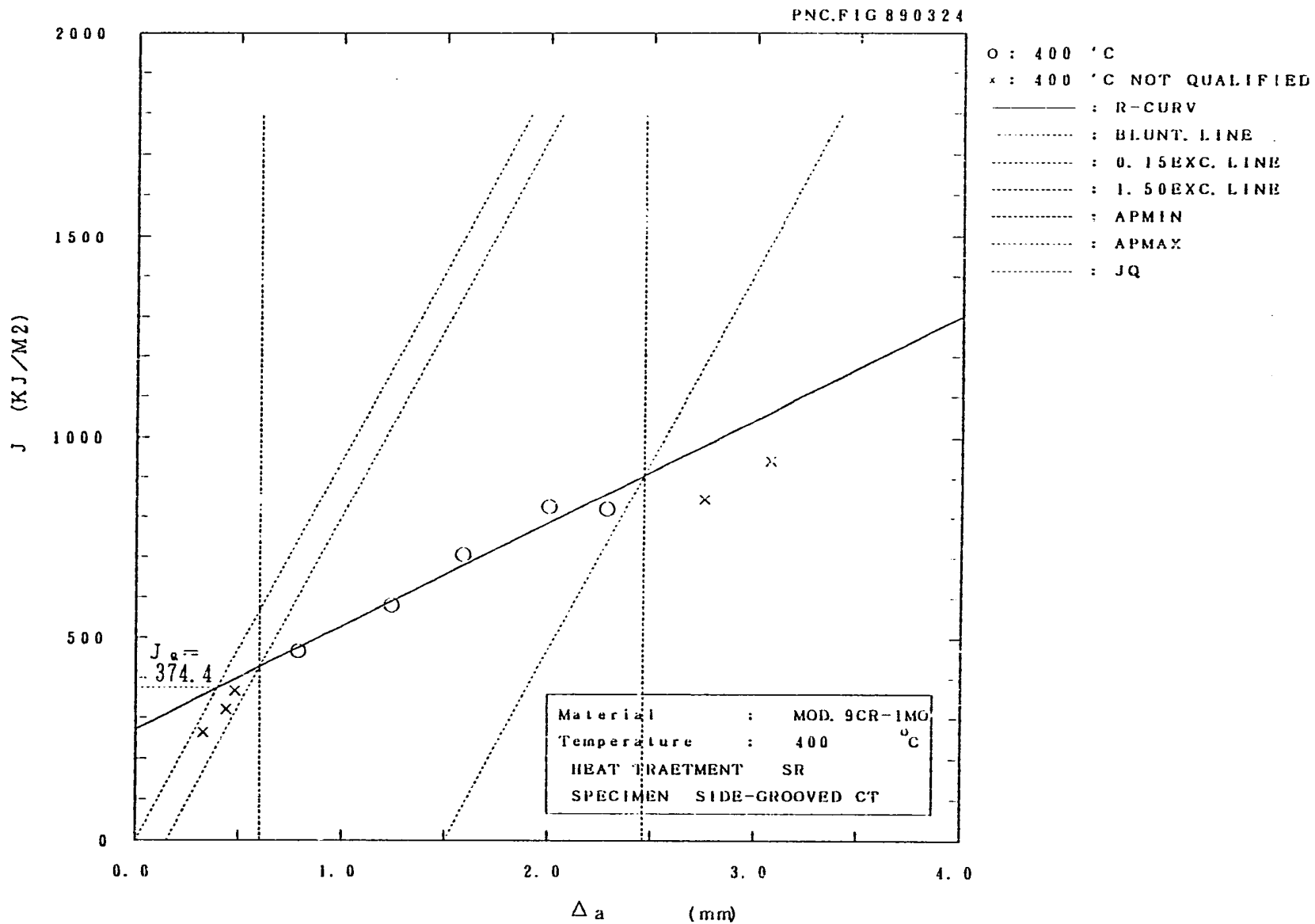


Fig.23.2 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
( $t=20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve)

PNC.FIG 890324

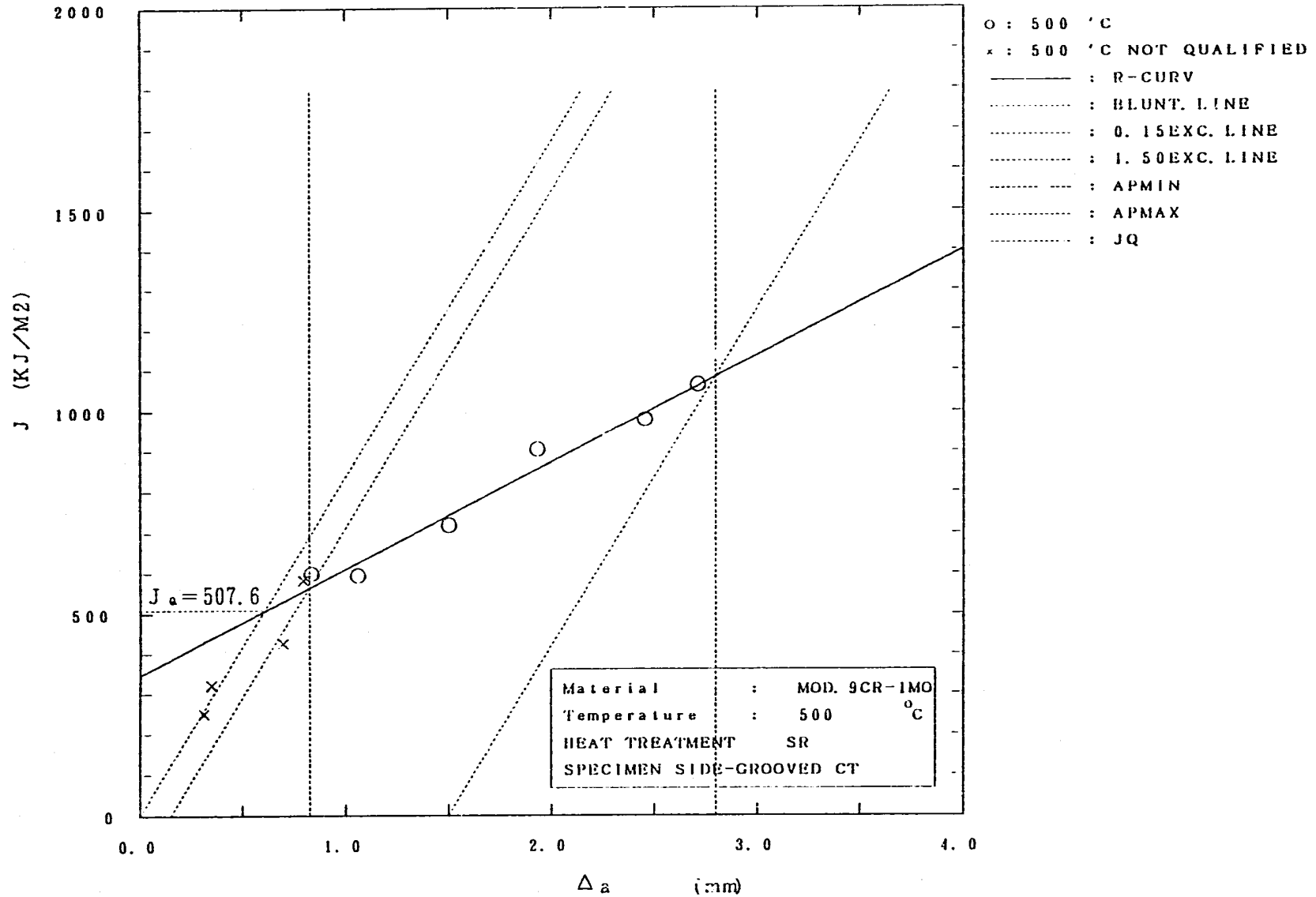


Fig. 23.3 Relationships between J<sub>a</sub> value and Δa  
 (t = 20mm, 500°C, SR material, side-grooved, R-curve)

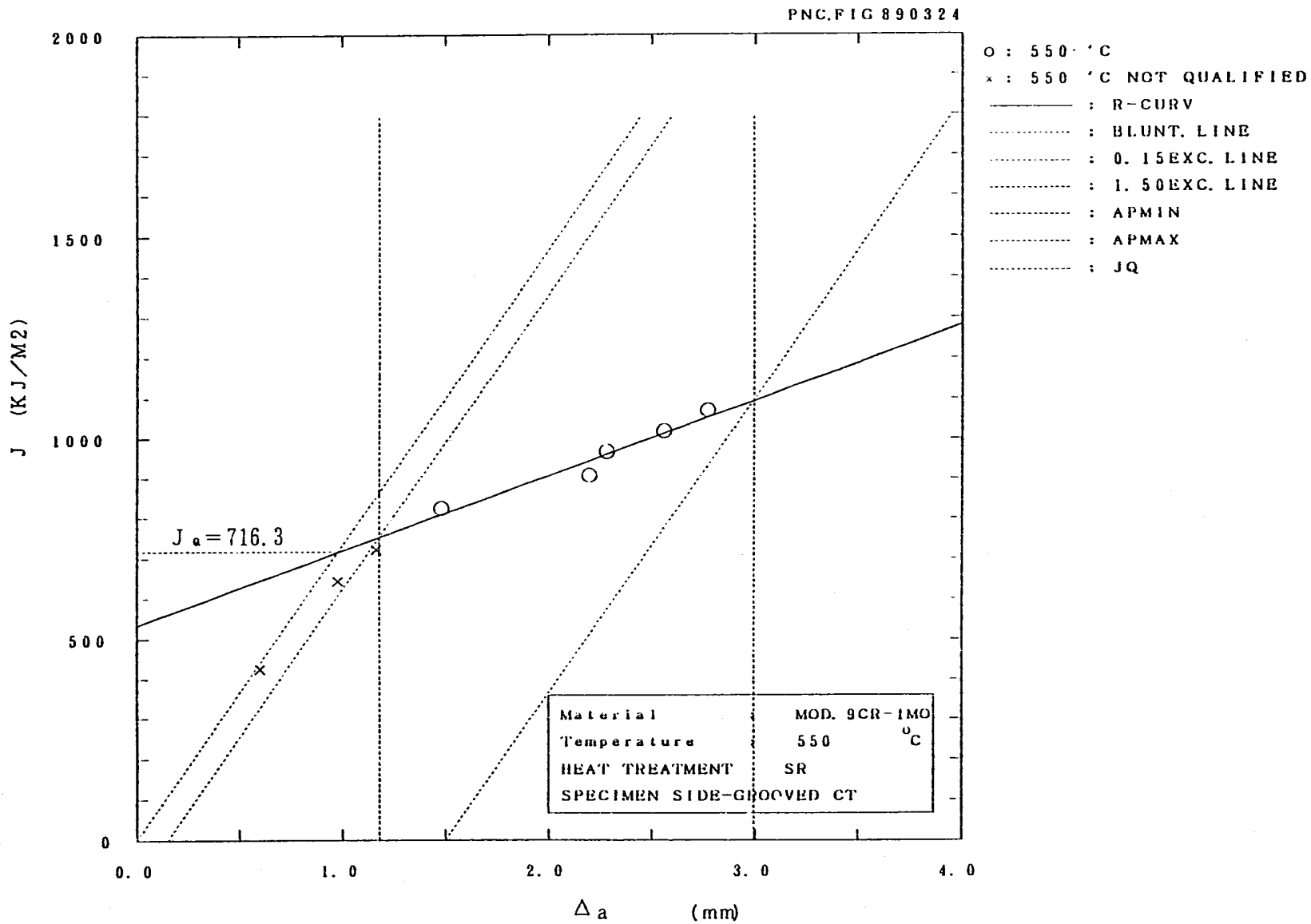


Fig.23.4 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20$ mm,  $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve)

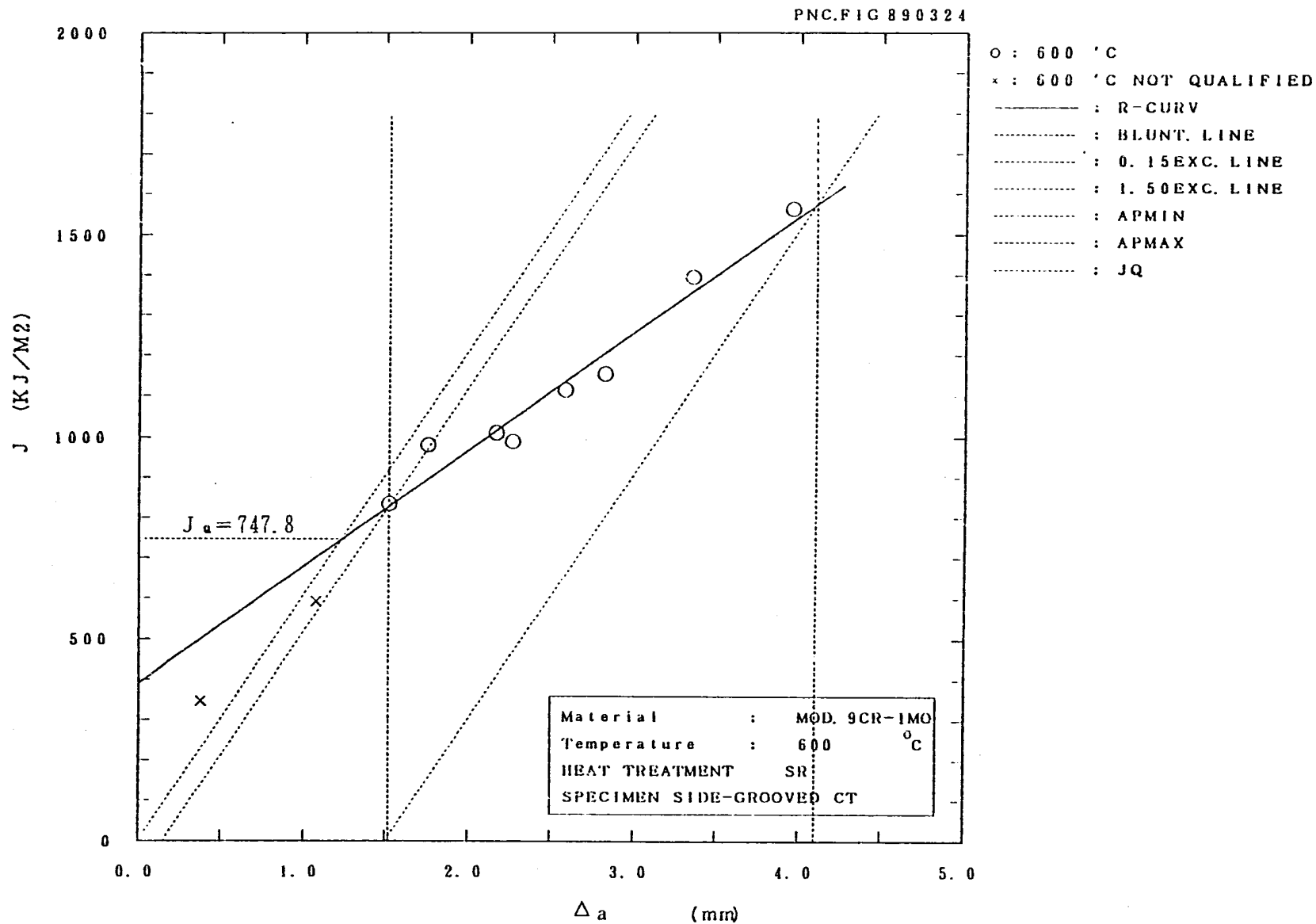


Fig.23.5 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve)

PNC.FIG 890227

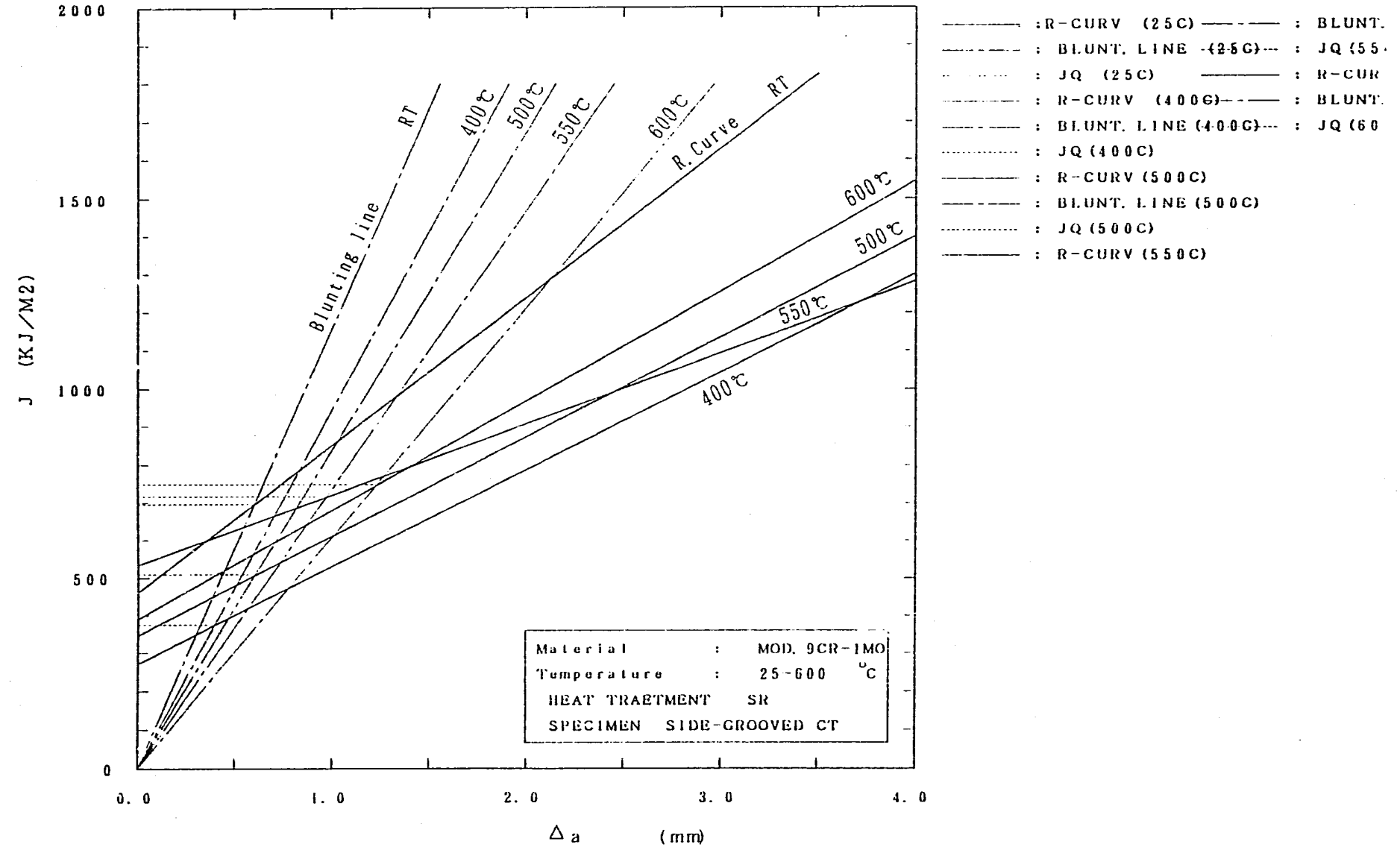


Fig. 23.6 Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $25\sim 600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, R-curve)

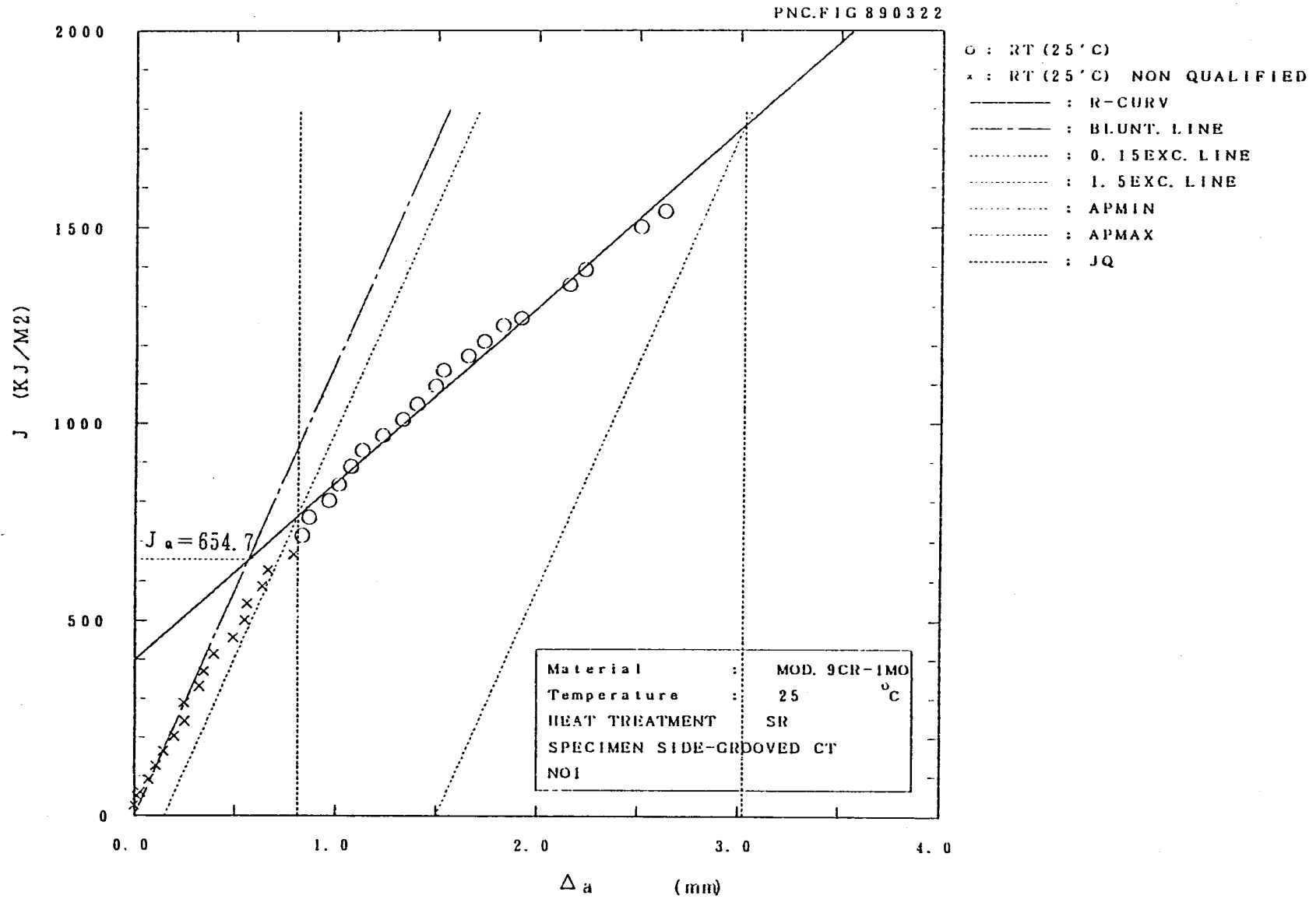


Fig.24.1(a) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)



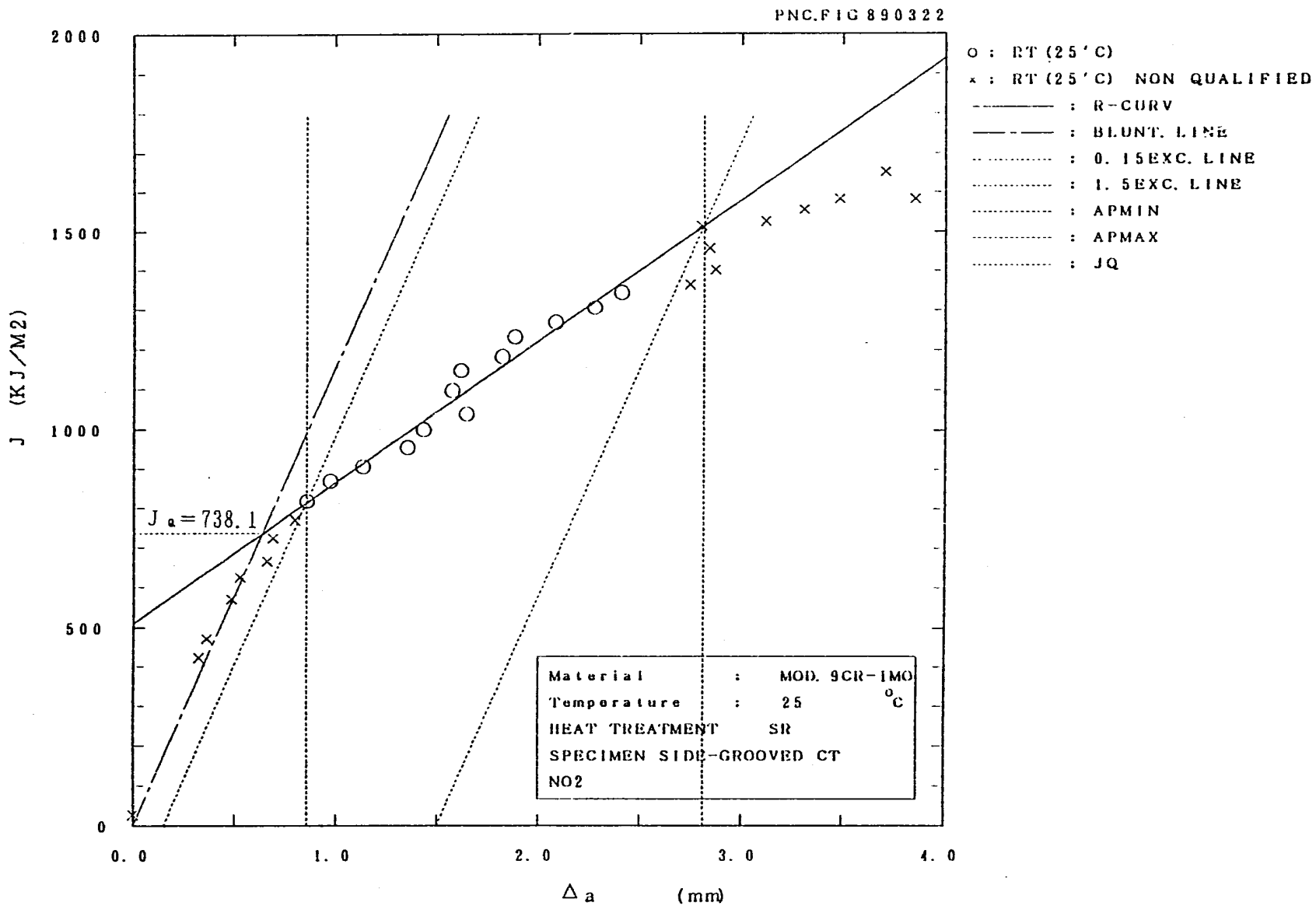


Fig. 24.1(b) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

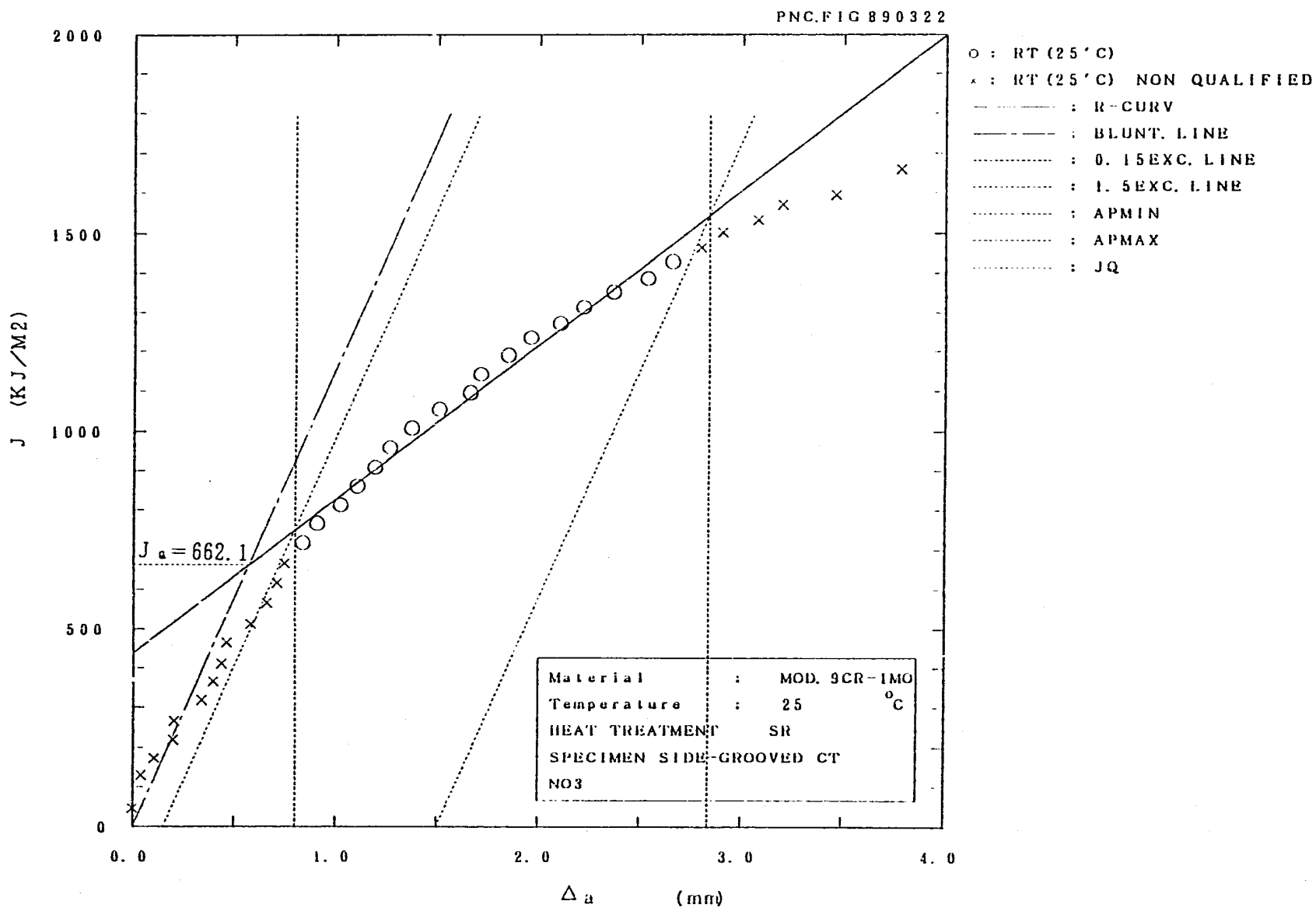


Fig. 24.1(c) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

PNC.FIG 890322

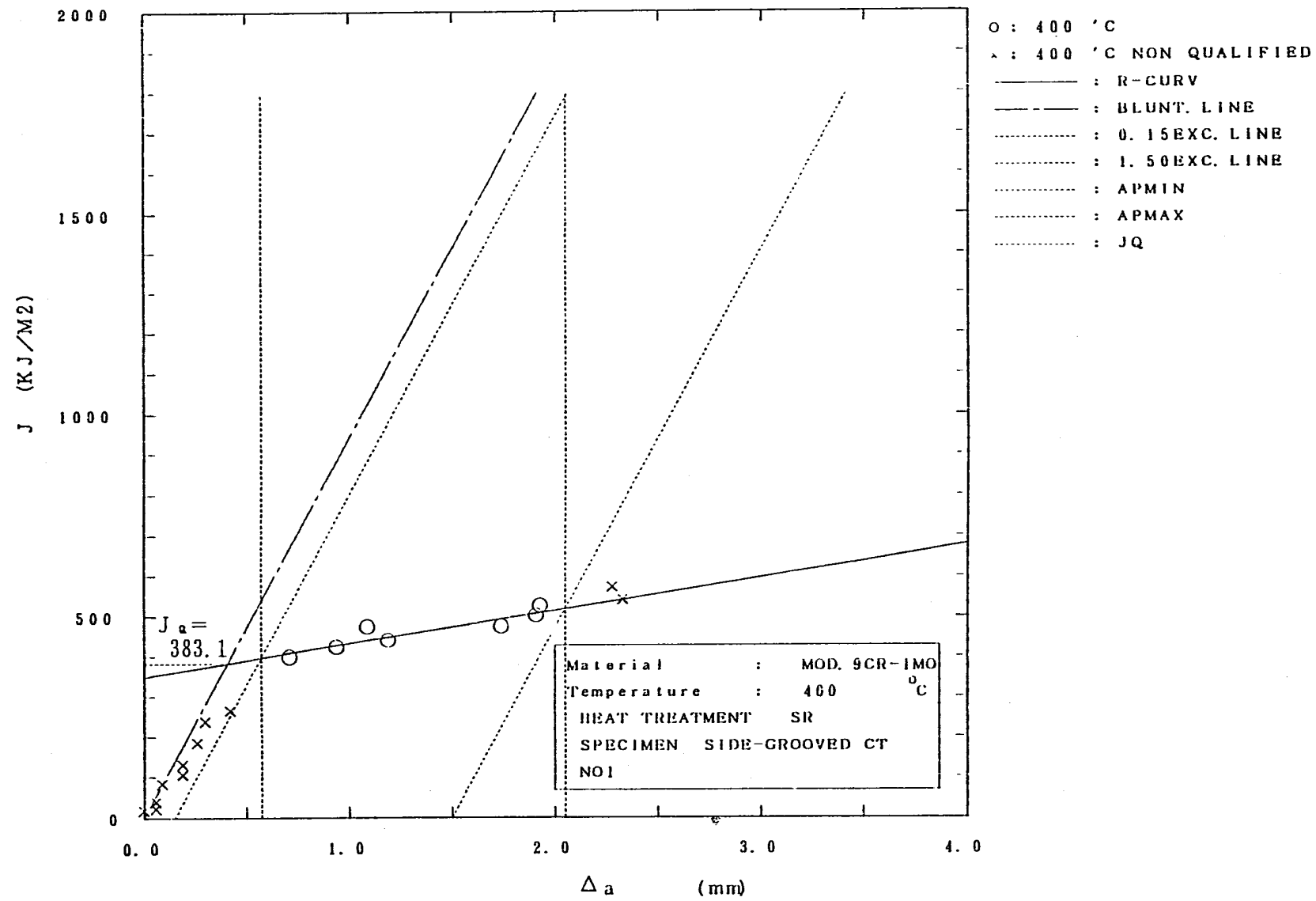


Fig. 24.2(a) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

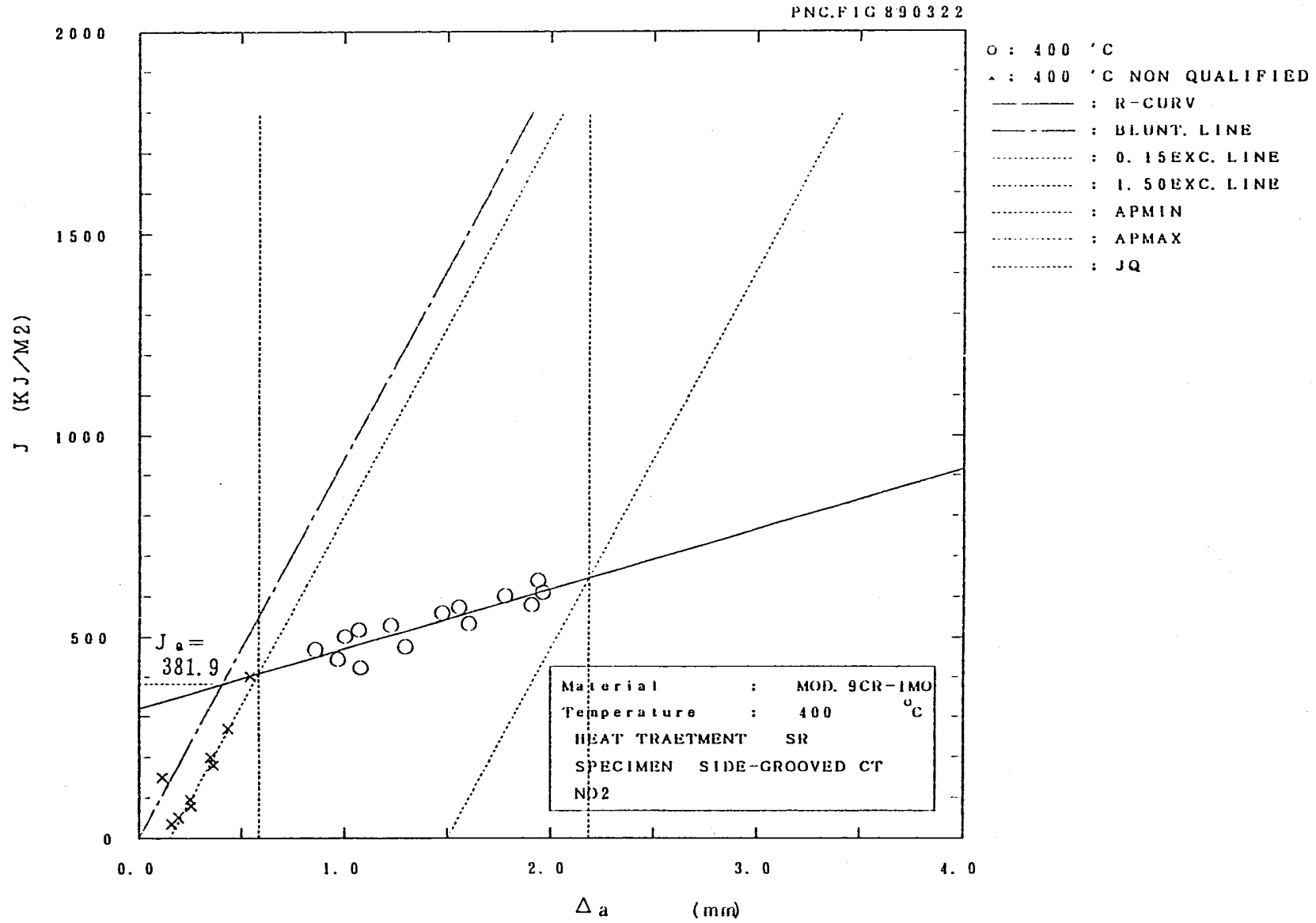


Fig.24.2(b) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

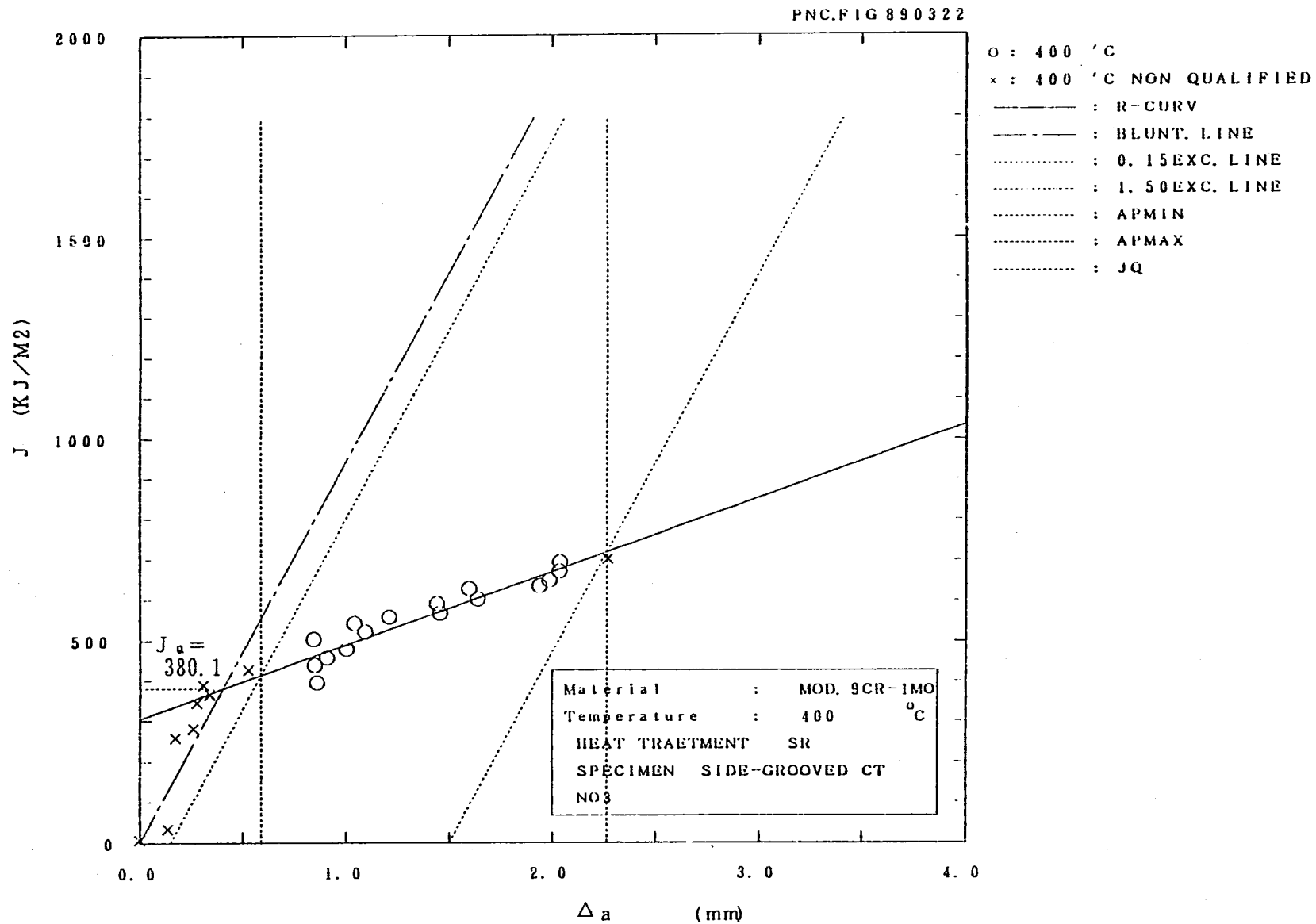


Fig. 24.2(c) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

PNC.FIG 890322

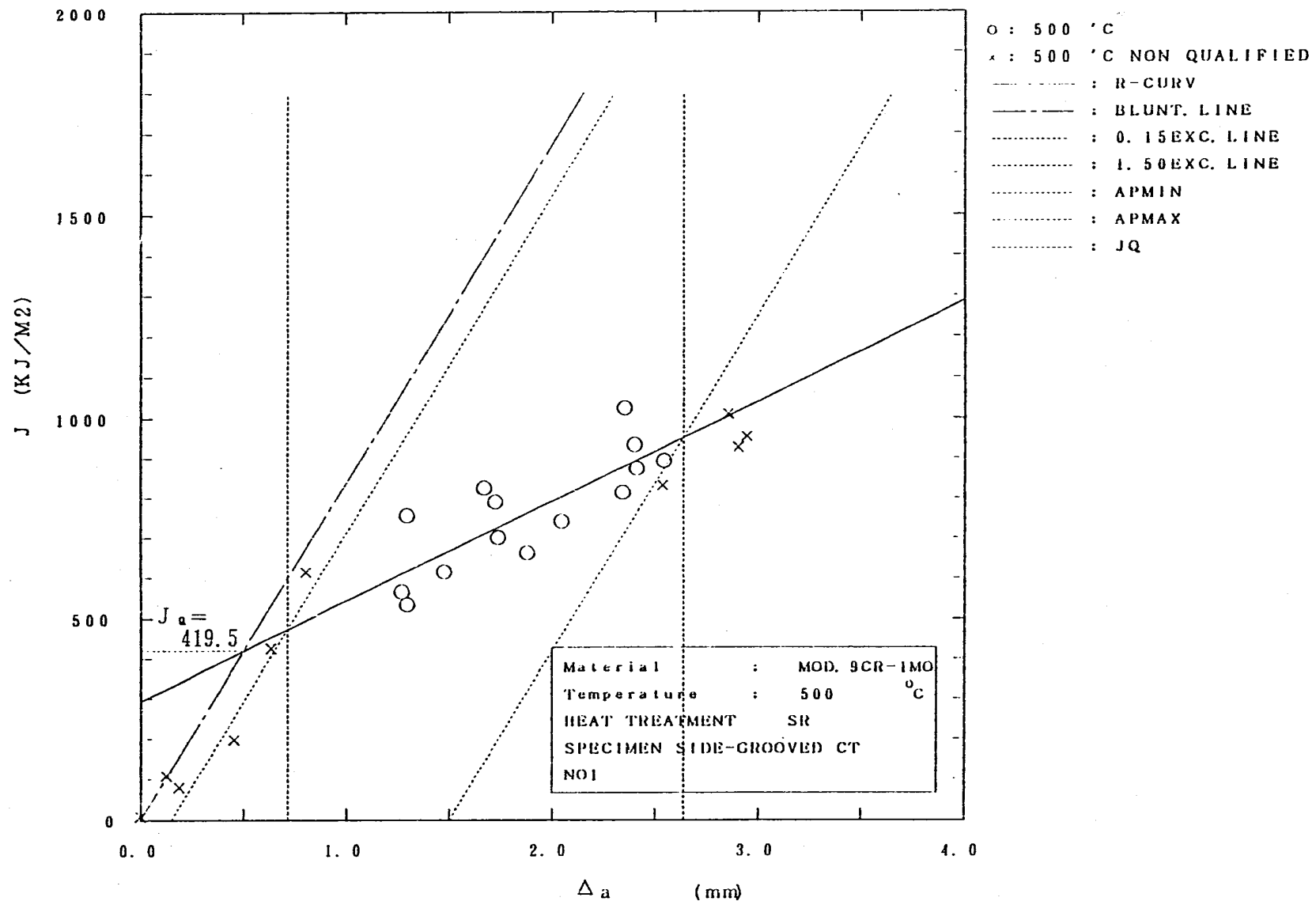


Fig.24.3(a) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , SR material, side grooved, unloading compliance)

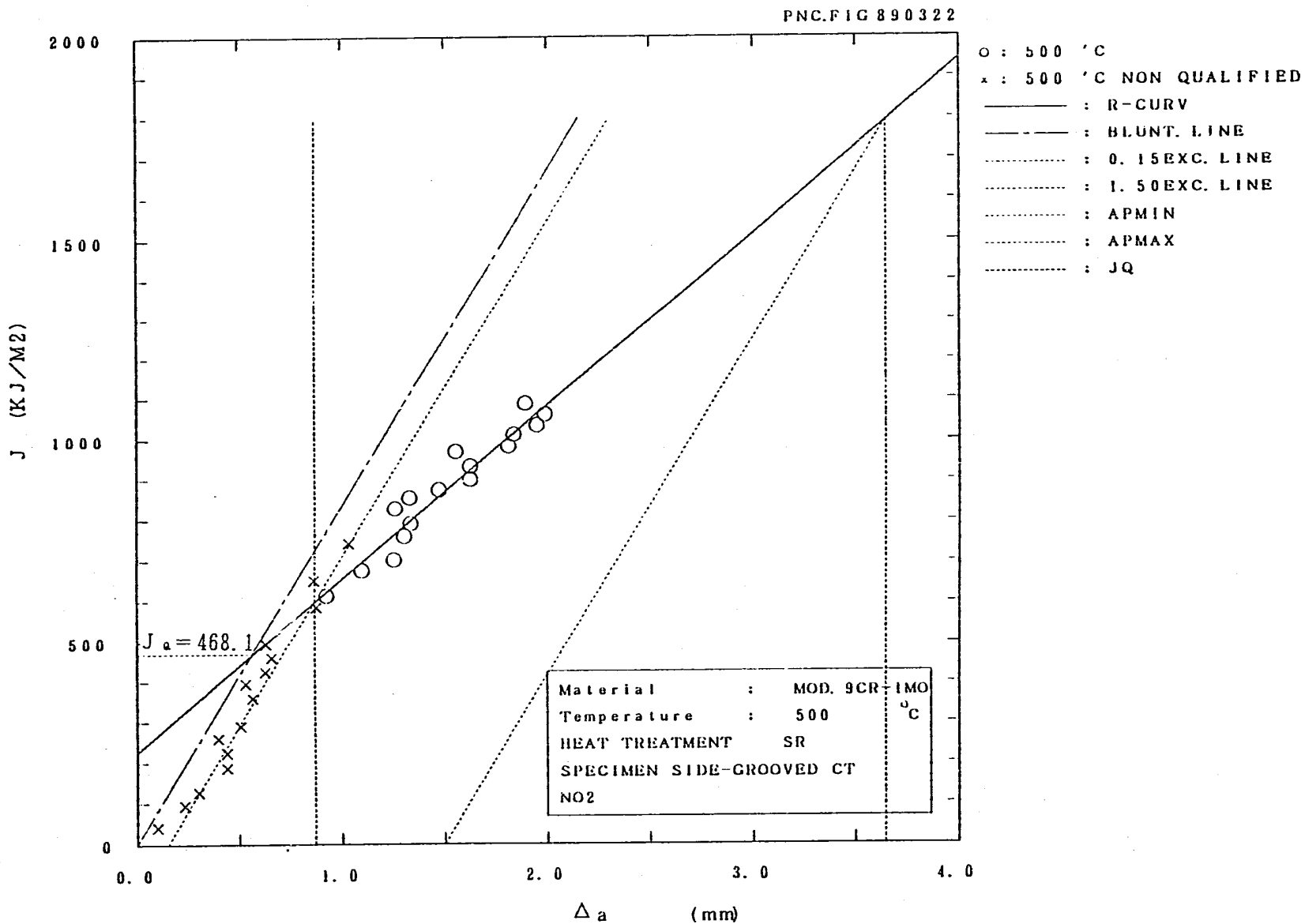


Fig.24.3(b) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

PNC.FIG 890322

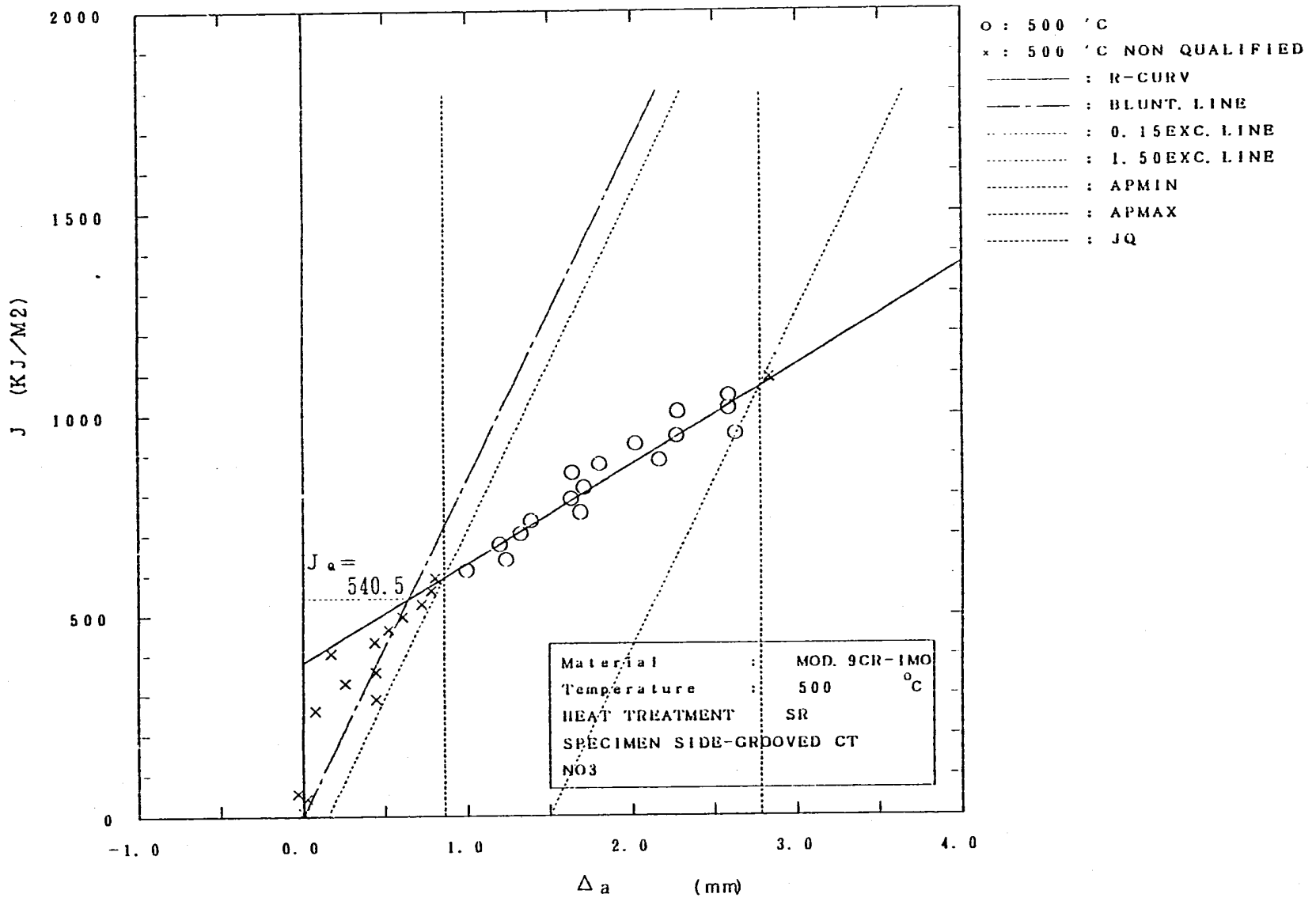


Fig. 24.3(c) Relationships between  $J_e$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)



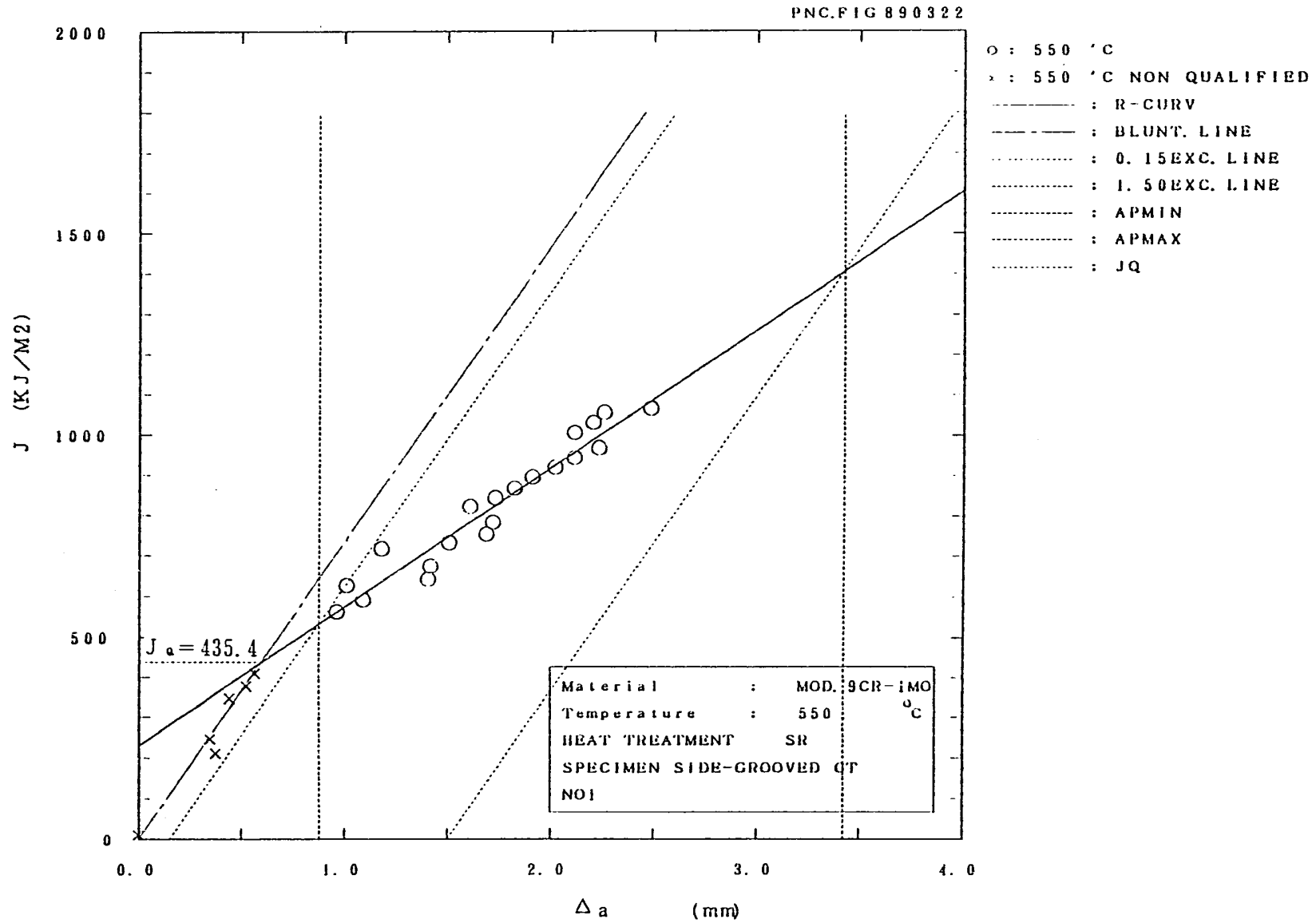


Fig. 24.4(a) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

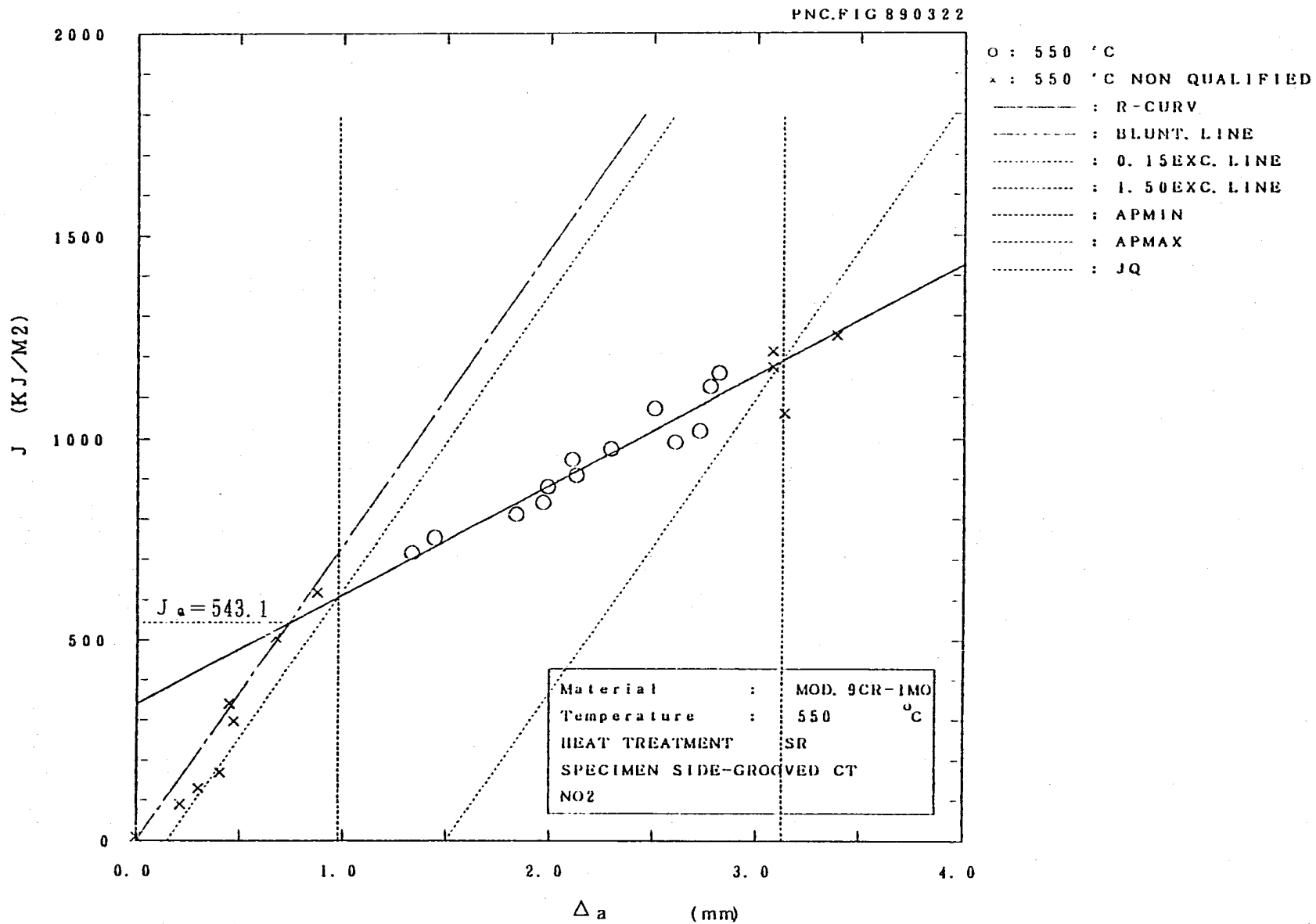


Fig. 24.4(b) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , SR material, side grooved, unloading compliance)

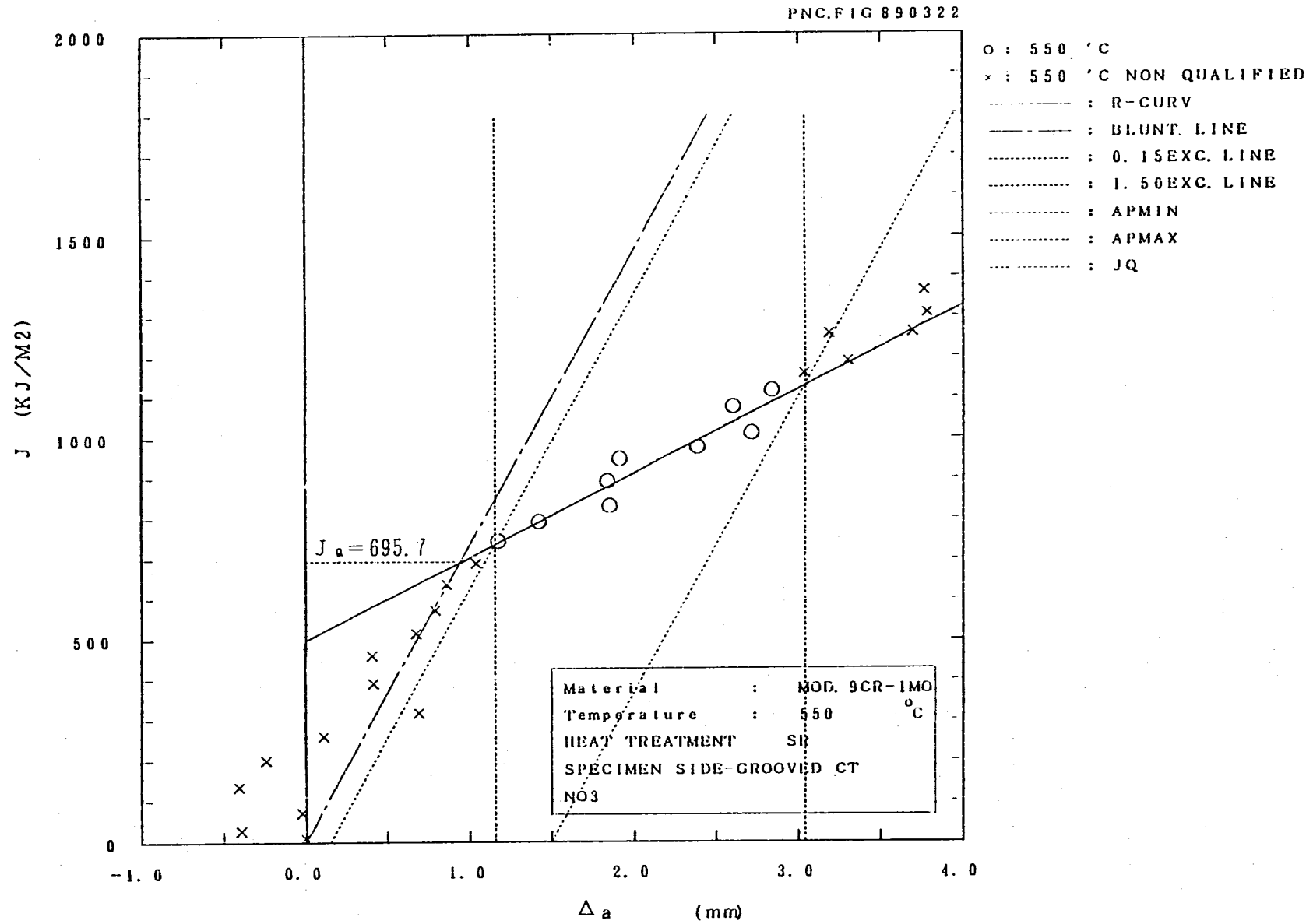


Fig. 24.4(c) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $550^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

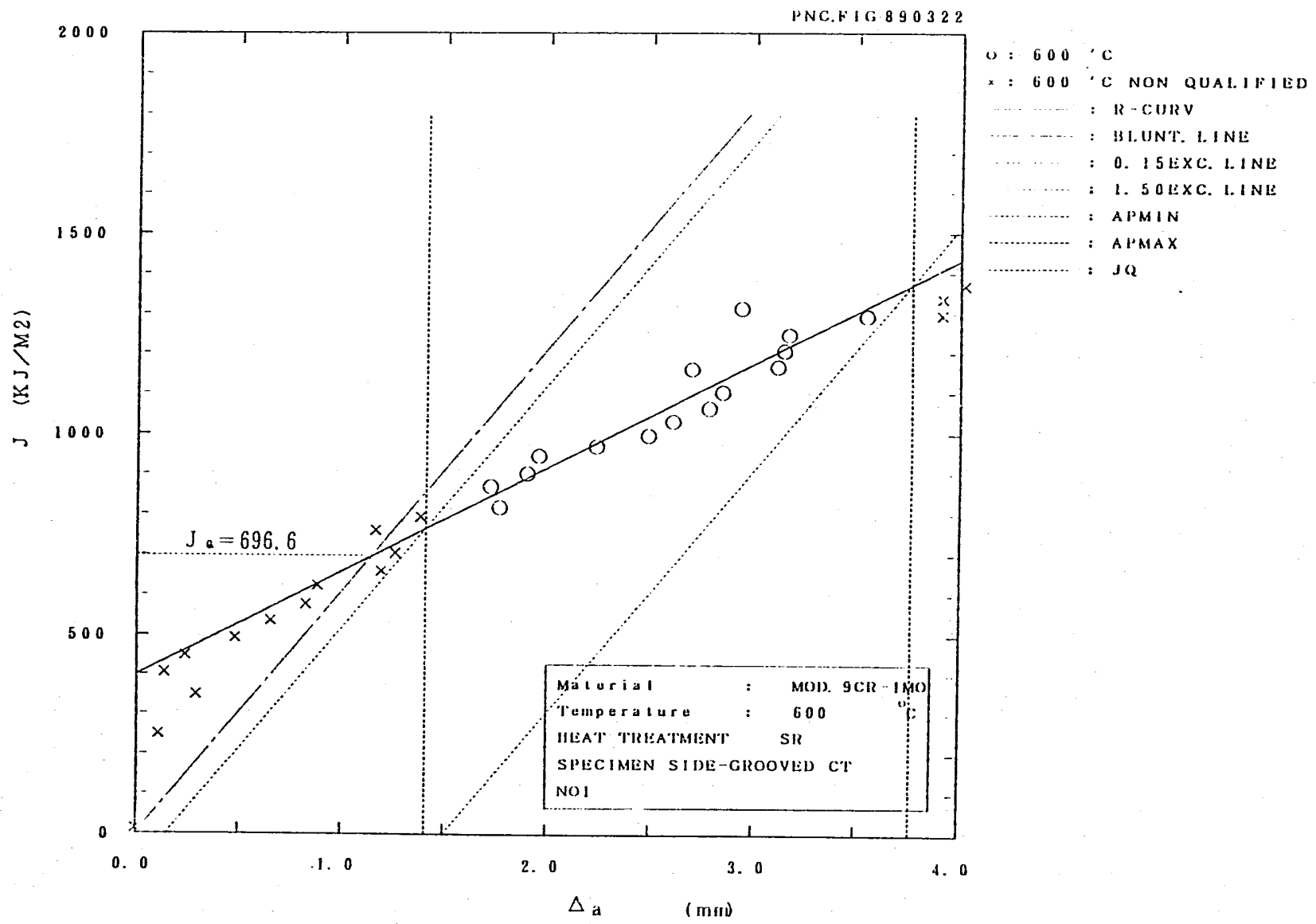


Fig. 24.5(a) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

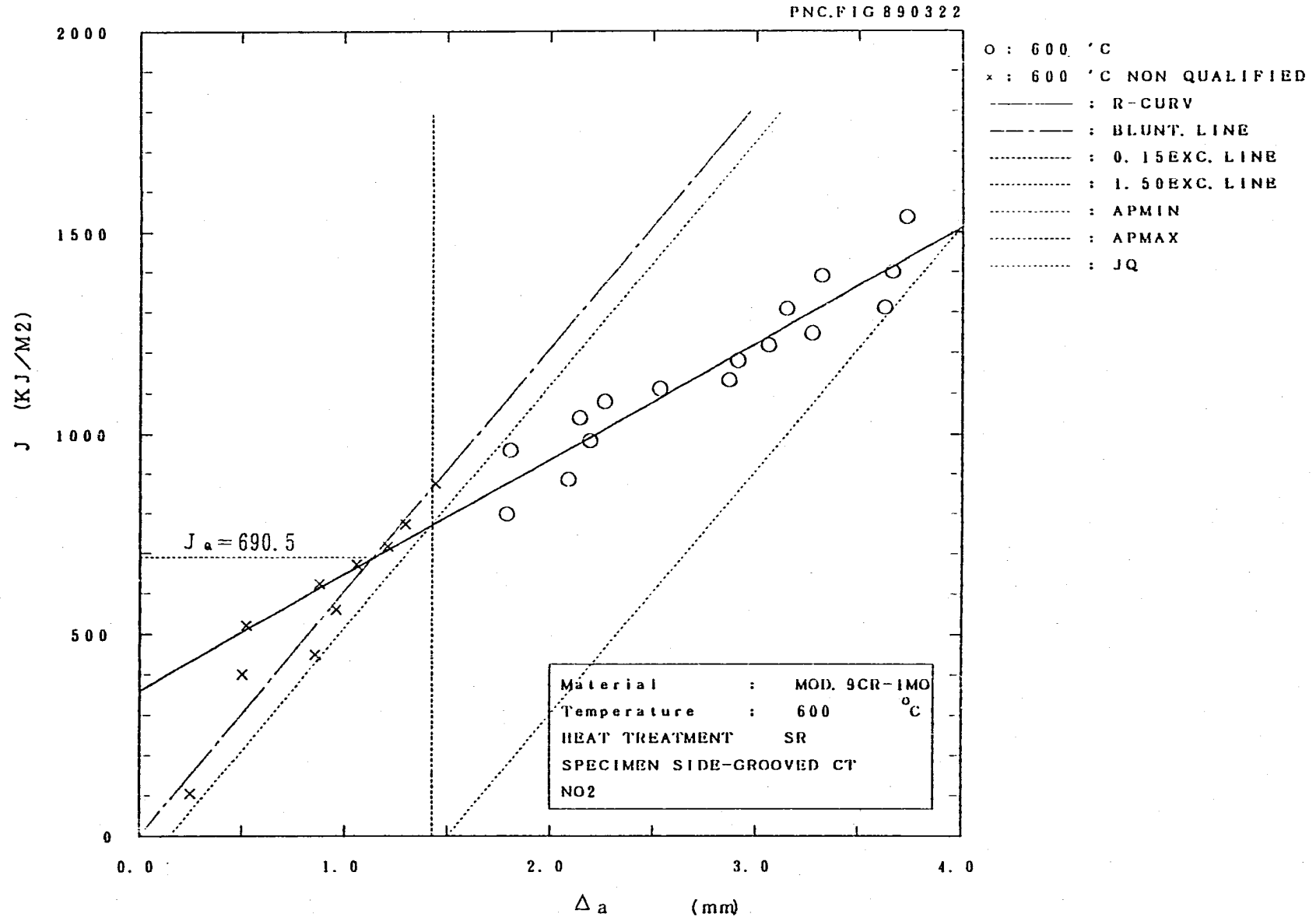


Fig. 24.5(b) Relationships between  $J_a$  value and  $\Delta a$   
 ( $t = 20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

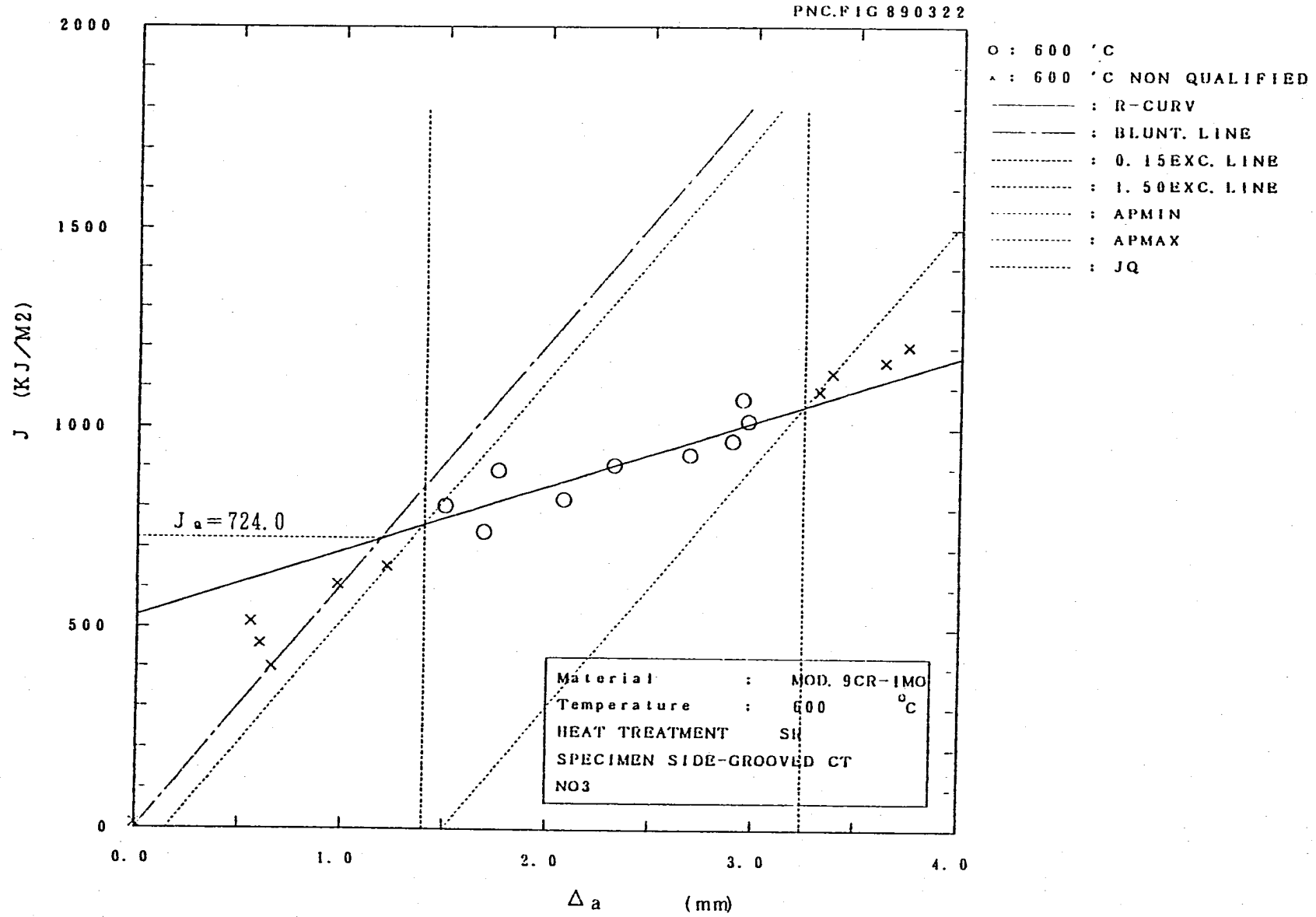


Fig. 24.5(C) Relationships between  $J_0$  value and  $\Delta a$   
 ( $t=20\text{mm}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)

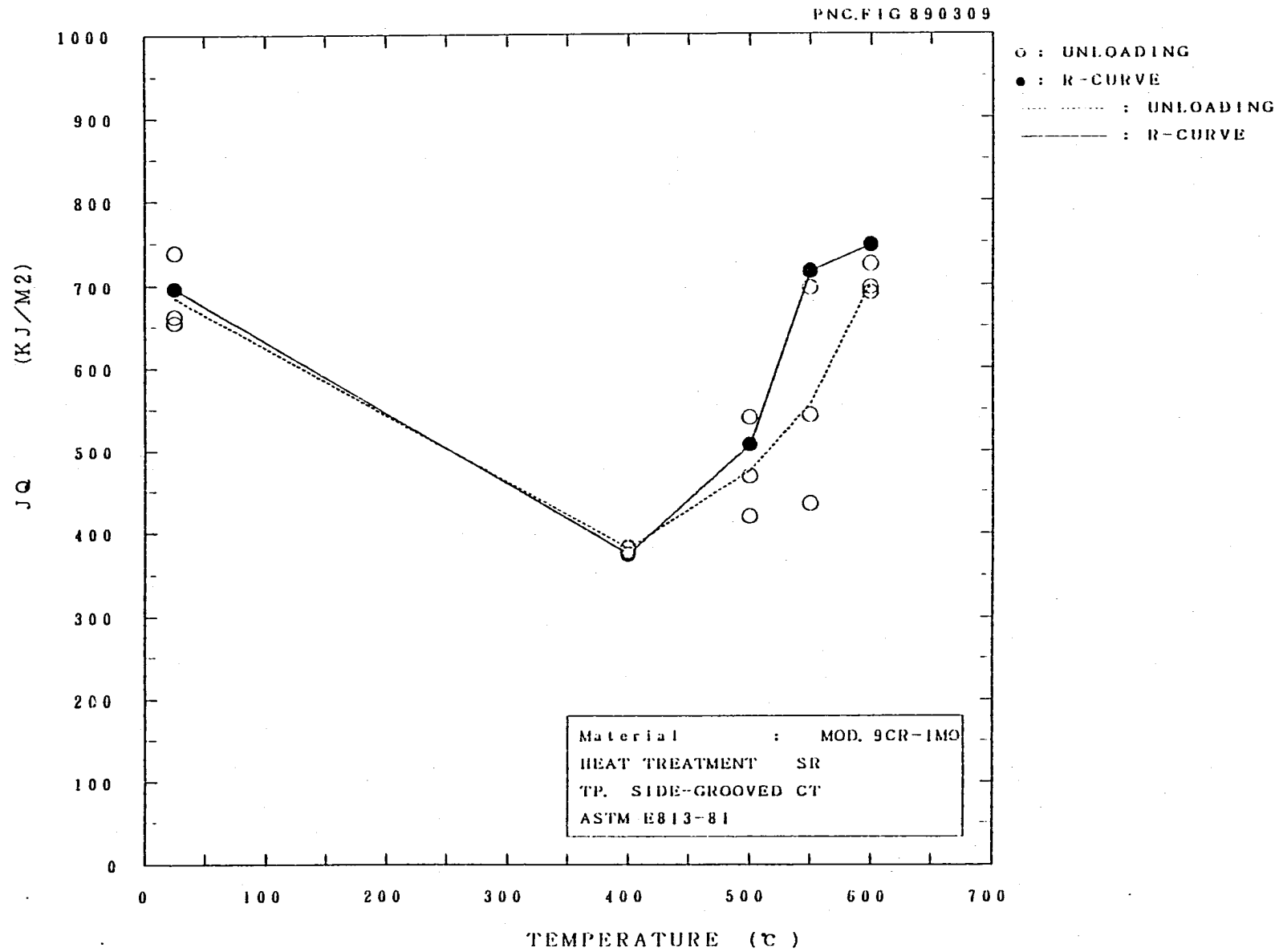
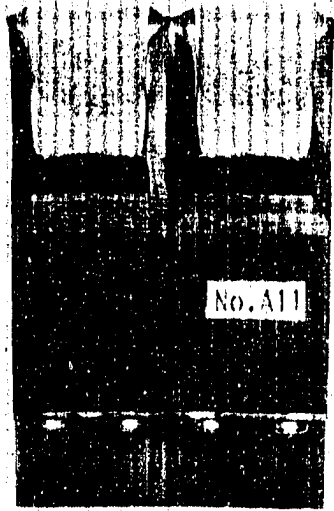
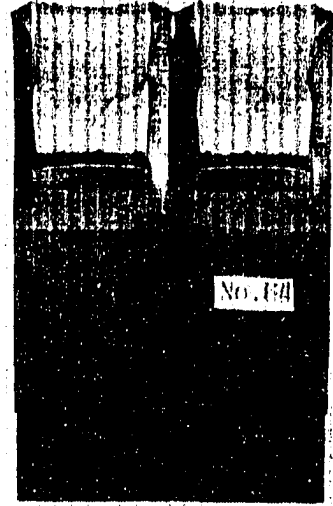


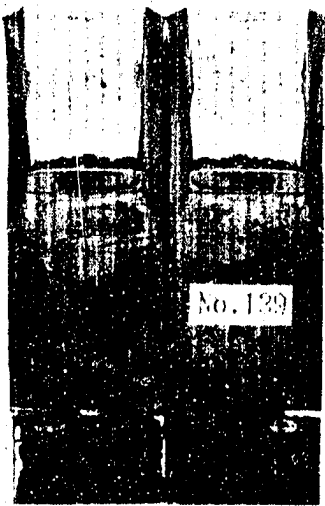
Fig. 24.6 Relationships between  $J_a$  value and temperature  
( $t = 20\text{mm}$ , SR material, side-grooved, unloading compliance)



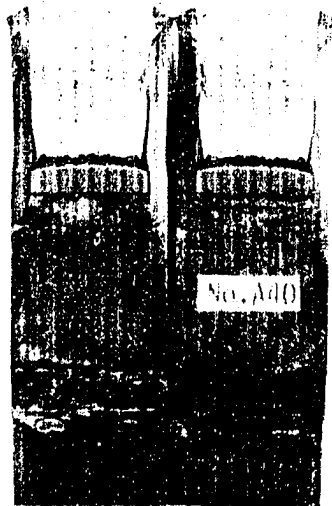
$\Delta a : 1.597\text{mm}$



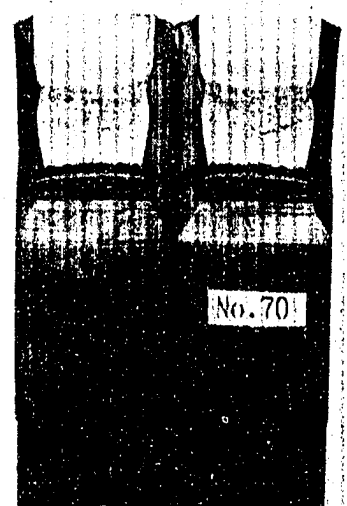
$\Delta a : 1.591\text{mm}$



$\Delta a : 1.506\text{mm}$



$\Delta a : 1.480\text{mm}$



$\Delta a : 1.523\text{mm}$

Fig. 25 Appearances of CT specimen  
( $t = 20\text{mm}$ ,  $25 \sim 600^\circ\text{C}$ , SR material,  
side-grooved)



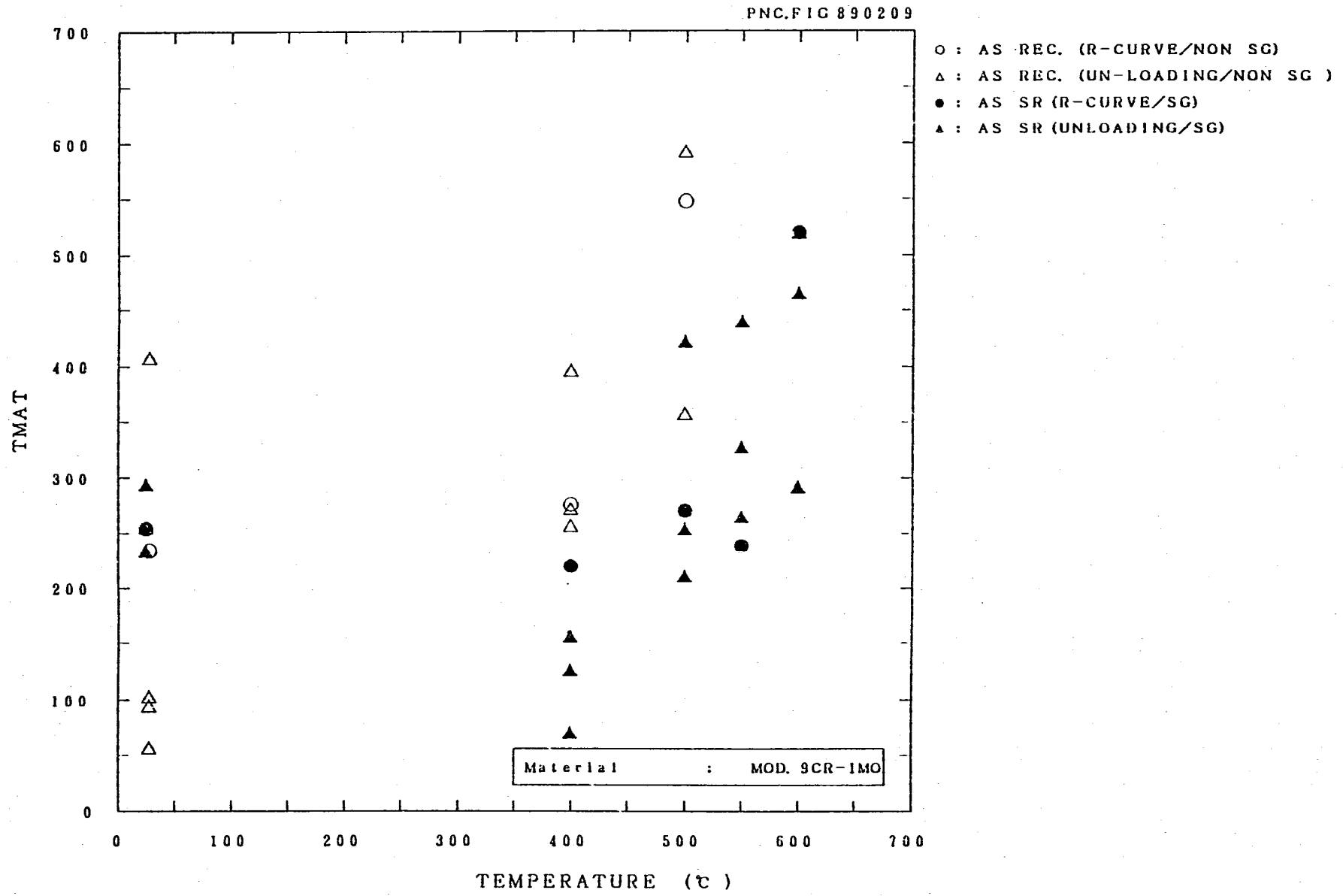


Fig.26 Relationships between T<sub>mat</sub> and temperature