

# 9Cr系鋼の高温破壊靱性試験(第2報)

1991年6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2報)

香川 裕之\* 小井 衛\* 和田 雄作\*

### 要 旨

高速大型炉の蒸気発生器の候補材として有力視されている9Cr系鋼の高温破壊靱性試験を、昭和62年度より3ヵ年計画で実施している。この一連の試験研究では、Mod.9Cr-1Mo鋼、9Cr-2Mo鋼および9Cr-1Mo-V-Nb鋼を供試材として、室温から600℃の温度範囲で、J積分をベースとした破壊靱性試験が実施されている。

第1年度では、Rカーブ法および除荷コンプライアンス法を用いた高温破壊靱性試験方法が確立され、Mod.9Cr-1Mo鋼の高温破壊靱性データが取得された。

第2年度では、9Cr-2Mo鋼と9Cr-1Mo-V-Nb鋼およびこれら3鋼種の5000時間時効材の破壊靱性試験が実施されるとともに、破壊靱性値に影響をおよぼすいくつかの因子が抽出された。本報告は、この第2年度の成果をとりまとめたものである。

第2年度までの成果を踏まえ、第3年度では、厚肉母材と溶接部の破壊靱性試験を実施するとともに、破壊靱性値に及ぼすき裂方向の影響についても検討を加える予定である。

---

\* 大洗工学センター，機器構造開発部，材料開発室

Fracture Toughness Tests of 9 Cr Type  
Steels at Elevated Temperature  
( 2 nd. Report)

Hiroyuki Kagawa \* Mamoru Koi \* Yusaku Wada \*

**Abstract**

A series of high temperature fracture toughness tests of 9Cr type steels was put in practice on a three-years scheme in 1988. In this experimental study, Mod. 9Cr-1Mo steel, 9Cr-2Mo steel and 9Cr-1Mo-Nb-V steel are tested, and these fracture toughness are investigated on the basis of J integral.

In a first year, high temperature fracture toughness test method was established using R-curve method and unloading compliance method, and  $J_a$  values of Mod. 9Cr-1Mo steel were measured at RT, 400 °C, 500 °C, 550 °C and 600°C.

In a second year, fracture toughness tests of 9Cr-2Mo steel, 9Cr-1Mo-V-Nb steel and these aged materials were performed, and several factors which affected fracture toughness values of 9Cr type steels were clarified. In this report, the test results in a second year are summarized.

In a last year, fracture toughness tests of weldment and thick plate of 9Cr type steel are going to be carried out. Furthermore, an effect of crack direction on  $J_a$  value will be studied.

---

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

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 試験方法 .....	1
2.1 供試材 .....	1
2.2 破壊靱性試験方法 .....	1
2.3 破壊靱性試験条件 .....	3
3. 試験結果 .....	4
4. 考 察 .....	6
4.1 Rカーブ法と除荷コンプライアンス法の比較 .....	6
4.2 サイドグループの効果 .....	7
4.3 試験片採取方向の影響 .....	7
4.4 ストレッチゾーン深さと $J_a$ の関係 .....	8
5. 結 言 .....	9
謝 辞 .....	10
参考文献 .....	11
付録1. 9Cr系鋼破壊靱性試験結果の詳細 .....	38
付録2. SUS304と2.25Cr-1Mo鋼の破壊靱性値 .....	71
付録3. 破壊靱性に及ぼすき裂採取方向の影響 .....	77

**List of Tables**

Table 1	Chemical compositions of tested 9Cr type steels .....	12
Table 2	Fracture toughness test conditions .....	13
Table 3	Measured $J_a$ values .....	14
Table 4	Measured $T_{mat}$ values .....	15
Table A1	R-curve tests results of Mod. 9Cr-1Mo (S) steel .....	39
Table A2	R-curve tests results of 9Cr-2Mo steel .....	43
Table A3	R-curve tests results of Mod. 9Cr-1Mo (N) steel .....	47
Table A4	R-curve tests results of 9Cr-1Mo-V-Nb .....	51
Table A5	Chemical compositions of tested SUS304 and 2.25Cr-1Mo steels ....	72
Table A6	Measured $J_a$ and $T_{mat}$ values of SUS304 and 2.25Cr-1Mo steels ....	72
Table A7	R-curve tests results of SUS304 stainless steel .....	73
Table A8	R-curve tests results of 2.25Cr-1Mo steel .....	74
Table A9	Effect of crack direction upon fracture toughness values of 9Cr type steels .....	78

**List of Figures**

Fig. 1	Tensile properties of tested materials .....	16
Fig. 2	Charpy impact test results .....	18
Fig. 3	J-crack extension curves obtained by R-curve method .....	19
Fig. 4	Relationship between $J_a$ and test temperature .....	23
Fig. 5	Relationship between $T_{mat}$ and test temperature .....	24
Fig. 6	Load - load line displacement curves obtained by R-curve method ..	25
Fig. 7	Crack extension - load line displacement curves obtained by R-curve method .....	29
Fig. 8	Differences of $J_a$ and $T_{mat}$ values obtained by R-curve method and unloading compliance method .....	33
Fig. 9	Ratio of fracture toughness values by unloading compliance method to those by R-curve method .....	34
Fig. 10	Effect of side-groove on fracture toughness properties at RT .....	35
Fig. 11	Effect of side-groove on fracture toughness properties at 600°C .....	36
Fig. 12	Comparison of experimental obtained $J_a$ to those estimated using stretched zone depth .....	37
Fig. A1	Unloading compliance tests results of Mod. 9Cr-1Mo (S) steel .....	54
Fig. A2	Unloading compliance tests results of 9Cr-2Mo steel .....	60
Fig. A3	Unloading compliance tests results of Mod. 9Cr-1Mo (N) steel .....	65
Fig. A4	Unloading compliance tests results of 9Cr-1Mo-V-Nb steel .....	68
Fig. A5	Unloading compliance tests results of SUS304 stainless steel .....	75
Fig. A6	Unloading compliance tests results of 2.25Cr-1Mo steel .....	76

## 1. 緒 言

9Cr系鋼は高速大型炉の蒸気発生器の候補材として有望視されているが、蒸気発生器の構造健全性を評価するうえで重要な破壊靱性に関しては、筆者の知るところ国内外ともに、有効なデータの報告例もなく、試験法においても確立していないのが現状である。

そこで動燃事業団・材料開発室では、昭和62年度から3年計画で9Cr系鋼の高温破壊靱性試験法の確立ならびに有効なデータの取得を目的に研究を開始した。

昭和62年から63年にかけて行われた第1年度の試験研究では、試験方法の確立を目的とし、これまで主として低温で実施されてきた破壊靱性試験法の高温への適用を試みた。その結果Rカーブ法および除荷コンプライアンス法により高温での $J_p$ 値を測定できることを明らかにした。また主としてMod. 9Cr-1Mo鋼SR処理材の破壊靱性データを蓄積した。これらの結果は「9Cr系鋼の高温破壊靱性試験（第1報）」<sup>1)</sup>にまとめた。

第2年度の試験研究は初年度に確立した試験法に基づき昭和63年から平成元年にかけて行い、9Cr-2Mo鋼と9Cr-1Mo-V-Nb鋼SR材および9Cr系鋼3鋼種のSR+時効材の高温破壊靱性データを取得した。本報告では9Cr系鋼の高温破壊靱性値に及ぼす各種効果のうち時効の影響を明らかにするとともに鋼種間の差を明らかにする。

第3年度ではこれまでの板厚効果試験の知見に基づき、より厚肉の試験片を用い高温における $J_{Ic}$ 試験を確立するとともに、破壊靱性値に及ぼすき裂方向の影響を明らかにする。さらに溶接部の破壊靱性値についても評価、検討を加える予定である。



## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

住友金属(株) (以下S社と呼ぶ)製のMod. 9Cr-1Mo鋼, 9Cr-2Mo鋼と, (株)NKK (以下N社と呼ぶ)製のMod. 9Cr-1Mo鋼, 9Cr-1Mo-V-Nb鋼の4種類の鋼板を試験に用いた。いずれも板厚25mmの圧延板である。化学成分をTable 1に示す。これらの4鋼種にSRおよびSR+時効の2種類の熱処理を施して, 供試材とした。時効熱処理条件は既報<sup>2)</sup>による時効による高クロムモリブデン鋼における衝撃エネルギー値の低下の結果から550℃×5000時間とした。

供試材の室温から600度の温度範囲での引張特性を, Fig. 1に示す。4種類のうち, Mod. 9Cr-1Mo (S社)鋼と9Cr-2Mo鋼に関しては, 試験片長手方向が圧延方向に一致 (L方向) するよう, Mod. 9Cr-1Mo (N社)鋼と9Cr-1Mo-V-Nb鋼に関しては直交 (C方向) するよう, それぞれ試験片を採取している。なお, 図中白抜印はSR処理材の, 黒塗印はSR+時効処理材の結果をそれぞれ示している。

供試材のシャルピー衝撃試験における脆性破面率と吸収エネルギーを, Fig. 2に示す。試験片は, いずれの鋼種においても, ノッチ方向が圧延方向と直交するよう採取されている。

### 2.2 破壊靱性試験方法

破壊靱性試験は, 複数試験片法であるRカーブ法と, 代表的な単一試験片法である除荷コンプライアンス法の2通りの方法で実施した。試験片としては20mm厚さの1TCTタイプのコンパクトテンション試験片を用い, 平面ひずみ状態を実現する目的で片側2.5mmのサイドグループを試験片両側に設けた。4鋼種のうち, Mod. 9Cr-1Mo (S社)鋼と9Cr-2Mo鋼では, き裂方向が圧延方向と直交するよう (L-Tタイプ<sup>3)</sup>), またMod. 9Cr-1Mo (N社)鋼とTEMPALOY SW9鋼では一致するよう (T-Lタイプ), それぞれ試験片を採取した。また, 疲労き裂の導入方法や, 疲労き裂およびき裂成長量の測定方法, J積分の評価方法,  $J_a$ 値の決定方法,  $J_{Ic}$ 条件等の試験方法の詳細は, ASTM E813<sup>4)</sup>に準拠した。

破壊靱性試験における荷重の負荷は、弾性域では1000Kgf/minの荷重制御で、塑性域では0.5mm/minの荷重線変位制御で行った。但し除荷コンプライアンス試験においては、塑性域においても、除荷時のみは荷重制御とした。高温における除荷コンプライアンス試験では、応力緩和の影響を取り除く目的で、応力緩和速度が10Kgf/minになった時点で除荷を開始した。除荷速度が1000kgf/minであるので、コンプライアンス値に及ぼす応力緩和の影響は無視し得ると判断した。除荷量は除荷開始時の荷重の10%を目標としたが、高温では応力緩和により著しい荷重低下を生じ、このため除荷量を最大25%にまで増加して試験を行った。なお除荷コンプライアンス試験では、除荷の開始および終了時に、データの取込みのため、10秒程度負荷を停止している。

除荷コンプライアンス値からき裂長さへの換算は、ASTM E813に従って行った。但し、試験後の試験片破面から疲労き裂長さとき裂成長量を測定し、これらの値を用いて計算されたき裂長さを修正した。

$J_a$ もしくは $J_{Ic}$ 値のほかに、き裂成長抵抗としてティアリングモデュラス $T_{mat}$ を、(1)式を用いて算出した。

$$T_{mat} = dJ / da \cdot E / \sigma_f^2 \quad (1)$$

ここで、 $J$ は $J$ 積分、 $a$ はき裂成長量、 $E$ はヤング率、 $\sigma_f$ は流動応力（引張強さと0.2%耐力の平均）である。ヤング率の値は文献1)から引用した。但し文献1)では375℃以上の値しか規定していないので、室温のヤング率はオーステナイト系ステンレス鋼の20℃の値<sup>5)</sup>で代用した。

### 2.3 破壊靱性試験条件

破壊靱性試験条件の一覧を、Table 2に示す、4鋼種とも、SR処理材は室温、400℃、500℃、600℃の5温度で、SR+時効処理材は室温と550℃の2温度で、それぞれRカーブ法と除荷コンプライアンス法の両方で試験を実施した。

### 3. 試 験 結 果

Rカーブ法により得られたJ積分とき裂成長量の関係を、Fig. 3に示す、図中の鈍化直線は、便宜上4鋼種の流動応力の平均値を用いて引いてる。点線は鈍化直線に平行に引いた0.15mmおよび1.5mmオフセットラインであり、鈍化直線以外の4本の実線は、オフセットラインに挟まれた領域のデータを各鋼種毎に最小自乗法近似して求めたものである。J<sub>a</sub>近傍もしくはこれを若干超えた点でのプロットを、図中に各鋼種毎に黒塗印で示す。

得られた破壊靱性J<sub>a</sub>とティアリングモデュラスT<sub>mat</sub>の一覧を、Table 3とTable 4に示す。なお本試験では、主として板厚不足のため、得られたJ<sub>a</sub>値はJ<sub>IC</sub>条件を満足していなかった。試験片にサイドグループを設けているため、本試験でも平面ひずみ状態が達成されている可能性があるが、少なくともASTM E813に従えば、真の平面ひずみ破壊靱性J<sub>IC</sub>を得るためには、より板厚の厚い試験片を用いる必要のあることが分かった。

J<sub>a</sub>と試験温度の関係を、Rカーブ法と除荷コンプライアンス法別に、Fig. 4 (1)および(2)に示す。またT<sub>mat</sub>と試験温度の関係を、Fig. 5 (1)(2)に示す。なお除荷コンプライアンス法では、一つの試験条件に対し複数回の試験を行っているが、図にはその平均値をプロットした。図よりJ<sub>a</sub>およびT<sub>mat</sub>ともに、9Cr-2Mo鋼，Mod.9Cr-1Mo (S社)鋼，9Cr-1Mo-V-Nb鋼，Mod.9Cr-1Mo (N社)鋼，の順に高い傾向が認められる。但し、破壊靱性試験では鋼種によって試験片の採取方向が異なっていること、および試験片の採取方向が統一されているシャルピー試験では、Fig. 2に見られるように、鋼種間の優劣関係が異なっていることから、鋼種間の破壊靱性の優劣を最終的に判断することは、現段階では妥当ではないと考えられる。550℃×5000時間の時効処理によるJ<sub>a</sub>値の低下は、9Cr-2Mo鋼で最も大きい。時効後のJ<sub>a</sub>値はなおこの鋼種で最も高い。他の3鋼種のJ<sub>a</sub>値も時効処理によって低下するが、その低下の度合はそれ程大きくない。T<sub>mat</sub>に及ぼす時効処理の影響は、図5からは明瞭ではなく、データのばらつきの範囲内に入っているようである。

Rカーブ法により得られた荷重と荷重線変位の関係（試験中断時の値がプロットされている）を、試験温度別および時効処理の有無別に、Fig. 6 (1)～(7)に示す。図より、高温になるに従って荷重レベルが低下すること、鋼種別の荷重レベルの差異は顕著でないこと、および時効処理によって荷重レベルが変化しないことが分かる。図中の黒塗印は、図3の

黒塗印と同じ意味で、 $J_a$ 近傍もしくはこれを若干超えた点を示している。 $J_a$ 近傍での荷重線変位量を鋼種別に比較すると、おおむね $J_a$ 値の順位に一致しており、 $J_a$ 値の鋼種別の差異が、種として延性き裂発生に要する荷重線変位量の差異に起因していることが分かる。

Rカーブ法により得たき裂成長量と荷重線変位の関係を、Fig. 7 (1)~(7)に示す。き裂成長量と荷重線変位の関係は鋼種によって異なり、 $J_a$ 値の最も高かった9Cr-2Mo鋼で、他鋼種に比べて、同じ荷重線変位で比較するとき裂成長量が小さい傾向を示している。図中の黒塗印は、Fig. 3やFig. 6と同様、 $J_a$ 近傍のプロットを意味している。

き裂成長量 $\Delta a$ は、き裂先端の鈍化による成分と延性き裂進展による成分とに分けられ、鈍化による成分はき裂先端開口変位CTODのおよそ半分と考えることができる。(2)式は、コンパクトテンション試験片のき裂先端開口変位CTODを、全面降伏状態を仮定して、回転中心概念により評価する式であり、

$$CTOD = r (W-a) / \{ a+r (W-a) \} \delta \quad (2)$$

$W$ は試験片幅、 $a$ はき裂長さ、 $\delta$ は荷重線変位、 $r$ は回転因子である。

本試験はき裂長さがおおよそ30mmの1TCT試験片を用いているため、 $W=50$ 、 $a=30$ とし、また回転因子の値として白鳥等<sup>6)</sup>による $r=0.431$  ( $a/w=0.6$ )を用いて、(2)式より鈍化によるき裂成長成分 $CTOD/2$ と荷重線変位 $\delta$ との関係を計算した。結果をFig. 7に実戦で示す。図より、負荷初期段階ではき裂先端の鈍化のみが生じるため、実験データが直線に沿ってプロットされるが、荷重線変位量が増すと延性き裂が進展し始めるため、き裂成長量が直線で示す予測より大きくなる傾向が認められる。(2)式が全面降伏を仮定していることもあり多少のずれもあるが、図7中黒塗印で示す $J_a$ 近傍は、プロットが直線から離れ始める点におおむね対応しているようである。図7より、 $J_a$ 値の鋼種別の差異が、延性き裂発生時のき裂先端開口変位量と良い対応関係にあることがわかる。

9Cr系鋼の高温破壊靱性試験結果の詳細を、巻末の付録1に示す。また参考のため、SUS 304および2.25Cr-1Mo鋼の破壊靱性データを、付録2にあわせて示す。

## 4. 考 察

### 4.1 Rカーブ法と除荷コンプライアンス法の比較

Rカーブ法と除荷コンプライアンス法の両方で求めた $J_a$ 値を比較してFig. 8 (1)に、また $T_{mat}$ の値を比較してFig. 8 (2)にそれぞれ示す。図中白抜印はSR処理材の、黒塗印はSR+時効処理材の結果をそれぞれ表している。Fig. 8 (1)より、除荷コンプライアンス法による $J_a$ の値の方が、Rカーブ法による $J_a$ 値に比べて低めとなる傾向にあること、またその傾向が $J_a$ が高くなるに従って顕著となることが分かる。一方 $T_{mat}$ では、バラツキが大きいため明瞭ではないが、両者の間に有意な差は認められないようである。

除荷コンプライアンス法とRカーブ法の試験方法の主な違いとして、除荷コンプライアンス法では部分的な除荷過程を伴うこと、および除荷コンプライアンス法では除荷やデータの取込みのため、Rカーブ法に比べて平均負荷速度が遅いこと、が挙げられる。これらの除荷コンプライアンス法の特徴が $J_a$ や $T_{mat}$ の $T_{mat}$ に及ぼす影響としては、①負荷過程と除荷過程の繰返しによる延性き裂成長の加速、等が考えられる。

Fig. 9 (1)(2)に、除荷コンプライアンス法とRカーブ法による $J_a$ と $T_{mat}$ の比を、試験温度に対してプロットして示す。Fig. 9 (1)から、両試験方法による $J_a$ の比が試験温度に依存せず、室温でも高温側でも1より低めにプロットされることが分かる。上記の①～③のうち、②と③はクリープ効果によるものであり、従ってその効果は高温側でのみ期待できる。一方①の効果は、高温側では、除荷量を最大25%にまで増していることから、顕著である可能性が高い。しかしながら室温では、除荷量を10%に制限していること、およびこれまでの多くの使用実績やASTM B813規格に採用されていること等を考えても、 $J_a$ 値に大きな影響を及ぼすとは考えにくい。

以上の検討から、高温側での両試験方法による $J_a$ の差は、少なくとも定性的には、説明可能であることが分かった。しかしながら、室温での差の原因は現状では明確ではなく、今後の課題として残された。但し本研究により、9Cr系鋼の室温および高温破壊靱性が、除荷コンプライアンス法とRカーブ法とで異なる傾向にあることが明らかにされており、今後データの比較等を行う際には留意する必要がある。

## 4.2 サイドグループの効果

Mod.9Cr-1Mo (S社) 鋼のAs-received材を用いて、J積分とき裂成長量の関係およびき裂成長量と荷重線変位の関係に及ぼすサイドグループの効果を調べた結果を、Fig.10とFig.11に室温と600℃に関して示す。図より、同じJ積分あるいは荷重線変位量で比較すると、サイドグループ有の場合の方がき裂成長量大きいことが分かる。同様のサイドグループの効果が、A533B鋼に関して100~150℃の温度範囲でも報告されている<sup>7)8)</sup>。また図には示さないが、延性き裂形状は、サイドグループ無では湾曲したサムネイル状であるのに対して、サイドグループ有では直線形状であった。

以上の検討から、サイドグループ有の場合には試験片側面での塑性変形が拘束され、ある程度平面ひずみ状態が達成されていたことが示唆される。従って、ASTM E813規格における $J_{Ic}$ 条件は満足していないが、本研究で得られた $J_0$ がこれに近い値である可能性は考えられる。しかしながら、完全な平面ひずみ破壊靱性 $J_{Ic}$ となっている保証は無く、この点を明らかにするためにも、より板厚の厚い試験片を用いた試験の実施が望まれる。このため第3年度において、2TCT試験片を用いた破壊靱性試験を実施する予定である。

## 4.3 試験片採取方向の影響

本報の供試材4種類のうち、き裂方向が圧延方向と直交するL-Tタイプの試験片を用いた2鋼種の方が、一致するT-Lタイプの試験片を用いた2鋼種より、高い破壊靱性値を示した。この差が鋼種の違いによるものであるかもしれないが、試験片採取方向の違いに起因する可能性も考えられる。

破壊靱性におよぼす試験片採取方向の影響については、ステンレス鋼を供試材として存在しないとする報告や<sup>9)</sup>、存在するとする報告<sup>10)</sup>、あるいは鋼種によって生じる場合と生じない場合とがあるとする報告<sup>11)</sup>等があり、必ずしも明確にはなっていないようである。従って本報の供試材である9Cr系鋼に関しても、試験片採取方向の影響は現状ではあきらかではない。このため第3年度において、同一鋼板を供試材として、L-TおよびT-Lタイプの試験片を用いた破壊靱性試験を実施する予定である。なおこの試験については、現時点である程度のデータが取得されているので、付録3にその途中

経過を速報として示すが試験片採取方向による破壊靱性値の差は認められていない。

#### 4.4 ストレッチゾーン深さと $J_a$ の関係

き裂先端開口変位CTODと $J_a$ との関係として、 $\sigma_y$ を流動応力、 $m$ をある定数として、(3)式が一般的に用いられる。

$$CTOD = m J_a / \sigma_y \quad (3)$$

また $m$ の値として、 $m = 0.47 \sim 0.67^{1,2)}$ が提案されている。CTOD値は(2)式等を用いて推定することもできるが、より正確には、試験片の2個の破面からストレッチゾーン深さSZDを測定し足し合わせるにより、直接求めることができる。

SZDを走査電顕で測定し、(3)式および $m = 0.47 \sim 0.67$ を用いて $J_a$ を推定した結果を、Fig. 12に示す。供試材はMod. 9Cr-1Mo (N社)と9Cr-1Mo-V-Nb鋼である。図中のプロットは実験値であり、またSZDからの推測値はバンドで示している。両者は良い一致を示しており、本報で得られた $J_a$ が信頼度の高いデータであることが分かる。

## 5. 結 言

昭和62年から3ヵ年計画で、9Cr系鋼の高温破壊靱性試験を実施している。このうち第1年度と第2年度において、Mod.9Cr-1Mo (S社) 鋼, 9Cr-2Mo鋼, 9Cr-1Mo-V-Nb鋼, Mod.9Cr-1Mo (N社) 鋼のSR処理材とSR+時効処理材の、室温から600℃の温度範囲での $J_a$ および $T_{mat}$ データを取得した。これら2ヵ年の試験研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) Rカーブ法および除荷コンプライアンス法を用いた破壊靱性試験法の高温への適用法を確立した。
- (2) 9Cr系鋼の破壊靱性値は、鋼種によって試験片の採取方向が異なっているが、現段階では9Cr-2Mo鋼, Mod.9Cr-1Mo (S社) 鋼, 9Cr-1Mo-V-Nb鋼, Mod.9Cr-1Mo (N社) 鋼の順に高かった。
- (3) 550℃×5000時間の時効条件における破壊靱性値は9Cr-2Mo鋼において低下したが、他鋼種については $J_a$ がやや低下するものの $T_{mat}$ の低下は認められなかった。
- (4) 鋼種別の破壊靱性の差は、延性き裂発生までに要するき裂先端鈍化量もしくはき裂先端開口変位CTODの差に主として起因する。
- (5) 一連の板厚効果試験により、9Cr系鋼に関しては通常用いられる1TCT相当試験片 (板厚20mm以下) では、ASTM規格の平面ひずみ破壊靱性値 $J_{Ic}$ を満足しないことを明らかにしており、ある程度の平面ひずみ条件は達成されていることから、2TCT相当試験片 (板厚50mm) では $J_{Ic}$ を満足する見通しを得た。

第3年度には $J_{Ic}$ 試験法確立のために引き続き板厚効果試験評価を行なうとともに、破壊靱性値に及ぼす試験片採取方向の影響を明らかにする。さらに溶接部の破壊靱性に関しても評価、検討を行う予定である。なお、評価に必要なデータを取得するために実施される材料試験は以下のとおりである。

- (1) 50mm厚さの試験片を用いた高温破壊靱性試験
- (2) 同一鋼種で異なる方向から採取した試験片を用いた高温破壊靱性試験
- (3) 溶接部の高温破壊靱性試験



## 謝 辞

本報告を作成するにあたり、9Cr系3鋼種に関する破壊靱性値ならびに引張やシャルピ  
ー衝撃データを㈱NKKおよび住友金属工業㈱から得た。その協力に対し謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 齊藤他, 「9Cr系鋼の高温破壊靱性試験 (第1報)」, PNC SN9410 89-096, 1989.
- 2) 青木他, 「高クロムモリブデン鋼の基本材料特性試験 (II)」, PNC SN9410 90-142, 1990.
- 3) Standard test method for plate-strain fracture toughness, ANUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01, 1983.
- 4) Standard test method for  $J_{1c}$ , a measure of fracture toughness, ANUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Vol. 03. 01, 1983.
- 5) 昭和55年通商産業省告示第501号
- 6) 白鳥他, 「数値破壊力学」, 実数出版株式会社, 1981.
- 7) M. G. Vassilaros et al. Effects of specimen geometry on  $J_I$ -R curve for ASTM A533B steel, ASTM STP700, 1980.
- 8) W. R. Andrews et al. Thickness and side-groove effects on J-and  $\delta$ -resistance curves for A533-B steel at 93 °C, ASTM STP 668, 1979.
- 9) W. H. Bamford, Fracture behavior of stainless steel, ASTM STP 668, 1979.
- 10) S. J. Garwood, Fracture toughness of stainless steel weldments at elevated temperature, ASTM STP 833, 1984.
- 11) P. Balladom et al, Influence of microstructure on the ductile rupture mechanisms of a 316L steel at room and elevates temperature, ASTM STP 791, 1983.
- 12) 「弾塑性破壊靱性値  $J_{1c}$  試験方法」, 日本機械学会, JSME S001, 1981.

Table 1 Chemical compositions of tested 9Cr type steels

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	N
Mod. 9Cr-1Mo (S社)	0.09	0.34	0.46	0.005	0.004	8.43	0.09	0.90	0.20	0.079	0.062
9Cr-2Mo	0.07	0.03	0.65	0.007	0.001	8.74	0.36	1.82	—	—	0.034
Mod. 9Cr-1Mo (N社)	0.09	0.24	0.44	0.016	0.001	8.15	0.14	0.93	0.21	0.06	0.033
9Cr-1Mo-V-Nb	0.08	0.13	0.72	0.009	0.002	8.01	0.18	0.92	0.21	0.05	0.012

Table 2 Fracture toughness test conditions

鋼種 温度	Mod. 9Cr-1Mo (S社)		9Cr-2Mo		Mod. 9Cr-1Mo (N社)		9Cr-1Mo-V-Nb	
	SR	SR+時効	SR	SR+時効	SR	SR+時効	SR	SR+時効
RT	○	○	○	○	○	○	○	○
400℃	○	-	○	-	○	-	○	-
500℃	○	-	○	-	○	-	○	-
550℃	○	○	○	○	○	○	○	○
600℃	○	-	○	-	○	-	○	-

○：Rカーブ法，除荷コンプライアンス法の両方で試験実施

-：いずれでも試験せず

Table 3 Measured  $J_a$  values

鋼種 方法 温度 (°C)	Mod. 9Cr-1Mo (S社)				9Cr-2Mo				Mod. 9Cr-1Mo (N社)				9Cr-1Mo-V-Nb			
	SR		SR+時効		SR		SR+時効		SR		SR+時効		SR		SR+時効	
	R*	UC**	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC
RT	71	67	59	37	181	125	82	63	40	35	31	28	50	44	42	39
		75		47		119		44		22		31		42		36
400	38	39			94	63			18	19			38	28		
		39				79								29		
500	52	51			126	94			32	27			55	44		
		52				90				36						
550	73	44	52	53	201	177	138	124	26	23	×	×	39	42	42	49
		59		53		172		108		24						
600	76	71			287	179			33	×			×	×		
		70				139				×				×		
600	76	74			287	179			33	×			×	×		
		74				139				×				×		

× 値を決定できなかったもの

R\* Rカーブ法

UC\* 除荷コンプライアンス法

Table 4 Measured  $T_{mat}$  values

鋼種 方法 温度 (°C)	Mod. 9Cr-1Mo (S社)				9Cr-2Mo				Mod. 9Cr-1Mo (N社)				9Cr-1Mo-V-Nb			
	SR		SR+時効		SR		SR+時効		SR		SR+時効		SR		SR+時効	
	R*	UC**	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC
RT	228	264 210 229	232	250 199 194	285	313 335	289	247 266 296	111	119 145	210	199 156	212	197 170	183	175 156
400	197	63 113 140			289	322 214 237			104	104			115	131 110		
500	240	187 374 225			447	373 405 291			150	165 164			145	185 225		
550	214	394 294 238	400	405 391 247	478	340 583 378	427	292 397 159	242	136 154	×	×	204	214	270	300
600	470	420 468 263			493	533 595			218	×			×	×		

× 値を決定できなかったもの

R\* Rカーブ法

UC\* 除荷コンプライアンス法

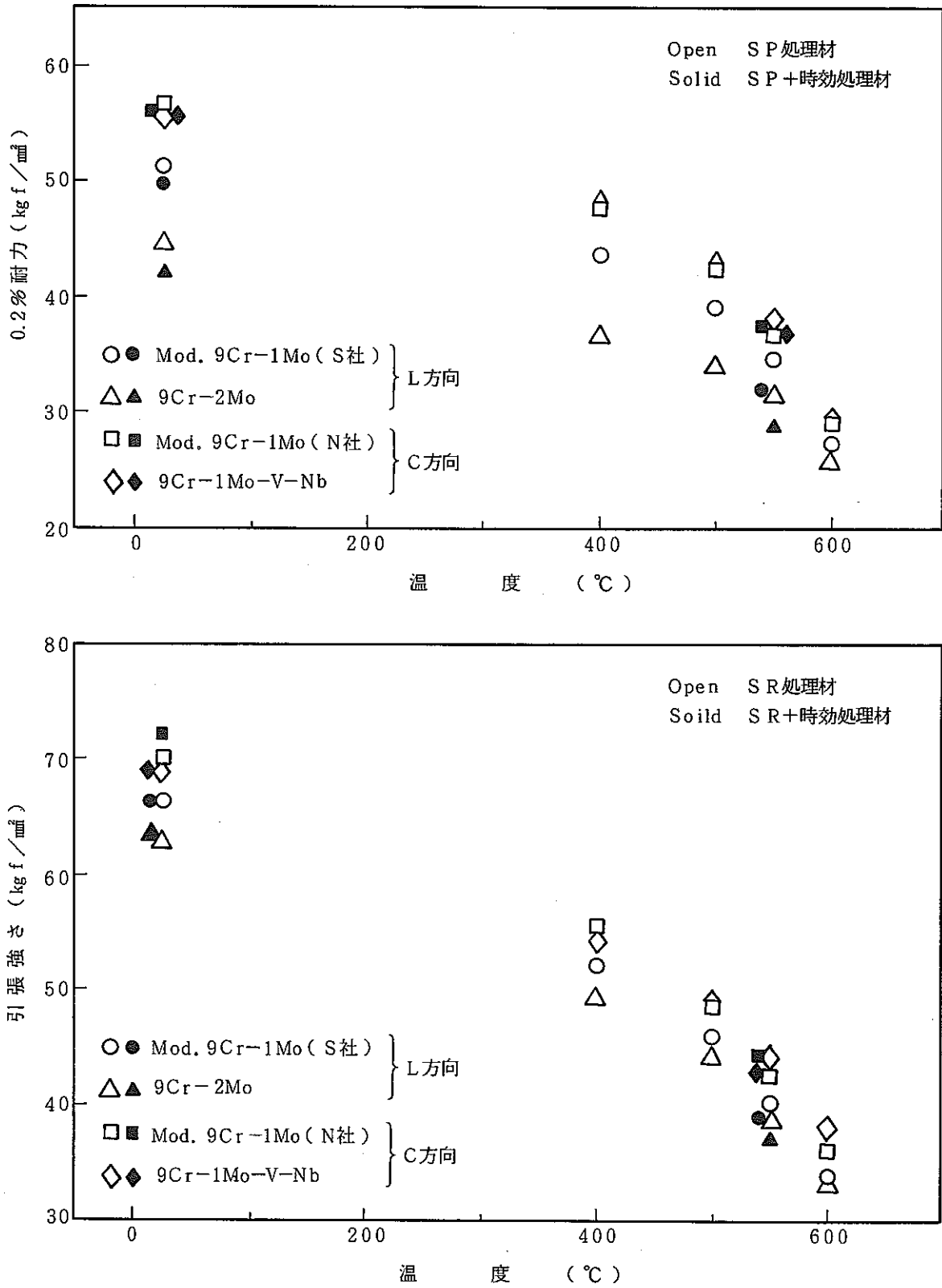
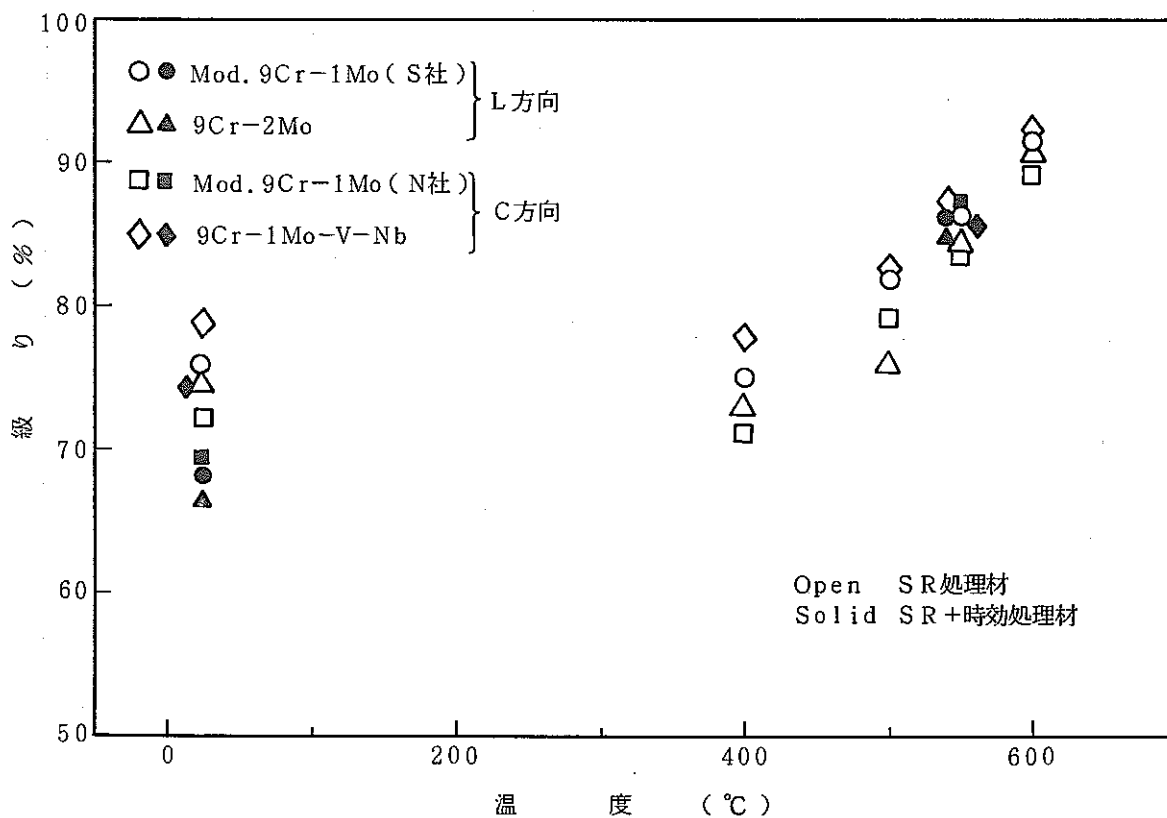
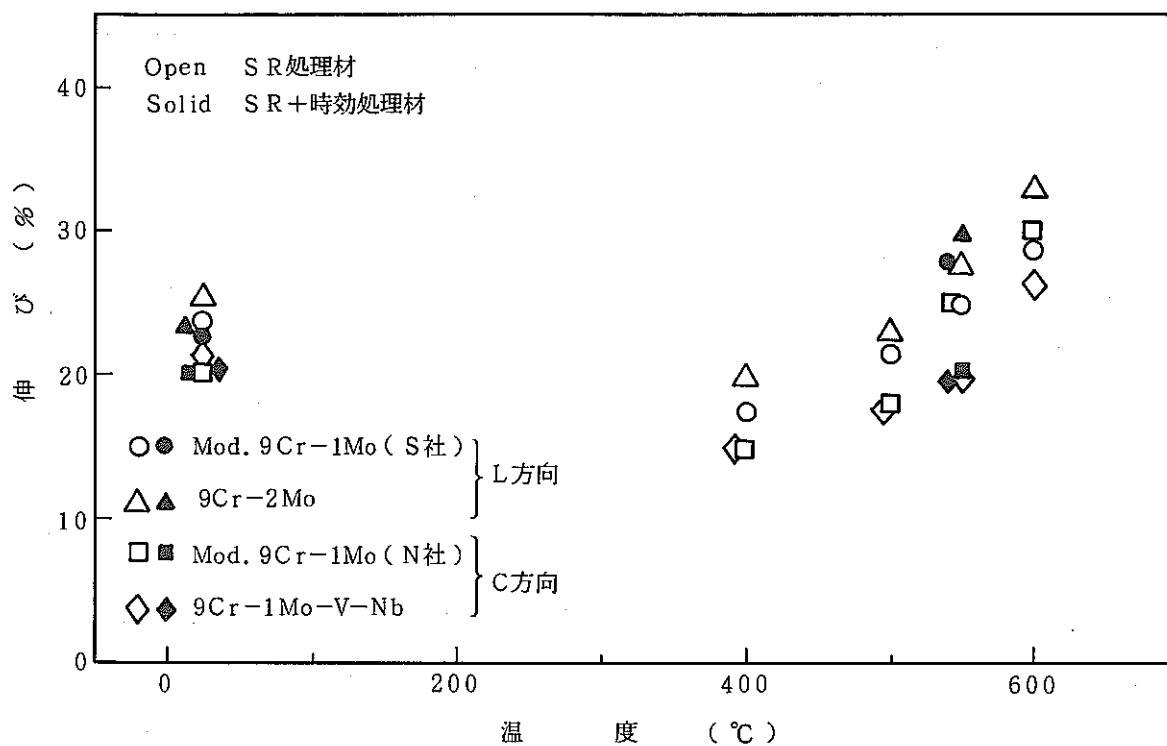


Fig. 1 Tensile properties of tested materials





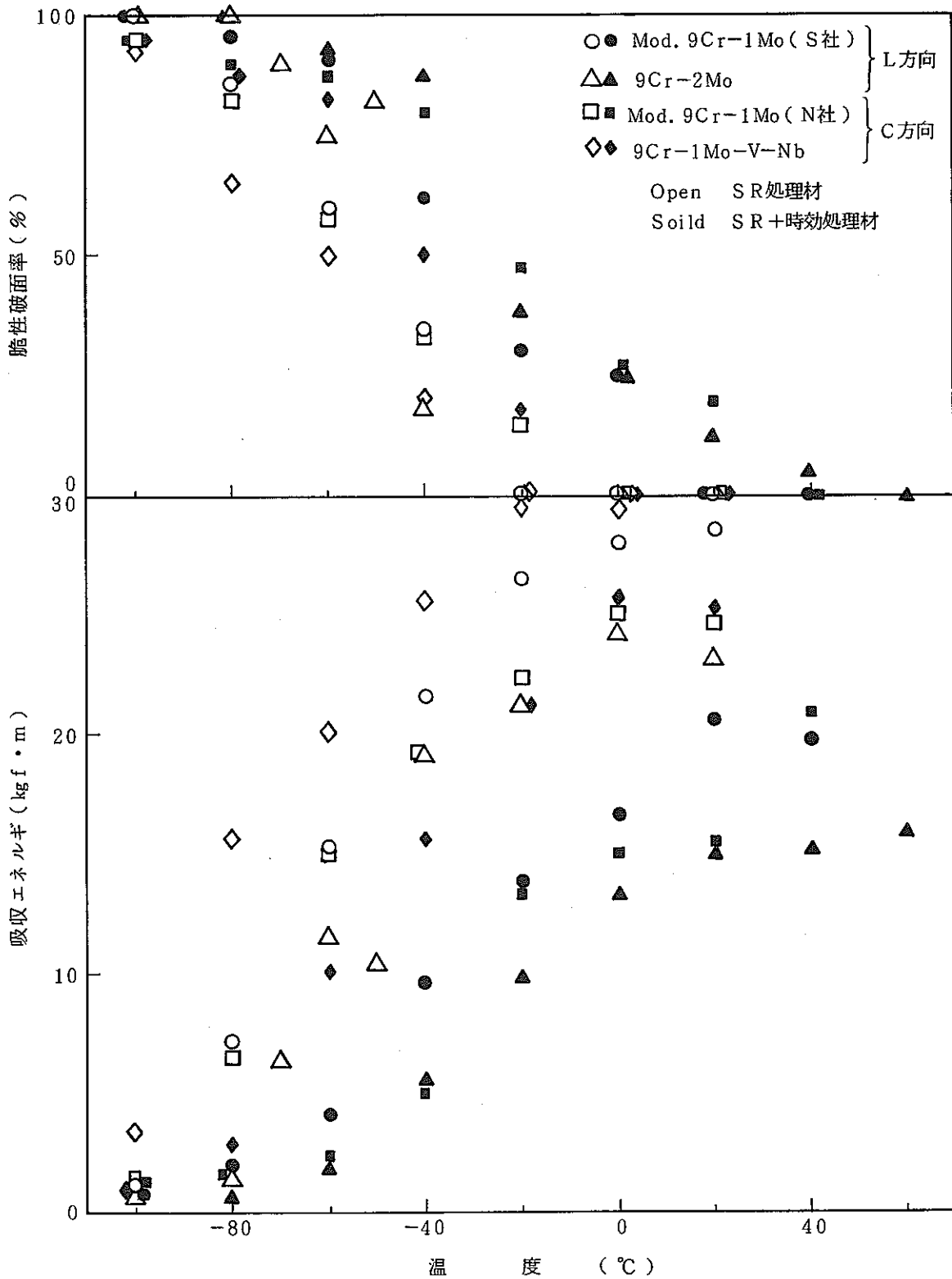


Fig. 2 Charpy impact test results

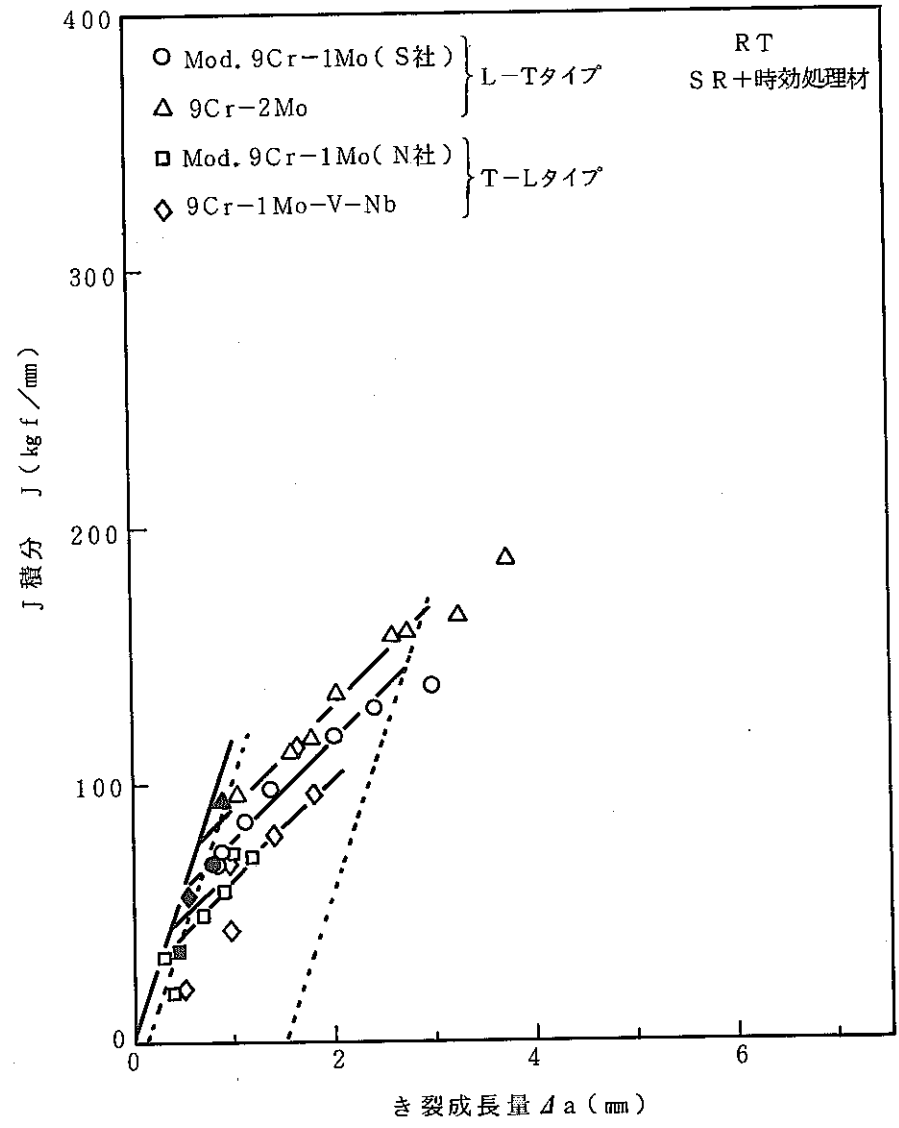
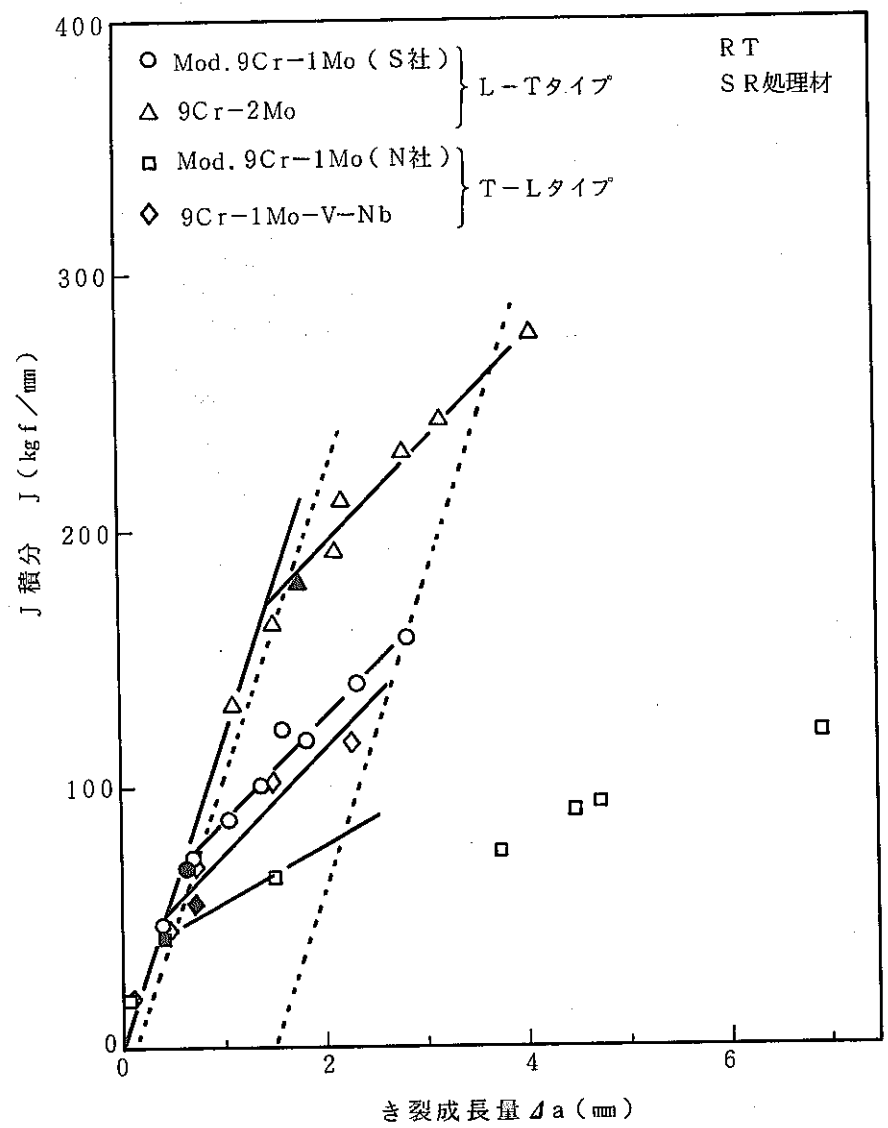
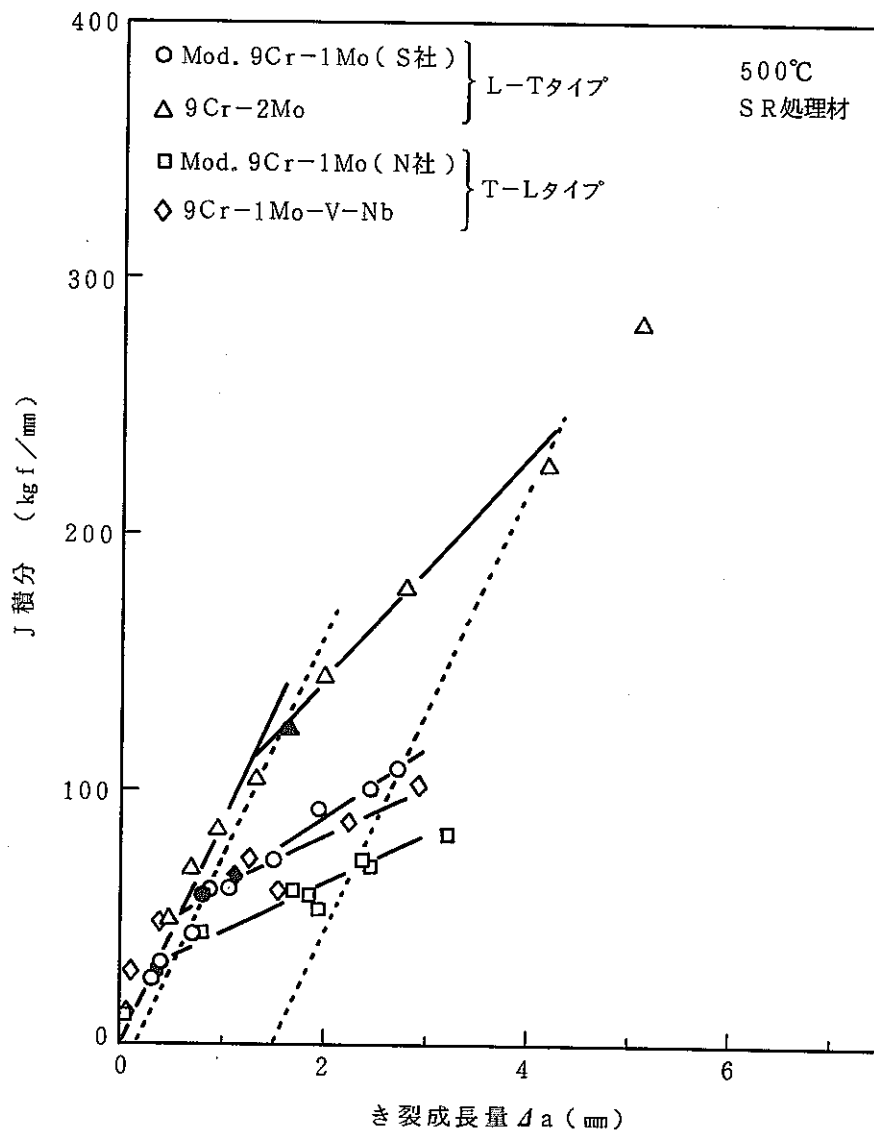
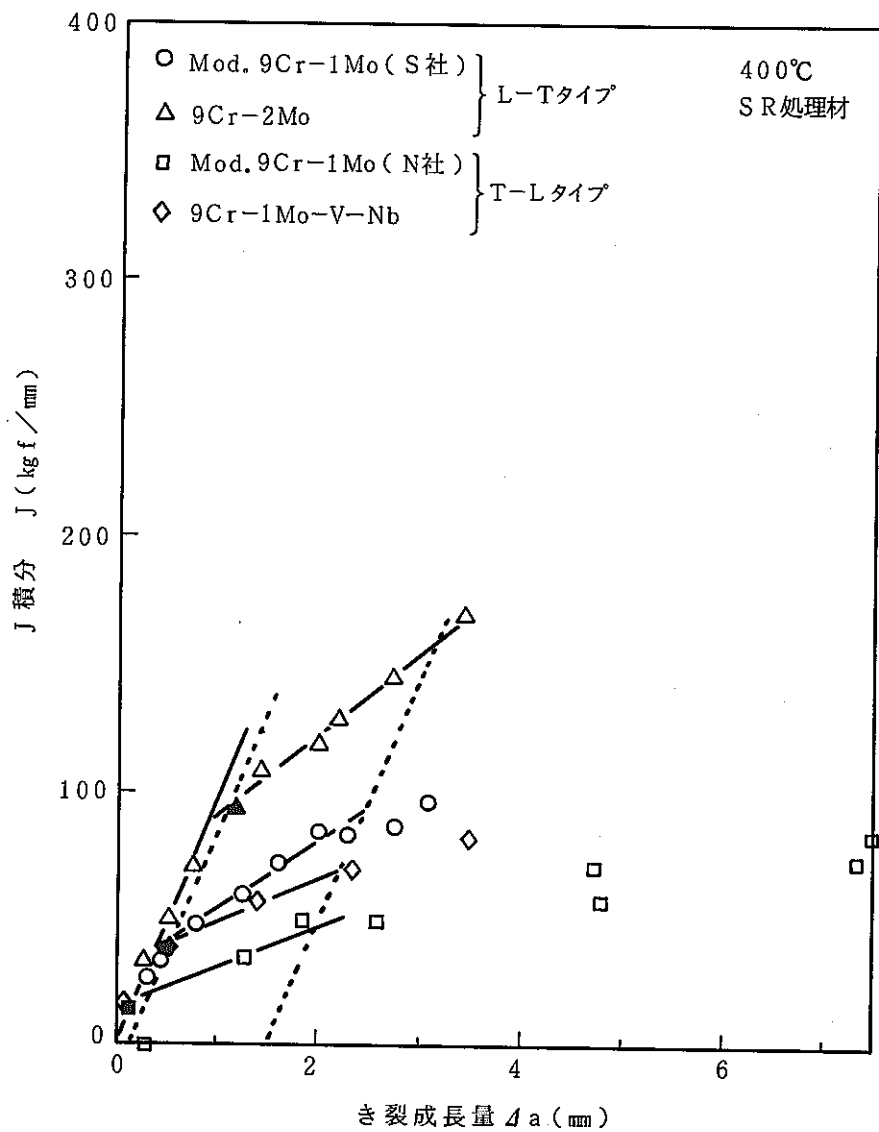
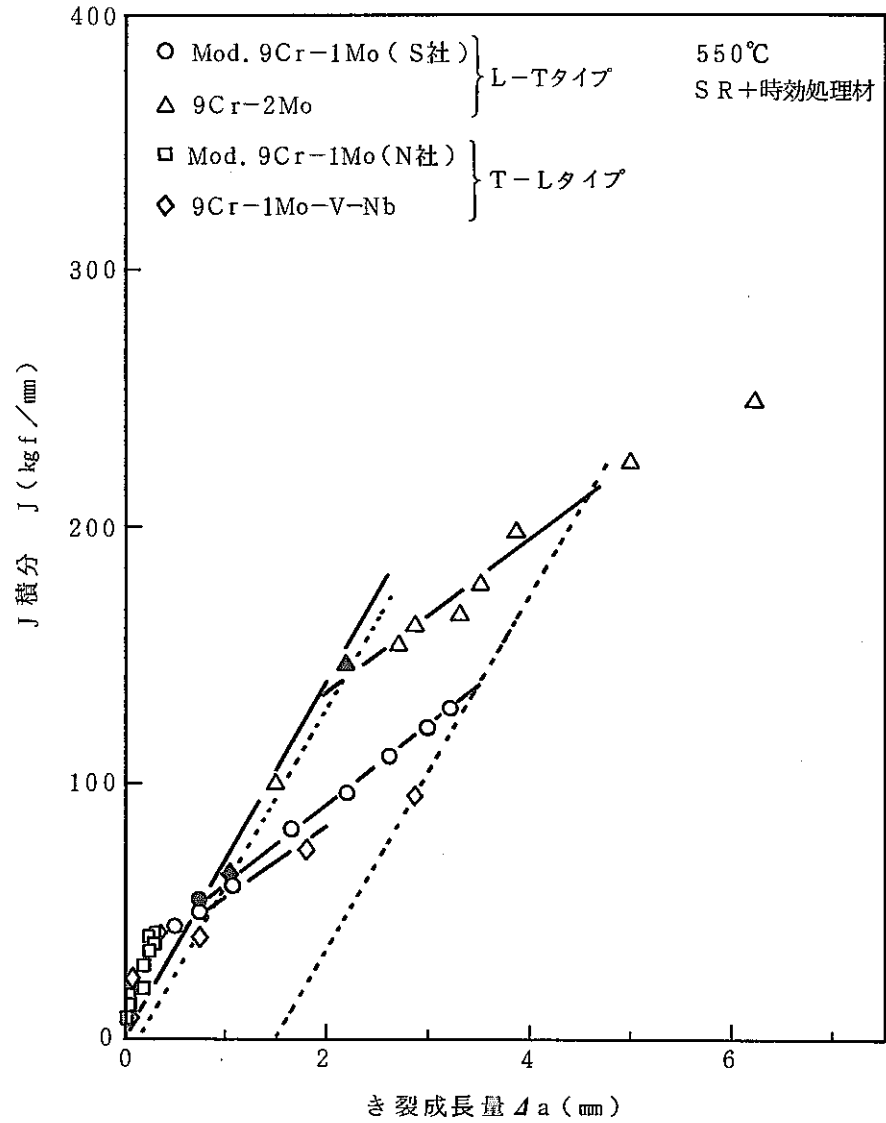
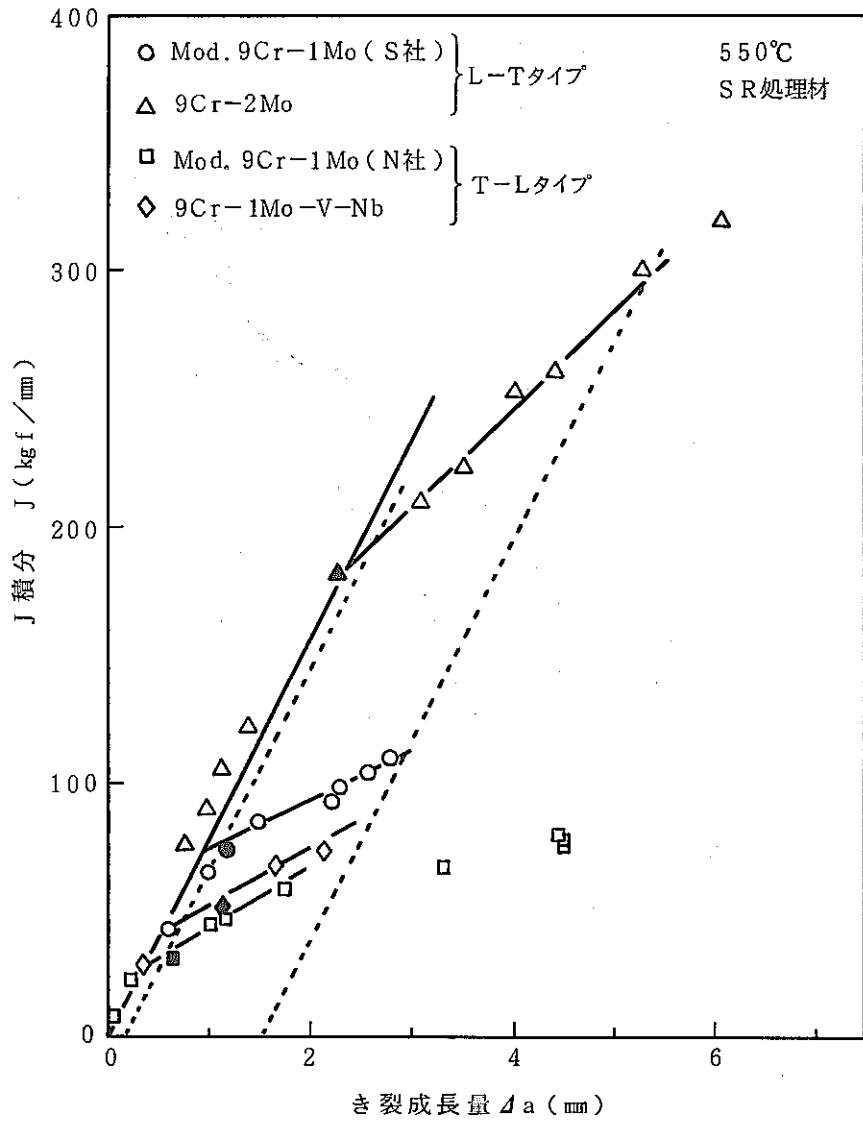
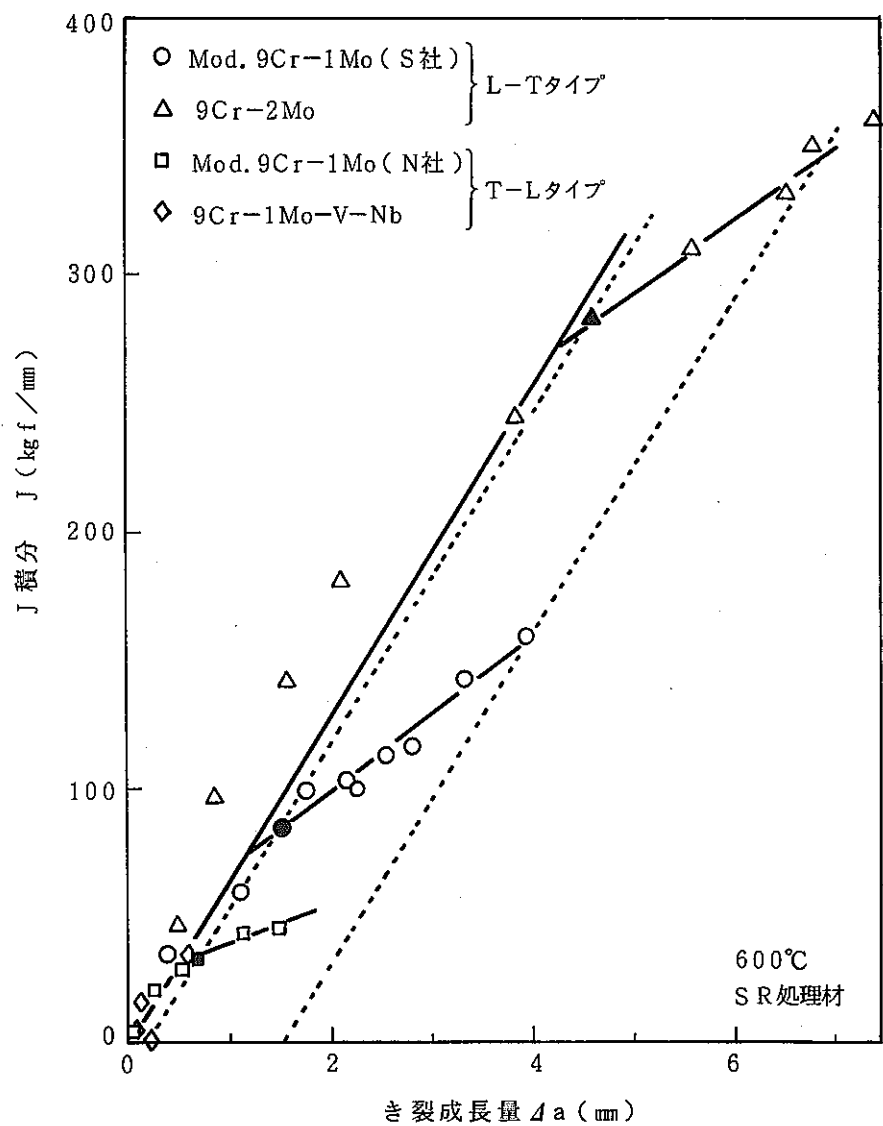


Fig. 3 J-crack extension curves obtained by R-curve method







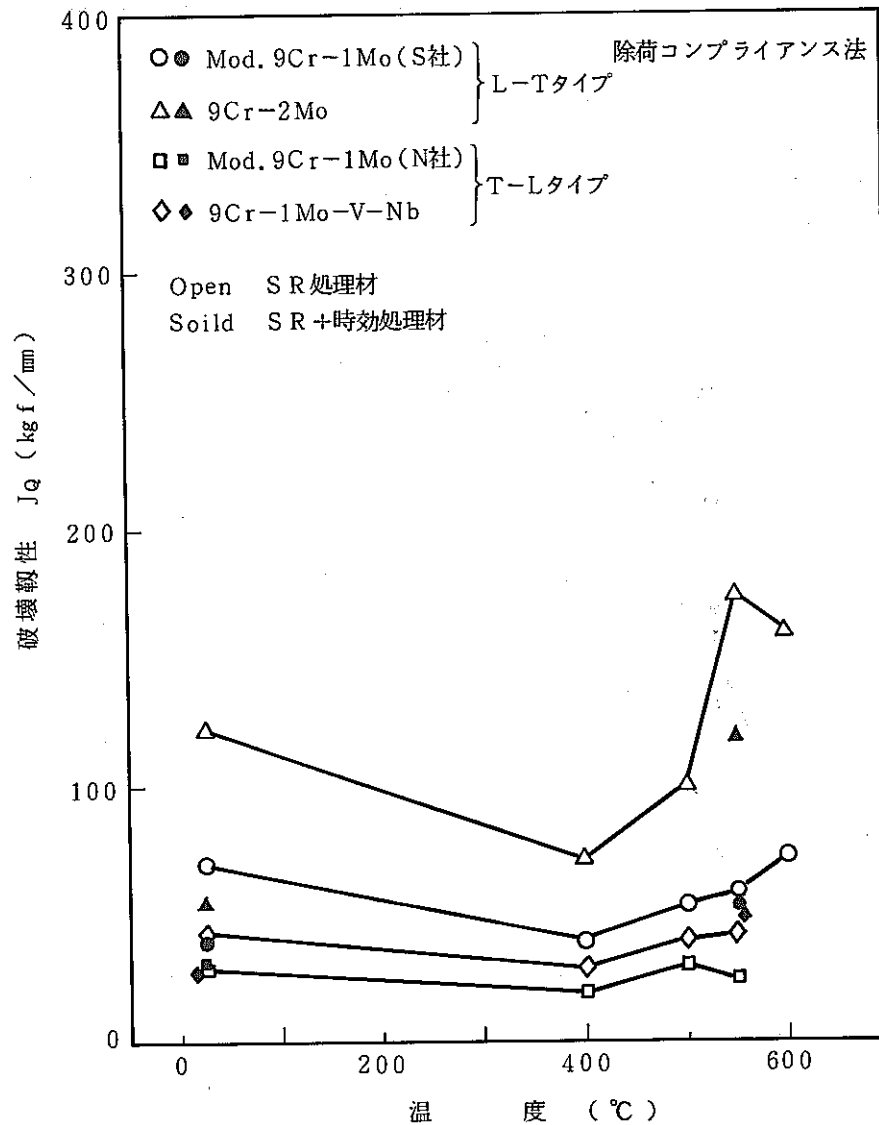
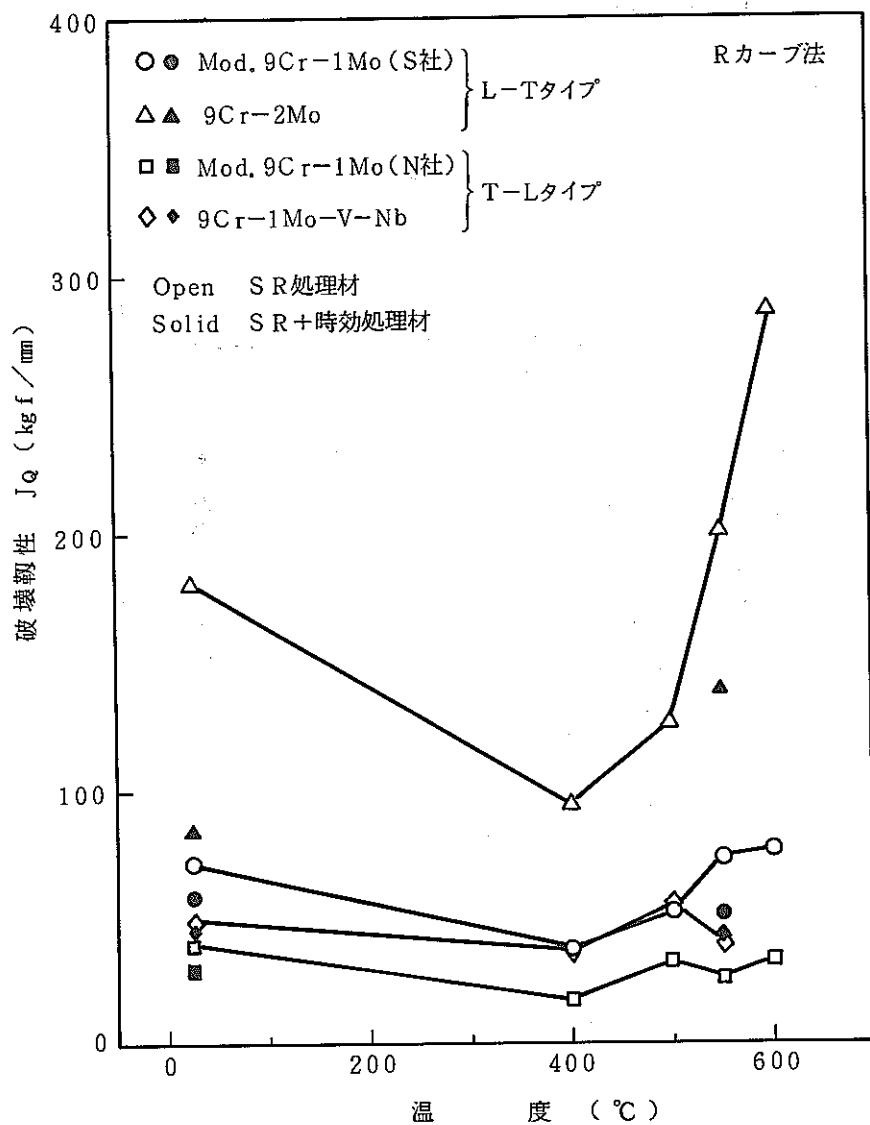


Fig. 4 Relationship between  $J_a$  and test temperature

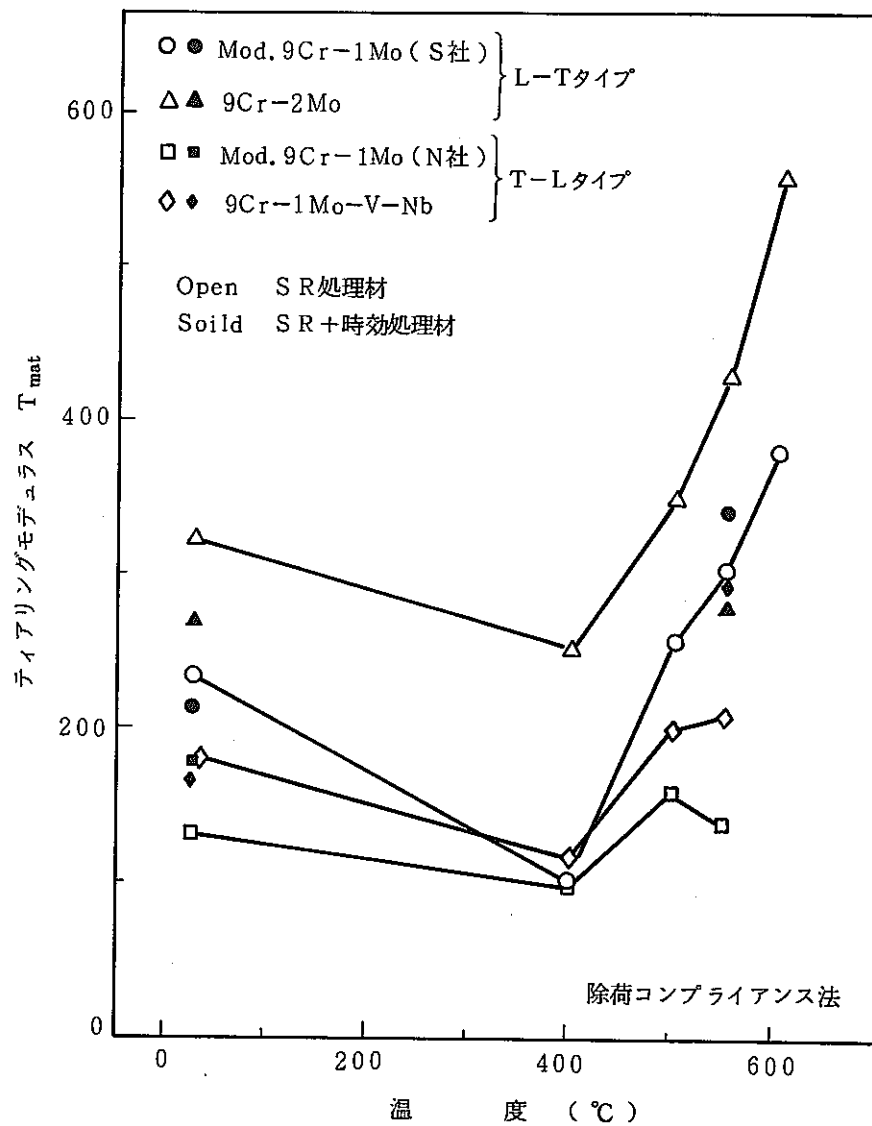
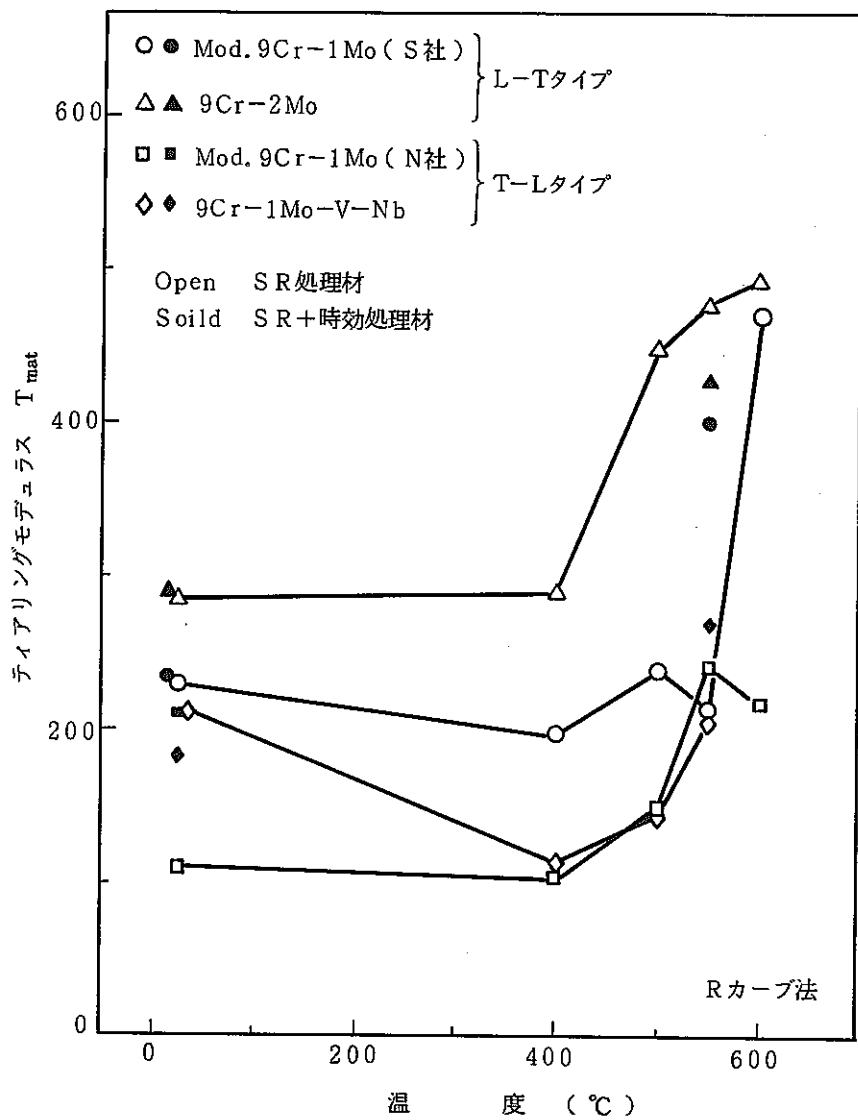


Fig. 5 Relationship between  $T_{mat}$  and test temperature

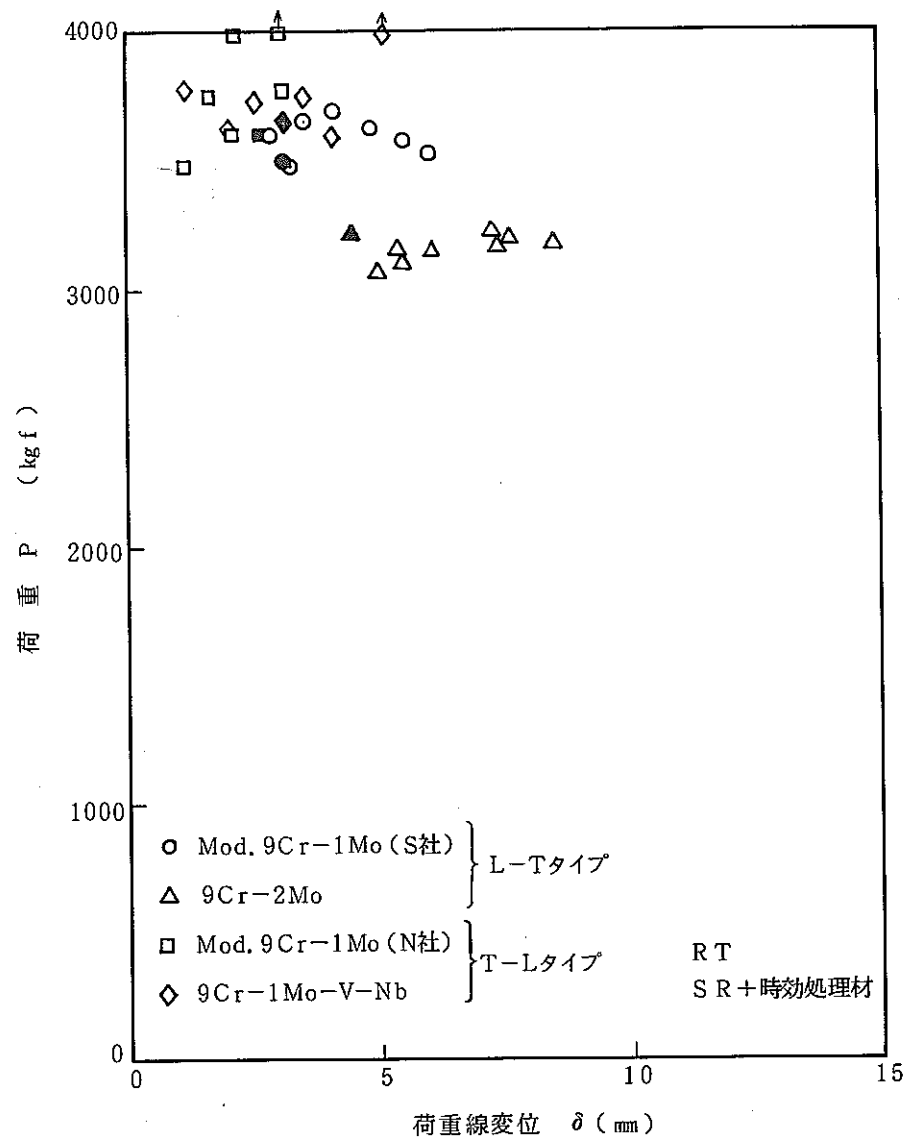
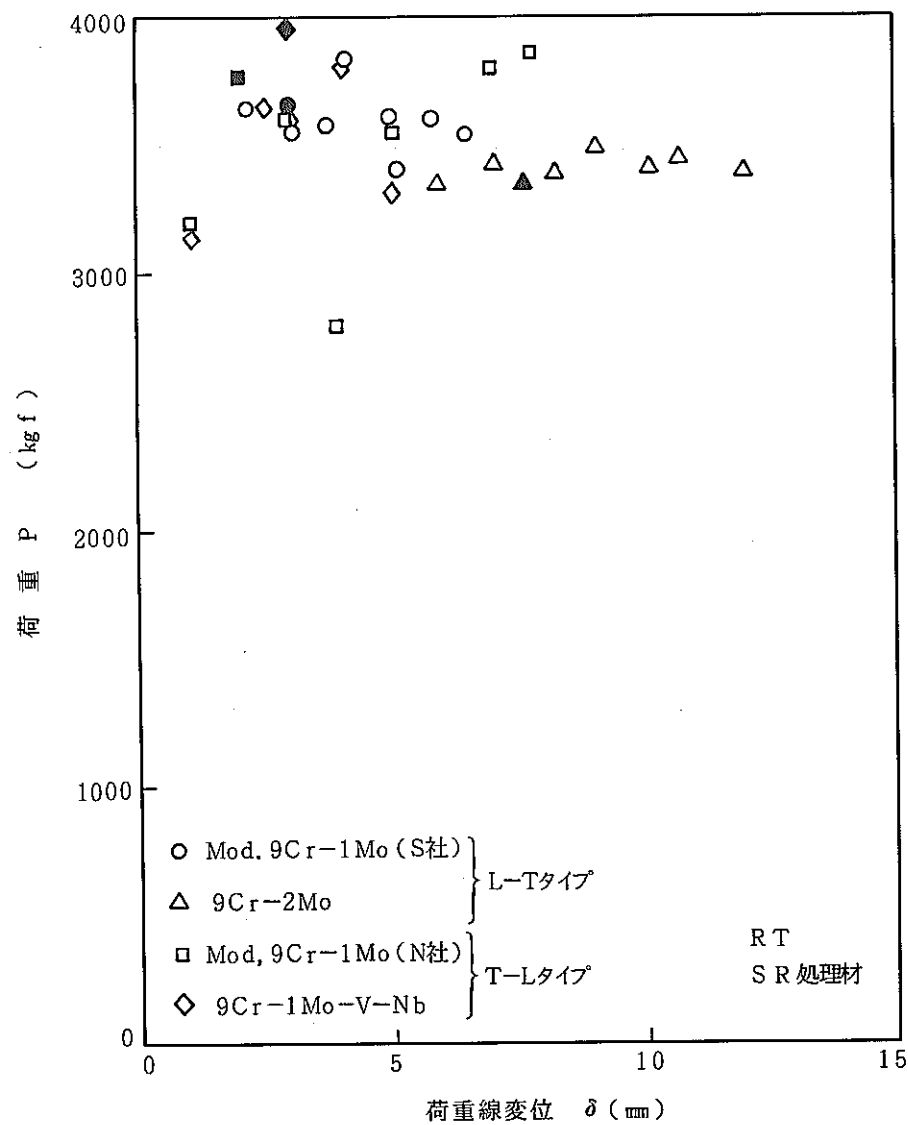
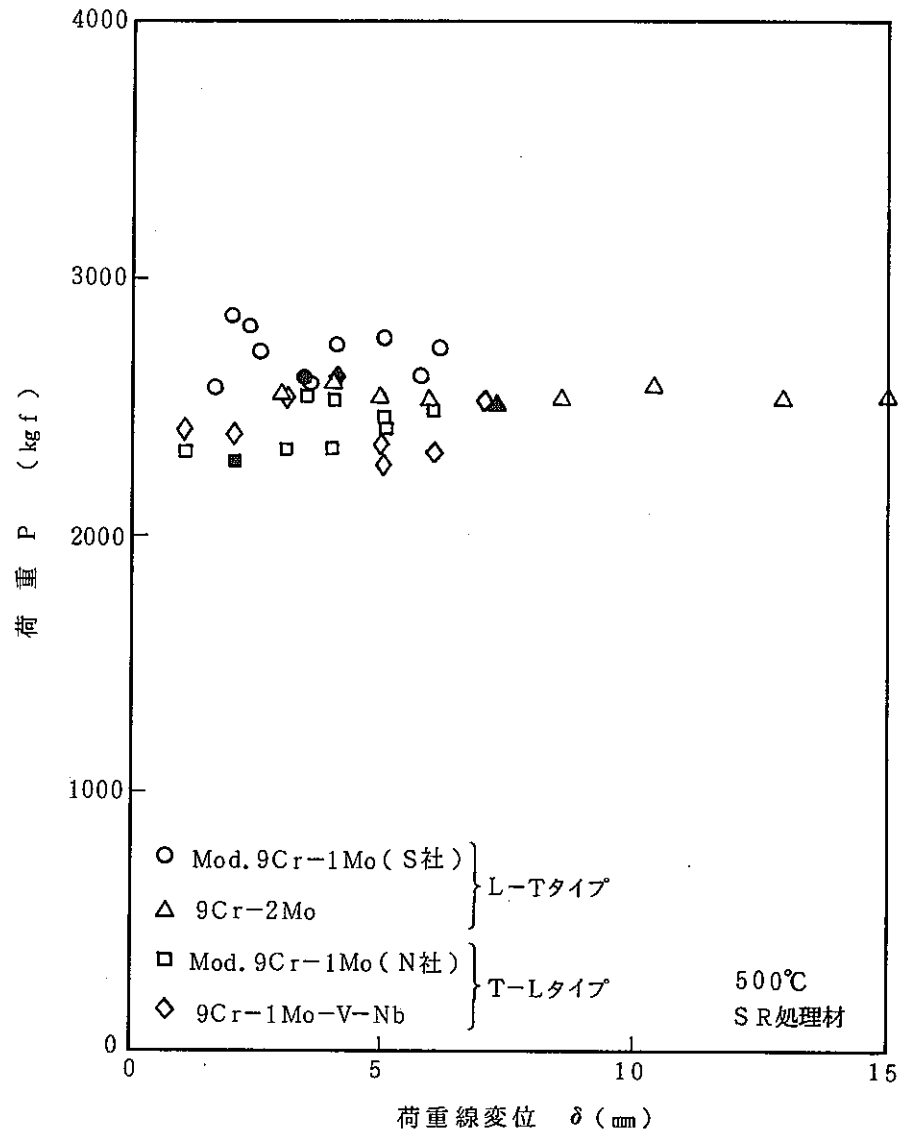
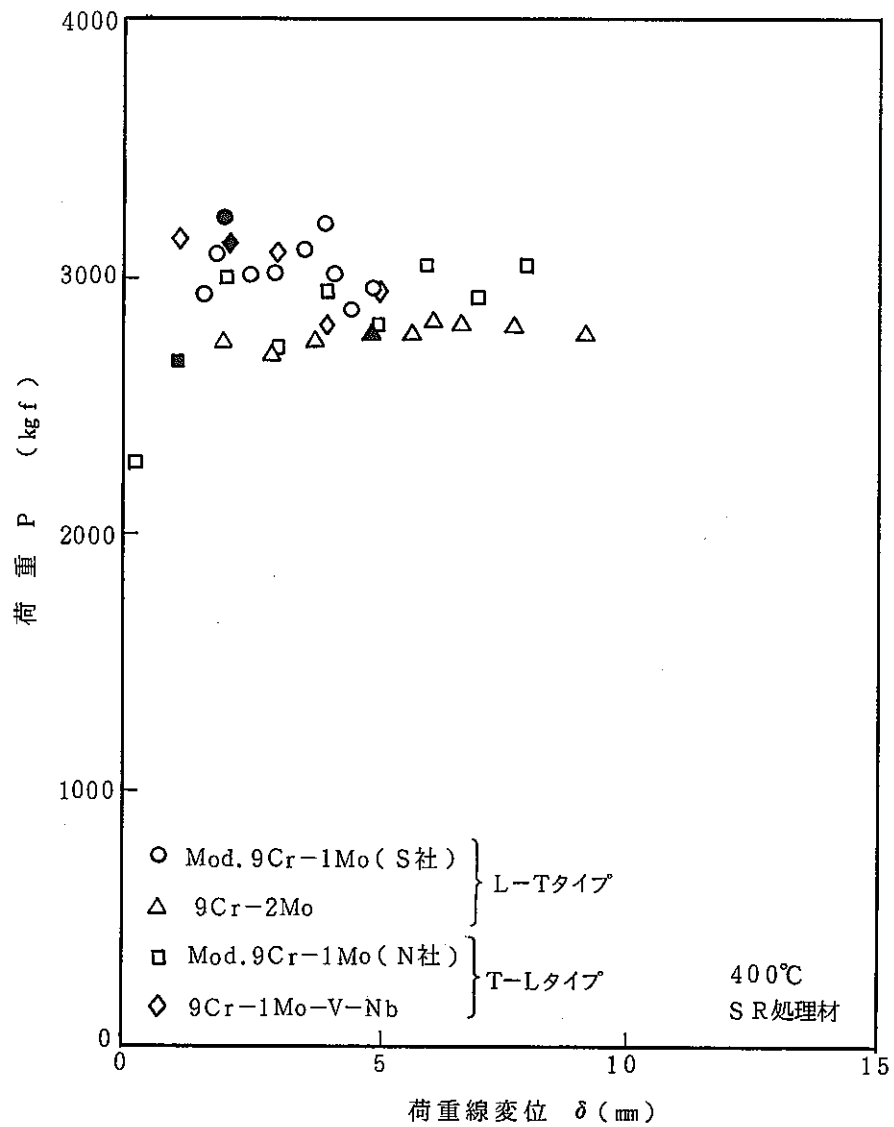
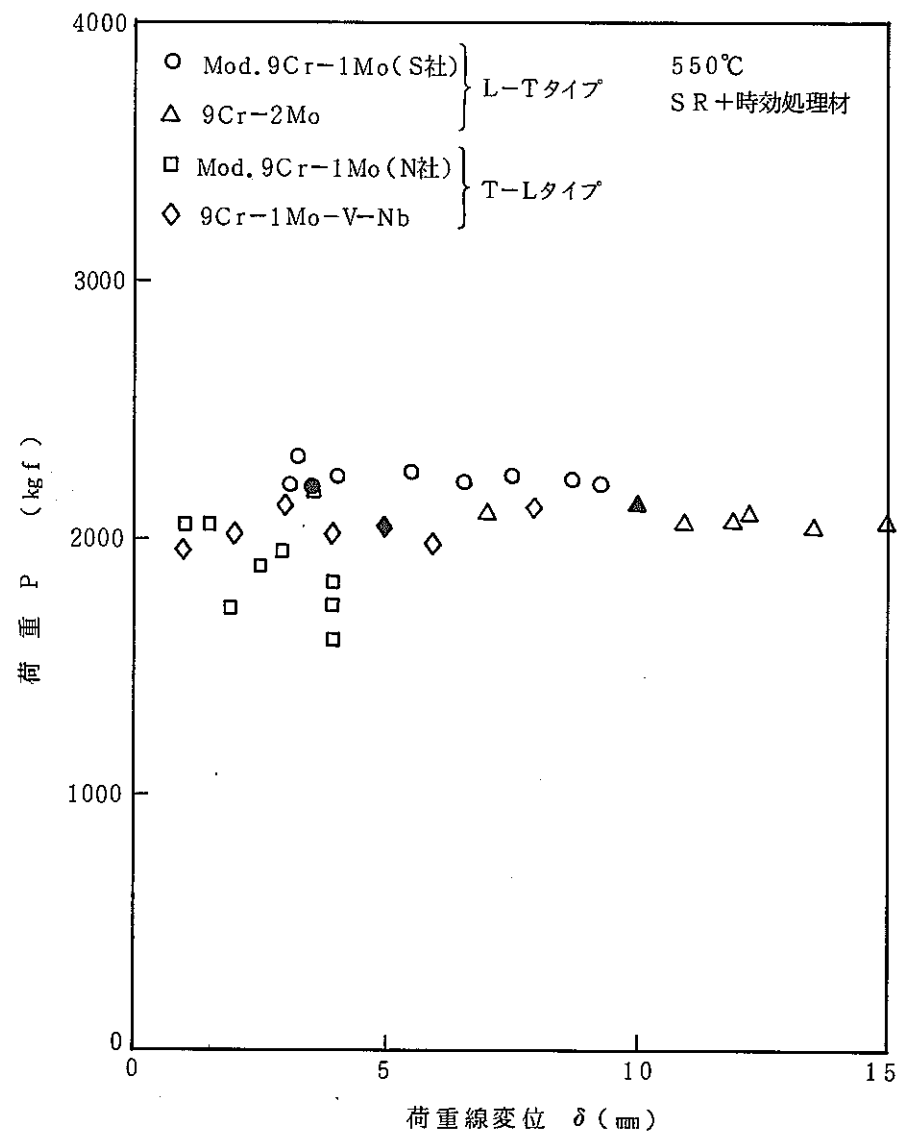
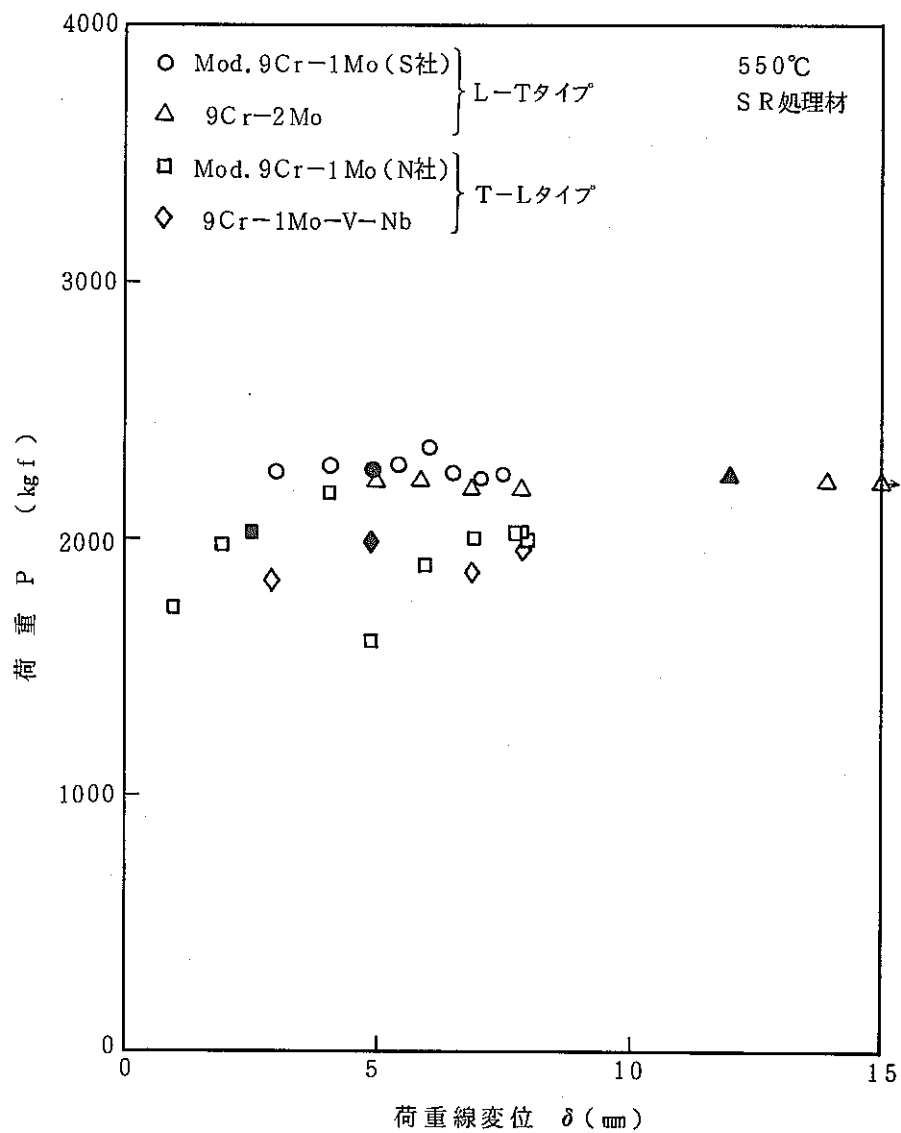
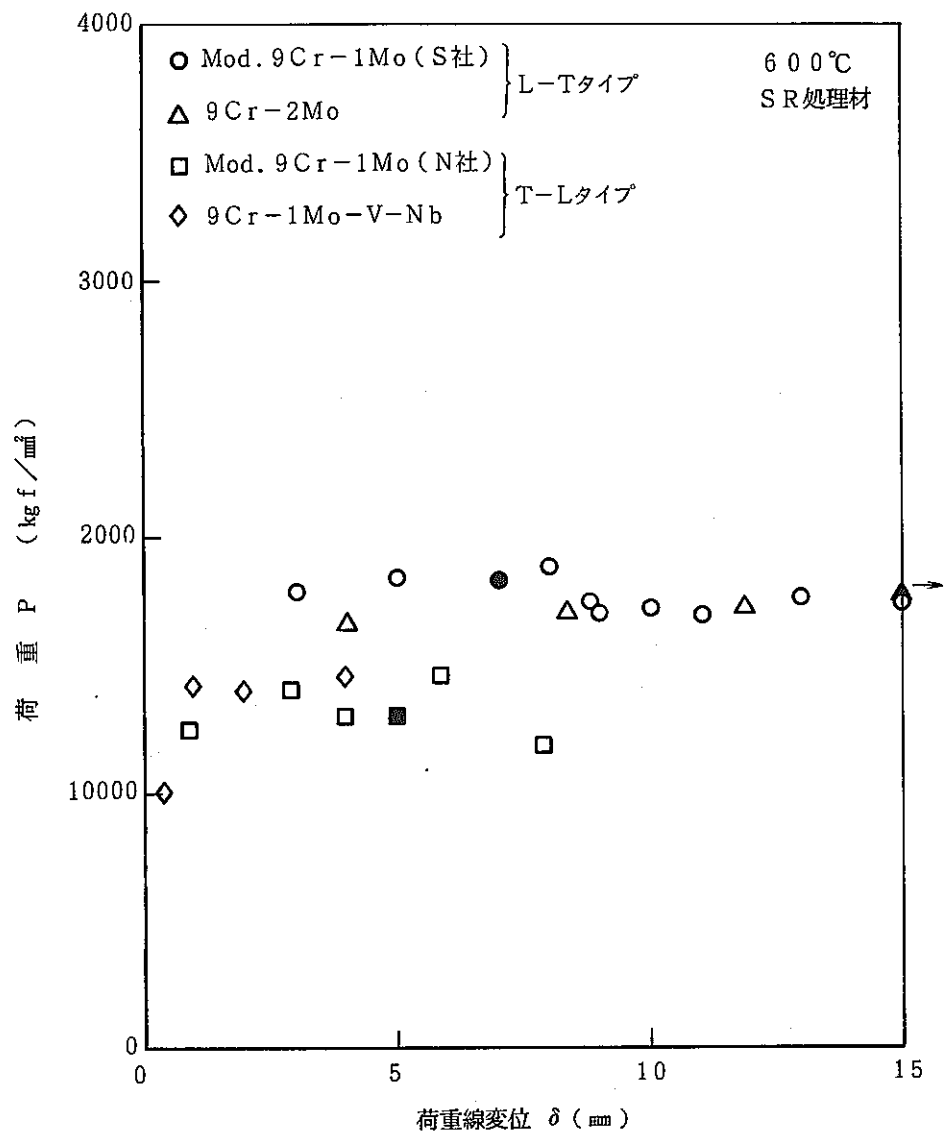


Fig. 6 Load - load line displacement curves obtained by R-curve method









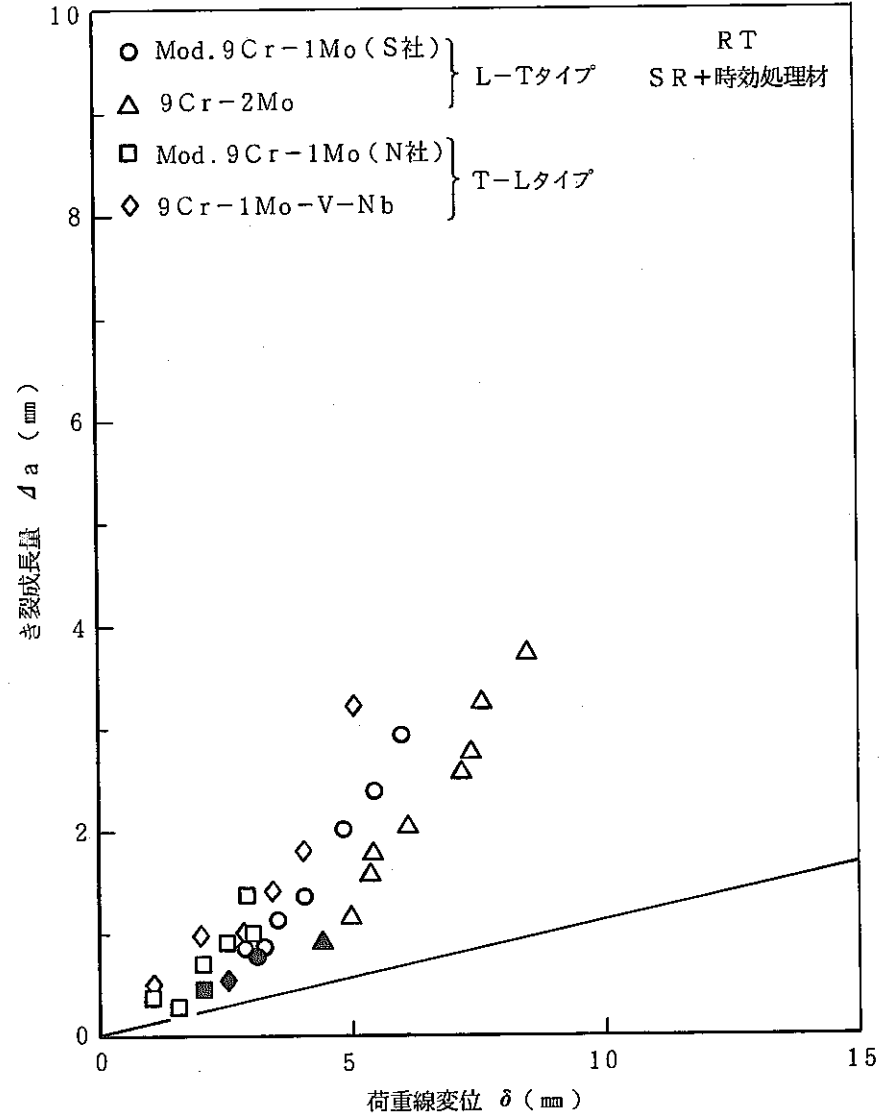
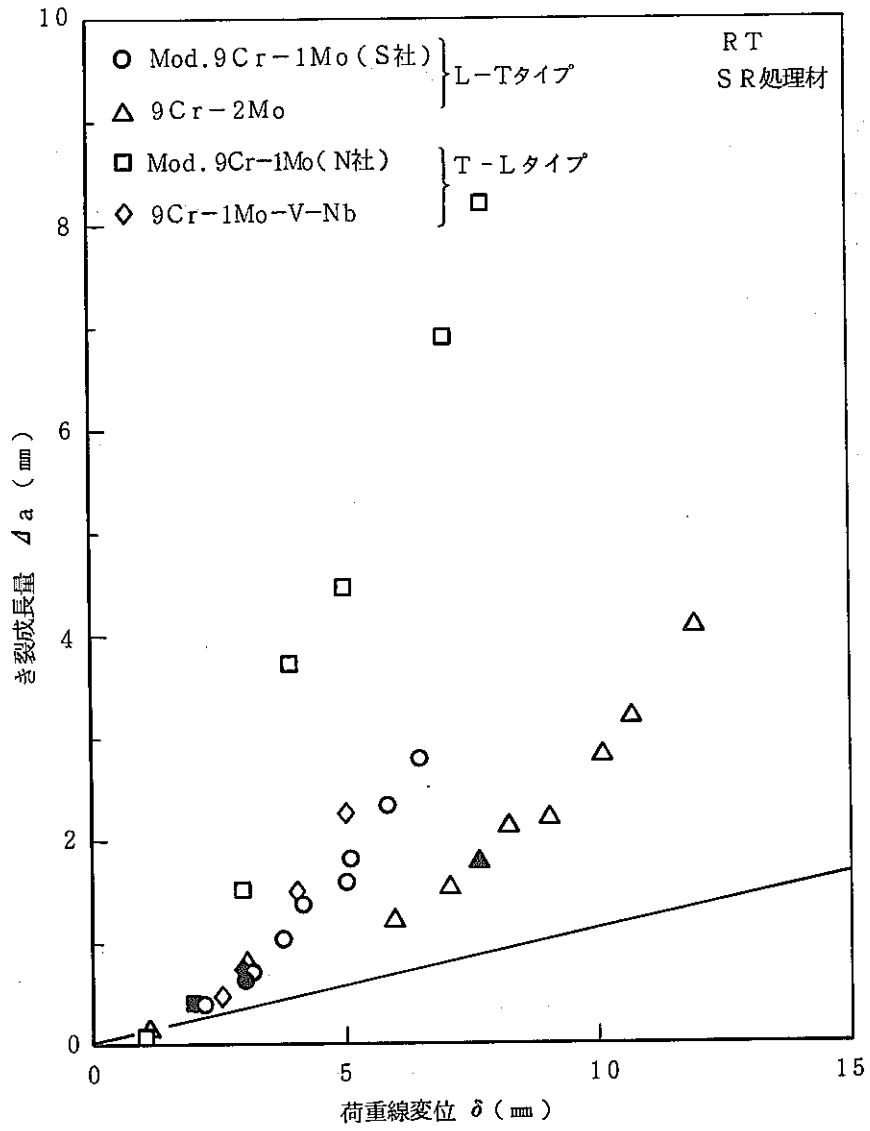
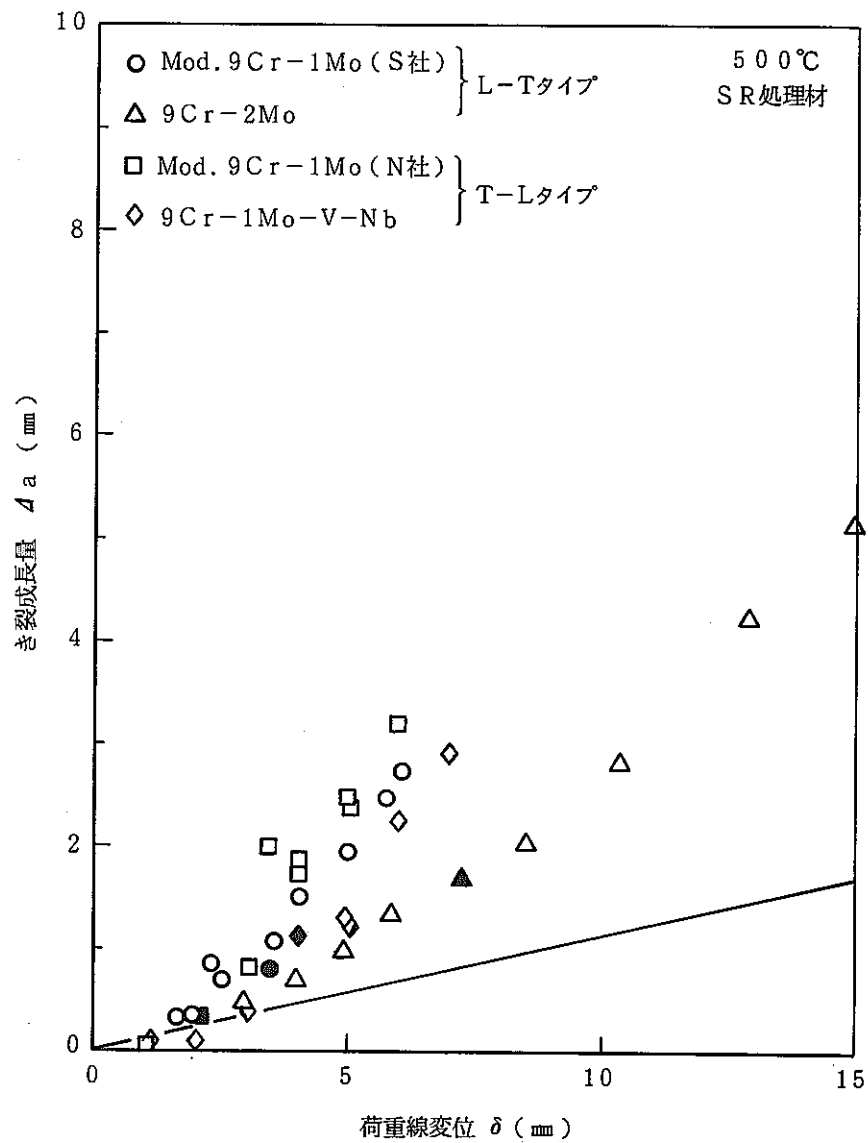
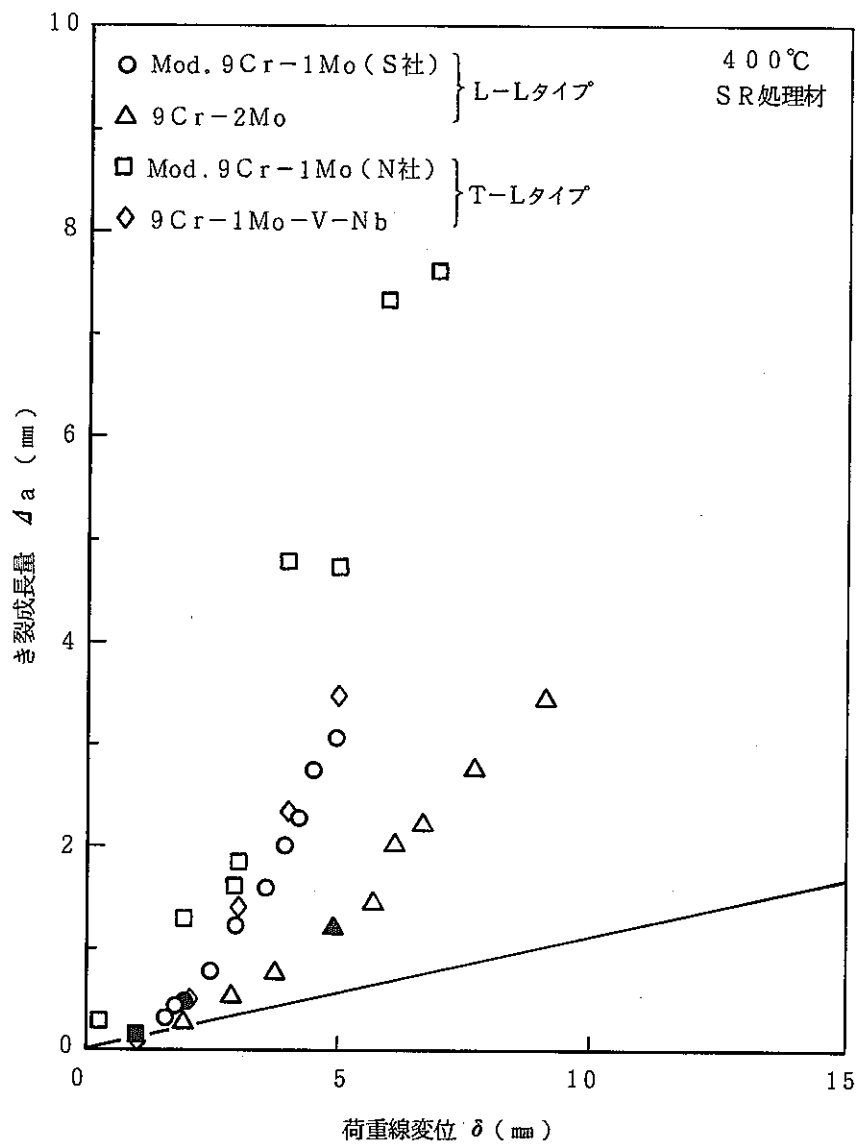
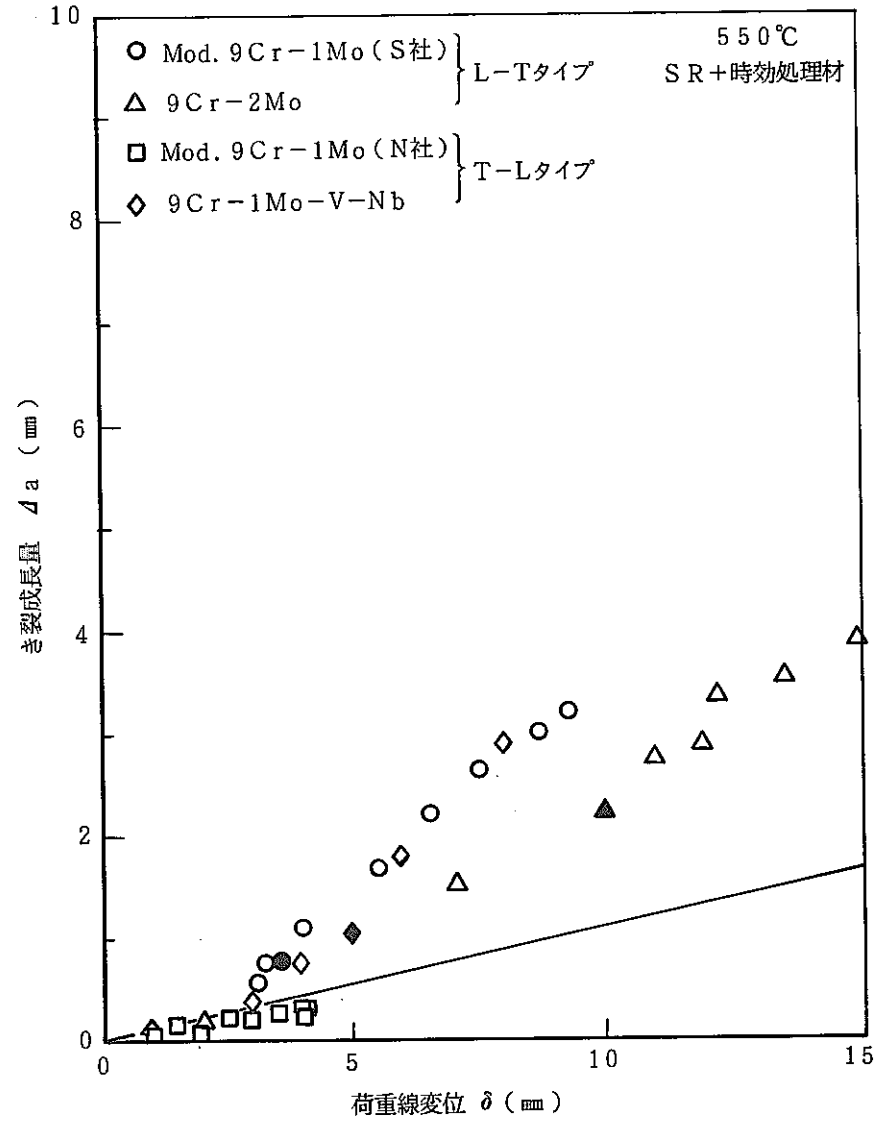
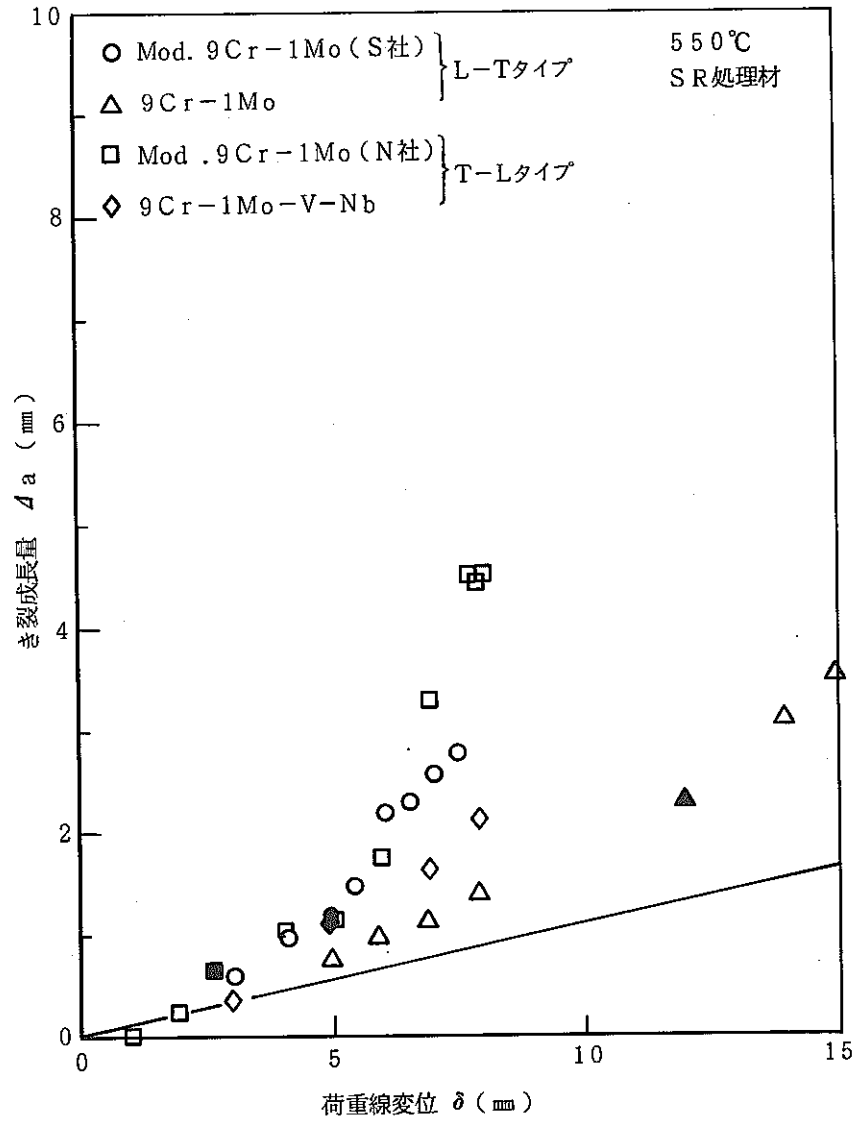
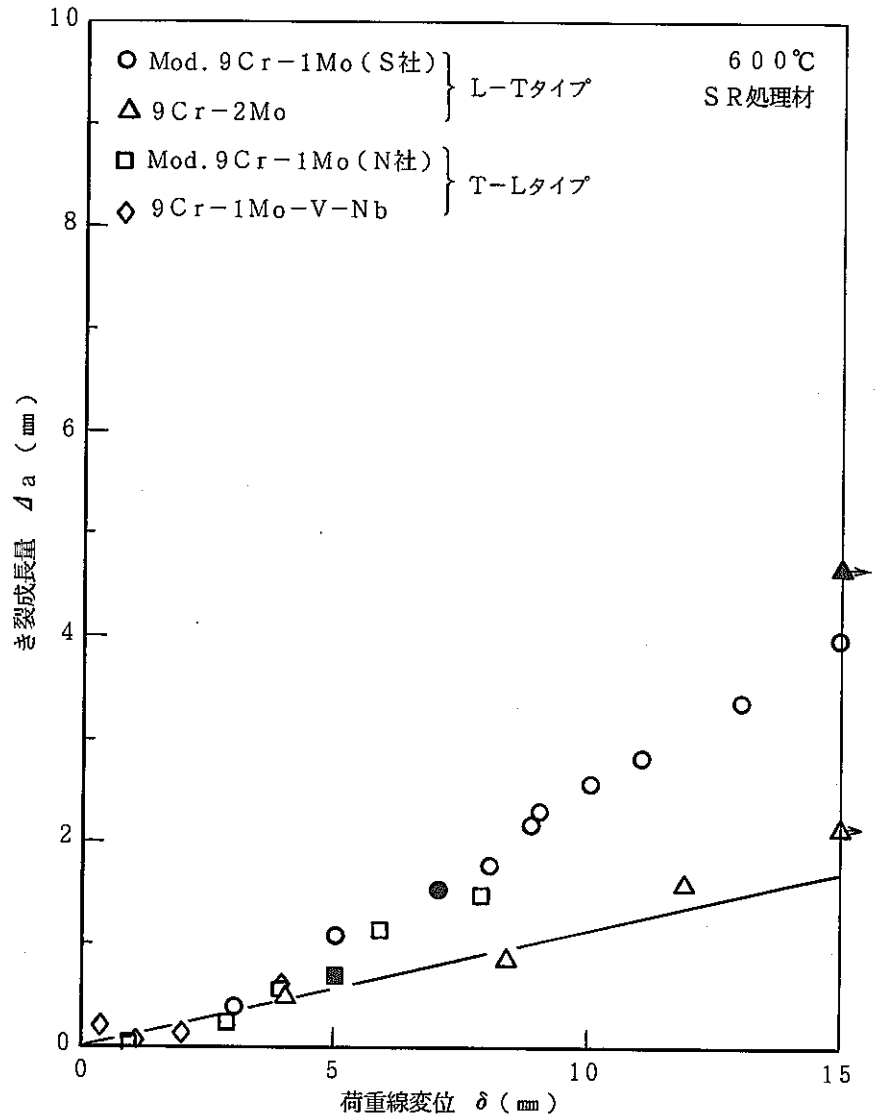


Fig. 7 Crack extension - load line displacement curves obtained by R-curve method







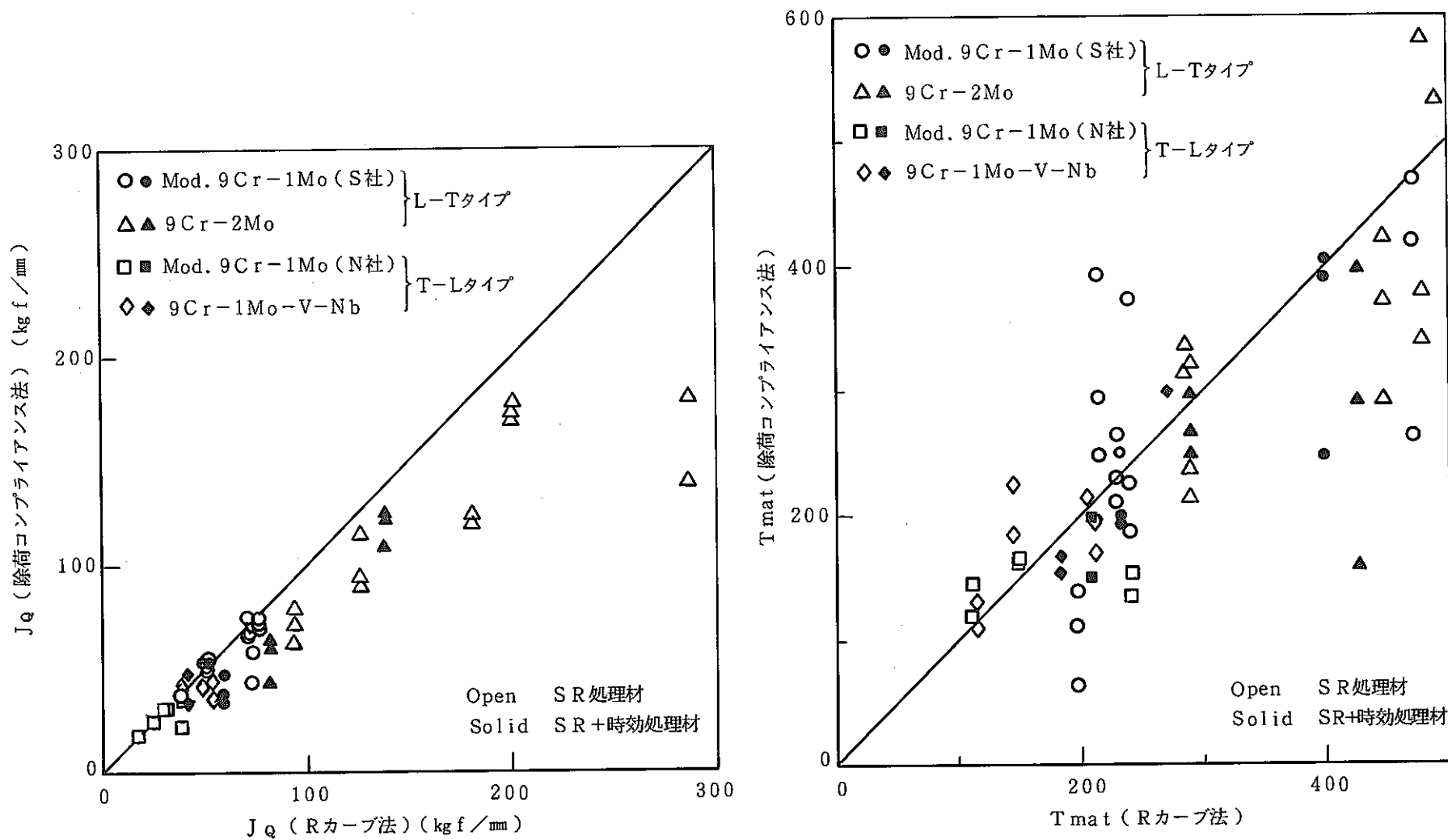


Fig. 8 Differences of  $J_q$  and  $T_{mat}$  values obtained by R-curve method and unloading compliance method



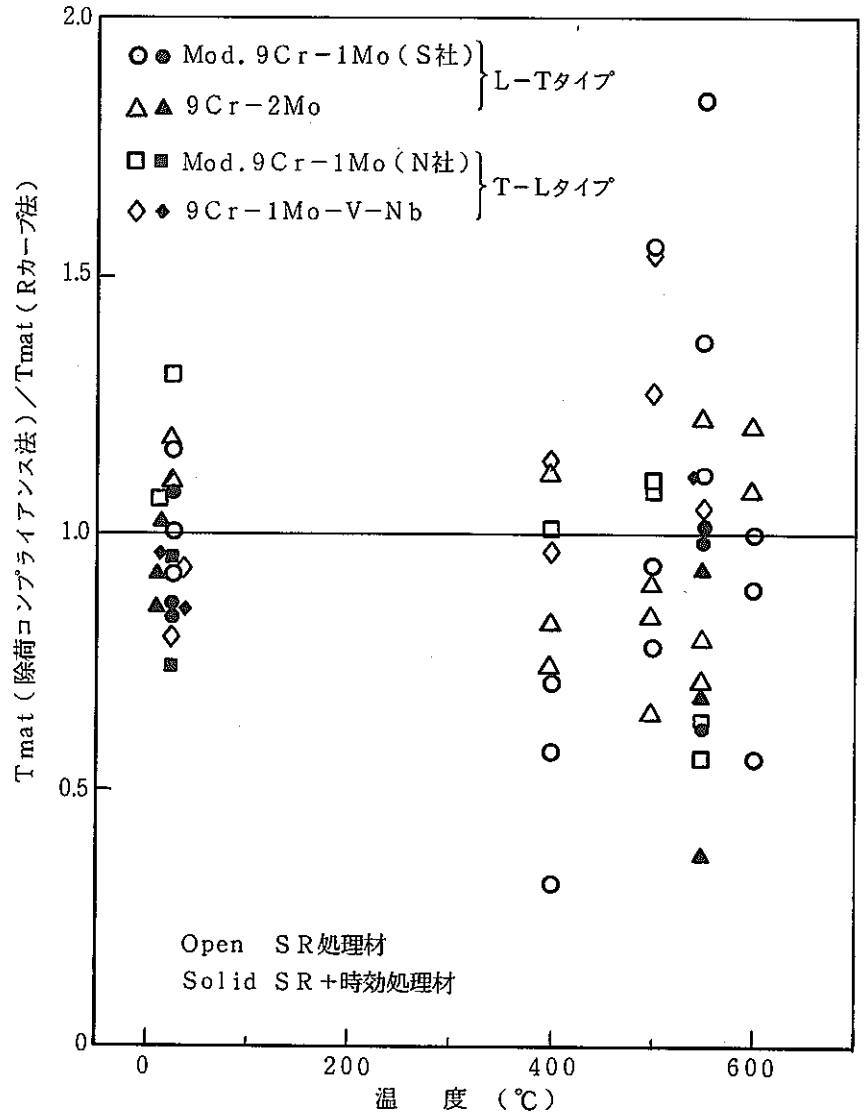
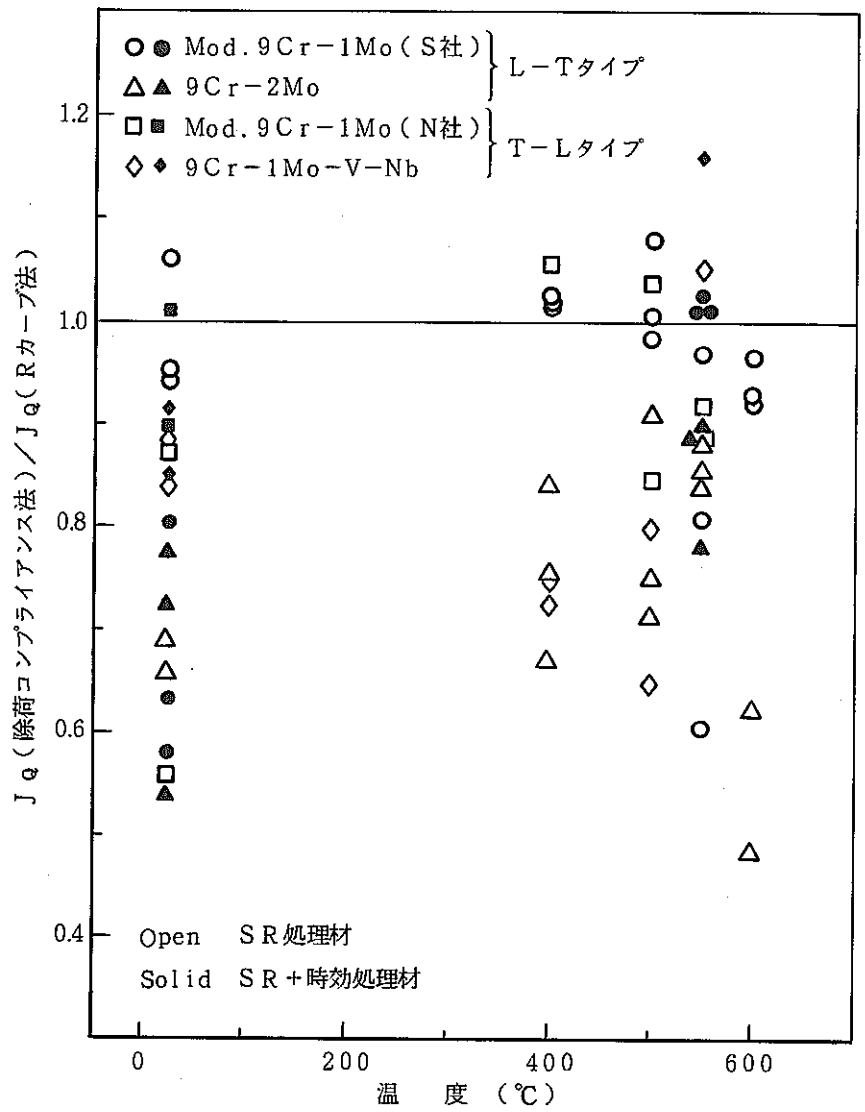


Fig. 9 Ratio of fracture toughness values by unloading compliance method to those by R-curve method

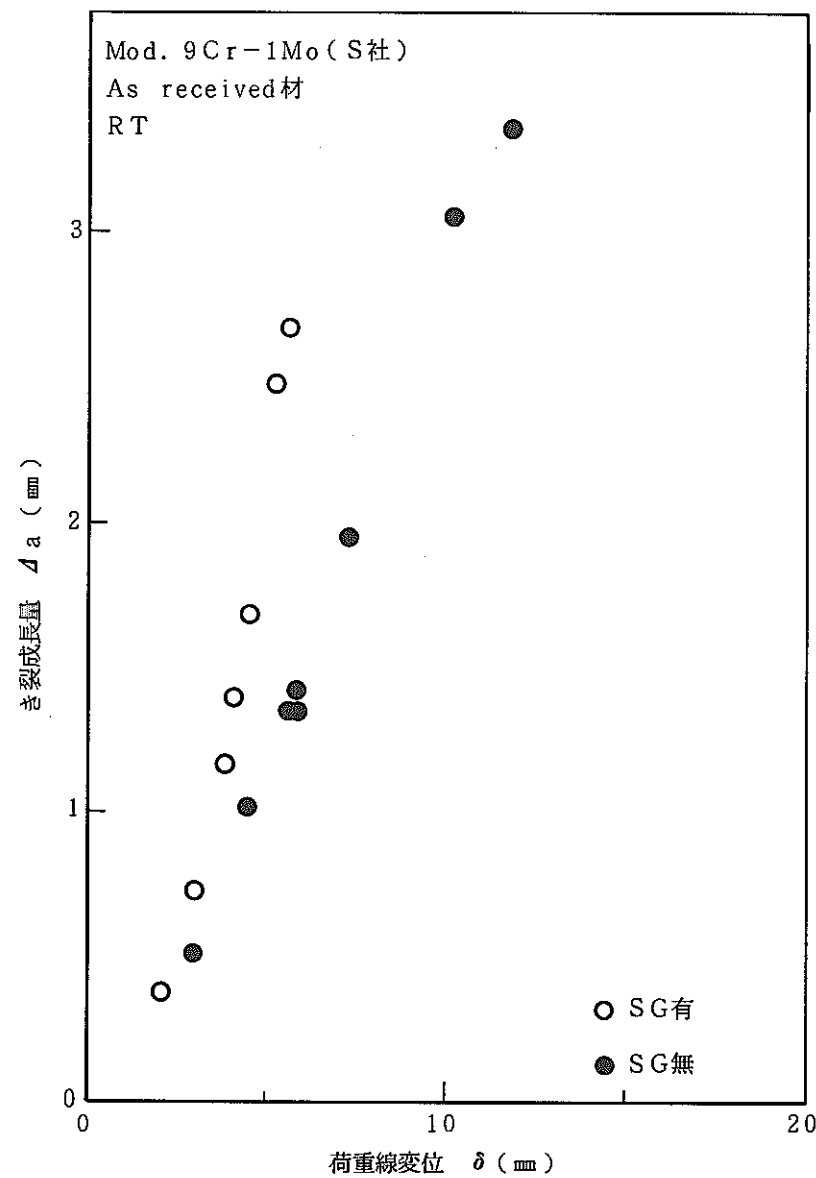
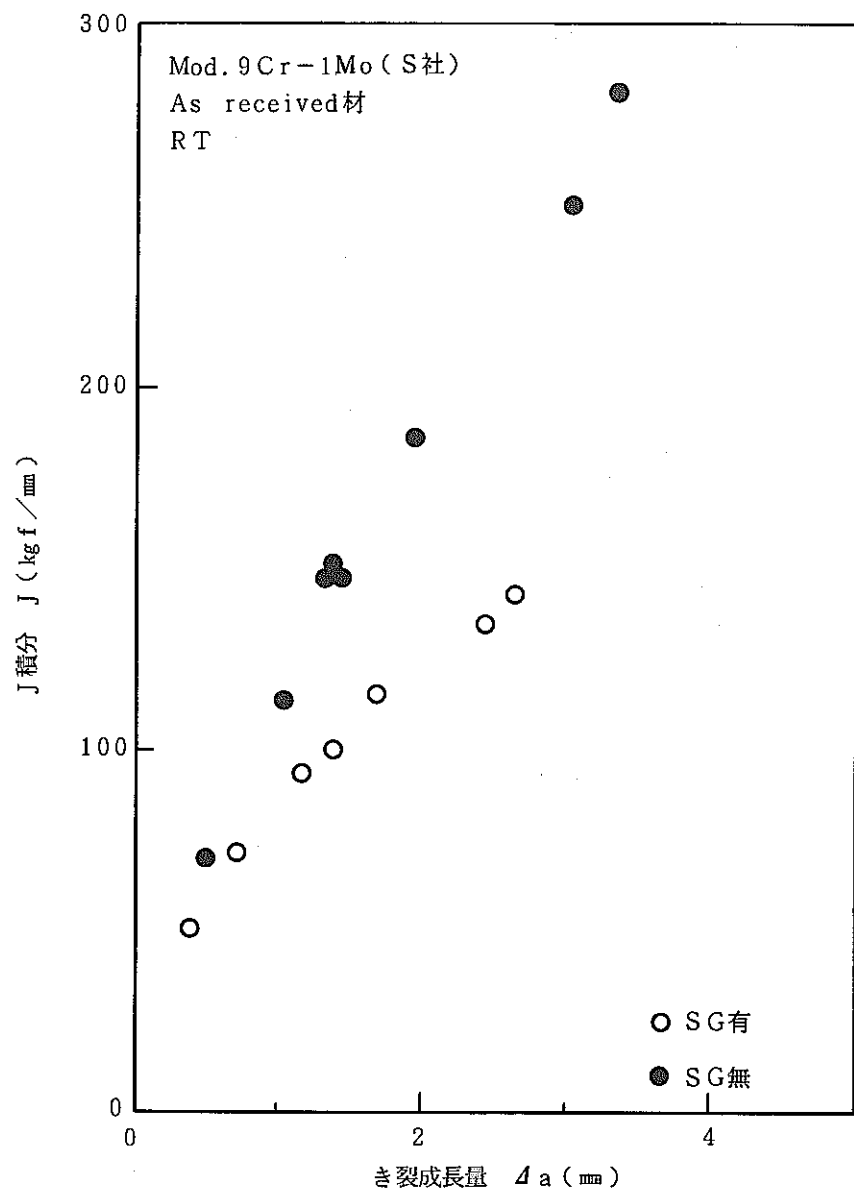


Fig. 10 Effect of side-groove on fracture toughness properties at RT

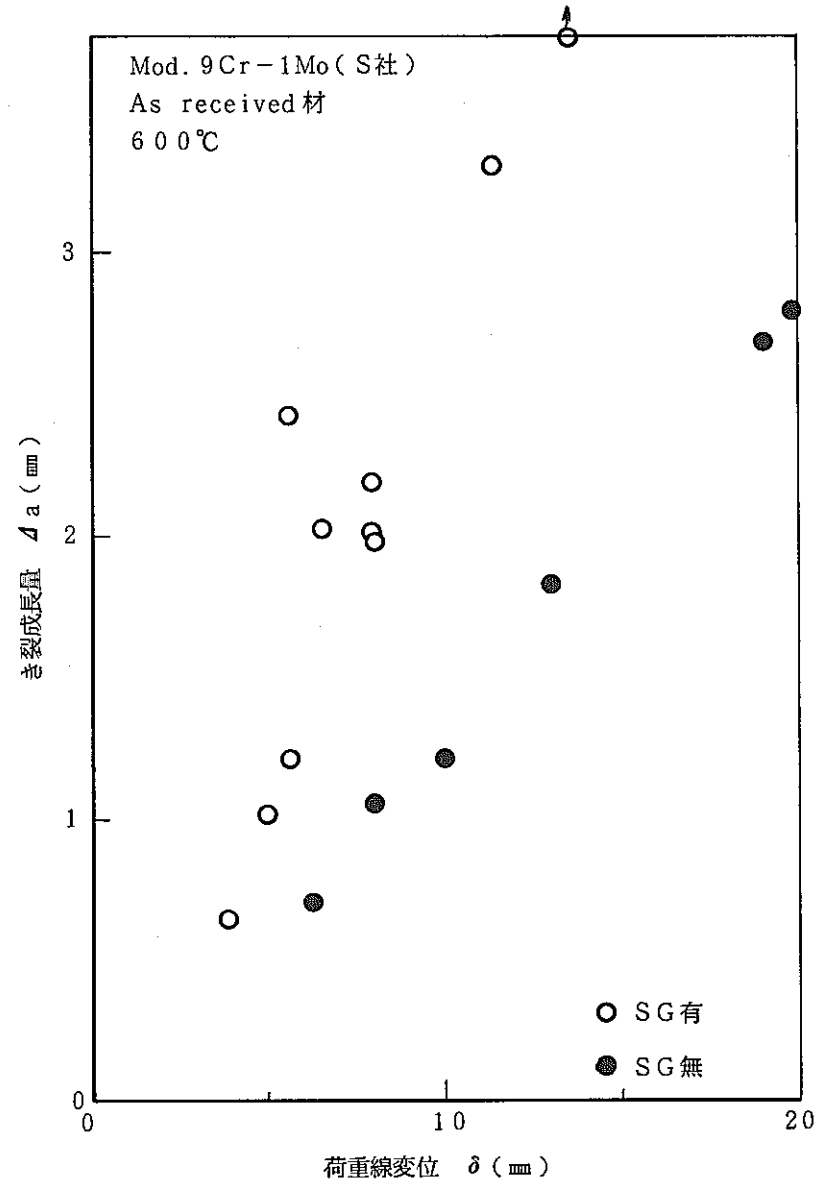
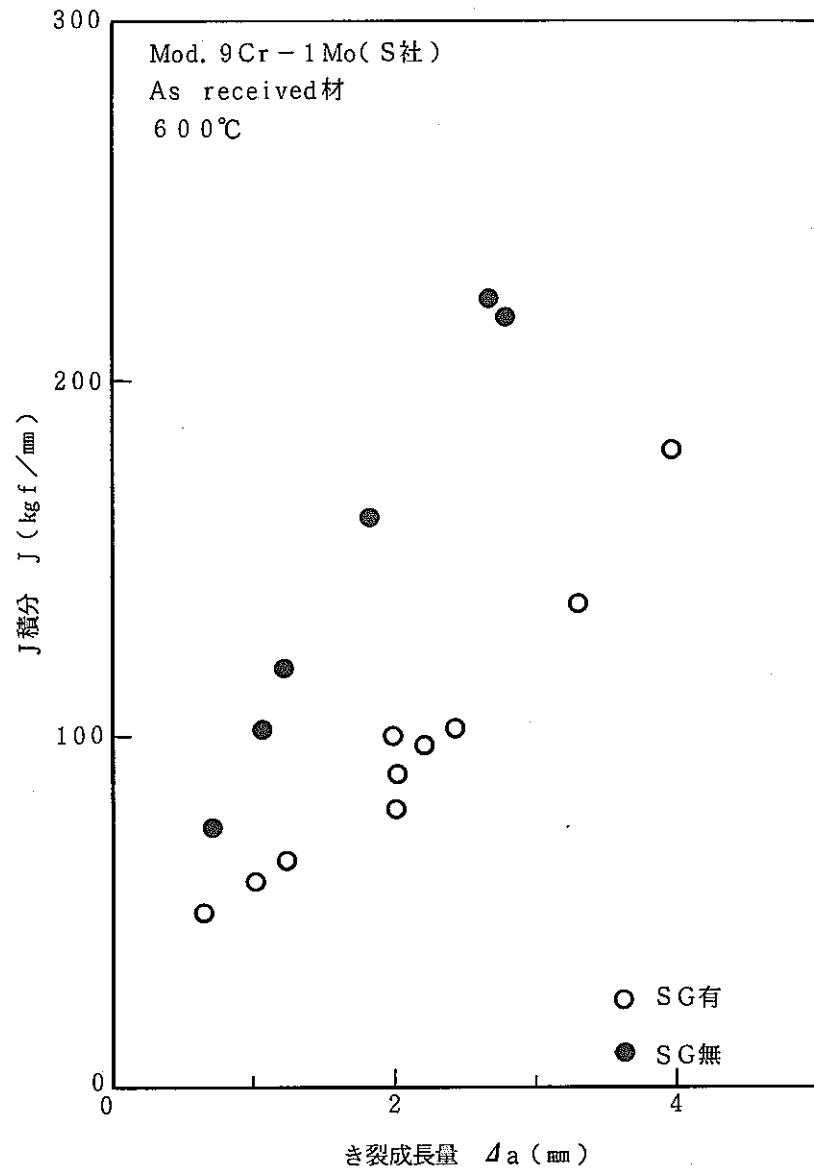


Fig.11 Effect of side-groove on fracture toughness properties at 600°C

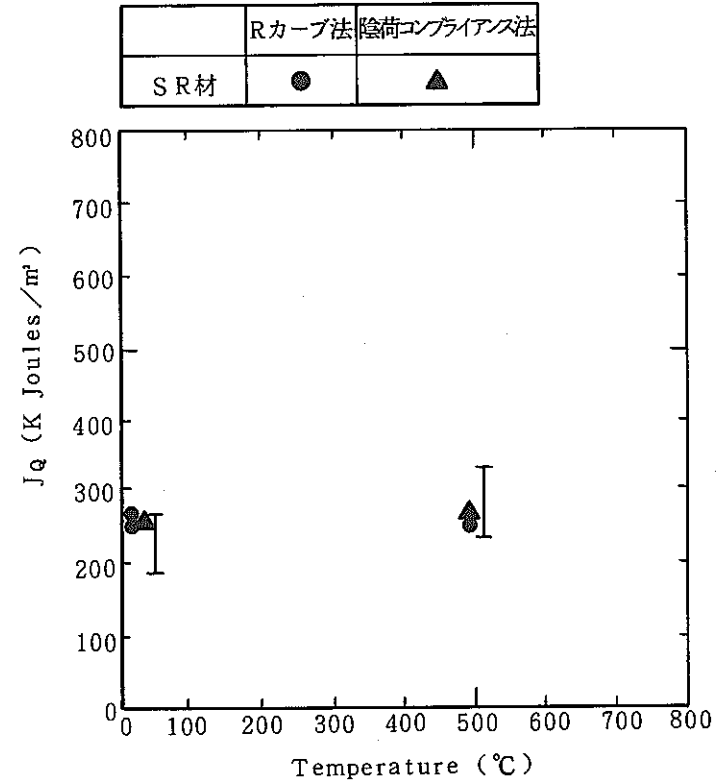
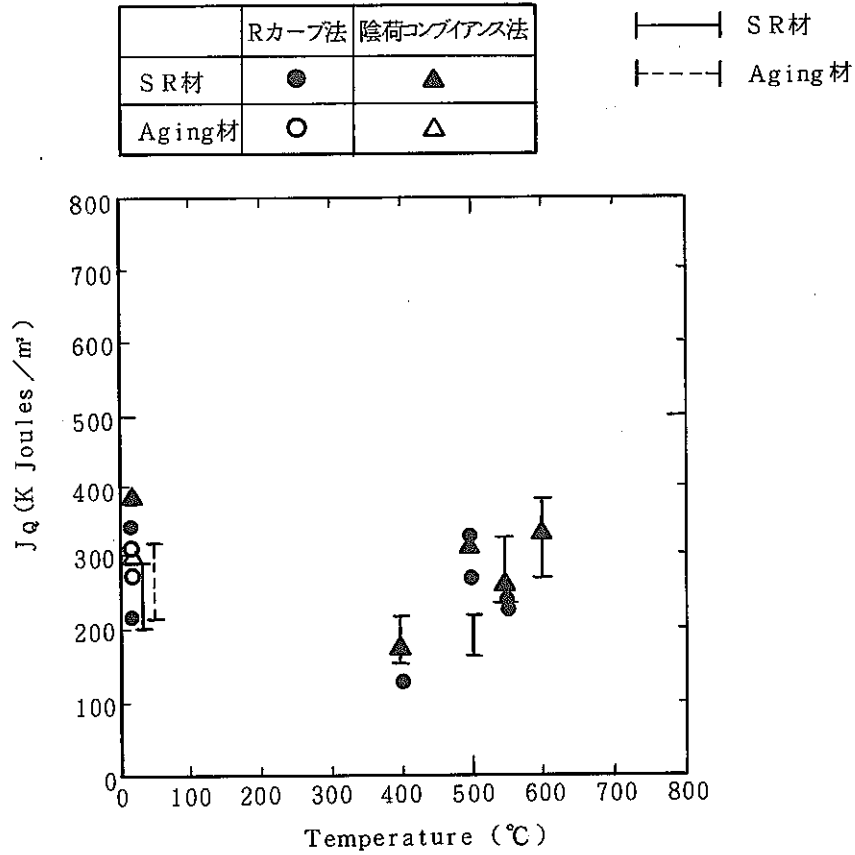


Fig. 12 Comparison of experimentally obtained  $J_a$  to those estimated using stretched zone depth

## 付録1. 9Cr 系鋼破壊靱性試験結果の詳細

Table A1～A4に、Mod. 9Cr-1Mo (S社) 鋼, 9Cr-2Mo鋼, Mod. 9Cr-1Mo (N社) 鋼, および9Cr-1Mo-V-Nb鋼の、Rカーブ法による破壊靱性試験結果の詳細を示す。

Fig. A1～A4に、Mod. 9Cr-1Mo (S社) 鋼, 9Cr-2Mo鋼, Mod. 9Cr-1Mo (N社) 鋼, および9Cr-1Mo-V-Nbの、除荷コンプライアンス法によるJ-き裂成長量関係を示す。

Table A1 R-curve tests results of Mod. 9Cr-1Mo (S) steel

試験温度：RT (25℃)

Mod. 9Cr-1Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	11111- A (kgf·mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
M91-A 8	20.02	15.01	50.01	30.170	2.210	6386	47.4	0.388	12.1	2.18	3640
M91-A 1	20.02	15.01	50.01	30.187	2.210	9225	68.5	0.621	17.5	3.00	3660
M91-A 21	20.02	14.99	50.01	30.295	2.209	9700	72.5	0.699	18.5	3.12	3560
M91-A 15	20.02	15.00	50.01	30.145	2.211	11822	87.7	1.039	22.4	3.76	3580
M91-A 5	20.02	15.01	50.01	30.052	2.212	13933	102.9	1.372	26.2	4.14	3830
M91-A 11	20.02	15.00	50.01	30.297	2.209	16416	122.6	1.597	31.3	5.03	3610
M91-A 24	20.02	14.99	50.02	30.548	2.206	15671	118.5	1.824	30.2	5.12	3410
M91-A 13	20.02	14.99	50.01	30.320	2.209	18738	140.2	2.342	35.7	5.82	3600
M91-A 17	20.02	14.99	50.04	30.110	2.208	21085	158.1	2.795	40.3	6.50	3540

$$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w) \quad B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs} \quad b_0 = w - a_0 \quad \sigma_{rs} = 58.9 \text{ kgf/mm}^2$$

$$J = a \cdot \Delta a + b, \quad a: 39.7, \quad b: 47.0 \quad J_a: 70.9 \text{ kgf/mm}$$

試験温度：室温

9Cr-1Mo鋼, 時効処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	11111- A (kgf·mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C1MA23	20.005	15.016	50.08	30.301	2.210	9080	68	0.860	17.6	2.88	3600
9C1MA21	20.045	14.998	50.07	30.340	2.209	9268	69	0.790	17.9	3.12	3500
9C1MA19	20.005	15.015	50.08	30.254	2.210	9933	74	0.878	19.2	3.25	3480
9C1MA32	20.008	15.004	50.01	30.330	2.209	11389	85	1.123	22.0	3.56	3660
9C1MA30	20.010	15.003	50.06	30.227	2.210	13257	98	1.380	25.4	4.10	3690
9C1MA10	20.055	14.999	50.02	30.113	2.015	16026	119	2.015	30.9	4.83	3630
9C1MA13	20.005	15.002	49.99	30.019	2.212	17579	130	2.408	33.7	5.48	3570
9C1MA 1	20.014	15.010	50.01	30.144	2.211	18569	138	2.964	35.8	6.00	3530

$$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w) \quad B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs} \quad b_0 = w - a_0 \quad \sigma_{rs} = 57.8 \text{ kgf/mm}^2$$

$$J = a \cdot \Delta a + b, \quad a: 38.9, \quad b: 39.3 \quad J_a: 59.2 \text{ kgf/mm}$$

試験温度：400℃

Mod. 9Cr-1Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	試験片 A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
M91-A 9	20.01	14.98	50.02	30.266	2.209	3594	26.8	0.331	8.4	1.61	2940
M91-59	20.02	15.02	50.03	30.185	2.210	4409	32.7	0.444	10.2	1.80	3090
M91-A 66	22.02	15.01	50.02	30.787	2.215	5120	37.3	0.485	11.7	1.97	3240
M91-134	20.02	15.00	50.01	30.241	2.210	6370	47.5	0.794	14.8	2.50	3010
M91-A 3	20.00	14.99	50.00	30.218	2.210	7953	59.3	1.243	18.5	3.00	3020
M91-64	20.02	14.99	50.02	30.078	2.211	9742	72.1	1.591	22.5	3.58	3120
M91-62	20.01	15.00	50.01	30.069	2.212	11407	84.3	2.007	26.3	3.98	3220
M91-A 35	20.00	15.01	50.01	30.257	2.210	11232	83.7	2.284	26.1	4.21	3020
M91-A 23	20.02	15.01	50.03	30.324	2.209	11524	86.1	2.757	26.9	4.52	2870
M91-A 12	20.01	15.00	50.00	30.362	2.208	12806	96.0	3.075	30.0	4.94	2960

$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs} = 48.0 \text{ kgf/mm}^2$   
 $J = a \cdot \Delta a + b, a = 26.4, b = 27.6$        $J_0 = 38.1 \text{ kgf/mm}$

試験温度：500℃

Mod. 9Cr-1Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	試験片 A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
M91-A 20	20.02	14.98	50.05	30.321	2.209	3416	25.5	0.313	9.0	1.64	2570
M91-63	20.02	15.01	50.02	29.672	2.216	4513	32.7	0.351	11.5	1.97	2860
M91-A 7	22.00	15.00	50.01	30.061	2.212	5844	43.2	0.700	15.2	2.50	2710
M91-A 37	19.98	15.00	50.02	30.507	2.207	7857	59.2	0.799	20.9	3.42	2610
M91-58	20.01	14.99	50.02	30.048	2.212	8253	61.0	0.839	21.5	2.32	2820
M91-A 29	20.02	15.00	50.01	30.285	2.209	8120	60.6	1.064	21.3	3.53	2590
M91-139	20.01	15.02	50.01	30.252	2.210	9826	73.2	1.506	25.8	4.02	2740
M91-A 10	20.00	15.01	50.00	30.162	2.210	12420	92.2	1.936	32.5	5.03	2770
M91-A 19	20.02	15.00	50.07	30.326	2.209	13365	99.7	2.458	35.1	5.74	2620
M91-A 14	20.01	15.01	50.02	30.317	2.209	14520	108.5	2.715	38.2	6.08	2730

$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs} = 42.6 \text{ kgf/mm}^2$   
 $J = a \cdot \Delta a + b, a = 26.9, b = 35.4$        $J_0 = 51.7 \text{ kgf/mm}$

試験温度 : 550℃

Mod. 9Cr-1Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材料- A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
M91-A 2	20.01	15.01	50.01	30.154	2.211	5807	43.1	0.601	17.3	3.02	2260
M91-A 30	20.02	15.01	50.02	30.353	2.209	8754	65.5	0.979	26.3	4.09	2280
M91-141	20.00	15.02	50.02	30.207	2.210	9901	73.5	1.165	29.5	4.92	2270
M91-A 40	20.00	15.00	50.00	30.473	2.207	11174	84.2	1.480	33.8	5.40	2290
M91-A 04	20.01	15.00	50.01	30.051	2.212	12517	92.5	2.199	37.1	6.04	2360
M91-A 16	20.02	15.00	49.98	30.381	2.208	13112	98.5	2.283	39.6	6.52	2260
M91-A 22	20.01	15.00	50.10	30.360	2.209	13894	103.7	2.558	41.6	7.03	2240
M91-A 27	20.00	15.02	50.02	30.418	2.208	14529	109.0	2.771	43.8	7.48	2250

$$J = A/B_{net} b_0 \cdot f(a_0/w) \quad B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs} \quad b_0 = w - a_0 \quad \sigma_{rs} : 37.4 \text{ kgf/mm}^2$$

$$J = a \cdot \Delta a + b, \quad a : 19.1, \quad b : 54.4 \quad J_a : 73.1 \text{ kgf/mm}$$

試験温度 : 550℃

Mod. 9Cr-1Mo鋼, SR + 時効処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材料- A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C1MA 4	20.008	15.013	50.02	30.348	2.209	5880	44	0.512	18.8	3.12	2210
9C1MA31	20.000	15.050	50.10	30.210	2.211	6833	50	0.726	21.4	3.29	2300
9C1MA16	20.014	15.002	50.04	30.271	2.210	7219	54	0.726	23.1	3.56	2200
9C1MA20	20.014	14.997	50.02	30.391	2.208	7940	60	1.083	25.7	4.04	2230
9C1MA 2	20.019	15.002	50.09	30.241	2.210	11102	82	1.667	35.1	5.54	2250
9C1MA 5	20.048	14.998	50.03	30.241	2.210	12906	96	2.196	41.1	6.56	2220
9C1MA 8	20.005	15.010	50.03	30.232	2.210	14744	110	2.624	47.1	7.52	2240
9C1MA22	20.051	15.004	50.06	30.352	2.209	16351	122	3.002	52.2	8.72	2220
9C1MA24	20.013	15.009	50.08	30.362	2.209	17285	129	3.196	55.2	9.28	2210

$$J = A/B_{net} b_0 \cdot f(a_0/w) \quad B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs} \quad b_0 = w - a_0 \quad \sigma_{rs} : 35.1 \text{ kgf/mm}^2$$

$$J = a \cdot \Delta a + b, \quad a : 31.2, \quad b : 28.6 \quad J_a : 51.5 \text{ kgf/mm}$$



試験温度 : 600℃

Mod. 9Cr-1Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	初期値 A (kgf·mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
M91-A 6	20.01	14.99	50.00	30.218	2.210	4730	35.2	0.382	17.1	3.04	1780
M91-138	20.00	15.00	50.00	30.227	2.210	8089	60.3	1.082	29.3	5.05	1840
M91-70	20.02	14.99	50.02	30.063	2.212	11527	85.2	1.523	41.4	7.06	1830
M91-65	20.01	14.99	50.02	30.006	2.212	13554	99.9	1.756	48.6	8.04	1880
M91-A39	20.00	14.98	50.01	30.465	2.207	13663	103.0	2.169	50.1	8.85	1740
M91-A26	20.00	15.01	50.02	30.449	2.208	13415	100.8	2.268	49.1	9.01	1700
M91-A18	19.98	15.01	50.06	30.436	2.208	15150	113.6	2.584	55.2	10.04	1720
M91-A25	20.01	15.00	50.01	30.355	2.208	15698	117.6	2.826	57.2	11.04	1690
M91-A38	19.99	15.01	50.02	30.502	2.207	18877	142.2	3.354	69.1	13.00	1760
M91-A46	20.01	15.00	50.02	30.509	2.207	21138	159.3	3.957	77.5	15.04	1740

$$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$$

$$B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$$

$$b_0 = w - a_0$$

$$\sigma_{rs} = 30.9 \text{ kgf/mm}^2$$

$$J = a \cdot \Delta a + b, a: 29.5, b: 39.9$$

$$J_a: 76.3 \text{ kgf/mm}$$

Table A2 R-curve tests results of 9Cr-2Mo steel

試験温度：室温

9Cr-2Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No.	厚さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	J積分 A (kgf・mm)	J積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MS54	20.014	15.001	50.04	30.320	2.209	17639	132	1.200	36.9	5.94	3340
9C2MS8	20.045	15.010	50.01	30.323	2.209	21980	164	1.518	45.9	7.08	3420
9C2MS29	20.054	15.005	50.08	30.417	2.208	24046	180	1.782	50.3	7.64	3340
9C2MS49	20.031	14.940	50.05	30.388	2.208	25665	193	2.120	54.0	8.24	3380
9C2MS16	20.054	14.990	50.03	30.207	2.564	28470	212	2.210	59.3	9.08	3470
9C2MS39	20.026	15.007	50.10	30.334	2.825	31080	231	2.825	64.6	10.16	3400
9C2MS63	20.024	15.001	50.04	30.298	2.209	32604	243	3.197	68.0	10.70	3440
9C2MS55	20.025	15.004	50.08	30.270	4.075	37215	277	4.075	77.5	11.96	3380

$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs} = 53.6 \text{ kgf/mm}^2$   
 $J = a \cdot \Delta a + b, a: 41.1, b: 111.4$        $J_a: 180.6 \text{ kgf/mm}$

試験温度：室温

9Cr-2Mo鋼, SR+時効処理 (Side-grooved)

試験片 No.	厚さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	J積分 A (kgf・mm)	J積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MA19	20.054	14.996	50.02	30.495	2.209	12482	93	0.907	26.5	4.43	3210
9C2MA10	20.005	15.008	50.02	30.362	2.209	12828	96	1.065	27.4	4.99	3060
9C2MA13	20.010	14.997	50.05	30.755	2.207	14961	113	1.586	32.2	5.39	3150
9C2MA21	20.059	15.009	50.04	30.311	2.209	15775	118	1.775	33.6	5.44	3100
9C2MA4	20.008	15.014	50.04	30.377	2.208	18104	135	2.039	38.5	6.12	3150
9C2MA1	20.010	14.996	50.03	30.323	2.209	21118	158	2.599	45.0	7.28	3230
9C2MA23	20.055	15.006	50.04	30.320	2.209	21382	160	2.755	45.6	7.38	3170
9C2MA16	20.008	15.008	50.00	30.321	2.209	22235	166	3.260	47.3	7.60	3200
9C2MA7	20.013	14.998	50.08	30.427	2.208	25051	188	3.730	53.6	8.52	3180

$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs} = 52.6 \text{ kgf/mm}^2$   
 $J = a \cdot \Delta a + b, a: 40.15, b: 50.91$        $J_a: 82.3 \text{ kgf/mm}$

試験温度：400℃

9Cr-2Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No.	厚さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材 A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MS5	20.045	15.008	50.07	30.254	2.210	4497	33	0.298	11.5	2.00	2750
9C2MS21	20.025	15.001	50.07	30.489	2.207	6697	50	0.542	17.4	2.95	2700
9C2MS1	20.065	15.036	50.05	30.361	2.209	9527	71	0.776	24.7	3.80	2750
9C2MS10	20.056	15.008	50.10	30.321	2.209	12462	93	1.210	32.4	4.93	2780
9C2MS30	20.024	15.007	50.09	30.234	2.210	14512	108	1.449	37.6	5.72	2780
9C2MS56	20.024	14.971	50.06	30.155	2.211	16072	119	2.014	41.4	6.17	2830
9C2MS17	20.045	14.978	50.10	30.283	2.238	17337	129	2.210	44.9	6.70	2820
9C2MS61	20.011	15.008	50.01	30.262	2.209	19461	145	2.753	50.5	7.72	2810
9C2MS45	20.031	14.956	50.06	30.243	2.210	22622	169	3.447	58.8	9.12	2780

$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs} = 43.1 \text{ kgf/mm}^2$

$J = a \cdot \Delta a + b, a: 31.2, b: 59.9$        $J_a: 93.9 \text{ kgf/mm}$

試験温度：500℃

9Cr-2Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No.	厚さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材 A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MS20	20.070	14.97	50.10	30.404	2.209	6499	49	0.479	18.8	2.95	2550
9C2MS6	20.045	15.06	50.11	30.322	2.209	9343	69	0.702	26.4	4.00	2590
9C2MS23	20.035	15.00	50.06	30.324	2.209	11365	85	0.964	32.5	4.93	2540
9C2MS2	20.045	14.82	50.08	30.676	2.207	13693	104	1.321	39.8	5.90	2530
9C2MS31	20.200	15.01	50.08	30.424	2.208	16537	124	1.681	47.4	7.26	2510
9C2MS36	20.025	15.02	50.09	30.271	2.210	19454	144	2.005	55.1	8.52	2530
9C2MS18	20.065	14.998	50.12	30.344	2.209	24045	179	2.813	68.5	10.35	2580
9C2MS51	20.021	14.939	50.06	30.404	2.208	30251	227	4.205	86.9	12.90	2530
9C2MS41	20.070	15.00	50.08	30.377	2.209	37648	281	5.123	107.5	15.17	2540

$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs} = 39.2 \text{ kgf/mm}^2$

$J = a \cdot \Delta a + b, a: 42.4, b: 57.7$        $J_a: 125.6 \text{ kgf/mm}$

試験温度：550℃

9Cr-2Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工種#- A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MS7	20.055	15.050	50.12	30.437	2.208	10139	76	0.763	32.3	5.00	2220
9C2MS25	20.040	15.002	50.06	30.311	2.209	12064	90	0.985	38.2	5.90	2200
9C2MS4	20.060	15.002	50.09	30.529	2.207	13996	105	1.134	44.6	6.90	2180
9C2MS22	20.030	15.000	50.08	30.460	2.208	16295	122	1.400	51.8	7.90	2180
9C2MS62	20.018	15.008	50.02	30.362	2.208	24360	182	2.281	77.3	12.00	2240
9C2MS42	20.045	15.008	50.08	30.435	2.208	27960	210	3.101	89.2	13.96	2220
9C2MS52	20.022	15.007	50.06	30.507	2.207	29798	224	3.519	95.1	15.40	2220
9C2MS19	20.057	15.004	50.08	30.400	2.208	33889	253	4.102	107.4	17.20	2220
9C2MS47	20.012	14.961	50.04	30.655	2.205	34392	261	4.432	110.8	18.78	2190
9C2MS64	20.012	15.004	50.02	30.322	2.209	40180	300	5.305	127.4	21.48	2270
9C2MS32	20.045	15.002	50.05	30.435	2.208	42664	320	6.090	135.9	24.096	2240

$J=A/B_{net} b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs}: 35.3 \text{ kgf/mm}^2$

$J = a \cdot \Delta a + b, a: 37.9, b: 93.4$        $J_a: 201 \text{ kgf/mm}$

試験温度：550℃

9Cr-2Mo鋼, SR+時効処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工種#- A (kgf・mm)	J 積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MA2	20.045	14.999	50.04	30.530	2.207	13284	100	1.492	45.3	7.04	2090
9C2MA5	20.010	15.002	50.05	30.372	2.209	19656	147	2.200	66.6	10.00	2120
9C2MA20	20.055	14.999	50.04	30.672	2.205	20227	154	2.724	69.8	10.96	2050
9C2MA22	20.050	15.012	50.06	30.639	2.206	21458	162	2.881	73.4	11.96	2060
9C2MA11	20.056	15.014	50.02	30.534	2.207	22083	166	3.342	75.2	12.26	2080
9C2MA17	20.009	15.012	50.07	30.758	2.205	23394	178	3.520	80.7	13.56	2030
9C2MA8	20.005	14.996	50.07	30.643	2.206	26161	198	3.875	89.7	15.12	2040
9C2MA14	20.055	14.998	50.08	30.576	2.207	29857	225	4.978	102.0	18.04	2080
9C2MA24	20.006	14.995	49.99	30.513	2.207	33053	250	6.226	113.3	20.88	2070

$J=A/B_{net} b_0 \cdot f(a_0/w)$        $B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs}$        $b_0 = w - a_0$        $\sigma_{rs}: 33.1 \text{ kgf/mm}^2$

$J = a \cdot \Delta a + b, a: 29.75, b: 75.74$        $J_a: 137.5 \text{ kgf/mm}$

試験温度：600℃

9Cr-2Mo鋼, SR処理 (Side-grooved)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予き裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	I値#- A (kgf・mm)	J積分 J (kgf/mm)	き裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
9C2MS3	20.050	15.080	50.01	30.333	2.209	6291	47	0.488	23.8	4.07	1660
9C2MS24	20.035	15.006	50.09	30.311	2.209	12982	97	0.849	49.1	8.40	1700
9C2MS26	20.025	14.999	50.07	30.520	2.207	18842	142	1.584	72.0	11.90	1720
9C2MS27	20.027	15.000	50.04	30.466	2.207	24108	181	2.123	91.7	15.80	1760
9C2MS28	20.035	14.997	50.05	30.452	2.208	32658	245	3.861	124.2	22.80	1740
9C2MS33	20.024	15.003	50.04	30.582	2.206	37264	282	4.635	142.9	26.40	1740
9C2MS15	20.045	15.031	50.03	30.643	2.206	41011.5	310	5.652	157.1	30.15	1740
9C2MS1'	20.025	15.034	50.06	30.500	2.207	44281	332	6.572	168.2	32.40	1763
9C2MS2'	20.020	15.129	50.05	30.590	2.206	46688	350	6.844	177.4	34.80	1760
9C2MS3'	20.025	15.063	50.02	30.633	2.206	47683	360	7.477	182.4	36.60	1730
9C2MS4'	20.026	14.985	50.02	30.375	2.208	49298	370	8.477	187.5	39.70	1720

$$J = A/B_{net} \cdot b_0 \cdot f(a_0/w) \quad B_{net}, b_0 > 15J/\sigma_{rs} \quad b_0 = w - a_0 \quad \sigma_{rs} = 29.6 \text{ kgf/mm}^2$$

$$J = a \cdot \Delta a + b, \quad a: 28.4, \quad b: 149.5 \quad J_0: 287 \text{ kgf/mm}$$

Table A3 R-curve tests results of Mod. 9Cr-1Mo (N) steel

試験温度: RT ( $\approx 20^\circ\text{C}$ )

材料: Mod. 9Cr-1Mo鋼, (SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ ao (mm)	f (ao/w)	工材 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 $\Delta a$ (mm)	15J/ $\sigma_{rs}$ (mm)	荷重線変位 $\delta_{max}$ (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>not</sub> (mm)									
PNC-19	20.0	15.0	50.8	31.50	2.202	119.3	751.1	3.76	18.12	3.94	2785
PNC-21	20.0	15.0	50.8	32.14	2.195	22.1	174.5	0.07	4.21	1.05	3200
PNC-23	20.0	15.0	50.8	31.59	2.201	147.8	915.1	4.48	22.08	5.04	3550
PNC-24	20.0	15.0	50.8	30.69	2.210	207.0	1213.9	6.93	29.29	7.00	3800
PNC-25	20.0	15.0	50.8	31.07	2.206	214.6	1296.0	8.21	31.26	7.74	3858
PNC-64	20.0	15.0	50.8	30.95	2.208	58.5	413.5	0.41	9.98	2.00	3765
PNC-65	20.0	15.0	50.8	33.03	2.186	88.5	655.3	1.51	15.81	2.97	3600
PNC-66	20.0	15.0	50.8	36.28	2.151	142.2	941.5	4.72	22.71	5.00	3350

試験温度: RT ( $\approx 20^\circ\text{C}$ )

材料: Mod. 9Cr-1Mo鋼, (Aging)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ ao (mm)	f (ao/w)	工材 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 $\Delta a$ (mm)	15J/ $\sigma_{rs}$ (mm)	荷重線変位 $\delta_{max}$ (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>not</sub> (mm)									
M9A-2	20.0	15.0	50.8	31.42	2.203	65.0	490.9	0.70	11.72	2.09	4000
M9A-5	20.0	15.0	50.8	31.63	2.201	24.6	190.2	0.40	4.54	1.08	3440
M9A-6	20.0	15.0	50.8	31.75	2.199	97.4	740.2	1.00	17.68	3.05	3770
M9A-7	20.0	15.0	50.8	31.48	2.202	43.3	330.6	0.30	7.90	1.59	3748
M9A-8	20.0	15.0	50.8	32.01	2.196	76.1	585.0	0.91	13.97	2.58	3600
M9A-9	20.0	15.0	50.8	30.88	2.208	102.1	719.7	1.38	17.19	2.95	4070
M9A-20	20.0	15.0	50.8	31.31	2.204	57.6	347.3	0.45	8.30	2.05	3600

試験温度：400℃

材料：Mod. 9Cr-1Mo鋼, (SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	試験片 A (J)	J積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
PNC-27	20.0	15.0	50.8	30.95	2.208	19.3	143.4	0.15	4.25	1.07	2683
PNC-28	20.0	15.0	50.8	31.05	2.207	69.0	501.5	1.84	14.86	3.05	2725
PNC-29	20.0	15.0	50.8	31.21	2.205	114.8	714.6	4.72	21.18	5.03	2813
PNC-30	20.0	15.0	50.8	31.09	2.206	140.9	841.1	7.62	24.93	7.00	2925
PNC-31	20.0	15.0	50.8	31.09	2.206	1.4	10.1	0.29	0.30	0.24	2275
PNC-32	20.0	15.0	50.8	30.63	2.211	97.1	574.0	4.79	17.02	4.03	2950
PNC-33	20.0	15.0	50.8	30.47	2.213	127.4	739.7	7.34	21.93	6.00	3050
PNC-34	20.0	15.0	50.8	30.55	2.212	132.3	770.7	11.03	22.85	8.00	3050
PNC-68	20.0	15.0	50.8	32.08	2.196	49.2	354.9	1.27	10.52	2.00	3013
PNC-69	20.0	15.0	50.8	33.40	2.182	73.0	498.7	2.57	14.78	2.98	2950

試験温度：500℃

材料：Mod. 9Cr-1Mo鋼, (SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	試験片 A (J)	J積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
PNC-37	20.0	15.0	50.8	31.08	2.206	36.9	275.8	0.34	9.26	2.03	2283
PNC-38	20.0	15.0	50.8	30.72	2.210	85.3	612.6	1.71	20.57	4.02	2525
PNC-39	20.0	15.0	50.8	30.98	2.207	119.2	831.2	3.19	27.91	5.99	2488
PNC-41	20.0	15.0	50.8	30.96	2.208	16.3	120.7	0.05	4.05	1.05	2325
PNC-42	20.0	15.0	50.8	30.91	2.208	59.9	442.0	0.79	14.84	3.04	2338
PNC-43	20.0	15.0	50.8	30.86	2.209	102.0	725.3	2.36	24.35	5.02	2425
PNC-70	20.0	15.0	50.8	31.14	2.206	98.8	701.0	2.45	23.54	5.00	2455
PNC-71	20.0	15.0	50.8	30.70	2.210	75.6	534.2	1.96	17.96	3.47	2550
PNC-72	20.0	15.0	50.8	31.18	2.205	81.1	592.4	1.84	19.89	3.99	2338

試験温度：550℃

材料：Mod. 9Cr-1Mo鋼，(SR)

試験片 No.	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	1/2W- A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
PNC-46	20.0	15.0	50.8	29.81	2.220	118.8	749.2	4.51	28.76	8.00	2000
PNC-47	20.0	15.0	50.8	30.97	2.208	30.0	223.7	0.23	8.59	1.95	1975
PNC-48	20.0	15.0	50.8	30.65	2.211	77.2	451.6	1.03	17.33	4.05	2175
PNC-49	20.0	15.0	50.8	31.27	2.204	96.8	582.4	1.74	22.35	5.95	1900
PNC-50	20.0	15.0	50.8	28.92	2.229	129.1	796.3	4.46	30.56	7.90	2025
PNC-51	20.0	15.0	50.8	31.23	2.205	11.9	89.4	0.04	3.43	1.00	1725
PNC-52	20.0	15.0	50.8	30.85	2.209	52.7	311.1	0.65	11.94	2.53	2025
PNC-53	20.0	15.0	50.8	31.25	2.205	77.2	464.1	1.16	17.81	4.90	1600
PNC-54	20.0	15.0	50.8	30.91	2.208	112.7	667.2	3.31	25.61	6.95	2000
PNC-55	20.0	15.0	50.8	29.86	2.219	122.7	779.7	4.50	29.39	7.75	2028

試験温度：550℃

材料：Mod. 9Cr-1Mo鋼，(Aging)

試験片 No.	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	1/2W- A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
M9A-10	20.0	15.0	50.8	31.98	2.197	66.2	411.8	0.29	15.34	3.98	1825
M9A-12	20.0	15.0	50.8	31.18	2.205	14.7	88.1	0.03	3.28	1.05	2050
M9A-13	20.0	15.0	50.8	32.18	2.195	28.2	177.1	0.05	6.60	1.98	1725
M9A-14	20.0	15.0	50.8	31.06	2.207	49.0	292.1	0.20	10.88	3.00	1950
M9A-15	20.0	15.0	50.8	31.08	2.199	61.3	377.9	0.29	14.08	3.98	1738
M9A-16	20.0	15.0	50.8	31.43	2.203	22.1	133.7	0.10	4.98	1.55	2050
M9A-17	20.0	15.0	50.8	31.40	2.203	33.1	200.4	0.21	7.47	2.55	1888
M9A-18	20.0	15.0	50.8	31.20	2.205	67.4	404.3	0.26	15.06	3.53	2200
M9A-19	20.0	15.0	50.8	32.20	2.194	56.4	354.6	0.24	13.21	4.00	1600



試験温度：600℃

材料：Mod. 9Cr-1Mo鋼, (SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /W)	工率 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
PNC-58	20.0	15.0	50.8	31.00	2.207	49.0	291.3	0.53	13.65	3.95	1300
PNC-59	20.0	15.0	50.8	30.59	2.212	73.5	429.0	1.12	20.10	5.88	1462
PNC-60	20.0	15.0	50.8	30.92	2.208	77.2	457.1	1.47	21.41	7.88	1188
PNC-61	20.0	15.0	50.8	30.80	2.209	7.7	50.5	0.03	2.37	0.95	1250
PNC-62	20.0	15.0	50.8	30.52	2.212	36.8	213.8	0.24	10.02	2.90	1413
PNC-63	20.0	15.0	50.8	31.23	2.205	55.1	331.2	0.68	15.52	5.00	1300

Table A4 R-curve tests results of 9Cr-1Mo-V-Nb

試験温度：RT (20℃)

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼, (SR)

試験片 No	厚さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材料- A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SW-2	20.0	15.0	50.8	31.00	2.207	142.8	1033.0	1.49	25.42	4.06	3795
SW-3	20.0	15.0	50.8	28.34	2.235	206.0	1173.0	4.56	28.87	5.98	3163
SW-6	20.0	15.0	50.8	32.38	2.193	22.4	177.3	0.10	4.36	1.08	3138
SW-7	20.0	15.0	50.8	31.99	2.197	92.4	710.5	0.72	17.49	3.07	3588
SW-8	20.0	15.0	50.8	31.25	2.205	167.3	1181.0	2.28	29.07	5.03	3315
SW-50	20.0	15.0	50.8	31.26	2.204	73.5	442.2	0.46	10.88	2.53	3650
SW-51	20.0	15.0	50.8	30.57	2.212	94.3	550.1	0.73	13.54	2.95	3950

試験温度：RT (20℃)

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼, (Aging)

試験片 No	厚さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材料- A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SWA-2	20.0	15.0	50.8	31.65	2.200	56.5	429.7	0.97	10.54	2.02	3615
SWA-3	20.0	15.0	50.8	31.23	2.205	132.9	965.1	1.81	23.68	4.03	3603
SWA-6	20.0	15.0	50.8	30.77	2.210	27.1	204.8	0.51	5.02	1.08	3783
SWA-7	20.0	15.0	50.8	31.49	2.202	95.6	710.3	0.93	17.42	3.07	3650
SWA-9	20.0	15.0	50.8	30.45	2.213	179.6	1150.0	3.23	28.21	5.05	4225
SWA-21	20.0	15.0	50.8	31.68	2.200	75.9	561.6	0.55	13.78	2.51	3733
SWA-22	20.0	15.0	50.8	32.21	2.194	112.8	799.7	1.41	19.62	3.46	3763

試験温度：400℃

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼，(SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工種 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>r.s.</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SW-12	20.0	15.0	50.8	30.94	2.208	52.2	384.0	0.52	11.46	2.09	3138
SW-13	20.0	15.0	50.8	31.59	2.201	97.0	699.1	2.35	20.86	4.04	2813
SW-16	20.0	15.0	50.8	30.57	2.212	22.7	167.1	0.10	4.99	1.08	3160
SW-17	20.0	15.0	50.8	30.98	2.207	78.7	575.5	1.40	17.17	3.05	3100
SW-18	20.0	15.0	50.8	31.39	2.203	120.0	823.0	3.48	24.56	5.02	2950

試験温度：500℃

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼，(SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工種 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>r.s.</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SW-22	20.0	15.0	50.8	31.33	2.204	39.1	293.8	0.10	9.75	2.03	2388
SW-23	20.0	15.0	50.8	31.04	2.207	89.2	667.5	1.12	22.15	4.03	2600
SW-24	20.0	15.0	50.8	31.59	2.201	120.2	872.8	2.24	28.96	5.98	2325
SW-26	20.0	15.0	50.8	31.14	2.206	16.4	122.6	0.05	4.07	1.05	2405
SW-27	20.0	15.0	50.8	31.25	2.205	64.3	485.5	0.37	16.11	3.04	2538
SW-28	20.0	15.0	50.8	31.69	2.200	96.4	736.1	1.26	24.42	4.99	2275
SW-29	20.0	15.0	50.8	31.75	2.199	142.7	1017.0	2.92	33.74	6.98	2525
SW-55	20.0	15.0	50.8	30.96	2.208	101.7	603.3	1.54	20.02	4.95	2350

試験温度：550℃

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼，(SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工種 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>r.s.</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SW-35	20.0	15.0	50.8	30.99	2.207	122.5	728.1	2.12	26.87	7.90	1950
SW-37	20.0	15.0	50.8	31.68	2.200	46.6	285.7	0.35	10.54	2.93	1838
SW-38	20.0	15.0	50.8	31.06	2.207	85.8	511.2	1.12	18.86	4.90	1988
SW-39	20.0	15.0	50.8	31.49	2.202	111.5	678.0	1.65	25.02	6.90	1863

試験温度：RT 550℃

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼, (Aging)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	エネルギー A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>TS</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SWA-14	20.0	15.0	50.8	30.76	2.210	32.2	236.0	0.10	9.03	2.03	2008
SWA-15	20.0	15.0	50.8	30.83	2.209	68.6	403.9	0.74	2.62	3.95	2013
SWA-16	20.0	15.0	50.8	32.83	2.188	100.9	730.6	1.79	27.94	5.96	1975
SWA-17	20.0	15.0	50.8	34.04	2.175	136.3	951.7	2.87	36.39	7.94	2113
SWA-18	20.0	15.0	50.8	30.92	2.208	13.5	79.8	0.03	3.05	1.00	1950
SWA-19	20.0	15.0	50.8	31.16	2.206	54.7	405.0	0.35	15.49	3.03	2125
SWA-20	20.0	15.0	50.8	31.57	2.201	88.5	634.7	1.02	24.27	5.01	2038

試験温度：600℃

材料：9Cr-1Mo-V-Nb鋼, (SR)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	エネルギー A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>TS</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SW-44	20.0	15.0	50.8	31.05	2.207	9.8	58.4	0.05	2.65	1.00	1425
SW-46	20.0	15.0	50.8	31.11	2.206	21.7	168.6	0.12	7.60	2.00	1403
SW-47	20.0	15.0	50.8	31.28	2.204	2.0	15.2	0.23	0.70	0.38	1015
SW-48	20.0	15.0	50.8	31.57	2.201	50.1	350.8	0.58	15.90	3.98	1455

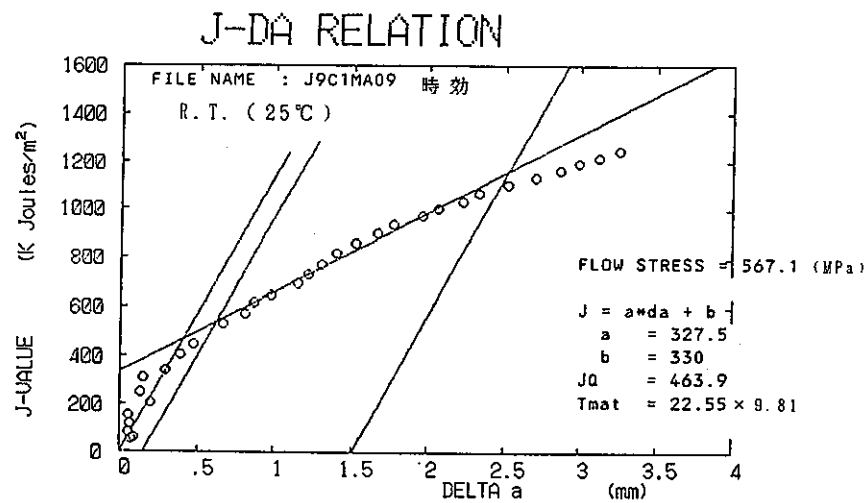
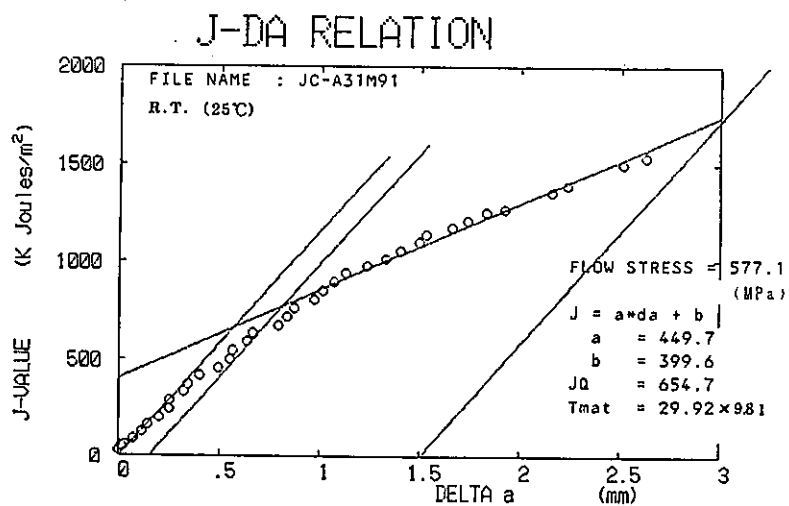
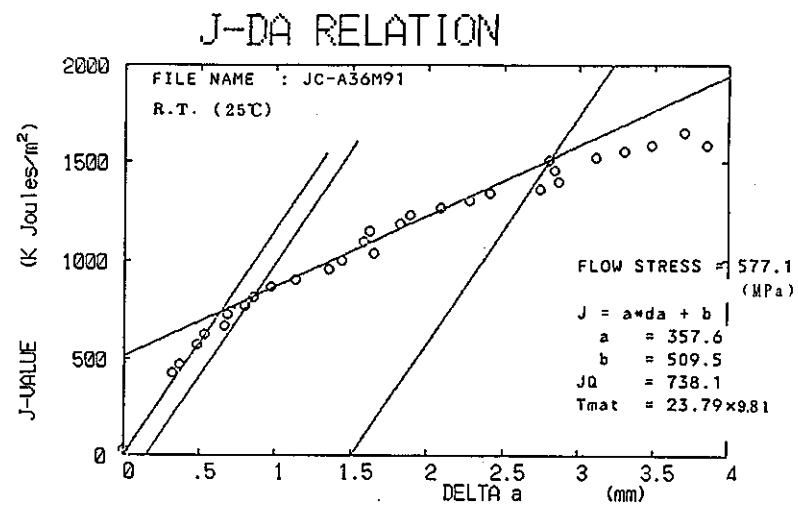
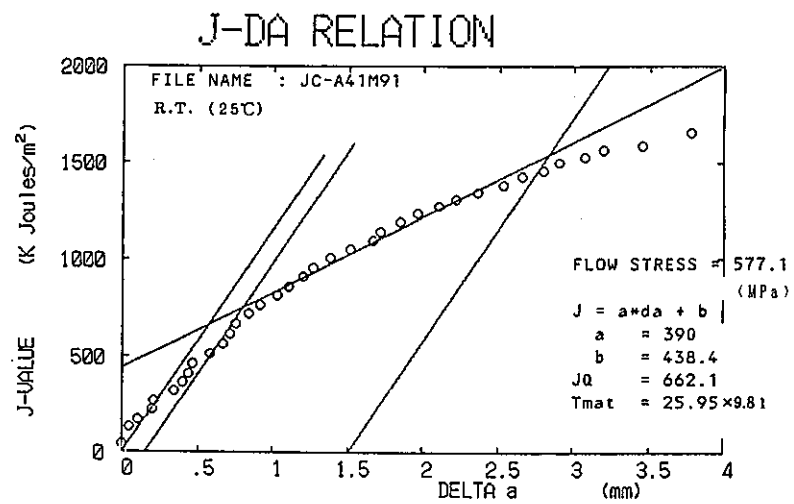
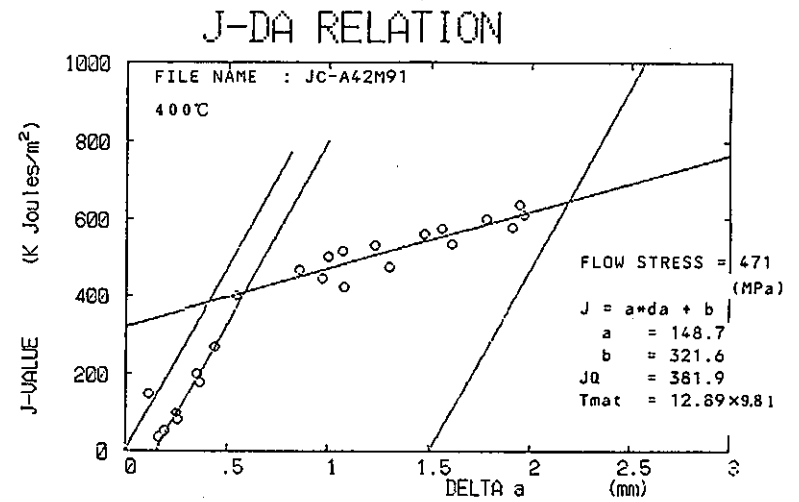
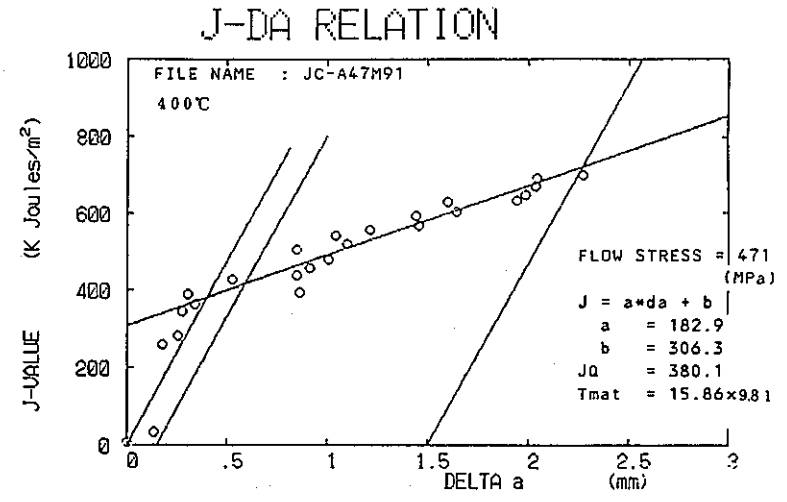
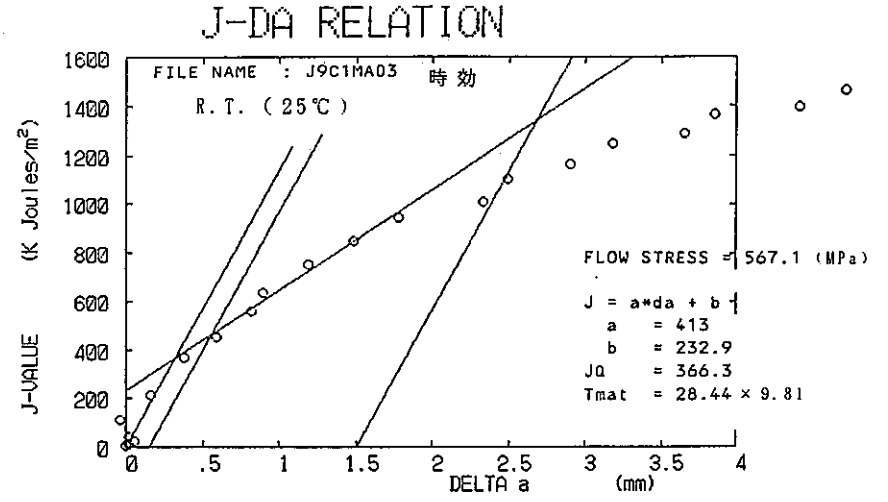
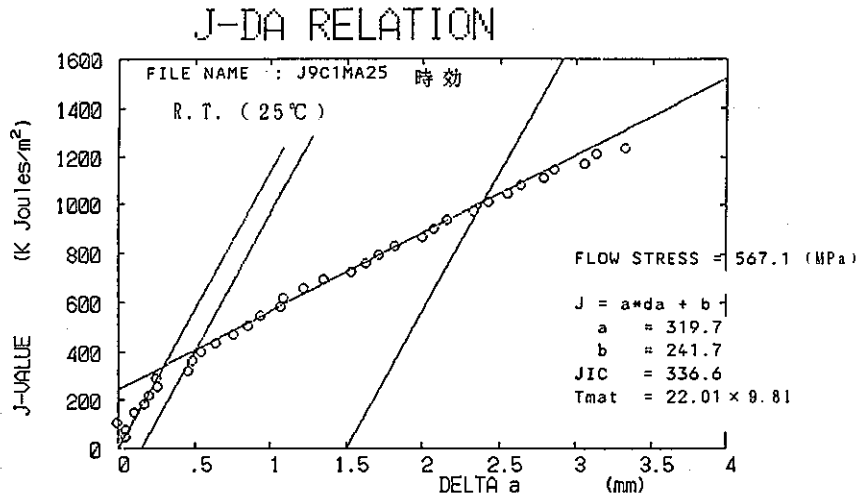
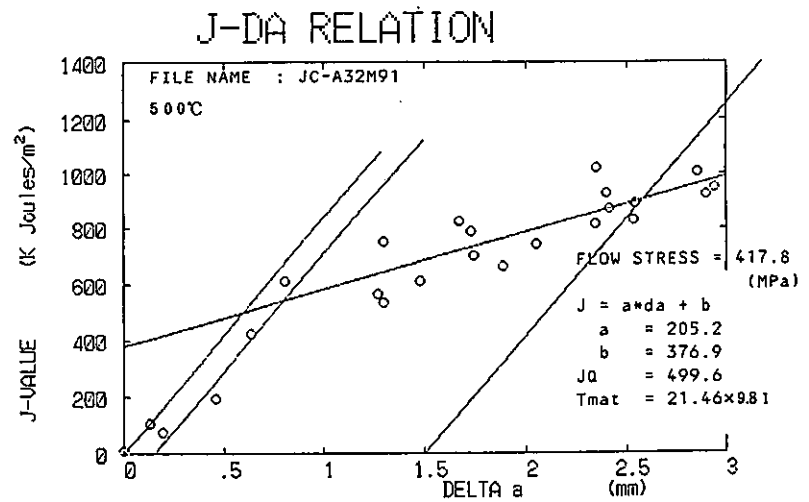
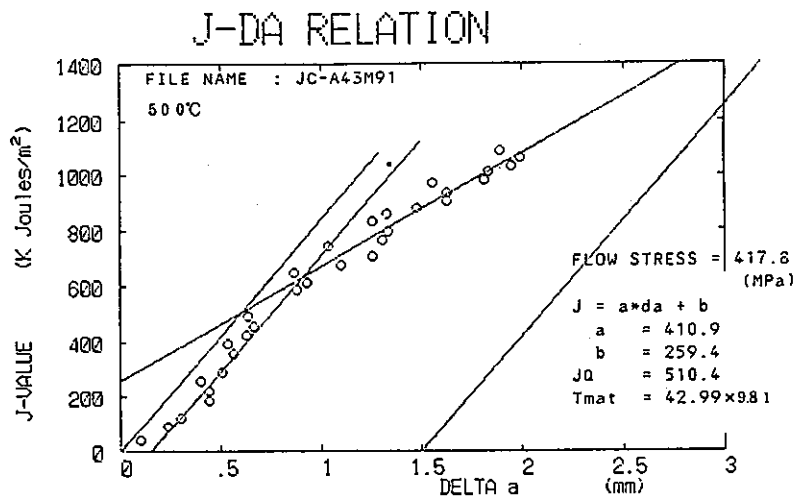
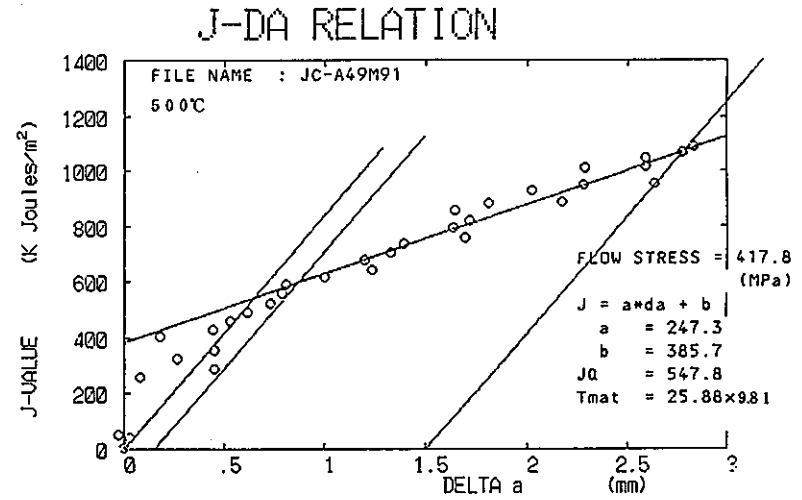
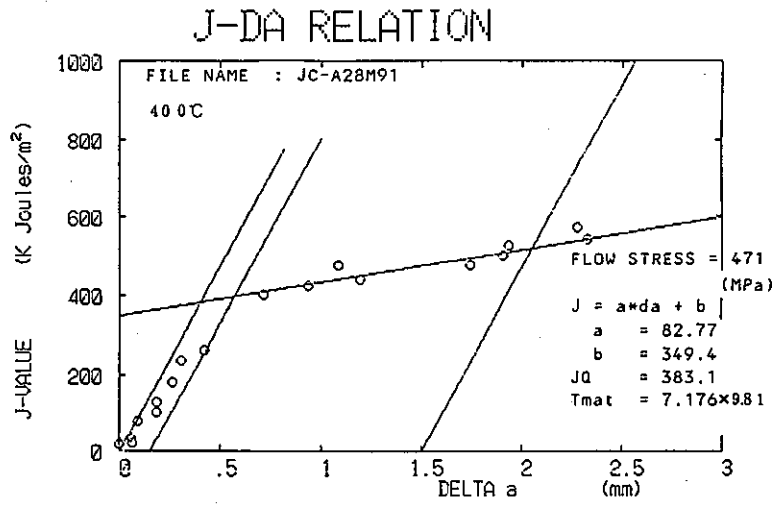
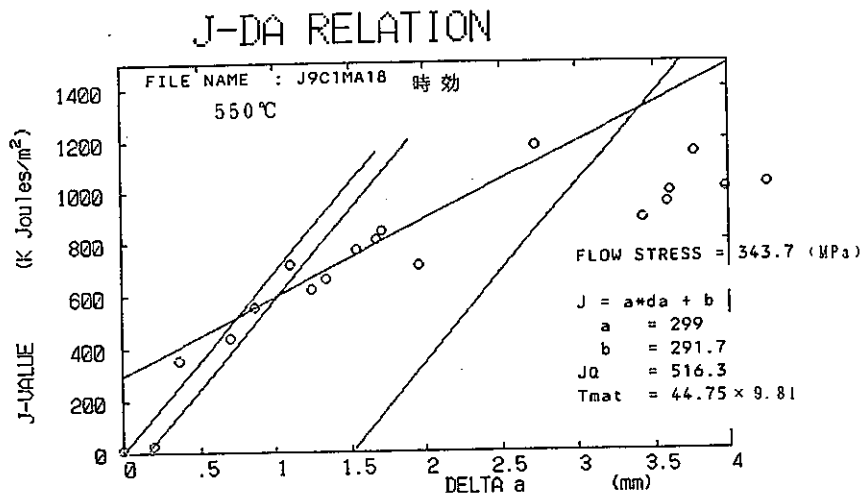
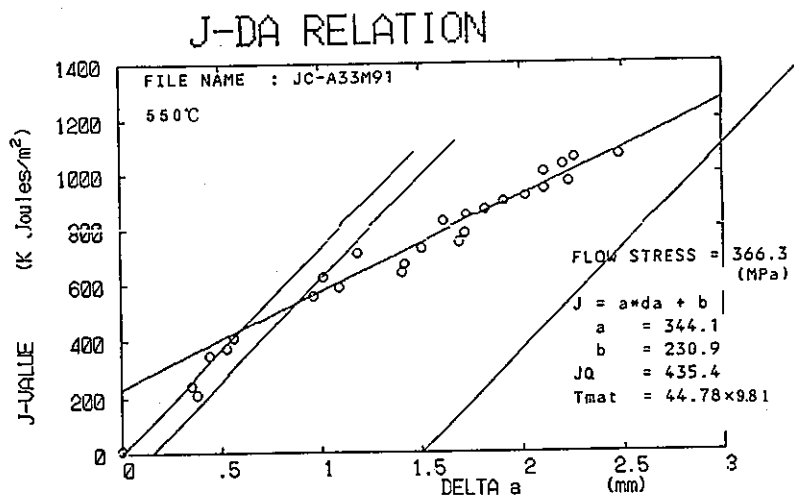
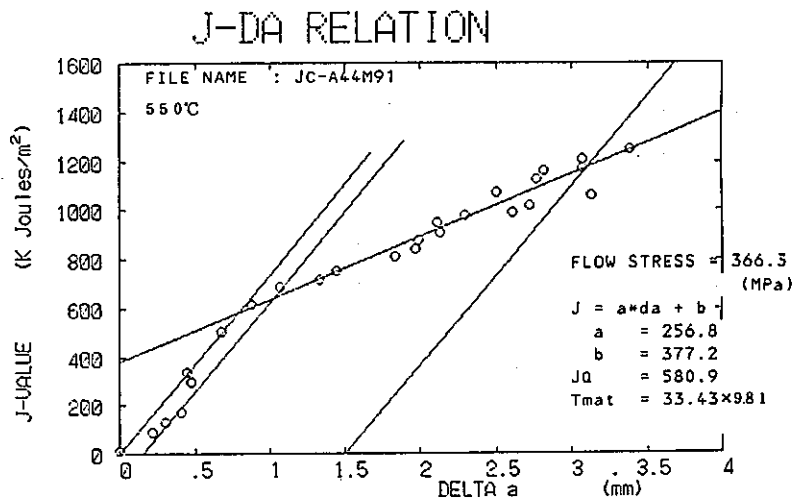
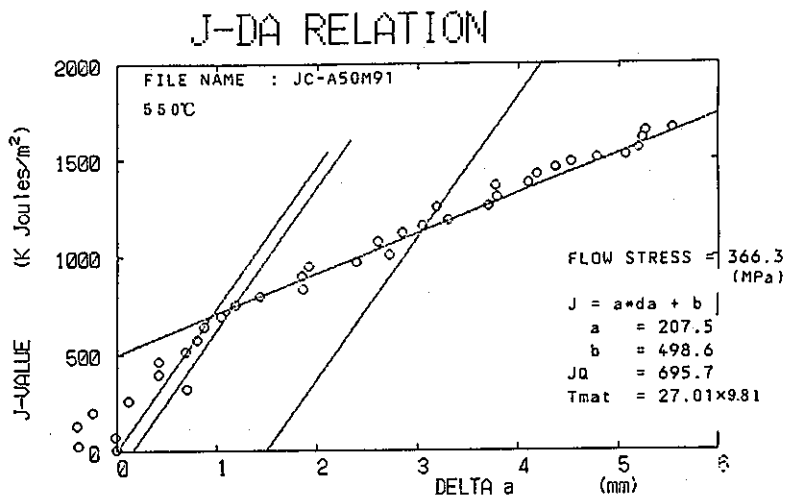


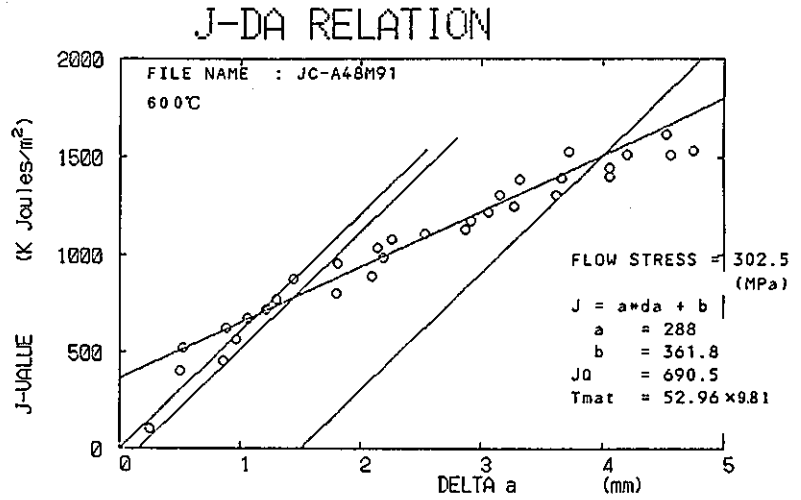
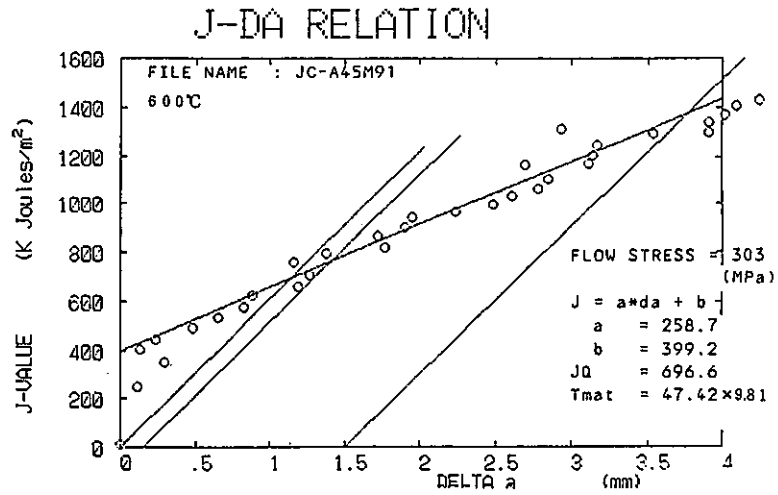
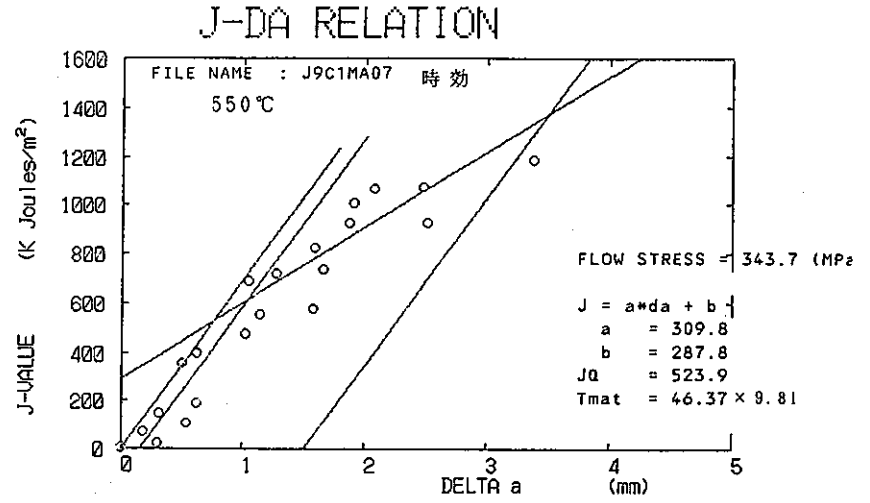
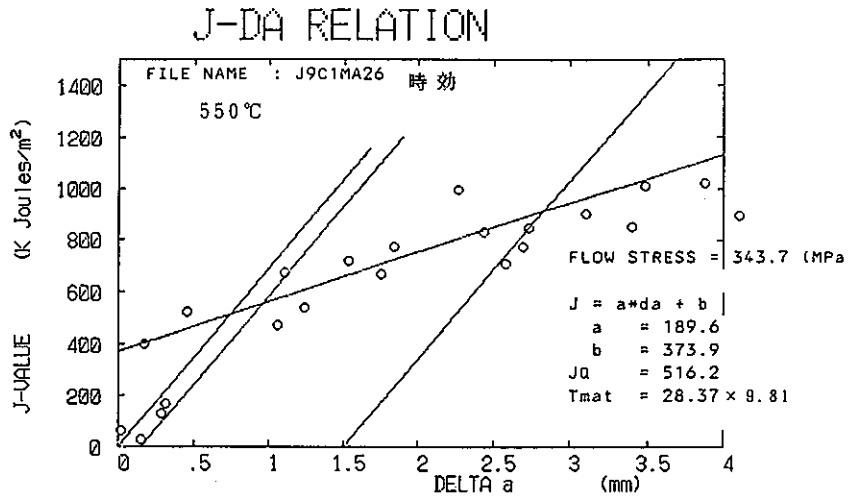
Fig.A1 Unloading compliance tests results of Mod. 9Cr-1Mo (S) steel

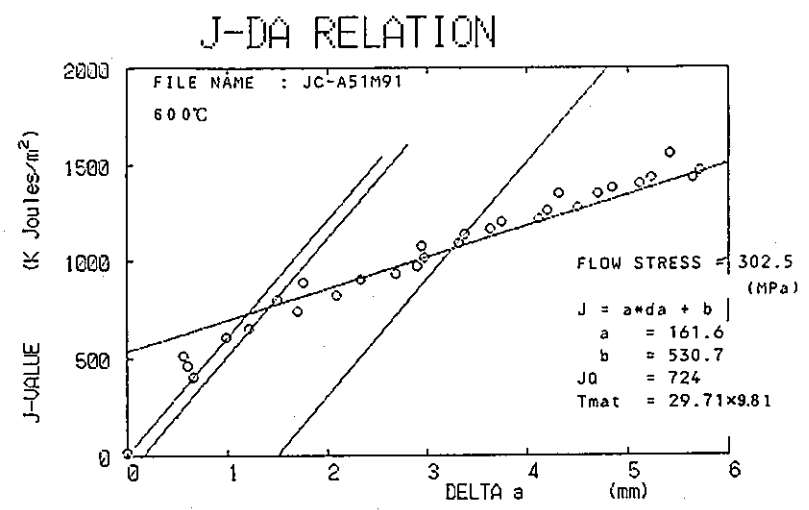












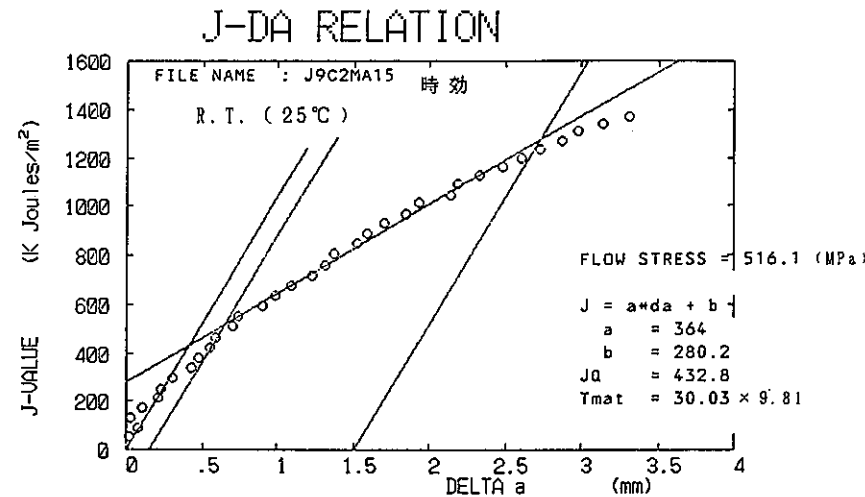
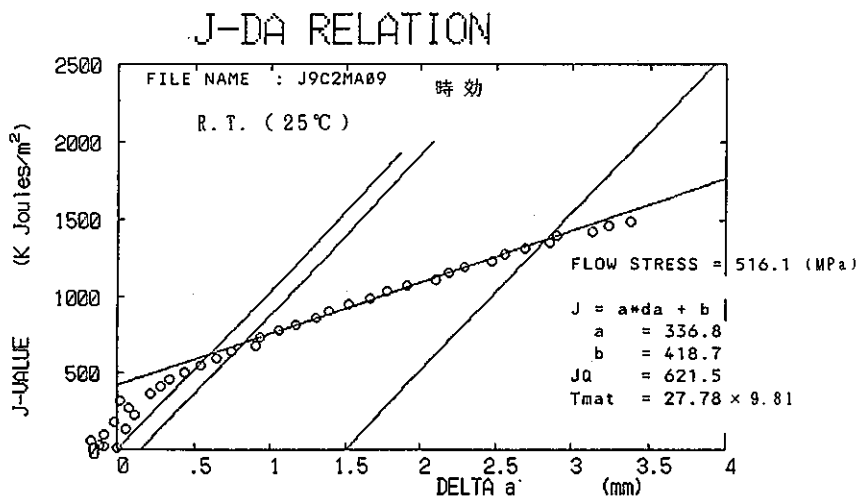
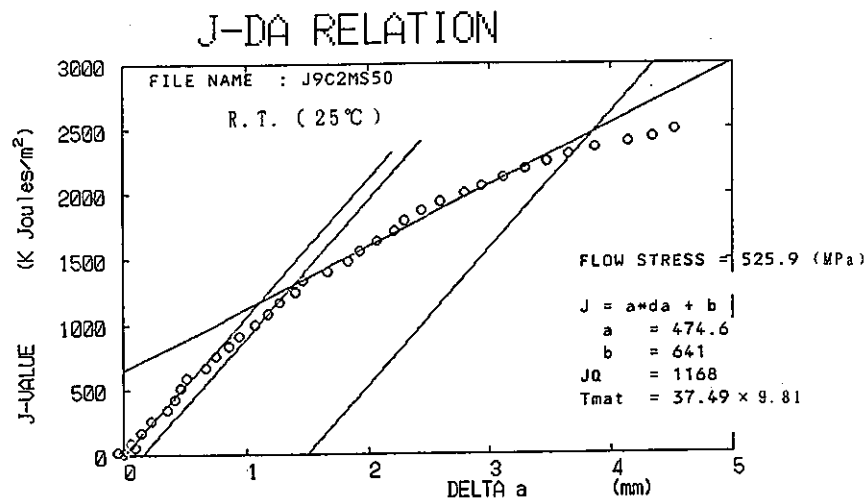
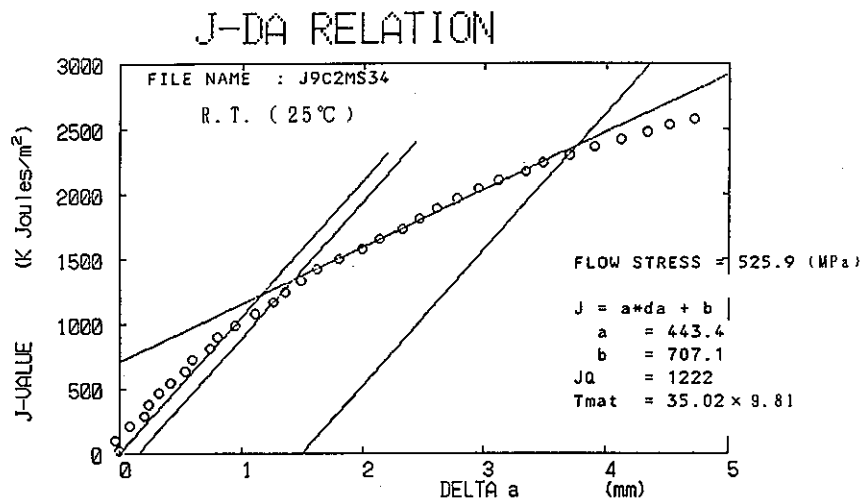
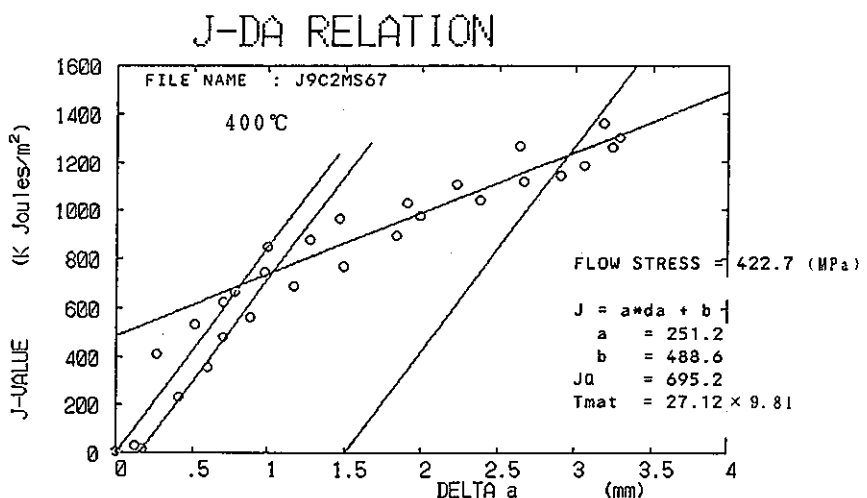
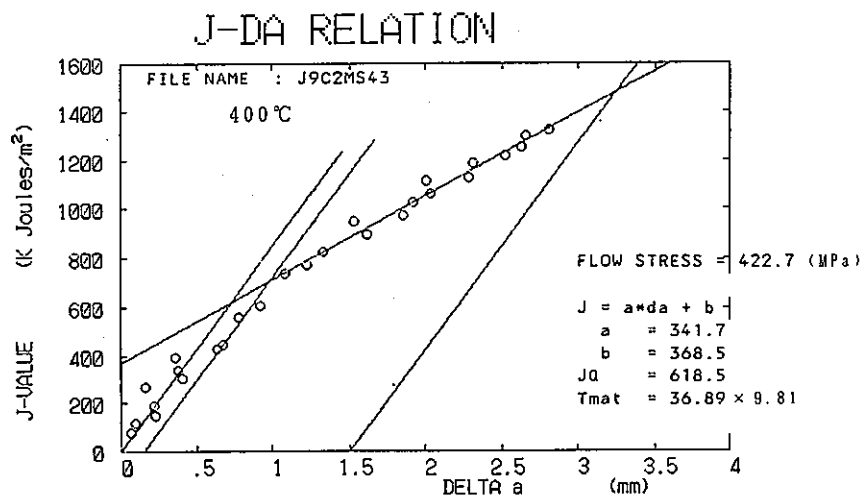
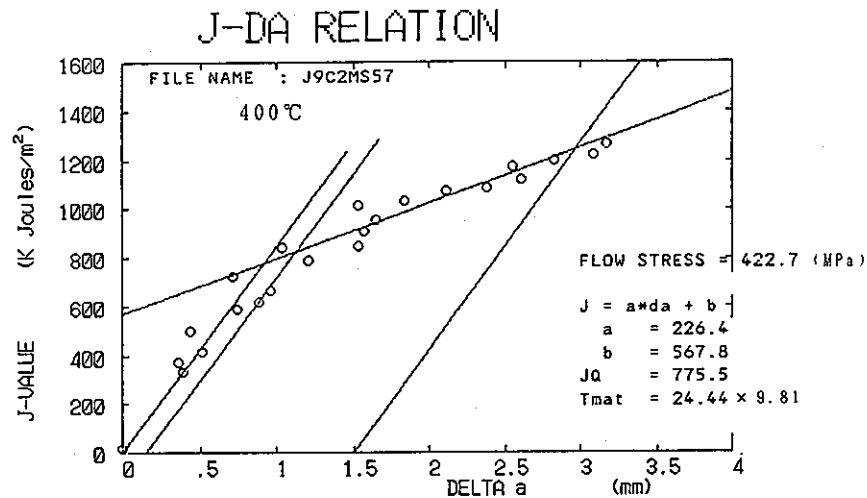
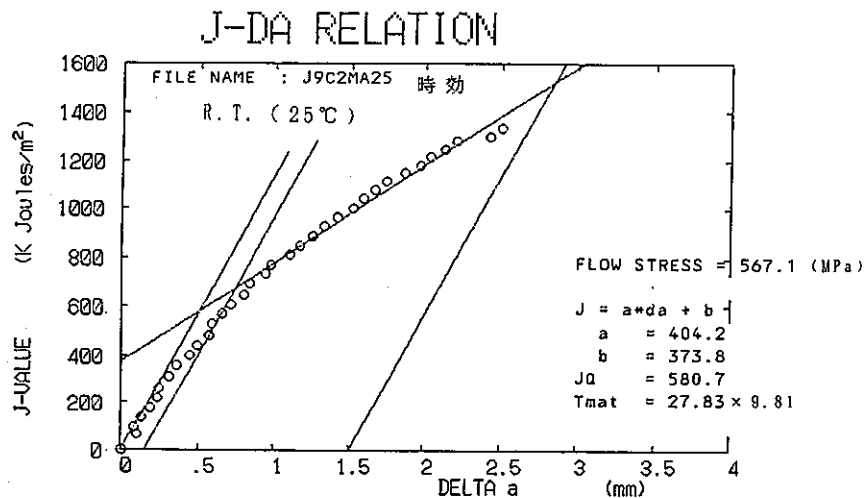
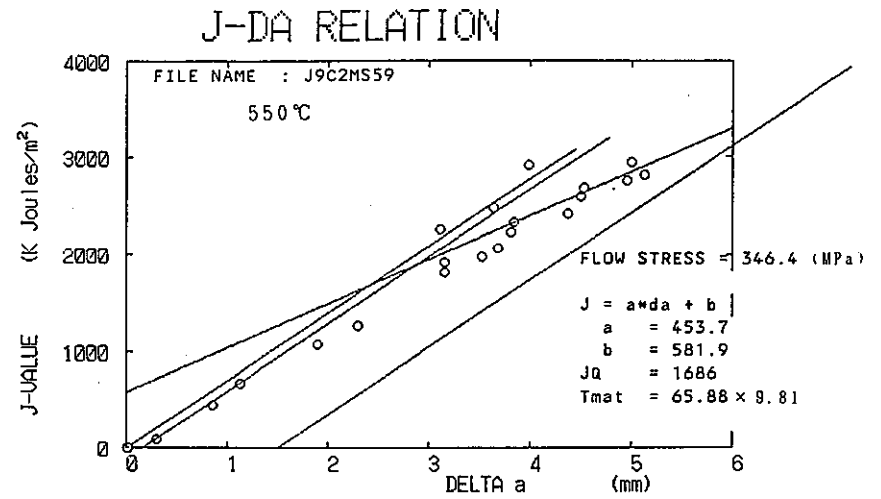
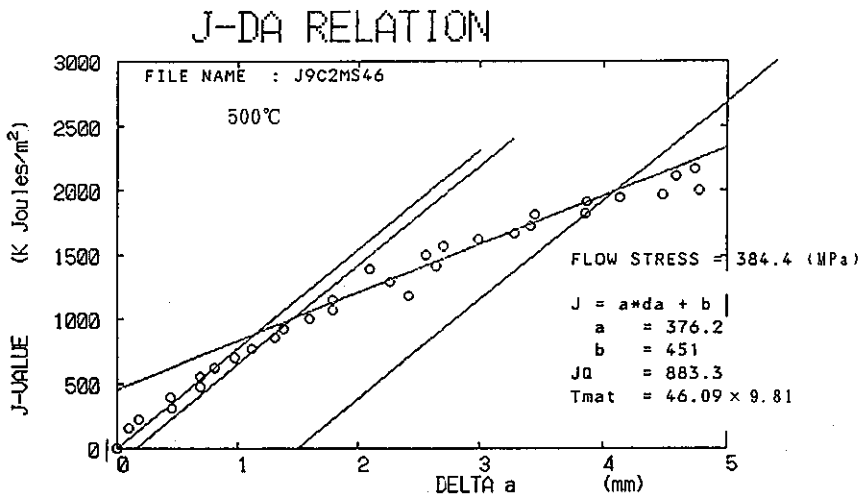
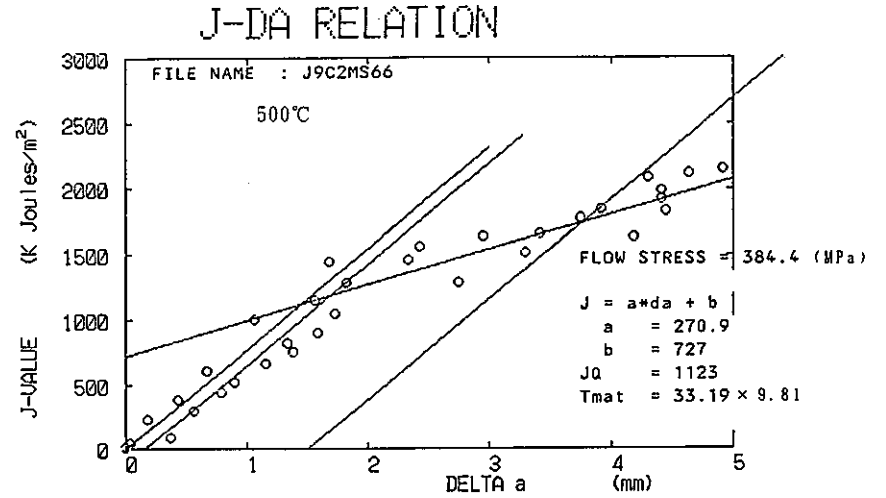
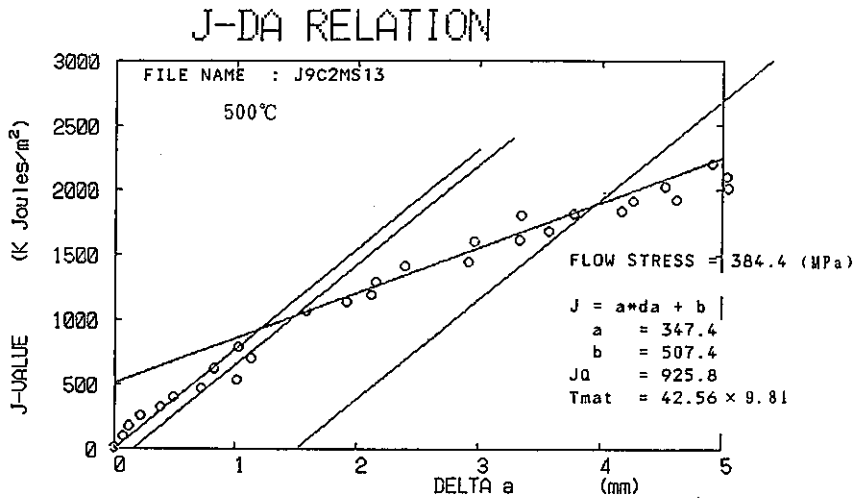
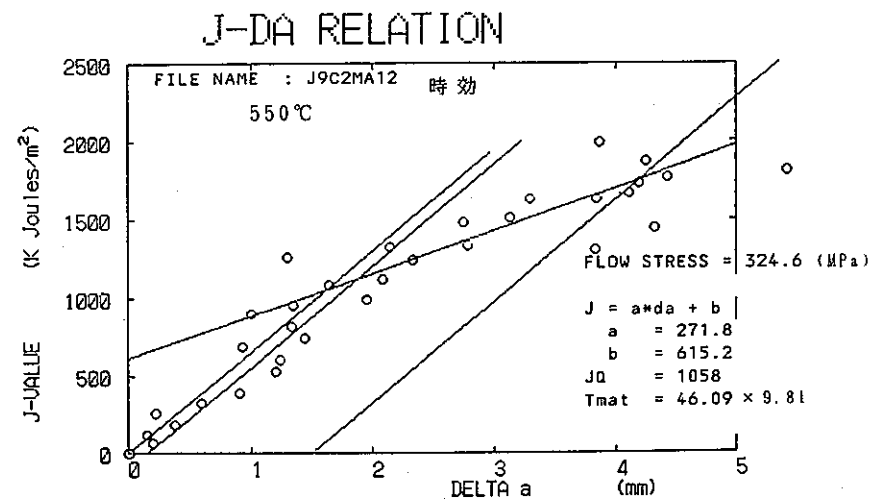
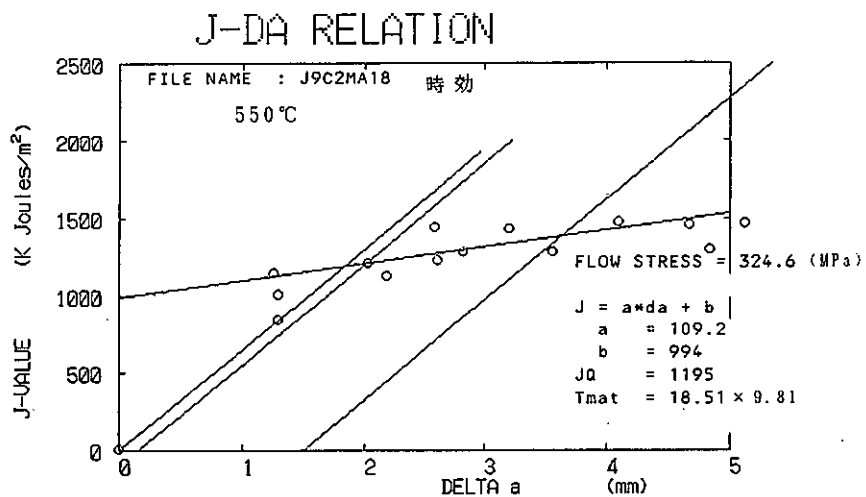
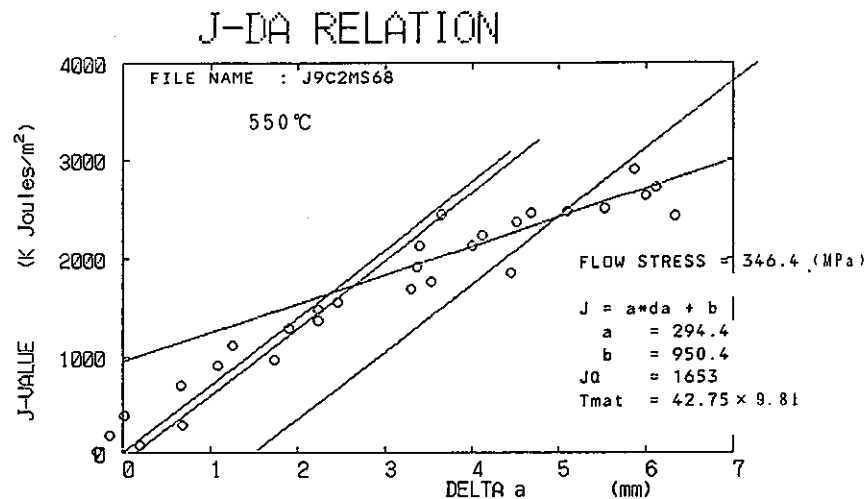
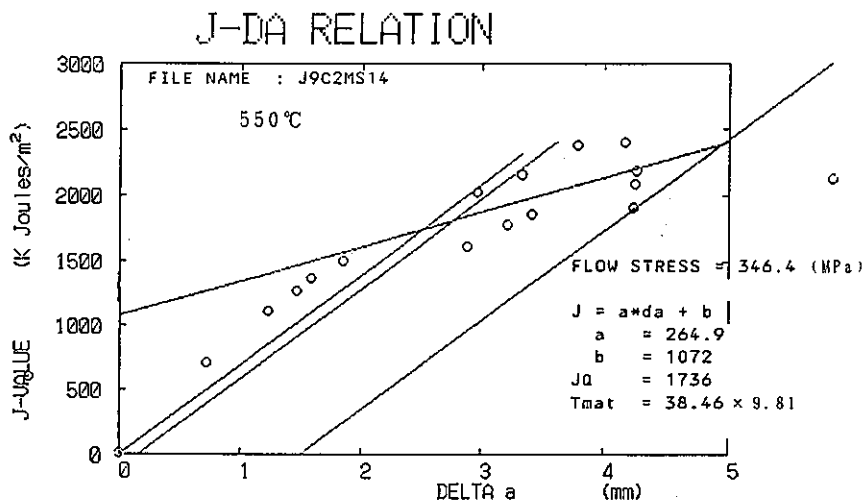
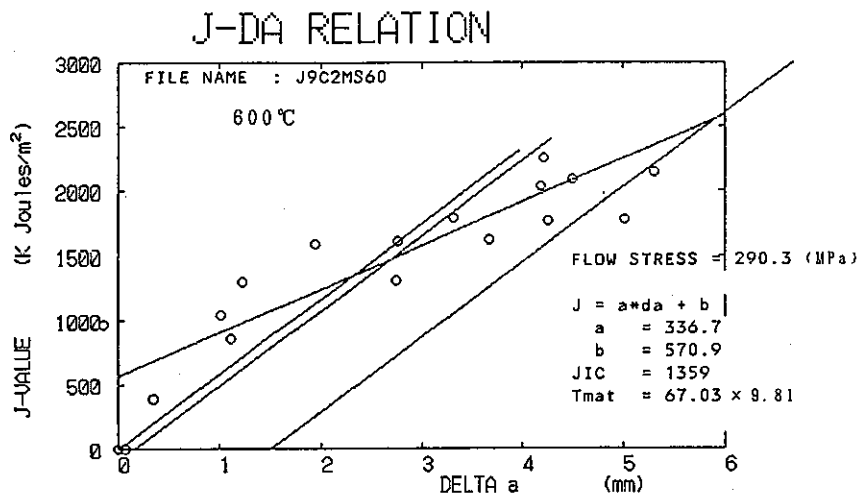
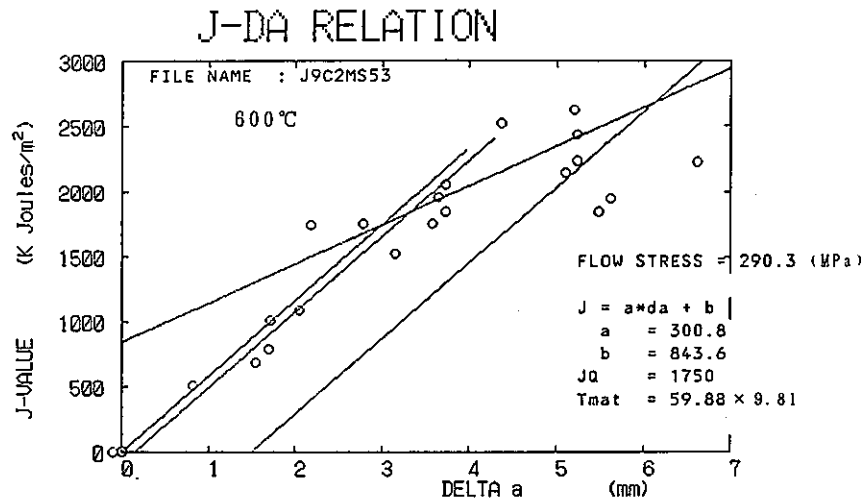
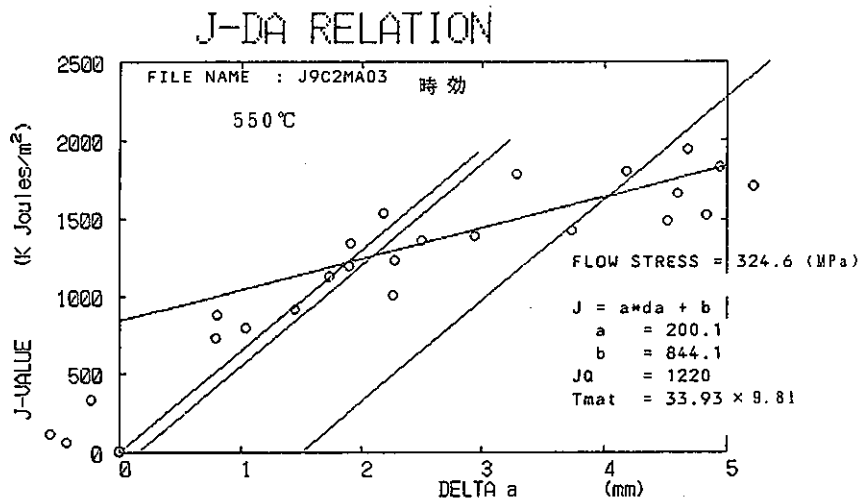


Fig. A2 Unloading compliance tests results of 9Cr-2Mo steel









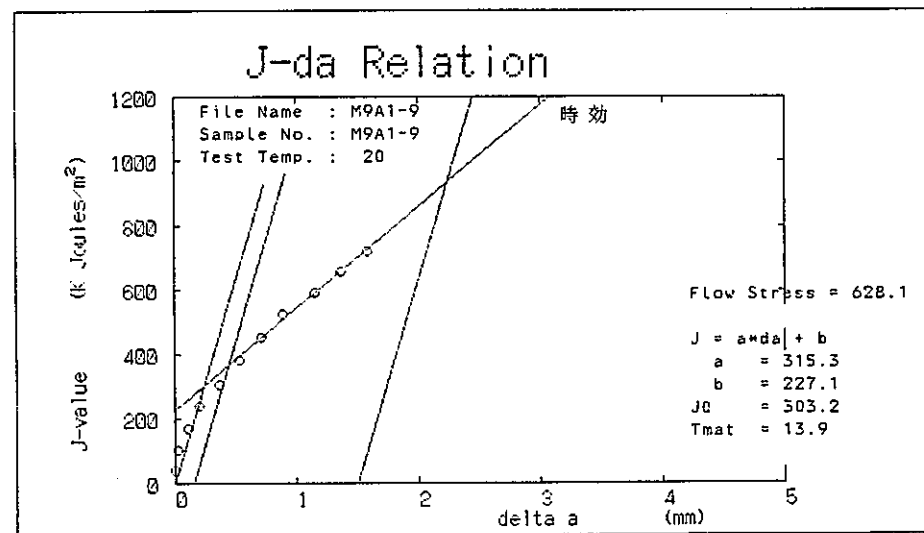
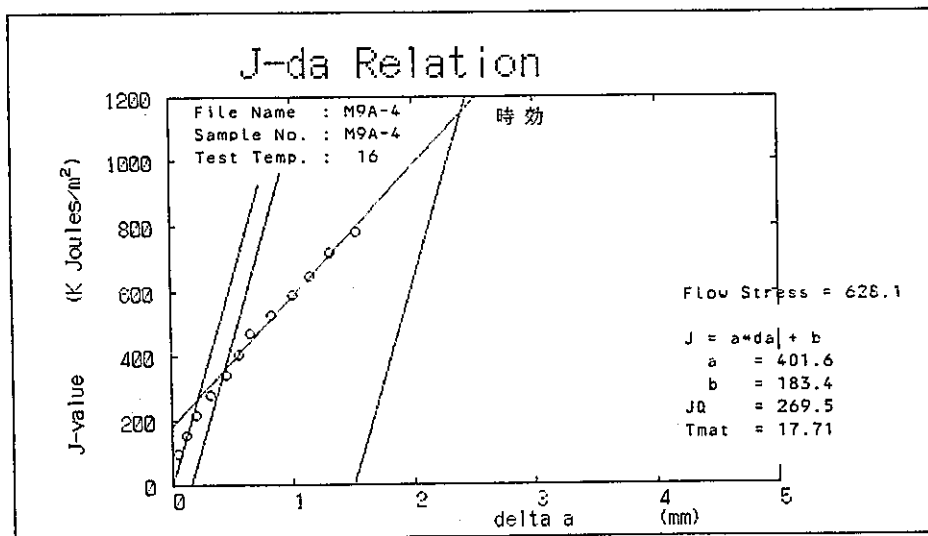
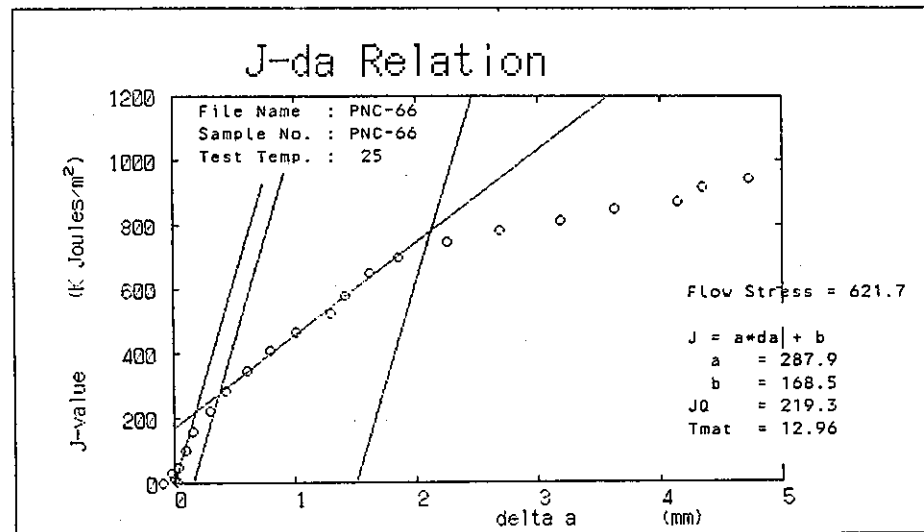
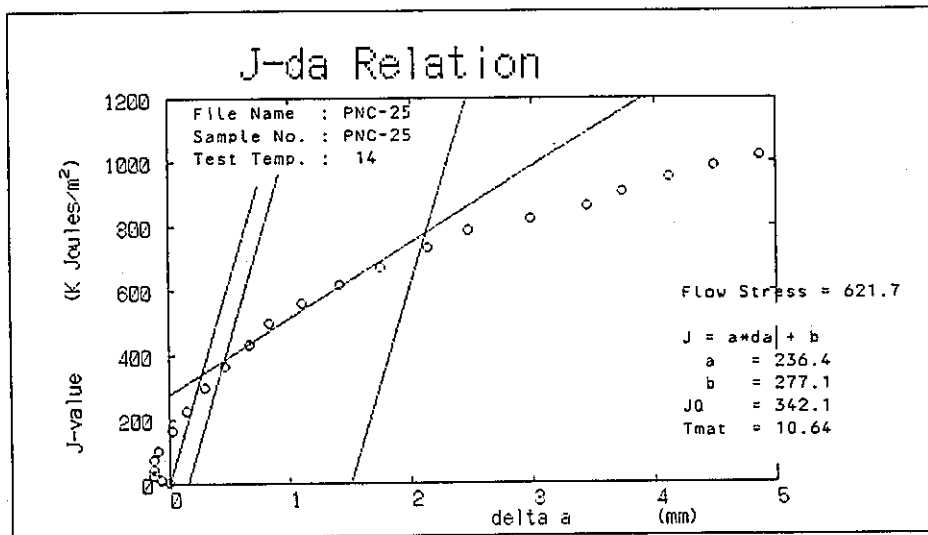
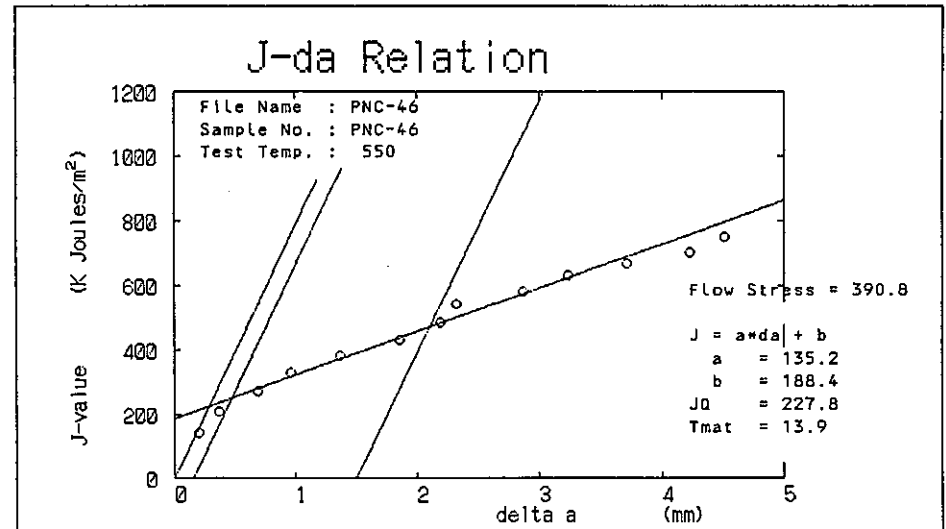
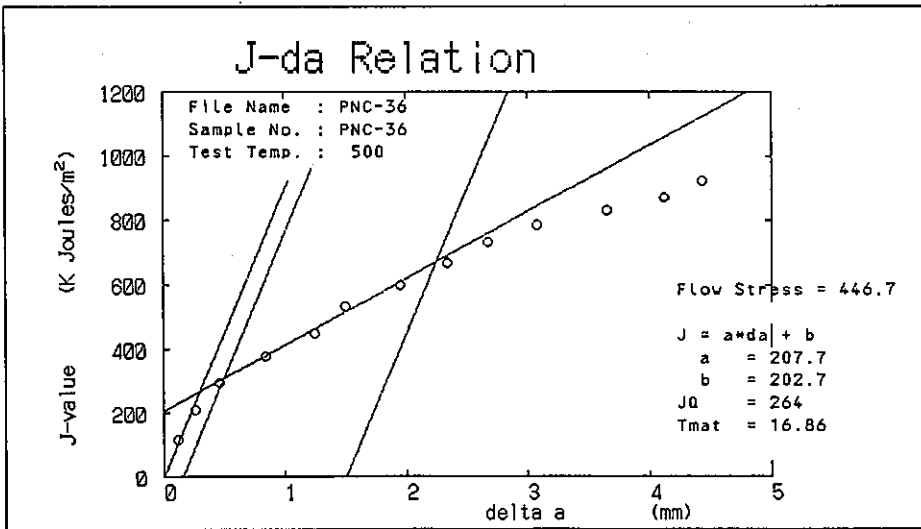
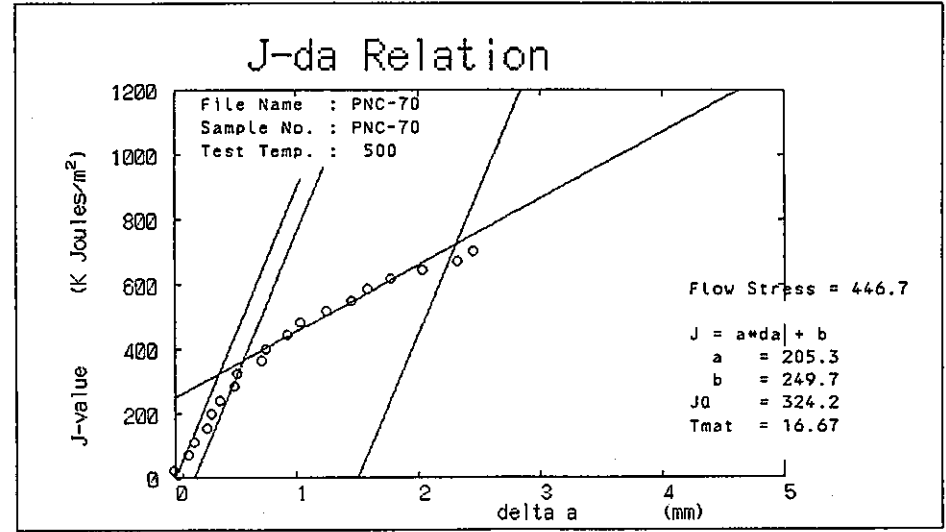
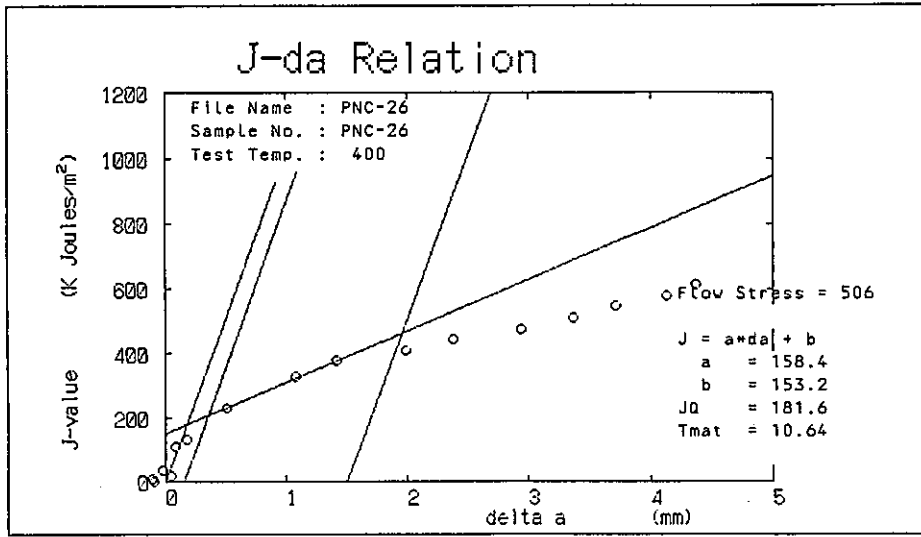
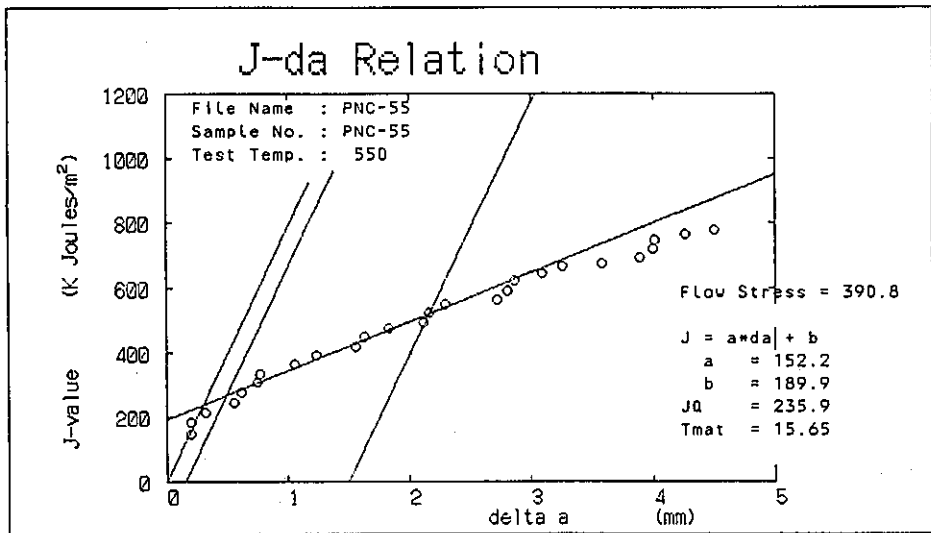


Fig. A3 Unloading compliance tests results of Mod. 9Cr-1Mo (N) steel







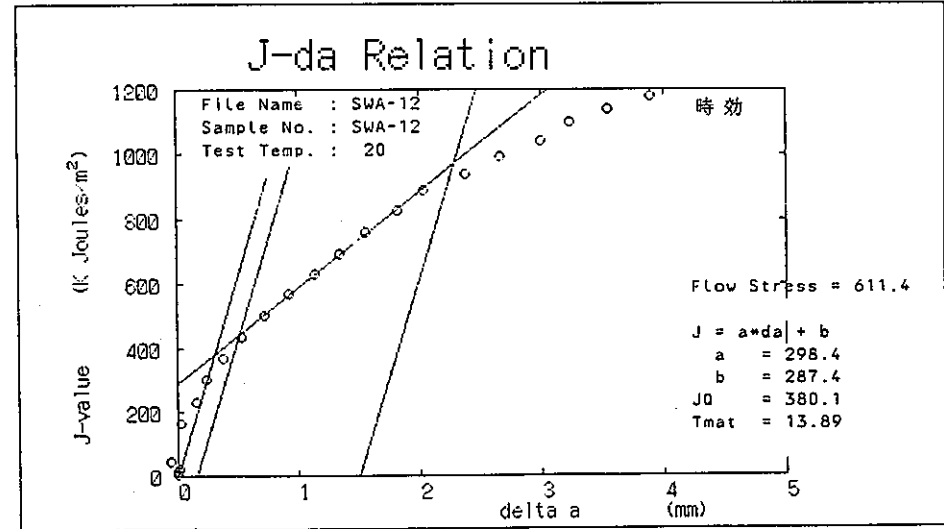
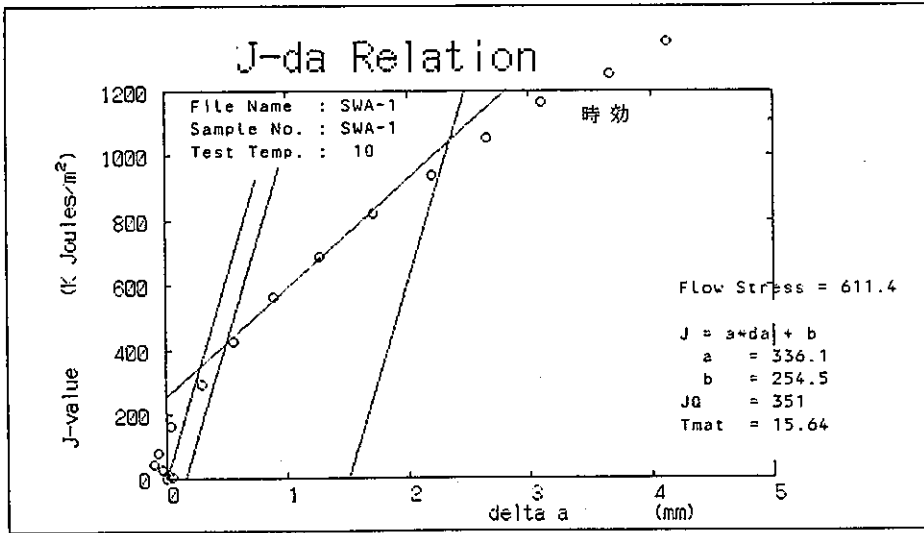
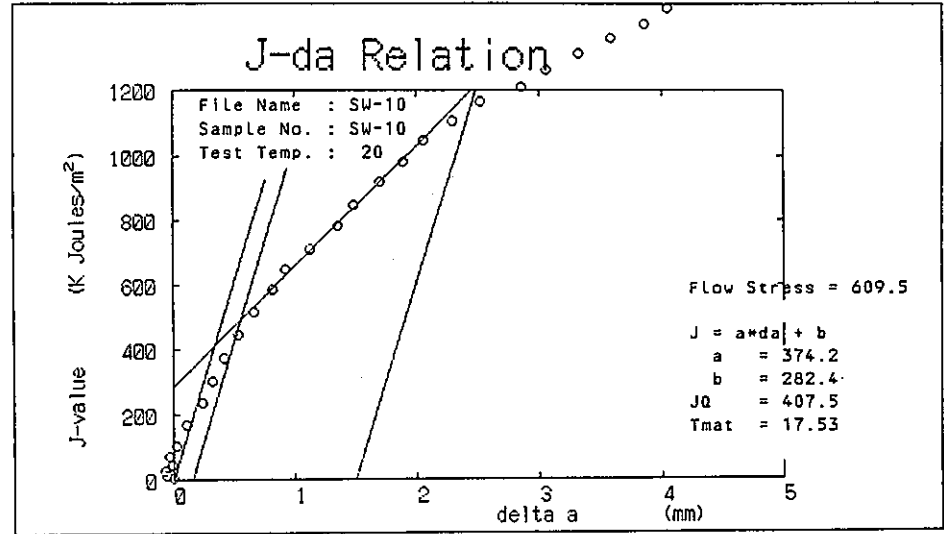
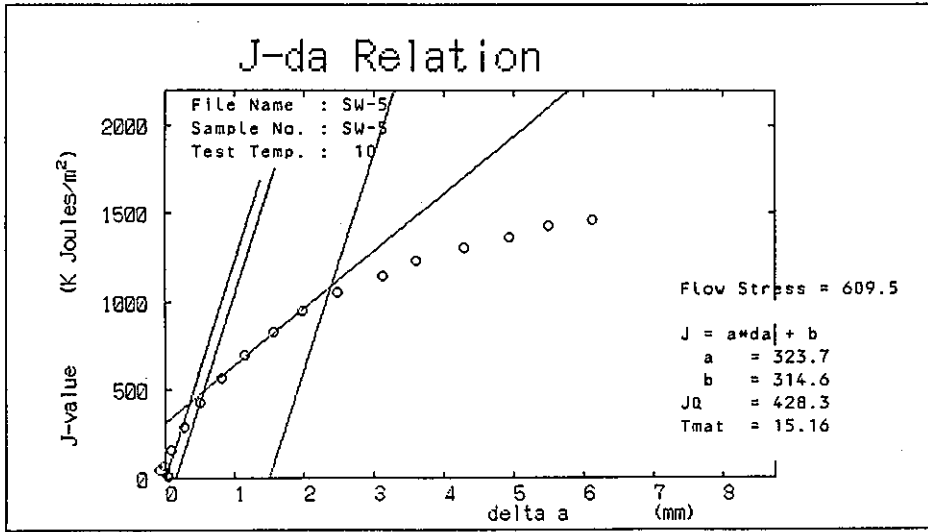
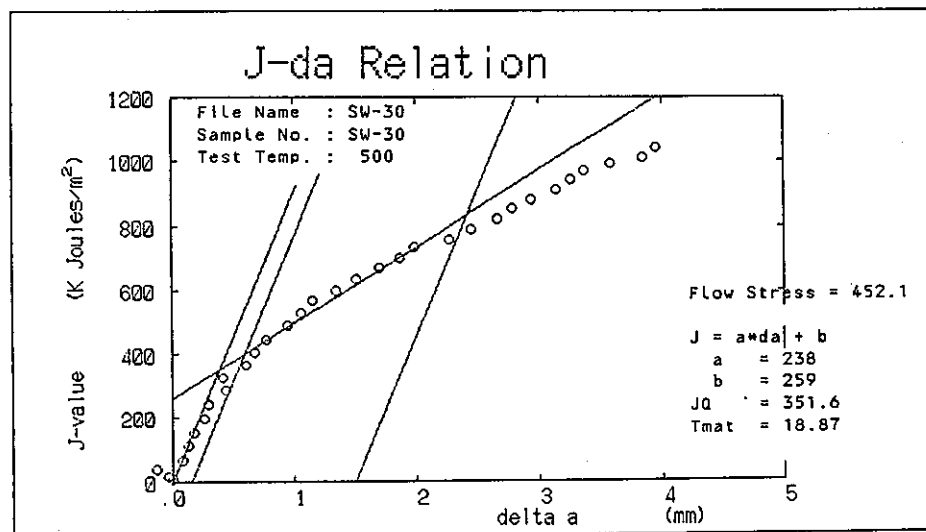
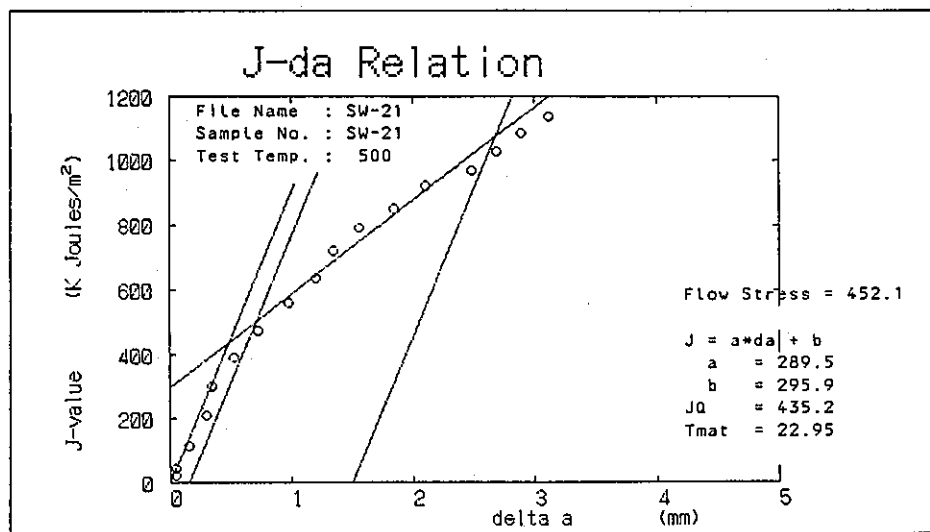
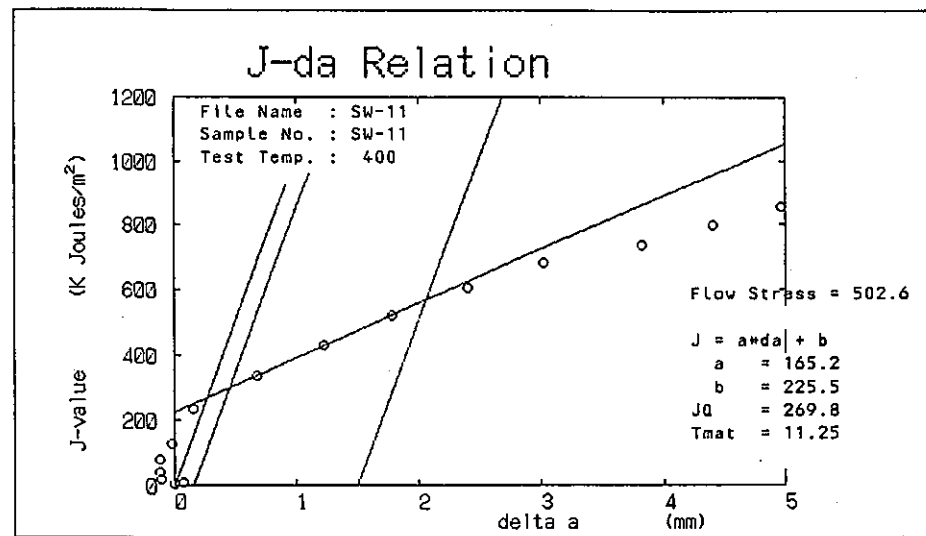
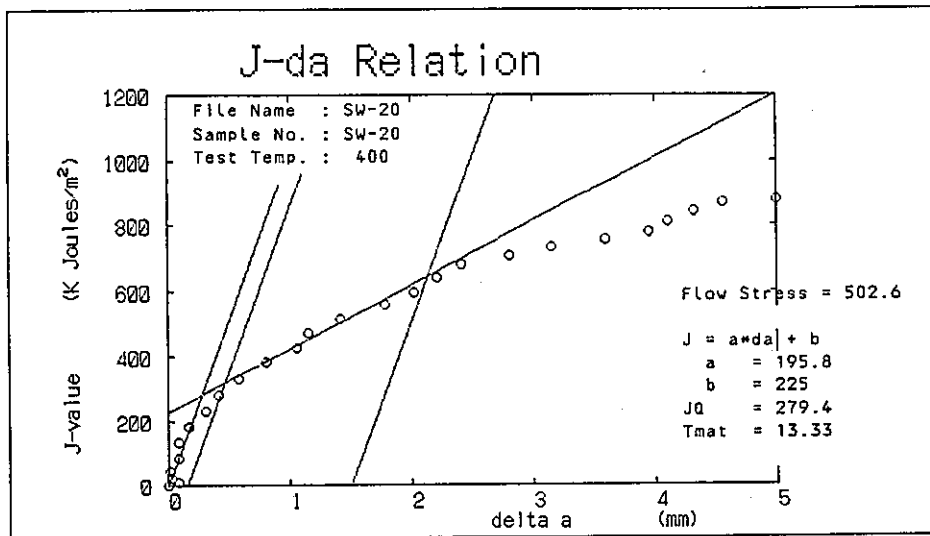
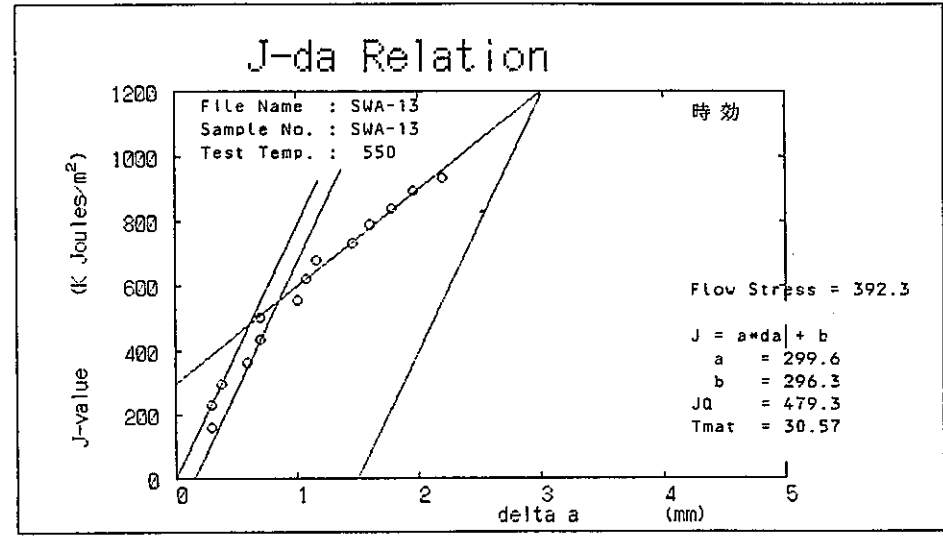
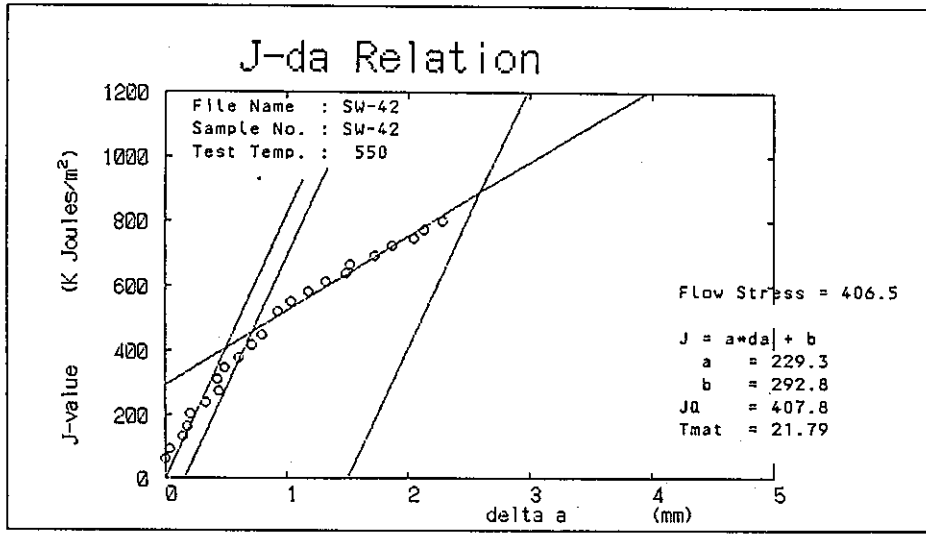


Fig.A4 Unloading compliance tests results of 9Cr-1Mo-V-Nb steel





## 付録2. SUS304と2.25Cr-1Mo鋼の破壊靱性値

SUS304 (A7) を供試材として室温および550℃で、また2.25Cr-1Mo鋼 (D7) を供試材として室温および500℃で、それぞれ破壊靱性試験を実施した。Table A5に、供試材の化学成分を示す。試験片は9Cr系鋼の場合と同一形状で、き裂方向が圧延方法と一致するよう (L-Tタイプ) 採取した。Table A6に、 $J_a$ と $T_{max}$ の一覧を示す。また、Table A7, A8にRカーブ法による結果の詳細を、Fig. A5, A6に除荷コンプライアンス法によるJ-き裂成長量関係を、それぞれ示す。

Table A5 Chemical compositions of tested SUS304 and 2.25Cr-1Mo steels

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS304 (A7)	0.050	0.060	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	0.11
2¼ Cr-1Mo (D7)	0.15	0.28	0.55	0.010	0.006	0.14	2.38	0.98

Table A6 Measured  $J_e$  and  $T_{nat}$  values of SUS304 and 2.25Cr-1Mo steels

温度 (°C)	$J_e$ (kgf/mm <sup>2</sup> )						$T_{nat}$			
	SUS304		2¼ Cr-1Mo		SUS304		2¼ Cr-1Mo			
	R *	UC **	R	UC	R	UC	R	UC	R	UC
RT	16	17	26	26	252	361	237	170		
		16		27		356		175		
500	-	-	27	26	-	-	150	199		
550	17	20	-	-	646	514	-	-		
		22				517				

R : R カーブ法

UC : 除荷コンプライアンス法

Table A7 R-curve tests results of SUS304 stainless steel

試験温度：RT (≒20℃)

材料：SUS304鋼 (受け入れまま)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材料- A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SUS-3	20.0	15.0	50.8	29.26	2.225	14.0	97.2	0.17	3.23	0.98	1868
SUS-4	20.0	15.0	50.8	29.43	2.223	32.7	240.1	0.38	7.97	1.98	2020
SUS-5	20.0	15.0	50.8	29.59	2.222	42.5	248.3	0.62	8.25	2.46	2110
SUS-6	20.0	15.0	50.8	29.64	2.221	54.8	300.2	0.99	9.97	3.00	2200
SUS-7	20.0	15.0	50.8	29.64	2.221	61.3	411.3	0.77	13.66	3.44	2135
SUS-8	20.0	15.0	50.8	29.67	2.221	69.6	390.2	1.14	12.96	3.95	2125
SUS-9	20.0	15.0	50.8	29.04	2.228	87.1	566.5	1.64	18.82	4.45	2350

試験温度：550℃

材料：SUS304鋼 (受け入れまま)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工材料- A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>rs</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷 重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
SUS-13	20.0	15.0	50.8	28.96	2.228	62.4	418.4	1.30	25.05	4.98	2600
SUS-15	20.0	15.0	50.8	29.50	2.222	8.6	59.9	0.97	3.58	0.97	1180
SUS-17	20.0	15.0	50.8	29.68	2.221	19.7	138.9	0.11	8.32	1.99	1225
SUS-18	20.0	15.0	50.8	29.62	2.222	27.6	192.4	0.11	11.52	2.51	1363
SUS-19	20.0	15.0	50.8	29.09	2.227	36.4	247.8	0.29	14.84	2.94	1563
SUS-20	20.0	15.0	50.8	29.18	2.226	40.9	280.5	0.44	16.79	3.44	1450
SUS-21	20.0	15.0	50.8	29.30	2.225	48.2	328.0	0.58	19.64	3.99	1538
SUS-22	20.0	15.0	50.8	29.71	2.221	62.5	349.9	1.03	20.94	5.00	1550
SUS-23	20.0	15.0	50.8	28.82	2.230	63.6	422.0	1.28	25.26	4.95	1550



Table A8 R-curve tests results of 2.25Cr-1Mo steel

試験温度：RT (≒20℃)

材料：2.25Cr-1Mo鋼 (SR材)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工積分 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>TS</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
CM-3	20.0	15.0	50.8	28.62	2.232	26.3	176.7	0.06	4.94	1.01	3743
CM-4	20.0	15.0	50.8	28.98	2.228	62.7	419.9	0.62	11.73	2.01	3858
CM-5	20.0	15.0	50.8	28.65	2.232	82.8	541.1	1.16	15.12	2.50	3848
CM-6	20.0	15.0	50.8	29.03	2.228	100.3	625.5	3.06	17.47	2.99	3900
CM-7	20.0	15.0	50.8	28.68	2.232	116.0	689.4	3.40	19.26	3.49	3850
CM-8	20.0	15.0	50.8	28.86	2.230	138.2	834.9	3.68	23.33	4.00	3950
CM-10	20.0	15.0	50.8	28.84	2.230	160.5	810.5	5.82	22.64	5.01	3800

試験温度：500℃

材料：2.25Cr-1Mo鋼 (SR材)

試験片 No	厚 さ		幅 W (mm)	予亀裂長さ a <sub>0</sub> (mm)	f (a <sub>0</sub> /w)	工積分 A (J)	J 積分 J (KJ/m <sup>2</sup> )	亀裂成長量 Δa (mm)	15J/σ <sub>TS</sub> (mm)	荷重線変位 δ <sub>max</sub> (mm)	荷重 P <sub>max</sub> (kgf)
	B (mm)	B <sub>net</sub> (mm)									
CM-15	20.0	15.0	50.8	28.69	2.231	17.9	122.5	0.07	4.63	0.96	2690
CM-16	20.0	15.0	50.8	28.98	2.228	45.0	293.9	0.94	11.11	2.00	2723
CM-17	20.0	15.0	50.8	28.63	2.232	61.4	406.6	1.26	15.37	2.53	2825
CM-18	20.0	15.0	50.8	28.64	2.232	73.3	396.5	1.01	14.88	3.05	2800
CM-20	20.0	15.0	50.8	28.77	2.230	92.9	501.4	2.15	18.96	4.00	2675
CM-21	20.0	15.0	50.8	28.75	2.231	101.7	548.6	3.24	20.74	4.55	2675
CM-22	20.0	15.0	50.8	28.67	2.231	117.1	629.3	3.09	23.80	5.00	2775

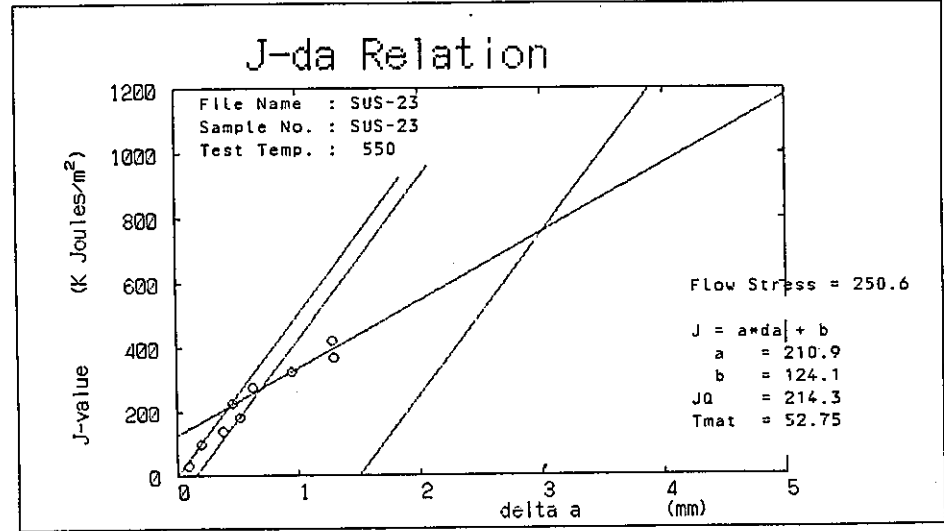
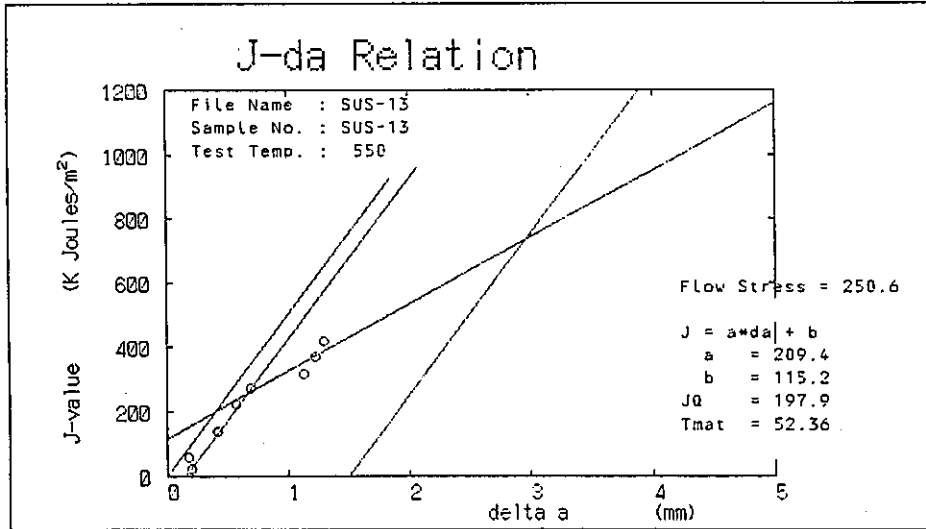
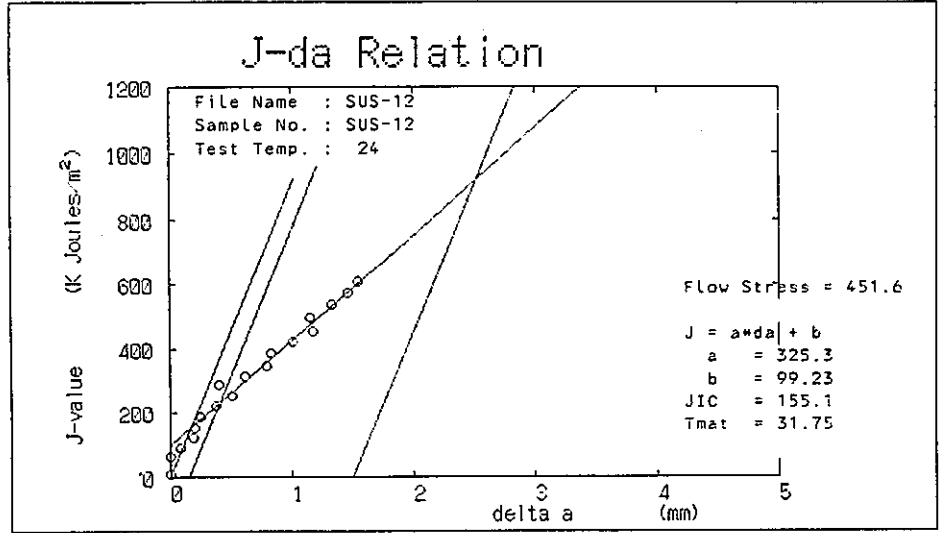
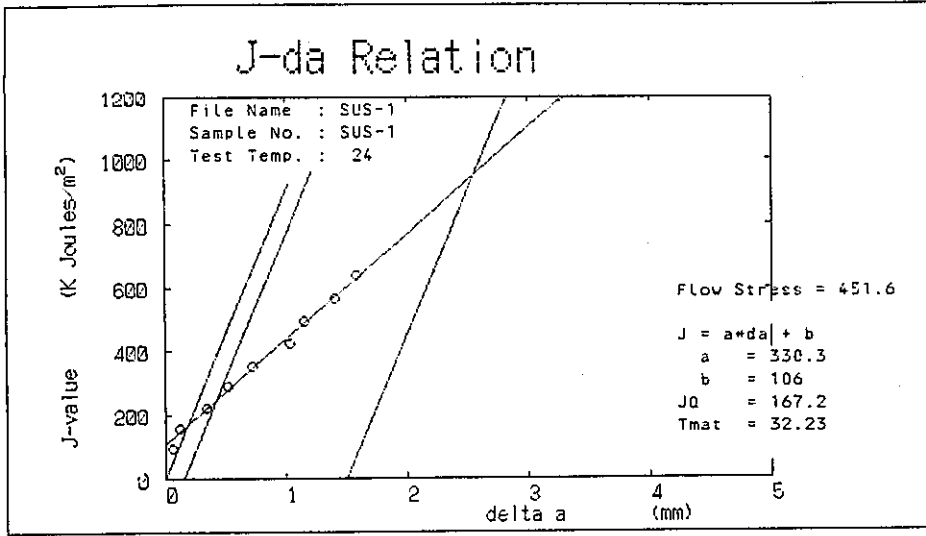


Fig.A5 Unloading compliance tests results of SUS304 stainless steel

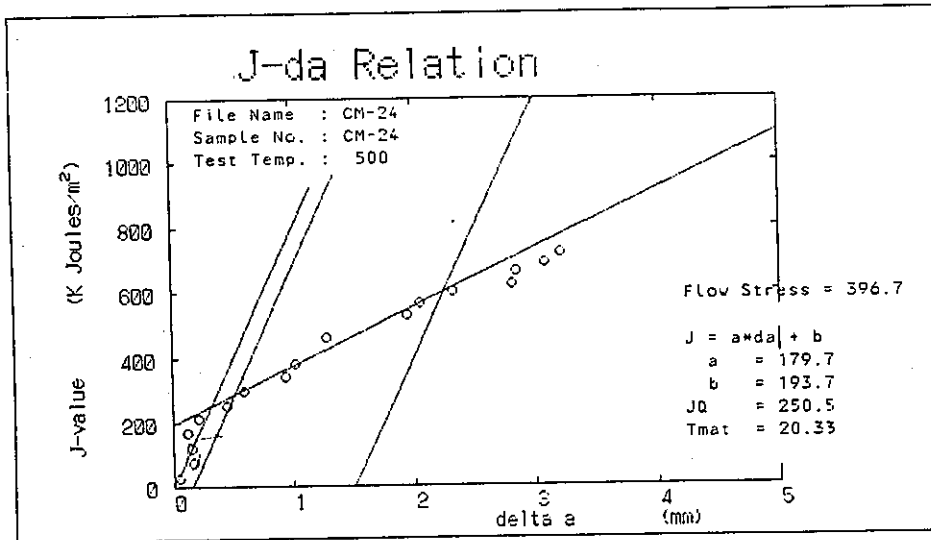
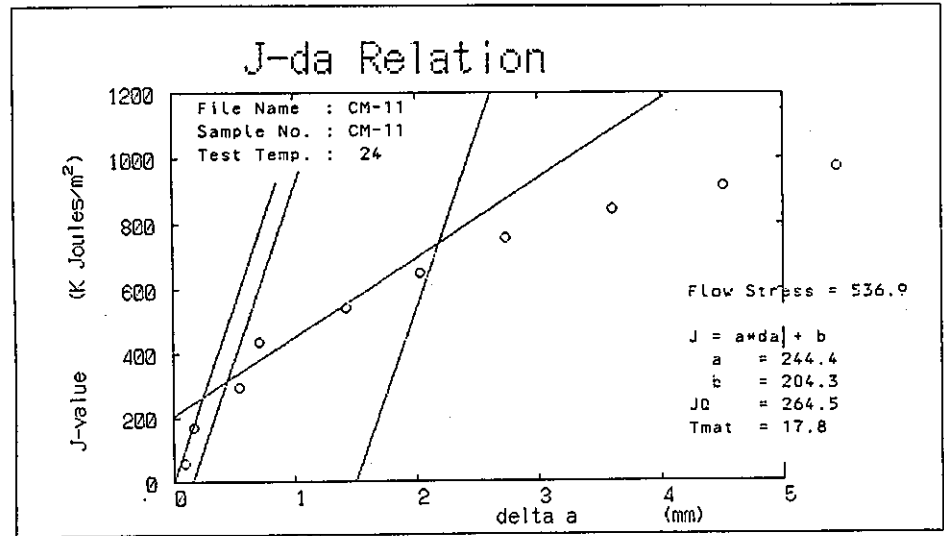
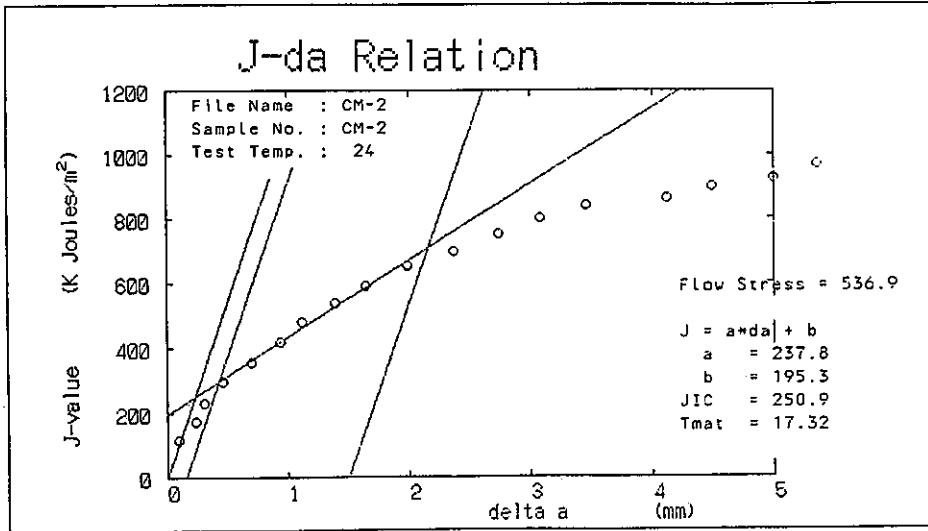


Fig.A6 Unloading compliance tests results of 2.25Cr-1Mo steel

### 付録3. 破壊靱性に及ぼすき裂採取方向の影響

破壊靱性値におよぼす試験片採取方向の影響を調べる目的で、第3年度に実施している試験の途中経過を、速報として示す。供試材はMod. 9Cr-1Mo (N社) 鋼と9Cr-1Mo-V-Nb鋼で、それぞれL-TタイプとT-Lタイプの試験片を採取し、室温と550℃で、除荷コンプライアンス法で破壊靱性試験を行った。

Table A9に結果を示す。一つの条件で3本ずつの試験を行う予定であるが、現時点では全ての試験が終了しておらず、表中には取得済データの平均値を示している。表からは、試験片採取方向による明瞭な影響は認められない。むしろTable 3との比較から、同一種でもヒート間でバラツキがあるようにも見える。これらの傾向に対する最終的な結論は、全データの取得を持って、第3報にて示す予定である。

Table A9 Effect of crack direction upon fracture toughness values of 9Cr type steels

鋼 種	温 度	J <sub>a</sub> (kgf/mm)	
		L-Tタイプ	T-Lタイプ
Mod. 9Cr-1Mo (N社)	RT	57	—
	550℃	43	37
9Cr-1Mo-V-Nb	RT	51	67
	550℃	38	30