

JAERI-Tech

99-076

JP9950658



# 低放射化Mn-Cr鋼の特性評価試験(1) —機械的特性および溶接性—

1999年10月

斎藤 滋・深谷 清・石山新太郎・衛藤基邦・佐藤育男\*  
楠橋幹雄\*・畠山 剛\*・高橋平七郎\*・菊池 満

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

## 低放射化 Mn-Cr 鋼の特性評価試験（1）

### -機械的特性および溶接性-

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

斎藤 滋・深谷 清・石山新太郎・衛藤 基邦

佐藤 育男<sup>\*1</sup>・楠橋 幹雄<sup>\*1</sup>・畠山 剛<sup>\*1</sup>・高橋平七郎<sup>\*2</sup>・菊池 満<sup>\*</sup>

(1999年9月10日受理)

現在、日本原子力研究所（以下原研）では、核融合炉の実現に向けて定常炉心試験装置（以下 JT-60SU）の検討・評価作業を進めている。この JT-60SU の真空容器鋼としては、高強度、低放射化かつ非磁性であることが求められている。しかし既存の鋼種でこれらの要求を満たすものは無いため、原研と（株）日本製鋼所は共同で Ni, Co が無添加で低 Mn 型の低放射化非磁性鋼の開発を進めてきた。始めに合金成分と製造工程の検討を行い、平成 9 年度までに VC9 と名付けた鋼種が有望であるという結果を得た。平成 10 年度以降はこの VC9 の JT-60SU 真空容器鋼としての適性評価として、機械的特性・溶接性・耐食性・相安定性など様々な特性試験を行っている。本報告書はそれらの結果の中から機械的特性と溶接性についてまとめたものである。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* 那珂研究所炉心プラズマ研究部

\*<sup>1</sup> （株）日本製鋼所室蘭製鋼所

\*<sup>2</sup> 北海道大学

Evaluation of Properties of Low Activation Mn-Cr Steel (1)  
-Mechanical Properties and Weldability-

Shigeru SAITO, Kiyoshi FUKAYA, Shintaro ISHIYAMA, Motokuni ETO,  
Ikuo SATO<sup>\*1</sup>, Mikio KUSUHASHI <sup>\*1</sup>, Takeshi HATAKEYAMA<sup>\*1</sup>, Heishichiro TAKAHASHI<sup>\*2</sup>  
and Mitsuru KIKUCHI<sup>\*</sup>

Department of Nuclear Energy System  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 10, 1999)

In JAERI, JT-60SU (Super Upgrade) program is discussed. In the design optimization activity of JT-60SU, it is required for vacuum vessel material to be highly strong, low activated and non-magnetic. However, there is no suitable material to fulfill all the requirements. Therefore, JAERI started to develop a new material for vacuum vessel together with The Japan Steel Works LTD. (JSW). Chemical composition and production processes were optimized and a new Mn-Cr steel named VC9 with a non-magnetic single  $\gamma$  phase was selected as a candidate material for vacuum vessel of JT-60SU. In this study, characterization of mechanical properties and weldability of VC9 were studied and the results were compared with those of 316L stainless steel.

Keywords : JT-60SU, Vacuum Vessel Material, Low Activated, Mn-Cr Steel, VC9, Characterization

---

<sup>\*</sup> Department of Fusion Plasma Research, Naka Fusion Research Establishment

<sup>\*1</sup>The Japan Steel Works LTD.

<sup>\*2</sup>Hokkaido University

## 目 次

1. 序論	1
2. 試験方法	2
3. 母材の機械的特性試験結果	5
3.1 引張試験	5
3.2 シャルピー衝撃試験	5
3.3 低サイクル疲労試験	5
3.4 破壊靭性試験	6
4. 溶接性試験結果	7
4.1 Non-filler TIG溶接試験	7
4.2 トランスバレストレイン試験	7
4.3 TIG溶接試験	7
4.4 TIG+MAG溶接試験	8
4.5 EB溶接試験	8
5. まとめ	10
謝辞	11
参考文献	12
付録	40

**Contents**

1. Introduction . . . . .	1
2. Experimental . . . . .	2
3. Results of Mechanical Property Tests . . . . .	5
3.1 Tensile Test . . . . .	5
3.2 Charpy Impact Test . . . . .	5
3.3 Low Cycle Fatigue Test . . . . .	5
3.4 Fracture Toughness Test . . . . .	6
4. Results of Weldability Test . . . . .	7
4.1 Non-filler TIG Test . . . . .	7
4.2 Transvarestraint Test . . . . .	7
4.3 TIG Welding Test . . . . .	7
4.4 TIG+MAG Welding Test . . . . .	8
4.5 EB Welding Test . . . . .	8
5. Summary . . . . .	10
Acknowledgment . . . . .	11
References . . . . .	12
Appendix . . . . .	40

## 1. 序論

現在、日本原子力研究所（以下原研）では、核融合炉の実現に向けて定常炉心試験装置（以下JT-60SU）の検討・評価作業を進めている[1]。このJT-60SUの設計の前提条件として、現行JT-60Uの建屋や付帯設備を最大限有効利用することとなっている。そのため総重量が制限されることになり、特に重量のある真空容器鋼には高比強度の材料を使用することが求められる。その他JT-60SUの真空容器鋼に求められる特性としては、低放射化・非磁性・核発熱が少ない・低コストなどがある。過去に既存の鋼種の中からTi系合金、フェライト鋼や高Mn鋼等が検討されたが、Ti系合金ではコストや燃料である水素との反応などの問題、フェライト鋼では強磁性材料がプラズマに与える影響が未知であることなどから、高Mn鋼が候補材料として挙げられた。しかし、既存の高Mn非磁性鋼の多くは、オーステナイト（以下 $\gamma$ ）相安定のためにNiおよびC、Nが添加されており、Niは低放射化という観点で、C、Nの大量添加は溶接性や耐食性の点で問題があると言われている。そこで上記要求を満たす材料として、原研と（株）日本製鋼所は共同でNi、Coが無添加で低Mn型の低放射化非磁性鋼の開発を進めてきた。始めに合金成分と製造工程の検討を行い、平成9年度までにVC9と名付けた鋼種が有望であるという結果を得ている[2, 3]。平成10年度以降はこのVC9を中心にJT-60SU真空容器鋼に適用するための特性評価として、機械的特性・溶接性・耐食性・相安定性など様々な試験を行っている。本報告書はそれらの結果の中から機械的特性および溶接性についてまとめたものである。

## 2. 試験方法

### (1) 製法及び成分分析値

本試験で用いた Mn-Cr 鋼 (VC9) は、平成 8～10 年度に（株）日本製鋼所で製造されたものである。以下に示すように、①溶解・造塊、②荒地鍛造、③熱間圧延、④固溶化処理の各製造工程を経て供試材を試作した。ただし、溶解後にレードル分析、完成後にもチェック分析を行った。以下に各工程の条件を示す[2]。

#### ①溶解・造塊

溶解は高周波溶解炉により行い、丸形 25～50kg 鋼塊に造塊した。目標成分は Table 2-1 の通りとした。

#### ②荒地鍛造

1 ton ハンマーにより鍛造を行い、板状に成形した。主鍛造方向は鋼塊の軸方向と一致させた。

#### ③熱間圧延

厚さ 30mm まで熱間圧延を行った。

#### ④固溶化熱処理

固溶化熱処理条件は 1050°C × 1hour で、その後水冷を行った。

#### ⑤チェック分析

チェック分析は JIS-G-0321 に準拠して行われた。チェック分析の結果は Table 2-1 に示す。

完成した各供試材は試験片形状に加工して、機械的特性試験や溶接試験などに供した。

### (2) 機械的特性試験

機械的特性試験は引張り、シャルピー試験、疲労及び破壊靭性試験を行った。以下に各試験の試験片形状、試験条件等を示す。

#### 引張試験

##### (1)JIS 規格試験片

試験片 :  $\phi 10\text{mm} \times \text{G.L.}50\text{mm}$  (室温 : JIS Z2201の14A号試験片、200°C～300°C : JIS G 0567のII型試験片)

クロスヘッド速度 : 0.5mm/min

試験温度 : 室温～300°C

雰囲気 : 大気中

#### (2) 小型試験片

試験片 :  $\phi 3\text{mm} \times \text{G.L.}30\text{mm}$  (JMTR照射用の小型試験片、Fig. 2-1)

クロスヘッド速度 : 0.5mm/min

試験温度 : 室温～500°C

雰囲気 : 大気中

#### シャルピー-衝撃試験

試験片 :  $10 \times 5 \times 55\text{mm}$ 、2mmVノッチ (ハーフサイズ、Fig. 2-2)

試験温度 : 室温

雰囲気 : 大気中

試験機 : 容量30kgf-mシャルピー-衝撃試験機

#### 低サイクル疲労試験

試験片 :  $\phi 10\text{mm} \times \text{G.L.}16\text{mm}$  (Fig. 2-3)

試験温度 : 室温

雰囲気 : 真空 ( $4 \times 10^{-5}\text{mmHg}$ )

全歪み範囲 : 1.5、1.2、1.0、0.8%目標

歪み速度 : 0.1%/sec

歪み波形 : 三角波両振り、軸歪み制御

伸び測定 : 石英ガラス押し当て方式

破損繰り返し数(Nf) は、引張応力が最大応力の75%に低下した時点とした。

#### 破壊靭性試験

ASTM E813-89 (破壊靭性 $J_{IC}$ の測定方法)。除荷コンプライアンス法を併用。

試験片 : 1.0Tコンパクト試験片 (Fig. 2-4)

試験温度 : 室温～300°C

雰囲気 : 大気中

#### (3) 溶接性試験

溶接性試験はNon-filler TIG溶接試験、トランスバレストレイン試験、TIG、TIG+MAGおよびEB溶接について行った。ただし、共材の溶接材が未開発のため、TIG溶接は15Mn-17Cr 鋼用の溶接金属を、TIG+MAG溶接はSUS316L用の溶接金属をそれぞれ用了。以下に試験方法について述べる。

### ①Non-filler TIG溶接試験

Fig.2-5にNon-filler TIG溶接試験方法を示す。溶接電流は120A、溶接速度は20cm/minとした。試験体は溶接後切断・研磨し、断面の金相観察、フェライト量測定（ポイントカウンティング法、フェライトスコープ）及び板厚方向の透磁率測定を行った。

### ②トランスバレストレイン試験

Fig.2-6にトランスバレストレイン試験方法[4,5]を示す。溶接電流は100A、溶接速度は6.5cm/minとした。板に負荷する歪みの範囲は0.5～5.0%とした。測定項目は割れ個数、割れ長さとした。

### ③TIG、TIG+MAGおよびEB溶接

Table 2-2にTIG、TIG+MAGおよびEB溶接の溶接条件を示す。各溶接体とも断面を研磨し、金相観察、硬さ分布測定、フェライト分布測定等による組織観察を行った。TIGおよびTIG+MAG溶接では引張り・シャルピー衝撃試験も行った。以下に試験方法を示す。

金相観察 : 光学顕微鏡、×100、×400

硬さ試験 : ビッカース硬度計、荷重=1kgf、保持時間=15秒

フェライト量測定 : Ferrite Content Meter 1.054(INSTITUT DR. FORSTER)

#### 引張り試験

試験片 : φ3mm×G.L.30mm (JMTR照射用の小型試験片、Fig.2-1)

クロスヘッド速度 : 0.5mm/min

試験温度 : 室温～500°C (TIG)、室温 (TIG+MAG)

雰囲気 : 大気中

#### シャルピー衝撃試験

試験片 : 10×5×55mm、2mmVノッチ (ハーフサイズ、Fig.2-2)

試験温度 : 室温

雰囲気 : 大気中

試験機 : 容量30kgf-mシャルピー衝撃試験機

### 3. 母材の機械的特性試験結果

機械的特性試験としては引張り、シャルピー衝撃、低サイクル疲労及び破壊非性試験を行った。以下に結果を述べる。

#### 3.1 引張試験

##### ①JIS規格試験片

JIS規格試験片による引張り試験の結果をTable 3-1に示す。室温においてVC9の0.2%耐力はSUS316Lの約1.8倍、引張り強度も約1.5倍あり、高強度の材料である事が分かった。伸び、絞りはSUS316Lに比べると若干小さいが、伸びは50~60%、絞りも60~70%あり、十分な延性を持つ材料であることが分かった。

##### ②小型試験片

小型試験片による室温~500°Cまでの引張試験の結果をTable 3-2に、試験温度依存性をFig.3-1にそれぞれ示す。JIS規格試験片の結果と比較すると、伸びは若干小さくなるものの、0.2%耐力、引張り強度、絞りはほとんど大差無く、試験片サイズ効果は小さいと言える。試験温度依存性は、0.2%耐力、引張り強度、伸びは試験温度とともに低下するが、絞りは室温でやや低く、200°C~500°Cでは70%前後でほぼ一定である。一方、SUS316Lと比較すると室温から200°Cまでの強度の低下は大きいが、500°Cまで0.2%耐力、引張り強度、伸びは上回り、絞りは若干下回ることが分かった。Fig.3-2に破面のSEM写真を示す。室温では絞りがはっきりせず、ディンプルも小さく数も少ない。300°C以上では絞りがはっきり見られ、ディンプルも大きく数も多い。200°Cはその中間である。付録A-1~3に母材の応力-変位曲線を示す。

#### 3.2 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験の結果をTable 3-3に示す。SUS316Lと比較すると衝撃値、横膨出量共に小さい。これはSUS316Lが低強度高延性の材料で衝撃値が特に大きいことならびにFig.4-6及びFig.4-10の破面写真でディンプル底部に見られる数μm程度の非金属性介在物の影響と考えられる。また、付録B-1、2に母材の荷重-変位曲線を示す。

#### 3.3 低サイクル疲労試験

低サイクル疲労試験の結果をTable 3-4およびFig.3-3に示す。全歪み-寿命サイクル線図において最小自乗法によってあてはめたManson-Coffin式から求めた全歪振幅 $\Delta \varepsilon_r$  ( $\Delta \varepsilon_r = \Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_c$ ) は次式で表される。

$$\Delta \varepsilon_r = 46.482Nf^{0.43117} + 0.902Nf^{0.0803}$$

(SUS316L[6] :  $\Delta \varepsilon_r = 22.772Nf^{0.4164} + 1.7485Nf^{0.18842}$ )

すなわち VC9 の室温での疲労寿命は同一歪みの場合、SUS316L[6]の 2 倍以上ある事が分かった。また、試験片の破面 SEM 写真を付録 C-1 に示す。

### 3.4 破壊革性試験

破壊革性試験の結果を Table 3-5 および Fig.3-4 に示す。室温の  $J_{lc}$  値は SZW 法や R 直線法 [7]で得られた SUS316L の値と比較すると大きい値であった。試験方法が異なるので単純な比較は出来ないが、高い革性を持つ材料であると言える。試験温度 200°C～300°C の  $J_{lc}$  値は室温の 60% 程度に低下する。 $J$ - $\Delta a$  曲線を付録 C-2～4 に示す。

#### 4. 溶接性試験結果

溶接性試験はNon-filler TIG溶接試験、トランスバレストレイン試験、TIG、TIG+MAGおよびEB溶接を行った。ただし、共材の溶接材が無いため、TIG溶接には15Mn-17Cr鋼用の溶接金属を、TIG+MAG溶接にはSUS316L用の溶接金属をそれぞれ用いた。以下に結果について述べる。

##### 4.1 Non-filler TIG溶接試験

Non-filler TIG溶接試験後の金相観察の結果、溶着金属、熱影響部のいずれの位置においても割れ、プローホール等の欠陥や熱影響部での著しい組織変化は認められなかった。また、Table 4-1に $\delta$ フェライト量、透磁率測定の結果を示す。ポイントカウンティング法による測定では2%強の $\delta$ フェライトと見られる第2相が観察された。しかしフェライトスコープによる $\delta$ フェライト量の測定結果及び透磁率の測定結果は非常に低い値を示している。おそらくポイントカウンティング法で $\delta$ フェライトと見ている相は実は金属間化合物の $\sigma$ 相のような非磁性の相であると考えられる。したがって溶着金属部の $\delta$ フェライト生成量はごく僅かであると思われる。

##### 4.2 トランスバレストレイン試験

Fig.4-1 (a) ~ (c) にトランスバレストレイン試験の結果を、負荷歪みと (a) 割れ個数 (b) 最大割れ長さ及び (c) 合計割れ長さとの関係として示す。SUS316 の結果[5]と比較すると、割れ個数は SUS316 の数倍あるにも関わらず、合計割れ長さはほとんど差が無かった。これは最大割れ長さが小さいことも含め、VC9 の高温割れは SUS316 と比べると小さな割れが多数発生する傾向があるためと考えられる。

##### 4.3 TIG 溶接試験

Fig.4-2 に TIG 溶接の溶着金属および熱影響部の金相写真を示す。いずれの位置においても割れ、プローホール等の欠陥や熱影響部での著しい組織変化は認められなかった。

Fig.4-3 に TIG 溶接の硬さおよびフェライト量分布測定結果を示す。熱影響部での若干の硬さの増加が認められた。また溶着金属部の硬さは熱影響部と同等か T8 の位置のようにむしろ軟らかい場所もあった。これらの結果は共材以外の溶接金属を用いた事に起因していると考えられる。フェライト量分布測定の結果、溶着金属部は最大37%のフェライトが認められたため、よりフェライト化しにくい溶接金属を用いる必要性があると考えられる。一方、熱影響部ではフェライトは認められなかった。

Table 4-2 に TIG 溶接継ぎ手の引張り試験結果を、Fig.4-4 に試験温度依存性をそれぞれ示す。TIG 溶接継ぎ手は母材に比べて 0.2% 耐力は若干増加しているが引張り強度はほぼ同じであった。伸び・絞りは母材を下回った。破断位置は溶着金属部であり、より高強度の溶

接金属を使用する必要があると考えられる。Fig.4-5 に破面の SEM 写真を示す。母材と比べると小さいディンプルが多数存在していることが分かる。付録 A4~8 に引張り試験の応力-変位曲線を示す。

次に Table 4-3 に TIG 溶接部材のシャルピ-衝撃試験結果を示す。TIG の熱影響部の衝撃値、横膨出量はいずれも母材を下回った。Fig.4-6 に破面の SEM 写真を示す。付録 B-1 にシャルピ-衝撃試験の荷重変位曲線を示す。

#### 4.4 TIG+MAG 溶接試験

Fig.4-7 に TIG+MAG 溶接の溶着金属および熱影響部の金相写真を示す。いずれの位置においても割れ、ブローホール等の欠陥や熱影響部での著しい組織変化は認められなかった。

Fig.4-8 に TIG+MAG 溶接の硬さおよびフェライト量分布測定結果を示す。熱影響部での若干の硬さの増加が認められた。また溶着金属部の硬さは母材と同等かそれ以下の硬さであった。これらの結果は SUS316L 用の溶接金属を用いた事に起因していると考えられる。フェライト量分布測定の結果、溶着金属部では 10 数 % のフェライトが認められた。よりフェライト化しにくい溶接金属を用いる必要性があると考えられる。一方、熱影響部ではフェライトは認められなかった。

Table 4-4 に TIG+MAG 溶接の継ぎ手および溶着金属の引張り試験結果を示す。TIG+MAG 溶接継ぎ手は母材に比べて 0.2% 耐力は若干増加しているが引張り強度、伸びは母材を下回り、絞りは同等であった。破断位置は溶着金属部であった。一方溶着金属部の引張り試験は母材と比べると 0.2% 耐力は若干増加しているが引張り強度、伸びとともに母材を下回り、絞りは同等であった。しかし継ぎ手と比べると 0.2% 耐力、引張り強度ともに母材を下回り、絞りは同等で伸びは上回った。これらの結果は SUS316L 用の溶接金属を使用しているためであり、より高強度の溶接金属を使用する必要があると考えられる。Fig.4-9 に破面の SEM 写真を示す。母材と比べると小さいディンプルが多数存在し、それらの底部には直径 1  $\mu$  m 程度の微粒子が見られる。ブラックスとして溶接棒に添加されているセラミック粒子が残存しているものと考えられる。付録 A9 に引張り試験の応力-変位曲線を示す。

次に Table 4-5 に TIG+MAG 溶接部材のシャルピ-衝撃試験結果を示す。衝撃値は母材、熱影響部、溶着金属部の順で低くなるが、横膨出量は母材、溶着金属部、熱影響部の順となる。Fig.4-10 に破面の SEM 写真を示す。熱影響部の試験片は溶着金属部と母材の境界に対して斜めに切り出しているため、熱影響の程度が異なり不均一な破面となっている。溶着金属部は、引張り試験の破面と同様に小さいディンプルが多数存在している。付録 B-2 にシャルピ-衝撃試験の荷重変位曲線を示す。

#### 4.5 EB 溶接試験

Fig.4-11 に EB 溶接の溶着金属および熱影響部の金相写真を示す。いずれの位置において

も割れ、ブローホール等の欠陥や熱影響部での著しい組織変化は認められなかった。溶着金属の組織は $\gamma$ 単相[8]であったが、一部に黒い析出物らしきものも見られた。

Fig.4-12にEB溶接の硬さおよびフェライト量分布測定結果を示す。溶着金属および熱影響部での若干の硬さの増加が認められるが、TIGおよびTIG+MAG溶接に比べると硬化の程度は小さい。フェライト量分布測定の結果、EB溶接では溶接金属部、熱影響部とともにフェライトは全く認められなかった。従って金相写真に見られる析出物らしきものは非磁性であり、炭化物または $\sigma$ 相と考えられる。

## 5. まとめ

JT-60SU 真空容器鋼として開発が進められている低放射化高強度 Mn-Cr 鋼 (VC9) について、機械的特性および溶接性の評価を行った。結果については ITER の真空容器鋼として用いられる SUS316L の結果と比較検討した。

### 5.1 機械的特性

(1) 引張り試験の結果、VC9 の 0.2% 耐力は SUS316L の約 1.8 倍、引張り強度も約 1.5 倍と高い強度を持つ材料である事が分かった。伸び、絞りは SUS316L に比べやや小さい。また、高温引張り試験の結果、200°Cまでの強度の低下は大きいが、SUS316L に比べ室温から 500°Cまで高強度で、伸びも大きいことが分かった。

(2) 室温でのシャルピー衝撃試験の結果を SUS316L と比較すると衝撃値、横膨出量共小さい。これは VC9 が強度は高いが、伸び・絞りが SUS316L に比べ若干小さいためと考えられる。

(3) 室温、真空中で全歪振幅 0.8%から 1.5%範囲の低サイクル疲労試験の結果、応力振幅は初期において若干の硬化、その後軟化する材料であることが分かった。全歪み-寿命サイクル線図において最小自乗法によってあてはめた Manson-Coffin 式から求めた全歪振幅  $\Delta \varepsilon_t$  ( $\Delta \varepsilon_t = \Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_e$ ) は次式で表される事が分かった。

$$\Delta \varepsilon_t = 46.482Nf^{-0.43117} + 0.902Nf^{0.0803}$$

$$(SUS316L: \Delta \varepsilon_t = 22.772Nf^{-0.4164} + 1.7485Nf^{-0.18842})$$

また、VC9 の室温での疲労寿命は SUS316L に比べ 2 倍以上ある事が分かった。

(4) ASTM E813-89 に準拠した 1.0T コンパクト試験片について試験した結果、J-Δa 曲線から求めた室温の  $J_{lc}$  値は SUS316L と比較すると大きい値であることが分かった。

### 5.2 溶接試験

#### (1) Non-filler TIG 溶接試験

Non-filler TIG 溶接試験を行った結果、溶着金属部の δ フェライト量はごく僅かであることがわかった。

#### (2) トランスバレストレイン試験

トランスバレストレイン試験を行った結果、VC9 の高温割れ感受性は SUS316 と比べると合計割れ長さはほぼ同じであるが、小さな割れが多数発生する傾向がある事が分かった。

#### (3) TIG、TIG+MAG および EB 溶接試験

##### ① 金相観察

いずれの溶接においても割れ・プローホール等の欠陥および熱影響部での組織変化は認められなかった。

#### ②硬さ分布・フェライト含有量

いずれの溶接においても熱影響部での若干の硬さの増加が認められた。また溶着金属部の硬さはTIG溶接では熱影響部と同等かそれ以下であった。TIG+MAG溶接では母材と同等かそれ以下の硬さであった。これらの結果は母材よりも軟らかい溶接金属を用いた事に起因していると考えられる。

いずれの溶接においても熱影響部ではフェライトは認められなかった。また溶着金属部はTIGでは30数%、TIG+MAG溶接では数%以上のフェライト含有が認められ、よりフェライト化しにくい溶接材の使用が必要と考えられる。EB溶接ではフェライトは全く認められなかった。

#### ③溶接部継ぎ手の引張試験

TIG溶接継ぎ手、TIG+MAG溶接継ぎ手ともに破断位置は溶着金属部であった。これは母材よりも軟らかい溶接金属を使用しているための結果と考えられ、より高強度の溶接材の使用が必要と考えられる。

#### ④シャルピー衝撃試験結果

TIG、TIG+MAGともに熱影響部及び溶着金属部の衝撃値、横膨出量は母材に比較すると共に小さくなる。

以上のことから、本Mn-Cr鋼(VC9)は従来のSUS316L鋼と比較して優れた機械的特性を有し、溶接性も良好であることが分かった。しかし、溶接材についてはフェライト化しにくく、高強度のものが需要と考えられる。

#### 謝辞

本研究を行うに当たり、多くの援助と助言を頂きました炉心プラズマ研究部炉心プラズマ計画室の方々ならびに原子力エンジニアリングの大山剛氏と森順二氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Ushiga, G. Kurita, N. Toyoshima et al., IAEA-F1-CN-69/FTP/12(1998).S.
- [2] Ishiyama, M. Eto, K. Fukaya et al., to be published.
- [3] H. Takahashi, Y. Shindo, H. Kinoshita et al., J. of Nuclear Mater. 258-263(1998), p1644-1650.
- [4] W. F. Savage and C. D. Lundin, Welding Journal, 44(1965), p.433S.
- [5] T. Senda et al., Trans. JWS, Vol.2, No.2(1971), p.45-66.
- [6] The Japan Welding Society, JWES-AE-9803, p.122-123.
- [7] 町田賢司、菊池正紀、宮本博、日本機械学会論文集（A編）,53(1987), p.1362.
- [8] 西本和俊、溶接技術、3(1998)、p.99-108.

Table 2-1 Chemical composition of VC9 and SUS316L (wt%).

		Mn	Cr	Ni	Mo	C	N	Si	P	S	Co
Nominal		15.5	16.0	—	—	0.20	0.20	0.30	—	—	—
VC9	1996	ladle	15.38	16.02	0.02	—	0.20	0.221	0.30	0.025	0.005
		product	15.31	16.02	0.01	—	0.21	0.205	0.30	0.026	0.005
	1997	ladle	15.38	16.05	0.02	—	0.20	0.219	0.32	0.025	0.005
		product	15.50	16.03	0.02	—	0.20	0.226	0.27	0.024	0.004
	1998	ladle	15.70	16.00	0.02	—	0.20	0.210	0.32	—	—
		product	15.90	16.00	0.01	—	0.19	0.190	0.28	—	0.007
SUS 316L	JIS spec.	<2.00	16~18	12~15	2~3	<0.03	—	<1.00	<0.045	<0.03	—
	product	1.07	17.16	12.07	2.14	0.011	0.07	0.51	0.021	0.001	—

Table2-2 Welding conditions.

Welding method	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Position	Sealding gas
TIG	240/280	11~12	80	Flat	Ar
TIG+MAG	220~280	25~35	200~500	Flat	Ar,Ar+20%CO <sub>2</sub>
EB	140mA	110kV	400	Flat/Horizontal	Vacuum

Table 3-1 Results of tensile test (JIS spec. T. P. ,Test temp. ; R.T.~300°C)

	Test temp. (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	R.A. (%)	T.P. size
VC9 (H8)	R.T.	438	779	59.0	63.4	JIS Z2201, type 14A ( $\phi$ 10×50G.L.)
	R.T.	438	782	58.6	60.9	
VC9D (H9)	R.T.	433	772	54.4	64.0	JIS Z2201, type 14A ( $\phi$ 10×50G.L.)
	R.T.	425	768	56.0	65.2	
VC9D1 (H10)	R.T.	410	756	54.8	65.2	JIS G 0567, type II ( $\phi$ 10×50G.L.)
	200	246	615	58.0	68.6	
	300	234	591	54.0	66.4	
VC9D2 (H10)	R.T.	406	754	56.6	64.0	JIS Z2201, type 14A
	200	253	615	56.2	66.4	JIS G 0567, type II ( $\phi$ 10×50G.L.)
	300	240	595	55.6	68.6	
SUS316L	R.T.	237	549	62.0	79.0	JIS Z2201, type 10 ( $\phi$ 12.5×60G.L.)
	R.T.	233	548	61.0	80.0	
	R.T.	233	548	61.0	80.0	

Table 3-2 Results of tensile test (JMTR T. P. ,Test temp. ; R.T.~500°C)

T. P. size ; Total length=55mm,  $\phi$  3X30G.L.

TP No.	Test temp(°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon$ (%)	RA (%)	Loc. of failure
M-1	R.T.	424	872	62.6	47.5	A
M-11	R.T.	414	858	62.0	58.3	A
M-3	200	262	621	60.1	70.5	A
M-4	200	262	623	63.0	72.7	A
M-6	300	241	606	57.1	62.8	A
M-7	300	235	595	61.8	73.9	A
M-5	400	230	542	52.0	76.9	A
M-8	400	231	548	55.0	79.2	A
M-9	500	214	512	41.6	72.1	A
M-10	500	221	510	40.3	70.7	A

TP No.	Test temp(°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon$ (%)	RA (%)	Loc. of failure
T-17	R.T.	432	845	78.5	63.3	A
HT-1	R.T.	447	865	66.5	65.8	A
T-16	200	252	654	67.7	72.4	B
HT-2	200	276	636	57.3	73.8	A
T-18	300	247	615	75.1	70.8	A
HT-3	300	255	595	55.0	71.3	A
T-19	400	230	562	55.4	58.9	A
HT-6	400	262	560	45.3	74.6	A
T-20	500	210	538	44.1	73.7	B
HT-5	500	220	523	37.1	72.1	A

Table 3-3 Result of charpy impact test (test temp. ; 20°C)

	T.P. No.	Absorbd energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
VC9	M1	85	211	100	1.78
	M2	83	206	100	1.69
	1B1	82	204	100	1.60
	1B2	84	207	100	1.80
	Ave.	83.5	207	100	1.72
SUS316L	Ave. (6T.P.)	133	332	100	2.16

Table 3-4 Result of low cycle fatigue test (test temp. ; R.T.)

Spec. No	$\varepsilon$ %/sec	$\Delta \varepsilon_t$ (%)	Stress,Strain at N cycle MPa, %						N25 cycle	Loc.of Failure
			N	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_e$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\sigma_a$		
LC1	0.1	1.468	3200	1.028	0.44	386	383	385	6378	A
LC2	0.1	1.159	8000	0.757	0.402	369	363	362	18117	A
LC3	0.1	0.959	12500	0.531	0.428	390	390	390	27175	A
LC4	0.1	0.76	32000	0.401	0.359	377	379	378	60416	B

Table 3-5 Result of fracture toughness test (test temp. ; R.T.~300°C)

T. P. No.	Test temp. (°C)	load rate at tp (kN/min.)	effective yield strength (MPa)	JIC (KJ/m <sup>2</sup> )
FT1	21	12.0	583	999.1
FT2	200	12.0	431	671.0
FT3	300	12.0	413	678.5
FT4	21	12.0	580	931.4
FT5	200	12.0	434	581.6
FT6	300	12.0	418	556.3

(T.P. width :50.00mm,T.P. thickness ;25.50mm,after side-groove processing ;20.50mm)

Table 4-1 Results of non-filler TIG welding tests.

		$\delta$ ferrite content(%)		Magnetic permeability
		Point counting	ferrite scope	
VC9	As cast	0	0	1.003
	DEPO	2.3	0.1	1.006

Table 4-2 Results of tensile tests of TIG welded joint (test temp. ;R.T. $\sim$ 500°C).

T.P. No.	Temp.(°C)	$\sigma$ 0.2(MPa)	$\sigma$ UTS(MPa)	$\varepsilon$ (%)	R.A. (%)	Loc. of Failure
H-1	20	500	892	35.6	49.4	B, Base metal
H-2	20	493	884	42.8	33.8	A, Weld metal
H-3	200	348	593	25.3	60.5	A, Weld metal
H-4	200	322	597	25.3	67.9	A, Weld metal
H-5	300	322	585	27.0	63.3	A, Weld metal
H-6	300	306	589	28.3	54.7	A, Weld metal
H-7	400	257	541	30.5	56.4	A, Weld metal
H-8	400	262	545	32.3	65.5	A, Weld metal
H-9	500	243	480	25.0	67.7	A, Weld metal
H-10	500	240	469	21.6	65.1	A, Weld metal

Table 4-3 Result of charpy impact test of base metal and TIG welded joint (test temp. ;R.T.).

T.P. No.	Position	Absorbed energy (J)	Impact value (J/ cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
M1	Base	85	211	100	1.78
M2	Base	83	206	100	1.69
H1	HAZ	58	144	100	1.29
H2	HAZ	56	138	100	1.51

Table 4-4 Results of tensile tests of base metal I, TIG welded joint and welded metal (test temp. ;R.T.).

T.P. No.	Position	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\varepsilon$ (%)	R.A. (%)	Loc. of Failure
TB-1	base	414	854	50.8	53.1	B
TB-2	base	438	866	50.2	52.3	B
TJ-1	Joint	478	623	15.8	53.0	B, Weld metal
TJ-2	Joint	466	627	19.5	51.0	B, Weld metal
TD-1	Weld	441	559	37.6	51.0	B
TD-2	Weld	446	568	34.3	59.1	B

Table 4-5 Results of charpy impact tests of base metal, TIG+MAG welded joint and welded metal(test temp. ;R.T.).

T.P. No.	Position	Absorbed energy (J)	Impact value (J/cm <sup>2</sup> )	Percent of ductile fracture (%)	Lateral expansion (mm)
1B1	Base	82	204	100	1.60
1B2	Base	84	207	100	1.80
1J1	HAZ	33	83	100	0.55
1J2	HAZ	35	87	100	0.60
1D1	Weld Metal	24	60	100	0.90
1D2	Weld Metal	26	65	100	0.93

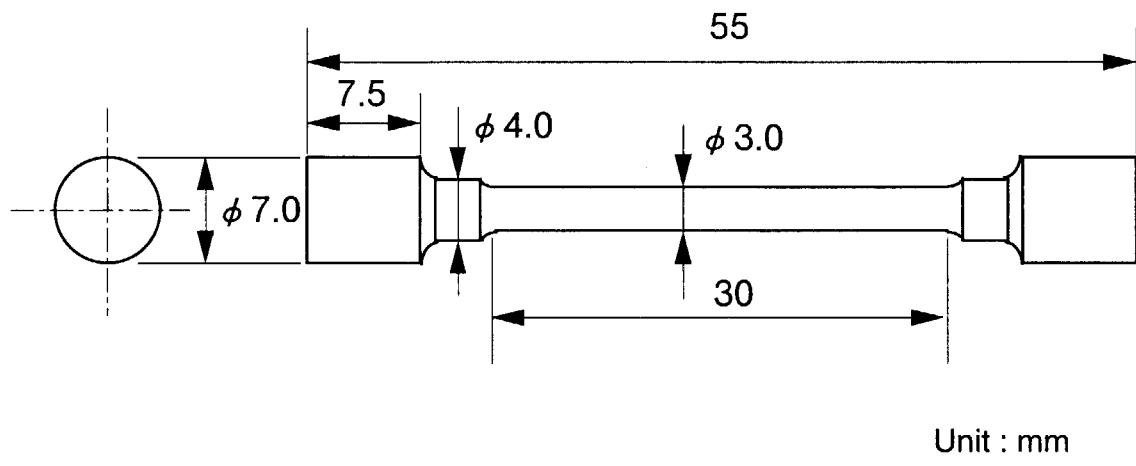


Fig.2-1 Test piece for tensile test.

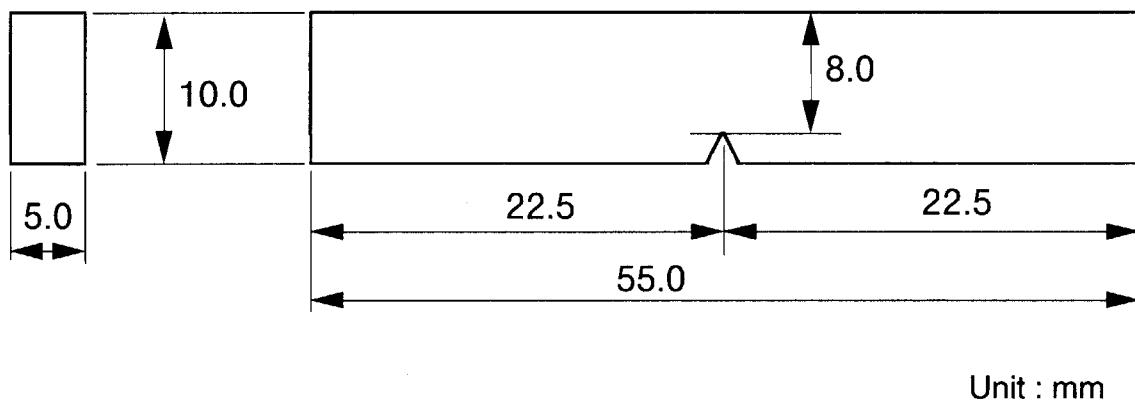


Fig.2-2 Test piece for half-size charpy impact test.

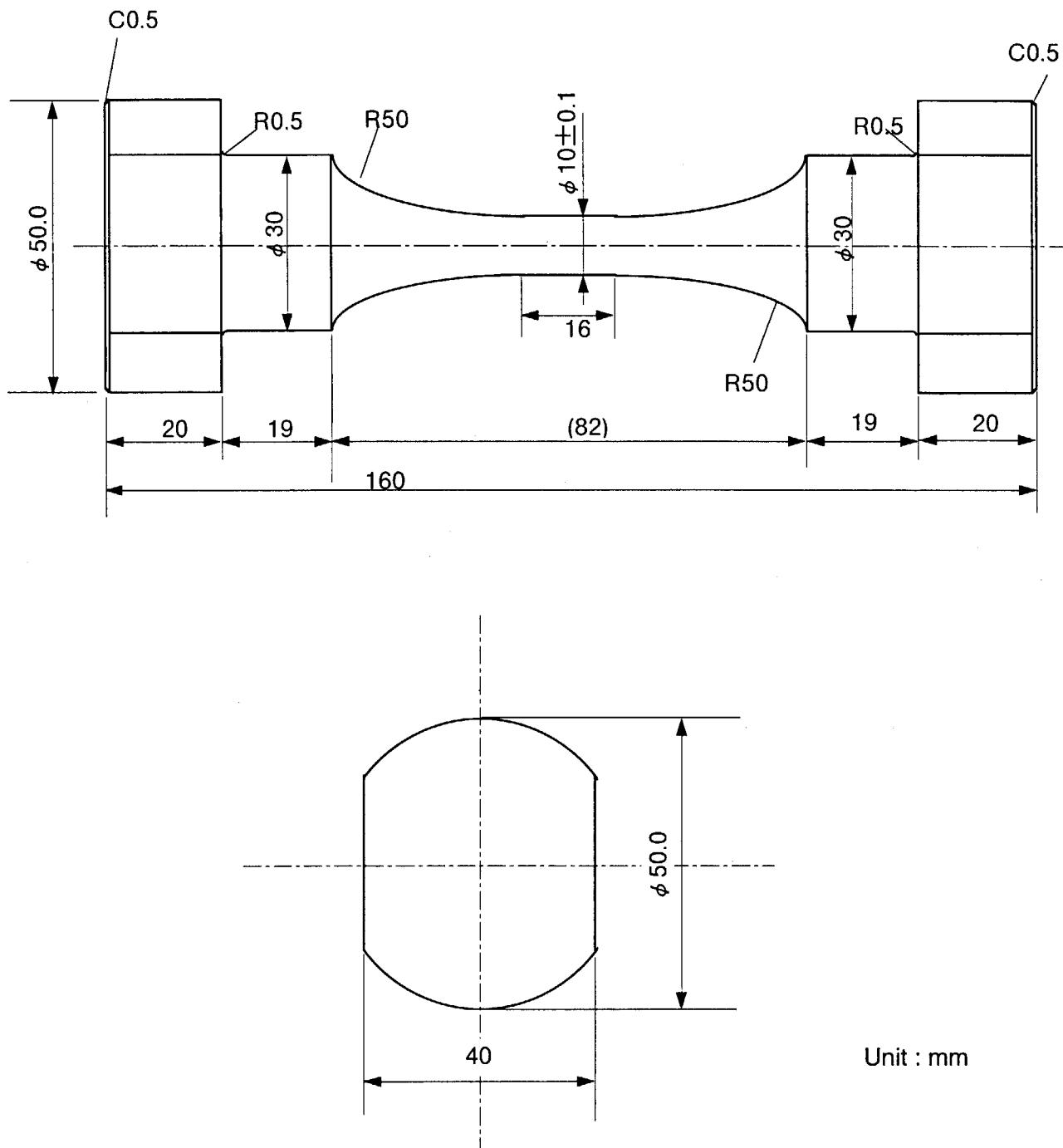


Fig. 2-3 Test piece for low cycle fatigue test.

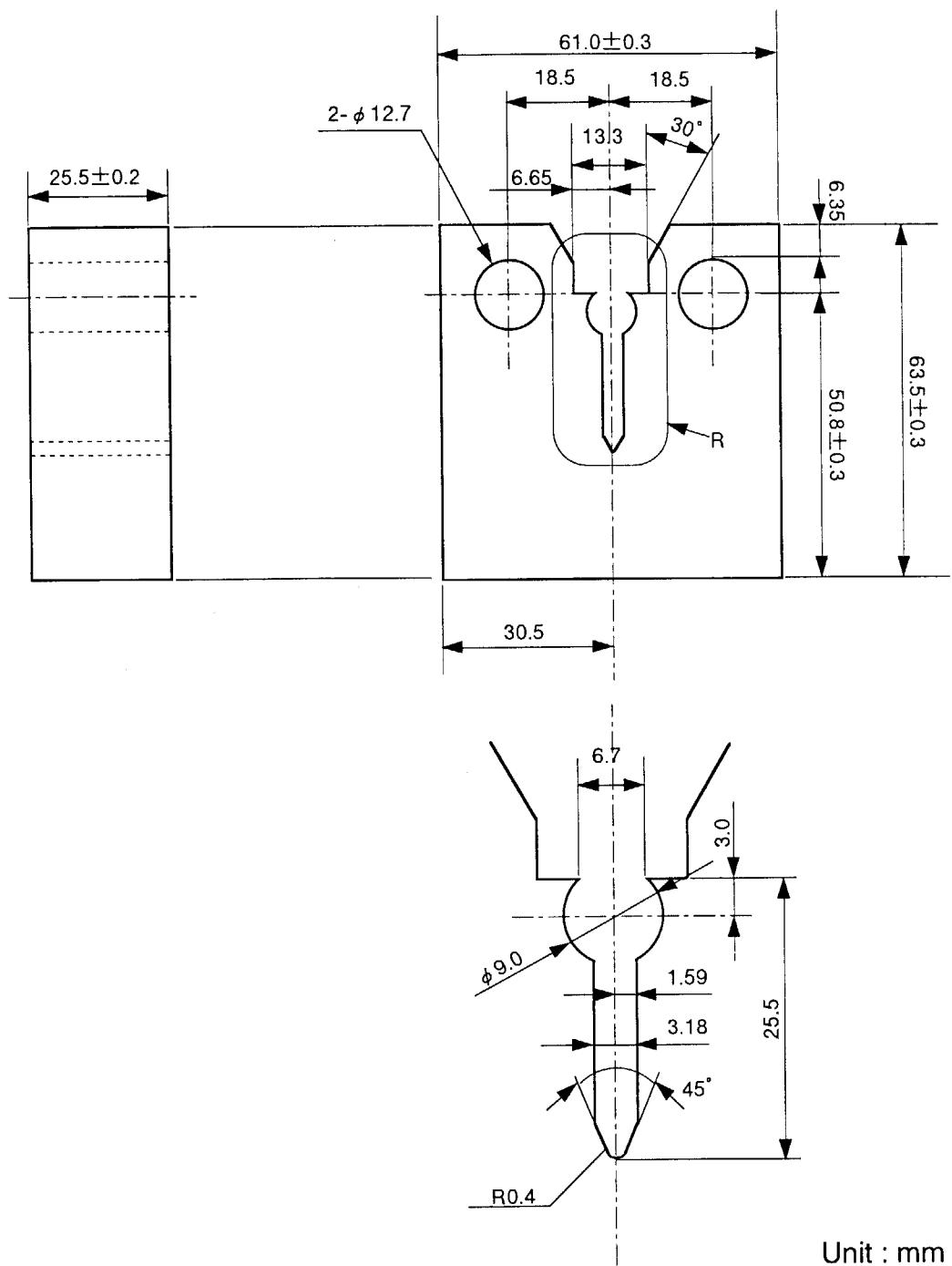


Fig. 2-4 Test piece for fracture toughness test.

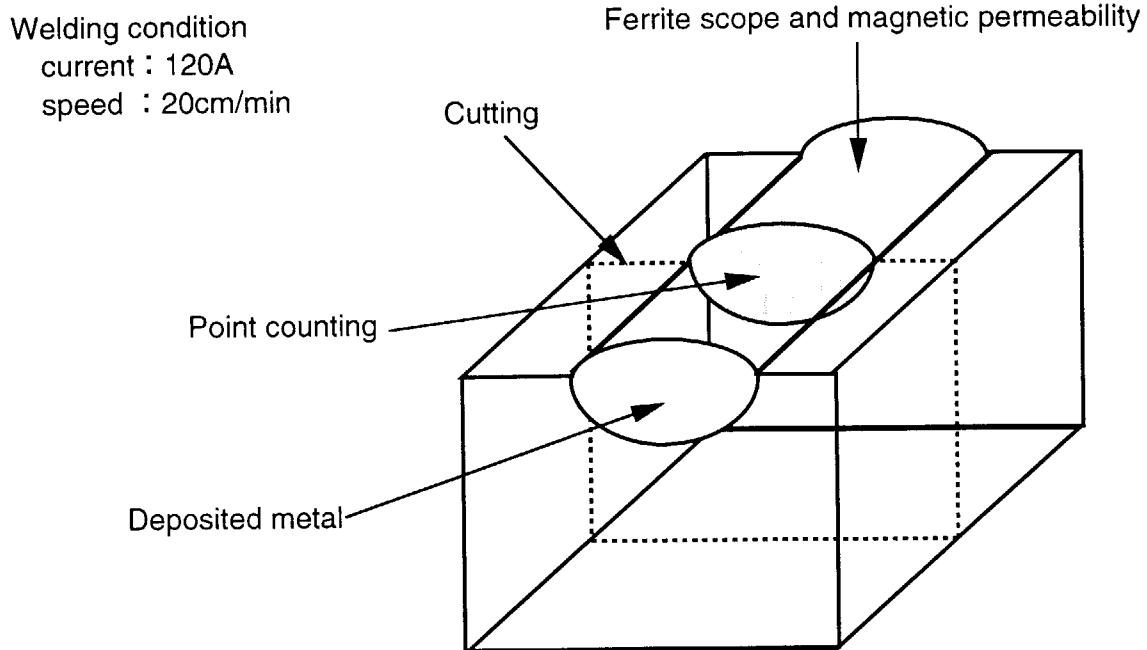


Fig. 2-5 Non-filler TIG welding test.

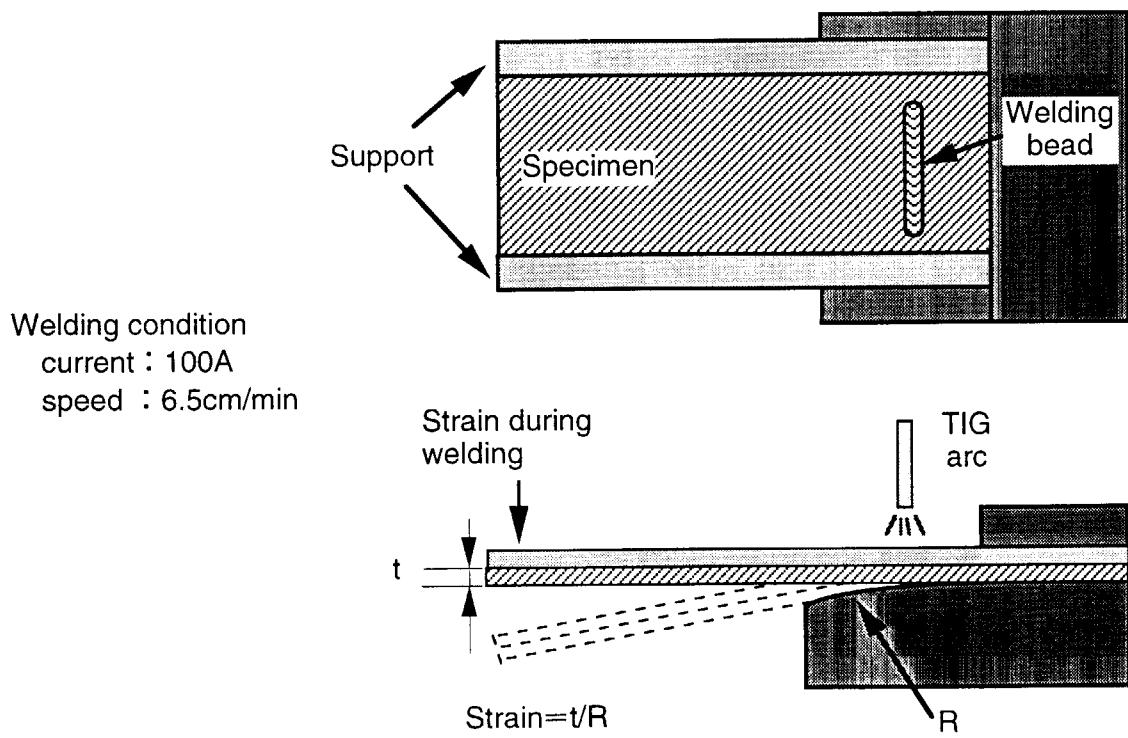


Fig. 2-6 Trans-varestraint test.

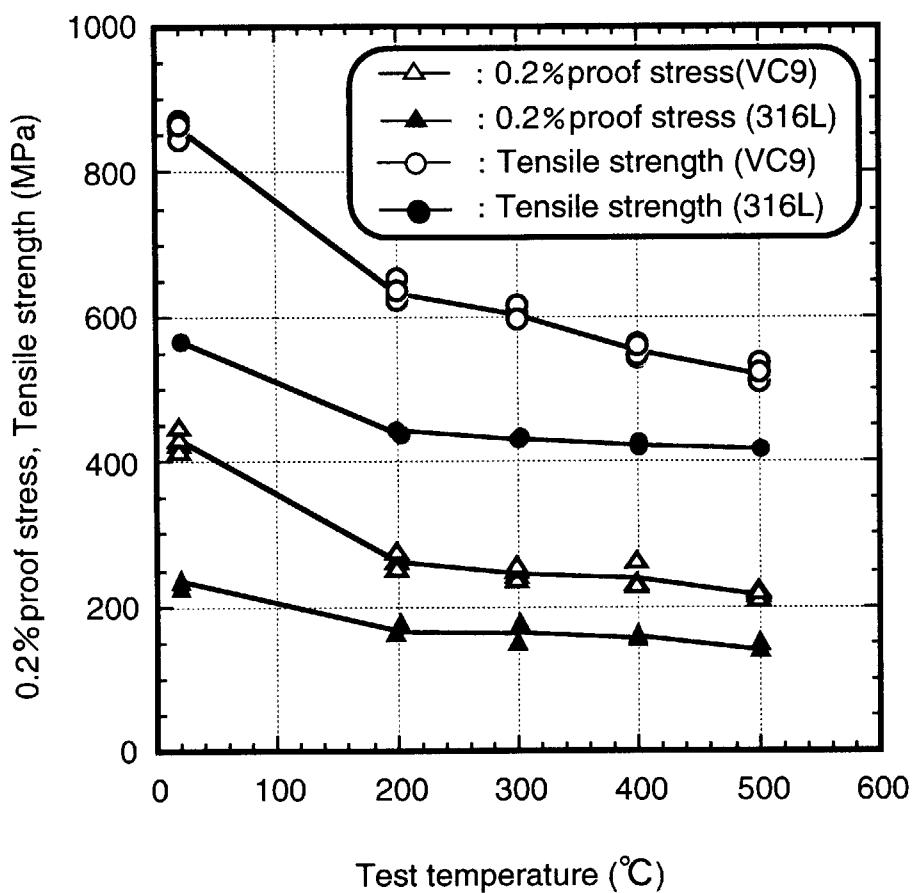


Fig. 3-1 Results of tensile tests of VC9 and SUS316L (0.2%proof stress, Tensile strength).

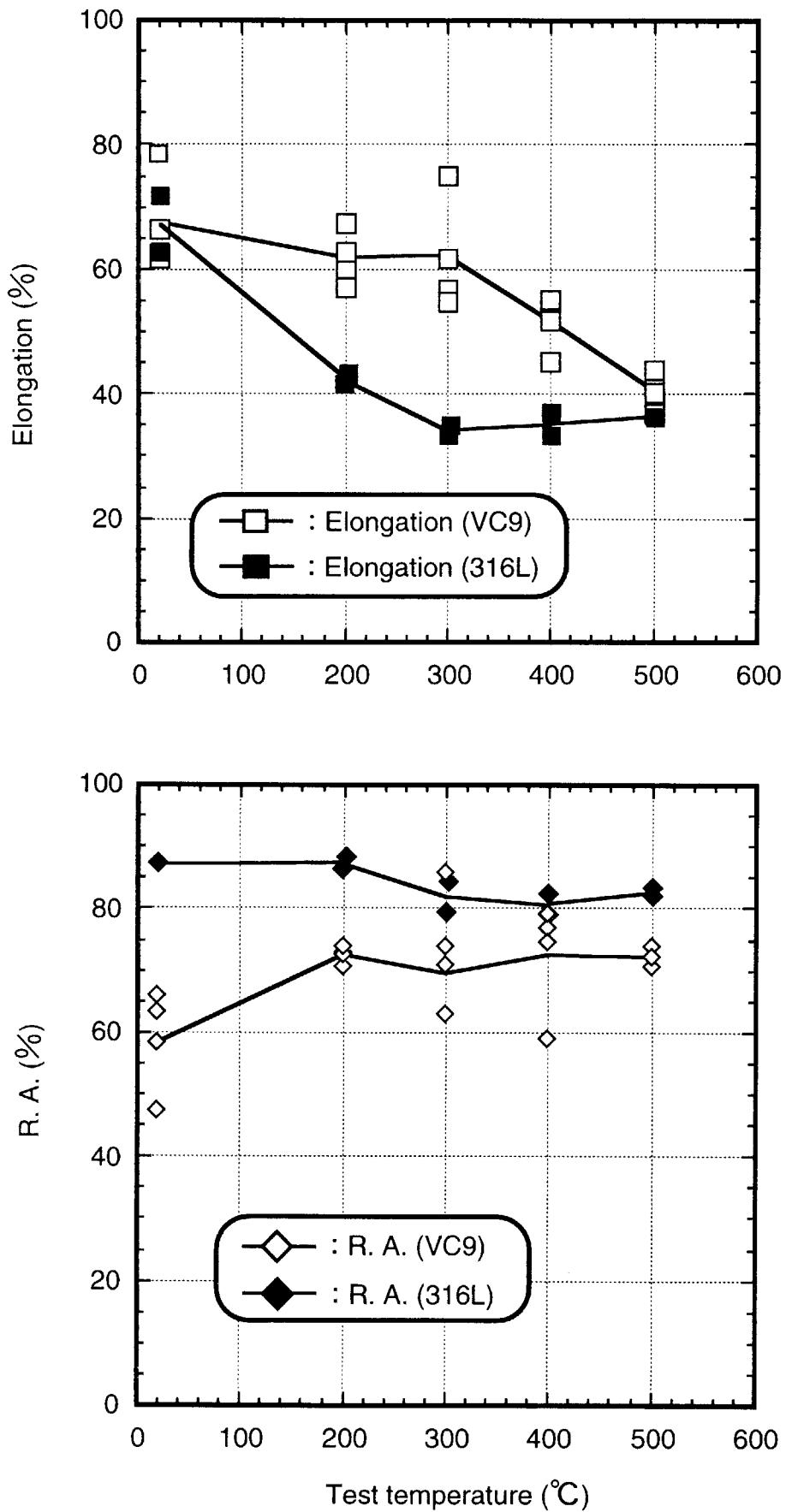


Fig. 3-1 Results of tensile test of VC9 and SUS316L (Elongation, R.A.)

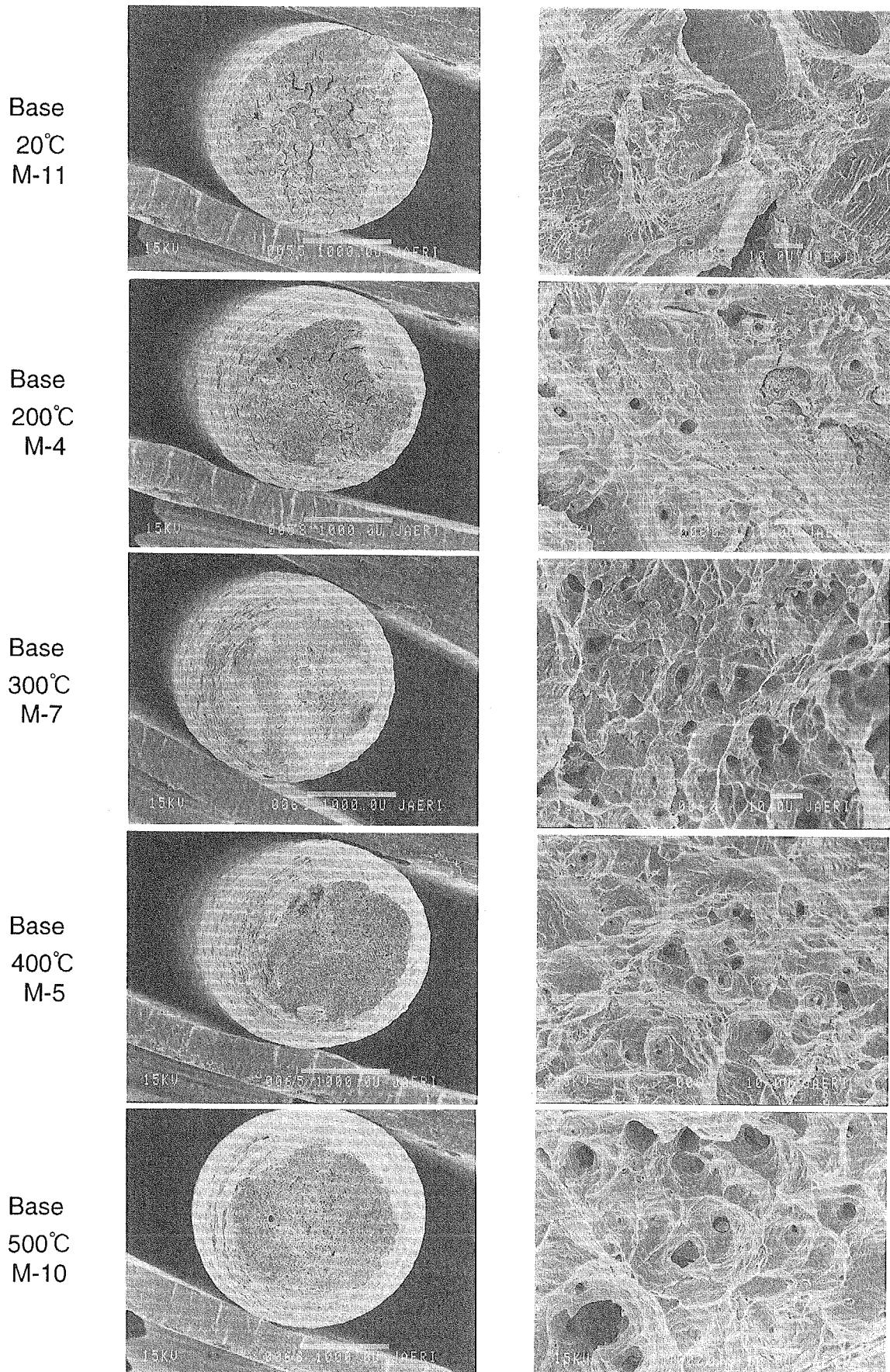


Fig.3-2 SEM photograph of fracture surface after tensile test (base metal).

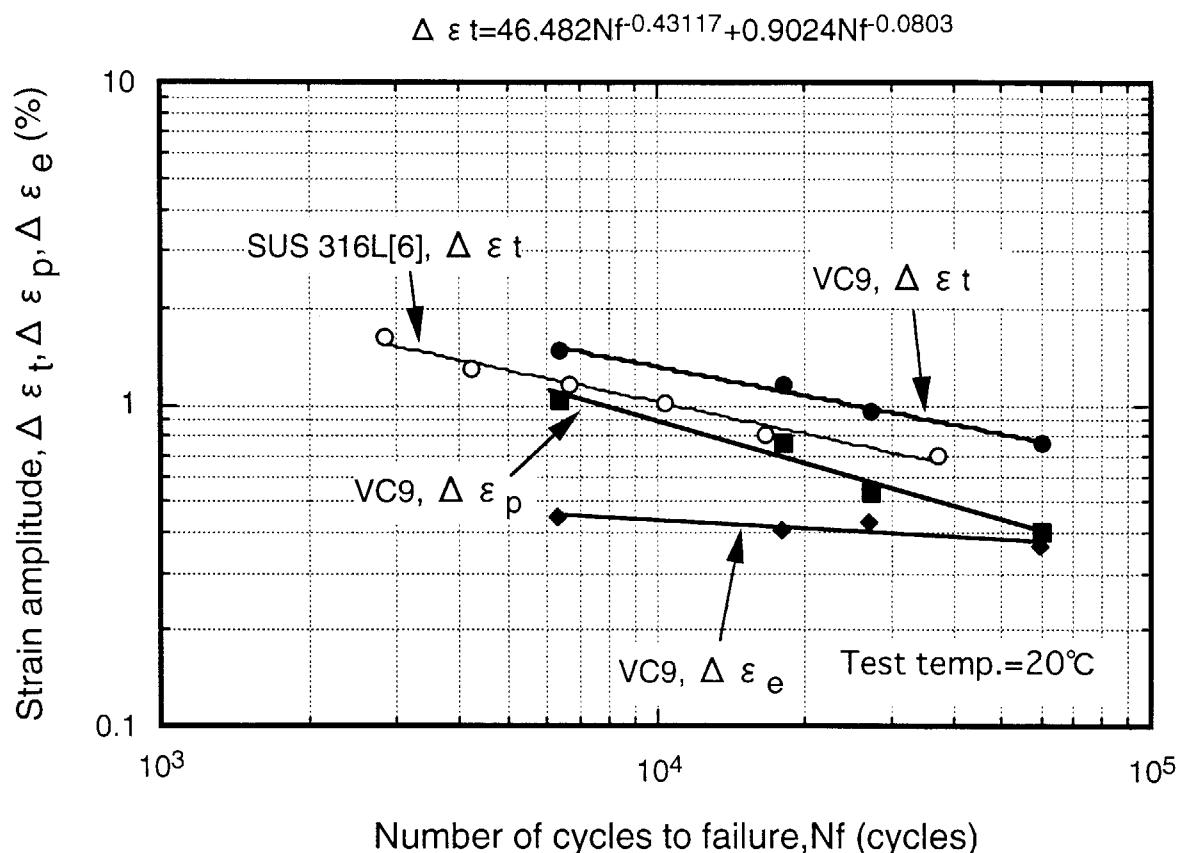


Fig. 3-3 Results of low cycle fatigue tests (S-N curve).

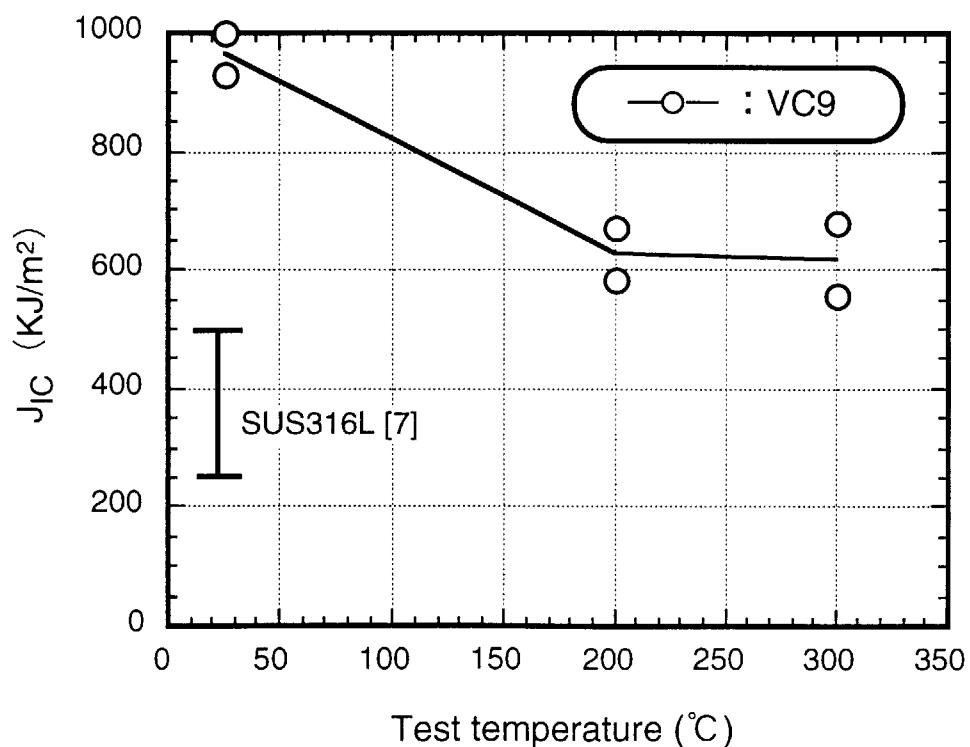


Fig. 3-4 Results of fracture toughness test (test temp. R.T. ~300°C).

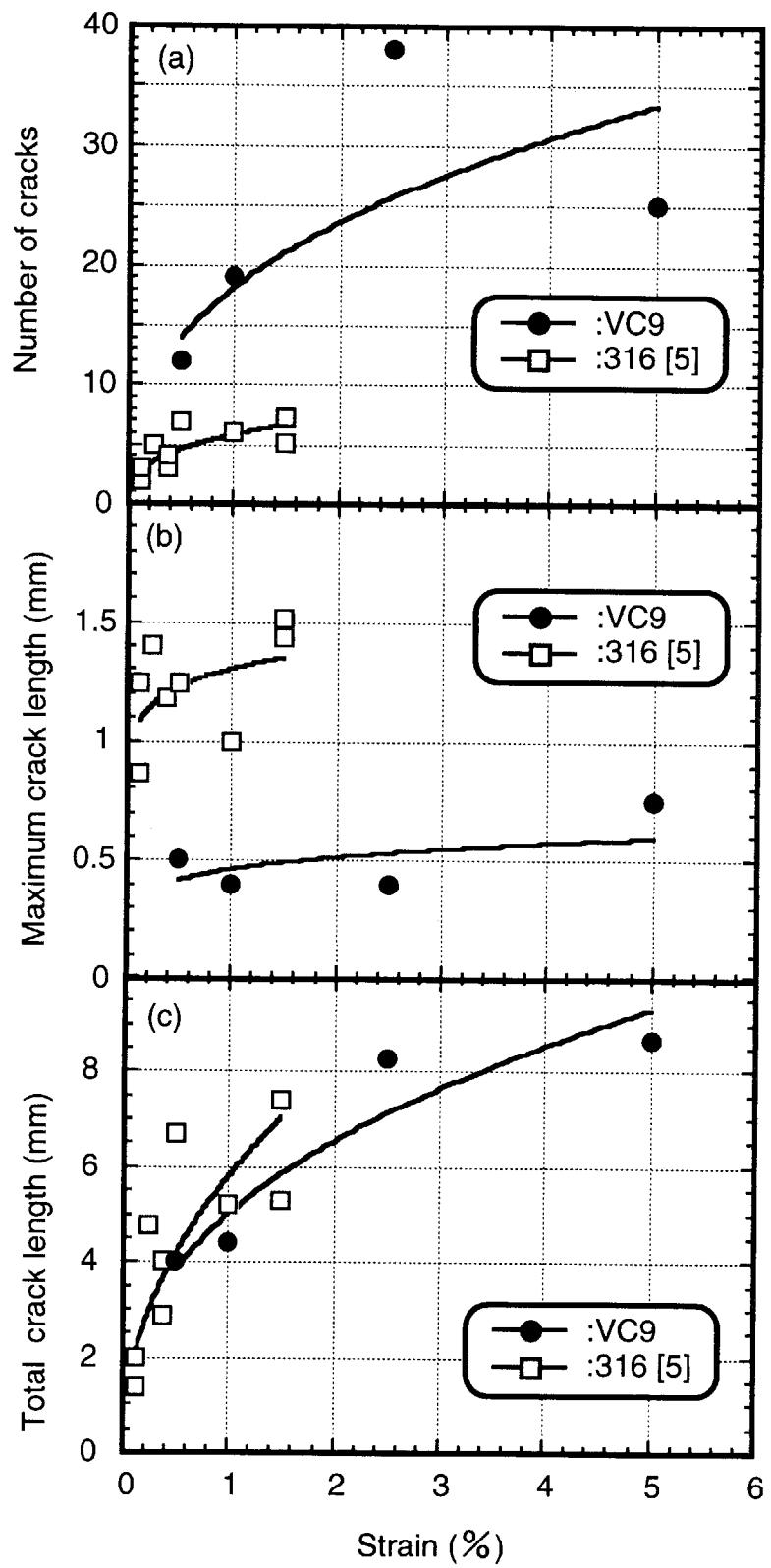


Fig. 4-1 The results of Trans-varestraint test ;(a)Number of cracks  
(b)maximum crack length (c)total crack length.

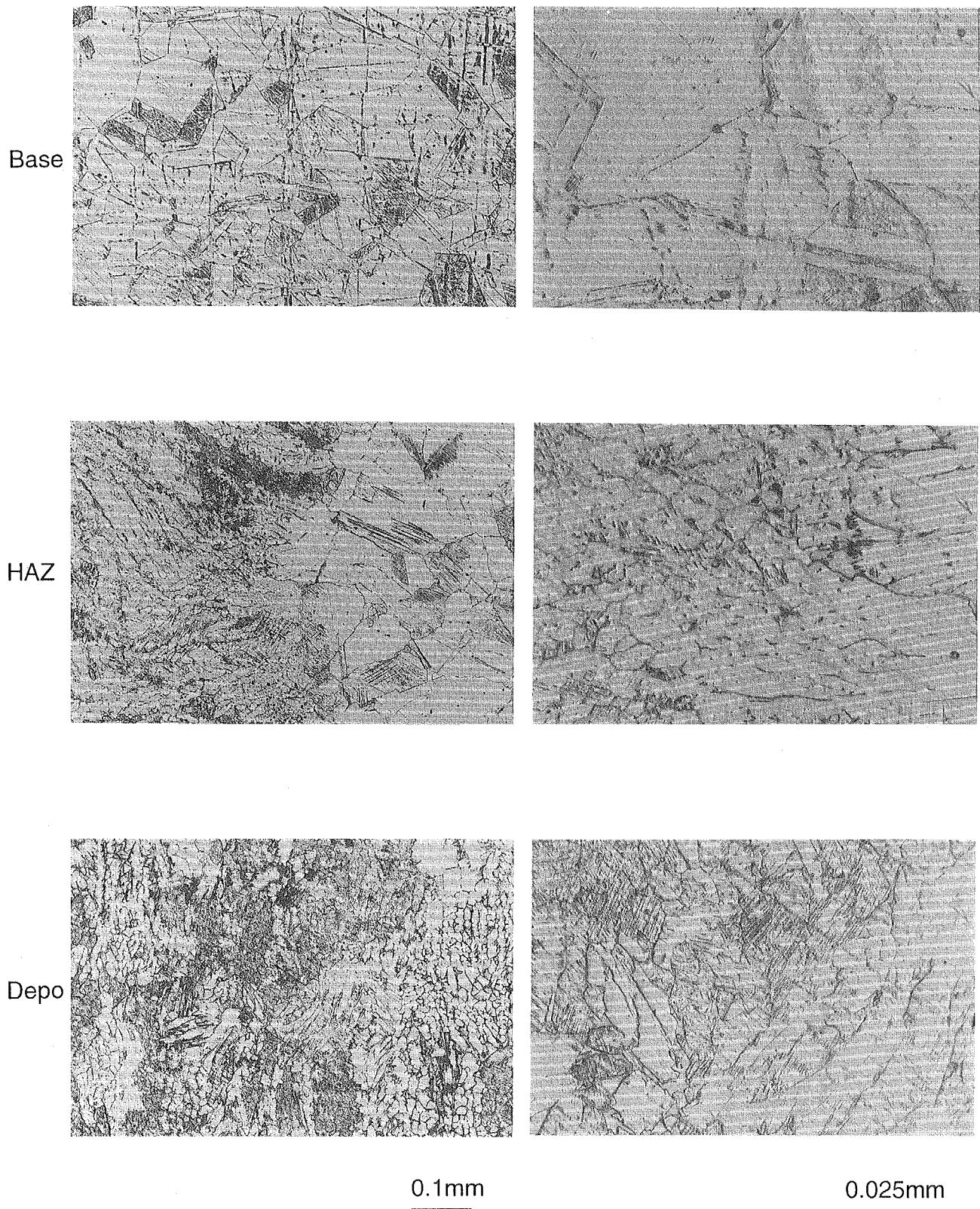


Fig. 4-2 Metallographic observation of TIG welded joint.

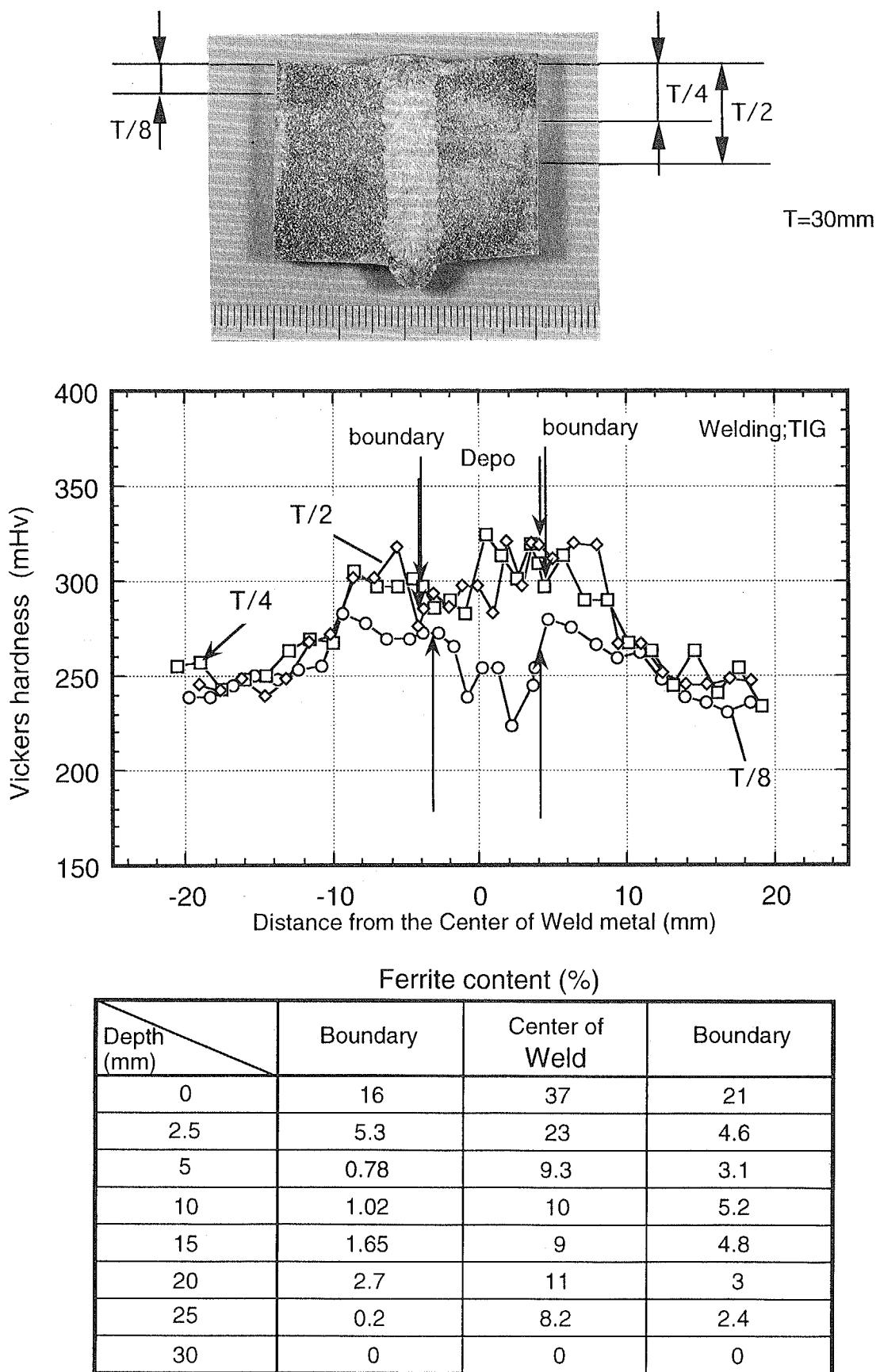


Fig. 4-3 Results of hardness tests and ferrite content measurement of TIG welded joint.

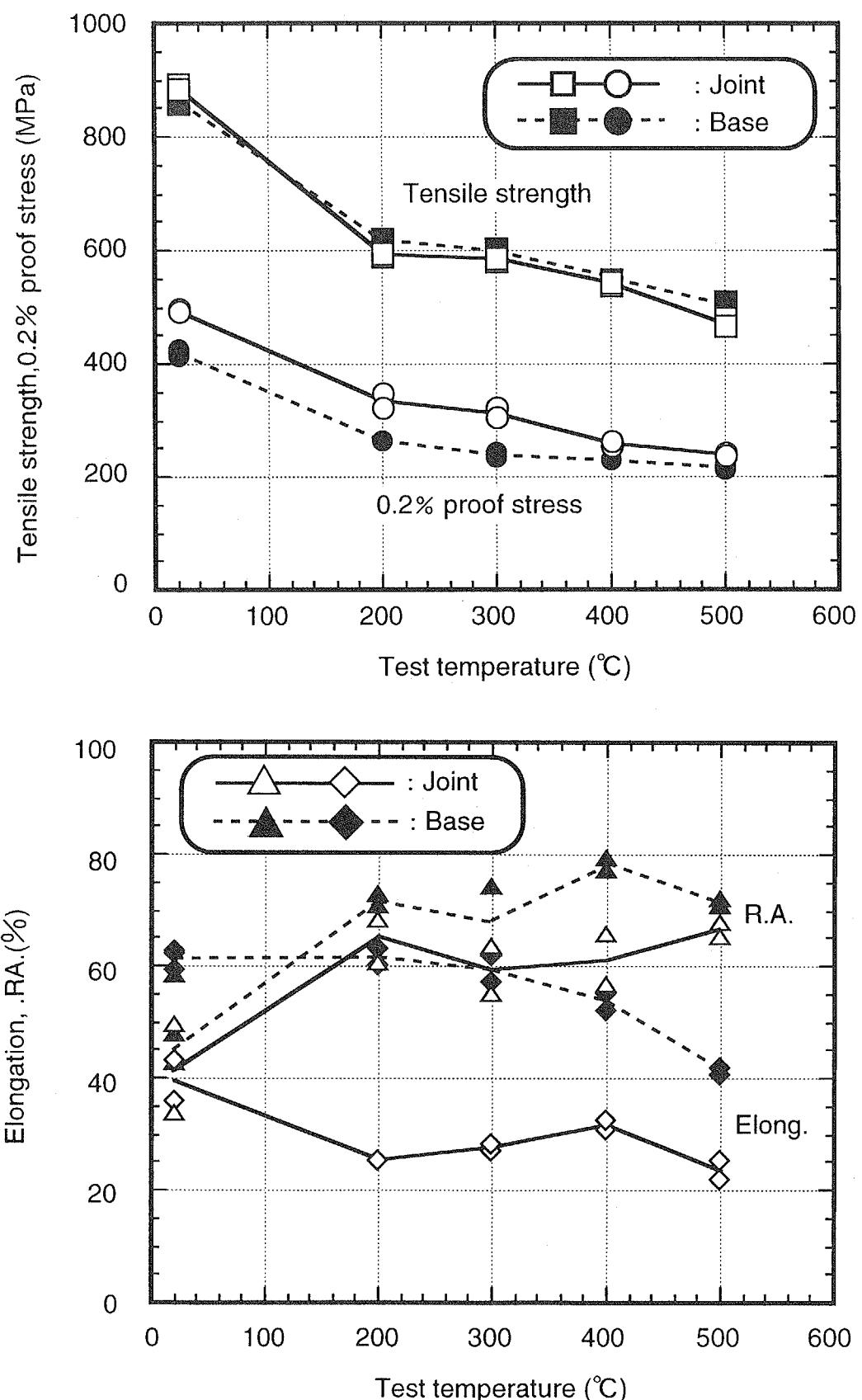


Fig. 4-4 Results of tensile tests of TIG welded joint.

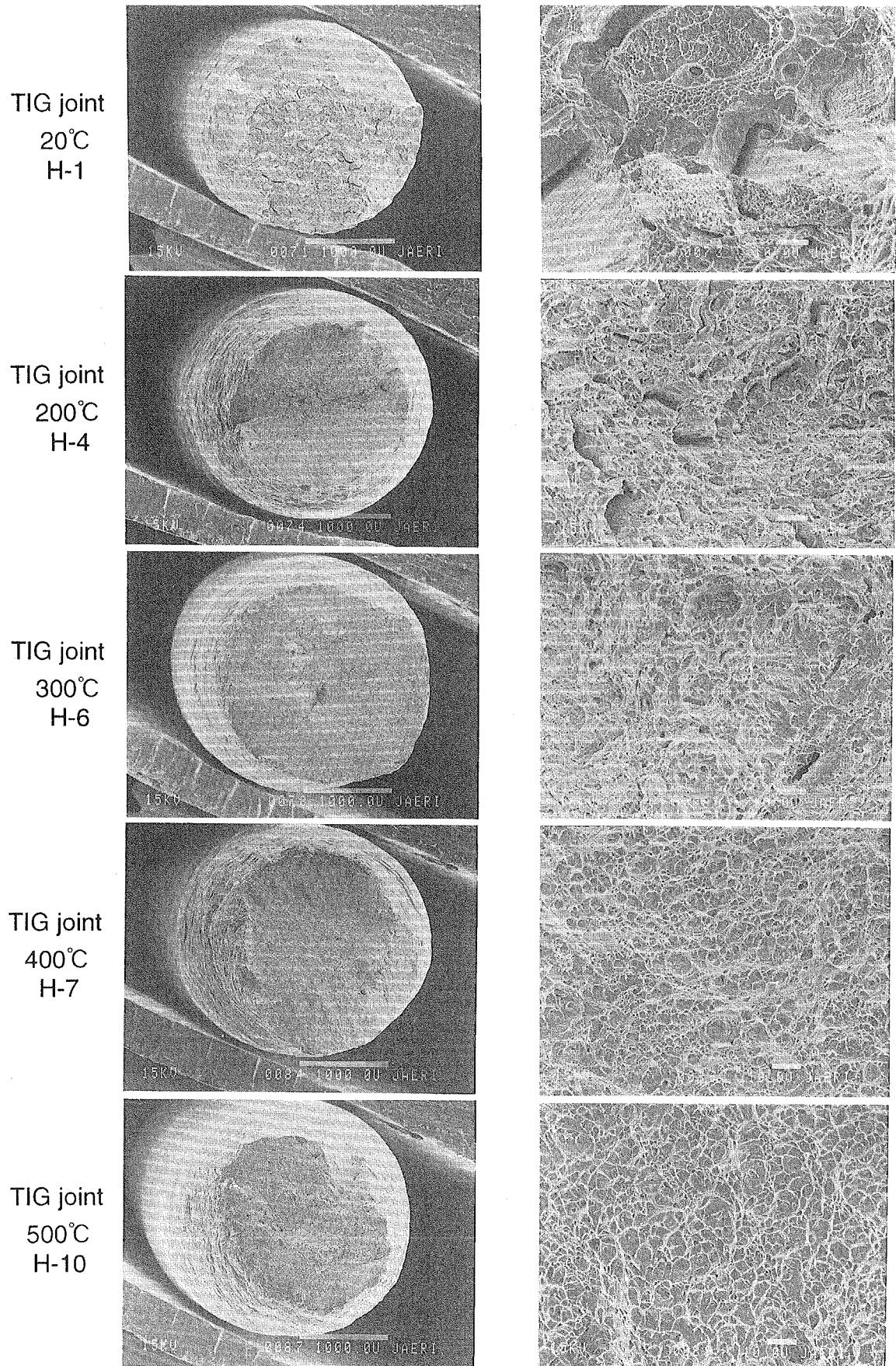
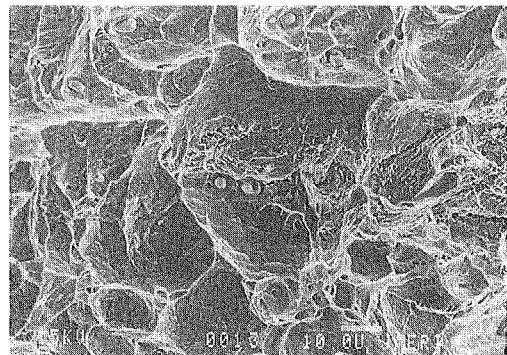
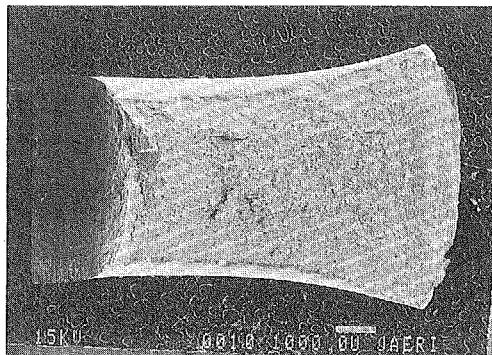


Fig.4-5 SEM photograph of fracture surface after tensile tests (TIG welded joint).

Base  
M1



TIG  
HAZ  
H2

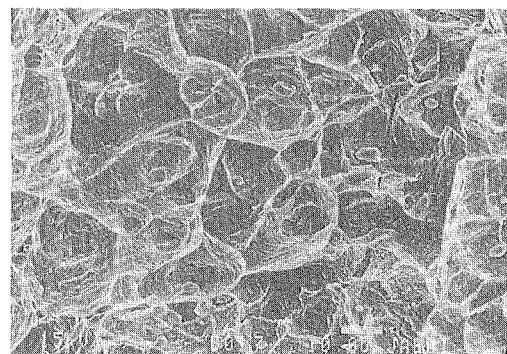
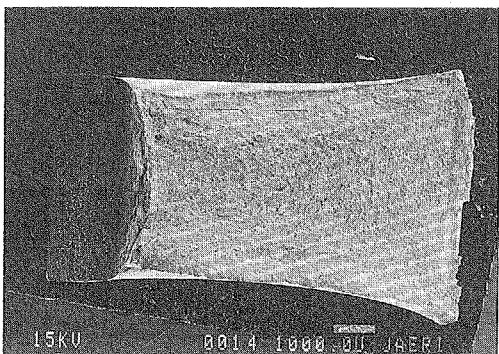


Fig.4-6 SEM photograph of fracture surface after charpy impact tests (TIG welded joint).

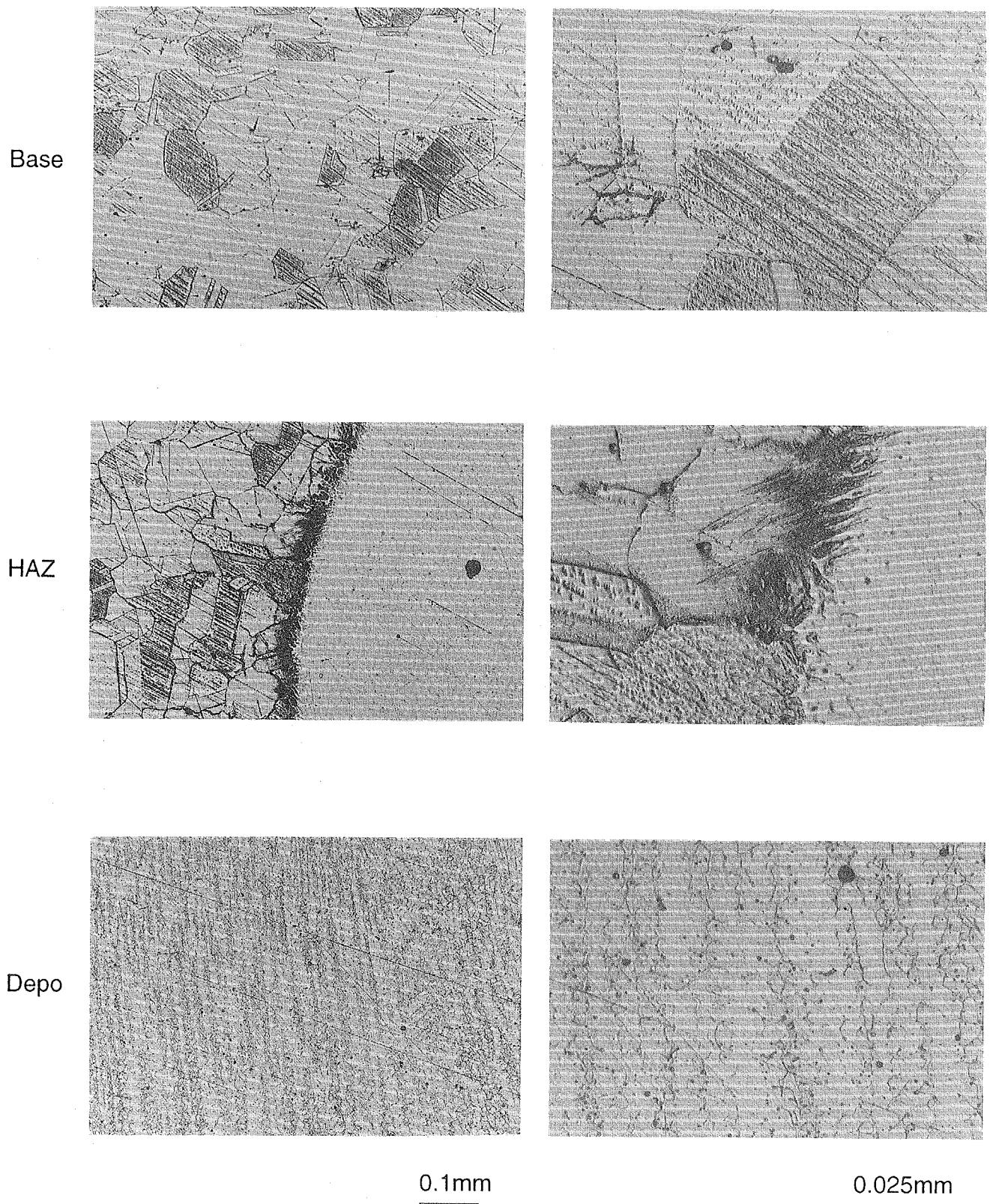


Fig. 4-7 Metallographic observation of TIG+MAG welded joint..

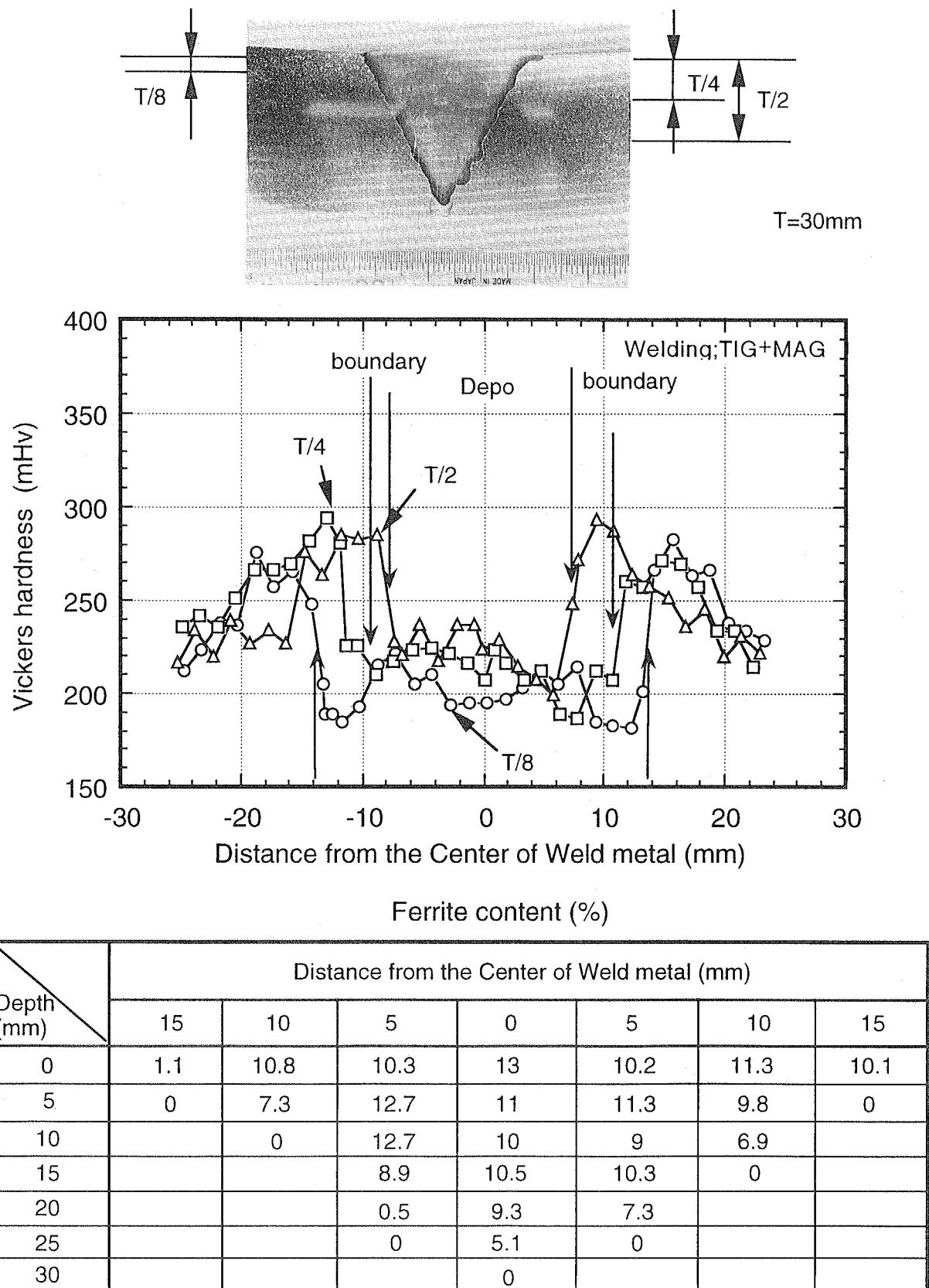
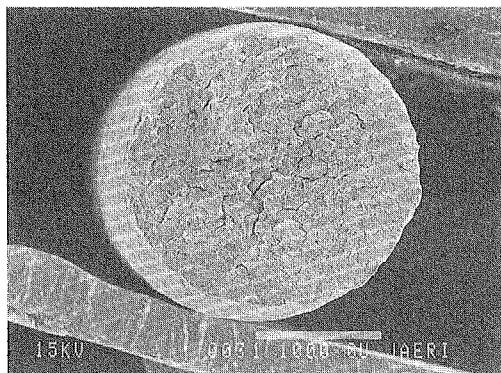
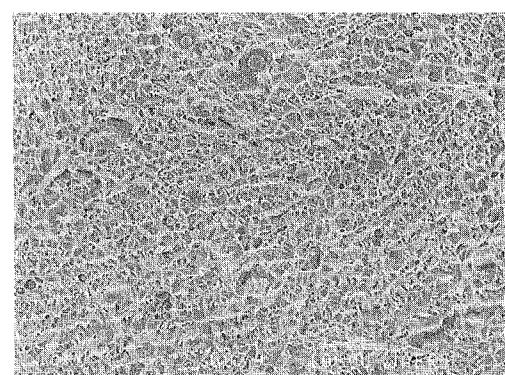
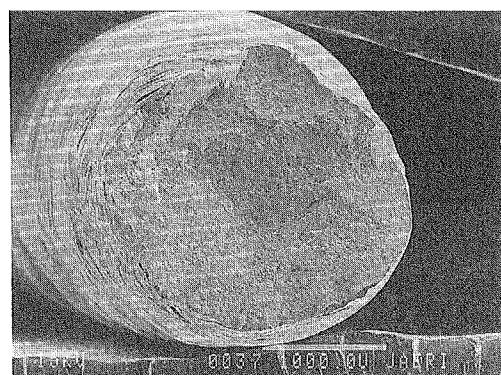


Fig. 4-8 Results of hardness tests and ferrite content measurement of TIG+MAG welded joint..

Base  
20°C  
TB-2



TIG+MAG  
Joint  
TJ2



TIG+MAG  
Depo  
TD1

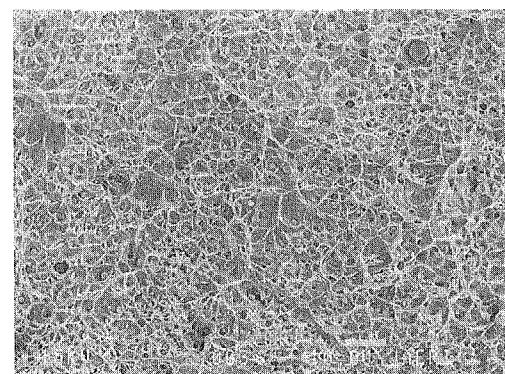
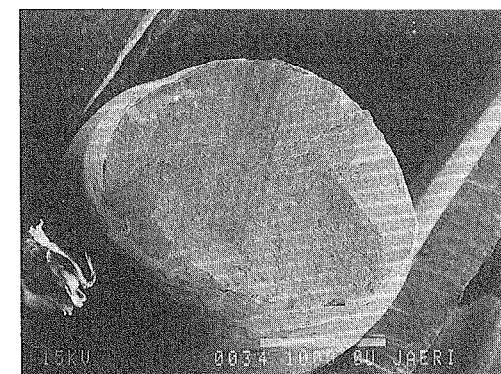
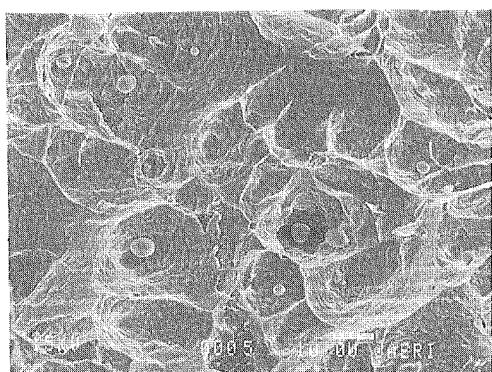
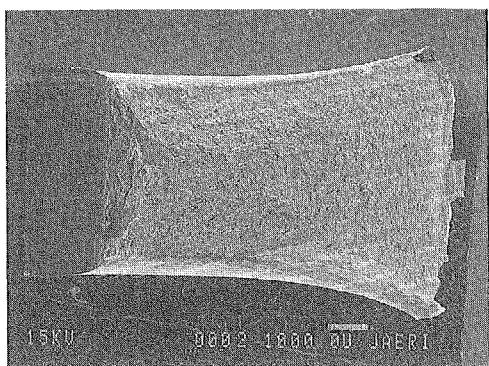
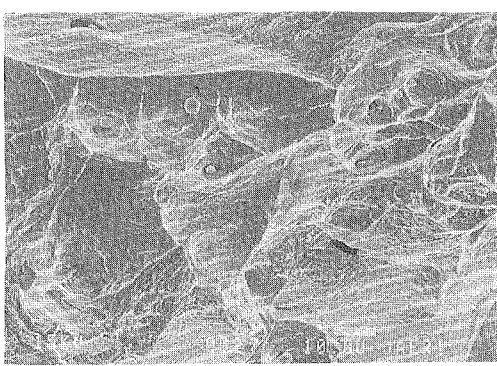
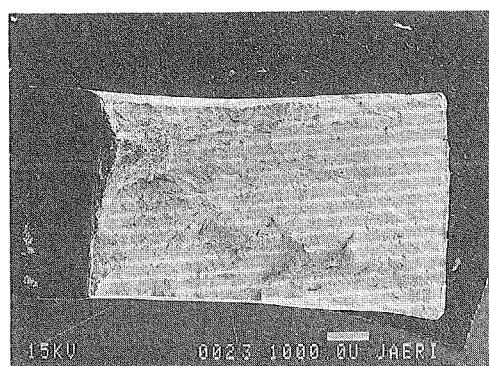


Fig.4-9. SEM photograph of fracture surface after tensile tests (TIG+MAG welding).

Base  
IB2



TIG+MAG  
HAZ  
IJ2



TIG+MAG  
Depo  
ID1

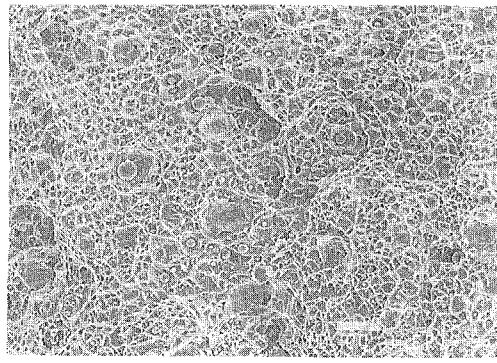
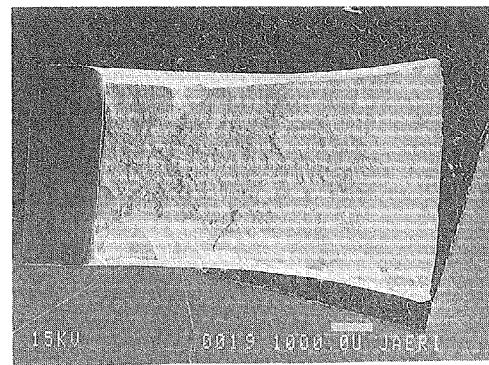


Fig.4-10 SEM photograph of fracture surface after charpy impact tests(TIG+MAG welding).

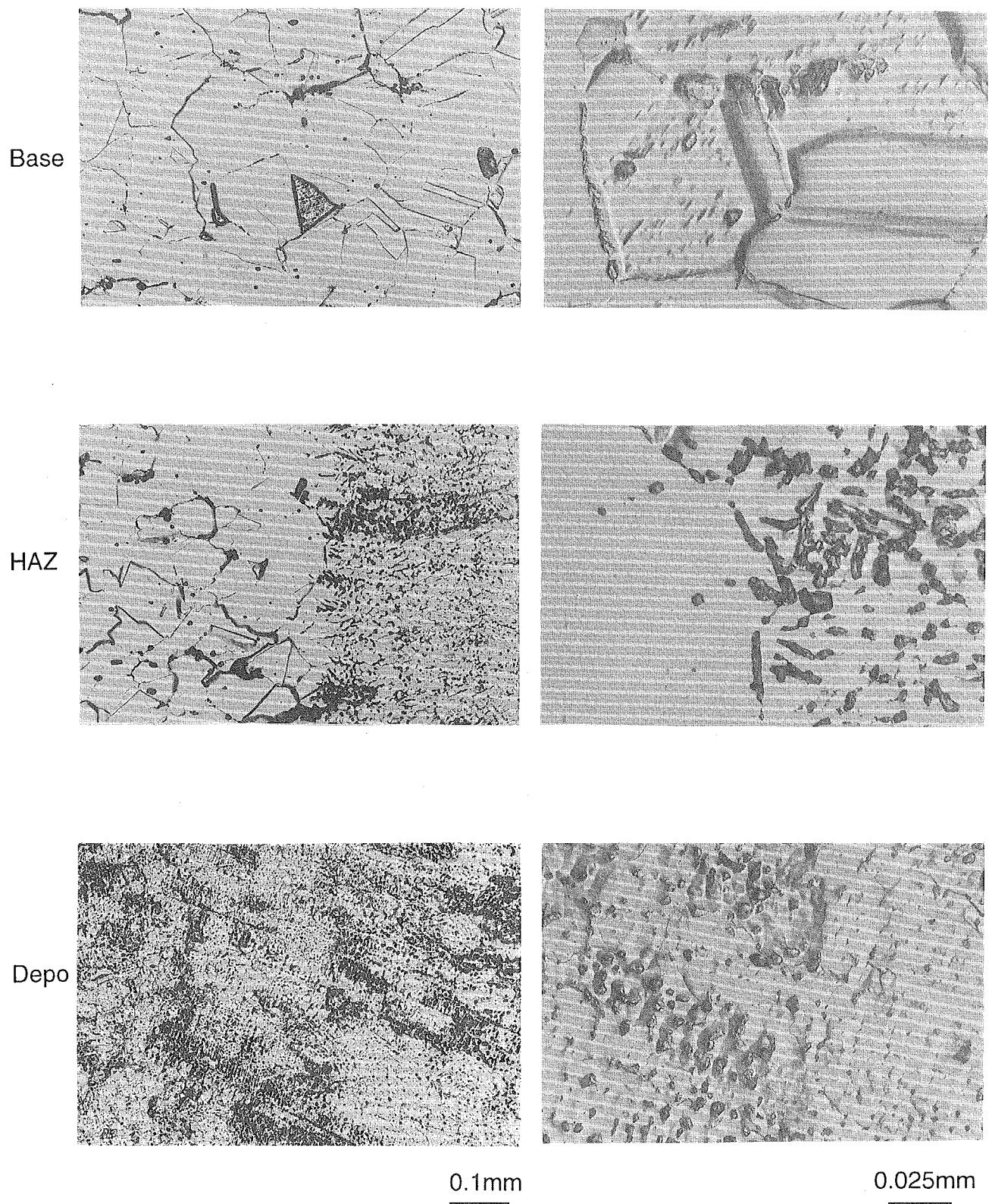


Fig. 4-11 Metallographic observation of EB welded joint..

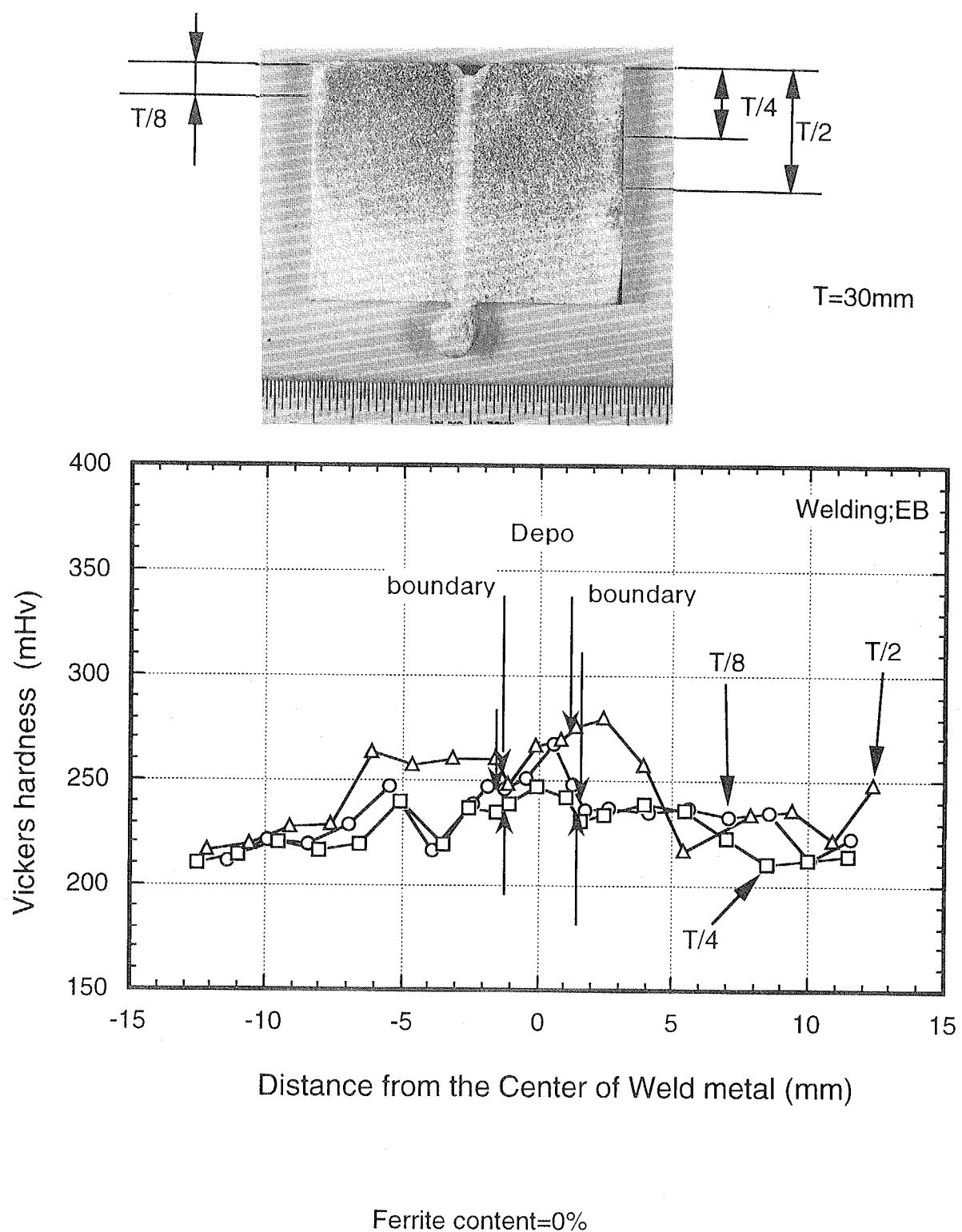
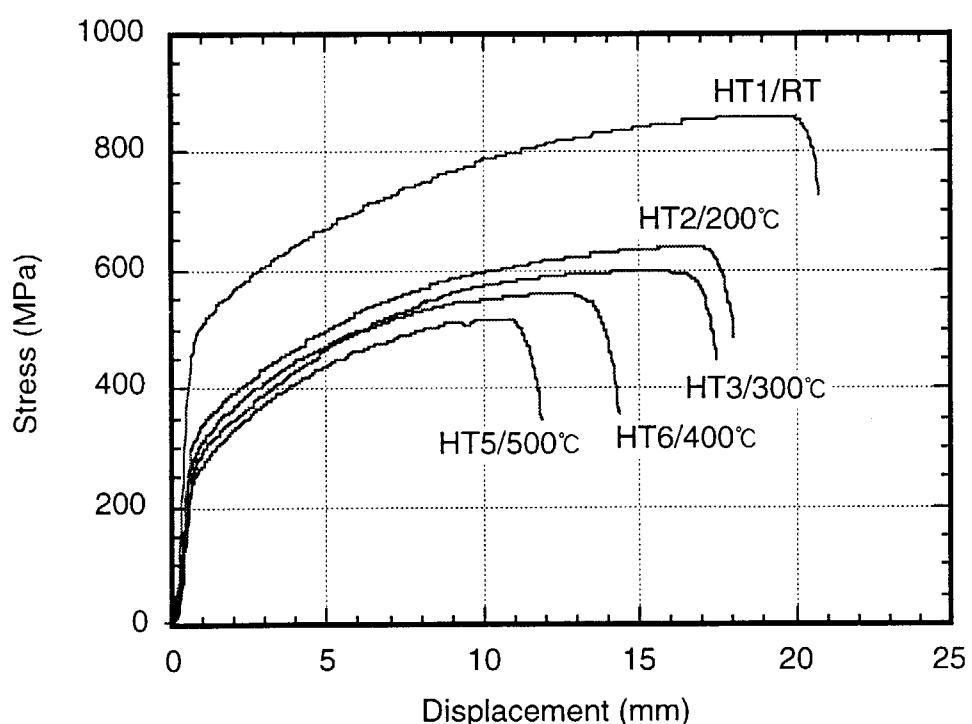
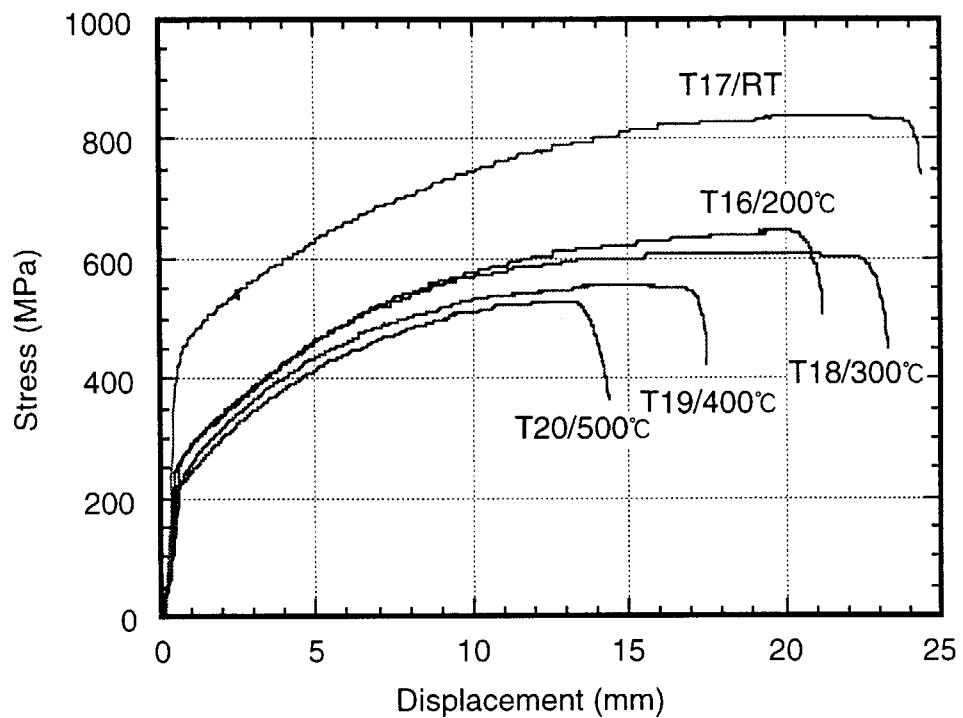
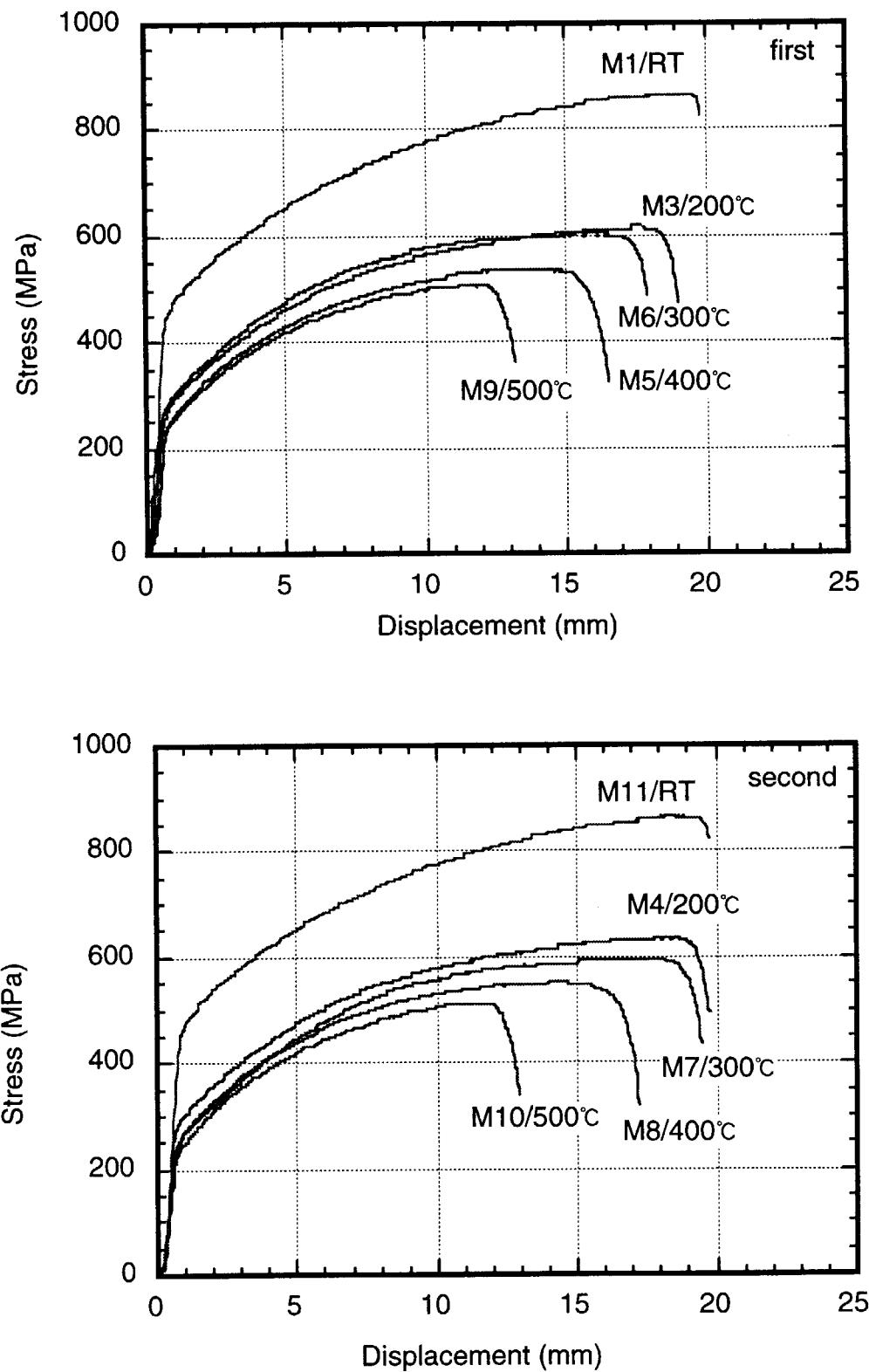


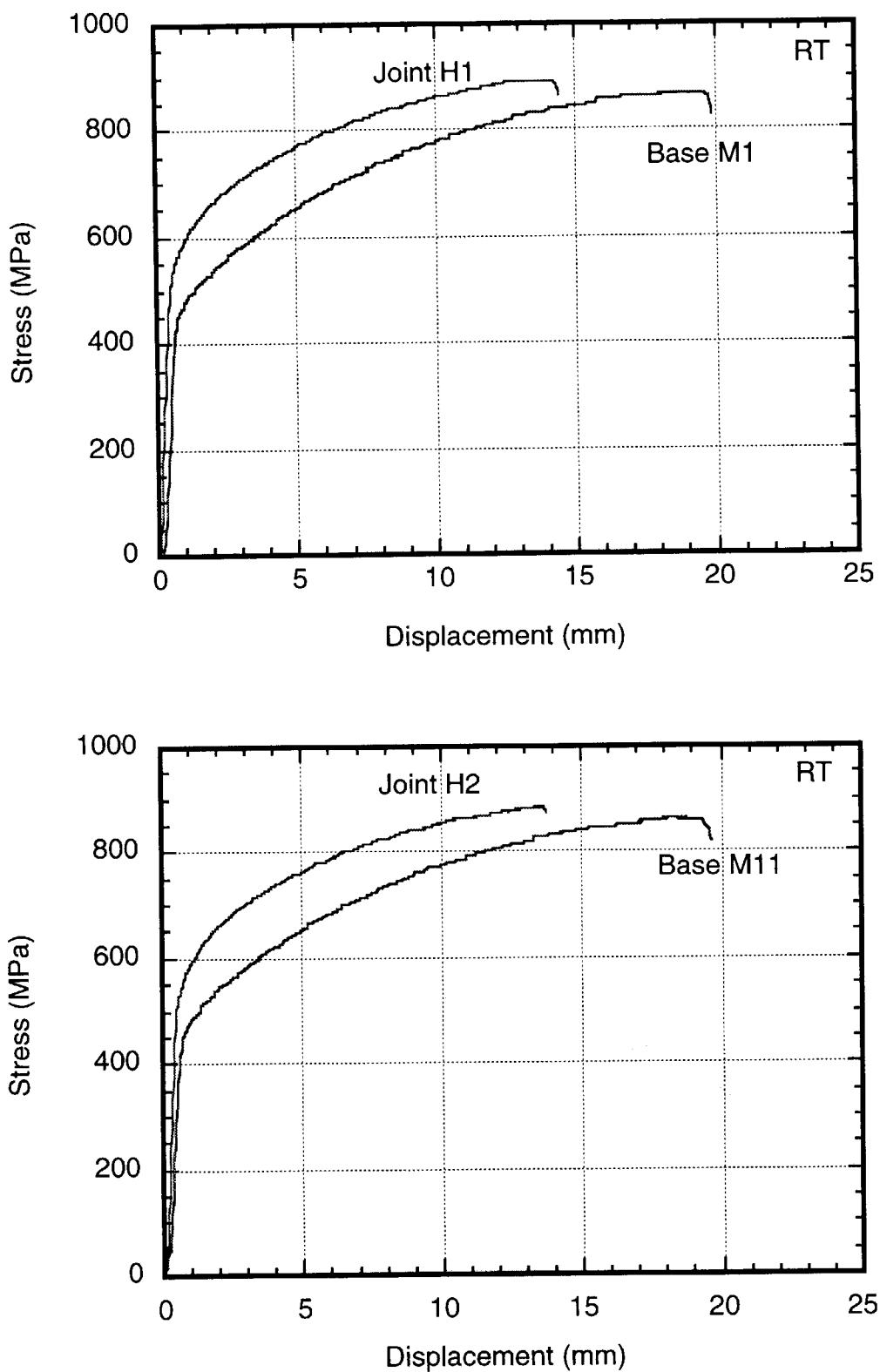
Fig. 4-12 Results of hardness tests and ferrite content measurement of EB welded joint..

## 付録A

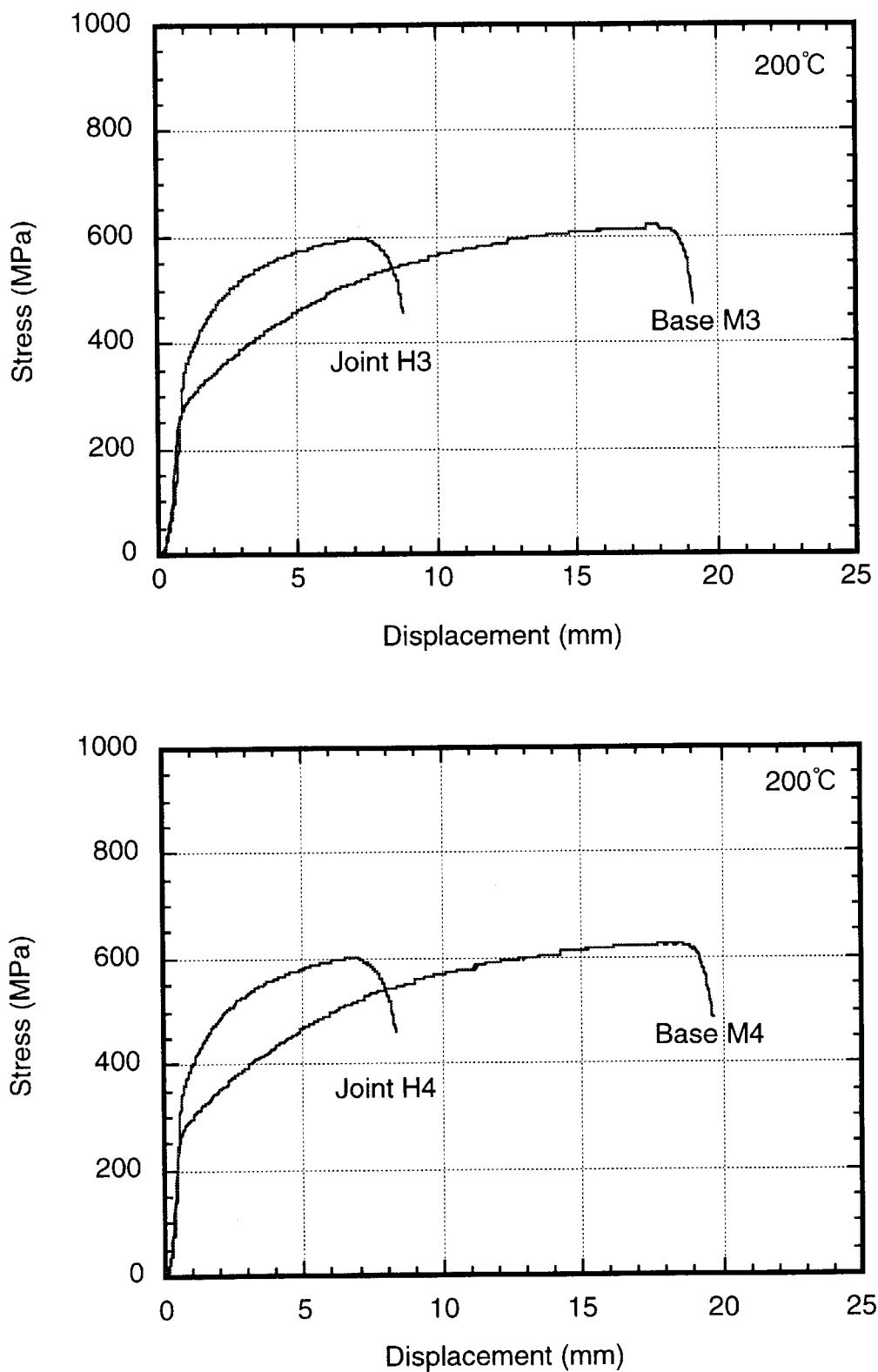




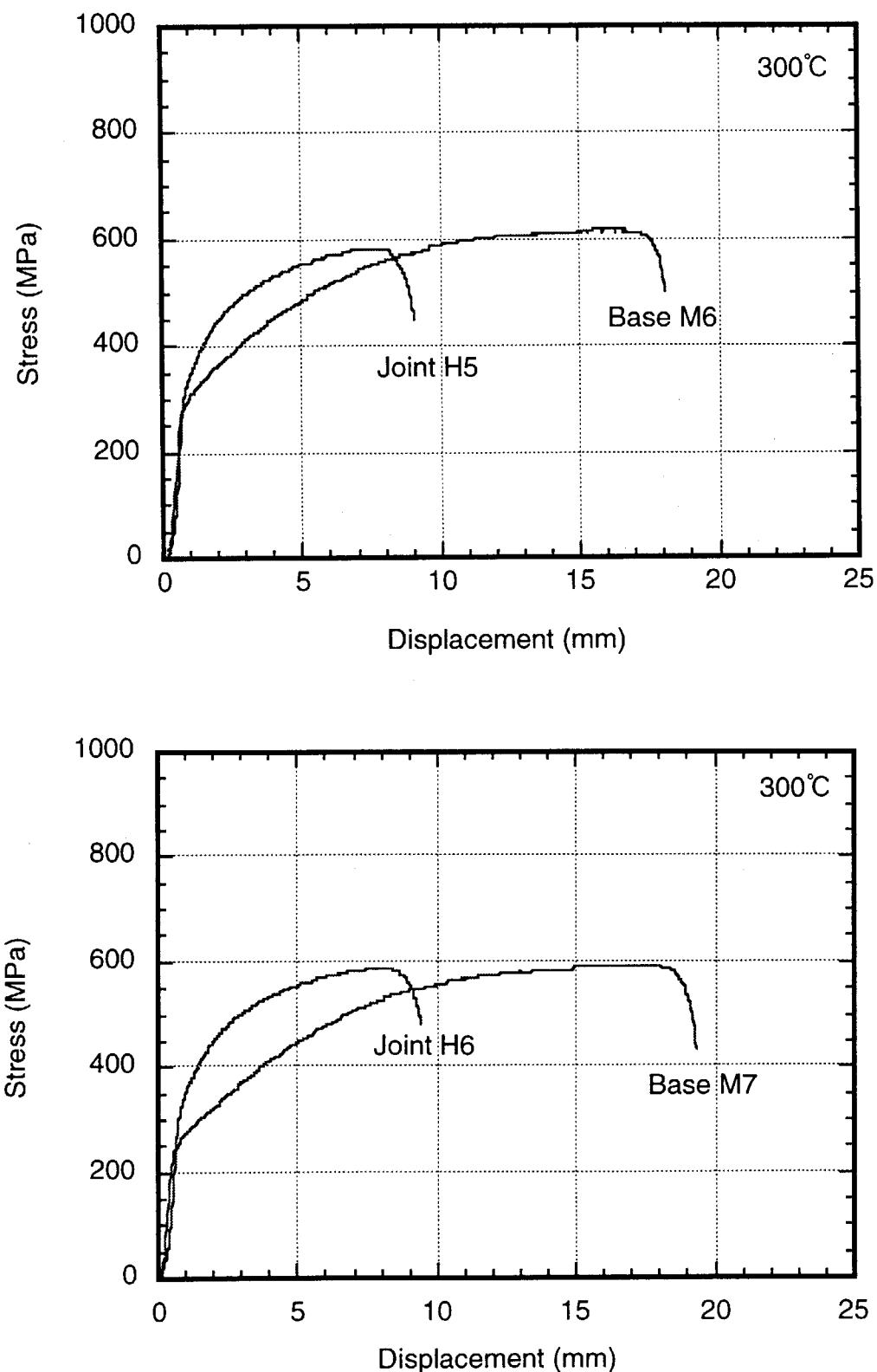
A-3. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 produced in 1998.  
(test temp ; R.T. to 500°C)



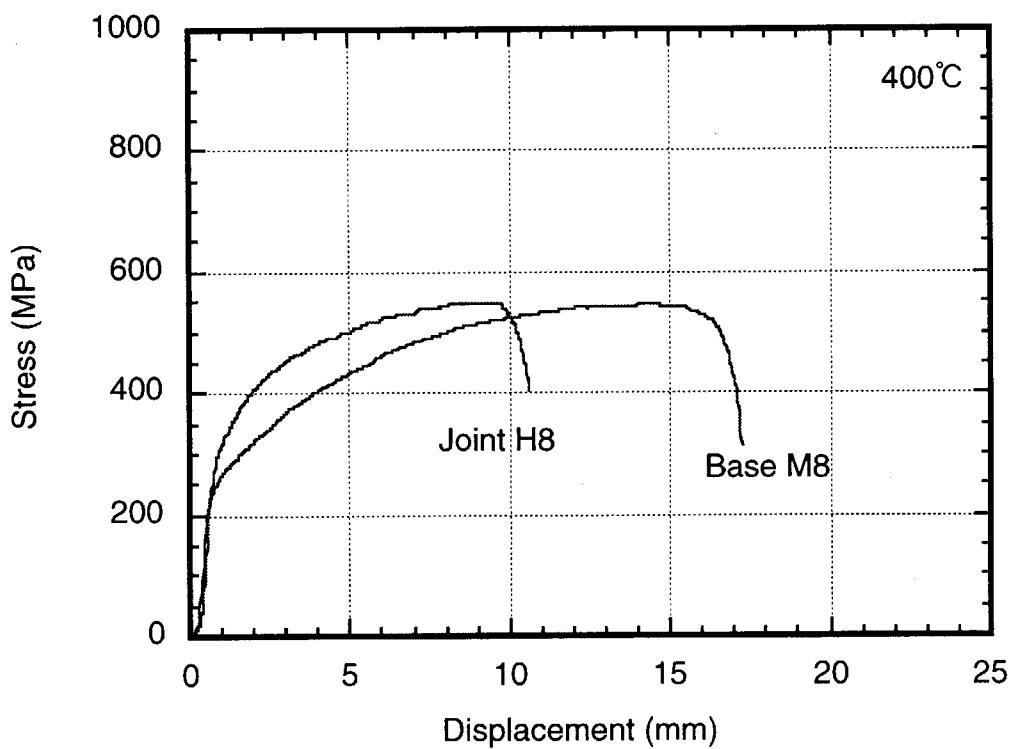
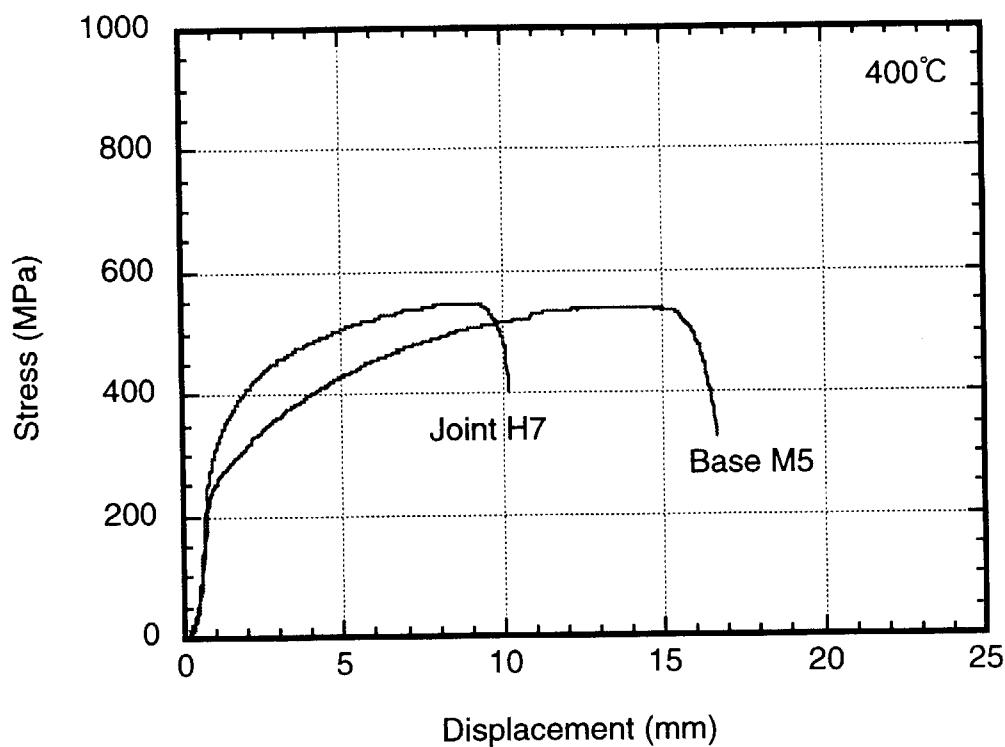
A-4. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 base metal and TIG welded joint.  
(test temp ; R.T.)



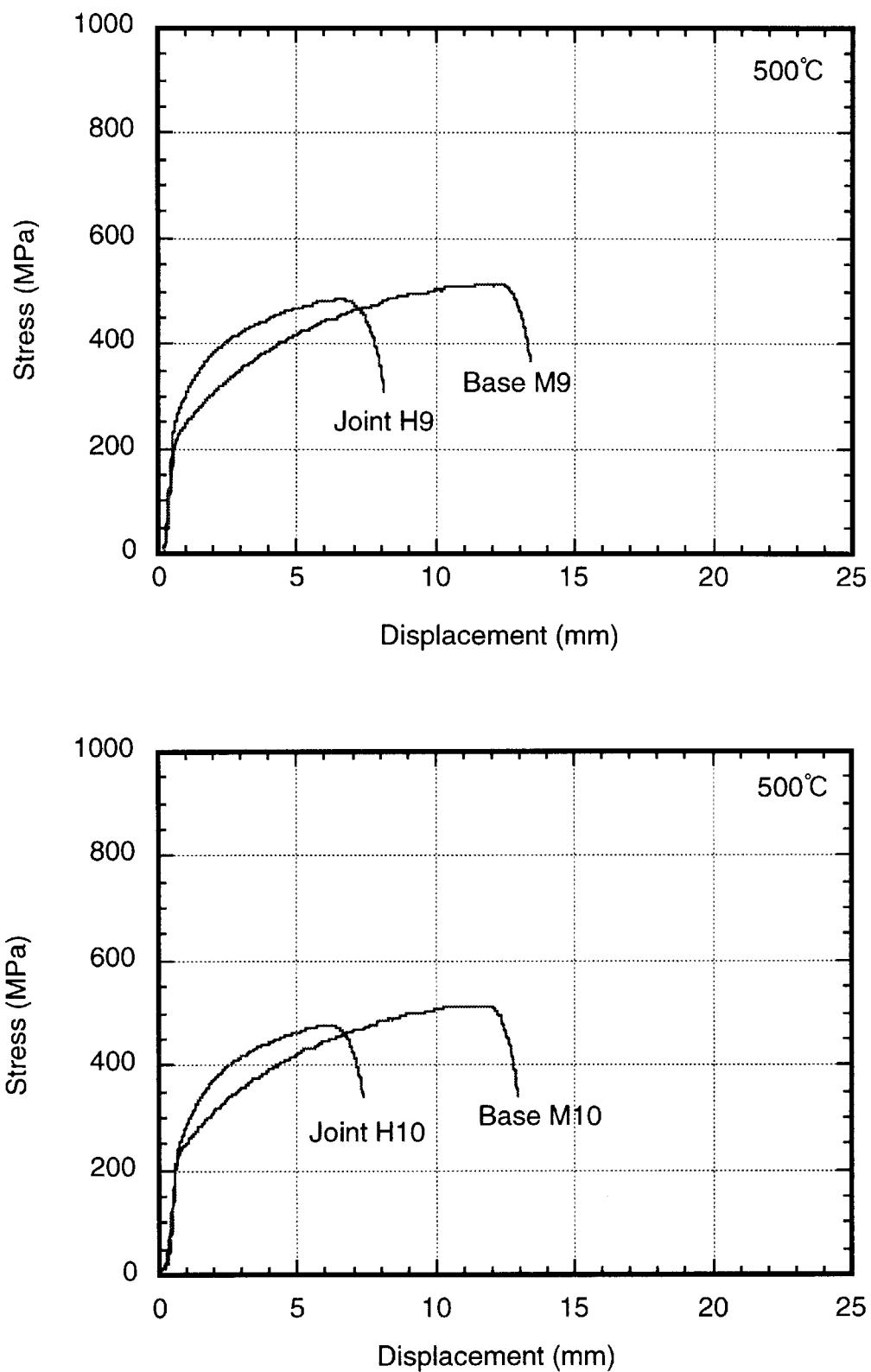
A-5. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 base metal and TIG welded joint  
(test temp ; 200°C) .



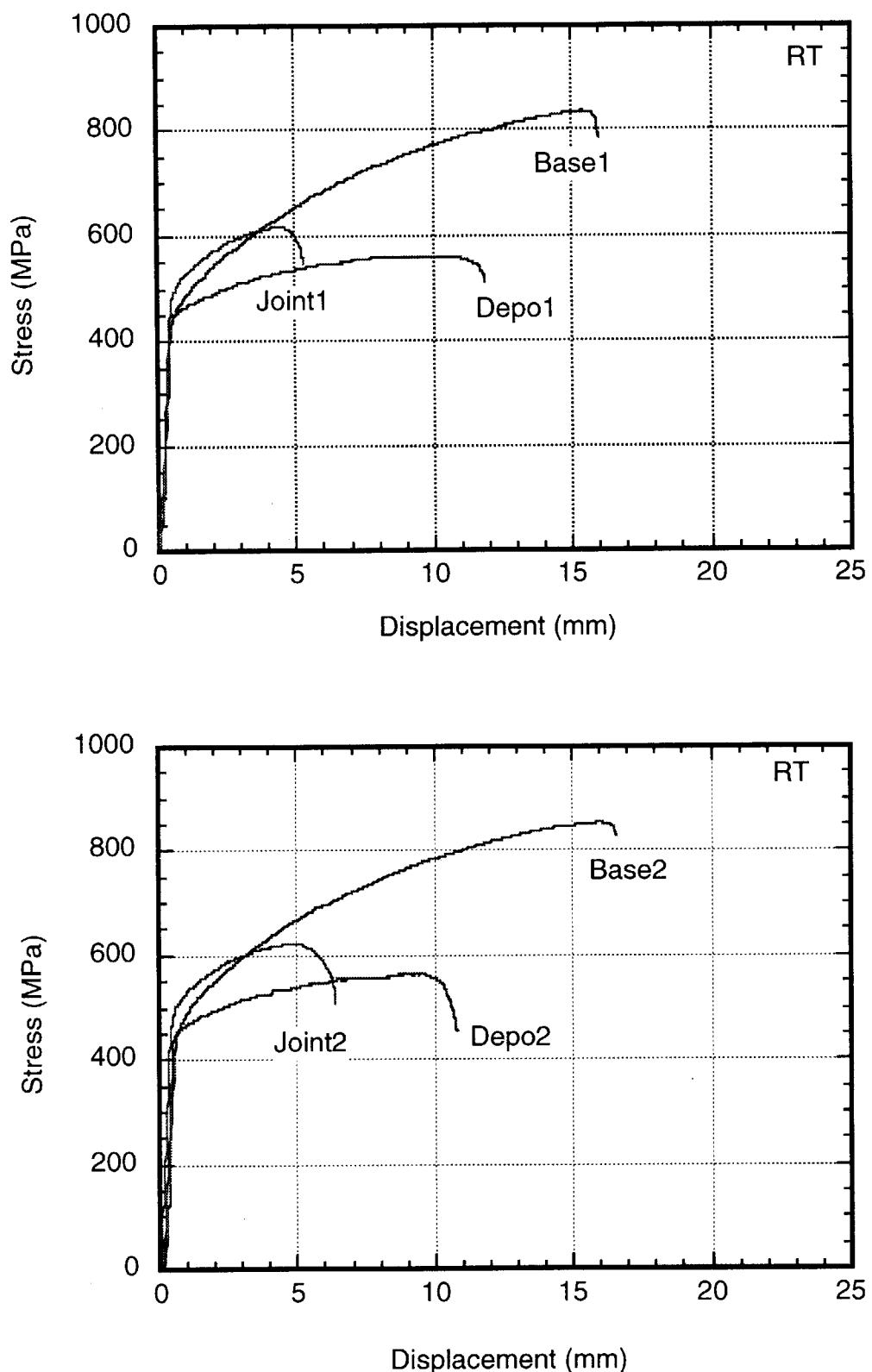
A-6. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 base metal and TIG welded joint (test temp ; 300°C) .



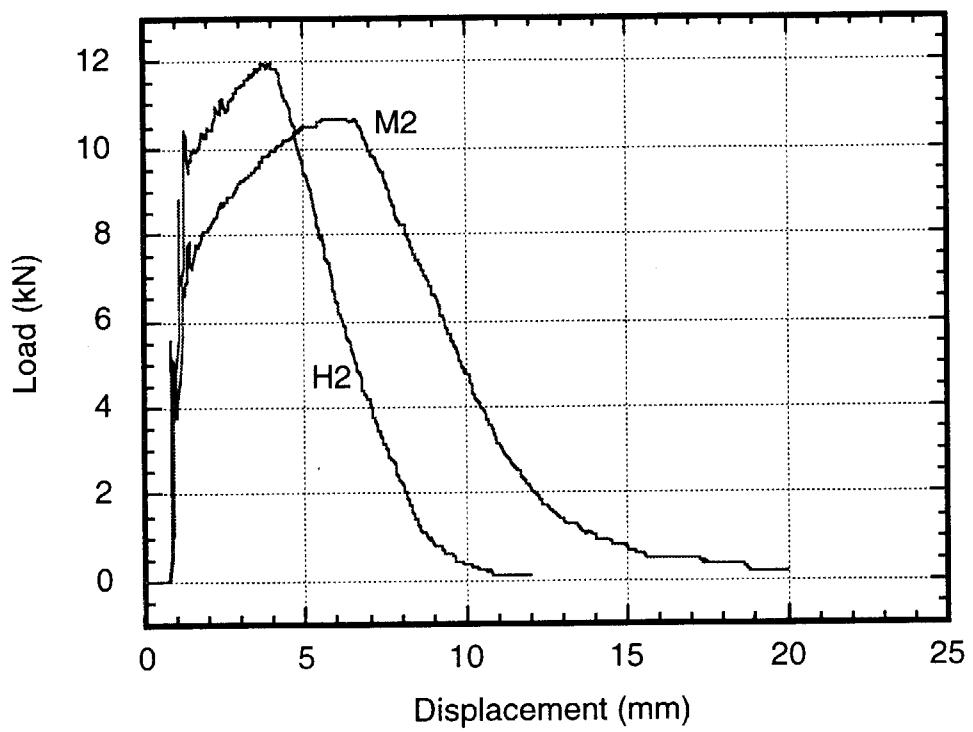
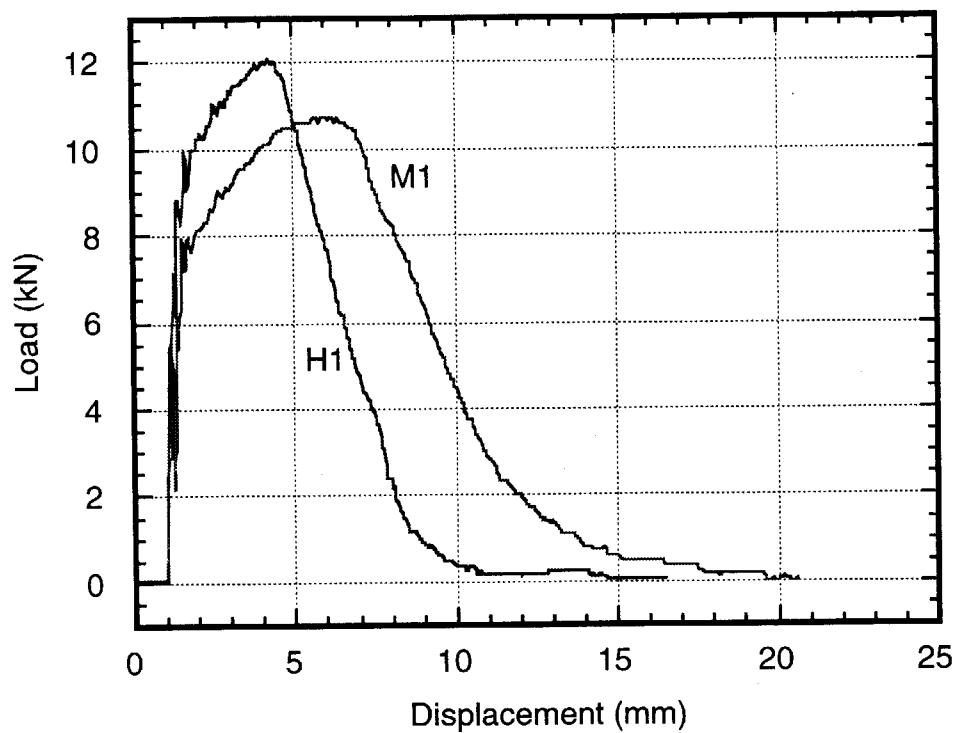
A-7. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 base metal and TIG welded joint.  
(test temp ; 400°C)



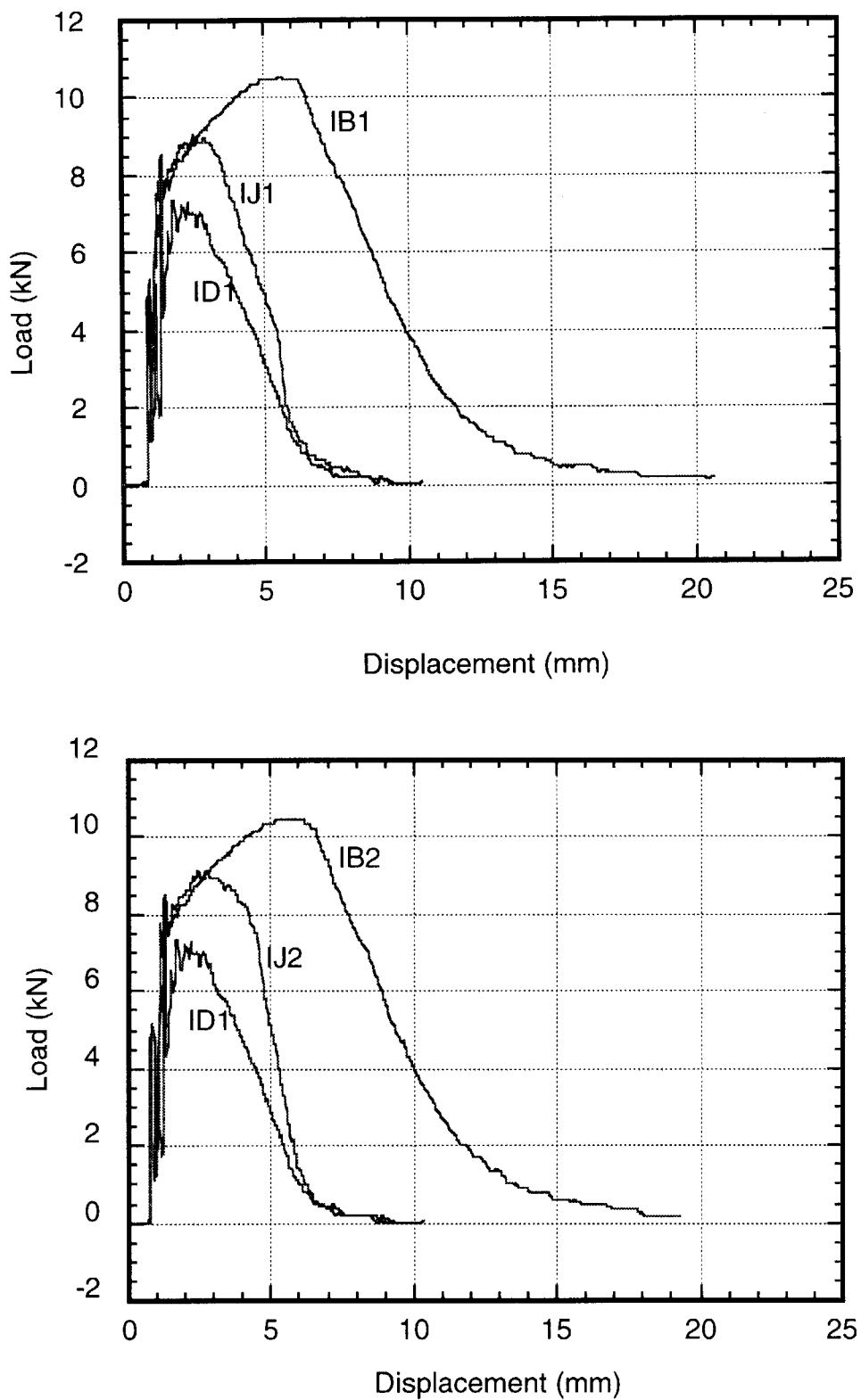
A-8. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 base metal and TIG welded joint (test temp ; 500°C).



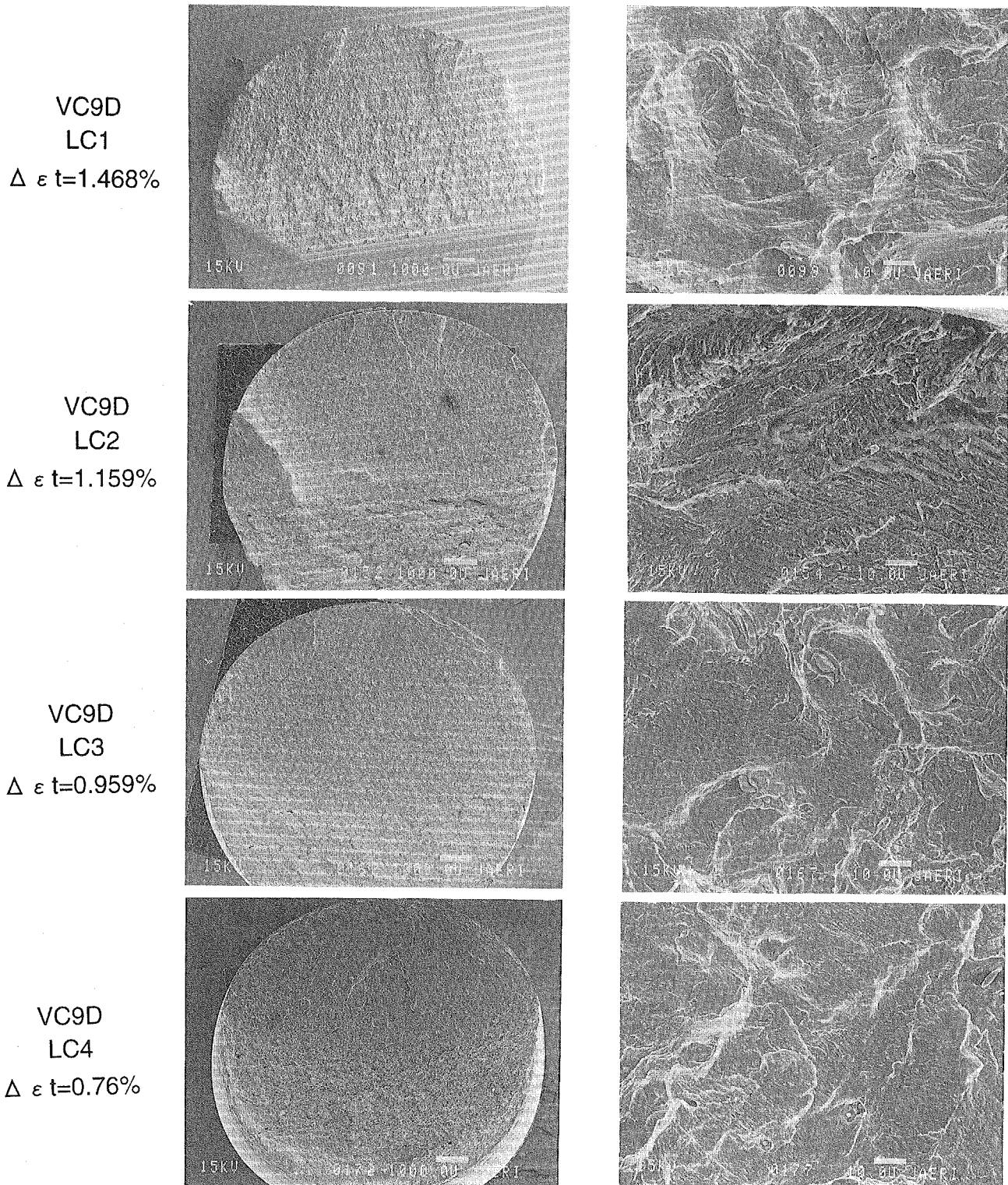
A-9. Stress-displacement curve of tensile test of VC9 base metal and TIG+MAG welded joint. (test temp ; R.T.)



B-1. Load-displacement curve of charpy impact test of VC9 base metal and TIG welded joint. (test temp. R.T.)

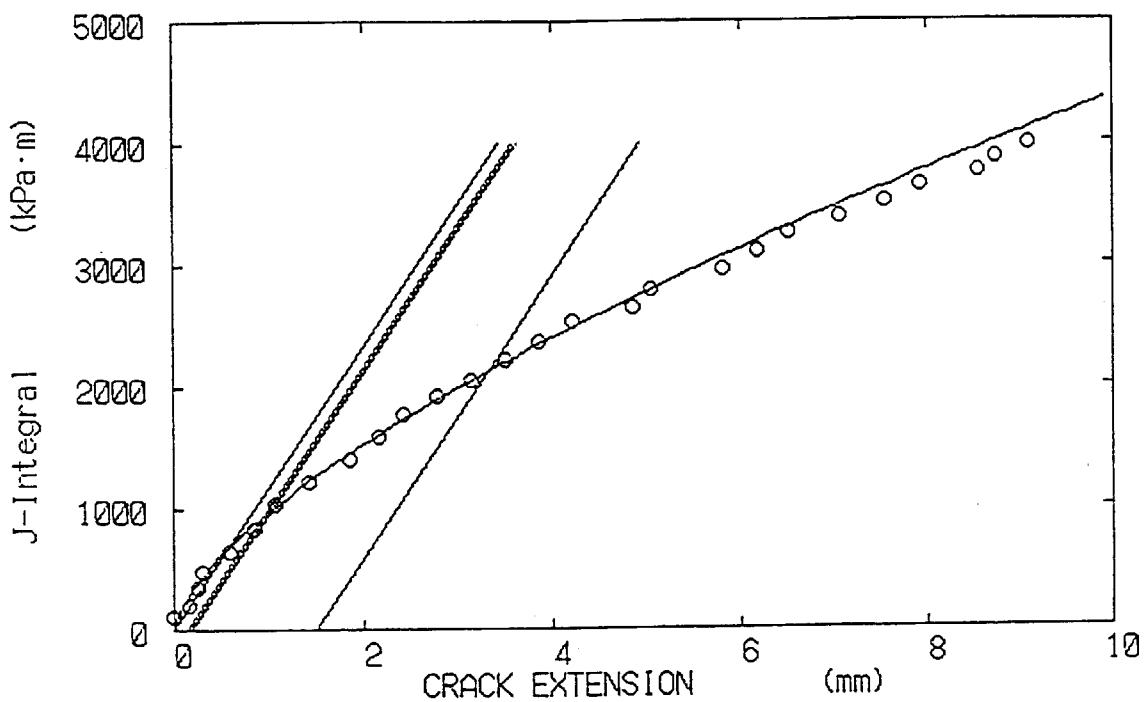


B-2. Load-displacement curve of charpy impact test of VC9 base metal and TIG+MAG welded joint. (test temp. R.T.)

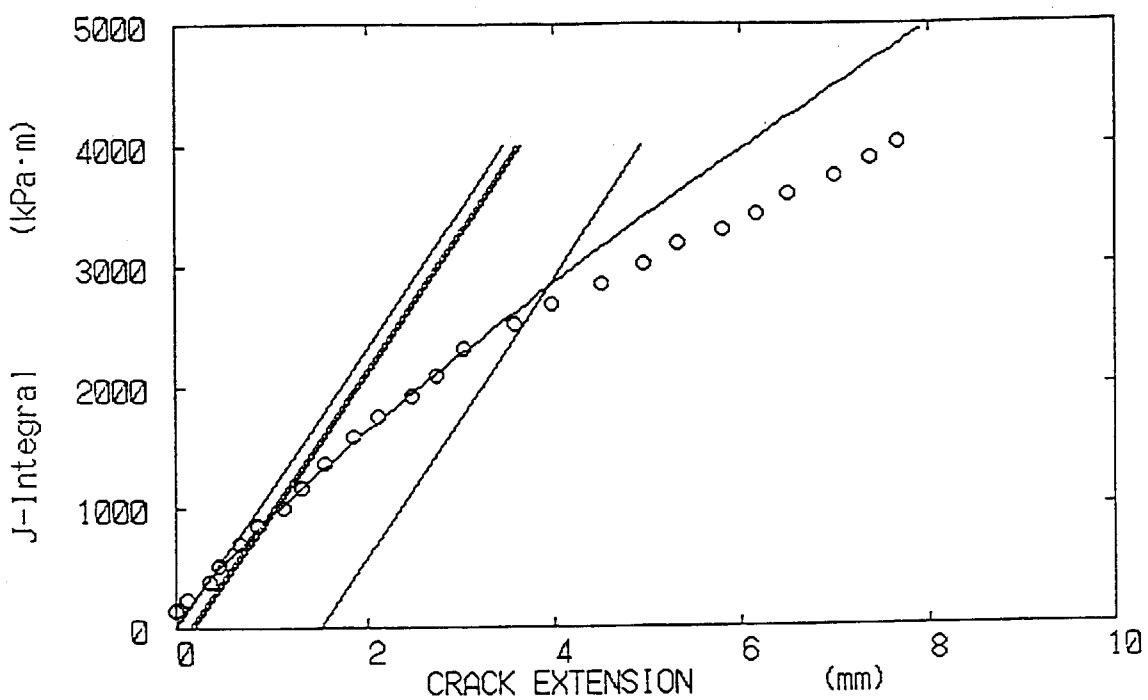


C-1. SEM photograph of fracture surface after low cycle fatigue test. (base metal)

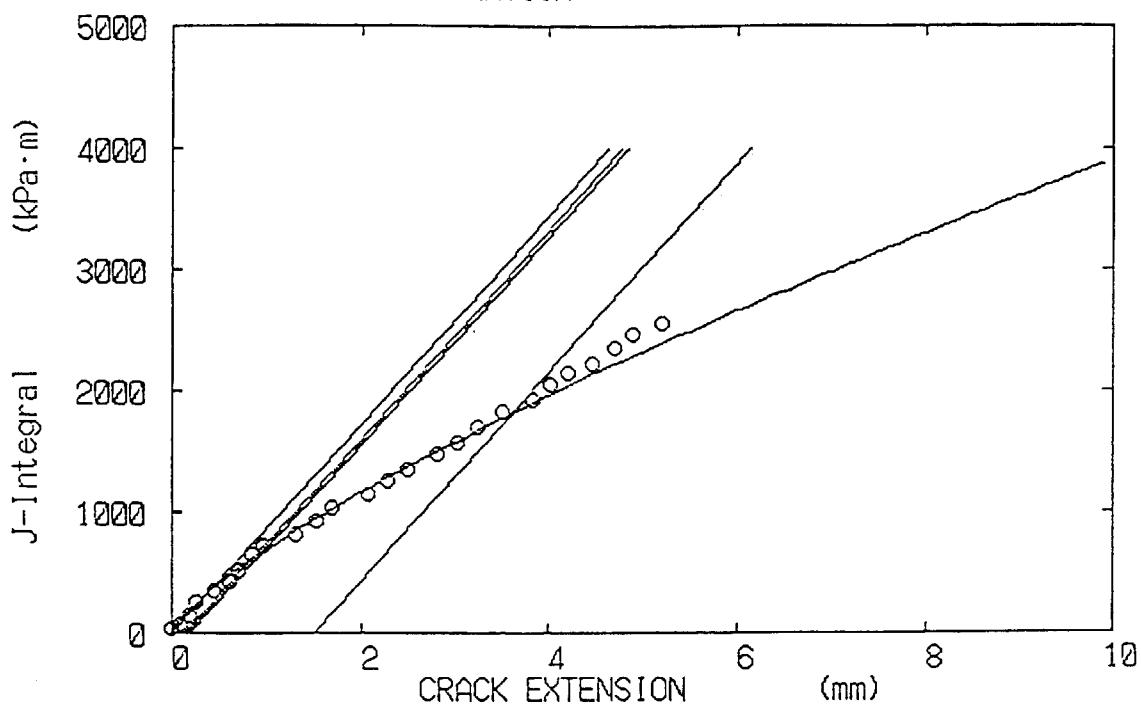
UC9D1 FT1

FILE NAME : 9D1FT1  
JQ = 999.07J -  $\Delta a$  RELATION

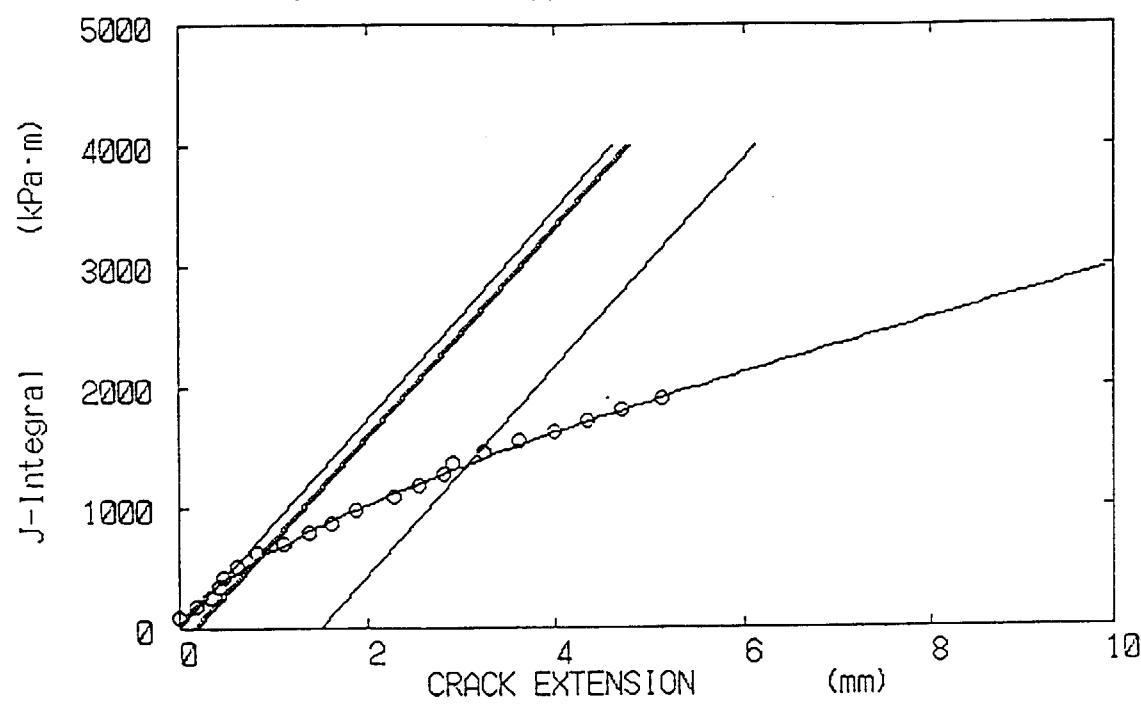
UC9D2 FT4

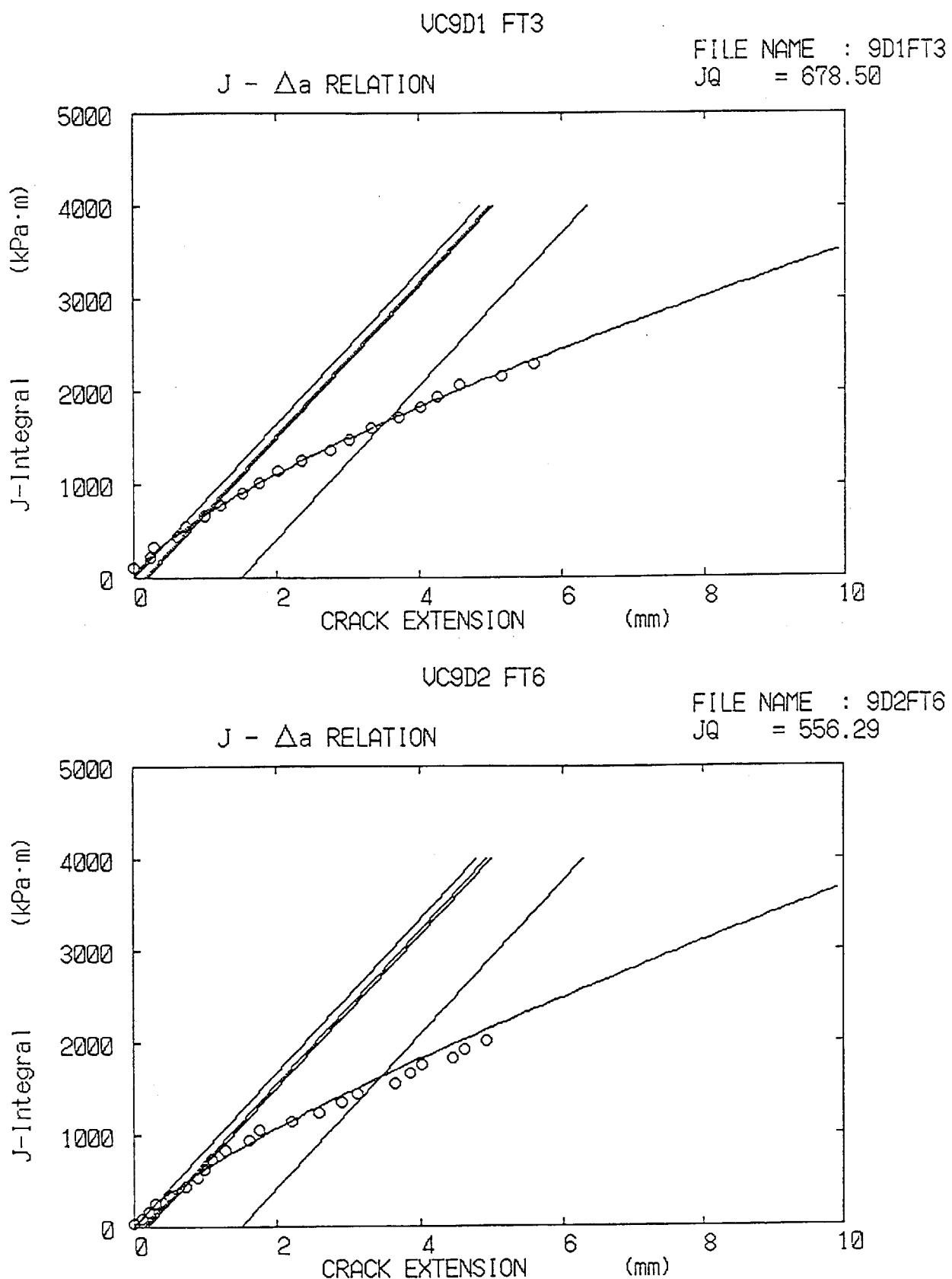
FILE NAME : 9D2FT4  
JQ = 931.37J -  $\Delta a$  RELATIONC-2. J- $\Delta a$  curve of fracture toughness test (test temp ; R.T.).

UC9D1 FT2

FILE NAME : 9D1FT2  
JQ = 671.01J -  $\Delta a$  RELATION

UC9D2 FT5

FILE NAME : 9D2FT5  
JQ = 581.56J -  $\Delta a$  RELATIONC-3. J- $\Delta a$  curve of fracture toughness test (test temp ; 200°C).

C-4. J- $\Delta a$  curve of fracture toughness test (test temp ; 300°C).

This is a blank page.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
吸収線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリエー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

### 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>		
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>		
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仮馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
				1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
				1	100
		2.58 × 10 <sup>-4</sup>		1	1

(86年12月26日現在)

低放射化Mn-Cr鋼の特性評価試験(1) —機械的特性および溶接性—