

JAERI-Research  
97-009



HTTR実機用ハステロイXRの総合特性評価  
— その6 伝熱管母材および溶接継手の引張特性およびクリープ特性 —

1997年2月

渡辺勝利・新藤雅美・中島 甫・小池上 一<sup>\*1</sup>  
樋口 洵<sup>\*1</sup>・仲西恒雄<sup>\*2</sup>・佐平健彰<sup>\*3</sup>・丸七香樹<sup>\*3</sup>  
竹入俊樹<sup>\*3</sup>・斉藤貞一郎<sup>\*4</sup>・高津玉男<sup>\*4</sup>

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（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷(株)

H T T R実機用 Hastelloy XR の総合特性評価

—その6 伝熱管母材及び溶接継手の引張特性及びクリープ特性—

日本原子力研究所東海研究所材料研究部

渡辺 勝利 ・新藤 雅美 ・中島 甫 ・小池上 一\*

樋口 洵\*<sup>1</sup> ・仲西 恒雄\*<sup>2</sup> ・佐平 健彰\*<sup>3</sup> ・丸七 香樹\*<sup>3</sup>

竹入 俊樹\*<sup>3</sup> ・斉藤貞一郎\*<sup>4</sup> ・高津 玉男\*<sup>4</sup>

(1997年1月17日受理)

H T T R実機用 Hastelloy XR 伝熱管材および実機用溶加材を用いて、伝熱管母材および溶接継手の引張特性およびクリープ特性を検討し、次のような結果を得た。引張特性に関しては、時効後の室温における強度変化は母材および溶接継手材とともに比較的少なかったが、著しい延性低下が両者ともに観測された。時効後の高温における強度変化は母材および溶接継手材ともに比較的少なく、また延性については試験温度が900℃の場合には変化が殆ど認められないのに対して試験温度が950℃の場合には両者ともに破断伸びの増大が観測された。一方、クリープ特性に関しては、母材と溶接継手材について、900℃および950℃のいずれの場合にも、クリープ破断強度に関する差異は比較的少なかった。クリープ破断延性に関しては、クリープ破断時間が長い程、破断伸びが減少する傾向にあり、溶接継手材の方が母材よりも低下する傾向が見られた。他方、板材との特性比較に関しては、板材と伝熱管材の時効後の引張特性について見ると、いずれの試験温度においても強度の差異は比較的少なかった。これに対して、破断伸びに関しては、室温では板材と伝熱管材との間で差異は少なかったが、高温においては特に溶接継手材の場合にその差異が認められ、板材に較べて伝熱管材の方が高い延性を示した。板材と伝熱管材のクリープ特性について見ると、母材および溶接継手材ともに、管材は低応力・長時間側で板材よりもクリープ破断時間が若干低下する傾向が見られたが、管材のクリープ破断時間は、Hastelloy XR母材のマスターカーブと同等以上であり、設計破断応力強さ  $[S_R]$  よりも十分に長いことから、実用上は特に問題ないと判断される。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ 企画室

\*1 石川島播磨重工業(株)

\*2 富士電機総合研究所

\*3 三菱マテリアル(株)

\*4 日本ウェルディング・ロッド(株)

Evaluation on Materials Performance of Hastelloy Alloy XR for HTTR Uses-6  
(Tensile and Creep Properties of Heat Exchanger Tube Base Materials  
and its Welded-Joints)

Katsutoshi WATANABE, Masami SHINDO<sup>†</sup>, Hajime NAKAJIMA, Hajime KOIKEGAMI<sup>\*1</sup>,  
Makoto HIGUCHI<sup>\*1</sup>, Tsuneo NAKANISHI<sup>\*2</sup>, Kensyo SAHIRA<sup>\*3</sup>, Kouki MARUSHICHI<sup>\*3</sup>,  
Toshiki TAKEIRI<sup>\*3</sup>, Teiichiro SAITOH<sup>\*4</sup> and Tamao TAKATSU<sup>\*4</sup>

Department of Materials Science and Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 17, 1997)

Tensile and creep properties of heat exchanger tube base materials and its welded-joints were investigated as a series of evaluation tests on Hastelloy Alloy XR heat exchanger tube and filler metal for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) components. As for tensile properties after thermal aging of base materials and welded joints, ductility was remarkably reduced at room temperature while it was raised at 950°C. On creep properties, the difference between base materials and welded joints in creep rupture strength was relatively small. Creep rupture elongation tended to decrease with increasing rupture time, and rupture elongation of welded joint had a tendency to be lower than that of base material. On the other hand, a comparison of plate with tube on high temperature tensile ductility after thermal aging was found to be higher in tube than in plate while its difference was slight at room temperature. As for creep properties, base materials and welded joints of tube had a tendency to be slightly shorter in rupture time at lower stress and long terms

---

† Office of Planning

\*1 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

\*2 Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

\*3 Mitsubishi Materials Corporation

\*4 Nippon Welding Rod Corporation

than those of plate. However, it is concluded that this is not problematic in practical uses from the fact that the rupture time in tube is comparable or greater than that of Hastelloy Alloy XR master curve and that it is much longer than that of design creep rupture strength [ $S_R$ ].

Keywords: Tensile Properties, Creep Properties, Heat Exchanger Tube, Base Material, Welded-Joint, Hastelloy Alloy XR, HTR, Plate

## 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. 緒 言 .....                   | 1  |
| 2. 供試材料 .....                  | 2  |
| 2.1 管 材 .....                  | 2  |
| 2.2 溶加材 .....                  | 2  |
| 3. 溶接施工 .....                  | 3  |
| 4. 評価結果 .....                  | 4  |
| 4.1 引張特性 .....                 | 4  |
| 4.2 クリープ特性 .....               | 5  |
| 4.3 板材との引張特性およびクリープ特性の比較 ..... | 7  |
| 5. 結 言 .....                   | 8  |
| 5.1 引張特性 .....                 | 8  |
| 5.2 クリープ特性 .....               | 8  |
| 5.3 板材との引張特性およびクリープ特性の比較 ..... | 9  |
| 謝 辞 .....                      | 9  |
| 参考文献 .....                     | 10 |
| 付 録 引張試験及びクリープ試験データ集 .....     | 61 |

Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction .....   | 1  |
| 2. Materials .....  | 2  |
| 2.1 Tube .....  | 2  |
| 2.2 Filler Metal .....  | 2  |
| 3. Welding Procedures .....                                     | 3  |
| 4. Results .....  | 4  |
| 4.1 Tensile Properties .....                                    | 4  |
| 4.2 Creep Properties .....                                      | 5  |
| 4.3 Comparison of Tensile and Creep Properties with Plate ..... | 7  |
| 5. Conclusions .....  | 8  |
| 5.1 Tensile Properties .....                                    | 8  |
| 5.2 Creep Properties .....                                      | 8  |
| 5.3 Comparison of Tensile and Creep Properties with Plate ..... | 9  |
| Acknowledgements .....  | 9  |
| References .....  | 10 |
| Appendix Tensile and Creep Test Data .....                      | 61 |

# 1. 緒言

高温工学試験研究炉(HTR: High Temperature Engineering Test Reactor)は高温ガス炉技術の基盤の確立と高度化並びに高温照射環境などを利用した先端的基礎研究を実施するための研究施設として、平成9年後半の初臨界を目指して、日本原子力研究所大洗研究所に建設が進められている。平成2年11月に原子炉設置許可取得後、建設に着手し、目下単体機器の機能試験を進め、さらには系統別ないしは総合的な機能試験がなされる計画である<sup>(1)</sup>。

ハステロイXRは周知の如くHTRの中間熱交換器のための高温部構造材料として開発され、その後の開発研究を通じて特性改良がなされてきた合金である。中間熱交換器は定格運転時850℃、高温試験運転時950℃において用いられる溶接構造物であることから、高ニッケル合金に特有の溶接性および溶接部材の高温強度特性についての解決されねばならない重要な課題があることが従来から指摘されていた<sup>(2)–(4)</sup>。即ち前者については溶接割れ感受性が高いことであり、後者については特にクリープ破断強度が母材のそれに較べて溶接部材で低いことが問題視されていた。このような背景を踏まえてこれまでに一連の開発研究が課題解決のために鋭意進められてきた。

第1期の研究<sup>(5)–(7)</sup>では重回帰分析手法を用いた合金設計により溶加材を試作し、それらの特性評価を通じて、優れた性能を有する溶加材を見出した。

第2期の研究<sup>(8)</sup>では実機への使用条件により近づけるべく薄肉溶接構造物(厚さ15mm程度)を想定した特性評価試験を通じて、開発された溶加材の溶接性および溶接部材の高温強度特性とも極めて良好であることを実証した。しかしながら、この段階において、本溶加材の厚肉溶接構造物に対する適合性の問題が重要な課題として残された。

第3期の研究<sup>(9),(10)</sup>ではこれまでに得られた成果をふまえて、中間熱交換器が厚肉溶接構造物(厚さ60mm程度)であることから、実機の使用条件を考慮し重回帰分析による微量元素量の最適化を行った溶加材の試作および特性評価試験を行った。これらを通じて溶接部材の高温強度特性を損なうことなく厚肉溶接構造物特有の溶接割れ感受性を低減した優れた性能を有する溶加材を開発することが出来た。本溶加材は現在、実機に適用され、HTRの中間熱交換器の製作のために用いられている。

本報はこれらの一連の開発研究を経て得られた厚板溶接構造物への適用可能な溶加材の総合特性評価<sup>(11)–(13)</sup>の一環として、工業規模で作製した実機用伝熱管材および実機用溶加材を用いて、伝熱管母材および溶接継手の引張特性およびクリープ特性に関する検討結果について述べたものである。

ここでは、実用条件近似下での試験を行い、溶接構造物への信頼性評価に資することを目的としている。



## 2. 供試材料

### 2.1 管 材

本評価試験用管材として、HTTRの中間熱交換器用に製造した伝熱管（継目無し管）の一部を用いた。HTTRの中間熱交換器用伝熱管には合計6チャージ溶解したが、その内の1チャージ（G2-547）の一部を本評価試験用管材とした。

Fig. 1にその製造工程を示す。真空誘導溶解（VI）＋エレクトロスラグ再溶解（ESR）の二重溶解で2tonインゴットを溶製し、熱間鍛造、熱間押出、ピルガー延伸、冷間引抜にて所定の寸法（外径31.8mm×肉厚3.5mm）にした後、最終熱処理を施して製造された実機用伝熱管の一部を供試した。

Table 1に管材の化学成分分析結果を示す。同表には、ハステロイXの規格 ASTM B435<sup>(11)</sup>、AMS 5754<sup>(12)</sup>を基にSi量及びMn量をより狭い範囲に、またCo量の下限値を無くし、Al及びTiの各々の含有量の上限值を低く設定したHTTR実機用成分規格<sup>(13)</sup>及び、目標成分範囲を掲げている。レードル分析、熱間鍛造後の中間素材であるビレットのTop部、Bottom部での成分分析結果とも実機用成分規格<sup>(13)</sup>及び目標成分範囲を満足する結果が得られた。

Table 2に管材の常温引張試験、硬さ、結晶粒度、クリープ破断試験の各結果を示す。常温引張試験は、同一製造ロット中、繰り返し数3回の試験を行っているが、差異がほとんど無く、引張強さ、0.2%耐力、伸びともにHTTR実機で規定されている規格<sup>(13)</sup>を十分に満足している。また、結晶粒度は目標のASTM番号2～5を満足しており、クリープ破断試験結果も実機用規格<sup>(13)</sup>及び製造者の社内規格を十分に満たしている。また、外観検査、寸法検査、超音波探傷検査の結果も良好であった。

### 2.2 溶加材

本評価試験用溶加材として、HTTRの中間熱交換器でのハステロイXR製の内筒および伝熱管などの溶接に用いられる溶加材(TIG用溶接線)の一部を用いた。

実機用溶加材は合計3チャージ溶解し、その内の1チャージ(ch.2-083)の一部を本評価試験用溶加材とした<sup>(12)</sup>。その工程をFig. 2に示す。溶解方法は真空誘導溶解とし、500kgインゴットを溶解後、熱間鍛造、熱間圧延および冷間引抜でφ5.5mmのコイルを製造した。

その後焼鈍、冷間引抜の繰り返しによりφ0.8mmの溶加材に加工した。また、伝熱管の初層溶接に使用されるインサート材は、φ3.2mmのものから冷間圧延、焼鈍により厚さ1.6mm、幅3.1mm、内径φ23.5mmのリング状に加工した。Table 3に溶加材の化学組成を示す。中間材φ5.5mmのコイルにおいてB含有量インゴットのTop部及びBottom部でチ

エック分析した結果、位置によるB量の有意差は認められなかった。溶加材の目標化学成分範囲は既報<sup>(9)</sup>において設定されたもので、C、B及びMgなどの微量元素含有量を最適化することにより厚肉溶接構造物においても溶接性並びに高温強度特性を充分満足できる合金設計となっている。

供試溶加材の化学組成はその目標成分範囲を満足していた。なお、加工中のBの減少抑止及び制御については既報<sup>(5),(8)</sup>において確立された製造条件<sup>(17)</sup>を踏襲することにより中間線径 $\phi 3.2\text{mm}$ から最終線径 $\phi 0.8\text{mm}$ までの線径変化に対しB量の減少を抑止でき最適含有量に調整することができた。

### 3. 溶接施工

実機伝熱管材として使用された Hastelloy XR 管材 (外径 $31.8\text{mm}$ ×肉厚 $3.5\text{mm}$ ) と実機用溶加材を用いて、溶接継手試験体を製作した。

溶接継手試験体の全長は $600\text{mm}$ であり、溶接は実機と同様の自動TIG溶接による片側突合せ溶接とした。Fig. 3に溶接継手試験体の形状および寸法を示す。なお、溶加材には、直径 $0.8\text{mm}$ の自動溶接用ソリッドワイヤを使用した。

溶接施工条件は、実機と同一の条件を適用した。Table 4に溶接施工条件を示し、Fig. 4に開先形状を示す。開先は、確実な裏波が得られるように、インサート有りのV型開先を採用した。Fig. 5にビード外観を示す。また、積層はFig. 6に示すように、3層、4パス程度であった。

次に、開先面及び溶接部に対して実施した非破壊検査の結果をTable 5に示す。試験方法及び判定基準は、総理府令第74号第15条、別表第12及び別表第15によった。開先面に対しては、浸透探傷試験 (PT) を実施し、溶接部に対しては、浸透探傷試験及び放射線透過試験 (RT) を実施したが、いずれも溶接欠陥は認められず判定基準を満足していた。

Fig. 7に溶接継手のミクロ組織を示す。ミクロ組織は正常で、溶接金属部及びボンド部にミクロ割れ等の溶接欠陥は認められなかった。なお、母材の熱影響部においても、溶接入熱による結晶粒の粗大化は認められず、良好な溶接継手と判断できる。

Fig. 8に引張試験及びクリープ試験に供した試験片の形状および寸法を示す。試験片は、管径が $31.8\text{mm}$ と小さいため「JIS Z 2201(1980): 金属材料引張試験片」の14B号試験片に準拠し円弧状試験片とした。なお、試験機との取り合いのため、溶接継手試験体から切り出した試験片の両端部に肉盛溶接を施し、ねじ加工を行った。

エック分析した結果、位置によるB量の有意差は認められなかった。溶加材の目標化学成分範囲は既報<sup>(9)</sup>において設定されたもので、C、B及びMgなどの微量元素含有量を最適化することにより厚肉溶接構造物においても溶接性並びに高温強度特性を充分満足できる合金設計となっている。

供試溶加材の化学組成はその目標成分範囲を満足していた。なお、加工中のBの減少抑止及び制御については既報<sup>(5),(8)</sup>において確立された製造条件<sup>(17)</sup>を踏襲することにより中間線径 $\phi$ 3.2mmから最終線径 $\phi$ 0.8mmまでの線径変化に対しB量の減少を抑止でき最適含有量に調整することができた。

### 3. 溶接施工

実機伝熱管材として使用されたハステロイXR管材（外径31.8mm×肉厚3.5mm）と実機用溶加材を用いて、溶接継手試験体を製作した。

溶接継手試験体の全長は600mmであり、溶接は実機と同様の自動TIG溶接による片側突合せ溶接とした。Fig. 3に溶接継手試験体の形状および寸法を示す。なお、溶加材には、直径0.8mmの自動溶接用ソリッドワイヤを使用した。

溶接施工条件は、実機と同一の条件を適用した。Table 4に溶接施工条件を示し、Fig. 4に開先形状を示す。開先は、確実な裏波が得られるように、インサート有りのV型開先を採用した。Fig. 5にビード外観を示す。また、積層はFig. 6に示すように、3層、4パス程度であった。

次に、開先面及び溶接部に対して実施した非破壊検査の結果をTable 5に示す。試験方法及び判定基準は、総理府令第74号第15条、別表第12及び別表第15によった。開先面に対しては、浸透探傷試験（PT）を実施し、溶接部に対しては、浸透探傷試験及び放射線透過試験（RT）を実施したが、いずれも溶接欠陥は認められず判定基準を満足していた。

Fig. 7に溶接継手のミクロ組織を示す。ミクロ組織は正常で、溶接金属部及びボンド部にミクロ割れ等の溶接欠陥は認められなかった。なお、母材の熱影響部においても、溶接入熱による結晶粒の粗大化は認められず、良好な溶接継手と判断できる。

Fig. 8に引張試験及びクリープ試験に供した試験片の形状および寸法を示す。試験片は、管径が31.8mmと小さいため「JIS Z 2201(1980)：金属材料引張試験片」の14B号試験片に準拠し円弧状試験片とした。なお、試験機との取り合いのため、溶接継手試験体から切り出した試験片の両端部に肉盛溶接を施し、ねじ加工を行った。

## 4. 評価結果

### 4.1 引張特性

#### (1) 目的

実機用の伝熱管材と実機用溶加材を用いて製作した溶接継手試験体より試験片を採取し、伝熱管母材及び溶接継手材についての時効に基づく引張特性を検討する。

#### (2) 試験方法

時効温度は900および950℃とした。時効時間は従来からの研究により1000h程度の時効により特性が飽和することが知られているため、それぞれの温度で1000hとした(18)。用いた試験片の形状及び寸法はFig.8に示す通りである。引張試験には島津製作所製荷重容量10トンの試験機(オートグラフ)を用い、試験方法はJIS Z 2241およびJIS G 0567に準拠した。時効後の引張試験温度は、室温および時効温度と同一の温度とし、試験はいずれも大気中で行った。

#### (3) 結果および考察

最初に時効後の室温における引張特性変化について述べる。Fig. 9に時効前および時効後の0.2%耐力の比較結果を示す。900℃時効後の溶接継手材の場合を除き、時効による0.2%耐力の低下が各時効温度において見られる。

Fig. 10に時効前及び時効後の引張強さの比較結果を示す。ここでも前者の場合と同様に時効による引張強さの低下が各時効温度において観測される。Fig.11に時効および時効後の破断伸びの比較結果を示す。時効により、母材および溶接継手材ともに破断伸びの著しい減少が認められる。この場合、破断伸びの低下割合は母材において著しいのに対して、溶接継手材では比較的少ないことが分かる。このことは変形機構は異なるが、時効によるシャルピー衝撃特性変化においても同様の傾向が認められている(18)。このような時効脆化現象は強度特性変化と併せて考えると、結晶粒界脆化に支配されているものと考えられる。即ち、時効によるマトリックスの硬化を伴わずに、結晶粒界に析出したM<sub>6</sub>C型炭化物が粒界の結合力の低下をもたらすことが要因であろうと推測される(19)。一方、溶接継手材の破断位置は、時効前では溶接金属部破断であったのに対して、時効後では母材ないしボンド部破断であった。

次に、時効後の高温における引張特性変化について述べる。Fig. 12に時効前および時効後の0.2%耐力の比較結果を示す。時効によりいずれの場合にも0.2%耐力の低下が認められる。Fig. 13に時効前および時効後の引張強さの比較結果を示す。ここでも前者の結果と同様にいずれの場合にも時効による引張強さの減少が観測される。Fig. 14に時効前及び時効後の破断伸びの比較結果を示す。試験温度が900℃の場合には時効による破断伸びの変化が殆ど認められないのに対して、試験温度が950℃の場

合には母材及び溶接継手ともに破断伸びの増大が観測される。ここで、溶接継手材の破断位置をみると、時効前では一部を除き溶接金属部破断であったのに対して、時効後では一部を除き母材破断であった。Fig. 15並びにFig. 16(a)、Fig. 16(b)及びFig. 16(c)に伝熱管溶接継手材の900℃及び950℃時効後のマクロ組織及びミクロ組織を示す。いずれの場合にもマクロ組織は正常で溶接欠陥は認められなかった。一方、ミクロ組織においても、溶接金属部およびボンド部にミクロ割れ等の溶接欠陥は認められなかった。なお、900℃時効により、マトリックス及び結晶粒界において著しい炭化物の析出がみとめられたが、950℃時効によりこれらの炭化物は凝集粗大化を呈していた。このことは、先に述べた高温引張特性の結果における950℃での破断伸びの増大とも密接に関連しているものと考えられる。

Fig. 17に伝熱管溶接継手材の時効に伴う硬さ分布の変化を示す。時効前の場合には母材部に較べて溶接金属部の硬さがやや上昇傾向にあることが分かる。900℃時効後では母材部及び溶接金属部とも著しい硬さの増大が認められるが、950℃時効により時効前の硬さに殆ど復元することが分かる。このことは先に述べたミクロ組織観察結果とよい対応をしているものと考えられる。

## 4.2 クリープ特性

### (1) 目的

実機伝熱管材として使用された Hastelloy XR 管材及び実機用溶加材を用いて製作した溶接継手試験体から、母材及び溶接継手の試験片を採取し、大気中クリープ試験を実施し、そのクリープ特性を評価する。

### (2) 試験方法

管材の母材及び溶接継手のクリープ試験を実施した。母材のクリープ試験においては、クリープ曲線を求めた。また、参考のため、溶接継手についても、クリープ曲線を求めた。試験片の形状及び寸法は、Fig. 8に示すとおりであり、標点距離は40mmとした。また、溶接継手試験片の場合の溶接部の余盛は、母材表面まで仕上げた。試験雰囲気は大気中で、試験温度は900℃及び950℃とした。なお、900℃の場合は、負荷応力33MPa、38MPa、47MPa及び58MPaの4水準の応力レベルとし、950℃の場合は、負荷応力18MPa、24MPa及び31MPaの3水準の応力レベルとした。いずれも、最長時間3000hを目標とした。

### (3) 結果及び考察

900℃及び950℃の場合について、Fig. 18及びFig. 19に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 20及びFig. 21には、破断伸びとクリープ破断時間の関係を示す。負荷応力とクリープ破断時間の関係では、母材及び溶接継手のいずれのクリープ破断時間も、Hastelloy XR母材のマスターカーブ<sup>(16)</sup>と同等以上であり、設計クリープ

破断応力強さ  $[S_R]$  <sup>(16)</sup>よりも十分に長いことが分かった。母材と溶接継手について、同一の負荷応力に対するクリープ破断時間を比較すると、900℃及び950℃のいずれの場合においても、溶接継手は破断位置が母材部であるにもかかわらず、破断時間が母材に比べてわずかに短時間側になる傾向であった。破断部近傍の断面マクロ観察の結果、母材試験片では平行部全体に多くの割れが分布しているのに対して、溶接継手試験片では破断部近傍に割れが集中する傾向が見られた。すなわち、溶接継手においては、破断部近傍のクリープ破断強度が周囲に比べてやや劣ると判断される。溶接継手の破断部は、溶接熱影響部の一部であることから、ある温度範囲の熱履歴を受けた領域のクリープ破断強度が、母材に比べてやや低下する可能性が考えられる。しかし、溶接継手と母材のクリープ破断時間の差異はわずかであり、実用上は問題にならないと判断される。

クリープ破断延性に関しては、クリープ破断時間が長いほど、破断伸びが減少する傾向にあり、溶接継手の方が母材よりも低下する傾向であった。なお、溶接継手の場合は、いずれも母材で破断していた。

Fig. 22及びFig. 23に、各温度・応力レベルにおけるクリープ曲線を示す。クリープ曲線は、2次及び3次クリープ領域が明瞭に現れており、ハステロイXR板材の場合と同様な傾向を示した。また、2次クリープ領域までは、母材と溶接継手のクリープ曲線の間に大きな差は認められなかった。溶接継手のクリープ伸びは、母材と溶接金属の伸びを同時に測定していることから、2次クリープ領域までは、溶接金属においても、母材と同様に伸びているものと考えられる。

母材の場合について、Fig. 24及びFig. 25に、各々、最小クリープ速度と負荷応力の関係及び最小クリープ速度とクリープ破断時間の関係を示す。いずれの関係も、ほぼ直線関係にあるといえる。また、最小クリープ速度とクリープ破断時間は、経験的に直線関係があることが知られており、いわゆる Monkman-Grant の関係<sup>(20)</sup>にあることが確認できる。

Fig. 26からFig. 32に試験後の試験片外観を示す。母材試験片では、破断部近傍に微細な割れを伴っているが、溶接継手試験片の場合は、母材で破断しているものの、母材試験片よりも微細な割れは少なかった。また、試験温度の違いによる破断状況の差異は認められなかった。

Fig. 33からFig. 40に代表的な試験片の破断部断面の顕微鏡組織写真を示す。母材試験片の場合は、き裂は結晶粒界に沿っており、き裂近傍の結晶にはクリープ変形による組織の流動が見られた。周辺組織には、結晶粒界にボイドが形成されており、クリープ破壊の形態はボイド成長型であろうと判断される。なお、結晶粒内には、炭化物と推定される微細な析出物が多く認められた。

また、試験温度が900℃の場合は、微細な割れが破断部近傍に多く認められるが、950℃の場合は、900℃の場合に比較して、微細な割れが標点間内でほぼ均一に発生し

ており、割れの酸化が著しく、結晶粒内の析出物も大きく成長していることが認められた。溶接継手試験片の場合も、母材で破断していることから、母材試験片の場合と同様に、破断部近傍に多数の割れが発生しているが、溶接金属部にはそのような割れはほとんど認められなかった。このような傾向は、破断時間が長くなっても同様であった。

#### 4.3 板材との引張特性およびクリープ特性の比較

##### (1) 引張特性

Fig. 41およびFig. 42にそれぞれ時効前における強度特性と破断伸びに対する試験温度との関係を示す。強度特性に関しては、室温および高温ともに板材と管材との間に顕著な差異は認められない。しかしながら、破断伸びに関しては板材と管材との間で室温での差異は比較的少ないが、高温においては特に母材の板材と管材との間で差異がみられ後者に較べて前者の方が著しく高い延性を示した。Fig. 43およびFig. 44にそれぞれ900℃時効後における強度特性と破断伸びに対する試験温度との関係を示す。これより強度特性に関してはいずれの試験温度においても板材と管材との間でその差異は少ないと言える。一方、破断伸びに関しては室温においては板材と管材との間でその差異は比較的少ないが、高温において特に溶接継手材の場合にその差異が認められ、板材に較べて管材の方が高い延性を示した。同様の結果を950℃時効の場合についてFig. 45におよびFig. 46に示す。ここでも前者の場合に得られた結果と同様の傾向が認められる。

##### (2) クリープ特性

本報で試験した実機伝熱管用ハステロイXR管材の継手と既報<sup>(13)</sup>において試験したハステロイXR板材の継手のクリープ特性を比較した。なお、ハステロイXR板材の継手は、実機と同一ヒート材の母材と実機用溶加材を用いて製作したものであり、溶加材は、ハステロイXR管材の継手の製作に使用したものと同一チャージ番号(2-083)である。

900℃及び950℃の場合について、Fig. 47及びFig. 48に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 49及びFig. 50には、破断伸びとクリープ破断時間の関係を示す。母材及び溶接継手ともに、管材は低応力・長時間側で板材よりもクリープ破断時間が多少低下する傾向であったが、管材のクリープ破断時間は、ハステロイXR母材のマスターカーブ<sup>(5)</sup>と同等以上であり、設計クリープ破断応力強さ[S<sub>R</sub>]<sup>(5)</sup>よりも十分に長いことから、実用上は特に問題ないと判断される。

一方、クリープ破断延性に関しては、母材の場合は、管材が板材の約1/2程度まで著しく低下するものの、その値自身は板材の溶接継手または溶接金属に較べれば同等以上である。このような母材の場合の管材の破断伸びが板材のそれに較べて著しく低い理由としては次のような要因が考えられる。即ち①寸法効果：試験片平行部寸法に関する

定数 $K (=L/\sqrt{A})$ 、 $L$ ：標点間距離、 $A$ ：平行部断面積)の値が大きい方が破断伸びが小さくなるが、ここでは用いた試験片の $K$ 値は板材では3.76及び5.64であるのに対して管材では8.23であった。②形状効果：同じ断面積の場合、試験片平行部で板材の場合のように円形断面にて、破断伸びが最も大きくなるが、管材の場合のように長方形断面で更に厚さが薄い場合には破断伸びは絞りが出にくくなるため最も小さくなる。③チャック部の影響：管材試験片はチャック部のR部も標点間に入っている。R部は断面積が大きくなっており、平行部に較べて応力が小さくなるため、当然クリープによる変形伸び(局所的な変形量)が小さくなる。そのような低変形領域が標点間に入っているため、破断伸びは更に小さくなると考えられる。④冷間歪みの影響：試験片に冷間歪みが加わっていると破断時間は長くなり、破断伸びは小さくなる傾向がある。ここで、板材は熱間加工であるのに対して、管材は冷間加工であることから、製造方法に相違がある。

溶接継手に関しては、900℃の場合でわずかに低め、950℃の場合で同等となっており、板材との大きな差は認められなかった。HTTRの中間熱交換(IHX)の伝熱管に使用された Hastelloy XR 管材の溶接継手の場合においても、Hastelloy XR 板材の溶接継手の場合と同様に、十分なクリープ特性を有していることが確認された。

## 5. 結 言

伝熱管母材および溶接継手材の引張試験およびクリープ試験を行い、次のような結果を得た。また、これらの結果と板材との引張特性およびクリープ特性に関する比較検討も併せて実施し、以下の結論を得た。

### 5.1 引張特性

- (1) 時効後の室温における強度変化は母材および溶接継手材ともに比較的少なかったが、著しい延性低下が両者ともに観測された。
- (2) 時効後の高温における強度変化は母材および溶接継手材ともに比較的少なく、また延性については試験温度が900℃の場合には変化が殆んど認められないのに対して試験温度が950℃の場合には両者ともに破断伸びの増大が観測された。

### 5.2 クリープ特性

- (1) 母材と溶接継手材について、900℃および950℃のいずれの場合にも、クリープ破断強度に関する差異は比較的少なかった。
- (2) クリープ破断延性に関しては、クリープ破断時間が長い程、破断伸びが減少する傾向にあり、溶接継手材の方が母材よりも低下する傾向が見られた。



定数 $K$  ( $=L/\sqrt{A}$ 、 $L$ : 標点間距離、 $A$ : 平行部断面積) の値が大きい方が破断伸びが小さくなるが、ここでは用いた試験片の $K$ 値は板材では3.76及び5.64であるのに対して管材では8.23であった。②形状効果: 同じ断面積の場合、試験片平行部で板材の場合のように円形断面にて、破断伸びが最も大きくなるが、管材の場合のように長方形断面で更に厚さが薄い場合には破断伸びは絞りが出にくくなるため最も小さくなる。③チャック部の影響: 管材試験片はチャック部のR部も標点間に入っている。R部は断面積が大きくなっており、平行部に較べて応力が小さくなるため、当然クリープによる変形伸び(局所的な変形量)が小さくなる。そのような低変形領域が標点間に入っているため、破断伸びは更に小さくなると考えられる。④冷間歪みの影響: 試験片に冷間歪みが加わっていると破断時間は長くなり、破断伸びは小さくなる傾向がある。ここで、板材は熱間加工であるのに対して、管材は冷間加工であることから、製造方法に相違がある。

溶接継手に関しては、900℃の場合でわずかに低め、950℃の場合で同等となっており、板材との大きな差は認められなかった。HTTRの中間熱交換(IHX)の伝熱管に使用された Hastelloy XR 管材の溶接継手の場合においても、Hastelloy XR 板材の溶接継手の場合と同様に、十分なクリープ特性を有していることが確認された。

## 5. 結 言

伝熱管母材および溶接継手材の引張試験およびクリープ試験を行い、次のような結果を得た。また、これらの結果と板材との引張特性およびクリープ特性に関する比較検討も併せて実施し、以下の結論を得た。

### 5.1 引張特性

- (1) 時効後の室温における強度変化は母材および溶接継手材ともに比較的少なかったが、著しい延性低下が両者ともに観測された。
- (2) 時効後の高温における強度変化は母材および溶接継手材ともに比較的少なく、また延性については試験温度が900℃の場合には変化が殆んど認められないのに対して試験温度が950℃の場合には両者ともに破断伸びの増大が観測された。

### 5.2 クリープ特性

- (1) 母材と溶接継手材について、900℃および950℃のいずれの場合にも、クリープ破断強度に関する差異は比較的少なかった。
- (2) クリープ破断延性に関しては、クリープ破断時間が長い程、破断伸びが減少する傾向にあり、溶接継手材の方が母材よりも低下する傾向が見られた。

### 5.3 板材との引張特性およびクリープ特性の比較

- (1) 板材と伝熱管材の時効後の引張特性に関しては、いずれの試験温度においても強度の差異は比較的少なかった。これに対して、破断伸びに関しては、室温において板材と伝熱管材との間で差異は少なかったが、高温においては特に溶接継手材の場合にその差異が認められ、板材に較べて伝熱管材の方が高い延性を示した。
- (2) 母材および溶接継手材ともに、管材は低応力・長時間側で板材よりもクリープ破断時間が若干低下する傾向が見られたが、管材のクリープ破断時間は、ハステロイXR母材のマスターカーブと同等以上であり、設計クリープ破断応力強さ  $[S_R]$  よりも十分に長いことから、実用上は特に問題ないと判断される。

## 謝 辞

本研究を行う上で、石川島播磨重工業（株）、（株）富士電機総合研究所、日本ウェルディング・ロッド（株）、三菱マテリアル（株）および日本原子力研究所の関係各位に多大なる御支援と御協力を頂きましたことを感謝致します。

### 5.3 板材との引張特性およびクリープ特性の比較

- (1) 板材と伝熱管材の時効後の引張特性に関しては、いずれの試験温度においても強度の差異は比較的少なかった。これに対して、破断伸びに関しては、室温において板材と伝熱管材との間で差異は少なかったが、高温においては特に溶接継手材の場合にその差異が認められ、板材に較べて伝熱管材の方が高い延性を示した。
- (2) 母材および溶接継手材ともに、管材は低応力・長時間側で板材よりもクリープ破断時間が若干低下する傾向が見られたが、管材のクリープ破断時間は、ハステロイXR母材のマスターカーブと同等以上であり、設計クリープ破断応力強さ [SR] よりも十分に長いことから、実用上は特に問題ないと判断される。

## 謝 辞

本研究を行う上で、石川島播磨重工業（株）、（株）富士電機総合研究所、日本ウェルディング・ロッド（株）、三菱マテリアル（株）および日本原子力研究所の関係各位に多大なる御支援と御協力を頂きましたことを感謝致します。

## 参考文献

- (1) 日本原子力研究所編：高温工学試験研究の現状、(1996)
- (2) T. Udoguchi and T. Nakanishi : Int. J. Press. Vessel and Piping, 9(1981)107.
- (3) S. Shimizu, K. Sato, Y. Muto and Y. Ogawa : J. Soc. Mater. Sci. Japan, 32(1983) 1307.
- (4) W. I. Hrivnak : Theory of Weldability of Metals and Alloys,(Elsevier, Amsterdam,(1992) p.307.
- (5) 渡辺、中島、佐平、倉内、齊藤、高津、仲西：JAERI-M 89-206(1989).
- (6) 渡辺、仲西、佐平、高津、中島：高温学会誌：Vol.16, No.6(1990)368
- (7) K. Watanabe, H. Nakajima, K. Sahira, N. Kurauchi, T. Takeiri, T. Saitoh, T. Takatsu and T. Nakanishi : Journal of Nucl. Mater. Vol. 185, No.1(1991)81.
- (8) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、齊藤、仲西、辻、塚田：JAERI-M 91-181(1991).
- (9) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、齊藤、仲西、小池上、樋口：JAERI-M 91-189-(1991).
- (10) K. Watanabe, W. Sahira, T. Takatsu, T. Nakanishi, M. Higuchi and H. Nakajima : Computer Aided Innovation of New Materials II, Elsevier Sci. Publishing Co.,(1993)p. 1491.
- (11) 渡辺、中島、齊藤、高津、小池上、樋口：JAERI-M 94-018(1994).
- (12) 渡辺、中島、齊藤、高津、小池上、樋口、仲西、佐平、丸七、竹入：JAERI-Research 94-046(1994).
- (13) 渡辺、中島、小池上、樋口、仲西、齊藤、高津：JAERI-Research 95-001(1995).
- (14) American Society for Testing and Materials : ASTM B435-87a(1987).
- (15) Aerospace Materials Specification : AMS 5754H(1984).
- (16) 羽田、元木、馬場：JAERI-M 90-148(1990).
- (17) 佐平、竹入、倉内、中島、渡辺、仲西、鬼束、高津、齊藤：“Ni基耐熱合金溶接ワイヤーの製造方法”、公開特許公報、公開番号 平3-133593.
- (18) 近藤、渡辺、佐藤、仲西、佐平、辻、倉田、塚田、小沢：JAERI-M 86-003(1986).
- (19) 渡辺、菊地、近藤：学振123委 研究報告、23(1982)275.
- (20) F. C. Monkman and N. J. Grant : Proc. ASTM 56(1956)593.

Table 1 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR tube (mass%)

| element                | C    | Si   | Mn   | P      | S      | Cr    | Fe    | Mo    | W    | Cu    | Al    | Ti    | Co   | B      | Ni   | N     |
|------------------------|------|------|------|--------|--------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|--------|------|-------|
| Ladle (ch.2-582)       | 0.07 | 0.36 | 0.90 | <0.001 | 0.002  | 21.4  | 18.0  | 9.0   | 0.48 | <0.01 | 0.01  | 0.01  | 0.03 | 0.005  | Rem. | 0.005 |
| Billet (Top)           | 0.07 | 0.35 | 0.95 | <0.001 | <0.001 | 21.30 | 17.97 | 9.10  | 0.48 | <0.01 | <0.01 | 0.01  | 0.03 | 0.0043 | Rem. | 0.005 |
| Billet (Bottom)        | 0.07 | 0.36 | 0.93 | <0.001 | <0.001 | 21.17 | 17.94 | 9.15  | 0.49 | <0.01 | <0.01 | 0.01  | 0.03 | 0.0021 | Rem. | 0.010 |
| Product Check Analysis | 0.08 | 0.36 | 0.94 | <0.001 | 0.001  | 21.18 | 18.02 | 9.07  | 0.49 | <0.01 | 0.02  | <0.01 | 0.01 | 0.0021 | Rem. | 0.009 |
| Specification *        | min  | 0.25 | 0.75 | —      | —      | 20.5  | 17.0  | 8.0   | 0.20 | —     | —     | —     | —    | —      | —    | —     |
|                        | max  | 0.15 | 0.50 | 0.040  | 0.030  | 23.0  | 20.0  | 10.0  | 1.00 | 0.50  | 0.05  | 0.03  | 2.50 | 0.010  | Rem. | —     |
| Aim range **           | min  | 0.25 | 0.75 | —      | —      | 20.50 | 17.00 | 8.00  | 0.20 | —     | —     | —     | —    | 0.0010 | —    | —     |
|                        | max  | 0.09 | 0.50 | 0.040  | 0.030  | 23.00 | 20.00 | 10.00 | 1.00 | 0.50  | 0.05  | 0.03  | 0.10 | 0.0050 | Rem. | —     |
| Aim point **           | 0.07 | 0.35 | 0.90 | LAP    | LAP    | 21.50 | 18.00 | 9.00  | 0.50 | LAP   | LAP   | LAP   | LAP  | 0.0030 | Rem. | LAP   |

Rem. : Remainder

LAP : Low as possible

— : Not specified or not analysed \* : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)

\*\* : Aim range and Aim point of Hastelloy XR for HTTR

Table 2 Materials properties of Hastelloy Alloy XR tube

|               | Ultimate Tensile Strength (MPa) | 0.2%offset Yield Strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (HRB) | Grain Size (AGS No.) * | Creep Rupture at 815°C, 105MPa |               | Creep Rupture at 900°C, 49MPa |               |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
|               |                                 |                                 |                |                |                        | Rupture Time(h)                | Elongation(%) | Rupture Time(h)               | Elongation(%) |
| Seamless tube | 694                             | 330                             | 54             | 83             | 3.0                    | 183                            | 46            | 624                           | 28            |
|               | 691                             | 311                             | 53             |                |                        |                                |               |                               |               |
|               | 693                             | 326                             | 53             |                |                        |                                |               |                               |               |
| Spec. **      | ≥ 655                           | ≥ 241                           | ≥ 35           | —              | —                      | ≥ 24                           | —             | —                             | —             |
| Spec. ***     | ≥ 655                           | ≥ 241                           | ≥ 35           | —              | 2 to 5                 | ≥ 24                           | ≥ 10          | ≥ 100                         | ≥ 10          |

\* AGS No. : Average Grain Size Number

(T) : Transverse plane to direction of rolling

(L) : Longitudinal plane to direction of rolling

\*\* : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)

\*\*\* : Specification of manufacturer

Table 3 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR filler metal (mass%)

| Elements        | C          | Si   | Mn   | P      | S     | Cr    | Fe    | Mo    | W    | Cu    | Al   | Ti     | Mg    | Co    | B      | Ni   | N      | O       |
|-----------------|------------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------|-------|-------|--------|------|--------|---------|
| Hastelloy Alloy | 0.05       | 0.25 | 0.75 | 0.040  | 0.030 | 20.5  | 17.0  | 8.0   | 0.20 | -     | 0.05 | 0.03   | -     | -     | 0.010  | Rem. | -      | -       |
| XR spec.        | 0.15       | 0.50 | 1.00 | -      | -     | 23.0  | 20.0  | 10.0  | 1.0  | 0.50  | 0.05 | 0.03   | -     | 2.50  | -      | Rem. | -      | -       |
| JIS YNiCrMo-2   | 0.05       | -    | -    | -      | -     | 20.5  | 17.0  | 8.0   | 0.20 | -     | -    | -      | -     | 0.50  | -      | -    | -      | -       |
| Spec.           | 0.15       | 1.0  | 1.0  | 0.040  | 0.030 | 23.0  | 20.0  | 10.0  | 1.0  | 0.50  | -    | -      | -     | 2.5   | -      | Rem. | -      | -       |
| Aim range       | 0.050      | 0.25 | 0.75 | -      | -     | 20.50 | 17.00 | 8.00  | 0.20 | -     | 0.05 | 0.03   | 0.01  | -     | 0.0020 | -    | -      | -       |
| of filler wire  | 0.070      | 0.50 | 1.00 | 0.040  | 0.030 | 23.00 | 20.00 | 10.00 | 1.00 | 0.50  | 0.05 | 0.03   | 0.05  | 0.10  | 0.0050 | Rem. | 0.010  | 0.002   |
| Ladle           | -          | -    | -    | -      | -     | -     | -     | -     | -    | -     | -    | -      | -     | -     | -      | -    | -      | -       |
| (Ch.No.2-083)   | 0.053      | 0.34 | 0.80 | <0.001 | 0.002 | 21.44 | 18.20 | 9.00  | 0.48 | <0.01 | 0.04 | 0.01   | 0.03  | 0.02  | 0.008  | Rem. | 0.002  | 0.001   |
| Check(φ 5.5mm)  | -          | -    | -    | -      | -     | -     | -     | -     | -    | -     | -    | -      | -     | -     | 0.0040 | -    | -      | -       |
| Top             | -          | -    | -    | -      | -     | -     | -     | -     | -    | -     | -    | -      | -     | -     | -      | -    | -      | -       |
| Check(φ 5.5mm)  | -          | -    | -    | -      | -     | -     | -     | -     | -    | -     | -    | -      | -     | -     | 0.0036 | -    | -      | -       |
| Bottom          | (1)* 0.059 | 0.38 | 0.82 | 0.001  | 0.003 | 21.50 | 18.2  | 9.07  | 0.53 | <0.01 | 0.05 | <0.01  | 0.02  | <0.01 | 0.0038 | Rem. | 0.003  | 0.001   |
| Check(φ 5.5mm)  | (2)* 0.058 | 0.40 | 0.80 | 0.001  | 0.004 | 21.45 | 18.3  | 9.12  | 0.52 | 0.001 | 0.05 | <0.001 | 0.015 | 0.004 | 0.0043 | Rem. | 0.0038 | <0.0005 |
| Check(φ 3.2mm)  | -          | -    | -    | -      | -     | -     | -     | -     | -    | -     | -    | -      | -     | -     | 0.0033 | -    | -      | -       |
| φ 0.8mm wire    | 0.055      | 0.36 | 0.82 | 0.001  | 0.003 | 21.42 | 18.09 | 9.04  | 0.51 | <0.01 | 0.05 | <0.01  | 0.02  | <0.01 | 0.0031 | Rem. | 0.005  | 0.001   |

\*:Repeat no.

Rem.:Remainder  
-:Not specified or not analyzed

Table 4 Welding conditions for Hastelloy Alloy XR tube

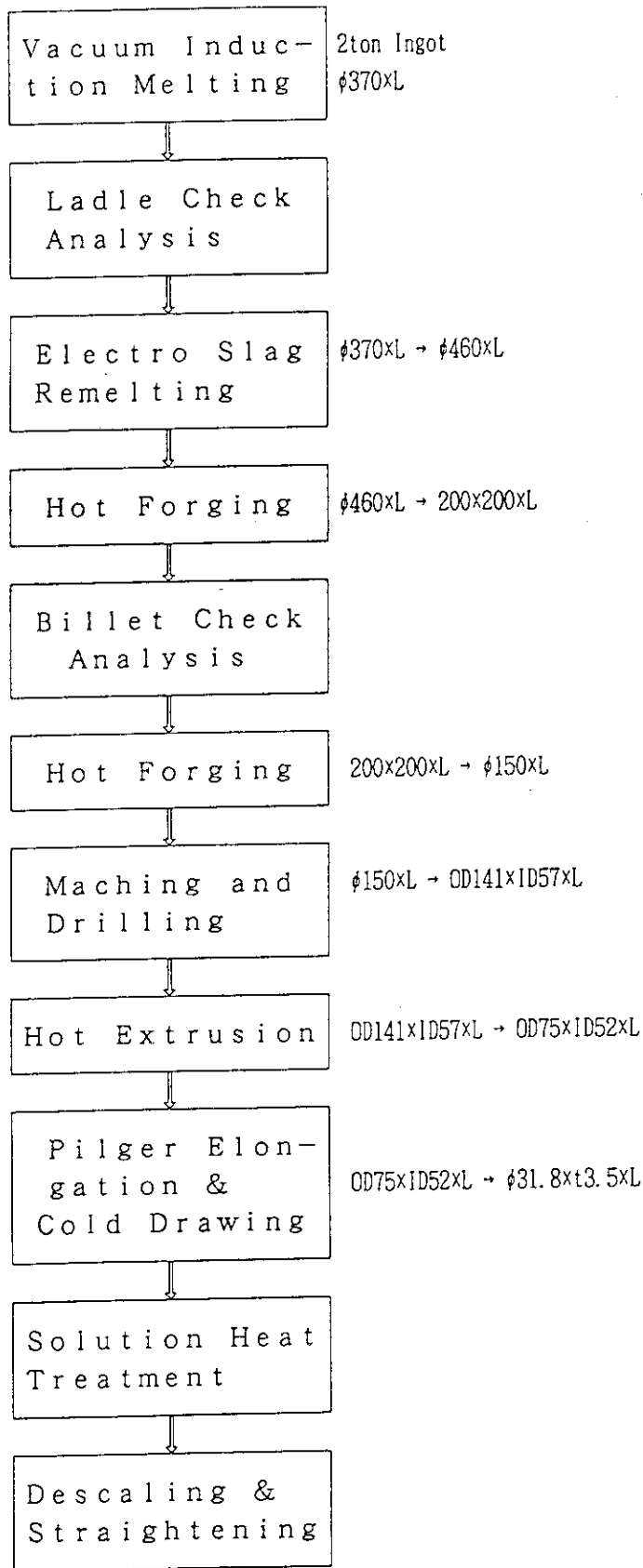
| Welding procedure | Diameter of filler metal (mm) | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Ar gas flow rate (l/min)                   |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|--|
| GTAW              | 0.8                           | 20-100              | 7-18            | 50-150                 | Torch : 8-30<br>Backing side shield : 8-30 |

Table 5 Results of non-destructive testings for groove face and welds

| Groove Face | Welded Joint |      |
|-------------|--------------|------|
| P T         | P T          | R T  |
| good        | good         | good |

(Remarks) P T : Liquid penetrant test  
R T : Radiographic test





Unit in Size:mm

Fig. 1 Production flow diagram of Hastelloy Alloy XR tube.

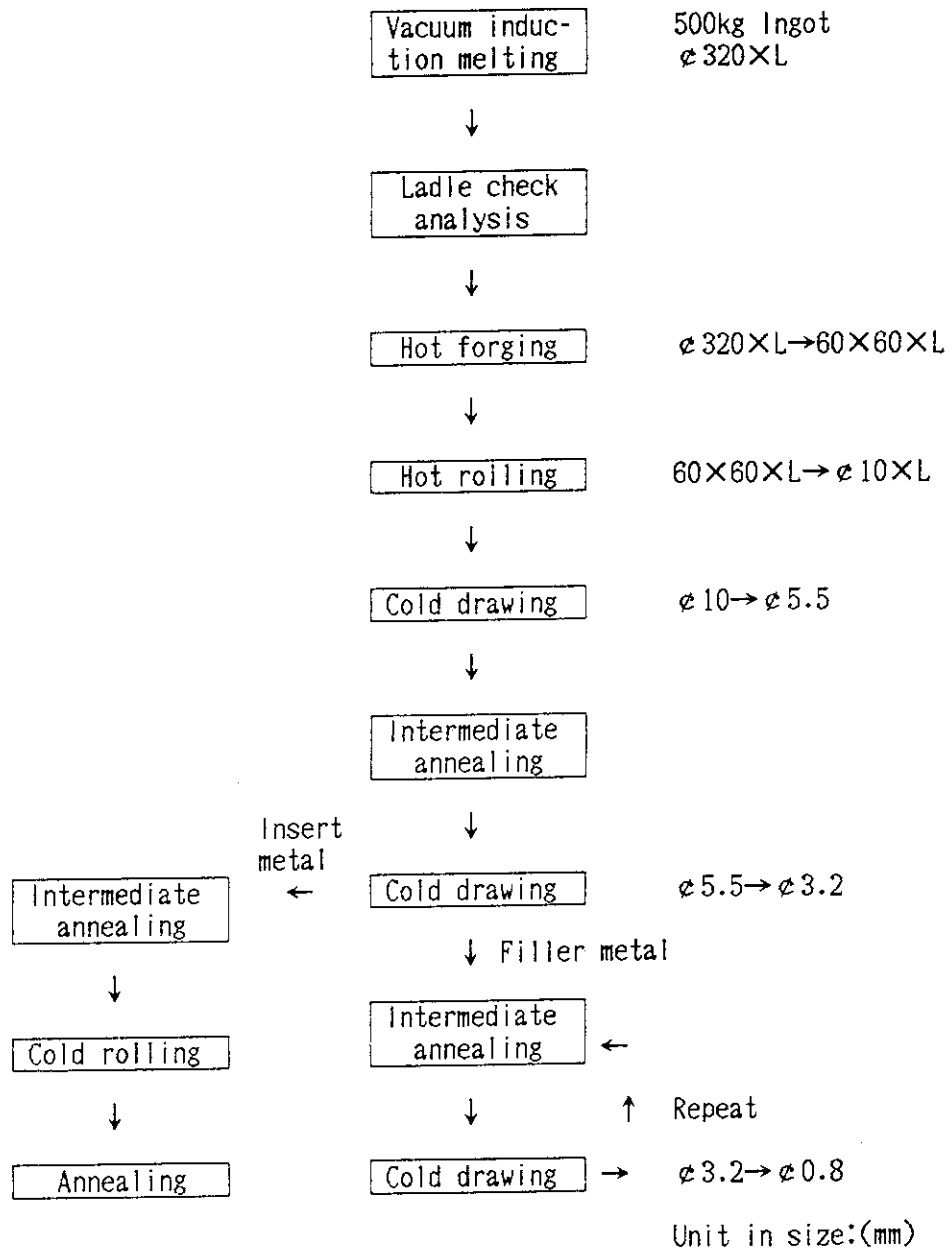


Fig. 2 Production flow diagram of Hastelloy Alloy XR filler metal and insert metal.

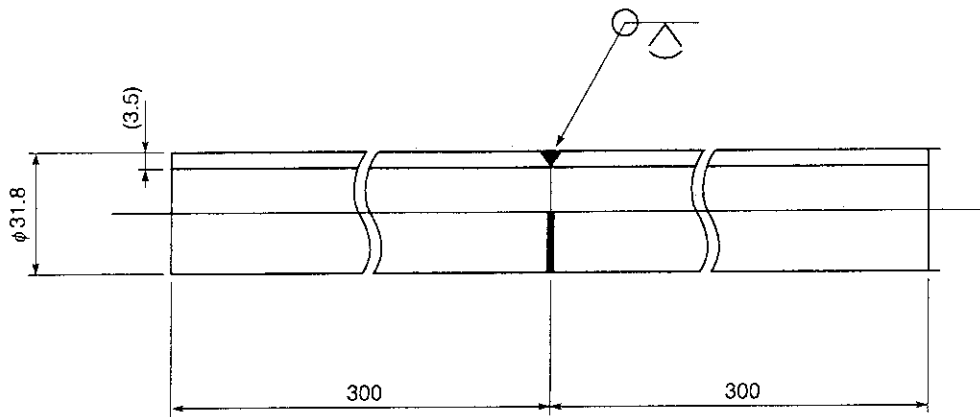


Fig. 3 Geometry of test tube for welded-joint specimen.

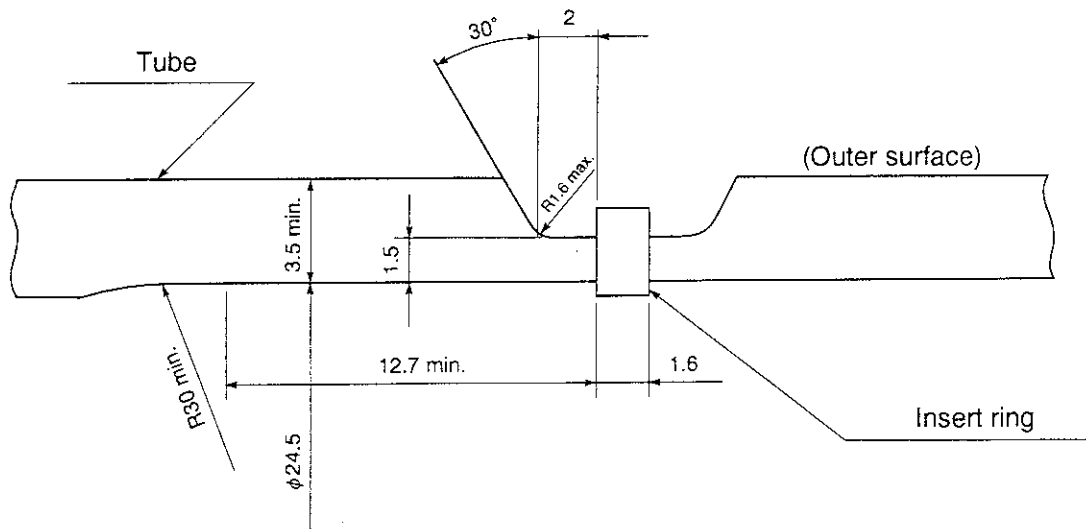
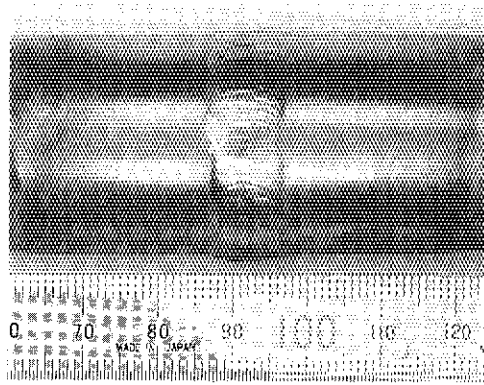
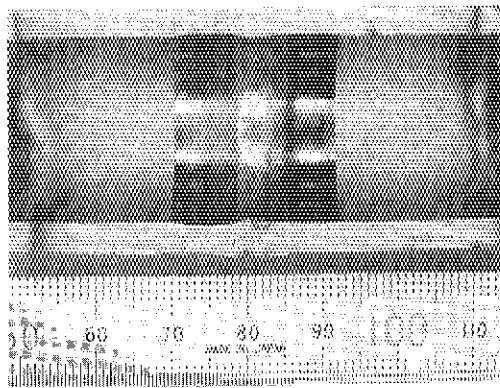


Fig. 4 Groove geometry.



(a) Finishing side



(b) Backing side

Fig. 5 Appearance of weld bead.

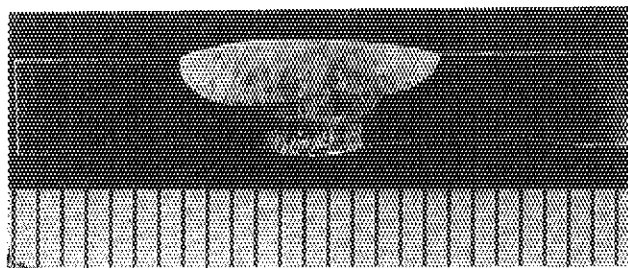


Fig. 6 Build-up sequence.

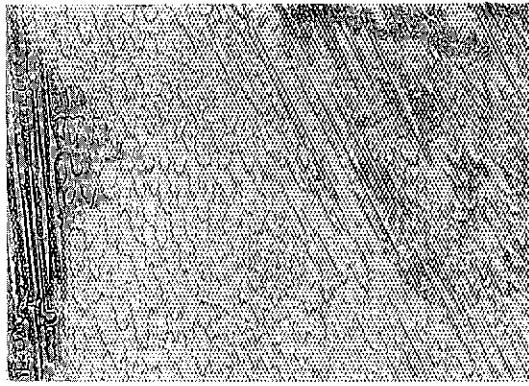
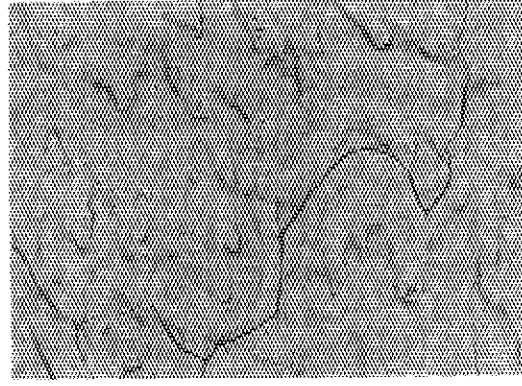
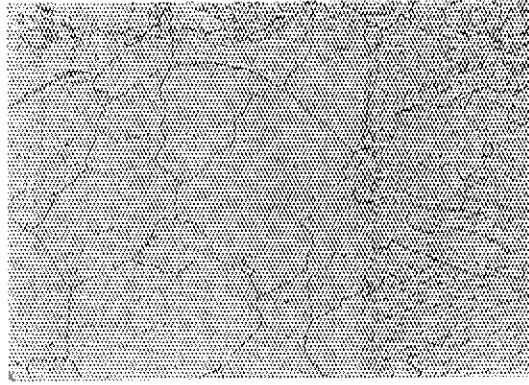
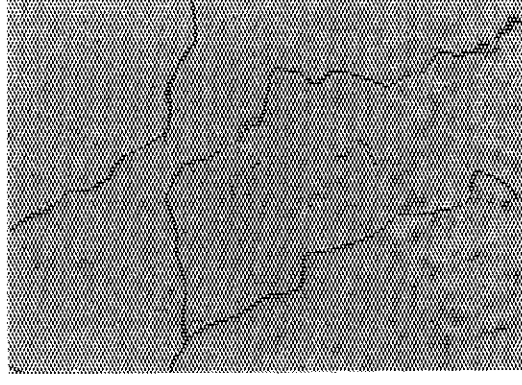
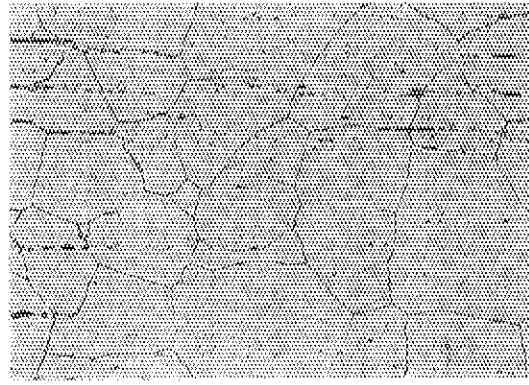
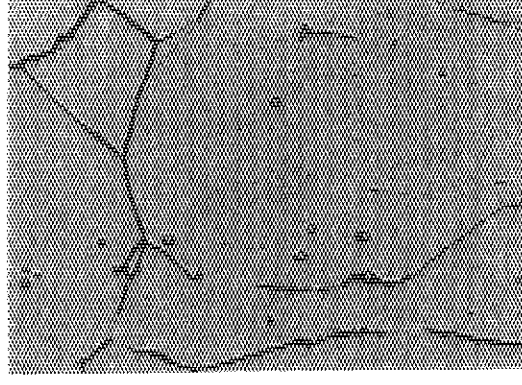
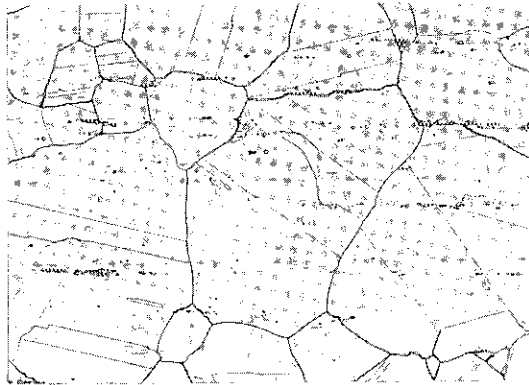
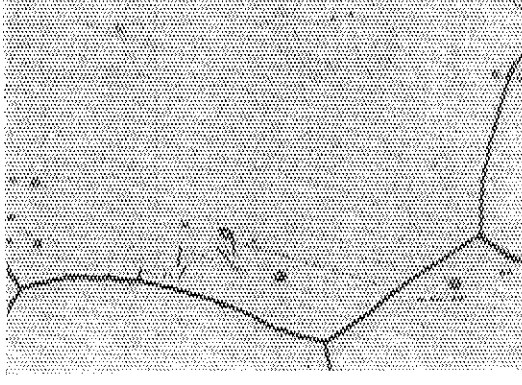
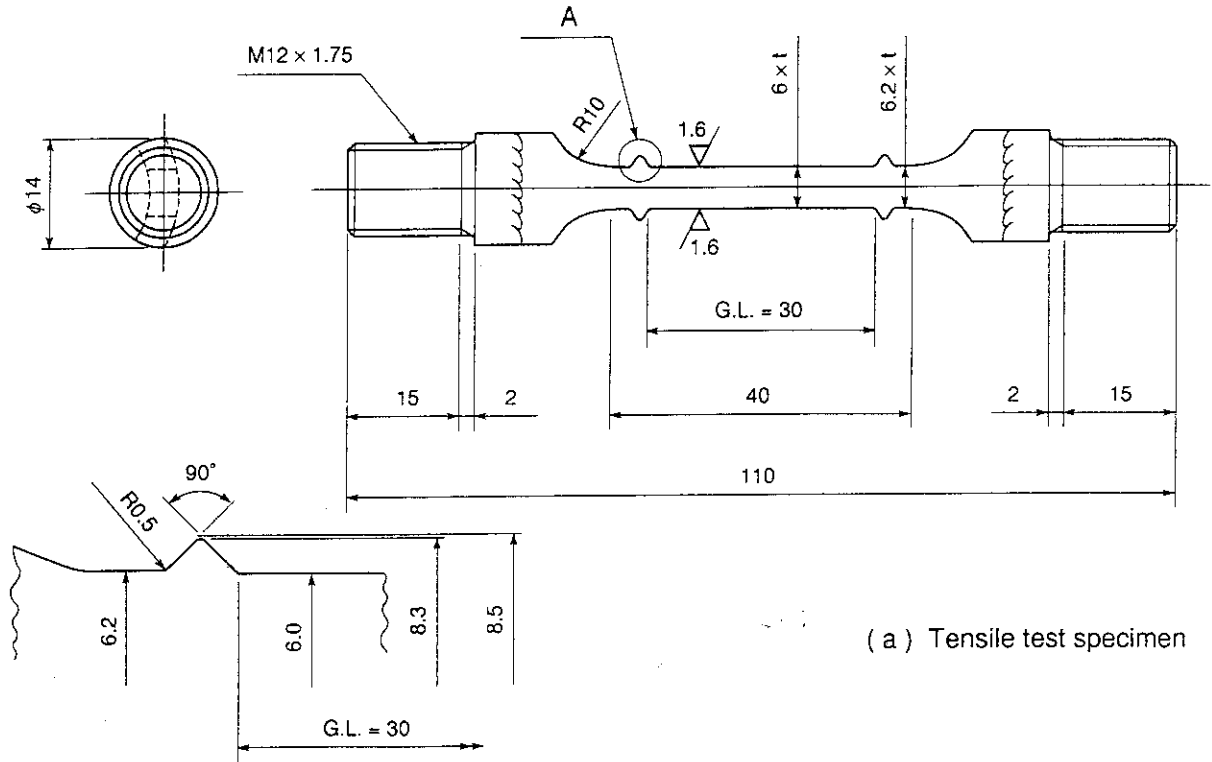
|               |   |  |
|---------------|---|--|
| Weld Metal    |    |    |
| Bond          |   |   |
| HAZ           |  |  |
| Base Metal    |  |  |
| Location      |   |  |
| Magnification | $100 \mu\text{m}$   | $25 \mu\text{m}$   |

Fig. 7 Microstructures of welded-joint.

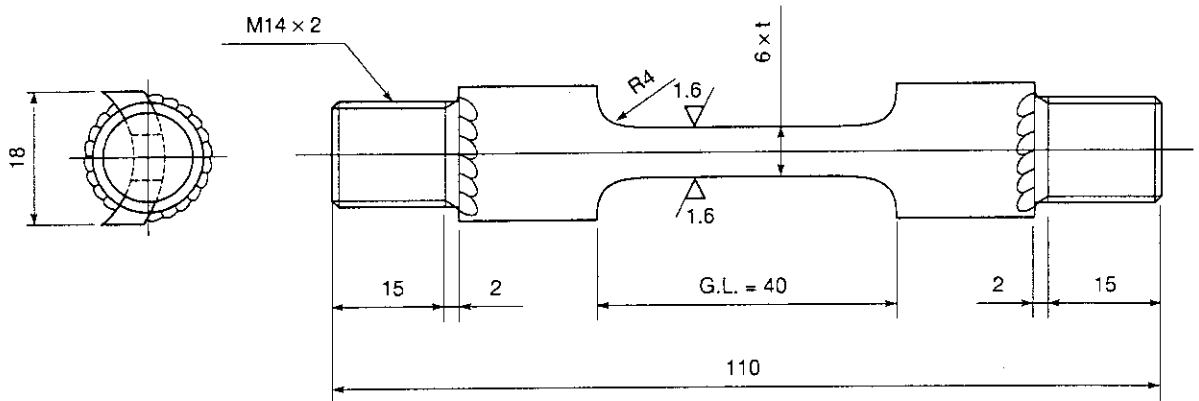
(Remarks)

- (1)  $t$ : Thickness of tube
- (2) Excess weld metal shall be finished in the boundary with the base metal.



(a) Tensile test specimen

Detail A



(b) Creep test specimen

Fig. 8 Geometry of tensile and creep specimen.

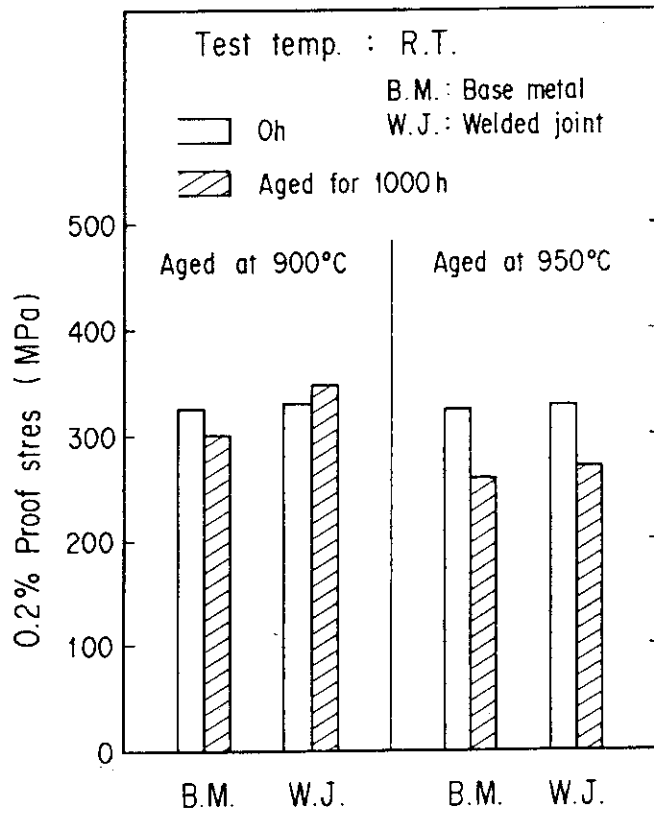


Fig. 9 0.2% proof stress at room temperature before and after thermal aging.

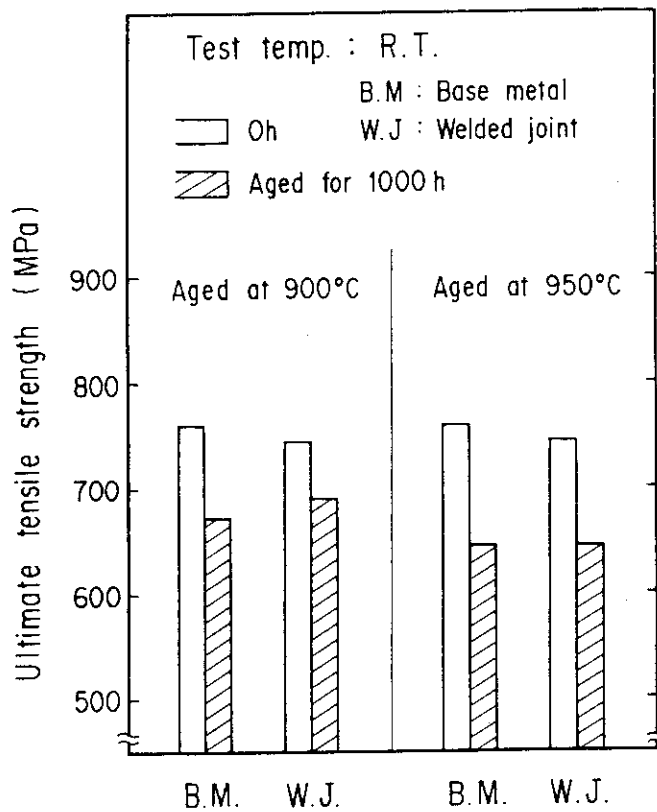


Fig. 10 Ultimate tensile strength at room temperature before and after thermal aging.

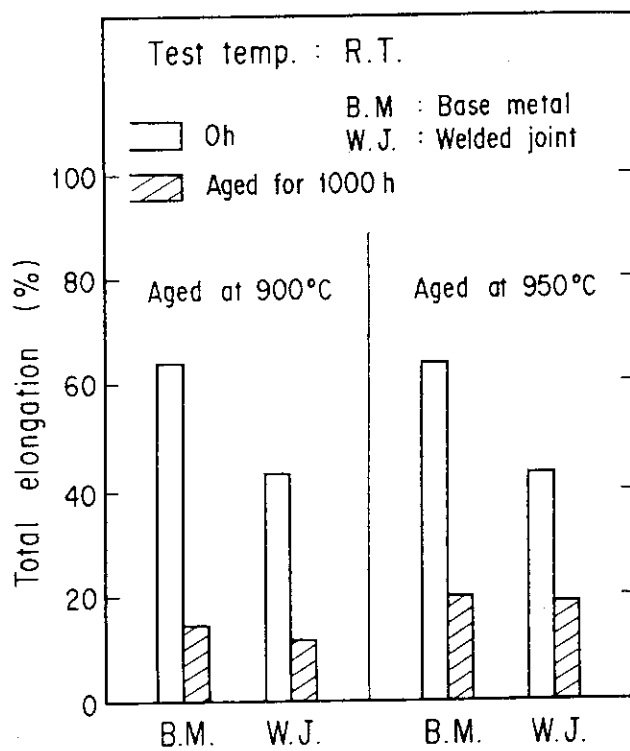


Fig. 11 Total elongation at room temperature before and after thermal aging.

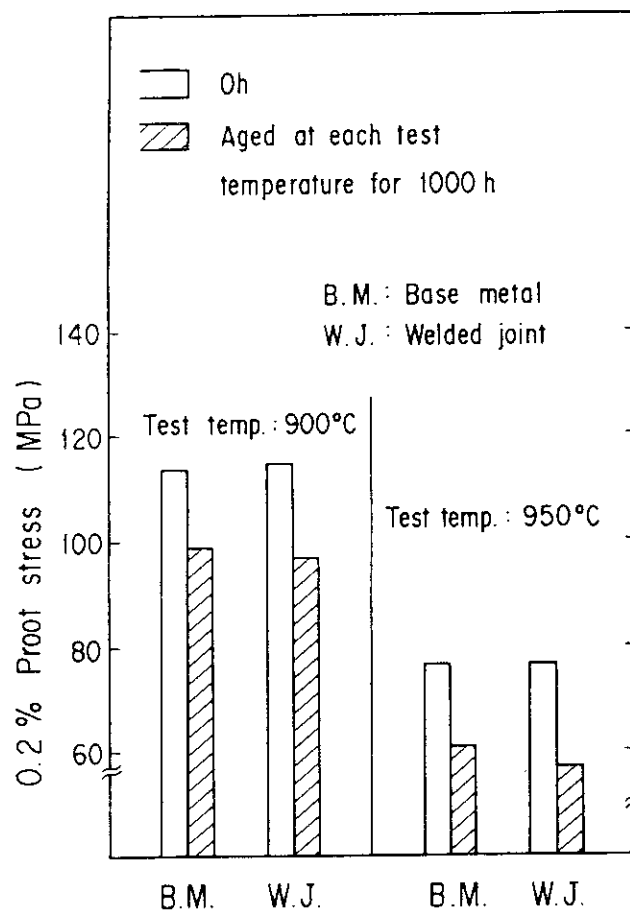


Fig. 12 0.2% proof stress at elevated temperatures before and after thermal aging.



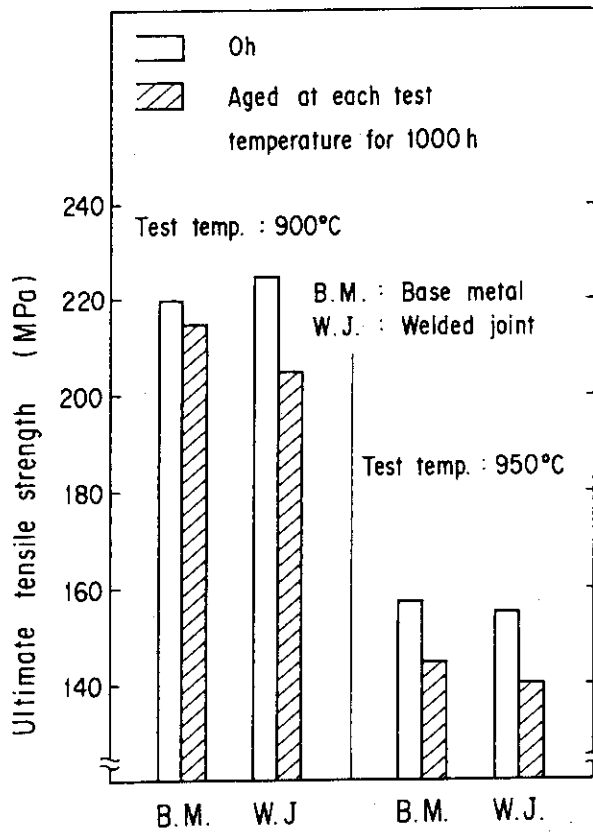


Fig. 13 Ultimate tensile strength at elevated temperatures before and after thermal aging.

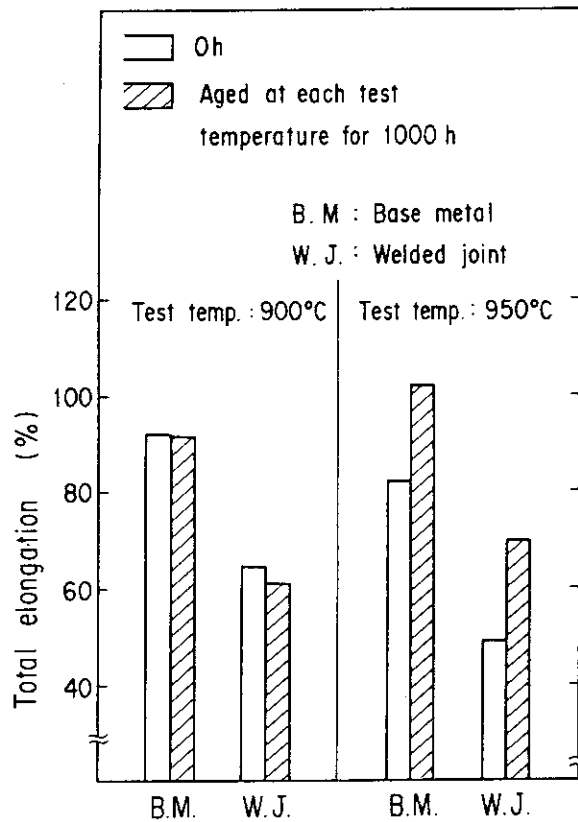


Fig. 14 Total elongation at elevated temperatures before and after thermal aging.

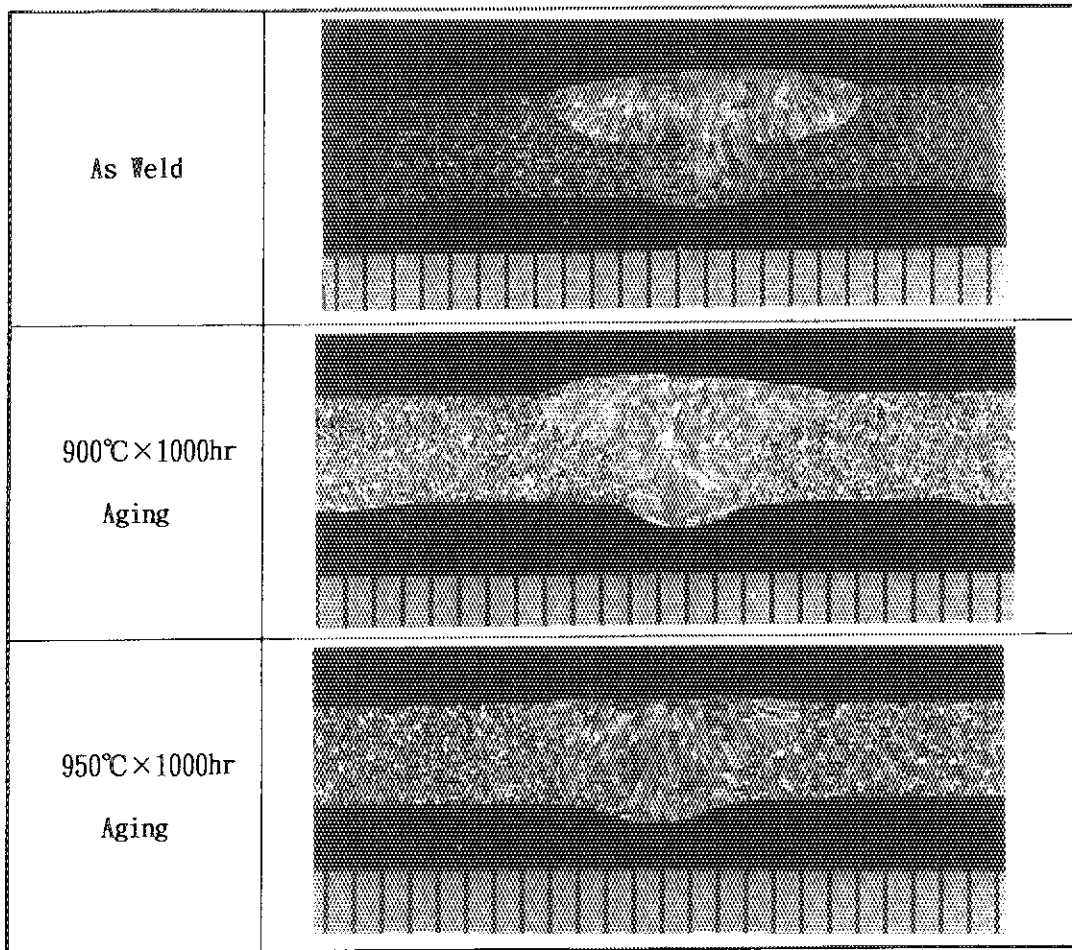


Fig. 15 Macrostructures of welded-joint tube after thermal aging at 900 and 950°C for 1000 hr.

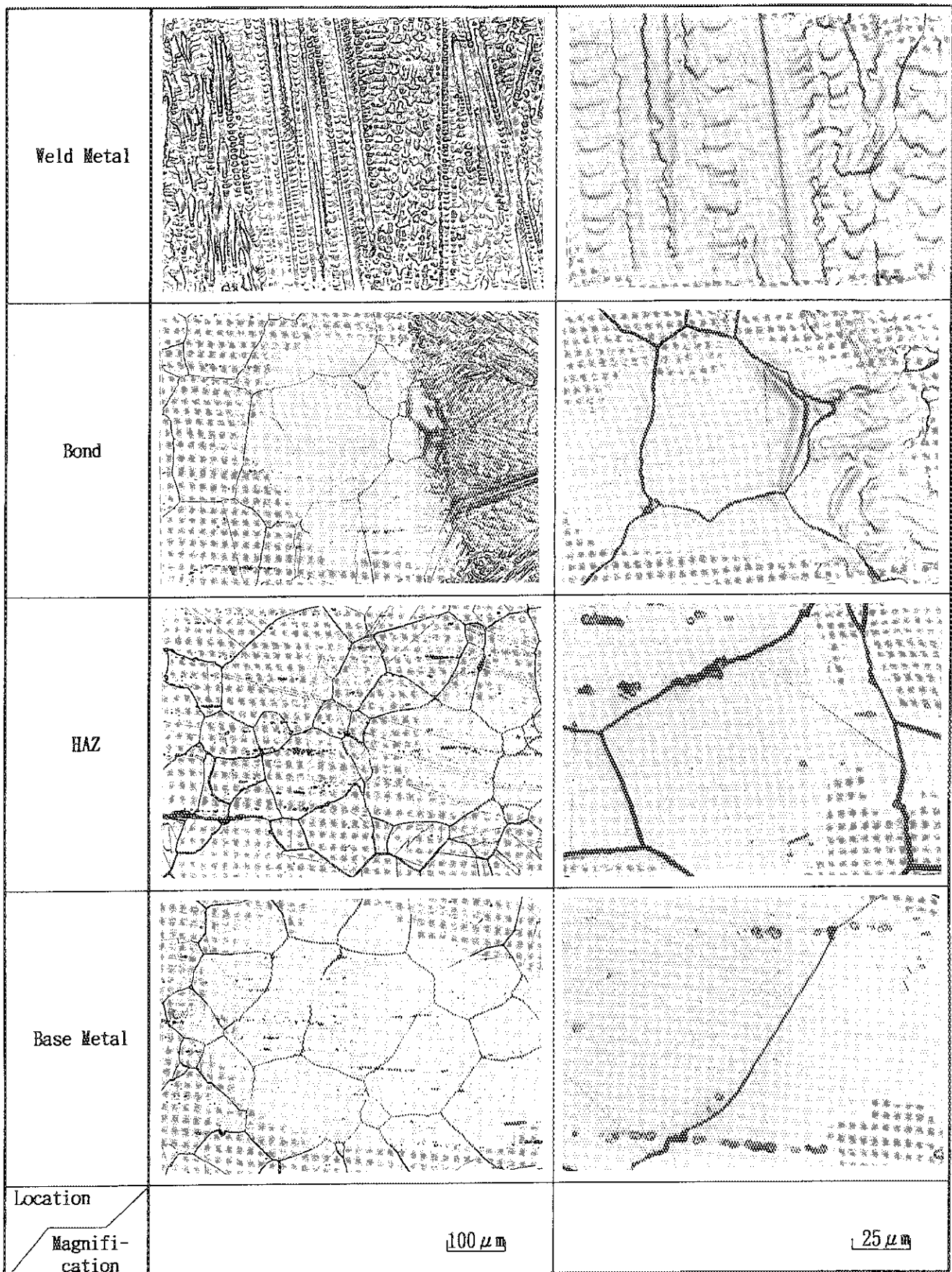


Fig. 16(a) Microstructures of welded-joint tube.

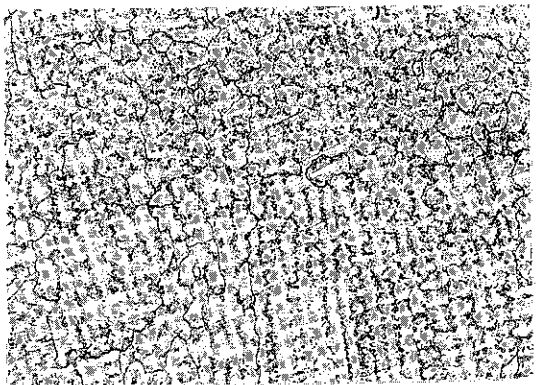
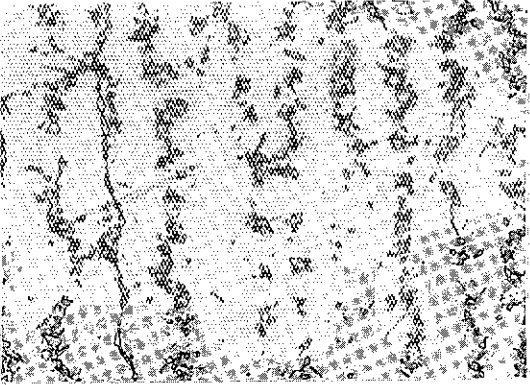
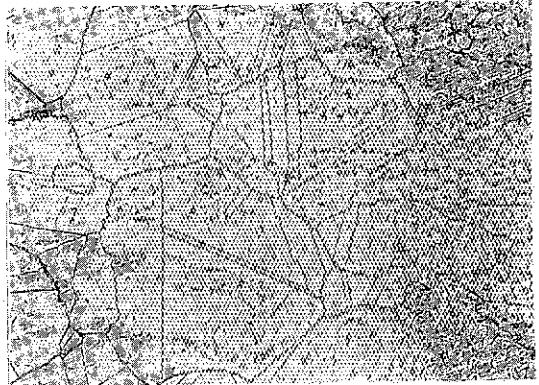
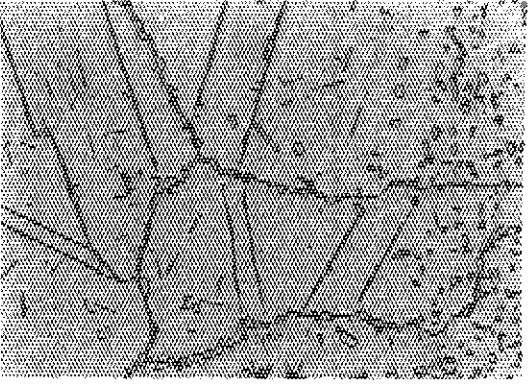
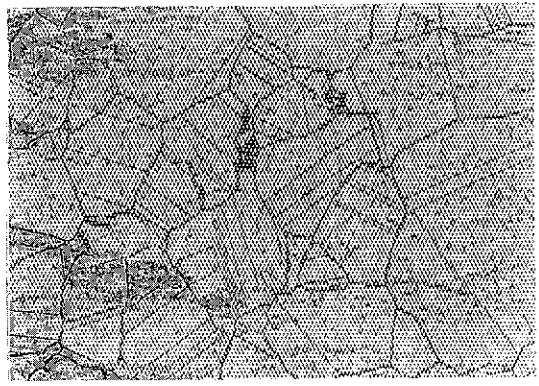
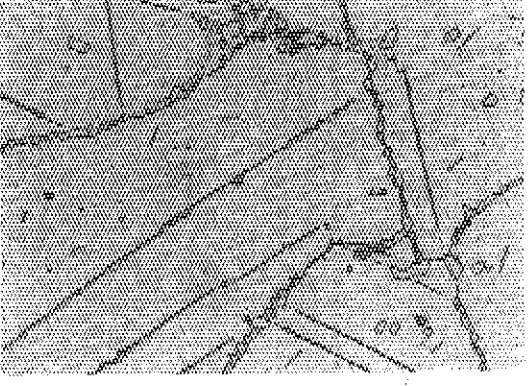
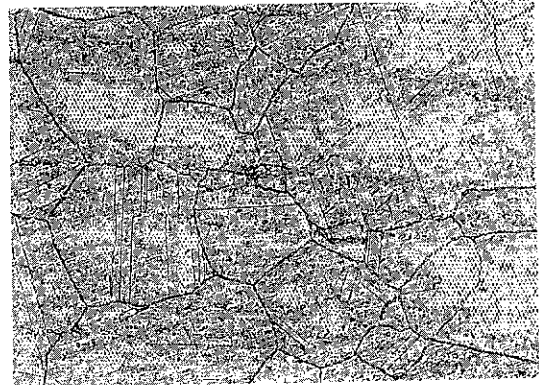
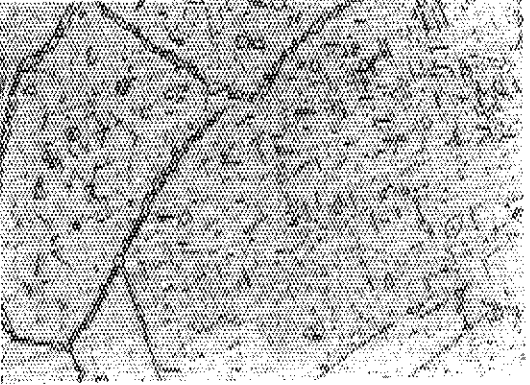
|               |   |  |
|---------------|---|--|
| Weld Metal    |    |    |
| Bond          |   |   |
| HAZ           |  |  |
| Base Metal    |  |  |
| Location      |   |  |
| Magnification | 100 μm  | 25 μm  |

Fig. 16(b) Microstructures of welded-joint tube after thermal aging at 900°C for 1000 hr.

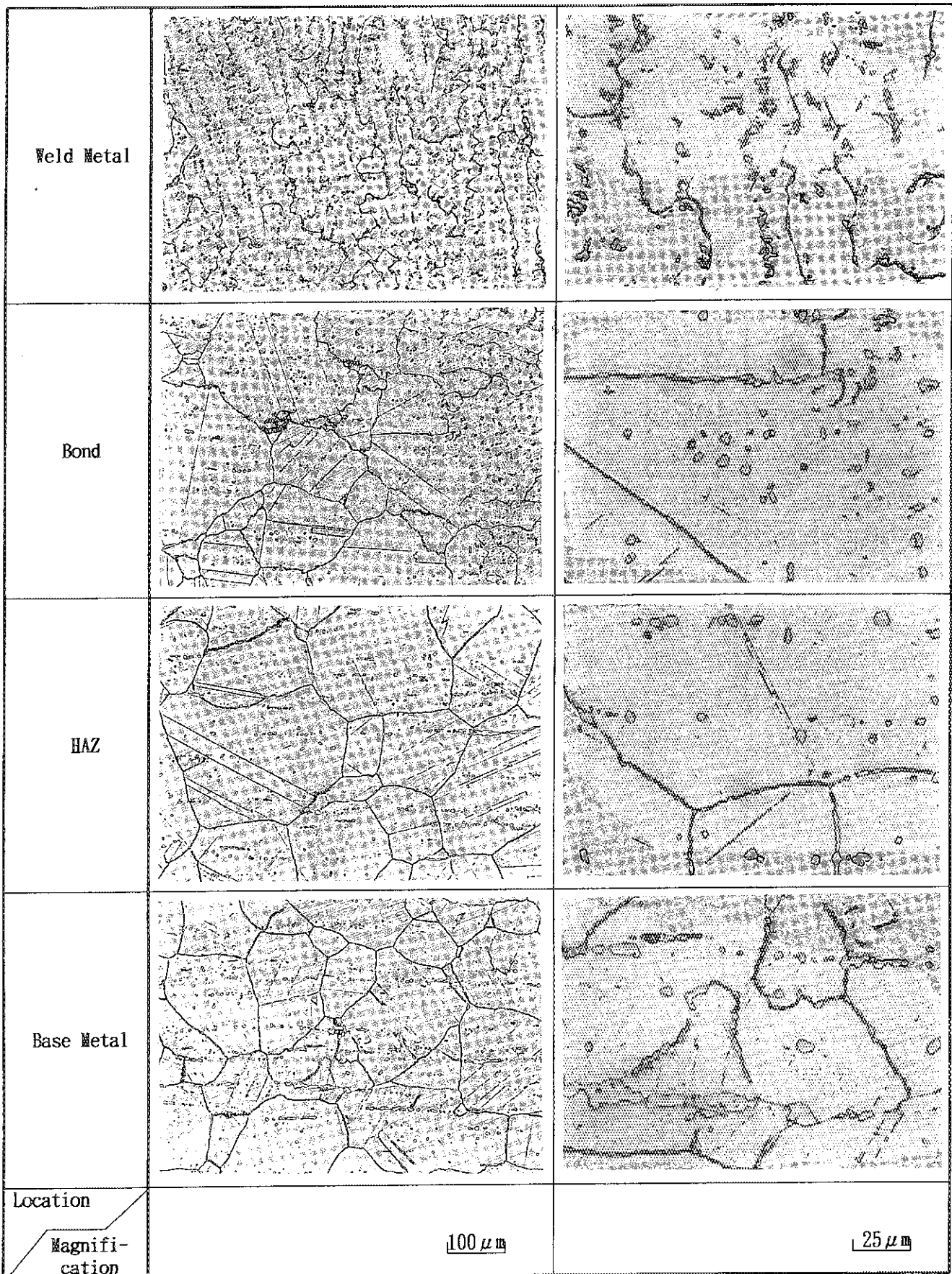


Fig. 16(c) Microstructures of welded-joint tube after thermal aging at 950°C for 1000 hr.

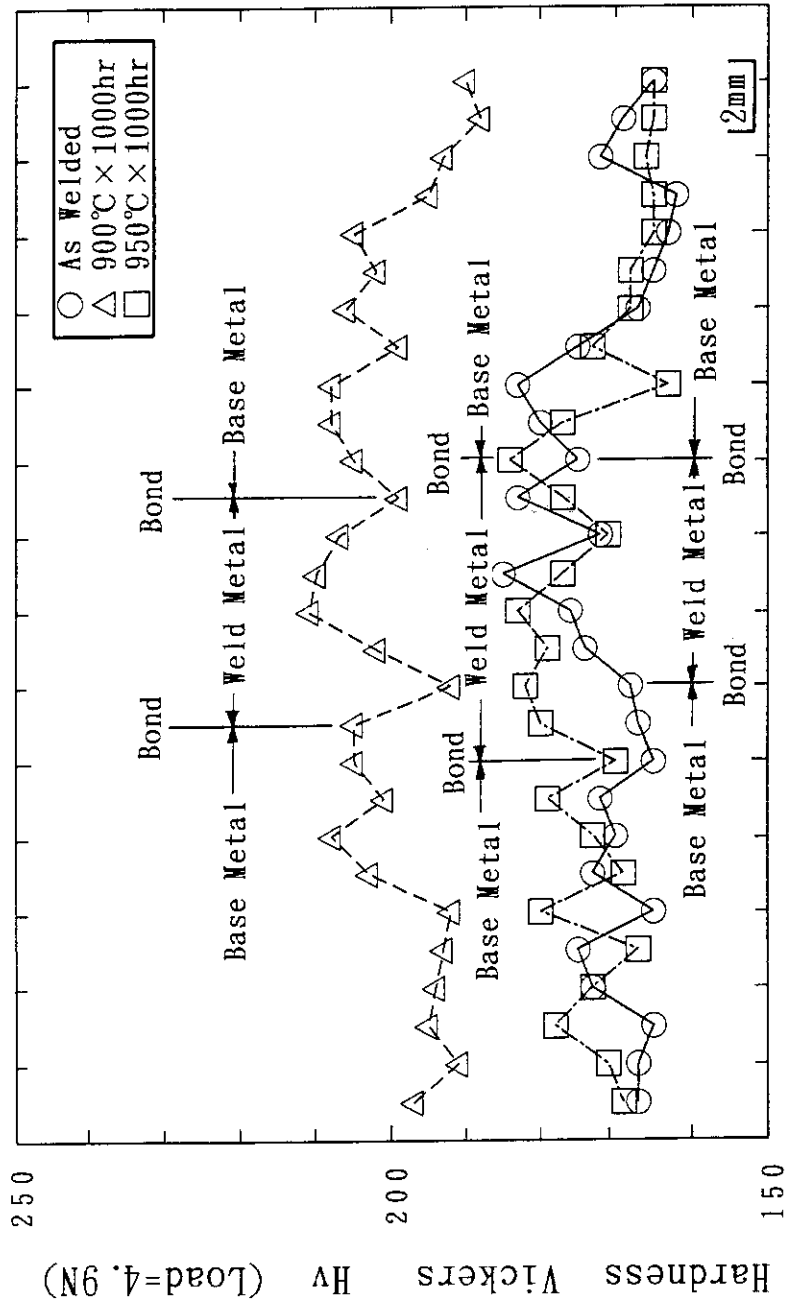


Fig. 17 Hardness distribution welded-joint tube after thermal aging at 900 and 950°C for 1000 hr.

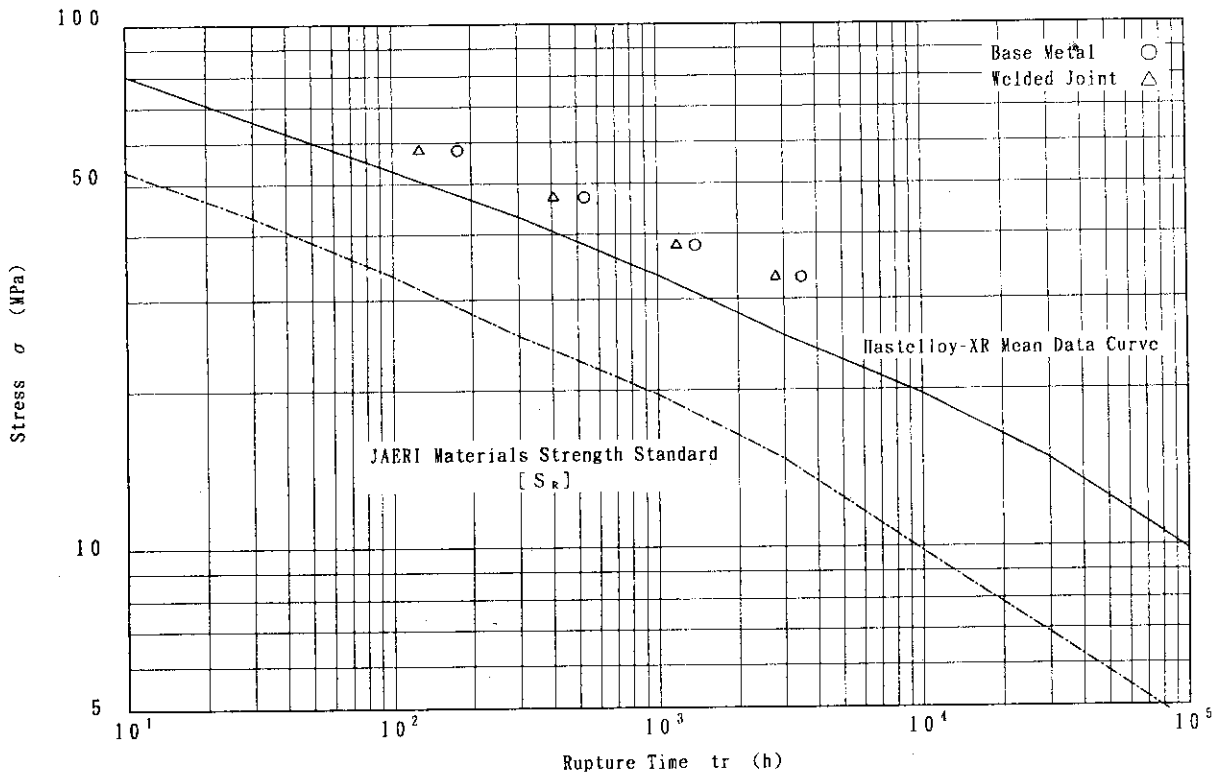


Fig. 18 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air

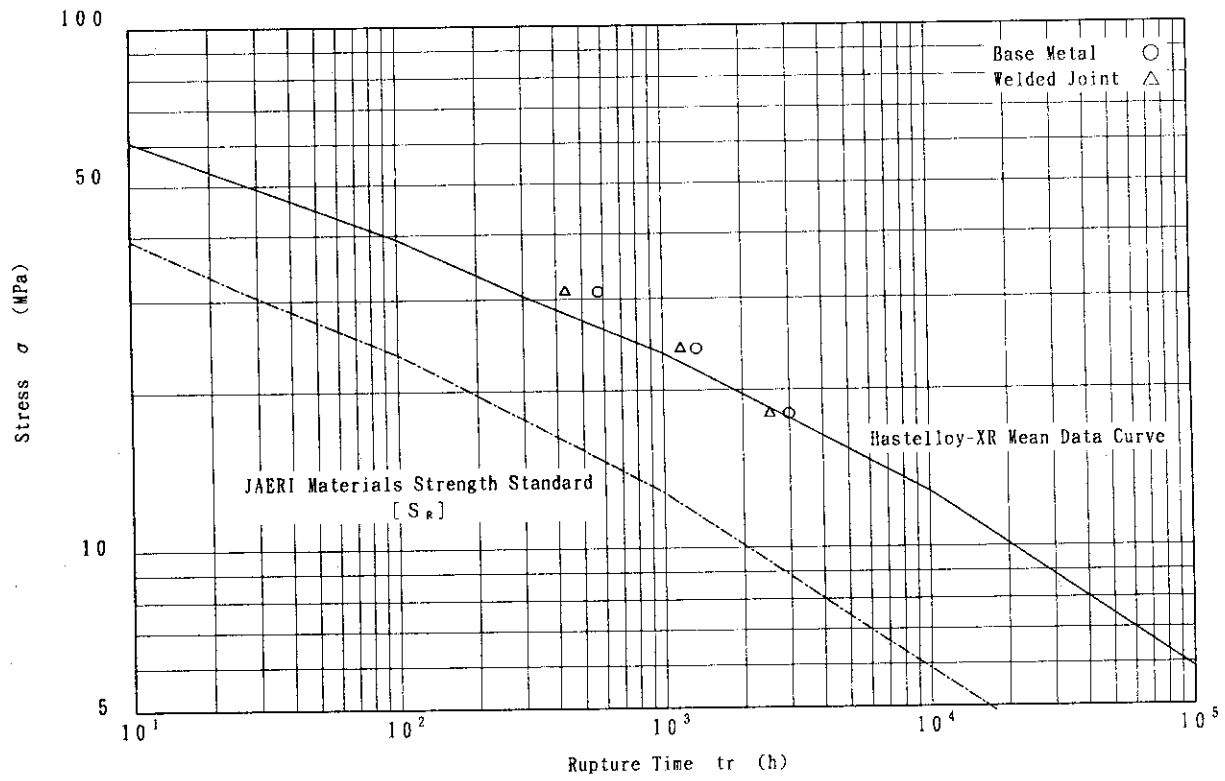


Fig. 19 Relation between applied stress and creep rupture time at 950°C in air

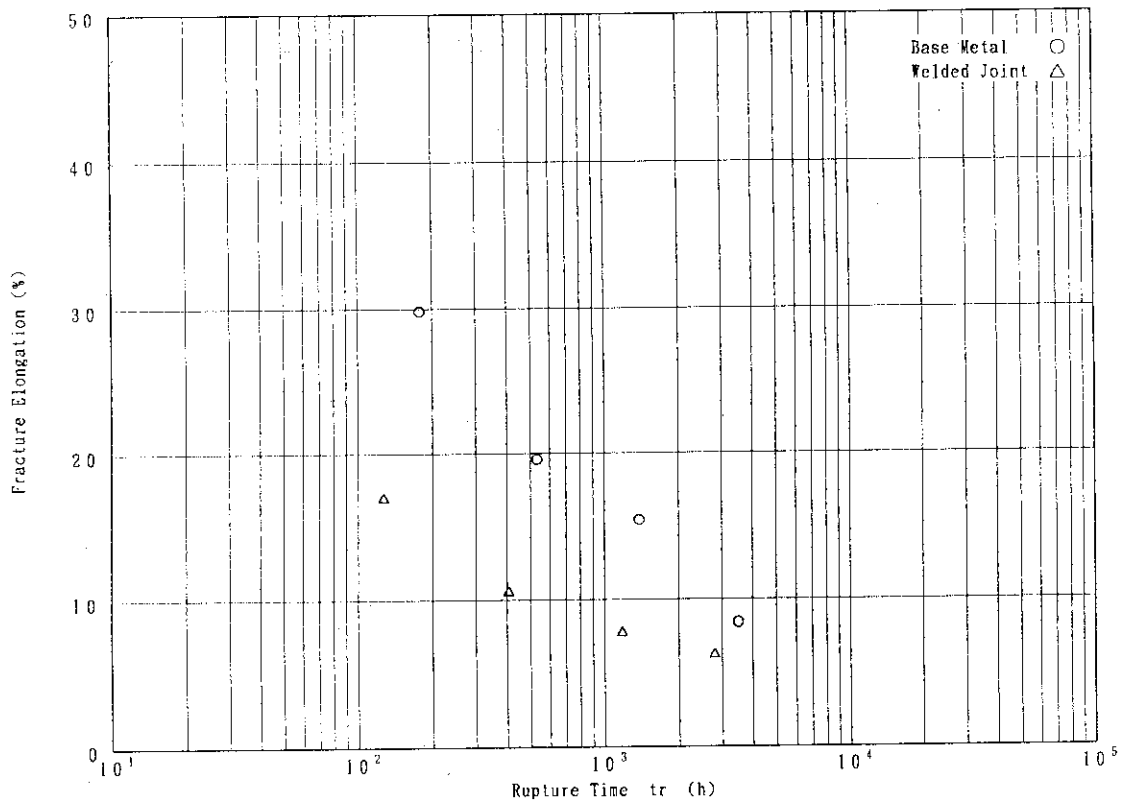


Fig. 20 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air

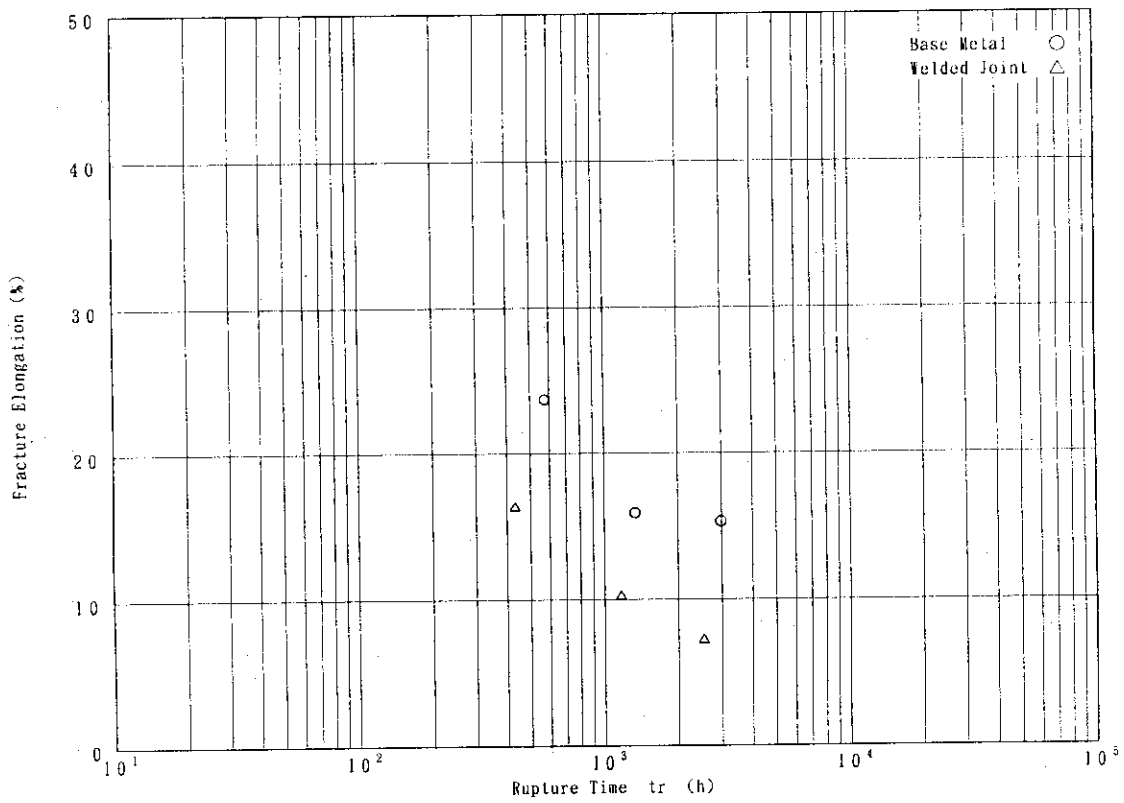


Fig. 21 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 950°C in air



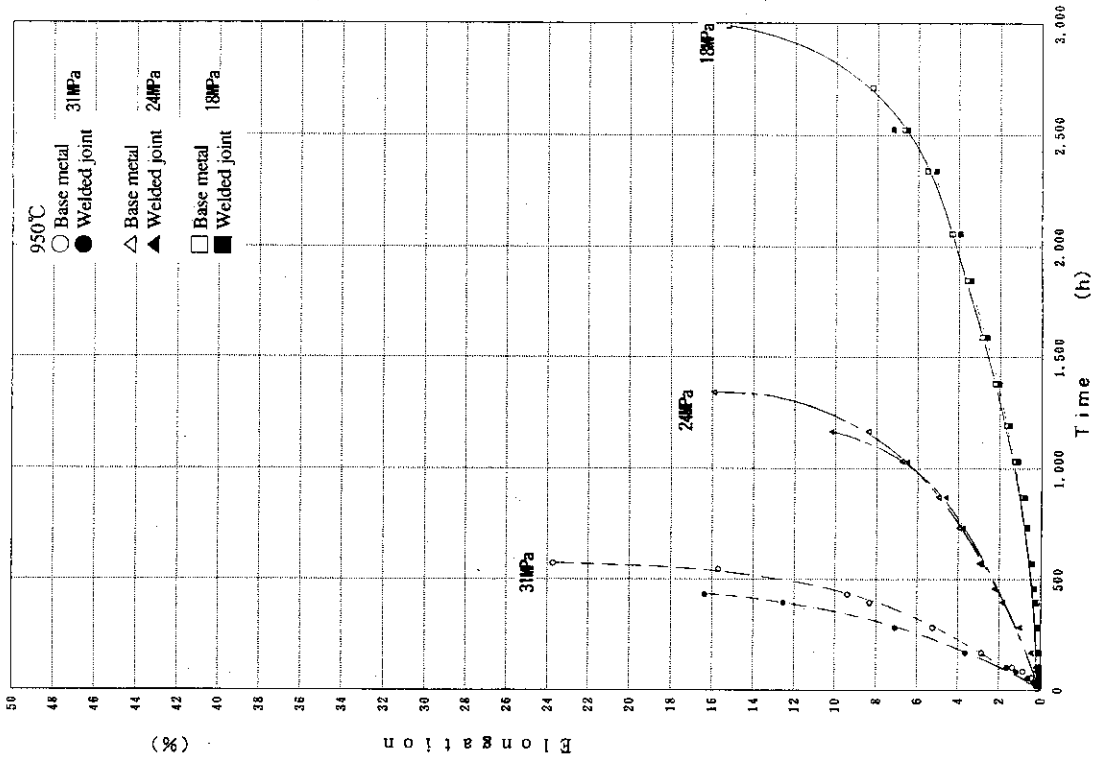


Fig. 23 Creep curves of Hastelloy Alloy XR tube at 950°C.

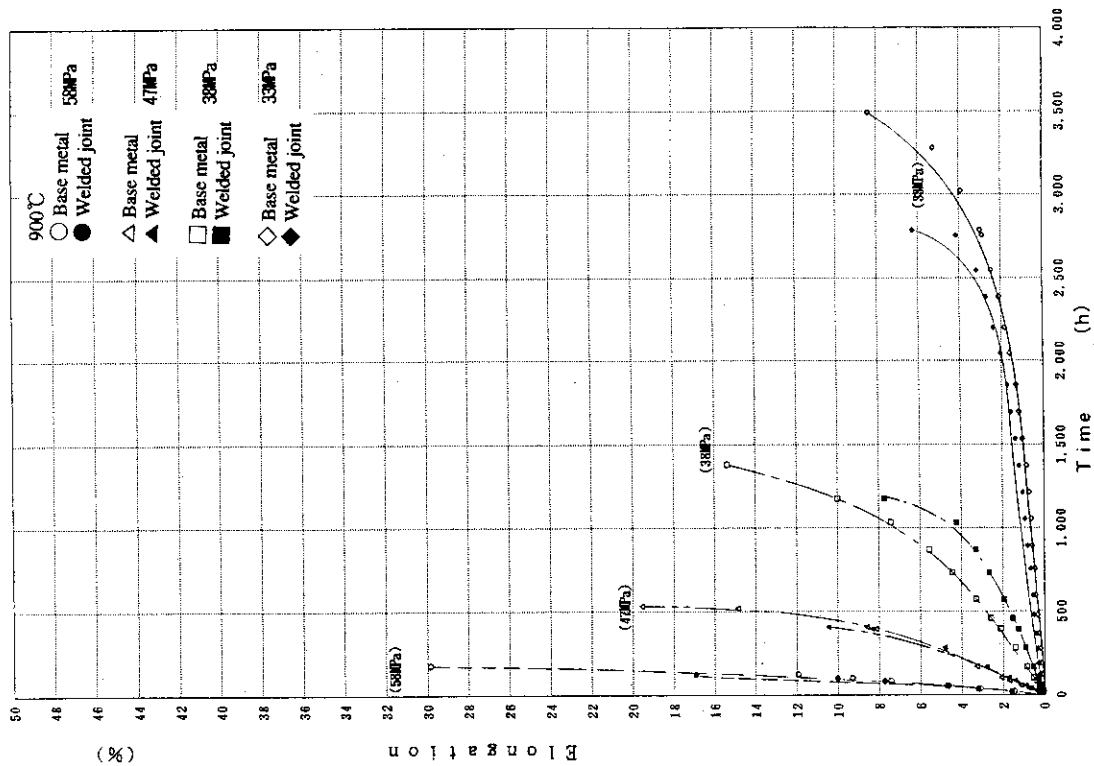


Fig. 22 Creep curves of Hastelloy Alloy XR tube at 900°C.

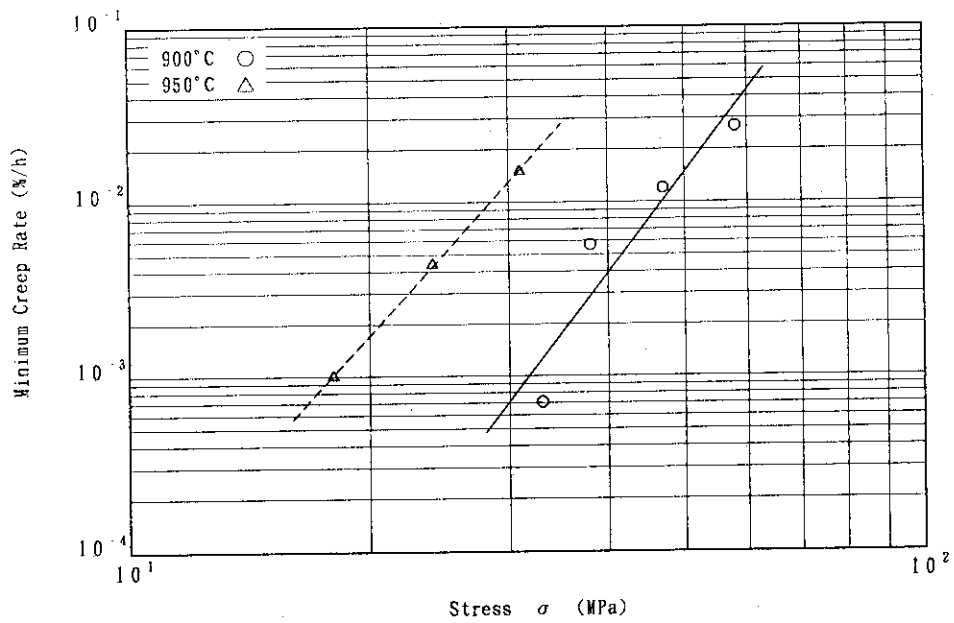


Fig. 24 Relation between minimum creep rate and applied stress in air (Base metal)

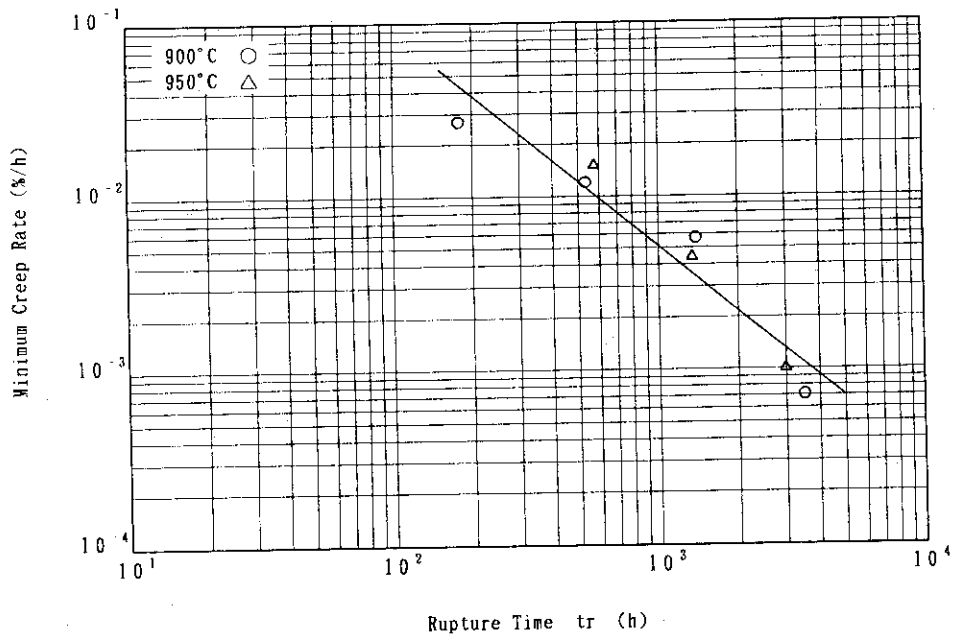
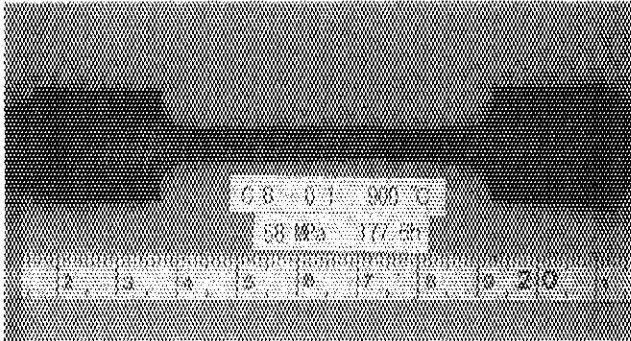
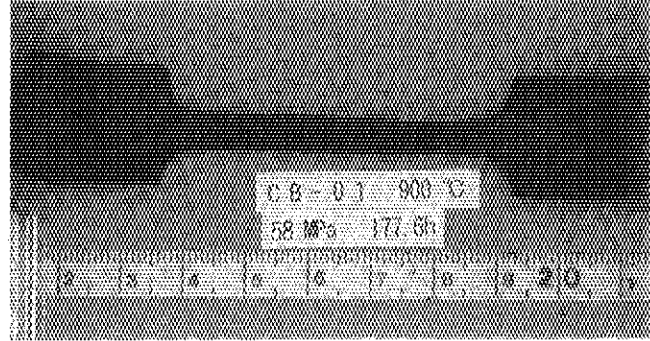


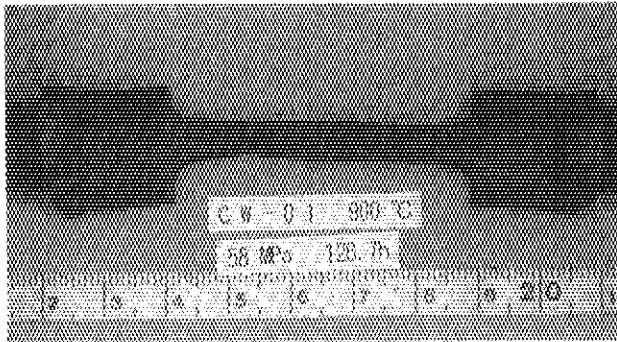
Fig. 25 Relation between minimum creep rate and creep rupture time in air (Base metal)



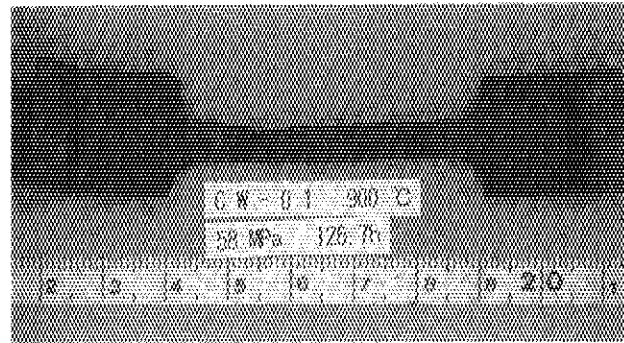
Outer side in base metal (CB-01)



Inner side in base metal (CB-01)

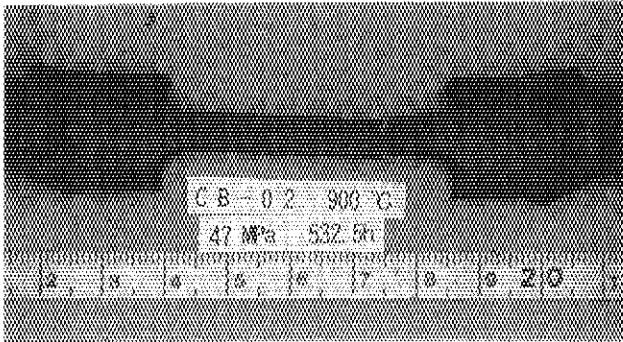


Outer side in welded joint (CW-01)

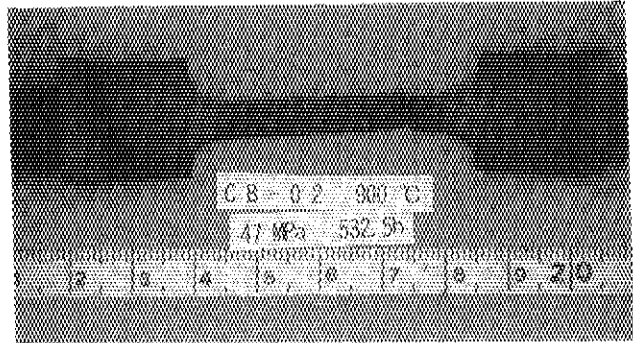


Inner side in welded joint (CW-01)

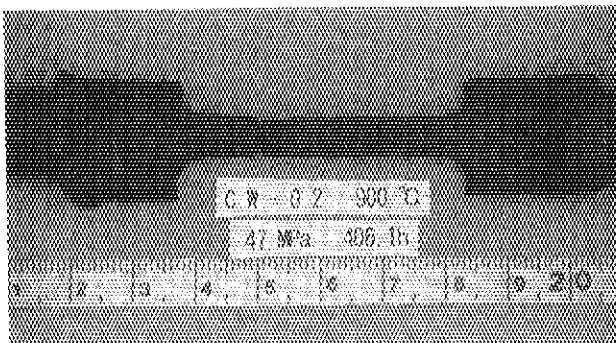
Fig. 26 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 58MPa at 900°C.



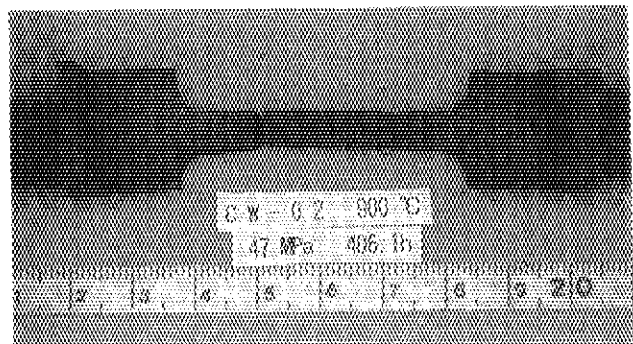
Outer side in base metal (CB-02)



Inner side in base metal (CB-02)

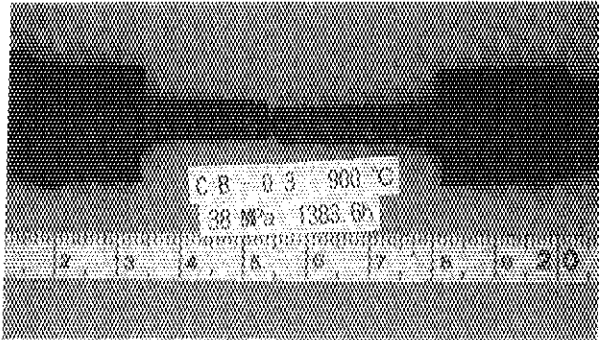


Outer side in welded joint (CW-02)

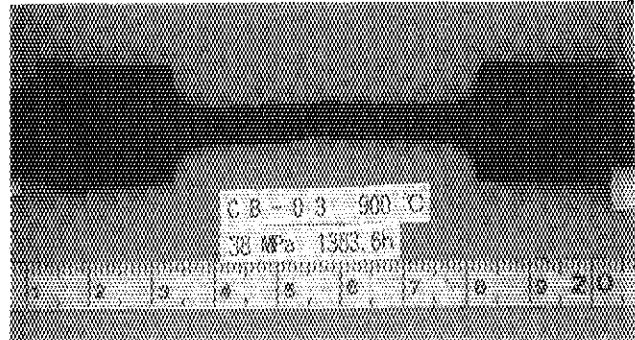


Inner side in welded joint (CW-02)

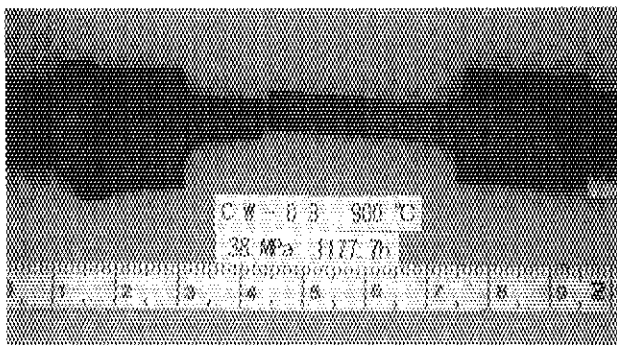
Fig. 27 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 47MPa at 900°C.



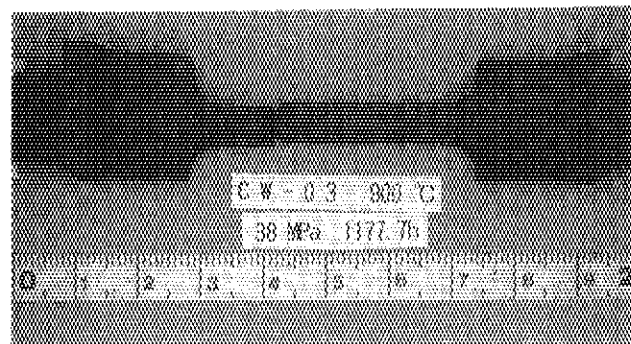
Outer side in base metal (CB-03)



Inner side in base metal (CB-03)

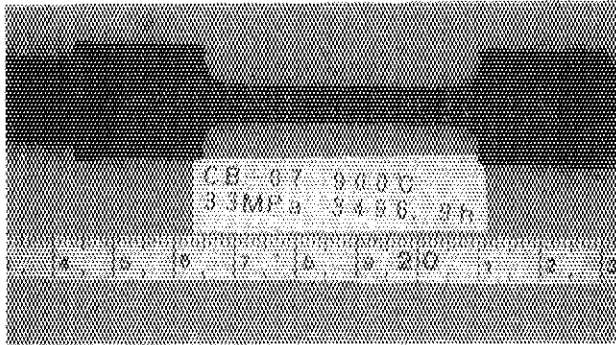


Outer side in welded joint (CW-03)

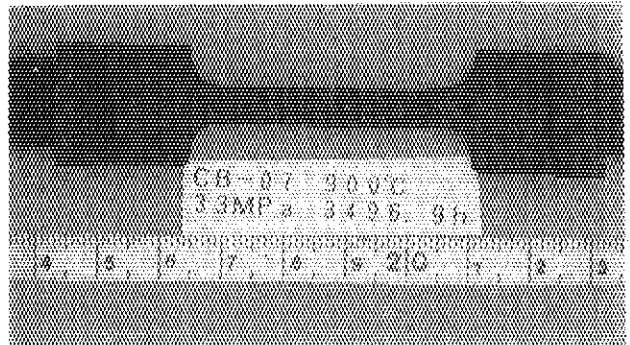


Inner side in welded joint (CW-03)

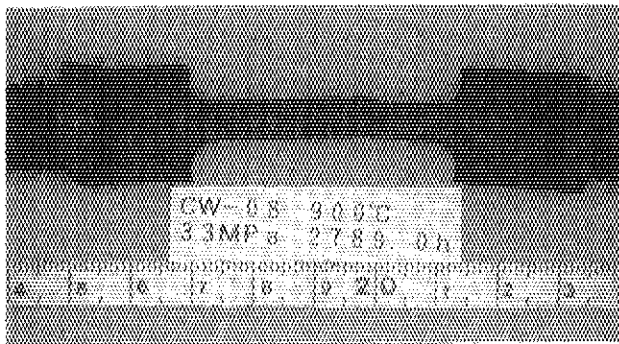
Fig. 28 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 38MPa at 900°C.



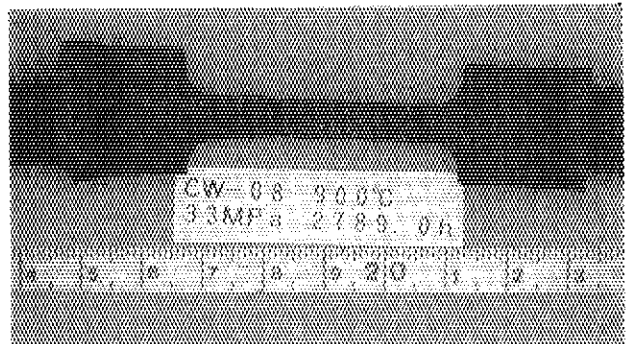
Outer side in base metal (CB-07)



Inner side in base metal (CB-07)

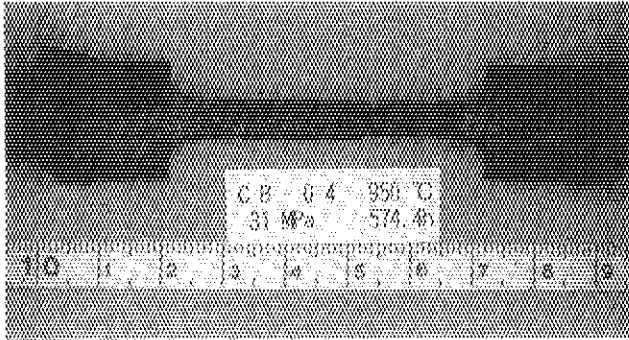


Outer side in welded joint (CW-08)

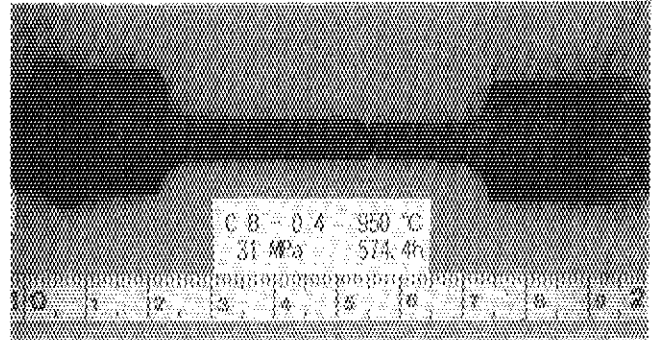


Inner side in welded joint (CW-08)

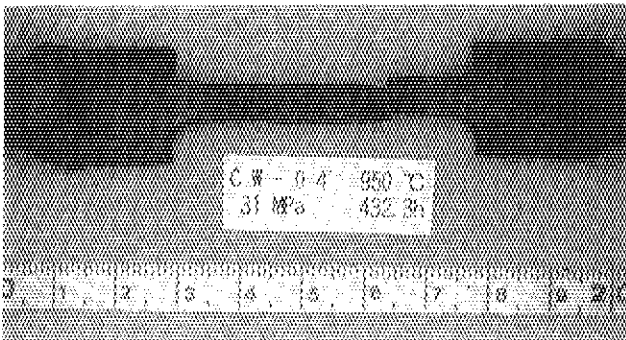
Fig. 29 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 33MPa at 900°C.



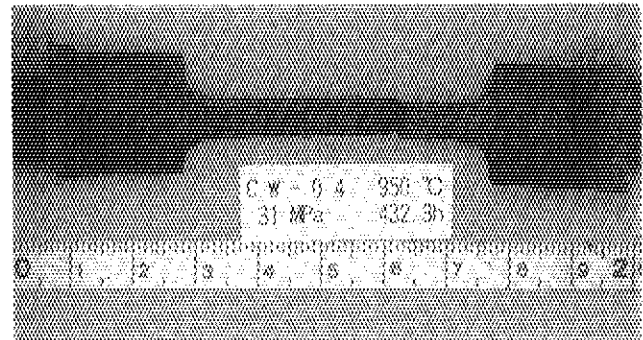
Outer side in base metal (CB-04)



Inner side in base metal (CB-04)

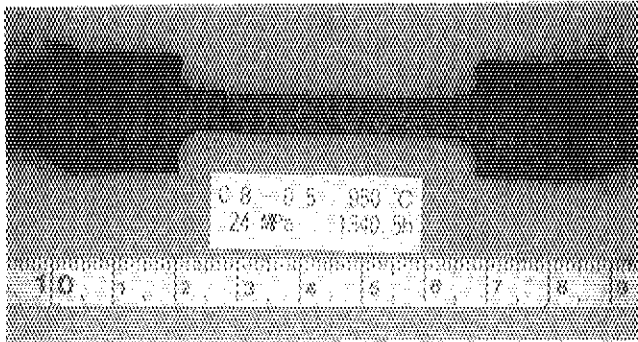


Outer side in welded joint (CW-04)

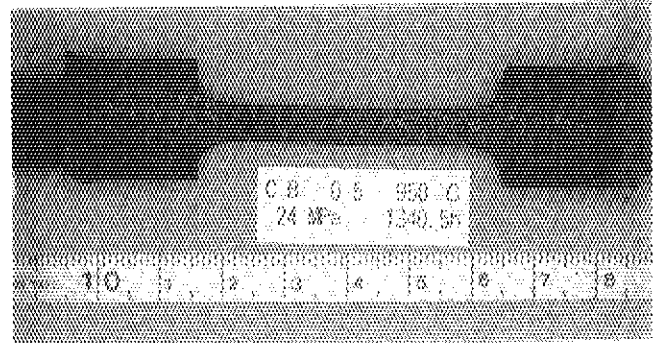


Inner side in welded joint (CW-04)

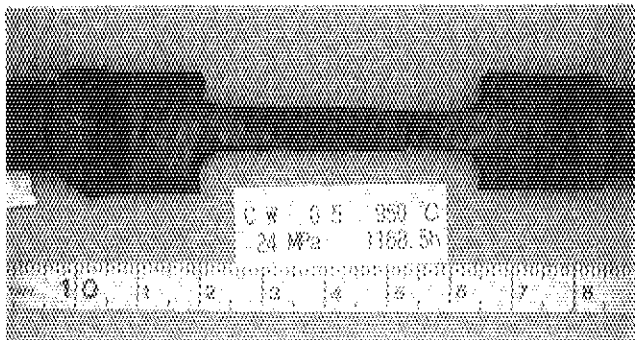
Fig. 30 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 31MPa at 950°C.



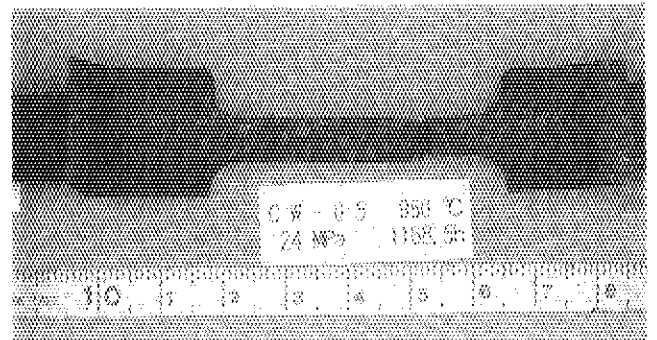
Outer side in base metal (CB-05)



Inner side in base metal (CB-05)



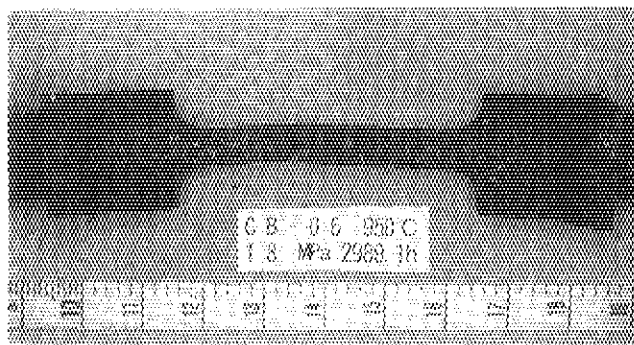
Outer side in welded joint (CW-05)



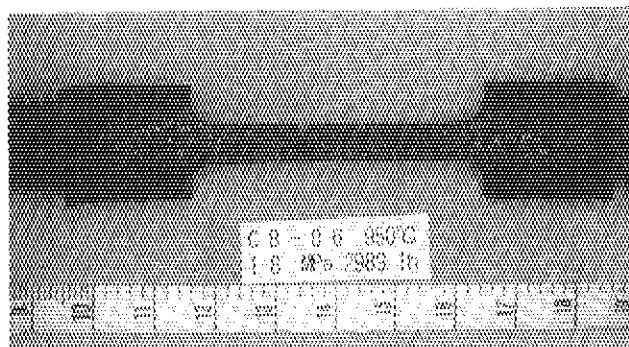
Inner side in welded joint (CW-05)

Fig. 31 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 24MPa at 950°C.

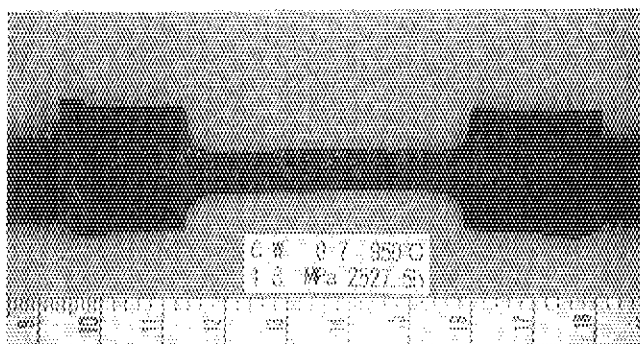




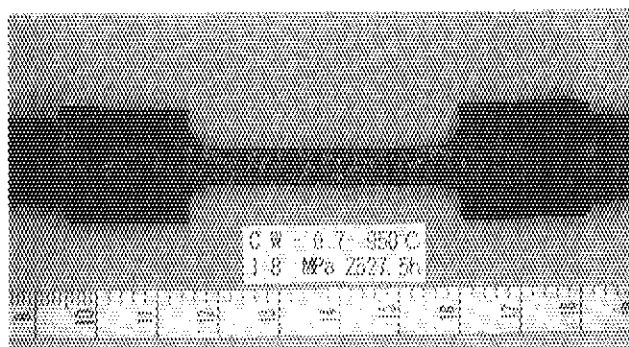
Outer side in base metal (CB-06)



Inner side in base metal (CB-06)



Outer side in welded joint (CW-07)



Inner side in welded joint (CW-07)

Fig. 32 Appearance of crept specimen after testing at a stress of 18MPa at 950°C.

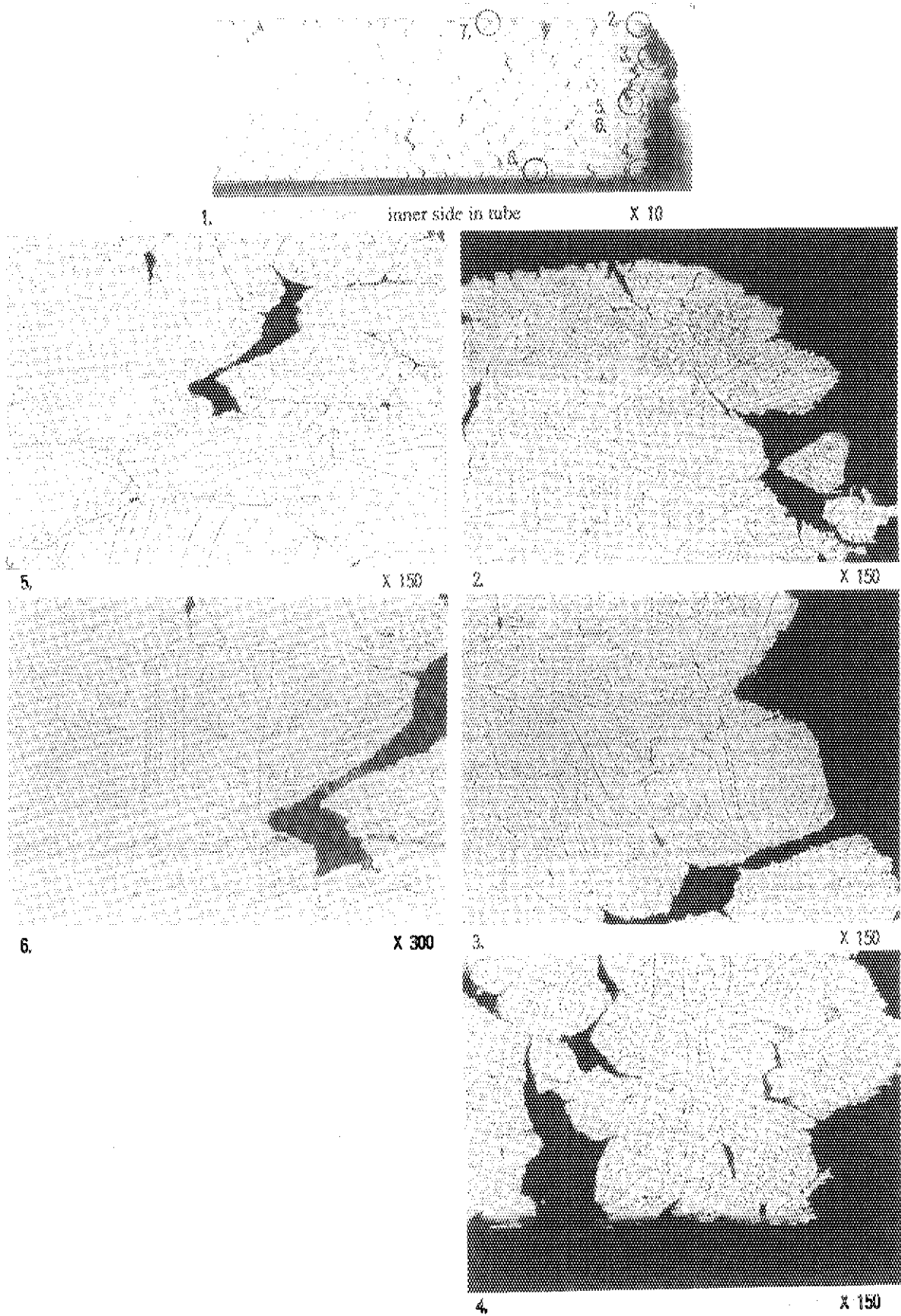
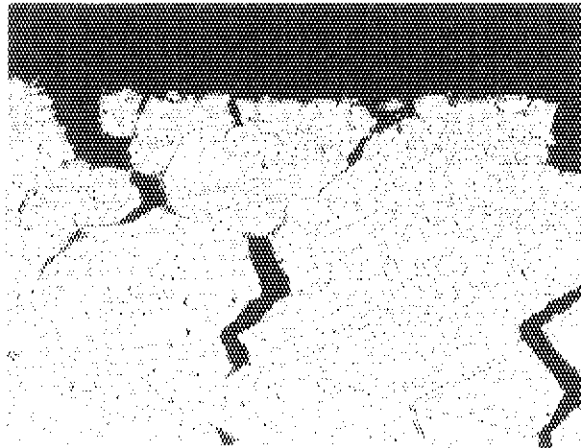


Fig. 33 Microstructures of fracture portion for base metal tube.  
(900°C, 58MPa, specimen No. CB-01)

inner side in tube



7.

X 150



8.

X 150

Fig. 33 (continued).

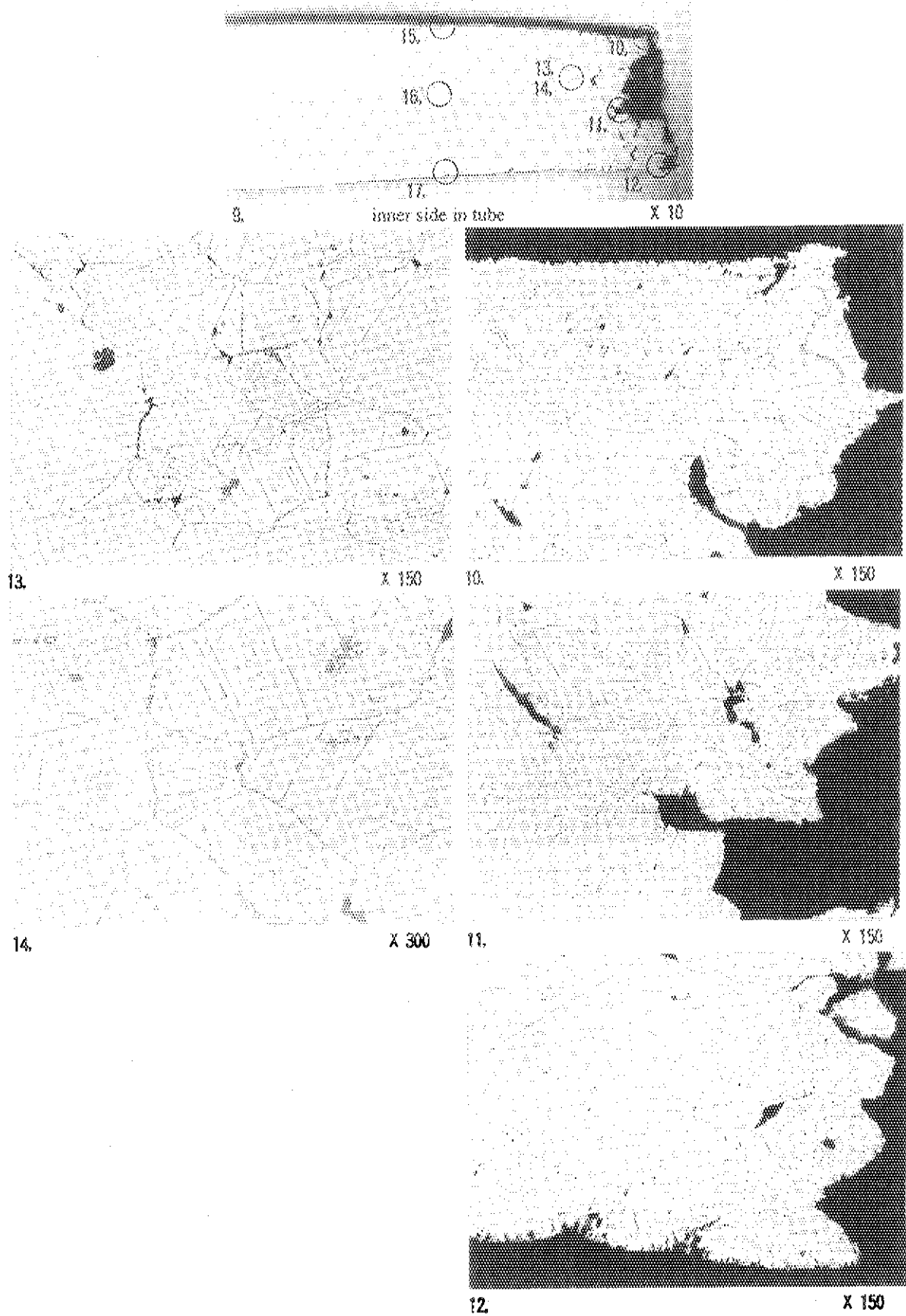


Fig. 34 Microstructures of fracture portion for welded-joint tube.  
(900°C, 58MPa, specimen No. CW-01)

inner side in tube

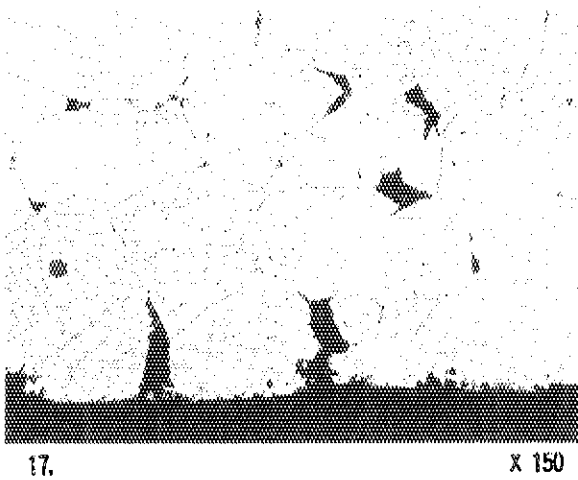
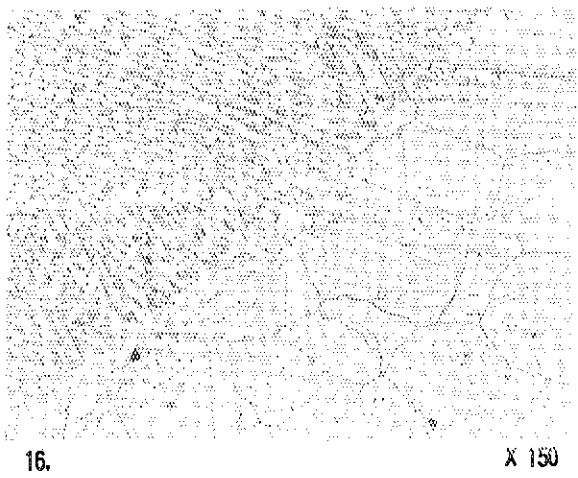
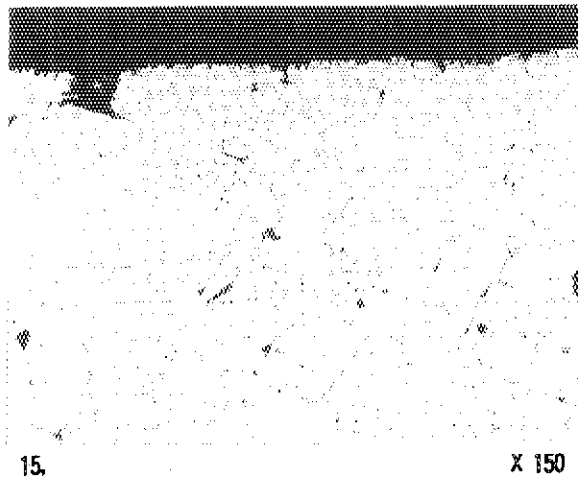


Fig. 34 (continued).

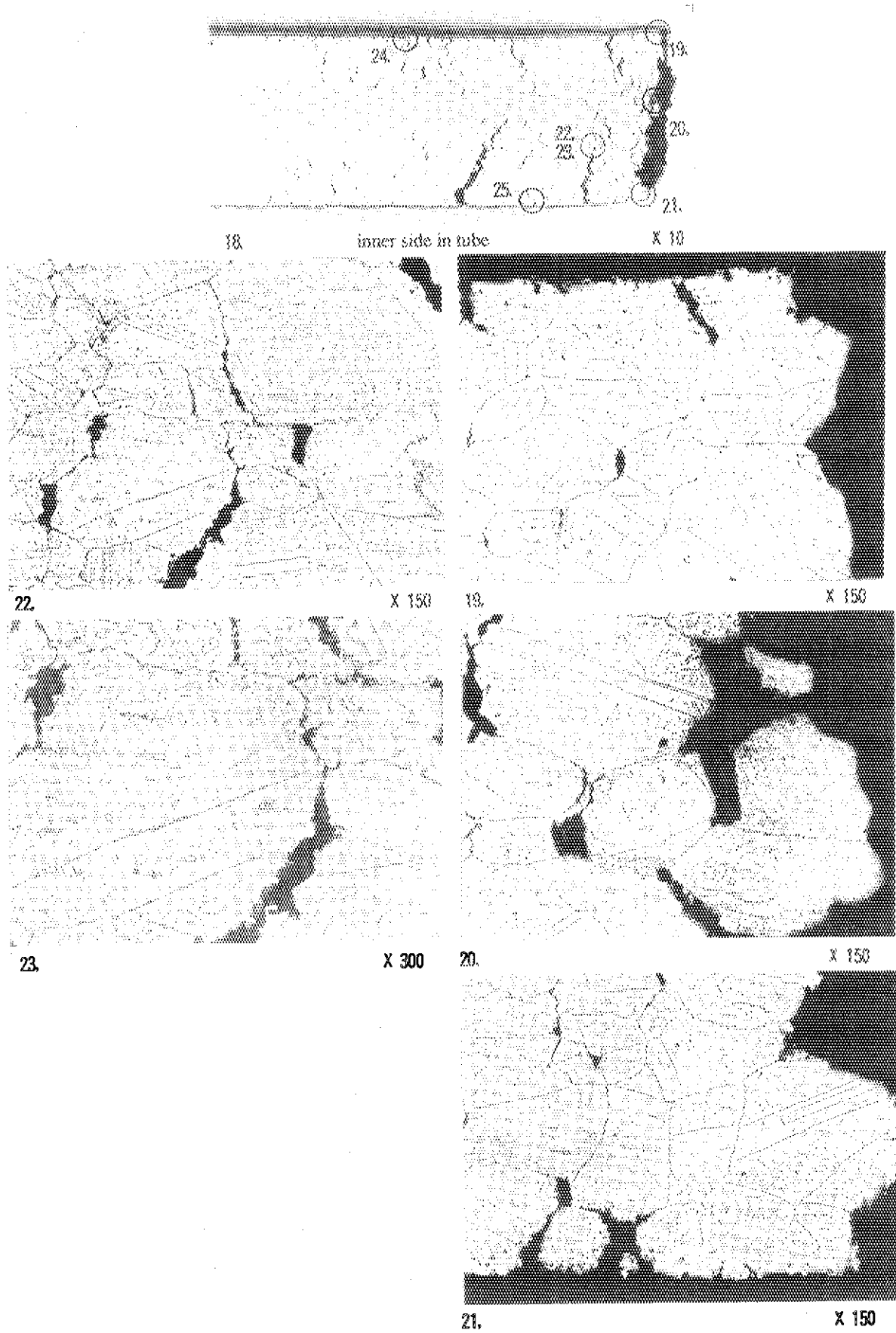


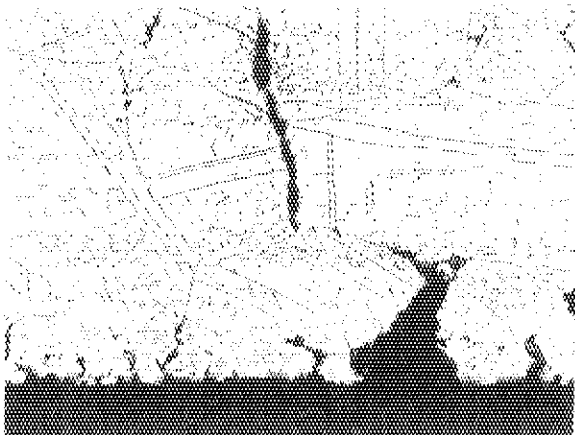
Fig. 35 Microstructures of fracture portion for base metal tube.  
(900°C, 38MPa, specimen No. CB-03)

inner side in tube



24.

X 150



25.

X 150

Fig. 35 (continued).

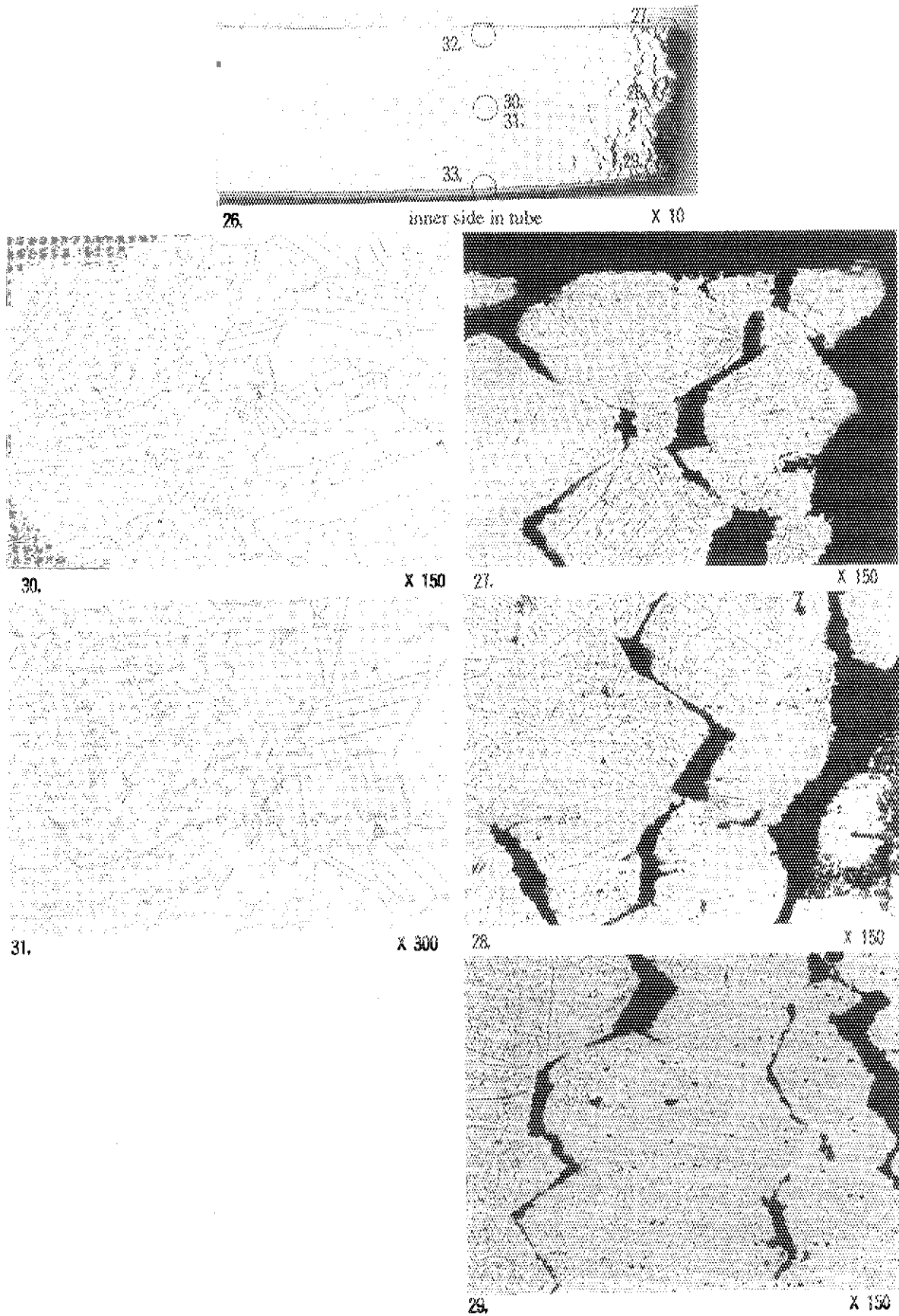
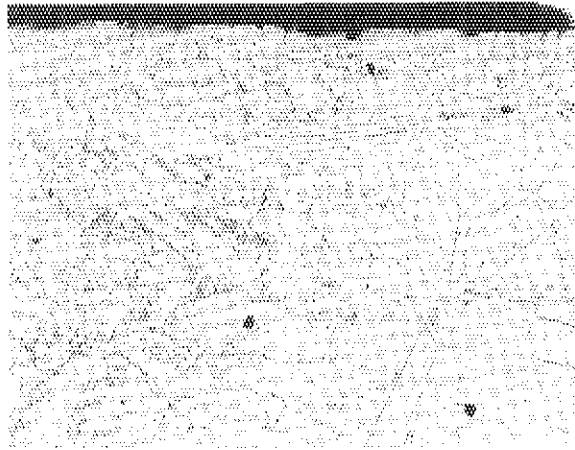


Fig. 36 Microstructures of fracture portion for welded-joint tube.  
(900°C, 38MPa, specimen No. CW-03)

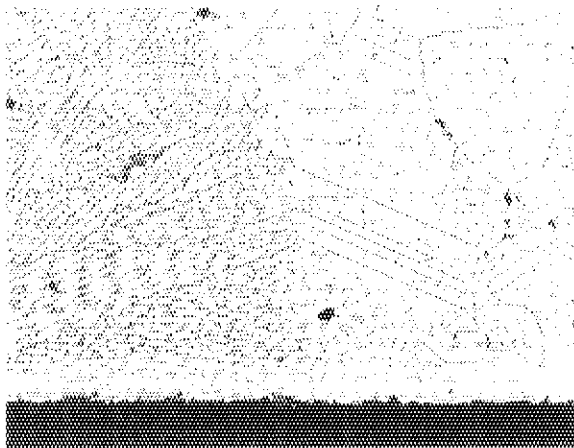


inner side in tube



32.

X 150



33.

X 150

Fig. 36 (continued).

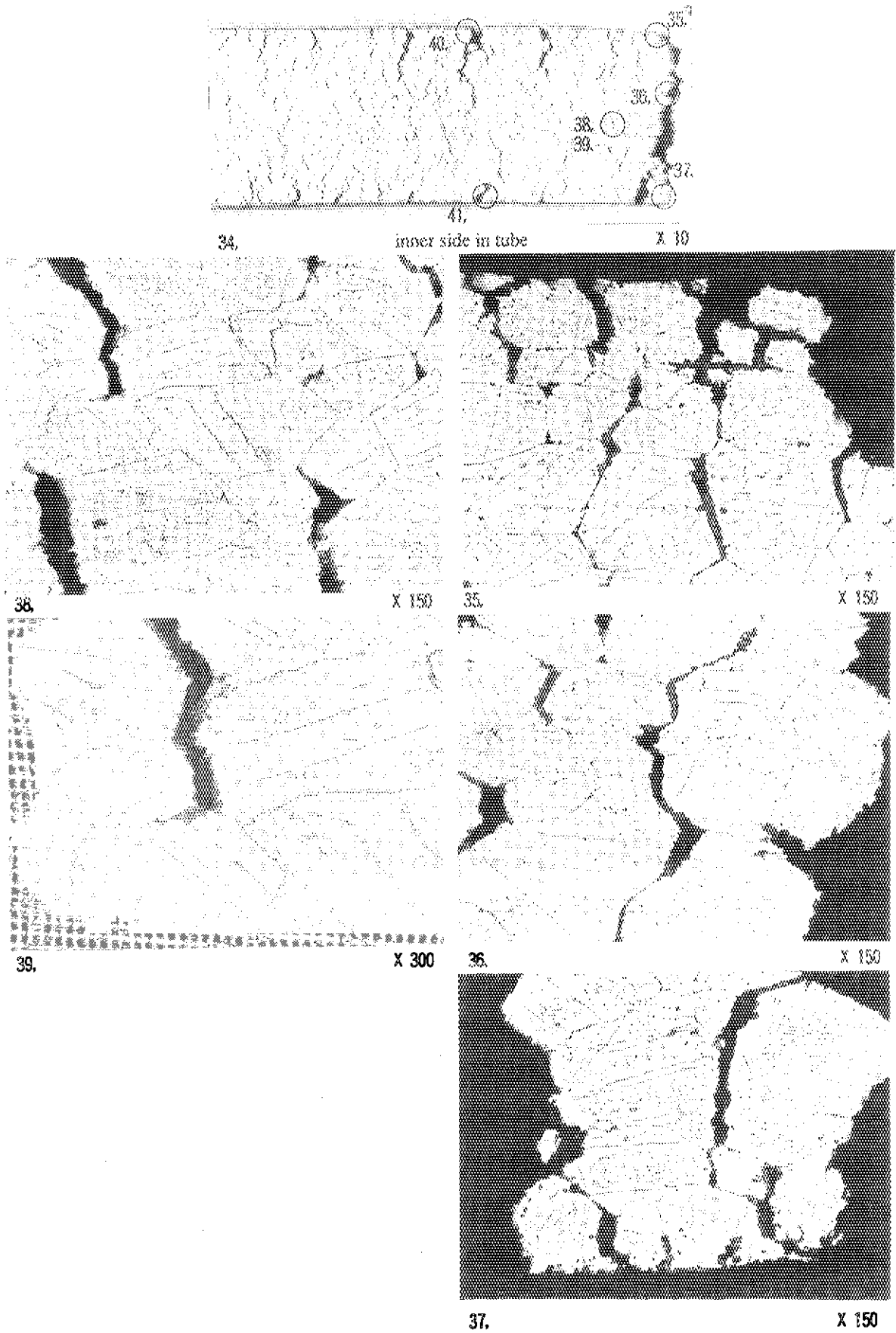
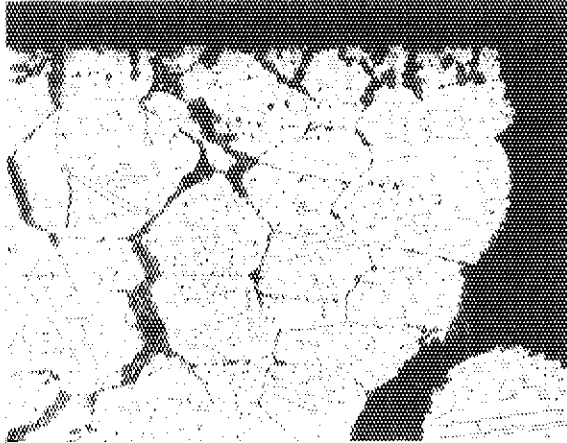


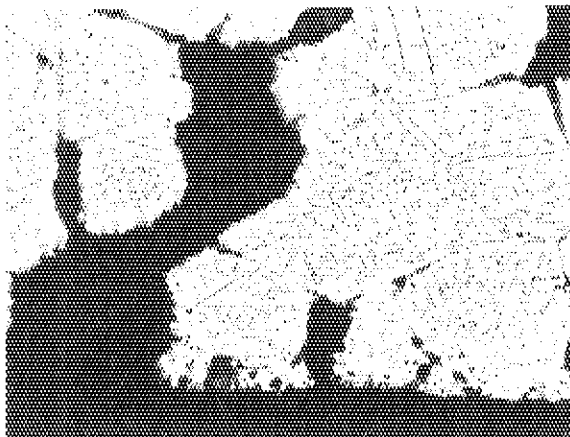
Fig. 37 Microstructures of fracture portion for base metal tube.  
(950°C, 31MPa, specimen No. CB-04)

inner side in tube



40.

X 150



41.

X 150

Fig. 37 (continued).

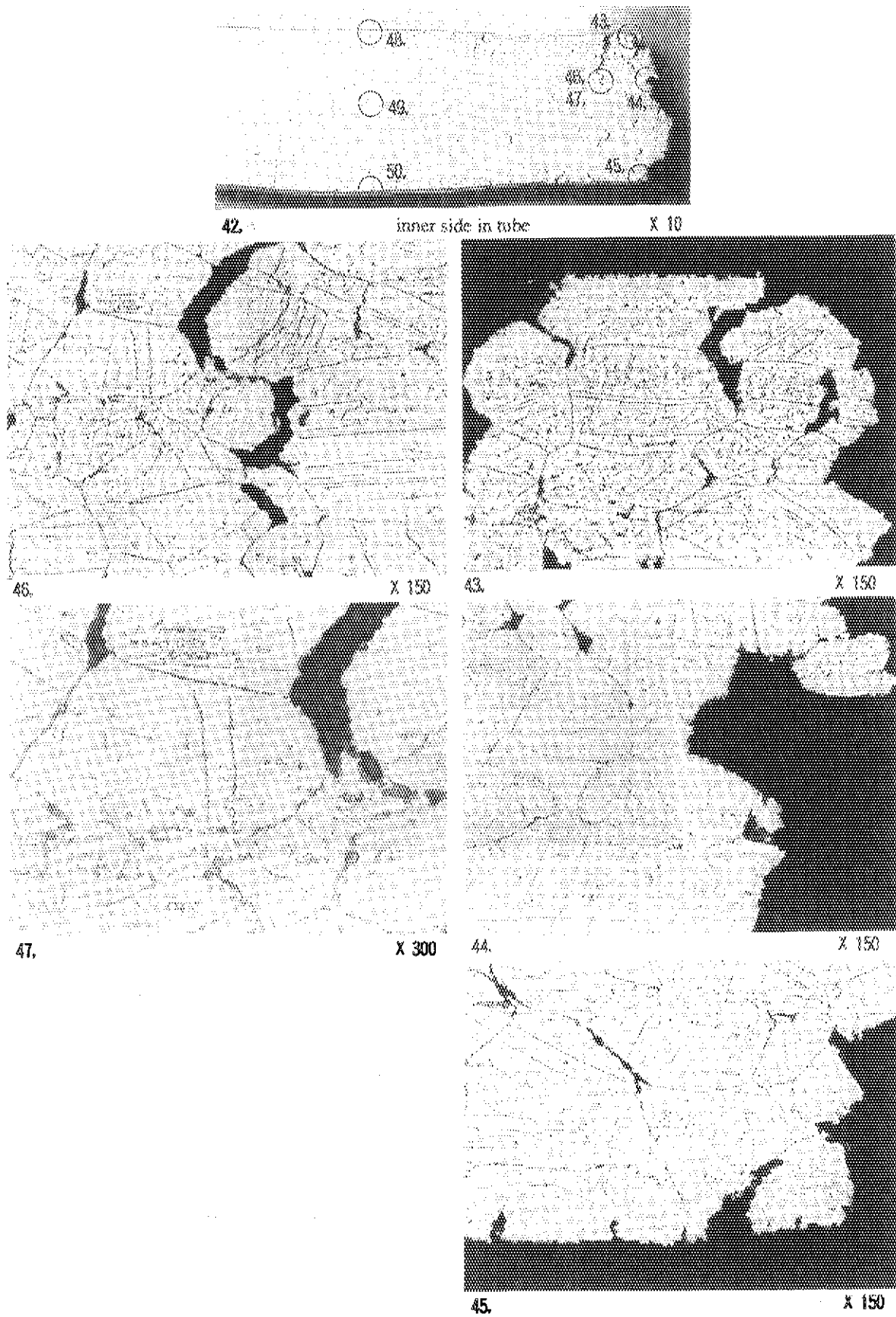
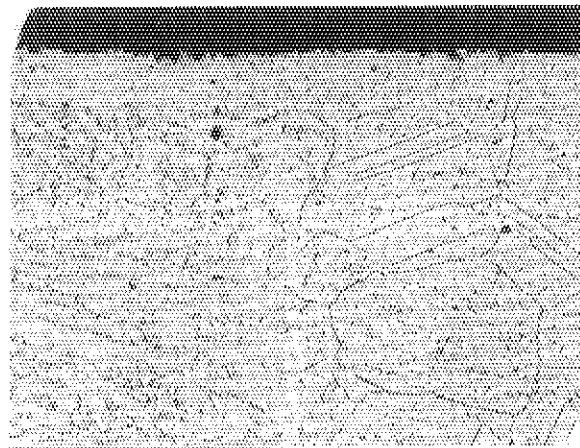


Fig. 38 Microstructures of fracture portion for welded-joint tube.  
(950°C, 31MPa, specimen No. CW-04)

inner side in tube



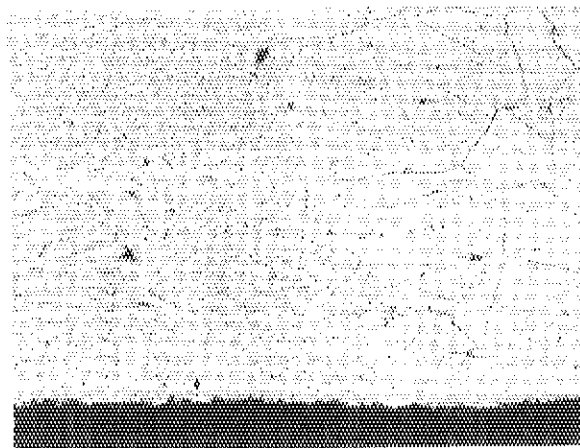
48.

X 150



49.

X 150



50.

X 150

Fig. 38 (continued).

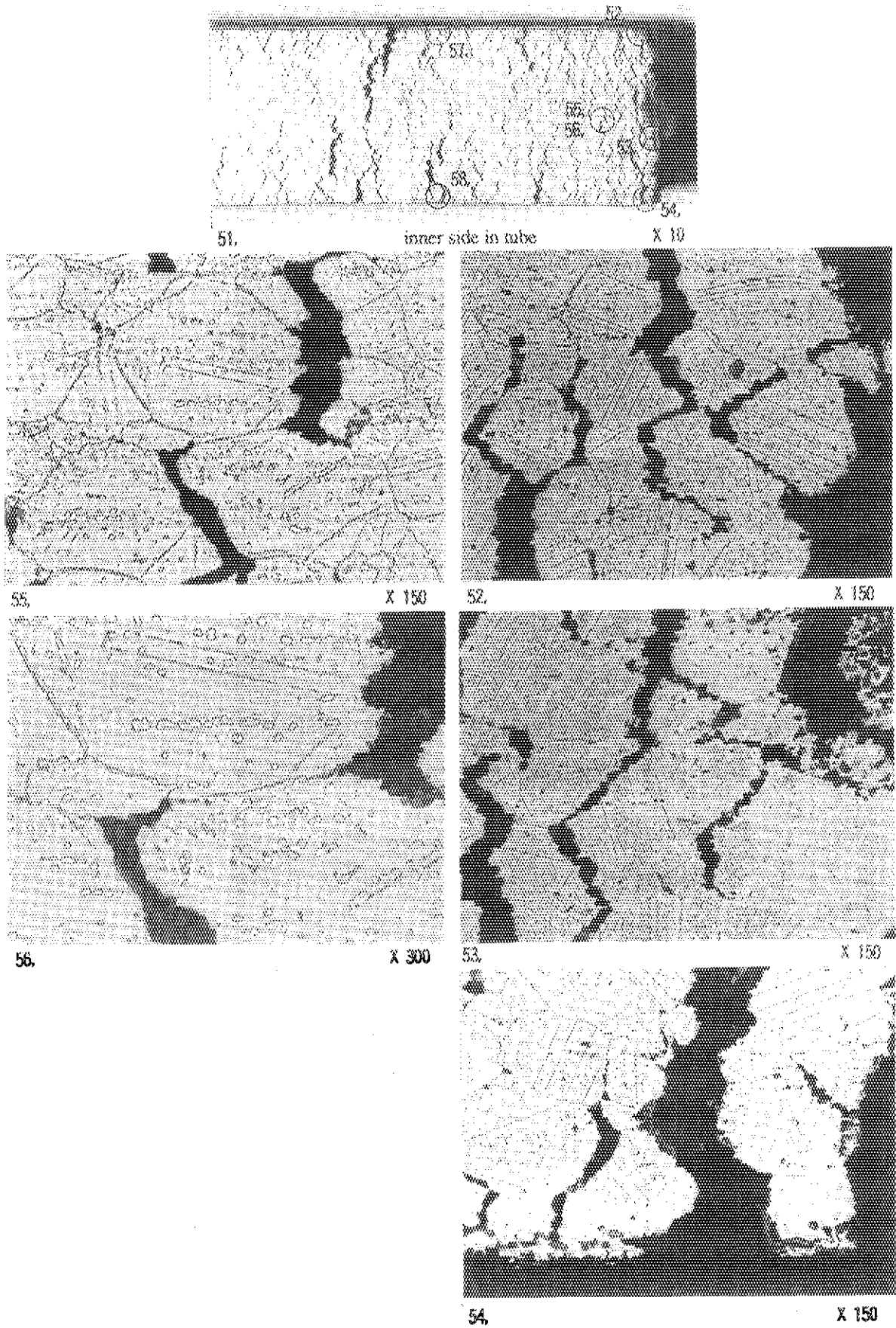
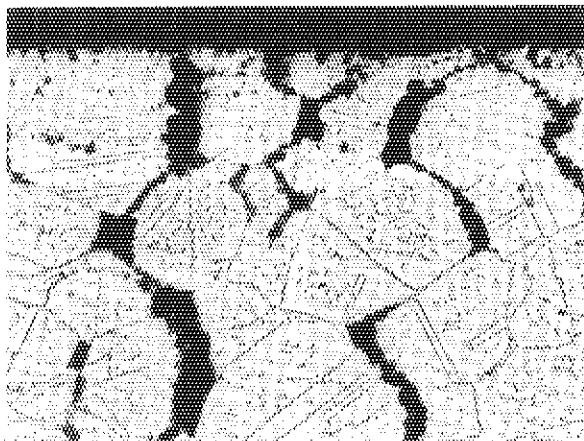


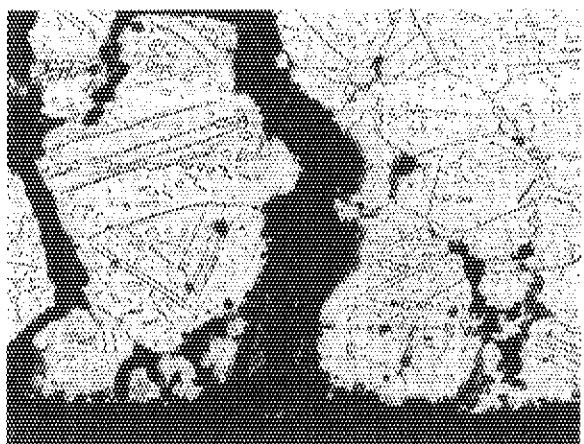
Fig. 39 Microstructures of fracture portion for base metal tube.  
(950°C, 18MPa, specimen No. CB-06)

inner side in tube



57.

X 150



58.

X 150

Fig. 39 (continued).

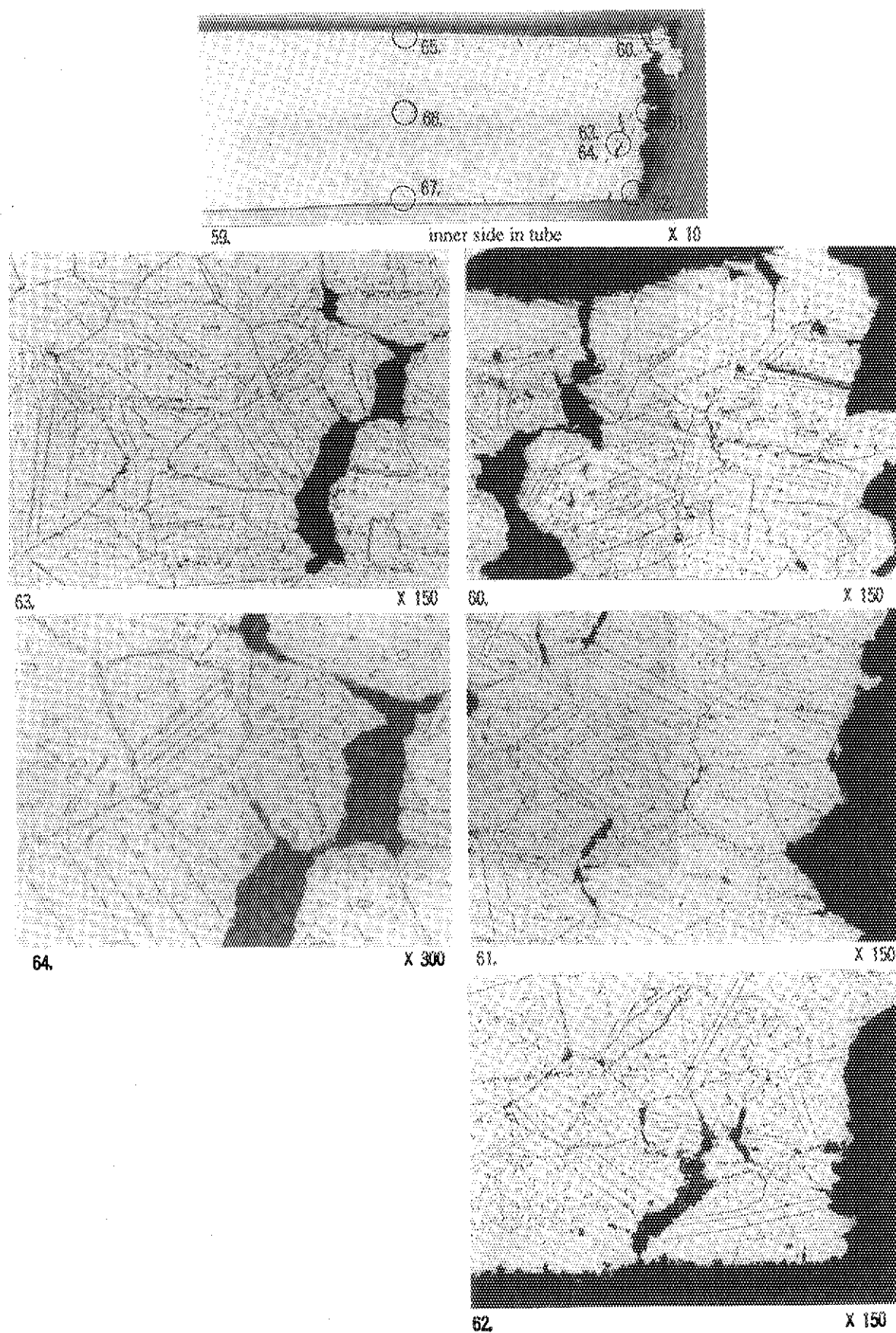


Fig. 40 Microstructures of fracture portion for welded-joint.  
(950°C, 18MPa, specimen No. CW-07)



inner side in tube

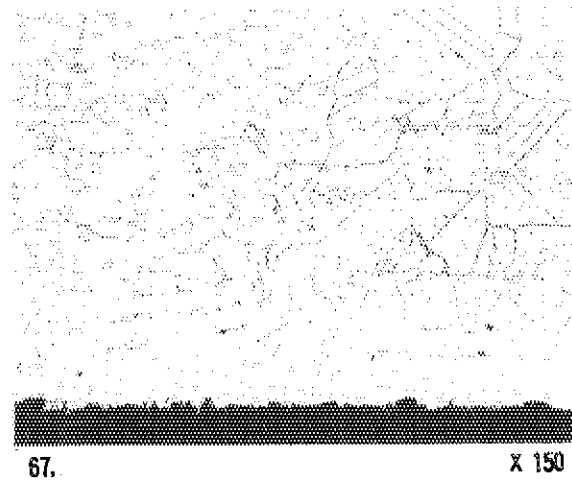
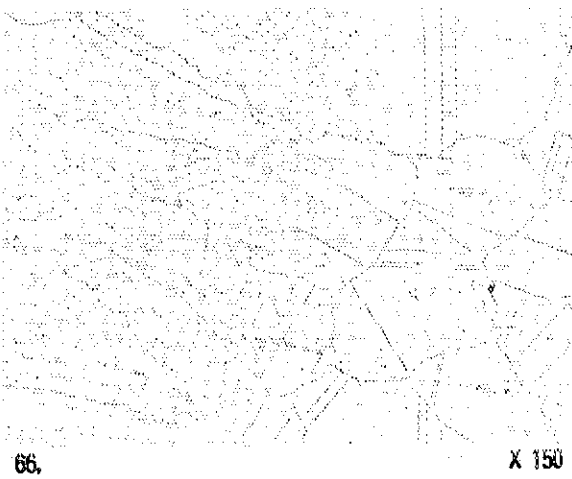
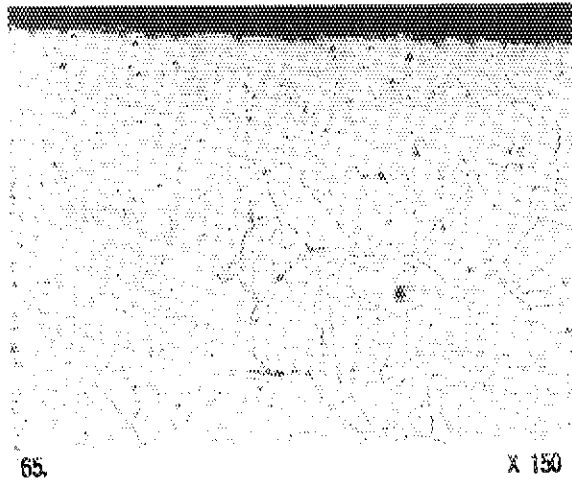


Fig. 40 (continued).

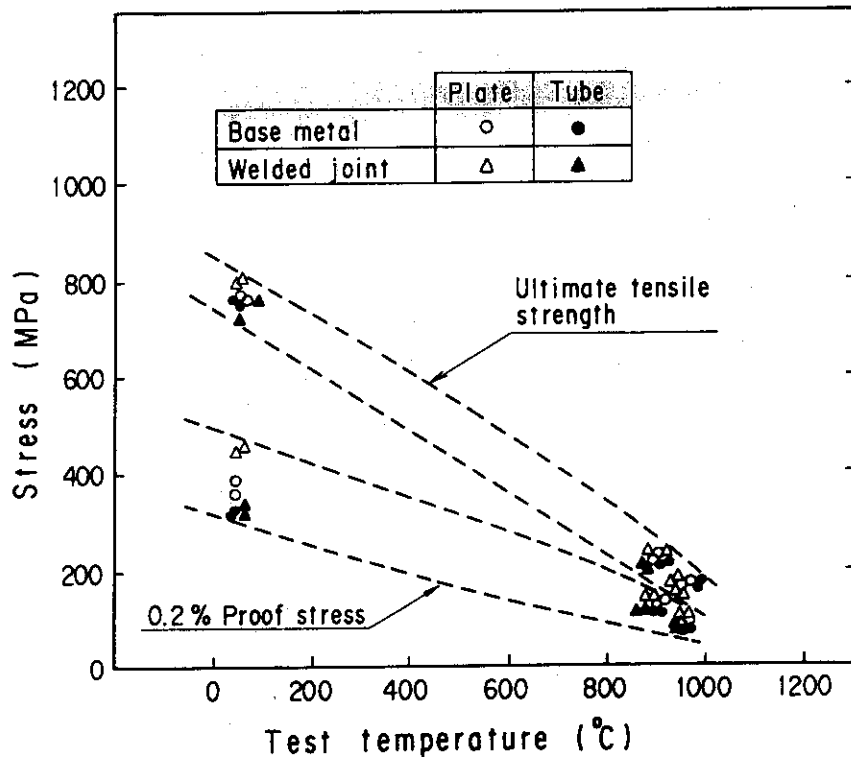


Fig. 41 Stress versus test temperature for plate and tube.

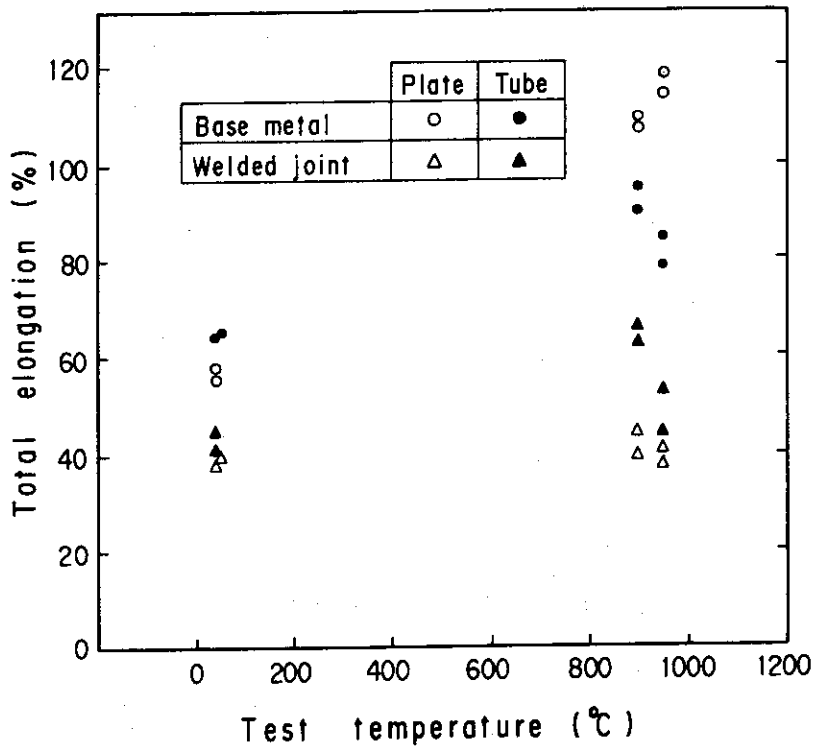


Fig. 42 Total elongation versus test temperature for plate and tube.

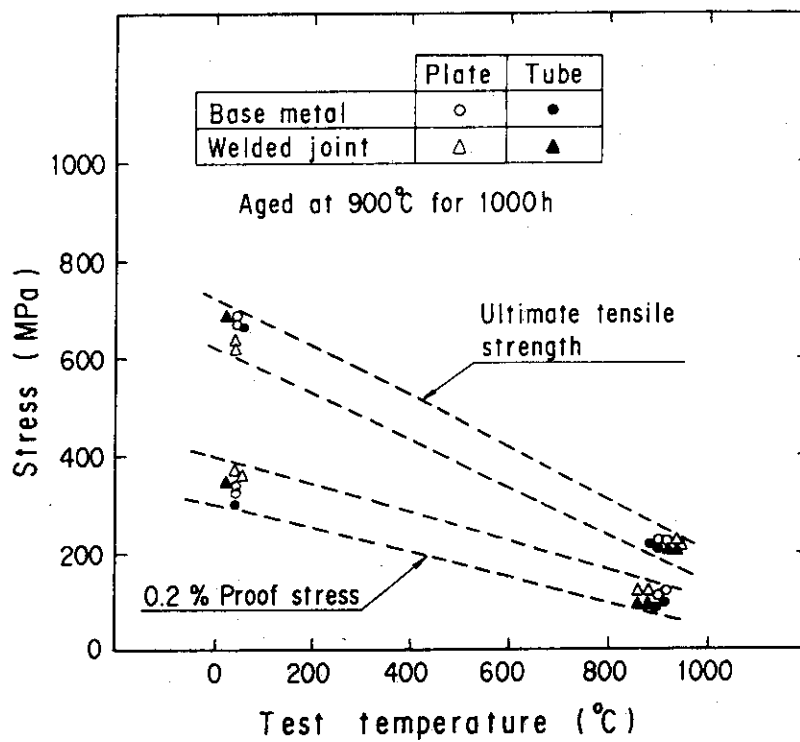


Fig. 43 Stress versus test temperature for plate and tube aged at 900°C for 1000 hr.

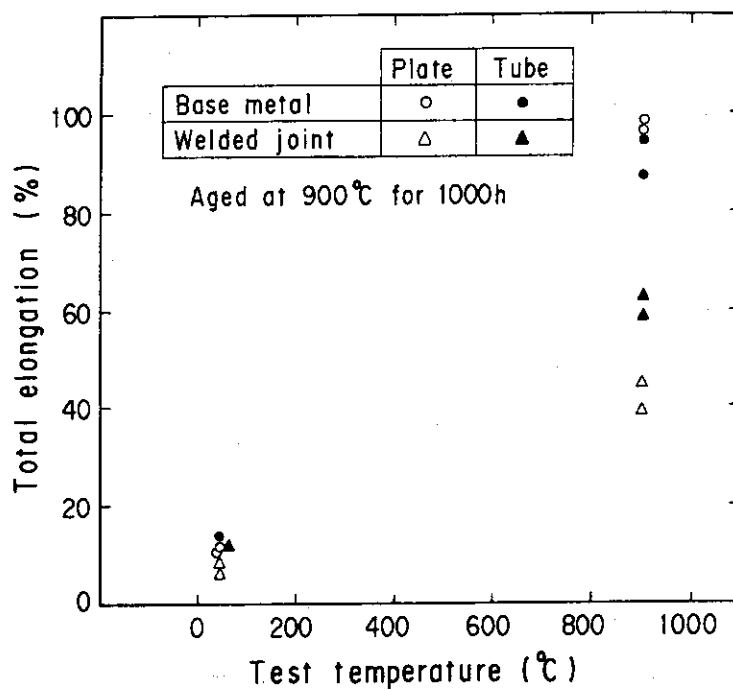


Fig. 44 Total elongation versus test temperature for plate and tube aged at 900°C for 1000 hr.

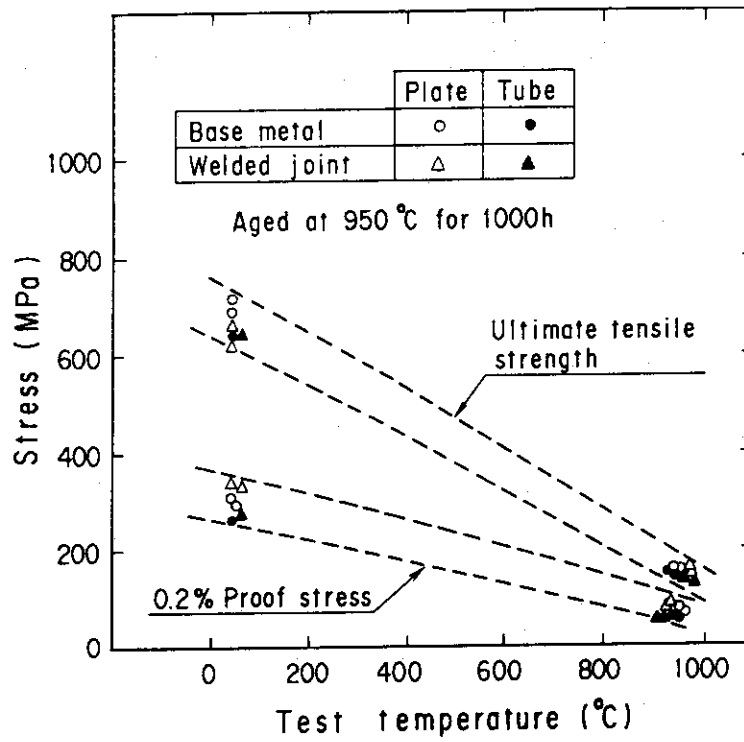


Fig. 45 Stress versus test temperature for plate and tube aged at 950°C for 1000 hr.

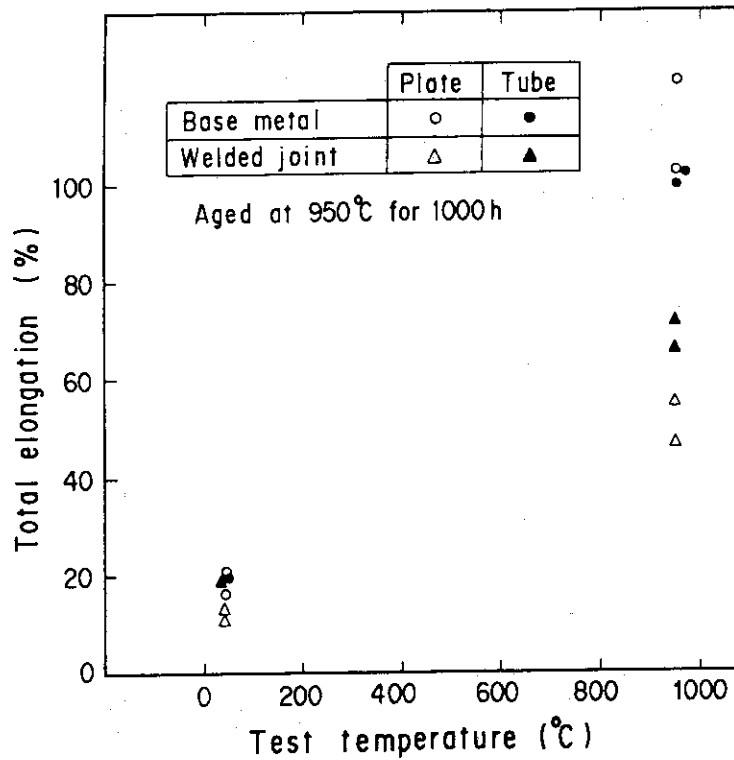


Fig. 46 Total elongation versus test temperature for plate and tube aged at 950°C for 1000 hr.

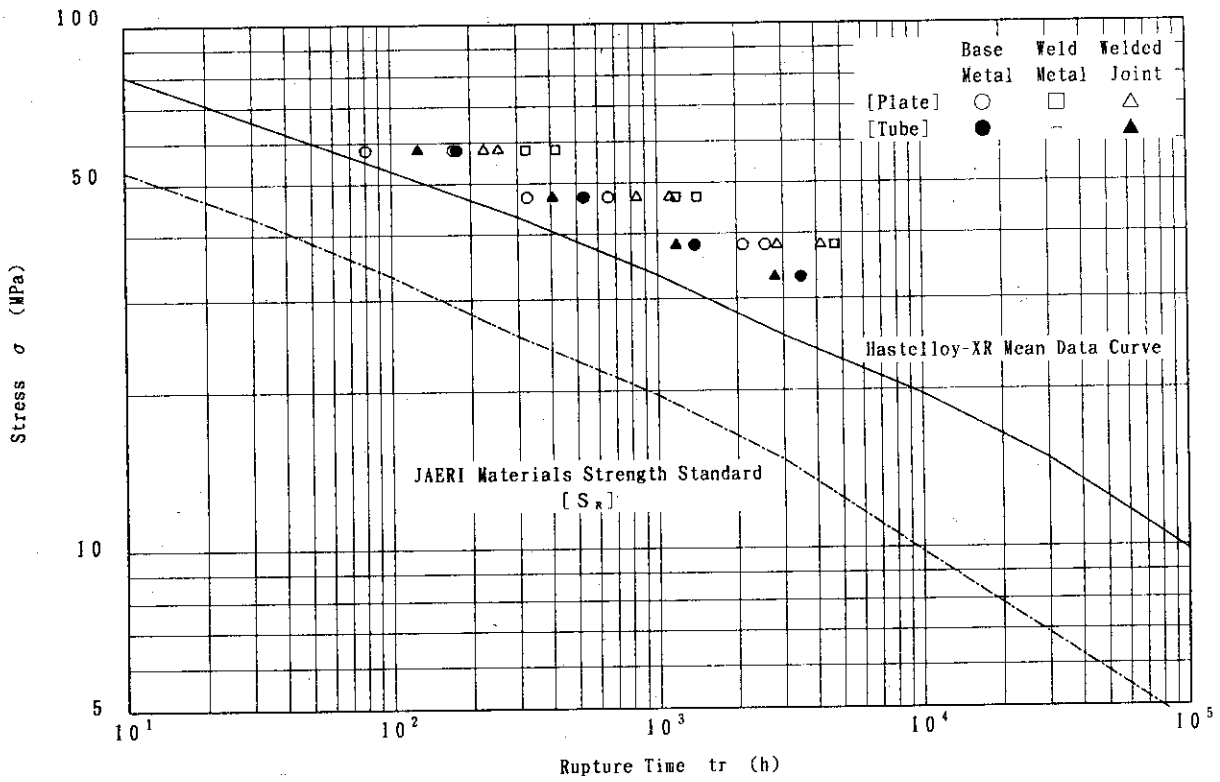


Fig. 47 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air

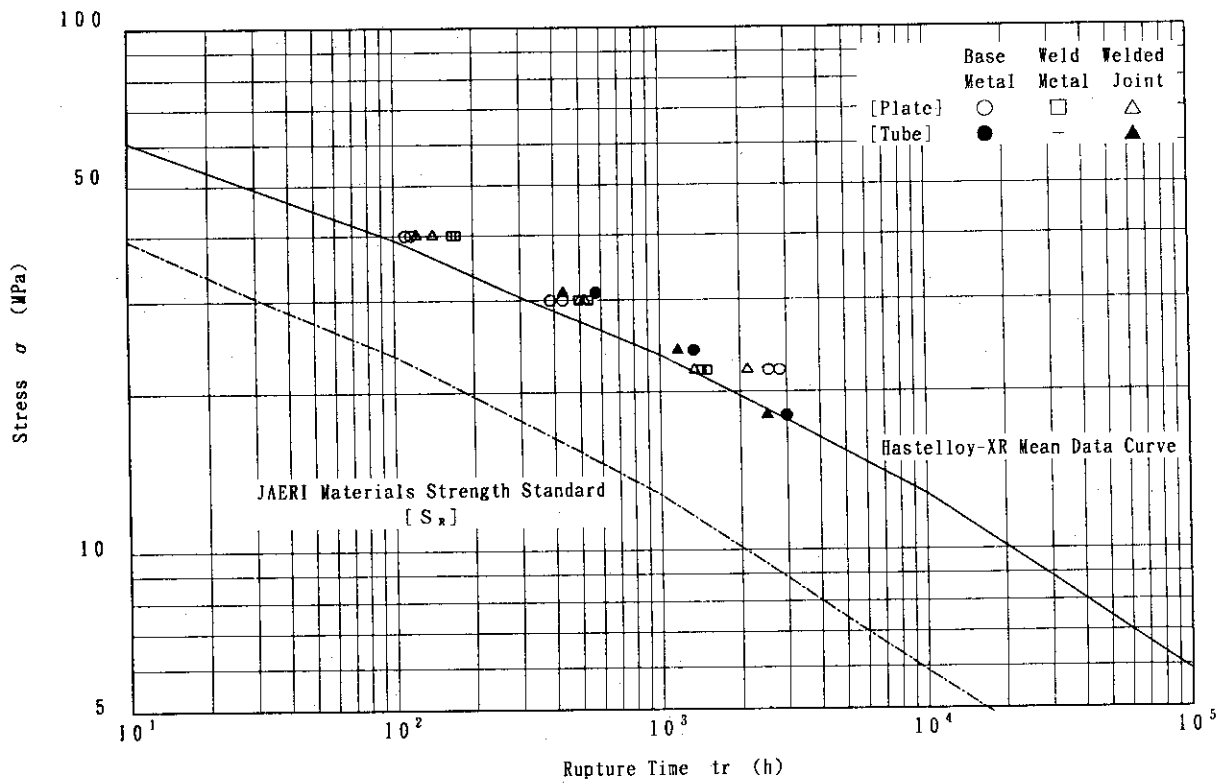


Fig. 48 Relation between applied stress and creep rupture time at 950°C in air

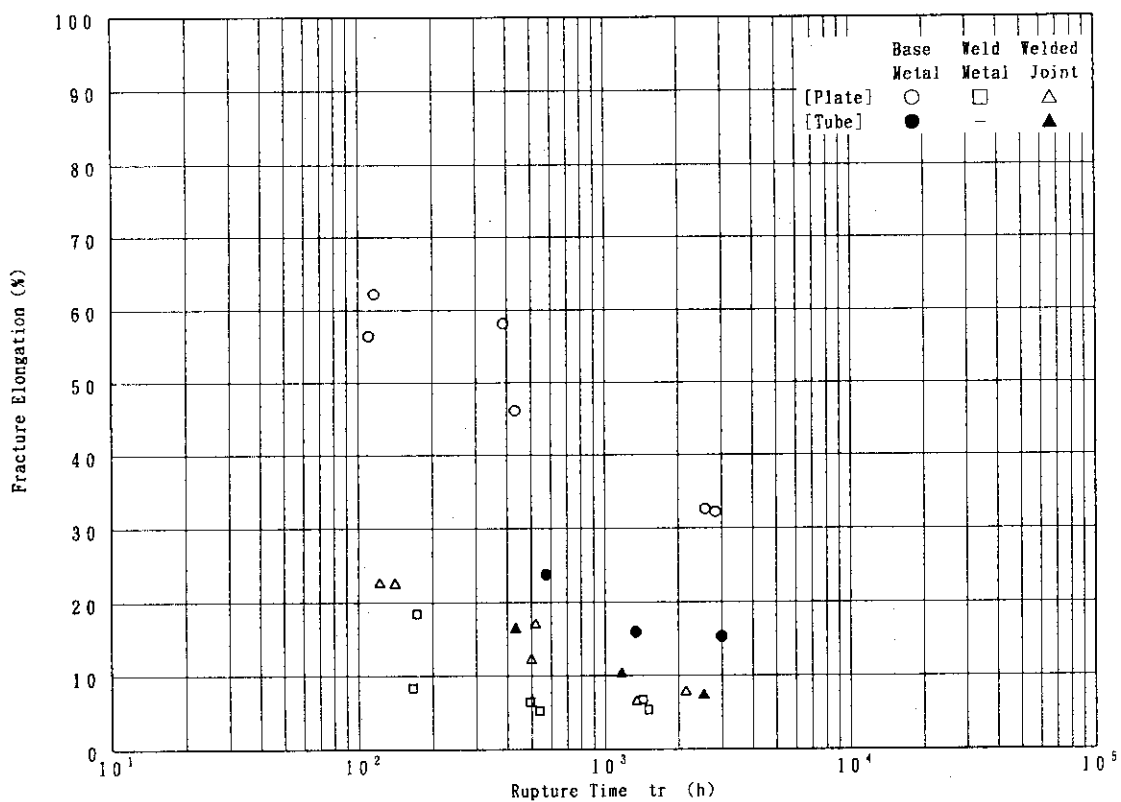


Fig. 49 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air

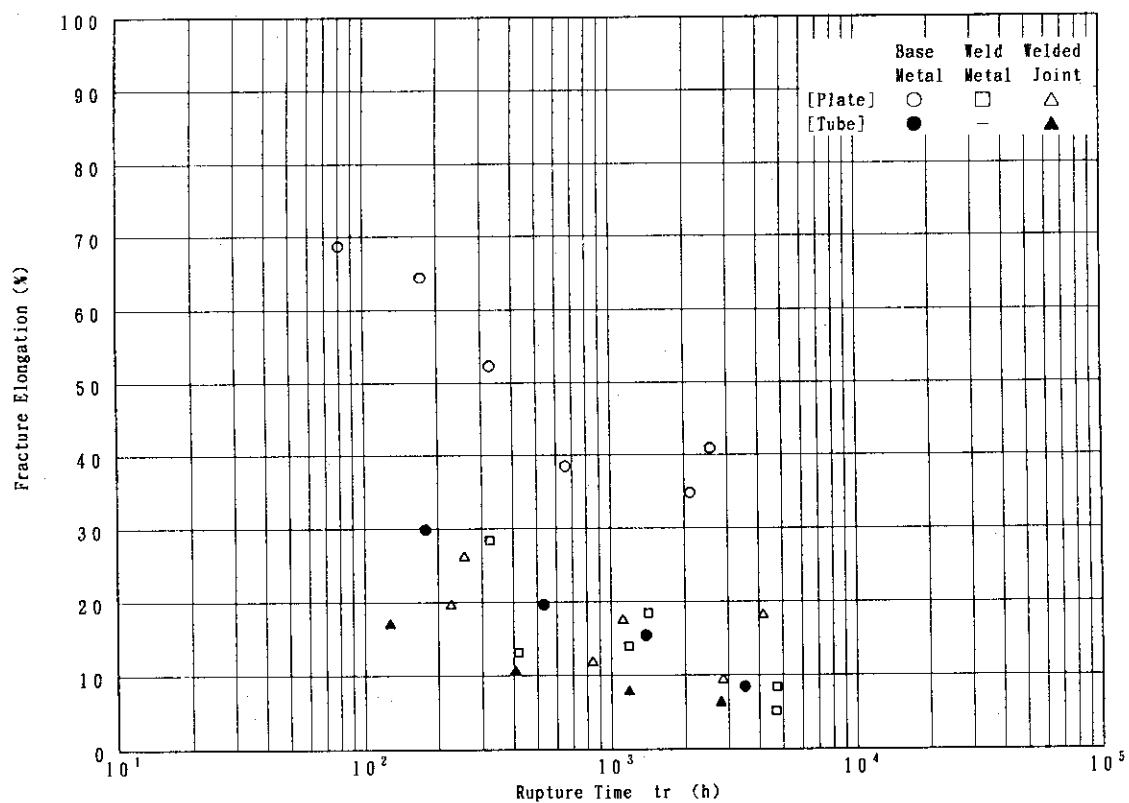


Fig. 50 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 950°C in air

## 付録 引張試験及びクリープ試験データ集

Table A1 Tensile properties of Hastelloy Alloy XR base metal and welded-joint tube

| Material                 |                          | Test temperature | 0.2% P.S. (MPa) | UTS (MPa) | Total elong. (%) | Frac location |            |
|--------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|-----------|------------------|---------------|------------|
| Base metal               | As received              | R T              | 327             | 754       | 63.7             | A             |            |
|                          |                          |                  | 326             | 761       | 64.2             | A             |            |
|                          |                          | 900 °C           | 114             | 209       | 89.1             | A             |            |
|                          |                          |                  | 114             | 211       | 94.8             | A             |            |
|                          |                          | 950 °C           | 76              | 158       | 84.3             | A             |            |
|                          |                          |                  | 76              | 156       | 79.2             | A             |            |
|                          | Aged at 900°C for 1000 h | R T              | 300             | 671       | 14.6             | B             |            |
|                          |                          | 900 °C           | 100             | 205       | 95.1             | A             |            |
|                          |                          |                  | 97              | 204       | 87.4             | A             |            |
|                          | Aged at 950°C for 1000 h | R T              | 259             | 645       | 19.9             | B             |            |
|                          |                          | 950 °C           | 62              | 142       | 102.2            | A             |            |
|                          |                          |                  | 60              | 145       | 101.1            | A             |            |
|                          | Welded joint             | As received      | R T             | 321       | 726              | 41.1          | Weld metal |
|                          |                          |                  |                 | 337       | 762              | 45.0          | Weld metal |
| 900 °C                   |                          |                  | 115             | 216       | 66.3             | Base metal    |            |
|                          |                          |                  | 115             | 214       | 62.4             | Weld metal    |            |
| 950 °C                   |                          |                  | 75              | 152       | 44.2             | Weld metal    |            |
|                          |                          |                  | 77              | 158       | 53.0             | Weld metal    |            |
| Aged at 900°C for 1000 h |                          | R T              | 347             | 688       | 11.5             | B.M & WM      |            |
|                          |                          | 900 °C           | 95              | 203       | 58.9             | Weld metal    |            |
|                          |                          |                  | 98              | 207       | 62.6             | Base metal    |            |
| Aged at 950°C for 1000 h |                          | R T              | 270             | 644       | 19.5             | Base metal    |            |
|                          |                          | 950 °C           | 56              | 139       | 66.2             | Base metal    |            |
|                          |                          |                  | 57              | 140       | 72.1             | Base metal    |            |

Table A2 Creep properties of Hastelloy Alloy XR base metal and welded-joint tube

900 °C

| T.P.No. | Applied stress<br>M P a | Rupture time<br>h | Fracture elongation<br>% | Fracture location | Larson miller<br>$\times 10^3$ |
|---------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------|
| CB - 01 | 5.8                     | 177.6             | 29.8                     | A                 | 20.23                          |
| CW - 01 |                         | 126.7             | 16.9                     | A                 | 20.06                          |
| CB - 02 | 4.7                     | 532.5             | 19.6                     | A                 | 20.79                          |
| CW - 02 |                         | 406.1             | 10.5                     | A                 | 20.65                          |
| CB - 03 | 3.8                     | 1383.6            | 15.4                     | A                 | 21.28                          |
| CW - 03 |                         | 1177.7            | 7.7                      | A                 | 21.20                          |
| CB - 07 | 3.3                     | 3496.9            | 8.4                      | B                 | 21.75                          |
| CW - 08 |                         | 2789.0            | 6.2                      | A                 | 21.64                          |

950 °C

| T.P.No. | Applied stress<br>M P a | Rupture time<br>h | Fracture elongation<br>% | Fracture location | Larson miller<br>$\times 10^3$ |
|---------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------|
| CB - 04 | 3.1                     | 574.4             | 23.7                     | A                 | 21.72                          |
| CW - 04 |                         | 432.3             | 16.3                     | A                 | 21.57                          |
| CB - 05 | 2.4                     | 1340.5            | 15.9                     | B                 | 22.17                          |
| CW - 05 |                         | 1168.5            | 10.2                     | A                 | 22.10                          |
| CB - 06 | 1.8                     | 2989.1            | 15.3                     | A                 | 22.60                          |
| CW - 07 |                         | 2527.5            | 7.2                      | A                 | 22.51                          |

CB: Base metal tube

CW: Welded-joint tube