

JAERI - M
94-081

HTTR 実機用 Hastelloy XR の総合特性評価

— その4 母材及び溶接部材の引張特性 —

1994年6月

渡辺 勝利・中島 甫・斎藤貞一郎*
高津 玉男*・小池上 一**・樋口 洵**

JAERI-M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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)原子力資料サービス

HTTR実機用 Hastelloy XR の総合特性評価

— その4 母材及び溶接部材の引張特性 —

日本原子力研究所東海研究所材料研究部

渡辺 勝利・中島 甫・斎藤貞一郎*・高津 玉男*

小池上 一**・樋口 洵**

(1994年3月31日受理)

HTTR実機用 Hastelloy XR の総合特性評価の一環として、母材及び溶接継手の時効に基づく引張特性変化を検討した。

800, 900及び950°Cにおいて1000hの時効を施した後、室温及び時効温度と同一の温度における大気中引張試験を行った。得られた結果は従来材と較べて、強度特性に関しては著しい差異は見られず、また延性に関しては、従来材のデータバンドの中に位置していた。これらのことから、実機用母材及び溶加材とも優れた引張特性を有していると言える。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* 日本ウェルディング・ロッド(株)

** 石川島播磨重工業(株)

Evaluation on Materials Performance of Hastelloy Alloy XR for HTTR Uses-4
(Tensile Properties of Base Metals and Welded Joints)

Katsutoshi WATANABE, Hajime NAKAJIMA, Teiichiro SAITOH*
Tamao TAKATSU*, Hajime KOIKEGAMI** and Makoto HIGUCHI**

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

(Received March 31, 1994)

Tensile properties due to thermal aging on Hastelloy Alloy XR base metals and welded joints were investigated as a series of evaluation test on the base metals and filler metals for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) components. Tensile test in air was performed at R.T. and then same temperatures as the thermal aging temperatures after the specimens were aged at 800, 900 and 1000°C for 1000hrs. In comparison with the previous data, the present results had no significant difference on the strength characteristics, and were in the previous data band on the ductility. Therefore, it is concluded that these base metals and filler metals for the HTTR components have excellent tensile properties.

Keywords: Tensile properties, Base Metal, Welded Joint, Thermal Aging, Hastelloy Alloy XR, Strength Characteristics, Ductility

* Nippon Welding Rod Co., Ltd.

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

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	1
2.1 供試材料	1
2.2 溶接施工	2
2.3 試験法	2
3. 結果及び考察	3
3.1 時効に基づく引張特性変化	3
3.2 従来材との引張特性比較	3
4. 結 言	4
謝 辞	4
参考文献	5
付 録 引張試験データ集	22

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedures	1
2.1 Materials	1
2.2 Welding Method	2
2.3 Tensile Test	2
3. Results and Discussion	3
3.1 Tensile Properties due to Thermal Aging	3
3.2 Comparison between the Present Data and Previous Ones	3
4. Conclusions	4
Acknowledgements	4
References	5
Appendix Tensile Test Data	22

1. 緒 言

高温工学試験研究炉（HTTR）は平成10年臨界を目指して、日本原子力研究所大洗研究所に建設が進められている⁽¹⁾。ハステロイXRは周知の如くHTTRの中間熱交換器（IHX）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及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、これまでに一連の開発研究が鋭意進められてきた。

第1期の研究^{(2) - (4)}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⁽⁵⁾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及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が解決されねばならない重要な課題として残された。

第3期の研究^{(6)・(7)}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及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、HTTRの中間熱交換器の製作のために用いられている。

本報はこのような背景のもとに進めてきた開発研究の成果を結実させた実機用溶加材によるハステロイXRの総合特性評価^{(2) - (7)}の一環として母材及び溶接部材の引張特性を検討した結果について述べたものである。

2. 試 験 方 法

2.1 供試材料

2.1.1 母 材

実機用溶加材のための試験に用いる母材として板厚60mm及び15mmの熱間圧延板を溶製した。それぞれの板厚の選定理由については、HTTRのIHXにおける最大相当厚さが60mmであること及び薄肉溶接構造物を代表する板厚として15mmであることによる。Table 1に両母材の化学成分分析結果を示す。これらの母材はHTTRでの中間熱交換器での耐圧部材に用いられるものと同じのインゴットより製造されている。一方、溶接施工確認用溶

1. 緒 言

高温工学試験研究炉（HTTR）は平成10年臨界を目指して、日本原子力研究所大洗研究所に建設が進められている⁽¹⁾。ハステロイXRは周知の如くHTTRの中間熱交換器（IHX）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及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、これまでに一連の開発研究が鋭意進められてきた。

第1期の研究^{(2) - (4)}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⁽⁵⁾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及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が解決されねばならない重要な課題として残された。

第3期の研究^{(6)・(7)}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及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、HTTRの中間熱交換器の製作のために用いられている。

本報はこのような背景のもとに進めてきた開発研究の成果を結実させた実機用溶加材によるハステロイXRの総合特性評価^{(2) - (7)}の一環として母材及び溶接部材の引張特性を検討した結果について述べたものである。

2. 試 験 方 法

2.1 供試材料

2.1.1 母 材

実機用溶加材のための試験に用いる母材として板厚60mm及び15mmの熱間圧延板を溶製した。それぞれの板厚の選定理由については、HTTRのIHXにおける最大相当厚さが60mmであること及び薄肉溶接構造物を代表する板厚として15mmであることによる。Table 1に両母材の化学成分分析結果を示す。これらの母材はHTTRでの中間熱交換器での耐圧部材に用いられるものと同じのインゴットより製造されている。一方、溶接施工確認用溶

加材のための試験に用いる母材として板厚60mm及び15mmの熱間圧延板を工業規模で溶製した。Table 2に各母材の化学成分分析結果を示す。

これらの供試材の製造方法はいずれも同じで、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2 tonインゴットを溶製し、熱間鍛造、熱間圧延で所定の板厚にした後、最終熱処理を施し、試験に供した。

2.1.2 溶加材

実機と同一ヒートの溶加材及び施工確認用溶加材とも最終寸法が直径1.2mmのものを製造した。Table 3及び4にそれぞれの化学成分分析結果を示す。これらの溶加材の製造方法はいずれも真空誘導溶解法により、500kgインゴットを溶製し、熱間鍛造、熱間圧延、冷間引抜により直径5.5mmの素線を製造した。その後、中間焼鈍、冷間引抜の繰り返しにより最終寸法のものを作製し、試験に供した。なお、加工中のBの減少抑止及び制御についてはこれまでに得られている知見⁽⁸⁾に基づいた製造条件に準拠して行った。

2.2 溶接施工

厚さ60mm及び15mmの Hastelloy X R 母材と実機用及び施工確認用の溶加材を用いて、溶接試験板を製作した。供試溶加材には、直径1.2mmの自動溶接用ソリッドワイヤを使用し、溶接は実機と同様な自動TIG溶接による片側溶接とした。

(1) 厚さ60mmの Hastelloy X R の溶接

溶接施工条件は、実機と同一の条件を設定した。Table 5に溶接施工条件を示し、Fig. 1に開先形状を示す。開先は、インサートなしのU型開先とした。

なお、Fig. 2(a)及びFig. 2(b)に試験片の採取要領を示す。

(2) 厚さ15mmの Hastelloy X R の溶接

溶接施工条件は、実機用溶加材及び溶接施工確認用溶加材とも同一の条件を適用した。Table 6に溶接施工条件を示し、Fig. 3に開先形状を示す。開先角度は60°とし、ルート間隔は2mmとして共金材の裏当て金を用いた。また、溶接施工においては、シールド効果をより良好にするため、トーチにトレーリングシールド用の治具を取り付け、トーチから流出するシールドガスから外れた溶接ビードもシールドするようにした。

なお、Fig. 4及びFig. 5に試験片の採取要領を示す。

2.3 試験法

時効温度は800, 900及び950°Cとした。時効時間は従来からの研究により1000時間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⁽⁹⁾、それぞれの温度で1000hとした。大気中加熱による表面酸化層の影響を取除くため時効処理後に試験片の作製を行った。用いた引張試験片の形状及び寸法をFig. 6に示す。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 Z2241⁽¹⁰⁾及びJIS G0567⁽¹¹⁾に

準拠した。時効後の引張試験温度は、室温及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. 結果及び考察

3.1 時効に基づく引張特性変化

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. 7は時効前及び時効後の0.2%耐力の比較結果である。各温度において時効により概ね0.2%耐力の低下がみられる。Fig. 8は時効前及び時効後の引張強さの比較結果を示す。溶接金属および800℃時効後の母材の場合を除き、0.2%耐力の場合と同様に引張強さの低下がみられる。Fig. 9に時効前及び時効後の破断伸びの比較結果を示す。時効により母材、溶接金属及び溶接継手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溶接部材で比較的少なく、母材で比較的大きいことが分かる。このことは変形機構は異なるが時効後のシャルピー衝撃特性の結果と類似している。Fig. 10に時効前及び時効後の破断絞りの比較結果を示す。ここでも破断伸びの場合と同様に時効による破断絞りの著しい減少が認められる。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_6C 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⁽¹²⁾。一方、溶接継手の破断の様相をみると、時効前及び時効後ともに母材での破断が認められた。

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. 11に時効前及び時効後の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%耐力の減少が認められる。Fig. 12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0.2%耐力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認められる。このようなことは時効軟化が生じていると言える。Fig. 13に時効前及び時効後の破断伸びの比較結果を示す。時効による破断伸びの変化はいずれの場合にも比較的少ないことが分かる。Fig. 14に時効前及び時効後の破断絞りの比較結果を示す。ここでも破断伸びの場合と同様に時効による破断絞りの変化はいずれの場合にも比較的少ないと言えよう。

ここで、溶接継手の破断の様相を見ると、試験温度が室温の場合には時効前及び時効後ともに母材破断であるのに対して、高温ではいずれの時効温度ないしは試験温度でも時効前及び時効後ともに溶金部で破断した。

3.2 従来材との引張特性比較

これまでの一連の開発研究により得られた溶加材による引張試験データとの比較結果をFig. 15, Fig. 16及びFig. 17に示す。これらの結果より、強度特性に関しては母材及び溶接部材とも従来材と比較して著しい差異は見られないことが分かる。また、破断伸び及び破

準拠した。時効後の引張試験温度は、室温及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. 結果及び考察

3.1 時効に基づく引張特性変化

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. 7は時効前及び時効後の0.2%耐力の比較結果である。各温度において時効により概ね0.2%耐力の低下がみられる。Fig. 8は時効前及び時効後の引張強さの比較結果を示す。溶接金属および800℃時効後の母材の場合を除き、0.2%耐力の場合と同様に引張強さの低下がみられる。Fig. 9に時効前及び時効後の破断伸びの比較結果を示す。時効により母材、溶接金属及び溶接継手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溶接部材で比較的少なく、母材で比較的大きいことが分かる。このことは変形機構は異なるが時効後のシャルピー衝撃特性の結果と類似している。Fig. 10に時効前及び時効後の破断絞りの比較結果を示す。ここでも破断伸びの場合と同様に時効による破断絞りの著しい減少が認められる。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_6C 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⁽¹⁾⁽²⁾。一方、溶接継手の破断の様相をみると、時効前及び時効後ともに母材での破断が認められた。

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. 11に時効前及び時効後の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%耐力の減少が認められる。Fig. 12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0.2%耐力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認められる。このようなことは時効軟化が生じていると言える。Fig. 13に時効前及び時効後の破断伸びの比較結果を示す。時効による破断伸びの変化はいずれの場合にも比較的少ないことが分かる。Fig. 14に時効前及び時効後の破断絞りの比較結果を示す。ここでも破断伸びの場合と同様に時効による破断絞りの変化はいずれの場合にも比較的少ないと言えよう。

ここで、溶接継手の破断の様相を見ると、試験温度が室温の場合には時効前及び時効後ともに母材破断であるのに対して、高温ではいずれの時効温度ないしは試験温度でも時効前及び時効後ともに溶金部で破断した。

3.2 従来材との引張特性比較

これまでの一連の開発研究により得られた溶加材による引張試験データとの比較結果をFig. 15, Fig. 16及びFig. 17に示す。これらの結果より、強度特性に関しては母材及び溶接部材とも従来材と比較して著しい差異は見られないことが分かる。また、破断伸び及び破

断紋りに関しては室温及び900°Cともに従来材について得られたデータバンドの中に位置していると言える。一方、板厚が60mmの材料から得られたデータとの比較結果から、強度特性及び延性ともに顕著な板厚効果は認められないことが分かる。

4. 結 言

実機用溶加材を用いて、母材及び溶接部材の時効に基づく引張性質変化を調べ、次のような結論を得た。

- (1)時効による室温における延性低下が顕著である。この場合、延性低下割合は溶接部材で比較的少なく、母材で比較的大きかった。
- (2)時効による高温での延性変化は母材及び溶接部材とも比較的少なかった。
- (3)強度特性に関しては母材及び溶接部材とも従来材と比較して著しい差異は見られなかった。
- (4)延性に関しては室温及び900°Cともに従来材のデータバンドの中に位置している。
- (5)強度特性及び延性ともに顕著な板厚効果は認められなかった。

これらのことから、実機用母材及び溶加材とも優れた引張特性を有していると言える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有益な討論を頂いた(株)富士電機総合研究所、仲西恒雄氏及び三菱マテリアル(株)、佐平健彰、丸七香樹、竹入俊樹の諸氏に感謝致します。また、引張試験を実施して頂いた当所派遣職員北智士氏に感謝致します。

断紋りに関しては室温及び900°Cともに従来材について得られたデータバンドの中に位置していると言える。一方、板厚が60mmの材料から得られたデータとの比較結果から、強度特性及び延性ともに顕著な板厚効果は認められないことが分かる。

4. 結 言

実機用溶加材を用いて、母材及び溶接部材の時効に基づく引張性質変化を調べ、次のような結論を得た。

- (1)時効による室温における延性低下が顕著である。この場合、延性低下割合は溶接部材で比較的少なく、母材で比較的大きかった。
 - (2)時効による高温での延性変化は母材及び溶接部材とも比較的少なかった。
 - (3)強度特性に関しては母材及び溶接部材とも従来材と比較して著しい差異は見られなかった。
 - (4)延性に関しては室温及び900°Cともに従来材のデータバンドの中に位置している。
 - (5)強度特性及び延性ともに顕著な板厚効果は認められなかった。
- これらのことから、実機用母材及び溶加材とも優れた引張特性を有していると言える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有益な討論を頂いた(株)富士電機総合研究所、仲西恒雄氏及び三菱マテリアル(株)、佐平健彰、丸七香樹、竹入俊樹の諸氏に感謝致します。また、引張試験を実施して頂いた当所派遣職員北智士氏に感謝致します。

断紋りに関しては室温及び900℃ともに従来材について得られたデータバンドの中に位置していると言える。一方、板厚が60mmの材料から得られたデータとの比較結果から、強度特性及び延性ともに顕著な板厚効果は認められないことが分かる。

4. 結 言

実機用溶加材を用いて、母材及び溶接部材の時効に基づく引張性質変化を調べ、次のような結論を得た。

- (1)時効による室温における延性低下が顕著である。この場合、延性低下割合は溶接部材で比較的少なく、母材で比較的大きかった。
 - (2)時効による高温での延性変化は母材及び溶接部材とも比較的少なかった。
 - (3)強度特性に関しては母材及び溶接部材とも従来材と比較して著しい差異は見られなかった。
 - (4)延性に関しては室温及び900℃ともに従来材のデータバンドの中に位置している。
 - (5)強度特性及び延性ともに顕著な板厚効果は認められなかった。
- これらのことから、実機用母材及び溶加材とも優れた引張特性を有していると言える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有益な討論を頂いた(株)富士電機総合研究所、仲西恒雄氏及び三菱マテリアル(株)、佐平健彰、丸七香樹、竹入俊樹の諸氏に感謝致します。また、引張試験を実施して頂いた当所派遣職員北智士氏に感謝致します。

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，(1993)。
- (2) 渡辺、中島、佐平、倉内、斉藤、高津、仲西：JAERI-M 89-206(1989)。
- (3) 渡辺、仲西、高津、佐平、中島：高温学会誌、Vol.16, No.6, (1990)368。
- (4) 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。
- (5) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、仲西、辻、塚田：JAERI-M 91-181(1991)。
- (6) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、高津、仲西、小池上、樋口：JAERI-M 91-189(1991)。
- (7) K. Watanabe, K. Sahira, T. Takatsu, T. Nakanishi, M. Higuchi and H. Nakajima : Computer Aided Innovation of New MaterialsII, Elsevier Sci. Publishing Co., (1993) p.1491。
- (8) 佐平、竹入、倉内、中島、渡辺、仲西、鬼束、高津、斉藤：“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
- (9) 近藤、渡辺、佐藤、仲西、佐平、辻、倉田、塚田、小沢：JAERI-M 86-003(1986)。
- (10) Japanese Industrial Standard, Method of tensile test for metallic materials, (JIS Z2241) (Japan Standard Association, 1980)。
- (11) Japanese Industrial Standard, Method of high temperature tensile test for steels and heat-resisting alloys, (JIS Z0567) (Japan Standard Association, 1987)。
- (12) 渡辺、菊地、近藤：日本学術振興会、第123委員会研究報告書、23(1982)3。

Table 1 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR plates for HTR components

		(mass%)														
		(t15mm plate:ch.G1-867 . t60mm plate:ch.G1-867)														
element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Co	B	Ni	N
Ladle.ch.G1-867	0.06	0.37	0.89	0.001	0.001	21.8	18.1	9.0	0.49	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.004	Rem.	0.003
Slab (Top)	0.06	0.33	0.89	0.001	<0.001	21.60	17.99	9.06	0.49	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.0037	Rem.	0.004
Slab (Bottom)	0.06	0.34	0.88	0.001	<0.001	21.62	18.05	9.04	0.49	0.08	<0.01	0.01	0.04	0.0019	Rem.	0.011
t15mm plate	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.0029	---	---
t60mm plate	0.06	0.34	0.90	<0.001	0.001	21.81	18.13	9.01	0.49	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.0030	Rem.	0.005
Specification †	min	0.05	0.25	---	---	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	0.05	0.25	---	---	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
 --- : Not specified or not analysed
 † : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)
 †† : Aim range and Aim point of Hastelloy XR for HTR

LAP : Low as possible

Table 2 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR plates for welding process test

element	(mass %)																
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Co	B	Ni	N	
Ladle, ch. 0-644	0.07	0.35	0.85	<0.001	0.002	21.7	18.1	9.2	0.49	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.002	Rem.	<0.01	
Slab(Top)	0.07	0.33	0.86	<0.001	<0.001	21.7	18.0	9.2	0.49	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.001	Rem.	<0.01	
Slab(Bottom)	0.07	0.33	0.85	<0.001	<0.001	21.6	18.0	9.3	0.49	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.001	Rem.	<0.01	
Specification	min	0.05	0.25	—	—	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.	—	—

* : thickness 60mm, 15mm

Rem. : Remainder

** : Ref. JAERI-M90-148

— : Not specified or not analysed

Table 3 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR filler metal for HTR components

element		C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O
ladle, ch. 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	0.02	0.02	0.008	Rem.	0.002	0.001
Specification	† min	0.05	0.25	0.75	—	—	20.5	17.0	8.0	0.20	—	—	—	—	—	—	Rem.	—	—
	max	0.15	0.50	1.00	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 of ladle ††	min	0.050	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.005	Rem.	—	—
	max	0.065	0.50	1.00	0.040	0.030	23.00	20.00	10.00	1.00	0.50	0.05	0.03	0.04	0.10	0.008	Rem.	0.003	0.002
Check(φ5.5mm) Location:Top		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+++	—	—	—
Check(φ5.5mm) Location:Bottom		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+++	—	—	—
Check(φ5.5mm)		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	0.0035	Rem.	0.0038	<0.0005
Check(φ3.2mm)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0033	—	—	—
Check(φ1.2mm, filler metal)		0.052	0.39	0.82	0.001	0.003	21.41	18.1	9.38	0.40	0.003	0.05	<0.001	0.018	0.002	0.0032	Rem.	0.0032	0.0010
Aim Range of filler metal ††	min	0.050	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.0020	Rem.	—	—
	max	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
Aim point of filler metal ††		0.055	0.35	0.80	≤0.010	≤0.010	21.5	18.0	9.0	0.50	≤0.1	0.04	≤0.01	0.030	≤0.05	0.0030	Rem.	0.003	≤0.002

Rem. : Remainder
 — : Not specified or not analysed
 † : Ref. JAERI-N91-180
 †† : After heat treatment
 LAP : Low as possible
 ‡ : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)
 +++ : After heat treatment

Table 4 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR filler metal for welding process test

(mass%)

element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O
Ladle, ch. 0-124	0.056	0.36	0.82	<0.001	0.001	21.60	18.05	9.10	0.49	<0.01	0.04	<0.01	0.02	0.02	0.0051	Rem.	0.003	0.001
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 of ladle **	min	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.02	—	0.0040	—	—	—
	max	0.065	0.50	0.040	0.030	23.00	20.00	10.00	1.00	0.50	0.05	0.03	0.04	0.10	0.0060	Rem.	0.003	0.002
Check(φ5.5mm) Location:Top	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0031	—	—	—
Check(φ5.5mm) Location:Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0028	—	—	—
Check(φ5.5mm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	0.001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0030	—	0.0052	—
Check(φ1.2mm, filler metal)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.008	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0021	—	—	—
Aim Range of filler metal**	min	0.050	0.25	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.0020	—	—	—
	max	0.070	0.50	1.00	0.040	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
Aim point of filler metal **	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	0.055	0.35	≤0.010	≤0.010	21.5	18.0	9.0	0.50	≤0.1	0.04	≤0.01	0.030	≤0.05	0.0030	Rem.	0.003	≤0.002

Rem : Remainder
 — : Not specified or not analysed
 ** : Ref. JAERI-M01-189
 * : Ref. JAERI-M00-148
 *** : After heat treatment
 LAP : Low as possible

Table 5 Welding conditions (plate thickness : 60mm)

Welding procedure	Diameter of filler (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Wire feed rate (mm/min)	Ar gas flow rate (L/min)
GTAW	1.2	150-200	9-10	80	600-1000	25

Table 6 Welding conditions (plate thickness : 15mm)

Welding procedure	Diameter of filler (mm)	Welding current (A)		Arc voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Wire feed rate (mm/min)	Ar gas flow rate (L/min)
		Peak	Base				
GTAW	1.2	170	150	8-10	50-100	800	Torch : 15-20 Trailing shield : 15-20

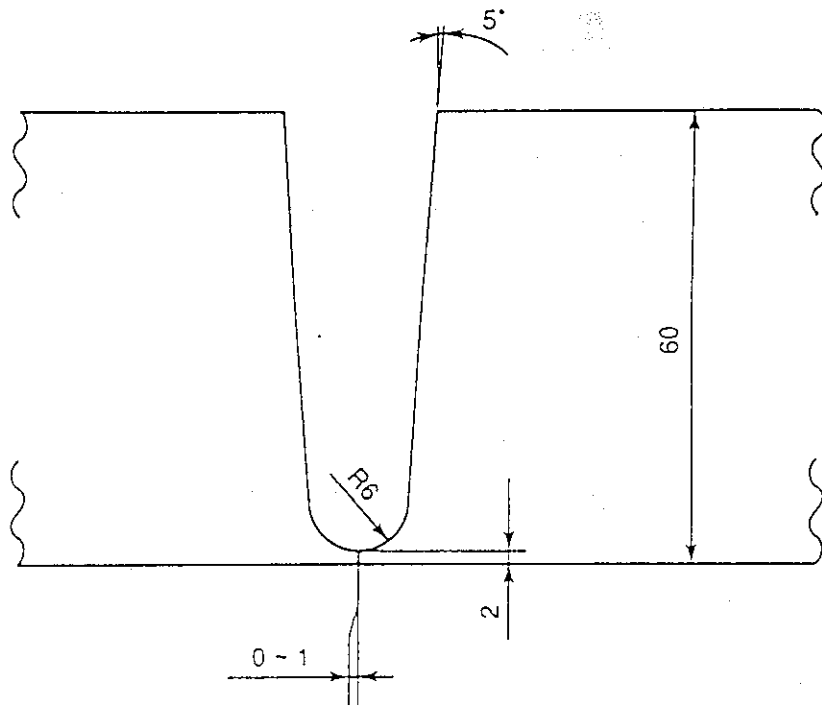
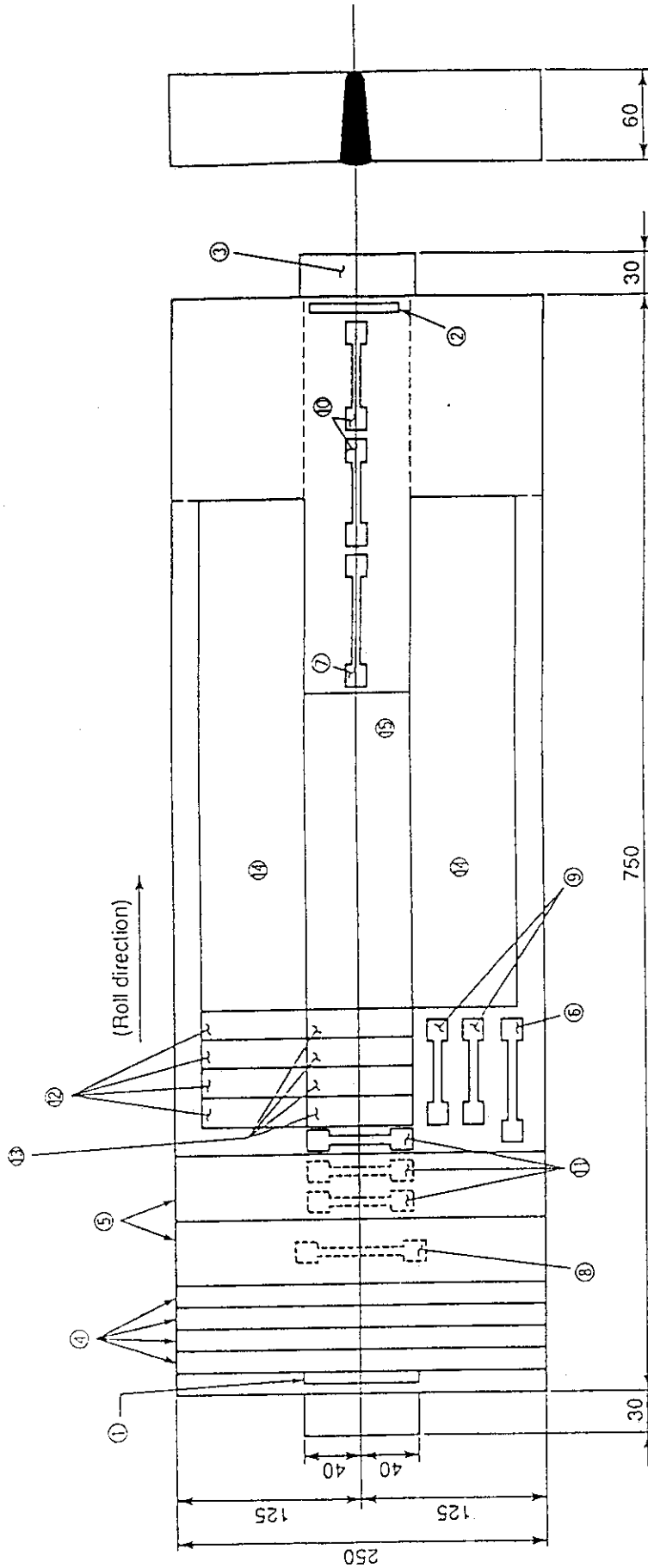


Fig. 1 Groove geometry(plate thickness : 60mm)



- | | |
|--|---|
| ① Macrostructure and hardness test | ⑩ Creep test (base metal) |
| ② Microstructure | ⑪ Creep test (weld metal) |
| ③ Chemical composition test (weld metal) | ⑫ Creep test (welded joint) |
| ④ Side bend test | ⑬ Test block for Charpy impact test (base metal) |
| ⑤ Face bend test | ⑭ Test block for Charpy impact test (weld metal) |
| ⑥ Tensile test (base metal) | ⑮ Test block for fracture toughness test (base metal) |
| ⑦ Tensile test (weld metal) | ⑯ Test block for fracture toughness test (weld metal) |
| ⑧ Tensile test (welded joint) | |

Fig. 2 (a) Sampling location of test specimens (plate thickness : 60mm)

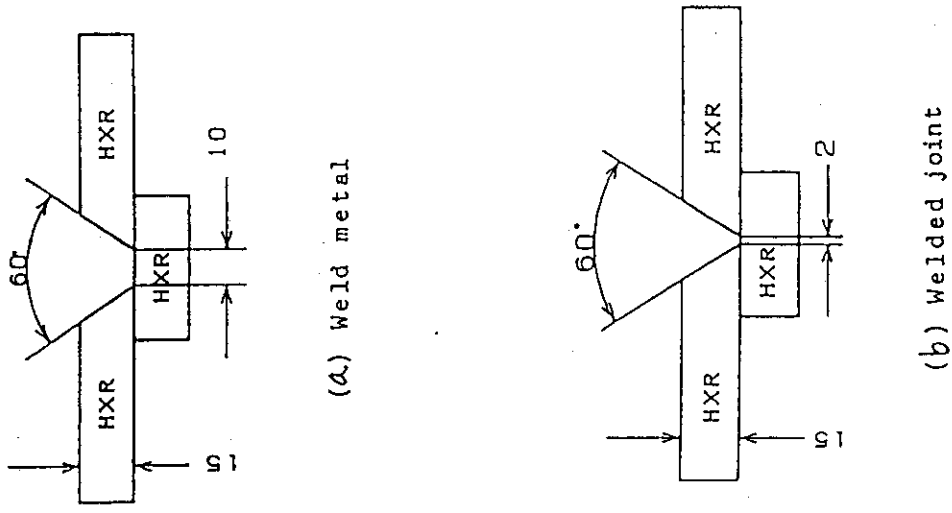


Fig. 3 Groove geometry (plate thickness : 15mm)

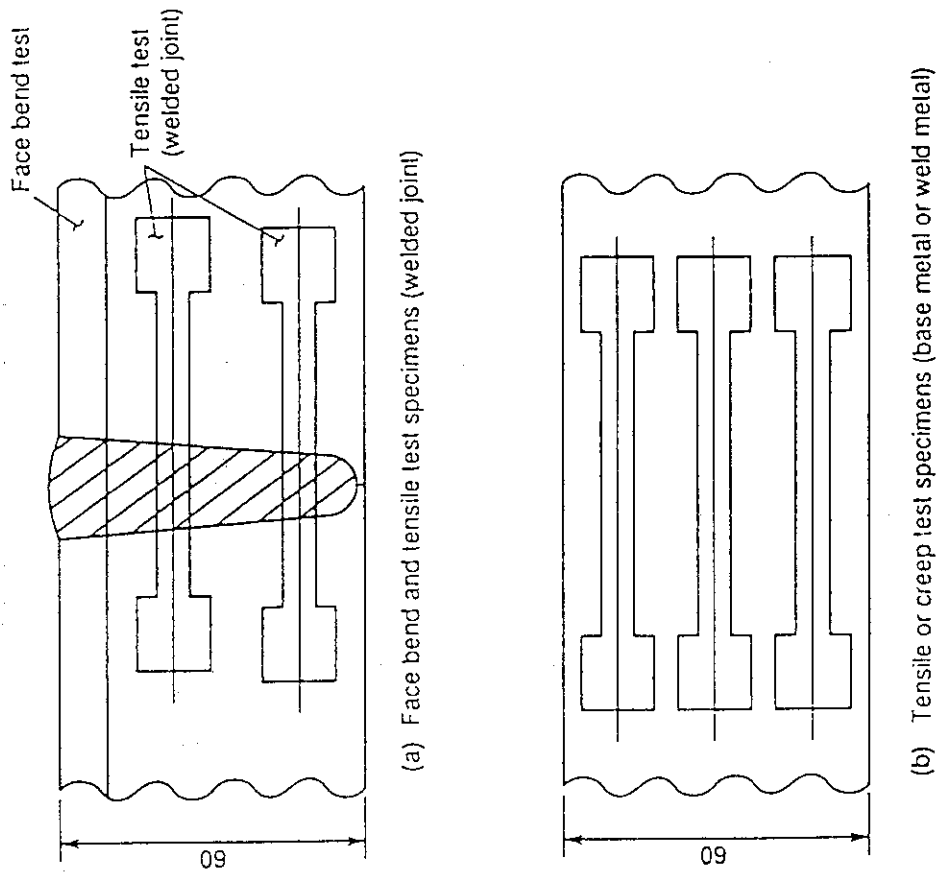


Fig. 2 (b) Sampling location of test specimens (plate thickness : 60mm)

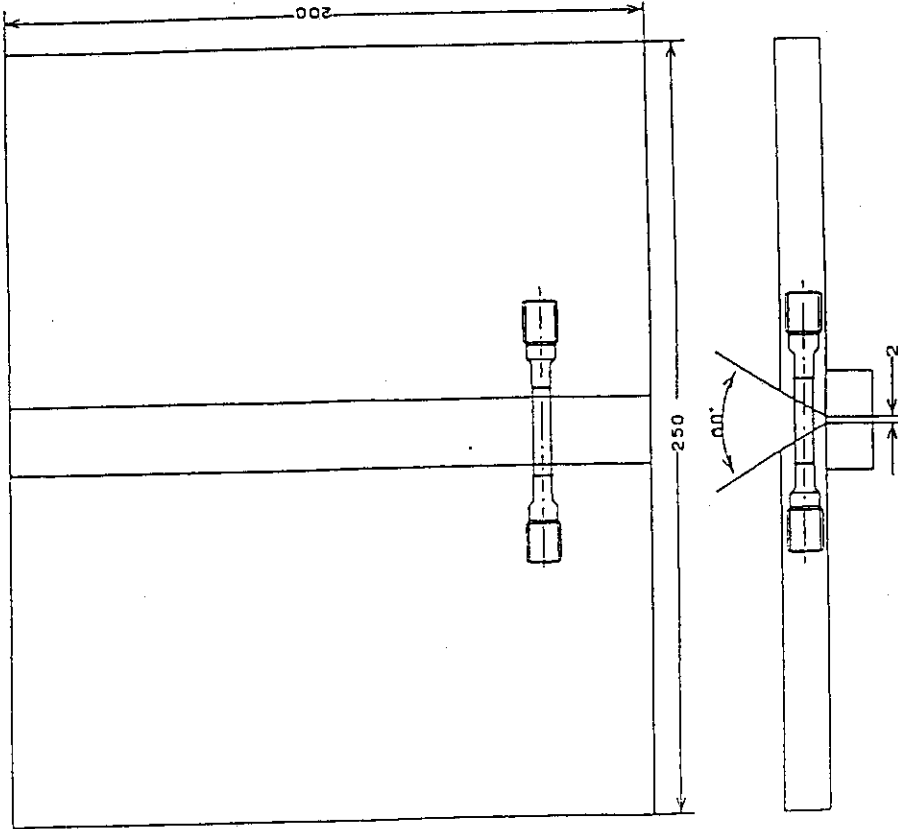


Fig. 5 Sampling location of welded joint specimens
(plate thickness : 15mm)

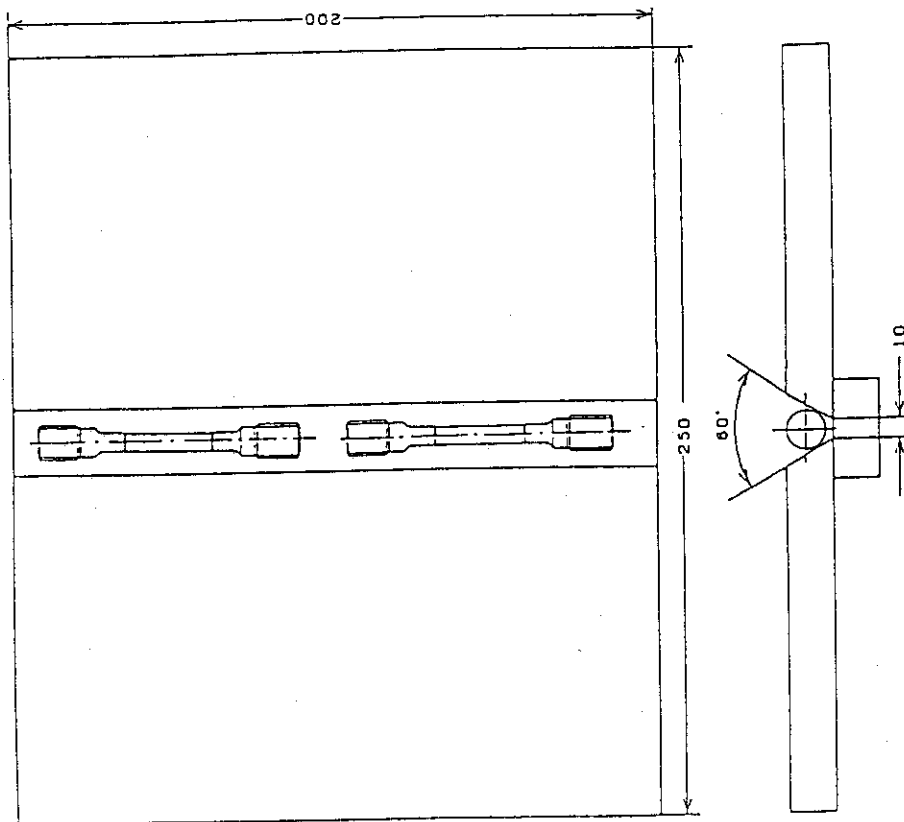


Fig. 4 Sampling location of weld metal specimens
(plate thickness : 15mm)

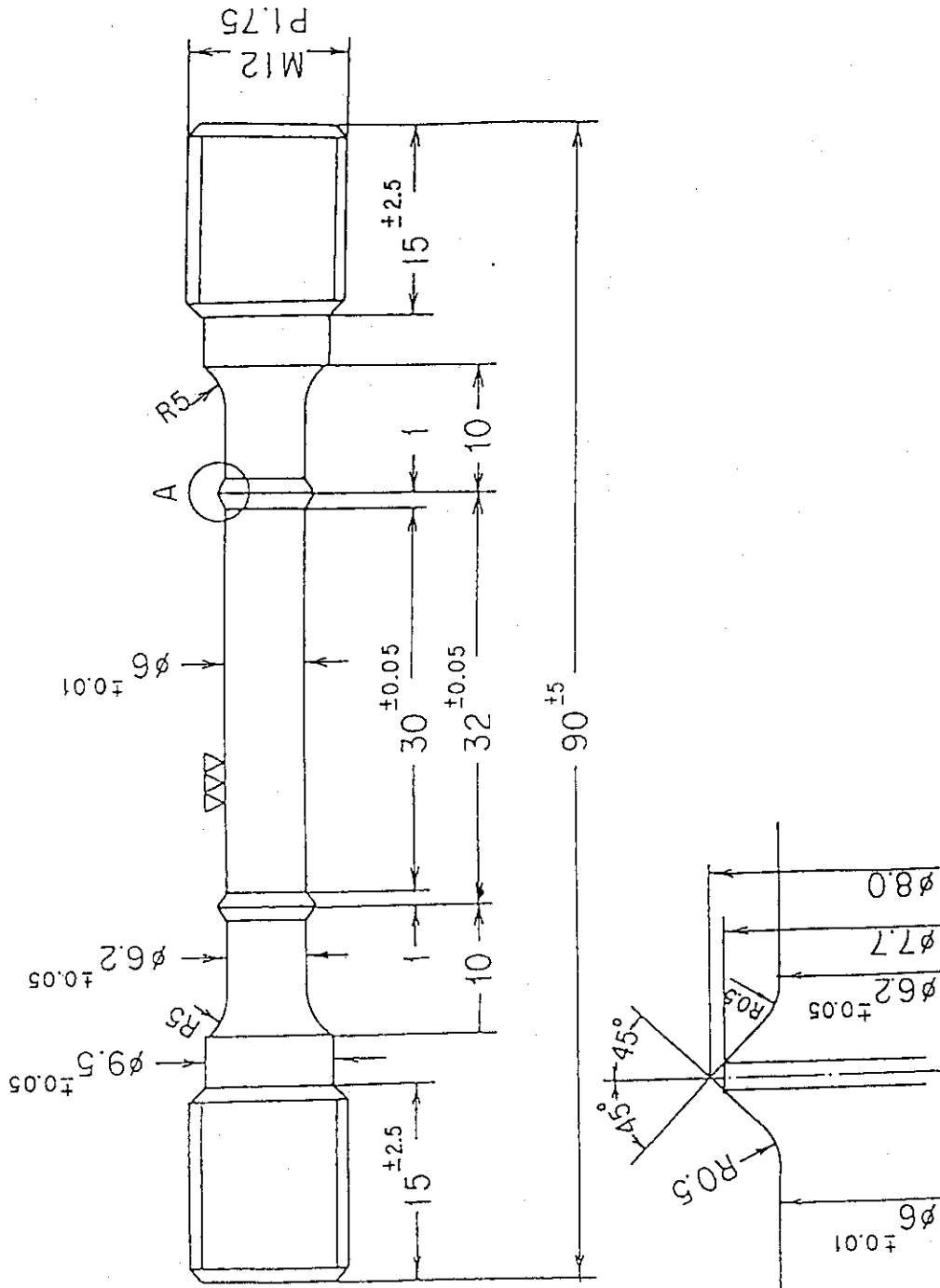


Fig. 6 Geometry of tensile test specimen

Detail of A

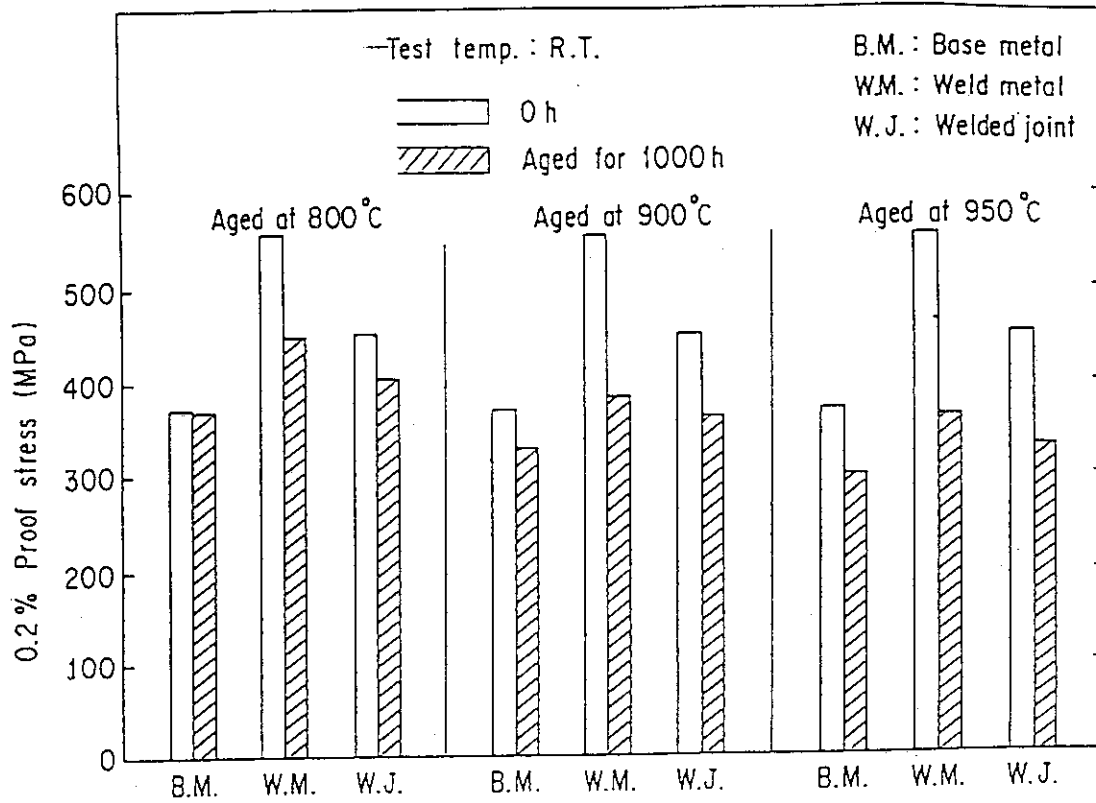


Fig. 7 0.2% proof stress at R.T. after thermal aging

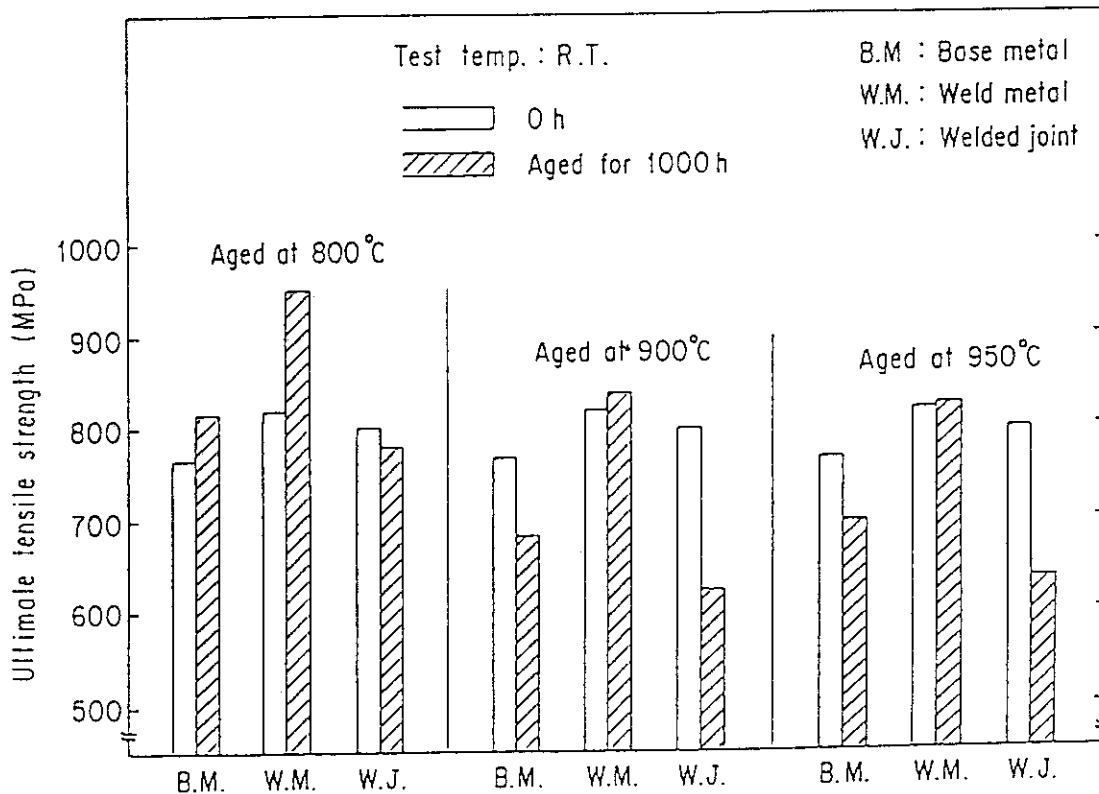


Fig. 8 Ultimate tensile strength at R.T. after thermal aging

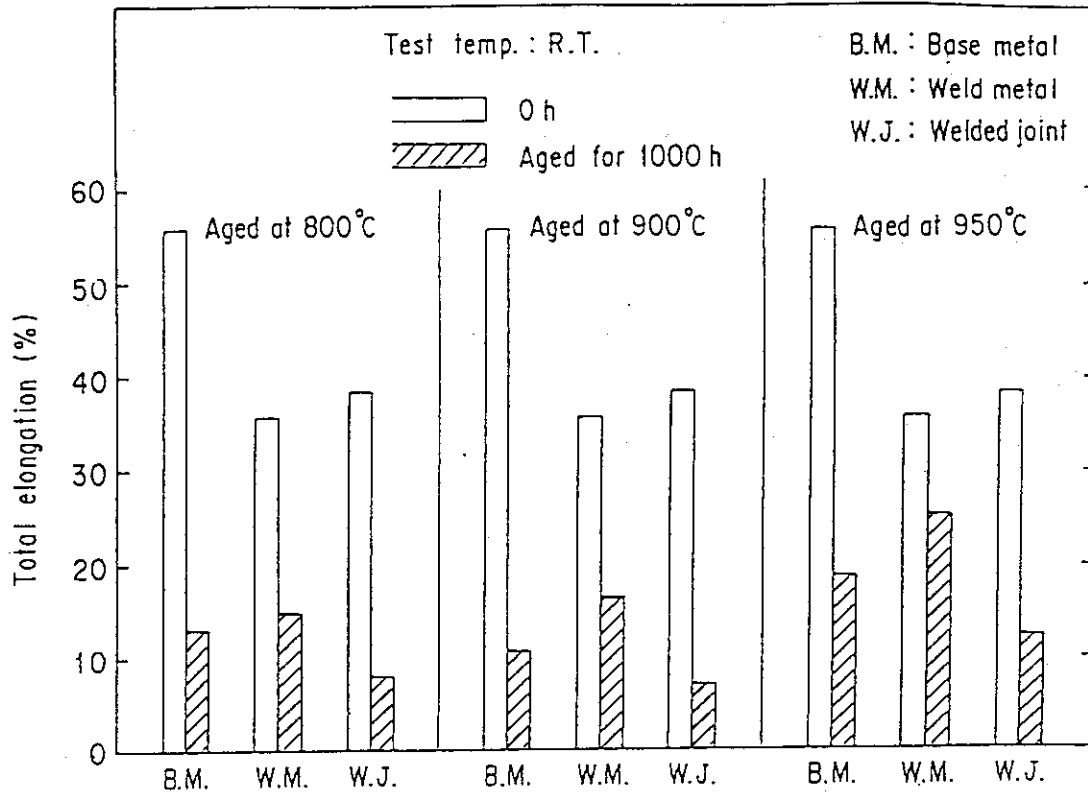


Fig. 9 Total elongation at R.T. after thermal aging

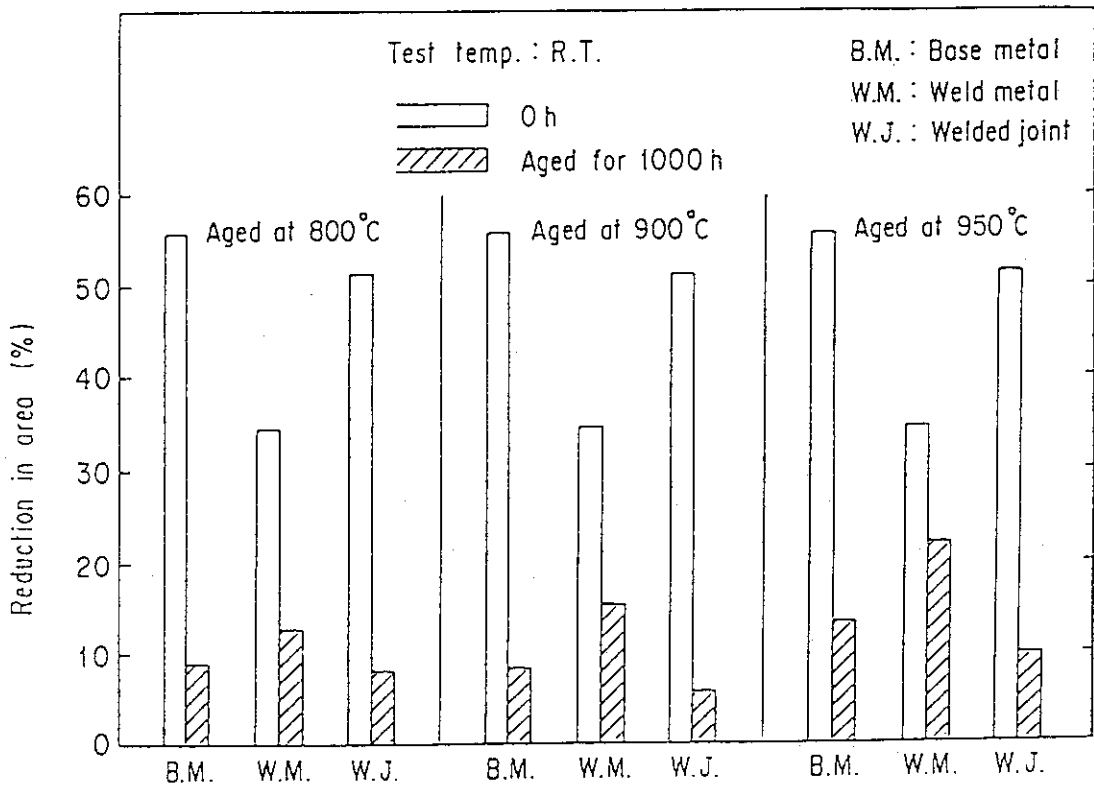


Fig.10 Reduction in area at R.T. after thermal aging

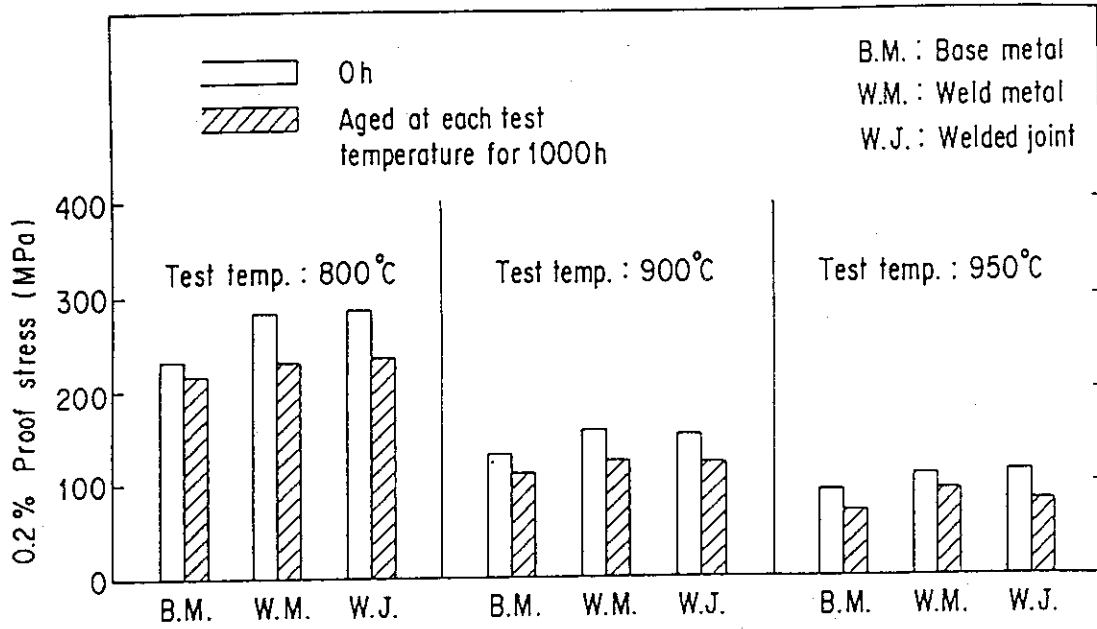


Fig.11 0.2% proof stress at each test temperature after thermal aging

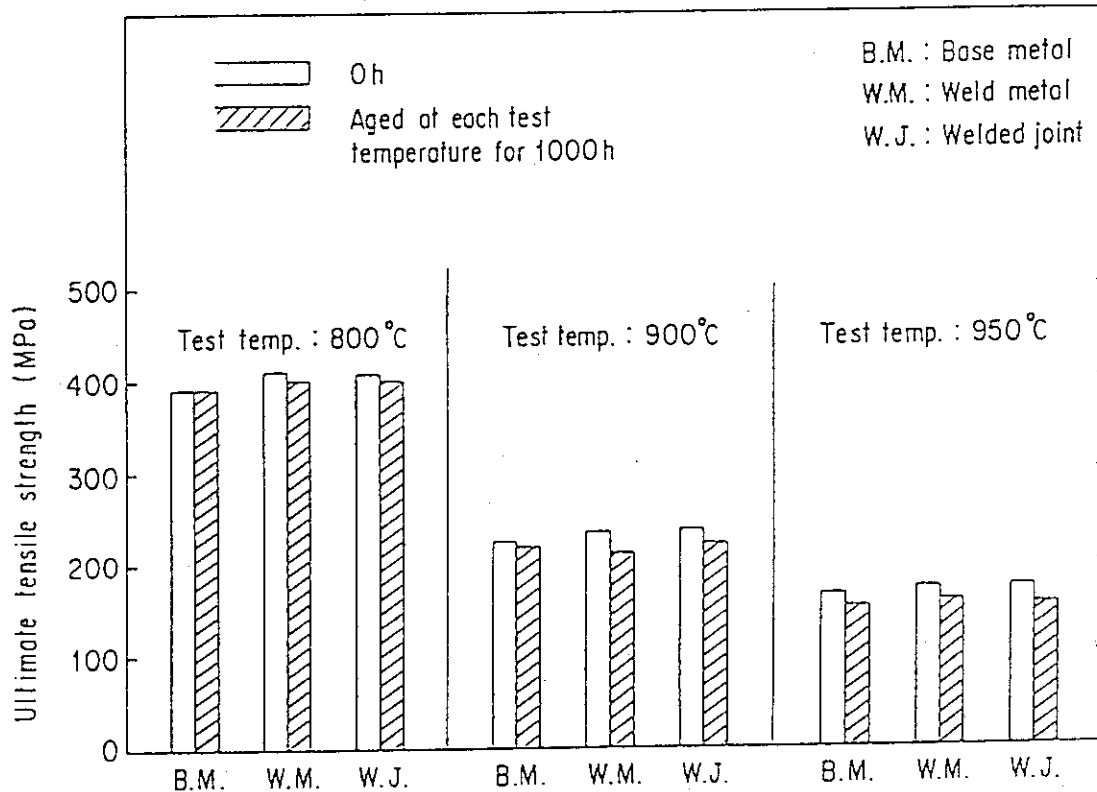


Fig.12 Ultimate tensile strength at each test temperature after thermal aging

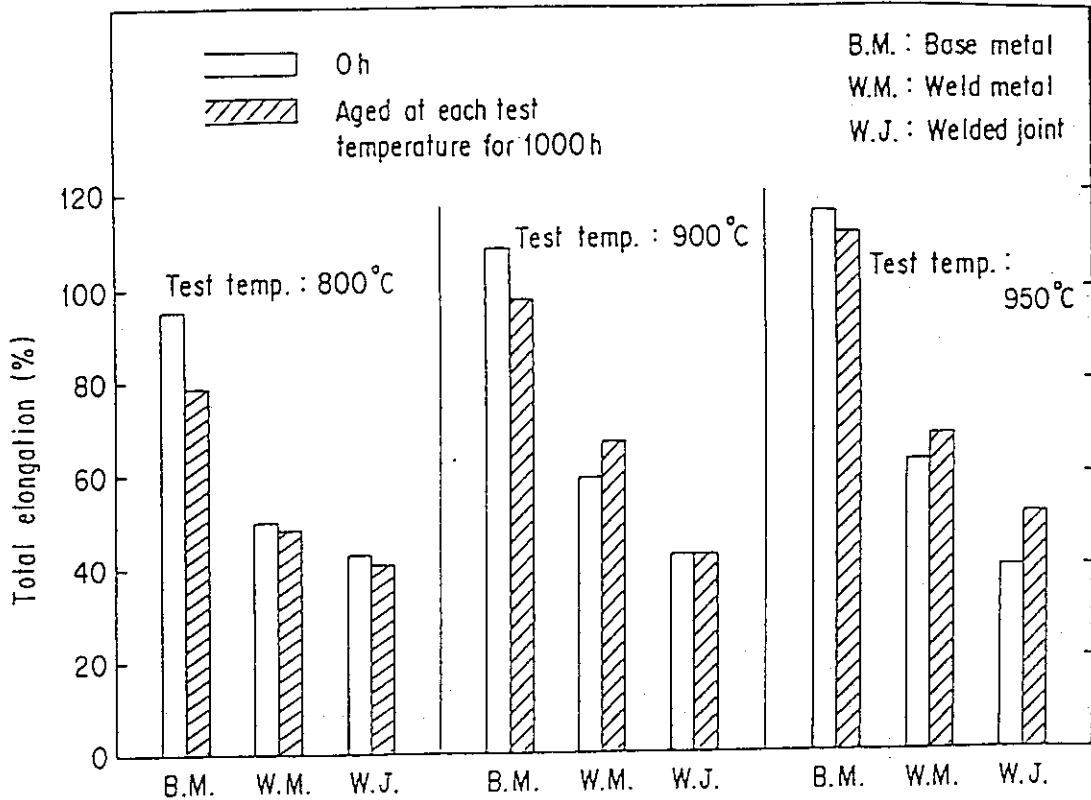


Fig.13 Total elongation at each test temperature after thermal aging

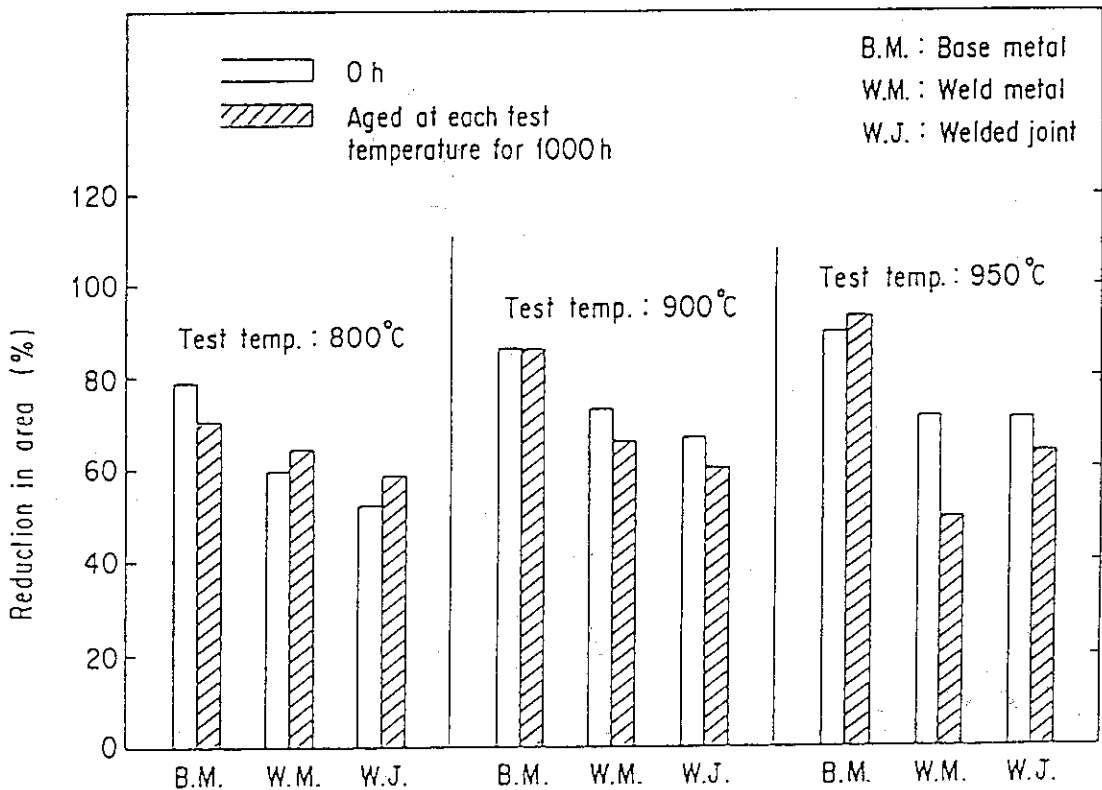


Fig.14 Reduction in area at each test temperature after thermal aging

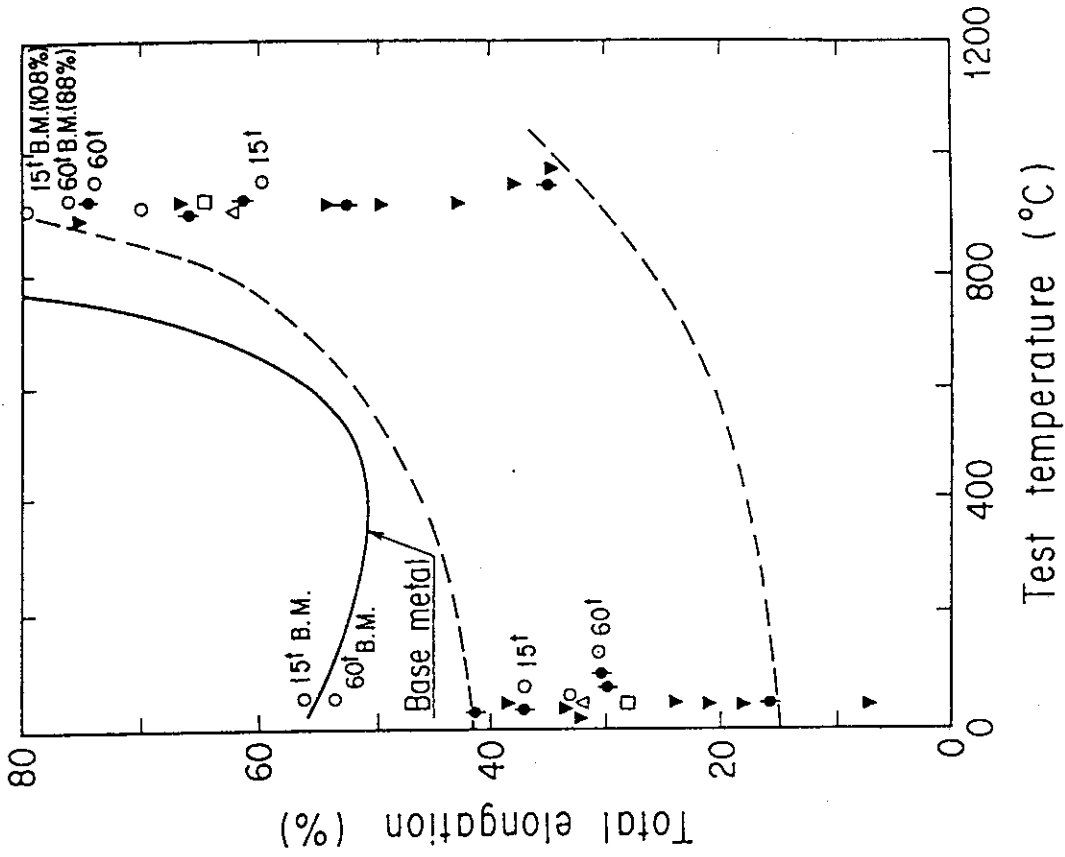


Fig.16 Total elongation versus test temperature for weldments

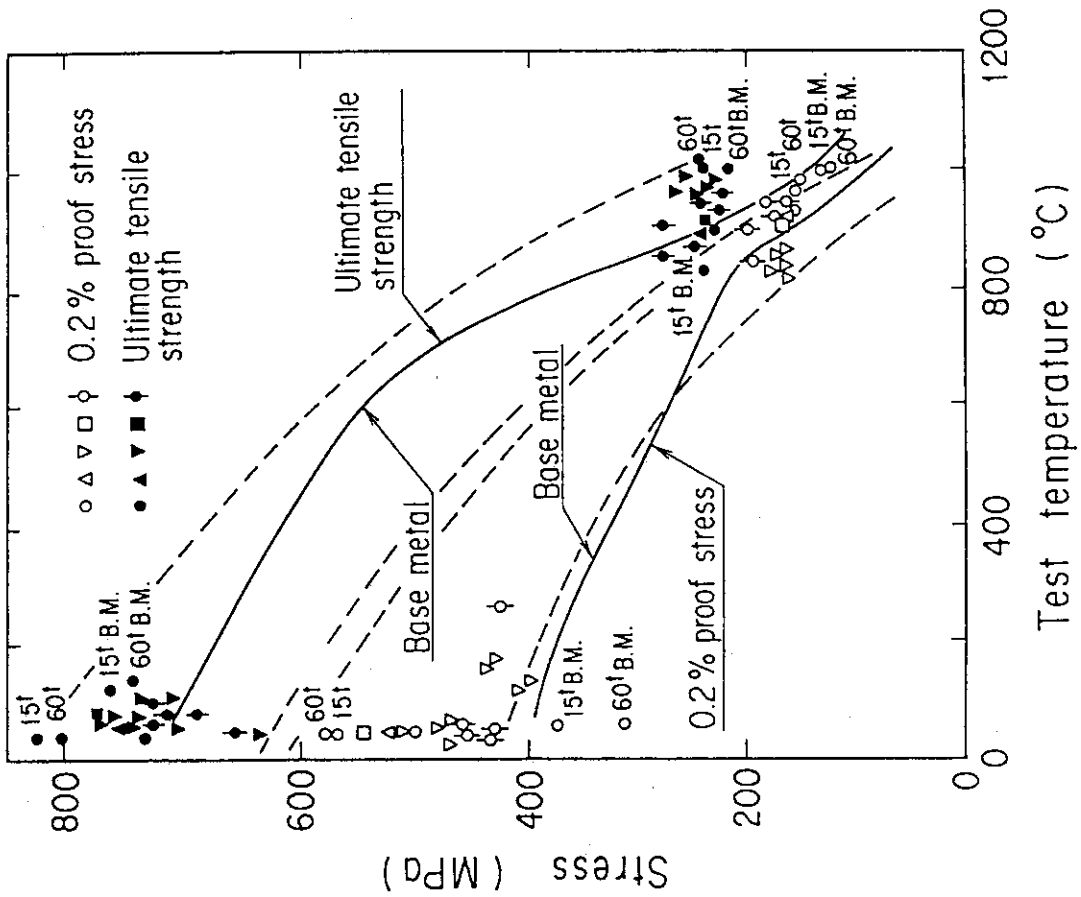


Fig.15 Stress versus test temperature for weldments

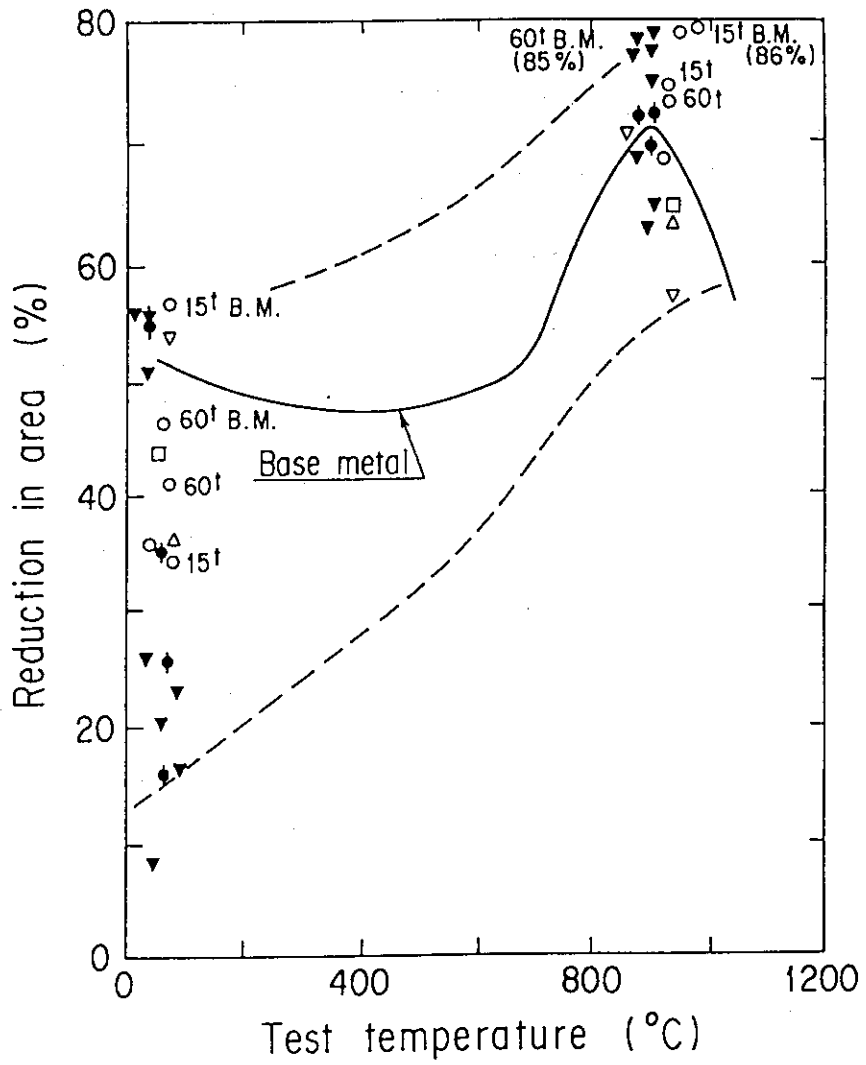


Fig.17 Reduction in area versus test temperature for weldments

付録 引張試験データ集

Table A1 Tensile properties of Hastelloy Alloy XR for HTTR components(plate thickness : 15mm)

Material	Test temperature	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Reduction in area (%)	Fracture location
Base metal	RT	386	768	55.3	55.7	A
		358	766	57.3	55.9	A
Weld metal		556	818	35.3	32.1	A
		561	821	36.2	36.4	B
Welded joint		450	798	38.3	53.6	Base metal
		453	800	38.9	48.7	Base metal
Base metal	800°C	232	389	106.7	82.3	A
		228	391	82.9	74.6	A
Weld metal		282	414	51.4	61.8	A
		278	403	48.8	56.8	A
Welded joint		271	407	43.5	44.7	Weld metal
		292	407	41.6	59.0	Weld metal
Base metal	900°C	127	228	107.1	86.8	A
		132	225	108.8	84.9	A
Weld metal		152	234	52.7	77.3	B
		157	238	64.7	68.5	A
Welded joint		148	237	40.0	64.5	Weld metal
		151	239	44.0	68.4	Weld metal
Base metal	950°C	90	166	118.3	92.3	A
		92	169	114.0	87.3	A
Weld metal		107	179	57.8	68.3	A
		106	171	67.0	74.9	B
Welded joint		110	178	41.0	71.1	Weld metal
		112	174	38.1	70.4	Weld metal

Table A2 Tensile properties of thermally aged Hastelloy Alloy XR
for HTRR components (plate thickness : 15mm)

Heat treatment	Material	Test temp.	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Reduction of area (%)	Fracture location	
Aged at 800°C for 1000h	Base metal	RT	375	822	13.1	8.6	B	
			364	809	12.8	9.2	B	
	Weld metal		450	961	15.1	13.7	A	
			445	939	14.9	11.5	B	
	Welded joint		408	780	8.5	7.9	Bond	
			404	779	7.7	8.0	Base metal	
	Base metal	800°C	216	392	76.7	70.0	A	
			214	388	80.1	70.3	A	
			Weld metal	228	398	50.1	62.7	B
				228	401	45.9	66.0	A
			Welded joint	233	399	39.8	55.8	Weld metal
				232	398	40.6	61.1	Weld metal
Aged at 900°C for 1000h	Base metal	RT	334	687	10.8	7.8	B	
			328	677	10.6	9.2	B	
	Weld metal		385	827	16.8	13.2	B	
			383	846	16.2	17.1	B	
	Welded joint		369	627	6.7	6.1	Base metal	
			362	619	7.4	5.0	Base metal	
	Base metal	900°C	109	218	96.7	83.2	A	
			110	218	98.3	88.3	A	
			Weld metal	121	216	69.7	66.2	B
				123	208	63.9	65.2	B
			Welded joint	120	221	39.3	68.8	Weld metal
				120	222	44.9	50.7	Weld metal
Aged at 950°C for 1000h	Base metal	RT	303	688	16.2	12.2	B	
			299	714	21.1	15.0	B	
	Weld metal		365	827	23.3	21.4	B	
			363	822	27.4	22.7	B	
	Welded joint		333	622	11.5	8.9	Base metal	
			331	651	13.6	10.4	Base metal	
	Base metal	950°C	72	154	102.3	91.9	A	
			70	153	121.1	94.2	A	
			Weld metal	90	162	79.4	59.2	A
				90	159	58.1	40.0	A
			Welded joint	86	160	47.0	69.3	Weld metal
				77	156	55.2	57.7	Weld metal

Table A3 Tensile properties of Hastelloy Alloy XR for HTTR components (plate thickness : 60mm)

Material	Test temperature	0.2% proof stress (MPa)	Ultimate tensile-strength (MPa)	Total elongation (%)	Reduction in area (%)	Fracture location
Base metal	RT	313	744	53.7	45.9	A
Weld metal		567	791	30.3	40.3	A
Welded joint		404	767	37.0	49.8	Base metal
Base metal	900°C	121	212	88.0	85.4	B
Weld metal		155	235	73.0	71.5	A
Welded joint		143	229	57.8	71.5	Base metal

Table A4 Tensile properties of Hastelloy Alloy XR for welding process test (plate thickness : 15mm)

	Test Temperature	0.2% Proof Stress	Ultimate Tensile Strength	Total Elongation	Reduction of Area	Fracture Position
J	RT	502 MPa	730 MPa	31.8 %	40.9 %	A
		508 MPa	753 MPa	28.6 %	31.8 %	A
	900°C	156 MPa	222 MPa	51.8 %	53.6 %	B
		150 MPa	220 MPa	53.6 %	61.3 %	A
JJ	RT	399 MPa	713 MPa	44.6 %	42.0 %	WM
		390 MPa	714 MPa	45.4 %	51.9 %	BM
	900°C	149 MPa	243 MPa	38.6 %	63.0 %	WM
		158 MPa	245 MPa	38.2 %	59.2 %	WM