

JAERI-Research

94-046



# HTTR実機用ハステロイXRの総合特性評価

— その3 溶加材の製作及び溶接性 —

1994年12月

渡辺勝利・中島 甫・斉藤貞一郎<sup>\*1</sup>・高津玉男<sup>\*1</sup>・小池上 一<sup>\*2</sup>  
樋口 洵<sup>\*2</sup>・仲西恒雄<sup>\*3</sup>・佐平健彰<sup>\*4</sup>・丸七香樹<sup>\*4</sup>・竹入俊樹<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開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（〒319-11 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 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 いばらき印刷(株)

HTTR実機用ハステロイXRの総合特性評価

—その3 溶加材の製作及び溶接性—

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 ・斉藤貞一郎\*<sup>1</sup> ・高津 玉男\*<sup>1</sup>  
小池上 一\*<sup>2</sup> ・樋口 洵\*<sup>2</sup> ・仲西 恒雄\*<sup>3</sup> ・佐平 健彰\*<sup>4</sup>  
丸七 香樹\*<sup>4</sup> ・竹入 俊樹\*<sup>4</sup>

(1994年11月29日受理)

HTTR実機用ハステロイXRと同一ヒートの母材及び実機用溶加材を用いて、溶接部の化学分析、金属組織観察、硬さ試験、FISCO試験及び曲げ試験を行い、総合特性評価の一環として溶接性を検討した。

得られた結果はいずれの試験においても良好な特性を示した。特に最もcriticalなpassである曲げ試験においては溶加材中のB量及びC量の最適化を図ったことにより、溶接割れ感受性が十分に低いことが分かった。これらのことにより、実機溶加材の優れた性能及び狭開先化の有効性を確認するとともに、実機適用上の工学的な問題はないことが結論された。

---

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

\*1 日本ウェルディング・ロッド(株)

\*2 石川島播磨重工業(株)

\*3 (株)富士電機総合研究所

\*4 三菱マテリアル(株)

Evaluation on Materials Performance of Hastelloy Alloy XR for HTTR Uses-3  
— Manufacture of Filler Metal and its Weldability —

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

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

(Received November 29, 1994)

Weldability on Hastelloy Alloy XR base metals and filler metals for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) components was examined by means of chemical analysis of deposited metals, optical microscopy, hardness measurements, FISCO and bend test. All of the results obtained by each test showed favorable performance. In particular, in the bend test which is considered to be critical pass, the optimization of B and C contents in the filler metal resulted in low susceptibility to weld cracking. Therefore, it is concluded that the excellent performance of the filler metal used and the effectiveness of narrowing groove are confirmed, and there is no problem from the viewpoint of engineering with respect to HTTR application.

Keywords: Weldability, Hastelloy Alloy XR, Filler Metal, Weld Cracking, Bend Test

---

\*1 Nippon Welding Rod Corporation

\*2 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

\*3 Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

\*4 Mitsubishi Materials Corporation

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 施工確認用溶加材の製作及び溶接性 .....	1
2.1 はじめに .....	1
2.2 供試材料の製作 .....	2
2.2.1 母 材 .....	2
2.2.2 溶加材 .....	2
2.3 溶接施工 .....	3
2.4 評価結果 .....	3
2.4.1 溶着金属の化学分析 .....	3
2.4.2 曲げ試験 .....	4
2.5 まとめ .....	5
3. 実機用溶加材の製作及び溶接性 .....	5
3.1 はじめに .....	5
3.2 供試材料の製作 .....	5
3.2.1 母 材 .....	5
3.2.2 溶加材 .....	6
3.3 溶接施工 .....	6
3.4 評価結果 .....	7
3.4.1 溶接部の化学分析 .....	7
3.4.2 金属組織観察 .....	8
3.4.3 硬さ試験 .....	8
3.4.4 F I S C O試験 .....	9
3.4.5 曲げ試験 .....	9
3.5 まとめ .....	10
4. 結 言 .....	11
謝 辞 .....	12
参考文献 .....	12

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Manufacture of Filler Metal for Welding Process Test and its Weldability .....	1
2.1 Introductory Remarks .....	1
2.2 Materials .....	2
2.2.1 Base Metal .....	2
2.2.2 Filler Metal .....	2
2.3 Welding Procedures .....	3
2.4 Results .....	3
2.4.1 Chemical Analysis of Deposited Metals .....	3
2.4.2 Bend Test .....	4
2.5 Conclusions .....	5
3. Manufacture of Filler Metal for HTTR Uses and its Weldability .....	5
3.1 Introductory Remarks .....	5
3.2 Materials .....	5
3.2.1 Base Metal .....	5
3.2.2 Filler Metal .....	6
3.3 Welding Procedures .....	6
3.4 Results .....	7
3.4.1 Chemical Analysis of Deposited Metals .....	7
3.4.2 Metallography .....	8
3.4.3 Hardness Test .....	8
3.4.4 FISCO Test .....	9
3.4.5 Bend Test .....	9
3.5 Conclusions .....	10
4. Concluding Remarks .....	11
Acknowledgements .....	12
References .....	12

## 1 . 緒 言

高温工学試験研究炉(H T T R)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<sup>(1)</sup>。ハステロイXRは周知の如くH T T R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<sup>(2) - (4)</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>(5)</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の問題が重要な課題として残された。

第3期の研究<sup>(6)・(7)</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、H T T R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の一環として、溶加材の製作及び溶接性に関わる検討結果について述べたものである。

ここでは工業規模で作製した実機と同一ヒートの母材及び実機用溶加材を用いて、実用条件近似下での諸特性試験を行い、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 . 施工確認用溶加材の製作及び溶接性

### 2.1 はじめに

既報<sup>(6)</sup>において開発したハステロイXR系厚肉構造物用溶加材(J案合金)を、実機製作時と同じ工業規模溶解で多量に供給できることを確認すると共に、実機製作に先立ち必要となる溶接施行確認試験及び実機に適用する溶接条件の最終確認のために、施工確認用溶加材を製作して、その溶接性を調べた。

## 1 . 緒 言

高温工学試験研究炉(H T T R)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<sup>(1)</sup>。ハステロイXRは周知の如くH T T R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<sup>(2) - (4)</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>(5)</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の問題が重要な課題として残された。

第3期の研究<sup>(6)・(7)</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、H T T R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の一環として、溶加材の製作及び溶接性に関わる検討結果について述べたものである。

ここでは工業規模で作製した実機と同一ヒートの母材及び実機用溶加材を用いて、実用条件近似下での諸特性試験を行い、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 . 施工確認用溶加材の製作及び溶接性

### 2.1 はじめに

既報<sup>(6)</sup>において開発したハステロイXR系厚肉構造物用溶加材(J案合金)を、実機製作時と同じ工業規模溶解で多量に供給できることを確認すると共に、実機製作に先立ち必要となる溶接施行確認試験及び実機に適用する溶接条件の最終確認のために、施工確認用溶加材を製作して、その溶接性を調べた。



## 2.2 供試材料の製作

### 2.2.1 母材

溶接施工確認用母材として板厚60mm及び15mmの熱間圧延板を製造した。なお、試験板の板厚については厚肉溶接構造物として、HTTRの中間熱交換器・内筒の最大厚さ相当の板厚60mm、及び薄肉溶接構造物を代表する厚さとして板厚15mmを選定した。Fig. 1にその製造工程を示す。製造方法は前報<sup>2) 5) 6)</sup>と同じであり、真空誘導溶解(VI) + エレクトロスラッグ再溶解(ESR)の二重溶解で2 t o n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、最終熱処理を施して供試された。なお、両母材はひとつの溶解チャージ(ch. 0-644)で溶製されている。

Table 1に両母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>8)</sup>及びAMS 5754<sup>9)</sup>を基にSi及びMnをより狭い範囲に、また、Coの下限值を無くし、Al及びTiの上限値を低く設定した成分仕様<sup>10)</sup>を掲げているが、レードル分析、熱間鍛造後の中間素材であるスラブのTop部及びBottom部での成分分析ともその成分仕様<sup>10)</sup>を満足する結果が得られた。

また、Table 2に両母材の常温引張試験、硬さ、結晶粒度及びクリープ破断試験の各結果を示す。硬さにおいて、板厚15mmの方が板厚60mmよりも値が高いものの、常温引張特性は板厚60mm及び15mmの両母材に差異がほとんど無く、引張強さ、0.2%耐力及び伸びともに、ASTMB435規格を満足している。両母材とも、結晶粒度は目標のASTM番号2~5を満足しており、クリープ破断試験の結果もAMS 5754及び製造者の社内規格を満たしている。また、外観検査、寸法検査及び超音波探傷検査の結果も良好であった。

### 2.2.2 溶加材

Fig. 2に施工確認用溶加材の製造工程を示す。溶解方法は真空誘導溶解(VI)とし、500 kgインゴットを溶製し、熱間鍛造、熱間圧延及び冷間引抜で直径5.5mmのコイルを製造した後、焼鈍、冷間引抜の繰り返しにより最終直径1.2mmの溶加材(ch. 0-124)として供試された。なお、加工中のB量の減少抑止・制御については前報<sup>2) 5) 6)</sup>の試験用溶加材製造で得た製造条件<sup>11)</sup>を踏襲した。

Table 3に溶加材の化学成分分析結果を示す。レードル分析は成分仕様<sup>10)</sup>及び施工確認用溶加材として定めた成分目標範囲<sup>6)</sup>を満たしている。なお、中間材であるコイル(φ5.5mm)にて、インゴットのTop部及びBottom部に相当する位置にあるコイルのチェック分析では、B量についての位置による有意差は認められなかった。また、溶加材(φ1.2mm)のチェック分析において、B量は成分目標範囲<sup>6)</sup>に入っていたものの、Mg量は成分目標範囲<sup>6)</sup>より減少していた。しかしながら、Mgは溶接金属の高温特性に大きな影響を及ぼさないと考えられるので、供試可能と判断した。

## 2.3 溶接施工

厚さ60mm及び15mmの Hastelloy X R 母材と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、溶接は実機と同様の自動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、これまでの予備試験の結果を踏まえて、実機と同一の条件を設定した。Table 4 に溶接施工条件を示し、Fig. 3 に開先形状を示す。パス数が低減されると、ひずみの累積による溶接金属の硬さ上昇を抑制し、曲げ試験における割れ感受性を低減させる効果があると考えられるので、既報<sup>6)</sup>よりも狭開先のインサート材なしのU型開先を採用した。積層は、約30層、約70パスであり、通常開先の既報<sup>6)</sup>の場合の約40層、約140パスに比べて、パス数で約 $\frac{1}{2}$ になった。

なお、Fig. 4 に別報<sup>12)</sup> で報告する試験の試験片も含め、各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、既報<sup>6)</sup>と同一の溶接施工条件を適用した。Table 5 に溶接施工条件を示し、Fig. 5 に開先形状を示す。開先角度は $60^\circ$ とし、溶接金属試験片採取用及び溶接継手試験片採取用とで、ルート間隔は、各々、10mm及び2mmであり、共金材の裏当て金を用いた。積層は、各々、9層、23パス及び8層、14パス程度であった。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. 6 及び Fig. 7 に別報<sup>12), 13)</sup> で報告する試験の試験片も含め、各試験片の採取要領を示す。

また、これらの溶接施工要領は、第3章で述べる実機用溶加材の場合と同じである。

## 2.4 評価結果

施工確認用溶加材を使用して溶接した溶接試験板を用いて、溶着金属の化学分析及び曲げ試験（表曲げ試験、側曲げ試験、裏曲げ試験）を行い、溶接性の検討を行った。

### 2.4.1 溶着金属の化学分析

#### (1) 目的

施工確認用溶加材の溶着金属の化学分析を行い、溶加材との化学成分の変化を調べ、TIG溶接施工の健全性評価に資する。

#### (2) 試験方法

溶着金属の化学分析用試料の作製は、JIS Z 3184「溶着金属の化学分析用試料の作製方法」<sup>(14)</sup>に準拠して行った。母材には、厚さ15mmの Hastelloy X R の板を用い、肉盛

溶着金属の4層目以上から分析用試料を採取した。溶着金属との比較のため、ワイヤ製造中に変動しやすい元素については、 $\phi 5.5\text{mm}$  と  $\phi 1.2\text{mm}$  のものについてもそれぞれの化学分析を行った。また、各元素の分析方法は、既報<sup>5)</sup>に示すとおりである。

### (3) 結果及び考察

Table 6 に溶加材とその溶着金属の化学分析結果を示す。

溶加材とその溶着金属の化学成分を比較すると、溶着金属中のMgは溶接によって約1/2に減少したが、Bを含むその他の元素は、溶接時にほとんど変化しないことが、既報<sup>2), 5), 6)</sup>における場合と同様に明らかになった。このことは不活性ガスを用いたTIG溶接法では、溶接時に酸化等により飛散する成分が少ないためと考えられる。

## 2.4.2 曲げ試験

### (1) 目的

施工確認用溶加材を用いた溶接継手の型曲げ試験を行い、溶接金属の耐割れ性を調べ、溶接性評価に資する。

### (2) 試験方法

型曲げ試験は、厚さ60mm及び15mmの溶接試験板について実施した。厚さ60mmの場合は板厚が19mm以上であるので、型曲げ試験は側曲げ試験とし、厚さ15mmの場合は表曲げ試験、側曲げ試験及び裏曲げ試験を行った。Fig. 8 に厚さ60mmの場合の試験片の形状及び寸法を示し、Fig. 9 に厚さ15mmの場合の試験片の形状及び寸法を示す。試験方法及び判定基準は、総理府令第74号第13条、別表第8によった。また、厚さ60mmの場合の側曲げ試験では、溶接試験板から、試験片を6本採取し、厚さ15mmの場合の表曲げ試験、側曲げ試験及び裏曲げ試験では、試験片をそれぞれ2本ずつ採取した。

### (3) 結果及び考察

Table 7 に厚さ60mmの場合の側曲げ試験結果を示し、Table 8 に厚さ15mmの場合の型曲げ試験結果をまとめて示す。

全ての型曲げ試験片について、曲げ前に浸透探傷試験(P T)を実施した。試験方法及び判定基準は、総理府令第74号第15条、別表第15に準拠し、全て判定基準を満足していたが、厚さ60mmの場合は、Table 7 に示すように、試験片によっては円形状欠陥指示模様を呈するものがあったので、曲げ試験前にマーキングし、側曲げ試験により生じた割れと区別できるようにした。Table 7 の試験結果に示すとおり、曲げ変形による割れはなく、従来の結果<sup>6)</sup>に比較して良好な結果が得られた。このことは、施工確認用溶加材の性能改良、すなわち、割れに及ぼす影響が大きいと考えられるB及びC量をクリープ強度を損なわない範囲内で最適化<sup>6)</sup>したことに加え、狭開先としたことなどが寄与していると考えられる。

厚さ15mmの場合も、Table 8 に示すように、いずれの試験片にも割れは検出されず、良好な結果が得られた。

なお、厚さ60mmの場合の狭開先化による耐割れ性能向上の要因としては、以下のよう  
なことが考えられる。

- ① 通常開先のハステロイXR厚板を小入熱のTIG溶接法で溶接すると、パス数が極  
めて多くなるため、ひずみの累積によって溶接金属の硬さが薄板の場合に比べて著し  
く高くなる。この溶接金属の硬さの上昇は、溶接金属の変形能の低下をもたらし、側  
曲げ試験での割れ感受性の増大につながる。狭開先化して溶接パス数を低減させるこ  
とによって、溶接金属の硬さの増大を抑制したことが割れ防止につながったと考えら  
れる。
- ② 通常開先の場合は側曲げ試験で、溶接金属が曲がり部の大部分を占めるのに対して、  
狭開先の場合は半分程度を占めるのみであり、この場合は溶接金属に較べて軟らかい  
母材が曲げ変形の際の伸びをより多く分担する。したがって、曲げ試験片表面での溶  
接金属部の実質伸びが減少し、割れ防止につながったと考えられる。

## 2.5 まとめ

施工確認用溶加材の溶着金属の化学分析を行った結果、溶加材の化学成分と溶着金属の化  
学成分とでは、Mgを除きほとんど変化がないことが分かり、施工確認用溶加材によるTIG  
溶接施工の健全性が確認された。

また、施工確認用溶加材の溶接継手の型曲げ試験を行った結果、厚さ60mmの厚板及び厚さ  
15mmの薄板のいずれの場合にも、良好な結果が得られた。

このように、施工確認用溶加材の溶接性が良好であることが確認されたことにより、安定  
した品質の実機用溶加材の製作が可能であることが確かめられた。

## 3. 実機用溶加材の製作及び溶接性

### 3.1 はじめに

実機用溶加材を用いて溶接性を検討することにより、実機高温溶接構造物の信頼性評価に  
資する。

### 3.2 供試材料の製作

#### 3.2.1 母材

溶接性試験用母材として板厚60mm及び15mmの熱間圧延板を製造した。

なお、厚肉溶接構造物として、HTTRの中間熱交換器・内筒の最大厚さ相当の板厚60mm、  
及び薄肉溶接構造物を代表する厚さとして板厚15mmを選定した。製造方法は2.2.1項と  
同じであり、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 t

なお、厚さ60mmの場合の狭開先化による耐割れ性能向上の要因としては、以下のよう  
なことが考えられる。

- ① 通常開先のハステロイXR厚板を小入熱のTIG溶接法で溶接すると、パス数が極  
めて多くなるため、ひずみの累積によって溶接金属の硬さが薄板の場合に比べて著し  
く高くなる。この溶接金属の硬さの上昇は、溶接金属の変形能の低下をもたらし、側  
曲げ試験での割れ感受性の増大につながる。狭開先化して溶接パス数を低減させるこ  
とによって、溶接金属の硬さの増大を抑制したことが割れ防止につながったと考えら  
れる。
- ② 通常開先の場合は側曲げ試験で、溶接金属が曲がり部の大部分を占めるのに対して、  
狭開先の場合は半分程度を占めるのみであり、この場合は溶接金属に較べて軟らかい  
母材が曲げ変形の際の伸びをより多く分担する。したがって、曲げ試験片表面での溶  
接金属部の実質伸びが減少し、割れ防止につながったと考えられる。

## 2.5 まとめ

施工確認用溶加材の溶着金属の化学分析を行った結果、溶加材の化学成分と溶着金属の化  
学成分とでは、Mgを除きほとんど変化がないことが分かり、施工確認用溶加材によるTIG  
溶接施工の健全性が確認された。

また、施工確認用溶加材の溶接継手の型曲げ試験を行った結果、厚さ60mmの厚板及び厚さ  
15mmの薄板のいずれの場合にも、良好な結果が得られた。

このように、施工確認用溶加材の溶接性が良好であることが確認されたことにより、安定  
した品質の実機用溶加材の製作が可能であることが確かめられた。

## 3. 実機用溶加材の製作及び溶接性

### 3.1 はじめに

実機用溶加材を用いて溶接性を検討することにより、実機高温溶接構造物の信頼性評価に  
資する。

### 3.2 供試材料の製作

#### 3.2.1 母材

溶接性試験用母材として板厚60mm及び15mmの熱間圧延板を製造した。

なお、厚肉溶接構造物として、HTTRの中間熱交換器・内筒の最大厚さ相当の板厚60mm、  
及び薄肉溶接構造物を代表する厚さとして板厚15mmを選定した。製造方法は2.2.1項と  
同じであり、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 t

on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、最終熱処理を施して供試された。

なお、両母材ともHTTRの中間熱交換器での耐圧部材（第一種容器）に充当される製品と同一のインゴット（ch. G1-867）より製造されている。

Table 9に両母材の化学成分分析結果を示す。

レードル分析及び熱間鍛造後の中間素材であるスラブのTop部、Bottom部、及び製品チェック分析ともHTTR実機で設定されている成分規格及び、目標成分範囲を満たしている。

また、Table 10に両母材の常温引張試験結果、硬さ、結晶粒度及びクリープ破断試験の各結果を示す。

板厚15mmにおいて、結晶粒が板厚60mmよりも細かく、常温引張特性の強度が高めであり、硬さも若干高くなっているが何れの特性も、HTTR実機で規定されている規格を満足しており、外観検査、寸法検査及び超音波探傷検査の結果も良好であった。

### 3.2.2 溶加材

製造工程は、2. 2. 2項でのFig. 2と同一の工程とした。即ち、溶解方法は真空誘導溶解（VI）とし、500kgインゴットを溶製、熱間鍛造、熱間圧延、冷間引抜で直径5.5mmのコイルを製造した後、焼鈍、冷間引抜の繰り返しにより最終直径1.2mmの溶加材を製造した。

なお、本溶加材はHTTR実機向け溶加材として製造した3チャージの内の1チャージ（ch. 2-083）である。Table 11に溶加材の化学成分分析結果を示す。

2. 2. 2項と同様に、中間材であるコイル（ $\phi$ 5.5mm）にて、インゴットのTop部及びBottom部に相当する位置にあるコイルのチェック分析では、B量についての位置による有意差は認められなかった。

レードル分析及び溶加材（ $\phi$ 1.2mm）チェック分析において、HTTR実機で規定されている成分規格及び目標成分範囲を満たしていた。

### 3.3 溶接施工

厚さ60mm及び15mmの Hastelloy XR 母材と実機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、溶接は実機と同様の自動TIG溶接による片側溶接とした。

#### (1) 厚さ60mmの Hastelloy XR の溶接

溶接施工条件は、実機と同一の条件を適用した。Table 12に溶接施工条件を示し、Fig. 10に開先形状を示す。開先は、インサート材なしのU型開先で、溶接施工確認用溶加材の場合と同様に、曲げ試験における割れ感受性を低減させる効果がある狭開先としており、開先角度は $10^\circ$ とした。積層は、Fig. 11に示すように、29層、54パス程度であり、通常開先の既報<sup>6)</sup>の場合の約40層、約140パスに比べて、層数及びパス数ともに大幅に減少した。なお、実

機の溶接においては、確実な裏波溶接とするため、インサート材有りの溶接となるが、本試験板の溶接では、実施する試験に影響を及ぼさないと判断し、インサート材なしの施工とした。

また、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 13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（PT）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。

なお、Fig. 12(a) 及び12(b) に別報<sup>12)</sup>・<sup>13)</sup>で報告する試験の試験片も含め、各試験片の採取要領を示す。

## (2) 厚さ15mmの Hastelloy XR の溶接

溶接施工条件は、施工確認用溶加材の場合と同一とした。

ただし、割れ感受性加速試験（FISCO試験）の溶接の場合のみは、装置の都合で、施工確認用溶加材の場合とは異なる溶接施工条件とした。FISCO試験の溶接の場合の溶接条件及び開先形状を、Table 14及びFig. 13に示す。開先は、Y型であり、開先角度は90°、ルート間隔は2mm、ルート面は板厚の1/2とした。

## 3.4 評価結果

実機用溶加材で溶接した溶接試験板を用いて、溶接部の化学分析、金属組織観察、硬さ試験、FISCO試験及び曲げ試験（表曲げ試験、側曲げ試験）を行い、溶接性の検討を行った。

### 3.4.1 溶接部の化学分析

#### (1) 目的

実機用溶加材の溶着金属及び溶接金属の化学分析を行い、溶加材に対する化学成分の変化を調べ、TIG溶接施工の健全性評価に資する。

#### (2) 試験方法

溶着金属の化学分析用試料は、母材に厚さ15mmの Hastelloy XR の板を用い、施工確認用溶加材の場合と同様に採取した。また、溶接金属の化学分析用試料は、厚さ60mm及び15mmの Hastelloy XR 母材を用いた溶接試験板の溶接金属から各々採取した。

また、溶着金属の化学分析は、分析精度を確認するため、同一の試料を異なる2機関で分析した。溶接金属の分析は、既報<sup>6)</sup>と同様に、B、C及び溶接によって変動することが予想されるMgについて実施した。

#### (3) 結果及び考察

Table 15に溶加材とその溶着金属及び溶接金属の化学分析結果を示す。

溶加材とその溶着金属及び溶接金属の化学成分を比較すると、溶着金属及び溶接金属中のMgは溶接によって約1/4以下に減少したが、Bを含むその他の元素は、溶接時に

ほとんど変化しないことが、施工確認用溶加材の場合及び既報<sup>2), 5), 6)</sup>における場合と同様に明らかになった。

また、2機関で分析した溶着金属の化学成分の間に、大きな差異はなく、分析精度を確認できた。

### 3.4.2 金属組織観察

#### (1) 目的

実機用溶加材を用いて製作した溶接継手について、金属組織観察を行い、溶接部の健全性評価に資する。

#### (2) 試験方法

厚さ60mm及び15mmの Hasteloy XR 溶接継手について、マクロ組織観察及びミクロ組織観察を行った。ミクロ組織観察は、10%シュウ酸の電解エッチを行い、観察位置は、厚さ60mmの場合は、表面から2mm、板厚中央、裏表面から2mmの3位置とし、厚さ15mmの場合は、板厚中央とした。なお、各々の位置において、母材部、ボンド部、熱影響部(HAZ部)及び溶接金属中央部を観察した。

#### (3) 結果及び考察

Fig. 14並びにFig. 15(a), 15(b) 及び15(c) に厚さ60mmの Hasteloy XR 溶接継手のマクロ組織及びミクロ組織を示す。また、Fig. 16及びFig. 17に厚さ15mmの Hasteloy XR 溶接継手のマクロ組織及びミクロ組織を示す。

いずれもマクロ組織は正常で溶接欠陥は認められなかった。また、ミクロ組織においても、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生じていなかった。

### 3.4.3 硬さ試験

#### (1) 目的

実機用溶加材を用いて製作した溶接継手について、硬さ試験を行い、溶接部の健全性評価に資する。

#### (2) 試験方法

硬さ試験は、マイクロビッカース硬度計を用い、厚さ60mmの場合の荷重は9.8N、厚さ15mmの場合の荷重は4.9Nとした。測定位置は、ミクロ組織観察の場合と同様に、厚さ60mmの場合は、表面から2mm、板厚中央及び裏表面から2mmの3位置とし、厚さ15mmの場合は、板厚中央とした。また、測定間隔は、厚さ60mmの場合は1mm、厚さ15mmの場合は0.5mmとした。

#### (3) 結果及び考察

Fig. 18及びFig. 19に、厚さ60mm及び15mmの Hasteloy XR 溶接継手の硬さ分布を示す。厚さ60mmの場合は、溶接金属部でHv210~300程度、母材部でHv200~260程度であり、



溶接金属部の方の硬さが高くなった。これは、溶接金属部及び母材部のマイクロ組織がいずれも正常であることから、溶接部における硬さの増大は、金属組織的なものに起因するのではなく、溶接金属の積層によるひずみの累積に起因しているものと推定される。

一方、厚さ15mmの場合は、溶接金属部、ボンド部及び母材部ともにHv210~260程度の範囲にあり、溶接金属部、ボンド部及び母材部の間の差異はほとんど認められなかった。これは、薄板の場合は溶接パス数が少ないため、溶接金属の積層によるひずみの累積の影響が小さいためと考えられる。また、Fig. 19には本測定結果に加えて、既報<sup>2), 5), 6)</sup>における硬さのデータバンドも示しているが、本測定結果は従来のデータバンドから大きくはずれることはなく、ほぼ同等であることが分かった。

#### 3.4.4 F I S C O 試験

##### (1) 目的

実機用溶加材を用いて、F I S C O 試験を行い、耐溶接割れ感受性について検討を行う。

##### (2) 試験方法

F I S C O 試験は、厚さ15mmの Hastelloy X R 母材による溶接試験板を用い、JIS Z 3155「C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法」<sup>(15)</sup>に準拠して行った。

##### (3) 結果及び考察

Table 16に試験結果を示す。発生した割れは、いずれもクレータ割れにとどまり、ビード割れの発生は全く認められなかった。これは、通常の本 Hastelloy X とほぼ同程度の溶接割れ感受性である。比較検討のため、既報<sup>2), 6)</sup>におけるA案よりK案合金の溶加材の割れ率を、Fig. 20に示す。実機用溶加材の割れ率は、これらのものと比較しても低く、耐割れ感受性は良好な水準にあった。このことは、厚板においても安定した良好な溶接性を得るための合金設計により、P、S及びO等の不純物を極力低減したことやB量を30ppm程度に、やや低減したことなども、耐溶接割れ感受性が良好であったことに寄与していると考えられる。

また、実機用溶加材は、J案合金とほぼ同一の組成であり、Fig. 20に示すように、F I S C O 割れ感受性もJ案合金の場合と同様な値が再現されている。

以上のことから、実機用溶加材の溶接割れ感受性は十分低いものであり、厚肉構造物用としても、実用上問題はないと言えよう。

#### 3.4.5 曲げ試験

##### (1) 目的

実機用溶加材を用いた溶接継手の型曲げ試験を行い、溶接金属の耐割れ性を調べ、溶接性評価に資する。

## (2) 試験方法

型曲げ試験は、厚さ60mm及び15mmの溶接試験板について実施した。厚さ60mm及び15mmの場合とも、表曲げ試験及び側曲げ試験を実施した。

Fig. 21及びFig. 22に厚さ60mmの場合の試験片の形状及び寸法を示す。

なお、厚さ15mmの場合の試験片の形状及び寸法は、施工確認用溶加材の場合と同一である。試験方法及び判定基準は、総理府令第74号第13条、別表第8によった。また、試験片は溶接試験板から各2本採取した。ただし、厚さ60mmの側曲げ試験の場合のみは、試験片を4本採取した。

## (3) 結果及び考察

Fig. 23及びFig. 24に厚さ60mmの場合の試験後の試験片外観を示し、Fig. 25に厚さ15mmの場合の試験片外観を示す。

Table 17に厚さ60mmの場合の型曲げ試験結果を示し、Table 18に厚さ15mmの場合の型曲げ試験結果を示すとともに、全ての型曲げ試験片について、曲げ試験前に実施した浸透探傷試験（PT）の結果も併わせて示す。試験方法及び判定基準は、総理府令第74号第15条、別表第15に準拠したが、全て判定基準を満足していた。

厚さ60mmの場合は、Table 17に示すように、欠陥は認められず判定基準を満足していた。一方、厚さ15mmの場合も、Table 18に示すように、割れが1個生じているものもあるが、全て判定基準を満足しており、良好な結果が得られた。また、参考までに、厚さ60mmの場合について、溶加材のB及びCの含有量と側曲げ試験における割れ個数との関係をFig. 26に示す。ここでは、狭開先を採用した施工確認用溶加材及び実機用溶加材の結果に加え、既報<sup>6)</sup>におけるF案よりK案合金の溶加材の結果も併わせて示している。施工確認用溶加材または実機用溶加材を用い、かつ、狭開先を採用した今回の溶接継手に対する側曲げ試験結果は、従来<sup>6)</sup>の結果<sup>6)</sup>に比べて更に良好な結果を示しているといえる。

以上のことから、実機用溶加材の性能改良、すなわち、クリープ強度を損なわない範囲内でB量を従来材<sup>2), 5)</sup>よりも多少低めの30ppm前後とし、C量も低めに設定することと、曲げ試験における割れ感受性を低減させる効果のある狭開先を適用することの有効性が明らかになった。

## 3.5 まとめ

溶着金属の化学分析結果より、Mgを除いてBをはじめとする他の元素については溶接時に殆ど変化しないことが分かった。

金属組織観察ではマクロ組織及びミクロ組織ともに正常で溶接欠陥は認められなかった。また母材熱影響部における結晶粒の粗大化は見られなかった。

硬さ測定結果ではこれまでに得られた結果と同様に従来のデータ・バンドの中に入っており、異常は認められなかった。即ち、厚板では溶接部が母材部よりも若干硬化したが、薄板

ではこれら両者の間に差異は殆ど見られなかった。

F I S C O 試験結果では発生した割れは、いずれもクレータ割れにとどまり、ビード割れの発生は全く認められなかった。このことは通常のアステロイ X とほぼ同程度の割れ感受性であり、厚肉溶接構造物用としての、実用上の問題はないことが分かった。

曲げ試験では溶加材中の B 量及び C 量の最適化を図ったこと並びに狭開先の適用により良好な特性が得られた。

これらのことから、本溶加材が優れた性能を有するものであり、実機適用上の工学的な問題はないということが言えよう。

## 4 . 結 言

施工確認用及び実機用の溶加材を工業規模で製作し、板厚 60mm 及び 15mm の母材を用いて、溶接性に関わる一連の検討を行い次のような結果を得た。

### (1) 施工確認用溶加材について

溶着金属の化学分析結果より Mg を除き殆ど変化がないことから、T I G 溶接施工の健全性が確認された。また、曲げ試験では厚板及び薄板ともに良好な結果が得られた。

これらのことを通じて、安定した品質の実機用溶加材の製作が可能であることが確かめられた。

### (2) 実機用溶加材について

溶着金属の化学分析により Mg を除く他の元素の溶接時における逸散は認められなかった。

金属組織観察ではマクロ組織及びミクロ組織において、溶接金属及びボンド部における溶接欠陥は認められず、母材熱影響部においても、結晶粒の粗大化は生じていなかった。硬さ試験では溶接金属及び母材とも良好な特性を示した。

一方、F I S C O 試験では発生した割れは、いずれもクレータ割れにとどまり、ビード割れの発生は全く認められず、割れ率は通常のアステロイ X とほぼ同程度であることから溶接割れ感受性は十分に低いことが分かった。さらに、曲げ試験では、溶加材中の B 量及び C 量の最適化を図ったこと並びに狭開先の適用により良好な結果が得られた。これらのことにより、実機溶加材の優れた性能並びに狭開先化の有効性が明らかになった。

以上を総合して、本溶加材を実機に適用するにあたり、工学的な問題はないことが結論された。

ではこれら両者の間に差異は殆ど見られなかった。

F I S C O試験結果では発生した割れは、いずれもクレータ割れにとどまり、ビード割れの発生は全く認められなかった。このことは通常のハステロイ X とほぼ同程度の割れ感受性であり、厚肉溶接構造物用としての、実用上の問題はないことが分かった。

曲げ試験では溶加材中の B 量及び C 量の最適化を図ったこと並びに狭開先の適用により良好な特性が得られた。

これらのことから、本溶加材が優れた性能を有するものであり、実機適用上の工学的な問題はないということが言えよう。

## 4 . 結 言

施工確認用及び実機用の溶加材を工業規模で製作し、板厚60mm及び15mmの母材を用いて、溶接性に関わる一連の検討を行い次のような結果を得た。

### (1) 施工確認用溶加材について

溶着金属の化学分析結果より Mg を除き殆ど変化がないことから、T I G 溶接施工の健全性が確認された。また、曲げ試験では厚板及び薄板ともに良好な結果が得られた。

これらのことを通じて、安定した品質の実機用溶加材の製作が可能であることが確かめられた。

### (2) 実機用溶加材について

溶着金属の化学分析により Mg を除く他の元素の溶接時における逸散は認められなかった。

金属組織観察ではマクロ組織及びミクロ組織において、溶接金属及びボンド部における溶接欠陥は認められず、母材熱影響部においても、結晶粒の粗大化は生じていなかった。硬さ試験では溶接金属及び母材とも良好な特性を示した。

一方、F I S C O試験では発生した割れは、いずれもクレータ割れにとどまり、ビード割れの発生は全く認められず、割れ率は通常のハステロイ X とほぼ同程度であることから溶接割れ感受性は十分に低いことが分かった。さらに、曲げ試験では、溶加材中の B 量及び C 量の最適化を図ったこと並びに狭開先の適用により良好な結果が得られた。これらのことにより、実機溶加材の優れた性能並びに狭開先化の有効性が明らかになった。

以上を総合して、本溶加材を実機に適用するにあたり、工学的な問題はないことが結論された。

## 謝 辞

本研究を行う上で、日本ウェルディング・ロッド(株)、石川島播磨重工業(株)、(株)富士電機総合研究所、三菱マテリアル(株)及び日本原子力研究所の関係各位に多大の御協力を頂きましたことを深謝します。

## 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 Materials II, Elsevier Sci. Publishing Co., (1993) p.1491.
- (8) American Society for Testing and Materials, ATSM B435 (Nov.1, 1987)
- (9) Aerospace Materials Specification, AMS 5754H (Jan.1, 1984)
- (10) 羽田、元木、馬場：JAERI-M 90-148(1990)
- (11) 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
- (12) 渡辺、中島、斉藤、高津、小池上、樋口：JAERI-M 94-081
- (13) 渡辺、中島、小池上、樋口、仲西、斉藤、高津：JAERI-Research, 投稿予定
- (14) 日本工業規格 JIS Z 3184 溶着金属の化学分析用試料の作製方法(1992)
- (15) 日本工業規格 JIS Z 3155 C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法(1993)

## 謝 辞

本研究を行う上で、日本ウェルディング・ロッド(株)、石川島播磨重工業(株)、(株)富士電機総合研究所、三菱マテリアル(株)及び日本原子力研究所の関係各位に多大の御協力を頂きましたことを深謝します。

## 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 Materials II, Elsevier Sci. Publishing Co., (1993) p.1491.
- (8) American Society for Testing and Materials, ATSM B435 (Nov.1, 1987)
- (9) Aerospace Materials Specification, AMS 5754H (Jan.1, 1984)
- (10) 羽田、元木、馬場：JAERI-M 90-148(1990)
- (11) 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
- (12) 渡辺、中島、斉藤、高津、小池上、樋口：JAERI-M 94-081
- (13) 渡辺、中島、小池上、樋口、仲西、斉藤、高津：JAERI-Research, 投稿予定
- (14) 日本工業規格 JIS Z 3184 溶着金属の化学分析用試料の作製方法(1992)
- (15) 日本工業規格 JIS Z 3155 C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法(1993)

Table 1 Specification and results of chemical composition of Hastelloy XR plates \* (ch.0-644) for Qualification Test for Welding Procedure

(t15mm plate:ch.0-644, t60mm plate:ch.0-644) (mass%)

element	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	1.00	0.040	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 2 Results of room temperature tensile test, hardness, grain size and creep rupture test at 815°C, 900°C of thickness 15mm, 60mm Hastelloy XR plates for Qualification Test for Welding Procedure

(t15mm plate:ch.0-644, t60mm plate:ch.0-644)

	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(hr)	Elongation(%)	Rupture Time(hr)	Elongation(%)
t15mm plate	687	343	55	87	2.0	88	48	242	49
t60mm plate	686	341	56	80	2.0	55	83	171	50
Specification *	≥655	≥241	≥35	—	2 to 5	≥24	≥10	≥100	≥10

\* : Specification of manufacturer  
\*\* : Average Grain Size Number

Table 3 Specification and results of chemical composition of Hastelloy XR filler metals (ch.0-124) for Qualification Test for Welding Procedure

		(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	0.0054	Rem.	0.003	0.001
	*	0.05	0.25	0.75	—	—	20.5	17.0	8.0	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Specification	min	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.	—	—
	max	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Aim Range of ladle **	min	0.050	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.02	—	0.0040	—	—	—
	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	0.0060	Rem.	0.003	0.002
Check(φ5.5mm) Location:Top		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0031	—	—	—
Check(φ5.5mm) Location:Bottom		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0028	—	—	—
Check(φ5.5mm)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0030	—	—	—
		—	—	—	0.001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0052	—
Check(φ1.2mm, filler metal)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.008	—	0.0021	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Aim Range of filler metal**	min	0.050	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.0020	—	—	—
	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-M91-189  
 \* : Ref. JAERI-M90-148  
 LAP : Low as possible  
 \*\*\* : After heat treatment



Table 4 Welding conditions (thickness: 60mm plate)

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	190	9-10	80	1000	20-30

Table 5 Welding conditions (thickness: 15mm plate)

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

Table 6 Chemical composition of filler metal and deposited metal

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O
Ladle (Ch. No. 0-124)	0.056	0.36	0.82	<0.001	0.001	21.60	18.05	9.10	0.50	<0.01	0.04	<0.01	0.02	0.02	0.0054	Rem.	0.003	0.001
Check(Φ5.5mm) Φ1.2mm Filler metal	-	-	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0030	-	0.0052	-
Deposited metal	0.050	0.38	0.80	0.001	0.003	21.61	18.4	9.34	0.41	<0.001	0.054	0.001	0.004	0.009	0.002	Rem.	0.0063	0.0013

Rem.:Remainder  
-:Not analyzed

Table 7 Results of side bend tests (thickness: 60mm plate)

Test item	Specimen No.	Liquid penetrant test (number)	Results of side bend tests (Crack length × Number) (mm × number)	*) Judgment
Side bend	1	1	(L.F. 0.5 × 1) **)	Good
	2	No defect	No defect	Good
	3	1	(L.F. 0.5 × 1) **)	Good
	4	No defect	No defect	Good
	5	No defect	No defect	Good
	6	No defect	No defect	Good

\*) Criteria : (Maximum crack length)  $\leq 3$  (mm),  
 (Total crack length)  $\leq 7$  (mm),  
 (Number of cracks)  $\leq 10$

\*\* ) L.F. : Lack of fusion

Table 8 Results of guided bend tests (thickness: 15mm plate)

Test item	Specimen No.	Liquid penetrant test (number)	Results of guided bend tests (Crack length × Number) (mm × number)	*) Judgment
Face bend	1	No defect	No defect	Good
	2	No defect	No defect	Good
Side bend	1	No defect	No defect	Good
	2	No defect	No defect	Good
Root bend	1	No defect	No defect	Good
	2	No defect	No defect	Good

\*) Criteria : (Maximum crack length)  $\leq 3$  (mm),  
 (Total crack length)  $\leq 7$  (mm),  
 (Number of cracks)  $\leq 10$

Table 9 Specification and results of chemical composition of Hastelloy XR plates for Welding Test

(mass%)

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

LAP : Low as possible

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

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

Table 10 Results of room temperature tensile test, hardness, grain size and creep rupture test at 815°C, 900°C of thickness 15mm, 60mm Hastelloy XR plates for Welding Test

(t15mm plate:ch.G1-867, t60mm plate:ch.G1-867)

	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(hr)	Elongation(%)	Rupture Time(hr)	Elongation(%)
t15mm plate	7 2 7	3 2 9	5 0	8 6	(T)4.5 (L)4.5	8 7	1 0 1	2 4 4	8 8
t60mm plate	6 6 8	2 9 0	5 7	8 4	(T)3.0 (L)3.0	9 9	1 0 0	2 8 8	6 6
Spec. **	≥ 6 5 5	≥ 2 4 1	≥ 3 5	—	—	≥ 2 4	—	—	—
Spec. ***	≥ 6 5 5	≥ 2 4 1	≥ 3 5	—	2 to 5	≥ 2 4	≥ 1 0	≥ 1 0 0	≥ 1 0

\* 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 11 Specification and results of chemical composition of Hastelloy XR filler metals (ch.2-083) for Welding Test

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	0.25	0.75	—	—	20.5	17.0	8.0	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	max	0.15	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	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.005	—	—	—
	max	0.065	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	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0036	—	—	—
Check(φ5.5mm)***	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
	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(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	0.49	0.003	0.05	<0.001	0.016	0.002	0.0032	Rem.	0.0032	0.0010
	0.050	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.0020	—	—	—
Aim Range of filler metal**	min	0.050	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
	max	0.070	0.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
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-M91-189  
 \*\*\*\* : 2 samples check  
 LAP : Low as possible  
 \* : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)  
 \*\*\* : After heat treatment

Table 12 Welding conditions (thickness: 60mm plate)

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 13 Results of nondestructive testings (thickness: 60mm plate)

Groove Face	Welded Joint	
	P T	R T
good	good	good

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

Table 14 Welding conditions for FISCO cracking test (thickness: 15mm plate)

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	230	8-12	130	600	Torch : 15-20 Back shield : 15-20

Table 15 Chemical composition of filler metal, deposited metal and weld metal

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O
φ1.2mm wire (Ch.no.2-083)	0.052	0.39	0.82	0.001	0.003	21.41	18.1	9.36	0.49	0.003	0.05	<0.001	0.016	0.002	0.0032	Rem.	0.0032	0.0010
Deposited metal ※(1)	0.051	0.39	0.80	0.001	0.003	21.30	18.2	9.20	0.53	0.003	0.05	0.002	0.004	0.001	0.0033	Rem.	0.0052	0.0018
Deposited metal ※(2)	0.052	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	-	0.0037	-	-	-
Weld metal ※※	0.052	0.36	0.80	<0.001	0.003	21.37	18.05	9.07	0.49	<0.01	0.03	<0.01	0.004	<0.01	0.0037	Rem.	0.005	0.001
Weld metal (thickness:15mm plate)	0.051	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.004	-	0.0034	-	-	-
Weld metal (thickness:60mm plate)	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	-	0.003	-	-	-

※ Analysis in Nippon Welding Rod Co.,Ltd.  
 ※※ Analysis in Mitsubishi Materials Corporation

(1),(2): Repeat no.  
 Rem: Remainder  
 -: Not analyzed



Table 16 Results of FISCO cracking test (thickness: 15mm plate)

Repeat no.		Weld bead no.			Total length(mm)	Crack ratio(%)
		1	2	3		
1	Length of weld(mm)	47.50	44.65	48.30	140.45	16.2
	Length of crack(mm)	8.60 ※	6.65 ※	7.50 ※	22.75	
2	Length of weld(mm)	56.10	54.55	56.00	166.65	13.6
	Length of crack(mm)	7.45 ※	6.00 ※	9.15 ※	22.60	

※ Crack in crater

Table 17 Results of guided bend tests (thickness: 60mm plate)

Test item	Specimen No.	Liquid penetrant test (number)	Results of guided bend tests (Crack length × Number) (mm × number)	*) Judgment
Face bend	1	No defect	No defect	Good
	2	No defect	No defect	Good
Side bend	1	No defect	No defect	Good
	2	No defect	No defect	Good
	3	No defect	No defect	Good
	4	No defect	No defect	Good

\*) Criteria : (Maximum crack length)  $\leq 3$  (mm),  
 (Total crack length)  $\leq 7$  (mm),  
 (Number of cracks)  $\leq 10$

Table 18 Results of guided bend tests (thickness: 15mm plate)

Test item	Specimen No.	Liquid penetrant test (number)	Results of guided bend tests (Crack length × Number) (mm × number)	*) Judgment
Face bend	1	No defect	No defect	Good
	2	No defect	No defect	Good
Side bend	1	No defect	0.2 × 1	Good
	2	No defect	0.2 × 1	Good

\*) Criteria : (Maximum crack length)  $\leq 3$  (mm),  
 (Total crack length)  $\leq 7$  (mm),  
 (Number of cracks)  $\leq 10$

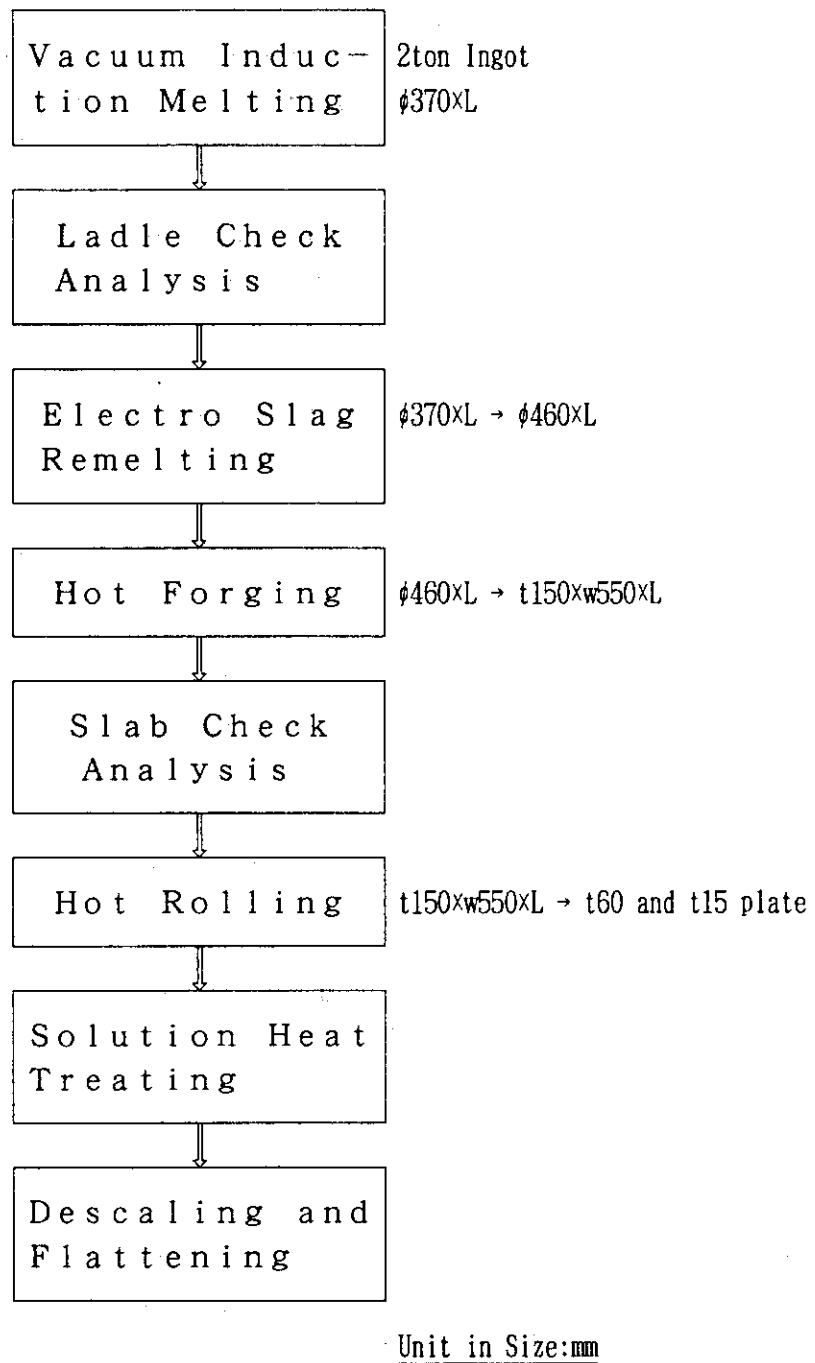


Fig. 1 Production flow diagram of Hastelloy XR Plate

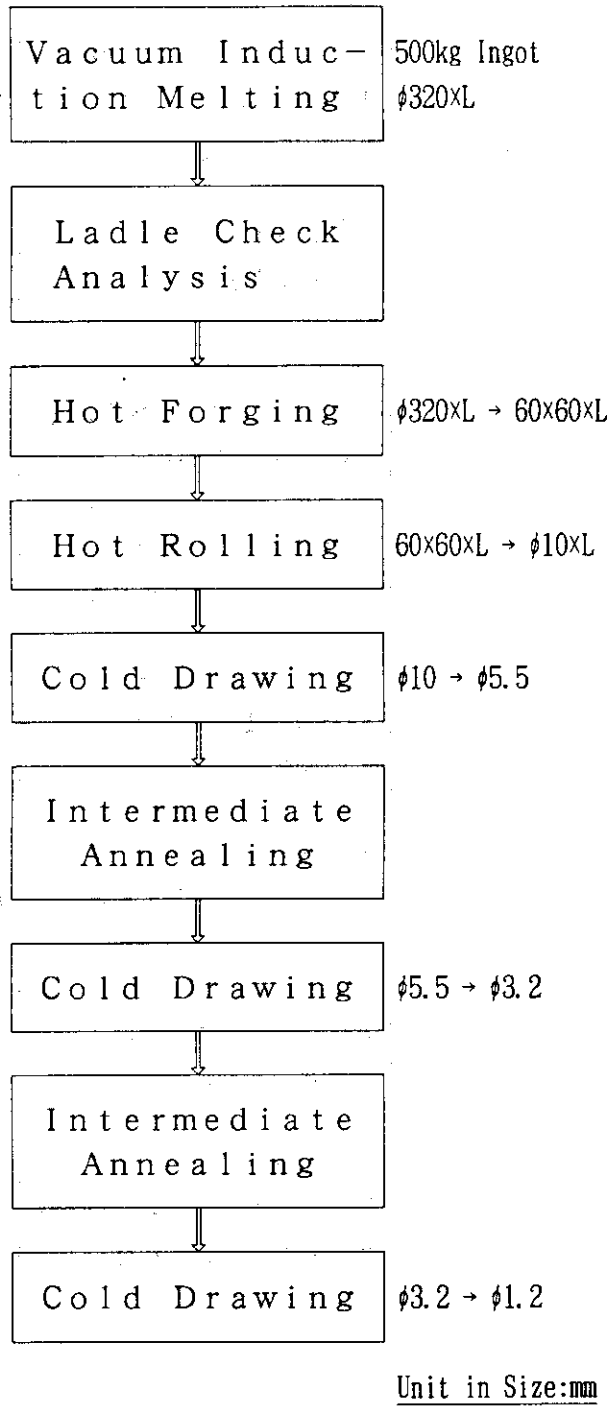


Fig. 2 Production flow diagram of Hastelloy XR filler metals

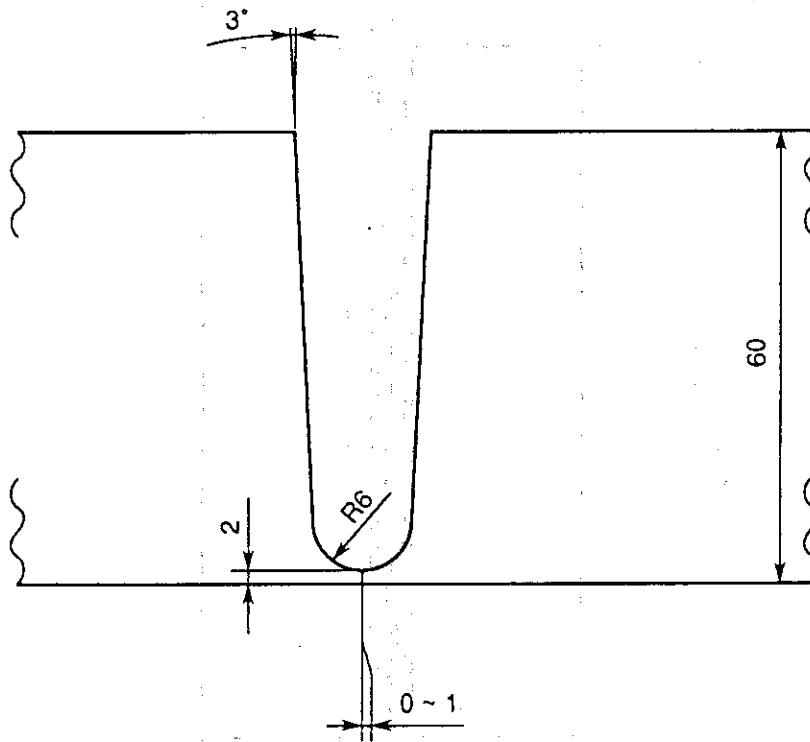
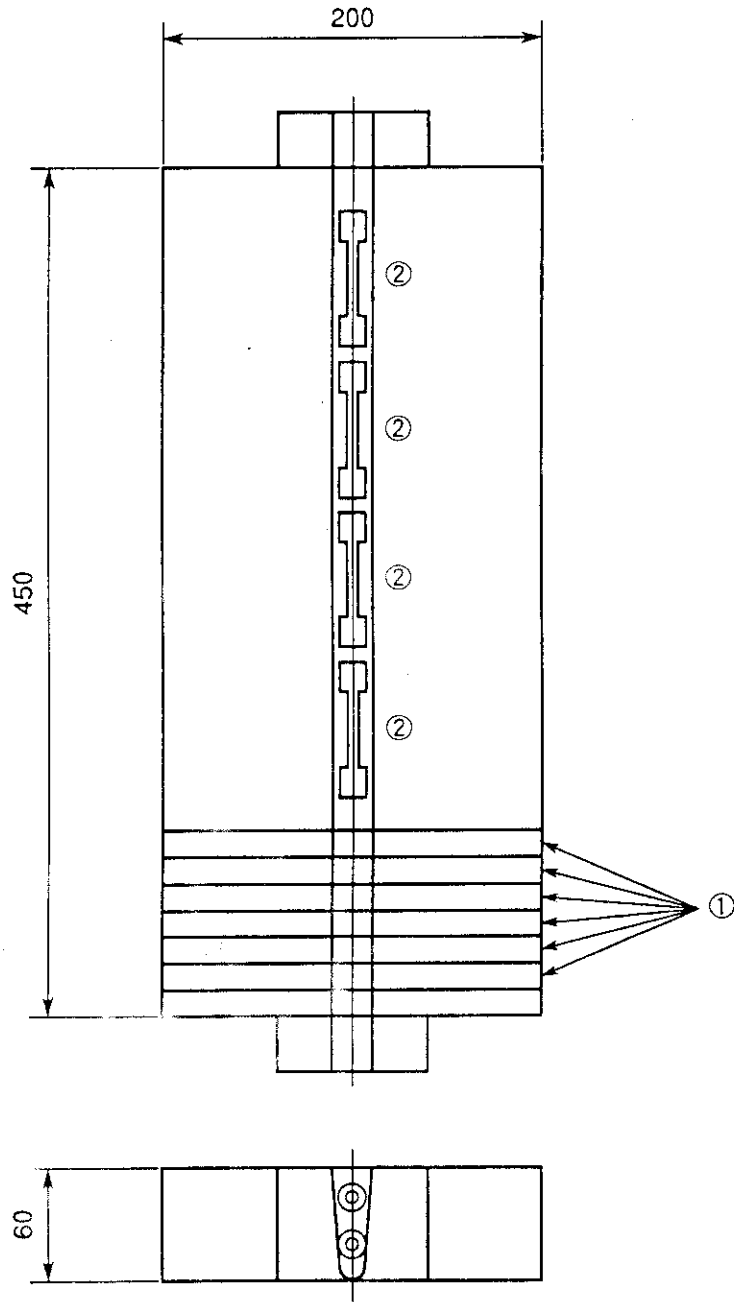


Fig. 3 Groove geometry (thickness: 60mm plate)



- ① Side bend test
- ② Creep test (weld metal)

Fig. 4 Sampling location of test specimens (thickness: 60mm plate)

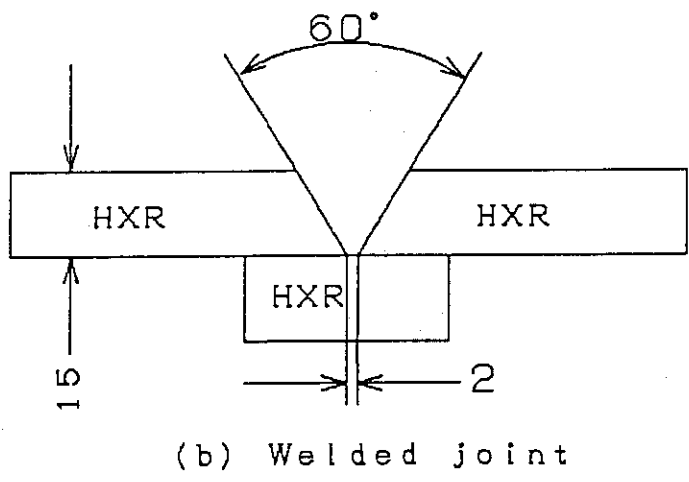
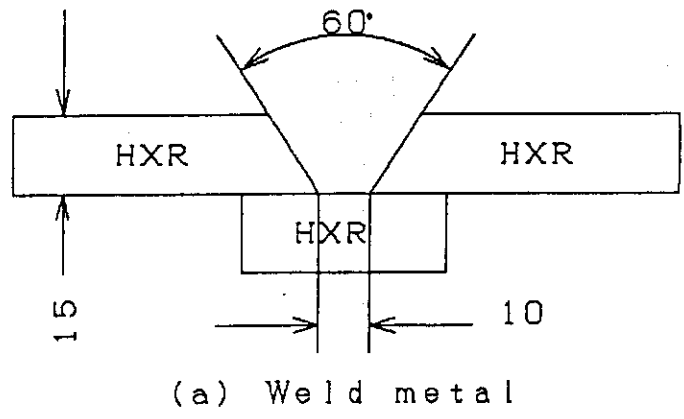


Fig. 5 Groove geometry (thickness: 15mm plate)

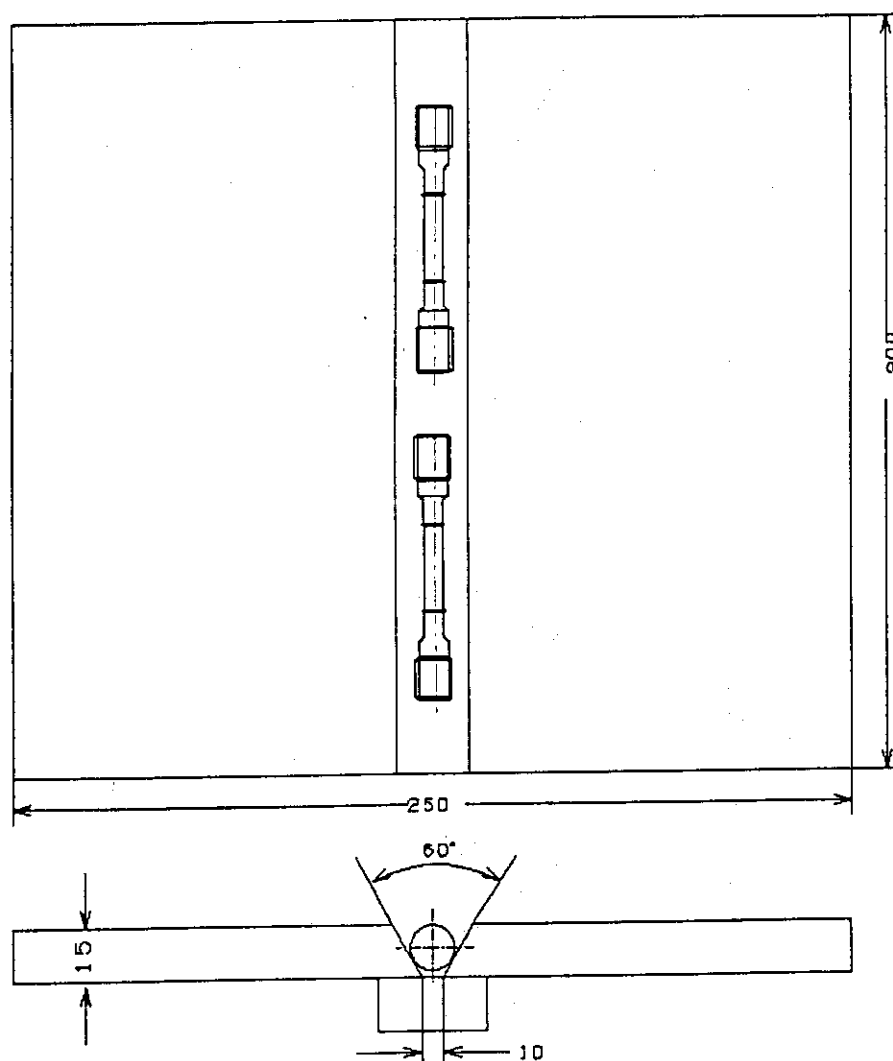


Fig. 6 Sampling location of weld metal specimens (thickness: 15mm plate)



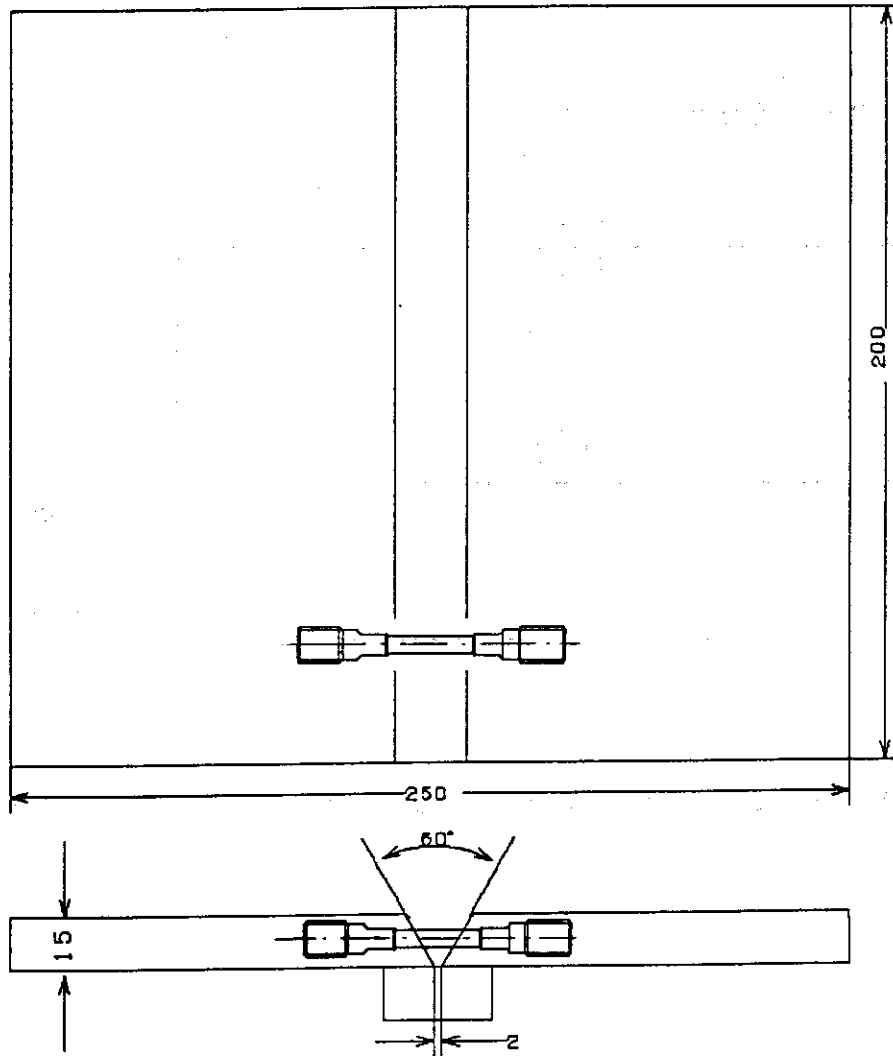


Fig. 7 Sampling location of welded joint specimens (thickness: 15mm plate)

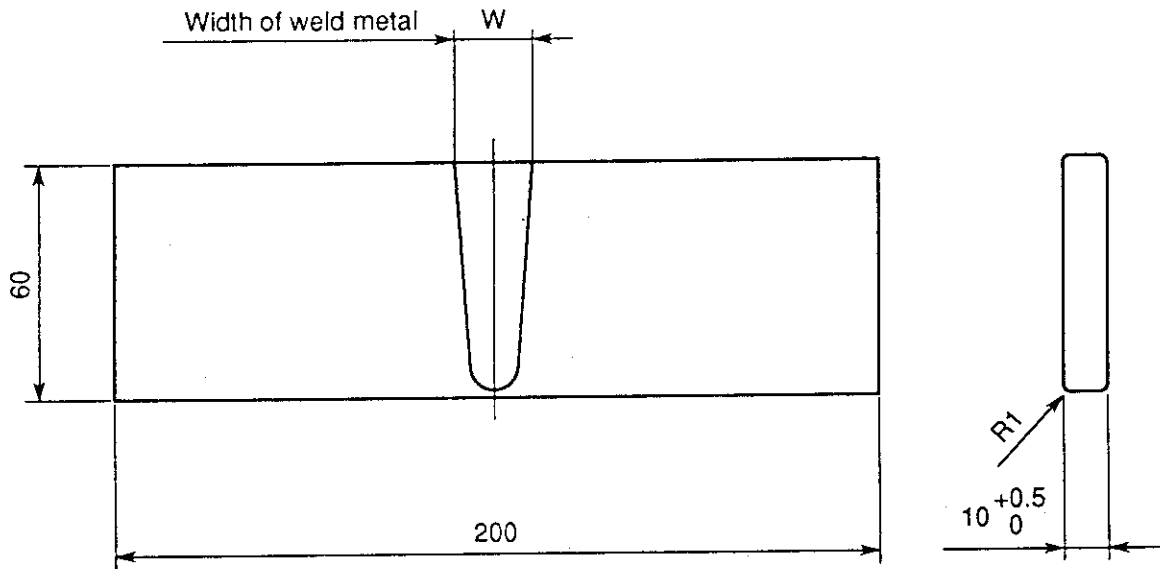


Fig. 8 Geometry of side bend test specimen (thickness: 60mm plate)

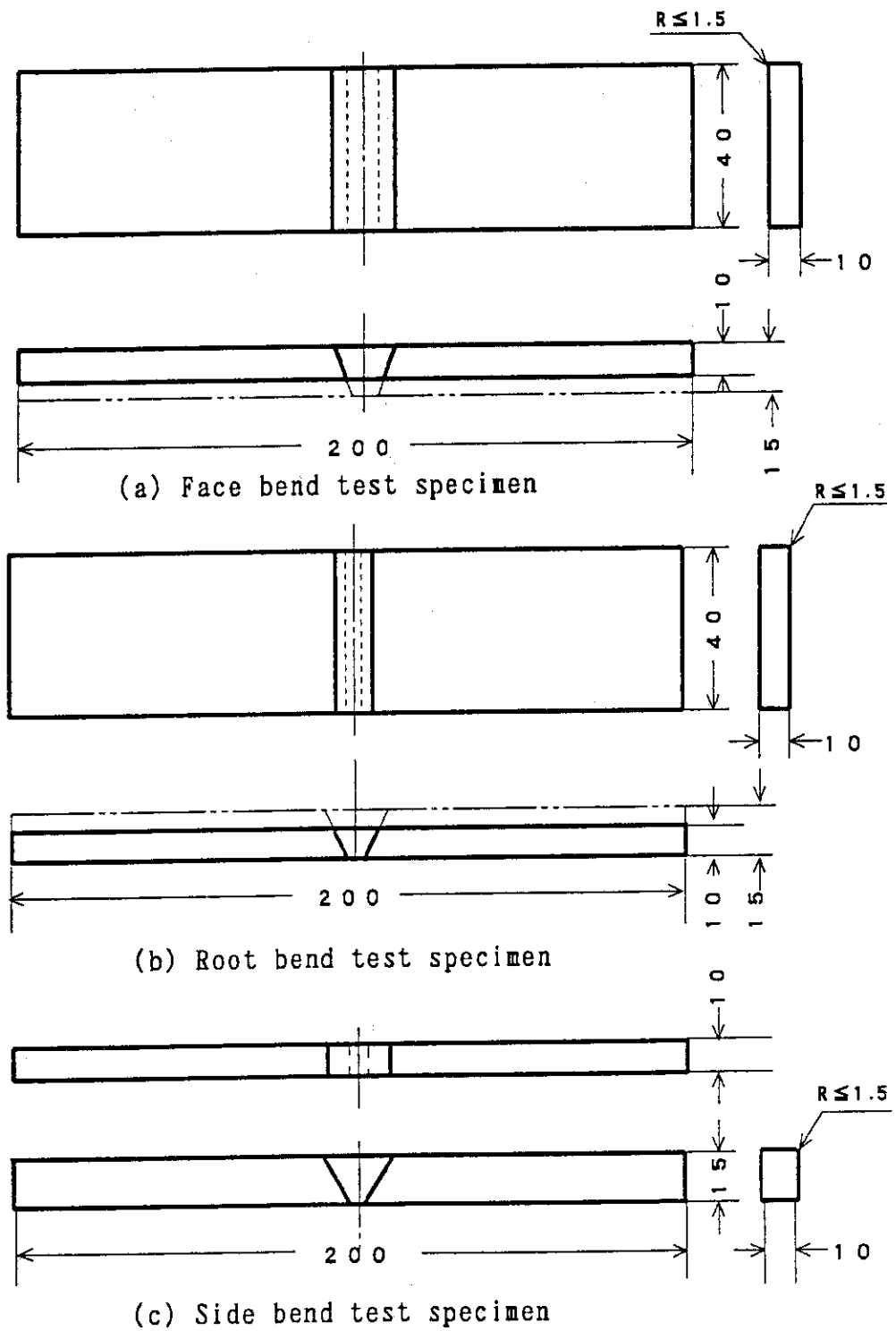


Fig. 9 Geometry of guided bend test specimen (thickness: 15mm plate)

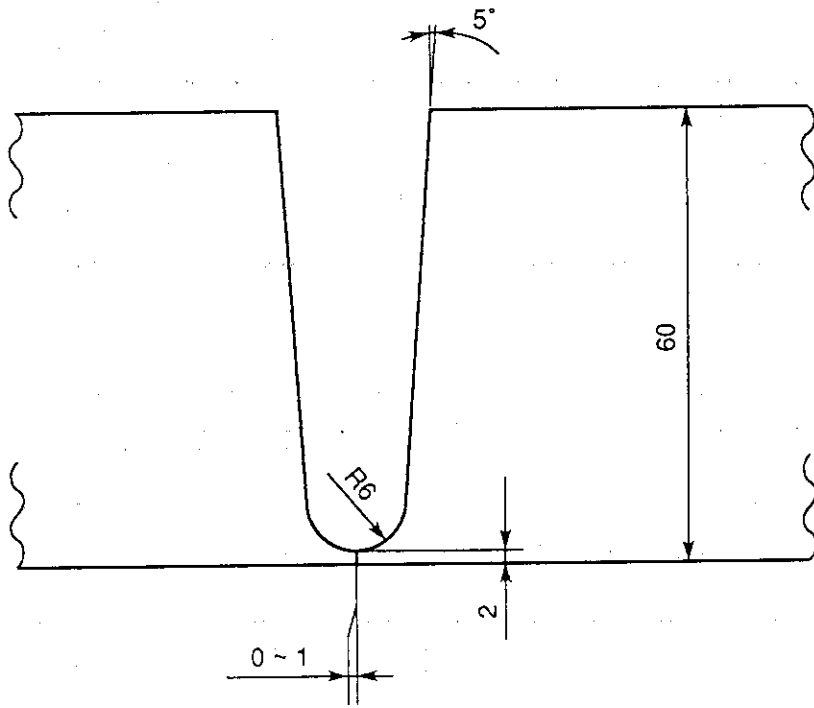


Fig. 10 Groove geometry (thickness: 60mm plate)

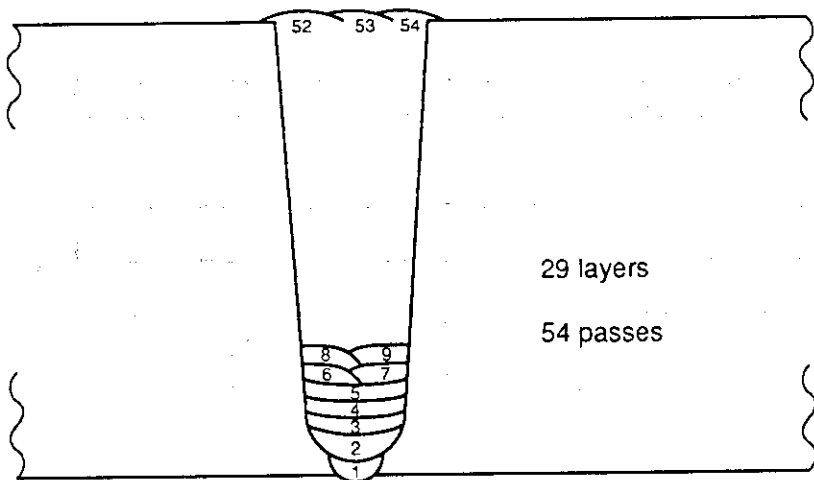
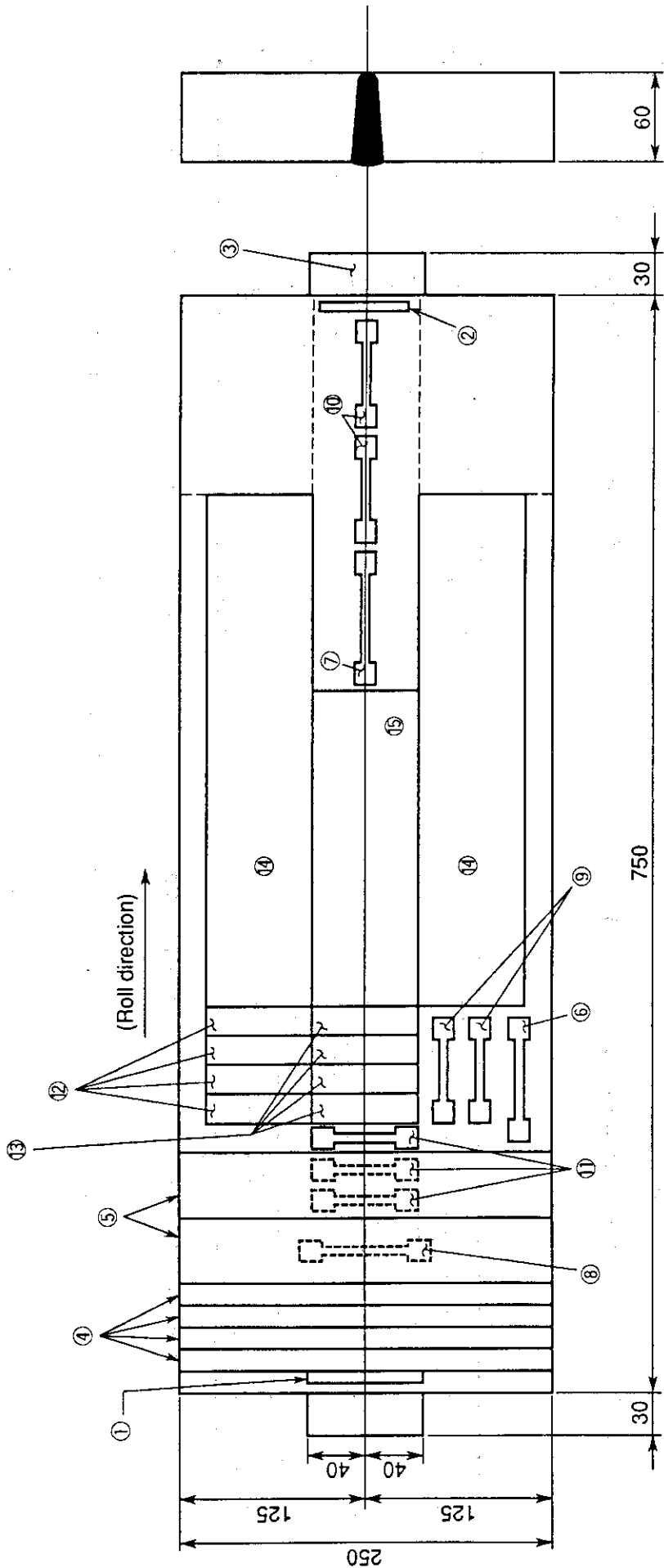


Fig. 11 Build-up sequence (thickness: 60mm plate)



- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>① Macrostructure and hardness test</li> <li>② Microstructure</li> <li>③ Chemical composition test (weld metal)</li> <li>④ Side bend test</li> <li>⑤ Face bend test</li> <li>⑥ Tensile test (base metal)</li> <li>⑦ Tensile test (weld metal)</li> <li>⑧ Tensile test (welded joint)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>⑨ Creep test (base metal)</li> <li>⑩ Creep test (weld metal)</li> <li>⑪ Creep test (welded joint)</li> <li>⑫ Test block for Charpy impact test (base metal)</li> <li>⑬ Test block for Charpy impact test (weld metal)</li> <li>⑭ Test block for fracture toughness test (base metal)</li> <li>⑮ Test block for fracture toughness test (weld metal)</li> </ul> |
|---|---|

Fig. 12(a) Sampling location of test specimens (thickness: 60mm plate)

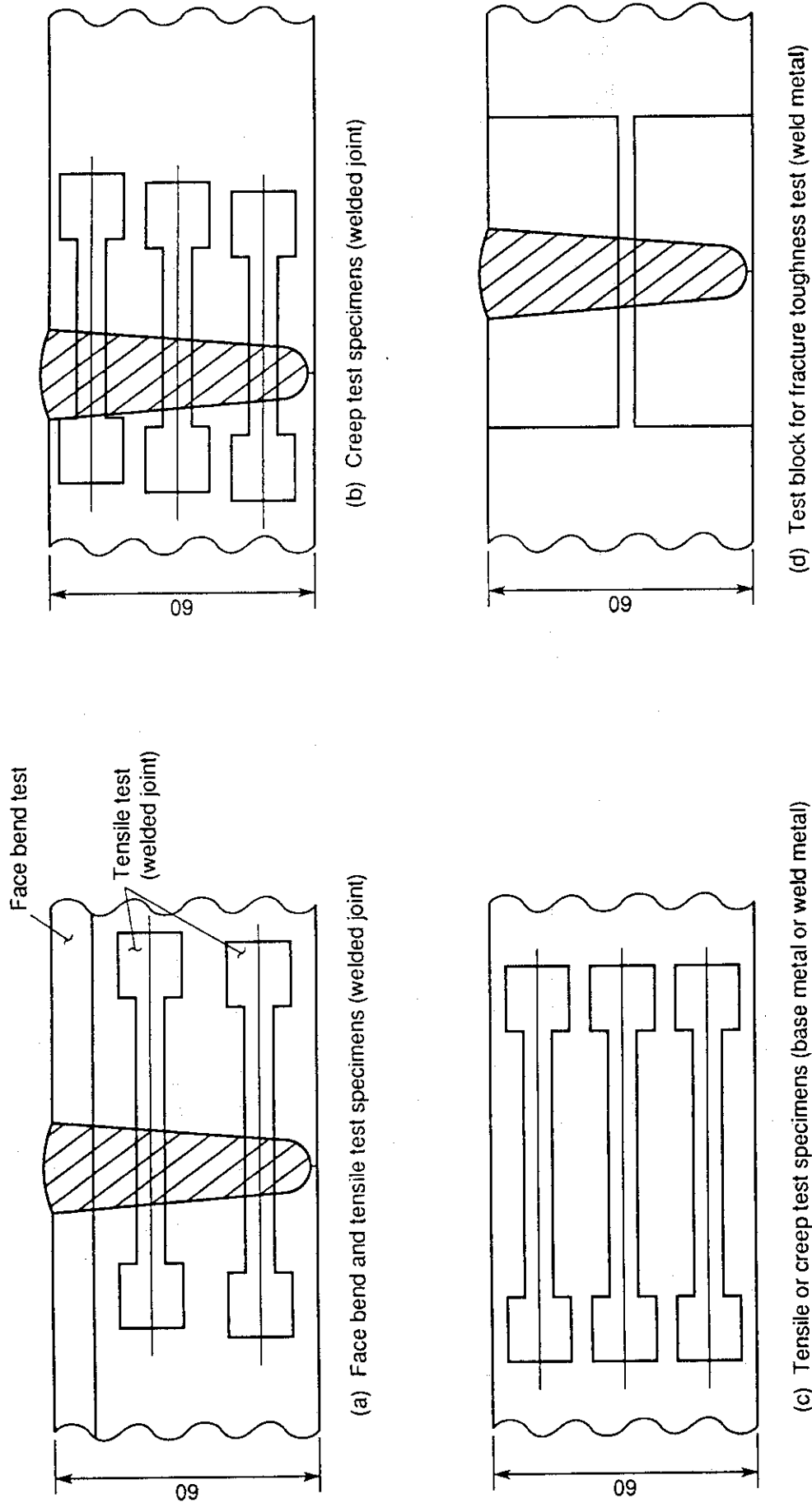


Fig. 12(b) Sampling location of test specimens (thickness: 60mm plate)

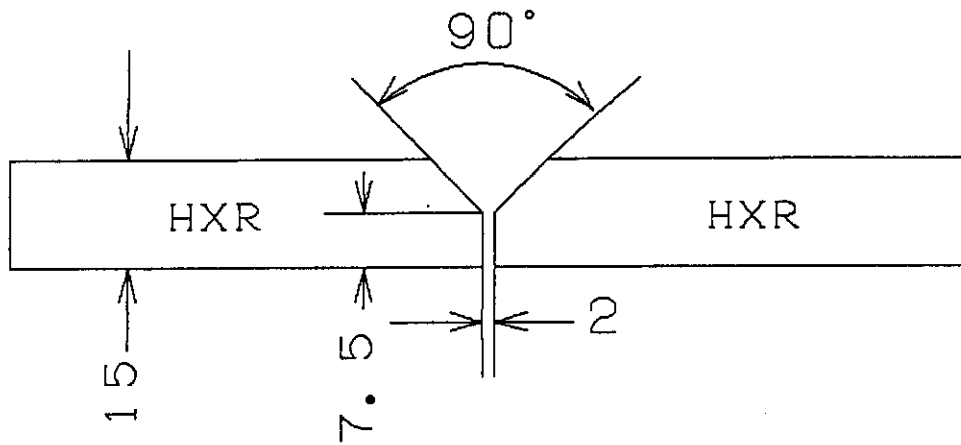


Fig. 13 Groove geometry (thickness: 15mm plate)

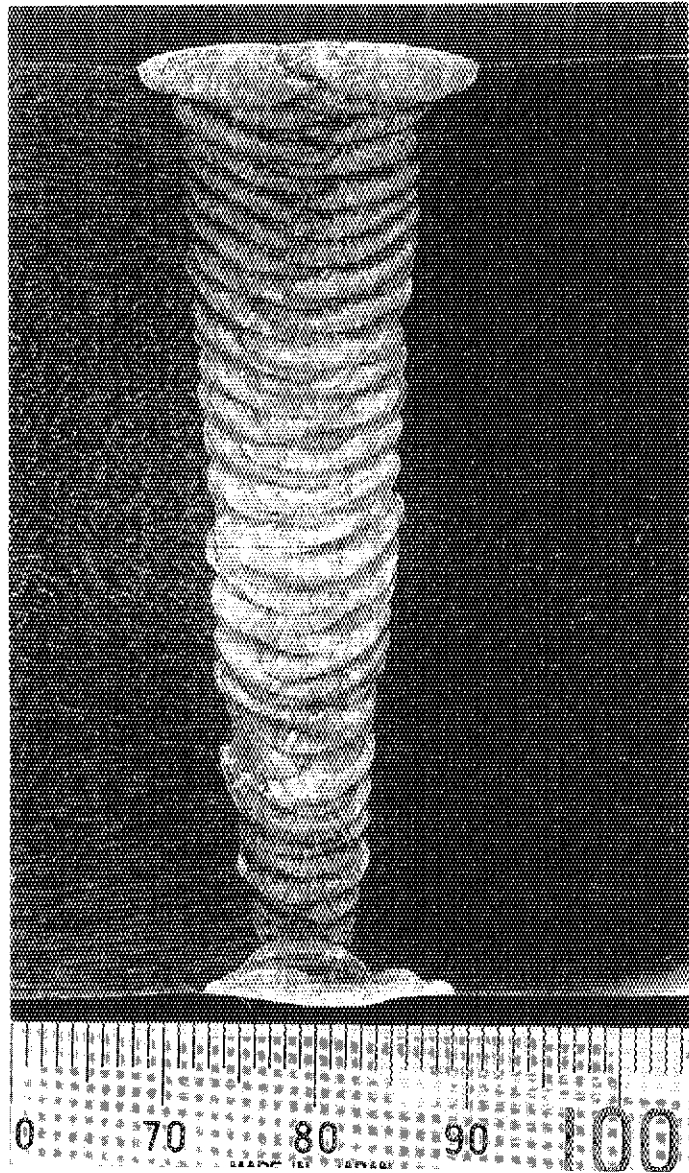


Fig. 14 Macrostructure of welded joint (thickness: 60mm plate)



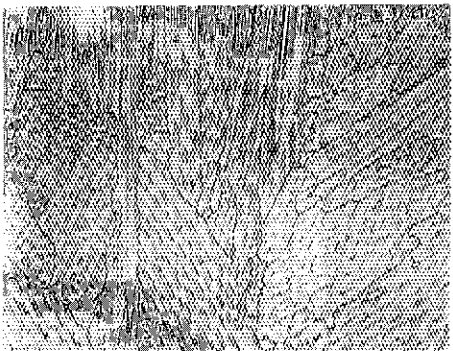

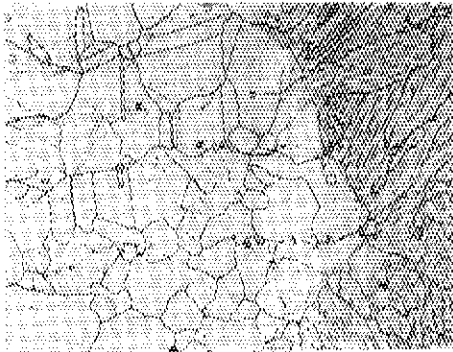
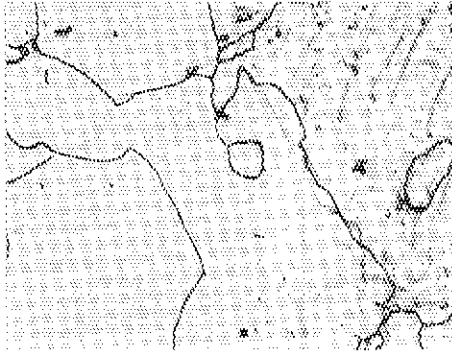
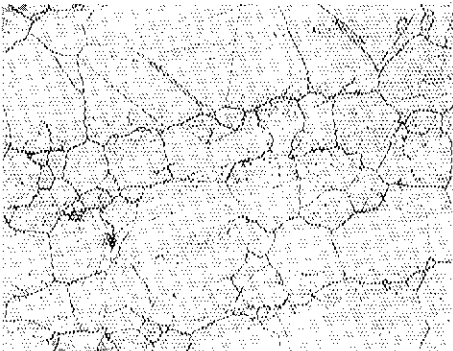
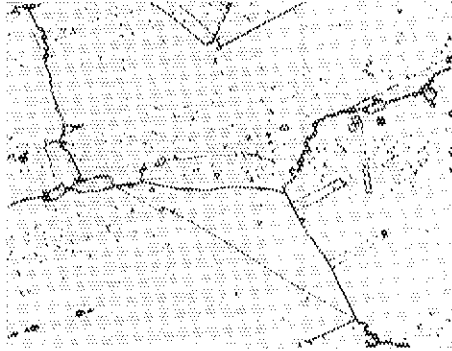
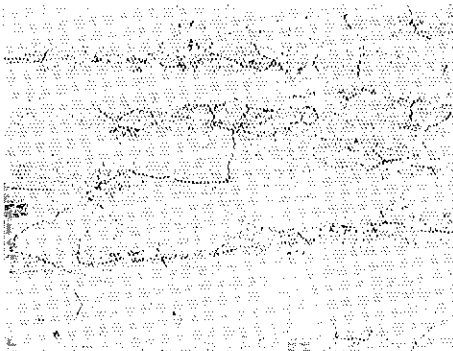
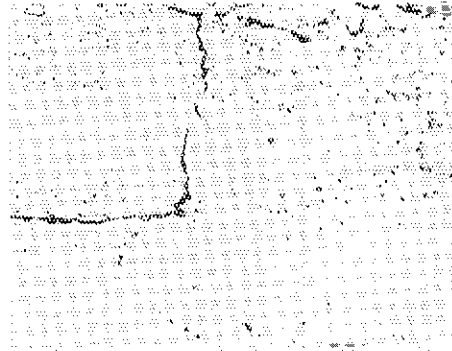
Weld Metal		
Bond		
HAZ		
Base Metal		
Location Magnification	$100 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m}$

Fig. 15(a) Microstructure of welded joint (backing side)  
(thickness: 60mm plate)

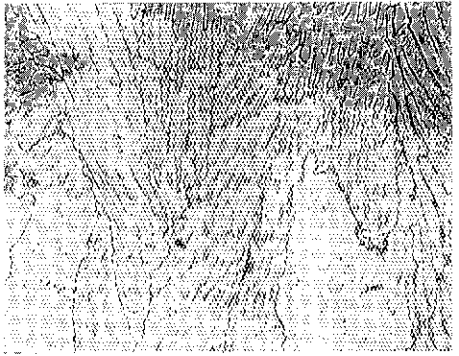
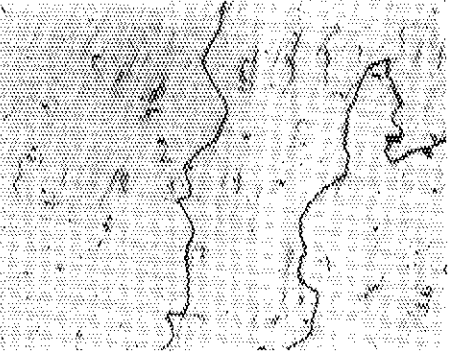

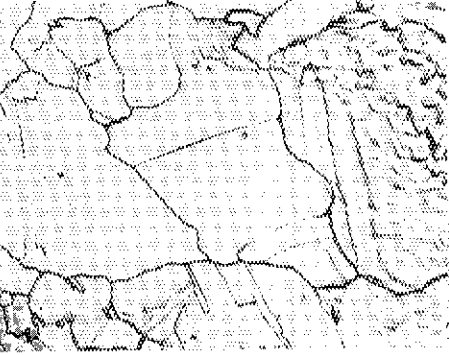

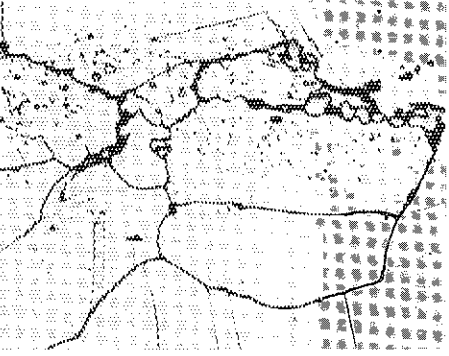
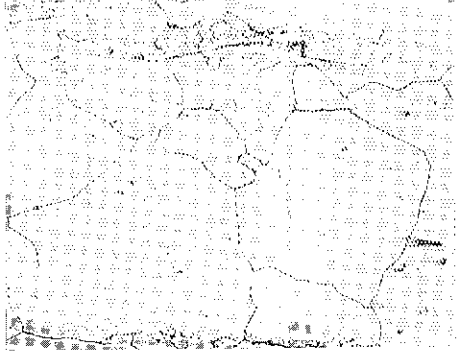
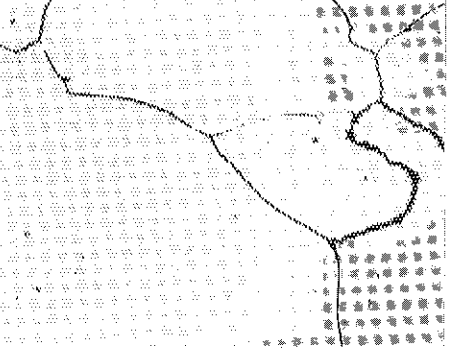
Weld Metal		
Bond		
HAZ		
Base Metal		
Location Magnification	$100 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m}$

Fig. 15(b) Microstructure of welded joint (1/2t)  
(thickness: 60mm plate)

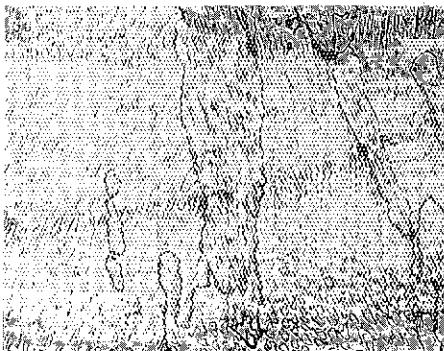
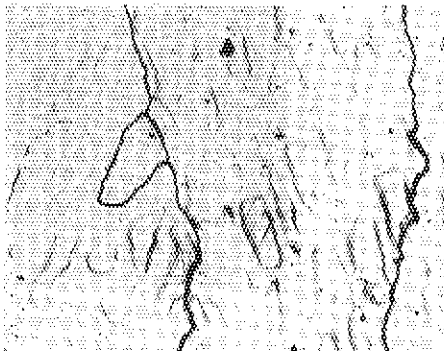
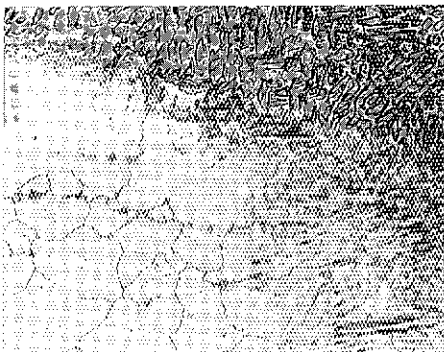
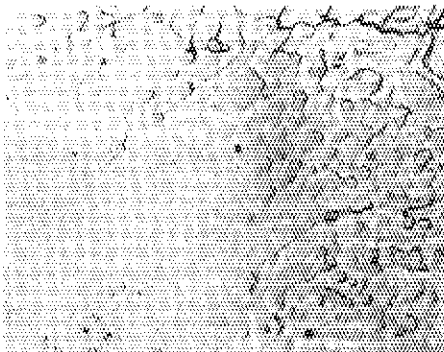
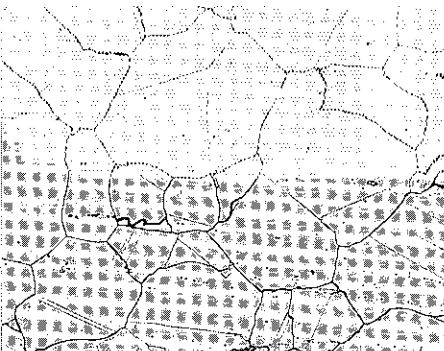

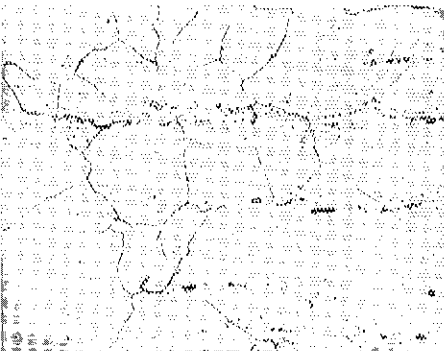

Weld Metal		
Bond		
HAZ		
Base Metal		
Location Magnification	$100 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m}$

Fig. 15(c) Microstructure of welded joint (finishing side)  
(thickness: 60mm plate)

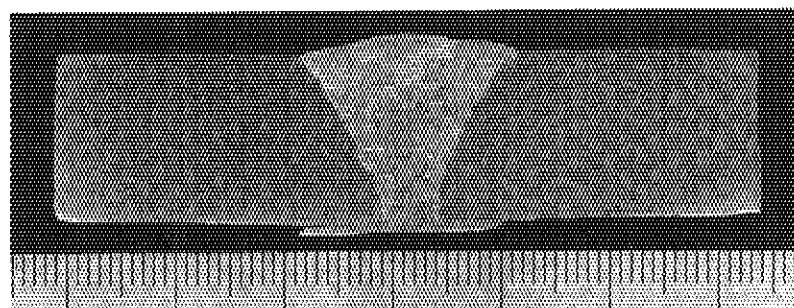
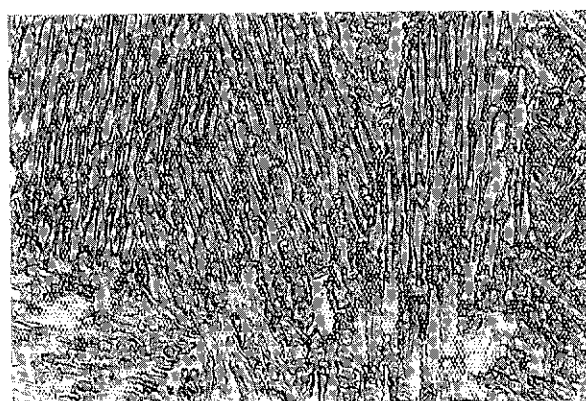
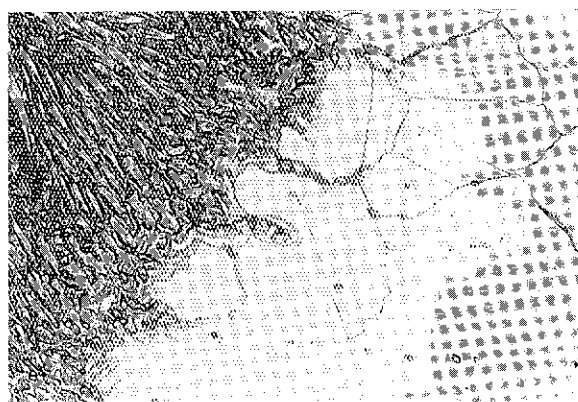


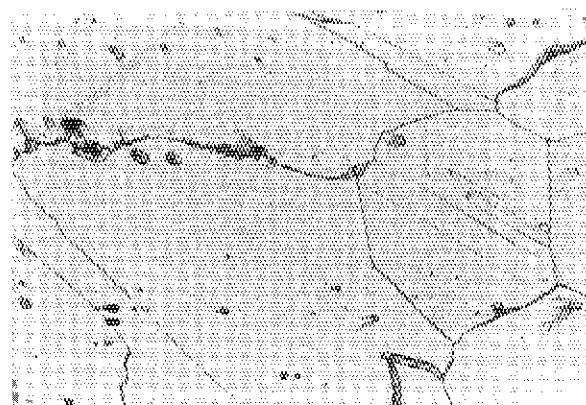
Fig. 16 Macrostructure of welded joint (thickness: 15mm plate)



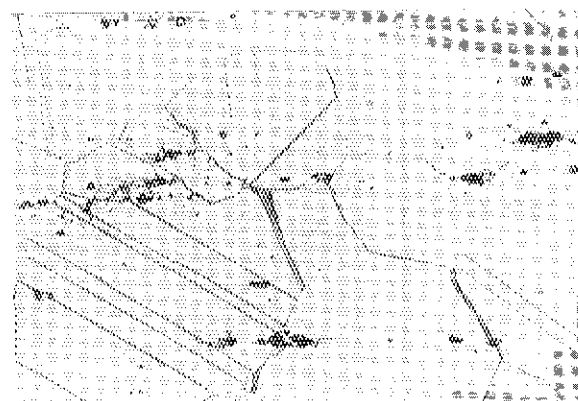
(a) Weld metal



(b) Bond



(c) HAZ



(d) Base metal

Fig. 17 Microstructure of welded joint (thickness: 15mm plate)

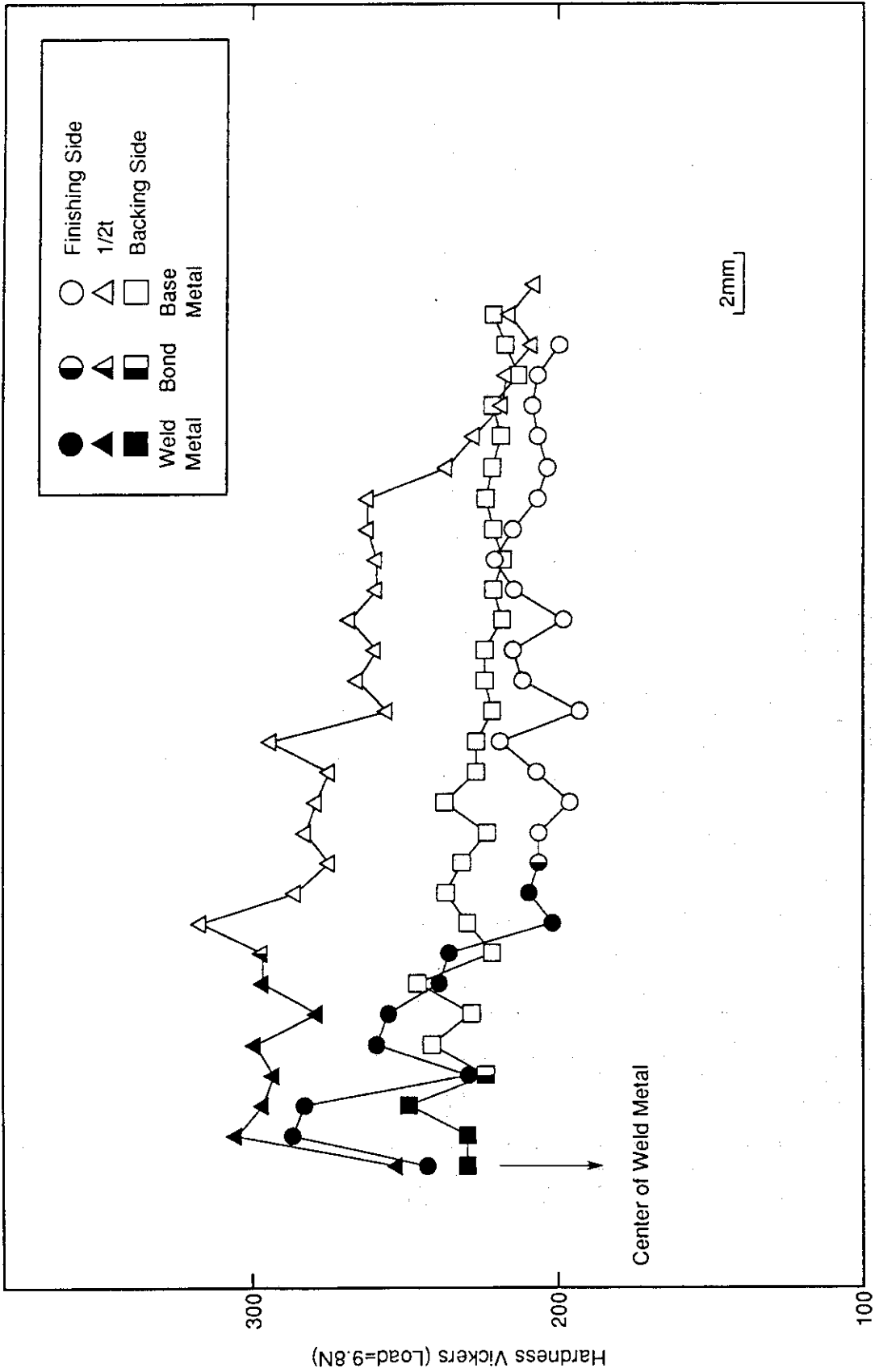


Fig. 18 Hardness distribution of welded joint (thickness: 60mm plate)

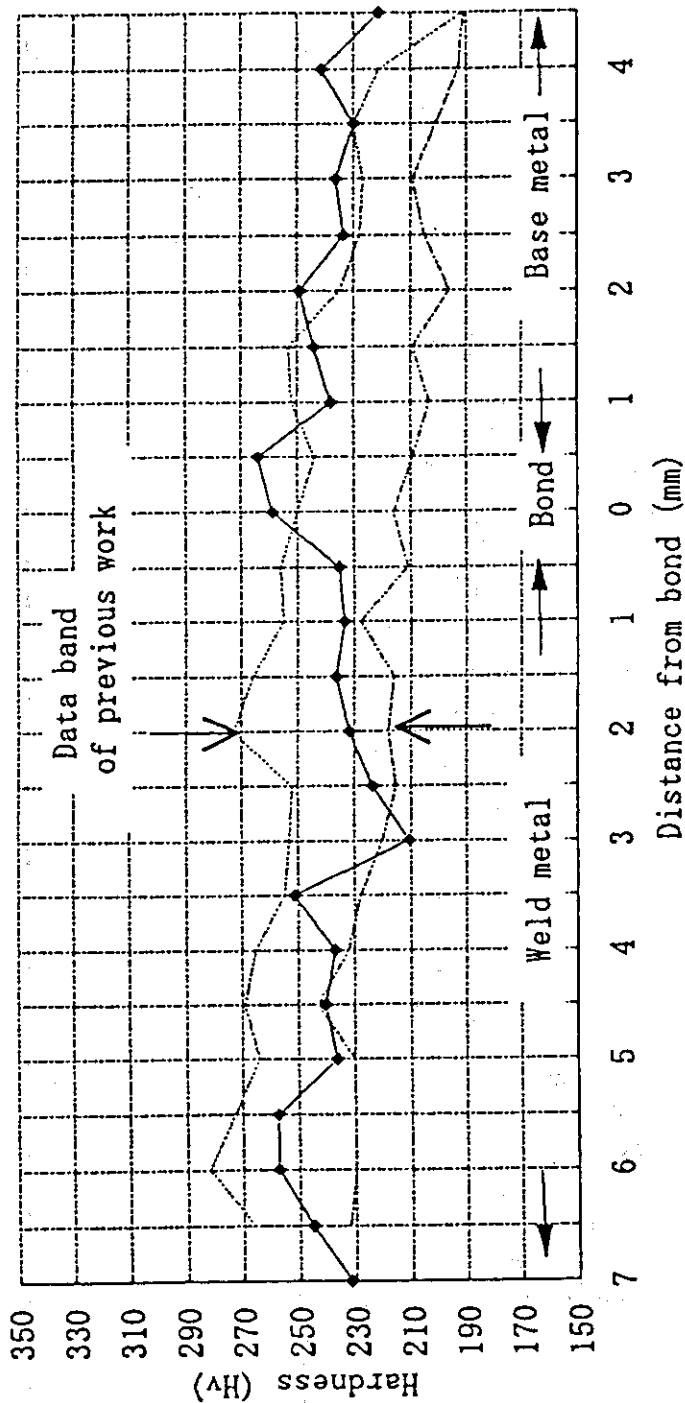


Fig. 19 Hardness distribution of welded joint (thickness: 15mm plate)

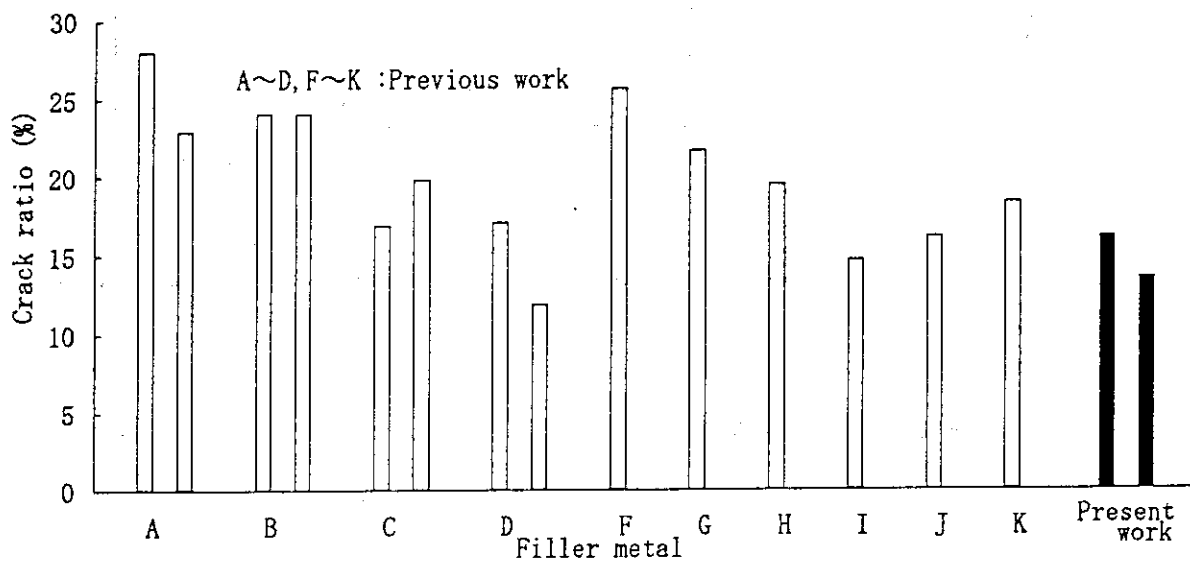


Fig. 20 Comparison of crack ratio on FISCO cracking test  
(thickness: 15mm plate)

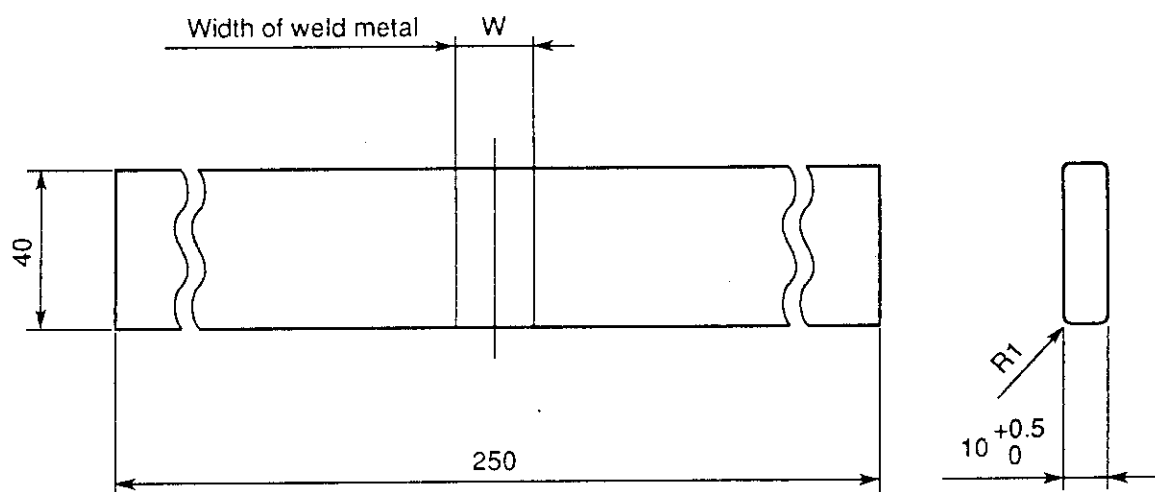


Fig. 21 Geometry of face bend test specimen (thickness: 60mm plate)

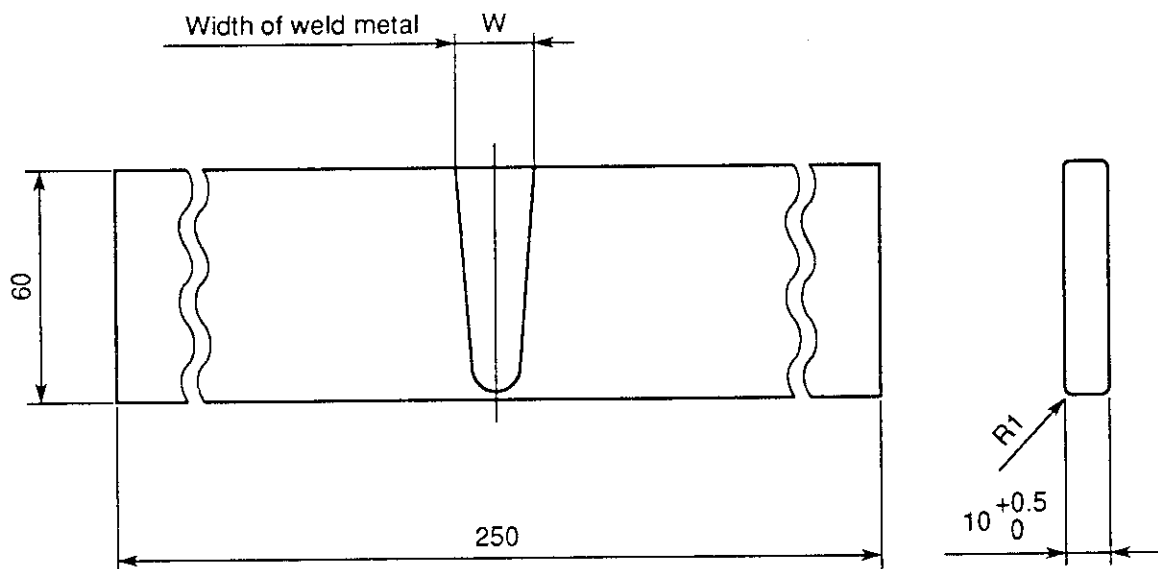


Fig. 22 Geometry of side bend test specimen (thickness: 60mm plate)



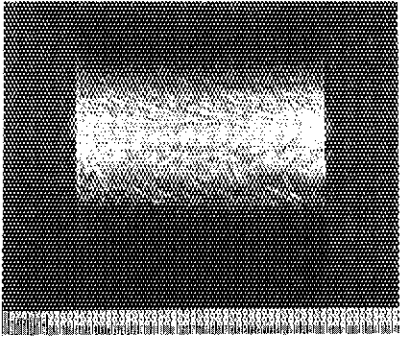
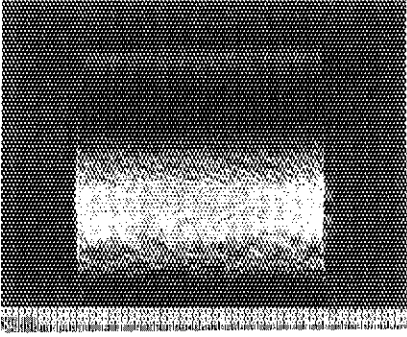
Test item	Test results	Appearance of test specimen
Face Bend Test	T.P No. :F1  No Defect	
	T.P No. :F2  No Defect	

Fig. 23 Appearance of welded joint face bend test specimens  
(thickness: 60mm plate)

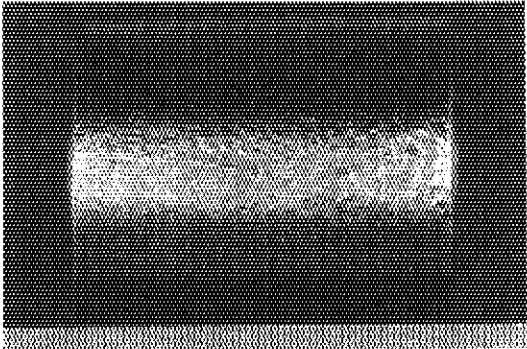
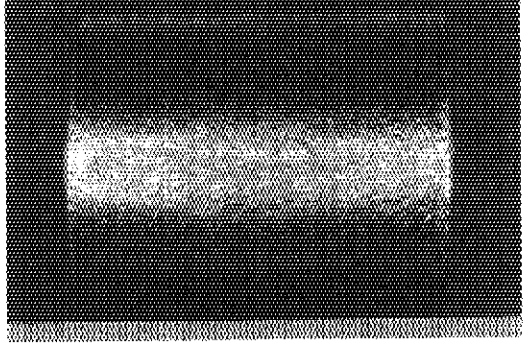
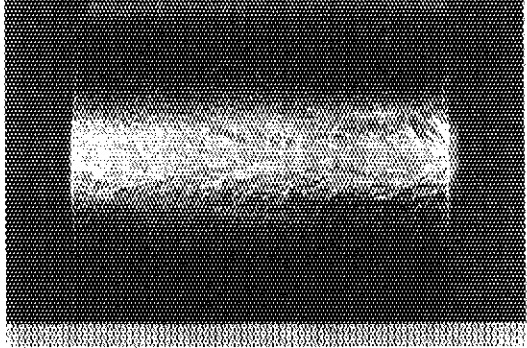
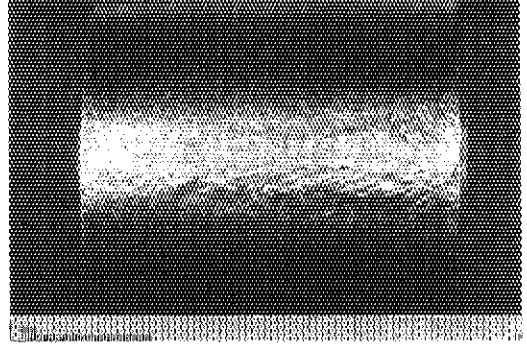
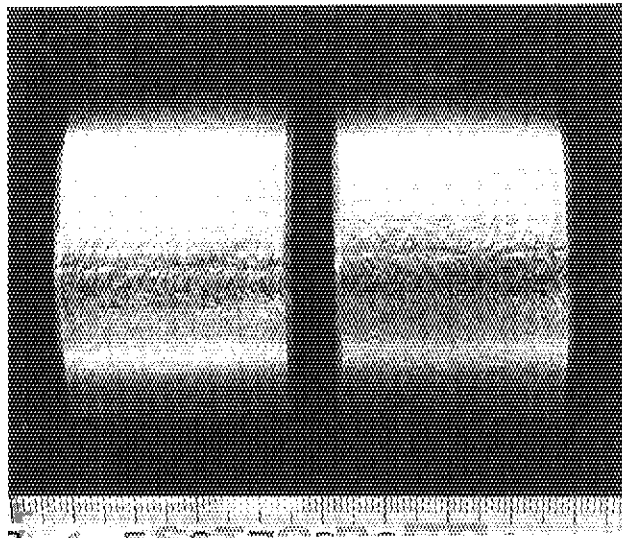
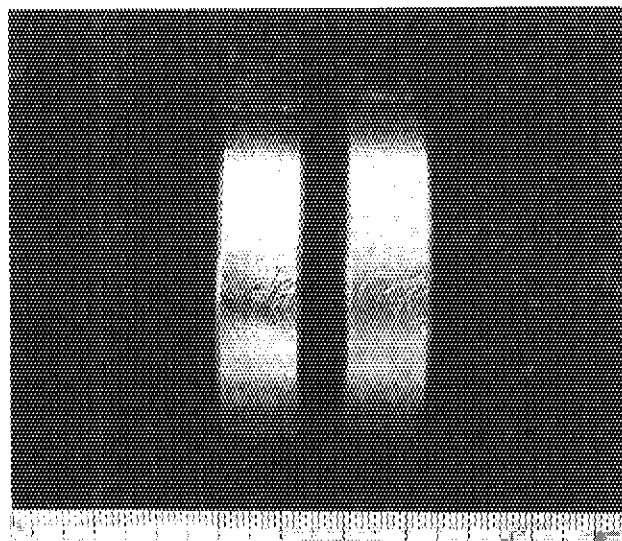
Test item	Test results	Appearance of test specimen
Side bend test	T.P No. :S1  No Defect	
	T.P No. :S2  No Defect	
	T.P No. :S3  No Defect	
	T.P No. :S4  No Defect	

Fig. 24 Appearance of welded joint side bend test specimens  
(thickness: 60mm plate)



(a) Face bend



(b) Side bend

Fig. 25 Appearance of welded joint bend test specimens  
(thickness: 15mm plate)

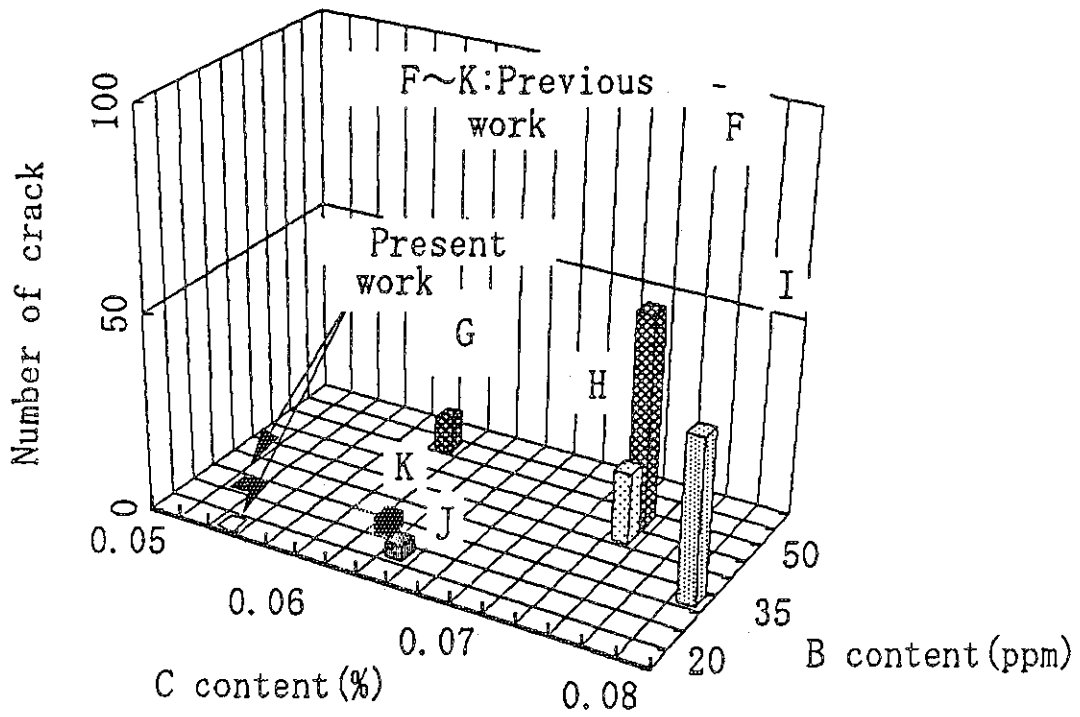


Fig. 26 C and B content of filler metal versus number of crack (thickness: 15mm plate)