

JAERI - M
91-077

フェライト鋼の高速炉用新型燃料被覆材への適用
—材料試験および溶接試験—

1991年5月

岩井 孝・笹山 龍雄・鈴木 康文

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。
入手の問合わせは、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, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

フェライト鋼の高速炉用新型燃料被覆材への適用
——材料試験および溶接試験——

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部
岩井 孝・笹山 龍雄・鈴木 康文

(1991年4月9日受理)

フェライト鋼は、高速中性子による照射スエリングがオーステナイト鋼に比べて格段に小さく高速炉において高燃焼度を達成できることから注目されている。このフェライト鋼を、高速炉用新型燃料であるウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピンの被覆材に適用した。本報告書では、フェライト鋼の選定、被覆管および端栓材の製作、溶接および熱処理の検討のほか、板材を用いた材料試験について紹介する。

Application of a Ferritic Steel for Advanced FBR Fuel Cladding
- Material and Welding Tests -

Takashi IWAI, Tatsuo SASAYAMA and Yasufumi SUZUKI

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

(Received April 9, 1991)

Ferritic steels have been noticed to attain high burn-up at FBR as they have rather low irradiated swelling rate compared with austenitic steels. A ferritic steel was applied for the cladding of an uranium-plutonium mixed nitride fuel pin. In this report, selection of the ferritic steel, fabrication of cladding and end plugs, welding test, heat treatment test are described, together with the material test using plates.

Keywords: Ferritic Steel, FBR Fuels, Cladding, Nitride Fuel, Fuel Pin, Weld, Heat Treatment, Swelling

目 次

1. まえがき	1
2. フェライト鋼の選択	2
3. 被覆管および端栓材の製作	3
3.1 製作仕様	3
3.2 製作工程	3
3.3 検査および試験	3
4. 溶接および熱処理	4
4.1 端栓形状および溶接条件	4
4.2 組織および硬さ	4
4.3 熱処理装置	4
4.4 熱処理条件	5
5. 材料試験	5
5.1 試験材料の製作	5
5.2 溶接および熱処理	6
5.3 試験結果	6
6. あとがき	7
謝辞	7
参考文献	8
付録	17

Contents

1. Introduction	1
2. Selection of ferritic steel	2
3. Fabrication of cladding tubes and end plug material	3
3.1 Specifications of fabrication	3
3.2 Fabrication process	3
3.3 Inspection and test	3
4. Welding and heat treatment	4
4.1 Shape of end plug and condition of welding	4
4.2 Microstructure and hardness	4
4.3 Apparatus for heat treatment	4
4.4 Condition of heat treatment	5
5. Material test	5
5.1 Fabrication of test pieces	5
5.2 Welding and heat treatment	6
5.3 Results	6
6. Summary	7
Acknowledgement	7
References	8
Appendix	17

1. まえがき

高速炉用燃料の被覆材には、従来よりSUS316を中心とするオーステナイト系ステンレス鋼が使用されている。しかし、高速中性子によるスエリングや照射クリープによる変形および機械的特性の劣化により、現在のところ約 $2 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$ (約100dpa)、実証炉レベルで約10万MWd/tが燃料寿命である¹⁾。今後、高速炉における燃料の高燃焼度化を達成するために、現用オーステナイト鋼の改良と他鋼種、特にフェライト鋼の開発が進められている。Fig. 1¹⁾に示すように、オーステナイト鋼は一定の潜伏期の後には約1%/dpaのスエリングを生じるが、フェライト鋼は100dpaでもほとんどスエリングを生じないのが特長である。

現在、フェライト鋼の開発の中心となっているのはHT-9に代表されるマルテンサイト鋼とフェライト/マルテンサイト2相鋼である。さらに高温強度を改善した酸化物分散強化鋼や金属間化合物強化鋼も検討されている。これらのフェライト鋼は、オーステナイト鋼に比べて熱膨張率が小さく熱伝導率が高いため高温部材として有利な反面、溶接性・加工性については必ずしも十分ではない。

原研ではこれまで高速炉用新型燃料として、ウラン・プルトニウム混合炭化物および窒化物燃料の照射試験が継続実施しているが、いずれも被覆材にはオーステナイト鋼(SUS316)を使用している^{2, 3, 4, 5)}。特に窒化物燃料は照射クリープ速度が小さく、高燃焼度を達成する上では燃料と被覆材の機械的相互作用(FCMI)が厳しくなることが予想される。従って、FCMIの観点からは高温クリープ強度特性に優れ、また、それ自身の照射スエリングでも優れたフェライト鋼を被覆材として使用できれば、高燃焼度を達成できる見通しを得ることができる。これまでに高速炉用新型燃料被覆材としてフェライト鋼を用いた例は、米国がHT-9による照射試験を実施している程度であり、公表されたデータは少ない。

今回、動力炉核燃料開発事業団が開発した高強度フェライト鋼を用いてウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピンを製作し、1991年1月からJMTRで照射を開始した。フェライト鋼は溶接時の入熱により溶接金属部および熱影響部の硬さが大幅に増加し、延性およびじん性の低下を生じるため、使用に際しては溶接後の熱処理が不可欠である。燃料ピンの製作に先立ち、溶接試験および溶接後の熱処理試験を実施するとともに、同材料の各種材料試験を実施したので合わせて報告する。なお、燃料ペレットを含む燃料ピンの製作については別に報告する⁶⁾。

2. フェライト鋼の選択

フェライト鋼を被覆材に適用する際に考慮すべき主な点は、①加工性、②溶接性、③強度、④照射特性、であり、それぞれ次のような条件が要求される。

① 加工性

高速炉用新型燃料である炭化物および窒化物燃料は高い熱伝導度を有しているため、被覆管外径は9～10mmの太径の燃料ピンが使用される。通常の燃料設計では肉厚が約0.5mmと薄く、燃料ペレットと被覆管のギャップは直径で約0.2mmと狭く設定される。このため、燃料被覆管としては外径（真円度）、肉厚ともに十分な精度の加工を要求される。また、実用的には2000mm程度の長さを必要とするため、真直度も重要である。

フェライト鋼はオーステナイト鋼に比べて、一般に加工性は悪く、要求される仕様を満たす材料は少ないのが現状である。

② 溶接性

燃料ピンの端栓溶接にはすでに設置されているTIG溶接機⁵⁾を予定しており、それを用いて十分な溶接性（溶け込み等）を得られることが必要である。

③ 強度

燃料ピンの設計上は、照射中に破損が生じない強度を有していなければならない。また、被覆材としての評価には、従来のオーステナイト鋼被覆材以上の強度を有していることが望ましい。

④ 照射特性

燃料被覆材としては照射特性が充分把握されていることが望ましいが、フェライト鋼を被覆材に使用した報告例がきわめて少ない現状では、上記①～③の条件を満たす材料であることが最低限必要である。

これらの観点から、現在開発されている材料を検討した結果、動力炉核燃料開発事業団が開発したマルテンサイト系フェライト鋼が上記①～③の条件を満たしており、窒化物燃料ピンの照射試験に採用することとした。このフェライト鋼は、炭化物析出強化型の11Cr-2W-Mo-Mn-V鋼であり、HT-9の約2倍の高温クリープ強度を有しているものである。その組成範囲をTable 1に示す。同事業団の了承を得て、同材を用いて被覆管および端栓材を製作するとともに板材を用いた材料試験も実施した。

3. 被覆管および端栓材の製作

3. 1 製作仕様

被覆管および端栓材の製作仕様をTable 2 に示す。被覆管の外径は従来から使用してきたオーステナイト鋼、SUS316と同一の9.40mmとし、肉厚は0.50mmとした。端栓材は外径10mmの丸棒としそれから切りだし加工で端栓を製作する。

3. 2 製作工程

素材は真空溶解で製造され、最終熱処理は被覆管および端栓材ともに焼きならしおよび焼きもどしを行った。最終熱処理としての焼きならしは1100℃×10分、焼きもどしは780℃×60分である。

後に述べる溶接後の熱処理条件の決定にあたっては、この最終熱処理条件を考慮して行った。

3. 3 検査および試験

製作した被覆管および端栓材について実施した、検査および試験の結果を簡単に紹介する。なお、詳細については付録に示す。

(1) 化学成分

製造後の分析によると、化学成分の値はTable 1 の仕様範囲内であり、11Cr-2W-0.5Mo-0.5Mn が主な成分である。

(2) 寸法

被覆管および端栓材とも仕様範囲であった。ただし、被覆管については、オーステナイト鋼より加工性が良くないことを反映して、従来のオーステナイト鋼に比べて肉厚の不均一が見られた。端栓を挿入した時、端栓と被覆管内面との全周にわたる良好な接触を得るためには被覆管肉厚（内径）の均一性が要求され、使用の際には十分なチェックが必要である。

(3) 硬度

マイクロビッカース硬さで250 ~260 であった。

(4) 引張強度

被覆管については、常温で引張強度72kg/mm²、0.2%耐力60kg/mm²、伸び16% であり、650℃では引張強度30kg/mm²、0.2%耐力28kg/mm²、伸び23% であった。端栓材については常温および650℃ともに、被覆管より若干高めの引張強度を示した。

4. 溶接および熱処理

4. 1 端栓形状および溶接条件

上部端栓の溶接はグローブボックス内に設置されているトーチ回転型TIG溶接機を用いて実施する^{5, 6)}。フェライト鋼はオーステナイト鋼に比べて熱伝導率が高いこと等の理由から、溶接条件（溶接トーチの先端形状・対象物との距離および回転速度、入熱の電流値および時間）の変更だけでは、溶接部の十分な溶け込みと良好なビード形状を得ることはできなかった。このため、端栓形状についても検討を加えた。Fig. 2 に最終的に決定した端栓形状を、Fig. 3 に溶接条件を示す。また、Fig. 4 に端栓溶接部断面の金相写真を示すが、十分な溶け込みが得られている。

なお、下部端栓についてはグローブボックス外の装置を利用することとし、電子ビーム(BB)溶接で行った⁶⁾。BB溶接を行った端栓溶接部断面の金相写真をFig. 5 に示す。

4. 2 組織および硬さ

(1) 溶接部の組織変化

溶接時の入熱で溶接部および周辺の熱影響部において組織変化を生じる。Fig. 6 に母材、溶接まま(As weld) および4.4 で述べる溶接後の熱処理を加えた材料の組織を示す。溶接部の母材内に δ フェライト相が析出し、材料特性に影響を及ぼしているほか、熱影響部のマトリクス相の結晶粒は母材に比べて細くなっていることが観察された。

(2) 溶接部の硬さ変化

硬さをひとつの指標として評価する。Fig. 7 に母材および溶接後の硬さを示す。硬さは微小硬度計(島津製 HMV-2000)を用いて、荷重200gで測定したビッカース硬さであり、端栓部を半割りにして燃料ピンの軸方向に測定した結果である。母材の硬さは約260であるが、溶接ままでは最大値は約490 に達している。また、硬さが最大となるのは、よく知られているように熱影響部においてである。より細かく組織内部の局所的な硬さを測定すると、マトリクス相は約260 のままで、析出相が硬く全体の硬度を上げていることが確認された。後に述べるように、溶接のままでは延性およびじん性が低下しており、溶接後の熱処理が不可欠である。

4. 3 熱処理装置

燃料ペレットを充填し端栓を溶接した後の溶接部の熱処理は、プルトニウム取扱用グローブボックス内で実施する必要がある。このため、小型の熱処理装置を設計・製作し、グローブボックス内に設置した。熱処理装置の外観図をFig. 8 に示す。電気炉本体は140mm ϕ ×長さ170mm と小型のものとし、ヒータ材はニクロム製で、炉温はグローブボックス外の装置で制御する構造とし

た。熱しゃへい用のカバーの中には空冷用のファンを設置し、炉最高使用温度900℃においてもカバー表面の温度は60℃以下に保たれる安全設計とした。反応管は石英製（外径25mmφ）で、真空排気装置により管内は 10^{-2} Pa以下の真空雰囲気中に保たれる。なお、真空排気装置は、低真空側および高真空側ともオイルを用いない方式がコンパクトにセットされている、ALCATEL CIT 社製 DRYTEL30を選定し、熱処理雰囲気の清浄化を図った。

熱処理の際、端栓溶接部のみならず、被覆管およびプレナム部に装填されているスプリングも加熱されるが、特にスプリングの弾性に大きな変化を与えることは好ましくない。このため、実際の燃料ピンの熱処理の際は、端栓溶接部のみを電気炉の端部に挿入し、燃料ピンの大部分を炉外に位置させて実施するが、端栓溶接部の熱処理試験時にも同様の位置で熱処理を行った。

4. 4 熱処理条件

溶接部の熱処理は表面の酸化等を防止するため真空中で実施した。最も重要なことは熱処理温度の決定である。熱処理温度は最高でも母材の最終熱処理温度、780℃を超えてはならないが、母材そのものの特性をできるだけ変化させないためには、必要かつ十分な範囲で低いことが望ましい。このため端栓を溶接したのち、720、750、780℃の各温度でそれぞれ60分の熱処理を行い、硬さを指標として条件を検討した。

熱処理後の硬さを母材および溶接まま(As weld)と合わせてFig. 7に示す。硬さはその最大値で、母材の約260から溶接により約490まで上昇するが、熱処理によって低下することが判る。780℃×60分の熱処理を行えば母材と同じ硬さに回復するが、720℃でも硬さは約340以下まで回復し後に述べる材料試験の結果と合わせて判断すると、720℃×60分で充分であるとして熱処理条件を決定した。

なお、Fig. 6に示すように、720℃で熱処理を加えても金相組織としては溶接まま(As weld)と大差ないが、実際には析出相の再固溶が一部で生じ、その結果硬さ、延性、じん性等が回復するものと推測される。

参考のために、EB溶接および溶接後の熱処理による硬さの変化をFig. 9に示す。溶接により硬さが最大で約420まで上がるが、720℃×60分の熱処理で約310以下まで回復した。EB溶接後の熱処理も720℃×60分の熱処理で充分であると判断した。

5. 材料試験

5. 1 試験材料の製作

各種材料試験（引張、曲げ、衝撃等）を行うためには、薄肉の被覆材や丸棒の端栓材は試験材として不適當である。そのため、被覆材と同一の母材を素材として板材を製作し、材料試験に供した。素材を鍛造し熱間圧延（加熱温度1150℃）で厚さ10mmの板にしたのち熱処理（1100℃×60分+760℃×60分）を加え、表面の切削仕上げにより厚さ6mm×幅130mm×長さ300mmの試験板

た。熱しゃへい用のカバーの中には空冷用のファンを設置し、炉最高使用温度900℃においてもカバー表面の温度は60℃以下に保たれる安全設計とした。反応管は石英製（外径25mmφ）で、真空排気装置により管内は 10^{-2} Pa以下の真空雰囲気中に保たれる。なお、真空排気装置は、低真空側および高真空側ともオイルを用いない方式がコンパクトにセットされている、ALCATEL CIT 社製 DRYTEL30を選定し、熱処理雰囲気の清浄化を図った。

熱処理の際、端栓溶接部のみならず、被覆管およびプレナム部に装填されているスプリングも加熱されるが、特にスプリングの弾性に大きな変化を与えることは好ましくない。このため、実際の燃料ピンの熱処理の際は、端栓溶接部のみを電気炉の端部に挿入し、燃料ピンの大部分を炉外に位置させて実施するが、端栓溶接部の熱処理試験時にも同様の位置で熱処理を行った。

4. 4 熱処理条件

溶接部の熱処理は表面の酸化等を防止するため真空中で実施した。最も重要なことは熱処理温度の決定である。熱処理温度は最高でも母材の最終熱処理温度、780℃を超えてはならないが、母材そのものの特性をできるだけ変化させないためには、必要かつ十分な範囲で低いことが望ましい。このため端栓を溶接したのち、720、750、780℃の各温度でそれぞれ60分の熱処理を行い、硬さを指標として条件を検討した。

熱処理後の硬さを母材および溶接まま(As weld)と合わせてFig. 7 に示す。硬さはその最大値で、母材の約260 から溶接により約490 まで上昇するが、熱処理によって低下することが判る。780℃×60分の熱処理を行えば母材と同じ硬さに回復するが、720℃でも硬さは約340 以下まで回復し後に述べる材料試験の結果と合わせて判断すると、720℃×60分で充分であるとして熱処理条件を決定した。

なお、Fig. 6 に示すように、720℃で熱処理を加えても金相組織としては溶接まま(As weld)と大差ないが、実際には析出相の再固溶が一部で生じ、その結果硬さ、延性、じん性等が回復するものと推測される。

参考のために、BB溶接および溶接後の熱処理による硬さの変化をFig. 9 に示す。溶接により硬さが最大で約420まで上がるが、720℃×60分の熱処理で約310 以下まで回復した。BB溶接後の熱処理も720℃×60分の熱処理で充分であると判断した。

5. 材料試験

5. 1 試験材料の製作

各種材料試験（引張、曲げ、衝撃等）を行うためには、薄肉の被覆材や丸棒の端栓材は試験材として不適當である。そのため、被覆材と同一の母材を素材として板材を製作し、材料試験に供した。素材を鍛造し熱間圧延（加熱温度1150℃）で厚さ10mmの板にしたのち熱処理（1100℃×60分+760℃×60分）を加え、表面の切削仕上げにより厚さ6mm×幅130mm×長さ300mmの試験板

を製作した。この試験板からそれぞれの試験に適した試験片を切りだした。

5. 2 溶接および熱処理

板材の溶接試験は被覆管の溶接試験と対応させるために、同じTIG溶接とした。溶接は溶加材を用いず、試験板の幅(130mm)方向に半分に切断し切断部をそのまま突き合わせて行った。シールドガスはアルゴンガス、溶接法は自動TIG溶接で両面から上下同位置を溶接した。溶接時の電流および電圧を変化させ、十分な溶け込みが得られる最適な溶接条件を採用した。

溶接後の熱処理条件は4.4に述べた理由で720℃×60分とした。

5. 3 試験結果

試験は「母材」「溶接まま(As weld)」「熱処理」の3種類について実施し、比較検討を加えた。試験項目にしたがって簡単に結果を紹介する。詳細については付録に示す。

(1) 溶接部の液体浸透探傷試験

溶接した試験板の両面について液体浸透探傷試験を実施したが、いずれも欠陥は全く認められなかった。

(2) 硬さ試験および組織観察

溶接部の断面(表面から1mmの深さ位置)の硬さ測定(ビッカース硬さ)では、母材の硬さが約260であるのに比べて、溶接ままでは溶接金属部で約430の最高硬さを示すが、熱処理により最高硬さは約300まで低下している。

(3) 曲げ試験

溶接ままでは180度曲げで破断を生じるが、熱処理により良好な曲げ性を示す。したがって、溶接によるじん性の低下と熱処理によるその回復が確認された。

(4) 衝撃試験

0℃におけるシャルピー衝撃試験の結果、母材の吸収エネルギーに比べて溶接金属部の吸収エネルギーは低い。熱処理によりやや改善される。

(5) 常温および高温(650℃)引張試験

溶接継手試験片の破断位置はいずれも母材である。引張強度の値はいずれもほとんど変わらないが、溶接ままの試験片の常温における破断伸びは低く、延性が低下していることが判る。熱処理による伸びの回復が見られる。650℃においてはほとんど差が見られない。

(6) 高温クリープ破断試験

650℃で目標破断時間100、300および1000時間で試験を実施した。1000時間破断強度は母材で約17kg/mm²であるのに対して、溶接ままおよび熱処理材では約13~14kg/mm²である。溶接ままおよび熱処理材ではいずれも熱影響部で破断を生じるが、これは熱影響部に局所的に存在する軟化領域(母材より柔らかい)での破断と推定され、そのために母材より破断強度が若干低くなるものと考えられる。

6. あとがき

高速炉用燃料の被覆材として、その格段に低い照射スエリング特性を生かして高燃焼度を達成することが可能と考えられるフェライト鋼を適用し、ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピンを製作し⁶⁾、JMTRでの照射を開始した。適用にあたり、被覆材としての溶接試験で十分な溶け込みを得るために、端栓形状および溶接条件の検討を行った。また、フェライト鋼の溶接では不可欠の溶接後の熱処理条件に検討を加えた。さらに、材料試験として各種の試験を実施し、強度等の材料特性を明らかにするとともに、溶接および熱処理による影響についても把握した。今後、フェライト鋼は高速炉燃料被覆材として一層注目され開発が進展することが予想される。また、照射データ等も蓄積されると考えられる。今回報告したフェライト鋼の燃料被覆材への適用は、さらに照射データ等を加えることで今後のフェライト鋼被覆材の開発に有意義なものとなることが期待できる。

謝 辞

今回のフェライト鋼の燃料被覆材への適用にあたり、自社で開発した高強度フェライト鋼についてその使用を了承していただくとともに、多大の助言をいただいた動力炉核燃料開発事業団関係者各位に深く感謝いたします。フェライト鋼の特性や溶接・熱処理について貴重な助言をいただいた高温工学部高温材料強度研究室・鈴木 雅秀氏、端栓制作および下部端栓の溶接等に尽力いただいた東海研技術部工作課・沢島 求氏並びに武山 友憲氏に感謝いたします。

また、本研究の遂行にあたり貴重な助言をいただいた近藤 達男燃料・材料工学部長、半田 宗男燃料・材料工学部次長並びに大道 敏彦プルトニウム燃料研究室長に厚くお礼申し上げます。

6. あとがき

高速炉用燃料の被覆材として、その格段に低い照射スエリング特性を生かして高燃焼度を達成することが可能と考えられるフェライト鋼を適用し、ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピンを製作し⁶⁾、JMTRでの照射を開始した。適用にあたり、被覆材としての溶接試験で十分な溶け込みを得るために、端栓形状および溶接条件の検討を行った。また、フェライト鋼の溶接では不可欠の溶接後の熱処理条件に検討を加えた。さらに、材料試験として各種の試験を実施し、強度等の材料特性を明らかにするとともに、溶接および熱処理による影響についても把握した。今後、フェライト鋼は高速炉燃料被覆材として一層注目され開発が進展することが予想される。また、照射データ等も蓄積されると考えられる。今回報告したフェライト鋼の燃料被覆材への適用は、さらに照射データ等を加えることで今後のフェライト鋼被覆材の開発に有意義なものとなることが期待できる。

謝 辞

今回のフェライト鋼の燃料被覆材への適用にあたり、自社で開発した高強度フェライト鋼についてその使用を了承していただくとともに、多大の助言をいただいた動力炉核燃料開発事業団関係者各位に深く感謝いたします。フェライト鋼の特性や溶接・熱処理について貴重な助言をいただいた高温工学部高温材料強度研究室・鈴木 雅秀氏、端栓制作および下部端栓の溶接等に尽力いただいた東海研技術部工作課・沢島 求氏並びに武山 友憲氏に感謝いたします。

また、本研究の遂行にあたり貴重な助言をいただいた近藤 達男燃料・材料工学部長、半田 宗男燃料・材料工学部次長並びに大道 敏彦プルトニウム燃料研究室長に厚くお礼申し上げます。

参考文献

1. 福谷 耕司、寺澤 倫孝、”高速炉炉心材および核融合炉構造材としてのフェライト鋼の照射効果”、日本原子力学会誌、28、1003 (1986).
2. 半田 宗男、大道 敏彦、福島 奨、笹山 龍雄、鈴木 康文 他、”照射用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作”、JAERI-M 83-206 (1983).
3. 荒井 康夫、岩井 孝、前多 厚、笹山 龍雄、塩沢 憲一 他、”高出力照射試験用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作”、JAERI-M 86-094 (1986).
4. 荒井 康夫、岩井 孝、前多 厚、笹山 龍雄、塩沢 憲一 他、”JMTR照射キャプセル(84F-10A, 84F-12A, 87F-2A)用混合炭化物燃料ピンの製作”、JAERI-M 89-060 (1989).
5. 鈴木 康文、岩井 孝、荒井 康夫、笹山 龍雄、塩沢 憲一 他、”第1回JMTR照射用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン(88F-5A)の製作”、JAERI-M 90-116 (1990).
6. 鈴木 康文、岩井 孝、笹山 龍雄、前多 厚、荒井 康夫 他、”第2回JMTR照射用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン(89F-3A)の製作”、JAERI-M 投稿中 (1991).

Table 1 Chemical composition of the ferritic steel

Element	Composition (wt%)
C	0.07~0.13
S.i	<0.1
Mn	0.30~0.75
P	≤ 0.030
S	≤ 0.030
Ni	≤ 0.80
Cr	10.0~12.0
Mo	0.30~0.70
Co	<0.01
N	0.03~0.07
Nb	0.03~0.07
V	0.15~0.25
W	1.70~2.30
Fe	bal

Table 2 Design parameters of cladding and plug material

	cladding	plug material
Diameter(mm)	9.40 ± 0.045	$10.0^{+0}_{-0.2}$
Thickness(mm)	0.50 ± 0.035	—————
Length(mm)	2000 ± 5	2000 ± 5

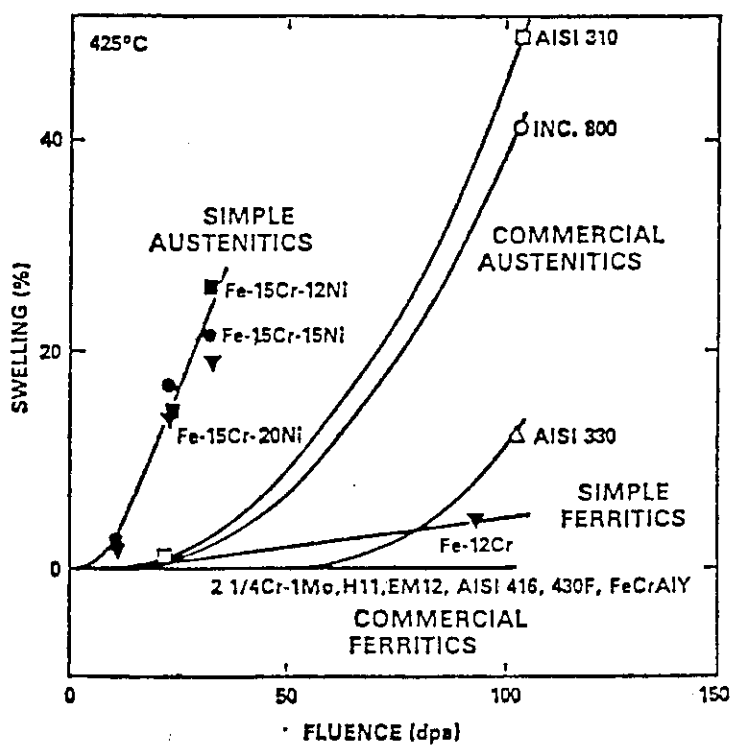
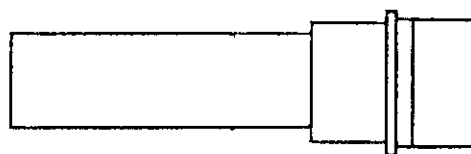
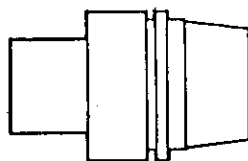


Fig. 1 Swelling of ferritic and austenitic steels



top plug



bottom plug

Fig. 2 Shape of end plugs(ferritic steel)

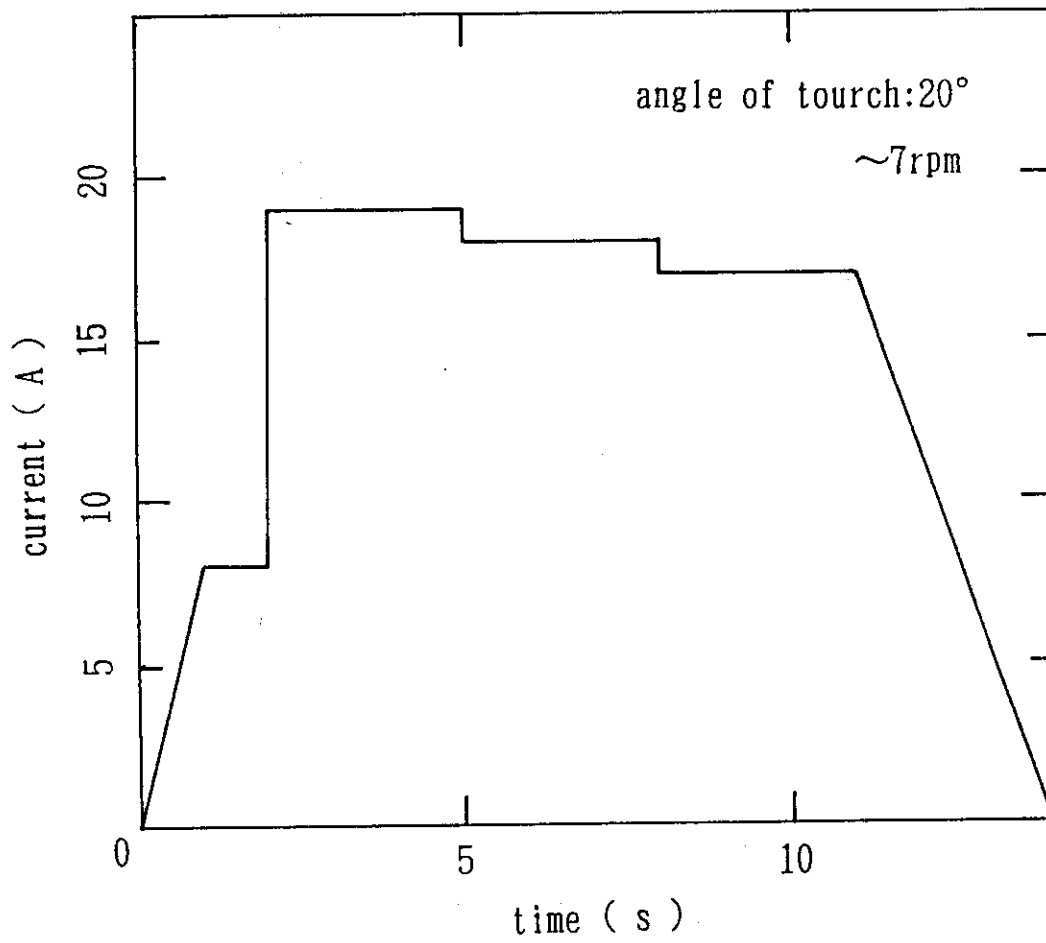


Fig. 3 Welding condition for ferritic steel

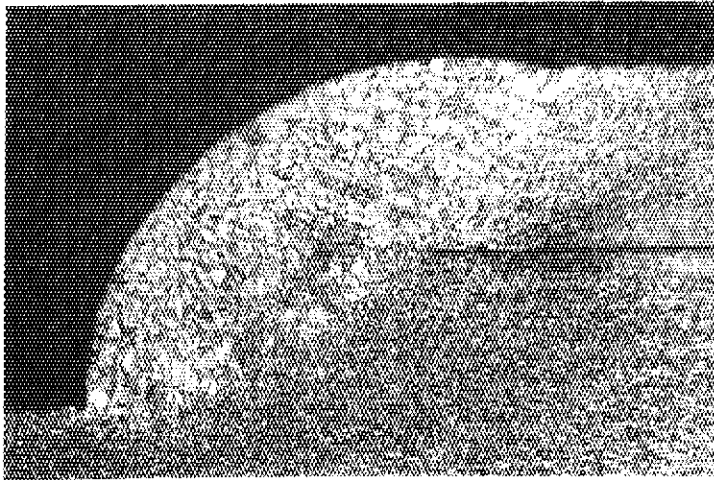


Fig. 4 Cross section of welded part(TIG weld)

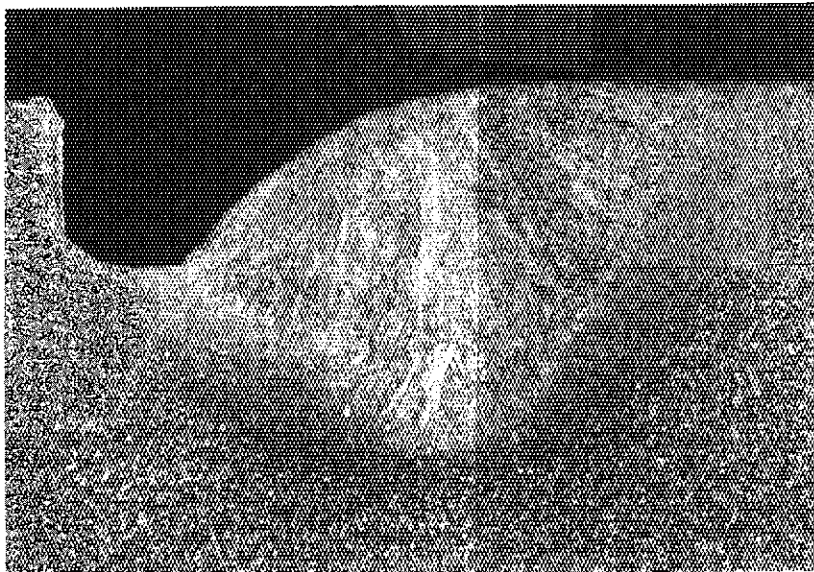
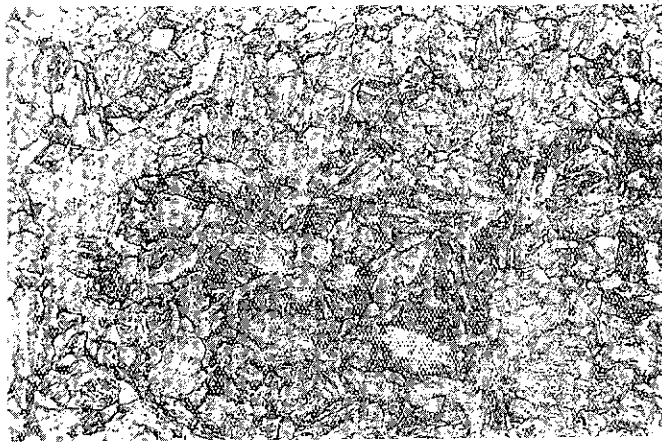
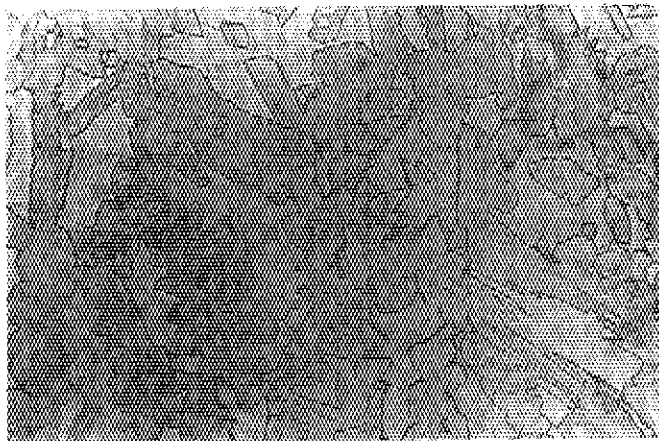


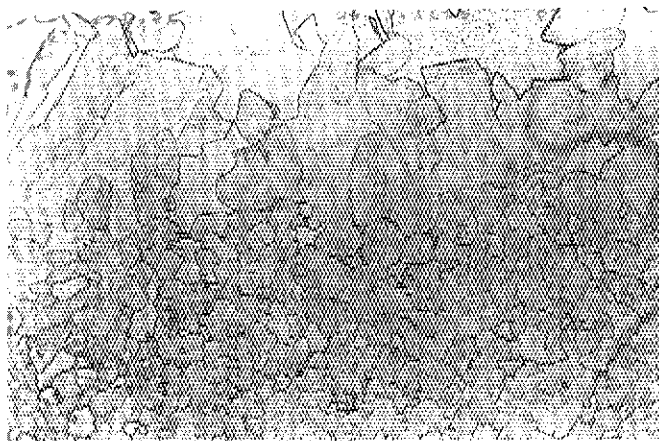
Fig. 5 Cross section of welded part(EB weld)



Basic Material Zone



Welding Material Zone



Heat Affected Zone

—
20 μ m

Fig. 6 Microstructure of welded part(TIG weld)

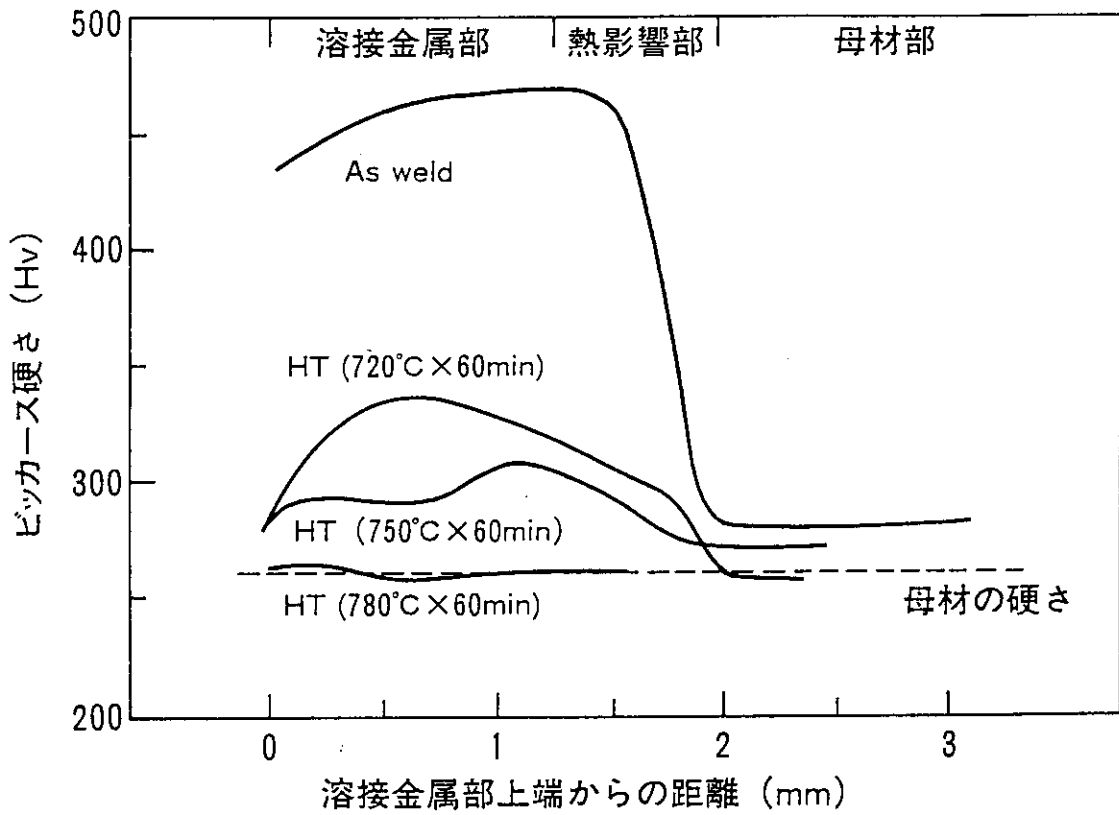


Fig. 7 Hardness of welded part(TIG weld)

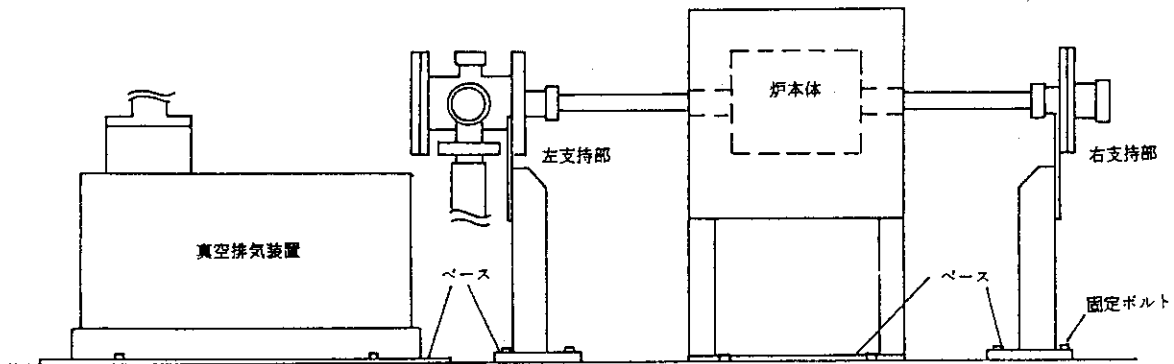


Fig. 8 Apparatus for heat treatment

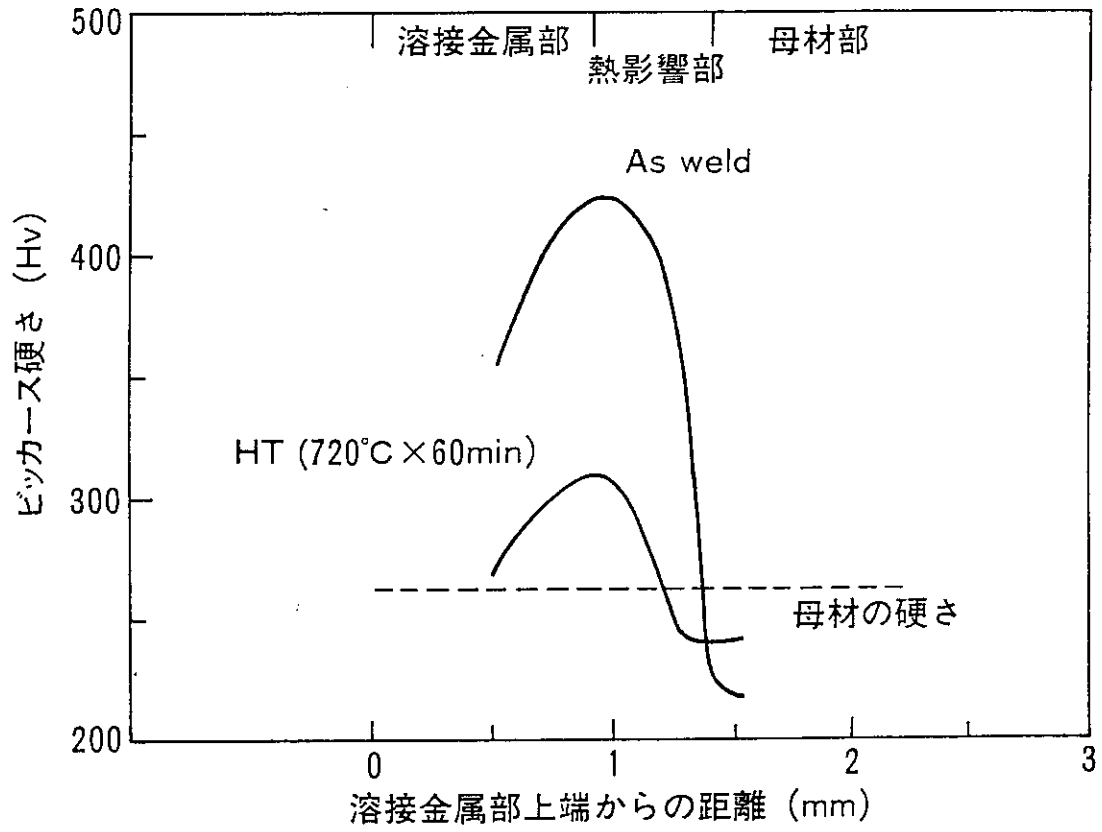


Fig. 9 Hardness of welded part(EB weld)

付 録

1. 被覆管の検査および試験結果
2. 端栓材の検査および試験結果
3. 板材による材料試験結果

1. 被覆管の検査および試験結果

Table A.1 検査及び試験(被覆管)

項 目	試 験 方 法	規 格 値	試 験 数	結果記載
化学成分	表1に規定した元素について分析。 分析方法はJIS G1201, G1253, G1256, G1257等に準ずる。	表1に示す値の 範囲内。	製品ロット毎に 各1個。	数 値
寸 法		(mm)		
外 径	超音波による。(両端と中央の3点)	9.40±0.045	全 数	数 値
肉 厚	超音波による。(両端2点)	0.50±0.035	〃	〃
長 さ	巻尺による。(JIS 1級)	2000±5	〃	合 否
真 円 度	超音波による。(両端と中央の3点)	≤0.050	〃	〃
真 直 度	定盤上で隙間ゲージによる。	全長に対し, ≤0.25	〃	〃
表面平滑度	JIS標準試料片(JIS B0659)と対比。	≤6.3S	〃	〃
硬 度	ASTM E-92に従う。 微小硬度計(マイクロビッカース)	参 考 値	製品ロット毎に 各2個。	数 値
結晶粒度	ASTM E-112に従う。	〃	〃 (縦断面)	数値及び 写真
介在物	ASTM-E45 plate IIIに基づく。	〃	〃	〃
熱処理条件	—————	—————	製品ロット毎 (温度及び時間)	数 値
探 傷	超音波による。 標準欠陥シグナルとの対比。	標準欠陥(mm) 深さ0.040× 幅 0.040× 長さ0.750	全 数	チャート
引張試験	JIS Z2241に従う。 JIS Z0567に従う。	(室温) 降状強度 ≥40kg/mm ² 引張強度 ≥60kg/mm ² 伸び ≥5% (650℃) 参 考 値 (降状強度, 引 張強度, 伸び)	製品ロット毎に 各2個。 〃	数 値 〃
内圧破壊試験	クローズエンド法による。 室温にて試験する。	参 考 値 (降状圧力, 破壊圧力)	〃	〃
押広げ試験	JIS G3463に従う。	参 考 値 (押広げ率)	〃	〃
偏平試験	JIS G3463に従う。	参 考 値 (偏平圧縮厚さ)	〃	〃

検査データシート

検査票 (A)

検査番号: S-89-137

検査種別	検査方法	検査場所
検査種別	検査方法	検査場所

品名	検査種別	検査方法
品名	検査種別	検査方法

製造番号	検査種別	検査方法
製造番号	検査種別	検査方法

品名	検査種別	検査方法	検査場所
1130	11	17	23
1130	11	17	23

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.02~0.15	0.01	0.03	0.03
0.11	0.02	0.49	0.003
0.12	0.02	0.48	0.003
0.11	0.02	0.50	0.002

品名	検査種別	検査方法	検査場所
244	248	257	25
244	248	257	25

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

品名	検査種別	検査方法	検査場所
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000

Table A.2 検査及び試験(端栓材)

項目	試験方法	規格値	試験数	結果記載
化学成分	表1に規定した元素について分析。 分析方法はJIS G1201, G1253, G1256, G1257等に準ずる。	表1に示す値の 範囲内。	製品ロット毎に 各1個。	数値
寸法		(mm)		
外径	超音波による。(両端と中央の3点)	10.0±0, -0.2	全数	数値
長さ	巻尺による。(JIS 1級)	2000±5	"	合否
真円度	超音波による。(両端と中央の3点)	≤0.050	"	"
真直度	定盤上で隙間ゲージによる。	全長に対し, ≤0.05	"	"
表面平滑度	JIS標準試料片(JIS B0659)と対比。	≤6.3S	全数	合否
硬度	ASTM E-112に従う。	参考値	製品ロット毎に 各2個。	数値
結晶粒度	ASTM E-112に従う。	参考値	" (縦断面)	数値及び 写真
介在物	ASTM-E45 plate IIIに基づく。	参考値	"	"
熱処理条件	—————	—————	製品ロット毎 (温度及び時間)	数値
探傷	超音波による。 標準欠陥シグナルとの対比。	標準欠陥(mm) 深さOD×50% 直径0.5	全数	チャート
引張試験	JIS Z2241に従う。 JIS Z0567に従う。	(室温) 降伏強度 ≥40kg/mm ² 引張強度 ≥60kg/mm ² 伸び ≥5% (650℃) 参考値 (降伏強度, 引 張強度, 伸び)	製品ロット毎に 各2個。	数値

2. 端栓材の検査および試験結果

2.1 目的及び概要

照射用燃料ピンの被覆材として用いる予定の11Cr系フェライト鋼について、溶接及び溶接後熱処理の影響を評価するための材料試験を実施する。

被覆材と同一の母材を用いた板材を製作し、これを試験材料として用いる。

2.2 試験材料母材の製造

2.2.1 素材

組成は11Cr-0.5Mo-2W-V・Nbで、既に納入した被覆材と同一の母材、すなわち以下に示す「契約番号K-0048、品名 原子炉用高強度フェライト鋼」と同一の母材を用い、材料試験のための板材を製作した。

素材形状：150φ×780Lmmブルーム

化学成分：鋼種KES11-2W

ヒートNo. HA4603

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Co	Cr	Mo	W	V	Nb	N
0.11	0.02	0.49	0.003	0.003	0.01	0.001	11.05	0.48	1.94	0.20	0.05	0.0449
0.11	0.02	0.50	0.002	0.003	0.01	0.001	11.12	0.46	2.06	0.18	0.046	0.046

上段はLadle分析値、下段はCheck分析値。

2.2.2 製造工程

素材：150φ×780Lmmブルーム（ヒートNo. HA4603）



鍛造：1200～1000℃，40t×120w mm



スラブ加工，切断：30t×130w mm



熱間圧延（加熱温度1150℃）：10t×130w mm



切断



熱処理：1100℃・1h・AC→760℃・1h・AC



表面切削仕上げ：6t×130w×300L mm



寸法，数量検査

2.2.3 検査結果

目標寸法：板厚 6.5±0.5mm

数量：20枚

幅 100mm以上

長さ 300±5mm

板No.	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)
1	5.8	130	302
2	5.8	130	302
3	6.0	130	302
4	6.0	130	303
5	6.0	130	303
6	5.8	130	303
7	6.0	130	303
8	6.0	130	303
9	6.0	130	304
10	6.0	130	304
11	6.0	130	304
12	6.0	130	304
13	6.0	130	303
14	6.0	129	302
15	6.0	130	305
16	6.0	130	303
17	6.0	130	303
18	6.0	130	303
19	6.0	130	303
20	6.0	130	303

3. 板材による材料試験結果

3.1 溶接及び材料試験

製作した板材を用いてTIG溶接継手を製作し、さらに溶接後熱処理も施し、これらの母材、溶接まま材 (As weld)、及び溶接後熱処理 (HT) の3種類から試験片を採取し、組織、硬さ、曲げ、割れ、衝撃、常・高温引張、高温クリーブ破断の各試験を実施した。

3.1.1 溶接法及び条件

板厚6mmの溶接試験板を溶加材 (フィラーワイヤ) を用いず、I開先で両面から各1パス溶接して製作する溶接条件を検討した。本溶接においては、I開先ギャップ0mmの母材を融合するだけの溶接であるため、板厚方向への溶け込みが十分であれば厳密な開先加工は不要と考えられるので、本試験においては試験板の幅130mmを半分に切断し、切断部をそのまま突合せ、開先を取らないまま溶け込みの十分出る条件を選定した。

溶接法：自動TIG溶接 (溶加材なし)。

開先形状：I型開先。両面溶接。上下同位置。

溶接条件：表1に示す。

溶接後熱処理：720℃×60min・AC

Table A.3 に示すごとく、溶接条件は電流、電圧を変化させた3条件で検討したが、溶接ビード外観はいずれも良好であった。また、断面マクロ組織を調査した結果 (Photo.A.1)、No.1の条件では溶け込みが不十分であったが、No.2及びNo.3の条件では十分な溶け込みがみられ、これらは適正な溶接条件と判断された。従って、試験板の溶接条件としてNo.3の条件 (電流180A、電圧10V) を採用し、Fig.A.1に示す溶接試験板6枚を製作した。溶接試験板6枚のうちの3枚については、上に示した溶接後熱処理を施した。

3.1.2 試験及び試験方法

試験項目をTable A.4に示す。

溶接試験板の切断要領をFig.A.2に、試験片採取位置及び試験片記号をFig.A.3に示す。ミクロ組織試験片をFig.A.4に、硬さ測定用試験片をFig.A.5に示す。曲げ試験片をFig.A.6に示す。母材についてはJIS Z 2204 1号試験片を、継手についてはJIS Z 3122 2号試験片を用いた。衝撃試験片をFig.A.7に示す。衝撃試験片は、JIS Z 2202 4号試験片 (5mm幅の2mmVノッチ・シャルピー衝撃試験片) を用いた。常温引張試験片をFig.A.8に、高温引張試験片をFig.A.9に、またクリーブ破断試験片をFig.A.10に示す。いずれも、継手試験片では溶接金属部を試験片平行部の中央に配置した。

3.1.3 試験結果

1) 溶接部検査結果

6枚の試験板の表、裏面の溶接部について液体浸透探傷試験を実施した。いずれも欠陥は全く認められなかった。

溶接まま、及び溶接後熱処理を施した試験板6枚について、Fig.A.2に示すごとく切断し、各試験板A、B両端の溶け込み形状をチェックし、正常であることを確認した。

2) 硬さ、組織試験結果

光学顕微鏡で観察した母材の組織をPhoto.A.2に示す。少量のフェライトを含む焼き戻しマルテンサイト組織を示している。溶接継手の溶接ままの組織をPhoto.A.3(a)、A.3(b)に、熱処理後の組織をPhoto.A.4(a)、A.4(b)に示す。光学顕微鏡では熱処理による顕著な違いは認められない。溶接金属部では、母材部に比べて δ フェライト部が多くなっている。また、熱影響部におけるマルテンサイト部の結晶粒は母材部に比べて細かくなっている。

溶接ままの溶接部の硬さ分布をFig.A.11に示す。熱処理後の溶接部の硬さ分布をFig.A.12に示す。溶接ままの溶接金属部ではHV430程度の最高硬さを示すが、720℃の後熱処理を施すことにより溶接金属部の最高硬さはHV300程度まで低下している。熱影響部では母材部の硬さよりやや低い軟化領域が認められるが、その程度はそれほど大きくはない。

3) 曲げ試験結果

母材及び継手の表、裏曲げ試験結果をTable A.5に示す。

溶接ままでは破断が生じるが、720℃の後熱処理を施すことによって良好な曲げ性を示す。

4) 衝撃試験結果

0℃におけるシャルピー衝撃試験結果をTable A.6に示す。母材部の吸収エネルギーに比べて溶接金属部(WM)の吸収エネルギーは低い。溶接後熱処理によってやや改善される。熱影響部(HAZ)は母材部より高い吸収エネルギーを示している。これは熱影響部の結晶粒が細かくなっているためと考えられる。

5) 常・高温引張試験結果

常温(20℃)及び高温(650℃)における引張試験結果をTable A.7に示す。溶接継手試験片の破断位置はいずれも母材である。溶接ままの継手試験片の常温における破断伸びは低いが、これはC破断のためである。熱処理によって引張強さ、0.2%耐力はやや低下し、破断伸びは大きくなる。650℃においては試料によってほとんど差はみられない。

6) クリープ破断試験

650℃において目標破断時間100, 300, 1000hで試験を実施した。結果をTable A.8およびFig.A.13に示す。母材のクリープ破断強度は、これまでに試作された被覆管の破断強度よりやや高い。溶接継手では、溶接ままおよび熱処理を施したもののいずれの場合も破断位置は溶接熱影響部(HAZ)となり、母材の強度よりやや低い破断強度となる。これは、硬さ分布測定結果で示したHAZ軟化領域で破断が生じるためと考えられる。

Table A.3 溶接条件

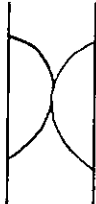
No.	溶接法	電流	電圧	溶接速度	シールドガス	積層法	予熱 パス間温度
1	自動 TIG	150A	8V	10cpm	Arガス 内側 20l/min 外側 30l/min		室温
2		170A	9.5V				
3		180A	10V				

Table A.4 試験項目

試験項目	試験材	溶接材		母材
		溶接まま	後熱処理	
液体浸透探傷試験		溶接ビード表面（全継手部）		—
常温引張試験		2本（継手）	2本（継手）	2本
高温引張試験（650℃）		2本（継手）	2本（継手）	2本
表（裏）曲げ試験		2本	2本	2本
衝撃試験（0℃）		（WM） 3本 （HAZ） 3本	（WM） 3本 （HAZ） 3本	3本
硬さ試験（HV）		溶接線に直角方向の断面。 表、裏面より1mmの位置。		—
マクロ組織		溶接条件3種	—	—
ミクロ組織 （100倍及び400倍）		WM, Bond, HAZ, BM 4箇所	WM, Bond, HAZ, BM 4箇所	1箇所
クリープ破断試験（650℃）		5本（継手）	5本（継手）	5本

WM:溶接金属部、Bond:溶接境界部、HAZ:溶接熱影響部、BM:母材部

Table A.5 曲げ試験結果

試料名	試験片		曲げ試験			備考	
	試験片 符 号	規格	幅×厚さ (mm×mm)	曲げ 半径 (mm)	曲げ 角度 deg.		試験結果
溶接継手 (溶接まま)	A F	* 1	40×6	12	180	破断	* 1 JIS Z 3122 2号 表曲げ試験片
	A R	* 2	40×6	12	180	破断	* 2 JIS Z 3122 2号 裏曲げ試験片
溶接継手 (熱処理)	S F	* 1	40×6	12	180	良好	* 1 JIS Z 3122 2号 表曲げ試験片
	S R	* 2	40×6	12	180	良好	* 2 JIS Z 3122 2号 裏曲げ試験片
母 材	B F	* 3	40×6	12	180	良好	* 3 JIS Z 2204 1号 曲げ試験片
	B R	* 3	40×6	12	180	良好	

Table A.6 衝撃試験結果

試験温度: 0 °C

JIS Z 2202 4号試験片 (幅5mm×厚さ10mm)

試料名	試験片 符 号	吸収 エネルギー (平均値) (kgf-m)	脆性 破面率 (平均値) (%)
溶接まま WM	AW 1	0. 1 7	1 0 0
	AW 2	0. 2 0 (0. 1 7)	1 0 0 (1 0 0)
	AW 3	0. 1 4	1 0 0
溶接まま HAZ	AH 1	2. 7 9	3 9
	AH 2	3. 1 3 (3. 1 2)	2 8 (3 1)
	AH 3	3. 4 5	2 6
熱処理 WM	SW 1	1. 5 4	1 0 0
	SW 2	1. 4 7 (0. 6 2)	1 0 0 (1 0 0)
	SW 3	0. 3 5	1 0 0
熱処理 HAZ	SH 1	3. 8 8	1 3
	SH 2	3. 6 3 (3. 7 0)	2 2 (2 0)
	SH 3	3. 5 9	2 6
母材	B 1	3. 0 6	4 5
	B 2	3. 2 4 (2. 7 7)	4 5 (5 0)
	B 3	2. 0 2	6 0

Table A.7 常・高温引張試験結果

試験温度	試料名	試験片 符号	試験片平行部		0.2% 耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置
			標点距離(mm)	幅×厚さ(mm)					
R T	溶接継手 (溶接まま)	AT1	25.0	6.35×6.02	72.7	85.5	3.9	55.2	C (母材)
		AT2	25.0	6.35×6.05	73.1	84.6	3.2	52.2	C (母材)
	溶接継手 (熱処理)	ST1	25.0	6.35×5.95	66.4	82.6	13.7	53.8	B (母材)
		ST2	25.0	6.35×6.02	66.2	81.6	14.5	50.9	B (母材)
	母材	BT1	25.0	6.35×6.00	72.2	81.6	19.1	54.4	A
		BT2	25.0	6.35×6.03	70.5	82.8	18.1	53.6	A
650℃	溶接継手 (溶接まま)	AH1	25.4	6.39×5.70	35.4	41.7	22.8	78.6	B (母材)
		AH2	25.4	6.39×5.71	33.5	41.3	22.8	83.7	B (母材)
	溶接継手 (熱処理)	SH1	25.4	6.39×5.72	33.1	42.1	21.7	75.1	B (母材)
		SH2	25.4	6.39×5.72	34.6	41.3	22.0	73.8	B (母材)
	母材	BH1	25.4	6.39×5.72	33.9	41.9	32.3	81.1	A
		BH2	25.4	6.39×5.73	32.0	39.8	32.7	80.7	A

Table A.8 650°Cにおけるクリープ破断試験結果

試験温度	試料名	試験片 符号	応力 (kgf/mm ²)	破断時間 (h)	破断伸び (%)	破断位置	備考
650°C	溶接継手 (溶接まま)	AC1	18.0	291.7	5.2	HAZ	
		AC2	16.0	562.5	3.0	HAZ	
		AC3	14.0	804.9	3.2	HAZ	
	溶接継手 (熱処理)	SC1	18.0	291.7	4.6	HAZ	
		SC2	16.0	515.2	3.8	HAZ	
		SC3	14.0	944.1	5.9	HAZ	
	母材	BC3	22.0	121.0	19.8	A	
		BC1	18.0	661.4	17.3	B	
		BC2	16.0	1038.9	19.9	A	

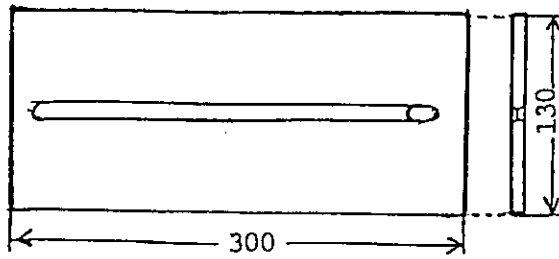


Fig. A.1 溶接試験板

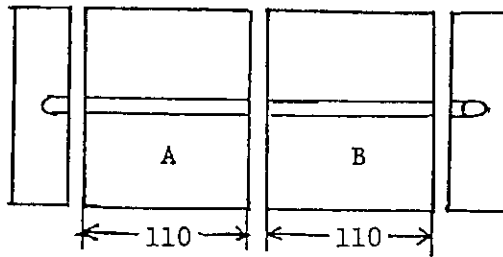


Fig. A.2 溶接試験板の切断要領

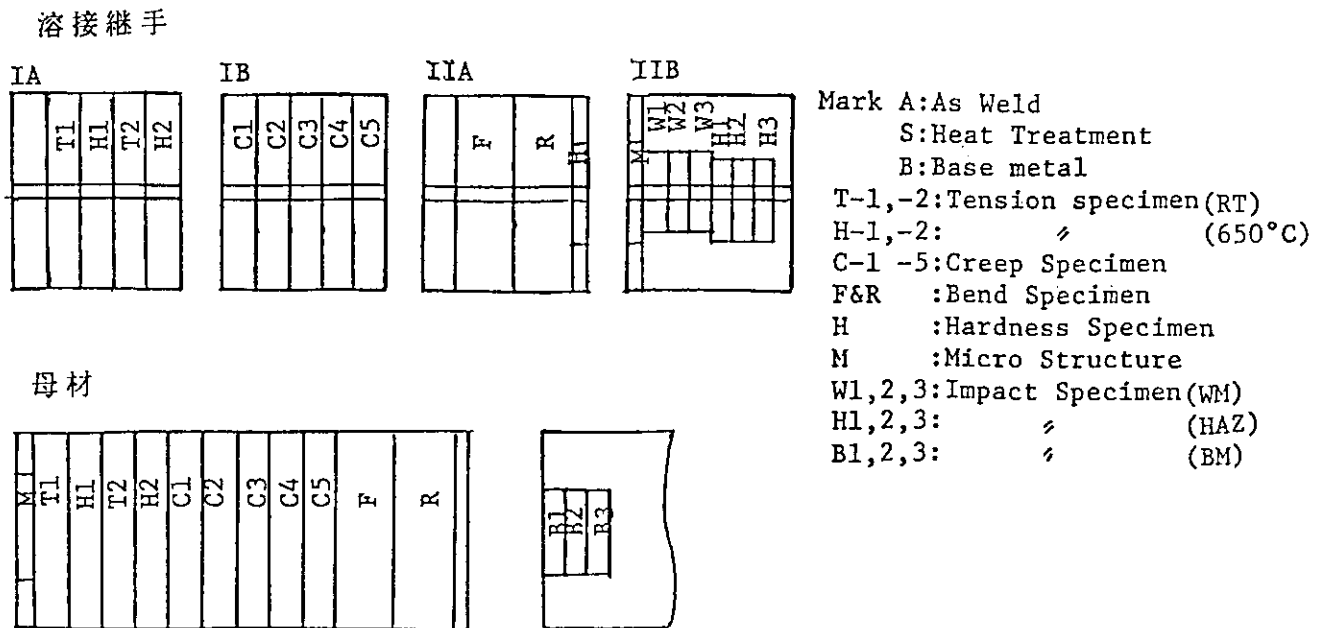


Fig. A.3 試験片採取位置及び試験片記号

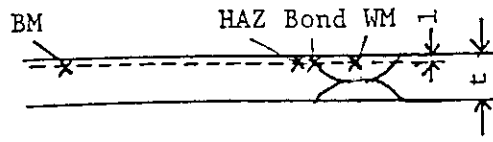


Fig.A.4 ミクロ組織試験片

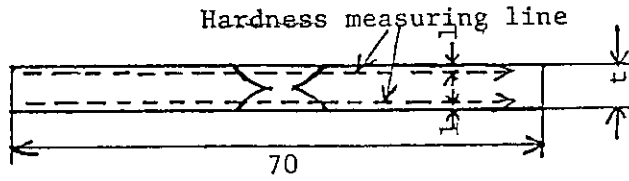


Fig.A.5 硬さ測定用試験片

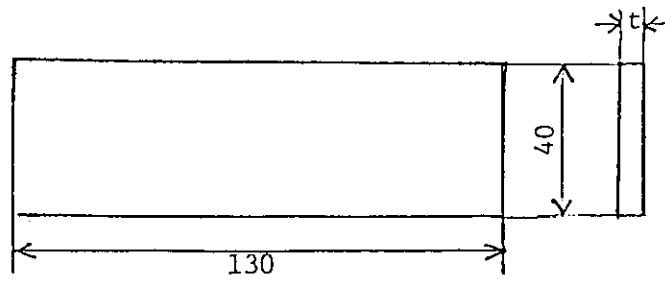


Fig.A.6 曲げ試験片

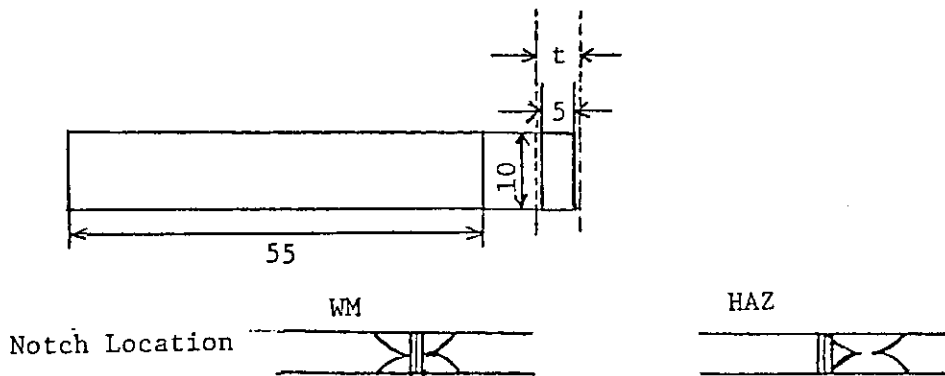


Fig.A.7 衝撃試験片

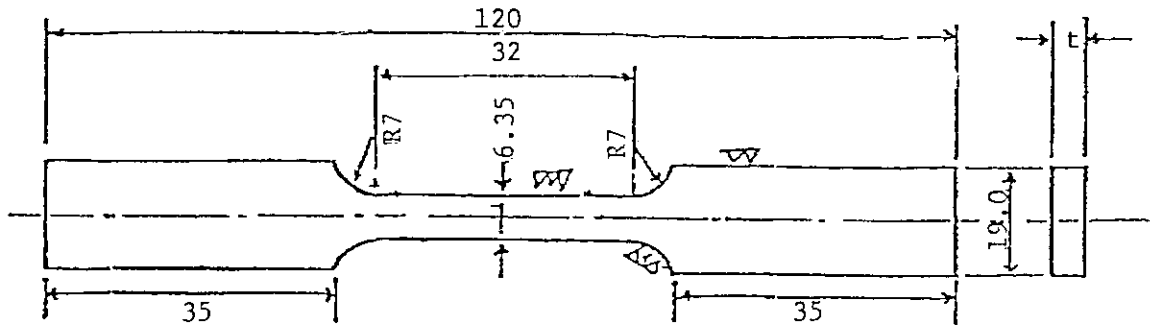


Fig.A.8 常温引張試験片

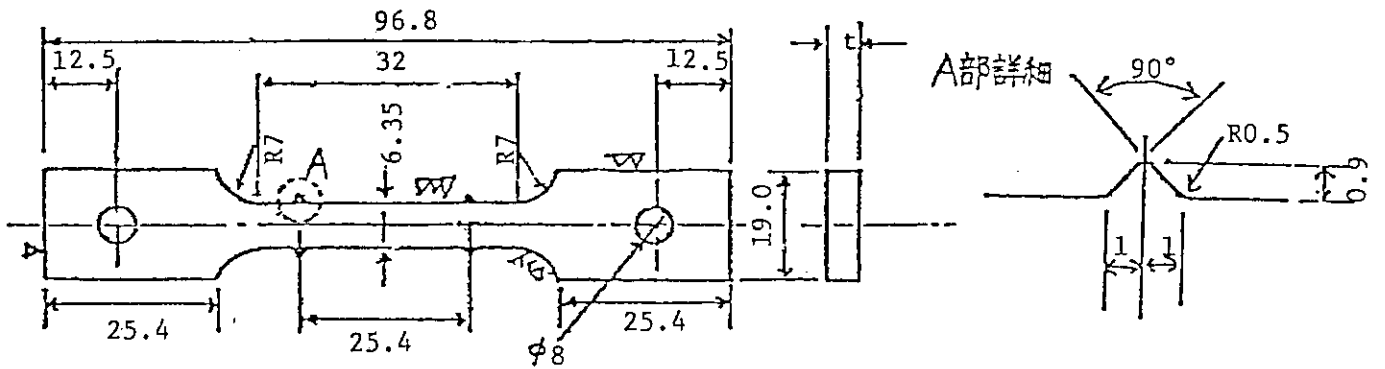


Fig.A.9 高温引張試験片

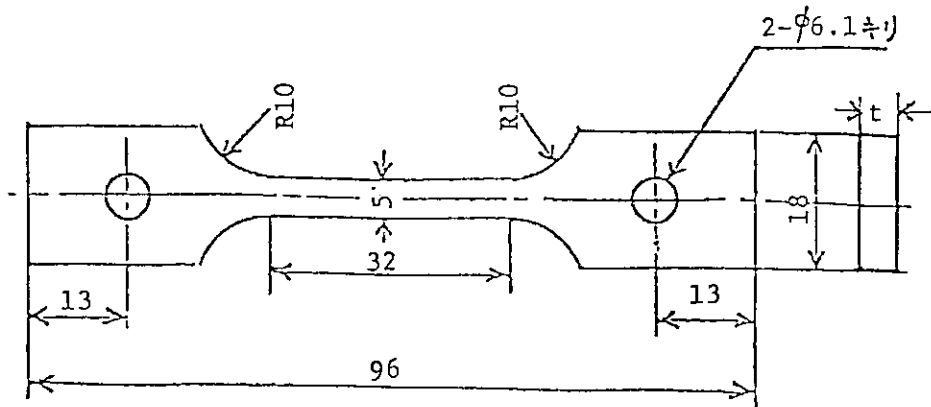


Fig.A.10 クリープ破断試験片

硬さ試験結果（溶接母材）

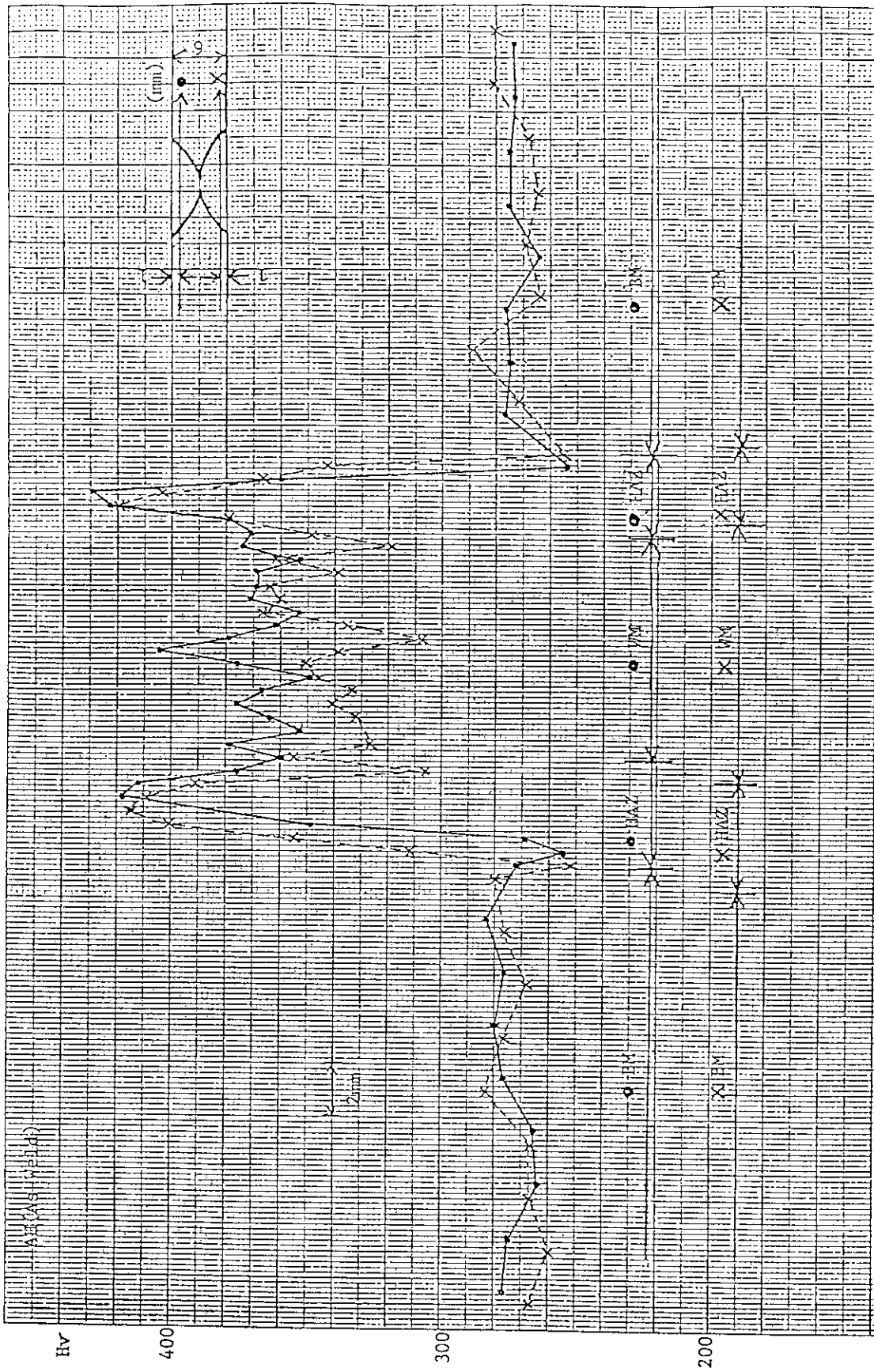


Fig.A.11 溶接ままの溶接部の硬さ分布

硬さ試験結果（熱処理材）

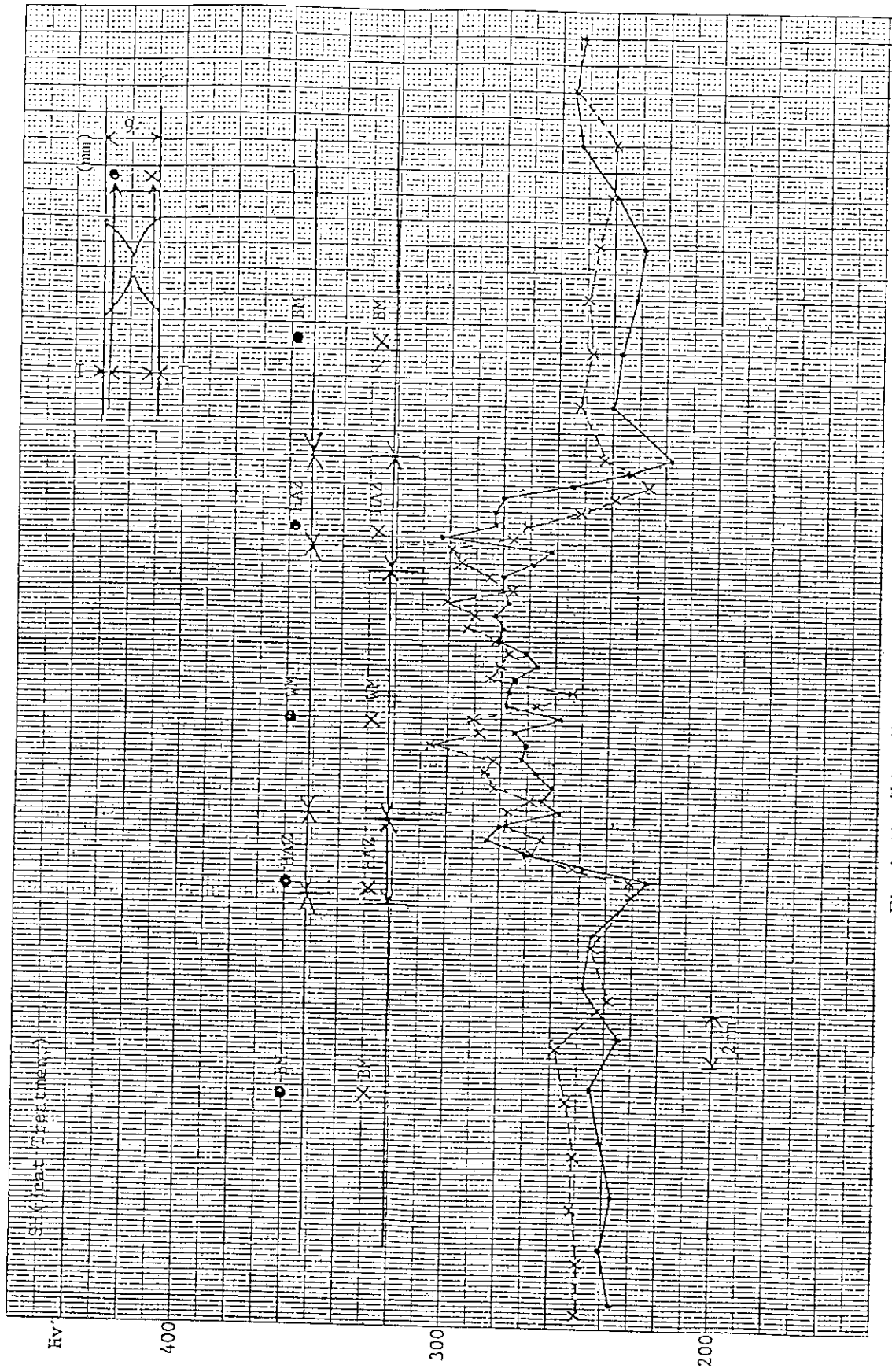


Fig. A.12 熱処理後の溶接部の硬さ分布

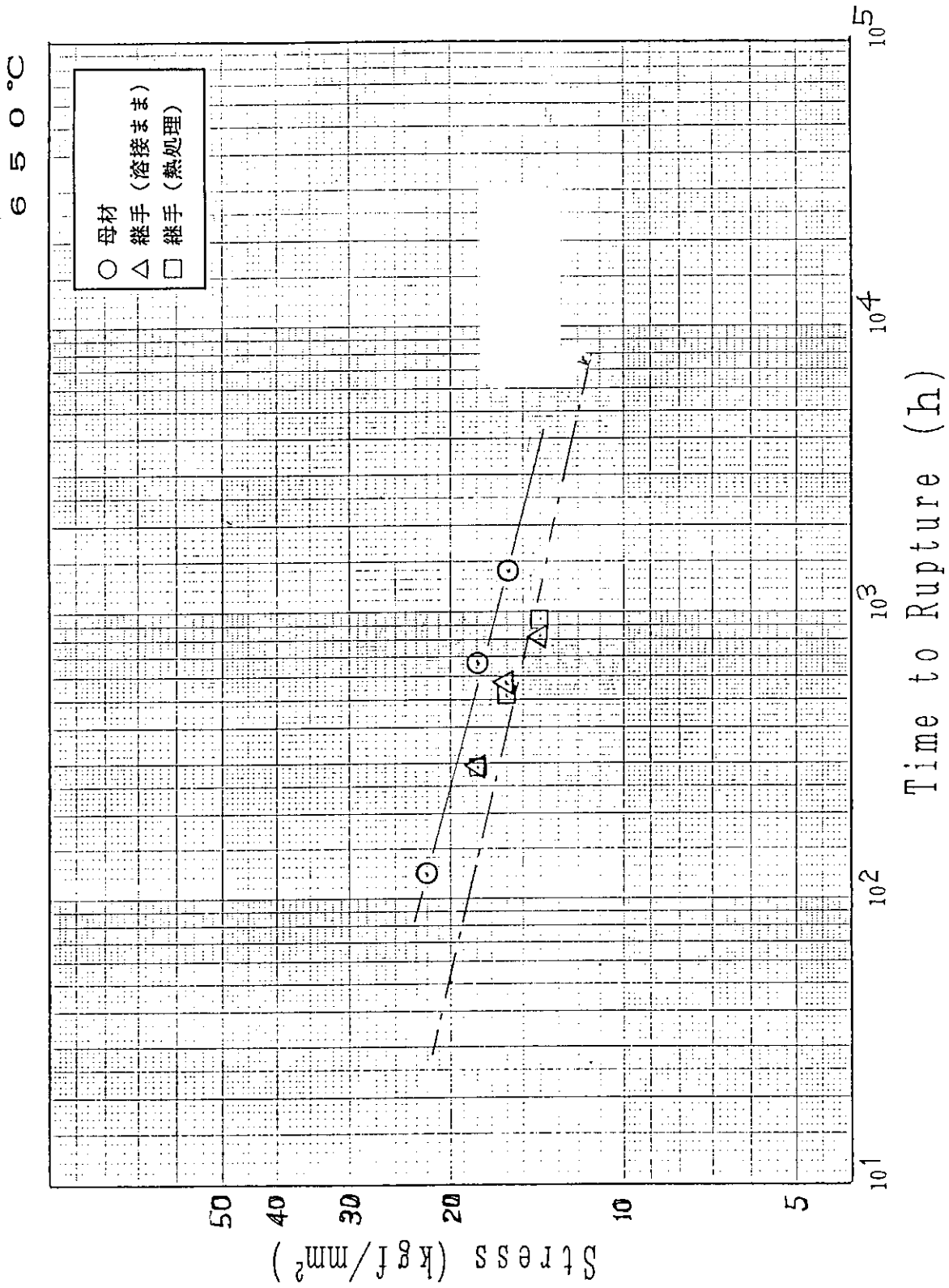


Fig.A.13 母材および溶接継手の650°Cにおけるクリープ破断試験結果

マクロ組織写真

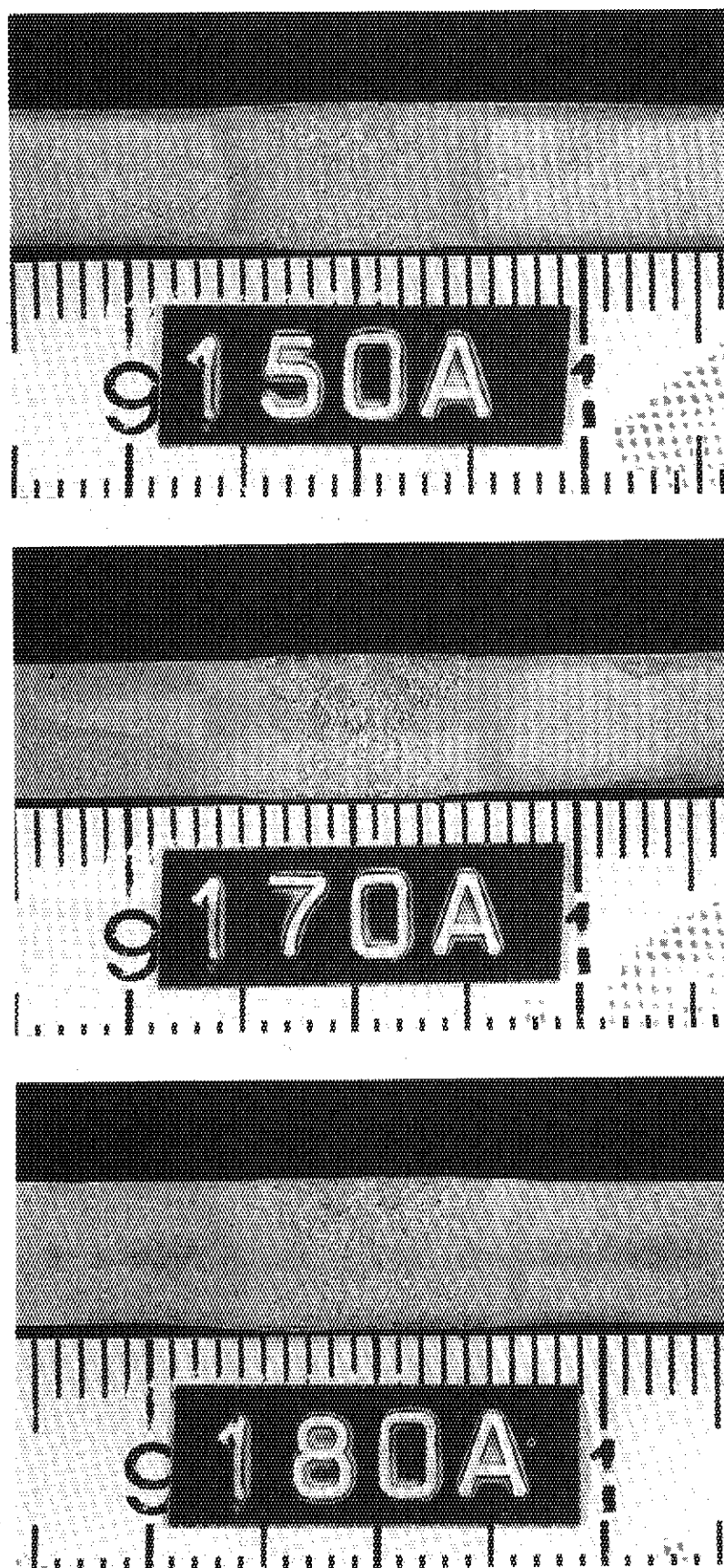
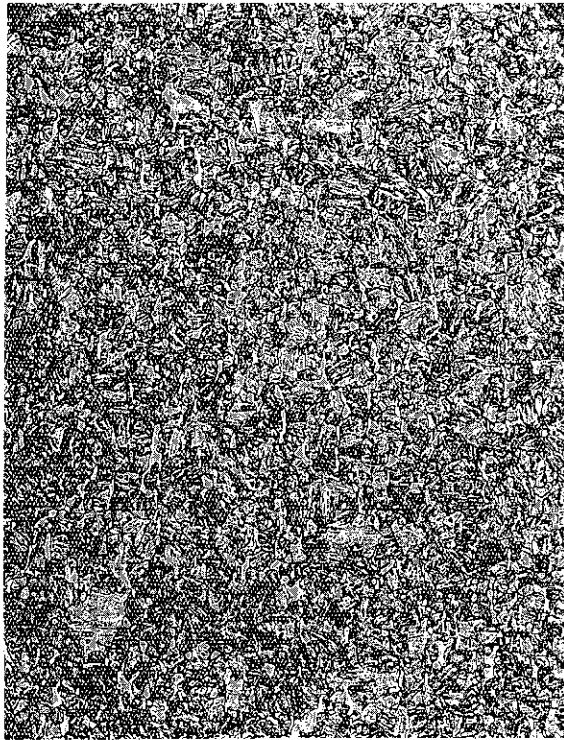


Photo. A.1 溶接部のマクロ組織

母材ミクロ組織



100倍



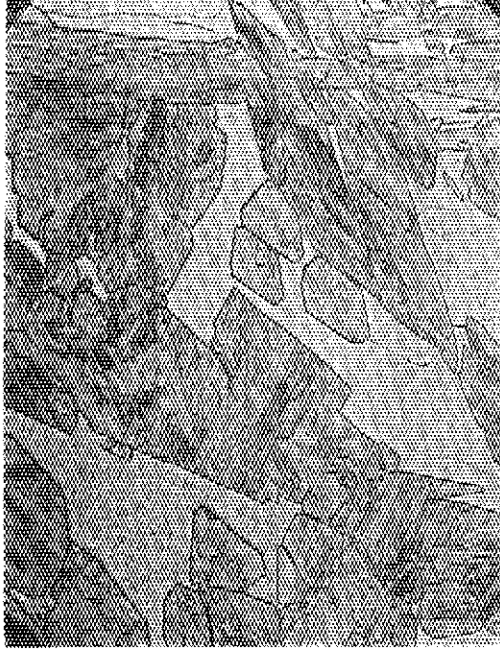
400倍

Photo. A.2 母材の組織

溶接材(溶接まま)ミクロ組織



WM
(100倍)



WM
(400倍)



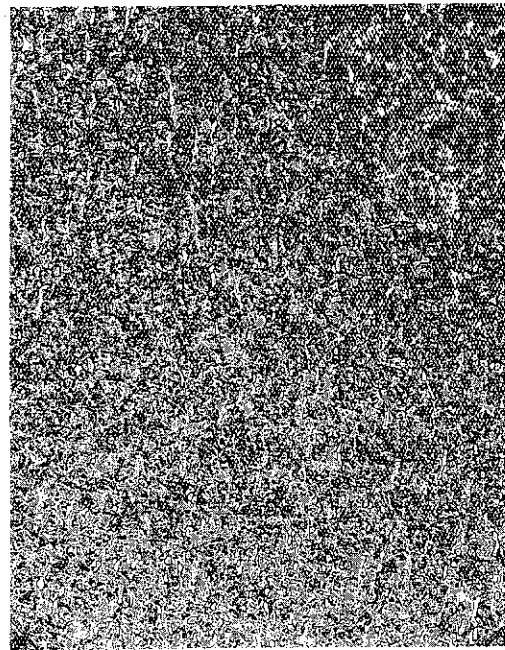
Bond
(100倍)



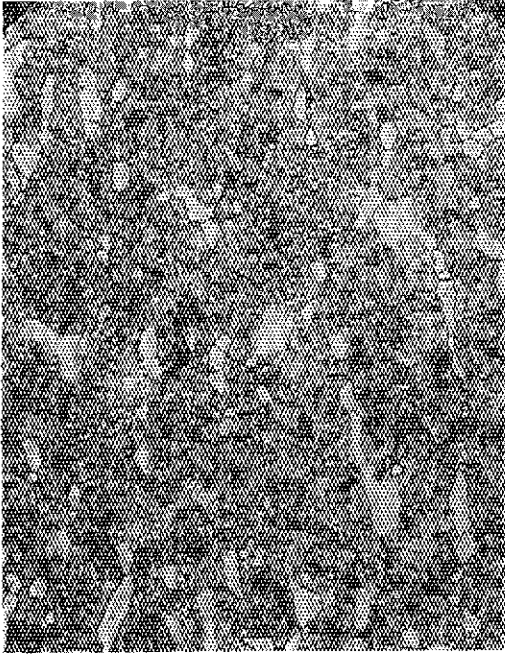
Bond
(400倍)

Photo. A.3(a) 溶接ままの溶接部の組織(WM, Bond)

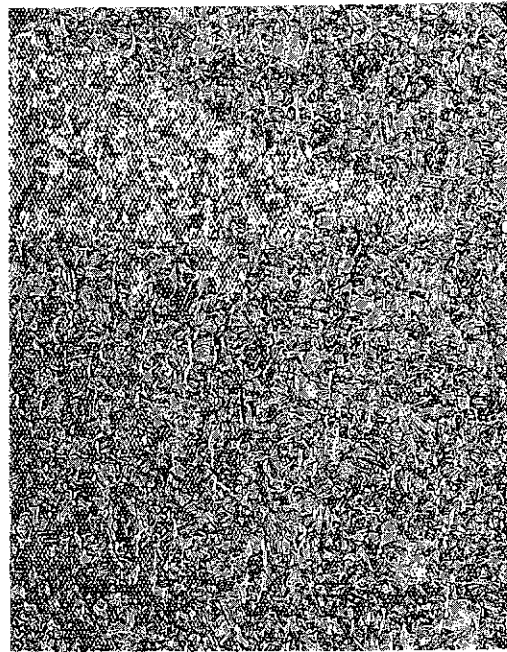
溶接材(溶接まま)ミクロ組織



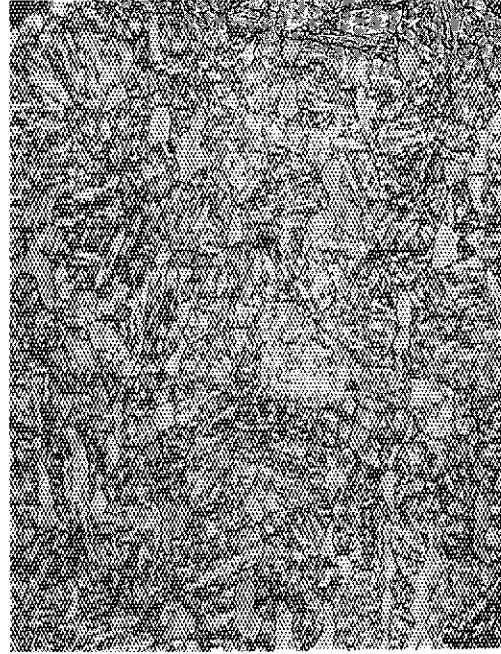
HAZ
(100倍)



HAZ
(400倍)



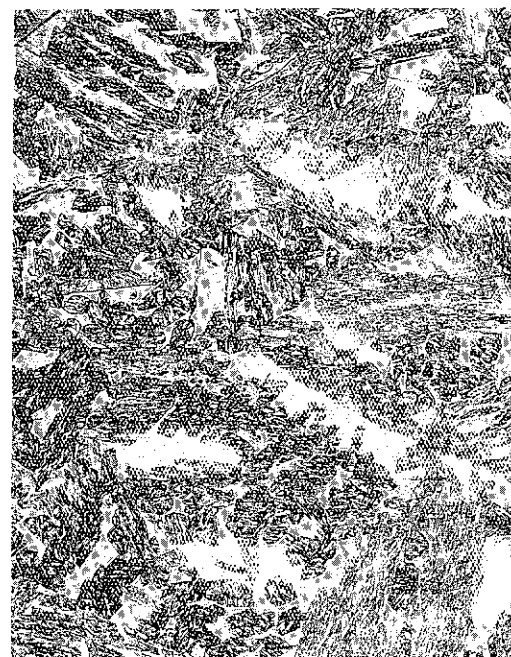
BM
(100倍)



BM
(400倍)

Photo.A.3(b) 溶接ままの溶接部の組織(HAZ, BM)

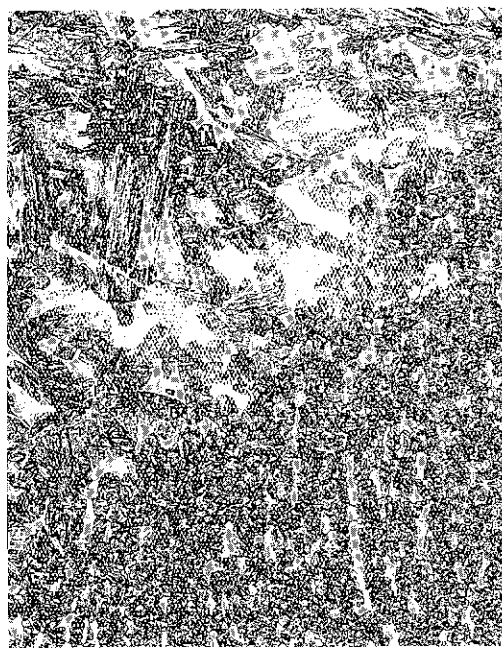
溶接材(熱処理)ミクロ組織



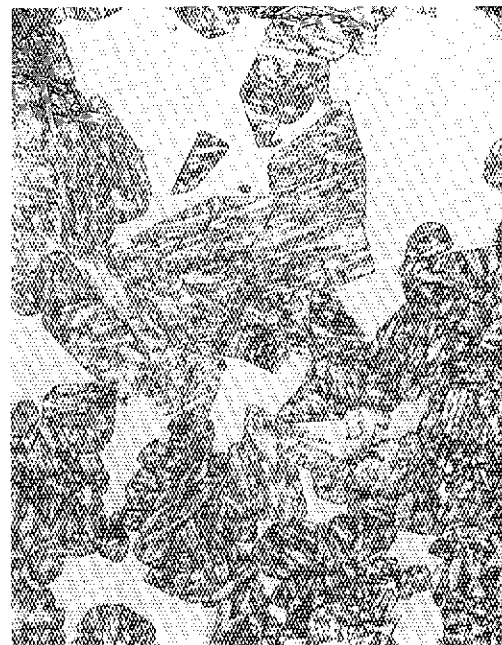
WM
(100倍)



WM
(400倍)



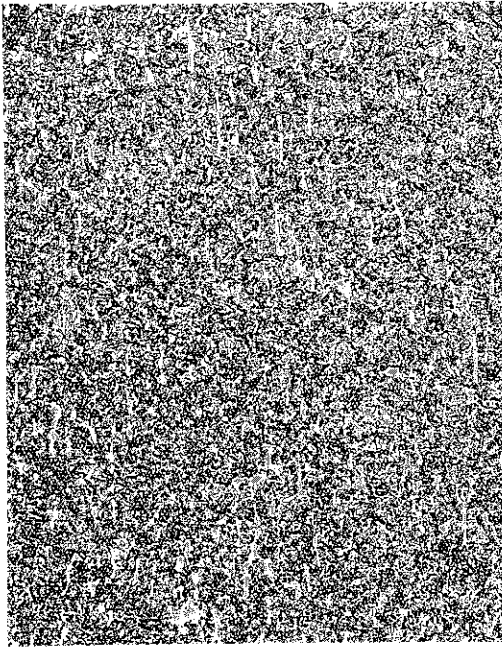
Bond
(100倍)



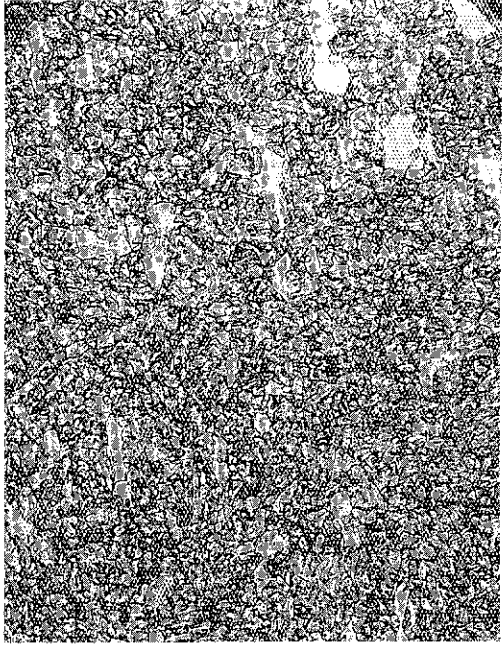
Bond
(400倍)

Photo.A.4(a) 熱処理後の溶接部の組織(WM, Bond)

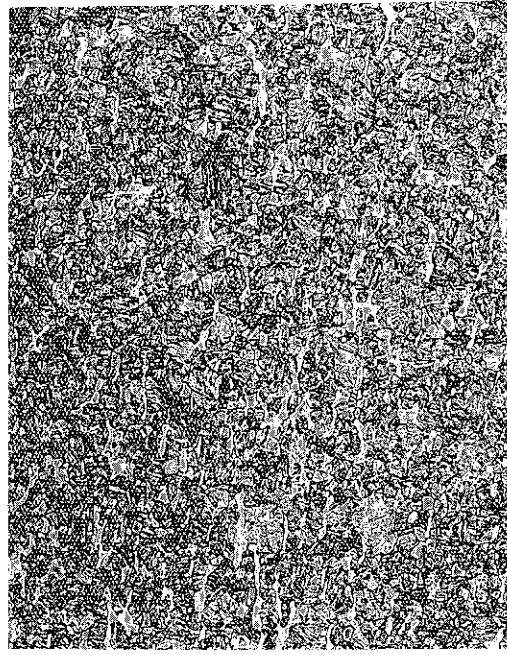
溶接材(熱処理)ミクロ組織



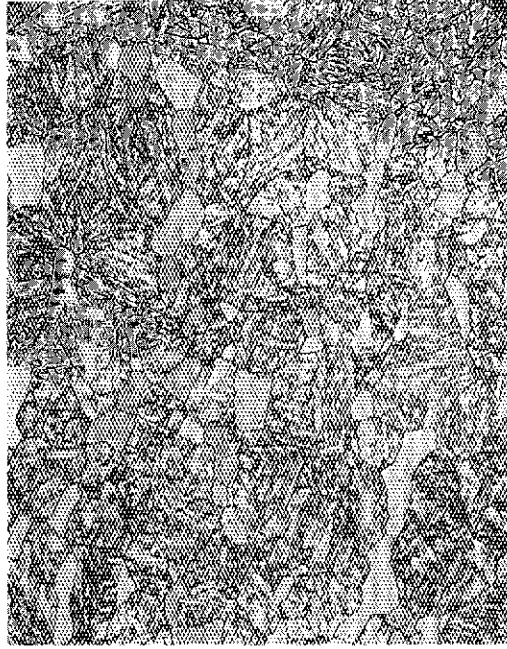
HAZ
(100倍)



HAZ
(400倍)



BM
(100倍)



BM
(400倍)

Photo. A.4(b) 熱処理後の溶接部の組織(HAZ, BM)