

JAERI-Tech

94-017



照射試験片の再生技術の開発
平成5年度原研・IHI共同研究成果報告書

1994年9月

鬼沢邦雄・深谷 清・西山裕孝・鈴木雅秀・柴田勝之・鴻坂厚夫
貝原正一郎*・中村照美*・佐藤 彰*・吉田和夫*・酒井啓一*

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所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, Tokaimura, 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

照射試験片の再生技術の開発
平成5年度原研・IHI共同研究成果報告書

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

鬼沢 邦雄・深谷 清⁺・西山 裕孝⁺⁺・鈴木 雅秀
柴田 勝之・鴻坂 厚夫・貝原正一郎^{*}・中村 照美^{*}
佐藤 彰^{*}・吉田 和夫^{*}・酒井 啓一^{*}

(1994年8月8日受理)

原子炉の構造基準では、原子炉圧力容器鋼の照射脆化評価のため監視試験が規定されている。しかしながら、原子力プラントの供用期間を延長する場合、監視試験用試験片が不足する可能性がある。そのため、試験済みのシャルピー衝撃試験片を有効に利用し、シャルピー試験片を再生する手法として、表面活性化接合法の適用性を検討した。試験片再生法に関しては、試験片の有効利用のため接合部の溶融領域・熱影響部を狭くすること、及び照射脆化の回復を防止するため試験片の温度上昇を極力低く抑えることが重要課題である。表面活性化接合法では、真空中で回転摩擦を用いて表面を活性化することにより、原理的には試験片を溶融させずに低温で接合させることが可能である。

原子炉圧力容器用 ASTM A533B-1 鋼を用いて、表面活性化接合法によるシャルピー衝撃試験片再生法の基礎的検討を行った。この結果から、接合部近傍の組織変化領域の幅を 3 mm (接合界面から片側 1.5 mm) 以下、照射温度以上に上昇する領域の幅を 6 mm (片側 3 mm) 以下に抑えることができることがわかった。また、接合したシャルピー試験片から遷移温度を十分評価できる可能性が示された。これらから、表面活性化接合法が他の溶接による接合法と比較して、より優れた試験片再生方法であることが確認できた。

本研究は、日本原子力研究所と石川島播磨重工業株式会社との共同研究として実施したものである。
東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2-4

+ 高温工学部

++ 企画室

* 石川島播磨重工業(株)

Development of Reconstitution Technique of Irradiated Specimen
- Progress Report for FY1993 on Cooperated Research between JAERI and IHI -

Kunio ONIZAWA, Kiyoshi FUKAYA⁺, Yutaka NISHIYAMA⁺⁺, Masahide SUZUKI
Katsuyuki SHIBATA, Atsuo KOUSAKA, Shoichiro KAIHARA^{*}
Terumi NAKAMURA^{*}, Akira SATO^{*}, Kazuo YOSHIDA^{*} and Keiichi SAKAI^{*}

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

(Received August 8, 1994)

Regulatory codes require the surveillance test to evaluate the irradiation embrittlement of reactor pressure vessel steel during operation. However, it is anticipated that the number of those specimens is insufficient in case plant life is extended. Reconstitution techniques by electron beam weld, laser weld, arc stud weld as well as surface-activated joining (SAJ) have been investigated for the re-use of un-deformed parts from tested Charpy impact specimen. The important items for the reconstitution technique are to reduce the width of heat affected zone to maximize the material available, and to lower the maximum temperature of specimen during joining process to preclude the recovery of radiation damage. SAJ can be achieved from a removal of surface contamination by rotating one-side specimen in vacuum with applying modest friction force. Therefore, SAJ method is expected to be suitable for specimen reconstitution in view of material heating and melting.

This paper describes preliminary study to develop Charpy specimen reconstitution technique using reactor pressure vessel steel, A533B-1, by SAJ method. Test results showed that the SAJ method had a capability of joining affected zone less than

This study was performed as a cooperated research between Japan Atomic Energy Research Institute and Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

⁺ Department of High Temperature Engineering

⁺⁺ Office of Planning

^{*} Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

1.5 mm in half width, and over-temperature region less than 3 mm in half width above reactor operating temperature during joining. It was also found that transition temperature from reconstituted Charpy specimen could be evaluated. It can be concluded from these results that SAJ method is attractive technique for reconstituting the irradiated surveillance specimen.

Keywords ; Surveillance, Irradiation Embrittlement, Charpy Specimen,
Reconstitution, Surface-activated Joining,
Transition Temperature

目 次

1. はじめに	1
1.1 背 景	1
1.2 共同研究の目的及び検討内容	2
2. 試験内容	3
2.1 接合装置・条件	3
2.2 供 試 材	4
2.3 試験条件	4
3. 試験結果	5
3.1 接合時の温度分布	5
3.2 接合部の組織	6
3.3 接合材の機械的性質	6
4. 考 察	8
4.1 接合条件の評価	8
4.2 他の接合法との比較	9
4.3 照射済みシャルピー試験片再生への適用性	11
5. ま と め	11
6. 今後の計画	12
謝 辞	13
参考文献	14
付録A 金相写真	38
付録B 試験結果生データ集	41
付録C 日本原子力学会 1994年春の年会口頭発表用予稿及びOHP集	51

Contents

1. Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Objectives and Items of Cooperated Research	2
2. Experiments	3
2.1 Equipments and Conditions for Joining	3
2.2 Material	4
2.3 Test Conditions	4
3. Results	5
3.1 Temperature Distribution during Joining	5
3.2 Macro-and Micro-structures of Joined Region	6
3.3 Mechanical Properties of Joined Material	6
4. Discussion	8
4.1 Evaluation of Joining Conditions	8
4.2 Comparison with other Methods	9
4.3 Applicability to Irradiated Charpy Specimen	11
5. Summary	11
6. Future Plan	12
Acknowledgments	13
References	14
Appendix A Metallurgical Photographs	38
Appendix B Datasheets of Mechanical Tests	41
Appendix C Abstract and Presentation Viewgraphs at the 1994 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan	51

1. はじめに

1. 1 背景

原子力プラント供用期間中の安全性・構造健全性を確保するため、省令・告示による構造基準において、安全上最も重要な機器である原子炉圧力容器鋼の照射脆化評価のための監視試験の実施が規定されている。これらの評価基準では、非延性破壊防止の観点から、中性子照射による原子炉圧力容器鋼の延性脆性遷移温度の移行量、あるいは破壊靭性特性を評価することが必要である。このため、供用期間中における原子炉圧力容器鋼の照射脆化を予測評価するため、いくつかの監視試験カプセルが原子炉内に挿入される⁽¹⁾。このカプセルには、通常1カプセルにシャルピー衝撃試験片が各材料毎に12本以上、引張試験片が3本以上装荷される。しかしながら、当初予定していた供用期間を超えて運転を計画する場合、監視試験片の不足が懸念される。また、照射脆化による破壊靭性低下を回復させるために焼なましを実施した場合や、予測評価に影響を与える変更がなされた場合にも、監視試験片の不足が考えられる。監視試験片の不足を補うための対策として、現有の監視試験片をより有効に利用することが適当である。このためには、試験後の試験片の未変形部分または未試験の試験片を細断したものを、類似材料と接合して再度試験片として使用する試験片再生、及び試験片サイズを小さくすることにより試験片数を増す試験片小型化の2通りが考えられる。このうち、シャルピー衝撃試験片の再生については、すでに未照射試験片による検討が行われており、各種溶接法による試験片再生技術が開発されている。また、照射試験片への再生法の適用は、現在検討が進められているところである。一方、試験片の小型化についても、数多くの研究機関で検討されているが、未だ統一的な試験方法の確立には至っていない。したがって、試験方法として既存の試験法の規格を適用でき、しかもこれまでの試験結果と直接対比できる試験片再生について、照射試験片への適用技術の確立が望まれている。図1にこの監視試験片再生の考え方を示す。

これまでに開発されている試験片再生法には、アークスタッド溶接^(2, 3)、電子ビーム溶接⁽⁴⁻⁶⁾、レーザー溶接⁽⁷⁾等がある。溶接接合に伴う溶融部+熱影響部の幅が狭いことは試験片有効利用の観点から最も重要であるが、この観点ではこれら溶接法は最善の条件設定によりある程度達成できている。しかし、これら溶接接合による方法を照射（監視）

試験片再生へ適用するに当たっては、材料を融点以上に加熱して接合するため、加熱による照射脆化の回復を防止すること、及び溶融部と熱影響部が試験片の変形挙動に及ぼす影響を低減することが重要な課題となっている。

このような背景の下で、より革新的な試験片再生技術の確立をめざして、常温真空中で表面を活性化することにより接合する表面活性化接合技術^(8, 9)に着目し、試験片再生への適用性の検討を行うこととした。試験片再生法の確立における技術的な目標は、次の2点である。

- ・ 試験片の有効利用のため接合部溶融領域・熱影響部の幅が狭いこと
- ・ 照射脆化の回復防止のため試験片の温度上昇が極力低く抑えられること

1. 2 共同研究の目的及び検討内容

前述のように、本研究では、常温接合法として表面活性化接合法の試験片再生への適用性を検討する。

溶接を含めた種々の接合法の中で、表面活性化接合法の位置付けを入熱量（接合温度）及び変形量の観点で表したのが図2である。図3には表面活性化接合法の原理を示す。材料の表面には常温中でも数十ナノメータ程度の酸化皮膜が存在し、吸着ガス、油、水などの汚染物質でおおわれている。そのため、常温で接合面を接触させても、汚染物質により原子同士の密着が妨げられ接合には至らない。常温で接合を行うためには、接合を阻止する汚染物質を取り除いて清浄面を形成（活性化）する必要がある。この清浄面同士を原子間引力が働く距離まで接近させると、外部から過大な熱や変形を加えることなく、常温でも原子同士が直接結びつきあって接合ができる。具体的には、図4に示すように、材料表面の汚染層を摩擦や機械的研磨によって除去して活性化し、弾性限以下の加圧力により接合する。この活性化及び接合過程は、活性化した面が再汚染されないように真空中で行う必要がある。この接合法を適用することにより、原理的には、試験片再生に必要な前述の2つの課題解決が期待できる。

本表面活性化接合法は、石川島播磨重工業株式会社（IHI）において発案され、すでに特許申請がなされている技術である。この方法を照射（監視）試験片の再生へ適用するに当たっては、IHIと照射試験の実施に関する設備・経験を有している日本原子力研究所（原研）とで協力して検討・評価し、技術開発を進めることで合意し、共同研究を開始

した。

この共同研究は、平成5年度から開始し、まず1年間にわたり現有装置により接合法の予備的な検討を行うこととした。平成5年度における主な検討内容は次の通りである。

- ・接合時の接合面近傍の温度測定
- ・接合部の金相観察及び硬さ分布測定
- ・引張試験による接合部健全性の確認
- ・シャルピー衝撃試験結果に及ぼす接合部の影響確認

表1に平成5年度におけるIHI-原研共同研究の試験検討スケジュールを示す。

2. 試験内容

2.1 接合装置・条件

今回、表面活性化接合を検討評価するために使用した接合装置は、局部真空チャンバーを有する摩擦圧接装置である。図5に接合装置の模式図及び外観写真を示す。この装置は最大荷重50トンの容量を有する大型装置のため、今回対象とするシャルピー試験片（断面10mm×10mm）のような小型試験片に対しては、低荷重で加圧力を制御することが困難である。そこで、シャルピー試験片よりも断面積の大きな試験体を用い、圧力を低く抑えて接合が可能なようにした。接合試験体の形状及び寸法を図6に示す。

接合に当たってはまず、試験体の一方を固定し、もう一方を回転させる。そして短時間両者の接合面を接触させて回転摩擦を与え、表面を活性化した後、回転を止めてアプセット加圧を行う。この際の回転摩擦力、回転数、回転摩擦時間、アプセット力、アプセット加圧時間、及びチャンバー内圧力を表2に示す。図7に接合時の回転数と摩擦力、アプセット加圧力の関係を示す。

また、真空度の影響を検討するため、超高真空接合装置も一部使用した。この装置の場合、荷重容量が2トンと非常に小さく接合試験体の断面積を大きくとれないため、片側の試験体先端形状を円錐型とし、先端部の直径を2mmとした。

接合したすべての試験体について、水浸超音波探傷法により接合状況の非破壊検査を行った。この検査では、試験体の端面から超音波を入射し、接合面からの反射波を測定する

した。

この共同研究は、平成5年度から開始し、まず1年間にわたり現有装置により接合法の予備的な検討を行うこととした。平成5年度における主な検討内容は次の通りである。

- ・接合時の接合面近傍の温度測定
- ・接合部の金相観察及び硬さ分布測定
- ・引張試験による接合部健全性の確認
- ・シャルピー衝撃試験結果に及ぼす接合部の影響確認

表1に平成5年度におけるIHI-原研共同研究の試験検討スケジュールを示す。

2. 試験内容

2.1 接合装置・条件

今回、表面活性化接合を検討評価するために使用した接合装置は、局部真空チャンバーを有する摩擦圧接装置である。図5に接合装置の模式図及び外観写真を示す。この装置は最大荷重50トンの容量を有する大型装置のため、今回対象とするシャルピー試験片（断面10mm×10mm）のような小型試験片に対しては、低荷重で加圧力を制御することが困難である。そこで、シャルピー試験片よりも断面積の大きな試験体を用い、圧力を低く抑えて接合が可能なようにした。接合試験体の形状及び寸法を図6に示す。

接合に当たってはまず、試験体の一方を固定し、もう一方を回転させる。そして短時間両者の接合面を接触させて回転摩擦を与え、表面を活性化した後、回転を止めてアプセット加圧を行う。この際の回転摩擦力、回転数、回転摩擦時間、アプセット力、アプセット加圧時間、及びチャンバー内圧力を表2に示す。図7に接合時の回転数と摩擦力、アプセット加圧力の関係を示す。

また、真空度の影響を検討するため、超高真空接合装置も一部使用した。この装置の場合、荷重容量が2トンと非常に小さく接合試験体の断面積を大きくとれないため、片側の試験体先端形状を円錐型とし、先端部の直径を2mmとした。

接合したすべての試験体について、水浸超音波探傷法により接合状況の非破壊検査を行った。この検査では、試験体の端面から超音波を入射し、接合面からの反射波を測定する

ことにより、未接合部分の有無を判断する。この検査結果に基づき、試験体からシャルピー衝撃試験片を採取する断面に未接合部分が無いことを確認した。

2. 2 供試材

本研究に用いた供試材は、原研が IAEAとの鋼材照射共同研究において使用した圧力容器鋼材（J R Q）である。板厚 225 mm を有するこの鋼材の $\frac{1}{2}$ t から試験片を採取した。本鋼材を使用したのは、本鋼材が IAEA 共同研究で共通鋼材として使用され、機械的特性に関するデータが照射材も含めて非常に豊富であるためである⁽¹⁰⁾。

表 3 に本鋼材の化学成分及び機械的特性のミルシート値を示す。この受領材に対して、強度レベルを変化させることにより、実際の照射材を再生する場合を模擬した熱処理材も作製し、試験に供した。この熱処理材の製作目標は、受領材より 200 MPa 以上高い降伏応力（ビッカース硬さでは 70 以上）を有する鋼材である。熱処理条件としては、890 °C 焼入れの後に行う焼戻しの温度を変えることにより目標の強度を得ることとした。3通りの熱処理（590 °C、620 °C 及び 640 °C、2 時間保持、その後炉冷）を試行し、硬さ測定の結果、590 °C 焼戻しの材料を熱処理材として使用することとした。

2. 3 試験条件

接合時の温度測定に当たっては、できる限り 3 次元的な分布を把握できるように、熱電対を配置した。試験体の回転中心から半径方向 5 mm の部分では、接合面から 1、2、3 及び 4 mm の距離で供試材の温度を測定した。また、接合面から 1 mm 離れた供試材の部分では、試験体の回転中心、中心から 3 mm、5 mm 及び 7、7 mm の 4箇所で測定した。これら熱電対の配置を図 8 に示す。熱電対は 2.5 mm ϕ の穴に保護管を通して差し込み、先端をパーカッション溶接により固定した。

接合した試験体の中央断面で切断し、接合部の金相観察を行った。観察に当たっては、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡を使用した。

接合部近傍の硬さ分布の測定は、マイクロビックアース試験機で、4.9 N (500 gf) の荷重で実施した。この条件で、本供試材の受領材の硬度レベル ($H_V \approx 200$) の場合、圧痕の大きさは約 70 μ m のため、測定点の間隔は 0.3 mm とした。

接合部の健全性確認のための引張試験は、JIS 13B型の平板試験片を使用し、室温で実施した。

計装シャルピー衝撃試験は、図9に示すように、接合した試験体から接合面を一箇所有するシャルピー試験片を採取し、接合無し試験片との比較を行った。試験結果に及ぼす接合部の影響について、接合面からVノッチまでの距離をパラメータとして評価するため、Vノッチから接合面までの距離Lは、3通り($L=3\text{mm}$ 、 5mm 及び 8mm)とした。熱処理材と受領材の接合試験片においては、Vノッチは熱処理材側に加工し、Lは 3mm 及び 5mm の2通りとした。測定項目は、吸収エネルギー、延性破面率、横膨出量に加えて、荷重-変位曲線、横膨出部の変形挙動、及びVノッチ面の変形挙動である。熱処理材と受領材の接合試験片については、延性脆性遷移温度が非常に低いことなどの観点から、上部棚(延性破面率が100%の温度)領域での変形挙動の比較を目的としてシャルピー衝撃試験を実施した。

3. 試験結果

3.1 接合時の温度分布

図10に温度測定結果の1例を示す。図中に示した①～④のデータは、図8(c)に示したとおり、すべて接合面の回転中心から 5mm の距離で、それぞれ境界面から 1mm ～ 4mm (目標値)離れた点で熱電対により測定したデータに対応する。摩擦圧接の開始から約0.5秒～1秒の間に最高温度に達し、その後温度は低下しており、温度上昇が非常に短時間であることがわかる。表4に温度測定結果として、熱電対の位置(実測値)、最高温度最高温度までの時間を示す。熱電対を挿入した部分の接合後の状況を図11に示す。熱電対の先端位置を確認するため、このようにすべての穴を切断し、接合面からの距離を測定した。熱電対用の穴が境界面に近い場合、接合面側で変形が生じていたが、試験片の接合はすべての場合健全であった。図12は、接合面からの距離の関数として、接合面回転中心から 5mm の距離における最高温度をプロットしたものである。測定データは3点と少ないが、これらのデータから推測する限り、境界面から 3mm 以上離れた点では、原子炉の運転温度(290°C)以上には上昇しないと考えられる。

接合部の健全性確認のための引張試験は、JIS 13B型の平板試験片を使用し、室温で実施した。

計装シャルピー衝撃試験は、図9に示すように、接合した試験体から接合面を一箇所有するシャルピー試験片を採取し、接合無し試験片との比較を行った。試験結果に及ぼす接合部の影響について、接合面からVノッチまでの距離をパラメータとして評価するため、Vノッチから接合面までの距離Lは、3通り（L=3mm、5mm及び8mm）とした。熱処理材と受領材の接合試験片においては、Vノッチは熱処理材側に加工し、Lは3mm及び5mmの2通りとした。測定項目は、吸収エネルギー、延性破面率、横膨出量に加えて、荷重-変位曲線、横膨出部の変形挙動、及びVノッチ面の変形挙動である。熱処理材と受領材の接合試験片については、延性脆性遷移温度が非常に低いことなどの観点から、上部棚（延性破面率が100%の温度）領域での変形挙動の比較を目的としてシャルピー衝撃試験を実施した。

3. 試験結果

3.1 接合時の温度分布

図10に温度測定結果の1例を示す。図中に示した①～④のデータは、図8(c)に示したとおり、すべて接合面の回転中心から5mmの距離で、それぞれ境界面から1mm～4mm（目標値）離れた点で熱電対により測定したデータに対応する。摩擦圧接の開始から約0.5秒～1秒の間に最高温度に達し、その後温度は低下しており、温度上昇が非常に短時間であることがわかる。表4に温度測定結果として、熱電対の位置（実測値）、最高温度最高温度までの時間を示す。熱電対を挿入した部分の接合後の状況を図11に示す。熱電対の先端位置を確認するため、このようにすべての穴を切断し、接合面からの距離を測定した。熱電対用の穴が境界面に近い場合、接合面側で変形が生じていたが、試験片の接合はすべての場合健全であった。図12は、接合面からの距離の関数として、接合面回転中心から5mmの距離における最高温度をプロットしたものである。測定データは3点と少ないが、これらのデータから推測する限り、境界面から3mm以上離れた点では、原子炉の運転温度（290°C）以上には上昇しないと考えられる。

3. 2 接合部の組織

接合部分の金属組織を図13～図15に示す。図13は受領材同士の接合材である。接合面の両側に明瞭に組織変化領域が観察される。接合界面のごく近傍では、図14に示すように、微細なマルテンサイト組織となっている。最も温度が高くなつたと考えられる接合面領域においても、受領材が溶融した形跡は認められない。また、マルテンサイト領域の外側には、塑性流動領域（組織の変化はないが、受領材の析出物層が流れている領域）が観察される。これらマルテンサイト領域+塑性流動領域の幅は、回転中心部分で約2mm（接合界面から片側約1mm）、最も広い部分（中心から半径方向に5～8mm）で約3mm（接合界面から片側約1.5mm）である。図15に受領材と熱処理材の接合面近傍の組織写真を示す。熱処理材側でやや塑性流動領域が狭いものの、接合状況は受領材同士と同様である。すなわち、接合界面近傍はマルテンサイト領域、その外側に塑性流動領域が広がっている。受領材同士の場合と同一の接合条件で、受領材と強度の異なる熱処理材とをこのように良好に接合ができたことから、照射材を再生する際に非照射材を利用する場合のように、強度が異なる材料の接合に対しても、今回のように受領材、すなわち非照射材に対する接合条件が適用できると推定される。

3. 3 接合材の機械的性質

（1）硬さ試験結果

図16に受領材同士の接合材の接合界面近傍のマイクロビッカース硬さ分布を示す。受領材の平均値約200に対し、接合面近傍では400以上に達する大きな硬さの上昇が認められた。硬さ分布から硬化領域の幅を求めるとき、回転の中心部分で約2mm（接合界面から片側約1mm）、中心から半径方向に5mm離れた部分で約3mm（接合界面から片側約1.5mm）である。この硬化領域は、前述の金相観察から認められたマルテンサイト領域+塑性流動領域とよく対応している。

図17に受領材と熱処理材の接合材における硬さ分布を示す。熱処理材の平均硬さは、約270であり受領材に対して高い値となっているが、接合面近傍では受領材同士の接合部と同様に、400を超える硬化領域が認められる。硬化領域の幅は、受領材同士の接合と同様に最大で約3mm（接合界面から片側約1.5mm）である。

超高真空中 (3×10^{-6} Pa) で接合を行った接合材界面近傍の硬さ分布を図 1-8 に示す。今回実施した超高真空接合試験は、接合条件が不十分であり、完全な接合は得られなかった。この硬さ分布は、接合が確認された箇所で測定したものである。接合界面近傍で硬さは最高 380 程度まで上昇し、その硬化領域の幅は約 1 mm (接合界面から片側約 0.5 mm) であった。組織観察からは、マルテンサイトは確認されず、この硬化は塑性流動のみによるものであると考えられる。

(2) 引張試験結果

接合した試験片の引張試験結果を表 5 に示す。また、引張試験前試験後の試験片破断状況を図 1-9 に示す。受領材同士、及び受領材 - 熱処理材の接合試験片とともに、引張試験片はすべて接合部以外で破断しており、接合部の強度が十分高いことを確認した。

(3) シャルピー衝撃試験結果

図 2-0 に V ノッチから接合面までの距離 $L = 3$ mm、 5 mm 及び 8 mm の試験片と接合無し試験片とのシャルピー衝撃試験結果 (吸収エネルギー) を示す。50 J 以下の延性脆性遷移領域では、接合試験片で $L = 3$ mm の場合でも、接合無し試験片との差はほとんど現れない。すなわち、41 J レベルの遷移温度の評価は十分可能であると考えられる。吸収エネルギーが増加し、上部棚領域に達すると、 $L = 3$ 及び 5 mm の場合には接合の影響が認められる。 $L = 3$ mm の場合、吸収エネルギーの低下量は、約 20 J である。一方、横膨出量に関しては、図 2-1 に示すとおり、接合の影響は吸収エネルギーの場合と比較して小さい。なお、破面率に関しては、接合の影響はほとんど見られなかった。

熱処理材と受領材との接合試験片は、上部棚領域でのみ試験を行った。図 2-2 に $L = 3$ 及び 5 mm の場合のシャルピー吸収エネルギーの比較を示す。図から明らかなように、接合の影響は受領材の場合ほど顕著ではなかった。これは、接合の影響が吸収エネルギーの絶対値の増加とともに大きくなることから、熱処理材の上部棚吸収エネルギー (約 150 J) が受領材 (約 200 J) に比較して低いことが原因であると考えられる。

(4) シャルピー試験片の変形状況

吸収エネルギーの低下に対する接合の影響をより詳しく調べるために、破断試験片を用いて、横膨出部の変形挙動の比較を行った。この比較に当たっては、最も変形が大きく特徴

が顕著に現れる延性破面率 100 % の試験片を用いて測定を行った。図 23 に横膨出挙動の比較を示す。L = 8 mm の場合は、接合無し試験片と全く同じ変形状況であることがわかる。L = 5 mm の場合は、接合界面近傍の硬化領域において変形が抑えられていることがわかる。L = 3 mm の場合は、横膨出の測定が可能な範囲においては、ほとんど変形しておらず、試験片の変形が極端に抑えられていた。図 24 に L = 5 及び 8 mm の試験片について、硬化領域の縁で変形が抑制されている状況を示す。図 25 には熱処理材と受領材との接合試験片の場合の横膨出挙動を示す。熱処理材は接合無しの場合にも変形が少ないとから、L = 5 mm の場合には、横膨出挙動の差はほとんど現れていない。L = 3 mm の場合も、受領材同士の接合の場合と比較すると、接合による変形の抑制効果は少なかった。

(5) 荷重一変位曲線

シャルピー衝撃試験時に得られた荷重一変位曲線に及ぼす接合の影響を調べた。図 26 に受領材同士の接合試験片で延性破面率 100 % の試験片に対する荷重一変位曲線を示す。接合無し試験片、L = 8 mm の試験片に対する曲線は、全く同じである。L = 5 mm の場合、わずかに最高荷重後の荷重低下挙動が異なる傾向があり、荷重低下が早い。L = 3 mm の場合は、初期の全面降伏から挙動が異なる。すなわち、降伏荷重及び最高荷重値は高くなり、最高荷重時の変位が小さくなるとともに、荷重低下が早い。このように、接合の影響は、接合面が V ノッチに近い場合、試験片の横膨出部の変形挙動のみならず、全体的な荷重一変位挙動にも現れることがわかった。

熱処理材と受領材との接合試験片の場合の荷重一変位曲線を図 27 に示す。受領材同士の場合と比較して、L = 3 mm の場合にもあまり大きな差は現れていない。これは、熱処理材の変形が元々受領材より少なく、したがって接合部の硬化領域により阻止される変形が少ないためと考えられる。すなわち、接合の影響は、対象とする材料の塑性変形特性に依存することがわかる。

4. 考 察

4.1 接合条件の評価

前述の金相観察結果及び硬さ分布測定結果から、接合部近傍では鋼材のオーステナイト

が顕著に現れる延性破面率100%の試験片を用いて測定を行った。図23に横膨出挙動の比較を示す。L=8mmの場合は、接合無し試験片と全く同じ変形状況であることがわかる。L=5mmの場合は、接合界面近傍の硬化領域において変形が抑えられていることがわかる。L=3mmの場合は、横膨出の測定が可能な範囲においては、ほとんど変形しておらず、試験片の変形が極端に抑えられていた。図24にL=5及び8mmの試験片について、硬化領域の縁で変形が抑制されている状況を示す。図25には熱処理材と受領材との接合試験片の場合の横膨出挙動を示す。熱処理材は接合無しの場合にも変形が少ないとから、L=5mmの場合には、横膨出挙動の差はほとんど現れていない。L=3mmの場合も、受領材同士の接合の場合と比較すると、接合による変形の抑制効果は少なかった。

(5) 荷重一変位曲線

シャルピー衝撃試験時に得られた荷重一変位曲線に及ぼす接合の影響を調べた。図26に受領材同士の接合試験片で延性破面率100%の試験片に対する荷重一変位曲線を示す。接合無し試験片、L=8mmの試験片に対する曲線は、全く同じである。L=5mmの場合、わずかに最高荷重後の荷重低下挙動が異なる傾向があり、荷重低下が早い。L=3mmの場合は、初期の全面降伏から挙動が異なる。すなわち、降伏荷重及び最高荷重値は高くなり、最高荷重時の変位が小さくなるとともに、荷重低下が早い。このように、接合の影響は、接合面がVノッチに近い場合、試験片の横膨出部の変形挙動のみならず、全体的な荷重一変位挙動にも現れることがわかった。

熱処理材と受領材との接合試験片の場合の荷重一変位曲線を図27に示す。受領材同士の場合と比較して、L=3mmの場合にもあまり大きな差は現れていない。これは、熱処理材の変形が元々受領材より少なく、したがって接合部の硬化領域により阻止される変形が少ないためと考えられる。すなわち、接合の影響は、対象とする材料の塑性変形特性に依存することがわかる。

4. 考察

4.1 接合条件の評価

前述の金相観察結果及び硬さ分布測定結果から、接合部近傍では鋼材のオーステナイト

変態温度（727°C）以上に昇温したと推定される。金相写真からは、温度上昇はごくわずかな領域（接合界面から片側約0.5mm）であったと考えられるが、温度計測結果から明らかなように、温度上昇が非常に短時間（1秒以内）であり冷却速度が早く、マルテンサイトが形成されたものと考えられる。これは、引張試験で接合部からの破断が1本もなかったことから推察されるように、今回設定した接合条件が、高すぎる接合部強度を与えたことから起きたものと考えられる。このため、接合条件の検討を加え、より低い温度上昇で接合すれば、マルテンサイト組織は形成されないものと考えられる。マルテンサイトが形成されると接合部は高強度となり、試験片の変形挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかになったので、この領域を形成させないことは、接合の影響を低減するために非常に有効である。

また、接合界面近傍のマルテンサイト領域の外側には、塑性流動による硬さ上昇領域も存在した。この部分も幅約2mm（片側約1mmずつ）であり、変形挙動に影響を及ぼすと考えられる。表面活性化接合法の原理に照らして、加圧力の低減、高真空化等の接合条件最適化が必要である。接合条件として、現状の真空度で、より低い回転摩擦力・アプセット加圧力による接合、あるいは超高真空状態では、さらに低圧力での接合が可能であると考えられる。このような条件変更により、前述のマルテンサイト形成は十分防止できるであろうし、塑性流動領域の幅をより狭くすることも可能である。

試験片の変形に及ぼす接合の影響を低減するため、接合部の硬さ上昇を抑制することも有効な方策であろう。これに対しては、例えばアルミニウムやニッケル等の薄膜をインサート材として利用する接合が考えられる。ただし、異材を含む継手となることから、接合後の試験片変形挙動の評価を十分に行う必要がある。

4. 2 他の接合法との比較

A S T M規格⁽¹⁾に示されているように、電子ビーム溶接、スタッド溶接等による試験片接合技術はすでに開発が進められ、試験片再生への適用性が検討されている。

アーチスタッド溶接⁽²⁾及び電子ビーム溶接⁽³⁾により再生したシャルピー試験片の試験結果をそれぞれ図28及び図29に示す。両者ともに、Vノッチから接合面までの距離は5mmである。図から明らかなように、上部棚領域において接合による吸収エネルギー値の大きな

低下が認められる。溶接による接合の場合、材料の溶融が必要なため、組織変化による硬さ上昇は避けられない。したがって、現状では試験片の変形能が低下することを避けられず、接合面をVノッチから遠ざけることが唯一の解決策であると考えられる。この点で表面活性化接合法は、わずかな塑性流動を必要とするだけであり、原理的に変形能に及ぼす影響を非常に小さくすることができる方法として優位性がある。

Klausnitzer & Hofmannは⁽⁵⁾、電子ビーム溶接による試験片再生法について、照射材も含めて報告している。この報告では、上部棚吸収エネルギー値は再生部分が10mm長さの場合、わずかに低下(174J→163J)することが示されている。一方、オリジナルと再生試験片とのシャルピー計装データから求めた降伏荷重($F_{v,y}$)及び最大荷重(F_m)を比較し、再生部分が10mm長さの場合でもほぼ同じ値になることを報告している。ただし、上部棚領域でのデータ数が少なく、 F_m はわずかに低くなっていると見ることもできる。

渡辺ら⁽⁶⁾は電子ビーム溶接により、再生部分長10mmの場合について試験片再生法の検討を行っている。電子ビーム溶接による試験片接合中の温度は、冷却ブロック等のデバイスを用いて極力低下させる努力が必要であること、試験片の変形挙動には接合無し試験片とやや差があるが、シャルピー吸収エネルギーの比較では、上部棚領域までほとんど差が現れないことを報告している。しかしながら、この場合の供試材は、今回の供試材と比較して上部棚吸収エネルギー値が低く、110J程度である(本報告の供試材は200J)。このため、吸収エネルギーの比較では大きな差が現れなかったものと考えられる。図20から明らかなように、110J程度までの材料であれば、本表面活性化接合法による再生試験片($L = 5\text{ mm}$ に相当)も、吸収エネルギー値に大きな変化は現れないと考えられる。

Manahanら⁽⁷⁾は、レーザー溶接による試験片再生を検討している。この報告では、再生部分が10mmの場合、吸収エネルギー値は遷移領域上部では接合により低下することが示されている。そのため、41Jレベルでの遷移温度の評価を中心に検討を進めることとしている。また、Vノッチ面に垂直な方向への塑性域の広がりに着目し、A302B鋼に対し、上部棚領域では再生部分が15mm以上必要であると結論している。しかしながら、塑性域の大きさと吸収エネルギーとの対応や、溶接により塑性変形が阻止された場合の影響は、検討されていない。本表面活性化接合法について、今後最適条件の検討を進め、塑性域の広がりと接合部の関係等を明らかにすることにより、上部棚領域での適用性のみならず再生部分の寸法の小型化に向けた検討が必要である。

4. 3 照射済みシャルピー試験片再生への適用性

3. 1節に述べたように、表面活性化接合中の温度測定結果から、接合面から3mm離れば照射温度(290°C)以下であることが確認された。試験片は本来照射脆化度を測定するためのものであり、接合中に温度上昇により脆化が回復することは防止しなければならない。アーカスラトド溶接⁽²⁾、電子ビーム溶接⁽⁵⁾及びレーザー溶接⁽⁷⁾と今回の表面活性化接合法との接合中の最高温度測定結果の比較を図30に示す。冷却ブロック等を用いたこれら溶接接合の結果においては、温度上昇域の幅は合計で4mm程度となる。一方、表面活性化接合法は、今回最適な接合条件ではなく、とくに強制冷却対策も考慮していないにも関わらず、温度の影響を受ける領域の幅は接合面から片側約3mm以下であった。照射材への適用性の観点では、表面活性化接合法が最も適しているといえる。

シャルピー試験片を再生する場合の利点として、再生する部分の長さを10mmとすると、再利用材の寸法は $10 \times 10 \times 10$ mm³の立方体となり、オリジナル試験片のVノッチの方向性を変更することが可能となる。そこで、再生部分の長さを10mm、すなわちVノッチから接合面までの距離が5mmと仮定すると、表面活性化接合法の場合、Vノッチ面から2mmまでの領域は温度の影響を受けない。したがって、脆性破壊の割合が大きく、変形領域が2mmとなる温度より低温領域では、照射脆化度を測定する上で問題は生じない。一方、他の溶接法では、この変形許容領域の幅が1mmとなり、使用可能な温度領域がかなり低い範囲に制限されることとなる。表面活性化接合法の場合、接合条件を今後最適化することにより、さらに熱影響を小さくすることが可能であり、さらに高い温度まで照射脆化評価に使用できることと考えられる。加えて、表面活性化接合時に試験片の温度が照射温度以上に上昇している時間はわずか1秒程度である。このような短時間の温度上昇による照射脆化の回復に及ぼす影響が、無視できるほど小さければ、照射脆化評価への適用性はさらに広がることとなろう。

5. まとめ

試験済みのシャルピー衝撃試験片を有効に利用し、シャルピー試験片を再生する手法として、表面活性化接合法の適用性を検討した。原子炉圧力容器用鋼材の予備的接合試

4. 3 照射済みシャルピー試験片再生への適用性

3. 1節に述べたように、表面活性化接合中の温度測定結果から、接合面から3mm離れば照射温度(290°C)以下であることが確認された。試験片は本来照射脆化度を測定するためのものであり、接合中に温度上昇により脆化が回復することは防止しなければならない。アーカスカット溶接⁽²⁾、電子ビーム溶接⁽⁵⁾及びレーザー溶接⁽⁷⁾と今回の表面活性化接合法との接合中の最高温度測定結果の比較を図30に示す。冷却ブロック等を用いたこれら溶接接合の結果においては、温度上昇域の幅は合計で4mm程度となる。一方、表面活性化接合法は、今回最適な接合条件ではなく、とくに強制冷却対策も考慮していないにも関わらず、温度の影響を受ける領域の幅は接合面から片側約3mm以下であった。照射材への適用性の観点では、表面活性化接合法が最も適しているといえる。

シャルピー試験片を再生する場合の利点として、再生する部分の長さを10mmとすると、再利用材の寸法は $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ の立方体となり、オリジナル試験片のVノッチの方向性を変更することが可能となる。そこで、再生部分の長さを10mm、すなわちVノッチから接合面までの距離が5mmと仮定すると、表面活性化接合法の場合、Vノッチ面から2mmまでの領域は温度の影響を受けない。したがって、脆性破壊の割合が大きく、変形領域が2mmとなる温度より低温領域では、照射脆化度を測定する上で問題は生じない。一方、他の溶接法では、この変形許容領域の幅が1mmとなり、使用可能な温度領域がかなり低い範囲に制限されることとなる。表面活性化接合法の場合、接合条件を今後最適化することにより、さらに熱影響を小さくすることが可能であり、さらに高い温度まで照射脆化評価に使用できることと考えられる。加えて、表面活性化接合時に試験片の温度が照射温度以上に上昇している時間はわずか1秒程度である。このような短時間の温度上昇による照射脆化の回復に及ぼす影響が、無視できるほど小さければ、照射脆化評価への適用性はさらに広がることとなろう。

5. まとめ

試験済みのシャルピー衝撃試験片を有効に利用し、シャルピー試験片を再生する手法として、表面活性化接合法の適用性を検討した。原子炉圧力容器用鋼材の予備的接合試

験を行い、接合部の評価を行うとともに、他の溶接法との比較を行った。以下に得られた結論を列挙する。

1. 表面活性化接合法により、接合部近傍の組織変化・硬化領域の幅を3mm（接合界面から片側約1.5mm）以下に抑えることができる。
2. 接合時の温度上昇領域の幅も、6mm（接合界面から片側約3mm）以下であり、他の溶接接合法と比較して十分狭い範囲に抑えることができる。
3. シャルピー衝撃試験に関する予備的検討結果から、本接合法で接合した試験片により、遷移温度の評価は十分可能である。
4. シャルピー試験片の変形能への影響をなくすため、硬さ低減化、または硬化領域幅の狭小化については、さらなる検討が必要である。

今回使用した接合装置は、加圧力の制御に関して過大容量のため十分すぎる加圧力があり、かつ局部真空装置のため低真空であった。しかしながら、以上の結果から、表面活性化接合法は、監視試験片の再生法として適用可能であり、しかも他の溶接法と比較して十分優位性を有することが確認された。

6. 今後の計画

接合条件の最適化へ向けて、以下の検討を行う予定である。

- ・熱影響の低減を目指した超高真空条件下での接合試験の実施
- ・硬さ低減（変形能低下防止）のためインサート材を利用した接合条件の検討

これらの検討を精度よく実施するため、次の項目についても考慮する。

- ・接合中の温度測定法の高精度化
- ・シャルピー試験片の塑性変形解析
- ・実寸法試験片による接合条件の検討、及びVノッチ両側での接合

さらに、放射化材料を取り扱える試験片再生装置の実用化へ向けて、接合装置及び試験片加工装置の遠隔操作化の設計、検討を行う。

験を行い、接合部の評価を行うとともに、他の溶接法との比較を行った。以下に得られた結論を列挙する。

1. 表面活性化接合法により、接合部近傍の組織変化・硬化領域の幅を3mm（接合界面から片側約1.5mm）以下に抑えることができる。
2. 接合時の温度上昇領域の幅も、6mm（接合界面から片側約3mm）以下であり、他の溶接接合法と比較して十分狭い範囲に抑えることができる。
3. シャルピー衝撃試験に関する予備的検討結果から、本接合法で接合した試験片により、遷移温度の評価は十分可能である。
4. シャルピー試験片の変形能への影響をなくすため、硬さ低減化、または硬化領域幅の狭小化については、さらなる検討が必要である。

今回使用した接合装置は、加圧力の制御に関して過大容量のため十分すぎる加圧力であり、かつ局部真空装置のため低真空であった。しかしながら、以上の結果から、表面活性化接合法は、監視試験片の再生法として適用可能であり、しかも他の溶接法と比較して十分優位性を有することが確認された。

6. 今後の計画

接合条件の最適化へ向けて、以下の検討を行う予定である。

- ・熱影響の低減を目指した超高真空条件下での接合試験の実施
- ・硬さ低減（変形能低下防止）のためインサート材を利用した接合条件の検討

これらの検討を精度よく実施するため、次の項目についても考慮する。

- ・接合中の温度測定法の高精度化
- ・シャルピー試験片の塑性変形解析
- ・実寸法試験片による接合条件の検討、及びVノッチ両側での接合

さらに、放射化材料を取り扱える試験片再生装置の実用化へ向けて、接合装置及び試験片加工装置の遠隔操作化の設計、検討を行う。

また、中性子照射を実施した接合済みシャルピー衝撃試験片の照射後試験を行い、照射脆化の評価に及ぼす接合の影響を検討する。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、日本原子力研究所高温工学部熱エネルギー材料研究室 衛藤室長には、多大なご支援とご協力をいただきましたので、ここに謝意を表します。また、日本原子力研究所原子炉安全工学部機器信頼性研究室 渡辺氏には、有益な知見とご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

また、中性子照射を実施した接合済みシャルピー衝撃試験片の照射後試験を行い、照射脆化の評価に及ぼす接合の影響を検討する。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、日本原子力研究所高温工学部熱エネルギー材料研究室 衛藤室長には、多大なご支援とご協力をいただきましたので、ここに謝意を表します。また、日本原子力研究所原子炉安全工学部機器信頼性研究室 渡辺氏には、有益な知見とご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 「原子炉構造材の監視試験方法」、JEAC 4201-1991、日本電気協会。
- (2) J.S. Perrin et al., "Reconstituted Charpy Impact Specimens", EPRI NP-2759, Research Project 2055-3, Final Report, December 1982.
- (3) E. van Walle et al., "The Reconstitution of Small Remnant Parts of Charpy-V Specimens", presented at SMiRT 11, PCS II, Taipei, Taiwan, August 1991.
- (4) P.R. Burch, "A Pilot Experiment to Determine the Feasibility of Reconstituting Tested Irradiated Charpy V Specimens", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 11, No. 5, Sept. 1983, pp. 312-319.
- (5) E.N. Klausnitzer & G. Hofmann, "Reconstituted Impact Specimens with Small Inserts", ASTM STP 1125, 1992, pp. 76-90.
- (6) 渡辺、私信。
- (7) M.P. Manahan, et al., "Laser Weld Reconstitution of Conventional Charpy and Miniaturized Notch Test (MNT) Specimens", ASTM STP 1204, 1993, pp. 62-76.
- (8) 平野ほか2名、「監視試験片再生のための雰囲気による表面活性化接合法の研究(Ⅰ)」、J25、日本原子力学会「1992年春の年会」。
- (9) 中村・貝原、「表面活性化接合法の開発」、機械材料・材料加工技術講演会、日本機械学会、1993年11月。
- (10) K. Onizawa et al., "JAERI Contribution for the IAEA Coordinated Research Program Phase III on Optimizing of Reactor Pressure Vessel Surveillance Programmes and Their Analysis", JAERI-M 93-201, October, 1993.
- (11) "Standard Guide for Reconstitution of Irradiated Charpy Specimens", E1253-88, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 12.02, ASTM.

表1 IH1-原研共同研究 平成5年度スケジュール

	平成5年 7月 ▽(7/9)	8月	9月 ▼(9/17)	10月	11月	12月 ▽(12/17)	平成6年 1月 ▼(1/28)	2月	3月 3月 ▼(3/25)
<u>素材準備（大切断、ムク加工）</u>									
非 燃 处 理 材									
接合用TP加工									
温度計測の準備（低真空接合）						温度計測（低真空接合）			
接合（低真空接合装置）						硬さ、金相			
接合材 沖孔一角加工						引張り試験片加工、試験			
接合無し 沖孔一試験片製作						VJツチ導入			
シャルビ一衝撃試験							硬さ低減接合条件の検討		
接合用TP加工、接合（超高真空接合装置）							(装置の改造)		
接合（低真空接合装置）						硬さ、金相			
接合用TP加工						硬さ、金相			
接合（低真空接合装置）						接合（低真空接合装置）			
接合材 沖孔一角加工						接合材 沖孔一角加工			
接合無し 試験片製作						接合無し 試験片製作			
シャルビ一衝撃試験						シャルビ一衝撃試験			
原子力学会投稿							Vノジ導入		
原子力学会口頭発表									
その他									

▼：定例会合、 ▽：ワークショップ会合

表2 表面活性化接合条件

回転摩擦力 P ₁ (kgf/mm ²)	回転摩擦 時間 T ₁ (s)	アプロセット加圧力 P ₂ (kgf/mm ²)		77°セット 加圧時間 T ₂ (s)	接合界面 圧力 (Pa)
		(MPa)	(MPa)		
3	29.4	0.3 ~ 0.4	13	127.4	1.0 3×10^{-3}

表3 供試材の化学成分及び機械的性質

鋼材名称	位置	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Si, Al
J R Q	± t	0.16 -0.20	0.25 -0.26	1.35 -1.43	0.019	0.004	0.13 -0.14	0.80 -0.85	0.12 -0.49	0.003 -0.51	0.012
J R Q	± t	4.55 -4.89	6.07 -6.38	2.4 -2.7	7.7						

表4 熱電対取付位置と温度測定結果

試験片番号	場所	接合面からの距離 δ (mm)	中心からの距離 D (mm)	最高温度 (°C)	最高温度までの時間 (s)
TP 6	①	1.8	5	346	0.85
	②	2.5	"	336	0.95
	③	3.5*	"	268	1.00
	④	4.0*	"	193	1.20
TP 12	①	1.0	5	482	0.60
	②	2.0	"	341	0.85
	③	2.5*	"	292	1.50
	④	4.0	"	249	1.60
TP 13	①	1.5	5	295	0.70
	②	2.0	"	249	1.00
	③	3.0	"	212	1.70
	④	4.0	"	193	2.00
TP 4	①	-	-	280	1.00
	②	2.8	0	185	1.25
	③	2.9	3	249	0.85
	④	2.3	7	341	0.70

* : 接合後試験片切断中に熱電対がとれたため、位置は推定

表5 引張試験結果

材 料	試験片番号	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断場所
接合無 母材	1-2	616	24.1	51.6	母材
	3-1	611	22.7	54.6	"
	5-2	615	24.9	50.5	"
接合有 母材-母材	GS12	616	22.0	46.4	母材
	GS9	611	20.7	46.2	"
	GS16A	616	21.0	50.8	"
接合無 熱処理材	9-2	917	17.6	45.6	熱処理材
	9-3	911	17.6	40.4	"
	102-2	919	19.3	49.2	"
接合有 母材-熱処理材	GS83A	623	23.3	53.9	母材
	GS81A	623	20.3	55.5	"

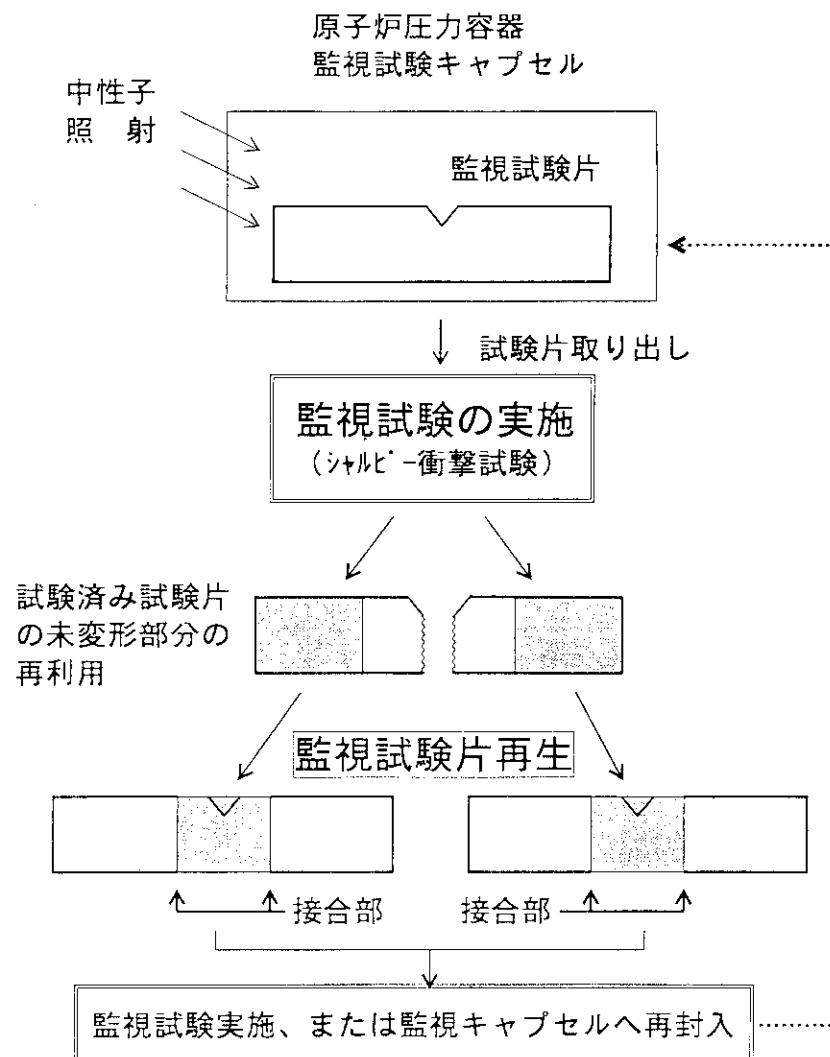


図1 監視試験片再生の考え方

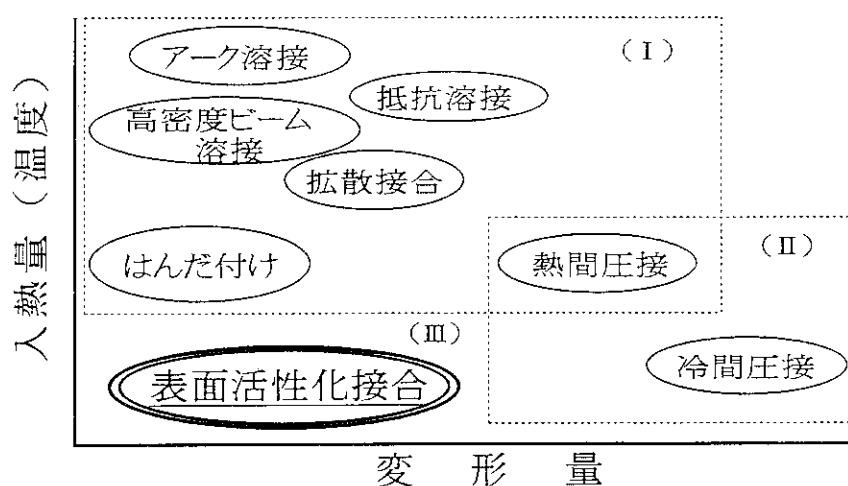


図2 表面活性化接合法の位置付け

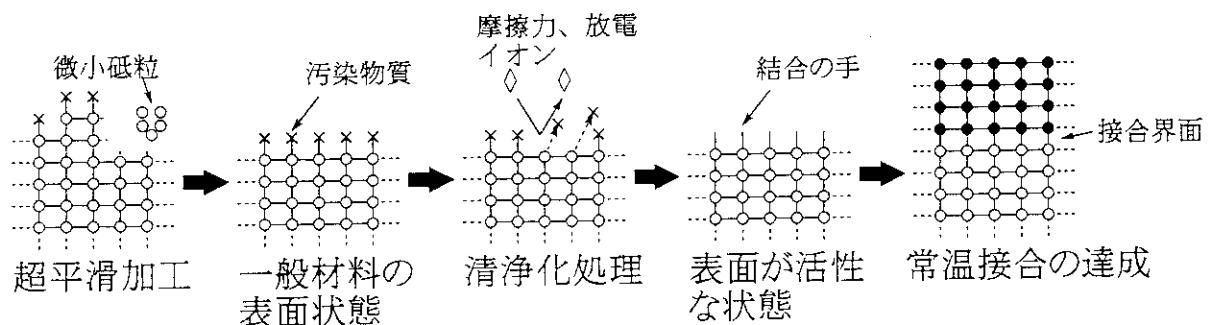


図3 表面活性化接合法の接合原理

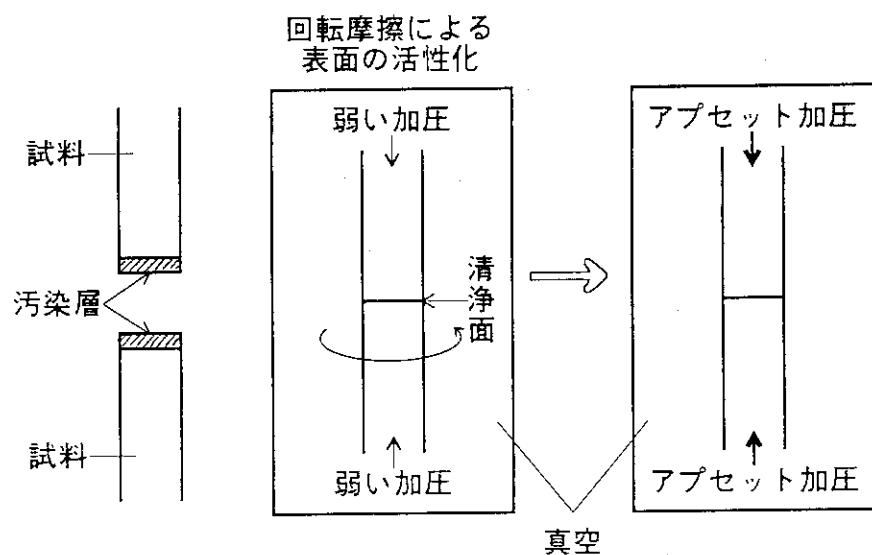


図4 表面活性化接合プロセス

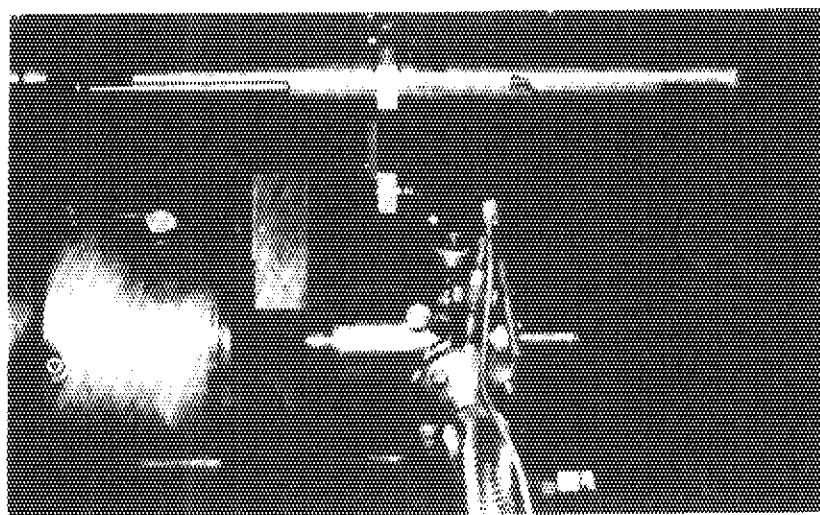
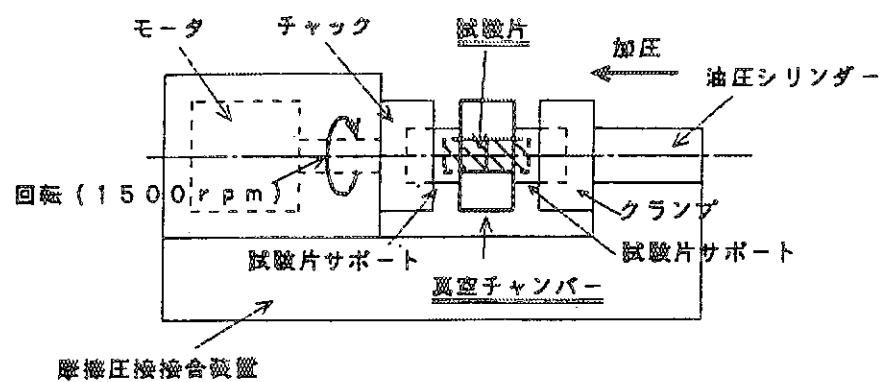


図5 表面活性化接合装置

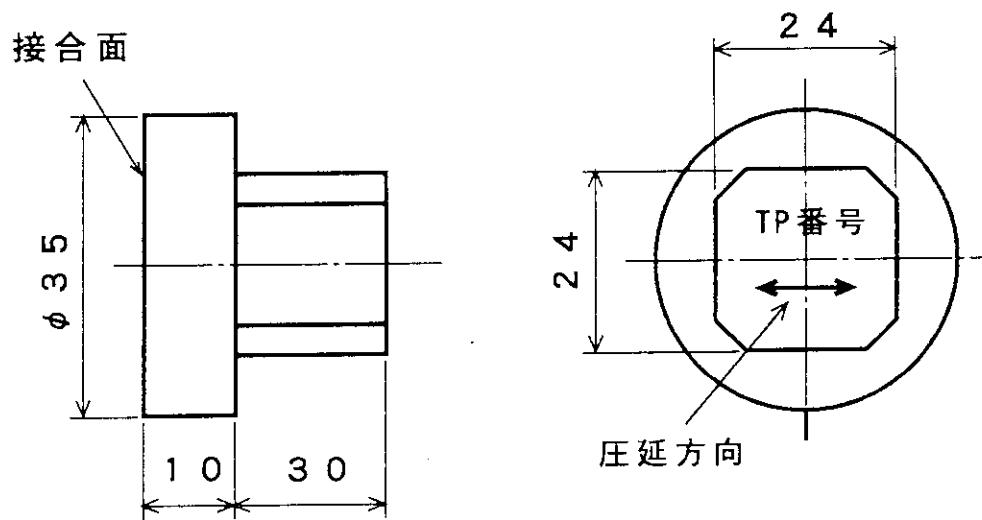


図6 接合試験体の形状及び寸法

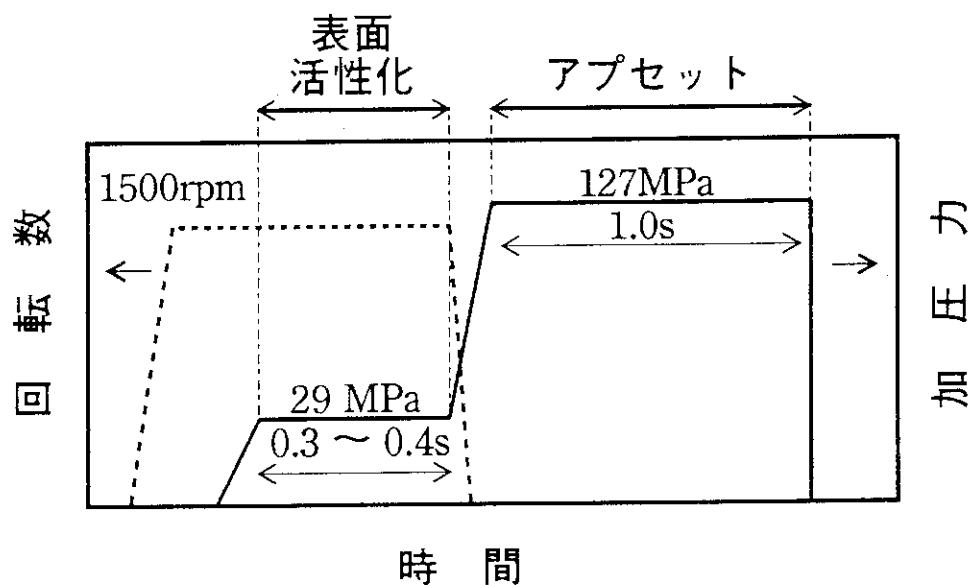
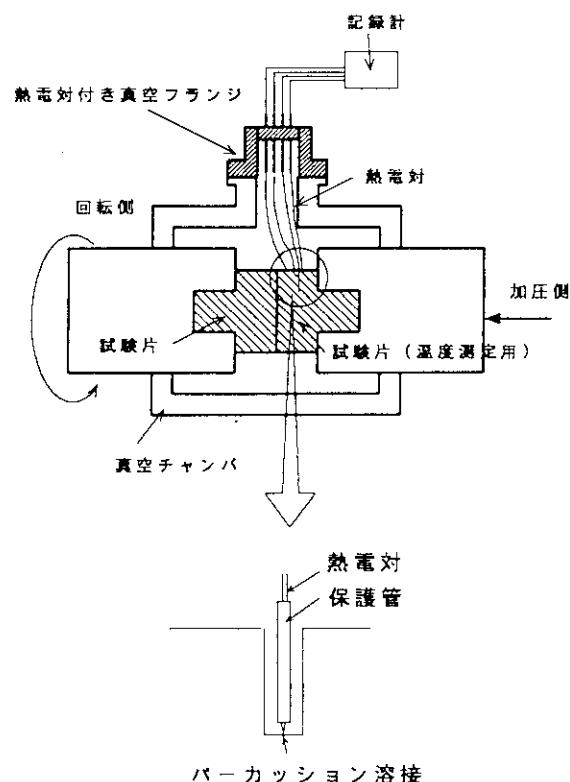
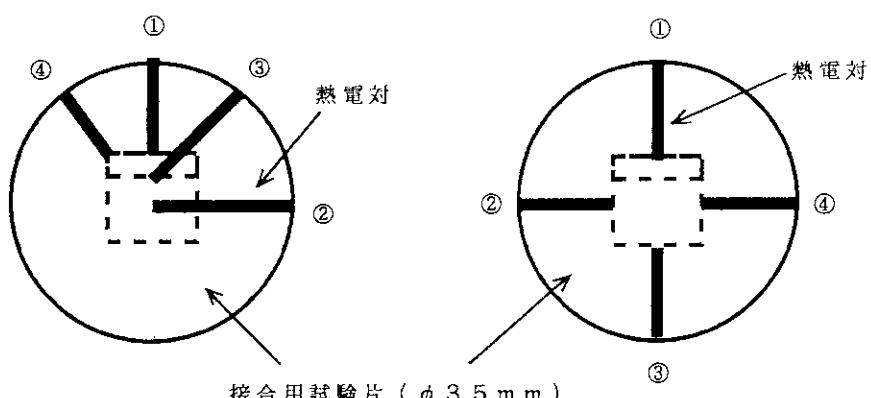


図7 接合条件模式図



(a) 温度測定方法



(b) 接合界面の温度分布測定点
①～④は接合面から1mm離れた面

(c) 接合界面から軸方向の温
度分布測定点

- ① 接合面から1mm離れた面
- ② 接合面から2mm離れた面
- ③ 接合面から3mm離れた面
- ④ 接合面から4mm離れた面

図8 温度測定方法と測定位置

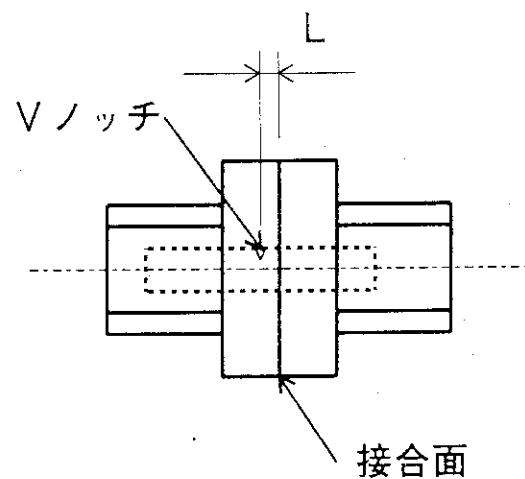


図9 接合した試験体からのシャルピー試験片採取位置

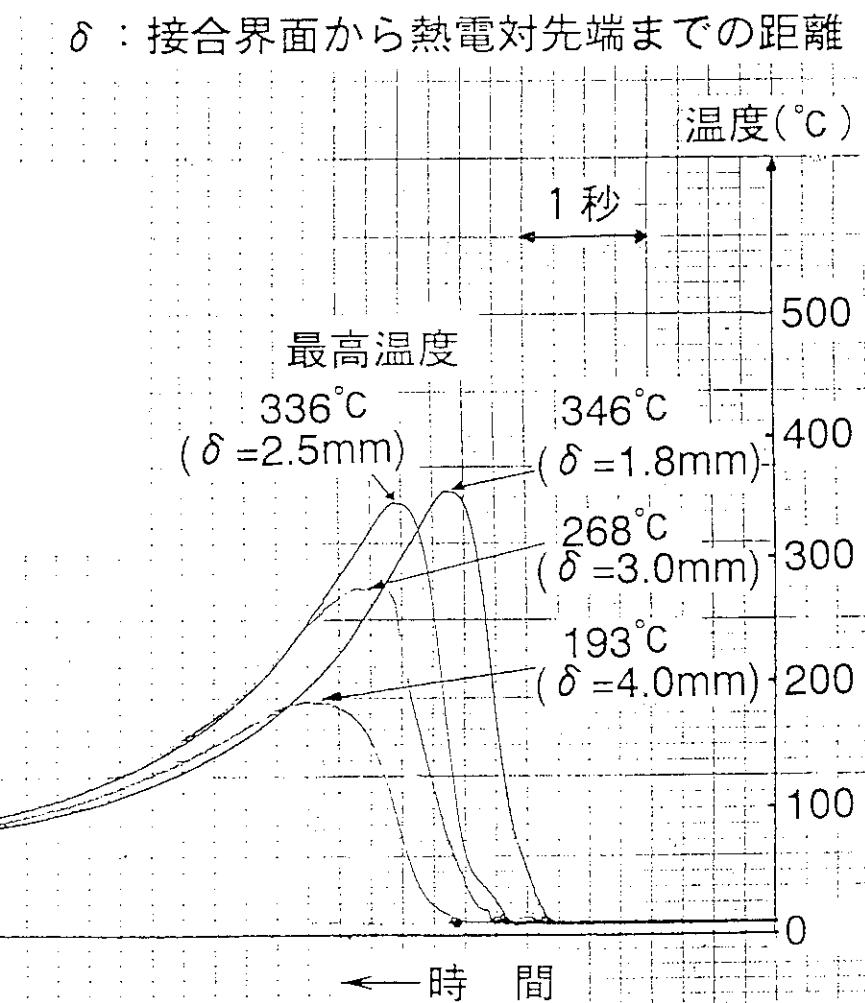
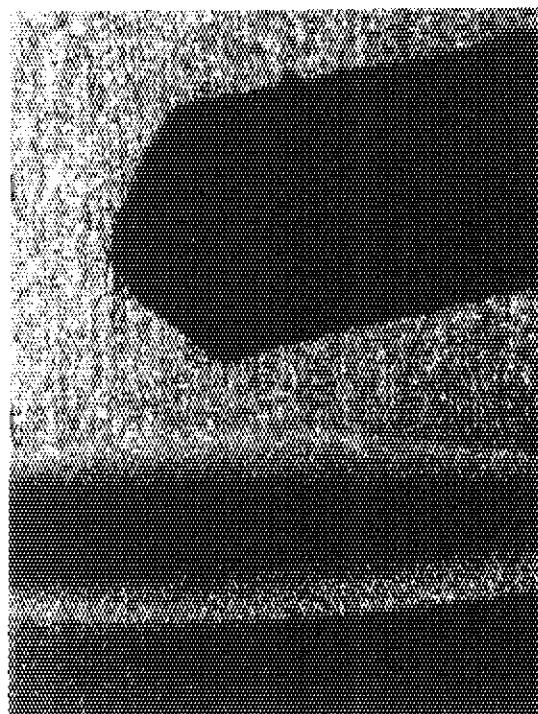
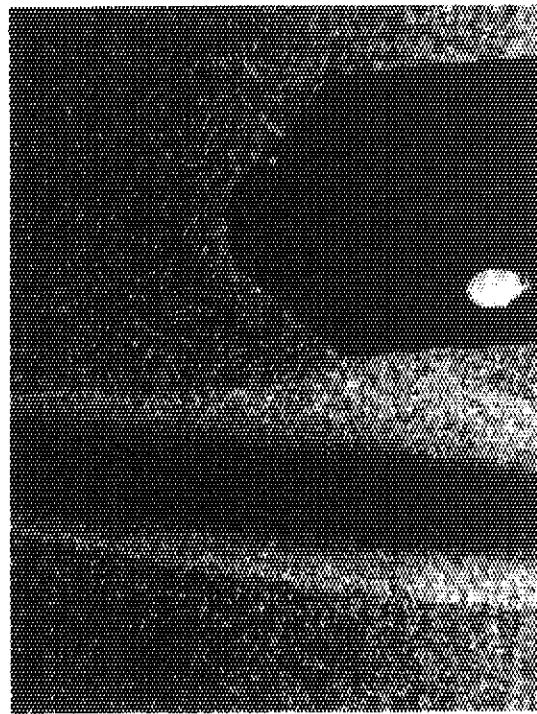


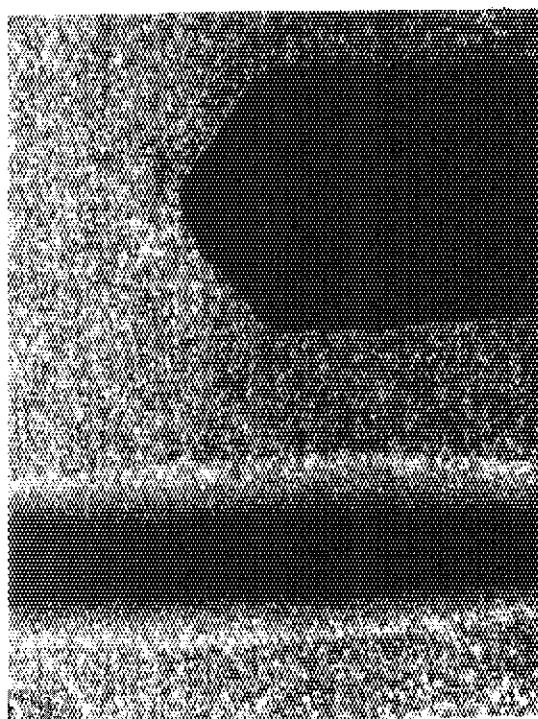
図10 温度測定結果



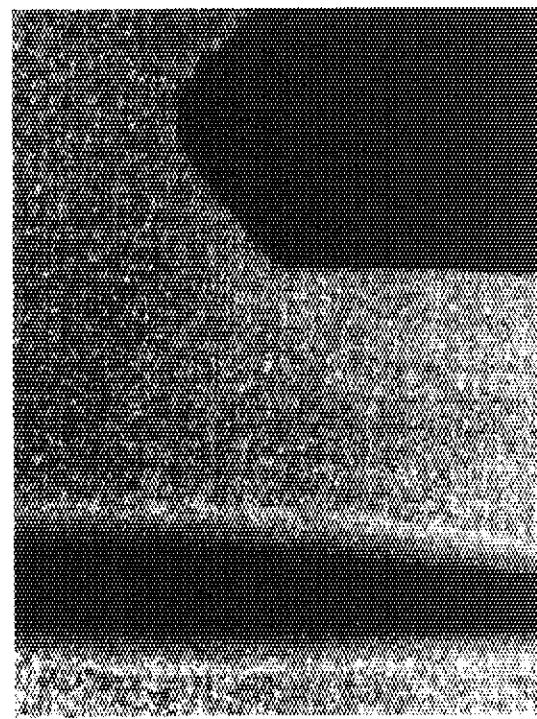
(a) 場所 : ①



(b) 場所 : ②



(c) 場所 : ③



(d) 場所 : ④

図11 熱電対取付孔の先端部（場所①から④は、図8(c)に対応）

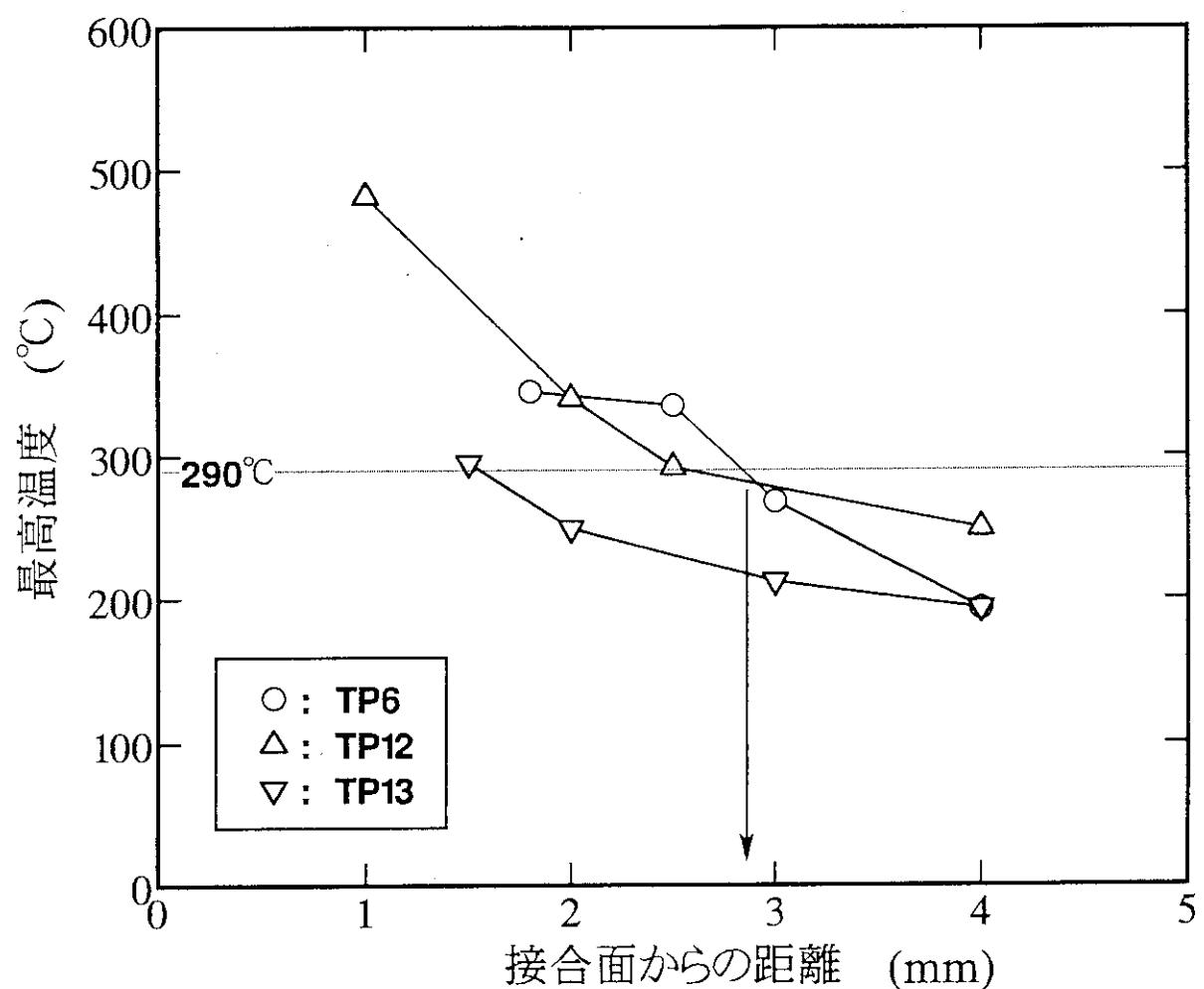


図12 接合時の最高温度測定結果

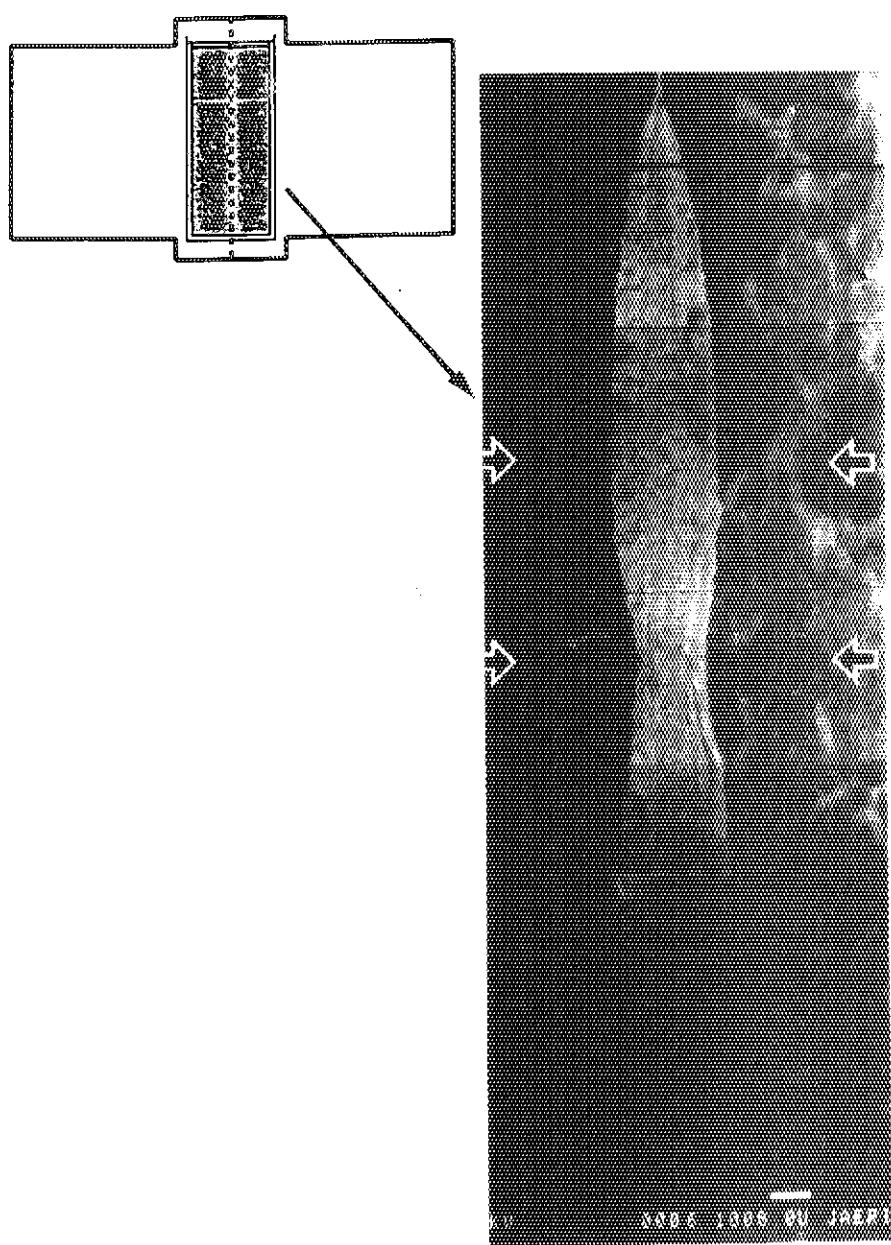


図13 接合面近傍のマクロ写真（受領材－受領材）

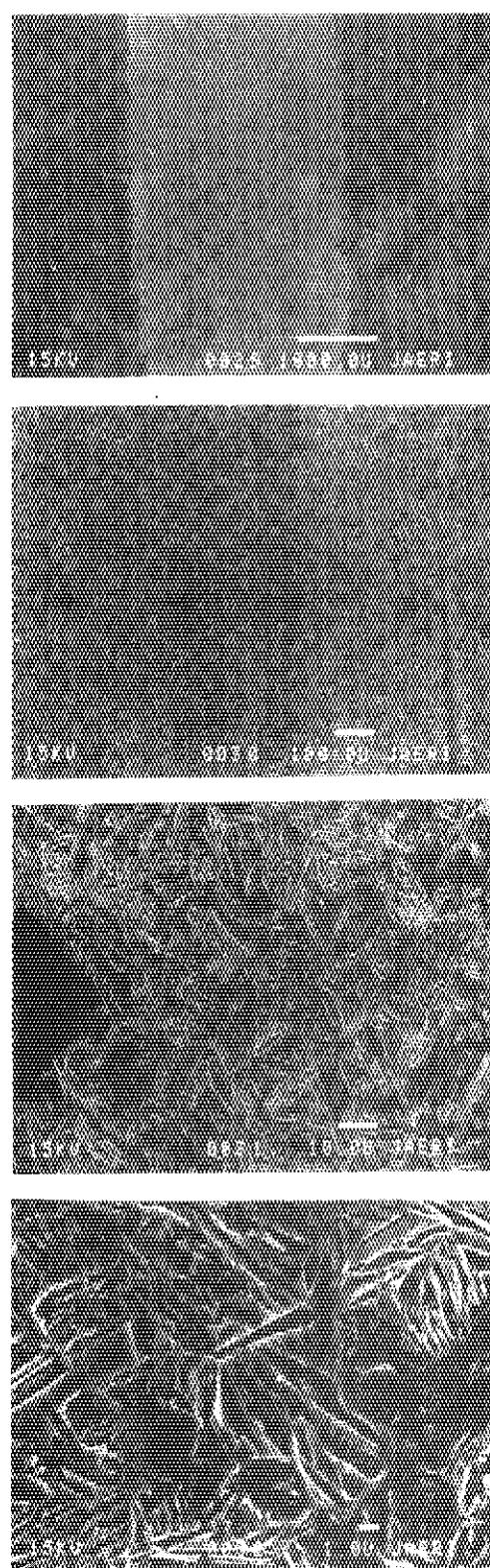


図14 接合部の金相写真（受領材－受領材、回転中心から 5 mm）

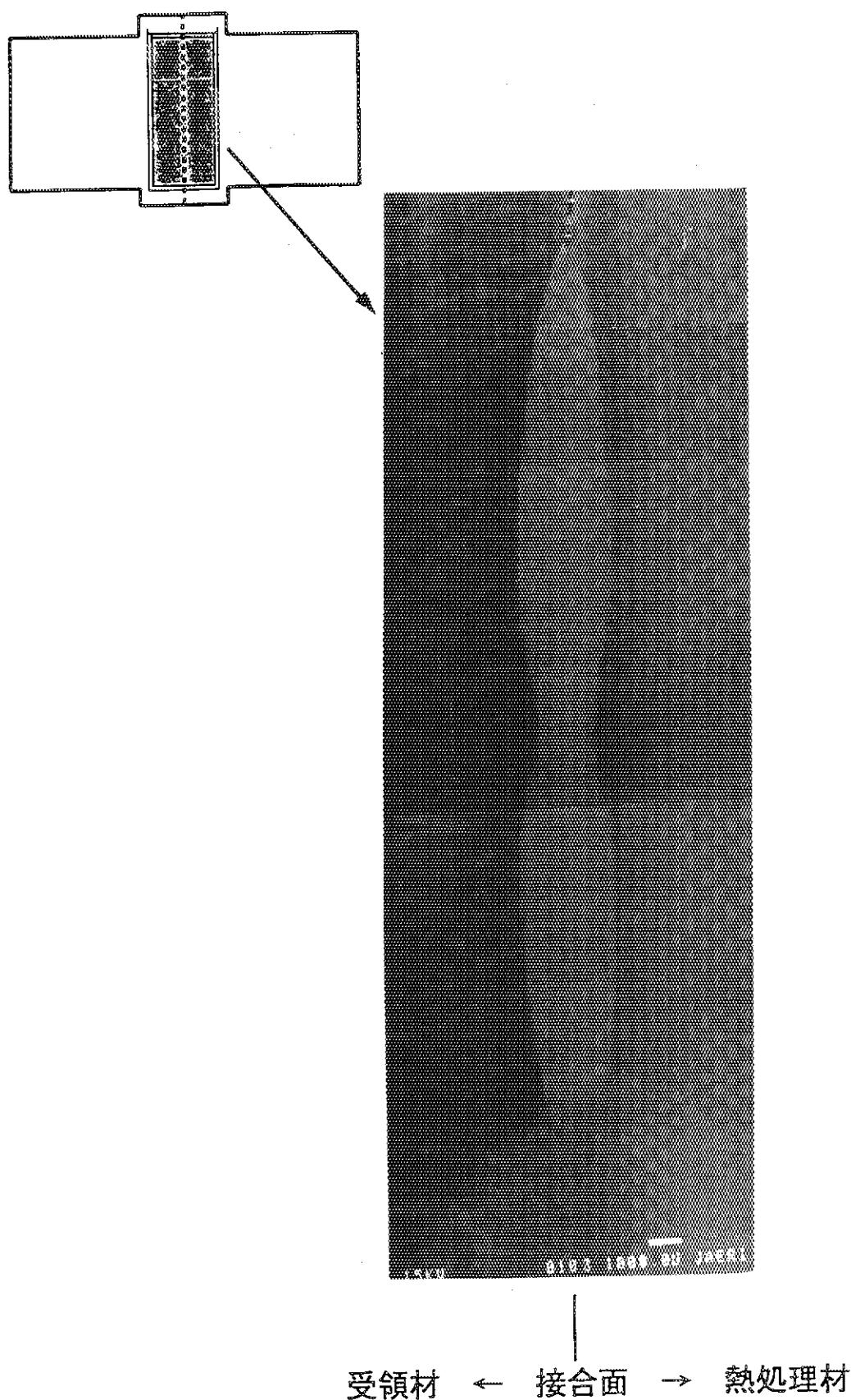


図15 接合面近傍のマクロ写真（受領材－熱処理材）

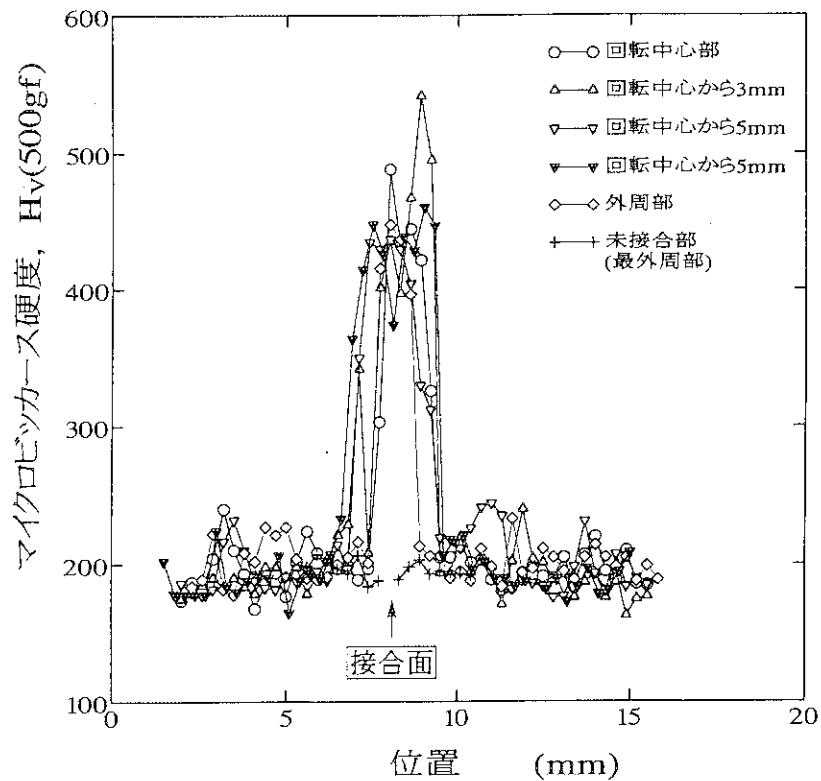


図16 接合部近傍の硬さ分布（受領材－受領材）

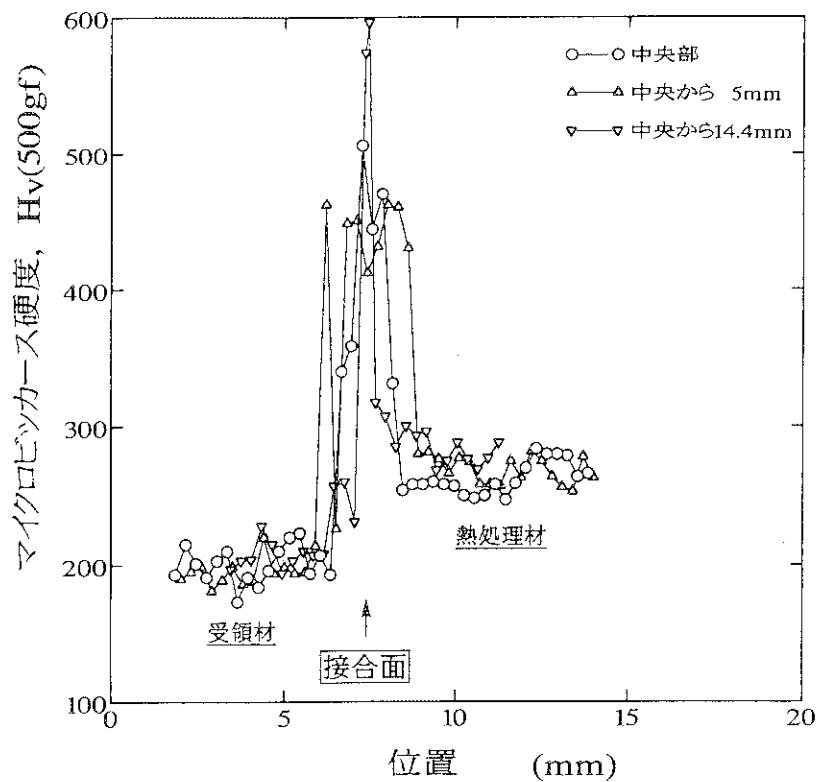


図17 接合部近傍の硬さ分布（受領材－熱処理材）

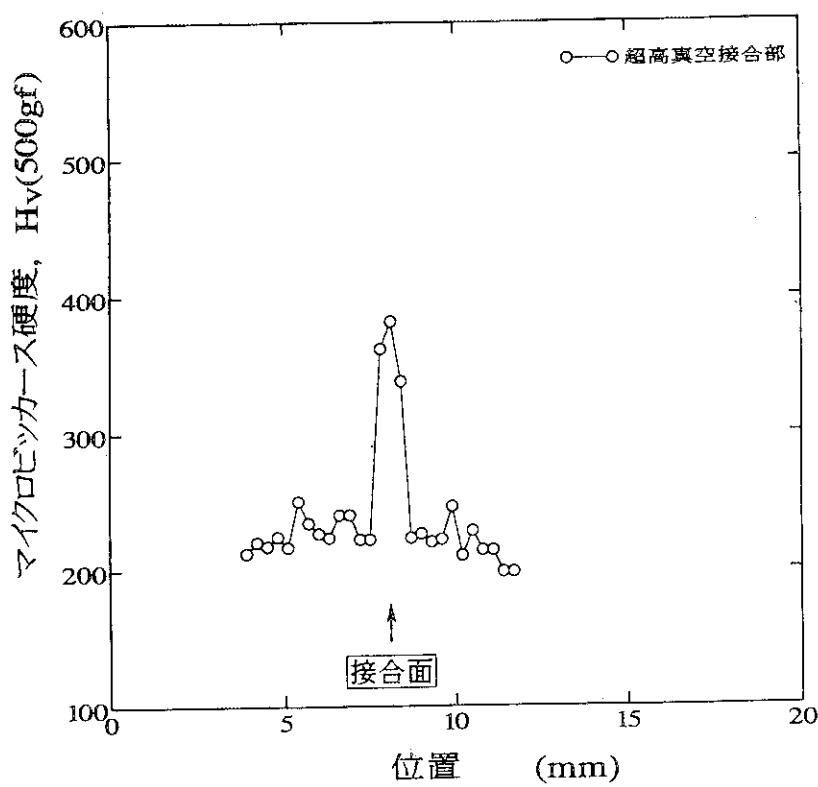


図18 超真空中で接合した試験片接合部近傍の硬さ分布（受領材－受領材）

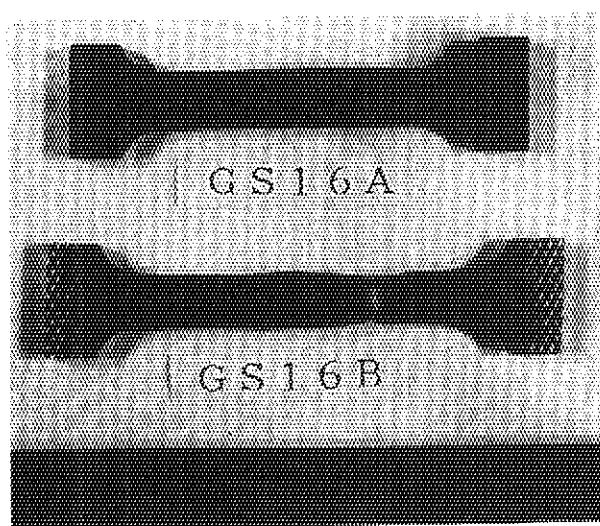


図19 試験前後の引張試験片外観

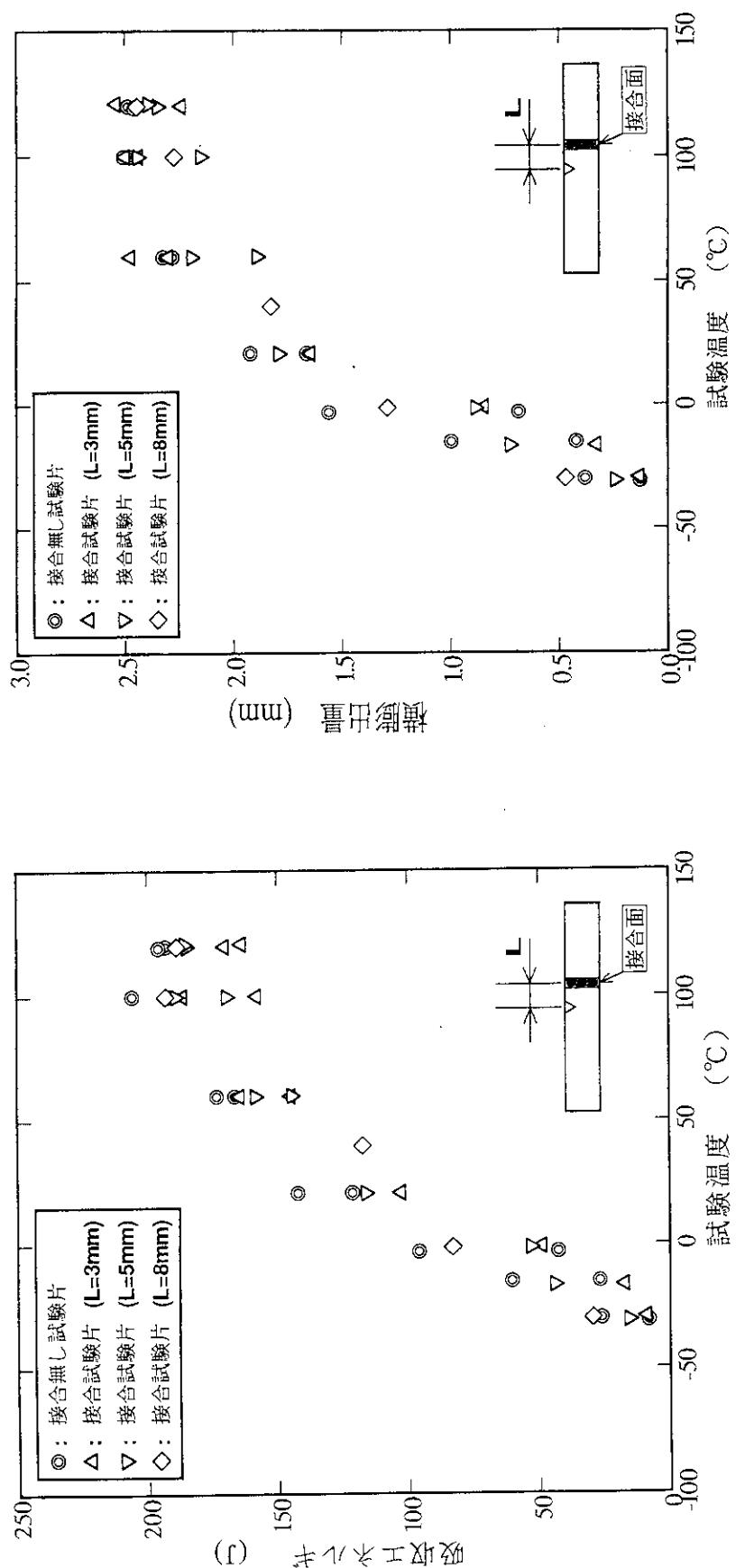


図20 接合試験片と接合無し試験片のシャルピーアブソルビギーの比較（受領材）

図21 接合試験片と接合無し試験片の横膨出量の比較（受領材）

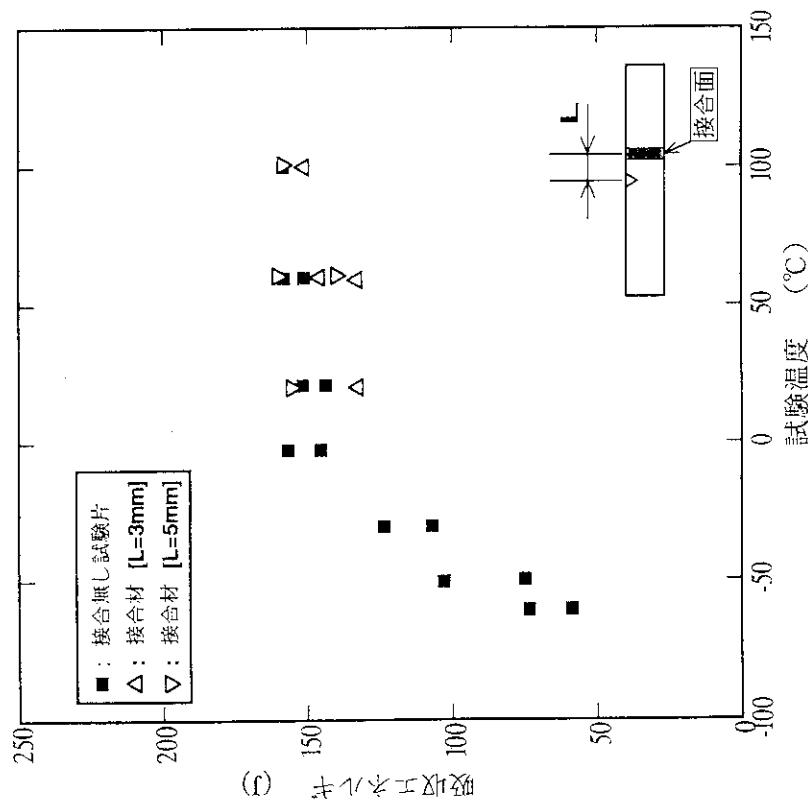


図22 接合試験片と接合無し試験片のシャルビー吸収エネルギーの比較（熱処理材）

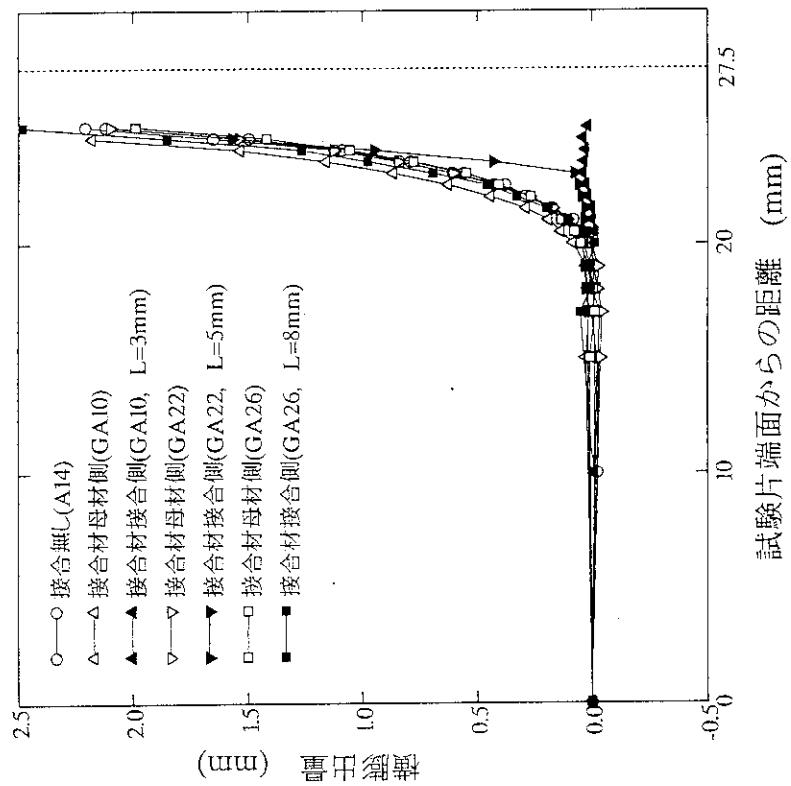
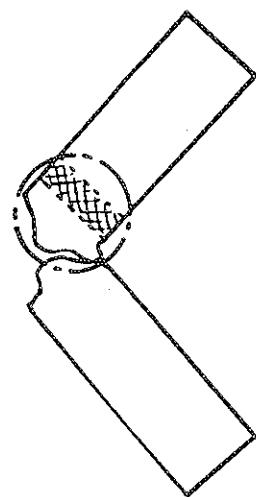
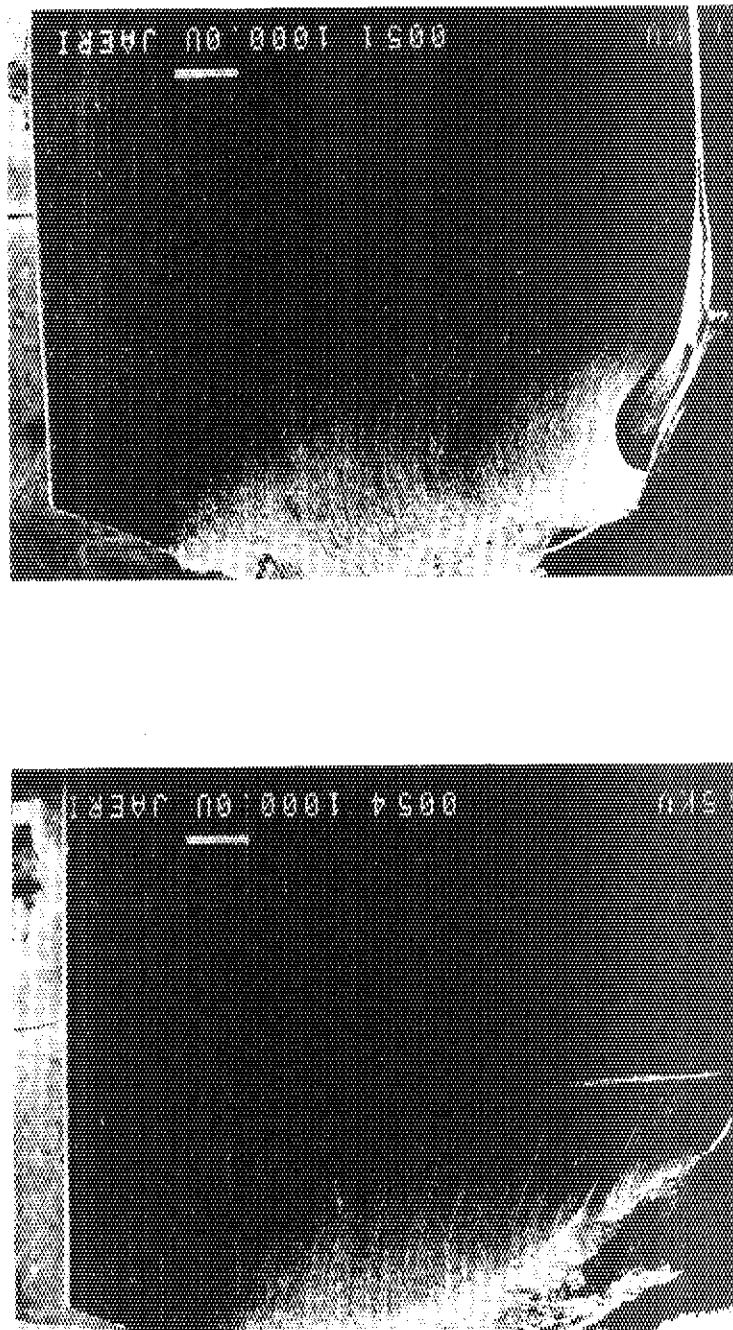


図23 延性破面率 100 %試験片における横膨出挙動の比較
(受領材、試験温度 120 °C)



シャルピー試験片横脇出部



(b) $L=8\text{mm}$
(a) $L=5\text{mm}$

図24 接合試験片のシャルピー試験後の横脇出部変形挙動 (a) $L=5\text{mm}$, (b) $L=8\text{mm}$

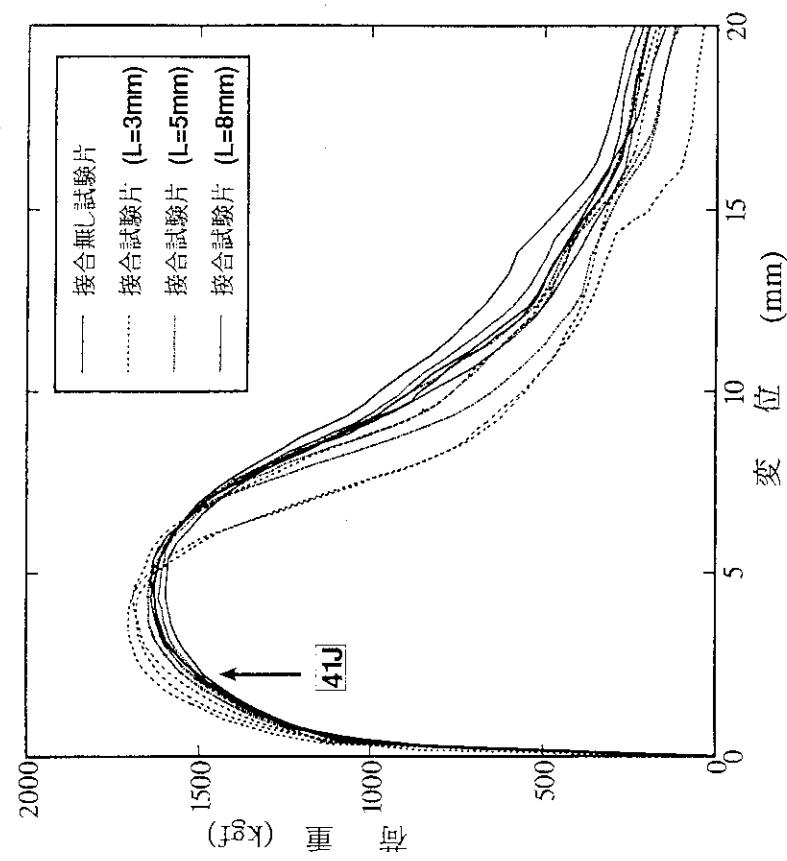


図26 シャルピー衝撃試験時の荷重－変位曲線の比較（受領材：破面率 100 %試験片）

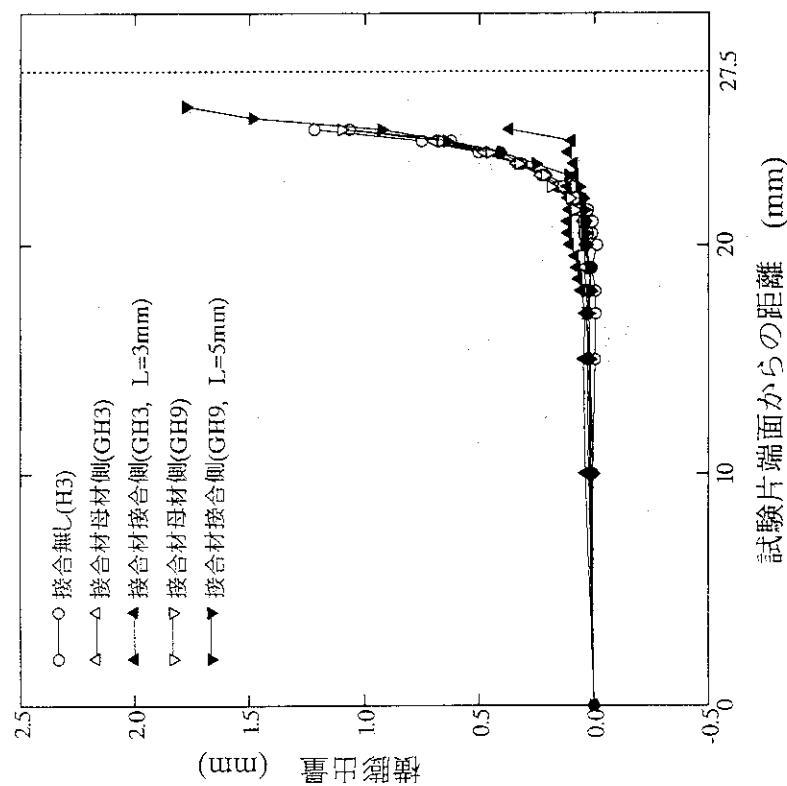


図25 延性破面率 100 %試験片における横膨出挙動の比較（熱処理材、試験温度 100 °C）

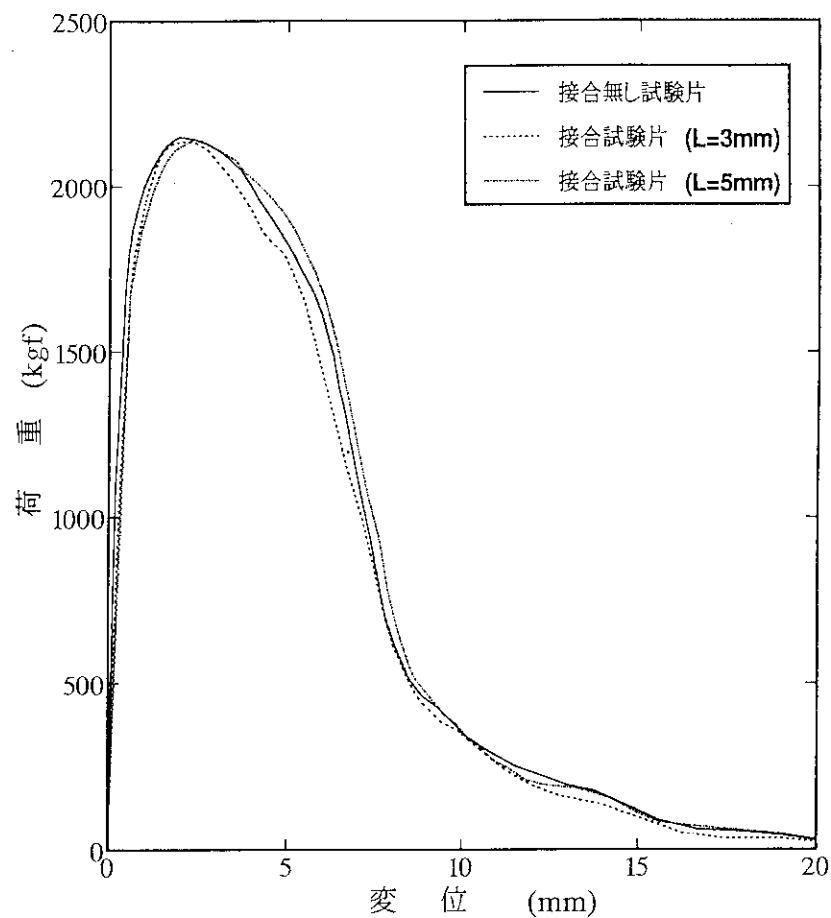


図27 シャルピー衝撃試験時の荷重-変位曲線の比較
(熱処理材 : 破面率 100 %試験片)

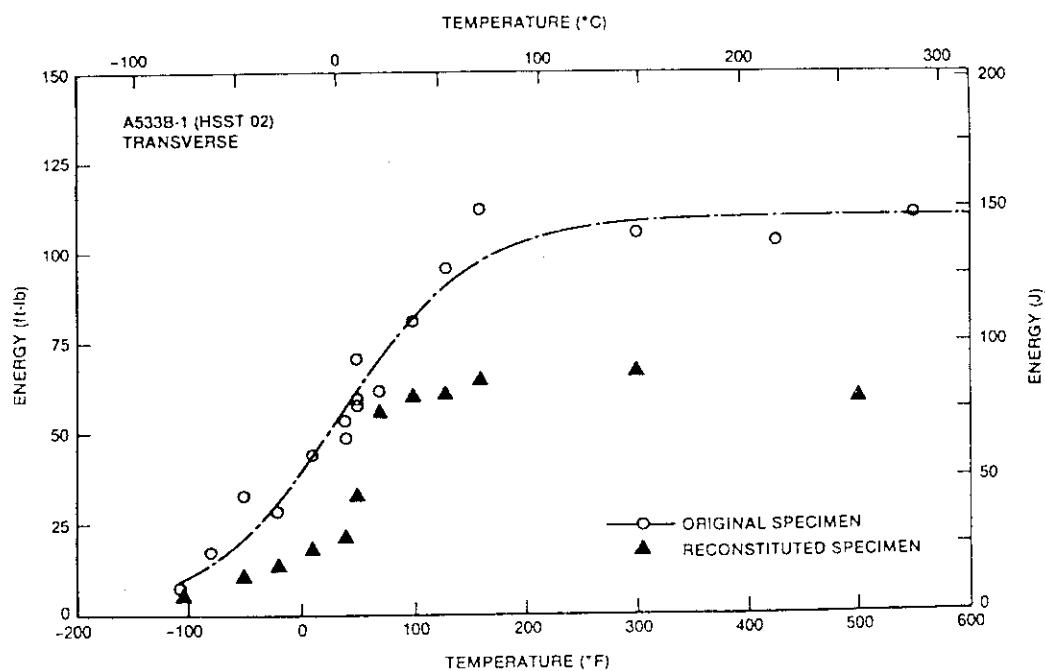
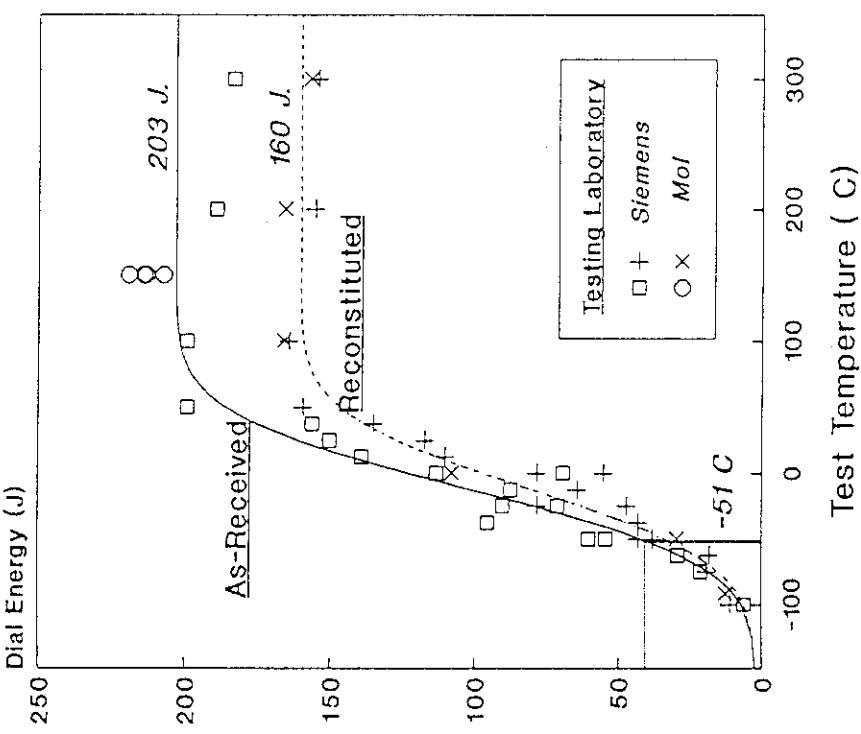
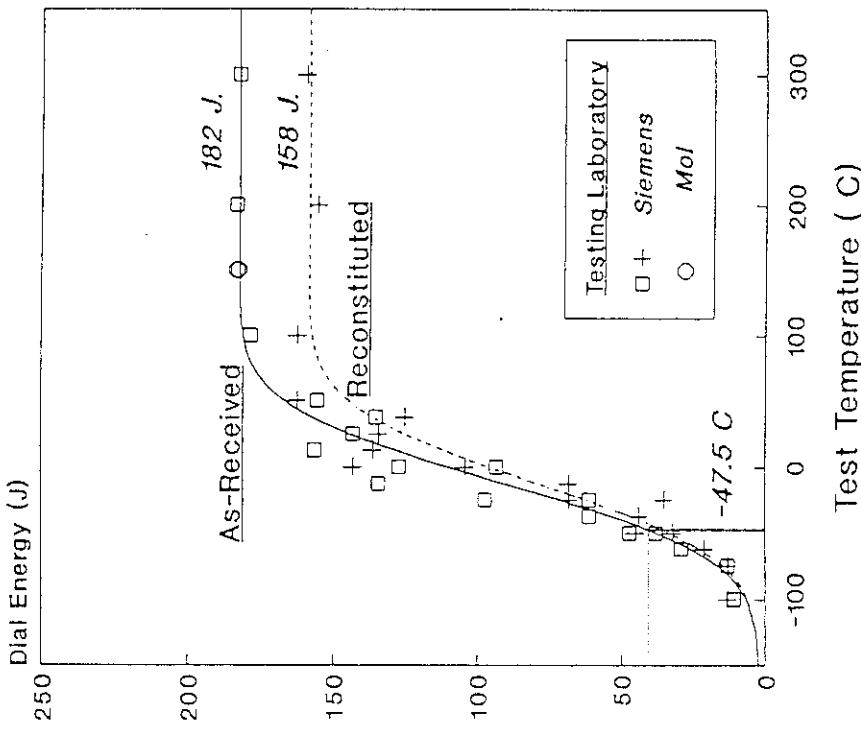


図28 アークスタッド溶接により再生した試験片と標準試験片の
シャルピー試験結果の比較⁽²⁾ (L= 5 mm に相当)

ASTM HAMMER (E23)



ISO HAMMER (DIN 50115)



BASE METAL, S-L NOTCH ORIENTATION
FITS CONSTRAINED TO EMPIRICAL REPRESENTATION BY TANH FUNCTIONS

図29 電子ビーム溶接により再生した試験片と標準試験片とのシャルピー試験結果の比較⁽³⁾
(L=5 mmに相当)

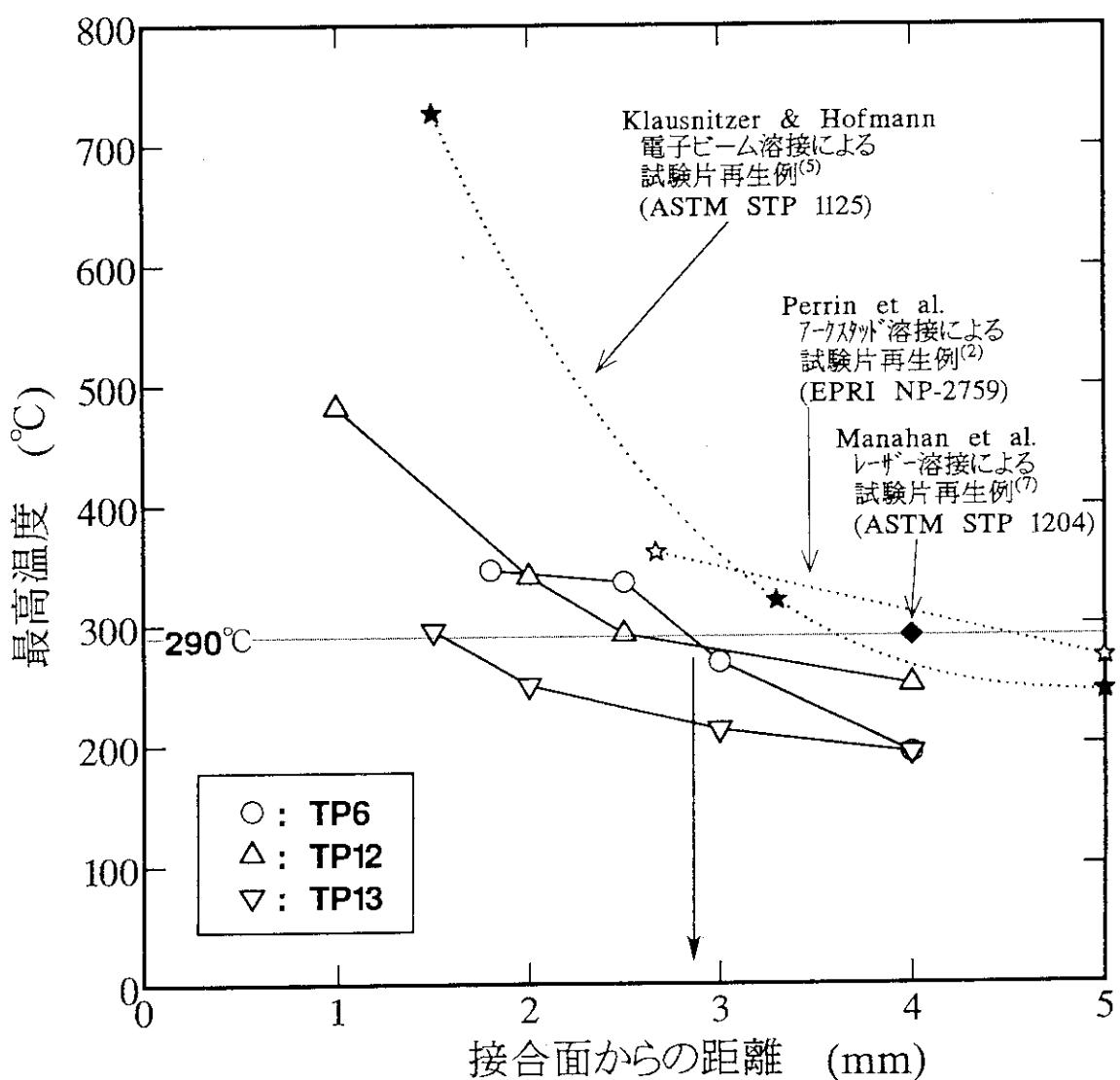


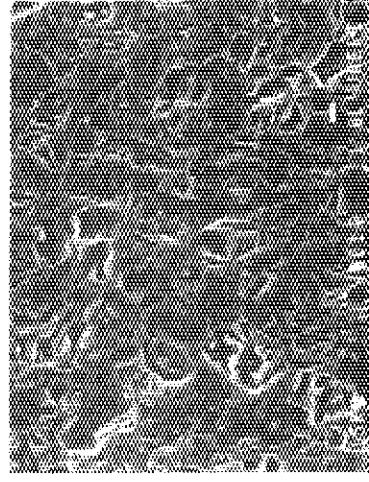
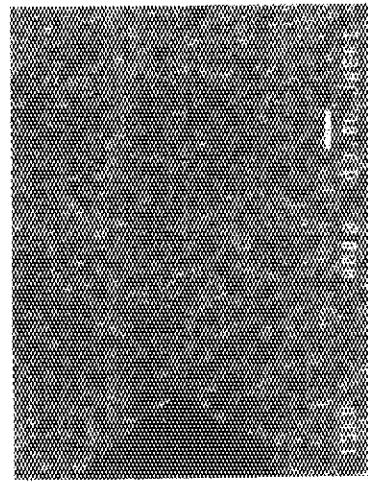
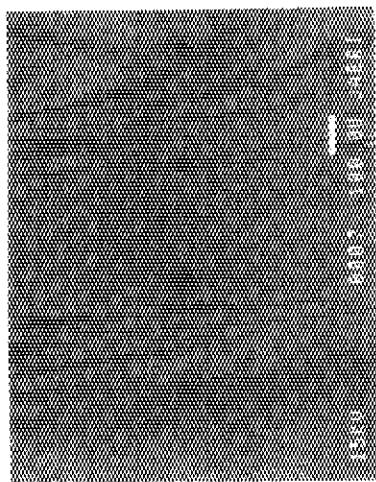
図30 表面活性化接合時の最高温度分布と文献データとの比較

付録 A 金相写真

写真 A 1 受領材組織

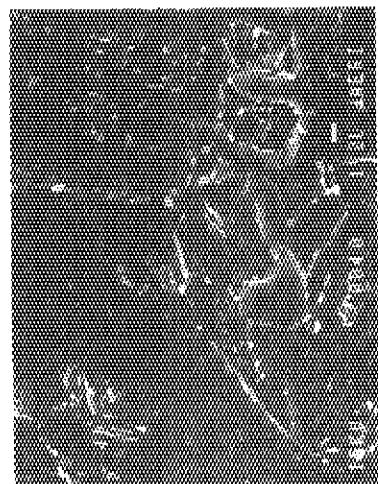
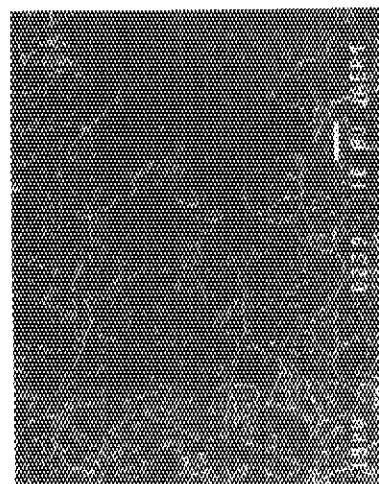
写真 A 2 受領材一受領材接合試験体回転中心部の組織

写真 A 3 受領材一熱処理材接合試験体各部の組織



写真A1 受領材 織組材

写真A2 受領材接合試験体回転中心部の組織



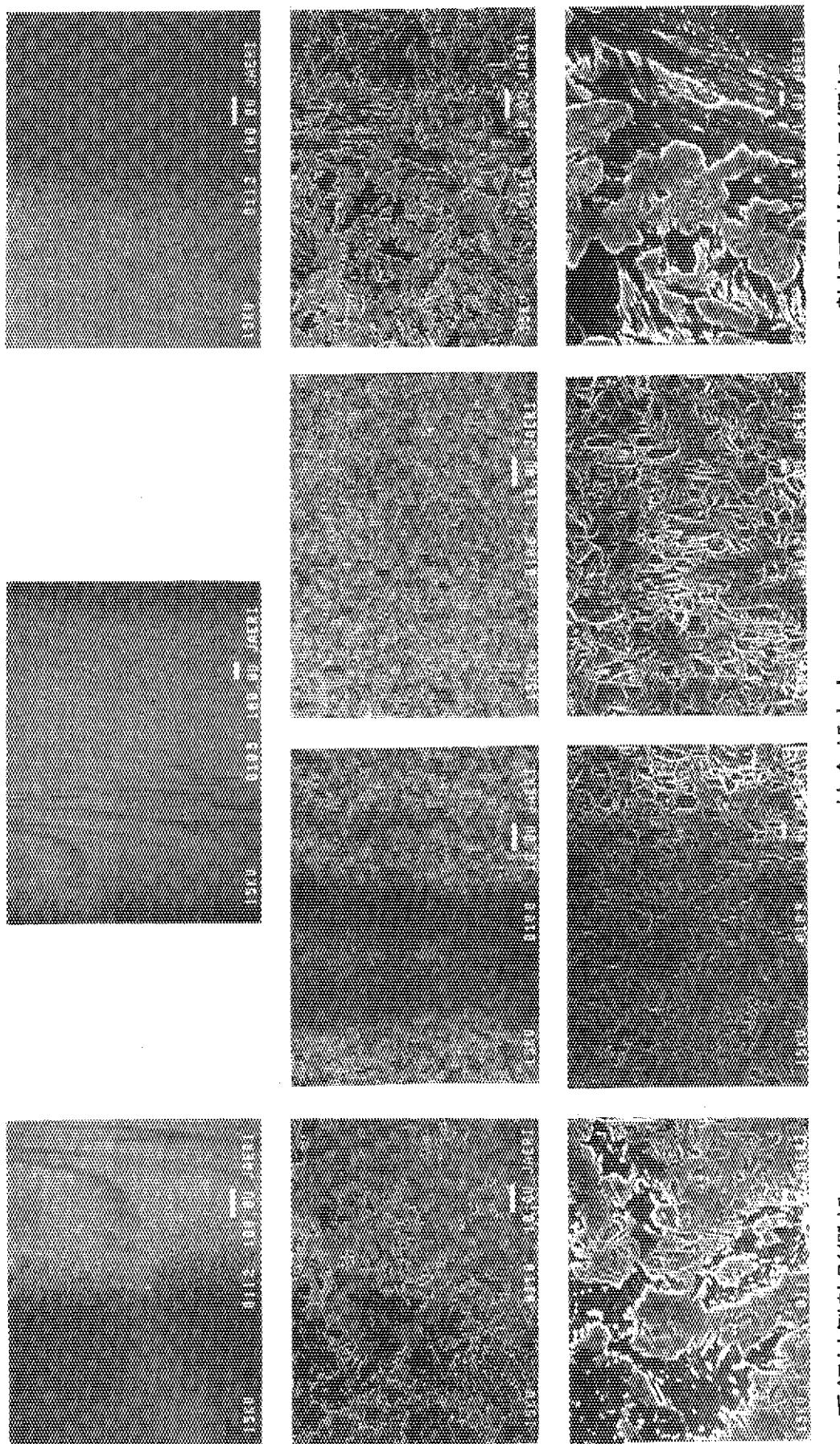


写真 A 3 受領材 - 热处理材接合試験体回転中心各部の組織

热处理材側熱影響部

接合部中央

受領材側熱影響部

付録B 試験結果生データ集

表B 1 マイクロビックケース硬さ測定結果

表B 2 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合無し、受領材）

表B 3 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合材、 $L = 3\text{ mm}$ ）

表B 4 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合材、 $L = 5\text{ mm}$ ）

表B 5 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合材、 $L = 8\text{ mm}$ ）

表B 6 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合無し、熱処理材）

表B 7 シャルピー衝撃試験データ整理票（熱処理材一受領材接合）

表B 8 シャルピー衝撃試験片横膨出挙動測定結果（受領材）

表B 9 シャルピー衝撃試験片横膨出挙動測定結果（熱処理材材）

表B1 マイクロビックカース硬さ測定結果

位置 (mm)	受領材-受領材接合部							熱処理材-受領材接合部		
	回中転心	中か心ら 3mm上	中か心ら 5mm上	中か心ら 12mm上	外周未接合部	中心か 5mm下	超真接合材	回中転心	中か心ら 5mm上	中か心ら 14mm上
16.1	-	-	-	189	-	-	-	-	-	-
15.8	-	-	185	199	-	-	-	-	-	-
15.5	185	177	190	188	-	-	-	-	-	-
15.2	186	175	184	205	-	208	-	-	263	-
14.9	210	163	207	198	-	195	-	266	278	-
14.6	189	195	181	205	-	182	-	264	253	-
14.3	195	176	193	214	-	179	-	279	256	-
14.0	220	193	231	205	-	197	-	280	264	-
13.7	207	187	198	189	-	184	-	280	275	-
13.4	183	176	177	195	-	173	-	284	282	-
13.1	205	192	176	205	-	189	-	270	263	-
12.8	190	189	184	211	-	182	212	259	275	288
12.5	191	201	186	197	-	188	220	247	257	277
12.2	198	204	188	194	-	184	217	258	258	269
11.9	194	240	182	233	-	190	224	250	258	276
11.6	183	202	235	184	-	190	216	248	274	288
11.3	181	171	244	198	-	202	250	250	277	275
11.0	189	198	241	211	-	197	234	257	266	268
10.7	203	202	226	188	-	221	226	258	276	296
10.4	201	195	211	195	192	217	223	260	281	293
10.1	214	220	218	190	193	206	240	258	280	300
9.8	205	194	219	206	194	446	240	258	430	285
9.5	205	194	312	206	195	460	222	254	460	307
9.2	326	495	330	213	193	428	222	331	462	317
8.9	421	541	404	396	203	438	362	470	431	596
8.6	444	467	429	436	198	374	382	444	412	574
8.3	432	397	436	447	189	425	338	506	450	231
8.0	488	435	429	415	176	447	223	359	448	260
7.7	303	401	434	201	188	414	226	340	-	257
7.4	197	208	350	216	184	364	220	193	462	208
7.1	189	342	197	205	206	233	222	207	214	207
6.8	199	229	214	200	193	207	246	194	195	210
6.5	197	221	188	191	197	189	210	223	194	203
6.2	196	204	195	189	203	193	228	220	198	194
5.9	208	193	197	190	207	188	214	210	194	215
5.6	224	179	188	204	198	165	214	196	220	228
5.3	202	198	191	227	-	206	198	184	188	204
5.0	177	191	182	221	-	190	198	191	186	203
4.7	194	198	183	227	-	193	-	173	199	197
4.4	186	198	188	202	-	188	-	210	189	-
4.1	168	179	210	208	-	180	-	203	181	-
3.8	193	184	232	178	-	184	-	191	199	-
3.5	210	190	216	182	-	224	-	201	195	-
3.2	240	184	182	222	-	178	-	215	190	-
2.9	204	190	178	189	-	178	-	193	-	-
2.6	182	185	180	184	-	178	-	-	-	-
2.3	187	179	186	-	-	179	-	-	-	-
2.0	174	175	-	-	-	202	-	-	-	-

太字は接合による硬化領域（熱影響・塑性流動領域と対応）

表B 2 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合無し、受領材）

試験日： 1993.12/13～12/15

試験機： 研究3棟 044室試験機 容量： 30 kgf・m

ハンマー角度： 141.5度 ハンマー質量： 25.41 kg

ハンマー打撃速度 5.1 m/s ハンマー長： 0.662 m

室温： 約20°C 測定者： 深谷

熱媒体： 高温はシリコンオイル、低温はエタノール

試験片番号	試験温度 °C	振上り 角度	吸収エネルギー kgf·m (J)	破面率 %	横膨出量 mm	備 考
A 15	-31.2	137.1	0.84 (8.2)	0	0.129	
A 16	-30.3	128.6	2.69 (26.4)	0	0.381	
A 6	-15.2	114.6	6.16 (60.6)	10	0.996	
A 17	-15.1	128.3	2.75 (27.0)	5	0.421	
A 5	-3	121.5	4.37 (42.9)	10	0.685	
A 4	-3	101.6	9.78 (95.9)	20	1.561	
A 1	20.8	92.6	12.40(121.6)	35	1.663	
A 2	20.8	85.4	14.51(142.3)	50	1.921	
A 11	60	77.0	16.95(166.2)	70	2.326	
A 12	60	74.5	17.66(173.2)	80	2.283	
A 13	100	67.6	19.57(191.9)	100	2.472	
A 3	100	62.3	20.98(205.7)	100	2.508	
A 7	119.5	66.2	19.95(195.6)	100	2.457	
A 14	120	67.2	19.68(193.0)	100	2.485	

表B 3 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合材，L = 3 mm）

試験日： 1993.12/13～12/15

試験機： 研究3棟 044室試験機 容量： 30 kgf・m

ハンマー角度： 141.5度 ハンマー質量： 25.41 kg

ハンマー打撃速度 5.1 m/s ハンマー長： 0.662 m

室温： 約20°C 測定者： 深谷

熱媒体： 高温はシリコンオイル、低温はエタノール

試験片番号	試験温度 °C	振上り 角度	吸収エネルギー kgf・m (J)	破面率 %	横膨出量 mm	備考
GA8	-29.9	136.7	0.92 (9.0)	0	0.132	
GA9	-16.8	132.6	1.78 (17.5)	0	0.328	
GA7	-1.1	119.0	5.01 (49.1)	15	0.844	
GA1	20.7	99.1	10.50(103.0)	40	1.645	
GA2	60	77.7	16.75(164.3)	100	2.474	
GA4	60	84.6	14.75(144.6)	80	2.302	
GA3	100	80.0	16.09(157.8)	100	2.500	
GA5	100	69.7	19.00(186.3)	100	2.438	
GA6	120	75.6	17.35(170.1)	100	2.242	
GA10	121	77.9	16.69(163.7)	100	2.542	

表B 4 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合材, L = 5 mm）

試験日 : 1993.12/13~12/15

試験機 : 研究3棟 044室試験機 容量 : 30 kgf · m

ハンマー角度 : 141.5度 ハンマー質量 : 25.41 kg

ハンマー打撃速度 5.1 m/s ハンマー長 : 0.662 m

室温 : 約 20°C 測定者 : 深谷

熱媒体 : 高温はシリコンオイル、低温はエタノール

試験片 番号	試験温度 °C	振上り 角 度	吸収エネルギー kgf·m (J)	破面率 %	横膨出量 mm	備 考
GA20	-31.1	133.4	1.61 (15.8)	0	0.243	
GA21	-16.6	121.0	4.50 (44.1)	10	0.725	
GA19	-1.4	117.4	5.42 (53.2)	15	0.883	
GA13	20.7	94.4	11.87(116.4)	50	1.790	
GA16	60	79.8	16.14(158.3)	75	2.193	
GA14	60.3	84.7	14.72(144.4)	75	1.890	
GA15	100	68.7	19.27(189.0)	100	2.440	
GA17	100	75.9	17.26(169.3)	100	2.153	
GA18	120	70.3	18.84(184.8)	100	2.350	
GA22	121	70.0	18.92(185.5)	100	2.394	

表B 5 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合材, L = 8 mm）

試験日： 1993.12/13～12/15

試験機： 研究3棟 044室試験機 容量： 30 kgf・m

ハンマー角度： 141.5度 ハンマー質量： 25.41 kg

ハンマー打撃速度 5.1 m/s ハンマー長： 0.662 m

室温： 約 20°C 測定者： 深谷

熱媒体： 高温はシリコンオイル、低温はエタノール

試験片番号	試験温度 °C	振上り 角度	吸収エネルギー kgf·m (J)	破面率 %	横膨出量 mm	備 考
GA28	-30.1	127.0	3.04 (29.8)	5	0.470	
GA27	-1.3	106.2	8.47 (83.1)	25	1.290	
GA29	39.9	94.0	11.99(117.6)	30	1.827	
GA25	100	67.2	19.68(193.0)	100	2.275	
GA26	120	68.8	19.25(188.8)	100	2.445	

表B 6 シャルピー衝撃試験データ整理票（接合無し、熱処理材）

試験日： 1993.12/13～12/15

試験機： 研究3棟 044室試験機 容量： 30 kgf・m

ハンマー角度： 141.5度 ハンマー質量： 25.41 kg

ハンマー打撃速度 5.1 m/s ハンマー長： 0.662 m

室温： 約20°C 測定者： 深谷

熱媒体：高温はシリコンオイル、低温はエタノール

試験片番号	試験温度 °C	振上り 角度	吸収エネルギー kgf・m (J)	破面率 %	横膨出量 mm	備考
H 16	-60.6	115.3	5.98 (58.6)	20	0.812	
H 17	-60.8	109.7	7.49 (73.5)	35	0.893	
H 6	-50.5	99.2	10.48(102.8)	75	1.028	
H 15	-49.8	109.2	7.63 (74.8)	60	1.008	
H 5	-30.9	92.0	12.58(123.4)	100	1.485	
H 14	-30.6	97.8	10.88(106.7)	90	1.345	
H 4	-2.7	80.4	15.97(156.6)	100	1.963	
H 13	-2.6	84.4	14.81(145.2)	100	1.517	
H 1	20.8	82.2	15.45(151.5)	100	1.829	
H 2	20.8	85.0	14.63(143.5)	100	1.718	
H 11	60	82.4	15.39(150.9)	100	1.925	
H 12	60	80.0	16.09(157.8)	100	1.911	
H 3	100	79.8	16.14(158.3)	100	2.035	

表B 7 シャルピー衝撃試験データ整理票（熱処理材、受領材接合）

試験日： 1994.3/18

試験機： 研究3棟 044室試験機 容量： 30 kgf・m

ハンマー角度： 141.5度 ハンマー質量： 25.41 kg

ハンマー打撃速度 5.1 m/s ハンマー長： 0.662 m

室温： 約20°C 測定者： 深谷

熱媒体：シリコンオイル

試験片番号	試験温度 °C	振上り角度	吸収エネルギー kgf·m (J)	破面率 %	横膨出量 mm	備考
L=3mm						
GH 4	20.0	88.9	13.49(132.3)	100	1.615	
GH 2	60.1	84.3	14.84(145.5)	100	1.908	
GH 1	59.1	88.8	13.52(132.6)	100	1.578	
GH 3	100.0	82.4	15.39(150.9)	100	1.940	
L=5mm						
GH 6	20.1	80.8	15.85(155.4)	100	1.895	
GH 8	61.0	86.3	14.25(139.7)	100	1.836	
GH 7	60.8	79.2	16.32(160.0)	100	1.839	
GH 9	101.0	79.8	16.14(158.3)	100	1.915	

表B 8 シャルピー衝撃試験片横膨出挙動測定結果（受領材）

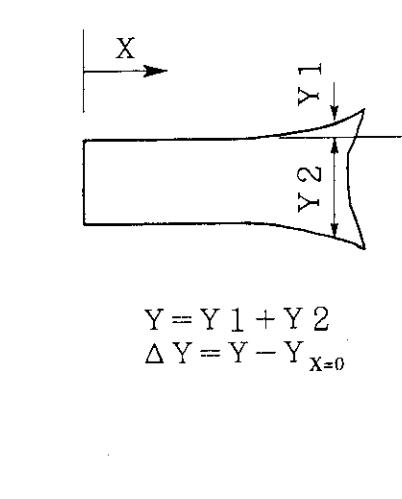
接合無し試験片-1					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0.000	0.000	10.005	10.005	0.000	
10.000	0.001	9.980	9.981	-0.024	
17.000	0.003	9.971	9.974	-0.031	
18.000	0.019	9.982	10.001	-0.004	
19.000	0.022	9.990	10.012	0.007	
20.000	0.049	9.993	10.042	0.037	
20.500	0.062	10.014	10.076	0.071	
21.000	0.097	10.036	10.133	0.128	
21.500	0.119	10.059	10.178	0.173	
22.000	0.167	10.115	10.282	0.277	
22.500	0.218	10.165	10.383	0.378	
23.000	0.318	10.247	10.565	0.560	
23.500	0.430	10.365	10.795	0.790	
24.000	0.575	10.519	11.094	1.089	
24.500	0.813	10.689	11.502	1.497	
25.000	1.089	11.034	12.123	2.118	

接合無し試験片-2					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0.000	0.000	10.005	10.005	0.000	
15.000	0.000	9.991	9.991	-0.014	
17.000	0.014	9.983	9.997	-0.008	
18.000	0.011	9.985	9.996	-0.009	
19.000	0.008	9.992	10.000	-0.005	
20.000	0.048	9.959	10.007	0.002	
20.500	0.045	10.001	10.046	0.041	
21.000	0.083	10.004	10.087	0.082	
21.500	0.120	10.057	10.177	0.172	
22.000	0.187	10.111	10.298	0.293	
22.500	0.251	10.180	10.431	0.426	
23.000	0.327	10.283	10.610	0.605	
23.500	0.420	10.424	10.844	0.839	
24.000	0.573	10.553	11.126	1.121	
24.500	0.921	10.734	11.655	1.650	
25.000	1.181	11.030	12.211	2.206	

GA 10 母材側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0.000	0.000	10.001	10.001	0.000	
15.000	-0.064	10.092	10.028	0.027	
17.000	-0.076	10.088	10.012	0.011	
18.000	-0.072	10.092	10.020	0.019	
19.000	-0.071	10.099	10.028	0.027	
20.000	-0.053	10.135	10.082	0.081	
20.500	-0.023	10.159	10.136	0.135	
21.000	-0.006	10.196	10.190	0.189	
21.500	0.040	10.248	10.288	0.287	
22.000	0.100	10.342	10.442	0.441	
22.500	0.188	10.438	10.626	0.625	
23.000	0.300	10.566	10.866	0.865	
23.500	0.451	10.707	11.158	1.157	
24.000	0.633	10.901	11.534	1.533	
24.500	0.943	11.234	12.177	2.176	

GA 10 接合側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0.000	0.000	10.009	10.009	0.000	
15.000	0.004	9.982	9.986	-0.023	
17.000	0.003	10.009	10.012	0.003	
18.000	0.004	9.983	9.987	-0.022	
19.000	0.012	9.987	9.999	-0.010	
20.000	0.021	9.995	10.016	0.007	
20.500	0.011	9.987	9.998	-0.011	
21.000	0.014	9.995	10.009	0.000	
21.500	0.023	9.987	10.010	0.001	
22.000	0.024	10.001	10.025	0.016	
22.500	0.031	10.005	10.036	0.027	
23.000	0.031	10.018	10.049	0.040	
23.500	0.031	10.011	10.042	0.033	
24.000	0.023	10.014	10.037	0.028	
24.500	0.024	10.024	10.048	0.039	
25.000	0.043	9.985	10.028	0.019	

GA 22 母材側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0.000	0.000	9.998	9.998	0.000	
15.000	0.005	10.009	10.014	0.016	
17.000	0.005	10.008	10.013	0.015	
18.000	0.006	10.018	10.024	0.026	
19.000	0.005	10.025	10.030	0.032	
20.000	0.002	10.037	10.039	0.041	
20.500	0.007	10.028	10.035	0.037	
21.000	0.006	10.024	10.030	0.032	
21.500	-0.001	10.026	10.025	0.027	
22.000	0.007	10.035	10.042	0.044	
22.500	0.007	10.048	10.055	0.057	
23.000	0.013	10.060	10.073	0.075	
23.500	0.177	10.252	10.429	0.431	
24.000	0.478	10.469	10.947	0.949	
24.500	0.857	10.710	11.567	1.569	



GA 26 母材側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0.000	0.000	10.009	10.009	0.000	
15.000	0.41	9.976	10.017	0.008	
17.000	0.21	9.976	9.997	-0.012	
18.000	0.034	9.970	10.004	-0.005	
19.000	0.054	9.970	10.024	0.015	
20.000	0.064	9.995	10.059	0.050	
20.500	0.080	10.006	10.086	0.077	
21.000	0.110	10.033	10.143	0.134	
21.500	0.143	10.058	10.201	0.192	
22.000	0.175	10.099	10.274	0.265	
22.500	0.248	10.169	10.417	0.408	
23.000	0.320	10.237	10.557	0.548	
23.500	0.434	10.352	10.786	0.777	
24.000	0.568	10.496	11.064	1.055	
24.500	0.748	10.679	11.427	1.418	
25.000	1.056	10.941	11.997	1.988	

表B 9 シャルピー衝撃試験片横膨出挙動測定結果（熱処理材）

接合無し試験片-1					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0,000	0,000	10,017	10,017	0,000	
10,000	0,002	10,024	10,022	0,005	
15,000	0,017	10,031	10,014	-0,003	
17,000	0,025	10,035	10,010	-0,007	
18,000	0,025	10,035	10,010	-0,007	
19,000	0,028	10,055	10,027	0,010	
20,000	0,031	10,034	10,003	-0,014	
20,500	0,019	10,045	10,026	0,009	
21,000	0,016	10,039	10,023	0,006	
21,500	0,012	10,056	10,044	0,027	
22,000	-0,003	10,066	10,069	0,052	
22,500	-0,028	10,082	10,110	0,093	
23,000	-0,125	10,104	10,229	0,212	
23,500	-0,173	10,159	10,332	0,315	
24,000	-0,195	10,229	10,424	0,407	
24,500	-0,302	10,339	10,641	0,624	
25,000	-0,421	10,661	11,082	1,065	

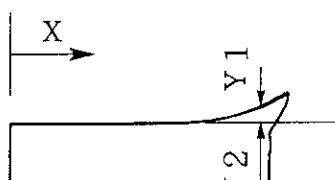
接合無し試験片-2					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0,000	0,000	9,991	9,991	0,000	
10,000	0,029	10,038	10,009	0,018	
15,000	0,041	10,054	10,013	0,022	
17,000	0,044	10,066	10,022	0,031	
18,000	0,048	10,058	10,010	0,019	
19,001	0,056	10,064	10,008	0,017	
20,000	0,056	10,084	10,028	0,037	
20,500	0,057	10,075	10,018	0,027	
21,000	0,059	10,086	10,027	0,036	
21,500	0,041	10,090	10,049	0,058	
22,000	0,036	10,106	10,070	0,079	
22,500	0,010	10,136	10,126	0,135	
23,000	-0,037	10,182	10,219	0,228	
23,500	-0,096	10,228	10,324	0,333	
24,000	-0,171	10,324	10,495	0,504	
24,500	-0,282	10,460	10,742	0,751	
25,000	-0,411	10,797	11,208	1,217	

GH 3 母材側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0,000	0,000	10,006	10,006	0,000	
10,000	-0,001	10,030	10,031	0,025	
15,000	0,014	10,050	10,036	0,030	
17,000	0,011	10,047	10,036	0,030	
18,000	0,017	10,056	10,039	0,033	
19,000	0,013	10,061	10,048	0,042	
20,000	0,016	10,059	10,043	0,037	
20,500	0,018	10,064	10,046	0,040	
21,000	0,012	10,064	10,052	0,046	
21,500	-0,005	10,088	10,093	0,087	
22,000	-0,009	10,103	10,112	0,106	
22,500	-0,043	10,132	10,175	0,169	
23,000	-0,061	10,179	10,240	0,234	
23,500	-0,121	10,223	10,344	0,338	
24,000	-0,198	10,288	10,486	0,480	
24,500	-0,338	10,370	10,708	0,702	

GH 3 接合側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0,000	-0,004	10,007	10,003	0,000	
10,000	0,014	10,027	10,041	0,038	
15,000	0,010	10,039	10,049	0,046	
17,000	-0,002	10,044	10,042	0,039	
18,000	0,007	10,051	10,058	0,055	
18,500	0,007	10,061	10,068	0,065	
19,000	0,016	10,061	10,077	0,074	
19,500	0,019	10,064	10,083	0,080	
20,000	0,035	10,072	10,107	0,104	
20,500	0,034	10,080	10,114	0,111	
21,000	0,038	10,077	10,115	0,112	
21,500	0,039	10,069	10,108	0,105	
22,000	0,040	10,073	10,113	0,110	
22,500	0,034	10,082	10,116	0,113	
23,000	0,018	10,067	10,085	0,082	
23,500	0,023	10,067	10,090	0,087	
24,000	0,050	10,065	10,115	0,112	
24,500	0,023	10,076	10,099	0,096	
25,000	0,151	10,221	10,372	0,369	

GH 9 母材側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0,000	0,000	10,014	10,014	0,000	
10,000	-0,009	10,027	10,018	0,004	
15,000	-0,001	10,031	10,030	0,016	
17,000	-0,003	10,038	10,035	0,021	
18,000	-0,007	10,036	10,029	0,015	
19,000	-0,006	10,036	10,030	0,016	
20,000	0,005	10,040	10,045	0,031	
20,500	0,011	10,049	10,060	0,046	
21,000	0,010	10,053	10,063	0,049	
21,500	0,024	10,073	10,097	0,083	
22,000	0,043	10,075	10,118	0,104	
22,500	0,099	10,101	10,200	0,186	
23,000	0,089	10,137	10,226	0,212	
23,500	0,139	10,201	10,340	0,326	
24,000	0,202	10,266	10,468	0,454	
24,500	0,301	10,377	10,678	0,664	
25,000	0,520	10,592	11,112	1,098	

GH 9 接合側					
X	Y1	Y2	Y	ΔY	
0,000	0,000	10,004	10,004	0,000	
10,000	0,000	10,017	10,017	0,013	
15,000	-0,024	10,045	10,021	0,017	
17,000	-0,014	10,053	10,039	0,035	
18,000	-0,035	10,050	10,015	0,011	
19,000	-0,021	10,046	10,025	0,021	
20,000	-0,023	10,068	10,045	0,041	
20,500	-0,031	10,070	10,039	0,035	
21,000	-0,025	10,067	10,042	0,038	
21,500	-0,028	10,073	10,045	0,048	
22,000	-0,023	10,075	10,052	0,048	
22,500	-0,024	10,091	10,067	0,063	
23,000	0,005	10,110	10,115	0,111	
23,500	0,075	10,183	10,258	0,254	
24,000	0,146	10,265	10,411	0,407	
24,500	0,268	10,378	10,646	0,642	
25,000	0,410	10,521	10,931	0,927	



$$Y = Y_1 + Y_2$$

$$\Delta Y = Y - Y_{X=0}$$

付録C 日本原子力学会1994年春の年会口頭発表用予稿及びOHP集

(社) 日本原子力学会「1994春の年会」(1994年3月29~31日、筑波大)

C3

表面活性化接合法による監視試験片再生法の検討

Investigation on Reconstitution Technique of Reactor Pressure Vessel Surveillance Specimen by Surface-Activated Joining Method

原研 ○鬼沢邦雄、深谷清、西山裕孝*、鈴木雅秀
Onizawa Kunio, Fukaya Kiyoshi, Nishiyama Yutaka, Suzuki MasahideIHI 貝原正一郎、中村照美 (*: 現科技庁)
Kaihara Shoichiro, Nakamura Terumi

緒言 原子力プラントの供用期間を延長した場合、原子炉圧力容器の監視試験用試験片が不足する可能性がある。そのため、試験済みのシャルピー衝撃試験片を有効に利用し、シャルピー試験片を再生する手法がいくつか提案されている。この再生法に関しては、試験片の有効利用のため接合部溶融領域・熱影響部を狭くすること、及び照射脆化の回復を防止するため試験片の温度上昇を極力低く抑えることが重要である。表面活性化接合法は、真空中で摩擦圧接することにより、試験片を溶融させずに低温で接合させることが可能である。本報では、原子炉圧力容器用 ASTM A533B-1 鋼を用いて、表面活性化接合法によるシャルピー衝撃試験片再生法の基礎的検討を行った結果を述べる。

接合方法 真空中(3×10^{-3} Pa)で、35mm ϕ の接合面を有する試験体の一方を固定し、もう一方を 1500rpm で回転させた。これを 29MPa の圧力で 0.3~0.4s 間回転摩擦を行い、127MPa のアプセット圧力で 1.0s 間保持し、接合させた。

試験結果及び考察 図1に接合試験体断面のマクロ写真を示す。接合面の両側には、接合時の加熱による組織変化が認められた。図2に接合部近傍の硬さ分布を示す。この組織変化(硬化)領域の幅は、試験体回転中心部分で約 2mm、最も広い部分は約 3mm であった。表1には接合時試験体各部の最高到達温度の一例を示す。接合面から 3mm 離れた位置における最高到達温度は、約 270 °C であった。これらの結果は、他の各種溶接による試験片再生法(例えば電子ビーム、レーザー溶接等)による結果と比較して、溶融部+熱影響部の幅は狭く、また接合時の温度も十分に低く抑えられている。今後真空度を上げ、加圧力を低減した試験等の実施、並びにシャルピー衝撃試験時の試験片変形挙動の検討により、以上の結果のさらなる改善を行う予定である。

結言 表面活性化接合法により、接合部近傍の組織変化領域の幅を 3mm 以下に抑えることができ、他の溶接による再生法と比較して十分有効な方法であることが確認できた。

表1 接合時の試験体最高温度

接合面から の距離 (mm)	最高到達 温度 (°C)
1	346
2	336
3	268
4	193

[回転中心部から 5mm 離れた
点での測定結果]

図1 接合部のマクロ写真

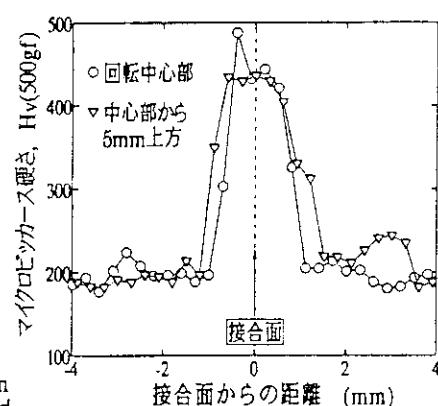


図2 接合部近傍の硬さ分布

C3

表面活性化接合法による監視試験片再生法の検討

Investigation on Reconstitution Technique of Reactor Pressure Vessel
Surveillance Specimen by *Surface-Activated Joining Method*

原研 鬼沢邦雄、深谷清、西山裕孝、鈴木雅秀

ONIZAWA Kunio, FUKAYA Kiyoshi, NISHIYAMA Yutaka, SUZUKI Masahide

I H I 貝原正一郎、中村照美

KAIHARA Shoichiro, NAKAMURA Terumi

平成6年3月29日

日本原子力学会「1994年春の年会」

はじめに

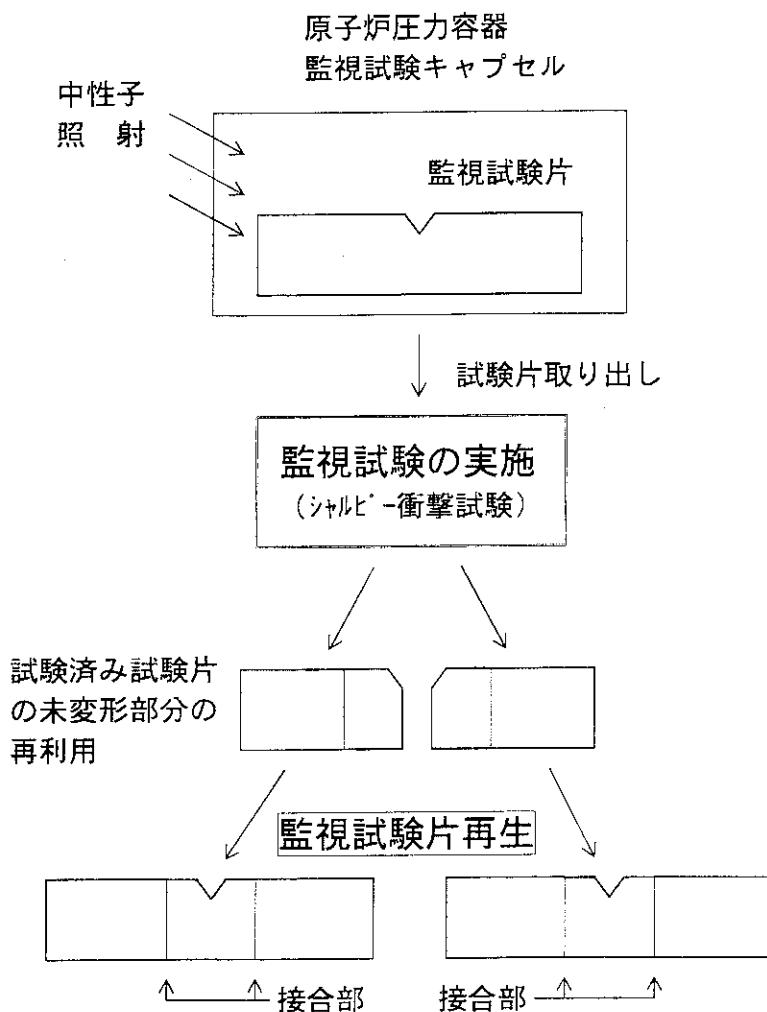
原子力プラントの供用期間延長

→ 原子炉圧力容器の監視試験片が不足

照射脆化の予測評価精度の向上

→ 監視試験片本数の増加が効果的

解決策：試験済みのシャルピー衝撃試験片から、
シャルピー衝撃試験片を再生



監視試験片再生法の条件

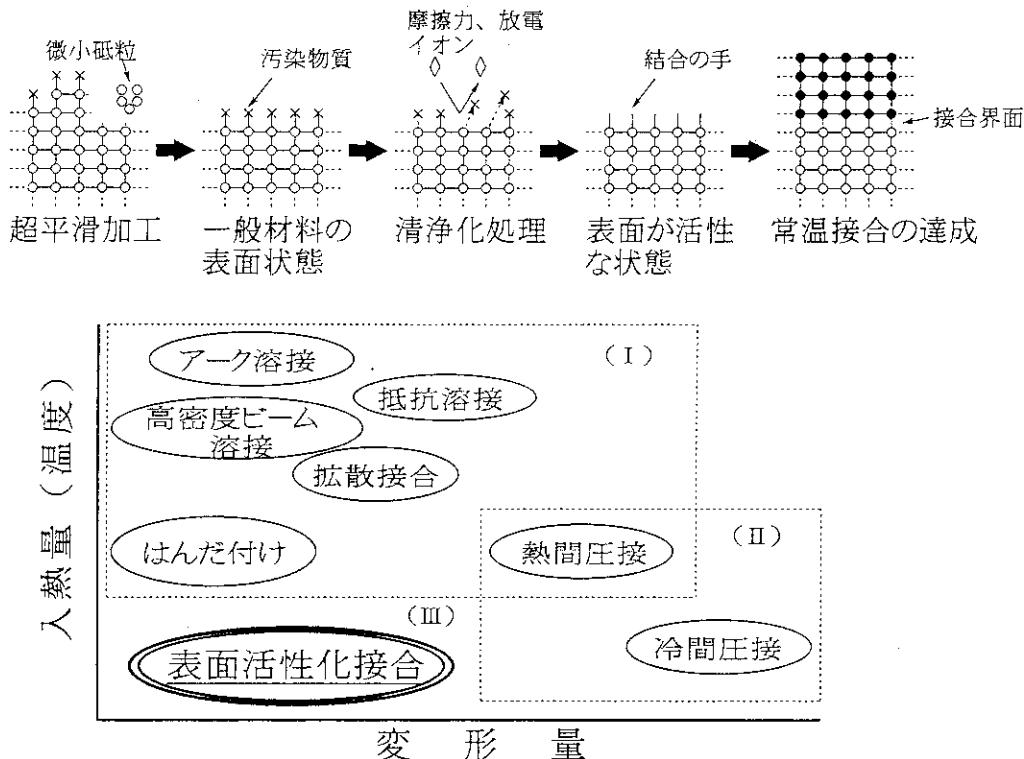
- 試験片の有効利用のため接合部溶融領域・熱影響部の幅が狭いこと
- 照射脆化の回復防止のため試験片の温度上昇が極力低く抑えられること

本報告では、原子炉圧力容器用ASTM A533B-1鋼を用いて、表面活性化接合法によるシャルピー衝撃試験片再生法の基礎的検討を行った結果を述べる。

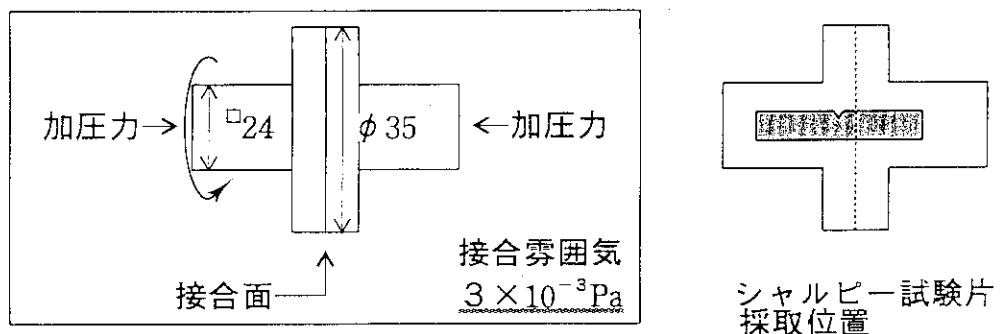
参考文献

- (1) 平野ほか2名、「監視試験片再生のための雰囲気による表面活性化接合法の研究(1)」、J25、日本原子力学会「1992年春の年会」。
- (2) 中村・貝原、「表面活性化接合法の開発」、機械材料・材料加工技術講演会、日本機械学会、1993年11月。

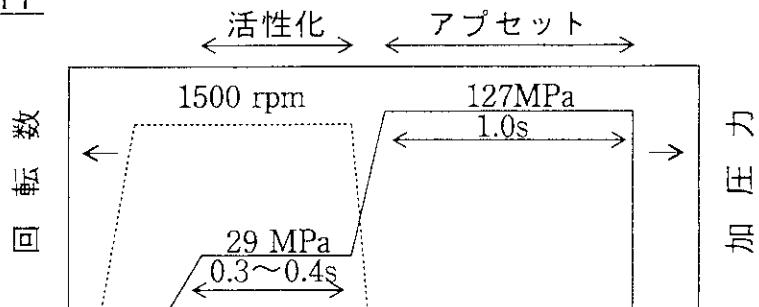
表面活性化接合法



接合方法

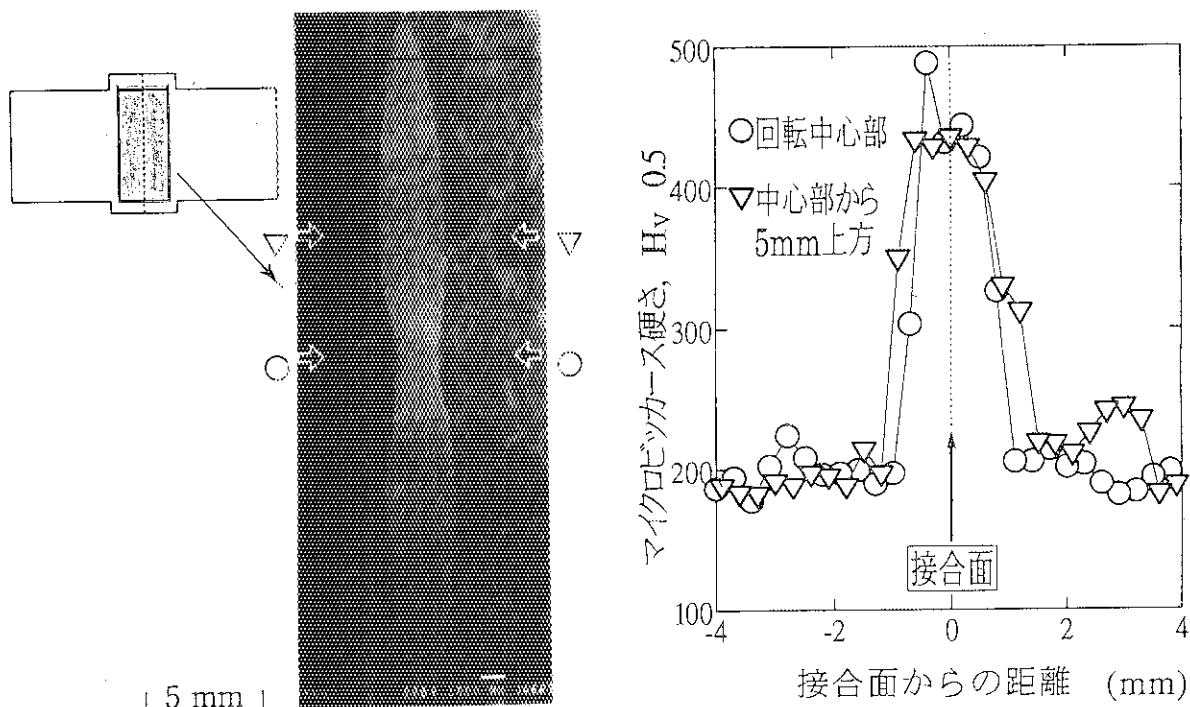


接合条件

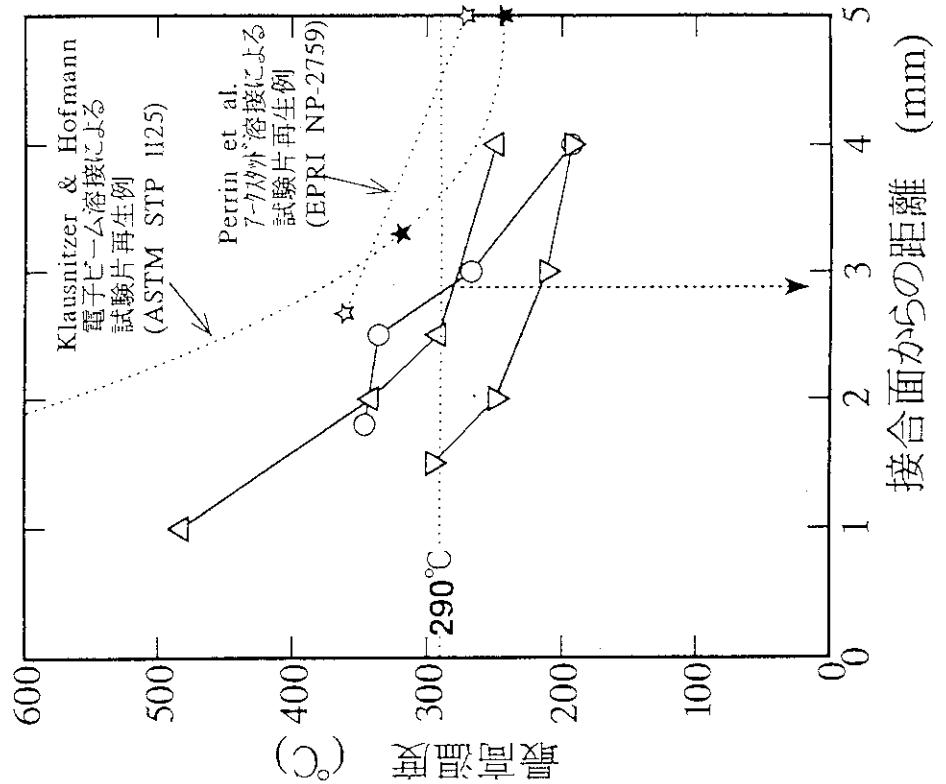
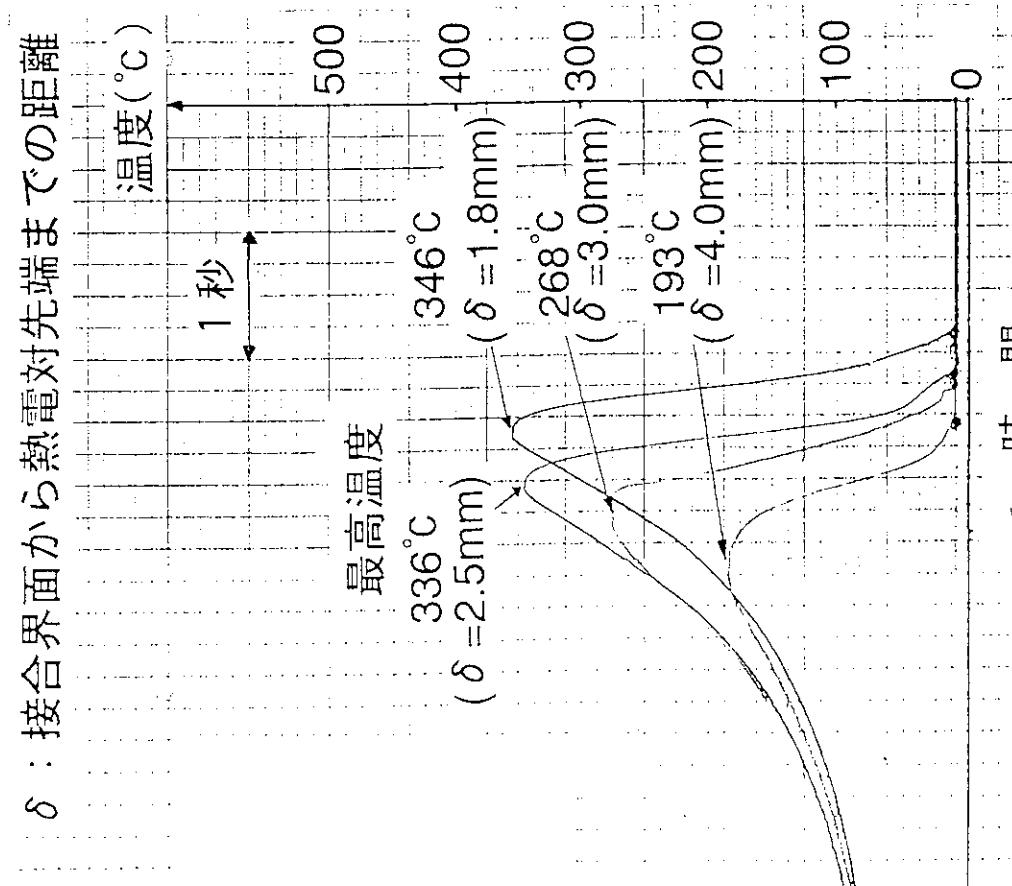


試験内容

- 接合部の金相観察
- 接合面近傍の硬度分布測定
- 接合時の温度計測
- 計装シャルピー衝撃試験

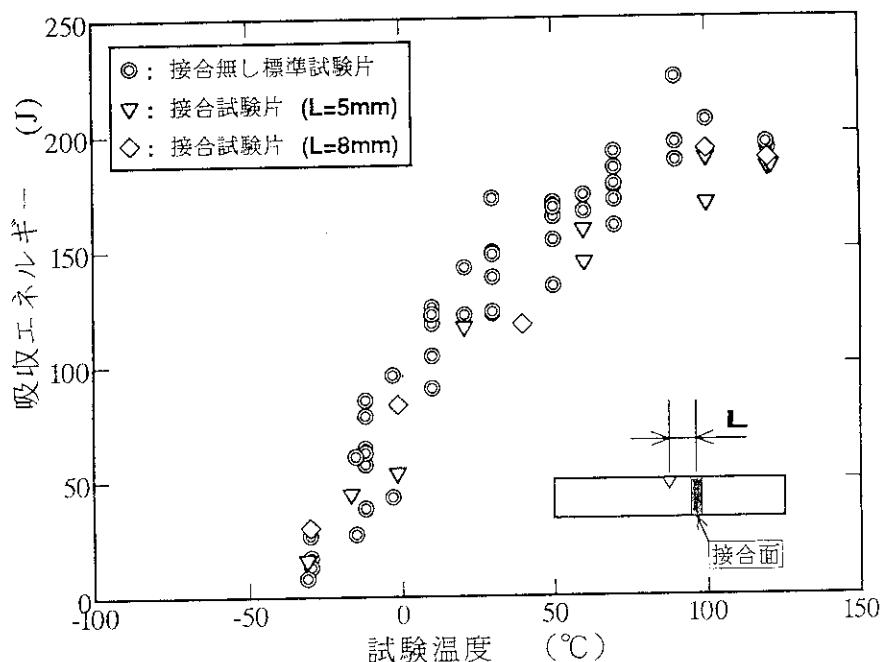


接合試験片の断面マクロ写真及び硬度分布



接合時 の 温度測定データ例 及び 最高温度分布
(回転中心部から半径方向に5mmの位置での測定結果)

Ref. 電子ビーム溶接による試験片再生例; Klausnitzer & Hofmann, ASTM STP 1125, 1992
アーチスタート溶接による試験片再生例; Perrin et al., EPRI NP-2759, 1982



接合試験片と標準試験片とのシャルピー試験結果の比較

まとめ

表面活性化接合法により、接合部近傍の組織変化領域の幅を3mm以下に抑えることができる。また、接合時の温度上昇領域の幅も、6mm以下であった。これらの特徴は、表面活性化接合法が、他の溶接による再生法と比較して優位性があることを示している。

シャルピー衝撃試験に関する予備的検討結果から、本接合法で接合した試験片により、遷移温度の評価が十分可能であることが確認された。

以上の結果から、表面活性化接合法は、監視試験片の再生法として十分適用可能である。