

JAERI-Tech

98-041



照射試験片の再生技術の開発(Ⅲ)
平成7、8年度原研・IHI共同研究成果報告書
(共同研究)

1998年10月

西山裕孝・深谷 清・鬼沢邦雄・鈴木雅秀
中村照美*・貝原正一郎*・吉田和夫*・佐藤 彰*

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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 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（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

照射試験片の再生技術の開発（Ⅲ）
平成7、8年度原研・IHI 共同研究成果報告書
（共同研究）

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部

西山 裕孝・深谷 清・鬼沢 邦雄・鈴木 雅秀

中村 照美*・貝原正一郎*・吉田 和夫*・佐藤 彰*

（1998年8月31日受理）

原研と石川島播磨重工業（IHI）は、平成5年度から照射試験片の再生技術の開発に関する共同研究を実施している。平成5、6年度は、試験片再生のための接合技術として表面活性化接合法を適用し、非照射材料を用いた基礎試験を実施した。その結果、本方法によれば、他の一般的な溶接法と比べて狭い熱影響部幅で材料を接合させることが可能であるとともに、接合したシャルピー試験片から遷移温度を評価できる見通しを得た。

本報告書は平成7、8年度に実施した共同研究の成果をまとめたものである。当該年度は、接合欠陥の発生等をさらに抑えるため、接合面形状の変更を行い、接合制御パラメータとしてトルクを新たに導入した。また、接合した試験片の非破壊検査、接合中の試験片の温度測定等を行うとともに、接合がシャルピー衝撃試験結果に与える影響等について詳細に検討した。さらに、中性子照射を受けても接合部の健全性が確保できることを示した。

本研究は、日本原子力研究所と石川島播磨重工業㈱の共同研究として実施したものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

*石川島播磨重工業㈱

Development of Reconstitution Technique of Irradiated Specimens (III)
— Report for FY 1995 and FY 1996 on JAERI-IHI Cooperated Research Program —
(Joint Research)

Yutaka NISHIYAMA, Kiyoshi FUKAYA, Kunio ONIZAWA, Masahide SUZUKI
Terumi NAKAMURA * , Shoichiro KAIHARA * , Kazuo YOSHIDA * and Akira SATO *

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

(Received August 31 , 1998)

The cooperated research between Japan Atomic Energy Research Institute and Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. on the development of reconstitution technique of irradiated reactor pressure vessel surveillance specimens has been performed from FY 1993. In FY 1993-1994, the method of surface activated joining (SAJ) was applied to reconstitution of Charpy impact specimens. Some verification tests using unirradiated reactor pressure vessel plate materials have shown that SAJ is feasible for a reconstitution technique, in particular, owing to low joining temperature.

The present paper reports the results of the cooperated research performed in FY 1995-1996. To improve the quality of the SAJ, the configuration of the end tab surface to be joined with the insert material was modified. The torque measured during joining was also introduced in joining parameters. A nondestructive inspection, temperature measurements in the specimens during joining were performed. The effect of joining on Charpy impact properties was discussed. For practical application of the technique to irradiated specimens, we confirmed that the impact specimens with joining interface gave rise to no failure at the joining position during impact test after neutron irradiation.

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

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

Keywords : Reactor Pressure Vessel Surveillance, Reconstitution, Charpy Impact Specimen, Surface Activated Joining, Friction, Heat Affected Zone, Neutron Irradiation

This is a blank page.

目 次

| | |
|----------------|----|
| 1. 序 | 1 |
| 2. 供試材 | 2 |
| 3. 接合試験 | 2 |
| 3.1 接合方法 | 2 |
| 3.2 接合の高度化 | 3 |
| 3.3 試験片保管状況の影響 | 4 |
| 3.4 非破壊検査 | 5 |
| 4. 組織観察及び硬さ試験 | 5 |
| 5. 接合中の温度測定 | 6 |
| 6. シャルピー衝撃試験 | 7 |
| 6.1 非照射材 | 7 |
| 6.2 照射材 | 7 |
| 6.3 変形量の測定 | 8 |
| 7. 結言 | 9 |
| 参考文献 | 10 |
| 付録 | 30 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Test Materials..... | 2 |
| 3. Joining..... | 2 |
| 3.1 Joining Condition..... | 2 |
| 3.2 Improvement of Joining..... | 3 |
| 3.3 Effect of the Specimen Storage Condition on Joining..... | 4 |
| 3.4 Nondestructive Examination..... | 5 |
| 4. Microstructure Examination and Hardness Measurement..... | 5 |
| 5. Temperature Measurement during Joining..... | 6 |
| 6. Charpy Impact Test..... | 7 |
| 6.1 Unirradiated Specimen..... | 7 |
| 6.2 Irradiated Specimen..... | 7 |
| 6.3 Deformation Measurement..... | 8 |
| 7. Conclusion..... | 9 |
| References..... | 10 |
| Appendix..... | 30 |

1. 序

原子炉圧力容器鋼の照射脆化は、供用期間中に圧力容器内に装荷されている監視試験片（シャルピー衝撃試験片、引張試験片）により評価されるが、原子力プラントの供用期間が長期化する場合には監視試験片が不足する。このため、試験済みの監視試験片の未変形部分を類似の非照射の材料と接合し、監視試験片を再生する技術（監視試験片再生技術）の開発が必要である。この監視試験片再生技術は、試験済みのシャルピー衝撃試験片から破壊靱性試験片を作り出すことにも利用できる。監視試験片再生技術の開発において解決すべき点は次のとおりである。

- ・限られた体積の試験片の有効利用を図るため、接合にともなう溶融領域及び熱影響部の幅を狭くする。
- ・接合に伴って生じる熱による照射脆化の回復を防止するため、接合時の試験片の温度上昇を極力低く抑える。
- ・接合試験片は接合なし試験片と同等の衝撃特性を有する。

既に開発が進められている試験片再生技術としては、アークスタッド溶接、電子ビーム溶接、レーザー溶接等による方法がある⁽¹⁾。これらは、主に研究段階として実用化されている。しかし、いずれの溶接法も材料の溶融を伴うため、溶接条件等を最適化し冷却ブロックを用いても、溶接入熱による試験片の温度上昇を抑えることには限界がある。そのため、常温真空中で材料表面を活性化させることによって低入熱で接合できる表面活性化接合法⁽²⁾に注目し、平成5年度から日本原子力研究所（以下 原研）と石川島播磨重工業（株）（以下 IHI）の共同研究を開始した。これまでの経過は次のとおりである。

平成5年度は、表面活性化接合法の監視試験片再生技術への適用を検討するため、予備的な接合試験を実施し、その結果について他の一般的な溶接法（レーザー、電子ビーム等）との比較を行った⁽³⁾。ここで用いた表面活性化法は、ホットセル内での作業性等を考慮し、回転摩擦による方法を採用した。その結果、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（290℃）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可能であり、他の溶接接合法と比較してこれらが十分狭い範囲であることを確認した。ただし、これらの結果はφ 32 mmの丸棒試験片の突きあわせ接合によるものである。

平成6年度においては、前年度の接合試験に用いた試験片はφ 32mmの丸棒という予備的なものであったことから、実際の監視試験片であるシャルピー衝撃試験片10×10×55 mmと同じ断面寸法を有する試験片について接合条件の検討を行った⁽⁴⁾。接合のための真空度は平成5年度の場合と比較し2オーダー高い $\sim 10^{-5}$ Pa

とした。その結果、熱影響部幅を接合界面から片側約 1 mm とすることが可能となった。また、接合面の形状を凹凸にすることにより、熱影響部幅を均一に、しかも狭くした接合を行える可能性を示した。

本報告書は平成 7、8 年度の共同研究における成果をまとめたものである。ここでは、熱影響部の狭小化と同時に接合欠陥の発生を抑えるため、接合面形状の変更を行うとともに、接合における制御方法を高度化した結果について報告する。また、接合がシャルピー衝撃試験結果に与える影響等について詳細に検討した結果についても報告する。さらに、ASTM により 1992 年から 1995 年まで実施された試験片再生に関するラウンドロビン試験⁽⁹⁾で使用されたものと同種の鋼材に対し、ラウンドロビン試験において推奨された方法に従って接合中の温度測定を行った結果についても示している。なお、このラウンドロビン試験の概要を付録として掲載する。

2. 供試材

供試材は、平成 5、6 年度と同様に原子炉圧力容器用 ASTM A533B-1 鋼(JRQ)である。本鋼は IAEA 鋼材照射共同研究⁽⁶⁾において使用されたものであり、板厚 225mm の 1/2t から接合に供する試験体を採取した。本鋼の化学成分等の基礎データは別報告のとおりである⁽³⁾。また、ASTM ラウンドロビン試験の供試材である HSST-03 を接合中の温度測定のために用いた。

3. 接合試験

3.1 接合方法

第 3-1 図に接合装置の外観を示す。この装置は平成 6 年度の共同研究で使用したものと同じであるが、時節で示すように、軸芯のブレの低減を図っている。接合装置は、アクチュエータ（容量 196 kN）、回転モータ（～960 rpm）、真空チャンバから構成されている。チタンゲッターターボ分子ポンプにより到達真空度は～ 10^{-5} Pa である。

接合方法は、第 3-2 図に示すとおり、材料の降伏応力より低い圧力で回転摩擦を加え、その後回転を停止し、回転摩擦時よりも大きな圧力でアップセットを行う。各パラメータについては次節で示す。再生手順を第 3-3 図に示す。まず、試験済みのシャルピー衝撃試験片あるいは元ブロックから切り出した断面が 10×10mm の

インサート（角）にカラムを4方向からビスで固定する。このカラムは、回転摩擦時のインサートの角の塑性変形を防ぐためのものであり、インサート材とともにタブ材に接合される。そして、インサートの両面を接合し、その後、フライスで10×10×55 mmに仕上げ、最後に2 mm深さのVノッチを加工されることにより再生されたシャルピー衝撃試験片が得られる。

3.2 接合の高度化

(1) トルク制御の導入

平成6年度においては、第3.2図に示されるように、回転摩擦中の圧力、回転数、時間、及びアップセット時の圧力、時間という計5つパラメータについて、試験片の熱影響部の幅がもっとも狭くなるような値を決定した。しかし、その後実施した接合試験において、同じ接合パラメータの値を設定しても、接合面の機械的仕上げの程度、試験片の装着具合、到達真空度のバラツキ等により、接合欠陥の発生や過大な熱影響部が生じる場合があることが問題となっていた。

そこで、平成7、8年度においては、過不足なく試験片に回転摩擦を与えるため、接合面の清浄度（活性化度）のパラメータとして回転摩擦中に測定されるモータトルクを導入した。すなわち、回転摺動によって材料の表面が活性化されると摩擦係数が大きくなってトルクが増大するが、接合のために必要なトルクに達した時に回転摩擦を停止するというものである。このように接合制御パラメータとしてトルクを導入した場合の接合のフローチャートを第3-4図に示す。

第3-5図は、回転摩擦停止トルクを変えた場合の接合試験片断面のエッチング写真を示したものである。なお、回転摩擦時の圧力、アップセット時の圧力及び時間はそれぞれ20 MPa、200 MPa、300 secである。停止トルクを4.5 kgf・mとした場合、回転摺動が少ない試験片中央部に接合欠陥が見られた。また、停止トルクを大きくすると、写真上で黒くエッチングされる熱影響部の幅が広がった。追加試験結果を合わせて、接合欠陥が生じない回転摩擦の停止トルクとして5.0 kgf・mを実験的に決定した。

(2) 芯ブレの低減

平成6年度の接合試験においては、接合装置の軸芯ブレに起因した接合欠陥の発生が問題となっていた。そこで、平成7、8年度は、回転摩擦中の芯ブレを出来るかぎり小さくするため、加圧側（第3.1図上側）の試験片掴み治具を、真空チャンバから3方向から伸ばした剛性棒によって固定するように改造した（第3-6図）。また、回転側（第3.1図下側）については、ベアリングを用いて回転ロッドを3方向から支持するようにした。これらの対策により、加圧側の芯ブレを0.05 mm

以下となった。なお、同時に軸芯合わせも行い、調整前は最大 4.5° あったものを、ほぼゼロに調整した。

(3) 接合面形状

平成6年度の接合試験で採用したタブ材の接合面形状は第3-7図に示すように熱影響部の形状に合わせ凹凸とし、熱影響部の幅が均一となるようにした。回転摩擦により活性化を行うときには、回転の中心部分は周辺部に比べて摺動量が小さくなるため十分な接合面の活性化が得られにくくなる。例えば、第3-8図に示すように、平坦面どうしを接合した場合、摺動量が少ない試験片中央部付近は熱影響部は狭いが、接合欠陥が認められることが多い。厳密に言えば、試験片装着等によるアライメントのズレ等がない場合は、試験片の回転中心では相対速度がゼロであるから材料は活性化しないことになる。一方、中心部分から4 mm離れた位置では熱影響部がもっとも広くなり最大2.5 mmになった。外周では発熱量が最大となるが、輻射による放熱と冷却のために熱影響部幅は急激に狭くなる。そこで、試験片中央部分の活性化を促進するため、タブ材側の接合面の中央部を高さ0.1 mmの凸状、熱影響部幅が大きくなる部分を深さ0.1~0.2 mmの凹状とした。第3-9図に接合試験片の断面をエッチングしたものを示す。黒く見える熱影響部は第3-8図と比較して平坦な形状となった。しかし、この接合試験片から加工されるシャルピー衝撃試験片を試験に供した場合、ノッチからでなく接合部での割れが全接合の約7割程度発生した。割れの典型的な例として、第3-10図に、再生されたシャルピー試験片における接合部の割れのマクロ写真（擦り傷が確認できるところが接合欠陥）とX線検査結果を示す。割れの原因となる接合欠陥は凹部に発生しており、チャッキングの際の試験片アライメントのズレ、あるいは、凹量が大きすぎることによるものと推察される。

そこで、平成7、8年度においては、タブ材の接合面の断面形状を第3-11図に示すとおり円錐台型に変更した。その結果、接合面の形状が凹凸と同様に平坦な熱影響部になるとともに、接合欠陥の発生割合を減少させることが可能となった。この形状については今後とも検討が必要であると考えているが、5.以降に示す各種評価試験結果は、この接合面形状によって接合された試験片によるものである。

3.3 試験片保管状況の影響

実際の試験片再生においては放射化材を扱うので、試験済み試験片からのインサートの切り出し、接合、接合試験片の機械加工という一連の作業をホットセル内での遠隔操作により行う必要がある。一般にホットセルは多湿であるため試験片が錆びやすい。このため、新たに試験片の保管方法の接合への影響に関する知

見を得るための試験を行った。ここでは、

(1) ダイヤモンドカッターで切断後、すぐに接合装置に試験片をセットして接合を行う。

(2) ダイヤモンドカッターで切断後、3日間大気中(温度10~15℃、湿度20~40%)に放置した後に接合する。

という2つの場合の接合試験を行った。なお、両方とも切断後に試験片の洗浄を施していない。(1)の場合、接合断面のエッチングでは接合欠陥は確認されなかったが、(2)の場合には、試験片表面にうっすらとサビが発生し、第3-12図に示すとおり明らかな接合欠陥が認められた。例えば、東海研ホットラボのセル中の湿度はおおよそ40%程度であり、今回の条件より厳しい環境にある。したがって、セル内で試験片を保管する場合には、デシケータに封入するとともに、接合直前にエメリー紙(#1500)で軽く接合面を研磨することが必要である。

3.4 非破壊検査

接合試験体から機械加工されたすべてのシャルピー衝撃試験片に対し、衝撃試験前にX線検査を行った。検査条件は、管電圧135kV、管流電流8mA、時間2min.である。このX線検査によって欠陥なしと判断されたものは、第3.10図に示したような接合部の割れは発生しなかった。ただし、実際の放射化材を扱う試験片再生では、接合後、すなわちカラム付きの段階で非破壊検査を行い、接合欠陥が存在しない接合試験片の加工のみを行うことが必要である。このようなカラム付きの接合試験片に対する非破壊検査においては、X線に比べて超音波探傷の適用がより簡便であるため、今後は超音波探傷条件の検討が必要である。

4. 組織観察及び硬さ試験

第4-1図に接合過程における摩擦力の変化の一例を示す。真空中では摩擦により材料の表面が活性化されると摩擦力(トルク)が急激に増加する。接合中に真空チャンバーの窓から接合面を観察したところ、トルクが急激に増加するのは接合開始から約5秒経後であり、接合界面近傍が局部的に赤くなることが認められた。これは、摩擦熱が局所的に発生したためである。しかし、結晶粒の粗大化等から判断できる材料の溶融は認められない。また、第4.2図に接合部の断面のマクロ写真及び接合部中心近傍の走査電子顕微鏡写真を示す。熱影響部(写真上で黒い部分)では、接合面に沿って組織が流れる微細マルテンサイトを含む塑性流動層が認められる。

第 4-3 図に接合面近傍のビッカース硬さ分布を示す。測定位置は、接合中心と接合中心から 4 mm 離れた位置である。この図から、熱影響部は硬化しており、その領域の幅は接合面片側約 1 mm である。

5. 接合中の温度測定

平成 5 年度においては、 ϕ 32 の丸棒試験片を用いることにより、実際の監視試験片の断面寸法よりもかなり大きい場合の試験片内温度上昇を、パークッション溶接した素線熱電対によって測定した。平成 8 年度では、監視試験片であるシャルピー衝撃試験片 $10 \times 10 \times 55$ mm と同じ断面寸法を有する試験片に対して接合中の温度を測定することとした。

接合中の温度測定のために用いた材料は JRQ と HSST-03 である。HSST-03 は、ASTM ラウンドロビン試験の供試材料と同じチャージものである。

温度測定のための熱電対は、 ϕ 2.5 mm の保護管に ϕ 0.32 mm の素線熱電対を通して先端をパークッション溶接したもの、及び ASTM ラウンドロビン試験法で定められた ϕ 1 mm の接地型シース熱電対を Ni ろう付けしたもの（以後、ASTM ラウンドロビン法）の 2 種類とした。前者では、インサートのコーナー部に熱電対先端が位置するようにパークッション溶接を行った。ASTM ラウンドロビン試験法では、第 5-1 図に示すように、長さ 20 及び 25 mm のダミーインサートを用い、接合中心に熱電対の先端が接合面からの距離で 2 mm と 4 mm の 2 種類となるようにした。なお、接合面からの距離が 2 mm 及び 4 mm の場合のダミーインサートの長さは、それぞれ 20 mm と 25 mm である。ろう付けは、 ϕ 2 mm の穴に Ni ろうの粉末を充填し、1100°C 前後で 1 分間保持し、その後、熱電対の鋭敏化を防止するために不活性ガス注入による強制冷却することにより行った。なお、温度測定の前にはシース熱電対先端近傍に空隙がないことを確認するため、X 線検査を行っている。

第 5-2 図に、接合中の温度の測定例として、HSST-03 に対し ASTM ラウンドロビン法で測定された接合面から距離が 2 mm の場合の温度と時間の関係を示す。また、第 5-3 図に、接合中において測定された最高温度と接合面からの距離との関係を示す。なお、同図には素線熱電対によって測定されたデータも含まれている。監視試験片の再生では、接合中における熱によって照射脆化の回復が回復してしまうことを避けるため、出来る限り試験片の温度上昇を抑える必要がある。第 5.3 図から、接合面から 2 mm 離れると接合中の温度は原子炉運転温度の 290°C 以下となり、照射脆化の回復の可能性がほとんどなくなる。他の一般的な溶接法と比較した場合⁽⁷⁾⁽⁸⁾、最も試験片の温度上昇が抑えられた場合でもこの距離が 3mm とな

っている。

6. シャルピー衝撃試験

6.1 非照射材

シャルピー衝撃特性に及ぼす試験片再生の影響は、接合で生じる硬化領域によって試験片の塑性変形がブロックされ、再生試験片の吸収エネルギーが低下することである。この影響は、インサート長さが短くなるほど試験片のノッチと接合部が近くなるため顕著になる。

平成5年度においては、シャルピー試験片のVノッチに対して3~8mm離れたところに片側だけ接合部が存在するシャルピー試験片を用いて衝撃試験を実施した。その結果、接合無し試験片と比べた場合、ノッチから3mm離れたところに接合部を有する場合のみ上部棚シャルピー吸収エネルギーの低下が認められた。しかし、実際の再生試験片はVノッチをはさんで両側に接合部が存在するため、この接合のシャルピー吸収エネルギーの影響は過小評価となっている。

平成7、8年度においては、インサート長さ10mmとし、その両側に接合部を有する実際の再生試験片と同じ状態として、シャルピー特性に及ぼす接合の影響を調べた。ここで用いた材料はJRQである。シャルピー衝撃試験はJIS Z 2242に従って実施した。第6.1表に非破壊検査結果とシャルピー試験結果を合わせて示す。試験前のX線検査で欠陥が検出された試験片では、衝撃試験によって第3.10図に示した接合部に起因する割れが発生した。なお、接合なし試験片による生データは別報を参照されたい⁽³⁾。第6-1図に吸収エネルギー、横膨出量、延性破面率の遷移曲線を示す。再生試験片によって得られる吸収エネルギー、横膨出量は、延性脆性遷移領域では接合なし試験片と同等の値が得られるが、上部延性脆性遷移温度領域及び上部棚領域における低下が見られる。上部棚吸収エネルギーで見れば、接合なし試験片では198Jであるのに対し、再生試験片ではその約10%低い値となる。これは、前述のように、塑性変形が接合で生じる硬化領域でブロックされるためであると推察される。一方、破面率では、接合なし試験片と再生試験片を比較すれば、すべての領域において再生試験片から得られる値は接合なし試験片による値と同等となる。この結果は、破面率が破壊様式を示すパラメータであるため、塑性変形に必要なエネルギー及び塑性変形の拡がりに影響されにくいことによるものと考えられる⁽⁹⁾。

6.2 照射材

中性子照射を受けた場合の接合部の健全性を確認するため、平成5年度の共同研究によって決定した接合条件で再生されたシャルピー試験片に対し、JMTRで照射を行った。これらの試験片に対してシャルピー衝撃試験を実施し接合部の割れの有無を調べた。ここでJMTRで照射を行った4本の再生されたシャルピー衝撃試験片は、接合部がノッチから5mmの位置に片側1箇所あるものである(以後、片側再生試験片とする)。照射温度は290℃、中性子照射量は $1.3\sim 1.8\times 10^{19}$ n/cm² (E>1MeV)である。

第6-2図に片側接合試験片により得られた吸収エネルギーを、同等の条件で中性子照射を受けた接合なし試験片(JRQ)で得られたシャルピー吸収エネルギー遷移曲線とともに示したものである。片側接合試験片における吸収エネルギーは、接合なし試験片の結果とほぼ一致している。これは、接合が1箇所であるため接合の影響が小さいこと等によると考えられる。

第6-3図はシャルピー衝撃試験後における接合部近傍の4方向からのマクロ写真である。すべての面において接合部での割れは認められない。また、他の3本の片側再生試験片についても同様な結果であり、下部柵領域～遷移温度領域～上部柵領域のいずれの場合においても、中性子照射後における接合部の健全性を確認することができた。

第6-4図に非照射材、照射材の接合中心、中心から4～5mmはなれた位置における硬さ分布を示す。母材は中性子照射によって硬さが上昇するが、接合部近傍の接合によってもともと硬くなっている領域での硬さの上昇はほとんどない。これは、熱影響部を構成するマルテンサイトの照射硬化感受性が鈍いことによると考えられる。以上の結果から、監視試験片を再生し、監視試験片カプセルに再装荷して中性子照射を受ける場合においても、中性子照射にともなう接合部の劣化はないものと推察される。

6.3 変形量の測定

平成7、8年度においては、試験済みのシャルピー衝撃試験片の変形部の範囲、すなわち塑性域の大きさを把握し、試験片再生に利用できる未変形部の長さを推定するための方法の検討を新たに実施した。シャルピー衝撃試験片の塑性域の大きさを測定した例として、硬さ分布による結果が報告されているが⁽¹⁰⁾、ここでは、より簡便な方法として試験済み試験片の変形量を測定することとした。測定には、シャルピー衝撃特性の異なる3種類の原子炉圧力容器鋼(第6-2表)の試験済みのシャルピー衝撃試験片を用いた。変形量として測定したものは、第6.5図に示すような試験片エッジを基準とした試験片長手方向に沿うy方向変形と紙面垂直方向

の幅（横膨出量）である。測定には X-Y ステージ付き光学顕微鏡（30 倍）を用いた。

第 6-6 図に上部棚域、遷移温度領域及び下部棚領域において試験した試験片の y 方向変形測定の代表例をノッチ側、非ノッチ側について示す。各試験片ともノッチに近づくにつれ第 6.5 図で定義したプラス側の変形が大きくなる。また、塑性変形の大きい上部棚域の試験片については、ノッチ近傍においてマイナス側の変形が見られる。次に、試験片の y 方向変形量（ノッチ側、非ノッチ側の変形量の差とする）に基づき、試験片端からの未変形部長さと吸収エネルギーの関係を示したのが第 6-7 図である。ここでの未変形部長さは、測定された変形量が JIS 規格で定められている試験片寸法許容量（0.05 mm）以内である距離とした。また、図中には、横膨出量(LE)の測定結果も示してある。横膨出量における未変形部長さとは、上記と同様な定義である。図から、y 方向変化量から決められる未変形部の長さとは吸収エネルギーとの間には相関が認められる。また、横膨出量の方がより変形が大きい。これらから、試験済みシャルピー衝撃試験片からのインサート切断位置の決定にあたっては、試験片長手方向に沿う横膨出量が一つの指標となることがわかる。なお、硬さを指標とした塑性域寸法の測定結果によれば⁽¹⁰⁾、破面率 100% の試験片では塑性域はノッチから最大 9 mm、すなわち未変形部長さは 18.5 mm であり、第 6.6 図において横膨出量から予測される値と一致している。

7. 結言

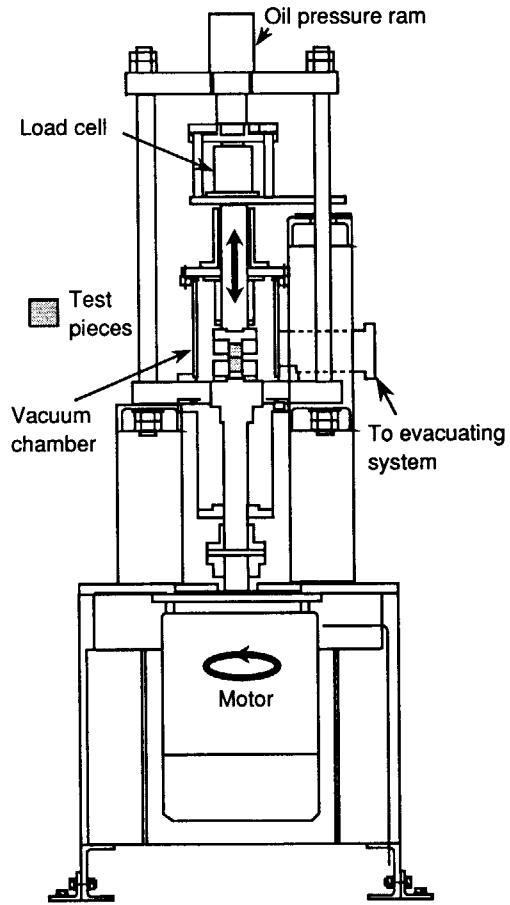
平成 7、8 年度に実施した照射試験片の再生技術の開発に関する共同研究では、熱影響の低減及び接合部の健全性の向上を目指し、接合制御方法や接合面形状を、これまでに実施した共同研究の成果を踏まえて改良するとともに、試験片再生に係る技術要件に関する詳細な評価試験を行った。以下、得られた知見を列挙する。

- (1) 接合パラメータとしてトルクを導入したことにより接合の安定化が図れた。
- (2) 接合装置の芯ブレ防止機構の付加、接合面の形状の改良により、接合不良の発生を低減することができた。
- (3) 接合中の温度測定結果から、接合面から 2 mm 以上離れた場所の温度は、压力容器の使用温度である 290℃以下であった。
- (4) インサート長さを 10 mm とした接合試験片によりシャルピー衝撃試験を実施した結果、延性脆性遷移温度領域における吸収エネルギーは接合なし試験片と同程度であった。ただし、上部棚領域では吸収エネルギーの低下が認められた。
- (5) 中性子照射を受けても、接合部の健全性は確保できる。
- (6) 再生用インサートを切り出す際、試験済みシャルピー衝撃試験片の未変形部を簡便に推定するためには、試験片長手方向に沿った横膨出量の測定が有効である。

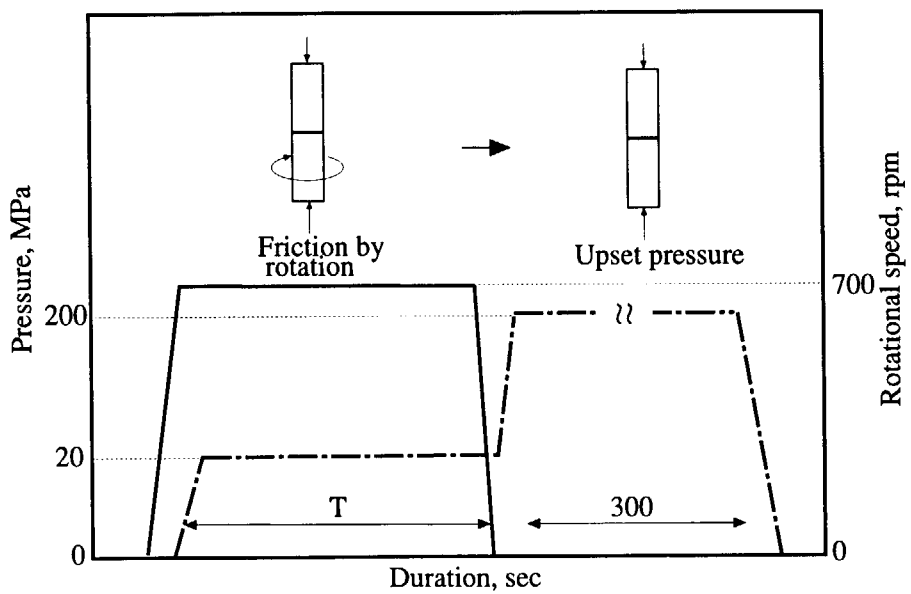
参考文献

- (1) van Walle, E., "Reconstitution: Where Do We Stand?," Effects of Radiation on Materials; 17th International Symposium, ASTM STP 1270, David S. Gells, Randy K. Nanstad, Arvind S. Kumar, and Edward A. Little, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1996, pp. 415-441.
- (2) Nakamura, T. and Kaihara, S., "Development of Cold Solid Phase Welding," Proceedings of the International Conference of Welding, IIW Doc. I-956-92, Madrid, Spain, 1992
- (3) 鬼沢他、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、JAERI-Tech 94-017, 1994.
- (4) 西山他、照射試験片の再生技術の開発(II) 平成6年度原研・IHI共同研究成果報告書、JAERI-Tech 96-003、1996.
- (5) Onizawa, K. et al., "Critical Analysis of the ASTM Round-Robin on Reconstitution," ASTM Symposium on Small Specimen Test Techniques, New Orleans, January 1997.
- (6) Onizawa, K. and Suzuki, M., "Correlation among the Changes in Mechanical Properties due to Neutron Irradiation for Pressure Vessel Steels," ISIJ International, Vol. 37, 1997, No. 8, pp. 821-828.
- (7) Klausnitzer, E. and Hofmann, G., "Reconstituted Impact Specimens with Small Inserts," Effects of Radiation on Materials; 15th International Symposium, ASTM STP 1125, R. E. Stoller, A. S. Kumar, and D. S. Gells, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, pp. 76-90.
- (8) Valo, M. and Ahlstrand, R., "Application of Reconstitution Welding Technique for Studying Base Metal of a Novovoronezh Unit-1 Trepan Sample," Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension, ASTM STP 1204, W. R. Corwin, F. M. Haggag, and W. L. Server, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, pp. 440-456.
- (9) van Walle, E., Fabry, F., Van Ransbeeck, T., Puzzolante, J.-L., Van de Velde, J., Tulke, K., and Backfisch, W., "Notch Reorientation of Charpy-V Specimens of the BWR Philippsburg 1 Through Reconstitution," Effects of Radiation on Materials; 17th International Symposium, ASTM STP 1270, David S. Gells, Randy K. Nanstad, Arvind S. Kumar, and Edward A. Little, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1996, pp. 458-485.
- (10) Klausnitzer, E., "Detailed Investigations on Reconstituted Charpy Specimens with Insert Length down to 10 mm," presented at the Workshop on Experiences with Testing Reconstituted Charpy Specimens, San Diego, CA, USA, January 1991.

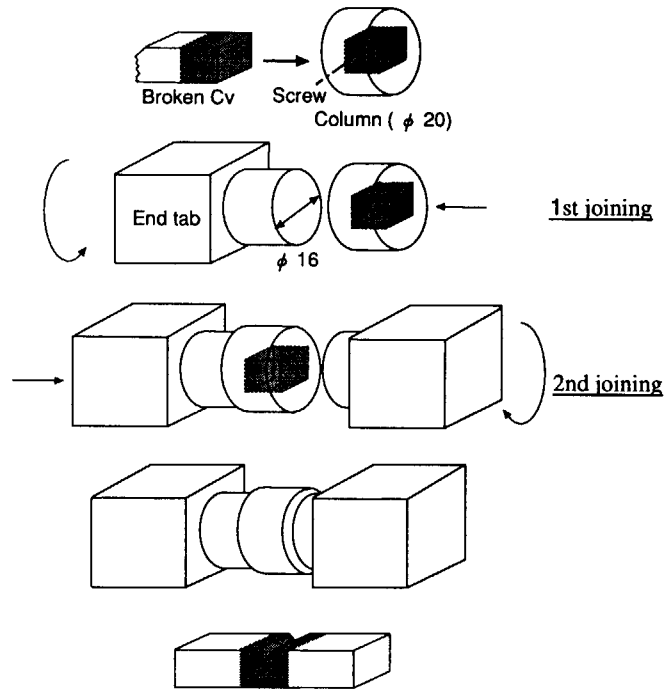
- (11) McElroy, R. et al., "Final Review for IAEA of UK Contribution to the IAEA Phase 3 Coordinated Research Program," presented at IAEA RCM meeting, Vienna, November 1993.
- (12) Wallin, K. et al., "Beyond the Charpy - Improved toughness predictions and advanced surveillance," presented at Radiation Damage and Embrittlement in Pressure Vessel Steels - IGRDM Open Workshop, Santa Barbara, May 6, 1994.



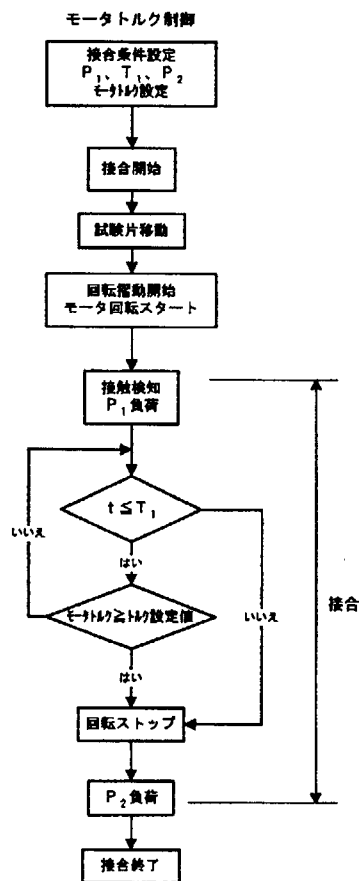
第 3-1 図 接合装置の外観



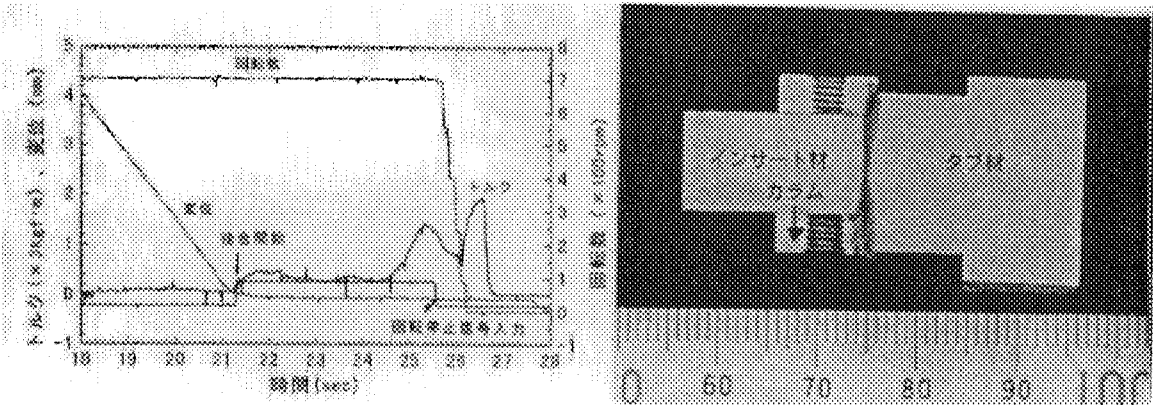
第 3-2 図 接合方法



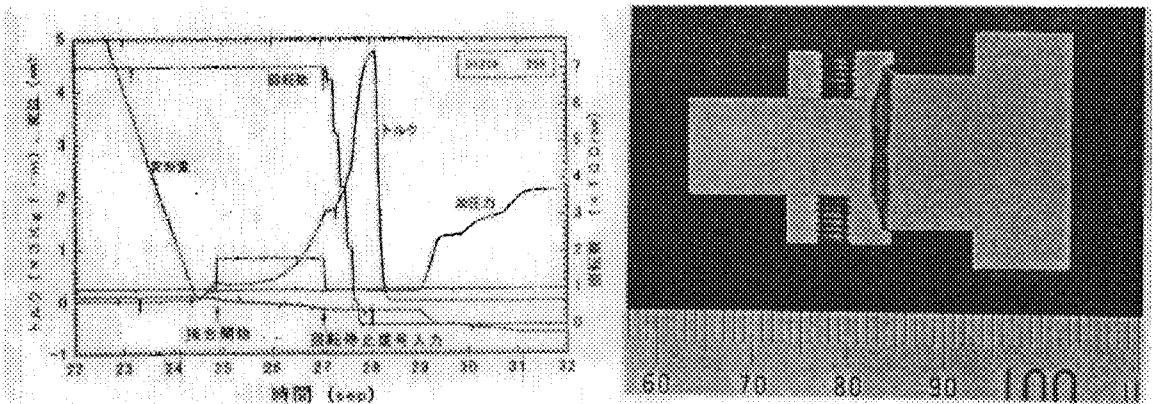
第 3-3 図 接合手順



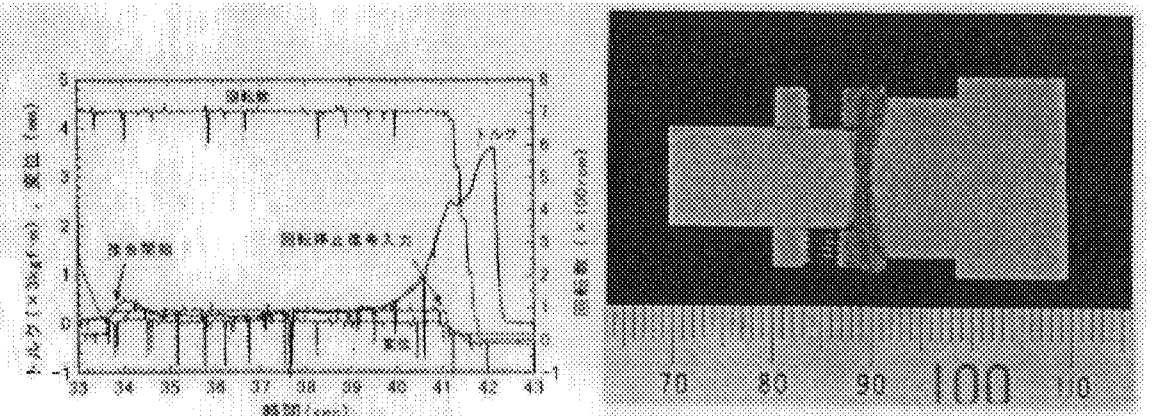
第 3-4 図 トルク制御による接合のフロー



(a) 停止モータトルク：4.5kgf・m

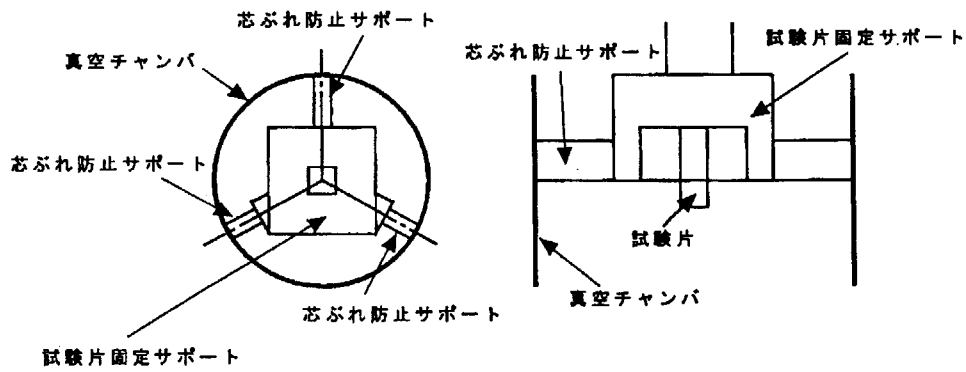


(b) 停止モータトルク：5.0kgf・m



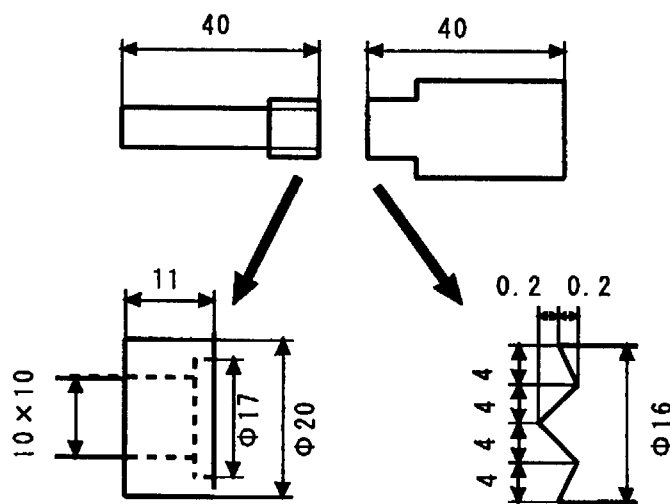
(c) 停止モータトルク：7.5kgf・m

第 3-5 図 接合試験片断面のエッチング写真

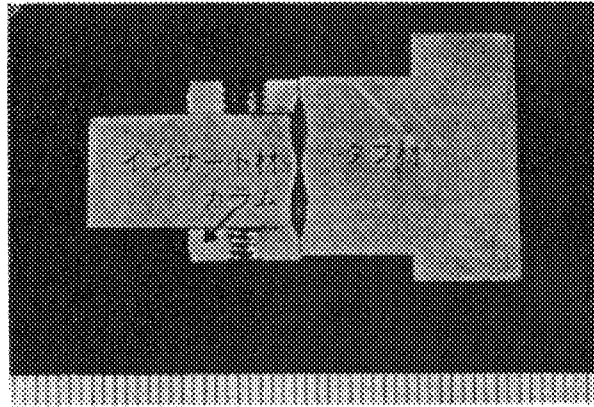


接合時の芯ずれの原因になる上側の試験片固定サポートを
を3方向から支持して芯ぶれの発生を防ぐ

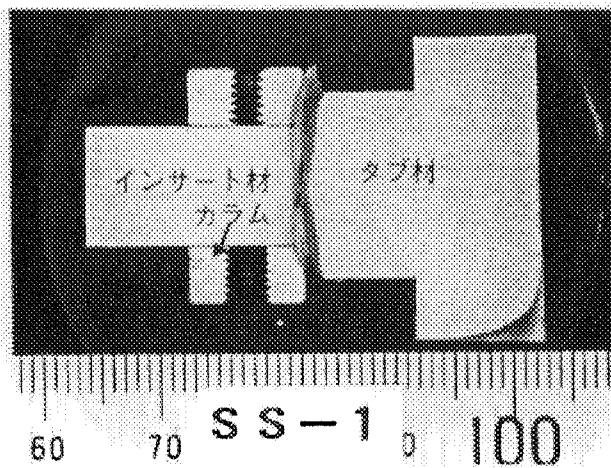
第3-6図 芯ブレ防止機構の付加



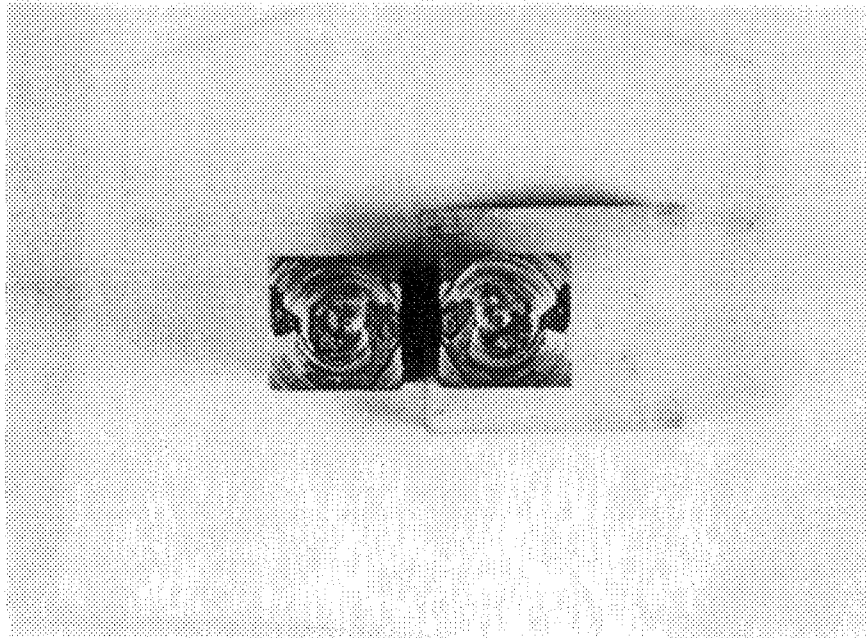
第3-7図 タブ材の接合面形状 (凹凸型)



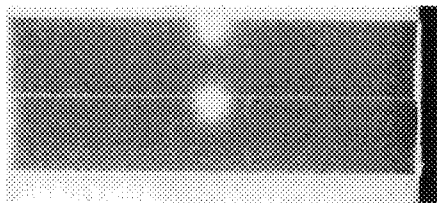
第 3-8 図 接合面形状を平坦とした場合の断面エッチング写真



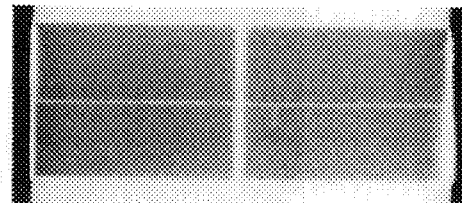
第 3-9 図 接合面形状を凹凸とした場合の断面エッチング写真



(a) シャルピー衝撃試験で生じた接合部割れ（摺動状の“擦り傷”が接合欠陥）



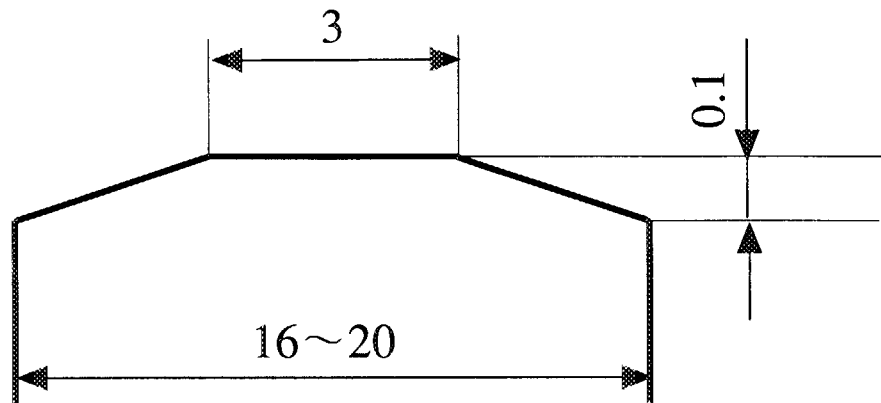
試験片側面から撮影



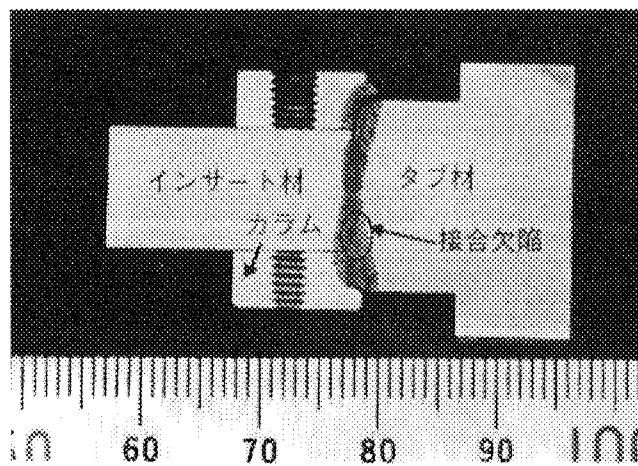
試験片ノッチ面から撮影

(b) 試験前 X 線検査

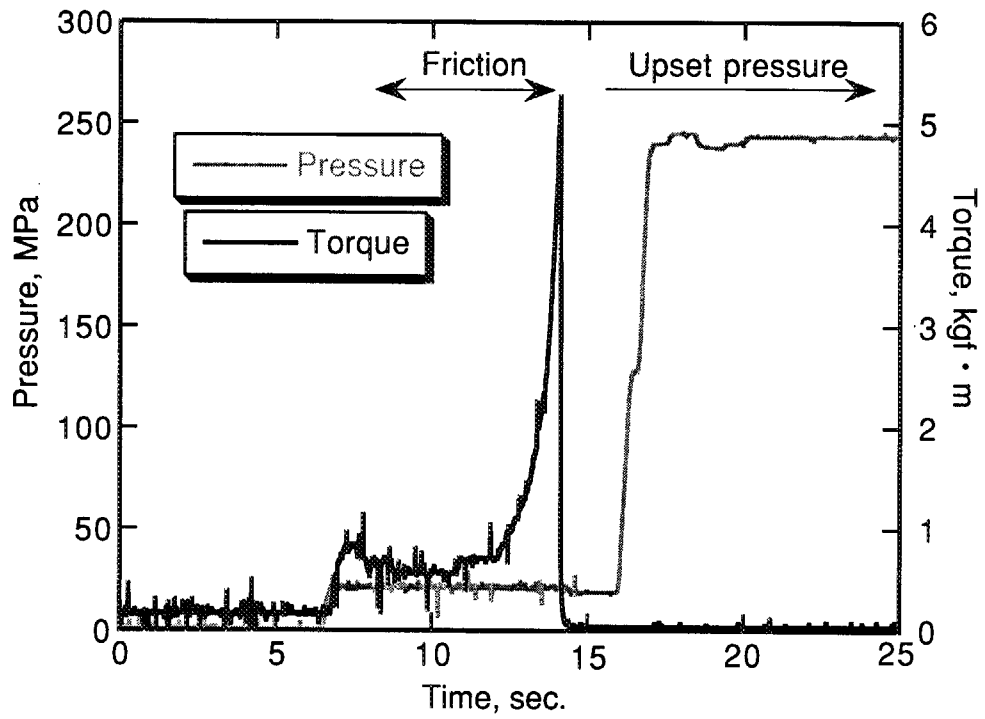
第 3-10 図 接合部の割れと X 線検査結果



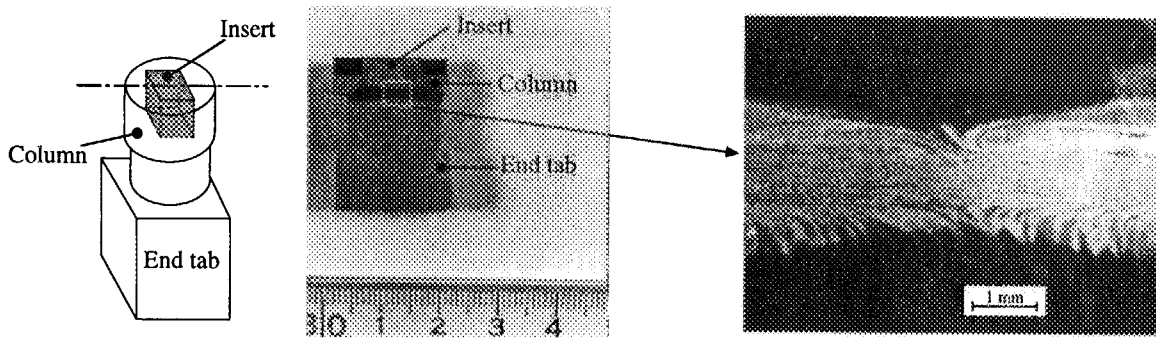
第 3-11 図 タブ材接合面の断面図 (円錐台型)



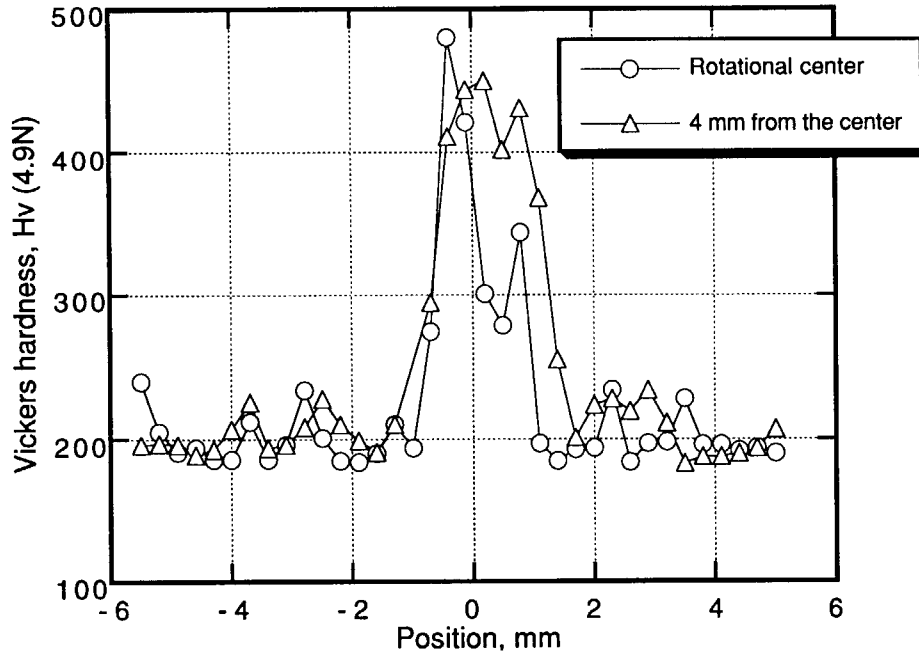
第 3-12 図 3 日間大気中にさらした試験片における断面エッチング写真



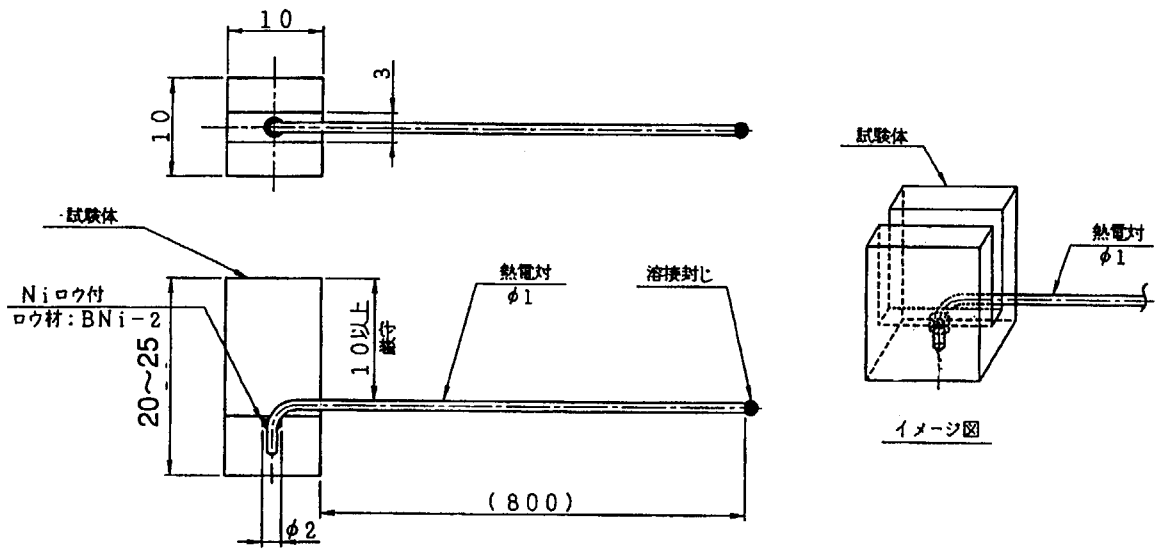
第 4-1 図 接合中の摩擦力（トルク）の変化



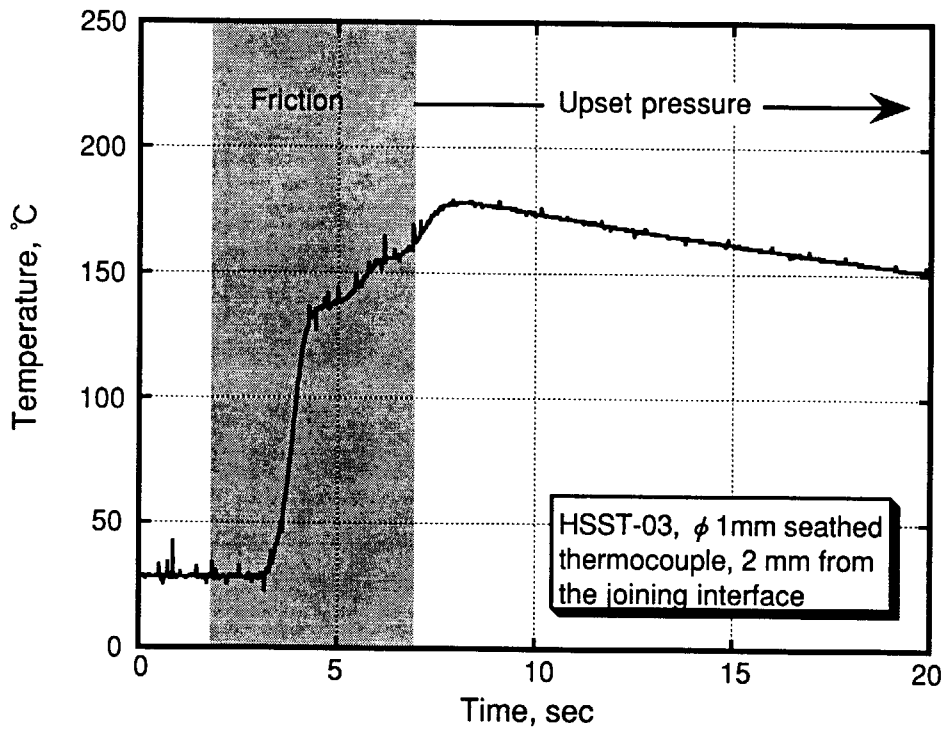
第 4-2 図 接合断面のエッチング写真と走査電子顕微鏡写真



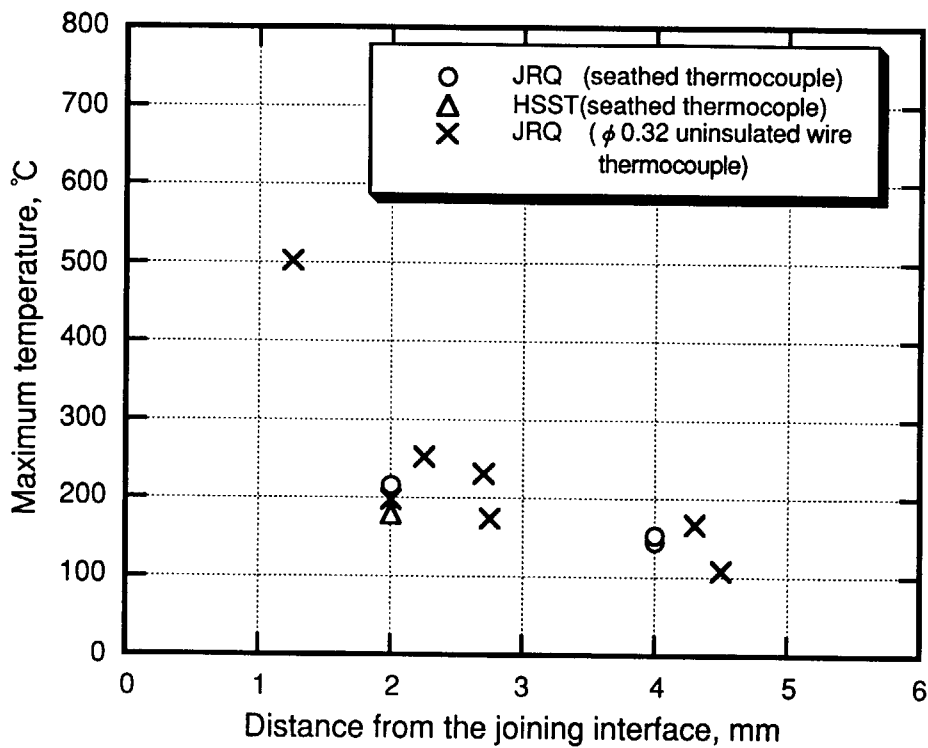
第 4-3 図 接合部近傍のビッカース硬さ分布



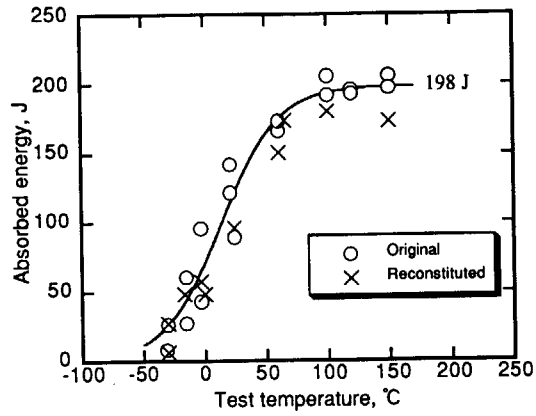
第 5-1 図 温度測定用ダミーインサート



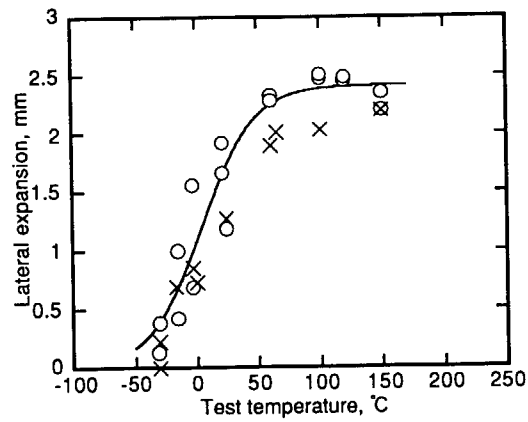
第 5-2 図 温度の測定例



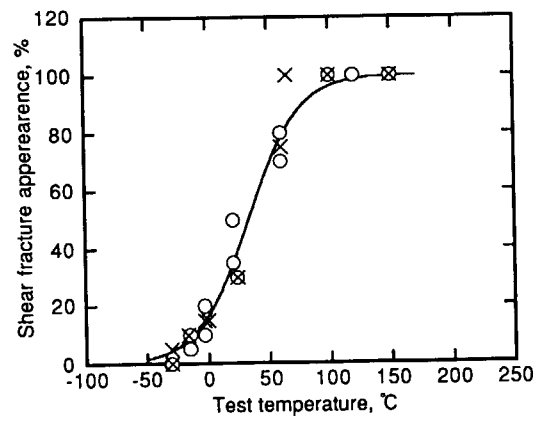
第 5-3 図 接合中に測定された最高温度と接合面からの距離の関係



(a) 吸収エネルギー

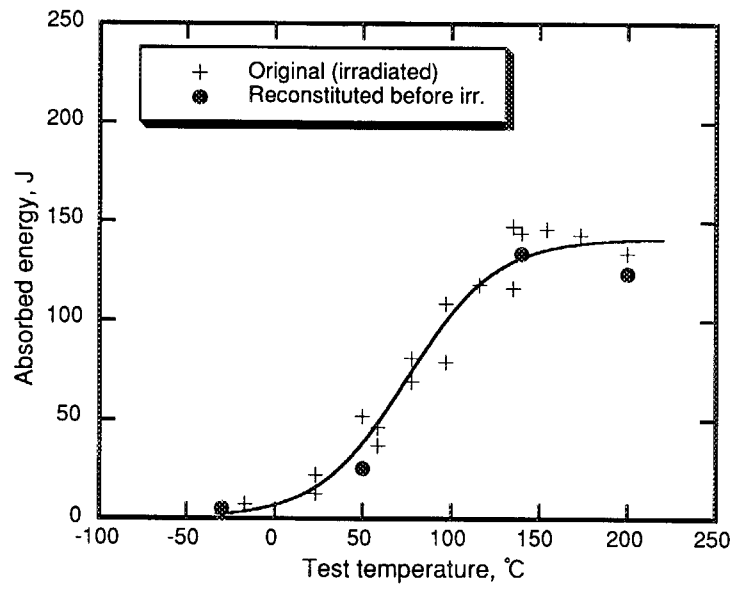


(b) 横膨出量

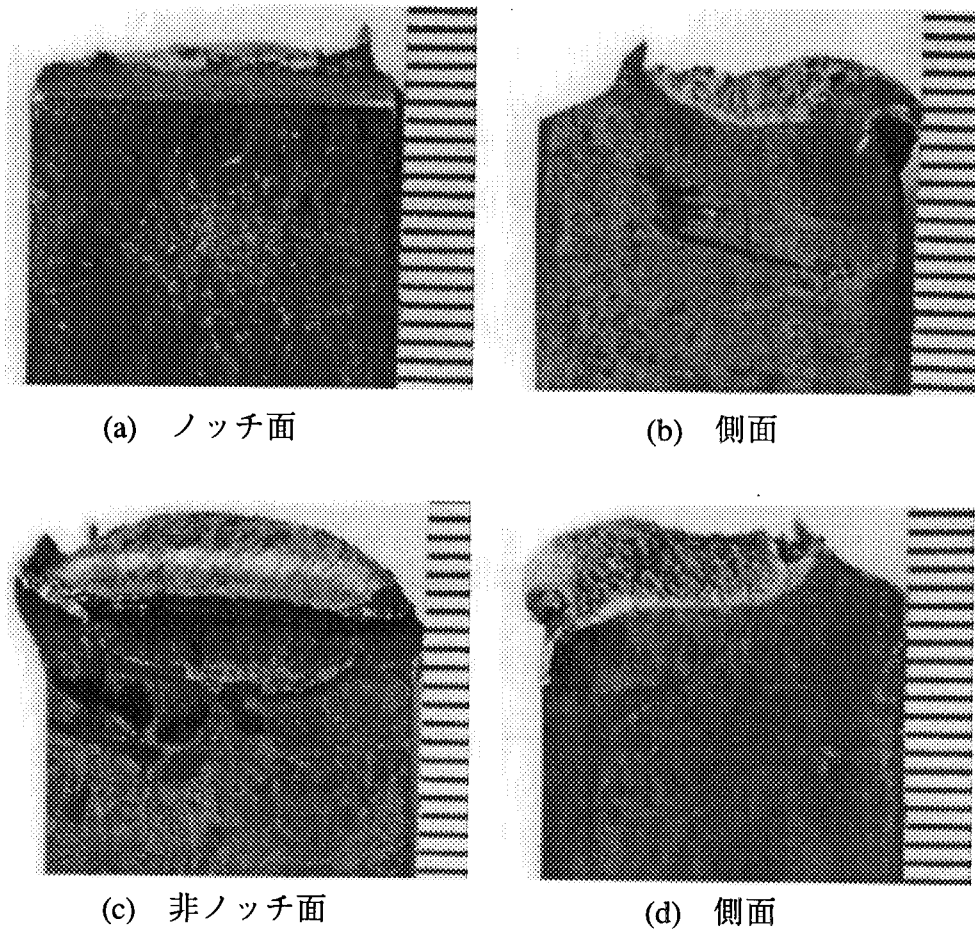


(c) 破面率

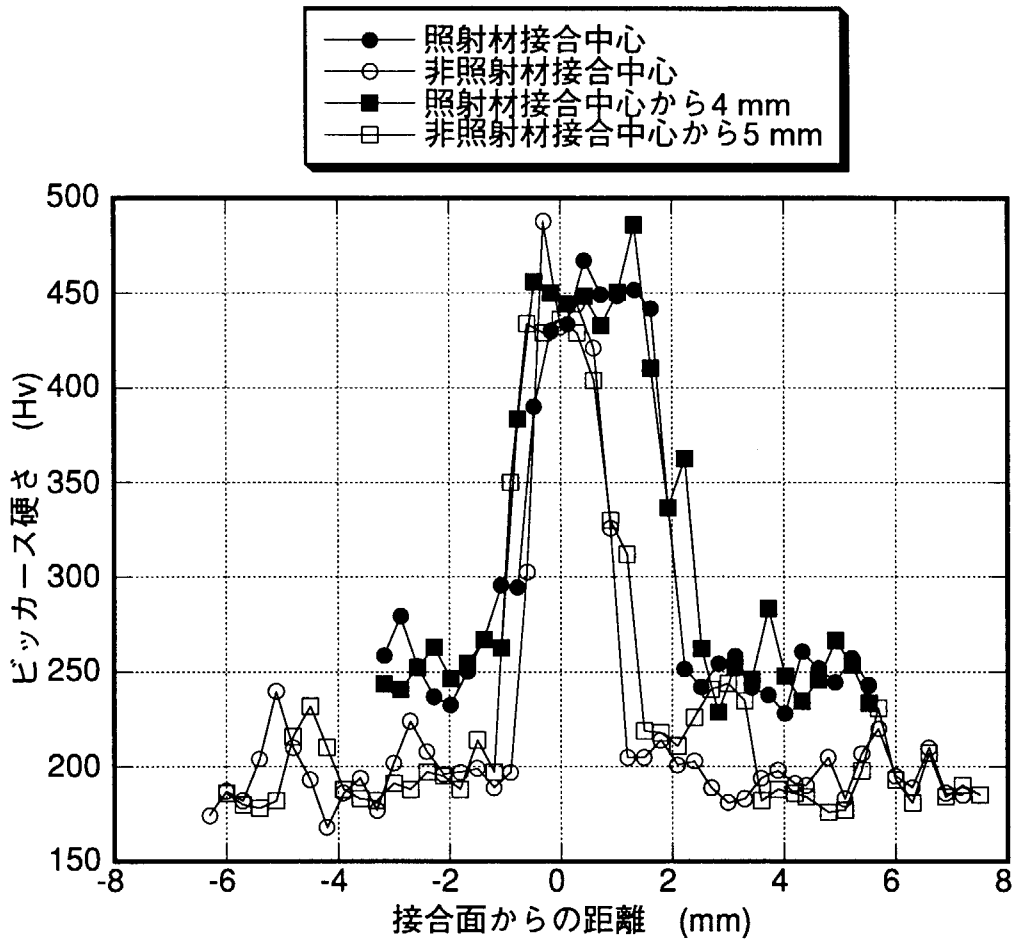
第 6-1 図 シャルピー遷移曲線 (非照射材)



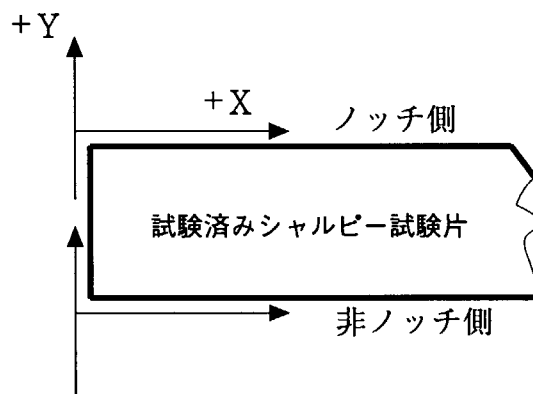
第 6-2 図 シャルピー吸収エネルギー遷移曲線



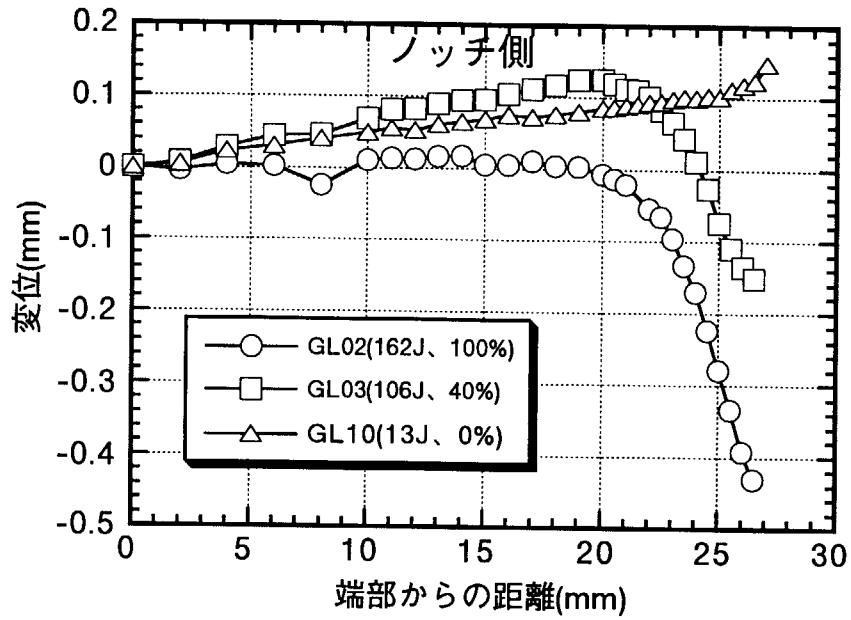
第 6-3 図 シャルピー試験終了後の接合部近傍マクロ写真 (QI2、試験温度 200°C)



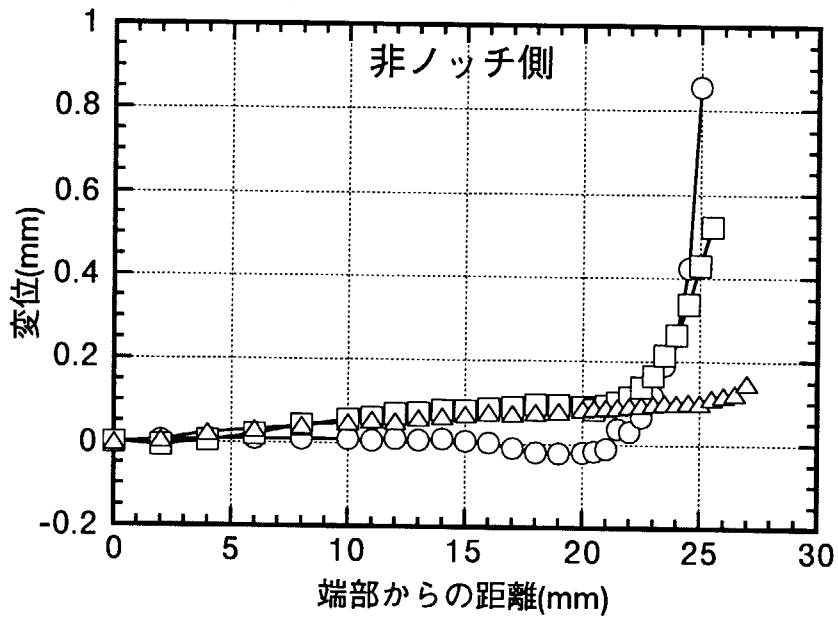
第 6-4 図 接合部近傍の硬さ分布 (照射材)



第 6-5 図 試験済みシャルピー衝撃試験片の変形測定方法

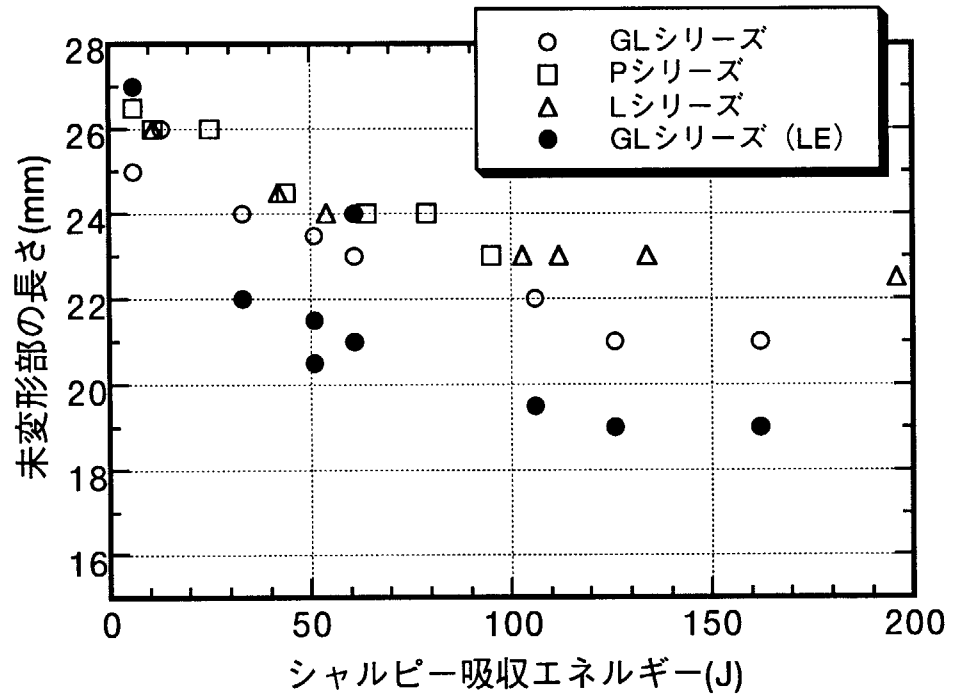


(a) ノッチ側



(b) 非ノッチ側

第 6-6 図 変形測定結果の例



第 6-7 図 未変形部長さと吸収エネルギーの関係 (LE：横膨出量)

第 6-1 表 非破壊検査と接合材（非照射）のシャルピー衝撃試験結果

| 試験片番号 | 試験片 方向 | X線結果 (注) | 接合部割れ有・無 | 試験実施温 度(℃) | 吸収エネル ギー(J) | 破面率 (%) | 横膨出量 (mm) |
|---------------------|-----------|-------------|----------|---------------|----------------|------------|--------------|
| J32-J37(1) | T-L | ○○ | 無 | -30 | 27 | 5 | 0.222 |
| J52- J48(2)HSST | L-T | ○× | 有 | 93 | *** | *** | *** |
| J24-J7(3) | T-L | ○○ | 無 | 24 | 96.5 | 30 | 1.270 |
| J38-J31(4) | T-L | × | 有 | 22.5 | 141.2 | *** | 1.930 |
| J26-J18(5) | T-L | ○○ | 無 | 60 | 150.6 | 75 | 1.896 |
| J21-J5(6) | T-L | ○○ | 無 | 150 | 173.2 | 100 | 2.200 |
| J50- J45(7)HSST | L-T | × | 有 | 93 | -100.4 | *** | 1.289 |
| J25-J9(8) | T-L | ○○ | 無 | -3 | 57.6 | 15 | 0.845 |
| J6-J23(9) | T-L | ○× | # | # | # | # | # |
| J51- J47(10)HSST | L-T | × | # | # | # | # | # |
| J49- J43(11)HSST | L-T | × | 有 | 93 | 161.1 | 100 | 2.063 |
| J35-J28(12) | T-L | ○○ | 無 | 100 | 180.4 | 100 | 2.030 |
| 290-284(13) | T-L | × | # | # | # | # | # |
| 300-293(14) | T-L | × | # | # | # | # | # |
| 254-256 | T-S | none | 無 | -30 | 6.2 | 0 | 0.000 |
| 271-275 | T-S | none | 無 | -16.5 | 48.3 | 10 | 0.690 |
| 284-292 | T-S | none | 無 | 0 | 48.3 | 15 | 0.726 |
| 278-283 | T-S | none | 有 | -30 | 12.3 | *** | *** |
| 282-287 | T-S | none | 無 | 64.8 | 173.8 | 100 | 2.013 |
| 291-298 | T-S | none | 無 | 103 | 168.9 | 100 | 1.965 |
| 272-276 | T-S | none | 無 | 16.3 | 41.7 | 15 | 0.520 |

(注) : ノッチをはさんで左右

○○ : 接合部 2 箇所とも接合欠陥なし

○× : 接合部 1 箇所に接合欠陥あり


×× : 接合部 2 箇所とも接合欠陥あり

*** : 接合部割れのため測定不能、# : 未試験


第 6-2 表 変形量測定に用いた圧力容器鋼のシャルピー特性値 (1/2)

(a) GL シリーズ ($T_{41J}=-57^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{50\%}=-22^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{0.9\text{mm}}=-48^{\circ}\text{C}$)

| 試験片番号 | 試験温度 ($^{\circ}\text{C}$) | 吸収エネルギー (J) | 延性破面率 (%) | 横膨出量(mm) |
|-------|-----------------------------|-------------|-----------|----------|
| GL01 | 0 | 126 | 60 | 1.97 |
| GL02 | 20 | 162 | 100 | 2.13 |
| GL03 | -20 | 106 | 40 | 1.71 |
| GL08 | -40 | 51 | 25 | 0.82 |
| GL09 | -60 | 61 | 20 | 1.07 |
| GL10 | -80 | 13 | 0 | 0.06 |
| GL11 | 10 | 151 | 100 | 2.09 |
| GL12 | -70 | 6 | 15 | 0.02 |
| GL13 | -50 | 61 | 30 | 1.04 |
| GL14 | -60 | 51 | 20 | 0.89 |
| GL15 | -70 | 33 | 15 | 0.45 |
| GL16 | -65 | 13 | 10 | 0.10 |

 測定に供した試験片
(b) P シリーズ ($T_{41J}=17^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{50\%}=30^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{0.9\text{mm}}=28^{\circ}\text{C}$)


| 試験片番号 | 試験温度 ($^{\circ}\text{C}$) | 吸収エネルギー (J) | 延性破面率 (%) | 横膨出量(mm) |
|-------|-----------------------------|-------------|-----------|----------|
| P32 | 0 | 25 | 25 | 0.41 |
| P33 | 20 | 44 | 45 | 0.66 |
| P34 | 40 | 64 | 55 | 1.12 |
| P35 | -20 | 23 | 20 | 0.29 |
| P36 | -40 | 11 | 5 | 0.06 |
| P37 | -60 | 6 | 0 | 0.02 |
| P39 | 60 | 79 | 95 | 1.31 |
| P40 | 80 | 92 | 100 | 1.64 |
| P41 | 10 | 35 | 30 | 0.57 |
| P42 | 30 | 54 | 40 | 0.93 |
| P43 | 20 | 44 | 40 | 0.75 |
| P44 | 100 | 95 | 100 | 1.55 |

 測定に供した試験片

第 6-2 表 変形量測定に用いた圧力容器鋼のシャルピー特性値 (2/2)

(c) L シリーズ (T_{41J} = -67°C、T_{50%} = -25°C、T_{0.9mm} = -54°C)

| 試験片番号 | 試験温度 (°C) | 吸収エネルギー (J) | 延性破面率 (%) | 横膨出量(mm) |
|-------|-----------|-------------|-----------|----------|
| L99 | 0 | 134 | 60 | 1.84 |
| L100 | 20 | 196 | 100 | 2.35 |
| L101 | -20 | 112 | 50 | 1.48 |
| L102 | -40 | 103 | 35 | 1.41 |
| L103 | -60 | 59 | 20 | 0.78 |
| L104 | -80 | 11 | 0 | 0.02 |
| L105 | -70 | 42 | 15 | 0.50 |
| L106 | -50 | 90 | 30 | 1.21 |
| L107 | -80 | 21 | 0 | 0.16 |
| L108 | -60 | 54 | 30 | 0.69 |
| L109 | -70 | 56 | 20 | 0.71 |
| L110 | -65 | 39 | 10 | 0.47 |

 測定に供した試験片

付録一試験片再生技術に関する ASTM ラウンドロビン試験の概要

ASTM によるラウンドロビン試験は 1992 年に開始され、その目的は、ASTM 規格 E1253 “Reconstitution of Irradiated Charpy Specimens”に従って再生されたシャルピー衝撃試験片から得られる試験結果の妥当性を検討することである。特に、(1)再生技術（方法）、(2)インサート長さ（溶接により類似材料で挟まれた部分の長さ）、(3)衝撃試験機のハンマーの刃先曲率の試験結果への影響について調べている。

ラウンドロビン試験の大まかな流れは次のとおりである。また、表に再生試験片を用いたシャルピー衝撃試験マトリクスを示す。

- (1) 供試材の決定...原子炉圧力容器鋼母材 HSST-03 及び溶接材 Linde-80
- (2) シャルピー試験の製作、Reference 試験（ASTM 型ハンマー、ISO 型ハンマーの両者を用いたシャルピー衝撃試験）
- (3) 破断シャルピー衝撃試験片の配布
- (4) 各参加機関による試験片再生—再生技術はアークスタッド溶接、電子ビーム溶接、アップセットバット溶接が適用された。インサート長さは 10 mm と 14 mm の 2 種類。溶接の際には、推奨された手法に準じて熱電対による温度測定を行う。
- (5) 非破壊検査（X 線）
- (6) 再生シャルピー衝撃試験片による試験（ORNL）

この試験結果のとりまとめは、1997 年 1 月に開催された ASTM Symposium on Small Specimen Test Techniques で報告された⁽⁹⁾。共同研究ではこのラウンドロビン試験には参加していないが、供試材である HSST-03 の試験済みシャルピー衝撃試験片を ORNL から入手し、ラウンドロビン試験に定められた方法に準じて接合中の温度測定を行った。

表 ASTM ラウンドロビン・シャルピー衝撃試験マトリクス

| Test Temp | ASTM Tup | | | | ISO Tup | | | |
|--------------------|------------|----|-------------|-------------------|------------|----|-------------|-------------------|
| | Transition | | Upper Shelf | | Transition | | Upper Shelf | |
| Insert Length (mm) | 10 | 14 | 10 | 14 | 10 | 14 | 10 | 14 |
| Low USE Material | 4 | 4 | 2 | 2 3 | 4 | 4 | 2 | 2 3 |
| High USE Material | 4 | 4 | 2 | 2 3 | 4 | 4 | 2 | 2 3 |

(注) Low USE Material : Linde 80 (溶接部) , High USE Material : HSST-03 (母材)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量, 電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位, 電圧, 起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメン | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光束 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バ | b |
| バ | bar |
| ガ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラ | rad |
| レ | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N (=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|--------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘度 1 Pa·s (=N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

| 圧 | MPa (=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg (Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal (計量法) | Btu | ft·lbf | eV |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁶ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 |

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

照射試験片の再生技術の開発(Ⅲ)平成7、8年度原研・I-I共同研究成果報告書(共同研究)