

JAERI-Tech  
96-003



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

1996年2月

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

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。

入手の問い合わせは、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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)高野高速印刷

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部  
西山 裕孝・深谷 清・鬼沢 邦雄  
鈴木 雅秀・柴田 勝之・貝原正一郎\*  
中村 照美\*・佐藤 彰\*・吉田 和夫\*

(1996年1月9日受理)

原子炉圧力容器用ASTM A533B-1鋼を用いて、表面化活性化接合法によるシャルピー衝撃試験片再生法について、実際の試験片寸法、再生手順を模擬した接合試験を実施し、接合条件等を確立した。

今年度は、超高真空接合装置を新たに整備し、熱影響部幅が接合界面から片側約1mmとなる接合条件を見いだした。また、実際のシャルピー試験片10×10×55mmと同じ断面寸法を有する角型試験片と丸型試験片(φ16mm)の接合では、角型試験片に変形防止用サポートを装着することにより、10×10mmの全面で接合が得られた。さらに、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が可能となった。

一方、放射化材を取り扱える遠隔操作型接合装置の基本仕様について検討し、接合機構、装置寸法の制約等を示すとともに、基本性能を定めた。

---

本研究は、日本原子力研究所と石川島播磨重工業(株)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白根2-4

\* 石川島播磨重工業(株)

Development of Reconstitution Technique of Irradiated Specimen(II)  
-Annual Report for FY1994 on JAERI-IHI Cooperated Research Program-

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

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

(Received January 9, 1996)

A surface-activated joining method to construct Charpy impact specimens from a limited volume of broken specimens is being developed. The method is likely to decrease the thermal input led to annealing and metallurgical changes. This paper describes the technical qualification process of the joining parameters and surface configuration of joined specimens. All tests have been done with A533B cl.1.

The joining machine with higher vacuum than that previously used was prepared for the tests. Precise control of joining parameters led to heat-affected zone as small as 1mm in each side. In the case of joining the square shaped (10x10mm) and circular shaped ( $\phi$  16mm) specimens, overall joining was achieved by an attached envelope to the square shaped specimen. In addition, the grooved surface of the circular shaped specimen brought out uniformly distributed heat-affected zone.

The specification of hot-use joining machine which involves the joining sequence and restrictions of the dimension was also examined.

Keywords : Surveillance, Irradiation Embrittlement, Charpy Impact Specimen, Reconstitution, Surface-activated Joining, Heat-affected Zone, Hot-use Joining Machine

---

The 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

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 試験方法 .....	2
2.1 供試材 .....	2
2.2 接合試験片形状 .....	2
2.3 接合装置（超高真空接合装置の整備） .....	2
2.4 接合方法 .....	2
3. 接合試験結果 .....	2
3.1 接合条件の検討 .....	2
3.2 試験片形状の影響 .....	3
3.2.1 異種形状（丸型，角型）試験片の接合 .....	3
3.2.2 異種端面形状試験片の接合 .....	4
3.3 接合挙動の検討 .....	4
3.3.1 回転摩擦の摺動エネルギー .....	4
3.3.2 接合雰囲気の影響 .....	5
4. 遠隔操作型接合装置の検討 .....	5
4.1 再生プロセス .....	5
4.2 接合装置の外形寸法 .....	6
4.3 基本仕様 .....	6
5. まとめ .....	7
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	8

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experiments .....	2
2.1 Material .....	2
2.2 Specimen Configuration .....	2
2.3 Joining Apparatus .....	2
2.4 Joining Conditions .....	2
3. Results .....	2
3.1 Evaluation of Joining Condition .....	2
3.2 Effects of Specimen Configuration on Joining .....	3
3.2.1 Square and Circular Shaped Specimens .....	3
3.2.2 Grooved Surface .....	4
3.3 Evaluation of Joining Behavior .....	4
3.3.1 Friction Energy .....	4
3.3.2 Effects of Atmosphere on Joining .....	5
4. Hot-use Joining Machine .....	5
4.1 Joining Sequence .....	5
4.2 Dimension of Joining Machine .....	6
4.3 Specification .....	6
5. Conclusion .....	7
Acknowledgements .....	8
References .....	8

## 1. はじめに

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れば監視試験片が不足する。その対策として、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の開発が重要な課題の一つである（図1 監視試験片再生の流れ）。また、高経年化原子炉圧力容器鋼の照射脆化の評価精度の向上を図るためには、監視試験から破壊靱性を直接的に評価することが最も有効であり、同様な技術の応用として、監視試験片（シャルピー試験片）から破壊靱性試験片を作り出すことも可能となる。この監視試験片の再生技術の開発に当たって解決すべき課題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。
- ・照射脆化の回復防止のために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。

これまでに開発されている試験片再生技術としては、アークスタッド溶接<sup>(1)(2)</sup>、電子ビーム溶接<sup>(3)</sup>、レーザー溶接<sup>(4)</sup>等による方法がある。しかし、いずれの溶接法も材料の溶融によって接合するため、溶接条件等を最適化し、冷却ブロックを用いたとしても、試験片の温度上昇を抑えることには限界がある。

このような背景の下、使用済み試験片あたりの再生数が多い独自の試験片再生技術の確立を目指して、常温真空中で材料表面を活性化させることにより低入熱で接合できる表面活性化接合法<sup>(5)</sup>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。表1に年次計画を示す。

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可能性を検討するため、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（レーザービーム、電子ビーム等）との比較を行った<sup>(6)</sup>。ここでの表面活性化法は、将来のホットセル内での作業性等を考慮し、装置的にシンプルな機構で済む回転摩擦による方法（真空中における丸棒（ $\phi 32\text{mm}$ ）試験片の突き合わせ）を採用した。その結果、接合部近傍の組織変化領域（硬化領域）の幅を3mm（接合界面から片側1.5mm）以下、照射温度（290℃）以上に上昇する領域の幅を6mm（片側3mm）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を十分狭い範囲に抑えられることを確認した。また、接合したシャルピー試験片から延性脆性遷移温度を評価できることがわかった。使用した接合装置は、監視試験片の再生のための試験片寸法に対し、加圧力、回転数ともに過大な容量であり、また、局部真空装置を用いているために低真空であったが、装置的に制限された条件下においても、表面活性化接合法は、他の溶接による接合法と比較して、特に、試験片の温度上昇を抑えるという点においてより優れた試験片再生技術であることを示した。

平成6年度は、新たに超高真空接合装置を整備して、超高真空下で熱影響部幅の狭小化を目指した接合試験を実施し、実寸法試験片（シャルピー試験片）からの再生を模倣した場合の接合条件を最適化することとした。さらに、放射化材料を取り扱える遠隔操

作型接合装置の予備的検討を実施した。スケジュール等を表1、表2に示す。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

供試材は、平成5年度と同じく原子炉压力容器用ASTM A533B-1鋼である。本鋼は原研がIAEA鋼材照射共同研究において使用したもの（JRQ）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<sup>(6)</sup>。

### 2.2 接合試験片形状

試験片の採取要領を図2に示す。シャルピー試験片と同じ断面を有する10×10×40mmの角型試験片と、タブ材を模擬したφ16～20×40mmLの丸型試験片を採取した。

### 2.3 接合装置（超高真空接合装置の整備）

前述のように、前年度は大型の摩擦圧接装置に局部真空装置を取付けた接合装置を流用したため、過大な加圧力、回転数及び低真空の接合条件下で接合試験を実施した。今年度は、実寸法の試験片再生を考慮し、適正な荷重容量等を有する超高真空接合装置を整備した。これは、φ6mm以下の小型試験体の接合に用いてきた超高真空接合装置に、回転駆動装置、加圧装置の大型化等の改造を施したものである。表3に、従来装置（前年度に使用した接合装置）及び改造前後の超高真空接合装置の仕様を比較する。この改造によって、到達真空度を約2オーダー向上させた。表面活性化接合法の原理<sup>(5)</sup>から、到達真空度が上がり摩擦係数が大きくなることにより、回転摩擦中に材料表面の汚染層を効果的に除去できるため、材料表面の清浄・活性化が容易になるとともに、再汚染・再酸化の進行を抑えることが期待される。すなわち、表面活性化の過程（回転摩擦時）において、加圧力、回転数を低くしてさらに熱影響（入熱）の少ない接合を達成できることになる。

### 2.4 接合方法

表面活性化の接合プロセスを図3に示す。真空中（ $10^{-5}$ Pa）で $P_1$ を加圧し $T_1$ 時間の回転摩擦により材料の表面を活性化する。この活性化終了後、アップセット加圧力 $P_2$ により接合を行った。以下、回転摩擦時の加圧力= $P_1$ 、回転摩擦時間= $T_1$ 、回転摩擦速度= $N$ 、アップセット加圧力= $P_2$ 、アップセット時間 $T_2$ とする。最適な接合条件の検討に当たっては、特に、回転摩擦時の接合パラメーターである $P_1$ 、 $T_1$ 、 $N$ に注目した。

## 3. 接合試験結果

### 3.1 接合条件の検討



作型接合装置の予備的検討を実施した。スケジュール等を表1、表2に示す。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

供試材は、平成5年度と同じく原子炉圧力容器用ASTM A533B-1鋼である。本鋼は原研がIAEA鋼材照射共同研究において使用したもの（JRQ）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<sup>(6)</sup>。

### 2.2 接合試験片形状

試験片の採取要領を図2に示す。シャルピー試験片と同じ断面を有する10×10×40mmの角型試験片と、タブ材を模擬したφ16～20×40mmLの丸型試験片を採取した。

### 2.3 接合装置（超高真空接合装置の整備）

前述のように、前年度は大型の摩擦圧接装置に局部真空装置を取付けた接合装置を流用したため、過大な加圧力、回転数及び低真空の接合条件下で接合試験を実施した。今年度は、実寸法の試験片再生を考慮し、適正な荷重容量等を有する超高真空接合装置を整備した。これは、φ6mm以下の小型試験体の接合に用いてきた超高真空接合装置に、回転駆動装置、加圧装置の大型化等の改造を施したものである。表3に、従来装置（前年度に使用した接合装置）及び改造前後の超高真空接合装置の仕様を比較する。この改造によって、到達真空度を約2オーダー向上させた。表面活性化接合法の原理<sup>(5)</sup>から、到達真空度が上がり摩擦係数が大きくなることにより、回転摩擦中に材料表面の汚染層を効果的に除去できるため、材料表面の清浄・活性化が容易になるとともに、再汚染・再酸化の進行を抑えることが期待される。すなわち、表面活性化の過程（回転摩擦時）において、加圧力、回転数を低くしてさらに熱影響（入熱）の少ない接合を達成できることになる。

### 2.4 接合方法

表面活性化の接合プロセスを図3に示す。真空中（ $10^{-5}$ Pa）で $P_1$ を加圧し $T_1$ 時間の回転摩擦により材料の表面を活性化する。この活性化終了後、アップセット加圧力 $P_2$ により接合を行った。以下、回転摩擦時の加圧力= $P_1$ 、回転摩擦時間= $T_1$ 、回転摩擦速度= $N$ 、アップセット加圧力= $P_2$ 、アップセット時間 $T_2$ とする。最適な接合条件の検討に当たっては、特に、回転摩擦時の接合パラメーターである $P_1$ 、 $T_1$ 、 $N$ に注目した。

## 3. 接合試験結果

### 3.1 接合条件の検討

作型接合装置の予備的検討を実施した。スケジュール等を表1、表2に示す。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

供試材は、平成5年度と同じく原子炉圧力容器用ASTM A533B-1鋼である。本鋼は原研がIAEA鋼材照射共同研究において使用したもの（JRQ）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<sup>(6)</sup>。

### 2.2 接合試験片形状

試験片の採取要領を図2に示す。シャルピー試験片と同じ断面を有する10×10×40mmの角型試験片と、タブ材を模擬したφ16～20×40mmLの丸型試験片を採取した。

### 2.3 接合装置（超高真空接合装置の整備）

前述のように、前年度は大型の摩擦圧接装置に局部真空装置を取付けた接合装置を流用したため、過大な加圧力、回転数及び低真空の接合条件下で接合試験を実施した。今年度は、実寸法の試験片再生を考慮し、適正な荷重容量等を有する超高真空接合装置を整備した。これは、φ6mm以下の小型試験体の接合に用いてきた超高真空接合装置に、回転駆動装置、加圧装置の大型化等の改造を施したものである。表3に、従来装置（前年度に使用した接合装置）及び改造前後の超高真空接合装置の仕様を比較する。この改造によって、到達真空度を約2オーダー向上させた。表面活性化接合法の原理<sup>(5)</sup>から、到達真空度が上がり摩擦係数が大きくなることにより、回転摩擦中に材料表面の汚染層を効果的に除去できるため、材料表面の清浄・活性化が容易になるとともに、再汚染・再酸化の進行を抑えることが期待される。すなわち、表面活性化の過程（回転摩擦時）において、加圧力、回転数を低くしてさらに熱影響（入熱）の少ない接合を達成できることになる。

### 2.4 接合方法

表面活性化の接合プロセスを図3に示す。真空中（ $10^{-5}$ Pa）で $P_1$ を加圧し $T_1$ 時間の回転摩擦により材料の表面を活性化する。この活性化終了後、アップセット加圧力 $P_2$ により接合を行った。以下、回転摩擦時の加圧力= $P_1$ 、回転摩擦時間= $T_1$ 、回転摩擦速度= $N$ 、アップセット加圧力= $P_2$ 、アップセット時間 $T_2$ とする。最適な接合条件の検討に当たっては、特に、回転摩擦時の接合パラメーターである $P_1$ 、 $T_1$ 、 $N$ に注目した。

## 3. 接合試験結果

### 3.1 接合条件の検討

今年度は新たに超高真空接合装置を整備し、超高真空下における接合条件の最適化を行った。また、このための接合試験は、 $\phi 16\sim 20\times 40\text{mm}$ の丸型試験片の突き合わせである（前年度は $\phi 32\text{mm}$ の丸型試験片の突き合わせ）。各接合パラメーターは、 $P_1=9.8\sim 29.4\text{MPa}$ 、 $T_1=1\sim 5\text{sec}$ 、 $N=600\sim 960\text{rpm}$ である。 $P_2=9.8\text{MPa}$ 、 $T_2=2\text{sec}$ は共通である。

接合試験結果を表4 (1)~(37)に示す。なお、熱影響部 (HAZ) 幅とは、接合継手のエッチングによって現出する変質層の幅の最大値である。 $P_1$ がいずれの場合も、 $N$ が同じである接合条件では、 $T_1$ を増加させることによって接合が達成できる。しかし、例えば図4 ( $P_1=9.8\text{MPa}$ 、 $N=960\text{rpm}$ 、 $T_1=3.0\text{sec}$ の接合継手断面) に示すように、 $N$ が大きい場合の接合においては、接合界面にバリが発生しやすくなるとともに、HAZ幅が2mm以上となった。

次に、 $N$ が860rpmにおける $P_1$ と $T_1$ の関係を図5に示す。なお、図中には $P_1=22.5\text{MPa}$ 、 $N=700\text{rpm}$ の結果についても合わせ示してある。 $N=860\text{rpm}$ の場合、 $P_1$ の増加にともない短い回転摩擦時間で接合が可能となるが、いずれもHAZ幅が2mm以上となり、バリが生じる場合があった。一方、 $P_1=22.5\text{MPa}$ 、 $N=700\text{rpm}$ 、 $T_1=3.0\text{sec}$ とした場合の接合継手断面を図6に示すとおり、本接合条件ではバリの発生が抑えられ、HAZ幅が約1mmとなる良好な接合継手が得られた。従って、これを基本接合条件とした。

### 3.2 試験片形状の影響

#### 3.2-1 異種形状 (丸型、角型) 試験片の接合

現在想定している表面活性化接合法による監視試験片再生の手順は図1に示したように、試験済みのシャルピー試験片から切断した10mm角のインサート材 (照射) と、10mm角の対角線よりも若干長い直径を有する丸型のタブ材 (非照射) を接合する。そこで、この手順に合わせ、 $10\times 10\text{mm}$ の角型試験片と $\phi 16\text{mm}$ の丸型試験片の突き合わせによる接合を実施して最適接合条件を検討した。各接合パラメーターは、 $P_1=14.7\sim 39.2\text{MPa}$ 、 $N=860\text{rpm}$ 、 $T_1=0.5\sim 6.0\text{sec}$ である。 $P_2=98\text{MPa}$ 、 $T_2=2.0\text{sec}$ は共通である。

表4(38)~(50)に接合試験結果を示す。そして、 $N=860\text{rpm}$ における $P_1$ と $T_1$ の関係を図7に示す。丸棒の突き合わせ接合の結果 (図5) と同様に、 $P_1$ の増加にともない、短い回転摩擦時間で接合が達成される。しかし、図8(a)に示すように、試験片中央部では接合が得られたが (図中は $\Delta$ で表示)、角型試験片側の角の部分の変形が大きく未接合部が認められる場合があった。また、図8(b)に示すように、丸棒の突き合わせ接合と比較すると、接合界面に不均一で著しいバリの発生が認められる傾向があった。

このように、丸型試験片と角型試験片の突き合わせ接合においては、バリが発生しやすく、さらに角の近傍において接合が得られにくい。これは、丸型試験片では、直径10mmの円は常に回転摩擦を受けるのに対し、直径10mmと直径約14mmの円に挟まれた部分は周期的に回転摩擦を受けることから、相対的に中心部よりも清浄 (活性化) の度合いが低くなるために接合しにくくなると考えられる。また、角の部分が塑性変形するのは、接合装置に試験片を装着した時に生じると考えられるアライメントのズレや角の部分の剛性が低いことに起因すると考えられる。

そこで、丸型試験片側で回転摩擦によって接触する面を十分に活性化し、また、角の塑性変形を防止して10×10mmの試験片の全面を接合させるため、図9に示すとおりφ16のサポートを角型試験片にビス止めによって装着し、φ16mmの丸型試験片の突き合わせとして接合試験を行った。なお、サポートの材質は角型試験片と同じである。接合条件は、 $P_1=22.5\text{MPa}$ 、 $N=700\text{rpm}$ 、 $T_1=3.0\text{sec}$ であり、これは、丸型試験片の突き合わせによる接合試験で得られた基本接合条件である。表4(52)に接合試験結果、図10に接合継手断面を示すとおり、丸型試験片の突き合わせによる接合の場合と同様に良好な接合継手を得ることができた。

### 3.2-2 異種端面形状試験片の接合

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、活性化や接合が十分に得られにくくなる。例えば、図11に示すように、平坦な面どうしを接合した場合、摺動量が少ない中央部で未接合部が認められる。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4mm離れた位置では熱影響部がもっとも広くなり最大2.5mm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、中央部分の活性化を促進するとともに、熱影響部幅を均一にするため、試験片の端面を図12に示す形状とした。すなわち、丸型試験片において、中央部は高さ0.1mmの凸状、熱影響部幅が大きくなる部分は深さ0.1mmの凹状とした。そして、サポートを装着して、 $P_1=20\text{MPa}$ 、 $T_1=5\text{sec}$ 、 $N=700\text{rpm}$ 、 $P_2=200\text{MPa}$ 、 $T_2=1\text{sec}$ として接合を行った。なお、試験片端面に凹凸を加工したことから、アップセット時の試験片端面の密着性を高めるために $P_2$ を平坦型試験片の場合より大きくしている。表4(53)に接合試験結果、図13に接合継手断面を示す。この図から、接合は全面にわたり得られていることがわかる。また、試験片の端面形状を平坦、凸型、凹凸型とした場合の上記と同一接合条件下における熱影響部幅の分布を図14に示す。凹凸型試験片を平坦型の場合と比較すれば、凹凸型試験片の場合の熱影響部幅は、その最大値が小さくなるとともに、中央部と外周部との差が少なくなる。すなわち、試験片の端面形状を凹凸型にすることにより、熱影響部幅を均一に、しかも、狭くできることが明らかとなった。

## 3.3 接合挙動の検討

### 3.3-1 回転摩擦の摺動エネルギー

接合時の回転摺動エネルギー（仕事）を求める。回転中心からの半径 $r$ の位置に生じる摩擦力 $dF$ は、真空中の摩擦係数を $\mu$ とすると、

$$dF = \mu P_1 \times 2\pi r \times dr$$

となる。この部分の $t$ 秒間の摺動距離 $S$ は、回転摩擦速度を $N$  (rpm) とすると、

$$S = (2\pi rN/60) \times t$$

となる。界面で回転摩擦により発生するエネルギー $dW$ は、

$$dW = dF \times S = \pi^2 \mu P_1 \times N \times r^2 \times t \times dr / 15$$

したがって、回転摩擦時間 $T_1$ に半径 $R$ の面に発生するエネルギー（摺動エネルギー）は

$$W = \int \pi^2 \mu P_1 \times N \times r^2 \times T_1 \times dr / 15 \\ = \pi^2 \mu P_1 N T_1 R^3 / 45 \dots\dots\dots (1)$$

となる。

### 3.3-2 接合雰囲気の影響

接合における摺動エネルギーを、図15に示す摩擦係数の測定結果<sup>7)</sup>をもとに(1)式から算出した。それぞれの値については表4に合わせ示してある。そして、低真空の接合試験結果(表4(54)(55))を含めて、接合に必要な摺動エネルギーと真空度の関係を求めた(図16)。真空度が低下するにつれて接合に必要な摺動エネルギーが大きくなるのがわかる。これは、真空度が低いほど回転摩擦による活性化がしにくくなり、長時間の回転摩擦が必要となって摺動エネルギーが大きくなるためであると考えられる。一方、 $10^3$ Paオーダーの高真空では、短時間の回転摩擦による活性化により摺動エネルギーを少なくして接合できる。

次に、熱影響部幅と摺動エネルギーの関係を図17に示す。熱影響部幅は、平坦型試験片、凹凸型試験片のそれぞれにおいて、摺動エネルギーとの直線関係が認められ、摺動エネルギーを抑えて接合することにより熱影響部幅を狭くできる。最適接合条件を求めるためには経験則が必要となるが、接合パラメーターとして摺動エネルギー $W$ を用いれば接合条件を簡便に推定できる。さらに、接合に必要な摺動エネルギーの最低値を確認することにより、熱影響部幅を最も狭くできる接合条件を決定できる。

## 4. 遠隔操作型接合装置の検討

これまで示したように、実寸法試験片再生に必要な接合条件を求めることができた。今後は、実際の放射化材への適用性を実証する必要がある。そのためには、遠隔操作型の接合装置、ならびに放射化した試験済みのシャルピー試験片の非損傷領域の切断及び接合試験体からの試験片加工に必要な遠隔操作型の機械加工装置等の技術開発が必須である。そこで、今年度は、これまで取得した接合条件や超高真空接合装置の仕様等を参考に、遠隔操作型接合装置の基本仕様について検討した。

### 4.1 再生プロセス

監視試験片の再生に際しては、図1に示したように、 $10 \times 10 \times 10$ mmの角材（照射材）の両側に丸型のタブ材（非照射）を接合する。こうした接合継手から十分な寸法精度を有するシャルピー試験片を製作するためには機械加工のための基準面が必要となる。そのため、インサート材に角型のサポートを装着する。また、接合方法については、基本的には1回の真空引きで角材の両側の接合を行うものとし、2通りの方法(図18)を検討した。すなわち、

(A案)

- (1) タブ材①を回転させる。
- (2) 角材入りサポート②は回転しないように固定する。

したがって、回転摩擦時間 $T_1$ に半径 $R$ の面に発生するエネルギー（摺動エネルギー）は

$$W = \int \pi^2 \mu P_1 \times N \times r^2 \times T_1 \times dr / 15 \\ = \pi^2 \mu P_1 N T_1 R^3 / 45 \dots\dots\dots (1)$$

となる。

### 3.3-2 接合雰囲気の影響

接合における摺動エネルギーを、図15に示す摩擦係数の測定結果<sup>7)</sup>をもとに(1)式から算出した。それぞれの値については表4に合わせ示してある。そして、低真空の接合試験結果(表4(54)(55))を含めて、接合に必要な摺動エネルギーと真空度の関係を求めた(図16)。真空度が低下するにつれて接合に必要な摺動エネルギーが大きくなるのがわかる。これは、真空度が低いほど回転摩擦による活性化がしにくくなり、長時間の回転摩擦が必要となって摺動エネルギーが大きくなるためであると考えられる。一方、 $10^{-5}$ Paオーダーの高真空では、短時間の回転摩擦による活性化により摺動エネルギーを少なくして接合できる。

次に、熱影響部幅と摺動エネルギーの関係を図17に示す。熱影響部幅は、平坦型試験片、凹凸型試験片のそれぞれにおいて、摺動エネルギーとの直線関係が認められ、摺動エネルギーを抑えて接合することにより熱影響部幅を狭くできる。最適接合条件を求めるためには経験則が必要となるが、接合パラメーターとして摺動エネルギー $W$ を用いれば接合条件を簡便に推定できる。さらに、接合に必要な摺動エネルギーの最低値を確認することにより、熱影響部幅を最も狭くできる接合条件を決定できる。

## 4. 遠隔操作型接合装置の検討

これまで示したように、実寸法試験片再生に必要な接合条件を求めることができた。今後は、実際の放射化材への適用性を実証する必要がある。そのためには、遠隔操作型の接合装置、ならびに放射化した試験済みのシャルピー試験片の非損傷領域の切断及び接合試験体からの試験片加工に必要な遠隔操作型の機械加工装置等の技術開発が必須である。そこで、今年度は、これまで取得した接合条件や超高真空接合装置の仕様等を参考に、遠隔操作型接合装置の基本仕様について検討した。

### 4.1 再生プロセス

監視試験片の再生に際しては、図1に示したように、 $10 \times 10 \times 10$ mmの角材（照射材）の両側に丸型のタブ材（非照射）を接合する。こうした接合継手から十分な寸法精度を有するシャルピー試験片を製作するためには機械加工のための基準面が必要となる。そのため、インサート材に角型のサポートを装着する。また、接合方法については、基本的には1回の真空引きで角材の両側の接合を行うものとし、2通りの方法(図18)を検討した。すなわち、

(A案)

- (1) タブ材①を回転させる。
- (2) 角材入りサポート②は回転しないように固定する。

- (3)  $P_1$ で加圧しながらタブ材①と角材入りサポート②を接合する。
- (4) 接合したタブ材①と角材入りサポート②を回転させる。
- (5) タブ材③を固定する。
- (6)  $P_1$ で加圧しながらタブ材③と角材入り②を接合する。

(B案)

- (1) タブ材①を回転させる。
  - (2) 角材入りサポート②は回転しないように固定する。
  - (3)  $P_1$ で加圧しながらタブ材①と角材入りサポート②を接合する。
  - (4) タブ材③を回転させる。
  - (5)  $P_1$ で加圧しながらタブ材③と角材入りサポート②を接合する。
- A案においては、回転系は一つで済むが、真空中（チャンバー内）で試験片の固定箇所を移動する必要がある。それに伴い、チャンバー内の固定機構が複雑化し、所定の真空度に到達しない可能性がある。したがって、現時点においては、接合方法としてB案を採用することとする。

以上のように、サポート材と角型とし、接合方法としてB案を採用した監視試験片の再生プロセスを図19に示す。

#### 4.2 接合装置の外形寸法

遠隔操作型接合試験装置の外形寸法は、現時点においては東海研ホットラボラトリーのメンテナンスケープあるいはDケープに設置することを想定して見積を行った。その場合、制限される事項は次の通りである。

- ・汎用装置ではないので長期間一つのセルを占有することが出来ないことが予想される。そのため、搬出入を比較的簡単にするために装置を一体型とする。すなわち、装置の架台内に真空排気系を収納できる構造にする。また、装置をアンカー等で固定することが出来ないため、装置の重心を低くして転倒を防止する。
- ・装置を横型とすると床面積をとるので、縦型とする。

これらを考慮した装置の主要な寸法（高さ方向の値はすべて床面からの距離）は次のとおりである。

- ・架台：1000mm四方、高さ750～800mm
- ・試験片の位置：1250～1450mm、マニピュレーターで操作できる範囲は1500mm以下のところ
- ・全体の高さ：2000mm以下（ホットセルの高さはこれよりあるが、クレーンで装置を吊る必要があるため）

#### 4.3 基本仕様

以上を考慮した装置の概略図を図20、21に示す。また、装置の性能等については、今年度までの接合試験結果及び超高真空接合装置の仕様を参考に、次のように設定した。

##### 1. 性能

- ・到達真空度： $5 \times 10^{-7}$  Pa

- ・荷重 : 最大4000kgf
- ・回転速度 : 最大960rpm
- ・試験片の大きさ  
: 10×10×10mm、ただし変形防止サポート(20×20×10 mm)に入れて  
接合を行う  
φ16×50 mm (タブ材)

## 2. 装置の構成

- ・真空チャンバー (180×180×320 mm)
- ・真空排気系 (油回転ポンプ、ターボ分子ポンプ等)
- ・回転圧接機構 (油圧シリンダー、油圧ポンプ、回転モーター、ロードセル等)
- ・制御系 (真空排気系、油圧制御、モーター制御、接合シーケンス制御等)

回転は駆動モーターからギヤボックスを介して試験片に伝達され、両側の油圧シリンダーにより試験片の加圧を行う。回転と軸方向の加圧力を同時に伝達できるように回転軸とギヤボックスの傘歯車はスプライン軸とし、回転しながら加圧できるようにした。

来年度は、遠隔操作による試験片の脱着機構、メンテナンス性を考慮した装置の構造、共同研究の知見を反映し、試験装置の基本設計を完了させる予定である。

## 5. まとめ

平成5年度においては、試験済みのシャルピー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。その結果、表面活性化接合法が、他の溶接による接合法と比較して、接合中の温度上昇や熱影響部幅を抑えるという試験片再生の技術的な要件において、より優れた試験片再生方法であることを確認した。

以上の成果を踏まえ、平成6年度は、新たに超高真空接合装置を整備し、実寸法試験片再生のための基本接合条件を確立し、放射化材を取り扱える遠隔操作型接合装置の使用環境を考慮した基本仕様(案)を作成した。以下に得られた結論を列記する。

- (1) 超高真空接合装置を用いた表面活性化接合法により、局部真空接合装置を用いた場合の熱影響部幅が片側約1.5mmであったのに対し、約1mmと低減することができた。
- (2) 実機の監視試験片(シャルピー衝撃試験片)とタブ材を模擬した角型試験片(10×10mm)と丸型試験片(φ16mm)の接合では、角型試験片に変形防止用サポートを取付けて丸型試験片と接合を行うことにより10×10mmの全面で接合が得られた。
- (3) 接合面の形状を凹凸にすると、熱影響部を均一に、しかも狭くした接合が可能となった。
- (4) 表面活性化接合では接合雰囲気の影響が大きく、高真空の場合は、接合の摺動エネルギーを小さくして接合できることを明らかにし、熱影響部幅を狭くして良好な接合継手を得るためには超高真空雰囲気(10<sup>-5</sup>Pa)が有効であることを示した。



- ・荷重 : 最大4000kgf
- ・回転速度 : 最大960rpm
- ・試験片の大きさ  
: 10×10×10mm、ただし変形防止サポート(20×20×10 mm)に入れて  
接合を行う  
φ16×50 mm (タブ材)

## 2. 装置の構成

- ・真空チャンバー (180×180×320 mm)
- ・真空排気系 (油回転ポンプ、ターボ分子ポンプ等)
- ・回転圧接機構 (油圧シリンダー、油圧ポンプ、回転モーター、ロードセル等)
- ・制御系 (真空排気系、油圧制御、モーター制御、接合シーケンス制御等)

回転は駆動モーターからギヤボックスを介して試験片に伝達され、両側の油圧シリンダーにより試験片の加圧を行う。回転と軸方向の加圧力を同時に伝達できるように回転軸とギヤボックスの傘歯車はスプライン軸とし、回転しながら加圧できるようにした。

来年度は、遠隔操作による試験片の脱着機構、メンテナンス性を考慮した装置の構造、共同研究の知見を反映し、試験装置の基本設計を完了させる予定である。

## 5. まとめ

平成5年度においては、試験済みのシャルピー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。その結果、表面活性化接合法が、他の溶接による接合法と比較して、接合中の温度上昇や熱影響部幅を抑えるという試験片再生の技術的な要件において、より優れた試験片再生方法であることを確認した。

以上の成果を踏まえ、平成6年度は、新たに超高真空接合装置を整備し、実寸法試験片再生のための基本接合条件を確立し、放射化材を取り扱える遠隔操作型接合装置の使用環境を考慮した基本仕様(案)を作成した。以下に得られた結論を列記する。

- (1) 超高真空接合装置を用いた表面活性化接合法により、局部真空接合装置を用いた場合の熱影響部幅が片側約1.5mmであったのに対し、約1mmと低減することができた。
- (2) 実機の監視試験片(シャルピー衝撃試験片)とタブ材を模擬した角型試験片(10×10mm)と丸型試験片(φ16mm)の接合では、角型試験片に変形防止用サポートを取付けて丸型試験片と接合を行うことにより10×10mmの全面で接合が得られた。
- (3) 接合面の形状を凹凸にすると、熱影響部を均一に、しかも狭くした接合が可能となった。
- (4) 表面活性化接合では接合雰囲気の影響が大きく、高真空の場合は、接合の摺動エネルギーを小さくして接合できることを明らかにし、熱影響部幅を狭くして良好な接合継手を得るためには超高真空雰囲気(10<sup>-5</sup>Pa)が有効であることを示した。

- (5) 放射化材を取り扱える遠隔操作型接合装置についての基本仕様についての検討を行い、接合機構、寸法の制約等を示した。

#### 謝辞

遠隔操作型接合装置の検討に際し、ホット試験室 ホット試験技術課 山原課長、ならびにホットラボ課 試験第2係 木崎係長には多大なご協力をいただきましたので、ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) J. S. Perrin et al., "Reconstituted Charpy Impact Specimens", EPRI NP-2759, Research Prject 2055-3, Final Report, December 1982.
- (2) E. van Walle et al., "The Reconstitution of Small Remnant Parts of Charpy-V Specimens", SMiRT-11, Taiwan, August 1991.
- (3) E. N. Klauanitzer and G. Hofmann, "Reconstituted Impact Specimens with Small Inserts", ASTM STP-1125, 1992, pp. 76-90
- (4) M. P. Manahan et al., "Laser Weld Reconstitution of Conventional and Miniaturized Notch Test (MNT) Specimens", ASTM STP-1204, 1993, pp. 62-76.
- (5) 貝原 他、常温接合技術の開発、石川島播磨技報第32巻第3号（平成4..5）、pp.147-152
- (6) 鬼沢 他、照射試験片の再生技術の開発 平成5年度原研・IHI共同研究成果報書、JAERI-Tech 94-017, 1994.
- (7) 桜井俊男、潤滑の物理化学、幸書房、1978.

- (5) 放射化材を取り扱える遠隔操作型接合装置についての基本仕様についての検討を行い、接合機構、寸法の制約等を示した。

#### 謝辞

遠隔操作型接合装置の検討に際し、ホット試験室 ホット試験技術課 山原課長、ならびにホットラボ課 試験第2係 木崎係長には多大なご協力をいただきましたので、ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) J. S. Perrin et al., "Reconstituted Charpy Impact Specimens", EPRI NP-2759, Research Project 2055-3, Final Report, December 1982.
- (2) E. van Walle et al., "The Reconstitution of Small Remnant Parts of Charpy-V Specimens", SMiRT-11, Taiwan, August 1991.
- (3) E. N. Klauanitzer and G. Hofmann, "Reconstituted Impact Specimens with Small Inserts", ASTM STP-1125, 1992, pp. 76-90
- (4) M. P. Manahan et al., "Laser Weld Reconstitution of Conventional and Miniaturized Notch Test (MNT) Specimens", ASTM STP-1204, 1993, pp. 62-76.
- (5) 貝原 他、常温接合技術の開発、石川島播磨技報第32巻第3号（平成4..5）、pp.147-152
- (6) 鬼沢 他、照射試験片の再生技術の開発 平成5年度原研・IHI共同研究成果報書、JAERI-Tech 94-017, 1994.
- (7) 桜井俊男、潤滑の物理化学、幸書房、1978.

- (5) 放射化材を取り扱える遠隔操作型接合装置についての基本仕様についての検討を行い、接合機構、寸法の制約等を示した。

#### 謝辞

遠隔操作型接合装置の検討に際し、ホット試験室 ホット試験技術課 山原課長、ならびにホットラボ課 試験第2係 木崎係長には多大なご協力をいただきましたので、ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) J. S. Perrin et al., "Reconstituted Charpy Impact Specimens", EPRI NP-2759, Research Project 2055-3, Final Report, December 1982.
- (2) E. van Walle et al., "The Reconstitution of Small Remnant Parts of Charpy-V Specimens", SMiRT-11, Taiwan, August 1991.
- (3) E. N. Klauanitzer and G. Hofmann, "Reconstituted Impact Specimens with Small Inserts", ASTM STP-1125, 1992, pp. 76-90
- (4) M. P. Manahan et al., "Laser Weld Reconstitution of Conventional and Miniaturized Notch Test (MNT) Specimens", ASTM STP-1204, 1993, pp. 62-76.
- (5) 貝原 他、常温接合技術の開発、石川島播磨技報第32巻第3号（平成4..5）、pp.147-152
- (6) 鬼沢 他、照射試験片の再生技術の開発 平成5年度原研・IHI共同研究成果報書、JAERI-Tech 94-017, 1994.
- (7) 桜井俊男、潤滑の物理化学、幸書房、1978.

平成6年6月3日

表1 共同研究年次計画

Phase 1 : 予備的検討 (平成5年度)	Phase 2 : 最適化、実用化検討 (平成6~7年度)	Phase 3 : 実証 (平成8年度~)
<p>表面活性化接合法 (SAJ*法) の優位性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現有装置(IHI)の利用</li> <li>・ EB溶接等との比較</li> </ul> <p>超真空接合装置の改造</p> <p>放射化材試験片再生装置の概念設計</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 試験片加工装置</li> </ul> <p>接合試験片の先行照射試験</p>	<p>SAJ法の接合条件最適化検討【接合部の硬さ低減】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ インサート材の利用 (低真空装置)</li> <li>・ 超高真空装置による接合</li> <li>・ 丸一角材、Vノッチ両側接合</li> </ul> <p>放射化材試験片再生装置の概念設計</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 放射化材接合装置</li> </ul> <p>放射化試験片再生装置製作</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 試験片加工装置</li> </ul> <p>破壊靱性試験片再生への応用検討</p> <p>先行照射試験片の照射後試験</p>	<p>放射化試験片再生装置製作</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 試験片加工装置</li> </ul> <p>放射化材接合装置</p> <p>照射試験片による再生技術の検証</p>

\* : Surface-Activated Joining

表2 平成6年度スケジュール

(H6. 11. 7)

	平成6年 4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平成7年 1月	2月	3月
I	<p>☆最適接合条件の検討【接合条件検討】</p> <p>・超高真空装置接合</p> <p>接合試験</p> <p>→</p> <p>・超高真空接合装置改造、調整</p> <p>→</p> <p>接合試験条件選定</p> <p>→</p> <p>丸-角材の接合</p> <p>→</p> <p>温度計測、引張試験、シャルピ-試験片製作</p>											
H	<p>・低真空インサート材接合</p> <p>→</p> <p>接合試験 温度計測</p>											
I	<p>☆放射化試験片再生装置の概念設計</p> <p>→</p> <p>放射化接合装置概念設計</p> <p>→</p> <p>☆発展的利用可能性の検討</p> <p>→</p> <p>破壊靱性試験片再生への応用検討</p>											
原	<p>☆最適接合条件の検討【接合の有効性評価】</p> <p>→</p> <p>・超高真空接合</p> <p>→</p> <p>硬さ、金相、シャルピ-試験</p>											
研	<p>・低真空インサート材接合</p> <p>→</p> <p>☆放射化試験片再生装置の概念設計</p> <p>→</p> <p>放射化接合装置概念設計</p> <p>→</p> <p>硬さ、金相</p> <p>→</p> <p>☆発展的利用可能性の検討</p> <p>→</p> <p>破壊靱性試験片再生への応用検討</p>											
その他	<p>▼(6/3)</p> <p>▼(11/2)</p> <p>▼</p>											

▼：定例会合、▽：ワーキンググループ会合

表3 接合装置の仕様

	局部真空接合装置	超高真空接合装置 (改造前)	超高真空接合装置 (改造後)
真空度 (Pa)	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
加圧力 (kgf)	50000	2000	2000
試験片サイズ	$\phi 35$	$\phi 6$	$\phi 20$
回転数 (rpm)	1500	24	0~960

表4 接合試験結果 (その1)

加圧力P1 (MPa)	試験片形状	真空度 (Pa)	回転数 N(rpm)	回転摩耗時間T1(sec)										777°テスト 加圧力P2 (MPa)	777°テスト 時間 T2 (sec)	接合試験 結果	摺動エネルギー W(J)	備考			
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0						6.0		
9.8	φ20+ φ20	4.0x10 <sup>-5</sup>	600				*								98	2.0	X		(1)		
		2.3x10 <sup>-5</sup>					*											X		(2)	
		4.5x10 <sup>-5</sup>						*											X		(3)
		4.0x10 <sup>-5</sup>					*												X		(4)
		3.0x10 <sup>-5</sup>						*											X		(5)
		5.0x10 <sup>-3</sup>							*										□	0.00618	(6)
		4.0x10 <sup>-5</sup>						*											X		(7)
		4.0x10 <sup>-5</sup>							*										X		(8)
		7.0x10 <sup>-5</sup>								*									□	0.00515	(9)
		6.4x10 <sup>-5</sup>																	□	0.00618	(10)
14.7	φ16+ φ16	1.4x10 <sup>-4</sup>	960				*										□	0.00618	(11)		
		3.0x10 <sup>-5</sup>				*										98	2.0	X		(12)	
		3.2x10 <sup>-5</sup>					*											○	0.00773	(13)	
		4.3x10 <sup>-5</sup>						*											○		(14)
		3.2x10 <sup>-5</sup>							*										○		(15)
		2.0x10 <sup>-3</sup>						*											○	0.00540	(16)
		2.0x10 <sup>-3</sup>							*										X		(17)
		4.5x10 <sup>-5</sup>						*											X		(18)
		4.5x10 <sup>-5</sup>							*										○	0.00554	(19)

接合結果： ○接合する (1<HAZ<2) □接合する (HAZ>2、バリ発生) △未接合部あり ×接合しない



表 4 接合試験結果 (その2)

加圧力P1 (MPa)	試験片形状	真空度 (Pa)	回転数 N(rpm)	回転摩擦時間T1(sec)											7ヶ月 加圧力P2 (MPa)	7ヶ月 時間 T2 (sec)	接合試験 結果	摺動エネ ルギー W(J)	備考	
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0						
14.7	φ20+φ20	9.0x10 <sup>-5</sup>	900													98	2.0	□	0.00290	(20)
		1.3x10 <sup>-5</sup>	960															□	0.00309	(21)
	φ16+φ16	6.0x10 <sup>-5</sup>	800			*												×		(22)
		3.0x10 <sup>-5</sup>	860															×		(23)
		4.0x10 <sup>-5</sup>				*												×		(24)
		4.5x10 <sup>-5</sup>																○		(25)
		5.0x10 <sup>-5</sup>				*												×		(26)
		6.0x10 <sup>-5</sup>					*											×		(27)
		6.0x10 <sup>-5</sup>								*								×		(28)
		4.5x10 <sup>-5</sup>										*						□		(29)
6.0x10 <sup>-5</sup>												*				□	0.00211	(30)		
22.5	φ16+φ16	4.0x10 <sup>-3</sup>	900														□		(31)	
		6.0x10 <sup>-5</sup>				*											□		(32)	
		3.0x10 <sup>-5</sup>	700				*									98	×		(33)	
		5.0x10 <sup>-5</sup>						*									○		(34)	
29.4	φ16+φ16	3.0x10 <sup>-5</sup>									*					○	0.00204	(35)		
		6.0x10 <sup>-5</sup>	860			*									98	□		(36)		
		4.0x10 <sup>-5</sup>										*				□		(37)		

接合結果: ○接合する (1<HAZ<2) □接合する (HAZ>2、バリ発生) △未接合部あり ×接合しない

表 4 接合試験結果 (その3)

加圧力P1 (MPa)	試験片形状	真空度 (Pa)	回転数 N(rpm)	回転摩擦時間T1(sec)											777*セト 加圧力P2 (MPa)	777*セト 時間 T2 (sec)	接合試験 結果	摺動エネ ルギ W(J)	備考	
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0						
14.7	10□+φ16	5.1x10 <sup>-5</sup>	860	※											98	2.0	×	(38)		
		4.4x10 <sup>-5</sup>		※														△	(39)	
		2.6x10 <sup>-5</sup>			※														×	(40)
		4.0x10 <sup>-5</sup>					※												×	(41)
		2.1x10 <sup>-5</sup>									※								×	(42)
		4.0x10 <sup>-5</sup>														※			□	(43)
29.4	10□+φ16	7.0x10 <sup>-5</sup>	860	※											98	2.0	×	(44)		
		4.6x10 <sup>-5</sup>																△	(45)	
		5.8x10 <sup>-5</sup>			※														○	(46)
		2.1x10 <sup>-5</sup>																	□	(47)
		2.0x10 <sup>-5</sup>						※											□	(48)
		3.3x10 <sup>-5</sup>							※										○	(49)
39.2	10□+φ16	6.2x10 <sup>-5</sup>	860						※						98	2.0	□	(50)		
22.5	10□7* -ト +φ16	5.1x10 <sup>-5</sup>	700	※											98	2.0	×	(51)		
		5.1x10 <sup>-5</sup>																○	(52)	
20.0	10□7* -ト +φ16凹凸	5.1x10 <sup>-5</sup>	700												200	1.0	○	(53)		
22.5	φ16+φ16	10 <sup>-3</sup>	700														○	(54)		
		10 <sup>-1</sup>																×	(55)	

接合結果： ○接合する (1<HAZ<2) □接合する (HAZ>2,バリ発生) △未接合部あり ×接合しない

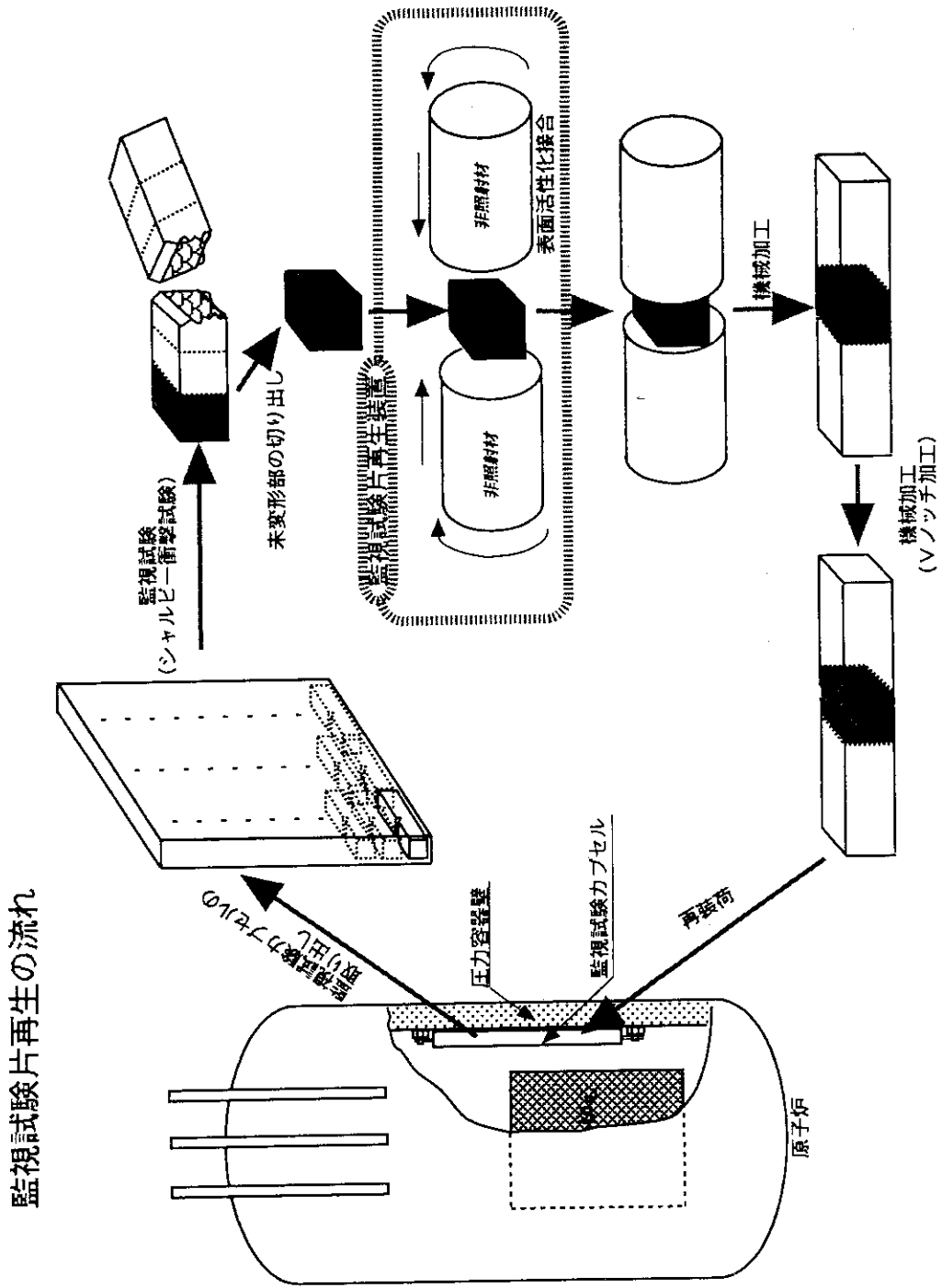


図1 表面活性化接合法による監視試験片再生の手順

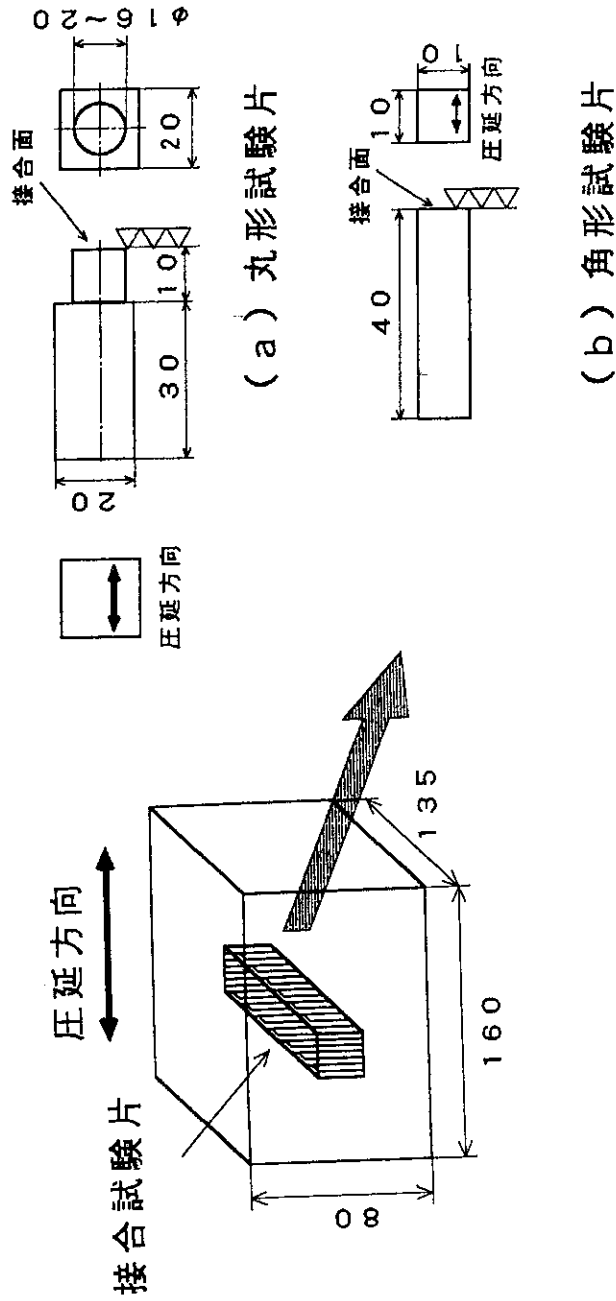


図2 接合試験片の採取要領

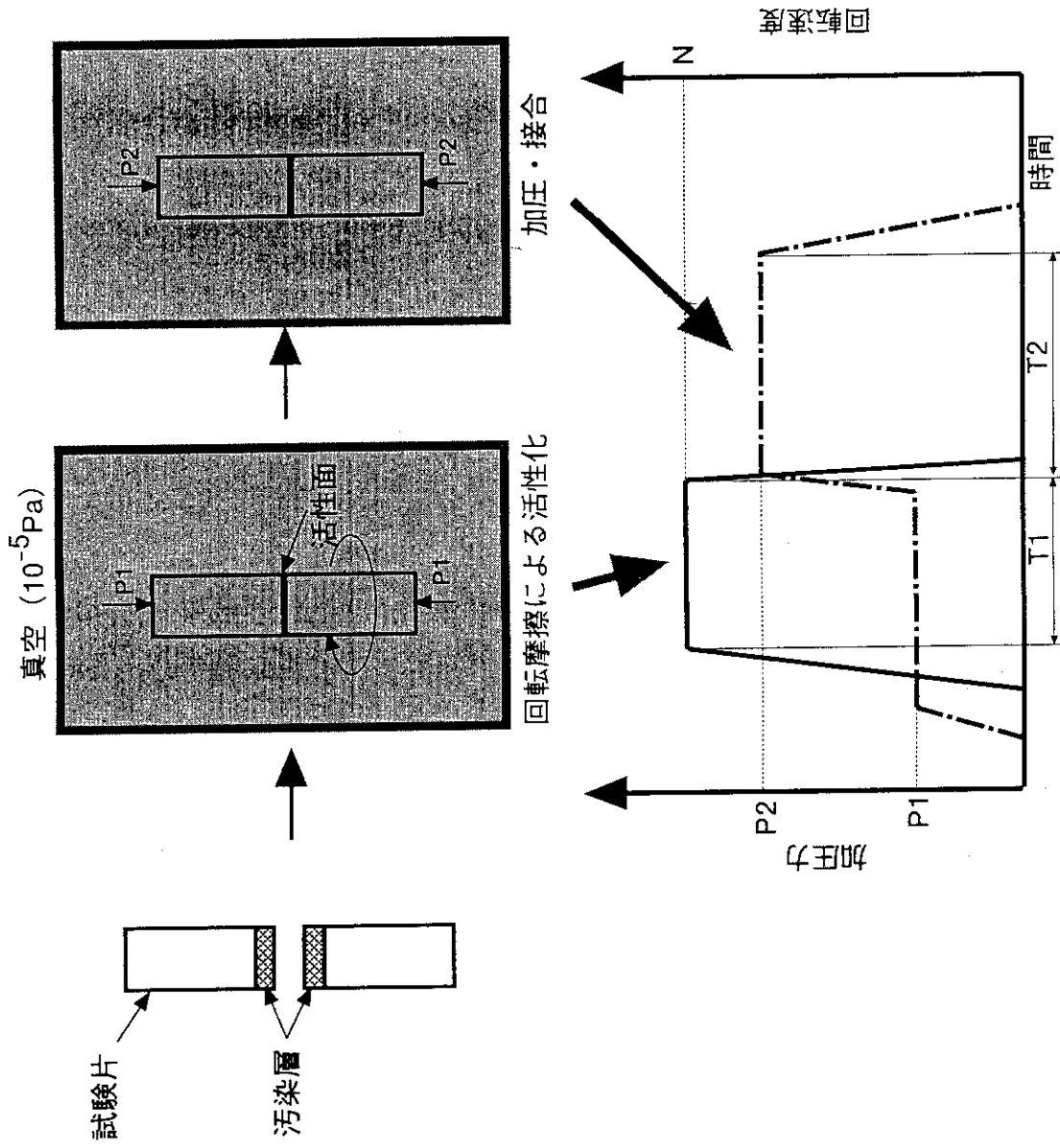


図3 接合プロセス

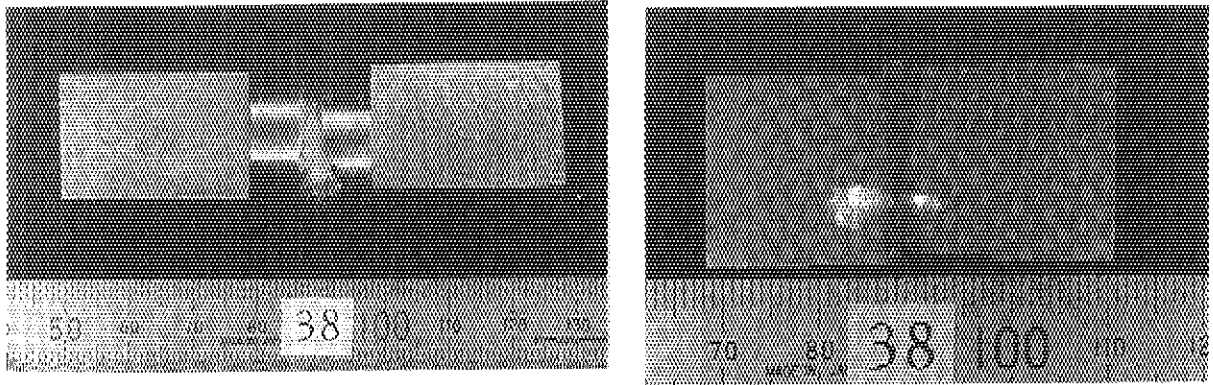


図4 接合継手の外観と断面（丸型試験片の突き合せ，接合条件： $P_1=9.8\text{MPa}$ ， $T_1=3.0\text{sec}$ ， $N=960\text{rpm}$ ）

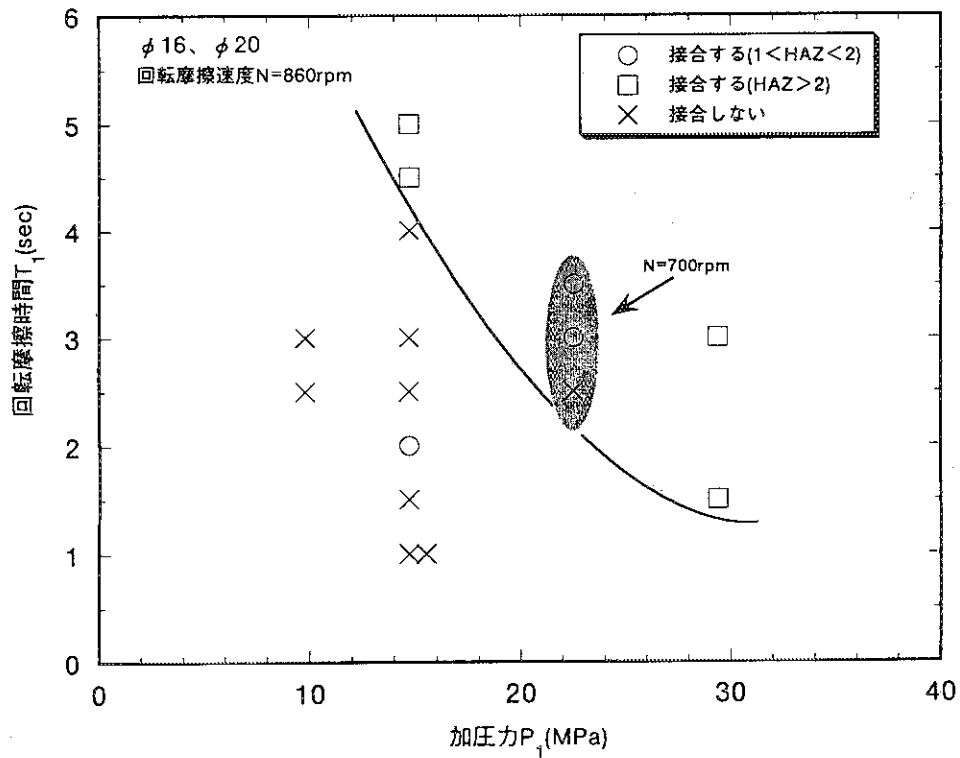


図5 加圧力 $T_1$ と回転摩擦時間 $T_1$ の関係と接合試験結果（丸型試験片の突き合わせ）

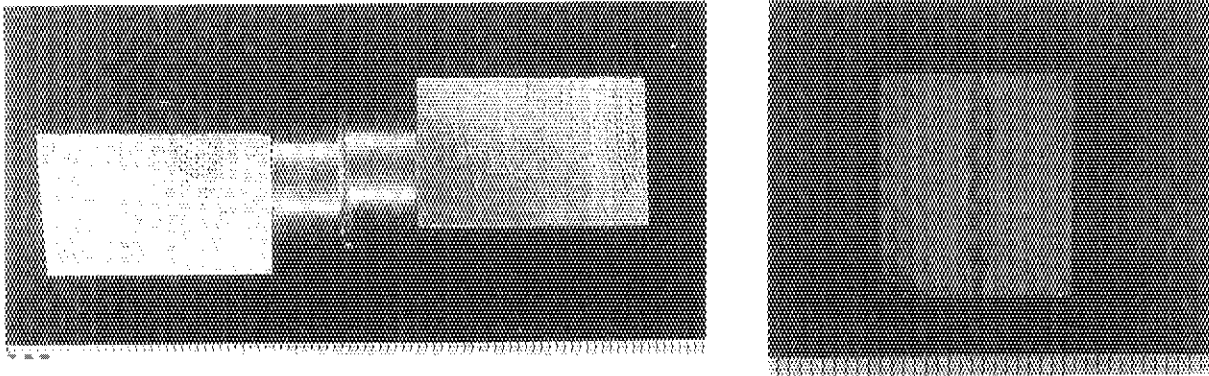


図6 接合継手の外観と断面 (丸型試験片の突き合せ, 接合条件:  $P_1=22.5\text{MPa}$ ,  $T_1=3.0\text{sec}$ ,  $N=700\text{rpm}$ )

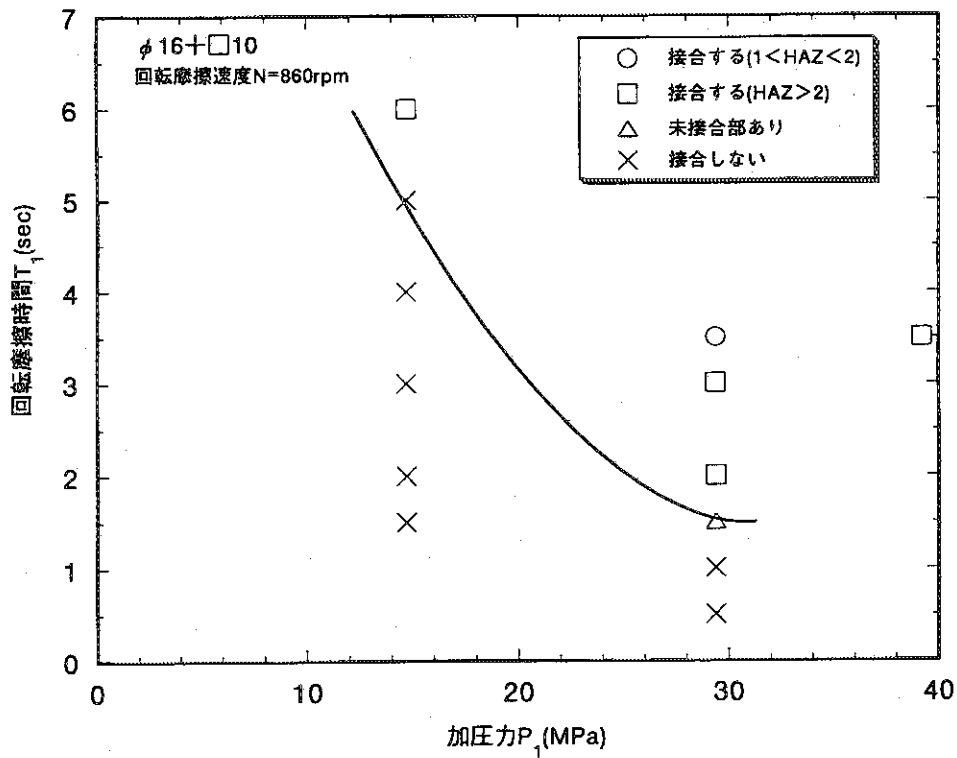
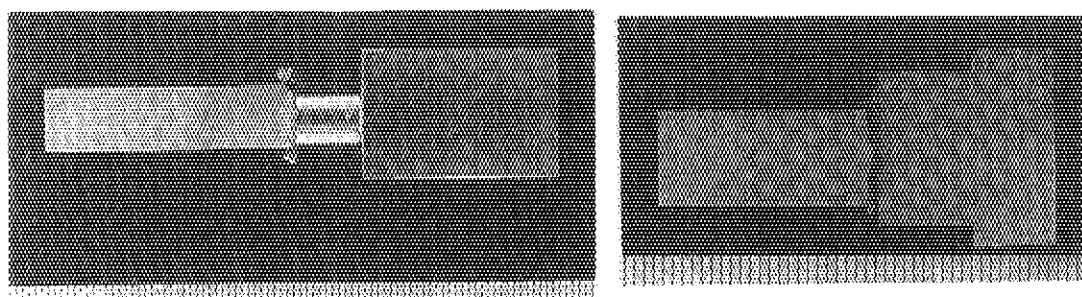
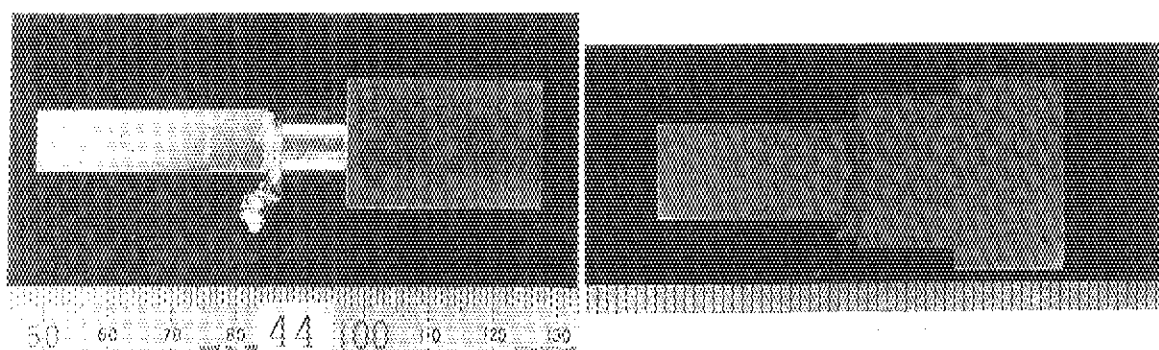


図7 加圧力  $T_1$  と回転摩擦時間  $T_1$  の関係と接合試験結果 (丸型試験片と角型試験片の突き合わせ)



(a)



(b)

図8 接合継手の外観と断面 (丸型試験片と角型試験片の突き合わせ)

(a) 接合条件： $P_1=29.4\text{MPa}$ ,  $T_1=1.0\text{sec}$ ,  $N=860\text{rpm}$

(b) 接合条件： $P_1=39.2\text{MPa}$ ,  $T_1=3.5\text{sec}$ ,  $N=860\text{rpm}$



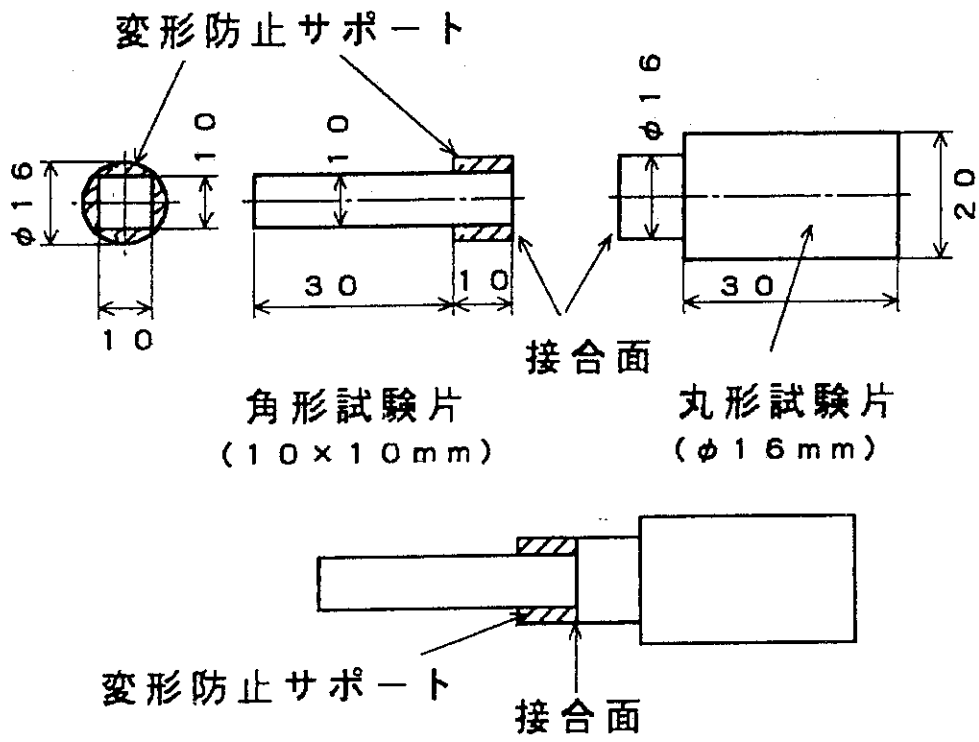


図9 角型試験片に装着する変形防止サポート

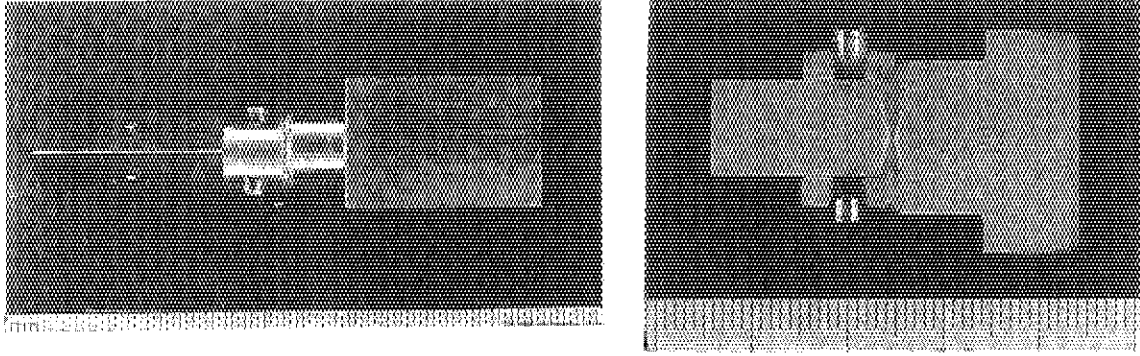


図10 接合継手の外観と断面（丸型試験片とサポート付き角型試験片の突き合わせ、）  
接合条件： $P_1=22.5\text{MPa}$ 、 $T_1=5.0\text{sec}$ 、 $N=700\text{rpm}$

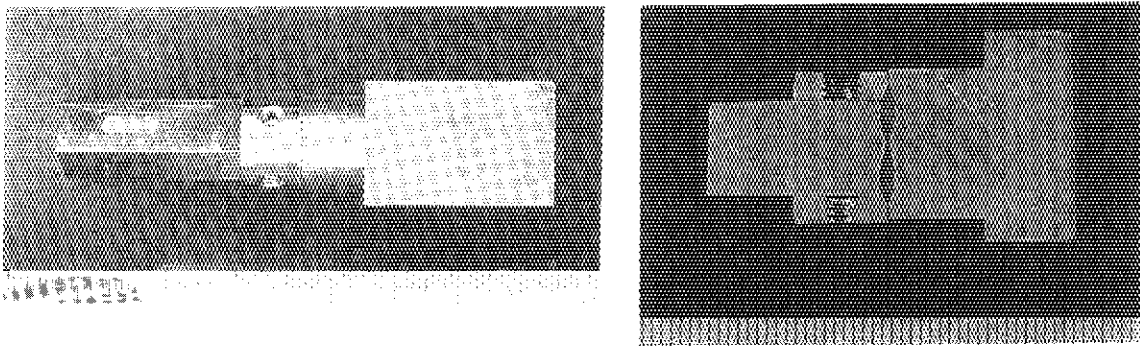


図11 接合継手の外観と断面（平坦な端面を有する丸型試験片の突き合わせ、接合条件： $P_1=20\text{MPa}$ 、 $T_1=5\text{sec}$ 、 $N=700\text{rpm}$ 、 $P_2=200\text{MPa}$ 、 $T_2=1\text{sec}$ ）

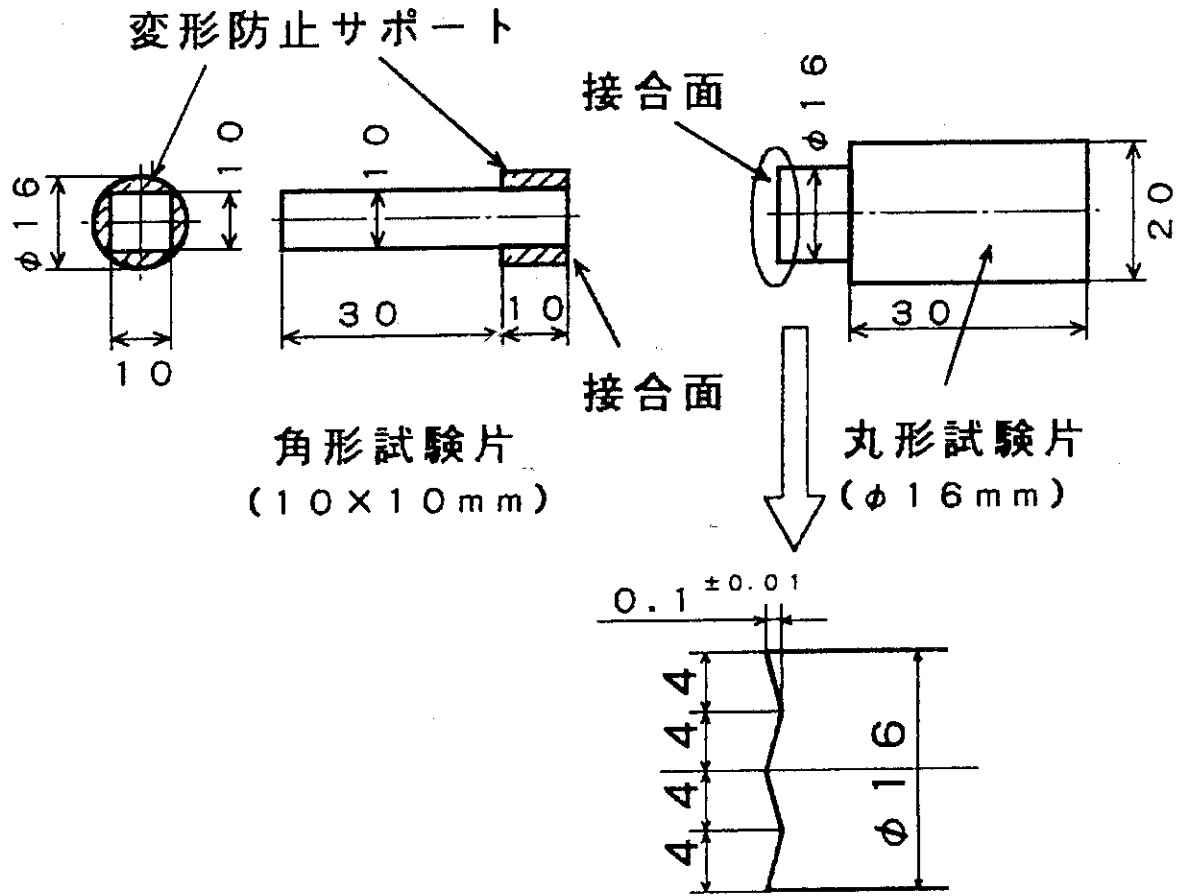


図12 凹凸型試験片

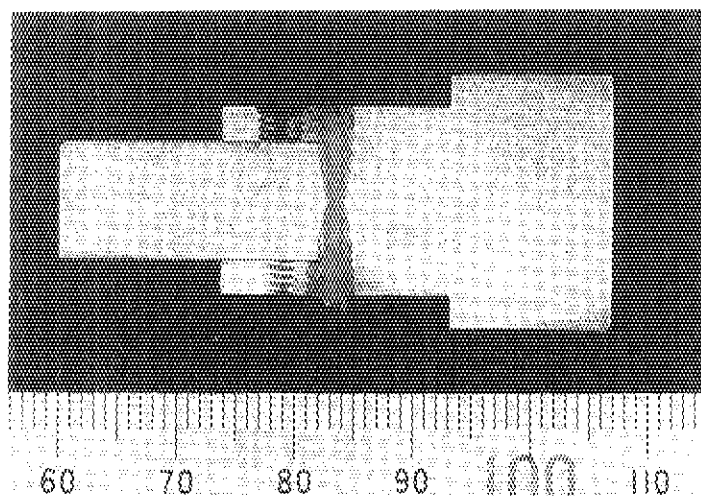


図13 接合継続の断面 (凹凸丸型試験片とサポート付き角型試験片の突き合わせ, 接合条件:  $P_1=20\text{MPa}$ ,  $T_1=5.0\text{sec}$ ,  $N=700\text{rpm}$ )

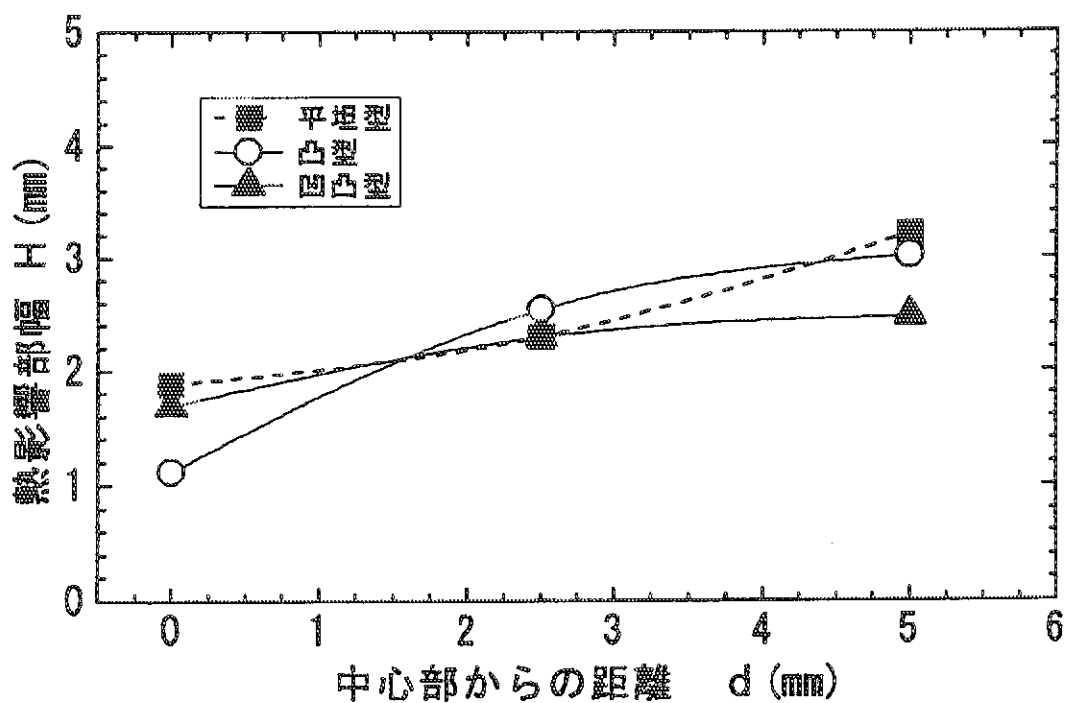


図14 熱影響部幅に対する試験片の端面形状の影響

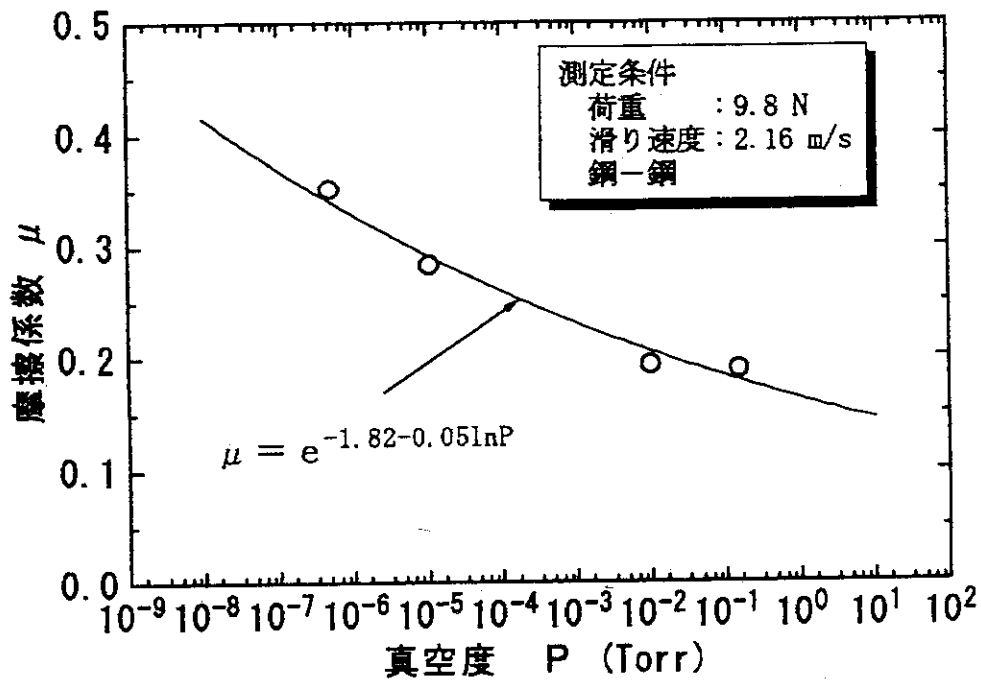


図15 摩擦係数と真空度の関係

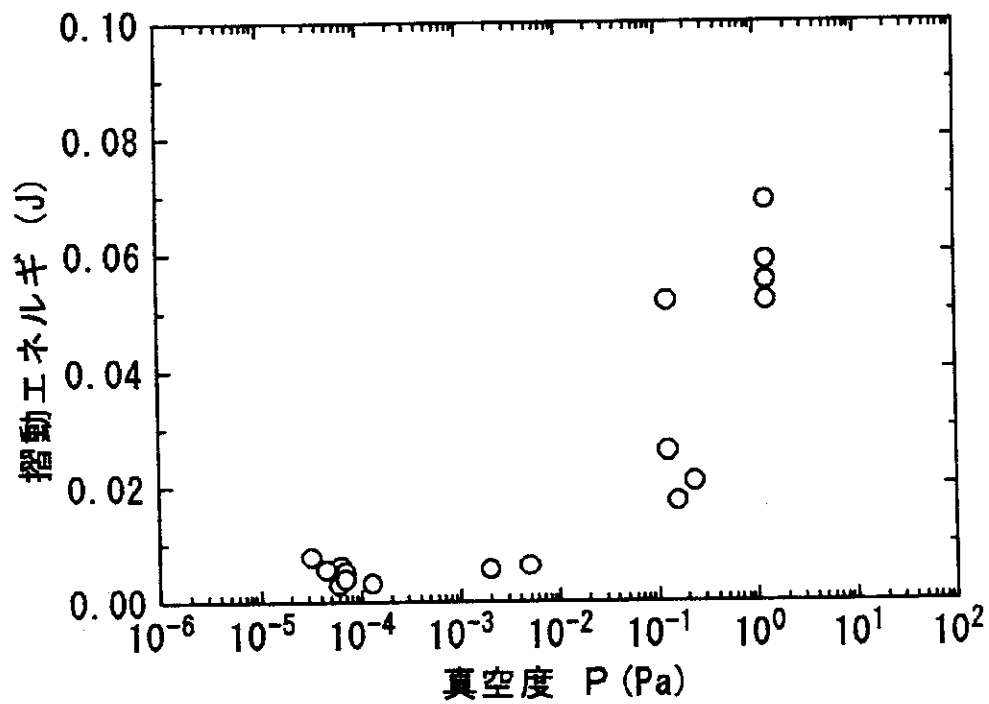


図16 接合エネルギーと真空度の関係

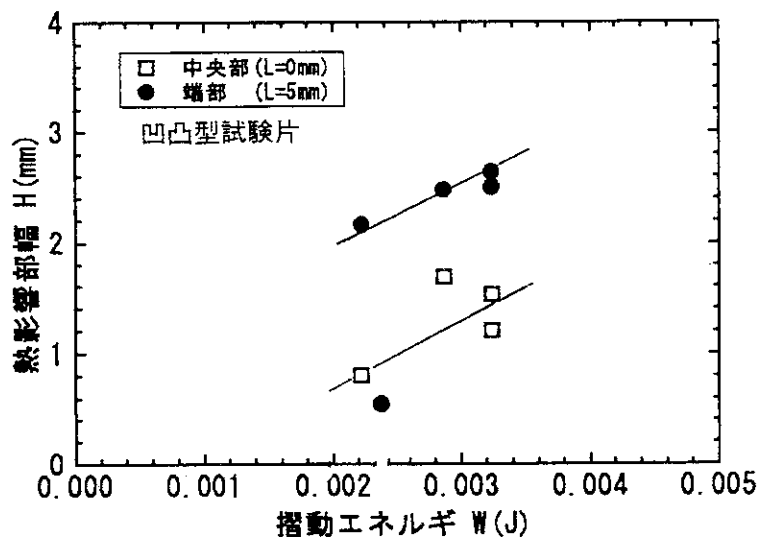
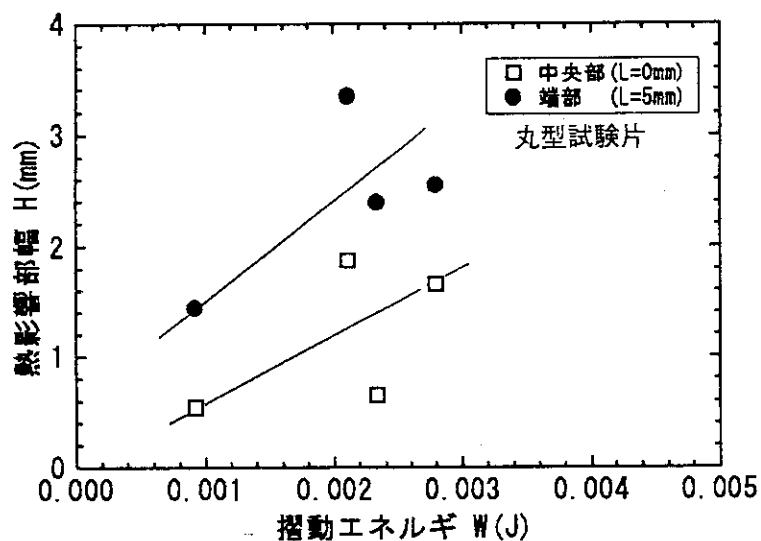


図17 熱影響部幅と摺動エネルギーの関係

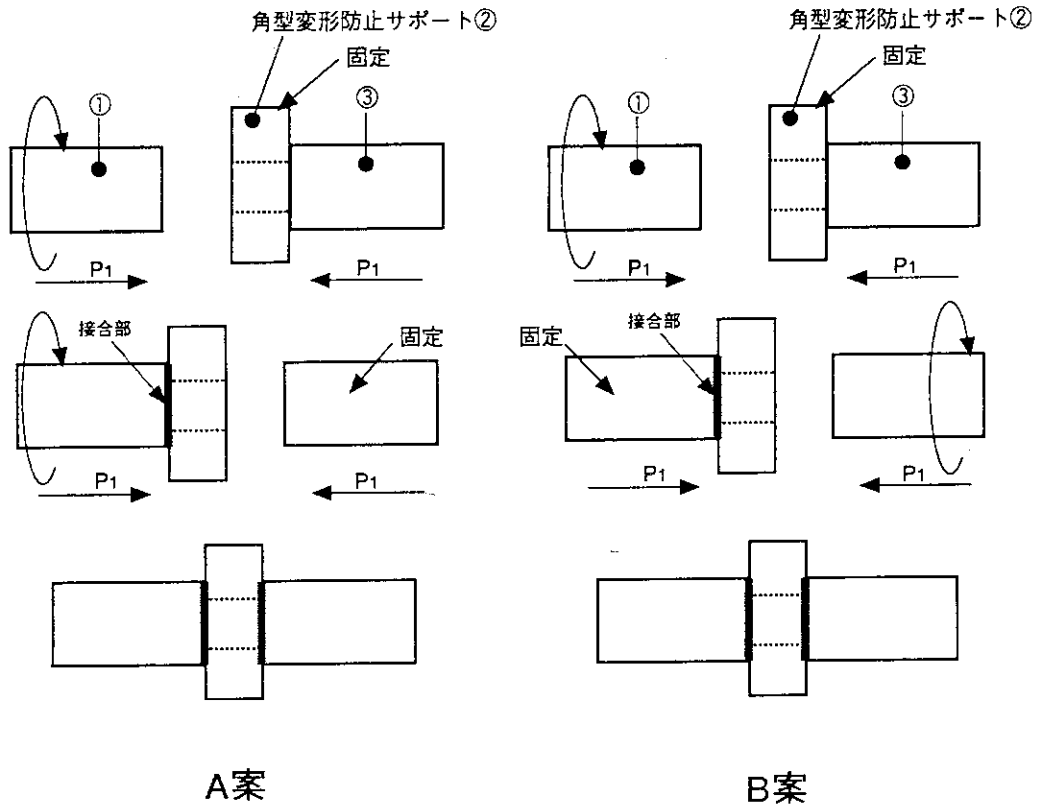


図18 接合方法の案

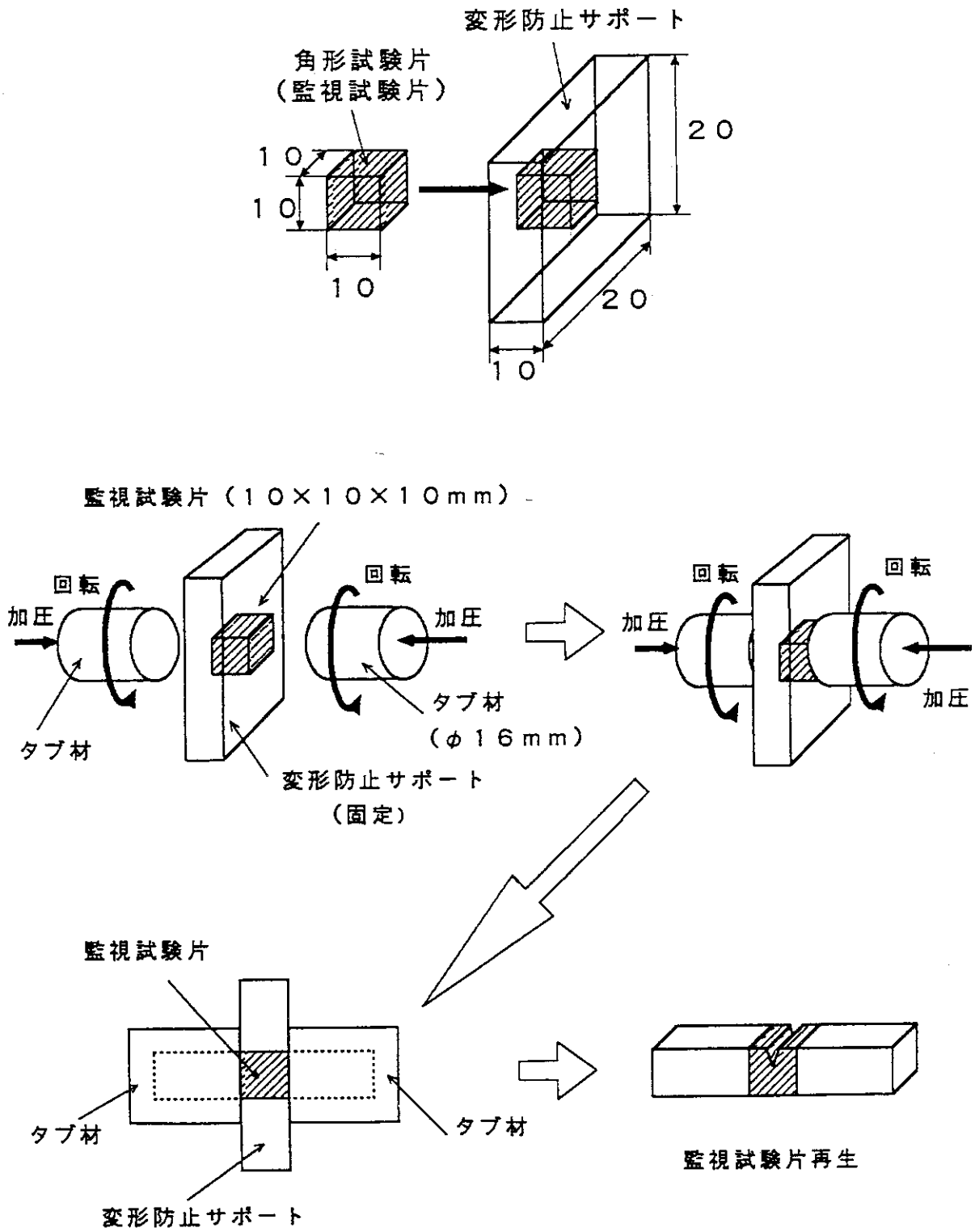


図19 監視試験片の再生プロセス



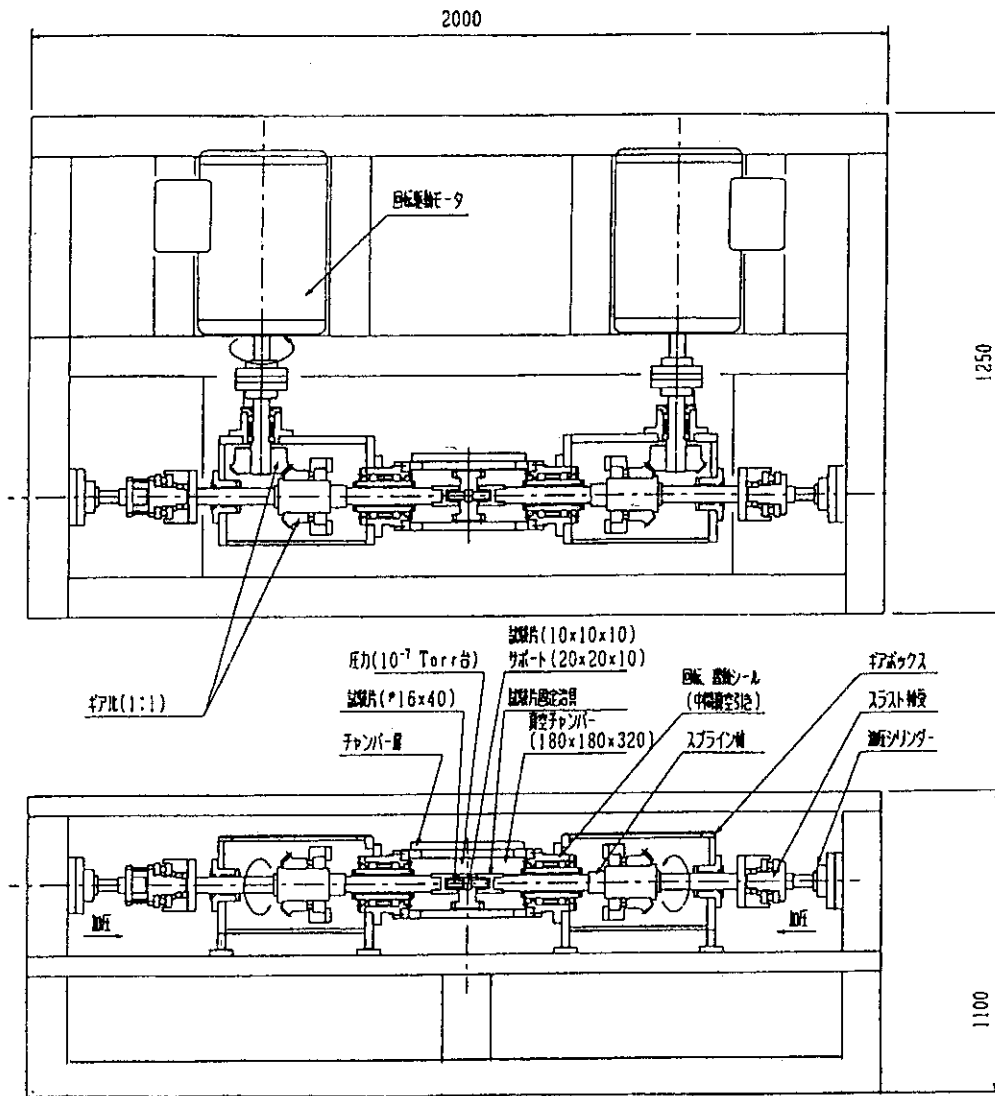


図20 遠隔操作型接合装置

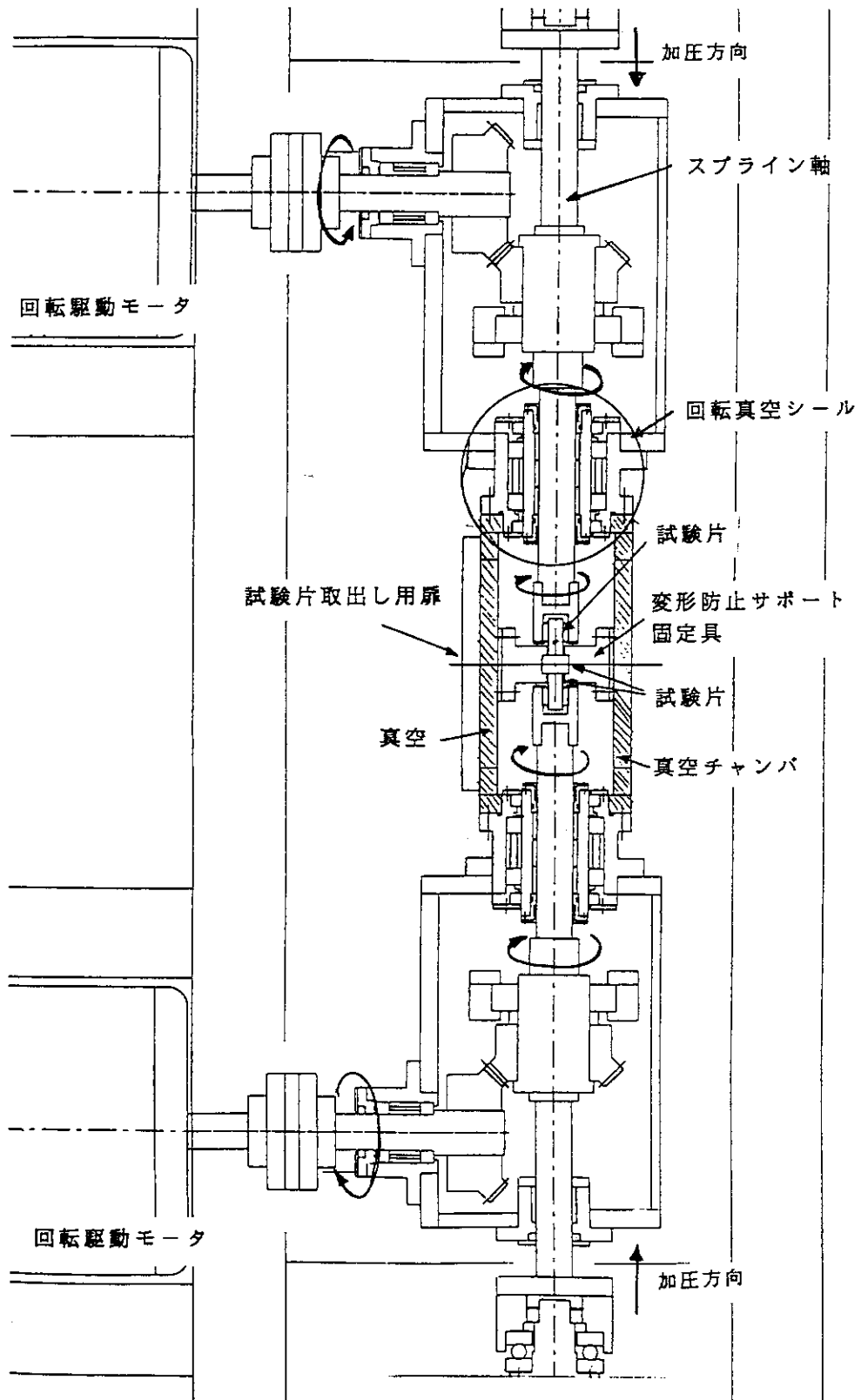


図21 遠隔操作型接合装置 (詳細)