

JAERI-M

6758

摩擦圧接法による水カラビット用
キャプセルの開発

1976年10月

大岡紀一・伊丹宏治

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

摩擦圧接法による水力ラビット用キャプセルの開発

日本原子力研究所大洗研究所
材料試験炉部

大岡 紀一・伊丹 宏治

(1976年9月29日受理)

J M T Rの短期間照射に用いられる水力ラビットキャプセルはアルミニウム材の溶接によって製作されるため、溶接欠陥を生じたり照射用試料に熱影響を与えるという問題があり、さらに製作コストも高価であった。そこで、ラビットキャプセルを摩擦圧接により製作する方法を考慮するため圧接条件の検討とその健全性に関する試験さらに製作の技術的検討を行なった。

その結果、アルミニウム製ラビットキャプセルの製作には摩擦圧接法が最も適していることが確められた。

JAERI-M 6758

Fabrication of an Al Capsule for the Hydraulic
Rabbit by Friction Welding

Norikazu OOKA and Hiroharu ITAMI

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received September 29, 1976)

Al capsules for the hydraulic rabbit in JMTR have been fabricated by fusion welding. In fusion welding, however, there are the following problems: defects formation in welding, thermal effect on the specimens before irradiation and high fabrication cost. Tests were carried out on the friction welding of capsules in order to eliminate the difficulties. As the results, it was confirmed that friction welding is the most suitable for fabrication of the Al capsule.

目 次

1	まえがき	1
2	摩擦圧接法	1
2.1	摩擦圧接の原理	1
2.2	摩擦圧接法の得失	2
2.3	各種金属の摩擦圧接による接合性	2
3	試 験	2
3.1	目 的	2
3.2	試験材の製作	2
3.3	圧接条件と強度	2
3.4	圧接部の非破壊試験	3
4	試験結果及び考察	3
5	製作技術の確立	5
6	結 論	7
7	あとがき	8
8	参考文献	9

1 ま え が き

アルミニウム及びその合金は原子炉材料として利用され、JMTRでもRI製造用及び低温の材料試料照射用の容器あるいは熱媒体として炉内で使用されている。

JMTRでの短期間照射に用いられる水力ラビット照射試験装置の照射容器は通常ラビットと呼ばれ、Fig-1に示すようにA₂製またはSUS製のホルダー内に照射試料を密封した溶接構造となっている。一般にA₂材の溶接は、(1)比重がSUS材に比して小さいのでスケールやスラグ類の浮き上がりが悪い。(2)温度拡散率がSUS材の約4倍も大きいため局部加熱が困難である。(3)膨張係数がSUS材の約2倍、凝固収縮率は約1.5倍で溶接ひずみが大きく、割れが発生し易い。(4)溶解中、ガス特に水素を吸収して気孔の発生原因となる。など施工上種々の問題を有している。そのため製作の歩留りが悪く加工費も著るしく高価となる。また照射時にHe封入孔溶接部が破損するというトラブルも生じている。

さらにラビットは溶接による密封構造であるため、その製作組立時溶接熱によって酸化、変形などを生じ易く特に陽電子消滅実験用銅(Cu)及びバナジウム(V)など酸化し易い材料及びカドミウム(Cd)などの低融点金属を照射するときにしばしば問題を生じた。

このような溶接施工によって生ずる諸問題を解決するため、摩擦圧接法の適用性について技術的検討を行なった。

その結果、溶接熱及び溶接欠陥などの諸問題を解決出来、品質管理上また生産性の上で良好なラビットが製作出来る結果が得られ、実用照射容器として昭和47年から現在まですでに300本以上の照射実績を有し未だトラブルを生じていない。

本報告書は実用に到るまでの一連の試験結果をまとめたものである。

2 摩 擦 圧 接 法^{1), 2)}

2.1 摩擦圧接の原理

摩擦圧接機はPhoto-1に示すように旋盤と類似の構造を有し、圧接は2つの被圧接物の接合面に圧力をかけたまま互いに相対的な回転を与え摩擦熱によって接合部が適当な高温に達したとき相対的回転をゼロにして加圧力を増加して接合する。

現在実用されている機械の形式を大別するとコンベンショナル方式(ブレーキ法)とフライホイール式(イナーシャ法)の2つに分けられる。前者はFig-2に示すようにモーターにより駆動される主軸のチャックに被圧接物を固定し、静止側の被圧接物を適当な加熱圧力で適当時間接触させる。被圧接物が所定の温度に到達した時点でクラッチを切ってブレーキにより急停止させ、さらに大きいアプセット圧力(据込移動圧力)を加えることにより圧接する方法である。後者はFig-3に示すように被圧接物の材料と面積により接合に必要なエネルギーをフライホイールの初期回転数により与え、静止側の被圧接物を回転中の被圧接物に接触発熱させ貯えたエネルギーがすべて圧接部で消費すると自然停止をし圧接が行なわれる方法である。

1 ま え が き

アルミニウム及びその合金は原子炉材料として利用され、JMTRでもRI製造用及び低温の材料試料照射用の容器あるいは熱媒体として炉内で使用されている。

JMTRでの短期間照射に用いられる水力ラビット照射試験装置の照射容器は通常ラビットと呼ばれ、Fig-1に示すようにA₂鋼またはSUS製のホルダー内に照射試料を密封した溶接構造となっている。一般にA₂鋼材の溶接は、(1)比重がSUS材に比して小さいのでスケールやスラグ類の浮き上がりが悪い。(2)温度拡散率がSUS材の約4倍も大きいので局所加熱が困難である。(3)膨張係数がSUS材の約2倍、凝固収縮率は約1.5倍で溶接ひずみが大きく、割れが発生し易い。(4)溶解中、ガス特に水素を吸収して気孔の発生原因となる。など施工上種々の問題を有している。そのため製作の歩留りが悪く加工費も著るしく高価となる。また照射時にHe封入孔溶接部が破損するというトラブルも生じている。

さらにラビットは溶接による密封構造であるため、その製作組立時溶接熱によって酸化、変形などを生じ易く特に陽電子消滅実験用銅(Cu)及びバナジウム(V)など酸化し易い材料及びカドミウム(Cd)などの低融点金属を照射するときにしばしば問題を生じた。

このような溶接施工によって生ずる諸問題を解決するため、摩擦圧接法の適用性について技術的検討を行なった。

その結果、溶接熱及び溶接欠陥などの諸問題を解決出来、品質管理上また生産性の上で良好なラビットが製作出来る結果が得られ、実用照射容器として昭和47年から現在まですでに300本以上の照射実績を有し未だトラブルを生じていない。

本報告書は実用に到るまでの一連の試験結果をまとめたものである。

2 摩 擦 圧 接 法^{1), 2)}

2.1 摩擦圧接の原理

摩擦圧接機はPhoto-1に示すように旋盤と類似の構造を有し、圧接は2つの被圧接物の接合面に圧力をかけたまま互いに相対的な回転を与え摩擦熱によって接合部が適当な高温に達したとき相対的回転をゼロにして加圧力を増加して接合する。

現在実用されている機械の形式を大別するとコンベンショナル方式(ブレーキ法)とフライホイール式(イナーシャ法)の2つに分けられる。前者はFig-2に示すようにモーターにより駆動される主軸のチャックに被圧接物を固定し、静止側の被圧接物を適当な加熱圧力で適当時間接触させる。被圧接物が所定の温度に到達した時点でクラッチを切ってブレーキにより急停止させ、さらに大きいアプセット圧力(据込移動圧力)を加えることにより圧接する方法である。後者はFig-3に示すように被圧接物の材料と面積により接合に必要なエネルギーをフライホイールの初期回転数により与え、静止側の被圧接物を回転中の被圧接物に接触発熱させ貯えたエネルギーがすべて圧接部で消費すると自然停止をし圧接が行なわれる方法である。

2.2 摩擦圧接法の得失

摩擦圧接法の特徴は Table-1 に示す通りである。

ラビットの場合、Fig-1 に示すように単純形状であるため圧接は容易であり、素材のチャックの傷及び外側に生ずるバリについては機械加工により外面仕上げを行なうため問題とならない。また内側に発生するバリについてはスペーサ（照射用試料の押え板）の押えとして利用した。そのため摩擦圧接法の短所はラビット製作に当ってはむしろ利点となった。

2.3 各種金属の摩擦圧接による接合性³⁾

アルミニウム及びその合金同志の摩擦圧接は Table-2 に示すように圧接後母材強さを満足するものとして接合性は一般に良好である。

しかし一般に良好であってもアルミニウム合金も種類によって圧接条件が異なり、強度も異なるから圧接施工を採用するに当って各種試験が必要となる。

3 試 験

3.1 目 的

摩擦圧接による製作条件とその健全性について下記のことを調べた。

- (1) 摩擦圧接と強度の関係
- (2) 圧接部の健全性の確認方法としての非破壊試験
- (3) ラビット製作技術の確立

3.2 試験材の製作

試験材の製作に当って、コンベンショナル方式による摩擦圧接法を採用した。

使用した圧接装置の仕様は次の通りである。

豊田製FW 61H型 能力20～60φ

回転：1200～1800 r.p.m

up set：0～60秒

ブレーキ：0.3秒以内

摩擦圧接では材料の種類によって接合性が異なる。A₂では純度が高いほど放射化量が少なくまた圧接性も良好なことからA1050材を選定した。

素材の化学組成及び機械的性質を table-3 に示す。

試験材は Fig-4 に示すように外径45mmφの丸棒素材を機械加工により外径42mmφの中空パイプ状にし、長さ110m/mと150m/mの2本を圧接により製作した。

試験材の圧接条件を Table-4 に示す。

3.3 圧接条件と強度

圧接部の強度を検討するため種々の圧接条件による試験材の引張試験、金相試験、硬さ試験、

2.2 摩擦圧接法の得失

摩擦圧接法の特徴は Table-1 に示す通りである。

ラビットの場合、Fig-1 に示すように単純形状であるため圧接は容易であり、素材のチャックの傷及び外側に生ずるバリについては機械加工により外面仕上げを行なうため問題とならない。また内側に発生するバリについてはスペーサ（照射用試料の押え板）の押えとして利用した。そのため摩擦圧接法の短所はラビット製作に当ってはむしろ利点となった。

2.3 各種金属の摩擦圧接による接合性³⁾

アルミニウム及びその合金同志の摩擦圧接は Table-2 に示すように圧接後母材強さを満足するものとして接合性は一般に良好である。

しかし一般に良好であってもアルミニウム合金も種類によって圧接条件が異なり、強度も異なるから圧接施工を採用するに当って各種試験が必要となる。

3 試 験

3.1 目 的

摩擦圧接による製作条件とその健全性について下記のことを調べた。

- (1) 摩擦圧接と強度の関係
- (2) 圧接部の健全性の確認方法としての非破壊試験
- (3) ラビット製作技術の確立

3.2 試験材の製作

試験材の製作に当って、コンベンショナル方式による摩擦圧接法を採用した。

使用した圧接装置の仕様は次の通りである。

豊田製FW 61H型 能力20～60φ

回転：1200～1800 r.p.m

up set：0～60秒

ブレーキ：0.3秒以内

摩擦圧接では材料の種類によって接合性が異なる。A₂では純度が高いほど放射化量が少なくまた圧接性も良好なことからA1050材を選定した。

素材の化学組成及び機械的性質を table-3 に示す。

試験材は Fig-4 に示すように外径45mmφの丸棒素材を機械加工により外径42mmφの中空パイプ状にし、長さ110m/mと150m/mの2本を圧接により製作した。

試験材の圧接条件を Table-4 に示す。

3.3 圧接条件と強度

圧接部の強度を検討するため種々の圧接条件による試験材の引張試験、金相試験、硬さ試験、

衝撃試験及び内圧破壊試験を実施した。

3.3.1 引張試験，金相試験及び硬さ試験

圧接条件としてアプセット量（据え込み量）の異なる6本の試験材からFig-5に示すように引張試験用，金相試験用及び硬さ試験用試験片をそれぞれ採取し各種試験を行なった。

引張試験の形状寸法及び金相及び硬さ試験の測定位置をFig-6に示す。

3.3.2 衝撃試験及び内圧破壊試験

試験材はFig-7に示すように圧接部が中心位置になるように圧接し，外径及び内径を所定寸法に加工した後内圧破壊試験に供した。

内圧破壊試験に先立って，ラビットが炉内挿入される際，約6m/secの挿入流速に対する停止衝撃を受けるので，その衝撃に対する安全性を確認するための自由落下による模擬衝撃試験を行なった。

衝撃試験後，漏洩試験を行ない圧接部の気密性が確保されていることを確認した上で油圧による内圧破壊試験を実施した。

3.4 圧接部の非破壊試験

内圧破壊試験用試験材の主として圧接部の内部欠陥及び表面欠陥に対し放射線透過試験及び液体浸透探傷試験を実施し，また参考として引張試験用試験片についても両者の試験を行なった。

さらに圧接境界面での貫通状欠陥を調べるため漏洩試験を行なった。

放射線透過試験はJIS Z 3108に準拠し，試験材の圧接部に対し，X線ビームを垂直に入射させる二重壁片面撮影方法により実施した。液体浸透探傷試験は原子力機器用の探傷液を用い圧接部表面のうち境界面の接合部を実施した。

また漏洩試験⁴は，現在の漏洩試験方法のうち最も洩れ検出感度の高いHeガスによる質量分析型Heリークディテクターを用いた。

4 試験結果及び考察

本試験では，A1050材をラビット製作の材料に選定し圧接はコンベンショナル方式を採用した。また圧接部の強度の検討及び製作における圧接の条件として，アプセット量^{*}をパラメータとして用いた。

引張試験の結果アプセット量と引張強さの関係をFig-8に示す。

その結果，引張強さはアプセット量が小さくなるとJIS規格を満足するが低下する。しかしアプセット量が8m/m以上では引張強さは9kg/mm²で圧接面全周にわたってバラツキも少

* アプセット量（据え込み量）は溶接時の溶け込み量に相当すると考えられ圧接前長さ（ l_0 ）から圧接後の長さ（ l ）を差し引いた値を示す。

衝撃試験及び内圧破壊試験を実施した。

3.3.1 引張試験，金相試験及び硬さ試験

圧接条件としてアプセット量（据え込み量）の異なる6本の試験材からFig-5に示すように引張試験用，金相試験用及び硬さ試験用試験片をそれぞれ採取し各種試験を行なった。

引張試験の形状寸法及び金相及び硬さ試験の測定位置をFig-6に示す。

3.3.2 衝撃試験及び内圧破壊試験

試験材はFig-7に示すように圧接部が中心位置になるように圧接し，外径及び内径を所定寸法に加工した後内圧破壊試験に供した。

内圧破壊試験に先立って，ラビットが炉内挿入される際，約6m/secの挿入流速に対する停止衝撃を受けるので，その衝撃に対する安全性を確認するための自由落下による模擬衝撃試験を行なった。

衝撃試験後，漏洩試験を行ない圧接部の気密性が確保されていることを確認した上で油圧による内圧破壊試験を実施した。

3.4 圧接部の非破壊試験

内圧破壊試験用試験材の主として圧接部の内部欠陥及び表面欠陥に対し放射線透過試験及び液体浸透探傷試験を実施し，また参考として引張試験用試験片についても両者の試験を行なった。

さらに圧接境界面での貫通状欠陥を調べるため漏洩試験を行なった。

放射線透過試験はJIS Z 3108に準拠し，試験材の圧接部に対し，X線ビームを垂直に入射させる二重壁片面撮影方法により実施した。液体浸透探傷試験は原子力機器用の探傷液を用い圧接部表面のうち境界面の接合部を実施した。

また漏洩試験⁴は，現在の漏洩試験方法のうち最も洩れ検出感度の高いHeガスによる質量分析型Heリークディテクターを用いた。

4 試験結果及び考察

本試験では，A1050材をラビット製作の材料に選定し圧接はコンベンショナル方式を採用した。また圧接部の強度の検討及び製作における圧接の条件として，アプセット量^{*}をパラメータとして用いた。

引張試験の結果アプセット量と引張強さの関係をFig-8に示す。

その結果，引張強さはアプセット量が小さくなるとJIS規格を満足するが低下する。しかしアプセット量が8m/m以上では引張強さは9kg/mm²で圧接面全周にわたってバラツキも少

* アプセット量（据え込み量）は溶接時の溶け込み量に相当すると考えられ圧接前長さ（ l_0 ）から圧接後の長さ（ l ）を差し引いた値を示す。

なく均一に圧接されていると判断される。

これらのことから最適圧接条件を求めると、安全率を考慮してアプセット量は $11 \pm 2 \text{ mm}$ となる。

引張試験後の外観写真を Photo-2 に示す。

アプセット量が大きい場合、破断は母材部で生じており、正常な引張試験の破断面を呈しているがアプセット量が小さい場合、圧接部の境界面でハク離した破断面となっている。

圧接条件としてのアプセット量が小さい場合と大きい場合の金相試験の結果をそれぞれ Photo-4 に示す。

アプセット量が大きくなると、中心部から外周部への texture の流れが顕著になることが断面マクロ写真から観察されるが一方アプセット量が小さいと圧接面に境界層が生じているのが観察される。

Photo-5 にアプセット量が 11.1 mm の場合の圧接部中心位置の顕微鏡写真を示す。

アプセット量が大きくなると圧接面に生ずる境界層は Photo-3 に観察されるような直線状でなく渦状となり消失していくものと推定される。

以上の結果から、アプセット量が小さいと圧接面での接合状態が不完全となり境界層が残留しハク離し易い圧接面の状態となる。

圧接面の境界層は摩擦圧、アプセット圧及び回転数などの条件と深い関係があるものと推測されるが本実験では相関々係を得るに到らなかった。

確実な接合を得るためには勿論アプセット量を大きくすることが重要であるが、アプセット圧のみを大きくして大きいアプセット量を得ようとするすると圧接部で異常変形する。一方摩擦圧を大きくして大きいアプセット量を得ようとしてもアプセット圧が小さいと不完全な接合となる。

従ってアプセット量を規定しても摩擦圧及びアプセット圧などの制御が重要となり接合状態の良否に関係してくる。

硬さ試験の結果を Fig-9 及び Fig-10 に示す。

外面と内面の中心位置における硬度は、アプセット量が 9.4 m/m から 13.2 m/m の範囲では顕著な差は見受けられない。

アプセット量が 11.1 m/m の場合、硬度は母材部より圧接部の方が高く、さらに圧接面の境界付近でやゝ高い傾向を示しているが熱影響部と推定される範囲では一様な硬度となっている。しかしいずれも通常の溶接にみられるような著しい硬度の上昇はみられない。⁵⁾

ラビットは原子炉内照射に当って挿入取出し時かなりの衝撃を受けるため、それと等価の模擬衝撃を与え圧接部の変形等を観察したが異常なく、また He による漏洩試験にも合格となり衝撃によって圧接部にクラックなどが発生しないことが確かめられた。

内圧破壊試験の結果、Fig-11 に示すようにアプセット量と破壊圧力との関係はアプセット量が 6.6 m/m 以上では破壊圧力 250 kg/cm^2 以上で破断も Photo-6 に示すように圧接部で生ずることなく母材部で破断している。

冷間圧接の場合^{6),7),8),9)}、変形度と内圧破壊強度との関係は Fig-12 に示すような結果が得られているが、摩擦圧接の場合、内圧破壊強度はアプセット量 6 mm 以上ではアプセット量

の変化にあまり関係ないようである。

圧接部の健全性を確認する非破壊試験として、内部欠陥あるいは内面のバリの発生状態を観察することの出来る放射線透過試験、表面での接合状態を調べるための液体浸透探傷試験が有用である。特に放射線透過試験は内部の照射試料が製作時に損傷変形が生じなかったか否かを調べるにも有効である。一方肉眼観察による方法も外側のバリの発生状況から Fig-13 に示すような圧接部の接合状態をある程度判断出来るため重要である。

非破壊試験の結果を Table-5 に示す。

その結果、X線透過試験で欠陥指示の得られた試験片は液体浸透探傷試験でも Photo-7 に示すように圧接面境界に欠陥指示が観察された。

そのうち、試験材 No.3 はアプセット量が 1.7m/m で内圧破壊試験の結果破断面も正常であり破壊圧力 (300kg/cm^2) も高いことから内面に貫通していない不連続の欠陥と推定される。

試験材 No.1, 2 はアプセット量が 13.2m/m であり破断面も正常で引張強さも JIS 規格を十分満足する値を示しているから不連続欠陥と判断される。

一方試験材 No.7 はアプセット量が 6.6m/m と小さい場合でアプセット量の大きい場合と異なり圧接面でハク離した状態で破断している。

このことはアプセット量が不十分なため接合状態が完全でなかったと判断される。

この様に非破壊試験により欠陥指示が得られても漏洩試験に合格して内面への貫通欠陥でないことが確認され、しかもアプセット量が大きい場合には強度的に問題はないものと考えられる。

以上の結果摩擦圧接によりラビットを製作した場合

(1) 圧接条件のアプセット量が 6.6m/m から 14.7m/m の範囲では引張強度及び内圧破壊強度も高く十分使用に耐え得る。

(2) 品質管理上及び強度の安全率を考慮して最適圧接条件としてのアプセット量は $11 \pm 2\text{m/m}$ である。

(3) 圧接部の健全性の確認方法として放射線透過試験、液体浸透探傷試験及び漏洩試験が有効であることが明らかになった。

5 製作技術の確立

すでに試験結果で述べたように、圧接部の強度及び非破壊試験の適用に問題ないことが確められた。

しかしラビットを製作する上で最も重要な熱的問題及びそれに付随した照射用試料の酸化・変形の問題に関し検討を加え摩擦圧接法による製作の可否を総合的に判断する必要がある。

(1) 熱的問題への対策

Weiss等¹⁰⁾は Seebeck 効果を利用して異種金属の圧接界面における平均温度を測定し融点以下であることを報告している。一方円筒状試験片の外周付近のある領域で溶融相を生じて

の変化にあまり関係ないようである。

圧接部の健全性を確認する非破壊試験として、内部欠陥あるいは内面のバリの発生状態を観察することの出来る放射線透過試験、表面での接合状態を調べるための液体浸透探傷試験が有用である。特に放射線透過試験は内部の照射試料が製作時に損傷変形が生じなかったか否かを調べるにも有効である。一方肉眼観察による方法も外側のバリの発生状況から Fig-13 に示すような圧接部の接合状態をある程度判断出来るため重要である。

非破壊試験の結果を Table-5 に示す。

その結果、X線透過試験で欠陥指示の得られた試験片は液体浸透探傷試験でも Photo-7 に示すように圧接面境界に欠陥指示が観察された。

そのうち、試験材 No.3 はアプセット量が 1.7m/m で内圧破壊試験の結果破断面も正常であり破壊圧力 (300kg/cm^2) も高いことから内面に貫通していない不連続の欠陥と推定される。

試験材 No.1, 2 はアプセット量が 13.2m/m であり破断面も正常で引張強さも JIS 規格を十分満足する値を示しているから不連続欠陥と判断される。

一方試験材 No.7 はアプセット量が 6.6m/m と小さい場合でアプセット量の大きい場合と異なり圧接面でハク離した状態で破断している。

このことはアプセット量が不十分なため接合状態が完全でなかったと判断される。

この様に非破壊試験により欠陥指示が得られても漏洩試験に合格して内面への貫通欠陥でないことが確認され、しかもアプセット量が大きい場合には強度的に問題はないものと考えられる。

以上の結果摩擦圧接によりラビットを製作した場合

(1) 圧接条件のアプセット量が 6.6m/m から 14.7m/m の範囲では引張強度及び内圧破壊強度も高く十分に使用に耐え得る。

(2) 品質管理上及び強度の安全率を考慮して最適圧接条件としてのアプセット量は $11 \pm 2\text{m/m}$ である。

(3) 圧接部の健全性の確認方法として放射線透過試験、液体浸透探傷試験及び漏洩試験が有効であることが明らかになった。

5 製作技術の確立

すでに試験結果で述べたように、圧接部の強度及び非破壊試験の適用に問題ないことが確められた。

しかしラビットを製作する上で最も重要な熱的問題及びそれに付随した照射用試料の酸化・変形の問題に関し検討を加え摩擦圧接法による製作の可否を総合的に判断する必要がある。

(1) 熱的問題への対策

Weiss等¹⁰⁾は Seebeck 効果を利用して異種金属の圧接界面における平均温度を測定し融点以下であることを報告している。一方円筒状試験片の外周付近のある領域で溶融相を生じて

いるという蓮井らの実験報告^{10), 11)}もある。

また AISI 410 Steel tube の摩擦圧接における熱的解析を Thomas Rich 等が行なっている。¹²⁾

しかし現在圧接時の圧接面の温度を正確に測定する方法は未だなく圧接面で金属が溶融しているか否か不明である。

ラビットの場合、照射用試料が内部に封じ込められるため照射用試料の近傍の雰囲気温度が重要になる。

そのため Fig-14 に示すように圧接面直下に C.A の熱電対を取り付け圧接時のラビット内雰囲気温度を電磁オシログラフを用いて記録測定した。

その結果、Fig-15 に示すように圧接面直下の雰囲気温度の最高温度は圧接開始約 7 秒後に 390℃ となり 1 分後には約 60℃ に下がった。

溶接時の温度と比較するため、外径及び肉厚が多少異なるがほぼ同形状のラビットを溶接し温度を測定したところ、Fig-15 に示すように溶接面直下での雰囲気温度は溶接開始約 5 分後にアルミニウムの融点の約 90% に相当する 550℃ に達し、2 層盛終了して内部の温度が 40℃ 近くになるのに約 1 時間を要した。

これらのことから圧接施工が短時間で行なわれるためラビット内部の雰囲気温度は高くなり従って照射用試料への熱的影響が少ないことが明らかになった。

(2) He 封入技術の開発

照射時 γ 発熱によりラビット内部の照射用試料が高温になったり酸化されることがある。従来の溶接構造のラビットではそのため内部に He を封入していた。封入は He 封入孔を予め設けておき He 雰囲気チャンバー内で He を充填して He 封入孔にピンを打ち込みそれをチャンバー外に持ち出して大気中で TIG によるスポット溶接を行なう方法である。

それらの問題を一挙に解決するため、摩擦圧接による場合、圧接施工中に He を封入する方法を採用し技術的開発を行なった。

Photo-8 に示す圧接用 He 封入治具を用い、圧接前ラビット内を真空にした後 He 置換を行なって He を流した状態で Photo-9 に示すように圧接施工する方法である。

従来の溶接施工による方法では試料の封じ込みとラビット内部へ He を封入する 2 回の溶接施工が必要であったが上記方法によれば Fig-16 に示すように 1 回の圧接工程で作業が完了し、しかもスポット溶接時に発生する溶接欠陥の発生も防止出来る。さらに圧接直後 He を流しておくことによりラビット全体を早急に冷却出来る長所を有していることも明らかになった。

(3) 圧接によるバリの利用

摩擦圧接の短所の一つにバリの発生があげられており、特に内側に生ずるバリの除去が困難なため摩擦圧接法が採用されないケースもある。

しかしラビットの場合、バリによるスペーサーの押えを考慮した設計にしておき適正なアブセット量を与えれば Fig-17 に示すようにスペーサーの押えとして内側に発生するバリを利用することが出来良好な結果が得られた。

(4) 生産性

従来の溶接施工による製作の場合、過去の製作実績から歩留りは約 6 割であった。

その原因はHe封入孔の溶接欠陥，特にブローホールが発生し不合格となったり，溶け込みが十分でなかったためである。

しかし摩擦圧接法による場合歩留りは90%以上と良好で，さらに適正圧接条件を設定しさえすれば短時間に施工が行なわれるため非常に能率的である。

最後に圧接ラビットの断面写真をPhoto-10に示す。

6 結 論

JMTRでは，RI製造用及び無計測材料試料用の照射容器としてアルミニウム材を多く使用している。

水力ラビット照射試験装置に用いられる照射容器のラビットは従来溶接構造であった。そのため最終溶接工程で溶接欠陥が発生したり，溶接熱により照射用試料の変形など種々の問題があって安全性及び生産性の面から好ましいラビット製作方法ではなかった。

本実験では先にRI製造用容器の製作において成功した冷間圧接の技術を基礎に圧接用He封入治具の開発も含め摩擦圧接法をラビットの製作に適用した。

その結果上記問題を容易に解決し下記の試験結果を得た。

摩擦圧接によりラビットを製作した場合，

- (1) 圧接条件のアプセット量が6.6 mmから147 mmの範囲では引張強度及び内圧破壊強度も高く十分使用に耐え得る。
- (2) 品質管理上及び強度の安全率を考慮して最適圧接条件を求めるとアプセット量は 11 ± 2 mmである。
- (3) 圧接部の健全性の確認方法として放射線透過試験，液体浸透探傷試験及び漏洩試験が有効である。

また溶接構造のラビットに対し

- (1) 圧接による場合ラビット内部の雰囲気温度がはるかに低く照射用試料への熱的影響は殆んどない。
- (2) 圧接用He封入治具の開発により溶接構造のラビットの製作に比較して作業性がよく簡単に製作可能となりかつ溶接欠陥などのないラビットが歩留まり良く生産される。

以上の結果から，摩擦圧接法による製作は通常の溶接法と比較して格段に安全性が高く品質管理上優れたラビットが製作され得ることが判った。

その原因はHe封入孔の溶接欠陥、特にブローホールが発生し不合格となったり、溶け込みが十分でなかったためである。

しかし摩擦圧接法による場合歩留りは90%以上と良好で、さらに適正圧接条件を設定しさえすれば短時間に施工が行なわれるため非常に能率的である。

最後に圧接ラビットの断面写真をPhoto-10に示す。

6 結 論

JMTRでは、RI製造用及び無計測材料試料用の照射容器としてアルミニウム材を多く使用している。

水力ラビット照射試験装置に用いられる照射容器のラビットは従来溶接構造であった。そのため最終溶接工程で溶接欠陥が発生したり、溶接熱により照射用試料の変形など種々の問題があって安全性及び生産性の面から好ましいラビット製作方法ではなかった。

本実験では先にRI製造用容器の製作において成功した冷間圧接の技術を基礎に圧接用He封入治具の開発も含め摩擦圧接法をラビットの製作に適用した。

その結果上記問題を容易に解決し下記の試験結果を得た。

摩擦圧接によりラビットを製作した場合、

- (1) 圧接条件のアプセット量が6.6 mmから14.7 mmの範囲では引張強度及び内圧破壊強度も高く十分使用に耐え得る。
- (2) 品質管理上及び強度の安全率を考慮して最適圧接条件を求めるとアプセット量は 11 ± 2 mmである。
- (3) 圧接部の健全性の確認方法として放射線透過試験、液体浸透探傷試験及び漏洩試験が有効である。

また溶接構造のラビットに対し

- (1) 圧接による場合ラビット内部の雰囲気温度がはるかに低く照射用試料への熱的影響は殆んどない。
- (2) 圧接用He封入治具の開発により溶接構造のラビットの製作に比較して作業性がよく簡単に製作可能となりかつ溶接欠陥などのないラビットが歩留まり良く生産される。

以上の結果から、摩擦圧接法による製作は通常の溶接法と比較して格段に安全性が高く品質管理上優れたラビットが製作され得ることが判った。

7 あ と が き

摩擦圧接法は近年国内外ともに利用が増大し自動車産業は勿論建設機械，機械部品さらにプラスチックに至るまで実用化されている。¹³⁾ 英国では原子炉熱交換器のチューブのプラグイングに利用し，またドイツではジルカロイ-2の摩擦圧接法の検討を行なっているなどの報告も^{14), 15)}されており原子力産業の分野にも大いに利用出来るものと考えらる。

本実験を通じての試験結果は今後のキャプセル製作にも十分応用可能である。

なお本実験の遂行に当り圧接作業の担当をして頂いた清水鉄工所(株)，清水ノズル(株)及び御協力を頂いた日立製作所国分工場原料部山田部長，平田課長並びに工場関係者に感謝するとともに金相試験などに関し御協力を頂いた茨城県工業試験所長はじめ佐久間氏，片岡氏，鴨志田氏に謝意を表します。

また温度測定に当って溶接施工を担当して頂いた東海研究所工作課沢島氏に感謝する次第です。最後に照射用試料等に関し照射依頼者の立場として助言を頂いた東北大学金属材料研究所大洗施設の鳴井技官に謝意を表します。

8 参 考 文 献

- 1) 岡村 ; " 摩擦圧接 [I] - [IV] " 溶接技術 No.6 - No.9 vol 18 (1970)
- 2) F. D. Duffin et al.; "Advances in Welding Processes" third international conference, may 1974, 228-242.
- 3) W. Lucas and E. D. Nicholas "Welding research related to power plants" Proceedings of an international conference on welding research related to power plants, England (1972).
- 4) 藤村, 大岡, ; " 漏れ試験の現状 " 軽金属溶接 No.99 (1971) 123-128
- 5) 溶接便覧 溶接学会編新版 72-74頁
- 6) 大岡, 伊丹, 他 ; JAERI-memo 3451(公開)(1969)
- 7) 大岡, 伊丹 ; " 冷間圧接アルミニウムカプセルの製作及び安全性の検討について " 軽金属溶接 No.116 337 (1972)
- 8) 山林, 他 ; " RI 製造用冷間圧接型試料容器 " 日本原子力学会誌 No.5 vol 16 (1974) 276-281
- 9) 溶接便覧 溶接学会編新版 484頁
- 10) M. Rao and T. H. Hazlett; "A study of the mechanisms involved in friction welding of Aluminum alloys" welding research supplement April, 1970 183-S.
- 11) Hasui, Fukushima and Kinugawa; "Experimental studies in friction welding phenomenon" Transactions of National Research Institute of Metals No.4 vol.10 (1968) pp.207-225.
- 12) Thomas Rich and Richard Roberts; "Thermal Analysis for basic friction welding" Metal construction and British welding journal, March 1971 93-98.
- 13) 溶接技術 " 特集・摩擦圧接の実際 " 1976年5月
- 14) R. Glanville and C. J. Smith; "A friction welder for tube plugging" CEEGB Research December 1975 32-40.
- 15) F. Eichhorn and R. Schaefer; "Investigation of friction-welded joints in Zircaloy 2" Kerntechnik 11 Jahrgang No.11 (1969) 624-640.

Table-1 Characteristics of friction welding

長所

1. 圧接作業時間が短いので生産性が高い，また熱ひずみなどの影響も少ない。
2. 圧接条件を設定すれば，自動運転が出来るため作業員は熟練を要しない。
3. また圧接後の寸法精度が高く品質の均一なものが得られる。
4. 広い範囲の異種材料の圧接が可能である。
5. 同径断面の接合は勿論，板材と丸棒パイプ等の異径断面の接合が出来る。

短所

1. 両素材の組立て相対位置の定められている形状のものは圧接が困難である。
2. 圧接後は圧接部にバリを生ずるため，必要に応じてバリの除去加工を行なわなければならない。
3. 素材にチャックの傷がつき易い。

Table 2 Weldability of materials by friction welding.

	アルミニウム合金	黄銅	青銅	炭化物	コバルト合金	コロンビウム	銅	銅ニッケル	鉛	マグネシウム合金	モリブデン	ニッケル合金	合金	炭素鋼	快削鋼	マレージング鋼	焼結合金	ステンレス鋼	工具鋼	タンタル	チタン合金	タングステン	バルブ鋼	ジルコニウム合金	
アルミニウム合金	○						●						●	●				●							
黄銅		○																							
青銅			○																						
炭化物														○							○				
コバルト合金													○	○											
コロンビウム						○																			
銅	●						○							○											
銅ニッケル								○						○					○						○
鉛									○																
マグネシウム合金										○															
モリブデン											○														
ニッケル合金												○	○	○				○	○						
合金	●											○	○	○	●	○		○	○		●			○	
炭素鋼	●	○	○	○			○	○				○	○	○	●			○	○		○				○
快削鋼													○	○	●										
マレージング鋼												○	○												
焼結合金														○			○								
ステンレス鋼	●							○				○	○	○								●			
工具鋼			○											○							○				
タンタル																					○				
チタン合金														●	●						●				○
タングステン																									○
バルブ鋼														○	○										
ジルコニウム合金								○																	○

○ 圧接後 母材強さを満足するもの (熱処理する場合)

● 圧接後 母材強さが少し足りないもの

岡村：溶接技術(1970.7)ヨリ

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of Aluminum.

品名 A1050BE-F 規格 JIS-H4040 製品番号 11603									引張試験	
化学組成										
成分%	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	引張強サ	伸び
規格	0.05以下	0.25以下	0.40以下	0.05以下	0.05以下	0.05以下	0.03以下	99.50以上	6Kg/mm ² 以上	— %
測定値	0.03	0.09	0.29	TR	0.01	0.02	0.01	99.55	11.0	42.8

Table-4 Welding condition

No	摩擦代規制 セット値(mm)	回転数 (r.p.m)	アブセット量 ^{**} (mm)	備 考
1	6	1800	14.7	引張, 金相, 硬度
2	4	"	11.1	"
3	3	"	11.7	バースト
4	"	"	8.8	引張, 金相, 硬度
5	"	"	8.6	バースト
6	"	"	8.6	予 備
7	"	"	6.6	引張, 金相, 硬度
8	"	"	6.5	バースト
9	"	"	9.4	引張, 金相, 硬度
10	"	"	9.5	バースト (予備)
11	"	"	13.5	バースト
12	"	"	13.2	引張, 金相, 硬度
13	"	"	8.7	バースト
14	4	"	15.3	"
15*	3	"	10.6	予 備
16	"	"	8.5	バースト
17	"	"	10.5	"
18	"	"	10.6	"
19	"	"	9.1	"
20	"	"	9.0	"
21	"	"	8.9	"
22*	"	"	10.5	"
23	"	"	8.7	予 備

* 装置の再調整を実施

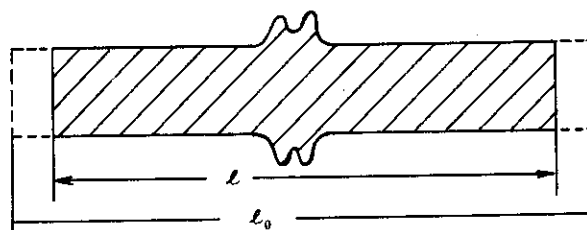
** アブセット量: ($l_0 - l$)

Table 5 Nondestructive examination results.

NO.	試験片	非破壊試験			
		漏洩試験	X線透過試験	衝撃後の漏洩試験	液体浸透探傷試験
1	引張, 金相, 硬度		○		○
2	"		○		○
3	バースト	○	△	○	△
4	引張, 金相, 硬度		○		○
5	バースト	○	○	○	○
7	引張, 金相, 硬度		△		△
8	バースト	○	○	○	○
9	引張, 金相, 硬度		○		○
10	バースト(予備)	○	△	○	△
11	バースト	○	○	○	○
12	引張, 金相, 硬度		○		
13	バースト	○	○	○	○
14	・	○	○	○	○
16	・	○	○	○	○
17	・	○	○	○	○
18	・	○	○	○	○
19	・	○	○	○	○
20	・	○	○	○	○
21	・	○	○	○	○
22	・	○	○	○	○

注1 ○印は試験の結果合格であったもの △印は欠陥指示の得られたもの

注2 漏洩試験はHeによる漏洩量が 1×10^{-8} atm CC/sec 以下のものを合格とした。

注3 衝撃試験は試験片重量687grとし、2mの高さより(コンクリート+鉄板)表面に自由落下させ、Heによる漏洩試験によって良否を判断。

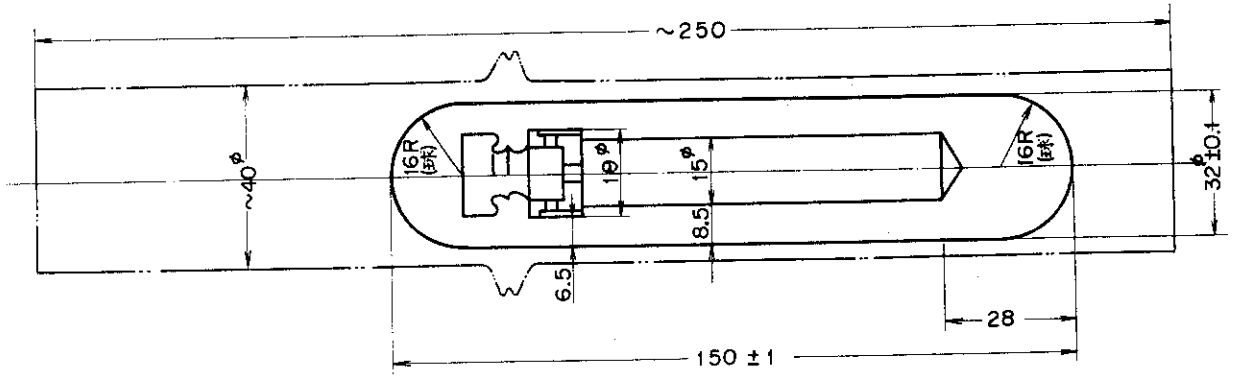


Fig. 1 Schematic drawing of "Rabbit" capsule.

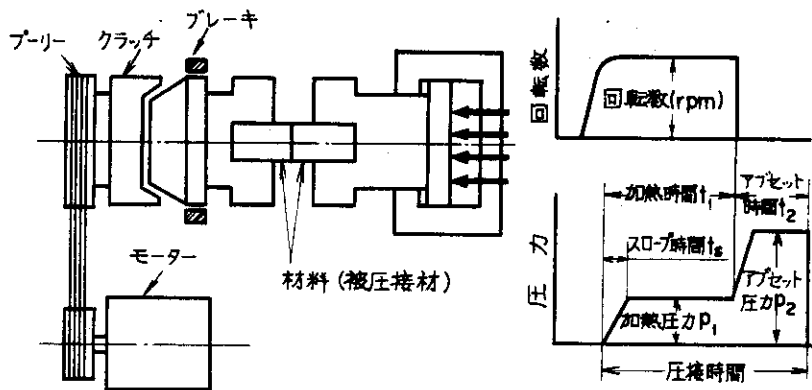


Fig. 2 Conventional type process in friction welding.

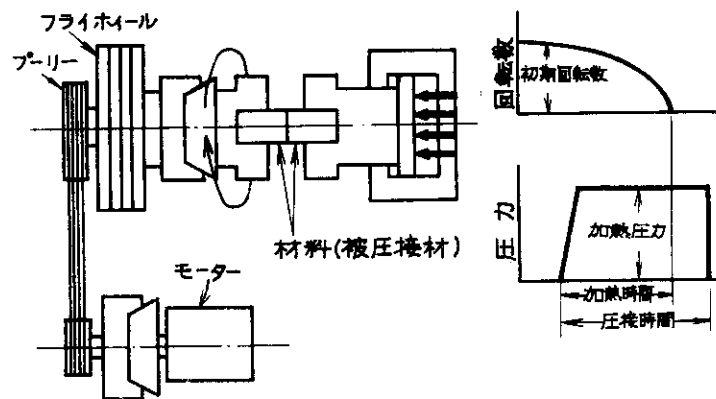


Fig. 3 Fly-wheel type process in friction welding.

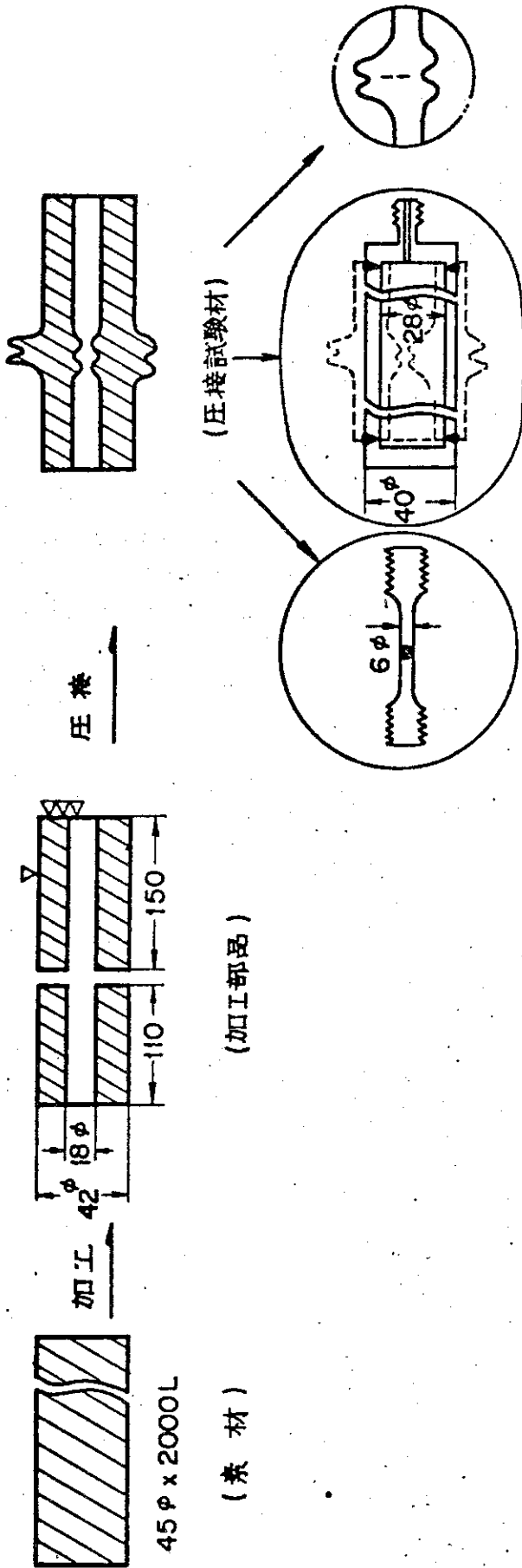


Fig. 4 Production process of test specimen.

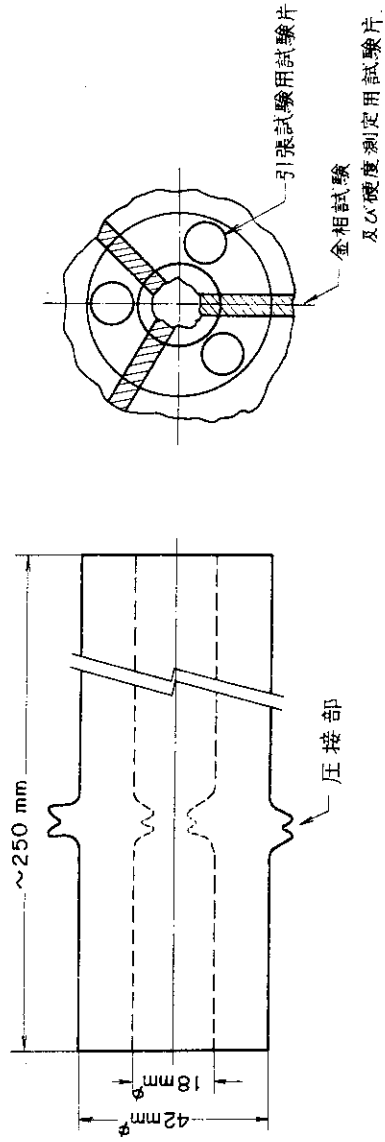


Fig. 5 Sampling position of test specimens.

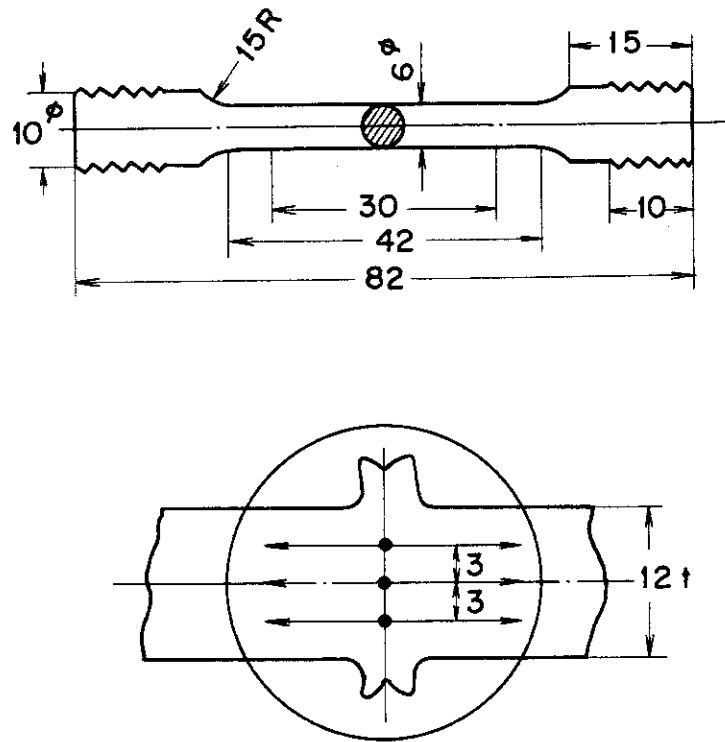
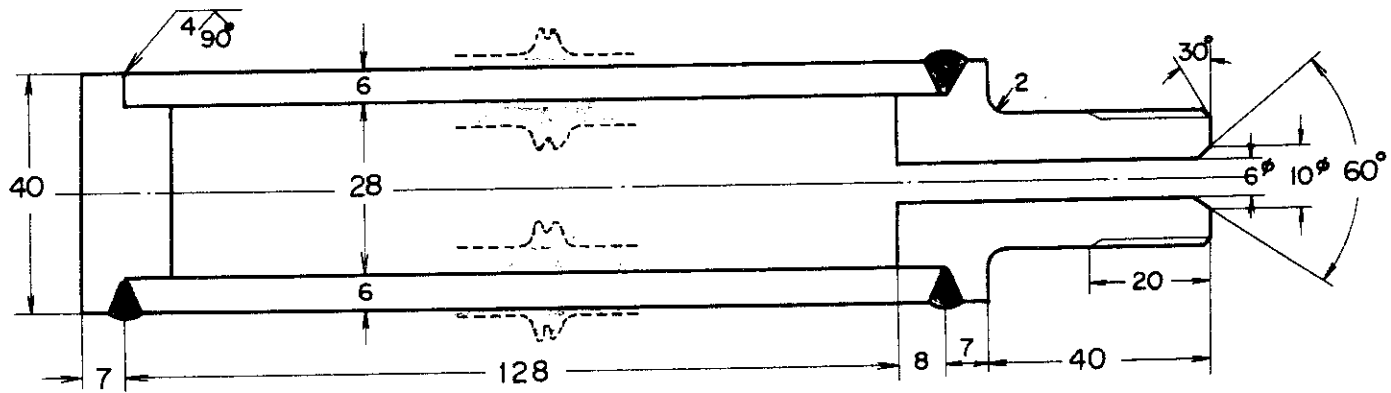


Fig. 6 Test pieces of tensile, metallographic and hardness measurement.



単位： m/m

Fig. 7 Burst test pieces.

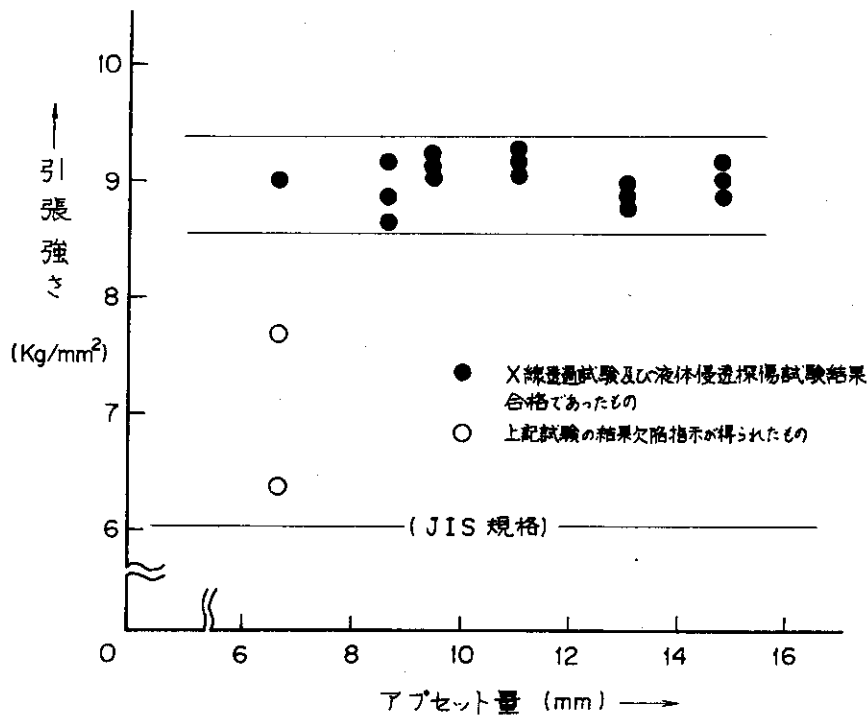


Fig. 8 Tensile strength vs various upset condition.

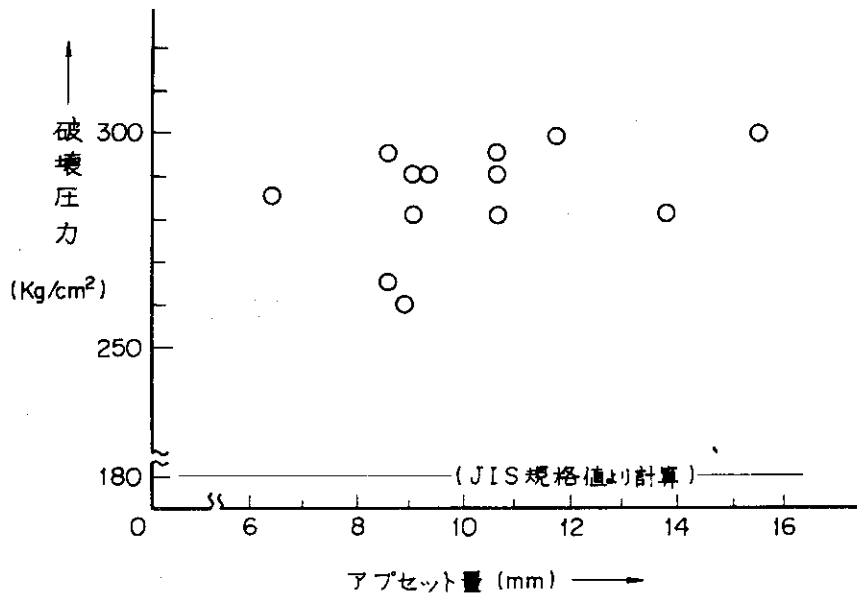


Fig. 11 Burst pressure vs various upset condition.

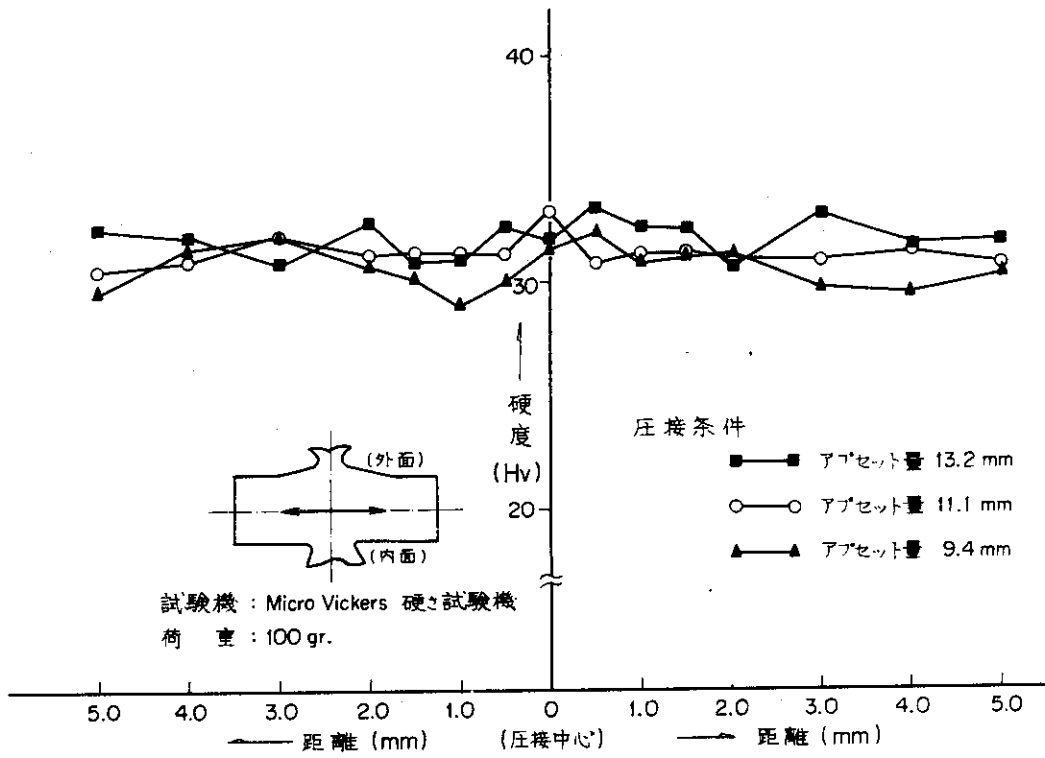


Fig. 9 Microhardness across the interface of Aluminum.

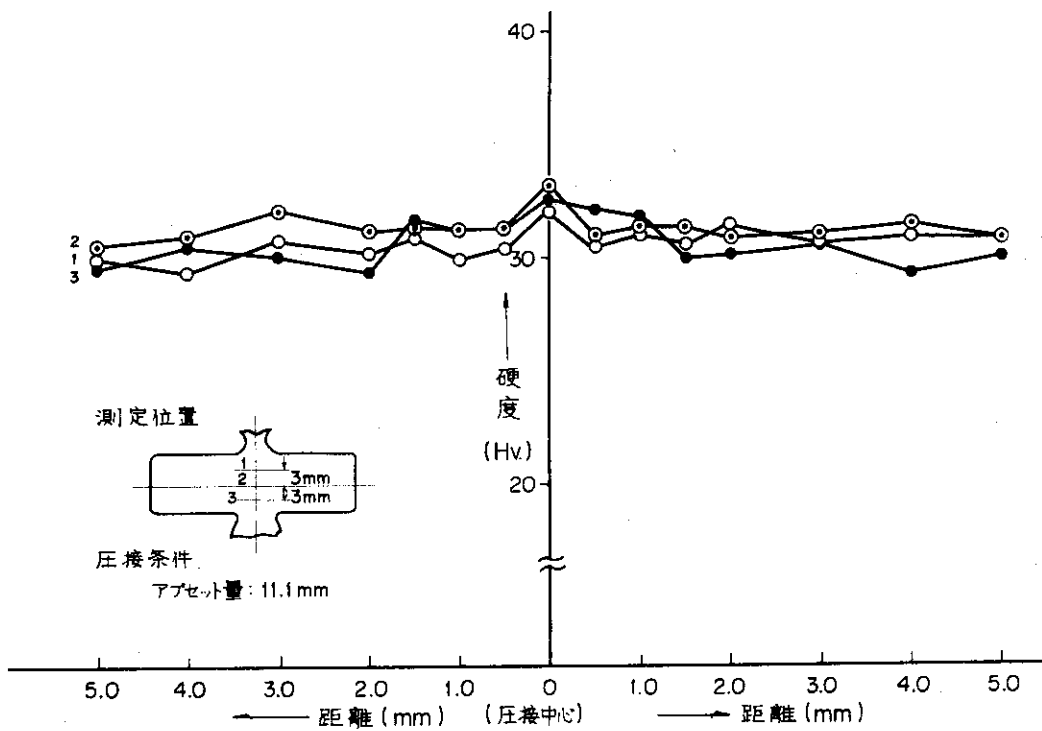


Fig. 10 Microhardness across the interface of Aluminum.

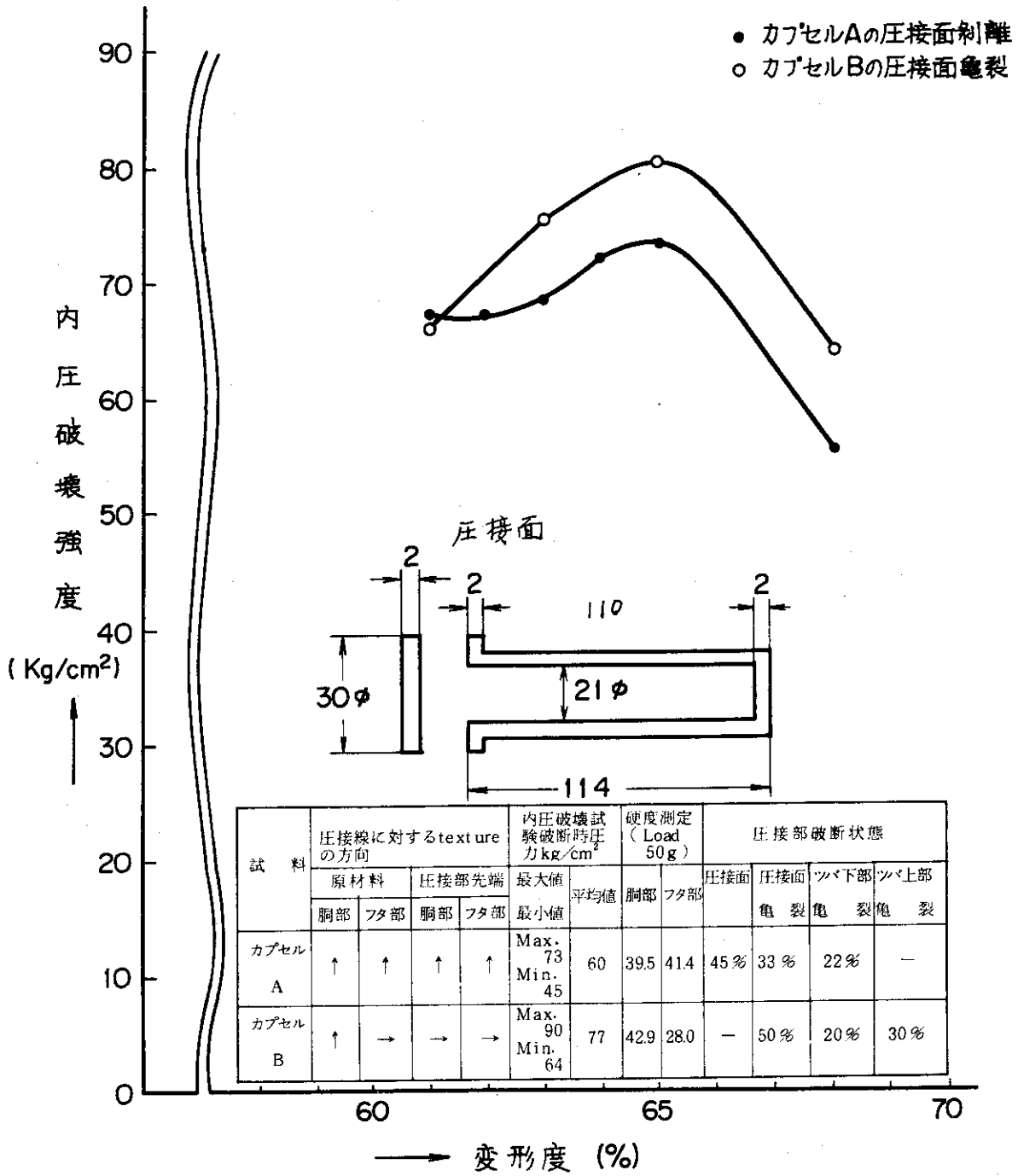


Fig. 12 Burst strength vs deformation in Aluminum cold welding.

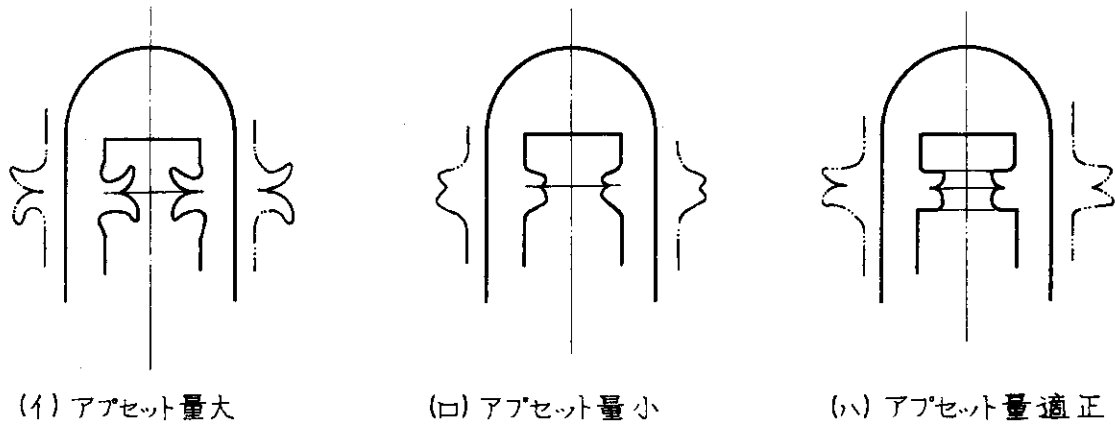


Fig. 13 Schematic illustration of various upset collar.

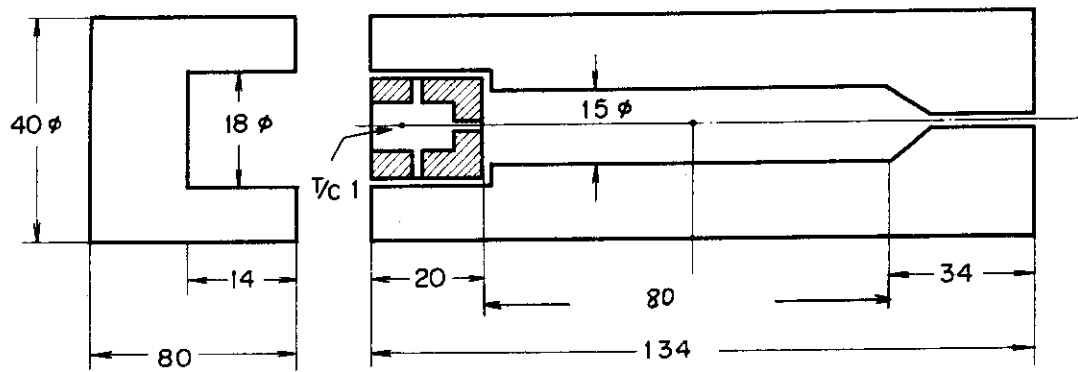


Fig. 14 "Rabbit" capsule for the temperature measurement during friction welding.

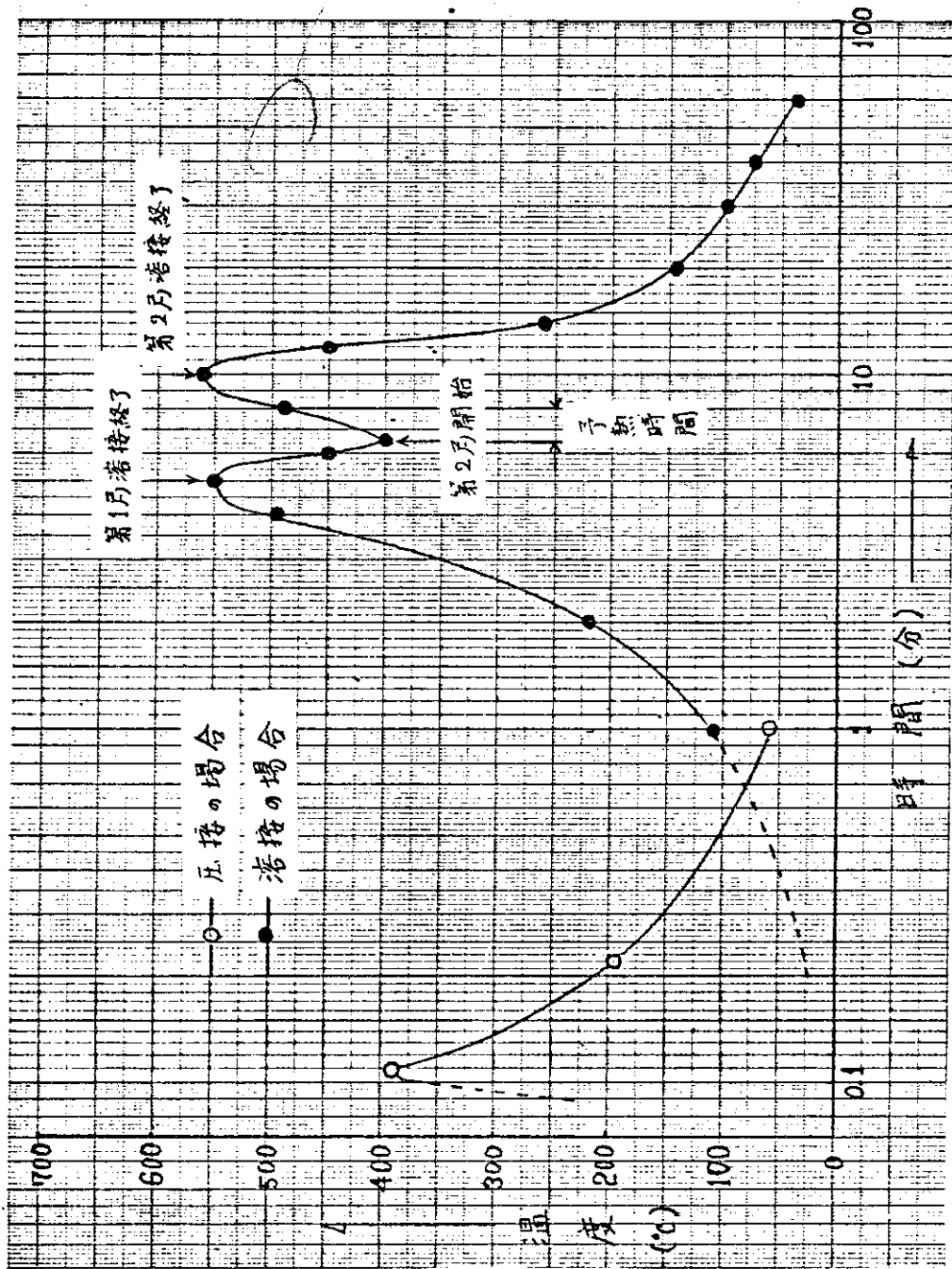


Fig. 15 Temperature history during friction and fusion welding

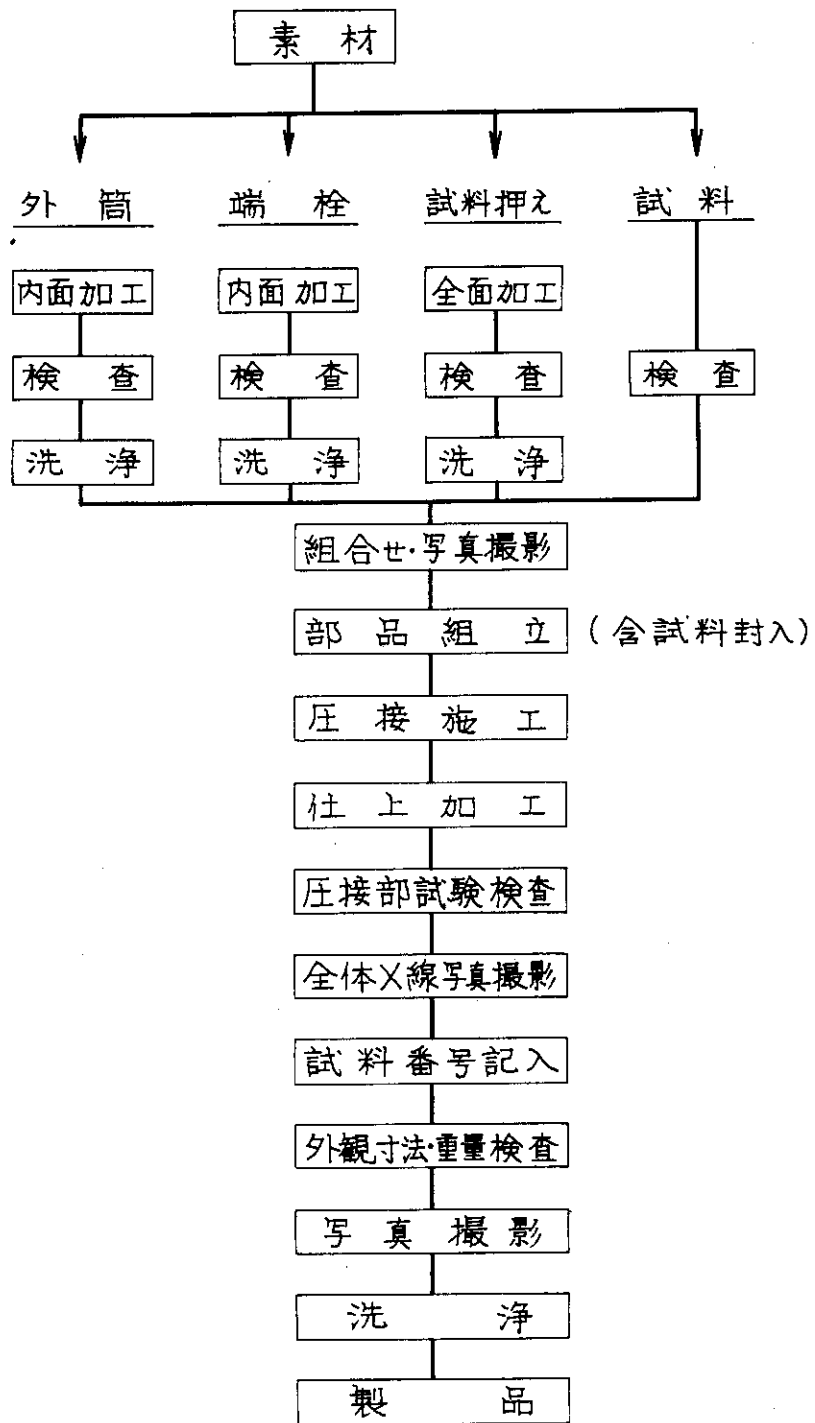


Fig. 16 Flow sheet of "Rabbit" capsule production process.

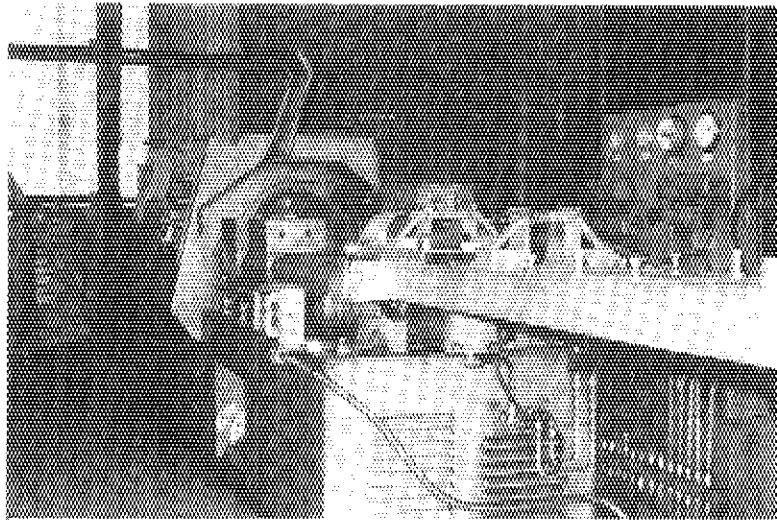


Photo. 1 Friction welding machine.

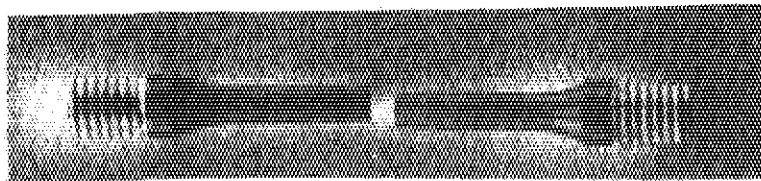
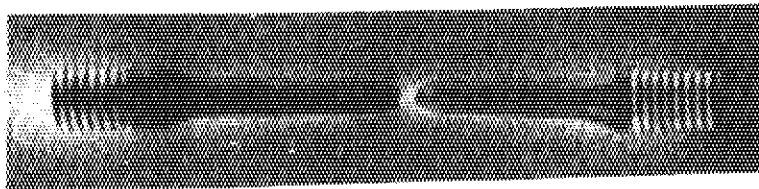
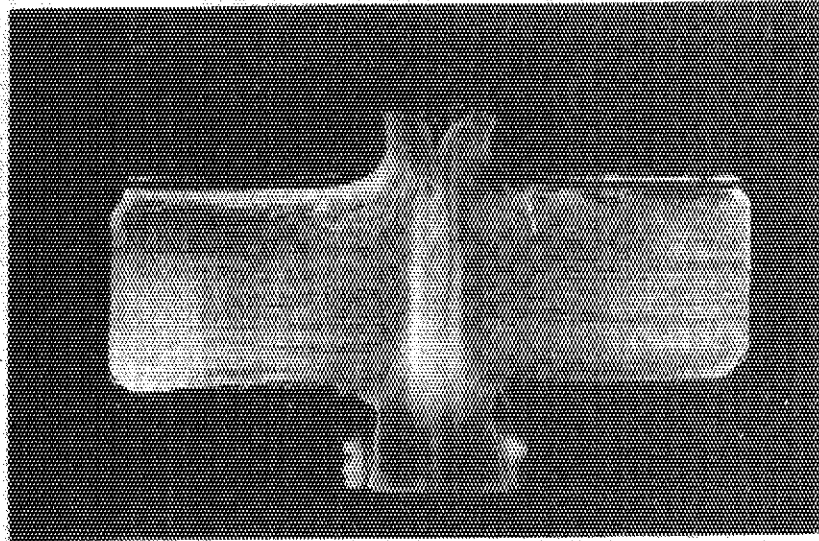
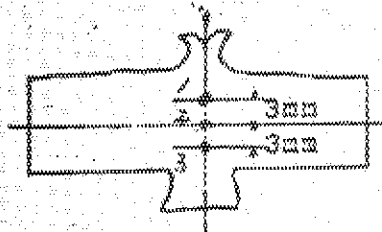


Photo. 2 Tensile test pieces after testing.



NO. 7 - マクロ組織 X 2



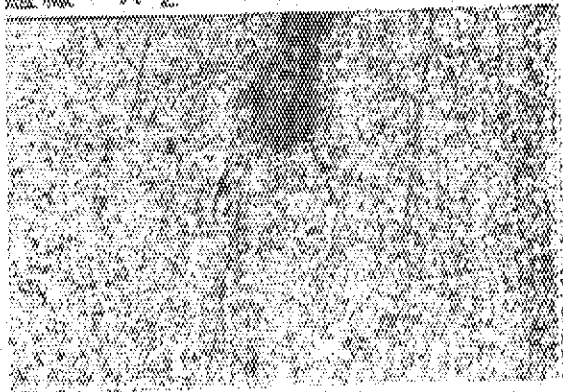
撮影箇所

Material: A1050BE-F (JIS)

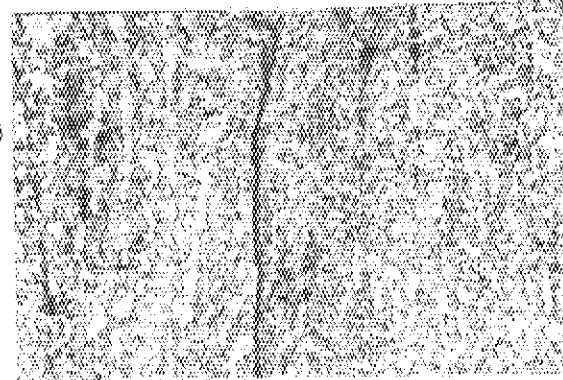
Magnification: X 150

Etching Reagent:

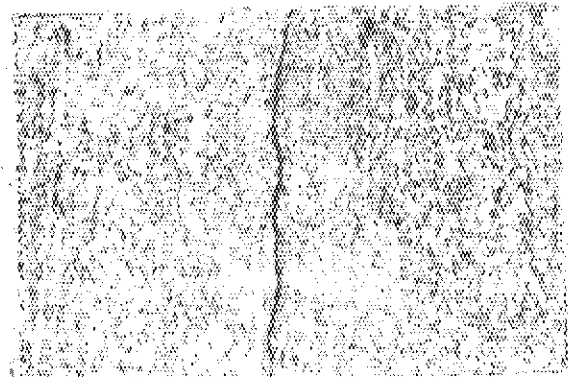
10% NaOH溶液



7-1



7-2

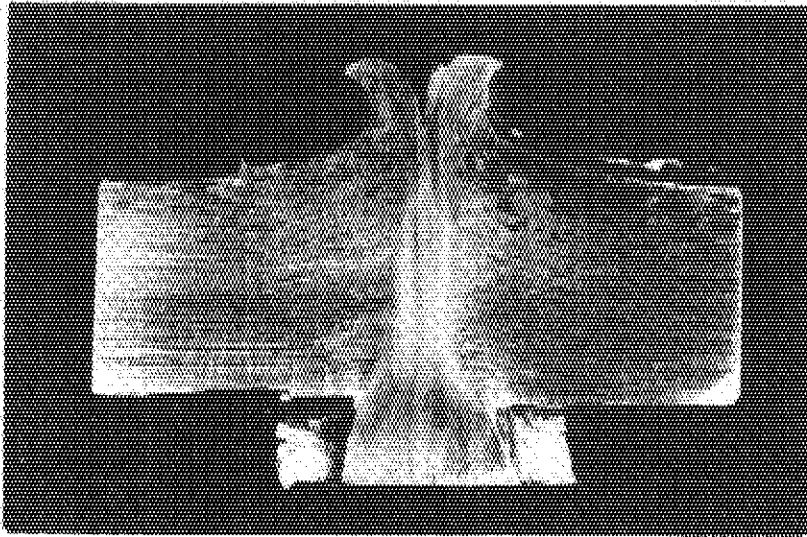


7-3

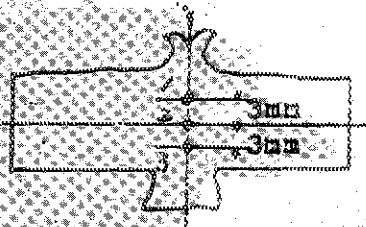
直接測定
3.7mm ± 0.1mm 6.6mm

Photo. 3

Macro and microstructure
at weld interface.

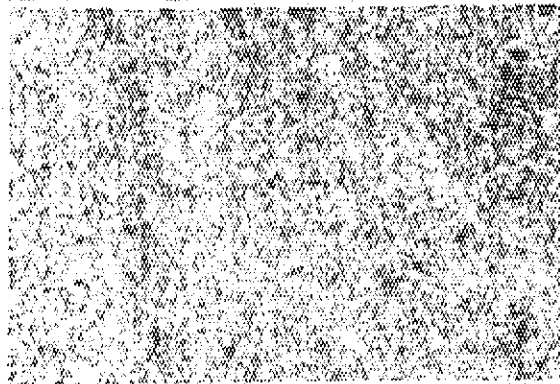


NO. 1 - マクロ組織 X 2

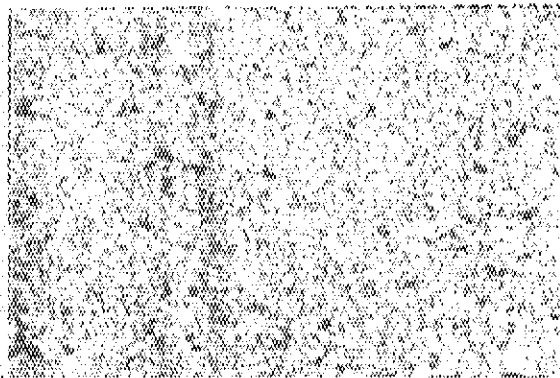


撮影箇所

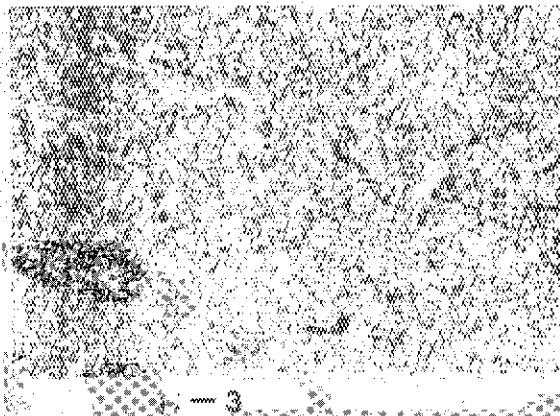
*Material: A1050BE-F (JIS)
Magnification: X 150
Etching Reagent:
10% NaOH溶液



1-1



1-2



1-3

圧接条件:

370°C 14.7mm

Photo. 4

Macro and microstructure
at weld interface.

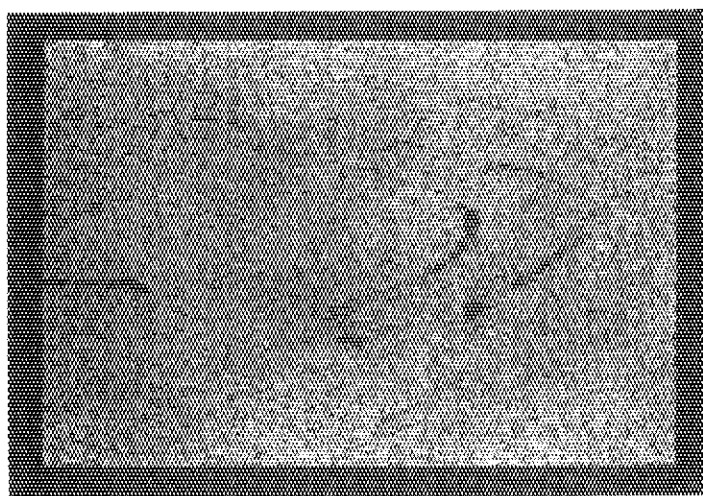


Photo. 5 Microstructure at weld interface.

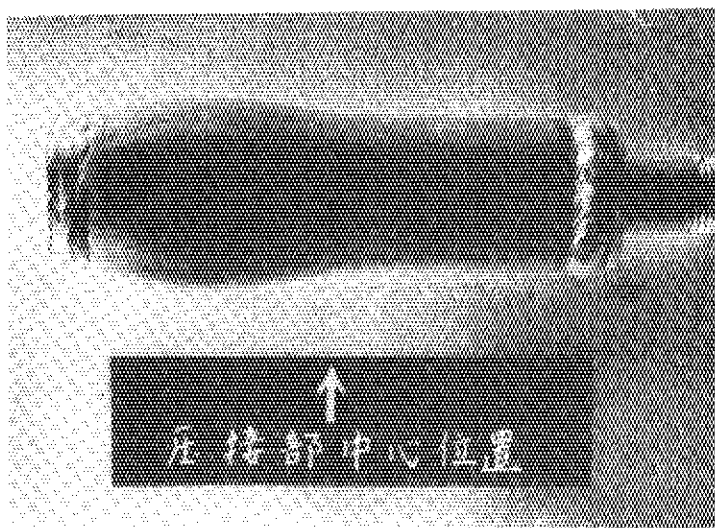


Photo. 6 Burst test specimen showing failure.

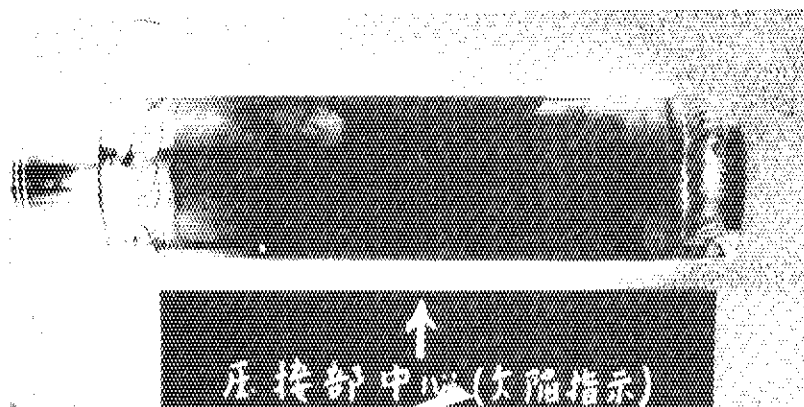


Photo. 7 Liquid penetrant examination showing flaw indication.

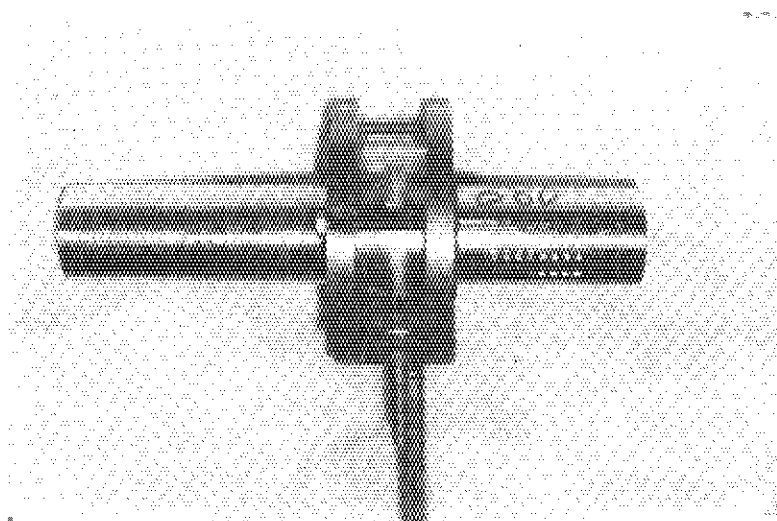


Photo. 8 Helium chamber for friction welding.

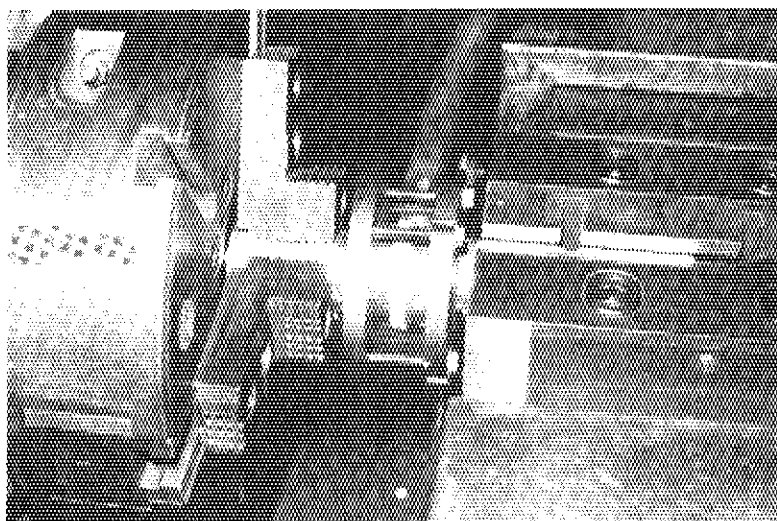


Photo. 9 Photograph of friction welding machine using a helium chamber.

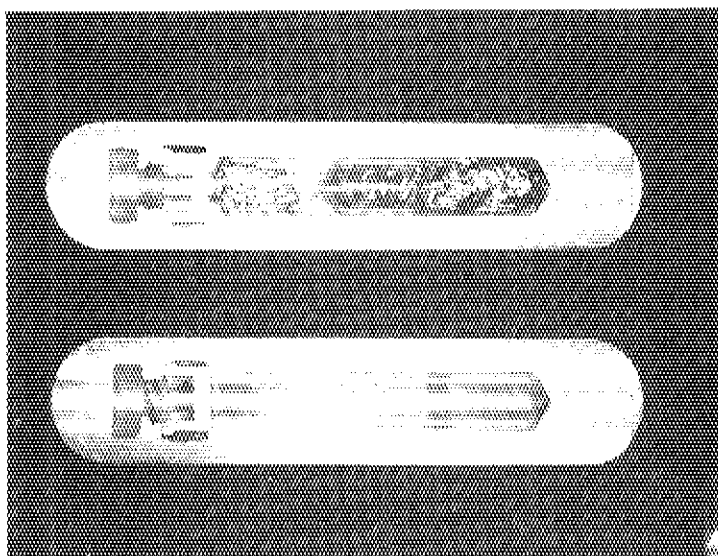


Photo. 10 Cross section of "Rabbit" capsule.