

分置

高速炉燃料被覆管の内圧封入型  
クリープ試験片の検討

1982年2月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 高速炉燃料被覆管の内圧封入型 クリープ試験片の検討

谷 賢\* 蟹川 昌也\* 多田 薫\*  
加藤 隆史\* 一海 俊景\*

### 要 旨

高速炉用燃料被覆管の開発を進める上で、炉内クリープ挙動はスウェリングと並んで最も重要な研究課題となっている。そのため、Phenix炉において炉内クリープ試験(Phenix PNC-P4)、FFTFにおいて炉内クリープ破断試験(FFTF CCR-1)の準備が進められている。また、「常陽」MK-IIでも炉内クリープ試験が計画されている。

本試験は、Phenix PNC-P4の炉内クリープ試験片を製作するにあたって、その製造方法を確立するとともに、「常陽」MK-II照射用の試験片形状を決定することを目的として実施したものである。その結果は下記のとおりである。

- (1) クリープ破断試験の結果、全ての試験片が被覆管部で破損しており、試験片の健全性が確認された。
- (2) 被覆管長さ及び端栓長さを変えても、クリープ変形量及びクリープ破断時間には有意な差は認められず、試験片の全長を34mm程度まで短くすることが可能である。

以上の結果にもとずき、Phenix PNC-P4照射用試験片の製作が可能となった。また、「常陽」MK-II照射用試験片の全長を短くして、貴重な照射スペースを有効利用できるようになった。

Preliminary Study for the Fabrication of In-reactor  
Creep Specimens

S. Tani, M. Kanikawa, K. Tada,  
T. Kato and T. Ikkai

Abstract

In-reactor creep is one of the most important properties of fuel claddings for fast reactors. The objectives of this study are to establish the fabrication technique of in-reactor creep specimen size for the irradiation in JOYO MK-II core. The results obtained are summarized as follows.

- (1) As a result of out-of-reactor creep-rupture tests, all the specimens failed at claddings, which means that in-reactor creep specimens are completely fabricated.
- (2) Both the cladding length and the plug length do not affect the creep and creep-rupture properties. It is possible to reduce the total length of specimen to 34 mm.

As a result of this work, it is possible to fabricate the in-reactor creep specimens for the irradiation in Phenix. It is also possible to shorten the specimen and to use the irradiation space of JOYO MK-II core effectively.

---

\* Material Monitoring Section, Fuel and Material Division,  
O-arai Engineering Center, PNC

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 端栓部のTIG溶接条件の検討 .....	2
2.1 目的 .....	2
2.2 供試材 .....	2
2.3 溶接条件 .....	2
2.4 試験方法 .....	3
2.5 試験結果 .....	3
2.6 まとめ .....	4
3. 内圧封入条件の検討 .....	5
3.1 目的 .....	5
3.2 供試材 .....	5
3.3 試験方法 .....	5
3.4 試験結果 .....	5
3.5 まとめ .....	7
4. 内圧封入型クリープ試験片の評価試験 .....	8
4.1 目的 .....	8
4.2 供試材 .....	8
4.3 溶接条件 .....	8
4.4 試験方法 .....	9
4.5 試験結果 .....	9
4.6 まとめ .....	11
5. あとがき .....	12
6. 参考文献 .....	13

# 1. ま え が き

高速炉用燃料被覆管の開発を進める上で、炉内クリープ挙動はスウェリングと並んで最も重要な研究課題となっている。そのため、動燃事業団でも Phenix 炉において「もんじゅ」用被覆管の炉内クリープ試験(Phenix PNC-P4)<sup>(1)</sup>、FFTF において「もんじゅ」用被覆管の炉内クリープ破断試験(FFTF CCR-1)<sup>(2)</sup>を実施することになっている。また、高速実験炉「常陽」MK-II でも「もんじゅ」用被覆管の炉内クリープ試験<sup>(3)</sup>が計画されている。

照射材料試験室(MMS)では、炉内クリープ試験の予備試験として、既に試験片の製作、試験方法等について検討を行っている。<sup>(4)</sup> 本試験はこれに引き続いて、実際に Phenix PNC-P4 の炉内クリープ試験片を製作するにあたって、その製造方法を確立するとともに、「常陽」MK-II 照射で用いる試験片形状を決定することを目的として実施したものである。炉内クリープ試験では貴重な照射スペースを有効に利用するため、試験片をできるだけ短くすることが望ましい。そのため、両端溶接による被覆管変形拘束効果が無視できる範囲で被覆管を短くし、溶接性を損わぬ範囲で端栓を短くするよう努めた。本報は端栓部の TIG 溶接条件、内圧封入条件及び炉外における評価試験結果をとりまとめたものである。

## 2. 端栓部のTIG溶接条件の検討

### 2.1 目的

内圧封入型炉内クリープ試験片として、従来MMSではFig. 1に示す全長60mmの試験片を用いていた。<sup>(4)</sup>しかし、貴重な炉内の照射スペースを有効に利用するためには、支障のない範囲でできるだけ短い試験片を用いることが望ましい。そのために、まず溶接性を損わない範囲で端栓をどの程度短くすることができるかを明らかにすることを目的として、端栓部のTIG溶接条件の検討を行った。

### 2.2 供試材

#### 2.2.1 素材

被覆管としては、神戸製鋼製の48年度試作もんじゅ被覆管(48MK)を用いた。ミルシートをTable 1に示す。端栓材としては、市販のSUS 316、溶体化処理材を用いた。ミルシートをTable 2に示す。

#### 2.2.2 試験片

端栓部のTIG溶接条件を検討するために用いた試験片の形状及び寸法をFig. 2に示す。また、溶接部の健全性を確認するために行った、バースト試験用の試験片形状及び寸法をFig. 3に示す。端栓部の長さは従来6mmとしていたが、今回は2mm(A type)と4mm(B type)の2通りを選んで、比較検討した。

### 2.3 溶接条件

端栓部の溶接にはTIGパルス制御装置(TIG-PULSE-A, YC-501TP)を備えたナショナル製直流イナートガス溶接機(YC-300TDS)を使用した。溶接は試験片をチャンバ内のチャック部にセットし、チャンバ内を真空引きした後、アルゴン雰囲気にして行った。

TIG溶接部の厚みは被覆管0.45mm、端栓0.55mmであり、被覆管裏面の溶接欠陥を防ぐため、溶込み深さを0.6~0.7mmの範囲にコントロールすることが望ましい。端栓部の長さが6mmの場合の最適溶接条件は前回の予備試験結果<sup>(4)</sup>から得られているので、今回はこれを参考として他の溶接条件は一定とし、溶接電流を26A、28A、30Aの3通りとして、各端栓に対する最適溶接条件を求めた。Table 3、Table 4に溶接条件の概略と詳細をそれぞれ示す。

## 2.4 試験方法

### 2.4.1 溶込み深さの検討

最適溶接条件を選定するため、ビード断面のマクロ観察を行い、溶け込み深さを測定した。

### 2.4.2 金相試験

溶接部の健全性を確認するため、光学顕微鏡による溶接ビード断面の組織観察を行った。エッチングは10%過硫酸アンモニウム溶液電解腐食とし、写真は200倍で撮影した。

### 2.4.3 硬さ試験

金相試験用の試料を用いて、溶接部の断面の硬さ分布を測定した。マイクロビッカース硬さ計を用いて、荷重300gで測定した。

### 2.4.4 パースト試験

溶接部の健全性を確認するため、水圧によるパースト試験を室温で実施した。

## 2.5 試験結果

### 2.5.1 溶込み深さの検討

Fig. 4 に溶接電流と溶込み深さの関係を示す。本溶接に必要な溶込み深さ0.6～0.7mmを得るためには、A type（端栓長さ2mm）では溶接電流26～30A、B type（端栓長さ4mm）では溶接電流30A以上とする必要がある。端栓形状による溶込み深さの差は冷し金の効果の違いによるものである。

Fig. 5 にA type について溶接電流28A、B type について溶接電流30Aで溶接したビード断面のマクロ組織を示す。いずれも十分な溶込み状態にある。

以上の結果から、最適溶接条件として溶接電流をA type では28A、B type では30Aとすることとした。

### 2.5.2 金相試験

Fig. 6, Fig. 7 に最適溶接条件におけるA type, B type の端栓溶接部のミクロ組織をそれぞれ示す。いずれも溶接部には欠陥もなく、健全な溶接が行われているのがわかる。また、溶接熱影響部の巾も小さく、Bond～HAZ 部における組織変化もほとんど認められない。

### 2.5.3 硬さ試験

Fig. 8 に最適溶接条件におけるA type, B type の端栓溶接部の硬さ試験結果を示す。溶接部の硬さは $H_V = 160 \sim 170$ であり、母材の被覆管の硬さは $H_V = 290$ 程度であった。硬さから見た熱影響部の巾は約1.2mmであった。



#### 2.5.4 パースト試験

Fig. 3 に示した試験片を用いて、最適溶接条件における A type, B type の端栓溶接部の強度をパースト試験により確認した。試験片の破断状況を Fig. 9 に示す。全ての試験片が溶接部では破断せず、被覆管側で破断しており、溶接部が十分な強度を有していることがわかった。

#### 2.6 ま と め

端栓をできるだけ短くするため、A type (2mm) と B type (4mm) の 2 種類の端栓について、TIG 溶接条件の検討を行った。その結果をまとめると下記のとおりである。

1. 端栓部の長さを従来の 6mm から 2mm 又は 4mm に変えても、端栓溶接部の健全性には問題がない。
2. 端栓部の TIG 溶接に最適な溶接電流は、A type の場合 28A, B type の場合 30A である。

## 3. 内圧封入条件の検討

### 3.1 目的

試験片に所定の圧力が封入されていることを確認するため、試験片に直接圧力トランスデューサを取り付けて内圧を測定した。また、溶封部の溶け込み深さが試験片の健全性に及ぼす影響について検討した。

### 3.2 供試材

#### 3.2.1 素材

被覆管としては、神戸製鋼製の48年度試作もんじゅ被覆管(48MK)，端栓材としては、市販のSUS 316，溶体化処理材を用いた。これらのミルシートをTable 1, Table 2にそれぞれ示す。

#### 3.2.2 試験片

内圧封入条件を検討するために用いた試験片の形状及び寸法をFig. 10に示す。図中(1)は内圧測定用試験片，(2)は溶け込み深さ測定用試験片，(3)は溶封部健全性確認用のバースト試験片，(4)はクリーブ試験片である。

### 3.3 試験方法

#### 3.3.1 内圧の測定

試験片の一端に小型の圧力トランスデューサ(Standard controls製211-35-120型)を取り付け，他端をレーザービームにより封入した。圧力封入装置から試験片を取り出し，圧力トランスデューサを計測系に接続して圧力を測定した。また，圧力封入前後の試験片の重量を測定することによりガスの重量を求め，これから圧力に換算した値とも比較した。

#### 3.3.2 溶け込み深さの検討

圧力封入装置の一部を改造して，レーザー溶接時の焦点距離を80mmから50mmに変更し，溶け込み深さを測定した。また，溶け込み深さを0.1～0.3mmとした試験片について，バースト試験及びクリーブ破断試験によりレーザー溶接部の健全性を調べた。

### 3.4 試験結果

#### 3.4.1 内圧の測定

圧力封入装置に付属している圧力トランスデューサにより測定したチャンバー内の圧力と試験片に取り付けた圧力トランスデューサにより測定した試験片内の圧力との関係をFig.11

に示す。両者は非常に良く一致しており、〔チャンバ内の圧力〕=〔試験片の内圧〕と考えてよいことがわかる。

圧力トランスデューサにより測定したチャンバ内の圧力と圧力封入前後の重量測定結果から算出した圧力との関係をFig. 12 に示す。両者の間にはきれいな直線関係が成立しているが、重量法による圧力は実際の封入圧力より10%程度低目になっている。この原因としては、試験片内容積の誤差、重量測定の誤差、溶封時における金属の蒸発などが考えられるが明確ではない。しかし、試験片製作時に内圧封入が確実に行われていることの確認及び中間検査時に試験片が破断しているかどうかの確認の手段としては、重量法は有効であると考えられる。

### 3.4.2 溶け込み深さの検討

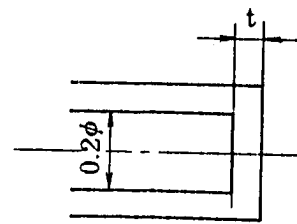
封入圧力が高くなると、レーザ溶接時の溶け込みが少なくなるので、入熱を増やすよう圧力封入装置の一部を改造した。Fig. 13 に改造前後のチャンバ上部の構造を示す。レーザの焦点距離を80mmから50mmに変更するため、チャンバ上部のガラスの板厚を減らしている。

Fig. 14 に改造前後の溶け込み深さを示す。ビームエキスパンダを使用した条件で比較すると、焦点距離を50mmにすることによって溶け込み深さがかなり増加していることがわかる。しかし、封入圧力が100kg/cm<sup>2</sup>以上では0.3~0.4mmしか溶け込んでいない。Fig. 15 に溶封部断面のマクロ組織を示す。

内径0.2mmの穴をふさぐために必要な板厚tを圧力容器構造規格に従って計算する。計算モデルを右図に示す。上記規格第50条によるとtは下式で与えられる。

$$t = d \sqrt{\frac{ZCP}{100\sigma x}} \dots\dots\dots (1)$$

- t : 平板の最小厚さ mm
- P : 最高使用圧力 kg/cm<sup>2</sup>
- d : 内径 mm                      d = 0.2
- σx : 許容引張応力 kg/mm<sup>2</sup>
- Z : 形状によって定まる定数      Z = 1
- C : 取付け方法で定まる定数      C = 0.5



計算モデル

封入時の圧力を  $150 \text{ kg/cm}^2$ 、試験温度を  $650^\circ\text{C}$  とすると、

$$P = 150 \times \frac{650 + 273}{20 + 273} = 473 \text{ kg/cm}^2$$

$650^\circ\text{C}$  における SUS 316 の許容引張応力  $\sigma$  は圧力構造規格によれば  $4.8 \text{ kg/mm}^2$  である。以上の数値を(1)式に入れると、

$$t = 0.2 \sqrt{\frac{1 \times 0.5 \times 473}{100 \times 4.8}} = 0.14 \text{ mm}$$

従って、圧力容器構造規格の考え方に従えば、溶け込み深さは  $0.14 \text{ mm}$  あれば十分と考えられる。

上記の評価には多くの仮定が入っており、これだけでは不十分であるので、実際に溶け込み深さが少ない試験片を製作し、パースト試験及びクリーブ破断試験により溶封部の健全性を確認した。

溶け込み深さを  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$  及び  $0.3 \text{ mm}$  とした試験片各 3 本を室温でパースト試験した結果、全ての試験片が被覆管部から破断した。Fig. 16 にパースト試験後の試験片の外観を示す。また、封入圧力を  $120 \text{ kg/cm}^2$ 、溶け込み深さを  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$  とした試験片 2 本及び  $0.3 \text{ mm}$  とした試験片 3 本について、 $650^\circ\text{C}$  でクリーブ破断試験を行ったところ、全ての試験片が被覆管部から破断した。

以上の結果により、溶け込み深さが  $0.2 \text{ mm}$  以上あれば、溶封部は十分な強度を有することが確認された。

### 3.5 ま と め

試験片に所定の圧力が封入されているかどうかについて、確認を行った。また、溶封部の溶け込み深さが試験片の健全性に及ぼす影響を調べた。その結果をまとめると下記のとおりである。

1. 試験片の内圧は圧力封入装置のチャンバ内の圧力と等しいことが確認された。
2. レーザ溶接時の集点距離を  $50 \text{ mm}$  にすることにより、溶け込み深さがかなり増加した。
3. 溶け込み深さが  $0.2 \text{ mm}$  以上あれば、溶封部は十分な強度を有する。

## 4. 内圧封入型クリープ試験片の評価試験

### 4.1 目的

炉内の貴重な照射スペースをできるだけ有効に利用するためには、試験結果に支障のない範囲で試験片を短くすることが望ましい。2章では端栓部の長さについて検討したが、本章では被覆管の長さがクリープ変形及びクリープ破断時間に及ぼす影響について検討した。なお、本試験は内圧封入型クリープ試験片の健全性確認試験も兼ねて実施した。

### 4.2 供試材

#### 4.2.1 素材

被覆管として神戸製鋼製の48年度試作もんじゅ被覆管(48MK)、端栓材として市販のSUS316溶体化処理材を用いた。これらのミルシートをTable1及びTable2にそれぞれ示す。

#### 4.2.2 試験片

評価試験に用いた試験片の形状及び寸法をFig.17に示す。端栓部の長さとしては2mm(A type)と4mm(B type)の2種類を選んだ。被覆管の長さとしては、32mm、45mm、70mmの3種類を選んだ。45mmはPhenix PNC-P4炉内クリープ試験片に近いもの、32mmはFFTFで用いている炉内クリープ試験片(全長/外径=4.9)に近いもの、70mmは十分長くて端部の効果が無視できるものである。試験片の一端には0.2mmの穴をあけ、レーザービームにより内圧封入できるようになっている。

### 4.3 溶接条件

端栓部の溶接条件は2章で選択された最適溶接条件とした。すなわち、溶接電流をA typeでは28A、B typeでは30Aとした。

試験片内にヘリウムを封入するため、改造前の圧力封入装置<sup>4)</sup>の容器内に試験片をセットし、内圧をかけ、レーザービームにより端栓部を溶封した。溶封には東芝製YAGレーザー加工装置<sup>4)</sup>(LAY-603型)を用いた。レーザー溶接条件は焦点距離：80mm、電圧：800V、パルス巾：9ms、ショット数：5回、フォーカス：±0mmとした。

Table 5 及びTable6にこのようにして製作されたクリープ試験片を示す。Table 5の試験片はクリープ及びクリープ破断試験に用い、Table6の試験片はクリープ破断試験に用いた。

## 4.4 試験方法

### 4.4.1 クリープ試験

Table 5に示した試験片を電気炉に挿入し、650℃でクリープ試験を行った。試験雰囲気は大気である。150hr毎を目安にして試験片を電気炉から取り出し、外径測定後再び電気炉に挿入した。外径測定箇所としては、試験片の端から10mmの範囲内では2mm間隔、中央部では5mm間隔とした。

### 4.4.2 クリープ破断試験

Table 5及びTable 6に示した試験片を電気炉に挿入し、650℃でクリープ破断試験を行った。試験雰囲気は大気である。150hr毎を目安にして試験片を電気炉から取り出し、破断の有無を調べた。

## 4.5 試験結果

### 4.5.1 クリープ試験

#### (1) クリープ曲線

Fig. 18-1～6にクリープ曲線を示す。端栓及び被覆管長さが同一な3本の試験片について、1枚のグラフに結果を整理している。端部の変形拘束効果を除くため、被覆管の端から10mm以上離れた中央部での外径測定値の平均値をFig. 14の縦軸にとった。いずれも類似したクリープ曲線を示しており、端栓及び被覆管長さの影響が少ないことがわかる。この点については、別途さらに検討する。

クリープ試験中の試験片軸方向の外径分布の一例をFig. 19に示す。試験片の局所的な変形はおよそ1000hr経過後より生じており、Fig. 17に示した外径値の急激な立ち上がりに対応している。

#### (2) 被覆管長さの影響

Fig. 20に長さの異なる被覆管を用いた場合の、同一経過時間における外径分布を示す。いずれの被覆管においても、被覆管の端（端栓の端からではない）より約8mmまでは端部の拘束効果が表われているが、その領域は被覆管の長さに依存しないようである。

Fig. 21に被覆管の長さが外径変化に及ぼす影響を示す。この図では、被覆管の長さが等しい6本の試験片の外径変化率の最大値、最小値及び平均値を示している。Fig. 21から被覆管の長さが違っても外径変化率に有意な差が生じないことがわかる。

今回の試験では均一変形部における外径測定箇所は被覆管の長さが32mm, 45mm, 70mmの場合に応じて、それぞれ3, 6, 11ヶ所であり、測定間隔はそれぞれ6, 5, 5mmであった。

以上の結果から、定常クリープ段階において必要な被覆管の長さは、端部の拘束効果と外径測定箇所を考慮して、下記のとおりとなる。

端部の拘束効果を除くために必要な被覆管の長さ	$10\text{ mm} \times 2 = 20\text{ mm}$
外径測定に必要な被覆管の長さ(5 mm間隔で3箇所測定)	10 mm
必要な被覆管の長さ(合計)	30 mm

### (3) 端栓形状の影響

Fig. 22に端栓形状が異なる試験片の外径分布の一例を示す。およそ2%の外径変化が生じている段階でも、A type (2 mm)とB type (4 mm)の端栓を用いた場合で、外径分布に顕著な差は認められない。

## 4.5.2 クリープ破断試験

### (1) 破断状況

Table 7とTable 8にクリープ破断試験結果を示す。Table 7は3.5.1のクリープ試験を継続して破断させた結果であり、Table 8はデータを補うため応力レベルを変えて行った試験結果である。

29本の試験片は全て被覆管部で破断しており、端栓溶接部、レーザ封入部で破断は生じていない。このことから、被覆管長さ、端栓形状が異っていても、今回製作した全ての試験片が健全であることが確認された。

全ての試験片は破損位置が肉眼では観察できないようなピンホール型の破損形態を示していた。

### (2) 被覆管長さの影響

破損位置に関しては、Table 7とTable 8に示したように、被覆管長さが32 mm及び45 mmの試験片の70%以上が端部の拘束効果が表われる位置すなわち被覆管の端から8 mm付近で破損している。一方、被覆管長さが70 mmの試験片では、中央部で破損することが多い。

このように破損位置は被覆管長さによって異なるが、Table 7及びTable 8に示したように破断時間には被覆管長さの違いによる系統的な差は認められない。

### (3) 端栓形状の影響

Table 7及びTable 8に示したように、端栓形状の異なる試験片の破断時間に系統的な差は認められない。

### (4) 破断時間の比較

本試験に用いた被覆管(48MK)と同一の被覆管について、クリープサブグループで実施した通常の試験方法によるクリープ破断試験結果と内圧封入型試験片を用いた本試験結果の比較をFig. 23に示す。Fig. 23から両者の破断時間がかなり一致していることがわ

かる。これから内圧封入技術の信頼性及び内圧封入型試験片を用いたクリープ破断試験の信頼性が確認された。

#### 4.6 ま と め

被覆管の長さがクリープ変形及びクリープ破断時間に及ぼす影響を明らかにするために、炉内クリープ試験片の評価試験を行った。その結果をまとめると下記のとおりである。

1. 全ての試験片が被覆管部で破損し、今回製作した試験片の健全性が確認された。
2. 被覆管長さ(32mm, 45mm, 70mm)及び端栓形状(A type, B type)異っていても、クリープ変形量及びクリープ破断時間には有意な差は認められなかった。被覆管の端から約8mmの範囲では、溶接による被覆管変形拘束効果が見られた。
3. 通常の試験方法によるクリープ破断試験結果と内圧封入型試験片を用いた本試験結果とはかなり一致していた。



## 5. あ と が き

炉内クリープ試験において貴重な照射スペースをできるだけ有効に利用するため、両端溶接による被覆管変形拘束効果が無視できる範囲で被覆管を短くし、溶接性を損わぬ範囲で端栓を短くするよう努めた。その結果をまとめると下記のとおりである。

1. クリープ破断試験の結果、全ての試験片が被覆管部で破損しており、試験片の健全性が確認された。
2. 被覆管長さ(32mm, 45mm, 70mm)及び端栓部長さ(4mm, 2mm)が異っていても、クリープ変形量及びクリープ破断時間には有意な差は認められなかった。被覆管長さを30mm, 端栓部長さを2mmとして、全長34mm程度まで試験片を短くすることが可能である。

以上の結果にもとづき、Phenix PNC-P4照射用試験片を製作するとともに、「常陽」MK-II照射用試験片形状を決定した。Fig.24にこれらの試験片の形状、Table 9, Table10に Phenix P-4のTIG溶接条件及びレーザー溶接条件を示す。

今後は「常陽」MK-II照射用試験片の製作及び炉内クリープ試験片の中間検査、最終検査用試験装置の整備を進めていく予定である。

## 6. 参 考 文 献

- 1) Phenix PNC-P4 material irradiation program specification file, 動燃団報告  
SN241 81-18, 1981
- 2) 高速増殖炉用燃料材料開発のための日米共同研究 — FFTF, EBR-IIでの照射実験計画, 動  
燃団資料, 1981
- 3) 「常陽」MK-IIにおける炉心材料照射試験計画, 動燃団資料, 1981
- 4) 新谷, 蟹川, 和田, 加藤, 鈴木 : インパイルクリープ予備試験(I), 動燃団報告 SN941  
80-117, 1980
- 5) 藤原 : 高速炉燃料被覆管の内圧封入型インパイルクリープ試験片の形状について, 1980
- 6) 吉田他 : 高速炉用燃料被覆管のクリープ試験 — 第5次クリープ試験 — , 動燃団報告  
SN241 77-23, 1977

Table 1 Mill sheet of cladding tube

Heat No. & Mill sheet No.	Lot No. (cladding No.)	Cold Work		Chemical Composition (wt%)										
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
Heat No. LO 308 Mill sheet No.S-74-9	Lot L (3143,3144)	18%	Spec.	0.035 ~0.064	≤0.75	1.50 ~2.00	≤0.03	≤0.02	12.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	≤0.10	≤0.0005	≤0.010
			Ladle	0.043	0.65	1.67	0.010	0.005	13.69	17.50	2.27	0.04	0.0003	0.005
				0.045	0.66	1.67	0.011	0.005	13.81	17.44	2.28	0.04	0.0003	0.006
			Check	0.048	0.67	1.66	0.011	0.005	13.90	17.44	2.30	0.04	0.0003	0.0071
				0.051	0.67	1.65	0.011	0.005	13.87	17.48	2.25	0.04	0.0003	0.0070
			Tensile properties (R.T.)				Burst properties					Grain size	Hardness (Hv)	
$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)	$P_B$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$P_{0.2}$ (kg/cm <sup>2</sup> )										
≥75	≥60	≥10	≥1000	≥900	≥6.0	-								
85.6	76.3	16	1480	1330	9.5	270								
85.7	76.0	19	1460	1320										
85.5	73.3	18	1460	1320										
85.0	72.7	18	1470	1320										

Table 2 Mill sheet of plug

	Chemical composition (wt%)								Tensile properties			Hardness (H <sub>B</sub> )	Heat treatment	Size
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)			
Spec.	≤0.08	≤1.0	≤2.0	≤0.04	≤0.03	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	21≤	53≤	40≤	≤187	-	7D (SUS 316-B)
Check	0.05	0.28	0.78	0.029	0.016	10.08	16.11	2.15	-	60	-	145	S.T	

Table 3 TIG welding conditions for plug (Outline)

Specimen No.	Type of specimen	Welding current	Welding time	Time for one pass
A 1	A type	26 A	30s	25 s
A 2				
A 17		28 A		
A 18				
A 21		30 A		
A 22				
B 9	B type	26 A	30 s	25 s
B 10				
B 19		28 A		
B 20				
B 23		30 A		
B 24				

Table 4 TIG welding conditions for plug (Detail)

Parameter	No.	I	II	III
(1) Pass		1	1	1
(2) Arc length	(mm)	0.4	0.4	0.4
(3) Time for one pass	(s)	25	25	25
(4) Initial current	(A)	20	20	20
(5) Welding current (I)	(A)	26	28	30
(6) Welding time	(s)	30	30	30
(7) Pulse current	(A)	12	12	12
(8) Pulse frequency	(Hz)	3	3	3
(9) Pulse width	(%)	50	50	50

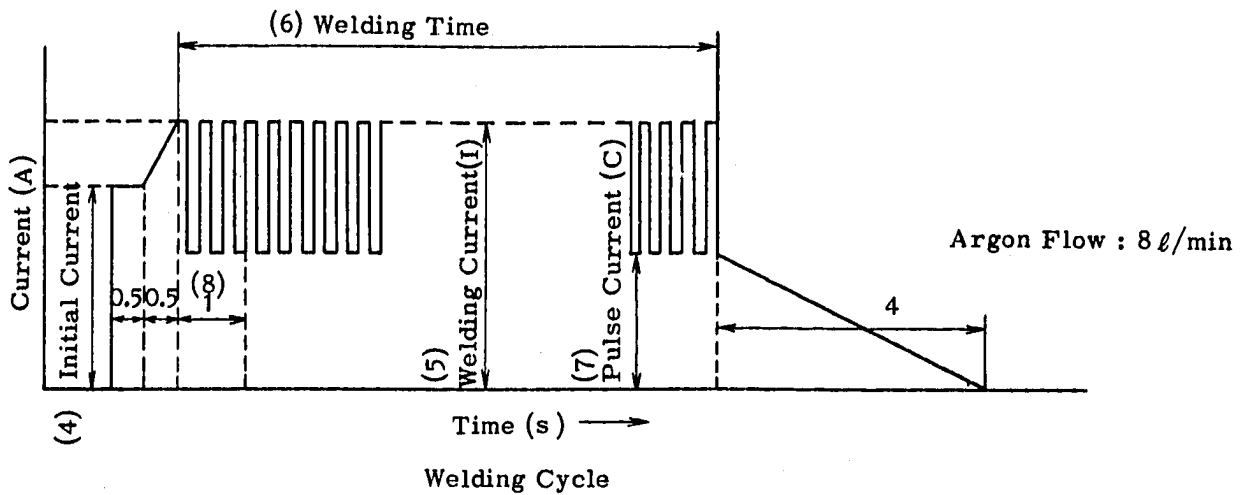


Table 5 Creep and creep-rupture specimens

Specimen No.	Type of specimen	Length of cladding	Welding current	Pressure at 14°C	Pressure at 650°C
1	A type	32 mm	28A	54 kg/cm <sup>2</sup>	174 kg/cm <sup>2</sup>
2					
3					
6		45 mm			
7					
8					
11					
12		70 mm			
13					
16					
17	B type	32 mm	30A	54 kg/cm <sup>2</sup>	174 kg/cm <sup>2</sup>
18					
21		45 mm			
22					
23					
26		70 mm			
27					
28					

Table 6 Creep - rupture specimens

Specimen No.	Type of specimen	Length of cladding ( $\ell$ )	Welding current	Pressure at 15.5°C	Pressure at 650°C
5	A type	32 mm	28A	67.5kg/cm <sup>2</sup>	216 kg/cm <sup>2</sup>
9		45 mm			
10					
14					
15		70 mm			
19	B type	32 mm	30A		
20		45 mm			
24					
25					
29		70 mm			
30					



Table 7 Creep-rupture test results (1)

Specimen No.	Type of specimen	Length of cladding ( $\ell$ )	Test condition	Time to rupture	Ruptured elongation	Failure location*	
1	A type	32 mm	650°C 174kg/cm <sup>2</sup>	1336~1450 hr	6.7 %	8 mm	
2				1336~1450 hr	5.3 %	6~8 mm	
3				1169~1336 hr	6.2 %	8 mm	
6		45 mm		1336~1450 hr	7.1 %	20 mm	
7				1336~1450 hr	6.7 %	8 mm	
8				1336~1450 hr	8.3 %	8 mm	
11				1169~1336 hr	7.2 %	8 mm	
12		70 mm		1169~1336 hr	6.3 %	15 mm	
13				1450~1635 hr	5.3 %	6~8 mm	
16		B type		32 mm	1336~1450 hr	7.4 %	10 mm
17					1336~1450 hr	5.7 %	8 mm
18	1336~1450 hr		6.7 %		6~8 mm		
21	45 mm		1336~1450 hr	6.5 %	6~8 mm		
22			1336~1450 hr	6.4 %	8 mm		
23			1450~1635 hr	6.5 %	6 mm		
26			1169~1336 hr	7.3 %	20 mm		
27	70 mm		1169~1336 hr	6.4 %	15 mm		
28			1169~1336 hr	3.8 %	30 mm		

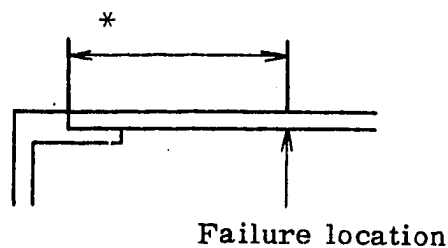


Table 8 Creep-rupture test results (2)

Specimen No.	Type of specimen	Length of cladding ( $\ell$ )	Test condition	Time to rupture	Failure location*
5	A type	32 mm	650°C 216kg/cm <sup>2</sup>	900~990 hr	8 mm
9		45 mm		735~900 hr	16 mm
10				900~990 hr	15 mm
14		70 mm		900~990 hr	20 mm
15				1082~1247 hr	30 mm
19	B type	32 mm		1015~1057 hr	9 mm
20				735~900 hr	-
24		45 mm		900~990 hr	18 mm
25				735~900 hr	-
29		70 mm		900~990 hr	32 mm
30			1015~1057 hr	9 mm	

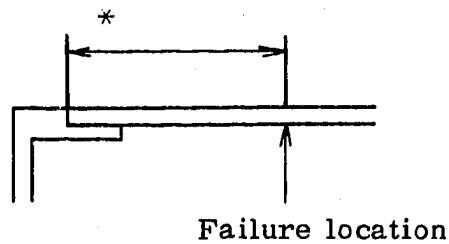


Table 9 TIG welding conditions for Phenix P-4 specimens

Parameter	No.	III
(1) Pass		1
(2) Arc length	(mm)	0.4
(3) Time for one pass	(s)	25
(4) Initial current	(A)	20
(5) Welding current (I)	(A)	30
(6) Welding time	(s)	30
(7) Pulse current	(A)	12
(8) Pulse frequency	(Hz)	3
(9) Pulse width	(%)	50

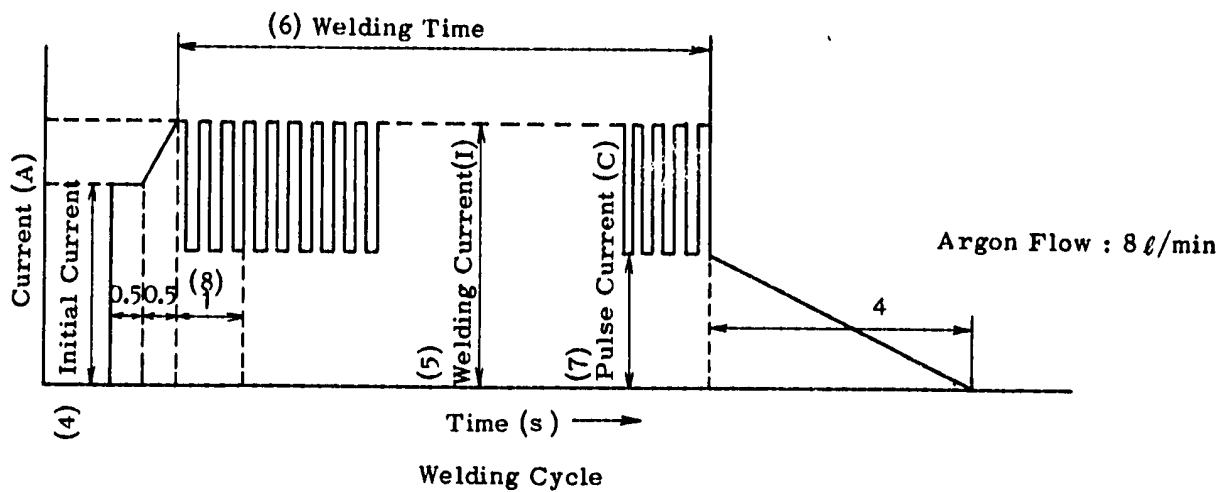
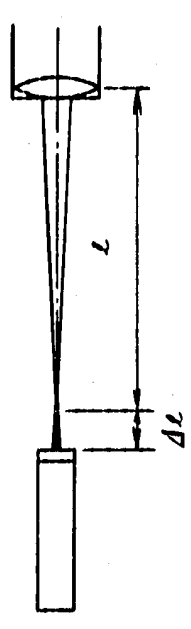


Table 10 Laser welding conditions for Phenix P-4 specimens

Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Voltage (V)	Pulse Width (ms)	Shot	Focus (mm)		
				<i>l</i>	<i>Δl</i>	
100	800	30	3	50	0	
90	"	"	"			
80	"	"	"			
70	"	"	"			
60	"	"	"			
50	"	"	"			
40	600	"	"	+3		
30	"	"	"			
20	"	"	"			
10	"	"	"			

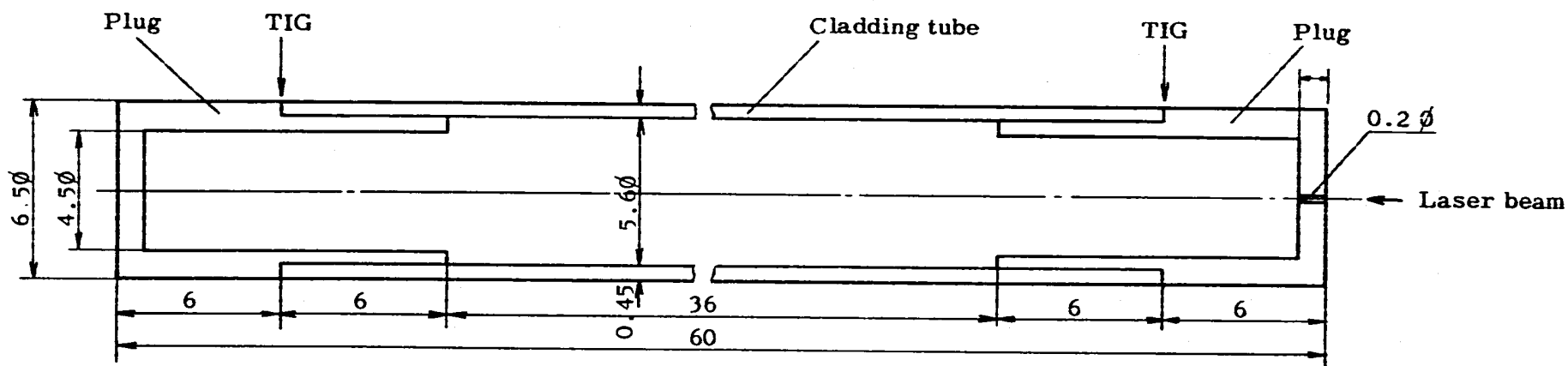


Fig.1 Profile of a specimen used for the preliminary study (I)

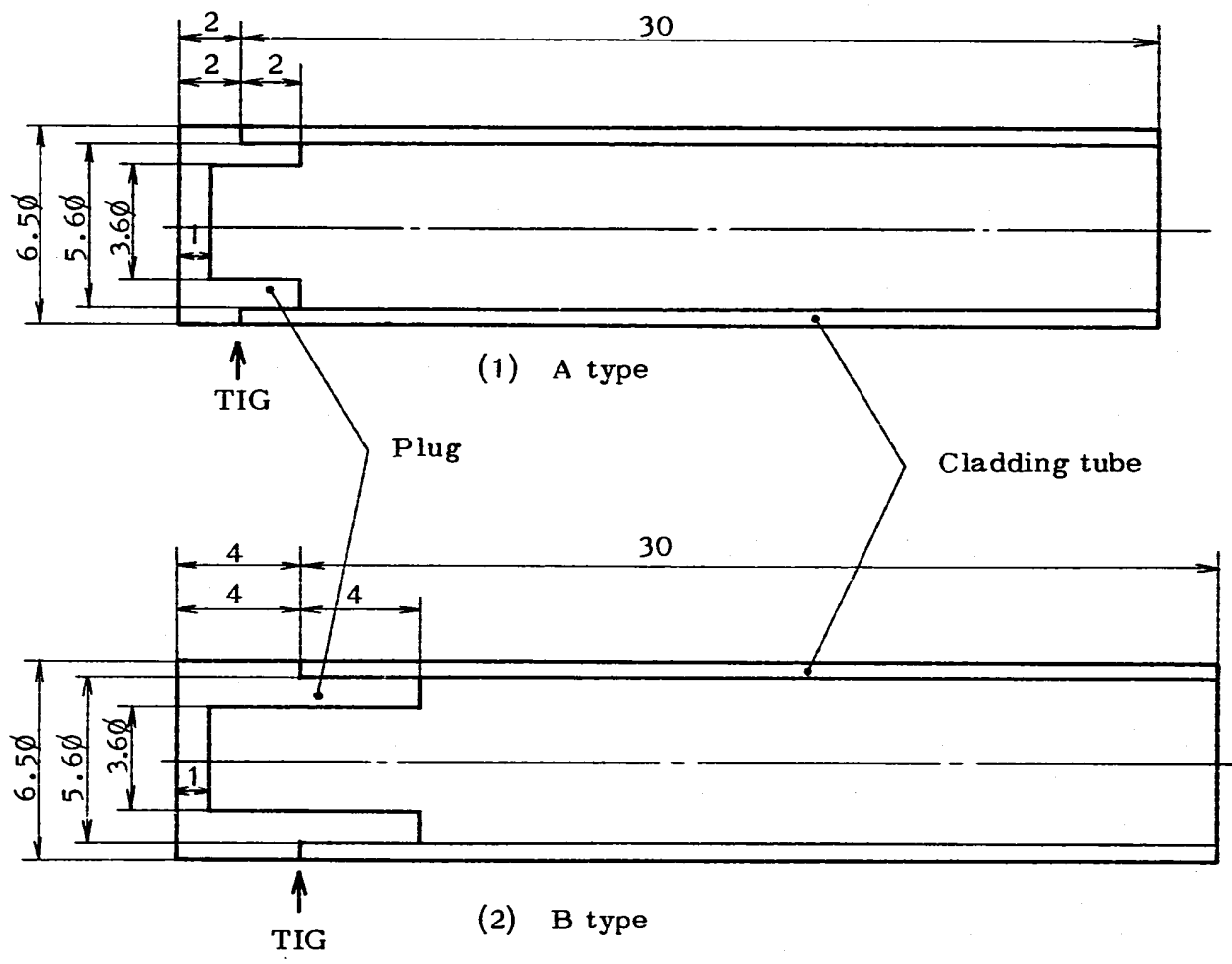


Fig. 2 Profile of specimens used for TIG welding

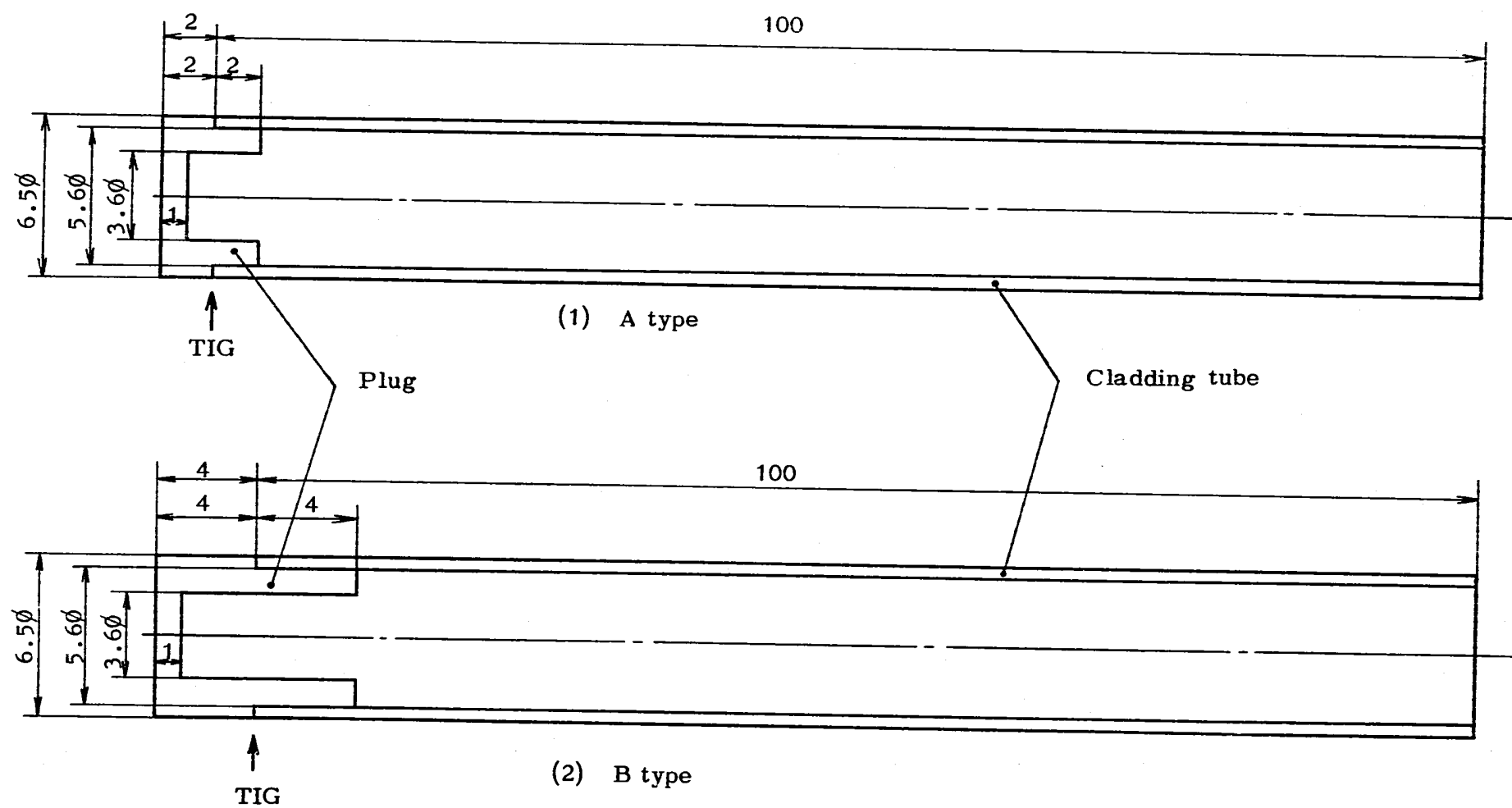


Fig. 3 Profile of specimens used for burst test.

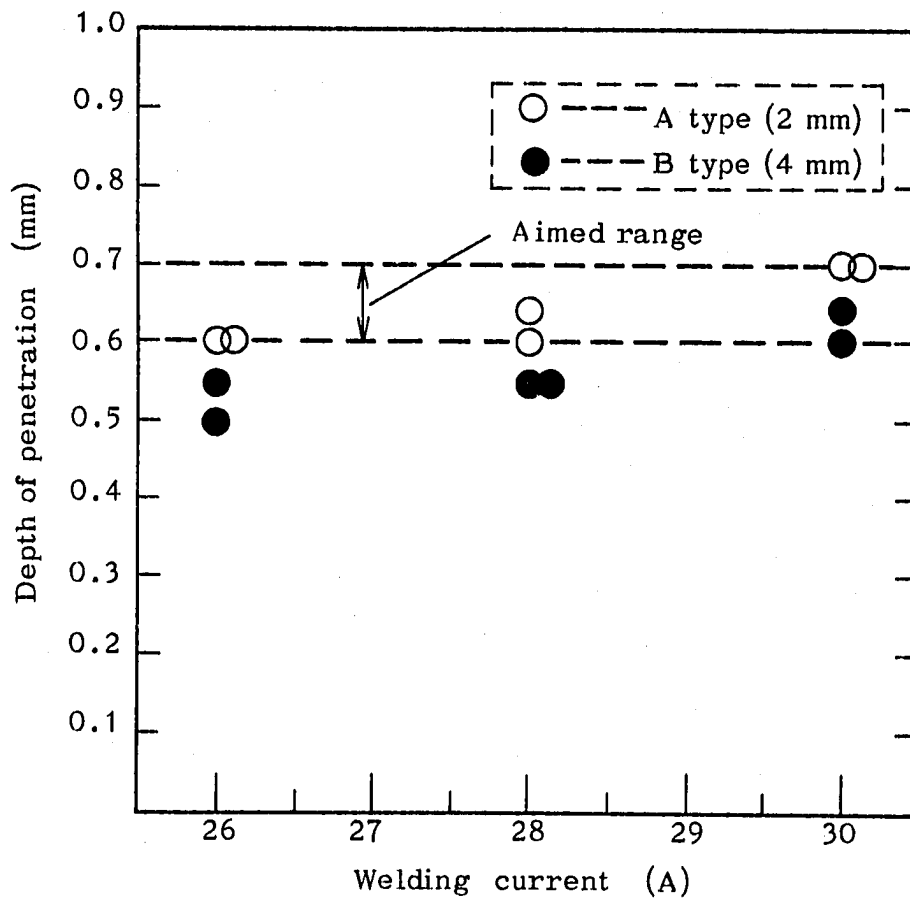
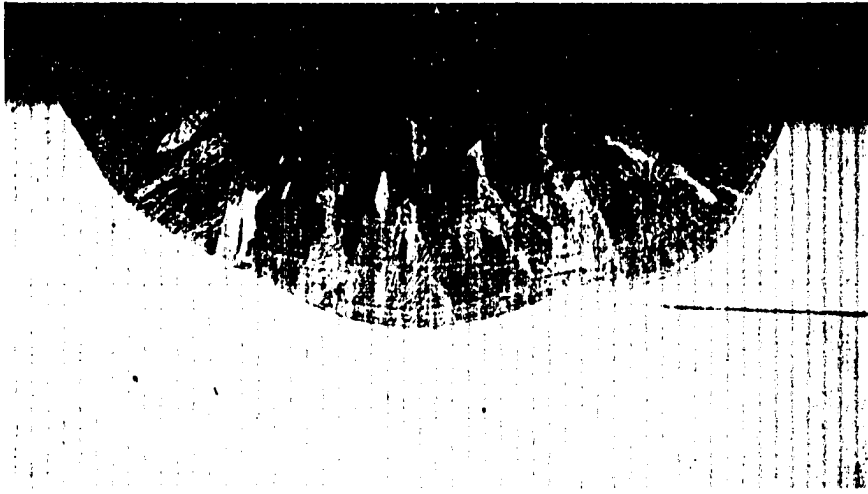


Fig. 4 Relation between welding current and depth of penetration





A 18

A type (2 mm)

Welding current : 28A



B 24

B type (4 mm)

Welding current : 30A

Fig. 5 Macrostructure of the cross section of specimens welded by TIG ( x 50 )

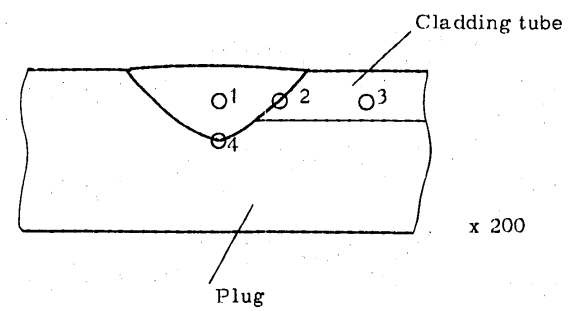
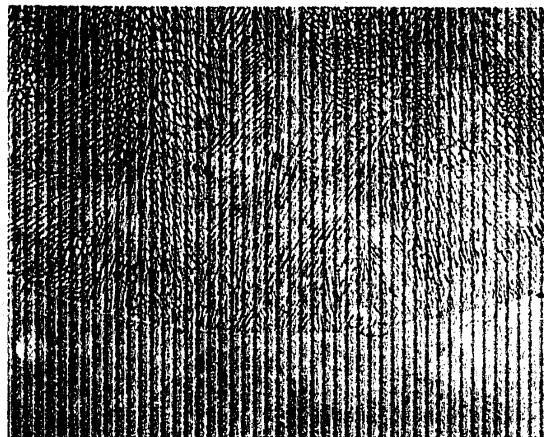
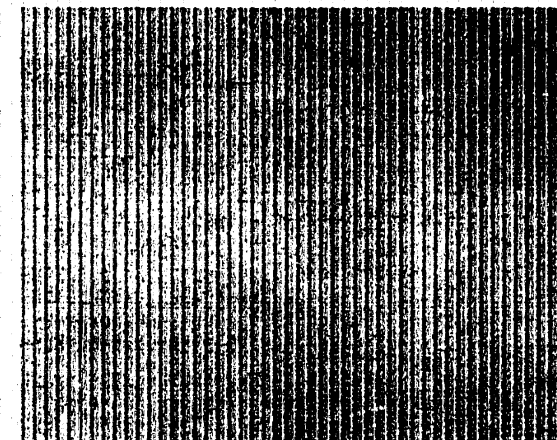
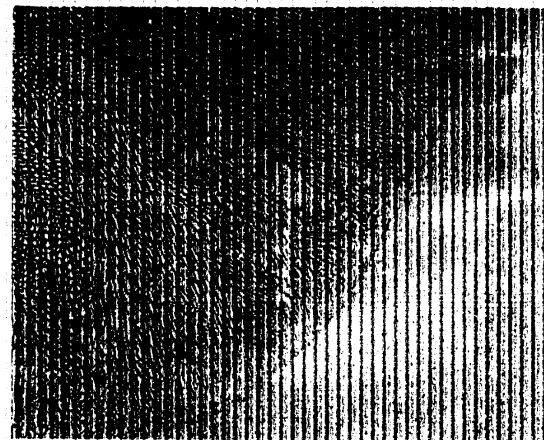
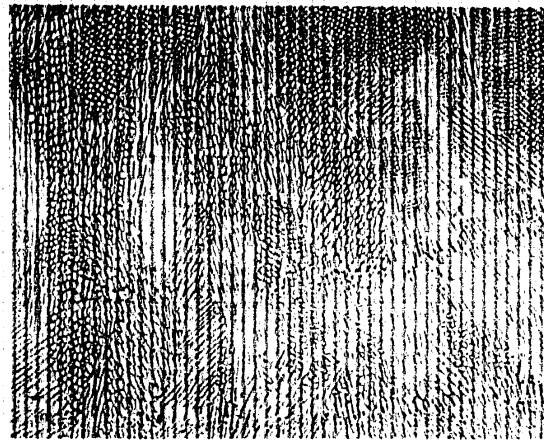


Fig. 6 Micrographs of the cross section of specimen welded by TIG (No. 18)  
A type (2 mm), Welding current : 28A

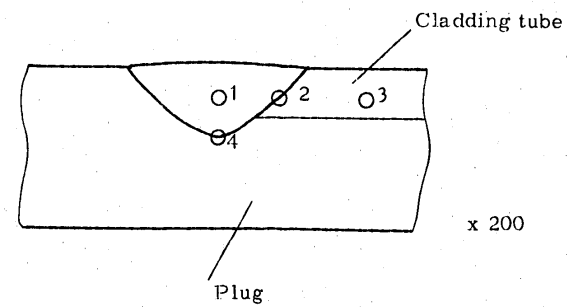
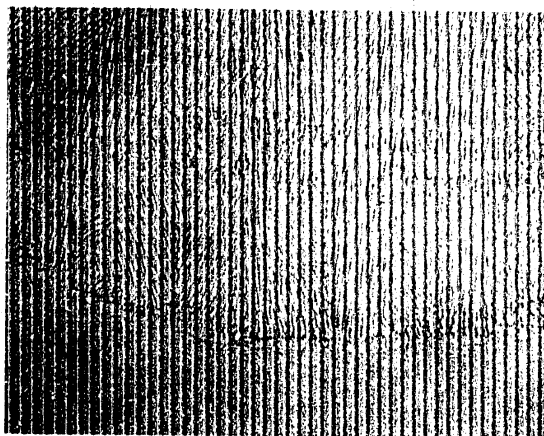
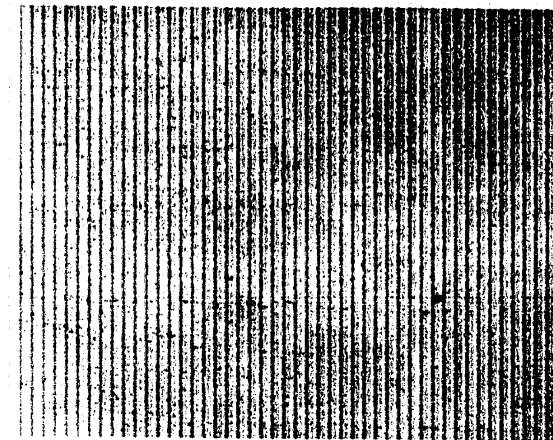
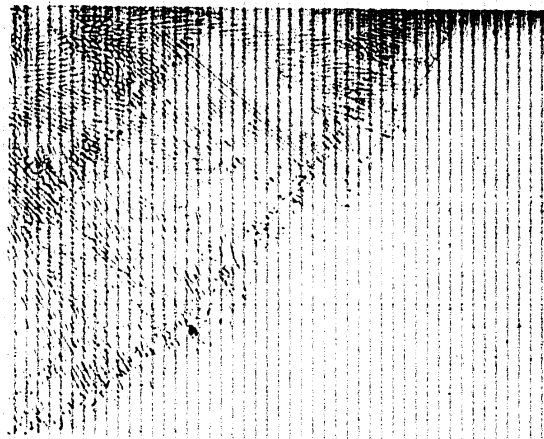
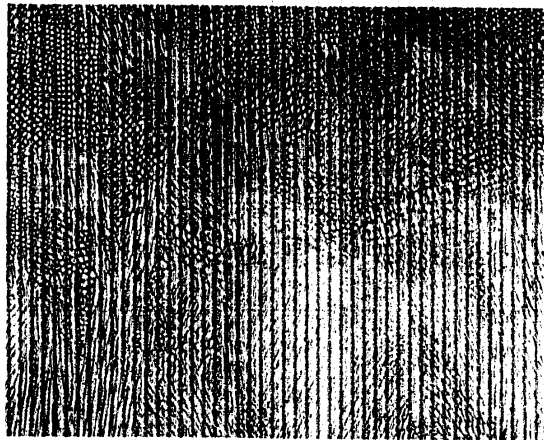


Fig. 7 Macrographs of the cross section of specimens welded by TIG (No. 24)  
B type (4 mm), Welding current : 30A

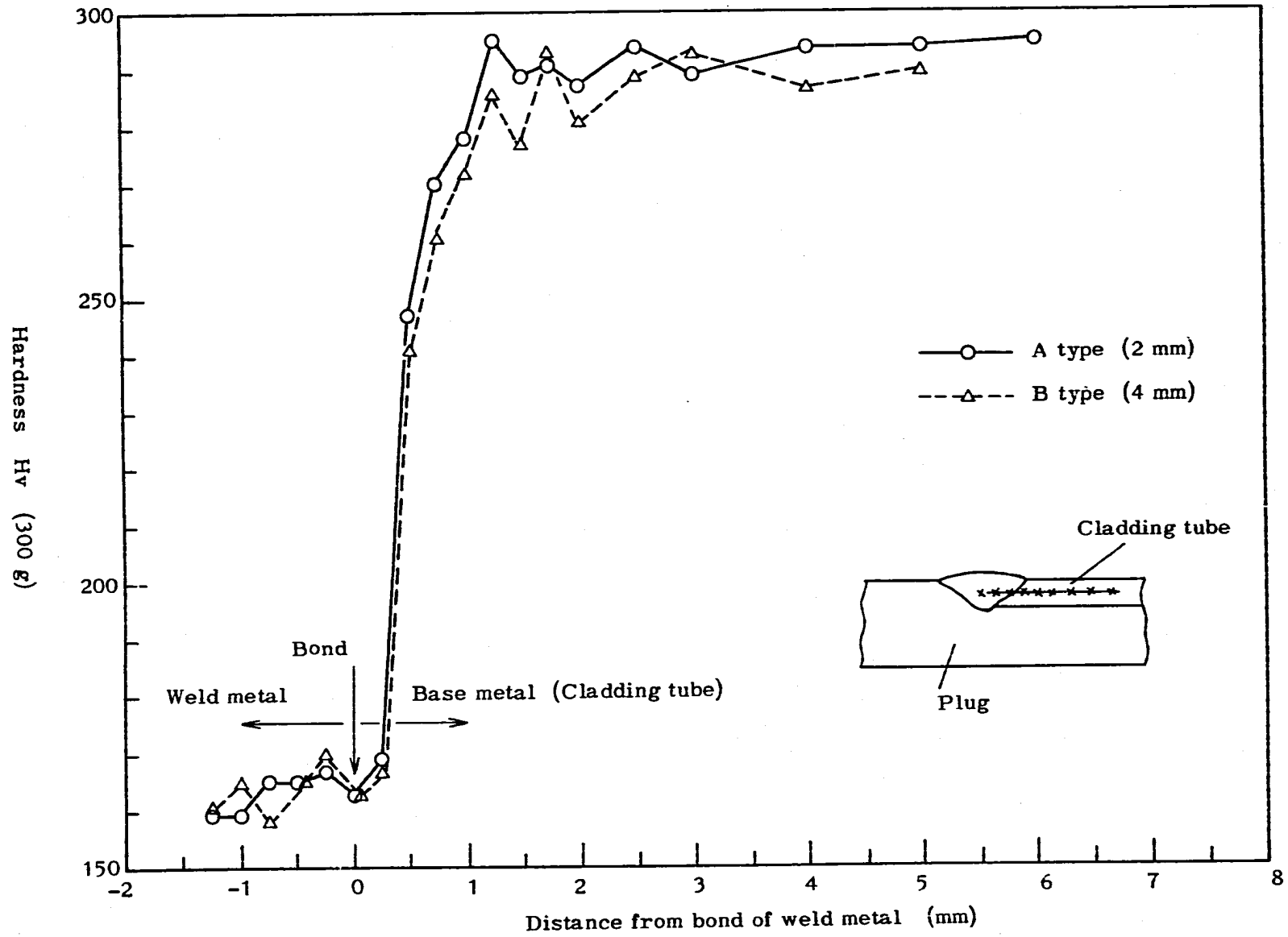
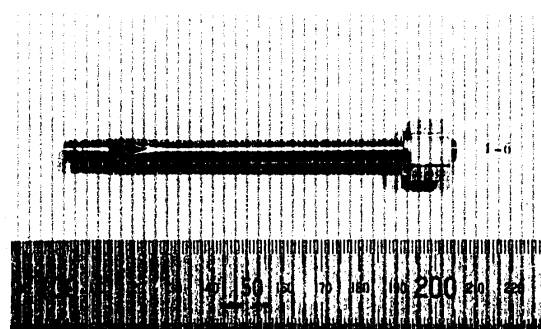
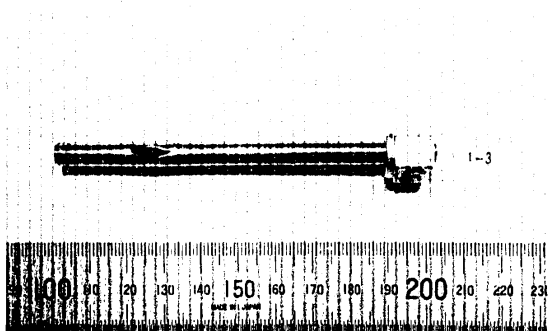
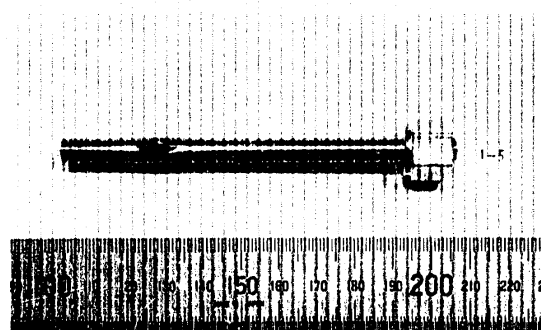
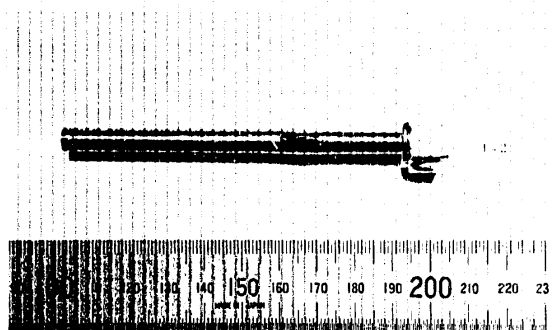
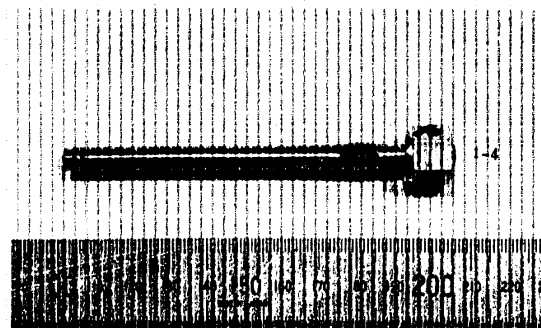
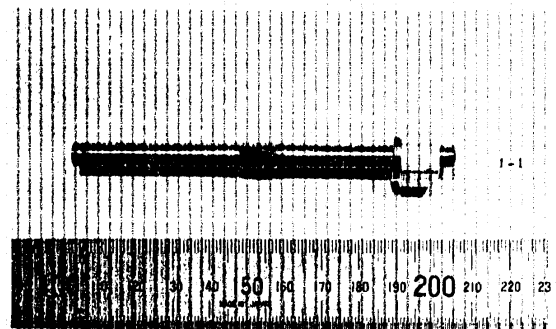


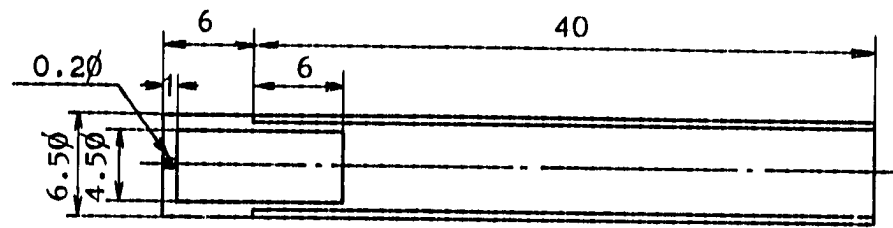
Fig. 8 Hardness distribution in TIG weldment



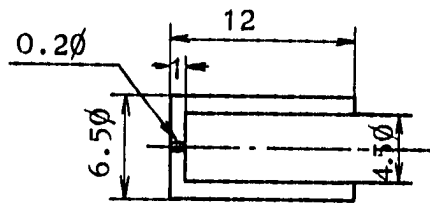
Type A (2 mm)

Type B (4 mm)

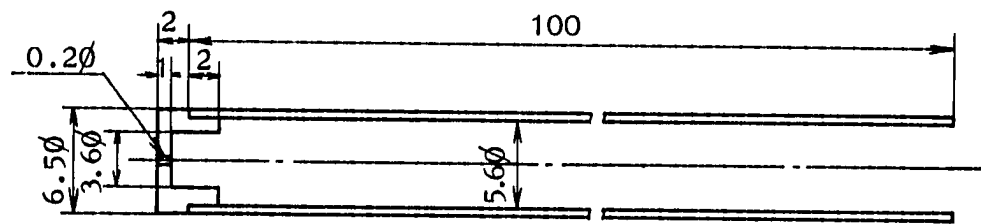
Fig. 9 Specimens after burst test



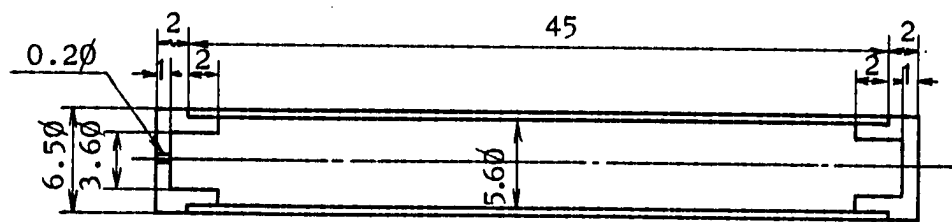
(1) Specimen for internal pressure measurement



(2) Specimen for the measurement of depth of penetration



(3) Burst specimen



(4) Creep specimen

Fig. 10 Profile of specimens used for the study of laser beam welding

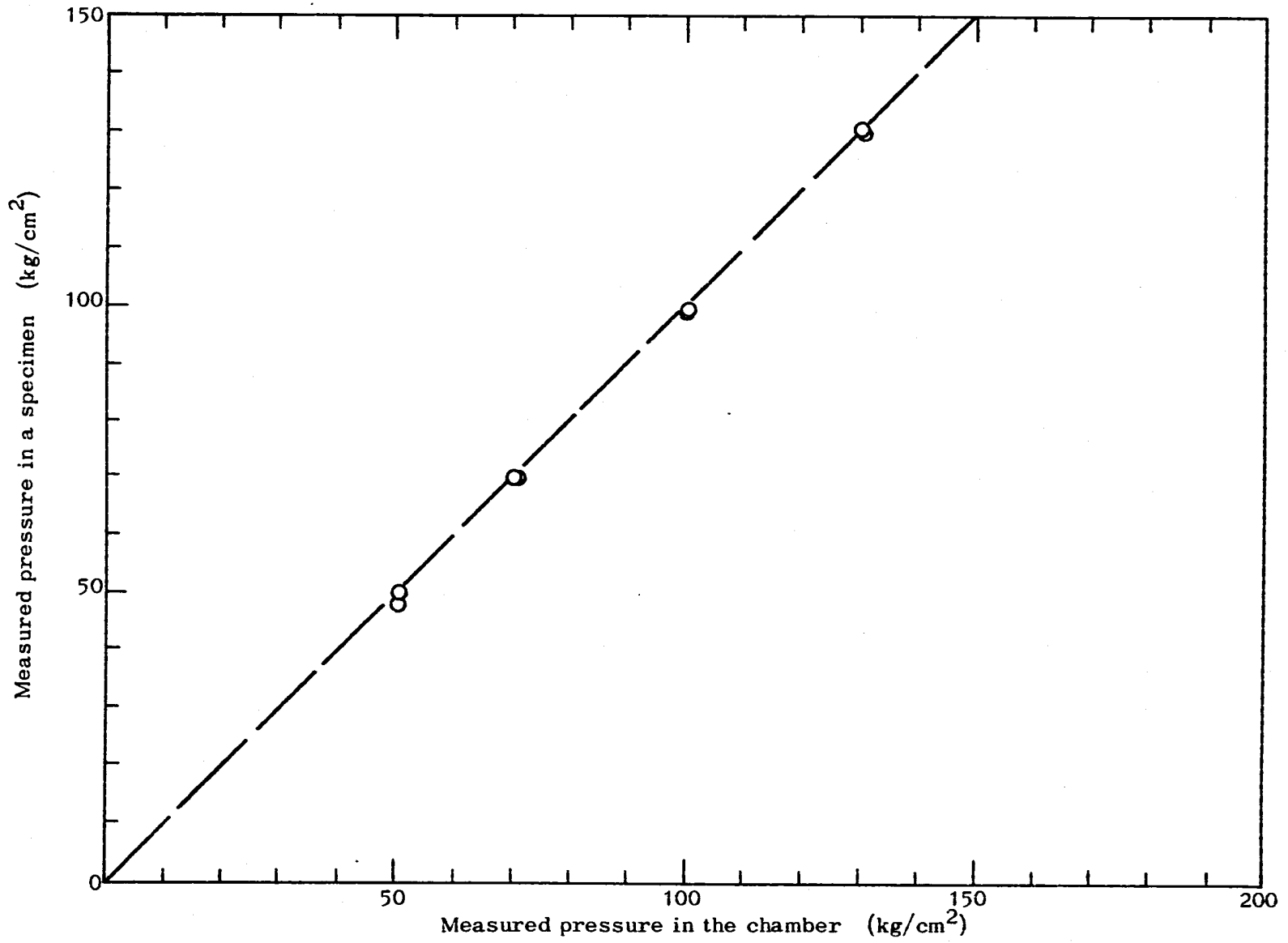


Fig. 11 Relation between pressure in the chamber and pressure in a specimen

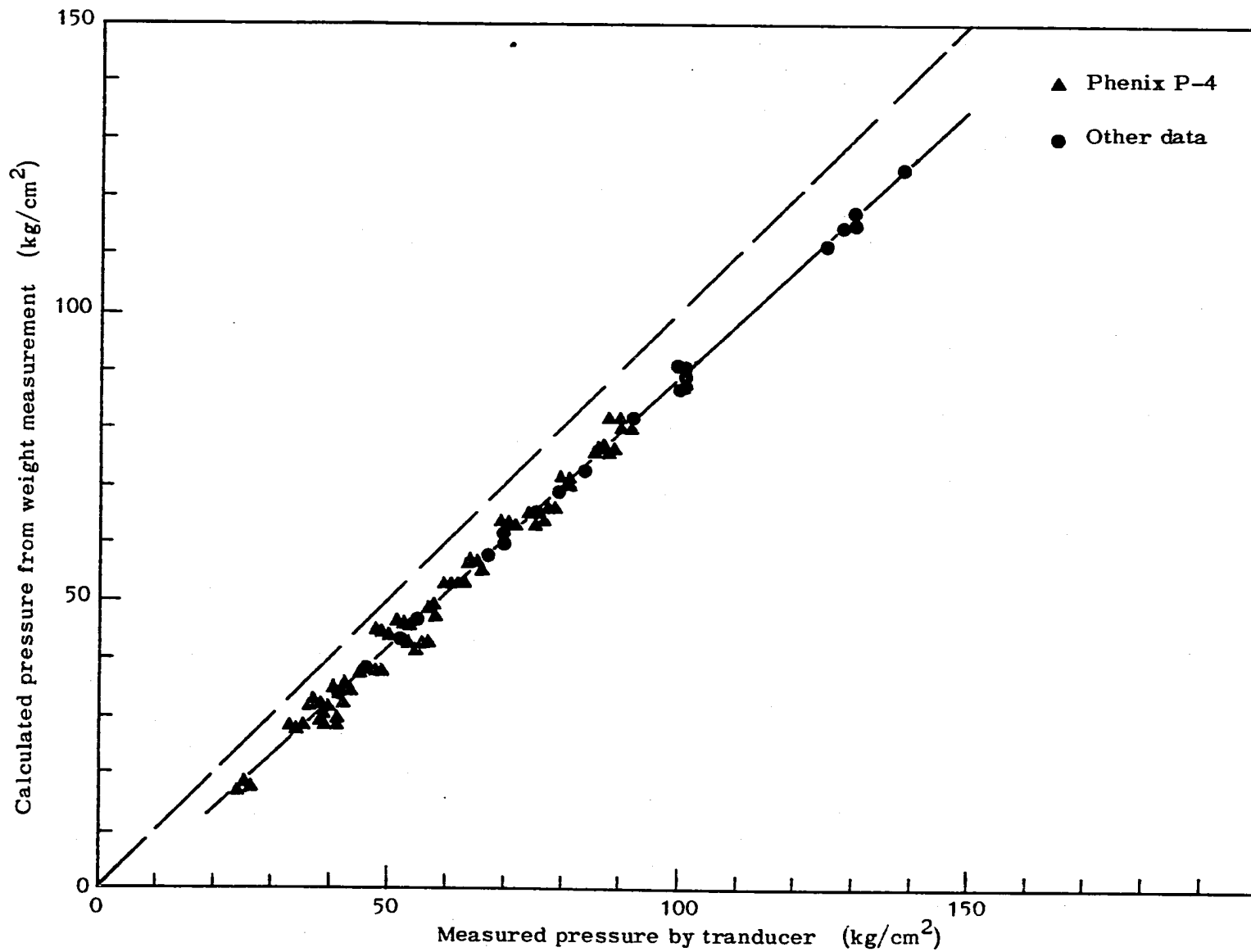


Fig.12 Relation between measured pressure by transducer and calculated pressure from weight measurement



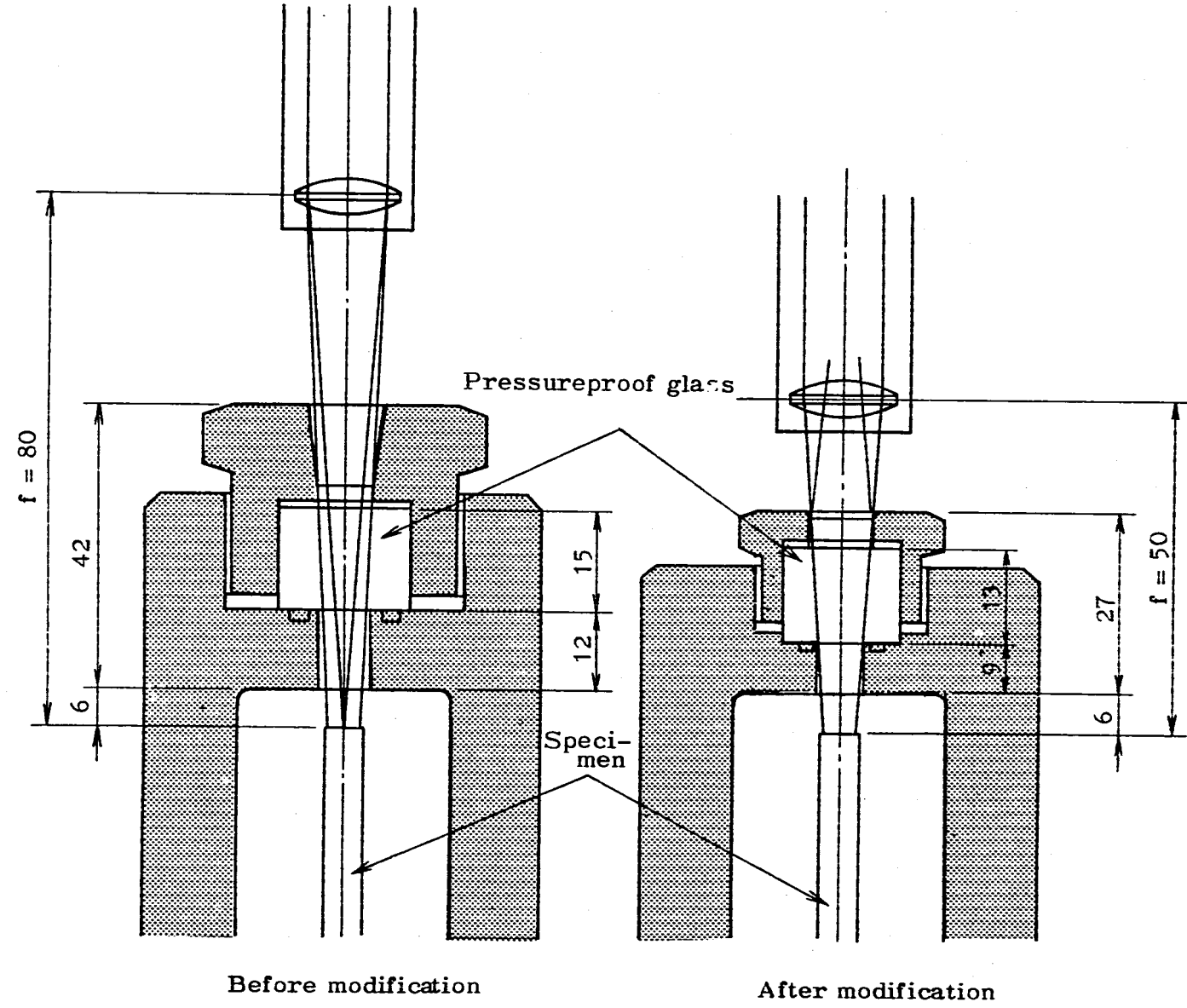


Fig. 13 Modification of pressure vessel equipment

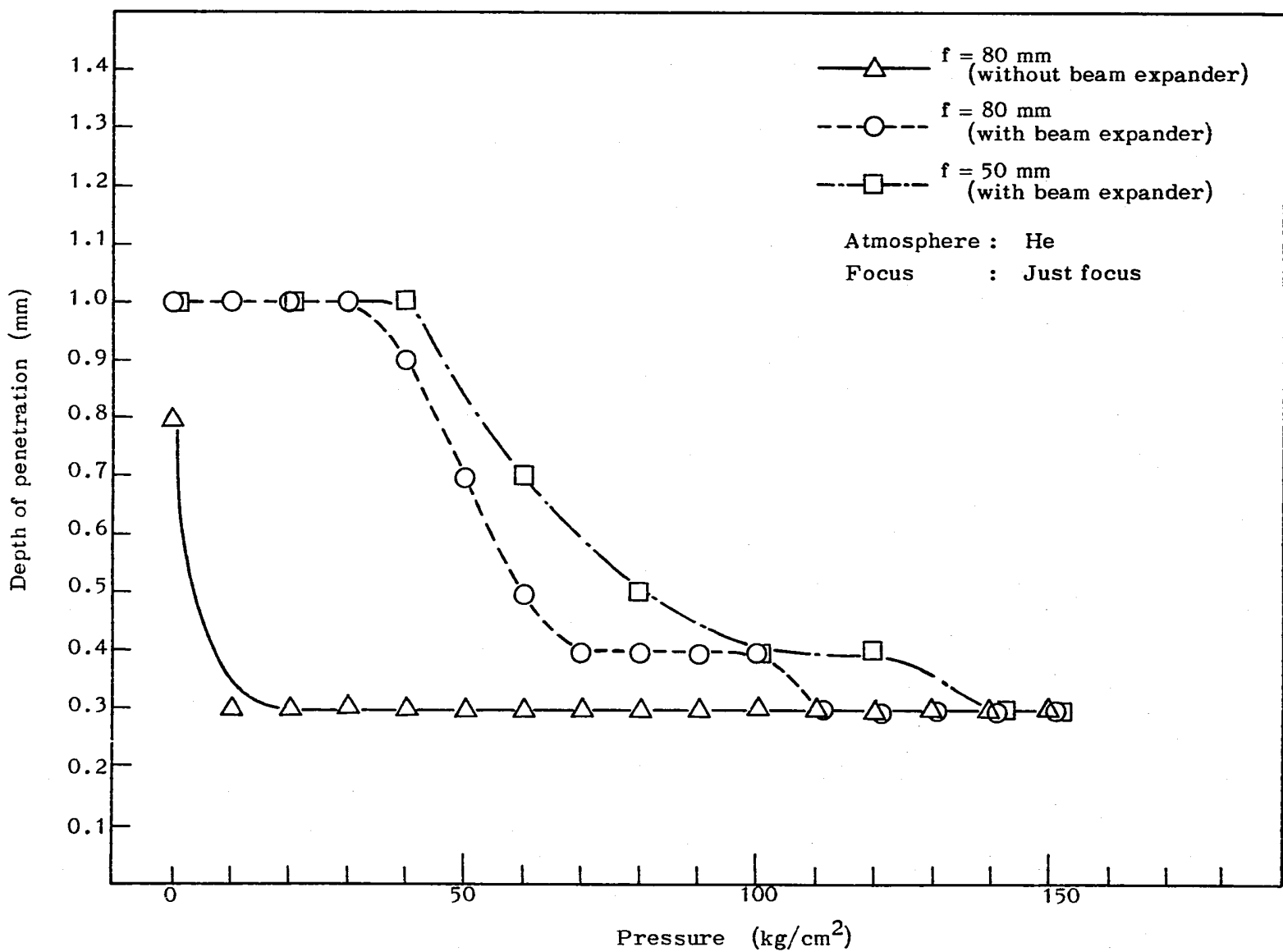
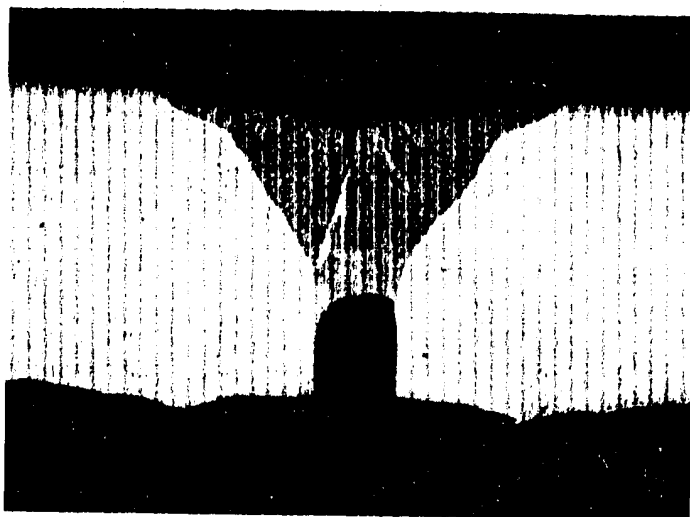
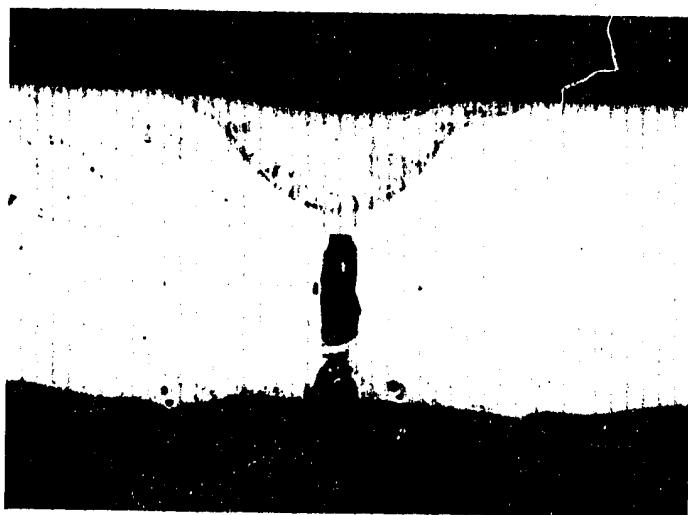


Fig. 14 Relation between pressure and depth of penetration



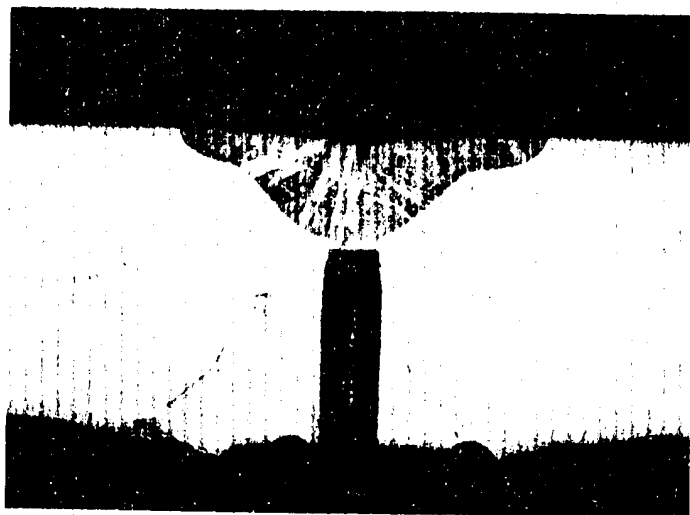
①

60 kg/cm<sup>2</sup>



②

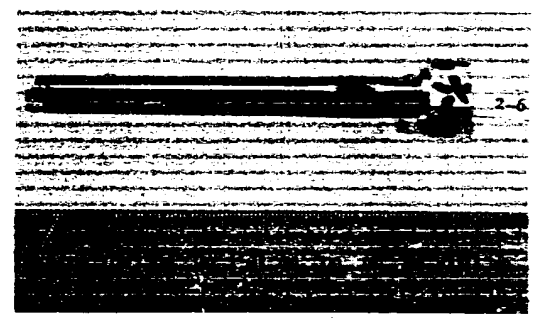
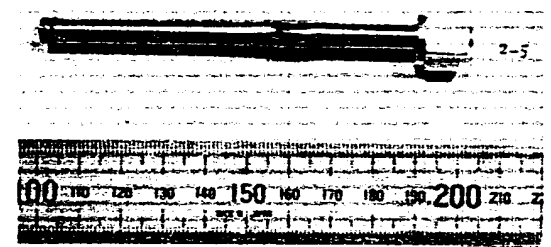
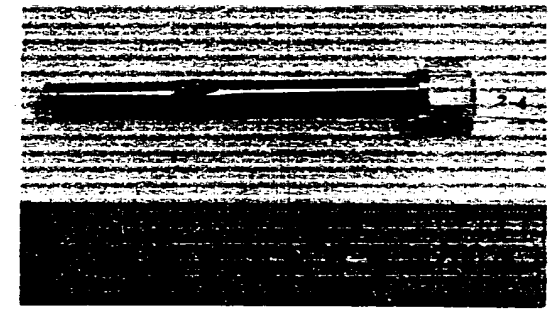
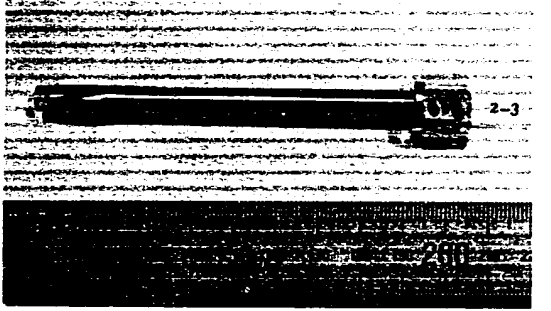
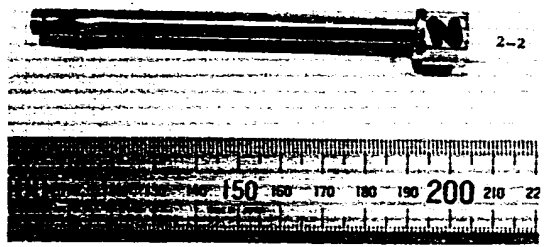
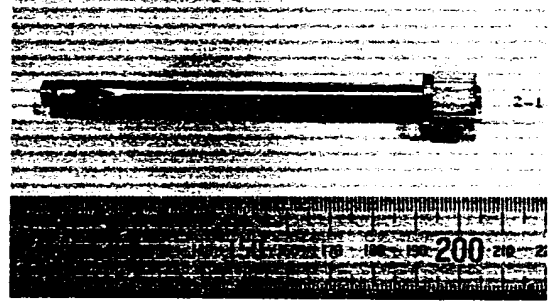
80 kg/cm<sup>2</sup>



③

100 kg/cm<sup>2</sup>

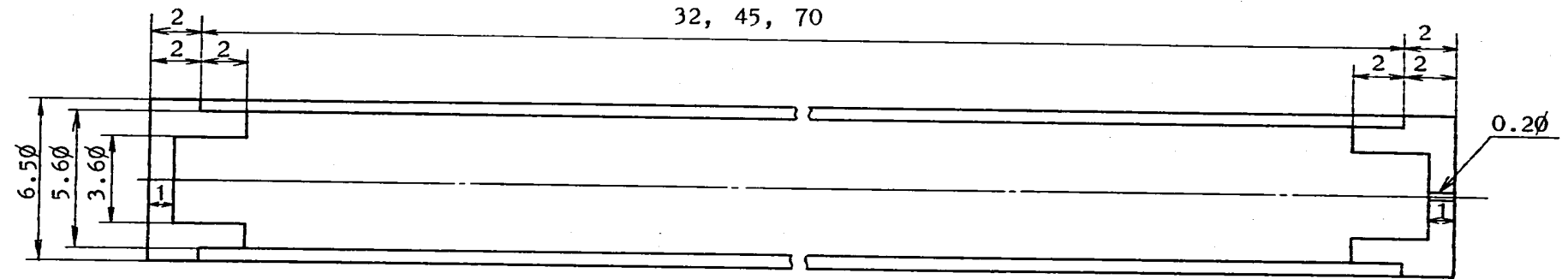
Fig. 15 Macrostructure of the cross section of specimens welded by laser beam



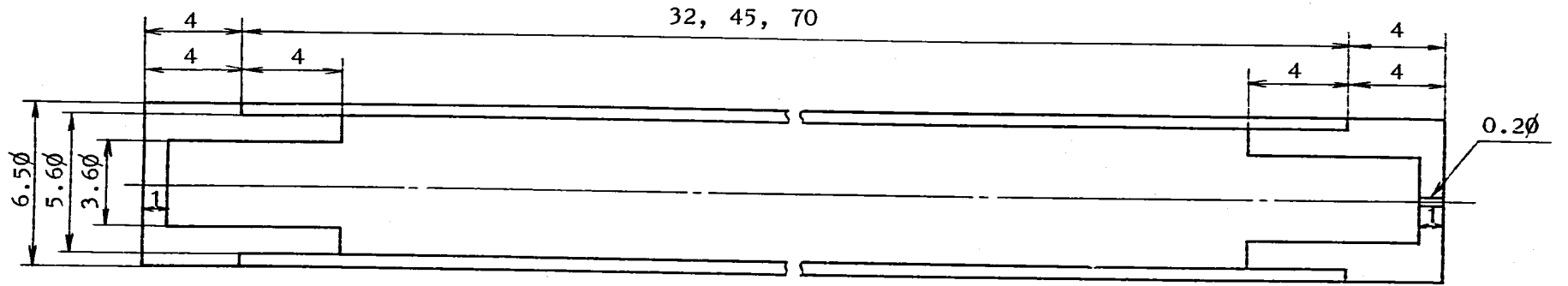
Depth of penetration : 0.1~0.2 mm

Depth of penetration : 0.3 mm

Fig. 16 Specimens after burst test



(1) A type



(2) B type

Fig. 17 Profile of creep specimens.

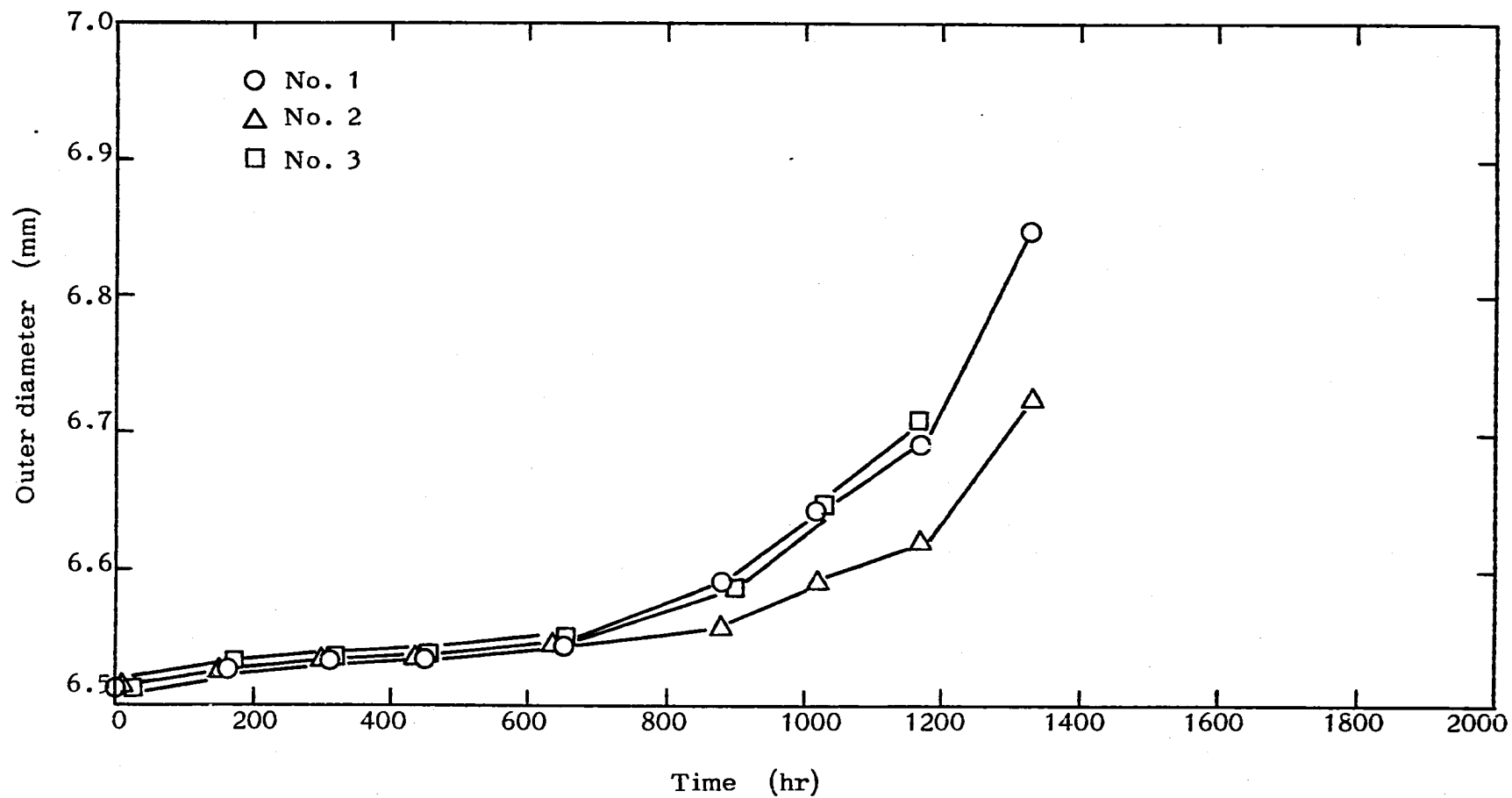


Fig.18-1 Creep curves at 650°C under the internal pressure of 174 kg/cm<sup>2</sup>  
(A type,  $l = 32$  mm)

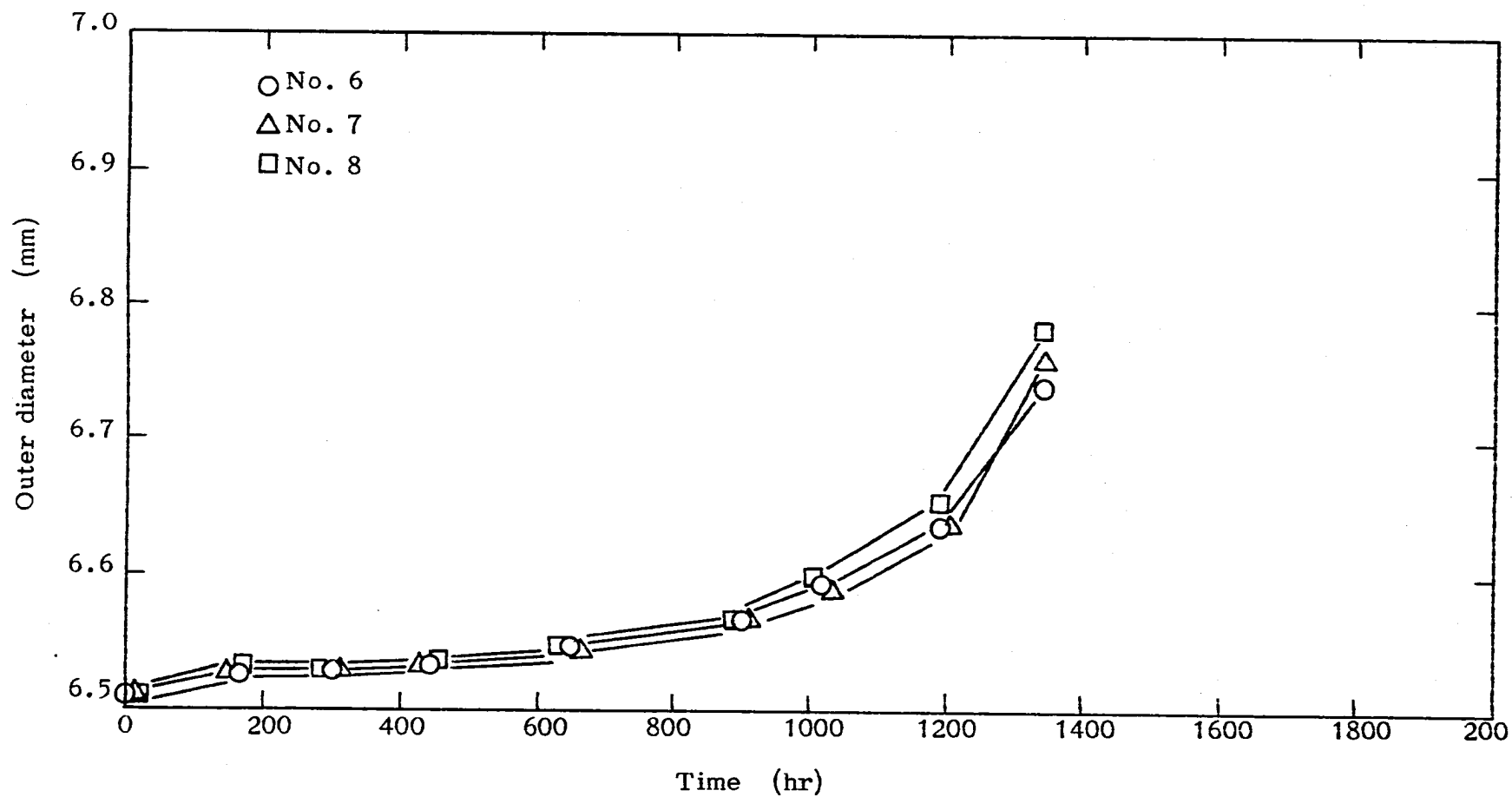


Fig. 18-2 Creep curves at  $650^{\circ}\text{C}$  under the internal pressure of  $174\text{ kg/cm}^2$   
(A type,  $l = 45\text{ mm}$ )

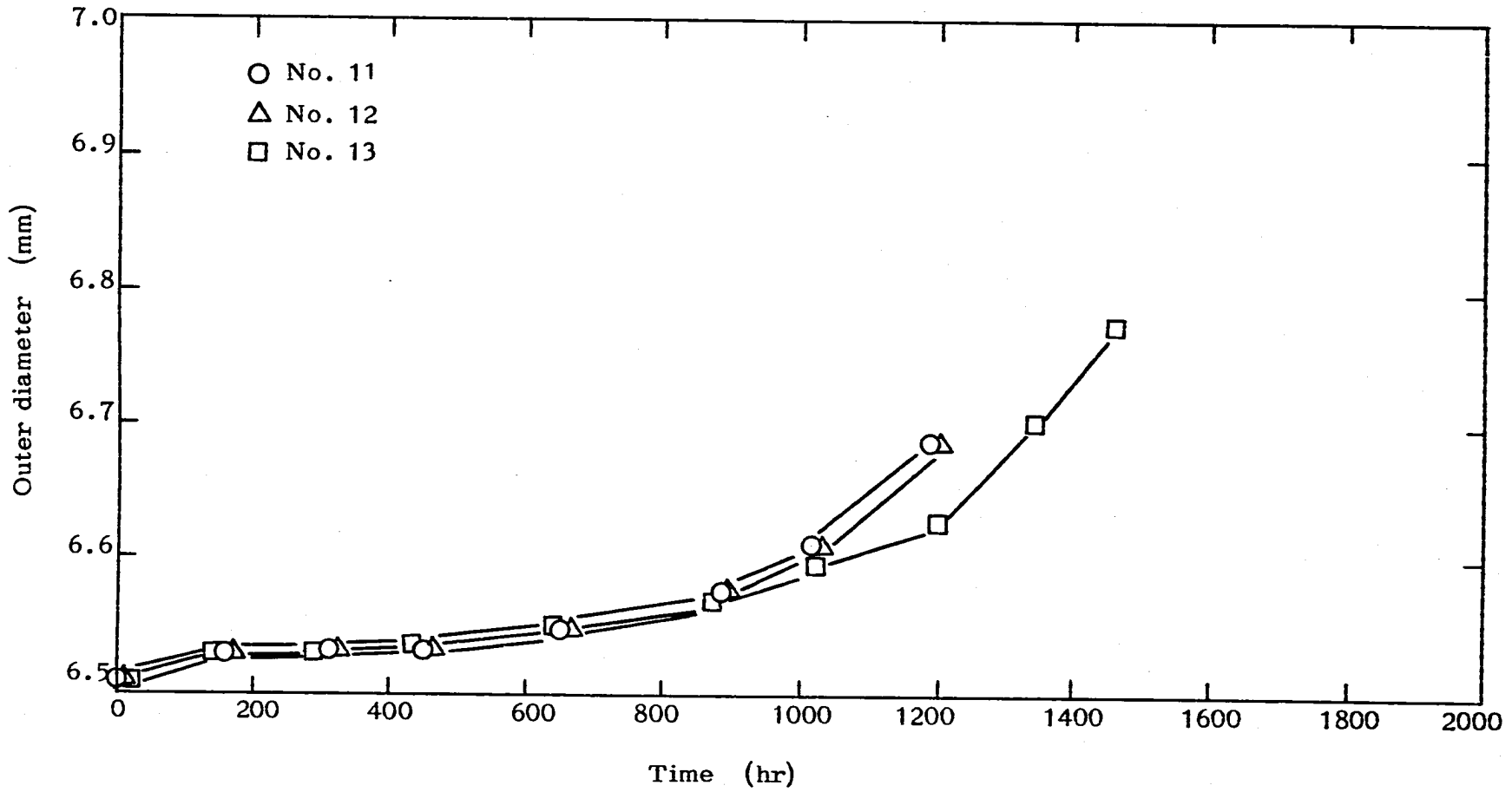


Fig. 18-3 Creep curves at 650°C under the internal pressure of 174 kg/cm<sup>2</sup>  
 (A type,  $l = 70$  mm)



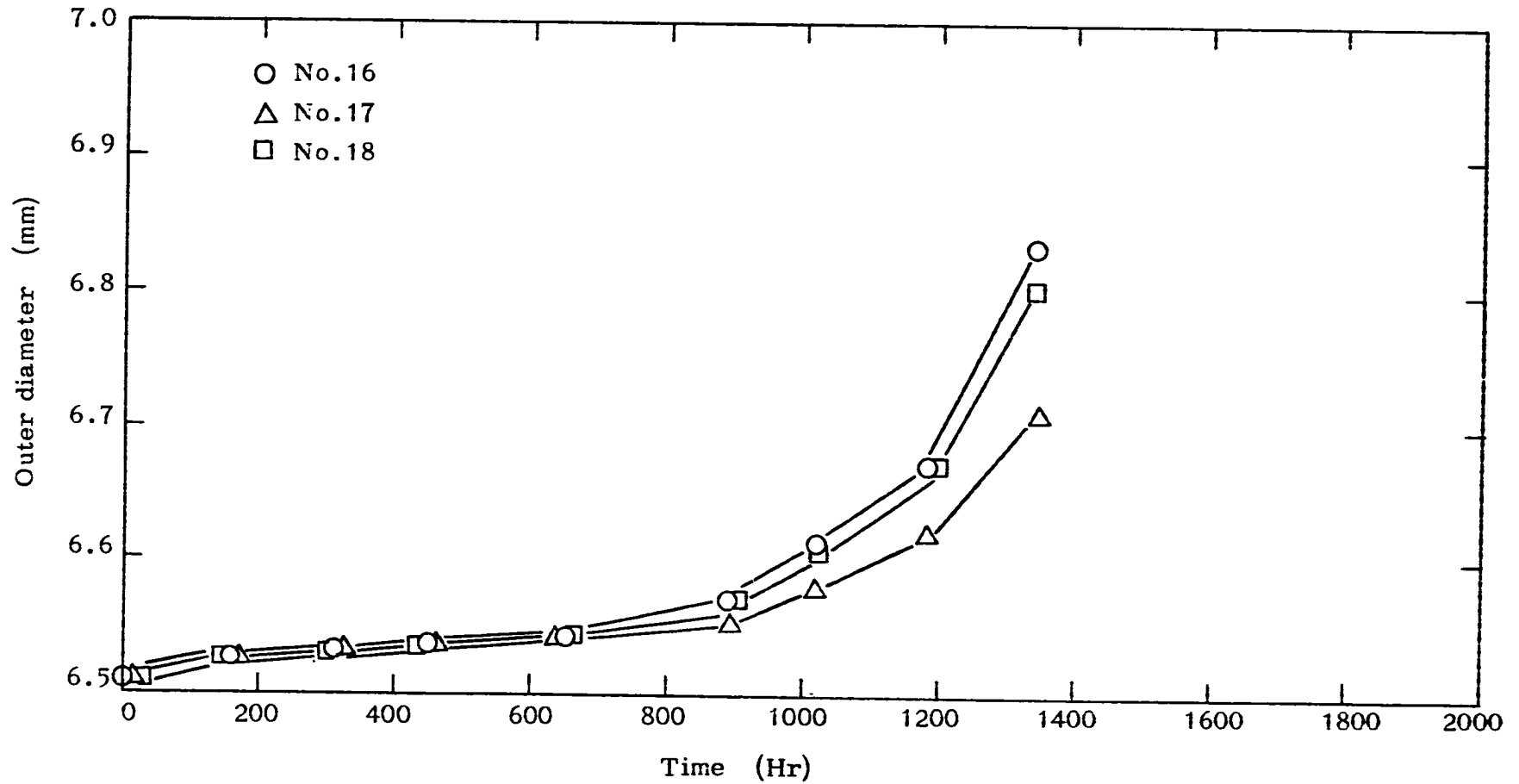


Fig. 18-4 Creep curves at 650°C under the internal pressure of 174 kg/cm<sup>2</sup>  
(B type,  $l = 32$  mm)

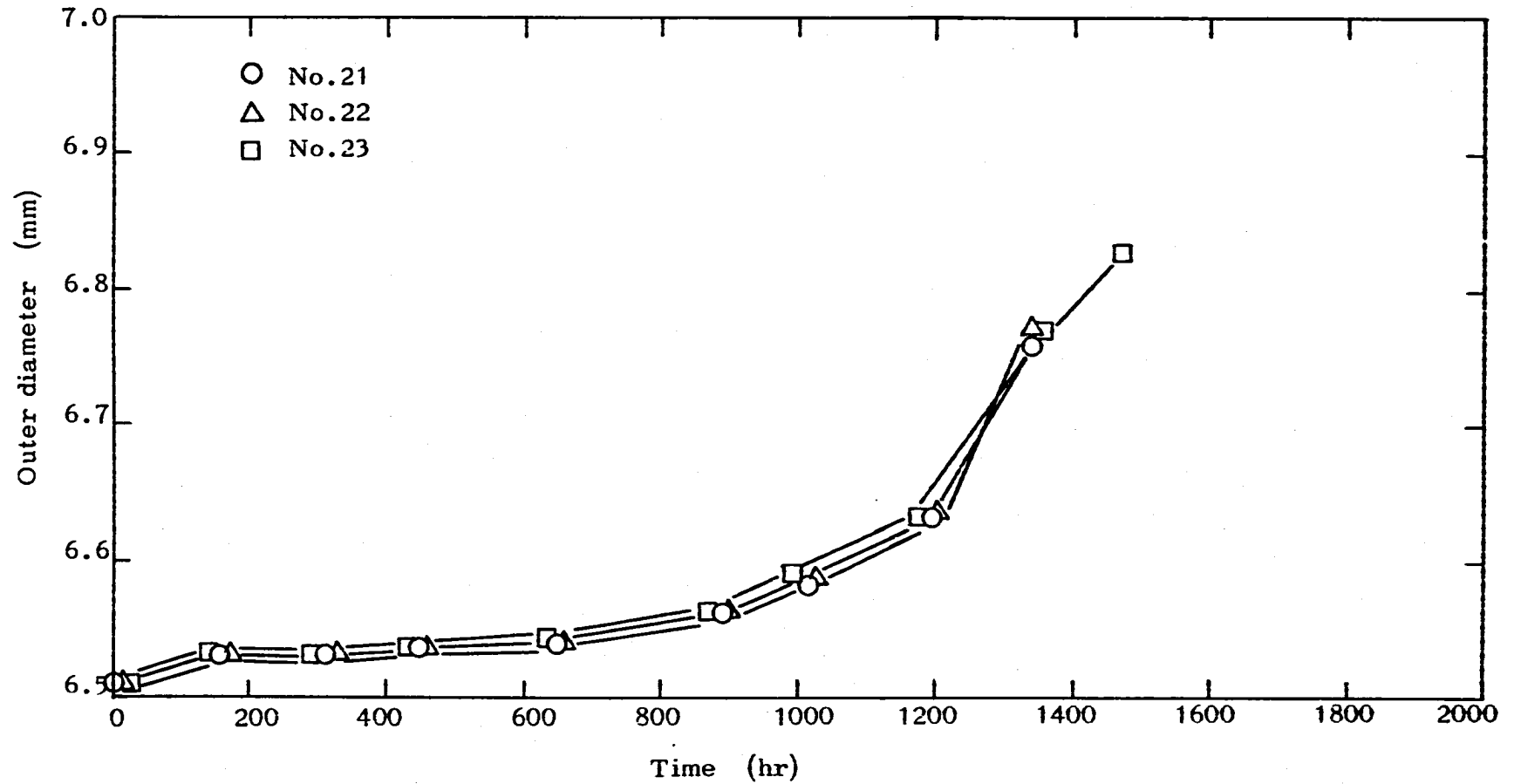


Fig. 18-5 Creep curves at 650°C under the internal pressure of 174 kg/cm<sup>2</sup>  
(B type,  $l = 45$  mm)

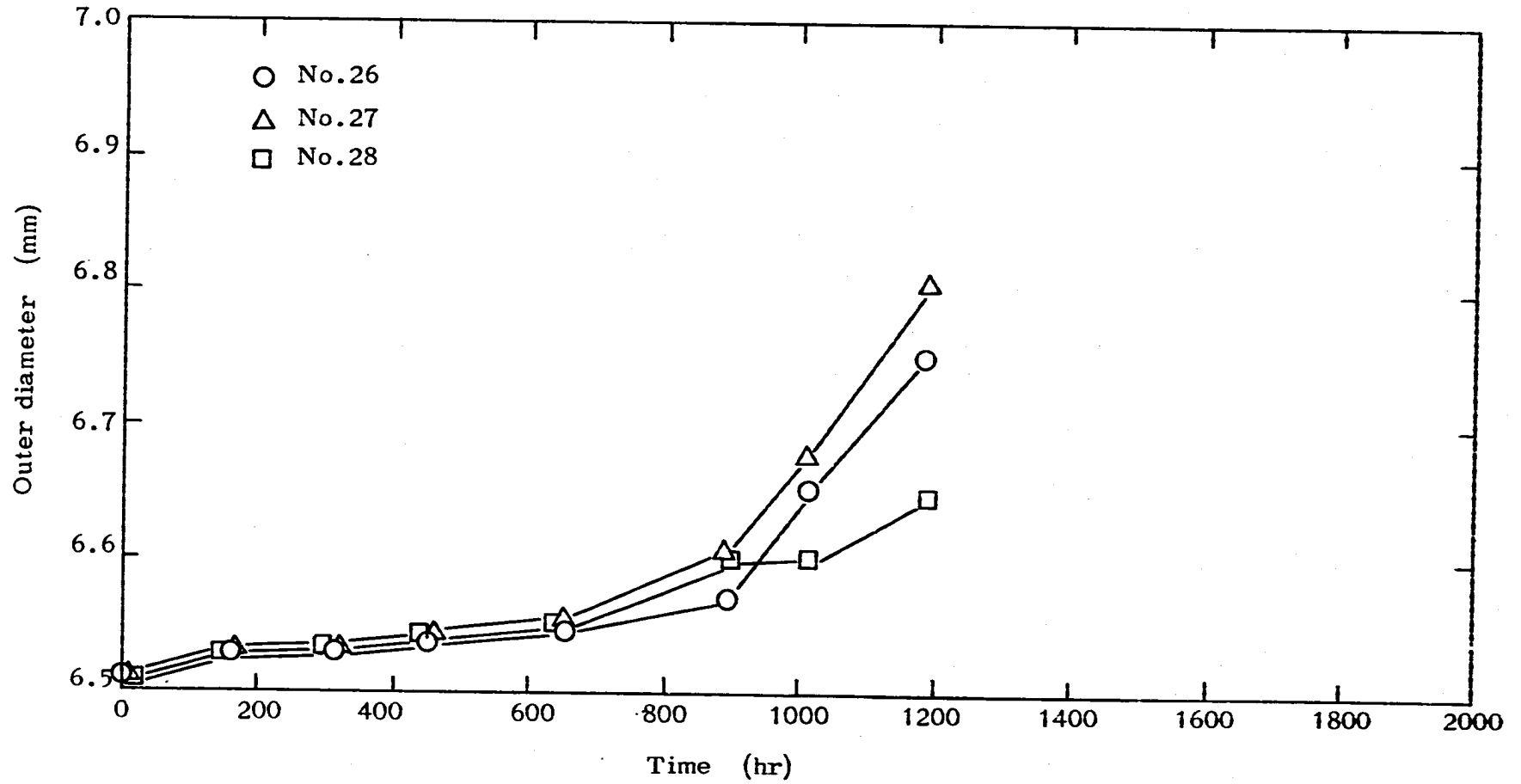


Fig. 18-6 Creep curves at 650°C under the internal pressure of 174 kg/cm<sup>2</sup>  
(B type,  $\ell = 70$  mm)

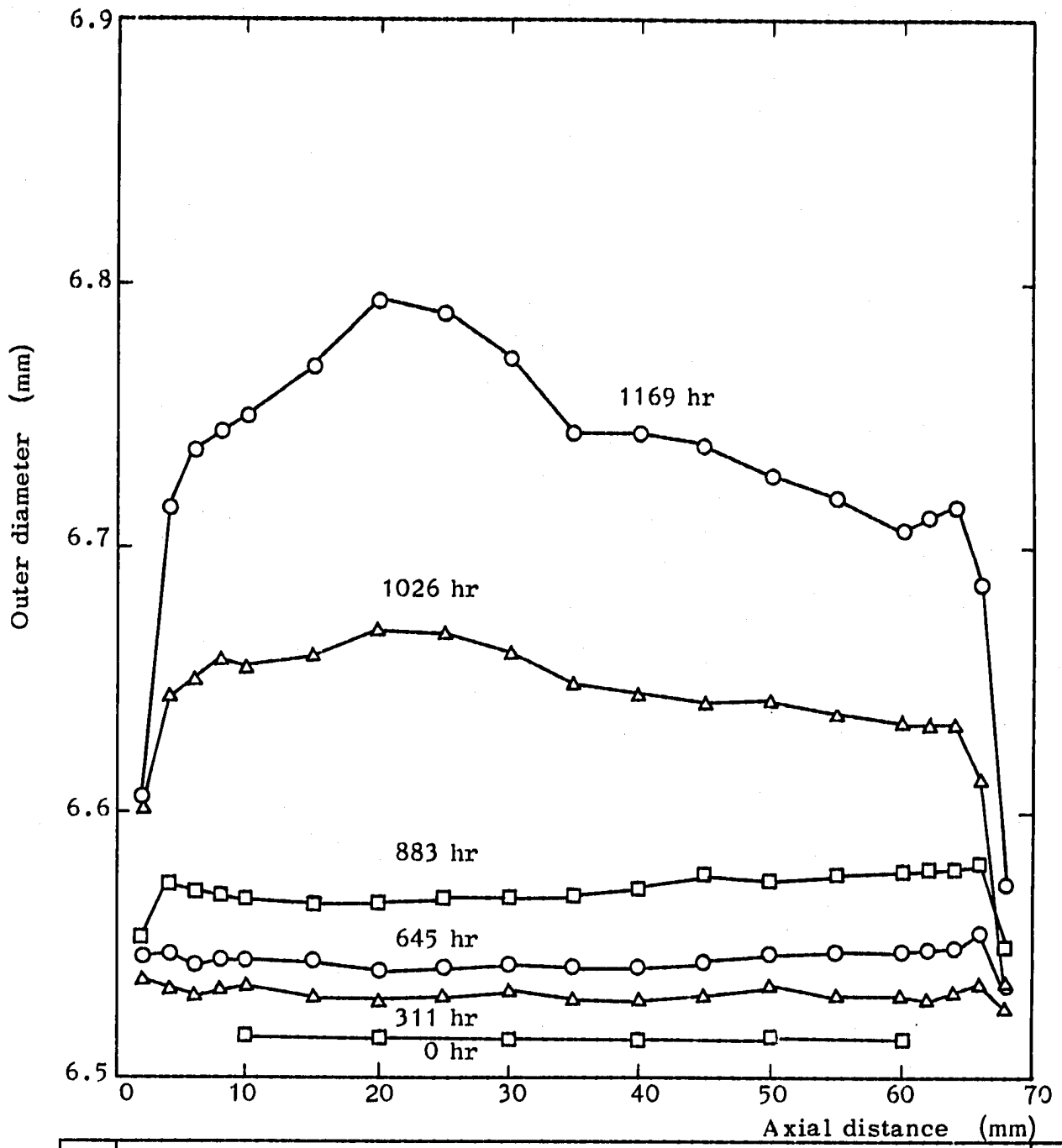


Fig.19 Outer diameter distribution during creep test at 650°C  
 ( No.26, B type,  $\ell = 70$  mm,  $P = 174$  kg/cm<sup>2</sup>)

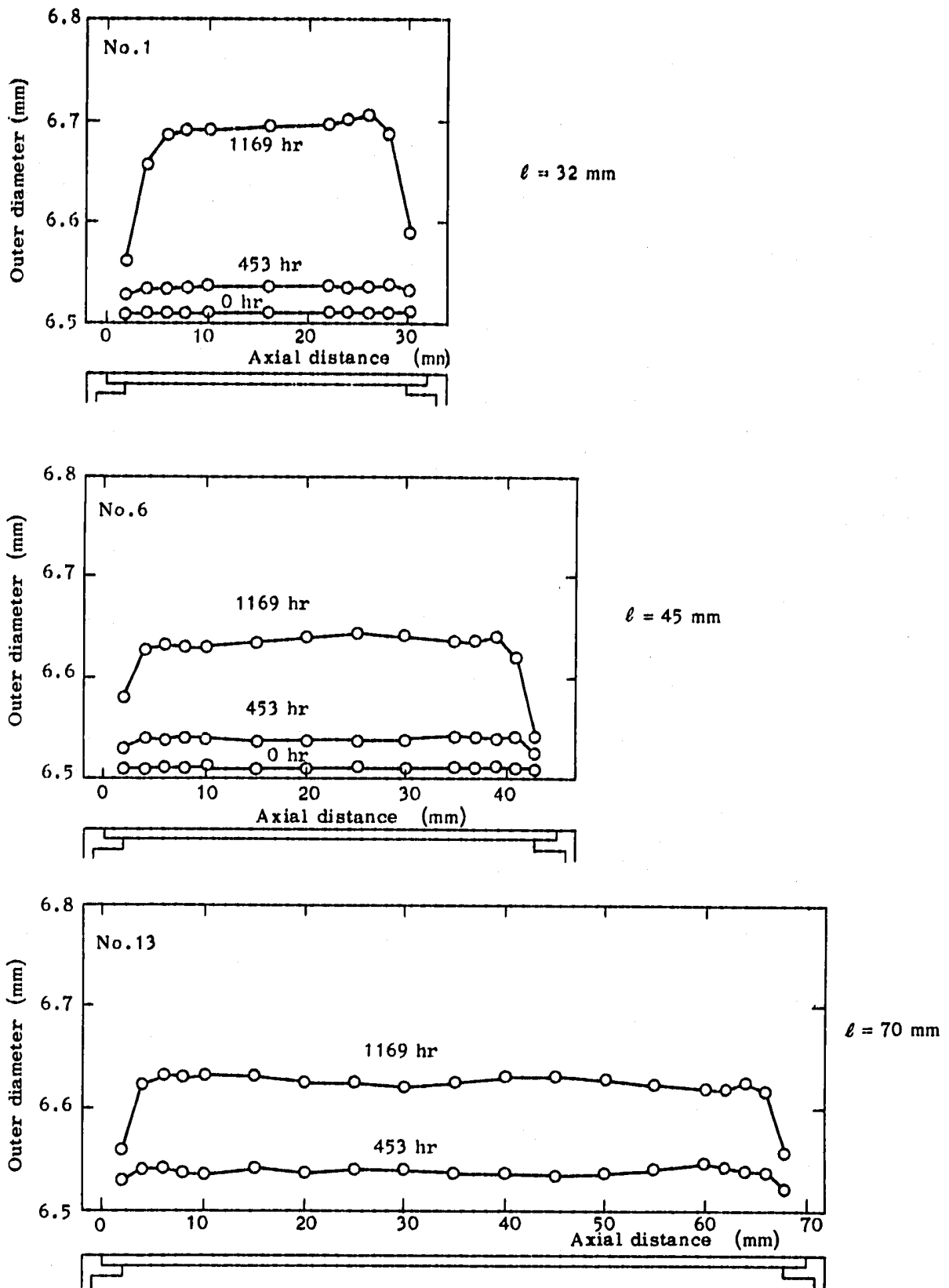


Fig. 20 Effect of cladding length on outer diameter distribution during creep test at 650°C ( P = 174 kg/cm<sup>2</sup>, A type)

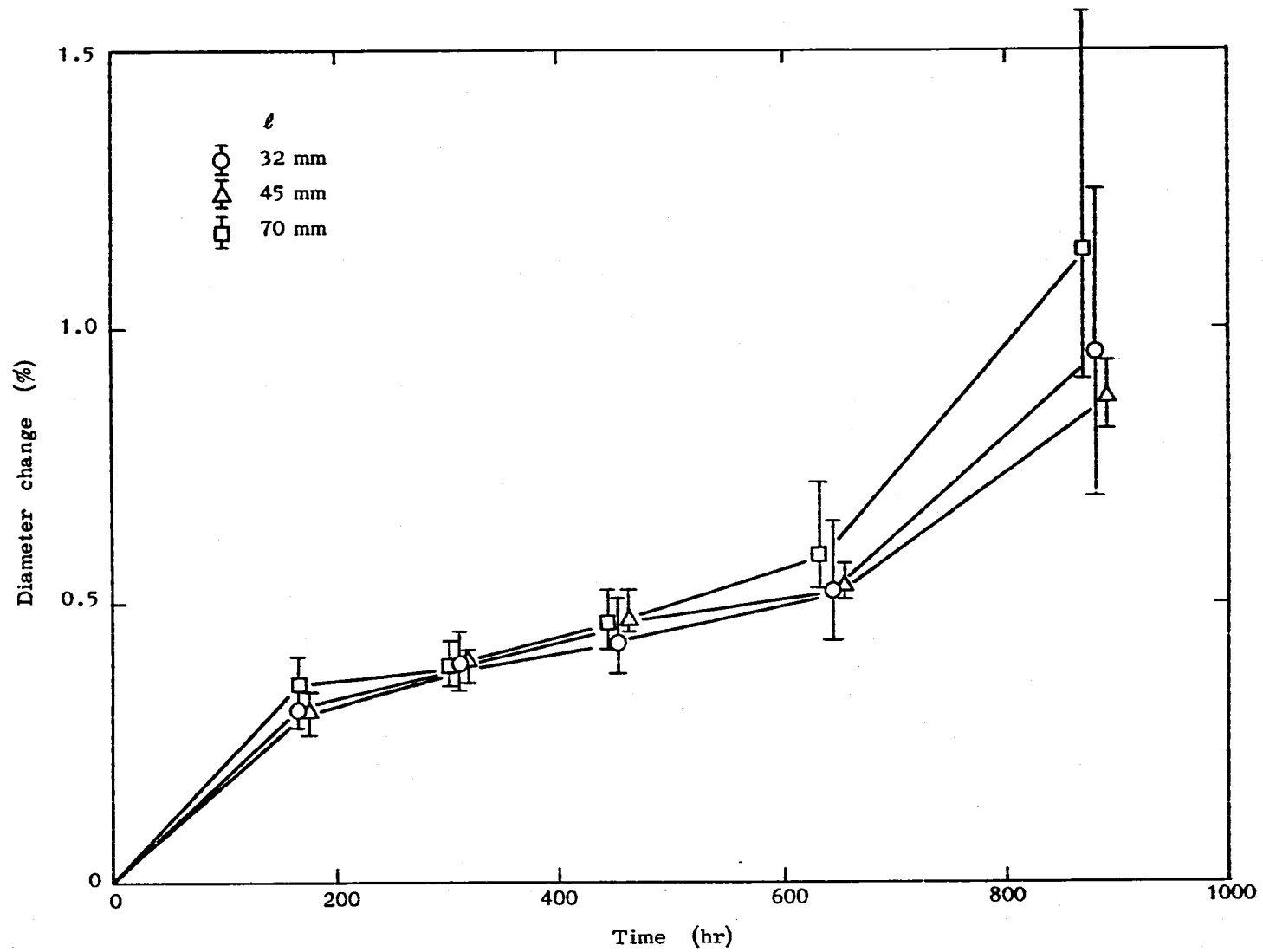


Fig. 21 Effect of cladding length on creep strain at 650°C  
(P = 174 kg/cm<sup>2</sup>)

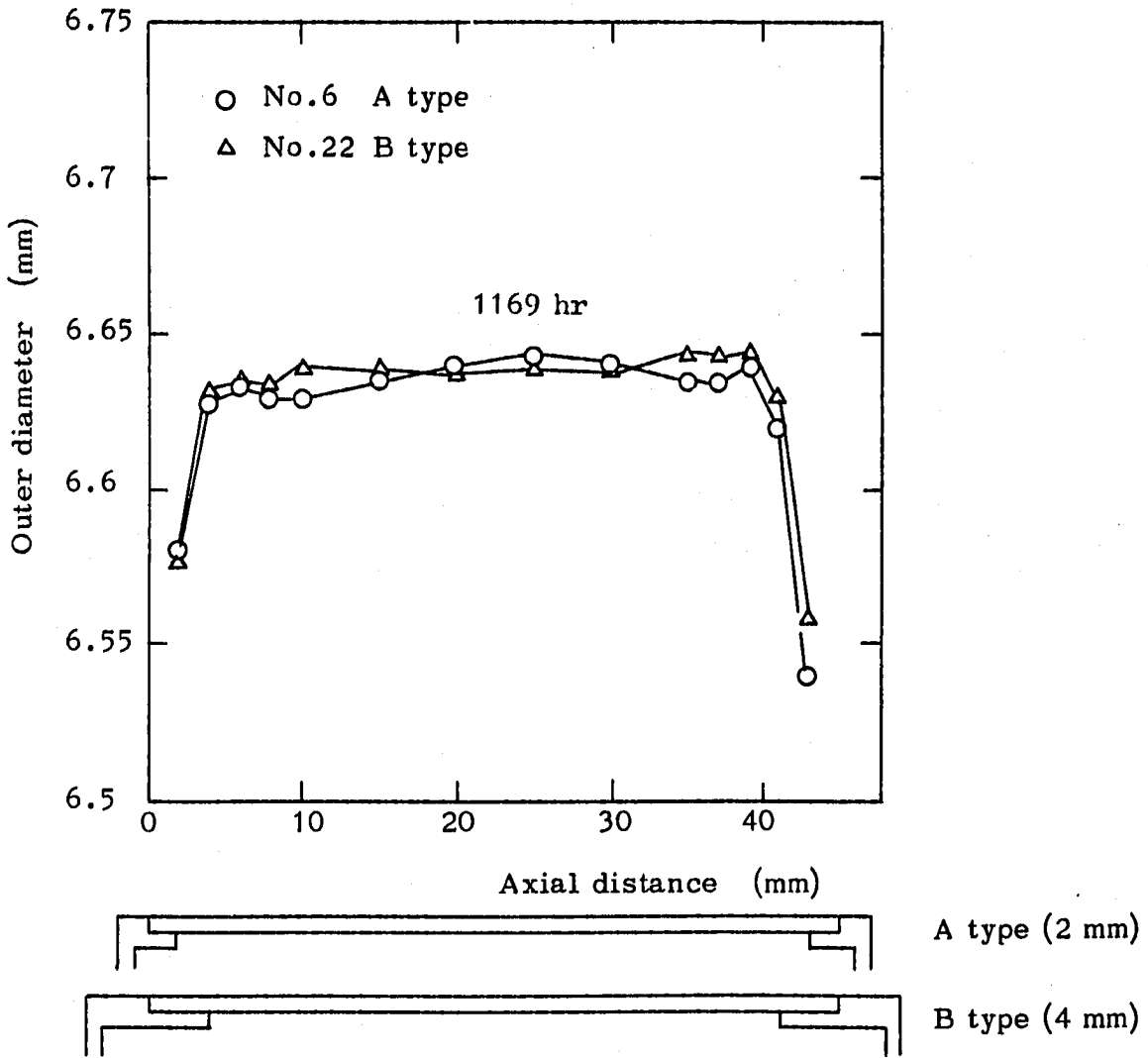


Fig.22 Effect of plug length on outer diameter distribution during creep test at 650°C.  
(P = 174 kg/cm<sup>2</sup>)

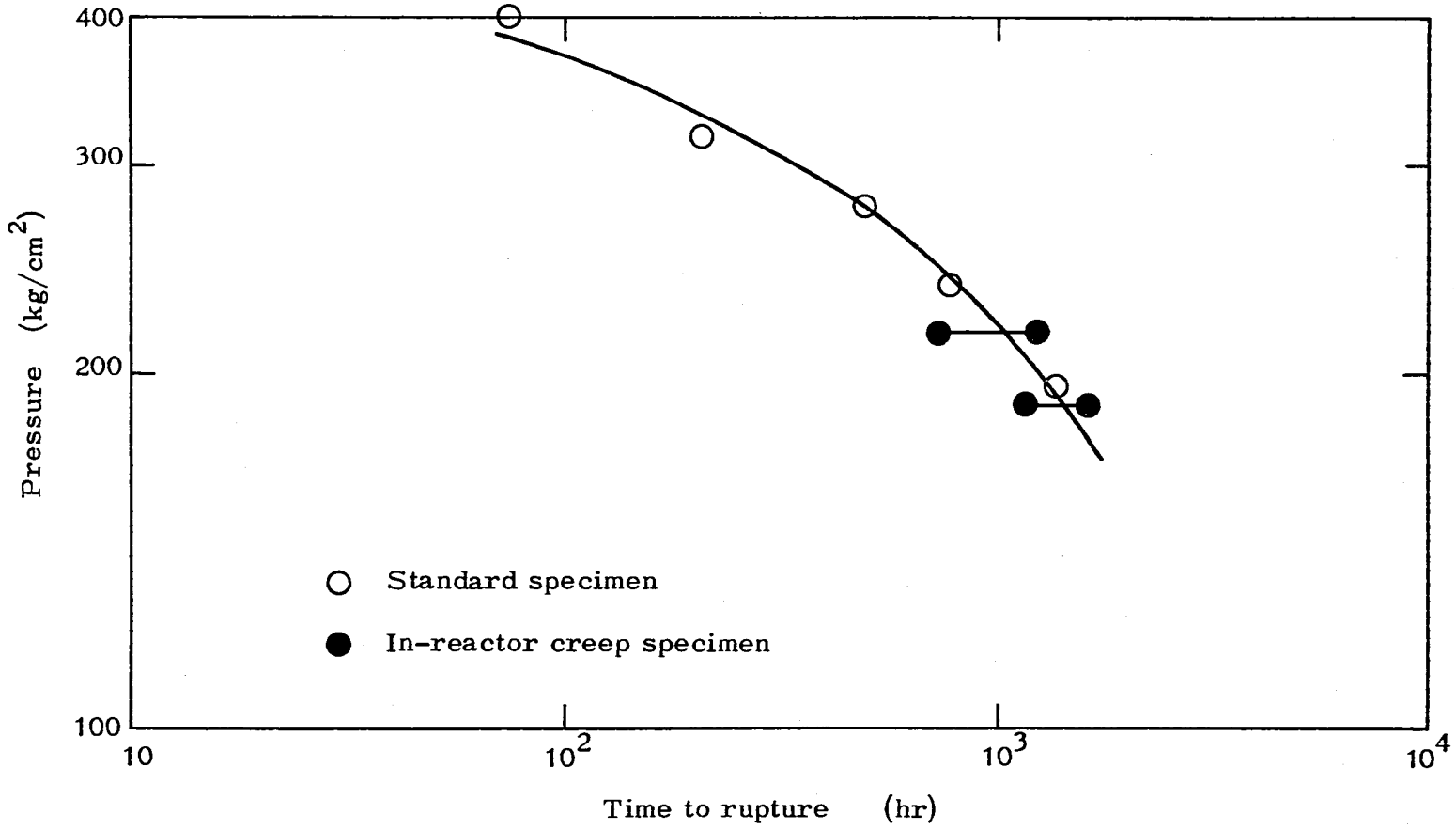
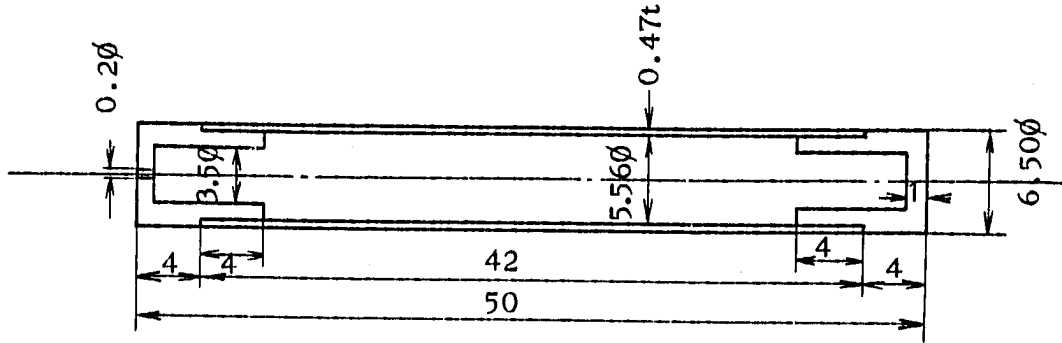
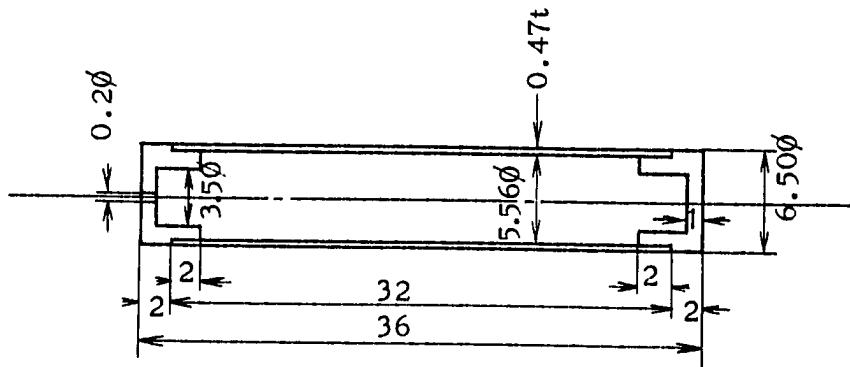


Fig. 23 Effect of specimen type on creep-rupture strength at 650°C





(a) Phenix PNC-P4



(b) JOYO MK-II

Fig. 24 Profile of specimens for Phenix and JOYO MK-II irradiation