

「常陽」サーベイランスバックアップ試験

第5報 インパイルクリープ破断試験(75M-17P,18P)

1980年12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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

「常陽」サーベイランスバックアップ試験
第5報 インパイルクリープ破断試験 (75M-17P, 18P)

榊原瑞夫^{*}, 谷 賢^{*}, 関 成一^{*}
江端 誠^{***}, 鈴木和久^{**}, 一海俊景^{*}

要 旨

構造材料のクリープ特性に及ぼす照射効果の影響を明らかにするために、従来から照射後のクリープ試験を実施してきたが、その結果を評価する上で、インパイルクリープ試験について検討する必要が生じた。このため JMTR を利用したインパイルクリープ試験を実施中である。本報はそのうち、SUS 304 の 550℃におけるインパイルクリープ試験を実施した結果をまとめたものである。

その結果、以下のような結論が得られた。

- 1) インパイルクリープ破断時間 321.5 h, 照射量 $5.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ までのデータが得られた。
- 2) 本実験範囲内でインパイルクリープ破断強度は $4.67 \sim 5.42 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の照射後のクリープ破断強度とほぼ等しかったが、両者で照射量が異なることから直ちに照射効果が等しいとは断定できない。
- 3) 今回短時間側のインパイルクリープ破断強度が得られたが、さらに長時間側のデータを蓄積、評価して行く必要があるものと考えられる。
- 4) 今回の実験で破断検出が出来なかったものもあり、インパイルクリープ試験を実施する上でさらに破断検出機等の再開発が必要である。

* 大洗工学センター，燃料材料試験部，照射材料試験室

** 現大洗工学センター，燃料材料試験部

*** 本社，FBR本部，構造材料グループ

Dec. 1980

The Back-up Tests for the "JOYO" Materials Surveillance Program

5. In-Reactor Creep Rupture Tests (75M-17P, 18P)

Mizuo Sakakihara*, Satoshi Tani*,
Seiich Seki*, Makoto Ebata***,
Kazuhisa Suzuki** and Toshikage Ikkai*

Abstract

To evaluate the effect of irradiation on the creep rupture properties, the post irradiation tests have been performed. In-reactor creep property is one of the most important for the evaluation of its effects on reactor materials. Thus in-reactor creep rupture tests in JMTR were performed on Type 304 stainless steel at 550 °C.

The results obtained are summarized as follows.

- 1) It is obtained the data ruptured from 5.2 to 321.5 h under the fast neutron fluence of 5.4×10^{19} n/cm² (>0.1 MeV).
- 2) It is seemed that the in-reactor creep rupture strength is nearly equal to post irradiation creep rupture strength in this test range. But we can not confirm the effect of irradiation is equivalent on both of them because the neutron fluence are different.
- 3) To evaluate the propriety of post irradiation creep rupture strength, the long-term in-reactor creep rupture tests are required.
- 4) Some of rupture detector was good and was not, so the mechanism should be reconsidered.

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

** Fuel and Material Division, O-arai Engineering Center, PNC. in present.

*** FBR Development Project.

目 次

1. ま え が き	1
2. 試 験 方 法	2
2.1 供 試 材	2
2.2 試 験 方 法	2
3. 試 験 結 果	3
3.1 インパイルクリープ試験中の照射条件	3
3.2 インパイルクリープ試験温度	3
3.3 インパイルクリープ破断試験結果	3
3.4 他のインパイルクリープ試験との比較	4
3.5 インパイルクリープ試験材の外観及び金相試験	4
4. 考 察	6
5. ま と め	7
6. 謝 辞	7
7. 参考文献	8

List of tables

Table 1 Mill sheet of test specimen

Table 2 Results of in-reactor creep rupture test

List of figures

- Fig. 1 Profile of specimen
- Fig. 2 Capsule
- Fig. 3 View of specimens before test
- Fig. 4 Flow diagram of pressurizing system
- Fig. 5 Relation between load and gas pressure in bellows
- Fig. 6 Relation between load and gas pressure in bellows elongated
1 mm.
- Fig. 7 Irradiation position in JMTR core.
- Fig. 8 Distribution of fast neutron flux (>0.1 MeV) and the posi-
tions of test specimen
- Fig. 9 Thermal histories of test specimens of 75M-17P during in-
reactor creep.
- Fig. 10 Thermal histories of test specimens of 75M-18P during in-
reactor creep
- Fig. 11 Selecting procedure of test conditions for No.1 ~ No.3
specimens
- Fig. 12 Creep rupture curve of Type 304 base metal at 550 °C
- Fig. 13 Creep rupture time ratio at 550 °C as a function of fluence
- Fig. 14 Creep rupture properties of Type 304 as a function of Larson-
Miller's parameter
- Fig. 15 View of specimens after in-reactor creep rupture test
- Fig. 16-(1) Micrograph of cross section of No.1 specimen ruptured in 17P.
- Fig. 16-(2) Micrograph of cross section of No.2 specimen ruptured in 17P.
- Fig. 16-(3) Micrograph of cross section of No.3 specimen ruptured in 17P.
- Fig. 16-(4) Micrograph of cross section of No.4 specimen ruptured in 18P.
- Fig. 16-(5) Micrograph of cross section of No.5 specimen ruptured in 18P.
- Fig. 16-(6) Micrograph of cross section of No.6 specimen ruptured in 18P.
- Fig. 17 View of rupture detector (Yoke) after test
- Fig. 18-(1) Cross section of rupture detector point for No.5 specimen
of 18P.
- Fig. 18-(2) Cross section of rupture detector point for No.6 specimen
of 18P.
- Fig. 19 View of bellows after test
- Fig. 20-(1) Cross section of bellows for No.5 specimen of 18P.
- Fig. 20-(2) Cross section of bellows for No.6 specimen of 18P.

1. ま え が き

材料のクリープ特性に及ぼす照射効果の影響を明らかにするために従来、照射後のクリープ試験を実施してきた^{1~3)}が、最近炉心材料の評価において照射後クリープはインパイル下での挙動と異なるという報告もあり、構造材料に対しても照射後クリープの妥当性を評価する上で、インパイルクリープ試験を行い、照射中挙動とあわせ検討する必要性が生じた。このためにJ MTR を利用したインパイルクリープ破断試験を実施中である。本報はそのうち、J MTR 炉心J-12孔で最大 $5.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.1 \text{ MeV}$) 照射のインパイルクリープ破断試験を実施した結果をまとめたものである。インパイルクリープ破断試験の実施に当っては照射リグ及び試験手段等について困難な技術開発、特に温度コントロール用の鋳込ヒータ、荷重伝達用ベローズ、クリープ破断検出機構の開発等が必要であったが、その一つ一つを炉外試験を実施しその性能と耐久性を確認⁵⁾してインパイルクリープ破断試験に供した。

2. 試験方法

2.1 供試材

Table 1 に供試材のミルシートを示す。供試材は高速実験炉の炉容器サーベイランス試験材の一部から採取した 25 mm 板厚の SUS 304 である。Fig. 1 に示す試験片を板厚の中心部から圧延方向に平行に採取した。照射キャプセルの構造、寸法などの制約により、JIS で規定された標準試験片を用いることが出来ず、平行部 1.8 mm ϕ 径 $\times$ 10 mm 長さの小型試験片を用いた。

2.2 試験方法

Fig. 2 に示すインパイルクリープ破断試験用キャプセル 2 体 (75 M-17 P 及び 75 M-18 P, 以下 17 P 及び 18 P) を製作した。17 P 及び 18 P は J MTR の J-12 孔でそれぞれ 42~44 及び 45~47 の各 3 サイクルの照射をうけた。17 P 及び 18 P は同一構成でそれぞれアルミニウム鑄込ヒータを内蔵した 3 箇所の試験部を持っている。Fig. 3 に示した試験片をそれぞれのキャプセルの 3 箇所の試験部にセットし、試験片中心部に固定した C A 熱電対により、試験片が 550 $^{\circ}$ C になるように制御した。キャプセル内部は He ガスで置換したが、Na 2 試験片は He ガス中では 550 $^{\circ}$ C にならなかったため N ガスを添加し昇温させた。各試験片は Fig. 4 に示した荷重制御部に設けたベローを高圧 He ガスで圧縮することによりヨークを介して上部へ引張られる。He ガスボンベから出る高圧ガスを減圧弁で減圧し、制御弁にて試験片に 25.4~38.1 kg/mm² の応力がかかるように制御した。ガス圧力と荷重の関係は炉外でベロー特性を検査し求めた。ベローの温度は N を添加したために 690 $^{\circ}$ C に過熱された。Na 2 試験用ベローを除くと 419~580 $^{\circ}$ C であった。各温度におけるベローのガス圧力-荷重の特性曲線は Fig. 5 に示す通りである。なお Na 2 試験片用ベローは 690 $^{\circ}$ C に過熱され使用限度温度を越えており圧力-荷重の関係が明らかでないが、500 $^{\circ}$ C における特性曲線を用いた。試験片はインパイルクリープ中、時間とともに伸び、そのためベロー反力が変化し荷重が変動するが、試験中の伸びを測定することが出来ないで、破断後突き合せ伸びからその荷重を推定することにした。試験片は最大 1 mm の伸びであったのでベローが 1 mm 伸びたものとして Fig. 6 に示す特性曲線から、荷重を求め、試験応力として初期応力と 1 mm 伸びた点での応力の範囲を用いることにした。クリープ破断は Fig. 2 に示した破断検出端に試験片が破断して上部に押し上げられたヨーク端のロジウムメッキ部が接触することにより電氣的に検出されるようにした。

3. 試験結果

3.1 インパイルクリーブ破断試験中の照射条件

Fig. 7 に示す JMTR の J-12 孔にて 17 P は 42～44 の 3 サイクル, 18 P は 45～47 の 3 サイクル照射した。試験片の照射位置及び速中性子束分布を Fig. 8 に示す。フラックスモニタは試験片と同位置の上, 中, 下段の 3 箇所に入れたが, 上段に入れたフラックスモニタによる検出は失敗した。このため中段及び下段に入れたフラックスモニタにより中性子束を測定し, 2 次元拡散方程式計算コード CIATON を用い標準曲線より計算により求めた。17 P 及び 18 P ともにほぼ等しい中性子束分布を示しており, 上段に配置した Na 3 及び Na 6 試験片で約 1×10^{14} n/cm²・sec (> 0.1 MeV), 中段 (Na 2 及び Na 5 試験片) 及び下段 (Na 1 及び Na 4 試験片) に配置した試験片で約 4×10^{14} n/cm²・sec (> 0.1 MeV) であった。

3.2 インパイルクリーブ破断試験温度

Fig. 9 及び Fig. 10 にインパイルクリーブ試験中の試験片の温度履歴を示す。17 P 及び 18 P ともに試験温度は 550 °C に設定した。試験中 Na 3 試験片で数時間にわたり, 最大 + 21 °C, - 16 °C の温度変動があった。その他の試験片温度は + 2 °C, - 5 °C 以内で JIS Z 2271 の基準 ± 3 °C から若干はずれるが, インパイルクリーブの特殊性を考えると温度管理はうまくいったと考えられる。

3.3 インパイルクリーブ破断試験結果

Table 2 にインパイルクリーブ破断試験結果を示す。17 P では Na 3, Na 1, Na 2 試験片の順に応力をかけた。その間応力を負荷しない試験片は無負荷状態で 200 °C～400 °C に加熱されていた。Na 3 試験片には Fig. 11 に示す炉外試験の結果⁵⁾(線 A) から目標破断時間 100 h に相当する応力 34.1 kg/mm² (He ガス圧: 29.9 kg/cm²) をかけた。Na 1 試験片には Na 3 試験片の破断時間 357 h を通り線 A に平行線 (B) を引き破断時間 130 h に相当する応力 38.0 kg/mm²

(He ガス圧: 33.7 kg/cm²) をかけた。Na 1 試験片は 5.2 h で破断し, Na 3 試験片から推定した破断時間からは著しく短かった。このため Na 2 試験片の負荷応力を決定することが困難であったが, 線 B から JMTR 44 サイクル運転期間 600 h を越えない最大時間で破断すると考えられる応力 32.1 kg/mm² (He ガス圧: 28.3 kg/cm²) をかけた。Na 2 試験片は予想に反し 0.8 h という短時間で破断した。17 P の試験結果はかなりばらついており, インパイルクリーブ特性を知るにはいたらなかった。又最初に試験した Na 3 試験片は試験前に照射を受けておらずインパイルクリーブ試験とし得るが, 後から試験した Na 1 及び Na 2 試験片は応力負荷以前に 0.6 ～

$1.2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.1 \text{ MeV}$) の照射を受けており、照射後インパイルクリープ試験とも考えられ、18 P の試験に際しては Na 4 ~ Na 6 試験ともに照射と同時に応力をかけることにした。又 17 P の結果がばらついており応力決定のための資料とすることが出来なかったため、Fig. 11 に示した炉外試験の結果 (線 A) から 400, 800 及び 1500 h 破断に相当する応力 29.2 kg/mm^2 , 27.4 kg/mm^2 , 及び 25.4 kg/mm^2 をかけた。その時の He ガス圧はそれぞれ 26 kg/cm^2 , 24.3 kg/cm^2 , 及び 22.8 kg/cm^2 であった。Na 5 試験片では破断が検出出来なかった。又 Na 2 試験片ではベロー温度が 690°C という高温に過熱されており、試験片応力を知ることが出来ず、データとして採用しないことにした。

Fig. 12 に同一供試材にて行った非照射材及び照射後クリープ破断試験の結果^{2), 3), 5), 6)}とあわせてインパイルクリープ破断応力時間曲線を示す。インパイルクリープ破断試験結果は非照射材に比べ劣っているようである。一方 $4.67 \sim 5.42 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.1 \text{ MeV}$) 照射後試験結果とほぼ等しい結果を示していた。

Fig. 13 にクリープ破断時間比 (照射材強度/非照射材強度及び高速原型炉高温構造設計指針 (S_R 値)⁷⁾) に及ぼす照射量の影響を示す。インパイルクリープ破断時間比は非照射材に対しては 1 以下であったが、 S_R に対しては 1 以上であった。照射量の差の影響はデータ点が少く明らかでない。今後の試験によるデータ蓄積が必要であると考えられる。

3.4 他のインパイルクリープ試験との比較

550°C における SUS 304 鋼のインパイルクリープ試験の報告は他になく、高温度域において極く少数の報告例^{8), 9)}が見られるだけである。従ってここではラルソンミラーパラメータ ($L.M.P = T (16.077 + \log t)$, ここで T : 絶対温度, t : クリープ破断時間 (h)) を用いて文献データ^{8), 9)}と比較した。Fig. 14 に LMP とインパイルクリープ破断応力の関係を示す。本実験範囲は L.M.P の小さい領域に、N.E. Hinkle⁹⁾の実験は大きい領域に、又 E.E. Bloom⁸⁾の実験は中間領域にある。3つの試験は試験温度及び中性子束、照射量が異なっているにもかかわらず、L.M.P で整理すると一つの線上に乗っているようである。又同図に示した非照射材のベストフィットカーブ⁷⁾と比較するといずれの L.M.P 領域でも強度は低いようである。しかし同図に示した照射後クリープ破断強度とはほぼ等しいようである。

3.5 インパイルクリープ試験材の外観及び金相試験

Fig. 15 にインパイルクリープ破断試験後の試験片の外観を示す。17 P 及び 18 P 試験材ともに試験片平行部は無光沢の褐色を呈していた。又試験片表面にはまだらにスケールが付着していた。試験片の破断位置は全て B ないし C 破断であったが、試験片の上部及び下部のどちら側でも破断しており、試験温度の偏熱によるものとは考えられなかった。18 P Na 5 試験片はインパイルクリープ中破断検出されなかったが、破断していた。

Fig. 16 に破断部断面の組織を示す。(1)~(3)は 17 P の Na 1 ~ Na 3 の又(4)~(6)は 18 P の Na 4 ~ Na 6 試験片の破断部近傍の断面組織である。試験応力 29.2 kg/mm^2 以上の(1)~(3)及び(5)には変形に伴う双晶が認められた。試験応力 32 kg/mm^2 以上の(1)~(3)は粒内破断が主であり、この種材料試験で通常認められるクリープ破断型態とは異なり、短時間引張試験材に類似した破断面組織を呈している。試験応力 29.2 kg/mm^2 以下の(4)~(6)は粒界破断が主でクリープ破断面に通常認められる組織を呈していた。破面より約 5 mm 離れた部分の組織は全ての試料で大きな変化は見られなかった。

Fig. 17 に破断検出端（ヨーク側）の外観を示す。A に 17 P の Na 1 ~ Na 3 破断検出端を、又 B に 18 P の Na 5 及び Na 6 破断検出端を示す。Na 1, Na 2 及び Na 5 破断検出端は黒色を呈していた。このうち Na 5 は破断検出が出来なかったものである。

Fig. 18 に 18 P Na 5 及び Na 6 破断検出端の断面の組織を示す。Na 5 及び Na 6 破断検出端表面の Rh メッキ部は残っており健全であったと考えられる。又 Rh メッキ板のヨークへの埋込み状態に異常は認められなかった。

Fig. 19 にペローの外観を示す。外観上異常は認められなかったが、いずれのペローも極くわずかに曲りが認められた。

Fig. 20 に 18 P の Na 5 及び Na 6 ペローの断面を示す。いずれの断面にも異常は認められず、試験中正常に作動していたものと考えられる。

4. 考 察

JMTR を利用し 6 本のインパイルクリープ試験を実施した。このうち 17 P Na 2 及び 18 P Na 5 試験片は以下の理由からデータとしては採用し得ないと考えられた。Na 2 試験片では試験温度が 550℃にあがらないために、試験に際し He ガス中に N ガスを混入し温度を上げた。このためベロー部分が過熱され常時 690℃になっていた。690℃はベローの使用温度範囲（600℃以下）をはるかに越えており、実荷重について評価できなかった。高温になることにより、ベロー反力が小さくなるため試験片にかかる荷重が設定値よりも過大になり短時間で破断したと考えられた。18 P Na 5 試験片では原因は明らかでないが Fig. 15 に示したように破断していたにもかかわらずインパイルクリープ中破断検出が出来なかった。

17 P Na 3 試験片のクリープ破断時間は目標破断時間を 3 倍以上越えており、Fig. 12 及び Fig. 14 に示すように他の試験データから著しく偏寄していた。Na 3 試験片の破断は JMTR 43 サイクル運転開始と同時に検出されたが、Na 5 試験片で破断検出出来なかったことから考えて Na 3 試験片でも 42 サイクル中に破断したが何らかの原因により検出出来なかった可能性もあり、今後計画中のインパイルクリープ試験結果から再度評価する必要があると考えられる。破断検出端は酸化、その他の変質を防ぐために表面に Rh メッキを施していたが、表面観察によると Fig. 17 に示したように変質が認められた。変質の原因は明らかでないが、この変質が破断検出が出来なかった一因になっている可能性もあり次に予定しているインパイルクリープ試験においては試験中の経過がわかるよう破断検出機能とともにクリープひずみ測定機能を併用する予定である。

今回実験したインパイルクリープ破断強度は Fig. 12 に示したように非照射材のベストフィット値よりも低く、 $4.67 \sim 5.42 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (> 0.1 \text{ MeV})$ 照射後クリープ破断強度とほぼ等しかった。E.E. Bloom⁸⁾によるとインパイルクリープ破断強度は非照射材に比較し低いが、照射後クリープ破断強度とほぼ等しい結果を得ており、本実験結果を支持するものと考えられる。一方 N.E. Hinkle⁹⁾は 704℃～871℃での内圧式インパイルクリープ試験において非照射材とほぼ等しい結果を得ており、本試験結果の傾向と一部で合致するが、一部で相反する。クリープ破断強度は材料、照射条件に影響されると考えられ、3つの報告において必ずしも一致した見解は得られないようである。本実験において、インパイルクリープ破断強度は $4.67 \sim 5.42 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 照射後クリープ破断強度とほぼ等しい結果が得られたが照射量が異なることから直ちに照射後クリープとインパイルクリープ破断強度が等しいという結論は得られない。今後インパイルクリープ試験データを蓄積し、照射後試験データとの相関性を検討し、照射効果をより正確に評価して行く必要があると考えられる。

5. ま と め

JMTR の J-12 孔を用いて、SUS 304 鋼の 550 °C における インパイルクリープ破断試験を実施し、以下の結果が得られた。

- 1) インパイルクリープ破断時間 321.5 h, 照射量 $5.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ までのデータ 4 点が得られた。
- 2) 実験範囲内でインパイルクリープ破断強度は $4.67 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.1 \text{ MeV}$) 照射後のクリープ破断強度とほぼ等しかったが、両者で照射量が異なることから直ちに照射効果が等しいとは断定できない。
- 3) 今回短時間側のインパイルクリープ破断強度が得られたが、さらに長時間側のデータを蓄積し、照射効果を評価して行く必要があると考えられる。
- 4) 今回の実験で、破断検出システムが作動しなかったものもあり、インパイルクリープ試験を実施する上でさらに破断検出機構の再検討が必要である。特に試験中挙動が監視できるシステムとしてクリープひずみ測定機構等を組み込む必要があると考えられる。

6. 謝 辞

本実験を実施するに当たり、FBR 本部厚母栄夫氏を始め関連各部門で御協力頂いた各氏に厚く謝意を表します。

7. 参 考 文 献

- 1) 鈴木和久, 他。高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験, 第2報 長時間強度試験,
PNC SN 941 79-21, (1979)
- 2) 榊原瑞夫, 他, 「常陽」サーベイランスバックアップ試験, 第2報 JMTR 照射 炉容器
材及び溶接継手の高温疲れ並びにクリープ破断試験 (74 M-16), 動燃団報告, PNC SN
941 80-118, (1980)
- 3) 榊原瑞夫, 他, 「常陽」サーベイランスバックアップ試験, 第3報 JMTR 照射 炉容器
材及び溶接継手の高温疲れ並びにクリープ破断試験 (74 M-11 P), 動燃団報告, PNC
SN 941 80-143, (1980)
- 4) E.R. Gilbert and A.J. Lovell, Temperature dependence of in-reactor
creep of 20 % cold worked 316 stainless steel, P.269 in "Radiation
Effects in Breeder Reactor Structural Materials" Scottsdale, 1977
- 5) 鈴木和久, 他, インパイルクリープ炉外試験, 動燃団報告, PNC SN 941 77-23
(1977)
- 6) 鈴木和久, 他, 「常陽」サーベイランス確認試験, 第4報 炉容器材の長時間強度試験, 動
燃団報告, PNC ZN 941 77-140, (1977)
- 7) 高速原型炉高温設計指針, 材料強度基準 (案), 動燃団報告, (1980.9)
- 8) E.E. Bloom, In-reactor and post irradiation creep rupture properties
of Type 304 stainless steel at 650 °C, ORNL-TM-2130, March, (1968)
- 9) N.E. Hinkle, Effect of neutron bombardment on stress rupture proper-
ties of some structural alloys, ASTM STP341, P344, (1962)

Table 1 Mill sheet of test specimen

	Chemical composition (wt%)									Tensile				Hardness (VHN)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	B	YS (kg/mm ²)	UTS (kg/mm ²)	Elongation (%)	R.A. (%)	
Spec.	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00~ 10.50	18.00~ 20.00	≤0.25	—	≥21.0	≥53.0	≥40.0	—	≤187
Mill analysis	0.07	0.65	1.63	0.026	0.004	9.01	18.34	0.23	—	22.0	57.0	67.8	72.8	134
Check analysis	0.069	0.64	1.68	0.026	0.005	8.87	18.77	0.23	0.0004					

Table 2 Results of in-reactor creep rupture test

Project No	Test piece No	Applied stress (kg/mm ²)	Expected rupture time (h)	Rupture time (h)	Fluence(n/cm ²)(>0.1MeV)		Gap of detector (mm)	Bellows temperature (°C)	
					Before test	Under test			
75M-17P	No.1	38.0~38.1	30	5.2	$\sim 6 \times 10^{19}$	$\sim 0.7 \times 10^{18}$	7.35	500	
	No.2	32.1	200	0.8	$\sim 1.2 \times 10^{20}$	$\sim 1.1 \times 10^{17}$	7.40	690*	* Over heated
	No.3	34.1~34.2	100	357	0	$\sim 6 \times 10^{19}$	5.80	440	
75M-18P	No.4	27.4~27.5	900	162	0	$\sim 2.8 \times 10^{19}$	8.05	415	
	No.5	29.2~29.4	500	*			7.20	580	* Not detected of rupture
	No.6	25.4~25.6	2000	321.5	0	$\sim 5.4 \times 10^{19}$	6.60	550	

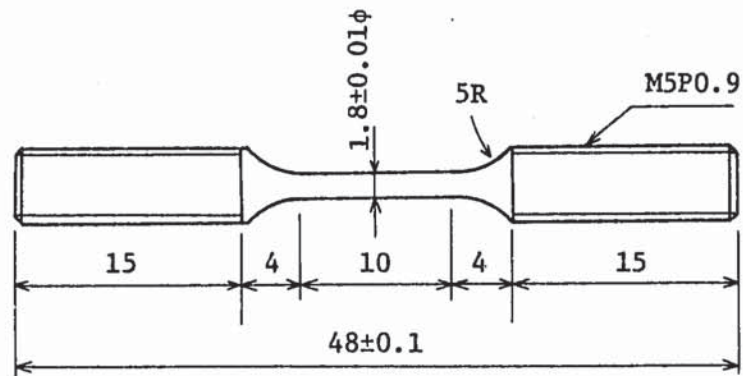


Fig. 1 Profile of specimen

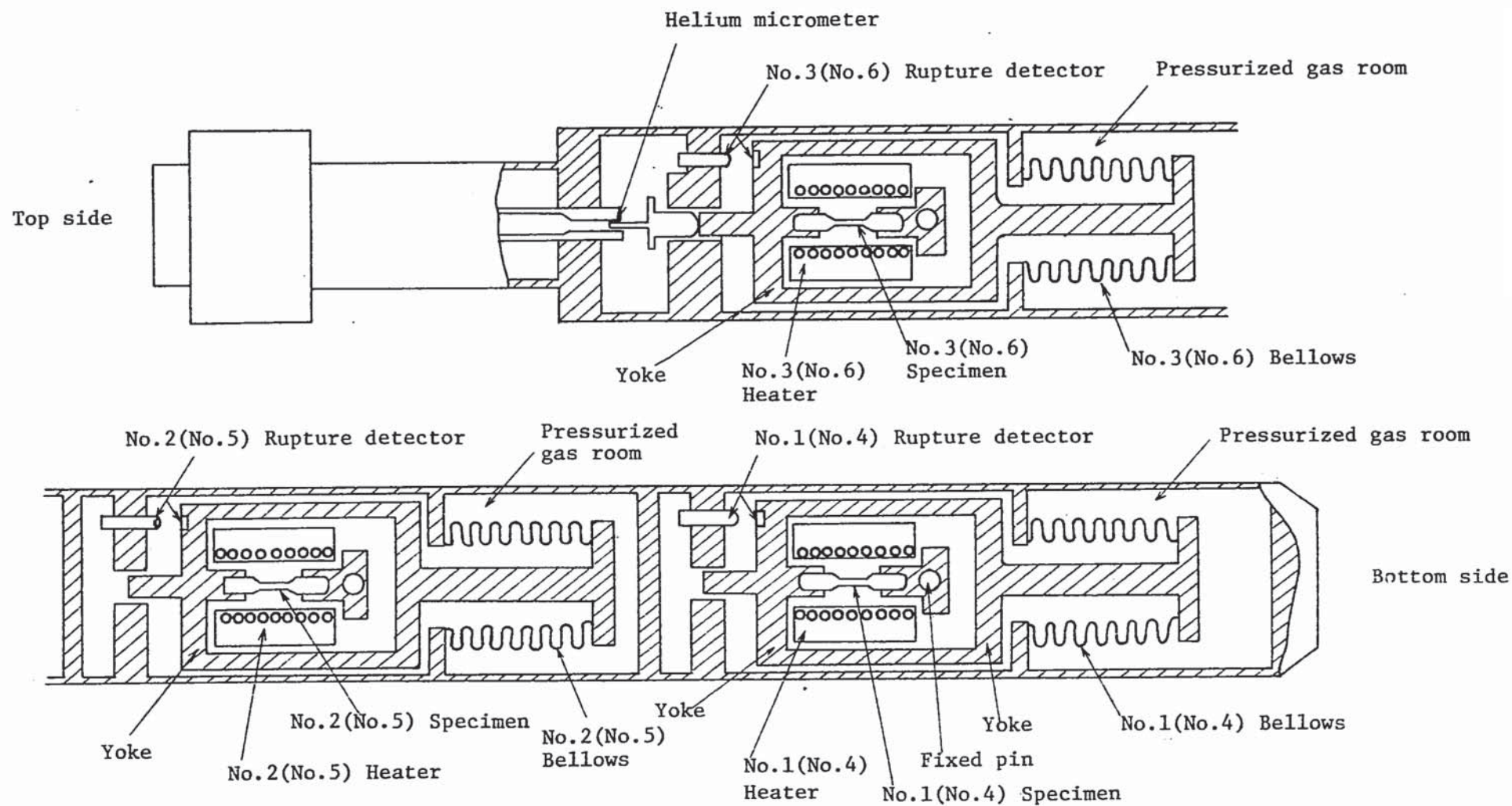
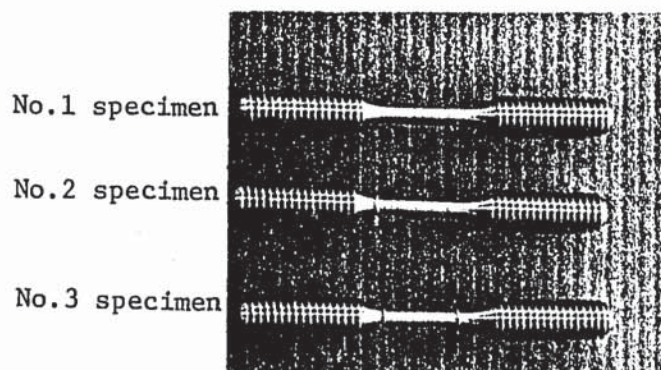
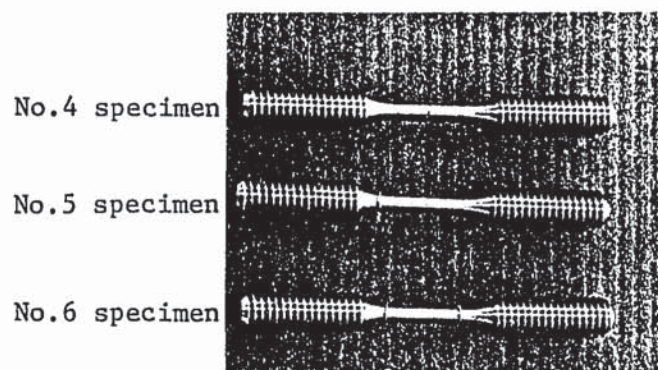


Fig. 2 Capsule

(): for 18P capsule



A. For 17P capsule



B. For 18P capsule

Fig. 3 View of specimens before test.

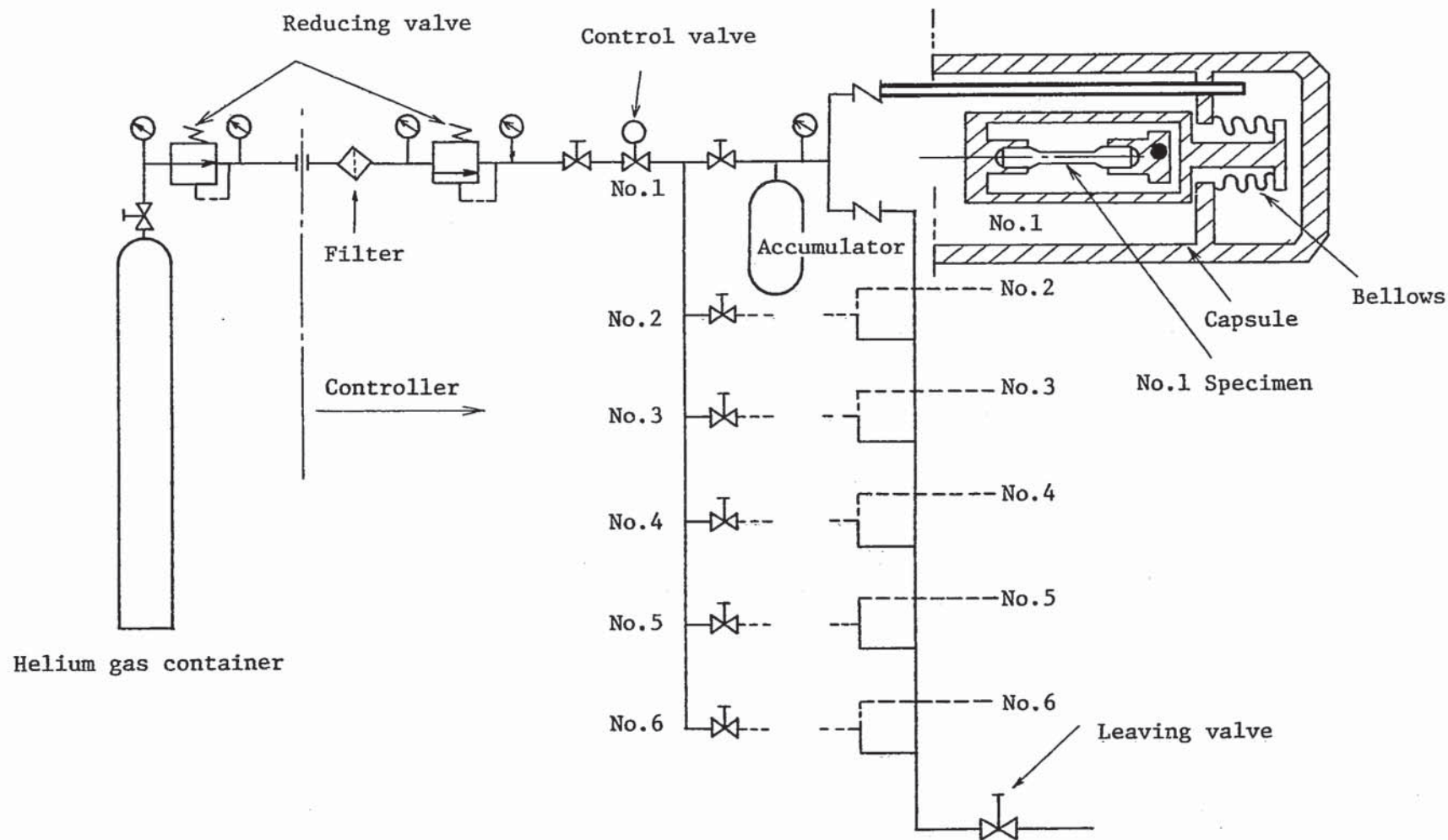


Fig. 4 Flow diagram of pressurizing system

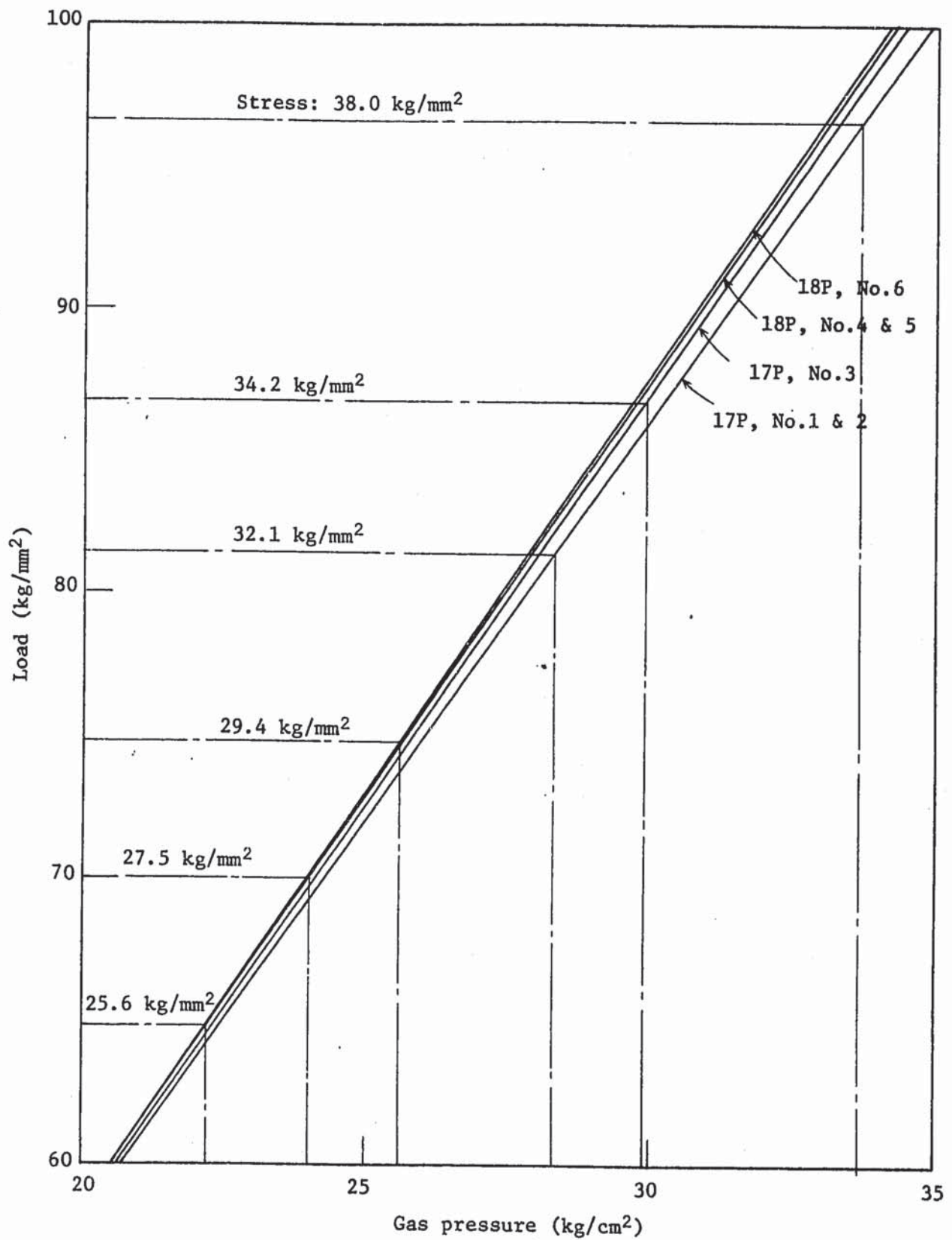


Fig. 5 Relation between load and gas pressure in bellows

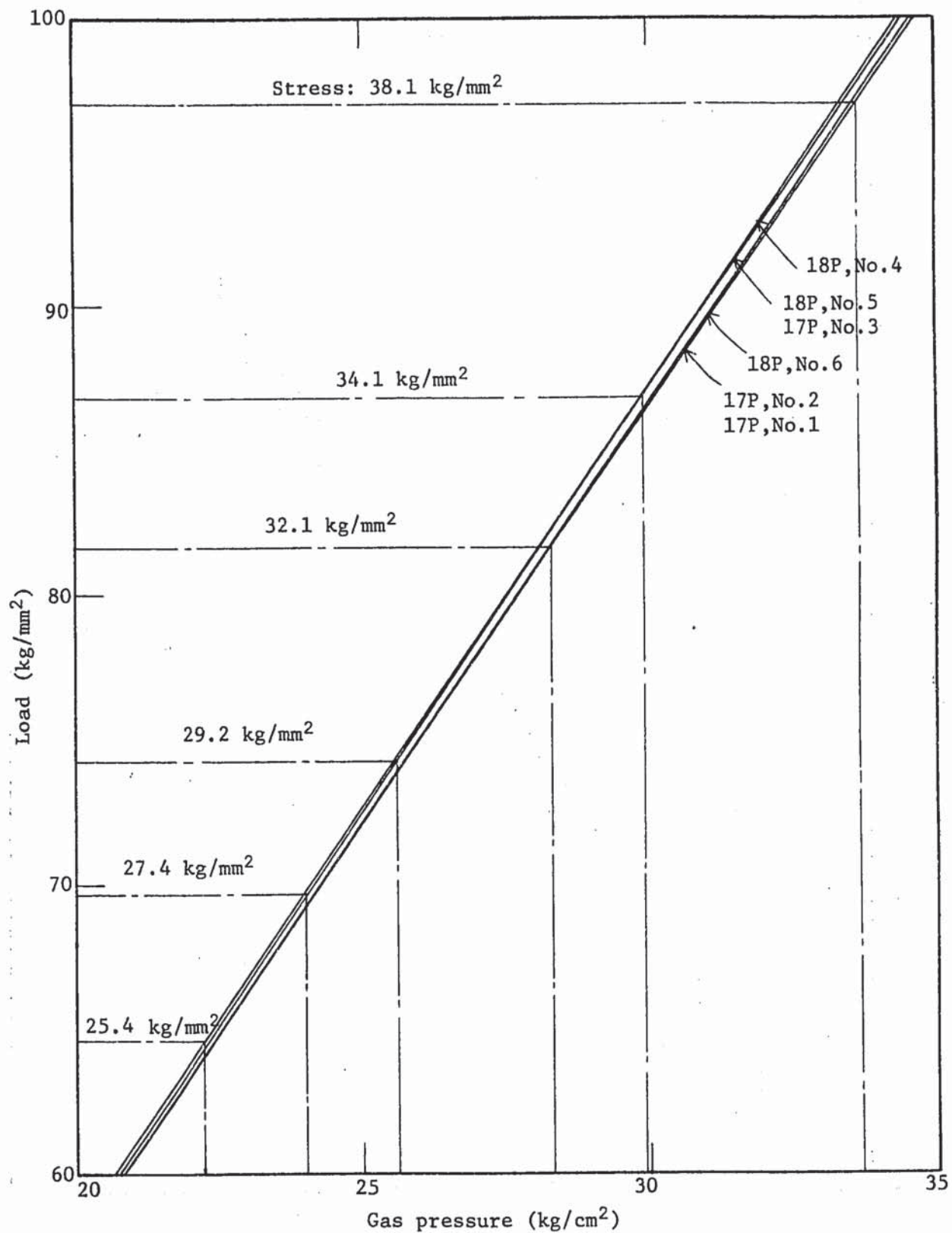


Fig. 6 Relation between load and gas pressure in bellows elongated 1 mm.

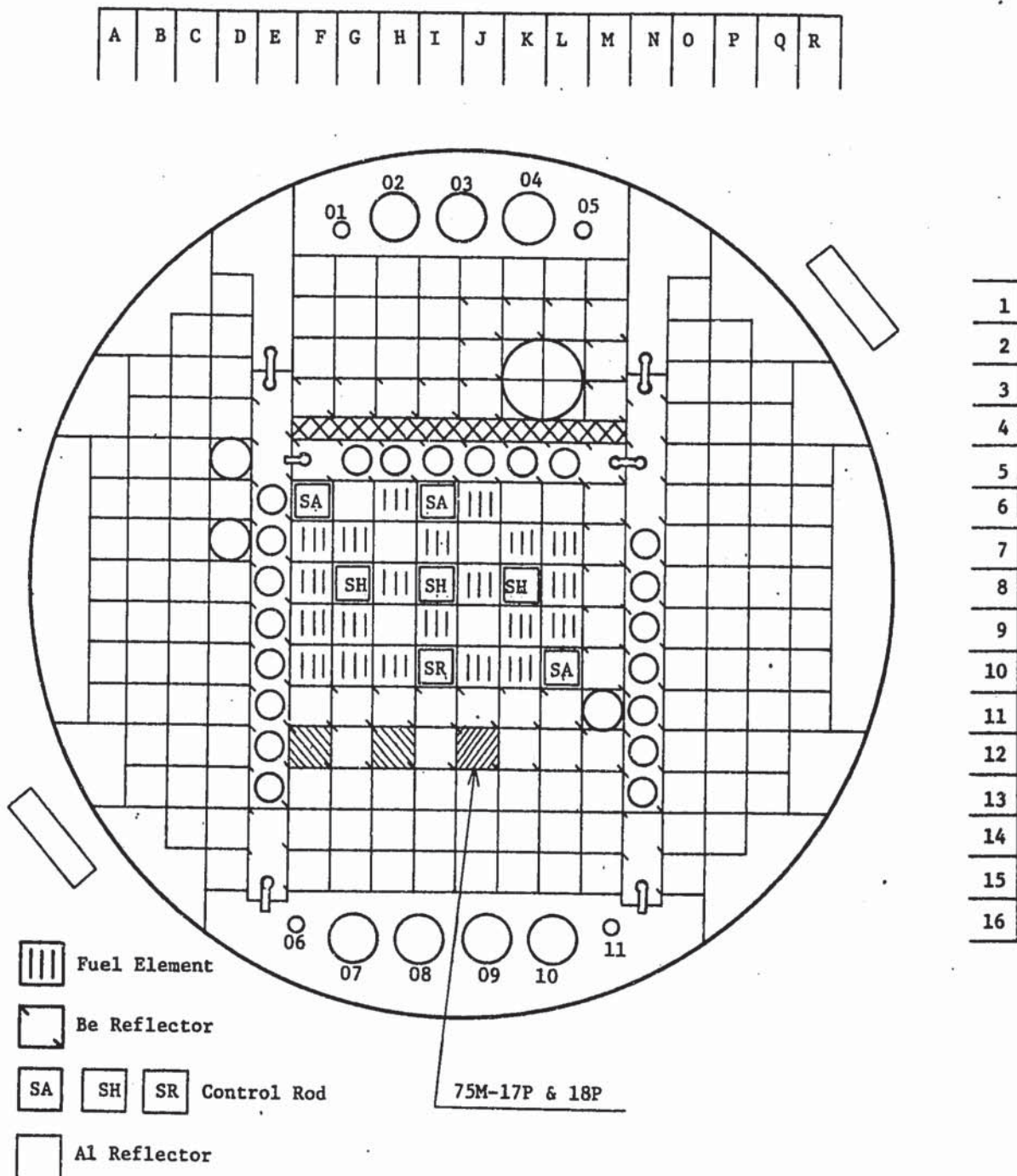


Fig. 7 Irradiation position in JMTR core

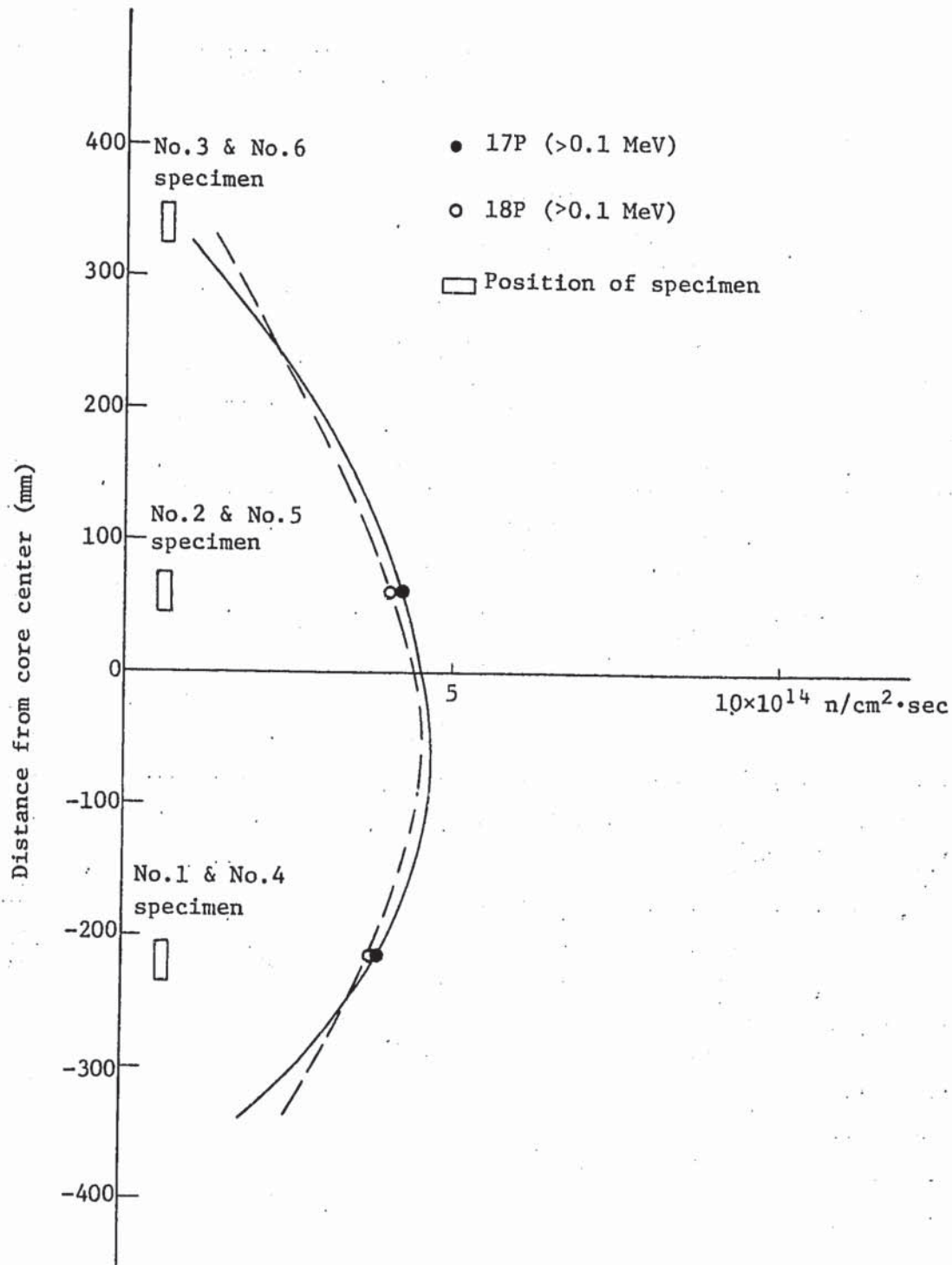


Fig. 8 Distribution of fast neutron flux (>0.1 MeV) and the positions of test specimens

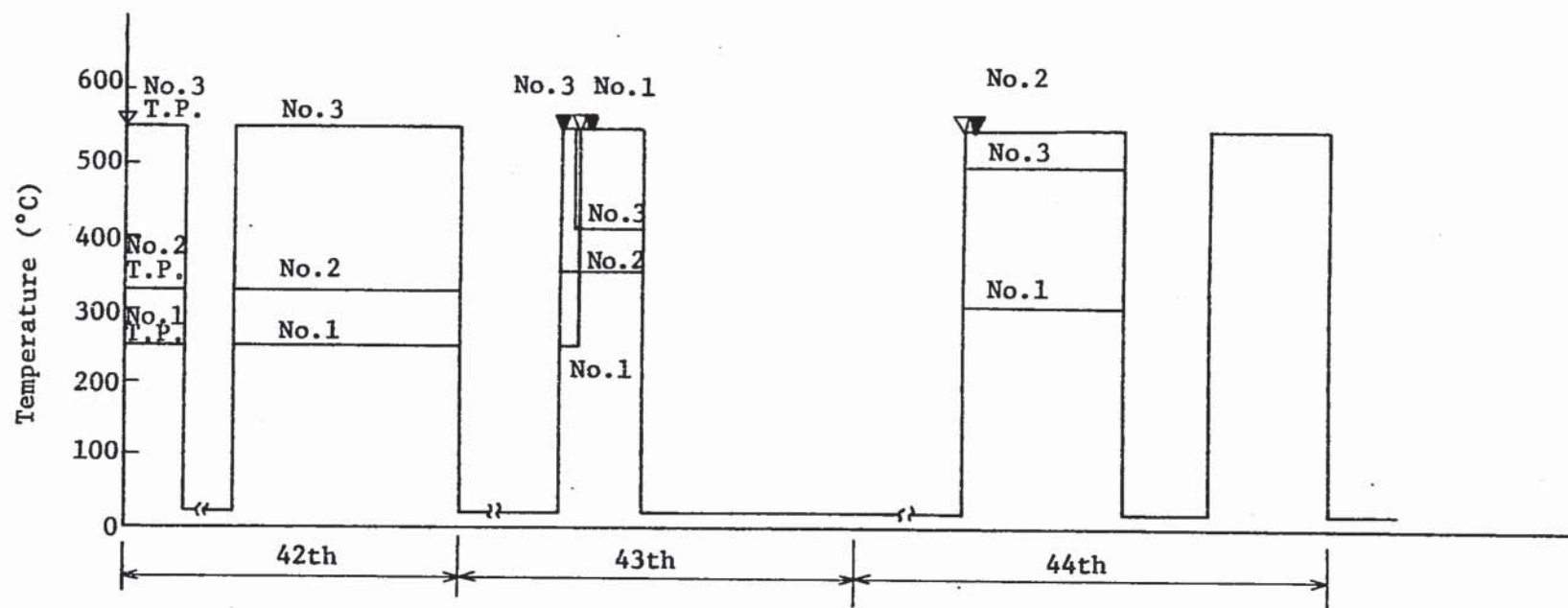


Fig. 9 Thermal histories of test specimens of 75M-17P during in-reactor creep

▽ Starting point of test

▼ Ruptured point

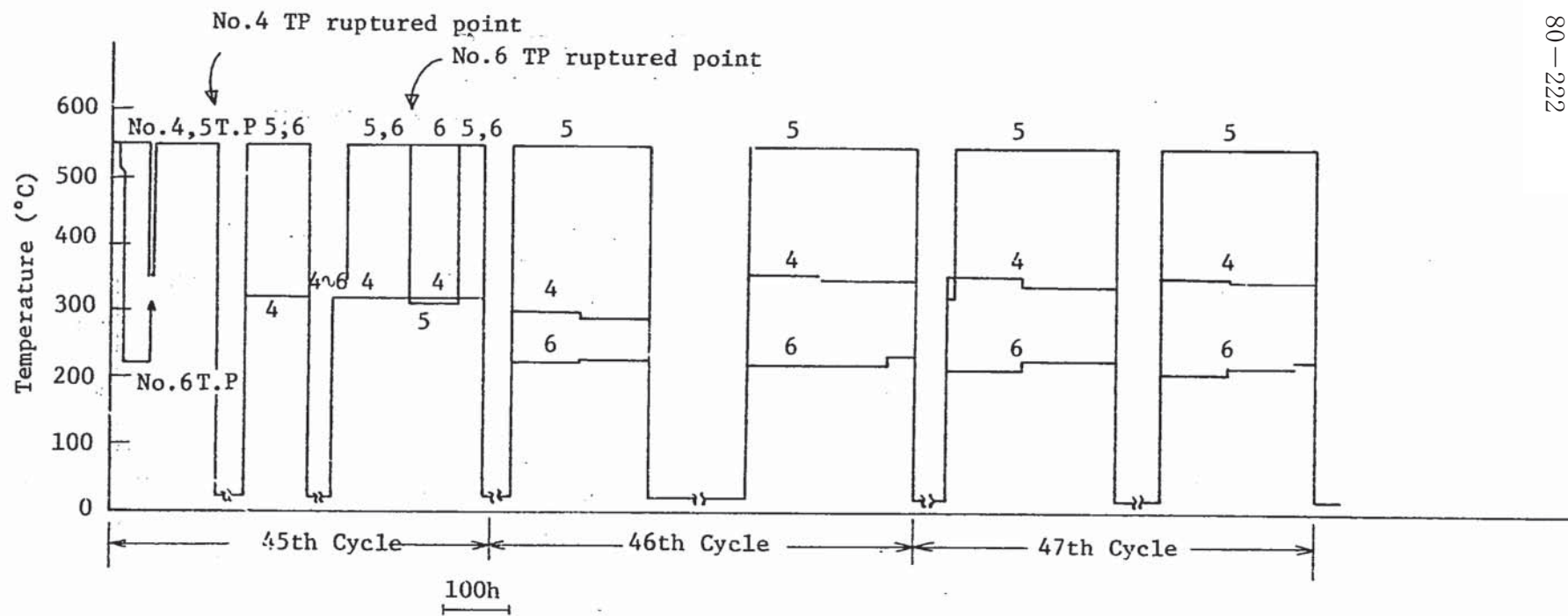


Fig. 10 Thermal histories of test specimens of 75M-18P during in-reactor creep

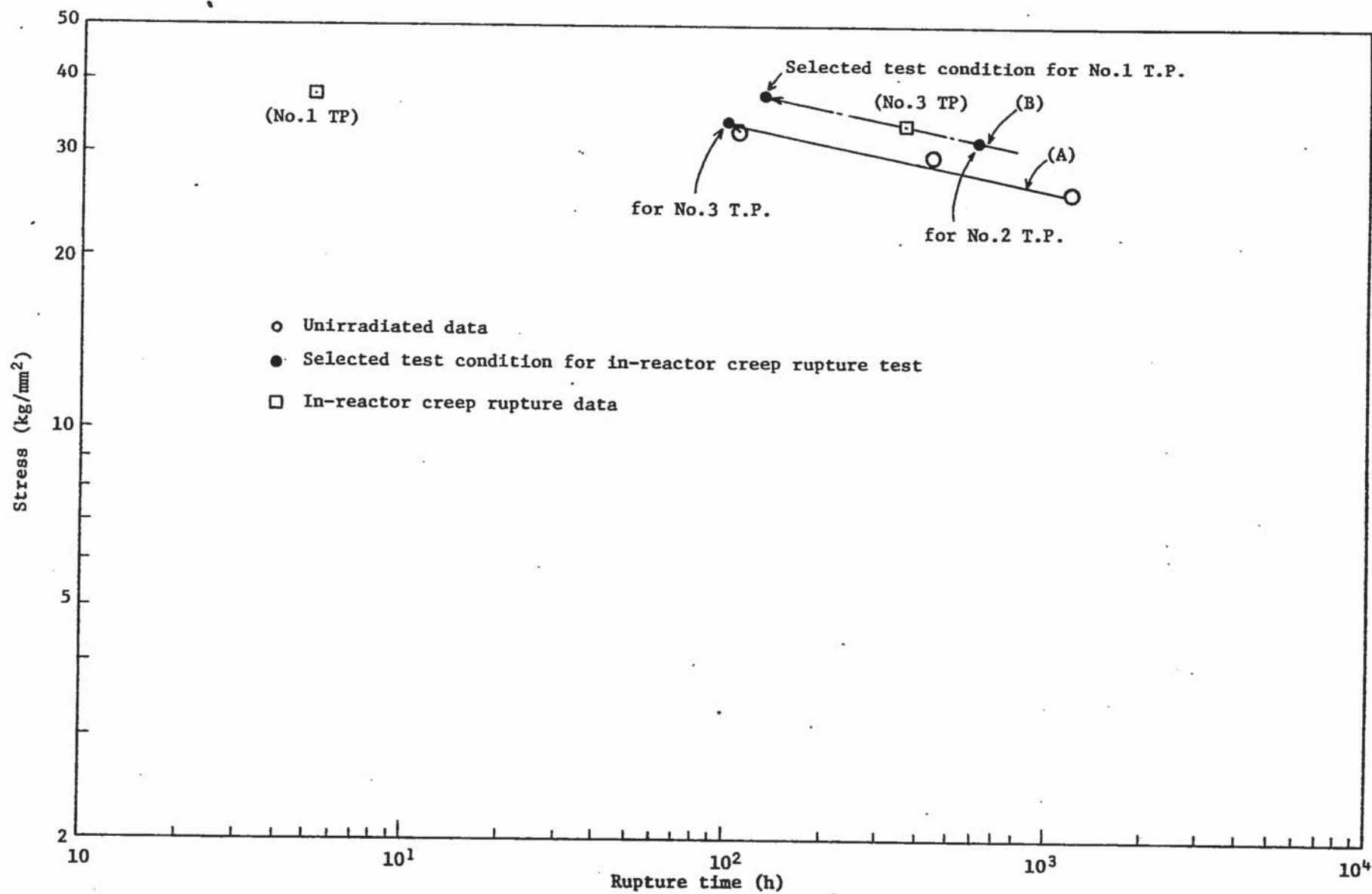


Fig. 11 Selecting procedure of test conditions for No.1 ~ No.3 specimens

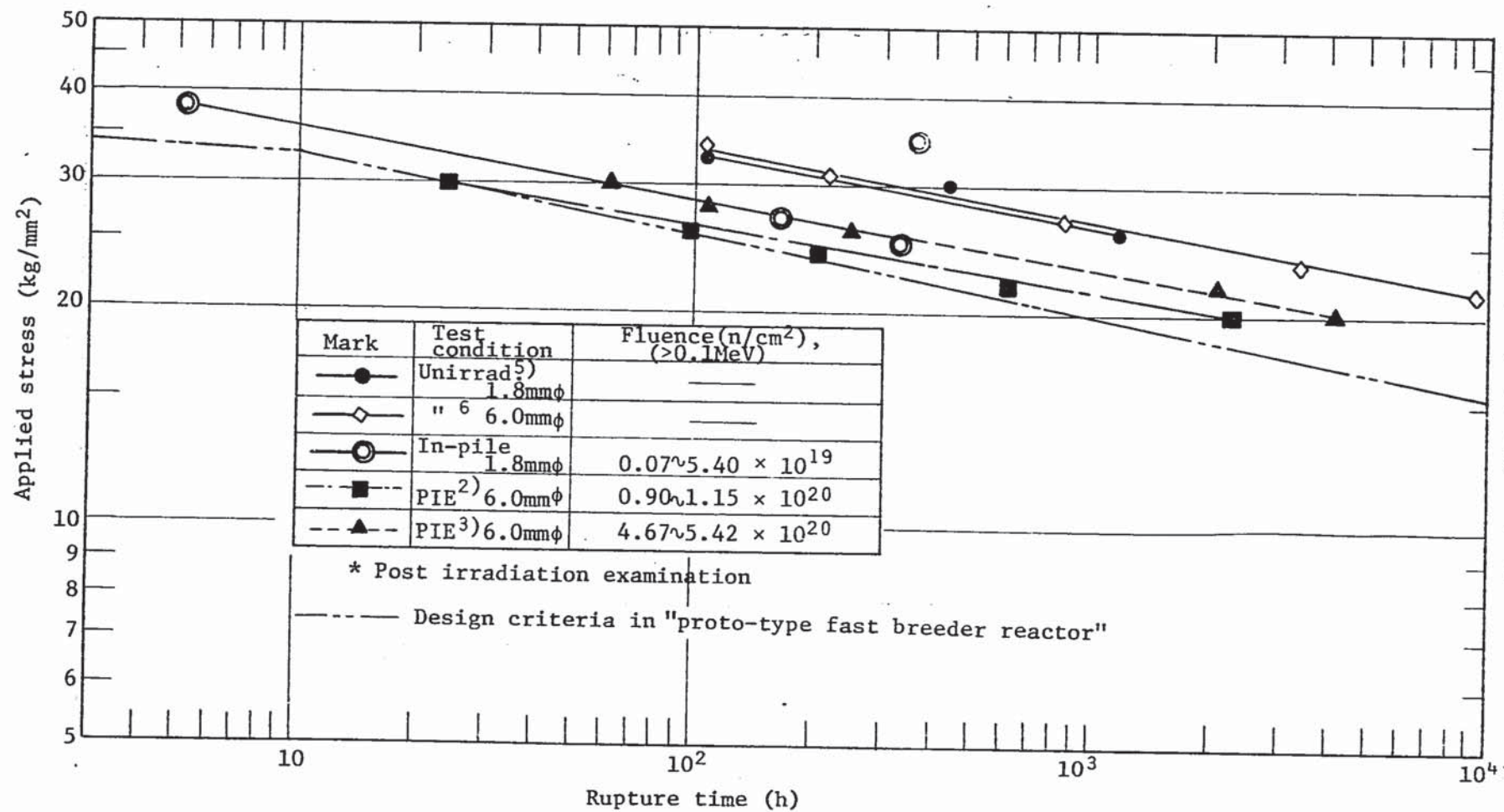


Fig. 12 Creep rupture curve of Type SUS 304 base metal at 550 °C

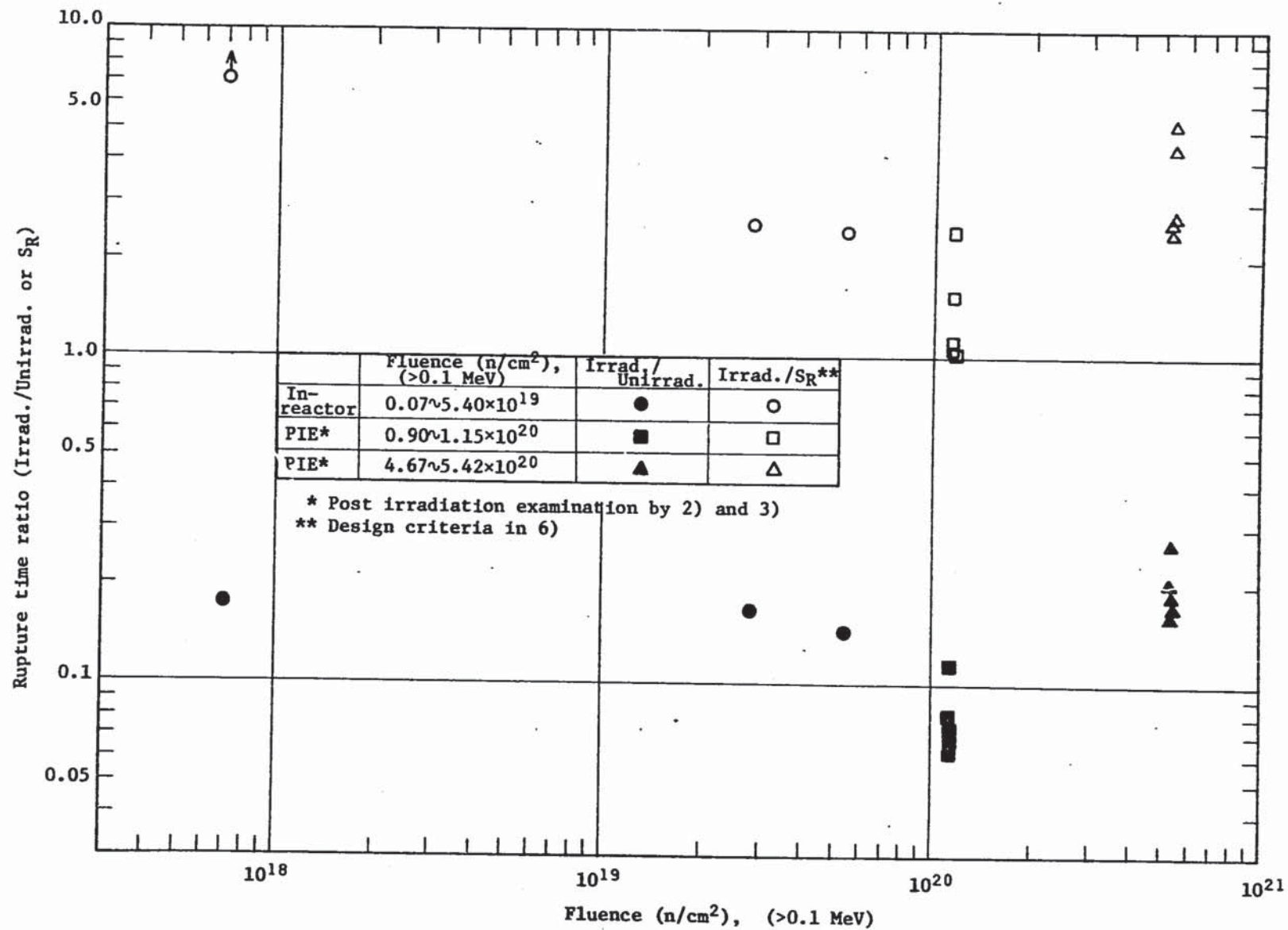


Fig. 13 Creep rupture time ratio at 550°C as a function of fluence

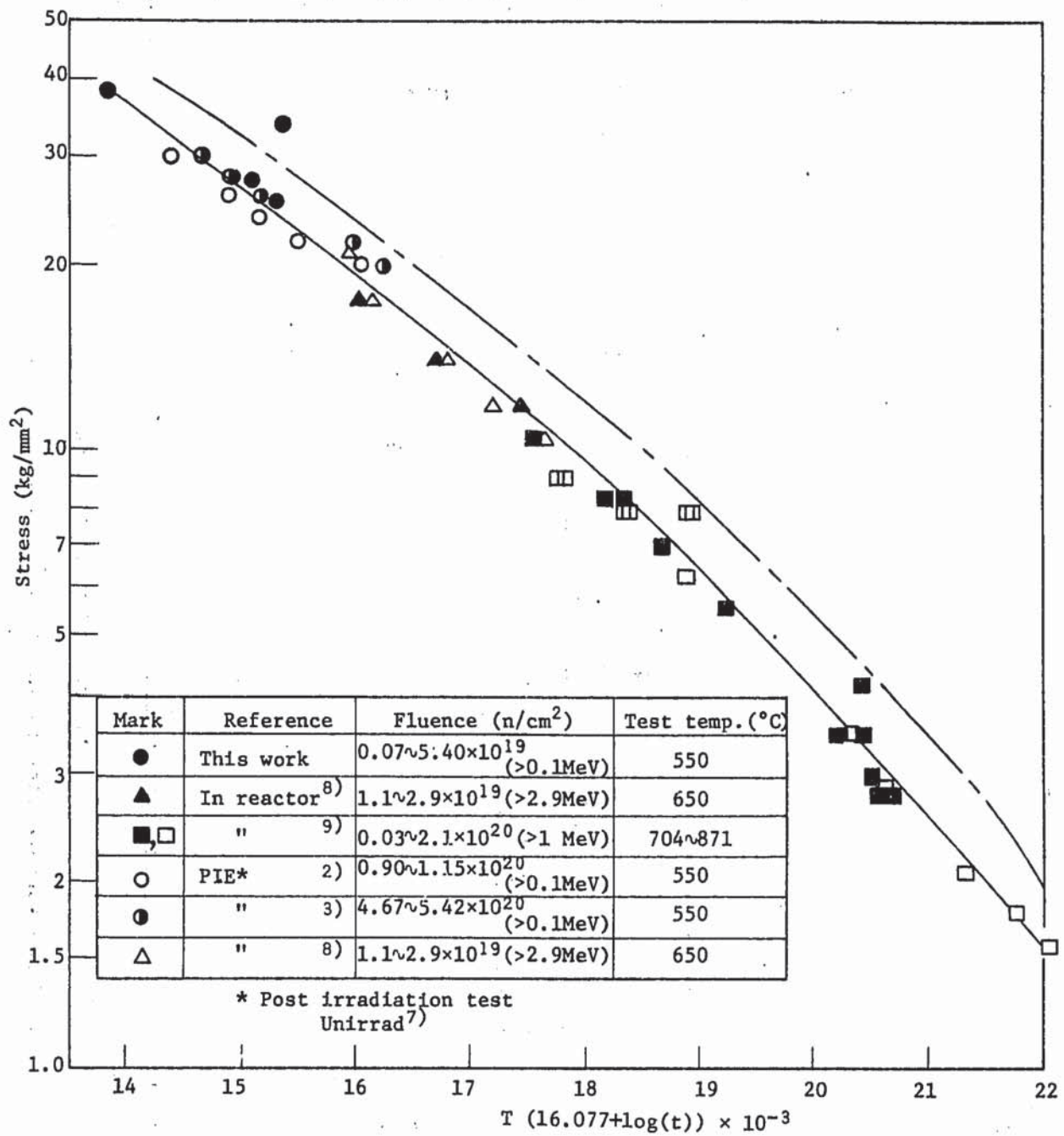
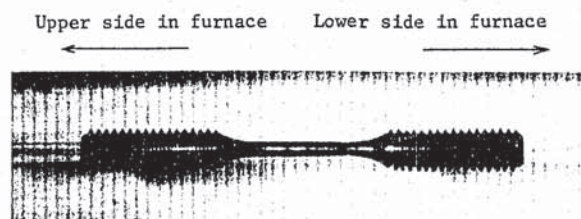


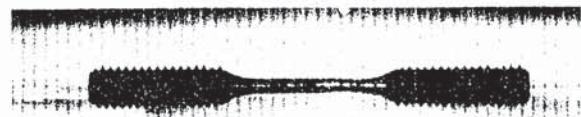
Fig. 14 Creep rupture properties of Type 304 as a function of Larson-Miller's parameter



No.3 specimen (Top part in core)



No.2 specimen (Middle part in core)

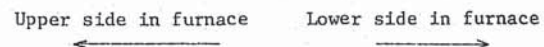


No.1 specimen (Bottom part in core)

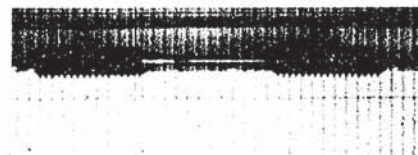
240 250 260



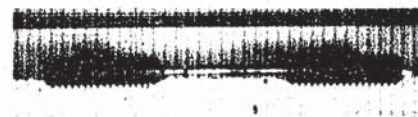
Specimens in 17P capsule



No.6 specimen (Top part in core)



No.5 specimen (Middle part in core)



No.4 specimen (Bottom side in core)



Fig. 15 View of specimens after in-reactor creep rupture test.

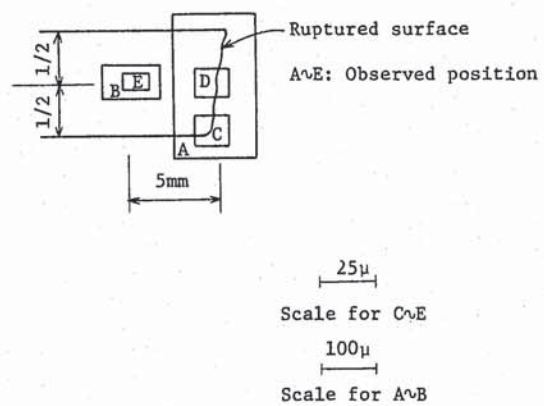
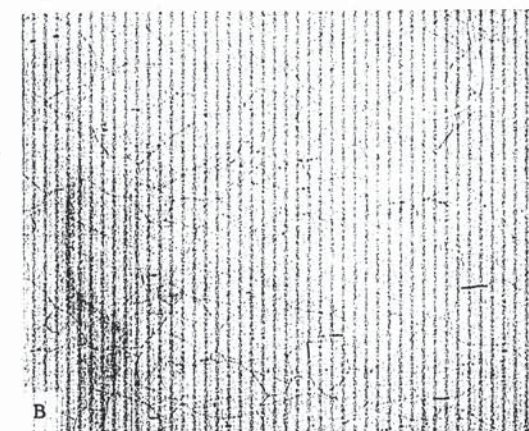
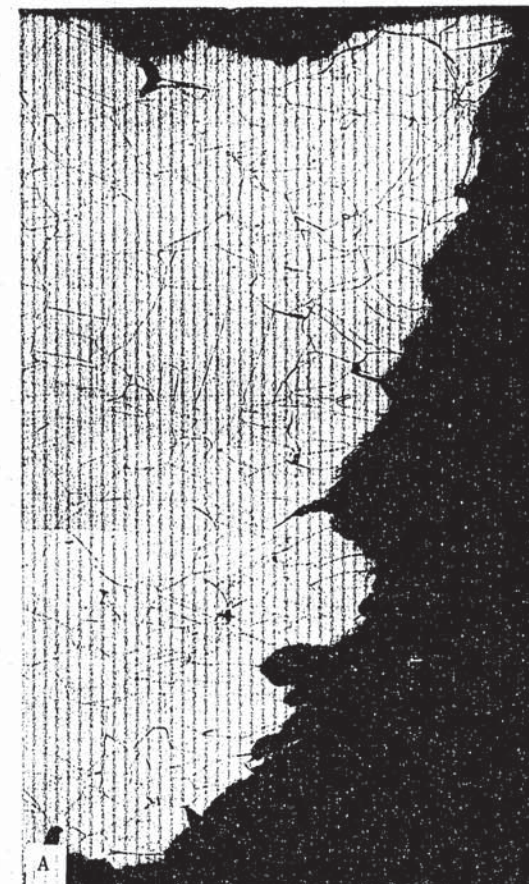
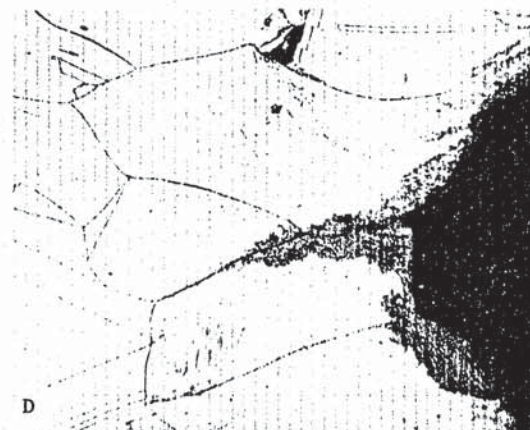


Fig.16-(1) Micrograph of cross section of No.1 specimen ruptured in 17P



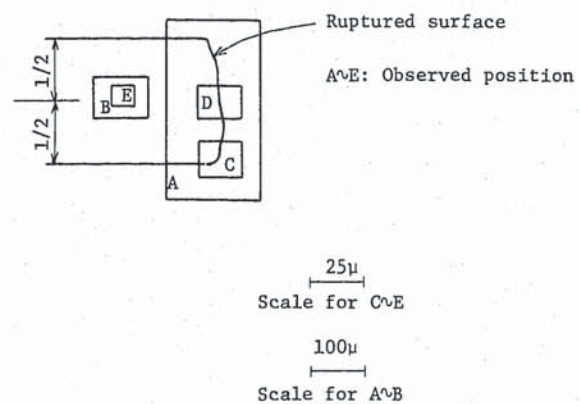
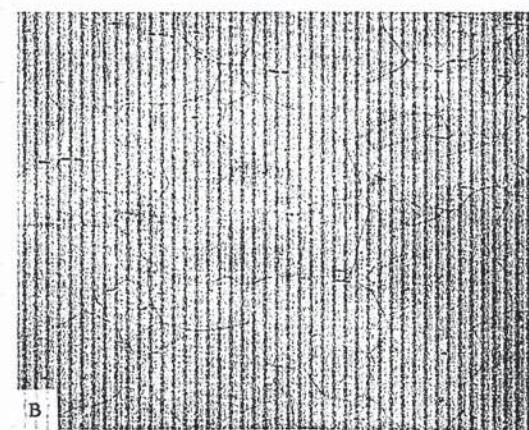
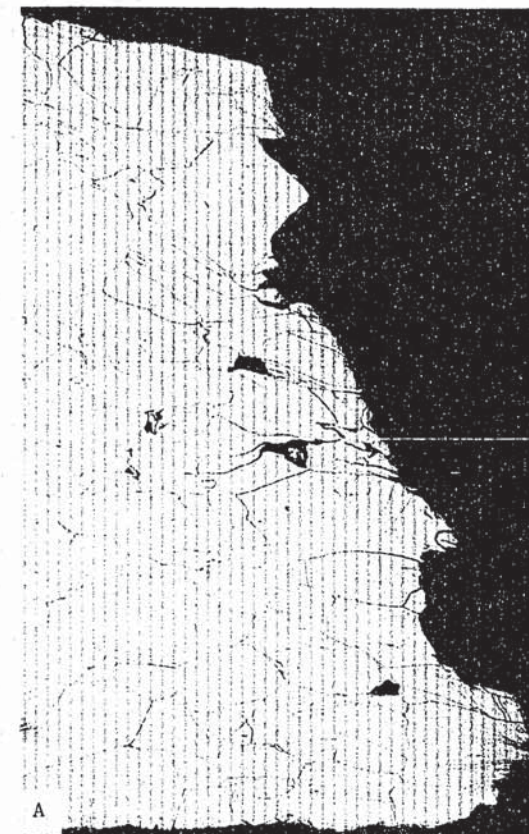
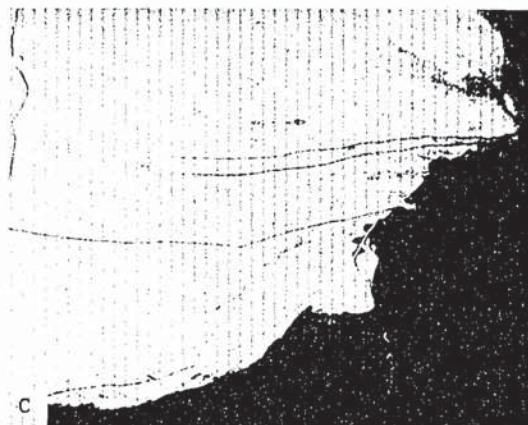
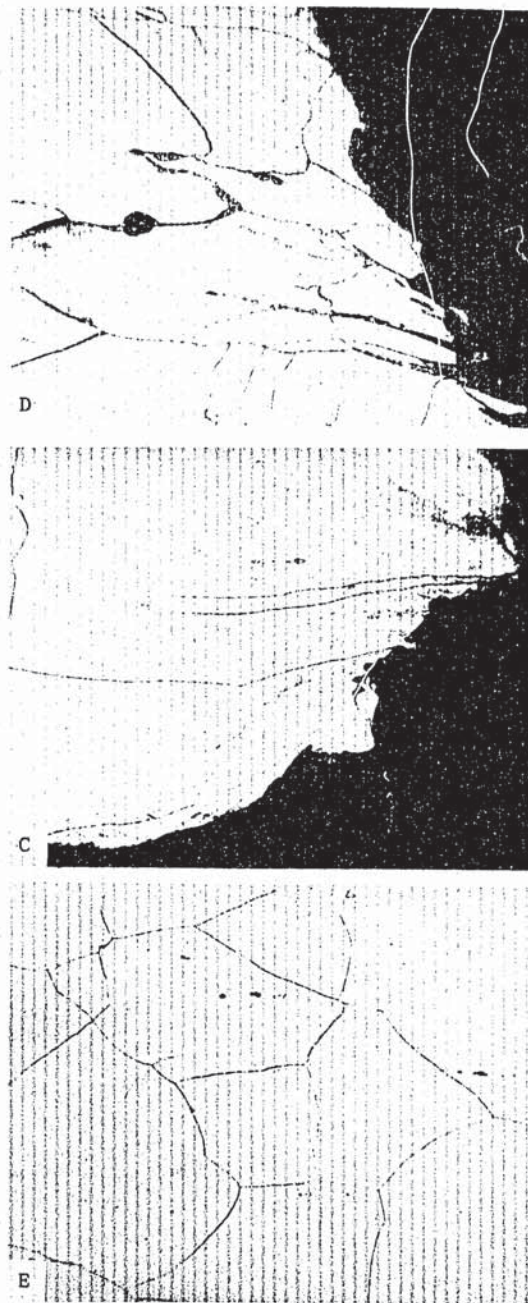
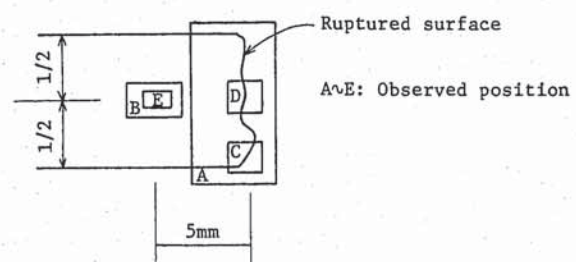


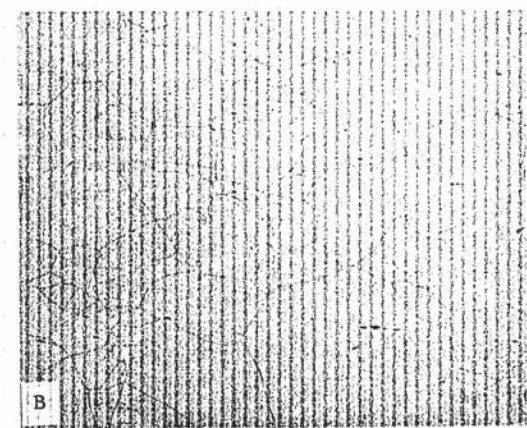
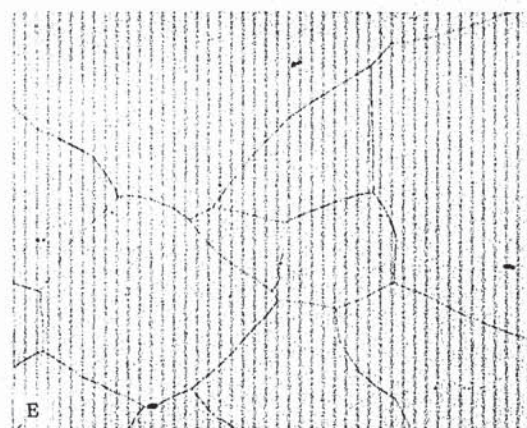
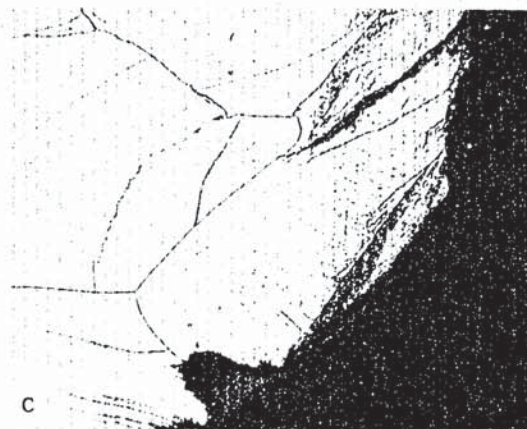
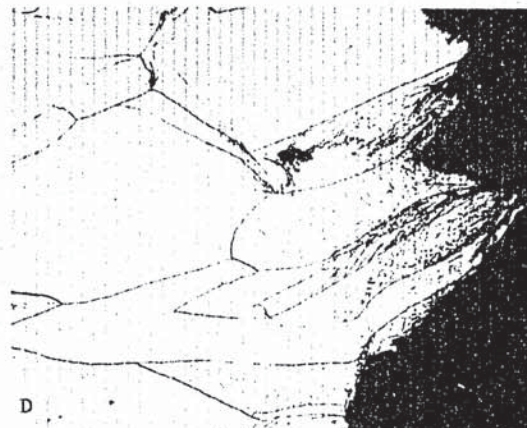
Fig.16-(2) Micrograph of cross section of No.2 specimen ruptured in 17P





25 μ
Scale for C~E
100 μ
Scale for A~B

Fig.16-(3) Micrograph of cross section of No.3 specimen ruptured in 17P



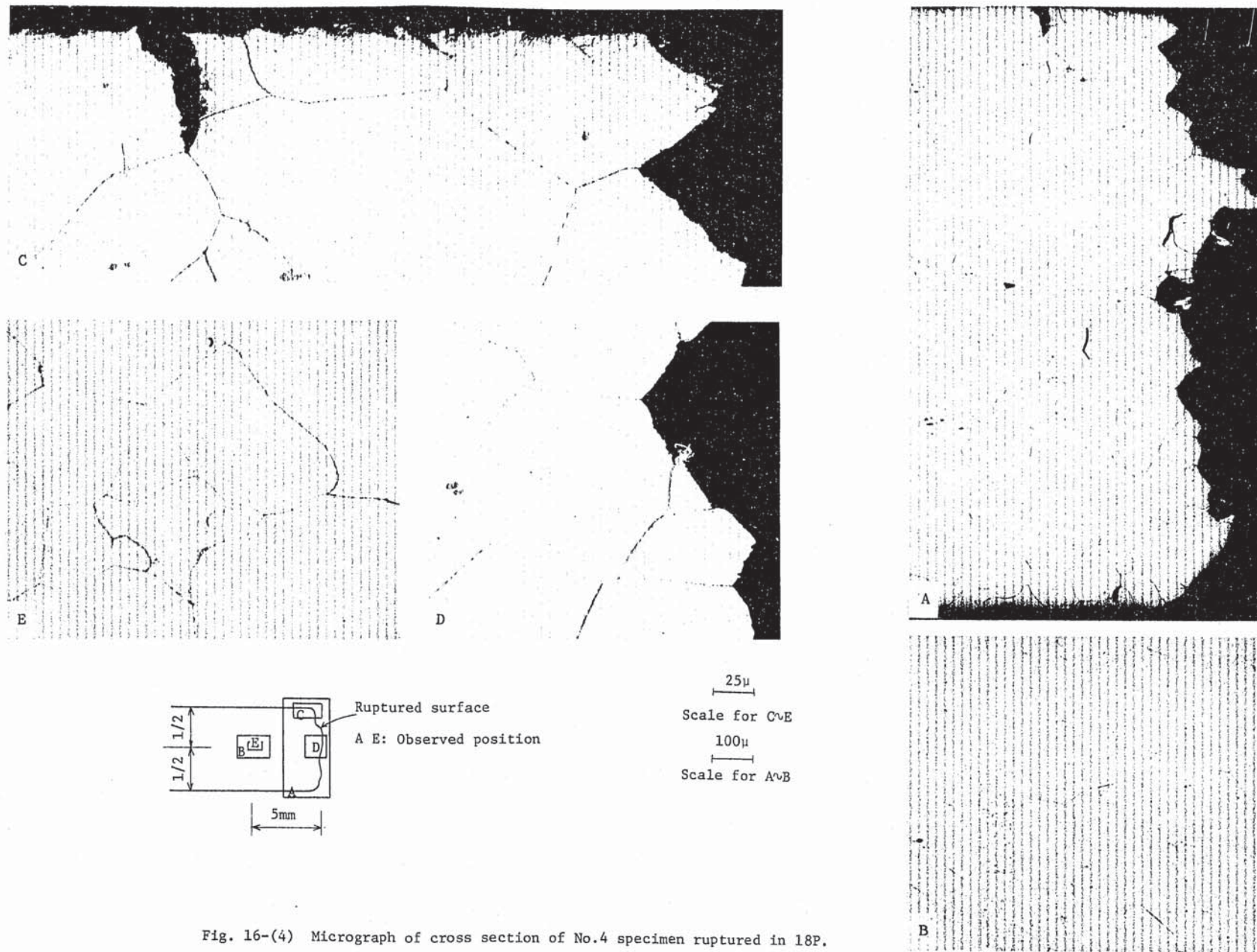
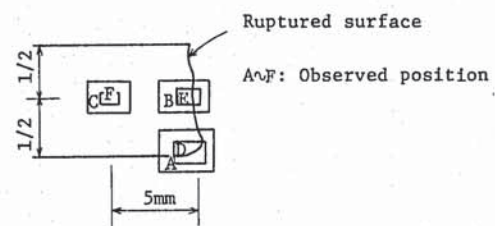


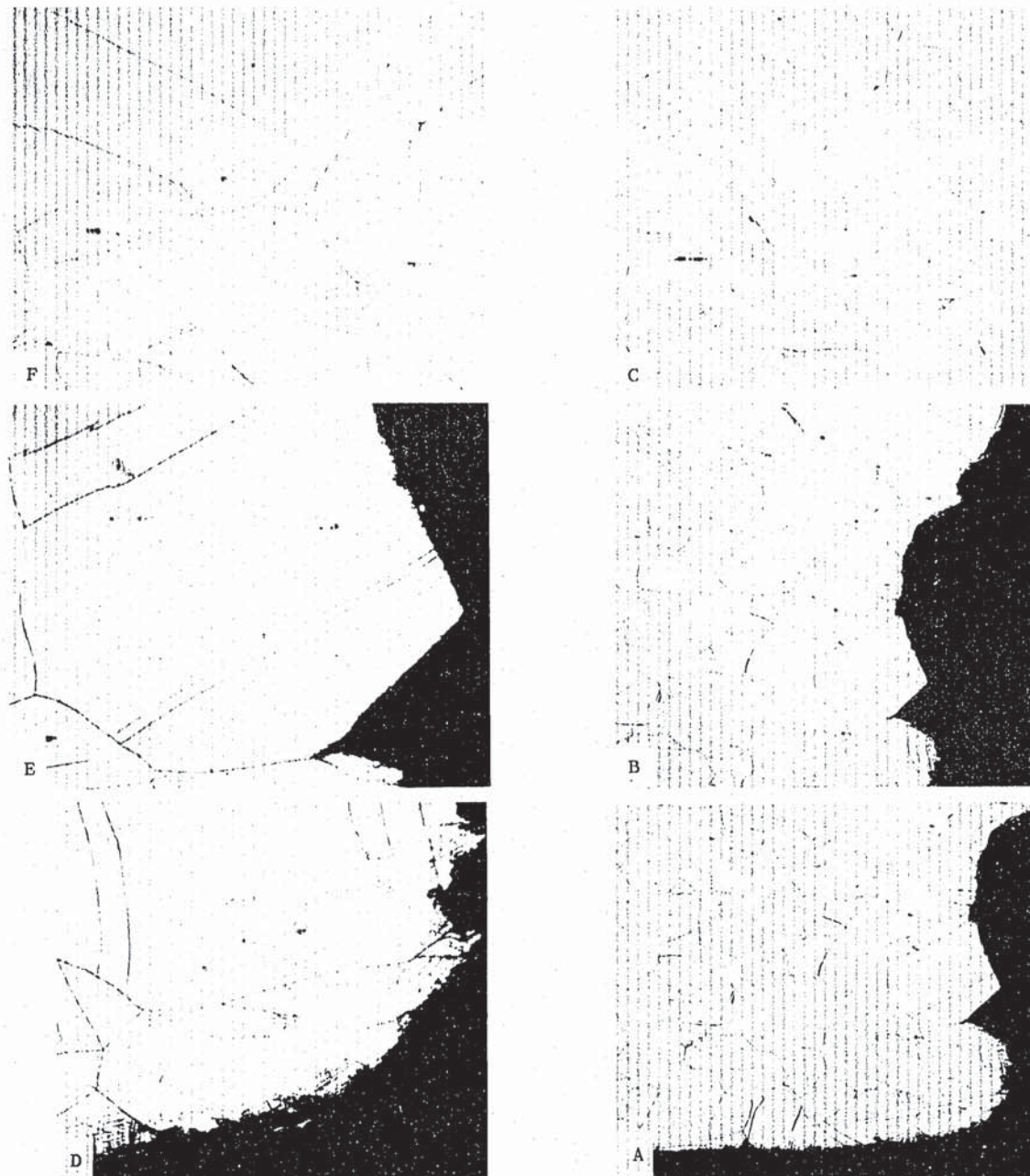
Fig. 16-(4) Micrograph of cross section of No.4 specimen ruptured in 18P.



25μ
Scale for D~F

100μ
Scale for A~C

Fig.16-(5) Micrograph of cross section of No.5 specimen ruptured in.18P



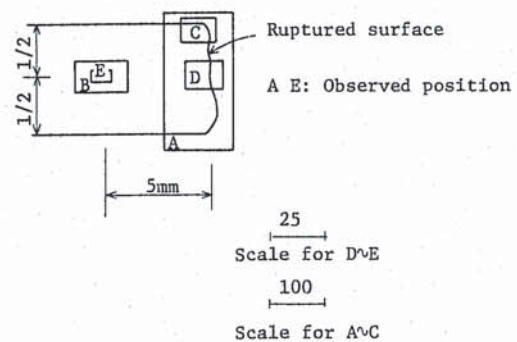
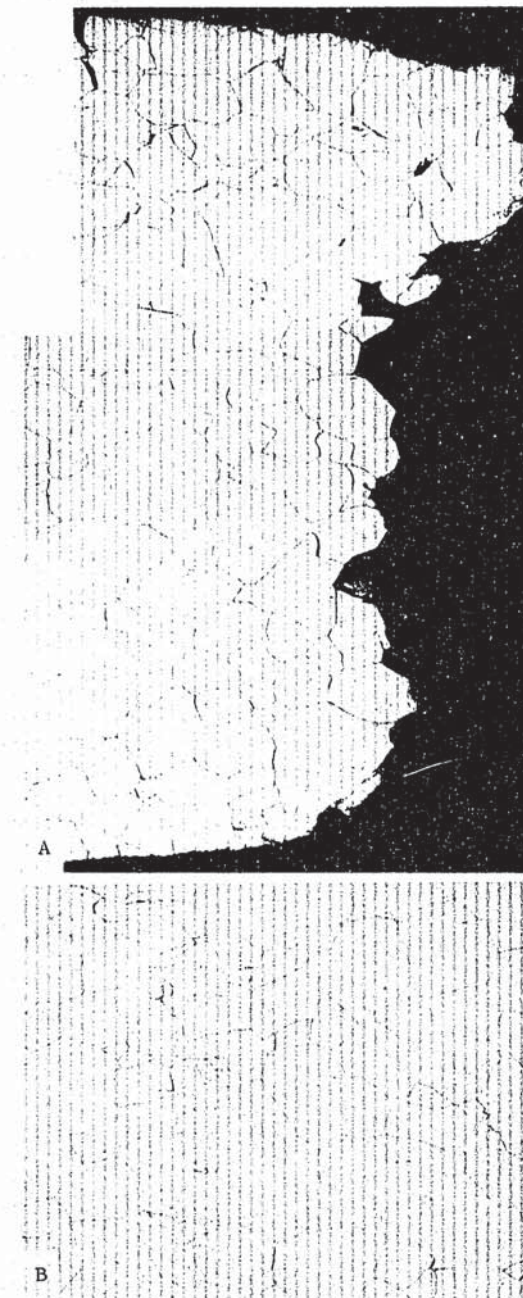
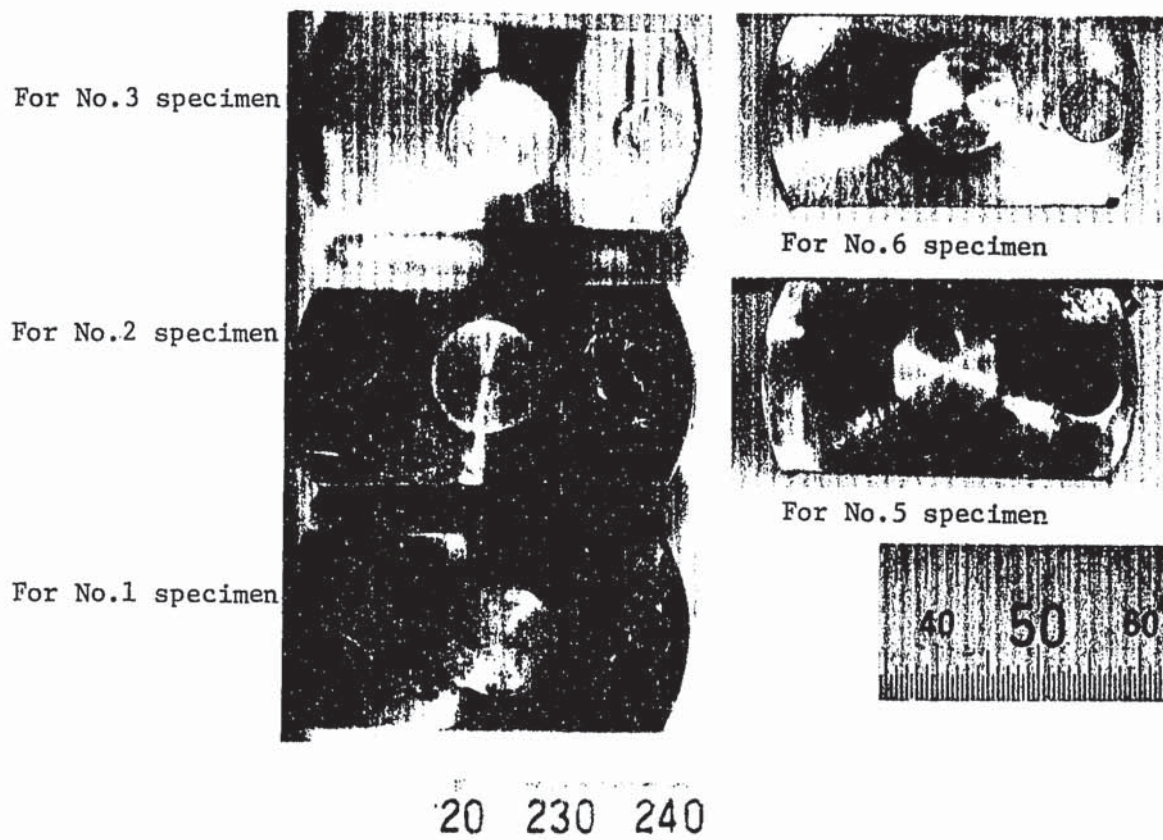


Fig.16-(6) Micrograph of cross section of No.6 specimen ruptured in 18P

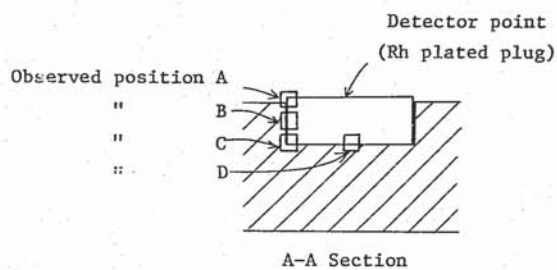
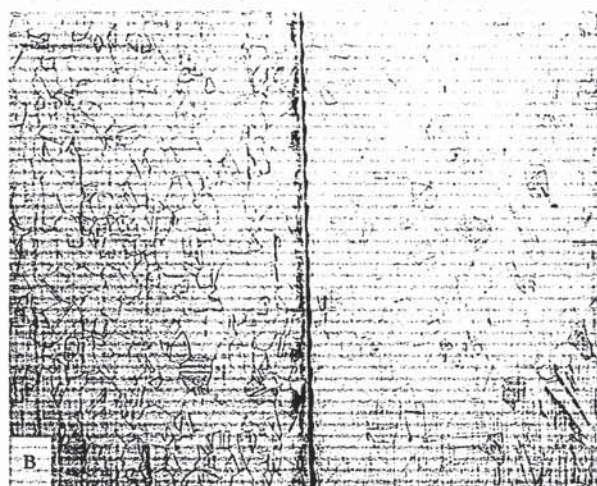
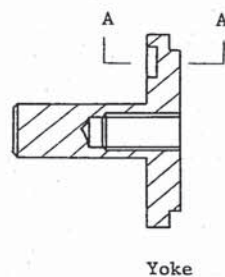
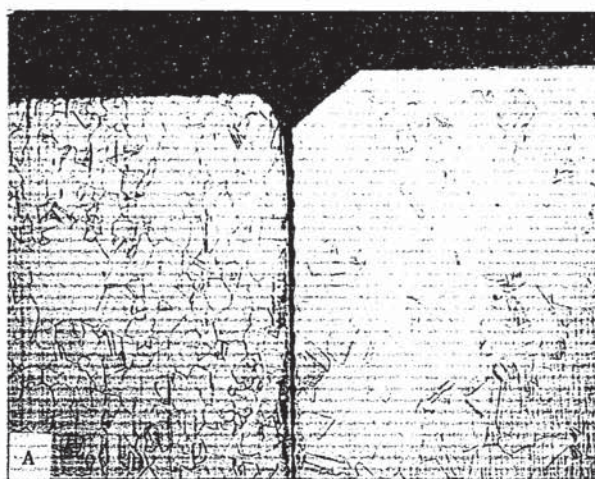




A : Yoke in 17P capsule

B : Yoke in 18P capsule

Fig. 17 View of rupture detector (Yoke) after test.



Observed position

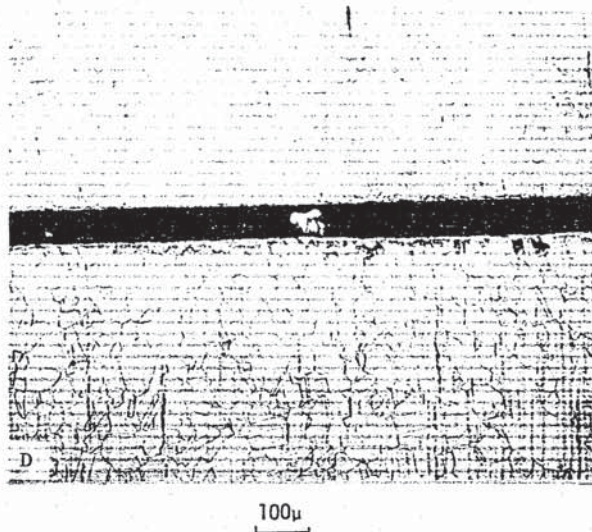
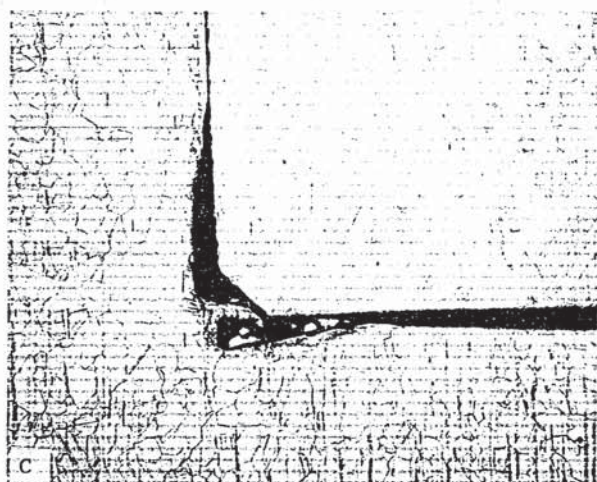
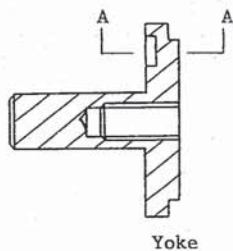
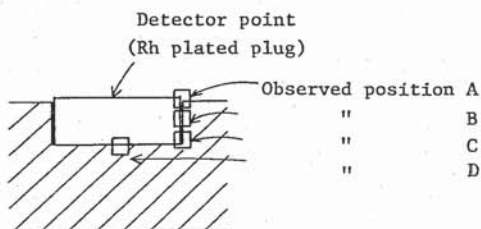


Fig. 18-(1) Cross section of rupture detector point for No.2 specimen of 18P.



Yoke



A-A Section

Observed position

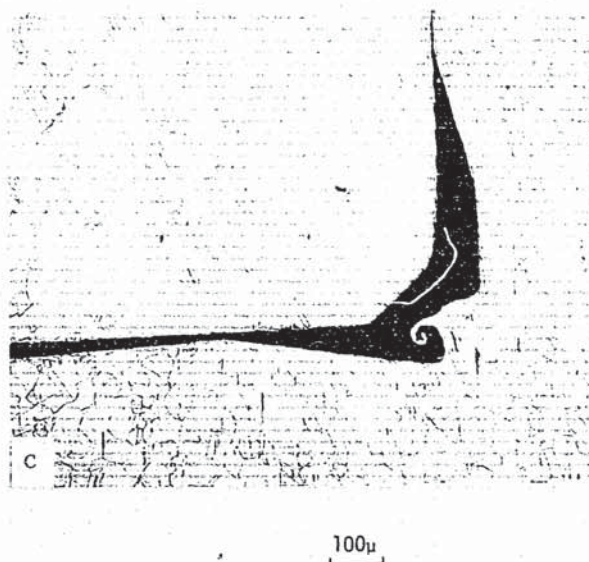
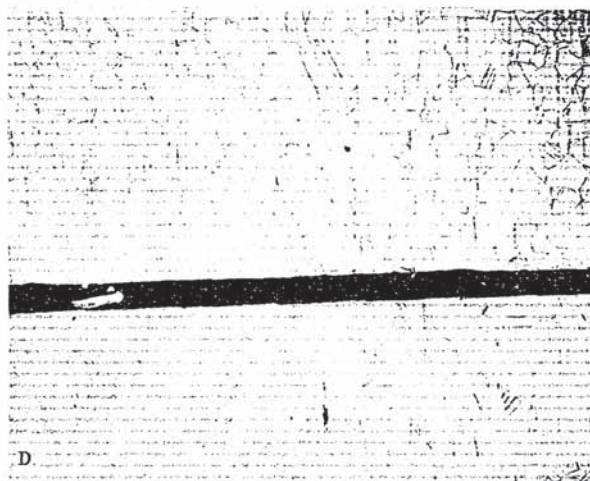
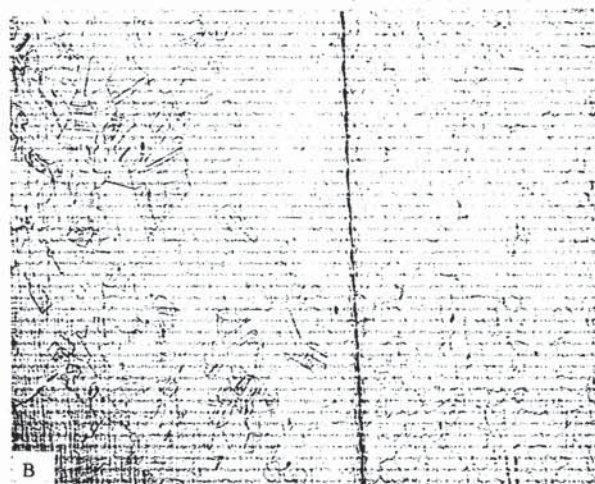
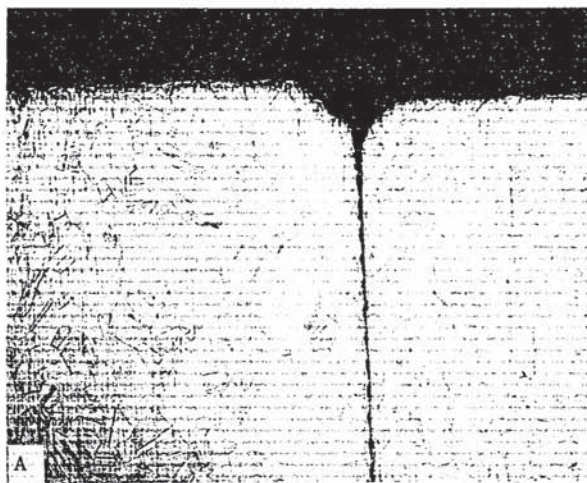
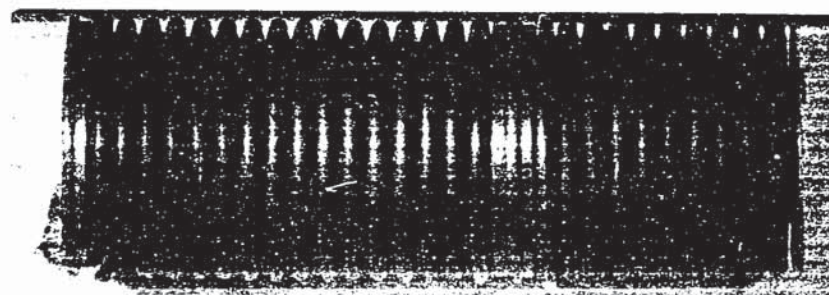
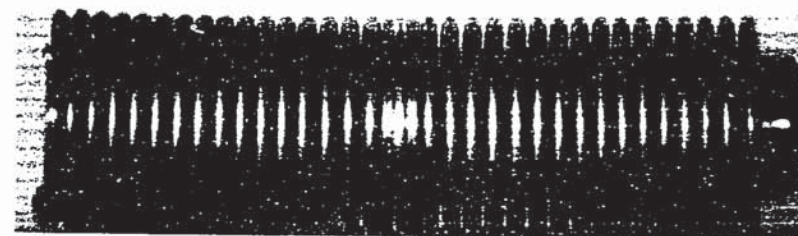


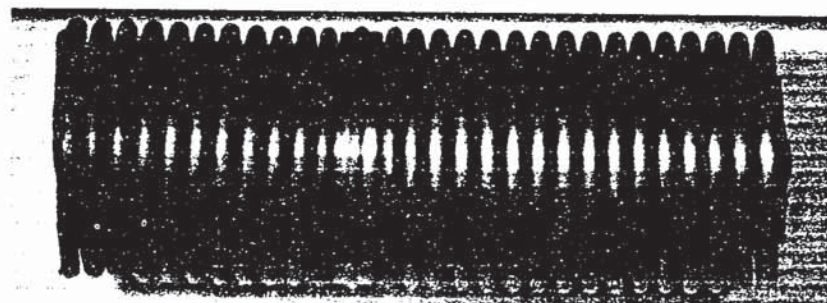
Fig. 18-(2) Cross section of rupture detector point for No.6 specimen of 18P.



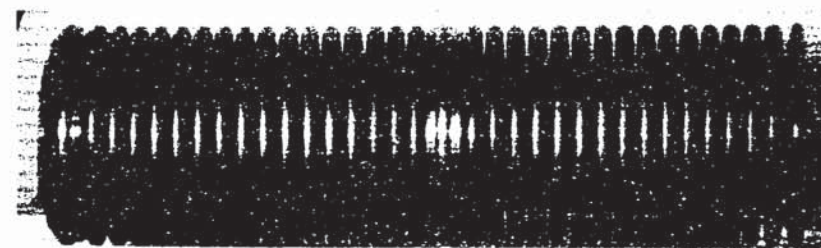
For No.3 specimen



For No.6 specimen



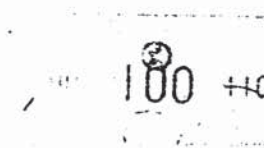
For No.2 specimen



for No.5 specimen



A : Bellows in 17P capsule



B : Bellows in 18P capsule

Fig. 19 View of bellows after test.

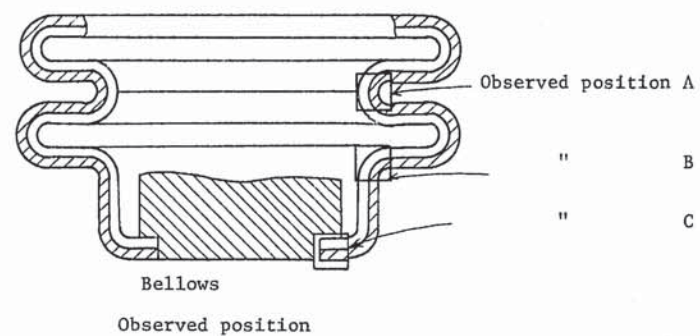
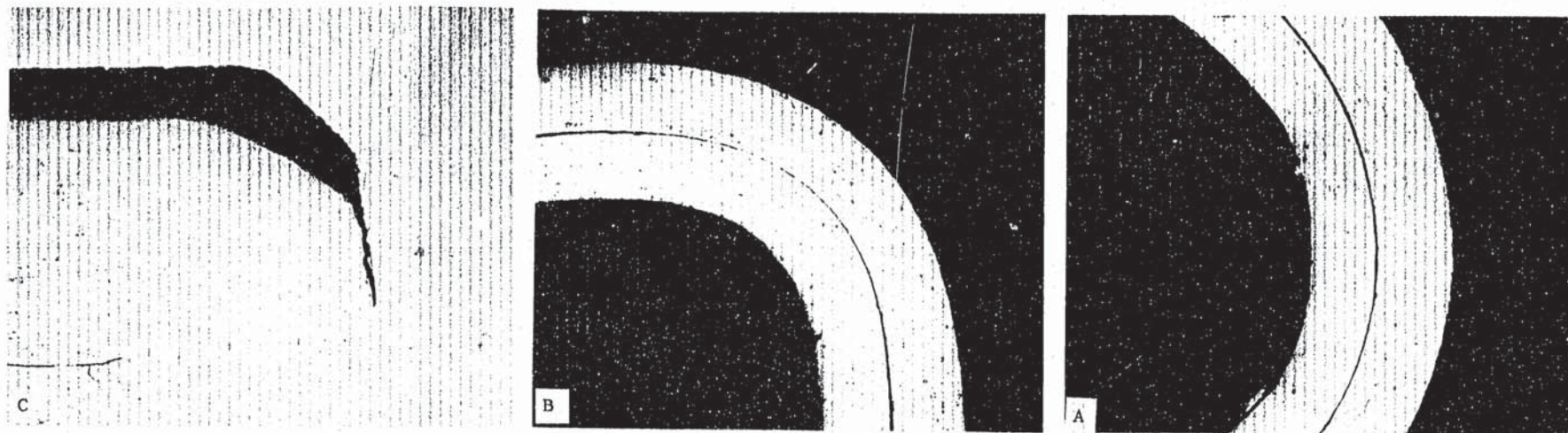


Fig. 20-(1) Cross section of bellows for No.5 specimen of 18P



100μ

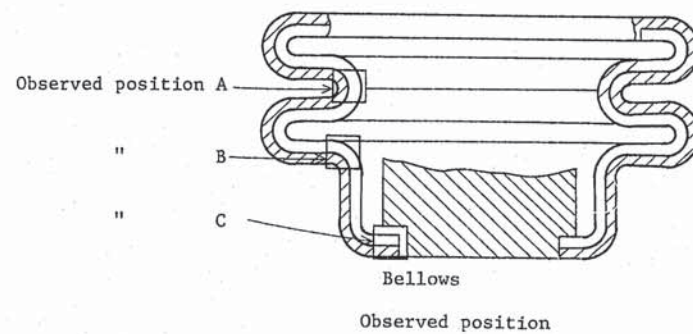


Fig. 20-(2) Cross section of bellows for No.6 specimen of 18P