

高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験
(JMTR-SM(1), 70M-60P)

第2報 長時間強度試験

1979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)

高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験

(JMTR - SM(1), 70M - 60P)

第2報 長時間強度試験

鈴木和久^{*}, 谷 賢^{*}, 佐々木澄男^{*}
加藤博史^{*}, 阿部康弘^{*}, 戸田重行^{*}
関 成一^{*}

要 旨

高速炉用構造材料の基礎的な確性試験として、数種の国産SUS304ステンレス鋼母材及び溶接継手に対する照射の影響を明らかにするために、原研材料試験炉(JMTR)でフリューエンス(1.6~2.4)×10²¹ n/cm² (E>0.1 MeV), 照射温度580°C±20°C, 照射時間約2200時間の照射を行った試料についての照射後試験を実施した。

本報告はこの照射後試験のうち、外観検査、クリーブ試験並びに金相試験結果をとりまとめ、受入材及び熱履歴材の試験結果と比較検討したものである。

主な結果は次の通りである。

- (1) 母材のクリーブ破断強度は照射により10%~20%低下した。溶接継手のクリーブ破断強度の照射による低下は10%以下で、照射後は母材と溶接継手のクリーブ破断強度はほぼ同程度であった。
- (2) 照射後のクリーブ破断強度は母材、溶接継手とも500時間未満で破断したものを除き、ASME Code Case 1592による要求を満足する値であった。
- (3) 母材の最小クリーブ速度の照射による変化には、ばらつきがあるが、試験温度によっては増大する傾向が見られた。
- (4) 母材のクリーブ破断伸びは照射により低下するが、溶接継手のクリーブ破断伸びは全体的に低いため、照射による影響ははっきりしなかった。

* 大洗工学センター燃料材料試験部 照射材料試験室

Post-Irradiation Examination on Structural Materials
and Welded Joints for Fast Reactors
(JMTR-SM(1), 70M-60P)

2. Long Term Strength

Kazuhisa Suzuki* Satoshi Tani*
Sumio Sasaki* Hirobumi Katoh*
Yasuhiro Abe* Shigeyuki Toda*
and Seiichi Seki*

As a basic irradiation experiment on structural materials for fast reactors, several SUS 304 stainless steels (base metal and welded joint) were irradiated in JMTR [$(1.6\sim 2.4)\times 10^{21}\text{n/cm}^2$ ($E>0.1\text{MeV}$), $580^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$, $\sim 2,200\text{hr}$]. Visual inspection, creep tests, metallurgical tests were performed on these irradiated specimens and results were compared to those of as-received and aged specimens. The results obtained are summarized as follows.

- (1) 10%~20% reduction in creep rupture strength is observed for irradiated base metal, and less than 10% for irradiated welded joint. Base metal and welded joint have same creep rupture strength after irradiation.
- (2) Post-irradiation Creep rupture strength of both base metal and welded joint satisfies the design value of ASME Code Case 1592-10 (1977) except short time rupture strength.
- (3) Irradiation effect on minimum creep rate of base metal is not clear, but slight increase is observed at a particular test temperature.
- (4) Creep rupture elongation of base metal decreases by irradiation. Irradiation effect on creep ductility of welded joint is not observed.

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

目 次

1. ま え が き	1
2. 供 試 材	2
3. 照 射 要 領	3
3.1 照射キャプセル	3
3.2 照射履歴	3
4. 照射後試験要領	4
4.1 外 観 検 査	4
4.2 クリープ試験	4
4.3 金 相 試 験	4
5. 照射後試験結果	5
5.1 外 観 検 査	5
5.2 クリープ試験	5
5.3 破断後外観検査及び金相試験	6
6. 試験結果の検討	8
6.1 照射によるクリープ破断強度の低下	8
6.2 設計基準データとの比較	8
6.3 海外照射データとの比較	9
7. あ と が き	10
8. 参 考 文 献	11

List of Figures

Fig. 1	Profile of Specimen.....	19
Fig. 2	Sampling of Creep Specimens for Welded Joint.....	19
Fig. 3	Outline of Irradiation Capsule.....	21
Fig. 4	Specimen Arrangement in Irradiation Capsule.....	23
Fig. 5	View of Specimens in Mock-up Capsule.....	24
Fig. 6	Irradiation Position in JMTR Core.....	25
Fig. 7	Typical Temperature Distribution in Capsule.....	26
Fig. 8	Thermal History under Irradiation.....	27
Fig. 9	Fluence Distribution in Capsule.....	28
Fig.10	View of Creep Specimens.....	29
Fig.11	Creep Rupture Strength of Lot A.....	30
Fig.12	Minimum Creep Rate of Lot A.....	31
Fig.13	Creep Rupture Elongation of Lot A.....	32
Fig.14	Creep Rupture Reduction of Area of Lot A.....	33
Fig.15	Creep Rupture Strength of Lot B.....	34
Fig.16	Minimum Creep Rate of Lot B.....	35
Fig.17	Creep Rupture Elongation of Lot B.....	36
Fig.18	Creep Rupture Reduction of Area of Lot B.....	37
Fig.19	Creep Rupture Strength of Lot C.....	38
Fig.20	Minimum Creep Rate of Lot C.....	39
Fig.21	Creep Rupture Elongation of Lot C.....	40
Fig.22	Creep Rupture Reduction of Area of Lot C.....	41
Fig.23	View of Creep Specimens after Fracture.....	42
Fig.24	(a) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Base Metal.....	
	after Creep Rupture (Lot A).....	43
	(b) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Base Metal	
	after Creep Rupture (Lot B).....	44
	(c) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Welded	
	Joint after Creep Rupture (Lot C)-(I).....	45
	(d) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Welded	
	Joint after Creep Rupture (Lot C)-(II).....	46
Fig.25	Creep Rupture Strength Ratio of Irradiated and As- Received SUS 304 Base Metal and Welded Joint.....	47
Fig.26	Effect of Neutron Irradiation on the Rupture Life of Type 304 Stainless Steel at 650°C.....	48

Fig.27 Evaluation of Irradiated Type 304 SS Creep Rupture
Strength by ASME Code Case 1592.....49

Fig.28 Creep Rupture Strength Ratio as a Function of
Neutron Fluence.....50

Fig.29 Minimum Creep rate ratio as a Function of Neutron
Fluence.....51

List of Table

Table 1 Mill Sheet of Test Specimens.....13

Table 2 Welding Procedure.....15

Table 3 (a) Creep Data of Lot A (Base Metal).....16

(b) Creep Date of Lot B (Base Metal).....17

(c) Creep Date of Lot C (Base Metal and Welded Joint).....18

1. ま え が き

高速炉における炉容器，炉心構造物等の構造材料及び溶接継手に対する中性子照射による照射効果を検討するために，数種の国産オーステナイト系ステンレス鋼とその溶接継手の照射試験を行い，これら材料に対する照射効果についての基礎的な確性試験を行った。試験計画，試験片の選定，試験片の製作，照射前試験及び熱履歴試験は日本学術振興会第122委員会，ステンレス鋼照射小委員会に委託して実施した。

クリーブ試験は3種類のSUS304ステンレス鋼母材及び1種類の溶接継手（サブマージアーク溶接）を試験対象とした。¹⁾

照射は高速炉を用いて実施することが望ましいが，本試験では原研材料試験炉（JMTR）の最も高速中性子束の高い照射孔を使用した。フルーエンスは $E > 1\text{MeV}$ で $(0.9 \sim 1.4) \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ， $E > 0.1\text{MeV}$ で $(1.6 \sim 2.4) \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ，照射温度は $580^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ，照射時間は約2200hrである。

このようにして準備された試験片を照射材料試験室に搬入し，各種照射後試験を実施した。この照射後試験のうち引張試験の結果についてはすでに報告した。²⁾

本報はクリーブ試験結果をとりまとめ，受入材及び熱履歴材の試験結果と比較検討したものである。

2. 供 試 材

供試母材は、SUS304ステンレス鋼川鉄材（A材）、新日鉄材（B材）及び日本冶金材（C材母材）の3種で、その化学成分をTable 1に示す。

供試溶接継手は、上記の日本冶金材を神戸製鋼でサブマージアーク溶接したもの（C材溶接継手）で、その開先形状並びに溶接条件をTable 2に示す。また、溶接に用いた溶接材料はUS-308ワイヤ4φとPFS-1フラックスで、その溶接金属の化学成分をTable 2に併せて示す。

以上の母材及び溶接継手から平行部径6mmφ、平行部長さ30mmの試験片を採取した。Fig. 2に試験片の採取要領を示す。なお溶接継手試験片の採取については、試験片平行部に熱影響部を入れるため、溶接部中心と試験片中心を2～3mmずらせてある。

3. 照 射 要 領

3.1 照射キャプセル

Fig. 3に照射キャプセルの概略を示す。キャプセルにはクリーブ試験片のほか、室温引張試験片、高温引張試験片、金相試験片などが一緒に装荷された。さらに、照射温度測定用の熱電対とフリーエンス測定用のフラックスモニターがそれぞれ上、中、下3ヶ所に配置された。キャプセルは二重管となっており、内筒内には高純度のNaKを封入し、これを熱媒体として、各試験片の照射温度をできるだけ一定とするよう設計されている。照射温度の制御は、内筒と外筒の間に入れる混合ガス(He + N₂)の混合比を制御して、その熱伝達率を変えることにより行った。

Fig. 4に各試験片のキャプセル内配置を示す。比較すべき試験片は照射量と照射温度をできるだけそろえるよう、試験目的に応じて試験片の配置を考慮した。Fig. 5に模擬キャプセルへの試験片の装荷状況を示す。

3.2 照 射 履 歴

照射キャプセルはJMTR燃料領域のG-6照射孔で17~21サイクルの5サイクルにわたって照射された。Fig. 6に照射孔の位置、Fig. 7に熱電対指示記録の詳細(18サイクル) Fig. 8に平均照射温度の履歴を示す。

Fig. 9に各照射位置での高速中性子($E > 1 \text{ MeV}$)のフリーエンスを示す。これは上、中下3ヶ所に配置されたフラックスモニターによる測定値によって計算値を補正して求めたものである。

以上により、キャプセル軸方向の温度分布はキャプセル中央が上、下に比べて若干高め(10~20°C)であるがほぼ均一と見て良いこと、定格出力時の照射温度は580°C±20°Cの範囲に入っていること、18サイクルで一時的に(10時間程度)640°Cまで上昇していることがわかる。照射温度は一応580°C±20°C、照射時間は~2200hrと考えてよい。

フリーエンスは、 $(0.9 \sim 1.4) \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)の範囲に全試験片が入っている。 $E > 0.1 \text{ MeV}$ のフリーエンスは $(1.6 \sim 2.4) \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ である。

4. 照射後試験要領

4.1 外観検査

クリープ試験を行う前に、全試験片の外観写真をペリスコープにより撮影した。また、破断後つきあわせた状態で、全試験片の外観写真を撮影した。

4.2 クリープ試験

クリープ試験には、ホットセル内に設置してある容量3トンの単軸クリープ試験機（遠隔操作型）を使用した。伸びは磁気式変位測定器を用いた伸び計でチャック間距離を3分間隔で連続して測定した。また、G. L. は30mmとしてボンチでマーキングし、破断後に試験片をつきあわせて撮影した写真から破断伸びを求めた。破断紋りは破面の写真から求めた。

試験温度はA材については500°C, 550°C, 600°Cの3温度, B材, C材については500°C, 550°Cの2温度で試験した。ただしA材については温度制御系の不調のため、500°C 予定が512°Cで、550°C 予定が562°Cで試験したものがそれぞれ1本ずつある。

4.3 金相試験

クリープ試験後の代表的な試験片について、つかみ部及び破断部近傍の光学顕微鏡観察を実施した。エッチングは10%過硫酸アンモン溶液電解腐食とし、写真は100倍および400倍で撮影した。

5. 照射後試験結果

5.1 外観検査

Fig. 10 に代表的な試験片の外観写真を示す。試験片に曲がり等の変形は認められなかった。試験片表面については、約半数は金属光沢を保っているが、半数は全体あるいは部分的に変色し、光沢を失っている。これはNaK洗浄不十分によるアルカリ腐食と考えられる。²⁾ このため試験前に水で超音波洗浄した後アルコールに浸し、よく乾燥させた。同じ照射キャプセルで照射された引張試験片のうち数本はこのアルカリ腐食によると考えられる異常破断を起しているが、クリープ試験ではとくに異常な破断はみられなかった。

5.2 クリープ試験

Table. 3 にクリープ試験結果を示す。

5.2.1 A材 (SUS304母材) のクリープ試験結果

① クリープ破断強度

Fig. 11 に A 材の応力破断時間曲線を示す。Fig. 11 には比較のため受入材及び熱履歴材の試験結果を示してある。^{1), 3)} 照射材の破断強度は各試験温度とも、受入材、熱履歴材に較べて低くなっているが、試験温度が低い程強度の低下がいちじるしい。また熱履歴材の破断強度は破断時間が長くなると熱履歴を加えない場合の強度に近づく傾向がみられるが照射材の場合は強度の低下はほぼ一定である。

② 最小クリープ速度

Fig. 12 に A 材の最小クリープ速度を示す。受入材のデータがないので照射による影響は、はっきりわからない。

③ 破断伸び、破断絞り

Fig. 13 に A 材の破断伸びを、Fig. 14 に A 材の破断絞りを示す。Fig. 13 及び Fig. 14 には比較のために、受入材及び熱履歴材の結果も示しているが、受入材、照射材は試験片長手方向をロール方向にとってののに対し、熱履歴材ではロール方向と直角方向にとっての。熱履歴材の破断伸び、破断絞りは、受入材よりかなり大きな値を示しているが照射材の破断伸び、破断絞りは受入材に較べて小さくなっている。500°C, 550°C における破断伸びは、受入材では長時間破断のものほど破断伸びが小さくなるが、照射材ではほぼ一定で10%前後のデータが多い。

5.2.2 B材 (SUS304母材) のクリープ試験結果

① クリープ破断強度

Fig. 15 に B 材の応力破断時間曲線を示す。B 材の場合も A 材と同様、照射による破断

強度の低下は550°Cで試験した場合よりも500°Cで試験した場合の方が大きい。また、長時間破断側で照射材の破断強度がやや受入材の強度に近づく傾向がみられるが、熱履歴材の場合ほど顕著ではない。

② 最小クリーブ速度

Fig. 16にB材の最小クリーブ速度を示す。受入材と比較すると500°Cでは照射材の方がやや大きな値を示す。550°Cではほとんど変化がない。

③ 破断伸び，破断絞り

Fig. 17にB材の破断伸びを，Fig. 18にB材の破断絞りを示す。破断伸びはA材の場合とは逆に熱履歴材の方が受入材より小さいが，照射材の伸びはさらに小さく，1試料をのぞいて500°C，550°Cの結果とも10%～15%の値になっている。破断絞りは受入材と熱履歴材がほぼ同程度の値で，破断時間が長くなるほど小さくなる傾向を示しているのに対し，照射材の破断絞りは破断時間に関係なく20%前後の値を示している。

5.2.3 C材（SUS304母材および溶接継手）のクリーブ試験結果

① クリーブ破断強度

Fig. 19にC材の応力破断時間曲線を示す。母材のクリーブ破断強度が大きく低下しているのに対し，照射された溶接継手のクリーブ破断強度は熱履歴材と同程度で，受入材と比較しても強度の低下はわずかである。550°Cでは照射後の母材と溶接継手のクリーブ破断強度はほぼ同じになっている。

② 最小クリーブ速度

Fig. 20にC材の最小クリーブ速度を示す。550°Cでの結果を比較すると母材の方が溶接継手よりやや大きな値を示している。

③ 破断伸び，破断絞り

Fig. 21にC材の破断伸びを，Fig. 22にC材の破断絞りを示す。溶接継手の受入材の破断伸びは試験温度が高い程小さく500°Cで11%～16%，550°Cで4%～9%である。照射後の破断伸びは500°C，550°Cとも4%～9%で試験温度による差はみられない。母材の破断伸びも照射後は550°Cで7%～9%となっている。

5.3 破断後外観検査及び金相試験

Fig. 23に破断後の外観写真の代表的な例を示す。破断部の外観に異常は認められなかった。

Fig. 24(a)～Fig. 24(d)に破断部縦断面の光学顕微鏡写真を示す。Fig. 24(a)は，A材の500°C及び550°C試験後破断部で，両温度とも粒界破断が主になっている。550°Cで試験したものにみられる析出は研磨によるものと思われる。Fig. 24(b)はB材を500°C及び550°Cで試験したもので，やはり粒界破断が主になっている。また粒界への析出はそれ程多くないが

破面近傍の粒界にはクラックがみられる。

C材の溶接継手試験片で溶接金属で破断したもの（試験温度550°C）をFig. 24(c)に、母材で破断したもの（試験温度500°C）をFig. 24(d)に示す。Fig. 24(c)では母材の粒界には析出物が見られるが、破断は溶接金属内でおこっている。Fig. 24(d)では、破断は母材の粒界破断が主であり、母材部分には破断部から離れた部分にも粒界にクラックが見られるが、溶接部にはクラックは見られない。溶接継手の試験片については母材で破断したものと、溶接金属で破断したものがほぼ同数であり、照射後は母材と溶接金属の強度はほぼ同程度と考えられる。

6. 試験結果の検討

6.1 照射によるクリーブ破断強度の低下

Fig. 25 に受入材に対する照射材のクリーブ破断強度の比を示す。全体としてみると、母材では照射による強度低下は、破断時間 (100 hr ~ 6000 hr) および試験温度 (500, 550, 600 °C) にそれほど依存しない。また試験温度 500 °C と 550 °C では、強度の低下率 ((1 - 強度比) × 100 %) は 8 % ~ 22 % の間にある。また溶接継手についてみると強度の低下率は母材にくらべてずっと小さく、最大でも 8 % 程度である。

母材について各材料別にみると、A材、B材とも 500 °C での強度の低下率は 550 °C での低下率よりやや大きい。また 3 つの材料を比較すると、500 °C, 550 °C とも C, A, B の順に低下率が大きい。(C材のデータは 550 °C のみ)。

受入材のクリーブ破断強度はやはり C, A, B の順に高かったので今回の 3 材料についていえば、受入材の強度が高いもの、すなわち炭素含有量が多いものほど強度低下率も大きく、照射後は各材料のクリーブ破断強度の差がほとんどなくなるという結果になっている。

今回求めたクリーブ特性は照射後試験によるものであり、実際に炉内での材料のクリーブ強度の低下を知るためには、炉内クリーブ試験との対応を知る必要がある。現在、JMTR を利用した炉内クリーブ試験を実施しているが、まだ照射後試験結果を十分評価するだけのデータは得られていない。海外での試験例として Fig. 26 に ORRR で炉内クリーブおよび照射後クリーブを行った Bloom の結果⁴⁾を示す。この報告によれば $8 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ($E > 2.9 \text{ MeV}$) のフラックスでの炉内クリーブと、 $2.9 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 2.9 \text{ MeV}$) のフリューエンスまで照射した後のクリーブ試験の結果にほとんど差はみられないが、海外でもまだデータは少なく JMTR での炉内クリーブ試験結果および海外における今後の試験結果を参考に今後この点についてさらに検討していく必要がある。

6.2 設計基準データとの比較

Fig. 27 に今回の試験結果を ASME Code Case 1592 によるクリーブ破断強度の要求値と比較して示す。500 °C でのクリーブ破断強度は短時間側では要求値を下回っているものもあるが、1000 時間以上の破断強度は母材、溶接継手とも要求値と同等かあるいはそれを上回っている。550 °C でのクリーブ破断強度は母材、溶接継手ともすべてのデータが Code Case 1592 の要求値と同等かあるいはそれを上回っている。なお高速炉用構造材料が寿命末期までに受ける照射量は炉容器ではたかだか 10^{20} n/cm^2 ($E > 0.1 \text{ MeV}$) であり、本試験の照射量はこれより 1 桁以上多く、実際よりはるかに過酷な照射条件になっている。

6.3 海外照射データとの比較

クリーブ破断強度の低下を、海外での照射後試験の結果と比較して Fig. 28 に示す。比較したデータは AISI 304 の母材を EBR II で 427°C 及び 482°C で照射し、それぞれ 538°C および 593°C の 2 温度で試験したものと、DIN 1.4948 の母材および溶接継手 (TIG 溶接) を HFR で 550°C で照射し、550°C で試験したデータである。HFR で照射したデータは非照射材として 550°C で 24 時間熱履歴した後の強度を採用している。EBR II で照射されたデータは照射温度が照射後試験温度よりかなり低いという問題があるが、強度の低下率は $10^{21}\text{n/cm}^2 \sim 10^{22}\text{n/cm}^2$ ($E > 0.1\text{MeV}$) の間で次第に大きくなっている。HFR で照射されたデータは $10^{19}\text{n/cm}^2 \sim 10^{21}\text{n/cm}^2$ ($E > 0.1\text{MeV}$) の間で母材、溶接継手とも照射量に対する依存性は顕著でない。今回の試験結果は母材については強度の低下率が約 10% ~ 20% と他のデータと同程度の値を示している。溶接継手については、溶接方法が異なるため HFR 照射データと直接の比較はできないが、今回の試験結果では溶接継手の強度の低下率は母材や HFR 照射の結果にくらべてかなり小さく 10% 以下である。

最小クリーブ速度の照射による変化について Fig. 28 に引用したのと同じ文献のデータと今回の試験結果を比較して Fig. 29 に示す。(ただし溶接継手についてのデータはない)。照射材の最小クリーブ速度は照射量が小さい場合には非照射材の場合より大きく、照射量が大きい場合には非照射材より小さくなる傾向がみられるが、照射量が $10^{21}\text{n/cm}^2 \sim 10^{22}\text{n/cm}^2$ ($E > 0.1\text{MeV}$) の範囲ではデータのばらつきがかなり大きい。今回の試験結果も大きくばらついており照射の影響について他のデータと比較して評価するのは困難である。

7. あとがき

本試験により、国産 SUS 304 ステンレス鋼のクリープ強度に及ぼす中性子照射効果に関する基礎データが得られた。 $(1.6 \sim 2.4) \times 10^{21} \text{ n/cm}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$ の照射により母材のクリープ破断強度は 10%~20%、溶接継手のクリープ破断強度は~10%低下したが、500時間以上の破断強度は照射後も母材、溶接継手とも ASME Code Case 1592 による要求値以上であった。本試験結果は「常陽」サーベイランス試験結果の評価、「もんじゅ」の設計などに役立つデータとなると考えられる。

終りに本照射試験の計画、照射前試験及び熱履歴試験の実施など、全ての面で御協力いただいた日本学術振興会・第122委員会・ステンレス鋼照射小委員会の委員各位ならびに各試験機関の方々、助言をいただいた FBR 本部岡林副主任研究員をはじめとする関係各位の方に感謝の意を表する次第である。

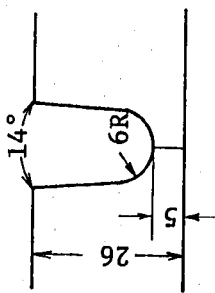
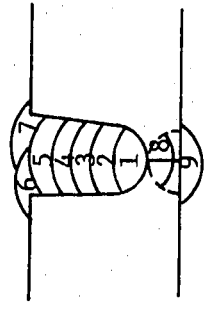
8. 参 考 文 献

- 1) 高速炉構造材料照射に伴う試験研究(その1)照射前試験の結果, 昭和46年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究, 日本学術振興会, 原子炉金属材料第122委員会, ステンレス鋼照射小委員会, 1972
- 2) 高速実験炉用構造材料および溶接継手の照射後試験(JMTR-SM(1), 70M-60P) 第1報短時間強度試験, SN941 77-139, 1977
- 3) 高速炉構造材料照射に伴う試験研究(その3)熱履歴試験結果, SJ259 74-01 昭和48年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究, 日本学術振興会, 原子炉材料第122委員会, ステンレス鋼照射小委員会, 1974
- 4) E·E·Bloom; ORNL-TM-2130, 15P, 1968
- 5) A·J·Lovell; BNWL-1279, 4-100P, 1969
- 6) B.van der Schaaf et al.; Influence of Irradiation on Creep and Creep-Fatigue Interaction of Type 304 Stainless Steel, ECN-78-001, 1977

Table 1. Mill Sheet of Base Metal

Lot	Manufacturer	Charge No.	Size of Product	Analysis Method	Chemical Composition (%)														Heat Treatment	Grain Size	Hardness						
					C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	Ti	Nb+Ta	B	Al (total)				N (total)	O				
-	-	-	-	SUS304 Spec.	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00~11.00	18.00~20.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A	Kawasaki Steel Co.	-	20t	Check	0.056	0.55	1.54	0.024	0.008	9.45	18.40	0.094	0.097	0.24	0.017	0.003	0.0003	0.006	0.018	0.0070	1050°C W.Q.	ASTM No. 6	-	-	-	-	
B	Nippon Steel Corp.	D7542	25t	Check	0.040	0.60	0.99	0.023	0.007	9.60	18.64	0.11	0.09	0.24	-	0.002	0.0005	0.004	0.029	-	1050°C×13min W.Q.	ASTM No. 4.2	ll _B 125	-	-	-	-
C	Nippon Yakin Kogyo	84712	26t×1000×770	Ladle Check	0.070 0.071	0.77 0.79	1.62 1.63	0.028 0.030	0.005 0.006	8.79 8.91	18.79 18.13	0.08 0.08	0.06 0.06	0.22 0.19	- <0.01	- 0.003	- <0.0001	-	-	-	1050°C×30min W.Q.	ASTM No. 4	ll _v 146	-	-	-	-

Table 2 Welding Procedure

Contributor	Welding Process	Edge Preparation	Welding Sequence	Welding Material	Welding Conditions			
					Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)
Kobe Steel	Submerged Arc Welding	 <p>14° 6R 26 5 18</p>	 <p>Inter Pass Temperature <150°C</p>	US-308(4φ) (Wire) PFS-1 (Flux)	1	400	30	300
					2~6	450	32	320
					7	450	32	350
					8	450	32	300
					9	450	35	350

Chemical Composition of Weld Metal (%)															
Manufacturer	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	Ti	B	Al (total)	N	O
Kobe Steel	0.051	0.71	1.74	0.025	0.015	9.81	19.67	0.12	0.088	0.177	-	0.0005	0.004	0.0479	0.0925

Table 3(a) Creep Data of Lot A (Base Metal)

Test Temperature (°C)	Specimen No.	Fluence ($\times 10^{21}$ n/cm ²)		Irradiation Temperature (°C)	Stress (kg/mm ²)	Minimum Creep Rate (%/hr)	Time to Rupture (hr)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
		>1MeV	>0.1MeV						
500	A 1	1.30	2.31	580 ±20	31.0	7.5×10^{-3}	259	9.1	11
	A 9	1.30	2.31		28.0	1.8×10^{-3}	1,237	10.2	23
	A10	1.30	2.31		24.0	3.5×10^{-4}	6,312	9.1	17
512	A 7	1.30	2.31		38.0	-	11.5	31.0	43
	A 6	1.32	2.34		27.0	-	87	18.0	22
550	A 8	1.32	2.34		24.0	1.7×10^{-2}	316	11.6	19
	A 3	1.37	2.44		22.0	2.8×10^{-3}	1,062	10.7	15
	A 5	1.36	2.41		19.0	1.9×10^{-3}	3,888	14.5	5
562	A 2	1.34	2.38		29.0	-	20	13.6	18
600	A 4	1.34	2.38		14.0	3.0×10^{-3}	3,224	22.7	21

Table 3(b) Creep Data of Lot B (Base Metal)

Test Temperature (°C)	Specimen No.		Fluence ($\times 10^{21}$ n/cm ²)		Irradiation Temperature (°C)	Stress (kg/mm ²)	Minimum Creep Rate (%/hr)	Time to Rupture (hr)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
	>1MeV	>0.1MeV	>1MeV	>0.1MeV						
500	F12	1.27	2.00		580 ±20	34.0	9.0×10^{-3}	109	14.0	21
	F 8	1.06	1.88			30.0	-	450	12.6	20
	F 9	0.90	1.60			28.0	1.2×10^{-3}	1,918	6.5	16
	F13	1.00	1.78			27.0	1.5×10^{-3}	1,569	12.0	24
	F15	1.12	1.98			25.0	3.8×10^{-2}	125	14.5	21
550	F 7	1.16	2.06		22.0	1.2×10^{-3}	680	11.7	20	
	F10	1.20	2.13		20.0	2.3×10^{-3}	1,998	11.3	15	
	F11	1.06	1.88		19.0	1.5×10^{-3}	3,431	11.5	20	

Table 3 (c) Creep Data of Lot C (Base Metal and Welded Joint)

Material	Test Temperature (°C)	Specimen No.	Fluence ($\times 10^{21}$ n/cm ²)		Irradiation Temperature (°C)	Stress (kg/mm ²)	Minimum Creep Rate (%/hr)	Time to Rupture (hr)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Fracture Location
			>1MeV	>0.1MeV							
Welded Joint	500	G 7	1.20	2.13	580±20	32.0	4.0×10^{-3}	654	4.3	11	B.M*
			1.20	2.13		29.0	6.0×10^{-4}	1,126	9.0	23	B.M
			1.30	2.31		27.0	4.5×10^{-4}	2,955	6.3	14	W.M**
	550	G 4	0.90	1.60		27.0	6.8×10^{-3}	132	9.2	9	B.M
			1.30	2.31		24.0	3.4×10^{-3}	599	4.7	10	W.M
			1.06	1.88		22.0	6.7×10^{-4}	1,230	5.3	10	W.M
			1.06	1.88		19.0	9.0×10^{-4}	2,383	4.4	8	W.M
			1.20	2.13		24.0	7.3×10^{-3}	367	9.2	23	-
			1.30	2.31		20.0	1.2×10^{-3}	2,364	7.0	13	-
Base Metal	550	G11	1.30	2.31							

* Base Metal
** Weld Metal

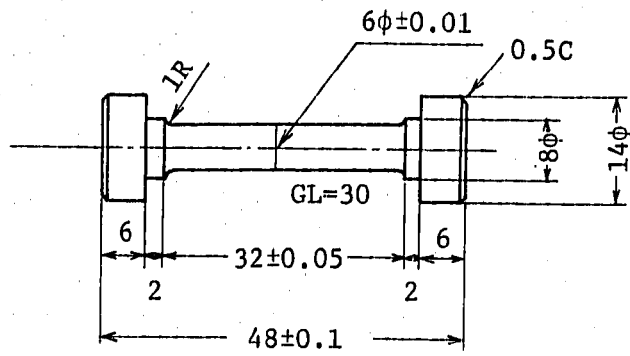
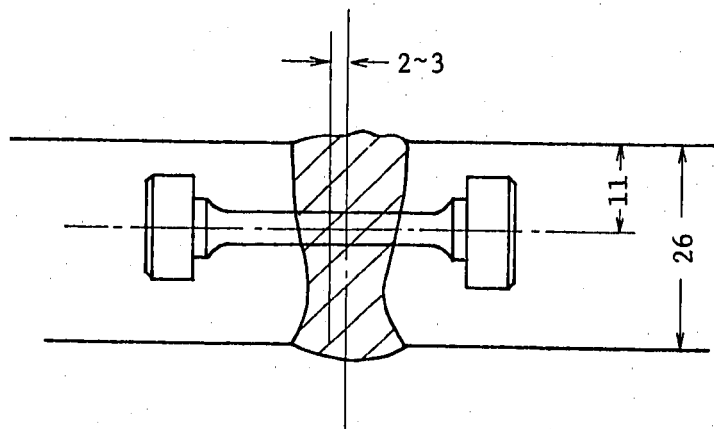
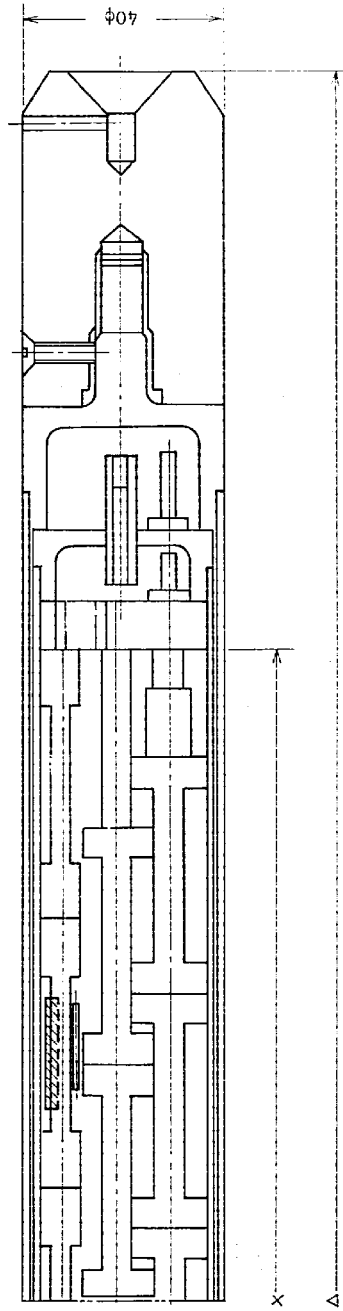
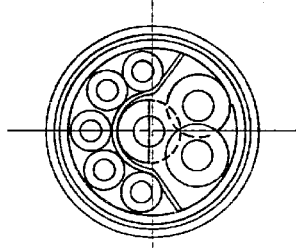
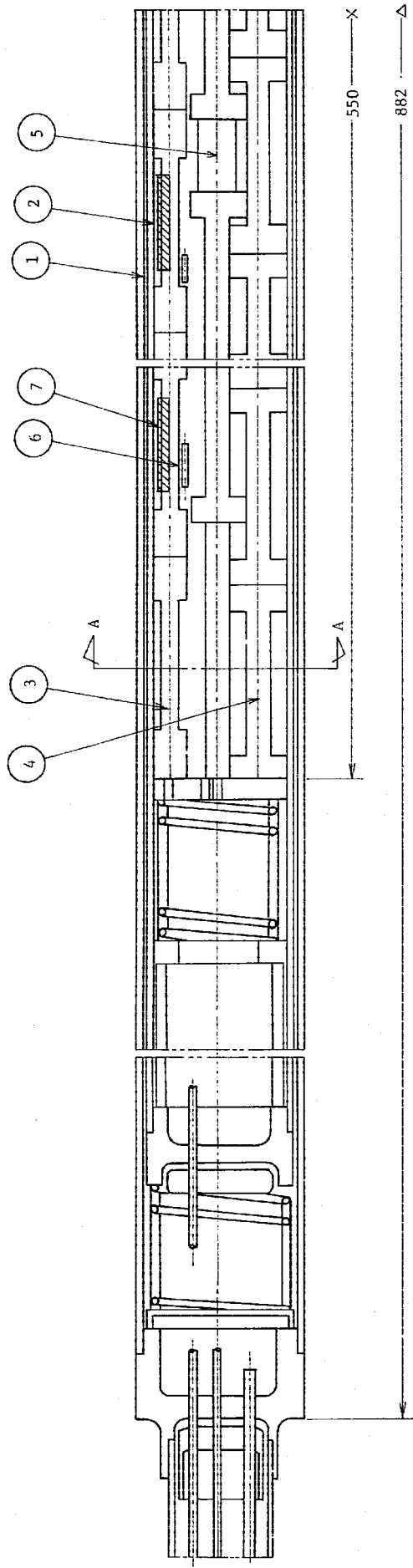


Fig. 1 Profile of Specimen



Kobe Steel
Submerged Arc Welding

Fig. 2 Sampling of Specimens for Welded Joint



A-A Section

1	Outer Tube
2	Inner Tube
3	Tensile Specimen
4	Creep Specimen
5	Metallurgical Specimen
6	Thermocouple
7	Flux Monitor

Fig. 3 Outline of Irradiation Capsule

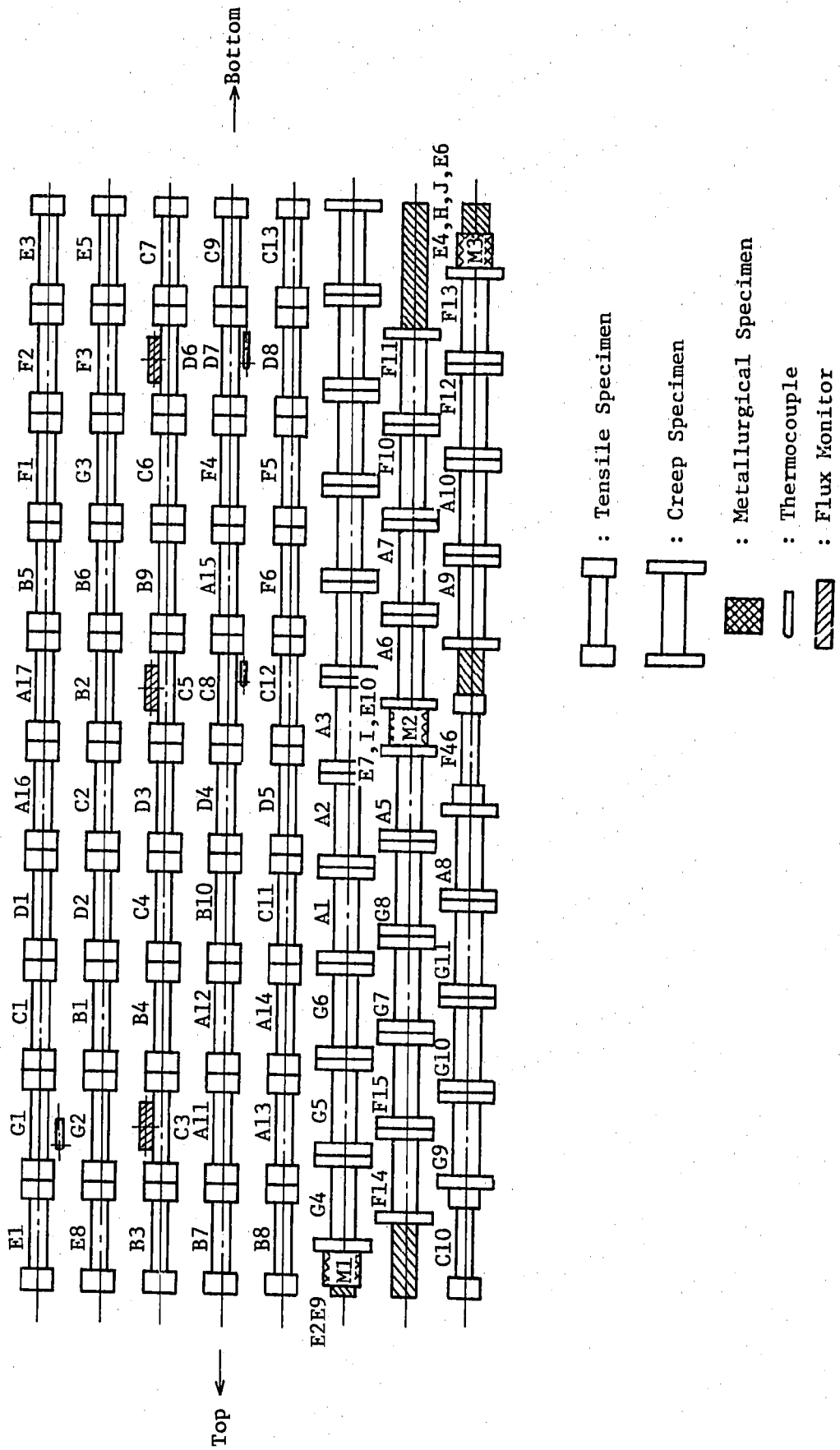


Fig. 4 Specimen Arrangement in Irradiation Capsule

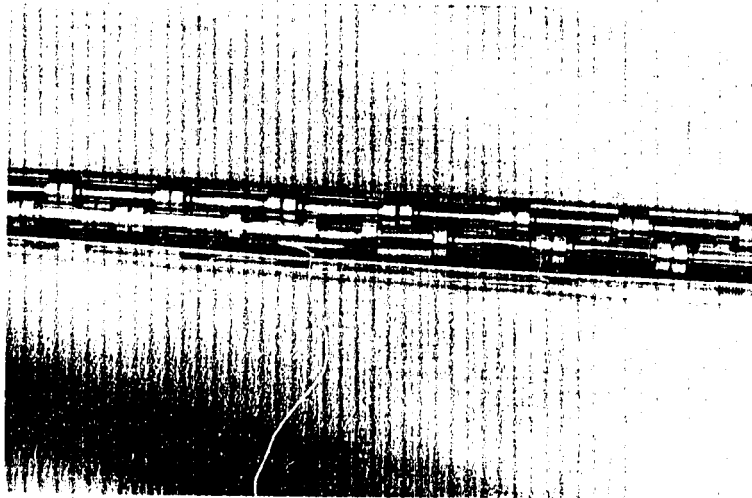
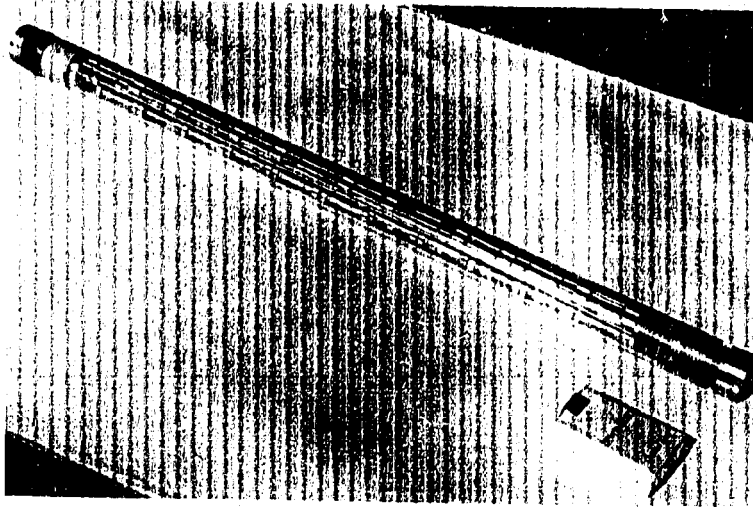


Fig. 5 View of Specimens in Mock-Up Capsule

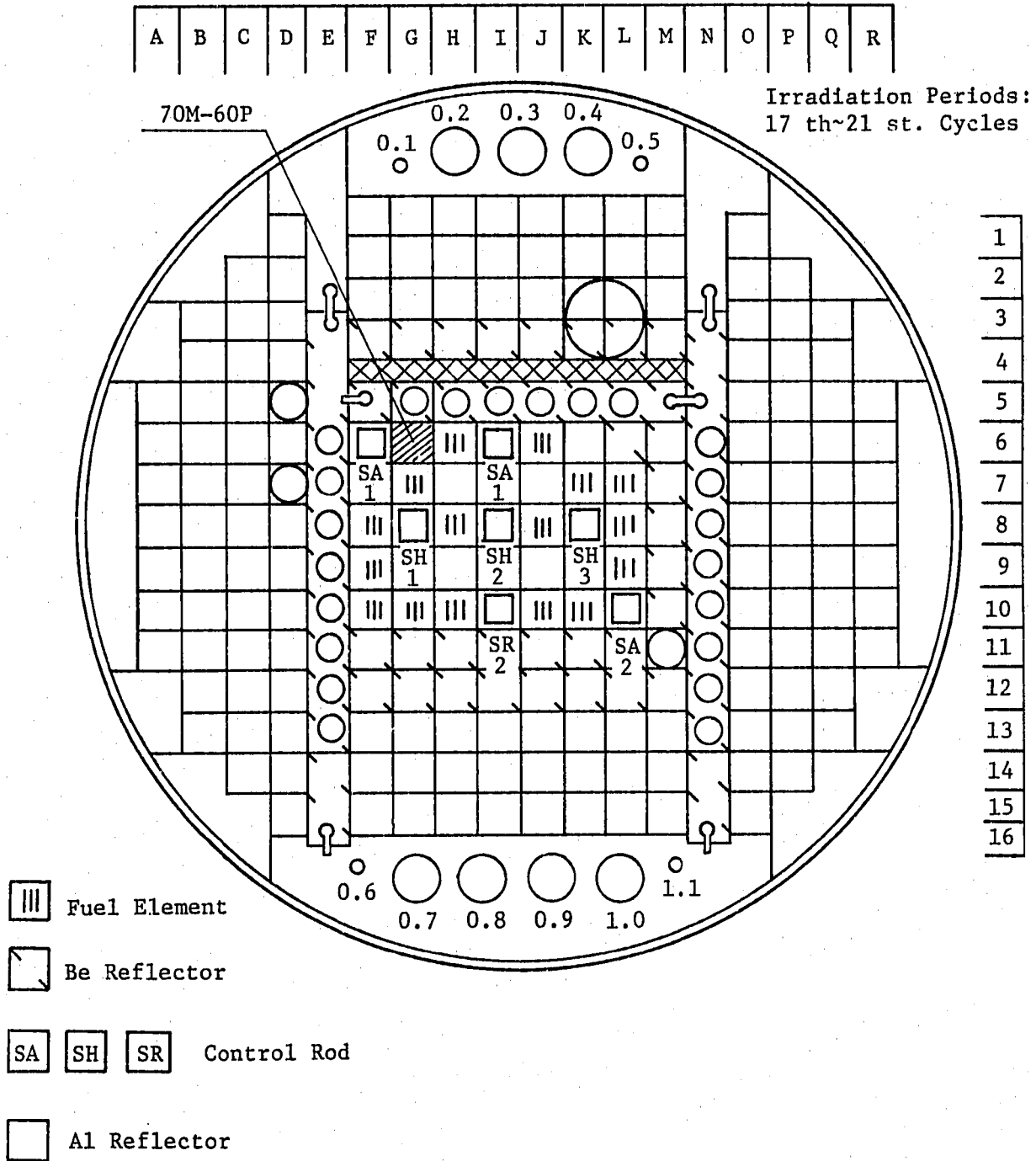


Fig. 6 Irradiation Position in JMTR Core

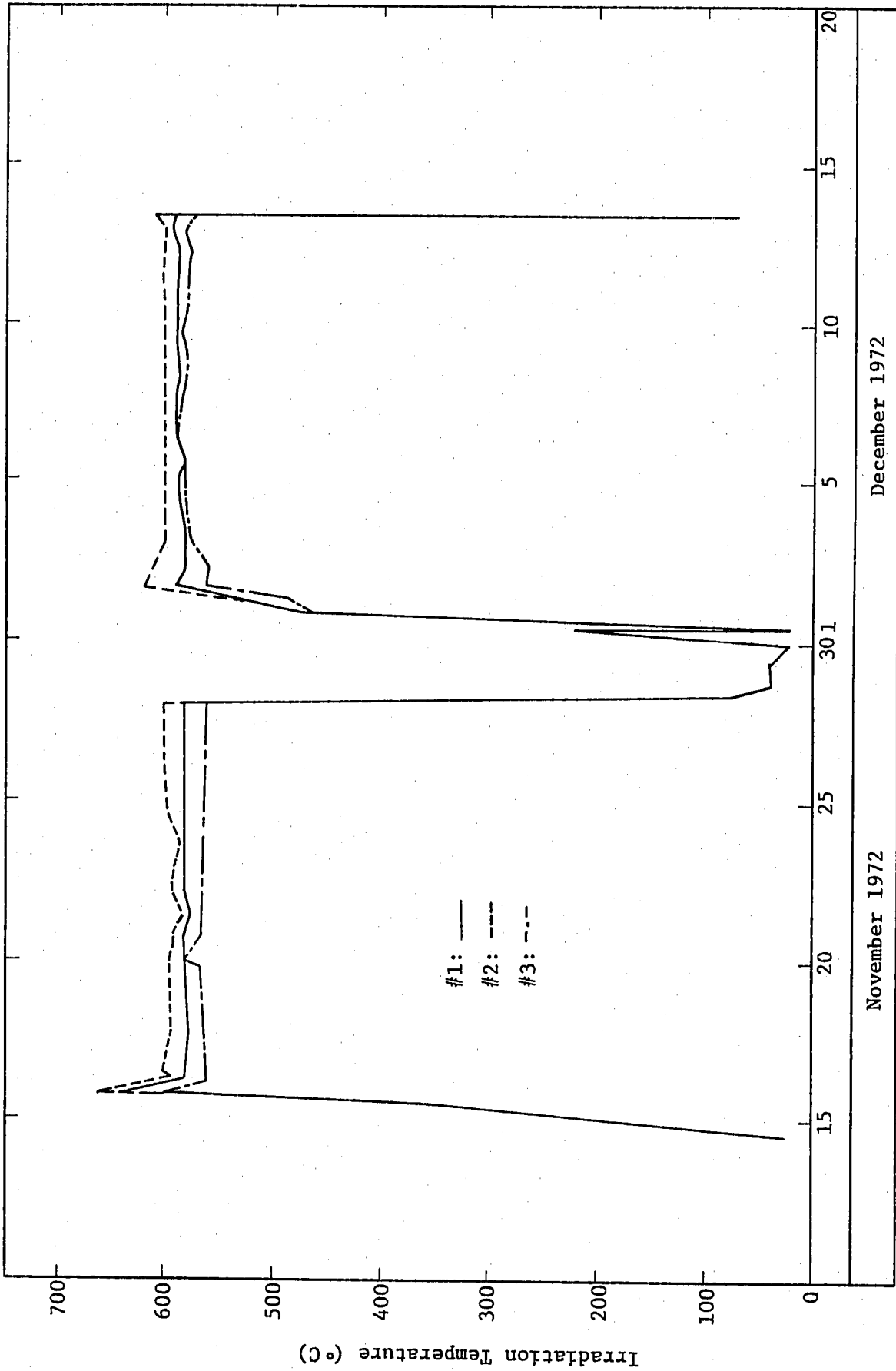


Fig. 7 Typical Temperature Distribution in Capsule (18th. Cycle)

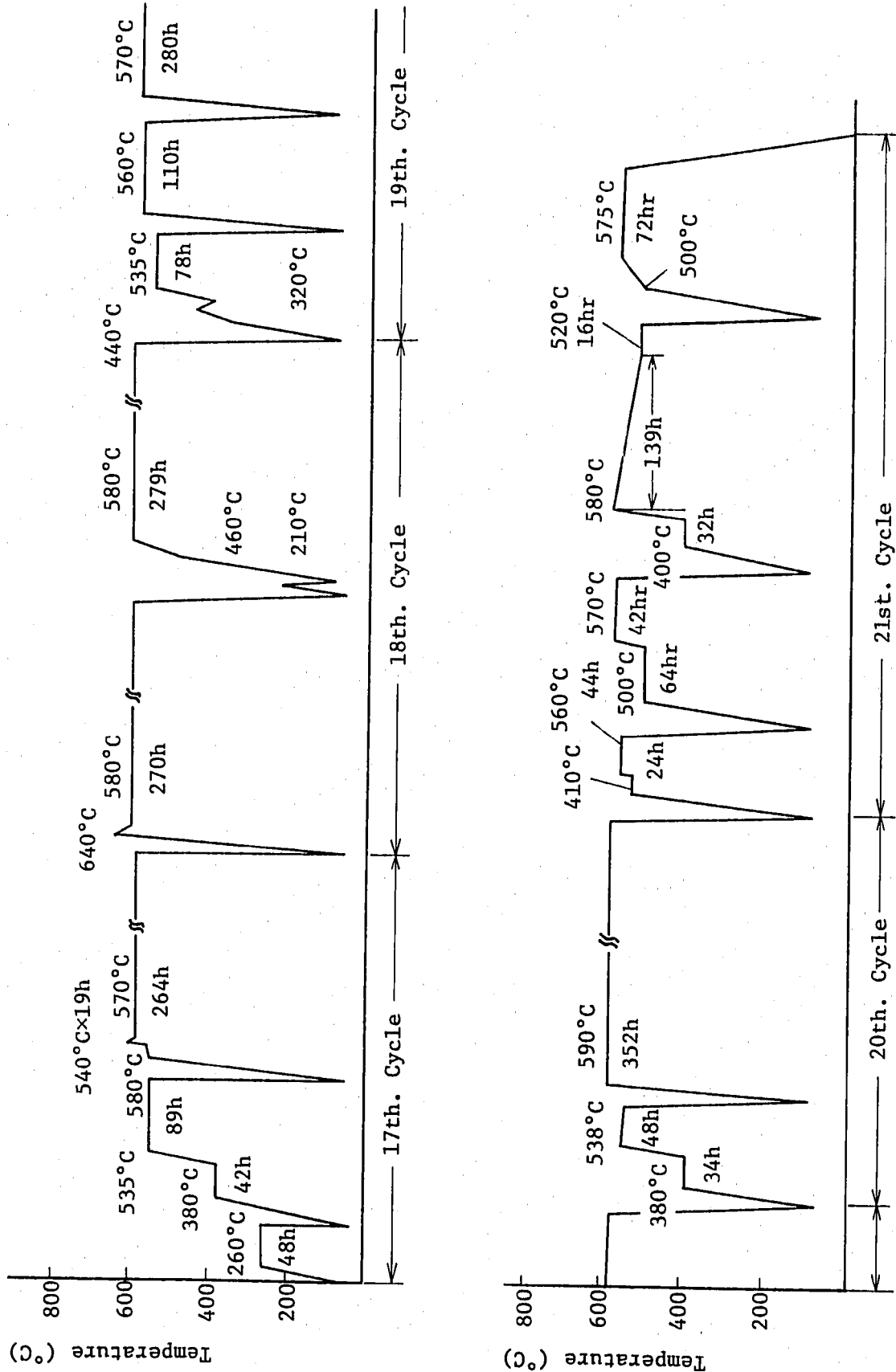


Fig. 8 Thermal History under Irradiation (Average)

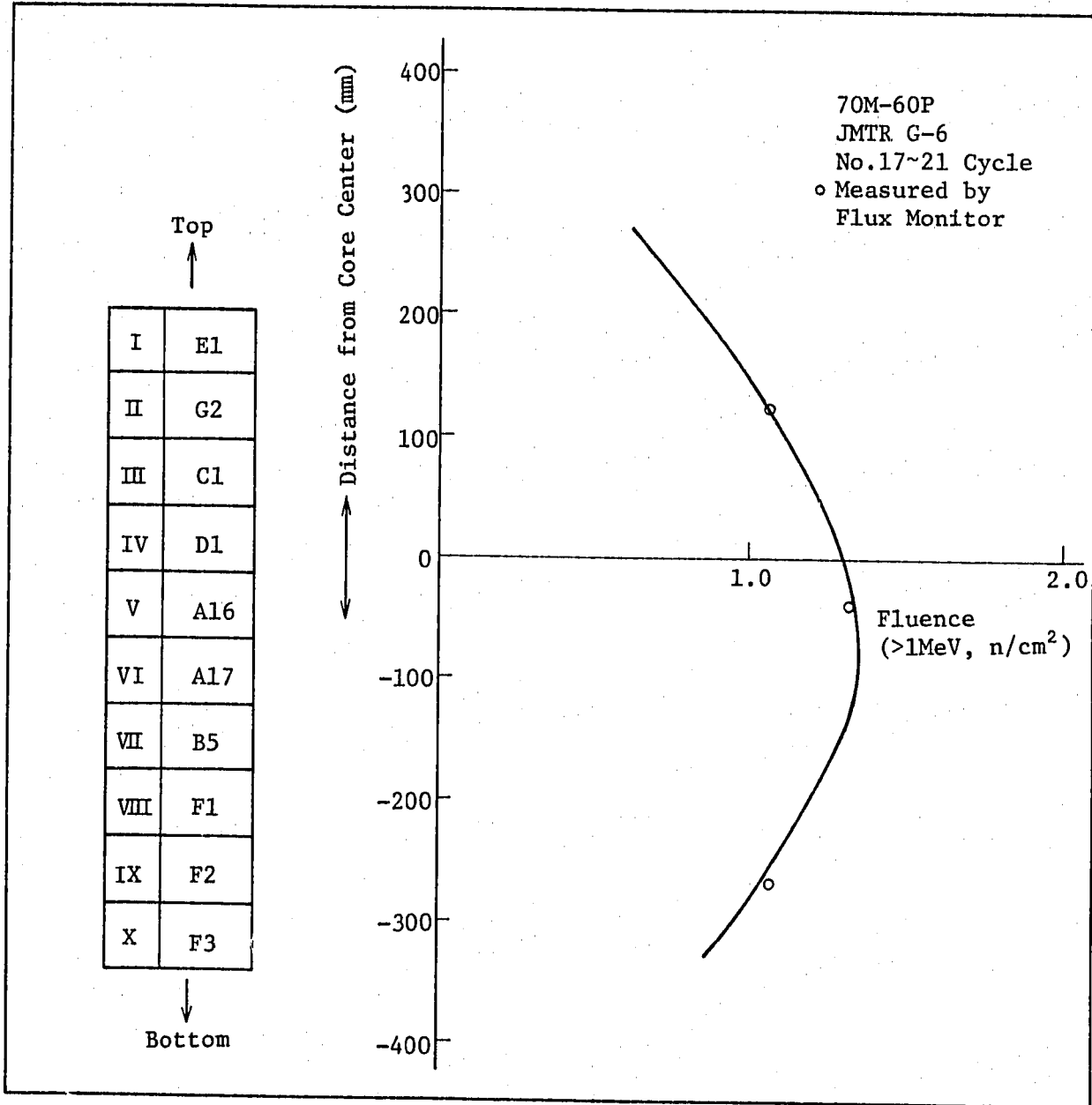
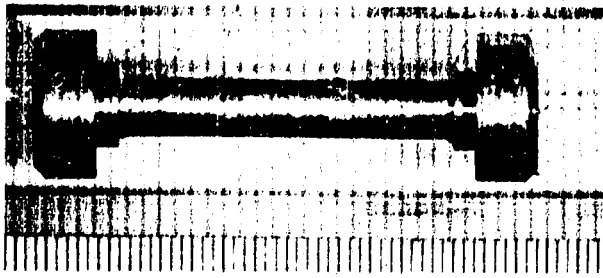
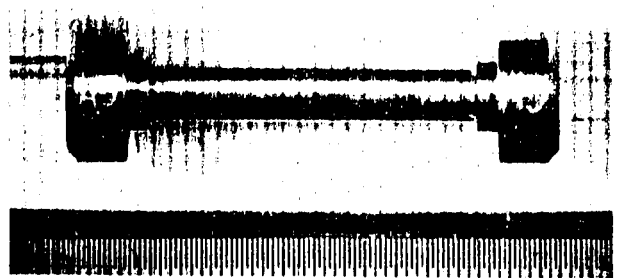


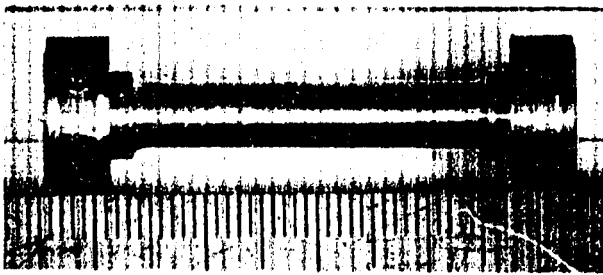
Fig. 9 Fluence Distribution in Capsule



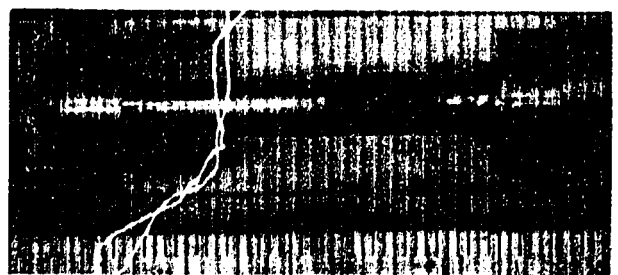
A9



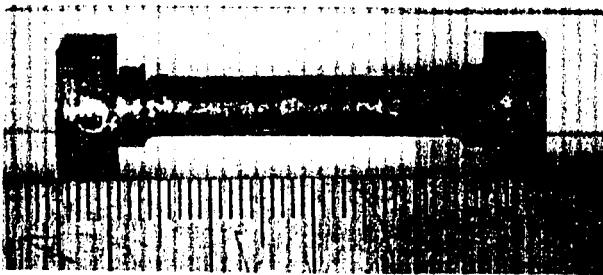
A5



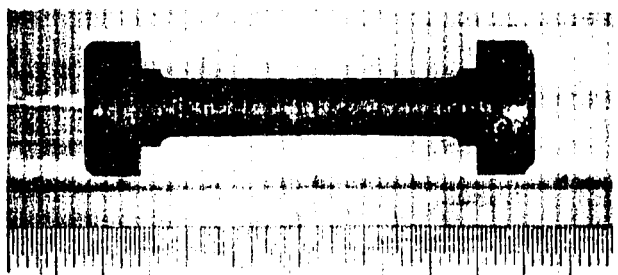
F13



F9



G9



G11

Fig.10 View of Creep Specimens

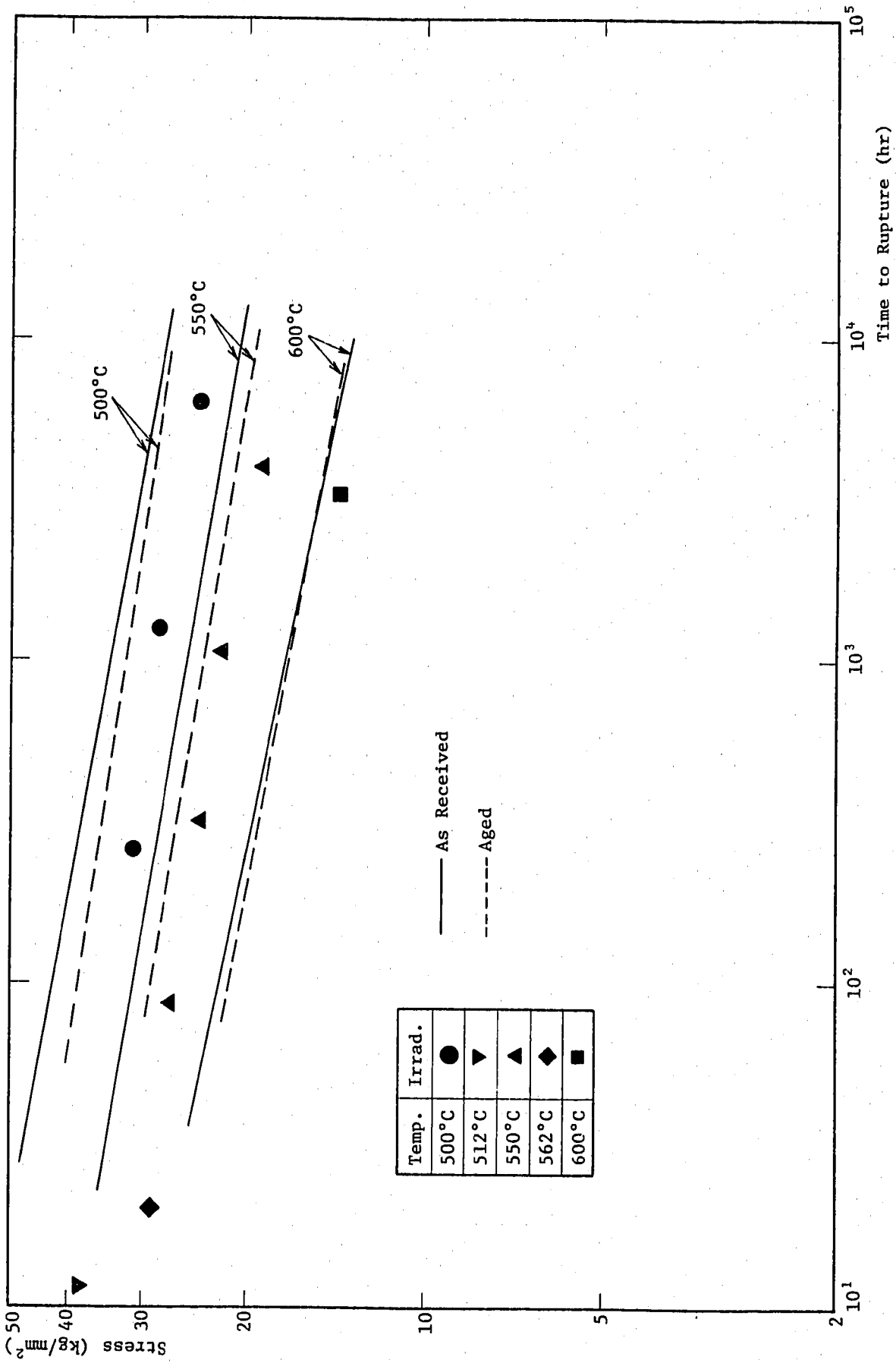


Fig.11 Creep Rupture Strength of Lot A (SUS 304 Base Metal)

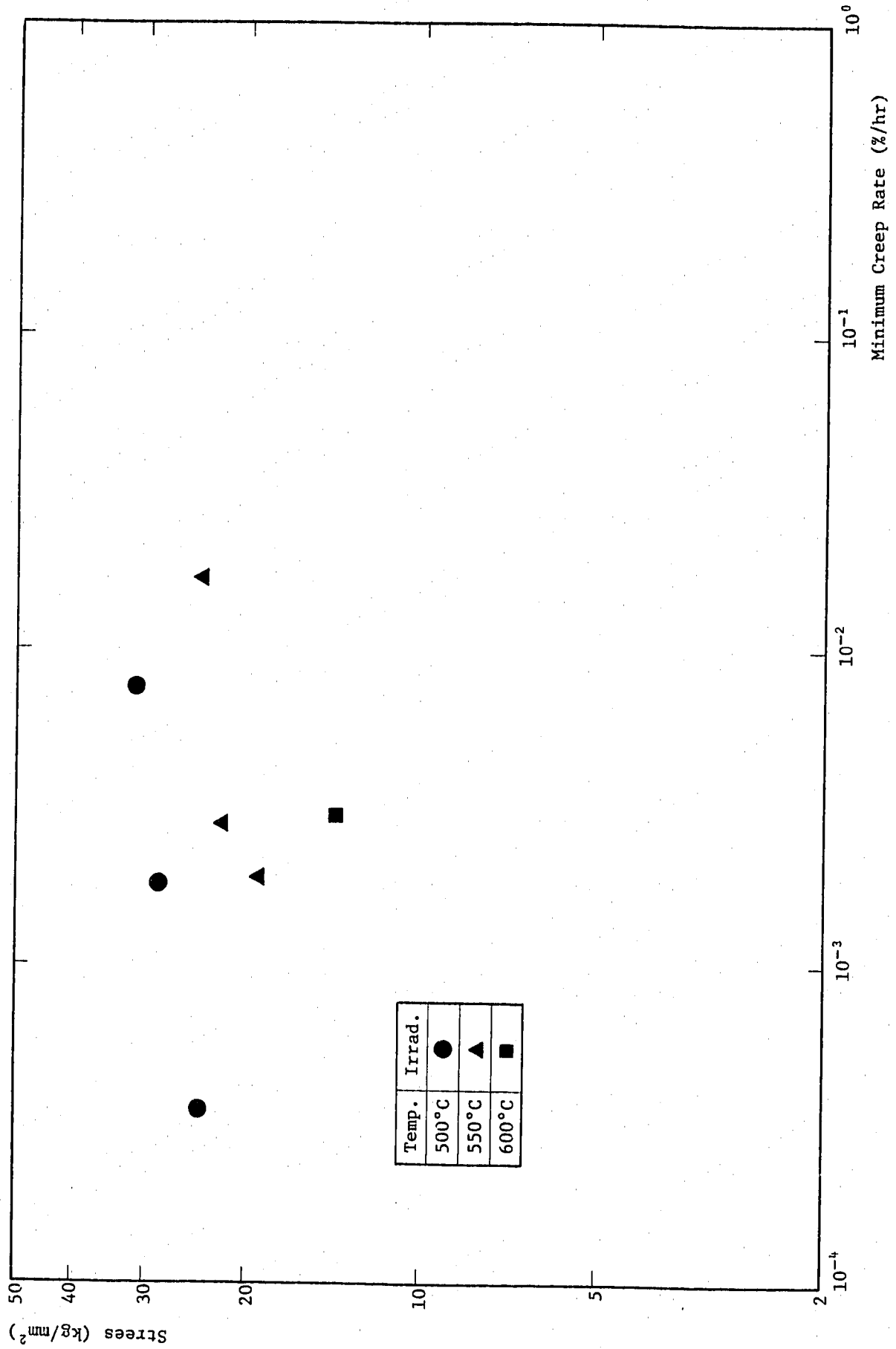


Fig.12 Minimum Creep Rate of Lot A (SUS 304 Base Metal)

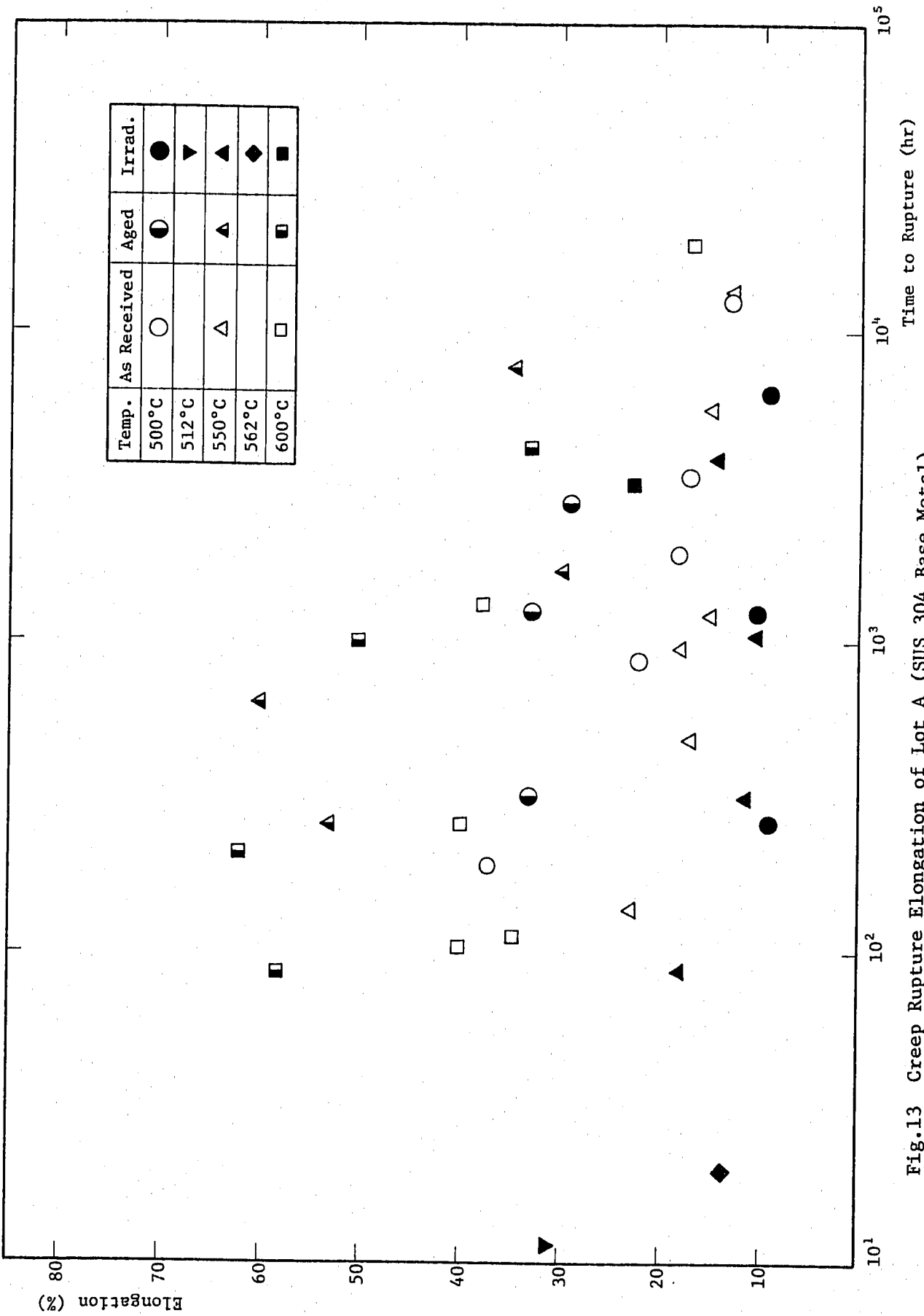


Fig.13 Creep Rupture Elongation of Lot A (SUS 304 Base Metal)

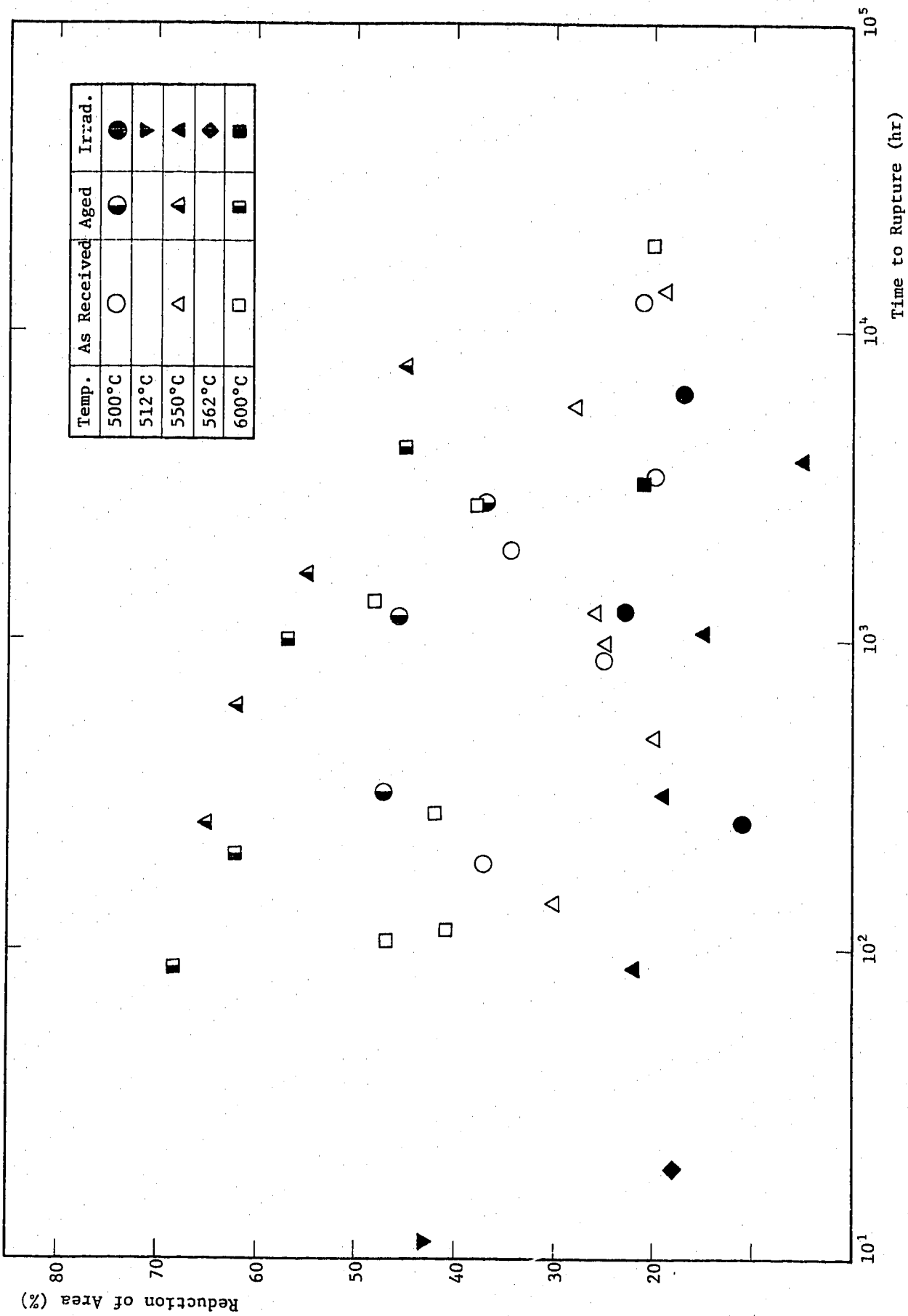


Fig.14 Creep Rupture Reduction of Area of Lot A (SUS 304 Base Metal)

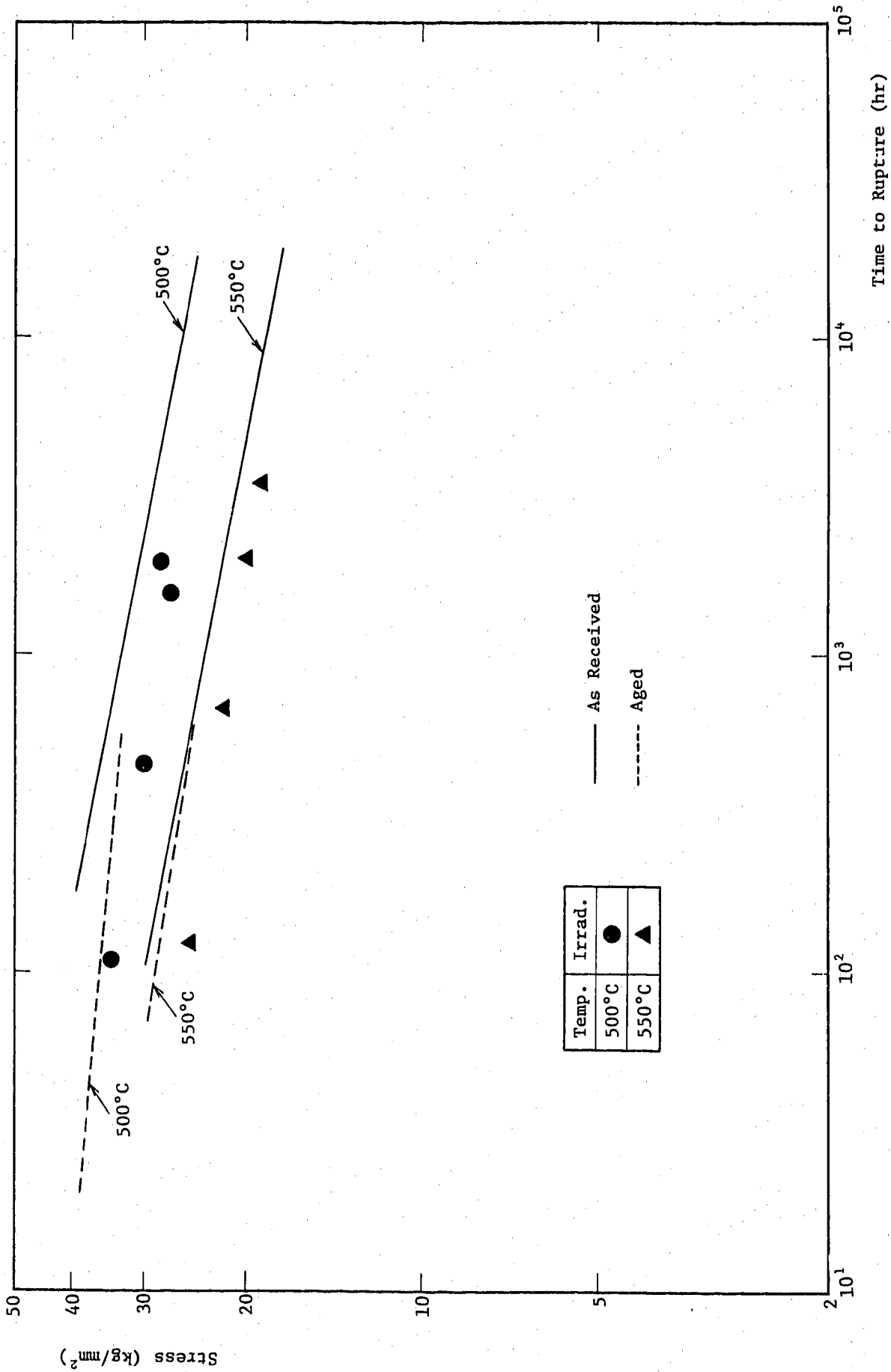


Fig.15 Creep Rupture Strength of Lot B (SUS 304 Base Metal)

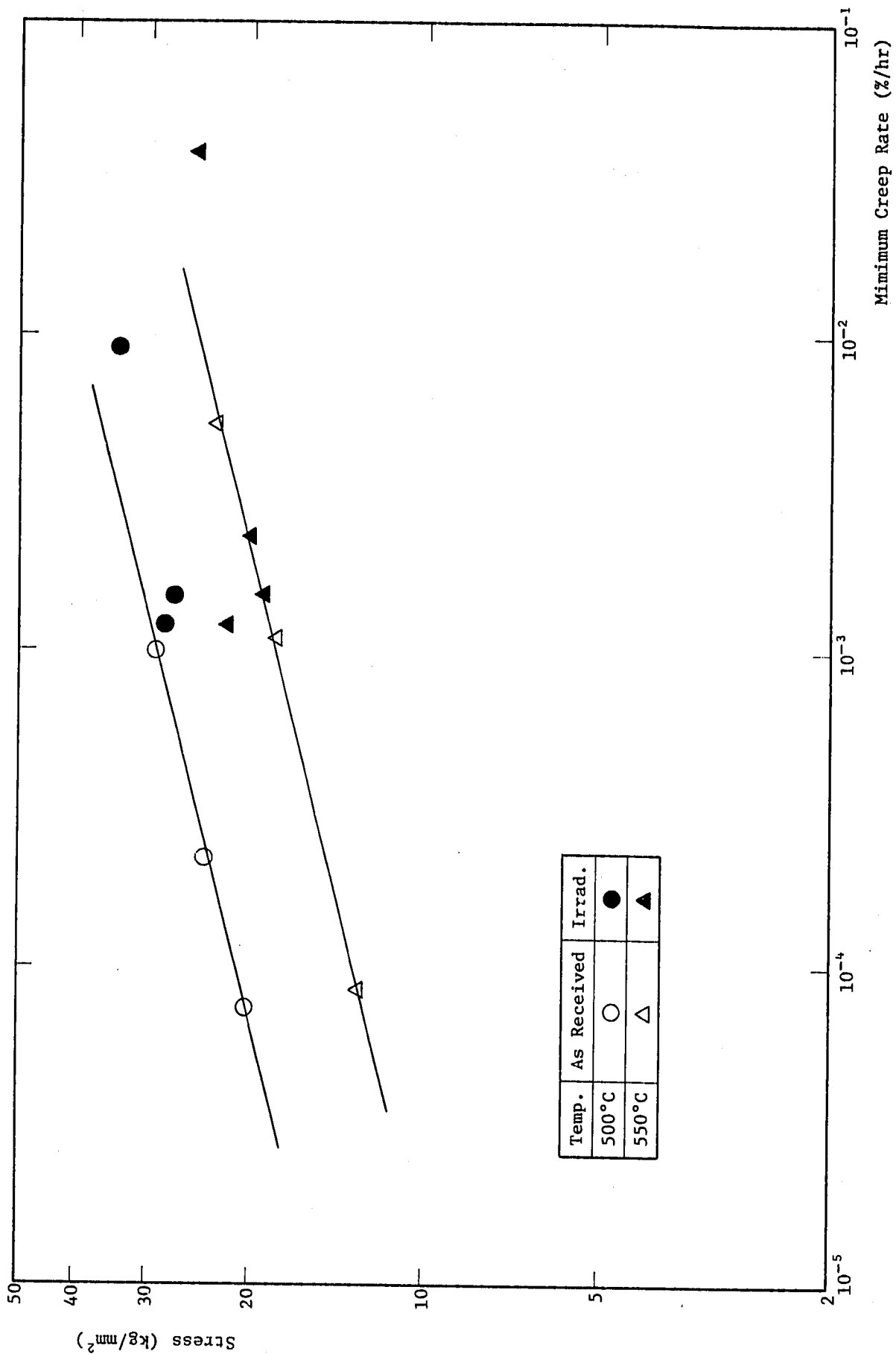


Fig.16 Minimum Creep Rate of Lot B (SUS 304 Base Metal)

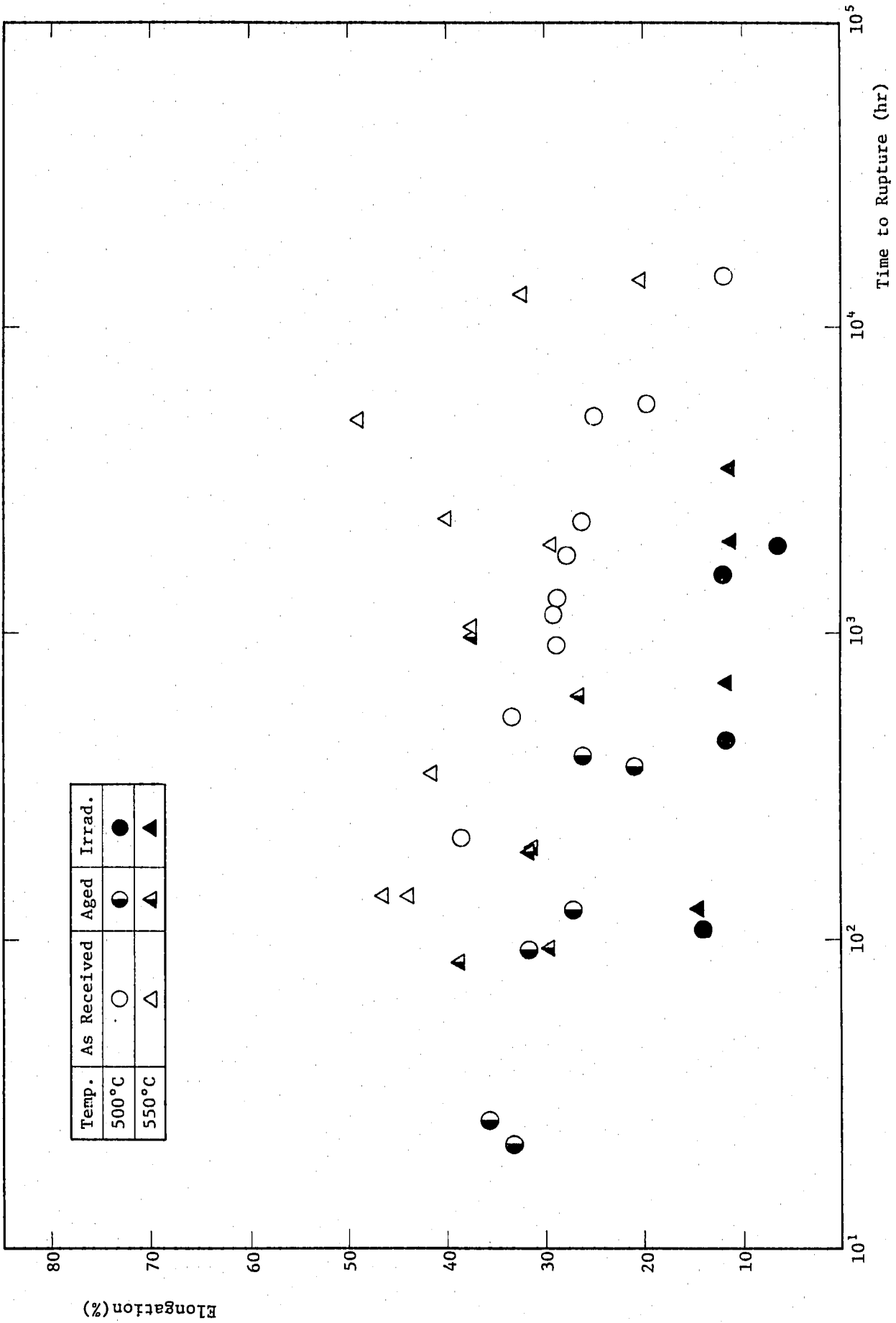


Fig.17 Creep Rupture Elongation of Lot B (SUS 304 Base Metal)

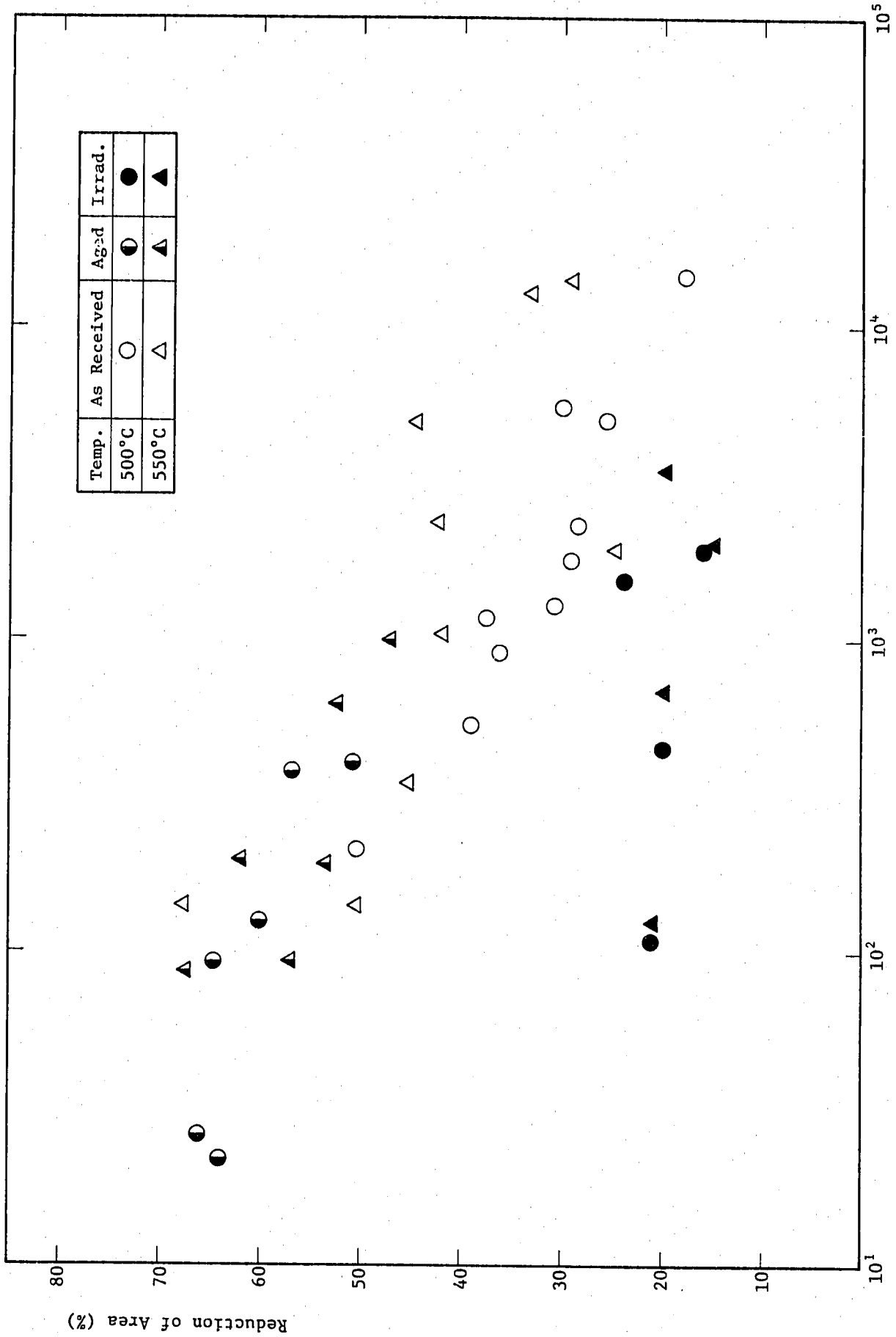


Fig.18 Creep Rupture Reduction of Area of Lot B (SUS 304 Base Metal)

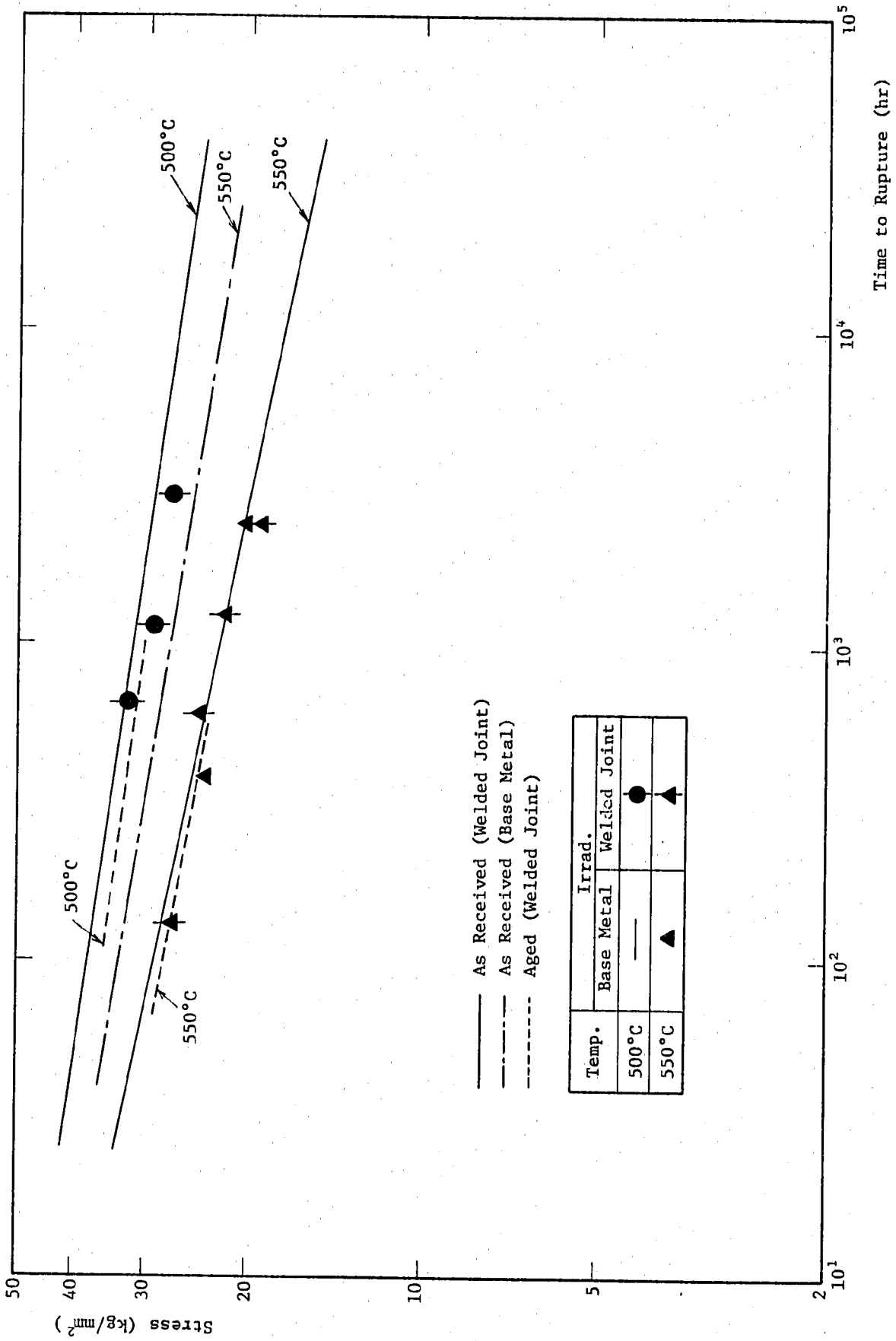


Fig.19 Creep Rupture Strength of Lot C (SUS 304 Base Metal and Welded Joint)

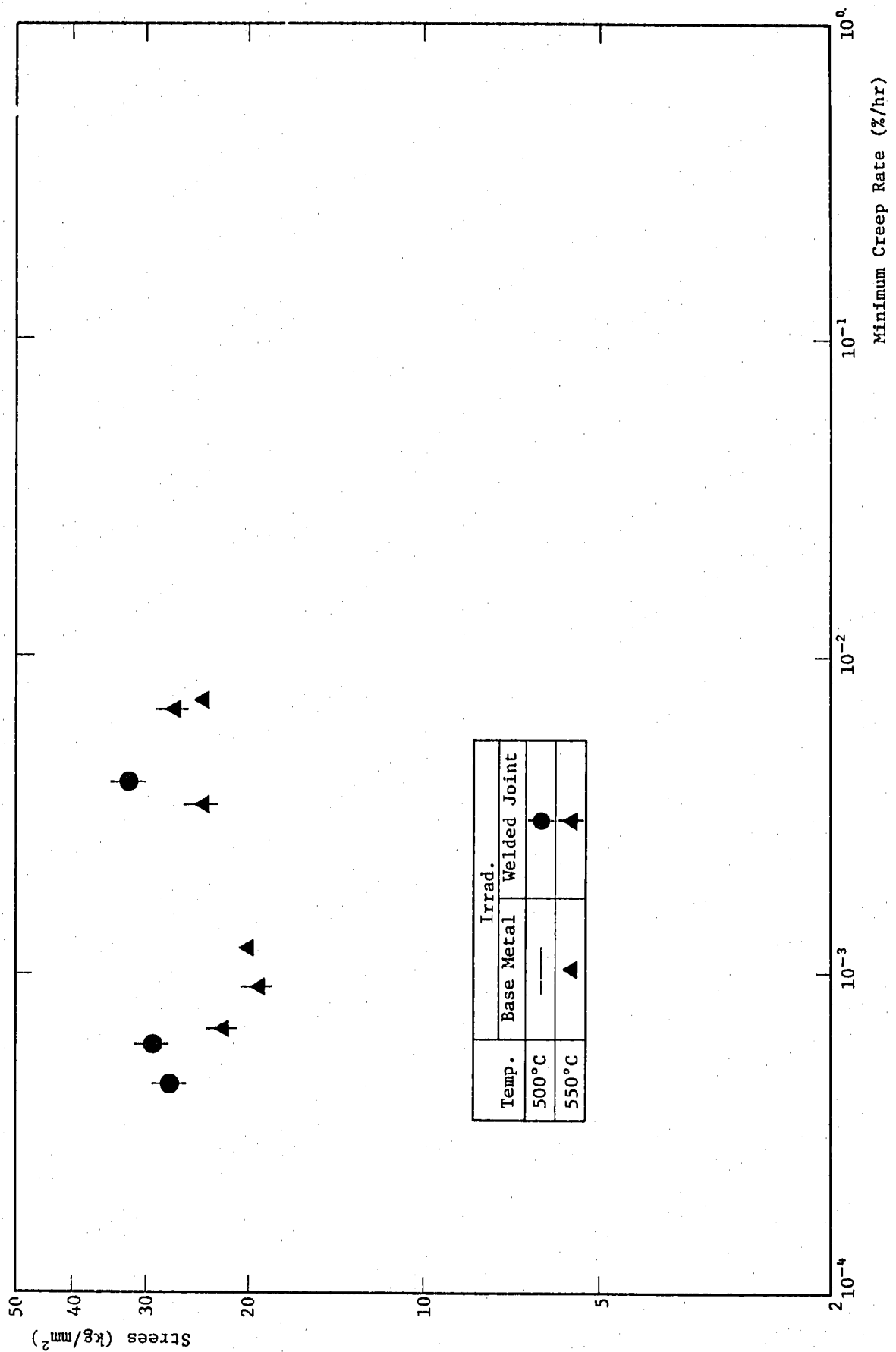


Fig.20 Minimum Creep Rate of Lot C (SUS 304 Base Metal and Welded Joint)

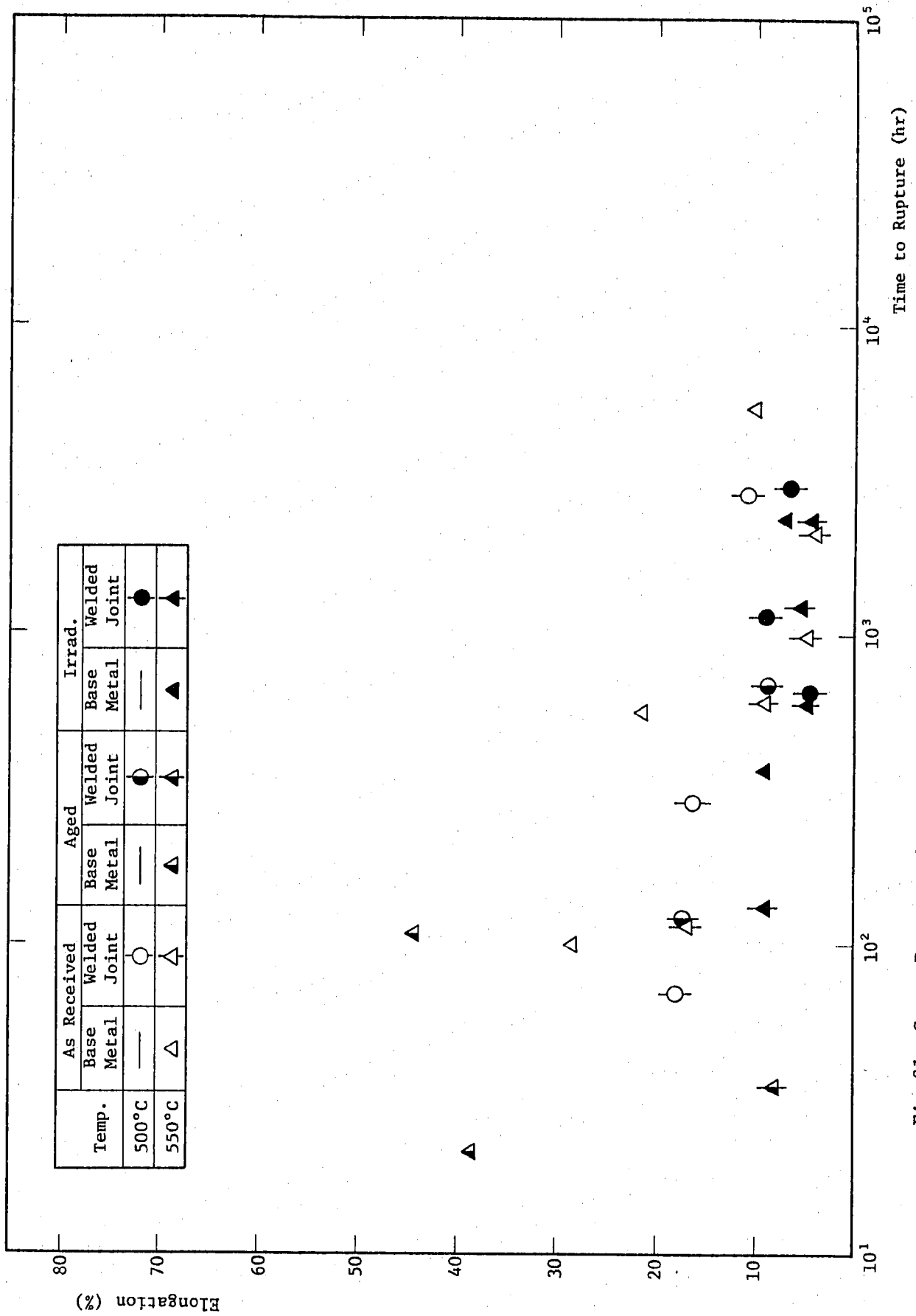


Fig.21 Creep Rupture Elongation of Lot C (SUS 304 Base Metal and Welded Joint)

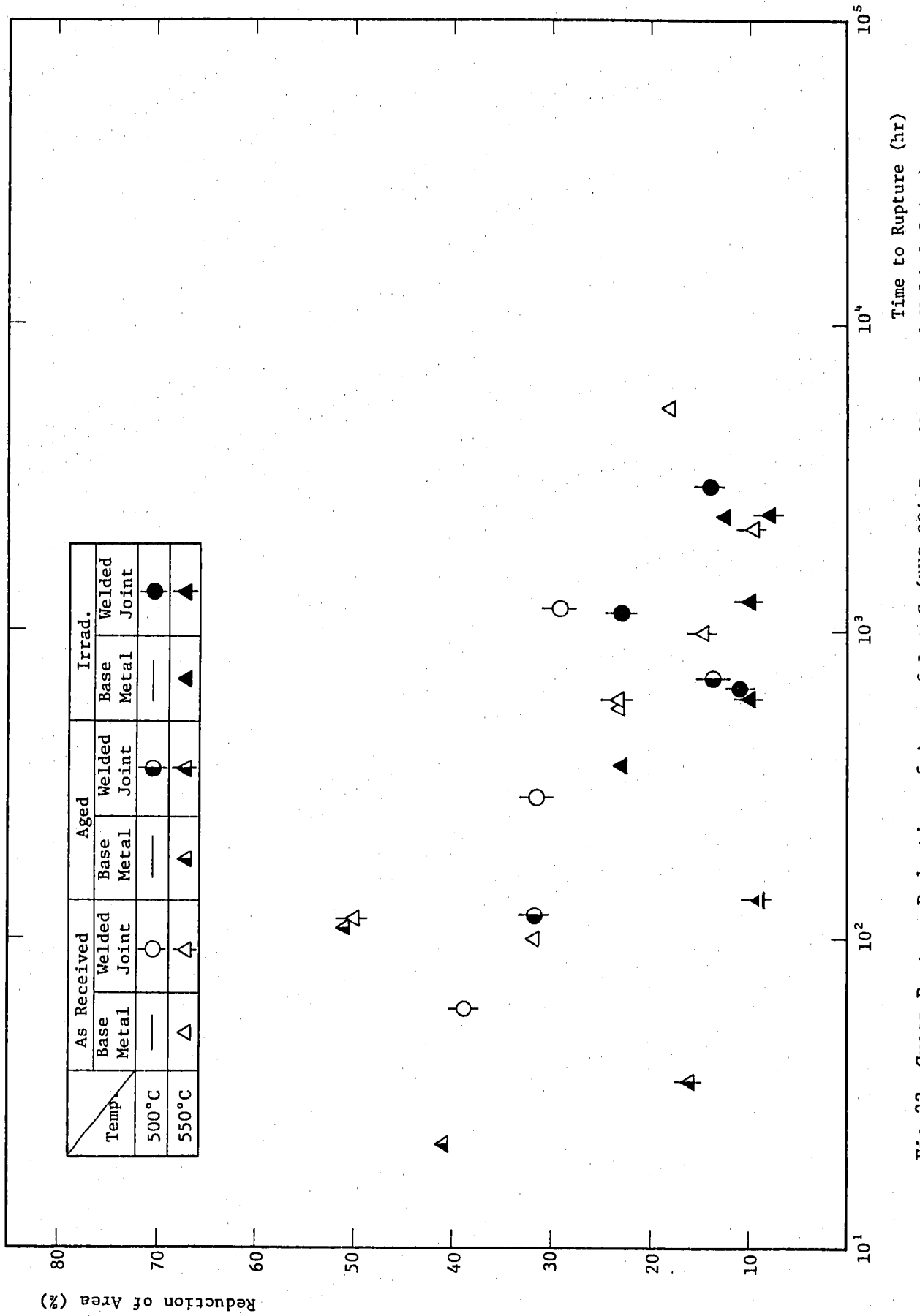
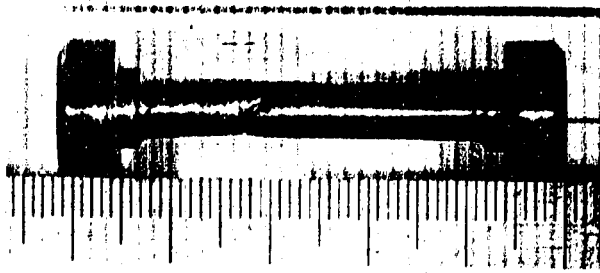
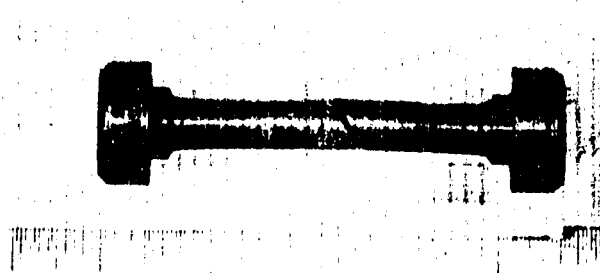


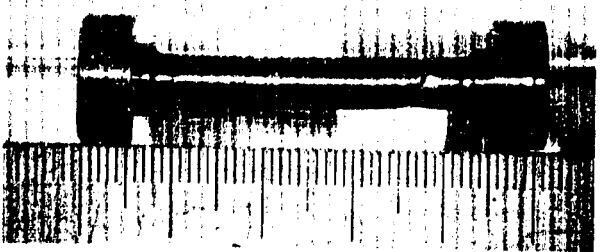
Fig.22 Creep Rupture Reduction of Area of Lot C (SUS 304 Base Metal and Welded Joint)



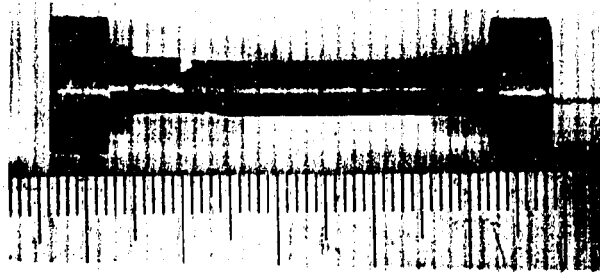
500°C (A9)
28.0 kg/mm², t_R=1,273hr



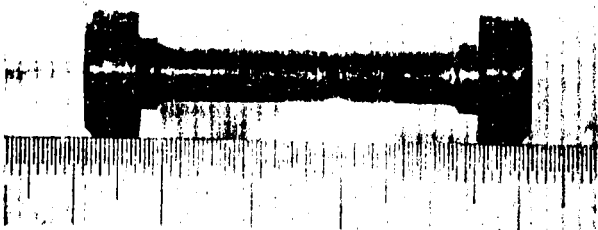
550°C (A5)
19.0 kg/mm², t_R=3,888hr



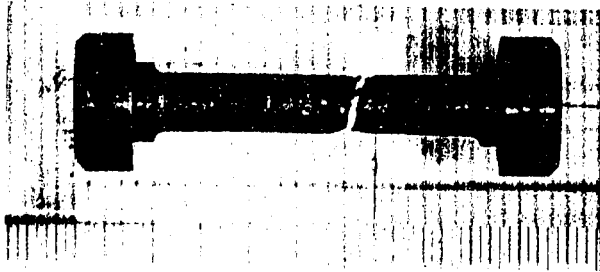
500°C (F13)
27.0 kg/mm², t_R=1,569hr



550°C (F10)
20.0 kg/mm², t_R=1,998hr

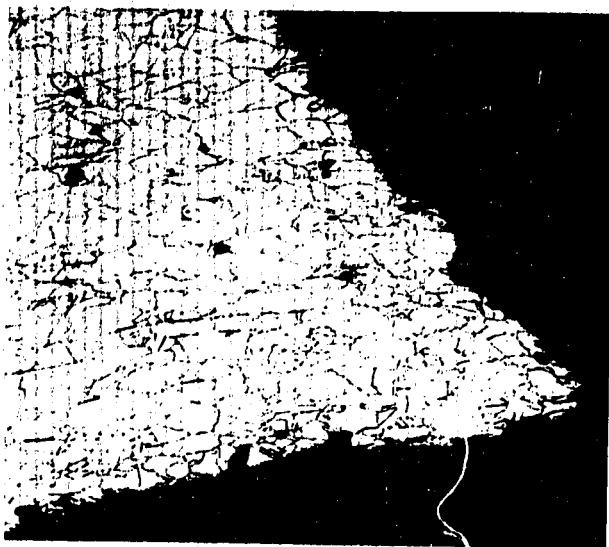


500°C (G12)
27.0 kg/mm², t_R=2,955hr

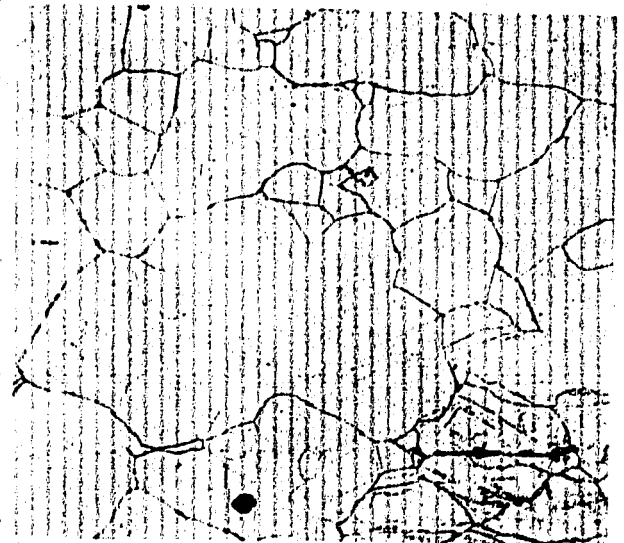


500°C (G5)
19.0 kg/mm², t_R=2,383hr

Fig.23 View of Creep Specimens after Fracture



100μ

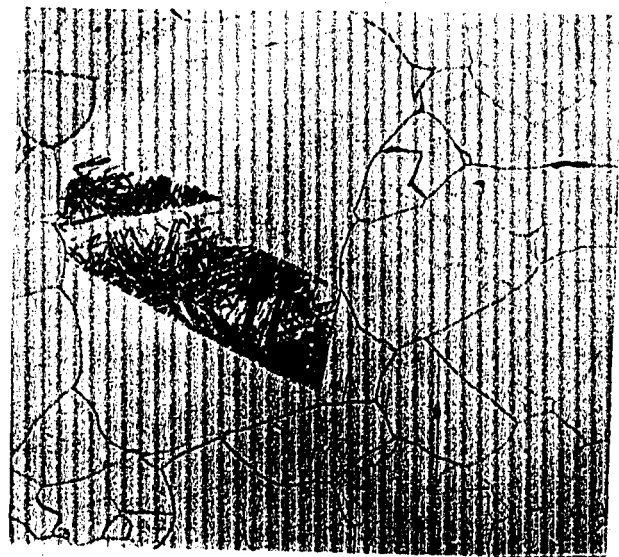


25μ

Test Temperature=500°C, Stress=24.0kg/mm², Time to Rupture=6,312hr (A10)



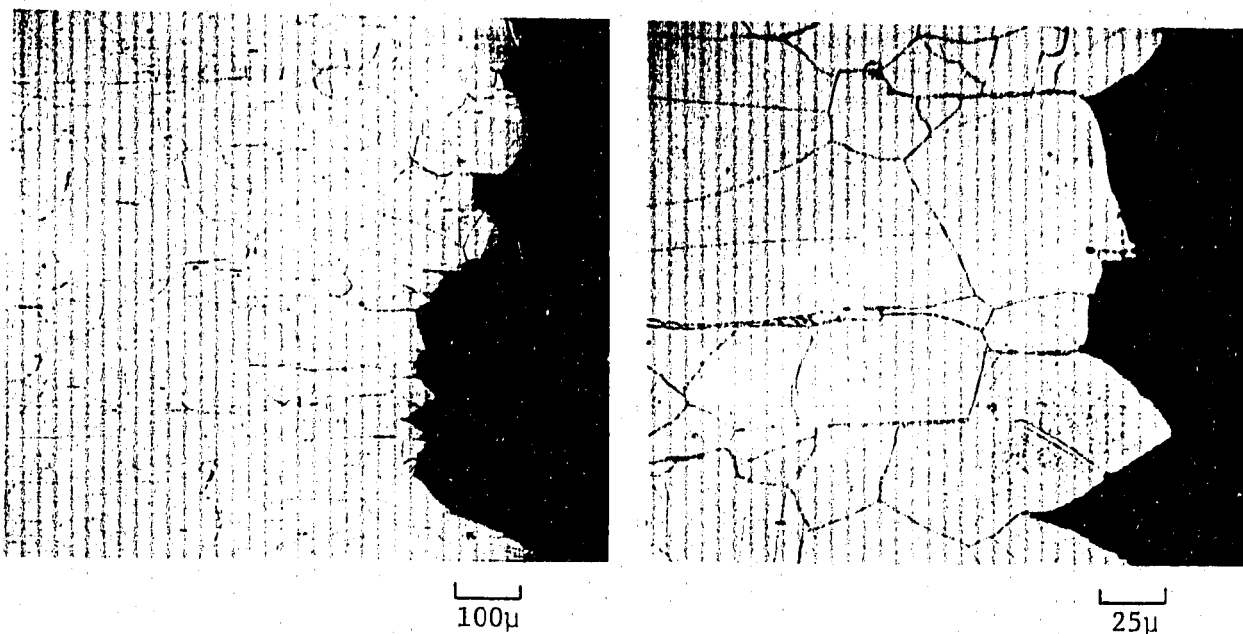
100μ



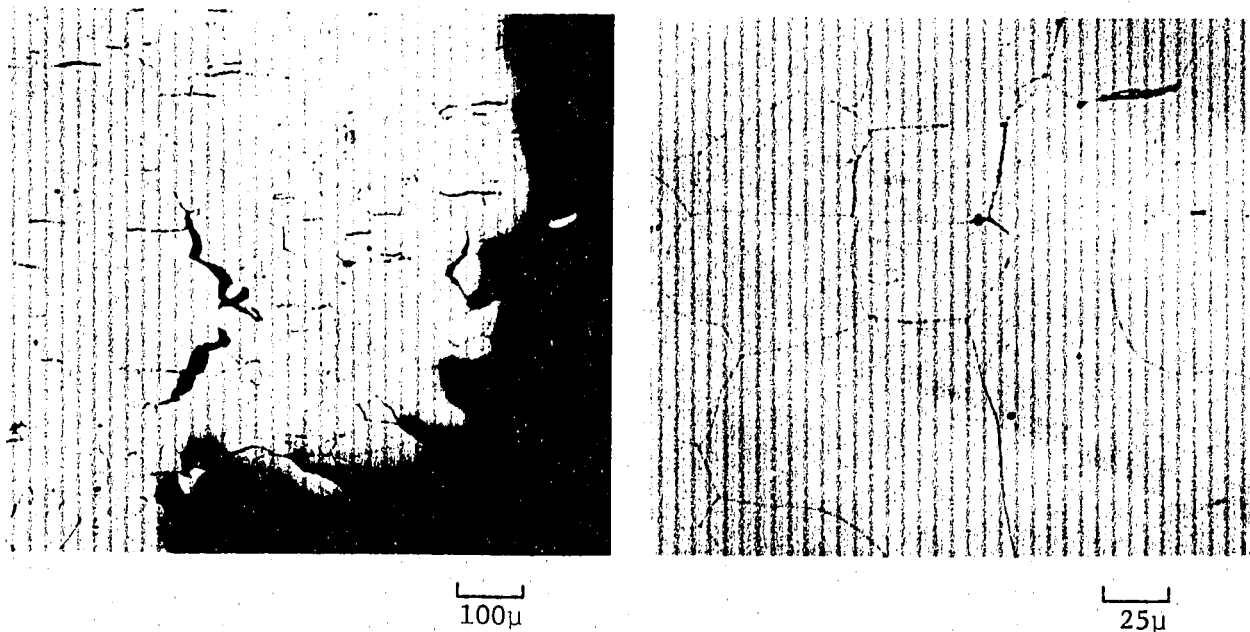
25μ

Test Temperature=550°C, Stress=19.0kg/mm², Time to Rupture=3,888hr (A5)

Fig.24(a) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Base Metal after Creep Rupture (Lot A)

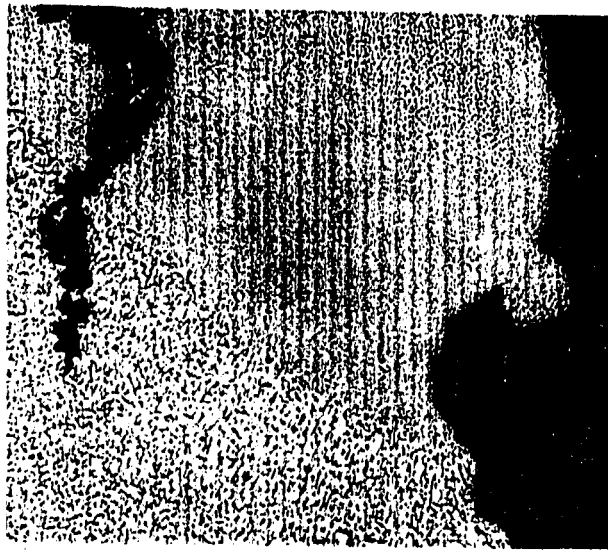


Test Temperature=500°C, Stress=27.0kg/mm², Time to Rupture=1,569hr (F13)



Test Temperature=550°C, Stress=22.0kg/mm², Time to Rupture=680hr (F7)

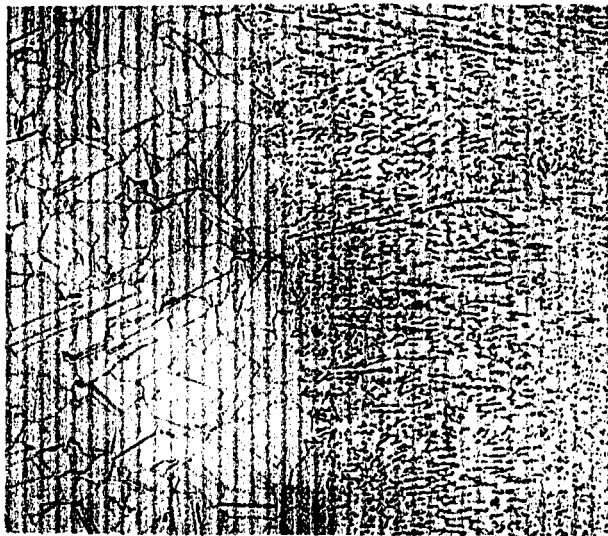
Fig.24(b) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Base Metal after Creep Rupture (Lot B)



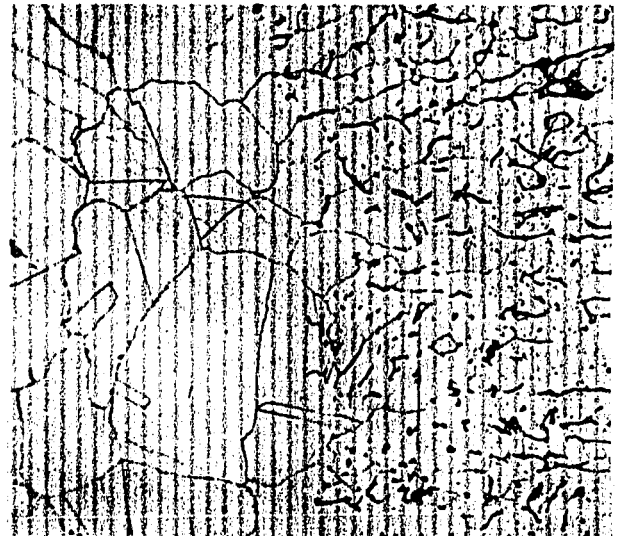
100μ



25μ



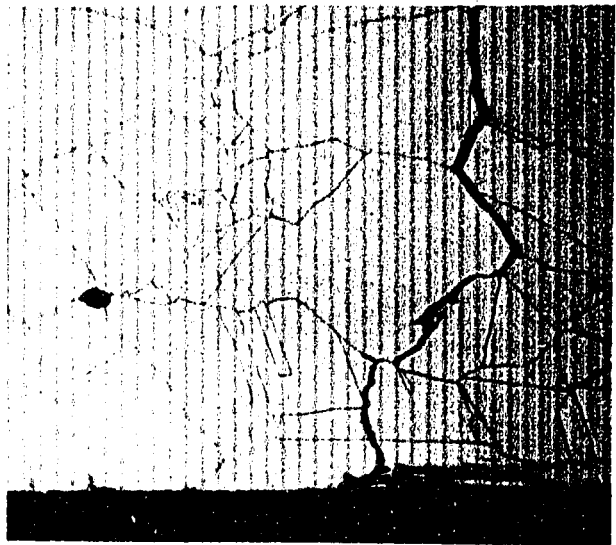
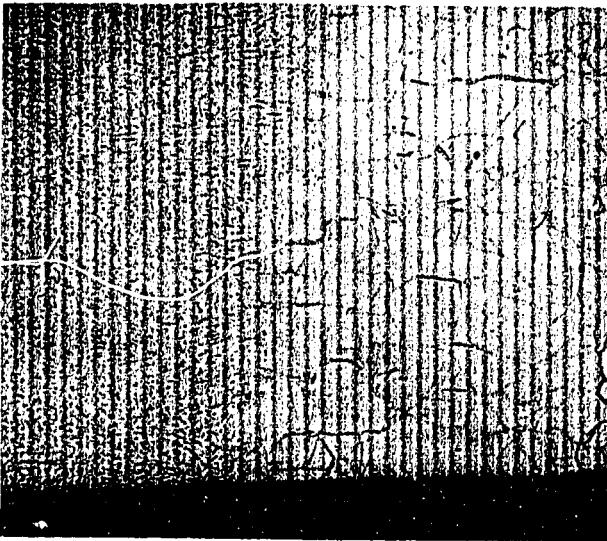
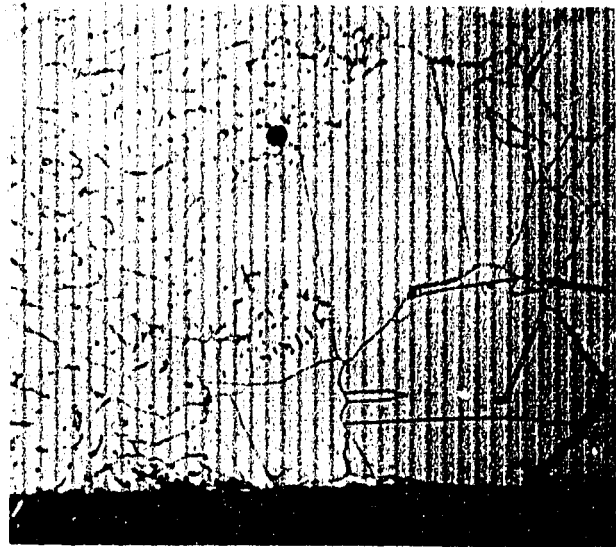
100μ



25μ

Test Temperature=550°C, Stress=19.0kg/mm², Time to Rupture=2,383hr (G5)

Fig.24(C) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Welded Joint after Creep Rupture (Lot C)



Test Temperature=550°C, Stress=29.0kg/mm², Time to Rupture=1,126hr (G6)

Fig.24(d) Micrographs of SUS 304 Stainless Steel Welded Joint after Creep Rupture (Lot C)

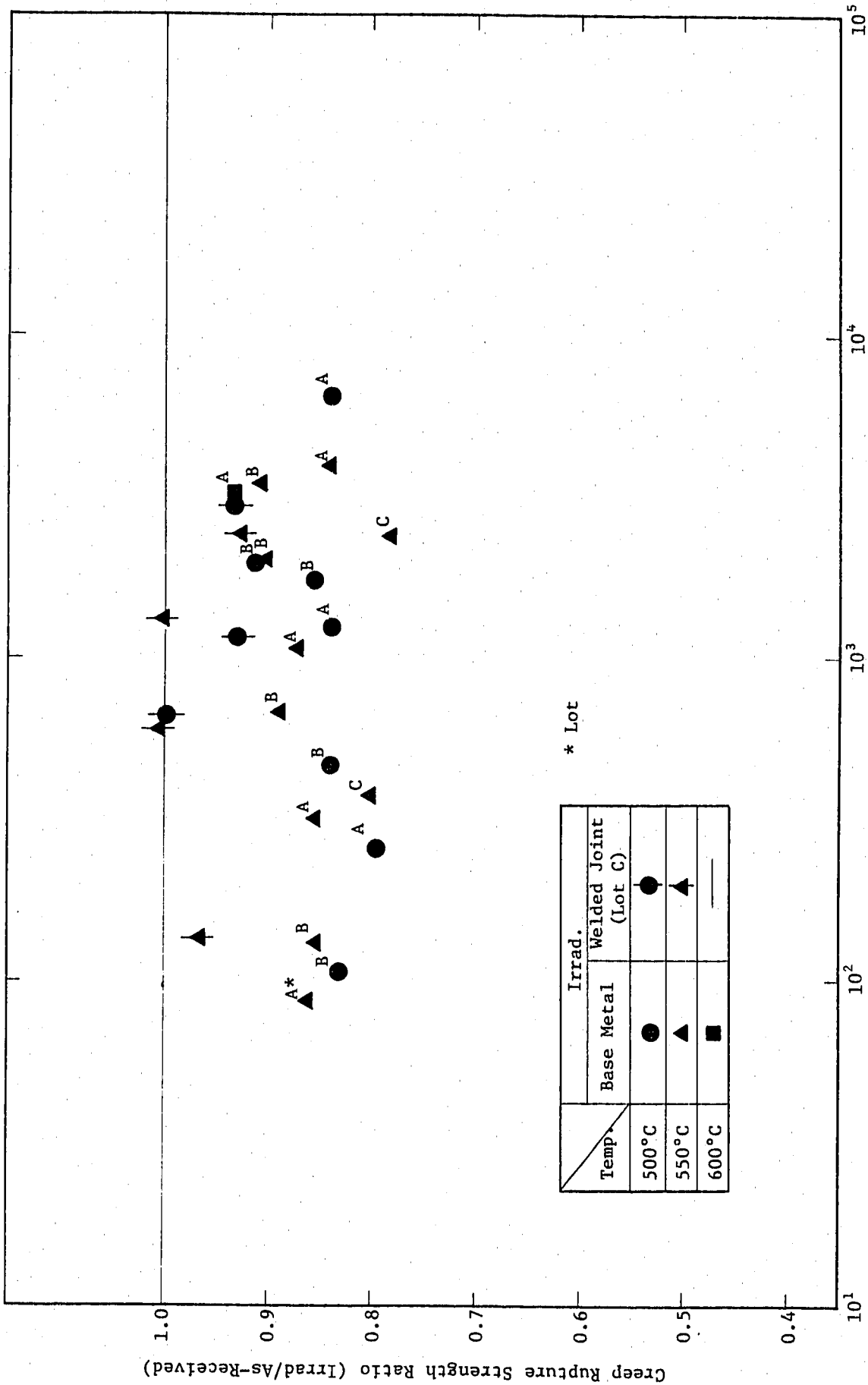


Fig.25 Creep Rupture Strength Ratio of Irradiated and As-Received SUS 304 Base Metal and Welded Joint.

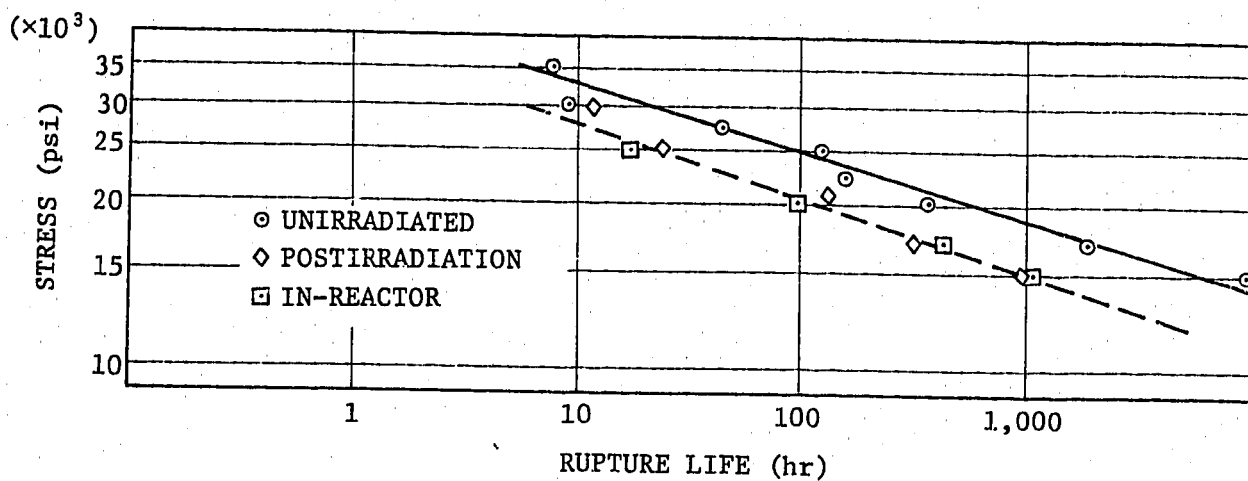


Fig.26 Effect of Neutron Irradiation on the Rupture Life of Type 304 Stainless Steel at 650°C. (Bloom⁴⁾)

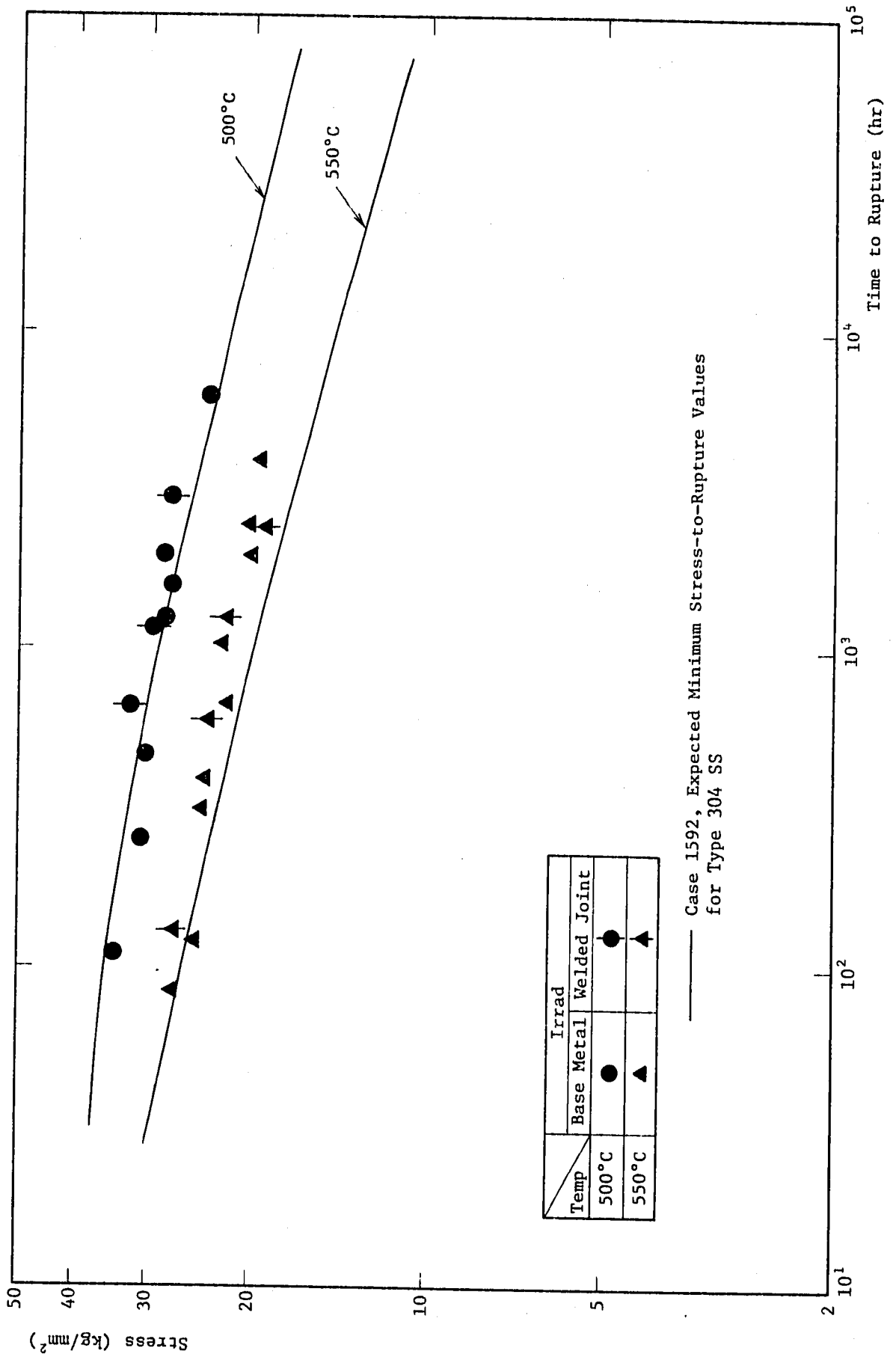


Fig.27 Evaluation of Irradiated Type 304 SS Creep Rupture Strength by ASME Code Case 1592

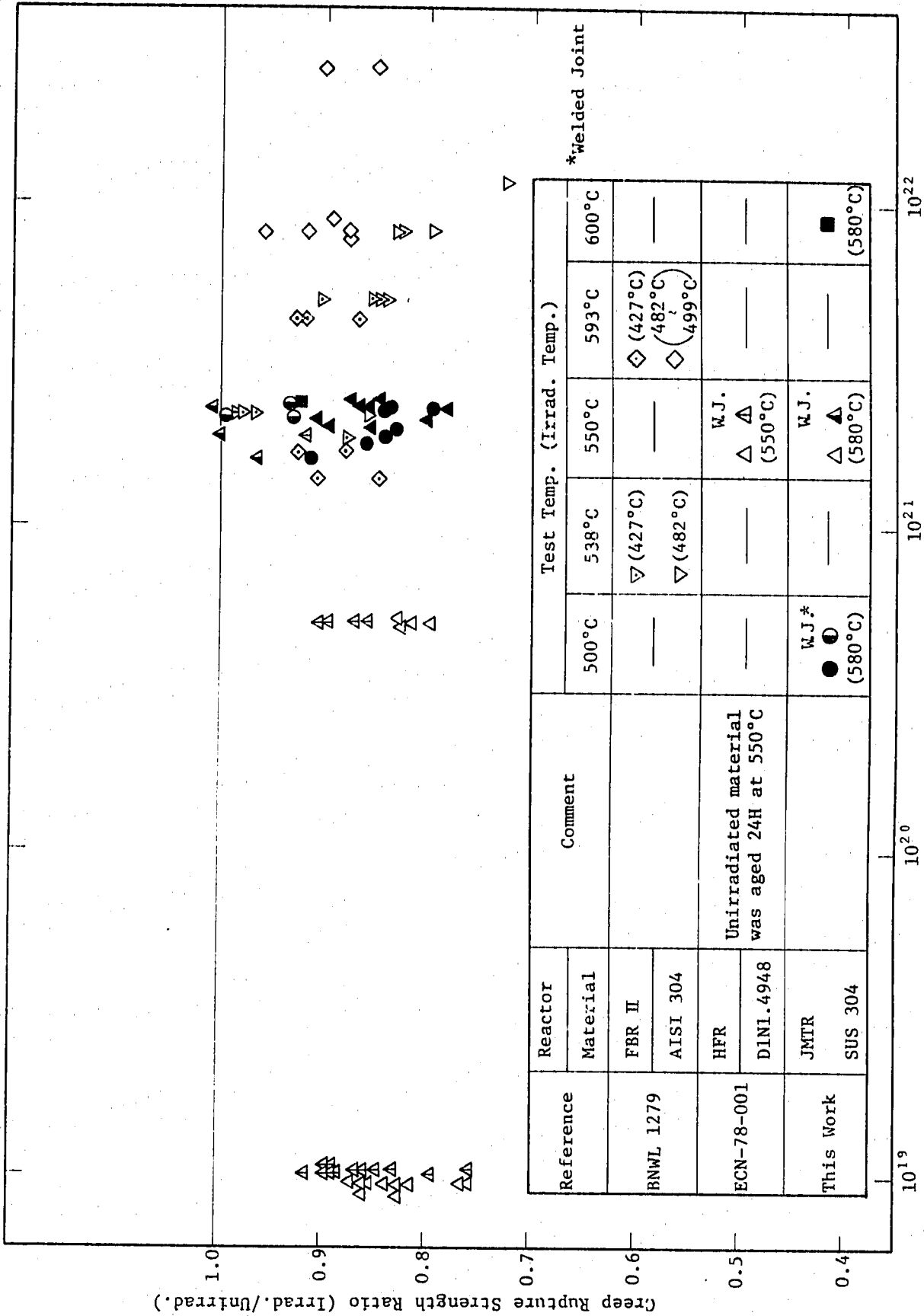


Fig.28 Creep Rupture Strength Ratio as a Function of Neutron Fluence

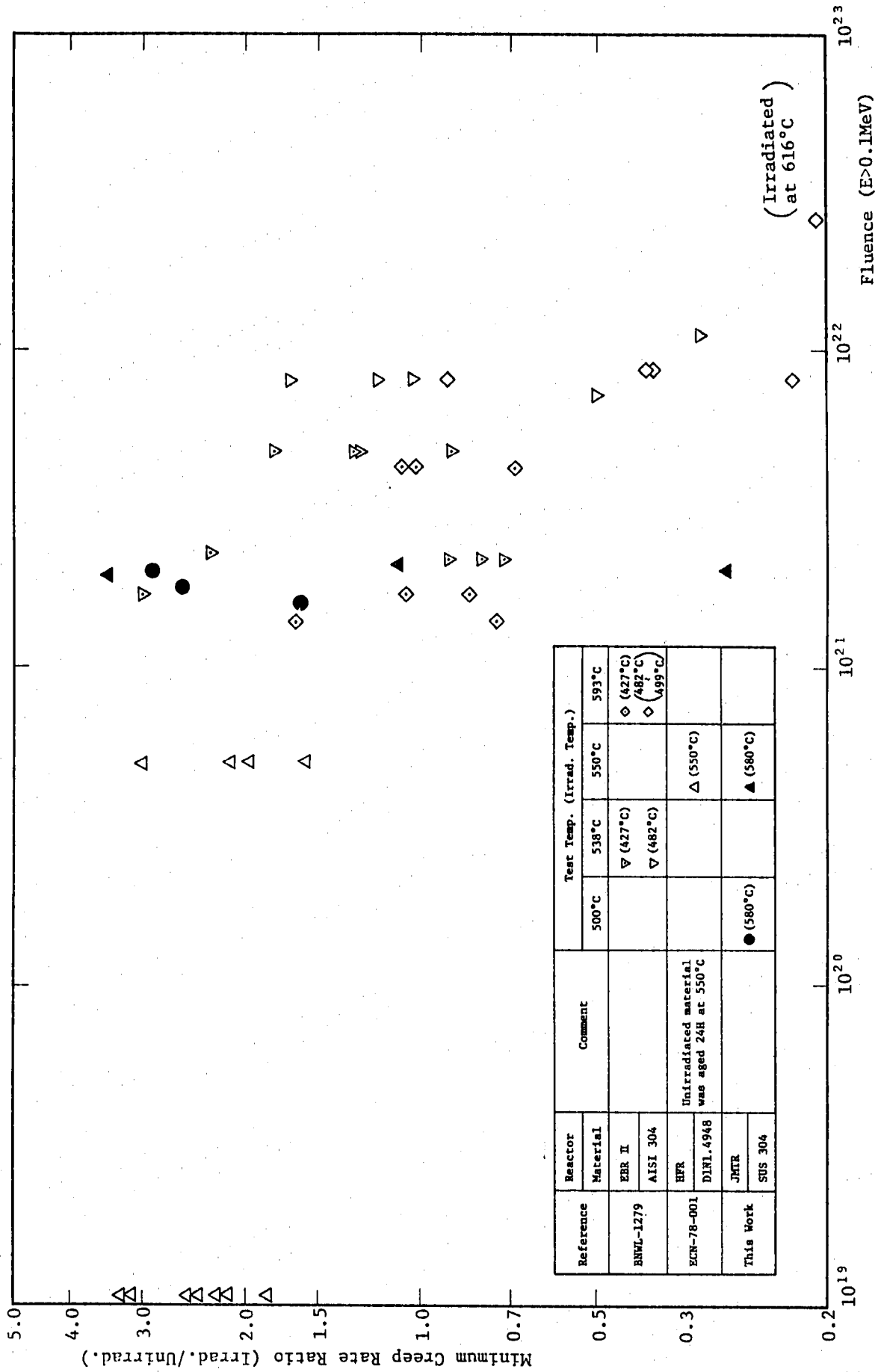


Fig.29 Minimum Creep Rate Ratio as a Function of Neutron Fluence