

「常陽」サーベイランスバックアップ試験

第2報 J M T R 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

(75M-16P)

1980年7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 (75M-16P)

榊原 瑞夫* 谷 賢* 新谷 聖法*
蟹川 昌也* 加藤 博史* 阿部 康弘*
石原 幹也* 鈴木 和久** 一海 俊景*

要 旨

高速実験炉「常陽」の安全性を確認するために、サーベイランス試験が義務づけられているが、試験片数が限られているのでその結果を正しく評価するためにはバックアップ試験が不可欠である。本報告は一連のバックアップ試験のうち「常陽」炉容器及び溶接継手のサーベイランス試験材の一部から採取した試験片を、JMTRで照射温度450～560℃、フリューエンス $0.4 \sim 1.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.1 \text{ MeV}$)で照射し、高温疲れ試験、クリープ破断試験及び金属組織試験等の照射後試験を行った結果である。主な試験結果をまとめると以下のとおりである。

1. 高温疲れ試験結果

- 1) 母材の550℃における寿命は照射によりわずかに低下した。500℃における寿命は短時間側で非照射材に比較し短い、長寿命側ではほぼ等しい。
- 2) 溶接継手では照射材及び非照射材ともデータがばらついており、照射の影響を明確に出来なかった。
- 3) 照射材の粒内、粒界に析出物が認められた。500℃試験材は特定面への析出が、550℃材では粒界反応型析出物が認められた。

2. クリープ破断試験結果

- 1) 母材の500℃試験における破断強度及び破断伸びは照射により減少した。
- 2) 溶接継手の550℃試験における破断強度は照射により長時間側になるに従い増加した。一方、破断伸びは減少した。
- 3) クリープ破断後の光学顕微鏡組織は照射によりほとんど変化が見られなかった。

* 大洗工学センター、燃料材料試験部、照射材料試験室

** 大洗工学センター、燃料材料試験部

Jul., 1980

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

2. High Temperature Fatigue and Creep Rupture Tests on
the Reactor Vessel Material and Its Welded Joint
Irradiated in JMTR

Mizuo Sakakibara*, Satoshi Tani*,
Kiyonori Aratani*, Masaya Kanikawa*,
Hirofumi Kato*, Yasuhiro Abe*,
Mikiya Ishihara*, Kazuhisa Suzuki**
and Toshikage Ikkai*

Abstract

To confirm the safety of fast experimental reactor "JOYO", the material-surveillance tests are required. As the data of the surveillance tests are too restrictive to judge the safety, it is evidently necessary to analyze the numerous back up data for evaluating the results of the material-surveillance tests. This report is one of the back up tests. The test specimens were taken from the same plate and its weldment used for the reactor vessel of "JOYO" and irradiated at 450~560°C to fast neutron fluence of $0.4 \sim 1.1 \times 10^{20}$ n/cm² (>0.1MeV) in the JMTR.

Fatigue and creep rupture tests at 500°C and 550°C, and metallurgical tests were performed before and after irradiation. The results obtained are summarized as follows.

1. Results of fatigue test.

1) Slightly reduction in fatigue life of base metal irradiated and tested at 550°C is observed. Short-term fatigue life of base metal irradiated and tested at 500°C decreased, but one of long-term improved with increasing the cycles and almost equal to one of as received specimen.

2) As the data for welded joints rather scattered, the irradiation

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

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

effects on fatigue life were not able to observe.

3) Precipitates exist on grain boundaries and with in the grains after irradiation. The precipitates along the specific planes were observed in the specimen tested at 500°C after irradiation. Reacted precipitates on grain boundary were also observed in one tested at 550°C.

2. Results of creep rupture test.

1) Both of the creep rupture strength and rupture elongation of the base metal tested at 500°C and 550°C decreased after irradiation.

2) The long-term creep rupture strength of welded joint tested at 550°C increased after irradiation, but the creep rupture elongation decreased.

3) Irradiation effects were not detected by optical microscope.

目 次

1. ま え が き	1
2. 供 試 材	2
3. 照 射 試 験	3
3.1 照 射 キ ャ プ セ ル	3
3.2 照 射 履 歴	3
4. 高 温 疲 れ 試 験	4
4.1 試 験 方 法	4
4.1.1 外 観 検 査 法	4
4.1.2 高 温 疲 れ 試 験 法	4
4.1.3 金 相 及 び 硬 さ 試 験 法	5
4.2 試 験 結 果	5
4.2.1 外 観 検 査 結 果	5
4.2.2 高 温 疲 れ 試 験 結 果	5
4.2.3 金 相 試 験 結 果	7
4.3 試 験 結 果 の 考 察	7
4.3.1 照 射 の 影 響	7
4.3.2 他 の 照 射 後 試 験 結 果 と の 比 較	8
4.3.3 疲 れ 設 計 曲 線 と の 比 較	8
5. ク リ ー プ 破 断 試 験	9
5.1 試 験 方 法	9
5.1.1 外 観 検 査 法	9
5.1.2 ク リ ー プ 破 断 試 験 法	9
5.1.3 金 相 試 験 法	9
5.2 ク リ ー プ 破 断 試 験 結 果	9
5.2.1 外 観 検 査 結 果	9
5.2.2 ク リ ー プ 破 断 試 験 結 果	9
5.2.3 金 相 試 験 結 果	11
5.3 試 験 結 果 の 考 察	11
5.3.1 ク リ ー プ 破 断 強 度 に 及 ぼ す 照 射 の 影 響	11
5.3.2 従 来 の 照 射 デ ー タ と の 比 較	12
5.3.3 設 計 基 準 デ ー タ と の 比 較	12

6. あとがき	13
7. 謝 辞	14
8. 参 考 文 献	15

List of Tables

Table 1.	Mill sheet of test specimen.....	16
Table 2.	Welding procedure.....	17
Table 3.	Low cycle fatigue properties.....	18
Table 4.	Strain and life ratio obtained from the comparison of this work and ASME design curve.....	19
Table 5.	Results of creep tests.....	20

List of Figures

Fig. 1	Profile of Specimens.....	21
Fig. 2	Outlin of irradiation capsule.....	22
Fig. 3	Specimen arrangement in irradiation capsule.....	23
Fig. 4	View of specimens in capsule.....	25
Fig. 5	Irradiation position in JMTR core.....	27
Fig. 6	Thermal history under irradiation for 75M-16P.....	28
Fig. 7	Temperature distribution in capsule.....	29
Fig. 8	Fluence distribution in capsule.....	30
Fig. 9	Profile of adapters for fatigue test.....	31
Fig. 10	Profile of specimen assembly for fatigue test.....	31
Fig. 11(a)	View of specimens before and after fatigue test (Base metal).....	33
Fig. 11(b)	View of specimens before and after fatigue test (Welded joint).....	35
Fig. 12	Effect of test temperature on fatigue life of base metal (As received).....	37
Fig. 13	Effect of test temperature on fatigue life of welded joint (As received).....	38
Fig. 14	Effect of test temperature on fatigue life of base metal (irradiated).....	39
Fig. 15	Effect of test temperature on fatigue life of welded joint (irradiated).....	40
Fig. 16	Effect of irradiation on fatigue life of base metal at 500°C.....	41
Fig. 17	Effect of irradiation on fatigue life of base metal at 550°C.....	42
Fig. 18	Effect of irradiation on fatigue life of welded joint at 500°C.....	43
Fig. 19	Effect of irradiation on fatigue life of welded joint at 550°C.....	44
Fig. 20	Stress range as a function of number of the fatigue cycles for base metal at 500°C.....	45
Fig. 21	Stress range as a function of number of the cycles for base metal at 550°C.....	46

Fig. 22	Stress range as a function of number of the cycles for welded joint at 500°C.....	47
Fig. 23	Stress range as a function of number of the cycles for welded joint at 550°C.....	48
Fig. 24	Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for as recieved materials at 500°C.....	49
Fig. 25	Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for irradiated materials at 500°C.....	50
Fig. 26	Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for as recieved materials at 550°C.....	51
Fig. 27	Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for irradiated materials at 550°C.....	52
Fig. 28	Micrographs of the cross section of specimens tested at 500°C and 550°C.....	53
Fig. 29	Comparison of fatigue life between this work and others for base metal at 500°C.....	55
Fig. 30	Comparison of fatigue life between this work and others for base metal at 550°C.....	56
Fig. 31	Comparison of fatigue life between this work and design curve at 500°C.....	57
Fig. 32	Comparison of fatigue life between this work and design curve at 550°C.....	58
Fig. 33	Effect of specimen size on fatigue life of base metal at 550°C (As received).....	59
Fig. 34	View of specimens before creep test.....	61
Fig. 35	View of specimens after creep test.....	63
Fig. 36	Effect of irradiation on creep rupture strength of SUS304 tested at 500°C and 550°C.....	65
Fig. 37	Effect of irradiation on minimum creep rate of SUS304 tested at 500°C and 550°C.....	66
Fig. 38	Effect of irradiation on creep rupture elongation of SUS304 tested at 500°C and 550°C.....	67
Fig. 39	Effect of irradiation on the creep rupture reduction of area of SUS304 tested at 500°C and 550°C.....	68
Fig. 40	Micrographs of the cross section of specimens Irradiated and creep ruptrue tested (Base metal)....	69

Fig. 41	Micrographs of the cross section of specimens irradiated and creep rupture tested (welded joint)...	71
Fig. 42	Comparison of creep rupture strength between this work and others for base metal tested at 550°C.....	73
Fig. 43	Comparison of creep rupture strength between this work and others for welded joint tested at 550°C....	74
Fig. 44	Comparison of creep rupture elongation between this work and others for base metal tested at 550°C.....	75
Fig. 45	Comparison of creep rupture elongation between this work and others for welded joint tested at 550°C.....	76
Fig. 46	Comparison of creep rupture strength ratio between this work and others as a function of neutron fluence.....	77
Fig. 47	Comparison of creep rupture strength among this work, the design guide for "JOYO" and design curve of ASME code case 1592.....	78

1. ま え が き

高速実験炉「常陽」の安全性を確認するためにサーベイランス試験が義務づけられている。しかし、炉心にサーベイランス試験用孔を数多く取れないこと及びキャプセル内容積が限られていることからサーベイランス用試験片数を多く取ることは不可能であり、照射後試験条件も自ずから限られる。従ってサーベイランス試験結果を正しく評価するためには一連のバックアップ試験結果と併せ評価する必要がある。そのサーベイランスバックアップ試験の一環として「常陽」炉容器材から採取した引張試験片、疲れ試験片及びクリープ試験片を原研材料試験炉（JMTR）で照射温度450～560℃、フリューエンス $0.4 \sim 1.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ （ $> 0.1 \text{ MeV}$ ）照射し、照射後試験を行った。本報は照射前後における試験片の外観検査、高温疲れ試験、クリープ破断試験及び金相試験を行った結果をまとめたものである。なお、引張試験については第1報として¹⁾すでに報告した。

2. 供 試 材

供試材は高速実験炉「常陽」炉容器のサーベイランス試験材の一部から採取した母材及び溶接継手である。母材は板厚 25 mm の溶体化処理された SUS 304 で、そのミルシート値を Table 1 に示す。溶接継手は母材の圧延方向に直角に開先をとり Table 2 に示す施工条件により溶接した素材から採取した。試験片形状を Fig. 1 に示す。高温疲れ試験片は砂時計型で最小部の径は 4 mm であり、クリープ破断試験片は平行部径 6 mm、平行部長さ 30 mm である。試験片の採取位置は母材及び溶接継手ともに板厚の中心部とし、試験片の長さ方向を圧延方向に平行にとった。また溶接継手試験片は溶接線と直角に採取し、高温疲れ試験片では最小径の部分に溶接境界がくるようにした。またクリープ破断試験片では平行部中央に溶接境界線がくるようにした。

3. 照射試験

3.1 照射キャプセル

照射キャプセル(75M-16P, 以下16P)の概要をFig. 2に示す。キャプセル内には本実験で使用した高温疲れ試験片16本とクリープ試験片18本(6mm径)のほか引張試験片18本, 微小クリープ試験片18本, 照射温度測定用熱電対6本とフリュウエンス測定用フラックスモニター3本が配置されている。試験片の配置と試験片符号をFig. 3に示す。又, 試験片符号をFig. 3に示す。又, 試験片装荷状態及び計装装置の配置状況はFig. 4に示した通りであり, 試験目的に応じて同一種類の試験片では照射温度と照射量をできるだけそろえるように配慮した。

3.2 照射履歴

照射はJMTRのベリリウム反射体領域で行われた。Fig. 5に照射孔の位置を示す。16Pの照射キャプセルはF-12照射孔で38~39の2サイクル照射された。Fig. 6に照射キャプセル内の各位置に装着された熱電対による温度記録の詳細を示す。各位置の温度は照射サイクル間及び照射期間中はほぼ一定であった。Fig. 7に各測定位置における照射温度の平均値を示す。温度測定はI, II, IV, K及びXゾーンにて行ったが, I, IIゾーンに比較し炉心に近いIVゾーンで温度が低目になっている。この原因については不明であるが, 所期の目的である照射条件を大きく逸脱するものではなく, 各試験片とも照射温度と試験温度を考慮することにより, 照射後試験に供した。Fig. 8に各測定位置III, VI及びXゾーンにおける高速中性子(>1 MeV)のフラックスモニターによる測定値と補正計算した各位置でのフリュウエンスを示す。1 MeV以上のフリュウエンスはフラックスモニターによる測定値から計算して求めたものであり, 0.1 MeV以上のフリュウエンスは原研から提出された換算値を用い計算で求めたものである。

照射材の機械的性質を評価する場合には中性子エネルギー0.1 MeV以上のフリュウエンスを用いることが多く, 本報告ではこの値を採用した。

定格出力時における高温疲れ試験片及びクリープ試験片の照射温度は400°C~560°Cの範囲に分布しており, 照射時間は849時間で $0.4 \sim 1.1 \times 10^{20}$ n/cm²のフリュウエンスであった。

4. 高温疲れ試験

4.1 試験方法

4.1.1 外観検査法

試験前後に全試験片の目視検査を行い、外観を写真撮影した。照射材の写真撮影にはペリスコープを用いた。

4.1.2 疲れ試験法

試験には容量 5 トンの遠隔操作型引張圧縮疲れ試験機を使用した。試験片を装荷するために Fig. 9a 及び Fig. 9b に示す治具を用い Fig. 10 に示す形状に組立てた。また、ネジのクリアランスによる不具合を防止するために、試験片装着後、チャックに内蔵された油圧ピストンにより、Fig. 9a 部を加圧圧潰し、試験機に固定した。

加熱には割り型管状電気炉を用い、試験温度に達したのち約 30 分保持した。均熱帯は約 60 mm で時間的溫度変化を含めて設定温度 ± 3 °C の範囲内であった。また、照射温度と試験温度をできるだけ近くするために、500 °C 試験には 440 °C ~ 500 °C 照射材を、550 °C 試験には 530 °C ~ 560 °C 照射材をあてた。

試験は繰り返し速度 0.07 Hz の正弦波を用いひずみ制御にて行った。引張側より開始し徐々にひずみを増加して約 10 回で所定のひずみ範囲に達するようにした。破断繰り返し数 (Nf) は、引張側荷重が予定 Nf のほぼ 1/2 にあたる繰り返し数における引張荷重の 50 % 以下に減少した時点をもって Nf と定義した。また軸ひずみ範囲、軸応力範囲は次式により求めた。

$$\Delta \epsilon_t = 2 \ln (d_2/d_1) + (1 - 2\nu) \Delta \sigma / E$$

$$\Delta \epsilon_e = \Delta \sigma / E$$

$$\Delta \epsilon_p = \epsilon_t - \epsilon_e$$

$$\Delta \sigma = \frac{P_t}{A_t} + \frac{P_c}{A_c}$$

但し、 E ; ヤング率 (500 °C ; $1.62 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, 550 °C ; $1.57 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$)

ν ; ポアソン比 (500 °C ; 0.302, 550 °C ; 0.306)

d_1 ; Pt 時の直径 (mm)

d_2 ; Pc 時の直径 (mm)

Pt ; 引張最大荷重 (kg)

Pc ; 圧縮最大荷重 (kg)

A_t ; Pt 時の断面積 (mm^2)

A_c ; Pc 時の断面積 (mm^2)

4.1.3 金相及び硬さ試験法

試験後、破断部近傍と把み部の縦断面について光学顕微鏡による組織観察を行った。エッチングには10%過硫酸アンモニア水溶液を用いた。非照射材はオリンパスPNG2型光学顕微鏡で50倍及び400倍で撮影した。

照射材はホットセル内光学顕微鏡(ライヘルト社製, テラトーム)にて100倍及び400倍で撮影した。又、一部試料についてはホットセル内の遠隔操作型ビッカース硬さ計にて10kg荷重で硬さ測定を行った。

4.2 試験結果

4.2.1 外観検査結果

試験前後における外観検査結果の代表的なものについてFig. 11に示す。照射材の表面には黒色の斑点状付着物かみられた。試験後の外観は照射材、非照射材ともにほぼ同じで、とくに変化はみられなかった。

4.2.2 高温疲れ試験結果

Table. 3に試験結果をまとめて示す。母材及び溶接継手の試験温度及び照射の影響について以下のことが明らかになった。

1) 試験温度の影響

(1) 非照射材(母材)

Fig. 12に示すとおり550°Cにおける疲れ寿命は500°Cよりもやや短く、寿命比は約1~1.5であり、ひずみ比は約1.2であった。

(2) 非照射材(溶接継手)

Fig. 13に示すとおり、割れが母材を伝播した $\epsilon_t = 1.56\%$ のデータを除けば、500°Cと550°C試験材ではほぼ同じ寿命と考えられる。

(3) 照射材(母材)

Fig. 14に示すとおり、550°Cにおける疲れ寿命は500°Cにおける寿命よりもひずみ範囲が高い領域で長い、 ϵ_t が約1%近くになると両者はほぼ一致する。

(4) 照射材(溶接継手)

Fig. 15に示すとおり、得られたデータが少なく、はっきりした傾向は明らかでないが、試験した範囲内では500°Cと550°Cの寿命には大きな差は認められなかった。

2) 照射の影響

(1) 母材 (500°C試験)

Fig. 16に示すとおり、照射材の疲れ寿命は低下している。しかし、低ひずみ範囲側では寿命比は小さくなる傾向を示している。寿命比は約1.4~4.0であった。

(2) 母材 (550°C試験)

Fig. 17に示すとおり照射材の疲れ寿命は非照射材とほぼ同じであった。

(3) 溶接継手 (500°C試験)

Fig. 18に示すとおり、 $\epsilon_t = 1.56\%$ の非照射材の破断寿命が長い、この試験片は割れが母材側を伝播しており、母材特性の影響を強く受けていると思われる。このためのバラツキと得られたデータが少ないこともあって、はっきりした傾向は明らかではないが、照射材の疲れ寿命は高ひずみ範囲側でやや低下しているように思われる。

(4) 溶接継手 (550°C試験)

Fig. 19に示すとおり、得られたデータは少ないが、照射材に疲れ寿命の低下が認められる。寿命比は約1.5であった。

3) 応力範囲の繰り返し数による変化

(1) 母材 (500°C及び550°C試験)

Fig. 20及び21に示す。照射材の550°C、 $N_f = 878$ の10~30サイクルのデータを除けば500°C及び550°C試験材ともに10サイクル以上で照射材は加工軟化を示し、非照射材は加工硬化を示している。これは照射により母材が著しく硬化したためと考えられる。

また、この傾向は550°C試験よりも500°C試験で著しい。

(2) 溶接継手 (500°C及び550°C試験)

Fig. 22及び23に示す。照射材では500°C、550°Cともに加工軟化を示している。非照射材では500°C、 $N_f = 122$ のデータを除けば母材と同様に加工硬化を示している。500°C、 $N_f = 122$ の試験片は、高ひずみのために10サイクル以下で著しい加工硬化を示し10サイクル以上では加工軟化を示しているものと考えられる。

4) 母材と溶接継手の比較

(1) 500°C試験

Fig. 24及び25に示す。割れが母材を伝播した $\epsilon_t = 1.56\%$ の溶接継手のデータを除けば、非照射材の場合、母材に比較し溶接継手の寿命は短い。照射材の場合は母材と溶接継手ではほぼ同じ寿命をもっている。

(2) 550℃試験

Fig. 26及び27に示す。非照射材の高ひずみ範囲側では母材と溶接継手はほぼ同じ寿命を示している。しかしその点を除けば、非照射材、照射材ともに母材に比較し溶接継手の寿命は短い。

4.2.3 金相試験

Fig. 28に金相試験の結果を示す。非照射材の受入ままの組織にくらべ、500℃及び550℃試験後では粒内に析出物が認められるが試験温度による変化はほとんど認められないようである。照射した500℃試験材では粒内の特定面にそって析出物が認められるが、550℃試験材では粒状析出物がほぼ均一に分散していた。また粒界反応型の析出物が認められ、照射により疲れ試験後の金相に差が認められることが明らかである。

疲れ試験後の組織中には疲れによるサブクラックが認められるが、いずれも粒内を伝播しており、照射による影響は認められなかった。

4.3 試験結果の考察

4.3.1 照射の影響

Fig. 16及び17の比較から母材についての試験温度及び照射の疲れ寿命に及ぼす影響を考察すると550℃試験では照射の影響がほとんど認められないのに対して、500℃試験では寿命低下が認められた。

一般に低サイクル領域において疲れ寿命は材料の延性に依存すると考えられているが、同時に照射された同一材料の引張特性について照射による延性低下が報告されており、⁽¹⁾ 500℃試験結果を裏付けているものと考えられる。また、500℃試験については、高ひずみ側で寿命低下が著しく、低ひずみ側では低下がわずかである。Fig. 20にみられるように、照射材は繰り返し軟化を示しており、これは照射による損傷が高温度での疲れ試験過程で回復されていく現象を示しているものと考えられる。高ひずみ側ではこの回復に要する時間が十分でなく照射材が非照射材に比較し、短寿命を示すのに対し、破断までに長時間を要する低ひずみ側では損傷の回復が進むことにより非照射材とほぼ同じ寿命を示すと考えることもできるが、さらに試験結果を蓄積し、あわせてマイクロ観察(電顕等)も実施していくことが現象の説明には必要である。

550℃試験結果については、前述の結果から推定される傾向とは一致しない。一般に、照射により硬さは高くなると考えられるが、⁽³⁾ 550℃試験材について試験後、チャック部近傍の硬さを測定した結果、非照射材とほぼ同等の数値を示し、500℃試験材がHvで約100程度高い数値を示した結果とは異なっていた。すなわち、550℃試験材においては何らか

の原因で照射の影響が阻止または回復された結果、疲れ寿命が非照射材とはほぼ同等になったものと考えられる。

一方、溶接継手においては Fig. 18 及び Fig. 19 に示したように照射により寿命がやや低下するようと思われるが、得られた試験結果が少ないため照射の影響を明らかにするにはいたらなかった。今後試験片の採取位置、試験片形状を含めて系統的な試験を実施し、その影響を明らかにしていく必要がある。

4.3.2 他の照射後試験結果との比較

照射材の疲れ試験データは国内外を問わず少なく、本試験結果と比較できるものはごくわずかである。

Fig. 29 は 500°C 母材試験結果を同程度の照射温度、試験温度の高速炉照射データと比較したものであるが、図よりわかるとおり、本試験とはほぼ一致していた。⁽⁴⁾

Fig. 30 には 550°C 母材試験結果を JMTR 照射 (70M-61P) の結果と比較して示したが、これもほぼ同じ傾向を示し照射量による差はみられなかった。⁽⁵⁾

以上のように内外のデータと比較したが、データ数が少なくとくに継手については全く評価できないのが現状である。したがって、構造材料の設計指針を与えるためにはさらにデータを積み上げていく必要がある。

4.3.3 疲れ設計曲線との比較

Fig. 31 及び 32 に試験結果を ASME Code Case 1592-10 の全軸ひずみ範囲⁽⁶⁾ (ϵ_t) による疲れ設計曲線と比較して示した。「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針によれば、寿命末期までに受ける熱サイクル数は約 1,000 回であるため、本項での評価は、破断繰返し数 1,000 回における寿命比、ひずみ比を対象とすることにした。

Table. 4 に寿命比、ひずみ比をまとめて示した。これより、全てのデータは ASME の疲れ設計曲線を上まわっていることがわかる。とくにひずみ比に関しては設計曲線の安全率 2 をほぼ満足していた。寿命比に関しては約 7.1 ~ 20.0 であり安全率 20 を割っていた。本試験に用いた試験片は照射リグの制約上 4 mm 径であるが 8 mm 径のサーベイランス確認試験⁽⁷⁾結果と比較すると Fig. 33 に示すように約 1.4 ~ 1.9 の寿命比がある。したがって、本結果でもこの試験片寸法効果を考慮して評価する必要があると考えられる。現状においては細径での疲れ試験データは皆無に近く、系統的に寸法効果を評価するにはいたらない。リグの制約を受ける照射後試験においては結果を精度よく評価するためには寸法効果を明らかにする必要があると考えられる。

5. クリープ破断試験

5.1 試験方法

5.1.1 外観検査法

クリープ破断試験を行う前に全試験片の外観をペリスコープにて検査すると同時にその外観写真を撮影した。また、破断後の突合せた状態で全試験片の外観写真を撮影した。

5.1.2 クリープ破断試験法

クリープ破断試験には、ホットセル内に設置してある遠隔操作型単軸クリープ試験機（容量3トン）を使用した。伸びはマグネスケール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、クリープ破断伸びはG・L・30mmをポンチでマーキングし、破断後突き合せた状態で撮影した写真より求めた。破断絞りは破面の写真から求めた。

5.1.3 金相試験法

クリープ破断試験後の代表的な試験片について、把み部及び破断部近傍の縦断面の組織を光学顕微鏡で観察した。エッチングは10%過硫酸アンモン溶液中で電解により行った。非照射材はオリンパスPNG2型光学顕微鏡で、又照射材はホットセル内の光学顕微鏡（ライヘルト社製、テラトーム）で100倍及び400倍で撮影した。

5.2 クリープ破断試験結果

5.2.1 外観検査結果

Fig. 34及びFig. 35に代表的試験片の試験前後における外観を示す。照射材の表面には黒色の斑点状付着物が認められた。試験後の外観は照射材、非照射材ともにほぼ同じで、とくに変化は認められなかった。

5.2.2 クリープ破断試験結果

Table. 5に試験結果をまとめて示す。母材及び溶接継手のクリープ特性に対する照射の影響として先に報告した非照射材と比較し、以下のことが明らかになった。

1) クリープ破断強度に対する照射の影響

Fig. 36に500℃及び550℃のクリープ破断強度に及ぼす照射の影響を示す。母材の場合、照射材のクリープ破断強度は非照射材に比較して500℃及び550℃試験ともかなり低下している。1000時間破断強度で見るとそれぞれ約9 kg/mm²及び約6 kg/mm²低くなっているが、さらに長時間側でこの差は小さくなる傾向にある。

溶接継手の場合、照射材のクリープ破断強度は短時間側約200時間までは非照射材とほぼ同じであるが、長時間側になるにつれて高くなる傾向にある。

2) 最小クリープ速度に及ぼす照射の影響

Fig. 37に500°C及び550°Cの最小クリープ速度に及ぼす照射の影響を示す。母材の場合、照射材の500°Cにおける最小クリープ速度は非照射材とほぼ同一線上であるが、550°Cにおいては非照射材に比較し約10倍速い。溶接継手の場合、照射材の550°Cにおける最小クリープ速度は非照射材とほぼ同じか、若干遅いようである。

3) クリープ破断伸びに及ぼす照射の影響

Fig. 38に500°C及び550°Cのクリープ破断伸びに及ぼす照射の影響を示す。母材の場合、照射材の500°Cにおけるクリープ破断伸びは非照射材と同様に時間が長くなるにつれ減少する傾向にあり、実験範囲の最長時間(2765 hr)で5.5%であった。550°Cにおけるクリープ破断伸びは照射材及び非照射材ともに時間が長くなるに従い一旦減少し、その後増加する傾向にあった。照射材のクリープ破断伸びは204.9時間で最も低く12.0%であった。

溶接継手の場合、照射材の550°Cにおけるクリープ破断伸びは実験範囲内の時間(129~5190 hr)において時間による変化は少なく、4.8~7.4%と低かった。

母材及び溶接継手のいずれにおいても照射によりクリープ破断伸びは著しく減少した。

4) クリープ破断絞りに及ぼす照射の影響

Fig. 39に500°C及び550°Cのクリープ破断絞りに及ぼす照射の影響を示す。母材の場合、照射材のクリープ破断絞りは非照射材と同様に時間が長くなるにつれ減少する傾向にあり、実験範囲の最長時間(2765 hr)で11%であった。550°Cにおける照射材のクリープ破断絞りは非照射材が時間が長くなるにつれ減少するのに対し、204.9時間までの短時間側で減少し、その後時間が長くなるにつれ増加する傾向にあった。実験最長時間での照射材のクリープ破断絞りは受入材とほぼ同じで31%であった。

溶接継手の場合、照射材のクリープ破断絞りは時間が長くなるにつれて減少し、実験最長時間(約5190 hr)で5.5%であった。非照射材は約500時間までは高いクリープ破断絞りをもっているが、約2000時間で33%と激減していた。

照射した母材の550°Cにおけるクリープ破断絞りは長時間側で高く、非照射材とほぼ同じ値を示しているが、その他の照射材は母材、溶接継手ともに照射によりクリープ破断絞りが著しく減少した。

5.2.3 金相試験結果

Fig. 40に母材のクリープ破断後の破断部縦断面の組織を示す。500℃試験材はポイドタイプの割れが生じ粒内貫通型の破断を呈していた。

Fig. 41に溶接継手のクリープ破断後の破断部縦断面の組織を示す。割れは溶接凝固線上に析出した析出物にそって起っており、いずれも溶着鋼内を伝播していた。

母材及び継手ともに照射による影響は認められなかった。

5.3 試験結果の考察

5.3.1 クリープ破断強度に及ぼす照射の影響

Fig. 36及びFig. 37に示したように550℃試験の母材では照射材は非照射材に比較しクリープ速度が約10倍速く、寿命が約1/10に減少しており、母材の550℃試験における寿命低下は照射期間中に生じる内部組織変化に基づくクリープ速度の増加に起因しているものと考えることが出来る。一方、500℃試験の母材では照射材と非照射材はほぼ等しいクリープ速度をもっているにもかかわらず寿命は約1/25に減少している。500℃試験材はFig. 38に示したように550℃試験材にくらべクリープ破断伸びの低下が顕著であり、この伸びの低下が寿命の低下に起因しているものと考えられる。しかし、550℃試験材においてもクリープ破断伸びは減少しており、クリープ速度、クリープ破断伸び、三次クリープ伸び等に対する照射の影響をよりマイクロに解析し明らかにして行くことがクリープ破断強度に対する照射の影響を探る上で必要である。

溶接継手の550℃試験における照射材はFig. 36に示したように短時間側では非照射材とほぼ同じ強度をもっている。また母材の照射材ともほぼ等しい。しかし長時間側においては溶接継手の照射材は非照射材や母材の照射材に比較しクリープ破断強度が高い。母材と溶着鋼を含む継手においてクリープ破断強度が母材より高いのは一見不思議に思われるが、この原因については今回明らかにすることは出来なかった。この原因を考察するには継手部の照射による組織変化やクリープ過程中におけるマイクロ歪み等の解析手法を考えて行く必要があるものと考えられ今後の課題であるといえる。

5.3.2 従来の照射データとの比較

Fig. 42及びFig. 43に本試験条件とほぼ同じ照射温度にて照射後550℃にてクリープ破断試験を行った従来データとの比較を示す。母材の非照射材のクリープ破断強度はロット間により差が認められるが、照射後の破断強度はいずれも同程度であり、ロットの違い及び照射量の違い(16P: $1.12 \sim 1.15 \times 10^{20}$ n/cm², 比較材: $1.6 \sim 2.4 \times 10^{21}$ n/cm²)による差は認められなかった。

溶接継手の非照射材のクリープ破断強度は本試験材が若干低い、照射材ではほぼ等しいか長時間側で高い傾向にあった。

Fig. 44及びFig. 45に母材及び溶接継手のクリープ破断伸びの結果を従来データと比較して示す。母材の照射後の破断伸びは参考材の中間に位置しているが、照射後の破断伸びは長時間側で高い値を示していた。

溶接継手の非照射材のクリープ破断伸びは参考材に比較し高い値を示しているが、照射後の破断伸びはほぼ同じであった。

Fig. 46にクリープ破断強度比と照射量の関係を口内外での照射後試験結果と比較して示す。本報告の母材のクリープ破断強度比は0.76～0.83であり、参考データのそれ(0.72～0.98)と比較すると照射量、試験温度に違いがあるにもかかわらずほぼ同程度の値であった。一方溶接継手のクリープ破断強度比は1.0～1.12であり、参考データのそれ(0.85～1.01)と比較すると全体的に高い。しかし、本報告の溶接継手の受入材のクリープ破断強度は母材に比較し、かなり低下していることから基準となる非照射材強度が低く、クリープ破断強度比が見かけ上大きくなっているとも考えられる。

5.3.3 設計基準データとの比較

Fig. 47に本報告結果を「常陽」ナトリウム構造設計指針強度の基準値及びASME Code Case 1592による設計曲線値と比較して示す。照射した母材の500℃でのクリープ破断強度は「常陽」ナトリウム構造設計指針の基準値及びASMEの設計曲線値を実験範囲内で下回っているが、本試験のクリープ応力-破断曲線の勾配は上記指針及び設計曲線の勾配よりも小さく、長時間側ではより近くなってくるものと考えられる。一方、550℃でのクリープ破断強度はASMEの設計曲線を上回っているが「常陽」の指針に関しては短時間側で低い。しかし2300時間ではほぼ等しく、それ以上の長時間側では指針を上回るものと考えられる。照射した溶接継手の550℃でのクリープ破断強度はASMEの設計値に対し、約100時間以上の短時間側で下回っているが、100時間以上になると十分上回っている。

また、「常陽」の設計指針に対しても同様に約900時間以上の長時間側で上回っている。

6. あとがき

本試験は「常陽」のサーベイランスバックアップ試験として「常陽」炉容器及び溶接継手のサーベイランス試験材の一部から採取した試験片をJMTRで照射し、高温疲れ試験及びクリープ破断試験を実施したものである。疲れ寿命とクリープ破断寿命に与える照射の影響は母材、継手、試験温度、試験時間により、それぞれ異なっており、照射の影響を明確にするにはいたらなかった。また、国内外のデータも数少なく、照射の材質に与える影響因子及びその程度を明らかにするためには今後さらに照射後試験を実施し、検討を進める必要がある。特に照射による材質変化には中性子そのものによる損傷と照射中の温度履歴によるものがあり、これらの因子を分けて解析検討していく必要がある。温度履歴効果については現在検討を進めており、また同時に照射後試験データの蓄積もはかっており、インパイルクリープ等との関連から、順次照射効果が明らかにされていくものと考えられる。本試験結果はこれらの一連の試験結果と併せて「常陽」サーベイランス試験結果の評価、さらには「もんじゅ」のための重要なデータとして活用出来るものと考えられる。

7. 謝 辞

本試験を実施するに当り、実験炉部 古平 清氏、FBR本部 厚母 栄夫氏、江端 誠氏、照射材料試験室 佐々木 澄男氏、関 成一氏を始め関連各部門において御協力頂いた各氏に厚く謝意を表します。

8. 参 考 文 献

- 1) 鈴木和久, 他 : 「常陽」サーベイランスバックアップ試験(第1報), 動燃団報告, SN941 79-06, (1979)
- 2) L.F.Coffin Jr : Cyclic Straining and Fatigue, (1959)
- 3) 日本溶接協会編 : 高速炉用ステンレス鋼に関する調査, (1969), P 48
- 4) J.M.Beeston and C.R.Brinkman : Axial Fatigue of Irradiated Stainless Steels Tested at Elevated Temperatures, ASTM STP484, (1970)
- 5) 鈴木和久, 他 : 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後疲れ試験, 動燃団報告, SN941 79-10, (1979)
- 6) 「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針 : 動燃団報告, N252 71-01, (1971)
- 7) 鈴木和久, 他 : 「常陽」サーベイランス確認試験(第4報), 動燃団報告, ZN941 77-140, (1977)
- 8) 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), 動燃報告, SN941 79-04, (1979)
- 9) A.J.Lovell : Uniaxial Creep-rupture Studies of Types 304 and 316 Stainless Steels, BNWL-1279, (1970), P495
- 10) B.Vander 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 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 Welding Procedure

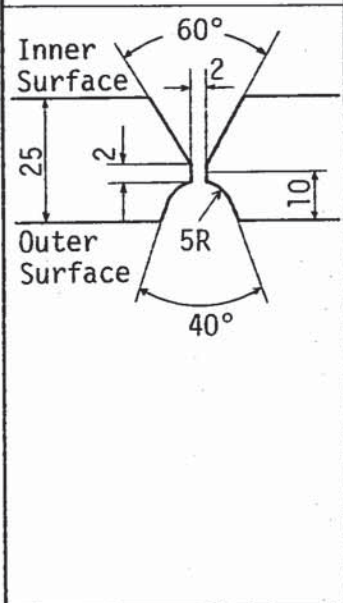
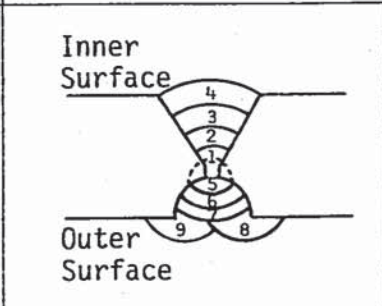
Edge Preparation	Welding Procedure															
		Welding Process	Welding Material	Pass	Rod Dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (J/cm)							
		Shielded Metal Arc Welding	WEL 308	1~2	4.0	150	25	150	~15,000							
		Submerged Arc Welding	US-308(Wire) PFS-1(Flux)	3~9	4.0	~450	32	~320	~27,000							
	1~2 Pass Shielded Metal Arc Welding															
	3~9 Pass Submerged Arc Welding	Chemical Composition of Weld Metal (wt%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	Cu	B			
			0.07	0.82	1.57	0.031	0.012	9.46	19.95	0.25	0.18	0.06	<0.001			
	Inter Pass Temperature <180°C															

Table 3 Low Cycle Fatigue Properties

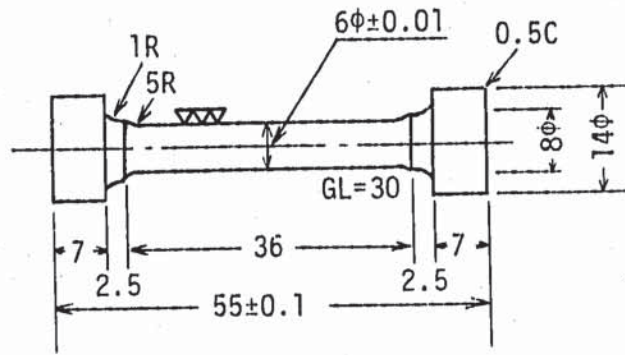
	Specimen NO.	Fluence ($\times 10^{20} \text{n/cm}^2$) ($> 0.1 \text{MeV}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		Strain range (%)			Stress range (Kg/mm^2)	Fatigue life (N)	
			Irrad.	Test	Total	Plastic	Elastic			
Base metal	Z8B001	-	-	-	500	3.24	2.64	0.60	97.4	243
	Z8B002					1.59	1.12	0.47	75.6	906
	Z8B003					0.95	0.58	0.37	59.5	2639
	Z8B006				550	3.24	2.63	0.61	95.1	140
	Z8B007					1.57	1.13	0.44	69.2	812
	Z8B008					0.95	0.56	0.39	60.4	1834
	ZF8H01	0.60	475	500	3.25	2.62	0.63	102.6	70	
	ZF8H02	0.77	445		1.63	1.04	0.59	95.1	337	
	ZF8H03				0.99	0.52	0.47	76.4	1901	
	ZF8H04				1.61	1.08	0.53	85.1	322	
	ZF8H05	0.97	563	550	3.18	2.69	0.49	76.4	192	
	ZF8H06				1.57	1.13	0.44	68.4	878	
ZF8H07	0.94				0.58	0.36	57.3	1982		
ZF8H08	0.81				530	0.57	0.37	0.38	58.9	3843
Welded Joint	Z8W001	-	-	-	500	3.24	2.64	0.60	98.6	122
	Z8W002 *					1.56	1.14	0.42	68.4	1411
	Z8W003					0.98	0.54	0.44	71.0	912
	Z8W004 *				550	0.83	0.51	0.32	50.9	3057
	Z8W005					3.21	2.68	0.53	83.6	166
	Z8W006					1.57	1.13	0.44	68.4	505
	ZF8H10	0.41	500	500	1.60	1.09	0.51	82.8	302	
	ZF8H11	0.60	475		0.96	0.55	0.41	66.8	1615	
	ZF8H15	0.65	463		3.18	2.72	0.46	74.8	52	
	ZF8H13	0.81	530	550	1.57	1.11	0.46	72.4	323	
ZF8H14	0.96				0.56	0.40	62.8	854		

Table 4 Strain and life ratios obtained from comparison of this
 PNC TN941 80-118
 work and ASME design curve

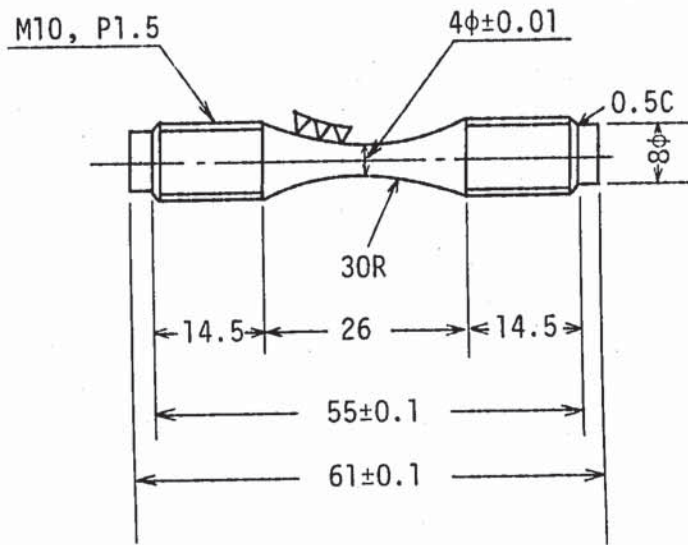
Test temperature (°C)		Irradiation	Strain ratio (at 1000 cycle)	Life ratio (at 1000 cycle)
500	Base metal	Unirrad.	2.7	16.1
		Irrad.	2.1	9.1
	Welded joint	Unirrad.	—	—
		Irrad.	1.9	7.1
550	Base metal	Unirrad.	3.0	18.5
		Irrad.	3.1	20.0
	Welded joint	Unirrad.	2.4	11.6
		Irrad.	2.1	7.7

Table 5 Result of creep tests

Material	Test Temperature (°C)	Specimen No.	Fluence ($\times 10^{20}$ 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						
Base metal	500	E 2	0.47	1.05	530	34.0		138.9	17.5	21
		E 1	0.47	1.05		32.0	3.44×10^{-3}	189.6	11.7	26
		E 3	0.47	1.05		29.0	1.17×10^{-3}	522.8	6.5	24
		E 4	0.495	1.11	550	25.0	4.0×10^{-4}	2765.0	5.5	11
	550	E 9	0.515	1.15	570	30.0	—	23.9	24.9	29
		E 8	0.515	1.15		26.0	—	96.5	12.4	18
		E11	0.50	1.12	575	24.0	1.78×10^{-2}	204.9	12.0	14
		E10	0.50	1.12		22.0	1.46×10^{-2}	619.3	18.3	19
		E12	0.50	1.12		20.0	4.85×10^{-3}	2262.4	21.0	31
		E14	0.42	0.90		418	26.0	—	129.4	7.4
E15	0.42	0.90	24.0	2.38×10^{-3}	450.1		4.8	19		
Welded joint	550	E16	0.48	1.08	575	22.0	2.53×10^{-3}	1548.6	6.8	15
		E17	0.48	0.97		20.0	2.8×10^{-4}	5189.8	7.0	5.5



Creep specimen



Fatigue specimen

Fig. 1 Profile of specimens

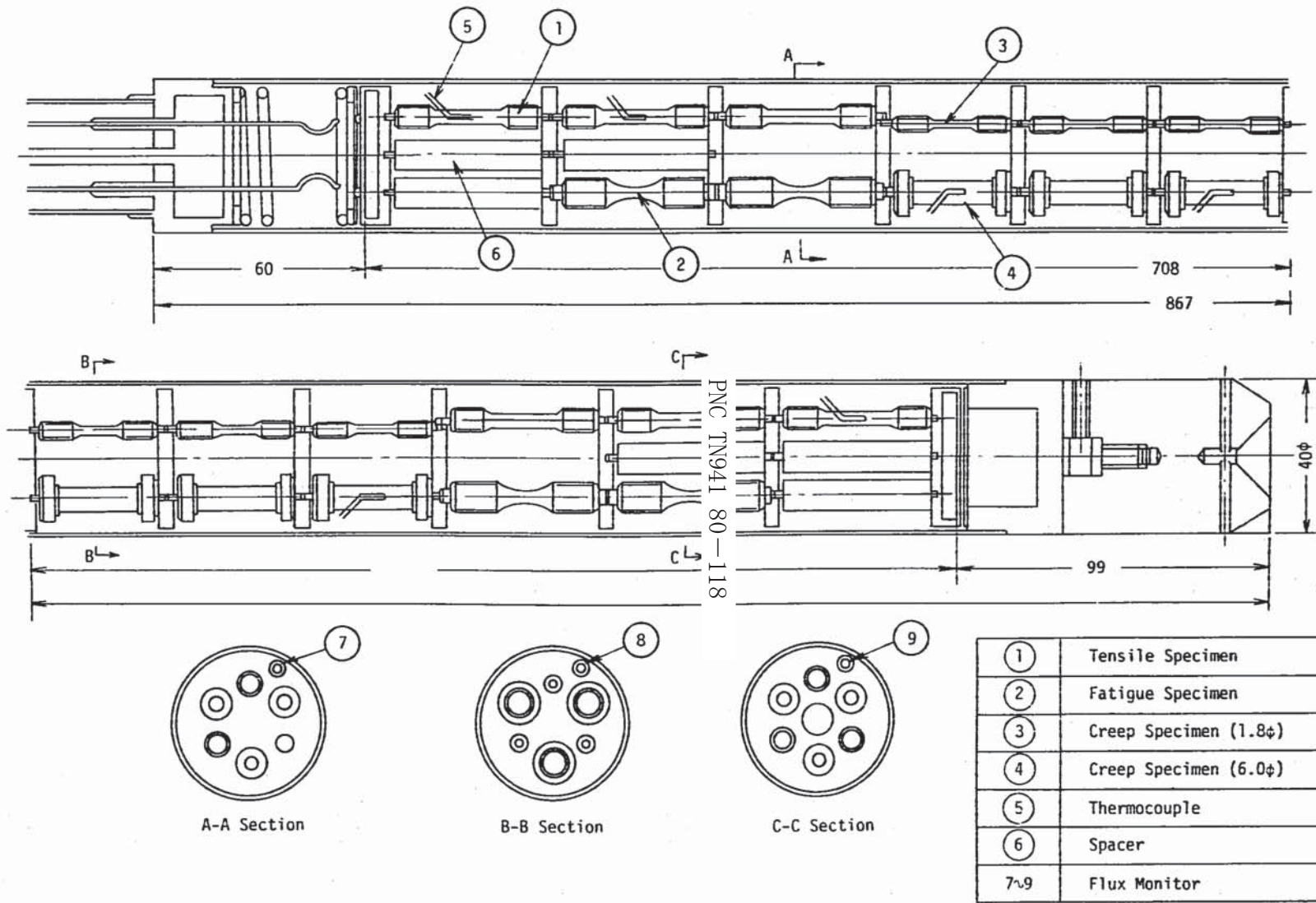


Fig. 2 Outline of irradiation capsule

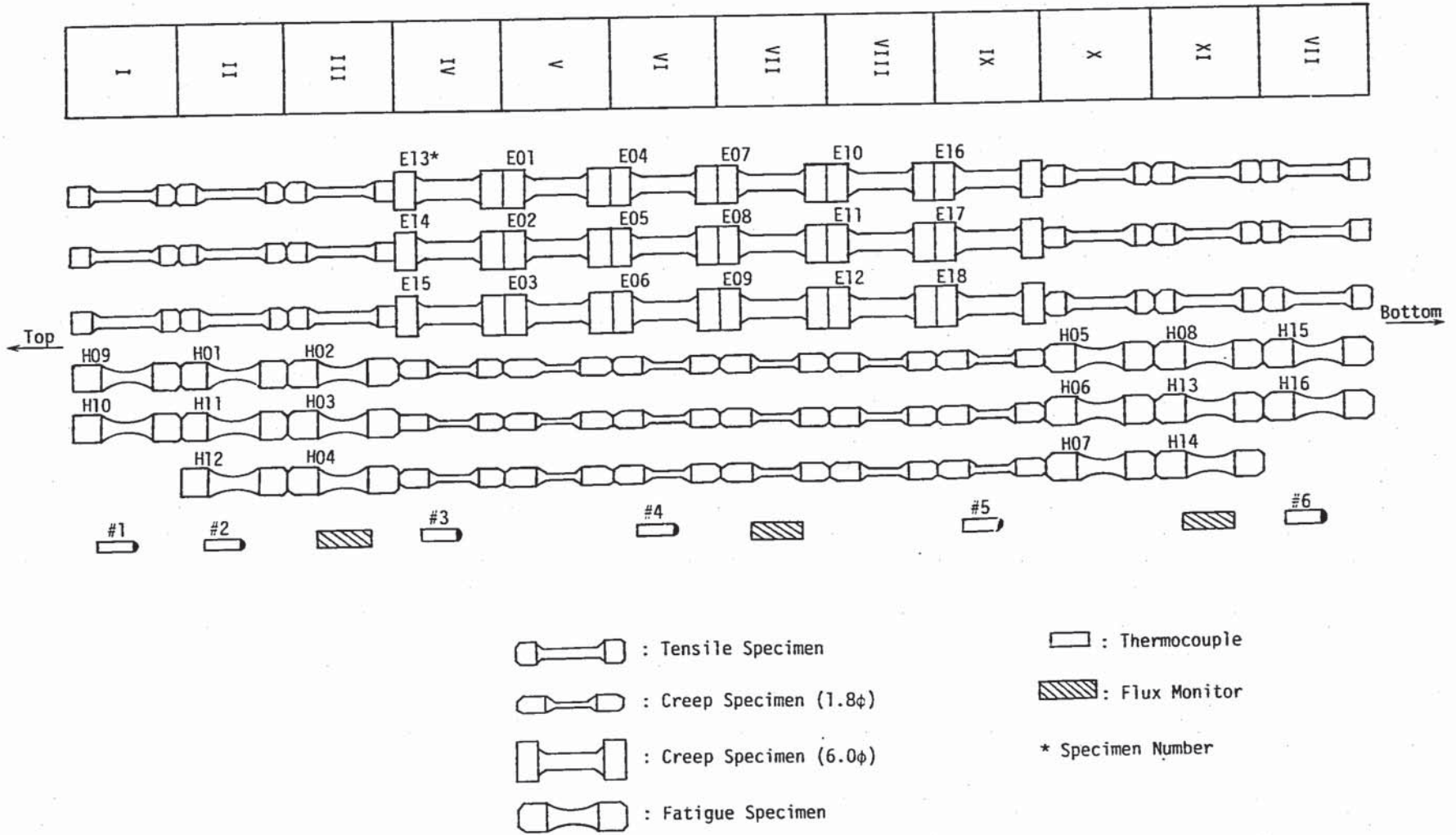


Fig. 3 Specimen arrangement in irradiation capsule

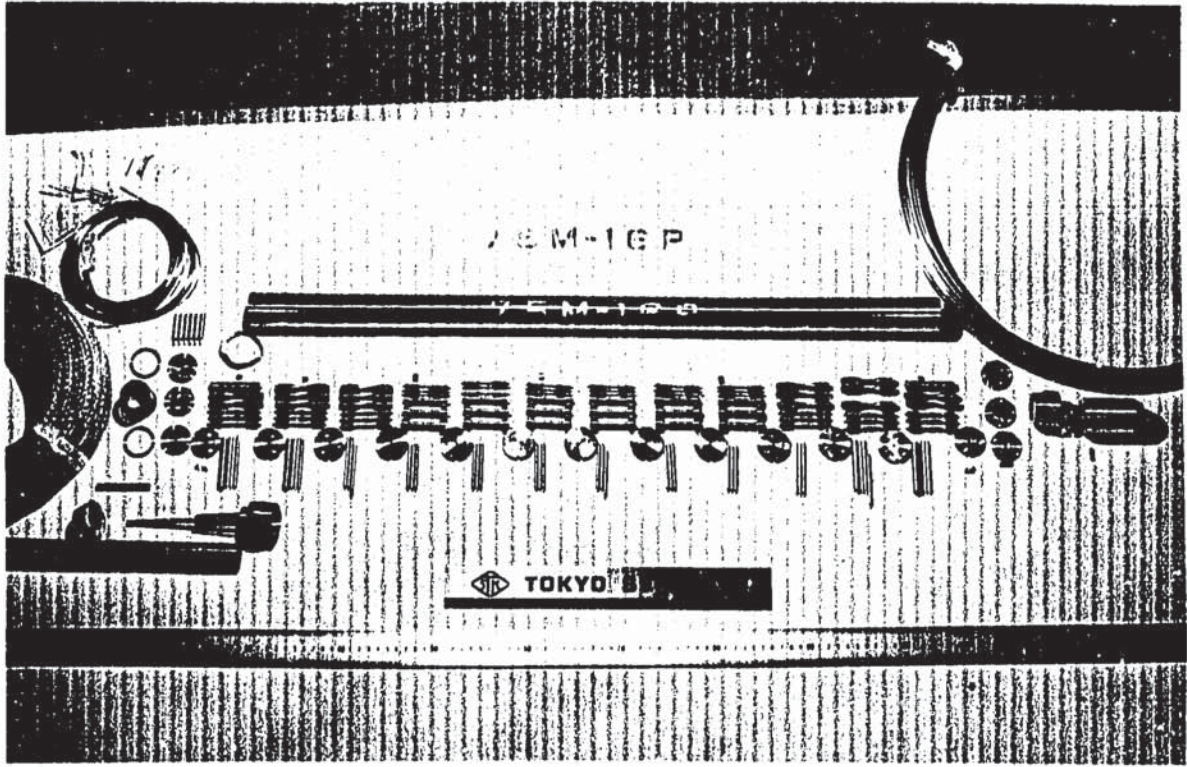


Fig. 4 View of specimens in capsule

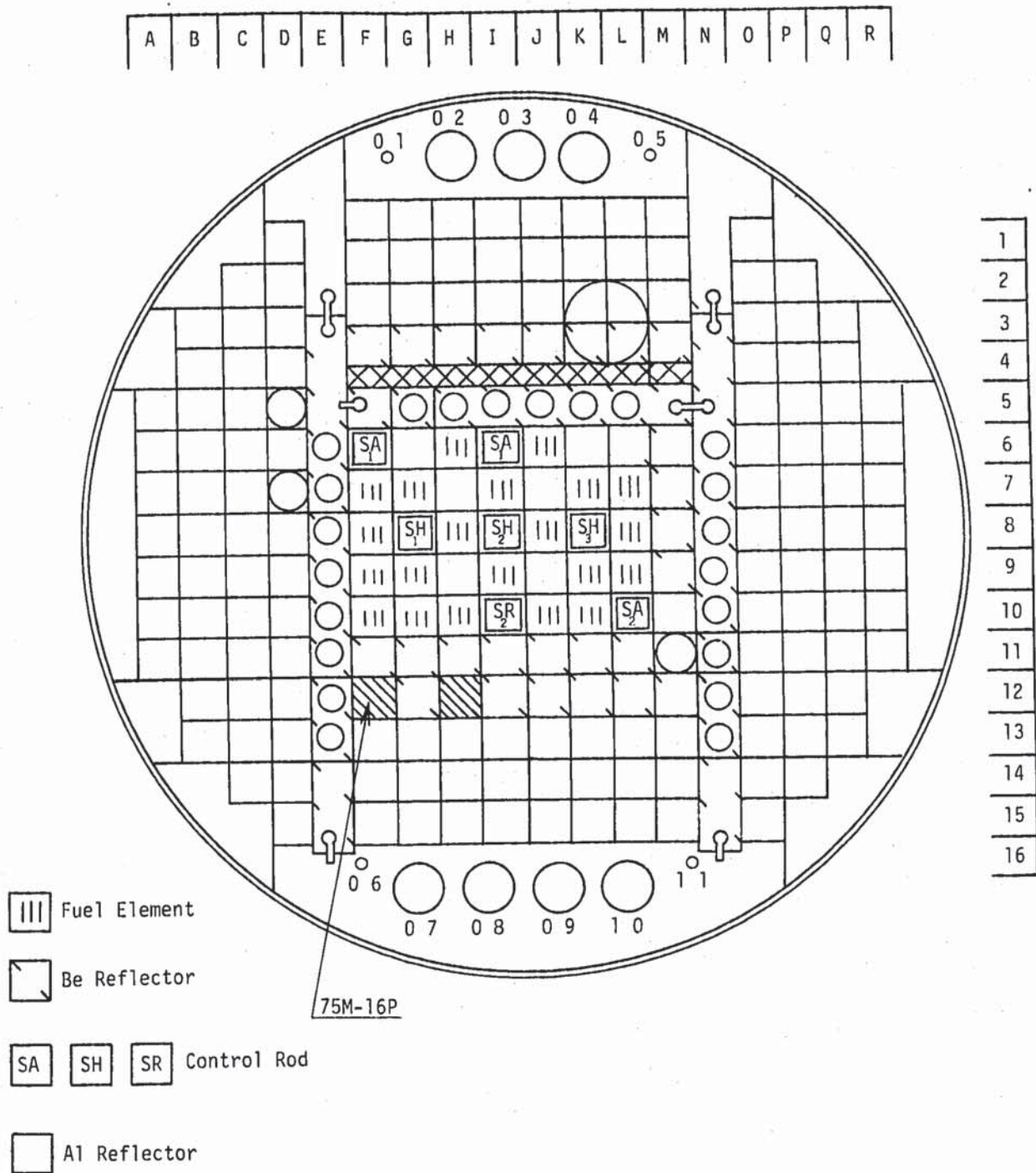


Fig. 5 Irradiation position in JMTR core

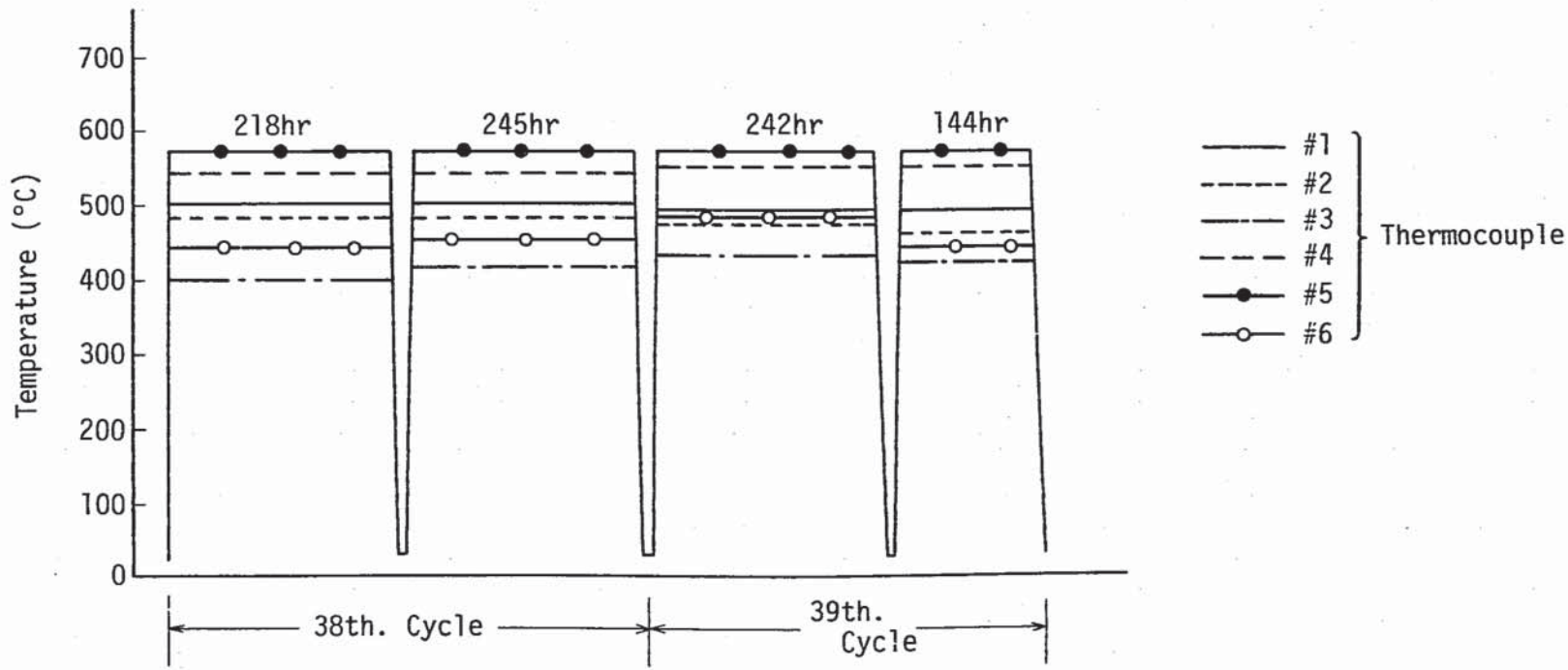


Fig. 6 Thermal history under irradiation (75M-16P)

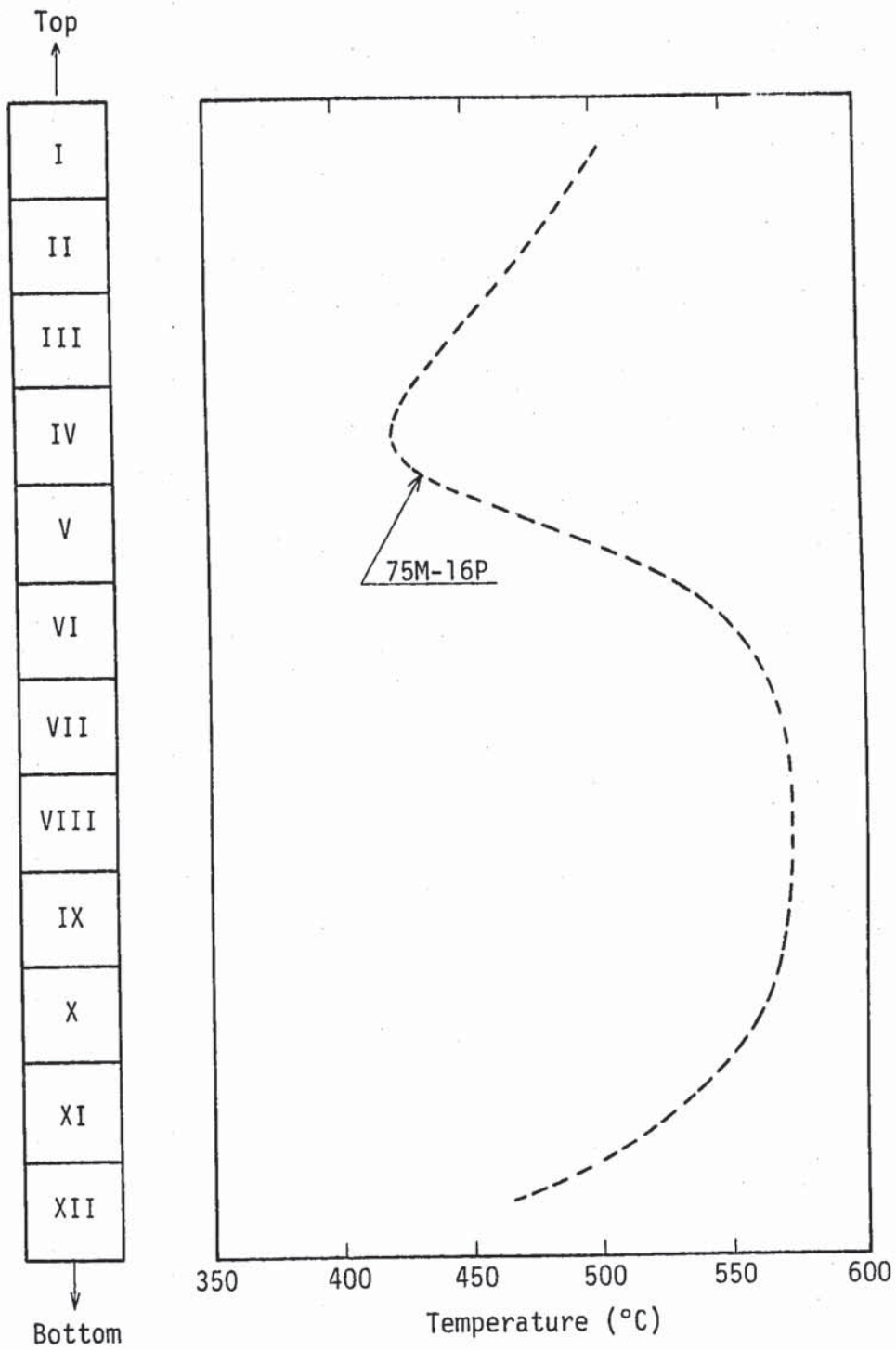


Fig. 7 Temperature distribution in capsule

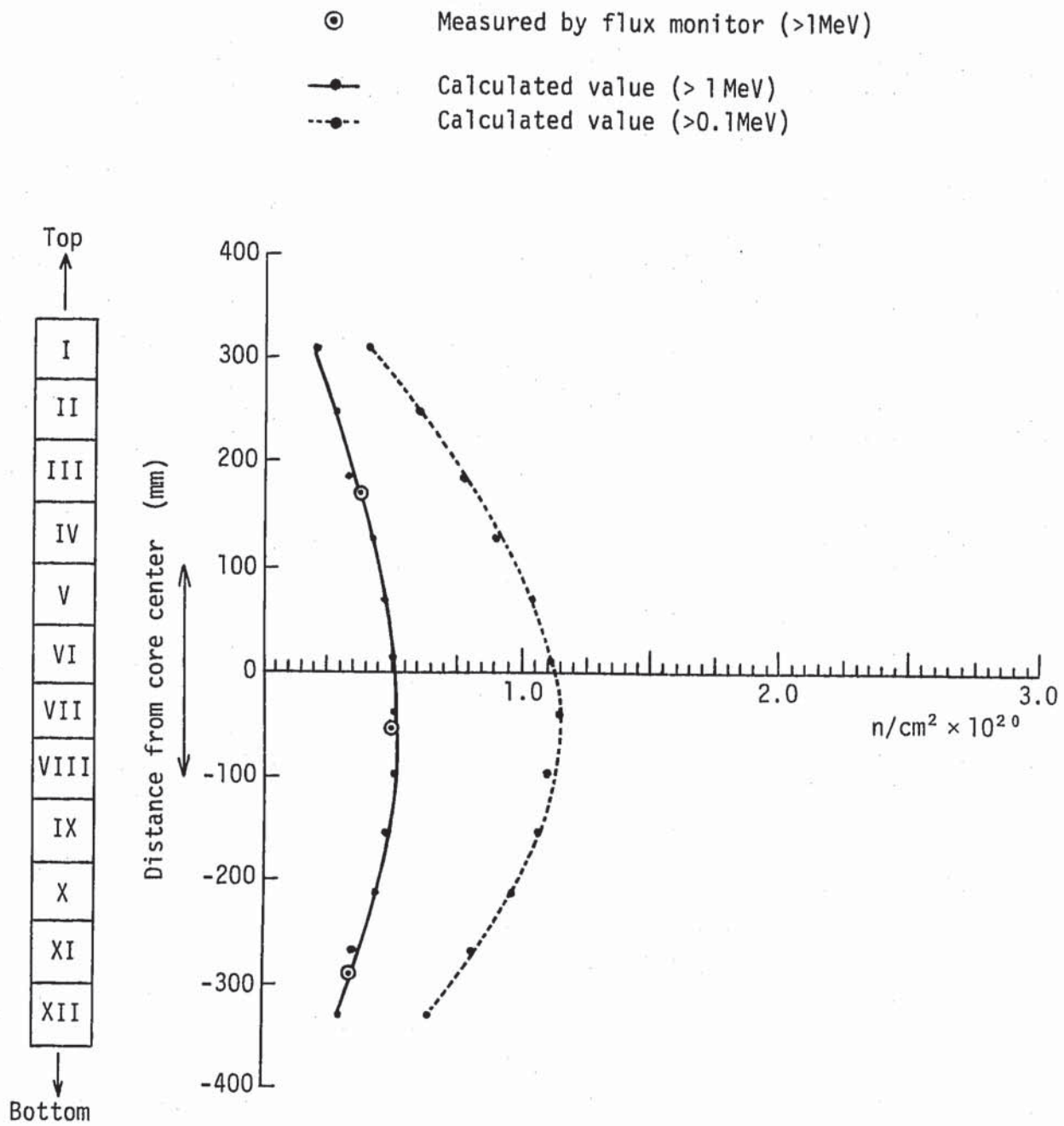


Fig. 8 Fluence distribution in capsule

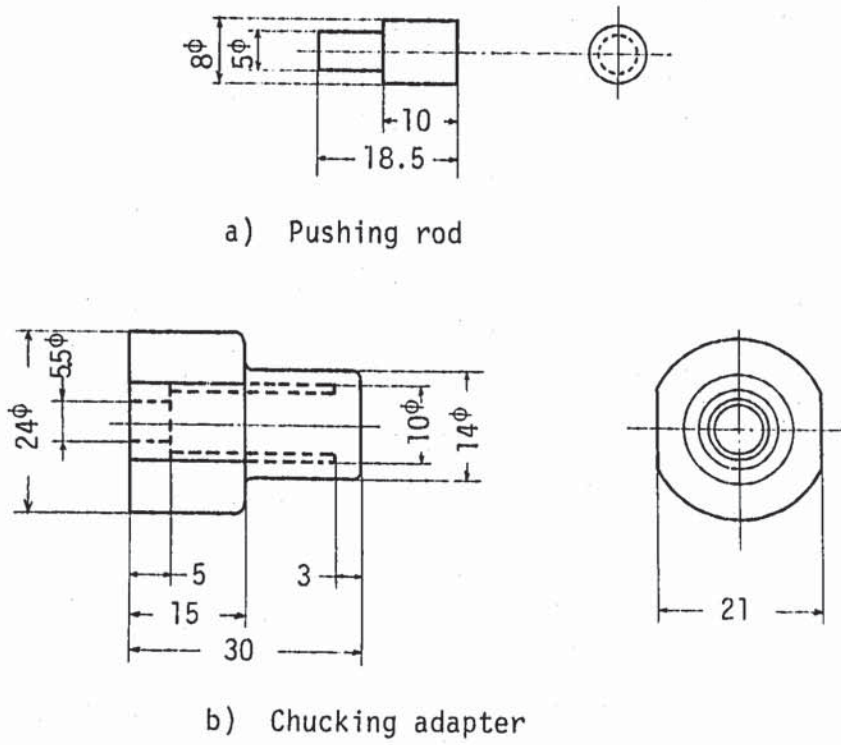


Fig. 9 Profile of adapters for fatigue test

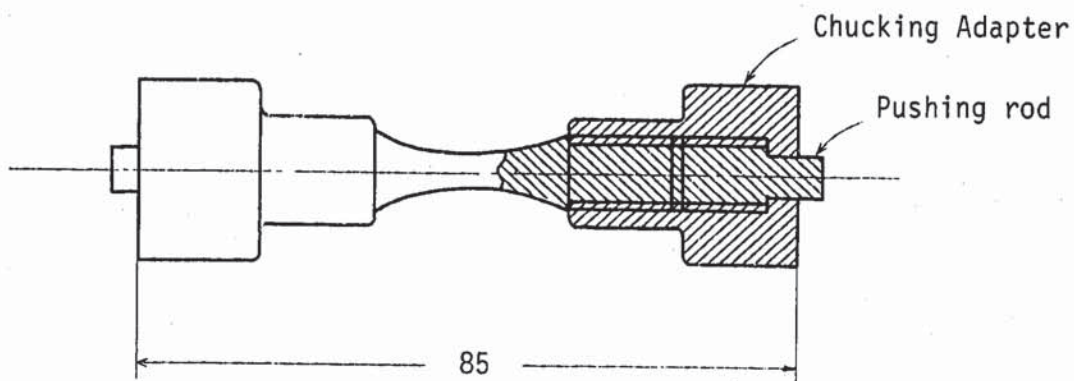
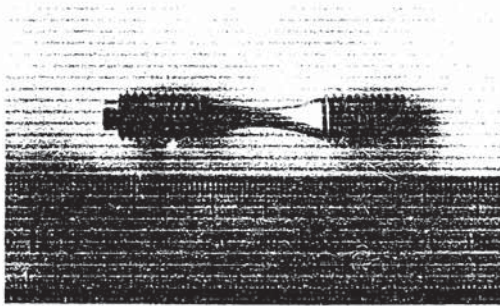
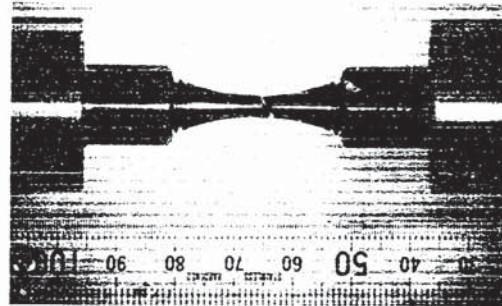


Fig. 10 Profile of specimen assembly for fatigue test

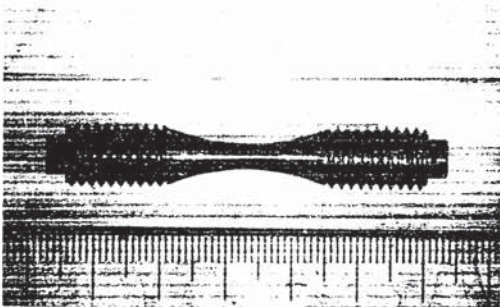


A

Z8B002 (500°C)

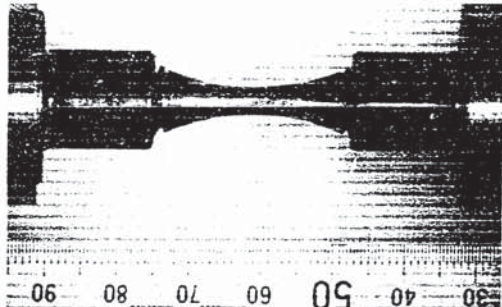


A

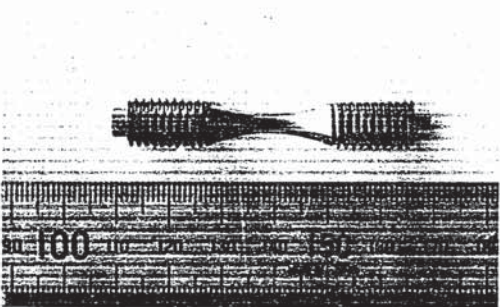


B

ZF8H02 (500°C)

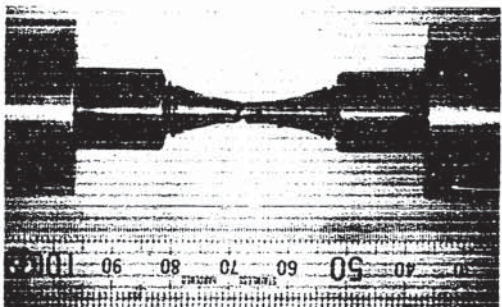


B

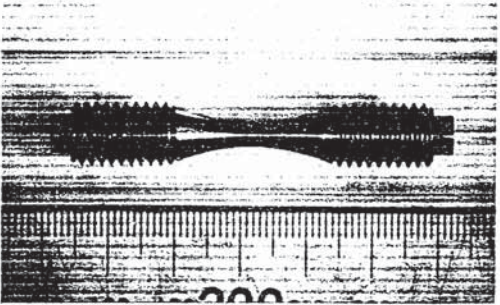


C

Z8B007 (550°C)

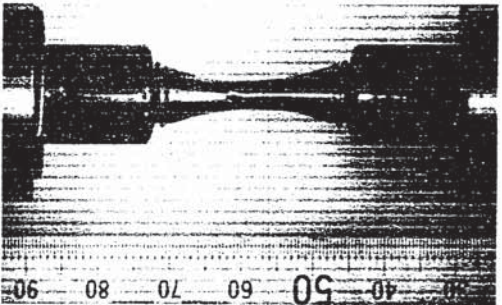


C



D

ZF8H06 (550°C)



D

Fig. 11(a) Views of specimens before and after test (Base metal)
A, C: Unirradiated, B, D: irradiated
A, B: tested at 500°C, C, D: tested at 550°C

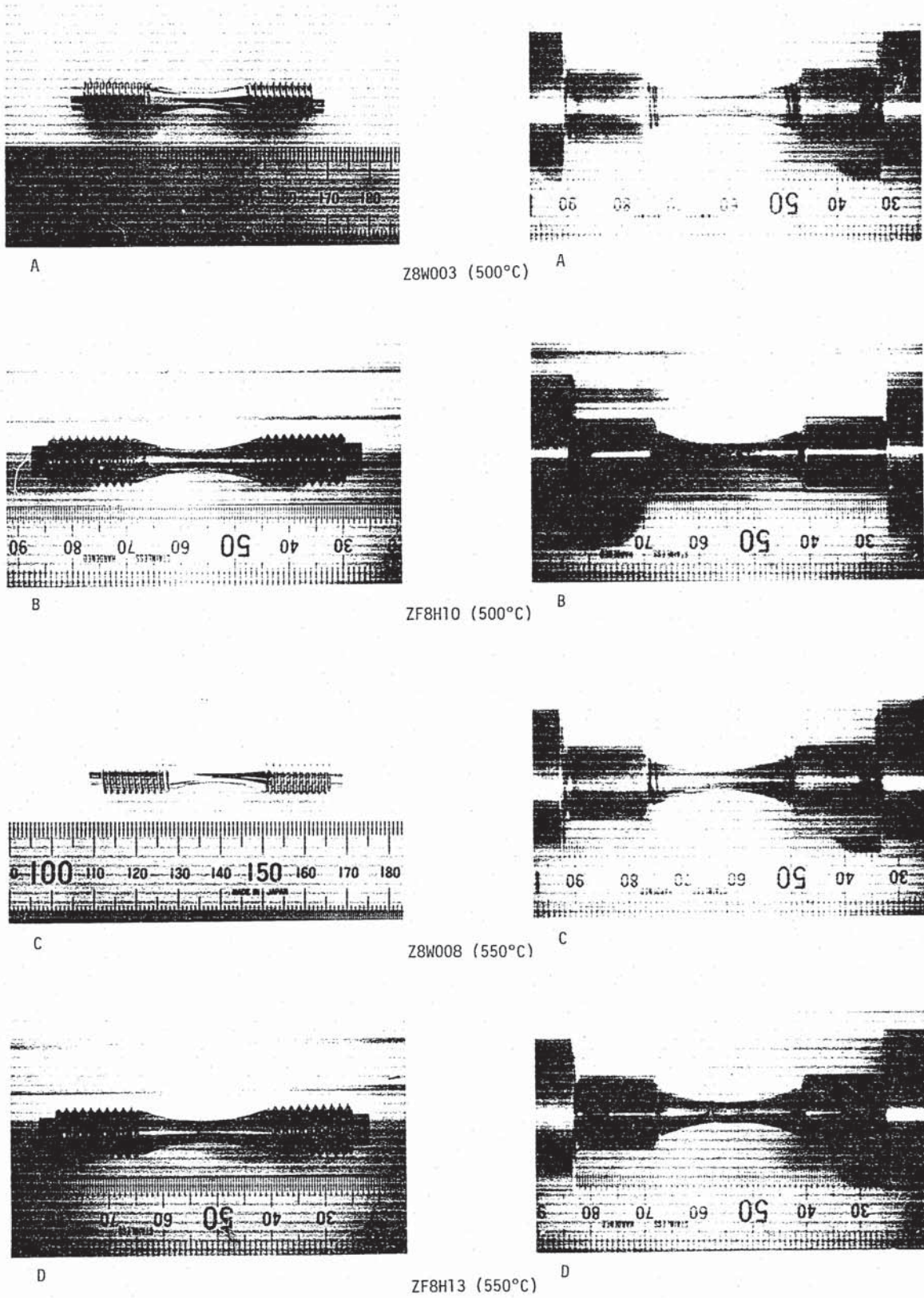


Fig. 11(b) Views of specimens before and after test (welded joint)
 A, C: Unirradiated, B, D: irradiated
 A, B: tested at 500°C, C, D: tested at 550°C

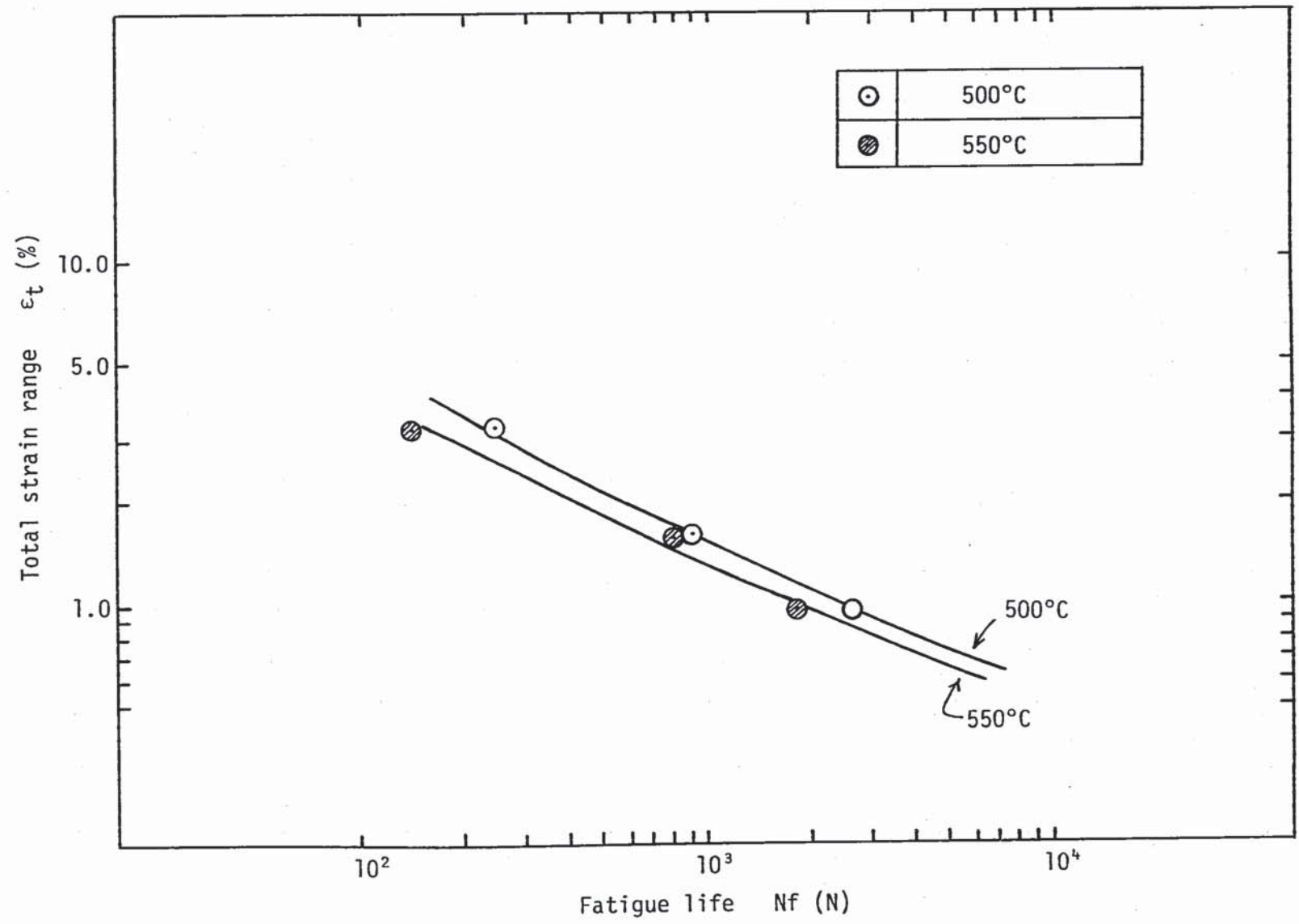


Fig. 12 Effect of test temperature on fatigue life of base metal (unirrad.)

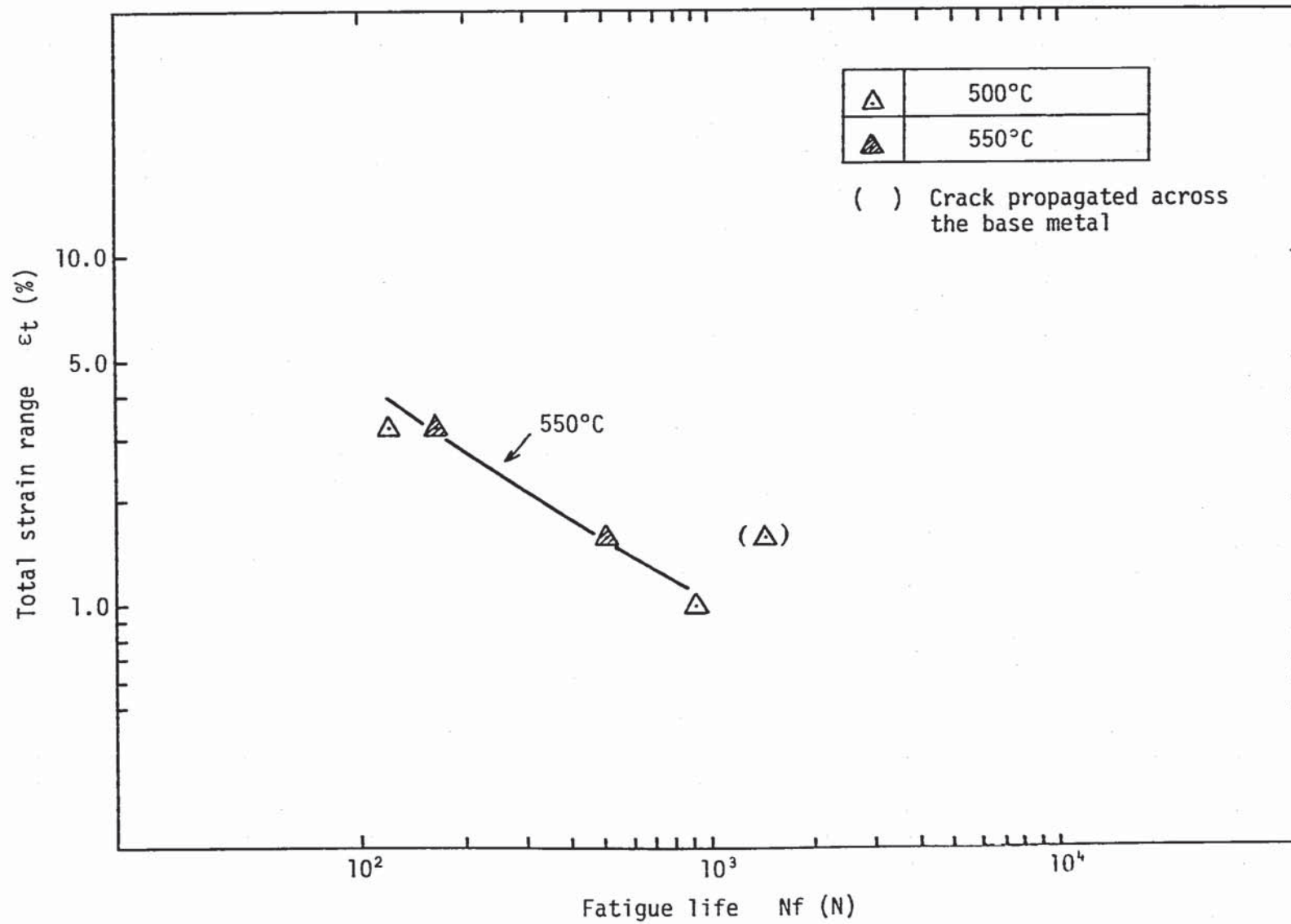


Fig. 13 Effect of test temperature on fatigue life of welded joint (Unirrad.)

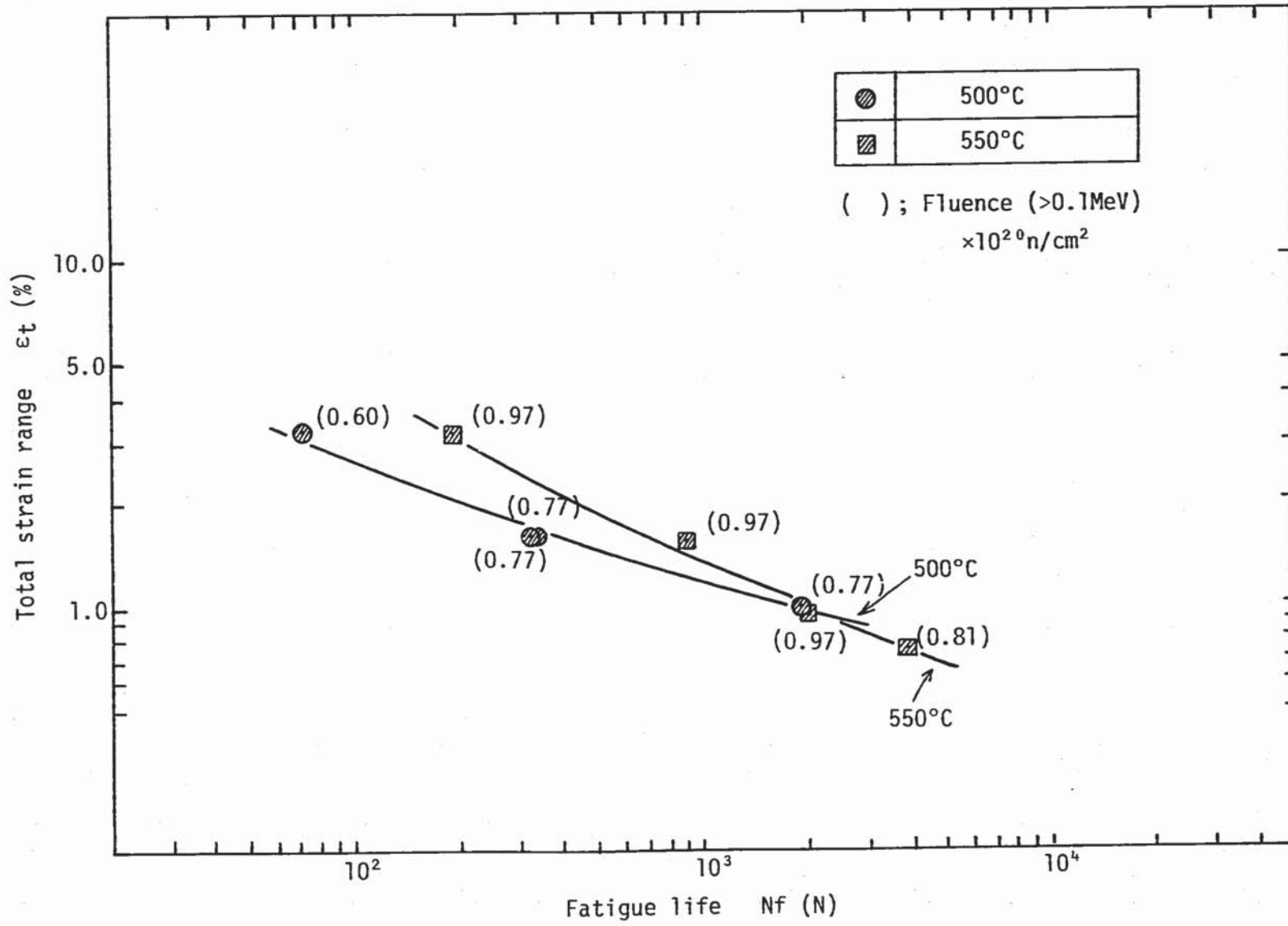


Fig. 14 Effect of test temperature on fatigue life of base metal (Irradiated)

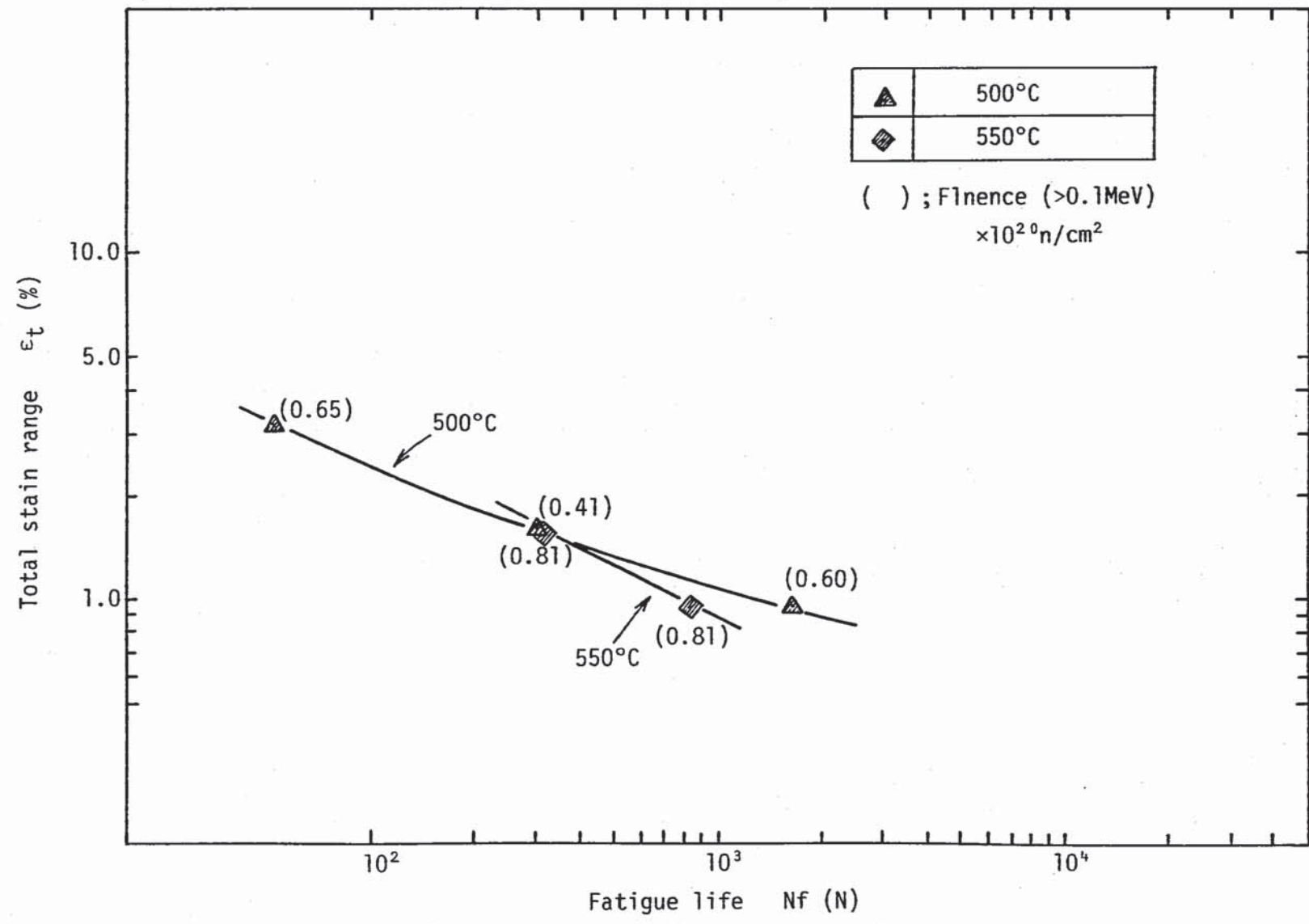


Fig. 15 Effect of Test temperature on fatigue life of welded joint (Irradiated)

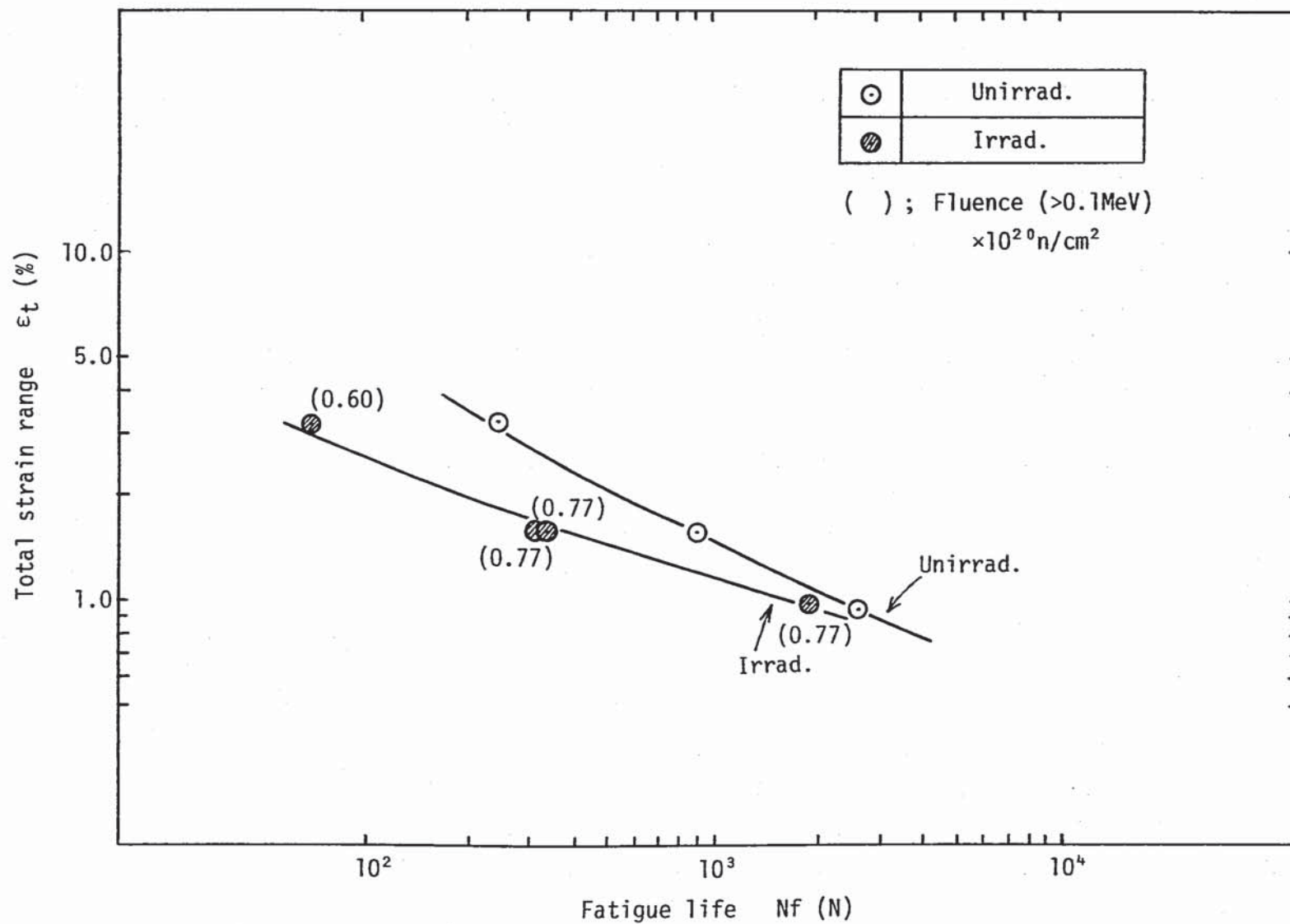


Fig. 16 Effect of irradiation on fatigue life of base metal at 500°C

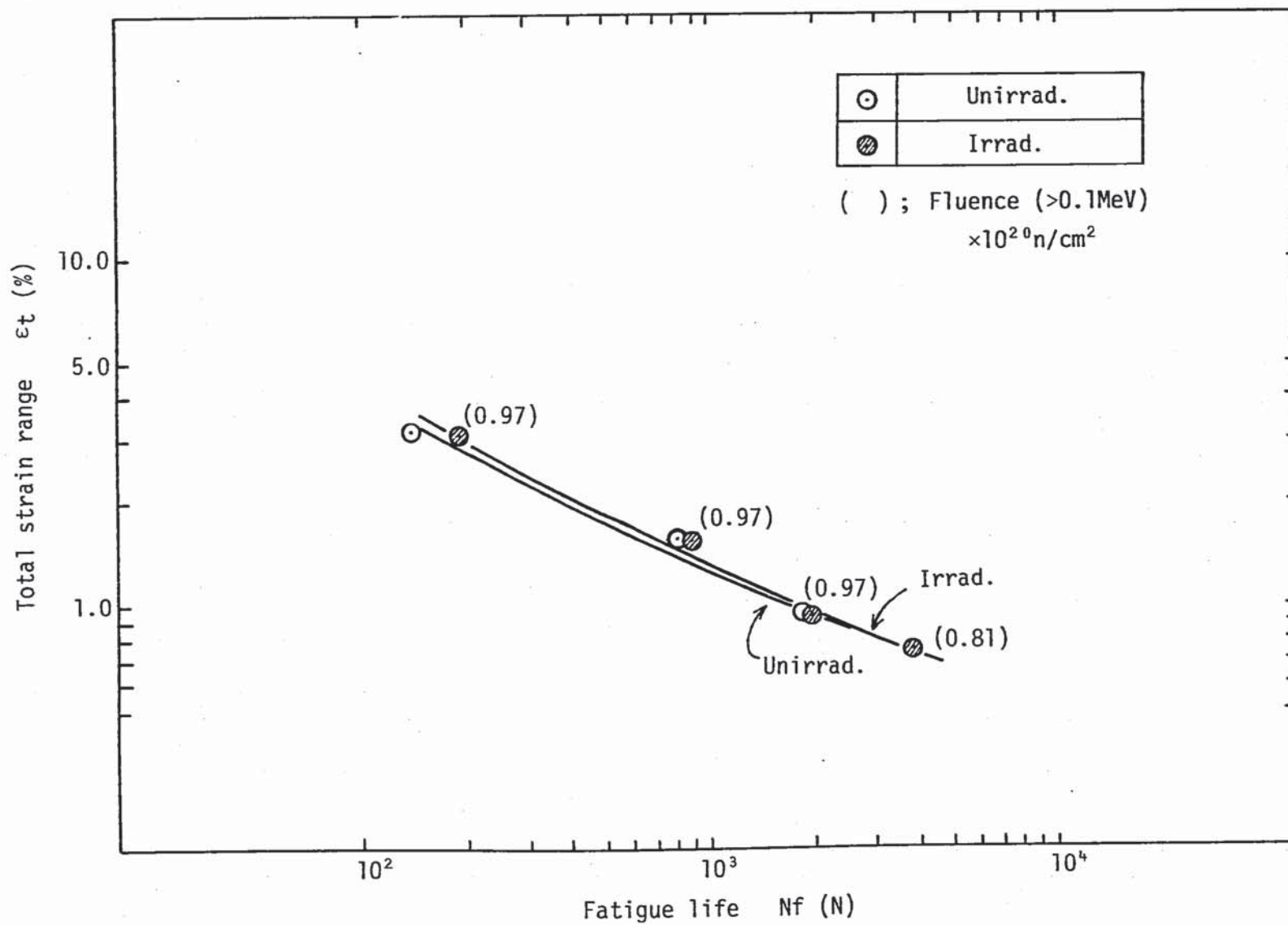


Fig. 17 Effect of irradiation on fatigue life of base metal at 550°C

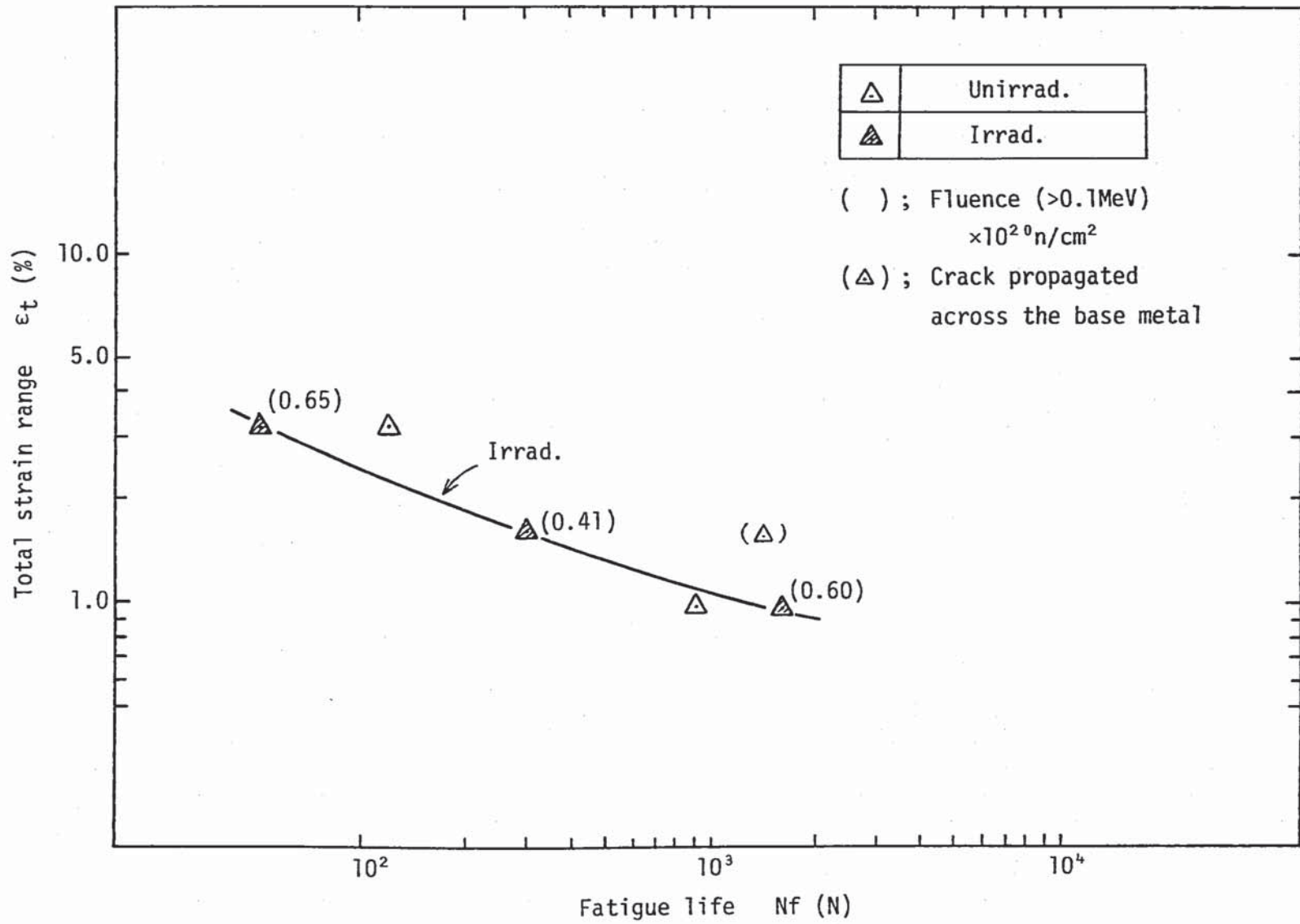


Fig. 18 Effect of irradiation on fatigue life of welded joint at 500°C

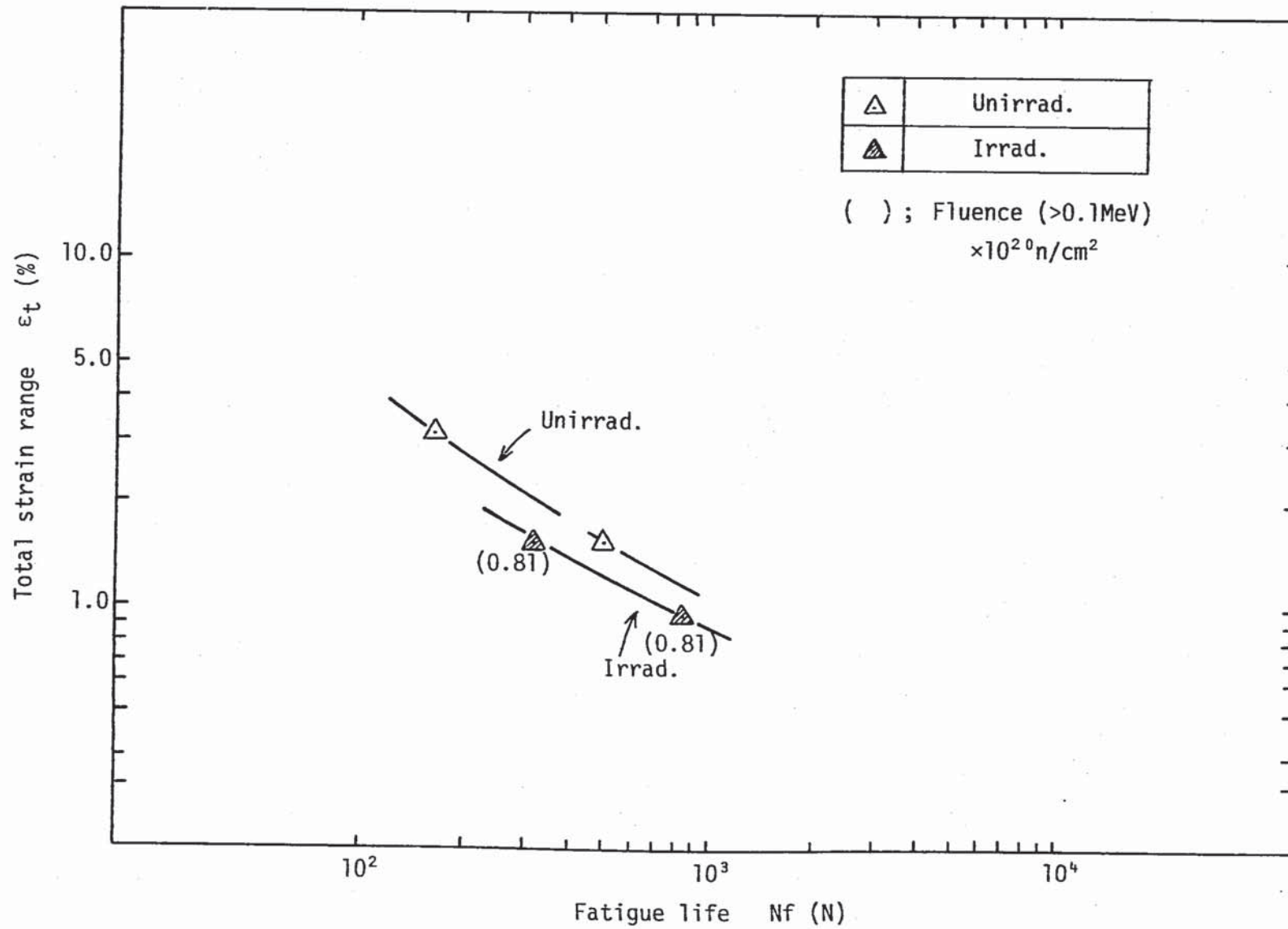


Fig. 19 Effect of irradiation on fatigue life of welded joint at 550°C

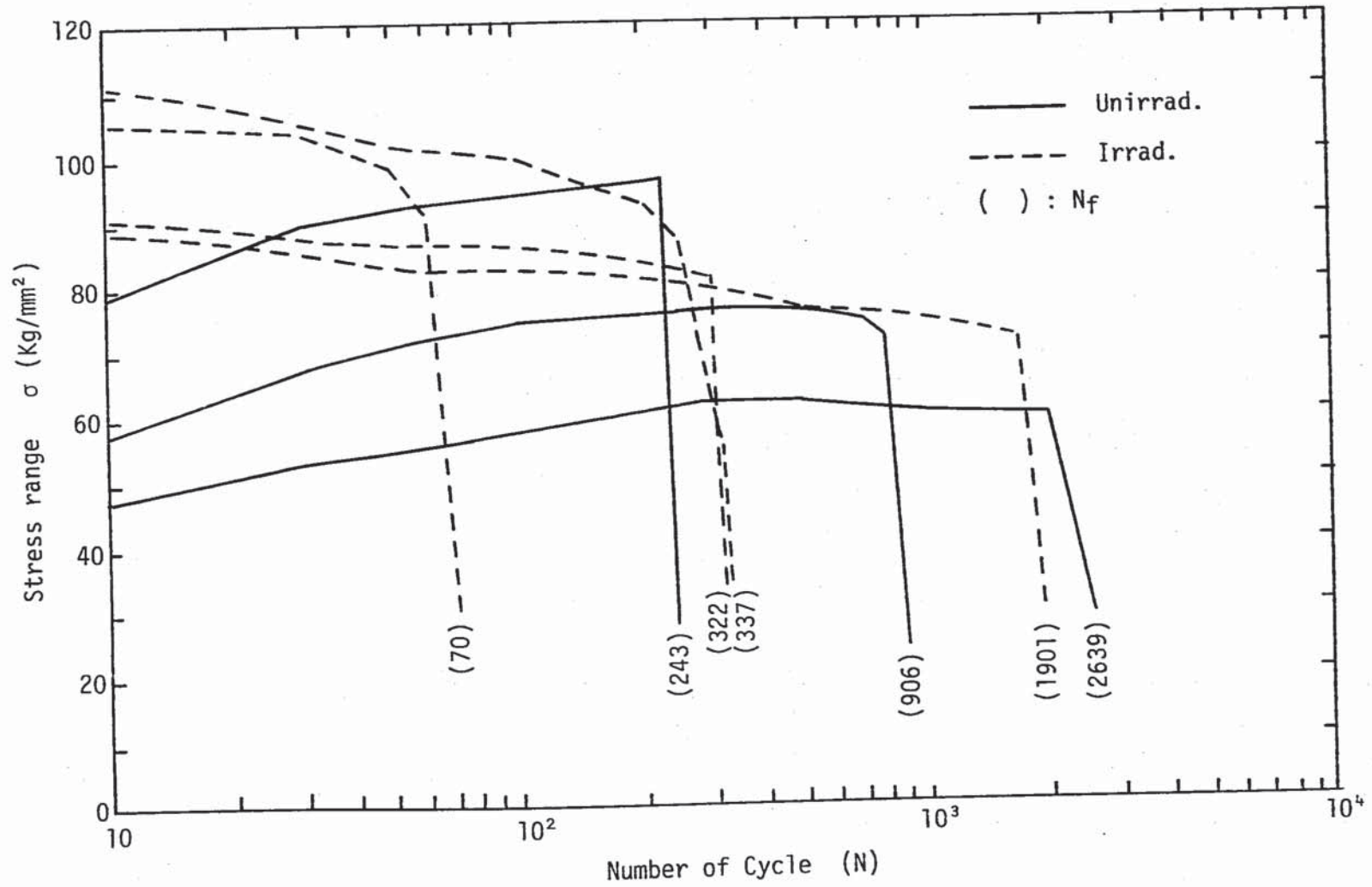


Fig. 20 Stress range as a function of number of the fatigue cycles for base metal at 500°C

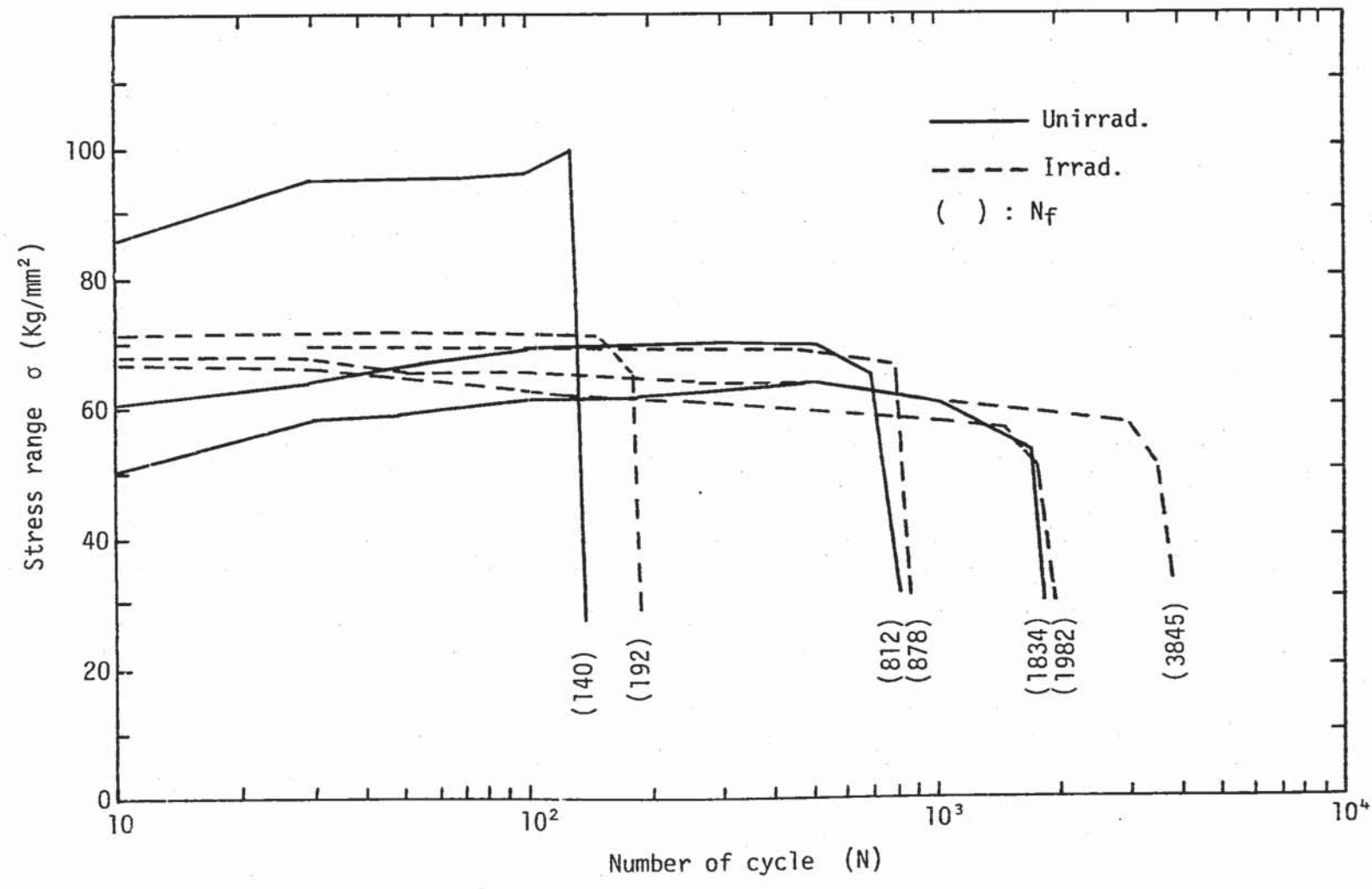


Fig. 21 Stress range as a function of number of the fatigue cycles for base metal at 550°C

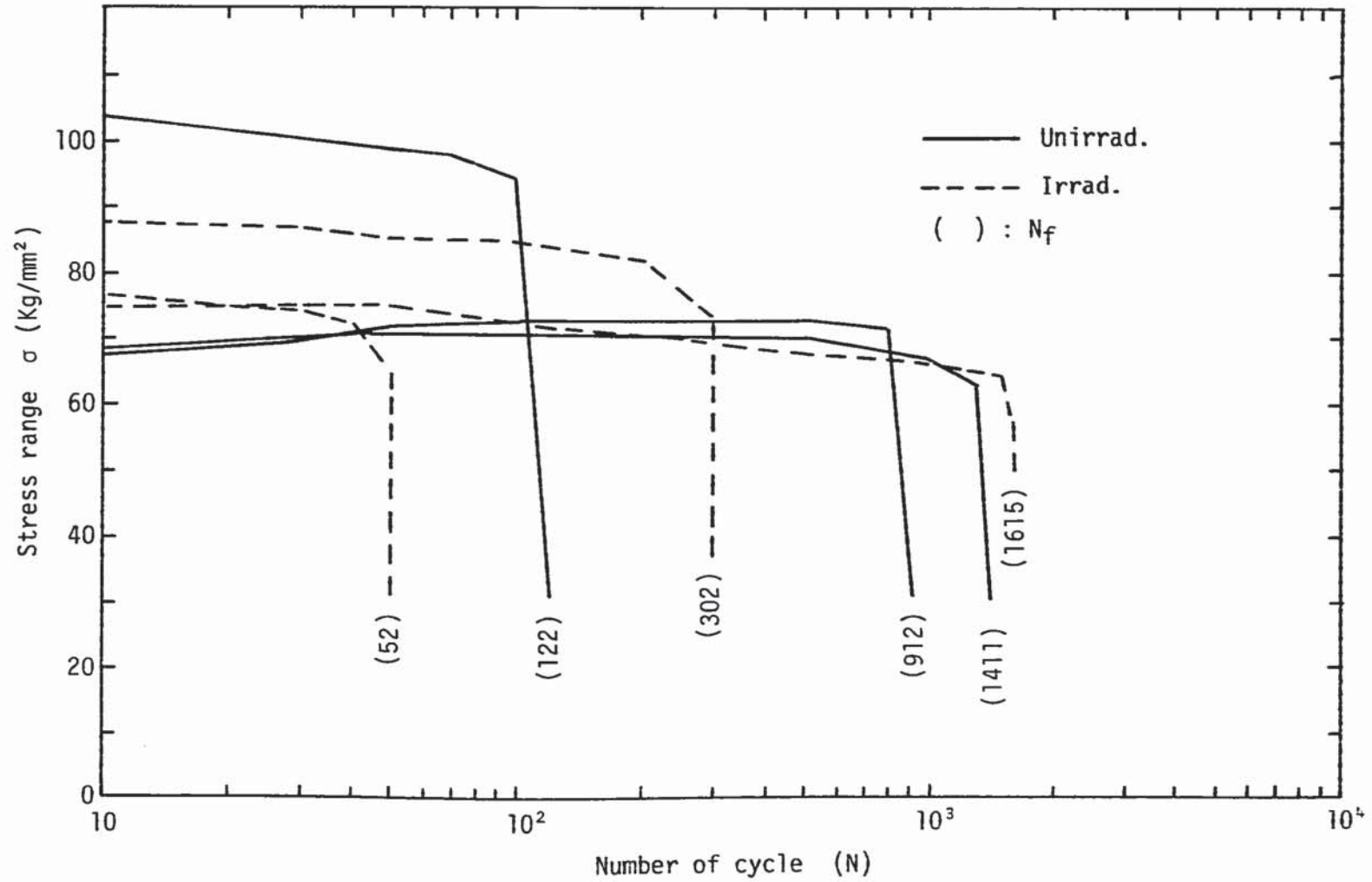


Fig. 22 Stress range as a function of number of the fatigue cycles for welded joint at 500°C

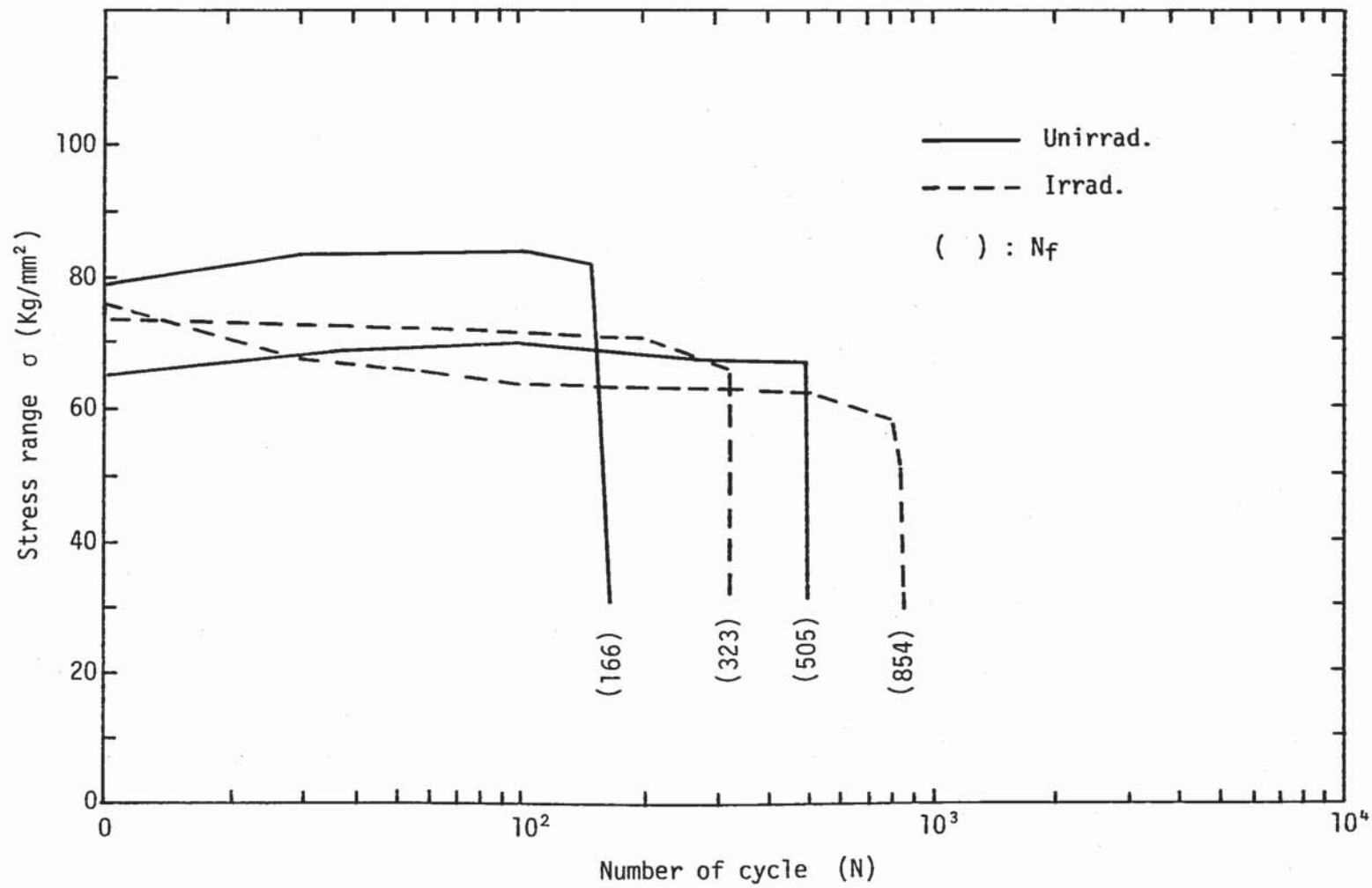


Fig. 23 Stress range as a function of number of the fatigue cycles for welded joint at 550°C

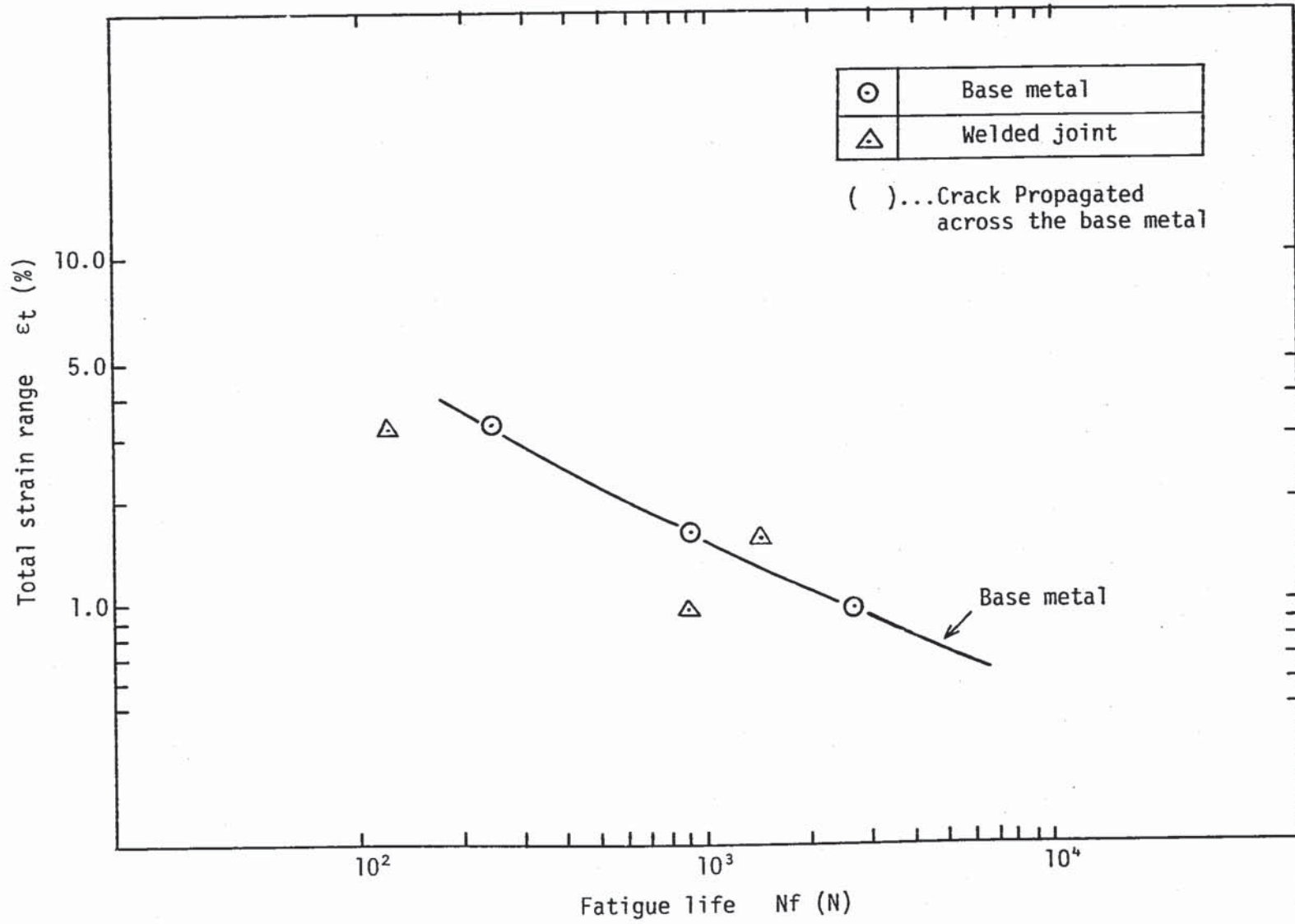


Fig. 24 Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for unirradiated materials at 500°C

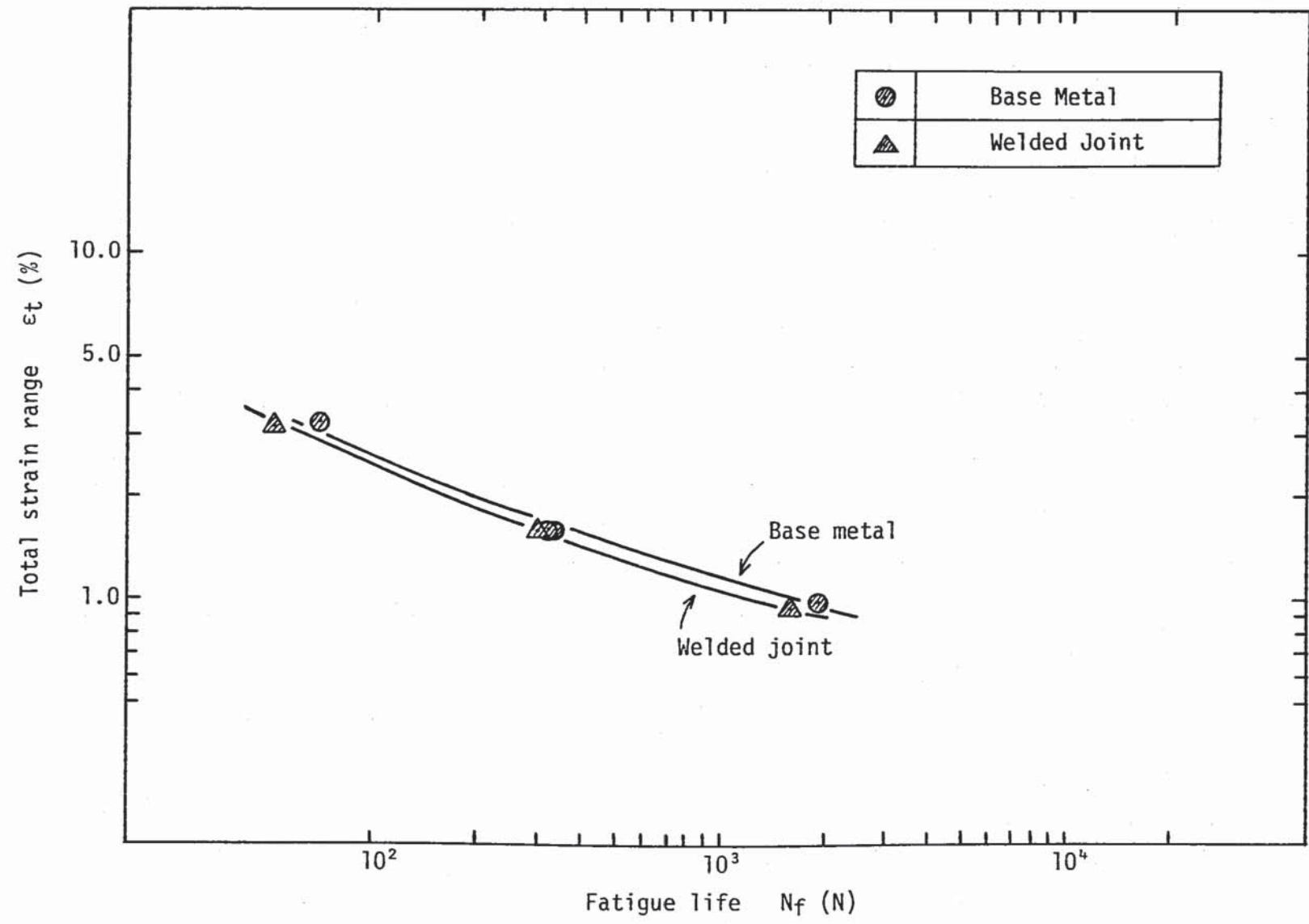


Fig. 25 Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for irradiated materials at 500°C

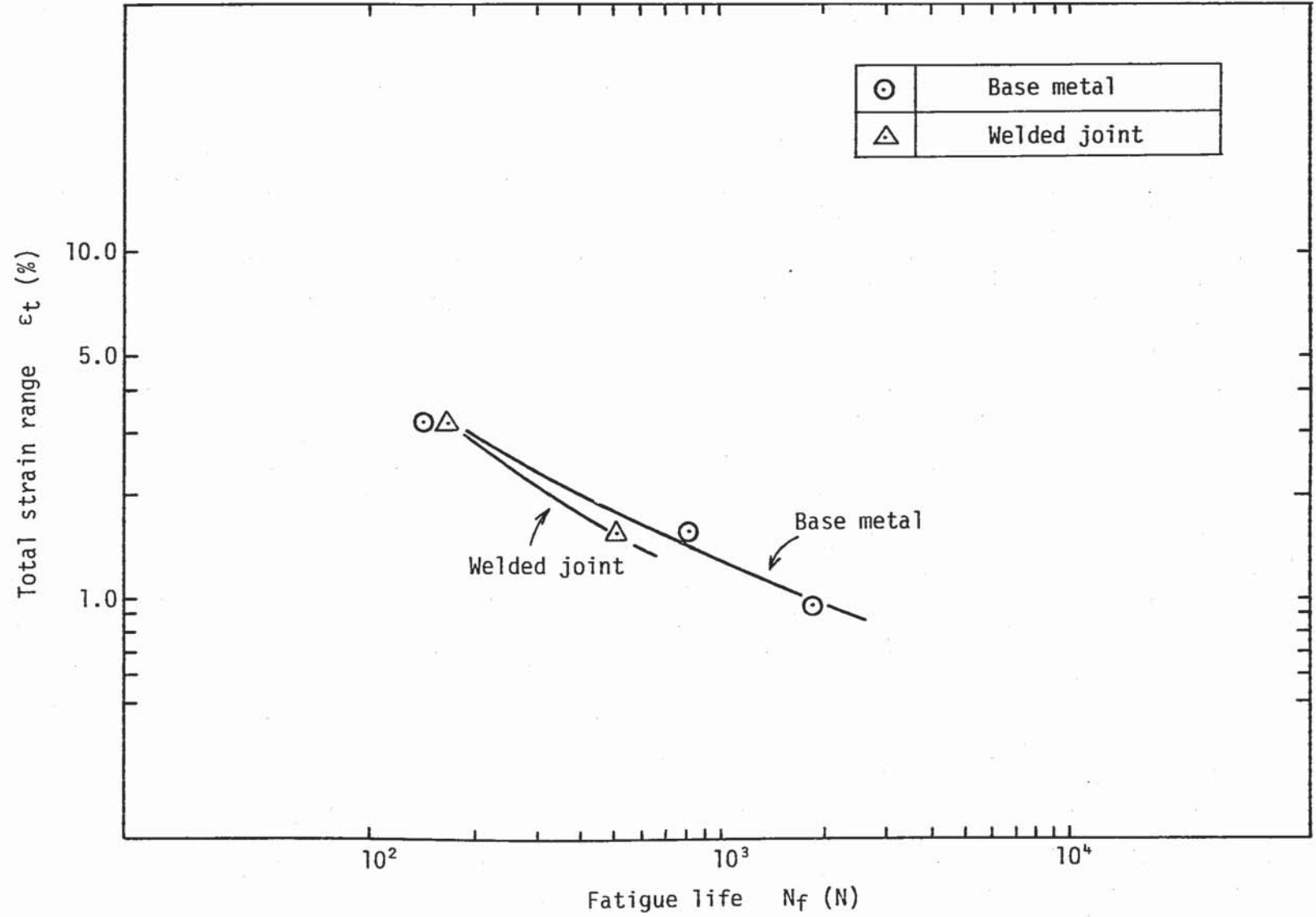


Fig. 26 Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for unirradiated materials at 550°C

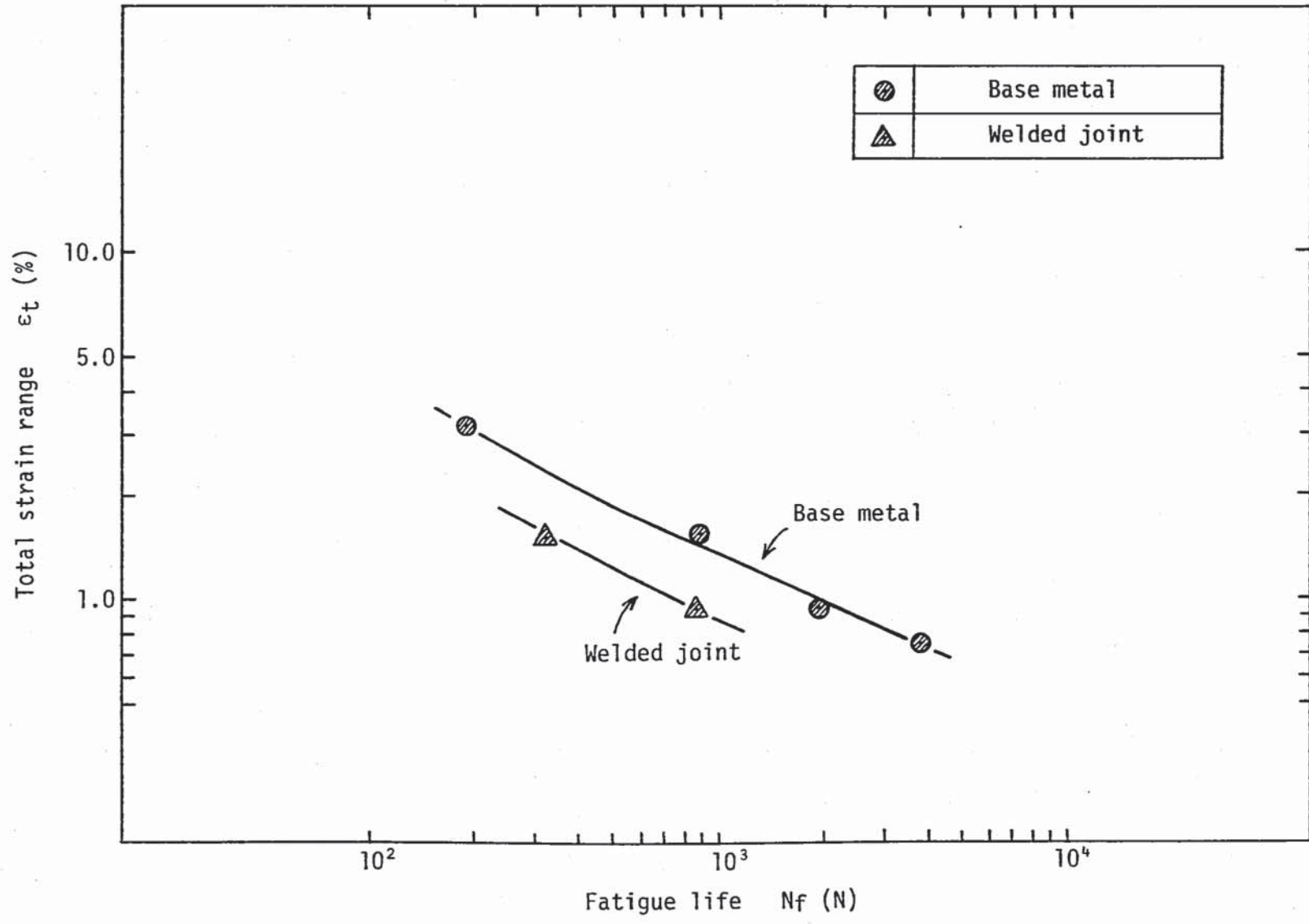


Fig. 27 Comparison of fatigue life between base metal and welded joint for irradiated materials at 550°C

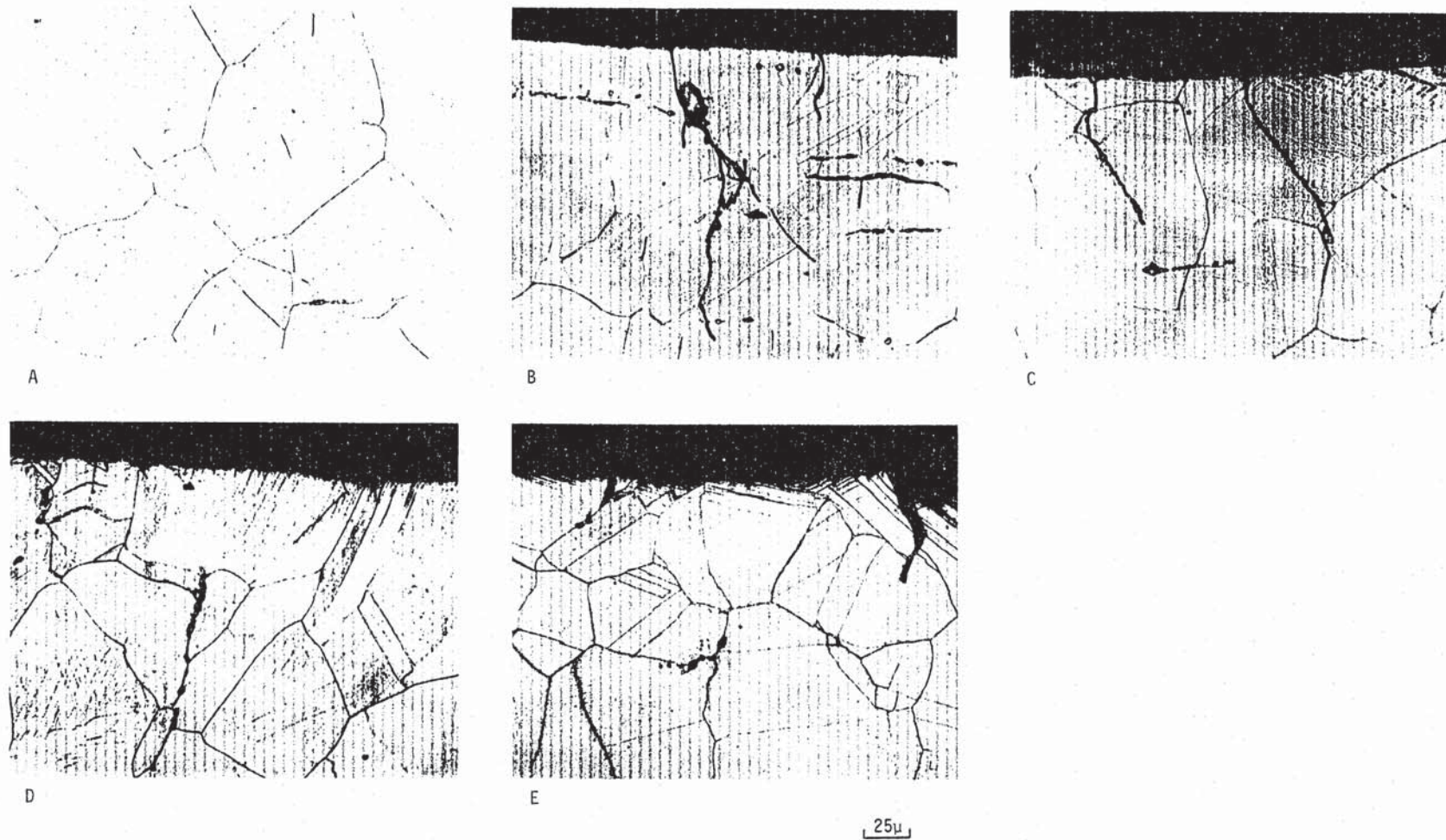


Fig. 28 Micrographs of the cross section of specimens tested at 500°C and 550°C.

- A: Unirradiated specimen before test
- B: Unirradiated specimen tested at 500°C
- C: Unirradiated specimen tested at 550°C
- D: irradiated specimen tested at 500°C
- E: irradiated specimen tested at 550°C

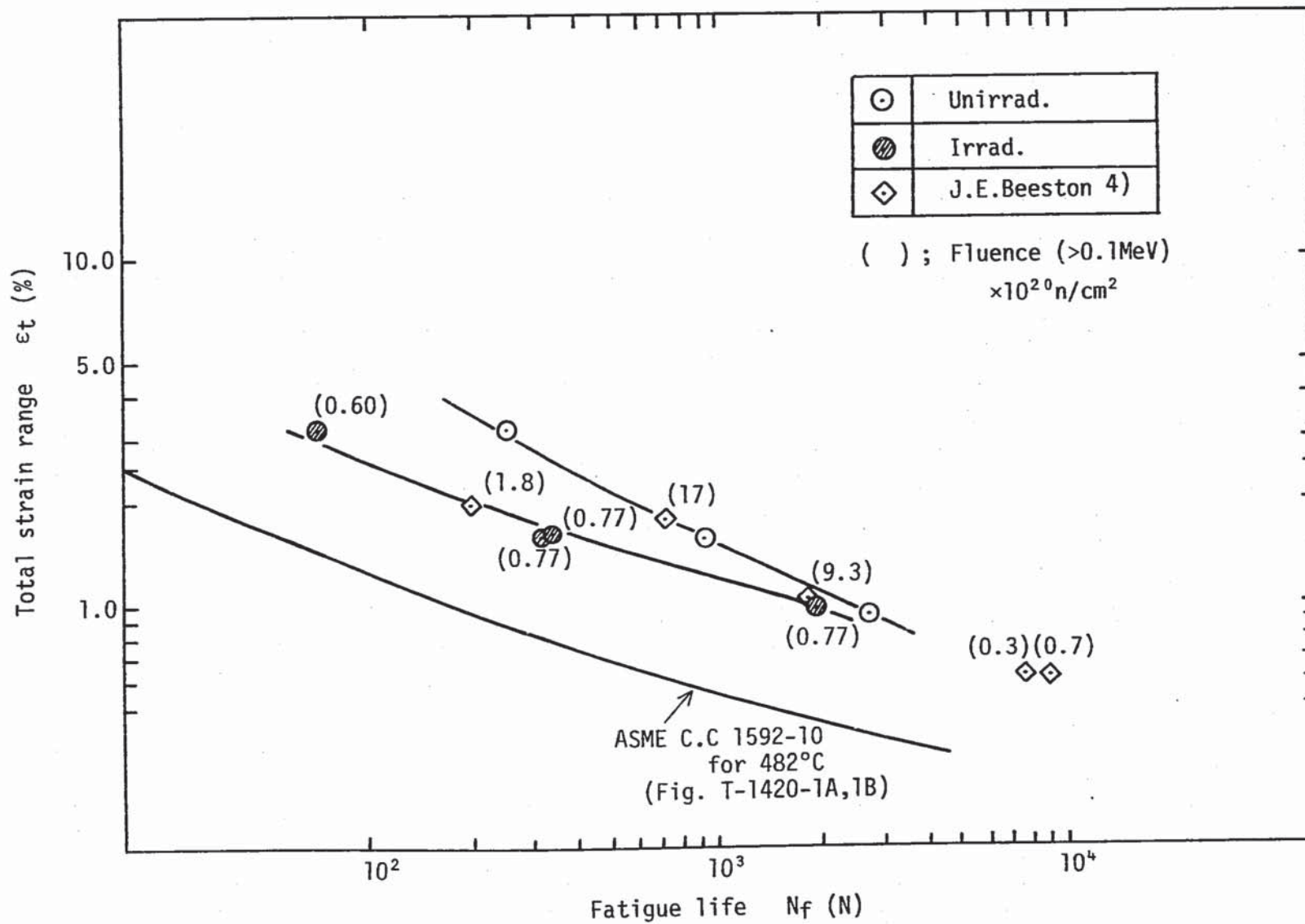


Fig. 29 Comparison of fatigue life of base metal at 500°C (This work and others⁴)

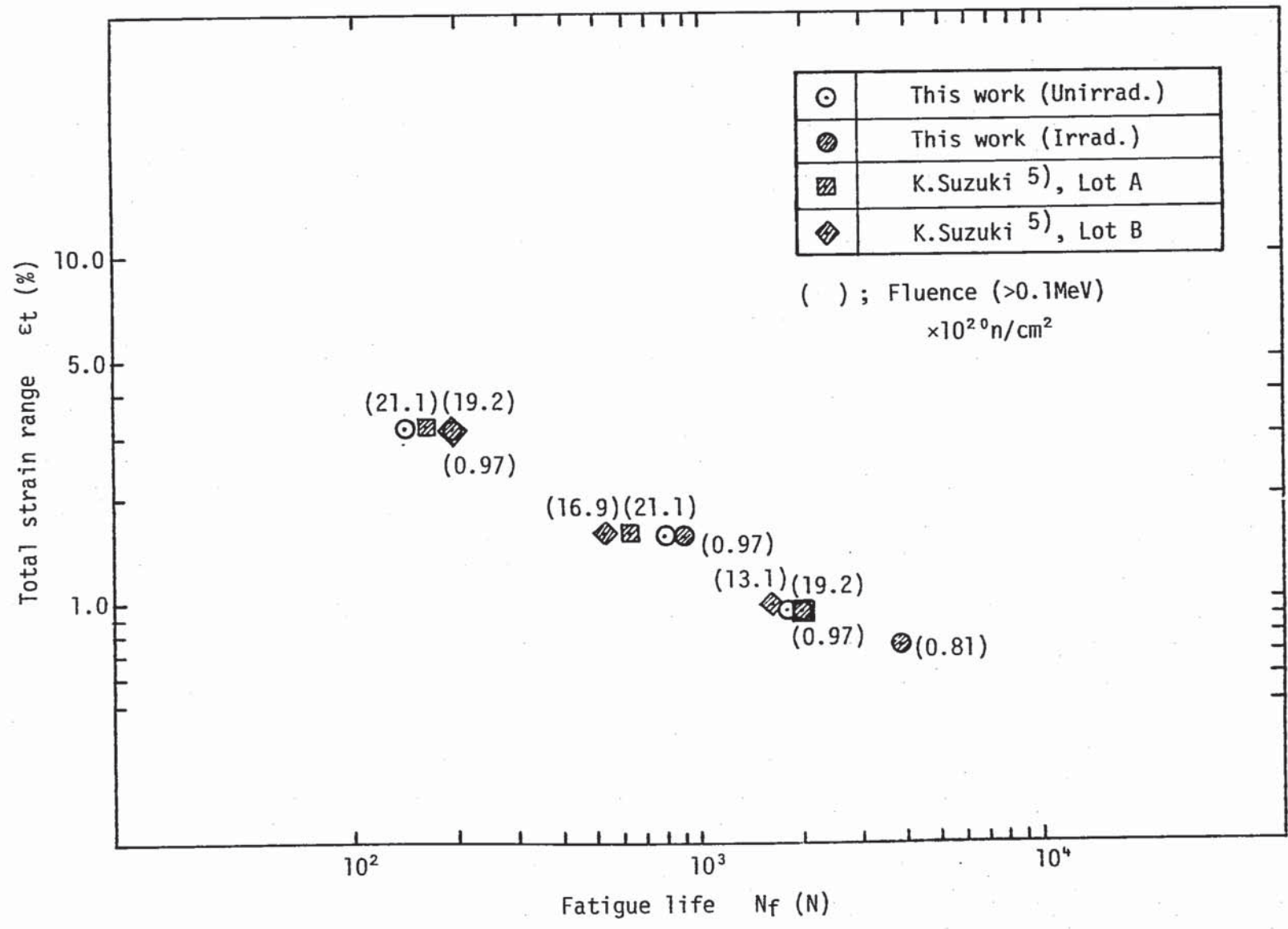


Fig. 30 Comparison of fatigue life of base metal at 550°C (This work and others⁵⁾)

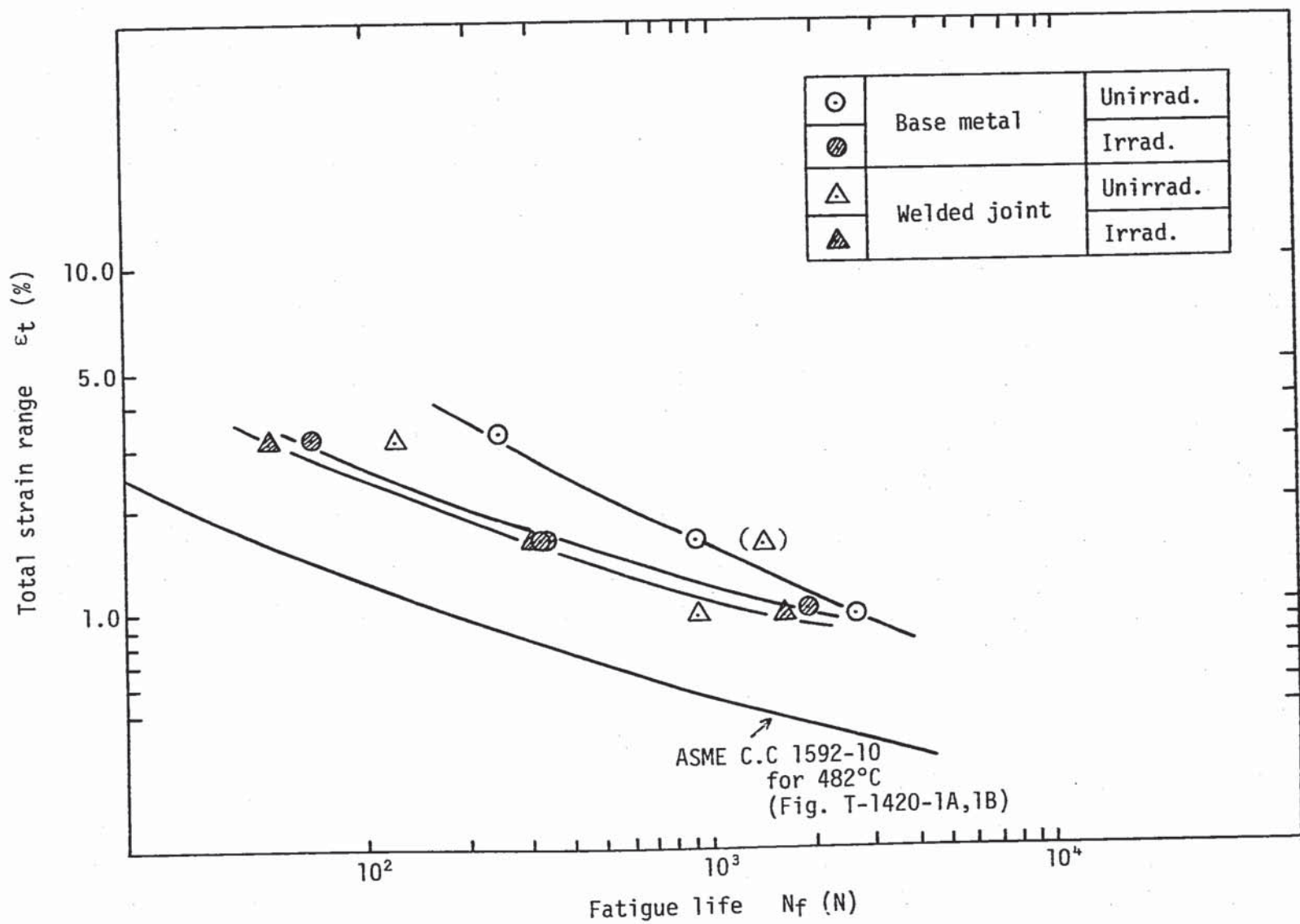


Fig. 31 Comparison of fatigue life between this work and design curve at 500°C

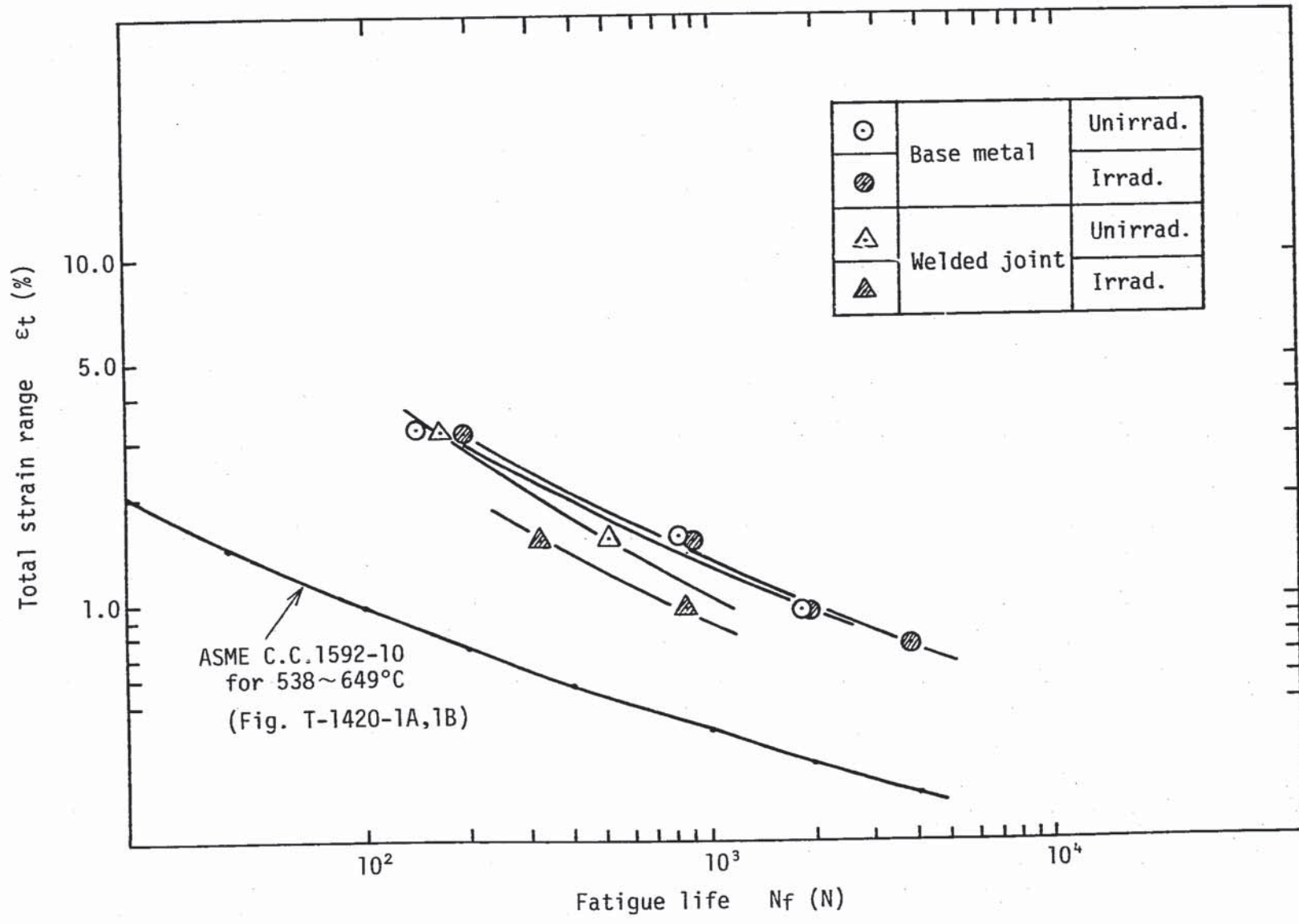


Fig. 32 Comparison of fatigue life between this work and design curve at 550°C

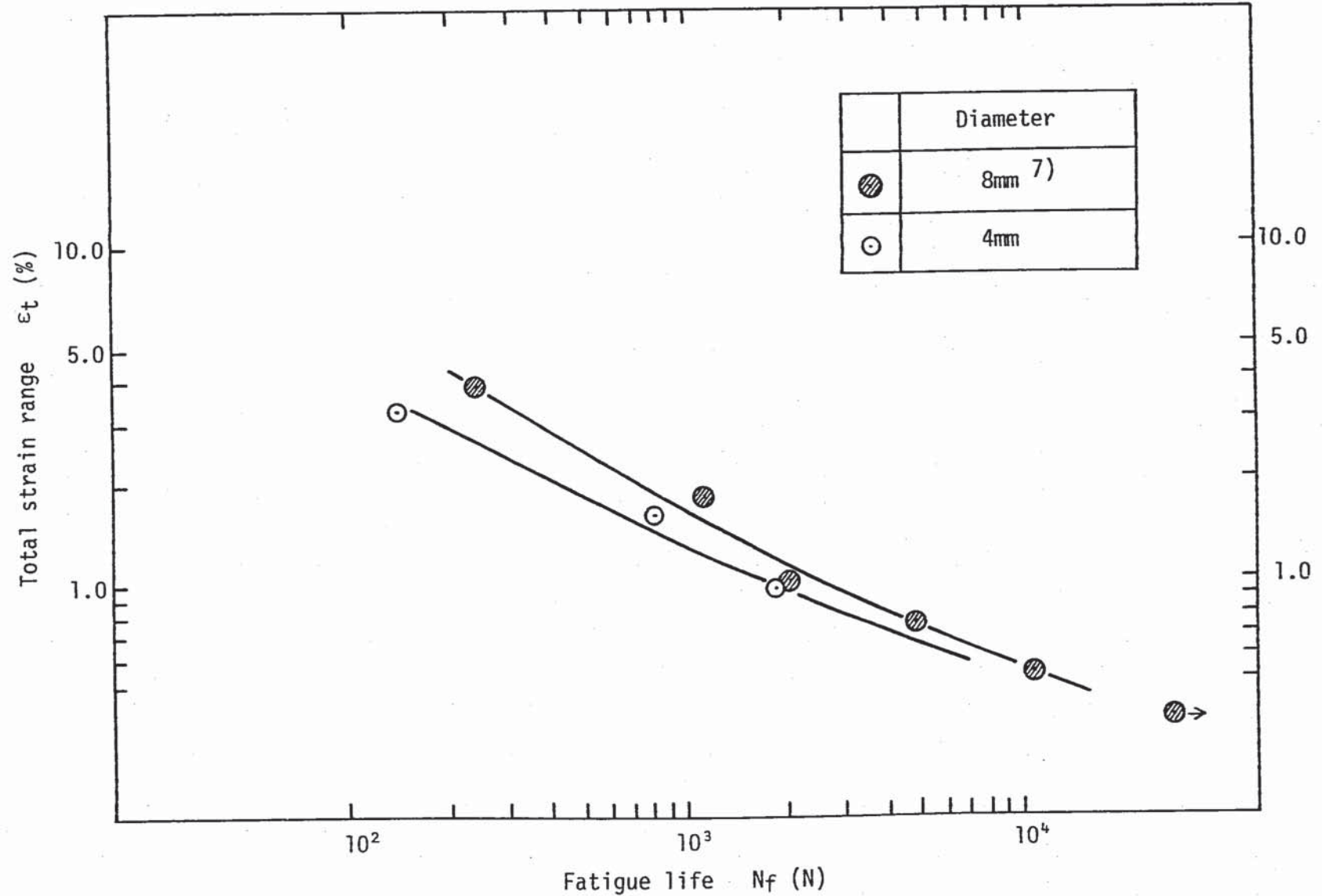
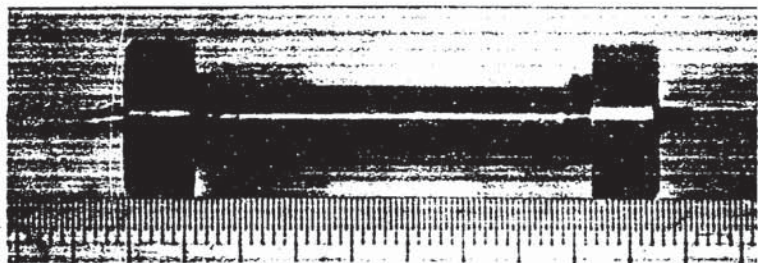
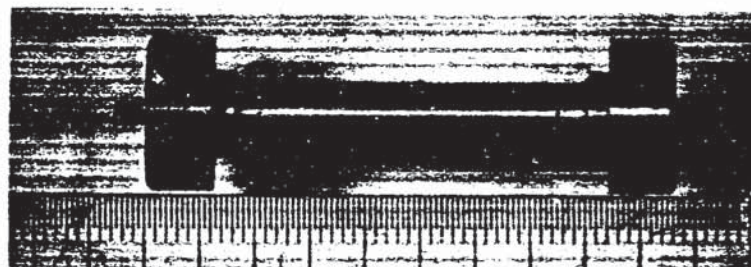


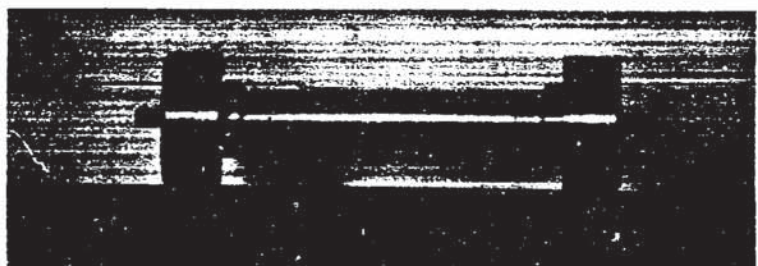
Fig. 33 Effect of specimen size on fatigue life of base metal at 550°C (Unirrad.)



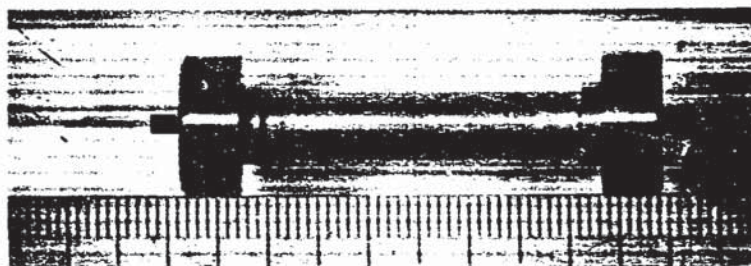
E1



E4



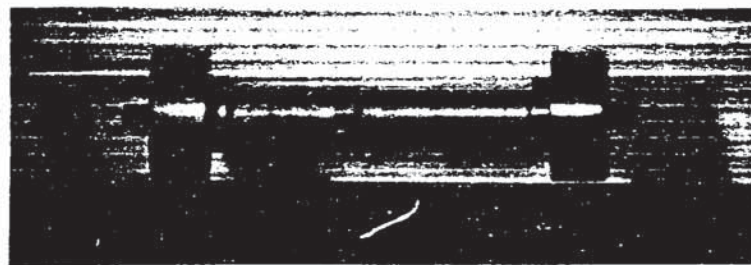
E11



E12



E15

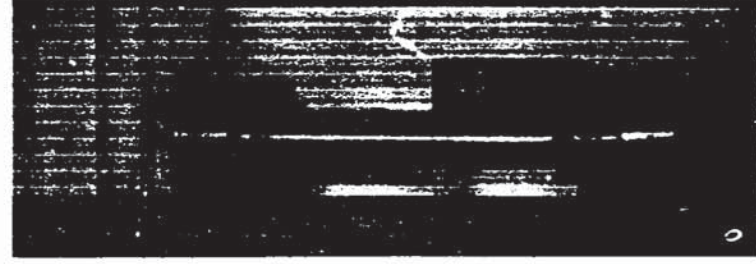


E17

Fig. 34 View of specimens before creep test



E1



E3



E11



E12



E15



E16

Fig. 35 View of specimens after creep test

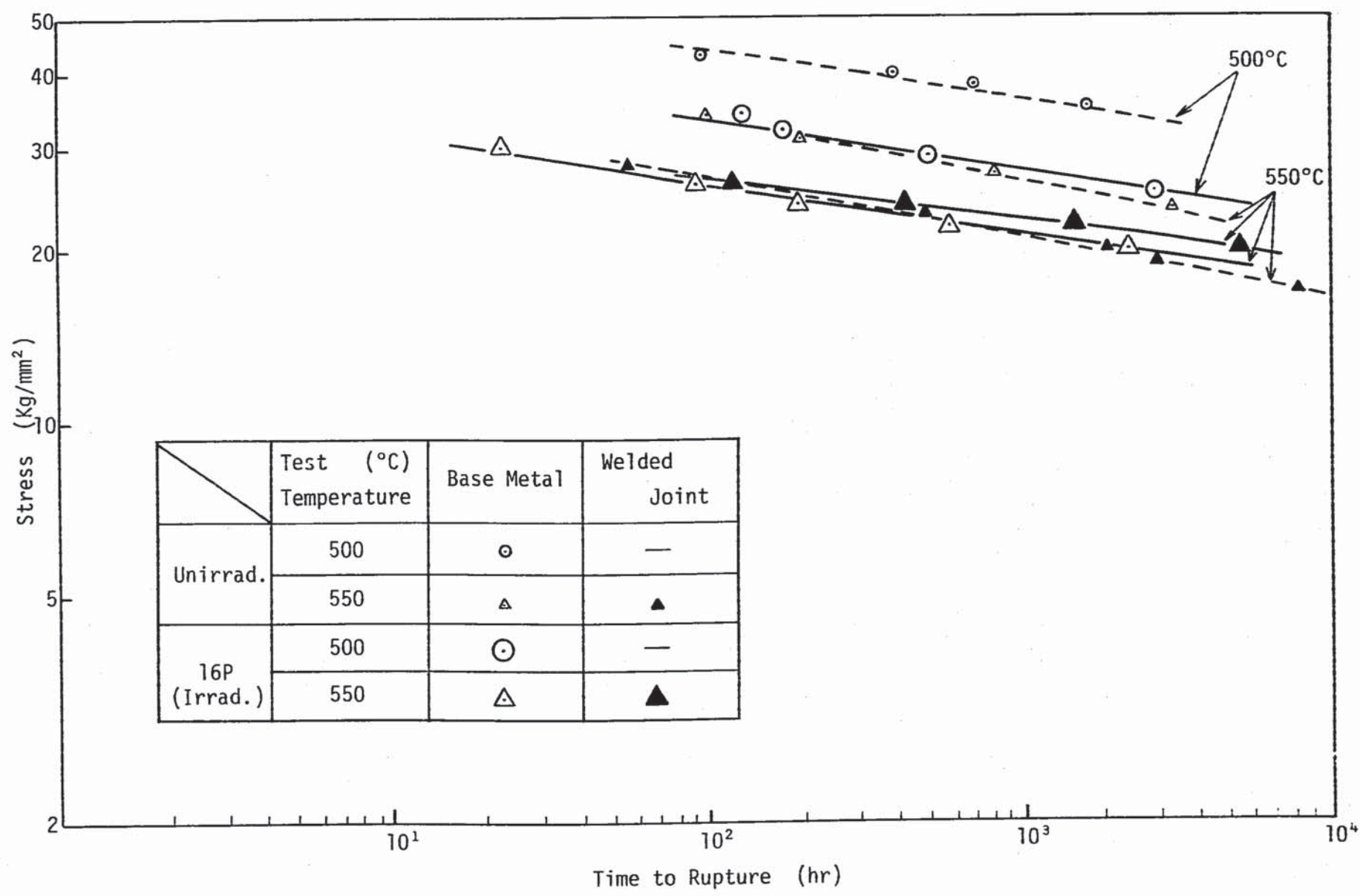


Fig. 36 Effect of irradiation on creep rupture strength of SUS304 tested at 500°C and 550°C

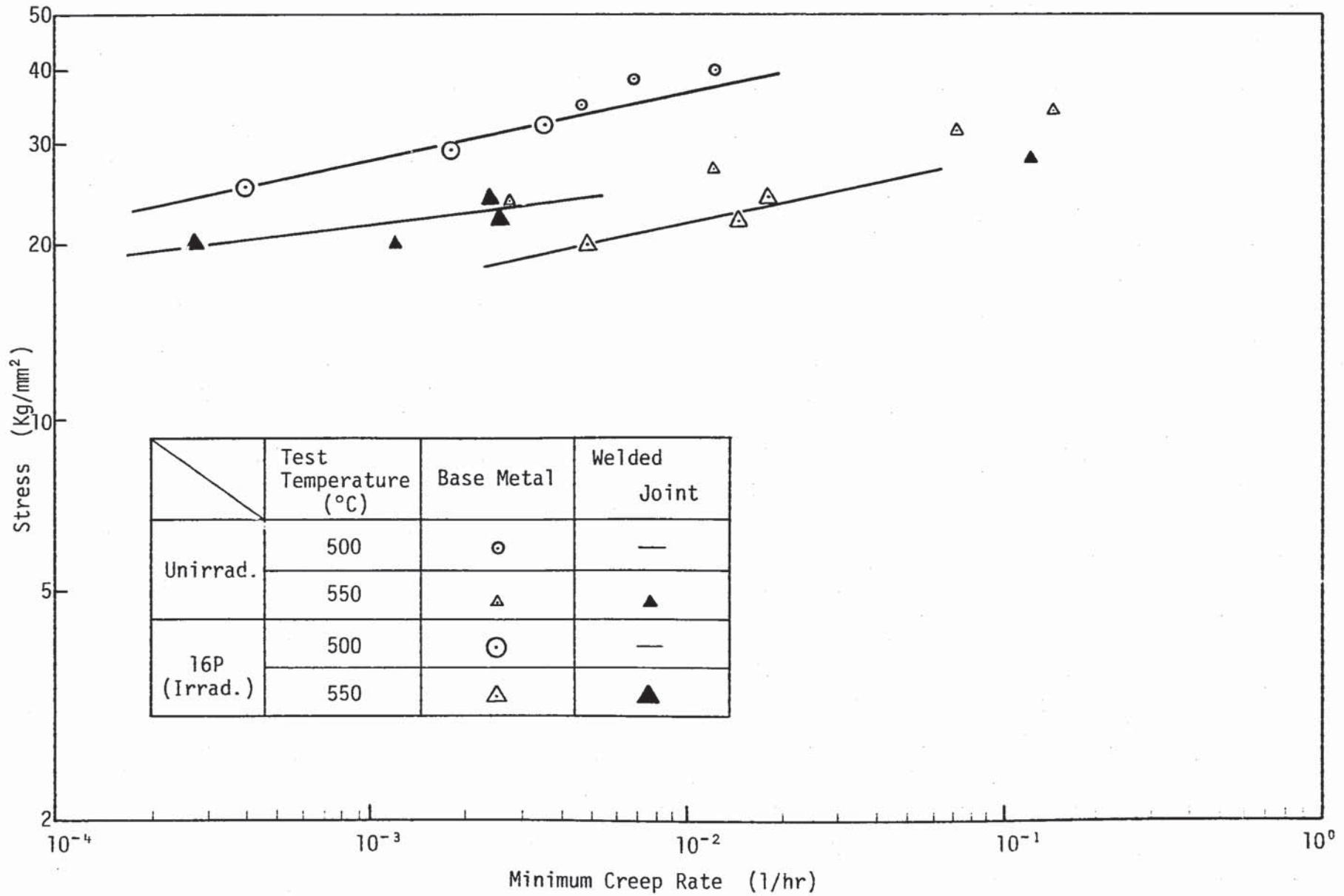


Fig. 37 Effect of irradiation on minimum creep rate of SUS304 tested at 500°C and 550°C

- 67 -

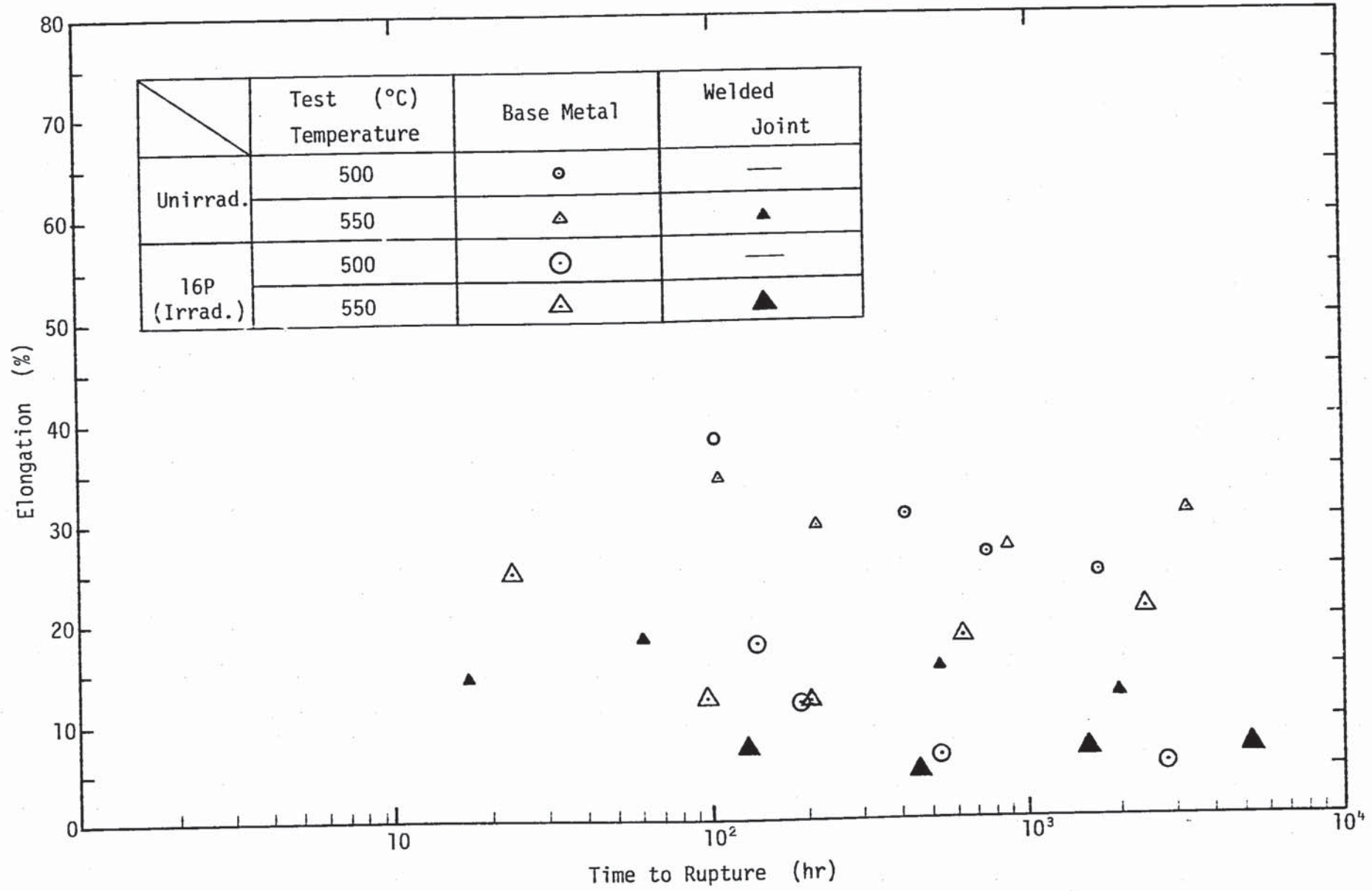


Fig. 38 Effect of irradiation on creep rupture elongation of SUS304 tested at 500°C and 550°C

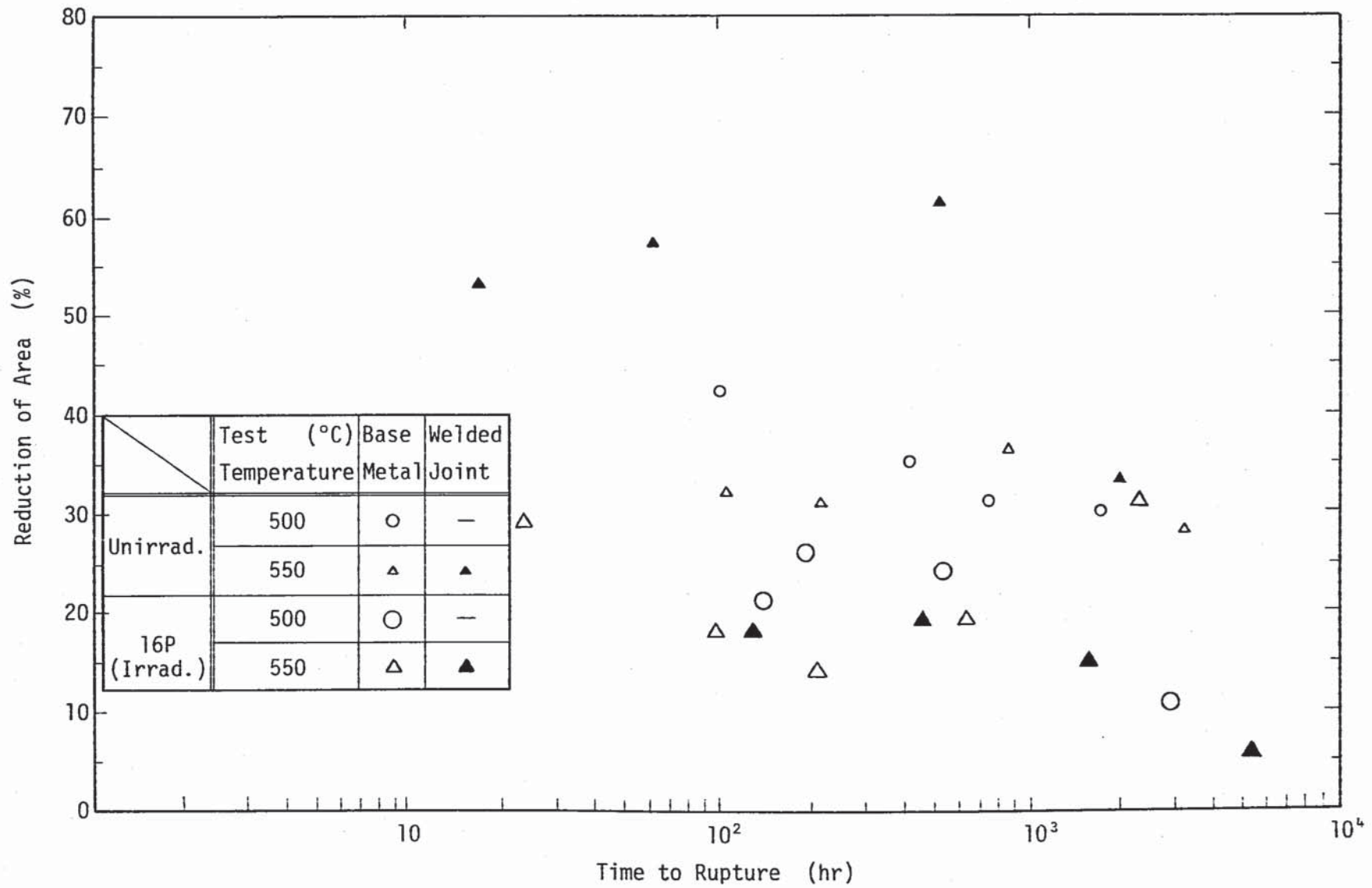


Fig. 39 Effect of irradiation on the reduction of area of specimen ruptured of SUS304 at 500°C and 550°C

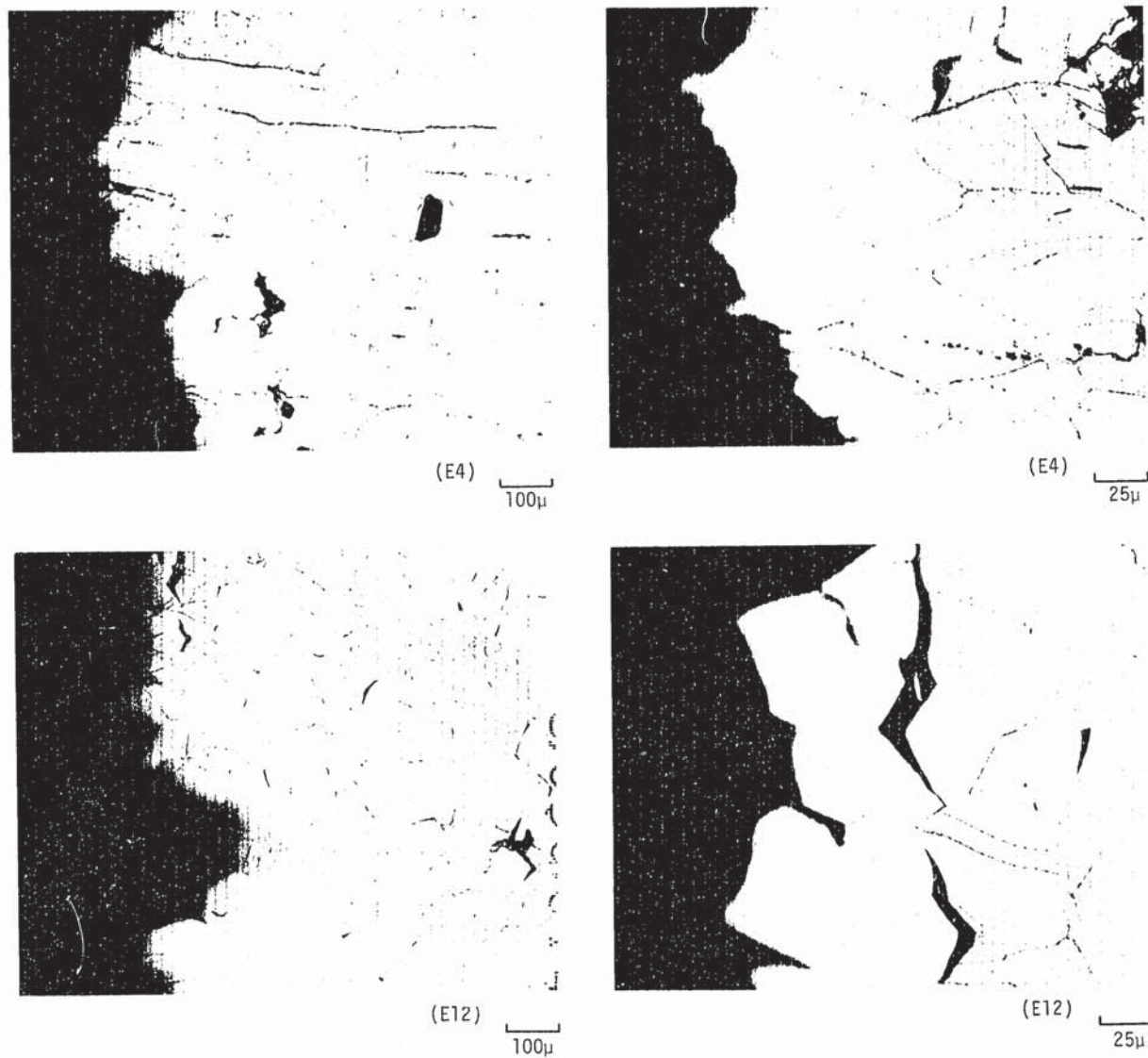
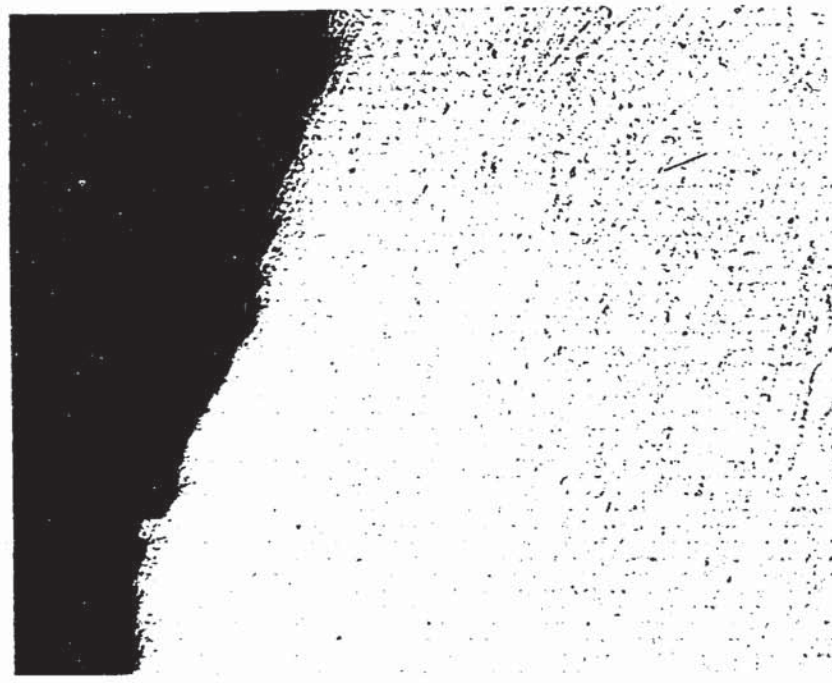

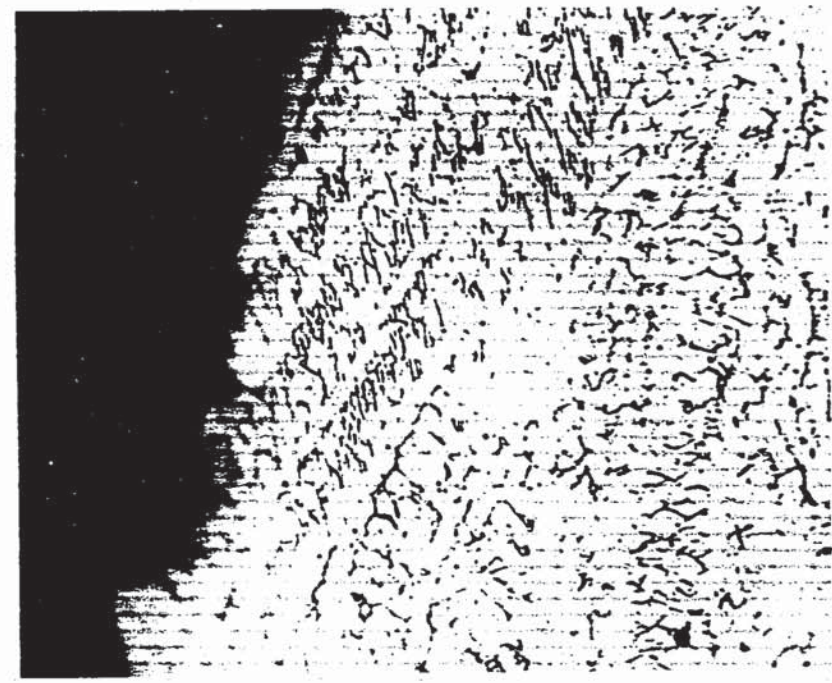


Fig. 40 Micrographs of the cross section of specimens irradiated and creep rupture tested for base metal
A, B: tested at 500°C, C, D: tested at 550°C



(E17)  100μ




(E17)  25μ

Fig. 41 Micrographs of the cross section of specimens irradiated and creep rupture tested for welded joint

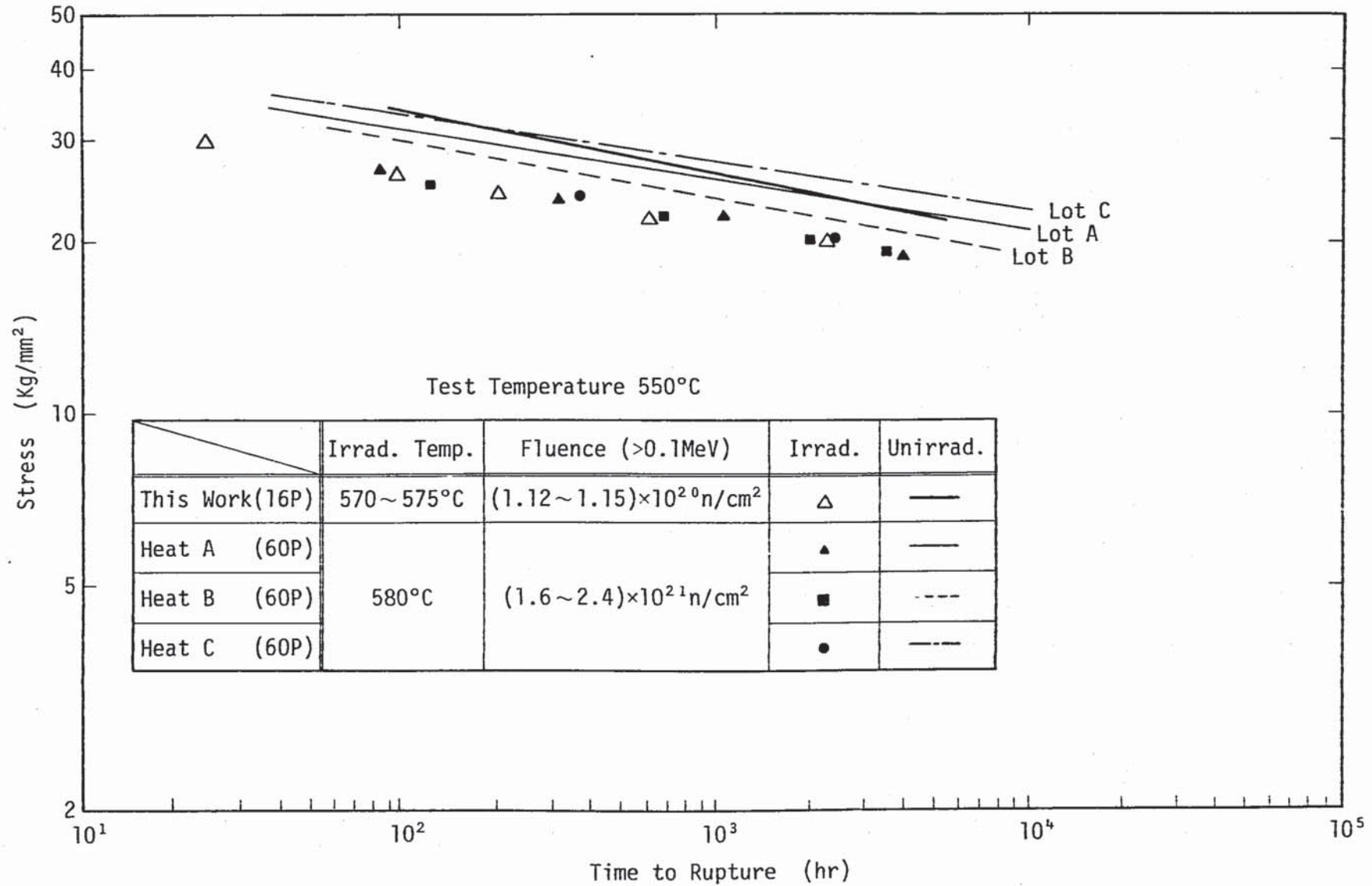


Fig. 42 Comparison of creep rupture strength between this work and others⁸⁾ for base metal tested at 550°C

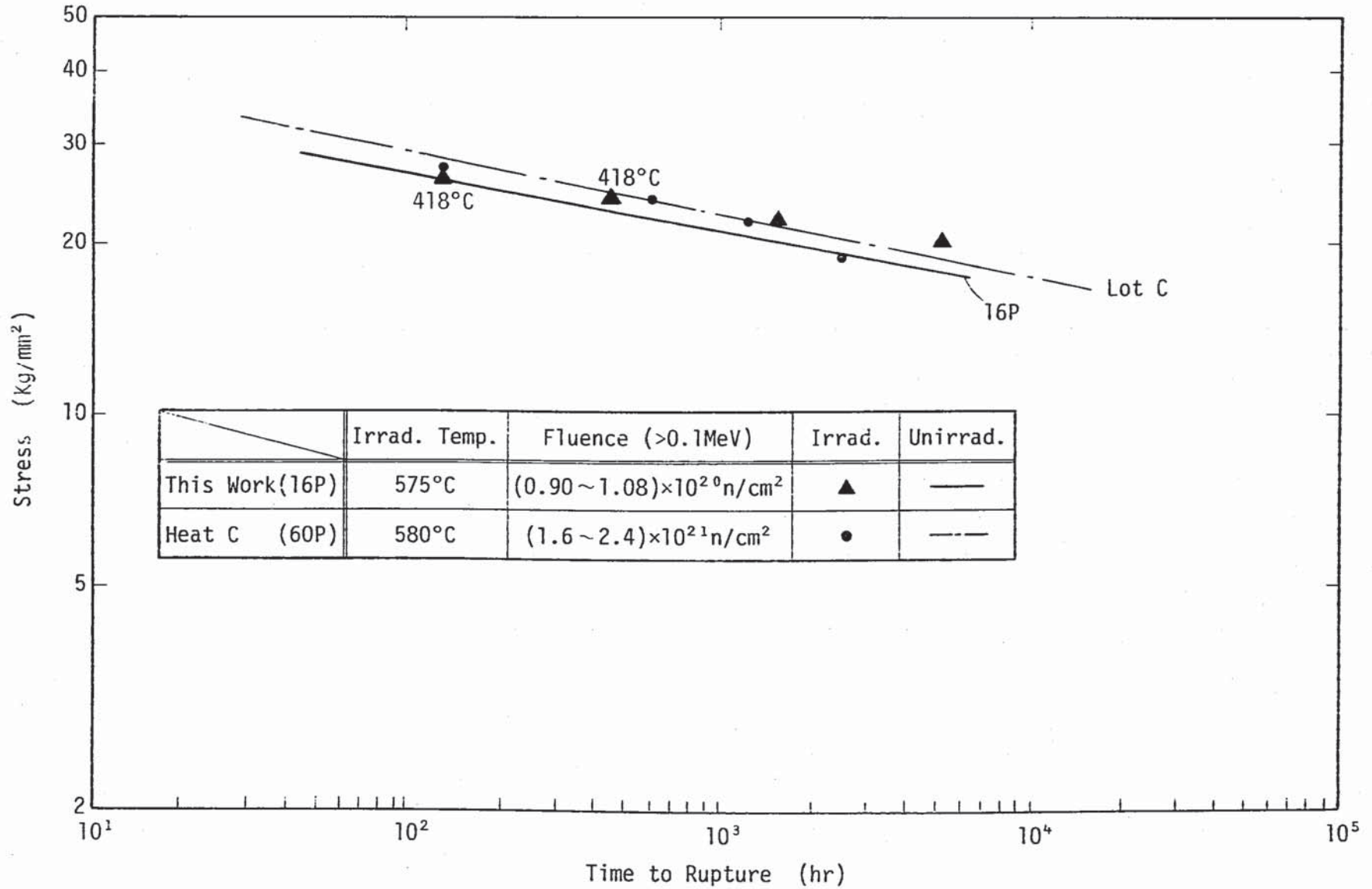


Fig. 43 Comparison of creep rupture strength between this work and others⁸⁾ for welded joint tested at 550°C

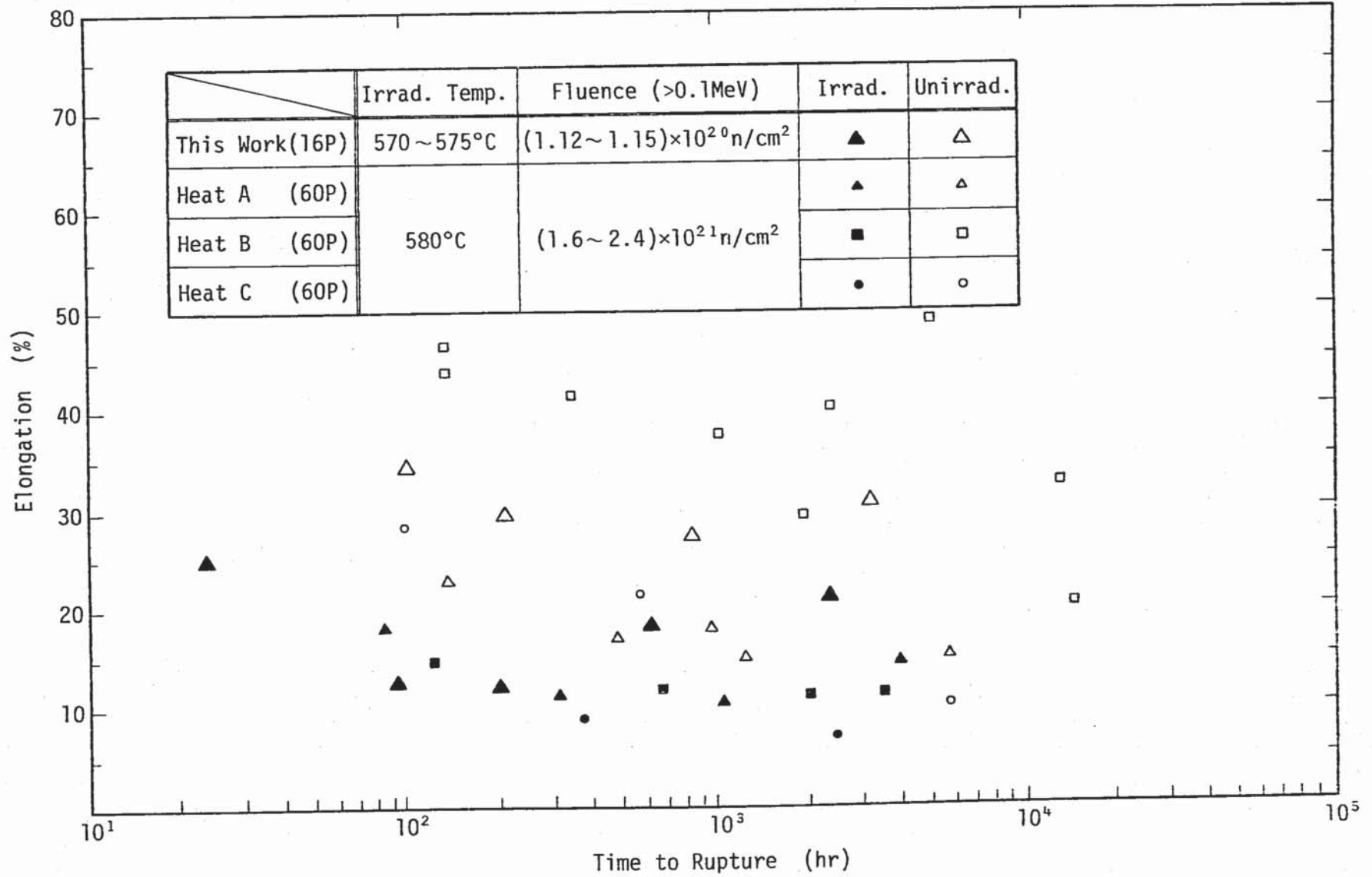
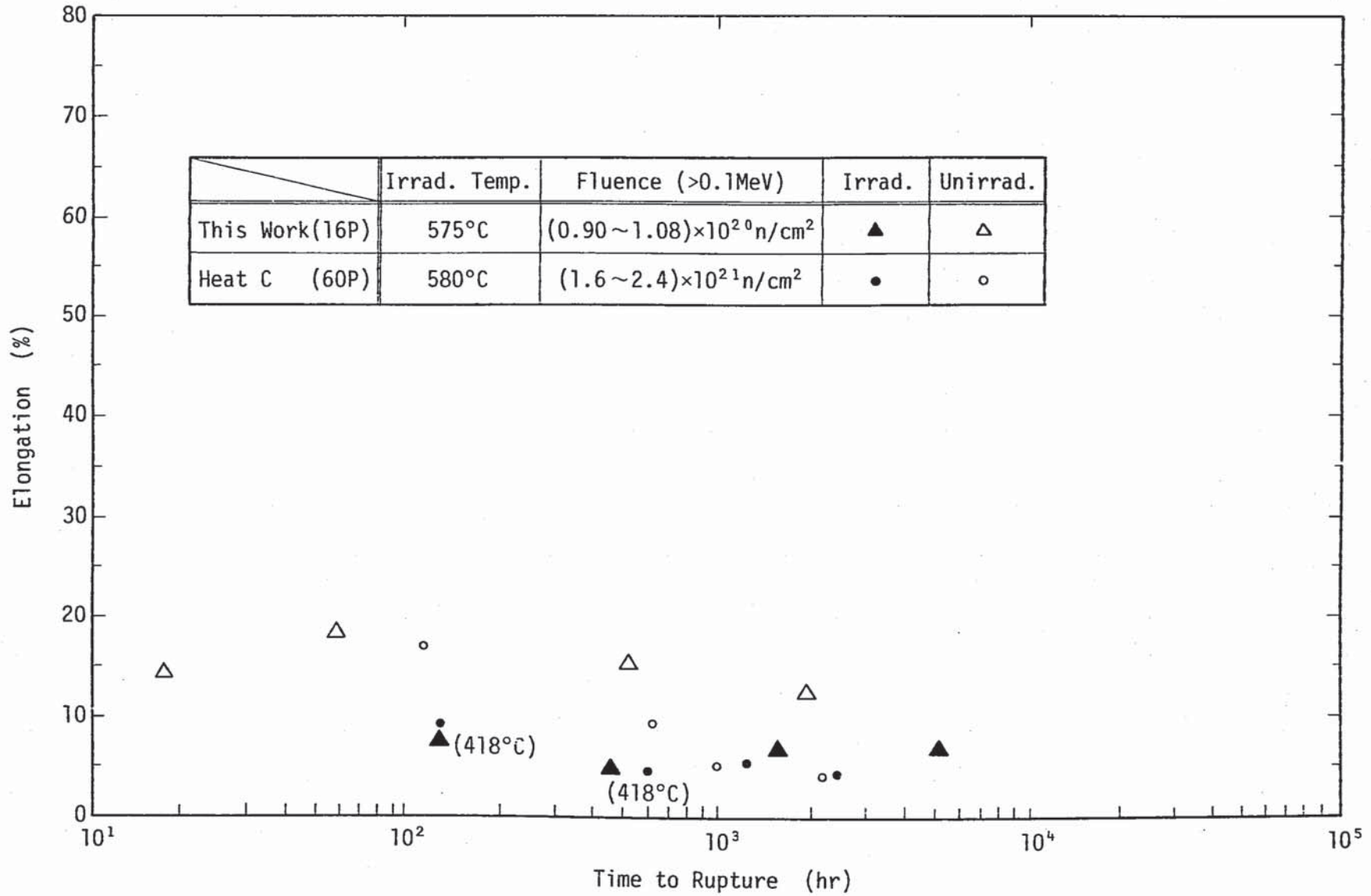


Fig. 44 Comparison of creep rupture elongation between this work and others⁸⁾ for base metal tested at 550°C



-- 76 --

Fig. 45 Comparison of creep rupture elongation between this work and others⁸⁾ for welded joint tested at 550°C

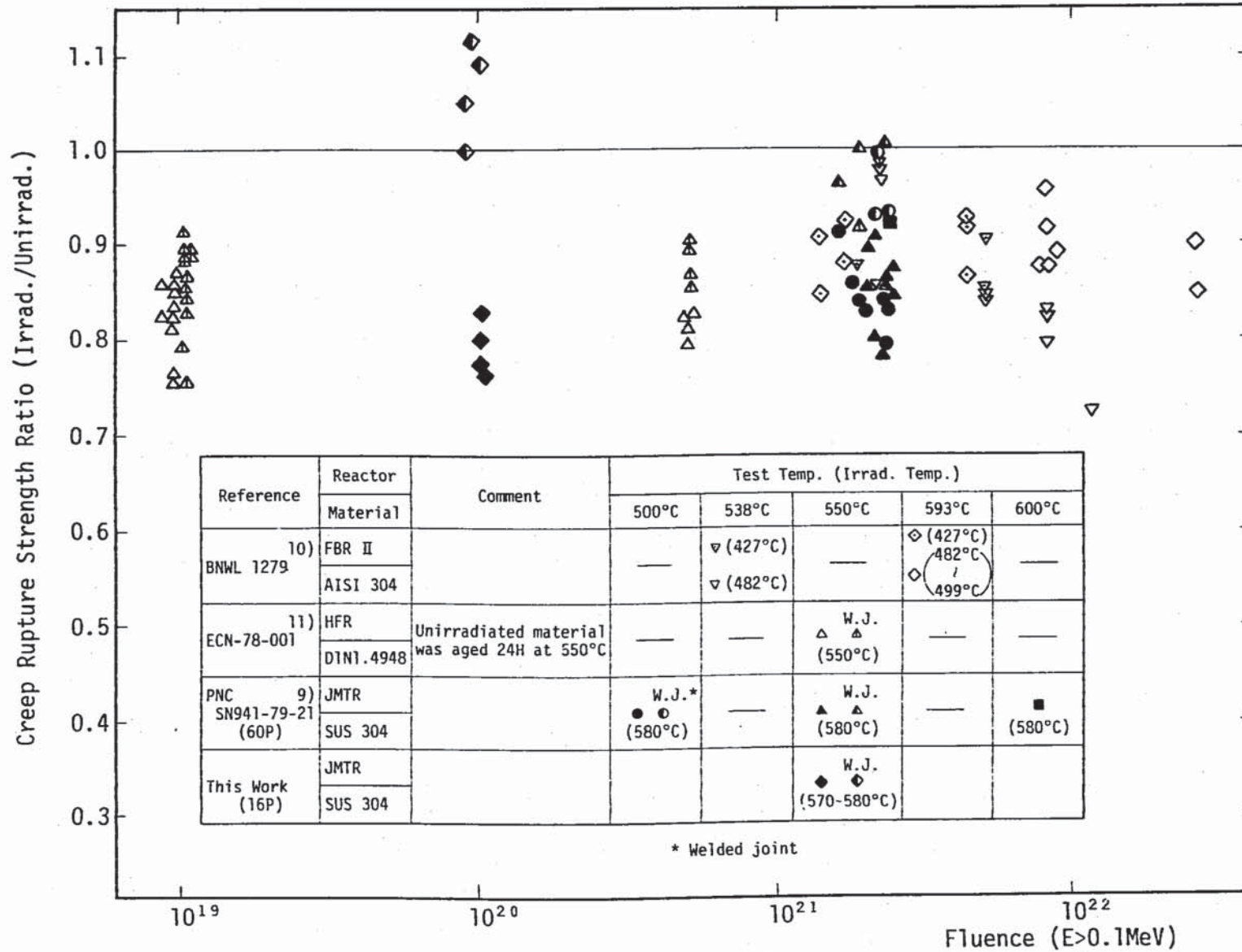


Fig. 46 Comparison of creep rupture strength ratio between this work and others⁸⁾ as a function of neutron fluence

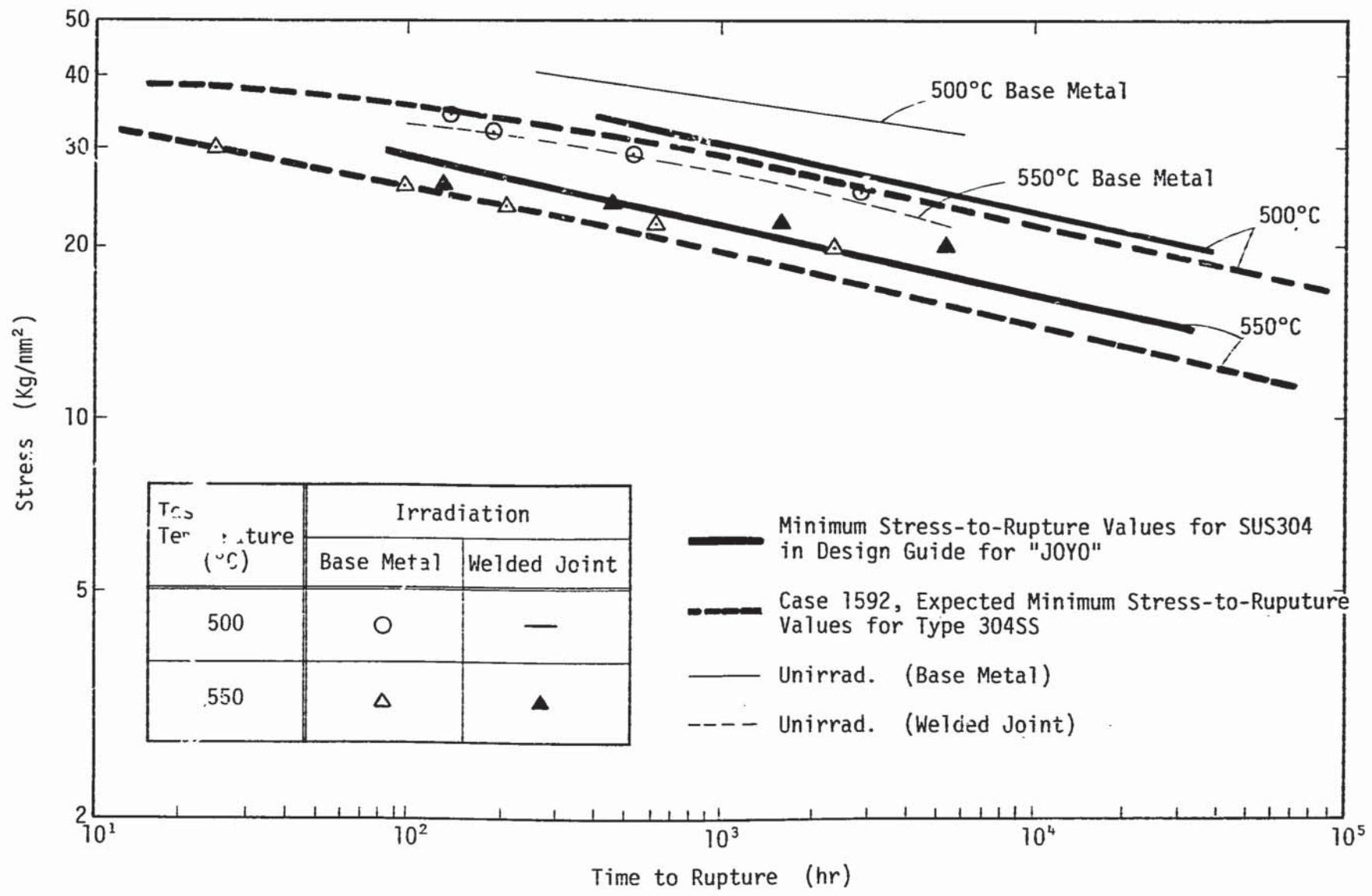


Fig. 47 Comparison of creep rupture strength among this work, the design guide for "JOY0" and design curve of ASME code case 1592