

「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 (74M-11P)

1980年8月

動力炉・核燃料開発事業団

## 「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破れ  
並びにクリープ破断試験 (74M-11P)

榊原瑞夫\*, 谷 賢\*, 新谷聖法\*, 釐川昌也\*  
加藤博夫\*, 阿部康弘\*, 石原幹也\*, 佐々木澄男\*  
関 成一\*, 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470~580℃、フュエンス $3.1\sim 5.45\times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> (>0.1MeV)で照射し、高温破れ試験、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. 高温破れ試験結果

- 1) 母材の550℃での寿命には照射の影響は認められなかった。
- 2) 溶接継手の550℃、約1000サイクルの寿命には照射の影響は認められなかった。又550℃ではデータ数が少なく照射の影響は明らかでなかったが、照射により寿命が若干低下するようである。

## 2. クリープ破断試験結果

- 1) 母材の500℃及び550℃でのクリープ破断強度及び破断伸びは照射により減少したが、長時間側で「常陽」の設計指針と同等以上の値を示す傾向にあった。
- 2) 溶接継手の550℃でのクリープ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。

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)

\* 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

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

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

Mizuo Sakakibara\*, Satoshi Tani\*,  
Kiyonori Alatani\*, Masaya Kanikawa\*,  
Hirofumi Kato\*, Yasuhiro Abe\*,  
Mikiya Ishihara\*, Sumio Sasaki\*,  
Seiich Seki\*, 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 470 ~ 580°C to fast neutron fluence of  $3.1 \sim 5.45 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  ( $> 0.1 \text{ MeV}$ ) 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.

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

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

1. Results of fatigue test.

- 1) No effect of irradiation on fatigue life of base metal tested at 550°C is observed.
- 2) No effect of irradiation on fatigue life of welded joint under about 1000 cycles tested at 500°C is observed. As the data tested at 550°C rather scattered, the irradiation effects on fatigue life were not observed.

2. Results of creep rupture test.

- 1) Both of the creep rupture strength and rupture elongation of base metal tested at 500°C and 550°C decreased after irradiation. It seemed to think the long-term life satisfied the value of "JOYO" guide line.
- 2) The long-term creep rupture strength of welded joint tested at 550°C increased after irradiation, but the creep rupture elongation decreased.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 供 試 材 .....	2
3. 試験方法 .....	3
3.1 照射試験法 .....	3
3.2 外観検査法 .....	3
3.3 高温疲れ試験法 .....	3
3.4 クリープ破断試験法 .....	3
3.5 金相試験法 .....	4
4. 試験結果 .....	5
4.1 照射試験結果 .....	5
4.2 外観検査結果 .....	5
4.3 高温疲れ試験結果 .....	5
4.4 クリープ破断試験結果 .....	6
4.5 金相試験結果 .....	7
5. 考 察 .....	9
5.1 高温疲れ試験結果の考察 .....	9
5.2 クリープ破断試験結果の考察 .....	9
6. あとがき .....	12
7. 謝 辞 .....	12
8. 参考文献 .....	13

## List of Tables

Table 1	Mill sheet of test specimen
Table 2	Welding procedure
Table 3	Low cycle fatigue properties
Table 4	Creep and creep rupture properties

## List of Figures

- Fig. 1. Profile of specimens .
- Fig. 2. Outline of irradiation capsule .
- Fig. 3. Specimen arrangement in irradiation capsule .
- Fig. 4. Irradiation position in JMTR core .
- Fig. 5. Thermal history under irradiation .
- Fig. 6. Temperature distribution in capsule .
- Fig. 7. Fluence distribution in capsule .
- Fig. 8. View of specimens after irradiation .
- Fig. 9. View of specimens after irradiation and test .
- Fig. 10. Effect of irradiation on fatigue life of base metal tested at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 11. Effect of irradiation on fatigue life of welded joint tested at  $500^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 12. Effect of irradiation on fatigue life of welded joint tested at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 13. Stress range as a function of cycles for base metal tested at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 14. Stress range as a function of cycles for welded joint tested at  $500^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 15. Stress range as a function of cycles for welded joint tested at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 16. Comparison of fatigue life between base metal and welded joint tested at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 17. Effect of irradiation on creep rupture strength .
- Fig. 18. Effect of irradiation on creep rate .
- Fig. 19. Effect of irradiation on creep rupture elongation .

- Fig. 20. Effect of irradiation on reduction of area of creep rupture specimen .
- Fig. 21. Micrograph of cross section of specimen after fatigue test .
- Fig. 22. Micrograph of cross section of specimen after creep test .
- Fig. 23. Comparison of fatigue life of base metal between this work and others <sup>2), 3)</sup> tested at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 24. Comparison of fatigue life of welded joint between this work and others <sup>2)</sup> .
- Fig. 25. Comparison of fatigue life of welded joint between this work and design curve at  $500^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 26. Comparison of fatigue life between this work and design curve at  $550^{\circ}\text{C}$  .
- Fig. 27. Comparison of creep rupture strength between this work and others <sup>2), 7)</sup> .
- Fig. 28. Comparison of creep rate of welded joint between this work and others <sup>2)</sup> .
- Fig. 29. Comparison of creep rupture elongation between this work and others <sup>2), 7)</sup> .
- Fig. 30. Comparison of creep rupture strength ratio between this work and others <sup>2), 8), 10), 11)</sup> as a function of neutron fluence .
- Fig. 31. Comparison of creep strength among this work, the design guide line for "JOYO" and design curve of ASME Code Case 1592 .

## 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試験片数を多く取ることが出来ず、照射後試験条件もおのずから限られる。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を行い、その結果と併せ評価する必要がある。本報告はサーベイランスバックアップ試験の一環として「常陽」炉容器のサーベイランス試験材の1部から採取した試験片を原研材料試験炉(JMTR)を用い、470℃~580℃の温度域で $3.1\sim 5.45\times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> (>0.1MeV)の照射を行い、引張試験、高温疲れ試験、クリープ破断試験及び金相試験等の照射後試験を実施した結果をまとめたものである。

なお引張試験<sup>1)</sup>については既に報告した。

## 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（以下継手）である。母材は板厚25mmの溶体化されたSUS304で、そのミルシート値をTable 1に示す。継手は母材の圧延方向に直角に開先を取り、Table 2に示す施工条件で溶接した継手から採取したものである。試験片の採取位置は母材及び継手ともに板厚の中心部で、母材の試験片は長さ方向を圧延方向に平行に、又継手の試験片は長さ方向を溶接線と直角に採取した。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径は4φmmであり、継手では最小部径の部分に溶接境界がくるようにした。クリープ破断試験片は平径部径6φmm、長さ30mmで、継手では平行部の中央に溶接境界がくるようにした。

## 3. 試 験 方 法

### 3.1 照射試験法

照射キャプセル（74M-11P、以下11P）の概要をFig. 2に示す。11P内には本実験で使用した高温疲れ試験片16本とクリープ破断試験片18本のほか引張試験片、微小クリープ試験片、照射温度測定用熱電対6本とフリューエンス測定用フラックスモニタ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。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。照射はFig. 4に示すJMTRのベリリウム反射体領域のD-12孔で35~40のGサイクル行われた。照射温度は11P内の熱電対6本により照射期間中連続して測定した。又照射量は3本のフラックスモニタにより照射試験後測定し、各試験片位置の照射量を求めた。

### 3.2 外観検査法

照射試験後、又高温疲れ及びクリープ破断試験後のすべての試験片外観を目視検査し、ホットセル内のペリスコープで写真撮影した。

### 3.3 高温疲れ試験法

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。加熱には割れ型管状電気炉を用い、試験温度の500℃及び550℃に昇温し約30分保定した後試験を開始した。試験中時間的変化を含めて設定温度±3℃に制御した。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℃試験には475℃~500℃照射材を、550℃試験には550℃~570℃照射材をあてた。試験は0.07Hzの正弦波を用いた径ひずみ制御で、徐々にひずみを増加し、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(Hf)は引張荷重が予定Nfのほぼ1/2における荷重の50%以下に減少した時点をもってNfと定義した。軸ひずみ範囲及び軸応力範囲の計算及び試験片装着方法については前報<sup>2)</sup>に詳しく報告したので省略する。

### 3.4 クリープ破断試験法

試験には容量3トンの遠隔操作型単軸クリープ試験機を使用した。クリープ破断時間の目標を100h、300h、1000h及び3000hとし、設定温度の500℃及び550℃の温度に達した後、約24h保定後試験荷重をかけた。クリープ伸びはチャック間距離をマグネスケールで3分間毎に10μmの精度で測定し求めた。クリープ破断伸びは標点間30mmにマークしたマークを破断後試験片を突合せた状態で写真撮影し、写真より測定した。クリープ破断紋りは破面を実物大に写真撮影し、写真より測定した。

### 3.5 金相試験法

高温疲れ及びクリーブ破断試験後の代表的試験片の破断部近傍縦断面の組織を光学顕微鏡で観察した。エッチングは10%過硫酸アンモニア水溶液中で電解により行った。組織は遠隔操作型光学顕微鏡（ライヘルト社製，テラトーム）で観察し，100倍及び400倍で撮影した。

## 4. 試験結果

### 4.1 照射試験結果

Fig. 5に11P内の各位置に装着した熱電対による温度測定の結果を示す。各位置の定常運転中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. 6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, VI, X及びXI段で行った。I段目は約400℃, II~VI段は約475℃, VII~XI段は約500~580℃であった。II~VI段に配置した試験片を500℃の照射後試験に，VII~XI段に配置した試験片を550℃の照射後試験に供した。又I段に配置した試験片は照射温度が低すぎ，試験目的にあわないため，今後の検討用試料として保存することにした。

Fig. 7にVII及びXI段に配置した高速中性子フラックスモニタによるフリュウ-エンス(>1MeV)と原研が補正した0.1MeV以上のフリュウ-エンスを示す。照射時間は2672hで， $3.1\sim 5.45 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  (>0.1MeV)のフリュウ-エンスであった。

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0.1MeV以上のフリュウ-エンスを用いることが多く，本報告においてはこの値を採用した。

### 4.2 外観検査結果

Fig. 8に照射後の試験片の外観写真を示す。11Pの上部(I~V段)に配置した試験片には黒色の斑点状付着物が認められたが，下部(VI~XI段)に配置した試験片には付着物は認められなかった。黒色斑点状付着物はアルミナでみかいたところ除去された。Fig. 9に高温疲れ及びクリーブ破断試験後の外観を示す。試験後の外観は前報<sup>2)</sup>の非照射材の外観とほぼ同じでとくに変化は認められなかった。

### 4.3 高温疲れ試験結果

Table 3に試験結果をまとめて示す。表中\*印をつけた試験片は照射により全面的に黒色斑点状付着物が認められた試験片であり，かつ後述するように試験後の破面は他の試験片と異なり，粒界破断を呈すると同時にサブクラックもすべて粒界伝播していた。このため他の試験結果と同様に扱うには疑問があり，本報告ではこのデータすべてを除外することにした。なお除外データに相当する500℃の母材は「常陽」照射による詳細な照射後試験を計画しており，その結果から照射の影響を明らかにして行く予定である。母材の550℃，継手の500℃及び550℃における照射の疲れ寿命に及ぼす影響について前報<sup>2)</sup>に報告した同一材料のデータを参考にし，以下のことが明らかになった。

#### 1) 照射の影響

Fig. 10に母材の550℃における疲れ寿命を示す。照射材の寿命は非照射材とほぼ等しく，照



射による影響は認められないようである。

Fig. 11に継手の500℃における疲れ寿命を示す。高ひずみ範囲では非照射材及び16P材に比較し、寿命が長いが、約1000サイクルでは非照射材、16P材とほぼ等しく照射による影響は認められないようである。

Fig. 12に継手の550℃における疲れ寿命を示す。データが2点しかなく、かつバラツキがあるためひずみ範囲と寿命の関係は明らかでないが、非照射材に比較しいずれも寿命が低下しているようである。

継手については500℃及び550℃試験ともデータがバラツキしており、今後ともデータを蓄積し照射の影響を明らかにして行く必要がある。

Fig. 13~Fig. 15に疲れ試験繰り返し数と応力範囲の関係を示す。すべての試験片が100サイクル以上で加工軟化傾向を示していた。この傾向は前報<sup>2)</sup>と同じであり、照射により材料が硬化しているためと考えられる。

## 2) 母材と継手の比較

Fig. 16に照射後の母材と継手の550℃における疲れ寿命を示す。継手のデータは2点しかなく、母材と比較し寿命比を出すことはできないが、継手の寿命は母材よりもやや短いようである。

## 4.4 クリープ破断試験結果

Table 4に試験結果をまとめて示す。母材と継手の500℃及び550℃のクリープ破断特性に及ぼす照射の影響について前報<sup>2)</sup>に報告した同一材料のデータを参考にし、以下のことが明らかになった。

### 1) クリープ破断強度に及ぼす照射の影響

Fig. 17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500℃及び550℃試験ともに低下している。1000時間破断強度で見るとそれぞれ約9kg/cm<sup>2</sup>及び約3kg/cm<sup>2</sup>低くなっている。

継手の照射材の550℃におけるクリープ破断強度は非照射材とほぼ等しいか高めである。又継手は照射材及び非照射材ともに母材よりも低い。しかしその差は照射により小さくなる傾向を示している。

### 2) 最小クリープ速度に及ぼす照射の影響

Fig. 18に500℃及び550℃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℃における最小クリープ速度は非照射材とほぼ同一線上にあるが、550℃においては非照射材に比較し約4倍速い。継手の550℃試験では照射材の速度は非照射材とほぼ等しいか若干遅いようであるが、バラツキがあるためその影響は明らかでない。又継手のクリープ速

度は非照射材で母材に比べ約4倍速いが、照射材では母材のそれとほぼ等しい。

### 3) クリープ破断伸びに及ぼす照射の影響

Fig. 19に500℃及び550℃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℃におけるクリープ破断伸びは212.9hで最も低く6.3%であったが、さらに時間が長くなると増加する傾向にあった。母材及び継手ともに照射材の550℃におけるクリープ破断伸びは実験範囲内の時間(10.9~2099.2h)において破断時間の違いによる傾向は明らかでなく、母材で16.0~26.3%、継手で5.1~9.0%であった。又母材及び継手ともに照射によりクリープ破断伸びは著しく減少した。

### 4) クリープ破断紋りに及ぼす照射の影響

Fig. 20に500℃及び550℃のクリープ破断紋りに及ぼす照射の影響を示す。母材の場合、500℃及び550℃試験のクリープ破断紋りはクリープ破断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でそれぞれ13%及び23%であった。継手の照射材の550℃におけるクリープ破断紋りは実験範囲内の時間(10.9~1877.5h)では時間に関係なく13~18%であった。母材及び継手ともにクリープ破断紋りは照射により減少し、クリープ破断時間が長くなれば両者の値は接近する傾向にあった。

## 4.5 金相試験結果

Fig. 21に疲れ試験後の金相写真を示す。A及びBは母材の500℃及び550℃試験後のサブクラック部の断面組織を示す。500℃試験材のサブクラックは粒界を伝播しており、SUS304で一般に認められる低サイクル割れ伝播とは様相を異にしていた。又前述した黒色斑点状付着物が認められた試験片ではすべて粒界伝播型の割れが認められた。これらのことから何らかの理由により照射中又は照射後の試験片取扱中に粒界が脆化したものと考えられた。550℃試験材のサブクラックは粒内を伝播しており、通常の割れ形態を呈しており、前報<sup>2)</sup>の結果と類似していた。C及びDは継手の500℃及び550℃試験後の破断部断面の組織を示したものである。割れはすべて溶着鋼内を伝播していた。割れ伝播経路と組織の関連については明らかでなかった。

Fig. 22に550℃でのクリープ破断試験後の破断部断面の金相写真を示す。A及びBは母材で破断時間が60.4h及び4090.0hであった試験片の断面組織である。高負荷応力の短時間破断材の破面は粒内伝播型の様相を呈し、粒の塑性変形にともなうスリップバンドが認められた。しかし破面から離れた部分ではウェッジタイプの粒界割れが認められた。低負荷応力の長時間破断材の破面は粒界伝播の様相を呈しているが、粒界反応型析出物が存在しており、脆性的な粒界破断形態とは異なっていた。C及びDは継手で破断時間が10.9h及び1877.5hであった試験片の断面組織である。高負荷応力の短時間破断材は母材破断で破面は粒界伝播型であった。低負荷応力の長時間破断材は溶着鋼内で破断していた。A及びCは母材破断であるにもかかわらず組織

が異なっていた。これはAは525℃照射であるのに対し、Cは470℃照射であり、照射温度により差が生じたものと考えられる。

## 5. 考 察

### 5.1 高温疲れ試験結果の考察

#### 1) 照射の影響

Fig. 10 から母材の550℃試験では実験範囲において照射の影響はないといえる。又Fig. 23 に他の試験結果<sup>2),3)</sup>との比較を示す。本試験結果を含めて母材の550℃における疲れ寿命は照射量  $0.4 \sim 2.2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (>0.1 \text{ MeV})$  の範囲で照射の影響は認められない。しかし照射により他の材質は変化を受けることは明らかであり<sup>4)</sup>、さらに容器器材の使われる温度域及び照射量の範囲で疲れ寿命に及ぼす照射の影響を明らかにしていくことが必要である。継手の500℃試験ではFig. 11及びFig. 12に示すように照射の影響は認められないが、550℃試験では照射により寿命がわずかに低下するようである。Fig. 24に他の試験結果<sup>2)</sup>と比較した結果を示す。継手の500℃及び550℃試験結果はかなりバラツキしており、これらのデータから照射の影響を明らかにには出来ない。今後試験片採取位置、試験片形状及び照射条件等系統的にデータを蓄積解析して行くことが必要である。

表3の\*印で示した試料はFig. 8に示したように照射後の表面に異常が認められたこと、及びFig. 21に示したように割れはすべて粒界破断型であったことから照射中又は照射後に何らかの理由により異常が生じ粒界が脆化したものと考えられる。この原因は明らかでないが、「常陽」第5、第6サイクルを利用し詳細な試験を計画しており、その照射後試験で明らかにされるであろう。

#### 2) 疲れ設計曲線との比較

Fig. 25及びFig. 26に母材及び継手の高温疲れ寿命をASME Code Case 1592-10の設計曲線と比較して示す。「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針<sup>5)</sup>によれば、定常状態における熱サイクル数は寿命末期において約1000回であるため、破断繰り返し数1000回における寿命比及びひずみ比について考察する。母材の550℃のひずみ比は約3.2、寿命比は約1.79であった。継手の500℃のひずみ比は約1.9、寿命比は約6.7であった。継手の550℃試験結果はデータが2点しかなく、かつバラツキているため設計曲線との比較は出来なかった。また全てのデータはASMEの疲れ設計曲線を上まわっており、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。寿命比は約6.7~1.79であり安全率20を割っていた。しかし本試験に用いた試験片の径は4mmφであり、8mmφの試験結果<sup>6)</sup>と比較し、約1.4~1.9の寿命比があるため、設計曲線と比較するためには試験片の寸法効果を考慮する必要がある。この効果については現在系統的試験を計画しており近いうちに明らかにならう。

## 5.2 クリープ破断試験結果の考察

### 1) 照射の影響

Fig. 17及びFig. 18に示したように550℃試験の母材の照射材は非照射材に比較し、クリープ速度が約4倍速く、クリープ破断寿命は約1/4に減少していた。このことは母材の550℃試験における寿命の低下が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られる。一方継手の550℃試験では、照射材のクリープ速度は非照射材とほぼ等しく破断強度は長時間側で高い。又Fig. 19に示したようにクリープ破断伸びは照射により低下した。一般的にはクリープ速度が同じ場合、破断伸びが減少すればその分だけクリープ破断強度が低下すると考えられるが、本実験の非照射材の伸びはもともと20%以下であり、それ以上延性が低下してもクリープ破断時間には影響を及ぼさなかったものと考えられる。500℃試験の母材の照射材は非照射材とほぼ等しいクリープ速度であるにもかかわらず、クリープ破断強度は低い。この強度の低下はFig. 19に示したように照射により延性が急減しているためと考えられる。

Fig. 27にクリープ破断強度を他の試験結果<sup>2),8)</sup>と比較して示す。500℃のクリープ破断強度は他の結果とはほぼ等しく、照射量 $0.4 \sim 2.44 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の範囲で差は認められないようである。一方550℃では他の結果に比較し高い。H. Böhmら<sup>9)</sup>によると照射後のクリープ破断強度は炭化物の析出状態によって変化することを指摘しており、照射により高くなる場合があることを示している。本試験結果においてはFig. 22A及びCに見られるように照射温度が異なる(照射後試験温度は等しい)場合粒内及び粒界での炭化物の析出状態が異なっている。又Fig. 28に示したように、本試験材は16P<sup>2)</sup>材に比較し550℃でのクリープ速度が遅い。このことは内部組織変化に基づく耐クリープ性の向上を示差しており、H. Böhmらの結果を支持しているものと考えられる。以上のことから本試験材の照射条件において、たまたまクリープ特性に好ましい組織が作り出され、照射量が16P及び60Pの間にあるにもかかわらずクリープ破断強度が高くなったものと考えられる。

これらの照射後組織の機械的性質に与える影響については今後詳細な検討を行い、照射損傷の少ない組織を模索し、炉容器材の安全性を更に高めた組織を作っていくことが肝要と考えられる。

Fig. 29にクリープ破断伸びを他の試験結果<sup>2),8)</sup>と比較して示す。母材及び継手の照射後の長時間クリープ破断伸びはバラツキが大きく、照射量の影響は明らかでない。

Fig. 30にクリープ破断強度比と照射量の関係を国内外の照射後試験結果<sup>2),8),10),11)</sup>と比較して示す。本報告の母材のクリープ破断強度比は500℃及び550℃試験でそれぞれ0.76~0.80及び0.83~0.91であり、参考データのそれ(0.72~0.98)<sup>10),11)</sup>と比較すると照射量、試験温度等に違いがあるにもかかわらずほぼ同程度の値であった。一方継手のクリープ破断強度比は1.03~1.05であり、前報<sup>2)</sup>に示した同一材の値(1.0~1.12)とはほぼ等しかったが、その他のデータ

のそれ(0.85~1.01)と比較すると全体的に高い。しかし本報告の継手の非照射材のクリープ破断強度は母材に比較し、かなり低いことから基準となる非照射材の強度が低く、見かけ上クリープ破断強度比が大きくなっているものと考えられる。

### 2) 設計基準データとの比較

Fig. 31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<sup>5)</sup>及びASME Code Case 1592による設計曲線と比較して示す。照射した母材の500℃でのクリープ破断強度は短時間側では設計指針及び設計曲線を下まわっているが、長時間側では設計曲線を上まわっており又設計指針と同程度であった。さらにクリープ応力-破断時間曲線の勾配から見て長時間側では設計指針に示された値と同等以上になるものと考えられる。一方550℃でのクリープ破断強度は設計指針及び設計曲線を上まわっていた。又継手の550℃でのクリープ破断強度はASMEの設計曲線値を上まわっており、かつ「常陽」設計指針に示される値とはほぼ等しかった。以上のことからクリープ破断強度の面から見て「常陽」設計指針の妥当性が確認出来たと考えられる。

## 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JMTTR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。高温疲れ寿命とクリープ破断寿命に与える照射の影響について母材、継手、照射量、試験温度、試験時間等の各断面の現象を明らかにしてきたが、パラメータが多く照射の影響をシステムティックに明確にするには至らなかった。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重畳しており、これらの因子をわけて解析検討していくことが肝要と考えられる。温度履歴の影響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及びインパイルクリープデータ等の蓄積をはかっており、順次照射効果が明らかにされて行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する。

## 7. 謝 辞

本試験を実施するに当たり、FBR本部厚母栄夫氏、江端誠氏、実験炉部古平清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) 榎原瑞夫, 他: 「常陽」サーベイランスバックアップ試験(第2報), 動燃団報告, SN941 80-118, (1980)
- 3) 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)
- 4) 例えば日本溶接協会編: 高速炉用ステンレス鋼に関する調査, (1969)
- 5) 「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)
- 6) 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)
- 7) L. K. Sigal: Metallurgical transactions Vol.2 (1971), 1967
- 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), 動燃団報告, SN941 79-04, (1979)
- 9) H. Böhm, et al: Influence of Neutron Spectrum and Microstructure on the Postirradiation Creep-rupture Behavior of an Austenitic Cr-Ni-Fe-B Steed, ASTM STP529, P437, (1972)
- 10) A. J. Lovell: Uniaxial Creep-rupture Studies of Types 304 and 316 Stainless Steels, BNWL-1279, P495, (1970)
- 11) 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 (w/o)									Tensile				Hardness (VHN)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	B	YS (kg/mm <sup>2</sup> )	UTS (kg/mm <sup>2</sup> )	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	728	134
Check analysis	0.069	0.64	1.68	0.026	0.005	8.87	18.77	0.23	0.0004					

- 14 -

Table 2 Welding procedure

Edge preparation	Welding procedure																																	
	Inner surface	Outer surface	Welding process	Welding material	Pass	Rod Dia. (mm)	Current(A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (J/cm)																								
		1-2 Pass shielded metal arc welding	Shielded metal arc welding	WEL 308	1-2	4.0	150	25	150	~15,000																								
		3-9 Pass submerged arc welding	Submerged arc welding	US-308(Wire) PFS-1(Flux)	3-9	4.0	~450	32	320	~27,000																								
Inter pass temperature <180C		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Chemical composition of weld metal (wt%)</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Co</th> <th>Mo</th> <th>Cu</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0.07</td> <td>0.82</td> <td>1.57</td> <td>0.031</td> <td>0.012</td> <td>9.46</td> <td>19.95</td> <td>0.25</td> <td>0.18</td> <td>0.06</td> <td>&lt;0.001</td> </tr> </tbody> </table>									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
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																							

- 15 -

Table 3 Low cycle fatigue properties

	Specimen No	Fluence ( $\times 10^{20} n/cm^2$ ) ( $> 0.1 MeV$ )	Temperature (°C)		Strain range (%)			Stress range (kg/mm <sup>2</sup> )	Fatigue life (N)
			Irrad	Test	Total	Plastic	Elastic		
Base metal	ZF9D02*	4.22	475	500	(3.19)	(271)	(0.98)	(77.9)	(14)
	ZF9D04*				(1.59)	(1.10)	(0.99)	(78.8)	(30)
	ZF9D05	4.67	570	550	3.17	273	0.44	69.2	150
	ZF9D06				1.54	1.18	0.36	56.9	1317
	ZF9D07				0.93	0.61	0.32	50.5	1654
	ZF9D08	3.91	550		0.92	0.59	0.33	51.7	2416
Welded joint	ZF9D11*	3.67	475	500	3.19	272	0.47	76.7	234
	ZF9D15	3.25	500		1.55	1.16	0.39	62.4	988
	ZF9D12*	3.67	475		0.95	0.55	0.40	65.2	728
	ZF9D16	3.25	500		0.95	0.57	0.38	62.1	909
	ZF9D13	3.91	550	550	1.57	1.13	0.44	68.4	441
	ZF9D14				0.95	0.57	0.38	59.7	437

\* Abnormal specimen

Table 4 Creep and creep rupture properties

Material	Test temperature (°C)	Specimen No	Fluence ( $\times 10^{20} n/cm^2$ )		Irradiation temperature (°C)	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Minimum creep Rate (%/Ar)	Time to rupture (hr)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
			$> 1 MeV$	$> 0.1 MeV$						
Base Metal	500	A 2	1.67	5.02	470	36.0		44.2	18.1	25
		A 1	1.67	5.02		32.0		2129	6.3	17
		A 3	1.67	5.02		29.0	$1.67 \times 10^{-3}$	656.4	14.0	13
		A 4	1.76	5.30		25.0		(4017)*		
	550	A 9	1.80	5.42	525	30.0	$1.74 \times 10^{-1}$	60.4	16.5	30
		A 10	1.78	5.36	570	28.0	$7.4 \times 10^{-2}$	108.7	26.3	29
		A 8	1.80	5.42	525	26.0	$3.28 \times 10^{-2}$	246.2	17.5	31
		A 11	1.78	5.36	570	22.0	$4.40 \times 10^{-3}$	2099.2	18.2	23
		A 12	1.78	5.36		20.0	$2.0 \times 10^{-3}$	4090.0	16.0	17
		Welded Joint	550	A 14	1.55	4.67	470	27.0		109
A 15	1.55			4.67	24.0	$1.60 \times 10^{-3}$		429.2	9.0	18
A 16	1.69			5.09	580	22.0	$1.30 \times 10^{-3}$	1366.2	6.6	14
A 17	1.69			5.09		20.0	$2.05 \times 10^{-3}$	1877.5	8.6	15

\* Run

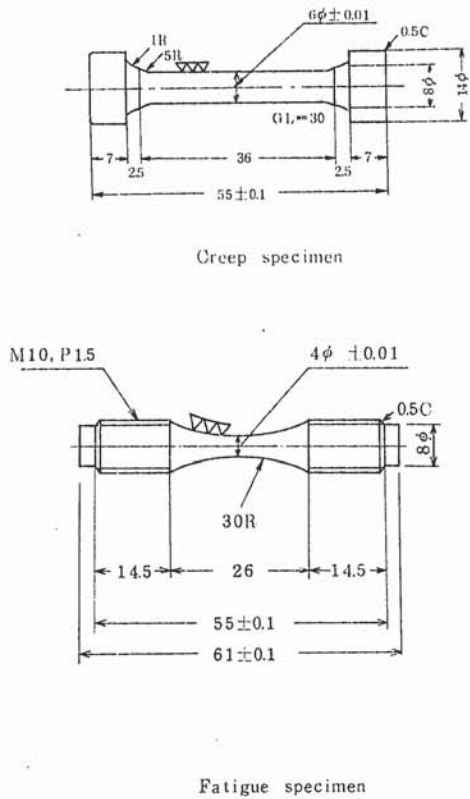


Fig. 1 Profile of specimens

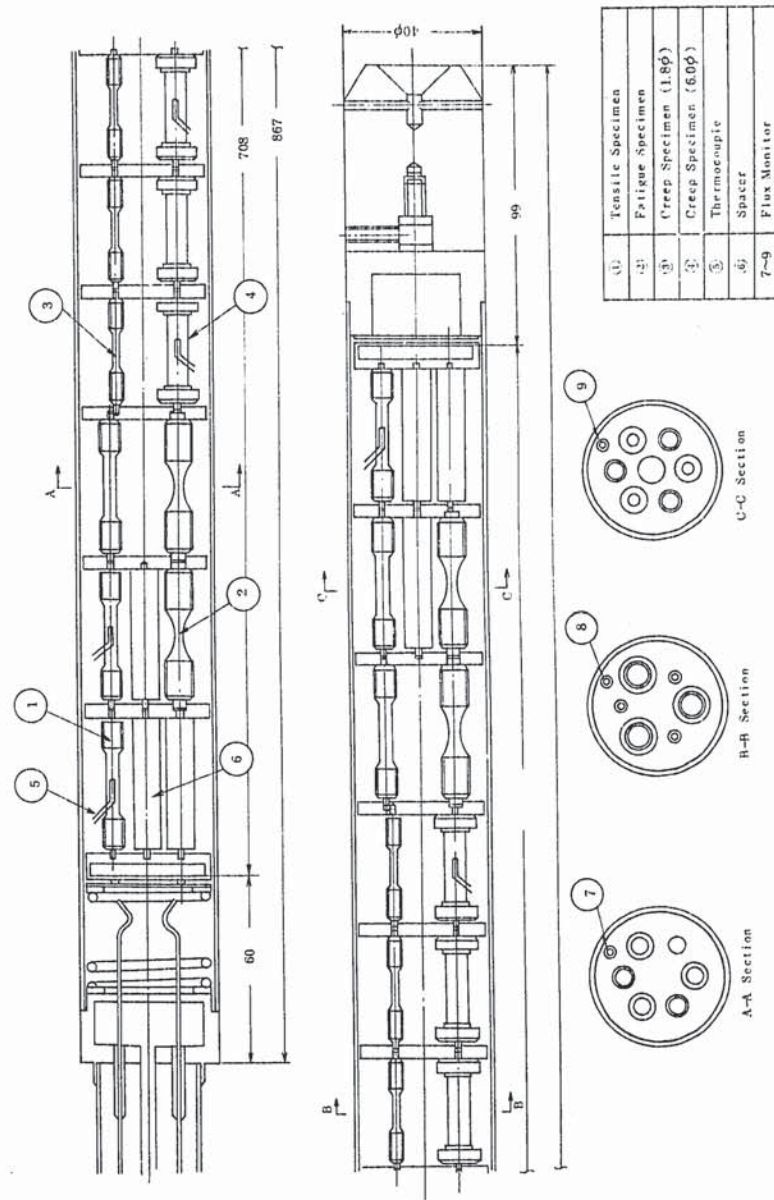


Fig. 2 Outline of irradiation capsule

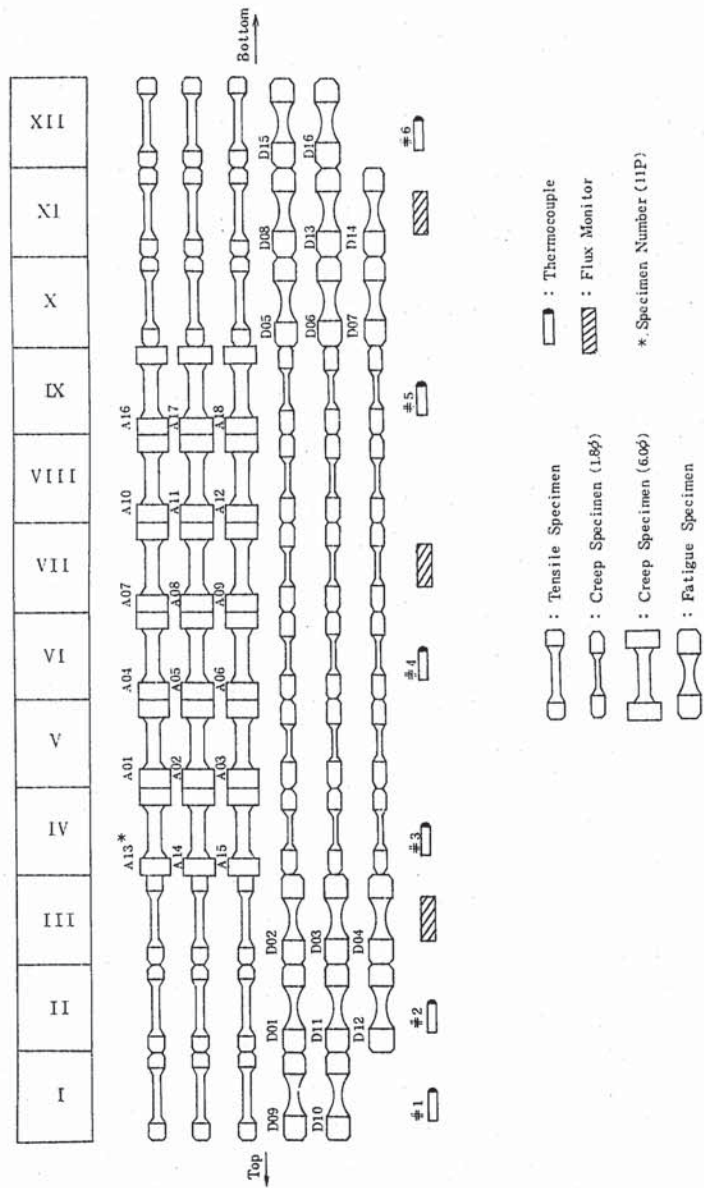


Fig. 3 Specimen arrangement in irradiation capsule

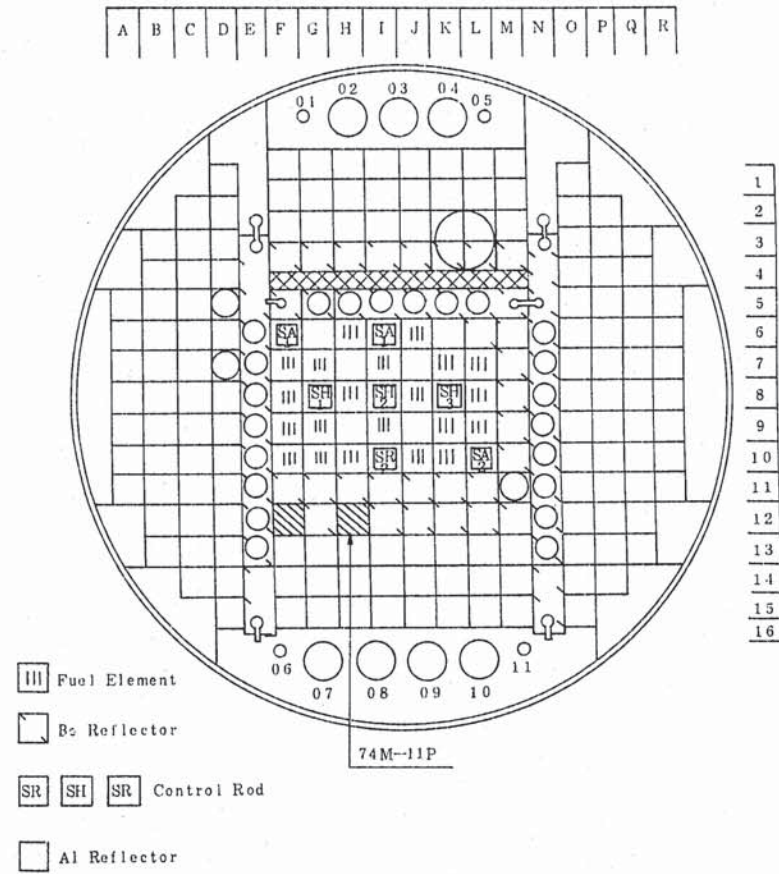


Fig. 4 Irradiation position in JMTR core



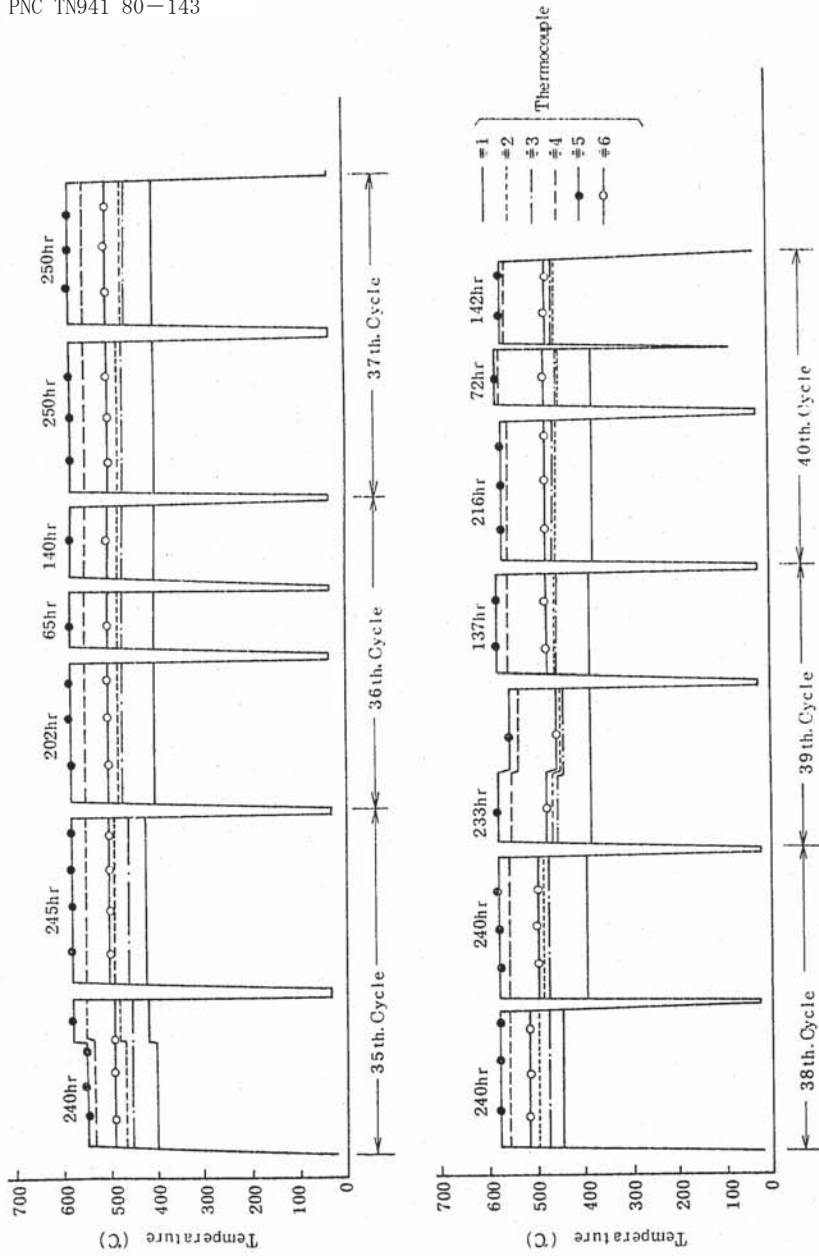


Fig. 5 Thermal history under irradiation (74M-11P)

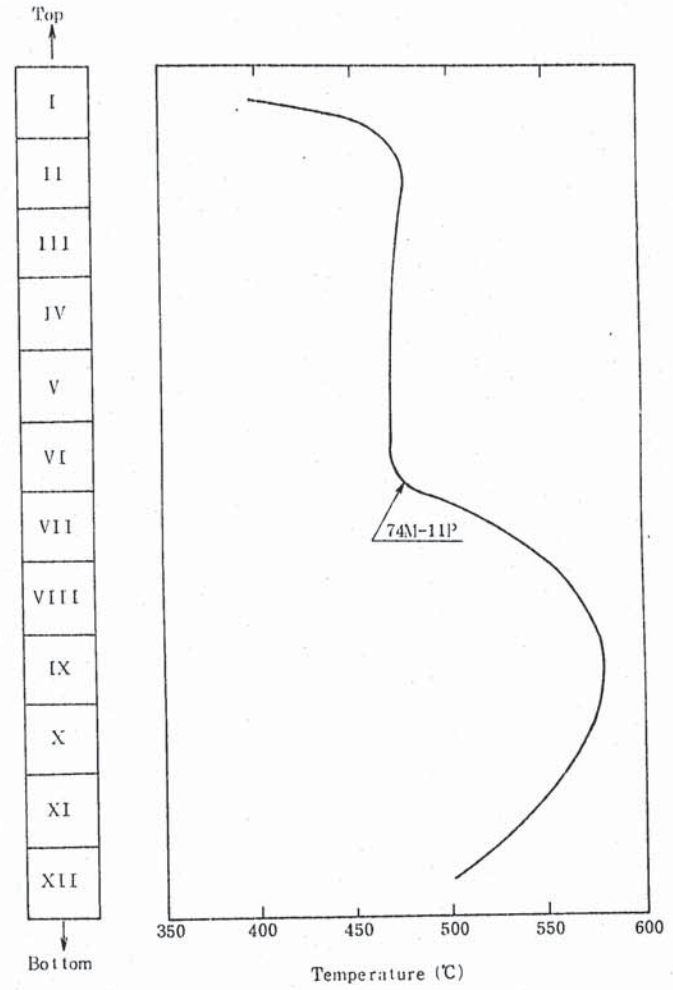


Fig. 6 Temperature distribution in capsule

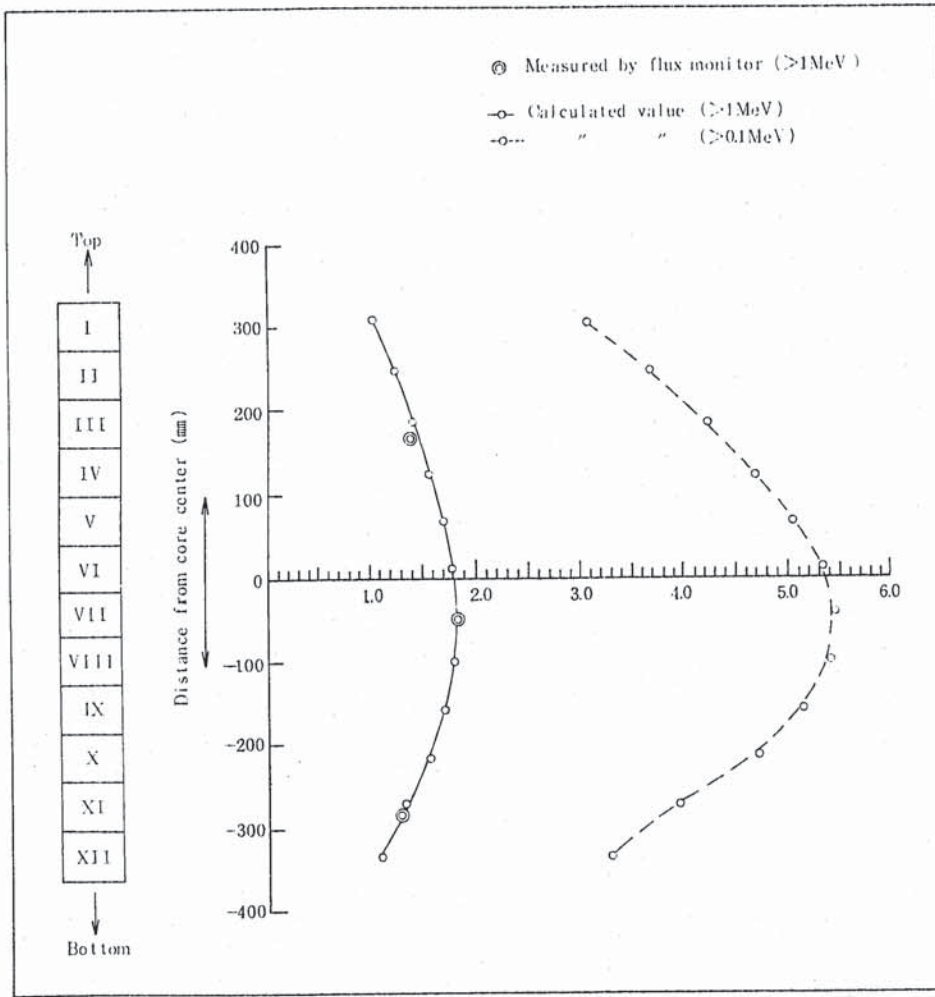
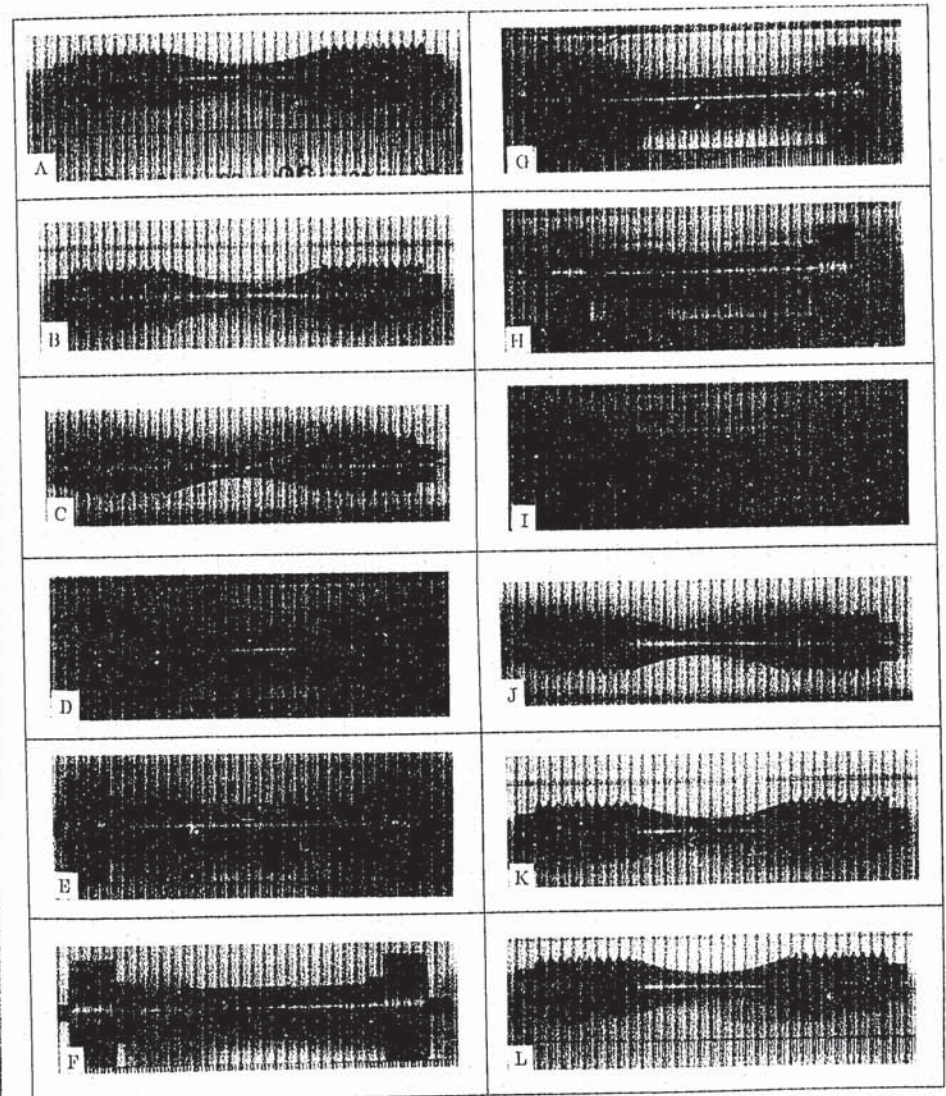
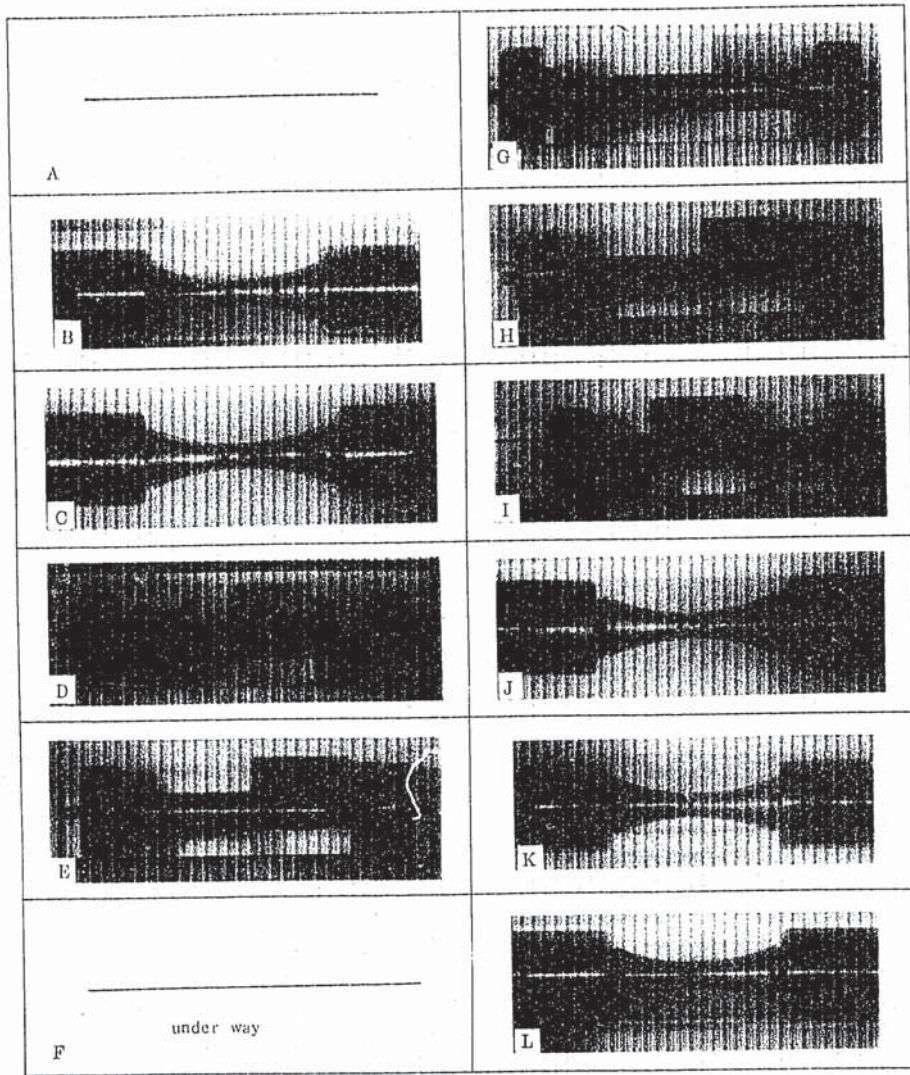


Fig. 7 Fluence distribution in capsule



A: The top stair specimen in capsule, B: 2nd, C: 3rd, D: 4th, E: 5th, F: 6th  
 G: 7th, H: 8th, I: 9th, J: 10th, K: 11th, L: The bottom stair specimen in capsule

Fig. 8 View of typical specimens after irradiation



A: The top stair specimen in capsule, B: 2nd, C: 3rd, D: 4th, E: 5th, F: 6th  
 G: 7th, H: 8th, I: 9th, J: 10th, K: 11th, L: The bottom stair specimen in capsule

Fig. 9 View of typical specimens after fatigue and creep rupture tests

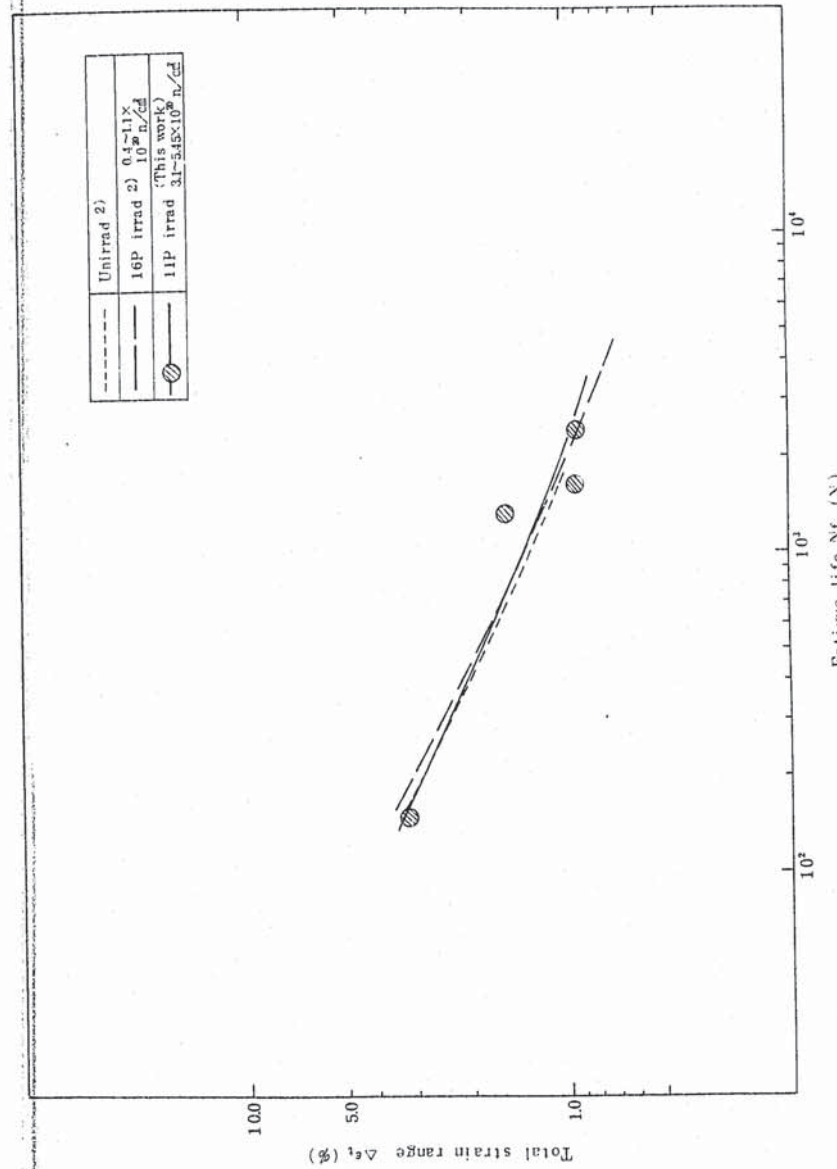


Fig. 10 Effect of irradiation on fatigue life of base metal at 550°C

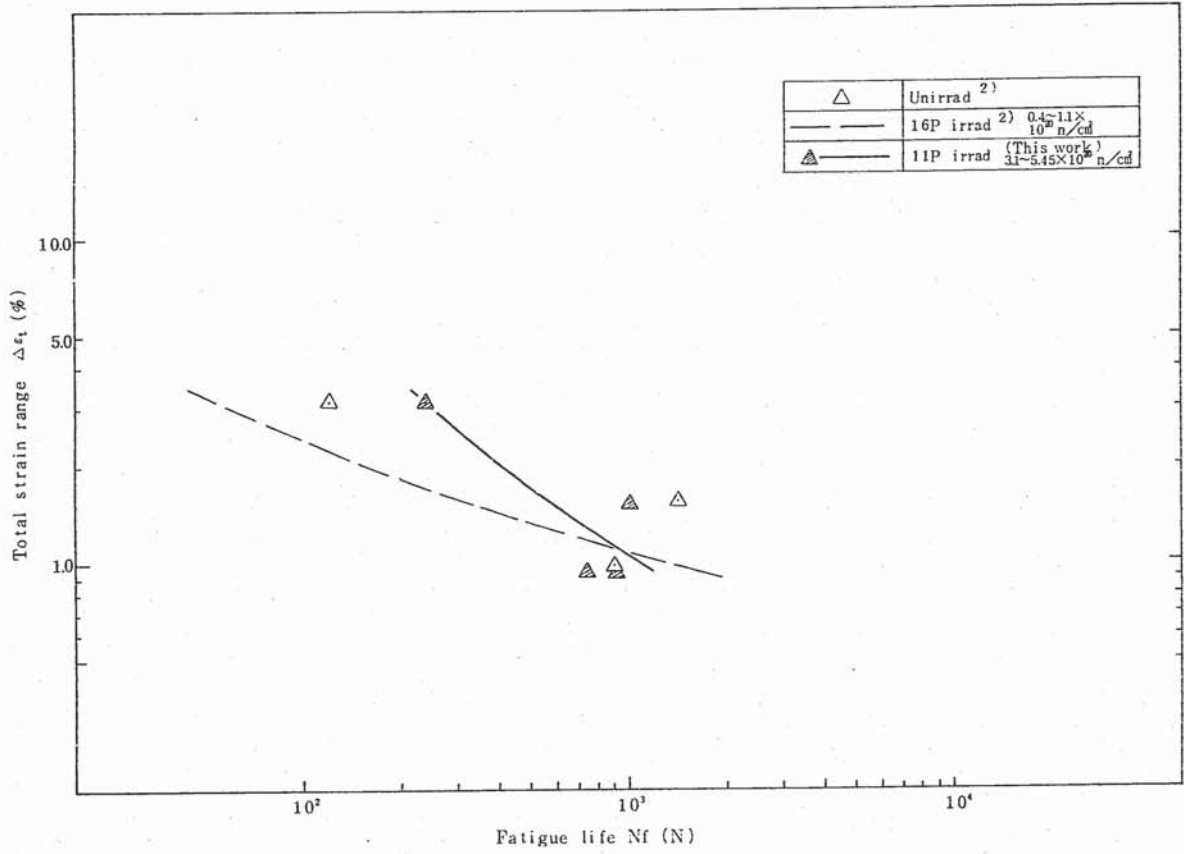


Fig.11 Effect of irradiation on fatigue life of welded joint at 500°C

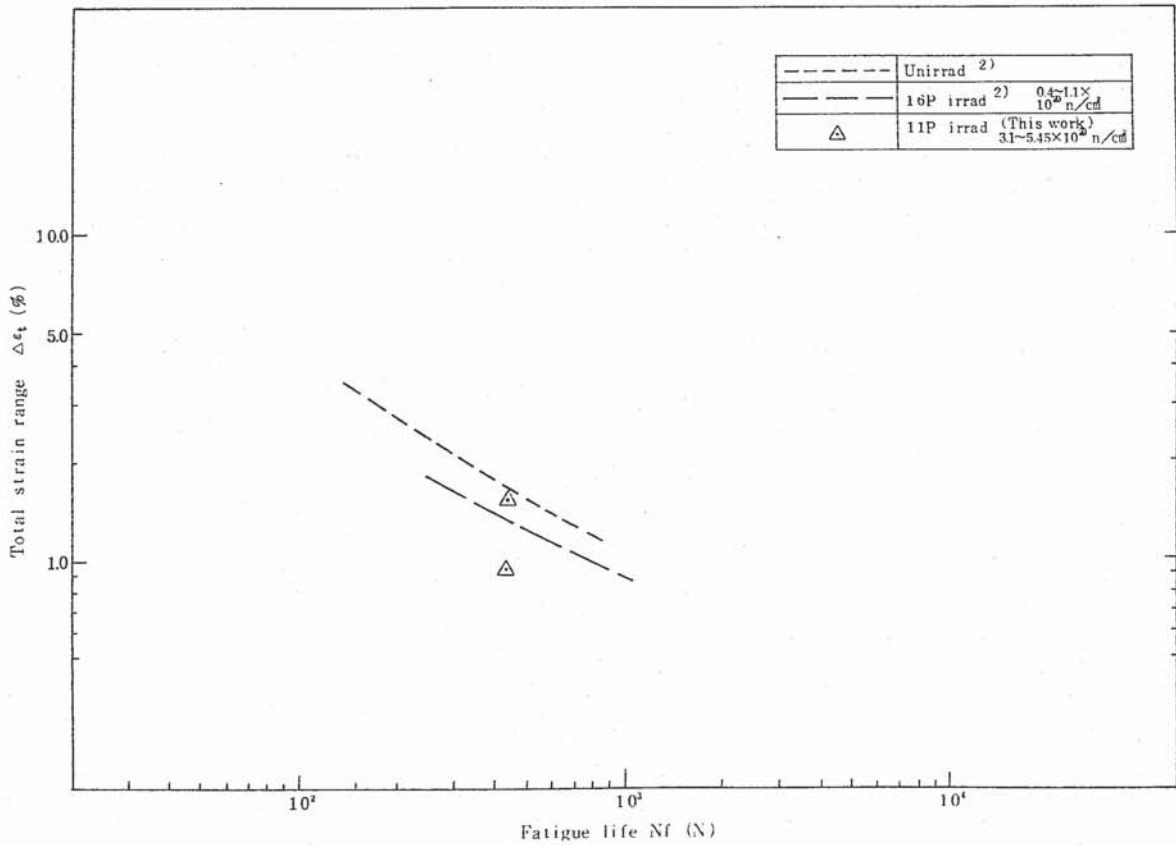


Fig.12 Effect of irradiation on fatigue life of welded joint at 550°C

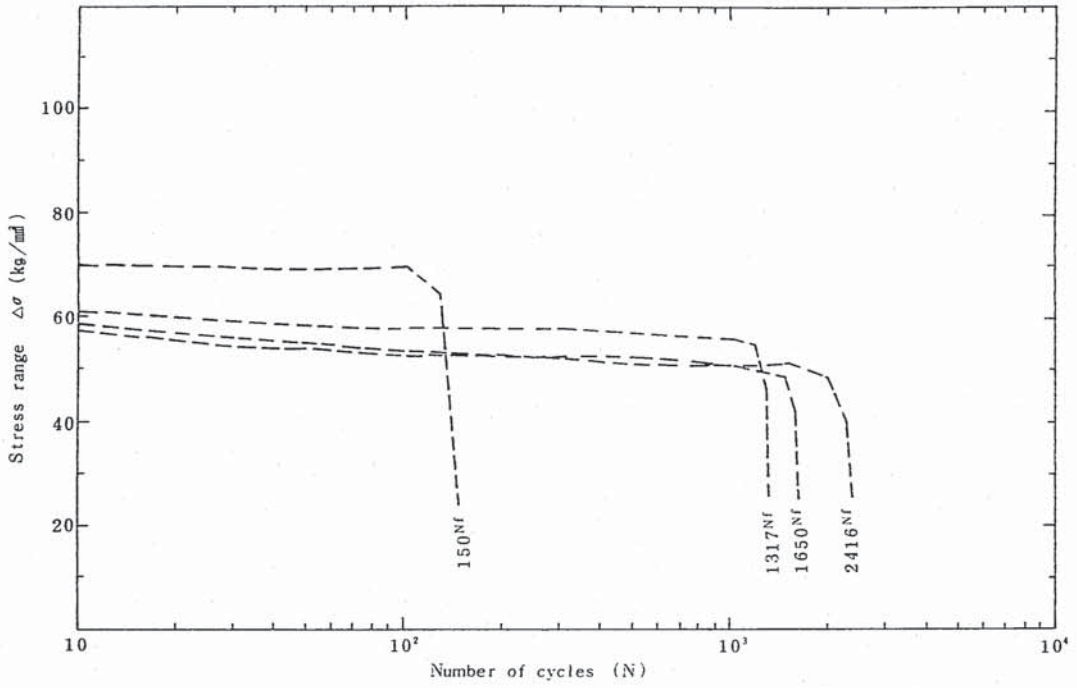


Fig 13 Stress range as a function of number of cycles for base metal at 550°C

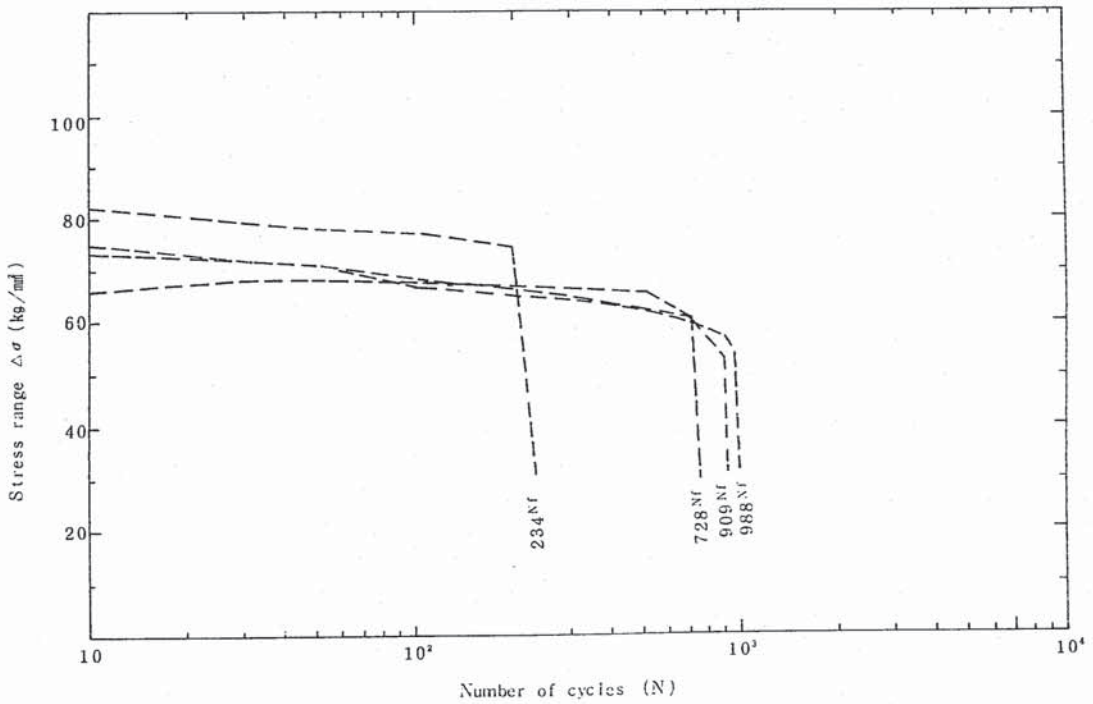


Fig 14 Stress range as a function of number of cycles for welded joint at 550°C

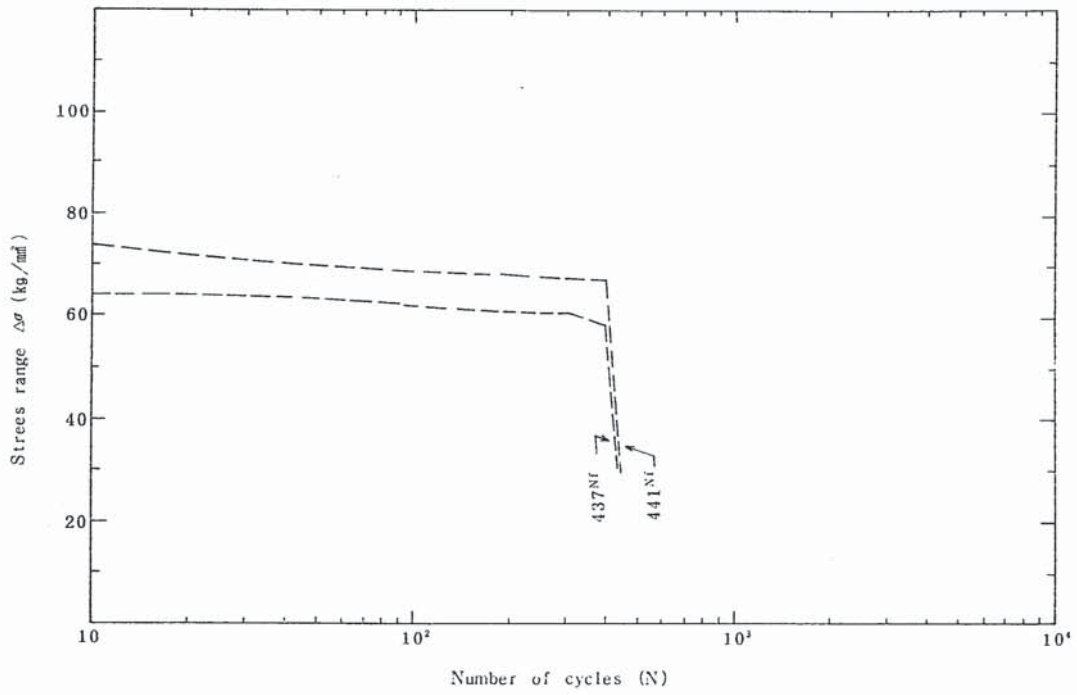


Fig 15 Stress range as a function of number of cycles for welded joint at 550C

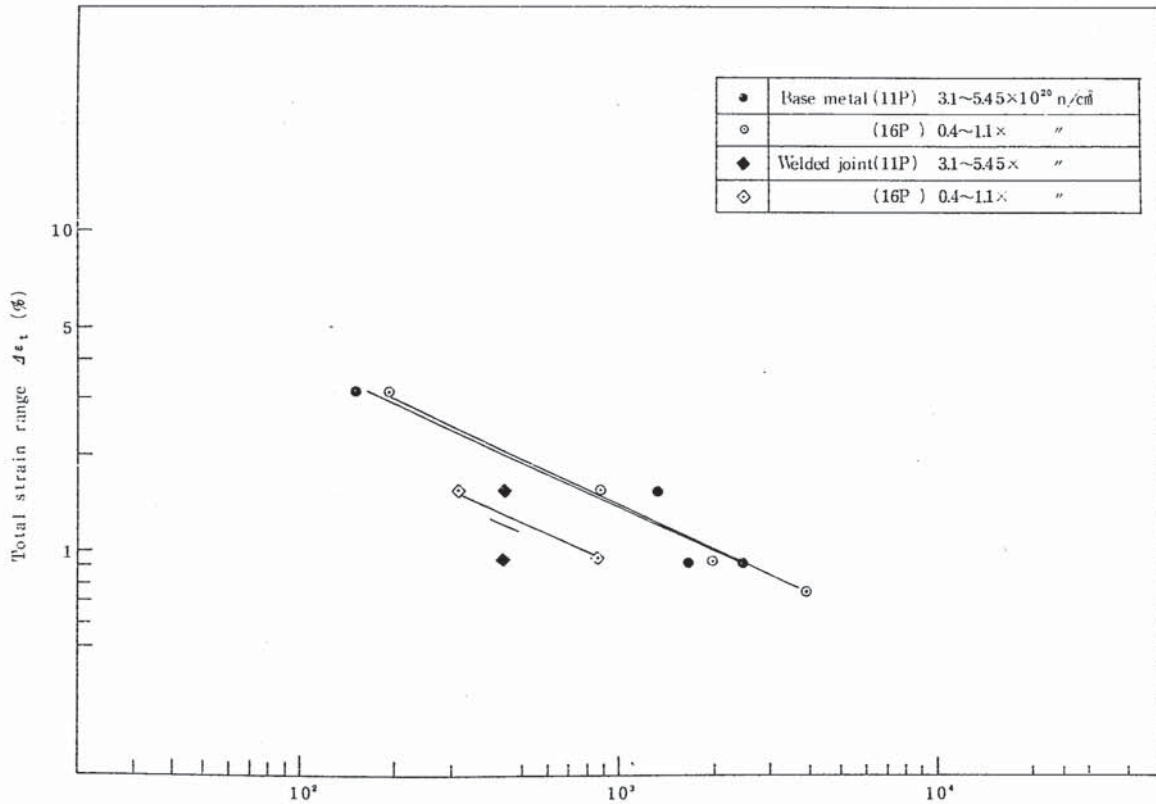


Fig 16 Comparison of fatigue life between base metal and welded joint tested at 550C

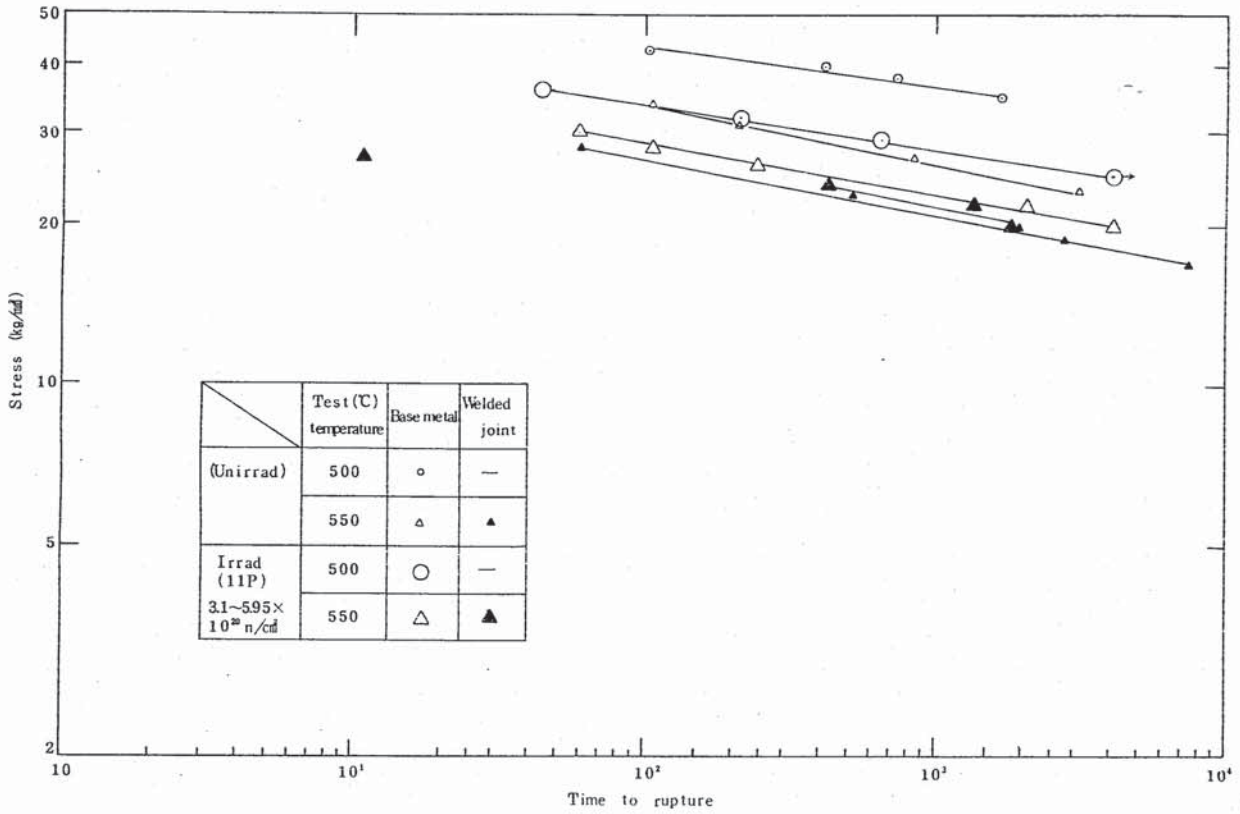


Fig 17 Effect of irradiation on creep rupture strength

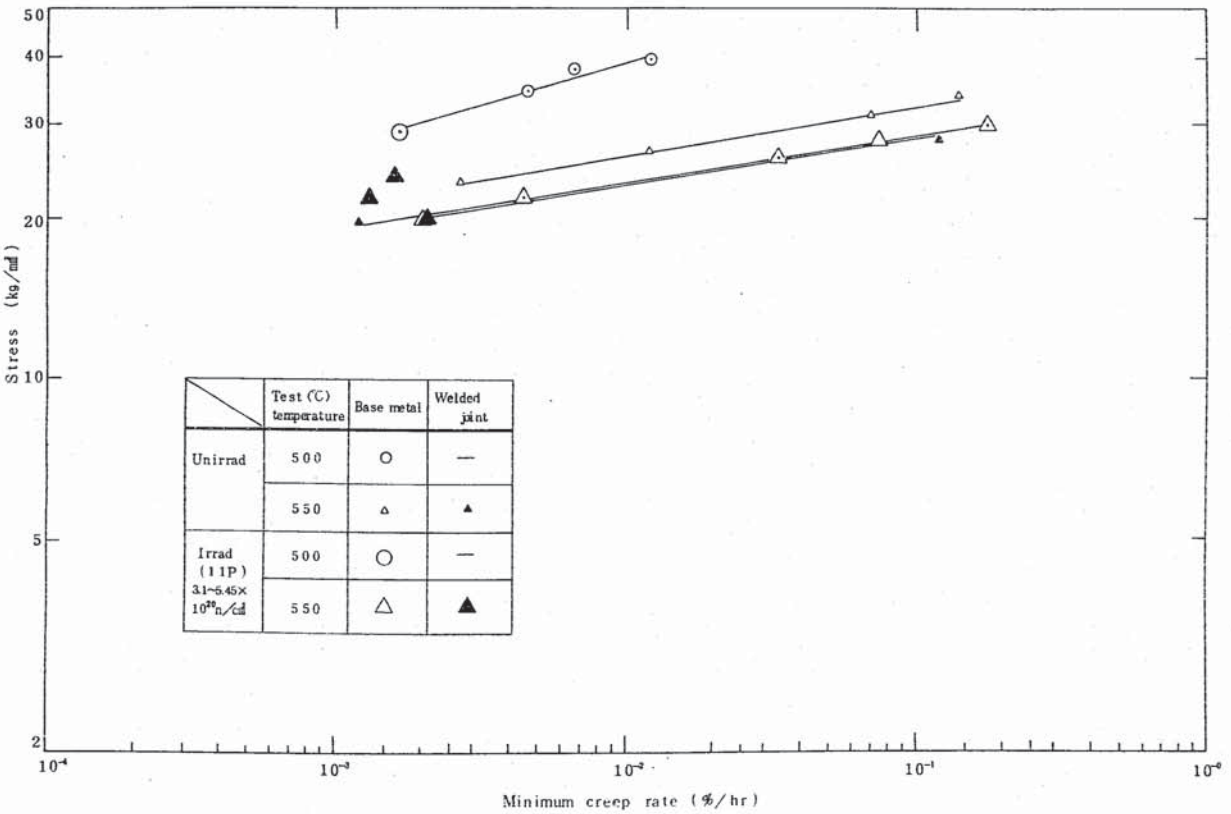


Fig 18 Effect of irradiation on creep rate

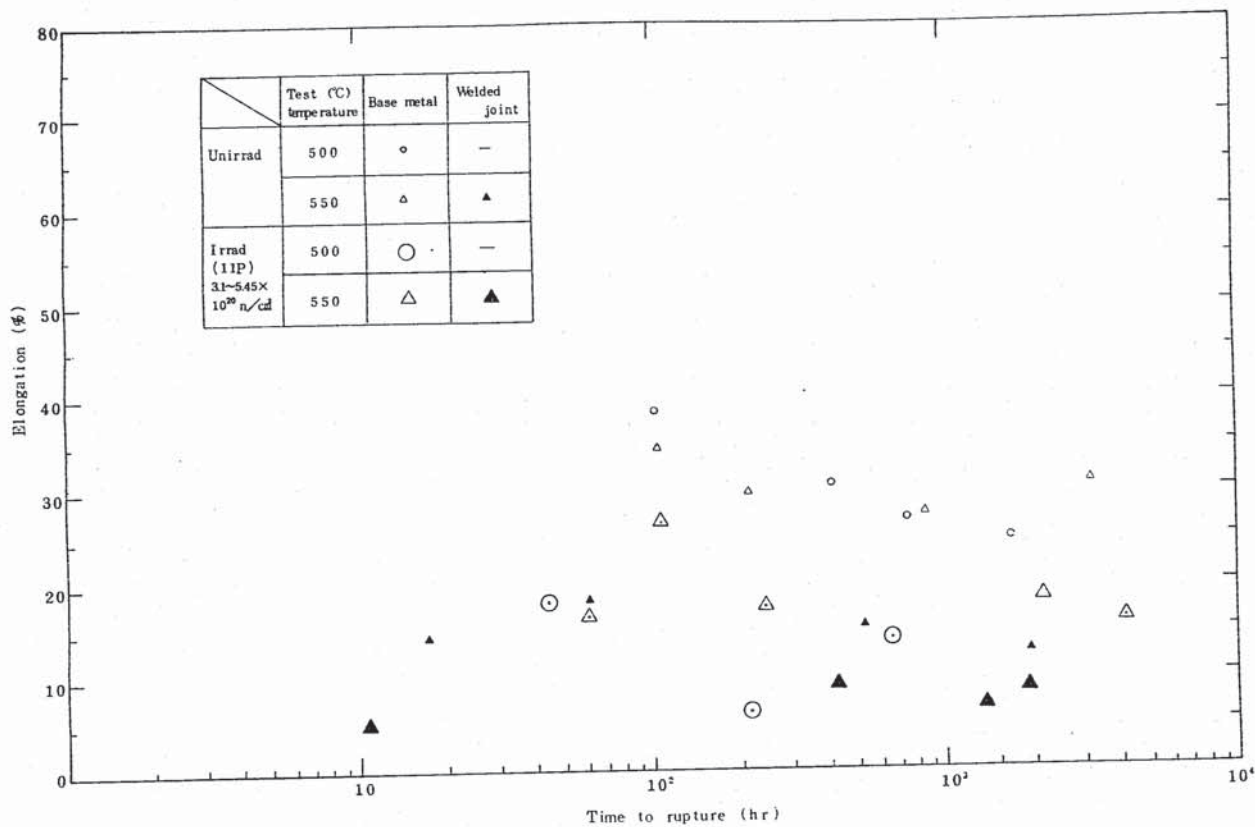


Fig 19 Effect of irradiation on creep rupture elongation

-36-

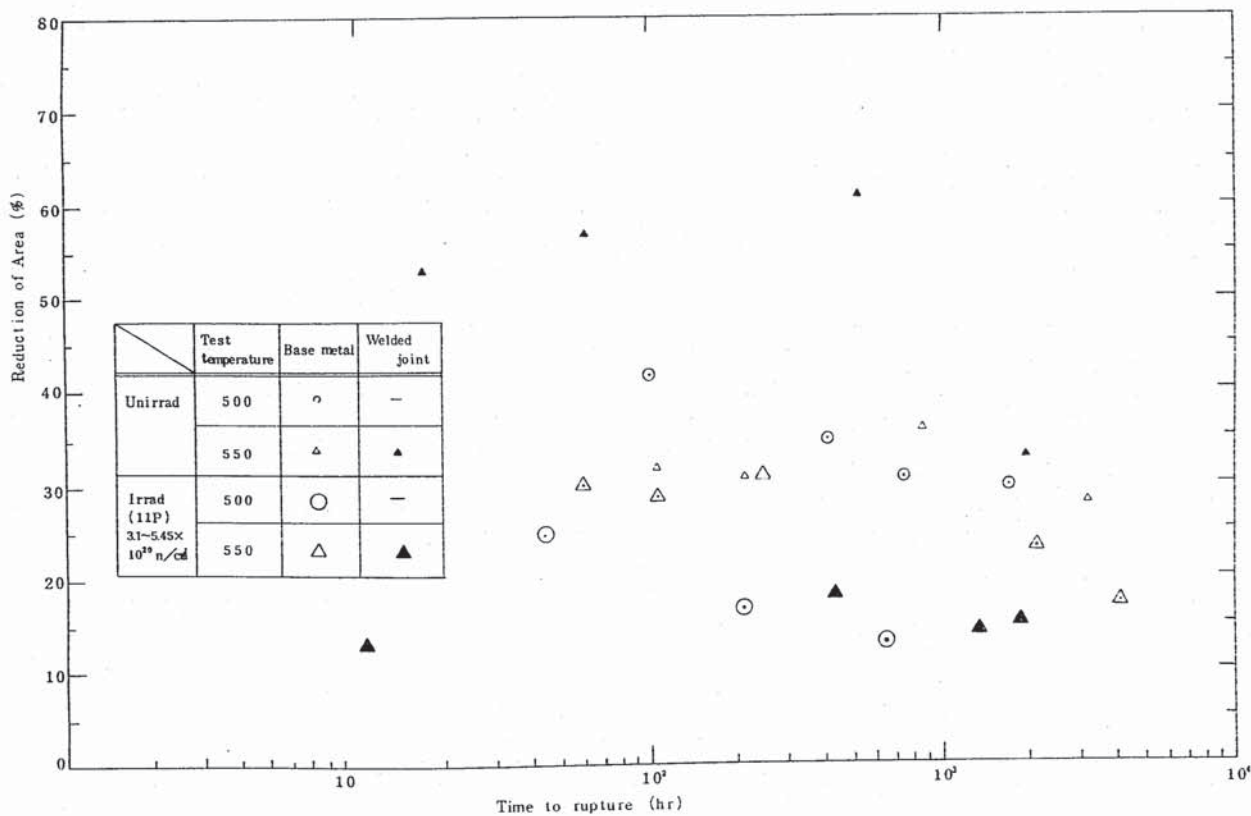
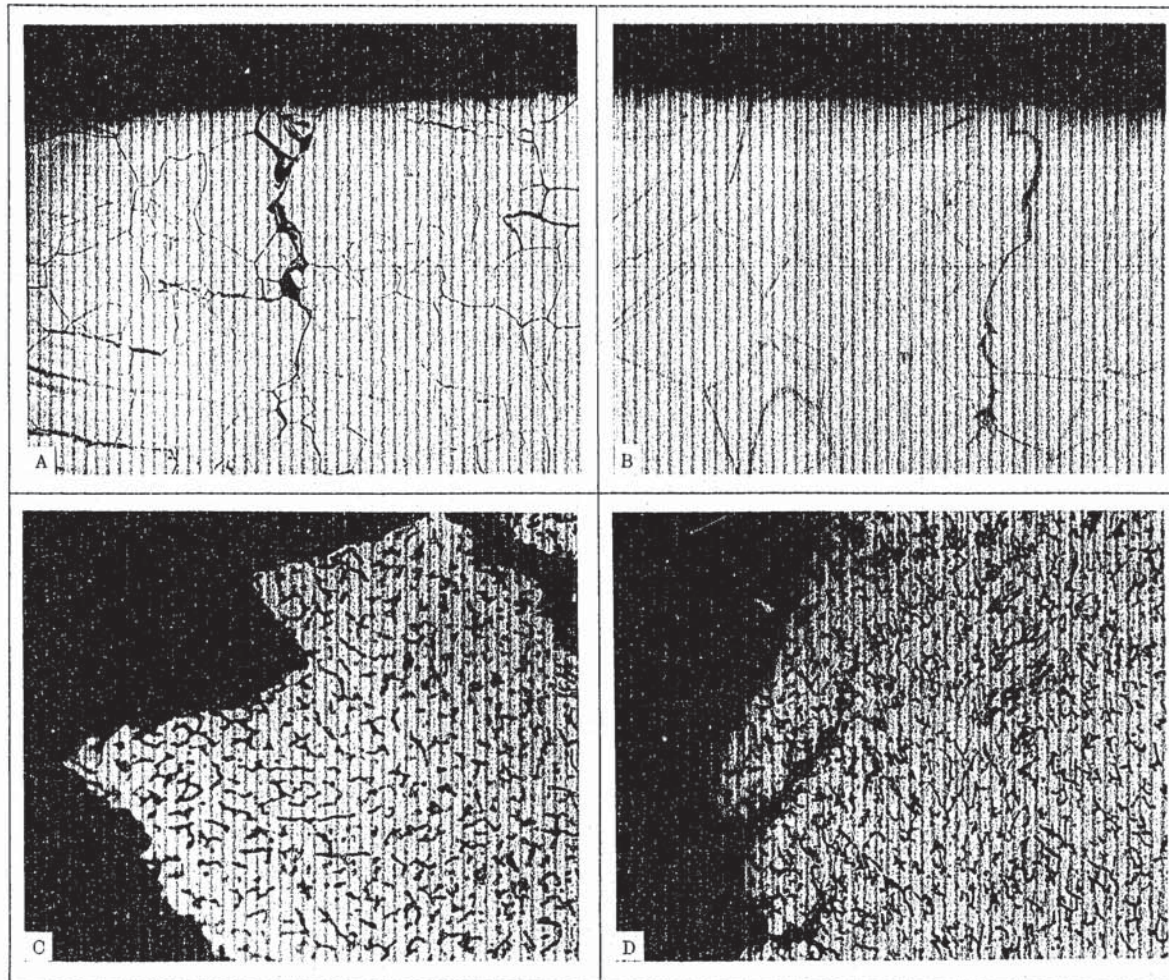


Fig.20 Effect of irradiation on reduction of area of creep ruptured specimen

-37-

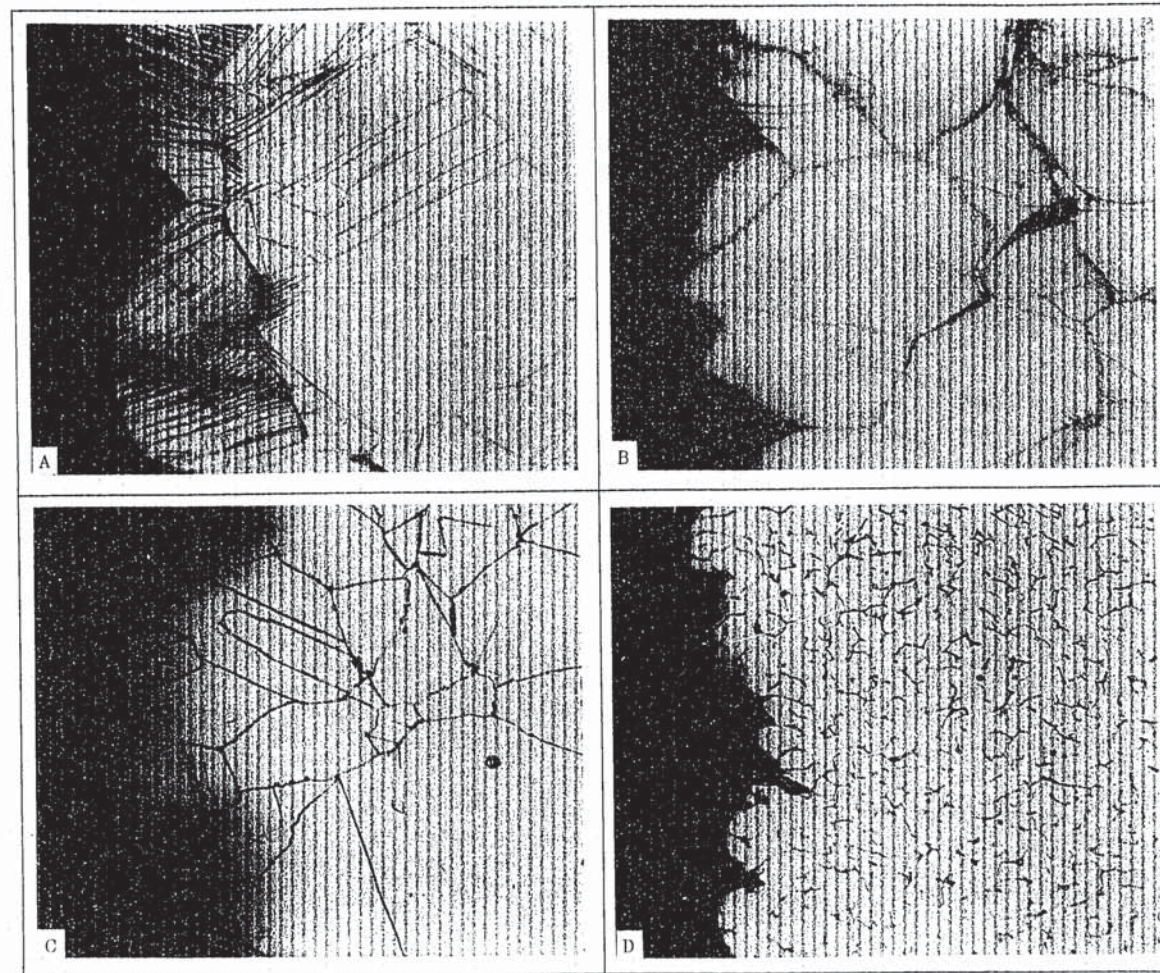




A, C: tested at 500°C, B, D: tested at 550°C  
A, B: base metal, C, D: welded joint

25 $\mu$

Fig. 21 Micrograph of cross section of specimens after fatigue test



A: applied stress: 30kg/mm<sup>2</sup>, rupture time: 60.4h  
B: " : 20 " , " : 4090.0h  
C: " : 27 " , " : 10.9h  
D: " : 20 " , " : 1877.5h  
A, B: base metal, C, D: welded joint

25μ

Fig. 22 Micrograph of cross section of specimens after creep rupture test at 550°C

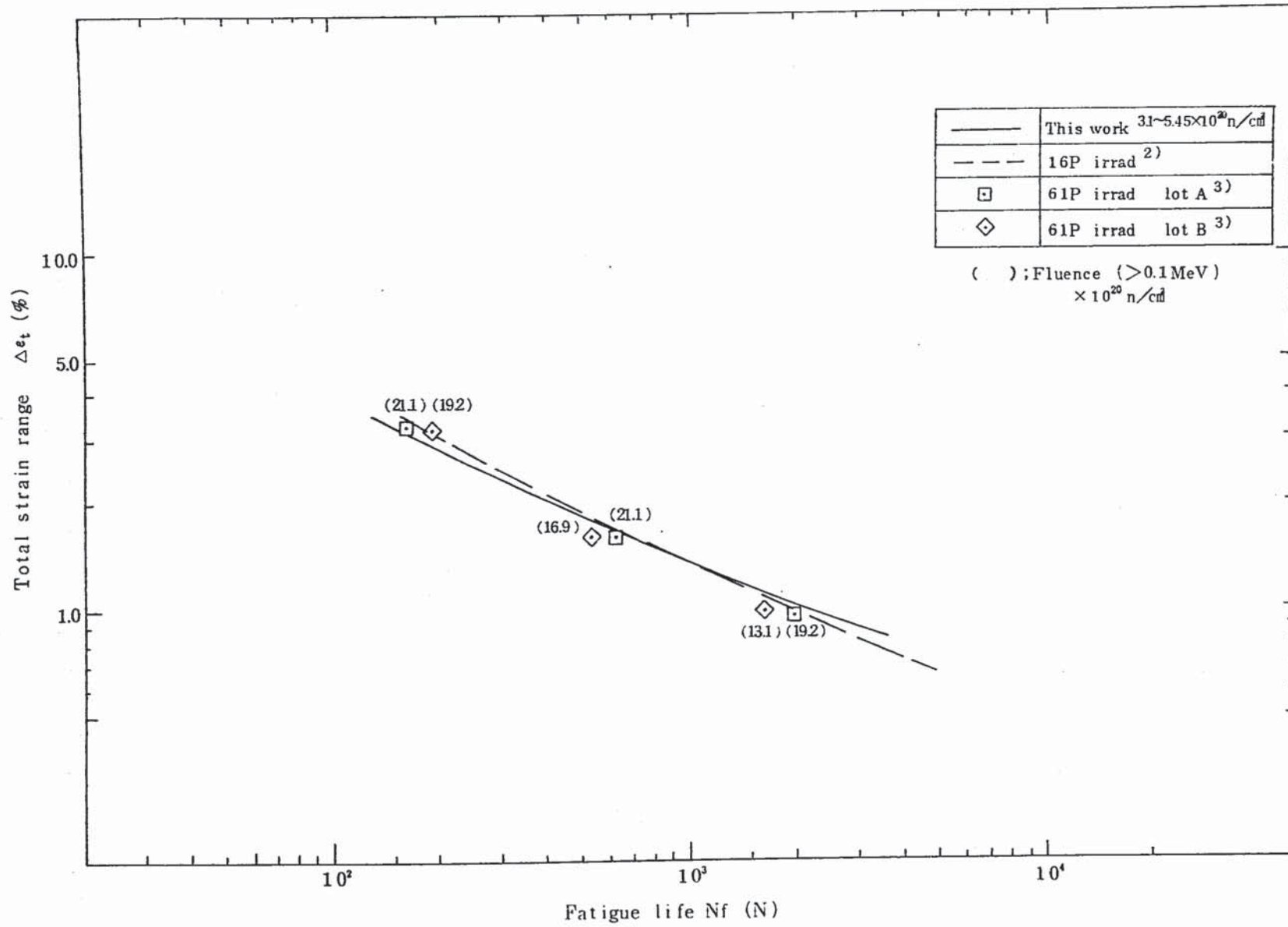


Fig. 23 Comparison of fatigue life of base metal between this work and others<sup>2),3)</sup> tested at 550°C

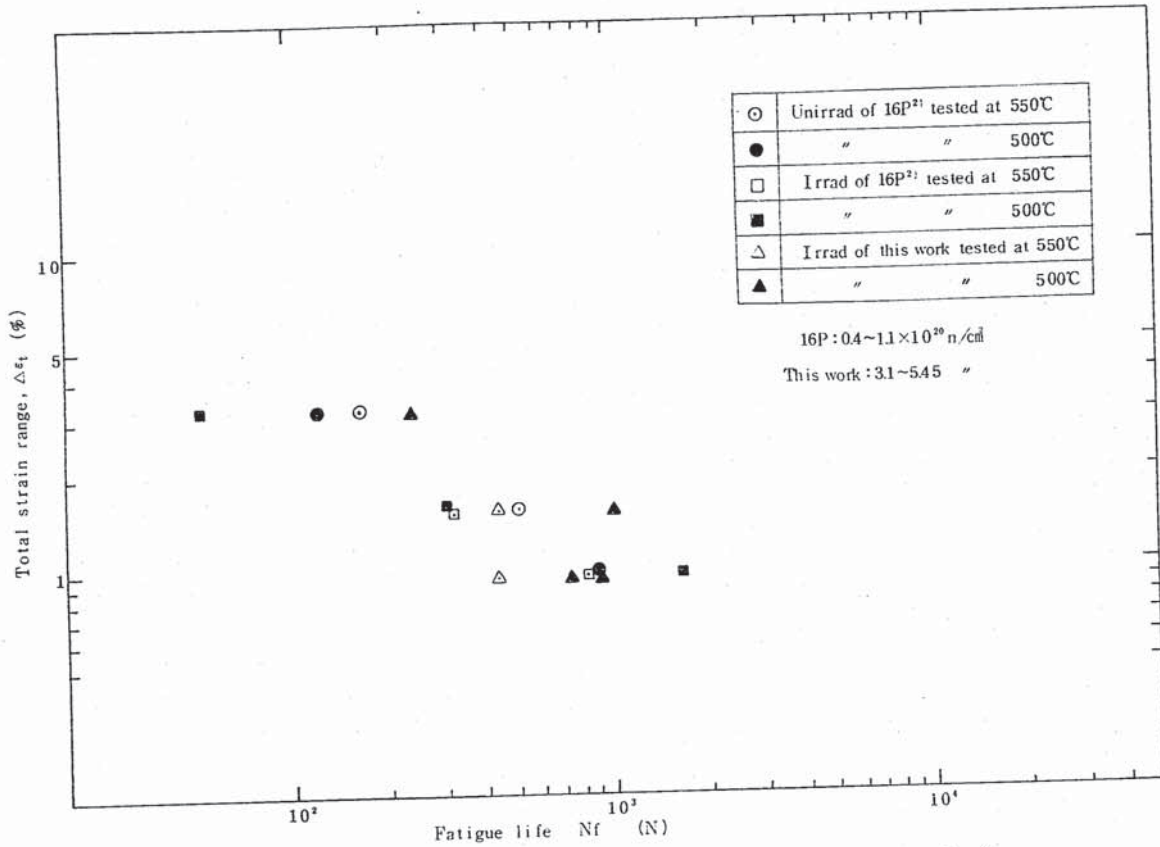


Fig 24 Comparison of fatigue life of welded joint between this work and others<sup>21</sup>

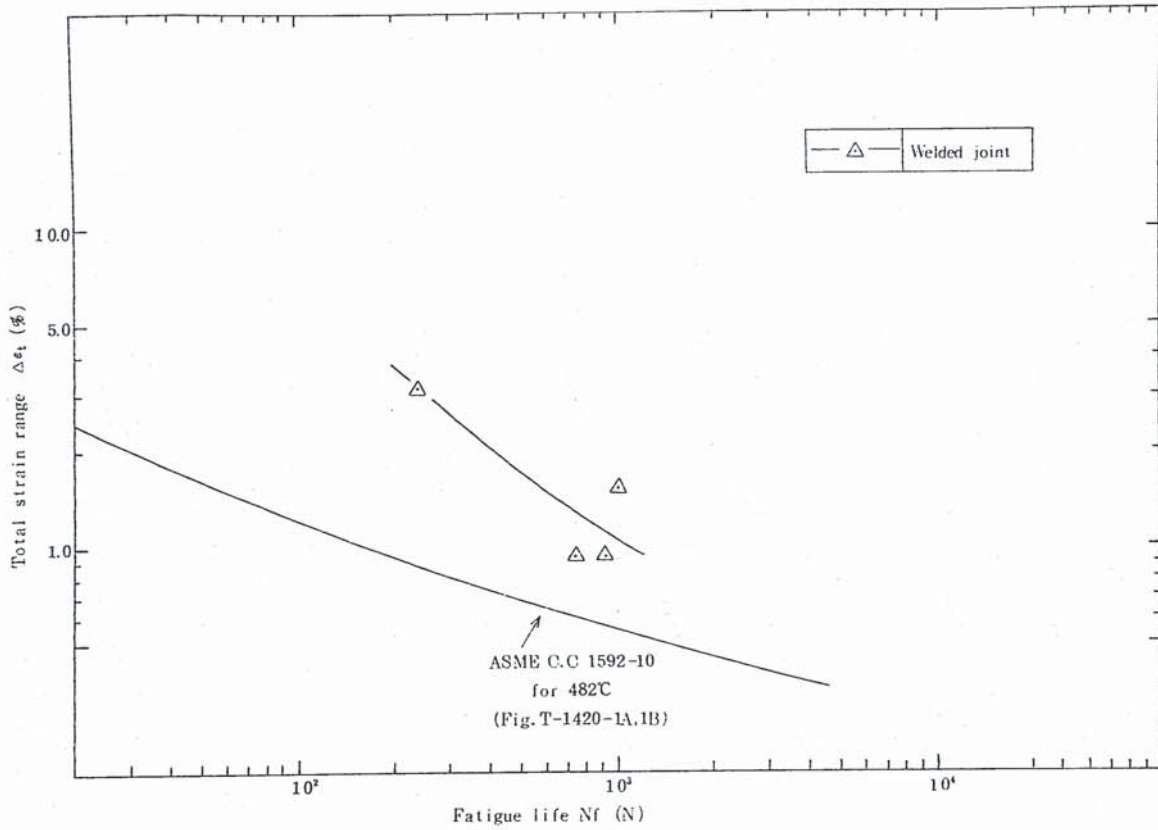


Fig 25 Comparison of fatigue life of welded joint between this work and design curve at 550°C

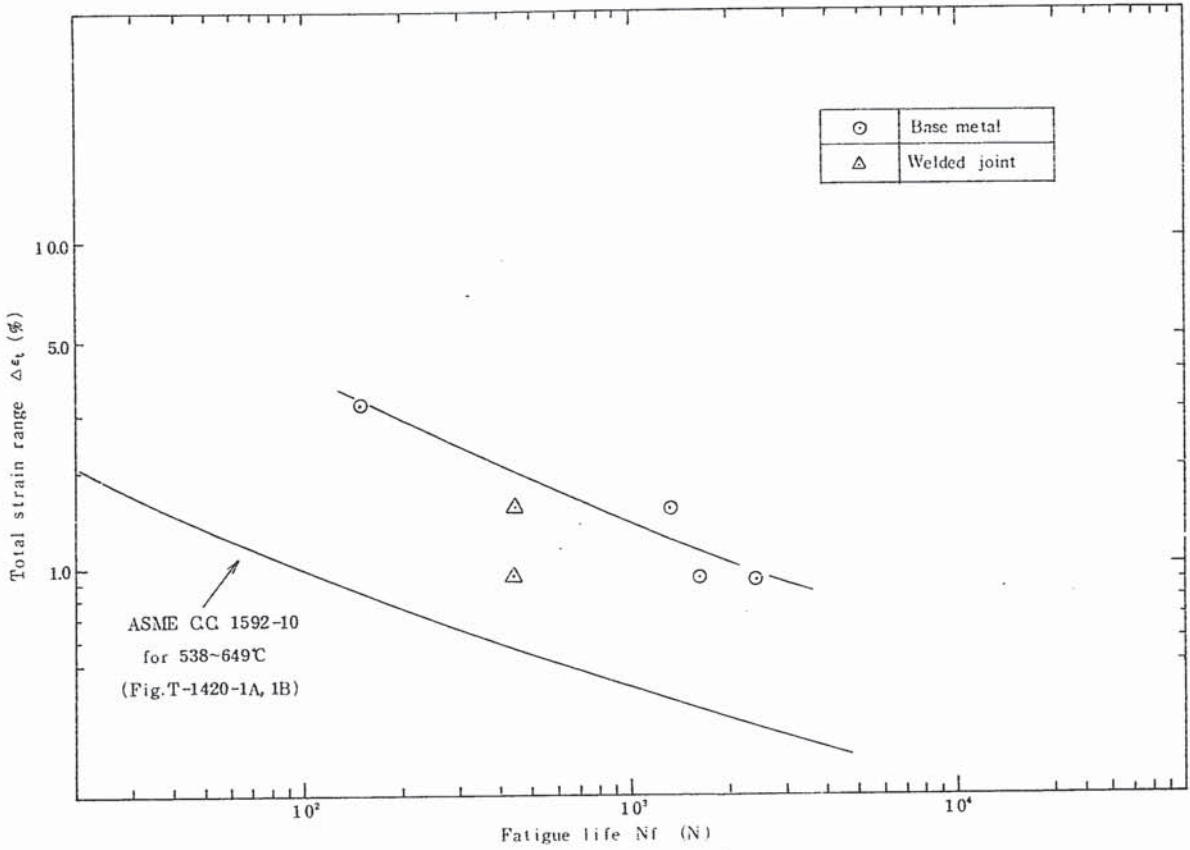


Fig. 26 Comparison of fatigue life between this work and design curve at 550°C

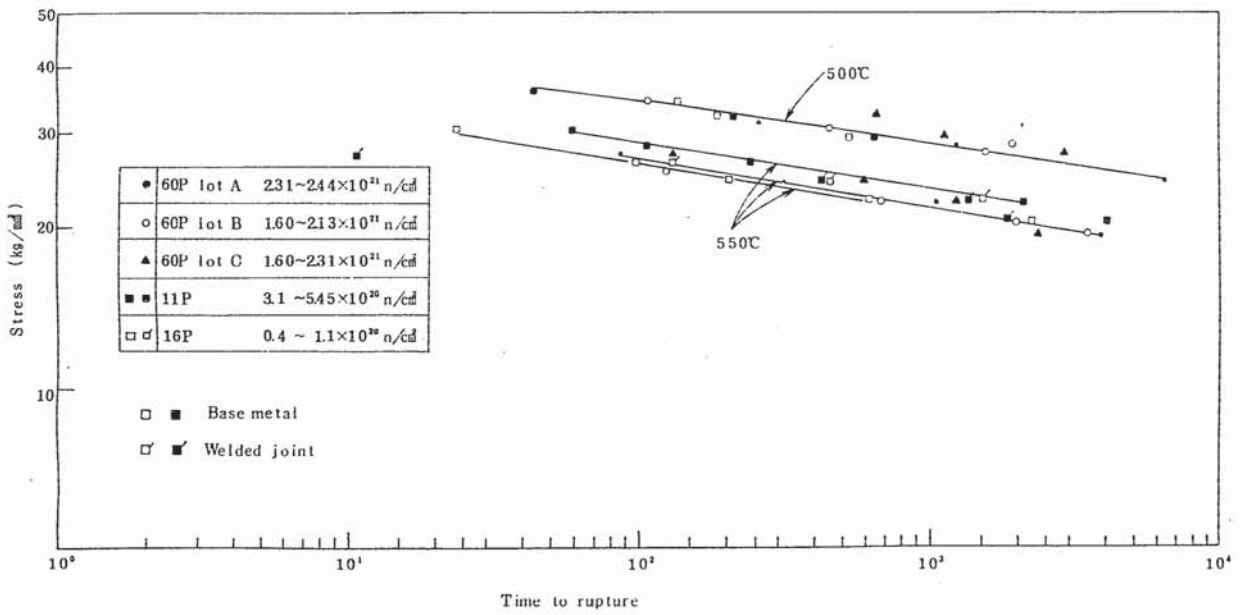


Fig. 27 Comparison of creep rupture strength between this work and others<sup>2),3)</sup>

- 45 -

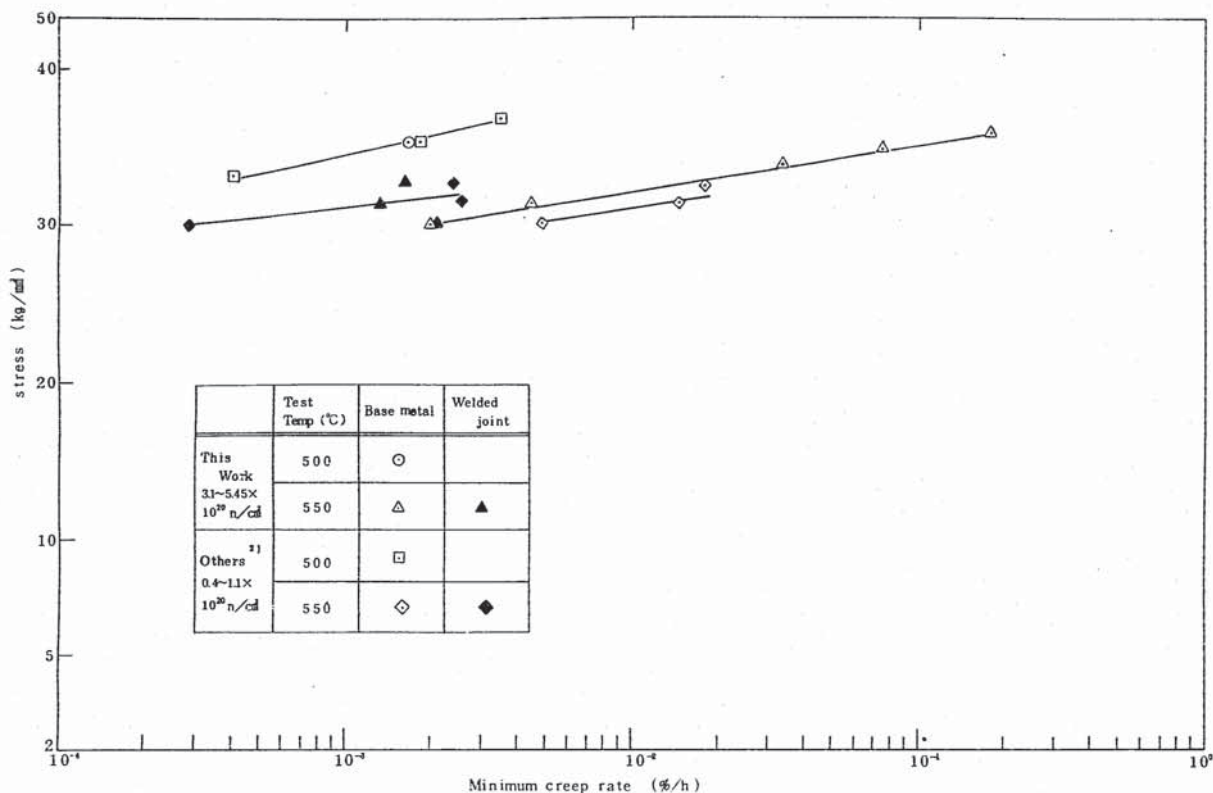


Fig.28 Comparison of creep rate between this work and others<sup>2)</sup>

- 46 -

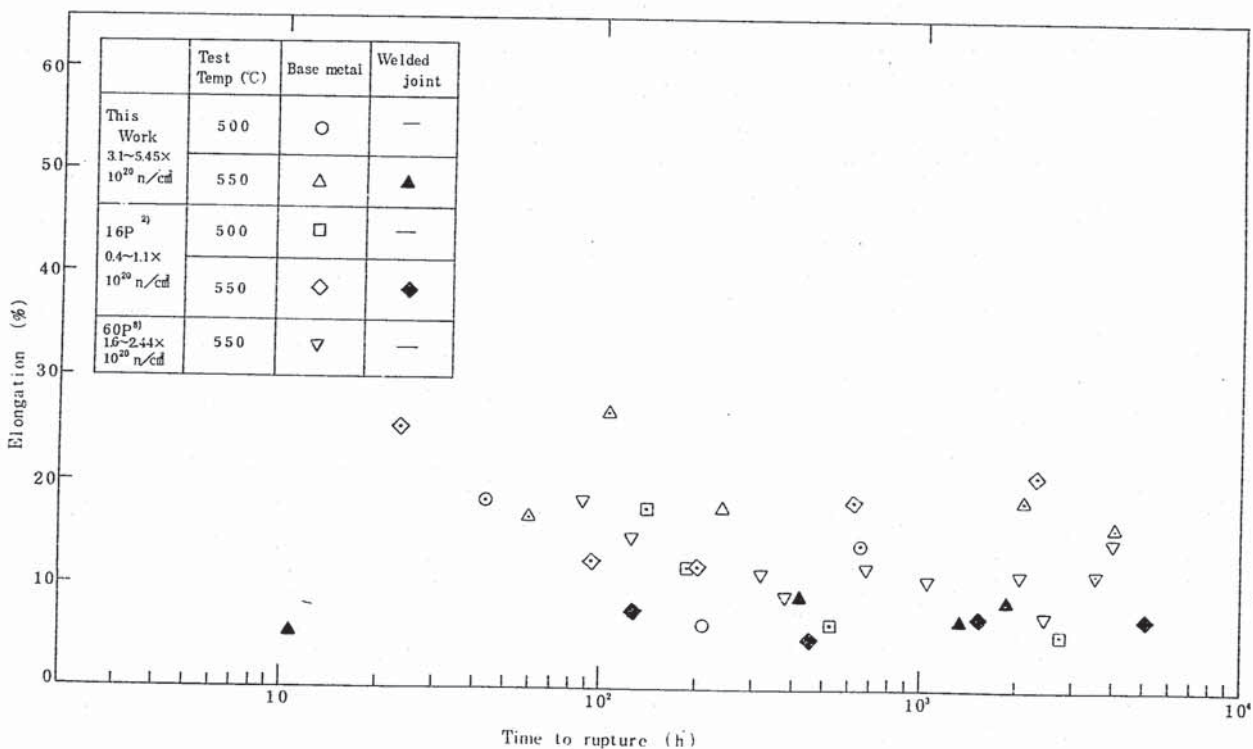


Fig.29 Comparison of creep rupture elongation between this work and others<sup>2)</sup>

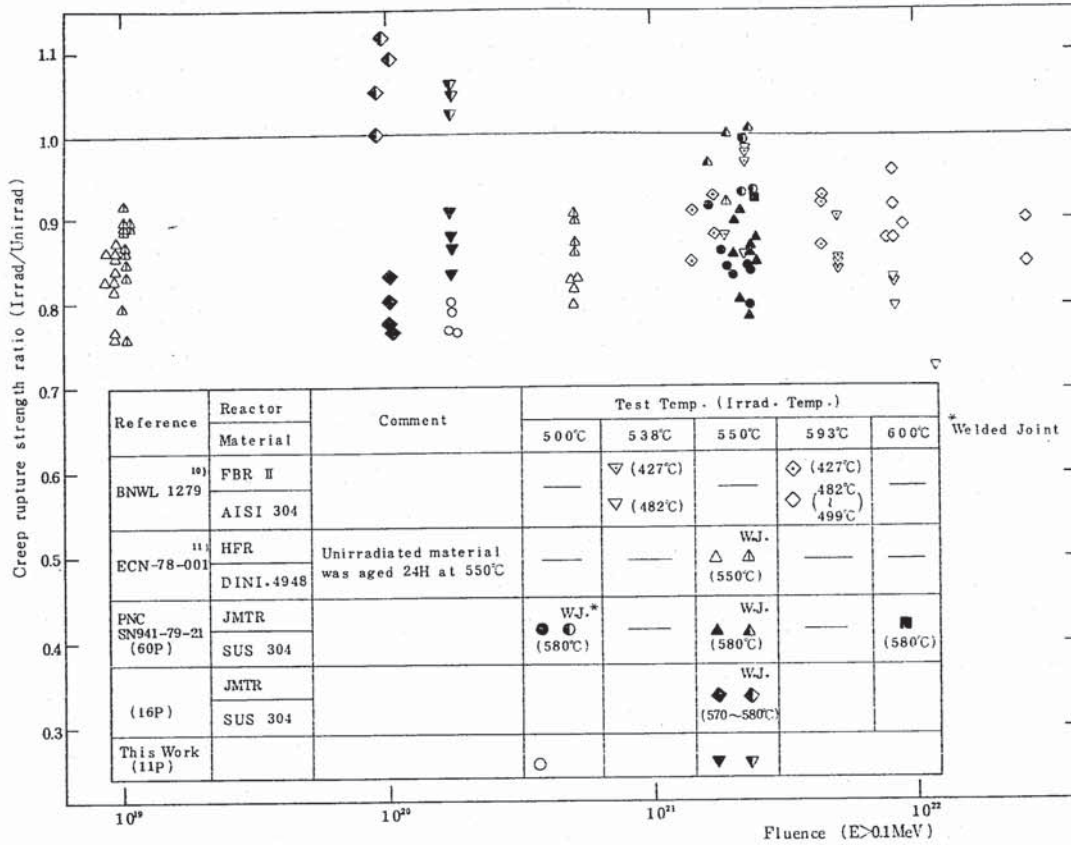


Fig. 30 Comparison of creep rupture strength ratio between this work and others<sup>2),7),9),10)</sup> as a function of neutron fluence

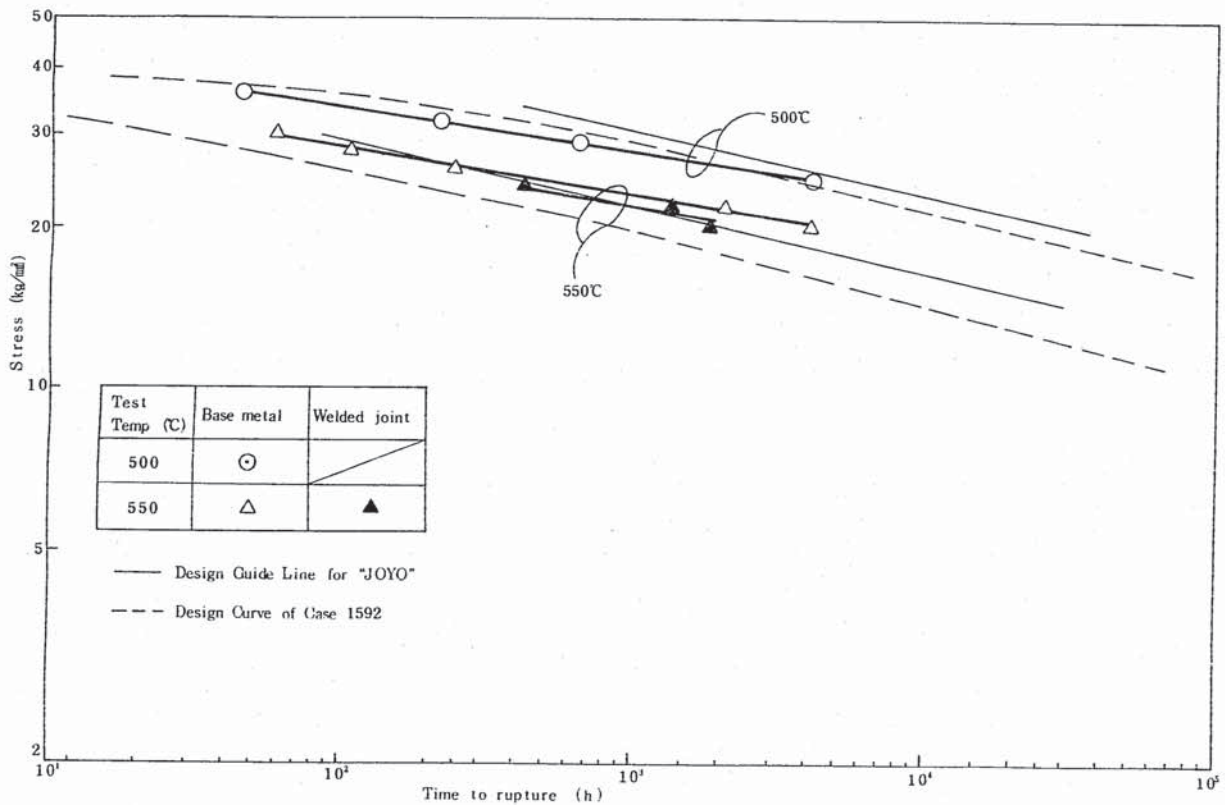


Fig. 31 Comparison of creep rupture strength among this work, the design guide for "JOYO" and design curve of ASME code case 1592