

## 照射リグ(Ⅱ-06)及びサーベイランスバックアップ材の照射試験(2)

## 第3報 炉容器相当材(母材及び溶接継手)のクリープ試験

区分変更	
変更後資料番号	PNC TN941 85-163
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

1985年11月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

## 照射リグ(Ⅱ-06)及びサーベイランスバックアップ材の照射試験(2) 第3報 炉容器相当材(母材及び溶接継手)のクリープ試験

実施責任者 柚原俊一  
著 者 菊地隆雄\* 岡 裕\*  
谷 賢\* 石原幹也\*\*

### 要 旨

「常陽」炉容器サーベイランス材のバックアップ試験の一環として「常陽」燃料貯蔵ラック位置(R11)で7.5 MW, 1サイクルの間照射した炉容器相当材の母材及び溶接継手について500℃でクリープ破断試験を行った。また同時に同照射リグを用いて安全棒の駆動機構に用いられるスプリングの照射による特性変化の基礎データを得ることを目的としてインコネルX750及びインコネル718製のスプリングを圧縮荷重負荷の状態に照射し、照射後、外観観察、寸法測定、バネ定数測定、金相試験を実施した。照射量は $1.0\sim 1.5\times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$ ,  $4.6\times 10^{16} \text{ n/cm}^2 (E < 0.4 \text{ eV})$ ,  $1.8\times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (\text{total})$ で、照射温度は420℃～470℃であった。

#### 1. 炉容器相当材のクリープ破断試験結果

照射した母材のクリープ破断伸び及び断面収縮率は破断時間が長い場合は受入材よりも低くなる傾向を示した。母材のクリープ破断伸び及び断面収縮率は破断寿命が～5000h程度の場合に照射の有無によらず16%以上の値を示している。

溶接継手のクリープ破断強度に及ぼす照射の影響は傾向的には母材の場合とほぼ同じである。未照射材の破断位置は溶接金属部であるが、照射材では母材部である。破断伸びは照射により低下し、その値は母材より小さい。

「常陽」構造設計指針の500℃におけるクリープ破断応力強さの最小値に対して本実験材は上回っている。

#### 2. スプリングの試験結果

インコネルX750製スプリングの全長は照射前に比べて最も変化の著しいもので30%短くなったが、インコネル718製スプリングの全長にはほとんど変化が見られなかった。いずれのスプリングも照射によるバネ定数の変化は見られなかった。

\* 大洗工学センター，燃料材料開発部，照射材料試験室

\*\* 現，石川島播磨重工業株式会社

## Post-Irradiation Test on Reactor Vessel Material Irradiated in Surveillance Test Rig (II-06)

### 3. Creep Rupture Test on Reactor Vessel Material

Takao Kikuchi\*, Yutaka Oka\*, Satoshi Tani\*,  
Mikiya Ishihara\*\* and Shunichi Yuhara\*

#### Abstract

As one of the back-up tests for the structural material surveillance program of the "JOYO" reactor vessel, creep rupture tests at 500°C were performed on a SUS304 stainless steel plate material and its welded joint, similar to the reactor vessel material.

The specimens were irradiated in a fuel storage rack (R11) of the "JOYO" for one cycle at the power of 75MW.

The irradiation rig also contained stressed spring specimens of Inconel X-750 and Inconel 718 to examine irradiation effects on the driving force of safety rods.

1. Creep rupture tests on the similar one to the "JOYO" reactor vessel material.

Creep rupture strength of base metal decreased after irradiation when the time to rupture was over 1400h. The values of creep rupture elongation and reduction of area for both irradiated and unirradiated materials were more than 16% at least even after creep rupture test of 5000h.

The influence of irradiation on the creep rupture strength of welded joint was similar to the effect for base metal. While the fracture position of unirradiated weld joint was located at the weld metal portion, that of irradiated one was base metal. The rupture elongation of weld joint, which decreased by irradiation, was smaller than that of base metal.

The creep rupture strength obtained at 500°C was slightly larger than the minimum stress intensity to rupture

---

\* Materials Monitoring Section, Fuels and Materials Division, OEC/PNC.

\*\* Present Address; Ishikawajima-Harima Heavy Industries

values for SUS304 in design guide for the "JOYO".

2. Test results for spring

The length of Inconel X-750 spring were shortened by 30% at most after irradiation, while that of Inconel 718 spring did not change. The spring constant of bath springs did not changed by irradiation.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 試験方法 .....	2
2.1 供試材 .....	2
2.2 照射試験方法 .....	2
2.3 クリープ破断試験方法 .....	2
2.4 金相試験方法 .....	2
3. 試験結果 .....	3
3.1 照射試験 .....	3
3.1.1 照射量 .....	3
3.1.2 照射温度 .....	3
3.2 母材のクリープ破断試験結果 .....	3
3.3 溶接継手のクリープ破断試験結果 .....	4
3.4 金相試験結果 .....	4
4. 考 察 .....	6
4.1 母材のクリープ特性に対する照射の影響 .....	6
4.2 溶接継手に対する照射の影響 .....	6
4.3 他の試験結果との比較 .....	7
4.4 「常陽」構造設計指針からの検討 .....	7
5. ま と め .....	9
5.1 母材に関する結果 .....	9
5.2 溶接継手に関する結果 .....	9
6. 謝 辞 .....	10
7. 参考文献 .....	11
別添 スプリング試験片の試験 .....	56

List of tables

Table 1	Chemical Compositions and Mechanical Properties of SUS304 Stainless Steel Tested .....	13
Table 2	Welding Procedure .....	14
Table 3	Irradiation Temperature of Surveillance Back-up Test Rig (II-06) .....	15
Table 4	Creep Properties of Irradiated SUS304 Base Metal and It's Welded Joints .....	16
Table S-1	Compressed Spring Length during Irradiation .	60
Table S-2	Test Results of Spring Specimens .....	60

## List of Figures

Fig. 1	Profile of Creep Test Specimen .....	17
Fig. 2	Preparation of Specimen .....	17
Fig. 3	Configuration of Surveillance Back-up Test Rig (II-06) .....	18
Fig. 4	Operational History of the "JOYO" in Cycle 5..	19
Fig. 5	Fast Neutron Fluence Distribution in Rig (II-06) .....	20
Fig. 6	Creep-Rupture Strength for Base Metal .....	21
Fig. 7	Minimum Creep Rate for Base Metal .....	22
Fig. 8	Relationship between Minimum Creep Rate and Time to Rupture of Irradiated and Unirradiated SUS304 Base Metal .....	23
Fig. 9	Creep-Rupture Elongation for Base Metal .....	24
Fig. 10	Relationship between Time to Rupture and Rupture Elongation Ratio of Irradiated to Unirradiated SUS304 Base Metal .....	25
Fig. 11	Reduction of Area for Base Metal .....	26
Fig. 12	Relationship between Time to Rupture and Reduction of Area Ratio of Irradiated to Unirradiated SUS304 Base Metal .....	27
Fig. 13	Relationship between Time to Tertiary Creep Onset and Time to Rupture .....	28
Fig. 14	Creep Rupture Strength for Welded Joint .....	29
Fig. 15	Minimum Creep Rate for Welded Joint .....	30
Fig. 16	Relationship between Minimum Creep Rate and Time to Rupture of Irradiated and Unirradiated SUS304 Weld Joints .....	31
Fig. 17	Rupture Elongation for Welded Joint .....	32
Fig. 18	Reduction of Area for Welded Joint .....	33



Fig. 19	Appearances of Creep-Ruptured Specimens at 500°C after Irradiation in the "JOYO" .....	34
Fig. 20	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Irradiated Base Metal (40005N3) .....	35
Fig. 21	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep Ruptured Base Metal after Irradiation at 500°C and 28.0 kgf/mm <sup>2</sup> (40005N) .....	36
Fig. 22	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep Ruptured Base Metal after Irradiation at 500°C and 34 kgf/mm <sup>2</sup> (40005L)..	37
Fig. 23	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Irradiated Welded Joint (400079A) .....	38
Fig. 24	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep Ruptured Welded Joint after Irradiation at 500°C and 34 kgf/mm <sup>2</sup> (400077)..	39
Fig. 25	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep Ruptured Welded Joint after Irradiation at 500°C and 28 kgf/mm <sup>2</sup> (400079)..	40
Fig. 26	Rupture Strength for Base Metal .....	41
Fig. 27	Minimum Creep Rate for Base Metal .....	42
Fig. 28	Rupture Elongation for Base Metal .....	43
Fig. 29	Reduction of Area for Base Metal .....	44
Fig. 30	Time to Tertiary Creep Onset vs Time to Rupture for Base Metal .....	45
Fig. 31	Rupture Strength for Welded Joint .....	46
Fig. 32	Minimum Creep Rate for Welded Joints .....	47
Fig. 33	Rupture Elongation for Welded Joint .....	48
Fig. 34	Reduction of Area for Welded Joint .....	49
Fig. 35	Rupture Strength for the "JOYO" Reactor Vessel Materials .....	50

Fig. 36	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Unirradiated Base Metal Crept to Failure at 550°C and 22.0 kgf/mm <sup>2</sup> (Z8000V)	. 51
Fig. 37	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Unirradiated Base Metal Crept to Failure at 550°C and 28.0 kgf/mm <sup>2</sup> (Z8000M)	. 52
Fig. 38	Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Unirradiated Weld Joint Crept to Failure at 500°C and 35.0 kgf/mm <sup>2</sup> (Z80014)	. 53
Fig. 39	Uniaxial Creep Test E-T Curve	54
Fig. 40	Uniaxial Creep Test E-T Curve	55
Fig. S-1	Profile of the Specimen	61
Fig. S-2	Apparatus for Measuring Spring Constant	62
Fig. S-3(1)	Inconel X750	63
Fig. S-3(2)	Inconel 718	64
Fig. S-4	Irradiation Effects on Specimen Length	65
Fig. S-5(1)	Irradiation Effects on Spring Constant	66
Fig. S-5(2)	Irradiation Effects on Spring Constant	67

## 1. まえがき

高速実験炉「常陽」ではそ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おり、約20年間にわたり定期的に試験片を取り出し、照射後試験を実施することになっている。<sup>(1)</sup> そのサーベイランス試験結果を評価する上でバックアップ試験が必要であり、既に数報にわたりサーベイランスバックアップ試験結果を報告してきた。<sup>(2)~(12)</sup>

本報はその一環として、「常陽」の炉容器が寿命末期までに受ける照射量を想定して「常陽」75 MW炉心で1サイクル照射した炉容器相当材の500℃でのクリープ試験結果をまとめたものである。なおサーベイランスバックアップ試験用照射リグ(II-06)には上記のクリープ試験片とともに引張、疲労及びスプリング試験片が組み込まれて照射された。引張、疲労試験の結果については既に前報で報告されている。<sup>(13),(14)</sup>

使用したスプリング試験片はインコネル718及びインコネルX750製であり、本照射試験では「常陽」の安全棒の駆動機構に用いられるスプリングの照射による特性変化の基礎データを得ることを目的としている。

本報告では付随して行われたスプリング試験片の照射後試験結果についても別添として併せて記述している。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

供試材は高速実験炉「常陽」炉容器相当材のSUS304ステンレス鋼の母材及び溶接継手を用いた。炉容器相当材は「常陽」炉容器材と同じ履歴で製造された熱間圧延SUS304ステンレス鋼板(JIS G4303)で、その化学成分及び機械的性質をTable 1に示す。炉容器相当材の溶接継手は実機と同一条件で2パスの被覆アーク溶接後7パスのサブマージアーク溶接を施したものでその溶接施工条件をTable 2に示す。クリープ試験に供した試験片の形状をFig. 1に示す。試験片は平行部径6mm、平行部長さ30mmである。試験片はFig. 2に示すように供試材の板厚(以下tと称す)の1/2の位置から母材については圧延方向に平行に、溶接継手材については試験片の長さ方向を溶接線と直角方向に、平行部中央に溶接線中心がくるように採取した。

### 2.2 照射試験方法

Fig. 3に示す照射リグを製作し、リグ内にクリープ試験片24本、引張試験片18本、疲労試験片15本、及びスプリング試験片12本を14段に組込んだ。SiC温度モニター内蔵キャプセル3個及びドジメータセットキャプセル3個を炉心中心部、炉心面から上方524mm及び下方278mmに装荷した。これらの供試体を内蔵した照射リグを75MW第5サイクルにおいて「常陽」燃料ラック位置(R-11)で1サイクルの間(公称1080h)照射した。

### 2.3 クリープ破断試験方法

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500h、1000h及び3000hとし、設定温度の500℃に達した後、約24h保持し試験荷重をかけた。クリープ伸びはチャック間距離をマグネスケールで1時間毎に1 $\mu$ mの精度で測定し求めた。クリープ破断伸びは、あらかじめ平行部に30mmの間隔で刻印した標点を破断後試験片を突合せた状態で写真撮影し、写真上で測定した。クリープ破断絞りも破面を実物大に写真撮影し、写真上で測定した。

### 2.4 金相試験方法

クリープ破断後の破断部の断面をダイヤモンドペーストを用いて研磨仕上げした後10%過硫酸アンモニウム水溶液中で電解エッチングを行った。その腐食面を遠隔操作型光学顕微鏡(ライヘルム社製、テラトーム)を用いて100倍及び400倍で組織を観察した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 照射試験

##### 3.1.1 照射量

II-06集合体は昭和56年6月8日「常陽」炉内貯蔵ラック(R-11)に装荷され、75 MW第5サイクルで照射された。照射中の運転パターンをFig. 4(a)に示す。実際の運転パターンを基にして出力75 MWの運転日数を算出し、Fig. 4(b)に示す運転パターンで照射量を計算した。

中性子照射量の計算には「常陽」の運転監視コード(計算コード, DOT・35)を用いた。計算結果をFig. 5に示す。高速中性子照射量は最大 $5.8 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV), 熱中性子照射量は $5.8 \times 10^{16}$  (n/cm<sup>2</sup>) ( $0.4$  eV  $> E > 10^{-3}$  eV), 全中性子照射量は $1.8 \times 10^{20}$  (n/cm<sup>2</sup>)である。クリープ試験片の照射リグ内における装荷位置はFig. 3に示すようにH/H側, 440~548 mmである。したがって高速中性子照射量は $1.0 \sim 1.5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV)であったと推定できる。

##### 3.1.2 照射温度

SiC温度モニタの格子定数から推定した照射温度をTable 3に示す。照射リグ内のクリープ試験片の装荷位置はH/H部のSiC装荷位置とほぼ等しい。したがってクリープ試験片の照射温度はおよそ470℃であると推定できる。

#### 3.2 母材のクリープ破断試験結果

照射材のクリープ破断試験の結果を未照射材のものとともにTable 4に示す。Fig. 6に応力とクリープ破断時間との関係を示す。未照射材と比べて破断時間が約1000~2000 hよりも短い場合には、照射材のクリープ破断強度は、高いが、約1000~2000 hよりも長くなると低くなる傾向がある。

Fig. 7に応力と最小クリープ速度の関係を示す。照射により、最小クリープ速度は小さくなっているが、応力が小さい場合、すなわち破断時間が長い場合には照射の影響が小さくなる傾向がある。

Fig. 8に最小クリープ速度と破断時間の関係を示す。最小クリープ速度が同じ場合、照射材の破断時間は未照射材より短くなる。

Fig. 9に破断伸びと破断時間の関係を示す。照射材及び未照射材はともに破断時間が長くなるとともに破断伸びが小さくなる。照射によるクリープ破断伸びの低下は、破断時間が700 h以下の場合にはほとんどないが700 h以上では大きくなる。

Fig. 10に未照射材の破断伸びと断試時間の関係を示す平均傾向線に対する照射材の実測値の比を示した。照射により破断伸びは未照射材の約70~98%まで低下している。

Fig. 11に断面収縮率と、破断時間の関係を示す。照射材の破断絞りは破断時間が長くなるとともに低下し、破断絞りの絶対値は未照射材よりも小さい。未照射材の破断絞りと破断時間の関係を示す。平均傾向線に対する照射材の実測値の比をとり、Fig. 12に示す。照射により破断絞りは未照射材の約60~80%まで低下している。

Fig. 13に第3期クリープ開始時間と破断時間の関係を示す。第3期クリープ開始時間が同じ場合、破断時間は照射材の方が短い。したがって照射材の第3期クリープの期間は未照射材に比べて短いことがわかる。

### 3.3 溶接継手のクリープ破断試験結果

Fig. 14に溶接継手のクリープ破断強度を示す。照射材の破断強度は破断時間が約1000~2000hを境としてより短い場合、未照射材よりも高いが、長時間側では逆に低くなる。この傾向は母材の場合と同じである。

Fig. 15に応力と最小クリープ速度の関係を示す。破断時間が短い場合には照射材の最小クリープ速度は未照射材よりも小さいが、破断時間が長い場合には、大きくなる。

Fig. 16に最小クリープ速度と破断時間の関係を示す。最小クリープ速度が同じ場合、照射材の方が破断時間が短い。

Fig. 17に破断伸びと破断時間の関係を示す。照射材の破断伸びは未照射材と同様に破断時間が長くなるとともに小さくなる。また未照射材と比べて照射材の破断伸びは小さいが、破断伸びの破断時間依存性は未照射材より少ない。

Fig. 18に破断絞りと破断時間の関係を示す。照射材のデータのバラッキは大きいですが、未照射材に比べて破断絞りは小さい。

### 3.4 金相試験結果

Fig. 19に照射材のクリープ破断後の試験片の外観を示す。母材の破断位置はA破断2本及びB破断2本であるのに対し、溶接継手材の場合は、すべて標点に近い破断であり、これは母材部の破断と推定できる。

Fig. 20に母材のクリープ破断後の試験片つかみ部の断面組織を示す。結晶粒は一部混粒となっている部分がある。また、圧延方向に伸延した $\delta$ フェライト及び結晶粒界に炭化物の析出が観察される。

Fig. 21及びFig. 22にクリープ破断後の母材の軸方向に平行な断面組織を示す。破断部の結晶粒の変形はほとんど無く、軸方向に垂直な粒界の割れが破断部近傍、並びに試験片表層部に観察される。さらに表層部には若干の加工組織がみられる。またつかみ部と同様、結晶粒界には炭化物の析出が認められる。

Fig. 23～Fig. 25に溶接継手材の照射後の軸方向に平行な断面の組織を示す。Fig. 23の組織写真から溶接ボンド部を中心として母材及び溶接金属側の0.5mm程度の範囲では結晶粒の変形はみられない。Fig. 24及びFig. 25から破断部分が母材であることがわかる。破断部の断面組織は表層部に割れがみられないことを除けばFig. 21及びFig. 22に示した母材とはほぼ同じである。

## 4. 考 察

### 4.1 母材のクリープ特性に対する照射の影響

照射リグⅡ-06で照射したクリープ試験片のクリープ破断強度は未照射材よりも低下したが、その低下の程度は従来報告されている"JMTR"照射のデータと比較して小さい。この原因として熱中性子照射量が $4.6 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ と比較的少ないために、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応による結晶粒界のHe脆化が従来のJMTR照射のデータより小さいことが考えられる。

500°Cで10<sup>4</sup>hの熱履歴を与えたSUS304ステンレス鋼の500°Cのクリープ破断強さは破断時間が1000hまでは受入材よりも低いが、1000h以上の場合には受入材とほぼ同じとなる。したがって破断時間が1400h以上の場合照射材のクリープ破断強さが未照射材よりも低いという本試験の結果は、熱履歴ではなく、照射に起因するものであると考えられる。

中性子照射の影響としては、(1)格子欠陥導入に伴う炭化物析出の促進、及び、(2) $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応による結晶粒界のHe脆化が考えられる。

照射期間に相当する熱履歴(470°C, 1080h)のみでは温度が低いため結晶粒内への炭化物の析出は少ないと考えられる。一方照射材の場合、中性子照射により鋼中に導入される格子欠陥は析出を促進することが考えられる。実際、照射材の透過型電子顕微鏡観察によれば、 $1.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ), 450°C, 1080hの条件で照射したSUS304ステンレス鋼(炉容器相当材)には照射の状態ですでに粒界へ炭化物が析出していることが報告されている。<sup>(12)</sup>

クリープ試験中に粒内に析出する炭化物はクリープ変形を抑制する効果がある。本実験では照射材のクリープ破断強度は破断時間が短い場合、未照射より高いが、破断時間が長い場合、低くなるという結果が得られた。クリープ破断時間が短い場合、未照射材は炭化物の析出量が少いのに対し、照射材は既に炭化物が析出しているために、照射材のクリープ強度の方が高くなったと考えられる。この粒内炭化物の析出量の違いは、最小クリープ速度に現われ、Fig. 7に示したように応力が同じ場合、照射材の最小クリープ速度の方が小さくなっている。一方、クリープ破断時間が長い場合、炭化物が粒界に既に析出した組織を持つ照射材は未照射材に比べて、クリープ試験中に粒内に析出する炭化物の量が少くなり、Fig. 7に示したように照射材と未照射材の最小クリープ速度の差が小さくなったものと考えられる。また、照射材のクリープ強度が未照射材より低下する理由として粒界に析出したHeによりFig. 13に示したように第3期クリープの開始時期が早くなること及び第3期クリープの期間が短くなることが上げられる。

### 4.2 溶接継手に対する照射の影響

500°Cにおける溶接継手未照射材のクリープ破断強度、破断伸び及び破断絞りに及ぼす熱履歴効果の影響は破断時間が5000h程度の場合ほとんどない。<sup>(9)</sup>従って、本試験において照射材のクリープ特性値の低下は照射によって生じるものと考えられる。本実験のように照射による



(15)  
溶接継手の延性の低下現象はSchaafらによっても報告されている。

本試験では未照射材の破断位置は溶接金属部であるのに対して照射材の破断位置は母材部であった。この結果は既報とも一致する。この現象は溶接継手においては照射による母材部の強度低下が溶接金属部よりも大きいことを示唆している。溶接継手部においては溶接金属部のホウ素の粒界偏析は母材より少ないというSchaafらの報告を考察すると、この現象はホウ素の析出状態の違いに基づくヘリウム脆化の程度の違いに起因していると考えられる。すなわちB含有量が4 ppmの場合、熱中性子照射量が $6 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>程度でヘリウム脆化が現われることを示している。

#### 4.3 他の試験結果との比較

TTJT05の照射条件と比較するとII-06の高速中性子照射量は約1/10であるが熱中性子照射量及び照射温度とも、ほぼ等しい。両者の母材及び溶接継手の500℃におけるクリーブ破断強さを同じ図にプロットし、Fig. 26及びFig. 31に示す。両者はほぼ同じ直線で整理できる。一方、Fig. 28, 29及びFig. 33, 34に示すように伸び、絞りに関してはバラッキが大きいため詳細な比較はできない。しかしながら、本試験の熱中性子照射量及び照射温度の条件では高速中性子照射量が、10倍程度異なってもクリーブ破断特性にはほとんど影響しないことがわかった。クリーブ破断特性に及ぼす中性子照射の影響を、TTJT05及びII-06のデータを基にして両試験の照射条件範囲である、 $1 \sim 1.5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV),  $5.8 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E < 0.4$  eV)に限定して以下のように総括することができる。

- ① クリーブ破断強度；母材及び溶接継手材ともに破断時間約1000～2000hを境にして、短時間側で照射材が未照射材を上回り、長時間側で照射材が低下した。(Figs. 26, 31)
- ② 最小クリーブ速度；母材及び溶接継手材ともに未照射材の方がわずかに大きい。(Figs. 27, 32)
- ③ 破断伸び；母材は照射により未照射材の破断伸びの100%～72%に低下し、溶接継手は65%～53%に低下する。(Figs. 28, 33)
- ④ 破断絞り；母材は照射により、未照射材の80%～60%に低下し、溶接継手は100%～65%に低下する。(Figs. 29, 34)
- ⑤ 第3期クリーブ開始時期；母材は照射により未照射材よりも第3期クリーブ開始時期が早くなる。(Fig. 30)

#### 4.4 「常陽」構造設計指針からの検討

本実験供試材は「常陽」炉容器相当材であるため「常陽」炉容器材に対するII-06での照射量に対する評価と、TTJT06リグで照射した後のクリーブ破断強度及び、「常陽」構造設計指

針とともに、Fig. 35に示す。同図に示したII-06での照射量に対する評価値は、次のようにして求めた。

Fig. 6に示したII-06の結果から $\sigma_{\text{irrad}}/\sigma_{\text{unirrad}}$ の応力比を照射後クリーブ破断時間に対応して求め、その比を「常陽」炉容器材の受入材のデータにかけてその低下量を求め図示した。

Fig. 35から、TTJT06の照射量 $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ に比べII-06相当の $1.0 \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ の強度低下量が少ないことがわかる。また、照射を受けたあとにおいても、クリーブ破断強度は「常陽」構造設計指針に対して十分な裕度を確保していることがわかる。

## 5. ま と め

「常陽」炉容器サーベイランス材のバックアップ試験として、「常陽」燃料ラック位置(R-11)で75 MW, 1サイクル間(1080時間,  $1.0 \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ,  $4.6 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ ,  $E < 0.4 \text{ eV}$ )照射温度420~470℃で照射した炉容器相当材の母材及び溶接継手について, 500℃でクリープ破断試験を行った。その結果, 以下のことが明らかとなった。

### 5.1 母材に関する結果

- (1) 破断強度は, 破断時間約1000~2000hを境にして, 短時間側では, 照射材が未照射材を上回り, 長時間側では照射材の方が低下した。
- (2) 照射材, 未照射材ともに破断伸び及び断面収縮率はクリープ破断時間~5000h程度で16%以上の値を示した。
- (3) 照射材の最小クリープ速度は未照射材とほぼ同程度である。
- (4) (1)~(3)に示した500℃のクリープ破断特性は高速中性子照射量が約10倍で, 熱中性子照射量がほぼ同じTTJT05照射材(75 MW, 1サイクル照射, 420℃×1080h,  $1.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ,  $4.6 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ ,  $E < 0.4 \text{ eV}$ )とほぼ同じである。

### 5.2 溶接継手に関する結果

- (1) 照射によるクリープ破断強度の変化は母材とほぼ同じ傾向を示す。
- (2) 未照射材の破断位置は溶接金属部であるが照射材では母材部に変る。
- (3) 破断伸びは照射により低下しその値は母材より小さい。
- (4) 溶接継手の500℃のクリープ破断特性は, TTJT05照射材とほぼ同じである。

「常陽」構造設計指針の500℃におけるクリープ破断強度の最小値に対して本実験材は上回っている。

なお, 参考として, Figs. 36~38に未照射材の金相写真を示し, Figs. 39~40に照射材のクリープ曲線を示した。

## 6. 謝 辞

本試験を実施するにあたり、燃料材料試験部井滝俊幸部長を始め、高速実験炉部の関係者の御協力、御指導に厚く謝意を表します。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 鈴木和久, 他: 原子炉構造材サーベイランス試験計画書,  
動燃団報告 SN942 74-05 (1974)
- (2) 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, (JMTR-SM(1), 70M-60P)  
第2報 長時間強度試験  
動燃団報告, SN941 79-21 (1979)
- (3) 榊原瑞夫, 他: 「常陽」サーベイランスバックアップ試験  
第3報 JMTR照射, 炉容器材及び溶接継手の高温疲れ並びにクリープ破断試験, (74M-11P)  
動燃団報告, SN941 80-143 (1980)
- (4) 榊原瑞夫, 他: 「常陽」サーベイランスバックアップ試験  
第2報 JMTR照射, 炉容器材及び溶接継手の高温疲れ並びにクリープ破断試験, (75M-16P)  
動燃団報告, SN941 80-118 (1980)
- (5) 石原幹也, 他: 照射リグ(TTJT05)及びサーベイランスバックアップ材の照射後試験(2)  
第2報 炉容器材のクリープ破断試験  
動燃団報告, SN941 83-10 (1983)
- (6) 石原幹也, 他: 照射リグ(TTJT05)及びサーベイランスバックアップ材の照射後試験(2)  
第2報 炉容器材のクリープ試験  
動燃団報告, SN941 83-88 (1983)
- (7) 中沢崇徳, 他: 高速原型炉構造材料及び溶接金属の照射後試験  
第6報 照射材のクリープ破断試験, (76M-42P, 43P)  
動燃団報告, SN941 82-159 (1982)
- (8) 鈴木和久, 他: 「常陽」サーベイランス確認試験  
第4報 炉容器材の長時間強度試験  
動燃団報告, SN941 77-140 (1977)
- (9) 蟹川昌也, 他: 「常陽」サーベイランスバックアップ試験  
第4報 炉容器材の熱履歴試験  
動燃団報告, SN941 80-169 (1980)
- (10) 石原幹也, 他: 高速原型炉構造材料及び溶接金属の照射後試験  
第5報 受入材のクリープ破断試験  
動燃団報告, SN941 82-150 (1982)
- (11) 関成一, 他: 高速原型炉構造材料及び溶接継手の照射後試験  
第3報 受入材のクリープ試験  
動燃団報告, SN941 83-112 (1983)

- (12) 中沢崇徳, 他: SUS304の照射後クリープ試験  
(総合報告)動燃団報告, ZN941 83-102(1983)
- (13) 中沢崇徳, 他: 照射リグ(II-06)及びサーベイランス材の照射後試験(2)  
第1報 炉容器材(母材及び溶接継手)の引張試験  
動燃団報告, SN941 83-07(1983)
- (14) 加藤博史, 他: 照射リグ(II-06)及びサーベイランス材の照射後試験(2)  
第2報 炉容器材(母材及び溶接継手)の高温疲労試験  
動燃団報告, SN941 83-20(1983)
- (15) B.Schaaf, et al: Effect of neutron irradiation on creep properties  
of 18Cr-11Ni(DINI.4948) stainless steel plate and welded joints  
at 823K, ECN-61(1979)
- (16) 柚原俊一, 他: 照射リグ(TTJT09)及びサーベイランスバックアップ材の照射後試験(2),  
炉容器材の高温疲労試験  
動燃団報告, SN941 85-81(1985)

Table 1 Chemical Compositions and Mechanical Properties of SUS304 Stainless Steel\* Tested

	Chemical composition (w/o)									Mechanical properties				Grain size ASTM No.	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	B	Tensile					
										YS (kg/mm <sup>2</sup> )	UTS (kg/mm <sup>2</sup> )	Elonga- tion (%)	R.A. (%)		Hard- ness (Hb)
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	5
Mill analysis	0.06	0.81	1.54	0.028	0.005	8.90	18.70	0.15	-	23	59	65	72	145	
Check analysis	0.06	0.81	1.51	0.027	0.003	8.98	18.72	0.15	0.0004						

\* This material is the same as the one irradiated with irradiation rigs; TTJT05, TTJT06 and TTJT07

Table 2 Welding Procedure

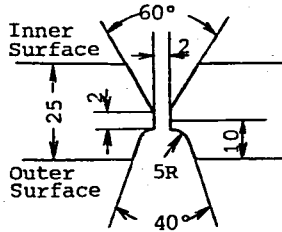
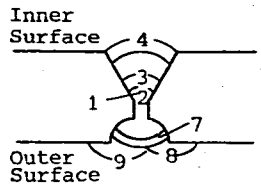
Edge preparation	Welding procedure												
Edge preparation		Welding process	Welding material	Pass	Rod dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (J/cm)				
		Shielded metal arc welding (SMAW)	WEL 308	1~2	4.0	150~160	25	180~200	11800 ~ 12600				
	1~2 Pass Shielded metal arc welding	Submerged arc welding (SAW)	US-308(Wire) PFS-1 (Flux)	3~9	4.0	440~480	32	~320	26400 ~ 28500				
	3~9 Pass Submerged arc welding	Chemical composition of weld metal	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	Cu	B
	Inner pass temperature < 180°C	(w/o)	0.06	0.69	1.89	0.028	0.010	1.007	2.061	0.23	-	-	0.0004



Table 3 Irradiation Temperature of Surveillance Back-up  
Test Rig (II-06)

Distance from Core Center	Specimen No.	Observed temperature
526mm (H.H. side)*	40BK72	471°C
48mm (E.N. side)*	40BK82	423°C
288mm (E.N. side)*	40BK92	451°C

\* { H.H. : Handling Head  
E.N. : Entrance Nozzle

Table 4 Creep Properties of Irradiated SUS304 Base Metal and It's Welded Joints

Material	Test temp. (°C)	Specimen No.	Fluence (n/cm <sup>2</sup> )	Irrad. temp. (°C)	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Time to rupt. (Hr)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (%/Hr)	Strain at onset of tertiary creep (%)	Time to tertiary creep (Hr)	Ruptured position
Base metal	500	Z8000R	-	-	36.0	199.4	27.9	44	$3.8 \times 10^{-2}$	23.3	120	B
		Z8000S			32.0	683.6	24.3	37	$1.0 \times 10^{-2}$	17.0	400	B
		Z8000T			27.0	4827.8	23.8	28	$1.7 \times 10^{-3}$	-	-	B
Welded joint	500	Z80014	-	-	35.0	281.5	17.7	37	$2.4 \times 10^{-2}$	-	-	A(W.M.)*
		Z80015			31.0	1136.5	14.8	28	$5.6 \times 10^{-3}$	-	-	A(W.M.)
		Z80016			28.0	4645.5	8.3	18	$6.0 \times 10^{-4}$	-	-	A(W.M.)
Base metal	500	40005L	$1.0 \sim 1.5 \times 10^{19}$ (E>0.1MeV)	420~470	34.0	567.3	25.3	30.6	$7.43 \times 10^{-3}$	19.3	410	A
		40005M			31.0	1049.3	19.1	23.1	$5.05 \times 10^{-3}$	17.1	760	B**
		40005N			28.0	2545.8	17.1	18.4	$1.67 \times 10^{-3}$	13.8	1740	B**
		40005K			26.0	4351.3	17.3	19.6	$9.20 \times 10^{-4}$	12.0	3280	A
Welded joint	500	400077	$5.8 \times 10^{16}$ (E<0.4MeV)	420~470	34.0	642.9	8.3	26.9	$6.93 \times 10^{-3}$	9.4	440	B**
		400078			31.0	1264.7	8.0	17.5	$2.72 \times 10^{-3}$	6.1	960	B**
		400079			28.0	2681.5	7.2	21.7	$1.00 \times 10^{-3}$	4.3	2150	B

\* W.M.; Weld metal

\*\*Fractured at the gage mark put before test

\*

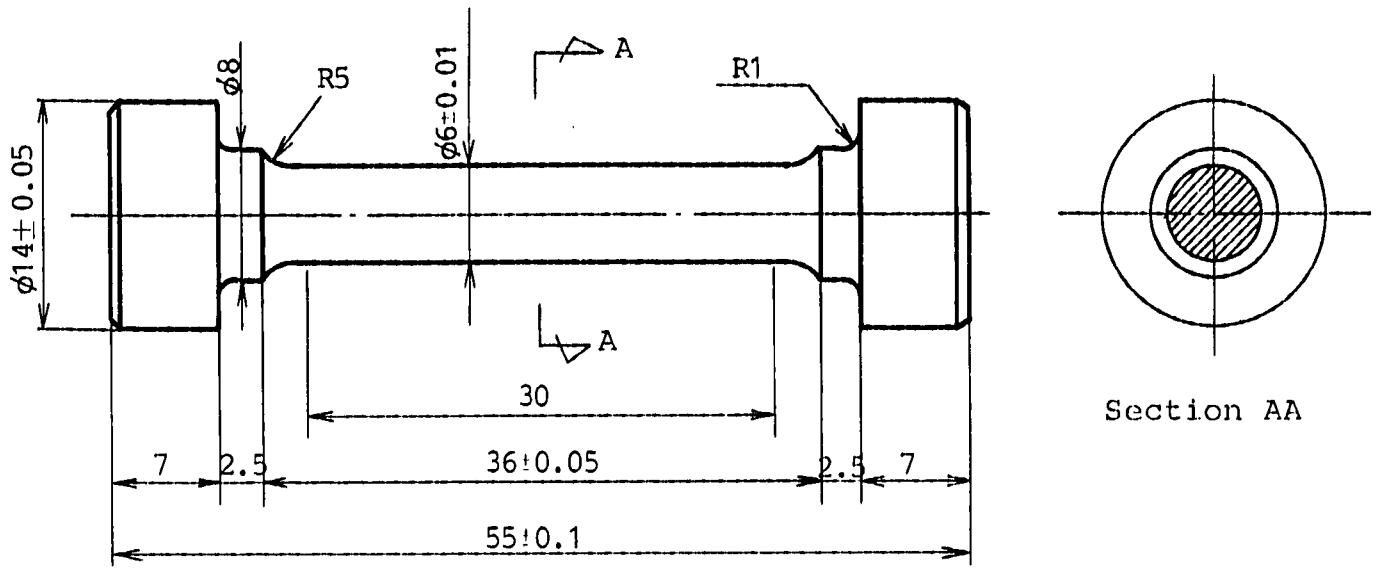


Fig. 1 Profile of Creep Test Specimen

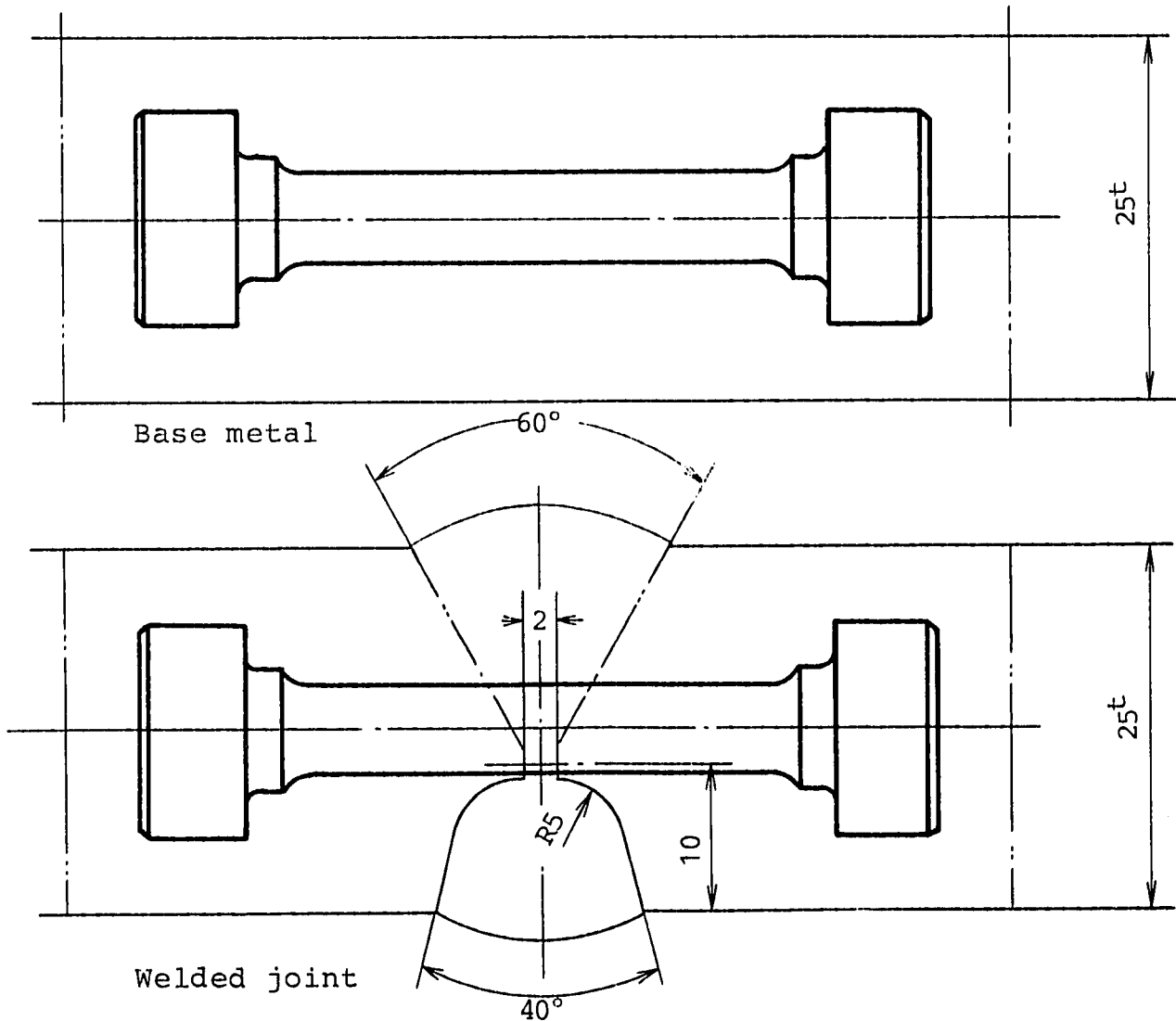


Fig. 2 Preparation of Specimen

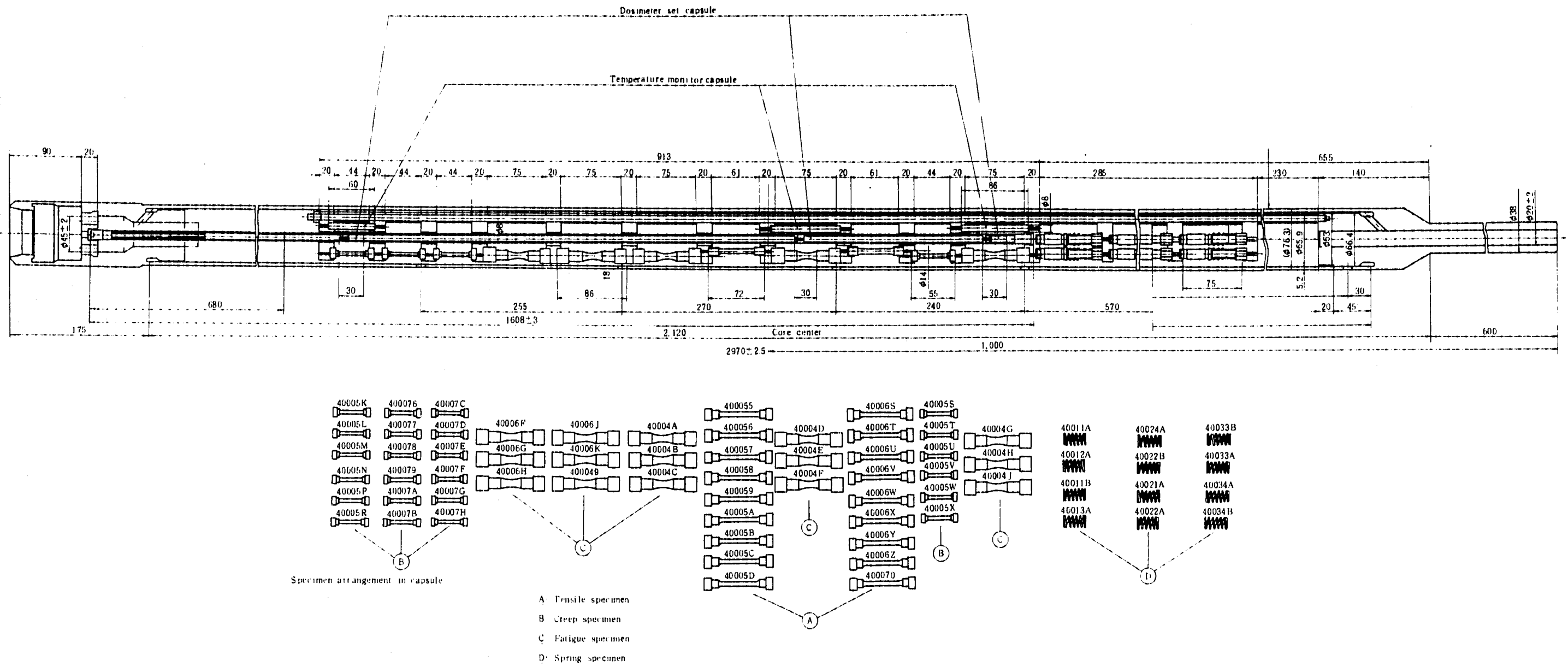
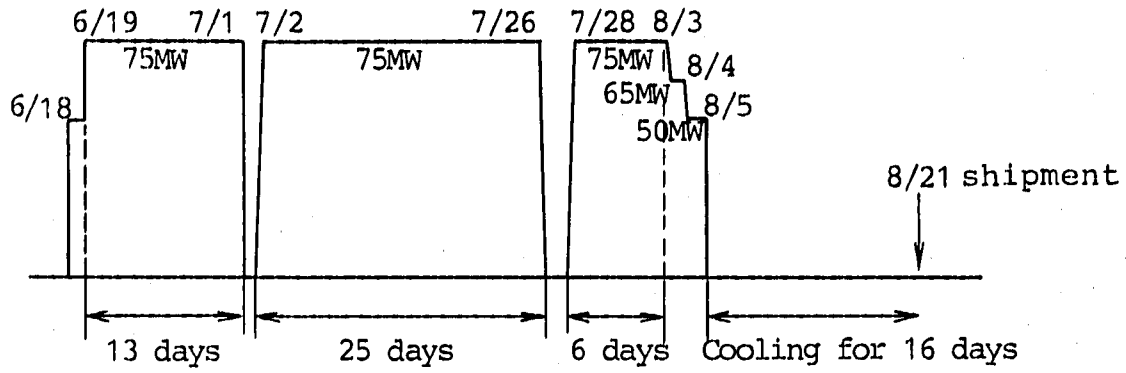


Fig. 3 Configuration of Surveillance Back-up Test Rig (II-06)

(a) Actual operational history



(b) Modified operational history used for calculation

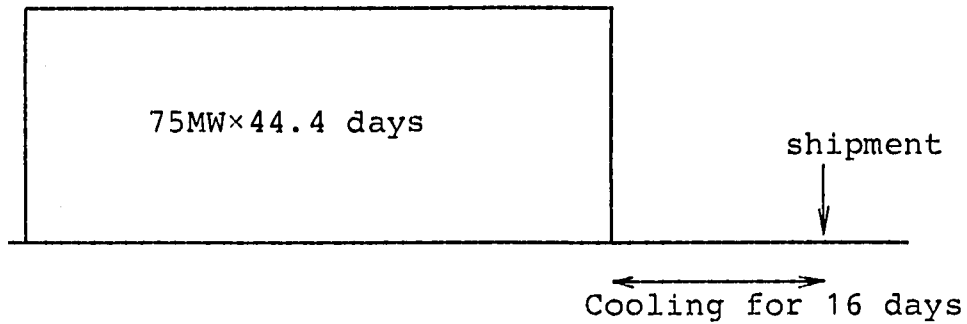


Fig. 4 Operational History of the JOYO in Cycle 5

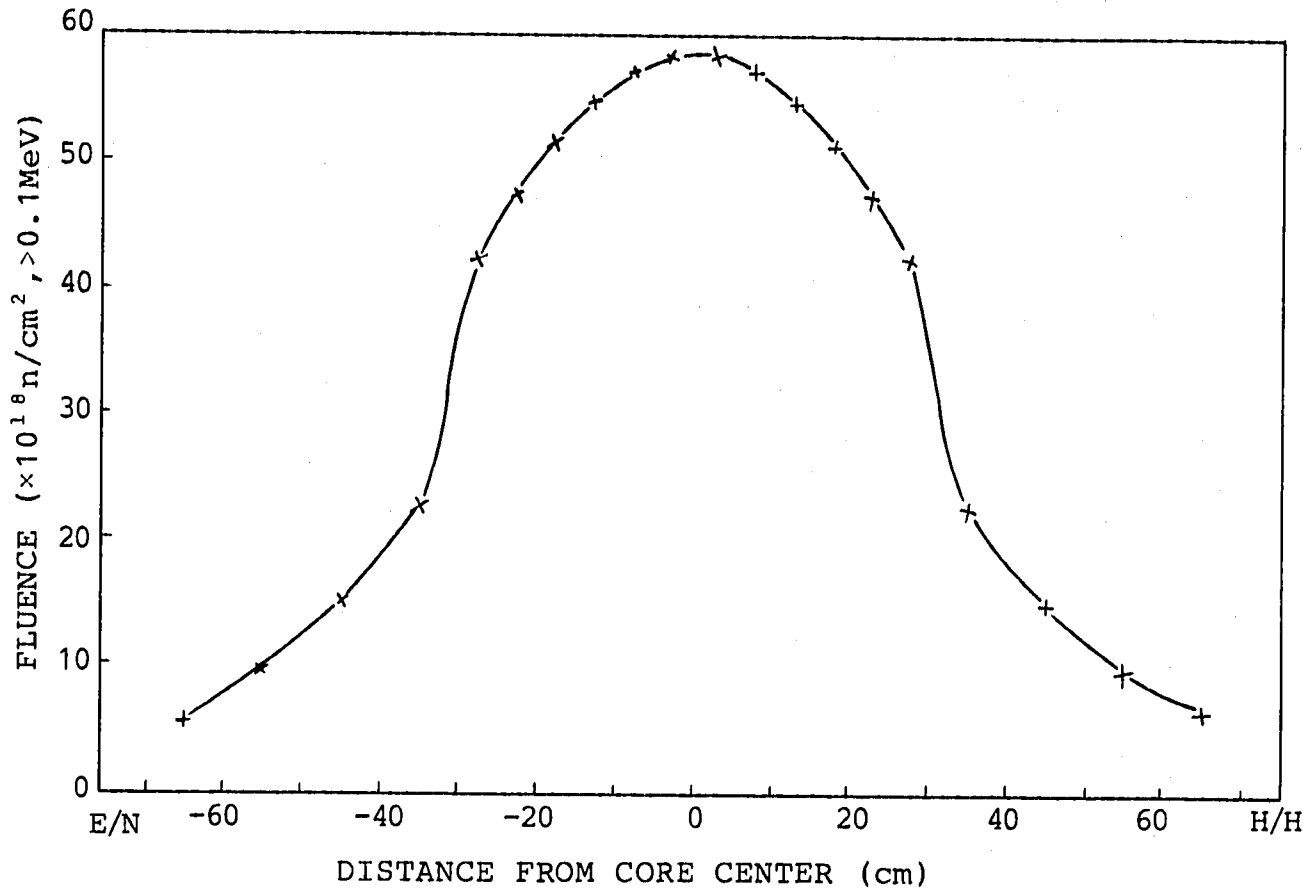


Fig. 5 Fast Neutron Fluence Distribution in Rig (II-06)

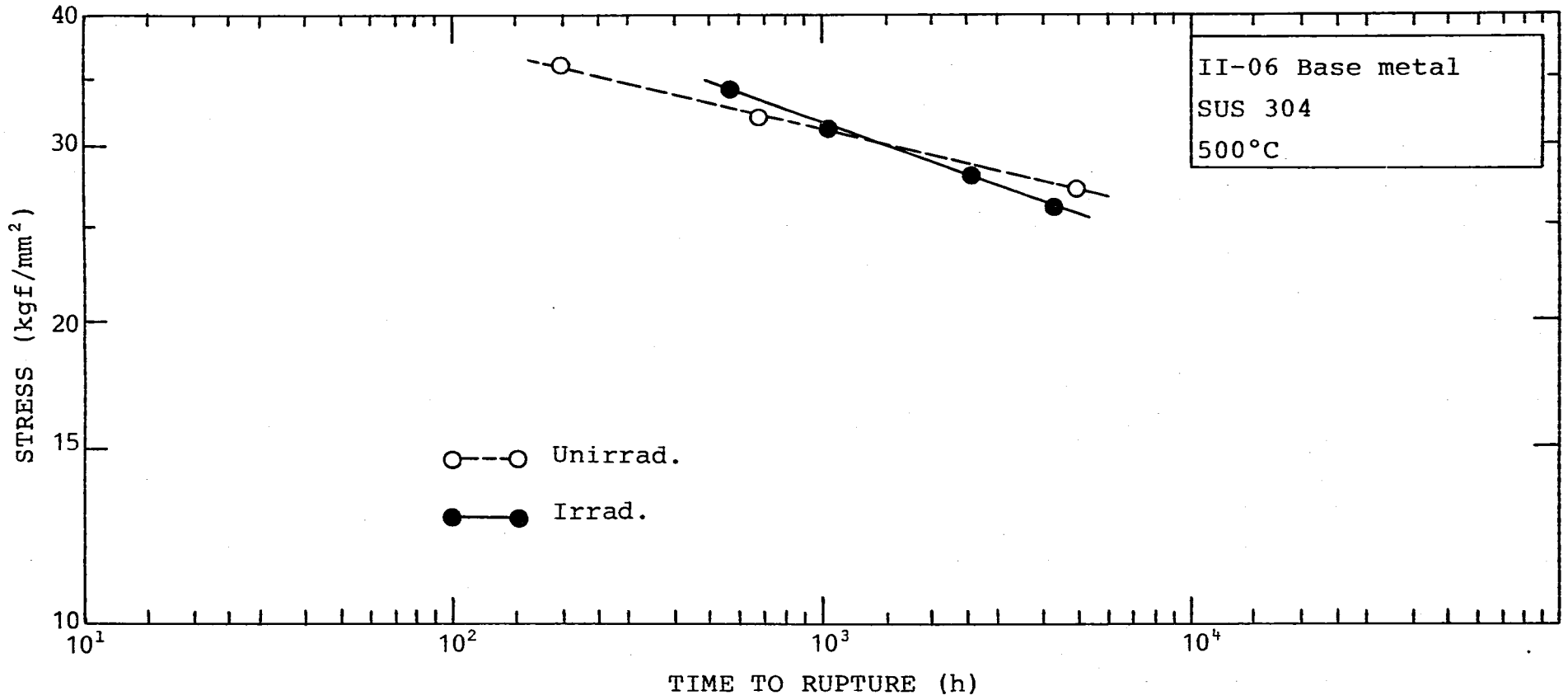


Fig. 6 Creep-Rupture Strength for Base Metal

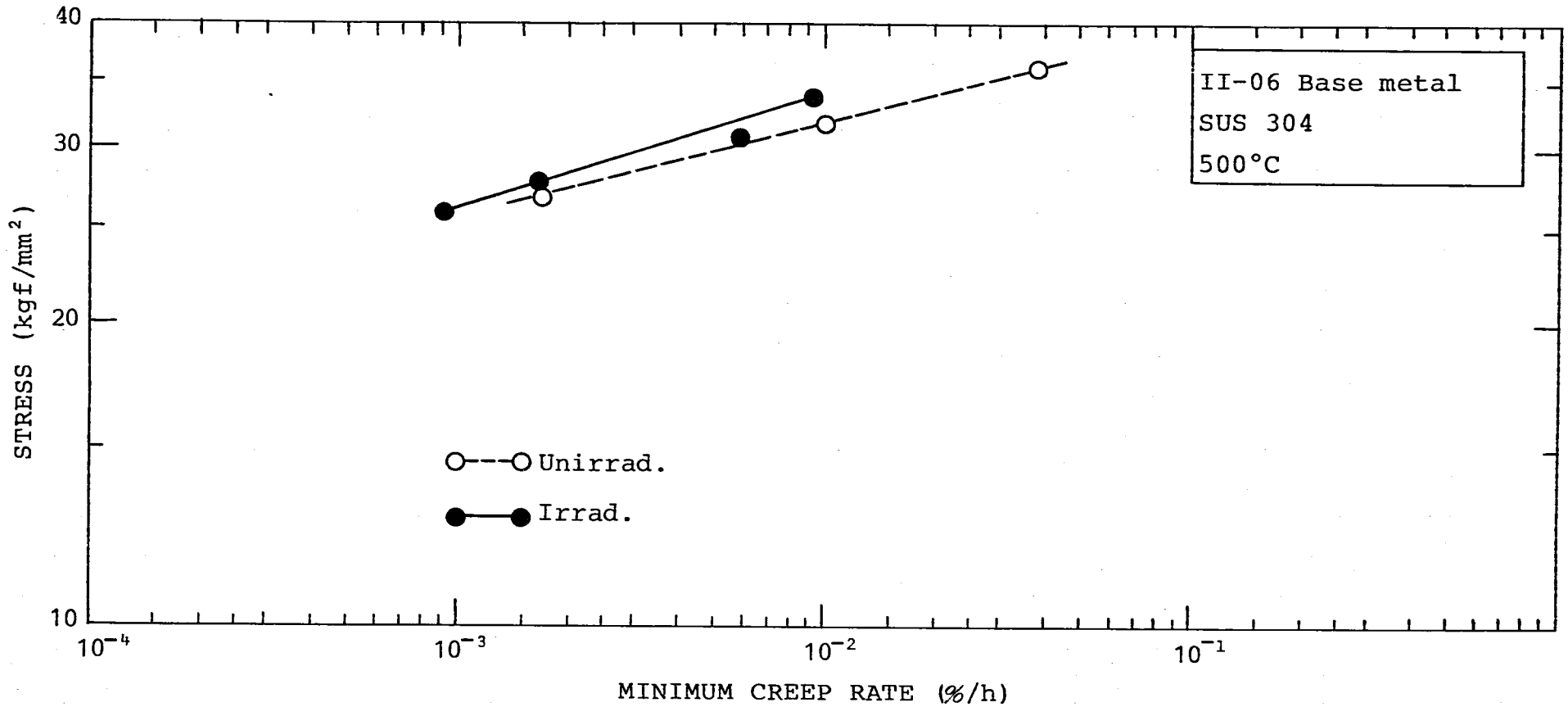


Fig. 7 Minimum Creep Rate for Base Metal



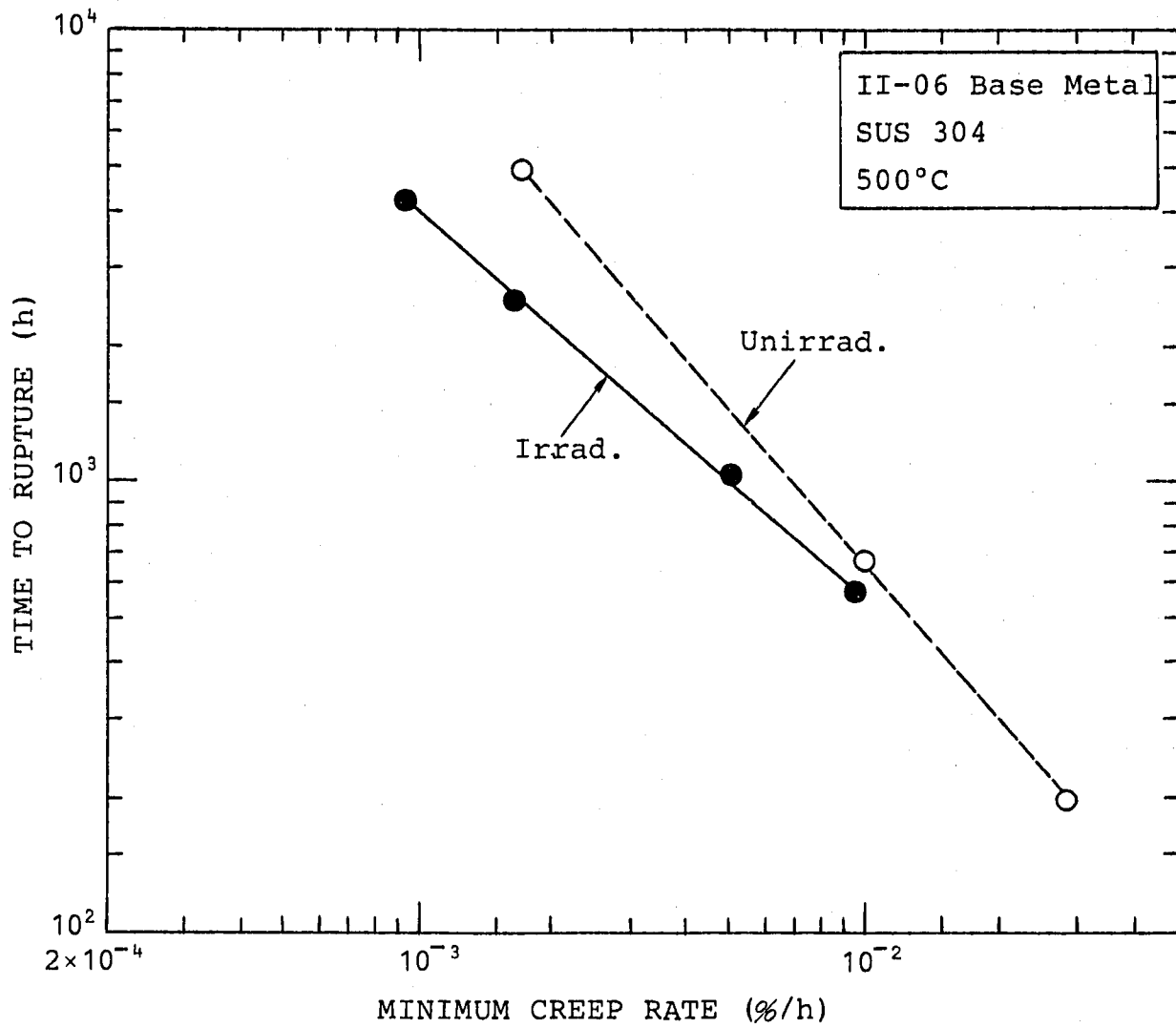


Fig. 8 Relationship between Minimum Creep Rate and Time to Rupture of Irradiated and Unirradiated SUS304 Base Metal

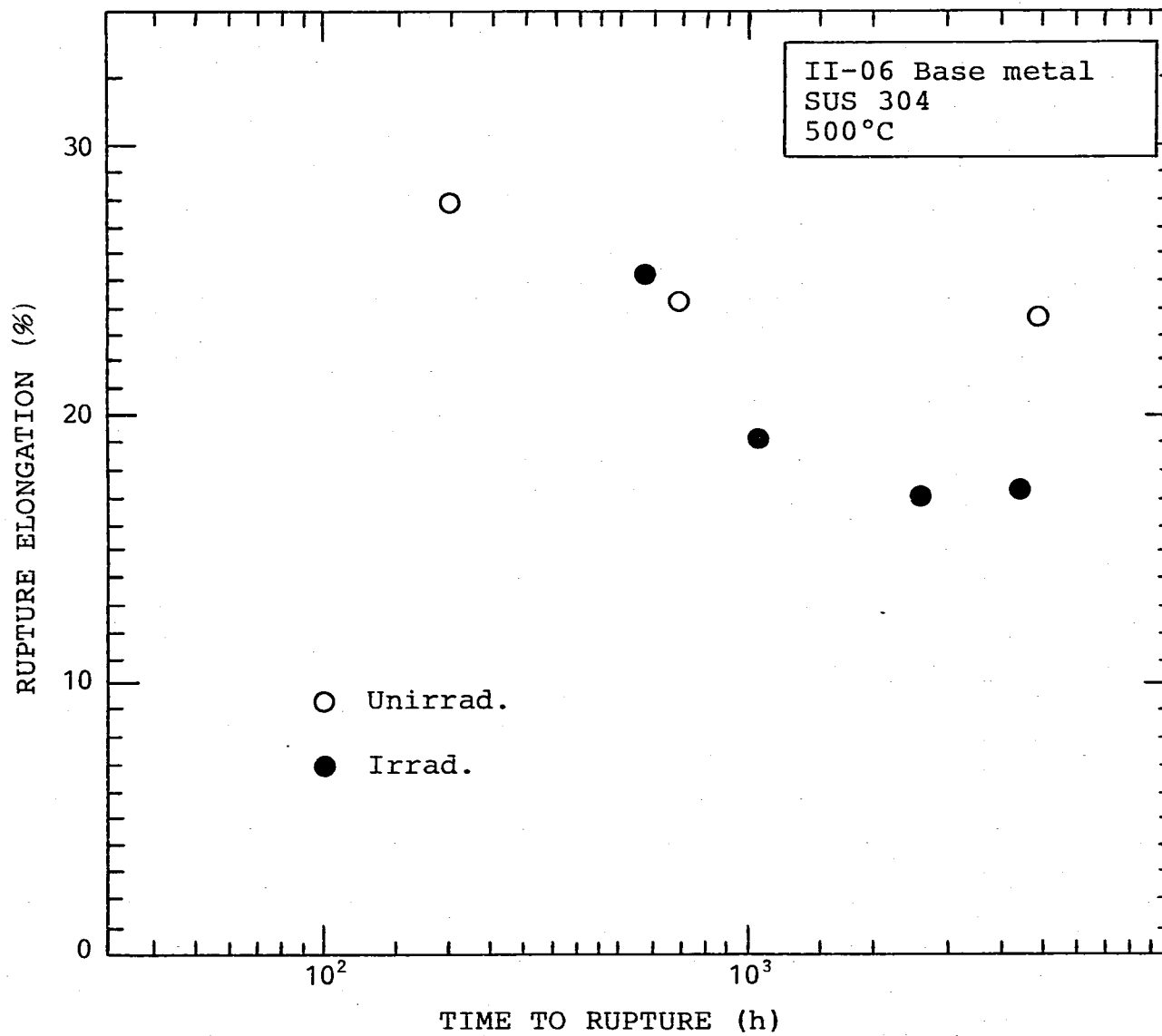


Fig. 9 Creep-Rupture Elongation for Base Metal

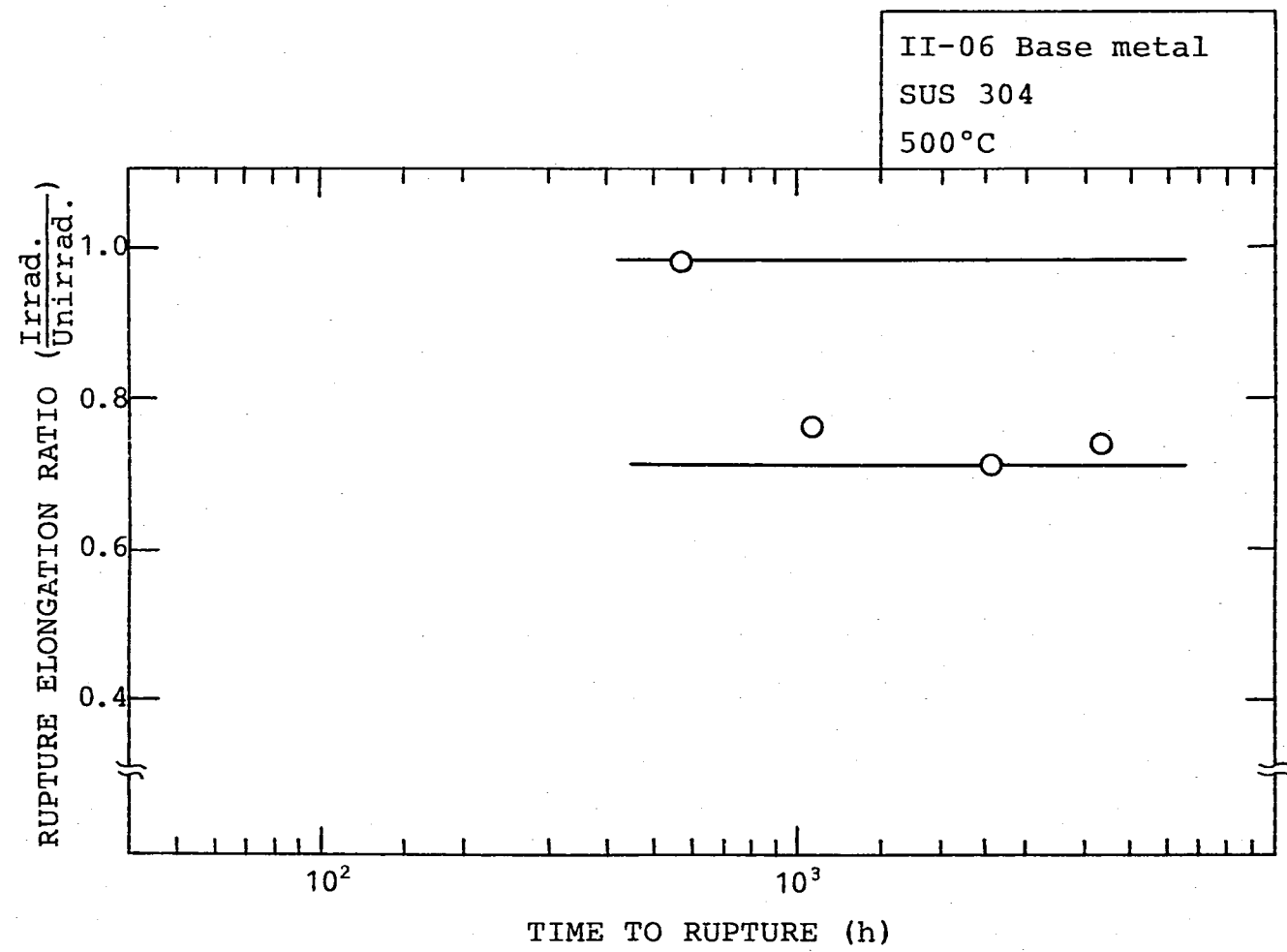


Fig. 10 Relationship between Time to Rupture and Rupture Elongation Ratio of Irradiated to Unirradiated SUS304 Base Metal

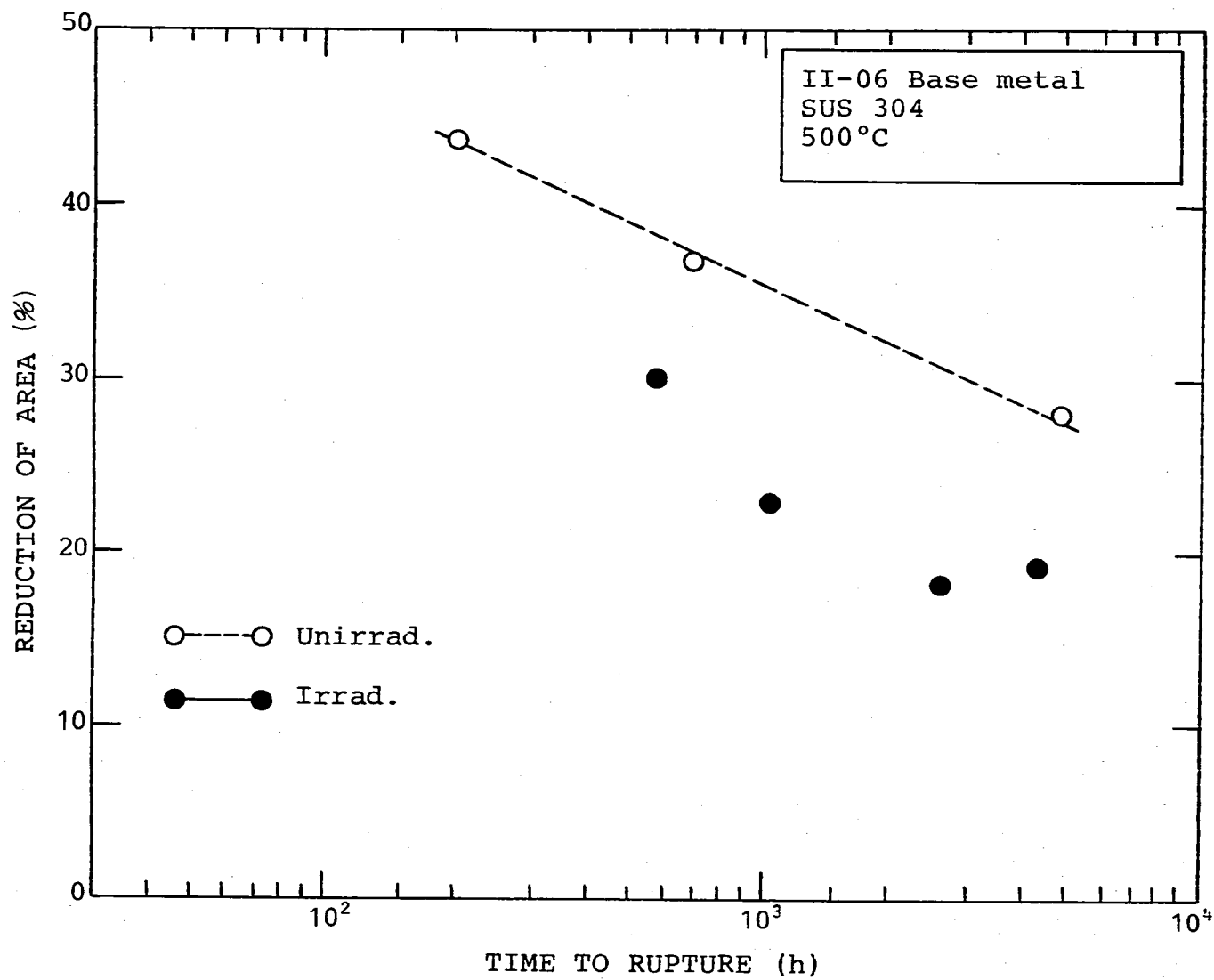


Fig. 11 Reduction of Area for Base Metal

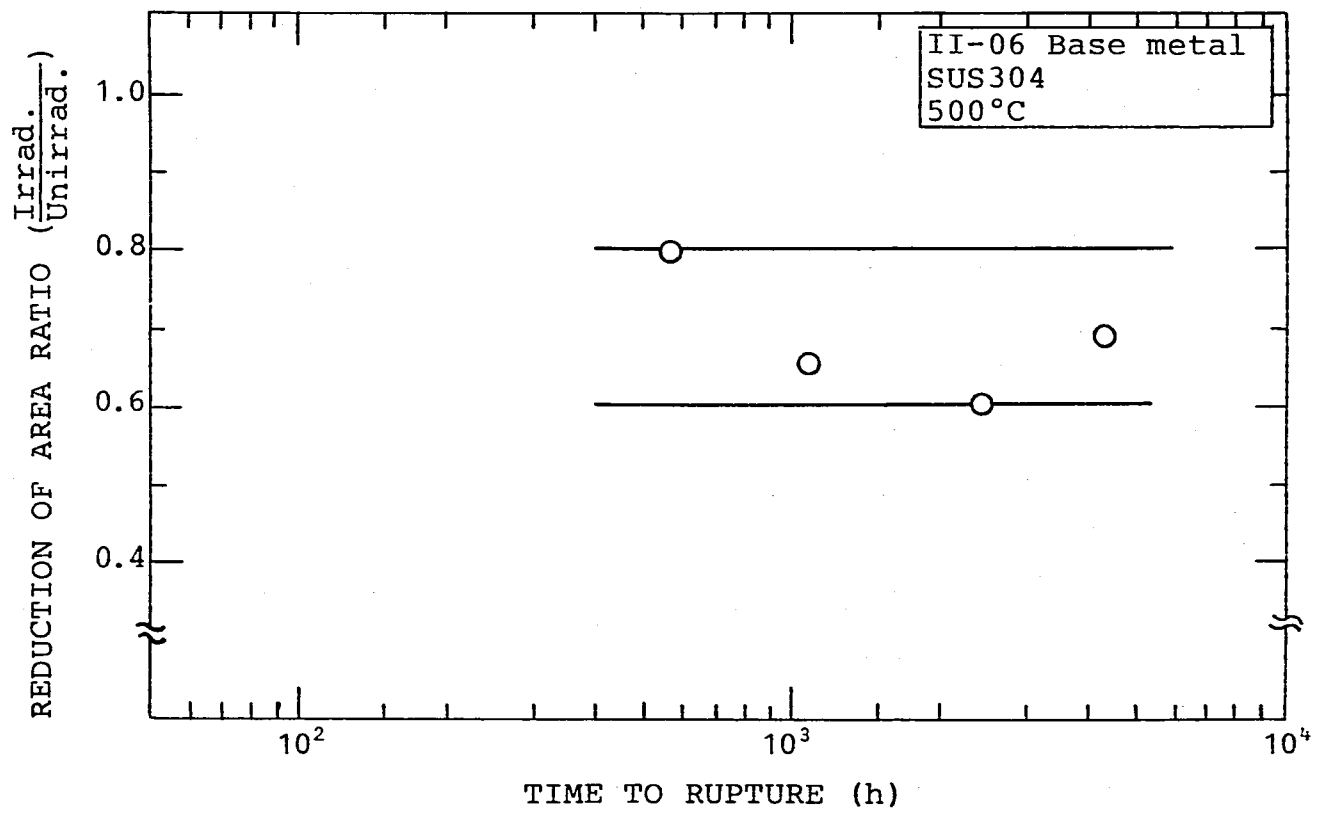


Fig. 12 Relationship between Time to Rupture and Reduction of Area Ratio of Irradiated to Unirradiated SUS304 Base Metal

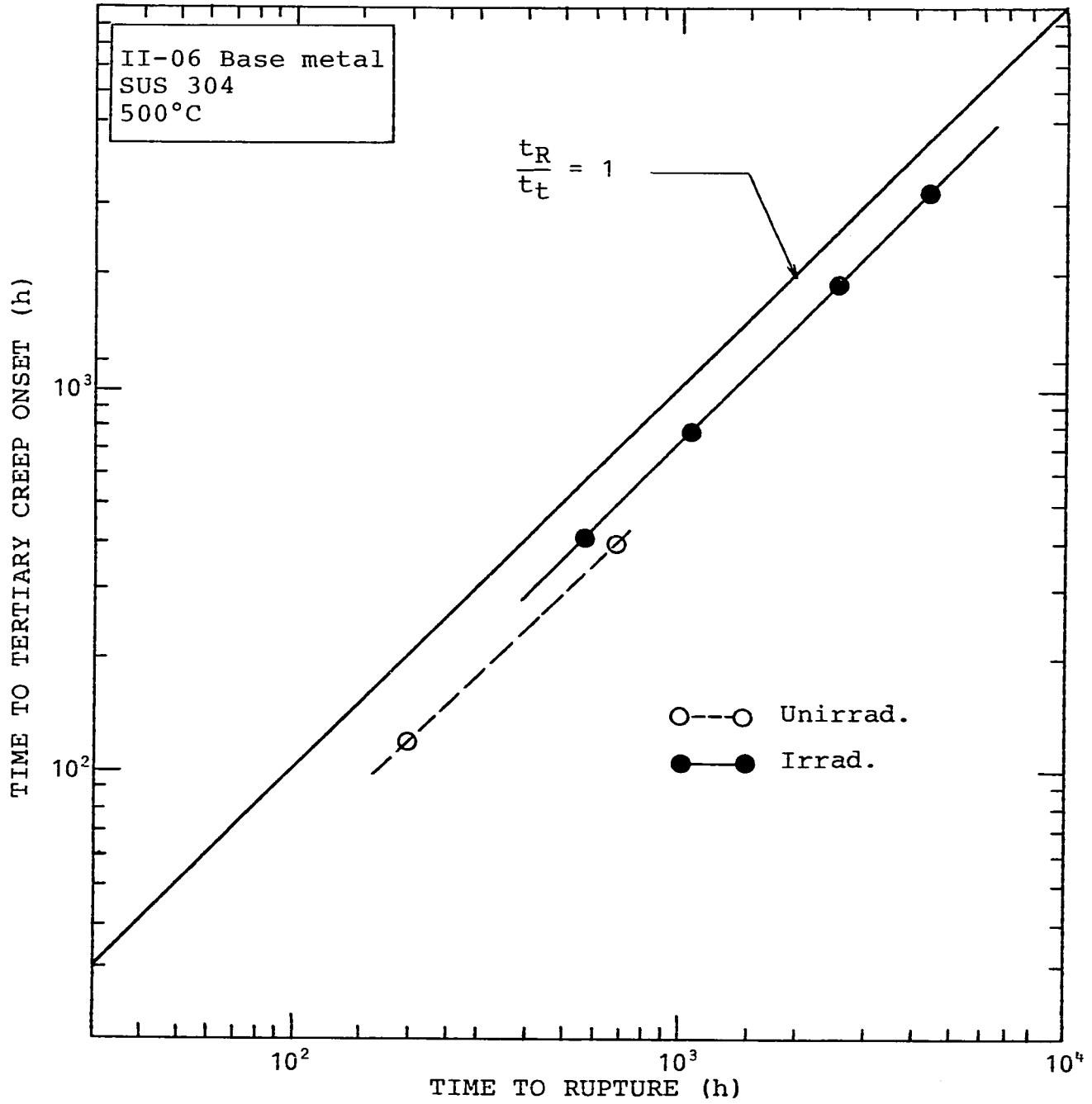


Fig. 13 Relationship between Time to Tertiary Creep Onset and Time to Rupture

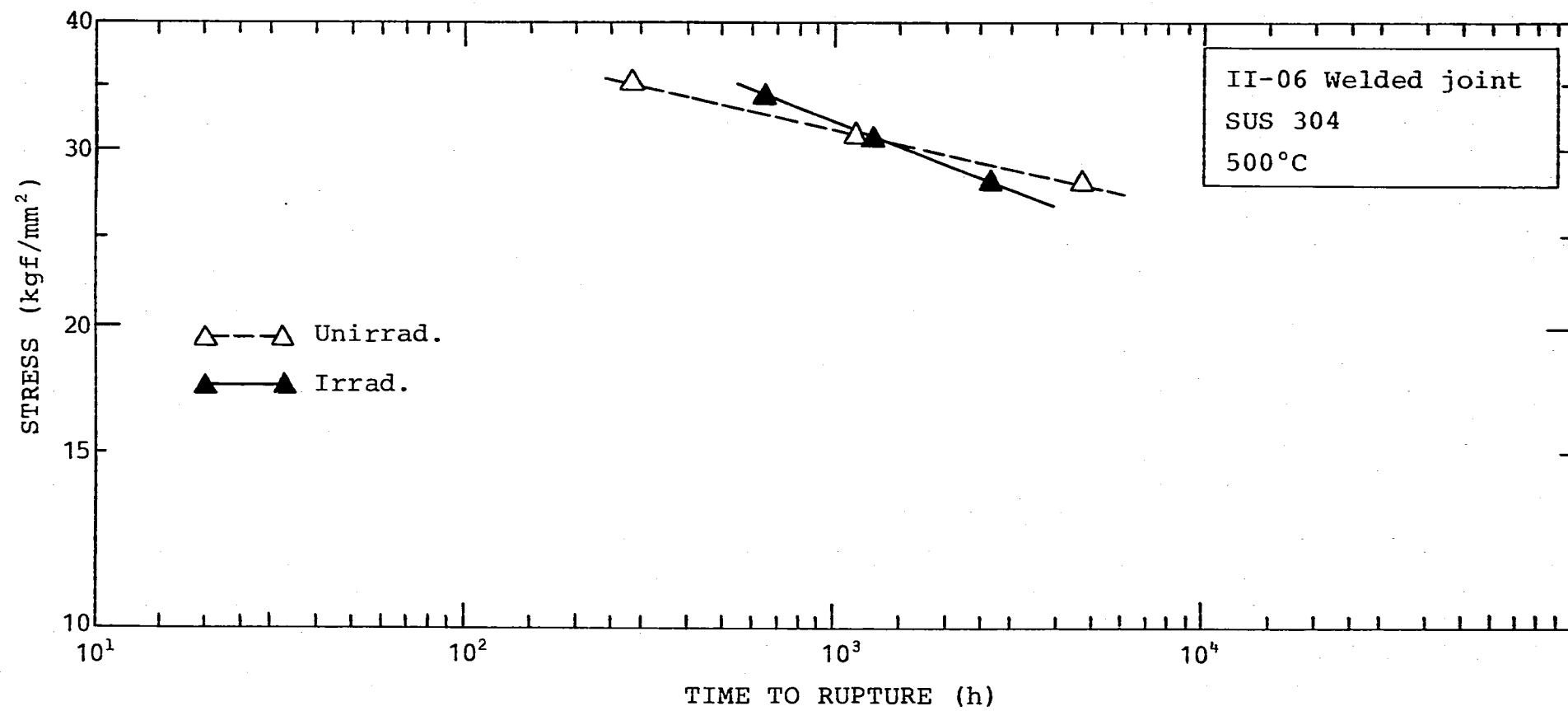


Fig. 14 Creep Rupture Strength for Welded Joint

- 30 -

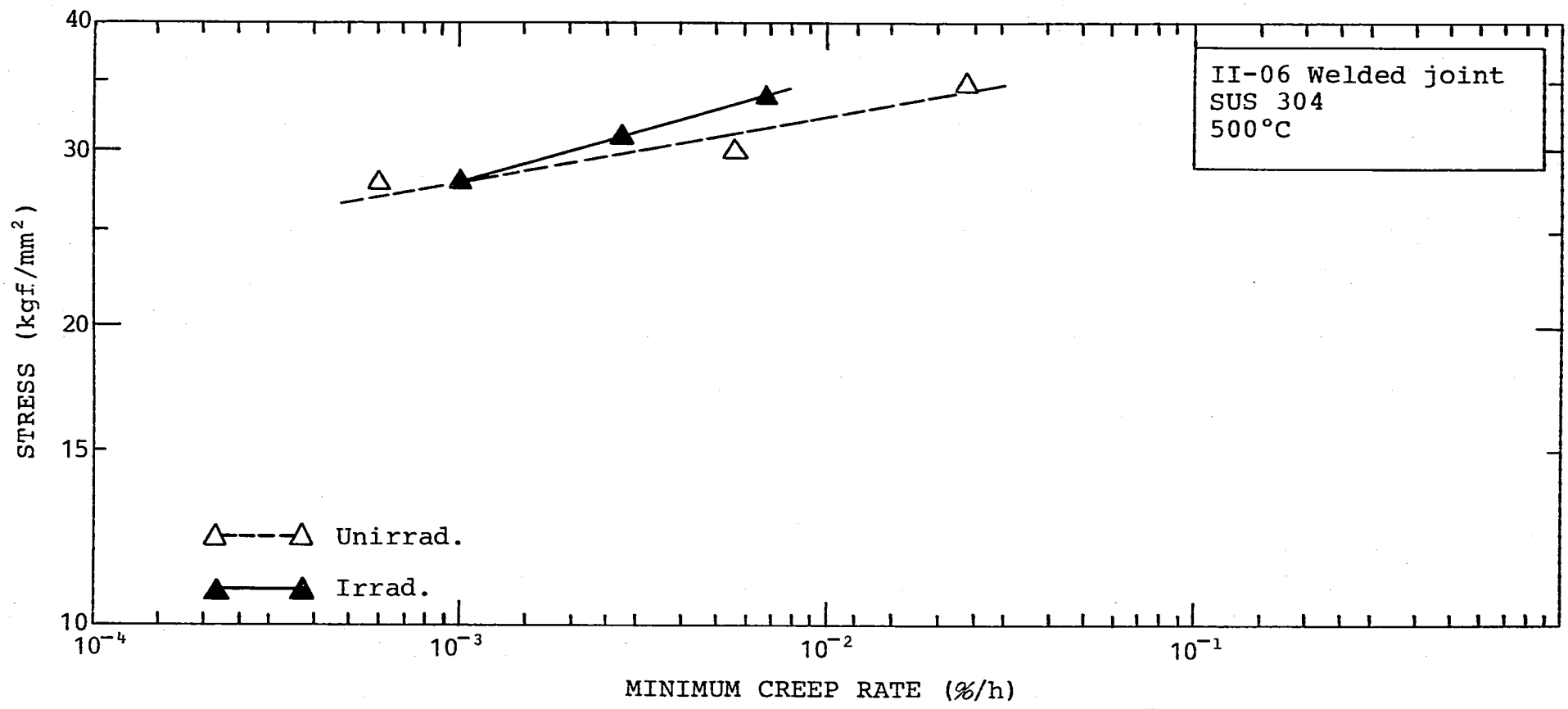


Fig. 15 Minimum Creep Rate for Welded Joint



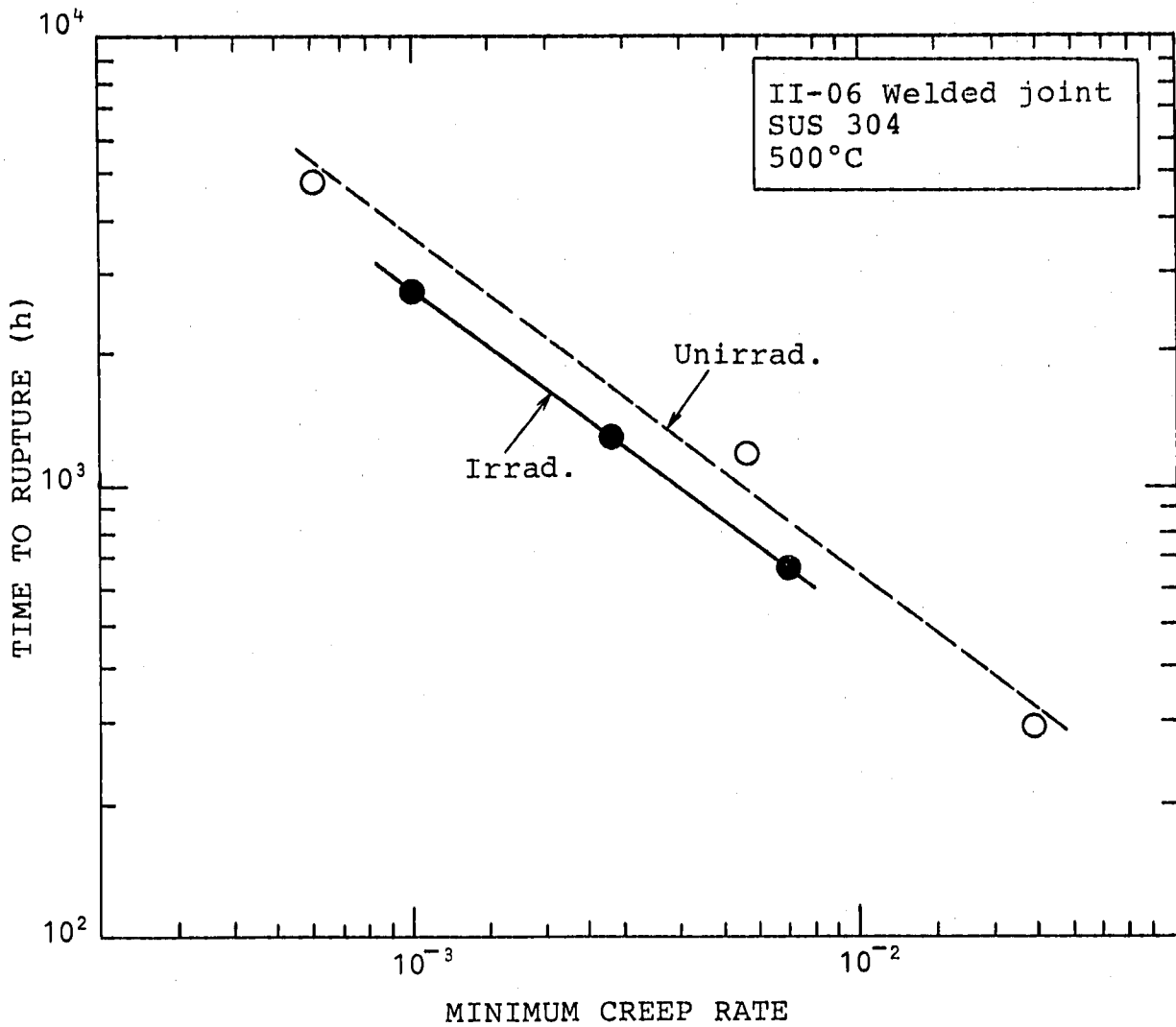


Fig. 16 Relationship between Minimum Creep Rate and Time to Rupture of Irradiated and Unirradiated SUS304 Welded Joints

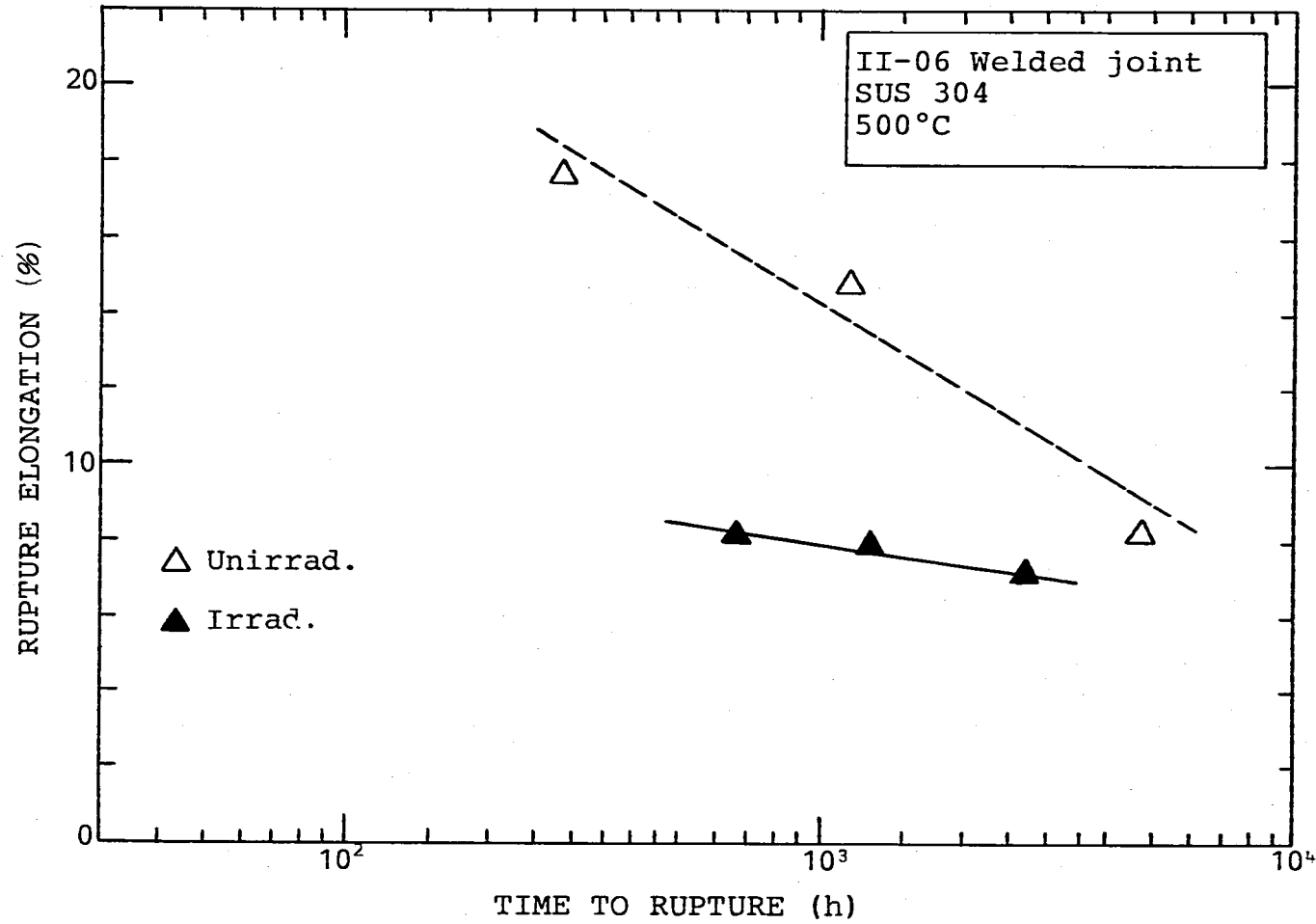


Fig. 17 Rupture Elongation for Welded Joint

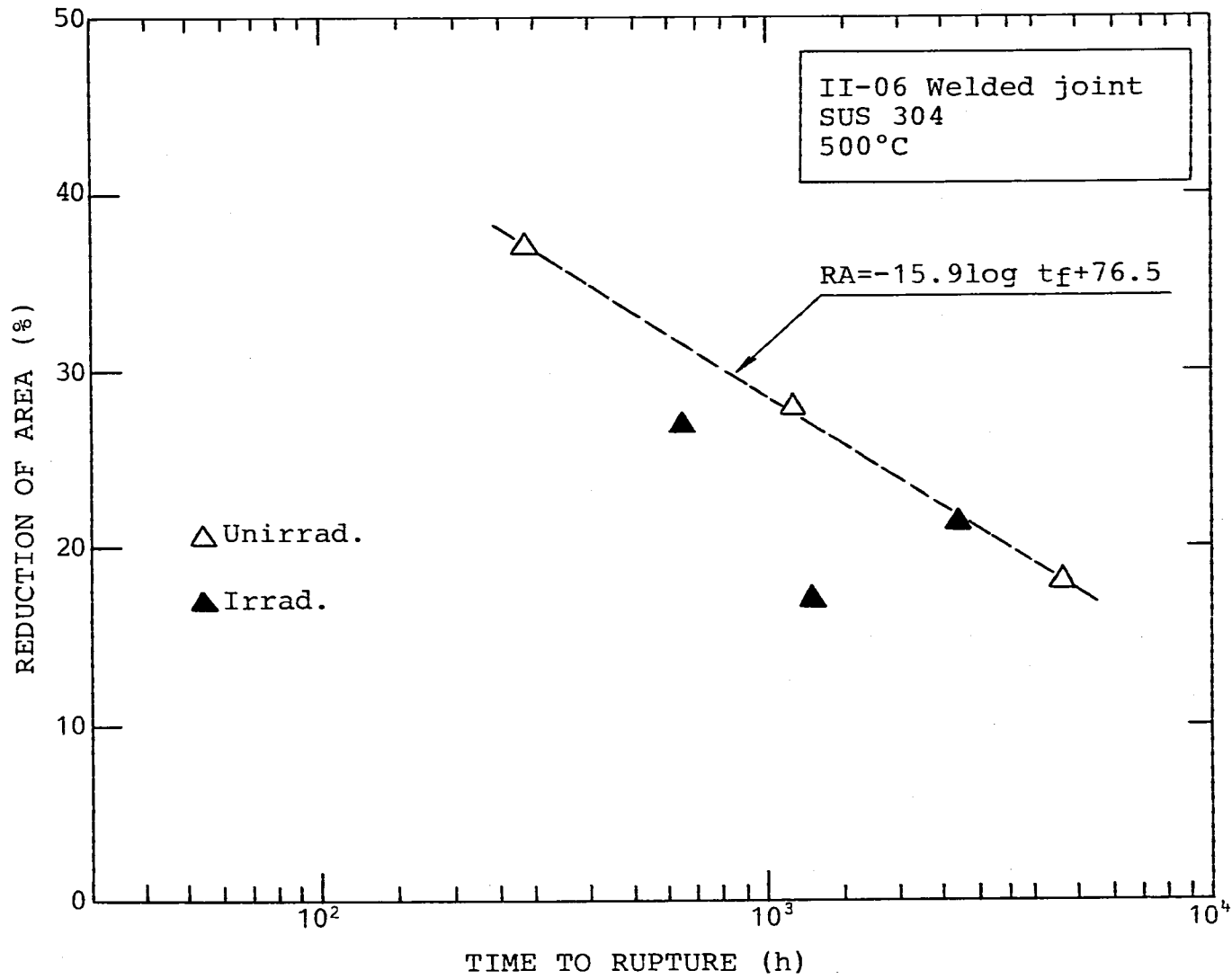


Fig. 18 Reduction of Area for Welded Joint

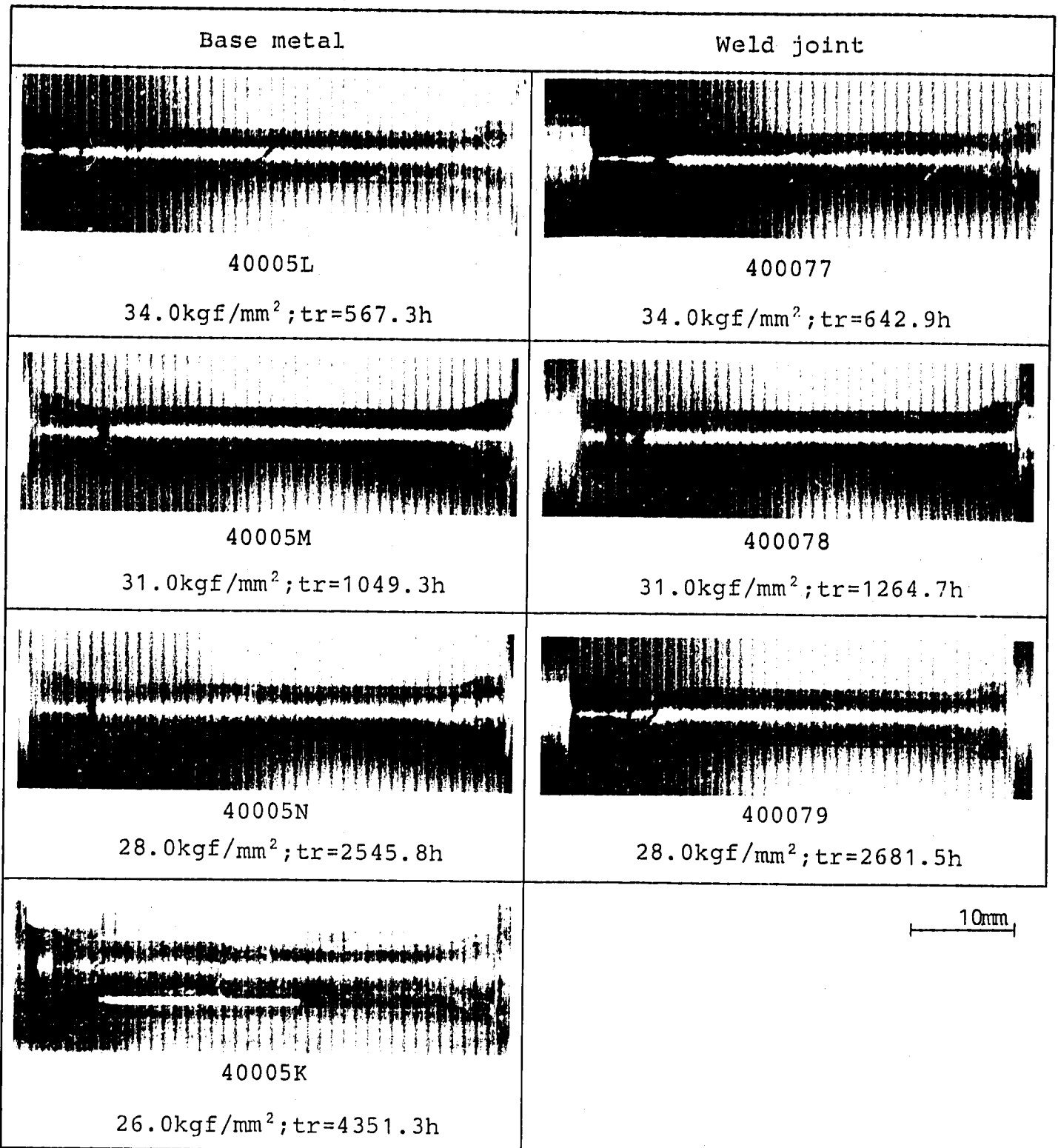


Fig. 19 Appearance of Creep-Ruptured Specimens at 500°C after Irradiation in the JOYO

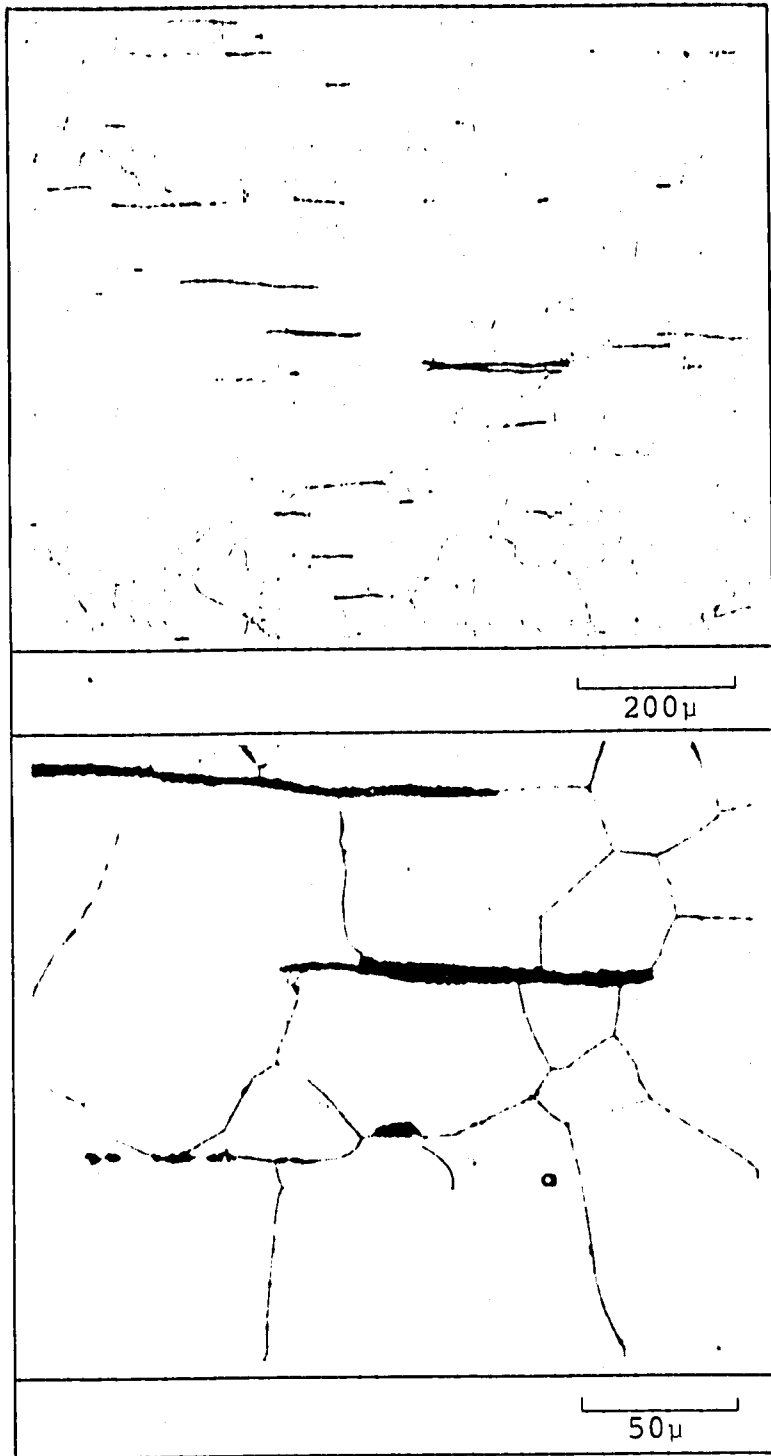


Fig. 20 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Irradiated Base Metal (40005N3)

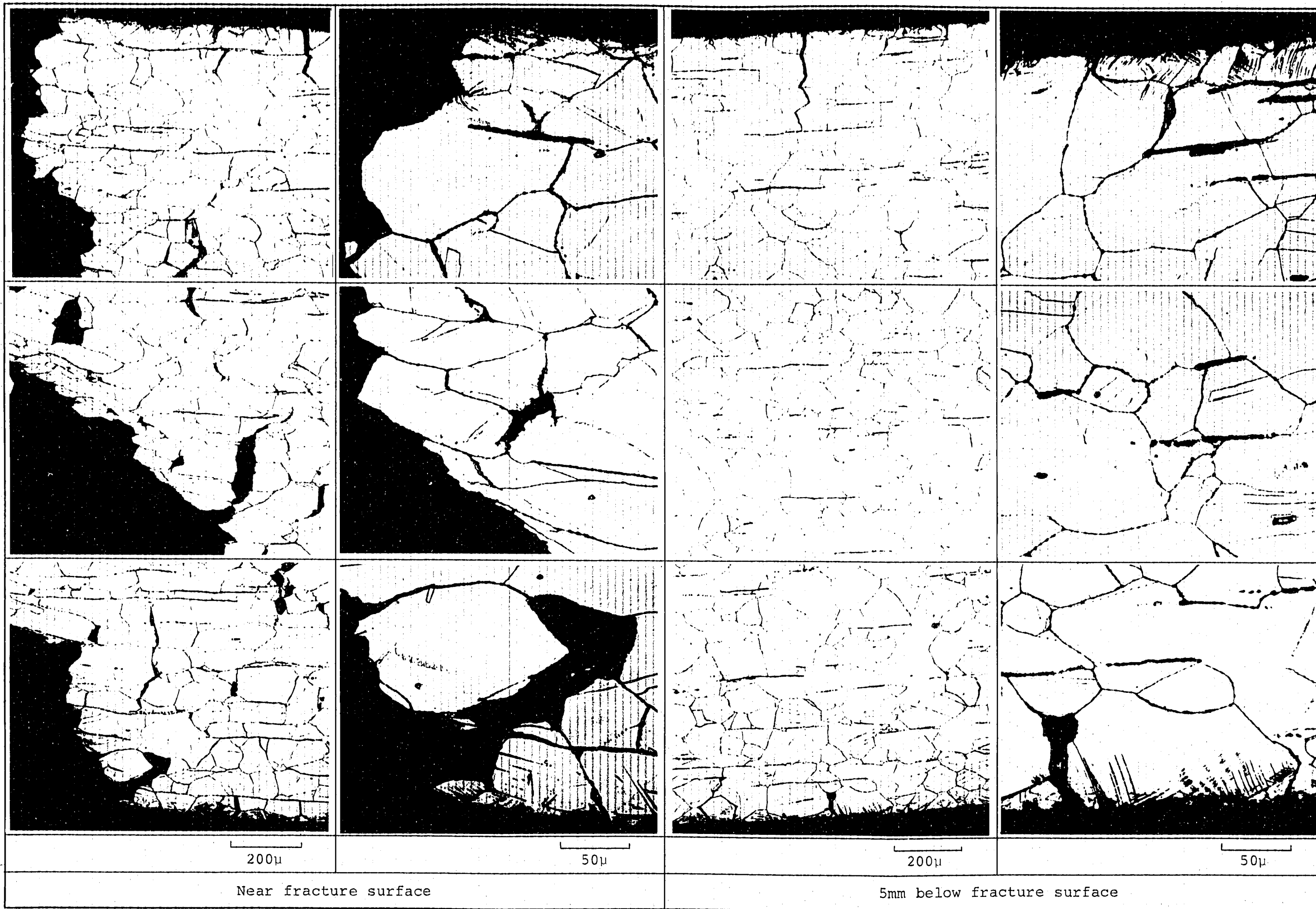


Fig. 21 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep-ruptured Base Metal after Irradiation at 500°C and 28.0 kgf/mm<sup>2</sup> (40005N) II-06

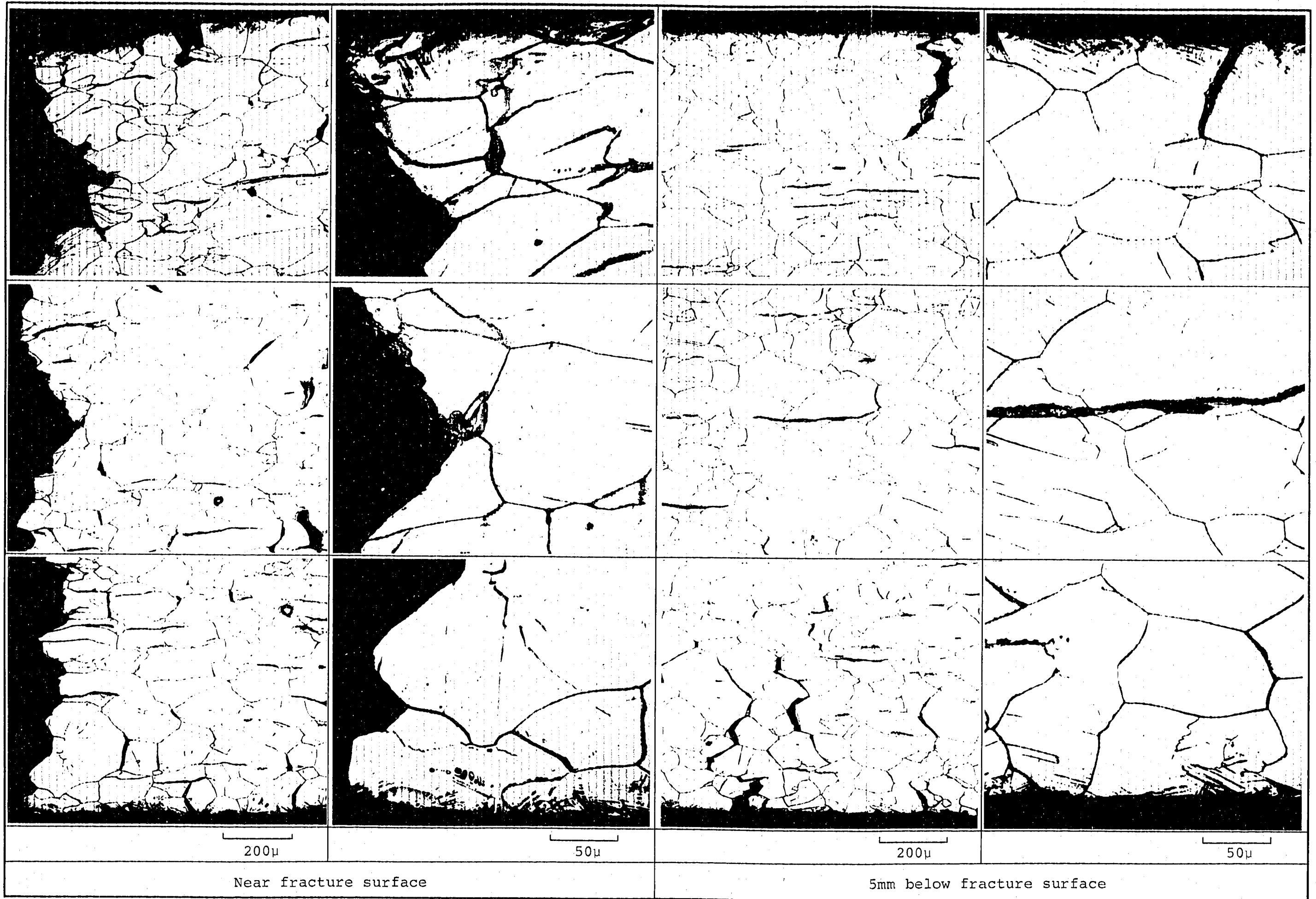


Fig. 22 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep-ruptured Base Metal after Irradiation at 500°C and 34 kgf/mm<sup>2</sup> (40005L) II-06

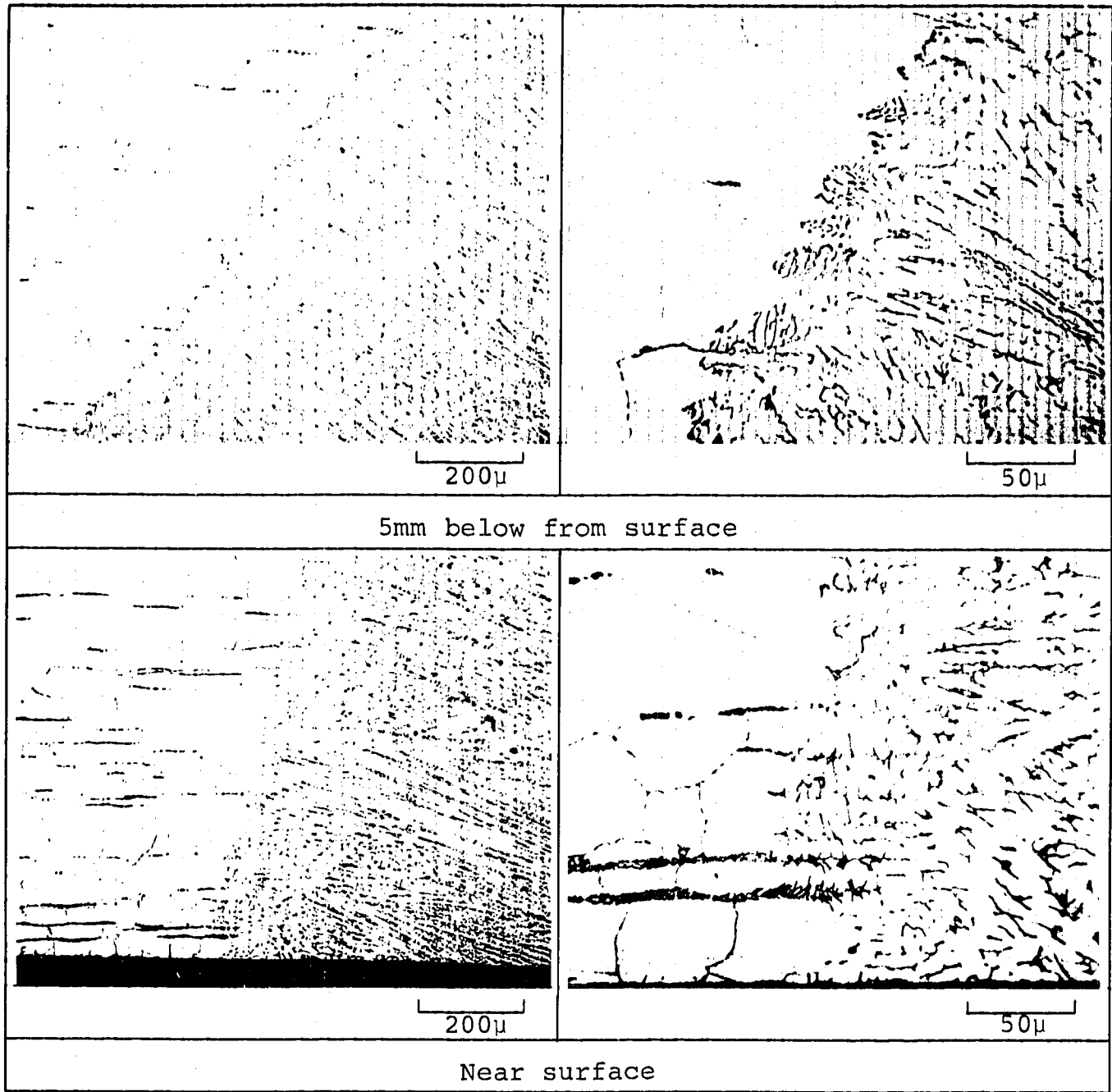


Fig. 23 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Irradiated Welded Joint (400079A)



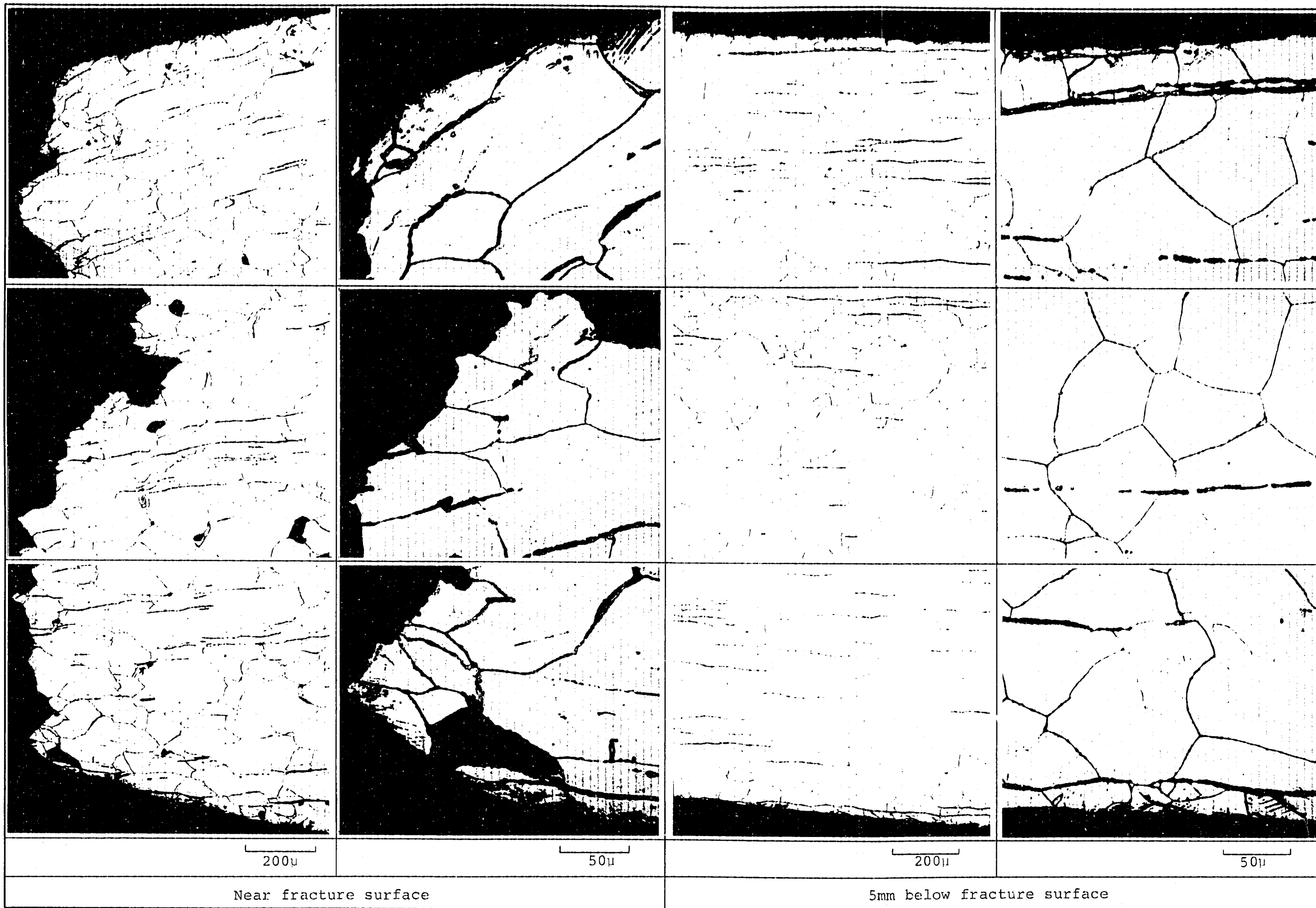


Fig. 24 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep-Ruptured Welded Joint after Irradiation at 500°C and 34 kgf/mm<sup>2</sup> (400077) II-06

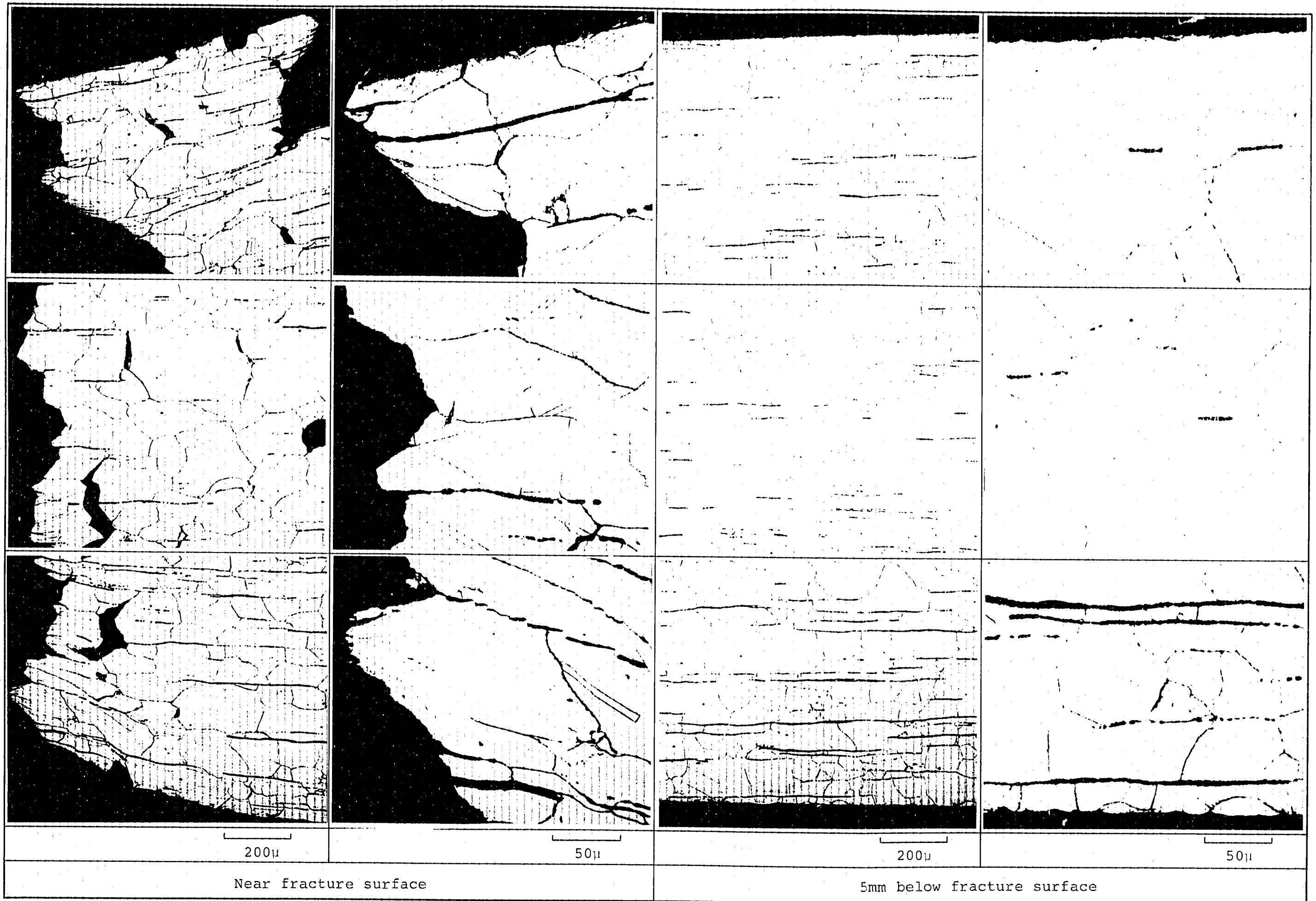


Fig. 25 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Creep-Ruptured Welded Joint after Irradiation at 500°C and 28 kgf/mm<sup>2</sup> (400079) II-06

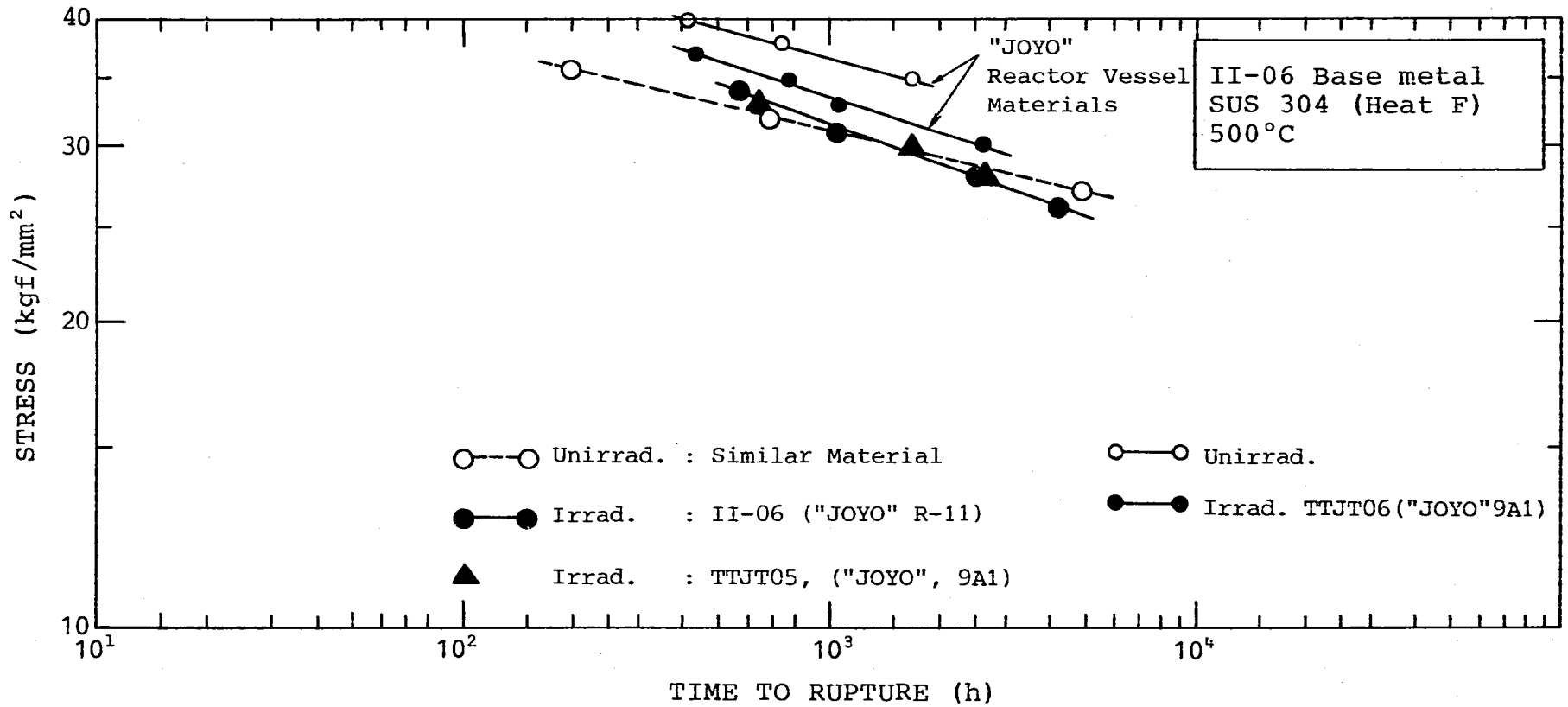


Fig. 26 Rupture Strength for Base Metal

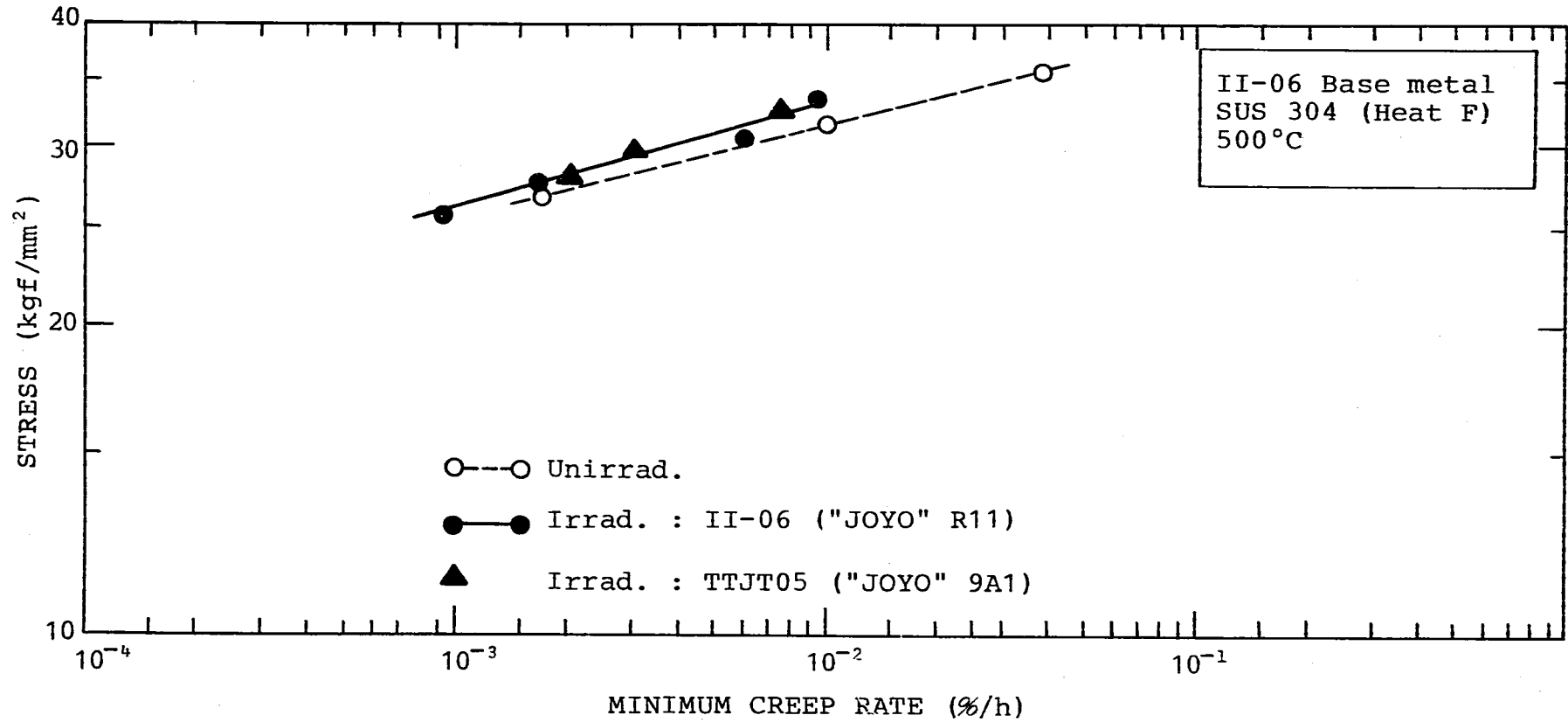


Fig. 27 Minimum Creep Rate for Base Metal

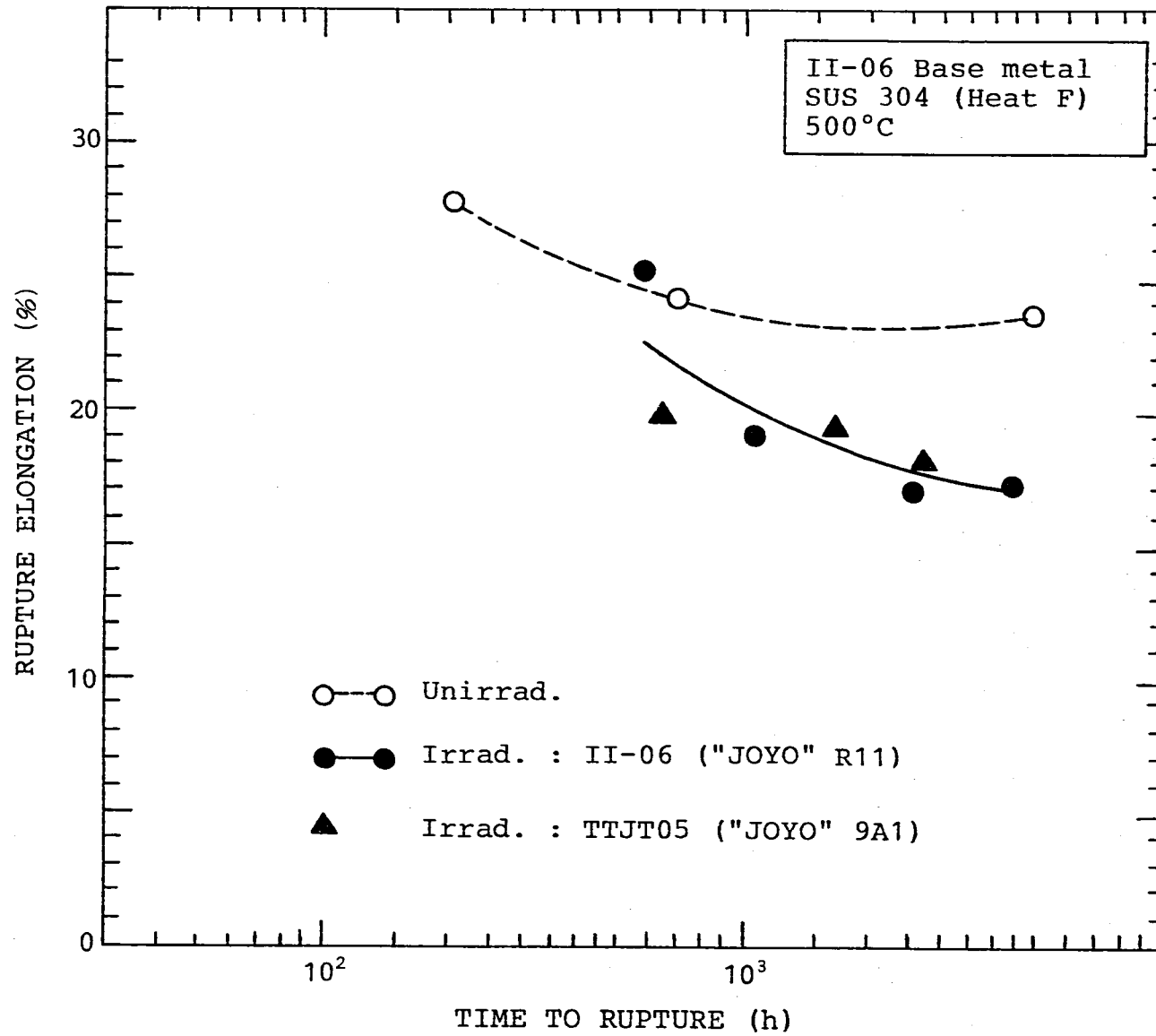


Fig. 28 Rupture Elongation for Base Metal

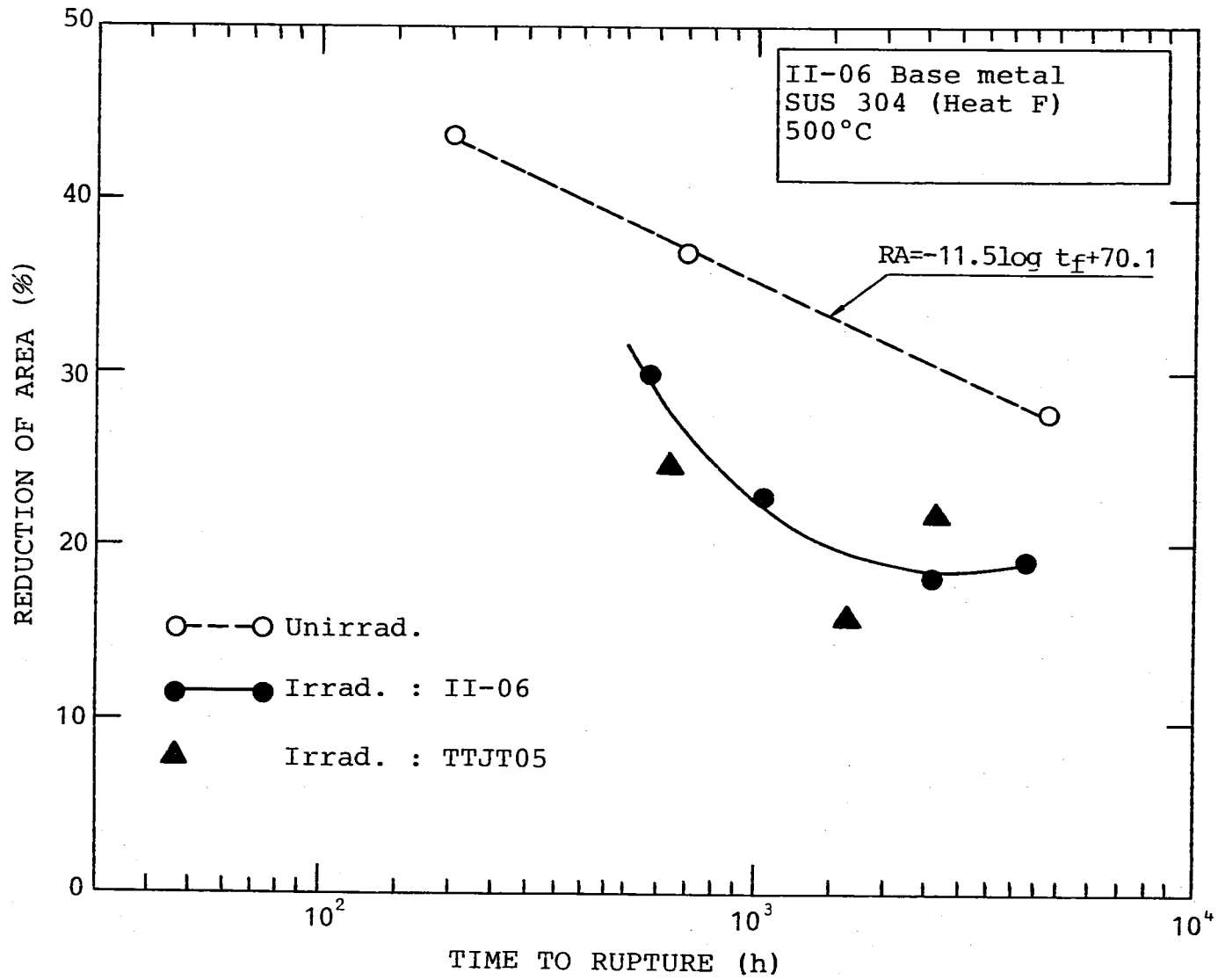


Fig. 29 Reduction of Area for Base Metal

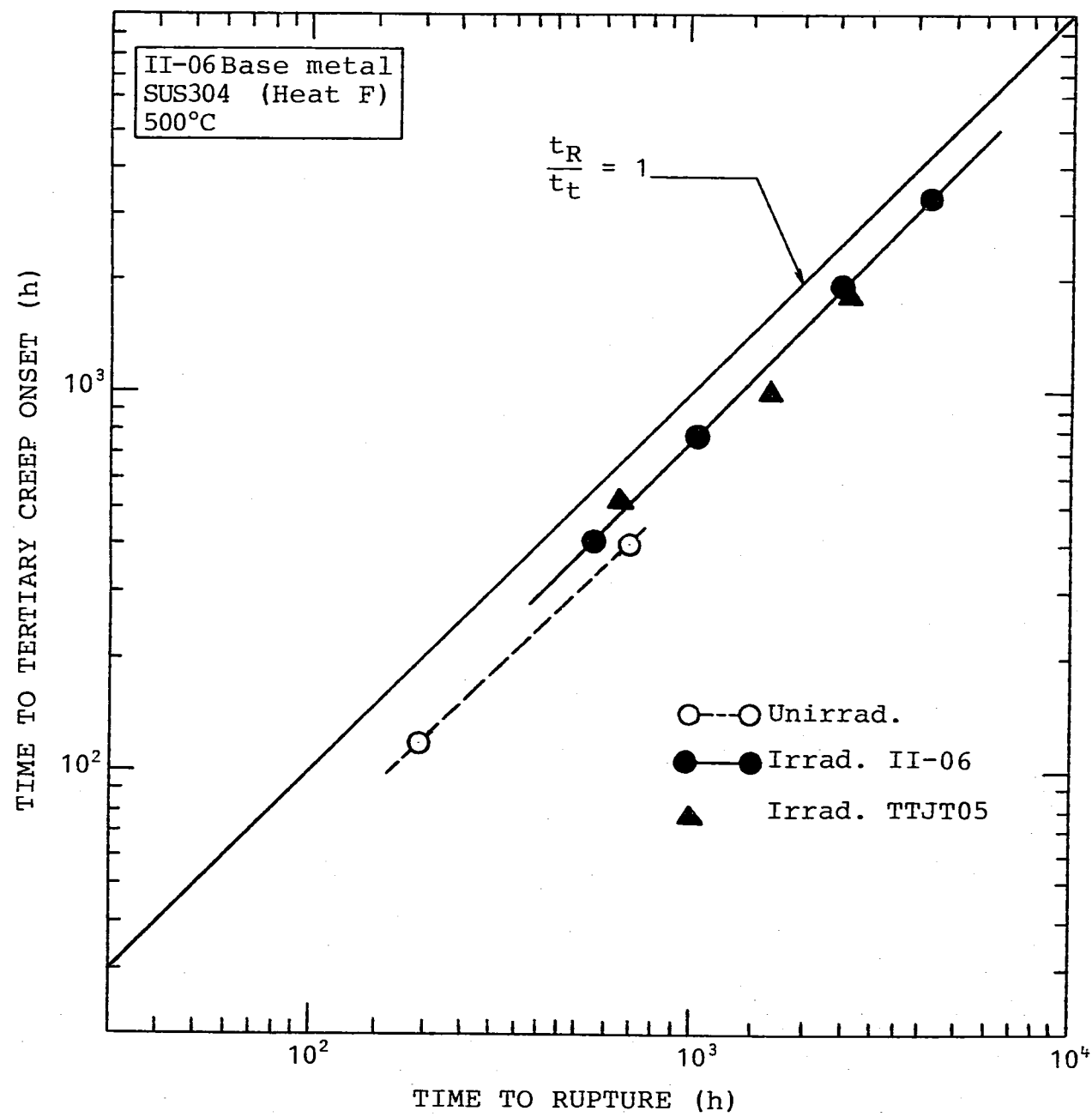


Fig. 30 Time to Tertiary Creep Onset vs Time to Rupture for Base Metal.

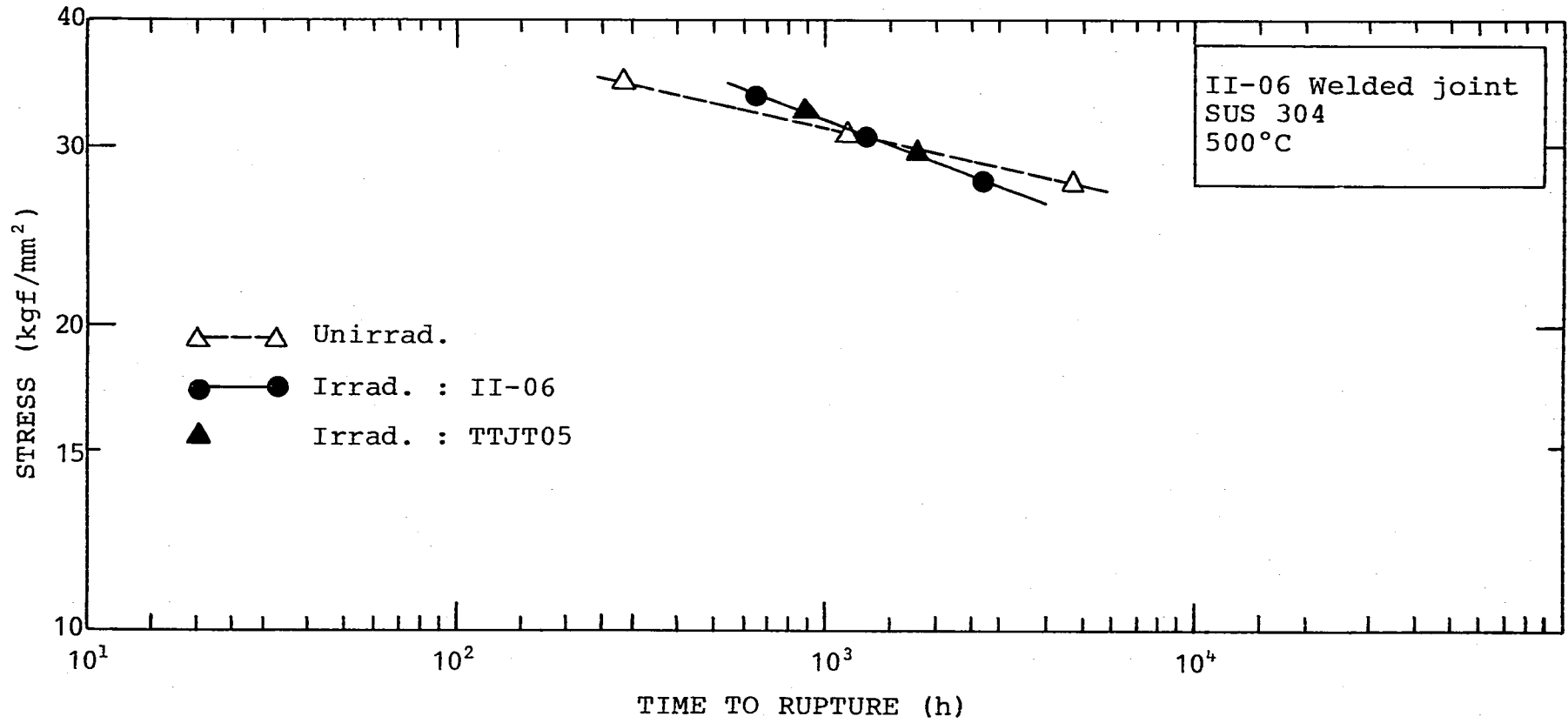


Fig. 31 Rupture Strength for Welded Joints



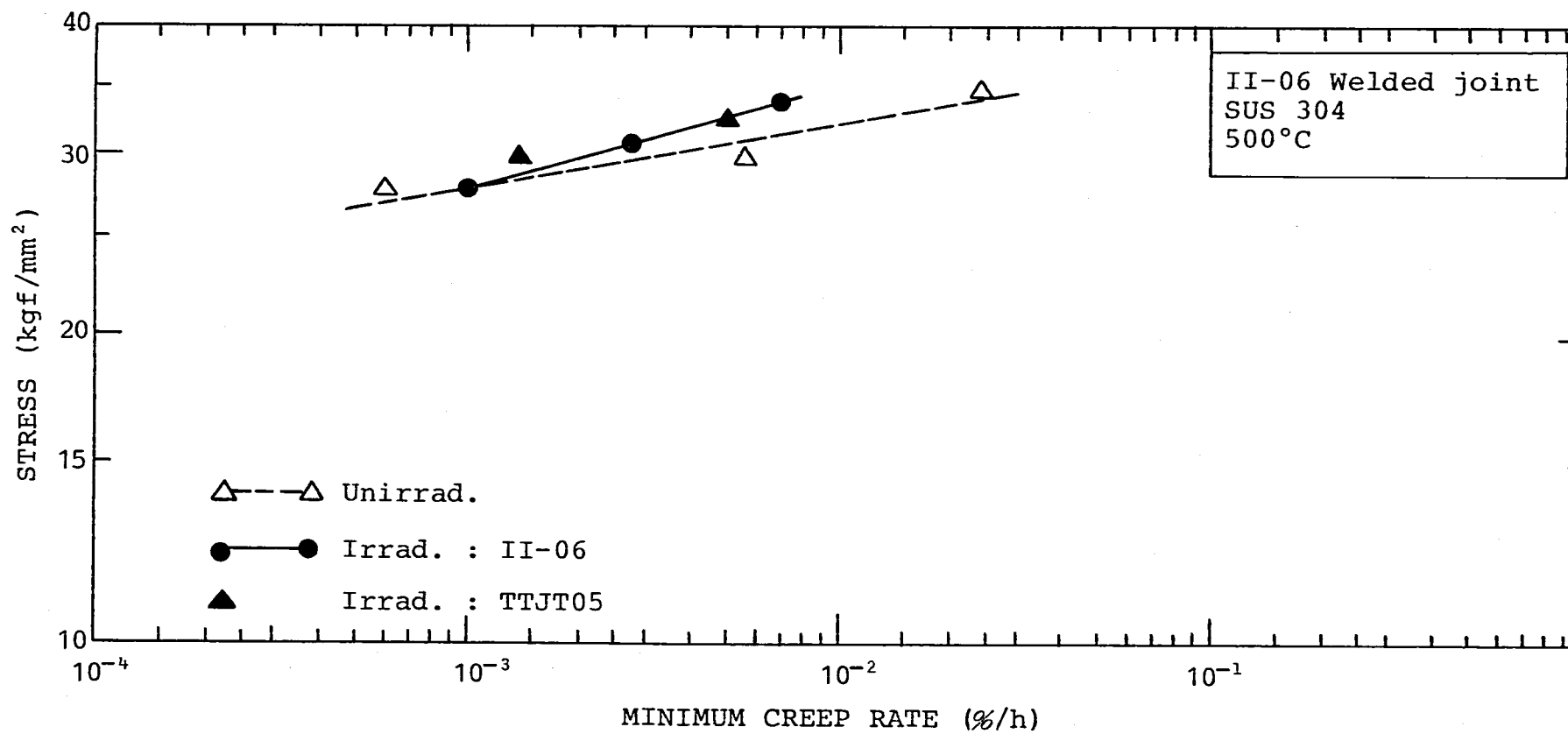


Fig. 32 Minimum Creep Rate for Welded Joints

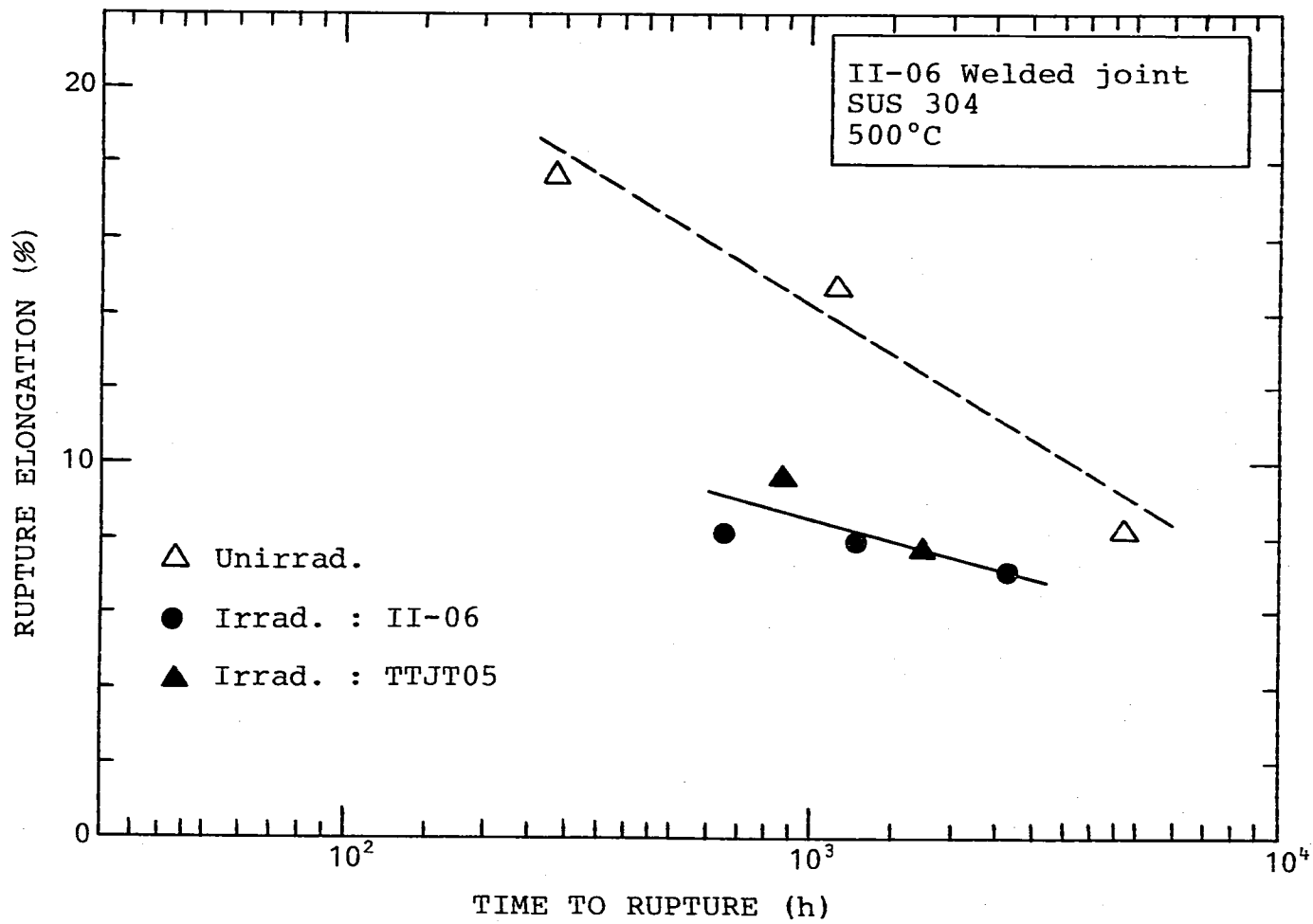


Fig. 33 Rupture Elongation for Welded Joint

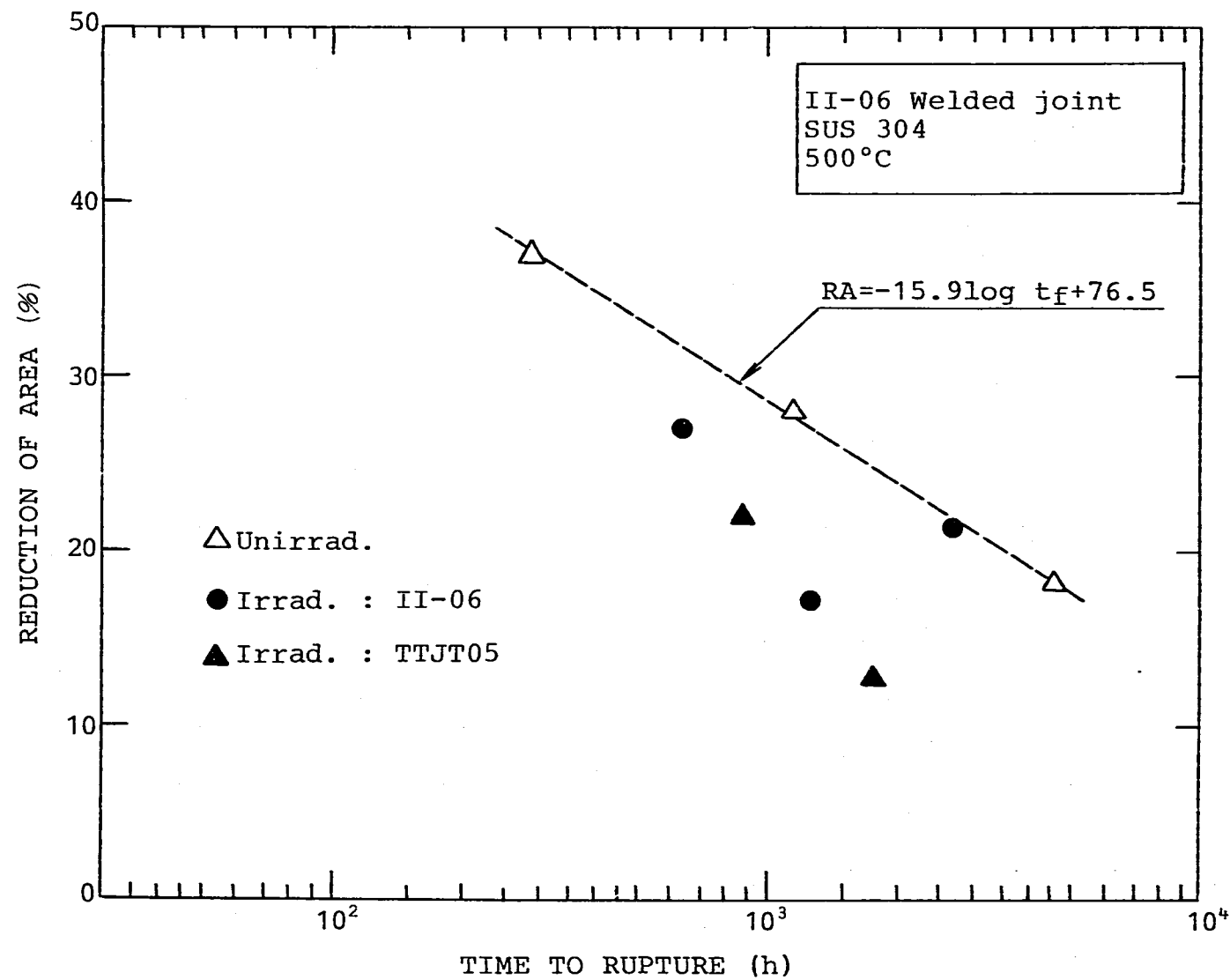


Fig. 34 Reduction of Area for Welded Joint

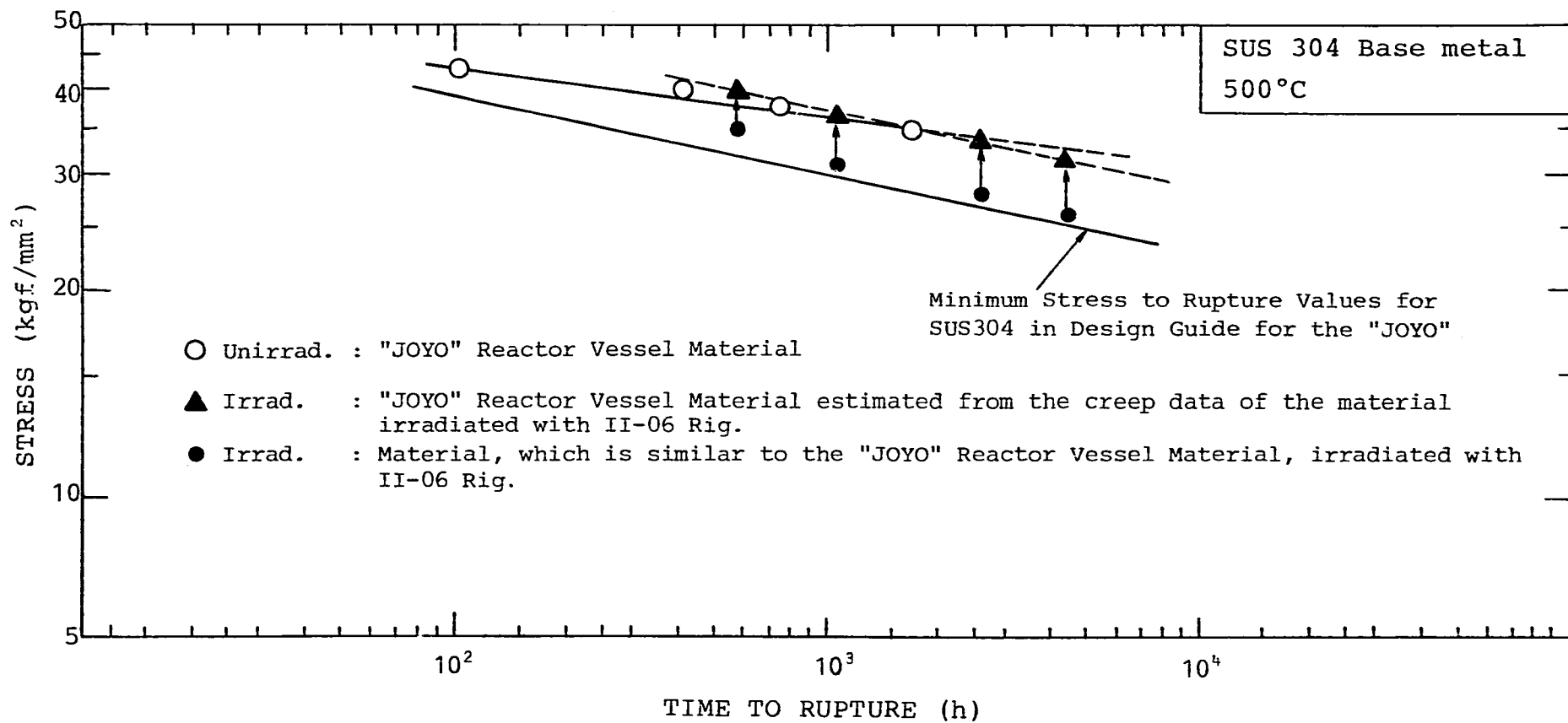
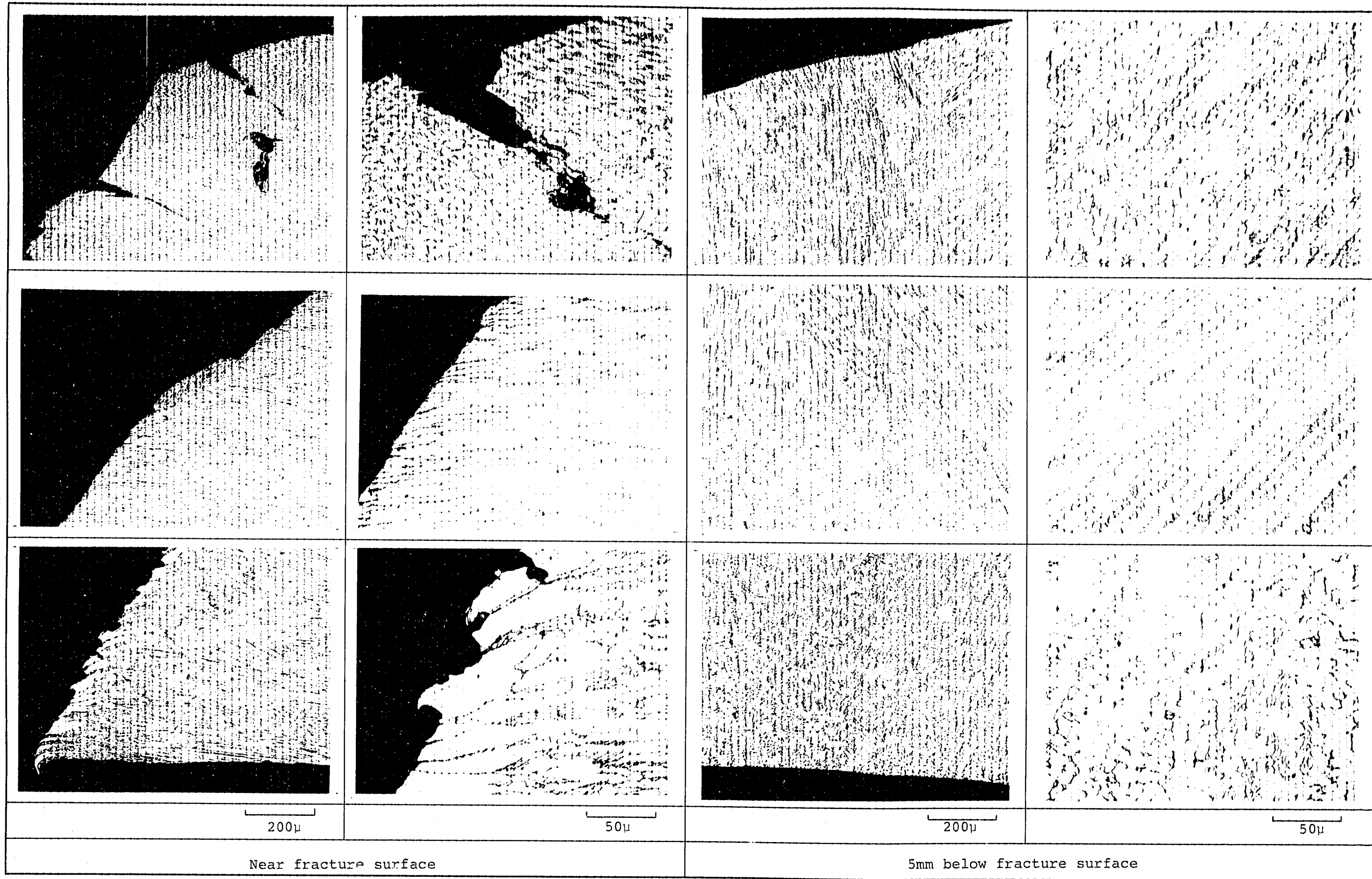


Fig. 35 Rupture Strength for the "JOYO" Reactor Vessel Material



Near fracture surface

5mm below fracture surface

Fig. 36 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Unirradiated Base Metal Crept to Failure at 550°C and 22.0 kgf/mm<sup>2</sup> (Z8000V)

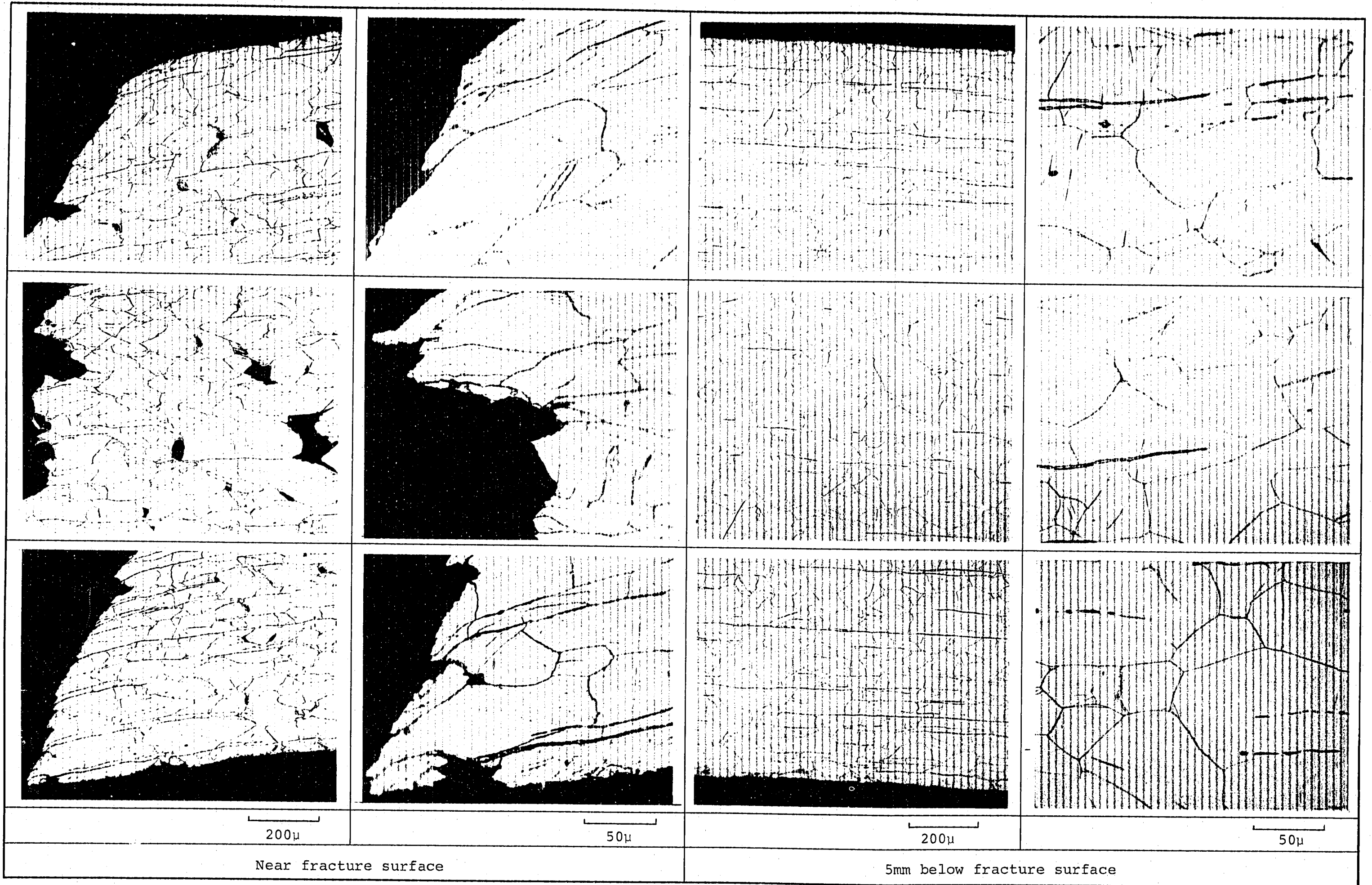
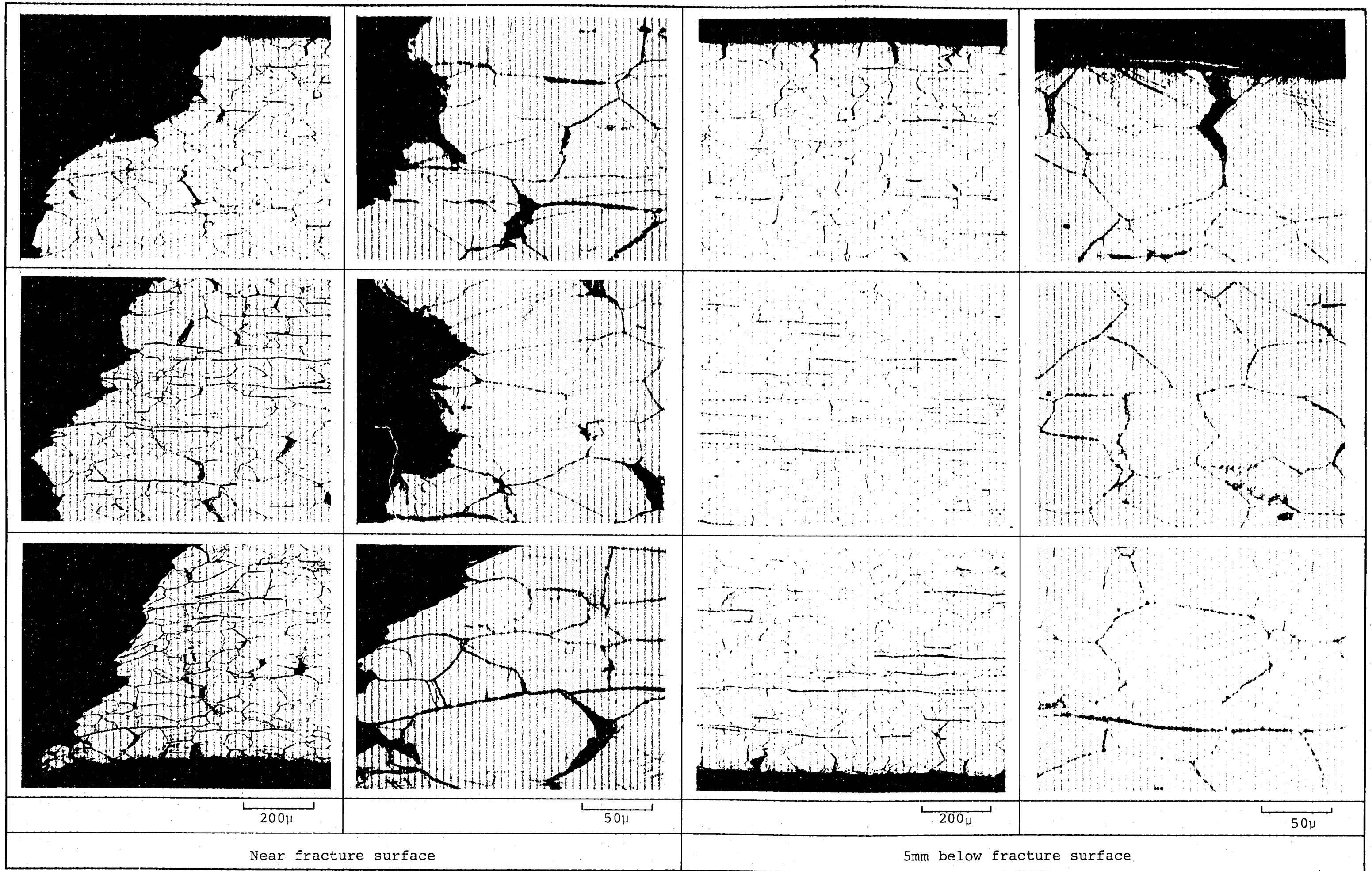


Fig. 37 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Unirradiated Base Metal Crept to Failure at 550°C and 28.0 kgf/mm<sup>2</sup> (Z8000M)



Near fracture surface

5mm below fracture surface

Fig. 38 Optical Micrographs of Longitudinal Sections of the Unirradiated Weld Joint Crept to Failure at 500°C and 35.0 kgf/mm<sup>2</sup> (Z80014)

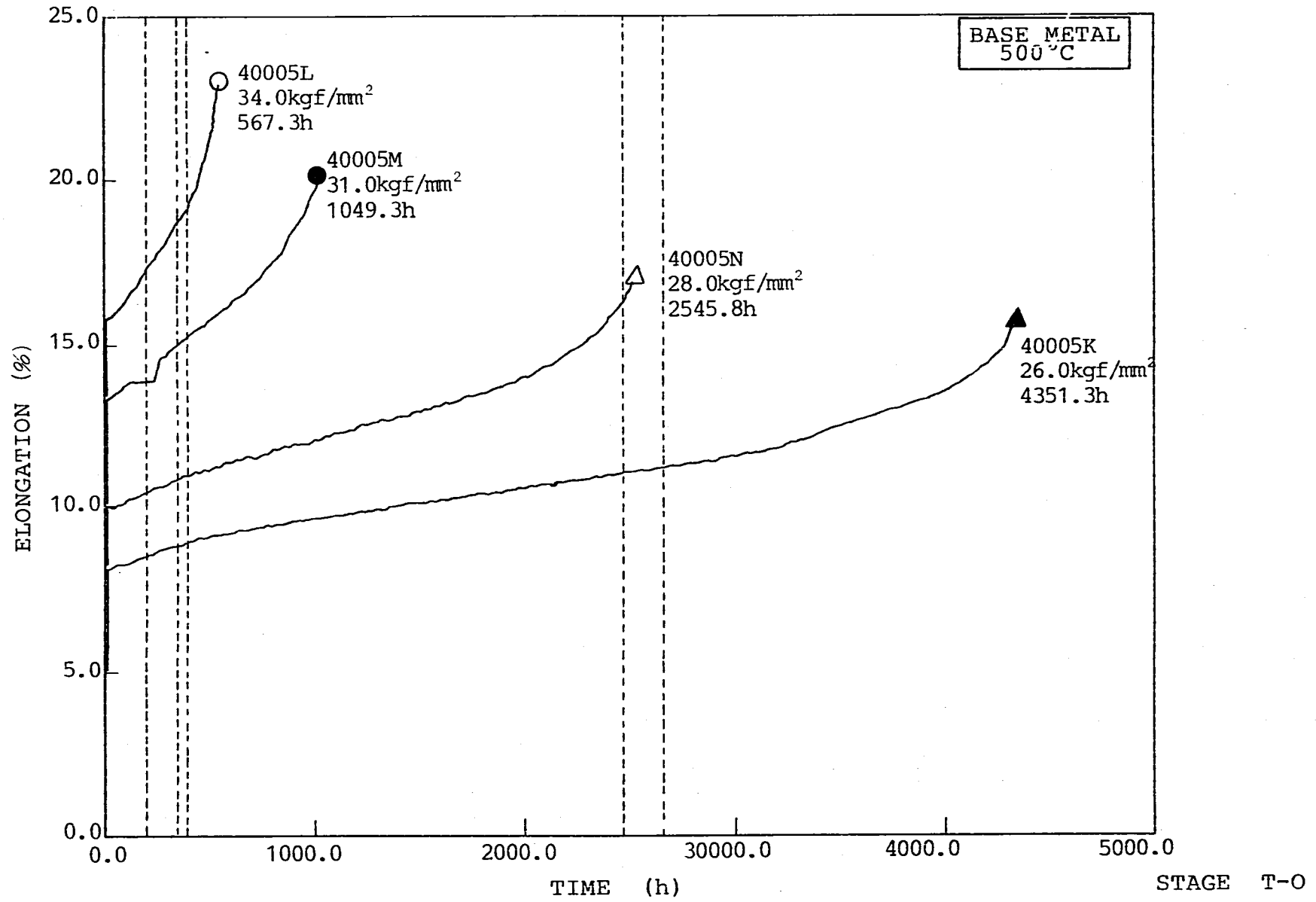


Fig. 39 Uniaxial Creep Test E-T Curve



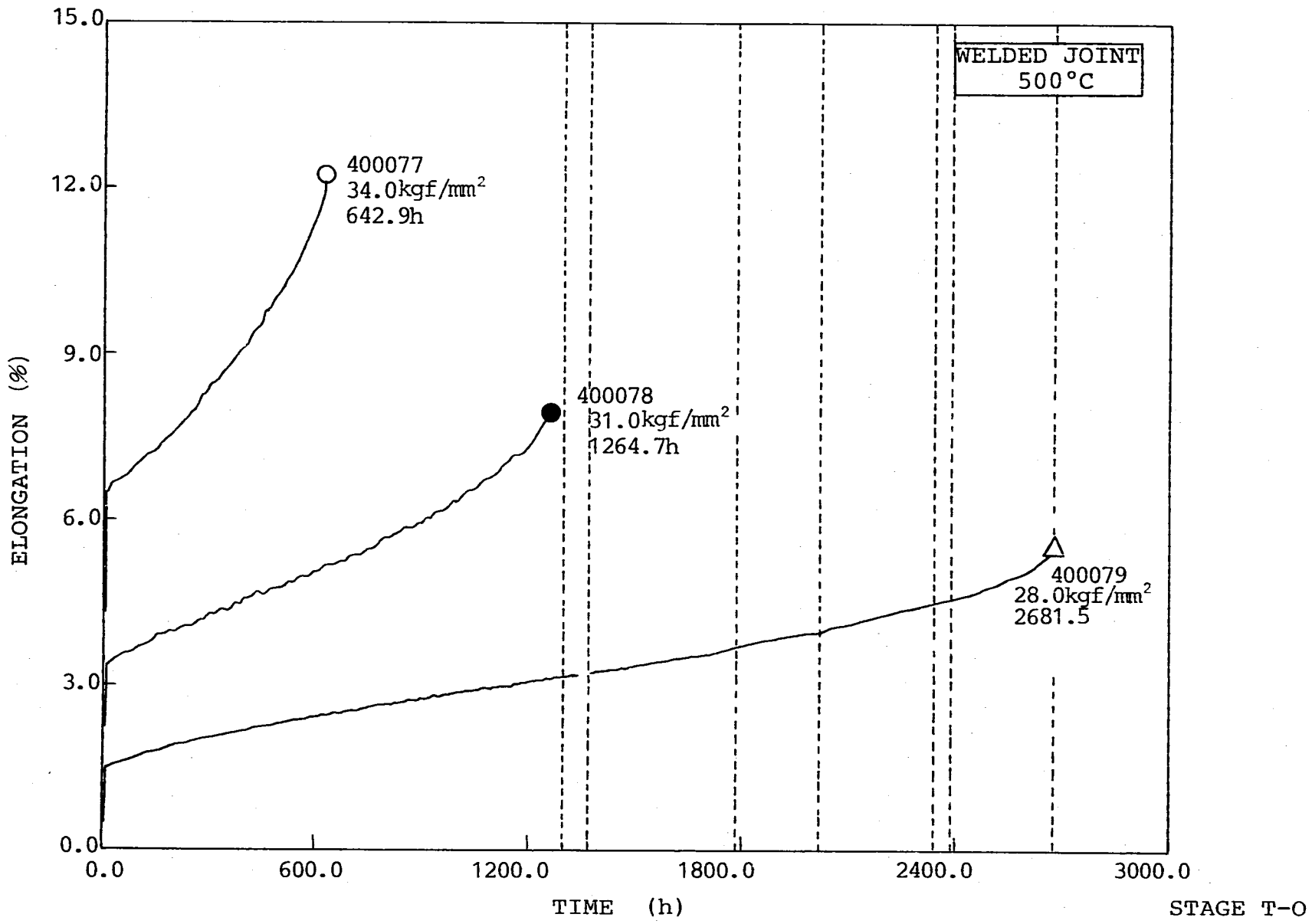


Fig. 40 Uniaxial Creep Test E-T Curve

## 別添 スプリング試験片の試験

- S 1 試験方法
  - S 1.1 供試材
  - S 1.2 照射条件
  - S 1.3 試験方法
- S 2 試験結果
  - S 2.1 外観観察
  - S 2.2 寸法測定
  - S 2.3 バネ定数測定
  - S 2.4 金相試験
- S 3 まとめ
- S 4 参考文献

## スプリング試験片の試験

### S 1 試験方法

#### S 1.1 供試材

供試材はインコネルX-750及びインコネル718製でFig. S-1に示すように素線径1mm, コイル直径約13mm, 自由長40mmのスプリングである。インコネルX-750は「常陽」の安全棒駆動機構に組み込まれている加速スプリングの材料であり, インコネル718は「もんじゅ」の加速スプリングに使用される予定の材料である。これらのスプリングに及ぼす照射の影響の基礎的なデータを得るため, それぞれのスプリングに4水準の圧縮応力を加えてII-06リグのFig. 3に示す最下端部に組み込み, 応力負荷の状態での照射した。Table S-1に圧縮による応力とスプリング長さを示す。

#### S 1.2 照射条件

照射量はFig. 5に示したリグ内の中性子照射量分布から,  $0.6 \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$ と推定される。また照射温度はTable 3に示したE/N側288mmの位置の温度から450℃前後であったと推定される。

#### S 1.3 試験方法

##### S 1.3.1 外観観察及び寸法測定

外観観察はローディングセルのペリスコープで行った。またVブロックに試験片をのせてペリスコープで写真撮影し, 写真から全長を測定した。試験片が曲がっている場合は左右両側の長さを測定し, 平均値を全長とした。

##### S 1.3.2 バネ定数測定

Fig. S-2に示す装置を用いて重錘でスプリングに圧縮荷重をかけ, 全長の変化を測定してバネ定数を求めた。インコネルX750試験片には, 300g, 500g, 700gの重錘をインコネル718試験片には600g, 900g, 1200gの重錘を用いた。

##### S 1.3.3 金相試験

試料を樹脂に埋め込み, 素線の断面を10%過硫酸アンモニウムで電解エッチングし, 100倍及び400倍で写真撮影した。

### S 2 試験結果

#### S 2.1 外観観察

Fig. S-3(1), Fig. S-3(2)に示す照射後の外観には試験片によって曲がりや引きのぼしたような変形が見られたが, TTJT09で照射したスプリングほどの極端な変形はない。遠隔操作で試料の解体や取り出しを行った際に生じたものと考えられる。

#### S 2.2 寸法測定

スプリングの全長を測定した結果をTable S-2及びFig. S-4に示す。同図には

TTJT09で照射したスプリングの結果も併記した。インコネルX-750の試験片は照射前に比べて9~30%短くなっていたが、インコネル718の試験片はほとんど変化していなかった。この結果はTTJT09照射材とほぼ同じであった。またインコネルX-750は照射前に設定した負荷応力が大きくなるとともに全長の変化量が大きくなった。一方、インコネル718の場合は、照射前に設定した負荷応力と全長の変化量の間に関係が認められなかった。

### S 2.3 バネ定数測定

バネ定数測定結果をTable S-2に示す。バネ定数の変化を照射前に設定した負荷応力で整理するとFig. S-5(1), (2)のようになるが、インコネルX-750、インコネル718のいずれの材質とも、照射中負荷応力によるバネ定数の変化はほとんどみられず、非照射材のバネ定数と比較しても変化はなかった。本実験の範囲では、負荷応力下の照射によりインコネルX-750、インコネル718のスプリングは全長が短くなるなど塑性変形を生じるが弾性率の変化はほとんどないと考えられる。

「常陽」安全棒加速用スプリング実機はインコネルX-750製で素線径7.9mm、コイル直径9.0mm自由長92.0mmであり、稼動中に受ける最大圧縮力は61.3kgである。最大圧縮力により素線が受けるねじ応力は31.8kg/mm<sup>2</sup>で、今回付加したS-(2)応力23.1kg/mm<sup>2</sup>~42.0kg/mm<sup>2</sup>のほぼ中間である。中性子照射量の点ではTTJT09よりII-06の方が少い。実機については、 $2.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV)以下の照射ではバネ定数の変化はないと考えられる。

### S 2.4 金相試験結果

インコネルX-750製スプリングの素線断面の顕微鏡写真をFig. S-6に示す。平均結晶粒径約70μmの結晶の中に300μmぐらいの粗粒が混在する組織であり、表層には約100μmの加工層が観察される。

## S 3 まとめ

インコネルX-750製スプリングとインコネル718製スプリングを「常陽」燃料貯蔵ラック位置で75MW1サイクル照射( $0.6 \sim 1.5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > 0.1$  MeV)した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) インコネルX-750製スプリングの全長は照射前、比べて9~30%短くなっていたが、インコネル718製スプリングにはほとんど全長の変化が見られない。照射中のインコネルX-750は照射中の負荷応力が大きくなるとともに全長の変化量は大きくなったが、インコネル718は負荷応力と全長の変化の間に関係は認められない。
- (2) インコネルX-750製スプリング、インコネル718製スプリングとも照射によるバネ定数の変化はみられない。

S 4 参考文献

- ( S - 1 ) Inconel バネの高温加熱試験結果と試験後の検査仕様(東芝原子力事業本部技術  
連絡票 ECS-TA-04652)1982年7月
- ( S - 2 ) 高速実験炉設計及び工事の方法の認可申請書 37, 動燃事業団

Table S-1 Compressed Spring Length during Irradiation

Length		Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )
INCONEL 718	INCONEL X-750	
32 mm	31.8 mm	31.5
29 mm	28.9 mm	35.0
26.6 mm	26.4 mm	38.0
25.4 mm	25.2 mm	42.0

Table S-2 Test Results of Spring Specimens

Specimen Number	Material	Spring Diameter	Wire Diameter	Constricted Stress set before Irradiation (kg/mm <sup>2</sup> )	Spring Length (mm)		Spring Constant (kg/cm)	
					Before Irradiation	After Irradiation	Before Irradiation	After Irradiation
40011A	Inconel X-750	12.8	1.01	42.0	39.5	27.4	0.97	1.07
012A	"	12.7	"	38.0	39.8	33.7	0.94	1.00
013A	"	12.6	"	35.0	40.0	34.2	1.00	1.00
021A	"	12.8	"	42.0	39.8	32.6	0.91	0.89
022A	"	"	"	38.0	39.8	32.4	0.91	1.07
024A	"	"	"	31.5	39.8	32.6	0.94	0.99
033A	"	12.7	"	35.0	39.8	36.2	0.97	1.07
034A	"	"	"	31.5	39.6	36.5	0.94	1.00
40011B	Inconel 718	12.8	1.01	42.0	40.1	39.3	0.94	0.99
022B	"	"	"	38.0	40.1	39.3	0.91	0.89
033B	"	"	"	35.0	40.2	39.7	1.03	0.96
034B	"	"	"	31.5	40.2	39.8	0.97	0.89

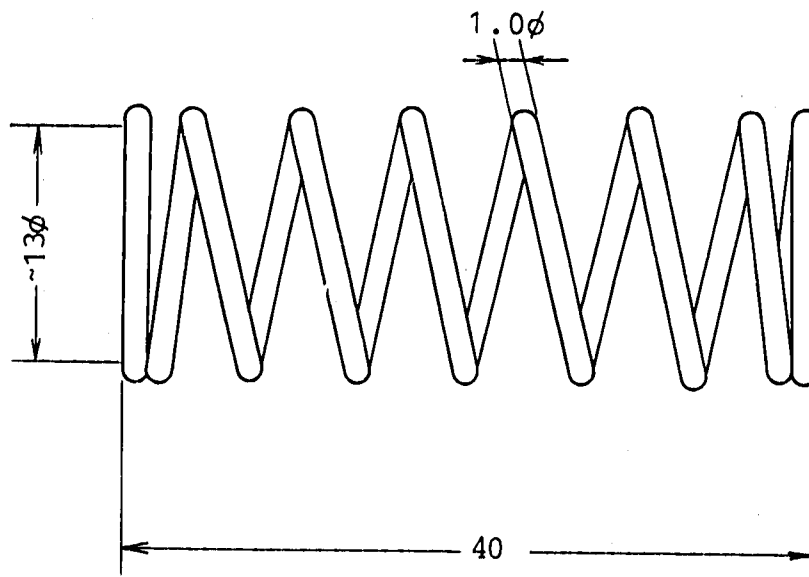


Fig. S-1 Profile of the Specimen

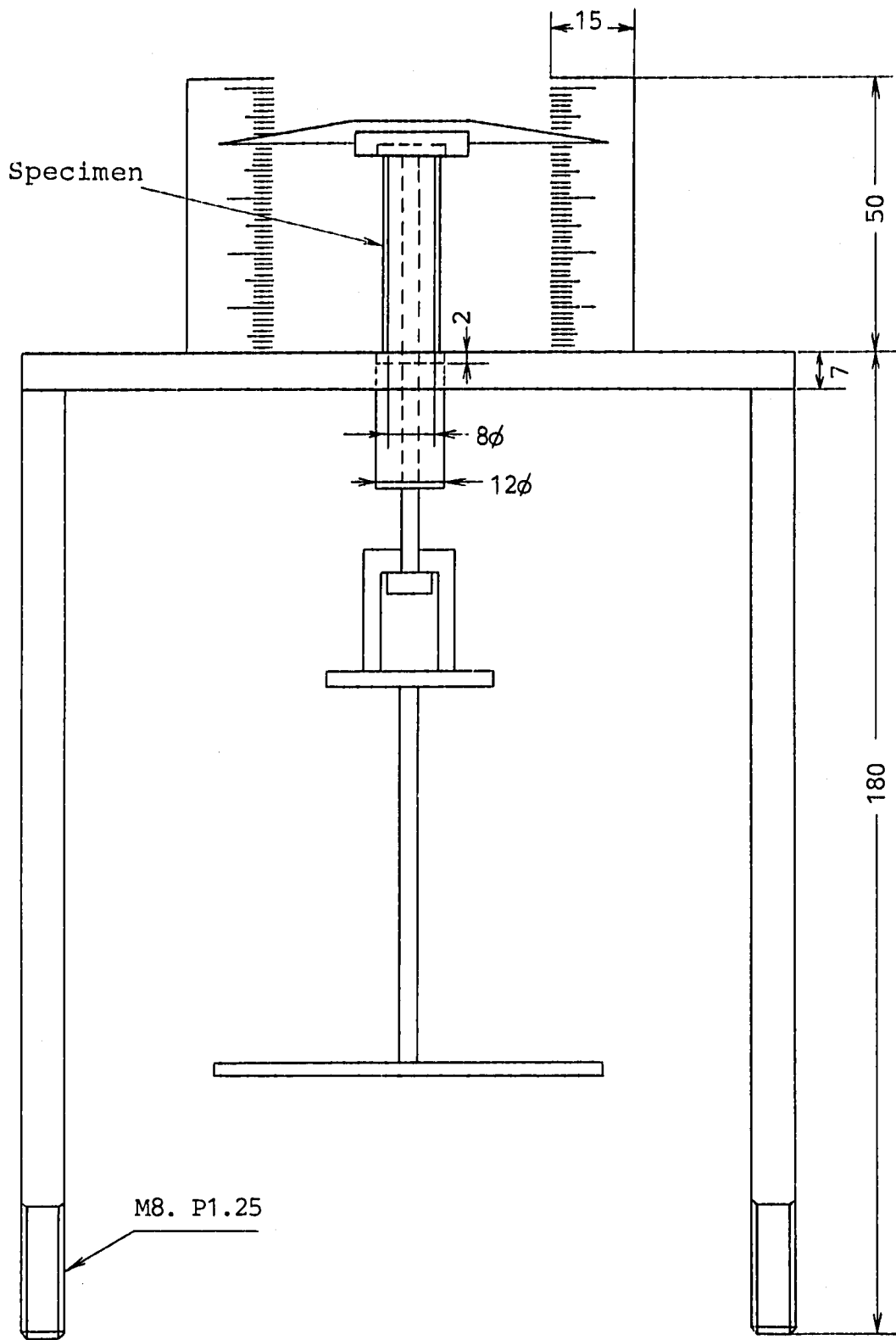
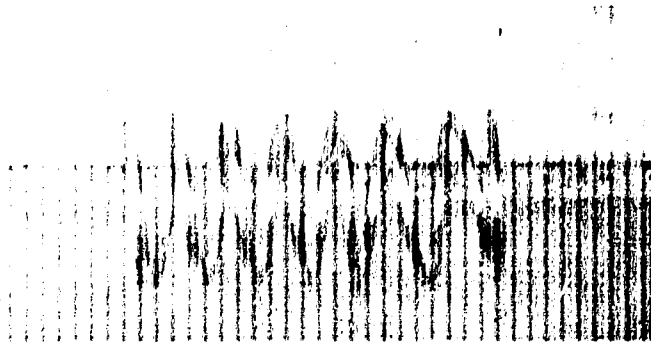
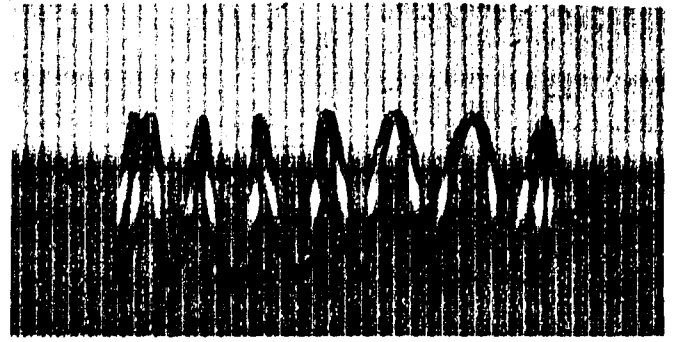


Fig. S-2 Apparatus for Measuring Spring Constant

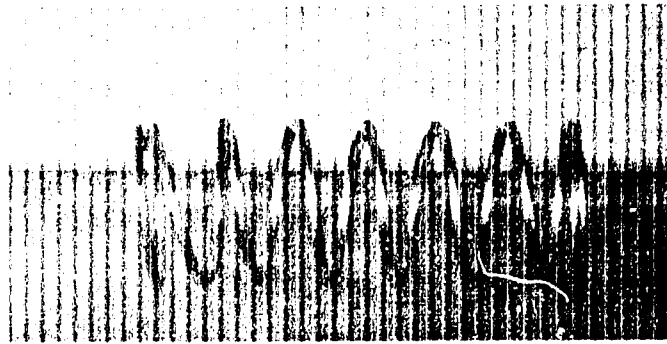




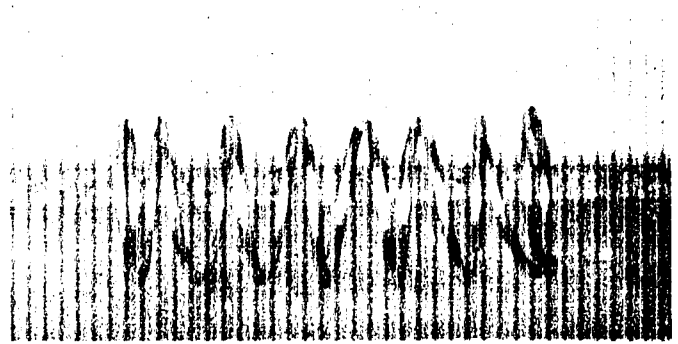
40011A



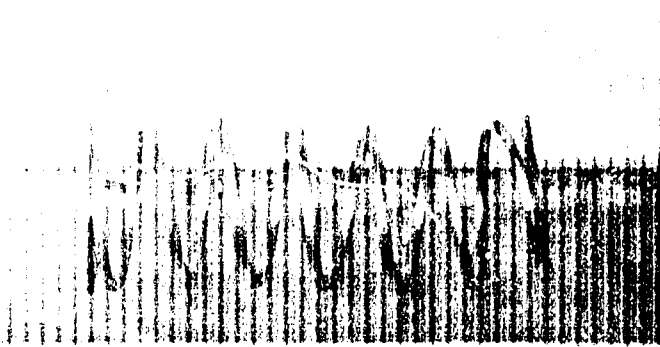
40021A



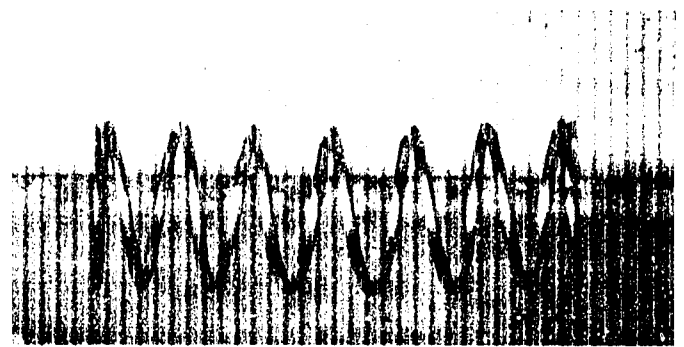
40012A



40022A



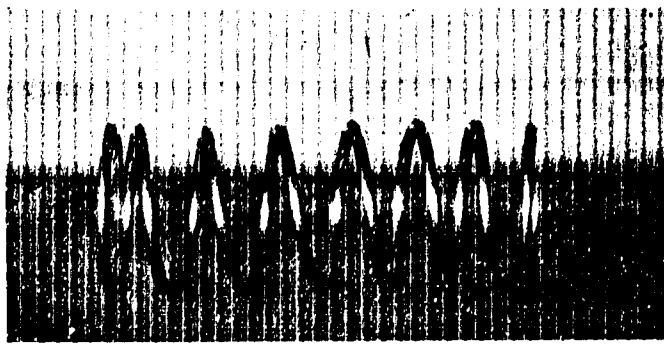
40013A



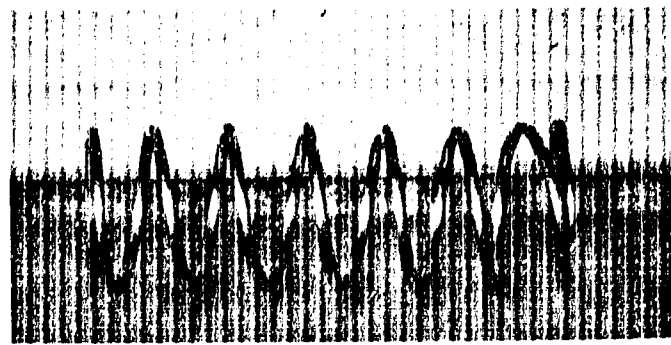
40033A

10mm

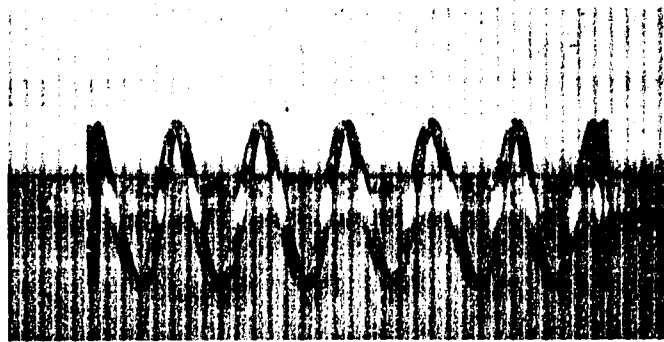
Fig. S-3(1) Inconel X750



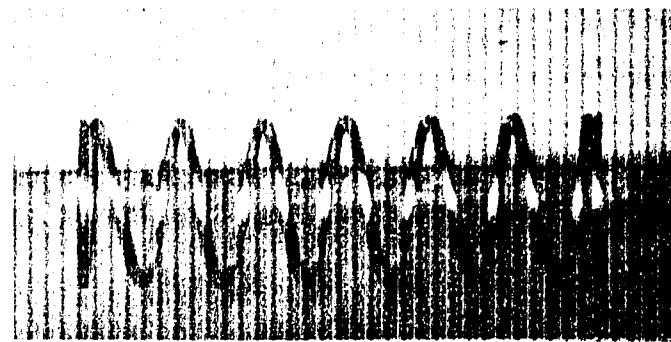
40024A



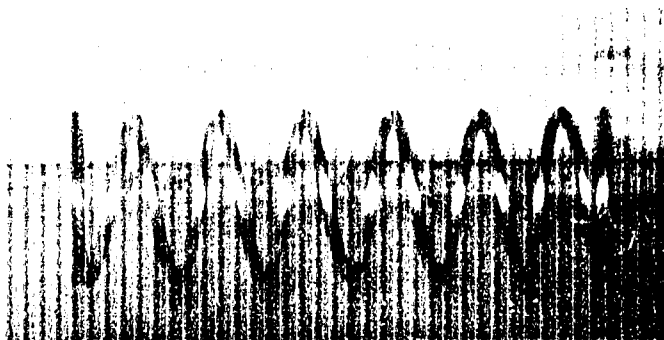
40034A



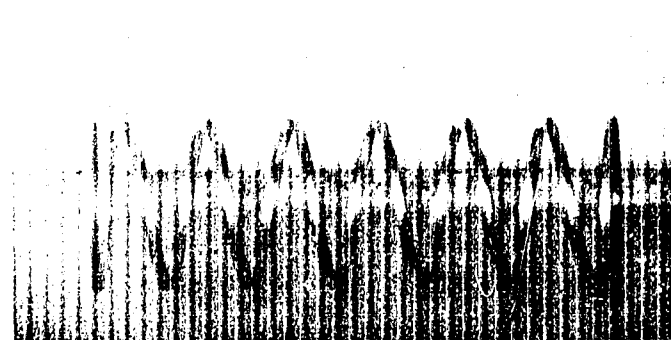
40011B



40022B



40033B



40034B

10mm

Fig. S-3(2) Inconel 718

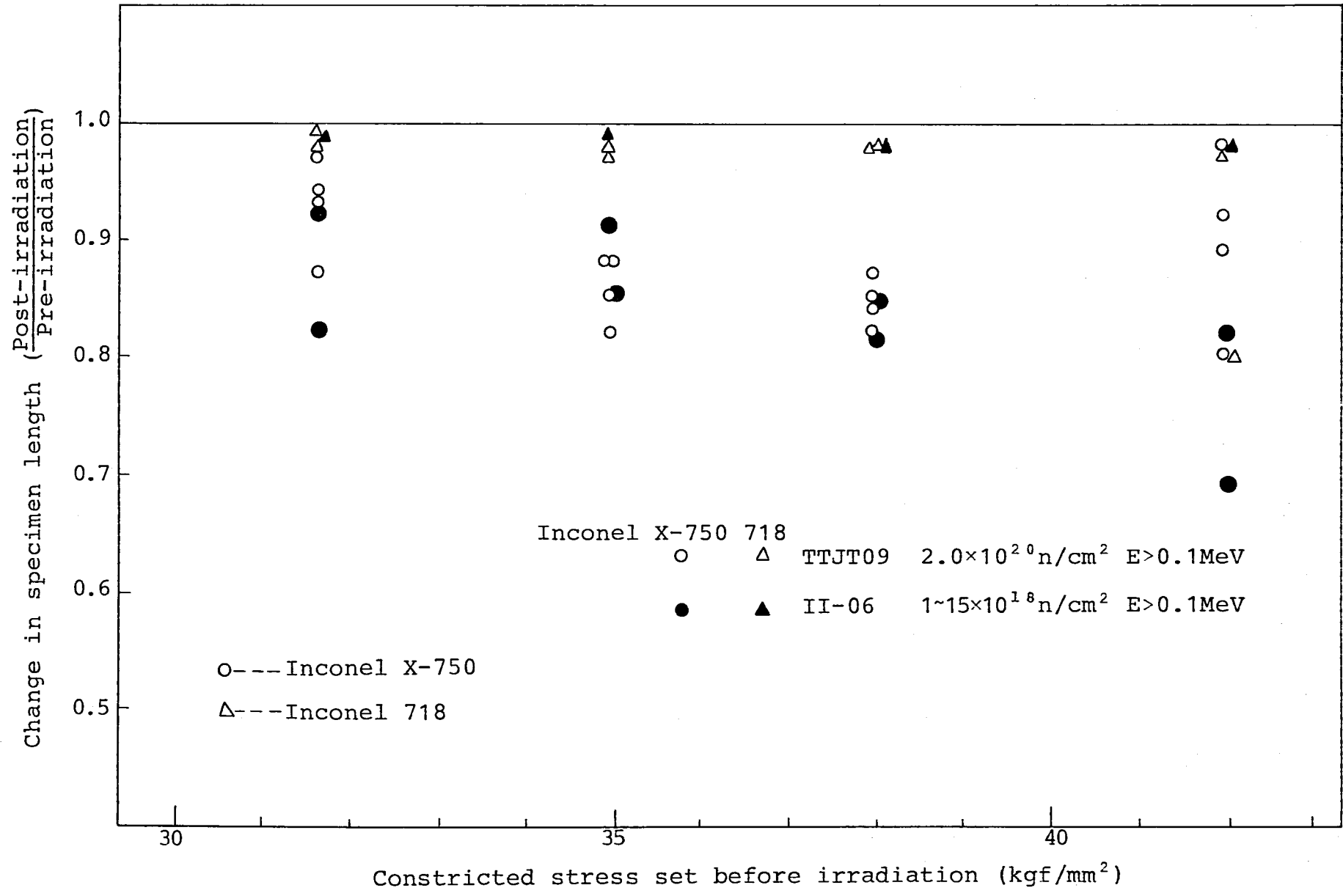


Fig. S-4 Irradiation Effects on Specimen Length

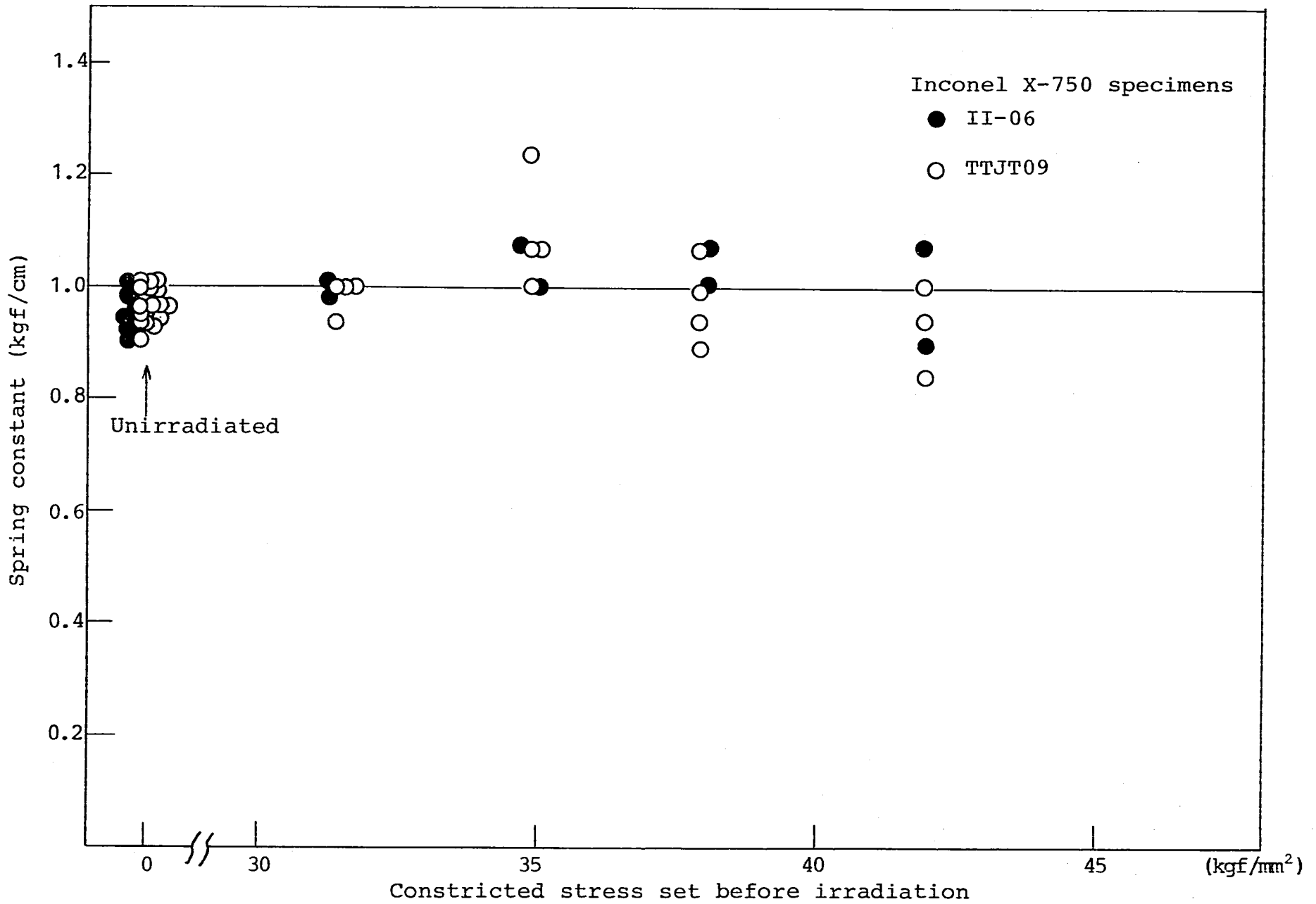


Fig. S-5(1) Irradiation Effects on Spring Constant

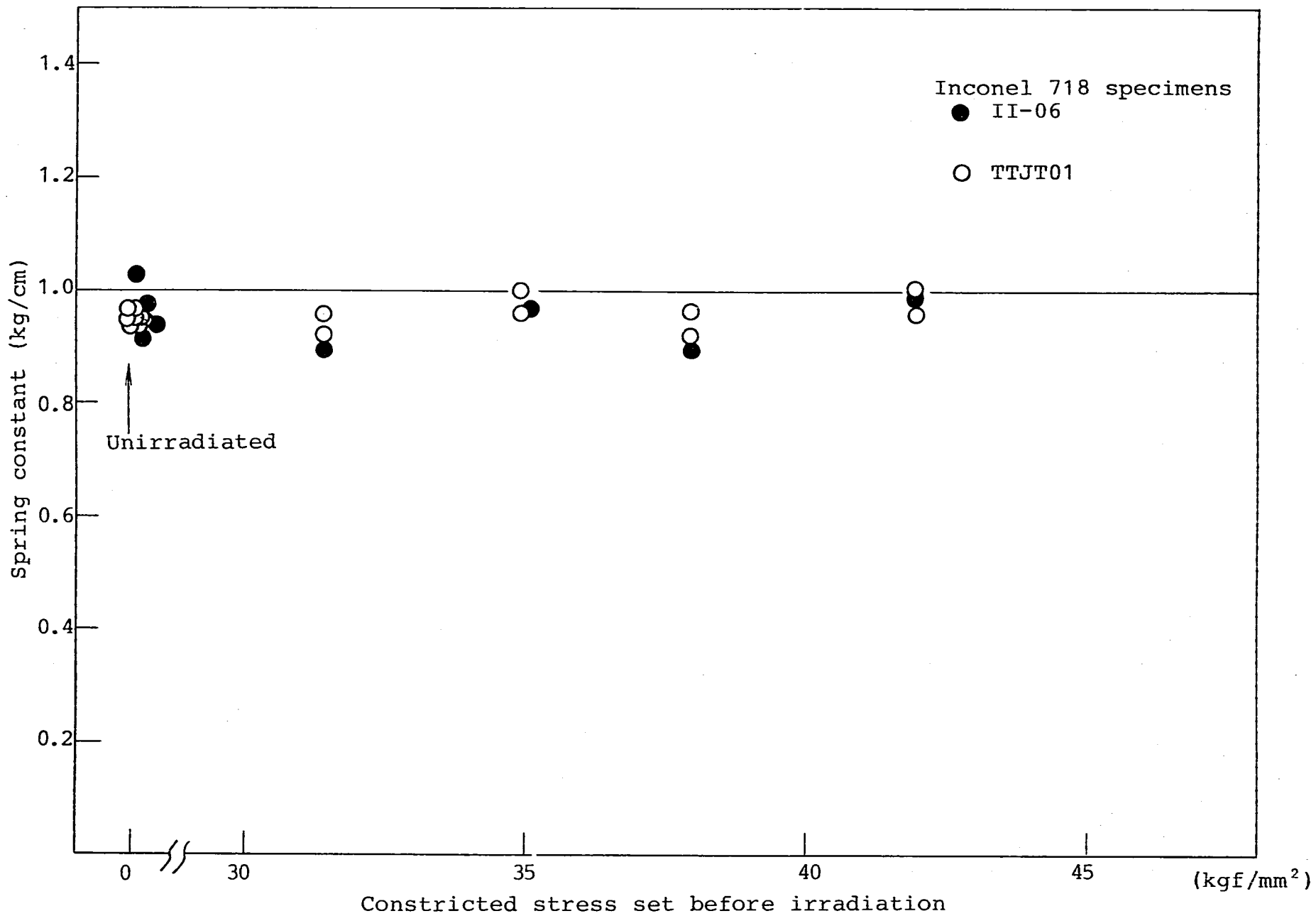


Fig. S-5(2) Irradiation Effects on Spring Constant