JAERI-M
88-217

照射済みジルカロイ管の変動応力下における ヨウ素ＳＣＣ挙動

１９８８年１１月

鈴木　元衛・木崎　　実・高田　文樹

日　本　原　子　力　研　究　所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319－11茨城県那珂郡東海村）あて，お申しこしください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　日立高速印刷株式会社

JAERI－M 88－217

照射済みジルカロイ管の変動応力下における ヨウ素ＳＣＣ挙動

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部
鈴木　元衛・木崎　実[+]・高田　文樹[+]

（1988年10月3日受理）

未照射および照射済のジルカロイ－２管を用いてヨウ素ＳＣＣ試験を行なった。試料管内部にヨウ素を封入し，アルゴンガスにより内圧を加え，直接通電によって350℃に加熱し，破損するまで保持した。内圧負荷モードについては，一定圧力の単調負荷および時間的に変化する変動負荷の２種類で試験した。内圧の負荷モード，強度，および予め管内面に付けた傷の有無等の試験条件の組合せに対する破損挙動を比較した。破損モードはピンホールとラプチャーが観察された。破損時間に対しては，内圧負荷モードの差による影響は明確ではないが，内圧強度および内面の傷は多少の効果が生じた。また，破損試料の金相・破面観察を行い，組織中の多量の水素化物と脆性破面を見いだした。

東海研究所：〒319-11茨城県那珂郡東海村白方字白根２-４
＋大洗研究所材料試験炉部

Iodine-SCC Behavior of Irradiated Zircaloy-2 Cladding under Changing Stress

Motoe SUZUKI, Minoru KIZAKI[+] and Fumiki TAKADA[+]

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 3, 1988)

Iodine-SCC test has been conducted using unirradiated and irradiated (2.3×10^{19} n/cm^2) zircaloy-2 claddings. Specimens have been internally pressurized by Argon gas, filled with Iodine vapor, and heated by direct joule-heating at 350°C until failure occurred. Stress loading by the internal pressure have been done by the two methods; monotonous and time-varying loadings. Failure features have been compared with respect to such test conditions as stress loading mode, internal pressure intensity, and artifitial pre-flaw in the cladding inner surface.

Observed failure mode contained both pinhole and fracture types. While failure time was not clearly dependent on the difference in loading modes, it was affected by the internal pressure intensity and pre-flaw to some extent.

Metallographic and fractographic observations have been carried out on the post-test specimens, finding a large amount of zirconium hydride and brittle fracture surface.

Keywords: Zircaloy, Irradiation, Iodine-SCC, Cyclic Loading, Failure Time

---

+ Department of JMTR Project, Oarai Research Establishment

目　　次

1. 序　言 …… 1
2. 実　験 …… 1
2.1　試験装置 …… 1
2.1.1　ＳＣＣ試験装置 …… 1
2.1.2　リング引張り試験装置 …… 2
2　試　料 …… 2
2.2.1　試料の履歴および機械的性質 …… 2
2.2.2　試験治具 …… 2
2.3　試験方法 …… 3
2.3.1　リング引張り試験 …… 3
2.3.2　ヨウ素ＳＣＣ試験 …… 3
2.3.3　断面金相観察 …… 3
2.3.4　破面観察 …… 3
3. 結　果 …… 4
3.1　リング引張り試験 …… 4
3.2　ヨウ素ＳＣＣ試験 …… 4
4. 考　察 …… 7
4.1　応　力 …… 7
4.2　降伏応力と照射硬化 …… 8
4.3　ＳＣＣ感受性と破損時間 …… 8
4.4　ヨウ素濃度 …… 9
4.5　サイクリック負荷と単調負荷 …… 10
4.6　ジルコニウム水素化物の影響 …… 10
5. ま と め …… 11
参考文献 …… 11

Contents

1. Introduction 1
2. Experimentals 1
2.1 Test apparatus 1
2.1.1 SCC test apparatus 1
2.1.2 Ring tensile test apparatus 2
2.2 Specimen 2
2.2.1 History and mechanical properties 2
2.2.2 Test rig 2
2.3 Test method 3
2.3.1 Ring tensile test 3
2.3.2 Iodine SCC test 3
2.3.3 Metallography 3
2.3.4 Fractography 3
3. Results 4
3.1 Ring tensile test 4
3.2 Iodine SCC test 4
4. Discussion 7
4.1 Stress 7
4.2 Yield stress and irradiation hardening 8
4.3 SCC susceptibility and failure time 8
4.4 Iodine concentration 9
4.5 Cyclic loading and monotonous loading 10
4.6 Effect of zirconium hydride 10
5. Conclusion 11
References 11

1. 序　言

軽水炉燃料において，出力急昇時に生ずるジルカロイ被覆管のＰＣＩ（ペレット・被覆管相互作用）破損現象は，燃料信頼性上の一つの重要な問題であり，原因になるメカニズムについて従来多くの研究が成されている。

このＰＣＩによる割れ破損は，多くは以下のようなＳＣＣ（応力腐食割れ）と考えられている。UO_2ペレットから放出された核分裂生成物のうち，ヨウ素，あるいは他のハロゲンおよび低融点・高蒸気圧金属のような腐食性あるいは脆化促進性元素が，熱膨張したペレットによる引張応力を受けている被覆管の内面に存在する微少なキズ，あるいはピットに作用し，そこからクラックを発生する。一旦クラックが発生した後は，腐食性元素がクラック先端の応力集中域に輸送されて新たにジルカロイと反応し，ペレットによる引張応力によってさらにクラックの成長を促すという経過をたどる。そして，クラックの数，深さがある臨界値に達すると，被覆管の急激な割れ破損が生じる。こうしたモデルに基づいて従来より一定荷重下のヨウ表ＳＣＣ実験が行なわれ，クラックの発生，成長と負荷応力レベル，ヨウ素濃度，照射の効果との関係などが調べられている。[1], [2]

一方，軽水炉の運転モードとして負荷追従運転が要請されており，この条件下では燃料に周期的な出力変動が生じ，したがって被覆管に繰り返し応力が課せられる。この繰り返し応力（cyclic stress）下でのＳＣＣ挙動は，定荷重ないしは一定応力によるヨウ素ＳＣＣ実験の結果から単純に類推し得ない性格があると考えられる。[3] すなわち，一般に材料の繰り返し応力による破損（破断）は，個々の応力サイクルでの損傷が互いに独立で相互作用がなく，それらの単純な累積によって最終的破断に至った結果であると考えるモデルから実際には外れた挙動を示す場合があるからである。[4] 本研究では，こうした観点に立ち，一定応力および周期的変動応力下でのヨウ素による破損挙動を，照射ジルカロイ管を用いて調べたものである。

2. 実　験

2.1 試験装置

2.1.1 ＳＣＣ試験装置

大洗研ＪＭＴＲホットラボの鉄ケーブ内に設置した内圧試験装置の系統図をFig. 1に示す。この装置は，次の4系統から成る。

(1) 試料加圧系

ベルジャー内部に取り付けられた試料ジルカロイ管の内側に，アルゴンガスを送り加圧する系であり，シリンダーとモーターおよびモーターの制御系により，一定圧力保持はもとより周期的な圧力変動を作り出すことが出来る。

1. 序　言

軽水炉燃料において，出力急昇時に生ずるジルカロイ被覆管のＰＣＩ（ペレット・被覆管相互作用）破損現象は，燃料信頼性上の一つの重要な問題であり，原因になるメカニズムについて従来多くの研究が成されている。

このＰＣＩによる割れ破損は，多くは以下のようなＳＣＣ（応力腐食割れ）と考えられている。UO_2ペレットから放出された核分裂生成物のうち，ヨウ素，あるいは他のハロゲンおよび低融点・高蒸気圧金属のような腐食性あるいは脆化促進性元素が，熱膨張したペレットによる引張応力を受けている被覆管の内面に存在する微少なキズ，あるいはピットに作用し，そこからクラックを発生する。一旦クラックが発生した後は，腐食性元素がクラック先端の応力集中域に輸送されて新たにジルカロイと反応し，ペレットによる引張応力によってさらにクラックの成長を促すという経過をたどる。そして，クラックの数，深さがある臨界値に達すると，被覆管の急激な割れ破損が生じる。こうしたモデルに基づいて従来より一定荷重下のヨウ表ＳＣＣ実験が行なわれ，クラックの発生，成長と負荷応力レベル，ヨウ素濃度，照射の効果との関係などが調べられている。[1], [2]

一方，軽水炉の運転モードとして負荷追従運転が要請されており，この条件下では燃料に周期的な出力変動が生じ，したがって被覆管に繰り返し応力が課せられる。この繰り返し応力（cyclic stress）下でのＳＣＣ挙動は，定荷重ないしは一定応力によるヨウ素ＳＣＣ実験の結果から単純に類推し得ない性格があると考えられる。[3] すなわち，一般に材料の繰り返し応力による破損（破断）は，個々の応力サイクルでの損傷が互いに独立で相互作用がなく，それらの単純な累積によって最終的破断に至った結果であると考えるモデルから実際には外れた挙動を示す場合があるからである。[4] 本研究では，こうした観点に立ち，一定応力および周期的変動応力下でのヨウ素による破損挙動を，照射ジルカロイ管を用いて調べたものである。

2. 実　験

2.1 試験装置

2.1.1 ＳＣＣ試験装置

大洗研ＪＭＴＲホットラボの鉄ケーブ内に設置した内圧試験装置の系統図をFig. 1に示す。この装置は，次の４系統から成る。

(1) 試料加圧系

ベルジャー内部に取り付けられた試料ジルカロイ管の内側に，アルゴンガスを送り加圧する系であり，シリンダーとモーターおよびモーターの制御系により，一定圧力保持はもとより周期的な圧力変動を作り出すことが出来る。

(2) 試料加熱系

試料を直接通電して加熱するための電極ターミナルおよび電力調節系よりなり，試験温度までの試料加熱および到達後の一定レベルの維持は，予め設定したプログラムにより試料外表面につけたＣＡ熱電対からのフィードバックをえて自動的に行われる。

(3) ヨウ素発生・回収系

ヨウ素蒸気を発生するための小型電気炉，および試料ジルカロイ管内部へヨウ素ガスを導くための配管系がある。また，実験の終了後の試料内のヨウ素，および試料が破損した際ベルジャー内部に放出されたヨウ素ガスを真空吸引して回収する配管系統および容器が付属している。ただし，本実験においては，ヨウ素は最初から試料内部にペレットの形で封入したので，このヨウ素蒸気発生系は全く使用しなかった。詳しくは，2.2.2 項に述べる。

(4) 計測・記録・制御系

試料外表面の温度，内圧，外形変化は，それぞれ熱電対，圧力センサー，変位センサーによって測られ，打点式レコーダーに記録される。温度と内圧の値は，加熱系と加圧系にフィードバックされ，予め設定された軌跡を辿るように制御される。外径測定用のセンサーは，Fig. 1 によれば試料の上下方向に移動が可能であるが，本実験においては試料の変形の進み具合いによって破裂，破損の時期を予測する定性的なモニターとして用いたので，試料のほぼ中央位置を定点測定した。

2.1.2 リング引張り試験装置

ＳＣＣ試験に供する試料の機械的性質を比較検討するため，予備試験としてリング引張り試験を行なった。この試験装置および治具をFig. 2 に示す。雰囲気はアルゴンとし，温度は一定に保持できる。リング状の試料は，その内直径と等しい外直径を持つ半円筒状のクロスヘッドによって引っ張られる。

2.2 試　料

2.2.1 試料の履歴および機械的性質

試料は，完全再結晶焼鈍ジルカロイ－２管で，その化学組成およびサイズをTable 1 に示す。また，未照射状態の試料の機械的性質をTable 2 に示す。実験には，主に照射材（ＲＡ材）を使い，比較試験用として若干の未照射材（ＮＲ材）およびＪＭＴＲ－ＯＷＬ－２ループ炉外テストセクション部の循環水配管内においたもの（未照射コントロール材，ＣＴＬ材）を用いた。ＯＷＬ－２の性能をTable 3 に示す。

2.2.2 試験治具

Fig. 1 に示すように，試料はベルジャー内部の電極ターミナルに固定される。詳しくはFig. 3 に示すように，試料は両端のスエージロックによって電極に取り付けられる。上部電極は上下方向の拘束がないが，銅メッシュの電流リードがつけられている。下部電極は装置フレームに固定され，中心部に気体流通用の小孔が貫通し，その下部はガス加圧系，吸引系につながっている。上下電極間の試料長は，スエージロックのナットに包み込まれた部分を除いて

160 mmである。

試料内部には，表面を溶射アルミナによって被覆した直径6 mmのステンレス製中子が入れられる。この中子の両端には，マコール（機械加工が可能なセラミック）製のブッシュがはめ込まれ，中子の中心線を試料の中心線と一致させて試料内部に固定する役目を果たしている。中子の中央には4カ所，横方向に貫通孔が設けてあり，この中に錫箔で包んだ合計約1ｇのヨウ素を入れる。試料が加熱されると中子も加熱され，錫は溶解し，ヨウ素は蒸気となって試料内部空間を満たす。

試料の温度測定および制御は，試料外表面上にスプリング固定したＣＡタイプ熱電対によって行なった。熱電対素線の外径は0.3 mmである。

一部の試料には，試料内部表面に，試験前に予め傷（プレフロー）をつけた。傷の深さは約0.1 mm，長さは中心軸に並行に約６０mm，傷の断面形状は先端の丸い楔型である。この傷は専用の治具によって作り，深さ，長さ，形状はいづれの試料においてもほとんど同一と思われる。

2.3 試験方法

2.3.1 リング引張り試験

未照射材（ＮＲ材），未照射コントロール材（以下，ＣＴＬ材と略称する），照射材の間の機械的性質の差を調べるため，インストロン型引張り試験機によってリング引張り試験を行なった。試料は管からその中心軸に垂直にリング状に切り出し，内直径に等しい外形を持つ一組の半円形断面のクロスヘッドにセットし，荷重一変位曲線を測定した。試験温度は350 ℃，雰囲気はアルゴンガス，変位速度は0.1 mm／minである。

2.3.2 ヨウ素ＳＣＣ試験

ヨウ素ＳＣＣ試験として，未照射材および照射材を用い，試験温度350 ℃で一定内圧および変動内圧をかけ，破損が起きるまで保持した。

2.3.3 断面金相観察

試験後の試料を中心軸に垂直に切り出し，断面を機械研磨後，ＳＷＡＢ法によるエッチングをして光学顕微鏡にて観察した。エッチング液は，

A：（HNO_3－４３ cc＋H_2O_2－４３ cc＋ＨＦ－４ cc）の混合液で８秒間，

B：（HNO_3－４５ cc＋グリセリン－４５ cc＋ＨＦ－１０ cc）の混合液で７秒間，

のいずれかの方法で行なった。いずれの方法でも観察される組織にはほとんど差はないが，Ａは，水素化物が比較的鮮明に観察される組成，Ｂは，結晶粒界が比較的鮮明に観察される組成である。

2.3.4 破面観察

試験後の試料を適当なサイズに切断し，アルコール洗浄した後，破断面の形状をＸＭＡの表

面観察機能を用いて観察した。

3. 結　果

3.1 リング引張り試験

リング引張り試験の結果をTabl 4に示す。また，ＣＴＬ材と照射材試料の試験後の形状をPhotos. 1，2に示す。また，試料の荷重－変位曲線をFig. 4～6に示す。Fig. 4の曲線上において，直線状の弾性域から曲線状の塑性域へ移行する境界を降伏点，曲線の最高点を引張り強さとみなし，各々の点における荷重を試料断面積で割ることにより降伏応力，引張り強さを算出した。Table 4より，降伏応力，引張り強さとも，未照射材，ＣＴＬ材，照射材の順に増大している。また，破断伸びは逆に未照射材，ＣＴＬ材，照射材の順に減少している。

3.2 ヨウ素ＳＣＣ試験

試料番号に対応する試験条件，結果，図，写真の対応表に一括して示す。この表中，Failure Modeの欄中に記した記号の意味を以下に示す。○印は破損箇所がプレフローの部分と重なったもの，つまりプレフローから発生したクラックが成長し，破壊に至ったと推定できるケースであり，●印はプレフローがついていてもその部分以外の箇所で破損したケースを示す。またPhotograpn No.と記した最右欄の中央の"Ｃ－section"とは，断面の組織観察を意味する。この欄に示した数字には，（　）の中にＡないしＢの記号が付いているが，これはエッチング液の種類を表わす。

以下，Table 5の試料番号順に結果の特徴を述べ，考察する。

(1) 試験No. Ｓ１ＳＰ～Ｓ４ＣＬＰ

この４ＲＵＮはＣＴＬ材の試験である。Figs. 7～10に試験条件と結果を示す。ここで，図の上半分に試料番号と内圧履歴等を示す。内圧履歴において，加圧－減圧の圧力変動期間の圧力変化速度は全ての実験について共通で，約12.5 kg／cm²／min.である。したがって，25 kg／cm²の圧力変動のためには約2分間を要する。

また，図の下半分に示した試料形状図の中心軸上試料中央に示す点線を重ねた線はプレフロー位置であり，△印は温度制御熱電対の位置，●印はピンホール発生と推定される位置である。ピンホール破損は，内圧の穏やかな減少開始として観測されたが，ピンホールそのものは試料外表面を目視しても見いだせず，石鹸液を付着させたいわゆるソープバブルテストによって辛うじて確認できるのみであった。試験Ｓ１ＳＰでは，250 kg／cm² の内圧で約5時間保持した後，試験を一旦中断し，翌日再試験したものである。

Ｓ２ＳＰとＳ３ＳＰの試料Ｓ３およびＳ４では，小規模なラプチャーが起こった。Ｓ４ＣＬＰでは周期的変動負荷をかけたが，途中で一旦加熱，加圧を中断し，再試験した。

試料Ｓ３，Ｓ４の試料断面写真をPhoto. 3およびPhoto. 4に示す。断面内の金属相内に

面観察機能を用いて観察した。

3. 結　果

3.1 リング引張り試験

リング引張り試験の結果をTabl 4に示す。また，ＣＴＬ材と照射材試料の試験後の形状をPhotos.1，2に示す。また，試料の荷重－変位曲線をFig.4～6に示す。Fig.4の曲線上において，直線状の弾性域から曲線状の塑性域へ移行する境界を降伏点，曲線の最高点を引張り強さとみなし，各々の点における荷重を試料断面積で割ることにより降伏応力，引張り強さを算出した。Table 4より，降伏応力，引張り強さとも，未照射材，ＣＴＬ材，照射材の順に増大している。また，破断伸びは逆に未照射材，ＣＴＬ材，照射材の順に減少している。

3.2 ヨウ素ＳＣＣ試験

試料番号に対応する試験条件，結果，図，写真の対応表に一括して示す。この表中，Failure Modeの欄中に記した記号の意味を以下に示す。○印は破損箇所がプレフローの部分と重なったもの，つまりプレフローから発生したクラックが成長し，破壊に至ったと推定できるケースであり，●印はプレフローがついていてもその部分以外の箇所で破損したケースを示す。またPhotograpn No.と記した最右欄の中央の"Ｃ－section"とは，断面の組織観察を意味する。この欄に示した数字には，（　）の中にＡないしＢの記号が付いているが，これはエッチング液の種類を表わす。

以下，Table 5の試料番号順に結果の特徴を述べ，考察する。

(1) 試験No. Ｓ１ＳＰ～Ｓ４ＣＬＰ

この４ＲＵＮはＣＴＬ材の試験である。Figs.7～10に試験条件と結果を示す。ここで，図の上半分に試料番号と内圧履歴等を示す。内圧履歴において，加圧－減圧の圧力変動期間の圧力変化速度は全ての実験について共通で，約12.5 kg／cm²／min.である。したがって，２５ kg／cm²の圧力変動のためには約２分間を要する。

また，図の下半分に示した試料形状図の中心軸上試料中央に示す点線を重ねた線はプレフロー位置であり，△印は温度制御熱電対の位置，●印はピンホール発生と推定される位置である。ピンホール破損は，内圧の穏やかな減少開始として観測されたが，ピンホールそのものは試料外表面を目視しても見いだせず，石鹸液を付着させたいわゆるソープバブルテストによって辛うじて確認できるのみであった。試験Ｓ１ＳＰでは，250kg／cm² の内圧で約５時間保持した後，試験を一旦中断し，翌日再試験したものである。

Ｓ２ＳＰとＳ３ＳＰの試料Ｓ３およびＳ４では，小規模なラプチャーが起こった。Ｓ４ＣＬＰでは周期的変動負荷をかけたが，途中で一旦加熱，加圧を中断し，再試験した。

試料Ｓ３，Ｓ４の試料断面写真をPhoto.3およびPhoto.4に示す。断面内の金属相内に

黒い縞模様となって現われているのはジルコニウムの水素化物と思われる。ラプチャー開口部の形状は機械的研磨およびエッチングによって丸みを帯びてしまい，輪郭は明瞭ではない。開口部以外にも内面から長さ約100μm程度のクラックが発生している。

Photo. 4－CはS3のラプチャー開口部近傍の偏光写真である。粒内割れか粒界割れの区別は明らかでない。開口部外側でやや塑性絞りがみられ，延性破壊の部分がある。

(2) 試験No. R1SP～R4SP

この4RUNは，照射材試料に対する単調負荷（一定内圧）試験であり，Figs. 11～14に，試験条件と破損位置を示す。R4SPのみがラプチャー破損であり，他の3ケースはいづれもピンホール破損である。破損部分の外観写真をPhotos. 5～8に示す。

R1SP～R3SPのピンホール破損した試料においては，Table 5にみられるように，内圧が減少するにつれ破損時間が増加する傾向が認められる。R2SP，およびR4SPの試料B51－2，B54－1のピンホール近傍ないしはラプチャー開口位置における断面の様子をPhoto. 18およびPhoto. 19に示す。

この断面においてもPhoto. 3およびPhoto. 4と同様な水素化物がみられる。R2SPの試料B51－2の断面においては，内側からのクラック発生がほとんど見られない。また，プレフローの窪みがみられないのは，ピンホールがプレフローの入っていない部分で生じたためである。一方，R4SPの試料B54－1においてはラプチャーはプレフロー部で生じており，かつ管内面の，ラプチャー部と反対側の部分には多数の自然発生クラックがみられる。ラプチャー部は，管の外側ほどネッキングが大きく，外側は延性破壊したことを示している。

R3SPの試料B52－1のピンホール発生部を人為的に割ってその破断面を観察したのがPhoto. 26である。試料B52－1においては，ピンホールないしはその近傍の様子を観察するために，Fig. 24に示す様な破面試料加工を行なった。まず，試料からピンホールを含む部分をリング状に切り出し，ピンホールの発生した位置で裂き，半円状の試験片を作る。試料は全体的にヨウ素を吸収し，かなり脆化しているので比較的容易にピンホールを含むとみられる破面が得られる。Photo. 26においてはピンホールが明確には区別できないものの，Fig. 25の下部に模式的に示す様に管内面に試験前につけられたプレフローの筋と，内面から発生したクラックの先端が外面に達していることをうかがわせるようなパターンが見える。その外側の，破裂した瞬間に生成した破断面はほとんど脆性破壊を示している。ただ，破断の表面はヨウ素ないしはヨウ化物で厚く覆われているので，真の金属面の様子は推定するのみである。

また，R4SPの試料B54－1のラプチャー開口部の破断面を観察したのがPhoto. 27である。この試料の破面観察の方法として，Fig. 25に示すように試料のバルーニング部分を点線で示したように管の中心軸に垂直な面によって切断し，さらにラプチャー開口部を含む部分を切り出し，観察試験片を作成した。Photo. 27においても，ラプチャー開口部の内面は脆化面，すなわちクラックの部分は層状，片状の脆化面を示し，その外面は延性破面と思われるが，表面を覆ったヨウ化物のため明確には観察されない。

(3) 試験No. R5S～R7S

照射材にプレフロー無しで単調負荷をかけたケースであるR5S～R7Sの負荷履歴等を，Figs. 15～17に示し，破損部分の外観をPhotos. 9～11に示す。いづれのケースもピ

ンホール破損であり，外面からの目視ではその位置を観察できない。しかし，Photo.２０およびPhoto.２１の断面写真には，明らかに貫通孔が観察される。Ｒ５Ｓの試料Ｂ５３－２においては，Photo.２０にみられるように貫通孔はかなり大きい。これは，複数のクラックの発生，成長，合体によってクラックとクラックの間にある金属相が試料作成時の機械研磨の際にはがれ落ちた空洞と思われる。また，貫通孔の根元付近の内表面は，ヨウ素による侵食を受けて凹凸を見せている。

Ｒ７Ｓの試料Ｂ５５－３の断面を示すPhoto.２１においては，ほとんど半径方向に鋭いクラックが延びている。Photo.２０およびPhoto.２１とも偏光写真による結晶粒の形状からは，クラック周囲でのマクロな塑性変形は認められない。

Photo.２８は，試料Ｂ５５－２のピンホール位置をFig.２４に示した方法で管の中心軸に変行な面によって縦に割った断面を観察したもので，著しい脆性破面となっている。特に，管の中心軸にほぼ並行に伸びる多数の偏平な空洞は，水素化物によってできた形状と思われる。

(4) 試験No. Ｒ８ＣＬＰ～Ｒ１１ＣＬＰ

照射材を周期的に変動する負荷によって試験したケースであるＲ８ＣＬＰ～Ｒ１１ＣＬＰの負荷履歴等をFigs.１８～２１に，同じく破損部分の外観をPhotos.１２～１５に示す。Ｒ８ＣＬＰ，Ｒ９ＣＬＰの場合は，破損までのサイクル数が２および１であるので，正確には「単なる変動負荷」と言うべきである。Ｒ１１ＣＬＰの試料Ｂ５３－３を除いて破損はいづれもプレフローが入っている範囲内で生じている。

Photos.２２～２４にＲ８ＣＬＰ～Ｒ１０ＣＬＰの試料断面を示す。Ｒ８ＣＬＰにおけるピンホール破損の試料Ｂ５２－２の断面写真Photo.２２を見ると，ほとんど半径方向に鋭いクラックが伸びている。ラプチャー破損したＲ９ＣＬＰ，Ｒ１０ＣＬＰの試料Ｂ５２－３，Ｂ５３－１の断面写真Photo.２３およびPhoto.２４には外側が延性破壊している様子が観察される。また，Photo.２３には，内面に多少の小さな初期クラックが見られる。

同じく試料Ｂ５２－３，Ｂ５３－１の破断面写真をPhoto.２９およびPhoto.３０に示す。Ｒ９ＣＬＰの試料Ｂ５２－３においてはラプチャー破断面が大きいので，Fig.２６に示す様に，試料を管の中心軸に垂直な面によって点線のように切断し，ラプチャー開口部の破断面を図の長方形で囲んだ３部分に分けて観察した。結果をPhoto.２９－Ａ，－Ｂ，－Ｃに示す。

Ｒ１０ＣＬＰの試料Ｂ５３－１は，Fig.２０，Photo.１４に示すように細く短いラプチャー開口を持つ，この破面を観察するために，Fig.２７に示す様にリング状に切り出した部分を裂き，ラプチャー破面の含まれている領域を観察した。結果をPhoto.３０に示す。

いづれの表面もヨウ化物で厚く覆われているが，特徴的なのは管の厚み全体にわたって脆性破面を示していることである。また，開口部に不連続で比較的角張った大きな凹凸がみられるのは，この部分全体が脆化していることを示すものである。

(5) 試験No. Ｒ１２ＣＬ，Ｒ１３ＣＬ

照射材にプレフローを付けずに周期的変動負荷をかけたケース，Ｒ１２ＣＬ，Ｒ１３ＣＬの負荷履歴と試料外観，断面をFigs.２２，２３，Photos.１６，１７およびPhoto.２５に示す。Ｒ１２ＣＬ，Ｒ１３ＣＬの試料Ｂ５４－３，Ｂ５６－３とも，上方電極の近くで破損が生じている。Photo.２５のＢに見られるように，Ｒ１２ＣＬの試料Ｂ５４－３においても，破

断部の管内側は伸びがみられず脆性破壊，管厚みの外側４割ほどの部分はネッキングが生じて延性破壊となっていることがわかる。また，内面には何本かのクラックが生じている。

4. 考　察

4.1 応　力

内圧を受ける円筒の円周方向応力は，円筒の両端の拘束がない場合，式(1)によって表わされる。

$$\sigma_h = \frac{r_{12} P_1 - P_2}{1 - r_{12}^2} + \frac{r_1 (P_1 - P_1)}{1 - r_{12}^2} \cdot \frac{1}{r} \quad \cdots\cdots (1)$$

ただし，　σ_h ：円周方向応力

P_1 ：内　圧

P_2 ：外　圧

r：半　径

r_1 ：内半径

r_2 ：外半径

$r_{12} = r_1 / r_2$

ここで以下に示す試料ジルカロイ管のサイズを用い，外圧 $P_2 = 0$ とおくと，式(1)より

$$\sigma n = 2.89 \cdot P_1 + 113 \cdot P_1 / r_2 \quad \cdots\cdots (2)$$

が得られる。

ただし，$r_1 = 5.398$mm，$r_2 = 6.262$mm，$r_{12} = 0.862$を用いた。

$r = r_1$においてσ$_h = \sigma_1$，$r = r_2$においてσ$_h = \sigma_2$とすると

$\sigma_1 = 6.78\ P_1$ （内面での応力），$\sigma_2 = 5.78\ P_1$ （外面での応力）

となる。

プレフローの箇所は，円周方向の断面がやや減少している。この部分での局所的な円周方向応力σ_3を評価すると，曲率の小さいプレフロー先端での応力拡大を無視すれば，以下のようになる。プレフローの深さは約 0.1 mmであるので，断面積減少分は

$$1 - \frac{r_2 - r_1}{r_2 - r_1 - 0.1} = 1 - \frac{0.864}{0.864 - 0.1} = 0.13$$

すなわち，σ_3はプレフローのない部分に比べて１３％程度増大している。

ここで，実験で加えた内圧からこれらの応力値を算出すると，Table 6 となる。ただし，$\sigma av = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$ とし，〔 〕内はプレフロー箇所での値とする。

断部の管内側は伸びがみられず脆性破壊，管厚みの外側4割ほどの部分はネッキングが生じて延性破壊となっていることがわかる。また，内面には何本かのクラックが生じている。

4. 考　察

4.1 応　力

内圧を受ける円筒の円周方向応力は，円筒の両端の拘束がない場合，式(1)によって表わされる。

$$\sigma_h = \frac{r_{12} P_1 - P_2}{1 - r_{12}^2} + \frac{r_1 (P_1 - P_1)}{1 - r_{12}^2} \cdot \frac{1}{r} \quad \cdots\cdots (1)$$

ただし，　σ_h ：円周方向応力

P_1 ：内　圧

P_2 ：外　圧

r：半　径

r_1 ：内半径

r_2 ：外半径

$r_{12} = r_1 / r_2$

ここで以下に示す試料ジルカロイ管のサイズを用い，外圧 $P_2 = 0$ とおくと，式(1)より

$$\sigma n = 2.89 \cdot P_1 + 113 \cdot P_1 / r_2 \quad \cdots\cdots (2)$$

が得られる。

ただし，$r_1 = 5.398$mm，$r_2 = 6.262$mm，$r_{12} = 0.862$を用いた。

$r = r_1$においてσ$_h = \sigma_1$，$r = r_2$においてσ$_h = \sigma_2$とすると

$\sigma_1 = 6.78\ P_1$ （内面での応力），$\sigma_2 = 5.78\ P_1$ （外面での応力）

となる。

プレフローの箇所は，円周方向の断面がやや減少している。この部分での局所的な円周方向応力σ_3を評価すると，曲率の小さいプレフロー先端での応力拡大を無視すれば，以下のようになる。プレフローの深さは約0.1 mmであるので，断面積減少分は

$$1 - \frac{r_2 - r_1}{r_2 - r_1 - 0.1} = 1 - \frac{0.864}{0.864 - 0.1} = 0.13$$

すなわち，σ_3はプレフローのない部分に比べて１３％程度増大している。

ここで，実験で加えた内圧からこれらの応力値を算出すると，Table 6となる。ただし，$\sigma av = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$とし，〔 〕内はプレフロー箇所での値とする。

4.2 降伏応力と照射硬化

リング引張り試験の結果から，同一材料を単軸引張りした場合に得られる降伏応力の値を推定する。

① 未照射材の350℃における降伏応力は，単軸引張りによるデータでは$\sigma s = 14.0$ kg／cm²（137 MPa），同じく本実験におけるリング引張り試験では$\sigma_R = 166$ MPaであり，その比$R = \sigma_R / \sigma s = 1.21$となる。このRの値がＣＴＬ材，照射材にも適用できると仮定すれば，Table 8の結果が得られる。ただし，〔 〕は推定値を意味する。

ＣＴＬ材の降伏応力の増加は，冷却水との酸化反応による金属相中の酸素濃度増大によると思われる。Table 6とTable 7の値を比較すると，ＣＴＬ材では内圧が250 kg／cm²ではほぼ降伏限界，それ以上では十分降伏点を越えた円周方向応力が加わったと見なせる。また照射材では，いずれのケースでも降伏点以下で，降伏応力の６５～９６％の円周方向応力が加えられたと考えられる。

4.3 ＳＣＣ感受性と破損時間

ジルカロイの照射によるＳＣＣ感受性の変化は，既存の報告により以下のようにまとめられる。[5]

① ＳＣＣ発生に必要な最少（臨界）応力は，中性子照射が～10^{20} n／cm² のレベルになるまで単調に増加し，それ以上の照射では照射量とともに減少していく。

② ＳＣＣ破断までに要する時間Tfは，照射量が10^{20} n／cm²のレベルまでは未照射材と比較して照射量とともに減少し，それ以上の照射量ではさらに減少することはない。

③ 照射による降伏応力の変化は，10^{23} n／cm²程度まで照射にともなって増大し，それ以上では飽和する。破断伸びは降伏応力とはちょうど逆の経過をたどる。

④ 照射材は，照射量が10^{20} n／cm² になると冷間加工などの加工履歴は感受性にほとんど無関係となる。

①～③より，ジルカロイのＳＣＣ感受性は照射量～10^{20} n／cm²を境界として，その前後で感受性変化のメカニズムが異なると考えられている。

本実験の試料では，照射量は2.3×10^{19} n／cm²であるので，ＳＣＣ発生のための臨界応力はかなり増大したレベルにあり，同時にTfはかなり減少していると思われる。

本実験においては，ＣＴＬ材のＳ１ＳＰ～Ｓ４ＣＬＰシリーズと照射材のＲ１ＳＰ～Ｒ４ＳＰシリーズとを比較すると，後者の破損時間Tfが短い傾向がみられる。しかし，析出した水素化物の存在，プレフローの破損促進効果などが総合的にTfに効いているので，定量的な比較をするにはデータ不足である。

また，照射材での試験のうちプレフローの無いケースＲ５Ｓ，Ｒ６ＳとＲ１２ＣＬ，Ｒ１３ＣＬとを比較すると，前者のTfが短い，これは，前者が単調負荷であるのに対して後者は変動負荷であるために平均的な応力が低かったためと思われる。

Ｒ１２ＣＬ，Ｒ１３ＣＬ（プレフロー無し）およびＲ１１ＣＬＰ（プレフロー以外の箇所で破損）と，プレフローの付いた，しかもプレフローを含む部分で破損した試験Ｒ８ＣＬＰ～Ｒ１０ＣＬＰの結果を比較すると，後者がＴｆが短い。これは，プレフローの効果，すなわちクラック発生までの時間が短くて済んだためと思われる。本実験におけるプレフローは，先端の局率半径が大きく，形状が丸みを帯びているので，応力集中の効果は少ない。しかし，「引っかき傷」としてヨウ素との反応を開始しやすい活性な場所であることから，クラック発生を促す傷として十分作用したと思われる。

4.4 ヨウ度濃素

ジルカロイのヨウ素ＳＣＣを生じるために必要なヨウ素濃度Ｉｃのしきい値は，文献によれば[2]

ＳＣＣが２０時間以内に起こるためには　Ｉｃ≃0.1 mg／cm³，
これ以上の長時間を要する場合は　Ｉｃ≃10^{-3} mg／cm³，
表面濃度としては　≃10^{-3} mg／cm²

である。また，粒内割れを引き起こすために必要な濃度は≃10^{-4} mg／cm²，それ以上の濃度増大の効果が現われない飽和値は≃10^{-2} mg／cm²とされている。

本実験における試料内部の空間は，厳密に言えば下部電極の細孔を通じて加圧シリンダーまでつながっている。したがって試料・加圧系の全内部空間容積は約 200 cm³ である。ここに１ｇのヨウ素が均一に分布したと仮定しても５mg／cm³の濃度であり，しきい値をはるかに越えている。

ところで，試料内面の中子の周囲の空間と加圧配管系の間には僅かな隙間しかなく，コンダクタンスは非常に悪いので，試料内面で高温ガスになったヨウ素が加圧配管系やシリンダー壁にまで届き，沈着する可能性は実質的には無視し得るほどであろう。すなわち，ヨウ素は加熱期間中十分な量が試料内部に閉じ込められていたと考えられる。事実，ラプチャーした瞬間には褐色の気体の噴出が観察された。また，多くの試料では試験後は管内面に黄褐色のヨウ化物が管内全域にわたって付着していた。

ここで，試料内部のヨウ素蒸気圧を見積ってみると，以下のようになる。試料内部の空間の最低温度箇所は加圧シリンダーの壁面であり，この位置はほぼ室温と見なせる。室温（２０℃）でのヨウ素平衡圧は，26.6 Paである。[6]　ところが，実質的には試料内部の空間と加圧配管系とは分離されているので，ヨウ素平衡圧は試料自身の最低温度部分での値として評価すべきである。最低温度は下部電極に包まれた部分と思われ，温度は試料の高さ方向中央部が 350℃のとき 200℃程度と推定される。200℃におけるヨウ素の平衡圧は１４６.４kPaである。[6] Cubicciottiらは，ジルカロイーヨウ素反応をヨウ素蒸気圧 0.0３～４Paにおいて発生させているので，[7] 本実験におけるヨウ素圧は反応を引き起こすのに十分な値であると思われる。

4.5 サイクリック負荷と単調負荷

この２つの負荷モードの効果の差については，一般論として以下の考察が可能である。Fig. ２８に模式的に示すように，サイクリック負荷は単調負荷と異なり負荷が高低２レベルの間を遷移する期間，その２レベルに対応した定常クリープ速度からかなり異なった速度の過渡的クリープ状態を生じる。低レベル負荷から高レベル負荷へ移行するときの遷移クリープ速度は，高レベル負荷状態の定常クリープ速度よりかなり大きいことが一般的に考えられる。このことは，クラック先端域（塑性域）での転位の移動，増殖，格子面の滑りなどが大きいことを意味する。このことが複数のクラックの成長の促進，成長したクラック相互の合体の促進につながり，結局は一つの大きなクラックの成長，管の破損へと導く可能性がある。

ただし本実験においては，結果を全般的にみて，単調負荷と変動負荷に対する破損挙動の差は明かでなく，何らかの差があったとしてもそれを見いだすにはデータ不足であると思われる。

4.6 ジルコニウム水素化物の影響

水素化物は，断面組織写真 Photos. ３，１８，２０～２４においては，かなりの密度で観察され，特に，Photos. ２３，２４では著しい。一方，Photos. ４，１９，２５においては比較的低密度である。写真で観察される密度と実験条件との相関は，Table ５を参照して，低密度の試料が破損時間が長いケース，高密度の試料が破損時間が短いケースである傾向が伺われる。しかし，他の試料にも破損時間の短いケースや長いケースがあり，この相関は明確ではない。

通常，ジルカロイへの水素浸透は表面の酸化膜によってかなり抑制されるので，組織写真に現れた水素化物が JMTRの２７０℃の水中において外表面での１４５６時間の酸化反応によって生成した水素の浸透によるものとしては異常に多量であると思われる。したがって，この水素化物は本実験中に生成した可能性がある。水素発生源として考えられるのは，試料のジルカロイ管の内部の中子の表面に溶射したポーラスなセラミック皮膜に含まれていた水分である。この水分が加熱とともに蒸発し，試料内面で酸化反応を引き起こし，水素を生成したと思われる。本実験においては，管内面の酸化膜は高濃度のヨウ素雰囲気中で生成した皮膜であるので水素透過を抑制する性質が弱い可能性があり，このことが多量の水素透過を許し水素化物を発生させたと思われる。

一方，水素化物は 350 ℃においては延性を持つので，ＳＣＣ感受性に直接的な効果を及ぼすとは考えられない。断面の金相写真においても初期の発生クラックが水素化物を連ねて伸びている様子は観察されない。

5. まとめ

非照射および照射材ジルカロイ管を用いて内圧負荷型のヨウ素ＳＣＣ試験を行なった結果，以下の結論を得た。

(1) 単調負荷と変動負荷の２種類の負荷モードによる試験における破損時間には明確な差は認められない。

(2) 破損形態は，ピンホール破損とラプチャー破損の２種類が観察され，破面はいずれも脆性面を示したが，負荷条件との相関は明確ではない。

(3) 負荷の強度は，破損時間の長短にある程度反映する。

(4) プレフローは，ヨウ素との反応を開始しやすい活性な場所として作用すると思われる。

(5) 高濃度のヨウ素雰囲気中で生成したジルカロイの酸化皮膜は，水素透過を抑制する性質が弱い可能性がある。

参考文献

(1) EPRI−NASA Cooperative Project on Stress Corrosion Cracking of Zircaloys, EPRI NP−717, March 1978

(2) Stress Corrosion Cracking of Zircaloys, EPRI NP−1329, March 1980

(3) R.L. Jones, E. Smith and A.K.Miller, Observations on Damage Accumulation during Iodine-Induced Stress Corrosion Cracking of Zircaloy Cladding, Nucl. Technol., vol. 42, №3, pp. 233−236, March 1979

(4) G.Brun, J.Pelchat, J.C. Floze and M.Galimberti, Cumulative Fatigue and Creep-Fatigue Damage at 350℃ on Recrystallized Zircaloy-4, 7 th Int. Conf. on Zirconium in Nuclear Industry, 24−27 June 1985, France

(5) SCCIG：A Phenomenological Model for Iodine Stress Corrosion Cracking of Zircaloy, EPRI NP−1798 (vol. 1), April 1981

(6) 化学便覧，日本化学会編，　丸善（1975）

(7) D. Cubicciotti, S.M. Howard and R.L. Jones, The Formation of Iodine−Induced Stress Corrosion Cracks in Zircaloys, J. Nucl. Mater., 78, pp. 2−16, 1978

5. まとめ

非照射および照射材ジルカロイ管を用いて内圧負荷型のヨウ素ＳＣＣ試験を行なった結果，以下の結論を得た。

(1) 単調負荷と変動負荷の２種類の負荷モードによる試験における破損時間には明確な差は認められない。

(2) 破損形態は，ピンホール破損とラプチャー破損の２種類が観察され，破面はいずれも脆性面を示したが，負荷条件との相関は明確ではない。

(3) 負荷の強度は，破損時間の長短にある程度反映する。

(4) プレフローは，ヨウ素との反応を開始しやすい活性な場所として作用すると思われる。

(5) 高濃度のヨウ素雰囲気中で生成したジルカロイの酸化皮膜は，水素透過を抑制する性質が弱い可能性がある。

参考文献

(1) EPRI−NASA Cooperative Project on Stress Corrosion Cracking of Zircaloys, EPRI NP−717, March 1978

(2) Stress Corrosion Cracking of Zircaloys, EPRI NP−1329, March 1980

(3) R.L. Jones, E. Smith and A.K. Miller, Observations on Damage Accumulation during Iodine-Induced Stress Corrosion Cracking of Zircaloy Cladding, Nucl. Technol., vol. 42, No. 3, pp. 233−236, March 1979

(4) G. Brun, J. Pelchat, J.C. Floze and M. Galimberti, Cumulative Fatigue and Creep-Fatigue Damage at 350℃ on Recrystallized Zircaloy-4, 7 th Int. Conf. on Zirconium in Nuclear Industry, 24−27 June 1985, France

(5) SCCIG：A Phenomenological Model for Iodine Stress Corrosion Cracking of Zircaloy, EPRI NP−1798 (vol. 1), April 1981

(6) 化学便覧，日本化学会編，　丸善（1975）

(7) D. Cubicciotti, S.M. Howard and R.L. Jones, The Formation of Iodine-Induced Stress Corrosion Cracks in Zircaloys, J. Nucl. Mater., 78, pp. 2−16, 1978

Table 1　ジルカロイ－２の化学組成とサイズ

Al	C	Cu	Hf	Mn	N	O	Pb
47ppm	140ppm	14ppm	64ppm	<25ppm	31ppm	1220ppm	<25ppm
Si	Ti	W	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
63ppm	<25ppm	<25ppm	1.53%	0.14%	0.11%	0.05%	Bal.

内径：10.795±0.002 mm.　肉厚：0.864±0.002 mm.

Table 2　末照射ジルカロイ－２（ＮＲ材）の機械的性質（公称値）

		RT	343℃
降伏強さ	kg／mm²	38.7	14.0
引張り強さ	kg／mm²	54.5	26.9
伸び	%	35.3	42.4

照射材の履歴

照射材履歴：大洗ＯＷＬ－２における外圧クリープ測定用試料で，ヘリウムガスを内部に大気圧封入し，－６ kg/cm²の外圧をかけ，２７０℃にて３サイクル（１４５６時間）保持した．　この結果，受けたフルーエンスは高速中性子()1MeV)にて　２．３×１０^{19}ｎ／ｃｍ² （平均）となった．

Table 3　ＯＷＬ－２の性能

熱中性子束：３ｘ１０^{13}　ｎ／ｃｍ²ｓｅｃ．
速中性子束：１．５ｘ１０^{13} ｎ／ｃｍ²ｓｅｃ．（>1MeV）
γ発熱率　：０．５　Ｗ／ｇ
冷却材：　軽水，　冷却材流量：　１１００　ｋｇ／ｍｉｎ．（最大）
冷却材温度：　２７０℃
冷却材圧力：　７３　ｋｇ／ｃｍ²Ｇ　（最高）

	炉内	炉外
テストセクション部有効寸法	117.8φ x 750ℓ mm	87.6φ x 750ℓ
冷却水流量：	２００～３００　ｋｇ／ｍｉｎ．	
平均流速：	0.70-1.06 m/sec	0.95-1.43

Table 4　リング引張り試験結果（350°C，Ar雰囲気）

		試料				
		未照射材 No.1	CTL材 No.1	CTL材 No.2	照射材 No.1	照射材 No.2
試料条件	平行部原寸法 (mm)	t:0.867 w:4.765	t:0.871 w:4.628	t:0.867 w:4.584	t:0.870 w:4.584	t:0.867 w:4.477
	原断面積 (mm^2)	8.263	8.062	7.966	7.976	7.763
降伏応力 (MPa)		166	182	197	277	290
引張り強さ (MPa)		231	238	246	304	331
クロスヘッド破断伸び (mm)		3.1	2.7	2.7	2.3	2.3

Table 6　内圧と円周方向応力の比較対応

内圧 P_1 (kg/cm^2)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	$\sigma_{eq.}$ (MPa)
250	166 [188]	139 [157]	153 [173]
275	183 [207]	153 [173]	168 [190]
300	195 [221]	167 [189]	181 [205]
330	215 [243]	183 [207]	199 [225]

Table 7　降伏応力の推定（350°C）

	単軸引張りによる σ_s	リング引張り試験による σ_R
未照射材	137 MPa	166 MPa
CTL材	[158 MPa]	190 MPa（平均値）
照射材	[234 MPa]	283 MPa（平均値）

Table 5 Summary of Test Results and Related Informartion

(1) Claddings were placed in a non-irradiated section of JMTR water loop.
●: Failure occurred inside the pre-flaw zone.
○: Failure occurred outside the pre-flaw zone.

Run Type	Specimen No.	Irradiation	Pre-flaw	Load Type	Period and No. of Cycles	Internal Pressure (kg/cm²)	Failure Time	Failure Mode	Fig. No.	Photograph No.		
										Overview	C-section	Surface
S1SP	S-2	None(1)	Yes	Monot.	-	250, 300	2hr. 8min.	● Pinhole	7	—	—	—
S2SP	S-3			Monot.	-	280	9hr. 5min.	● Rupture	8	—	3 (A)	—
S3SP	S-4			Monot.	-	280, 300	5hr.32min.	● Rupture	9	—	4 (A)	—
S4CLP	S-5			Cyclic	94min.×8	280 - 300 - 330	13hr.27min.	● Pinhole	10	—	—	—
R1SP	B51-1	Yes	Yes	Monoto -nous	-	300	1hr. 29min.	● Pinhole	11	5	—	—
R2SP	B51-2					280	4hr. 12min.	● Pinhole	12	6	18 (A)	—
R3SP	B52-1					275	8hr. 24min.	○ Pinhole	13	7	—	26
R4SP	B54-1					300	5hr.	○ Rupture	14	8	19 (B)	27
R5S	B53-2	Yes	No	Monoto -nous	-	300	4hr. 29min.	Pinhole	15	9	20 (A)	—
R6S	B55-2					300	3hr. 40min.	Pinhole	16	10	—	28
R7S	B55-3					275	7hr. 16min.	Pinhole	17	11	21 (A)	—
R8CLP	B52-2	Yes	Yes	Cyclic	124min.×2	275 - 300	2hr. 58min.	○ Pinhole	18	12	22 (A)	—
R9CLP	B52-3				64min.×1	275 - 300	1hr. 22min.	○ Rupture	19	13	23 (A)	29
R10CLP	B53-1				16min.×10	275 - 300	2hr. 37min.	○ Rupture	20	14	24 (A)	30
R11CLP	B53-3				28min.×12	275 - 300	5hr. 40min.	● Pinhole	21	15	—	—
R12CL	B54-3	Yes	No	Cyclic	14min.×35	275 - 300	8hr. 16min.	Rupture	22	16	25 (B)	—
R13CL	B56-3				28min.×17	275 - 300	7hr. 50min.	Pinhole	23	17	—	—

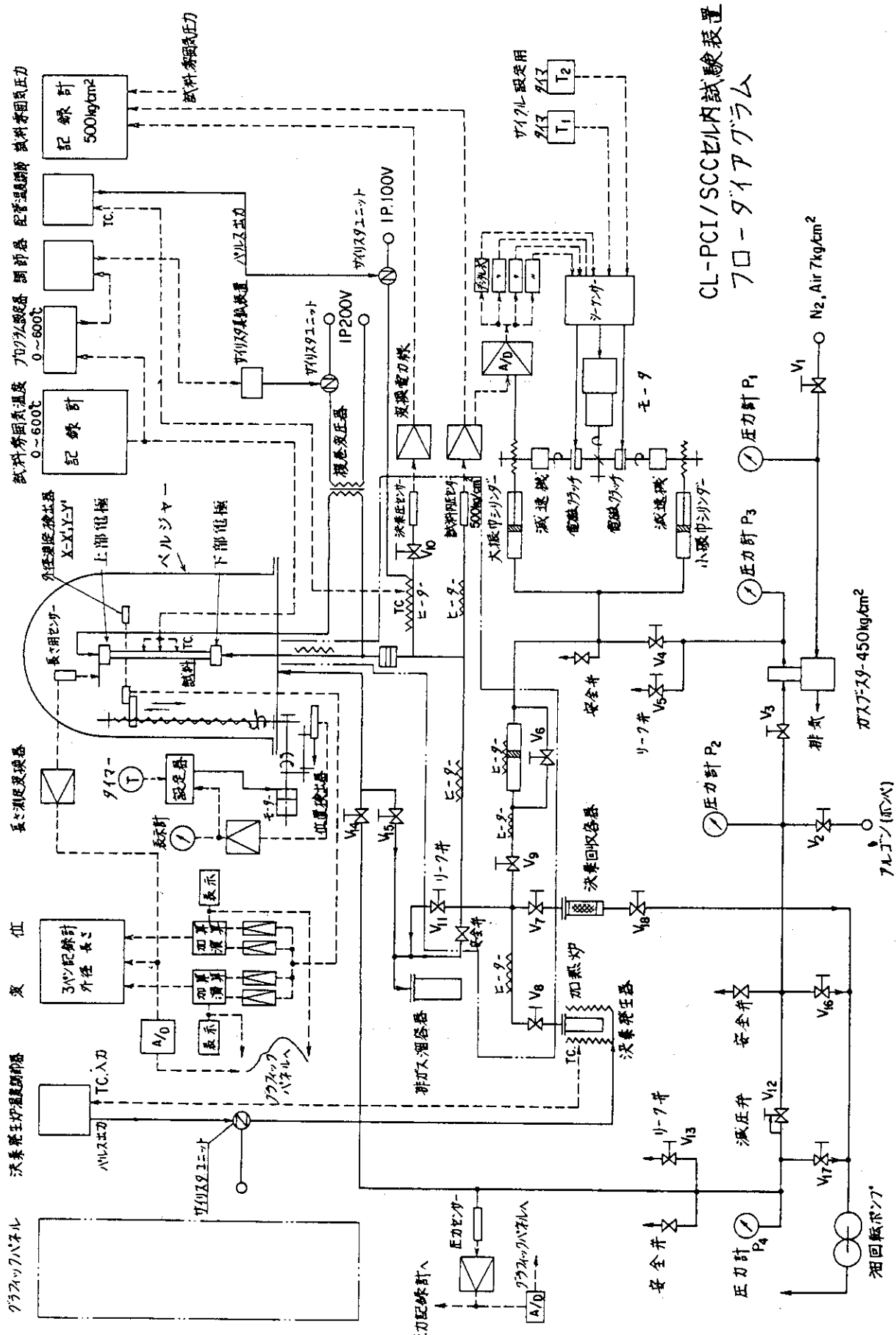


Fig.1 ヨウ素ＳＣＣ試験装置系統図

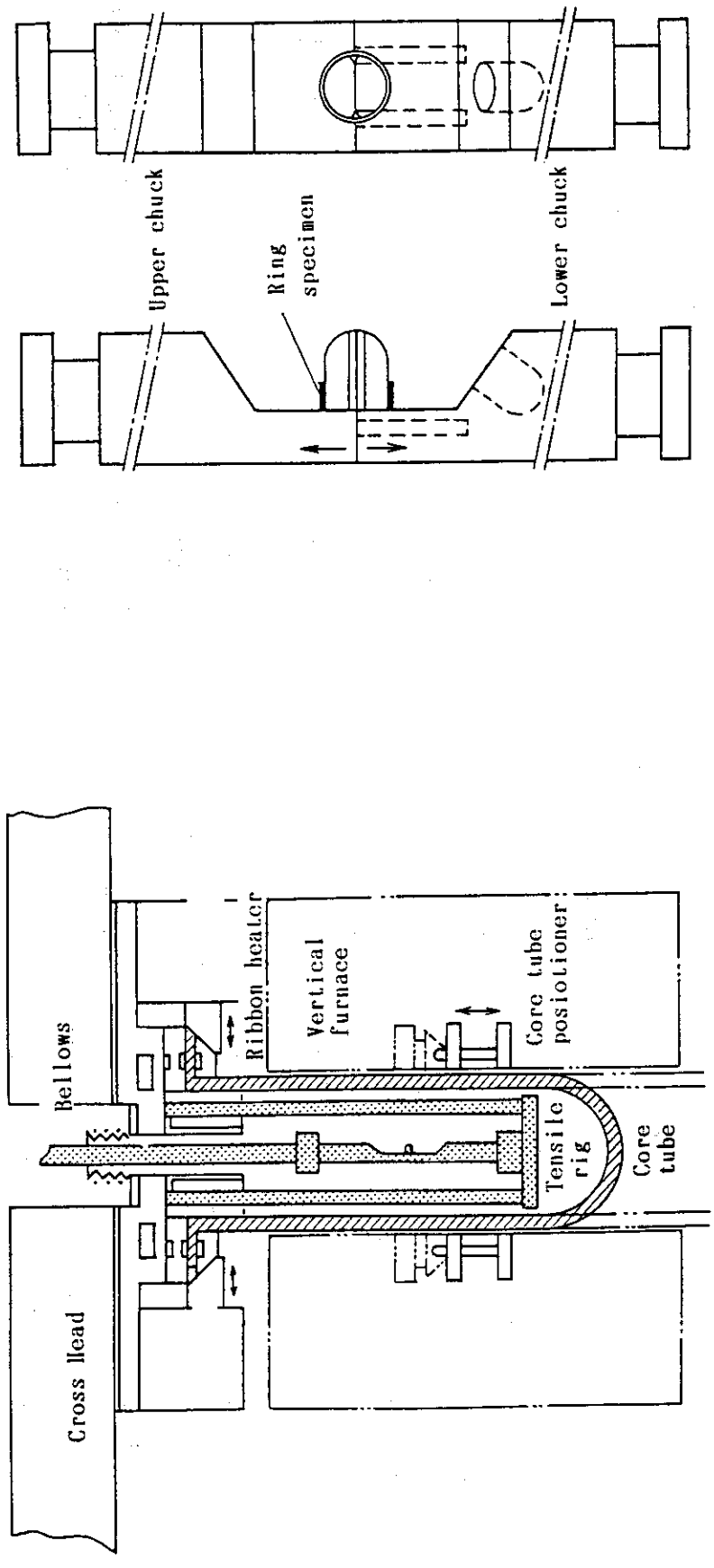


Fig. 2 Apparatus of ring tensile test in controlled atomsphere.

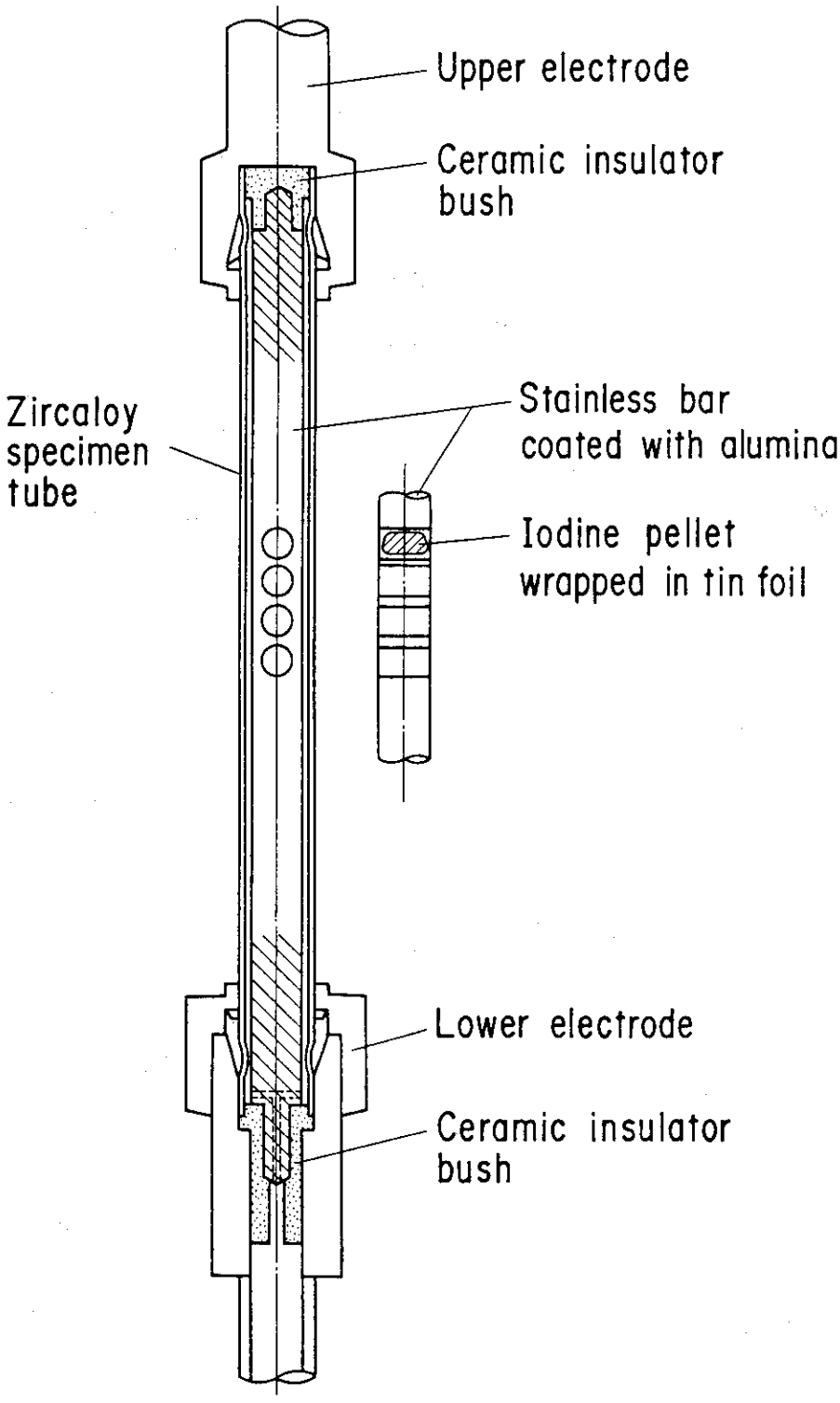


Fig. 3 Structure of Test Rig for Zircaloy SCC Experiment

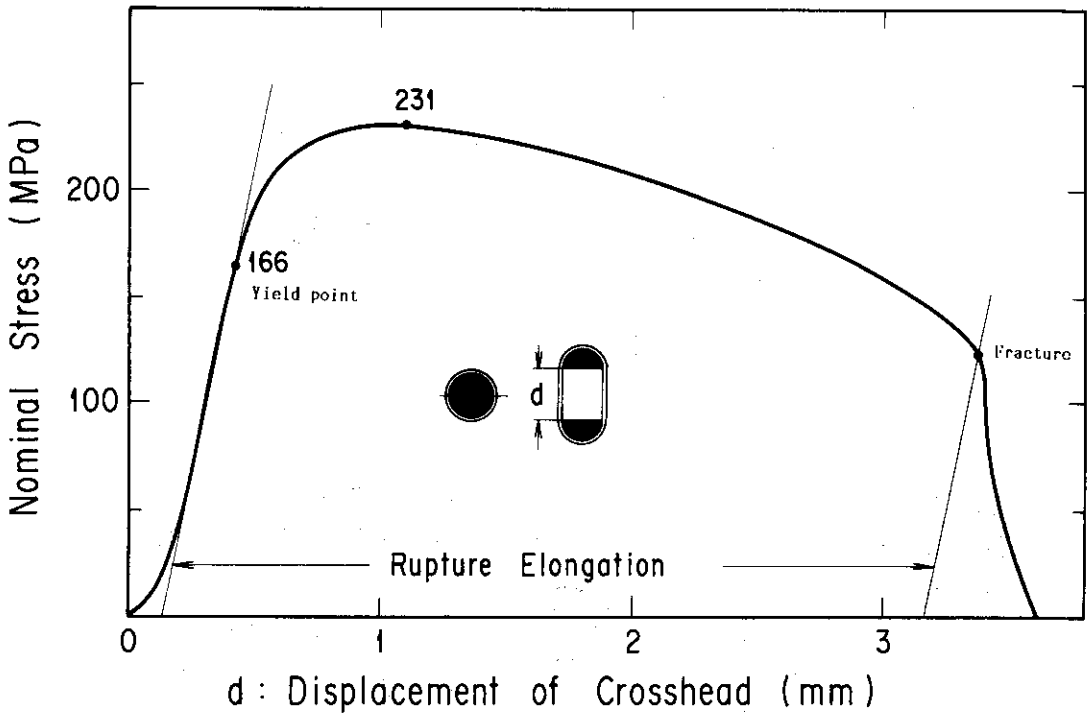


Fig. 4 Stress-displacement curve in ring-tensile test of non-irradiated zircaloy-2 tube. The test has been conducted at 350 °C in Argon with cross-head speed of 0.1 mm/min.

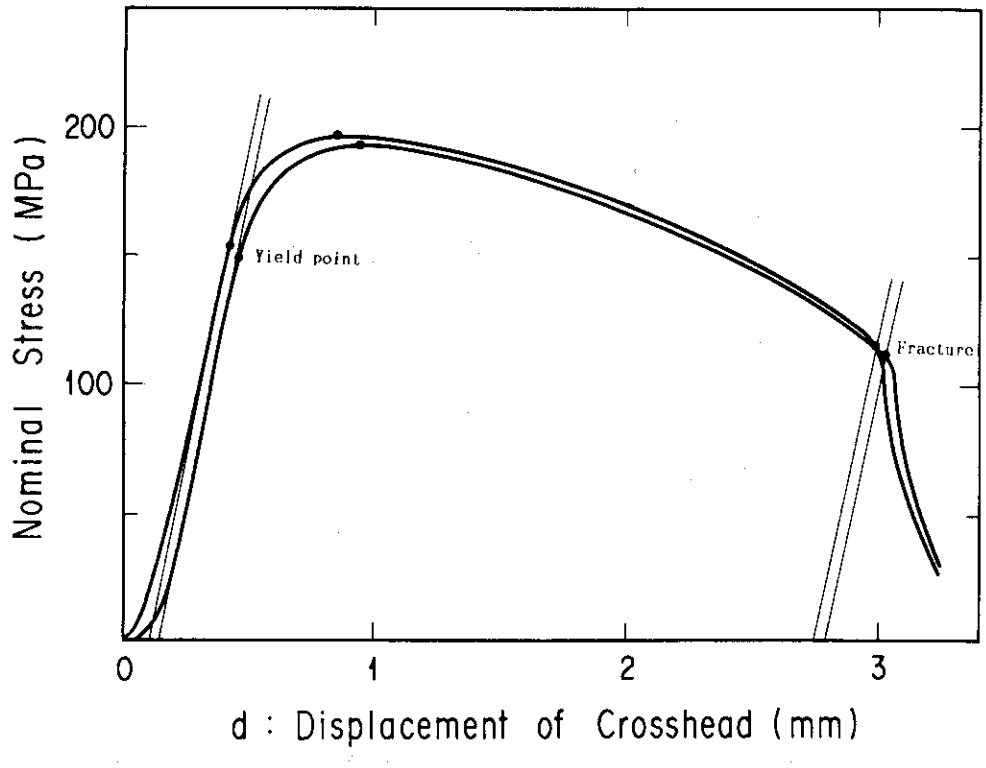


Fig. 5 Stress-displacement curves in ring-tensile test of zircaloy-2 tube specimens which have been immersed in the non-irradiated section of JMTR water loop. The test has been conducted at 350 °C in Argon with cross-head speed of 0.1 mm/min.

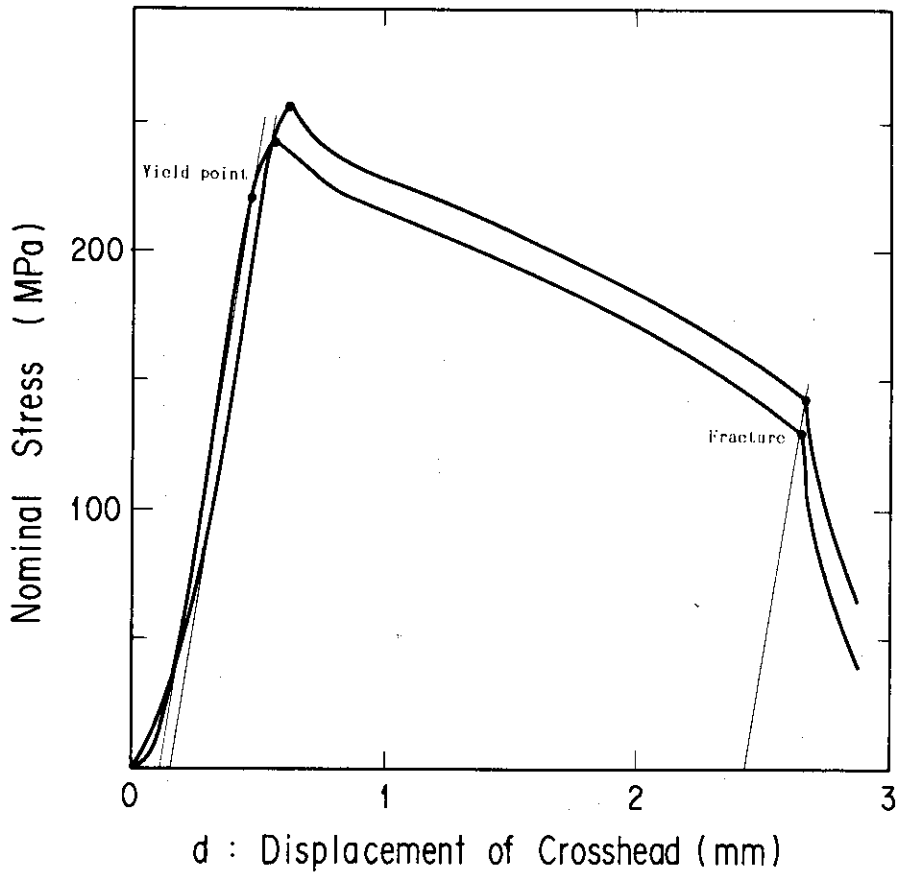


Fig.6 Stress-displacement curve in ring-tensile test of irradiated zircaloy-2 tube. The test has been conducted at 350 °C in Argon with cross-head speed of 0.1 mm/min.

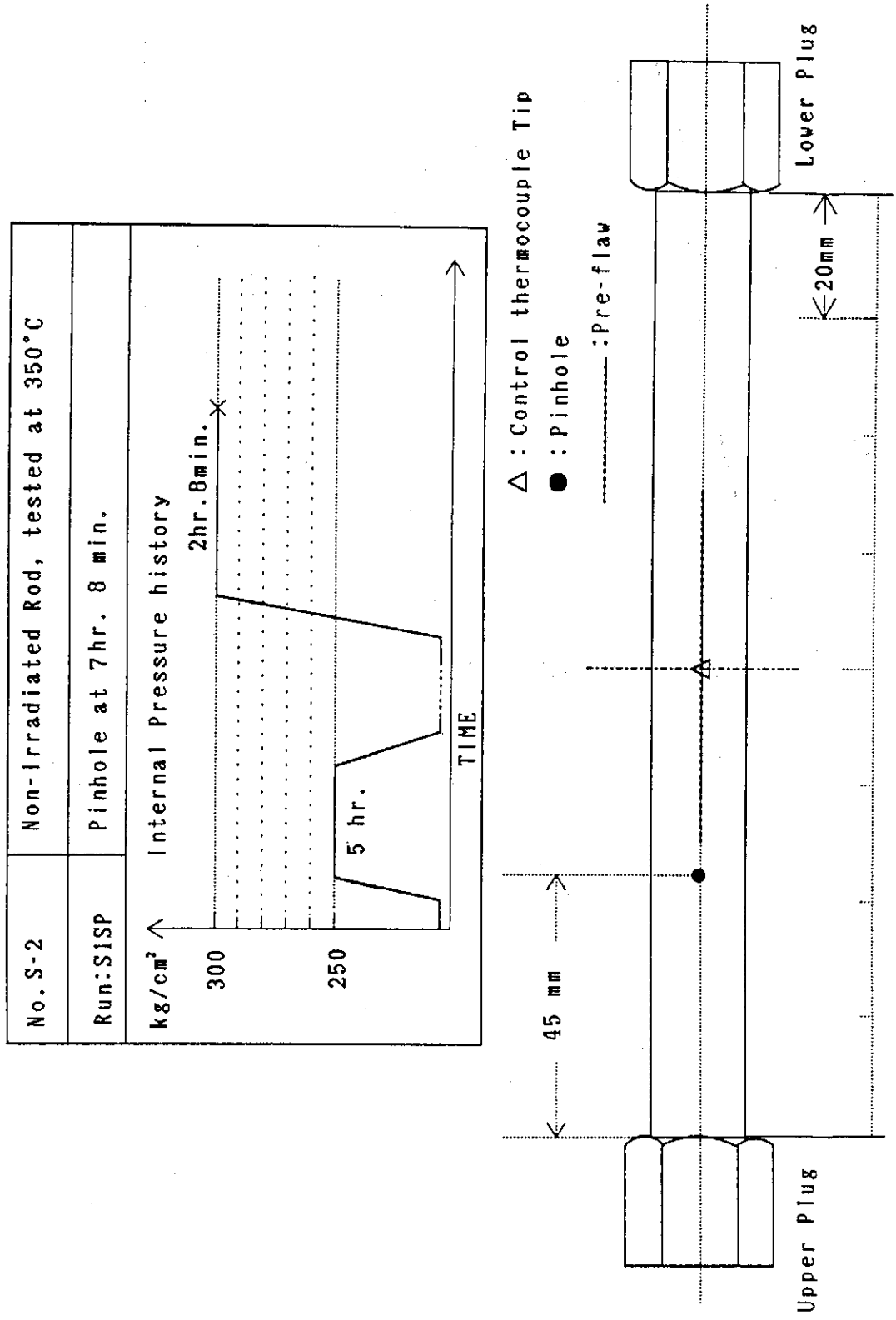


Fig. 7 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

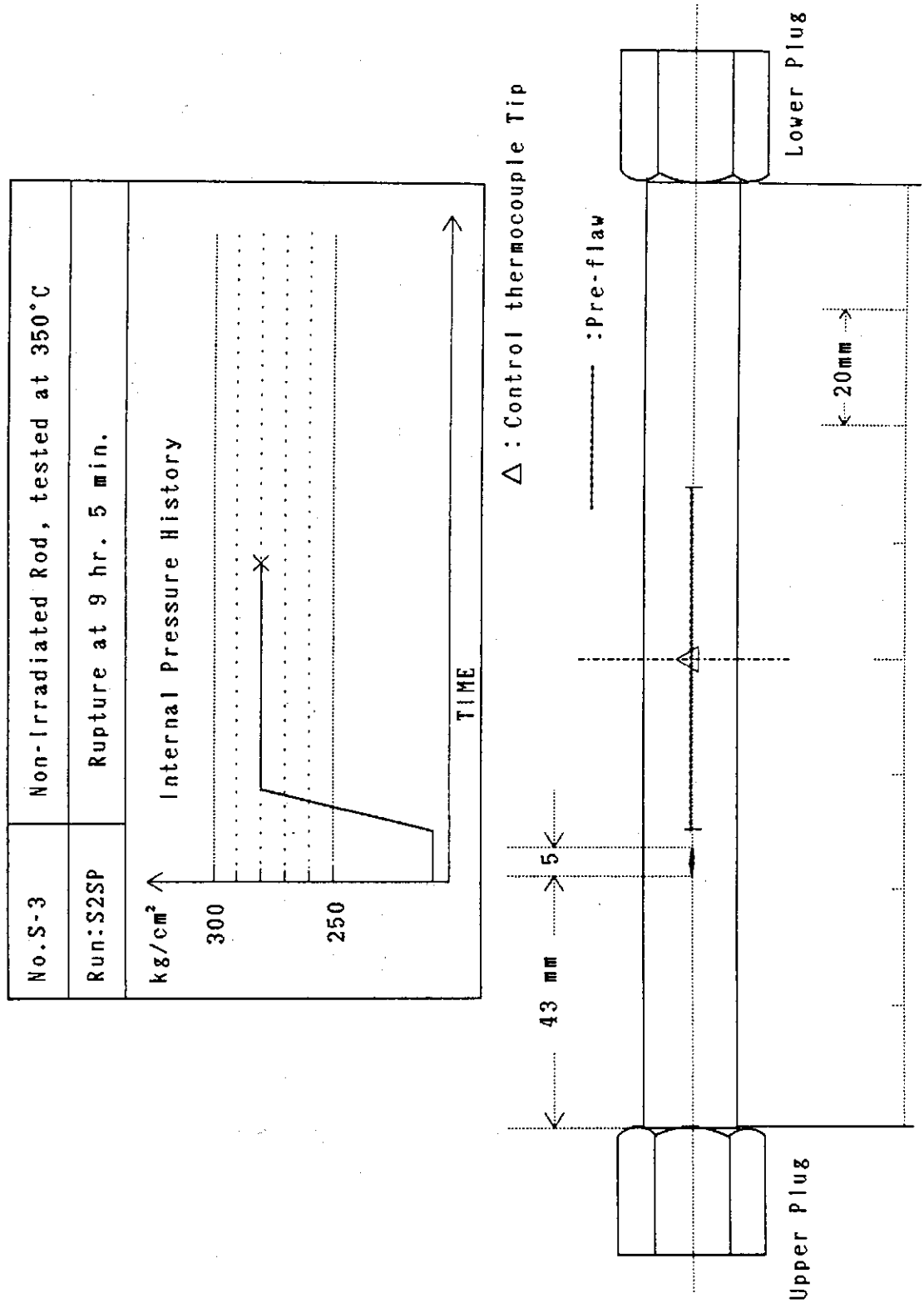
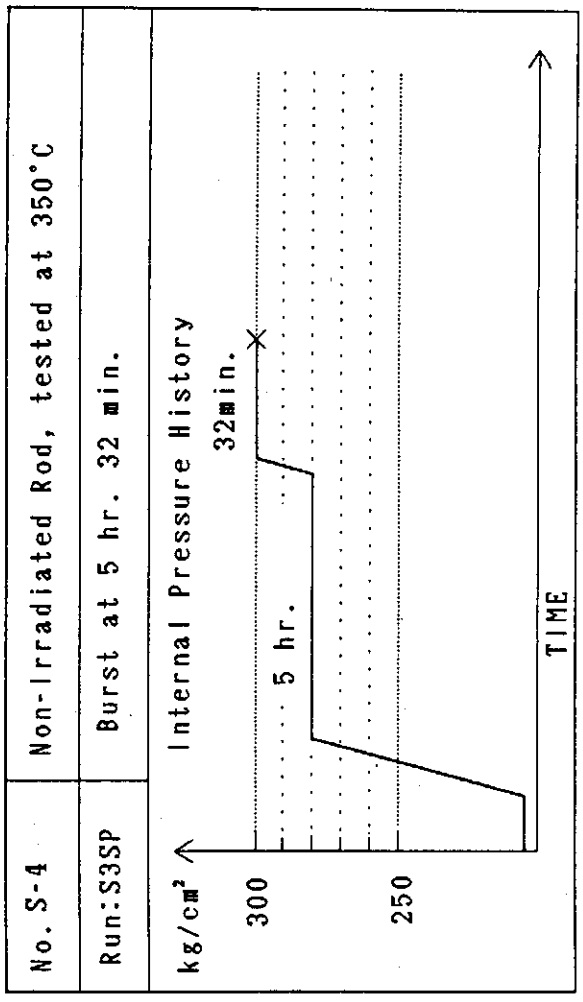


Fig. 8 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.



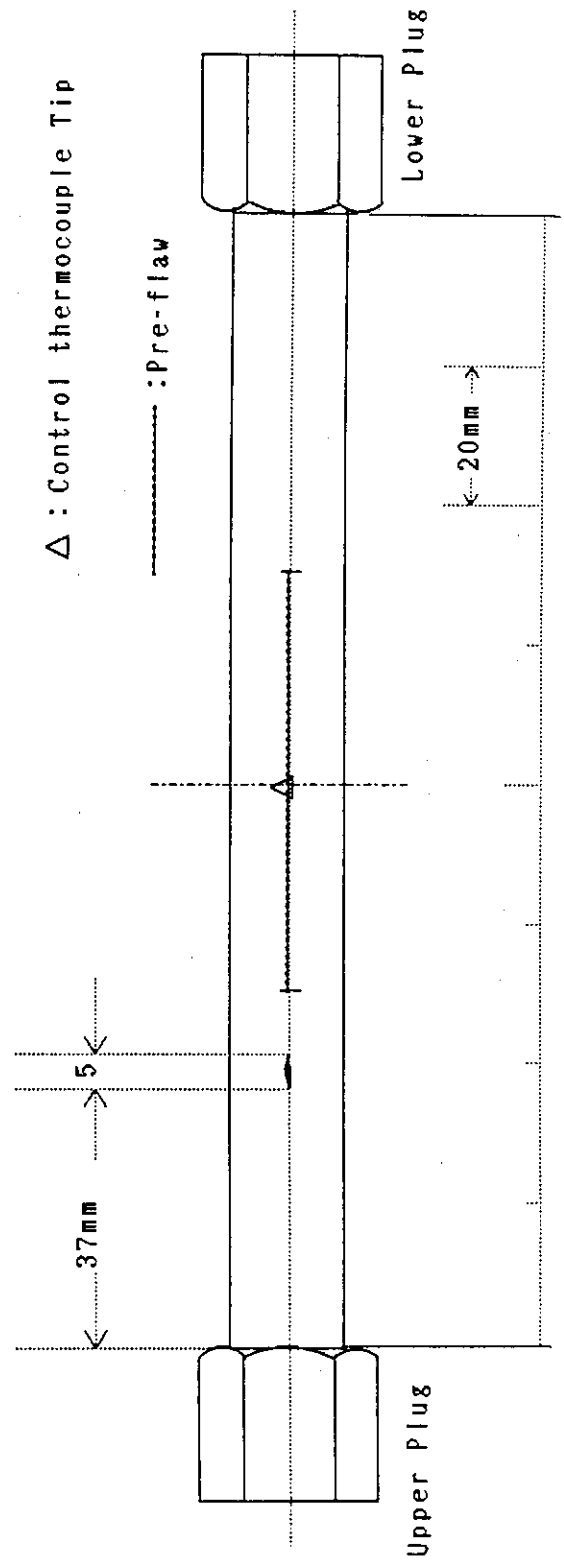


Fig. 9 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

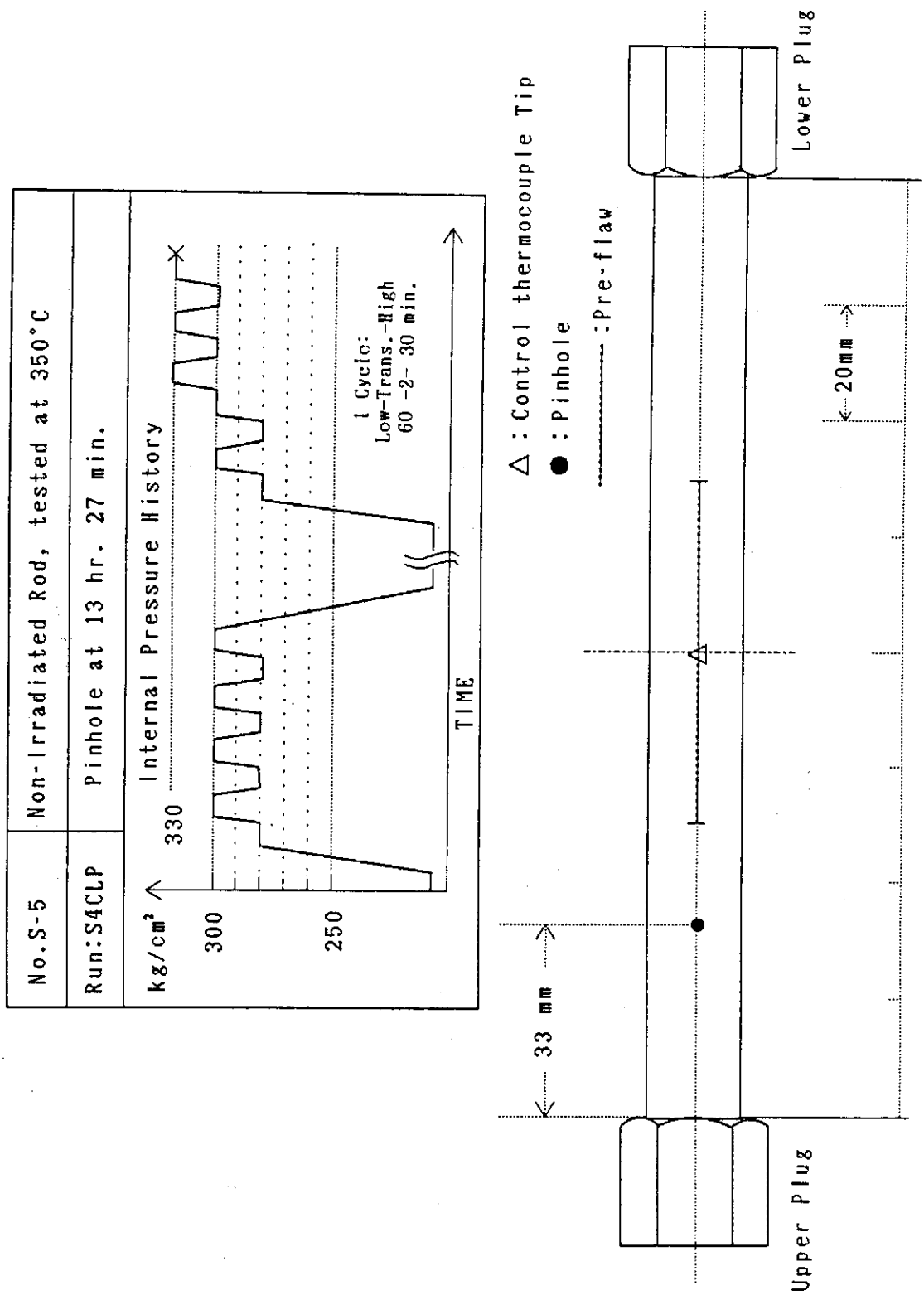


Fig.10 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

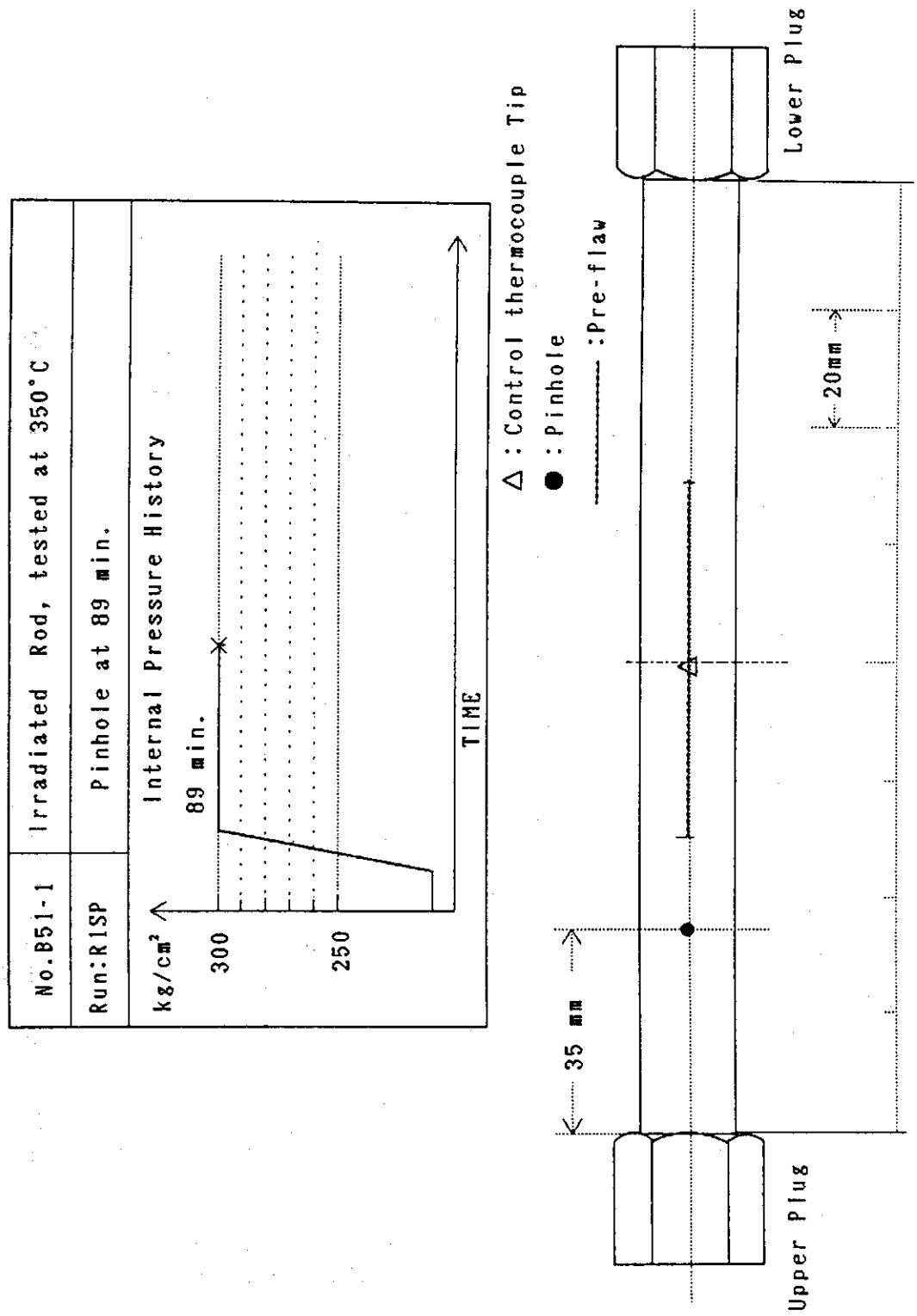


Fig.11 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

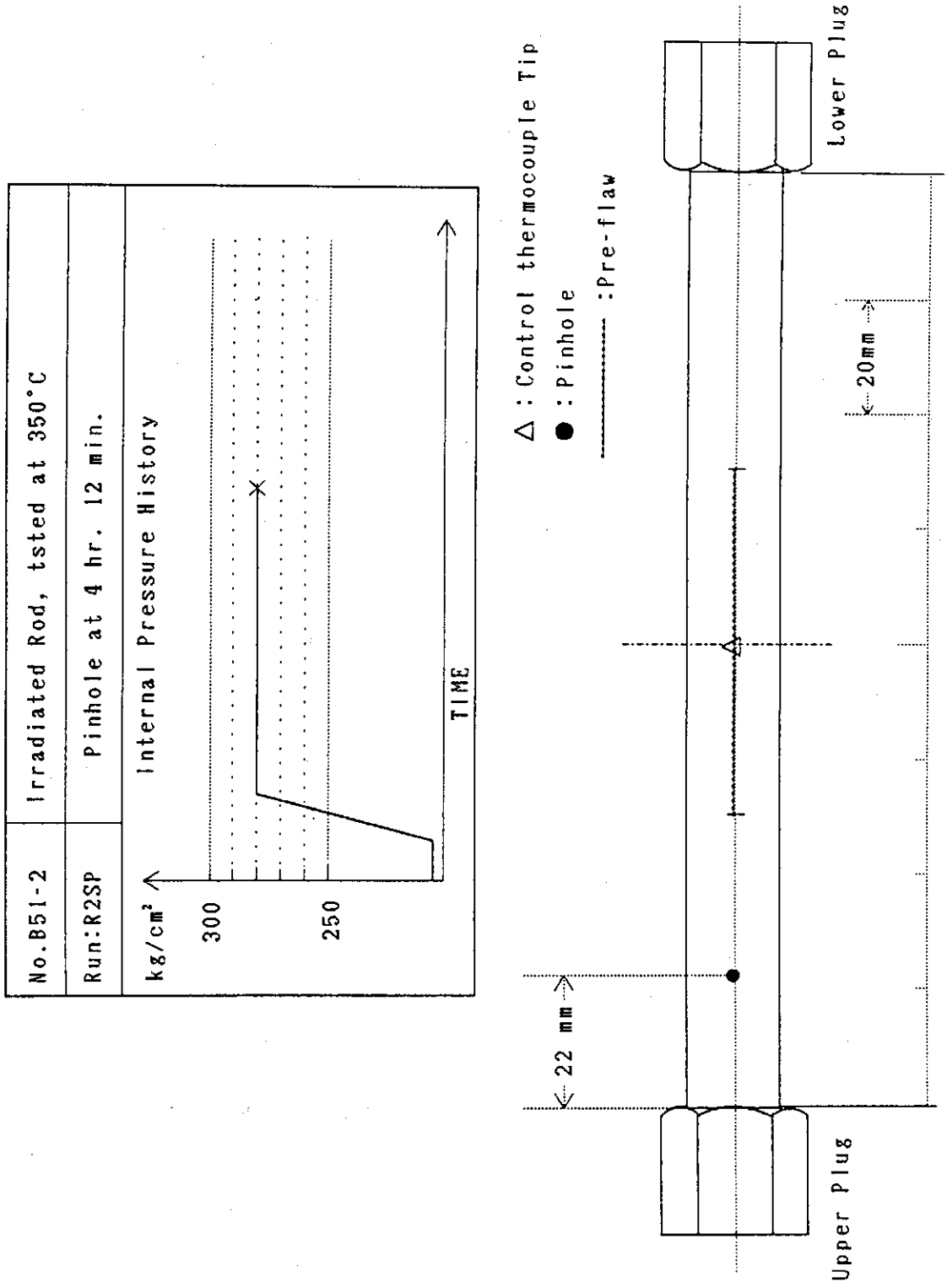


Fig.12 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

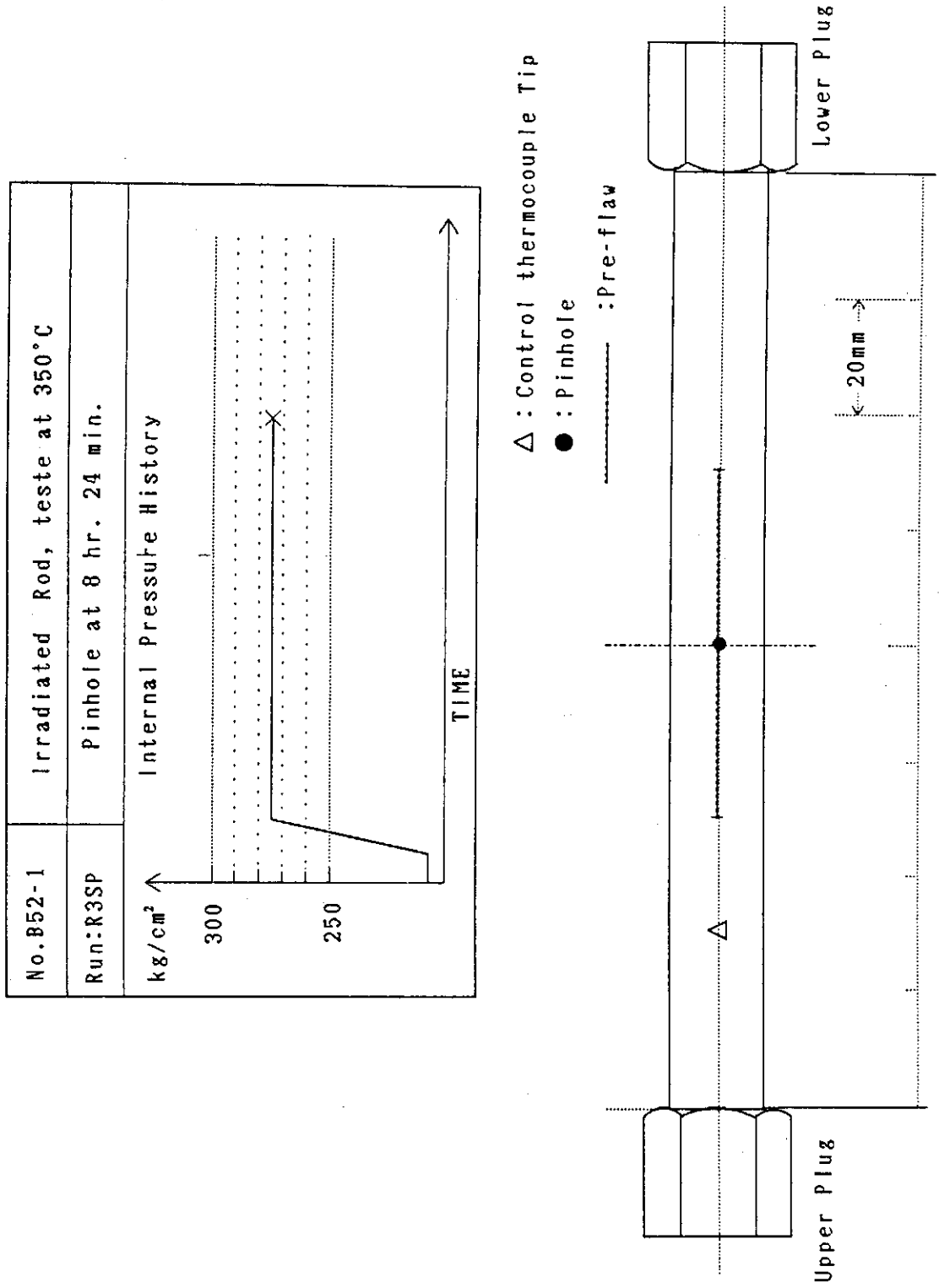


Fig.13 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

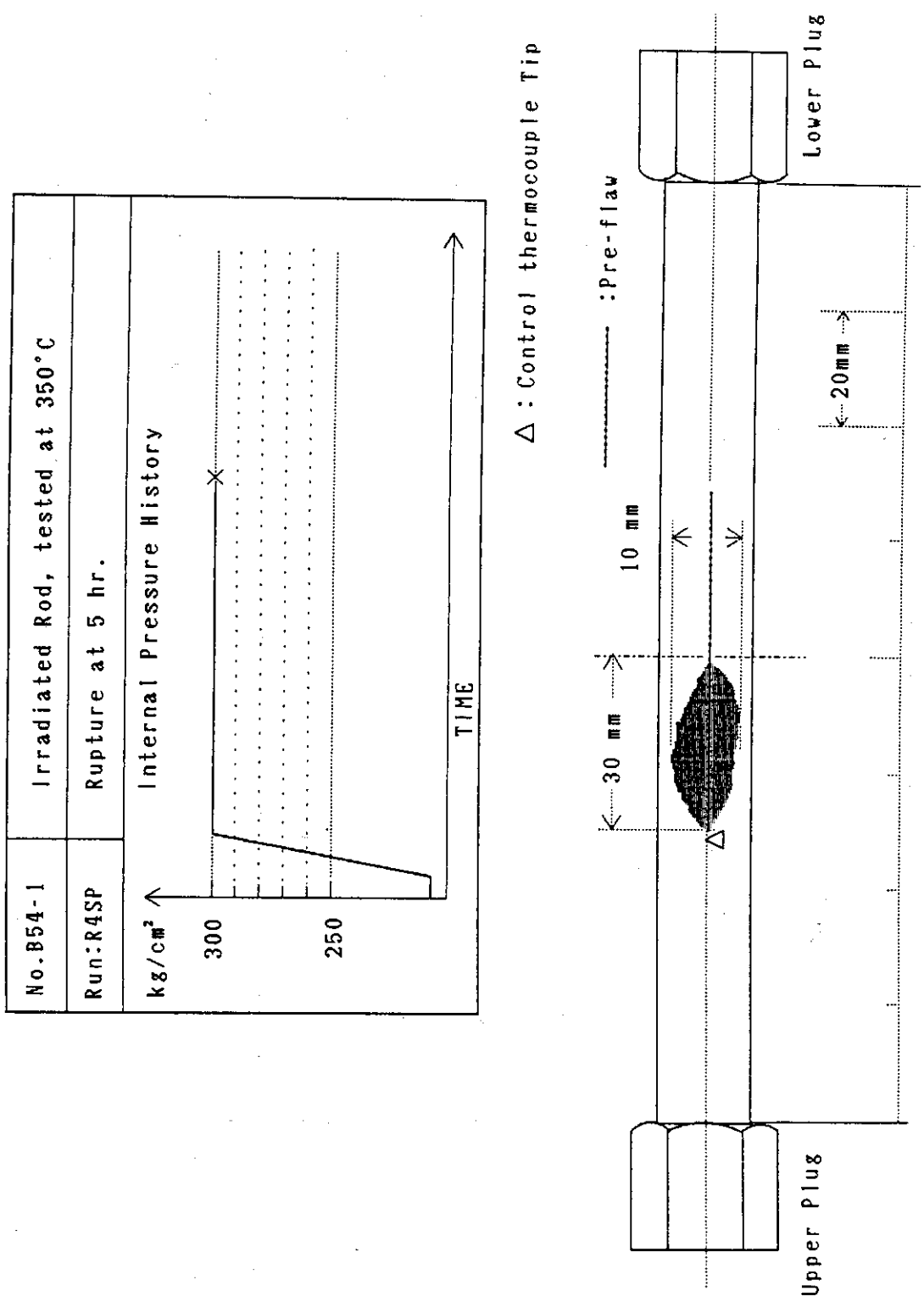


Fig.14 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

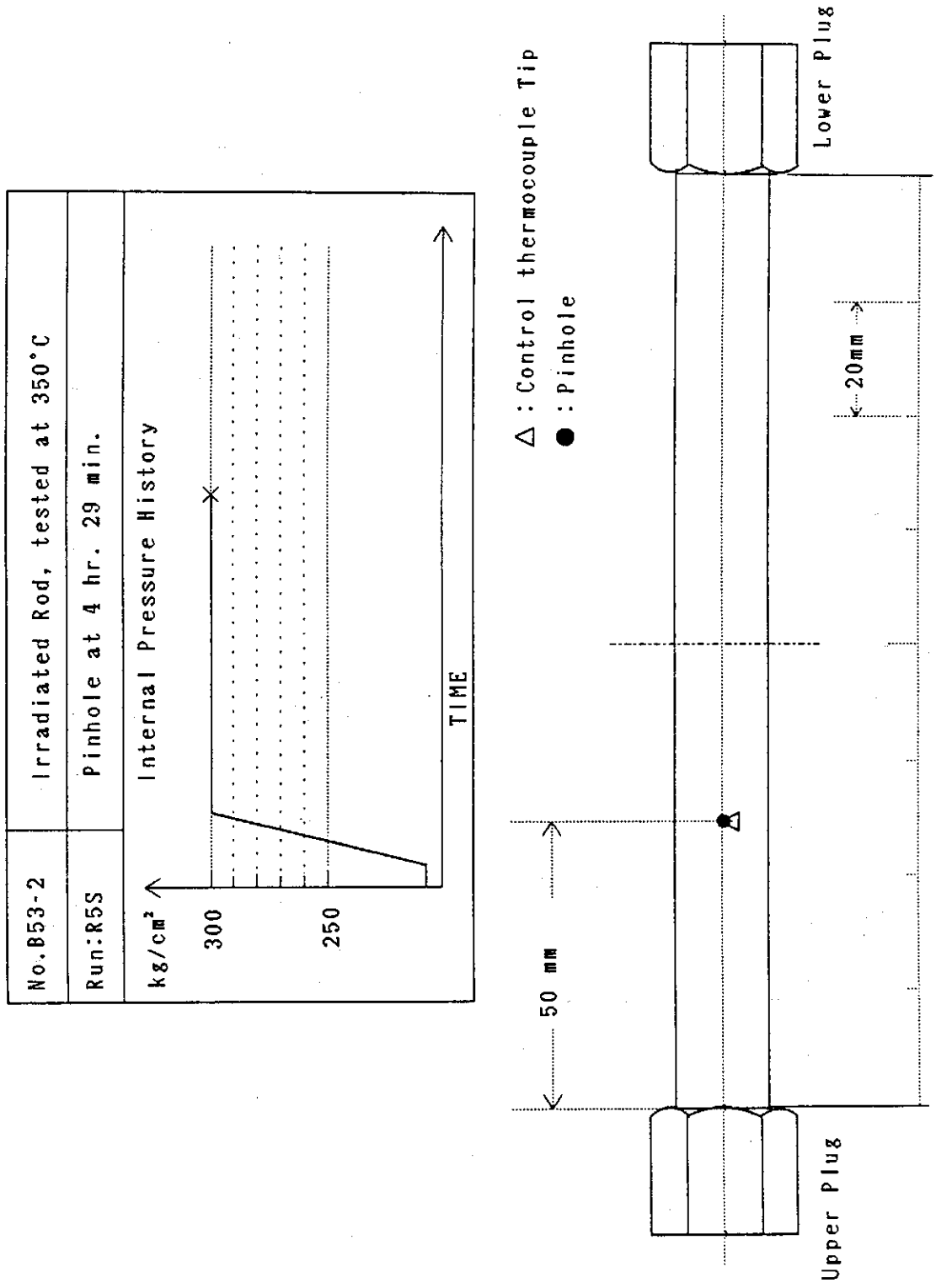


Fig.15 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

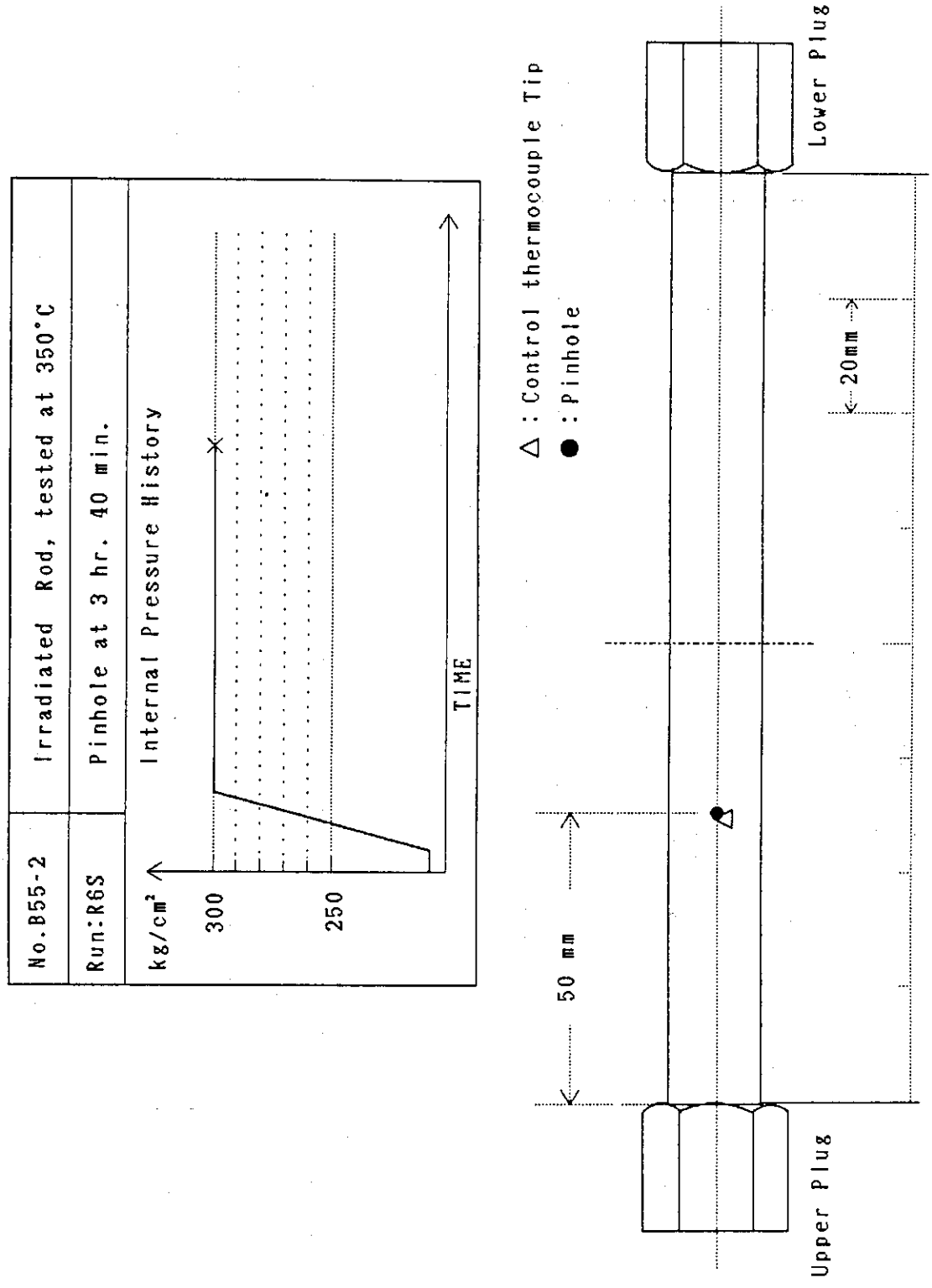


Fig.16 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

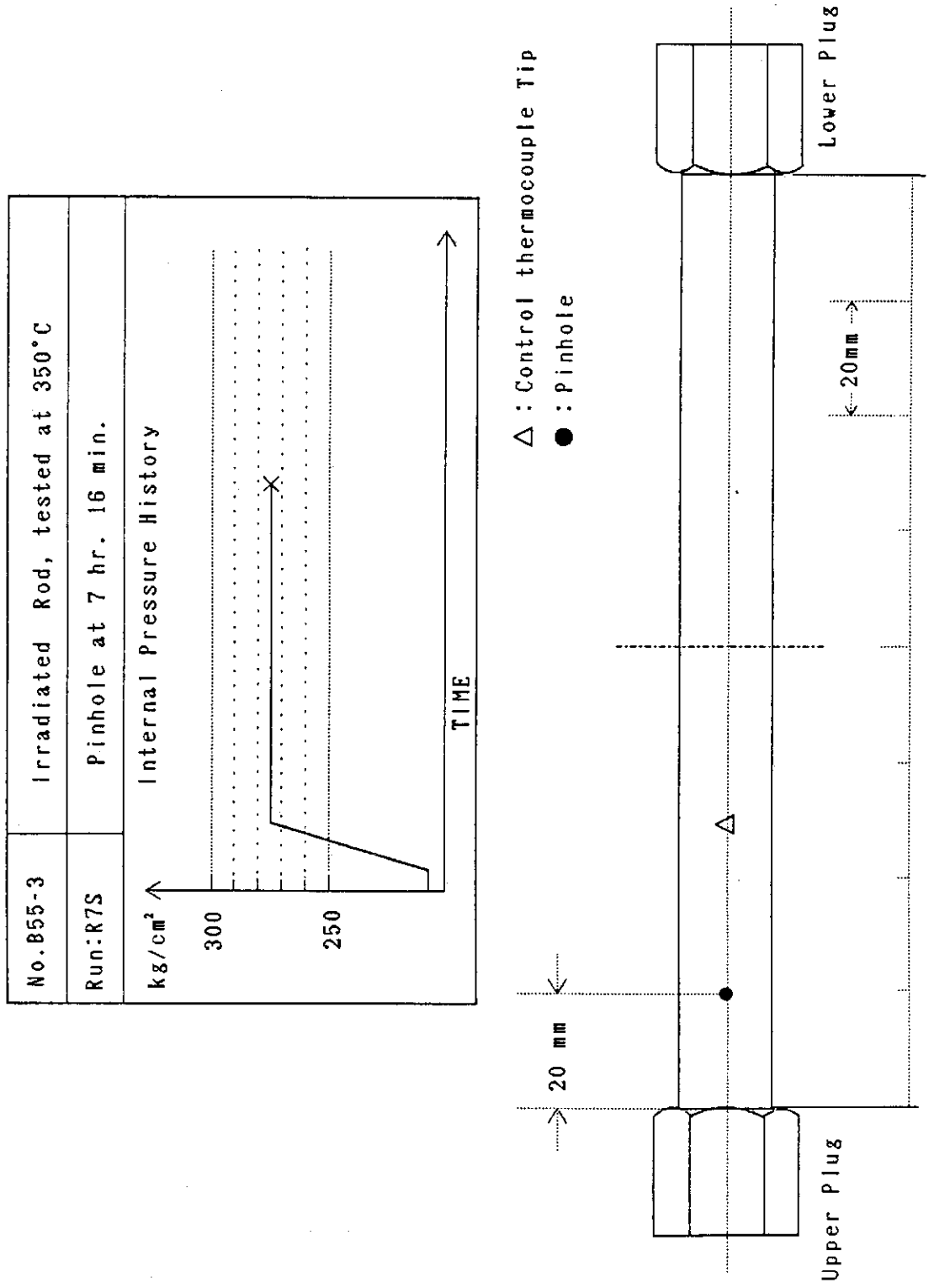


Fig.17 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

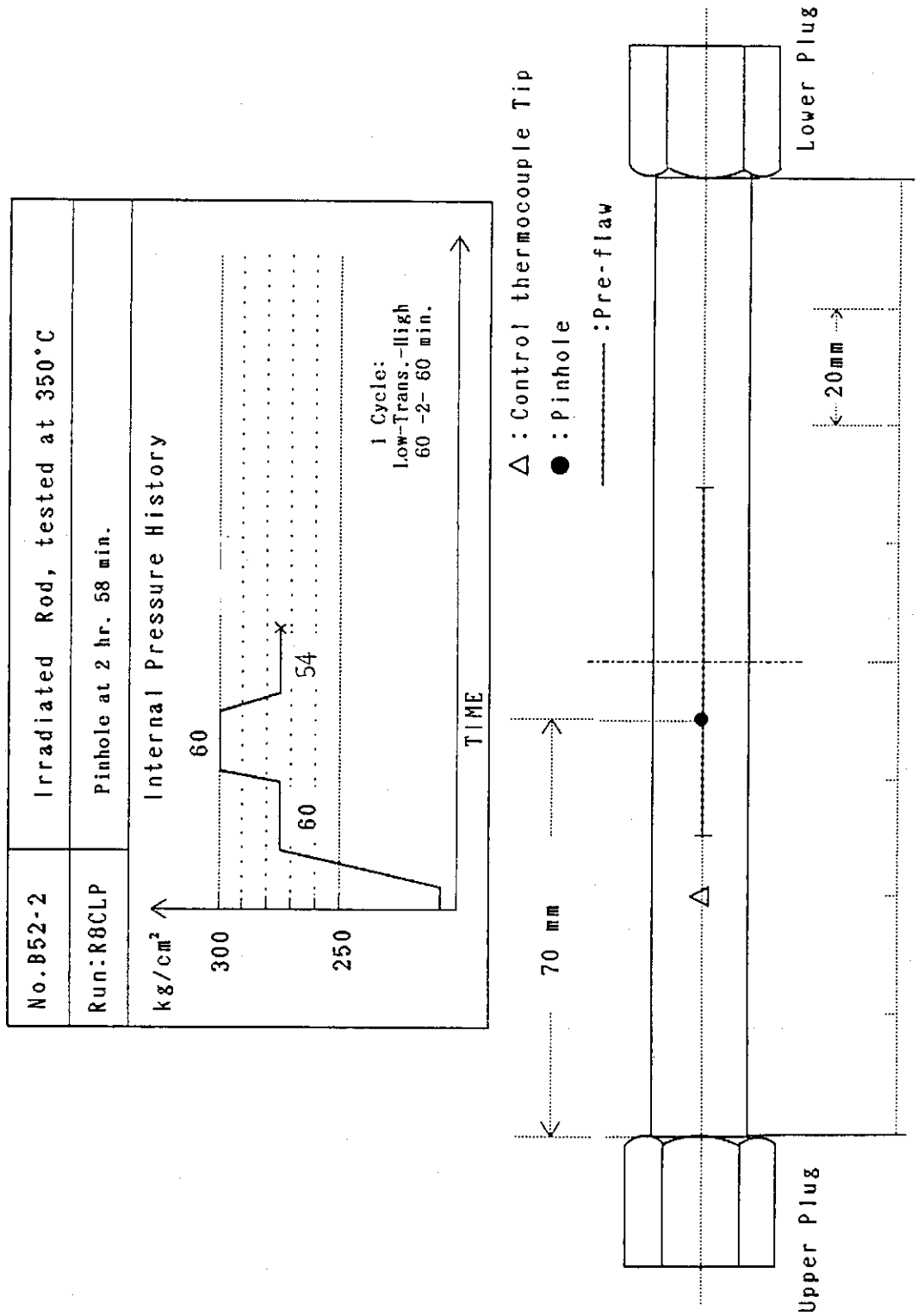


Fig.18 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

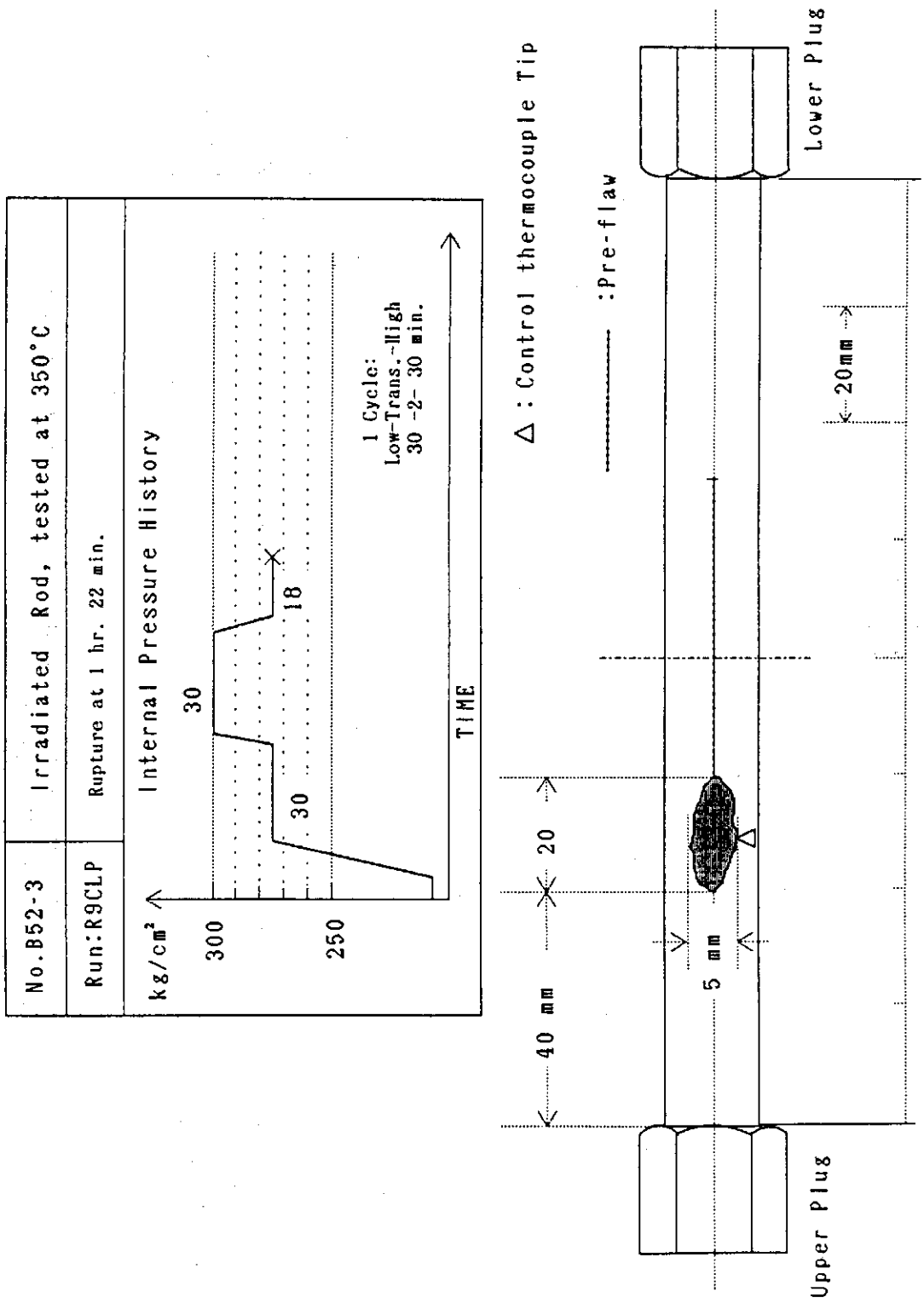


Fig.19 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

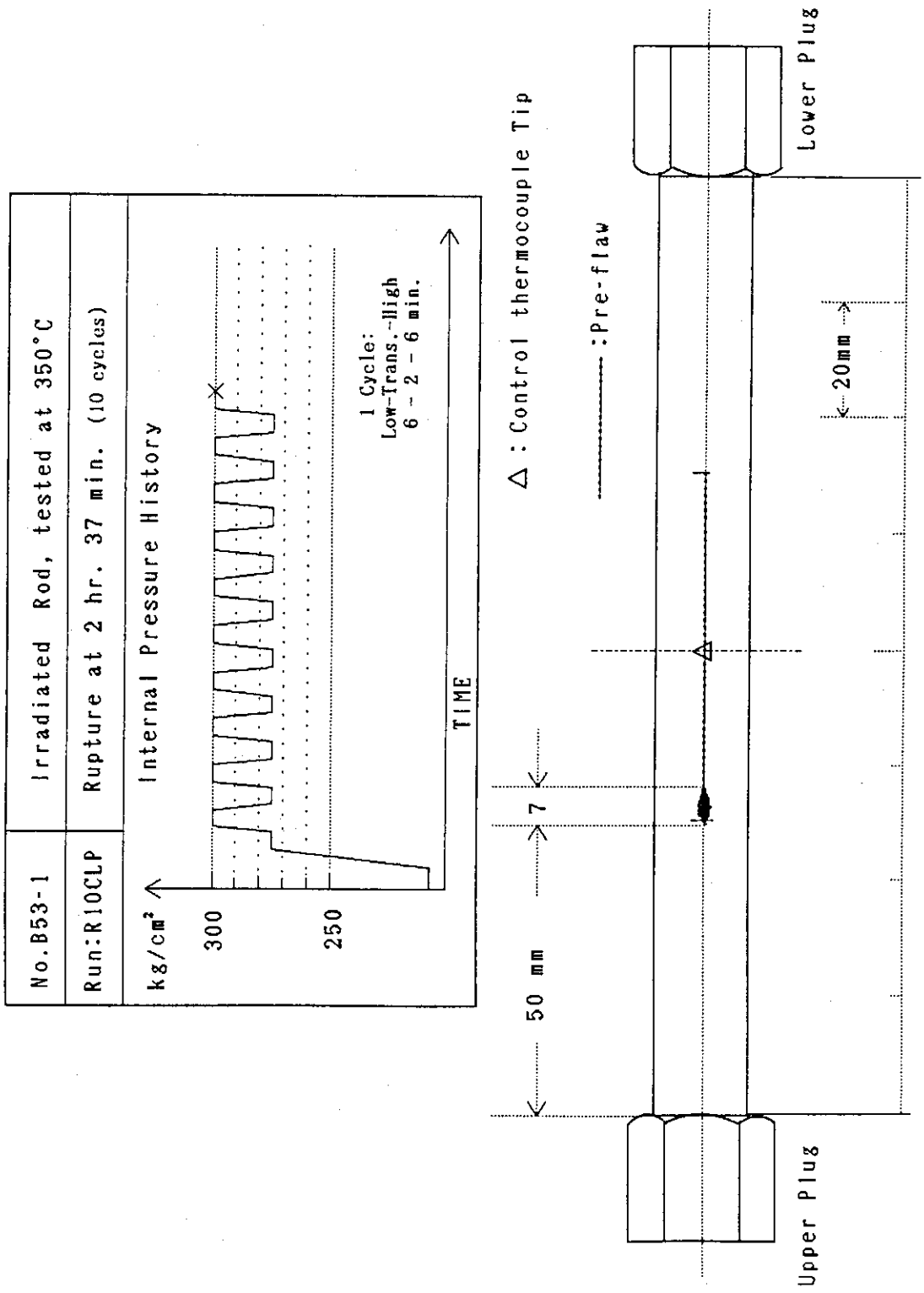


Fig.20 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

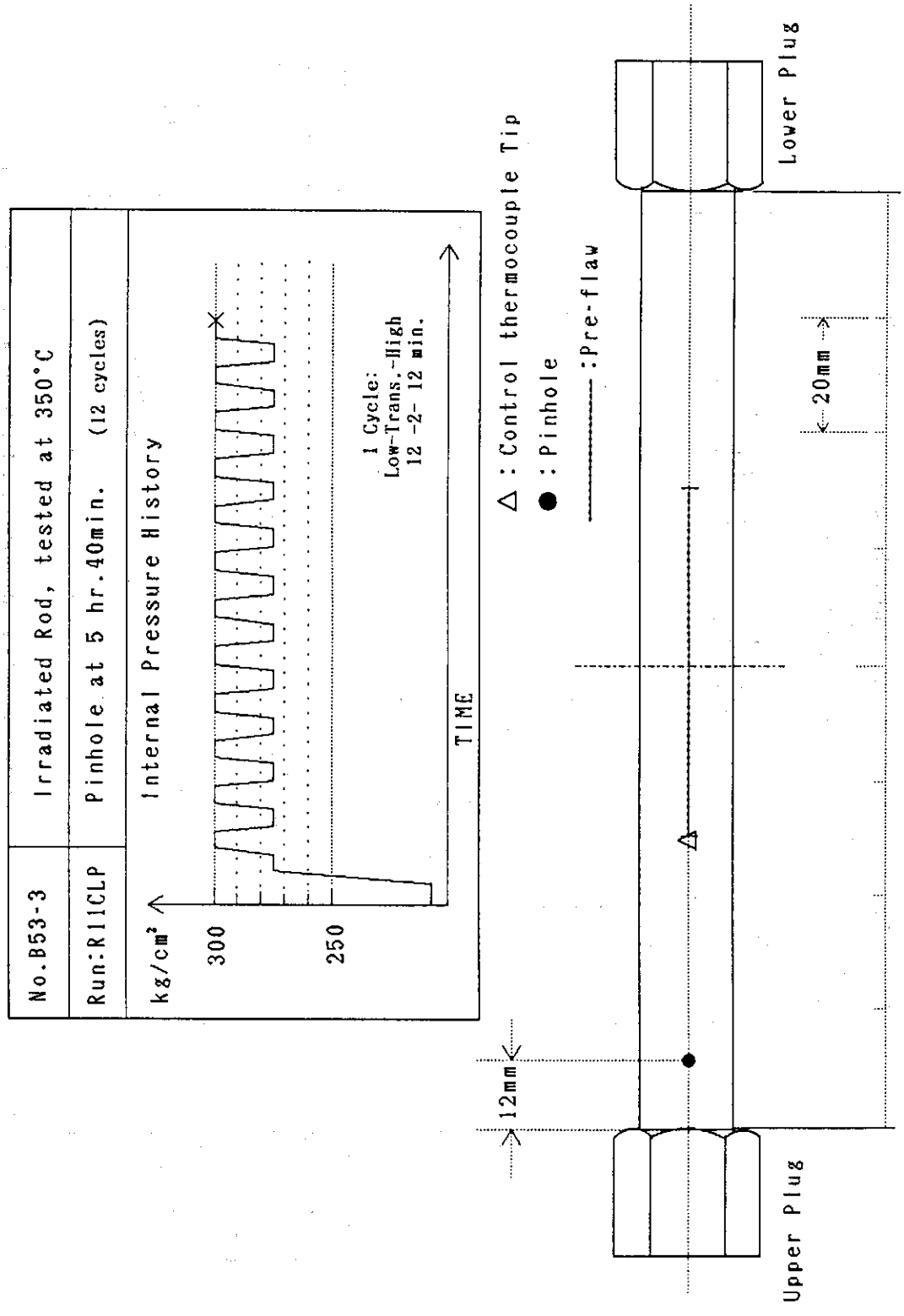


Fig.21 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

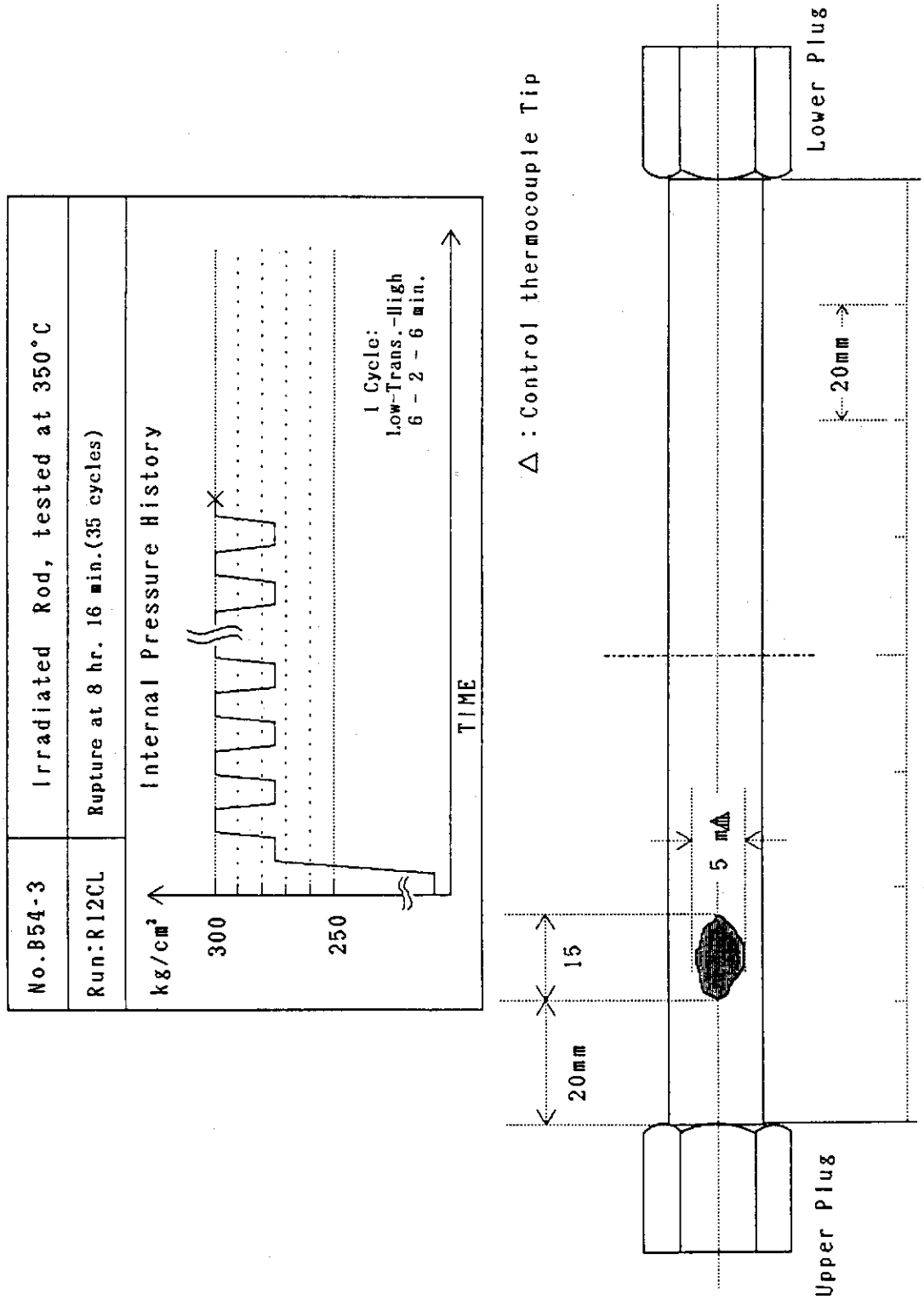


Fig.22 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

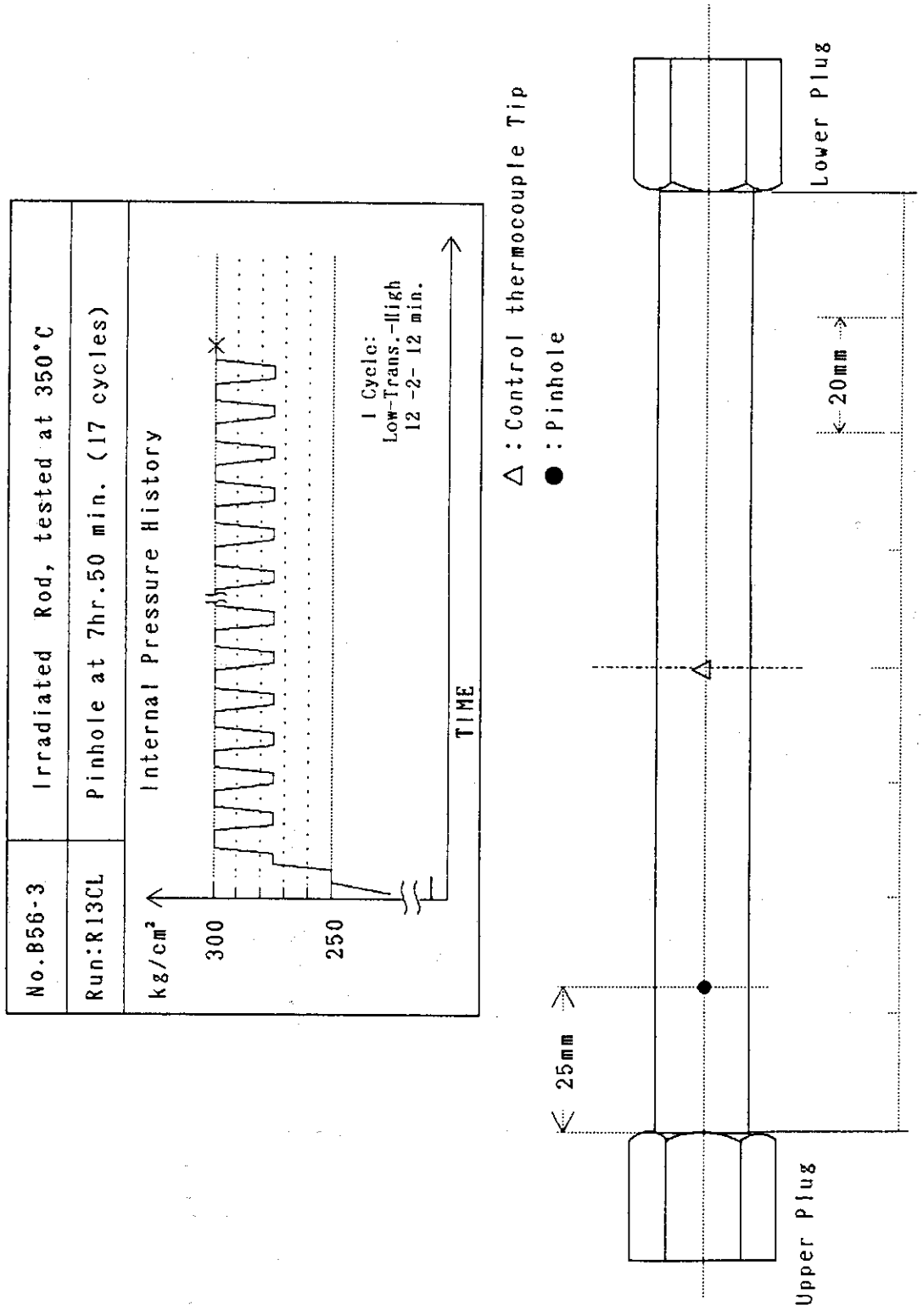


Fig.23 Description of test conditions, loading history, and failure mode of zircaloy-2 tube specimen in SCC experiment.

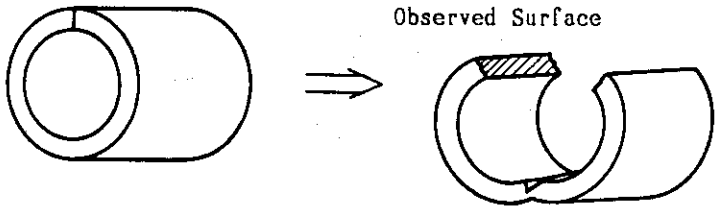


Fig.24 Preparation of pinhole-failed specimens B52－1 (Photo. 26) and B 55－2 (Photo. 28) for fractography. A short rings has been cut from the specimen tube and manually split to obtain fracture surface containing the pinhole.

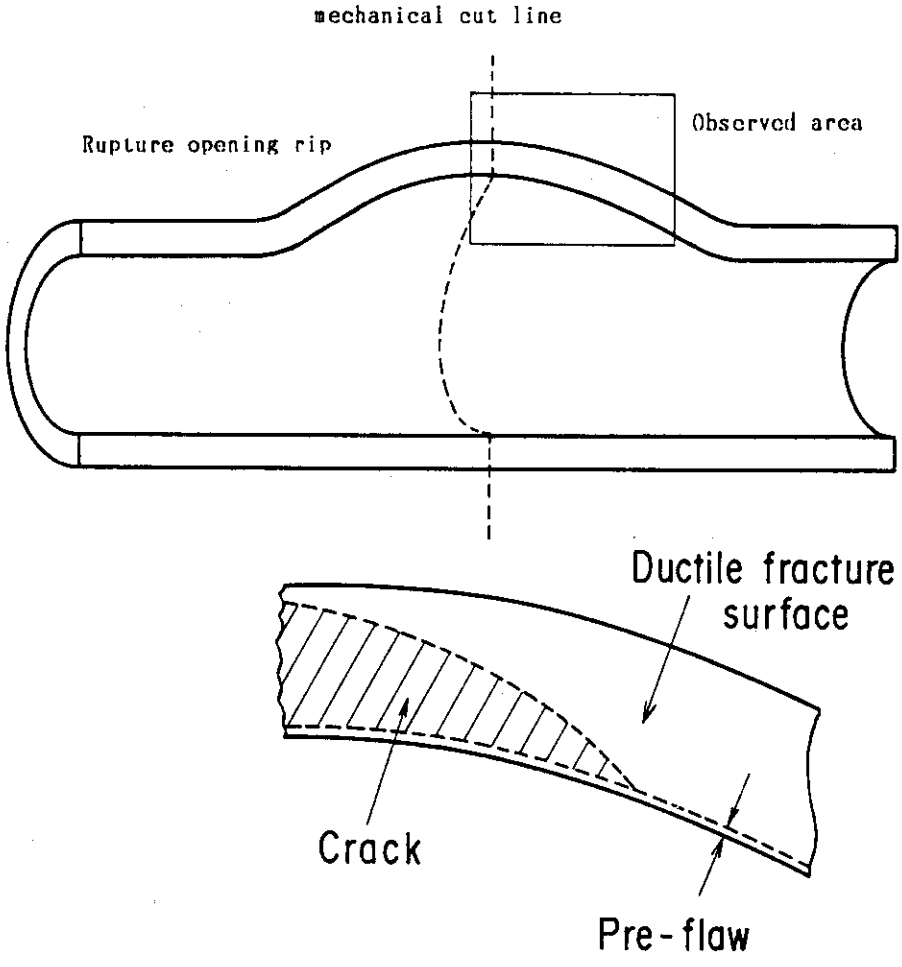


Fig.25 Fractography area and its feature of specimen B 54－1 (Photo. 27) with large rupture opening.

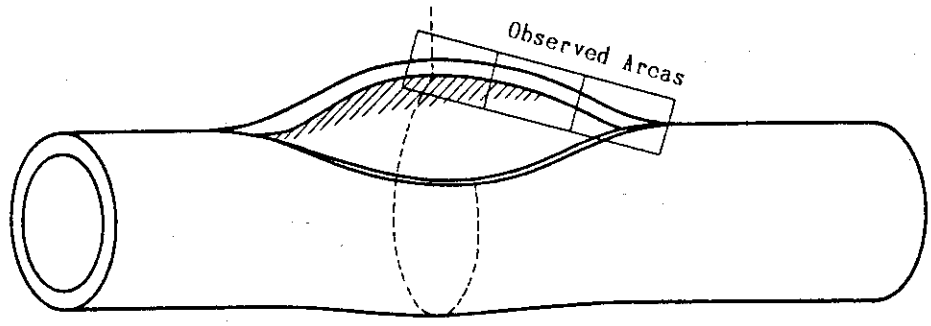


Fig.26 Fractography area of specimen B 52－3 (Photo. 29) with large rupture opening.

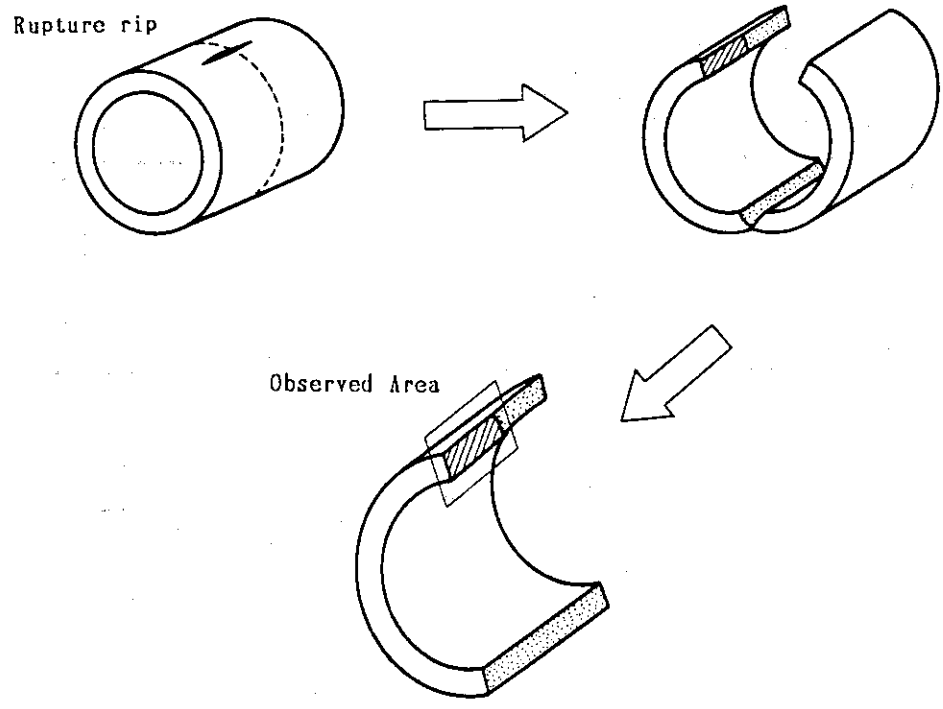


Fig.27 Preparation of specimen B 53－1 (Photo. 30) with small rupture opening for fractography. A short ring has been cut from the speeimcn tube and manually split to obtain fracture surface containing the rupture opening.

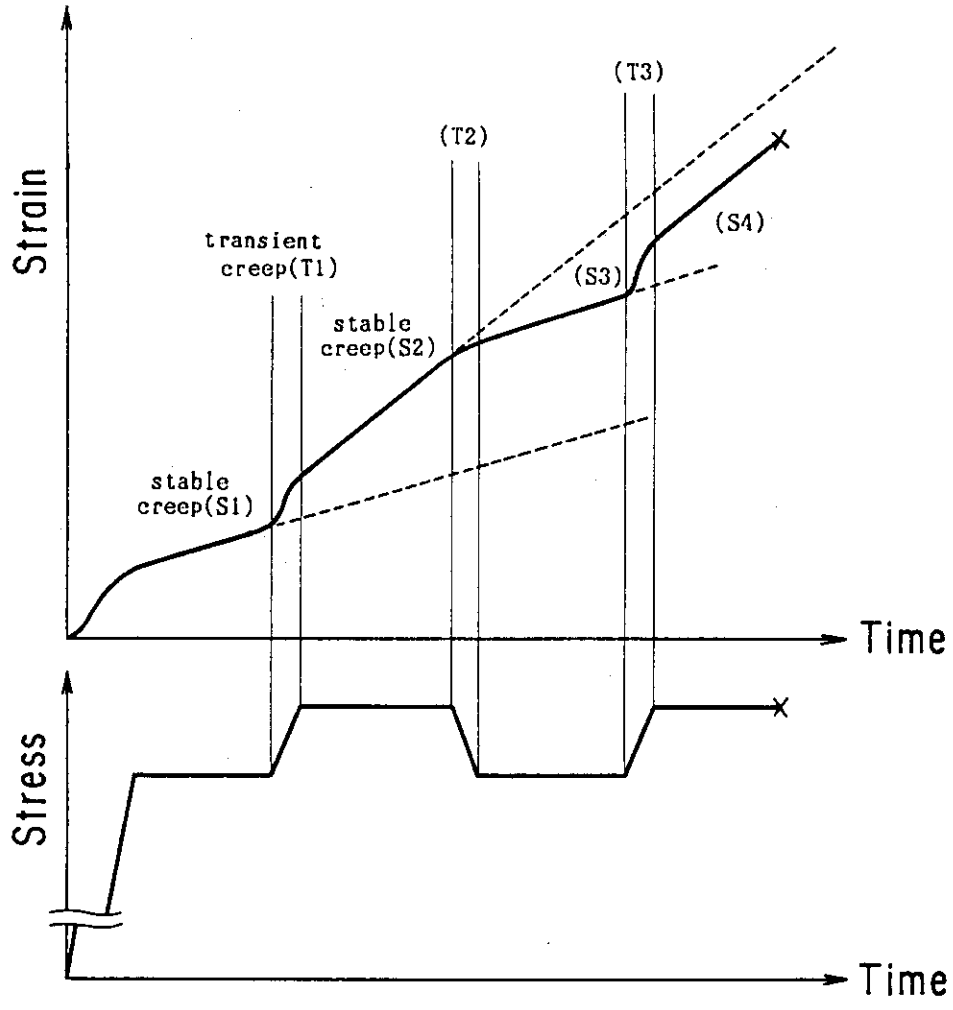


Fig.28 Schematics of creep rate transients induced by cyclic change of stress.

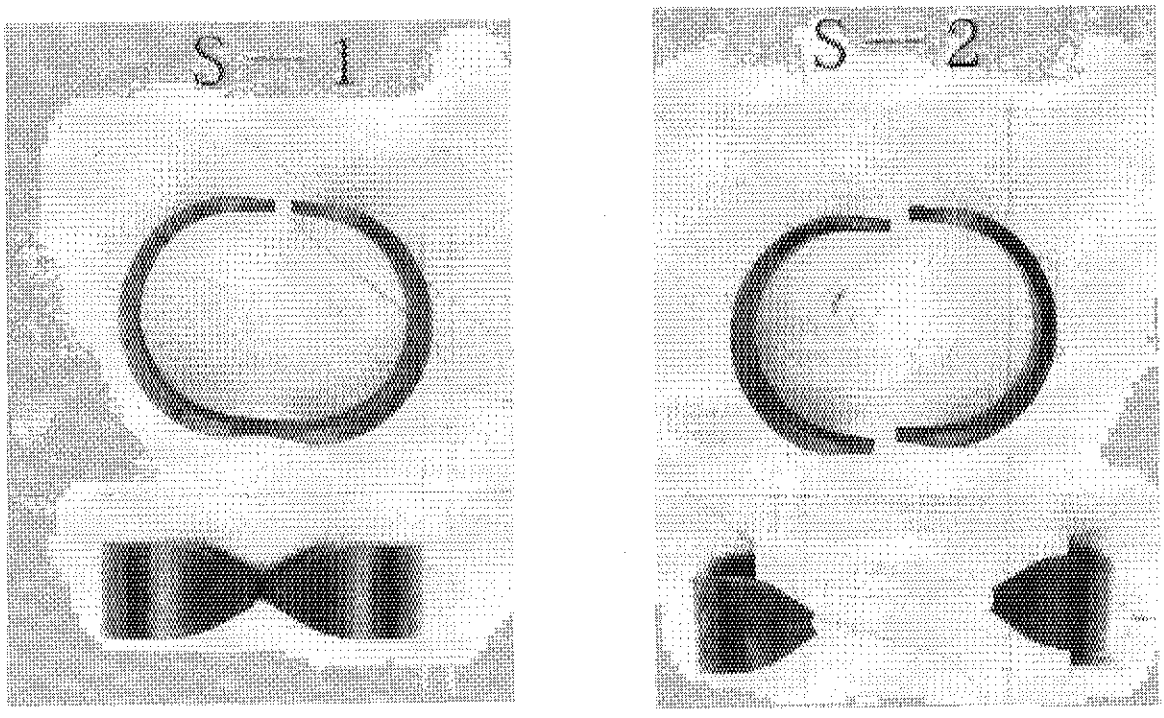


Photo.1 Post-test samples of zircaloy-2 tubes in the ring tensile test conducted in Argon at 350 °C with cross-head speed of 0.1 mm/min.
The tubes have been immersed in the non-irradiated section of JMTR water loop.

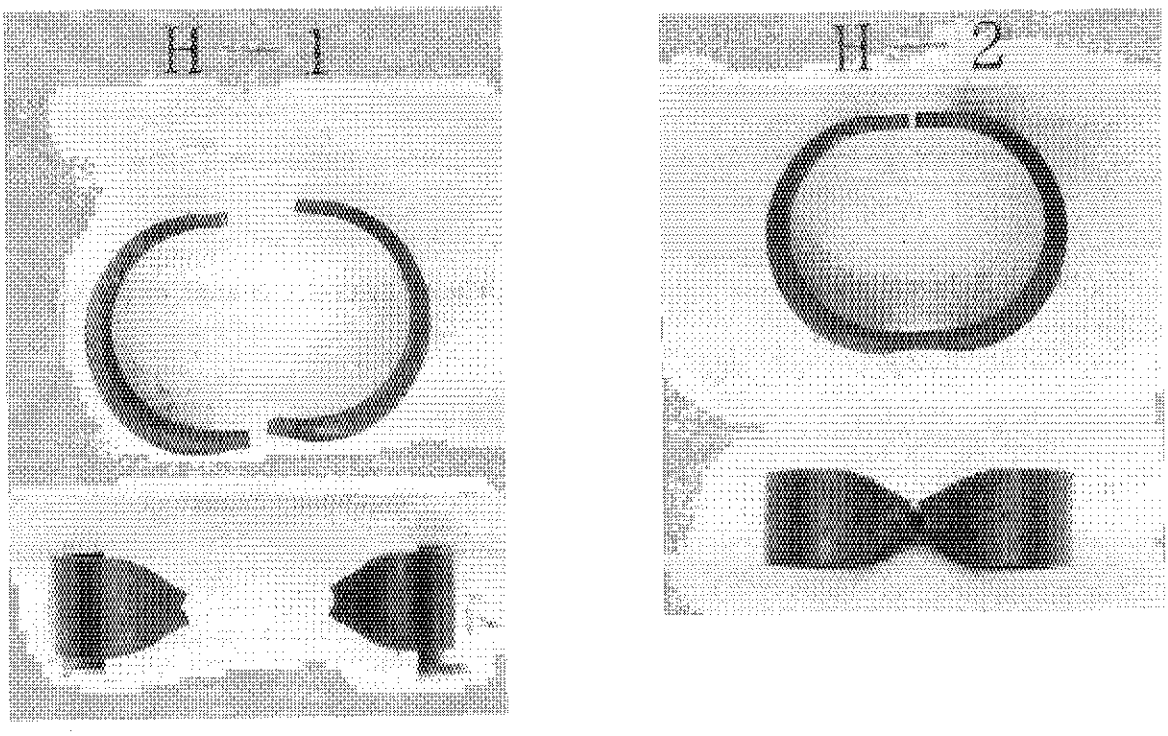


Photo.2 Post-test samples of irradiated zircaloy-2 tubes in the ring tensile test conducted in Argon at 350 °C with cross-head speed of 0.1mm/min.

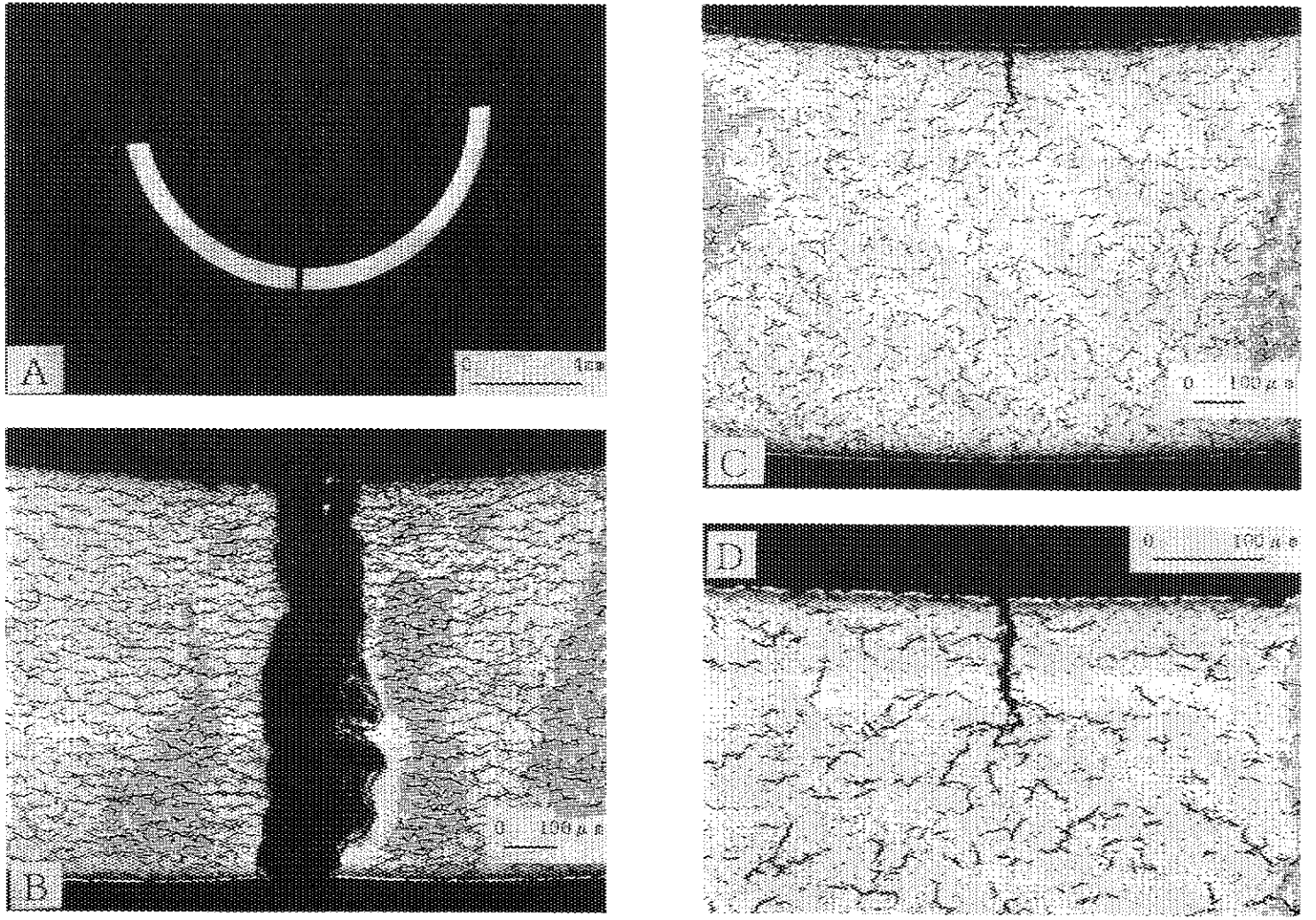


Photo.3 Cross-sectional view of non-irradiated zircaloy-2 tube specimen S-3 failed by pinhole penetration under monotonous load ing.

A : pinhole, B : magnified view of the pinhole,
C : incipient crack in the inner surface of specimen,
D : magnified view of the incipient crack.

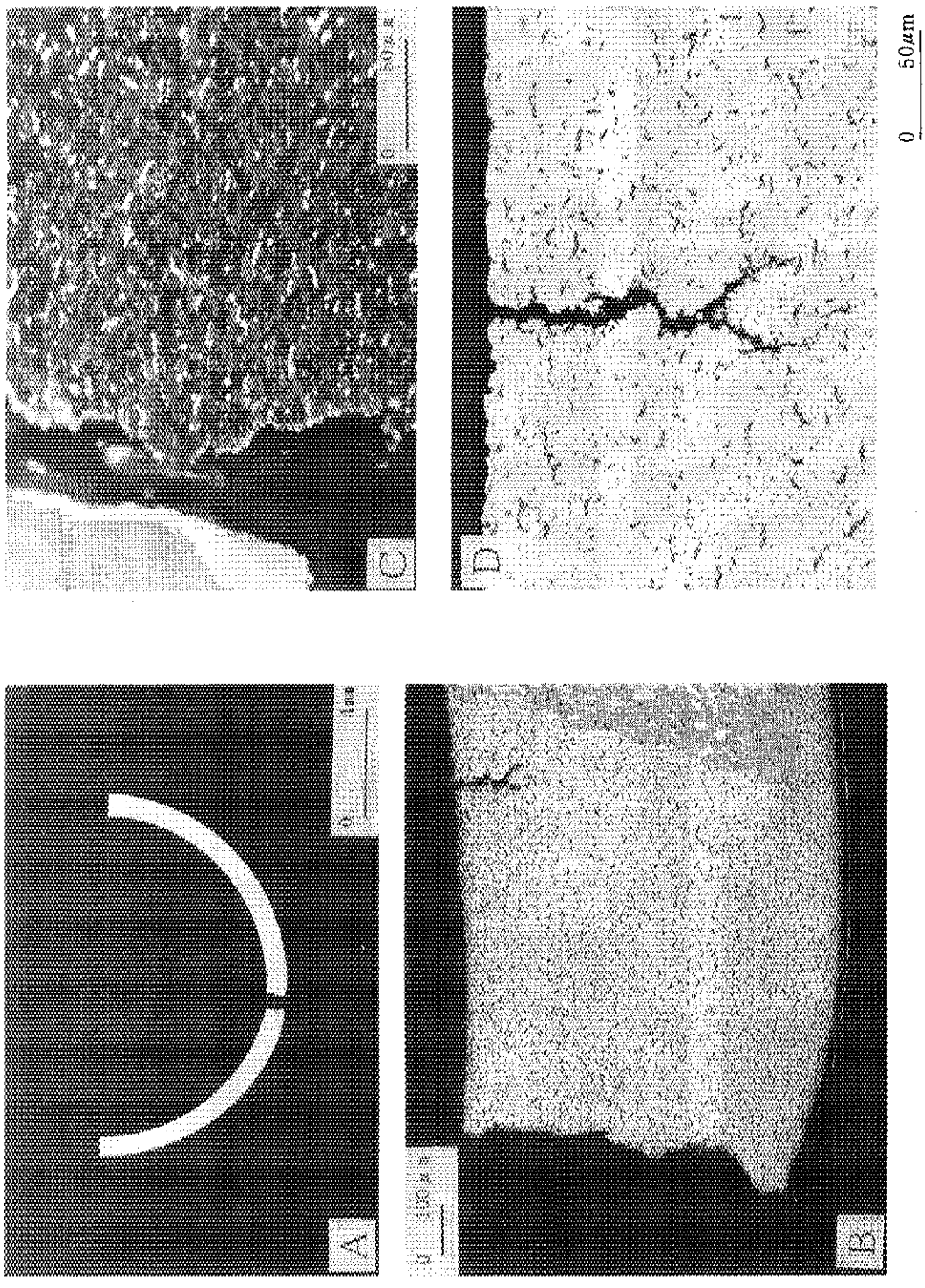


Photo.4 Cross-sectional view of non-irradiated zircaloy-2 tube specimen S-4 failed by rupture under monotonous loading.

A : overview, B : rupture rip and inciepient crack,
C : magnified view of the metal near the rupture rip under polarized light, D : magnified view of the incipient erack.

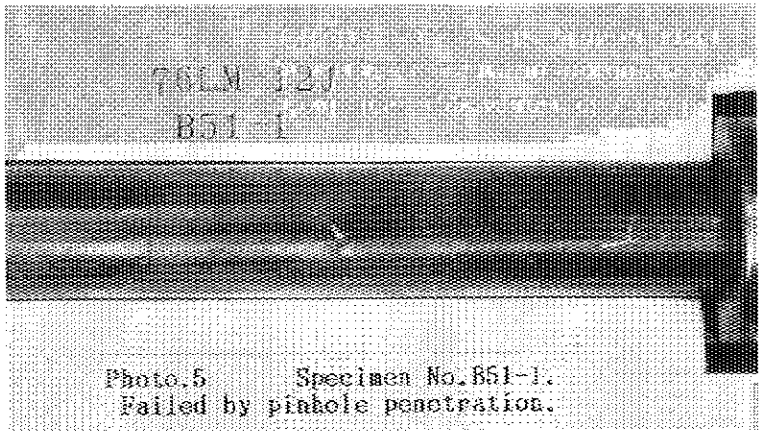


Photo.5 Specimen No.B51-1.
Failed by pinhole penetration.

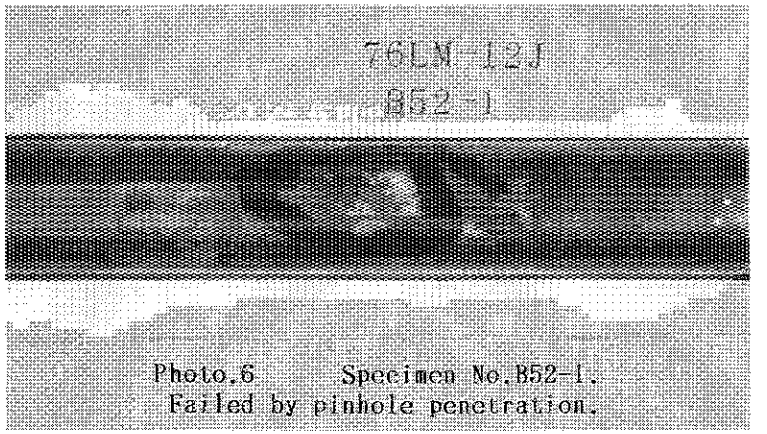


Photo.6 Specimen No.B52-1.
Failed by pinhole penetration.

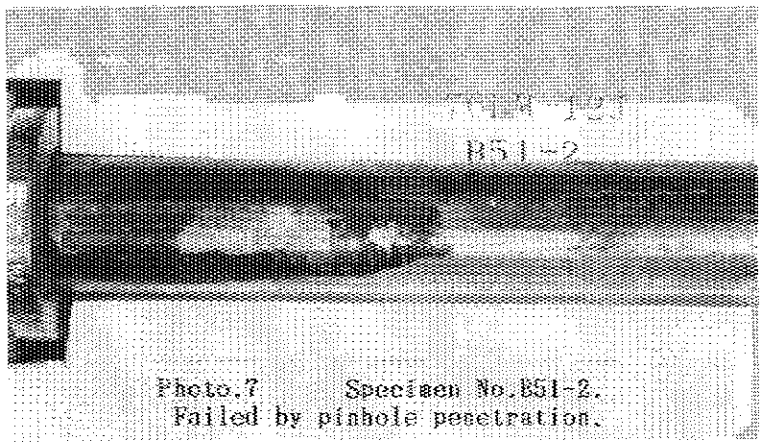


Photo.7 Specimen No.B51-2.
Failed by pinhole penetration.

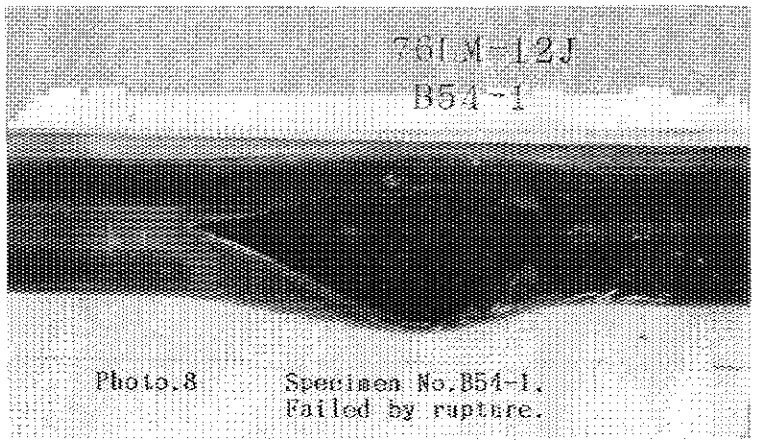


Photo.8 Specimen No.B54-1.
Failed by rupture.

0 10mm

Post-test appearance of irradiated, pre-flawed zircaloy-2 tube specimens failed under monotonous loading. Circles indicate pinhole sites.

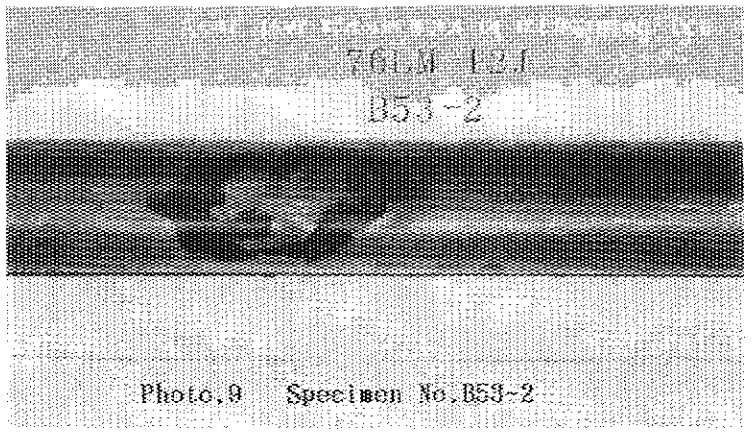


Photo.9 Specimen No.B53-2

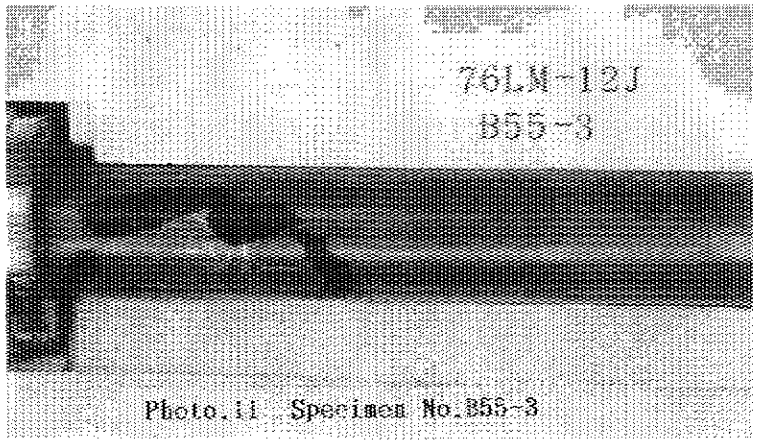


Photo.11 Specimen No.B55-3

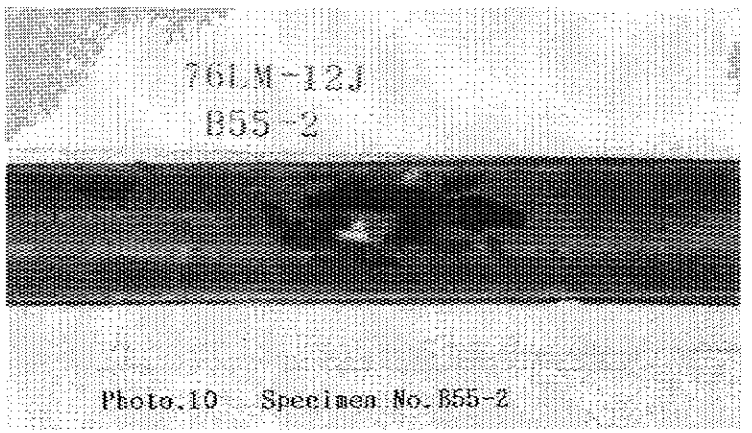


Photo.10 Specimen No.B55-2

0 10mm

Post-test appearance of irradiated zircaloy-2 tube specimens failed by pinhole penetration under monotonous loading.
Circles indicate the pinhole sites.

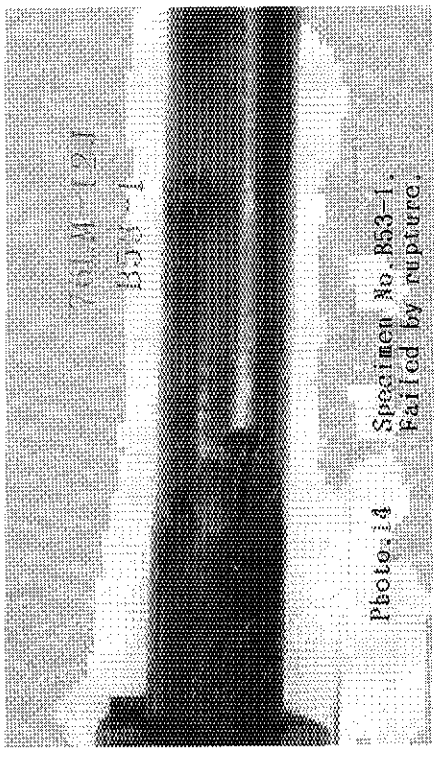


Photo.14 Specimen No. B53-1.
Failed by rupture.

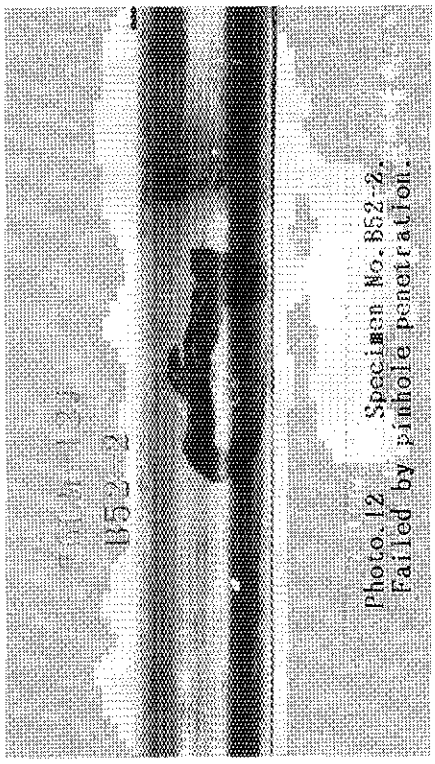


Photo.12 Specimen No. B52-2.
Failed by pinhole penetration.

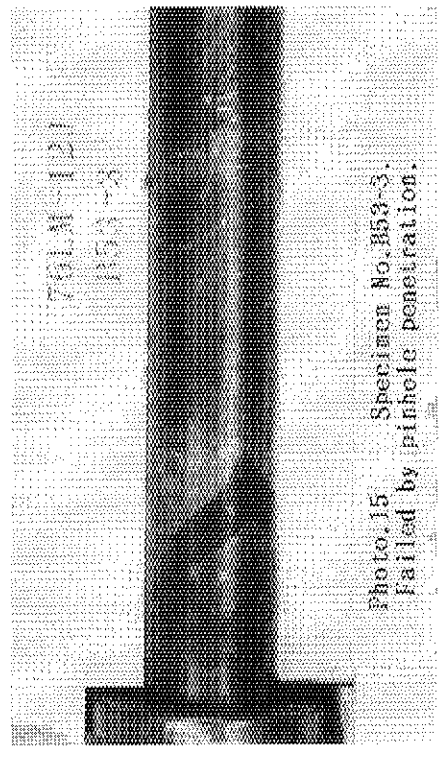


Photo.15 Specimen No. B53-3.
Failed by pinhole penetration.

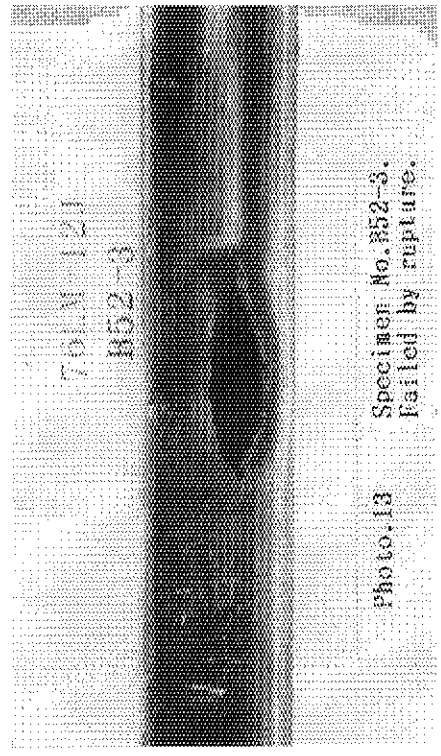
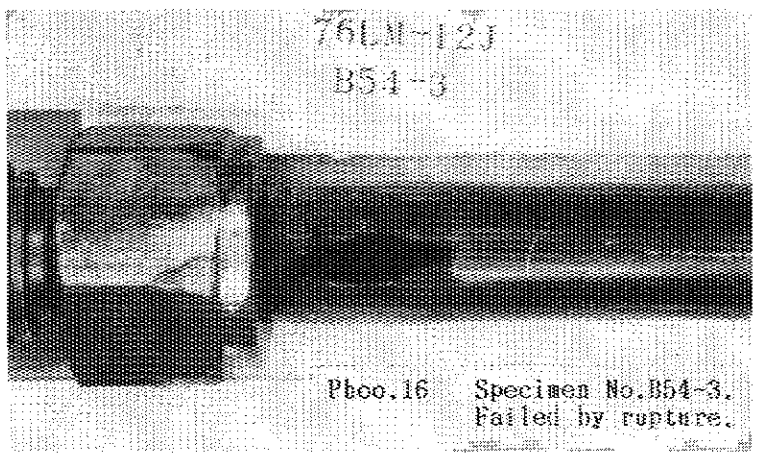


Photo.13 Specimen No. B52-3.
Failed by rupture.

0 10 mm

Post-test appearance of irradiated, pre-flawed zircaloy-2 tube specimens failed under cyclic loading. Circles indicate pinhole sites.



Phoo.16 Specimen No.B54-3.
Failed by rupture.

0 10mm

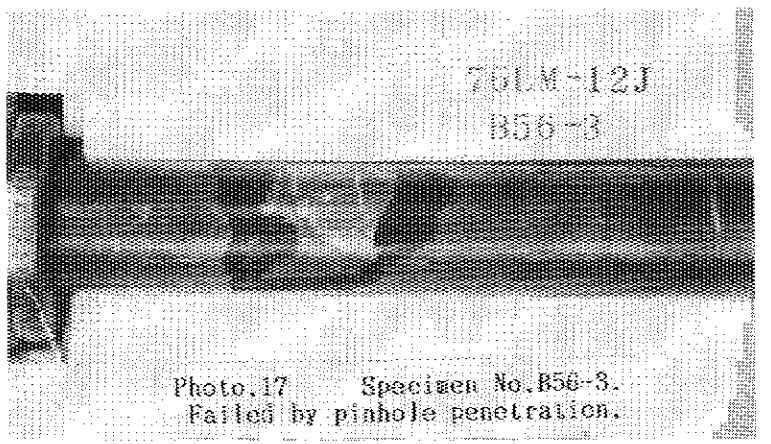
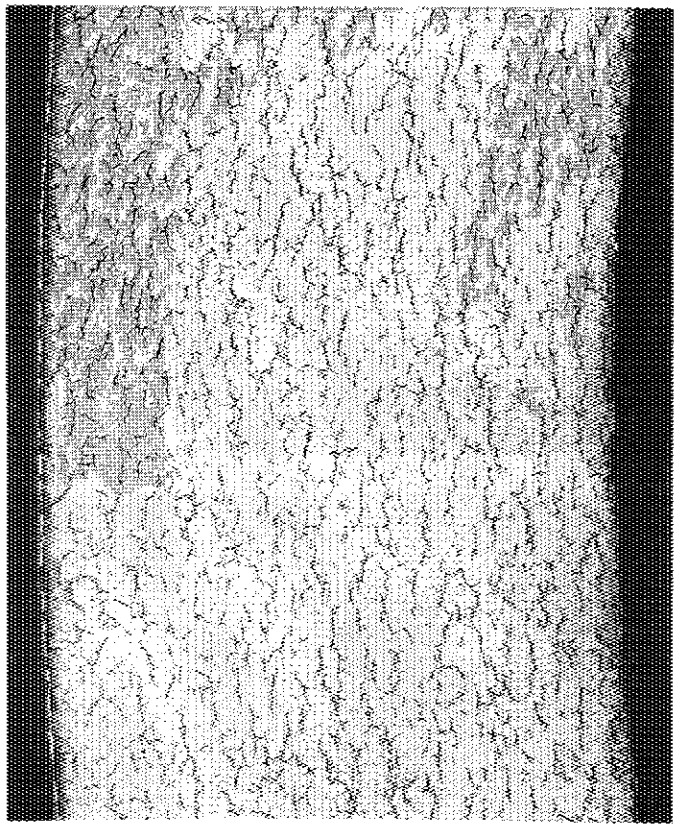


Photo.17 Specimen No.B56-3.
Failed by pinhole penetration.

Post-test appearance of irradiated zircaloy-2 tube specimen failed under cyclic loading.
Circle indicates pinhole site.



0 100μm

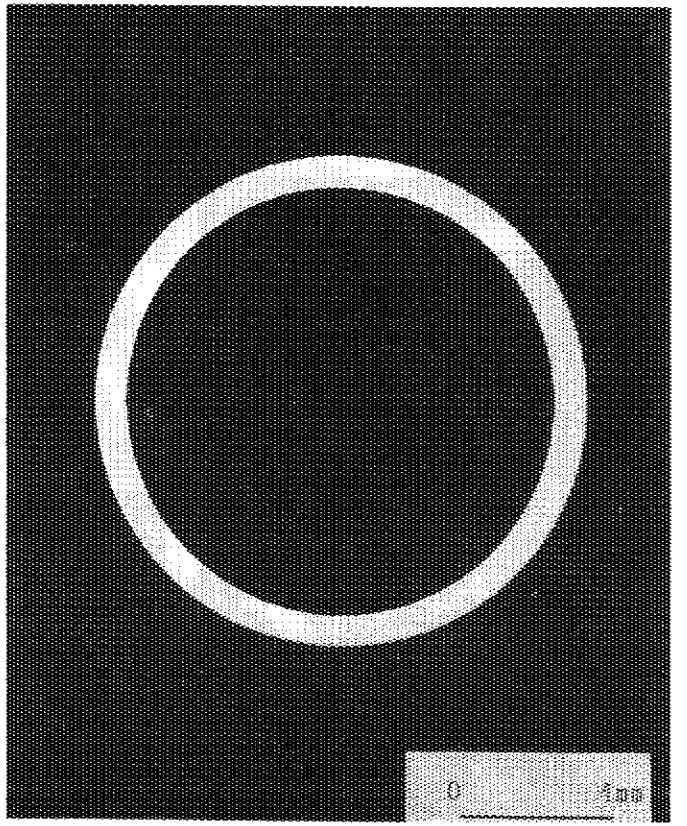


Photo.18 Cross-sectional view of irradiated zircaloy-2 specimen B 51－2 failed by pinhole penetration under monotonous loading.

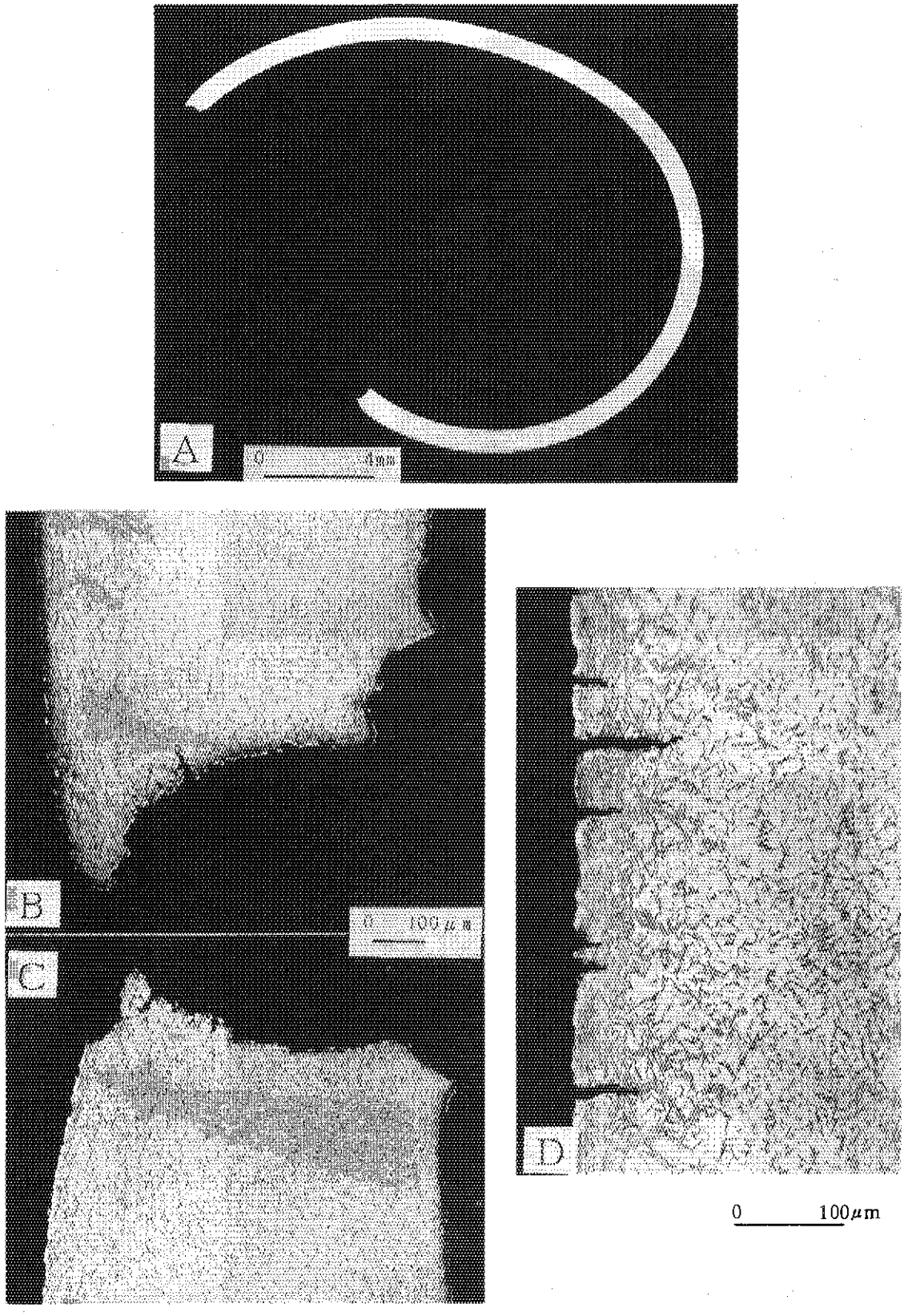


Photo.19 Cross-sectional view of irradiated zircaloy-2 specimen B 54－1 failed by rupture under monotonous loading.
A : overview, B, C : magnified view of rupture rips,
C : incipient cracks observed in the inner surface of specimen.

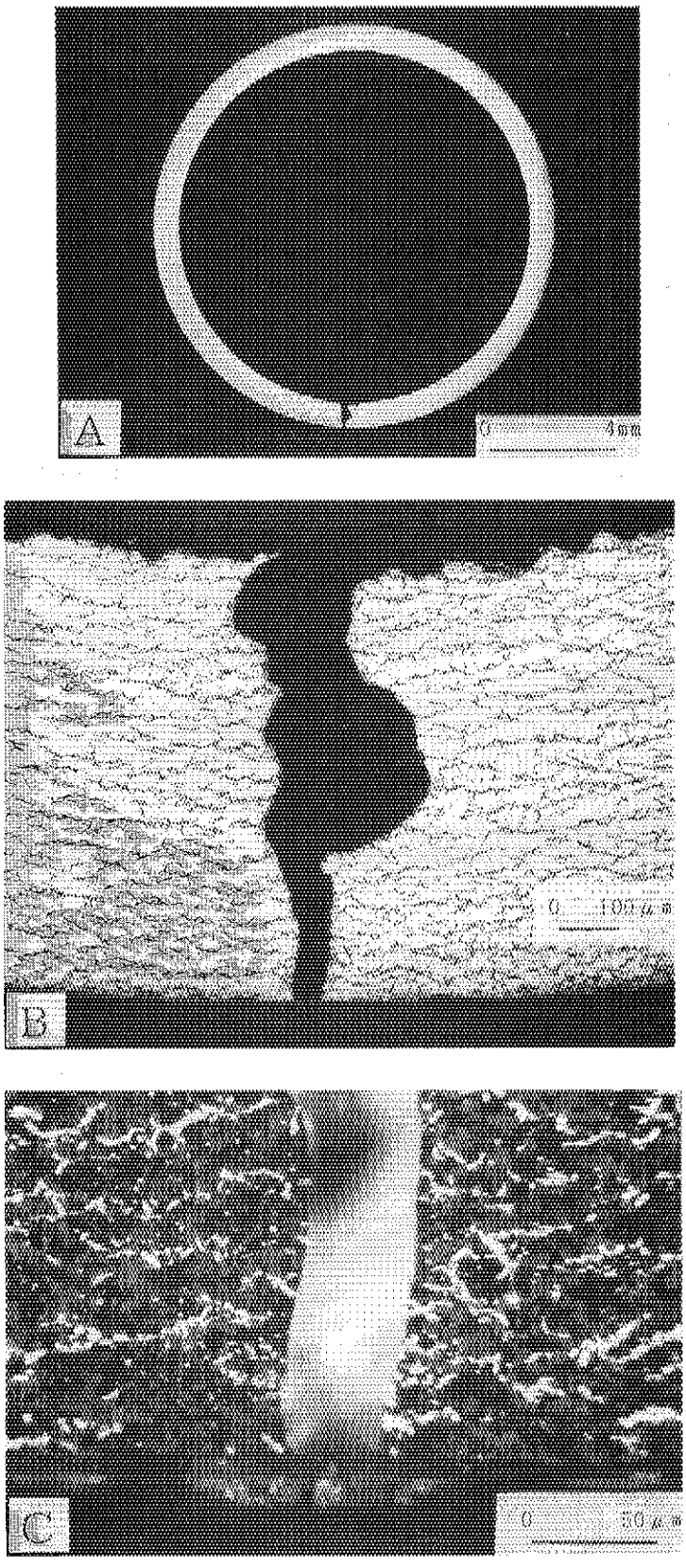


Photo.20 Cross-sectional viewof irradiated zircaloy-2 specimen B 53—2 failed by pinhole penetration under monotonous loading.
A : overview, B : magnified view of the pinhole, C : polarized light view of the structure of metal around the pinhole.

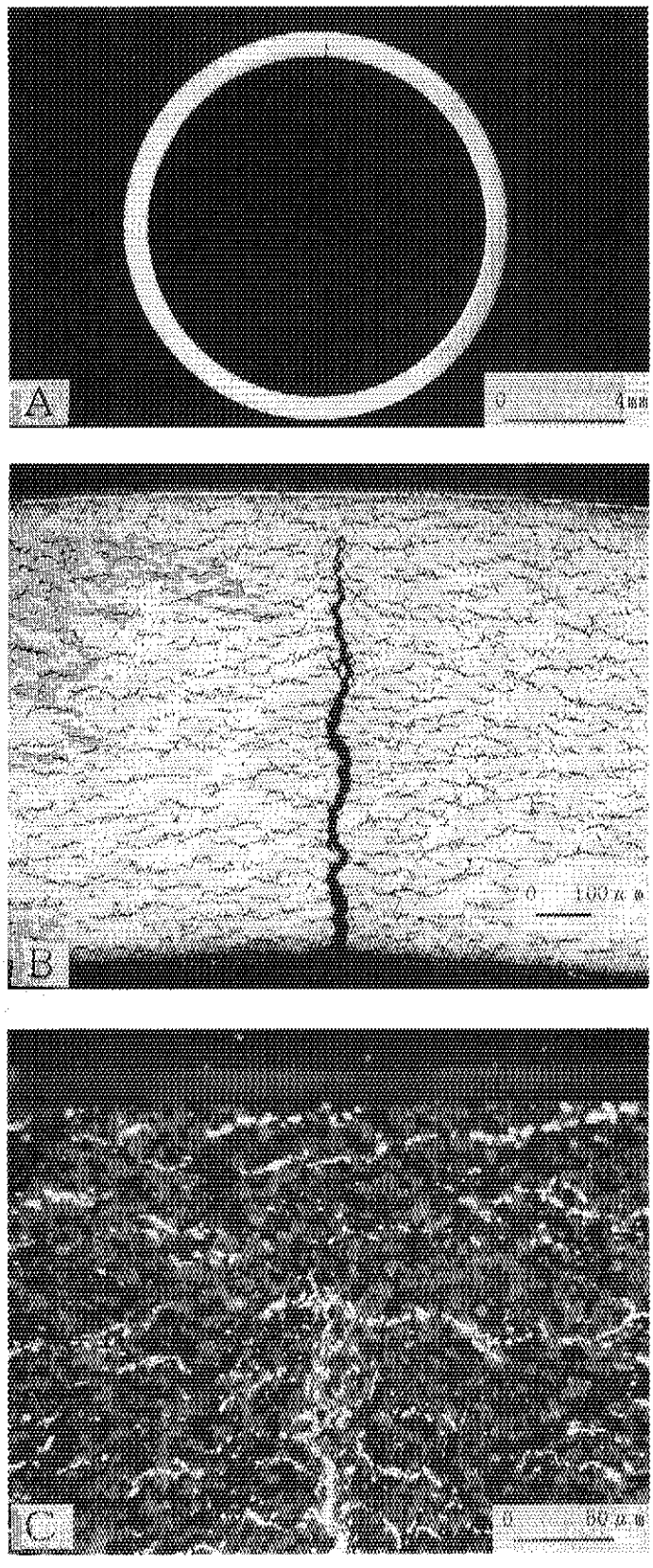


Photo.21 Cross-sectional viewof irradiated zircaloy-2 specimen B 55－3 failed by pinhole penetration under monotonous loading.
A : overview, B : magnified view of the pinhole crack, C : polarized light view of the metal structure around the crack top.

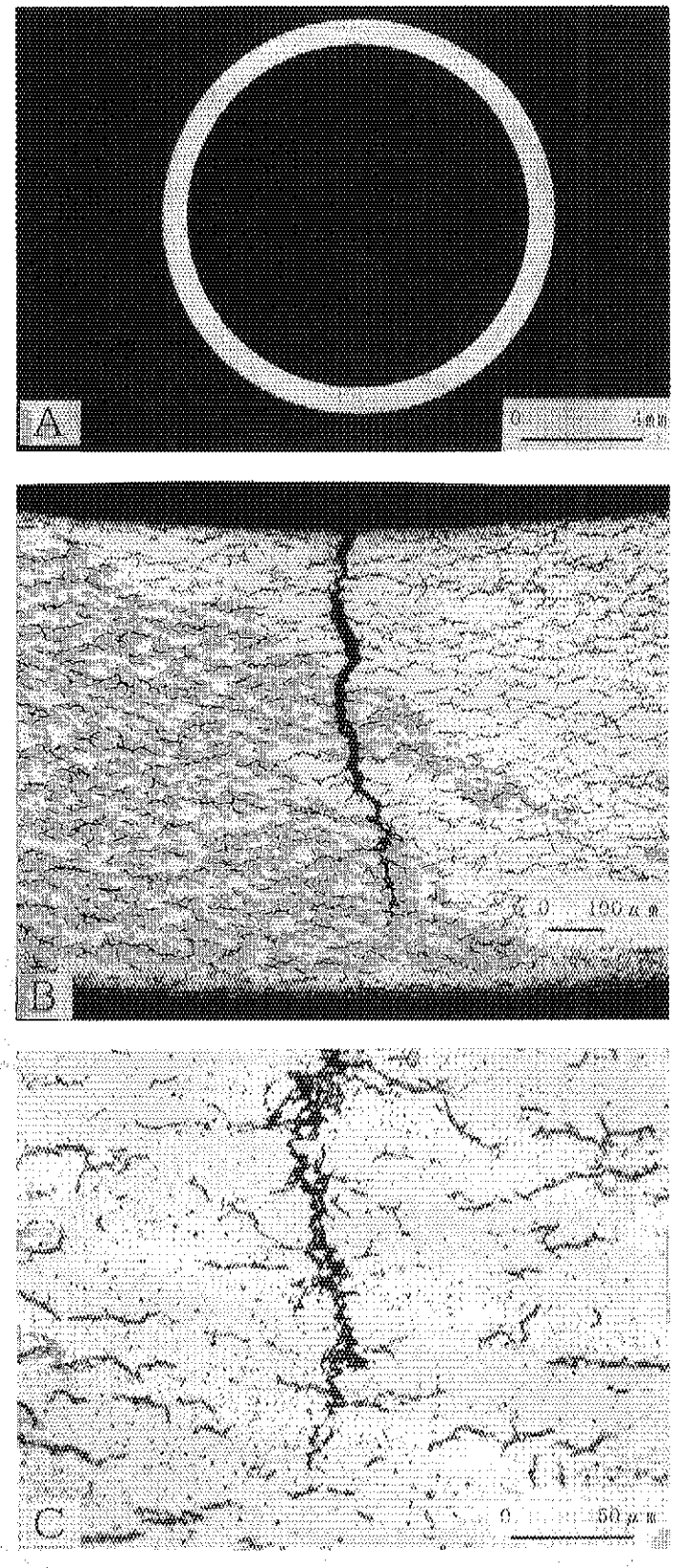


Photo.22 Cross-sectional view of irradiated, pre-flawed zircaloy-2 specimen B52-2 failed by pinhole penetration under cyclic loading. A: overview, B, C: magnified view of the pinhole crack.

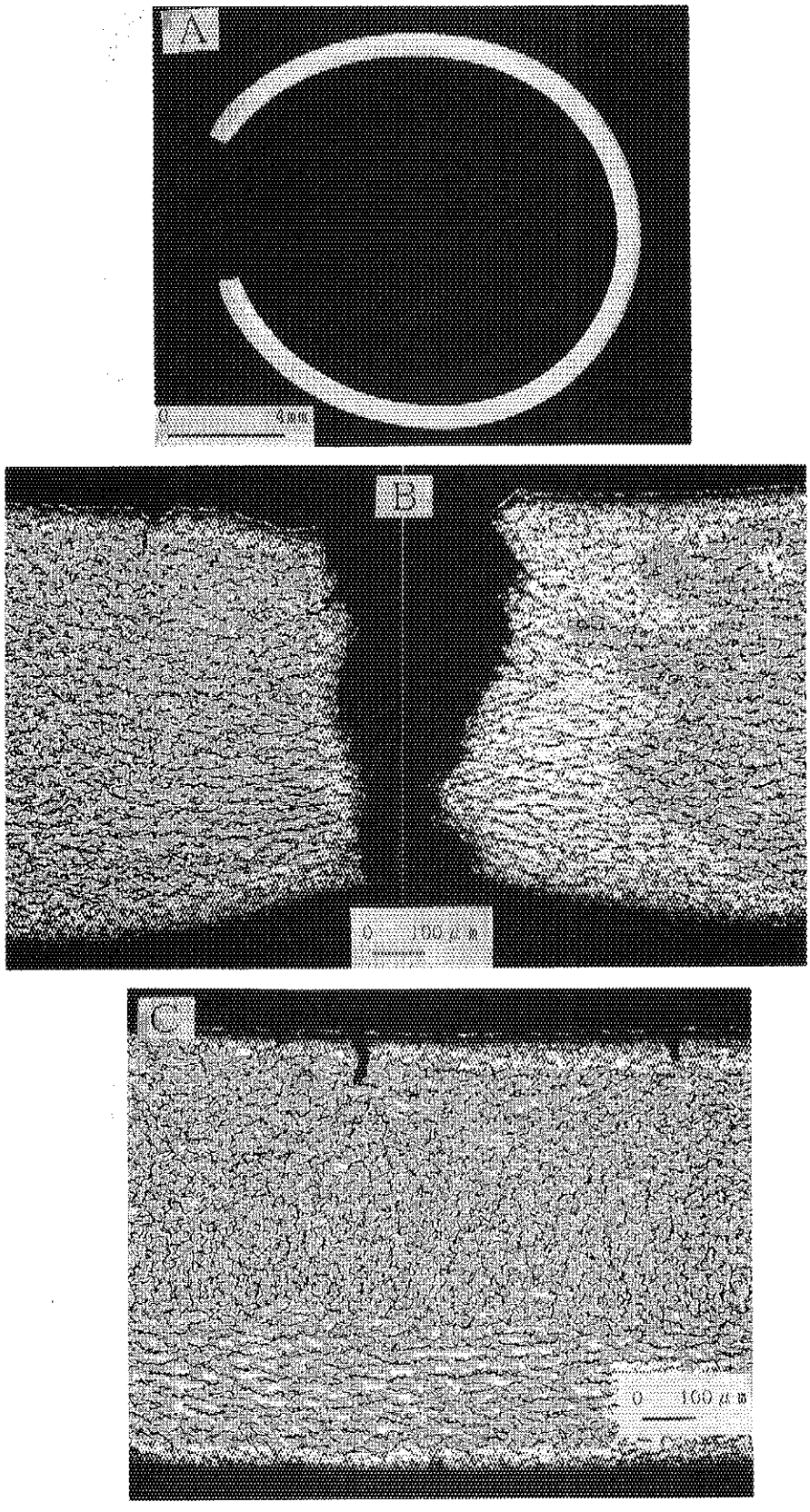


Photo.23 Cross-sectional view of irradiated, pre-flawed zircaloy-2 specimen B 53－3 failed by rupture under cyclic loading. See Fig. 25－A.
A : overview, B : magnified view of rupture rips,
C : incipient cracks in the inner surface of specimen.

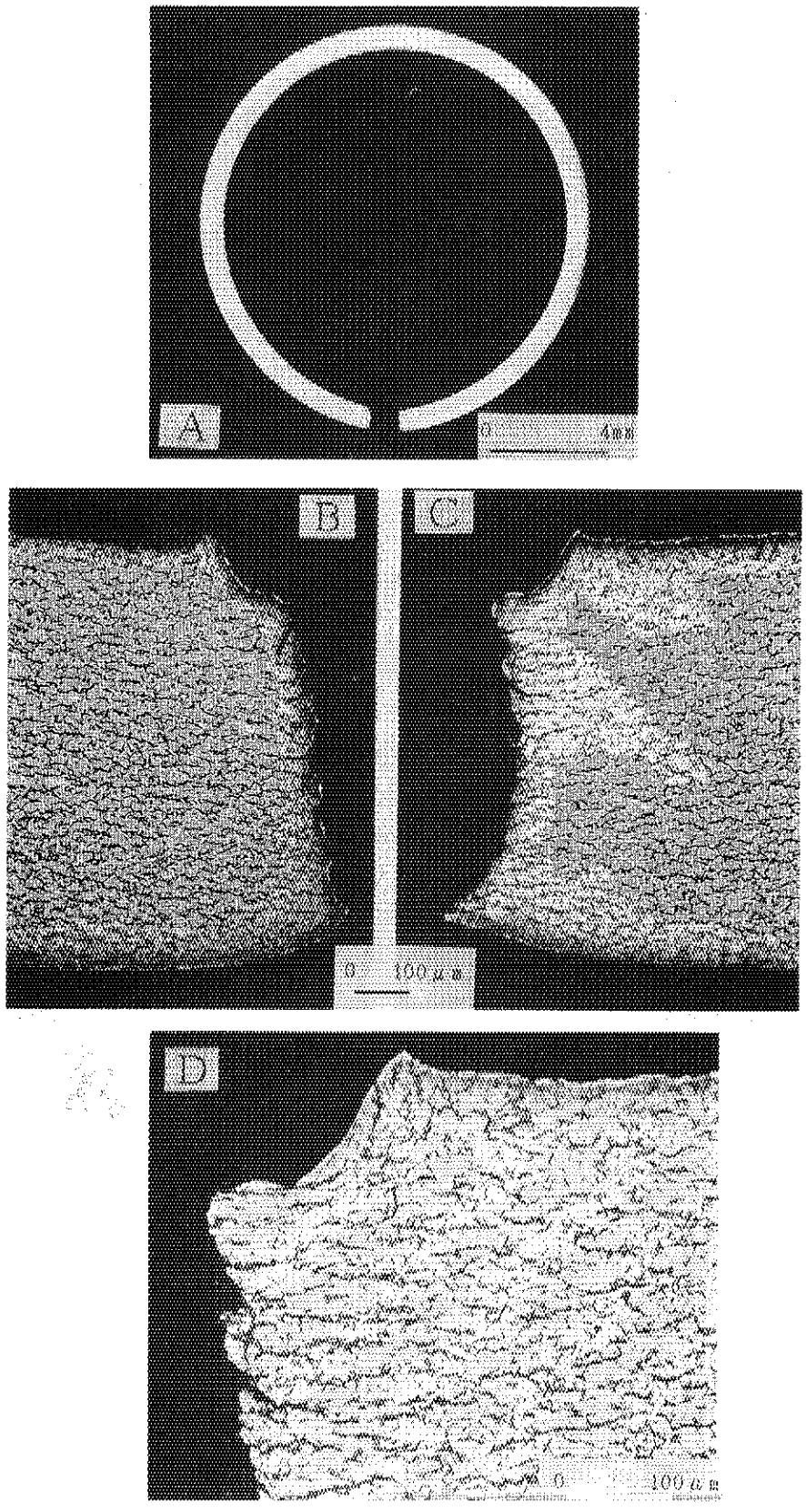


Photo.24 Cross-sectional view of irradiated, pre-flawed zircaloy-2 specimen B 53－1 failed by rupture under cyclic loading.
A : overview, B, C : magnified view of the rupture rips.

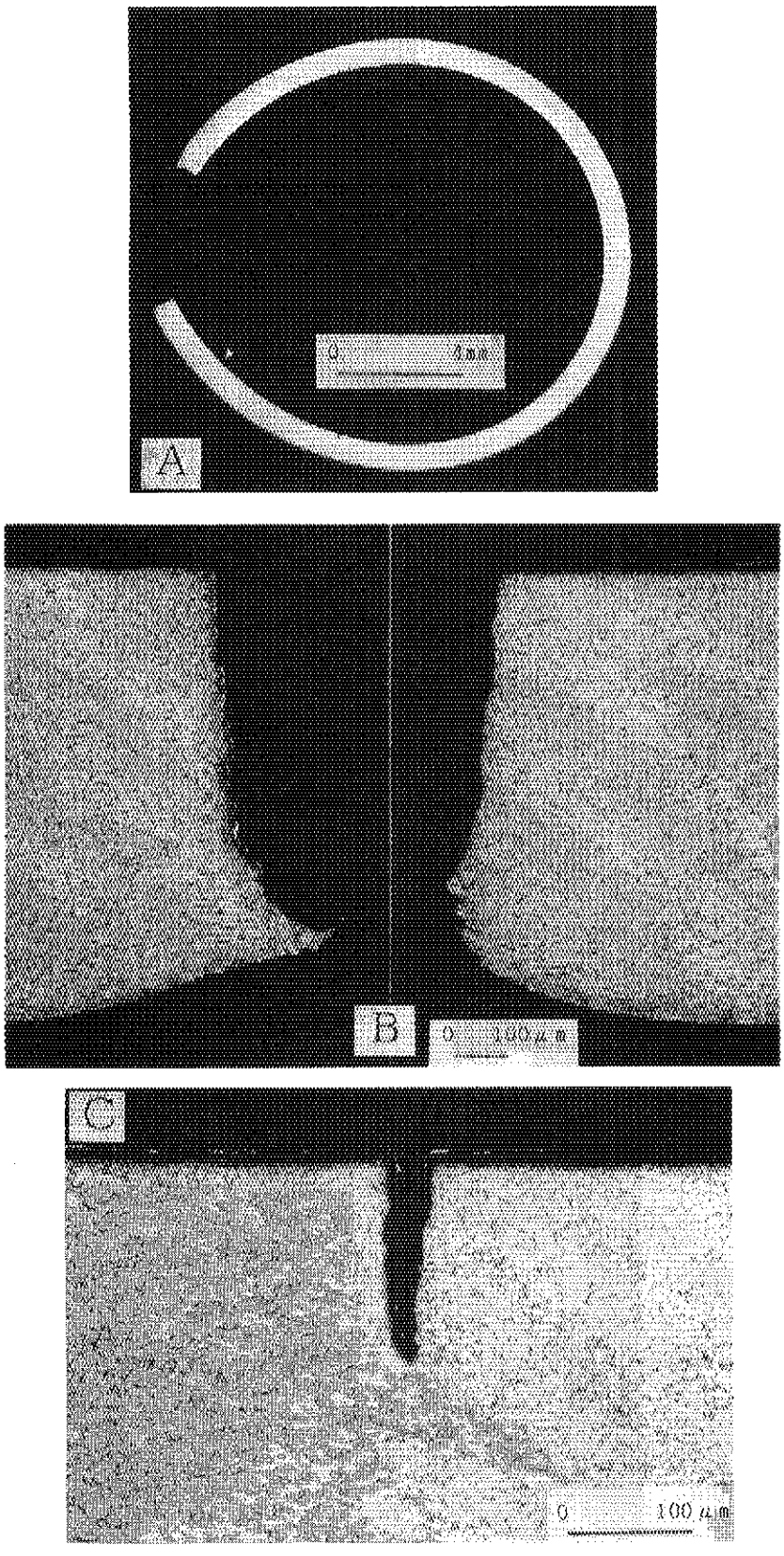


Photo.25 Cross-sectional view of irradiated zircaloy-2 specimen B 54－3 failed by rupture under cyclic loading.
A : overview, B : magnified view of rupture rips, C : incipient crack in the inner surface of specimen.

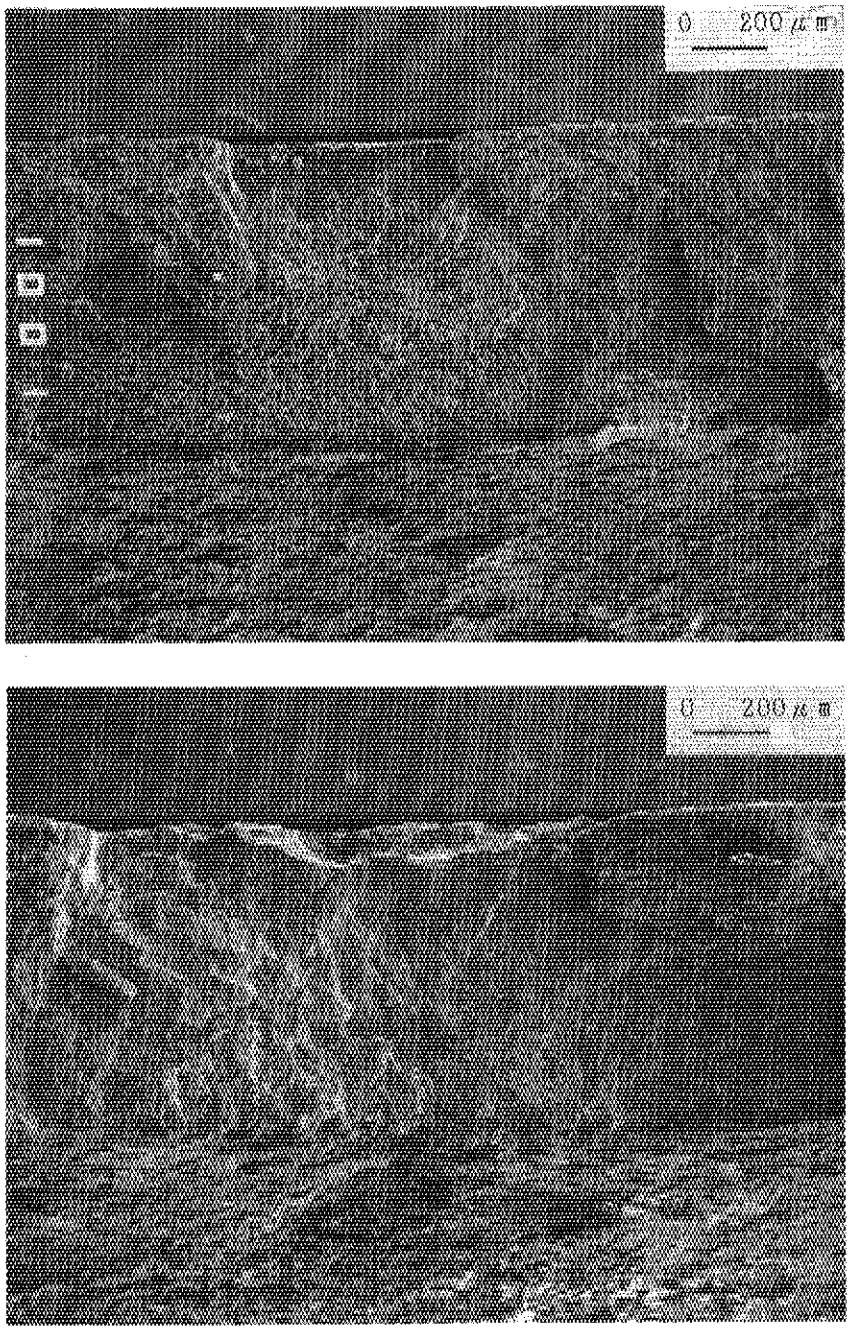


Photo.26 Surface made by splitting the sample segment containing pinhole crack in the irradiated, pre-flawed specimen B 52－1 failed under monotonous loading. See Fig. 24－B.

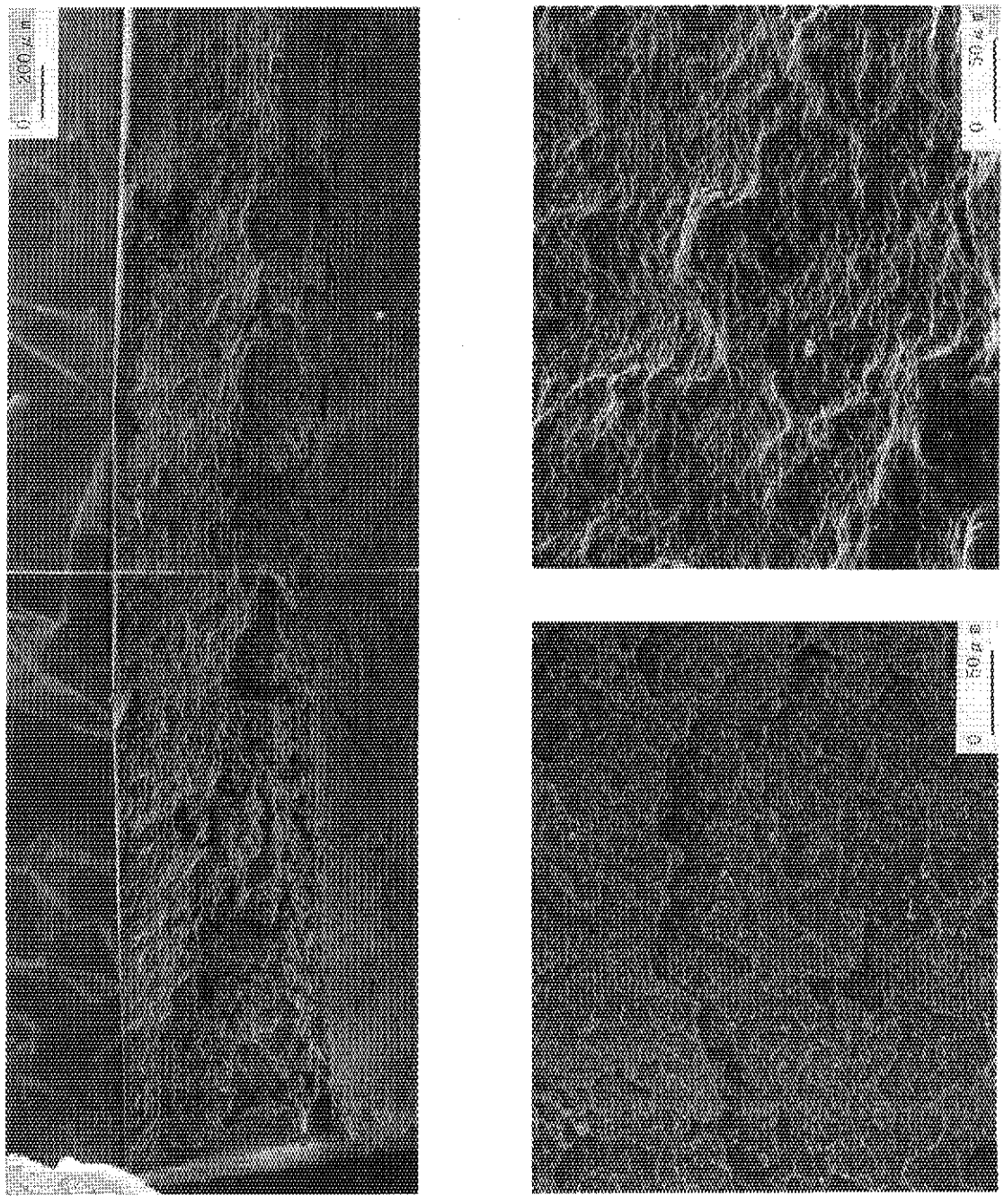
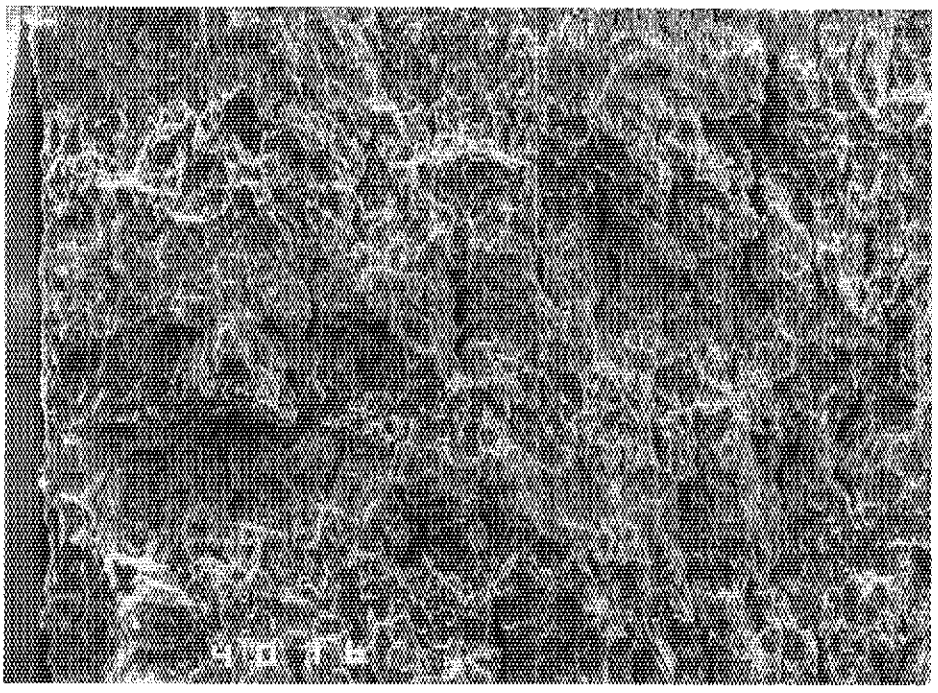
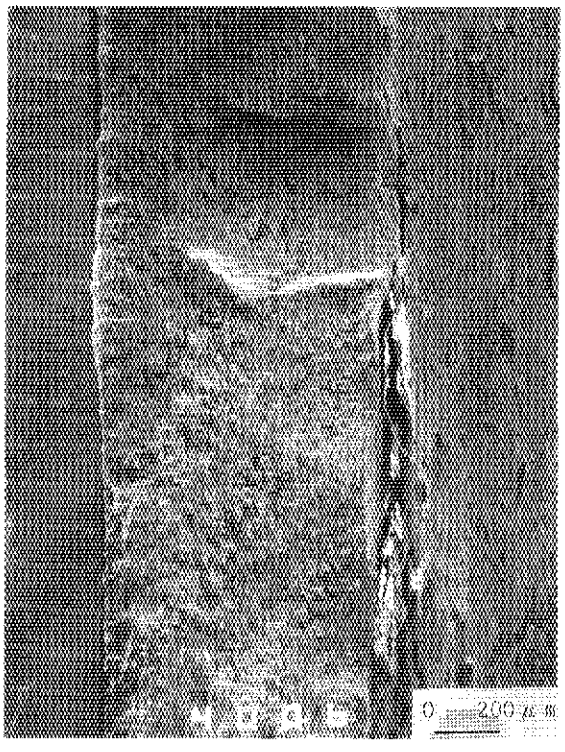


Photo.27 Rupture surface of irradiated, pre-flawed specimen B 54－1 failed under monotonous loading. See Fig. 24－A.



0 50μm



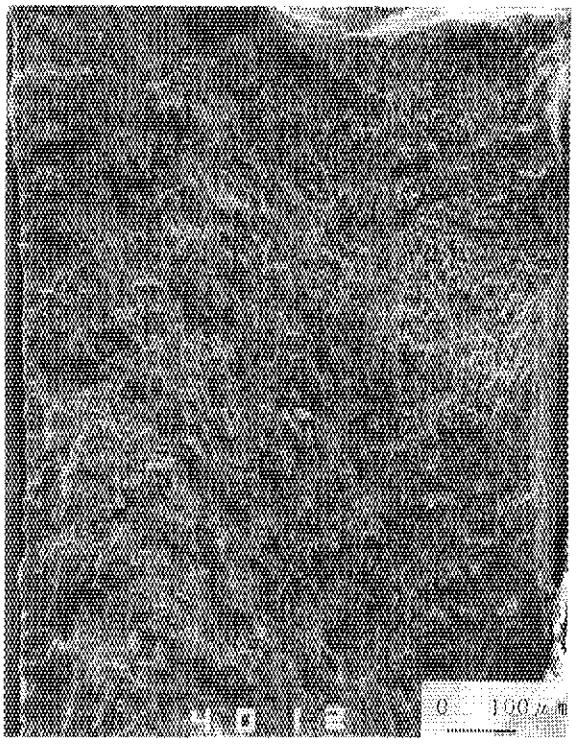


Photo.28 Surface made by splitting the sample segment guessed to contain pinhole crack in the irradiated specimen B 55－2 failed by pinhole penetration under monotonous loading.
Photos. B and C are magnified views of Photo. A. See Fig.24－B.

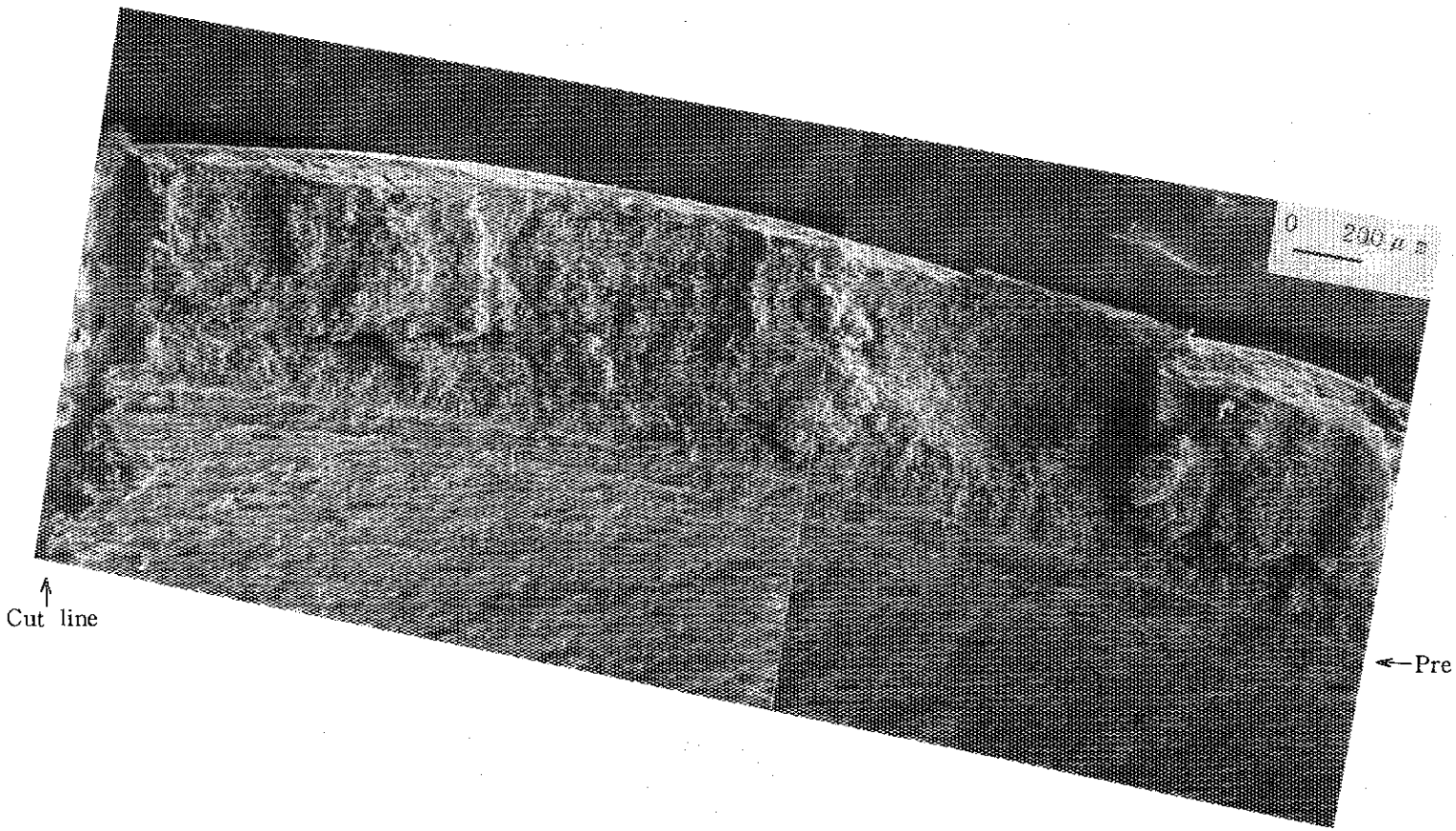


Photo.29(A) Rupture surface of irradiated, pre-flawed specimen B 52－3 failed under cyclic loading.

Photo 29(B, C) Rupture surface of irradiated, pre-flawed specimen B 52－3 failed under cyclic loading.

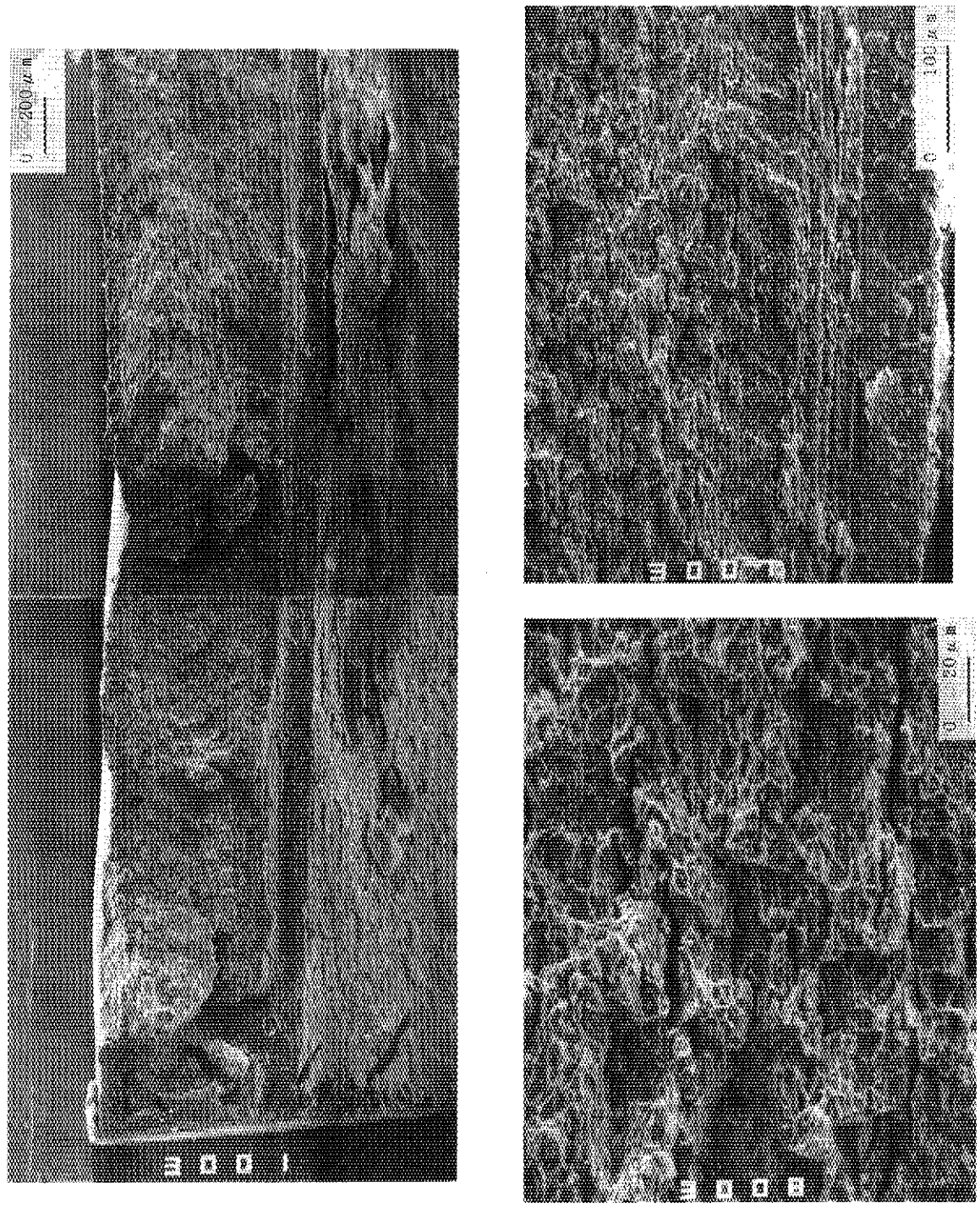


Photo.30 Rupture surface of irradiated, pre-flawed specimen B 53－1 failed under cyclic loading. See Fig. 25－B.