JAERI-M
83-096

燃料集合体のジルカロイ被覆管の変形におけるロッド間相互作用に関する模擬燃料棒試験
―ふくれ変形におよぼす外部発熱体の影響―

1983年7月

鈴木元衛

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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　　刷　㈱高野高速印刷

JAERI-M 83-096

燃料集合体のジルカロイ被覆管の変形における ロッド間相互作用に関する模擬燃料棒試験 ―ふくれ変形におよぼす外部発熱体の影響―

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
鈴 木 元 衛

（1983年6月2日受理）

軽水炉の冷却材喪失事故において燃料集合体のジルカロイ被覆管のふくれ変形中に起きると想定される，被覆管の間の機械的・熱的相互作用を調べるために，単一の模擬燃料棒を8本の非加圧外部発熱パイプで囲んだ状態で変形破裂試験を行った。この外部発熱体と接触した，ふくれ変形中の被覆管の変形・破裂挙動は，単に被覆管と発熱体との間の温度差のみならず，ふくれ変形が進行している時の内圧と温度にも依存することが見出された。また観察と解析により，被覆管のフープ引張応力は被覆管の発熱体との接触面の外側に生じる変曲点において最大となることが見出された。

Simulator Test on the Rod-to-Rod Interactions of Ballooning Zircaloy Claddings of Fuel Assembly
—— Effects of External Heaters on the Deformation Behavior ——

Motoye SUZUKI

Department of Nuclear Safety Research
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received June 2, 1983)

Burst tests were conducted with a single rod simulator surrounded by eight non-pressurised external heaters in order to investigate the mechanical and thermal interactions assumed to occur among zircaloy claddings of fuel assemblies in a hypothetical LOCA of LWR. It was found that deformation and rupture behaviors of ballooning cladding which made contact with the external heaters depend not only on the temperature difference between the sheath and external heaters but also on the internal pressure and temperature at which ballooning takes place. It was observed and analyzed that cladding hoop tensile stress is largest at the inflection points generated outside the contact surface of the expanding tube.

Keywords: LOCA, Zircaloy Cladding, Ballooning, Rupture, Mechanical Interactions, Thermal Interactions, Rod, Temperature Difference, LWR

目　　次

1. 緒言 …… 1
2. 実験 …… 1
2.1 試料 …… 1
2.2 テストリグ …… 2
2.3 実験の順序および条件 …… 3
3. 結果 …… 4
3.1 特性テスト …… 4
3.2 発熱体中の破裂テスト …… 4
3.3 破裂開口の特徴 …… 8
4. 考察 …… 8
4.1 実験の背景 …… 8
4.2 実験における温度差条件 …… 9
4.3 湾曲の抑制効果 …… 11
4.4 外部発熱体の効果 …… 12
5. 結論 …… 13
謝辞 …… 13
参考文献 …… 14
表，図 …… 15
写真 …… 40

Contents

1. Introduction 1
2. Experimentals 1
2.1 Specimen 1
2.2 Test rig 2
2.3 Experimental sequence and condition 3
3. Results 4
3.1 Characterization test 4
3.2 Burst test in external heaters 4
3.3 Observation of burst opening 8
4. Discussion 8
4.1 Background of experiments 8
4.2 Temperature difference conditions 9
4.3 Restraining effect on bowing 11
4.4 Effects of external heaters 12
5. Conclusions 13
Acknowledgement 13
References 14
Table, Figures 15
Photographs 40

1. 緒　　言

加圧水型軽水炉（ＰＷＲ）の冷却材喪失事故（ＬＯＣＡ）においては，燃料棒のジルカロイ被覆管は，高温に加熱され，かつ一次系圧力の低下によって内圧と外圧の差が高まるので，ふくれ変形を起こし，局所的に破裂すると想定されている。この変形は，緊急冷却水の集合体内流路を減少させることによって炉心冷却の効果を減殺し，熱水力挙動に影響を与え，被覆管の温度上昇を助長する原因になるが，一方では，燃料ペレットから被覆管が遠ざかり，ギャップ熱伝達率の低下をまねき，被覆管温度の上昇を抑える効果を持つ。また，破裂開口部から被覆管内面に水蒸気が流入すると被覆管の内面酸化が起きるが，この反応は，破裂時点からの温度履歴および破裂開口の大きさ，破裂までの変形などにより影響される。

流路減少による被覆管温度の上昇は，酸化反応を加速することによって被覆管の大きな脆化につながる。また内面酸化は，その結果として生成した水素を吸収することと相まって，被覆管を著しく脆化する。こうして，ＬＯＣＡにおいては，ふくれ・破裂変形は，燃料集合体の挙動，炉内の熱水力条件などを規定する重要な因子となる。したがって，この変形挙動を解明する目的で，模擬燃料棒を用いた多くの実験が従来から行なわれてきた。それらの実験手法を大別すると，単一の試料被覆管を用いたsingle－rod test[8),(9),(10)〜(14)]と，複数の試料被覆管を集合体の一部に模して配置したものの変形実験を行うMulti－rod test に分かれる[(1)〜(7)]。Single－rod test は，単一の試料に対してその温度（分布）や変形過程を詳細に測定でき，かつパラメーターを変えて数多く実験することが可能である。しかしその反面，集合体内で生ずると予想されるところの，隣接被覆管との相互作用を模擬できない。また，Multi－rod testは，集合体内で生ずると当然予想されるところの，燃料被覆管間の熱的，機械的相互作用を模擬することができるが，一方，温度分布や変形過程に関する正確で詳細なデータをとることは，構造の複雑さゆえに不可能である。このことは，Multi－rod testの結果を解析する上で，困難をもたらす。すなわち，Multi－rod testにおいては，それぞれの燃料棒の被覆管は，その周囲の隣接した被覆管と熱のやりとりをし，かつ，それぞれがふくれ変形をしたとき相互に接触することで，変形・破裂挙動に相互に大きな効果を与え合う。この相互作用の過程は，実験終了後試料集合体を解体してみて初めて推測をつけることができる性格のものである。このような解析の際，１本の被覆管が周囲の被覆管から受ける熱的，機械的効果に関して，Multi－rod test よりも単純な条件下で得た，それがゆえに比較的詳しいデータがあれば，きわめて有用である。このような見地から，本研究においては，１本の試料被覆管を８本の発熱棒で囲んだ状態でふくれテストを行い，試料のふくれ変形におよぼす発熱体の熱的，機械的効果を調べることを目的とした。

2. 実　　験

2.1 試料

試料の構造の模式図をFig.1に示す。中央部のジルカロイ－4被覆管は，外径１０.７３mm，肉厚０.６３mm，軸長２６０mmあり，その内部にＢＮシースで絶縁された軸方向の長さ２００mmの電気ヒー

1. 緒　　　言

加圧水型軽水炉（ＰＷＲ）の冷却材喪失事故（ＬＯＣＡ）においては，燃料棒のジルカロイ被覆管は，高温に加熱され，かつ一次系圧力の低下によって内圧と外圧の差が高まるので，ふくれ変形を起こし，局所的に破裂すると想定されている。この変形は，緊急冷却水の集合体内流路を減少させることによって炉心冷却の効果を減殺し，熱水力挙動に影響を与え，被覆管の温度上昇を助長する原因になるが，一方では，燃料ペレットから被覆管が遠ざかり，ギャップ熱伝達率の低下をまねき，被覆管温度の上昇を抑える効果を持つ。また，破裂開口部から被覆管内面に水蒸気が流入すると被覆管の内面酸化が起きるが，この反応は，破裂時点からの温度履歴および破裂開口の大きさ，破裂までの変形などにより影響される。

流路減少による被覆管温度の上昇は，酸化反応を加速することによって被覆管の大きな脆化につながる。また内面酸化は，その結果として生成した水素を吸収することと相まって，被覆管を著しく脆化する。こうして，ＬＯＣＡにおいては，ふくれ・破裂変形は，燃料集合体の挙動，炉内の熱水力条件などを規定する重要な因子となる。したがって，この変形挙動を解明する目的で，模擬燃料棒を用いた多くの実験が従来から行なわれてきた。それらの実験手法を大別すると，単一の試料被覆管を用いたsingle－rod test[(8),(9),(10)〜(14)]と，複数の試料被覆管を集合体の一部に模して配置したものの変形実験を行うMulti－rod test に分かれる[(1)〜(7)]。Single－rod test は，単一の試料に対してその温度（分布）や変形過程を詳細に測定でき，かつパラメーターを変えて数多く実験することが可能である。しかしその反面，集合体内で生ずると予想されるところの，隣接被覆管との相互作用を模擬できない。また，Multi-rod testは，集合体内で生ずると当然予想されるところの，燃料被覆管間の熱的，機械的相互作用を模擬することができるが，一方，温度分布や変形過程に関する正確で詳細なデータをとることは，構造の複雑さゆえに不可能である。このことは，Multi-rod testの結果を解析する上で，困難をもたらす。すなわち，Multi-rod testにおいては，それぞれの燃料棒の被覆管は，その周囲の隣接した被覆管と熱のやりとりをし，かつ，それぞれがふくれ変形をしたとき相互に接触することで，変形・破裂挙動に相互に大きな効果を与え合う。この相互作用の過程は，実験終了後試料集合体を解体してみて初めて推測をつけることができる性格のものである。このような解析の際，１本の被覆管が周囲の被覆管から受ける熱的，機械的効果に関して，Multi－rod test よりも単純な条件下で得た，それがゆえに比較的詳しいデータがあれば，きわめて有用である。このような見地から，本研究においては，１本の試料被覆管を８本の発熱棒で囲んだ状態でふくれテストを行い，試料のふくれ変形におよぼす発熱体の熱的，機械的効果を調べることを目的とした。

2. 実　　　験

2.1　試料

試料の構造の模式図をFig.1に示す。中央部のジルカロイ－４被覆管は，外径１０.７３㎜，肉厚0.６３㎜，軸長２６０㎜あり，その内部にＢＮシースで絶縁された軸方向の長さ２００㎜の電気ヒー

ターが入っている。ジルカロイ管の上端にはステンレス製のプラグが溶着されており，このプラグの中心を貫通してアルミナで周囲を絶縁されたヒーターリードが出ている。ジルカロイ管の下端には，同様にステンレス製のパイプが溶着され，このパイプの中には，被覆管の昇温や変形に伴う軸方向の伸びや収縮によって生ずる内部ヒーターの軸方向の移動を吸収するための，パイプから絶縁された銅メッシュが入っている。ヒーターの下端はこのメッシュに接続され，さらにメッシュ下端にはジルカロイ管から絶縁されたリードが接続されている。この下端リードには試料内部スペースに通じる貫通孔があけられており，この孔を通して試料内は一たん真空に引かれた後，ヘリウムが充塡され，密閉される。

2.2 テストリグ

テストリグの構成を，Fig.2−A，−B，Fig.3に示し，またその写真をPhoto.1に示す。Fig.2−Aに断面を示すように，中央に試料の模擬燃料棒が置かれ，その周囲に8本の外部発熱体が対称に並んでいる。この発熱体は，直径13㎜あるいは10㎜（Case P−2，A−5のみ），肉厚1.0㎜のSUS304あるいはインコネル601のパイプの両端に端栓を熔接したものである。この外部発熱体の中心軸間の距離すなわちピッチ間隔は，直径13㎜のものに対して13.7㎜，10㎜のものに対して12.2㎜とした。これらの値は，中央の試料被覆管がふくれ変形して最初に接触するときの直径の公称歪量が～34％となるように選ばれた。この値は典型的なPWR型集合体においては，被覆管が一斉にふくれ変形して最隣接被覆管同志が燃料棒間隔の中央で接し始める時点の直径公称歪量が～34％となることを模擬している。

試料および外部発熱体の温度は，直径0.1㎜のPt／Pt−13Rh熱電対をそれらの外表面にスポット熔接することにより，計測・制御した。試料被覆管においては，円周方向90°間隔に4カ所（Fig.2−A参照），第二最隣接発熱体を向く位置に（Case A−5においては最隣接発熱体を向く位置に），軸方向2レベル（Fig.3参照）合計8点を熔接した。第二最隣接発熱体を向く位置は，後述する接触面の中央から45°ずれているがこれは以下の理由による。接触面の中心すなわち最隣接発熱体を向く位置に熱電対を付けた場合，熱電対の保護シース（直径1㎜のアルミナ管，0.2㎜ϕの孔が二つ貫通している）が接触面間に入って被覆管を局所的に凹ませ，それが異常な破裂を誘起することが，本格実験に先立つ試行テストにおいて多かった。したがって，温度計測上の正確さを多少犠牲にして，熱電対の位置を45°ずらすこととした。各々の熱電対はアルミナシースで絶縁されているが，熔接部の裸の素線の部分は，液体セラミックを塗ることにより絶縁した。発熱体に付けた熱電対の熔着箇所は，Fig.2−Bに示したように中心の試料に最も近い外周上の箇所を選び，その裏側から，アルミナシースで絶縁してリードをとり出している。

テストリグを水平方向から見たときの模式図をFig.3に示す。外部発熱体の軸長は230㎜であり，両端は電極に固定され，これを通して交流電流が流されることによってジュール発熱する。試料の発熱長（内部ヒーターの軸方向長さ）200㎜の部分が中央に位置するように試料は下端をフレームに固定される。試料上端は，上下方向には動くが半径方向には0.2㎜程度しか動かないように拘束される。なお，試料被覆管は，発熱体の通電系統からも，内部ヒーターの電源系からも完全に絶縁されている。Photo.1−A，−Bは，テストリグ全体を示す。Aは，手前の三本の発熱体をはずして，テスト前の試料を見たところ，Bは全体の組立てが完了した状態である。

2.3 実験の順序および条件

(1) 試料模擬燃料棒の特性テスト

i) 試料の単独破裂テスト(Case P－1, P－2)

試料を外部発熱体で囲まない状態で変形破裂試験を行った。このテストの目的は，試料被覆管に内部ヒーターによって生じる周方向温度分布および，被覆管単独のふくれ変形挙動を予め調べておくことである。試料は，2.2ににおいて述べた様にフレームにセットされ，内部にヘリウムを加圧封入し，ヒーターに通電して加熱し，破裂するまで変形させた。

ii) 試料の温度分布テスト(Case P－3, P－4)

試料を8本の外部発熱体で囲み，低い内圧で加圧し加熱することによって，変形しない状態での温度分布を求めた。Case P－3においては，軸方向に10本の熱電対を分布させ，試料昇温とほぼ平行して外部発熱体も加熱した。

また，Case P－4においては，外部発熱体には通電せず，単に熱反射体としてのみ作用させて，試料に生じる円周方向温度差(＝azimuthal temperature difference，ΔTazと略)を求めた。

(2) 昇温する外部発熱体中の破裂テスト(Case A, B)

このテストが，本研究の主たる実験である。すなわち2.2において述べた通りの装置系において，予めヘリウムで加圧した試料を外熱し，変形して破裂した直後に試料および外部発熱体への通電を切る。外部発熱体の昇温速度は試料のそれと等しくなるように制御されるが，試料と最隣接の4本の発熱体との温度差は，パラメーターの1つである。この温度差の定義は，後述する。

(3) 発熱体2本を非通電とするテスト(Case C)

Fig.4に◍印で示したように2本の外部発熱体を非通電とし，その他については(2)に述べた条件と同様の条件のテストを行った。この目的は，実際の集合体内の非加熱ロッド，すなわち制御棒の存在の，隣接被覆管のふくれ変形に及ぼす効果を模擬することである。ただし，実際の集合体においては制御棒がFig.4の様に2本並んでいることはあり得ないが，本実験においては発熱体の電極板形状からくる制約のため，2本同時に非通電とせざるを得なかった。

(4) 試料内圧および昇温速度

本実験においては，ふくれ変形を最大として隣接発熱体との接触を最大とするために，初期内圧を4.4～5.0 MPaとした。従来の研究によれば，5～10K/secの昇温速度で連続的に試料被覆管を加熱した場合，破裂歪が最大となる破裂温度～1100Kで破裂させるためには，6～8MPaの内圧レベルが必要である。[(9),(12)～(14)] このレベルは，管の初期外径や肉厚に余り依存しない。しかし，この内圧の値では，試料は～1100Kに達した直後に破裂する。したがって，最大の円周方向歪を生成する～1100Kレベルにおいて破裂までの時間を長びかせ，以て拡大された接触を生み出すには，4.4～5.0MPaのレベルが必要であると判断した。

また，昇温速度は全ケースを通して6～9K/secとしたが，これは原研における模擬燃料集合体の変形実験における値7～9K/secにならったものである。[(1),(2)]

(5) その他

Case P, A, B, Cのシリーズを通じて，試料の昇温は原則として～1100Kのレベルに達するまでは自動調節で，それ以降は手動調節によった。またCase A, B, Cを通して，試料初期内圧は被

覆管温度が573Kとなった時点の値をとるものとする。本節以降，試料熱電対の指示温度をTsp，4本の最隣接発熱体のそれらをTexとし，TspとTexの平均値の差を⊿Tavとする。Table1にCase P，A，B，Cの実験条件をまとめて示す。

3. 結　　果

3.1 特性テスト

(1) 単独破裂テスト

この結果は，Fig.5とPhoto.2（CaseP−1），およびFig.6とPhoto.3（Case P−2）に示される。横軸の時間は，温度が650〜750Kに達した任意の時刻を起点にとったもので，電力を投入した時刻からの値ではない。Case P−1においては試料の上部拘束として発熱部上端より上方に約60−80㎜の部分を金属治具によって半径方向への変位を抑える方法をとった。初期内圧は4.5MPa（580Kにおいて）である。Fig.5において，実線のプロットは軸方向上方レベルの，破線のプロットは同じく下方レベルにおける円周方向4点の温度である。⊿Tazは温度上昇とともに増大し，破裂時点では〜40Kにも達した。⊿Tazは内部ヒーターの偏心により生じ，被覆管の非軸対称ふくれ変形とそれに伴う試料の湾曲によって拡大され，局所的なふくれの進行→破裂となる。Photo.2は，試料外観と破裂開口部での断面形状を示す。破裂円周歪は小さい。

Case P−2においては，Case P−1と等しい初期内圧のもとに，試料上部拘束を発熱部上端より上方20−40㎜とした。こうすることにより，変形過程の湾曲を抑え，破裂歪量の増大を期待した。しかし⊿TazはFig. に示されるように増大し，小さな円周方向歪量で破裂した。Photo.3は，Photo.2と同様の形状を示している。

(2) 温度分布テスト：Case P−3（No.989）

Fig.7は，試料発熱部内10点の温度ヒストリーを示している。試料内圧は0.1MPaであり，試料は，直径13㎜，ピッチ間隔13.7㎜とした8本の外部発熱体の中央に固定されている。0.1MPa程度の内圧（差圧）では，被覆管は1000°K程度においても数分のオーダーの時間内では，塑性変形は無視しうる。Fig. 中点線で示したカーブは，最隣接発熱体の上方レベルの熱電対の指示である。この場合の昇温速度はB，C，D，Eの各点で〜9K／sec である。B−C−Dの約78㎜の間で，軸方向温度差は最大〜40Kあり，中央部C−Dの44㎜の間では，最大〜18Kとなっている。

(3) 周方向温度分布テスト：Case P−4（No.3A）

Fig.8は，円周方向温度差⊿Tazを測った結果を示している。このテストにおいては，内圧を1.3MPaとし，外部発熱体に通電せず，被覆管の上方レベルの円周上90°おきの4カ所について，温度を測定した。最高温度が1000K以下ではあるが，⊿Taz〜15K程度の小さな値となった。

3.2 発熱体中の破裂テスト

(1) Tsp＜Tex の条件（Case A）

1）Case A−1：Fig.9は，初期内圧を4.9MPaとして加熱された試料と，その周囲の8本の外部発

覆管温度が573Kとなった時点の値をとるものとする。本節以降，試料熱電対の指示温度をTsp，4本の最隣接発熱体のそれらをTexとし，TspとTexの平均値の差を⊿Tavとする。Table 1にCase P，A，B，Cの実験条件をまとめて示す。

3. 結　　果

3.1 特性テスト

(1) 単独破裂テスト

この結果は，Fig.5とPhoto.2（Case P−1），およびFig.6とPhoto.3（Case P−2）に示される。横軸の時間は，温度が650～750Kに達した任意の時刻を起点にとったもので，電力を投入した時刻からの値ではない。Case P−1においては試料の上部拘束として発熱部上端より上方に約60−80㎜の部分を金属治具によって半径方向への変位を抑える方法をとった。初期内圧は4.5MPa（580Kにおいて）である。Fig.5において，実線のプロットは軸方向上方レベルの，破線のプロットは同じく下方レベルにおける円周方向4点の温度である。⊿Tazは温度上昇とともに増大し，破裂時点では～40Kにも達した。⊿Tazは内部ヒーターの偏心により生じ，被覆管の非軸対称ふくれ変形とそれに伴う試料の湾曲によって拡大され，局所的なふくれの進行→破裂となる。Photo.2は，試料外観と破裂開口部での断面形状を示す。破裂円周歪は小さい。

Case P−2においては，Case P−1と等しい初期内圧のもとに，試料上部拘束を発熱部上端より上方20−40㎜とした。こうすることにより，変形過程の湾曲を抑え，破裂歪量の増大を期待した。しかし⊿TazはFig. に示されるように増大し，小さな円周方向歪量で破裂した。Photo.3は，Photo.2と同様の形状を示している。

(2) 温度分布テスト：Case P−3（No.989）

Fig.7は，試料発熱部内10点の温度ヒストリーを示している。試料内圧は0.1MPaであり，試料は，直径13㎜，ピッチ間隔13.7㎜とした8本の外部発熱体の中央に固定されている。0.1MPa程度の内圧（差圧）では，被覆管は1000°K程度においても数分のオーダーの時間内では，塑性変形は無視しうる。Fig. 中点線で示したカーブは，最隣接発熱体の上方レベルの熱電対の指示である。この場合の昇温速度はB，C，D，Eの各点で～9K／sec である。B−C−Dの約78㎜の間で，軸方向温度差は最大～40Kあり，中央部C−Dの44㎜の間では，最大～18Kとなっている。

(3) 周方向温度分布テスト：Case P−4（No.3A）

Fig.8は，円周方向温度差⊿Tazを測った結果を示している。このテストにおいては，内圧を1.3MPaとし，外部発熱体に通電せず，被覆管の上方レベルの円周上90°おきの4カ所について，温度を測定した。最高温度が1000K以下ではあるが，⊿Taz～15K程度の小さな値となった。

3.2 発熱体中の破裂テスト

(1) Tsp＜Tex の条件（Case A）

1）Case A−1：Fig.9は，初期内圧を4.9MPaとして加熱された試料と，その周囲の8本の外部発

熱体のうち最隣接の4本の温度ヒストリー，および試料と発熱体との平均温度差，試料内圧の変化を示す。図中横軸は，試料被覆管温度が～750Kを越えた時点からの経過時間であり，左の縦軸は温度，右の縦軸は，部分的に内圧のスケールとなっている。なおこれ以降Fig.10～Fig.23のいづれの図においても，横軸の起点は試料温度がある任意の値を越えた時点となっており，加熱電力の投入開始時刻を起点とした値ではない。

図中，試料被覆管の上方の4本の熱電対の指示のうち最高の値を○印の中心位置，最低の値を○印の下に付けた線の下端の位置によって表わす。したがって，残り2つの熱電対の指示値は，○印とこの線の下端との間に位置することとなる。また，同じく被覆管の下方の4本の熱電対の指示値のうち最高値を●印の中心位置，最低値を●印の下に付した線の下端の位置によって表わす。同様にして，最隣接の4本の発熱体の上方の4カ所の熱電対，下方の4カ所の熱電対の指示値についても，それぞれ△，▲印およびそれらに付した線分によって示す。試料内圧ヒストリーは，図中，上に凸で，極大点をすぎてから時間の経過とともに単調かつ急速に減少していくところの，太線のカーブによって示される。このカーブが終っている点の値は，試料の破裂圧力である。

さらに，凹凸を持ちかつ互にほぼ似かよった変化を示している実線と点線のカーブは，次に述べる温度差（ΔTav：average temperature difference）である。すなわち，最隣接4本の発熱体の上方4点の温度の平均値から，試料被覆管の上方4点の温度の平均値を引いた値が実線で，同じく発熱体下方の4点と試料下方の4点の温度のそれぞれ平均値を出し，前者から後者を引いた値が点線のカーブである。これらのカーブの縦方向スケールは，図の右枠の一部に示されている。以下，Fig.10～Fig.20においては同様の表現法をとる。

さて，昇温カーブ（○，●，△，▲を連結したカーブ）をみると，～1100Kを越えた時点から昇温が鈍っている。これは，加熱パワーを人為的に減少させて被覆管を～1100K付近でふくれ変形させようとしたためである。この温度域では内圧を受けたジルカロイ管のふくれ変形は最大になることが従来の研究により確認されており[(9),(12)～(14)]，本実験においては外部発熱体との機械的相互作用（＝接触によるふくれ変形への影響）を最大にする条件として，この温度域を選択した。

内圧が極大値を過ぎる時点は，とりもなおさず被覆管が顕著なふくれ変形を開始した時点とみなしてよい。すると，そのような変形は，被覆管温度が～1030Kに達した頃より始まることが図より読みとれるが，このことはまた，従来の単一被覆管による変形実験の結果とも一致している[(9),(14)]。

さて，このケースにおいては，発熱体は試料より最大で～40K，平均で10～30K高い。すなわち，ふくれていった試料はより高温の発熱体に接し，そこで変形を抑制されると同時に加熱される。しかし，発熱体の間の空間へせり出していくようにしてふくれ変形は続き，遂には破裂する。破裂した試料とその断面をPhoto.4に示す。変形が発熱体によって抑えられたものの，さらにせり出していった部分に小さな破裂開口が生じている。

2) Case A－2：

Fig.10に示されるこのケースにおいては，初期内圧4.9MPaとし，平均温度の差ΔTavは約＋28～50Kとなった。最隣接外部発熱体間の温度差が～20Kあるのに対し試料の周方向温度差は高々～7K程度である。横軸上～37secの時点で外部発熱体の温度ヒストリーに小さな極大が生じているのは，電力コントローラーの性能に起因するオーバーシュートである。Photo.5は，Photo.4とよく似た試料（断面）形状を示している。

3） Case A－3，Case A－4

Fig.11およびFig.12に示したCase A－3およびCase A－4においては，初期内圧はそれぞれ6.8および6.7 MPa であり，平均温度の主⊿Tavのは約＋20～40Kとなった。試料（断面）形状を，Photo.6およびPhoto.7に示す。

本2ケースは，前2ケースに比べ内圧が高く，～1100Kに達した直後に破裂が起きている。Photo.6，7から見られるようにふくれ変形量は小さく，最隣接発熱体と接して生じた凹部の面積も，狭い。

4） Case A－5

Fig.13は，初期内圧を5.4MPa とし，⊿Tav＝0～20Kと，かなり近接した温度ヒストリーを与えた結果を示す。Photo.8は，この試料（断面）形状を示す。～1080K付近から昇温が鈍っている間にふくれ変形が大きく進んだことを，内圧の急速な減少カーブが物語っている。変形は，軸方向に拡大するとともに，発熱体との接触面積，破裂開口も大きいものを生じた。

(2) Tex≲Tsp. の条件（Case B）

1） Case B－1.

Fig.14は，初期内圧を4.9MPa とし，⊿Tavが約－10～＋15Kとなった結果を示す。温度ヒストリーにおいては，Case A－1の結果において説明した○●△▲印がいづれも重なり合うので，代表的な4点のヒストリーのみを実線によって示した。他の温度データはほとんどこれらのカーブの間に含まれる。Photo.9は，試料（断面）形状を示す。ふくれの軸方向の拡大は大きく，また最隣接発熱体の間の空間に被覆管がせり出していき，凸部を形成している状態が観察される。

2） Case B－2

本ケースの初期内圧は4.9MPa であり，⊿Tavは約～＋5～－25Kとなった。結果をFig.15とPhoto.10に示す。ふくれ変形，破裂開口ともに軸方向に長く拡大している。また，被覆管上方レベルの周方向温度差が，～43sec.の時点より増大している。内圧が急速に低下していることも特徴である。

3） Case B－3

本ケースの初期内圧は4.9MPa であり，⊿Tavは約－20～－40Kとなった。結果をFig.16とPhoto.11に示す。内圧が最高点を過ぎてから急速に低下しているが，このことはPhoto.11にみられる軸方向に長く拡大した変形とによる試料内容積増大対応していることは明らかである。破裂開口も長い。断面形状は，Photo.10のものとよく似ている。

4） Case B－4

本ケースの初期内圧は5.5MPa とした。結果をFig.17とPhoto.12に示す。本ケースの場合，試料の周方向温度差および最隣接発熱体間の温度差が大きく，したがって⊿Tavの変動も大きく，0～30Kにわたっている。Photo.12には，軸方向に拡大しつつも半径方向へのふくれが前2ケースに比べて小さい試料形状が示されている。

断面形状は，ほぼ前2ケースと同様であるが，肉厚分布の不均一がより大きい。これは，試料の周方向温度差の大きいほとに帰因するものであろう。

5） Case B－5

本ケースの初期内圧は5.0MPa であるが，⊿Tavについては0～－20Kを試みたが，結果としてFig.18に示す経過となった。試料（断面）形状は，Photo.13に示す。特殊なケースとして，

以下に破裂までの経過を述べる。

被覆管温度が～１１００Ｋに達した時点で昇温速度を下げるために内部ヒーターへの電力を減少させたところ，ふくれによるギャップ熱伝達率の大幅な低下とヒーター電力減少との時期が偶然一致したものと思われ，被覆管温度は低下し始めた。それにつれて外部発熱体の温度も低下し始めた。Fig.１８の横軸上１２０～１３０sec.の時点で，試料内部ヒーターへの電力を増大させ，温度低下を抑えた。しかし，この温度（～１０６０Ｋ）と，4.6～4.7ＭＰａ の内圧とでは破裂は容易には起こりそうもないことは従来の研究から明らかだったので，更にヒーター電力を増大し，温度上昇をはかった。すると，～１１００Ｋに至って破裂した。Photo.13 に示されるように，ふくれは外部発熱体間に大きくせり出していると同時に，軸方向にも長く拡大している。このときは，被覆管と接触した発熱体は，被覆管に押されて外側へ湾曲した。その湾曲による中央部の変位は，約1.3㎜であった。破裂開口は，大きな変形に比較して小さい。

6） Case Ｂ－６

本ケースでは，初期内圧を4.9ＭＰａ とし，ΔTavを～－１０～－２０Ｋ程度とし，昇温を～１１００Ｋに達しても鈍らせずに破裂まで続行した。結果を，Fig.１９とPhoto.１４に示す。破裂温度は～１１７０Ｋである。ふくれ量は比較的少ないものの，破裂開口が大きく，軸方向に長いのが特徴的である。外部発熱体間の上方レベルの温度差は～３０Ｋと，かなり大きい。しかし，試料のΔTazは１０Ｋ程度であった。

7） Case Ｂ－７

本ケースにおいては，初期内圧を6.9ＭＰａ と高くした以外は，ほぼ前ケース（Case Ｂ－６）と同様な条件とした。結果をFig.２０とPhoto.１５に示す。内圧が高いため被覆管は～１１００Ｋに達してすぐに破裂した。Photo.１５に見られるように，変形は小さいが接触部の凹凸は明瞭に形成され，肉厚分布も断面の変曲点（凹部と凸部の境界，外部発熱体との接触面のほぼ中央箇所）を除いてほぼ均一である。また，破裂開口は小さい。

(3) ２本の外部発熱体を非通電としたテスト（Case Ｃ）

1） Case Ｃ－１：本ケースの初期内圧は，4.9ＭＰａ とした。Fig.２１，Photo.１６に結果を示す。Fig.２１には，試料およびその周囲の１６点の温度のうち，１０点を選んで示した。図中の数字は，熱電対の位置を示しており，また$\dot{2}$，$\dot{5}$と$\dot{B}$は，いづれも軸方向下方レベルの位置，それ以外は上方レベルの値であることを示している。Fig.２１にも明らかなように，最隣接４本の発熱体Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄの温度には大きな差が生じた。上方レベルの温度ヒストリーで示せば，Ａ→Ｂ→Ｃ→Ｄの順に低くなっており，Ｄの温度は高々～６５０Ｋであり図中には現われ得ない。

試料円周方向の温度は，上方レベルでみれば１が最高，４が最低であり，その差は～６０sec.を過ぎてから破裂までの間，～４０Ｋに達している。この結果，Photo.１６に見られる非軸対象な変形が生じた。Fig.２１には断面の模式図を描いた。すなわち，被覆管の高温側が優先的にふくれて隣接発熱体と接し，さらに発熱体間へせり出していくと同時にふくれが軸方向に拡大するが，低温側は変形が少く，発熱体と接触しない。破裂開口は軸方向に比較的長くなった。

2） Case Ｃ－２

本ケースは，初期内圧を4.4ＭＰａ とやや低くし，破裂までの時間を延長させることを試みたもので，結果をFig.２２およびPhoto.１７に示す。図中の黒丸および数字，Ａ～Ｄの文字は，Fig.２１と同様，熱電対の位置（本ケースでは上方レベルのみ）とそれに対応する温度ヒストリーを示

したものである。温度ヒストリーのカーブに凹凸が多いのは，内部ヒーター電力を手動で調節したためである。③で示した温度カーブが～１００sec.の時点から急上昇しているが，この原因は不明である。Photo.17にみられるように，変形形状，破裂開口およびその位置は，Case C－1のそれとよく似ている。温度ヒストリーで注目しておくべきことは，①，②，④で示したカーブ，すなわち被覆管の円周上の３点の温度カーブの値の差が，時間経過とともに，～１５Kから～５０Kほどまで増大していることである。また内圧のカーブは，最高値に達してから～８０sec.をかけて緩かに低下しているが，変形の漸次的増大に対応しているものと考えられる。

３）Case C－３：

本ケースは，初期内圧を～4.5MPaとやや低くし破裂までの時間を延長しようと試みたものである。結果をFig.23とPhoto.18に示す。内圧は低め，かつ，最隣接発熱体Bの温度も，試料被覆管に比べて～２０K以上低いが，破裂はFig.23の温度ヒストリーに見るように～１１００Kを越してから遅滞することなく起っている。破裂開口は１で示した最も高い温度履歴の部分で生じた。

変形は，Case C－1，C－2に比べても少く，破裂開口も小さいことが，Photo.18に示されている。

3.3 破裂開口の特徴

Photo.4～Photo.18に示された断面を観察すると，破裂開口に関してほぼ共通して次のような特徴がうかがわれる。

破裂は，開口の大きさ，変形の大きさにかかわらず，被覆管断面の凹部と凸部の中間の変曲点あるいはその近傍において生じている。この部分が優先的に薄肉化して裂けやすくなることは，Photo.7に典型的に現われている。

4. 考　　　察

4.1 実験の背景

現実の燃料集合体の被覆管の，LOCA時のふくれ変形においては，集合体内の多数の被覆管がほぼ同時にふくれ変形を開始すると想定される。この変形によって生じる問題の１つは，ある軸方向レベルにおける被覆管の間の空間の閉塞率である。この閉塞率が高い程，緊急冷却水の流路は減少し，炉心冷却効果は減殺される。変形に伴うもう１つの問題は，被覆管の機械的強度の低下である。これは，主としてふくれによる肉厚減少および内面酸化による脆化が原因となる。内面酸化の程度は，被覆管の変形・破裂開口の大きさなどにも依存する。こうした問題と本実験の性格との比較考察は，以下のようになるであろう。すなわち，隣接した被覆管がほぼ同時にふくれ変形を起こすと，その接触面の曲率は著しく減少すると予測される。一方，ふくれの進み方（歪速度）が異なれば，―― 温度の高い被覆管の方が歪速度は高くなる ―― 先に変形した被覆管は変形の遅れた被覆管に接触し，接触面は凹凸を生じるであろう。本実験は，このような，断面の曲率が不連続に分布する場合の変形・破裂挙動に関する知見を与えるものである。集合体において隣接する２本の被覆管のうち１本に先に

したものである。温度ヒストリーのカーブに凹凸が多いのは，内部ヒーター電力を手動で調節したためである。③で示した温度カーブが～100 sec.の時点から急上昇しているが，この原因は不明である。Photo.17にみられるように，変形形状，破裂開口およびその位置は，Case C－1のそれとよく似ている。温度ヒストリーで注目しておくべきことは，①，②，④で示したカーブ，すなわち被覆管の円周上の3点の温度カーブの値の差が，時間経過とともに，～15Kから～50Kほどまで増大していることである。また内圧のカーブは，最高値に達してから～80 sec.をかけて緩かに低下しているが，変形の漸次的増大に対応しているものと考えられる。

3）Case C－3：

本ケースは，初期内圧を～4.5MPaとやや低くし破裂までの時間を延長しようと試みたものである。結果をFig.23とPhoto.18に示す。内圧は低め，かつ，最隣接発熱体Bの温度も，試料被覆管に比べて～20K以上低いが，破裂はFig.23の温度ヒストリーに見るように～1100Kを越してから遅滞することなく起っている。破裂開口は1で示した最も高い温度履歴の部分で生じた。

変形は，Case C－1，C－2に比べても少く，破裂開口も小さいことが，Photo.18に示されている。

3.3 破裂開口の特徴

Photo.4～Photo.18に示された断面を観察すると，破裂開口に関してほぼ共通して次のような特徴がうかがわれる。

破裂は，開口の大きさ，変形の大きさにかかわらず，被覆管断面の凹部と凸部の中間の変曲点あるいはその近傍において生じている。この部分が優先的に薄肉化して裂けやすくなることは，Photo.7に典型的に現われている。

4. 考　　　察

4.1 実験の背景

現実の燃料集合体の被覆管の，LOCA時のふくれ変形においては，集合体内の多数の被覆管がほぼ同時にふくれ変形を開始すると想定される。この変形によって生じる問題の1つは，ある軸方向レベルにおける被覆管の間の空間の閉塞率である。この閉塞率が高い程，緊急冷却水の流路は減少し，炉心冷却効果は減殺される。変形に伴うもう1つの問題は，被覆管の機械的強度の低下である。これは，主としてふくれによる肉厚減少および内面酸化による脆化が原因となる。内面酸化の程度は，被覆管の変形・破裂開口の大きさなどにも依存する。こうした問題と本実験の性格との比較考察は，以下のようになるであろう。すなわち，隣接した被覆管がほぼ同時にふくれ変形を起こすと，その接触面の曲率は著しく減少すると予測される。一方，ふくれの進み方（歪速度）が異なれば，――温度の高い被覆管の方が歪速度は高くなる――先に変形した被覆管は変形の遅れた被覆管に接触し，接触面は凹凸を生じるであろう。本実験は，このような，断面の曲率が不連続に分布する場合の変形・破裂挙動に関する知見を与えるものである。集合体において隣接する2本の被覆管のうち1本に先に

ふくれ変形が進むためには，その１本が他に比べて温度が高いか，少くとも同程度であることが必要であると考えると，中心の１本の試料のみがふくれ変形するという本実験の条件においては，Tex≦Tsp の温度条件が，Tex＞Tsp の条件より実際に起こりうる現象を模擬していると思われる。

また，集合体の変形実験において観察されるとのある軸方向に長く拡大したふくれ変形は，緊急冷却水流路を著しく減少させる可能性を持つが，このタイプの変形は，変形の進行に対する負のフィードバックの作用の結果であると考えられる[15]。すなわち，ふくれた部分の被覆管における冷却の増大やギャップ熱伝達率低下による温度低下とそれに伴う歪速度の低下，被覆管相互の接触によるふくれへの機械的抑制といった，半径方向への変位の進行に対する負のフィードバックによって，局所的に発生したふくれ変形がそのまま急速に進行して破裂に至ることが抑制された結果，ふくれの軸方向の拡大が生じたと考えられる。本実験は，変形に対する機械的抑制の効果に関する知見を与えると同時に，この負のフィードバックに，隣接被覆管からの熱的変動が重なった場合の変形挙動に関する知見を与えるものである。

4.2　実験における温度差条件

(1)　熱電対ホットジャンクションの位置

ホットジャンクションは，Fig.2－Aに示すように，Case A－5を除いては，被覆管表面上第二最隣接続発熱体の方向を向く位置に付けられている。試料の円周方向温度差は，接触を開始するまでは～１０Kであることは，Fig.9～Fig.20 に示されている。外部発熱体との接触後，発熱体との温度差にしたがって熱の出入が生じ，接触部中央の被覆管の温度は，それが熱電対の位置より円周上中心角にして45°ずれているために，熱電対の指示とは差を生じるであろう。したがって，各図中に記した温度ヒストリー相互の差，あるいは⊿Tavの値は，被覆管と最隣接発熱体の，熱電対のある軸方向レベルでの温度差の最大値を示していることになる。

しかし，接触後も接触面における温度差は急速には減少しないことは，Case A－5の温度ヒストリー（Fig.13中の○と△印のデータ及び⊿Tavの実線）からうかがわれる。

(2)　⊿Tavの評価

接触の開始時刻は，周方向歪が～３４％に達した時と考えてよく[9],[12],[14]，これは，内圧が急速に低下し始める時点にほぼ一致すると考えられる。内圧の急速な低下から破裂までの時間は，Fig. 9～Fig.2３より，ほぼ5～２０sec.である。⊿Tavは，接触している間こそ大きな意味を持つのであり，したがって各ケースにおいては内圧が急減少している時間域の⊿Tavを考察の対象にすることが必要である。

(3)　試料の特性テスト

i）Case P－1およびP－2においては，単一試料破裂テストのひとつの典型的経過が示された。すなわち，ふくれ変形は局所的に発生し，ある程度進行すると円周方向温度差のために非軸対称変形となる。このことが，試料棒の湾曲を生じさせ，さらに内部ヒーターの偏心を増大させて円周方向温度差の増大を加速する。その結果，Photo.2，3に示される断面に見られる不均一な肉厚分布を伴ったふくれ変形となる[9],[11],[12],[14]。Case P－2において，上部拘束位置を発熱部に近づけたことの変形挙動への影響はうすかったと思われる。

ii）Case P－3のFig.7に示されるように，試料の発熱部中ほぼ均熱域と見なしうる領域は，軸方向中央よりやや上方に中心をもって分布している。温度上昇も，全体として上方に偏っている。

これらは，周囲の空気の自然対流の効果によると考えられる。また，Fig.3とFig.7とを比較すればわかるように，変形テストにおける熱電対の軸方向レベルは，Fig.7のCおよびDの位置からそれぞれ2～3㎜上方へずれたところとなる。

Case P－4における試料の円周方向温度差が高々～15Kであることは，被覆管がふくれ変形をせずまた内部ヒーターからの熱の放出場所が被覆管およびそれに接している空気が主要なものである場合の値として，従来の研究例と比較して妥当なものとみなしうる。高い内圧による変形がある場合には，50～70Kに達することもある。

(4) 外部発熱体中の変形破裂テスト

i) Tex > Tsp の条件（Case A）

この条件では，試料被覆管の半径方向への変形は最隣接発熱体に接することによって抑制されるものの，同時に接触部は加熱されるので歪速度は増加する。したがって破裂までの時間が短くPhoto. 3～8に見られるように，接触面積や変形領域の拡大は小さくなると思われる。内圧を高くしたCase A－3，A－4では特にこの傾向が強い。

Case A－5の試料の変形が大きいのは，次の二つの理由によると思われる。第一は，ΔTavが0～20Kと，比較的少なかったこと，第二に，外部発熱体の直径が10㎜あり，発熱体間の空間スペースが他ケースに比べて大きかったことである。

ii) Tex ≲ Tsp の条件（Case Bシリーズ）

ふくれ変形は発熱体との接触によって抑制され，また冷却効果も加わるので，接触面およびその近傍の部分の温度は低下するかあるいは昇温が鈍り，歪速度が低下し破裂までの時間が延長されると考えられる。また，その延長された時間に，ふくれ変形領域が発熱体間スペースの方向および軸方向ともに拡大すると考えられる。

試料被覆管と外部発熱体間の接触による伝熱冷却の効果は，温度ヒストリーやΔTavのカーブを見る限り，温度差の減少としては顕著ではない。しかしCase AとCase Bの試料外形を比較すれば，Case Bの変形が軸方向に明らかに長く拡大していることから，伝熱冷却の変形に及ぼす効果は確実に存在すると考えられる。

Case B－1においては，ΔTavは正の値をとる期間が長いのであるが，内圧が急減少し始める～60 sec.の時点より，ΔTavの値は負になっている。すなわち，接触後はΔTav＜0とみなしうる。このことにより，Photo.9に見られる大きな変形が生じたと思われる。また，このケースでは接触した発熱体は被覆管に押されて外側へ1㎜程の変位を以て湾曲した。この湾曲は，変形を助長したと考えられる。

Case B－2とCase B－3を比較すると，被覆管の温度ヒストリー自体はほぼ等しいが，ΔTavの絶対値はCase B－3の方が大であり，このことが，Photo.10とPhoto.11にみられるように，変形の軸方向拡大がCase B－3において大きくさせたこと考えられる。

一方，Case B－4においては，変形がやや少いが，これは内圧を～0.5MPaほど高くしたことによると思われる。

Case B－5においては，接触した発熱体との温度差も大きく，また温度レベル自体も～1100K以下であったので，～5MPaの内圧によっては破裂するまでに長時間を経過し，極めて大きな変形となった。破裂開口は小さいが，この理由は，以下のように考えられる。接触による発熱体の外側への湾曲変位は，軸方向中央部で～1.3㎜であった。したがって，試料の変形は発熱体を湾曲

させつつ，発熱体の間の空間にせり出していったが，そのせり出し部の歪は大きく，それだけ肉厚も減少した。（Photo.12とPhoto.13に示された断面を比較のこと。）変曲部のある一部に一たん裂け目が発生すると，内圧がそれを軸方向に拡大された形で一挙に裂くに足るレベルを変形の軸方向の拡大量に対応するだけ持っていなかったため，裂け目は周辺の薄肉部に走ったのみで終り，結果的に小さな，丸みを帯びた開口になったと思われる。

Case B − 6は，昇温を，～1100Kを越えても継続した試みであり，変形がやや少いのは，～1170Kまで昇温したからであると考えられる。すなわち，高温に加熱されて歪速度が高くなり，接触面が十分広がらない前に破裂したものと思われる。

Case B − 7は⊿Tavの値はCase B − 6とほぼ等しいが，内圧が高いため，～1100Kに加熱される以前から変形が開始され，接触部の拡大をみないまま破裂したと考えられる。

(3) 部分発熱の条件

Photo.16，17および18にみられる非軸対称なふくれ変形は，明らかに外部発熱体間の大きな温度差によるものと考えられる。すなわち，内圧の減少と平行して試料の周方向温度差が増大していることがFig.21～Fig.23に示されているが，非軸対称なふくれは，この温度差増大の直接的帰結である。外部発熱体間の大きな温度差が試料の周方向温度差増大をもたらす理由は，次のように考えられる。

昇温期間中は，試料内部ヒーターからの熱のシンクは，被覆管からより低温の外部発熱体，特に非通電発熱体への熱放射があるとはいえ，被覆管およびその周囲の大気が主たるものである。一方，周囲の大気は，自然対流以上の流れはなく，外部発熱体によっても加熱されているので，被覆管に対する冷却材としての熱容量は小さい。したがって，被覆管の半径方向の熱流束も小さく，周方向温度差も増加しない。

ところが，～1100Kに近づきふくれ変形が顕著になってくると，ギャップ熱伝達率の低下が大きくなる。したがって，内部ヒーターからの被覆管への熱流束が減少してくると（昇温カーブの鈍化），温度の低い外部発熱体への放射が被覆管から外部への熱流束量における相対的比重を増加させ，外部発熱体間の温度差を反映して，被覆管の周方向温度差が増加するのである。このことは，破裂歪量を減少させるのに効果的である。

ところで，LOCAにおける燃料集合体においては，強制流的な水蒸気流が被覆管表面を冷却する可能性もあり，このような状況では，周方向温度差は変形の初期あるいは開始前から大きく生じるであろう。その結果，破裂歪は小さくなりうる。

4.3 湾曲の抑制効果

Photo.2および3に示されたように，単一模擬燃料棒の破裂テストでは，局所的に生じたふくれ変形が棒の湾曲を生じさせる。この湾曲は内部ヒーターの偏心による被覆管の非軸対称ふくれによるものであるが，湾曲自体がさらにヒーターの偏心を助長し，円周方向温度差を増加させる。その結果，破裂円周歪は小さい。しかしCase A，B，Cシリーズを通して，Photo.2および3に見られる湾曲は生じず，～50Kの円周方向温度差の生じたCase C − 2にしても，高温側のふくれ変形は軸方向に拡大している。このことは，接触した外部発熱体によって湾曲に対する抵抗が与えられた結果と考えられる。

4.4 外部発熱体の効果

変形の開始から破裂に至る過程を，Fig.24に模式的に示したように，Ⅰ～Ⅳの4段階に大別する。

第Ⅰ～Ⅲ段階は，ふくれの開始から最初の接触までの経過である。第Ⅳ段階は接触後の状態であり，本実験の結果を比較考察して以下のように分析される。

接触によってふくれは一たんは抑止される。ここで，$T_{sp} \gtrsim T_{ex}$ ならば，4.2で考察したように接触面積は拡大し，被覆管は発熱体の外面に沿って凹面を作り，同時にこの凹面に狭まれた部分の曲率半径は減少していく。

このとき，被覆管に働く内圧によるフープ応力を考える。曲率半径 r，肉厚 t，内圧Pにおける円筒殻のフープ応力 σ_θ は，

$$\sigma_\theta = \frac{2Pr}{t} \qquad \cdots\cdots\cdots (1)$$

となる。ここで，Fig.24に示したように，被覆管の断面を曲率半径の減少したA，凹面のB，AとBの中間の変曲点とその近傍のCの三部分に分けてみる。式(1)より，Aの部分では σ_θ は低下し，Bの部分では内圧Pが外側の発熱体からの抗力によって大幅にキャンセルされかつ凹面であるので σ_θ はきわめて小さい。すなわち，Cの部分の σ_θ が最大となり，最も薄肉化する（Ⅳ－aの図参照）。

しかし，接触しても変形の歪速度が十分高くなる条件下では，接触した凹面は，十分拡大しないまま破裂に至る。すなわち，$T_{sp} < T_{ex}$ であること，$T_{sp} \gtrsim T_{ex}$ でも内圧が十分高いことがこうした条件である。ただし，破裂開口は，このような場合でもやはり断面の変曲点近傍に発生することは，結果の章に述べたとおりである。

ところで，Case B－5の非常に長く拡大したふくれをどう解釈すべきであろうか。Fig.18に記された温度ヒストリーは，Fig.3に示された位置の熱電対の指示値である。この箇所の温度は，変形および接触によってFig.18に示されるように低下していく。しかし，被覆管におけるこの最初にふくれて接触した部分の上下の，変形の未発達な部分では，ギャップ熱伝達率の低下も小さく，温度降下も少いと推定される。したがって，そうした変形の少い部分では，既に「冷たい」外部発熱体と接触して温度降下した部分より高温となっている可能性があり，この部分が次々とふくれを拡大して接触していくので，結果として軸方向に長く拡大した変形が生ずると思われる。またCase B－5の場合は，接触による最隣接発熱体の外側への湾曲によって，被覆管の変曲点形成が鈍ったことも一因をなしていると思われる。

破裂開口が，Photo.10，12，14などに見られるような軸方向に長く拡大したふくれ変形において，軸方向に長く裂けることとは，前述の変曲点が変形の軸方向拡大に伴って長く分布することが主要因と考えられる。

また，部分発熱条件における変形，接触，破裂に関しても，ΔT_{az} が大であることによる効果を除けば，ほぼ以上の分析が妥当すると考えられる。

5. 結　　論

1本の加圧した模擬燃料棒のジルカロイ被覆管の高温でのふくれ変形に対する，隣接する非加圧外部発熱体の効果を調べた。その結果，以下の結論が得られた。ただし試料のジルカロイ被覆管の温度をTsp，外部発熱体の温度をTexとする。

(1) 被覆管のふくれ変形は，外部発熱体との接触によって半径方向の抑制を受け，試料燃料棒のふくれに伴う湾曲も抑制される。

(2) 温度差（Tex −Tsp）が＋２０〜４０Kの場合，接触部の拡大およびふくれの拡大が十分進行する前に破裂が生じる。内圧の高いケースにおいてこの傾向は増大する。

(3) 同じく温度差（Tex −Tsp）が０〜−４０Kの場合，接触部が変形の継続によって軸方向上下に拡大していくと同時に，被覆管は外部発熱体の間へせり出していく。

この傾向は，温度差が大きく，内圧が低いほど増大するが，高い内圧および温度レベル自身が低い条件のもとでは減少する性質のものである。

(4) 外部発熱体の中に著しく温度が低いものを含む場合は，変形時に被覆管の円周方向温度差が増大し，高温側が優先的にふくれ変形して接触し，破裂する。

(5) 外部発熱体との接触によって，被覆管断面には凹部が生じ，せり出していく凸部との変曲点が形成される。フープ応力はこの変曲点において最大となり，破裂開口箇所となる。

謝　　辞

本実験の遂行にあたり，装置・試料の製作および現象の考察において，市川逵生氏，(燃料安全第1研室長）および川崎了氏（燃料安全第3研室長）に多大の御援助をいただきました。記して深く感謝いたします。

5. 結　　　　論

1本の加圧した模擬燃料棒のジルカロイ被覆管の高温でのふくれ変形に対する，隣接する非加圧外部発熱体の効果を調べた。その結果，以下の結論が得られた。ただし試料のジルカロイ被覆管の温度をTsp，外部発熱体の温度をTexとする。

(1) 被覆管のふくれ変形は，外部発熱体との接触によって半径方向の抑制を受け，試料燃料棒のふくれに伴う湾曲も抑制される。

(2) 温度差（Tex －Tsp）が＋２０～４０Ｋの場合，接触部の拡大およびふくれの拡大が十分進行する前に破裂が生じる。内圧の高いケースにおいてこの傾向は増大する。

(3) 同じく温度差（Tex －Tsp）が０～－４０Ｋの場合，接触部が変形の継続によって軸方向上下に拡大していくと同時に，被覆管は外部発熱体の間へせり出していく。

この傾向は，温度差が大きく，内圧が低いほど増大するが，高い内圧および温度レベル自身が低い条件のもとでは減少する性質のものである。

(4) 外部発熱体の中に著しく温度が低いものを含む場合は，変形時に被覆管の円周方向温度差が増大し，高温側が優先的にふくれ変形して接触し，破裂する。

(5) 外部発熱体との接触によって，被覆管断面には凹部が生じ，せり出していく凸部との変曲点が形成される。フープ応力はこの変曲点において最大となり，破裂開口箇所となる。

謝　　　　辞

本実験の遂行にあたり，装置・試料の製作および現象の考察において，市川逵生氏，(燃料安全第1研室長）および川崎了氏（燃料安全第3研室長）に多大の御援助をいただきました。記して深く感謝いたします。

References:

(1) Hashimoto,M.,Ohtomo,T.,Furuta,T.et al.: JAERI-M 9223 (1980) (in Japanese)

(2) Ohtomo,T.,Hashimoto,M.,Kawasaki,S. et al.: JAERI-M 9624 (1981) (in Japanese)

(3) Chapman,R.H.: ORNL/NUREG/TM-297 (1979)

(4) Chapman,R.H.: Multirod Burst Test Programme Status Report, Paper presented at the 8th Water Reactor Safety Research Information Meeting. Gaithursburg, U.S.A. Oct. (1980)

(5) Chapman,R.H. et al.: ORNL/NUREG/TM-360,-390 and -392 (1980)

(6) Erbacher,F., Neitzel,H.J., Wiehr,K.: Proceedings of the 4th ASTM Conference on Zirconium in the Nuclear Industry (1978)

(7) Wiehr,K., Erbacher,F., Neitzel,H.J.:"Results of REBEKA Test 3", paper presented at the 4th JAERI-FRG-NRC Annual Fuel Behavior Information Exchange Meeting. U.S.A. (1979)

(8) Weidinger,H.G.: Results of Burst Test at KWU, paper presented at the 4th JAERI-FRG-NRC Annual Fuel Behavior Information Exchange Meeting, U.S.A. (1979)

(9) Suzuki,M : JAERI-M 8523 (1979) (in Japanese)

(10) Chapman,R.H.: ORNL/NUREG/TM-108 (1977)

(11) Wiehr,K., Schmidt,He.: KfK-2345 (1977)

(12) Boček,M., Peterson,C., Schneider,H. et al.: KfK-2500 p.270 (1977)

(13) Chapman,R.H.: Paper presented at the 5th Water Reactor Safety Research Information Exchange Meeting, Gaithursburg U.S.A. Nov. (1977)

(14) Chung,H.M., Kassner,T.F.: NUREG/CR-0344, ANL-77-31 (1978)

(15) Mann,C.A., Hindle,E.D., Parsons,P.D.: UKAEA Report ND-R-701 (S) (1982)

Table 1 Summary of Test Conditions

Pi: Initial internal pressure at 573 K (MPa),
ΔTav: Difference in average temperatures between specimen cladding and four nearest external heater pipes (K),
M.T.E.: Test on mechanical and thermal effects of external heaters on claddding deformation.

Case	Purpose	Pi	Rough range of ΔTav	Ex.heater condition	Fig. No.	Photo. No.
P-1	Single rod burst test	4.9	——	No external heaters	5	2
P-2		4.9	——		6	3
P-3	Temperature gradient	0.1	——	All powered	7	—
P-4		1.3	——	Not powered	8	—
A-1	M.T.E.	4.9	+10～30	All heaters powered	9	4
A-2		4.9	+26～50		10	5
A-3		6.8	+20～40		11	6
A-4		6.7	+20～40		12	7
A-5		5.4	0～+20		13	8
B-1	M.T.E.	4.9	-12～+15	All heaters powered	14	9
B-2		4.9	-20～+5		15	10
B-3		4.9	-40～-20		16	11
B-4		5.5	-40～0		17	12
B-5		5.0	-80～-20		18	13
B-6		4.9	-20～-10		19	14
B-7		6.9	-15～-5		20	15
C-1	M.T.E.	4.9	——	Two heaters not powered	21	16
C-2		4.4	——		22	17
C-3		4.5	——		23	18

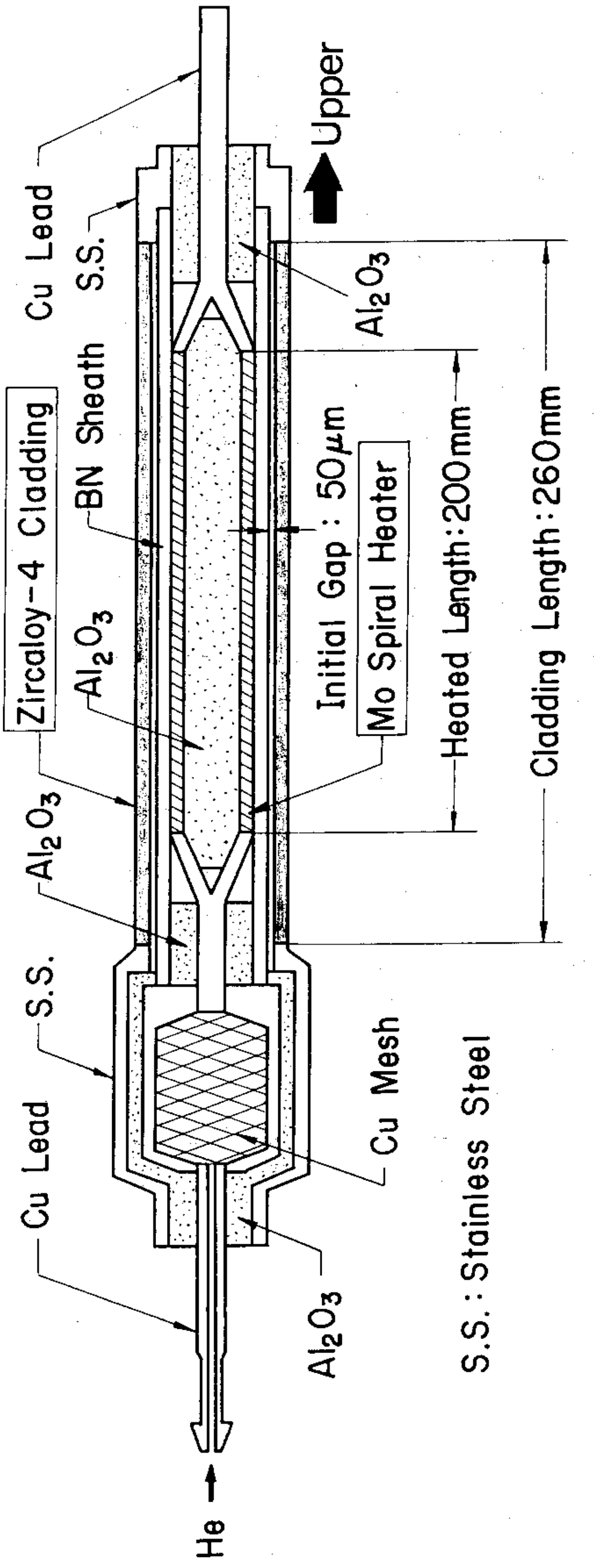

Fig.1 Schematic of Specimen Structure

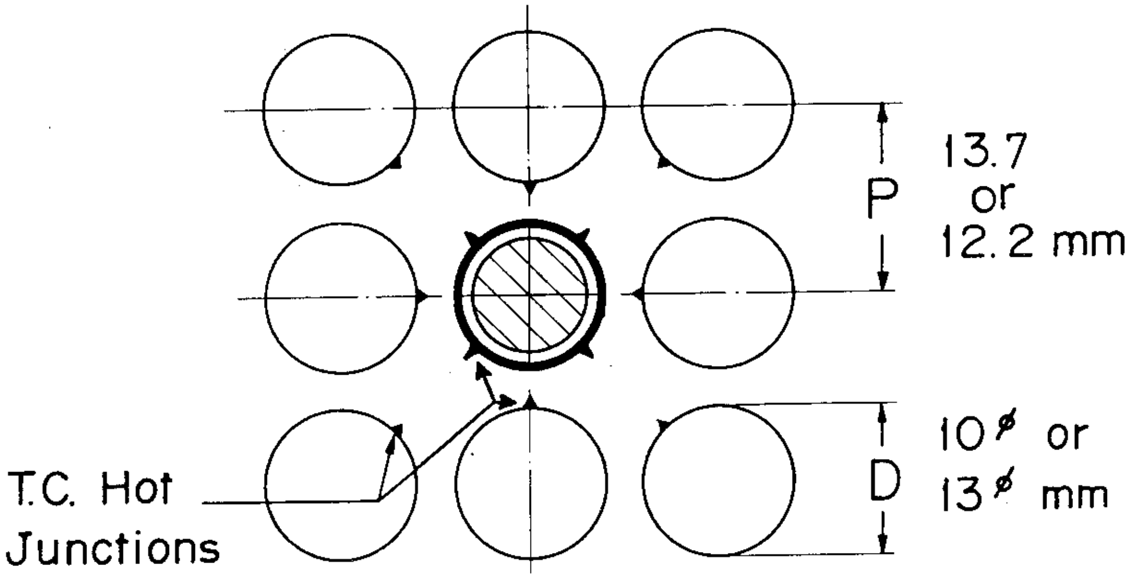

Fig. 2-A Cross-sectional view of test bundle.
The central specimen rod is surrounded
by eight external heater pipes.

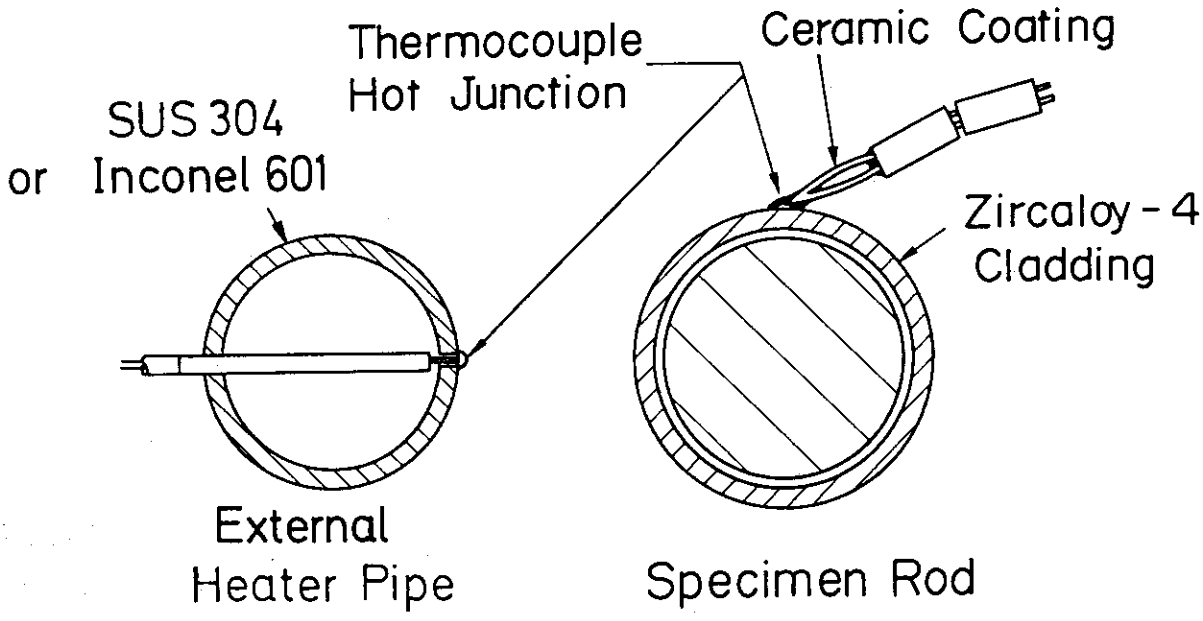

Fig.2-B Illustration of thermocouple hot junctions
and their lead wires covered with insulator

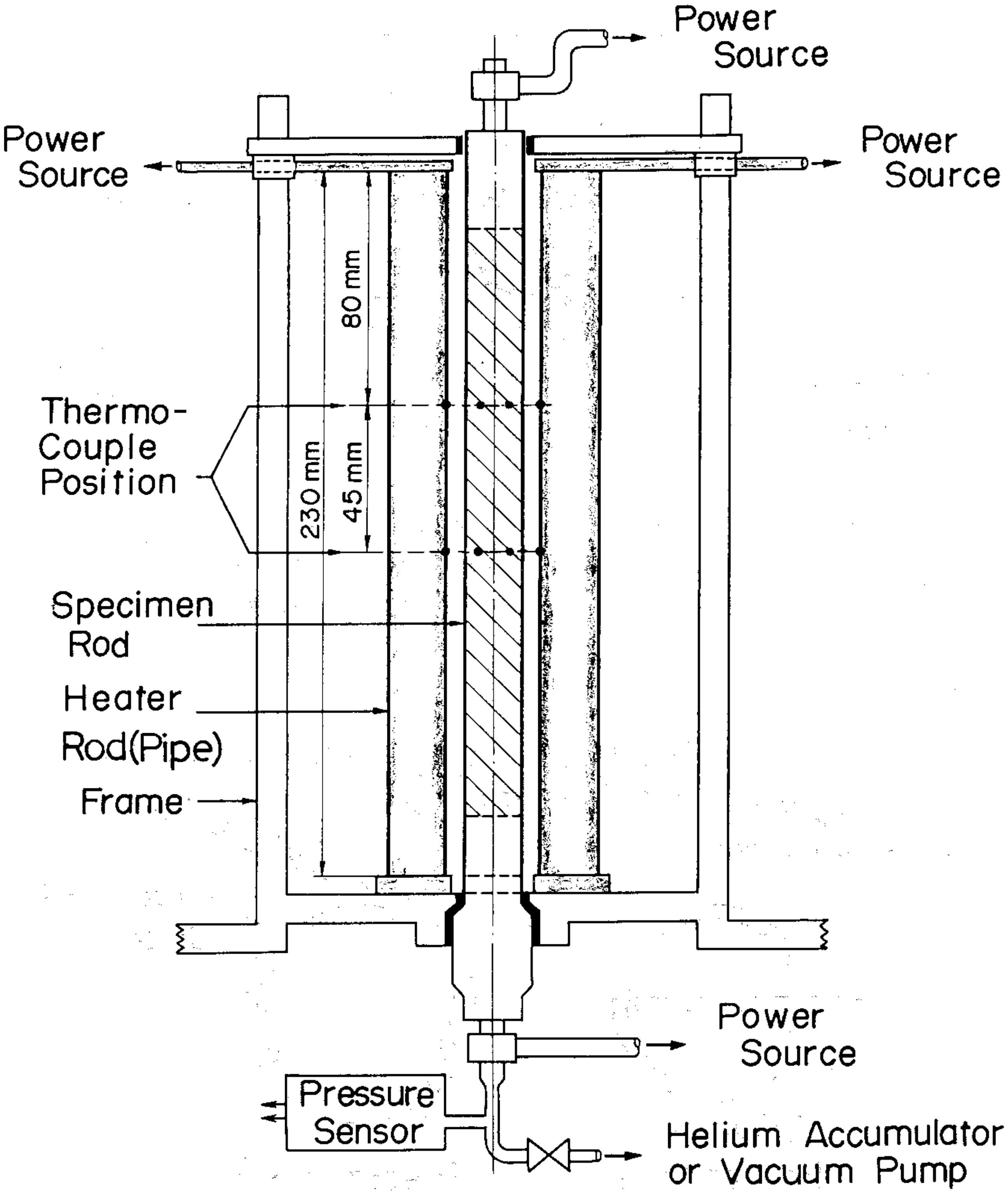

Fig.3 Schematic of test rig which is viewed from a horizontal direction and consists of specimen rod , external heater pipes with electrodes, and outer frame structure.

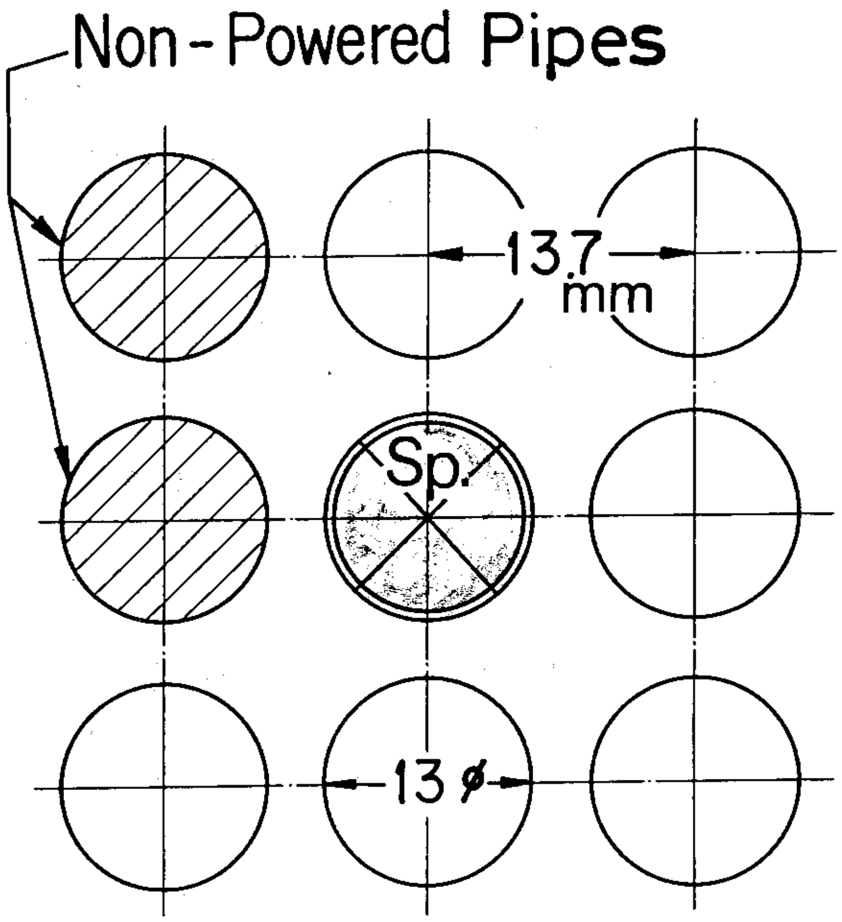

Fig.4　Cross sectional view of test bundle.
Two of eight external heater pipes are not powered.

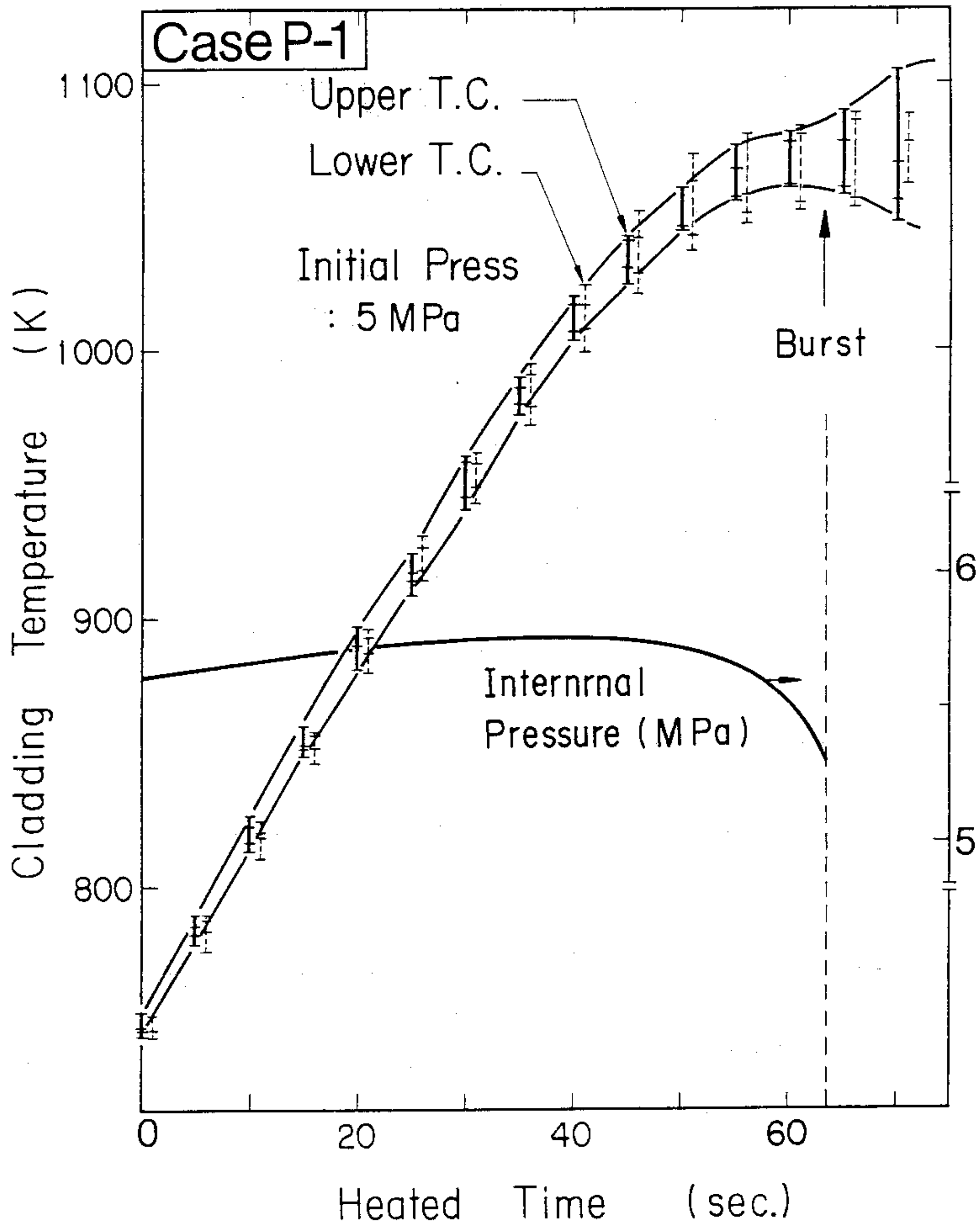

Fig. 5 Temperature and internal pressure histories of single rod burst test conducted in air with no external heater pipes. I : temperature at upper elevation of rod, ⁞ : temperature at lower elevation of rod.

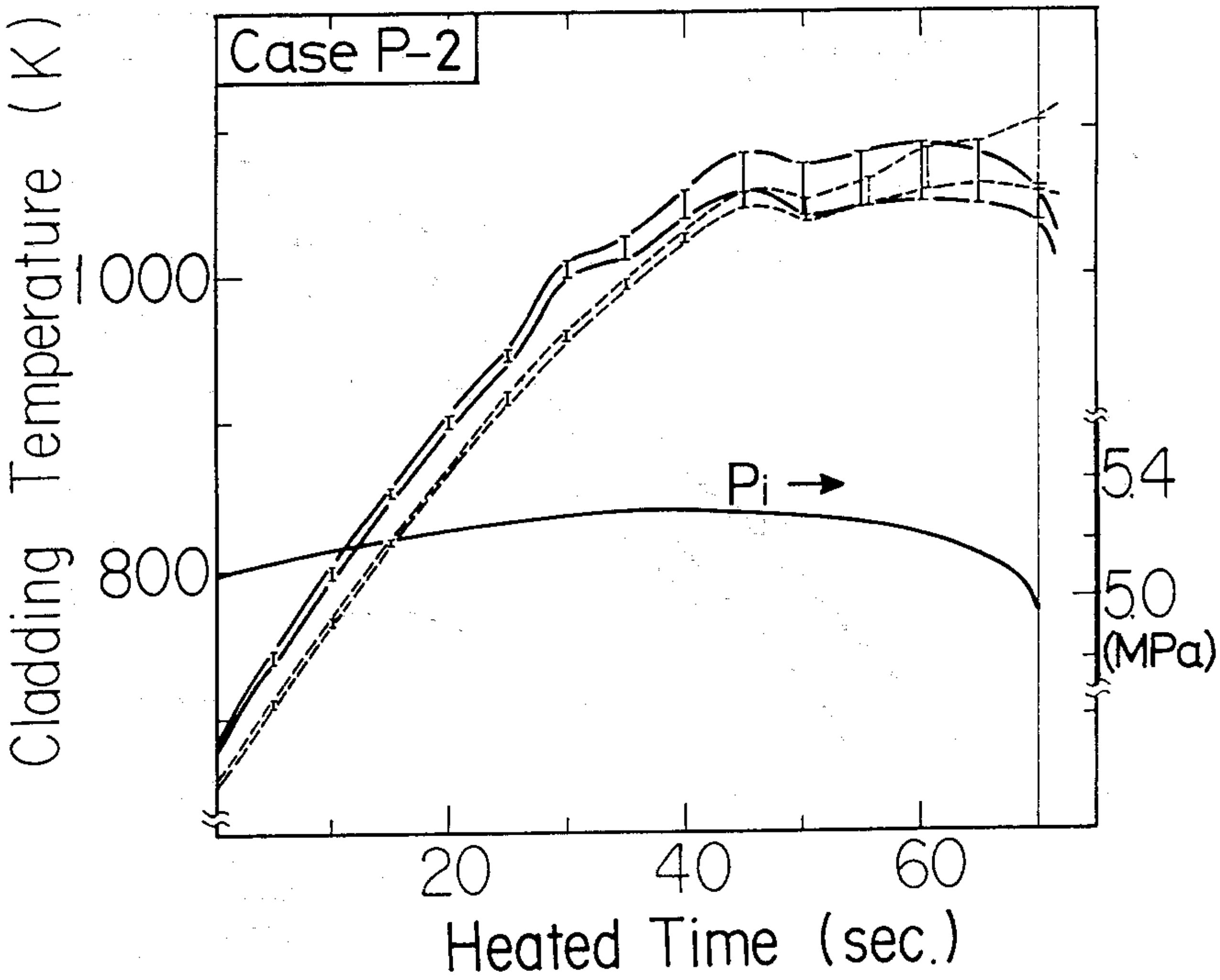

Fig. 6 Temperature and internal pressure histories of single rod burst test conducted in air with no external heater pipes. —— : temperature at upper elevation of rod, ---- : temperature at lower elevation. Pi: internal pressure.

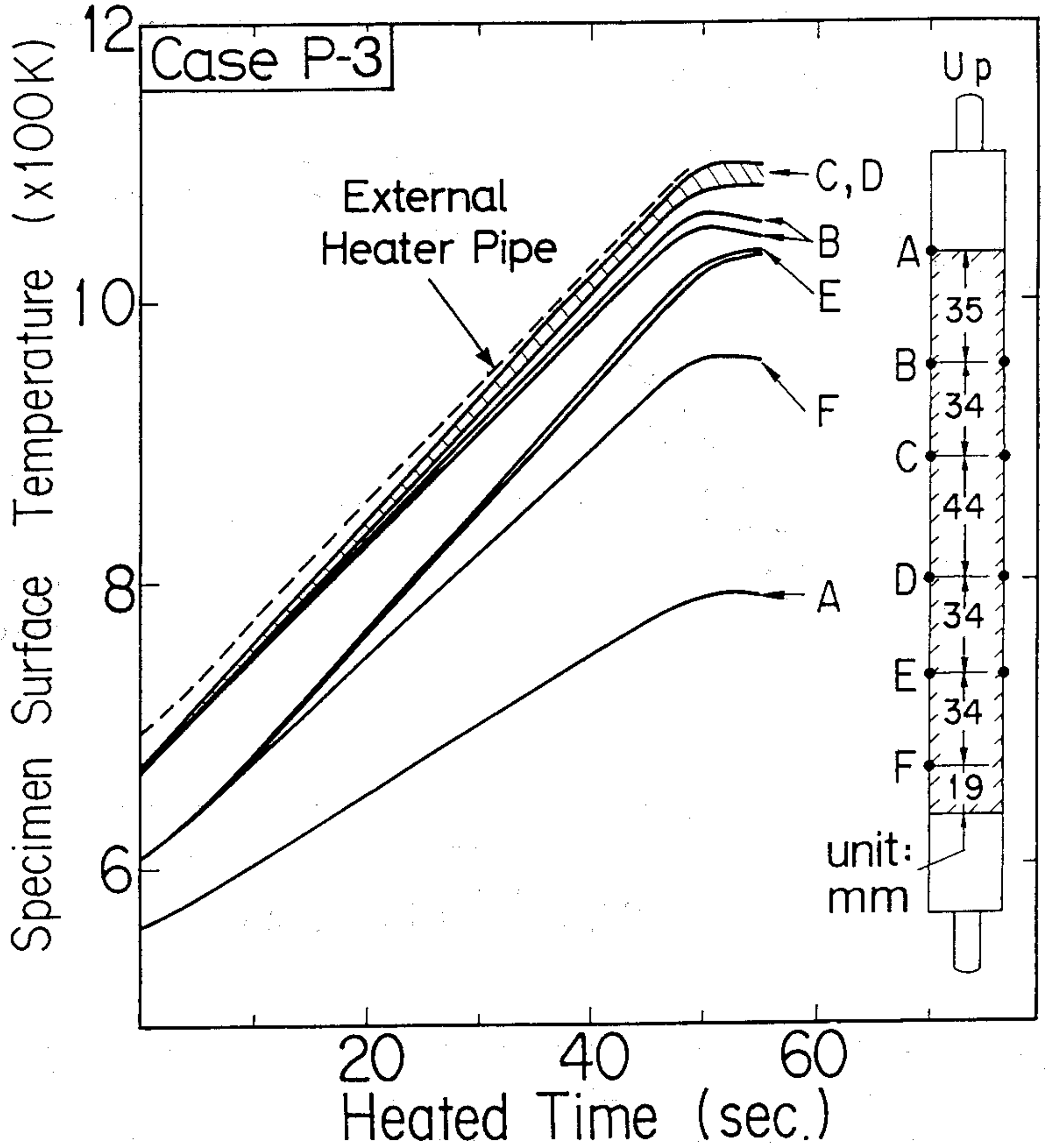

Fig. 7 Axial temperature distribution of specimen cladding within heated zone. The specimen rod was placed in the center of eight external heater pipes which were heated at almost the same rate as that of the cladding. A, B, C, D, E and F denote the positions of thermocouple hot junctions.

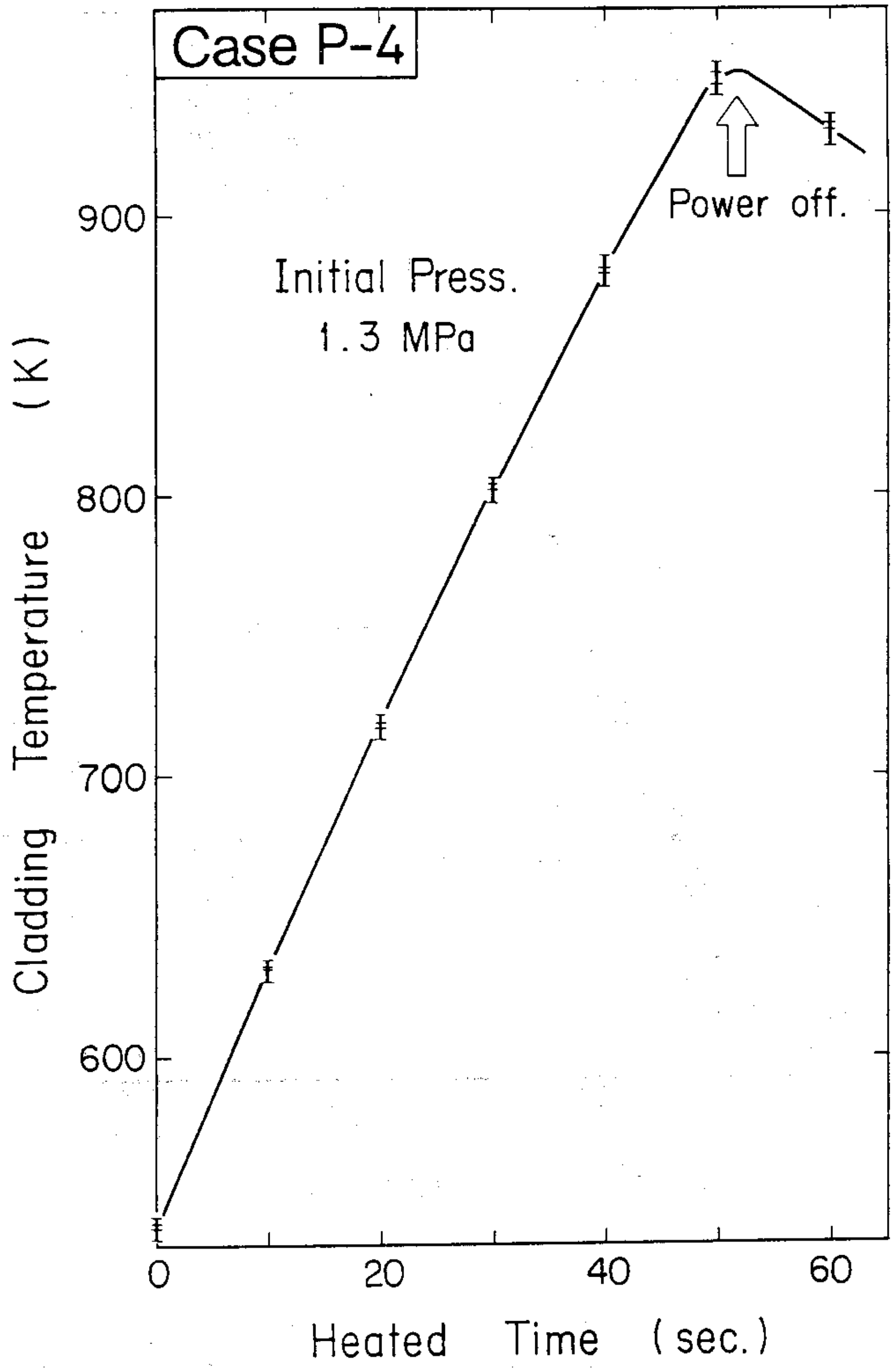

Fig. 8 Azimuthal temperature difference of a specimen cladding heated in air at the center of 8 heater rods which were not powered.

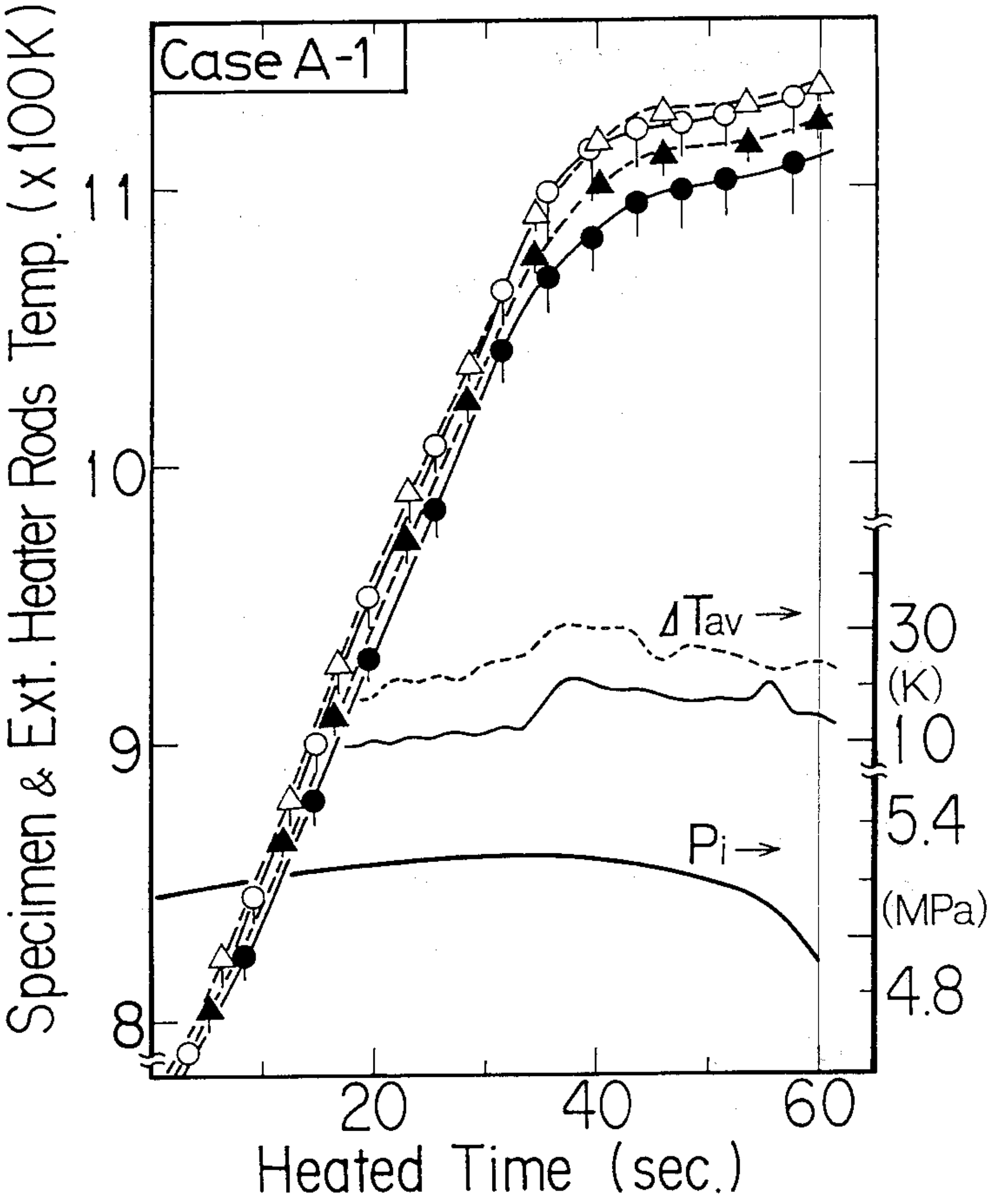

Fig. 9 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes(rods). ○,● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively, △,▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest external heater pipes, respectively.

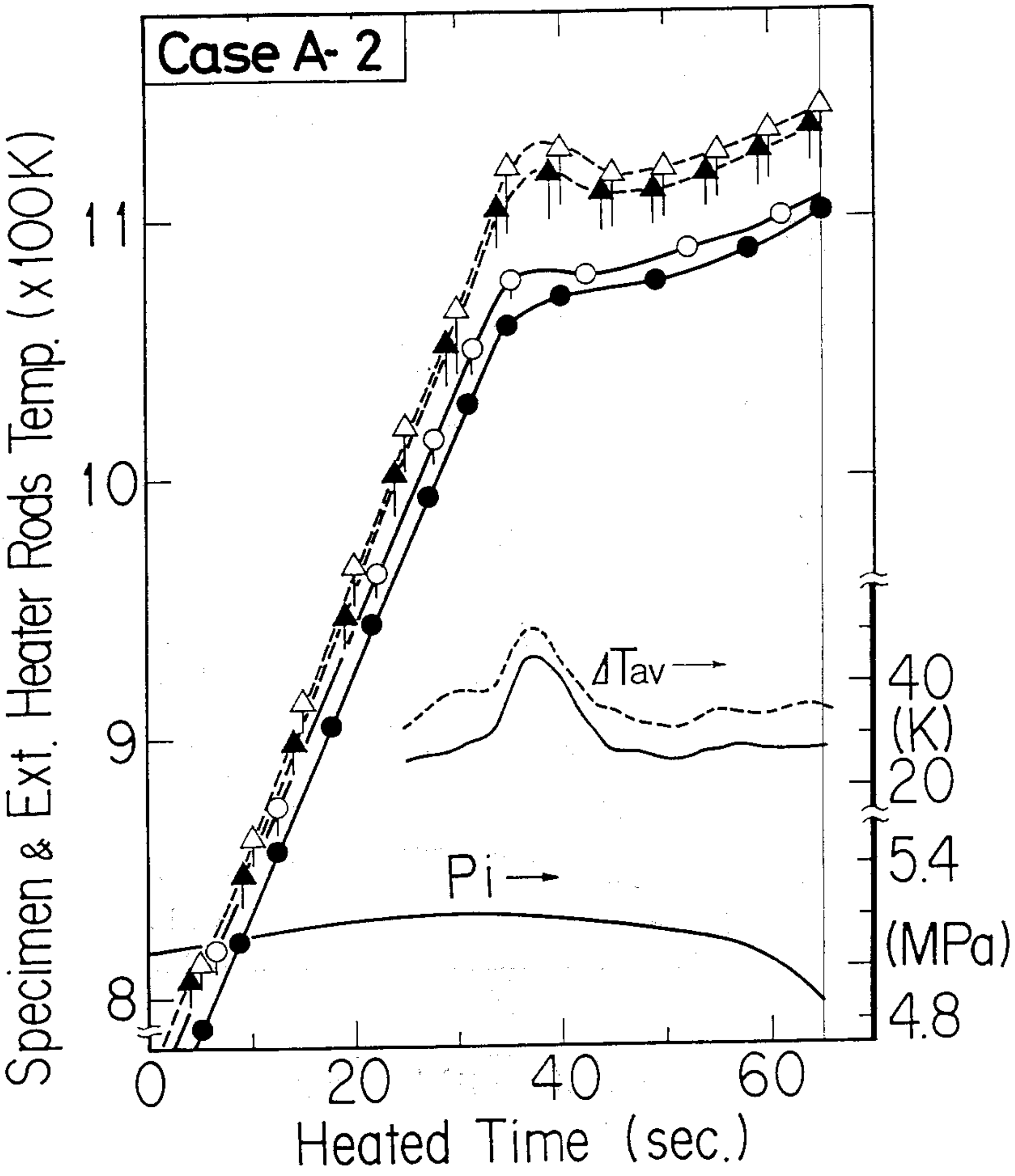

Fig.10 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○ ● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively.
△ ▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

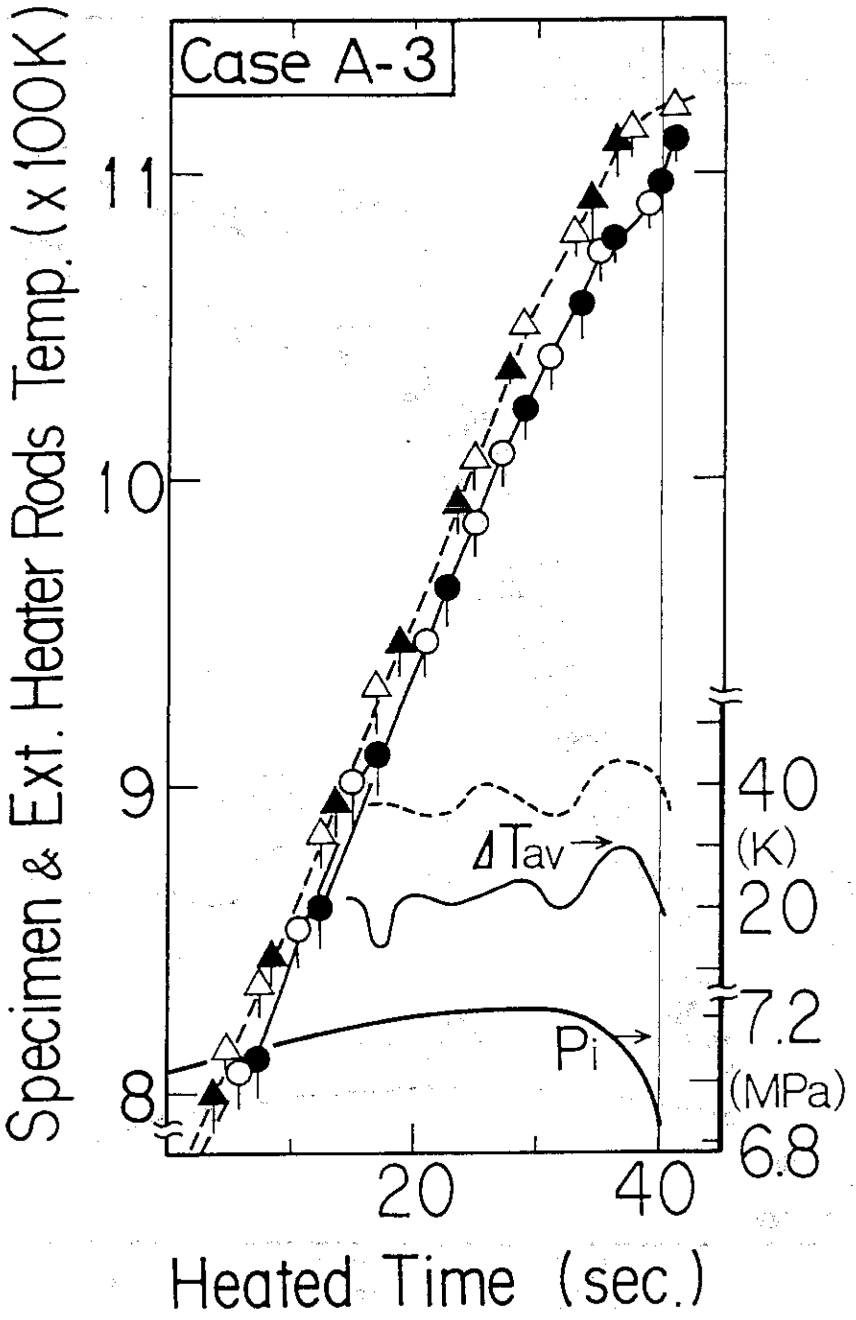

Fig.11 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○,●: temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively.
△,▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

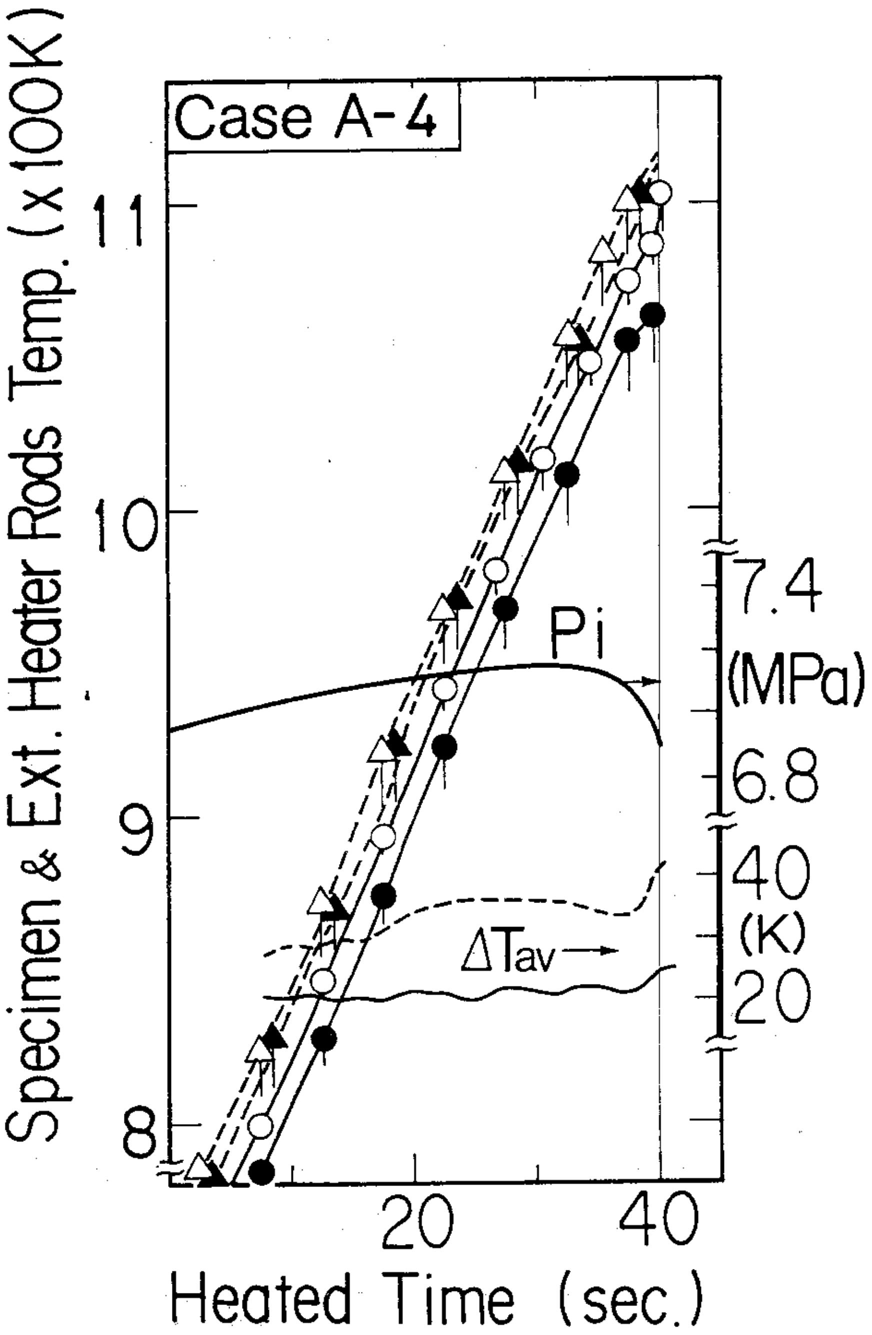

Fig.12 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes (rods). ○,●: temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively, △,▲: temperatures at upper and lower elevations of four nearest external heater pipes, respectively.

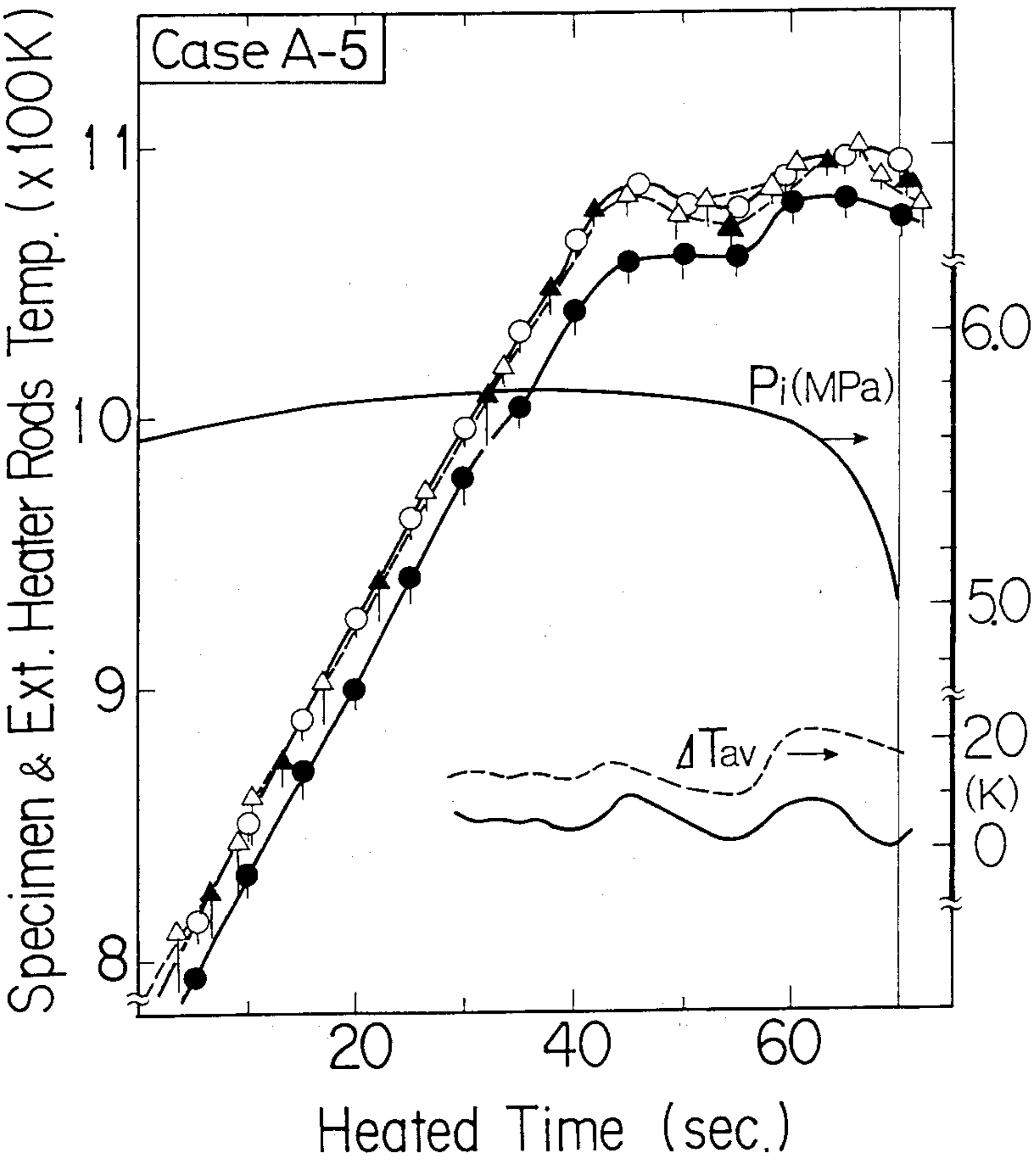

Fig.13 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○,● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively.
△,▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes,respectively.

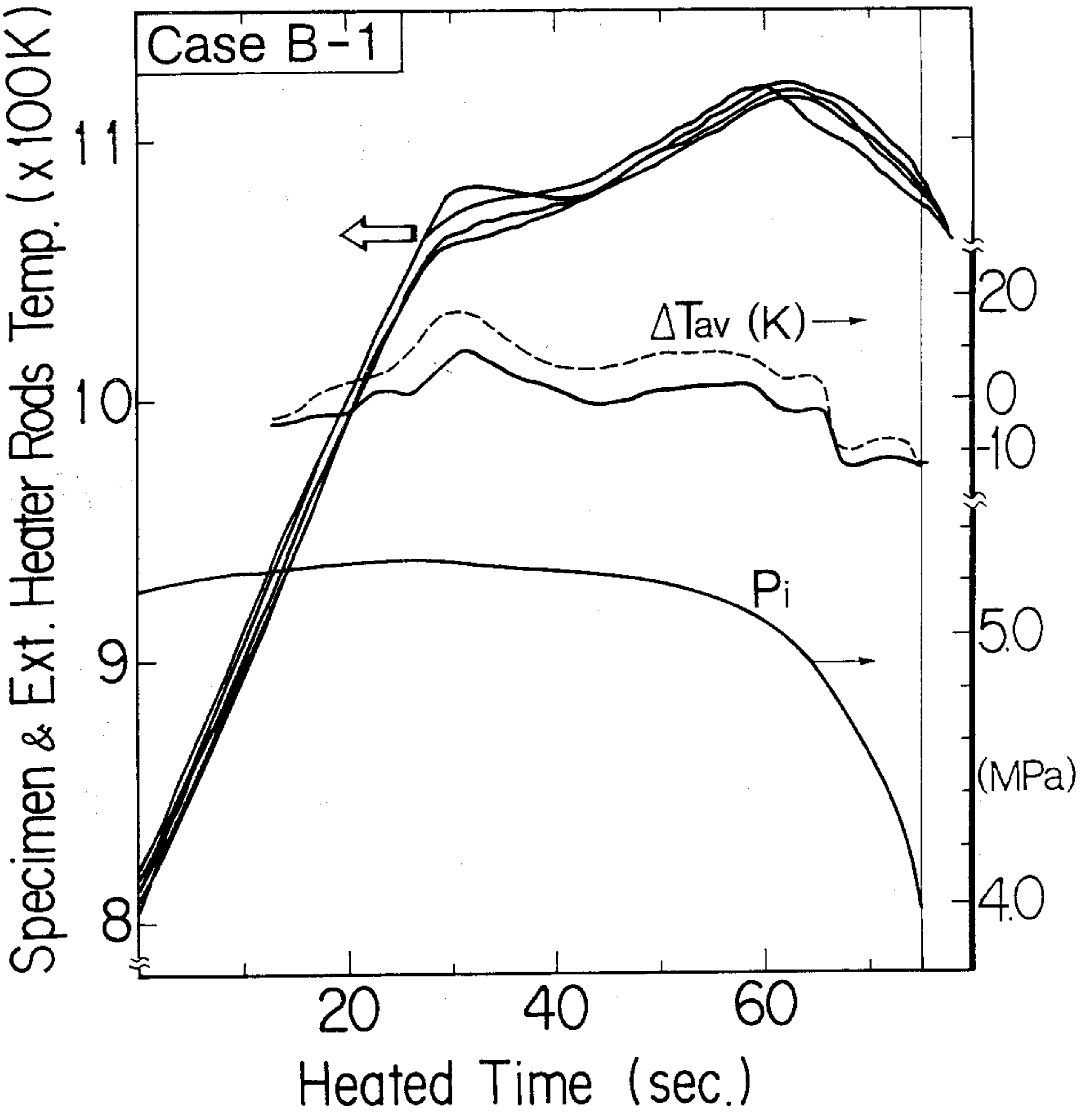

Fig.14 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes (rods). Temperatures of specimen and external heaters were so close to one another that they are included in between the four representative curves in this figure.

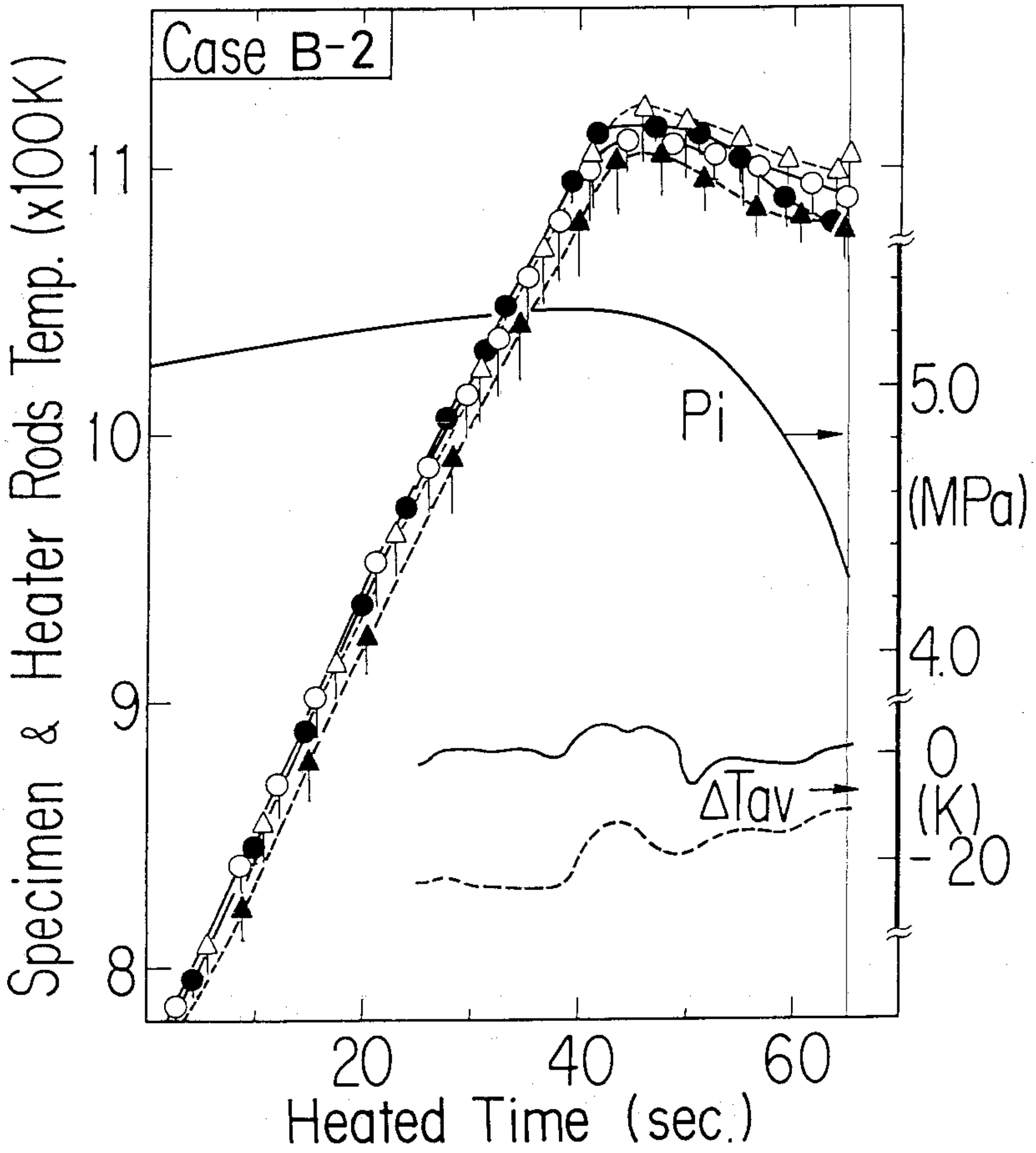

Fig.15 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○ ● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively. △ ▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

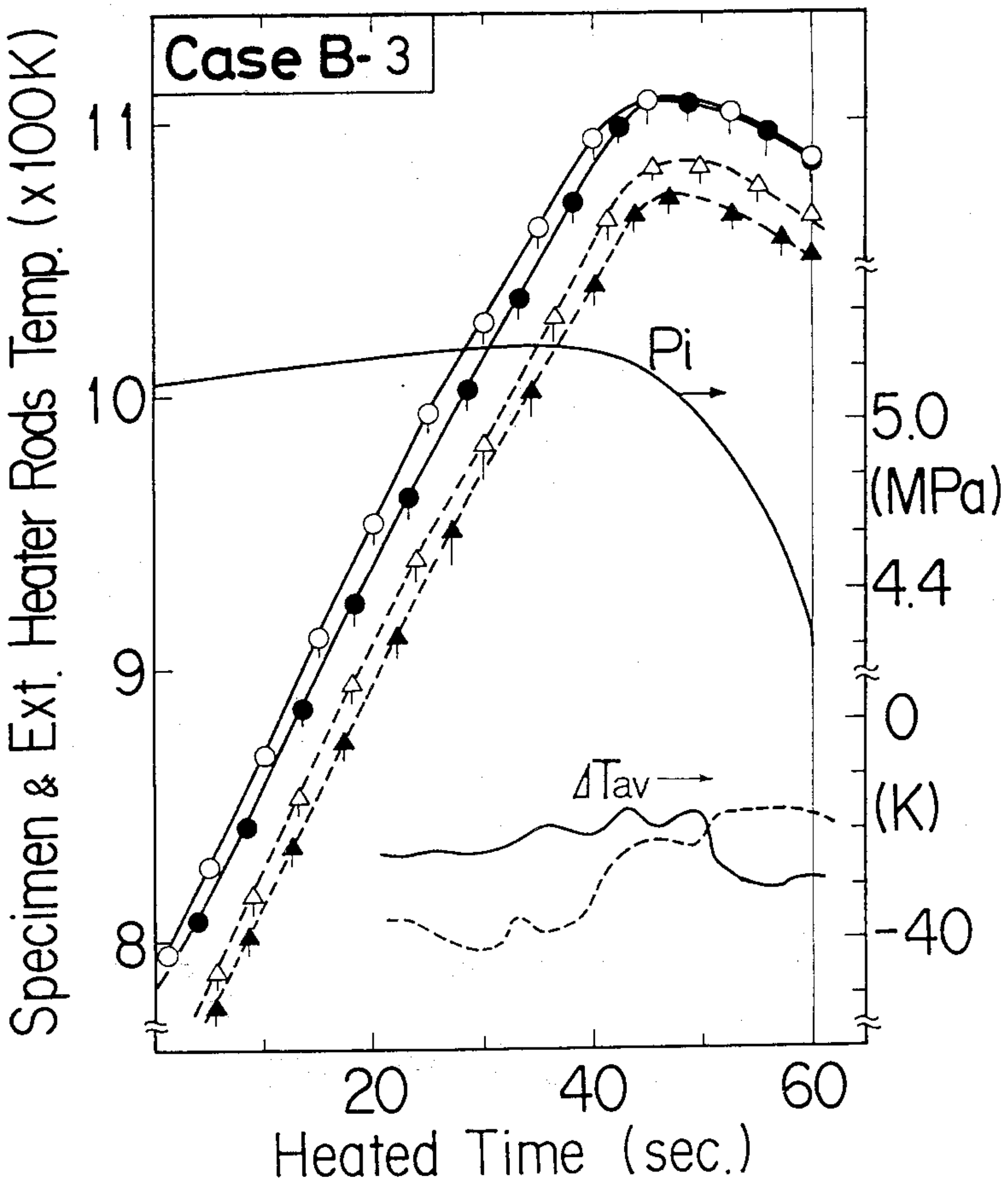

Fig.16 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and averagetemperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○ ● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively.

△ ▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

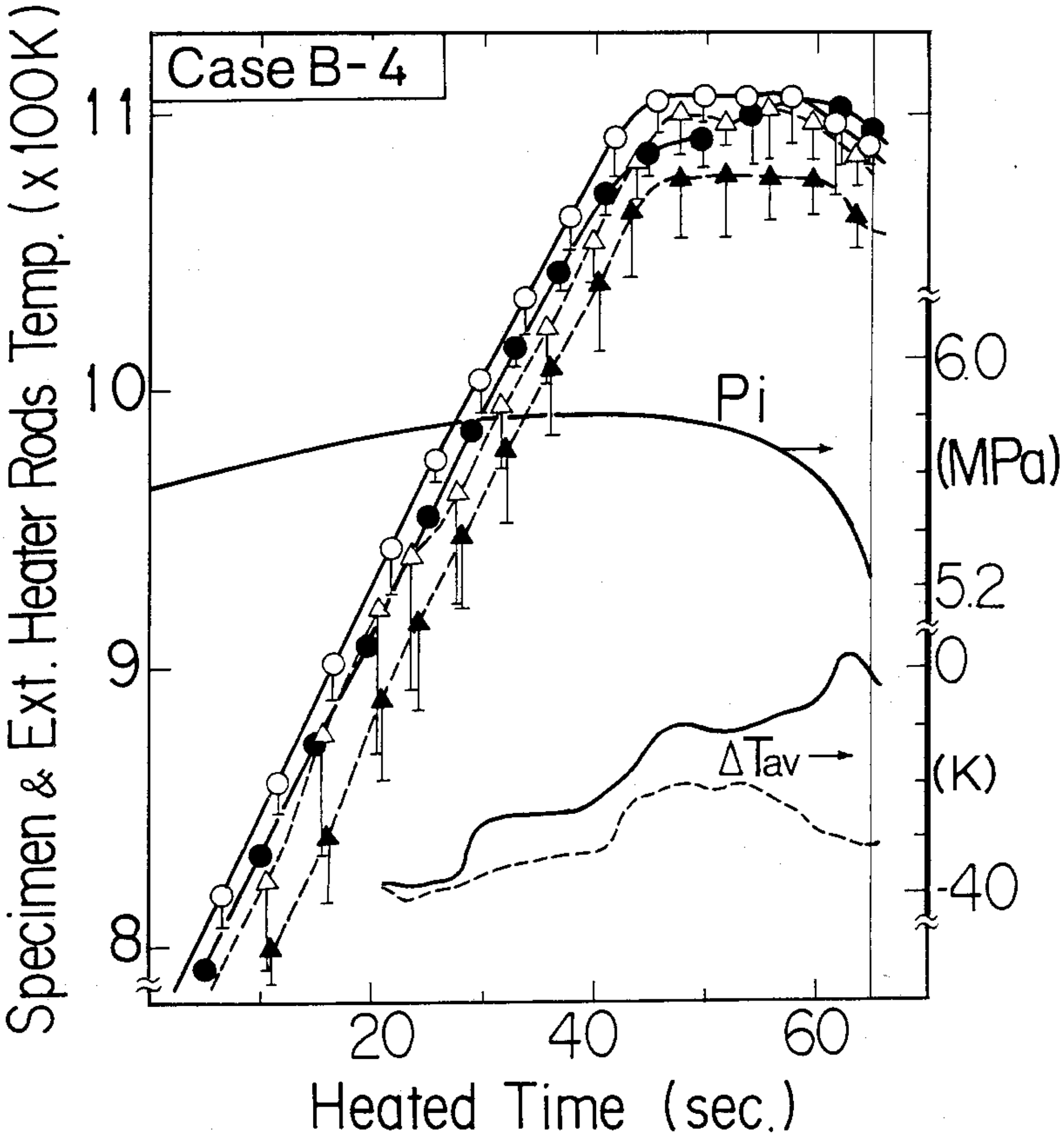

Fig.17 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes (rods). ○,● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively. △,▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest external heater pipes, respectively.

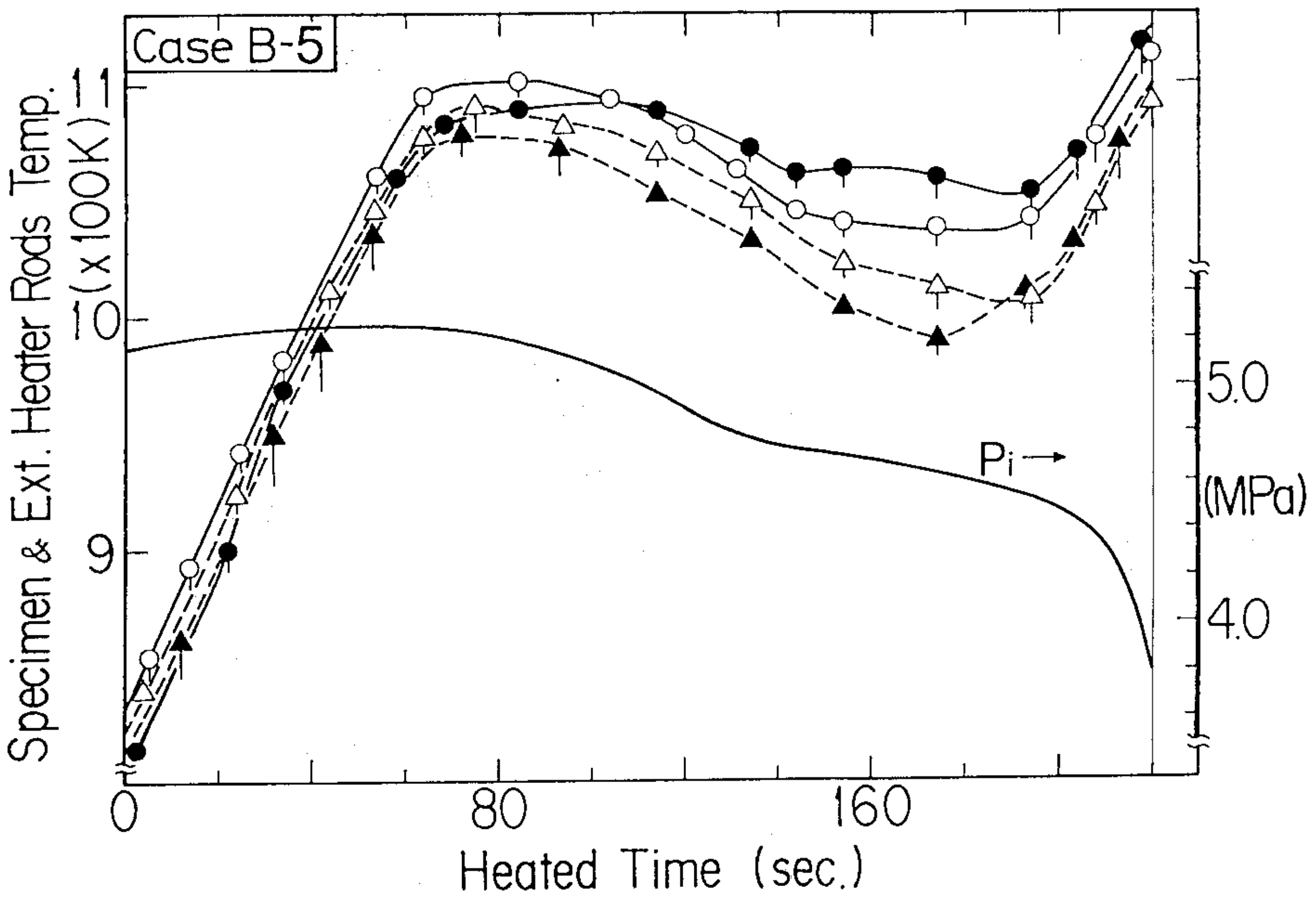

Fig. 18 Histories of temperatures and specimen internal pressure Pi. ○,●: temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively. △,▲: temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

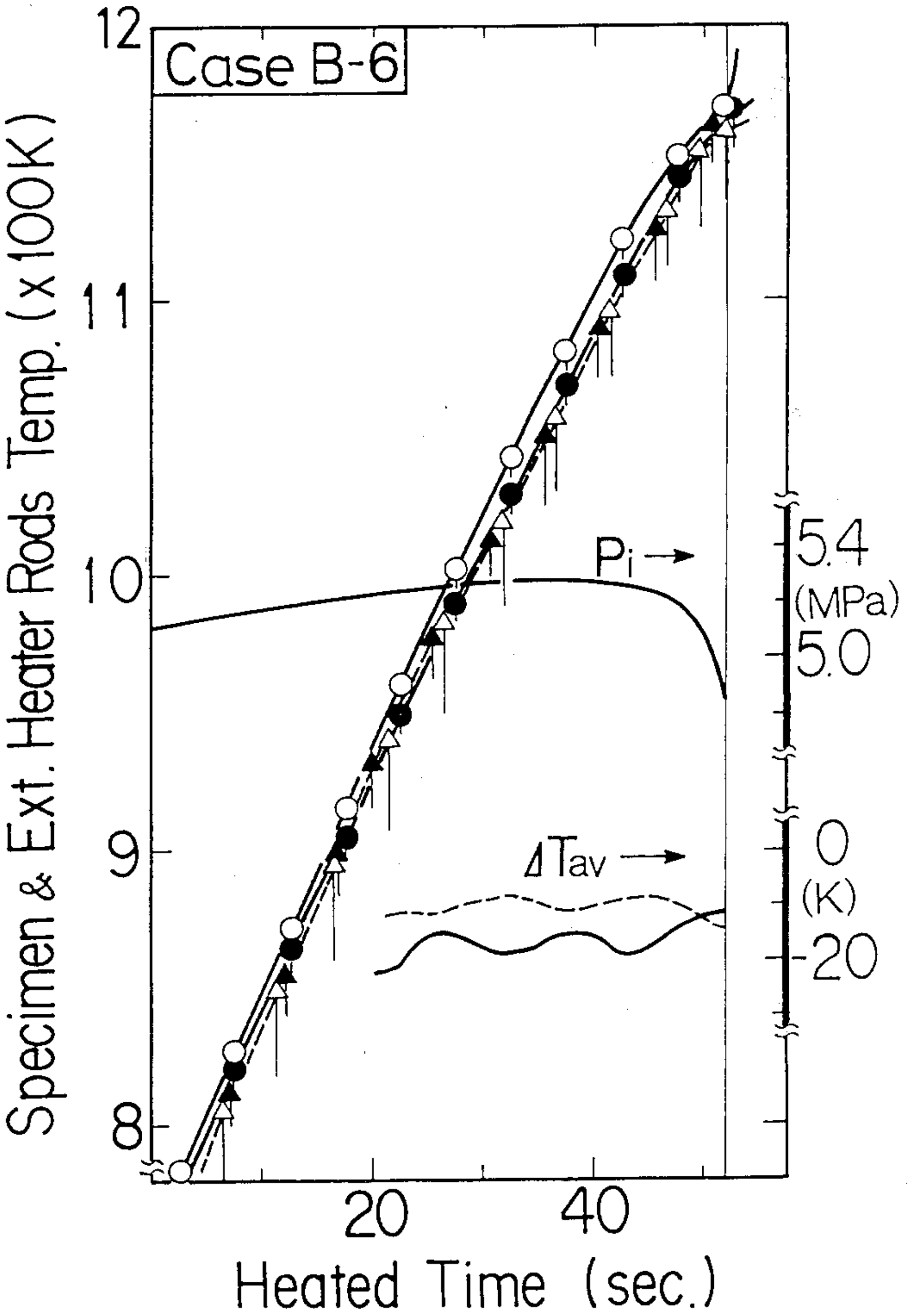

Fig.19 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○,●: temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively.
△,▲: temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

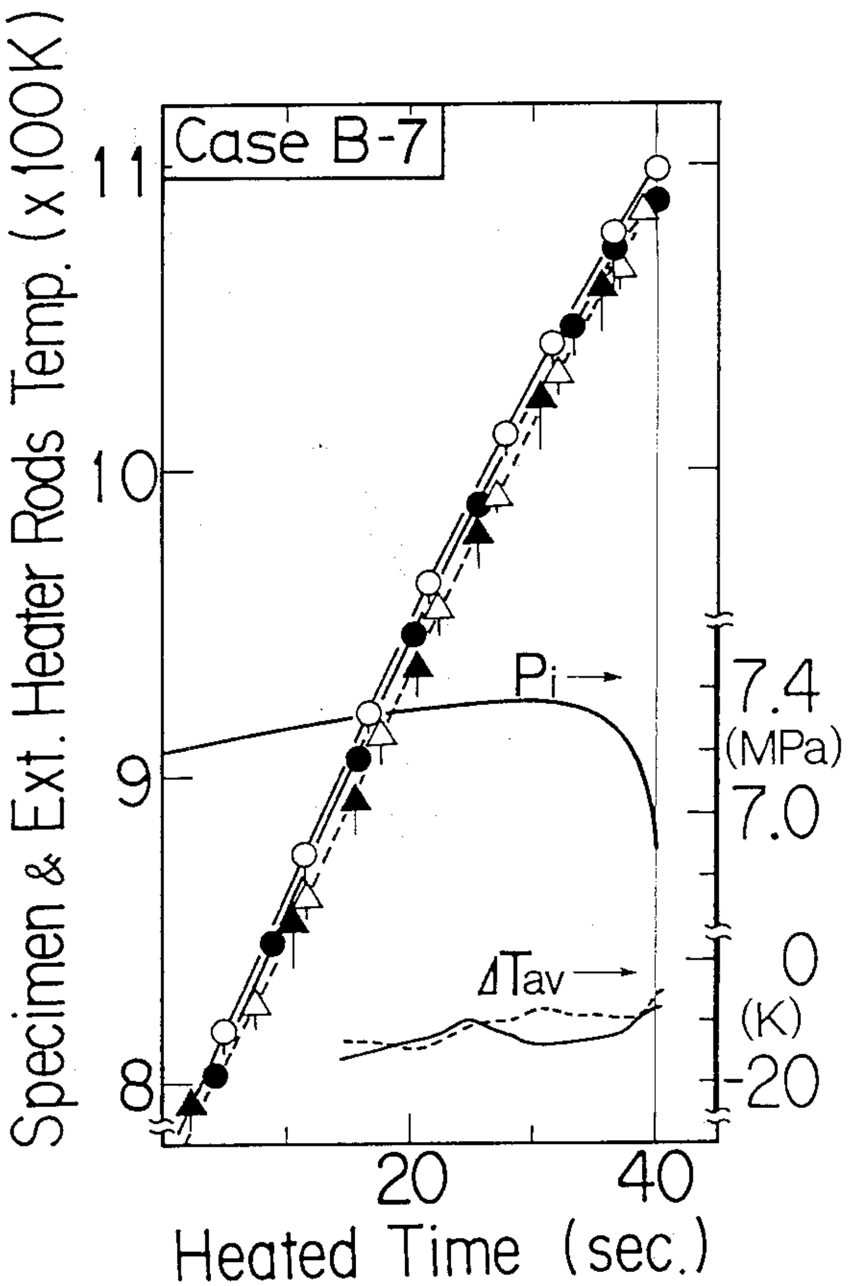

Fig. 20 Histories of temperatures, specimen internal pressure Pi, and average temperature difference ΔTav between specimen and four nearest heater pipes. ○,● : temperatures at upper and lower elevations of specimen cladding, respectively.
△,▲ : temperatures at upper and lower elevations of four nearest heater pipes, respectively.

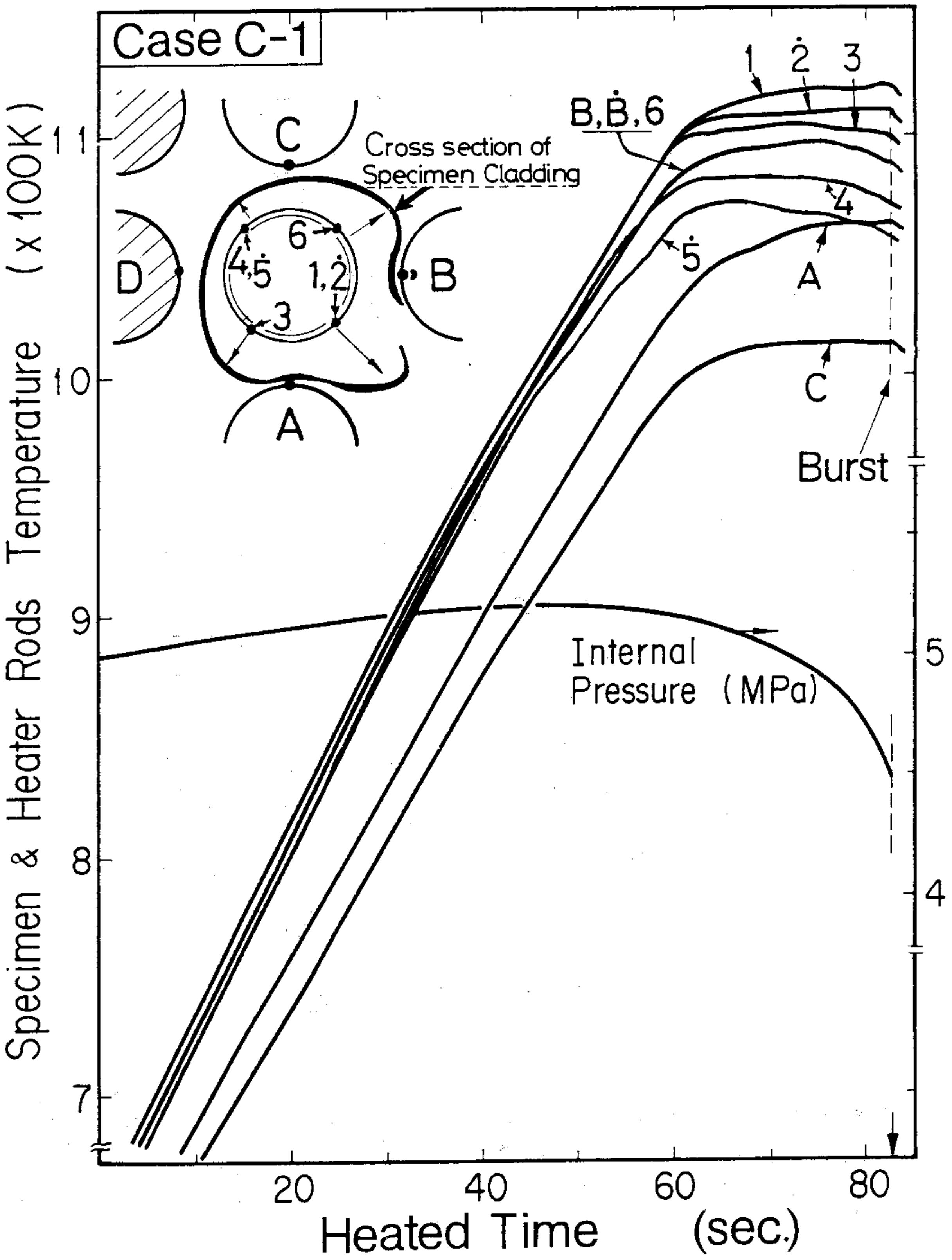

Fig.21 Histories of temperatures and specimen internal pressure Pi of the test conducted with two non-powered external heater pipes shown as ▨. Letters and numbers indicate thermocouple positions. Dot over some of them denotes thermocouples at lower elevation.

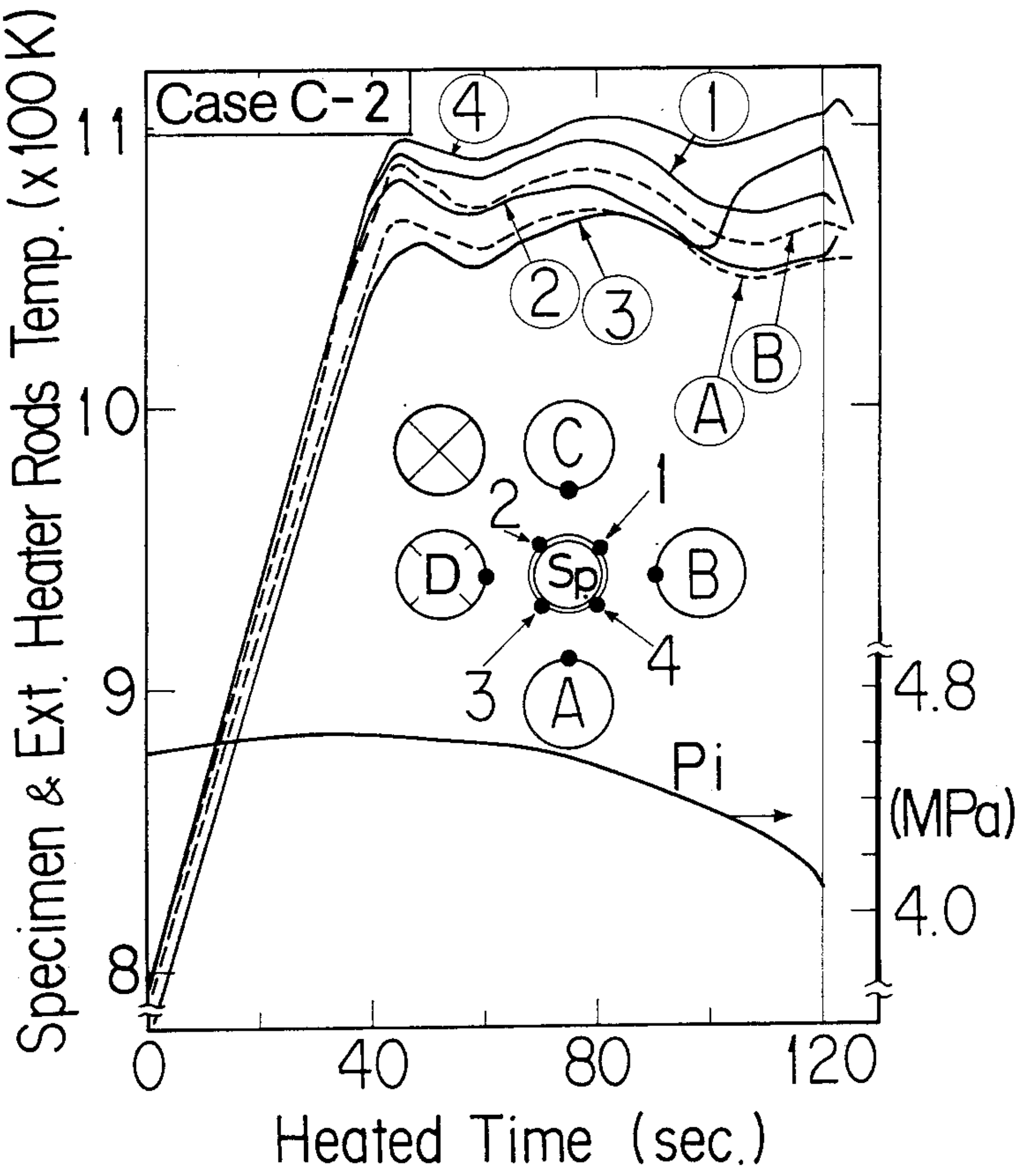

Fig.22 Histories of temperatures and specimen internal pressure Pi of the test conducted with two non-powered external heater pipes shown as ⊗. Numbers 1, 2, 3 and 4 indicate the thermocouple positions at upper elevation of specimen cladding, and letters A and B denote also the thermocouple sites at upper elevation of four nearest heater pipes.

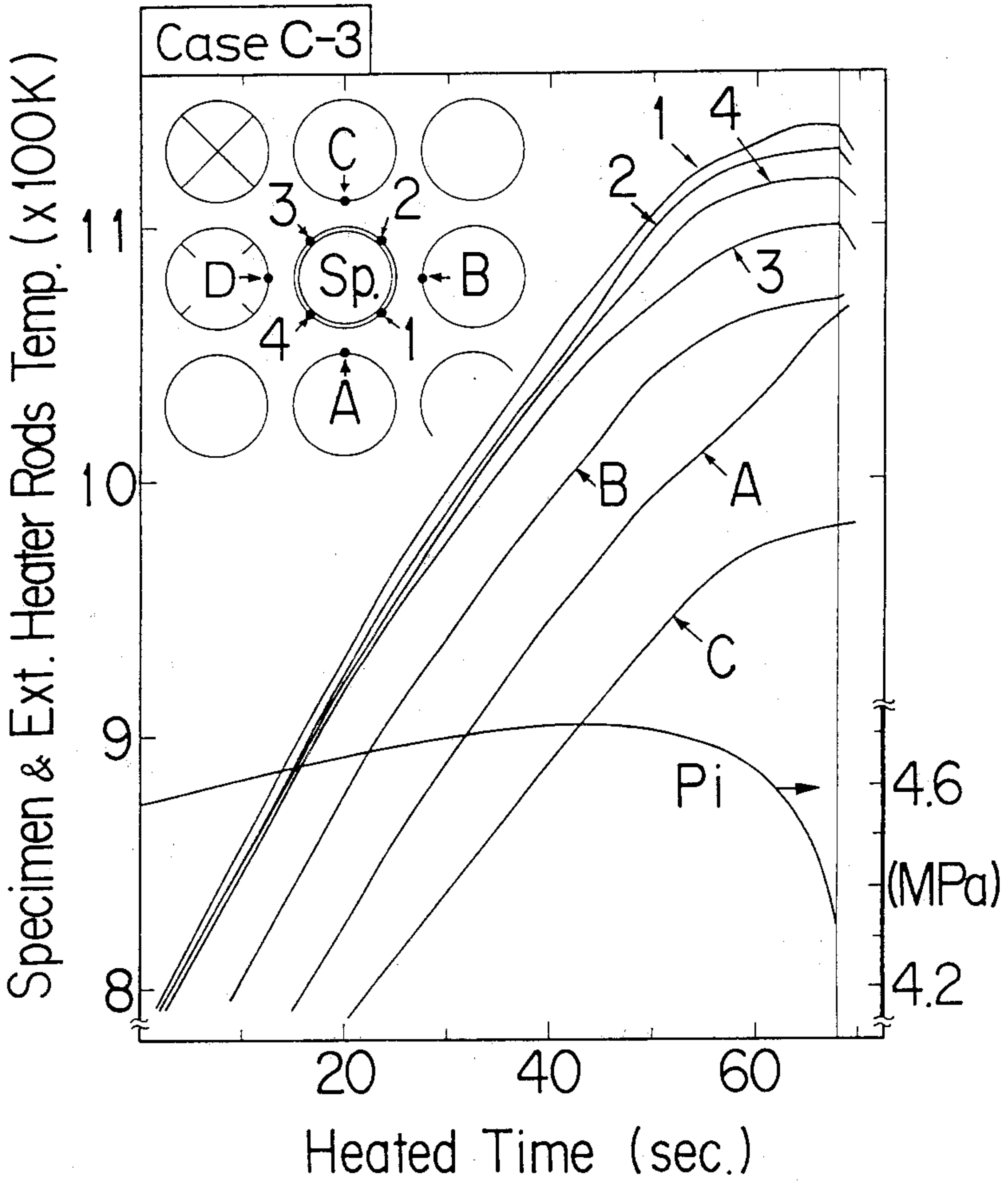

Fig. 23 Histories of temperatures and specimen internal pressure Pi of the test carried out with two non-powered external heater pipes shown as ⊗ . The numbers 1, 2, 3 and 4 indicate the thermocouple positions at upper elevations of specimen cladding, and letters A, B, C and D denote also the thermocouple sites at upper elevation of four nearest heater pipes.

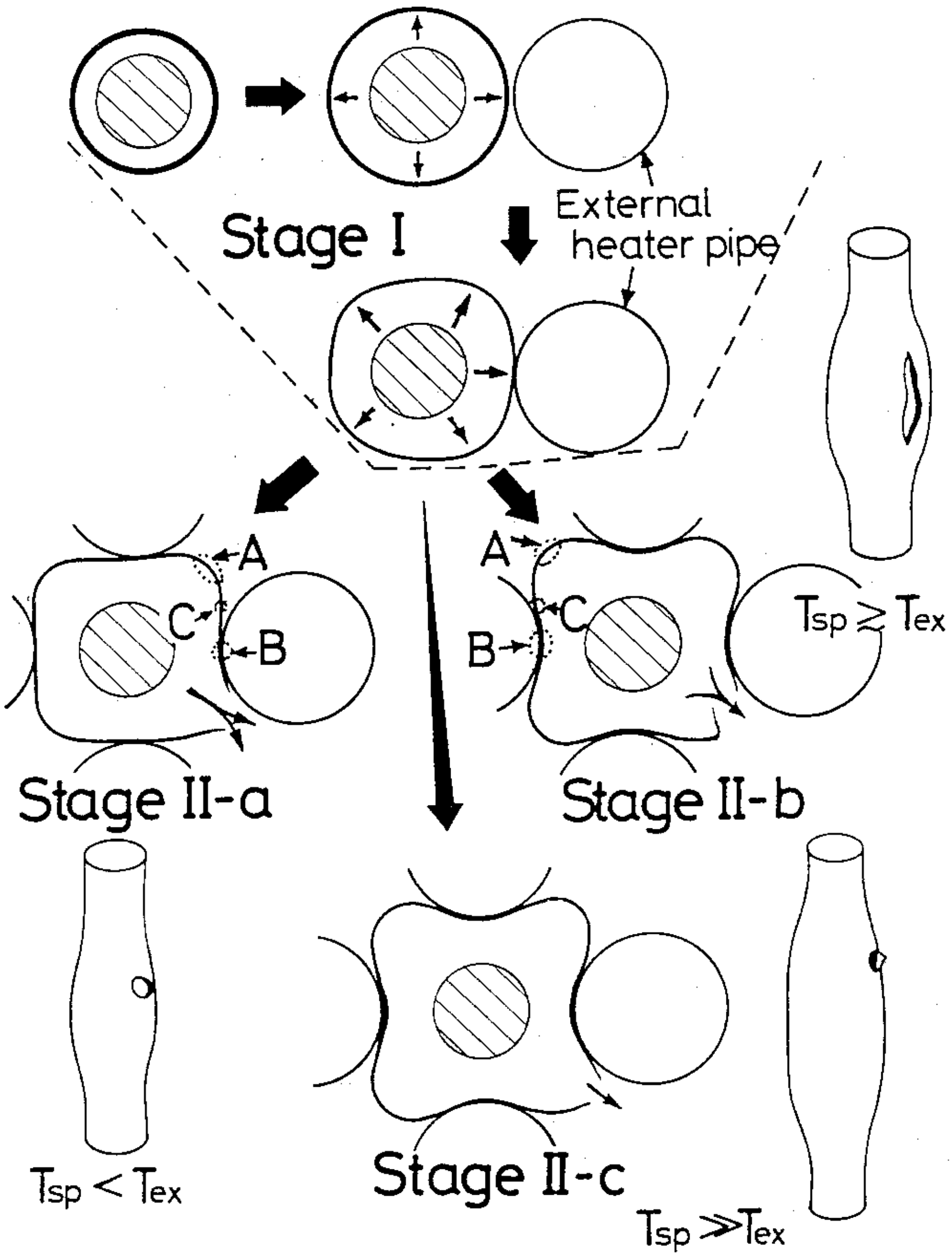

Fig. 24 Schematic illustration of the effects of external heater pipes on the deformation behavior of specimen cladding from initiation of contact until rupture. A: convex region, B: concave region, C: inflection point. Tsp.: specimen cladding temperature, Tex.: external heater pipe temperature.

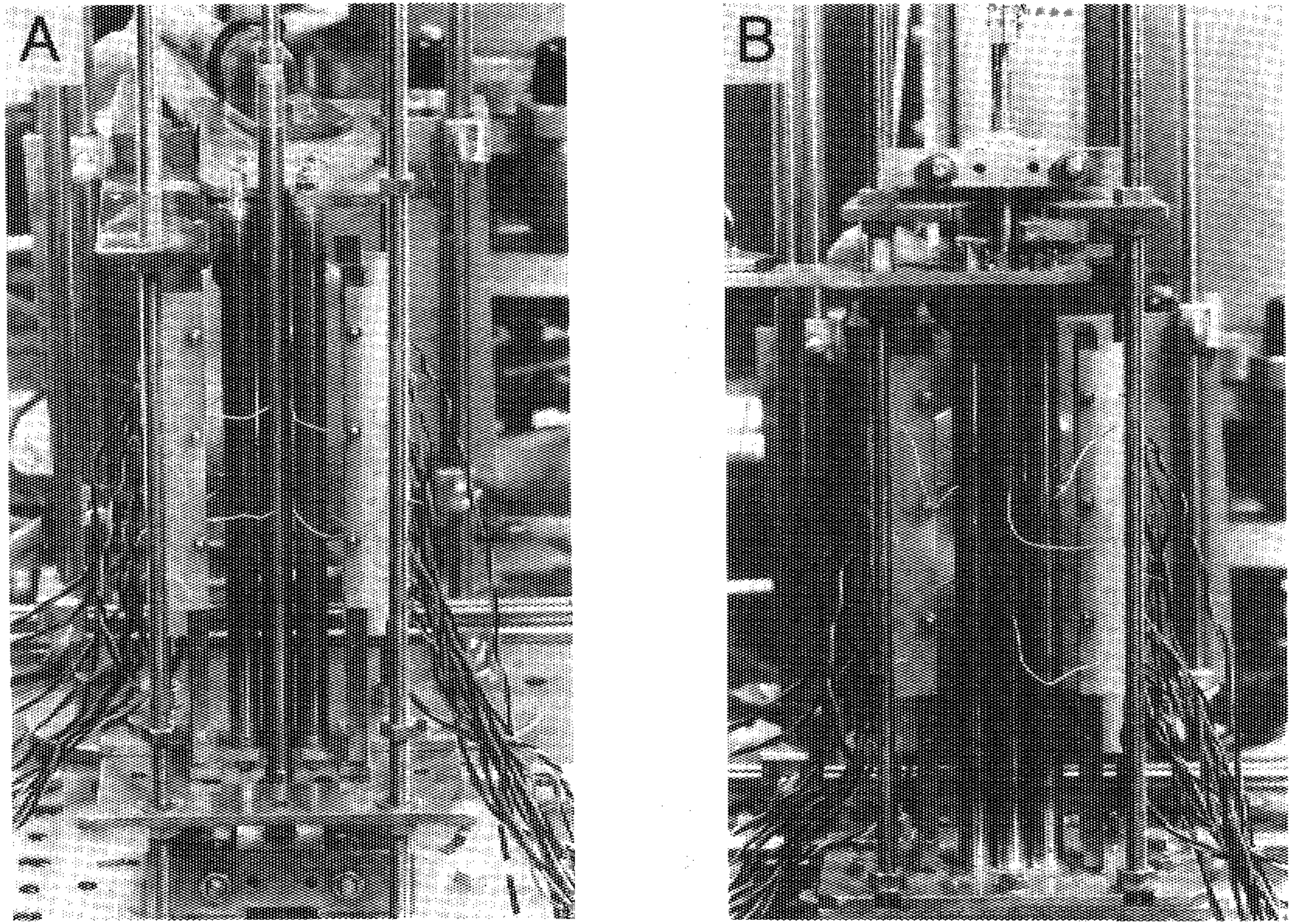

Photo.1 Test rig consisting of specimen rod (center), external heater pipes, power electrode plates, frame and thermocouple lead wires.
A: under construction, B: assembled up.

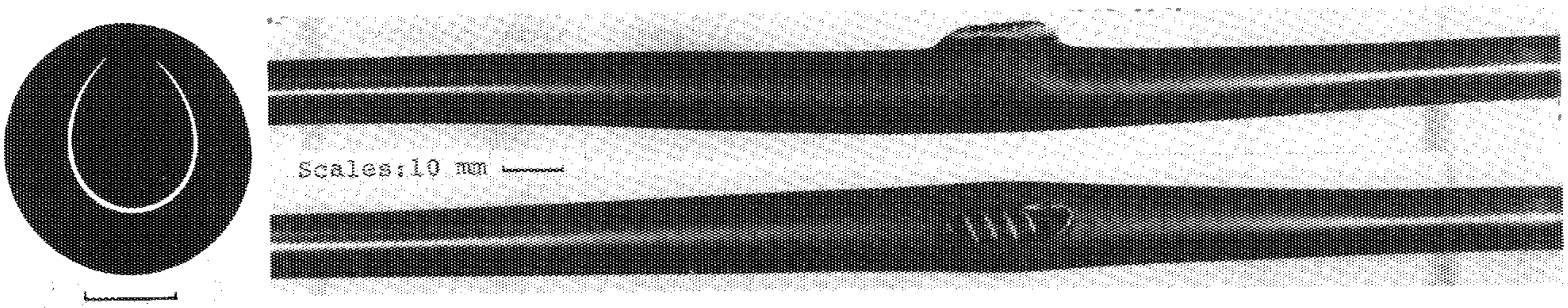

Photo.2 Ruptured specimen cladding tested alone in air with no external heater pipes (Case P-1, Fig.5). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left).

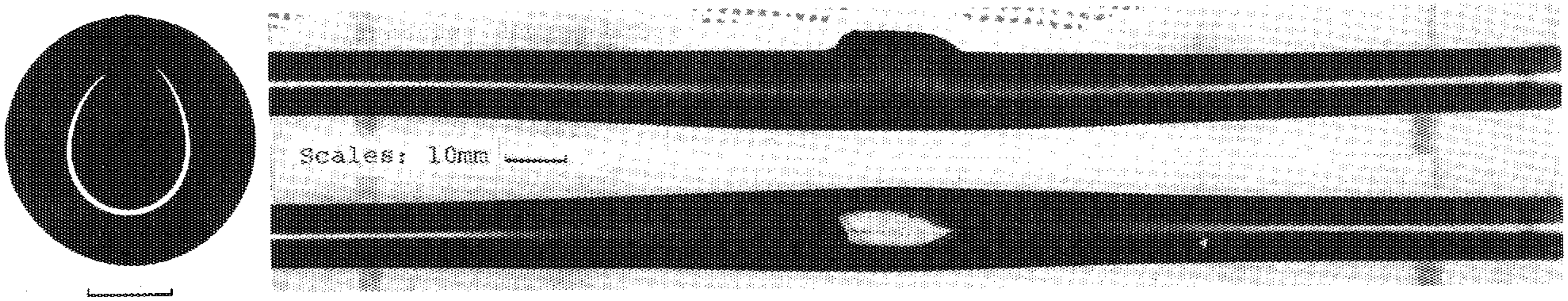

Photo.3 Ruptured specimen cladding tested alone in air with no external heater pipes (Case P-2, Fig.6). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left).

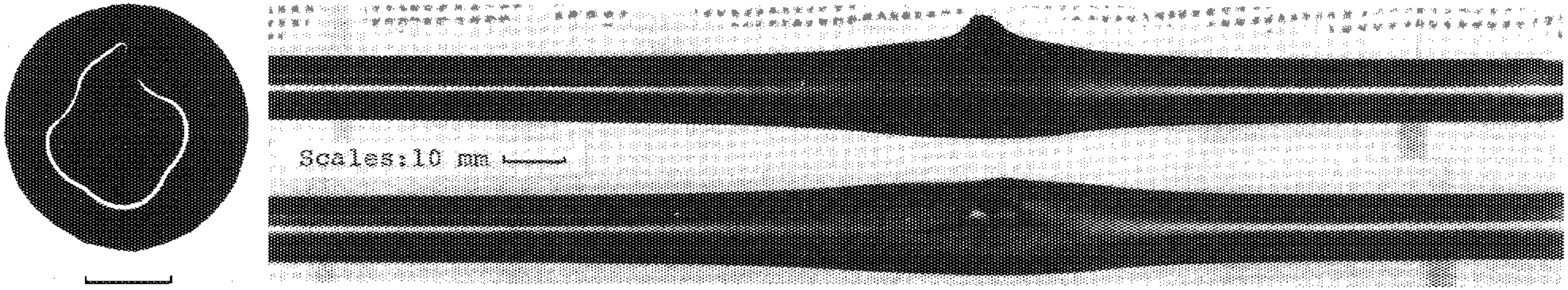

Photo.4 Specimen cladding of Case A-1 (Fig.9). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

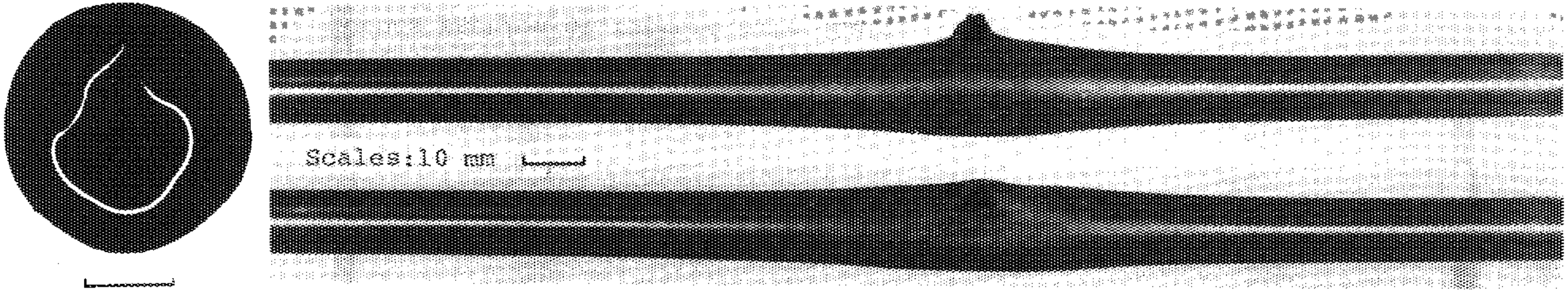

Photo.5 Specimen cladding of Case A-2 (Fig.10). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

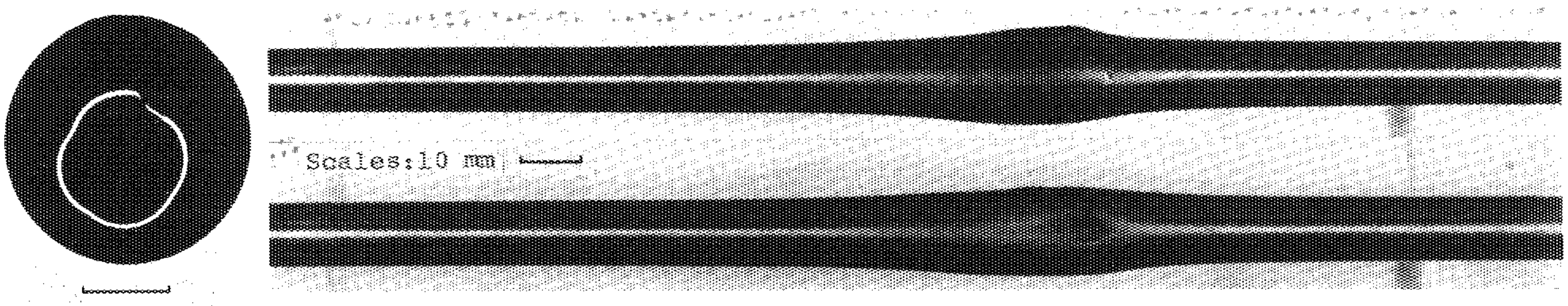

Photo.6 Specimen cladding of Case A-3 (Fig.11). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

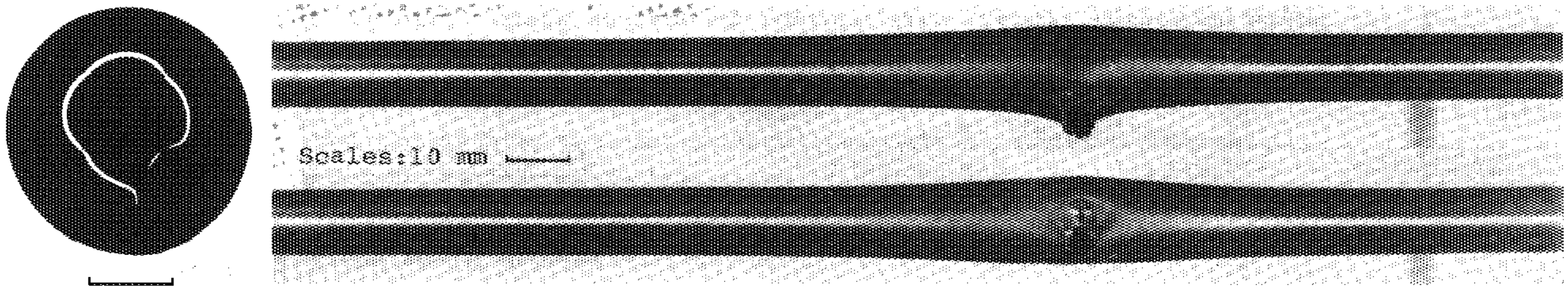

Photo.7 Specimen cladding of Case A-4 (Fig.12). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

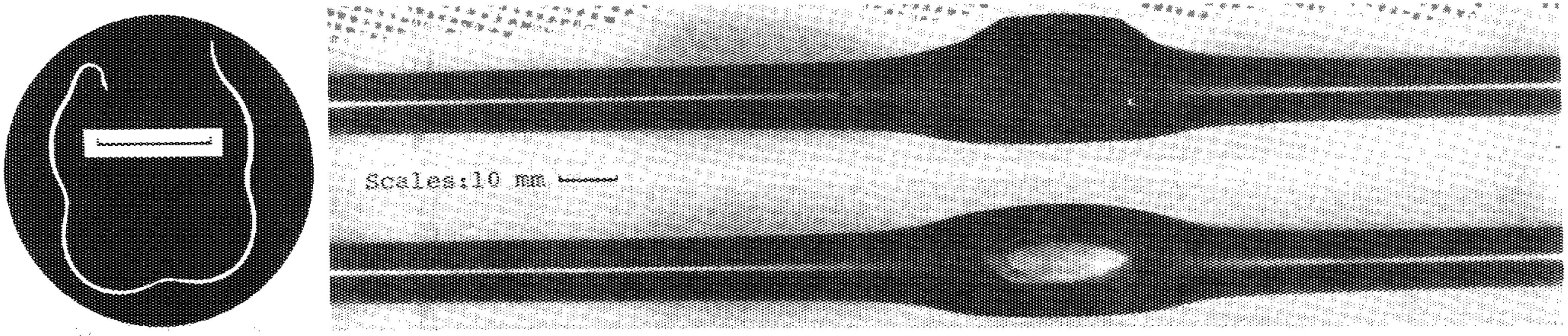

Photo.8 Specimen cladding of Case A-5 (Fig.13). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

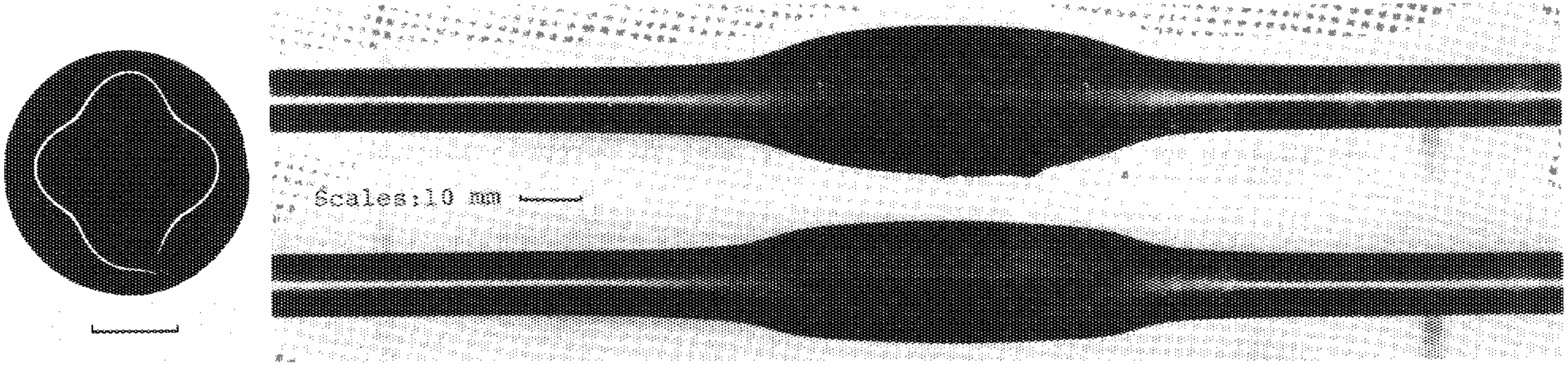

Photo.9 Specimen cladding of Case B-1 (Fig.14). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

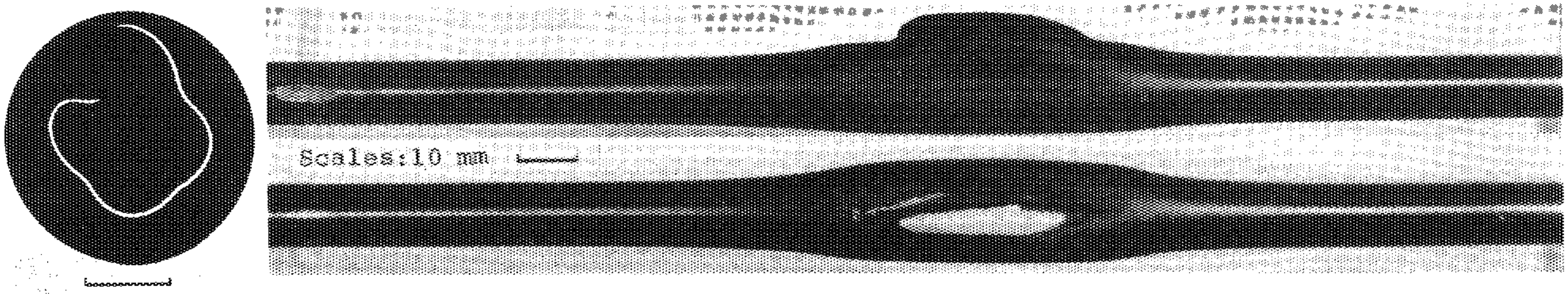

Photo.10 Specimen cladding of Case B-2 (Fig.15). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

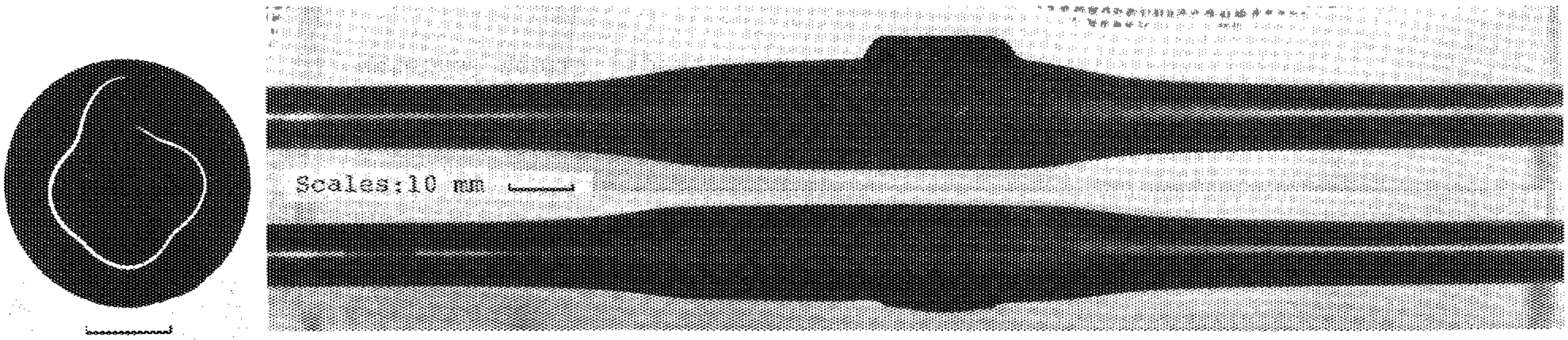

Photo.11 Specimen cladding of Case B-3 (Fig.16). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

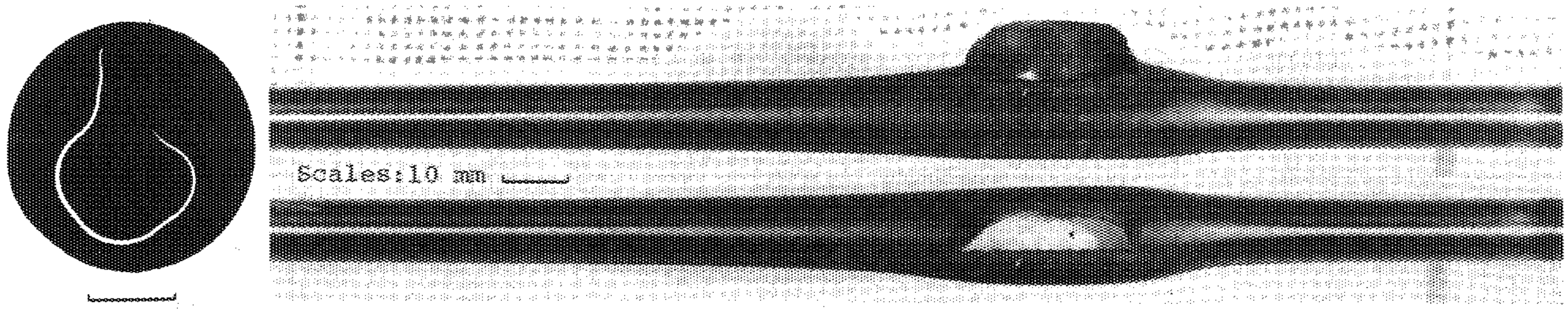

Photo.12 Specimen cladding of Case B-4 (Fig.17). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

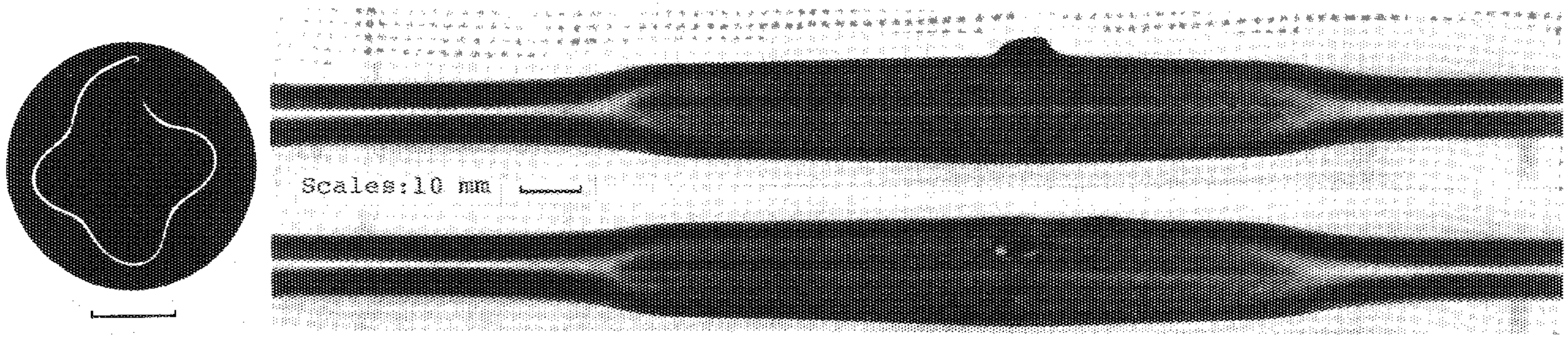

Photo.13 Specimen cladding of Case B-5 (fig.18). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

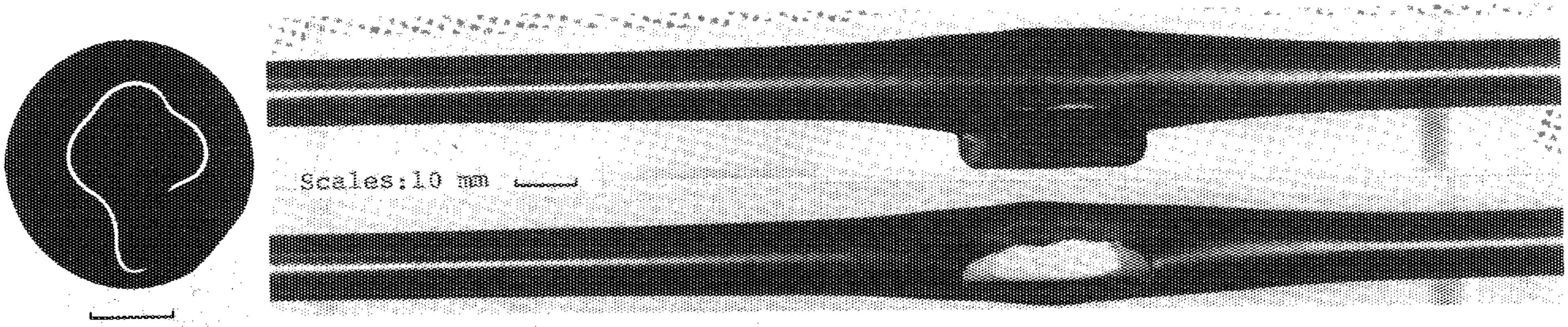

Photo.14 Specimen cladding of Case B-6 (Fig.19). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

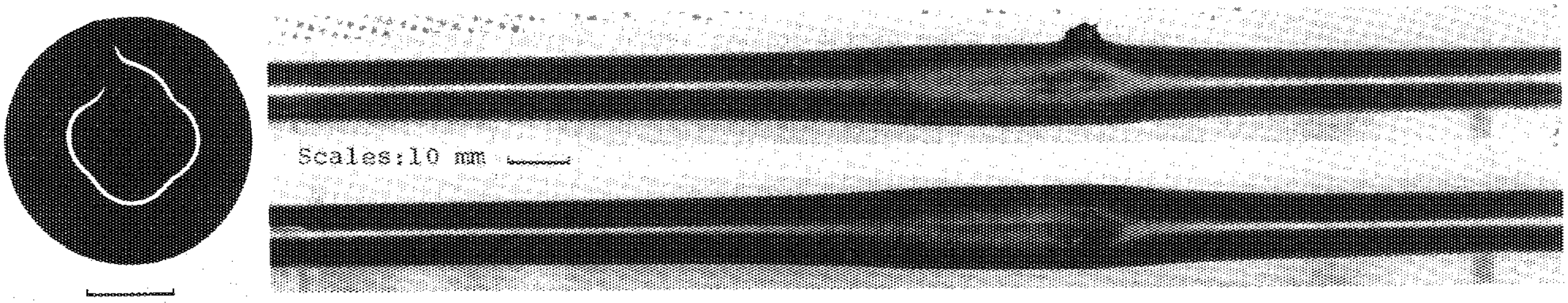

Photo.15 Specimen cladding of Case B-7 (Fig.20). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes.

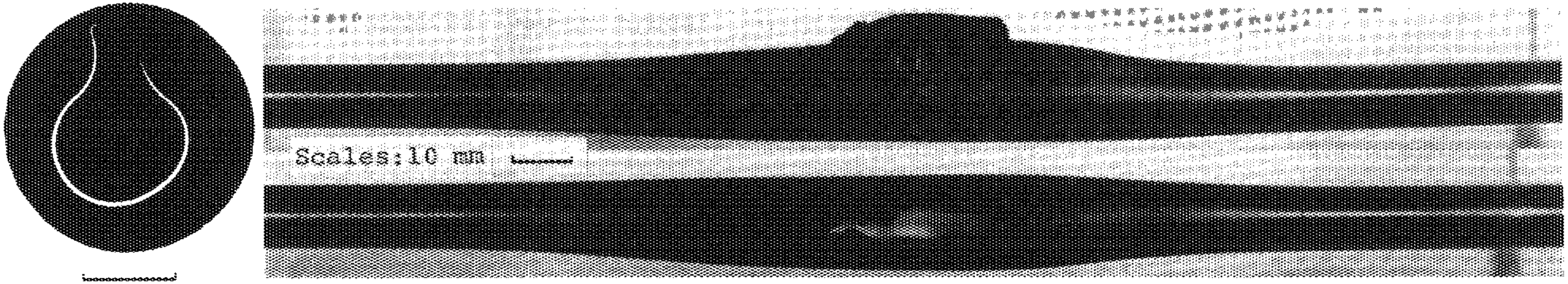

Photo.16 specimen cladding of Case C-1 (Fig.21). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes two of which were not powered.

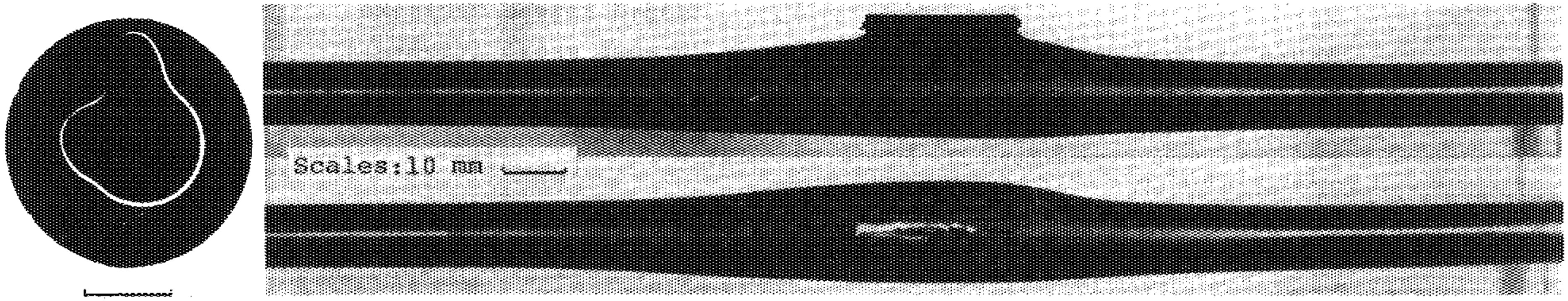

Photo.17 Specimen cladding of Case C-2 (Fig.22). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes two of which were not powered.

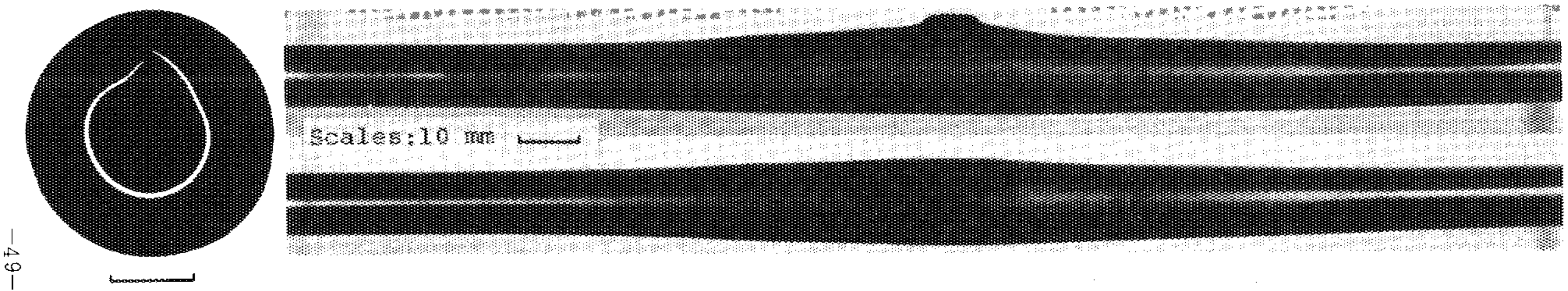

Photo.18 Specimen cladding of Case C-3 (Fig.23). Seen from two directions (Right); cross section at rupture site (Left). Tested in eight external heater pipes two of which were not powered.