

JAERI-M

83-038

冷却材喪失事故条件下での模擬燃料
集合体の破裂試験 (Ⅲ)

—No.7807 試験結果—

1983年3月

橋本 政男・大友 隆・川崎 了
古田 照夫・上塚 寛

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。

入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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 山田軽印刷所

冷却材喪失事故条件下での模擬燃料集合体の破裂試験 (Ⅲ)

— No. 7807 試験結果 —

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

橋本政男・大友 隆・川崎 了

古田照夫・上塚 寛

(1983年1月31日受理)

軽水炉の冷却材喪失事故時における炉心の流路閉塞量を定量的に推定するための基礎データをを得るため、模擬燃料集合体による水蒸気中膨れ破裂試験No.7807を行った。この実験は、初期内圧 70 kg/cm^2 、蒸気流量 $0.4 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ 、昇温速度 $9 \text{ }^\circ\text{C/秒}$ の条件で行ったものである。

その結果、以下の知見が得られた。

(1) 燃料棒の最高圧力は $87 \sim 93 \text{ kg/cm}^2$ であり、破裂圧力は $78 \sim 88 \text{ kg/cm}^2$ であった。その時の燃料棒破裂温度は $765 \sim 780 \text{ }^\circ\text{C}$ と考えられる。

(2) 34%以上の周方向歪をもつ軸方向長さは、大部分の燃料棒で $20 \sim 140 \text{ mm}$ の範囲であって、内部燃料棒(5×5)の方が周辺燃料棒よりも幾分長い傾向が認められる。

(3) 集合体の最大膨れ率は99.4%であるが、比較的均一な温度分布を示す内部燃料棒(5×5)では125.3%である。

(4) 集合体の最大流路閉塞率は67.3%であり、内部燃料棒(5×5)に限定すると78.1%である。

Multi-rod Burst Test under a Loss-of-Coolant Accident Condition, III
— Experiment Result of the Bundle No.7807 —

Masao HASHIMOTO, Takashi OTOMO, Satoru KAWASAKI, Teruo FURUTA
and Hiroshi UETSUKA

Division of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1983)

Multirod burst test, No. 7807 was performed with a view to estimating the quantity in coolant flow channel restriction caused by the ballooning of claddings in a fuel assembly during a postulated LOCA. The test was conducted on a condition that the initial internal pressure in each rod was $70 \text{ kg/cm}^2(\text{R.T.})$, and the heating rate was 9°C/s in steam with flow rate of $0.4 \text{ g/cm}^2\text{min}$.

The following results were obtained:

- (1) Maximum and burst pressures in rods ranged 87 to 93 kg/cm^2 and 78 to 88 kg/cm^2 respectively. The burst temperatures of claddings were estimated to be 765 to 780°C .
- (2) The portion of tubes with greater than 34% in circumferential strain axially stretches for 20 to 140 mm in most rods. It is somewhat longer in the internal rods(5x5) than in the peripheral rods.
- (3) The degree of maximum ballooning is 99.4% in the assembly and 125.3% in the internal rods(5x5) with better uniformity in lateral temperature distribution.
- (4) The degree of maximum channel area restriction is 67.3% in the assembly and 78.1% in the internal rods(5x5).

Keywords: LOCA, Multi-rod Burst, Temperature, Ballooning, Channel Blockage, Zircaloy, LWR

目 次

1. はじめに	1
2. 方 法	1
2.1 実験装置の概要	1
2.2 模擬燃料集合体	2
2.3 模擬燃料棒	2
2.4 温度測定	2
2.5 実験手順	2
2.6 初期条件	3
2.7 測定点	3
2.8 集合体解体ならびに観察	3
2.9 流路閉塞量測定	4
3. 結果及び討論	4
3.1 用語の定義	4
3.2 温度分布と昇温速度	5
3.2.1 半径方向	5
3.2.2 軸方向	6
3.3 圧力変化	7
3.3.1 最高圧力と破裂圧力	7
3.3.2 圧力降下と降下時間	7
3.4 破 裂	7
3.4.1 破裂位置	7
3.4.2 破裂温度	8
3.5 膨れ観察	8
3.5.1 各列毎の観察	8
3.5.2 燃料棒毎の観察	8
3.5.3 断面の観察	8
3.6 膨れ量	9
3.6.1 34%の膨れ長さ	10
3.6.2 最大膨れ率	10
3.6.3 膨れの範囲	10
3.7 流路閉塞	10
4. 総 括	11
参考文献	11

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experimental Methods	1
2.1 General Description of Experimental Apparatus.....	1
2.2 Fuel Assembly Simulator.....	2
2.3 Fuel Rod Simulator.....	2
2.4 Temperature Measurements	2
2.5 Experimental Procedures	2
2.6 Initial Condition	3
2.7 Measuring Points	3
2.8 Disassembling of Burst Bundle and Observation.....	3
2.9 Channel Blockage Measurements	4
3. Results and Discussion	4
3.1 Definition of Technical Terms	4
3.2 Temperature Distribution and Heating Rate	5
3.2.1 Radial Direction	5
3.2.2 Axial Direction	6
3.3 Internal Pressure	7
3.3.1 Maximum and Burst pressure.....	7
3.3.2 Pressure Drop from Maximum to Burst and its Duration	7
3.4 Burst Behavior	7
3.4.1 Burst Location.....	7
3.4.2 Burst Temperature	8
3.5 Observation of Ballooning	8
3.5.1 Side Views of Bundle	8
3.5.2 Views of Rod	8
3.5.3 Views of Cross Section	8

3.6 Ballooning	9
3.6.1 Length of Ballooned Region Having Expansion above 34%	10
3.6.2 Maximum Ballooning	10
3.6.3 Length of Ballooned Region	10
3.7 Channel Blockage	10
4. Summary	11
Reference	11

1. はじめに

軽水型動力炉の想定冷却材喪失事故（LOCA）のとき、放射性核分裂生成物が原子炉周辺に放出されることを抑制するためには、炉心がすみやかに冷却されなければならない。したがって、「燃料集合体が冷却可能な形状を保っている」ことが必要とされる。又、この事故が起こったならば、燃料被覆管は高温の水蒸気にさらされ、燃料棒内外の圧力差の増大によって膨れ変形を生じる。このような、被覆管の膨れは炉心における非常用炉心冷却水の流路閉塞の主因となる。このため、被覆管の膨れによる集合体の流路閉塞量は非常用炉心冷却系等の機能や性能を評価するうえで非常に重要な値である。被覆管の膨れ現象は管に与えられる条件によって変化するから、燃料集合体の流路閉塞量もそれに応じて変わり得る。この値を求めるには、集合体に配列された燃料棒の幾何学的配置を念頭に置かねばならない。したがって、単に燃料棒のみの膨れ試験を積み重ねるだけでは十分でなく、隣接燃料棒の干渉下での膨れ試験、即ち、集合体を用いた膨れ試験が必要である。この種の試験は、米⁽¹⁾（ORNL）・西独⁽²⁾⁽³⁾（kfk）においても行われている。

集合体を用いて流路閉塞量を求めるにあたり、動力炉に装荷されている集合体と全く同一のものを使用して行うことは、技術上の困難さが増大するばかりでなく、必要とされる経費も多額なものとなる。しかし、集合体の幾何学的配置や炉内における燃料棒の出力分布から考えて、1グリッド間隔をもつ7行7列（49本）で構成された集合体による破裂試験を行えば、隣接燃料棒の干渉下での膨れに関して十分な情報を得ることができると考えられる。しかも、流路閉塞量について定量的な情報も得ることができる。

我々は上記の理由にもとづいて小型の集合体を用いて、水蒸気中膨れ試験を1977年から実施し、集合体毎に膨大な量の測定を行った。これらの内のいくつかの測定結果は現在解析に利用する予定のないものもあるが、ふくれ挙動と試験パラメータの因果関係が十分に解明されていない状況下では、今後どのようなデータが必要であるか適確に予測できない。したがって、得られた結果で今後の解析に利用する可能性のある総てのデータが集録されていることが必要である。そこで、各集合体毎のデータを中心にまとめを行った。

2. 方 法

実験装置ならびに燃料棒についての詳細は、先に報告したJAERI-M 9233のAppendixにまとめられているので参照されたい。従って、試験体の概要と実験方法について以下に記す。

2.1 実験装置の概要

装置はFig. A-1に示す試験体（集合体）、49本の燃料棒を各々制御する電力制御装置、水

1. はじめに

軽水型動力炉の想定冷却材喪失事故（LOCA）のとき、放射性核分裂生成物が原子炉周辺に放出されることを抑制するためには、炉心がすみやかに冷却されなければならない。したがって、「燃料集合体が冷却可能な形状を保っている」ことが必要とされる。又、この事故が起こったならば、燃料被覆管は高温の水蒸気にさらされ、燃料棒内外の圧力差の増大によって膨れ変形を生じる。このような、被覆管の膨れは炉心における非常用炉心冷却水の流路閉塞の主因となる。このため、被覆管の膨れによる集合体の流路閉塞量は非常用炉心冷却系等の機能や性能を評価するうえで非常に重要な値である。被覆管の膨れ現象は管に与えられる条件によって変化するから、燃料集合体の流路閉塞量もそれに応じて変わり得る。この値を求めるには、集合体に配列された燃料棒の幾何学的配置を念頭に置かねばならない。したがって、単に燃料棒のみの膨れ試験を積み重ねるだけでは十分でなく、隣接燃料棒の干渉下での膨れ試験、即ち、集合体を用いた膨れ試験が必要である。この種の試験は、米⁽¹⁾（ORNL）・西独⁽²⁾⁽³⁾（kfk）においても行われている。

集合体を用いて流路閉塞量を求めるにあたり、動力炉に装荷されている集合体と全く同一のものを使用を行うことは、技術上の困難さが増大するばかりでなく、必要とされる経費も多額なものとなる。しかし、集合体の幾何学的配置や炉内における燃料棒の出力分布から考えて、1グリッド間隔をもつ7行7列（49本）で構成された集合体による破裂試験を行えば、隣接燃料棒の干渉下での膨れに関して十分な情報を得ることができると考えられる。しかも、流路閉塞量について定量的な情報も得ることができる。

我々は上記の理由にもとづいて小型の集合体を用いて、水蒸気中膨れ試験を1977年から実施し、集合体毎に膨大な量の測定を行った。これらの内のいくつかの測定結果は現在解析に利用する予定のないものもあるが、ふくれ挙動と試験パラメータの因果関係が十分に解明されていない状況下では、今後どのようなデータが必要であるか適確に予測できない。したがって、得られた結果で今後の解析に利用する可能性のある総てのデータが集録されていることが必要である。そこで、各集合体毎のデータを中心にまとめを行った。

2. 方法

実験装置ならびに燃料棒についての詳細は、先に報告したJAERI-M 9233のAppendixにまとめられているので参照されたい。従って、試験体の概要と実験方法について以下に記す。

2.1 実験装置の概要

装置はFig. A-1に示す試験体（集合体）、49本の燃料棒を各々制御する電力制御装置、水

蒸気雰囲気を作るための水蒸気発生及びその配管装置、及び燃料棒の温度、圧力そして出力などの計測値を記録するデータ収録再生装置から構成される。試験本体は7行7列(7×7)の模擬燃料棒(以下、燃料棒と記す)をもつ模擬燃料集合体(以下、集合体と記す)、チャンネルボックス、集合体を水蒸気雰囲気に保つためのステンレス槽及び集合体の放熱を防ぐ補助加熱炉などから構成される。

2.2 模擬燃料集合体

集合体は7行7列の格子に商用PWR(15×15)と同じ間隔(14.3mm)で燃料棒を配列したものであり、Fig. A-2に概略を示す。集合体は100.1mm中で約2,500mmの高さを持ち、49本の燃料棒と1対のインコネル718製のスペーサグリッドで構成され、グリッド間隔はグリッド中心間で650mmである。また、集合体の全発熱量の最大196kW(30V)である。この集合体の外周106.5mm中の位置にステンレス製チャンネルボックス(厚さ1.0mm)を配置する。

2.3 模擬燃料棒

燃料棒はTable A-1に示す化学組成をもつPWR用ジルカロイ-4被覆管(外径10.72φ、内径9.48mm)、直径0.6mmのW-Re発熱体素子6本と燃料ペレットを模擬したアルミナペレットで構成され、Fig. A-3に示した。発熱体素子は発熱長850mmで最大出力4kW(30V)であり、燃料棒中心から2.6mmのところを6本配列されている。UO₂ペレットを模擬したアルミナペレットは純度99.5%以上、密度3.9引上で外径9.2mm、長さ20mmである。被覆とアルミナペレットとの半径ギャップは0.14mm、燃料棒内の空隙と圧力変化を計測する圧力変換器までの全内部空隙量は23.5±1.5ccで、この空隙にはヘリウムガスを充填する。

2.4 温度測定

燃料棒の温度測定は、Fig. A-4に示した燃料棒各位置の被覆管表面にタンタル板を挟んで点溶接したCA非接地型シーズ熱電対で行う。燃料棒に関する温度測定点は、ヒーター発熱長中心より75mm上方を基準測定点とした。基準測定点で燃料棒全数の温度を測定し、更に、燃料棒の配列を考慮して基準の上下の点、グリッド位置などでも測定した。測定点総数は66点である。なお、補助加熱炉、蒸気配管の温度についても測定を行っている。

2.5 実験手順

実験は水蒸気中で加圧燃料棒を加熱することによって被覆管に膨れを起こさせ、燃料棒全数が破裂した時点で加熱を停止し冷却を行う。実験の詳細をFig. 1に示し、以下に詳細を記す。

- (1) 室温にて、各燃料棒にヘリウムガスを所定の圧力(70kg/cm²)まで充填する。
- (2) 補助加熱炉の電源を投入し、集合体及びステンレス槽の加熱を行う。

- (3) 補助加熱炉で集合体外周燃料棒の温度が上昇し始めた時、燃料棒ヒーターの加熱を開始する。
- (4) 集合体が約 300 °C に達した時に、あらかじめ用意された水蒸気をステンレス槽内に供給する。その後、約 400 °C で30分間保持する。
- (5) 保持時間経過後、補助加熱炉の加熱を停止すると同時に全燃料棒に全出力を負荷して集合体の加熱を行う。但し加熱炉の熱容量が大きくステンレス槽はその後昇温を続ける。この加熱により集合体は昇温し被覆管は膨れ及び破裂する。
- (6) 全数の被覆管が破裂した時点で、燃料棒ヒーターの加熱を直ちに停止する。
- (7) 破裂した集合体を水蒸気によって冷却する。

2.6 初期条件

実験開始時における各項目の値を以下にまとめる。

- (1) 燃料棒初期内圧（室温）……………70 kg/cm²（各燃料棒）
- (2) ステンレス槽入口蒸気温度……………300 °C
- (3) 水蒸気流量……………0.4 g/cm²・min
- (4) 燃料棒発熱条件……………全数均一

2.7 測定点

データは下記項目について2秒間隔毎に収集する。

- (1) 被覆管表面温度……………総数66点
- (2) 燃料棒圧力……………総数49点
- (3) 燃料棒消費電力量……………総数49点

2.8 集合体解体ならびに観察

破裂後冷却された集合体を試験装置から取りはずし、以下の手順で集合体の解体及び観察を行う。解体の手順をわかりやすく Fig. A-5 に示す。

- (1) 上下のグリッド部を樹脂で固定した後切断する。
この操作により1グリッド間隔の集合体が得られる。(図中の③)
- (2) グリッド間隔を1列毎に切断して7列にする。(図中の④)
- (3) 各列の正面、裏面ならびに側面からの写真撮影を行う。
- (4) 各列に解体されたものを、さらに1本毎の燃料棒に切離す。(図中の⑤)
- (5) 1本毎に34%以上の膨れを示す部分の軸方向長さ測定ならびに写真撮影を行う。
- (6) 49本の燃料棒に分離されたものから再び各列毎、そして集合体に再組立てを行う。
(図中の⑥)
- (7) 再組立された集合体全体を樹脂で固定する。

- (8) 固定後、10mm間隔の水平断面に集合体を切断する。(図中の⑦)
- (9) 各断面の上面及び下面の写真撮影を行う。この写真をもとに画像解析装置を用いて流路閉塞量を測定する。

2.9 流路閉塞量測定

各断面写真をもとに画像解析装置(QTM720)を利用して、被覆管の全断面積測定を行い、流路閉塞量を求める。測定は、7行7列全体、内部の5行5列及び中心の3行3列などについて行う。なお、被覆管の破裂開口部の測定は破裂端の両端を直線で結び、それで囲まれる部分を被覆管断面積と規定して測定する。

3. 結果及び討論

実験中に得られた温度、内圧などのデータ及び破裂後の観察によって得られる各種のデータにつき、以下項目毎に整理した。

3.1 用語の定義

(1) 破裂時刻及び破裂圧力

測定間隔が2秒毎であるので、測定された圧力値が零となった時刻より2秒前の時刻を破裂時刻、その時の圧力値を破裂圧力とする。

(2) 破裂温度

破裂時刻の燃料棒軸方向における温度分布を求め、破裂位置に内外挿した温度を破裂温度とする。

(3) 破裂位置

燃料棒ヒーターの発熱長中心を基点として、破裂開口の中心までの距離を測定し、破裂位置として表わす。

(4) 34%の膨れ長さ

集合体内の各燃料棒が水平面上均一に膨れたとき、隣接燃料棒と接触する場合の膨れは、燃料棒間隔が14.3mmであるから34%となる。この膨れ量以上を持つ各燃料棒軸方向の長さを34%膨れ長さとして規定する。

(5) 膨れ(Ballooning)

破裂試験前の被覆管全断面積 S_0 に対する破裂後の被覆管全断面積 S の百分比を表わす。従ってここでの膨れは断面積の増加を意味し、(4)で用いた周方向の増加とは異なる。

(6) 流路閉塞率(Channel Blockage)

$$\text{Channel Blockage (\%)} = (S - S_0) / (SA - S_0) \times 100$$

S_0 : 破裂試験前の被覆管全断面積

- (8) 固定後、10mm間隔の水平断面に集合体を切断する。(図中の⑦)
- (9) 各断面の上面及び下面の写真撮影を行う。この写真をもとに画像解析装置を用いて流路閉塞量を測定する。

2.9 流路閉塞量測定

各断面写真をもとに画像解析装置(QTM720)を利用して、被覆管の全断面積測定を行い、流路閉塞量を求める。測定は、7行7列全体、内部の5行5列及び中心の3行3列などについて行う。なお、被覆管の破裂開口部の測定は破裂端の両端を直線で結び、それで囲まれる部分を被覆管断面積と規定して測定する。

3. 結果及び討論

実験中に得られた温度、内圧などのデータ及び破裂後の観察によって得られる各種のデータにつき、以下項目毎に整理した。

3.1 用語の定義

(1) 破裂時刻及び破裂圧力

測定間隔が2秒毎であるので、測定された圧力値が零となった時刻より2秒前の時刻を破裂時刻、その時の圧力値を破裂圧力とする。

(2) 破裂温度

破裂時刻の燃料棒軸方向における温度分布を求め、破裂位置に内外挿した温度を破裂温度とする。

(3) 破裂位置

燃料棒ヒーターの発熱長中心を基点として、破裂開口の中心までの距離を測定し、破裂位置として表わす。

(4) 34%の膨れ長さ

集合体内の各燃料棒が水平面上均一に膨れたとき、隣接燃料棒と接触する場合の膨れは、燃料棒間隔が14.3mmであるから34%となる。この膨れ量以上を持つ各燃料棒軸方向の長さを34%膨れ長さとして規定する。

(5) 膨れ(Ballooning)

破裂試験前の被覆管全断面積 S_0 に対する破裂後の被覆管全断面積 S の百分比を表わす。従ってここでの膨れは断面積の増加を意味し、(4)で用いた周方向の増加とは異なる。

(6) 流路閉塞率(Channel Blockage)

$$\text{Channel Blockage (\%)} = (S - S_0) / (SA - S_0) \times 100$$

S_0 : 破裂試験前の被覆管全断面積

S : 破裂後の被覆管全断面積 (境界内のみ)

SA : 集合体の全断面積 (境界内)

なお、集合体の境界を、集合体の外周にも燃料棒が同様に配列されると仮定して、燃料棒間隔の1/2に相当する長さだけの外側とした。

3.2 温度分布と昇温速度

本実験は、F1燃料棒の電力制御器が加熱途中で故障したため、集合体内の温度分布に著しい高低が生じた。

3.2.1 半径方向

ここでは、集合体の基準温度測定位置の水平面上、即ち、発熱長中心より軸方向75mm上方に取付けた熱電対TC-2 (Fig. A-4参照)について考察を行った。まず、Fig. 2-1に集合体の対角線上に配列された燃料棒、D行及び第4列の燃料棒の温度分布を示し、Fig. 2-2には集合体の外周燃料棒の温度分布を示した。これらは、全出力を各燃料棒に負荷した時刻(0秒とする)から全燃料棒が破裂するまでの時刻(50秒)について表わしている。この結果から、F1燃料棒は最初から極端に高く、その影響で周囲燃料棒も高温となり、集合体全体としては、高低の著しい温度分布となった。しかし、F1燃料棒の周囲以外の燃料棒は、ほぼ平坦な温度分布を保ちながら昇温している。

このF1燃料棒が高温となった原因は、燃料棒ヒータの初期加熱時に全負荷が加わったためである。その影響が周囲燃料棒は勿論のこと、2ピッチ離れた燃料棒まで及んで、それらの燃料棒が高温となっている。この影響を受けた燃料棒は、D1.2、E1.2.3、F2.3とG1.2.3と考えられる。

それから、B1、C1燃料棒では、破裂時に温度の停滞及び低下がみられる。この原因として熱電対のはづれ、及び被覆管の膨れによる影響が考えられるが明確ではない。

次に各燃料棒の昇温速度をTable 1-1に示す。この昇温速度の値は、集合体の中心燃料棒(D4)の熱電対(TC-2)が500℃に達した時刻から破裂を生じた時刻までの平均として表わされている。まずF1燃料棒とその影響を受けたと思われる燃料棒を除いて検討してみると、内部燃料棒(5×5領域)の昇温速度は8.3~9.3℃/秒、最外周燃料棒では5.5~8.8℃/秒である。

次に最外周燃料棒だけについて考察してみると、第7列目の燃料棒の昇温速度は、内部燃料棒とほぼ同じ値であるが、第1列目の燃料棒(A1、B1、C1)は、極めて遅い。A列、及びG列の燃料棒の、ほぼその中間の値となっている。この差異はFig. A-4からわかるように、燃料棒に取付けられた熱電対の位置の違いにもとづいている。即ち、熱電対の取付け位置が第7列では集合体内側であるのに対し、第1列は逆に外側である。これらの結果から外周燃料棒は、被覆管の半径方向に温度差が生じている。この原因は、補助加熱炉の加熱不足によって集合体の熱が外側へ逃げているためと考えられる。

以上、昇温速度にはばらつきがあるが、集合体全体としての昇温速度は、約9℃/秒程度と

考えられる。

次に、F 1 燃料棒とその影響を受けたと思われる燃料棒について考察してみると、集合体昇温開始時にはF 1 燃料棒が942℃と高温であったため、この影響で周囲及び2ピッチ目の燃料棒までが513～727℃と他燃料棒の約470℃に比べ高温である。

又、これらの燃料棒の昇温速度は、F 1 燃料棒の隣接燃料棒 (E 1, F 2, G 1) の昇温速度が5.7～6.6℃/秒と他の燃料棒の昇温速度より幾分遅い。その他の燃料棒 (E 2, G 2, D 1, D 2, E 7, F 3, G 3) は、7.3～9.2℃/秒であって集合体の昇温速度とそれ程変わらない。しかしこれらの燃料棒は、昇温開始時にはすでに高温であったため、F 1 燃料棒の影響を受けなかったものに比べて破裂時刻は早くなった。

3.2.2 軸方向

燃料棒軸方向の温度分布を測定するために、49本の燃料棒のうち10本について軸方向に2～3本の熱電対が取付けてある。(Fig. A. 4参照)これらの燃料棒の温度分布を各々の最高圧力時及び破裂時についてFig. 3-1, 2に示した。この結果より最高圧力時の軸方向の温度分布は、発熱長中心より上方約50mm附近で最も高い上下にゆるやかな曲線となった。破裂時刻では、外周燃料棒の温度分布は実にゆるやかであり、平坦化の傾向がある。このような平坦化傾向は、内部燃料棒には認められない。この事は、Table 1-2の昇温速度からも明らかである。この昇温速度は、中心燃料棒D 4の温度が500℃に達した時から破裂時までの平均昇温速度である。この表からも、内部燃料棒の熱電対取付位置による昇温速度の差、即ちTC-1, TC-2とTC-3による差は認められない。しかし外周燃料棒では、TC-2より上又は下位置のTC-1, 及びTC-3の方が、0.3～0.6℃/秒程速く、温度分布が平坦化する傾向が認められる。

次に、Table 2に各々の燃料棒の最高圧力時から破裂時までの昇温速度を示した。この時間帯での軸方向位置の違いによる昇温速度は、外周と内部燃料棒では異っている。まず、内部燃料棒のB 2, D 4は、TC-3の方が約2℃/秒速く、一方C 3はTC-3の方が0.6℃/秒遅い。TC-2とTC-1で同じ昇温速度を示す燃料棒 (B 2, 3, C 3, D 4), TC-1の方が速い燃料棒 (B 4), 及び逆にTC-2の方が速い燃料棒 (C 4) などがあって、内部燃料棒軸方向の昇温速度には一様性がない。この様なばらつきは、膨れや破裂による隣接燃料棒との相互関係、及びふくれによる中心ヒータと被覆管の隙間変化などによるものと考えられる。

外周燃料棒の場合は、TC-2よりTC-1及びTC-3の方が0.3～1.6℃/秒程速く、昇温速度に一様性がある。この事は、隣接燃料棒との相互関係が内部燃料棒に比べて少いためであって、明らかに軸方向の温度分布は、時間経過と共に平坦化する傾向が認められる。

それから、中心燃料棒 (D 4) の上下スペーサ位置の昇温速度と昇温の一番遅い燃料棒 (A 1) とを比較してみると、Table 1-2の昇温時は、スペーサ位置の昇温の方が、幾分遅い。しかし、Table 2の最高圧力時以後の時間帯では、スペーサ位置の方が速い。下部と上部スペーサ位置では、いずれの場合でも上部の方が約1℃/秒程速い。

3.3 圧力変化

3.3.1 最高圧力と破裂圧力

個々の燃料棒の最高、及び破裂圧力値と各々の時刻をTable 3に示し、これらの分布をFig. 4, 5にまとめた。最高圧力値は87~93 kg/cm²に達し、初期圧力値の24~33%増に相当する。最高圧力値は、外周より内部燃料棒の方が幾分高いようである。この時の破裂位置に最も近いTC-2の温度は、外周燃料棒で595~669℃、内部燃料棒では幾分高く622~696℃である。この温度範囲は、F1燃料棒の影響を受けたと思われる燃料棒の温度は、除いてある。

破裂圧力値は、39~88 kg/cm²であって、最高圧力値と比べると広い範囲に及んでいる。この事は、データ測定間隔が2秒毎で粗いためと思われる。しかし、全燃料棒数の約85%は、78~87 kg/cm²で破裂している。この値は、初期圧力の11~24%増に相当し、外周と内部燃料棒とで差は認められない。

次に、Fig. 5から最高圧力及び破裂圧力時刻は、燃料棒によってばらついていて、長い時間に及んでいる。この事は、F-1燃料棒の影響が大きく左右しているためである。まず、F1燃料棒の影響を受けた燃料棒を除いて考察してみると、最高圧力に達した時刻は、全負荷出力後28~36秒であって、外周と内部燃料棒とで差は認められない。

破裂時刻は、42~50秒間であり、この時間内で全数が破裂していて、内部と外部燃料棒では明確な差は認められない。F1燃料棒及びその影響を受けた燃料棒は、早い時刻から高温であったため、それらの最高圧力及び破裂時刻は他の燃料棒より明らかに早くなっている。

3.3.2 圧力降下と降下時間

燃料棒の圧力が、最高圧力から破裂圧力までに降下した値とそれに要した時間をTable 4にまとめ、各々の分布をFig. 6に示した。圧力降下に要した時間は、10~20秒であり、その時に降下した圧力は、5~13 kg/cm²の範囲であって、外周と内部燃料棒では、それぞれ大きな違いは認められない。

次にF1燃料棒の周囲燃料棒を考察してみると、隣接燃料棒(E1, F2, G1)は圧力降下時間が62~82秒と非常に長く、降下圧力は、1~3 kg/cm²と小さい。

3.4 破 裂

3.4.1 破裂位置

各燃料棒における破裂開口の方向および位置、そして破裂時刻をFig. 7に示す。破裂開口の位置は、発熱長中心を原点として、上下にどれだけ隔たっているかを表わしている。外周部燃料棒の破裂開口の向きは、すべて集合体内部に向いており、前述した半径方向の温度分布が内側で高いという結果と一致している。内部燃料棒の破裂開口の向きには一様性がないが、全出力を負荷した時から高温であったF-1燃料棒の隣接及び周囲の燃料棒の破裂開口の向きは、いずれもF-1燃料棒の方を向いて破裂していて、高温側で破裂が生じている。破裂位置は、Fig. 9に示した通り、発熱長中心から上方約200mmまで及んでいる。しかし全燃料棒の約90

は、発熱長中心から上方75mmの範囲で破裂している。この範囲は、スペーサ間の約12%に相当している。外部と内部燃料棒を比べると外部の燃料棒の方が広い範囲に及んで破裂している。

3.4.2 破裂温度

燃料棒(10本)の破裂温度をFig. 8に示す。この破裂温度は、Fig. 3-1, 2に示すように、2及び3点の熱電対の温度から破裂位置へ内外挿して求めた値であって、半径方向の温度差は考慮に入れていない。これらから破裂温度は外周燃料棒で740～775℃、内部燃料棒で765～780℃となり、内部燃料棒の方が幾分高い。

3.5 膨れ観察

試験後の集合体は、破裂部を最大ふくれとした、ゆるやかな湾曲形となった。

3.5.1 各列毎の観察

集合体を解体して、燃料棒の膨れを観察した。各列毎の中で代表的な写真を、Photo. 1-1. 2. 3.に示した。Photo. 1-1は、A行の内外面とB形のA行に相對した図を示す。この写真から明らかなように、A行の外側には、破裂開口がなく、内側に破裂が生じている。この事は、前に述べた通り集合体の最外周燃料棒には、半径方向に温度差が生じていて、内側の方が高温であることと一致している。

Photo. 1-2は、4列目(中心列)とこれに相對している3列と5列の面を示す。外周のA行燃料棒よりも、燃料棒同志の接触部も長く、又、破裂開口部も、接続し合って複雑となっている。

昇温前から高温であったF1燃料棒を含んだ1列の写真を、Photo. 1-3に示した。F1燃料棒は、破裂開口部で極端な曲りが生じている。その影響でG1燃料棒も大きく弓なりの曲りになっているのがわかる。

3.5.2 燃料棒

集合体の49本燃料棒のうち代表的な数例を、Photo. 2-1～6に示す。この写真は、燃料棒(A-2, A-7, D2, D5とF1)の四方向又は四面からの観察と破裂開口部の拡大である。写真から明らかなように、燃料棒は曲りが生じているが、この曲りは、隣接燃料棒の破裂方向及び、破裂位置等によって種々の形をしている。破裂開口部も、Photo. 3に示した通り、燃料棒D5のように隣接燃料棒によって極端につぶされた形のもの、及び燃料棒B1, E5の様に大きな開口部のもので多種多様である。破裂開口部の軸方向の長さは、最も長いものが燃料棒D5で38mmであって、平均すると約19mmである。

3.5.3 断面観察

断面観察の数例を、Photo. 4に示す。

1) 膨れ量の小さい位置 (ふくれ量 約10%)

Photo. 4-1は、集合体発熱長中心より162, 7mm下方の位置で、膨れ量は、9.8%である。この位置では顕著な膨れ、及び破裂はない。併し、格子間隔にかなりの乱れがあり、燃料棒に曲りが生じている。特にF 1燃料棒の周囲に大きな曲りが認められる。この事は、初期から高温であったF 1燃料棒の影響と考えられる。

2) 最初に破裂した位置

Photo. 4-2に、最初に破裂したE 5燃料棒の開口位置断面を示した。この位置は、発熱長中心より22.4mm上方で、膨れ量は83.1%である。

断面写真から、最初に破裂したE 5燃料棒は、隣接燃料棒によってそれ程制約を受けないで膨れ破裂が生じている。この事は、隣接燃料棒がこの位置で膨れが小さく、かつ、破裂がないためである。併し、この位置より10.6mm上方の位置では、Photo. 4-3に示した様に異なる。即ち、E 5燃料棒より後に破裂した隣接燃料棒によってE 5燃料棒のふくれは、押し潰された形となっている。即ちFig. 2-5の四方向からの写真からも明らかである。この位置での膨れ量は、94.1%である。

3) 遅く破裂した燃料棒の場合

B-4燃料棒がこれに該当し、Photo. 4-3から明らかな様に、周囲燃料棒を押し潰して膨れた形をしている。

4) 破裂位置が同じで、破裂開口部が向き合っているが破裂時刻に差がある場合、

B-3, C-3燃料棒がこれに該当し、Photo. 4-3からまずB-2, C-3が同時に破裂して、開口部の一端が互に開口部へ入り、後にB-3が破裂して、C-3の開口部の一端を上げています。

5) 破裂位置及び破裂時刻が同じで尚且つ同じ方向で破裂した場合

D-4, E-4燃料棒がこれに該当し、D 5も同じ時刻に破裂している。Photo. 4-4から燃料棒同志が制約し合いながら膨れて、接触面が多くなり、正方形のような形になっている。この位置は、発熱長中心より42.6mm上方であって、集合体の膨れ量は、99.4%である。

6) 破裂位置が同じで破裂方向及び破裂時刻が異なる場合

D 6とD 5, 及びD 6とE 6燃料棒がこれに該当するPhoto. 4-5からD 5燃料棒は後から破裂したD 6燃料棒によって押し潰されている。しかし、E 6燃料棒の場合は、破裂開口部がD 6燃料棒に面しているため押し潰されるのではなく、破裂開口部へD 6燃料棒が膨れ込んでいような形をしている。

この位置は、発熱長中心より56.7mm上方であって集合体の膨れ量は、93.4%である。

以上、集合体各々の燃料棒の膨れ断面は隣接燃料棒との相互作用で多種多様となる。しかし、早く膨れ及び破裂した燃料棒の膨れ量は、結果的には押し潰されて小さくなっている。

3.6 膨れ量

各断面写真から被覆管の膨れ率を下記の領域ごとに求めてTable 5に示し、それぞれの分布

をFig. 11-1～2に示した。Fig. 11-1は全燃料棒49本の領域(7×7)、内部燃料棒25本の領域(5×5)及び中心部燃料棒の領域(3×3)を示し、Fig. 11-2は外周燃料棒、即ち24本の領域(7□)及び外周から2周目燃料棒、即ち16本の領域(5□)を示している。

3.6.1 34%の膨れ長さ

燃料棒が互に34%膨れた場合、たとえ曲がりが起こらなくても燃料棒同志が接触してお互の膨れに対して影響を及ぼしあう。そこで、各燃料棒毎に34%以上の膨れを示す位置とその長さをFig. 9に、そのヒストグラムをFig. 10に示す。

燃料棒A1、E5のように破裂開口の上方又は下方の一方向にのみ長く膨れているものもあるが、多くの燃料棒では破裂開口をはさんで上下に膨れが認められる。34%以上の膨れ長さは0～160mmの範囲で認められるが、Fig. 10から明らかなように外周と内部燃料棒では、内部燃料棒の方が比較的長く、その内の90%の燃料棒は60～140mmである。この長さは、スペーサ間の9～22%に相当する。外周燃料棒は全体的に短いがA1燃料棒のように極端に長いものもある。又、F1燃料棒及びその周辺燃料棒では、その他の燃料棒と比べても34%以上の膨れ長さではとくに異った傾向は認められない。

3.6.2 最大膨れ率

領域別の最大膨れ率をTable 6-1に示す。領域別の最大膨れ率はFig. 11-1～2から明らかなように集合体の外周から中心部に向う程大きくなる傾向が認められる。最も大きな膨れ率は3×3領域の137.2%、最も小さい膨れ率は外周燃料棒の80.8%であり、集合体全体では99.4%である。この最大膨れ量はFig. 9から明らかなように各燃料棒の破裂位置のばらつきによって大きく左右され、破裂位置が整うと大きな値となる。

3.6.3 膨れ長さ

Table 6-2にある膨れ以上の及んだ長さを示した。等円に膨れたと仮定すると隣接燃料棒が接触する量に相当する77.9%以上に膨れ断面積の増加が及んだ長さは全領域に認められ、最も長いのが3×3領域で82mm、集合体全体で47mmである。この軸方向の膨れ長さも、最大膨れ率と同じく中心部の燃料棒程大きくなる傾向が認められる。

3.7 流路閉塞

流路閉塞率を集合体全域及び内部燃料棒の5×5領域の最大膨れ位置付近に対して求めた結果をTable 5に示し、その分布をFig. 12-1～2に示した。

最大流路閉塞率は集合体全域で67.3%、5×5領域で78.1%となり、その位置は発熱長中心より上方42.6mmである。この最大流路閉塞位置から上下25mmの範囲における平均流路閉塞率は集合体全域で60%、5×5領域で69%となる。同じく上下50mmの範囲では、集合体全域で51%、5×5領域が58%である。

4. 総 括

隣接燃料棒の干渉下での燃料棒膨れを求めるため、1 スパン長さをもつ小型集合体を用いて、初期内圧 70 kg/cm^2 を各燃料棒に与えて破裂試験を行った。

その結果、以下の事柄が明らかになった。

- (1) 昇温速度は、中心燃料棒 (D4) が 500°C に到達した時点から破裂時刻までの平均で約 9°C/秒 である。但し、半径方向に温度差がついた外周燃料棒と電力制御器の故障で高温となった一部の燃料棒は除いた。
- (2) 外周燃料棒の膨れは半径方向に温度差がついたために内部燃料棒のそれよりも小さい。
- (3) 最高圧力は $87\sim 93 \text{ kg/cm}^2$ となり、初期圧力 70 kg/cm^2 で $24\sim 33\%$ 増までに達した。破裂圧力は $78\sim 87 \text{ kg/cm}^2$ でその時の温度は $765\sim 780^\circ\text{C}$ である。又最高圧力から破裂までの降下圧力は $5\sim 13 \text{ kg/cm}^2$ であり、その間の時間は $10\sim 20$ 秒である。
- (4) 隣接燃料棒同志が互に接触する 34% 以上の膨れ長さは $0\sim 160\text{mm}$ の紐囲で認められるが、外周より内部燃料棒の方が長く、その値は $60\sim 140\text{mm}$ である。
- (5) 燃料棒の膨れ観察から、被覆管の周方向で温度差が存在すると、破裂開口は高温の方に向っているのが認められる。又、膨れは隣接燃料棒の破裂位置及び破裂時間等の相互関係で影響されていることが認められる。しかし、燃料棒同志における破裂の伝播は認められない。
- (6) 膨れ率は、多くの燃料棒が破裂した位置で大きくなり、集合体全域の最大膨れ率 99.4% となり、中心部燃料棒の 3×3 領域では 137.2% と最も大きな値を示す。
- (7) 最大流路閉塞率は集合体全域で 67.3% 、内部燃料棒の 5×5 領域で 78.1% となり、その位置は発熱長中心より 42.6mm 上方である。又、最大流路閉塞位置から上下 25mm にわたる範囲の平均流路閉塞率は集合体全域で 60% 、 5×5 領域で 58% となる。

参 照 文 献

- (1) Chapman, R.H. et al; ORNL/NUREG/TM-332(1979), 337(1979), 360(1980)
392(1980)
- (2) Erbacher, F.J., Neitzel, H.J., Wiehr, H.; ASTM-STP-681, 429(1978)
- (3) Erbacher; Proc. ANS Topical Meeting on Reactor Safety Aspects of
Fuel Behavior, 2-100(1981)

4. 総 括

隣接燃料棒の干渉下での燃料棒膨れを求めるため、1 スパン長さをもつ小型集合体を用いて、初期内圧 70 kg/cm^2 を各燃料棒に与えて破裂試験を行った。

その結果、以下の事柄が明らかになった。

- (1) 昇温速度は、中心燃料棒 (D4) が 500°C に到達した時点から破裂時刻までの平均で約 9°C/秒 である。但し、半径方向に温度差がついた外周燃料棒と電力制御器の故障で高温となった一部の燃料棒は除いた。
- (2) 外周燃料棒の膨れは半径方向に温度差がついたために内部燃料棒のそれよりも小さい。
- (3) 最高圧力は $87\sim 93 \text{ kg/cm}^2$ となり、初期圧力 70 kg/cm^2 で $24\sim 33\%$ 増までに達した。破裂圧力は $78\sim 87 \text{ kg/cm}^2$ でその時の温度は $765\sim 780^\circ\text{C}$ である。又最高圧力から破裂までの降下圧力は $5\sim 13 \text{ kg/cm}^2$ であり、その間の時間は $10\sim 20$ 秒である。
- (4) 隣接燃料棒同志が互に接触する 34% 以上の膨れ長さは $0\sim 160\text{mm}$ の紐囲で認められるが、外周より内部燃料棒の方が長く、その値は $60\sim 140\text{mm}$ である。
- (5) 燃料棒の膨れ観察から、被覆管の周方向で温度差が存在すると、破裂開口は高温の方に向っているのが認められる。又、膨れは隣接燃料棒の破裂位置及び破裂時間等の相互関係で影響されていることが認められる。しかし、燃料棒同志における破裂の伝播は認められない。
- (6) 膨れ率は、多くの燃料棒が破裂した位置で大きくなり、集合体全域の最大膨れ率 99.4% となり、中心部燃料棒の 3×3 領域では 137.2% と最も大きな値を示す。
- (7) 最大流路閉塞率は集合体全域で 67.3% 、内部燃料棒の 5×5 領域で 78.1% となり、その位置は発熱長中心より 42.6mm 上方である。又、最大流路閉塞位置から上下 25mm にわたる範囲の平均流路閉塞率は集合体全域で 60% 、 5×5 領域で 58% となる。

参 照 文 献

- (1) Chapman, R.H. et al; ORNL/NUREG/TM-332(1979), 337(1979), 360(1980)
392(1980)
- (2) Erbacher, F.J., Neitzel, H.J., Wiehr, H.; ASTM-STP-681, 429(1978)
- (3) Erbacher; Proc. ANS Topical Meeting on Reactor Safety Aspects of
Fuel Behavior, 2-100(1981)

Table 1-1 AVERAGE HEATING RATE OF EACH THERMOCOUPLE

Ass. NO 7807

	1	2	3	4	5	6	7
	(°c/sec)						
A	6.5	8.1	7.6	7.5	7.9	8.1	7.2
B	6.1	8.3	8.6	8.6	8.6	8.6	8.3
C	5.5	8.4	9.1	8.9	9.1	8.8	8.4
D	7.3	7.8	8.9	8.8	8.7	8.8	8.7
E	5.9	7.6	9.2	8.9	9.0	8.9	8.8
F	* 1.5	6.6	9.1	9.3	—	8.1	7.7
G	5.7	9.0	8.0	—	7.9	7.1	7.7

Heating rate was obtained from the temperature increase in the time of which the temperature of the rod, D-4 Tc-2 changed from 500°C to burst (794°C)

* : Ruptured during the stand-by because of accidental electric power supply

Ass. No 7807 (70kg/cm²)

TABLE 1-2 AVERAGE HEATING RATE OF CLADDING

		(°C/sec)			
	A1	A2	A3	A4	
	6.8	7.2	8.1	8.1	
	6.5	8.1	7.6	7.5	
	6.9			7.9	
		B2	B3	B4	
Tc-1	→	8.5	8.6	8.7	
Tc-2	→	8.3	8.6	8.6	
Tc-3	→	8.4			
			C3	C4	
			9.1	8.8	
			9.1	8.9	
			9.0		
				D4	
				6.6	
Tc-S1	→			8.9	
Tc-1	→			8.8	
Tc-2	→			8.8	
Tc-3	→			5.8	
Tc-S2	→				

Heating rate was obtained from the temperature increase in the time of which the temperature of the rod, D-4 Tc-2 changed from 500°C to burst (794°C)

Table 2 AVERAGE HEATING RATE OF RODS FROM MAXIMUM TO BURST PRESSURE

Ass. No 7807

(°C/sec)

A1	6.6 5.5 7.1	A2	8.6 8.3	A3	9.6 8.4	A4	8.4 7.7 8.4
Tc-1	→	B2	8.3 8.3 10.3	B3	8.6 8.6	B4	9.9 8.9
Tc-2	→			C3	9.9 10.0 9.4	C4	7.4 8.1
Tc-3	→					D4	8.4 8.9 8.9 10.8 7.4
				Tc-S1	→		
				Tc-1	→		
				Tc-2	→		
				Tc-3	→		
				Tc-S2	→		

Table 3 RESULTS OF BURST PRESSURE AND BURST TIME

Ass. No 7807

	1	2	3	4	5	6	7
A	90-30	90-32	89-34	89-30	91-30	88-34	90-34
	51-50	82-48	84-48	82-50	83-50	80-50	84-50
B	89-30	90-34	90-34	91-36	89-32	92-34	92-34
	84-44	81-46	81-48	66-50	82-48	83-48	85-48
C	89-32	90-30	91-32	88-36	92-30	93-36	91-34
	83-42	83-44	84-46	81-48	81-48	39-48	81-48
D	92-24	91-26	92-32	88-34	90-30	91-32	92-32
	84-32	57-38	87-44	78-48	85-46	79-48	85-46
E	87 ^{**} (-66)	90-18	90-22	89-34	92-28	93-32	91-32
	86-12	88-26	39-40	78-46	87-44	84-46	78-48
F	*	88--70)	89-24	91-32	90-28	90-30	89-26
		87-16	85-36	83-44	41-46	79-46	82-44
G	88 ^{**} (-68)	88-16	90-22	87-26	93-32	90-30	90-32
	85 ^{**} (-6)	84-24	79-38	82-42	86-46	80-46	81-44

Pm-Tm

Pb-Tb

Pm: Maximum pressure (Kg/cm²)

Tm: Time of maximum pressure (sec)

Pb: Burst pressure (Kg/cm²)

Tb: Burst time (sec)

*: Ruptured during the stand-by because of accidental electric power supply.

**: Maximum pressure achieved during the stand-by because of accidental heat up of the neighbor rod. (negative sign indicates the time before start up)

Table 4 PRESSURE DECREASE AND DURATION BETWEEN MAXIMUM AND BURST PRESSURE AND PRESSURE DROP RATE

Ass. No 7807

	1	2	3	4	5	6	7
A	1.95 39 20	0.53 8 16	0.36 5 14	0.35 7 20	0.40 8 20	0.50 8 16	0.38 6 16
B	0.38 5 14	0.75 9 12	0.64 9 14	1.79 25 14	0.44 7 16	0.64 9 14	0.50 7 14
C	0.60 6 10	0.50 7 14	0.50 7 14	0.58 7 12	0.50 9 18	4.50 54 12	0.71 10 14
D	1.0 8 8	2.83 34 12	0.58 7 12	0.71 10 14	0.31 5 16	0.75 12 16	0.50 7 14
E	0.01 1 78	0.25 2 8	2.83 51 18	0.92 71 12	0.31 5 16	0.64 9 14	0.81 13 16
F		0.01 1 86	0.33 4 12	0.67 8 12	2.72 49 18	0.69 11 16	0.39 7 18
G	0.05 3 62	0.50 4 8	0.69 11 16	0.31 5 16	0.50 7 14	0.63 10 16	0.75 9 12

0.71
10
14

- ← Average pressure drop rate from maximum pressure to burst pressure (Kg/cm²/sec)
- ← Pressure drop (Kg/cm²)
- ← Duration of pressure drop (sec)

Table 5 AMOUNT OF BALLOONING AND CHANNEL BLOCKAGE IN 7807

D (MM)	BALLOONING (PERCENT)			CHANNEL BLOCKAGE (PERCENT)		
	7*7	5*5	3*3	7*7	5*5	3*3
232.8	14.3	12.2	11.2	12.8	16.5	
226.6	18.2	15.7	15.0	16.1	20.9	
222.9	19.4	16.7	16.4	16.8	22.3	
216.0	21.5	18.8	17.7	19.3	24.3	
212.3	20.6	18.1	17.4	18.4	23.2	
202.6	24.2	21.0	20.6	21.2	27.6	
195.9	26.6	22.2	22.1	22.2	31.3	
186.5	30.7	25.9	24.7	24.3	34.0	
183.1	32.5	27.5	26.1	25.8	35.6	
173.1	34.5	29.8	28.5	30.2	39.4	
166.4	38.3	34.5	33.9	34.8	42.3	
156.5	41.7	36.4	36.0	36.7	42.1	
153.2	43.2	36.4	37.1	36.1	50.3	
146.9	47.4	41.1	41.7	40.8	53.9	
143.5	46.9	41.5	42.5	41.0	52.5	
136.6	47.0	44.7	46.5	43.7	49.4	
126.5	50.5	49.7	47.6	43.8	49.9	
123.2	47.8	47.2	49.3	46.1	48.3	
116.6	53.1	53.9	56.6	52.5	52.1	
112.8	54.9	55.9	57.8	54.8	51.7	
106.1	57.2	60.0	62.3	58.7	54.3	
102.8	58.7	61.5	62.4	61.0	55.7	
96.9	61.6	67.6	71.9	65.2	55.4	
93.4	58.6	69.6	74.9	66.7	47.0	
86.6	66.6	77.8	79.5	76.8	54.9	
82.7	65.8	78.2	78.9	77.8	52.9	
76.3	72.3	87.9	88.9	87.4	56.0	
72.9	70.8	86.8	88.6	85.8	54.0	
66.5	79.2	94.7	98.0	92.8	63.0	
63.0	81.5	97.6	98.3	97.2	64.7	
56.7	93.4	112.9	107.2	116.2	73.0	
53.0	92.8	115.3	111.4	117.5	69.3	
45.8	99.1	125.3	131.6	121.7	71.8	
42.6	99.4	123.3	127.2	115.5	74.4	
36.4	97.1	112.6	128.2	103.9	80.8	
33.0	94.1	107.5	135.1	92.1	80.1	
26.0	89.4	101.8	133.8	83.9	76.4	
22.4	83.1	95.8	130.4	76.4	69.8	
16.3	74.0	83.4	98.8	74.8	64.2	
12.2	69.6	77.5	91.6	69.5	61.5	
5.9	63.6	68.8	74.6	65.6	58.2	
2.7	63.1	67.9	73.5	64.8	58.1	
-3.5	55.6	59.3	63.3	57.1	51.7	
-7.2	52.5	58.3	62.2	56.1	46.5	
-13.6	46.7	51.4	54.7	49.6	41.7	
-17.0	44.6	49.6	52.9	47.7	39.4	
-22.9	40.3	44.6	47.6	42.8	35.9	

D (MM)	BALLOONING (PERCENT)			CHANNEL BLOCKAGE (PERCENT)		
	7*7	5*5	3*3	7*7	5*5	3*3
-26.5	38.1	42.1	44.7	40.6	34.0	
-33.4	34.1	37.7	40.1	36.4	30.2	
-36.9	34.3	38.1	40.7	36.7	30.3	
-43.3	31.2	34.6	37.3	33.1	27.5	
-46.9	29.6	33.0	36.3	31.2	25.9	
-56.8	25.9	30.9	33.3	29.5	24.2	
-62.5	25.6	28.9	31.7	27.3	22.7	
-66.9	23.9	26.2	28.7	24.7	21.5	
-72.0	21.6	23.3	25.2	22.1	19.8	
-75.7	22.5	23.8	25.8	22.7	21.2	
-81.8	14.8	16.4	17.7	15.7	13.2	
-85.3	19.4	21.0	22.9	19.9	17.8	
-91.9	19.0	20.2	22.4	18.9	17.8	
-96.0	16.7	17.8	19.5	16.9	15.6	
-101.5	16.1	17.3	18.9	16.3	14.8	
-105.0	18.1	19.1	21.2	17.9	17.0	
-111.8	14.2	15.1	16.3	14.2	13.3	
-115.6	14.3	15.1	16.7	14.2	13.4	
-122.9	14.8	15.6	16.6	15.0	14.0	
-126.7	14.5	15.2	16.1	14.7	13.7	
-132.9	13.4	14.0	15.0	13.4	12.9	
-137.6	12.4	13.1	13.8	12.7	11.6	
-143.6	13.0	13.4	13.9	13.4	12.7	
-146.2	12.6	13.0	13.9	12.5	12.3	
-152.9	13.5	14.1	14.6	13.9	12.6	
-156.9	13.1	13.6	13.3	13.7	12.7	
-162.7	9.8	10.4	10.5	10.3	9.1	
-166.4	10.5	10.6	10.5	10.6	10.4	
-172.9	9.6	10.1	11.0	9.6	9.1	
-176.5	10.0	10.3	10.4	10.3	9.7	
-183.4	8.8	9.2	9.4	9.0	8.5	
-187.1	9.0	9.5	9.6	9.5	8.5	
-193.1	10.0	10.6	11.1	10.3	9.3	
-196.9	8.3	8.8	9.4	8.4	7.9	
-203.1	8.4	9.1	9.9	8.7	7.7	
-206.8	5.6	5.9	6.2	5.7	5.3	
-213.4	6.4	7.0	7.2	6.8	5.8	
-217.1	4.7	5.5	5.5	5.0	4.1	
-223.3	5.1	5.8	6.1	5.6	4.3	
-227.0	4.1	4.6	4.4	5.6	3.7	
-233.0	4.0	4.6	5.0	4.3	3.5	
-237.1	2.6	3.2	3.8	2.8	2.1	
-243.0	4.4	5.0	5.5	4.7	3.7	
-246.9	3.4	4.2	4.9	3.4	3.1	
-253.2	3.6	4.2	4.4	3.7	2.9	
-256.7	3.3	3.6	4.4	3.1	3.1	
-263.3	3.3	4.0	5.0	3.4	2.7	
-266.8	1.6	1.8	2.2	1.6	1.5	
-272.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.2	
-276.0	0.0	0.4	0.5	0.3	0.5	
-282.7	0.0	0.3	1.8	0.2	0.3	

D = DISTANCE FROM MIDPOINT.
 BALLOONING = INCREASE IN CROSS-SECTIONAL AREA
 CHANNEL BLOCKAGE = INSIDE THE ASSUMED BOUNDARY 7*7(100.1),5*5(71.5)

SKAKU = INTERIOR ZONE (16 RODS)
 7KAKU = EXTERIOR ZONE (24 RODS)

Table 6-1 MAXIMUM BALLOONING (%)

Zone	7x7	5x5	3x3	7 [□]	5 [□]
Max, Ballooning	99.4	125.3	137.2	80.8	121.7

Table 6-2 LENGTH OF BALLOONED REGION (mm)

Zone Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	7 [□]	5 [□]
126.6	0	0	25	0	0
100.	0	35	45	27	0
77.9	47	74	82	60	14
50.	125	135	140	130	150

126.6% : この膨れ量が境界内で膨れたと仮定すると、流路閉塞率が100%となる量

77.9% : 被覆管が等円に膨れたとすると、隣接燃料棒が接触する量

TABLE A-1 CHEMICAL COMPOSITION OF ZRY-4 (WT %)

Sn	Fe	Cr	Fe+Cr
1.54	0.20	0.11	0.31

									(ppm)
Al	B	Cd	C	Co	Cu	Hf	Mn	Si	
49	0.2	0.2	150	10	21	58	25	55	

									(ppm)
W	U	Ni	Cl	H	Pb	Mg	N	Ti	
25	1.4	35	5	5	25	10	33	25	

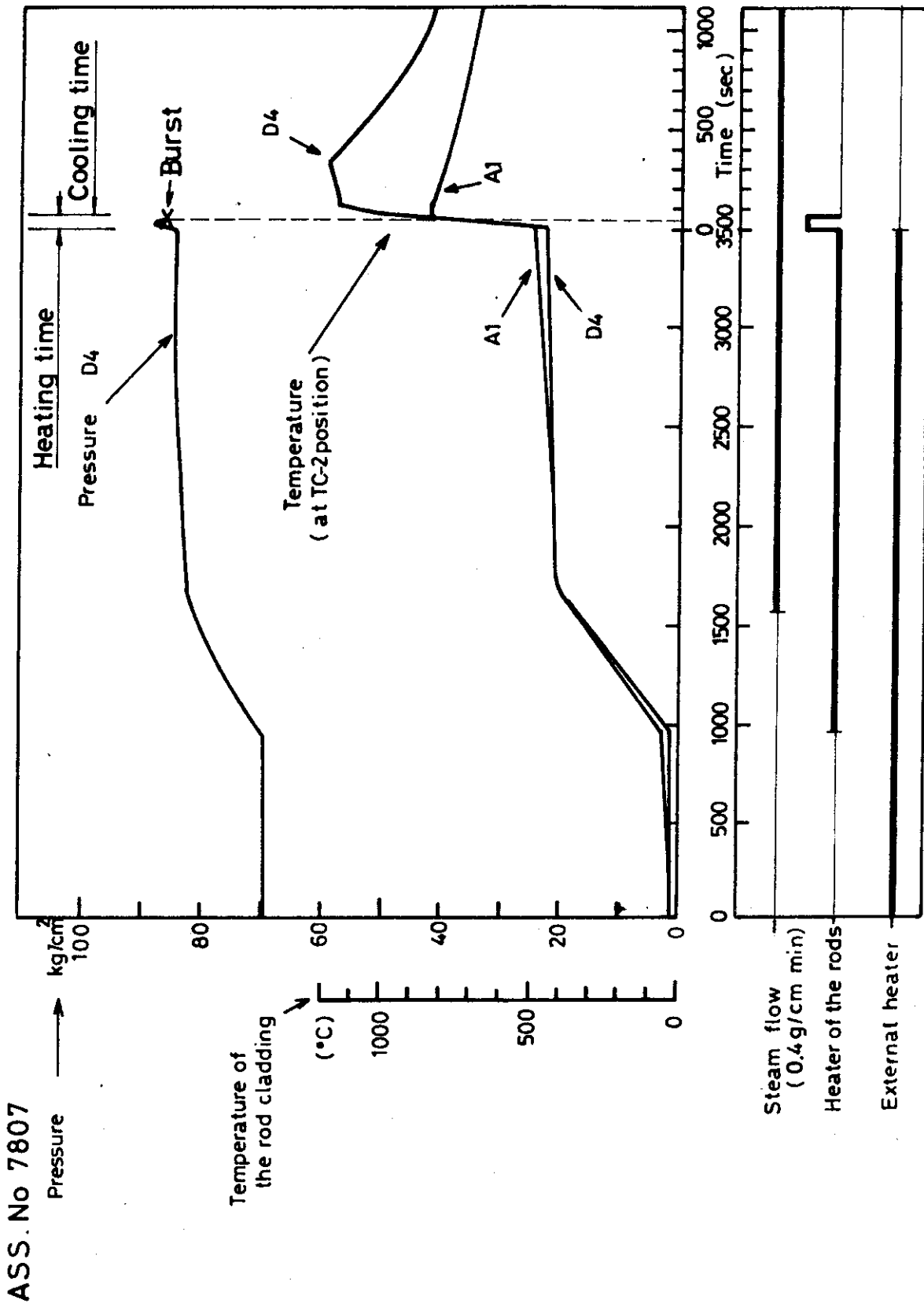


Fig 1 Histories of cladding temperatures internal pressures and operating conditions

ASS. No 7807

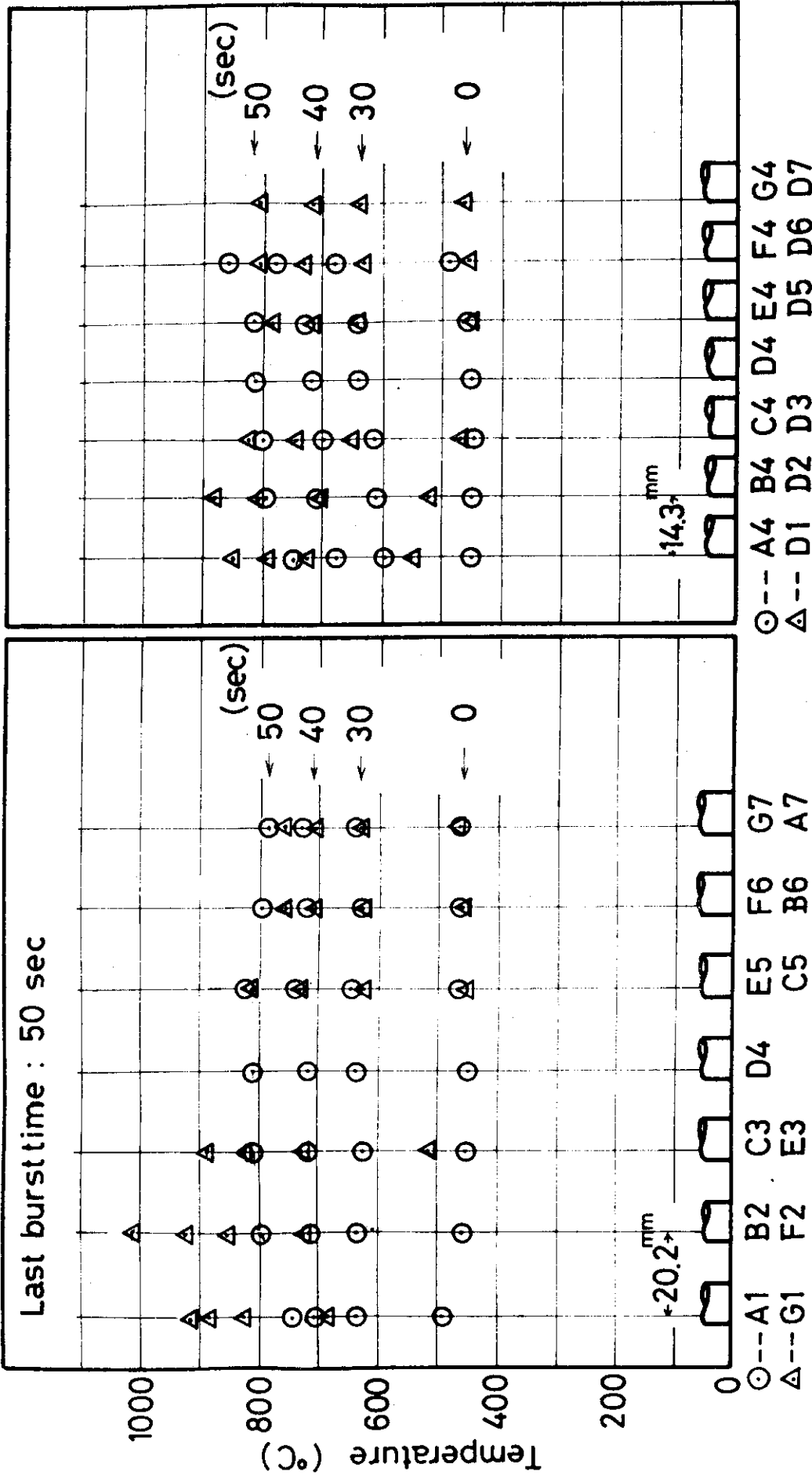


Fig 2-1 Horizontal temperature distribution of the Cladding as a function of time (at TC-2)

Ass. No 7807

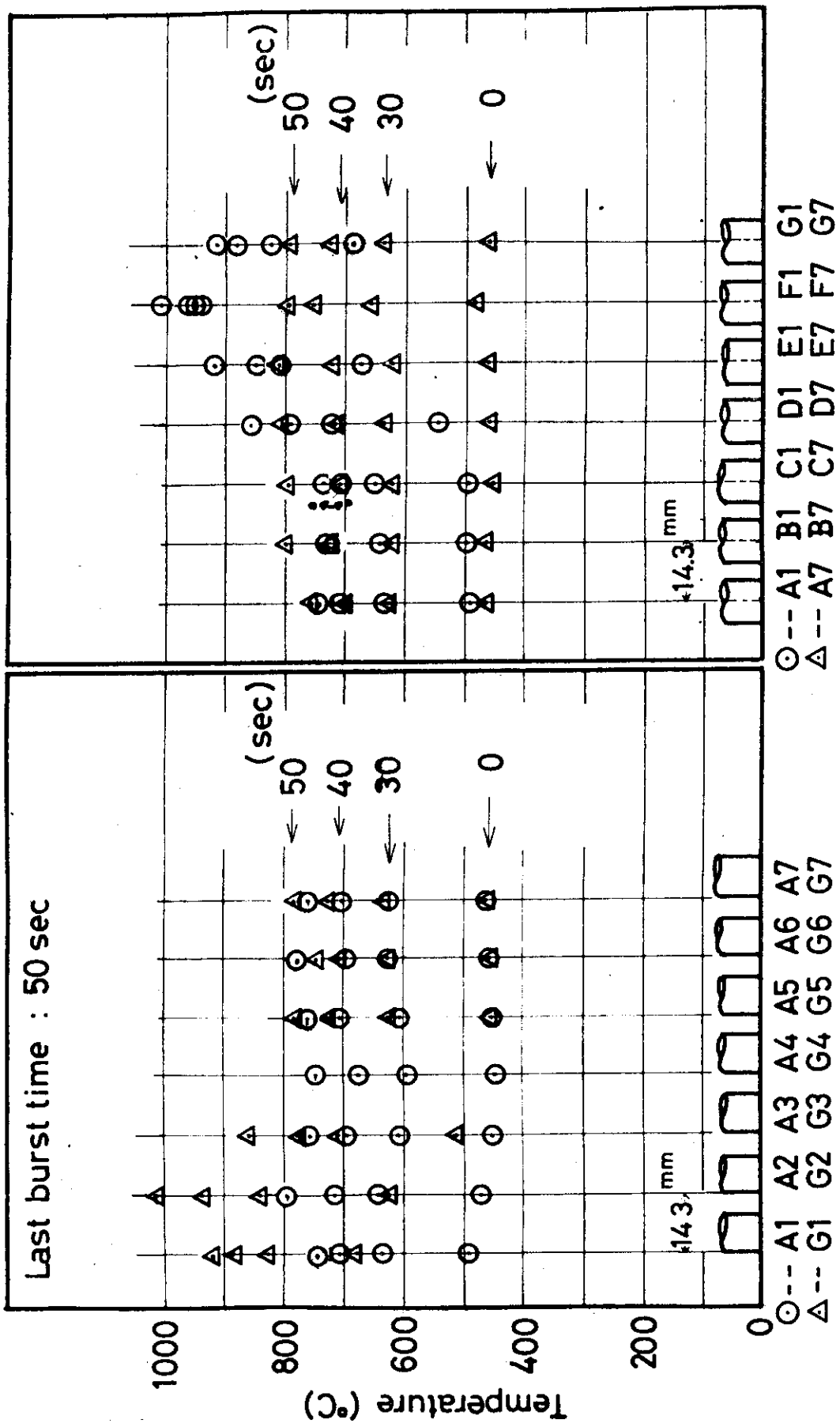


Fig 2-2 Horizontal temperature distribution of the cladding as a function of time (at TC-2)

ASS. No 7807

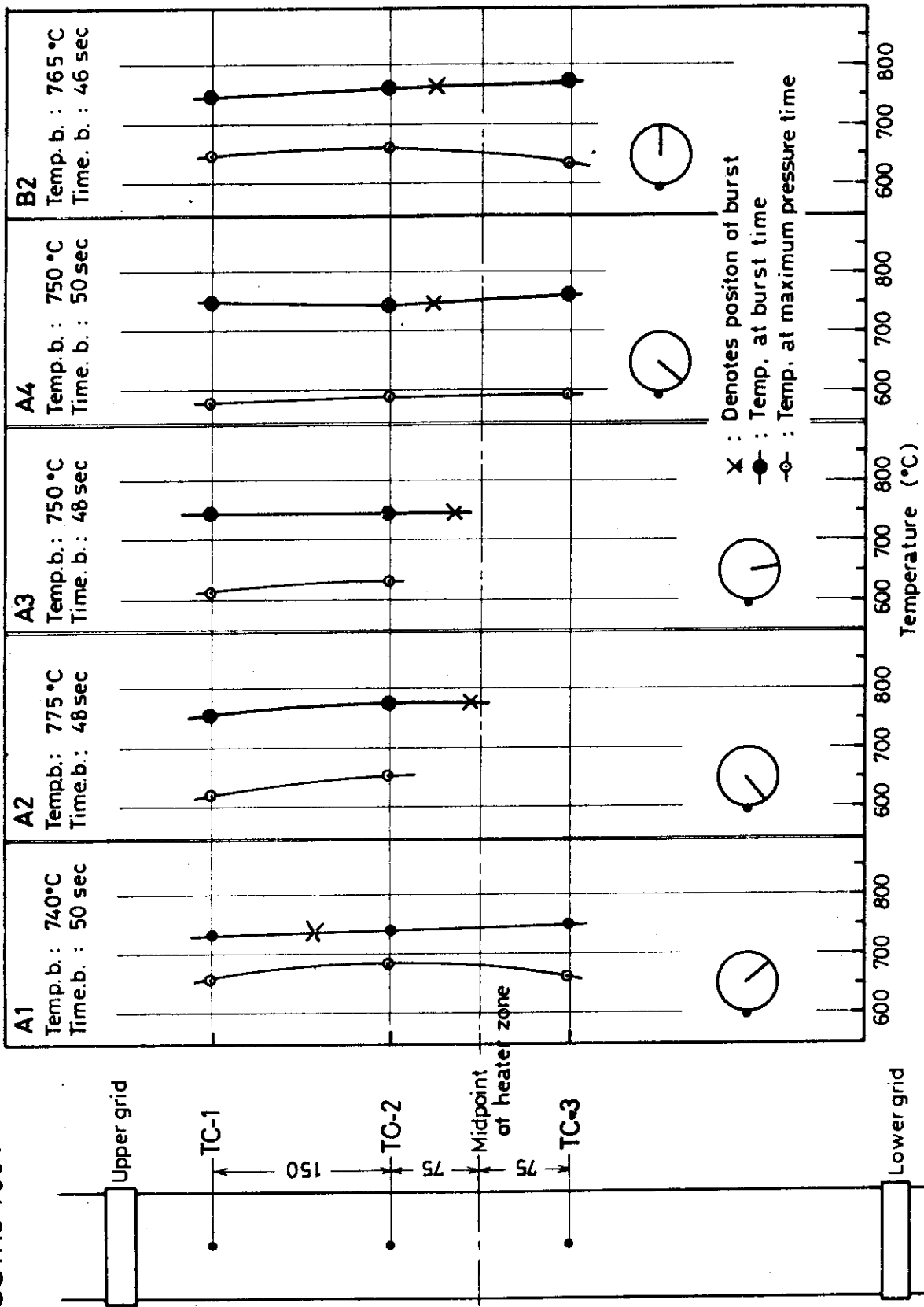


Fig 3-1 Axial distribution of temperature at burst time

ASS. No 7807

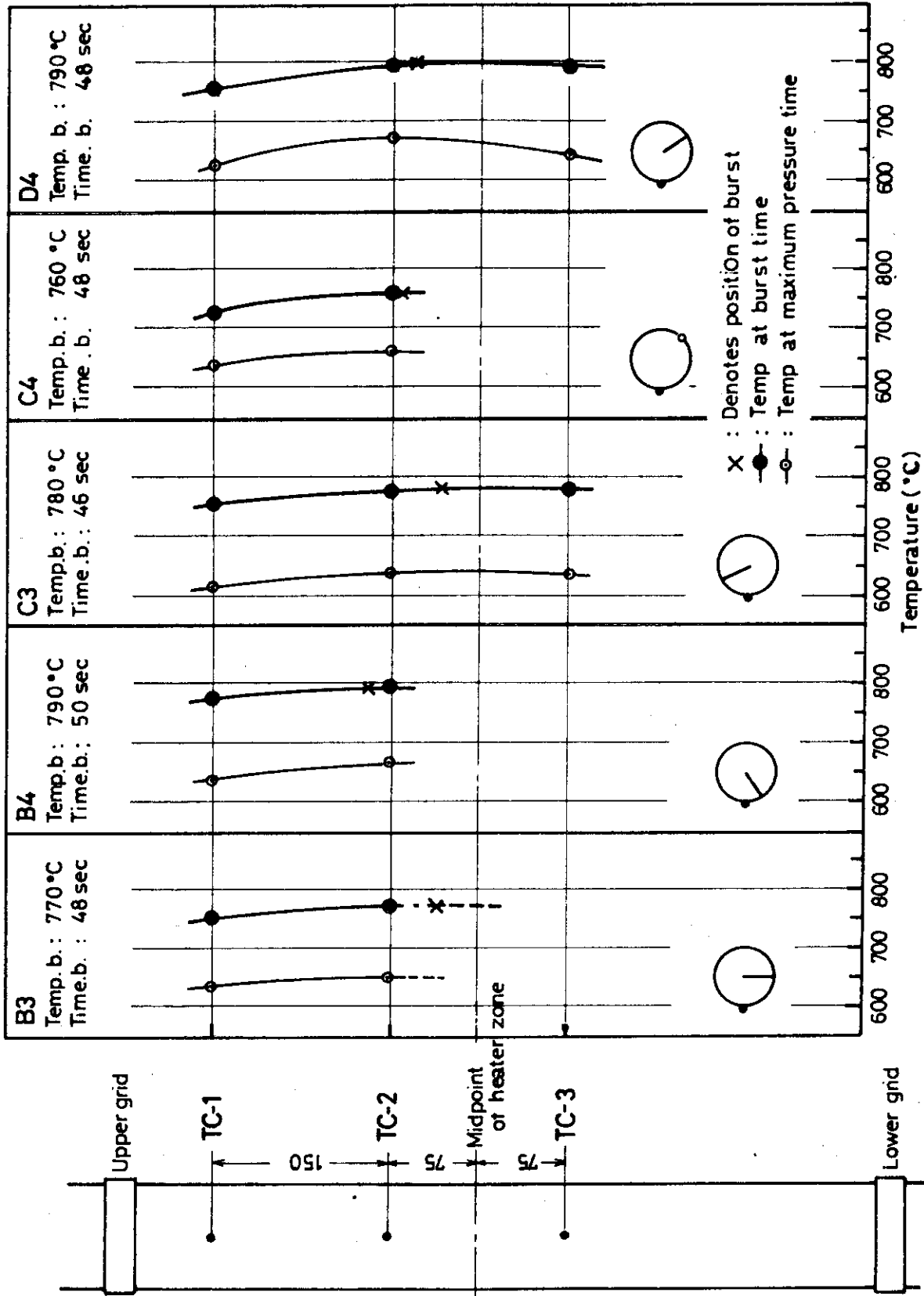


Fig 3-2 Axial distribution of temperature at burst time

Ass. No 7807

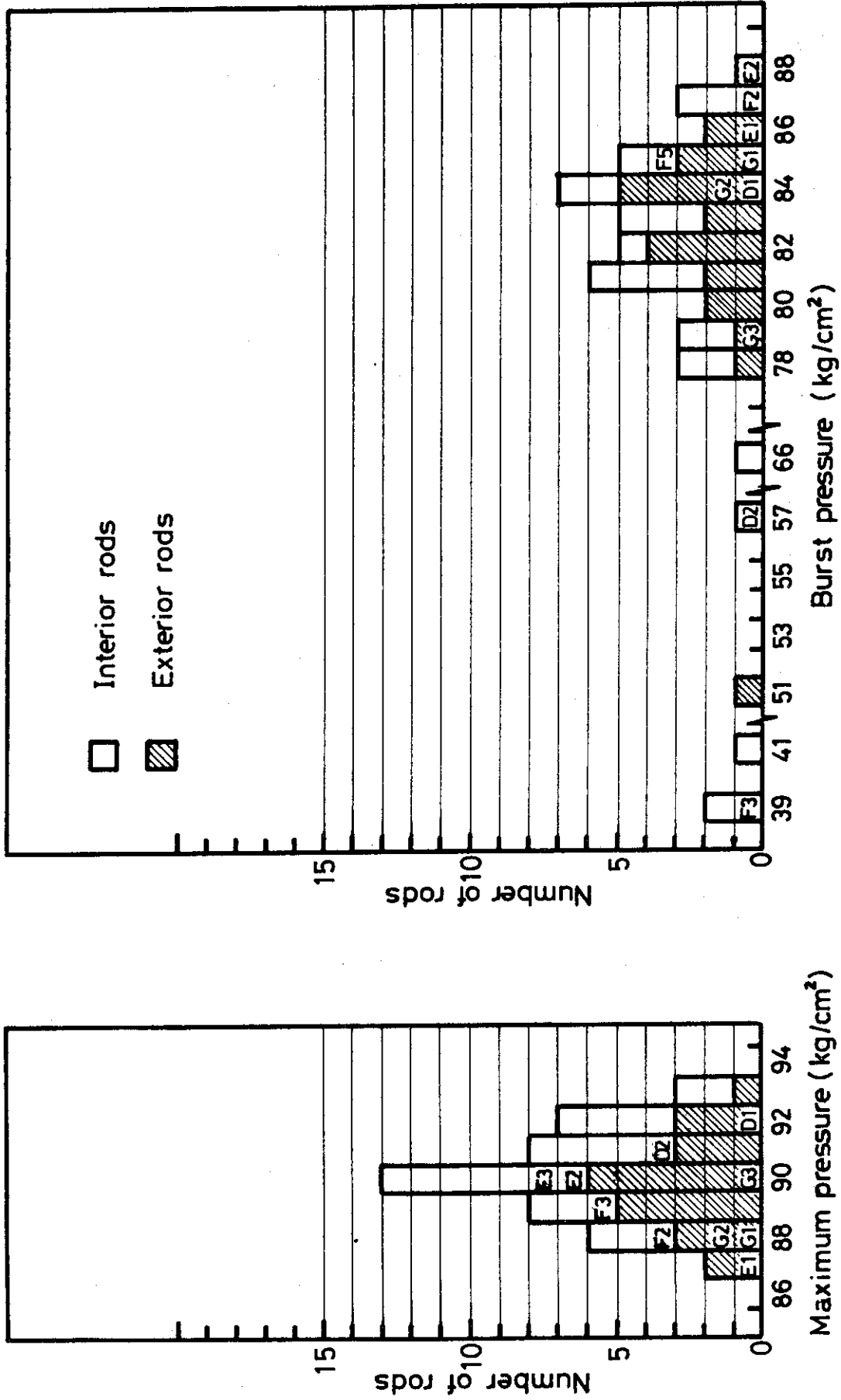


Fig 4 DISTRIBUTION OF MAXIMUM PRESSURE AND BURST PRESSURE

Ass.No 7807

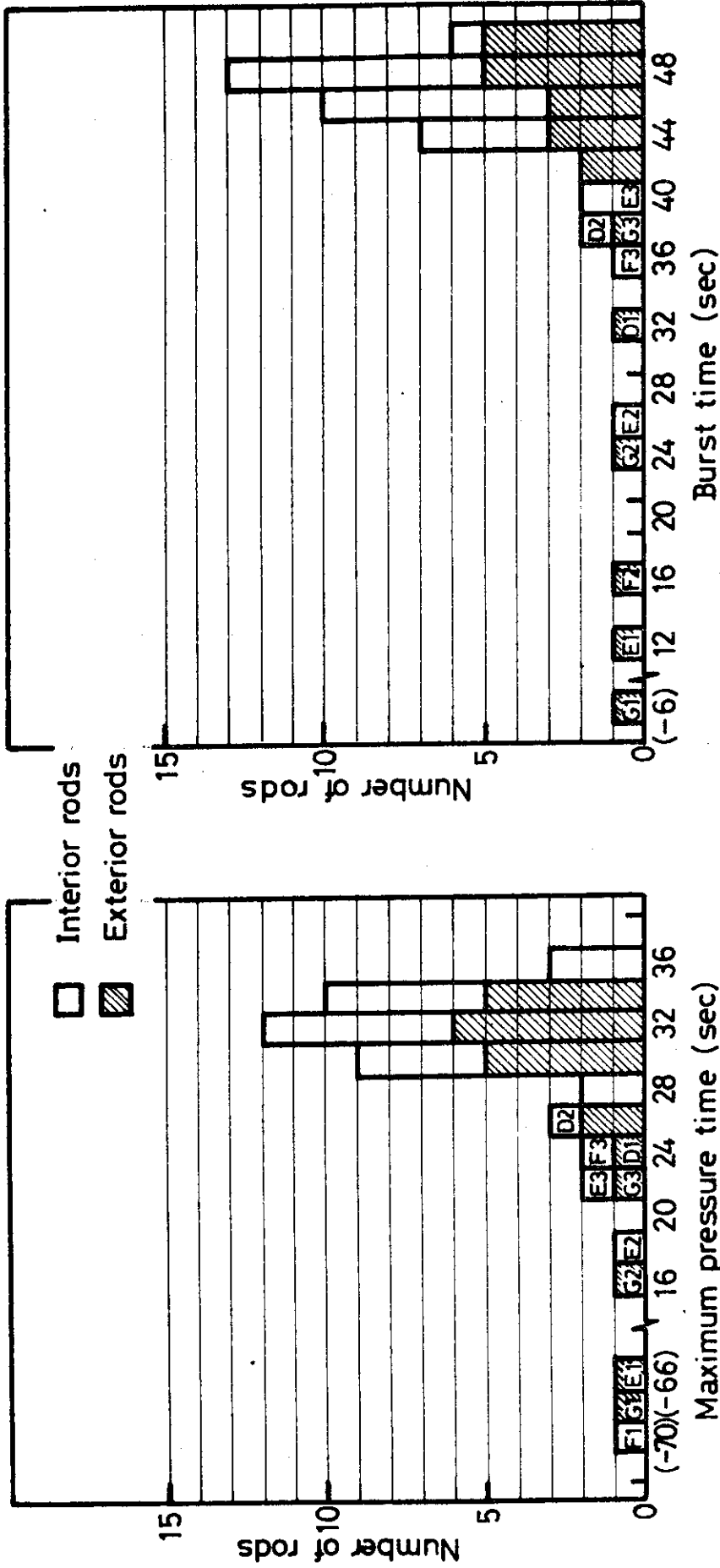


Fig 5 DISTRIBUTION OF MAXIMUM PRESSURE TIME AND BURST TIME

(Negative sign indicates the time before start up)

Ass. No 7807

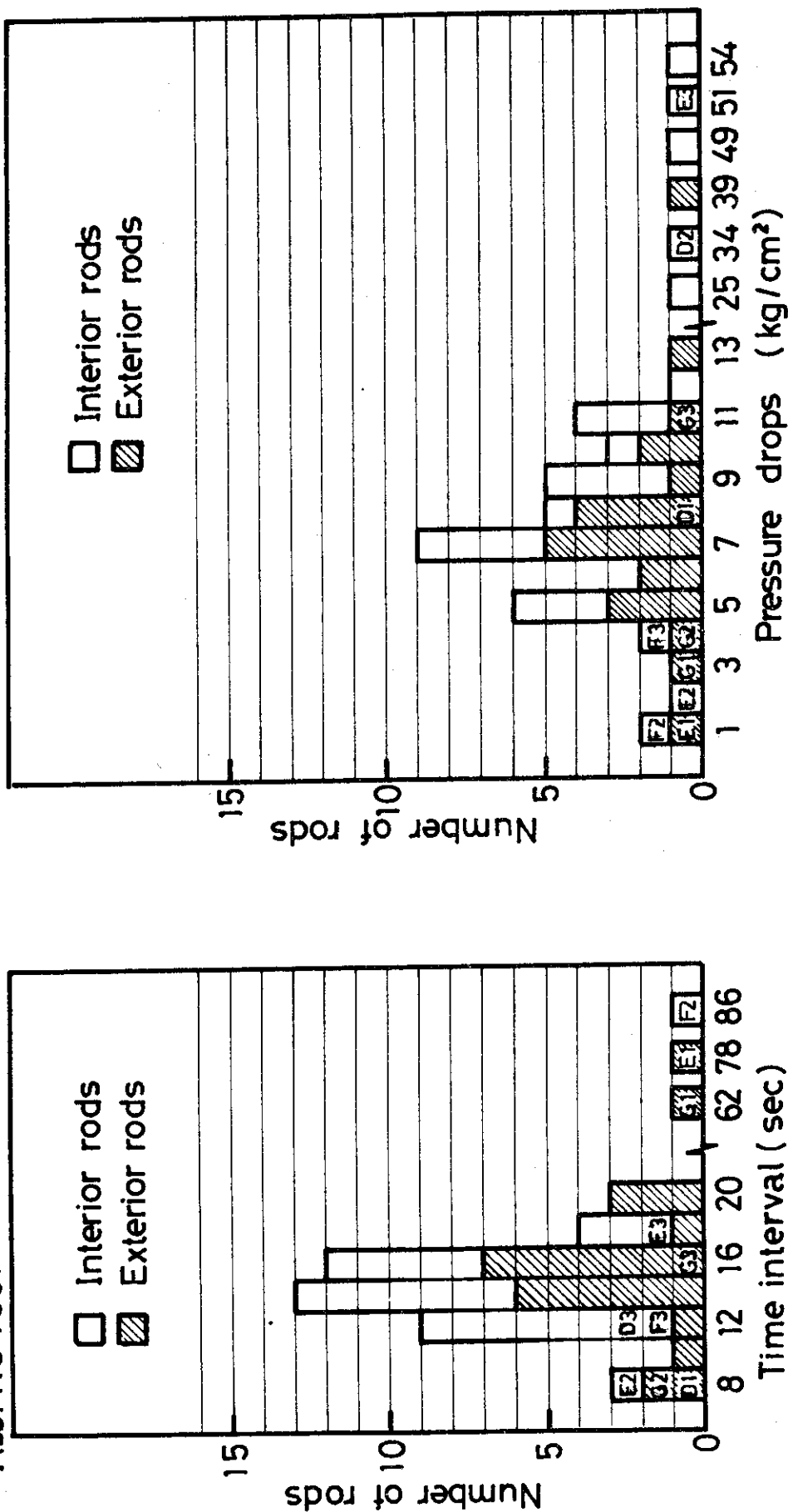


Fig 6 HISTOGRAMS OF TIME AND PRESSURE DECREASE FROM MAXIMUM PRESSURE TO BURST OF ROD SIMULATOR

Ass. No. 7807

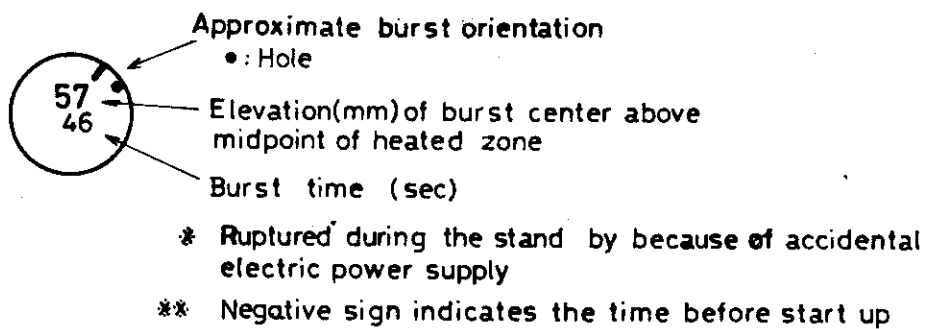
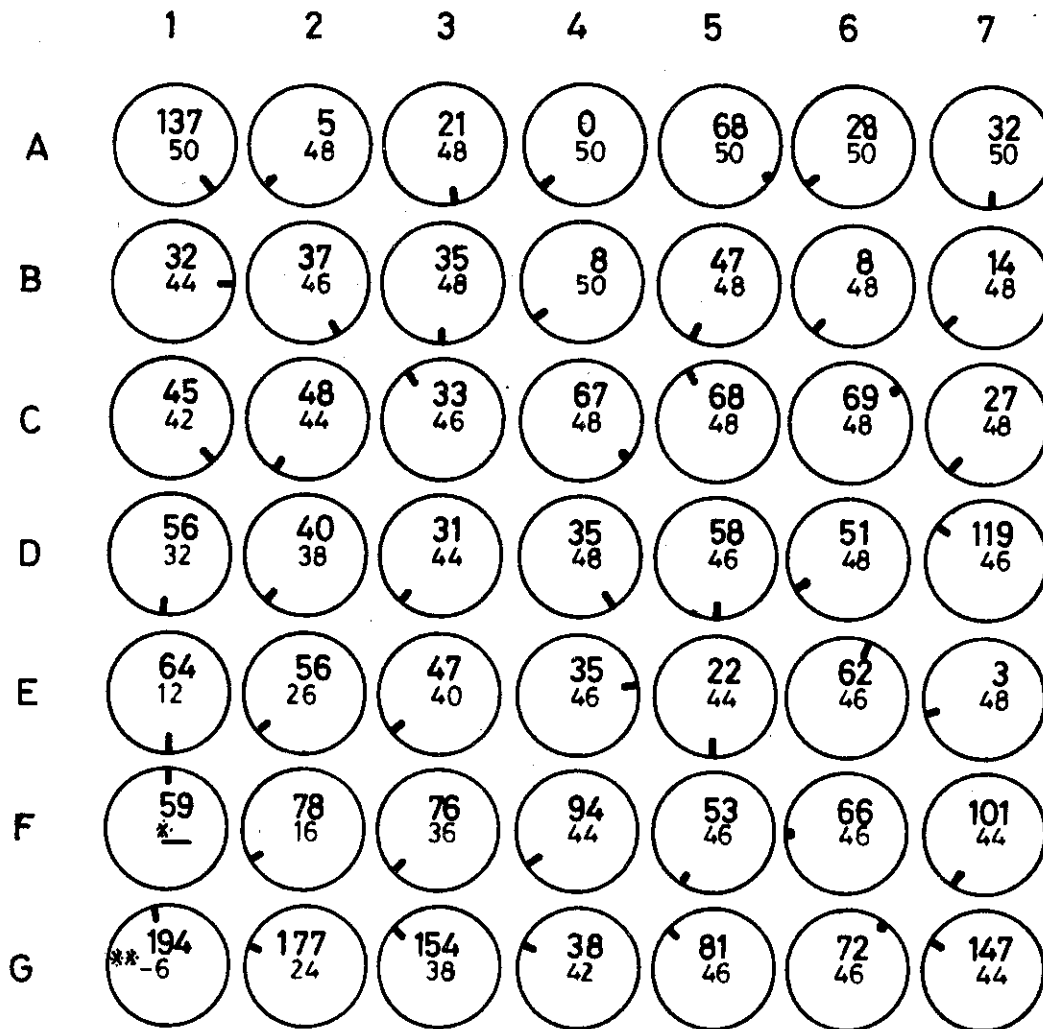


Fig 7 Approximate burst locations

Ass. No 7807

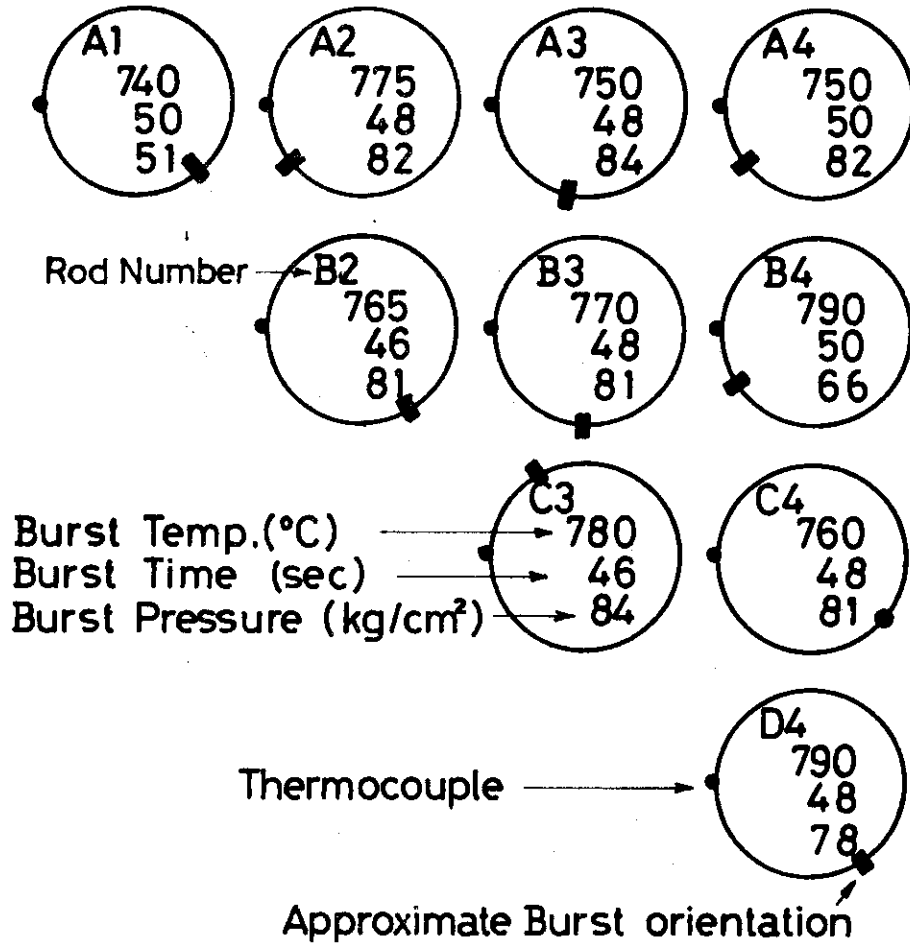


Fig 8 SUMMARY OF BURST DATA

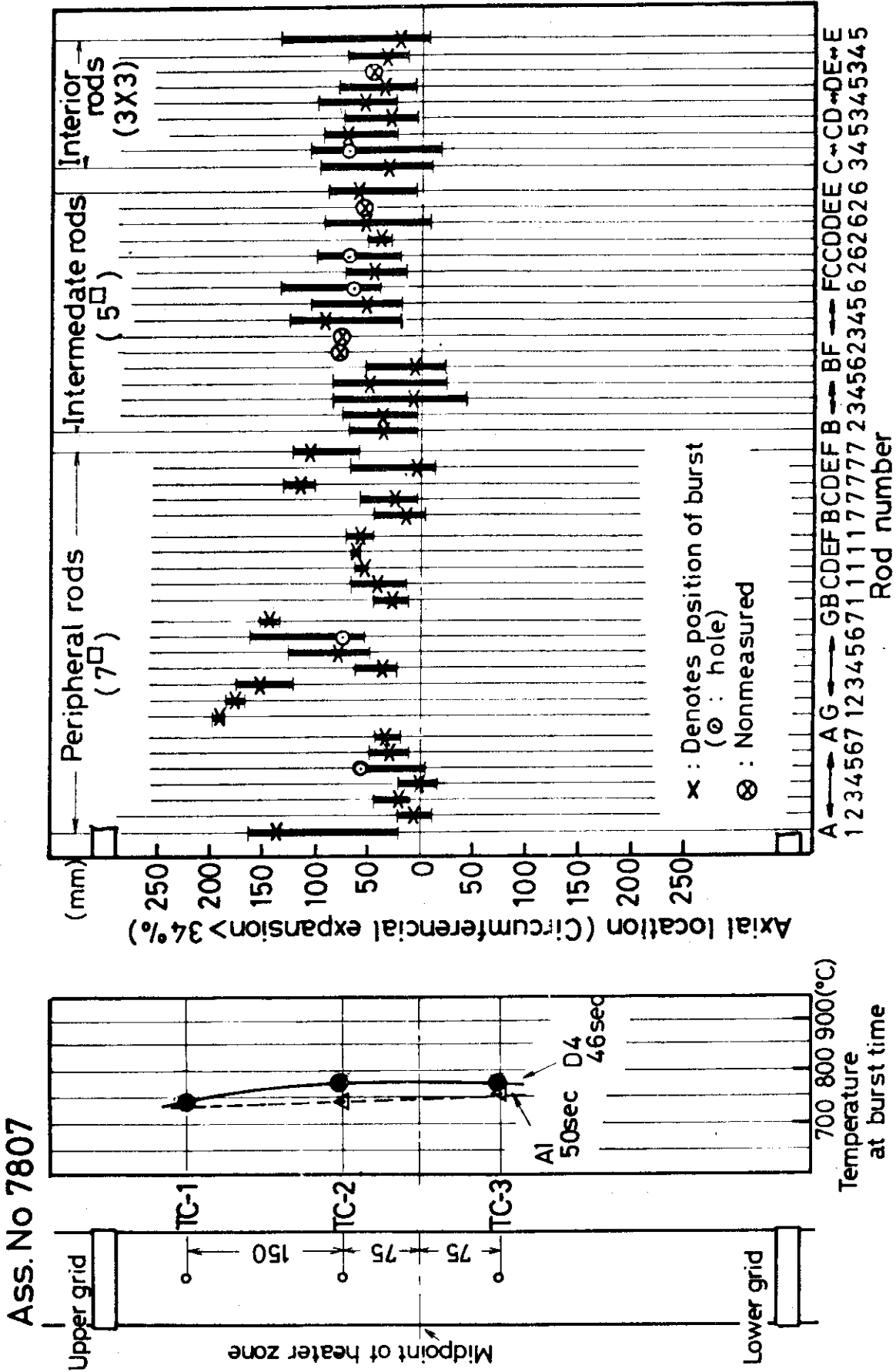


Fig 9 AXIAL LOCATIONS OF BURST POSITION AND BALLOONED REGION

Ass. No 7807

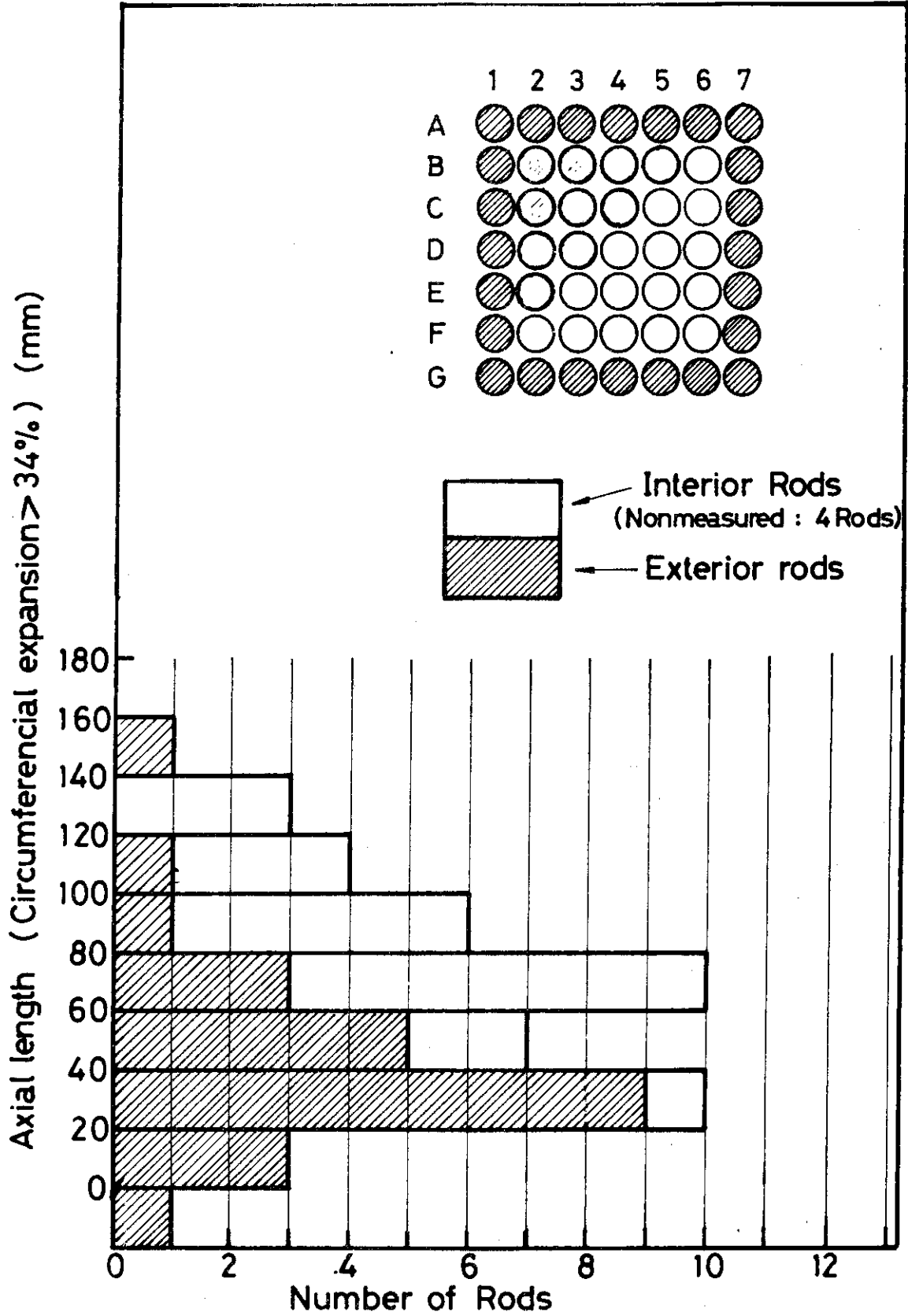


Fig 10 FREQUENCY DISTRIBUTION OF BALLOOND REGION (EXPANDED ABOVE 34 %)

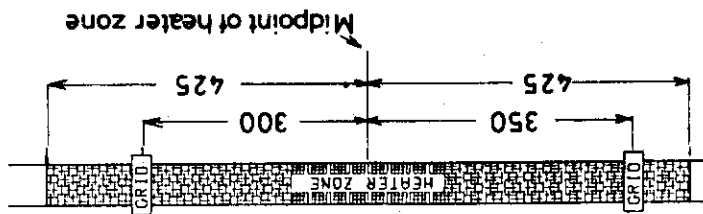
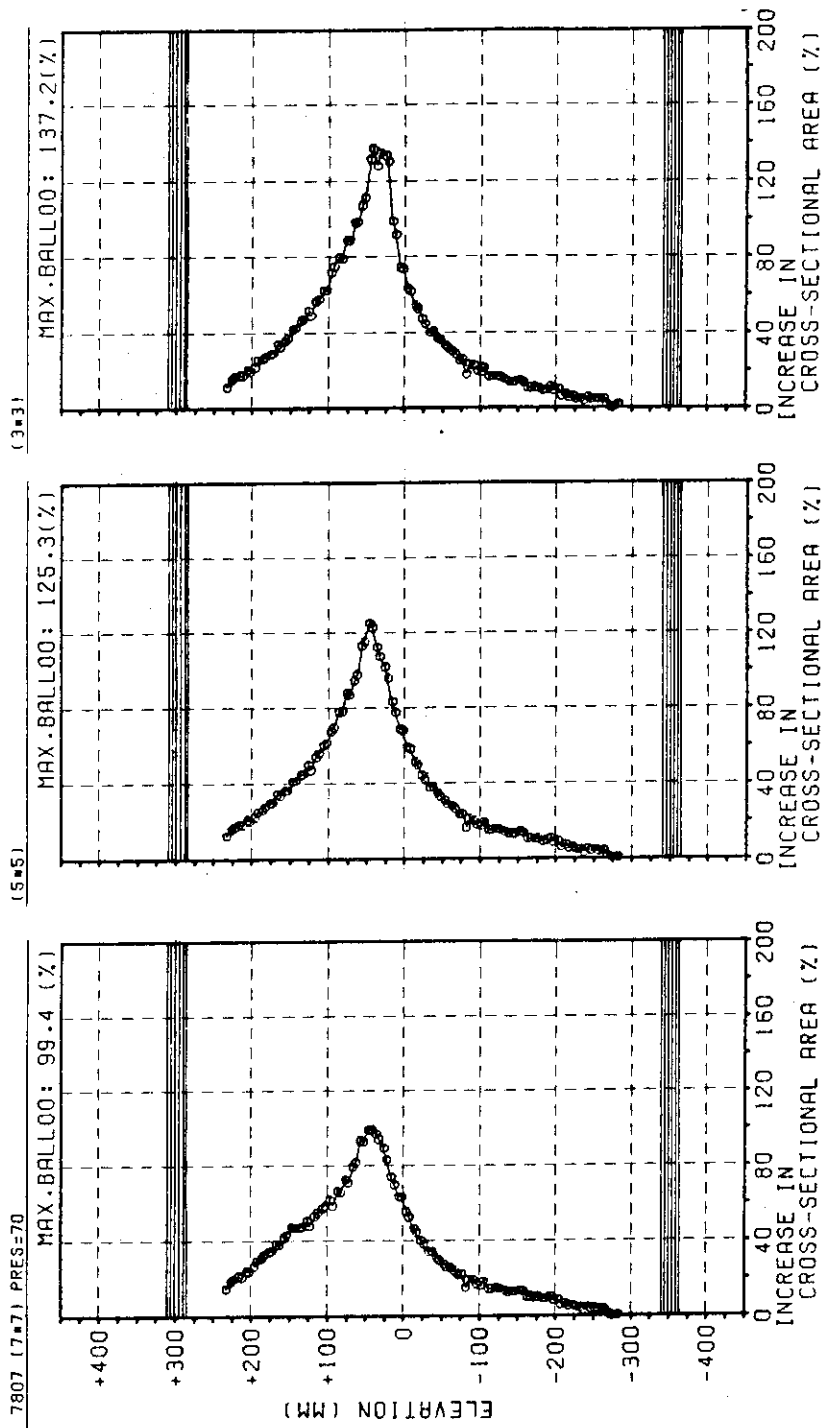


Fig 11-1 AXIAL DISTRIBUTION OF BALLOONING

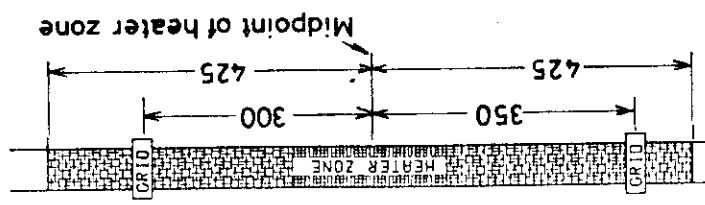
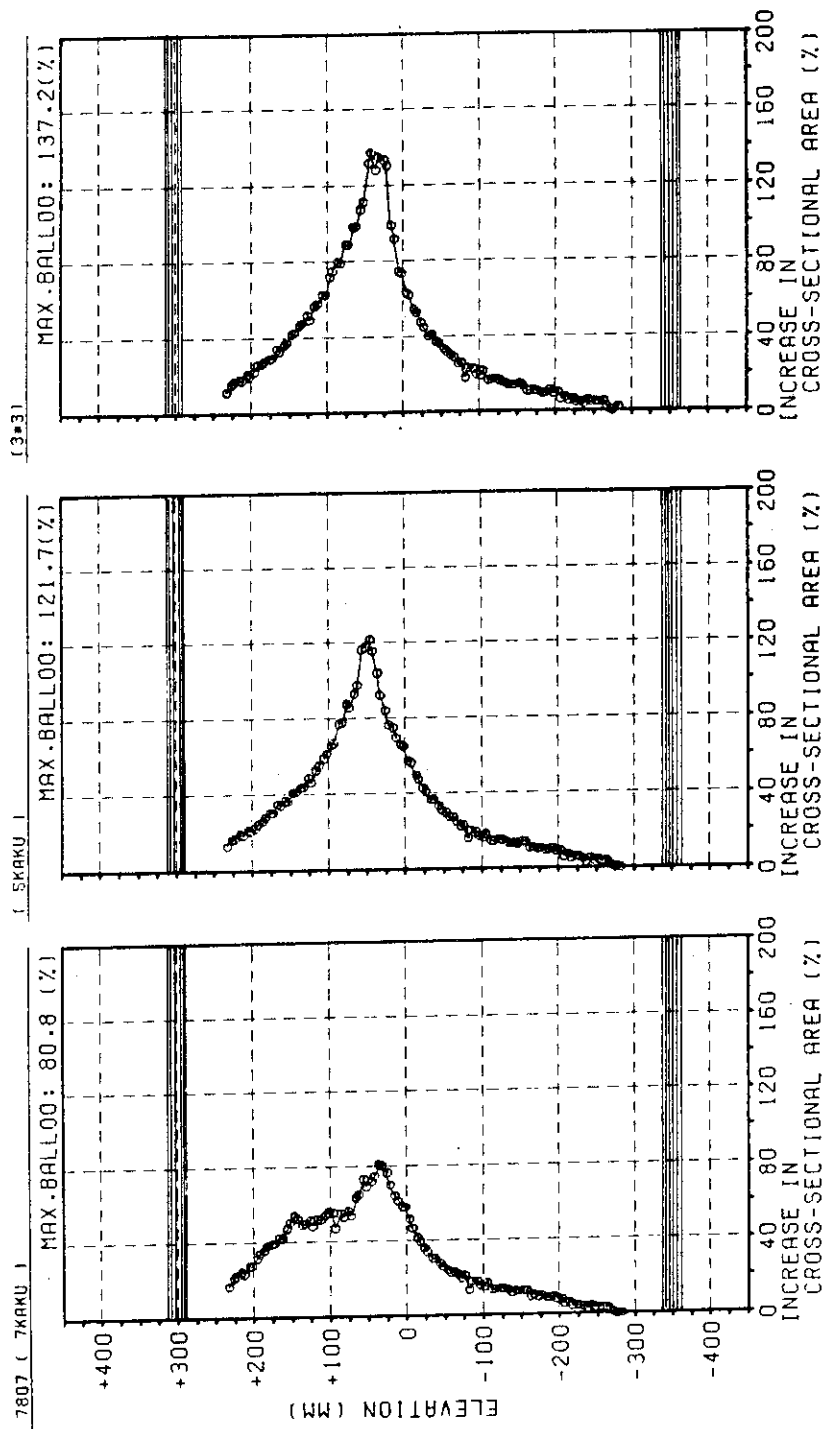


Fig 11-2 AXIAL DISTRIBUTION OF BALLOONING

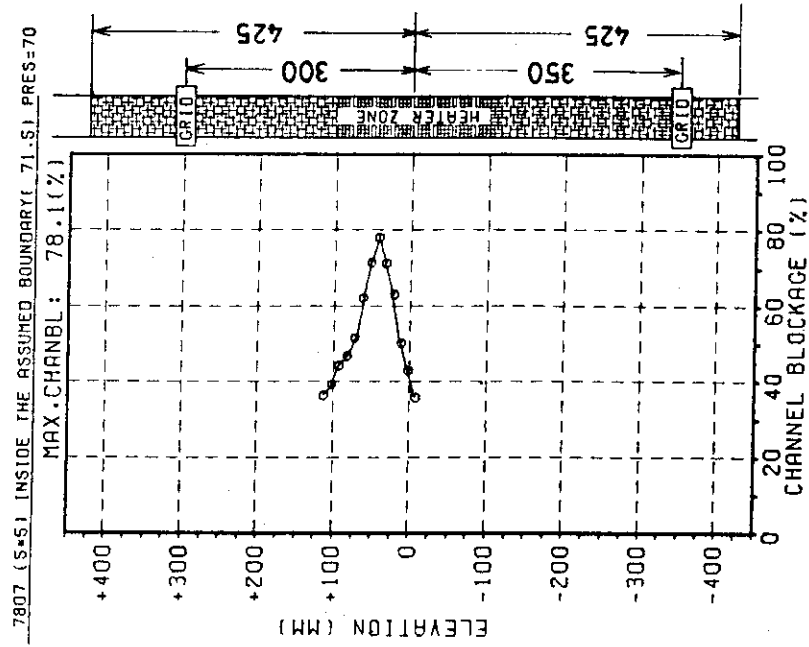


Fig 12-2 AXIAL DISTRIBUTION OF CHANNEL BLOCKAGE.

STEAM FLOW RATE 0.40(G/CM2.MIN)
 INI.INT.PRESS. 70 (KG/CM2)
 HEATING RATE 5.9-7.2 (C /SEC) (430-830 C)
 BURST TEMP. 750 -790 (C)
 CHANBL=((TCSA-SO1)/(ASSEM-SO1))*100
 SO(INI. AREA)= 2256.4 (MM2)
 ASSEM= S112.3 (MM2)
 QTHMAG= 0.0250000 (MM2/PP2)
 TEST DATE 1978 - 10 - 17

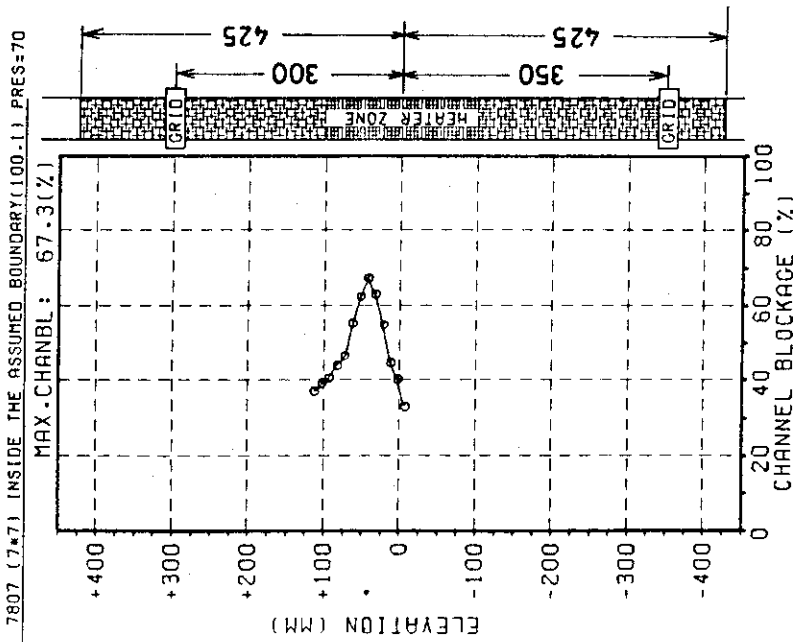


Fig 12-1 AXIAL DISTRIBUTION OF CHANNEL BLOCKAGE.

STEAM FLOW RATE 0.40(G/CM2.MIN)
 INI.INT.PRESS. 70 (KG/CM2)
 HEATING RATE 5.9-7.2 (C /SEC) (430-830 C)
 BURST TEMP. 750 -790 (C)
 CHANBL=((TCSA-SO1)/(ASSEM-SO1))*100
 SO(INI. AREA)= 4422.6 (MM2)
 ASSEM= 10020.0 (MM2)
 QTHMAG= 0.0250000 (MM2/PP2)
 TEST DATE 1978 - 10 - 17

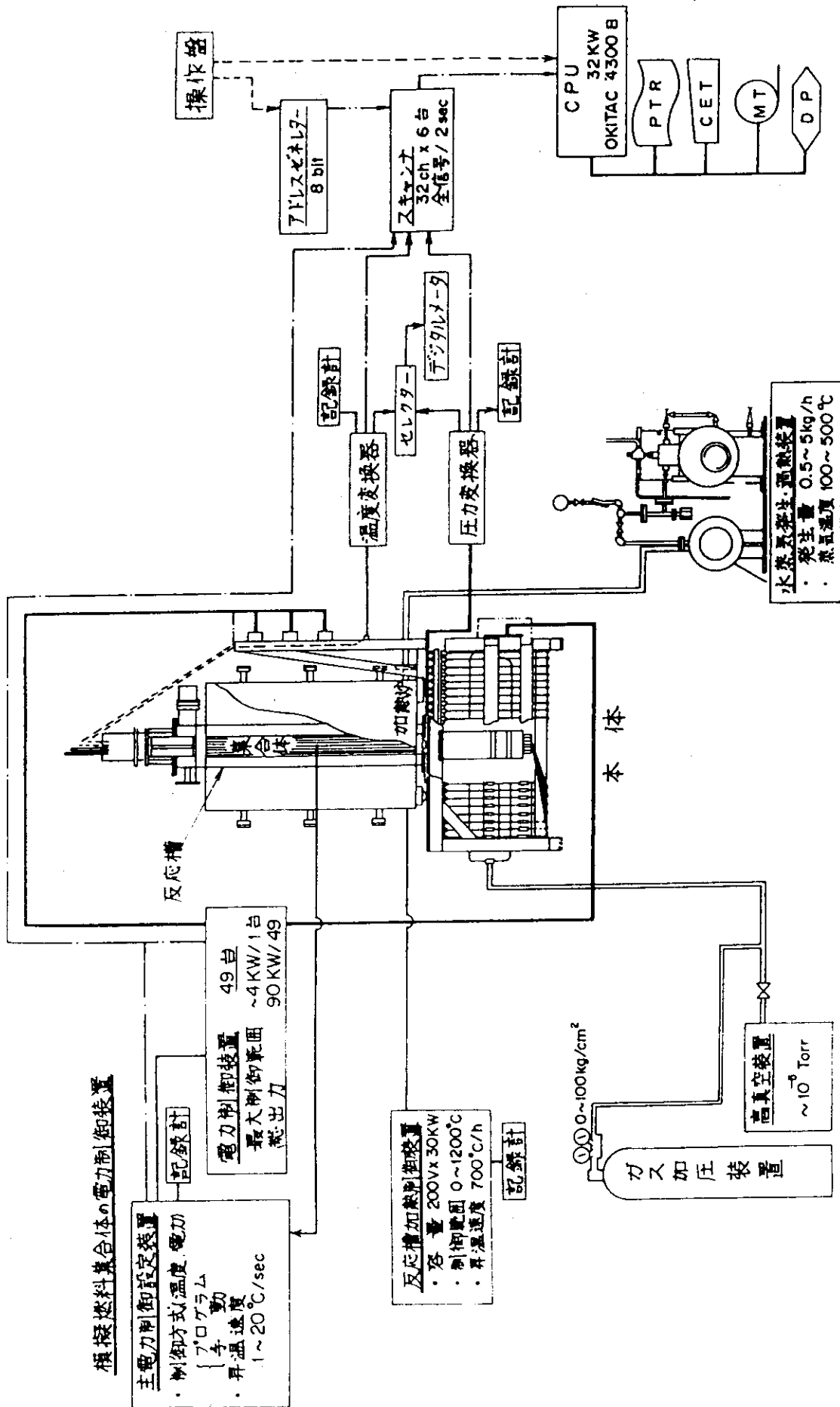
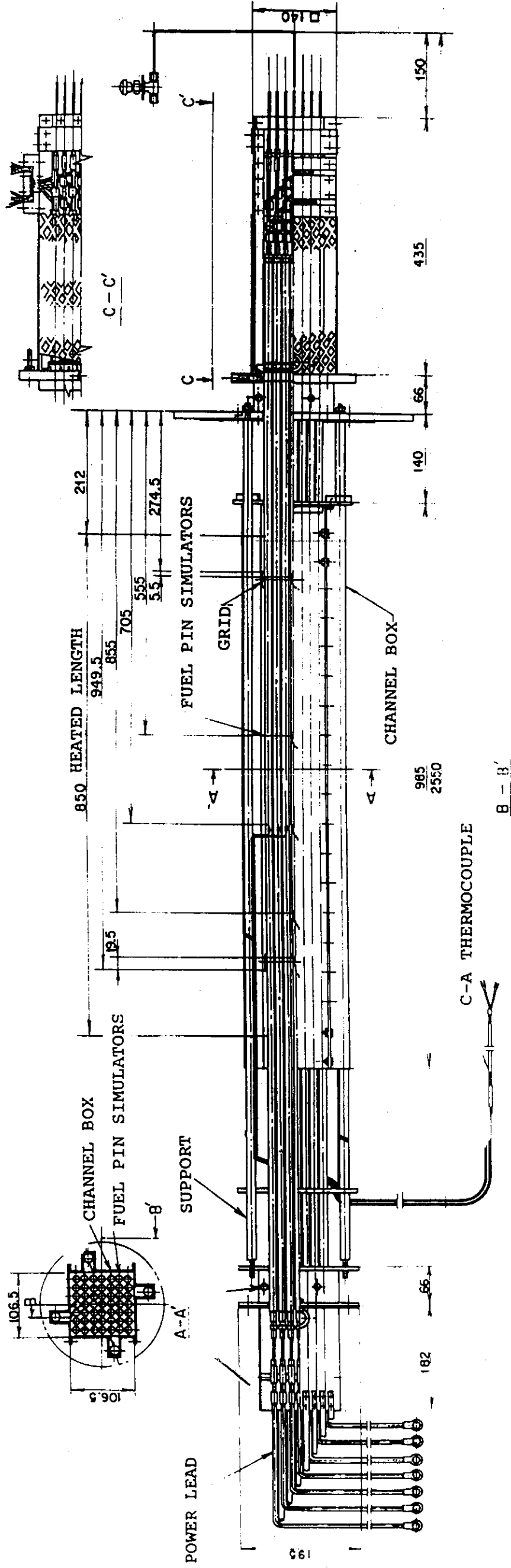
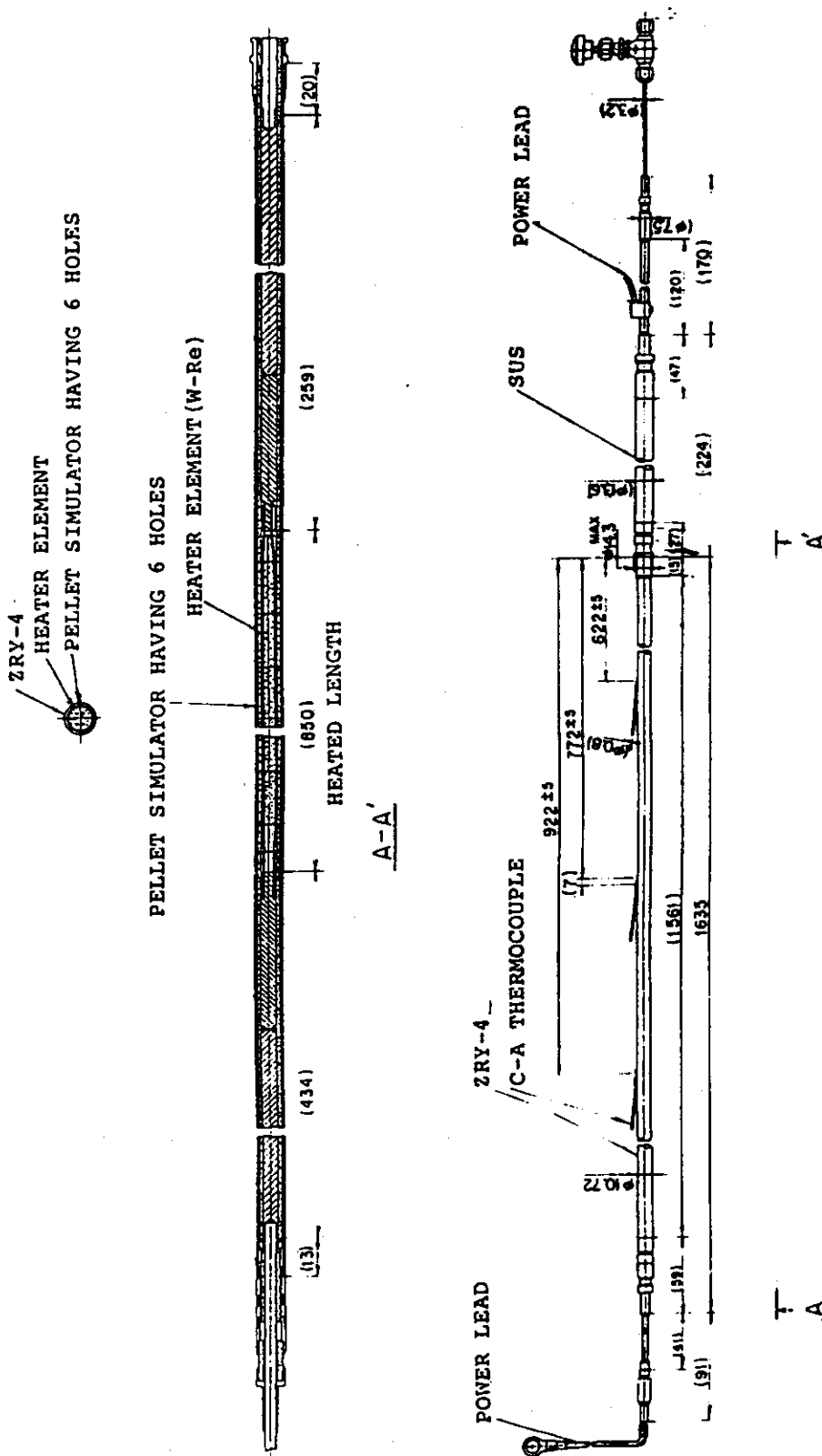


Fig.A-1 SCHEMATIC DIAGRAM OF A FACILITY FOR BURST TEST OF A FUEL ASSEMBLY.



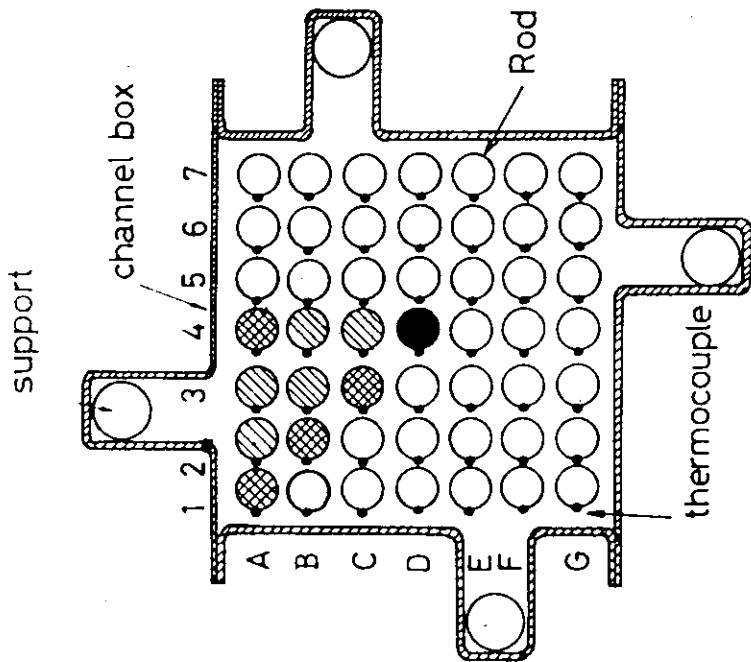
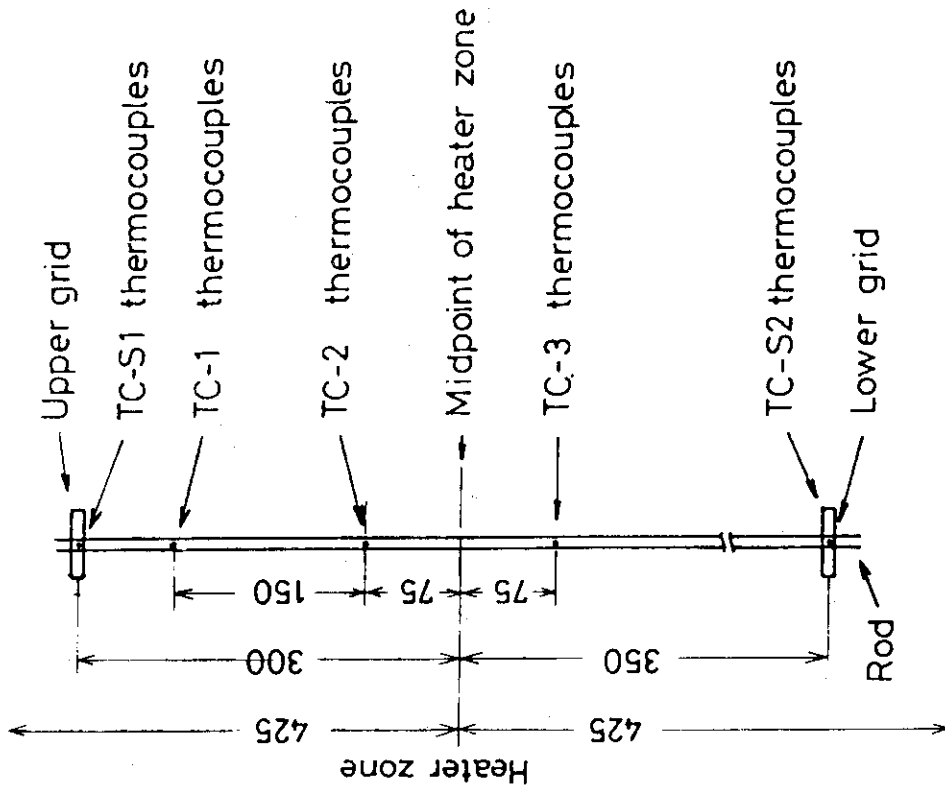
FUEL ASSEMBLY SIMULATOR

Fig.A-2 SCHEMATIC OF 7806 TEST ASSEMBLY.



FUEL PIN SIMULATOR (W-Re 0.6 φ)

Fig.A-3 TYPICAL FUEL PIN SIMULATOR.



- TC-2 thermocouple
- ▨ TC-1 and TC-2 thermocouple
- ▩ TC-1, TC-2 and TC-3 thermocouple
- TC-1, TC-2, TC-3, TC-S1 and TC-S2 thermocouple

Radial locations of thermocouple

Axial locations of thermocouple

Fig.A-4 LOCATIONS OF THERMOCOUPLE.

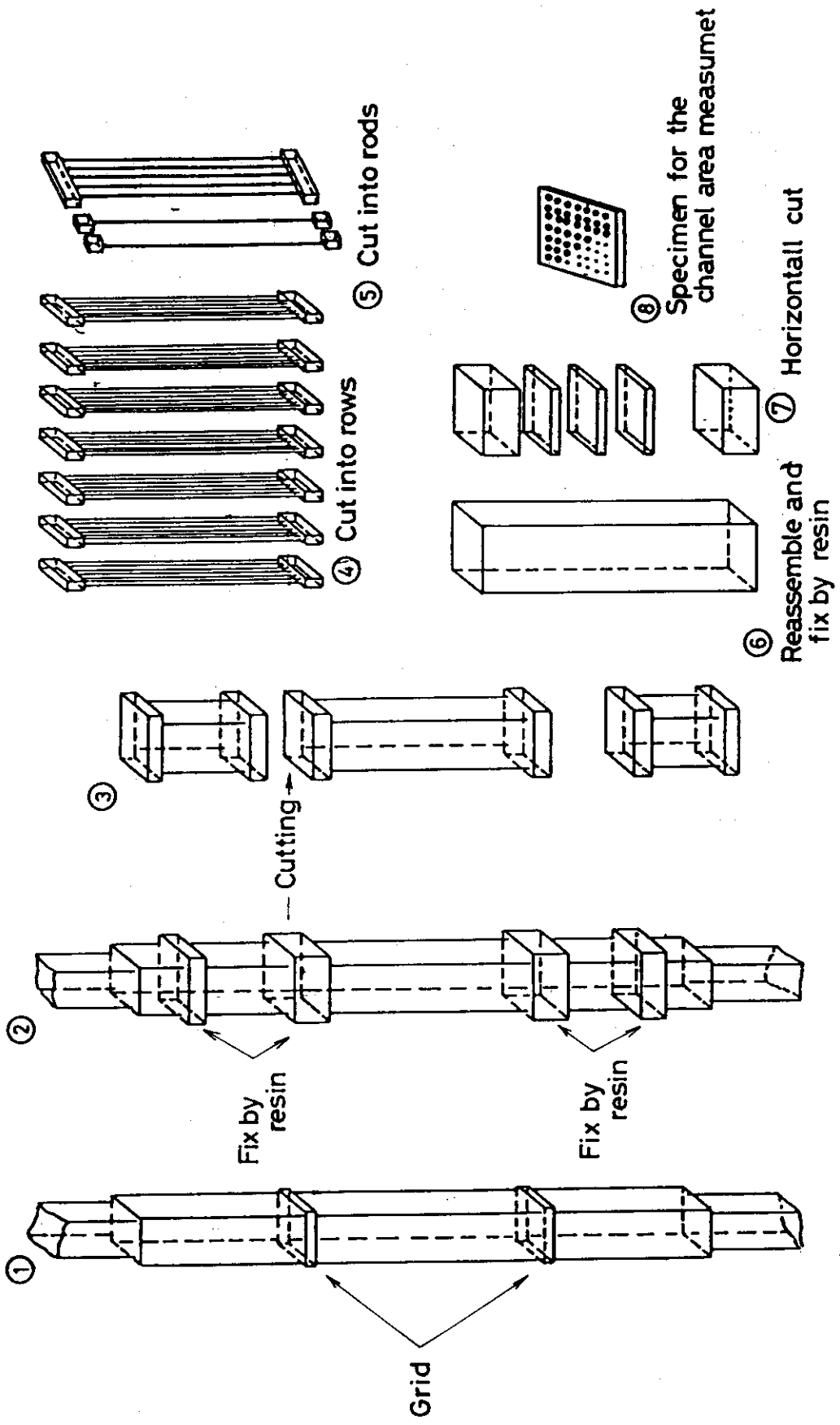


Fig A-5 SEQUENCE OF THE POST BURST EXAMINATION OF AN ASSEMBLY

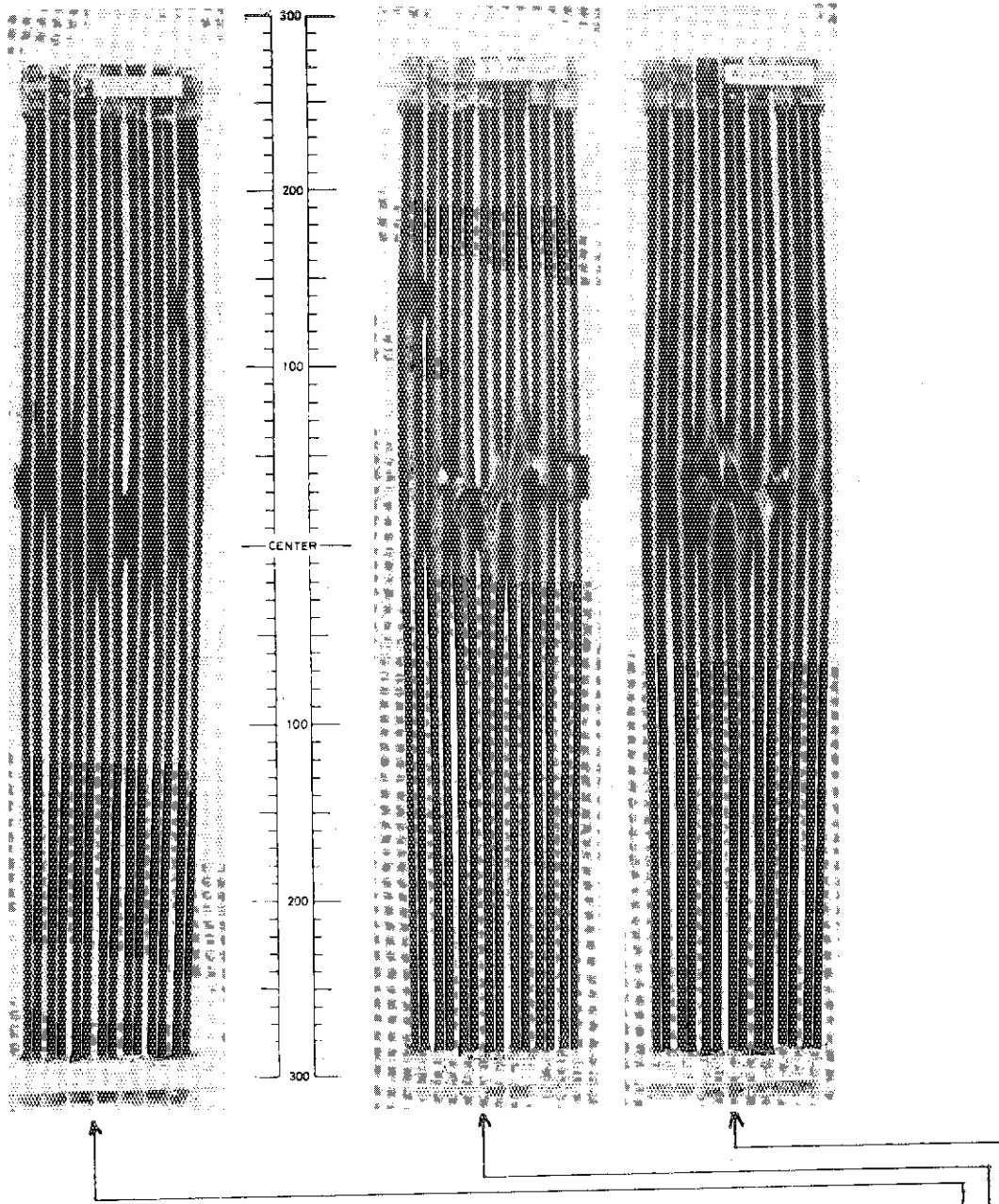
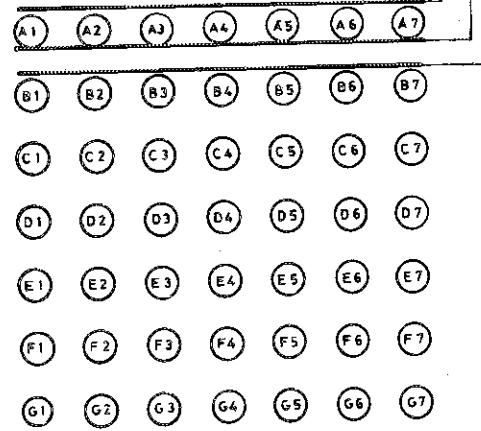


Photo.1-1 THE SIDE VIEWS OF A FUEL BUNDLE BURST AND CUT VERTICALLY.



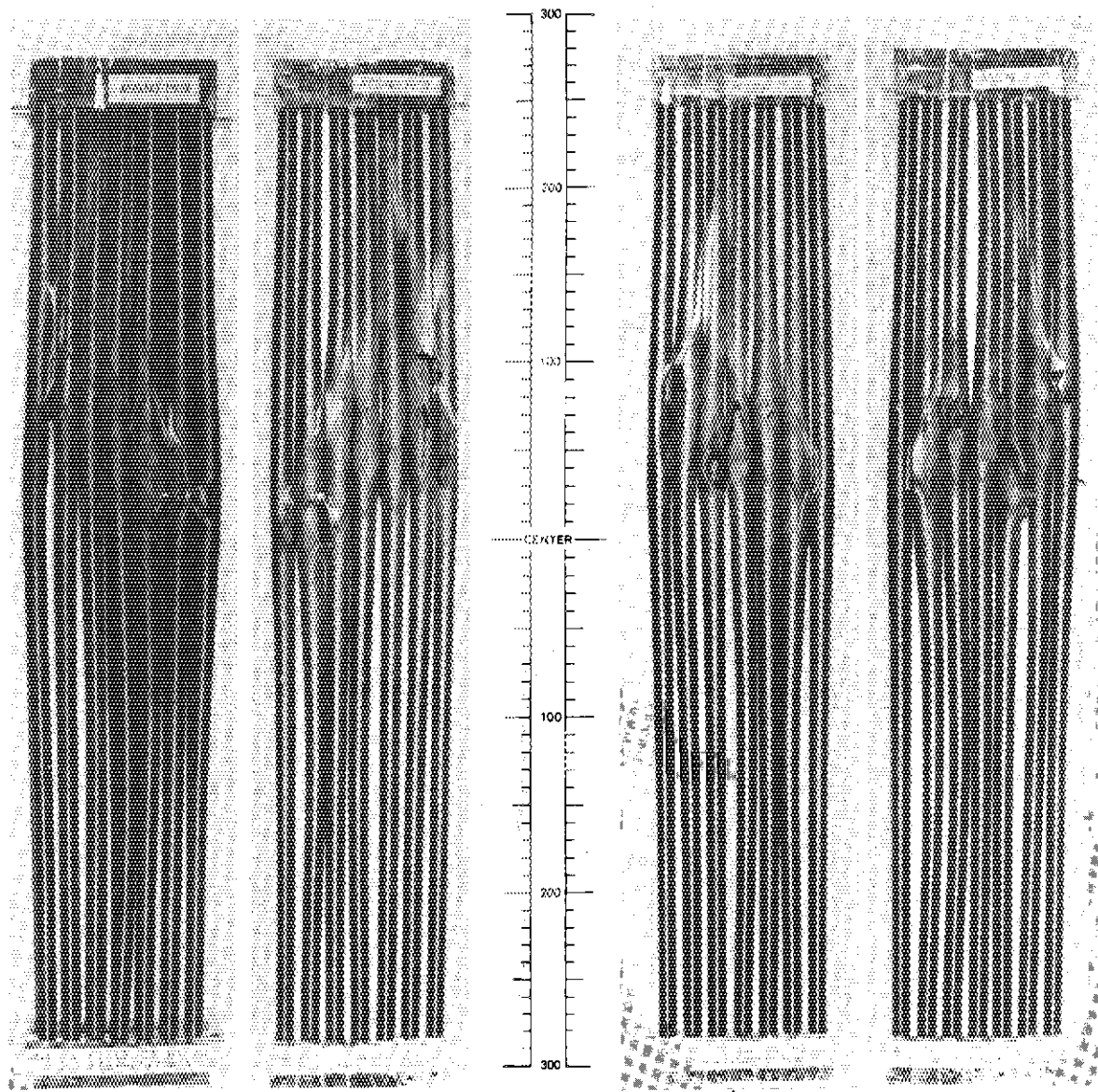
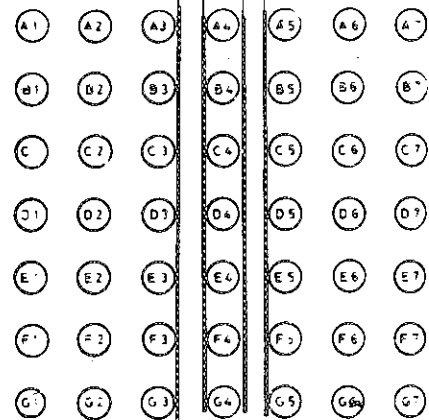


Photo.1-2 THE SIDE VIEWS OF A FUEL BUNDLE BURST AND CUT VERTICALLY.



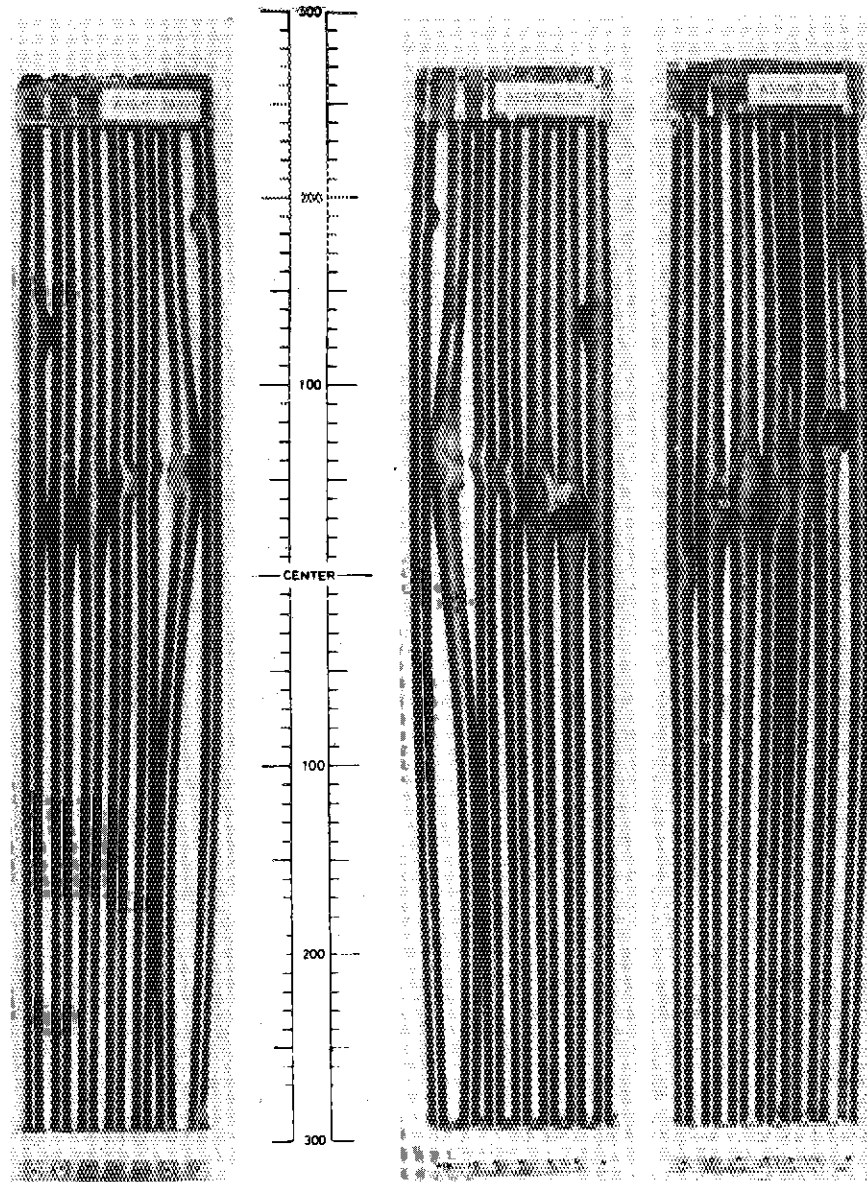
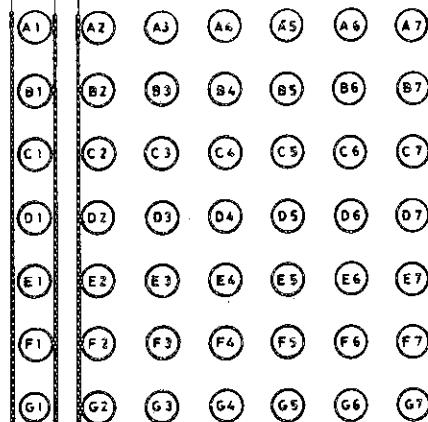
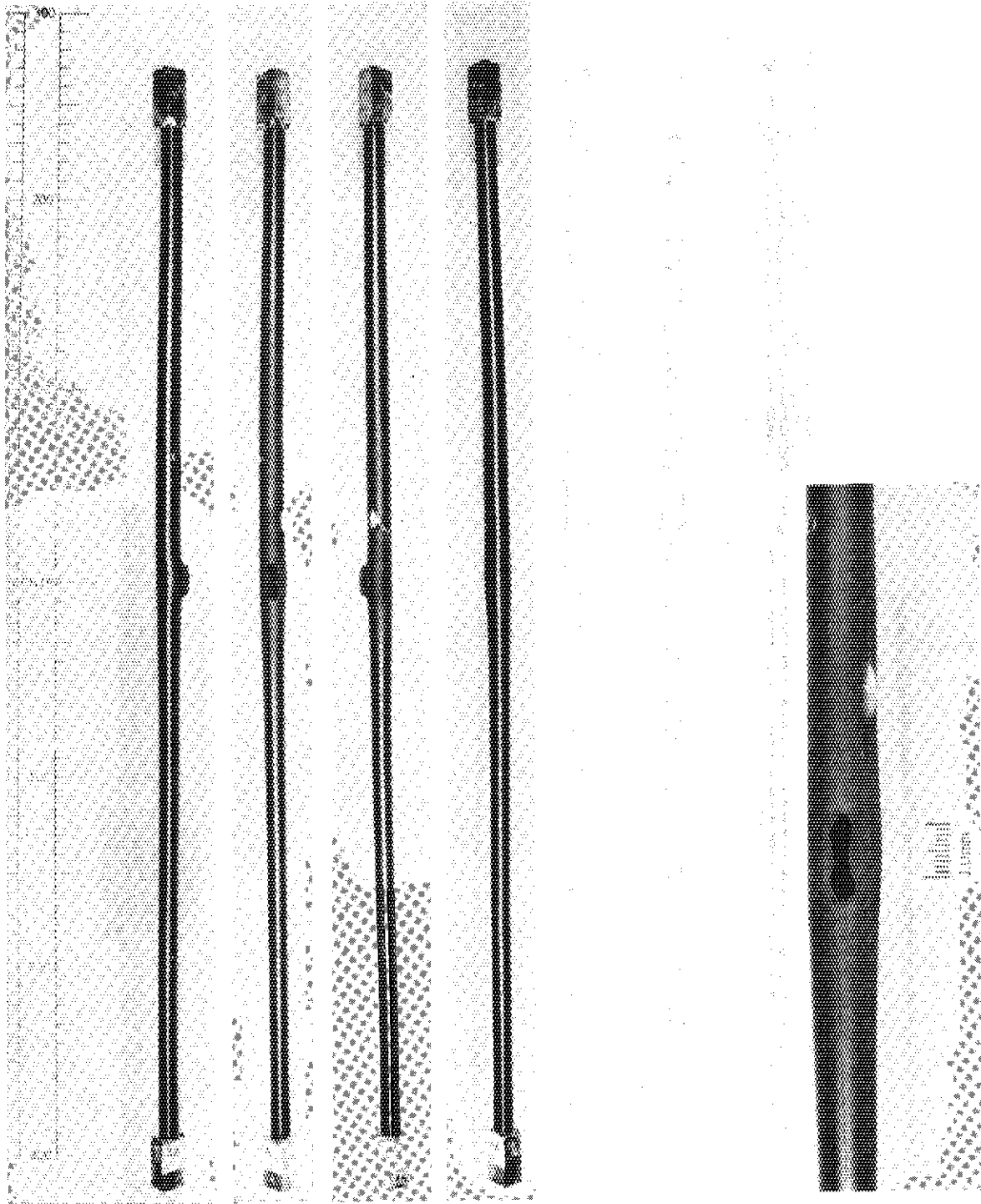


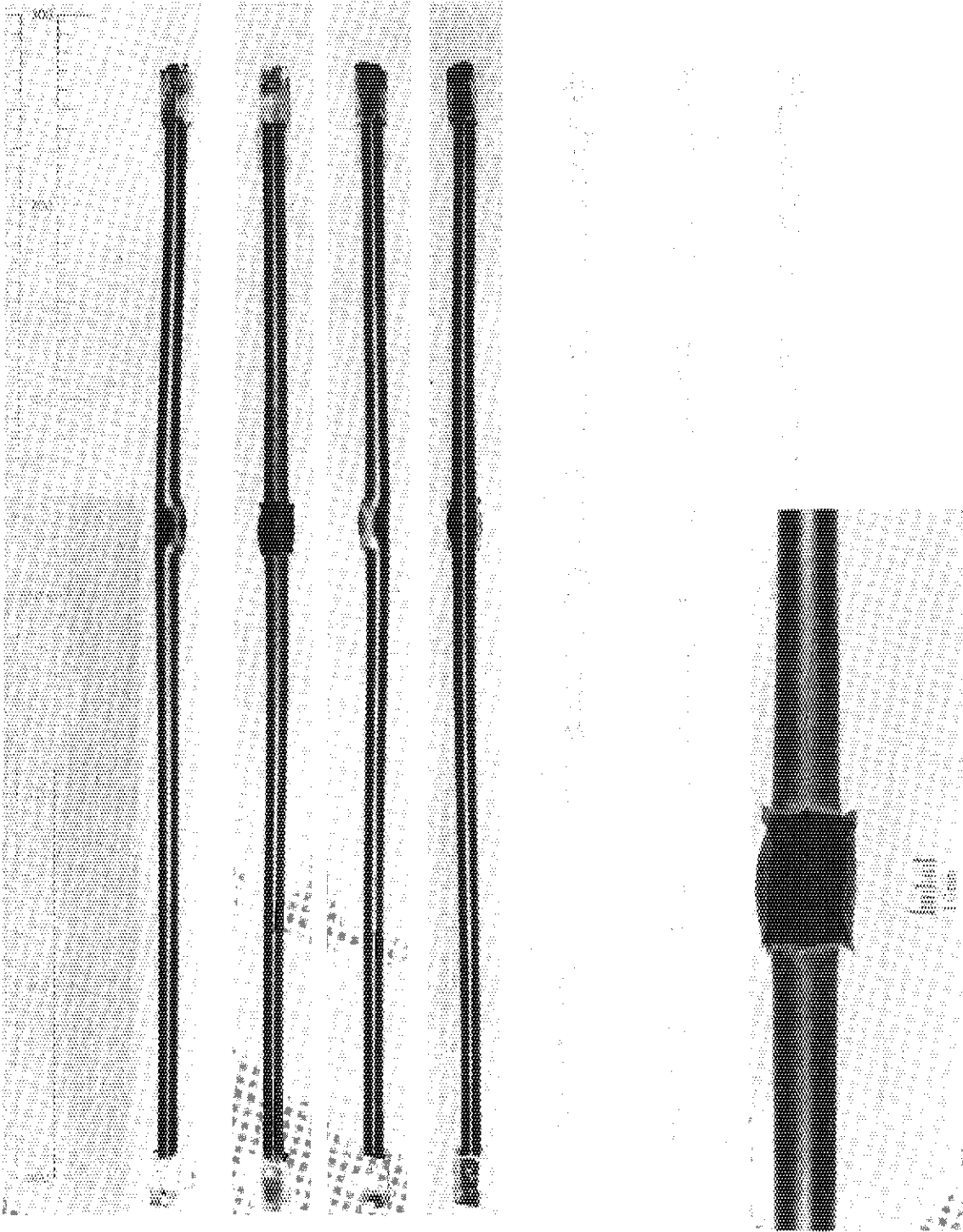
Photo.1-3 THE SIDE VIEWS OF A FUEL BUNDLE BURST AND CUT VERTICALLY.





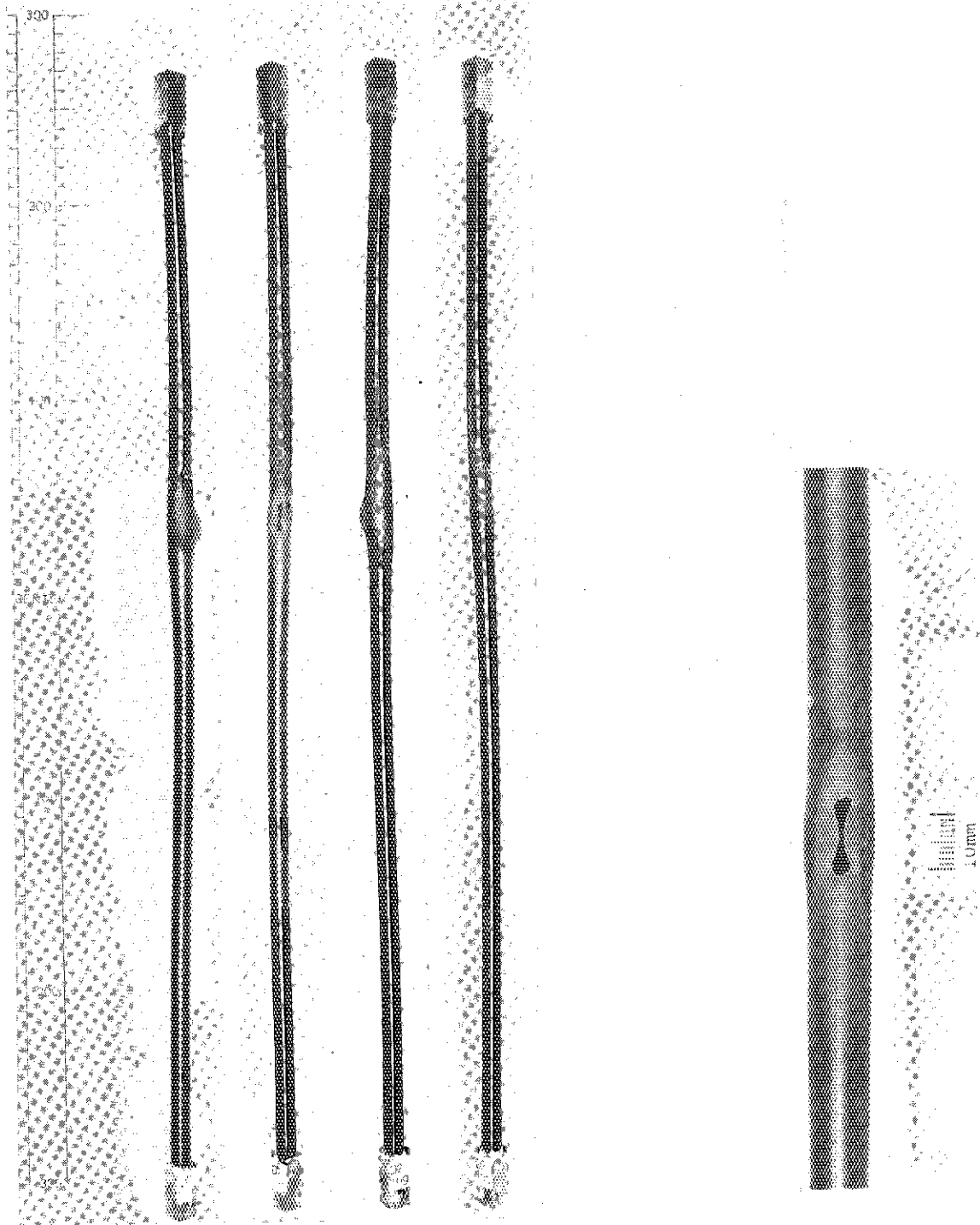
FUEL ROD No. A2

Photo.2-1 OVERVIEW AND CLOSE-UP VIEW OF A-2 ROD.



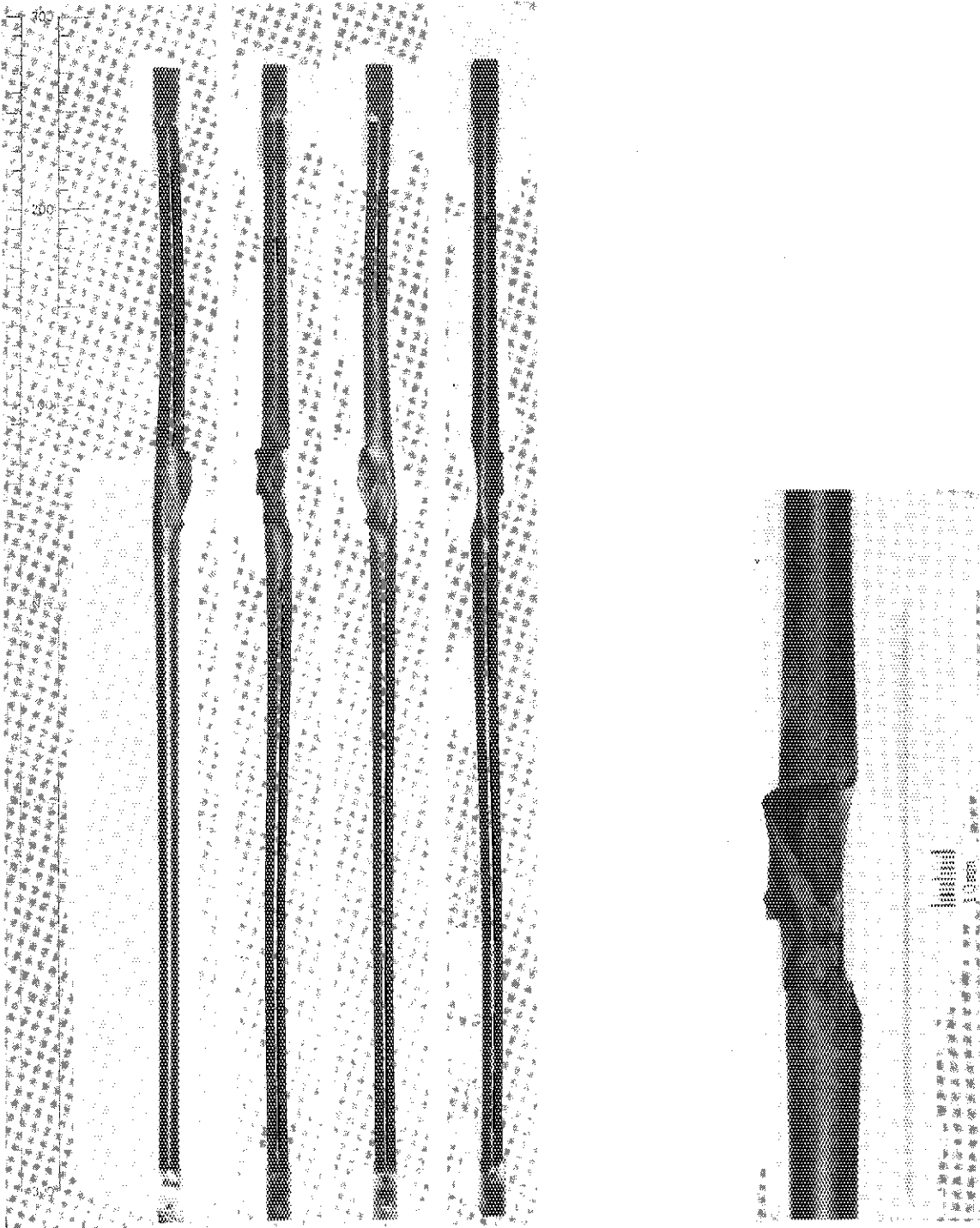
FUEL ROD No. A7

Photo.2-2 OVERVIEW AND CLOSE-UP VIEW OF A-7 ROD.



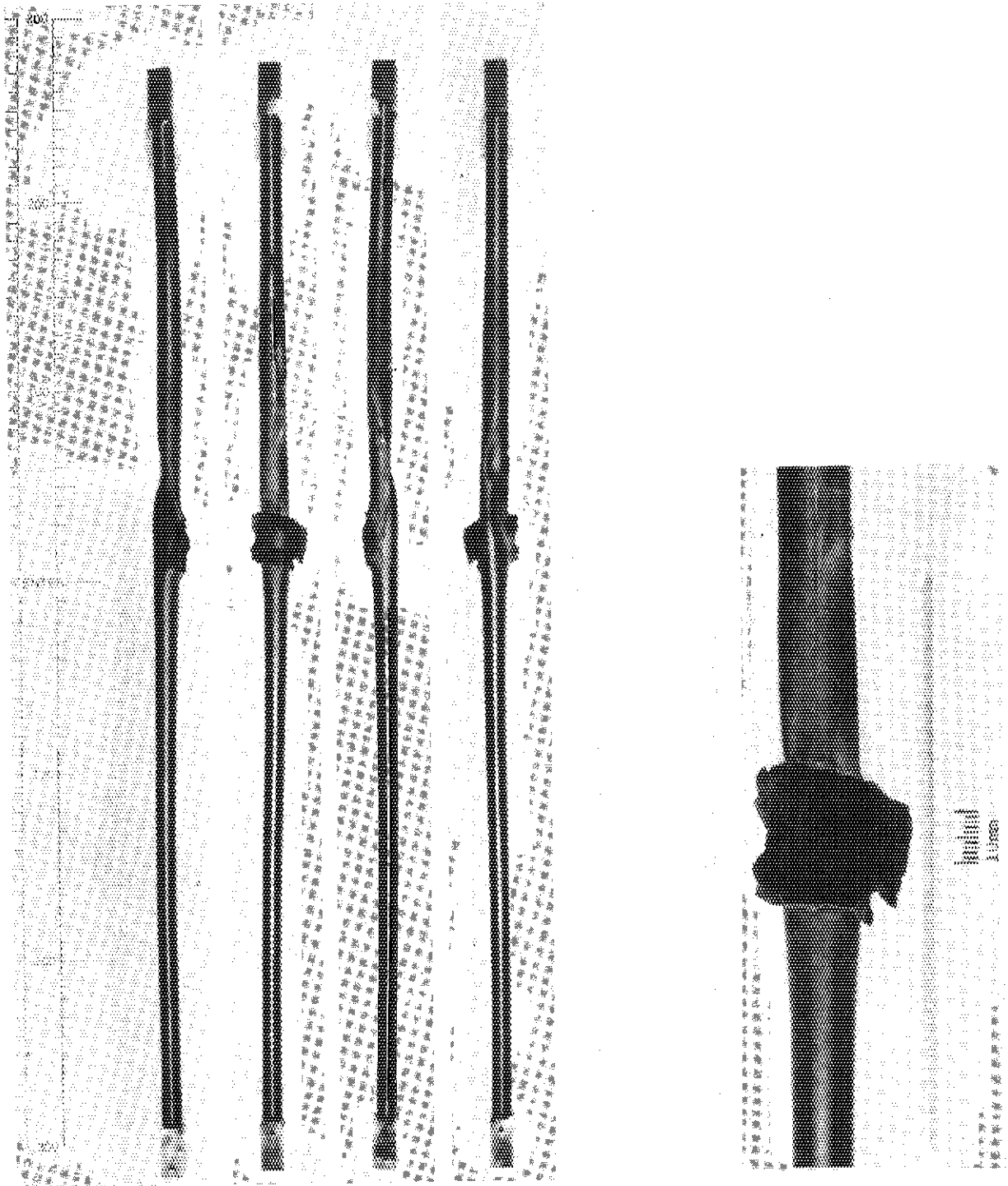
FUEL ROD No. D2

Photo.2-3. OVERVIEW AND CLOSE-UP VIEW OF D-2 ROD.



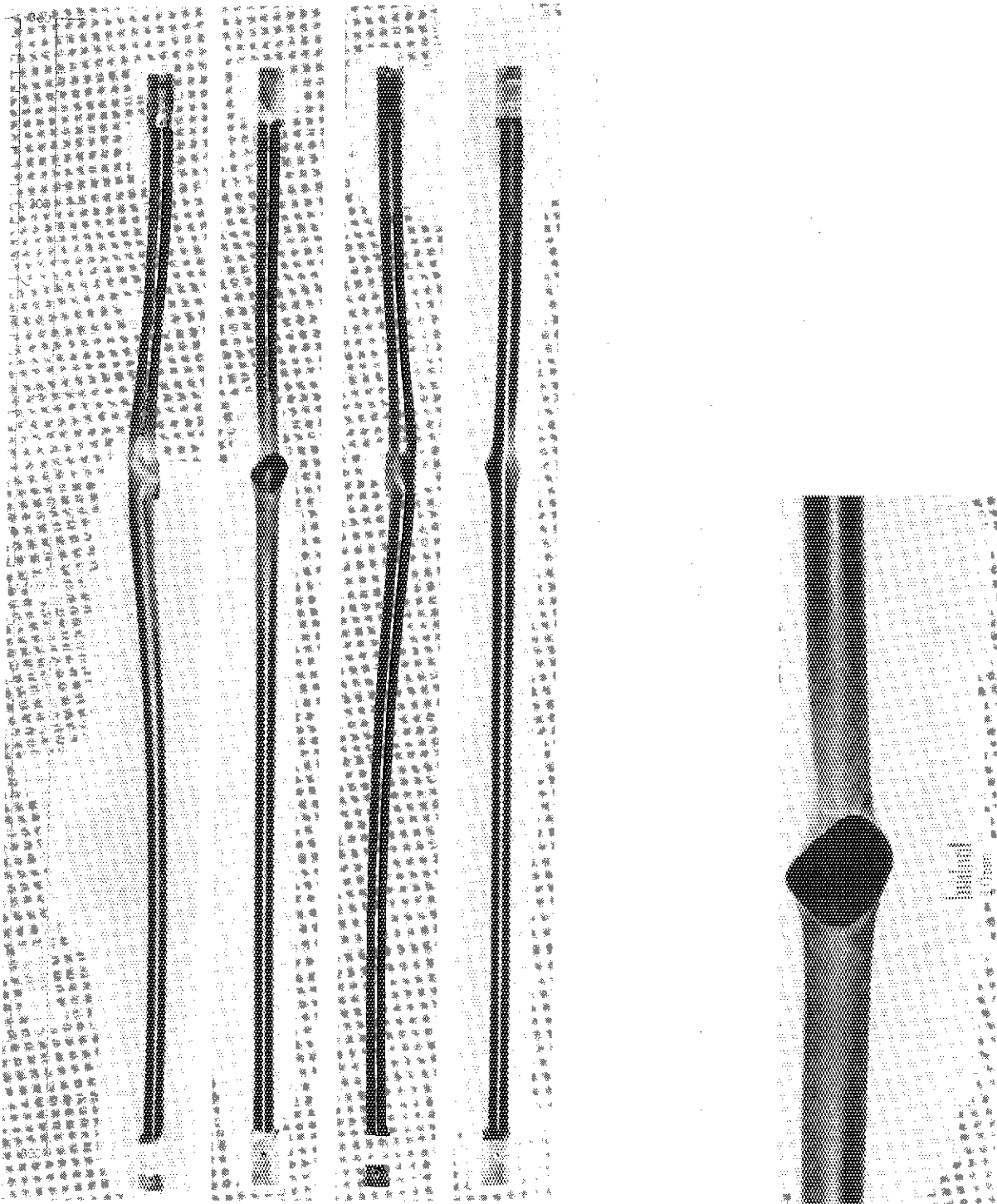
FUEL ROD No. D5

Photo.2-4 OVERVIEW AND CLOSE-UP VIEW OF D-5 ROD.



FUEL ROD No. E5

Photo.2-5 OVERVIEW AND CLOSE-UP VIEW OF E-5 ROD.



FUEL ROD No. F1

Photo.2-6 OVERVIEW AND CLOSE-UP VIEW OF F-1 ROD.

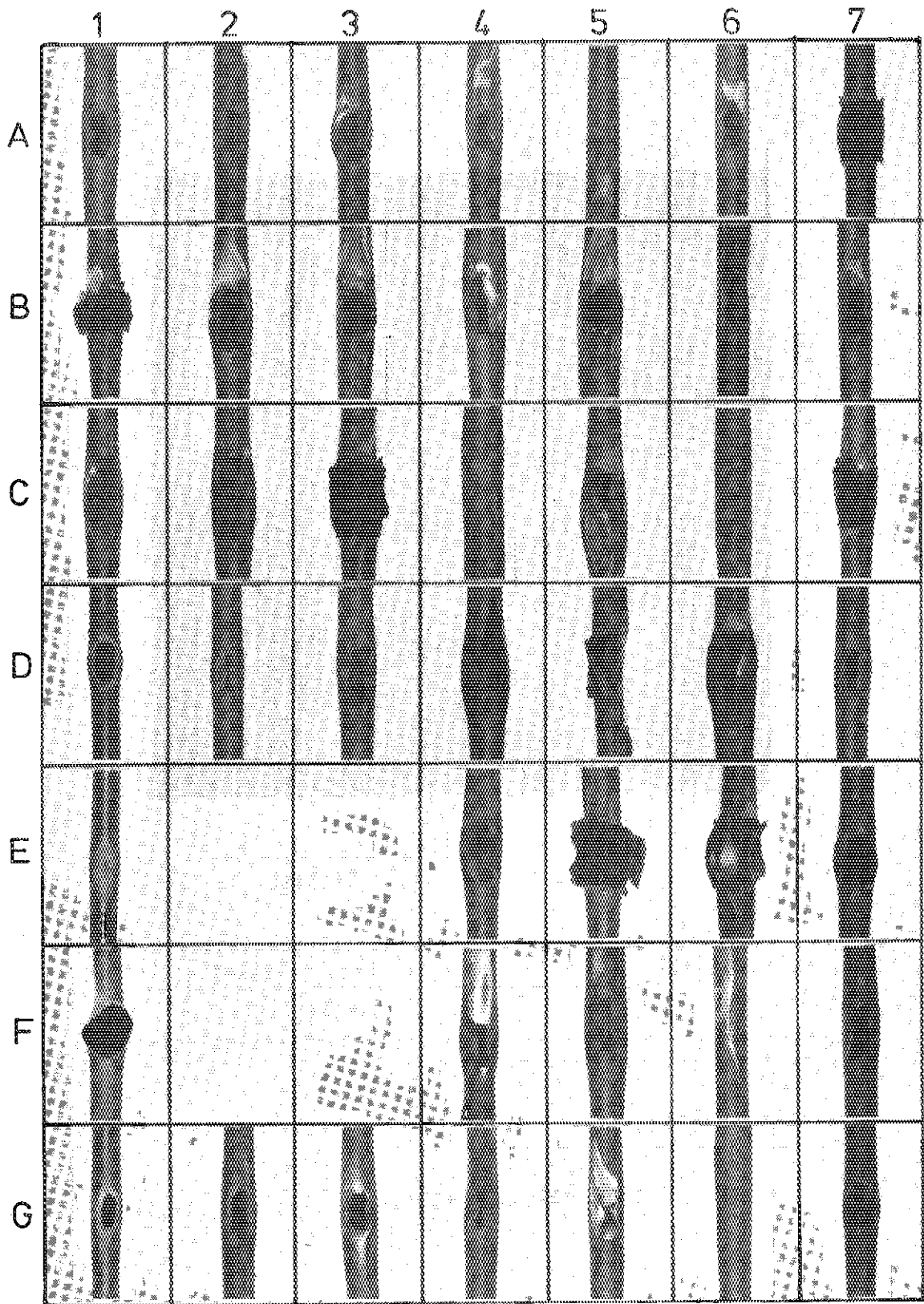
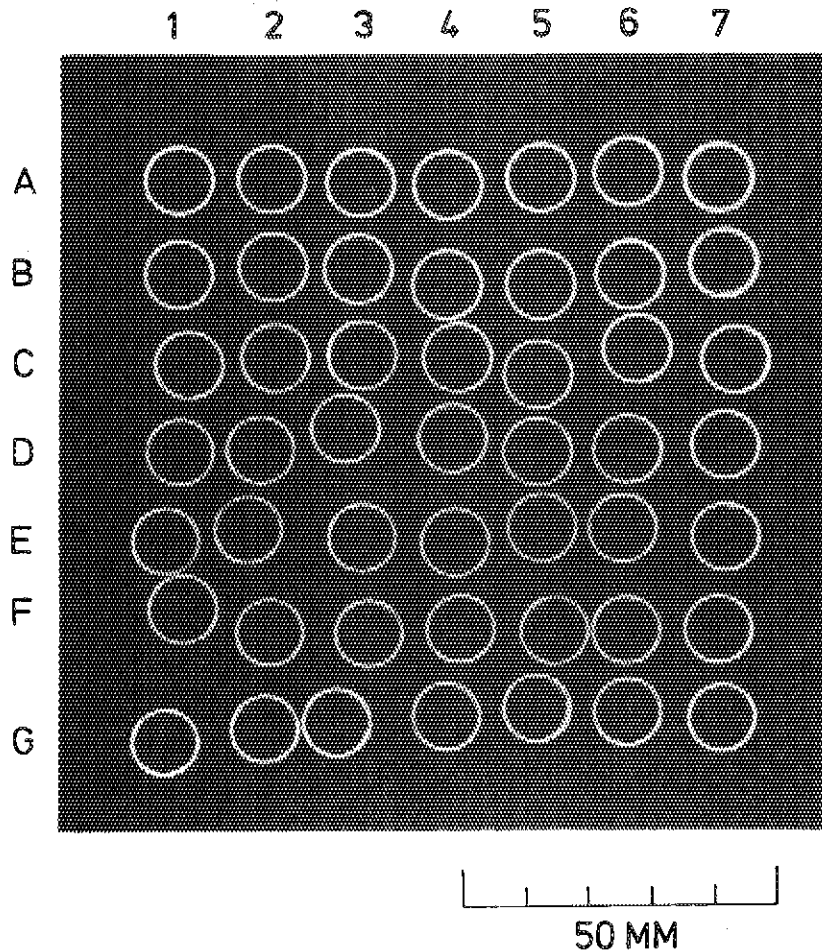


Photo.3 CLOSE-UP VIEWS OF RUPTURE OPENING AREAS.

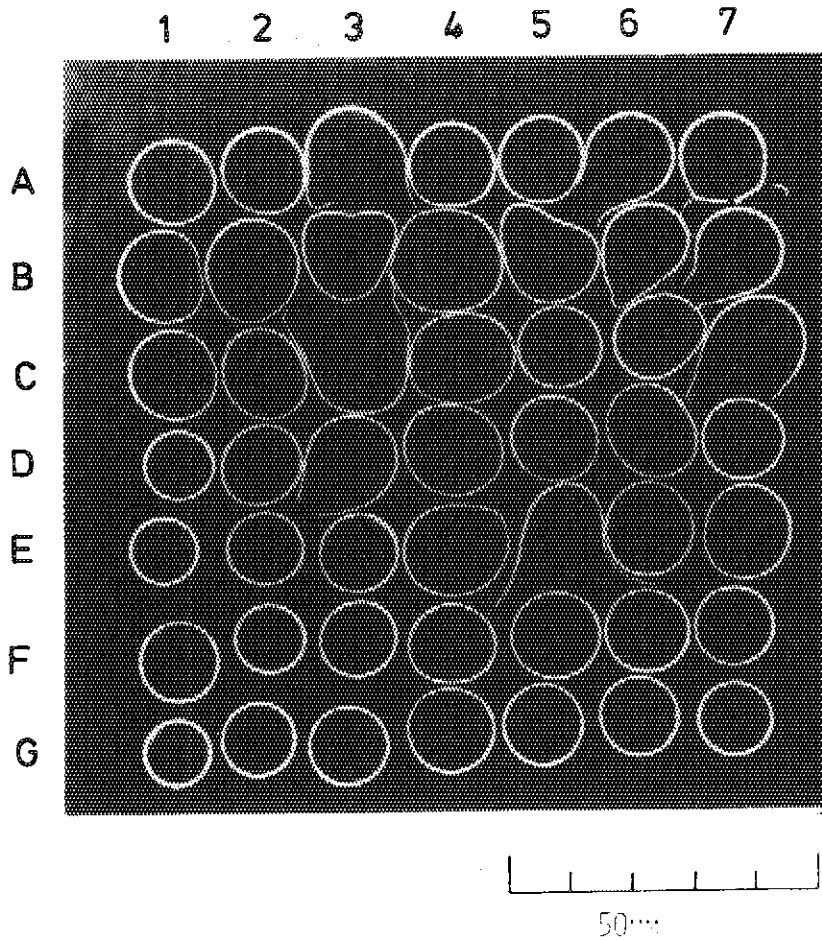


BALLOONING (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	9.8	10.4	10.5	10.3	9.1

*CHANNEL BLOCKAGE (%)	7x7	5x5
	-	-

*; INSIDE THE ASSUMED BOUNDARY

Photo.4-1 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM.
(BELOW 162.7mm FROM THE MIDPOINT)

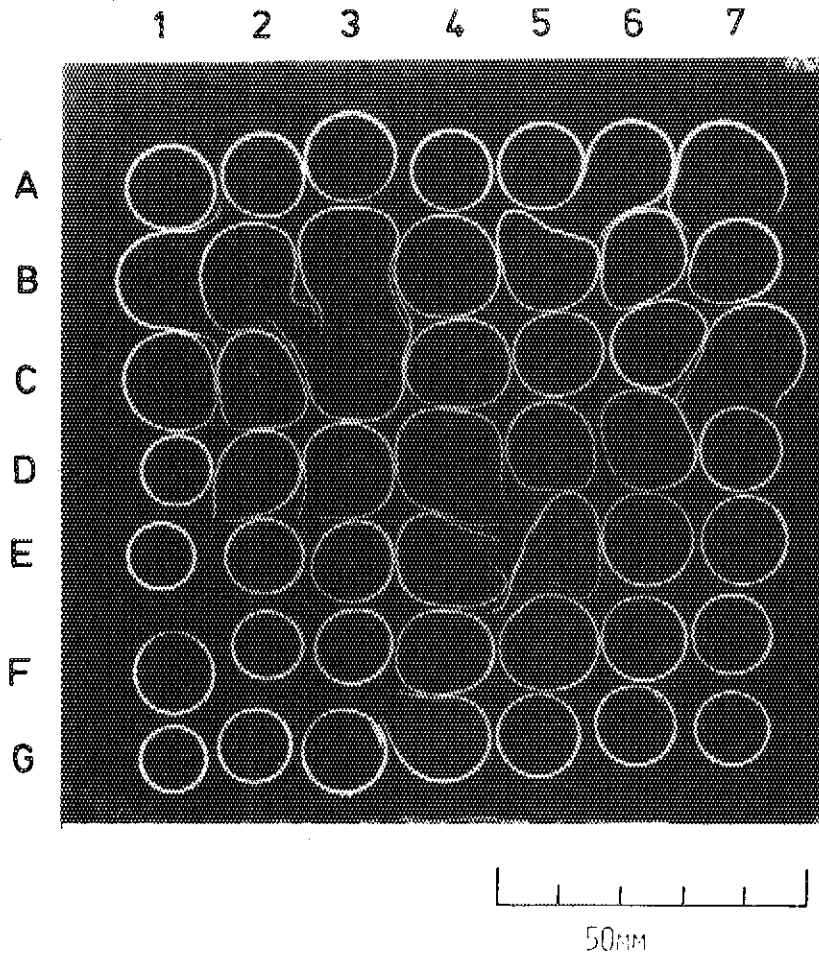


BALLOONING (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	83.1	95.8	130.4	76.4	69.8

*CHANNEL BLOCKAGE (%)	7x7	5x5
	54.8	63.1

*; INSIDE THE ASSUMED BOUNDARY

Photo.4-2 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM.
(ABOVE 22.4mm FROM THE MIDPOINT)

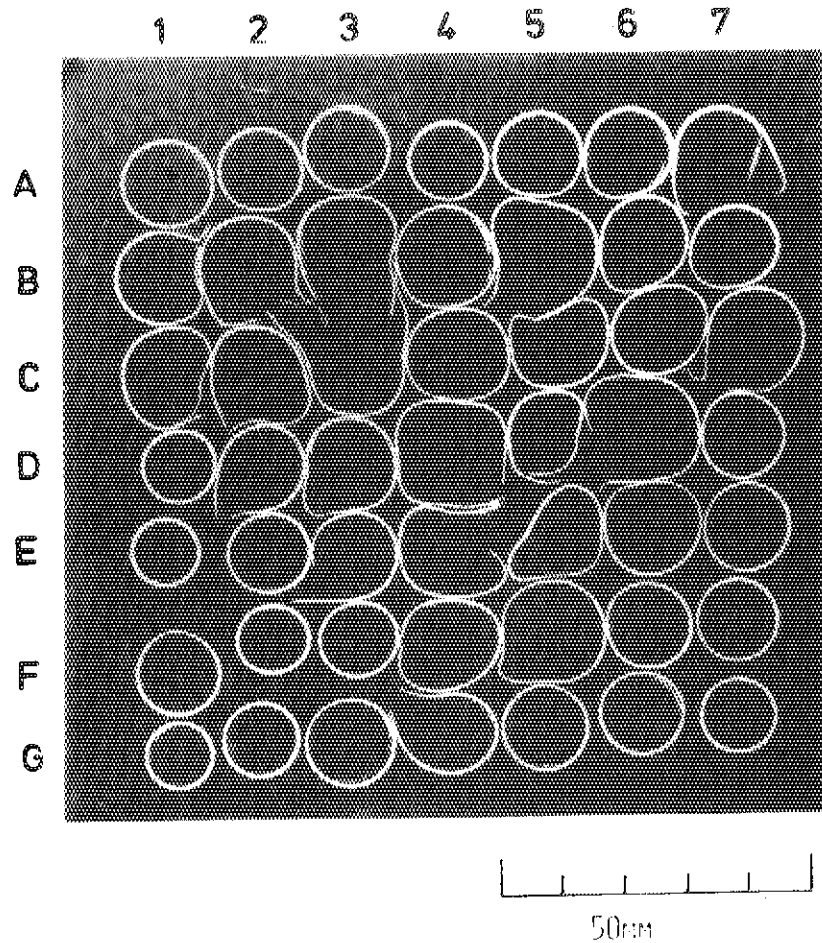


BALLOONING (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	94.1	107.5	135.1	92.1	80.1

*CHANNEL BLOCKAGE (%)	7x7	5x5
	63.0	71.3

*; INSIDE THE ASSUMED BOUNDARY

Photo.4-3 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM.
(ABOVE 33.0mm FROM THE MIDPOINT)

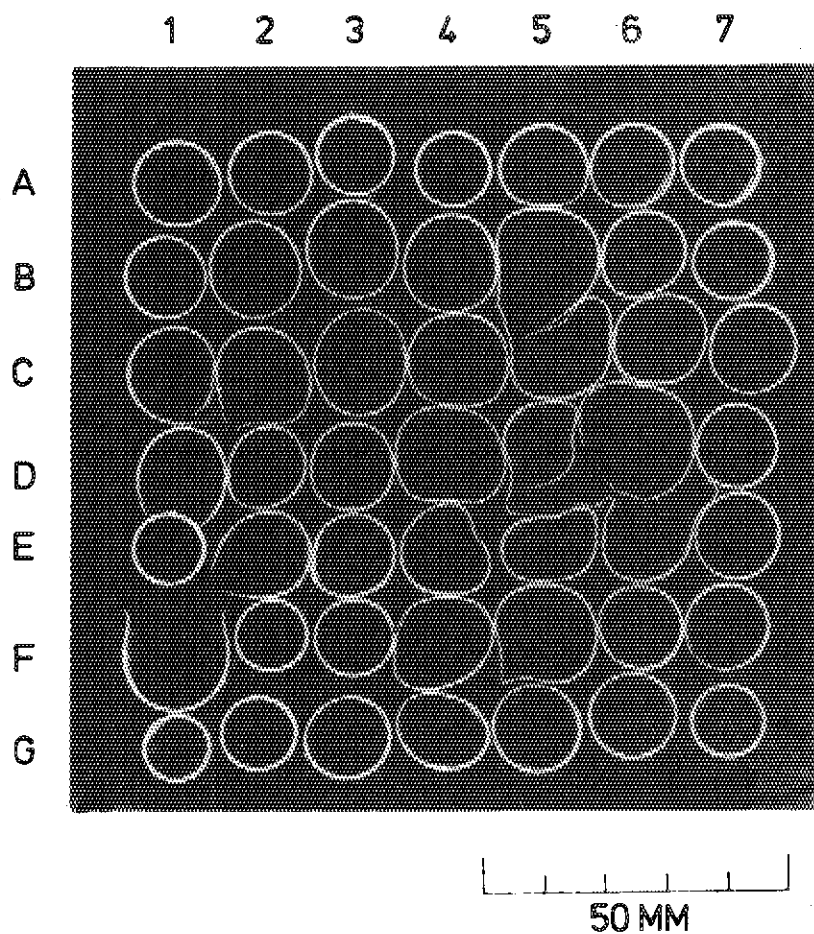


BALLOONING (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	99.4	123.3	137.2	115.5	74.4

*CHANNEL	7x7	5x5
BLOCKAGE (%)	67.3	78.1

*; INSIDE THE ASSUMED BOUNDARY

Photo.4-4 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURE FLOWING STEAM.
(ABOVE 42.6mm FROM THE MIDPOINT)



BALLOONING	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	93.4	112.9	107.2	116.2	73.0

*CHANNEL	7x7	5x5
BLOCKAGE (%)	-	-

*; INSIDE THE ASSUMED BOUNDARY

Photo.4-5 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM.
(ABOVE 56.7mm FROM THE MIDPOINT)