

JAERI-M  
83-083

冷却材喪失事故条件下での模擬燃料集合  
体の破裂試験（IV）

—集合体No.7808試験結果—

1983年6月

大友 隆・橋本 政男・川崎 了  
古田 照夫・上塙 寛

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 日立高速印刷株式会社

冷却材喪失事故条件下での模擬燃料集合体の破裂試験(IV)

—集合体No.7808 試験結果—

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

大友 隆・橋本政男・川崎 了

古田照夫・上塙 寛

(1983年5月17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を定量的に推定する基礎データを得るために、模擬燃料集合体による水蒸気中膨れ破裂試験No.7808を行った。この実験は初期内圧 $35\text{ kg}/\text{cm}^2$ 、蒸気流量 $0.4\text{ g}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ 、昇温速度 $9\text{ }^\circ\text{C}/\text{秒}$ 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) 最高圧力は $45\sim48\text{ kg}/\text{cm}^2$ であり、破裂圧力は $41\sim45\text{ kg}/\text{cm}^2$ である。また、その時の破裂温度は $850\sim880\text{ }^\circ\text{C}$ と評価された。
- (2) 被覆管が34%以上膨れた軸方向の長さは、大部分の燃料棒で $0\sim40\text{ mm}$ の範囲であり、平均すると $19\text{ mm}$ である。
- (3) 最大断面増加率は $7\times7$ 領域で54.2%， $5\times5$ 領域では66.9%である。
- (4) 最大流路閉塞率は $7\times7$ 領域で40.5%であり、内部燃料棒領域( $5\times5$ 領域)では51.4%である。

Multi-rod Burst Test under A Loss-of Coolant Accident Condition ( IV )  
---- Experimental Result of the No.7808 Bundle ----

Takashi OTOMO, Masao HASHIMOTO, Satoru KAWASAKI

Teruo FURUTA and Hiroshi UETSUKA

Department of Nuclear Safety Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 17, 1983)

Multi-rod burst test of No.7808 bundle was performed in steam to estimate quantitative coolant flow channel restriction caused by the ballooning of zircaloy claddings in a fuel assembly during a LOCA transient in LWRs.

The test was conducted under the condition that the initial internal pressure in each rod was 35kg/cm<sup>2</sup>(RT) and the heating rate was 9°C/s in steam with flow rate of 0.4g/cm<sup>2</sup>.min.

The following results were obtained ;

- (1) Maximum and burst pressures in rods were in the range 45 to 48kg/cm<sup>2</sup> and 41 to 45kg/cm<sup>2</sup>, respectively. The burst temperature of cladding were estimated to be 850 to 880°C.
- (2) Axial portions of tubes with greater than 34% strain were observed in the range 0 to 40mm in most rod. The mean length was 19mm in the bundle.
- (3) The degree of maximum increase in cross-sectional area is 54.2% in the bundle(7x7) and 66.9% in the internal rods(5x5).
- (4) Maximum channel area restriction was 40.5% in the bundle(7x7) and 51.4% in the internal rods(5x5).

Keyword : LOCA, Zircaloy cladding, Internal Pressure, Multi-rod Burst, Ballooning, Channel Blockage, Temperature Distribution, LWR

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.方法 .....	1
2.1 実験装置の概要 .....	2
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 .....	3
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 .....	6
3.3.1 最高圧力と破裂圧力 .....	6
3.3.2 圧力低下と降下時間 .....	6
3.4 破裂 .....	6
3.4.1 破裂位置 .....	6
3.4.2 破裂温度 .....	7
3.5 膨れ観察 .....	7
3.5.1 各列・行の観察 .....	7
3.5.2 燃料棒の観察 .....	7
3.5.3 断面の観察 .....	8
3.6 断面増加量 .....	8
3.6.1 34%の膨れ長さ .....	8
3.6.2 最大断面増加量 .....	8
3.6.3 断面増加の範囲 .....	8
3.7 流路閉塞 .....	9
4.総括 .....	9
参考文献 .....	10

## CONTENTS

1.	Introduction .....	1
2.	Experimental Methods .....	1
2.1	General Description of Experimental Apparatus .....	2
2.2	Fuel Assembly Simulator .....	2
2.3	Fuel Rod Simulator .....	2
2.4	Temperature Measurements .....	2
2.5	Experimental Procedures .....	3
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 .....	6
3.3.1	Maximum and Burst Pressure .....	6
3.3.2	Pressure Drop from Maximum to Burst and its Duration .....	6
3.4	Burst Behavior .....	6
3.4.1	Burst Location .....	6
3.4.2	Burst Temperature .....	7
3.5	Observation of Ballooning .....	7
3.5.1	Side Views of Bundle .....	7
3.5.2	Views of Fuel Rod .....	7
3.5.3	Views of Cross Section .....	8
3.6	Increase in Cross-sectional Area .....	8
3.6.1	Length of Ballooned Region Having Expansion above 34% .....	8
3.6.2	Maximum Increase in Cross-sectional Area .....	8
3.6.3	Length of Increase in Cross-sectional Area .....	8
3.7	Channel Blockage .....	9
4.	Summary .....	9
	References .....	10

## 1. はじめに

軽水型動力炉の想定冷却材喪失事故（L O C A）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、この事故が起つたならば、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、集合体に配例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<sup>(1)</sup>(ORNL)・西独<sup>(2)(3)</sup>(KfK)においても行なわれている。

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なうことは、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なえば、隣接隣接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。

著者ら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<sup>(4)(5)(6)</sup>実施し、集合体毎に膨大な量の測定を行なった。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充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集合体における燃料棒の膨れ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行なった。

## 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<sup>(4)</sup>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。

## 1. はじめに

軽水型動力炉の想定冷却材喪失事故（L O C A）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、この事故が起きたならば、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、集合体に配例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<sup>(1)</sup>（ORNL）・西独<sup>(2)(3)</sup>（KfK）においても行なわれている。

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なうことは、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なえば、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。

著者ら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、<sup>(4)(5)(6)</sup>集合体毎に膨大な量の測定を行なった。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充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集合体における燃料棒の膨れ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行なった。

## 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<sup>(4)</sup> 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 ( $7 \times 7$ ) 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 ( $15 \times 15$ ) と同じ間隔 (14.3 mm) 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 100.1 mm  $\phi$  で約 2500 mm の高さをもち、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 650 mm である。また、集合体の全発熱量は最大 196 KW (30 V) である。この集合体の外周 106.5 mm  $\phi$  の位置にステンレス製のチャンネルボックス（厚さ 1.0 mm）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 10.72 mm  $\phi$ 、内径 9.48 mm）、直径 0.6 mm 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ニナペレットで構成され、Fig.A-3 に示す。発熱体素子は発熱長 850 mm で最大出力 4 KW (30 V) であり、燃料棒中心から 2.6 mm のところに 6 本配列されている。UO<sub>2</sub> ペレットを模擬したアルミニナペレットは純度 99.5 % 以上、密度 3.9 以上で外径 9.2 mm、長さ 20 mm である。被覆とアルミニナペレットとの半径ギャップは 0.14 mm、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 ± 1.5 cc 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狭んで点溶接した CA 非接地型シーズ熱電対で行なう。燃料棒に関する温度測定点は、ヒーター発熱長中心より 75 mm 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なっている。

## 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なう。実験のパラメータの時間変化を Fig.1 に示し、詳細を以下に記す。

- (1) 室温にて、各燃料棒にヘリウムガスを所定の圧力 ( $35 \text{ kg/cm}^2$ ) 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なう。
- (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  $400^\circ\text{C}$  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  $400^\circ\text{C}$  で 8 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なう。但し、加熱炉の熱容量が大きく、集合体に比べて温度上昇が遅くなるため、ステンレス槽はその後も昇温を続ける。この加熱によって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) .....  $35 \text{ kg/cm}^2$  (各燃料棒)
- (2) ステンレス槽入口蒸気温度 .....  $300^\circ\text{C}$
- (3) 水蒸気流量 .....  $0.4 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$
- (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なう。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) 得られた集合体を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なう。
- (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なう。
- (6) 49本の燃料棒に分離されたものから再び各列毎、そして集合体に組立てを行なう。  
(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なう。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ない、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列などについて行なう。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、以下の項目毎に整理した。

### 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、

体が得られる。（図中の③）

- (2) 得られた集合体を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なう。
- (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なう。
- (6) 49本の燃料棒に分離されたものから再び各列毎、そして集合体に組立てを行なう。  
(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なう。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ない、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列などについて行なう。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、以下の項目毎に整理した。

### 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 14.3 mm 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 % 膨れ長さと規定する。

(5) 断面増加率 (Increase in cross-sectional area)

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。

(6) 流路閉塞率 (Channel Blockage)

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

$S_0$  : 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)

$S_A$  : 集合体の全断面積 (境界内)

なお、集合体の境界は、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外側に拡張したものとする。

### 3.2 温度分布と昇温速度

#### 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 7.5 mm 上方に取付けた熱電対 TC-2, 49 本 (Fig. A-4 参照) について考察を行った。Fig. 2-1 に集合体の対角線上に配列された燃料棒と、第 4 列及び、D 列の燃料棒の温度分布を示す。又、Fig. 2-2 には、外周部の燃料棒の温度分布を示す。これらの温度分布は、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 (72 秒) について表わしている。この結果から、燃料棒の温度は、初めはほぼ平坦な分布を示しているが、時間が経過するにつれ、即ち温度が上昇するにつれて中心部が最も高く、外周になるにつれ徐々に低くなり、特にコーナ燃料棒 (A 1, A 7, G 1, G 7) は低い。

同じ外周に配列された燃料棒の温度でも、第 1 列の温度と第 7 列の温度を比べると、第 1 列の方が時間の経過に伴う、温度上昇は遅い。この原因は、Fig. A-4 からわかるように、熱電対の取付け位置の違いにもとづいている。即ち、第 7 列の熱電対の取付位置は、集合体の内側に位置しているのに対して、第 1 列では逆に外側であるためである。したがって、集合体内の温度分布を均一にするために、補助加熱炉による加熱を行っているが、集合体側の昇温が速く、チャンネルボックスの方へ熱が逃げたためと考えられる。以上のことにより、外周燃料棒では、内部燃料棒に比べて、被覆管の半径方向に生じた温度差は大きいと考えられる。

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、中心燃料棒 (D4) の熱電対 (TC-2) が 500 °C に達した時刻から破裂を生じた時刻までの平均を表わしている。この表より内部燃料棒 (25 本) の昇温速度は、8.4 ~ 9.5 °C/秒で外周燃料棒 (24 本) は、6.6 ~ 9 °C/秒である。特に第 1 列の昇温速度は、前述した原因のため明らかに遅い。そこで第 1 列の燃料棒を除外すると、7.7 ~ 9.5 °C/秒となり、集合体の昇温速度は、約 9 °C/秒程度と考えられる。

### 3.2.2 軸方向

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である。(Fig. 3-1, 2 参照) 求められた温度分布と、破裂位置の関係から集合体軸方向で高温となった位置は、燃料棒発熱長の中心から上下約50mm間と思われる。

次に、Table 1-2 に10本の燃料棒軸方向における、各々の昇温速度を示した。この昇温速度は、Table 1-1 と同じように中心燃料棒 (D 4) の温度が 500 °C に達した時から破裂までの昇温速度である。この表から、破裂位置に近い TC - 2 と TC - 3 を比較して見ると、外周燃料棒 (A 1, A 4) は、TC - 2 より TC - 3 の方が約 0.5 °C / 秒程速い昇温速度であって、時間経過と共に軸方向温度分布は、平坦化する傾向がある。内部燃料棒の D 4 燃料棒は、TC - 2 より TC - 3 の方が 0.4 °C / 秒遅い。しかし、B 2, C 3 燃料棒は TC - 2, TC - 3 でもほぼ同じ昇温速度である。

Table 2 には、各々の燃料棒について最高圧力時から破裂時までの昇温速度を示してある。この時間帯は、被覆管が変形しているときであるが、全般的に TC - 3 より TC - 2, TC - 2 より TC - 1 と燃料棒の上部の方が速い昇温速度である。

## 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その時刻を Table 3 に示す。また、これらの最高及び破裂圧力値のヒストグラムを Fig. 4 にまとめた。最高圧力は、45~48 kg/cm<sup>2</sup> であって初期圧力 35 kg/cm<sup>2</sup> の約 29~37 % 増に相当し、外周と内部燃料棒との間では、差が認められない。

破裂圧力値は、41~45 kg/cm<sup>2</sup> であって、内部燃料棒の方が外周燃料棒よりも、幾分低い値となっている。

Fig. 5 には、最高及び破裂圧力に達するまでの時間についてヒストグラムとして示した。外周燃料棒は、全出力後 40~56 秒、内部燃料棒が 39~54 秒で最高圧に達している。破裂は、外周燃料棒で 64~72 秒、内部燃料棒で 62~70 秒の間で起こっている。最高圧及び破裂を示す時間とも外周より内部燃料棒の方ではらつきが少ない。

### 3.3.2 圧力降下と降下時間

燃料棒内の圧力が、最高圧力から破裂までに降下した圧力値とそれに要した時間を Table 4 にまとめ、各々のヒストグラムを Fig. 6 に示す。圧力が降下している時間は、10~26秒であって、内部燃料棒の方で外周よりも幾分短い傾向がある。その時の圧力降下は、2~5 kg/cm<sup>2</sup> の範囲であって、内部燃料棒の方が幾分大きいようである。

## 3.4 破裂

### 3.4.1 破裂位置

各燃料棒の破裂開口の向き及び軸上の位置、そして破裂時刻を Fig. 7 に示す。破裂開口の

向きは、外周と内部燃料棒では異なる。即ち内部燃料棒の破裂開口の向きには一様性がないが、外周燃料棒は、すべて集合体内部に向いている。この事は、前述した外周燃料棒の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。

破裂位置は、Fig. 13 から明らかなように、発熱長中心より下方 175 mm から上方 150 mm の広い範囲に及んでいる。しかし、外周燃料棒は発熱中心より、下方 50 mm から上方 50 mm の間で、内部燃料棒は、下方 25 mm から上方 75 mm の間で、大部分が破裂しており、外周燃料棒の方が幾分低い位置で、破裂している傾向が認められる。

### 3.4.2 破裂温度

破裂温度は、軸方向の温度分布を求めるため、軸方向に 2 ~ 3 点熱電対を取付けた 10 本の燃料棒について求めた。これらで得られた燃料棒の軸方向温度分布 (Fig. 3-1.2) から、破裂位置の温度を、内外挿して求め Fig. 8 に示した。このようにして求めた破裂温度は、850 ~ 880 °C の範囲である。但し、外周部の第 1 列の燃料棒 (A1) は、熱電対の取付位置により、実際よりも低目の温度 (830 °C) を示している可能性があるので除外してある。

## 3.5 膨れ観察

集合体の四方向からの写真を、Photo.1 に示した。集合体全体は、破裂附近を最大とした、なだらかな湾曲を示す膨みをもち、外面では破裂が起きなかった。

### 3.5.1 各列・行の観察

Fig. A-5 に示した、集合体解体順序④に相当する集合体の列及び行の数例の写真を Photo. 2 ~ 7 に示した。写真から、破裂部での燃料棒の曲り、及び隣接燃料棒と接触していることがわかる。

### 3.5.2 燃料棒の観察

4 9 本の燃料棒の内代表的な数例を、Photo. 8 ~ 11 に示す。これらの写真は、燃料棒の四方向からと破裂開口部の拡大写真である。

まず Photo. 8, 9 は、破裂開口部が大きい場合、Photo. 10, 11 は小さい場合で、外周及び内部燃料棒である。燃料棒の曲りは、外周燃料棒の場合 Photo. 8, 10 に示す燃料棒のように、破裂開口部を内側とした曲りをしている。これに対し、内部燃料棒の曲りは隣接燃料棒との破裂時間差及び接触等により一様性がない。

次に、全燃料棒の破裂開口写真を Photo. 12 に示す。写真から明らかなように、破裂開口部は初期圧力の高い場合に比べて比較的小さいので、外周と内部燃料棒での差は認められない。破裂開口部の軸方向の長さは C2, F1 燃料棒が最も長く 40 mm であり、全燃料棒の平均の長さは、約 19 mm である。

### 3.5.3 断面の観察

Fig.A-5 の集合体解体手順⑦に相当する 10  $\mu\text{m}$  間隔毎に切断した断面写真的数例を Photo. 13～27 に示す。Photo. 20 は、外周燃料棒が最も大きく膨れた位置の断面写真である。同じく Photo. 23 は、 $5 \times 5$  領域及び集合体で最も大きく膨れた位置の断面写真である。

これらの写真から、破裂部では隣接燃料棒と接触しているのが認められるが、相手の膨れに対して影響を与えていない。

## 3.6 断面増加量

各断面写真から被覆管の膨れ率を次記の領域別に求めて Table 5 に示し、それぞれの分布を Fig. 11-1～2 に示した。

1. $7 \times 7$ 領域	(全燃料棒)	49 本)	Fig. 11-1
2. $5 \times 5$ 領域	(内部燃料棒)	25 本)	Fig. 11-1
3. $3 \times 3$ 領域	(中心部燃料棒)	9 本)	Fig. 11-1
4. $7^{\square}$ 領域	(外周燃料棒)	24 本)	Fig. 11-2
5. $5^{\square}$ 領域	(2 周目燃料棒)	16 本)	Fig. 11-2

### 3.6.1 34 % の膨れ長さ

燃料棒が互いに 34 % 膨れた場合、たとえ曲りが起らなくても、燃料棒同志が接触して相手の膨れに対し、影響を与えることになる。そこで各燃料棒毎に、34 % 以上膨れた範囲を Fig. 9 に示し、そのヒストグラムを Fig. 10 に示した。34 % 以上の膨れ長さは、0～40  $\mu\text{m}$  であって、ほとんどの膨れ長さが破裂開口の長さである。

また、34 % 以上の膨れ長さを初期内圧の違う実験<sup>5)</sup>  $20 \text{ kg/cm}^2$  (No. 7806)・ $50^4 \text{ kg/cm}^2$  (No. 7805)・ $70^6 \text{ kg/cm}^2$  (No. 7807) と比較すると、初期内圧  $20 \text{ kg/cm}^2$  の場合とほぼ同じであるが、初期内圧  $50 \cdot 70 \text{ kg/cm}^2$  の場合と比べて非常に短い。

### 3.6.2 最大断面増加率

領域別最大断面増加率を Table 6-1 に示す。最大断面増加率は、集合体の外周部から中心部に向う程大きくなる傾向が認められる。領域別最大断面増加率は  $7 \times 7$  領域で 54.2 %、 $5 \times 5$  領域 66.9 %、 $3 \times 3$  領域で 71.2 % である。したがって最も大きい増加率は  $3 \times 3$  領域である。なお、最も小さい最大断面増加率は、最外周  $7^{\square}$  領域の 45.2 % である。

### 3.6.3 断面増加の範囲

Table 6-2 に、断面増加率がある値以上に及んだ長さを示す。被覆管が等円に膨れたとする、隣接燃料棒に接触する量である 77.9 % 以上の断面増が認められる領域はなく、50 % に達した領域は  $7 \times 7$  領域で 5  $\mu\text{m}$  であり、 $5^{\square}$  領域では 45  $\mu\text{m}$  となっている。

### 3.7 流路閉塞

流路閉塞率は、 $7 \times 7$  領域及び $5 \times 5$  領域の最も膨れた附近のみ求めて、Table 5 に断面増加率と共に示し、その分布を Fig. 12-1～2 に示した。 $7 \times 7$  領域の最大流路閉塞率は、40.5%， $5 \times 5$  領域が 51.4% で、発熱中心より上方 44.5 mm の位置である。又、この最大流路閉塞位置より上下 25 mm 範囲での平均流路閉塞率は、 $7 \times 7$  領域が 33.8%， $5 \times 5$  領域が 41.1% である。同じく上下 50 mm 範囲では $7 \times 7$  領域が 32.5%， $5 \times 5$  領域は 38.3% と上下 25 mm 範囲より幾分小さい程度である。

## 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、グリッド 1 スパン長さをもつ小型集合体の破裂試験（初期内圧  $35 \text{ kg/cm}^2$ ）を行った結果、以下の事柄が明らかになった。

- 1) 外周燃料棒を除く、他の燃料棒の昇温速度は、中心燃料棒（D 4）が  $500^\circ\text{C}$  に到達した時点から、破裂時刻までの平均で約  $9^\circ\text{C}/\text{秒}$  である。
- 2) 外周燃料棒は半径方向に温度差がついたために、内部燃料棒よりも膨れ量が小さい。
- 3) 最高圧力は約  $45 \sim 48 \text{ kg/cm}^2$  であって、初期圧力  $35 \text{ kg/cm}^2$  の 29 ~ 37% 増まで達している。破裂圧力は、約  $41 \sim 45 \text{ kg/cm}^2$  であって、その時の温度、即ち破裂温度は、 $850 \sim 880^\circ\text{C}$  である。
- 4) 又、最高圧力から破裂までの圧力降下は  $2 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$  で、その降下時間は  $10 \sim 26$  秒である。
- 5) 隣接燃料棒同志が接触する 34% 以上の膨れ長さは、ほとんどが破裂開口部の長さであって、0 ~ 40 mm と短かい。
- 6) 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、破裂開口の向きは温度の高い方に向っていることが認められた。又、破裂開口部は隣接燃料棒と接触しているが、相手の膨れに対して影響を与えるまでに至っていない。
- 7) 流路閉塞率  
集合体（ $7 \times 7$  領域）の最大流路閉塞率は 40.5%， $5 \times 5$  領域は 51.4% であって、発熱中心より上方 44.5 mm の位置である。また、この最大流路閉塞位置より上下 25 mm 範囲の平均流路閉塞率は、 $7 \times 7$  領域が 33.8%， $5 \times 5$  領域が 41.4% である。

### 3.7 流路閉塞

流路閉塞率は、 $7 \times 7$  領域及び $5 \times 5$  領域の最も膨れた附近のみ求めて、Table 5 に断面増加率と共に示し、その分布を Fig. 12-1~2 に示した。 $7 \times 7$  領域の最大流路閉塞率は、40.5%， $5 \times 5$  領域が 51.4% で、発熱中心より上方 44.5 mm の位置である。又、この最大流路閉塞位置より上下 25 mm 範囲での平均流路閉塞率は、 $7 \times 7$  領域が 33.8%， $5 \times 5$  領域が 41.1% である。同じく上下 50 mm 範囲では $7 \times 7$  領域が 32.5%， $5 \times 5$  領域は 38.3% と上下 25 mm 範囲より幾分小さい程度である。

## 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、グリッド 1 スパン長さをもつ小型集合体の破裂試験（初期内圧  $35 \text{ kg/cm}^2$ ）を行った結果、以下の事柄が明らかになった。

- 1) 外周燃料棒を除く、他の燃料棒の昇温速度は、中心燃料棒（D 4）が  $500^\circ\text{C}$  に到達した時点から、破裂時刻までの平均で約  $9^\circ\text{C}/\text{秒}$  である。
- 2) 外周燃料棒は半径方向に温度差がついたために、内部燃料棒よりも膨れ量が小さい。
- 3) 最高圧力は約  $45 \sim 48 \text{ kg/cm}^2$  であって、初期圧力  $35 \text{ kg/cm}^2$  の 29 ~ 37% 増まで達している。破裂圧力は、約  $41 \sim 45 \text{ kg/cm}^2$  であって、その時の温度、即ち破裂温度は、 $850 \sim 880^\circ\text{C}$  である。
- 4) 又、最高圧力から破裂までの圧力降下は  $2 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$  で、その降下時間は  $10 \sim 26$  秒である。
- 5) 隣接燃料棒同志が接触する 34% 以上の膨れ長さは、ほとんどが破裂開口部の長さであって、0 ~ 40 mm と短かい。
- 6) 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、破裂開口の向きは温度の高い方に向っていることが認められた。又、破裂開口部は隣接燃料棒と接触しているが、相手の膨れに対して影響を与えるまでに至っていない。
- 7) 断面増加率は、多くの燃料棒が破裂した位置で大きくなり、集合体（ $7 \times 7$  領域）の最大値は 54.2%，領域別でも最も大きいのは、 $3 \times 3$  領域の 71.2% である。
- 8) 流路閉塞率  
集合体（ $7 \times 7$  領域）の最大流路閉塞率は 40.5%， $5 \times 5$  領域は 51.4% であって、発熱長中心より上方 44.5 mm の位置である。また、この最大流路閉塞位置より上下 25 mm 範囲の平均流路閉塞率は、 $7 \times 7$  領域が 33.8%， $5 \times 5$  領域が 41.4% である。

References

- (1) Chapman,R.H., et al.:ORNL/NUREG/TM-322(1979), 337(1979), 360(1980), 392(1980)
- (2) Erbacher,F.J., Neitzel,H.J., Wiehr,H.; ASTM-STP-681, 429(1978)
- (3) Erbacher,F.J.: Proc. ANS Topical Meeting on Reactor Safety Aspect of Fuel Behavior, 2-100(1981)
- (4) Hashimoto,M., et al.; JAERI-M 9233(1980)
- (5) Otomo,T., et al.; JAERI-M 9624(1981)
- (6) Hashimoto,M., et al.;JAERI-M 83-038(1983)

Table 1-1 AVERAGE HEATING RATE OF EACH THERMOCOUPLE

Ass. No 7808

	1	2	3	4	5	6 ( $^{\circ}\text{C/sec}$ )	7
A	7.4	7.7	8.8	8.3	8.6	8.6	8.4
B	7.6	8.5	8.7	8.9	9.1	9.1	9.0
C	8.0	8.4	9.2	9.0	9.4	9.1	8.4
D	7.7	9.3	8.7	9.3	9.3	9.5	9.0
E	7.8	8.9	9.5	9.0	8.9	9.2	8.9
F	7.4	9.1	8.6	8.8	—	9.1	8.2
G	6.6	8.4	8.4	8.7	8.5	8.3	8.1

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 (893°C)

Table 1-2 AVERAGE HEATING RATE OF CLADDING

Ass. No 7808

(°c/sec)			
A1	A2	A3	A4
7.0	8.4	8.6	8.4
7.4	7.7	8.8	8.3
7.9			8.8
	B2	B3	B4
Tc-1	8.4	8.5	8.9
Tc-2	8.5	8.7	8.9
Tc-3	8.5		
	C3	C4	D4
	9.3	9.0	7.0
	9.2	9.0	9.4
	9.1		9.3
			8.9
			6.5
Tc-S1			7.0
Tc-1			9.4
Tc-2			9.3
Tc-3			8.9
Tc-S2			6.5

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 (893°C)

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

Ass. No 7808

(°c/sec)			
A1	A2	A3	A4
7.1	7.8	8.9	8.3
6.4	7.4	7.6	7.8
5.0			8.8
	B2	B3	B4
Tc-1	8.8	9.2	8.0
Tc-2	8.3	8.7	7.9
Tc-3	7.6		
	C3	C4	
	10.1	9.4	
	9.3	9.0	
	8.2		
	D4		
Tc-S1	7.8		
Tc-1	9.3		
Tc-2	9.3		
Tc-3	9.2		
Tc-S2	7.5		

Table 3 RESULTS OF BURST PRESSURE AND BURST TIME

Ass. No 7808

	1	2	3	4	5	6	7
A	47-54	47-52	47-56	46-44	47-50	46-46	46-48
	43-72	44-70	43-70	43-68	42-70	43-68	43-72
B	47-52	46-52	46-54	47-50	46-52	48-54	47-56
	44-68	42-70	41-66	42-66	42-66	44-66	44-68
C	47-44	47-54	47-54	46-50	47-52	47-50	47-44
	43-66	43-64	43-64	42-64	44-64	45-64	44-68
D	47-44	47-50	47-46	47-42	47-52	47-50	47-42
	43-64	43-64	43-64	43-64	43-64	44-64	45-64
E	46-50	47-50	47-52	46-42	47-38	47-50	47-48
	44-64	43-64	44-62	42-62	43-62	43-64	44-66
F	48-44	47-44	46-52	47-54	46-50	46-52	46-54
	44-66	42-64	43-64	42-64	43-64	41-64	43-66
G	48-46	45-48	46-40	45-52	47-44	46-44	47-46
	45-66	43-66	44-66	43-66	44-68	43-68	42-68

Pm : Maximum pressure (Kg/cm<sup>2</sup>)

Pm - Tm

Tm : Time of maximum pressure (sec)

Pb - Tb

Pb : Burst pressure (Kg/cm<sup>2</sup>)

Tb : Burst time (sec)

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

Ass. No 7808

	1	2	3	4	5	6	7
A	0.22 4 18	0.17 3 18	0.29 4 14	0.13 3 24	0.25 5 20	0.17 3 18	0.13 3 24
B	0.19 3 16	0.22 4 18	0.42 5 12	0.31 5 16	0.29 4 14	0.33 4 12	0.25 3 12
C	0.33 4 12	0.4 4 10	0.4 4 10	0.29 4 14	0.25 3 12	0.16 2 14	0.13 3 24
D	0.2 4 20	0.29 4 14	0.22 4 18	0.18 4 22	0.33 4 12	0.21 3 14	0.09 2 22
E	0.14 2 14	0.29 4 14	0.3 3 10	0.2 4 20	0.17 4 24	0.29 4 14	0.17 3 18
F	0.18 4 22	0.25 5 20	0.25 3 12	0.5 5 10	0.5 3 6	0.42 5 12	0.25 3 12
G	0.15 3 20	0.11 2 18	0.08 2 26	0.14 2 14	0.21 3 14	0.13 3 24	0.23 5 22

0.18 4 22
-----------------

Average pressure drop rate from maximum  
pressure to burst pressure ( $\text{Kg/cm}^2/\text{sec}$ )  
Pressure drop ( $\text{Kg/cm}^2$ )  
Duration of pressure drop (sec)

Table 5 AMOUNT OF BALLOONING AND CHANNEL BLOCKAGE IN 7808 (35 kg/cm<sup>2</sup>)

D (MM)	BALLOONING (PERCENT)				CHANNEL BLOCKAGE (PERCENT)				BALLOONING (PERCENT)				CHANNEL BLOCKAGE (PERCENT)			
	7*7	5*5	3*3	SKAKU	7KAKU	7*7	5*5	7*7	5*5	3*3	SKAKU	7KAKU	7*7	5*5	7*7	5*5
234.0	19.8	22.8	22.9	16.7	22.8	16.7	16.7	-6.5	45.9	41.7	48.3	42.9	42.9	34.0	35.6	35.6
225.5	19.9	24.0	25.4	23.2	21.8	15.5	15.5	-13.9	47.3	52.5	43.4	57.6	52.5	42.0	42.0	42.0
223.4	18.4	22.3	23.1	21.8	21.2	14.1	14.1	-15.7	48.4	54.5	46.2	59.1	54.5	42.1	37.3	43.2
215.7	17.7	21.2	21.2	21.3	21.2	14.1	14.1	-23.3	47.9	54.6	47.5	58.6	54.6	40.9	40.9	43.2
213.5	21.2	25.0	25.8	24.5	24.5	17.2	17.2	-25.2	46.8	52.7	46.0	56.5	56.5	40.6	35.5	41.3
205.5	19.8	23.5	24.2	23.2	23.7	15.9	15.9	-25.4	40.1	41.1	44.2	44.2	44.2	39.1	39.1	39.1
203.7	20.8	24.4	25.6	25.6	23.7	17.0	17.0	-35.6	40.4	40.2	34.6	43.3	43.3	40.7	31.1	32.5
195.9	23.0	27.2	28.5	26.4	28.5	18.6	18.6	-43.5	42.7	43.2	38.9	45.6	45.6	42.2	42.2	42.2
193.8	23.4	27.9	29.6	26.9	29.6	18.8	18.8	-45.2	39.8	40.4	35.7	43.0	43.0	39.2	39.2	39.2
185.7	21.4	25.7	27.1	24.9	24.9	16.9	16.9	-52.9	42.8	41.7	43.5	43.5	43.5	34.4	34.4	34.4
183.7	23.0	26.8	28.7	25.7	25.7	19.1	19.1	-56.9	36.4	38.4	38.4	37.7	37.7	38.7	38.7	38.7
176.3	24.4	28.6	30.7	27.5	27.5	20.0	20.0	-63.4	35.3	38.0	40.0	36.9	36.9	32.5	32.5	32.5
174.2	25.5	30.1	31.8	29.2	29.2	20.7	20.7	-65.4	35.2	37.8	40.5	36.3	36.3	32.5	32.5	32.5
166.2	25.5	30.1	31.8	29.2	29.2	21.0	21.0	-73.7	37.3	39.8	39.2	40.1	40.1	34.6	34.6	34.6
164.4	25.5	29.7	31.8	28.6	28.6	21.0	21.0	-75.7	36.1	35.8	33.9	37.4	37.4	32.4	32.4	32.4
156.5	26.6	31.3	33.9	29.9	29.9	21.8	21.8	-83.6	32.7	35.0	30.3	37.6	37.6	30.3	30.3	30.3
154.2	26.3	31.1	33.2	29.9	29.9	21.4	21.4	-86.0	31.7	33.5	28.7	36.1	36.1	29.9	29.9	29.9
146.2	26.4	31.1	34.1	29.4	29.4	21.5	21.5	-94.0	30.9	31.7	29.2	33.1	33.1	30.0	30.0	30.0
143.2	28.0	33.2	36.6	31.3	31.3	22.5	22.0	-96.1	29.6	29.6	27.5	30.7	30.7	29.7	29.7	29.7
135.2	28.1	34.2	41.6	30.0	30.0	21.8	21.8	-104.0	27.2	27.2	24.7	28.3	28.3	27.4	27.4	27.4
133.5	28.1	34.1	41.8	29.7	29.7	21.8	21.8	-105.6	28.0	28.1	25.2	29.7	29.7	28.0	28.0	28.0
125.6	27.7	31.2	35.4	28.9	28.9	23.9	23.9	-113.6	25.4	26.3	23.7	27.7	27.7	24.4	24.4	24.4
123.8	27.7	31.1	34.9	29.0	29.0	24.1	24.1	-116.3	27.1	27.1	24.7	29.4	29.4	26.5	26.5	26.5
116.0	25.9	29.0	31.3	27.7	27.7	22.7	22.7	-124.2	27.8	27.8	23.7	27.7	27.7	27.8	27.8	27.8
113.9	25.9	29.3	31.3	28.1	28.1	22.4	22.4	-125.8	27.9	27.9	24.8	29.5	29.5	27.9	27.9	27.9
105.6	28.6	32.5	33.3	32.1	32.1	24.0	24.0	-134.3	27.1	27.1	25.3	28.3	28.3	27.0	27.0	27.0
103.7	28.8	32.6	32.4	32.7	32.7	22.7	22.7	-135.4	27.1	27.1	26.8	28.4	28.4	27.4	27.4	27.4
95.6	29.8	35.6	32.9	37.1	37.1	23.9	23.9	-143.0	25.4	26.1	24.0	27.2	27.2	24.6	24.6	24.6
93.7	33.0	39.7	34.7	42.6	42.6	26.0	26.0	-145.0	23.1	23.1	23.0	20.3	20.3	23.3	23.3	23.3
85.6	33.3	40.5	33.7	44.3	44.3	25.8	25.8	-153.3	23.5	22.4	20.6	23.5	23.5	24.6	24.6	24.6
83.3	35.0	42.5	36.4	46.0	46.0	27.2	28.9	-155.5	24.0	24.5	22.7	21.9	21.9	22.7	22.7	22.7
75.5	34.4	40.7	34.2	44.3	44.3	27.9	27.9	-163.8	22.7	22.7	21.9	23.5	23.5	22.7	22.7	22.7
73.4	40.6	47.6	42.1	50.7	53.3	31.6	37.1	-165.7	23.8	23.8	22.9	24.9	24.9	23.7	23.7	23.7
65.6	36.8	43.9	37.7	47.4	47.4	28.6	32.4	-173.5	20.2	21.0	20.1	21.5	21.5	19.4	19.4	19.4
64.0	38.5	45.8	49.1	50.9	50.9	30.3	36.7	-175.6	20.4	20.4	19.7	20.0	20.0	18.9	18.9	18.9
55.9	40.5	46.0	44.4	46.9	46.9	34.4	34.4	-183.6	20.4	20.4	20.8	19.7	19.7	21.3	21.3	21.3
53.7	38.7	44.6	41.9	46.1	46.1	32.6	32.6	-185.9	20.8	20.8	21.1	20.0	20.0	21.7	21.7	21.7
47.8	48.6	59.5	59.8	59.3	59.3	37.2	37.2	-193.9	21.7	22.5	22.0	22.8	22.8	20.9	20.9	20.9
44.5	54.2	64.5	64.5	64.5	64.5	40.5	51.4	-195.5	18.6	19.2	18.3	19.6	19.6	18.1	18.1	18.1
36.9	49.1	62.1	64.4	60.8	60.8	35.6	47.0	-203.2	19.5	20.0	19.0	20.6	20.6	18.9	18.9	18.9
34.2	47.4	59.7	61.3	58.8	58.8	37.3	47.0	-205.6	19.6	20.2	19.2	20.8	20.8	18.9	18.9	18.9
26.2	45.7	54.1	55.8	53.1	53.1	36.9	36.9	-213.9	20.6	21.6	21.2	21.9	21.9	19.5	19.5	19.5
24.3	42.1	49.9	51.2	49.2	49.2	32.7	32.7	-216.0	15.6	15.6	15.1	16.7	16.7	15.0	15.0	15.0
16.4	44.3	48.2	44.2	50.4	50.4	40.2	40.2	-224.1	15.0	15.4	14.6	15.8	15.8	14.6	14.6	14.6
14.4	44.3	46.3	41.7	48.9	48.9	42.2	32.5	-226.0	15.6	15.6	15.1	16.4	16.4	15.2	15.2	15.2
6.4	45.0	44.9	40.9	47.1	47.1	45.2	34.9	-233.8	15.5	16.3	16.1	16.4	16.4	14.6	14.6	14.6
4.0	42.9	42.7	39.1	44.6	44.6	43.1	33.0	-235.4	12.1	12.1	11.5	13.1	13.1	11.7	11.7	11.7
-4.2	43.5	44.7	41.7	46.4	46.4	42.2	32.2	-243.0	13.8	14.9	14.6	15.0	15.0	12.6	12.6	12.6

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	54.2	66.9	71.2	45.2	64.5

Table 6-2 LENGTH OF BALLOONED REGION (mm)

Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	7□	5□
126.6	—	—	—	—	—
100.	—	—	—	—	—
77.9	—	—	—	—	—
50.	5	35	25	—	45

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 A1 CHEMICAL COMPOSITION OF ZRY-4 (WT %).

Sn	Fe	Cr	Fe+Cr
1.54	0.20	0.11	0.31

Al	B	Cd	C	Co	Cu	Hf	Mn	Si
	4.9	0.2	0.2	150	10	21	58	25
(ppm)								
W	U	Ni	Cl	H	Pb	Mg	N	Ti
25	1.4	35	5	5	25	10	33	25

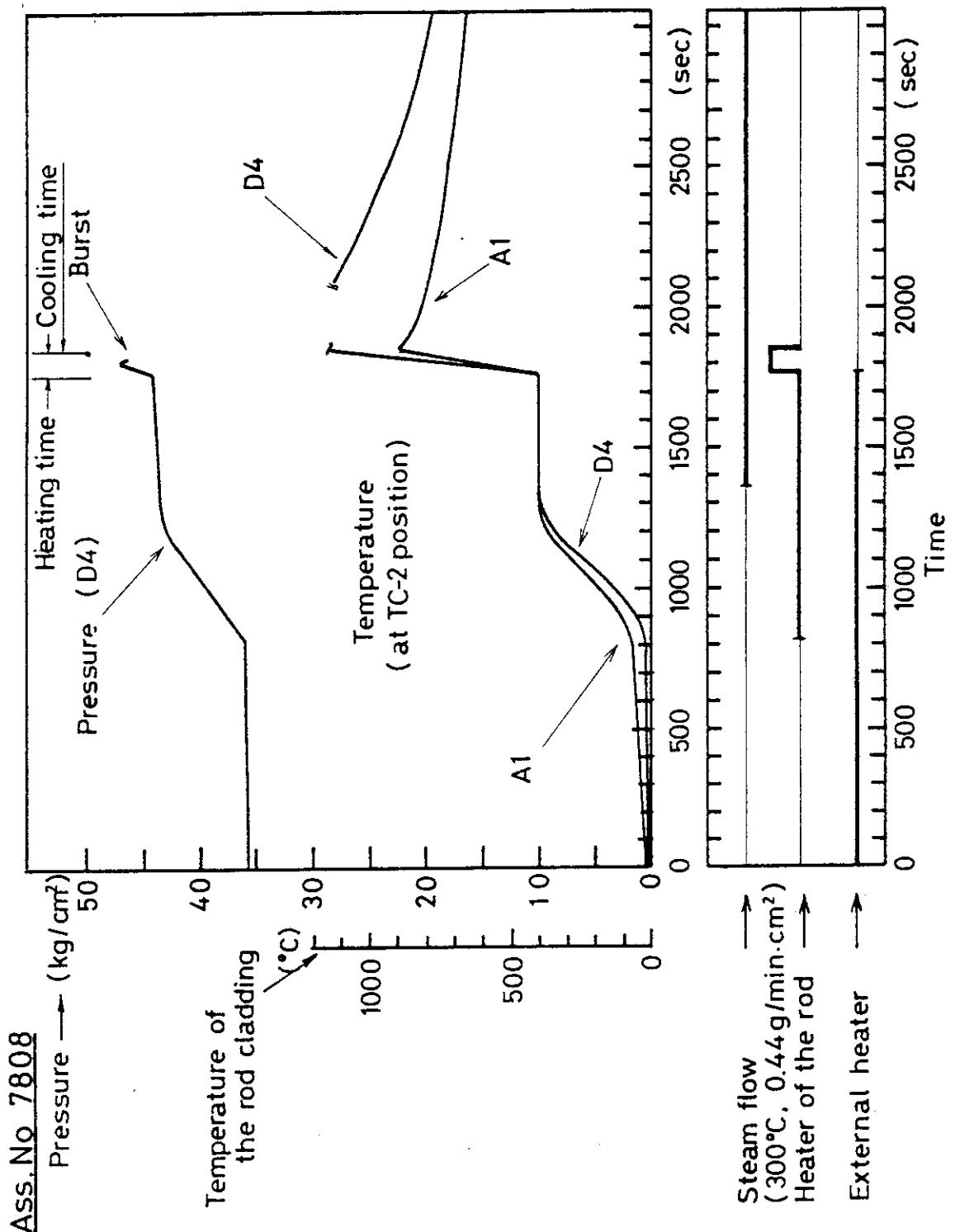


Fig. 1 HISTORIES OF CLADDING TEMPERATURES, INTERNAL PRESSURE AND OPERATING CONDITIONS.

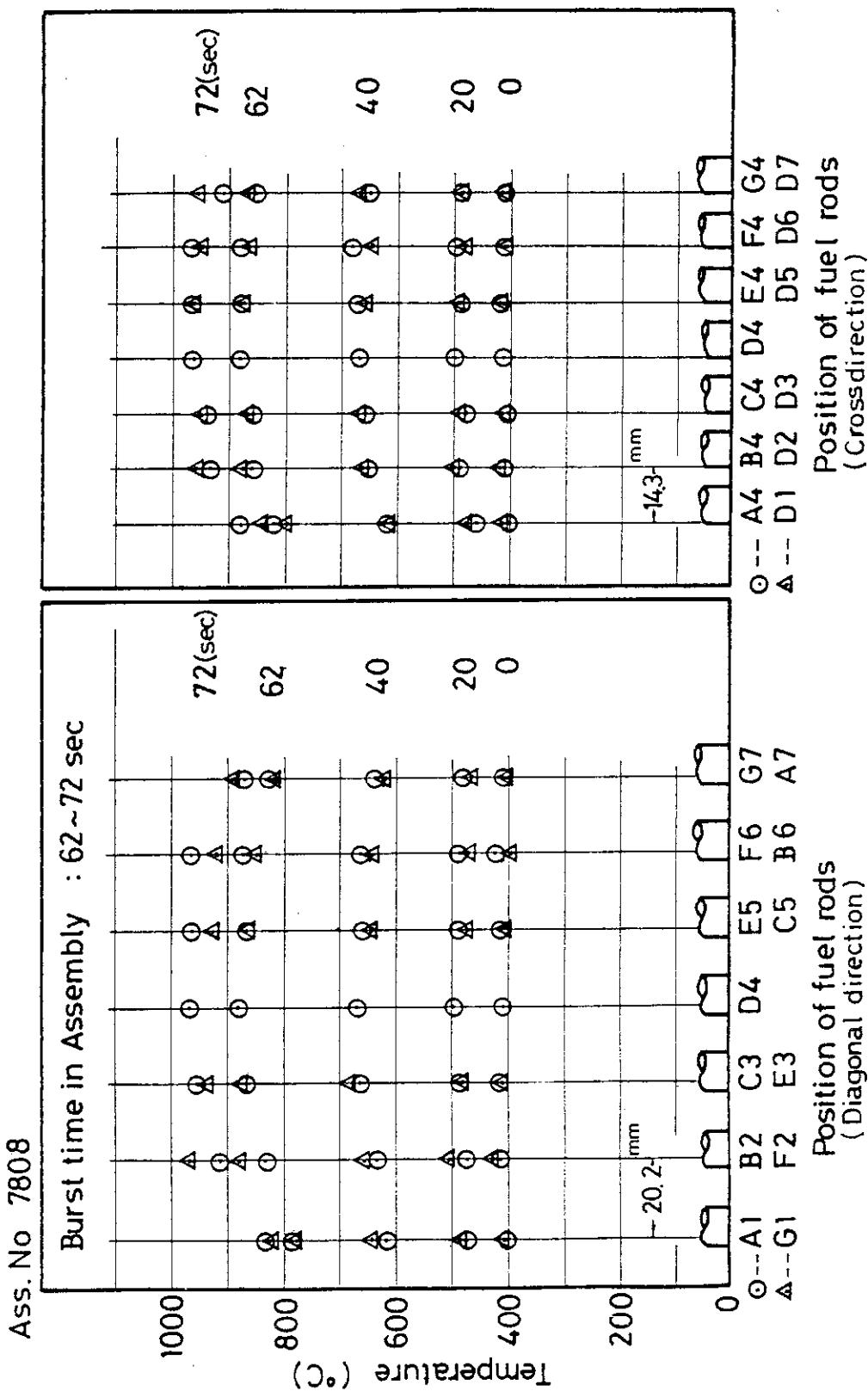


Fig. 2-1 HORIZONTAL TEMPERATURE DISTRIBUTION OF THE CLADDING AS A FUNCTION OF TIME  
(at  $T_{\text{C}}=2$ )

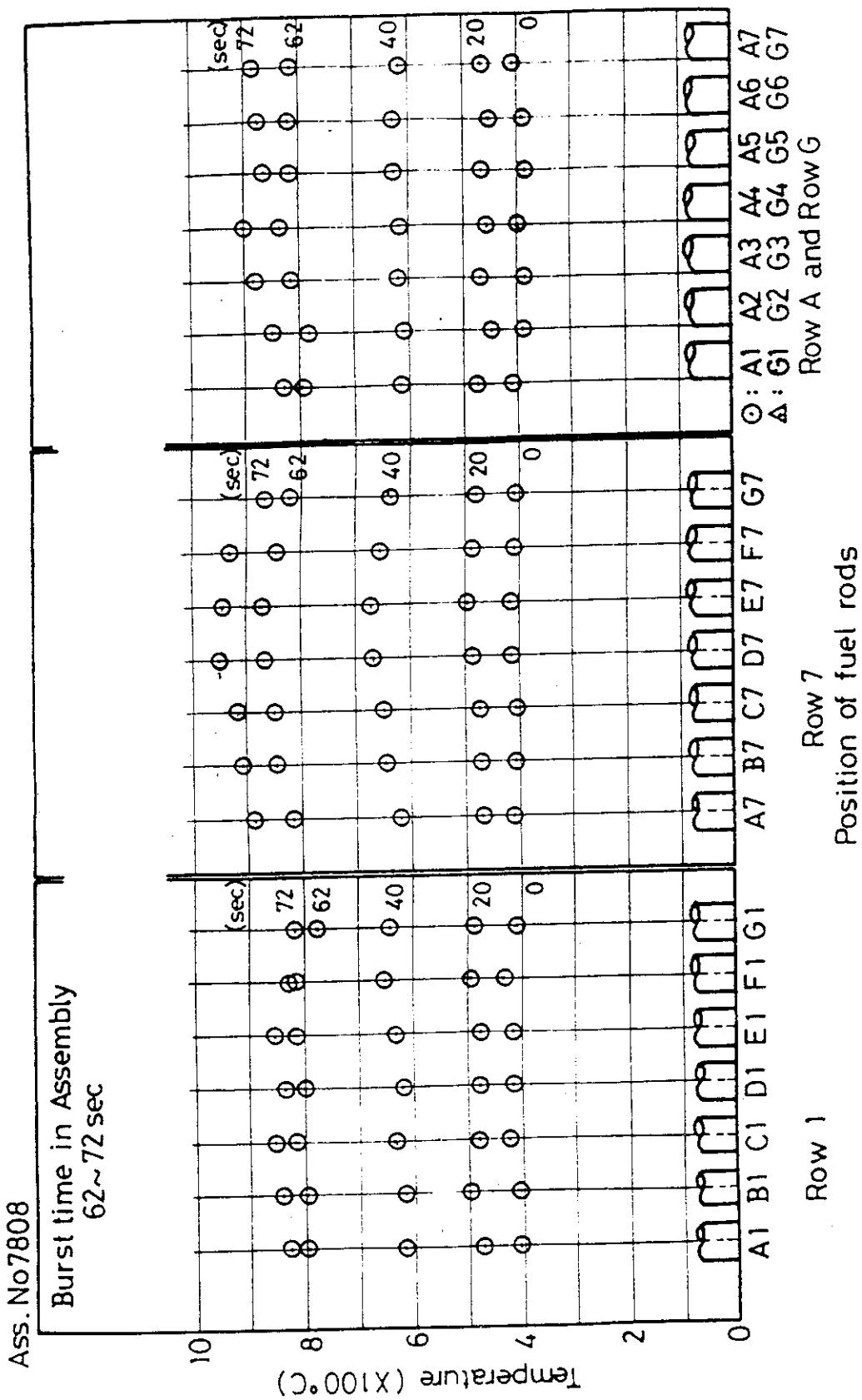


Fig 2-2 HORIZONTAL TEMPERATURE DISTRIBUTION OF THE CLADDING AS A FUNCTION OF TIME  
(at TC-2)

ASS. No 7808

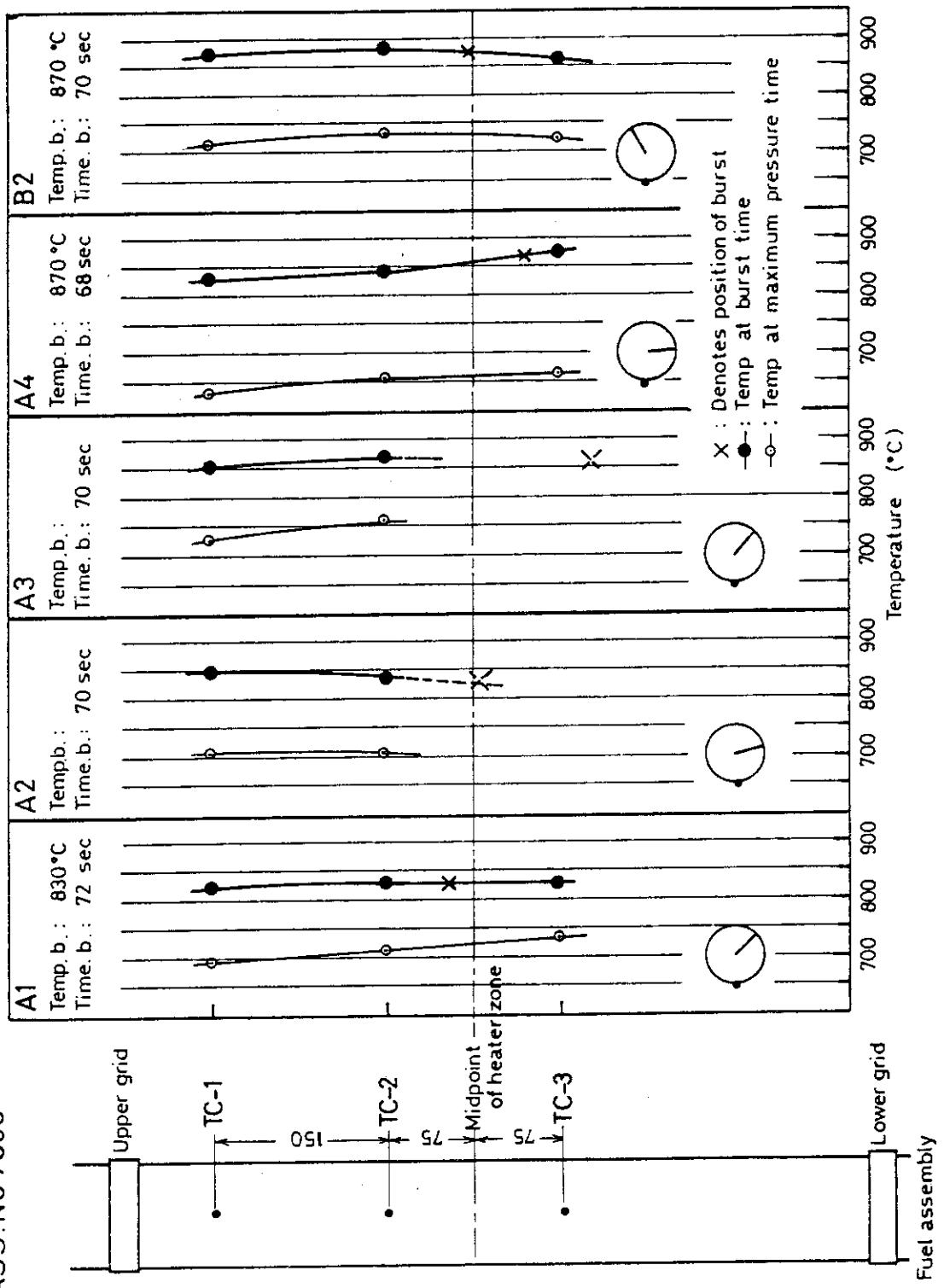


Fig. 3-1 AXIAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AT BURST TIME.

ASS. No 7808

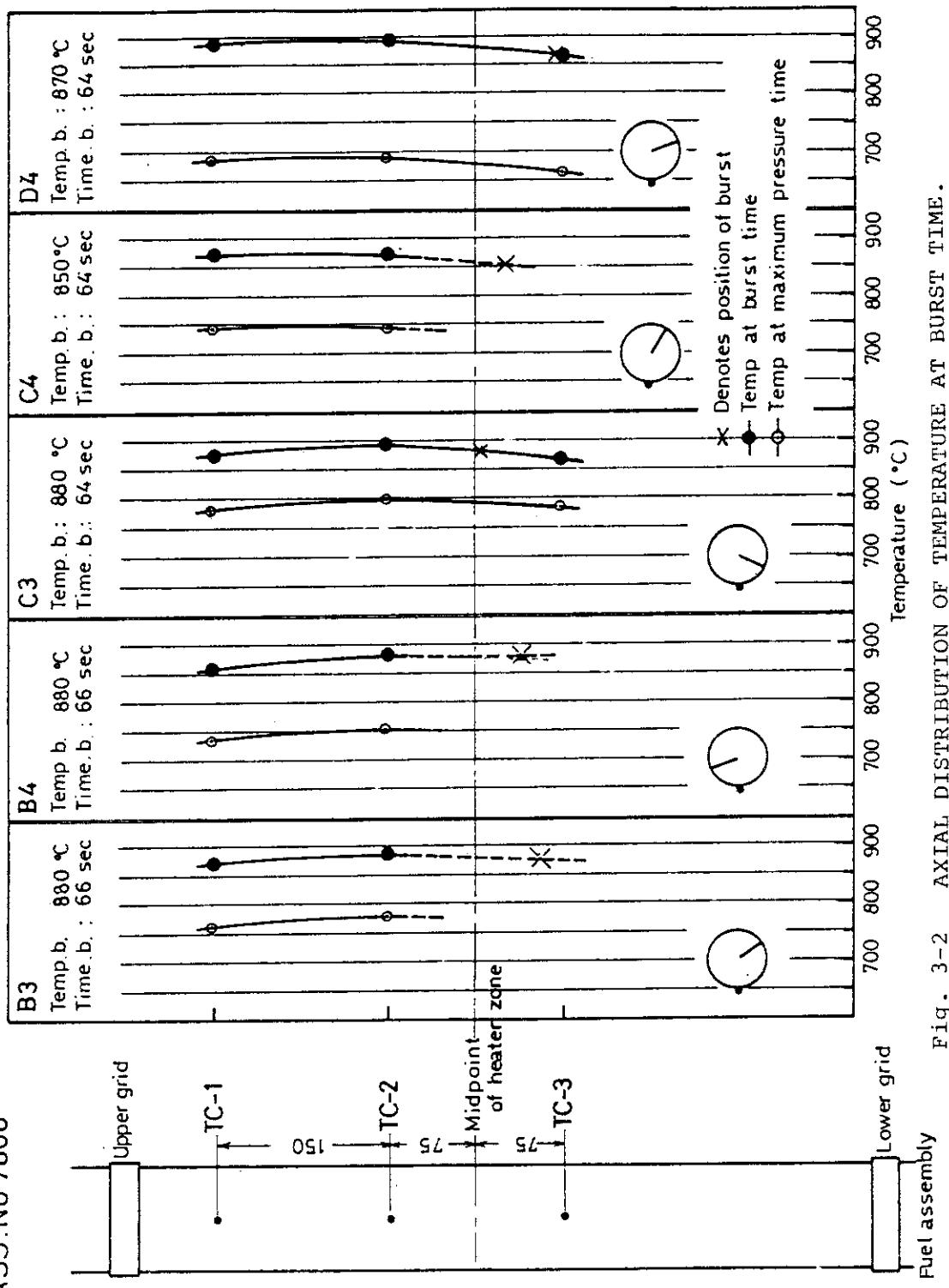


Fig. 3-2 AXIAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AT BURST TIME.

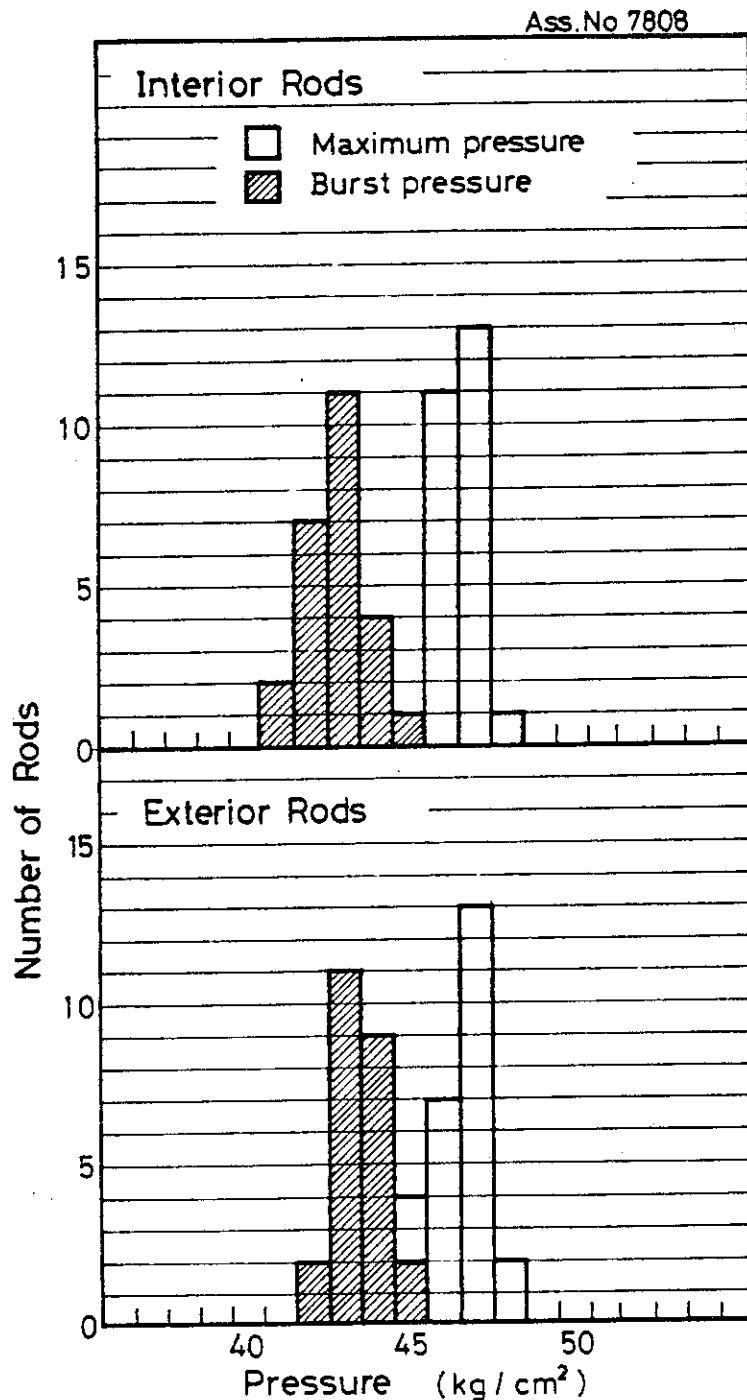


Fig. 4 DISTRIBUTION OF MAXIMUM PRESSURE  
AND BURST PRESSURE

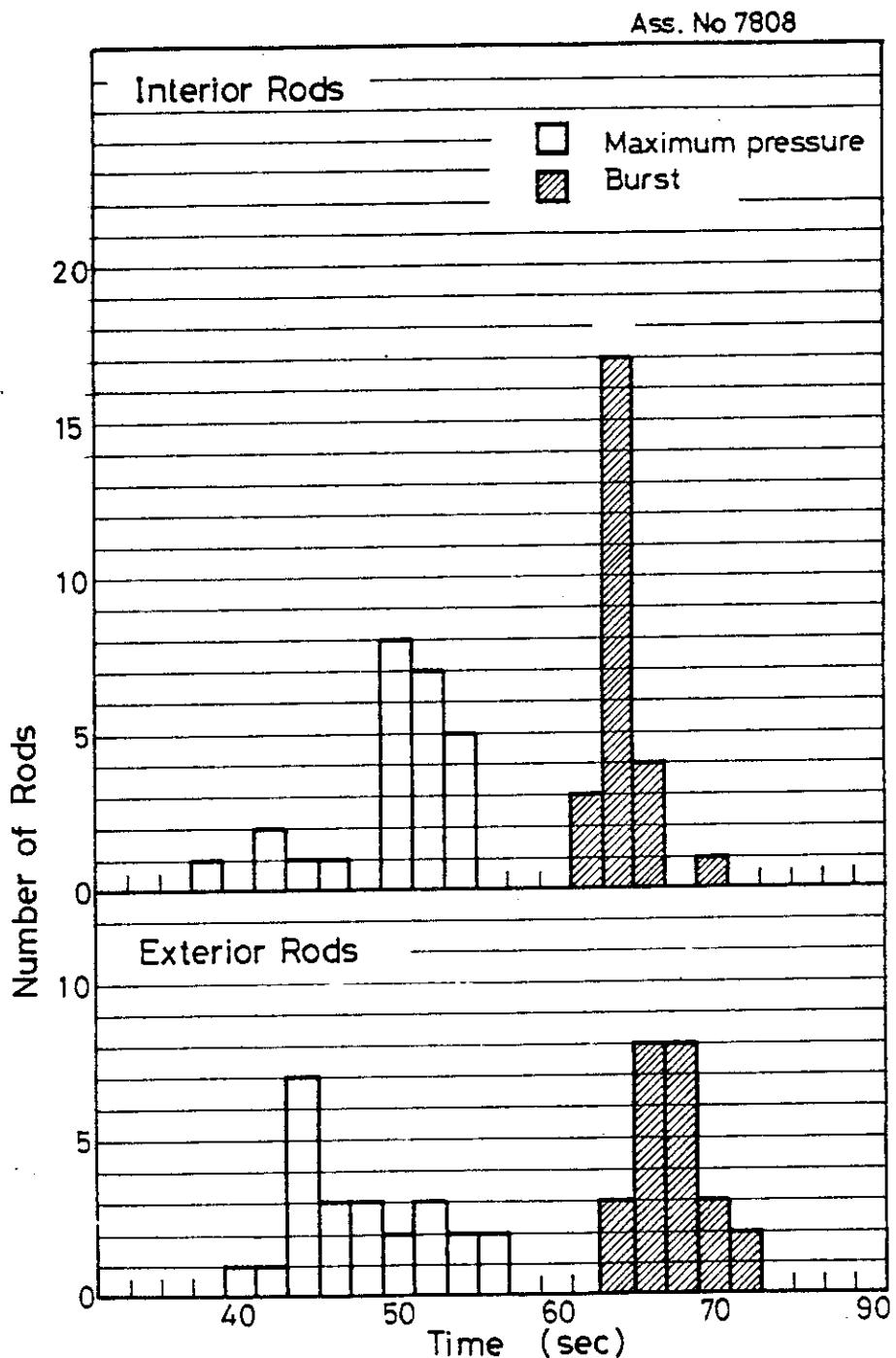
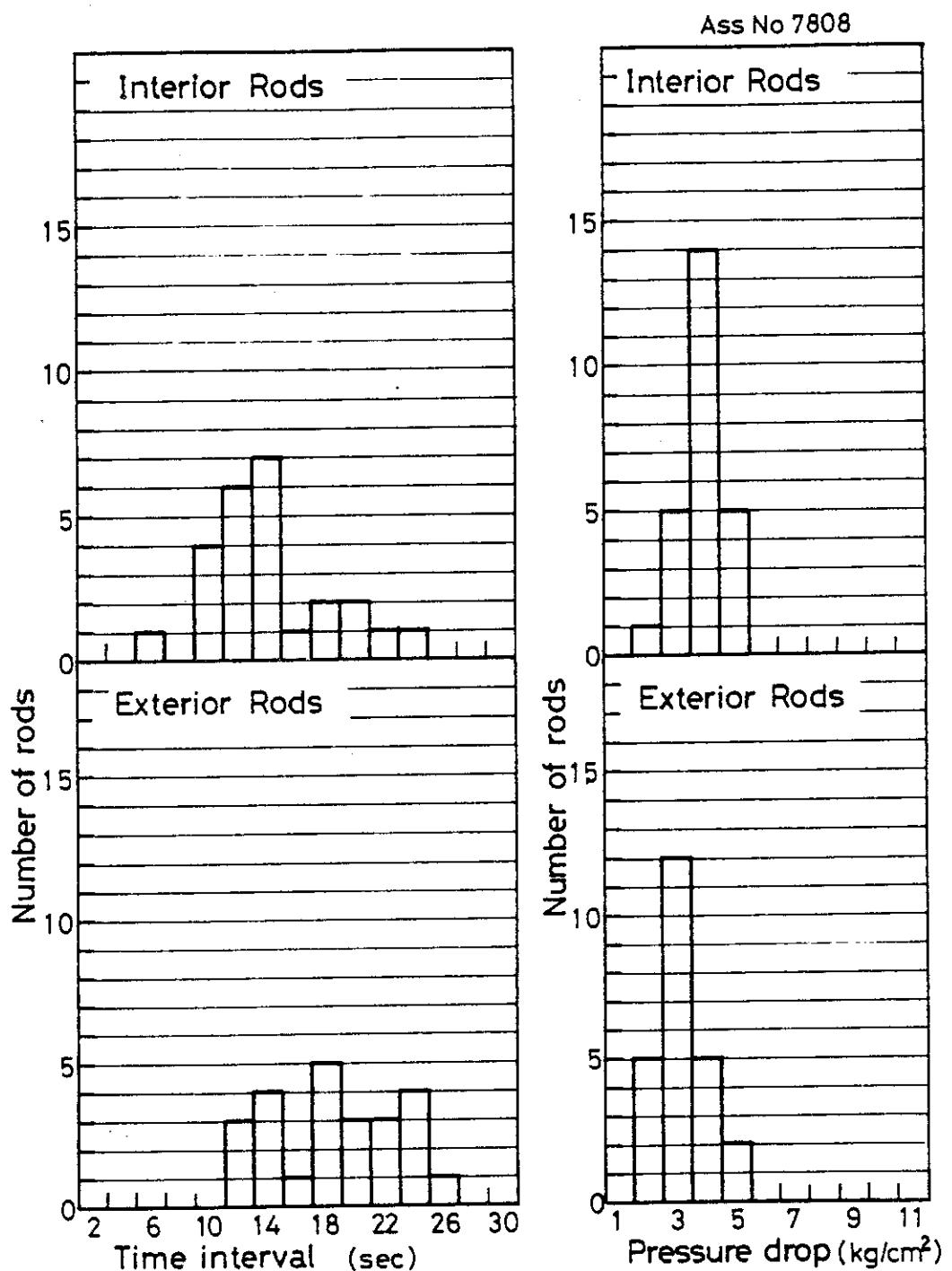


Fig. 5 FREQUENCY DISTRIBUTION OF MAXIMUM PRESSURE AND BURST



Ass. No 7808

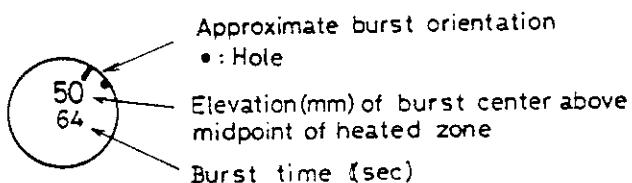
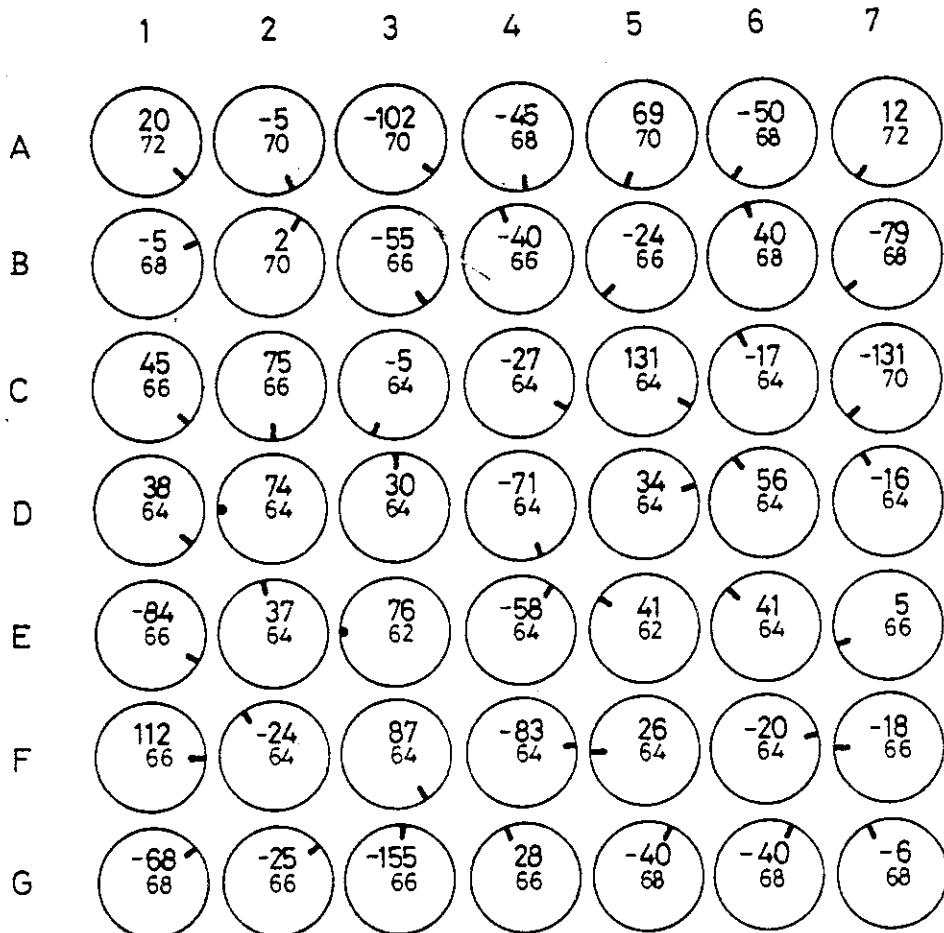


Fig. 7 APPROXIMATE ORIENTATION AND ELEVATION OF BURSTS AND BURST TIME.

Ass. No 7808

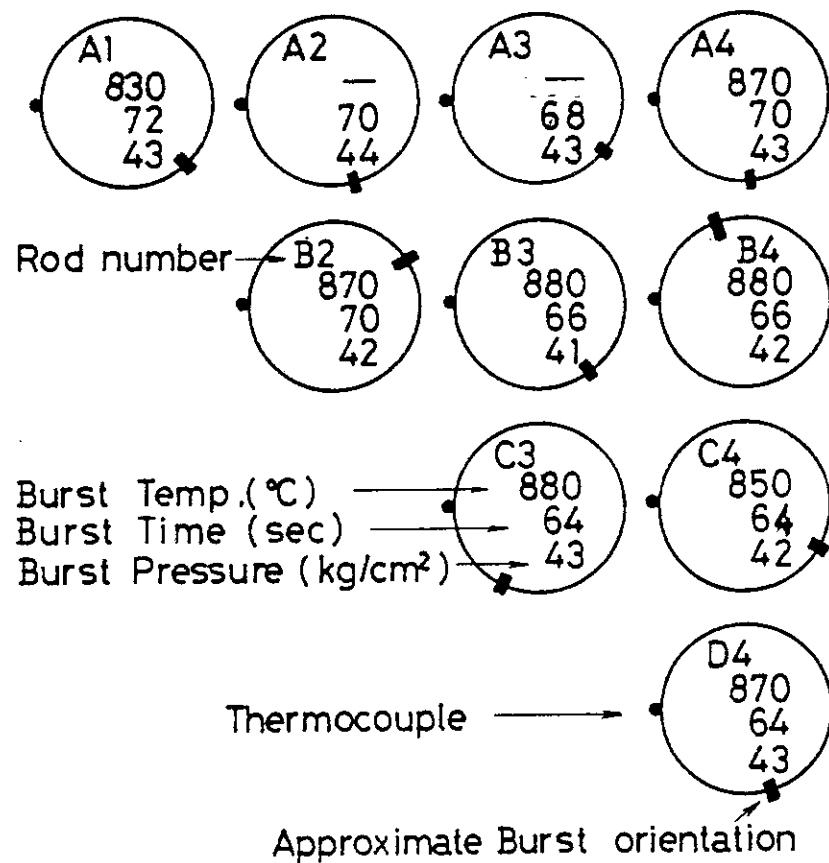


Fig. 8 SUMMARY OF BURST DATA

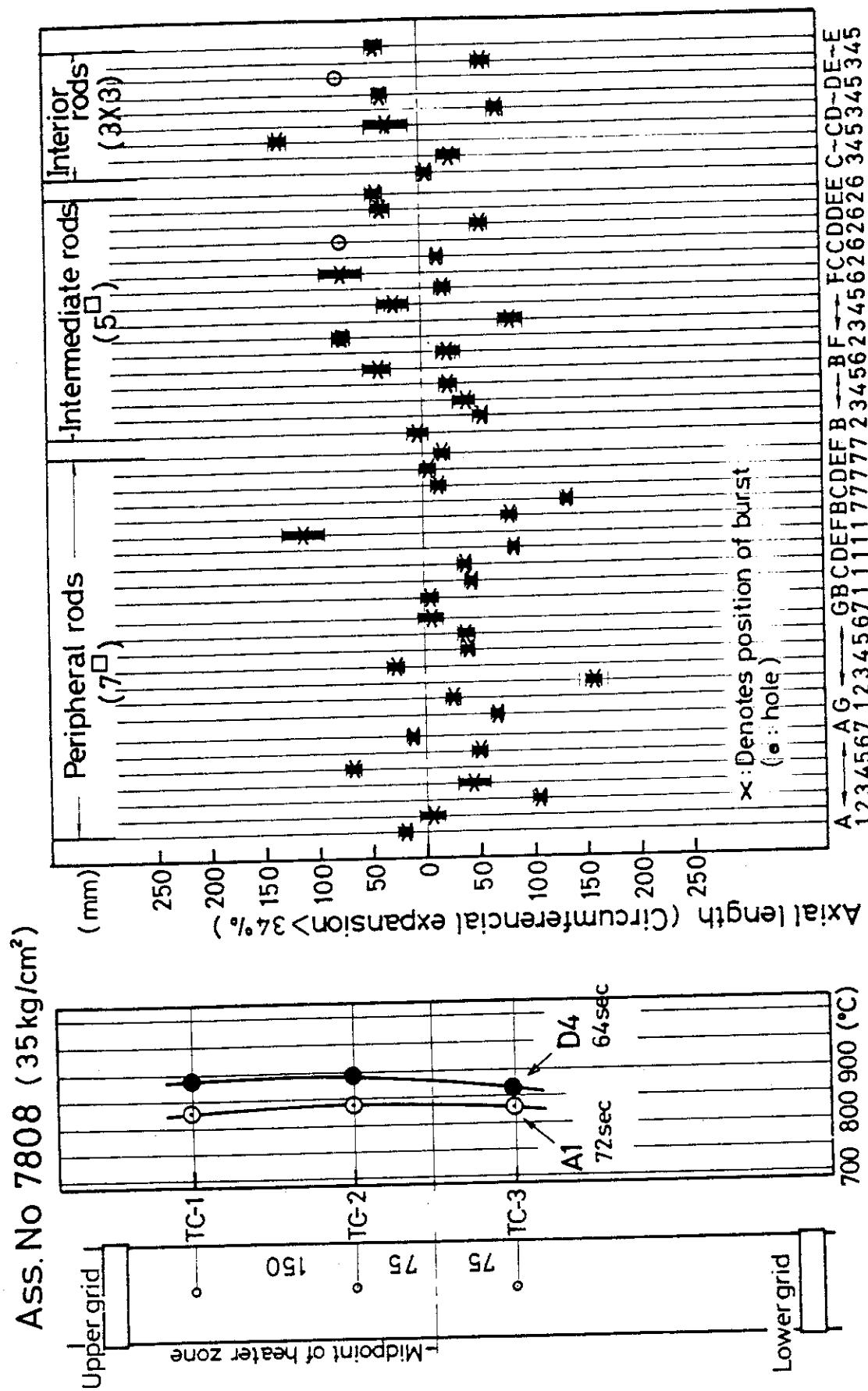


Fig. 9 AXIAL LOCATIONS OF BURST POSITION AND BALLOONED REGION

Ass. No 7808

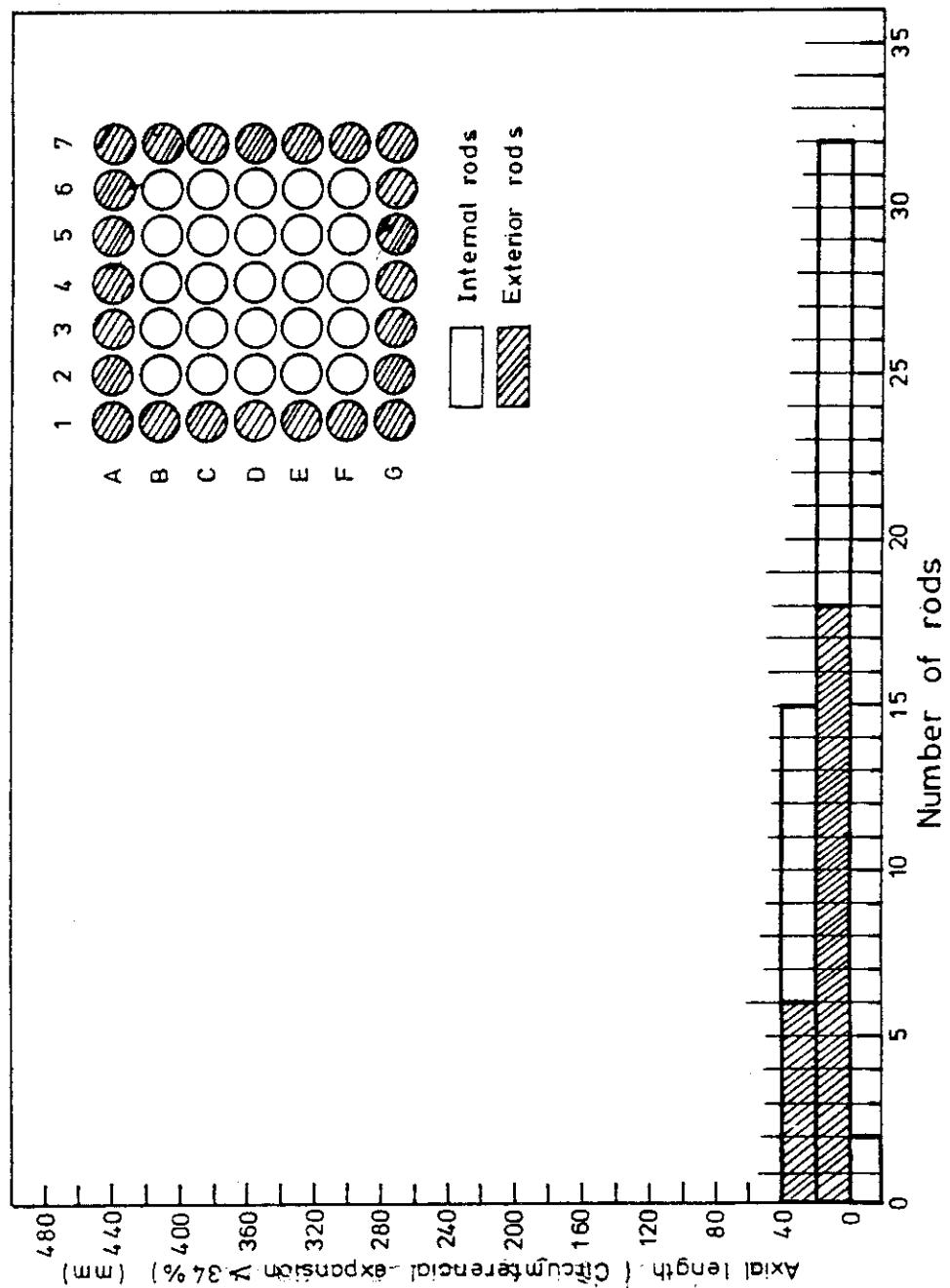
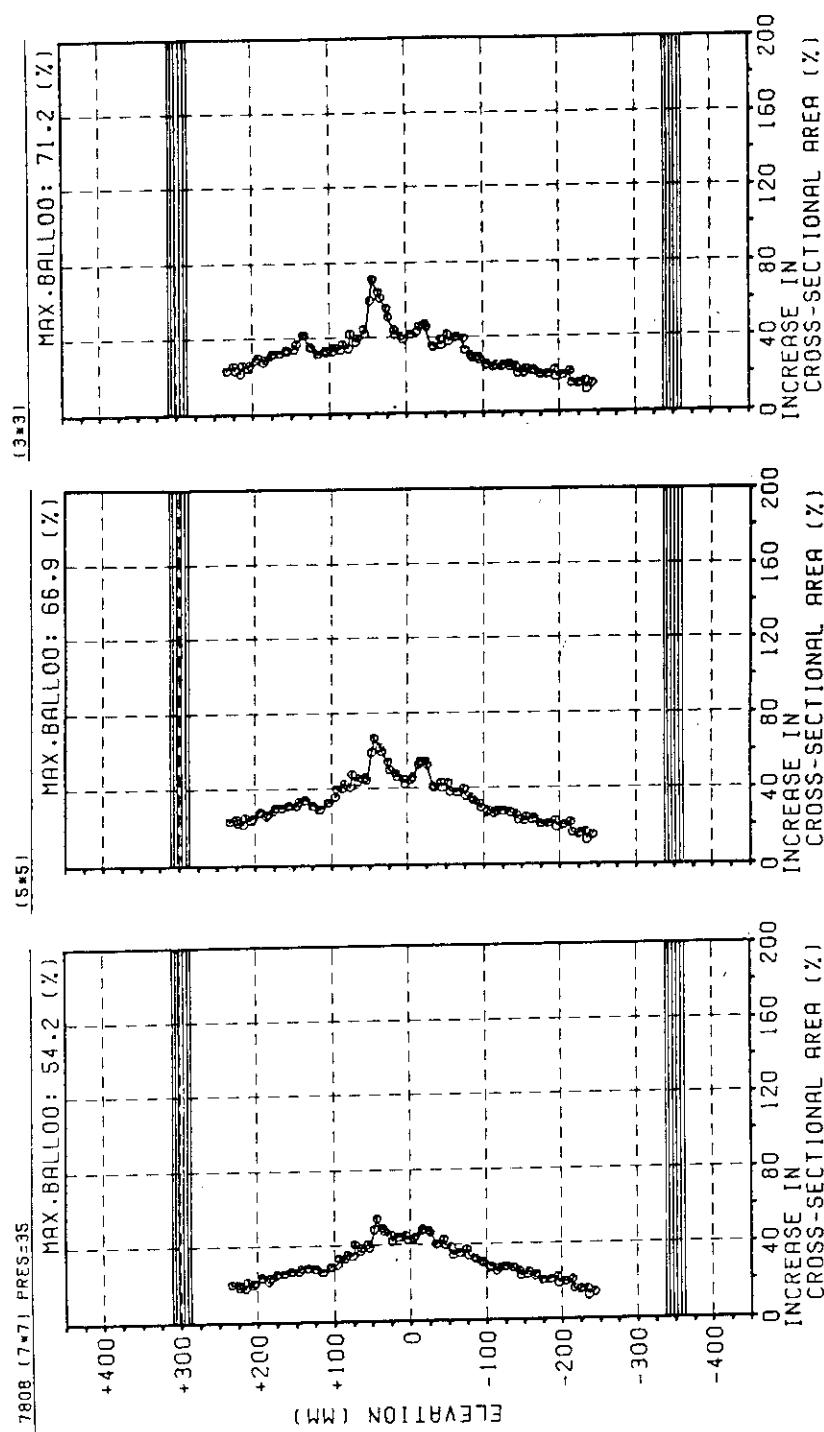
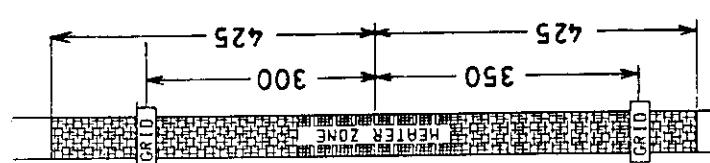


Fig.10 FREQUENCY DISTRIBUTION OF BALLOONED REGION (EXPANDED ABOVE 34%)



**Fig. 11-1 AXIAL DISTRIBUTION OF BALLOONING**



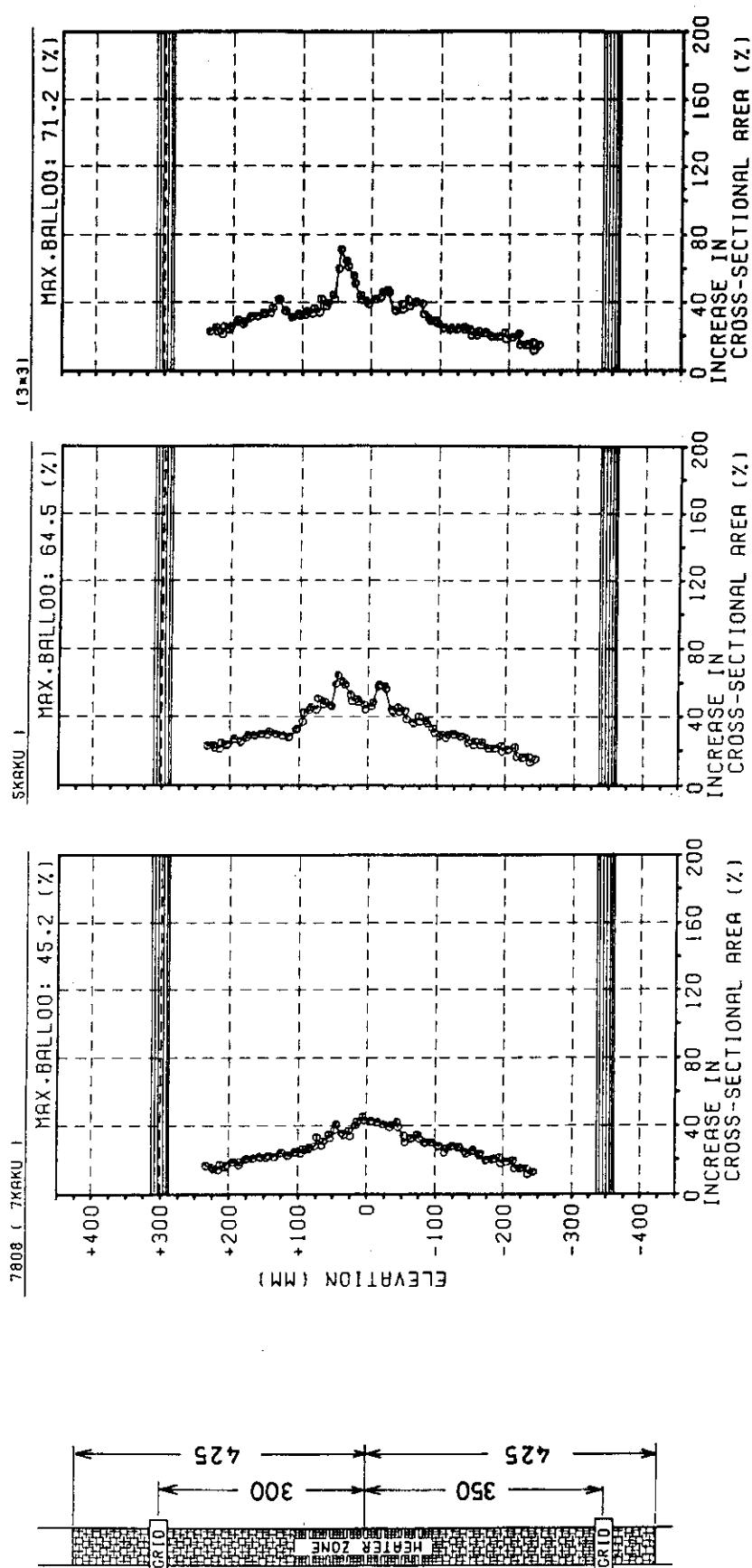


Fig. 11-2 AXIAL DISTRIBUTION OF BALLOONING

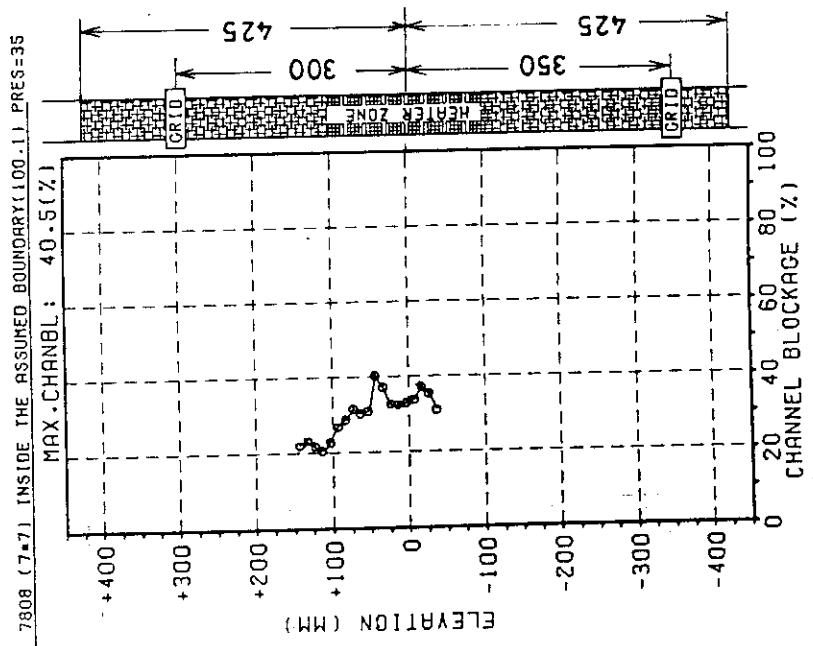


Fig. 12-1  
AXIAL DISTRIBUTION OF CHANNEL BLOCKAGE.

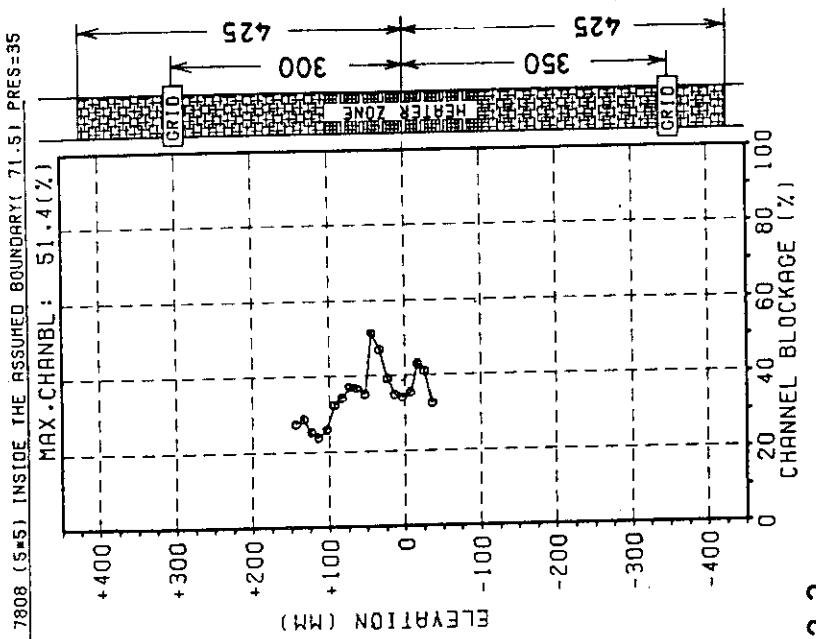


Fig. 12-2  
AXIAL DISTRIBUTION OF CHANNEL BLOCKAGE.

```

STEAM FLOW RATE 0.441(CH2-MIN)
INI.INT.PRESS. 35 (KG/CH2)
HEATING RATE 5.3-7.9 ( C / SEC)( 500-890 C )
BURST TEMP. 0 (-880 C)
CHANBL=(TC5A-S0)/(RS5H-S0)*100
SOL INT. AREA1= 2256.4 (MM2)
ASSEM= 5112.3 (MM2)
OTRAG= 0.0250000 (MM2/PP2)
TEST DATE 1979-1-26

```

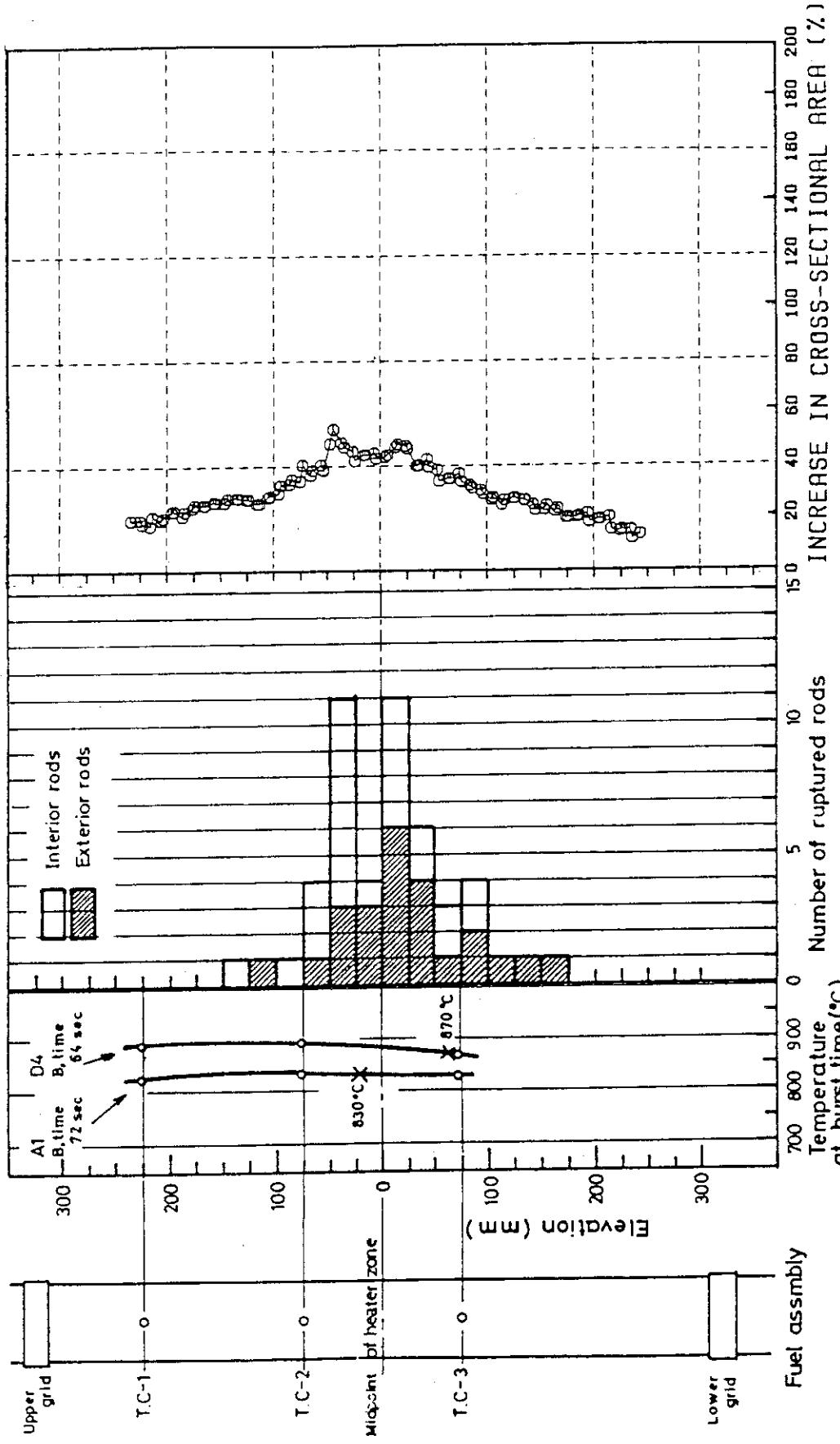
Ass. No 7808 (35 kg/cm<sup>2</sup>)

Fig. 13 AXIAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AT BURST TIME, RUPTURED POSITION AND INCREASE IN CROSS-SECTIONAL AREA.

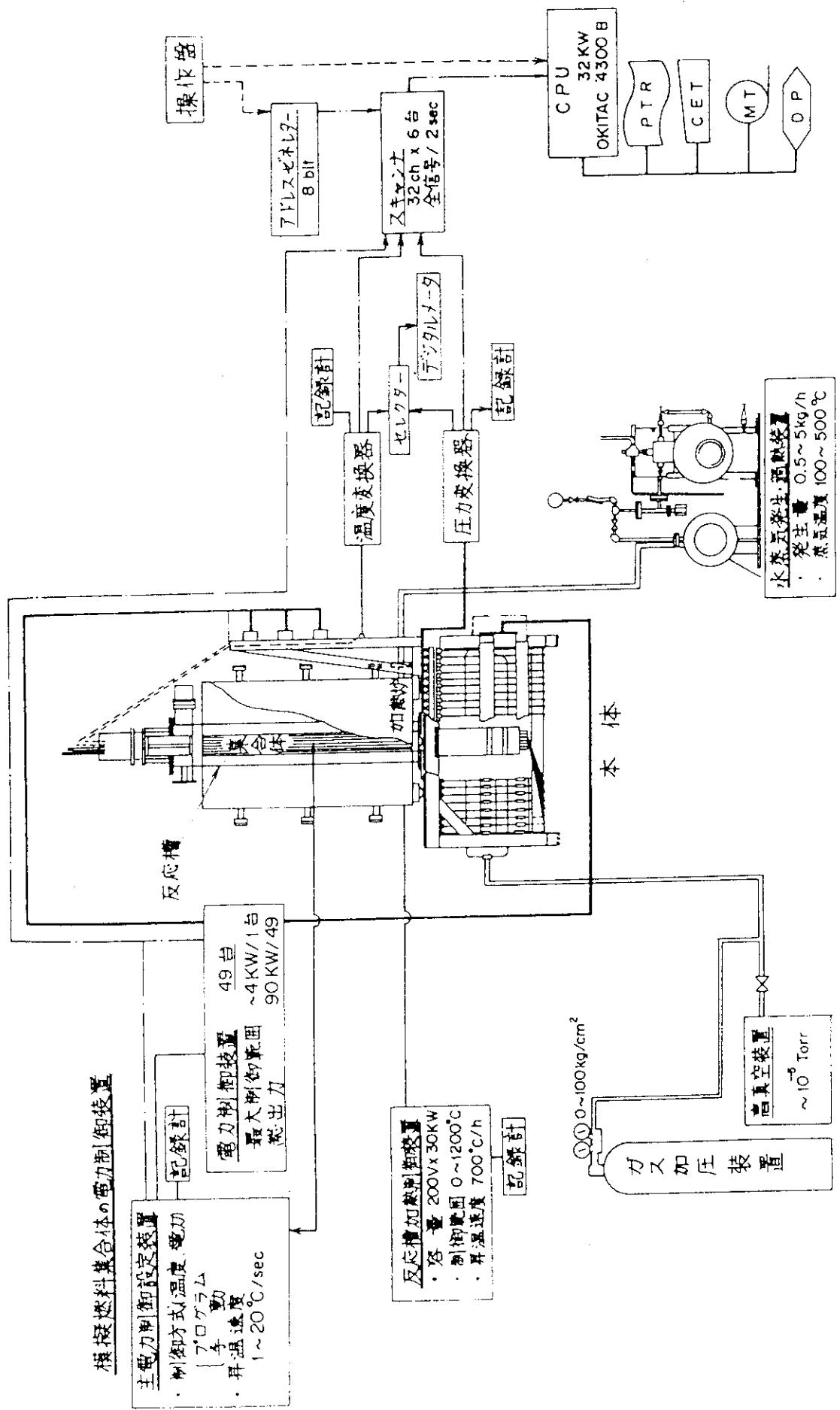
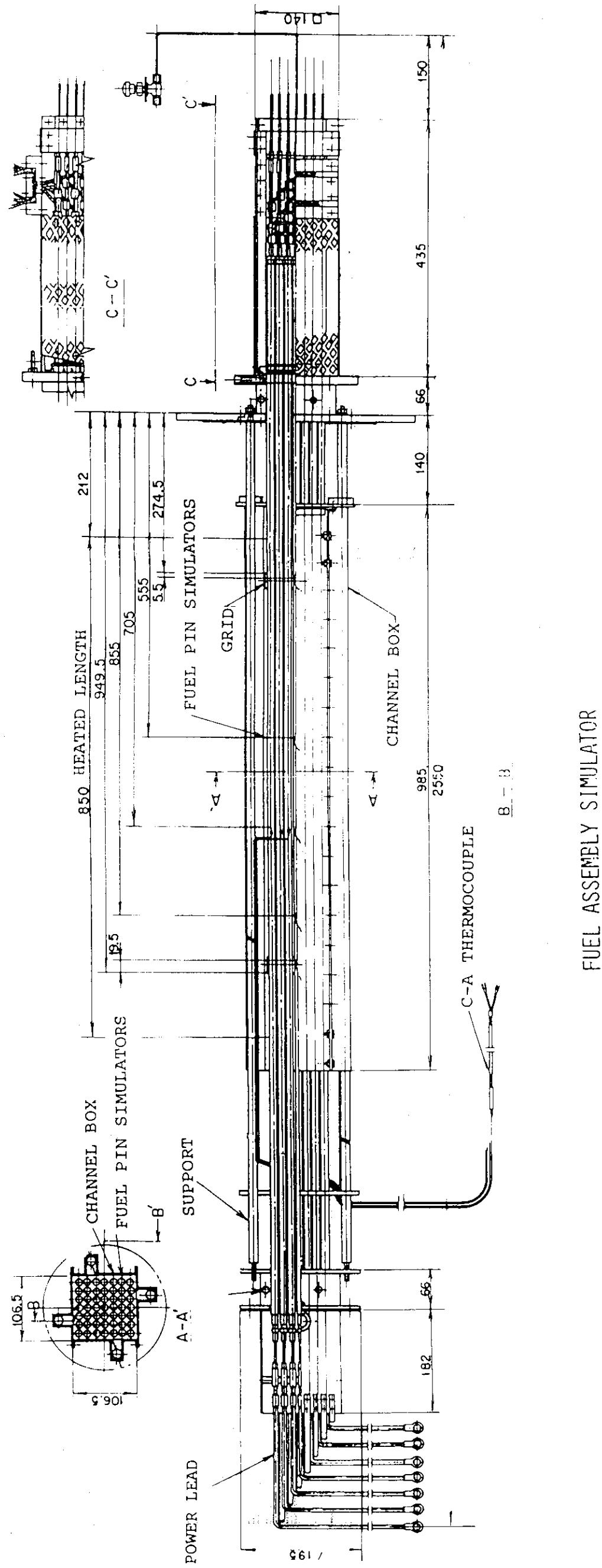


Fig. A-1 SCHEMATIC DIAGRAM OF A FACILITY FOR BURST TEST OF A FUEL ASSEMBLY.



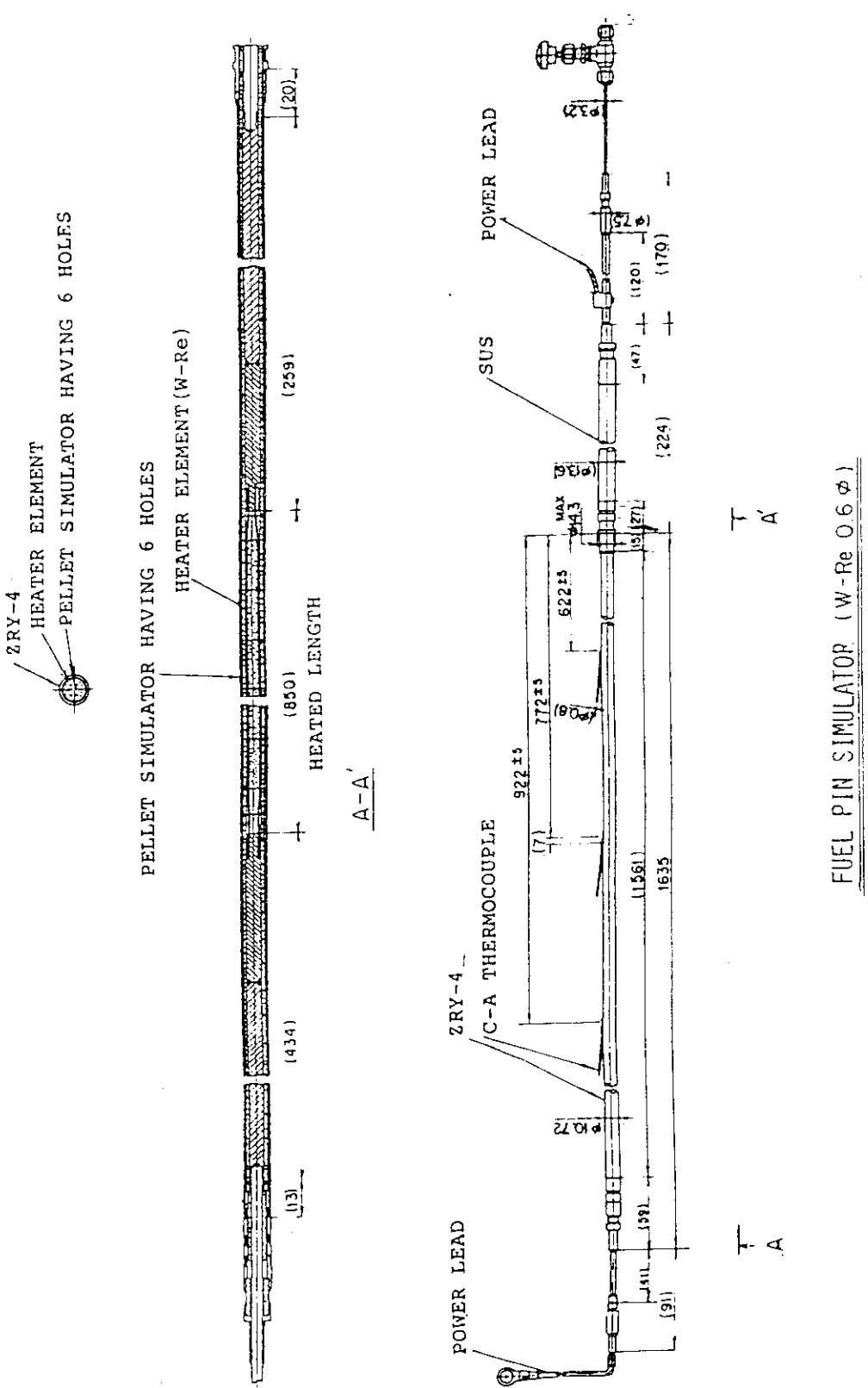
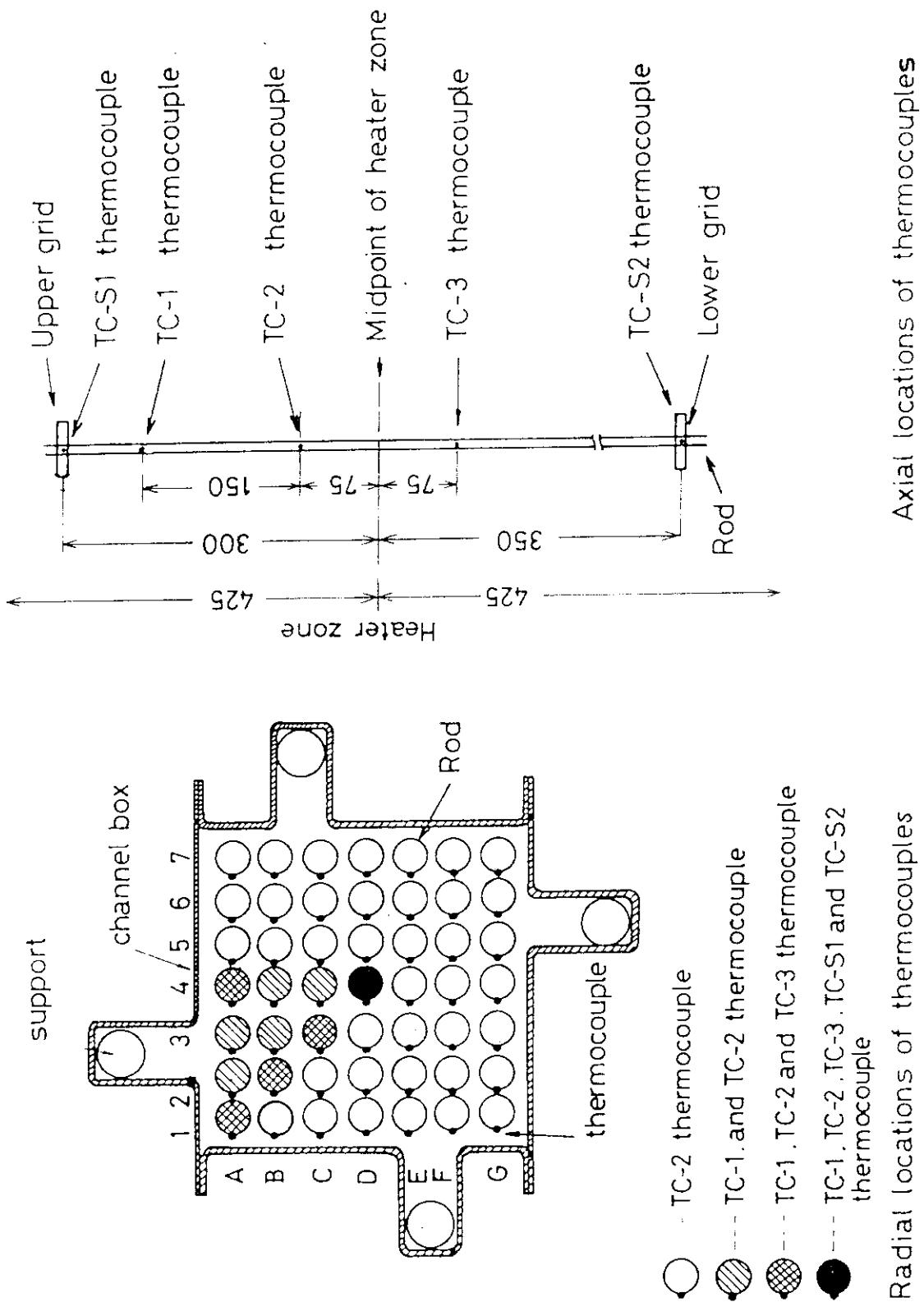


Fig. A-3 TYPICAL FUEL PIN SIMULATOR.



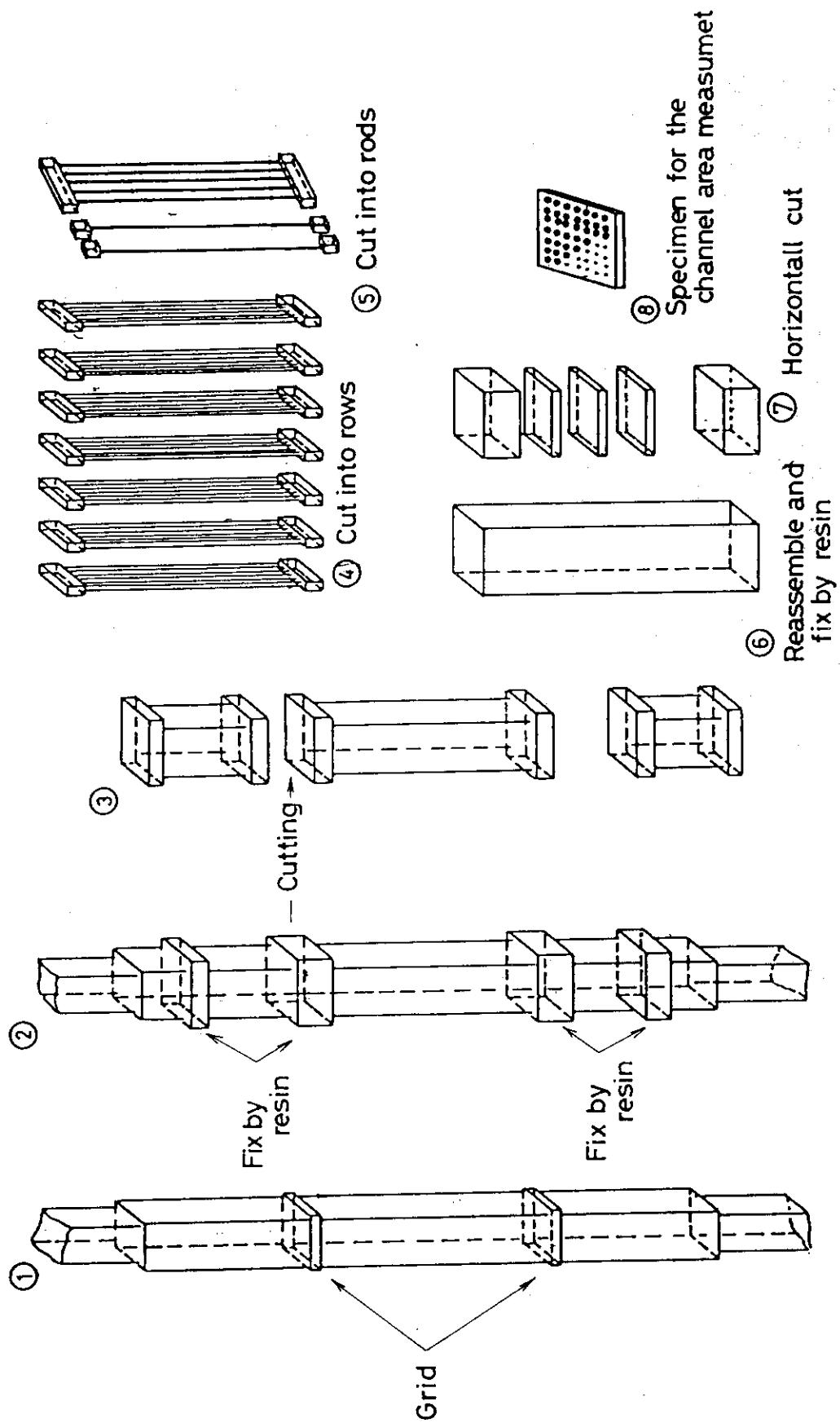


Fig. A-5 SEQUENCE OF THE POST BURST EXAMINATION OF AN ASSEMBLY

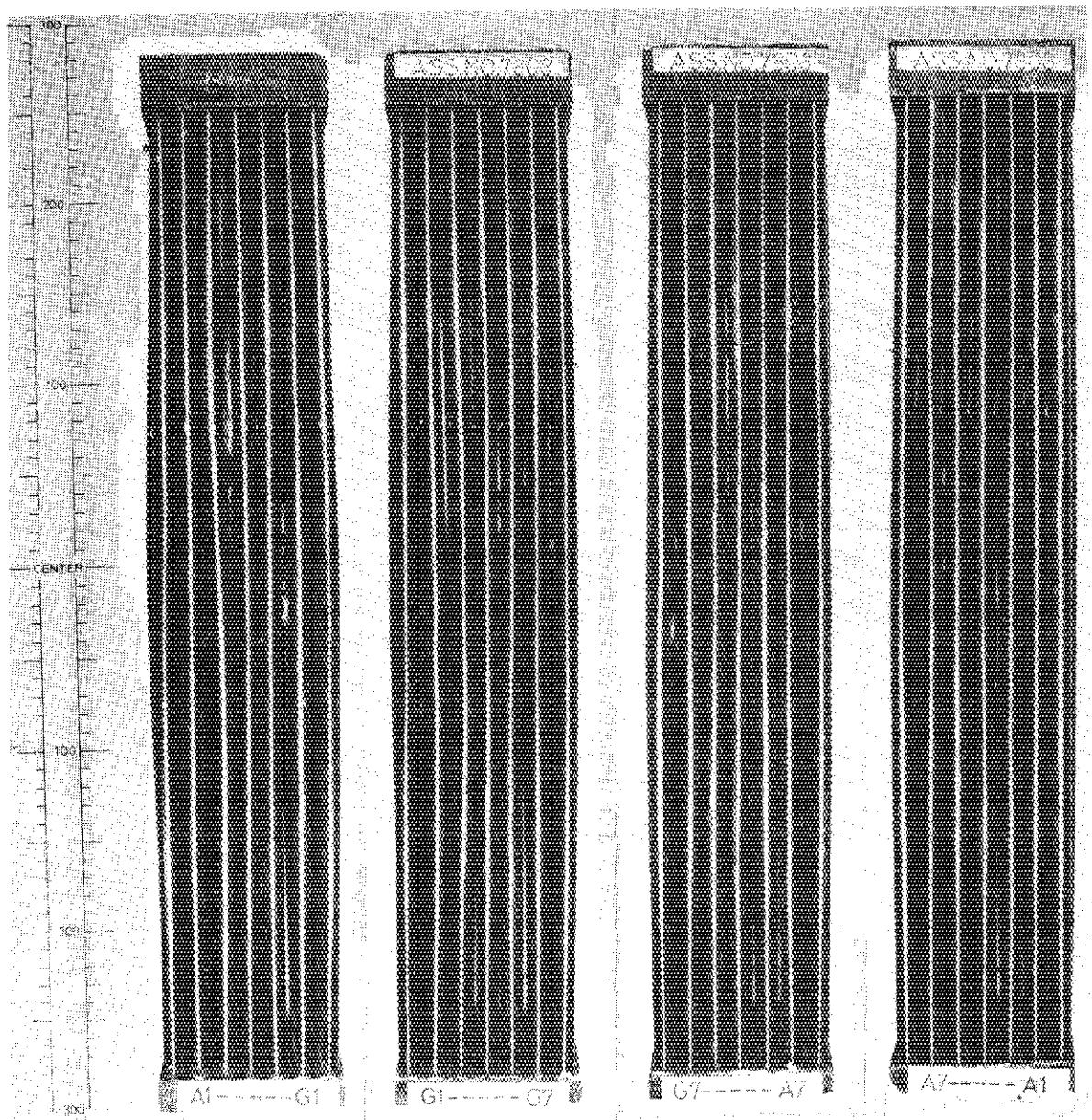


Photo. 1 POSTTEST VIEWS OF FOUR-SIDES OF BUNDLE

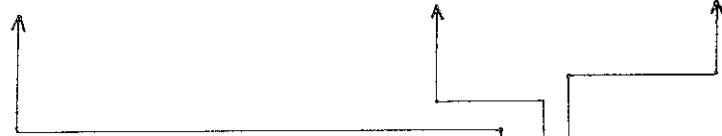
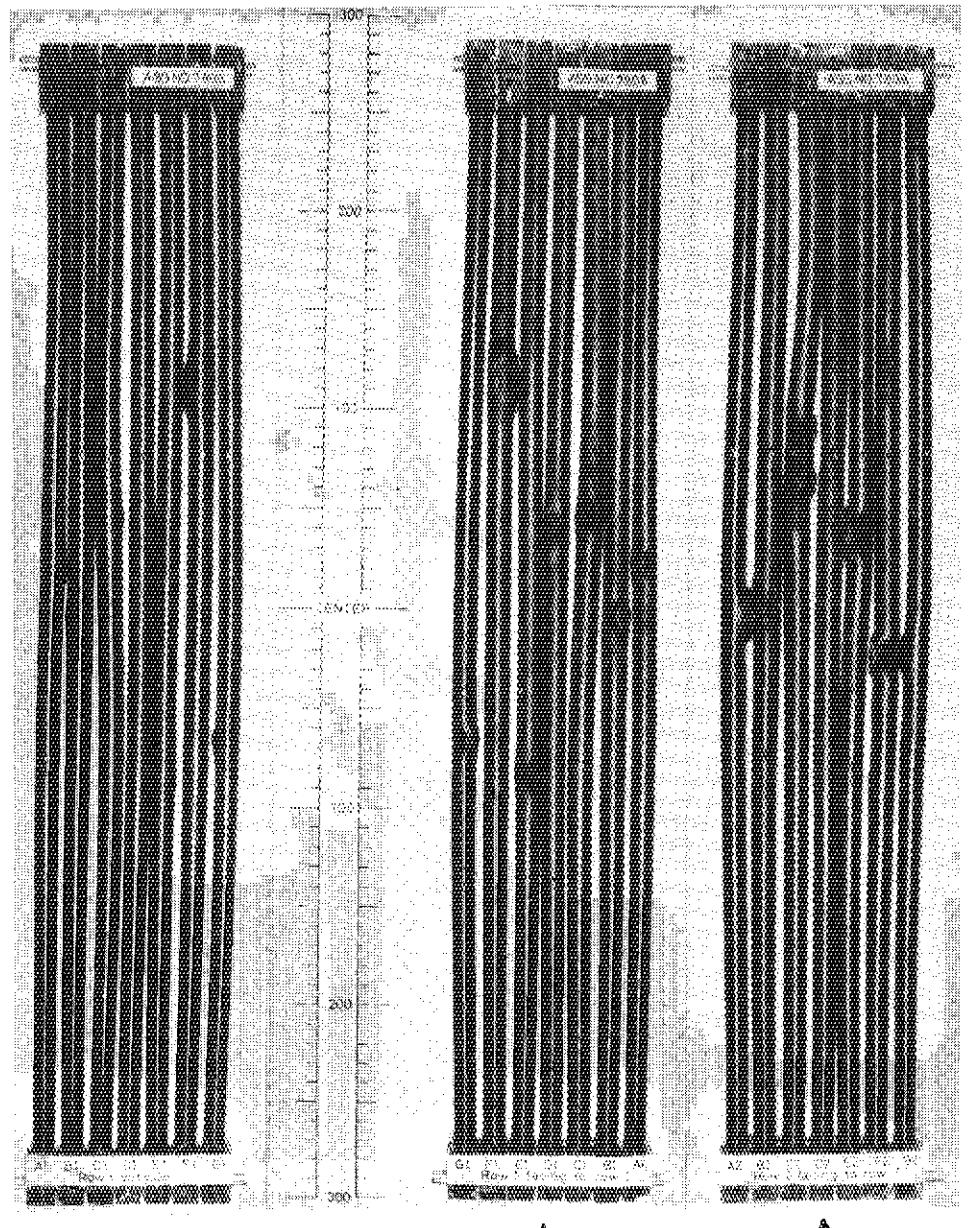
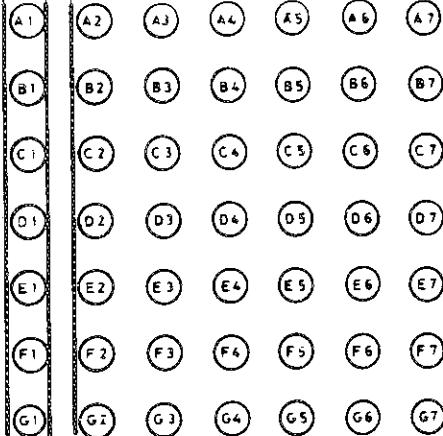


Photo. 2 POSTTEST VIEWS OF EACH ROW.



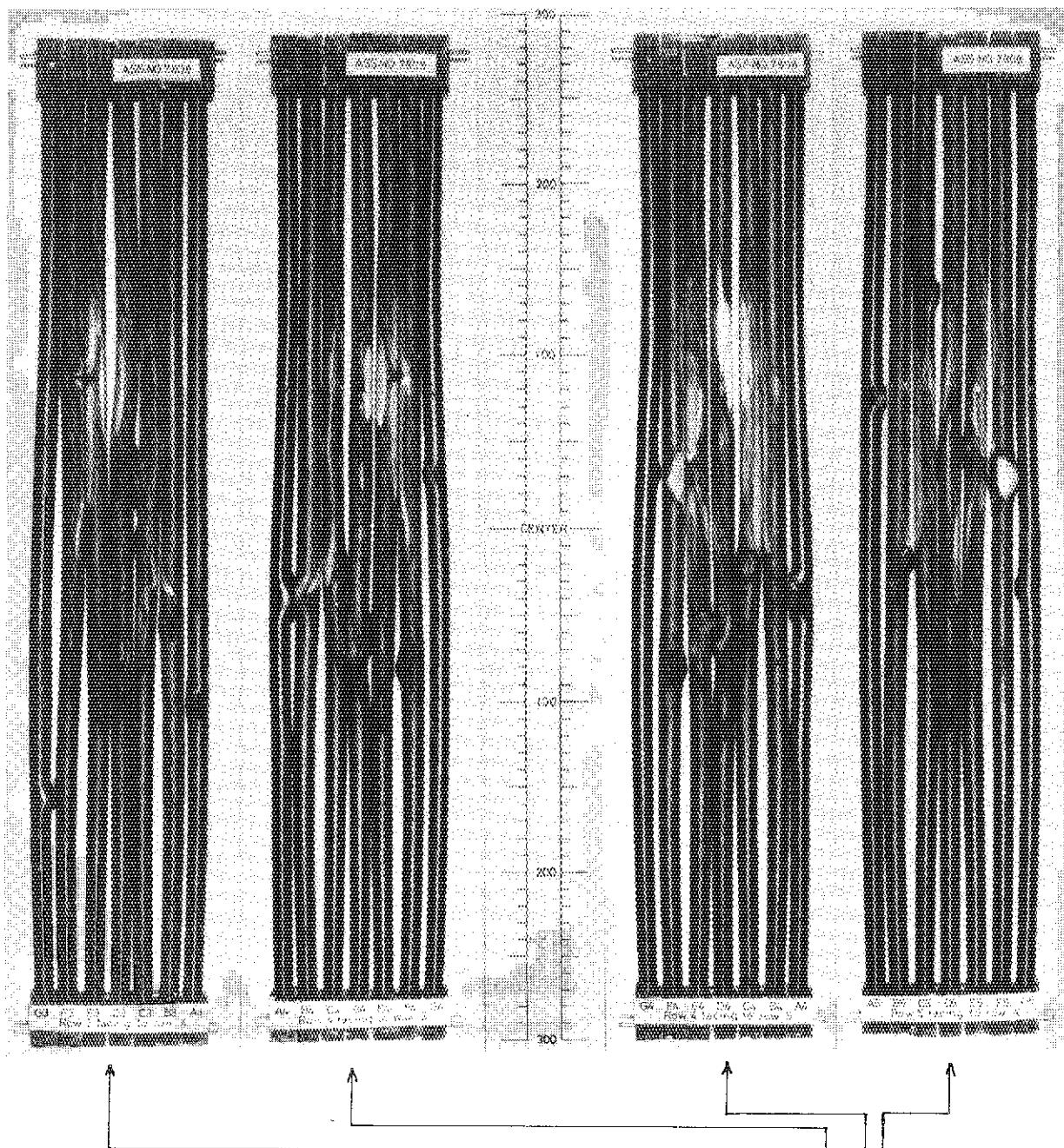
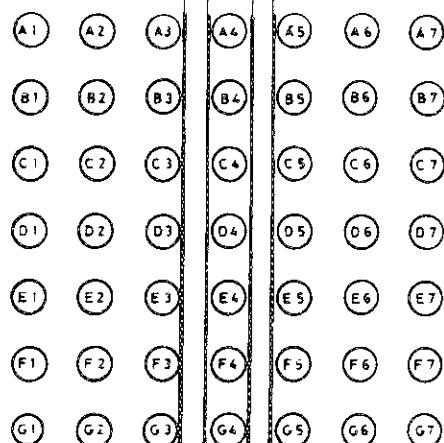


Photo. 3 POSTTEST VIEWS OF EACH ROW.



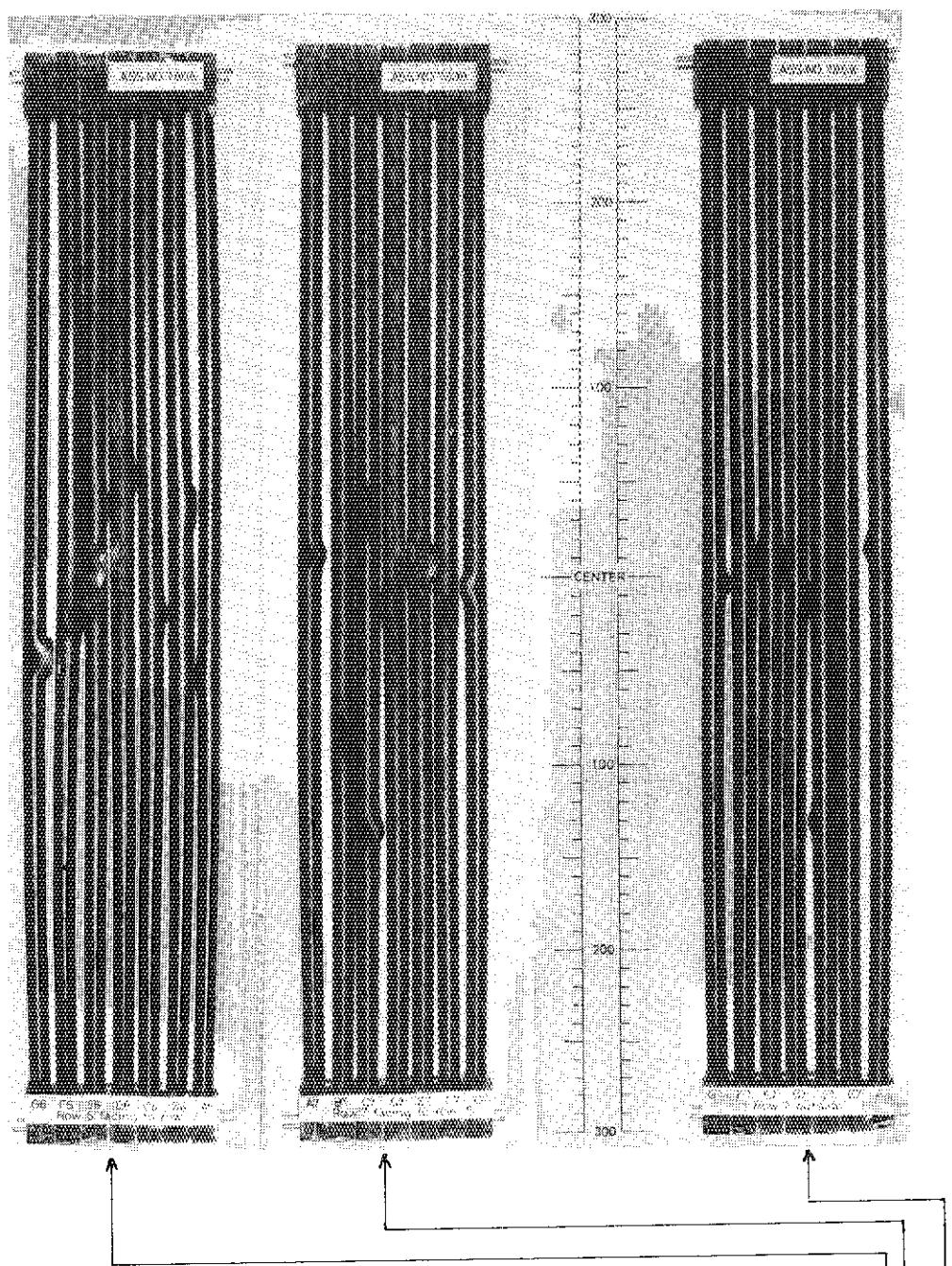
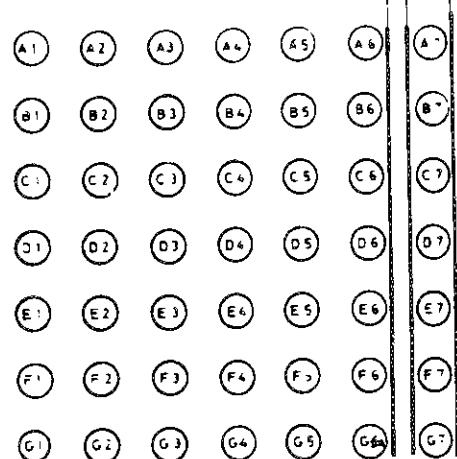


Photo.4 POSTTEST VIEWS OF EACH ROW.



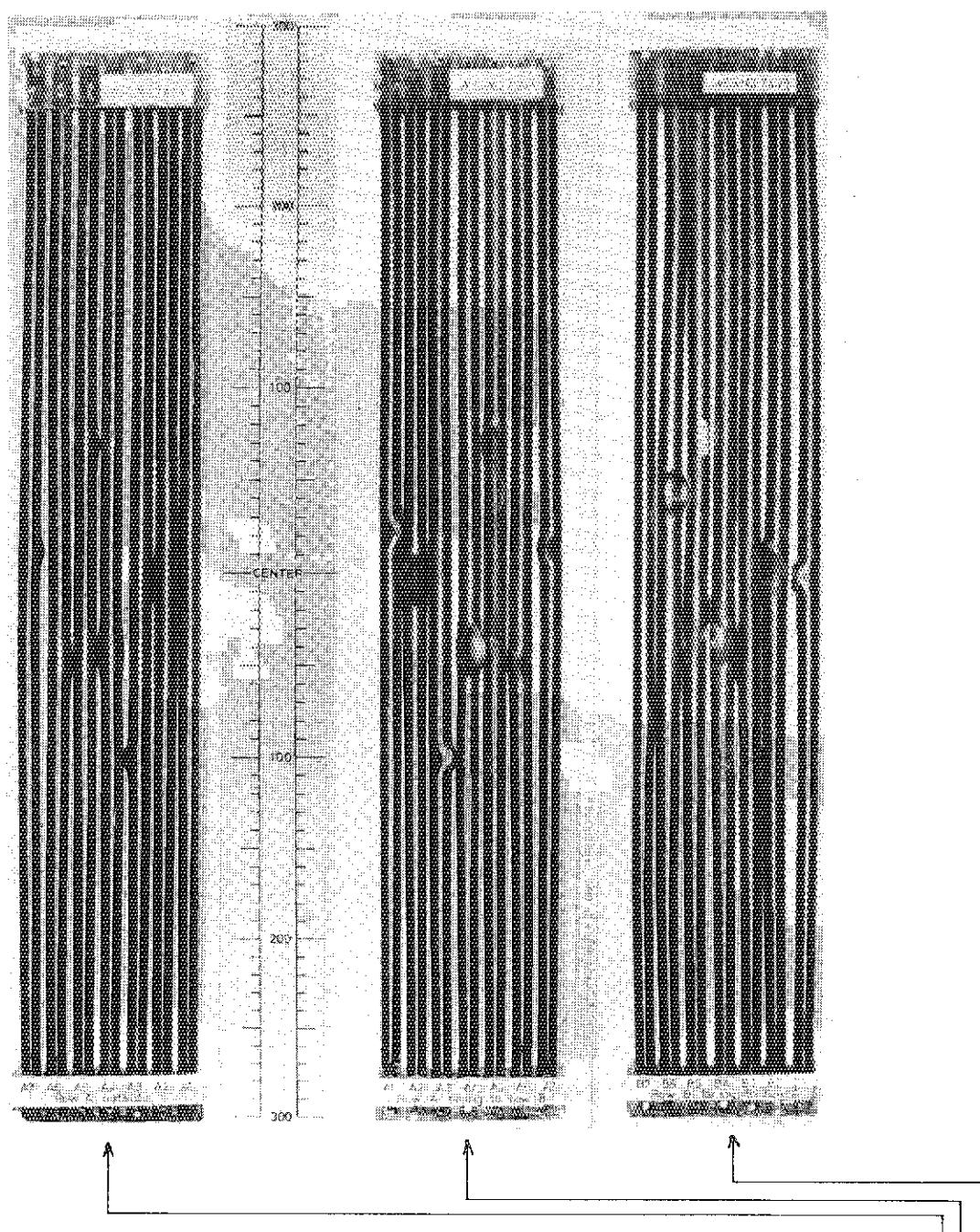
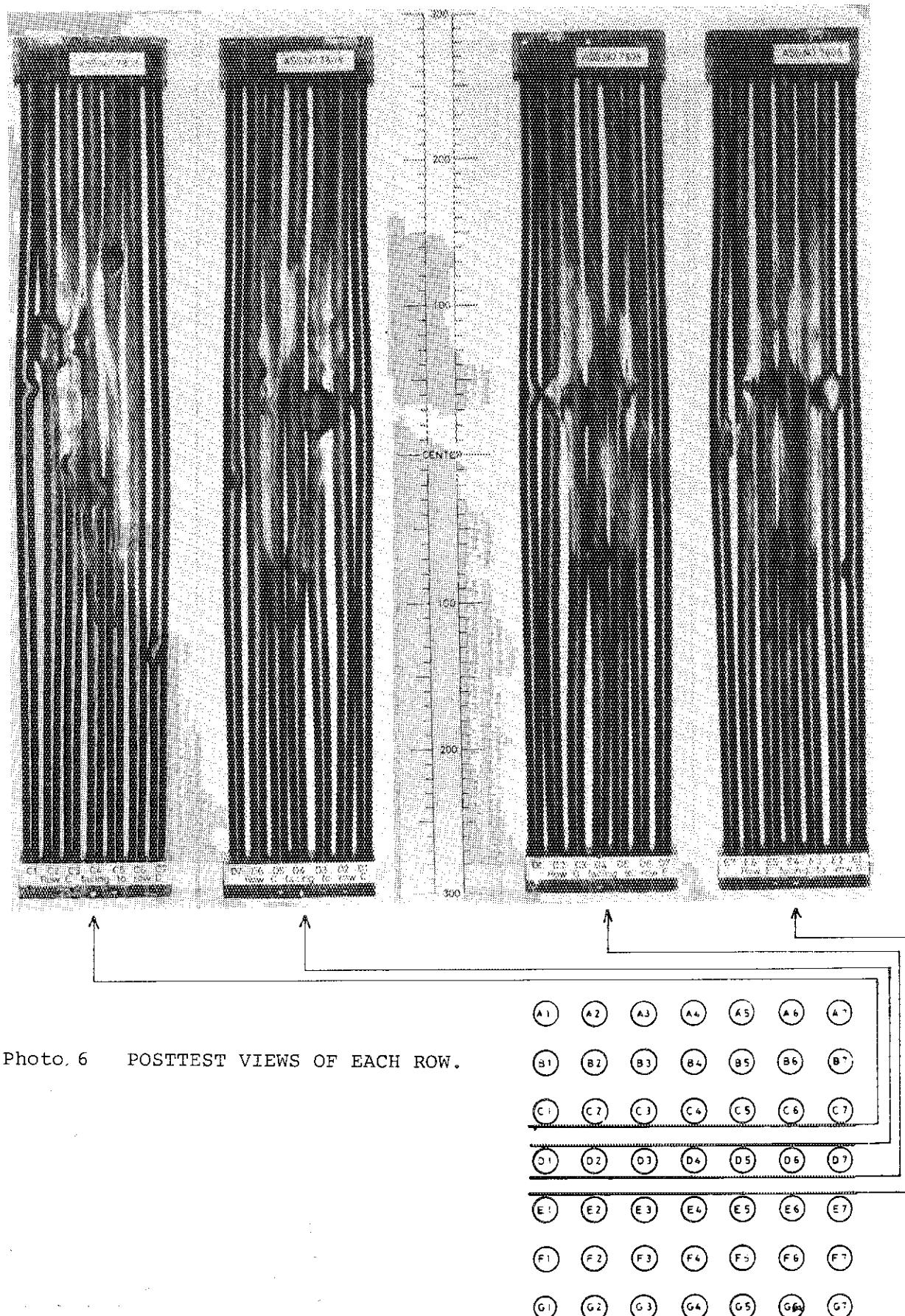
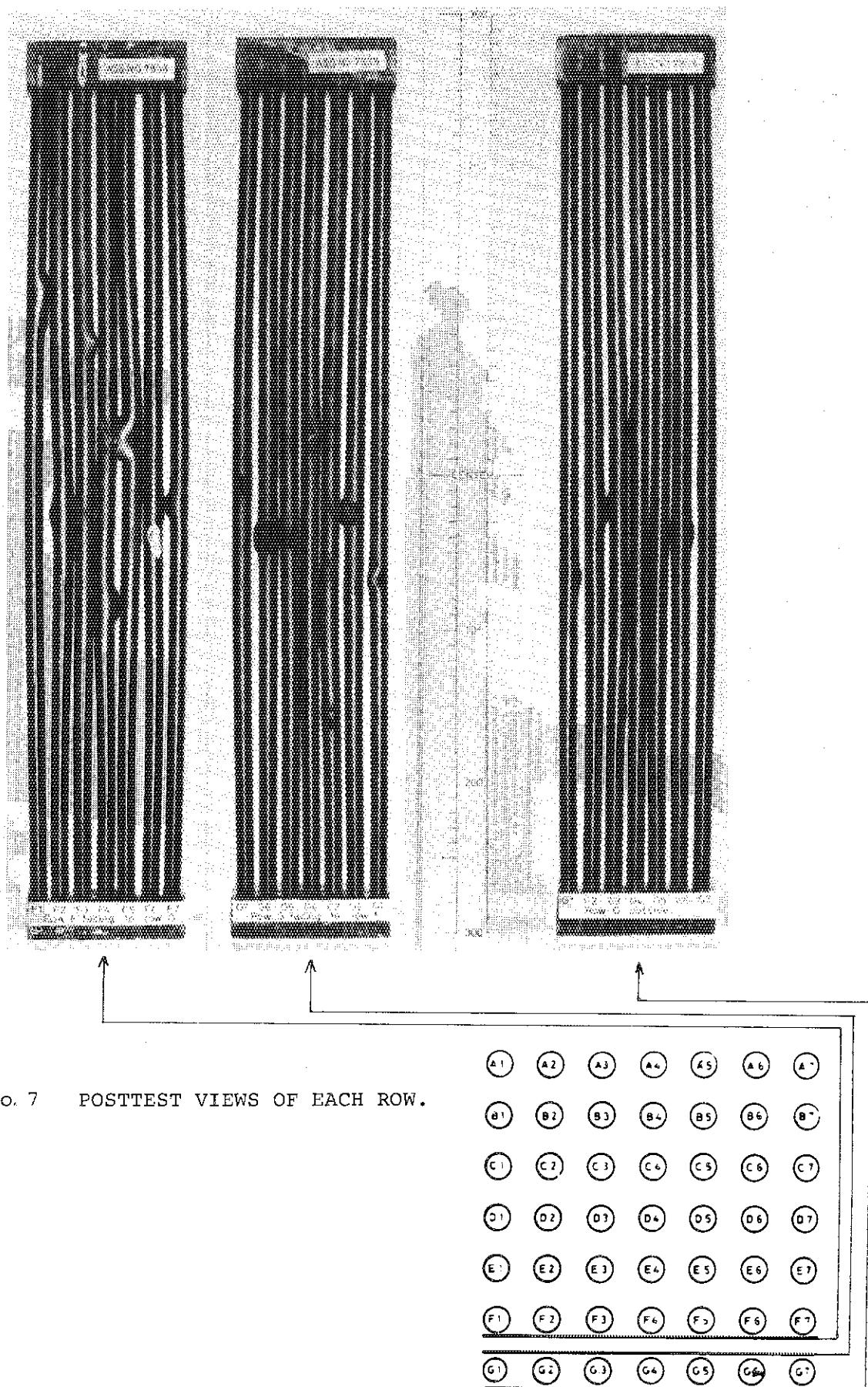
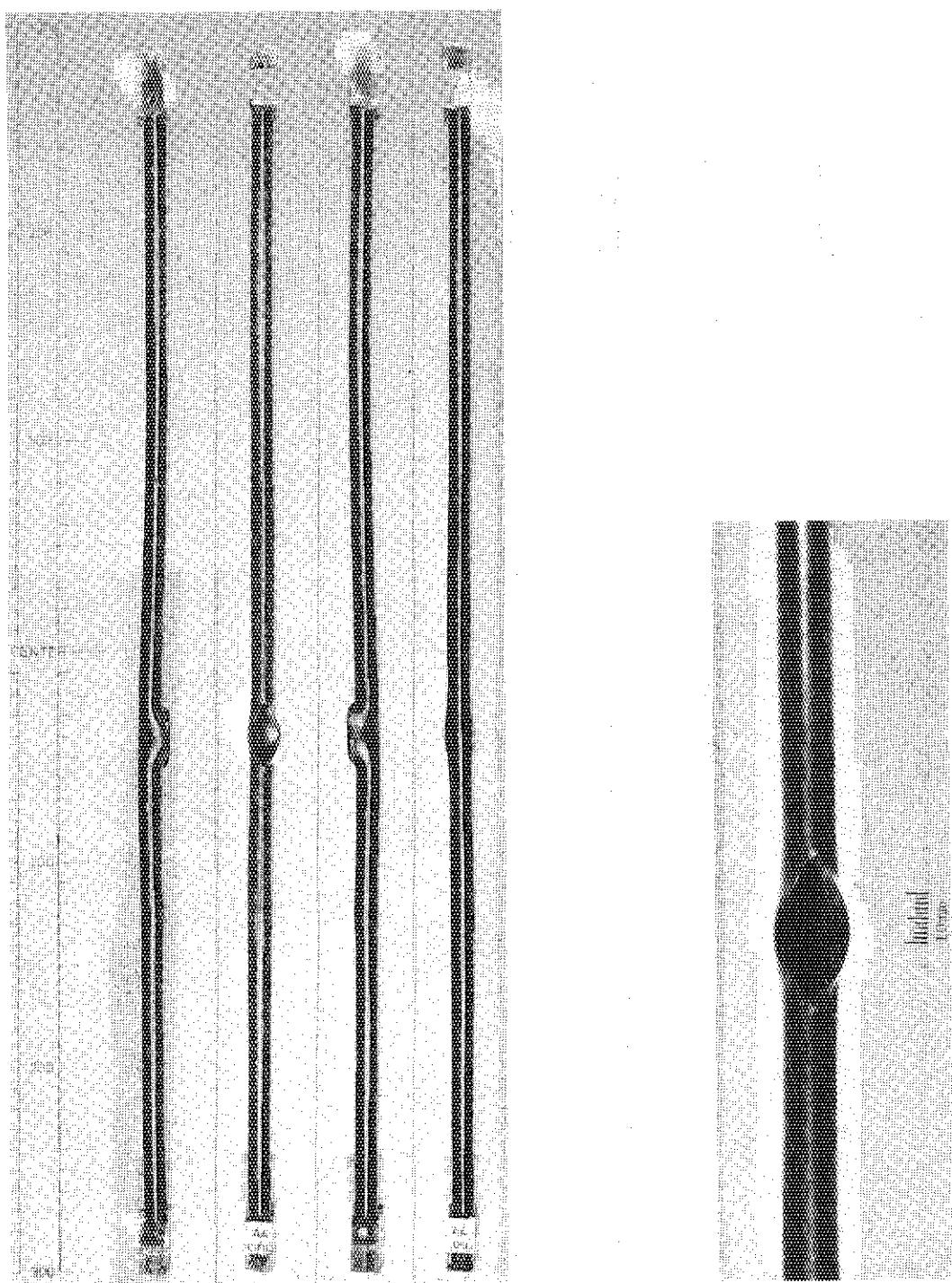


Photo. 5 POSTTEST VIEWS OF EACH ROW.

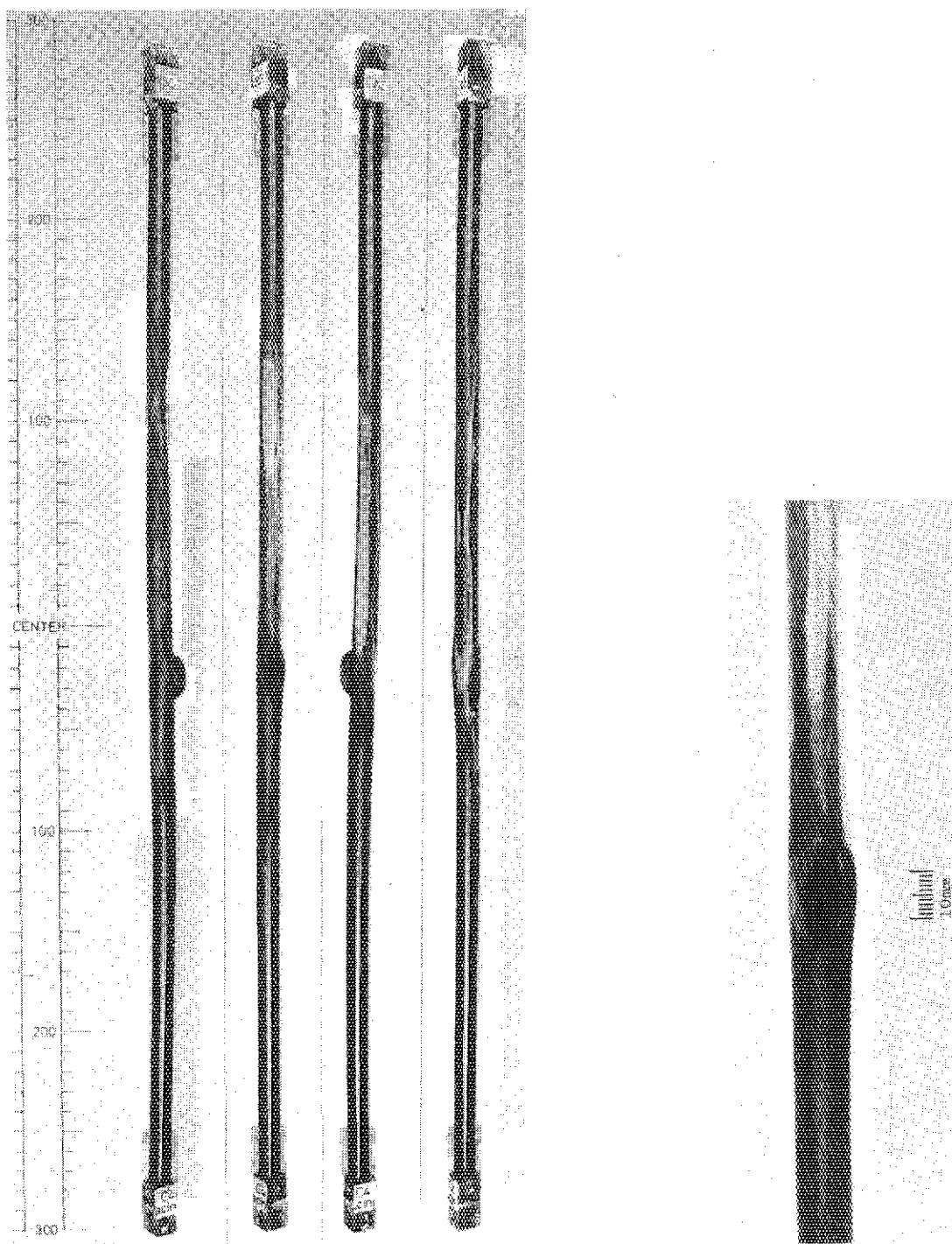






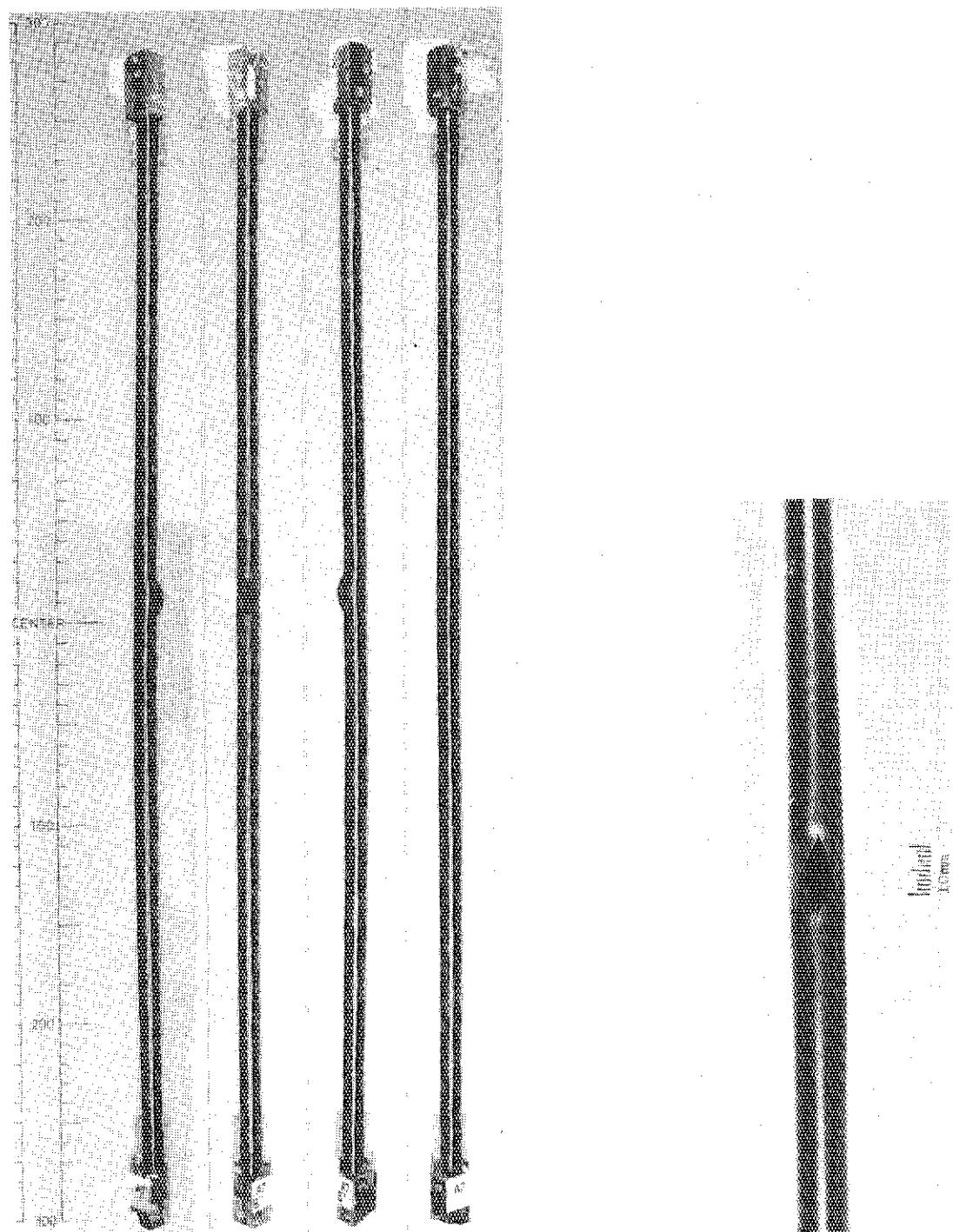
FUEL ROD No. A4

Photo.8 Overview and close-up view of A-4 rod.



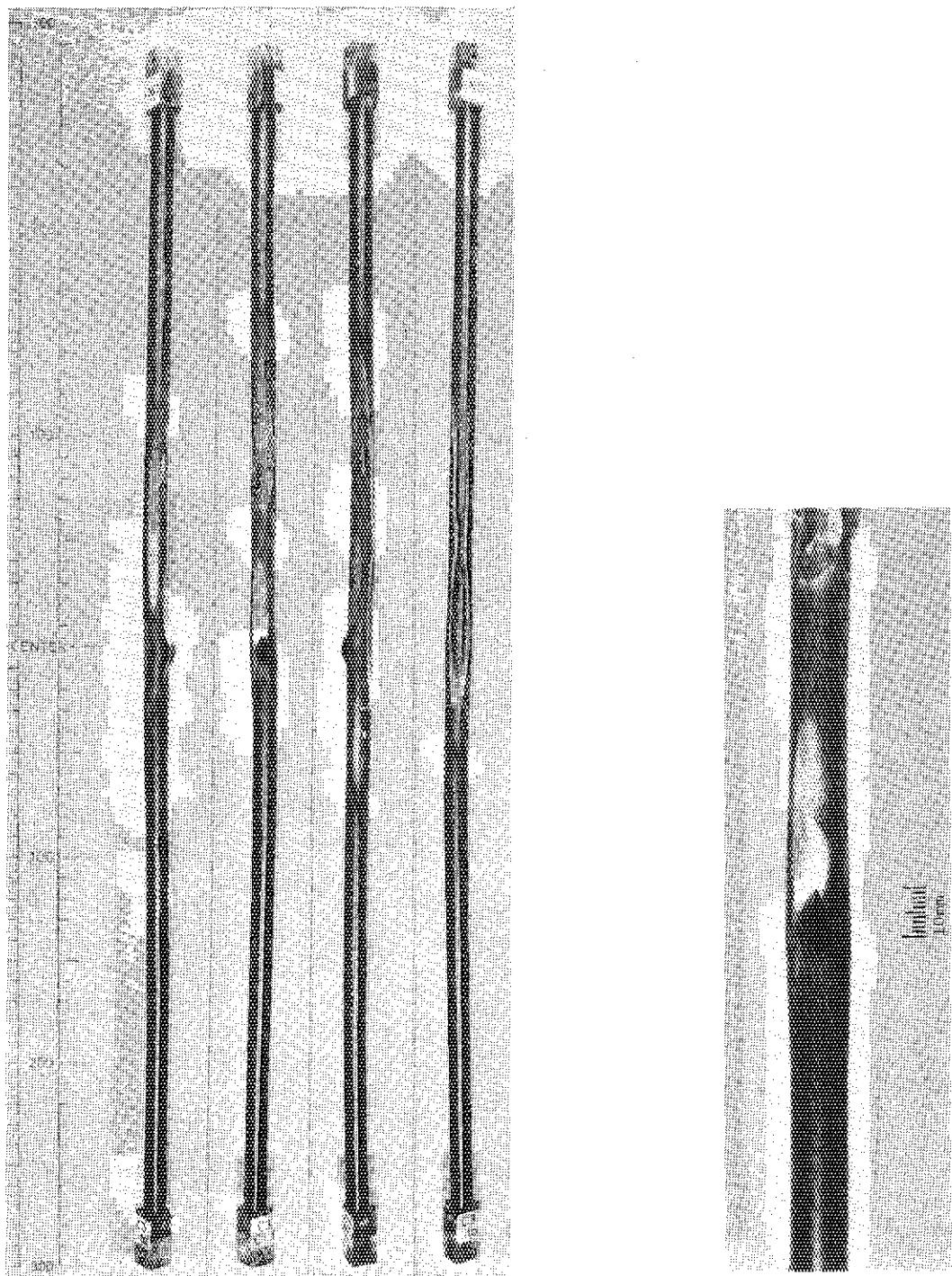
FUEL ROD No. C4

Photo.9 Overview and close-up view of C-4 rod.



FUEL ROD No. A7

Photo.10 Overview and close-up view of A-7 rod.



FUEL ROD No. C3

Photo.11 Overview and close-up view of C-3 rod.

Ass. No. 7808

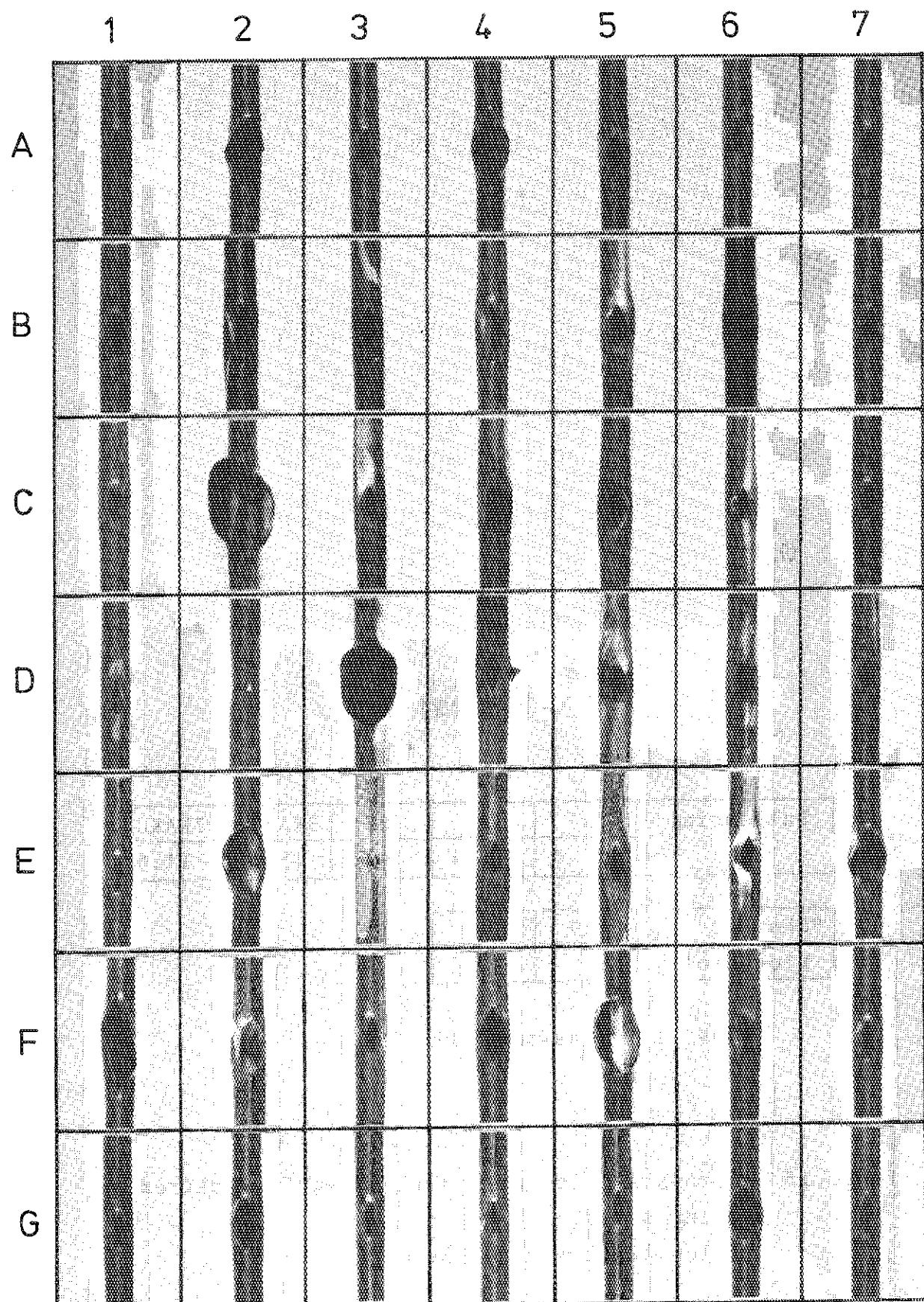
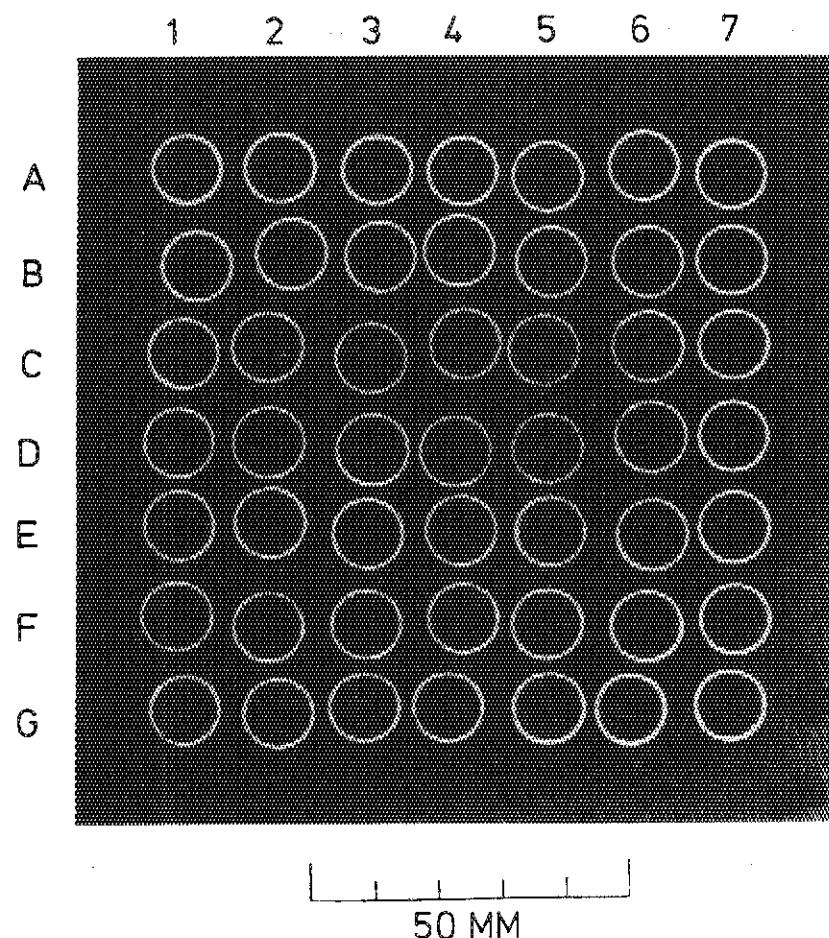


Photo.12 Close-up views of rupture opening area.

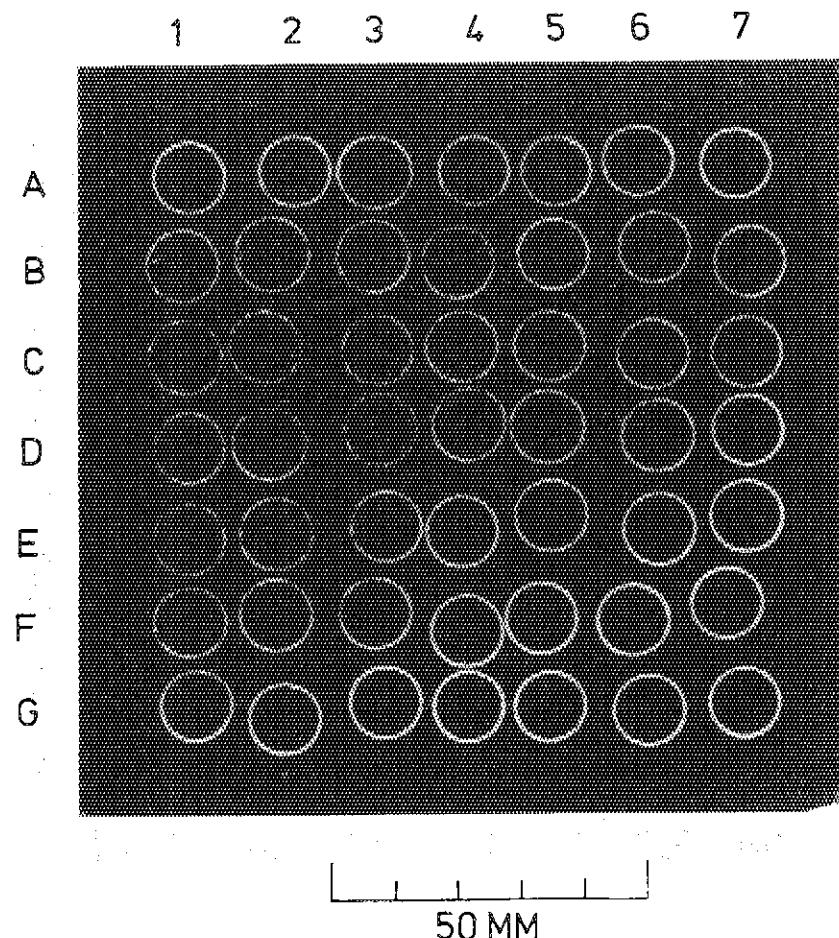
ASS.NO, 7808

Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	15.0	15.4	14.6	15.8	14.6

*Channel blockage (%)	7x7	5x5
	-	-

\*;Inside the assumed boundary.

Photo.13 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Below 224.1mm from the midpoint)

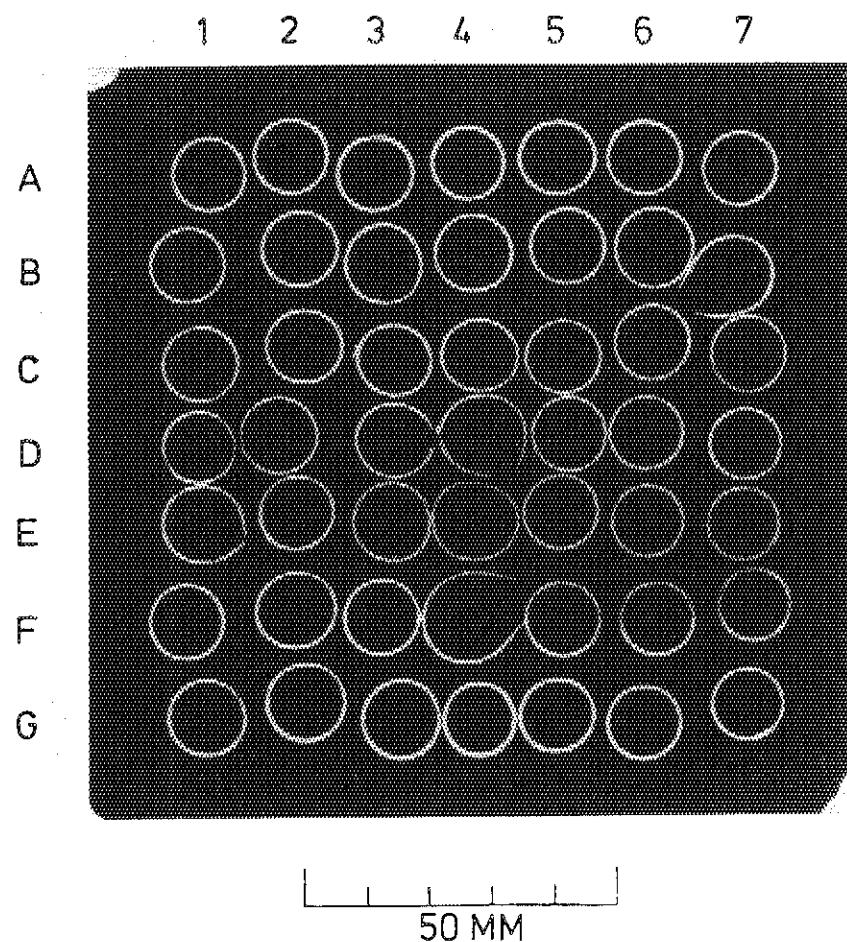


Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	20.2	21.0	20.1	21.5	19.4

*Channel blockage(%)	7x7	5x5
-	-	-

\*;Inside the assumed boundary.

Photo.14 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Below 173.5mm from the midpoint)

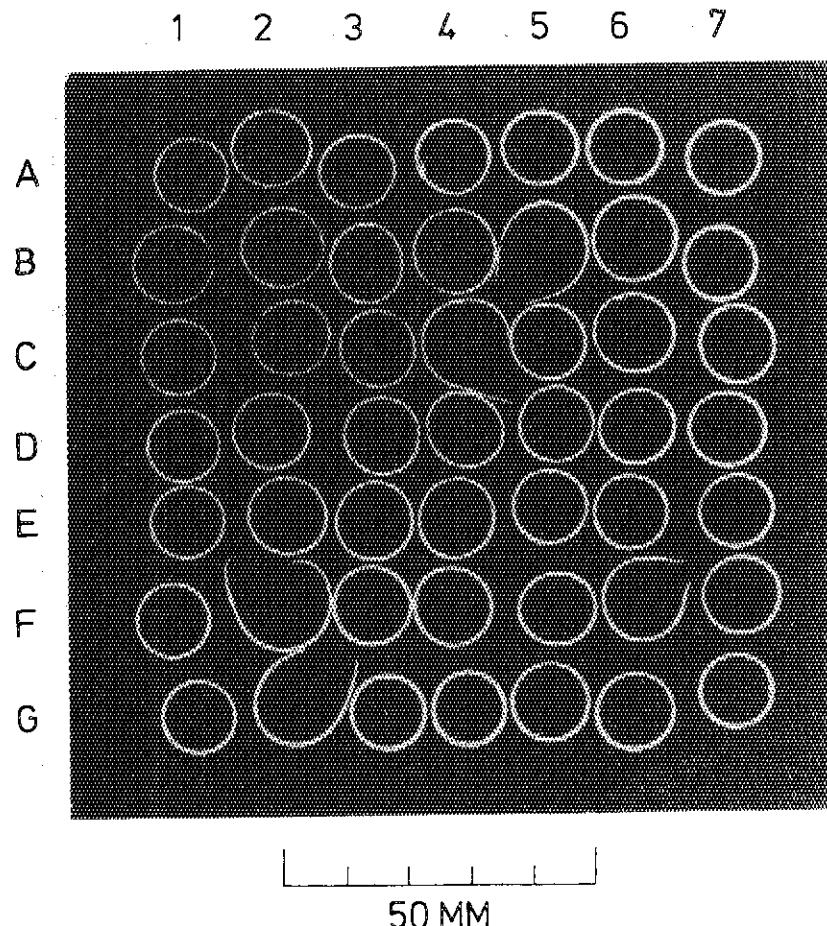
ASS.NO, 7808

Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	37.3	39.8	39.2	40.1	34.6

*Channel 1 blockage (%)	7x7	5x5
-	-	-

\*;Inside the assumed boundary.

Photo.15 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Below 73.7mm from the midpoint)

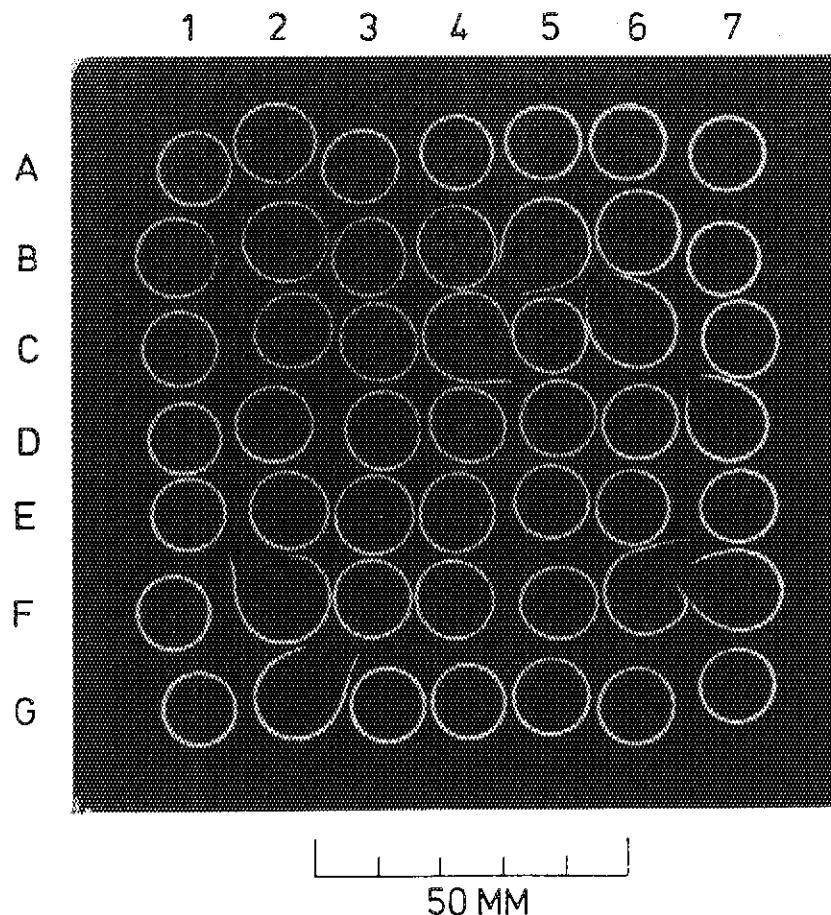


Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	47.9	54.6	47.5	58.6	40.9

*Channel blockage (%)	7x7	5x5
-	-	-

\*; Inside the assumed boundary,

Photo.16 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Below 23.3mm from the midpoint)

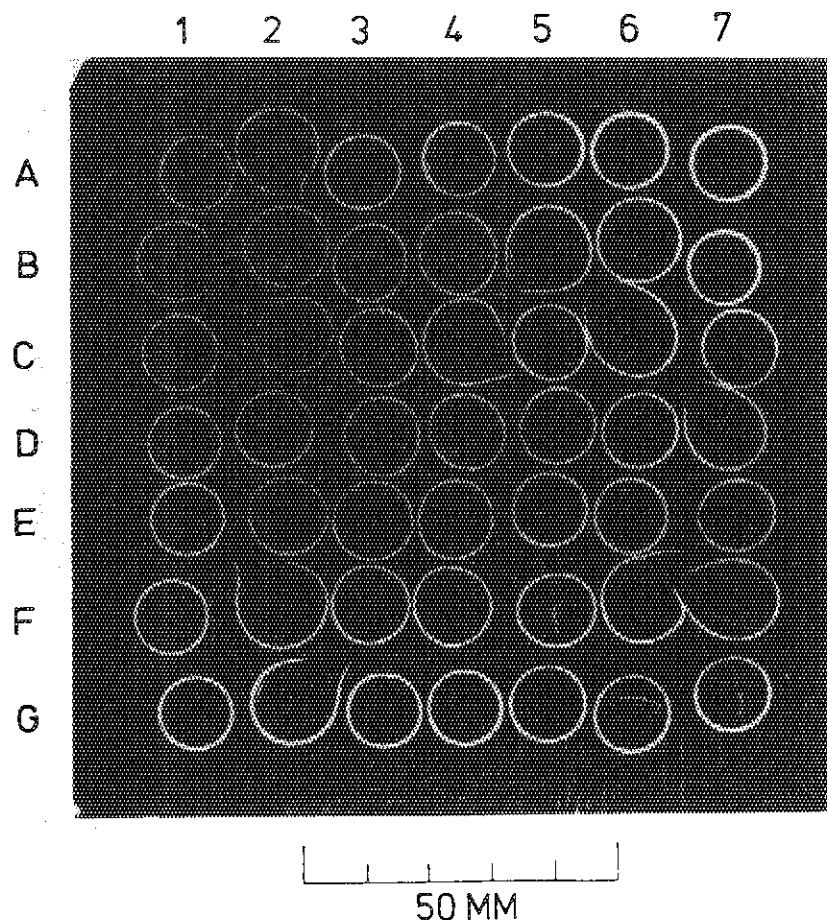
ASS.NO, 7808

Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	48.4	54.5	46.2	59.1	42.2

*Channel	7x7	5x5
Blockage(%)	37.3	43.2

\*;Inside the assumed boundary.

Photo.17 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Below 15.7mm from the midpoint)

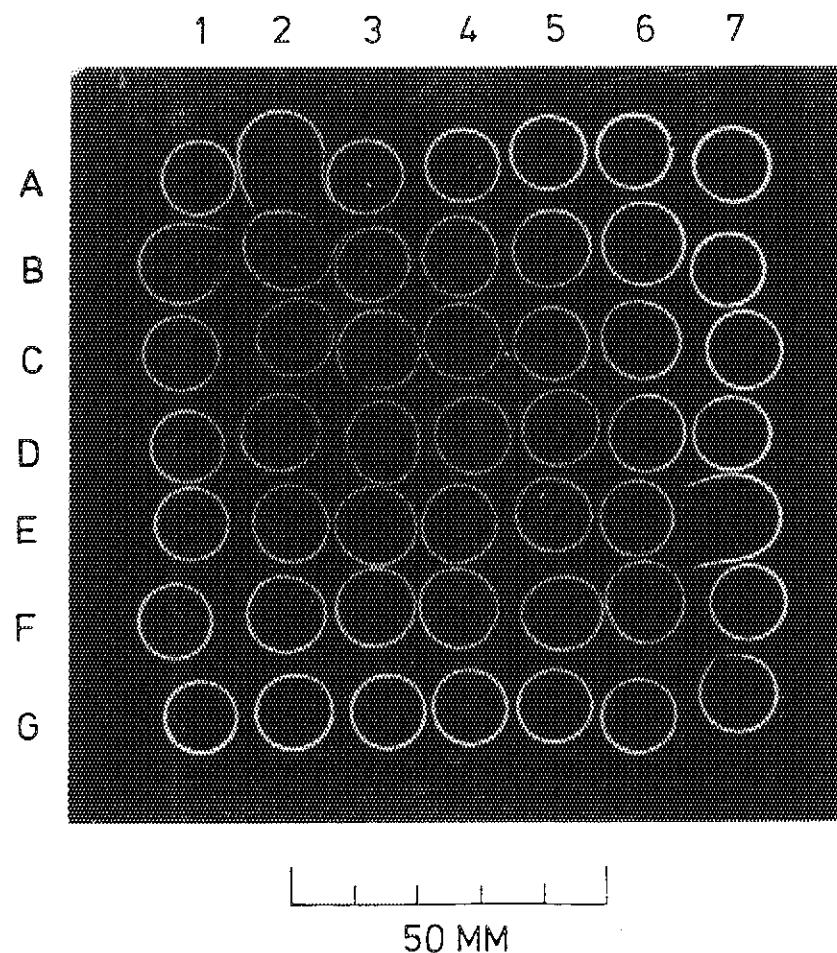
ASS.NO, 7808

Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	47.3	52.5	43.4	57.6	42.0

*Channel blockage (%)	7x7	5x5
	-	-

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.18 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Below 13.9mm from the midpoint)

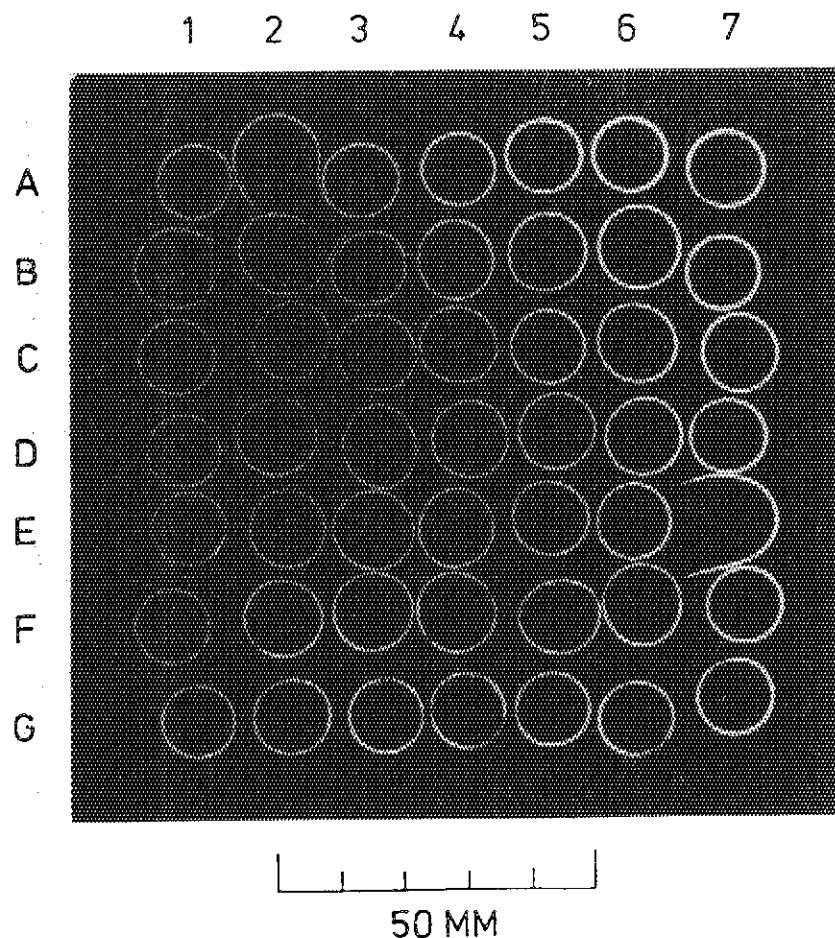
ASS.NO, 7808

Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	42.9	42.7	39.1	44.6	43.1

*Channel blockage(%)	7x7	5x5
	33.0	34.3

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.19 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 4.0mm from the midpoint)

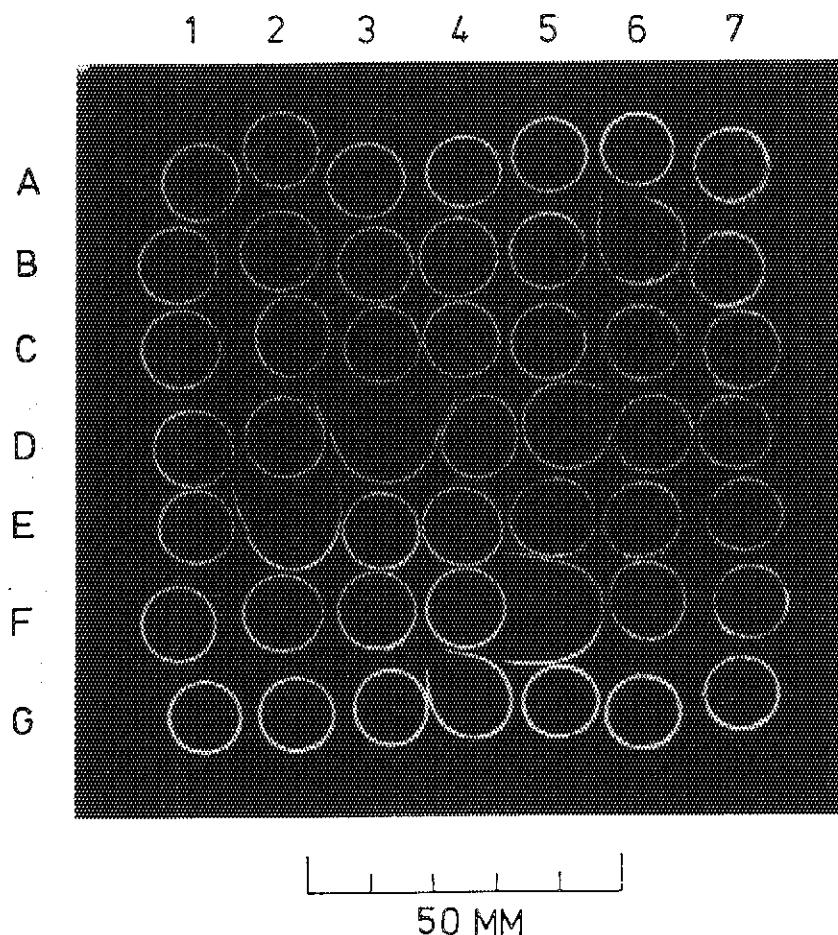


Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	45.0	44.9	40.9	47.1	45.2

*Channel	7x7	5x5
blockage(%)	-	-

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.20 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 6.4mm from the midpoint)

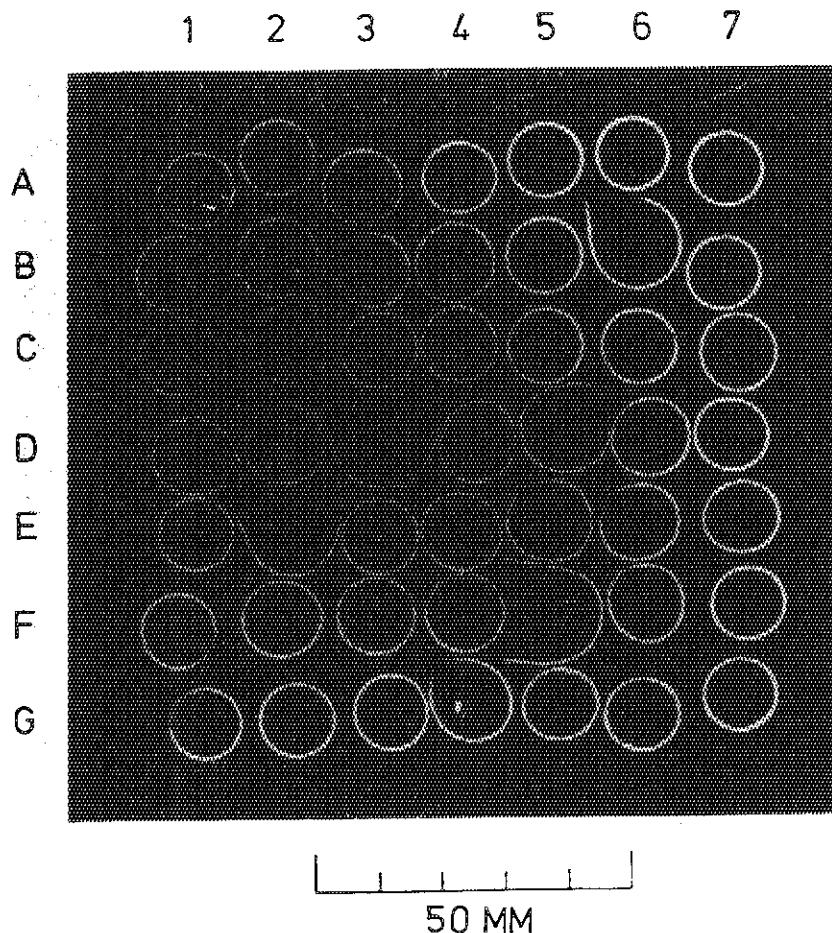
ASS.NO, 7808

Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	47.4	59.7	61.3	58.8	34.5

*Channel blockage (%)	7x7	5x5
	37.3	47.0

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.21 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 34.2mm from the midpoint)

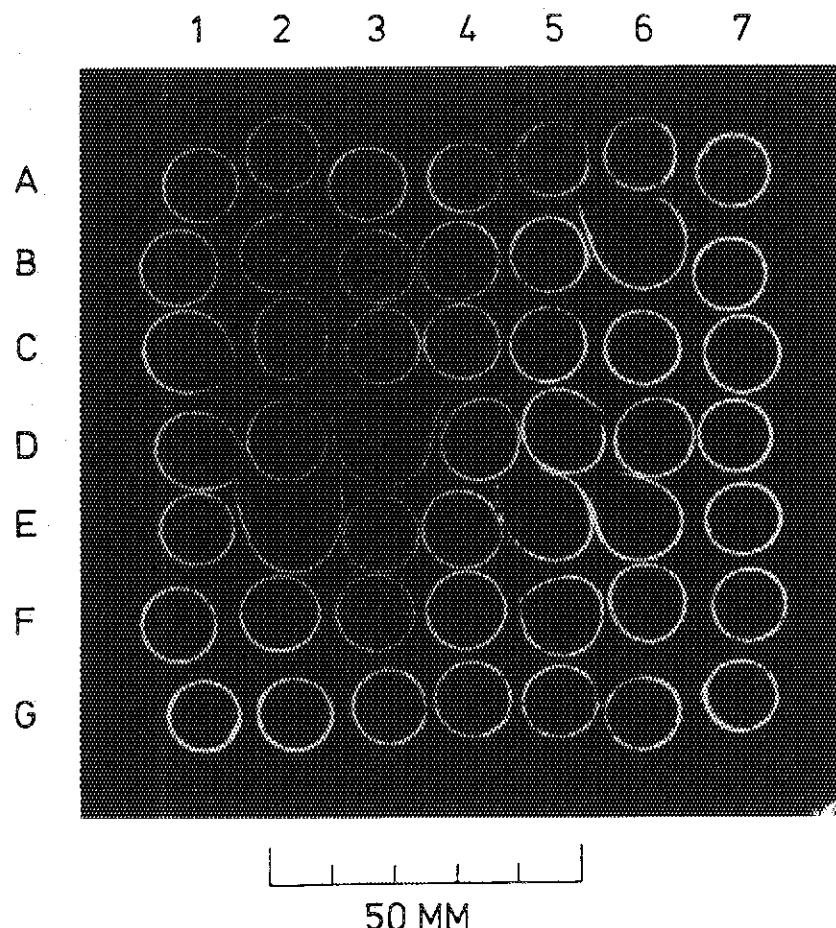
ASS.NO, 7808

Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	49.1	62.1	64.4	60.8	35.6

*Channel blockage (%)	7x7	5x5
	-	-

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.22 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 36.9mm from the midpoint)

ASS.NO, 7808

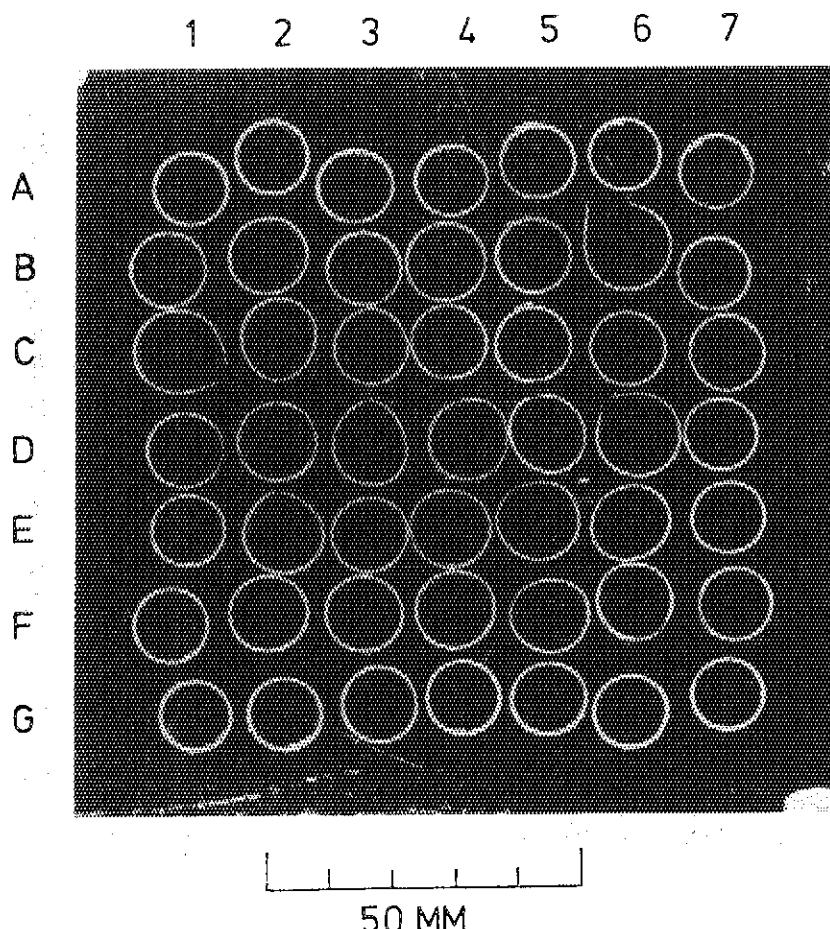
Ballooning (%)	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
	54.2	66.9	71.2	64.5	40.9

*Channel blockage (%)	7x7	5x5
	40.5	51.4

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.23 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.

(Above 44.5mm from the midpoint)

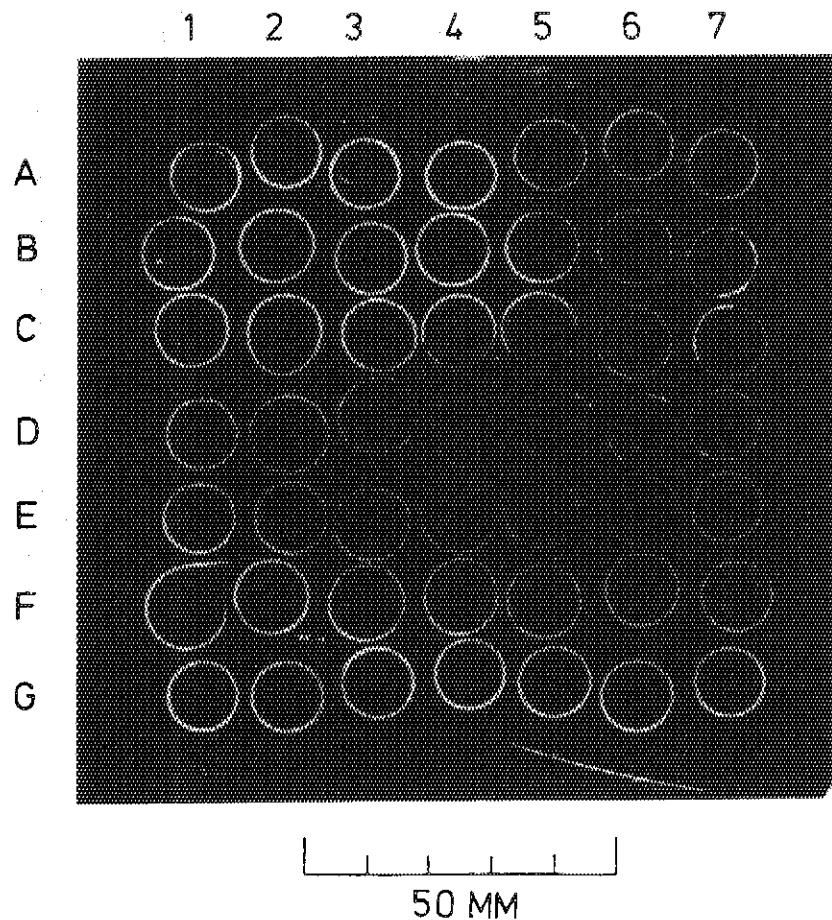
ASS.NO, 7808

Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	38.7	44.6	41.9	46.1	32.6

*Channel blockage(%)	7x7	5x5
	31.0	35.2

\*;Inside the assumed boundary.

Photo.24 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 53.7mm from the midpoint)

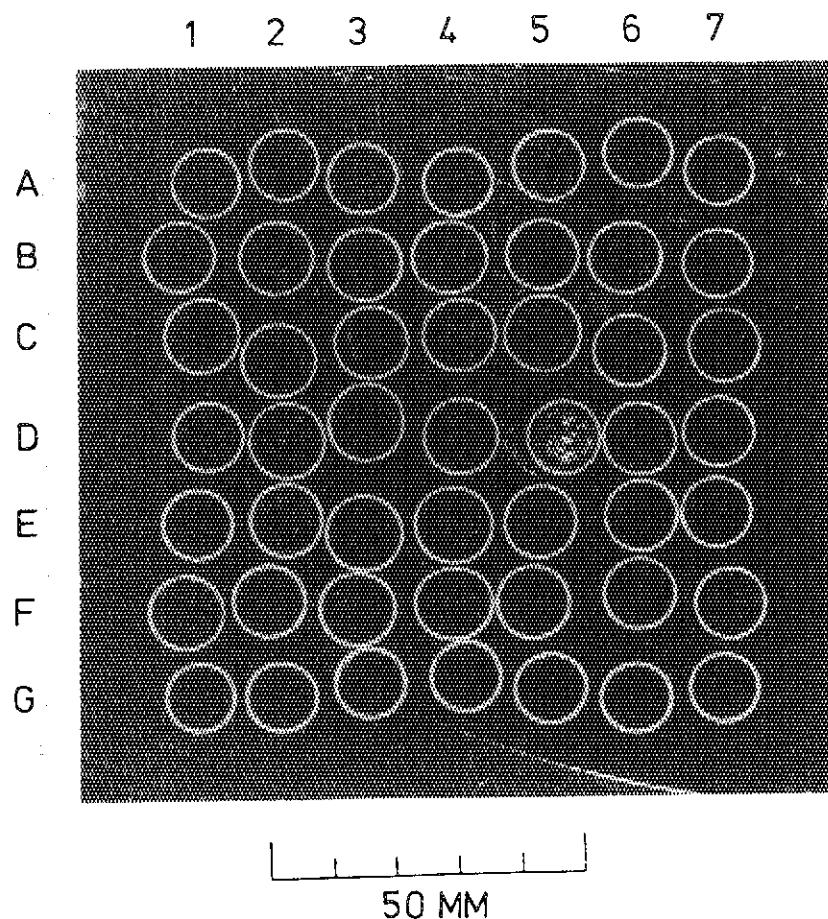
ASS.NO, 7808

Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	28.8	32.6	32.4	32.7	24.9

*Channel blockage(%)	7x7	5x5
	22.7	25.9

\*; Inside the assumed boundary

Photo.25 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 103.7mm from the midpoint)

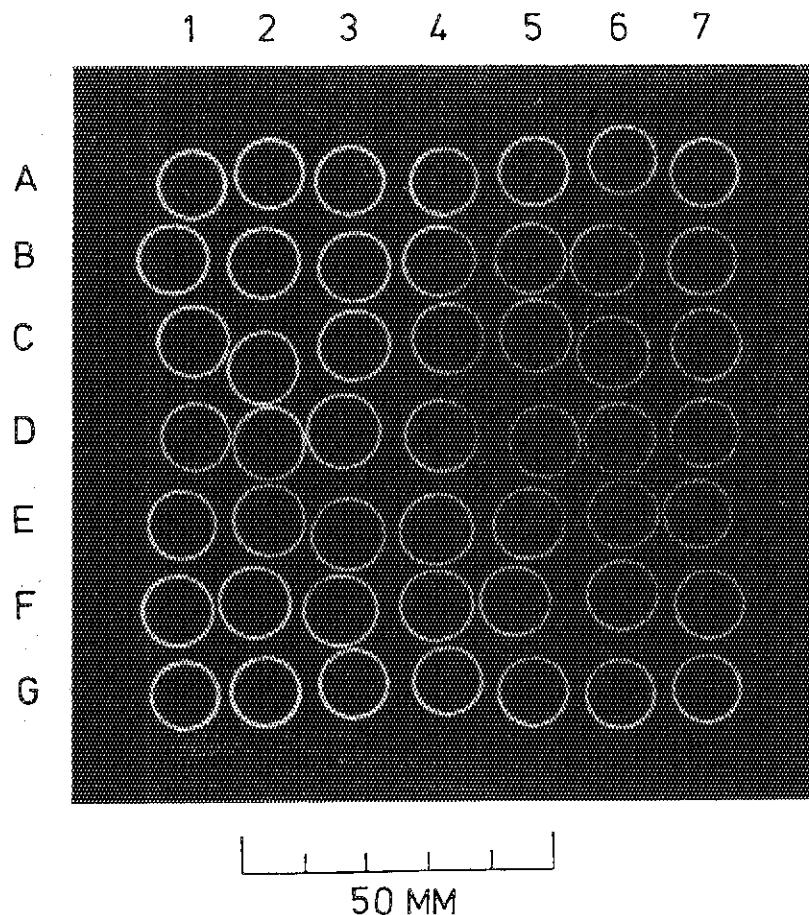


Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	26.3	31.1	33.2	29.9	21.4

*Channel blockage	7x7	5x5
	-	-

\*; Inside the assumed boundary.

Photo.26 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 154.2mm from the midpoint)

ASS.NO, 7808

Ballooning	7x7	5x5	3x3	5KAKU	7KAKU
(%)	20.8	24.4	25.6	23.7	17.0

*Channel blockage(%)	7x7	5x5
-	-	-

\*; Inside the assumed boundary

Photo.27 A cross section of a fuel assembly ruptured in flowing steam.  
(Above 203.7mm from the midpoint)