

JAERI-M

9 2 3 3

冷却材喪失事故条件下での模擬燃料  
集合体の破裂試験（I）

——No.7805試験結果——

1980年12月

橋本 政男・大友 隆・古田 照夫  
川崎 了・上塚 寛

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

冷却材喪失事故条件下での模擬燃料集合体の破裂試験(I)

- No. 7805 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・古田照夫

川崎 了・上塚 寛

(1980年11月19日受理)

軽水炉の冷却材喪失事故時における流路閉塞量を求めるため、模擬燃料集合体による水蒸気中膨れ破裂試験を行なった。この試験は流路閉塞量に影響を与えるいくつかのパラメーターを変化させて行ない、事故時に想定される流路閉塞量を定量的に明らかにすることを目的として、1977年から数回にわたり実施されている。

本報告書は、今後行なわれる最終の解析に利用するため、1体毎のデータを中心としてまとめたシリーズの一つで、No. 7805 集合体に関するものである。収められたデータは燃料棒の温度、圧力そして膨れ破裂挙動および集合体の流路閉塞量などである。

Multi-rod Burst Behavior under a Loss-of-Coolant  
Accident Condition ( I )

——— No. 7805 bundle results ———

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

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI

( Received November 19, 1980 )

Multi-rod burst tests have been planned since 1977 to estimate quantitative channel restriction during a LOCA transient in LWRs. For this purpose, many bundle tests have been making to burst in a steam in varying a few parameters which influence the degree of channel restriction.

The purpose of this report is to provide a background document for final reports to be published in the future. This report includes the results of No. 7805 bundle test, namely temperature, internal pressure, burst behavior of rods and channel restriction of the bundle.

Keywords : LOCA, Temperature Distribution , Multi-Rod,  
Ballooning, Burst, Heating Rate, Pressure,  
Channel Blockage,

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 方 法 .....	2
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 .....	5
3.1 用語の定義 .....	5
3.2 温度分布と昇温速度 .....	6
3.2.1 半径方向 .....	6
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 .....	8
3.5.3 断面の観察 .....	9
3.6 34%の膨れ長さ .....	9
3.7 流量閉塞率 .....	10
4. 総 括 .....	11
参考文献 .....	11

## Appendix

1. 概 要 .....	45
2. 構成機器 .....	45
2.1 模擬燃料集合体 .....	45
2.2 模擬燃料集合体の電力制御装置 .....	47
2.3 データ収録・再生装置および監視装置 .....	48
2.4 反応槽と加熱用電気炉 .....	51
2.5 水蒸気発生装置 .....	52
2.6 He 加圧装置 .....	53

## Contents

1.	Introduction	-----	1
2.	Experimental Procedures	-----	2
2.1	General Description	-----	2
2.2	Assembly	-----	2
2.3	Sham Fuel Rod	-----	2
2.4	Temperature Measurements	-----	2
2.5	Procedures	-----	3
2.6	Initial Condition	-----	3
2.7	Measuring Points	-----	3
2.8	Breaking up Assembly and Observation	-----	3
2.9	Channel Blockage Measurements	-----	4
3.	Results and Discussion	-----	5
3.1	Definition of Technical Terms	-----	5
3.2	Temperature Distribution and Heating Rate	-----	6
3.2.1	Radial Direction	-----	6
3.2.2	Axial Direction	-----	6
3.3	Internal Pressure	-----	7
3.3.1	Maximum and Burst Pressure	-----	7
3.3.2	Pressure Drop and its Time Interval	-----	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 Sham Fuel Rod	-----	8
3.5.3	Views of Cross Section	-----	9
3.6	Ballooned Region showing more than 34%	-----	9
3.7	Channel Blockage	-----	10

4.	Summary	-----	11
	References	-----	11
	Appendix	-----	45
	1. General Description	-----	45
	2. Equipments	-----	45
	2.1 Assembly	-----	45
	2.2 Power Control System	-----	47
	2.3 Data System	-----	48
	2.4 Reaction Tube and Auxiliary Furnace	-----	51
	2.5 Steam Generator	-----	52
	2.6 Pressurizer	-----	53



## 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ねばならない。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。しかし、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、燃料棒内の圧力によって膨れ変形を生じる。そのため、被覆管の膨れが炉心における非常用冷却水の流路閉塞の主因となる。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。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の重要性が指摘され、<sup>(1-3)</sup>米・西独において試験が行なわれている。

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対の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、集合体毎に膨大なデータを得ている。これらのデータは貴重なものであり、今後の解析に利用するうえで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、Appendix にまとめられているので参照されたい。以下は各試験体毎の細部と観察について主として記述する。

### 2.1 実験装置の概要

装置は Fig. 1 に示す試験本体（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収得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成立っている。

### 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. 2に概略を示す。集合体は100.1mm $\phi$ で約2,500mm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650mmである。また、集合体の全発熱量は最大196KW（30V）である。この集合体の外周106.5mmの位置にステンレス製の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 1 に示す化学組成をもったPWR用ジルカロイ-4被覆管（外径10.72 $\phi$ 、内径9.48 $\phi$ mm）、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. 3に示される。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ナペレットは純度99.5%以上、密度3.9以上で外径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 $\pm$ 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. 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非接地型シース熱電対で行う。燃料棒に関する温度測定点は、ヒーター発熱長中心

より 75 mm 上方を基準測定点として燃料棒全数に、そして、燃料棒の配列を考慮して基準の上下の点、さらにグリッドの位置など測定点総数は 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。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、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 15 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最大出力を負荷して集合体の加熱を行う。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) ..... 50 kg/cm<sup>2</sup> (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/cm<sup>2</sup>・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. 5 に模式的に示す。

- (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、さらに各1本毎の燃料棒に切離す。(図中の⑤)
- (5) 各1本毎に34%以上の膨れを示す部分の燃料棒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間隔毎の水平断面に集合体を切断する。(図中の⑦)
- (9) 各断面は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。

測定にあたっては、7行7列全体、内部の5行5列や中心の3行3列などについても行う。な  
お、被覆管の破裂開口部の測定は両先端を直線で結び、被覆管内に含まれる面積と規定して測定  
を行う。

### 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%膨れ長さとして規定する。

##### (5) 膨れ (blooming)

元の被覆管全断面積  $S_0$  に対する破裂後の被覆管全断面積  $S$  の百分比で表わす。

##### (6) 流路閉塞率 (channel blockage)

元の被覆管全断面積  $S_0$ 、破裂後の被覆管全断面積  $S$  及び集合体の元の全断面積  $S_A$  から次式によって算出する。

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

なお、元の全断面積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大された面積(仮想の集合体境界)を用いる。

したがって、この定義では仮想の集合体境界を越える燃料棒の膨れも流路閉塞率に含まれるため、流路閉塞率を大きめに評価していることになる。

### 3.2 温度分布と昇温速度

#### 3.2.1 半径方向

集合体の水平面上、即ち、発熱長中心より軸方向 75 mm 上方に取付けた熱電対 TC-2 (Fig. 4 参照) による温度変化を Figs. 6, 7 に示す。Fig. 6 は集合体の対角線上に配列された燃料棒の温度を、Fig. 7 は最外周に配列された燃料棒の温度を各々示し、最大出力を各燃料棒に負荷した時刻から全燃料棒が破裂するまでの時刻について表わしている。Fig. 6 で見られるように、初めは平穏な温度分布を示している集合体に最大出力を負荷して急速に温度を上昇させると、中心燃料棒の温度が最も高くなり、外側燃料棒になるにつれ温度は徐々に低くなっている。したがって、熱が集合体内部からチャンネルボックスに向かって逃げていることを意味している。しかし、2 方向における対角線上の温度分布はほとんど同じ傾向を示している。Fig. 7 から最外周に配列された燃料棒の温度分布で第 7 列に位置する燃料棒の温度に比べ、第 1 列のそれは昇温時間の経過につれてより低くなっている。この原因は Fig. 4 からわかるように、第 7 列燃料棒と第 1 列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、熱電対の位置が 7 列では集合体内側であるのに対して、1 列では逆に外側であるためによる。なお、水蒸気の流れが集合体内部より外部でより多く、熱の逃げに寄与した可能性も考えられる。以上の温度分布から、外周燃料棒では中心部のものに比べて、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。

そこで、各燃料棒の昇温速度を求めて Table 2 に示す。この昇温速度の値は中心燃料棒 (D-4) の中央に取付けられた熱電対 (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として表わされている。この表より、最外周部および極端に遅い 1 本の燃料棒 (F-5) を除いた内部燃料棒 24 本の昇温速度は 8.3 ~ 9.1°C/s となる。一方、最外周燃料棒 22 本では 6.6 ~ 8.8°C/s となる。ただし、周辺燃料棒には内部燃料棒と変らない昇温速度を示すものもあるが、それらのほとんどは比較的遅く、とくに第 1 列目では前述した原因により極めて遅い。以上の結果から、集合体の平均の昇温速度は約 8°C/s 程度と考えられる。

#### 3.2.2 軸方向

軸方向に 3 本の熱電対を取付けた燃料棒 10 本 (Fig. 4 参照) の各燃料棒の最高圧力および破裂時刻における温度を Fig. 8 に示す。各燃料棒の温度分布で最も高い温度を示す位置は発熱長のほぼ中心もしくはやや下方である。破裂位置はすべてこれらの燃料棒では発熱長中心より下方であるから、軸方向の温度分布は破裂位置との間に一応の対応が認められる。最高圧力および破裂時刻を比較すると、軸方向の温度分布は両者でそれほど顕著な変化がみられないが、破裂時刻での軸方向温度分布は最高圧力時刻よりもやや均一になる傾向がみられる。

前項と同様に処理した昇温速度を求めて Table 3 にまとめた。各燃料棒の軸方向における昇温速度は 1 本毎の燃料棒でそれほど大きな違いが認められないから、各燃料棒の昇温速度は Table 2 の値で代表してもよいと思われる。なお、中心燃料棒 (D-4) の上下スペーサー位置に取付けられた熱電対の昇温速度も同表に示してあり、上下とも外周燃料棒の最も遅い昇温速度と同程度である。

### 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および破裂圧力値と各々の時刻を Table 4 に示す。この表から、最高および破裂圧力値の分布を Fig. 9 にまとめた。最高圧力は初期圧力に比べ 40 % 増加の  $70 \text{ kg/cm}^2$  から 28 % 増加の  $64 \text{ kg/cm}^2$  までの値を示すが、燃料棒全数の 57 % が初期圧力の約 35 % 増加に相当する  $67 \sim 68 \text{ kg/cm}^2$  に達する。一方、破裂圧力は  $39 \sim 64 \text{ kg/cm}^2$  と最高圧力に比べて広い範囲に分布しているが、概して外周燃料棒の方が内部燃料棒よりも高い破裂圧力を示している。即ち、最外周燃料棒 (24 本) の 37.5 % が破裂圧力  $58 \sim 62 \text{ kg/cm}^2$ 、内部燃料棒 (25 本) の 44 % が破裂圧力  $55 \sim 59 \text{ kg/cm}^2$  であり、全燃料棒の約 80 % が  $55 \sim 62 \text{ kg/cm}^2$  で破裂したことになる。

最高および破裂圧力に達する時間分布を Fig. 10 に示す。最高圧力では最初の燃料棒 (G-2) が最高圧力に達してから 16 秒後に到達する燃料棒 (A-1) もあるが、燃料棒全数の 57 % が 6 ~ 8 秒後に最高圧力に到達している。破裂圧力の分布では、概して高い温度を示した内部燃料棒が最外周燃料棒よりも早く破裂するため、内部燃料棒相互での破裂時刻の隔たりは小さく、内部燃料棒 (25 本) の 76 % は 2 秒以内に破裂している。最外周燃料棒 (24 本) では約半数が 4 秒後に破裂している。集合体の全燃料棒は 8 秒以内に全て破裂していることがわかる。

最高圧力を示す時刻の燃料棒温度を Fig. 11 に示す。ただし、燃料棒軸方向に 3 点の温度測定をおこなった 10 本についてのみ示してある。これらの燃料棒の破裂位置は TC-2 と TC-3 の間であるが TC-2 の温度で比較すると、最高圧力を示す時刻の温度は  $615 \sim 683^\circ\text{C}$  である。

#### 3.3.2 圧力降下と降下時間

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 5 にまとめ、各々の燃料棒の分布を Fig. 12 に示す。圧力降下に要した時間は 16 ~ 28 秒であり、内部および最外周部の燃料棒でそれほど大きな違いは認められず、全燃料棒の約 70 % で 20 ~ 24 秒間圧力降下が起きている。その時の圧力降下は  $5 \sim 17 \text{ kg/cm}^2$  の範囲であり、最外周燃料棒の方が内部燃料棒に比べて圧力降下が  $6 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$  と狭い範囲に分布している。ここで、Table 6 にこの圧力降下が起きている時間内の温度上昇と昇温速度を各燃料棒毎に示す。この間の昇温速度も Table 2 に同じように燃料棒毎にかなり違っているが、内部燃料棒が最外周燃料棒に比べて一般的に速いという傾向が認められる。圧力降下中に上昇した燃料棒温度は  $105 \sim 231^\circ\text{C}$  である。

### 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. 14 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。最外周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よい一致を示している。内部燃料棒の破裂開口の向きは、はっきりとした傾向を

示さないが、それでも中心と考えられる9本を除いた外周16本の燃料棒では比較的中央に向かって破裂が生じている。したがって、中央ほど温度が高くなっていると考えられる。

破裂位置は発熱長中心の下方約100mmから上方約130mmまでにわたっているが、全燃料棒の75%はスパン長の約14%に相当する90mmの範囲で破裂している。また、全燃料棒の半数はスパン長の約8%に相当する50mmの範囲で破裂している。

破裂時刻と破裂位置を比較することによって、1本の燃料棒が破裂した時隣接する燃料棒の破裂を誘発したかどうか分かる。即ち、燃料棒が隣合っていて破裂時刻、破裂位置と向きがほとんど同じであるものが存在するかどうかである。Fig. 13から、この条件に当てはまる燃料棒はD-2とD-3、C-5とD-5、F-3とF-4、E-6とF-6などの4組が存在する。しかし、集合体全体で考えるとこれらの組み合わせは非常に少なく、1本の燃料棒の破裂が隣接燃料棒の破裂を次々と誘発する破裂伝播は考慮しなくてもよいと考えられる。

### 3.4.2 破裂温度

燃料棒の破裂温度をFig. 14に示す。この図には、軸方向の3点に温度計測を行った燃料棒10本について示してある。破裂温度は3点での熱電対の温度から破裂位置へ内挿を行って求めた値であり、内挿からはずれた燃料棒については示されていない。この図から、破裂温度は約800～860°Cである。

## 3.5 膨れ観察

### 3.5.1 各列毎の観察

Fig. 5 に示した集合体解体にしたがって、燃料棒の膨れを観察した。Fig. 5 中の④に相当する集合体の各列毎の観察のなかで代表的な写真をここに示す。Photo. 1は第1列目の正面および裏面と第2列目の第1列目に相対した場合である。集合体の最外周(第1列目)では破裂開口が認められないが、半径方向に温度分布が生じ高くなったと考えられる内側で破裂開口が認められる。Photo. 2は中央の3～5列目における場合を示す。破裂部が集合体中心から上下100mm程度に集中し、燃料棒同志が膨れのため実験開始前に比べてかなり接近した様子が認められる。Photo. 3は観察方向を変えた各行毎の一例を示す。Photo. 2と3からわかるように、燃料棒の膨れは観察の方向による違いは顕著に認められない。

### 3.5.2 燃料棒

集合体を構成している49本の燃料棒のうち代表的な数例をPhoto. 4に示す。写真は1本の燃料棒を四方向から観察した結果と破裂開口部の拡大観察結果とで構成されている。Photo. 4.1～4は各々B-2、C-3、D-4、E-1燃料棒である。各燃料棒で観察される曲がり、燃料棒が集合体内に配置された位置、言い換えるならば隣接燃料棒との関係で色々な形になっている。また、破裂開口もC-3のように大きなものから、かなり小さなものまで存在する。しかも、B-2やD-4燃料棒のように隣接燃料棒の膨れまたは破裂の影響を受けたと考えられるものなどもある。



### 3.5.3 断面の観察

解体した燃料棒を Fig. 5 ⑦ のように再び組み立てた後切断した断面観察の数例を Photo. 5 に示す。Photo. 5. 1 は集合体中心より 245.7 mm 下方の位置で、全燃料棒に顕著な膨れがほとんど認められない場合である。この断面での膨れ量は 14.5 %、流路閉塞率は 11.5 % である。Photo. 5. 2 は中心より下方 96.8 mm で、ほぼ流路閉塞率が 50 % のものである。Photo. 5. 3 ~ 5 は各々 43.2 mm、2.5 mm 上方、そして 24 mm 下方の位置であって、流路閉塞率は各々 72.6、84.8 そして最大の 92.1 % である。これらの断面写真から、燃料棒同志が膨れによって接触したり、また、その接触によって他方の燃料棒の膨れが制約を受けている様子がよくわかる。また、1 本の燃料棒の破裂部が隣の燃料棒の破裂部のなかに含まれてしまう場合も見られる。

ここで、前述した破裂時刻および破裂位置やその向きがほとんど等しい場合の例を Photo. 6 に示す。この写真中、F-3 と F-4 および E-6 と F-6 燃料棒が相当する。まず、F-3 と F-4 では F-3 が破裂した後に F-4 が破裂しており、F-4 は F-3 の破裂部のなかへ入ったことが観察でき、F-4 の破裂で F-3 の破裂部の一端を上げた可能性も考えられる。一方、E-6 と F-6 では破裂がほぼ同時に起こったと考えられ、お互いに影響をおよぼしあった様子はあまりみられない。Photo. 5-5 は破裂が同時に起こったとみられる D-2 と D-3 の場合である。これらの燃料棒は F-2 と F-3 の場合と同じように、D-3 が D-2 の破裂部に含まれている。この写真から考えると D-3 の破裂は D-2 の破裂よりもやや遅れて起こったと思われる。しかも、破裂時刻が同じであるから、大きな変形から破裂まで 2 秒以内であったと推測できる。したがって、D-3 の破裂で D-2 の破裂部が更に変形させられた可能性も考えることができる。以上、隣接した燃料棒では他の燃料棒の膨れおよび破裂で十分影響を受けるものと思われる。

### 3.6 34 % の膨れ長さ

燃料棒がお互いに 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相手の膨れに対して影響を与えることになる。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. 15 に示す。34 % 膨れは破裂開口の上下にかなり長い範囲にわたって認められる。とくに、G-6、E-4 そして E-5 燃料棒では軸方向の 2ヶ所にこの膨れが見られ、いわゆるひょうたん型膨れも生じている。この型の膨れには燃料棒に取付けられた熱電対が影響を及ぼしていると思われる。破裂開口位置と 34 % 膨れ長さの関係は明確でなく、破裂開口の上方または下方で反対方向に比べてかなり長い範囲にわたって 34 % 膨れ長さが認められる燃料棒もある。燃料棒の配置による違いは、かなり明瞭に認められ、34 % 膨れ長さは内部燃料棒で最外周燃料棒よりも長くなっている。このことを明らかにしたのが Fig. 16 である。34 % 膨れ長さは最大で約 300 mm まで達し、その長さはスパン長の 46 % にもなっている。また、スパン長の約 22 % に相当する 140 mm 以上の 34 % 膨れ長さをもつ燃料棒はすべて内部に配置されたものであり、その本数は 14 本であって内部燃料棒本数の 56 % にあたる。しかも、内部燃料棒の 34 % 膨れ長さを 120 mm 以上と考えると、内部燃料棒本数の約 80 % が 120 mm 以上の 34 % 膨れ長さを示すことになる。一方、最外周燃料棒では 34 % 膨れ長さが 20 ~ 140 mm の範囲にわたって生じているが、燃料棒本数が特定の範囲に集中する傾向は認められなかった。したがって、集

合体内の温度分布が均一であれば、かなり長い 34 % 膨れ長さが各燃料棒に生じると考えられる。

### 3.7 流路閉塞率

各断面写真より求められた流路閉塞率を集合体の断面位置によって整理したのが Fig. 17, 18 である。Fig. 17 は集合体断面のなかで、中心燃料棒の 9 本、内部燃料棒の 25 本、そして全燃料棒の 49 本について流路閉塞率を測定した結果である。全燃料棒についての最大流路閉塞率は集合体中心から 25 mm 下方の位置で認められ、その値は 92.1 % である。流路閉塞率は約 25 mm にわたって 90 % 程度であるが、これらの位置から上下に遠ざかるにつれて、ほぼ対称的に減少している。流路閉塞率が 50 % を越える集合体の長さは約 170 mm であり、この長さはスパン長の約 26 % に相当している。なお、熱電対を取付けた位置付近での流路閉塞率の変化はこの図でみるかぎり顕著でなく、本集合体の流路閉塞率測定には熱電対取付けの影響はなかったものと思われる。つぎに、内部燃料棒と中心燃料棒の各々について測定した流路閉塞率をみると、最大流路閉塞率とその示す位置が全燃料棒で行なった測定結果とは異なっている。即ち、内部燃料棒の場合、集合体中心部で最大流路閉塞率 102.4 % を示すが、中心燃料棒では中心部から 75 mm 下方で 96.7 % を示している。また、位置による流路閉塞率の変化を比べると、内部燃料棒の場合は全燃料棒の場合とかなりよい一致が認められる。一方、中心燃料棒の場合は全燃料棒の場合と比べて、かなりの違いがみられる。これまで述べてきたように、集合体内部と外周部では温度差が生じているから、燃料棒の膨れ挙動において内部と外周部では異なっていると考えられる。以上の流路閉塞率の位置による変化からみて、内部燃料棒による流路閉塞率が集合体内の全燃料棒の温度分布がほぼ均一である場合を表わしていると考えてもよいだろう。

Fig. 18 は、最外周燃料棒 (25 本) のみ、内部燃料棒の外周 (16 本) のみと中心部燃料棒 (9 本) における流路閉塞率を示す。最外周燃料棒のみの場合および内部燃料棒の外周のみの場合とも、最大流路閉塞率を示す位置は、Fig. 17 の各々全燃料棒および内部燃料棒の場合と一致している。ただし、位置による流路閉塞率の変化は最外周燃料棒のみの場合に全燃料棒の場合に比べてかなりの違いが認められるのに対して、内部燃料棒の外周は逆に全燃料棒や内部燃料棒の場合とかなり似た様子を示している。

測定された流路閉塞率は、3.1(6)で述べたように仮想の集合体境界を越える燃料棒の膨れも流路閉塞率に含まれているため流路閉塞率を大きめに評価している。たとえば、流路閉塞率が 100 % を越える場合がある。著者らが、初期において予備的に行なった試験結果では、仮想の集合体境界をほとんど越えなかったため、3.1(6)に記述した仮想の集合体境界を一応の目安として流路閉塞率測定を実施した。しかし、本試験結果のように仮想の集合体境界を越えるような大きな燃料棒の膨れが認められる場合、3.1(6)で仮定した仮想の集合体境界の適否は問題になるものと思われる。このため、流路閉塞率の測定において、仮想の集合体境界を越える燃料棒の膨れを除いて行なうことを今後予定している。

## 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に、1 スパン長をもつ小型集合体の破裂試験を行なった結果、以下の事柄が明らかにされた。

- (1) 最外周の燃料棒を除く他の燃料棒の 500 °C から破裂時刻までの昇温速度は約 8 °C/s であり、各燃料棒とも発熱長中心の 300 mm にわたってはそれほど大きな温度勾配は存在しない。
- (2) 最高圧力は初期内圧に比べ約 35 % 増加した 68 kg/cm<sup>2</sup> 程度であり、破裂温度は 800 ~ 860 °C と  $\alpha$ - $\beta$  相変態温度の直下である。破裂時刻の隔りは全燃料棒で 8 秒以内と短かく、最高圧力から破裂圧力までの圧力低下は 5 ~ 17 kg/cm<sup>2</sup> でその時間は 20 ~ 24 秒程度である。
- (3) 燃料棒同志が接触する 34 % 以上の膨れは、燃料棒全数にわたって認められ、最も長い範囲にわたって起こったものはスパン長の 46 % に相当する約 300 mm である。34 % の膨れ長さは集合体内の温度分布が均一であったと考えられる内部燃料棒で長い範囲にわたっている。
- (4) 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き、破裂開口は温度の高い方向へ向かっていることや、膨れおよび破裂が隣接燃料棒の膨れに影響されていることが認められた。
- (5) 多くの燃料棒が破裂した位置で流路閉塞率は大きくなり、その最大値は 92.1 % である。流路閉塞率が 50 % を越える集合体の長さは、スパン長の約 26 % に相当する 170 mm 程度である。集合体内の全燃料棒の温度分布がほぼ均一である場合、内部燃料棒 (25 本) による流路閉塞率で集合体の流路閉塞率を表わすことができる。
- (6) 1 本の燃料棒が破裂して、隣接の燃料棒の破裂を誘発する場合は少なく、集合体内の燃料棒で破裂の伝播が顕著に起こることはないだろう。

## 参 考 文 献

- (1) Chapman, R.H. et al., : ORNL/NUREG/TM-322 (1979), 337 (1979), 390 (1980) and 392 (1980)
- (2) Wiehr, K. et al., : "Results of REBEKA test-3", 4th JAERI-FRG-NRC Annual Fuel Behavior Information Exchange, Idaho Falls, Idaho, June 22-29 (1979)
- (3) Weidinger, H.G. : "Results of Burst Test at KWU", 4th JAERI-FRG-NRC Annual Fuel Behavior Information Exchange, Idaho Falls, Idaho, June 22-29 (1979)

Table 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

Ass. No 7805

Table 3 AVERAGE HEATING RATE OF EACH THERMOCOUPLE

A1	7.1 6.6 7.0	A2	7.8 7.7	A3	8.0 8.6	A4	8.0 8.0 8.1
		B2	8.3 8.5 8.8	B3	8.5 8.5	B4	8.8 8.8
				C3	8.9 8.7 8.9	C4	8.7 8.7
						D4	6.9 8.9 8.6 8.5 6.5

Tc-1 →  
Tc-2 →  
Tc-3 →

Tc-S1 →  
Tc-1 →  
Tc-2 →  
Tc-3 →  
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 (864°C)

Ass. No 7805 (50kg/cm<sup>2</sup>)

Table 2 Average heating rates of claddings

	1	2	3	4	5	6	7
	°c/sec						
A	6.6	7.7	8.6	8.0	8.1	7.6	7.3
B	7.5	8.5	8.5	8.8	8.5	8.6	8.5
C	7.3	8.3	8.6	8.7	9.1	9.0	8.5
D	7.7	8.5	8.4	8.6	8.7	8.8	8.6
E	7.3	8.6	8.9	8.8	9.1	8.7	—
F	7.2	8.8	8.5	8.7	6.5	8.6	8.4
G	—	8.0	8.8	8.2	8.3	8.1	7.8

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 (864°C)

Ass. No 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

Table 5 Pressure decrease and duration time between maximum and burst pressures and pressure drop rate

	1	2	3	4	5	6	7
A	0.63 10 16	0.29 7 24	0.36 8 22	0.29 7 24	0.32 7 22	0.31 8 26	0.25 7 28
B	0.33 6 18	0.67 12 18	1.63 16 26	1.32 29 22	0.33 6 18	0.5 10 20	0.3 6 20
C	0.44 8 18	0.32 7 22	0.36 8 22	0.41 9 22	0.3 6 20	0.39 7 18	0.4 8 20
D	0.36 8 22	0.65 17 26	0.46 12 26	0.54 13 24	0.55 12 22	0.5 10 20	0.6 12 20
E	0.38 9 24	0.63 15 24	0.6 12 20	0.67 16 24	0.5 11 22	0.58 14 24	0.42 10 24
F	0.3 6 20	0.25 5 20	0.4 8 20	0.5 10 20	0.68 15 22	0.65 13 20	0.29 7 24
G	0.36 8 22	0.29 8 28	0.45 10 22	0.36 10 28	0.21 6 28	0.45 10 22	0.56 10 18

0.36  
8  
22

← Pressure drops rate (kg/cm<sup>2</sup>/sec)  
 ← The difference between the pressure values of maximum and burst (kg/cm<sup>2</sup>)  
 ← Time required from maximum pressure and burst (sec)

Ass. No 7805

Table 4 Results of burst pressure and burst time

	1	2	3	4	5	6	7
A	68-46 58-62	67-38 60-62	67-40 59-62	67-36 60-60	68-38 61-60	67-34 59-60	67-36 60-64
B	67-42 61-60	67-42 55-60	67-34 51-60	68-36 39-58	68-38 62-56	70-38 60-58	68-40 62-60
C	67-40 59-58	62-36 55-58	67-34 59-56	66-34 57-56	68-36 62-56	69-38 62-56	68-40 60-60
D	68-36 60-58	68-32 51-58	68-32 56-58	64-34 51-58	68-36 56-58	69-38 59-58	70-38 62-58
E	67-36 58-60	67-36 52-60	67-38 55-58	66-34 50-58	68-36 57-58	67-36 53-60	68-36 58-60
F	70-38 64-58	67-36 62-56	67-36 59-56	68-38 58-58	67-38 52-60	67-40 54-60	68-32 61-56
G	68-38 60-60	67-30 59-58	67-36 57-58	65-32 55-60	68-32 62-60	68-38 58-60	68-42 58-60

Pm-Tm  
Pb-Tb

Pm: Maximum pressure (kg/cm<sup>2</sup>)  
 Tm: Time of maximum pressure (sec)  
 Pb: Burst pressure (kg/cm<sup>2</sup>)  
 Tb: Burst time (sec)

Ass. No 7805 (50kg/cm<sup>2</sup>)

Table 6 Temperature increase and duration time between maximum and burst pressures and heating rate

	1	2	3	4	5	6	7
A	6.6 105 16	7.2 173 24	8.7 192 22	7.7 185 24	9.2 202 22	8.2 213 26	7.2 202 28
B	6.1 109 18	8.5 153 18	8.8 230 26	9.2 202 22	8.3 149 18	8.2 164 20	7.6 151 20
C	7.2 129 18	8.0 175 22	8.7 191 22	9.5 209 22	9.3 185 20	9.1 163 18	8.3 165 20
D	8.0 175 22	8.7 227 26	8.8 229 26	9.2 221 24	8.9 196 22	8.6 172 20	8.6 171 20
E	6.7 161 24	8.9 214 24	8.6 172 20	9.2 220 24	9.5 208 22	8.9 213 24	— — 24
F	5.9 118 20	9.0 179 20	8.1 162 20	8.5 169 20	6.0 132 22	7.7 153 20	8.4 201 24
G	— — 22	8.1 227 28	8.9 195 22	7.5 211 28	8.3 231 28	7.5 165 22	7.6 136 18

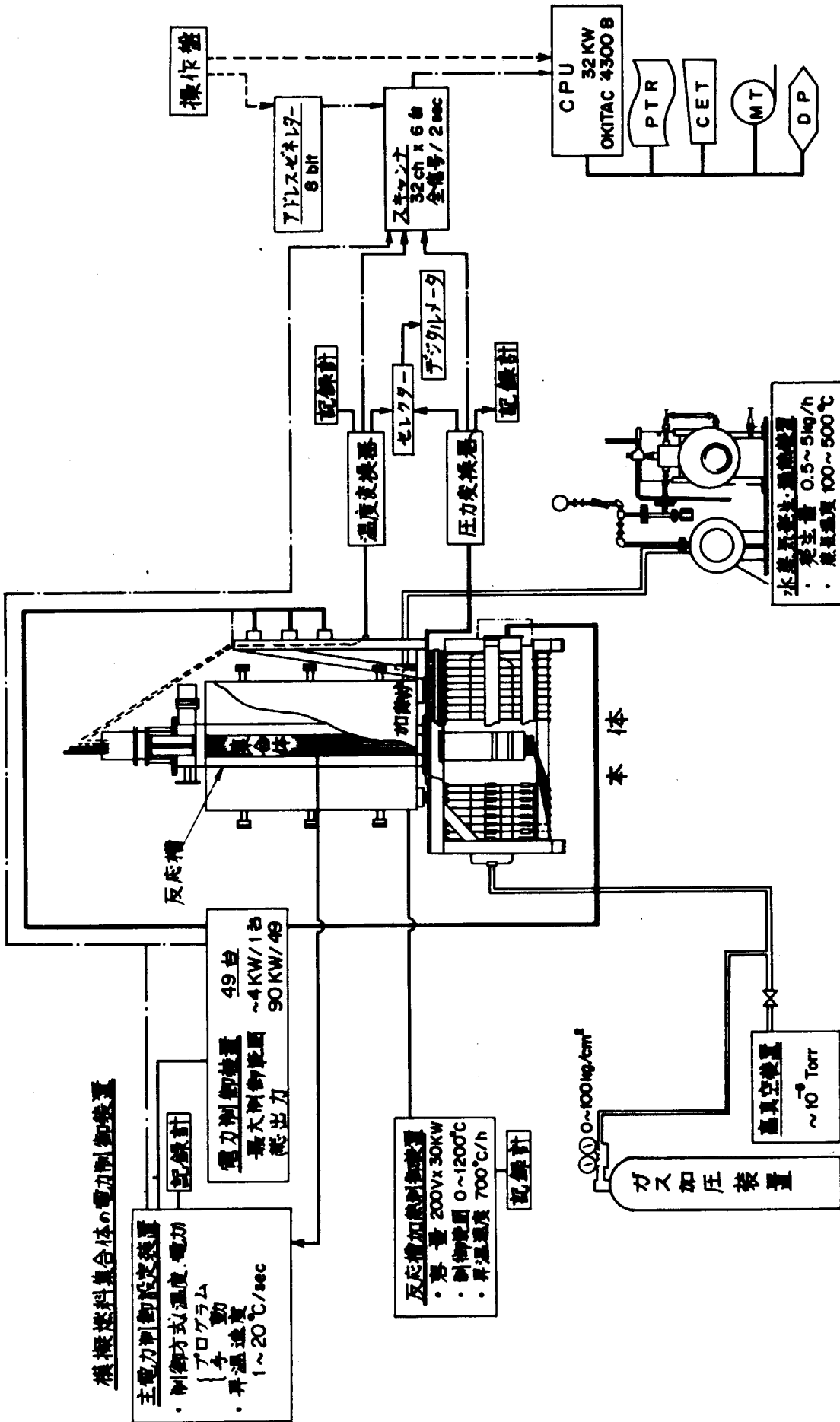


Fig. 1 模擬燃料集合体水蒸気中加熱装置の模式図



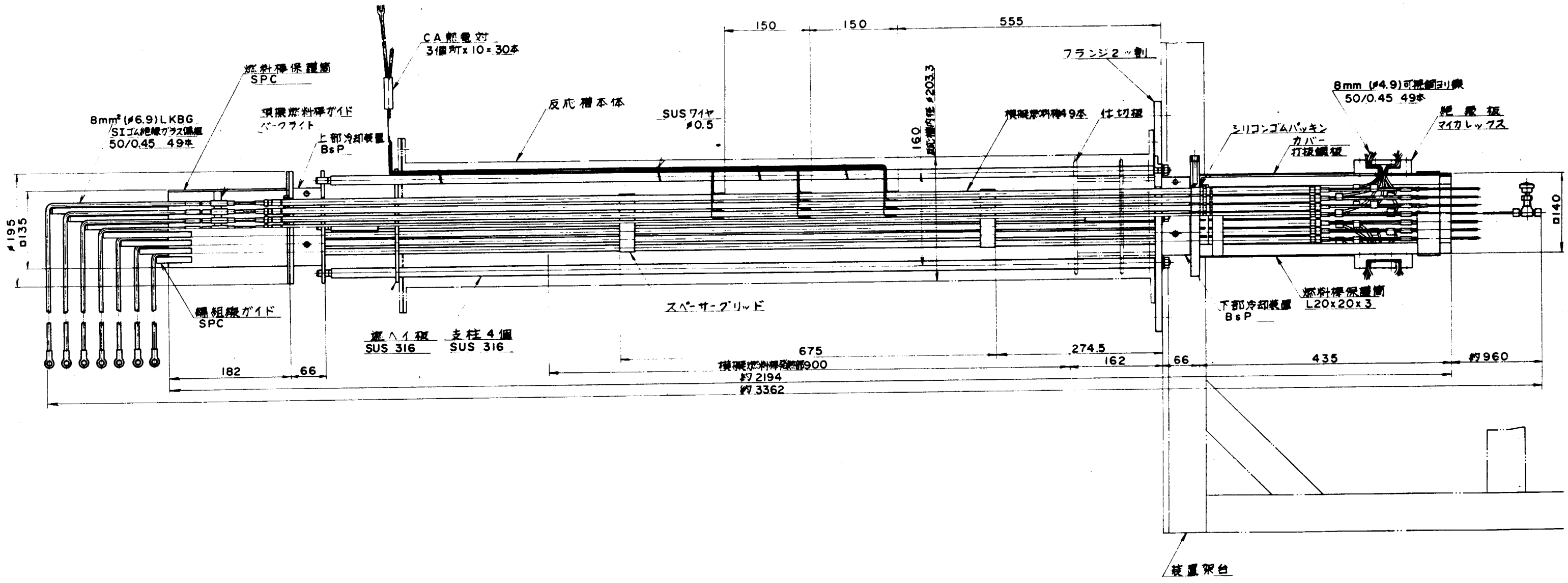


Fig. 2 模擬燃料集合体 (チャンネルボックス付)

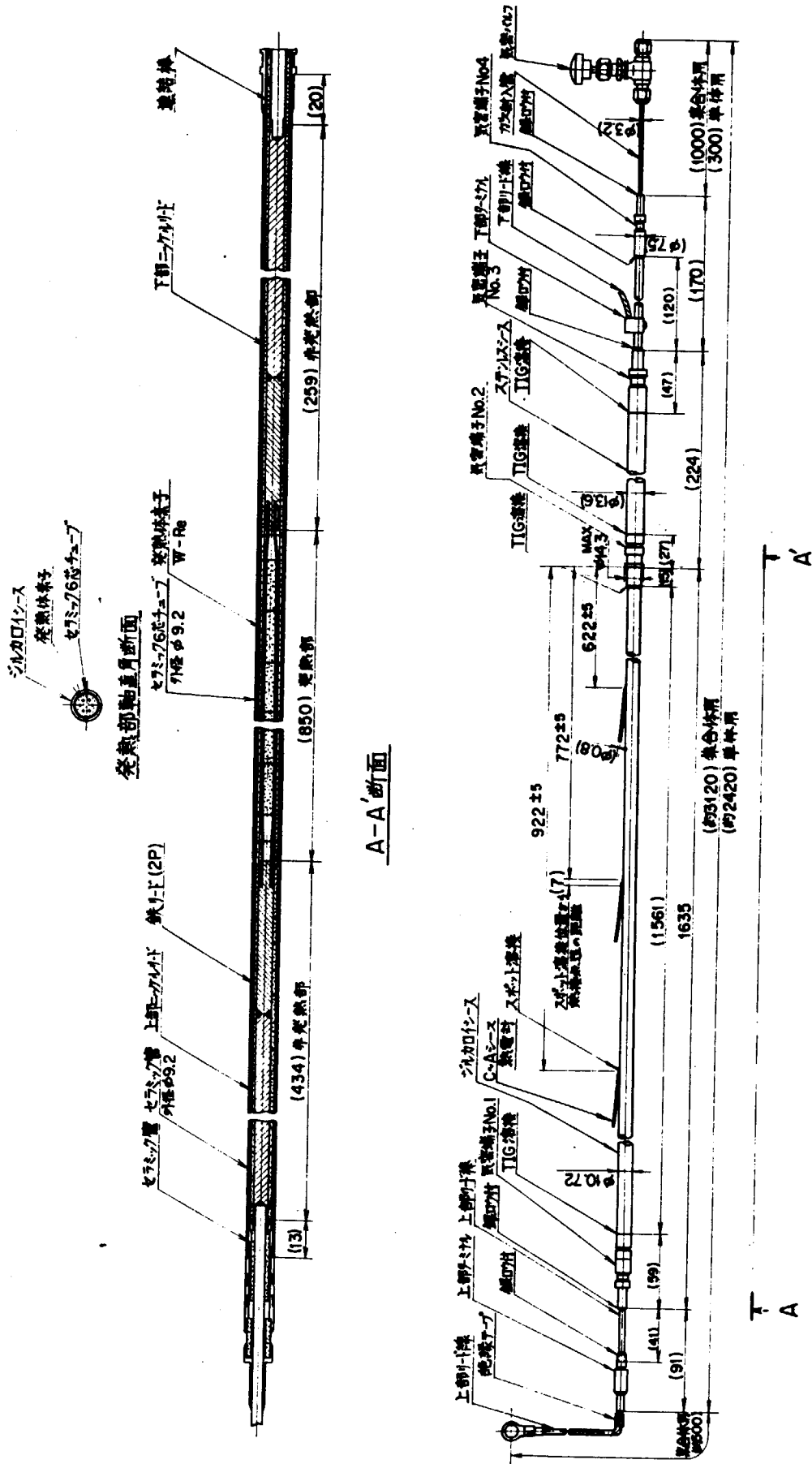
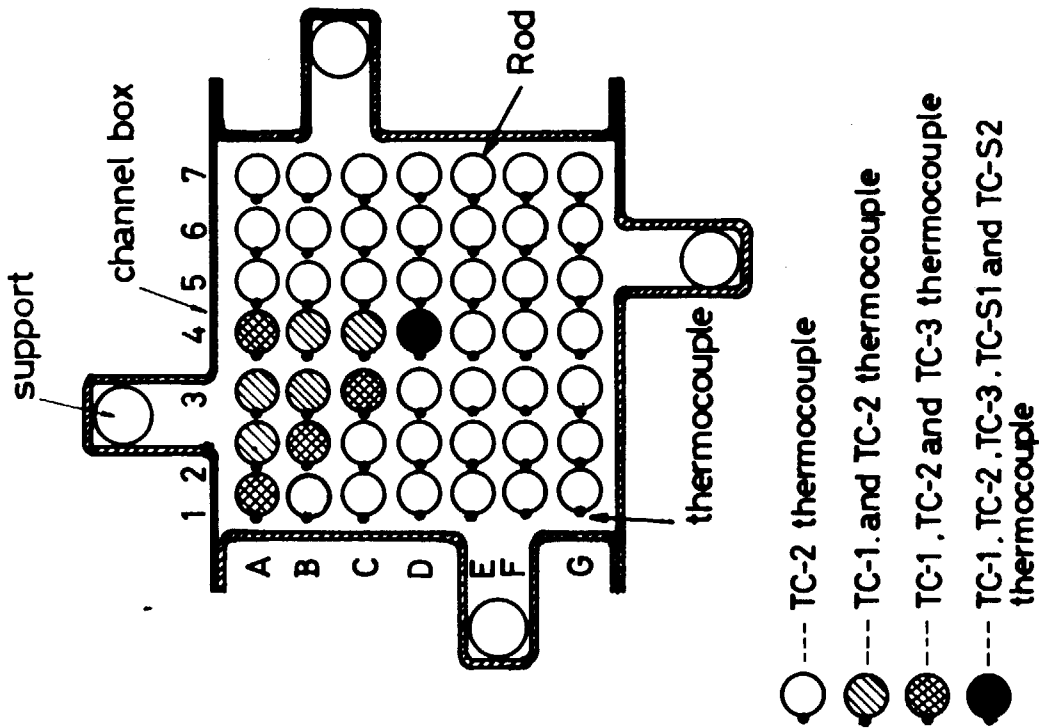
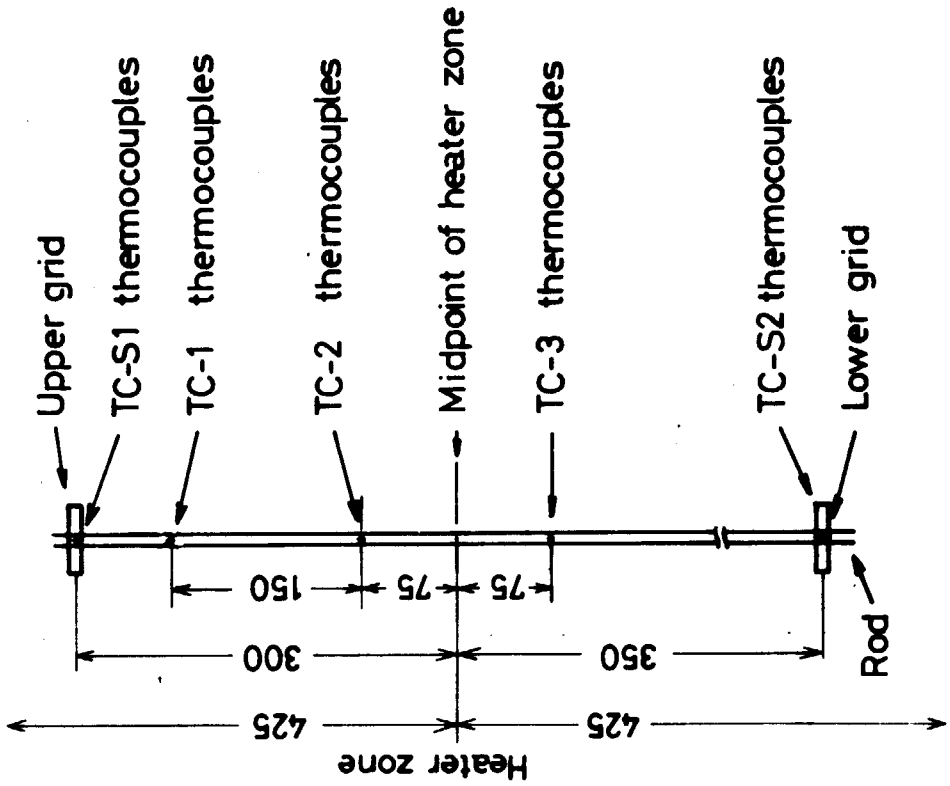


Fig. 3 模擬燃料棒 (W-Re 0.6 φ)



Axial locations of thermocouple

Radial locations of thermocouple

Fig. 4 Locations of thermocouple

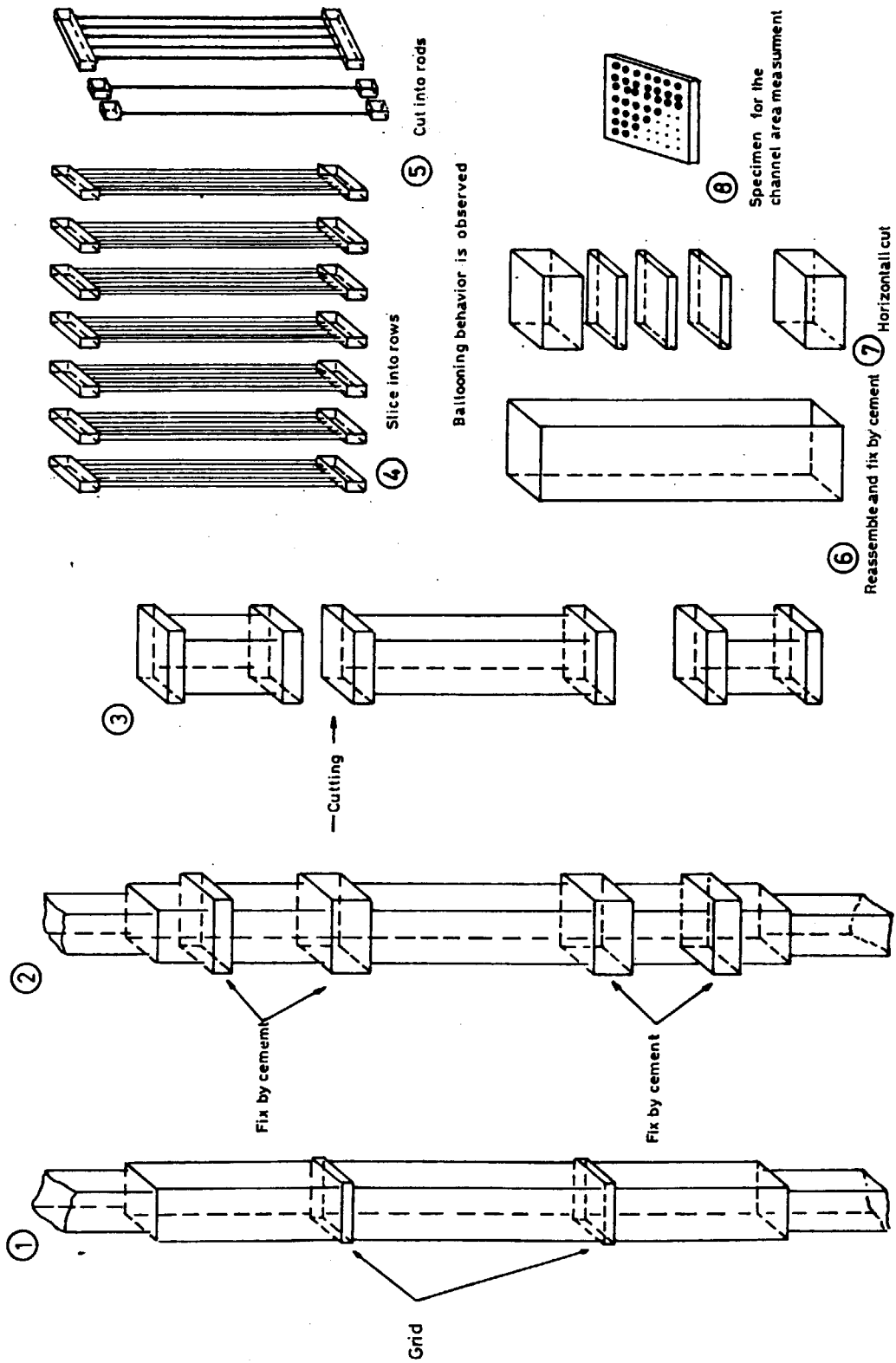


Fig. 5 Sequence of the post burst examination of a assembly

Ass. No. 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

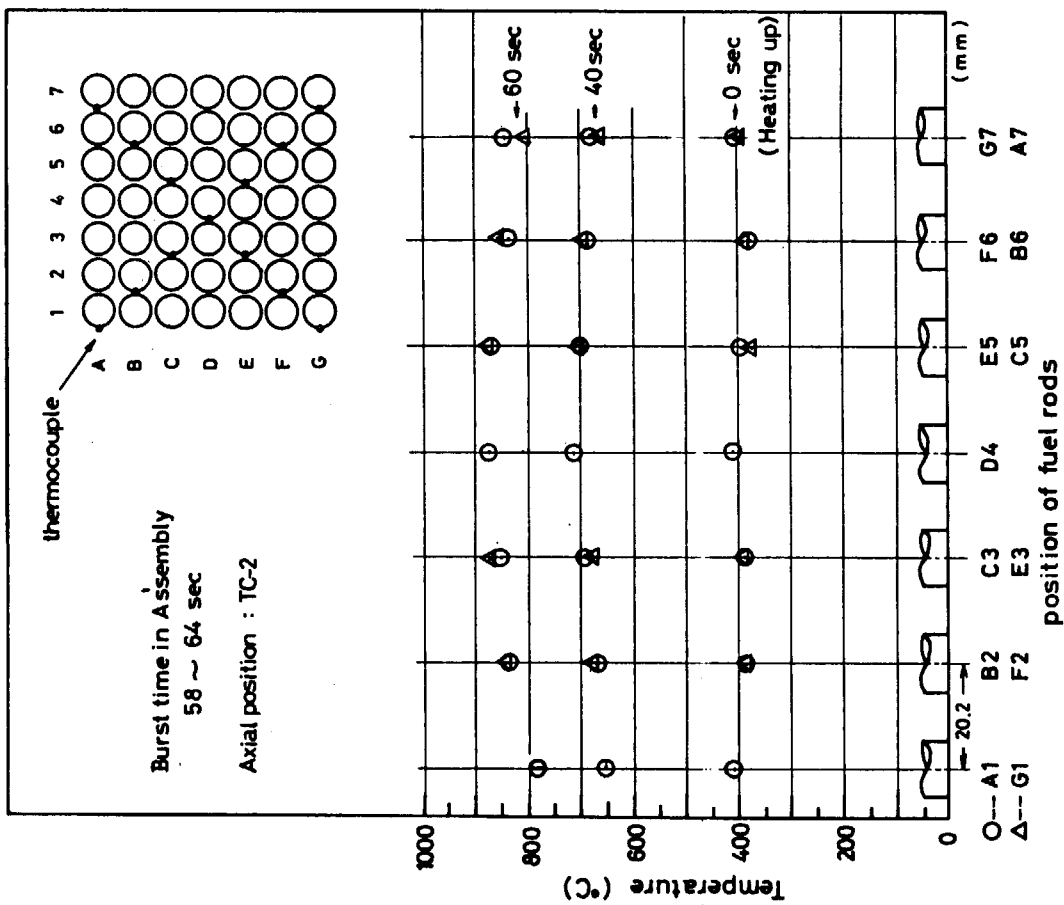


Fig. 6 Horizontal temperature distribution of the cladding as a function of time (Diagonal direction)

Ass. No 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

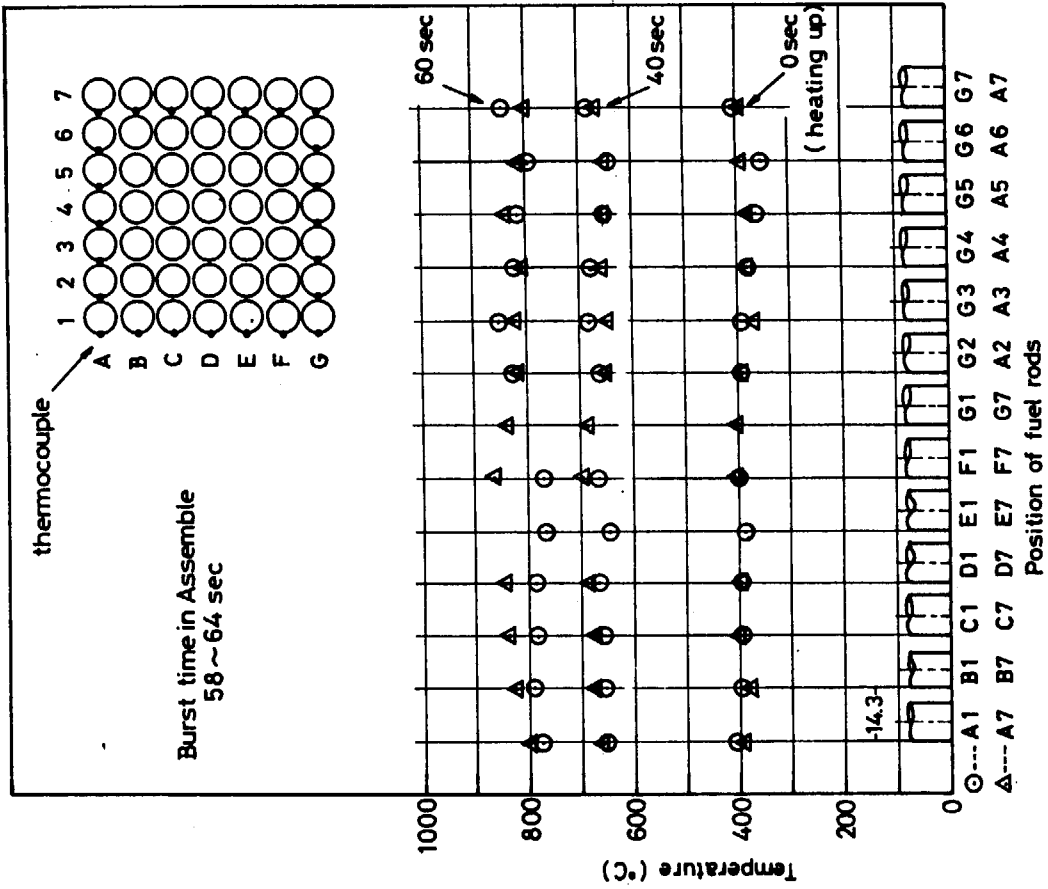


Fig. 7 Horizontal temperature distribution at TC-2 position of the cladding as function of time (outer rods)

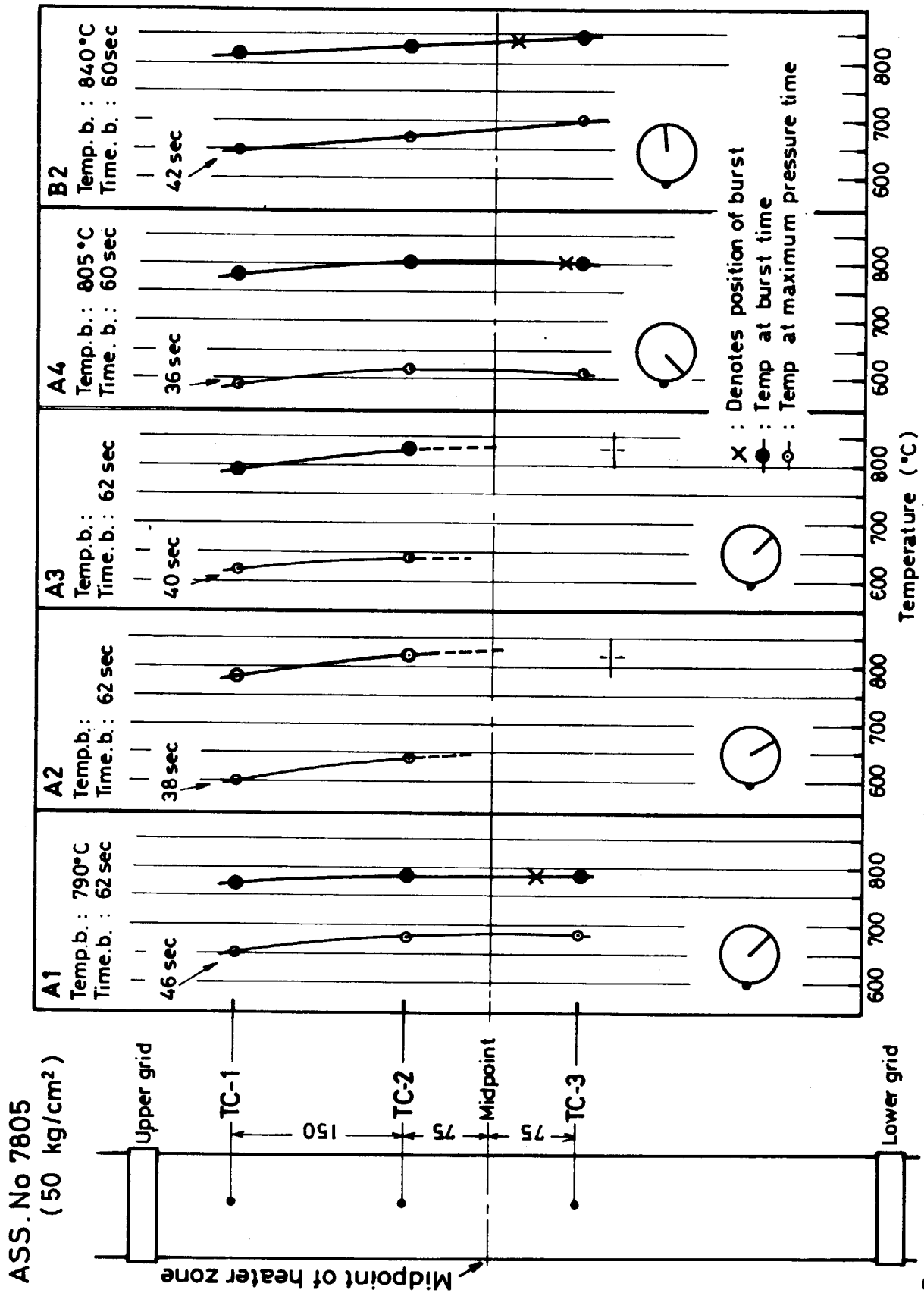


Fig. 8-1 Axial distribution of temperature at burst time

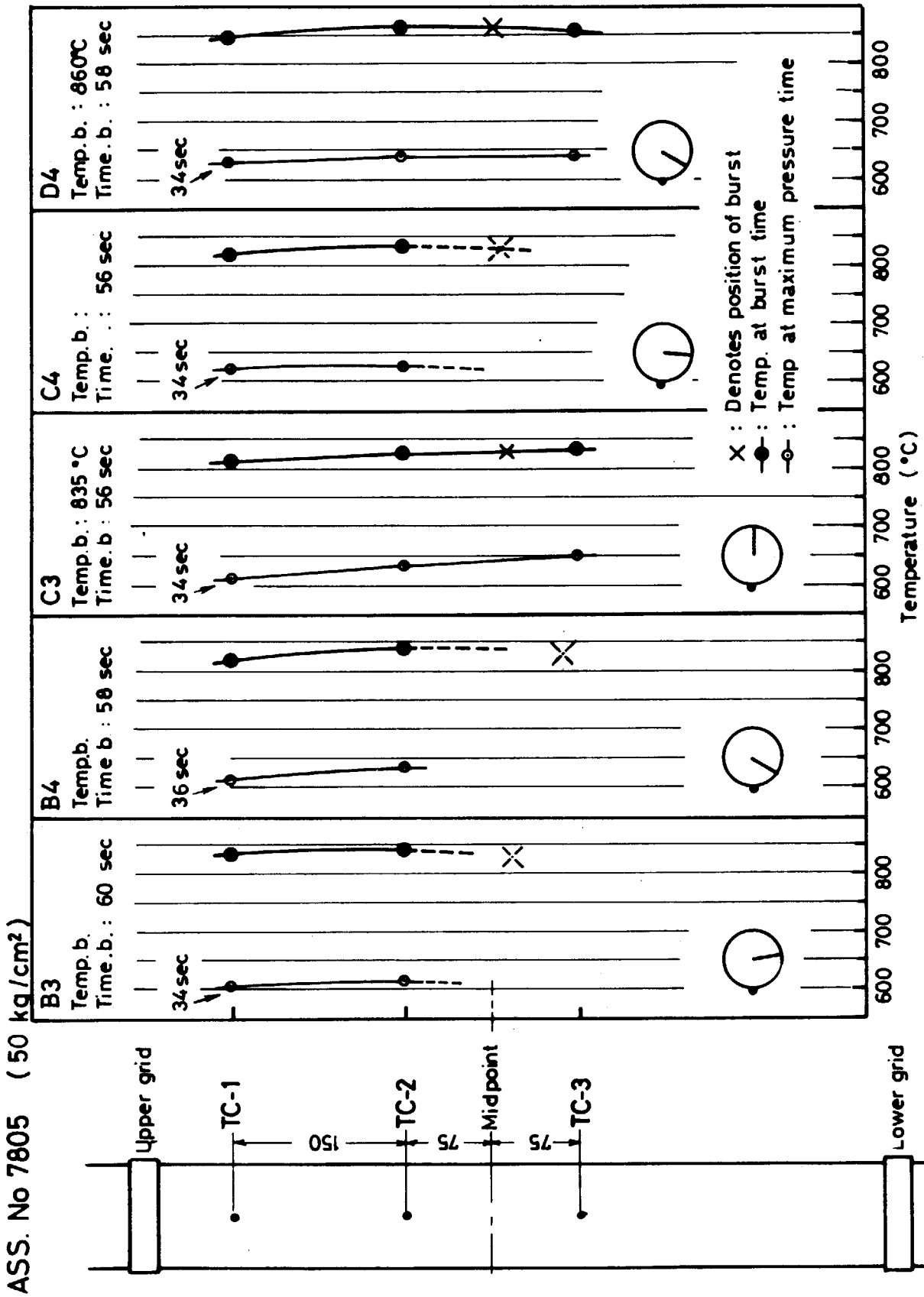


Fig. 8-2 Axial distribution of temperature at burst time

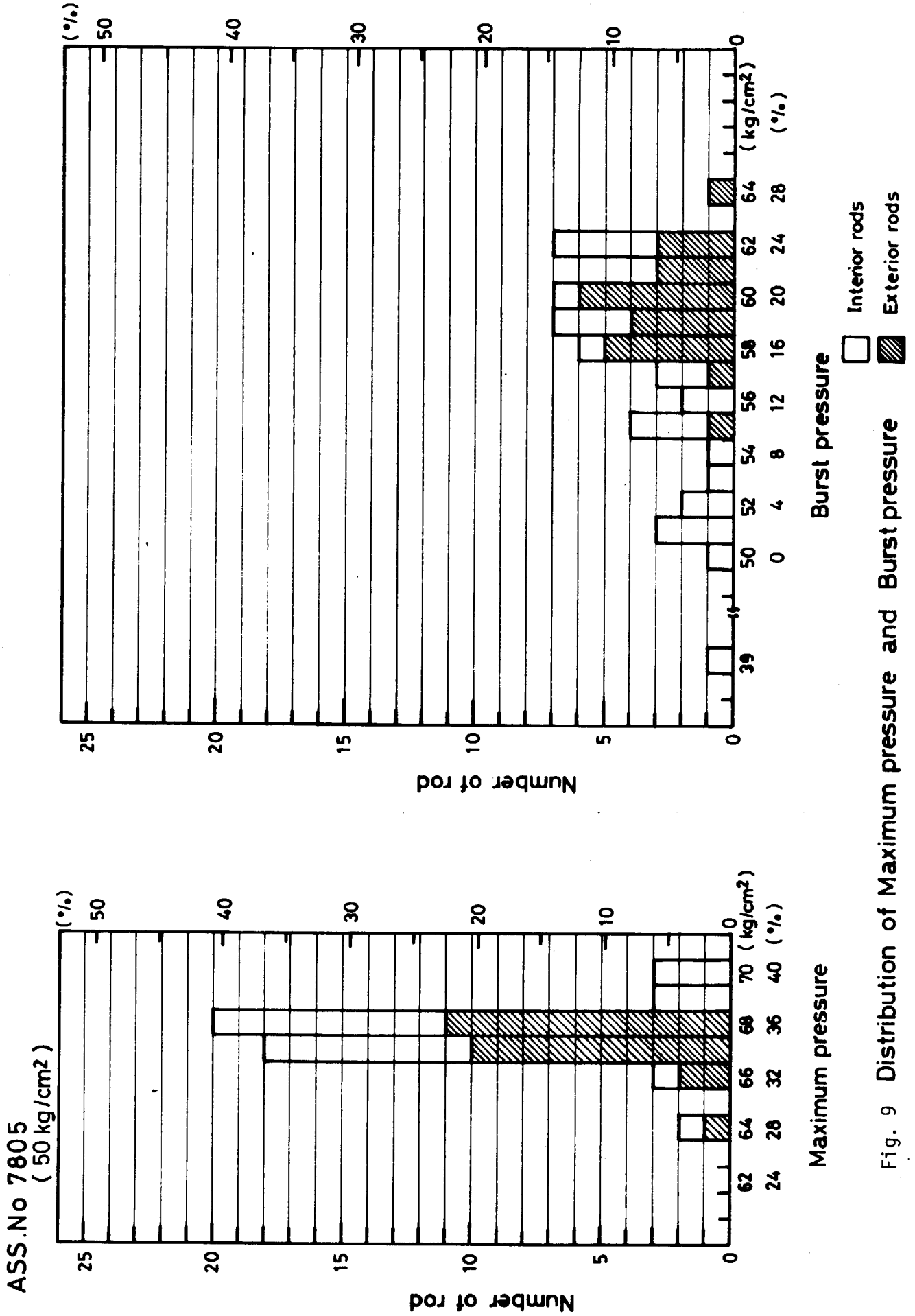


Fig. 9 Distribution of Maximum pressure and Burst pressure



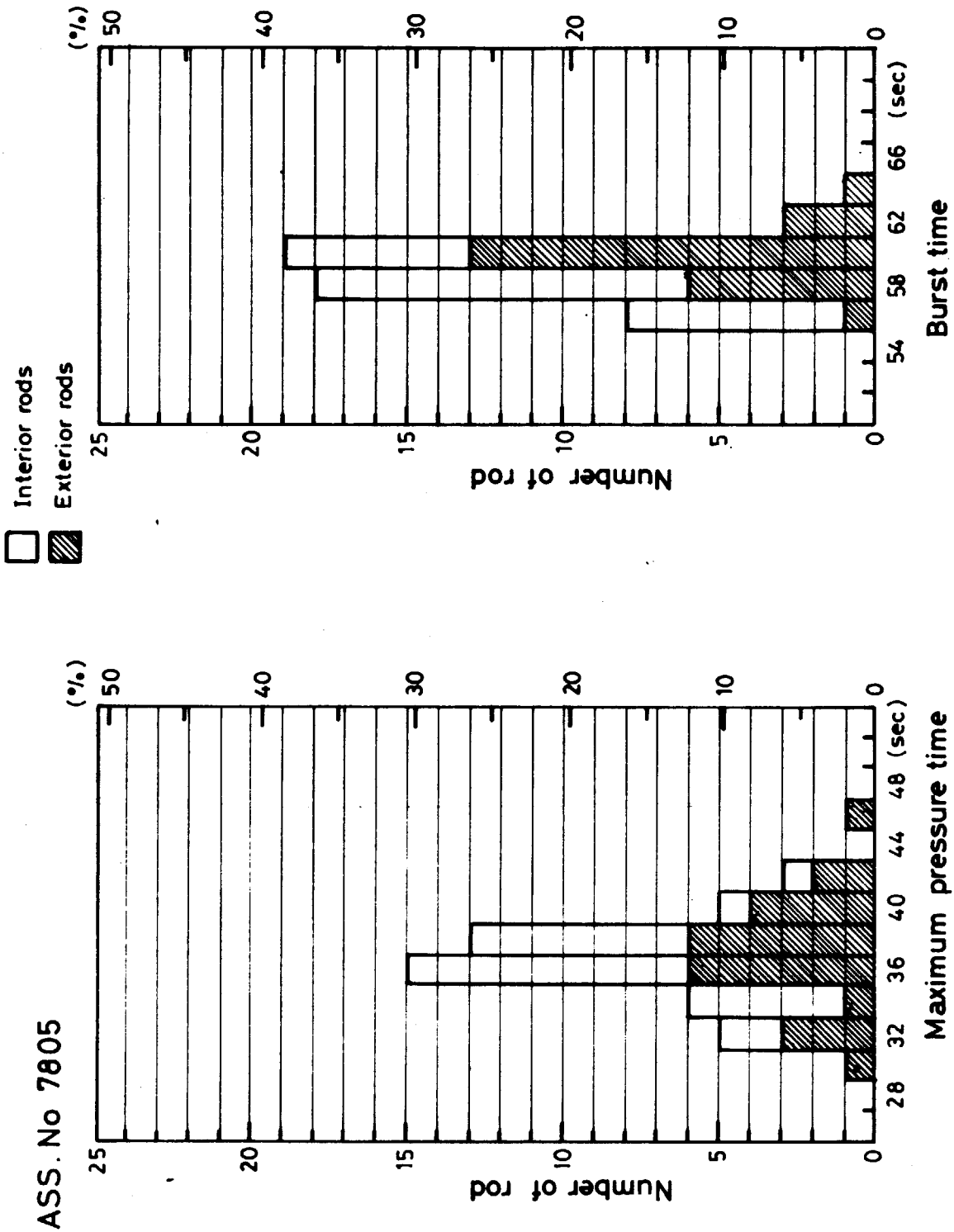


Fig. 10 Distribution of Maximum pressure time and Burst time

Ass. No 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

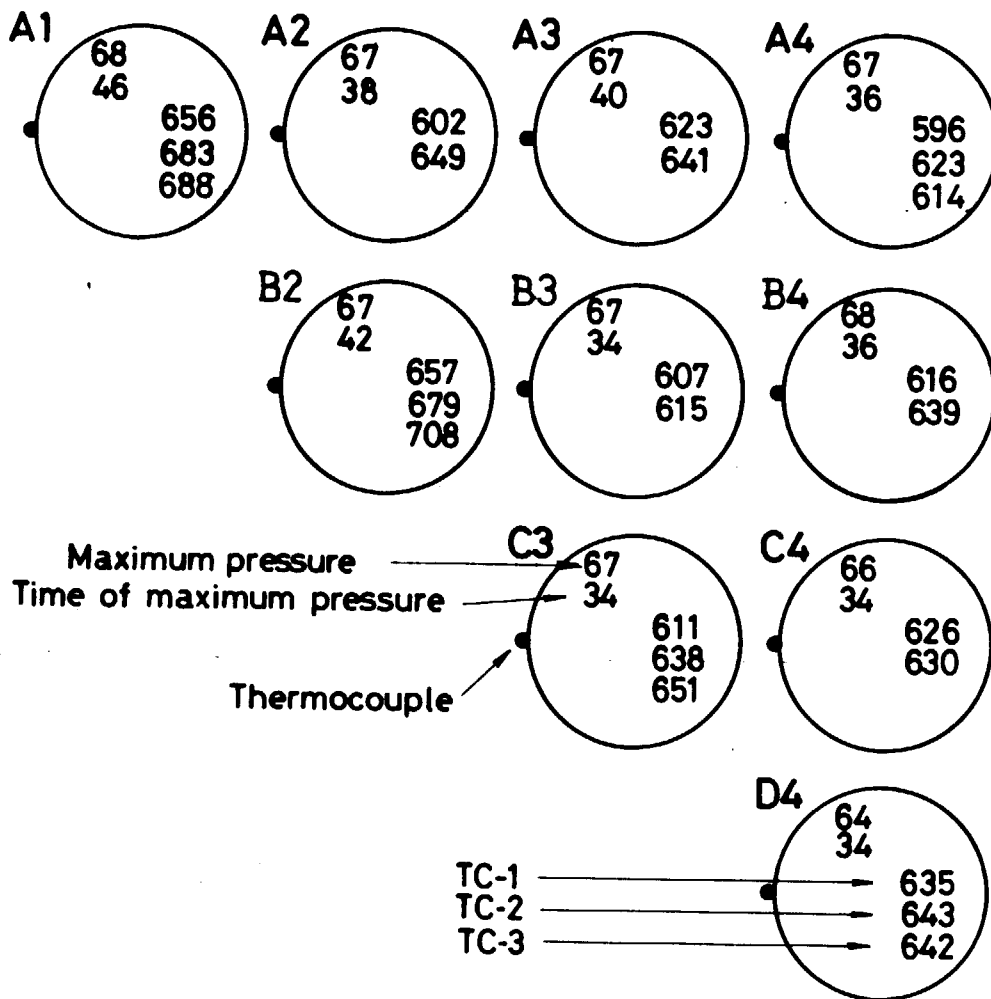


Fig. 11 Temperature at maximum pressure

Ass. No 7805 ( 50 kg/cm<sup>2</sup> )

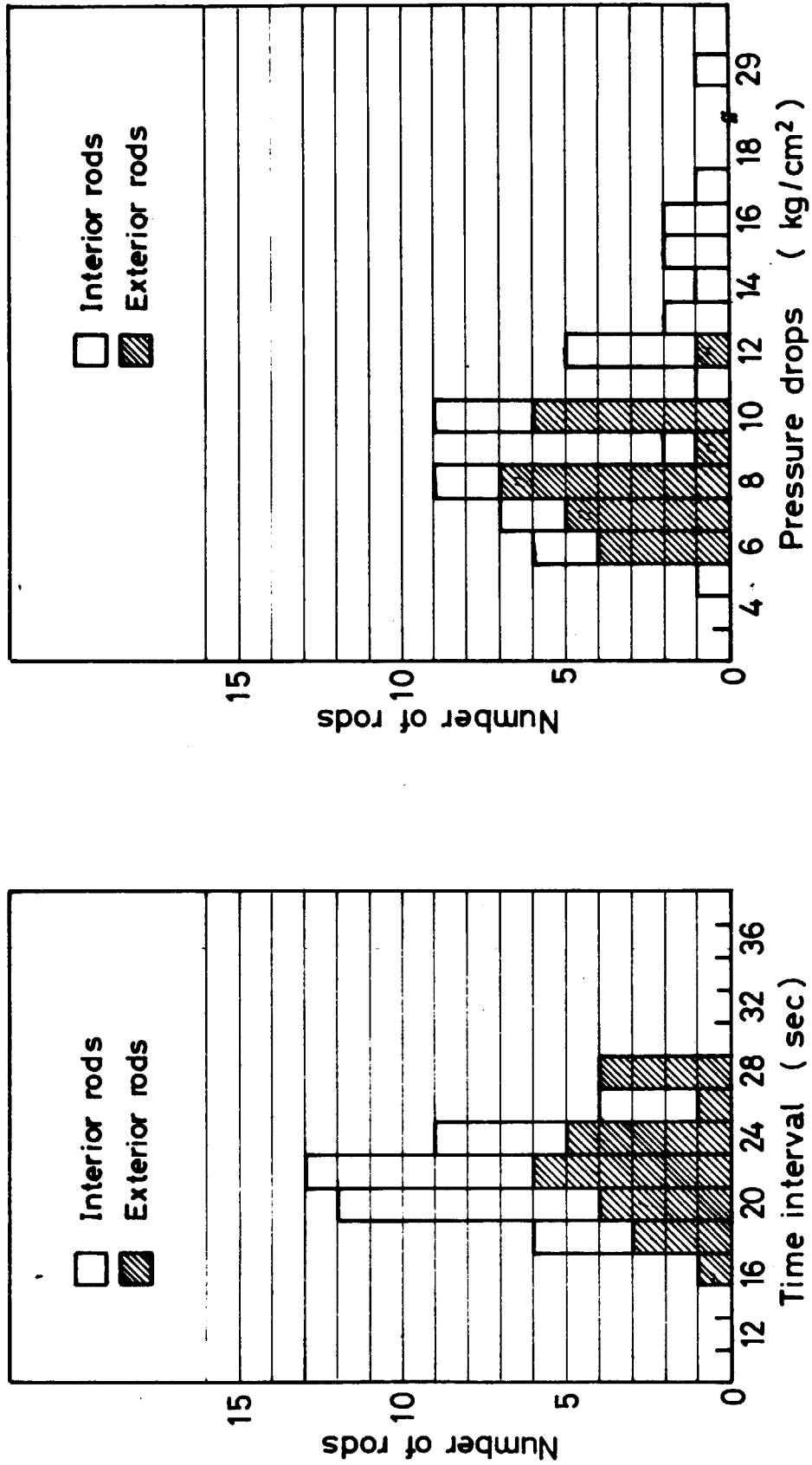


Fig. 12 Histograms of time and pressure decrease from maximum pressure to burst of a rod simulator

Ass. No 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

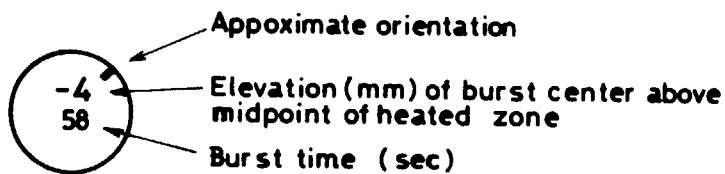
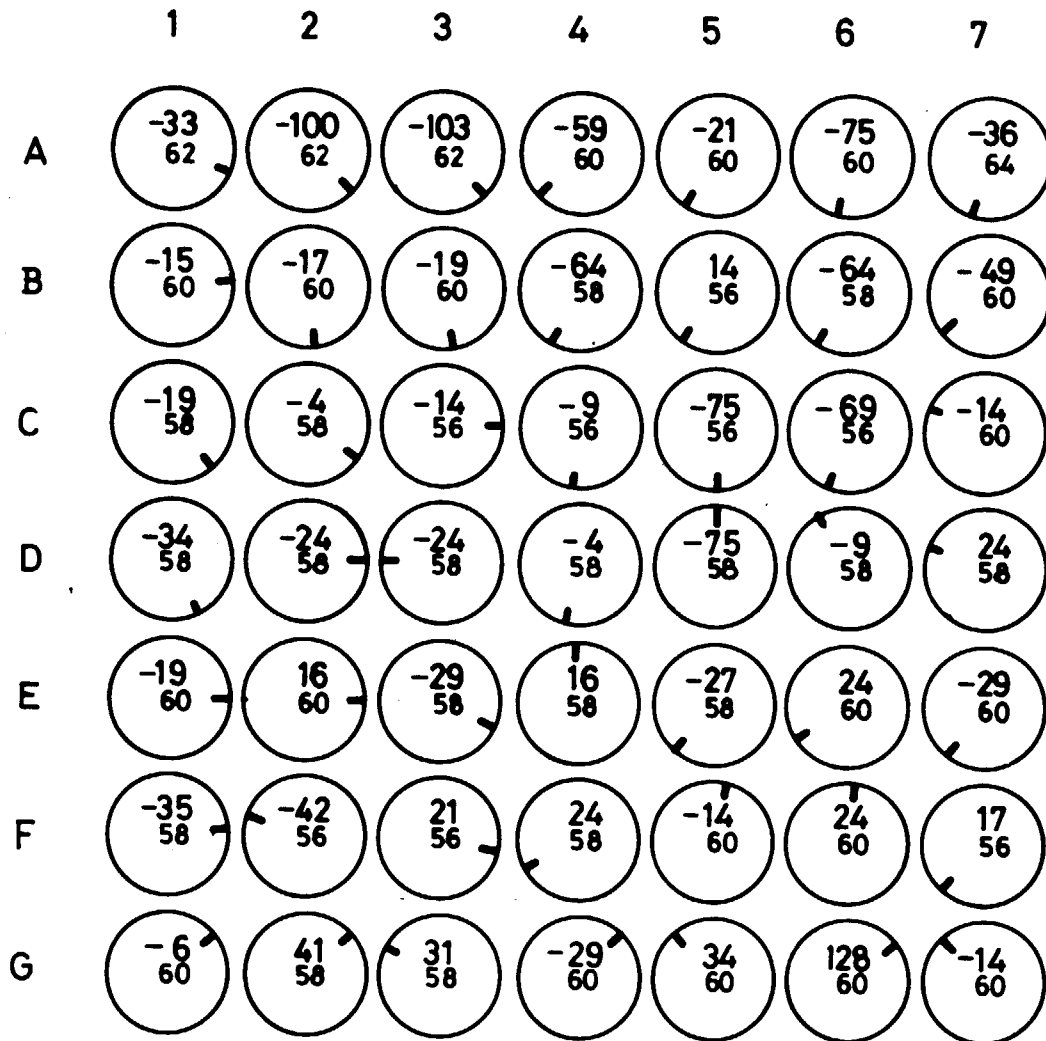


Fig. 13 Burst locations and Burst time

Ass. No 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

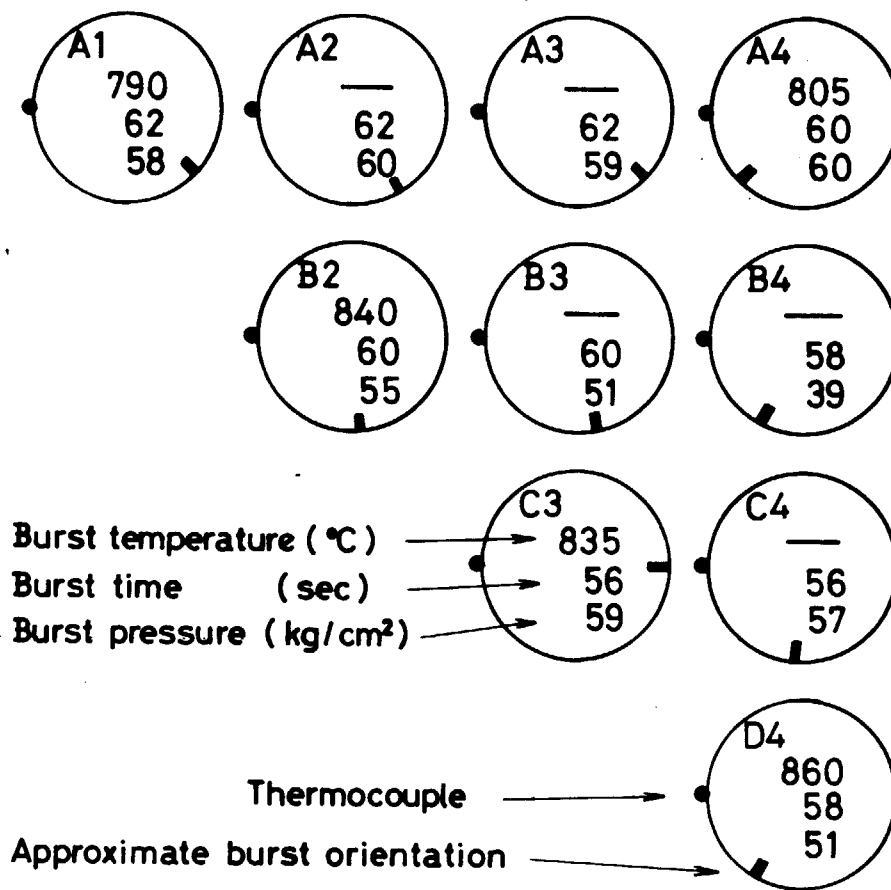


Fig. 14 Summary of burst data

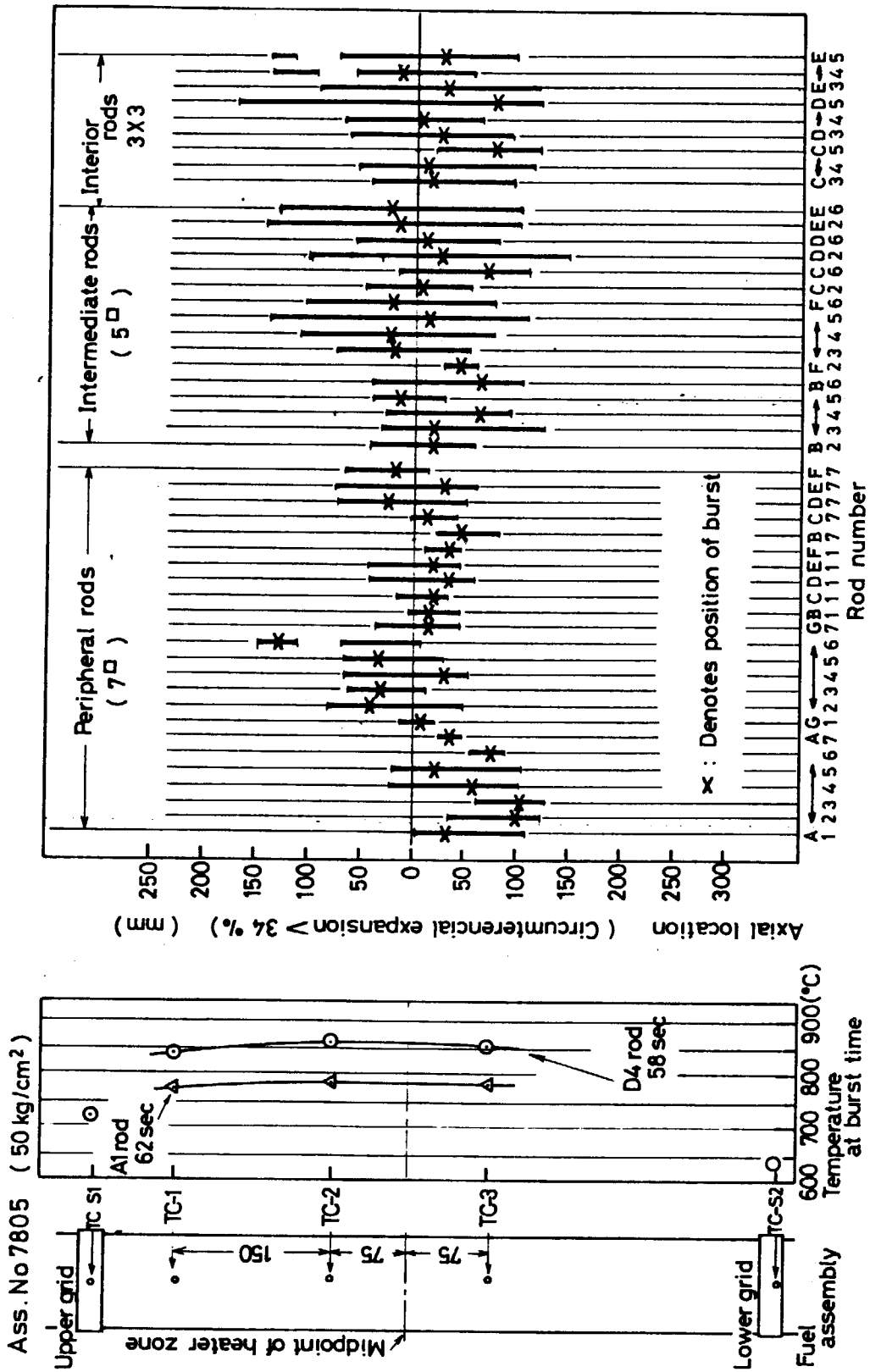


Fig. 15 Axial locations of burst position and ballooned region

ASS. No 7805 (50 kg/cm<sup>2</sup>)

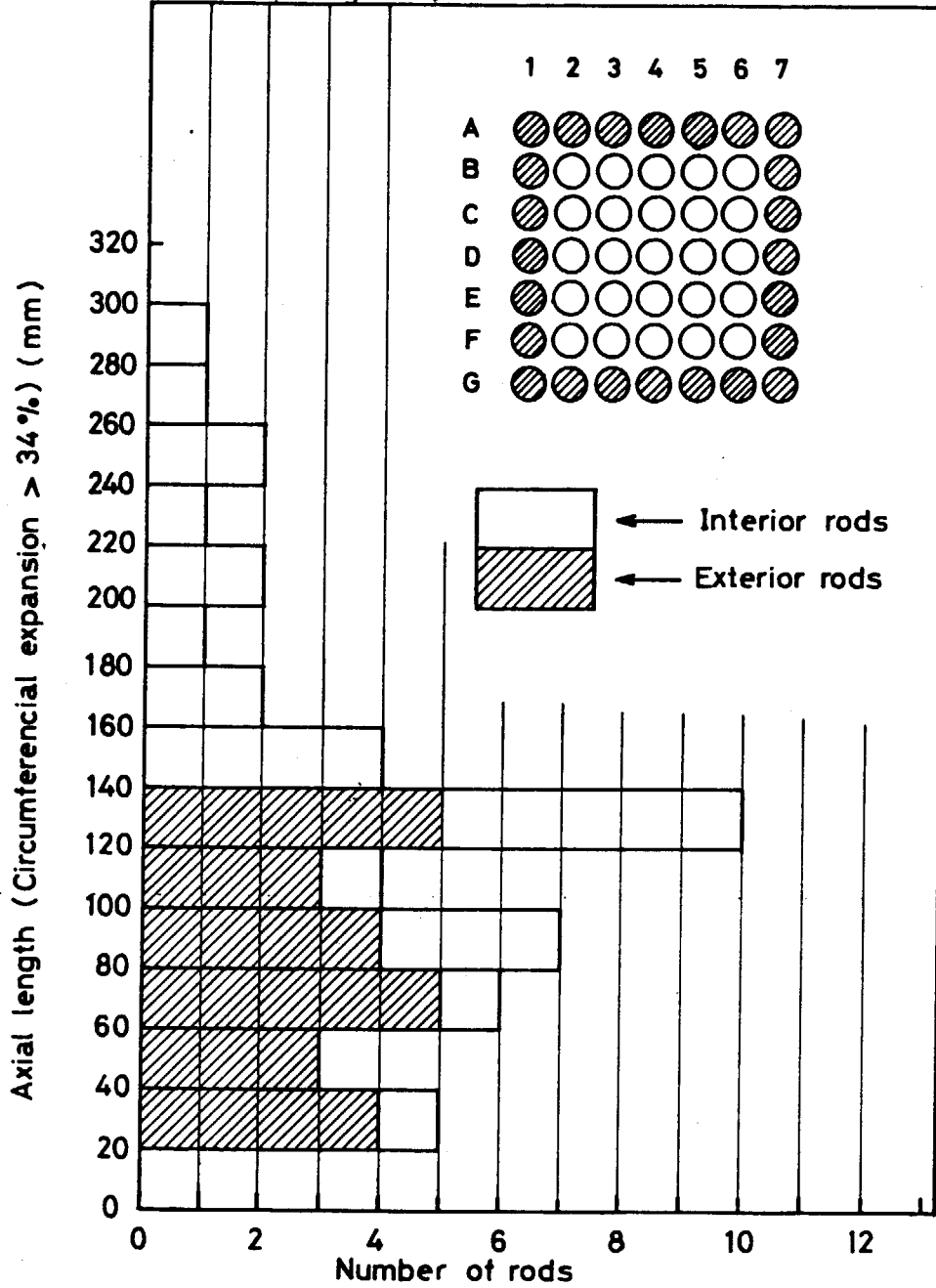


Fig. 16 Axially ballooned behavior of rods as a function of rod position

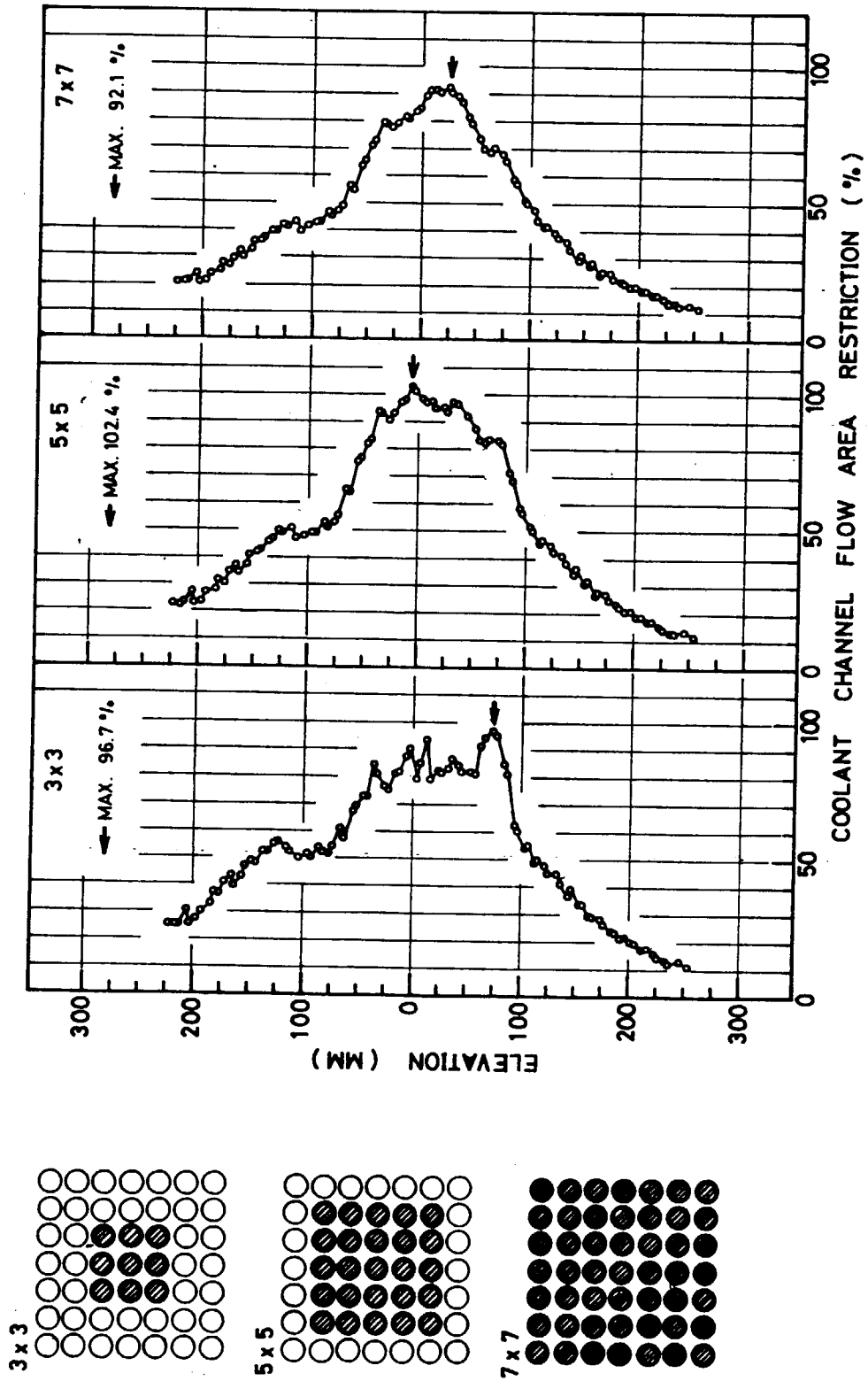


Fig. 17 AXIAL DISTRIBUTION OF COOLANT CHANNEL FLOW AREA RESTRICTION IN 7805.



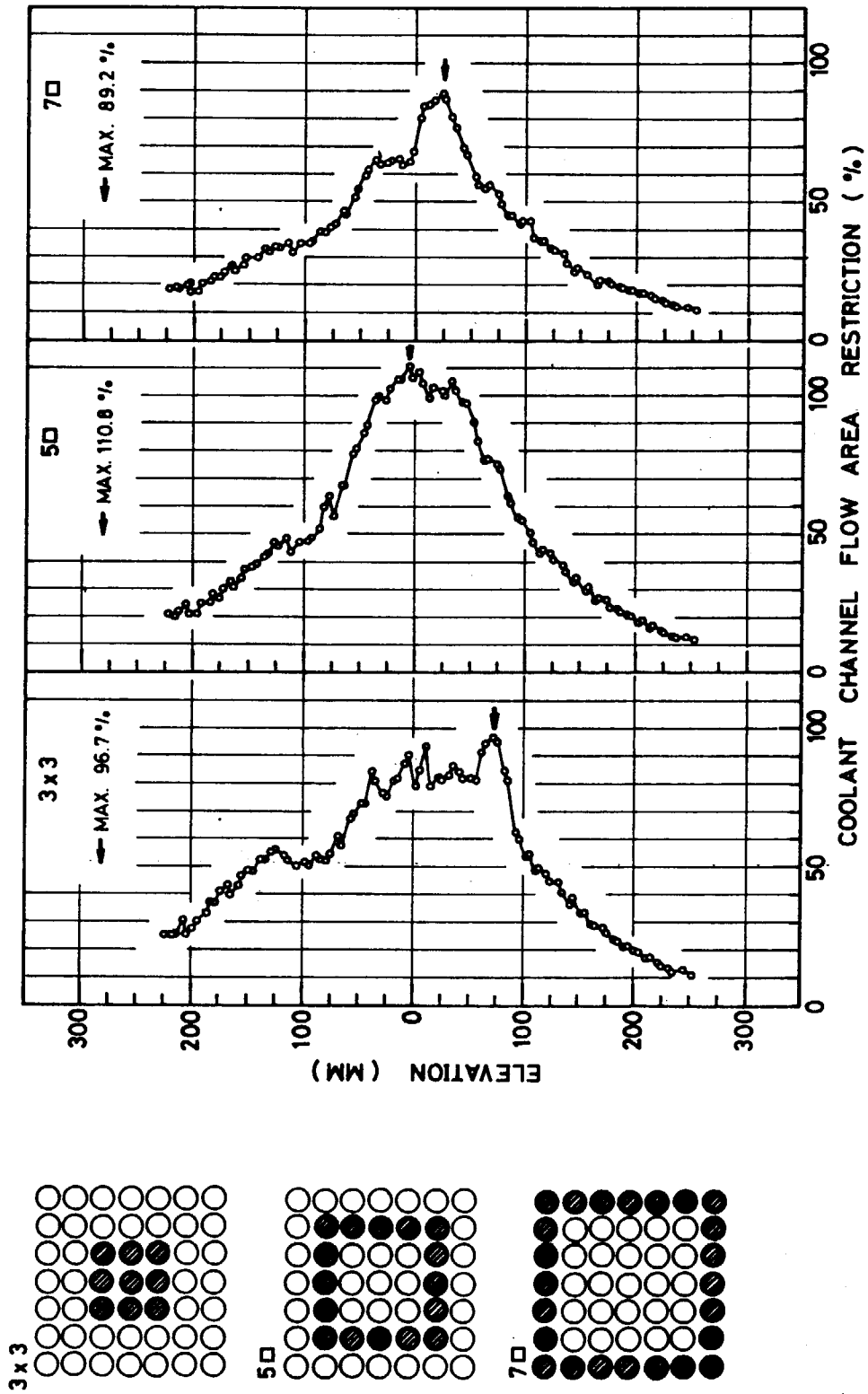


Fig. 18 AXIAL DISTRIBUTION OF COOLANT CHANNEL FLOW AREA RESTRICTION IN 7805.

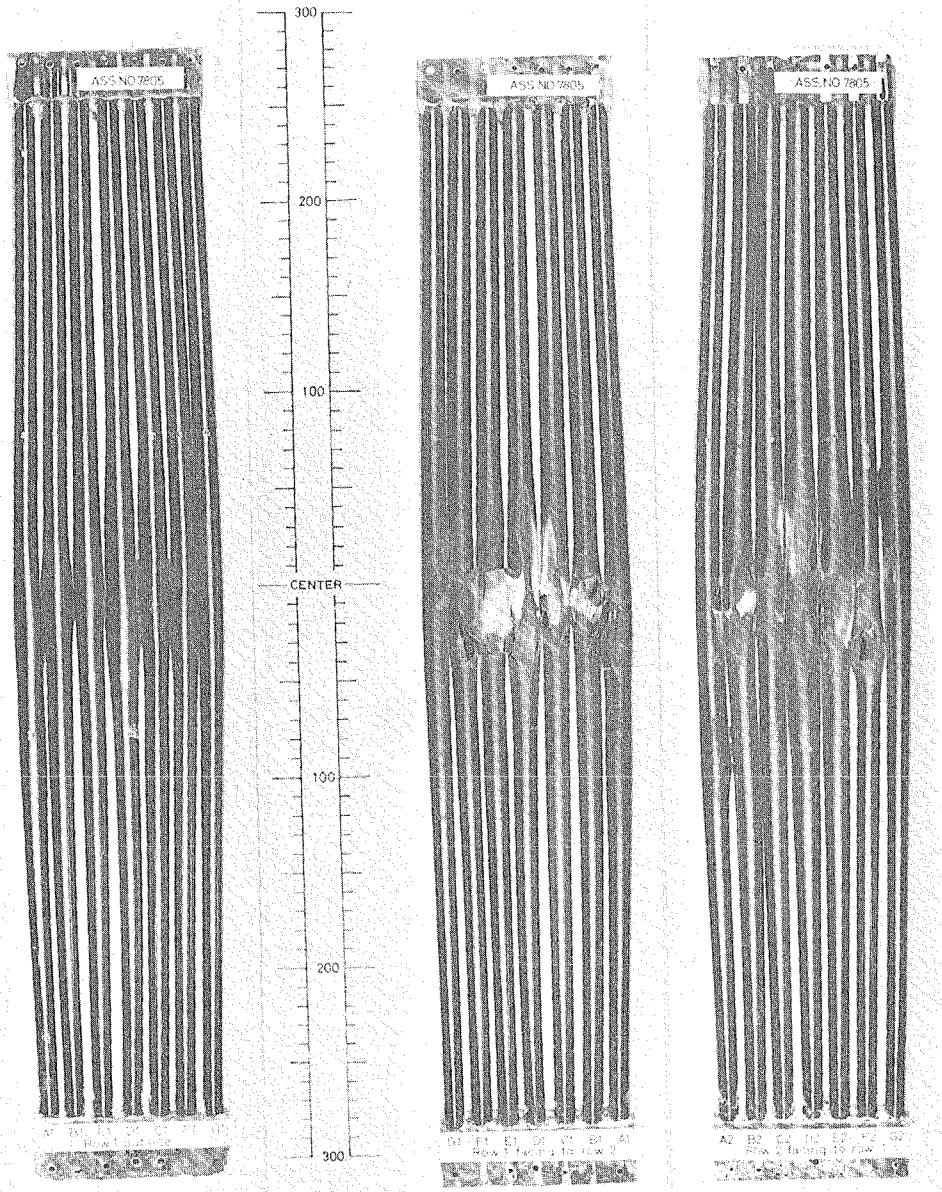
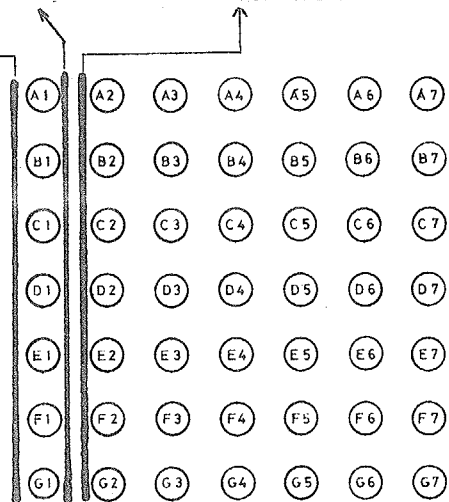


Photo.1 The side views of a fuel bundle burst and cut vertically.



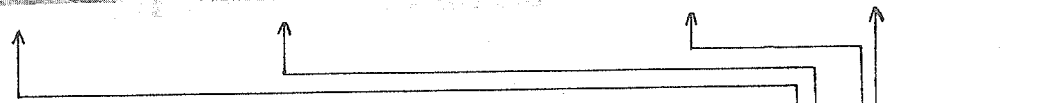
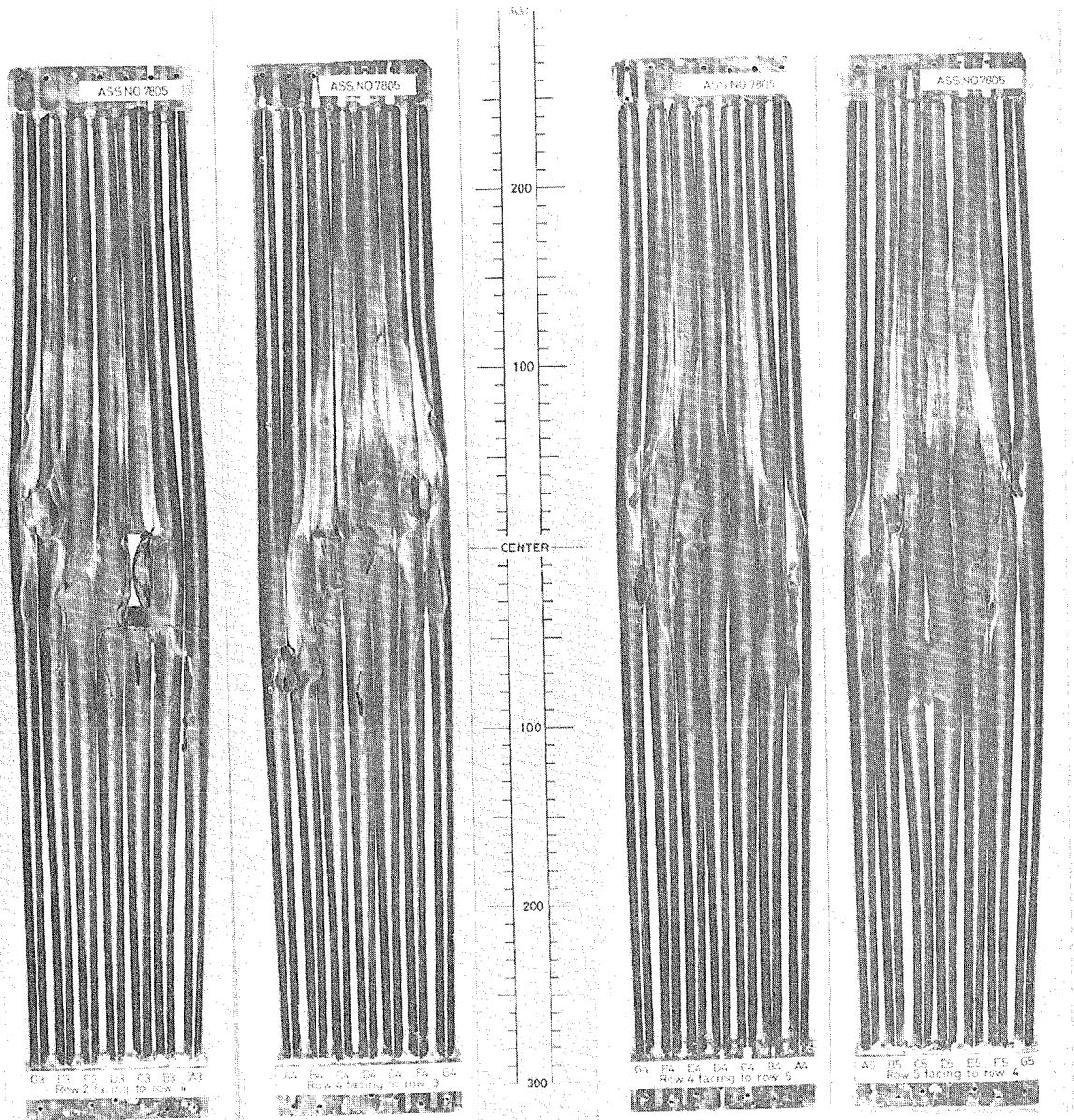
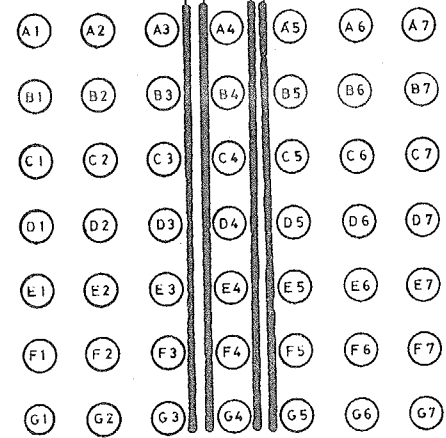


Photo.2 The side views of a fuel bundle burst and cut vertically.



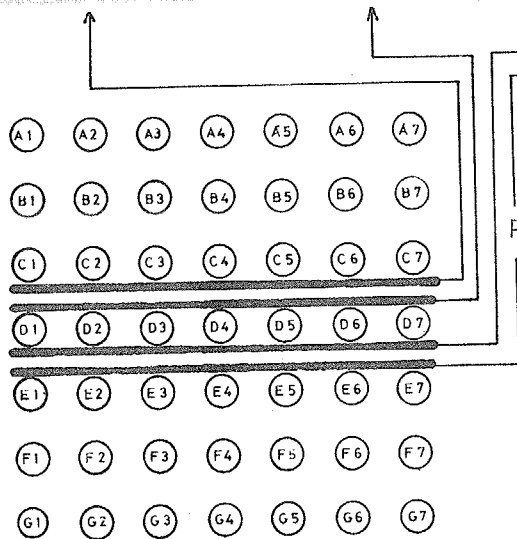
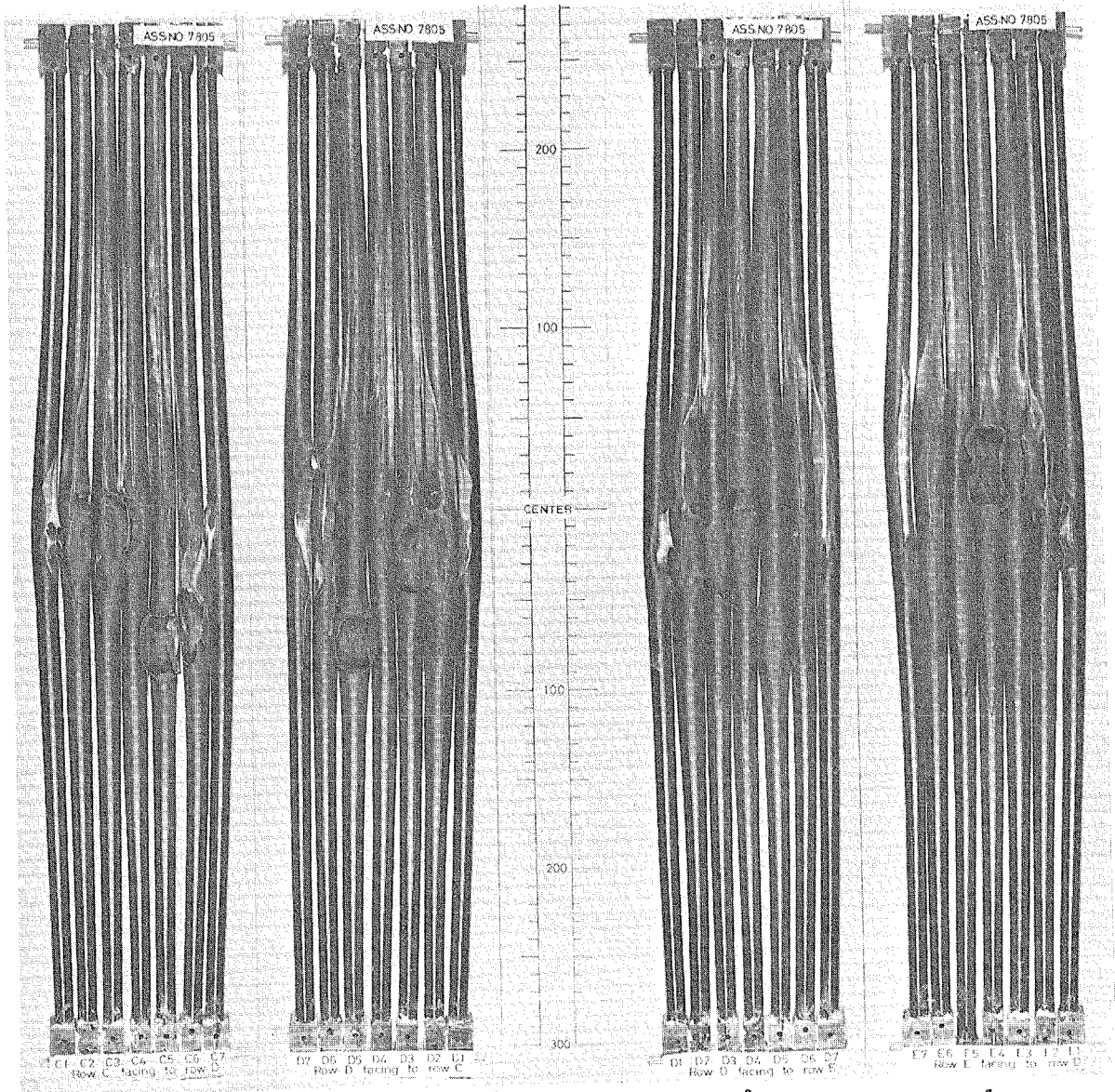
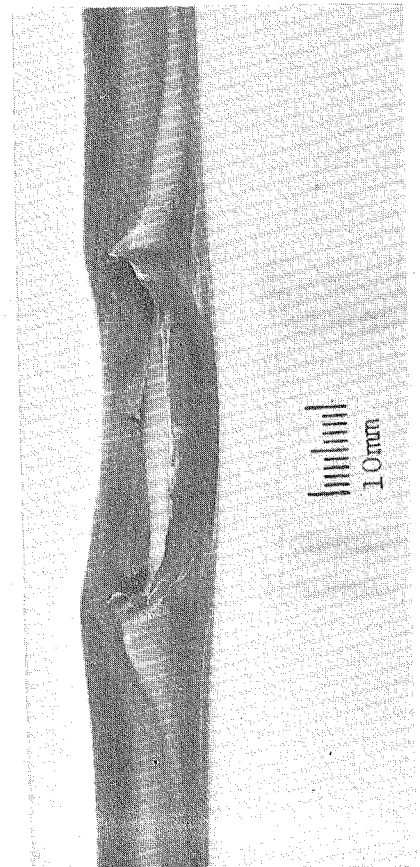
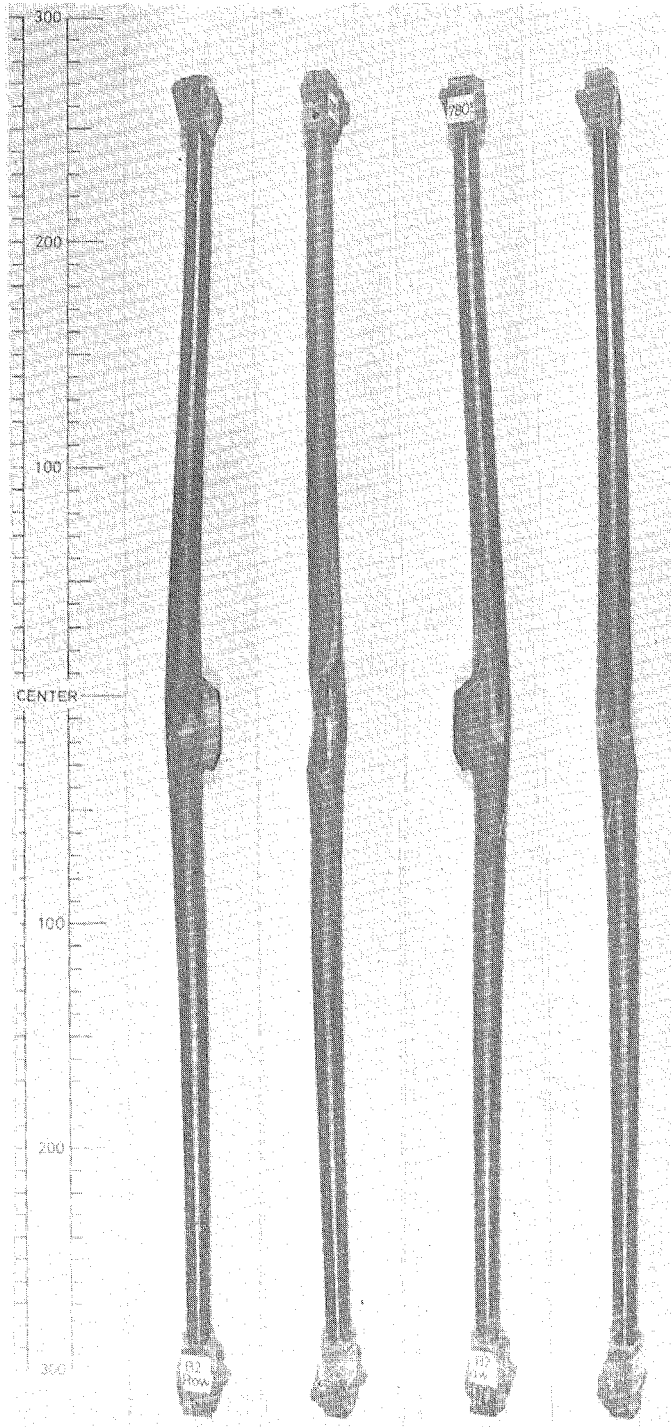


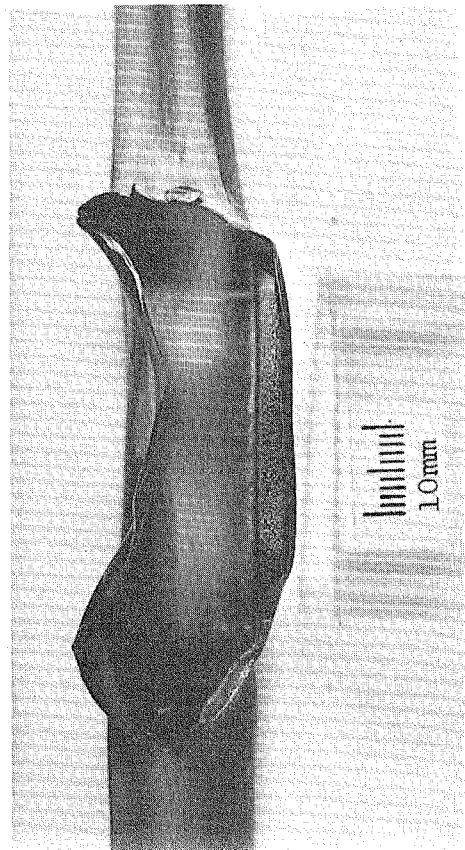
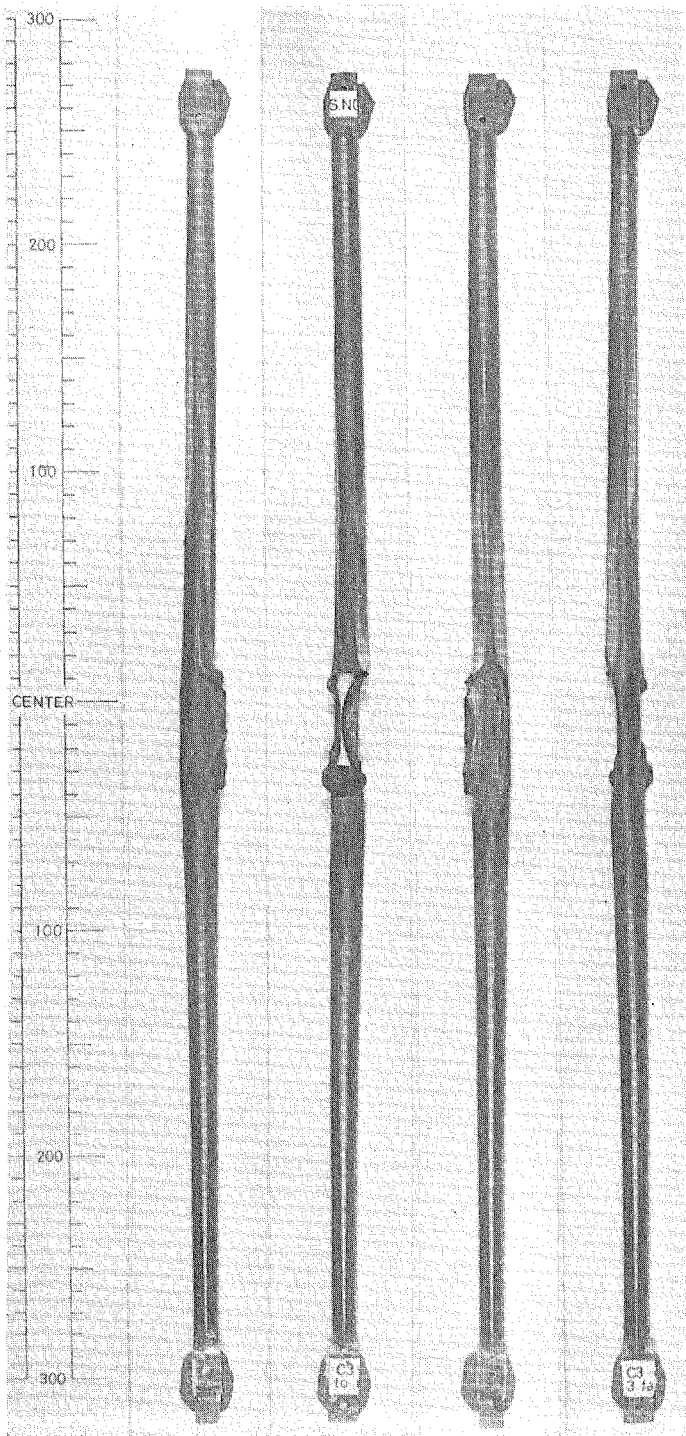
Photo.3 The side views of a fuel bundle burst and cut vertically.



FUEL ROD No. B2

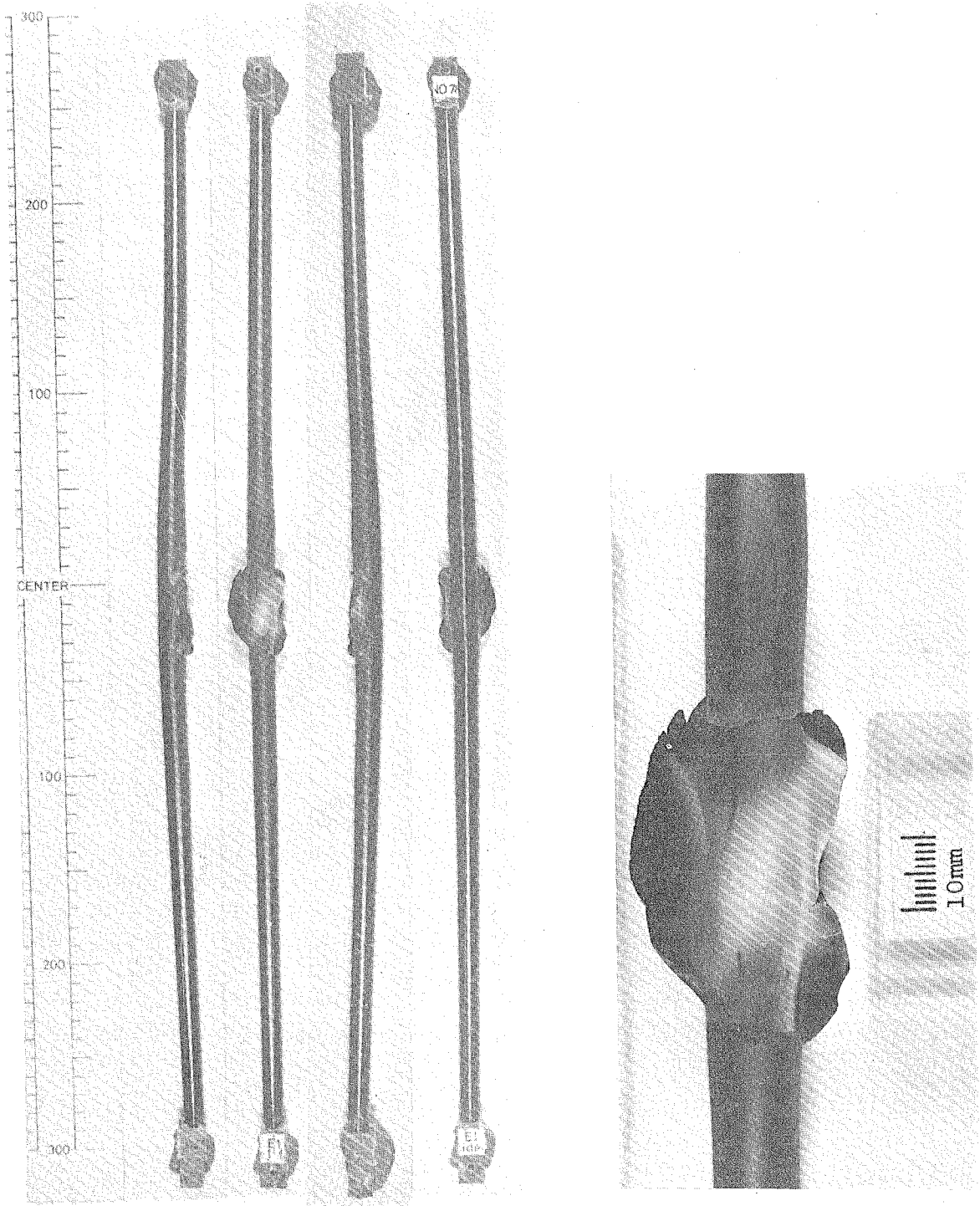
Photo.4-1 Overview and close-up view of B-2 rod





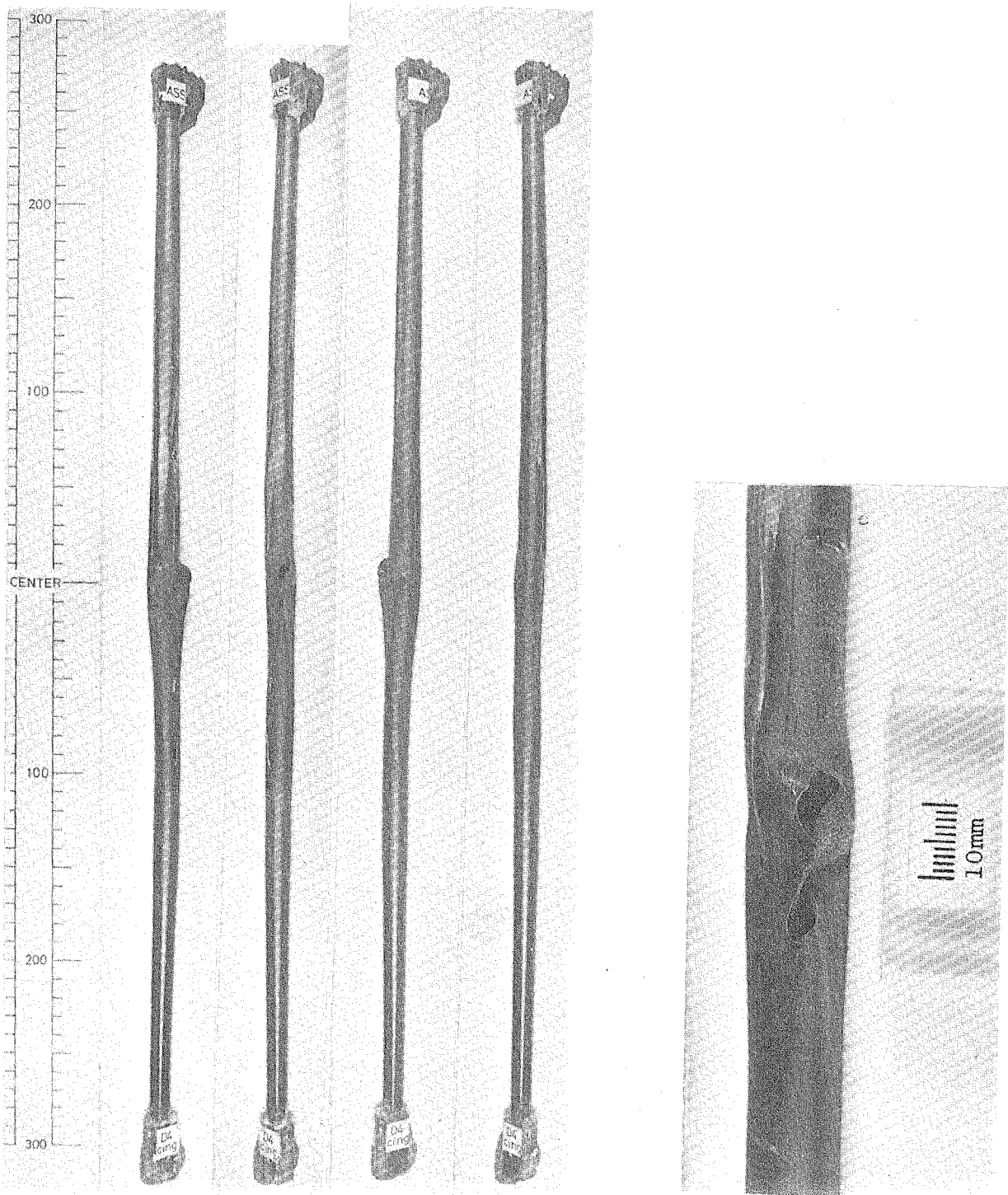
FUEL ROD No. C3

Photo.4-2 Overview and close-up view of C-3 rod



FUEL ROD No. E1

Photo.4-3 Overview and close-up view of E-1 rod



FUEL ROD No. D4

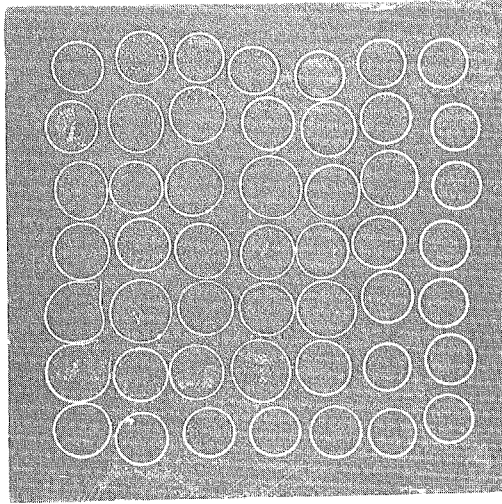
Photo.4-4 Overview and close-up view of D-4 rod



ASS. NO. 7805

ASS. NO. 7805

A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7



A1 B1 C1 D1 E1 F1 G1



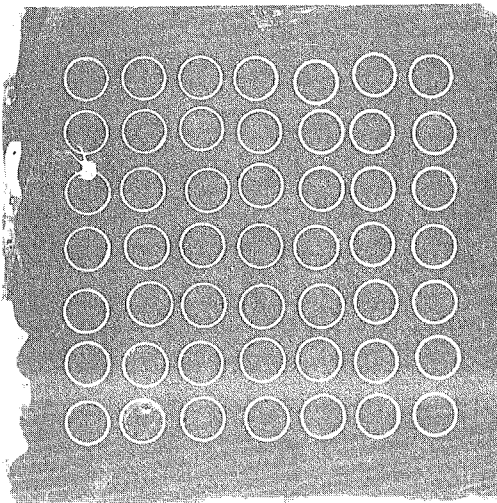
S : 7213 MM<sup>2</sup>  
SWELLING : 63.1 %  
CHANNEL BLOCKAGE : 49.9 %

Photo. 5-2 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM.

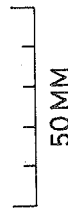
(BELOW 96.8 MM FROM THE MIDDLE LEVEL)

S: TOTAL CROSS SECTION AREA OF 49 RODS.

A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7



A1 B1 C1 D1 E1 F1 G1



S : 5065 MM<sup>2</sup>  
SWELLING : 14.5 %  
CHANNEL BLOCKAGE : 11.5 %

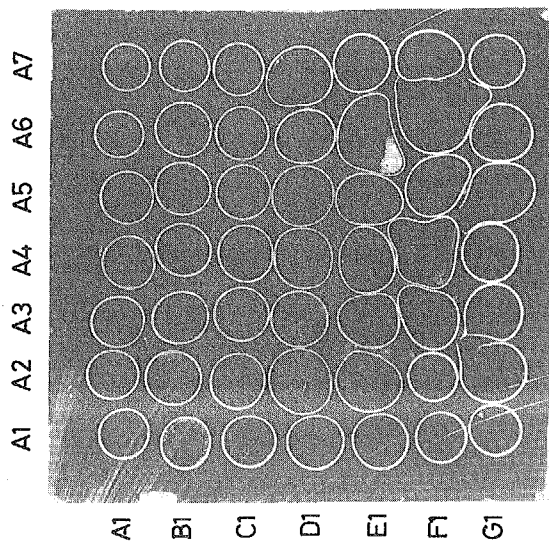
Photo. 5-1 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM.

(BELOW 254.7 MM FROM THE MIDDLE LEVEL)

S: TOTAL CROSS SECTION AREA OF 49 RODS.

ASS. NO. 7805

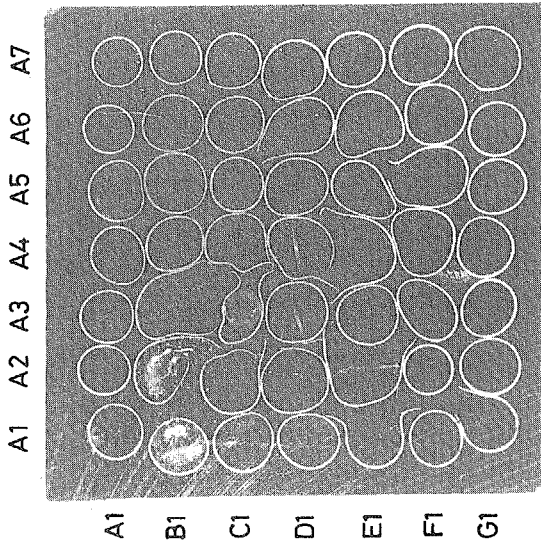
ASS. NO. 7805



S : 8486  $\text{mm}^2$   
 SWELLING : 91.9 %  
 CHANNEL BLOCKAGE : 72.6 %

Photo.5-3 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM, (ABOVE 43.2 MM FROM THE MIDDLE LEVEL)

S: TOTAL CROSS SECTION AREA OF 49 RODS.



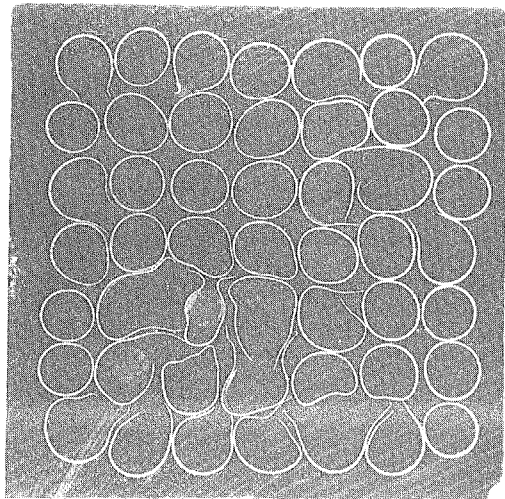
S : 9170  $\text{mm}^2$   
 SWELLING : 107.4 %  
 CHANNEL BLOCKAGE : 84.8 %

Photo.5-4 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM, (ABOVE 2.5 MM FROM THE MIDDLE LEVEL)

S: TOTAL CROSS SECTION AREA OF 49 RODS.

ASS. NO. 7805

A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7



A1 B1 C1 D1 E1 F1 G1

50 MM

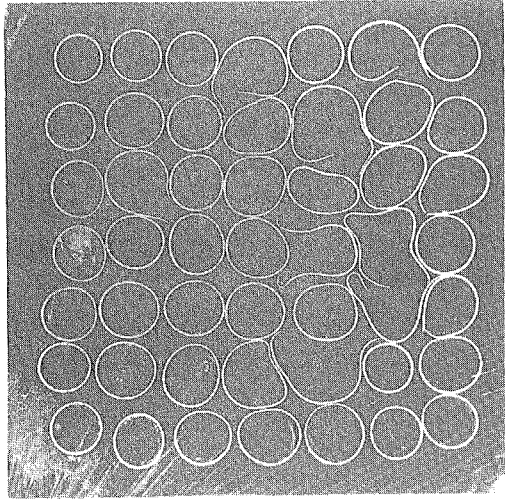
S : 9578 MM<sup>2</sup>  
 SWELLING : 116.6 %  
 CHANNEL BLOCKAGE : 92.1 %

Photo.5-5 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM, (BELOW 24.0 MM FROM THE MIDDLE LEVEL)

S: TOTAL CROSS SECTION AREA OF 49 RODS.

ASS. NO. 7805

A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7



A1 B1 C1 D1 E1 F1 G1

50MM

S : 8841 MM<sup>2</sup>  
 SWELLING : 99.9 %  
 CHANNEL BLOCKAGE : 78.9 %

Photo.6 A CROSS SECTION OF A FUEL ASSEMBLY RUPTURED IN FLOWING STEAM, (ABOVE 23.4 MM FROM THE MIDDLE LEVEL)

S: TOTAL CROSS SECTION AREA OF 49 RODS.

## Appendix

### 1. 概 要

軽水炉の冷却材喪失事故時を模擬し、高温水蒸気中で模擬燃料集合体の膨張、破裂試験を行う実験装置である。装置は、模擬燃料集合体、水蒸気中で加熱するためのステンレス槽、集合体内の温度をできるだけ均一に保持するための加熱炉、集合体の電力制御装置、データ収録再生装置および水蒸気発生装置等で構成されている。

### 2. 構成機器

#### 2.1 模擬燃料集合体

模擬燃料集合体は、下記に示した要素から構成されていて、燃料棒 49 本をピッチ 14.3 mm で 7×7 に配列した集合体である。総出力は 196 KW (30 V) である。

集合体は、4本の支柱と上・下部フランジで保持されて、反応槽内に組込まれていて、熱歪が生じて燃料棒には影響しないように考慮されている。

##### 構成要素

- |    |             |             |       |
|----|-------------|-------------|-------|
| 1) | 模擬燃料棒       | 49本 (7×7)   |       |
| 2) | 燃料棒表面温度検出素子 | 1～5点/1本×49本 | 総数60本 |
| 3) | グリッド        | 上部・下部       |       |
| 4) | 模擬燃料集合体支柱   |             |       |
| 5) | 上・下端部冷却装置   |             |       |
| 6) | 圧力検出器       |             |       |

##### 2.1.1 模擬燃料棒

模擬燃料棒は、被覆管がジルカロイ4で内部にアルミナペレットで絶縁された6芯のW-Reヒータを組みこんだシースヒータである。(Fig.3 参照)

- |    |        |                                    |                 |
|----|--------|------------------------------------|-----------------|
| 1) | 発熱部被覆管 | Zry-4                              |                 |
|    |        | OD 10.72 φ × ID 9.48 φ × L 1569 mm |                 |
| 2) | 発熱体    | タングステン-レニウム (W-Re), 直径 0.6 mm      |                 |
|    |        | 発熱部長さ 850 mm                       |                 |
|    |        | 最大出力 4 KW, 30 V                    |                 |
| 3) | 絶縁物    | アルミナ                               |                 |
|    |        | $Al_2O_3 \geq 99.5\%$              | $\rho \geq 3.9$ |
| 4) | 充填ガス   | He $\geq 99.999\%$                 |                 |
| 5) | 内部空隙容積 | 23.5 cc ± 1.5                      |                 |

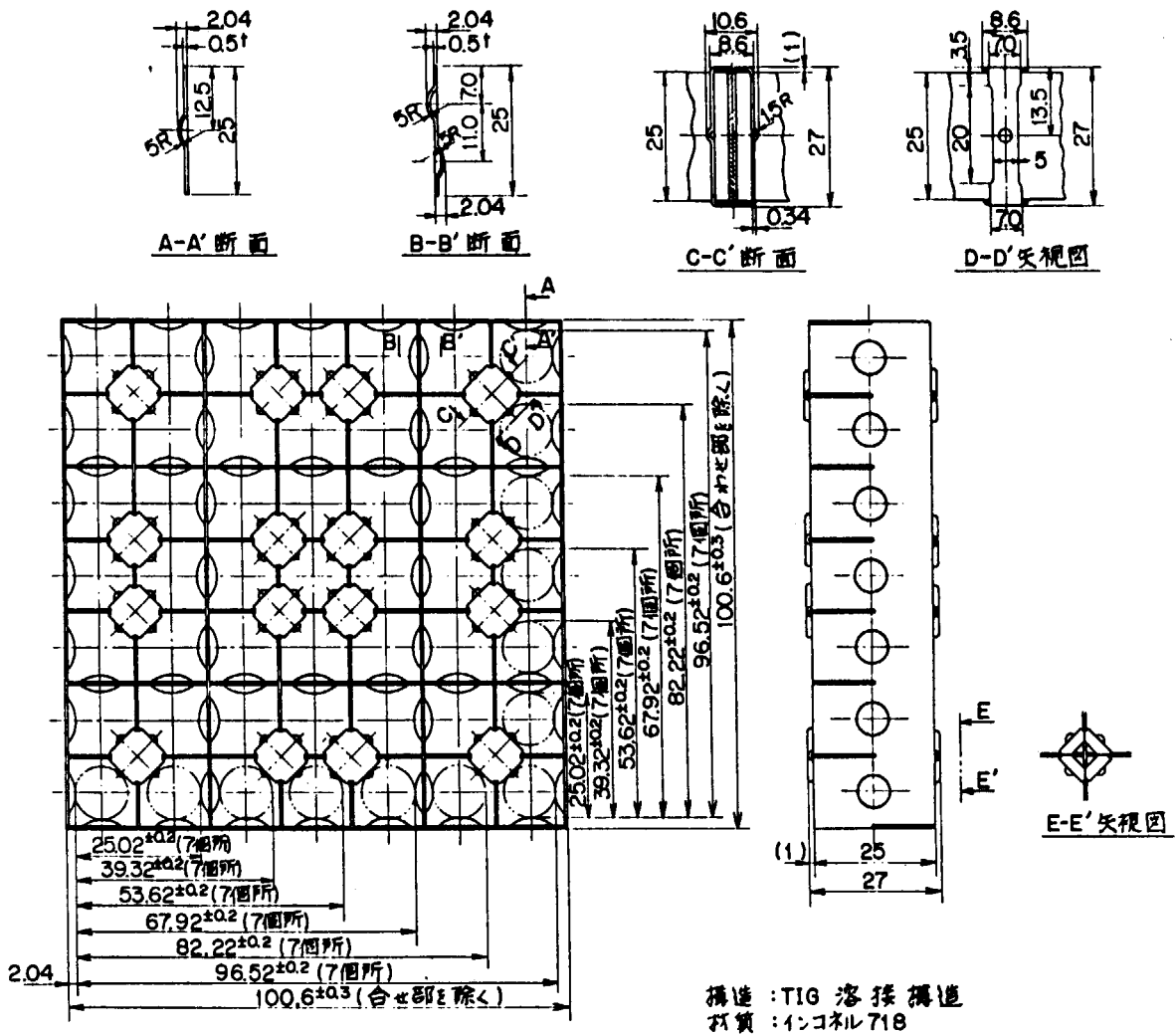
- 6) 耐 圧 力      150 kg/cm<sup>2</sup> (常温)
- 7) 圧力低下度    1 kg/cm<sup>2</sup>/100 hr (常温)

2.1.2 温度検出素子

素子は、C-A非接地型構造のシース熱電対であって、被覆管の表面にタンタル板を介しスポット溶接されている。温度検出位置は Fig. 4 に示すとおりである。

2.1.3 スペーサグリッド

グリッドは、インコネル718 板材を用いてスプリング機構とし、溶接で組立てられている。燃料棒との静摩擦力は、約 2 kg/cm<sup>2</sup> である。取り付け位置は、燃料棒発熱部中心より上・下 325 mm の 2ヶ所である。詳細は下図に示す。



スペーサグリッド

## 2.1.4 圧力検出器

模擬燃料棒から圧力変換器までの配管は、スエジロック方式である。

- |          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| 1) 圧力変換器 | PG - 200 K V (共和電業社製)                |
|          | 49 個                                 |
| 2) 配管材質  | SUS - 304 2 $\phi$ $\times$ 0.5 t mm |
| 3) 配管内容積 | 4 ~ 5 cc                             |

## 2.2 模擬燃料集合体の電力制御装置

本装置は、模擬燃料棒 49 本の発熱用電力を制御する装置であって、主電力制御設定装置とこれに連動する 49 個の電力制御装置から成立っている。制御方法は、手動または、プログラムによって電力制御か温度制御ができる。

最大出力は、4 K W  $\cdot$  30 V である。

## 2.2.1 主電力制御設定装置

本装置は、次記の機器から構成されていて、オペレタ SW を選択することによって、手動またはプログラムで電力制御か温度制御ができる。電力制御範囲は 0 ~ 4 K W、温度制御範囲は室温 ~ 1200  $^{\circ}$ C である。制御設定は 4 桁のディジットスイッチでおこなう。

プログラムによる制御は、複式スロープレベルを任意に設定することによって、10 組の勾配・レベル、時間の制御方法がとれる。

この主電力制御設定装置で、選択された制御信号が電力制御器 (49 台) 送られて個々の模擬燃料棒の電力を制御する。

## 1) 構成品

- 電力設定器 (モジュール No 6811 - 3)  $\times$  1 台
- 高精度コントローラ ( " 6313 )  $\times$  1 "
- マスタープログラム ( " 6812 )  $\times$  1 "
- 複式スロープレベル ( " 6831 )  $\times$  5 "
- 電 源 ( " 6701 )  $\times$  1 "

いずれも Eurotherm K K 製

## 2) プログラマ仕様

- 昇温および降温速度 1 ~ 2  $^{\circ}$ C / sec
- 電力上昇・下降速度 上記相当分の電力
- プログラム時間 5 ~ 30 min
- 勾配精度 < 1 % (スパン)
- レベル設定精度 < 0.1 % (スパン)

## 2.2.2 電力制御装置

この装置は、49 個の電力制御器で構成されていて、主電力制御装置からの制御信号を受入れ

て各々の模擬燃料棒の電力を制御する。電力制御器は、周波数変化、負荷抵抗が一定でない場合、または、電圧と電流の位相ずれ等について十分考慮に入れ、真の電力制御ができるように設計されている。制御範囲は、0～100%（最大出力4KW）である。

#### 構 成 品

- 電力制御器 (モジュールNo.6390) 49個
  - デジタル設定 ( " 6392)
  - トリムセット ( " 6393)
- サイリスタ ( " 6501) 49個
  - 負荷断線アラーム付
  - プリセット電流リミット付
- 電源トランス 4KVA
  - 1次側 200V
  - 2次側 18, 20, 25, 30V
- 電 源 (モジュールNo.6701) 6個
  - いずれも Eurotherm KK製

### 2.3 データ収録・再生装置および監視装置

データ収録・再生装置は、次記の諸データを収録・再生するものであって、各種インプットコンバータ、スキャナ、およびミニコンピュータ（OKITAC-4300C）等で構成されている。全データの収録速度は2秒である。

監視装置としては、温度、圧力の記録計、デジタル表示計、およびアラーム等を設けてある。

#### 2.3.1 データ変換器

本機器は、諸データをミニコンピュータへ入力可能な形に変換するもので、CA熱電対、圧力変換器からのデータはインプットコンバータで線形化されて、0～10Vに規格化される。

#### 集 録 デ ー タ

デ ー タ 名	数 量	測 定 範 囲
a) 模擬燃料棒表面温度	60	0～1200 °C
b) 模擬燃料棒内圧力	49	0～200 kg/cm <sup>2</sup>
c) 模擬燃料棒中心加熱電力量	49	0～4 KVA
d) 主電力制御設定値	1	0～4 KVA

また、電力制御ループ回路からの中心加熱用電力量も0～10Vに規格化される。

これらの規格化されたデータ信号は6台の32 wayスキャナで連続的にスキャンされる。ス

キャンナはアドレスゼネレータによって順次番地が与えられて、データ信号と共にアナログバスに移されてミニコンピュータに送られる。

#### 諸データ変換器

• 温度変換器	(モジュールNo.6002)	60 個
• 圧力変換器	( " 6006)	49 "
• 電力変換器	( " 6006)	1 "
• 32 way スキャンナ	( " 6403)	6 "
• アドレスゼネレータ	( " 6420)	1 "
• 電 源	( " 6701)	7 "

いずれも Eurotherm K K 製

### 2.3.3 ミニコンピュータ

本装置は、データロギングスキャンナから送られた0～10Vのアナログデータ信号をデジタル信号に変換して記録する集録機器と集録したデータを物理量に変換し作表、作図する再生機器などで構成される。

データ集録、再生はI/Oタイプライタを操作することで各機器の作動およびソフトプログラム（あらかじめ中央演算器に記憶させておく）が実行されて行なわれる。

ソフトプログラムの変更、追加作業は高速紙テープ装置より行なうことが可能である。

#### 1) データ集録

データ集録は、次の条件で行なうことができる。

- a 集録サンプリング : 各CHとも2秒毎
- b 集録最大チャンネル数 : 160 CH
- c 集録時間 : 1200 フィート磁気テープで約10時間記録可能

#### 2) データ再生

磁気テープ上のデータを基に数値としてI/Oタイプライタにより作表印字するものと、デジタルプロッタにより作図を行なうことが可能である。

#### 3) 機器仕様

##### 中央演算機

記憶素子	: 磁気コア
語 長	: 16ビット+2パリティ
サイクルタイム	: 0.6 $\mu$ S
記憶容量	: 24 KW

##### コンソールタイプライタ

速 度	: 1,000字/分
最大印字数	: 132字/分
タイプリボン	: 赤黒切替

##### 高速紙テープリーダー

速 度	: 30,000字/分
-----	-------------



- 単位数 : 8単位
- 磁気テープ装置
- 記録密度 : 800 BPI
- テープスピード : 30 インチ/秒
- トラック数 : 9トラック
- デジタルプロッタ
- プロット速度 : X, Y軸 400パルス/秒
- プロット巾 : 0.1 mm/パルス
- 記録用紙 : X軸 35 mm, Y軸 270 mm
- プロセス入出力装置
- サンプルホルダ
    - サンプル時間 : 5  $\mu$ S
    - アパーチャタイム : 40 nS
  - AD変換器
    - 相対精度 :  $\pm 0.05\%$
    - 変換速度 : 2.5 nS
  - 割込入口 : 8点
  - デジタル入口 : 32語
  - デジタル出口 : 32語
  - タイムベース
    - 基準発振器 : 周波数 100 KHZ
    - 設定時間 : 1 msec, 10 msec, 100 msec, 1 sec,
    - I/O命令によるスタート, ストップ制御可能
  - 操作部
    - 押ボタンスイッチ
      - 電源 : ON/OFF
      - コントロール : START/STOP
      - 動作表示ランプ
  - 使用条件
    - 温度 : 20 ~ 30  $^{\circ}$ C
    - 湿度 : 20 ~ 70 %
    - 電源 : AC 100 V, 50 HZ

### 2.3.3 監視・記録装置

この装置は、実験中装置の動作状態を監視するものであって、記録計、デジタル表示計およびアラム等がある。

#### 1) 記録計 (301型EUROTHERM K.K製)

圧力 : 3ペン式×2台

温 度 : 3ペン式×2台

電 力 : 1ペン式×1台

測定個所は、結線を任意に変えることが可能

## 2) デジタル表示

温度、圧力の値は、全チャンネルについてデジタル表示ができる。但し、同時に表示できる個数は、温度3点、圧力1点である。どのチャンネルを表示させるかは、チャンネル選択スイッチを作動させることによって、実験中でも任意に選ぶことができる。

## 3) 表示灯

アラーム表示灯は、温度60点、圧力49点および模擬燃料棒中心加熱用ヒータ断線49点であって、容易にアラーム設定値を変えることができる。

アラーム動作

温 度 : 設定値 < 消 灯

圧 力 : 設定値 > 消 灯

模擬燃料棒中心加熱用ヒータ : 断 線 …… 消 灯

## 2.4 反応槽と加熱用電気炉

反応槽は、模擬燃料集合体を格納し蒸気雰囲気を保持させるものである。加熱用電気炉は、模擬燃料集合体の昇温速度を早めるために反応槽の外部を加熱するものである。

### 2.4.1 反 応 槽

#### 1) 主要寸法

OD 216  $\phi$  × ID 203  $\phi$  × L 1300 mm. SUS 316.

#### 2) 視 窓

反応槽軸方向に2列(180度間隔)

1列に各々3個、視窓の大きさ20  $\phi$  mm (但し、チャンネルボックス付のため集合体の監視はできない。)

#### 3) 水蒸気取入口

下端側壁1ヶ所 15  $\phi$  mm

#### 4) 水蒸気排気口

上端側壁1ヶ所 30  $\phi$  mm

#### 5) ドレン抜き

下部フランジに1ヶ所

#### 6) 安全装置

上部壁面にアルミ箔防爆膜1ヶ所設置

### 2.4.2 加熱用電気炉

電気炉の温度調整は、反応槽外壁面の温度を検知して自動制御される。なお、反応槽外壁面の

軸方向 3 点について温度測定し記録ができる。

- 1) 最大出力  
25 KW (200 V)
- 2) 昇温速度  
700 °C/Hr (反応槽中央部の内壁温度)
- 3) 発熱体  
カンタル A -1
- 4) 構造  
半割型
- 5) 温度調整計  
制御範囲 : 0 ~ 1200 °C  
EUROTHERM 018 型
- 6) 温度記録計  
EUROTHERM 301 型 3 打点式
- 7) 熱電対  
P. R 1.6 φmm

## 2.5 水蒸気発生装置

この装置は、所定量の水蒸気を発生させ、任意の加熱水蒸気 (110 ~ 400 °C) にして反応槽へ送り込む装置であって、水蒸気発生部と過熱部から構成されている。配管系には水蒸気の凝縮を防ぐためにヒータを施してある。

### 2.5.1 水蒸気発生装置

- 1) 型式  
EB - 5 型 (東洋ヒータ K K 製)
- 2) 水蒸気発生量  
0.5 ~ 3.0 kg/Hr
- 3) 発生蒸気圧  
0.5 kg/cm<sup>2</sup>
- 4) 給水  
蒸留水
- 5) 蒸気流量  
0.3 ~ 3.0 kg/cm<sup>2</sup>, TS - MS 型 (東京精器 K K 製)
- 6) 電気容量  
5 KW, 200 V
- 7) 温度指示調節計  
0 ~ 150 °C, pt 100 Ω (YAMATAKE · H 製)

## 2.5.2 水蒸気過熱装置

## 1) 形式

BH - 4 型 (東洋ヒータKK製)

## 2) 蒸気温度

110 ~ 400 °C

## 3) 蒸気圧力

0.5 kg/cm<sup>2</sup> 飽和蒸気

## 4) 温度指示調節計

MK - 100 H (LEC, COLTD)

## 2.6 He 加圧装置

模擬燃料棒内に、He ガスを挿入する装置であって、加圧装置 (He ポンペ) と真空排気装置で構成されている。模擬燃料棒内に挿入するガス圧は、減圧弁を調整することによって、0 ~ 50 kg/cm<sup>2</sup> の圧力を挿入できる。

真空排気装置は、模擬燃料棒内、および配管系統の不純物ガス (空気) の混入をさけるため、設けたものであって、排気してから He を挿入する方式をとっている。

## 1) He ガス

He ≥ 99.999 %

## 2) 減圧弁

0 ~ 50 kg/cm<sup>2</sup>

## 3) 高真空排気装置

## a) 形式

YH - 350 (日本真空技術KK製)

## b) 有効排気速度

330 l/sec (10<sup>-4</sup> Torr)

## c) 油拡散ポンプ

600 l/sec 10<sup>-4</sup> Torr

## d) 油回転ポンプ

320 l/sec 260 Torr

## e) 圧力測定系

測定範囲 10<sup>-2</sup> ~ 10<sup>-5</sup> Torr

ガイストラ, ベニング真空計