

JAERI-M

7726

IFA-208および224の照射，照射後試験，
および評価

1978年7月

柳澤和章

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.

IFA - 208 および 224 の照射, 照射後試験, および評価

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳 澤 和 章

(1978年5月26日 受理)

IFA - 208/224をHBWRにて照射した結果の解析が終了したのでとりまとめて報告する。

IFA - 208に関しては中心孔付のフラット, 片端ディッシュ, 両端ディッシュペレットを平均線出力 615 W/cm で平均燃焼度 5.1 GWd/t UO_2 まで照射した。照射後この燃料は優秀な寸法安定性を有していた事が示された。

またIFA - 224に関しては中実および中心孔付のフラット, 両端ディッシュペレットを用い平均線出力 590 W/cm で平均燃焼度 11.8 GWd/t UO_2 まで照射した。照射後大きな欠陥は観察されなかったが2本の棒に1箇所ずつ小さなサンバーストブリストアがみられた。被覆管の歪は非常に小さくリッジ変形は見られなかった。以下解析より得た詳細な挙動を示すと次の様である。

IFA - 208

- (1) 第1出力サイクル時, ペレット-被覆管の相互作用 (PCI) はディッシュペレットで強くフラットペレットで弱かった。燃焼の進展と共に PCI の開始は高線出力側に移行した。第1出力サイクルから全部の棒に焼きしまりが生じた。
- (2) 燃焼度の低線出力部分ではペレット中心孔径がスウェリングの為に減少した。ディッシュペレットの端面には塑性的変形が生じた。高線出力部分では中心孔径の減少がフラットペレットで生じたが片端/両端ディッシュペレットでは中心孔径が増加した。 UO_2 の蒸発 ~ 付着機構に基づく UO_2 の付着がディッシュボイド部に観察された。
- (3) 燃料中心温度は燃焼が進んでもあまり変化しなかった。

IFA - 224

- (4) PCI に関する設計パラメーターの効果は次のようであった; ディッシュペレットの形状の違いの効果は明確ではなかった, 低温焼結ペレットは高温焼結のものより PCI が大きい。ペレット中心孔はPCIを緩和させる傾向にある。
- (5) 低温焼結/中実/フラットペレットをもった棒の1つが第1サイクル時に異常に大きな伸び変形を示した。
- (6) 燃料中心温度は燃焼の進展と共に変化し低温焼結ペレットでは温度上昇, 高温焼結ペレットでは温度の低下が生じた。FREG - 3 コンピューターモデルによる計算結果は実験結果と比較的良好一致を示した。

IFA-208/224 の比較

- (7) 被覆管の変形は低密度のものが高密度のものに比べて小さくかつ早く一定値に達して飽和する。
- (8) ディッシュペレットはフラットペレットに比べて密度変化の影響を大きく受ける。
- (9) 燃料中心温度は密度の低いものが高いものに比べてひくめであるがあまり顕著ではない。

Irradiation, Post-Irradiation Examination, and Evaluation
of IFA-208 and 224

Kazuaki YANAGISAWA

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment,
JAERI

(Received May 26, 1978)

This paper describes the analysis of IFA-208 and of IFA-224 irradiation tests at HBWR.

As for IFA-208, the hollow pellet fuel with flat ends, one end dished and both ends dished pellet were irradiated to the average burnup of 5.1GWd/tUO₂ at the average linear heat rating of 615W/cm. After irradiation the fuel showed excellent dimensional stability.

As for IFA-224, both the solid and the hollow pellet fuel with flat ends and both ends dished pellet were irradiated to the average burnup of 11.8GWd/tUO₂ at the average linear heat rating of 590W/cm. No major defects were observed, but two small sunburst blisters were found. Cladding strains were very small and no ridge deformation occurred. The summary of the study is as follows.

IFA - 208

- (1) During the first power cycle, the pellet-cladding interaction (PCI) was strong in the dished pellet and weak in the flat pellet. With the burnup the initiation of PCI tend to begin at higher linear heat rate. Fuel densification was observed for all of the rods.
- (2) At low heat rated section of the rod, center hole diameter decreased by swelling. The end faces of the dished pellet deformed plastically. At high rated section, the center hole diameter decreased in flat pellet and increased in one end dished / both end dished pellets. The dished void was filled with UO₂ primarily due to the vapour deposition mechanism.
- (3) Variation with the fuel centre temperature was small with the burnup.

IFA - 224

- (4) Influence of the fuel paramaters on PCI are as follows: flat end and both ends dished pellet showed little shape effect on cladding deformation, low temperature sintered pellets was stronger in PCI compared with high tempe-

rature sintered ones, the hollow pellet tended to decrease the PCI.

- (5) One of the rods with solid, and flat end pellets sintered at low temperature showed the extraordinary large deformation of the cladding during the first power cycle.
- (6) Fuel center temperature varied with the burnup: it increased in the case of low temperature sintered pellets and decreased in the case of high temperature sintered one. Calculation from the FREG 3 computer program showed comparatively good agreement with experimental results.

Comparison of IFA - 208 with 224

- (7) Cladding deformation was smaller and saturated quickly in low density pellets than in high density ones.
- (8) Both ends dished pellet was affected largely by pellet density variation than flat end pellets.
- (9) Fuel center temperature was lower in low density pellets than in high density pellets but that difference was not remarkable.

Keywords : Irradiation, Post-Irradiation Examination, Pellet Shape, Fuel Rod, Fuel Cladding, Pellet-Cladding Interaction (PCI), Cladding Elongation, Fuel Stock Elongation, UO_2 Pellet, Fuel Center Temperature, Pellet Density, Radiation Effects.

目 次

1. 序	1
2. 燃料体の設計および製造	2
2.1 設 計	2
2.2 製 造	2
3. 照射と照射後試験	3
3.1 照 射	3
3.2 燃料の計装と集合体	3
3.3 照射後試験	4
3.3.1 外観検査と寸法	4
3.3.2 ガンマスキニング	5
3.3.3 X線写真と核分裂ガスの分析	5
3.3.4 金 相	5
4. 実験結果	7
A. IFA - 208 の実験結果	7
A. 4.1 ペレットと被覆管の相互作用	7
A. 4.1.1 照射初期での相互作用の挙動	7
A. 4.1.2 照射末期での相互作用の挙動と永久変形	7
A. 4.1.3 燃焼に伴うペレットスタックの挙動	8
A. 4.2 構造変化	8
A. 4.2.1 中心孔	8
A. 4.2.2 ペレット端の形状	8
A. 4.2.3 微細組織	9
B. IFA - 224 の実験結果	9
B. 4.1 被覆管および燃料スタックの伸びに対するペレットの形状効果	9
B. 4.2 被覆管および燃料スタックの伸びに対するペレット製造時焼結 温度の効果	10
B. 4.3 被覆管および燃料スタックの伸びに対するペレット中心孔の効 果	10
B. 4.4 棒Bの被覆管の初期起動時の異常挙動	10
B. 4.5 燃料中心温度の測定	11
C. IFA - 208とIFA - 224 との比較	11
C. 4.1 初期起動時の被覆管伸びに対する密度の効果	11
C. 4.2 被覆管伸びに対するペレットの形状効果	12
C. 4.3 中心温度に関する比較	12

5. 結 言	13
参 考 文 献	15
付 録	89

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. DESIGN AND FABRICATION	2
2.1 Design	2
2.2 Fabrication	2
3. IRRADIATION AND POST-IRRADIATION EXAMINATION	3
3.1 Irradiation	3
3.2 Fuel instrumentation and fuel assembly	3
3.3 Post-irradiation examination	4
3.3.1 Visual inspection and dimensions	4
3.3.2 Gamma scanning	5
3.3.3 X-ray and fission gas analysis	5
3.3.4 Metallography	5
4. EXPERIMENTAL RESULTS	7
A. Experimental results of IFA-208	7
A.4.1 Pellet-cladding interaction	7
A.4.1.1 The interaction behavior at the beginning of irradiation	7
A.4.1.2 The interaction behavior at the end of irradiation and the permanent deformation	7
A.4.1.3 Pellet stack behavior with burnup	8
A.4.2 Structural change	8
A.4.2.1 Centre hole	8
A.4.2.2 Pellet end shape	8
A.4.2.3 Microstructure	9
B. Experimental results of IFA-224	9
B.4.1 Effect of pellet shape on elongation of cladding and fuel stack	9
B.4.2 Effect of pellet sintering temperature during fabricant process on elongation of cladding and fuel stack	10
B.4.3 Effect of pellet centre hole on elongation of cladding and fuel stack	10
B.4.4 Abnormal behavior of cladding elongation on rod B during first start-up	10
B.4.5 Measurement of fuel centre temperature	11
C. Comparison IFA-208 with IFA-224	11
C.4.1 Pellet density effect on cladding elongation during	

start-up irradiation	11
C.4.2 Pellet shape effect on cladding elongation	12
C.4.3 Comparison with concerning to fuel centre temper- ature on IFA-208 and IFA-224	12
5. CONCLUSIONS	13
REFERENCES	15
ANNEX	89

TABLES

Table 1	Characteristics and Experimental Design of IFA-208 and -224	16
Table 2	Chemical Analysis of the Pellet of IFA-208	17
Table 3	Chemical Analysis of the Pellet of IFA-224	18
Table 4	Fuel Pin Length Increase (IFA-208)	19
Table 5	Fuel Pin Diameter Increase (IFA-208)	19
Table 6	Fuel Pin Length Increase (IFA-224)	19
Table 7	Power Distribution in the IFA-208 Fuel Rods and Local Form Factors of Samples Cut for Destructive PIE	20
Table 8	Power Distribution in the IFA-224 Fuel Rods (Gamma Scanning Results) and Local Form Factors of Samples Cut for Destructive PIE	21
Table 9	Results of Puncturing	22
Table 10	Results of Fission Gas Analysis	22
Table 11	Results of X-ray Photograph (All measures in mm)	23
Table 12	Maximum Elongations During First Start-up (In-pile)	23

FIGURES

Fig. 1	Schematic drawing of the fuel pin of IFA-208	24
Fig. 2	Schematic drawing of the fuel pin of IFA-224	25
Fig. 3	Core position of IFA-208 (HBWR core loading No.24 from February 1, 1977)	27
Fig. 4	Power history of fuel of IFA-208; irradiation period covered from Feb. to Sept. 1971	28
Fig. 5	Core position of IFA-224 (HBWR core loading No.5 from March 1972)	27
Fig. 6	Power history of fuel of IFA-224; irradiation period covered from Mar. 1972 to Sept. 1973	29
Fig. 7	Weld and spacer regions on Rod C (one and dish), mag. X2	30
Fig. 8	Upper 45°-deposit on Rod C, mag. X8	31
Fig. 9	Lower 45°-deposit on Rod C in profile, mag. X8	31
Fig. 10	Upper 315°-deposit on Rod C in profile, mag. X8	31
Fig. 11	Same region as in Fig. 9, after scraping-off most of the	

	deposit, mag. X2	31
Fig. 12	Spiral diameter curve over range 900-960 mm, Rod C (one end dish), IFA-224	32
	Sensitivity : 10 μ /sc. div.	
	Axial scale : 1:1 (10mm/sc. div.)	
	Pitch : 2mm	
Fig. 13	Area of sunburst blister found during dimensional measurements, Rod No.C, IFA-224, 937mm, 60°	33
Fig. 14	Area of sunburst blister found during dimensional measurements, Rod C, IFA-224, 980mm, 270°	33
Fig. 15	Pre-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-208	34
	Sensitivity : 0.01 mm/sc. div.	
	Axial scale : 12.46 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.50 mm on 70 sc. div.	
Fig. 16	Post-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-208	35
	Sensitivity : 10 μ m/sc. div. on diameter 20 μ m/sc. div. on profile	
	Axial scale : 20mm/sc. div.	
	Reference diam. : 14.50mm on 70 sc. div.	
Fig. 17	Pre-irradiation diameter and profile Rod D (both end dish) 10°, IFA-208	36
	Sensitivity : 0.01 mm/sc. div.	
	Axial scale : 12.46 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.50 mm on 70 sc. div.	
Fig. 18	Post-irradiation diameter and profile Rod D (both end dish) 0°, IFA-208	37
	Sensitivity : 10 μ m/sc. div. on diameter 20 μ m/sc. div. on profile	
	Axial scale : 20 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.50 mm on 70 sc. div.	
Fig. 19	Pre-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-224	38
	Sensitivity : 10 N/sc. div.	
	Axial scale : 49.84 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.50 mm on 80 sc. div.	

Fig. 20	Post-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-224	39
	Sensitivity : 10 μ m/sc. div.	
	Axial scale : 20 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.3 mm on 60 sc. div.	
Fig. 21	Pre-irradiation diameter and profile Rod C (both end dish), 0°, IFA-224	40
	Sensitivity : 10 N/sc. div.	
	Axial scale : 49.84 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.50 mm on 80 sc. div.	
Fig. 22	Post-irradiation diameter and profile Rod C (both end dish), 0°, IFA-224	41
	Sensitivity : 10 μ m/sc. div. on diameter 50 μ m/sc. div. on profile	
	Axial scale : 20 mm/sc. div.	
	Ref. diam. : 14.3 mm on 60 sc. div.	
Fig. 23	Axial gamma scans (Zr 95/Nb 95) and sample location ; upper Rod D (both end dish) and lower Rod B (flat), IFA-208	43
Fig. 24	Axial gamma scans (Zr 95/Nb 95) and sample location ; upper Rod C (one end dish) and lower Rod A (flat), IFA-208	45
Fig. 25	Arrangement for X-ray photography, IFA-208	47
Fig. 26	X-ray pictures of plenum region, IFA-208	48
Fig. 27	Results obtained from metallographic observations	49
Fig. 28	Macrophotographs and autoradiographs of Rod A (flat). Sample M21, 731-747 mm, 798 W/cm	50
Fig. 29	Macrophotographs and autoradiographs of Rod B (flat) IFA-208, upper; sample M17, 186-196 mm, 660 W/cm, lower; sample M8, 196-212 mm, 677 W/cm	51
Fig. 30	Macrophotographs and autoradiographs of Rod B (flat), IFA-208, upper; sample M18, 494-504 mm, 816 W/cm, middle; sample M9, 504-520 mm, 816 W/cm and lower; sample M10, 895-911 mm, 640 W/cm	52
Fig. 31	Macrophotographs and autoradiographs of Rod C (one end dish), IFA-208, upper; sample M19, 165-175 mm, 640 W/cm and lower; sample M11, 175-191 mm, 653 W/cm ...	53

Fig. 32	Macrophotographs and autoradiographs of Rod C (one end dish), IFA-208, upper; sample M20, 513-523 mm, 825 W/cm, middle; sample M12, 523-539 mm, 825 W/cm and lower; sample M13, 892-908 mm, 672 W/cm	54
Fig. 33	Macrophotographs and autoradiographs of Rod D (both end dish), IFA-208, upper; sample M15, 175-186 mm, 645 W/cm and lower; sample M5, 186-202 mm, 658 W/cm	55
Fig. 34	Macrophotographs and autoradiographs of Rod D (both end dish), IFA-208, upper; sample M16, 507-517 mm, 807 W/cm, middle; sample M6, 517-533 mm, 807 W/cm, and lower; sample M7, 930-946 mm, 635 W/cm	56
Fig. 35	Fuel radii as of Rod A (flat) and of Rod C (dish), upper; sample M13 (Rod C, 670 W/cm) and lower; sample M21 (Rod A, 800 W/cm)	57
Fig. 36	Fuel radii of Rod B (flat), upper sample M18 (815 W/cm) and lower; sample M9 (815 W/cm)	58
Fig. 37	Fuel radii of Rod C (one end dish), upper; sample M11 (655 W/cm), middle and lower; sample M12 (825 W/cm)	59
Fig. 38	Fuel radii of Rod D (both end dish), upper; sample M16 (805 W/cm) and lower; sample M6 (805 W/cm)	60
Fig. 39	Hydride distribution in the cladding of longitudinal samples of Rod D (both end dish), M5, M6 and M7	61
Fig. 40	Fuel radii and detail pictures of Rod A (flat), IFA-224, sample No.51, 537 mm, 583 W/cm	62
Fig. 41	Fuel radii and detail pictures of Rod B (flat), IFA-224, sample No. 54, 623 mm, 581 W/cm	63
Fig. 42	Fuel radii and detail pictures of Rod C (both end dish), IFA-224, sample No.58, 511 mm, 589 W/cm	64
Fig. 43	Fuel radii and detail pictures of Rod D (both end dish), IFA-224, sample No.59, 564 mm, 560 W/cm	65
Fig. 44	Hydride distribution and grain structure of Rod A (flat), IFA-224, sample No.50, 51 and 52	66
Fig. 45	Hydride distribution and grain structure of Rod C (both end dish; upper) and of Rod D (both end dish; lower) ...	67
Fig. 46	Cladding elongation vs linear heat rating during the first power cycle	68

Fig. 47	Cladding fractional shrinkage during holding at full power in the first power cycle	68
Fig. 48	Fuel stack elongation vs linear heat rating during the first power cycle	68
Fig. 49	Pellet stack shrinkage during holding at full power in the first power cycle	68
Fig. 50	Effect of burnup on the cladding elongation curve	69
Fig. 51	Pellet stack change of flat pellet	69
Fig. 52	Pellet stack change of both ends pellet	69
Fig. 53	Cross section of the specimens	70
Fig. 54	The microstructure of flat pellet fuel near the centre hole	71
Fig. 55	Shapes of the central hole of one end dished pellet fuel	71
Fig. 56	Longitudinal section at the pellet interface	72
Fig. 57	UO ₂ vapour deposition on the pellet end face in the dished space	72
Fig. 58	Axial distribution of the depth of dips in gamma scanning at pellet interface	73
Fig. 59	Density, pellet end shape and temperature distribution of one end dished pellet pin at the position L and M	74
Fig. 60	Cladding elongation for rod B (flat) and rod C (dish) vs linear heat rating during first and third ramp cycle, IFA-224	75
Fig. 61	Fuel stack elongation for rod B (flat) and rod C (dish) vs linear heat rating during first, second and third ramp cycle, IFA-224	76
Fig. 62	Cladding elongation for rod A (high temp. sintered) and rod B (low temp. sintered) vs linear heat rating during first and third ramp cycle, IFA-224	77
Fig. 63	Fuel stack elongation for rod A and rod B vs linear heat rating during first, second and third ramp cycle, IFA-224	78
Fig. 64	Cladding elongation for rod C (with centre hole) and rod D (without centre hole) vs linear heat rating during first and third ramp cycle, IFA-224	79

Fig. 65	Fuel stack elongation for rod C and rod D vs linear heat rating during first, second and third ramp cycle, IFA-224	80
Fig. 66	Abnormal cladding elongation behavior for rod B vs linear heat rating during first ramp cycle, adding to second, and third ramp cycle for references, IFA-224 ...	81
Fig. 67	Sketch of the plenum region and the measurements taken on the photographs, IFA-224	82
Fig. 68	Fuel centre temperature for rod A vs linear heat rating as a function of burnups, IFA-224	83
Fig. 69	Fuel centre temperature for rod B vs linear heat rating as a function of burnups, IFA-224	84
Fig. 70	Calculated fuel centre temperature with FREG-3 computer model and measurement fuel centre temperature vs linear heat rating, IFA-224	85
Fig. 71	Cladding elongation of IFA-208 (rod A) and of IFA-224 (rod A and rod D) vs linear heat rating	86
Fig. 72	Cladding elongation of IFA-208 (rod C and rod D) and of IFA-224 (rod D) vs linear heat rating	87
Fig. 73	Fuel centre temperature for rod A of IFA-208 vs linear heat rating as a function of burnups	88

Annex	1	IFA-208	Operational Data
	2	IFA-208	Test Assembly Data
	3	IFA-208	Test Assembly Drawing
	4	IFA-224	Operational Data
	5	IFA-224	Test Assembly Data
	6	IFA-224	Test Assembly Drawing

1. 序

IFA-208 は 4 体の燃料棒より成る。HBWR における照射の目的はペレット溶融域にまで達する高線出力下での燃料棒の挙動を研究する事である。

ペレットと被覆管の相互作用を調べるために 4 体の被覆伸び計と 3 体の燃料スタック伸び計が取り付けられている。更に燃料中心温度測定用の熱電対が 1 体取り付けられている。IFA-208 を用いた実験でのパラメーターはペレットの形状である；つまり燃料棒 2 体はフラットペレット、燃料棒 1 体は片面ディッシュ、残りの 1 体の燃料棒は両面ディッシュのペレットを使用している。

その他主要なデータとしては、

—燃料： UO_2 ペレット，濃縮度 7 w/o，密度 95 % TD

—ペレット：直径 1238 mm×長さ 20 mm，中心孔直径 2 mm

—被覆管：Zry-2，オートクレーブ，内径 1268 mm×肉厚 0.99 mm

IFA-224 は IFA-208 と同様に燃料ペレット溶融域に達する高線出力下での燃料棒の挙動を研究する目的で作られたものである。

燃料体は 4 本の燃料棒より成っている。そのうち 2 体には中心温度測定用の熱電対が取り付けられており同時に燃料スタック伸び計も取り付けられている。残りの 2 体は燃料スタック伸び計だけである。また 4 体の燃料棒全部に被覆管伸び計が取り付けられている。

燃料には濃縮度 7 w/o， ^{235}U の UO_2 ペレットを用いた。

—棒 A と棒 B はフラットペレット

—棒 C は両端ディッシュペレット

—棒 D は両端ディッシュで 2 mm 直径の中心孔付

その他の重要なパラメーターとしてペレットの安定性（組織）がある。棒 A は 1650 °C で残りの棒 B，C および D は 1390 °C で焼結した。ペレットの密度は 89.0 - 89.9 % TD の間にあった。

2. 燃料体の設計および製造

2.1 設 計

IFA-208 および IFA-224 は前者が高密度・高出力下のペレットと被覆管の相互作用を調べることを目的としたものであり、後者が低密度・高出力下のペレットと被覆管の相互作用を調べることを目的としたものである他は全体的に仕様の同じ燃料体である。両燃料体の特性表を Table 1 に示す。詳細な実験パラメーターをデータシートに一括して付録 (Annex) に示す。

1) IFA-208 燃料棒

典型的な BWR 型の被覆管寸法となる様に Zry-2 の直径と肉厚を選定した。UO₂ ペレット濃縮度は 7w/o-²³⁵U でペレット密度は 95%TD である。ペレットは水素雰囲気中 1650°C で焼結した。全部のペレットに 2mmφ の中心孔があけてある。ペレット形状にはフラット、一端ディッシュ、および両端ディッシュの 3 種類を使用した。直径ギャップは 300μm である。燃料ピンの概要を Fig. 1 に示す。

2) IFA-224 燃料ピン

IFA-224 はペレット密度以外は IFA-208 と同様な燃料集合体である。集合体は 4 本のクラスターより成っている。典型的な BWR 型長尺燃料棒である。UO₂ ペレットの濃縮度は 7w/o-²³⁵U でペレット密度は 90%TD である。ペレット焼結温度は高温 (1600~1650°C)、低温 (1350~1400°C) の 2 通りのものを用い、ペレット形状にはフラット、両端ディッシュ (一部中心孔付) を用いた。

各ピンの両端には 4w/o Dy₂O₃ 入りの 6w/o-²³⁵UO₂ ペレットを用いている。

線出力密度は IFA-208 とほぼ同様であり平均 600 W/cm で照射を行なった。

試験集合体は自然循環水で冷却した。燃料ピンの概要を Fig. 2 に示す。

2.2 製 造

製造過程はすでに報告した方法(1)とほぼ同じである。IFA-208 に用いた UO₂ ペレットの化学分析結果を Table 2 に、IFA-224 に用いた UO₂ ペレットのそれを Table 3 に示す。

3. 照射と照射後試験

3.1 照射

IFA-208は1971年1月に装荷され9月まで照射が続けられた。炉心位置はFig.3に示す様に2-0で燃焼度は炉内熱水力的測定によれば 6.3 GWd/t UO_2 であった。IFA-208の出力履歴をFig.4に示す。1971年4月にチャンネルの最大出力は 359 kW に達した。これは平均線出力 615 W/cm 、最大線出力表示で 770 W/cm に相当する。ハルデンでの計算によれば 770 W/cm に相当する燃料中心温度は 2820°C である。照射中、除荷、貯蔵時での燃料体に破損は見られなかった。

平均燃焼度 5.1 GWd/t まで燃料を照射した、燃焼度の決定はPIEでNd, UおよびPuを用いた同位体解析によった。出力計の指示値は燃焼度測定の結果から修正を施した。その結果をchronologicallyにFig.4に示す。燃料の平均および最大線出力はそれぞれ 615 W/cm および 770 W/cm である。軸方向および半径方向の出力係数は燃料ピンのガンマスキニングより得た。

燃料の計装データーは炉運転中に行なった出力の上昇、下降中に得た。炉運転期間の当初に出力急昇試験を数回実施し、照射末期に本実験では特別に計画した出力サイクルを実行した。

照射した燃料をシェラーに運び非破壊PIEを1972年3月～5月中に行なった。更に金相試験を1972年9月～10月の間に行なった。

IFA-224は1972年2月に装荷され1973年の11月まで照射を行なった。燃焼度は 11.8 GWd/t UO_2 に達した。1972年の2月～8月までの初期照射期間中集合体の炉心位置は4-5であった。その様子をFig.5に示す。その後、炉心外側の7-2に移動し、以後除荷まで照射が続けられた。集合体最大出力は1973年10月に 309 kW に達したが、炉運転の最終期間中での定常運転状態で 260 kW であった。この値は平均線出力で 442 W/cm に相当する。

IFA-224の出力履歴をFig.6に示す。照射時間中燃焼料の破損は生じなかった。

3.2 燃料の計装と集合体

IFA-208/224はともに被覆管伸び計と燃料スタック伸び計を装荷している。これらの検出器は小さな差動トランスでできておりそれらの説明は文献(2)を参照されたい。

トランズデューサーコイルのハウジングと燃料上端はシュラウド(集合体チャンネルボックス)に固定されフェライト系のステンレス鋼でできているコアが燃料底部に取りつけられている。ペレットスタック長の伸び検出器においては、スタックの動きは燃料ピン被覆の膨脹量に相対的に測定される。従って真のスタックの伸びはペレットスタック伸び量に燃料ピンの伸び量を加算して得られる。

燃料集合体には軸方向出力分布測定用の中性子温度計が3体、冷却材温度計、タービン流量計および燃料破損検出器等が取り付けられていた。

中性子温度計は集合体出力をだすために熱的に換算された。計算からの全データーはIBM-

1800 で処理した。

3.3 照射後試験

3.3.1 外観検査と寸法

(外観検査)

1) IFA-208 の外観検査

一般に燃料棒表面は清浄で光沢を持っていた。リッジングの生じた形跡はなかった。スペーサー部には照射中に生じたと思われるクラッドが附着していた。Fig.7は棒C(片端ディッシュ)についての溶接・スペーサー部分の外観写真である。スペーサー部分にはスペーサーばねとの接触によって生じたと思われる楕円形の影が生じている。生じたクラッドは場所によって大きさが異なっている。Fig.8~Fig.11は棒C(片端ディッシュ)のクラッド堆積部分を更に詳しく観たものである。Fig.8はFig.7の拡大である。Fig.9は更に完全な形のクラッドでそれを横から観たのが Fig.10である。金属破片でFig.9のクラッドを取り除いた様子を Fig.11に示す。

2) IFA-224 の外観検査

棒の検査によって割れ、ブリストアまたは端栓部の腐蝕といった大きな欠陥は検出されなかった。ペレットとペレットの相互作用を示す円周上の色の規則性が全く見られなかった。不規則性の生じた殆んど場所はスペーサーと被覆管の接触部であった。

棒A(フラット)および棒C(片端ディッシュ)のらせん直径曲線による測定の結果、典型的な“サンバーストブリストア”局所的偏平がみられた。らせん直径曲線を棒CについてFig.12に示し、サンバースト発見による再検査後の棒AおよびCの外観写真をFig.13およびFig.14に示す。ブリストアはやっと見える程度のごく程度の軽いものであった。

(寸法)

1) IFA-208

○ 軸方向長さの測定

照射前後の燃料棒の長さの変化を測定した結果を Table 4 に示す。ペレットのいろいろな形状に関して永久変形の差が驚く程少ない事が Table 4 よりわかる。この事実は起動時の炉内測定値にも観察された。290kW ランプ後の3本の棒に対する残留量は0.01% (0.15mm) であった。フラットペレットを用いた場合0.3mmの直径ギャップを持つ燃料棒では燃料スタックと被覆管の間に殆んど相互作用が生じない。ディッシュペレットを用いた場合、大きな“アワーグラス”効果の為に高線出力時には半径方向の接触が生じている。

○ 直径およびプロフィール測定

棒Aおよび棒Dの照射前後の直径およびプロフィール測定の結果を Fig.15~Fig.18 に示す。曲線からわかる様に軸に沿っての直径変動は非常に小さい。照射前の直径曲線には被覆管製造時に生じた10 μ m波高の15mm波長をもった“ripple”が観察された。この“ripple”は照射中に幾分か緩和されPIEの直径曲線に於てはなだらかになっている。リッジングは観察されなかった。また、スペーサーばねの位置に生じたクラッド堆積物によって生じた不規則性のみが観察された。

直径およびプロフィール曲線から得た平均直径をまとめて Table 5 に示す。

2) IFA-224

○ 軸方向長さの測定

照射前後の燃料棒の長さの変化を測定した結果を Table 6 に示す。ペレット形状に関係なくほぼ変形量が一定であった。

○ 直径およびプロフィール測定

棒A (フラットペレット使用) および棒C (両端ディッシュペレット使用) につき照射前後の直径およびプロフィール測定の結果を Fig. 19 ~ Fig. 22 に示す。

照射前の直径曲線 Fig. 19 および Fig. 21 をみるとある幅で僅かな振動が生じているのがわかる。その規則性からみてこれは被覆管製造時に生じたものと思われる。

照射後の直径曲線 Fig. 20 および Fig. 22 をみるとリッジングは生じていない。直径の増加は殆んどおこっておらず最大でも棒Cで $90\mu\text{m}$ 程度の増加である。

3.3.2 ガンマスキニング

1) IFA-208

IFA-208 の各棒A ~ 棒Cの軸方向ガンマスキンの結果を Fig. 22²³ (棒Dおよび棒B) および Fig. 24 (棒Aおよび棒C) に示す。また Table 7 には棒全体に関する出力係数および平均線出力と各軸方向に分割した場合のそれらを示す。表より軸方向出力係数は 1.32 - 1.35 であった事がわかる。集合体平均線出力は 610W/cm であるから棒Aと棒Cは最大 825W/cm の線出力を経験した。なおリークテストの結果, IFA-208 にはリークが検出されなかった。

2) IFA-224

棒全体に対する出力係数および各軸方向位置に対する出力係数の値をまとめて Table 8 に示す。表中線出力の平均値としては $\bar{q} = 442\text{W/cm}$ (集合体出力: 260kW) を用いている。各棒とも最大線出力として $580 \sim 590\text{W/cm}$ を経験している。

3.3.3 X線写真と核分裂ガスの分析

IFA-224 に関するX線写真の解析結果は“被覆伸び”の項でのべるので IFA-208 に関するX線写真および分裂ガスの分析結果についてのべる。

X線写真 (IFA-208)

燃料スタックの最上端の位置およびエンドプラグに関連した移動マーカーの最上端位置の決定の為にプレナム部のX線写真撮影を行なった。照射前後のX線写真の模式図を Fig. 25 に、また実際のプレナム部X線写真を Fig. 26 に示す。棒Aのスタックの移動が照射前後で 10.5mm と大きくこの棒だけは押えばねの力が効果しなかった事がわかる。

核分裂ガスの分析

“puncturing”の結果を Table 9 に示す。棒Bの圧力が他の棒に比べて低い事から棒Bでは分裂ガスのリークが生じたと考えられる。棒Aおよび棒Cのガス結果が棒Dに比べて大きいのはこれらが大きな線出力を有していた為である。分裂ガスの 50 % 程度を捕集してガス分析した結果を Table 10 に示す。

3.3.4 金 相

1) IFA-208

金相観察より得た知見をまとめてFig.27に示す。照射後、低線出力域にあったペレットの中心孔には0.7~1.0mm程度の中心孔収縮がみられ(ペレット形状に無関係に収縮)、高線出力域にあったフラットペレットで0.4mmの収縮、ディッシュペレットには0.2~0.8mmの膨脹が見られた。柱状晶をした結晶粒が高線出力部にペレット形状に無関係にみられたが低線出力部では片端ディッシュのみにそれがみられた。等軸晶はペレットに無関係に高低線出力部に於て50~80%生じていた。

棒A~棒Dの各組織写真とオートラジオグラフをFig.28~Fig.34に示す。棒A~棒Dの高線出力部の高倍率写真をFig.35~Fig.38に示す。被覆管長手方向での水素化物の分布写真の例を棒DによってFig.39に示す。

2) IFA-224

棒A~棒Dの最高線出力部部分の横断面写真をFig.40~Fig.43に示す。また棒Aおよび棒C/Dの被覆管水素化物分布の模様をFig.44およびFig.45に示す。高線出力域ペレットのみならず低線出力域のペレットにおいても金属的な核分裂生成物の析出が見い出された。

高濃度水素化物の分布が棒A(Fig.45)の被覆管金相に見られた他は特別なことは観察されなかった。棒A以外の水素化物の分布は均質かつ円周上にきれいに並んでいた。

4. 実験結果

A. IFA-208の実験結果

A.4.1 ペレットと被覆管の相互作用

燃料ピンを用いたペレットと被覆管の相互作用の研究を照射下の燃料計装データーと照射後試験からの寸法測定データーとを用いて行なった。

A.4.1.1 照射初期での相互作用の挙動

Fig. 46は初期出力サイクル時の線出力に対する燃料被覆管の伸びを示したものである。被覆管は熱膨張により生ずる伸びよりもはるかに大きい伸びを示した。この伸びの増分はペレットと被覆管の機械的相互作用(PCMI)により生じる。被覆管伸び曲線の勾配が大体 200W/cm 以上で急激になっている事から相互作用はこの線出力以上で強くなる。ペレットの形状効果をはっきりとした；ディッシュのものに比べてフラットペレットによる相互作用は弱く線出力増加と共に一定値に近づく、これは伸びの駆動力が幾つかの要因によって平衡化した事を意味する。初期定常出力運転中に被覆管に縮みが観られた。保持時間に対する縮みの挙動を Fig. 47に示す。

縮みは時間に対して指数的に進行しその完了時間は最高出力時の被覆管の最大変形量に依存した。

Fig. 48は初期出力サイクル時の線出力に対するペレットスタックの伸びである。フラットペレットのスタック伸びはディッシュペレットのものより数段大きかった。また図からペレットスタック伸びはペレットまたはディッシュ中心での熱膨張から簡単に計算される。

前述の如く 200W/cm 以上の線出力では伸び勾配が減少する。これは被覆管の弾性膨張によりペレットに軸方向の力が作用しペレットの変形がおこる事をいみする。燃料ペレットの焼結および焼きしまり等も寄与するであろう。

ペレットスタックの縮みが最高出力保持中に生じた。この様子を Fig. 49に示す。検出器に用いたコイルばねによるばね力は約 445N であった。

A.4.1.2 照射末期での相互作用の挙動と永久変形

照射末期に出力サイクルを実行した。Fig. 50はこのサイクル中の被覆伸びを示している。比較対象の為に照射初期での被覆伸びも図中に示してある。図が煩雑化するのを避ける為に出力増加中の伸び曲線のみを示す。曲線は原点を全て一致させた。燃焼と共に相互作用の程度がおち、ペレットと被覆管の相互作用の開始が線出力の高い方に移行する傾向がみられた。

照射後試験(PIE)に於て照射後の被覆管の永久変形を測定した。崩壊熱による温度上昇分は修正した。その結果はすでに Table 4に示してある。

照射前後のピンのプロフィロメトリーを同一方向について実行した。装置の詳細は文献(3)にある。直径スキニングとフラット・両端ディッシュペレットのプロフィロメトリーの測定結果はすでに Fig. 15~Fig. 18に示してある。照射でリッジは生ぜずまたピンの長さ方向の直径変動は微小であった。照射前の直径測定では製造の引抜き過程で生じた $10\mu\text{m}$ 振幅、 15mm 波長をもった“さざ波”が観察された。この“さざ波”はペレットと被覆管の相互作用による被覆管の伸びによって照射中に引きのばされPIEでは非常に滑らかな直径曲線を得た。同様な傾向が他のピン

にも見られた。曲線から得た被覆管の平均直径値は Table 5 に示した。

A. 4.1.3 燃焼に伴うペレットスタックの挙動

Fig.51 および Fig.52 はフラットおよびディッシュペレットの各燃焼度におけるペレットスタック伸び曲線である。出力低下運転中の第2 (50 MWd/t) および第3 (80 MWd/t) サイクルで伸び、縮み曲線が非常に滑らかになる。これは被覆管にペレットのぶら下がりが生じていない事を示す。

ペレットスタック長の照射後の長さ測定には2つの方法が用いられた。1つはガンマスキャンニングでもう1つはX線ラジオグラフィーによるプレナム長の変化である。この2つの方法では共通してフラットペレットのスタックが20mm伸びたこと、ディッシュペレットのそれが殆んど変化しなかったことが見られた。しかしながら、可能性として(PIEの為の)輸送中にペレットは動くこと、照射後試験の為の取扱い中に検出器のコイルばねを通してスタックが445N程度の力が作用することが考えられる。

A. 4.2 構造変化

軸方向の3カ所について冶金的な試料を採取した；1カ所は最高線出力位置(位置M)、1つは位置Mと~~と~~底部(位置L)の中間、残りの1つはMと頂部(位置U)との中間である。ペレット形状の異なる燃料ピンの間の比較を可能にする為に位置UとLの試料は同一線出力部分で切断した。

A. 4.2.1 中心孔

位置MとLでの横断面写真を Fig.53 に示す。中心孔の径は Fig.27の最下段に示してある。

もともとの中心孔径は2.0mmで照射によって孔径の増加と減少が生じている。高線出力部におかれた試料は低線出力部のそれより大きな孔径を有した。ペレットの形状の違いによる孔径の差異は大きかった。高線出力部におかれた(位置M)試料孔径のうち1番大きかったのが両端ディッシュのピンで続いて片端ディッシュ、フラットペレットのそれが1番小さかった。

理論的に中心孔径の減少は軸方向高温材からの蒸気の付着の結果生じる。フラットペレットの位置Lに於ける写真 Fig.54で見られる様に内表面の顕微鏡組織には蒸気付着の形跡がない。それ故中心孔径の減少は燃料ペレットのスウェリングによるものである。“スウェリング”という語にはペレットのおこしうる反転現象(solarization)(4.5)も含んでいる。片端ディッシュペレットの中心孔の軸方向切断写真を Fig.55 に示す。位置Mで中心孔の直径はかなり均一的であるのに対し位置Lでは、中心孔径がペレット境界面近くで大きくしかも孔の端の方が蒸発の為に丸くなっている。L位置での縦方向の切断は軸心より少しずれた為、孔の形状は幾分変形している。

A. 4.2.2 ペレット端の形状

Fig.56は各ピンの位置Mにおけるペレット端形状を示す。縦軸の軸心から切断位置がずれた為、ディッシュ、フラットペレット共に中心孔からずれており、ディッシュでは僅か一部分のみの孔しかみえず、フラットの場合孔が全然見えていない。

フラット端のペレット以外の形状のものではペレット端に変形の微候があった。それは片端ディッシュの場合に特に明らかでディッシュ空間の一部が UO_2 で満たされていた。この UO_2 充填の外縁では蒸発の典型的形態がみられた。この低温側の半径方向位置は柱状晶外縁の幾分外側にあった。つまり UO_2 がつまった外縁部の温度はボイドの形状がドーナツ型でその大きな熱抵抗の

為相当高かった事を説明している。Fig.57に示されている様に、ディッシュ空間部への充填は主に蒸気付着の為に生じたと考えられる。

フラットペレットに於てもまた界面の消失が認められた。しかし半径方向の広がり等は軸晶の域と一致していた。これは恐らく焼結によると思われる。殆んどの部分に於てもとからあった割れが癒着したのがわかる。この域の計算による温度は約 1500 °C でこの温度は Canon ら(5)の報告による UO_2 の延性-脆性遷移温度と一致した。

ディッシュ容積消費の軸方向変化について知るのに、その部分の沈み深さをガンマスキャニングチャートを利用して測定した。沈み深さはディッシュ容積と考えられる。軸方向出力分布と併せて Fig.58 にその結果を示す。ディッシュ容積のうまり具合は一般的に顕微鏡拡大写真と傾向が一致した。

両端ディッシュペレットでは出力最高位置でディッシュ容積の著しい減少が生じた。沈み深さの軸方向分布は対称にならなかった。この傾向は片端ディッシュで更にはっきりした。この現象の説明として可能なのはペレットスタック下部は上部に比べてその受ける応力の大きい事、クラックの数の多い事が挙げられる。照射中に割れた破片がディッシュ容積中に落ち込んだと思われる幾つかの痕跡がある。

フラットペレットでは沈み深さが最高出力位置で最も深く上部 1/4 長さまで分散していた。これによれば下部半分では炉内ディッシングを示す変形があるが上部 1/4 の辺では照射後試験の為に輸送中にペレットが動いたことがわかる。

A. 4.2.3 微細組織

試料より得る微細組織として割れ、等軸晶粒の成長、レンズ状ボイドを含む柱状晶粒の成長がある。IFA-208 に於ては数ミクロン直径の金属性の核分裂生成物の析出が柱状晶域中に見られた。

フラットペレットの粒構造はペレット中心孔近くに軸応力があつた為に細心の注意を払って行なわれスタック伸び検出器によって示された様な塑性歪を得た。切断部 M での粒構造には顕著な差異がフラットペレットと他のペレット間で生じなかったのに対し、Fig.55 で見られる如く切断部 L ではフラットペレットの等軸晶成長部分に異常な粒の成長が観察された。この成長はそれ以前からあつた割れの癒着に関連している。Robertson ら(6)によれば粒成長は応力により助長される。彼らは UO_2 表面を UO_2 のくさびで応力をかけた実験を行なった。同様な現象がクラック上に半径または軸方向応力をかけたときにも見られた。

中心孔径の減少とペレット中の気孔度によるペレット端の形状変化の関連を行なう為にエッチング前の微細組織中の気孔の計数を行ない気孔度を求めた。

琢磨中の粒の剥離は気孔度を過大に評価する方向にある。

Fig.59 は切断部 M および L における片端ディッシュペレットに関する結果で位置 M でのペレット端形状変化も含んでいる。半径方向の密度分布は大体に於て報告文献(7)と一致した。

ペレットと形状変化を製造時形状からどの程度変化したかについてプロットして図中には末端形状の変位として示す。全体的に変位の程度は密度の減少量と一致した。

B. IFA-224の実験結果

B. 4.1 被覆管および燃料スタックの伸びに対するペレットの形状効果

棒Bと棒Cは焼結温度が共に $1350 \sim 1400^{\circ}\text{C}$ 、中心孔のない中実ペレットを用いているが前者のペレットがフラットなのに対して後者のものは両端ディッシュとなっている。そこで両者を比較することによりペレットの形状の違いによる PCMI を比較することができる。Fig. 60 は線出力に対する被覆管の伸びをプロットしたもの、Fig. 61 は線出力に対する燃料スタックの伸びをプロットしたものである。Fig. 60 の棒Bでは異常と思われるペレット—被覆管の挙動が生じているので直接的な比較は行なえないが、Fig. 61 の燃料スタックの変形からみるとディッシュペレットの変形はフラットのものに比べて大きい。燃焼度の進展と共にソフトな相互作用位置が高線出側に移行する。

B. 4.2 被覆管および燃料スタックの伸びに対するペレット製造時焼結温度の効果

棒Aおよび棒Bはフラットな中実ペレットより成る燃料棒であるが、前者は焼結温度が $1600 \sim 1650^{\circ}\text{C}$ なのに対し後者は $1350 \sim 1400^{\circ}\text{C}$ と 250°C 程度低く焼結してある。従って両者の比較により低密度 (90% TD) 高温焼結および低密度 (90% TD) 低温焼結の焼結温度の違いによる PCI への寄与を比較する事ができる。

Fig. 62 は線出力に対する被覆管の伸び、Fig. 63 は線出力に対する燃料スタックの伸びをプロットしたものである。両図より高温焼結したペレットより成る燃料棒は低温焼結したものに比して被覆管の伸び変形が小さく燃料スタックの伸び変形が大きい (PCI が小さい)。一方低温焼結したペレットより成る燃料棒は被覆管の伸び変形が大きく燃料スタックの伸び変形が小さい (PCI が大きい)。燃焼度の進展と共に被覆管伸びは同じ程度の伸び変形量になるのに対して燃料スタックの伸び量には相当な差が生じる。

B. 4.3 被覆管および燃料スタックの伸びに対するペレット中心孔の効果

棒Cと棒Dは共に低温焼結のディッシュペレットを用いた燃料棒であるが前者は中実ペレットであるのに対して後者は中心に $2\text{mm}\phi$ の孔をもつ孔あきペレットである。従って両者を比較する事により中心孔の有無が燃料棒の PCMI に及ぼす効果を調べる事が可能である。

Fig. 64 は線出力に対して被覆管の伸びをプロットしたもの、また Fig. 65 は線出力に対して燃料スタックの伸びをプロットしたものである。両図より被覆管の変形様式は非常によく似ているが中心孔付のペレットを持った被覆管伸び量が中心孔のないペレットをもった被覆管より大きい。燃料スタックの伸び変形では両者にあまり差が見られないが中心孔のないペレットよりなる燃料のほうが変形量が大きめである。つまり燃料スタックの伸び変形に対しては中心孔の有無は寄与しないが被覆管の伸びに対しては寄与する。中心孔のないペレットをもつ燃料棒の方が PCI が大きめであると考えられる。

B. 4.4 棒Bの被覆管の初期起動時の異常挙動

棒B (低温焼結、中実フラットペレット) は初期ランプ時に被覆管が異常な変形挙動を示した。Fig. 66 はこのときの様子を示したもので線出力に対して被覆管の伸びが示してある。初期ランプ時に相互作用がいち早く生じ線出力の増加と共に $200\text{W}/\text{cm}$ まで被覆管伸びは増大する。

以後はそこを境にして線出力の増加に対して被覆管伸びの減少が生じ $40\text{W}/\text{cm}$ で変形前の長さに復帰した。しかし燃焼度の進んだ時点 ($4600\text{MWd}/\text{t}$) ではこの棒の伸び変形は他の被覆

管と全く同様な変形様式を示した。

これに関連して照射後試験のX線写真についてのべる。このX線写真の目的はプレナム部に一定量のマーカーを設けこれによって燃料ピンの動きを調べるためのものである。Fig.67はプレナム部のスケッチである。図中の各部分の照射前後の寸法測定の結果をTable 11に示す。表よりマーカーが一番大きく移動したのが棒Aであり、これはFig.64に示した様に棒Aの燃料の変形が起動時に一番大きかった事に対応している。起動時の燃料ピンの変形量についてはTable 12に示す結果が得られている(8)。

ところが棒Bは棒Aと同一のフラットペレットでありながらTable 11でみる様にマーカー変位が最小であった。この理由は明らかでないが恐らく燃料と被覆管の間にペレットのチップが落ちこんでこの為に燃料スタックが被覆管に対して固定化された為と考えられる。このTable 11の結果は棒Bの初期起動時の異常挙動に対応している。

B. 4.5 燃料中心温度の測定

測定結果

燃料棒の中心温度を棒Aと棒Bにつき測定した。Fig.68およびFig.69はその結果である。Fig.68は棒Aについて示したもので棒Bに比べてペレットの焼結温度が高い。図によれば棒Aでは燃焼度の進展と共に各線出力に対して燃料の中心温度が低下し10 GWd/t の程度で約300°C

(300W/cmにおいても)もの温度差が生じている。これに対してFig.69(棒B, 低温焼結)では逆に燃焼度の進展と共に温度の上昇が生じている。両図の比較から同じ線出力, 同じ燃焼度に対しては棒B(低温焼結ペレット)のほうが棒A(高温焼結ペレット)よりも高温になることがわかった。

FREG-3 コンピューターモデルとの照合結果

ギャップコンダクタンスにRESAR-41モデル(7), 焼きしまりにはRolstadらのモデル(10), そしてリロケーションを考慮したFREG-3による計算結果を実験結果と併せてFig.70に示す(11), 計算結果は実験結果(棒Aについての結果)と比較的良好一致を示した。

C. IFA-208とIFA-224との比較

C. 4.1 初期起動時の被覆管伸びに対する密度の効果

IFA-208の棒AとIFA-224の棒Aは共にペレットの形状がフラットで両者の主たる相違点はIFA-208棒A(以下208棒A)が95%TDの高密度なのにに対しIFA-224棒A(以下224棒A)は90%TDの低密度のペレットであることである。そこで両者の被覆管伸びを線出力に対してプロットした。その結果をFig.71に示す。高密度の208棒Aは低密度の224棒Aに比べて低出力側で被覆管伸びが小さいが高出力側にいくとその関係は逆転する。フラットペレットの場合, 密度差は変形にあまり寄与しなかった。

IFA-208の棒D(208棒D)とIFA-224の棒D(224棒D)は共にペレットの形状が両端ディッシュで両者の主たる相違点は上記と同様208棒Dが高密度(95%TD)に対し(224棒D)が低密度(90%TD)という点である。両者の被覆管伸びを線出力に対してプロットしたものをFig.72に示す。今度の場合も上記と同様に高密度のものは低密度のものに比べて低出力側で被覆管伸びが小さいが出力の上昇と共にそれが逆転した。全体的に高出力側で伸び変形に大きな差が生じた。つまり両端ディッシュでは密度差が変形に大きく寄与した。

低密度燃料と高密度燃料の間にはもう1つの特徴が見られた。それは被覆管の変形挙動に於て低密度燃料では高出力域になると早目に伸びが飽和してしまうのに対して、高密度燃料ではじわじわと伸びが継続する事である。(Fig.71の208棒Aと224棒A又は棒Dとの比較、もしくはFig.72, 208棒C又はDと224棒Dとの比較を参照)

以上を簡単にまとめておくと次の様になる。

- (I) 低密度の燃料での被覆管の変形量は高密度の燃料での被覆管変形量よりも小さい。
- (II) 低密度の燃料の被覆管変形量は出力増加と共に高密度の燃料のそれよりも早く飽和する。
- (III) 密度が変化した場合、被覆管変形に関してはその受ける影響はディッシュペレットの方がフラットペレットより大きい。

C. 4.2 被覆管伸びに対するペレットの形状効果

IFA-208(高出力、高密度燃料体)ではディッシュ付ペレットのPCIはフラットペレットのものより大きくはっきりとした差が生じたが、IFA-224(高出力、低密度燃料体)でははっきりとした差は生じなかった。

C. 4.3 中心温度に関する比較

IFA-208の中心温度測定結果をFig.73に示す。これとIFA-224の中心温度測定結果を比較すると以下の様なことがわかる。

- (I) 高密度燃料(IFA-208)の方が低密度燃料(IFA-224)よりも中心温度は幾分高目ではあるが顕著でない。
- (II) 高密度燃料では燃焼度の進展と共に中心温度が高い方に移行した。低密度燃料では燃焼度の進展と共に高温焼結のものは中心温度が低下し、低温焼結のものは中心温度が上昇した。

5. 結 言

5.1 IFA-208

中心孔付のフラット、片端ディッシュ、両端ディッシュペレットを平均線出力 615W/cm で平均燃焼度 5.1GWd/t まで照射した。照射後この燃料は優秀な寸法安定性を有していた事が示された。燃料の詳細な挙動は下記の通りであった。

- (1) 第1出力サイクル時、ペレット-被覆管の相互作用 (PCI) はディッシュペレットで強く、フラットペレットで弱かった。燃焼の進展と共に PCI の開始は高線出側に移行する傾向にあった。
が 5.1GWd/t まで
- (2) 第1出力サイクル時から全部の棒にペレットスタックの収縮 (焼きしまり) が観察された。
- (3) 燃料棒の低線出力部分ではペレットの中心孔の径がスウェリングの為に減少した。ディッシュペレットの端面では塑性変形が生じた。高線出力部分では、中心孔径の減少がフラットペレットで生じたが、片端、両端ディッシュペレットでは中心孔径の増加が生じた。ディッシュボイドには UO_2 がつまっているが、これは主として蒸発-付着機構によるものである。
- (4) 燃料中心温度は燃焼度の進展においてもあまり変わらなかった。

5.2 IFA-224

中実および中心孔付のフラット、両端ディッシュペレットを平均線出力 590W/cm で、平均燃焼度 118GWd/t まで照射した。照射後大きな欠陥は観察されなかったが棒Cと棒Dに小さなサンバーストブリスターが2箇所みられた。被覆管の歪は非常に小さくリッジ変形はなかった。燃料の詳細な挙動は下記の通りであった。

- (1) ペレット-被覆管の相互作用 (PCI) に関するパラメーターの効果は次の通りである。
 - (a) ディッシュペレットとフラットペレットの形状による差は明確ではなかった。
 - (b) 低温焼結ペレットは高温焼結したものより大きな PCI を生ずる。
 - (c) ペレットの中心孔は PCI を緩和させる傾向にある。
- (2) 棒B (低温焼結、中実、フラットペレット) では第1出力サイクル時に異常に大きな伸び変形を示した。
- (3) 燃料中心温度は燃焼度の進展と共に変化し低温焼結ペレットでは中心温度が上昇し、高温焼結のものでは低下した。FREG3 コンピューターモデルによる結果は実験結果と比較的よい一致を示した。

5.3 IFA-208 (高密度燃料) / IFA-224 (低密度燃料) との比較

IFA-208/224は前者が高線出力高ペレット密度燃料なのに対し後者は高線出力低ペレット密度燃料であるので、両者の比較により高線出力下での PCI に及ぼすペレット密度の効果を

知ることができた。その結果は、

- (1) 被覆管変形量は低密度燃料のものが高密度のそれに比較して小さくかつ早く飽和する。
- (2) ディッシュペレットはフラットペレットよりも密度変化の影響を大きく受ける。
- (3) 燃料中心温度は低密度燃料のほうが高密度のそれに比較してひくめであるが差は顕著ではない。

また燃焼度の進展と共に高密度燃料では中心温度が高くなったが低密度燃料では焼結の程度によって相違が生じた。

参 考 文 献

- (1) M. Ichikawa et al.: Irradiation, Post-Irradiation Examination, and Evaluation of IFA-106, 107, 149 and 150, (1975) (HPR 196).
- (2) G. Kjaerheim and E. Rolstad, "In core study of the mechanical interaction between fuel and cladding" Nucl. Appl. Technol., 7 (1969) 347.
- (3) K.D. Olshausen, "An electronic processing system for data from post-irradiation examination of fuel element" Atomkernenergie 19 (1972) 241.
- (4) I. Amato, R.L. Colombo and A.M. Protti, "Pore growth during solarization of sintered UO_2 " J. Nucl. Mat., 13 (1964) 265.
- (5) R.F. Canon, J.T.A. Roberts and R.J. Beals, "Deformation of UO_2 at high temperature" J. Amer. Cer. Soc., 54 (1971) 105.
- (6) J.A.L. Robertson, A.M. Ross, M.J.F. Notely and J.R. MacEwan "Temperature distribution in UO_2 fuel elements" J. Nucl. Mat., 7 (1962) 225.
- (7) H.J. Matzke and C. Ronchi, "Spaltgasverhalten in theroretische dichtem Brennstoff" KFK-1400 (1971), XVII.
- (8) Tobioka; IDG 1862 (24/9, 1972).
- (9) Westinghouse Nucl. Energy System, "Reference Safety Analysis Report (RESAR-41), Vol. II, Docket-STN-50480-2 (1973).
- (10) E. Rolstad et al., "Measurements of the Length Changes of UO_2 Fuel Pellets During Irradiation" Enlarged HPG Meeting on Computer Control and Fuel Research, (1974) June 4-7.
- (11) Y. Harayama; JAERI-M 6878.

Table 1 Characteristics and Experimental Design of IFA-208 and -224

IFA-No.	208	224
experimental objectives	PCMI high density high power	PCMI low density high power
fuel type	BWR type long size Zry-2 cladding	BWR type long size Zry-2 cladding
characteristics and experimental parameter of fuel	pellet shape (all pellets having centre hole)	pellet shape pellet sintering temp.(1400/1600°C)
shape and density of pellets	95% TD flat dish with one end dish with both end	90% TD flat dish with both end
instrumentation	EC EF TF	EC EF TF
power(W/cm)	ave.615 max.770	ave.590
attained burnups (MWd/tUO ₂)	ave.6300	ave.11 900
PIE	dimensional measurement of fuel pin metallograph gas analysis	dimensional measurement of fuel pin metallograph
irradiation period	1.1971-10.1971	3.1972-9.1973

Table 2 Chemical Analysis of the Pellet of IFA-208

Element	Specification	Results (U. basis except Dy ₂ O ₃)		
		No.1(1)	No.2(2)	No.3(3)
Al	< 500 ppm	< 14 ppm	< 14 ppm	-
Ag	< 1 "	< 0.3 "	< 0.3 "	-
B	< 1 "	< 0.2 "	< 0.2 "	-
C	< 400 "	80 "	70 "	-
Ca	< 200 "	< 20 "	< 20 "	-
Cd	< 1 "	< 0.3 "	< 0.3 "	-
Cl	< 25 "	< 10 "	< 10 "	-
Cr	< 30 "	< 8 "	< 8 "	-
Cu	< 10 "	< 5 "	< 5 "	-
F	< 25 "	< 10 "	< 10 "	-
Fe	< 500 "	60 "	65 "	-
Mg	< 100 "	< 2 "	< 2 "	-
Mo	< 25 "	< 3 "	< 3 "	-
N	< 200 "	< 50 "	< 50 "	-
Ni	< 70 "	10 "	10 "	-
Pb	< 5 "	< 1 "	< 1 "	-
Si	< 200 "	75 "	65 "	-
Sn	< 20 "	< 1 "	< 1 "	-
O/U Ratio	2.00 - 2.03	2.009	2.010	-
Dy ₂ O ₃ ⁽⁴⁾	4 ± 0.1%	-	-	3.96%

Note: (1) Sample was chosen from 6 % U235 pellets not contain Dy₂O₃

(2) Sample was chosen from 7 % U235 pellets.

(3) Sample was chosen from 6 % U235 pellets contain Dy₂O₃

(4) UO₂ pellet basis.

Table 3 Chemical Analysis of the Pellet of IFA-224
(All measured in ppm)

Element	7.0w/o	7.0w/o
	high temp sintered	low temp sintered
Al	21	23
Ag	0.7	0.7
B	0.2	0.3
C	9.1	14.6
Ca	17	16
Cd	0.08	0.17
Cl	10	12
Cr	40.0	65.0
Cu	5.2	13.1
F	10	12
Fe	260	392
Mg	19	10
Mo	1.20	0.80
N	71	51
Ni	37	57
Pb	0.8	1.0
Si	11	12
Sn	4.6	4.0
O/U	2.00	2.00
U(%)	88.11	88.11

Table 4 Fuel Pin Length Increase (IFA-208)

Rod No.	Length(in units 0.01 mm)		
	Pre-	Post-	Increase
B(F)	+0	+65	+65
C(D)	-7	+68	+75
D(DD)	+2	+89	+87

Table 5 Fuel Pin Diameter Increase (IFA-208)

Rod No.	Orientation (degree)	Diameter(mm)		Increase $\Delta D(\mu m)$
		pre-	post-	
A(F)	0	14.480	14.480	0
	90	14.485	14.485	0
B(F)	0	14.485	14.490	5
	90	14.475	14.485	10
C(D)	0	14.470	14.475	5
	90	14.465	14.480	15
D(DD)	0	14.480	14.490	10
	90	14.475	14.485	10

Table 6 Fuel Pin Length Increase (IFA-224)

Rod No.	Pre-irradiation	Post-irradiation	Increase
	L(mm)	L(mm)	$\Delta L(mm)$
A	1671.96	1673.10	1.14
B	1672.08	1673.12	1.04
C	1667.93	1668.92	0.99
D	1667.96	1669.10	1.14

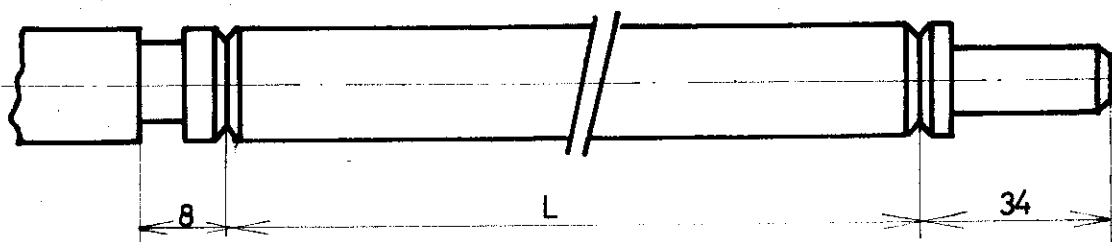


Table 7 Power Distribution in the IFA-208 Fuel Rods and Local
Form Factors of Samples Cut for Destructive PIE

Power Distribution in the IFA-208 Fuel Rods

Rod No.	Krad	$\bar{q}$ (W/cm)
A	1.02	623
B	0.99	605
C	1.01	616
D	0.98	598

Cutting of Samples

Rod No.	Position (mm)	Kloc	q (W/cm)
A	731-747	1.28	798
	747-752	1.26	785
B	186-196	1.09	660
	196-212	1.12	677
	494-504	1.35	816
	504-520	1.35	816
	895-911	1.06	640
	165-175	1.04	640
C	175-191	1.06	653
	513-523	1.34	825
	523-539	1.34	825
	892-908	1.09	672
	175-186	1.08	645
D	186-202	1.10	658
	507-517	1.35	807
	517-533	1.35	807
	930-946	1.06	635

Krad: linear heat rating averaged over particular pin, divided by linear heat rating averaged over the bundle

Kloc: linear heat rating at a particular axial position, divided by linear heat rating averaged over that pin

Table 8 Power Distribution in the IFA-224 Fuel Rods (Gamma Scanning Results) and Local Form Factors of Samples Cut for Destructive PIE

Gamma Scanning Results			
Rod No.	Axial form factor	Radial form factor	
A	1.32	1.010	
B	1.29	1.046	
C	1.37	0.980	
D	1.32	0.964	

Rod No.	Axial position(mm)	Form factor	Linear heat rating(W/cm)
A	88	0.958	423
	537	1.320	583
	783	1.295	572
B	88	1.014	448
	623	1.314	581
	783	1.221	539
	950	1.070	473
C	1368	0.470	208
	500	1.333	589
D	511	1.333	589
	564	1.267	560

The linear heat rating given in the last column was calculated assuming an assembly power of $Q_A = 260$ kW, corresponding to an overall average linear heat rating of 442 W/cm.

Table 9 Results of Puncturing

	Rod No.			
	A	B	C	D
Rod pressure(kPa)	243	91	203	181
Rod free volume(cm ³)	31.5	35.3	37.7	40.5
Amount of gas(Ncm ³)	69.5	29.3	70.0	66.6

Table 10 Results of Fission Gas Analysis

Rod No.	N ₂ (mg)	O ₂ (mg)	Krypton at%				Kr(mg)	Xenon at%				Xe(mg)
			83	84	85	86		131	132	134	136	
A	1.31	0.097	14.55	27.31	7.11	51.03	29.3	11.72	17.38	30.01	40.79	242
B	31.2	<0.02	14.74	27.33	7.05	50.88	6.72	11.97	18.34	29.76	39.92	72.9
C	1.20	0.126	14.61	27.33	7.01	51.05	29.7	11.85	17.79	29.94	40.41	233
D	1.32	0.108	14.46	27.20	6.98	51.36	23.6	12.08	17.41	30.22	40.58	199

Table 11 Results of X-ray Photograph (All measures in mm)

Rod No.	Pre-irradiation			Post-irradiation			ΔA	ΔD
	A	C	D	A	C	D		
A	26.8	0.2	77.0	16.9	14.4	81.0	9.9	4.0
B	28.0	0	77.8	22.6	9.6	81.9	5.4	4.1
C	29.7	0	79.9	20.7	10.5	81.9	9.0	2.0
D	28.6	0.3	78.8	22.6	9.0	81.4	6.0	2.6

ΔA represents the (upward) displacement of the movement marker, while ΔD is the (downward) displacement of the upper end of the stack.

Table 12 Maximum Elongations During First Start-up (In-pile)

Rod No.	EF+EC(mm)	EC(mm)	EF=(EF+EC)-EC
A	6.5	0.40	6.10
B	4.0	0.76	3.24
C	5.2	0.34	4.86
D	4.4	0.61	3.79

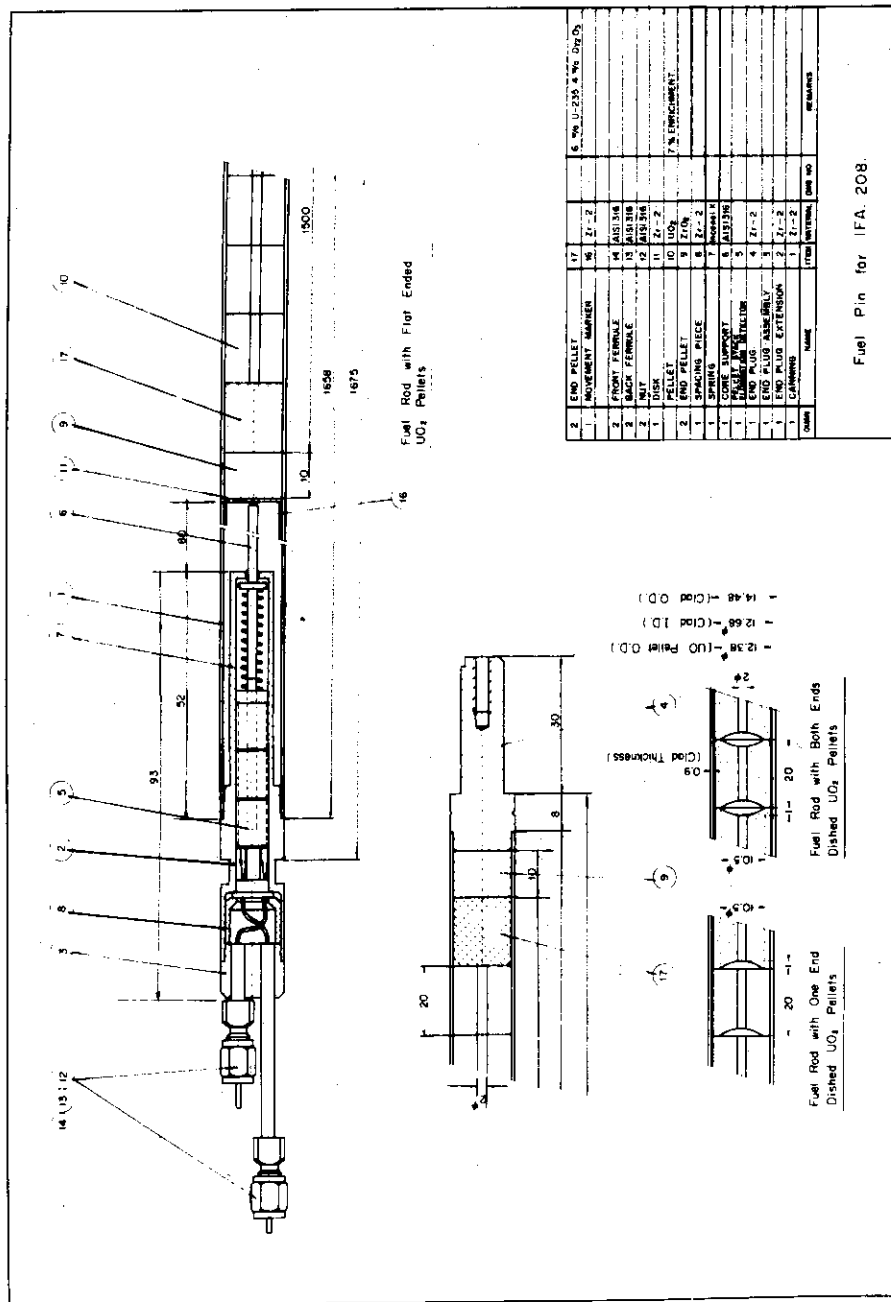


Fig. 1 Schematic drawing of the fuel pin of IFA-208

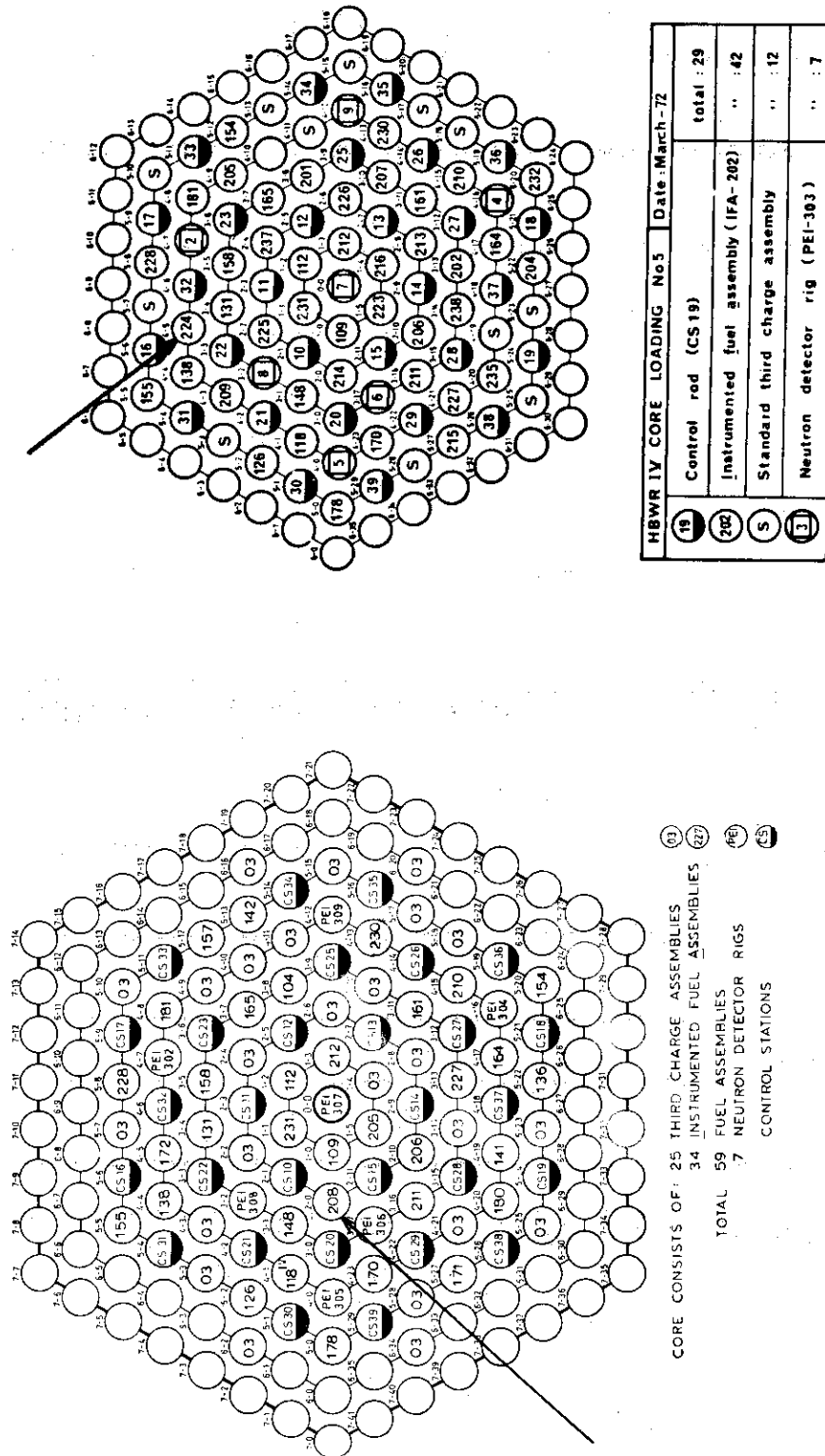


Fig. 3 Core position of IFA-208
(HBWR core loading No.24 from February 1, 1971)

Fig. 5 Core position of IFA-224
(HBWR core loading No.5 from March 1972)

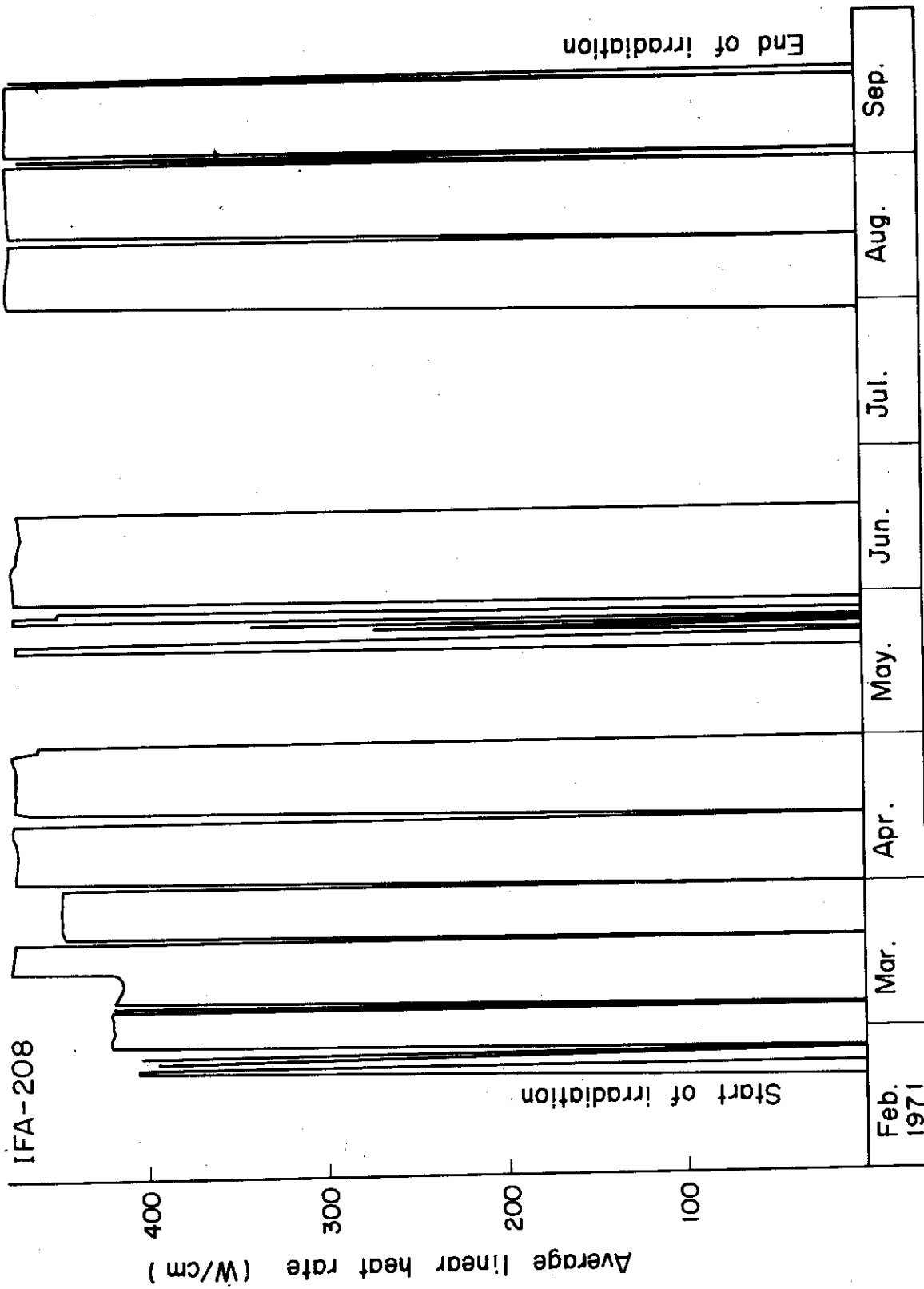
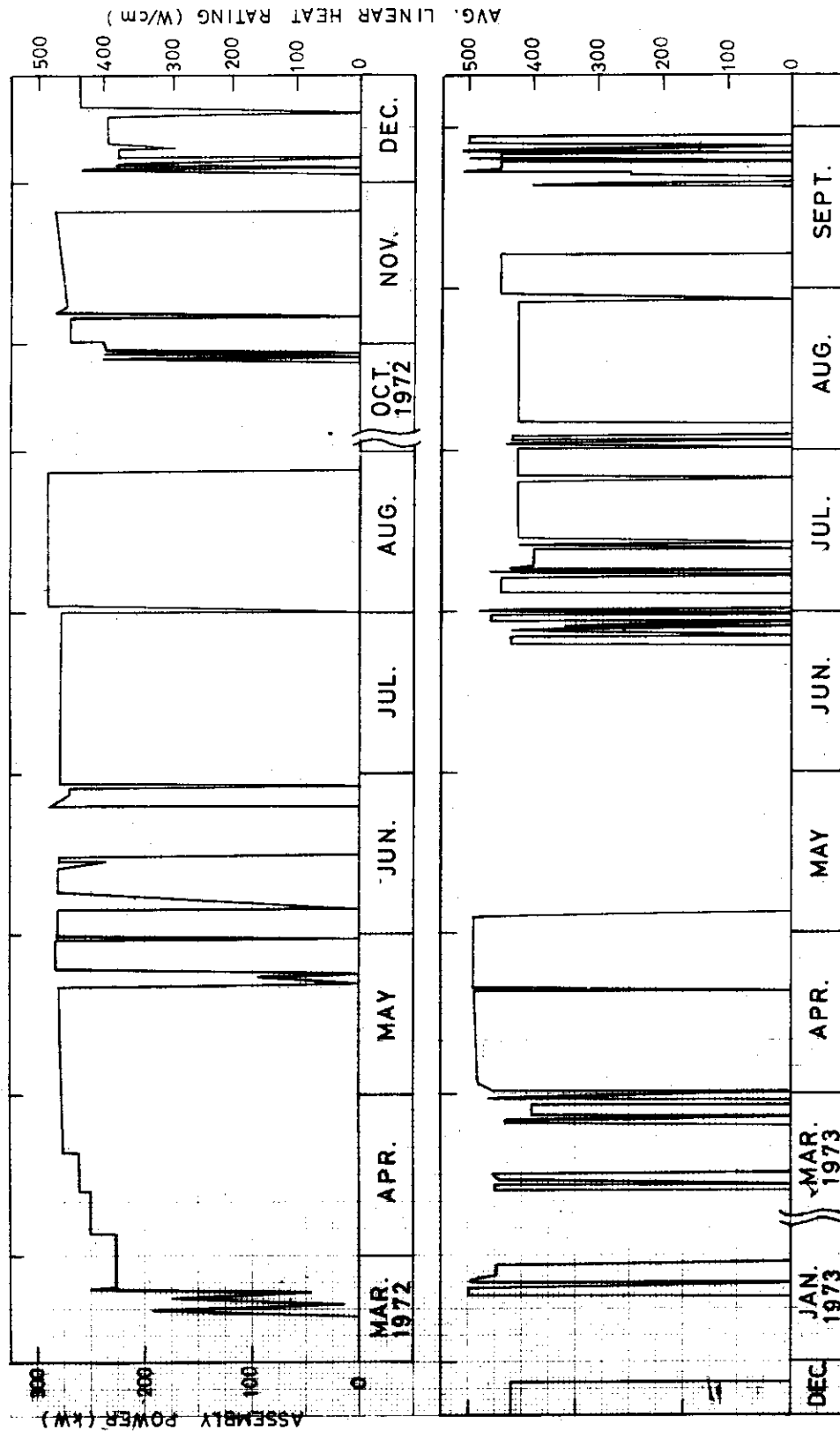


Fig. 4 Power history of fuel of IFA-208; irradiation period covered from Feb. to Sept. 1971



POWER HISTORY OF IFA-224

Fig. 6 Power history of fuel of IFA-224; irradiation period covered from Mar. 1972 to Sept. 1973

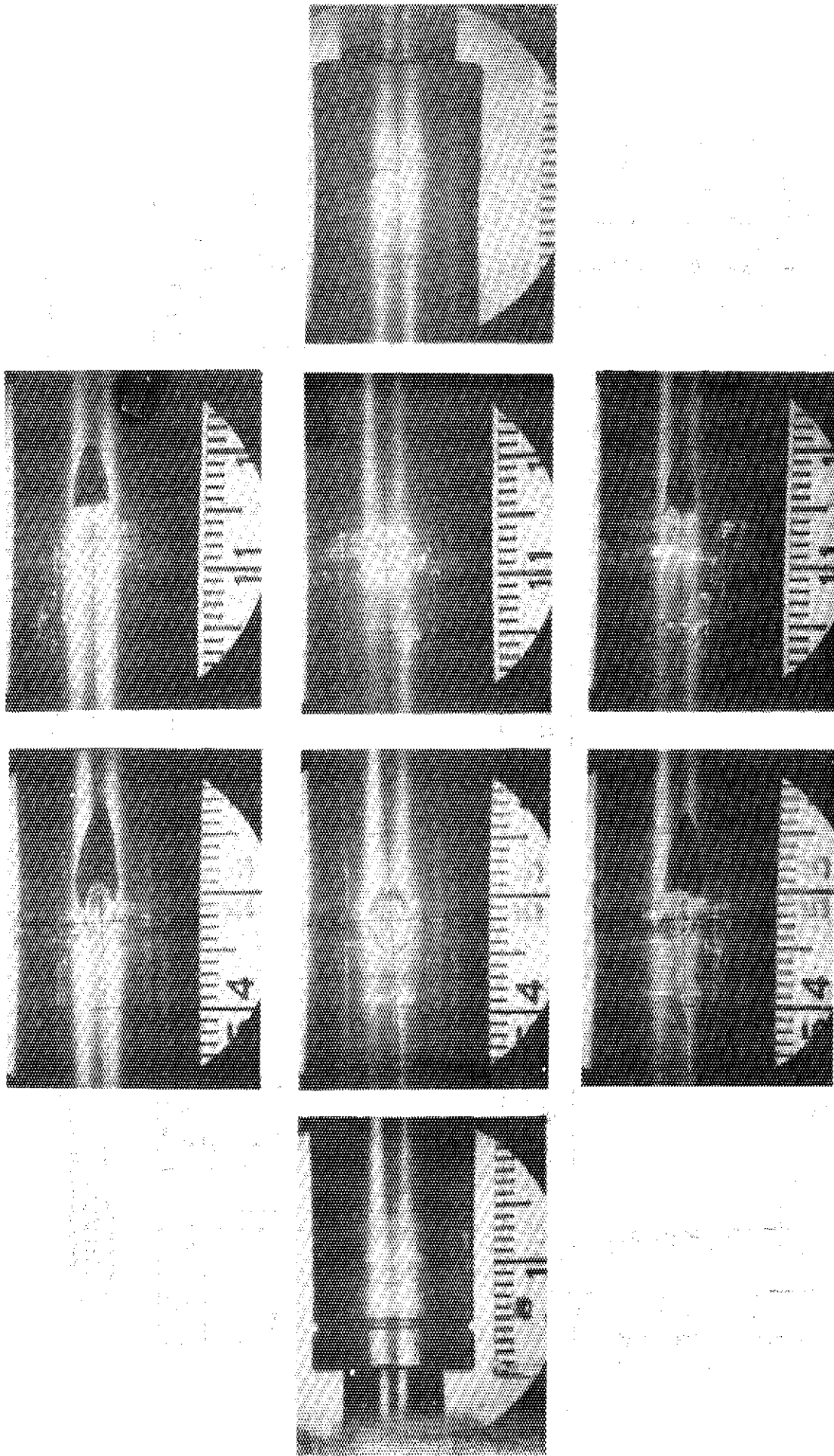


Fig. 7 Weld and spacer regions on Rod C (one and dish), mag. $\times 2$



Fig. 8 Upper 45°-deposit
on Rod C, mag.×8



Fig. 9 Lower 45°-deposit on Rod
C in profile, mag.×8



Fig. 10 Upper 315°-deposit
on Rod C in profile,
mag.×8

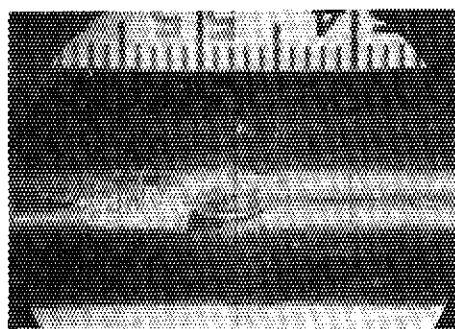


Fig. 11 Same region as in Fig. 9,
after scraping-off most
of the deposit, mag.×2

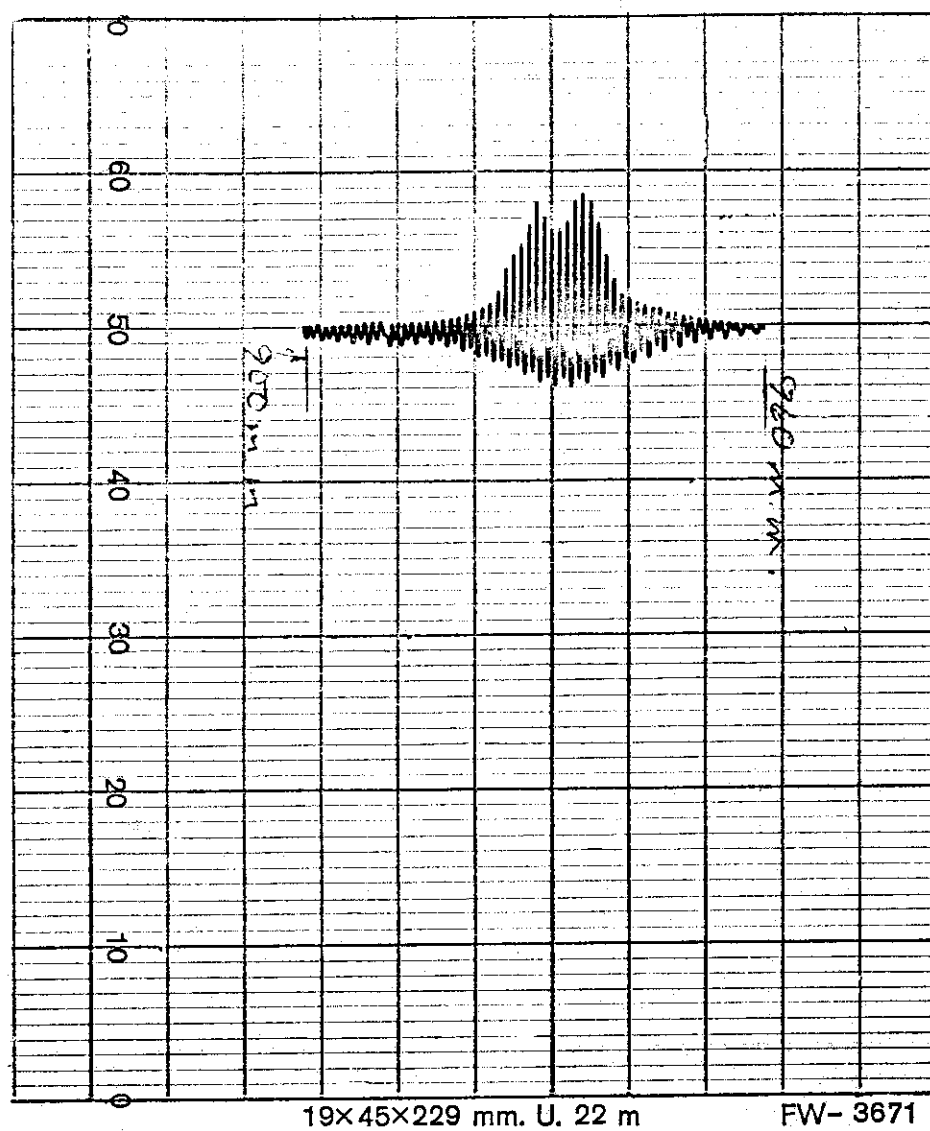


Fig. 12 Spiral diameter curve over range 900-960 mm, Rod C (one end dish), IFA-224

Sensitivity : 10 μ /sc. div.

Axial scale : 1:1 (10 mm/sc. div.)

Pitch : 2 mm

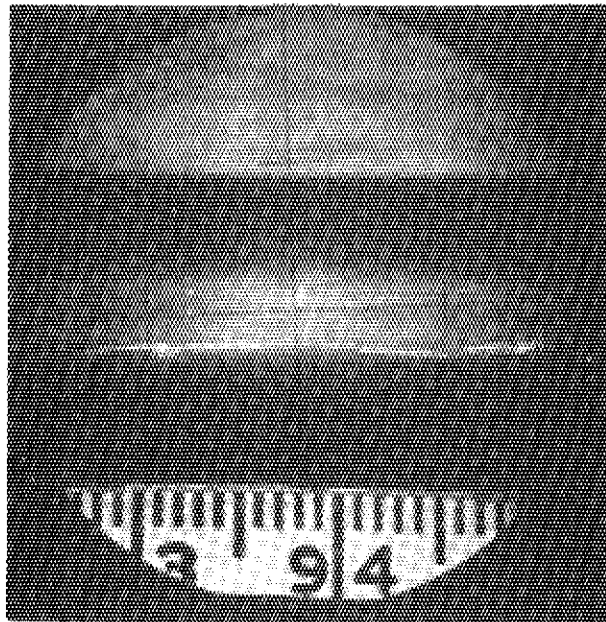


Fig. 13 Area of sunburst blister found during dimensional measurements, Rod No.C, IFA-224, 937 mm, 60°

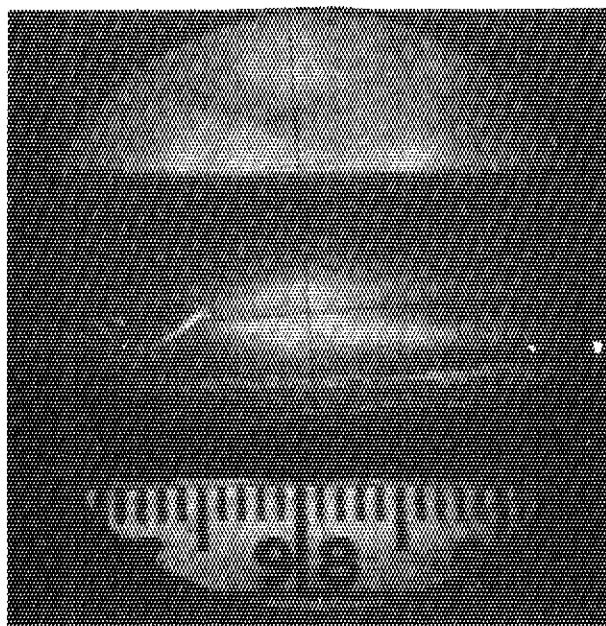


Fig. 14 Area of sunburst blister found during dimensional measurements, Rod C, IFA-224, 980 mm, 270°

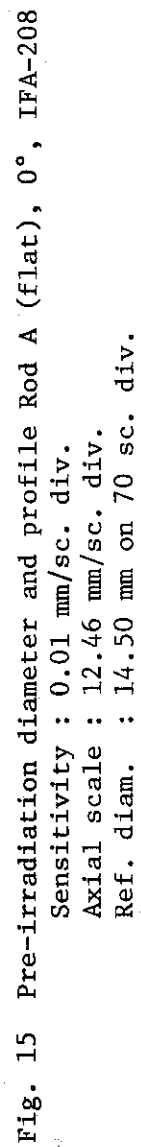


Fig. 15 Pre-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-208

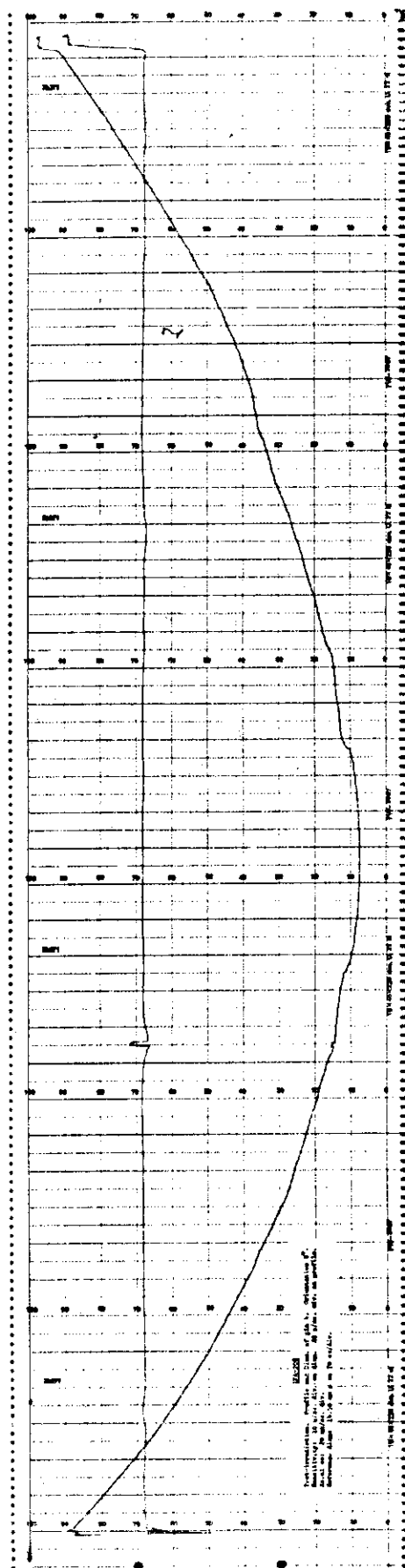


Fig. 16 Post-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-208

Sensitivity : 10 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$ on diameter

20 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$ on profile

Axial scale : 20 mm/sc. div.

Reference diam. : 14.50 mm on 70 sc. div.

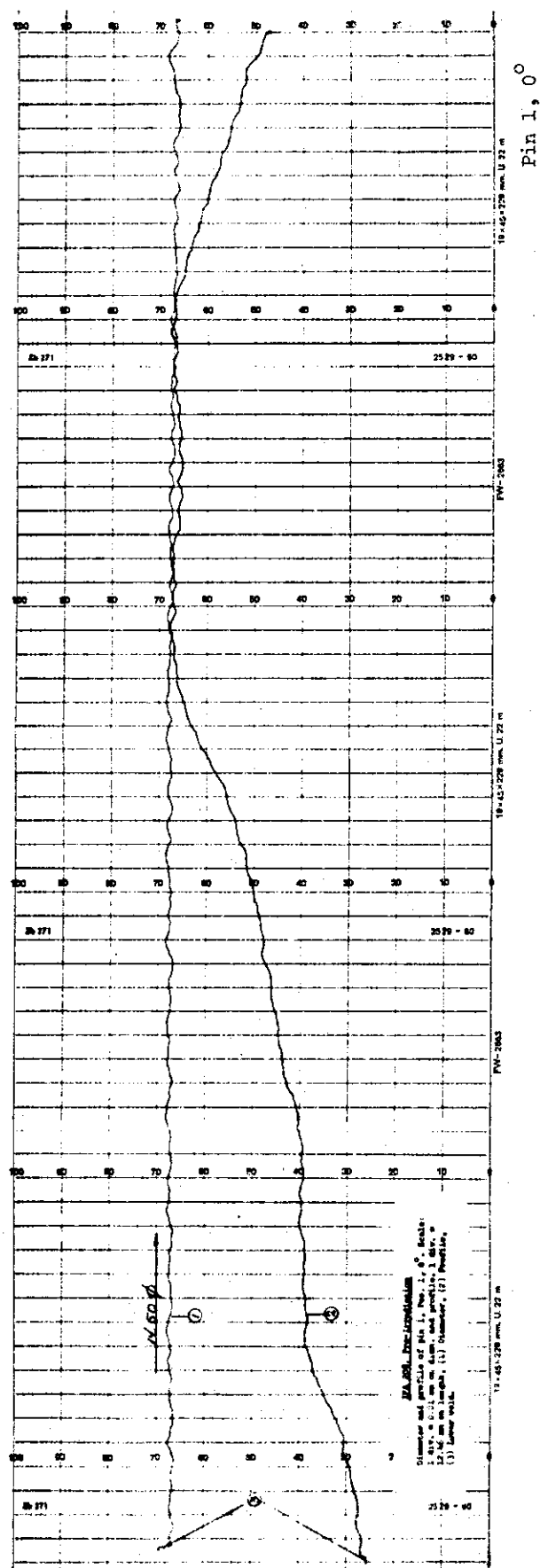


Fig. 17 Pre-irradiation diameter and profile Rod D (both end dish) 10°, IFA-208

Sensitivity : 0.01 mm/sc. div.
Axial scale : 12.46 mm/sc. div.
Ref. diam. : 14.50 mm on 70 sc. div.

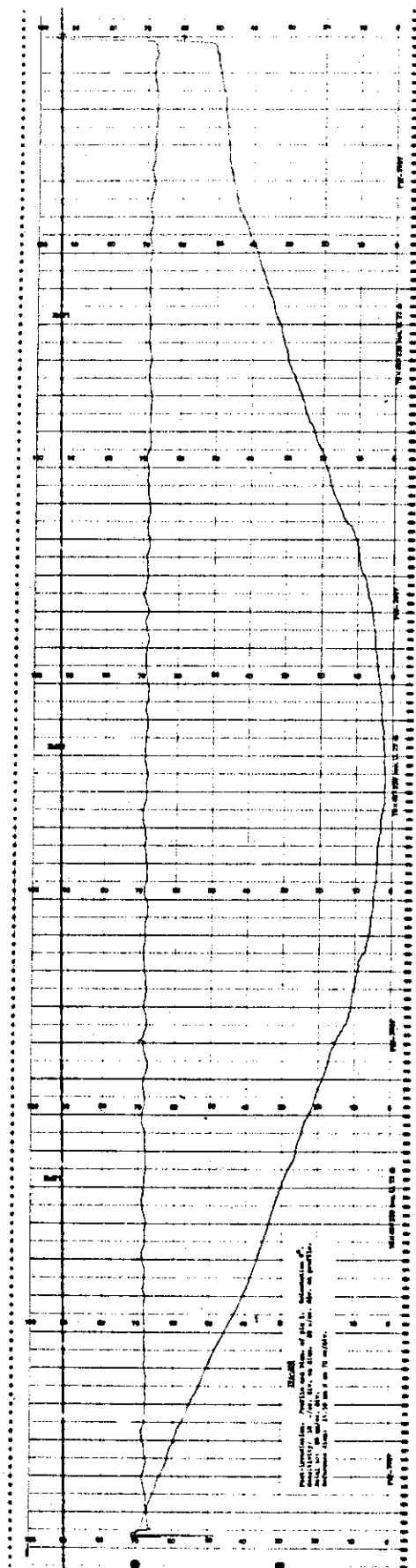


Fig. 18 Post-irradiation diameter and profile Rod D (both end dish),
0°, IFA-208

Sensitivity : 10 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$ on diameter
20 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$ on profile

Axial scale : 20 mm/sc. div.

Ref. diam. : 14.50 mm on 70 sc. div.

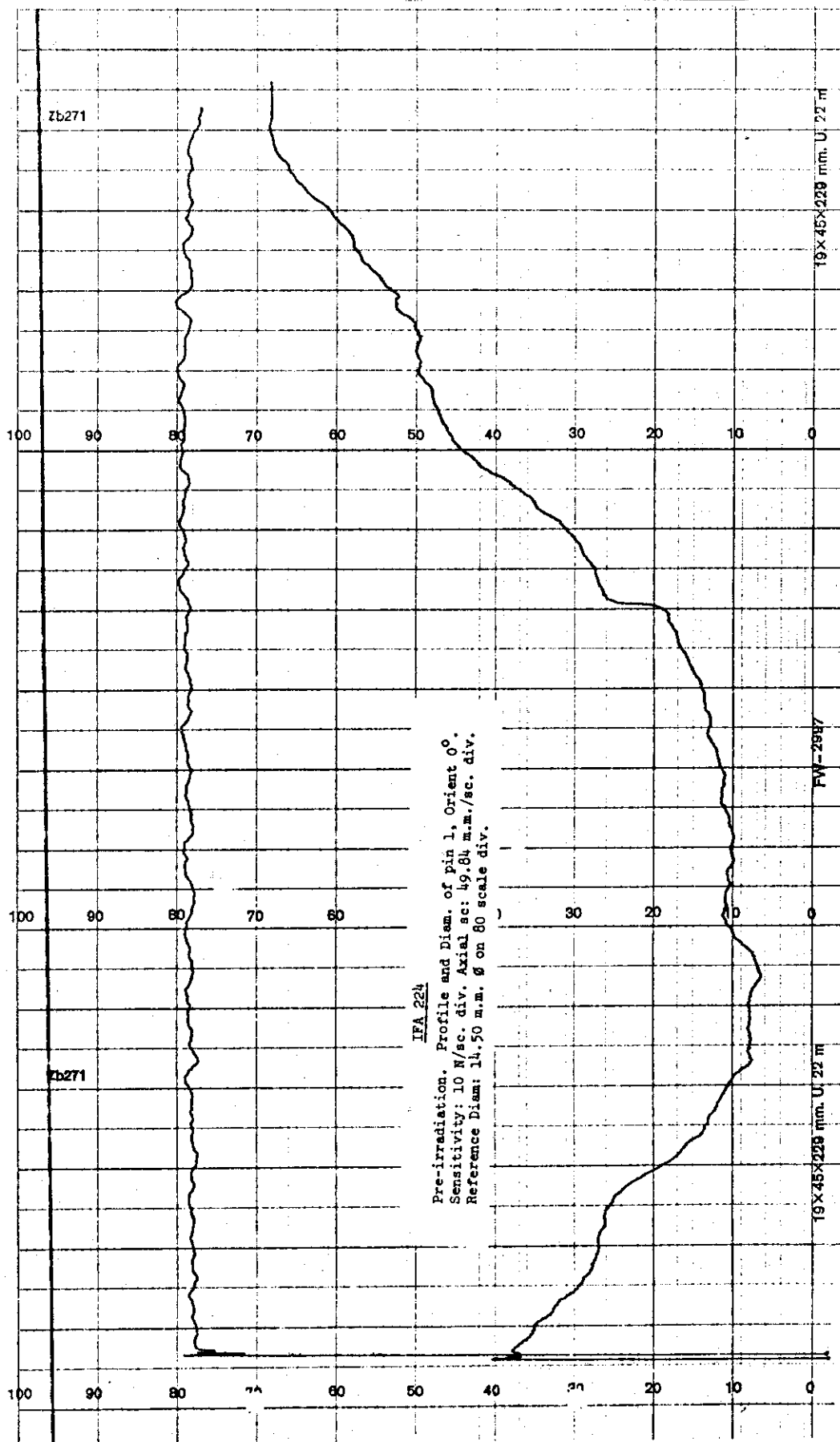


Fig. 19 Pre-irradiation diameter and profile Rod A (Flat), 0°, IFA-224
Sensitivity : 10 N/sc. div.
Axial scale : 49.84 mm/sc. div.
Ref. diam. : 14.50 mm on 80 sc. div.

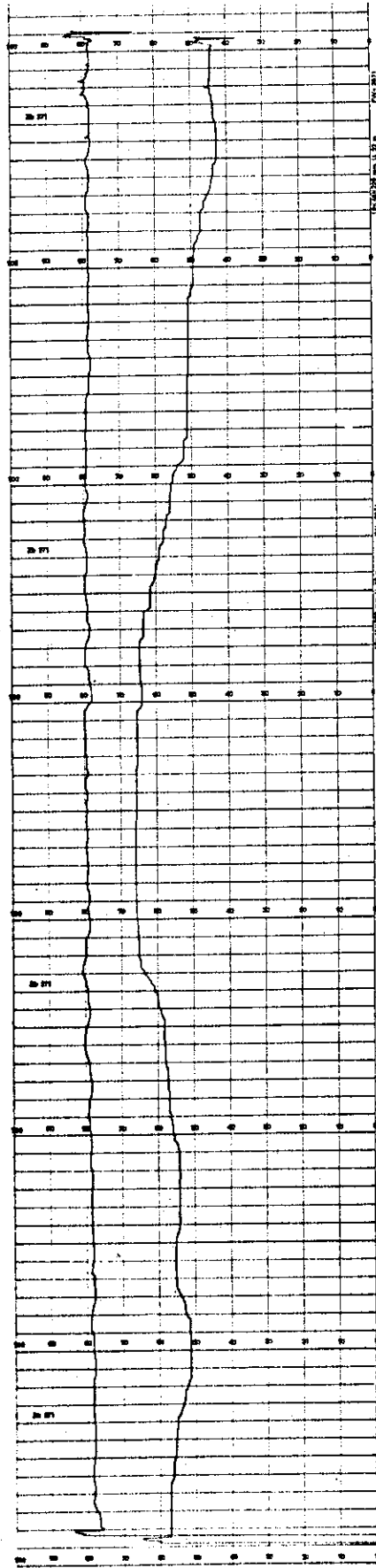


Fig. 20 Post-irradiation diameter and profile Rod A (flat), 0°, IFA-224

Sensitivity : 10 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$

Axial scale : 20 mm/sc. div.

Ref. diam. : 14.3 mm on 60 sc. div.

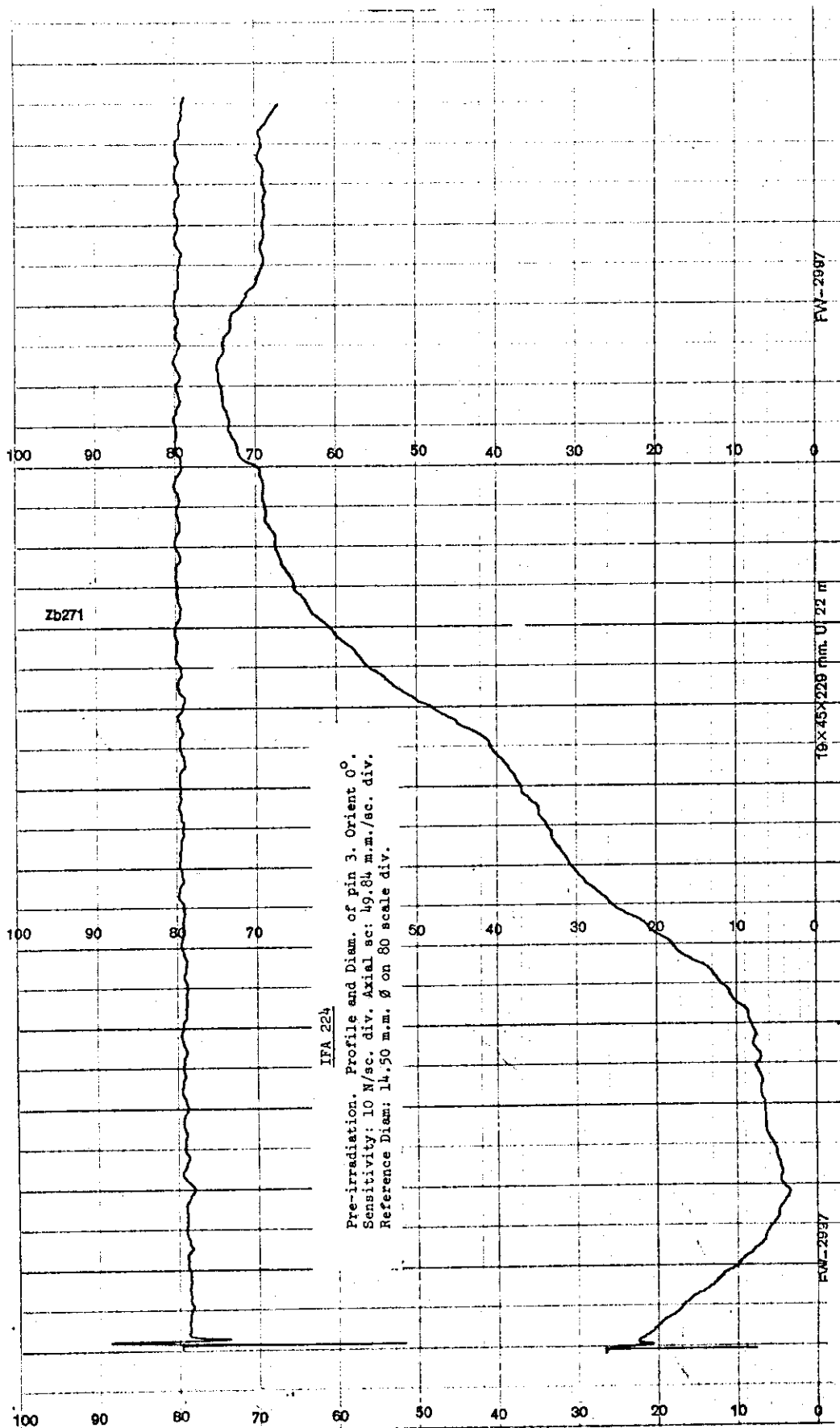


Fig. 21 Pre-irradiation diameter and profile Rod C (both end dish),
0°, IFA-224

Sensitivity : 10 N/sc. div.
Axial scale : 49.84 mm/sc. div.
Ref. diam. : 14.50 mm on 80 sc. div.

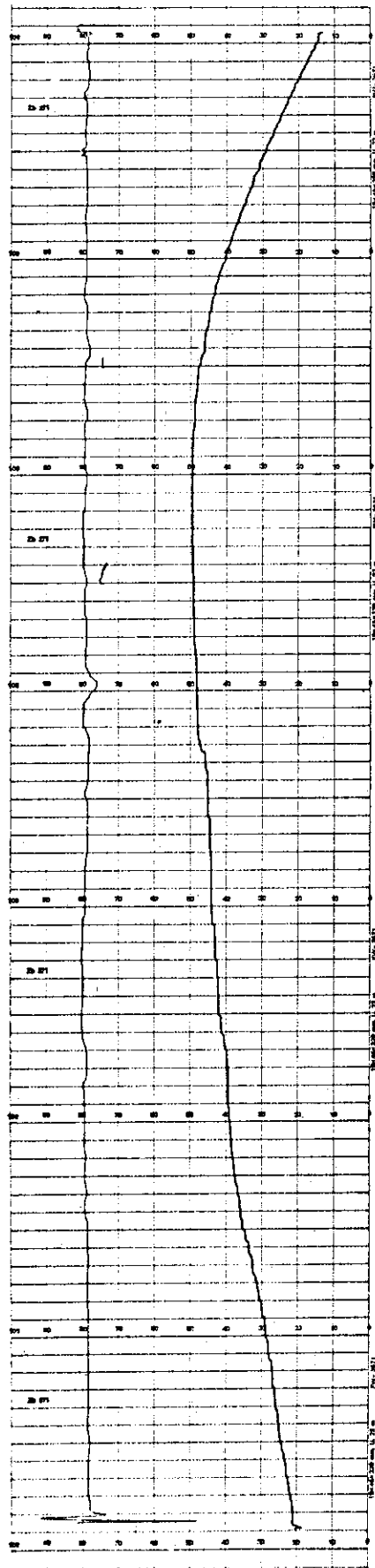


Fig. 22 Post-irradiation diameter and profile Rod C (both end dish),
0°, IFA-224

Sensitivity : 10 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$ on diameter

50 $\mu\text{m}/\text{sc. div.}$ on profile

Axial scale : 20 mm/sc. div.

Ref. diam. : 14.3 mm on 60 sc. div.

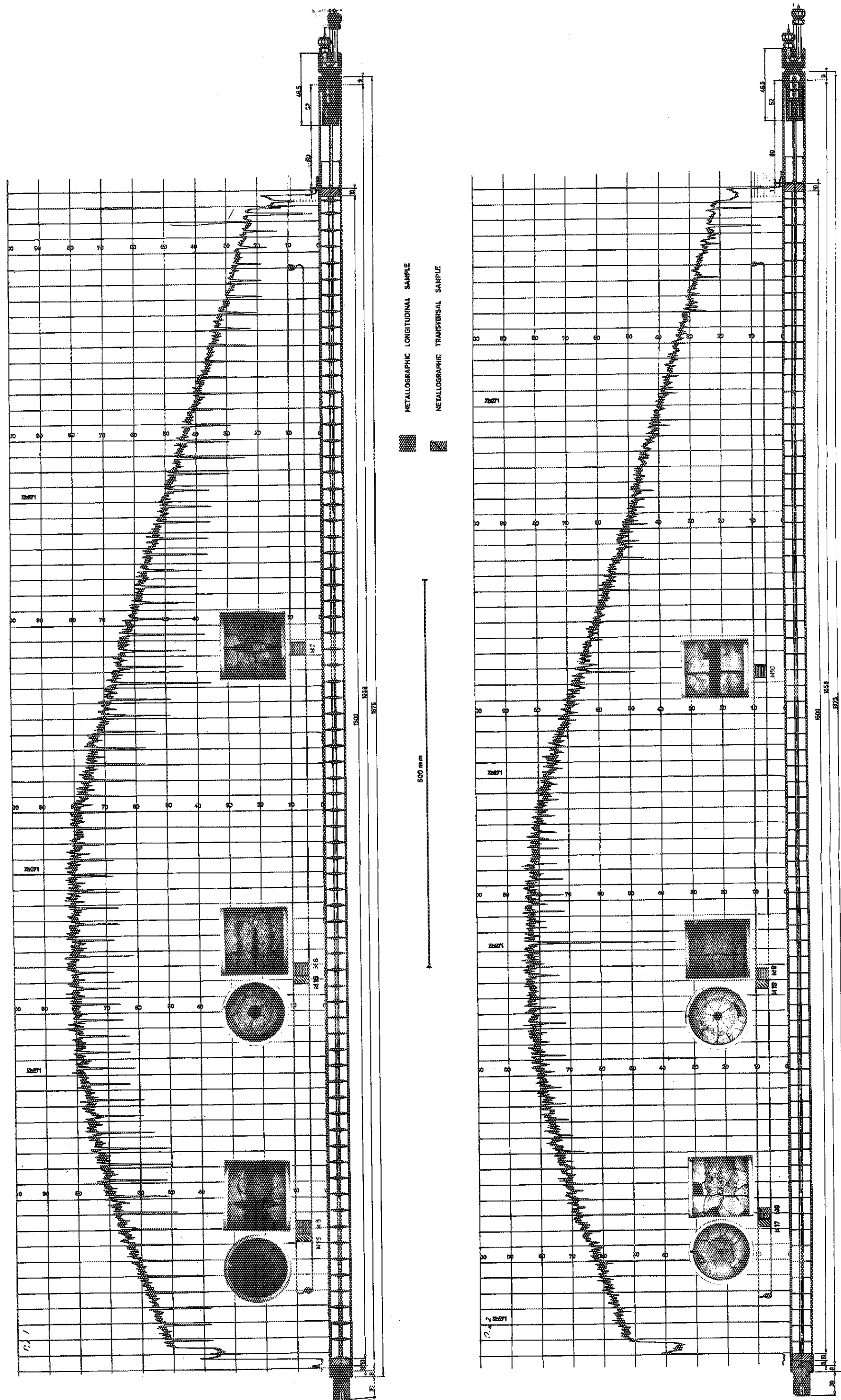
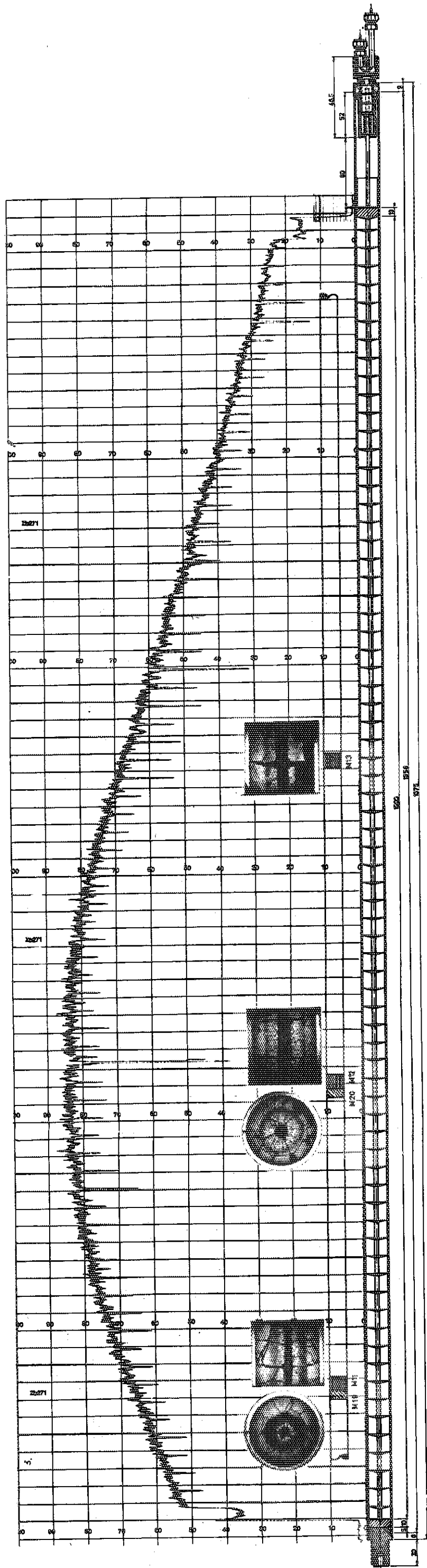


Fig. 23 Axial gamma scans (Zr 95/Nb 95) and sample location; upper Rod D (both end dish) and lower Rod B (flat), IFA-208



METALLOGRAPHIC LONGITUDINAL SAMPLE
 METALLOGRAPHIC TRANSVERSAL SAMPLE
 BURN-UP SAMPLE

100 mm

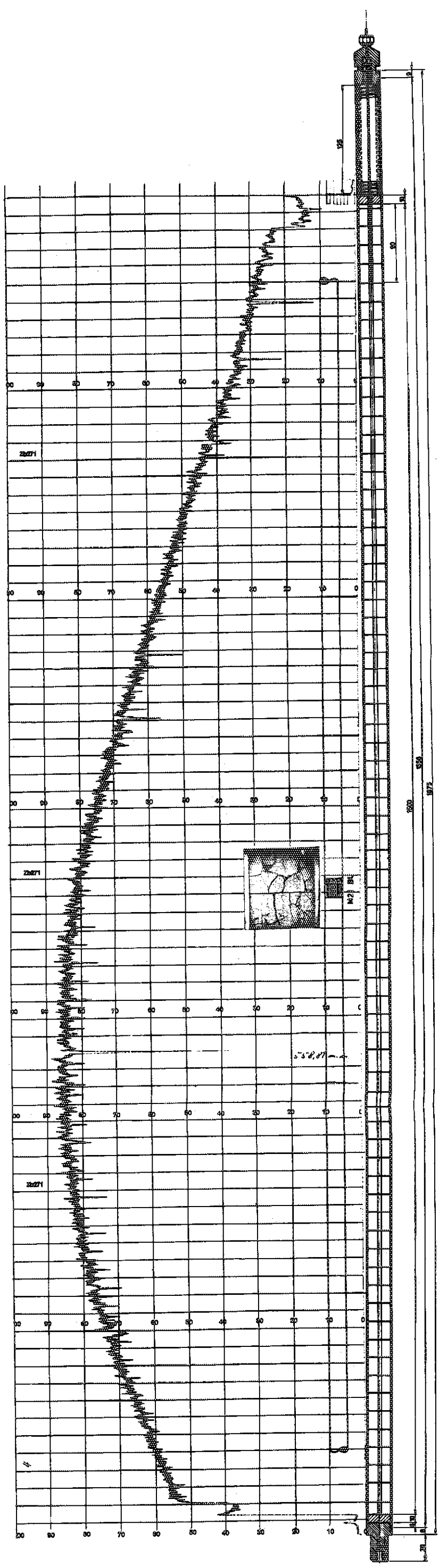


Fig. 24 Axial gamma scans (Zr 95/Nb 95) and sample location; upper Rod C (one end dish) and lower Rod A (flat), IFA-208

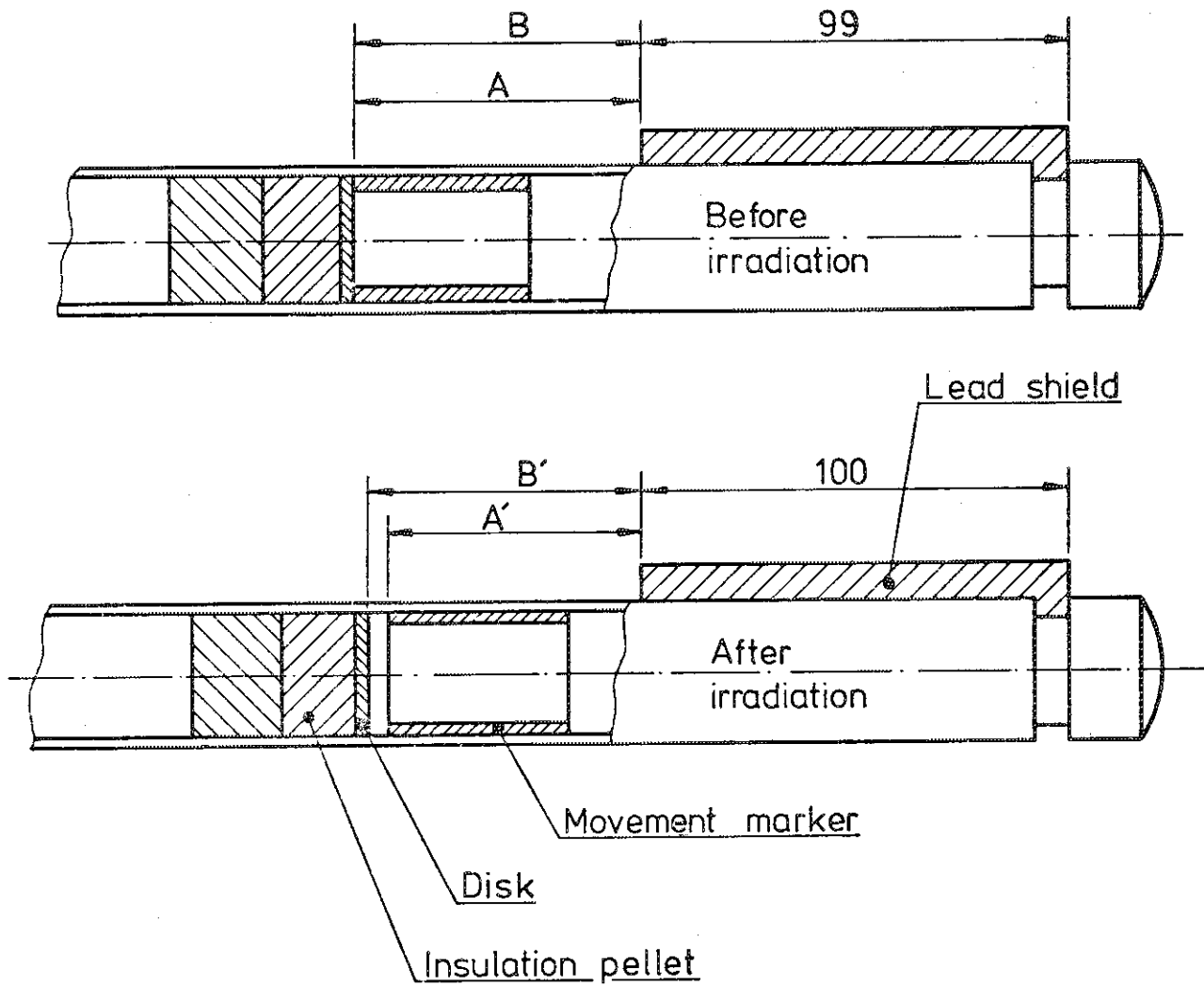


Fig. 25 Arrangement for X-ray photography, IFA-208

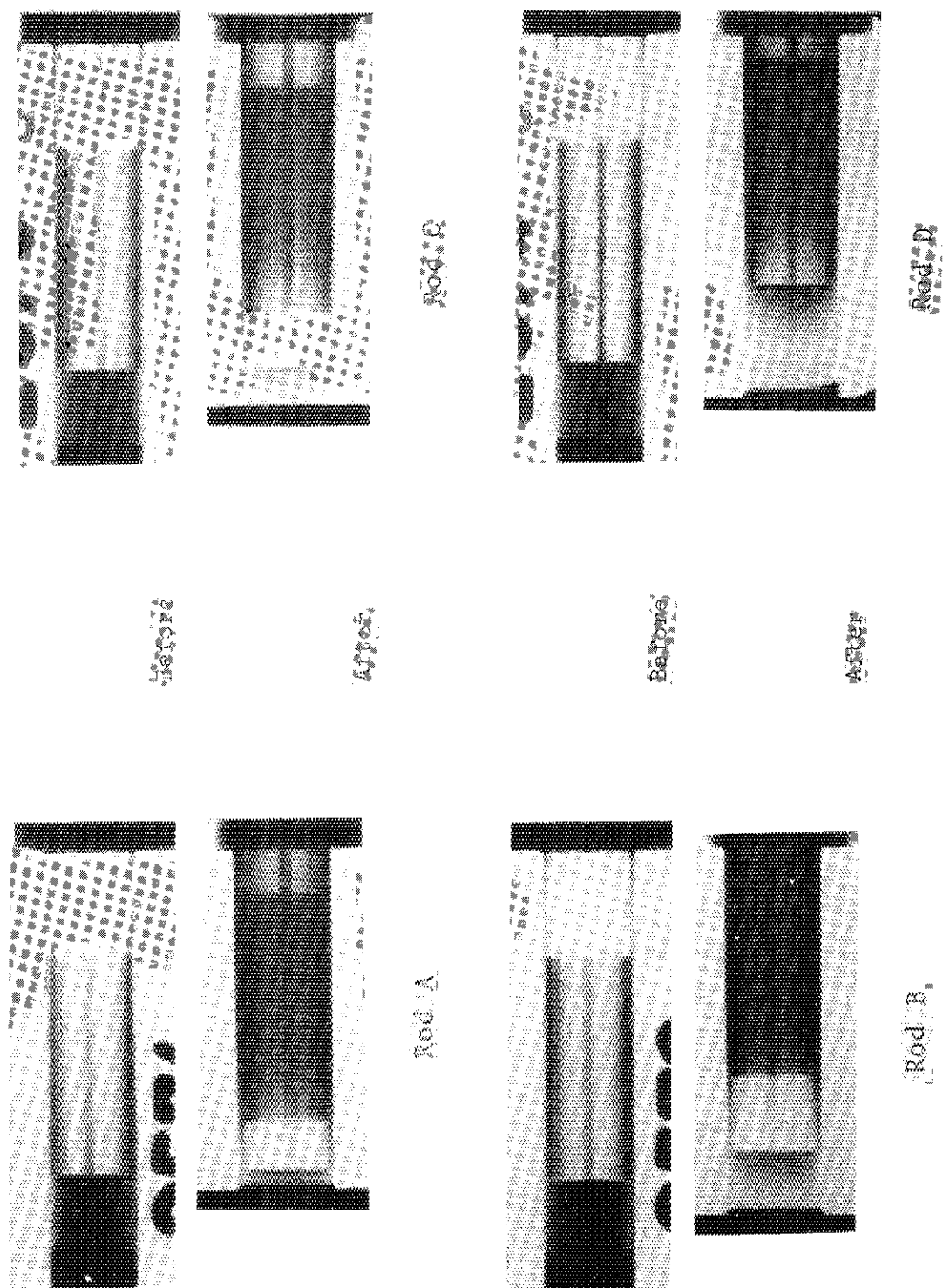


Fig. 26 X-ray pictures of plenum region, IFA-208

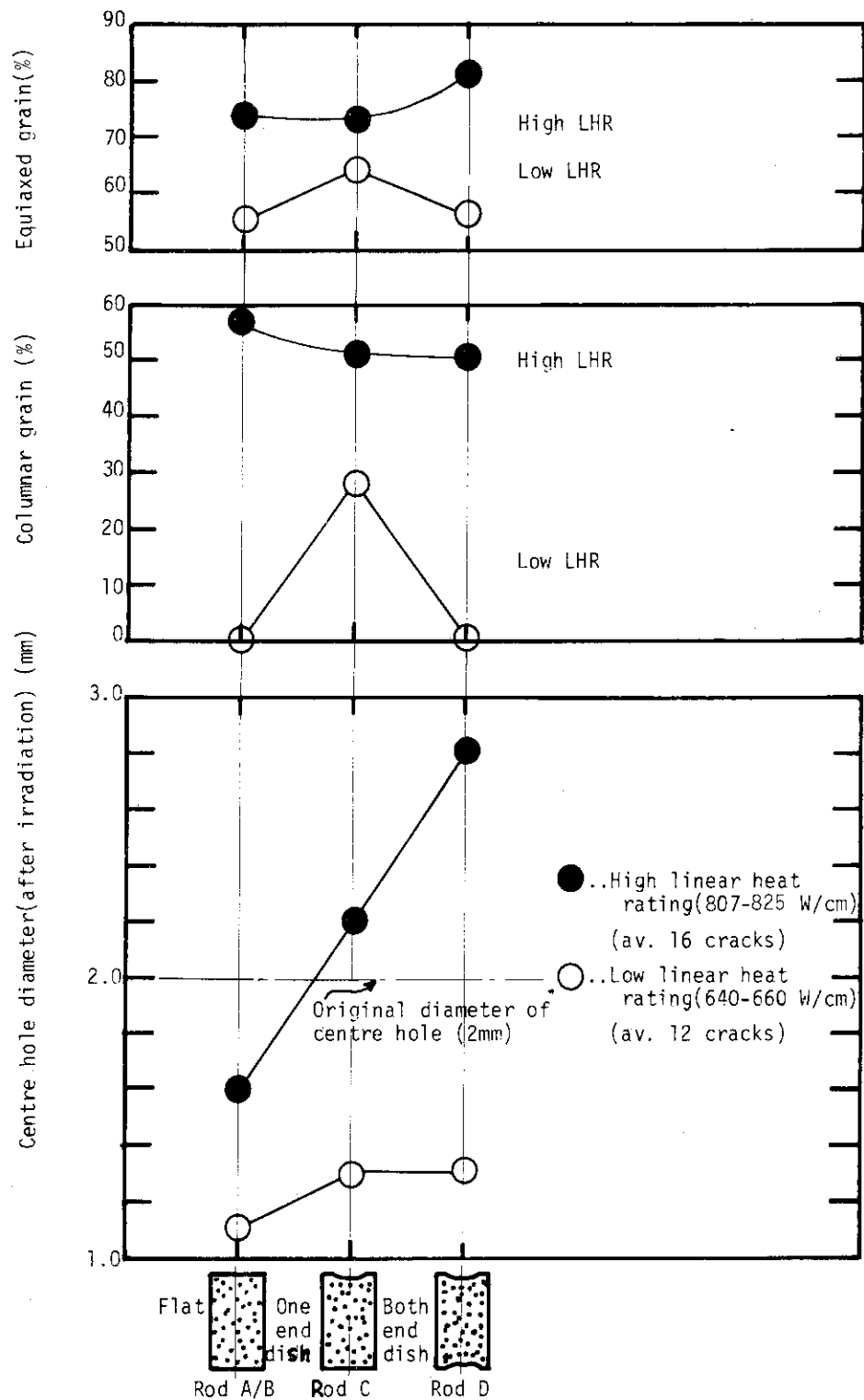


Fig. 27 Results obtained from metallographic observations

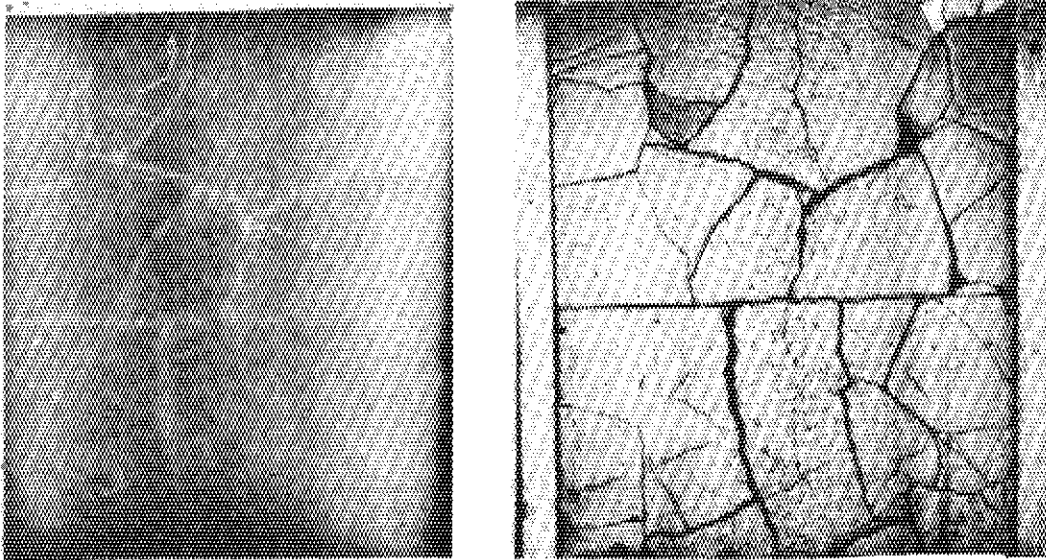


Fig. 28 Macrophotographs and autoradiographs of Rod A (flat).
Sample M21, 731-747 mm, 798 W/cm

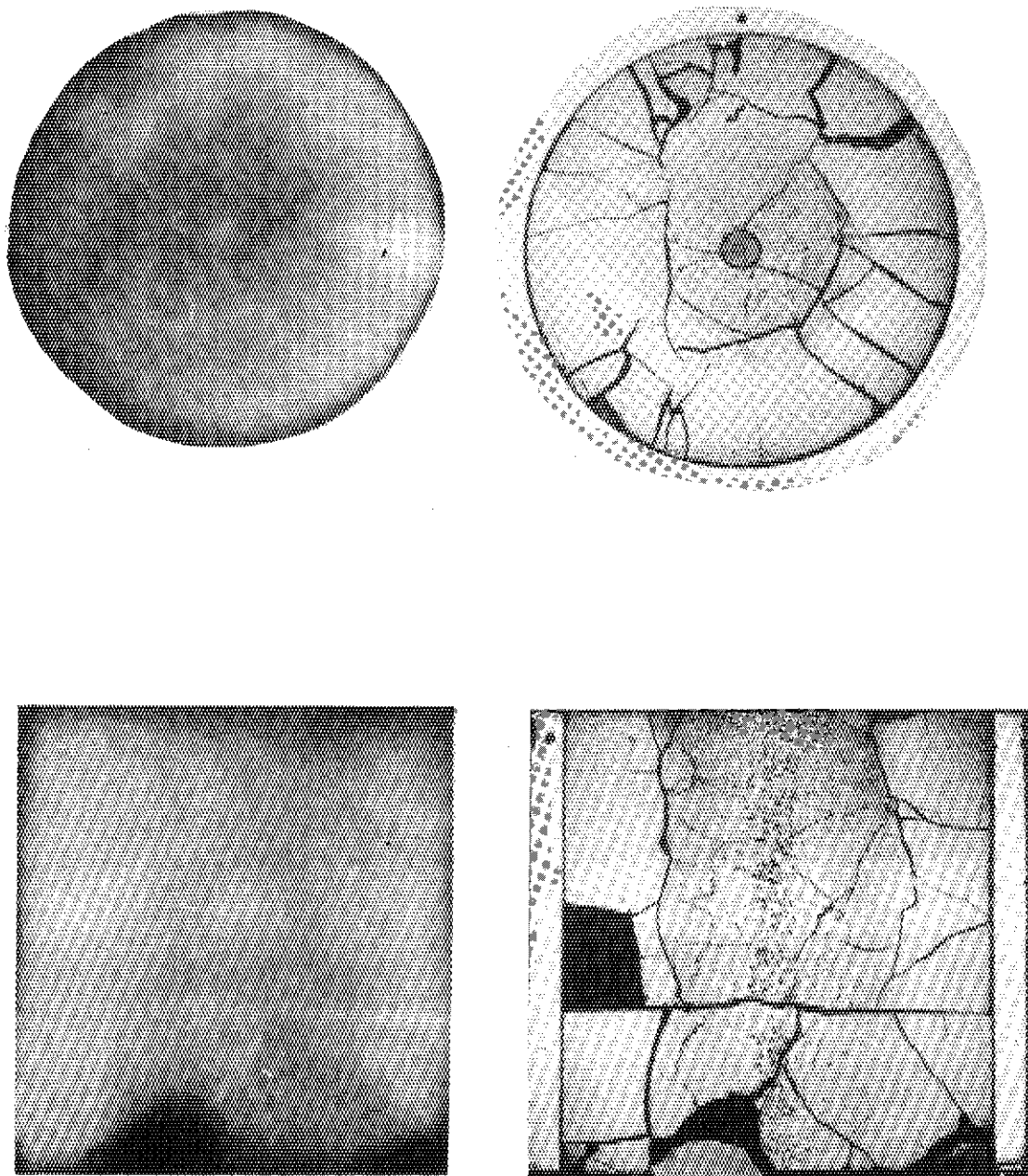


Fig. 29 Macrophotographs and autoradiographs of Rod B (flat)
 IFA-208, upper; sample M17, 186-196 mm, 660 W/cm, lower;
 sample M8, 196-212 mm, 677 W/cm

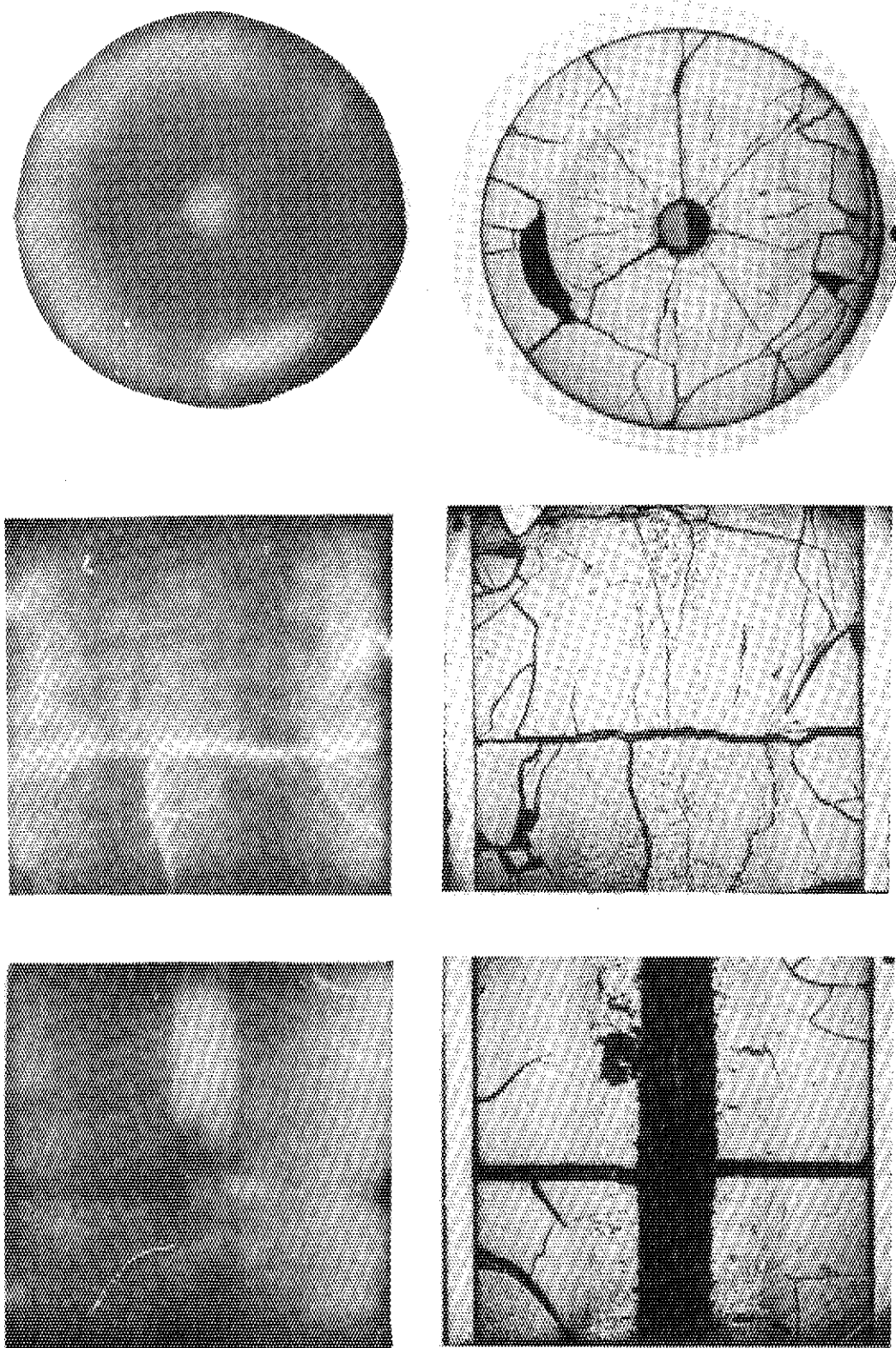


Fig. 30 Macrophotographs and autoradiographs of Rod B (flat),
 IFA-208, upper; sample M18, 494-504 mm, 816 W/cm, middle;
 sample M9, 504-520 mm, 816 W/cm and lower; sample M10, 895-
 911 mm, 640 W/cm

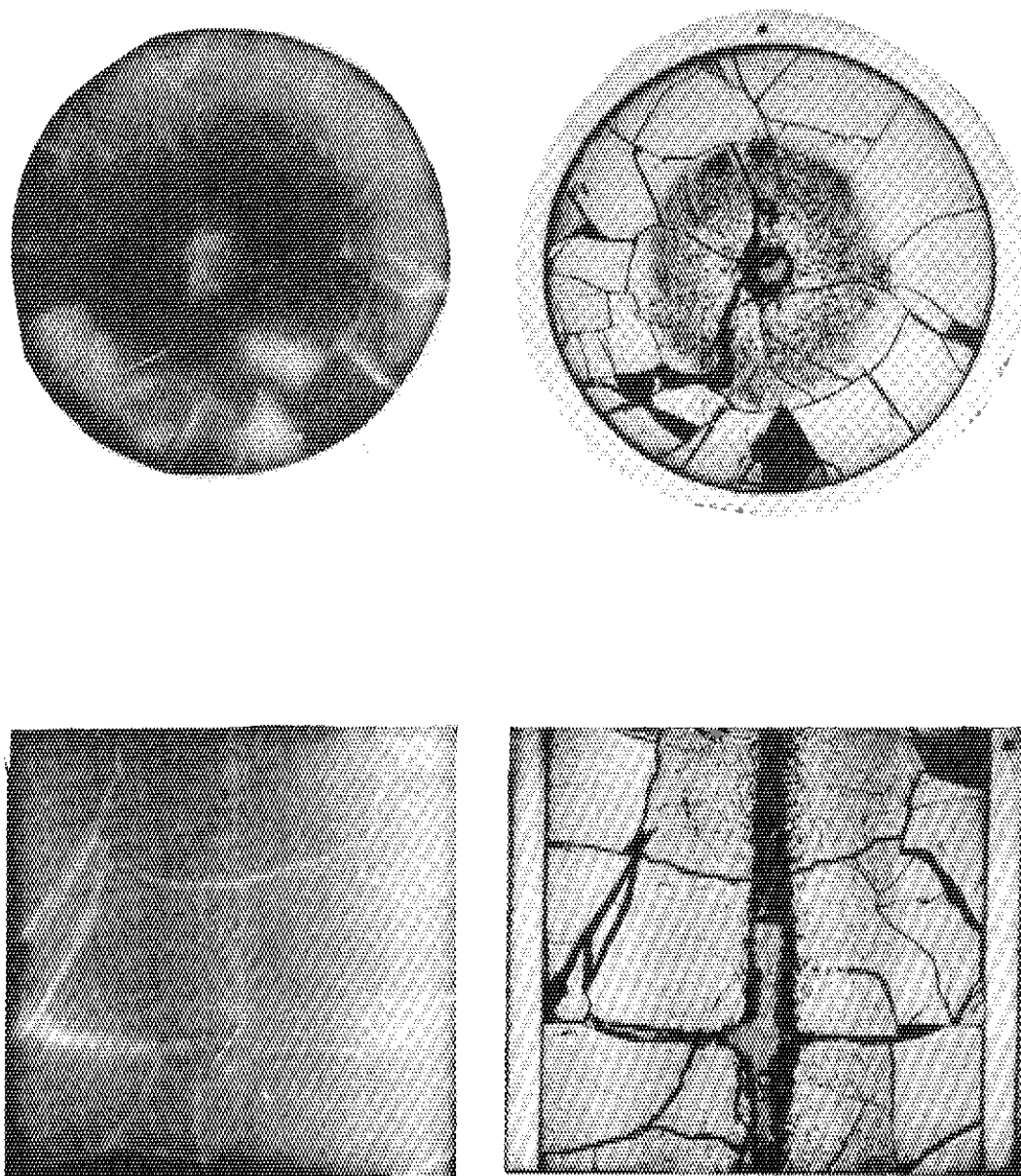


Fig. 31 Macrophotographs and autoradiographs of Rod C (one end dish), IFA-208, upper; sample M19, 165-175 mm, 640 W/cm and lower; sample M11, 175-191 mm, 653 W/cm

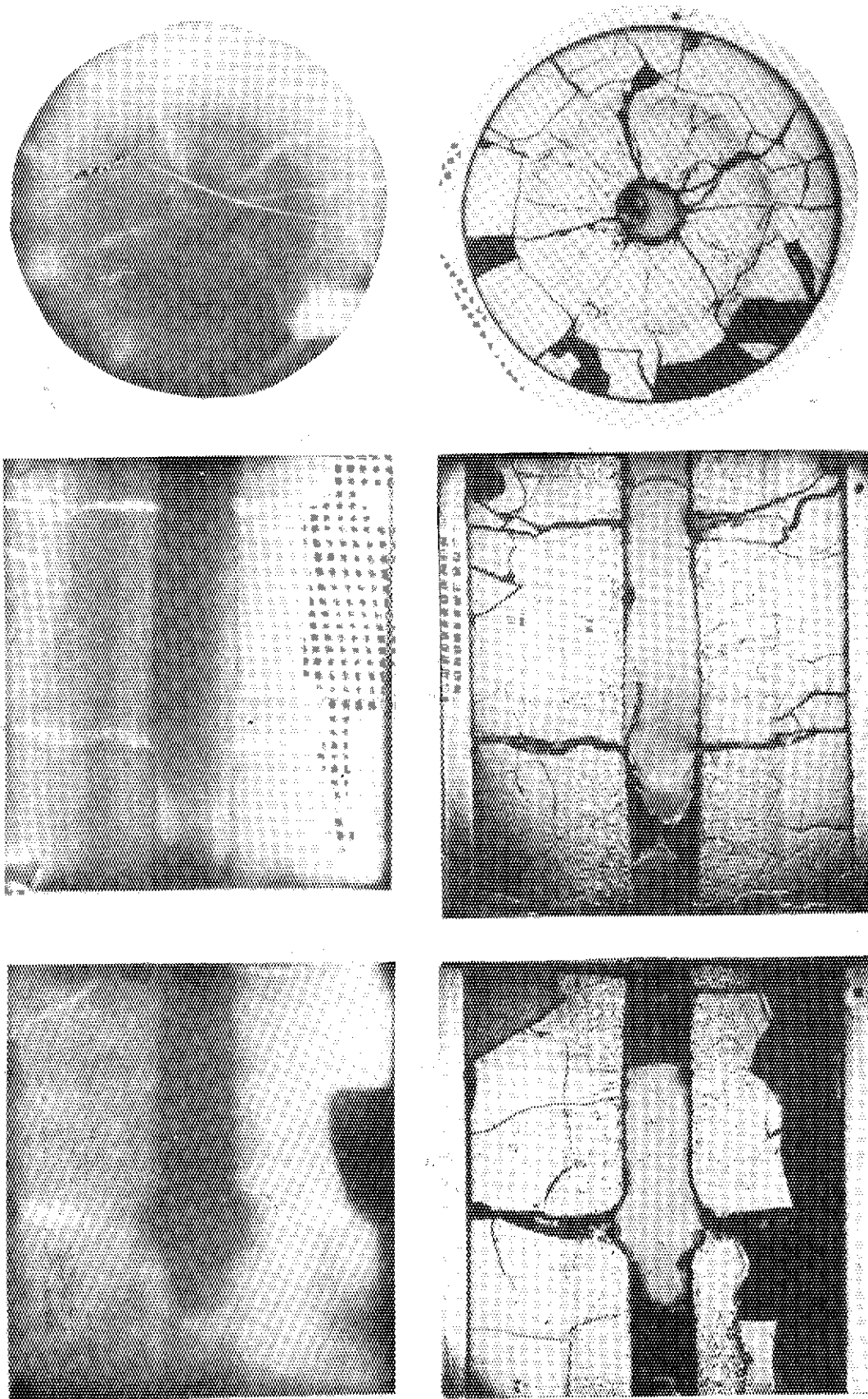


Fig. 32 Macrophotographs and autoradiographs of Rod C (one end dish), IFA-208, upper; sample M20, 518-523mm, 825 W/cm, middle; sample M12, 523-539 mm, 825 W/cm and lower; sample M13, 892-908 mm, 672 W/cm

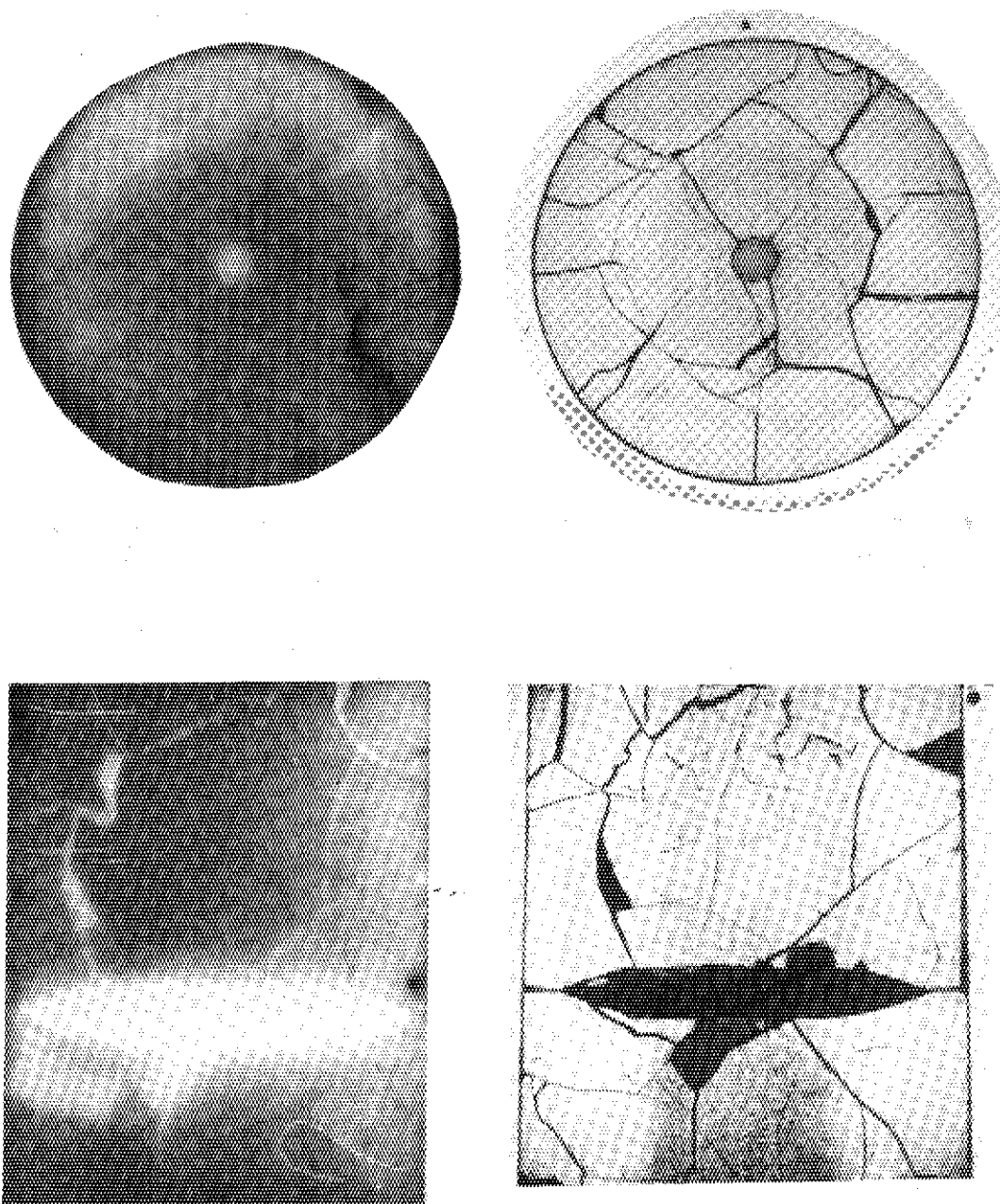


Fig. 33 Macrophotographs and autoradiographs of Rod D (both end dish), IFA-208, upper; sample M15, 175-186 mm, 645 W/cm and lower; sample M5, 186-202 mm, 658 W/cm

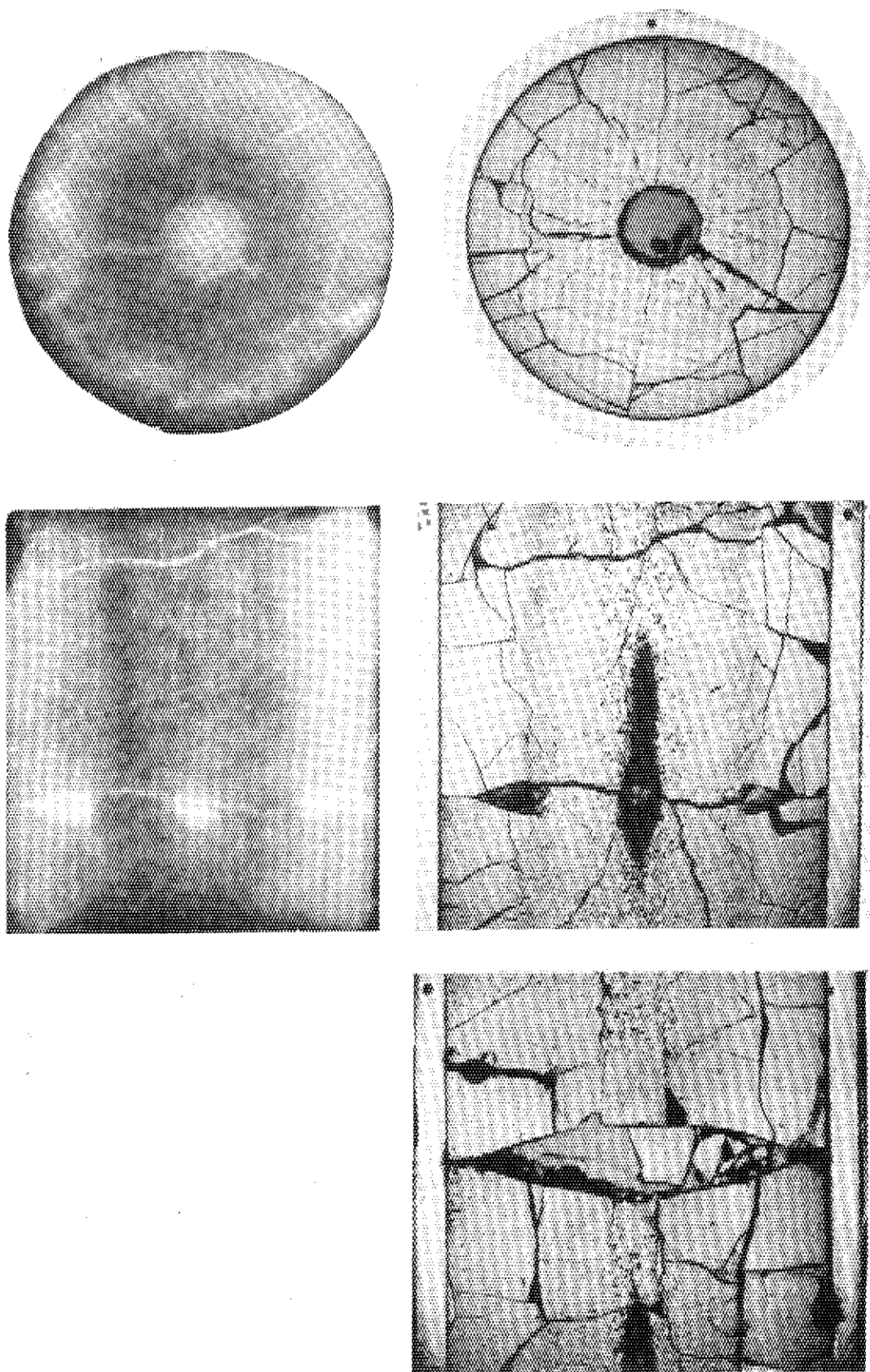


Fig. 34 Macrophotographs and autoradiographs of Rod D (both end dish), IFA-208, upper; sample M16, 507-517 mm, 807 W/cm, middle; sample M6, 517-533 mm, 807 W/cm, and lower; sample M7, 930-946 mm, 635 W/cm

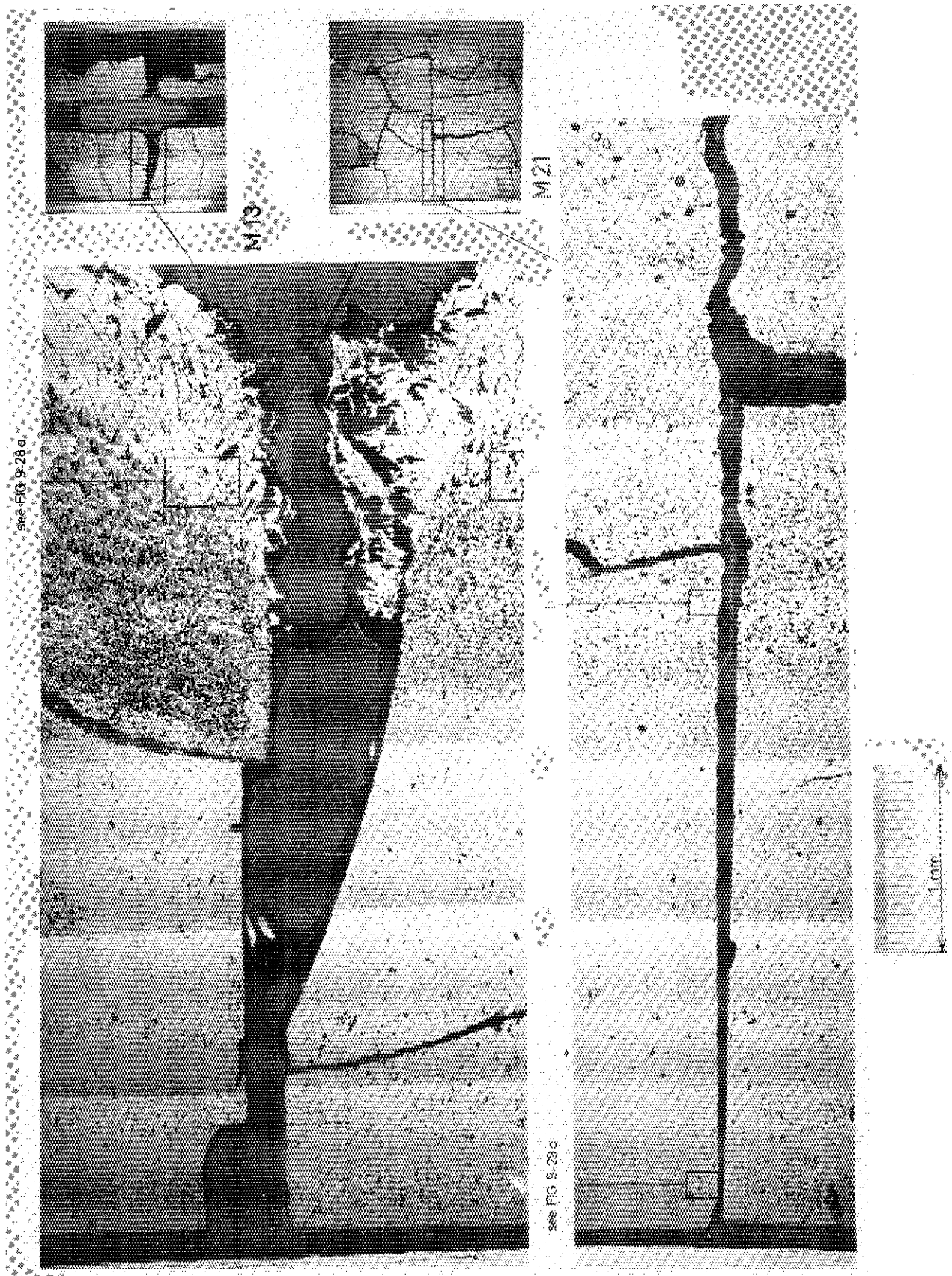


Fig. 35 Fuel radius of Rod A (flat) and of Rod C (dish), upper; sample M13 (Rod C, 670 W/cm) and lower; sample M21 (Rod A, 800 W/cm)

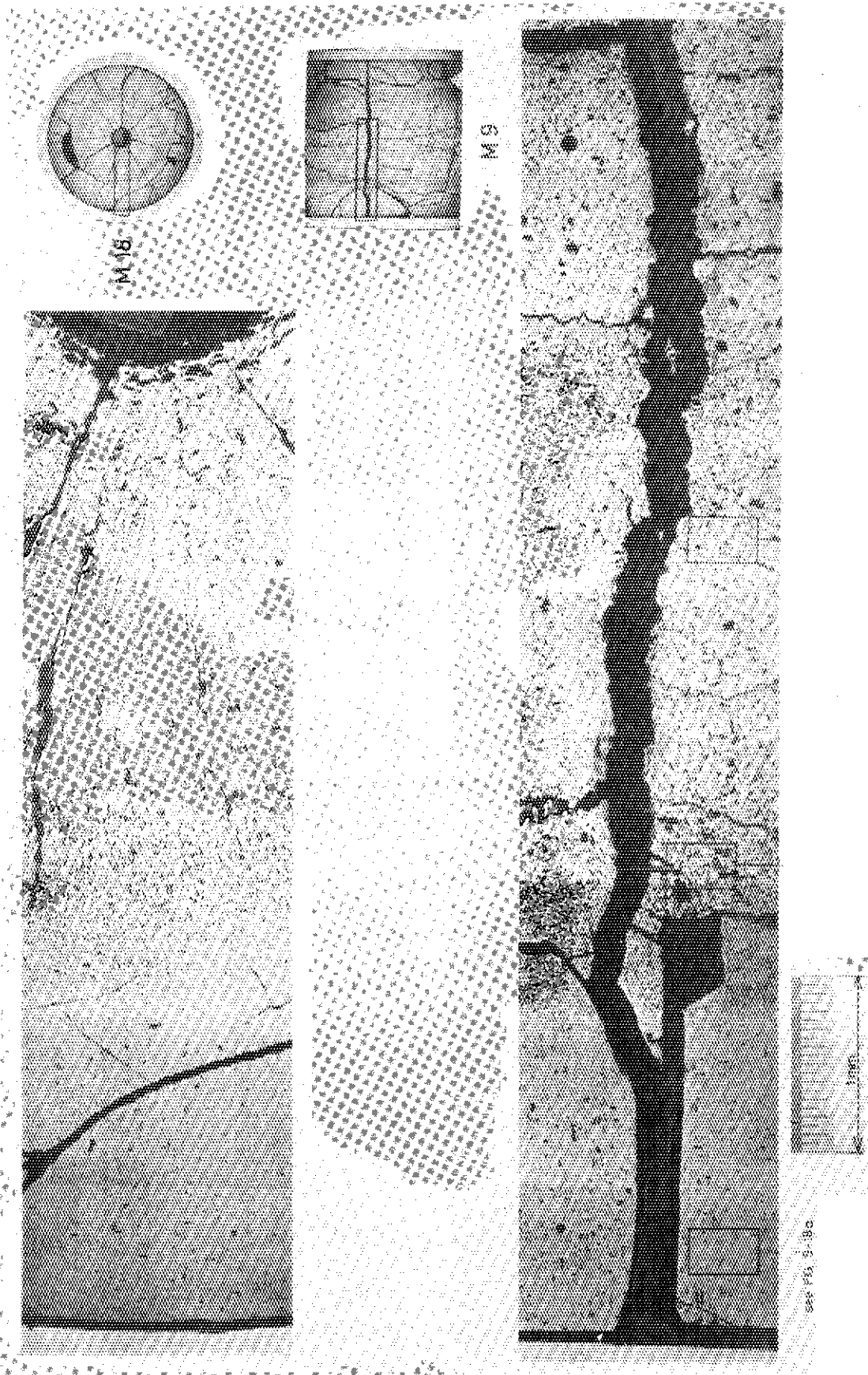


Fig. 36 Fuel radiographs of Rod B (flat), upper; sample M18 (815 W/cm) and lower; sample M9 (815 W/cm)

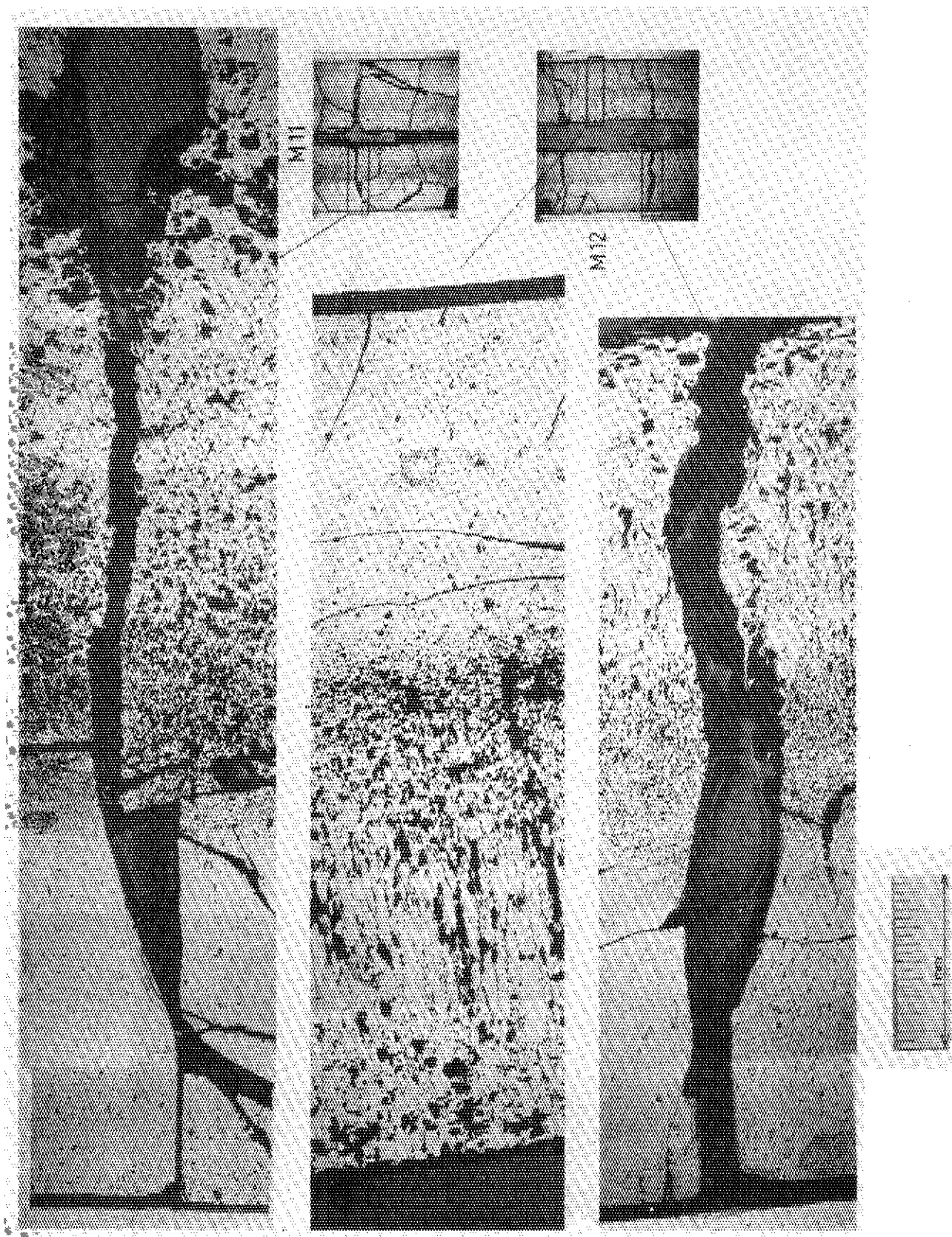


Fig. 37 Fuel radiographs of Rod C (one end dish), upper; sample M11 (655 W/cm), middle and lower; sample M12 (825 W/cm)

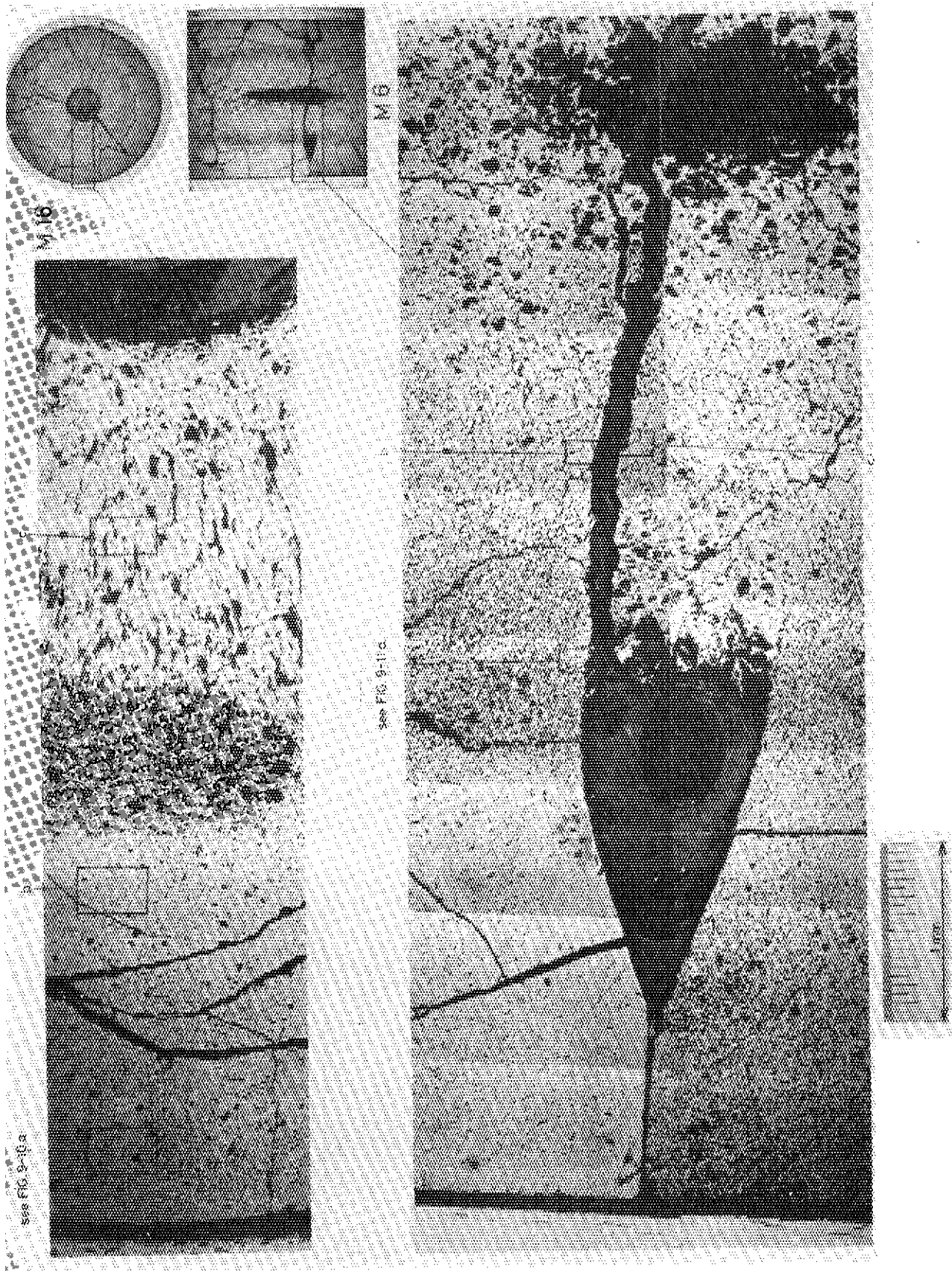


Fig. 38 Fuel radii of Rod D (both end dish), upper; sample M16 (805 W/cm) and lower; sample M6 (805 W/cm)

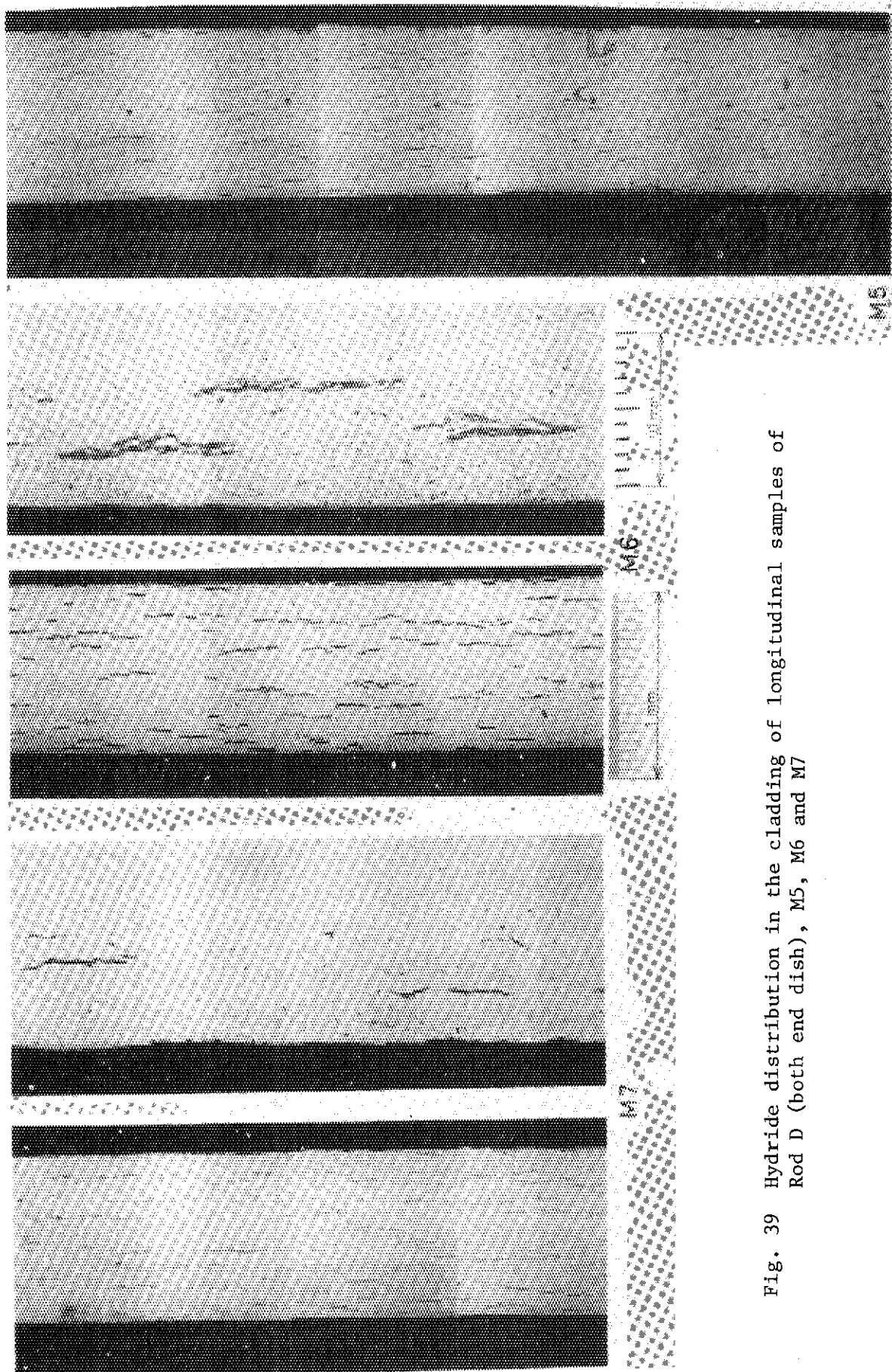


Fig. 39 Hydride distribution in the cladding of longitudinal samples of Rod D (both end dish), M5, M6 and M7

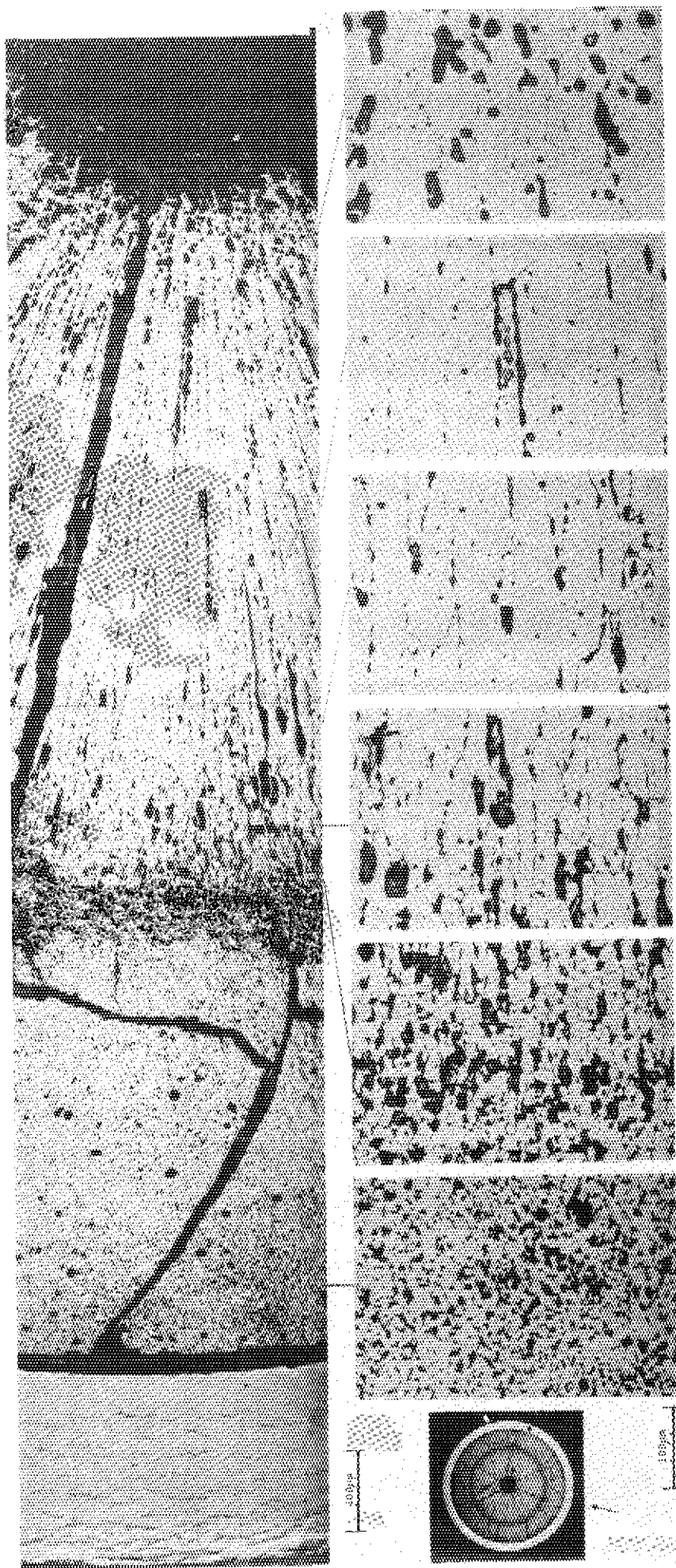


Fig. 40 Fuel radious and detail pictures of Rod A (flat, IFA-224), sample No.51, 537 mm, 583 W/cm

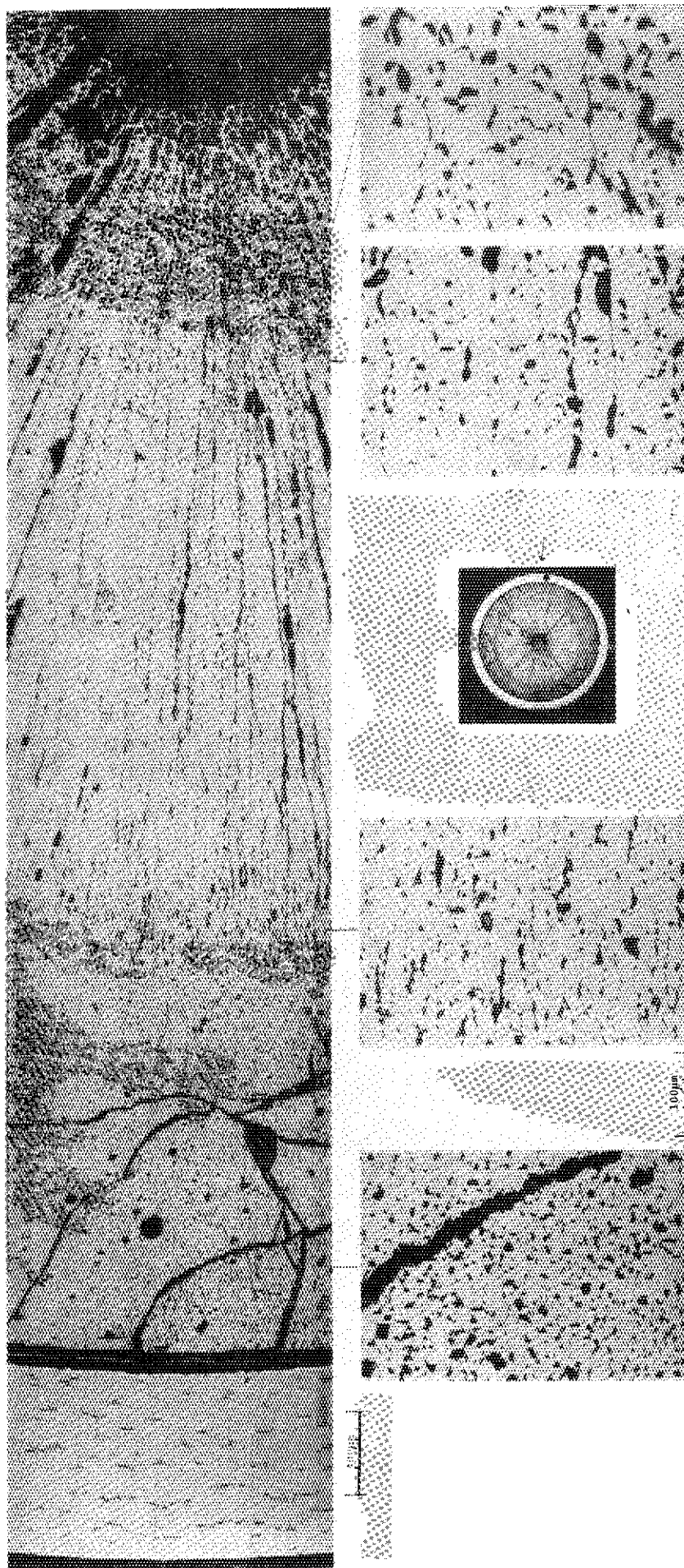


Fig. 41 Fuel radious and detail pictures of Rod B (flat), IFA-224,
sample No.54, 623 mm, 581 W/cm

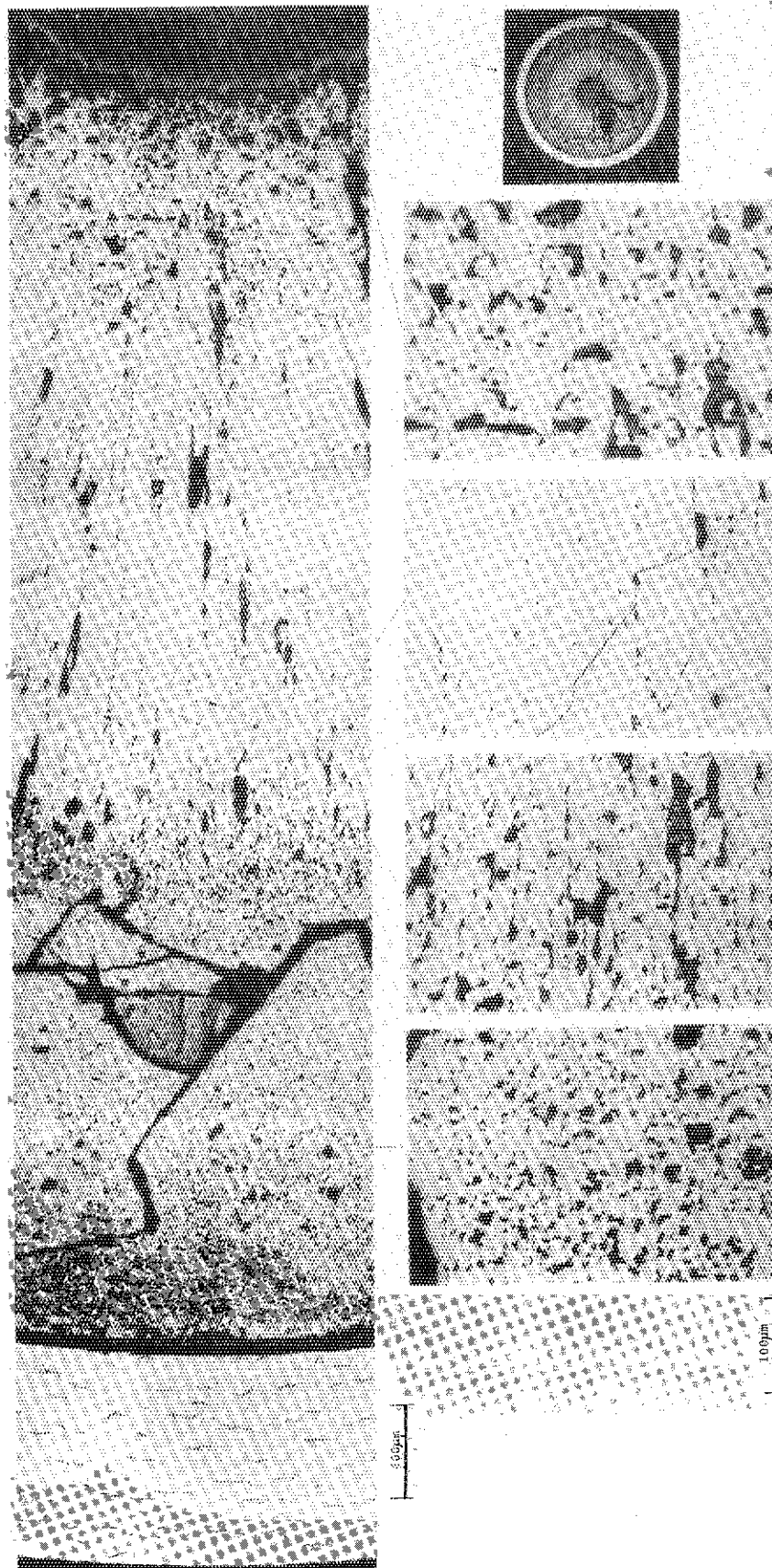


Fig. 42 Fuel radious and detail pictures of Rod C (both end dish),
IFA-224, sample No.58, 511 mm, 589 W/cm

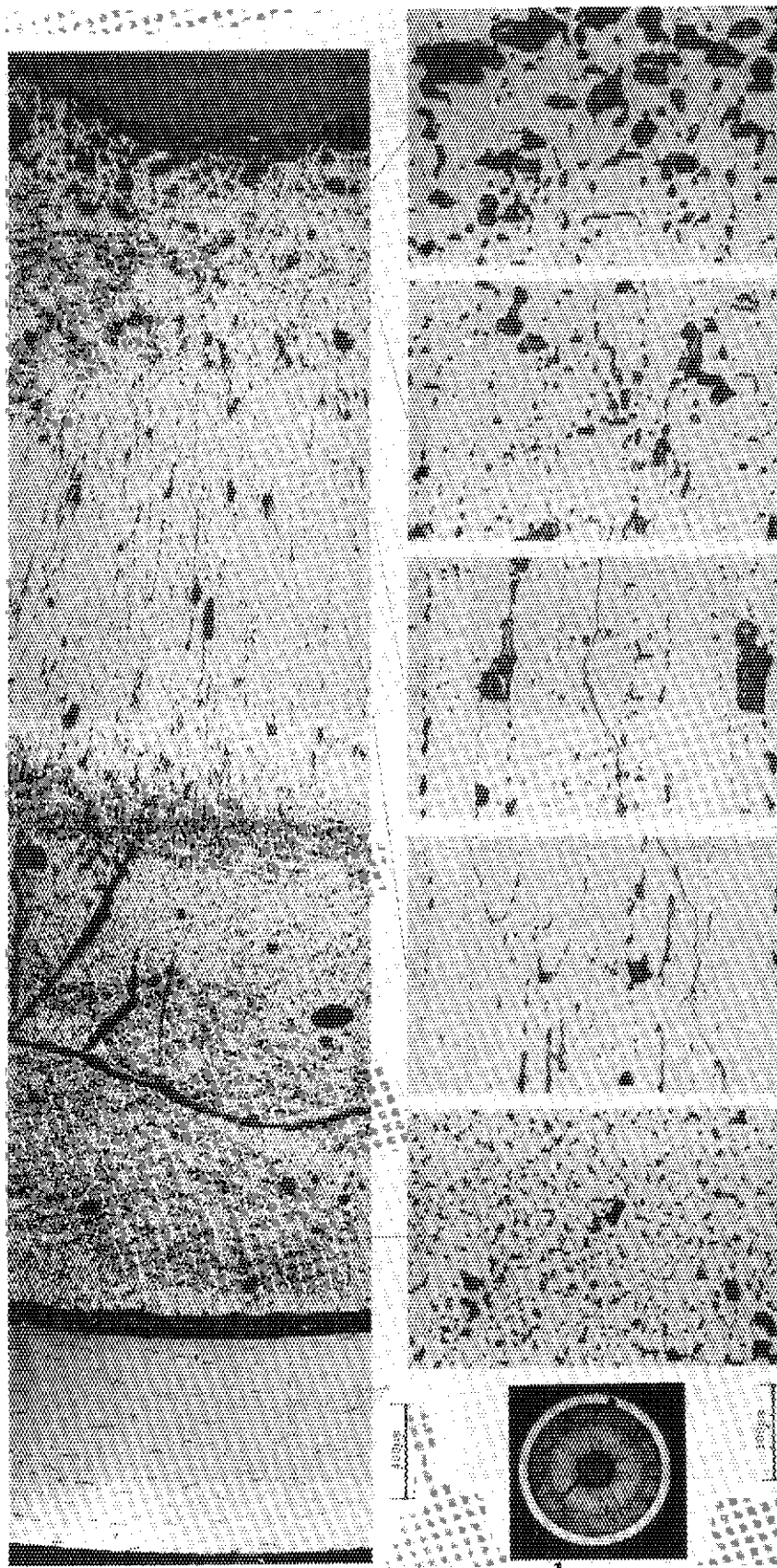


Fig. 43 Fuel radious and detail pictures of Rod D (both end dish),
IFA-224, sample No.59, 564 mm, 560 W/cm

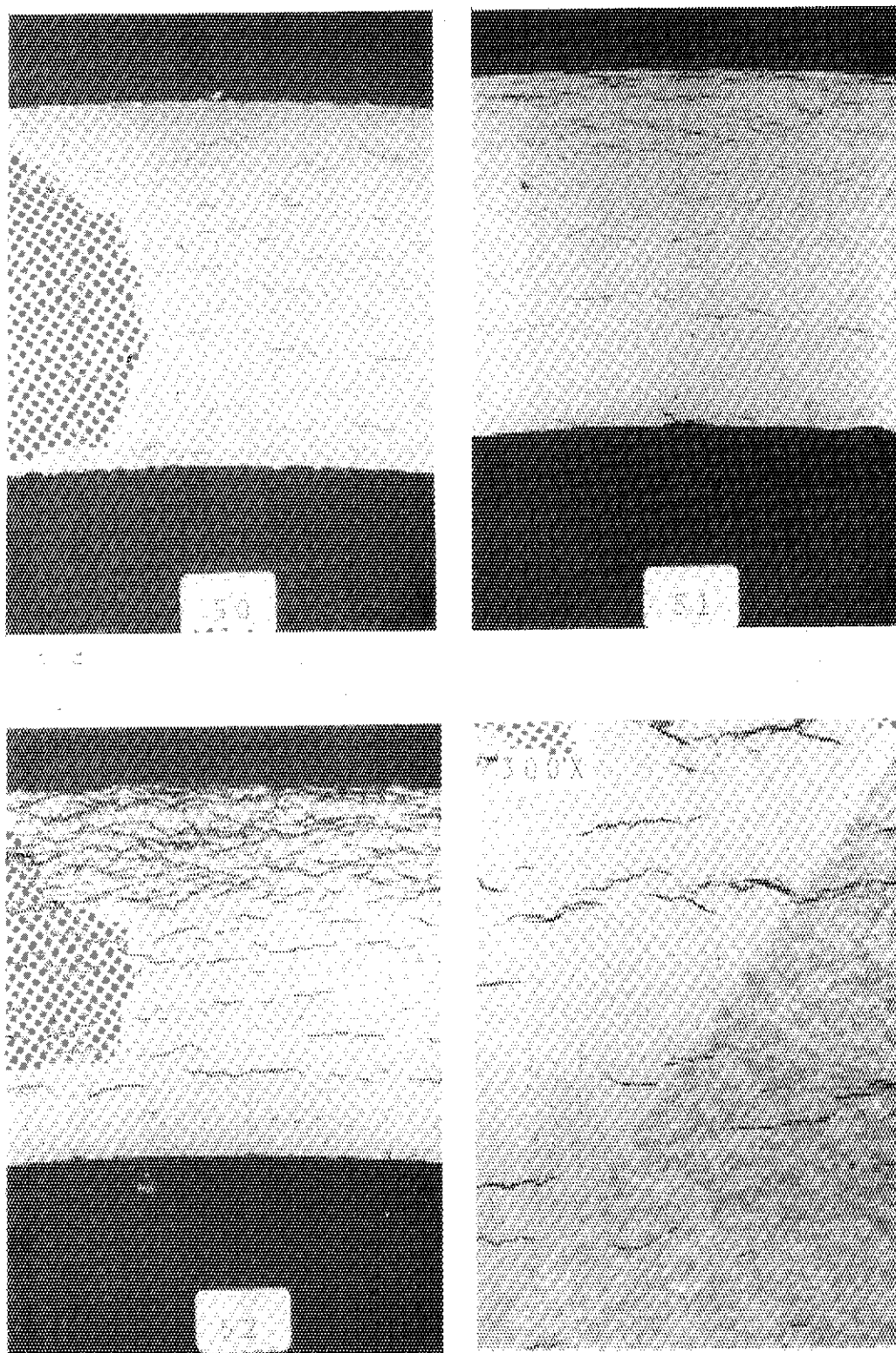


Fig. 44 Hydride distribution and gran structure of Rod A (flat), IFA-224, sample No.50, 51 and 52

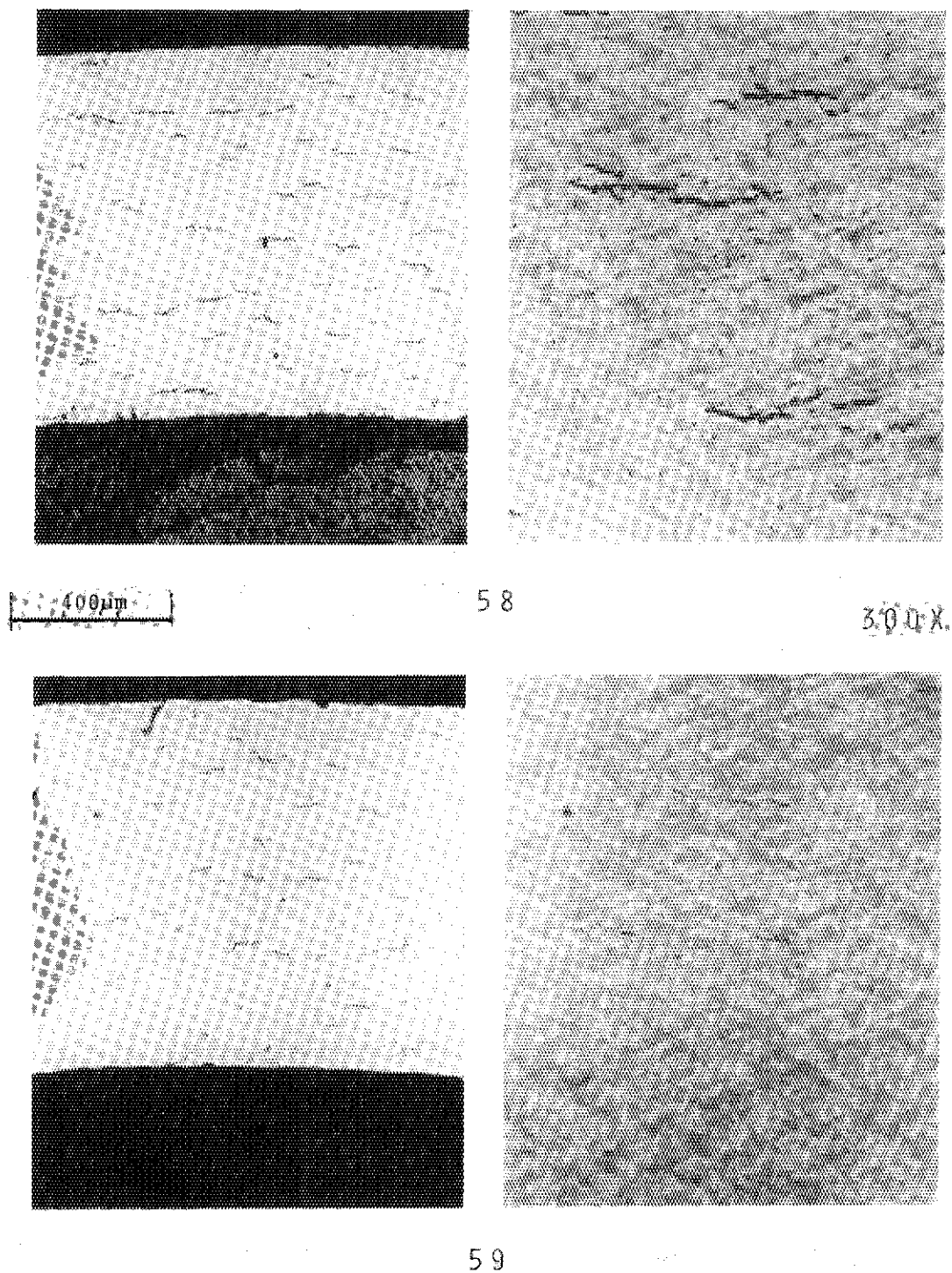


Fig. 45 Hydride distribution and grain structure of Rod C (both end dish; upper) and of Rod D (both end dish; lower)

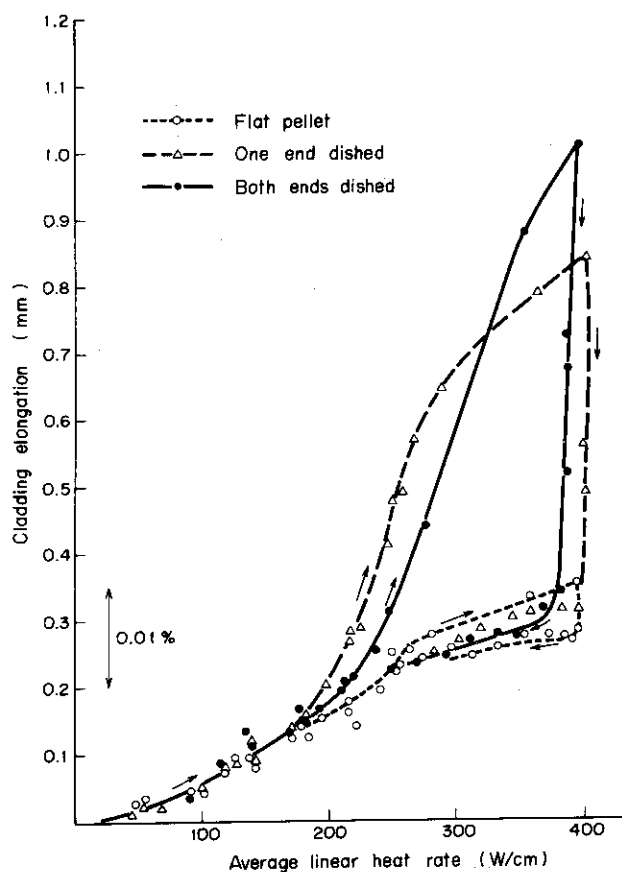


Fig. 46 Cladding elongation vs linear heat rating during the first power cycle

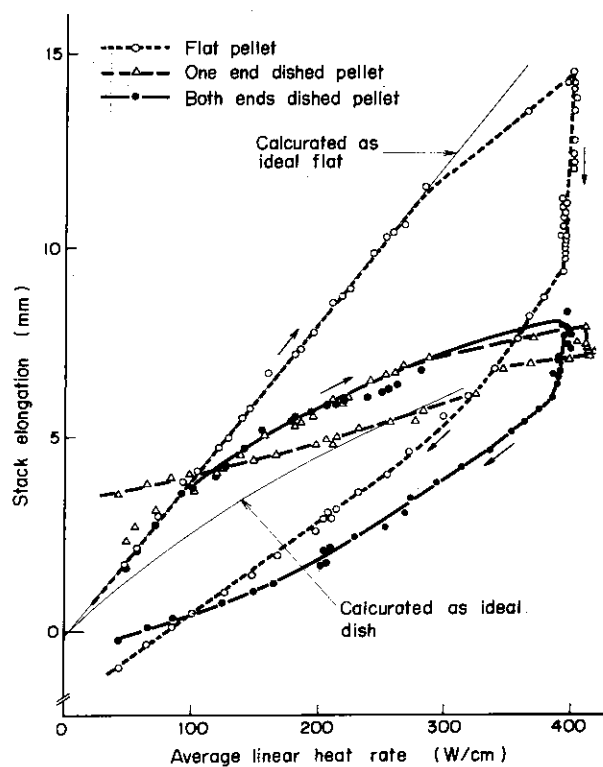


Fig. 48 Fuel stack elongation vs linear heat rating during the first power cycle

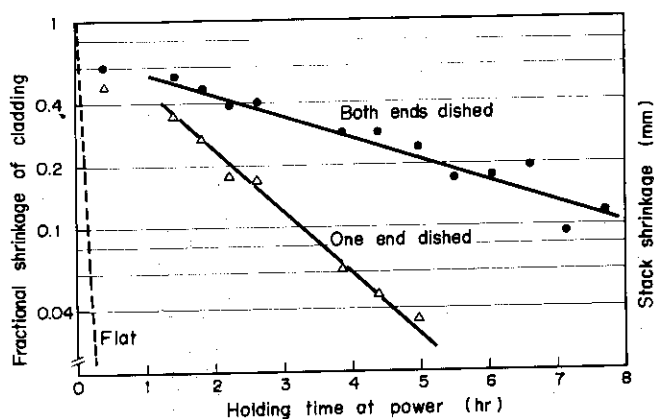


Fig. 47 Cladding fractional shrinkage during holding at full power in the first power cycle

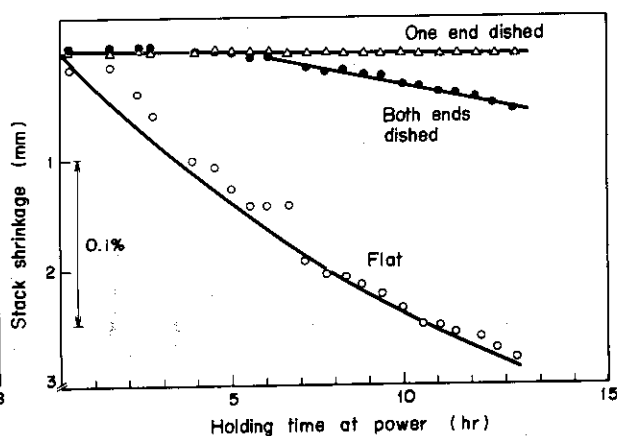


Fig. 49 Pellet stack shrinkage during holding at full power in the first power cycle

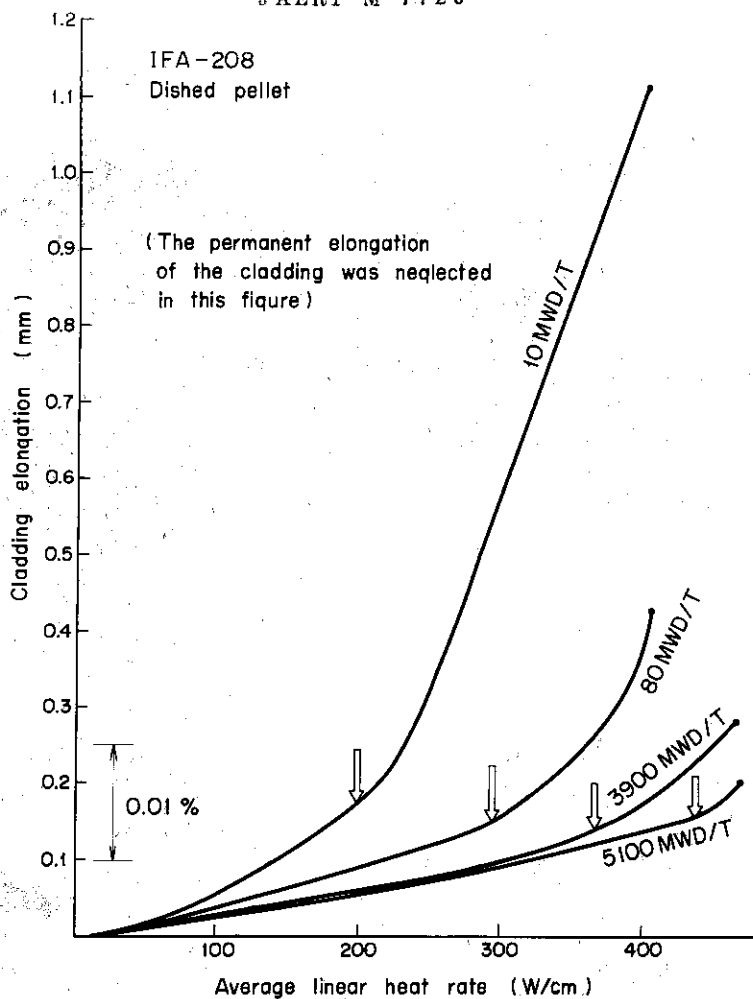


Fig. 50 Effect of burnup on the cladding elongation curve

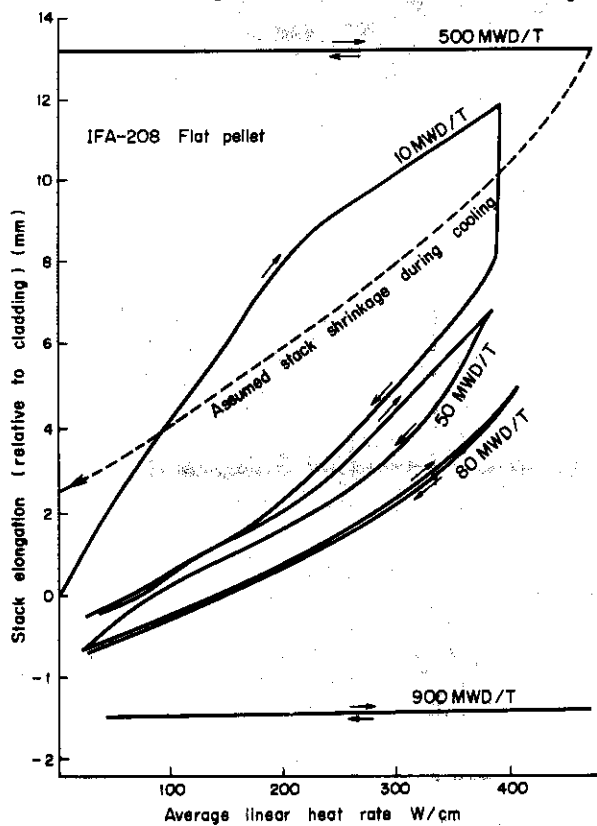


Fig. 51 Pellet stack change of flat pellet

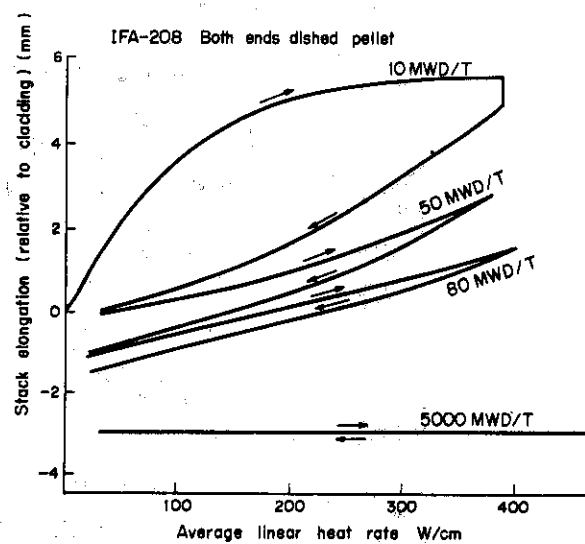
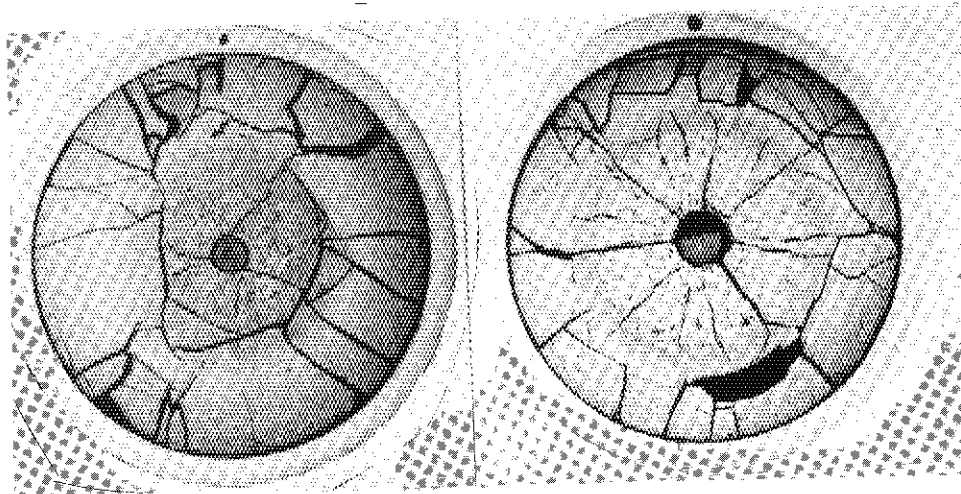


Fig. 52 Pellet stack change of both ends pellet

position L

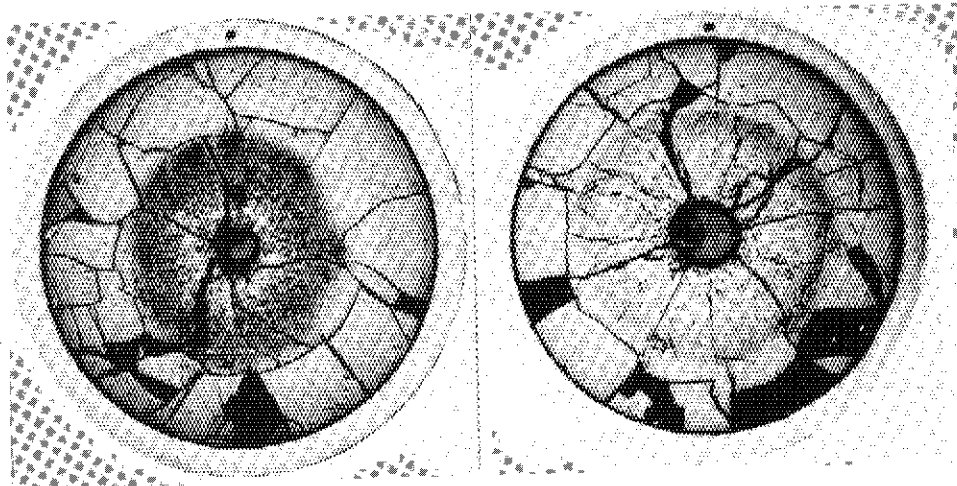
position M



530 w/cm

660 w/cm

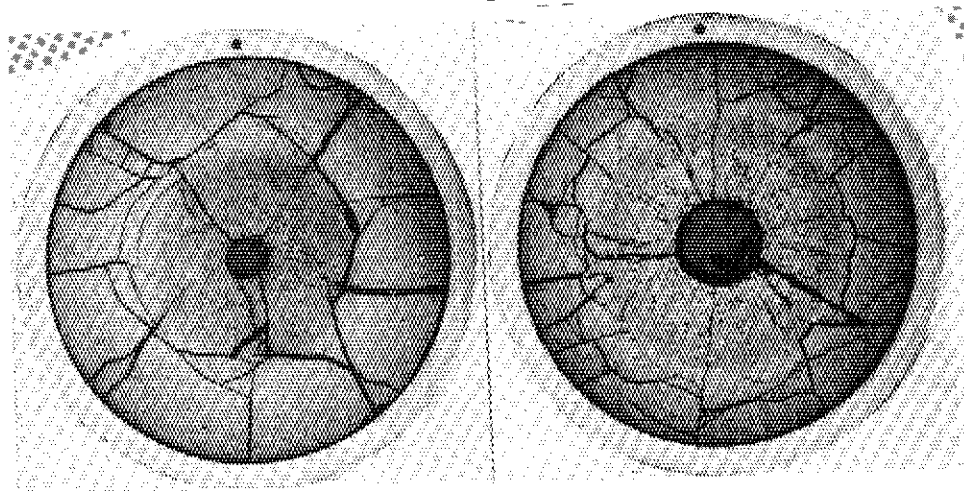
Flat pellet



520 w/cm

670 w/cm

One end dished pellet



530 w/cm

650 w/cm

Both ends dished pellet

Fig. 53 Cross section of the specimens

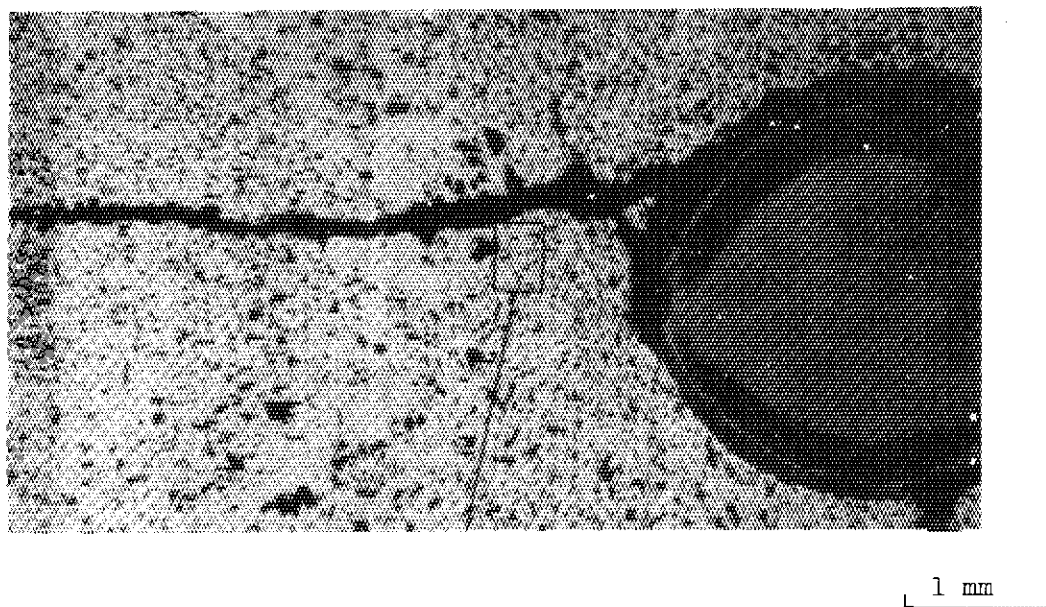
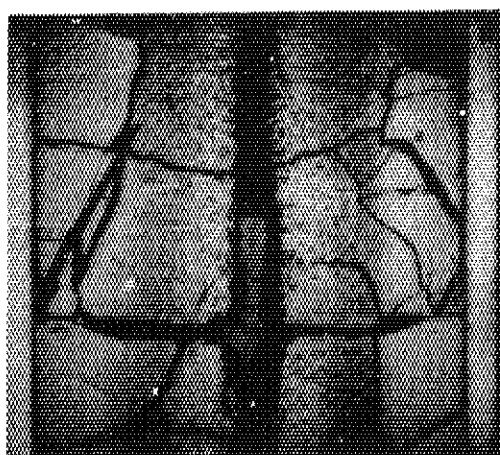


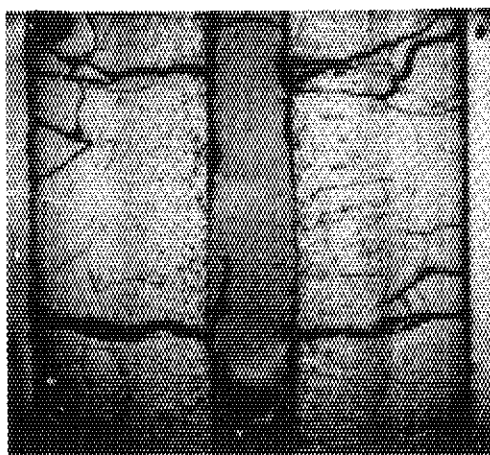
Fig. 54 The microstructure of flat pellet fuel near the centre hole



Position L

(520 w/cm)

(Cut deviated from the center)



Position M

(670 w/cm)

Fig. 55 Shapes of the central hole of one end dished pellet fuel

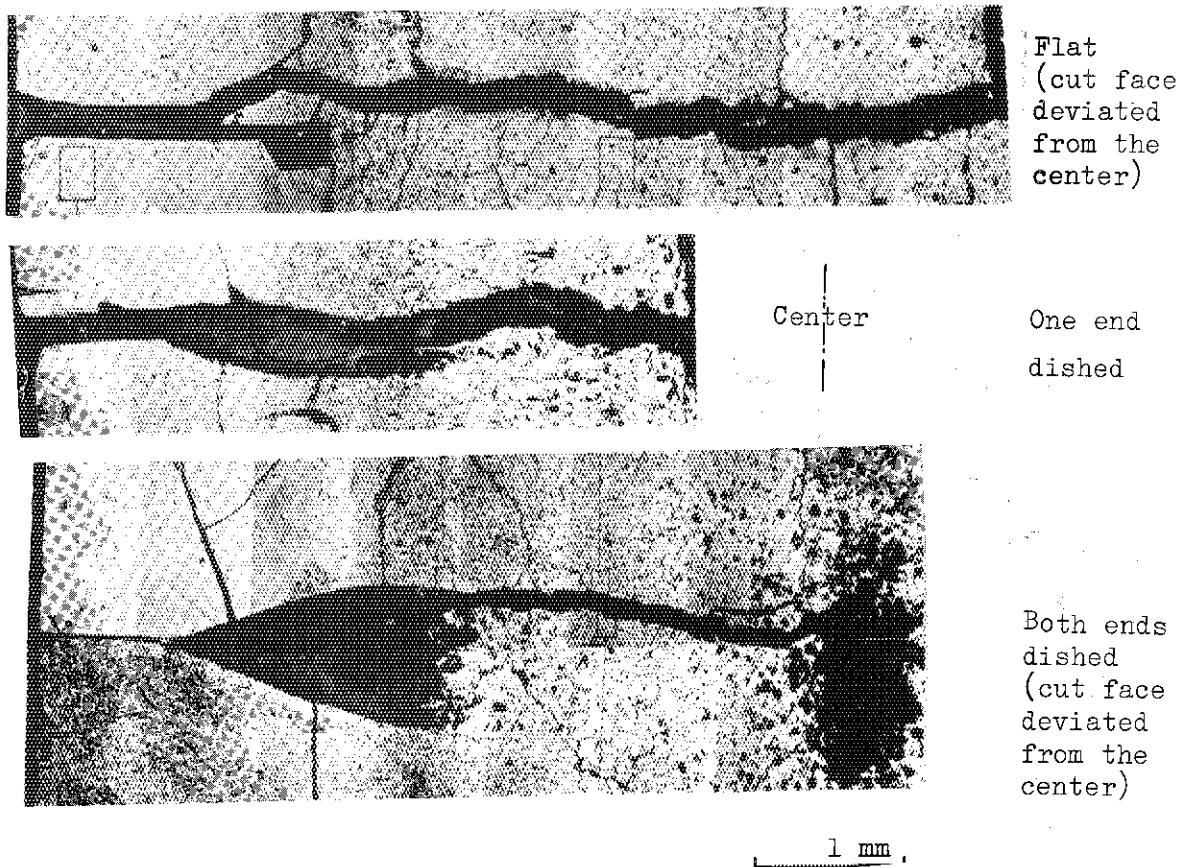


Fig. 56 Longitudinal section at the pellet interface

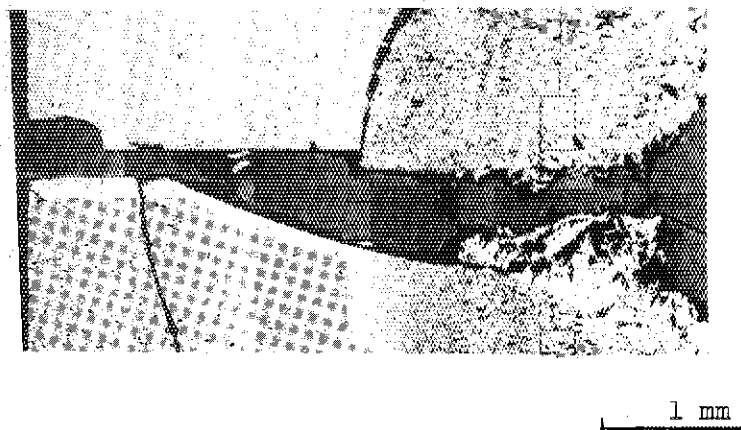


Fig. 57 UO₂ vapour deposition on the pellet end face in the dished space

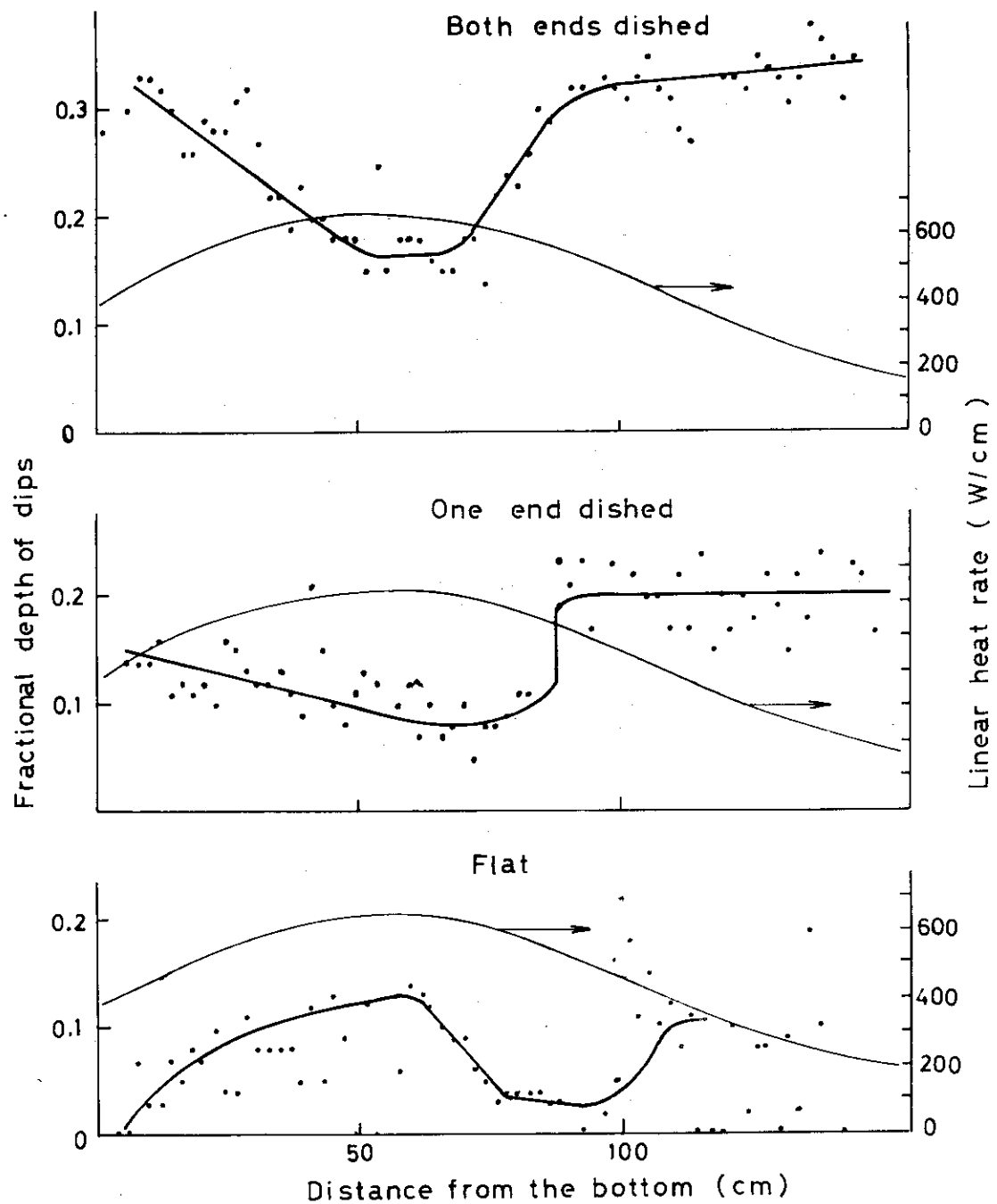


Fig. 58 Axial distribution of the depth of dips in gamma scanning at pellet interface

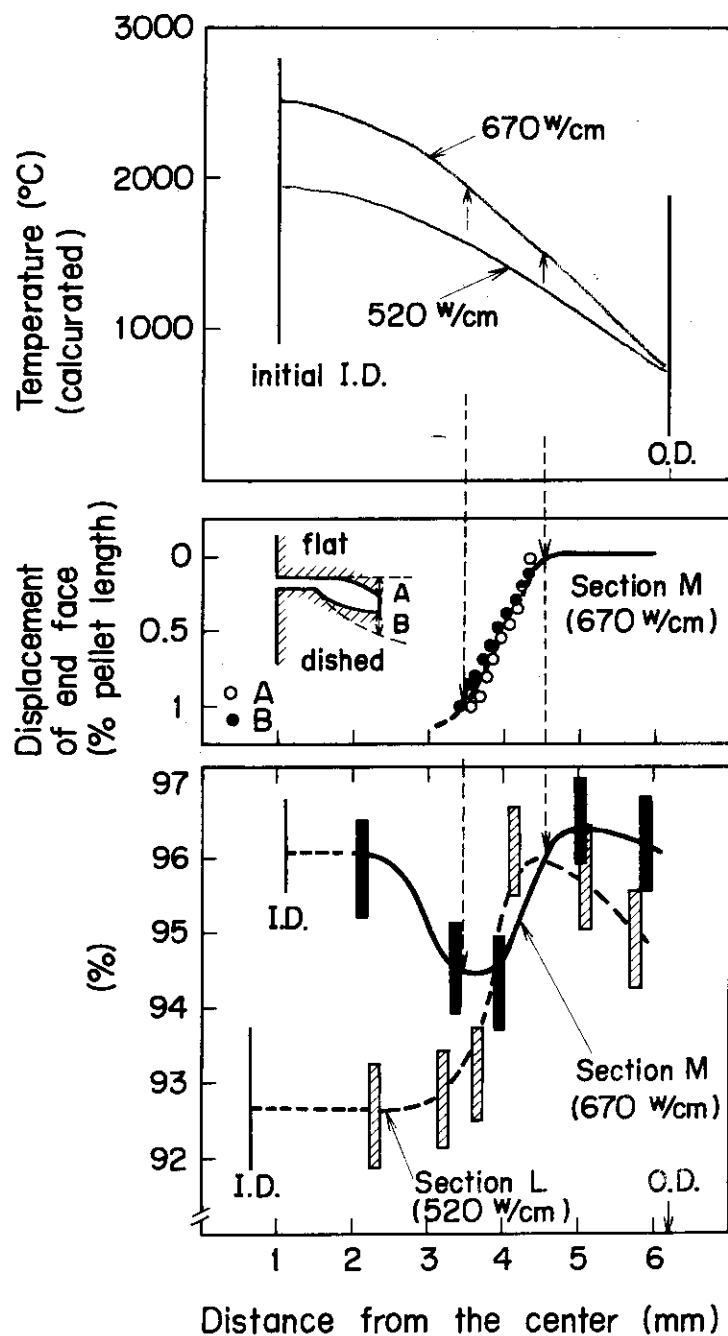


Fig. 59 Density, pellet end shape and temperature distribution of one end dished pellet pin at the position L and M

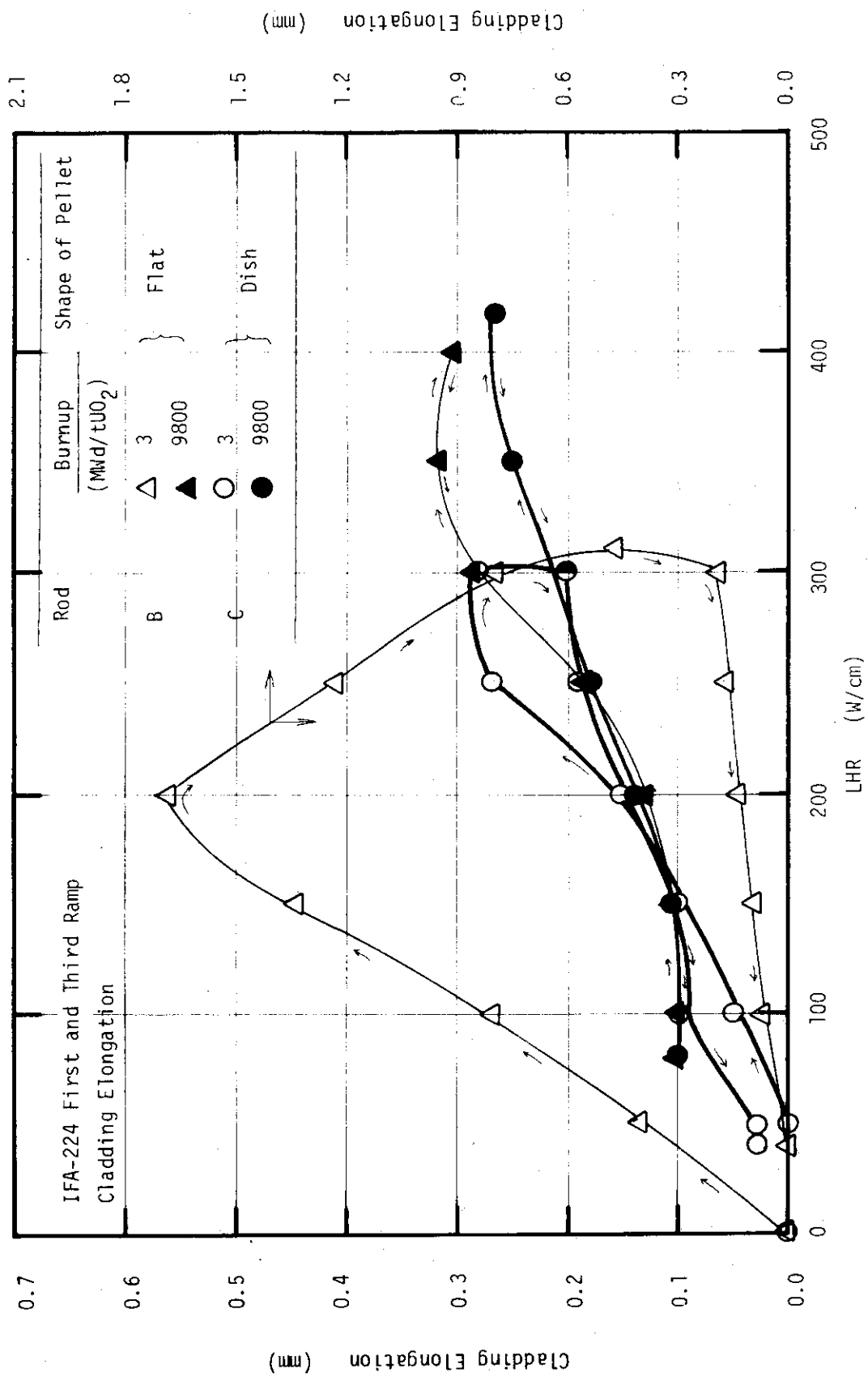


Fig. 60 Cladding elongation for rod B (flat) and rod C (dish) vs linear heat rating during first and third ramp cycle, IFA-224

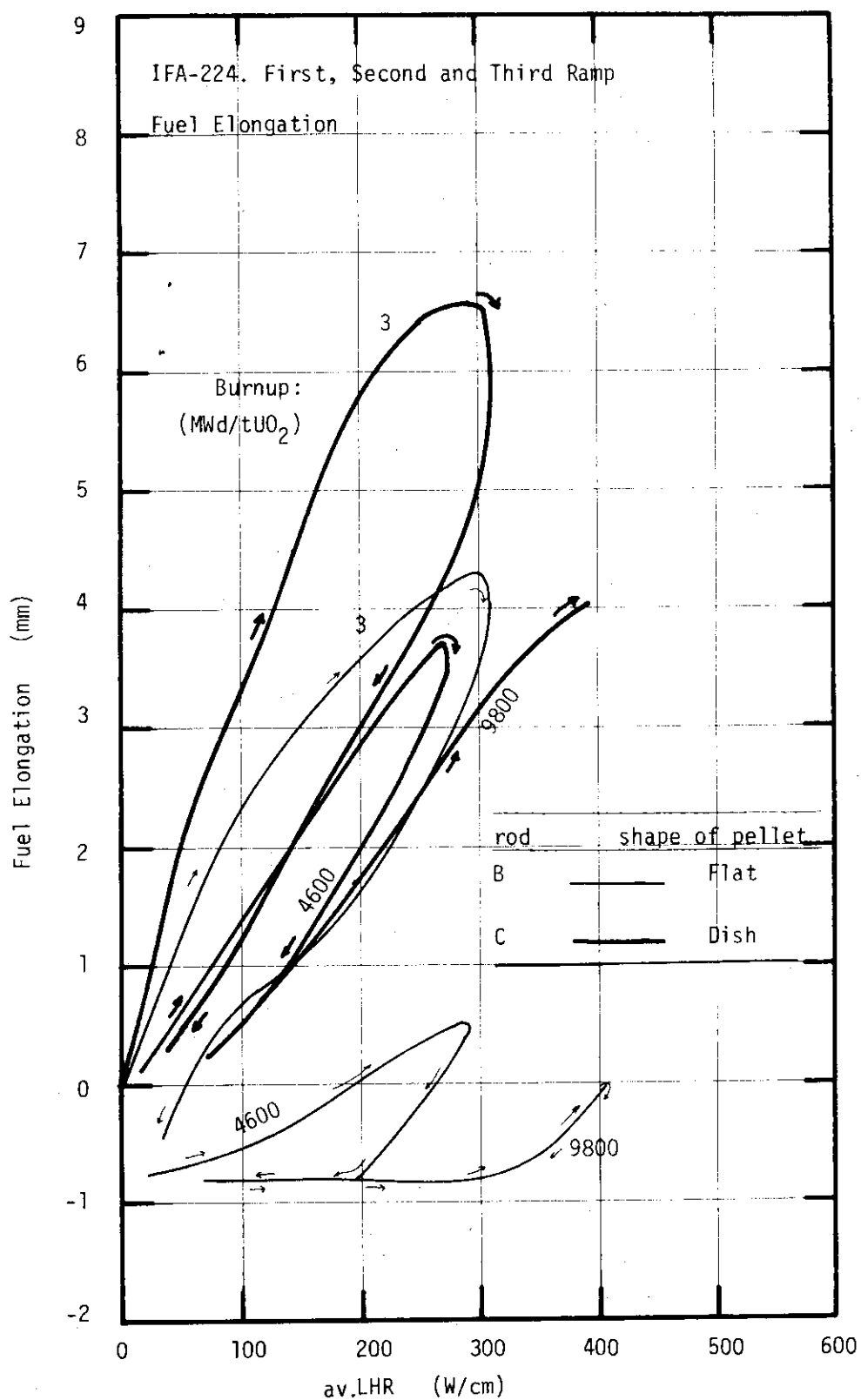


Fig. 61 Fuel stack elongation for rod B (flat) and rod C (dish) vs linear heat rating during first, second and third ramp cycle, IFA-224

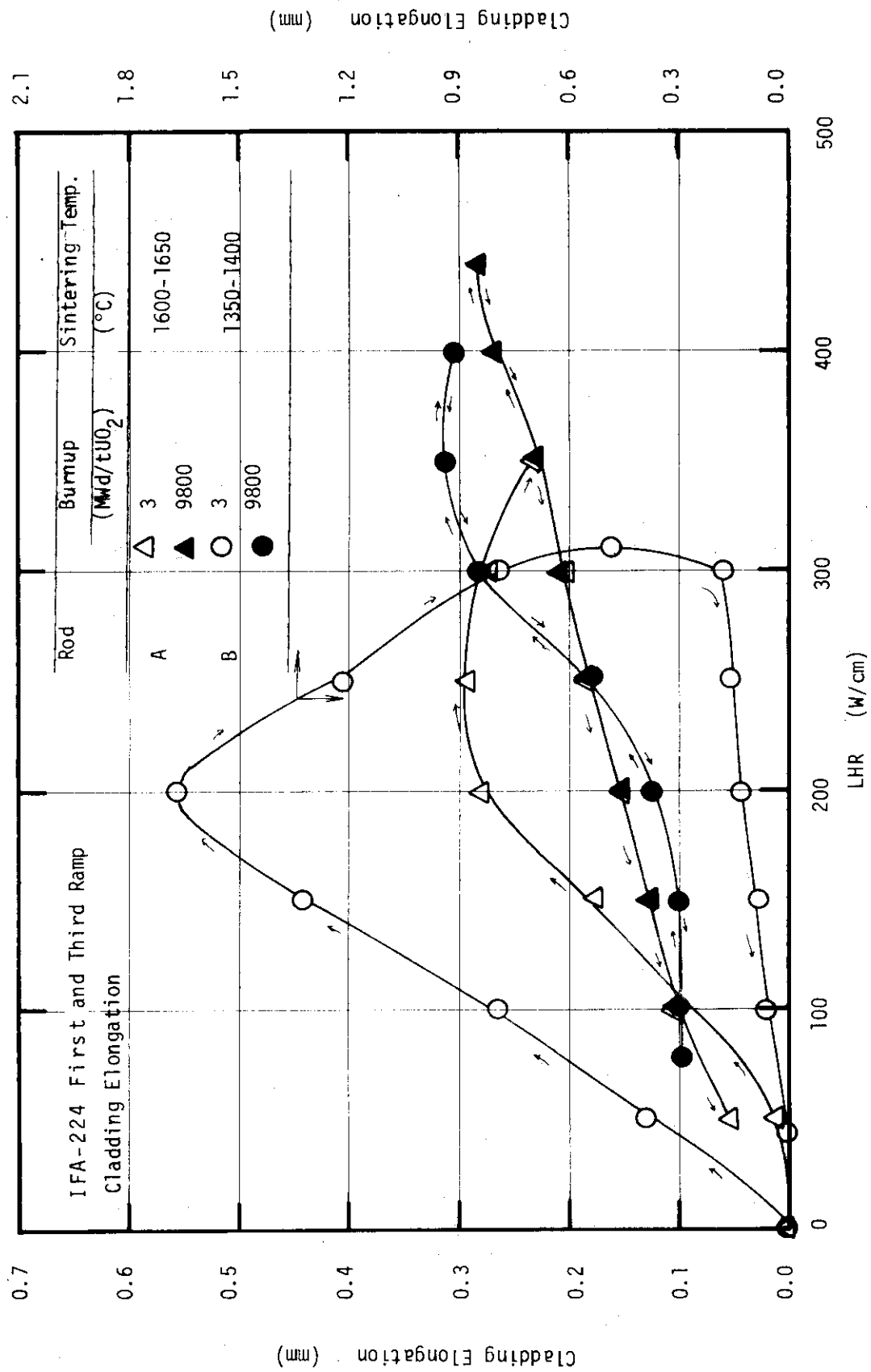


Fig. 62 Cladding elongation for rod A (high temp. sintered) and rod B (low temp. sintered) vs linear heat rating during first and third ramp cycle, IFA-224

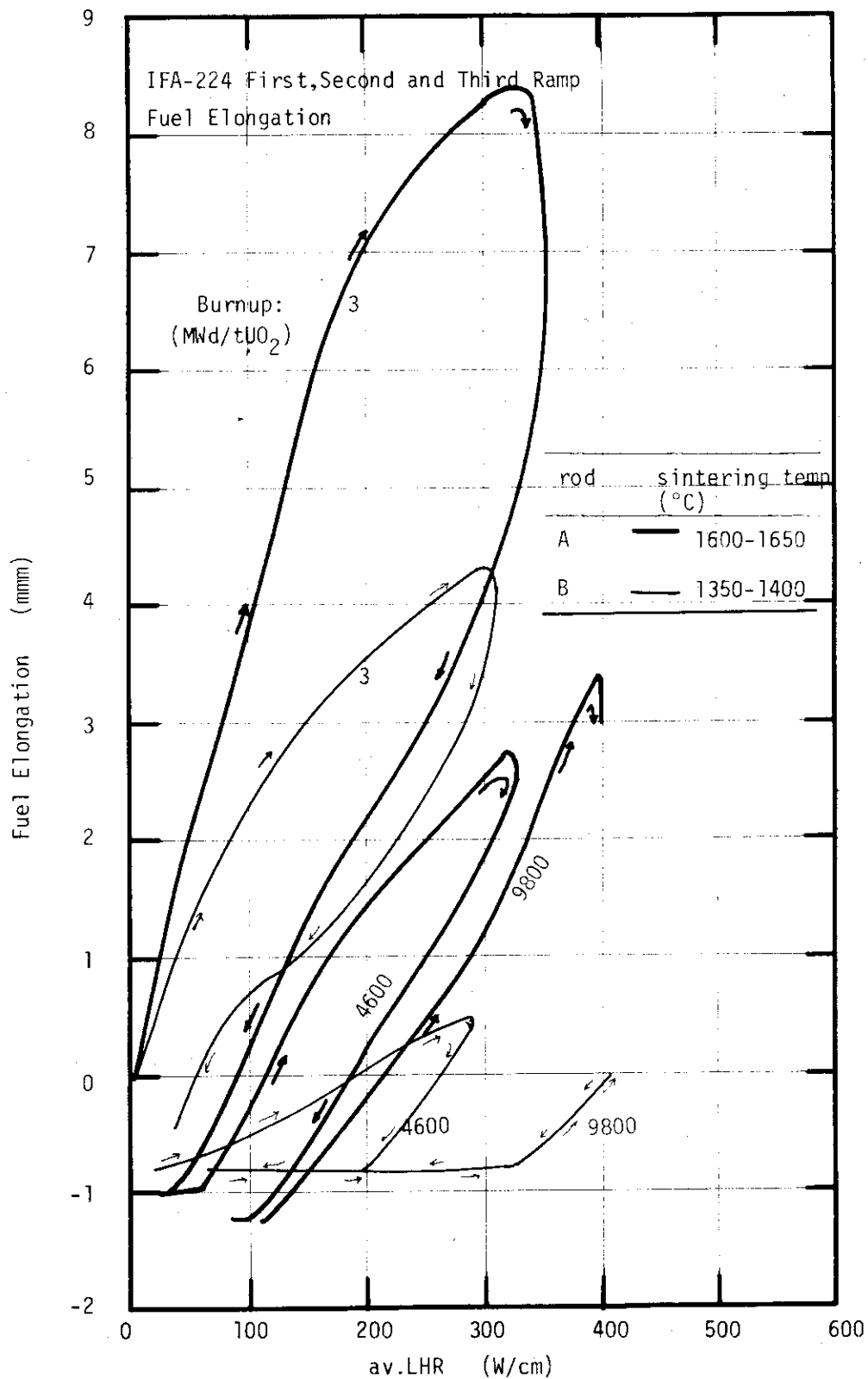


Fig. 63 Fuel stack elongation for rod A and rod B vs linear heat rating during first, second and third ramp cycle, IFA-224

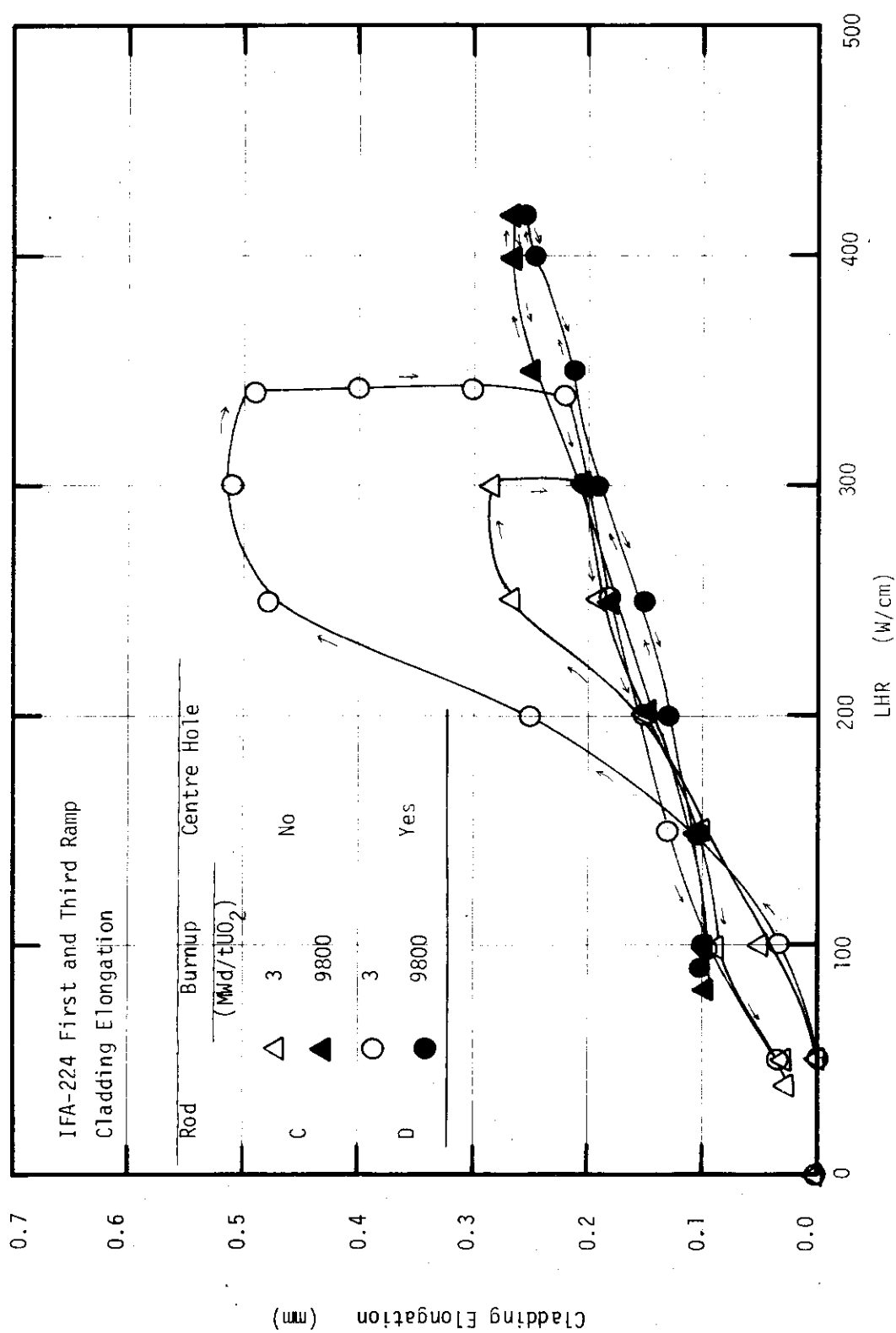


Fig. 64 Cladding elongation for rod C (with centre hole) and rod D (without centre hole) vs linear heat rating during first and third ramp cycle, IFA-224

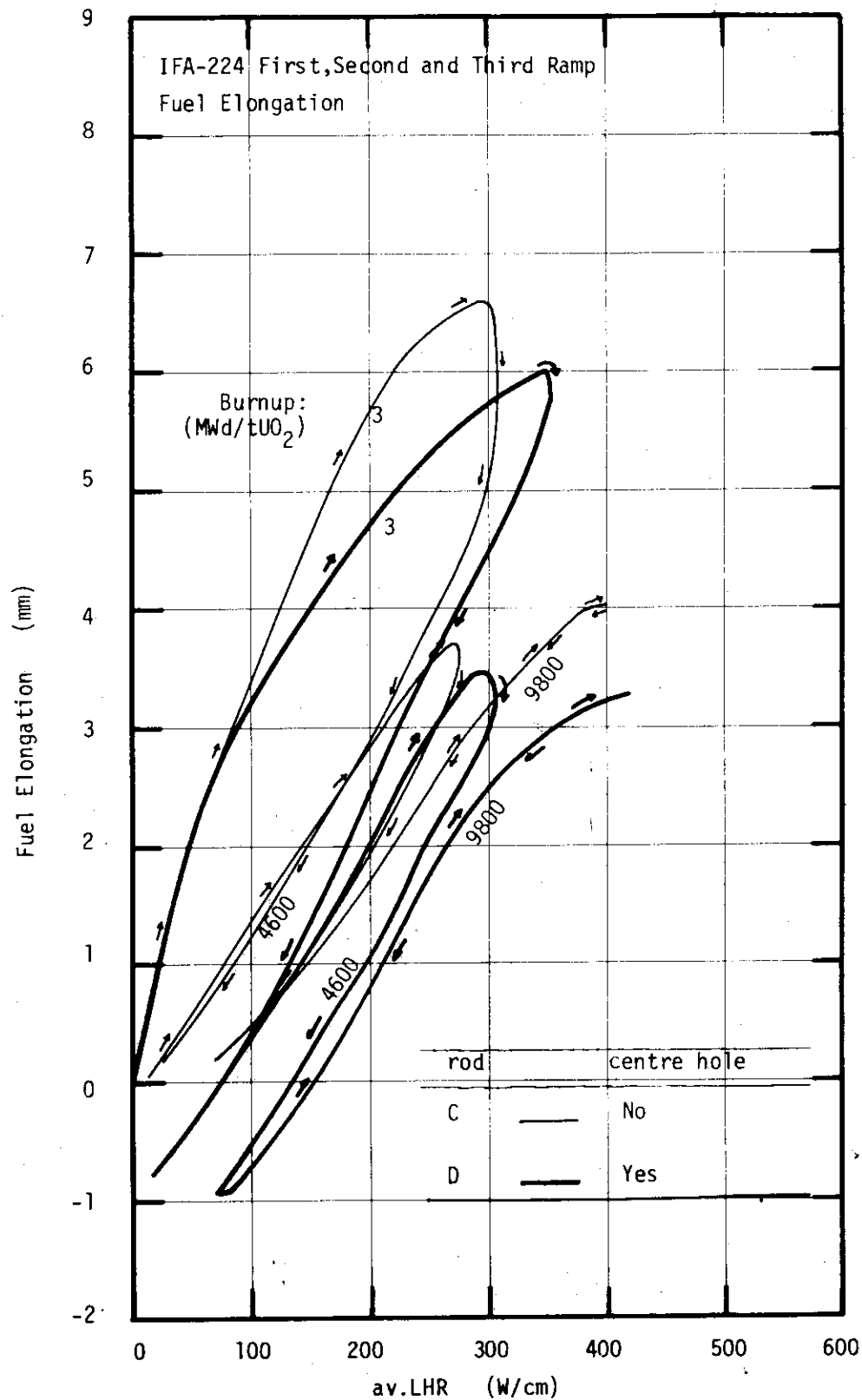


Fig. 65 Fuel stack elongation for rod C and rod D vs linear heat rating during first, second and third ramp cycle, IFA-224

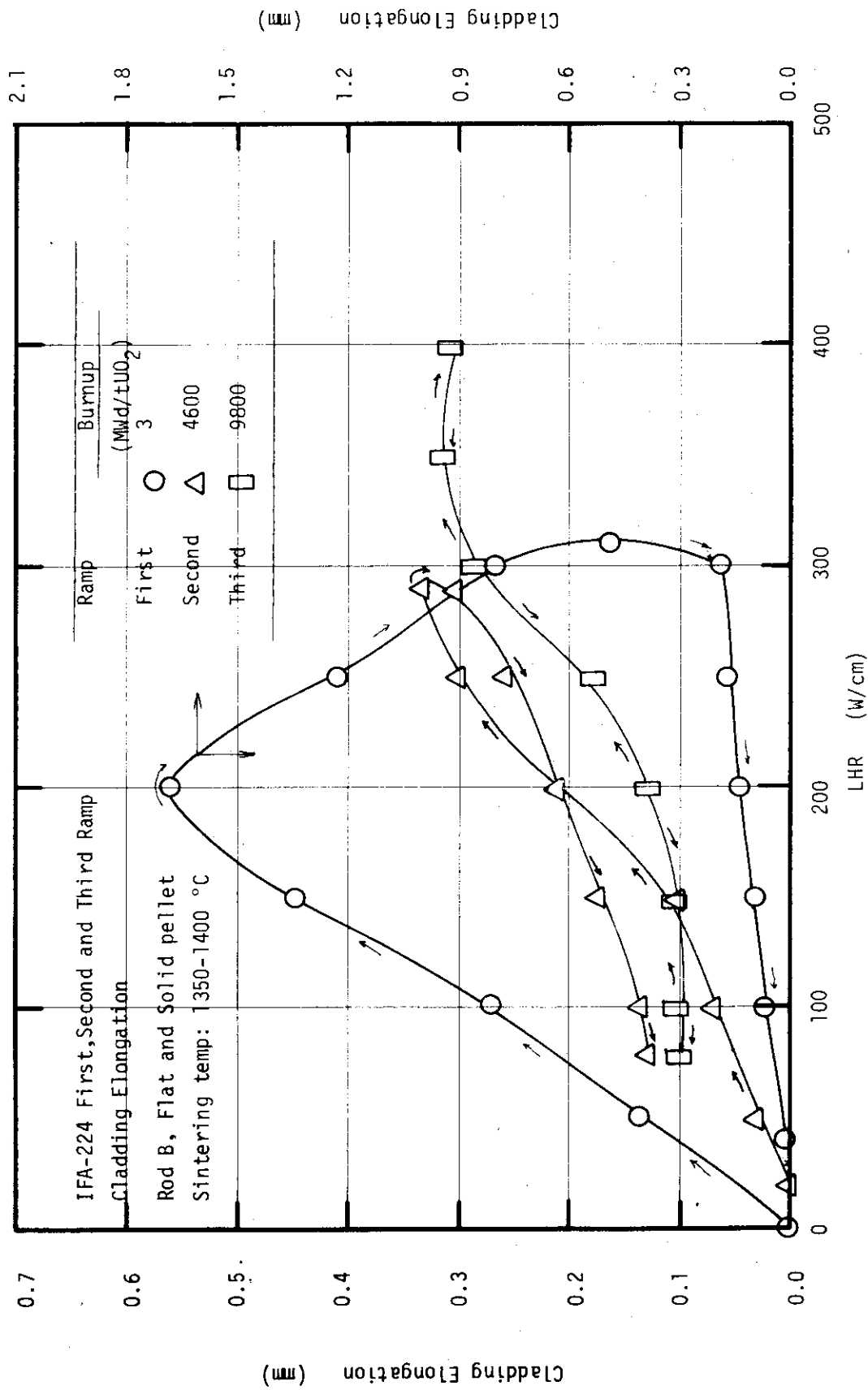


Fig. 66 Abnormal cladding elongation behavior for rod B vs linear heat rating during first ramp cycle, cladding to second, and third ramp cycle for references, IFA-224

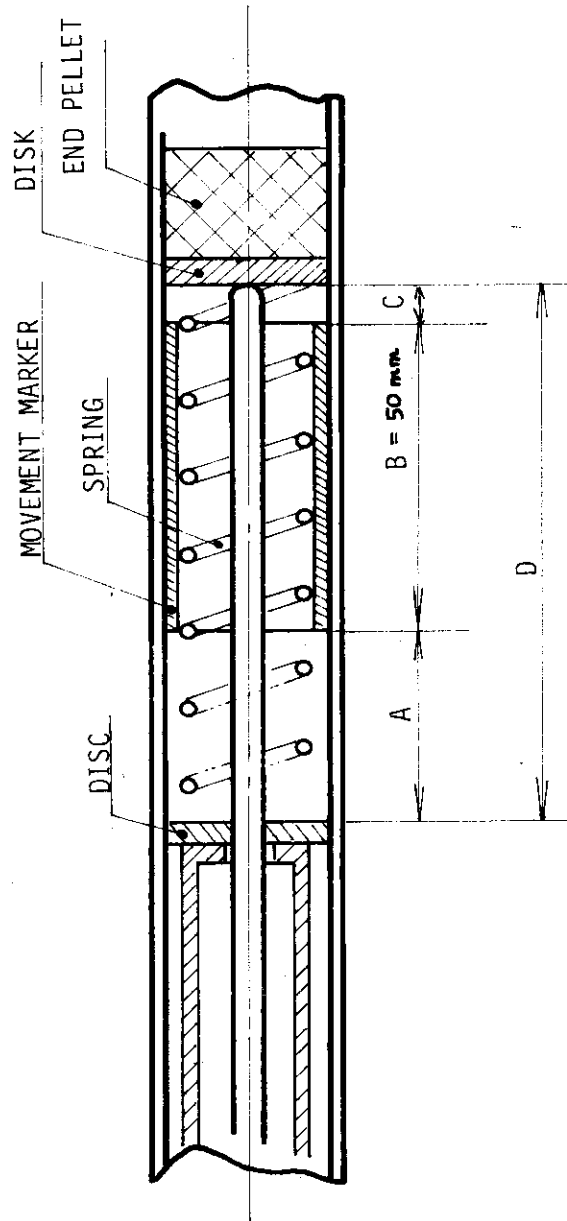


Fig. 67 Sketch of the plenum region and the measurements taken on the photographs, IFA-224

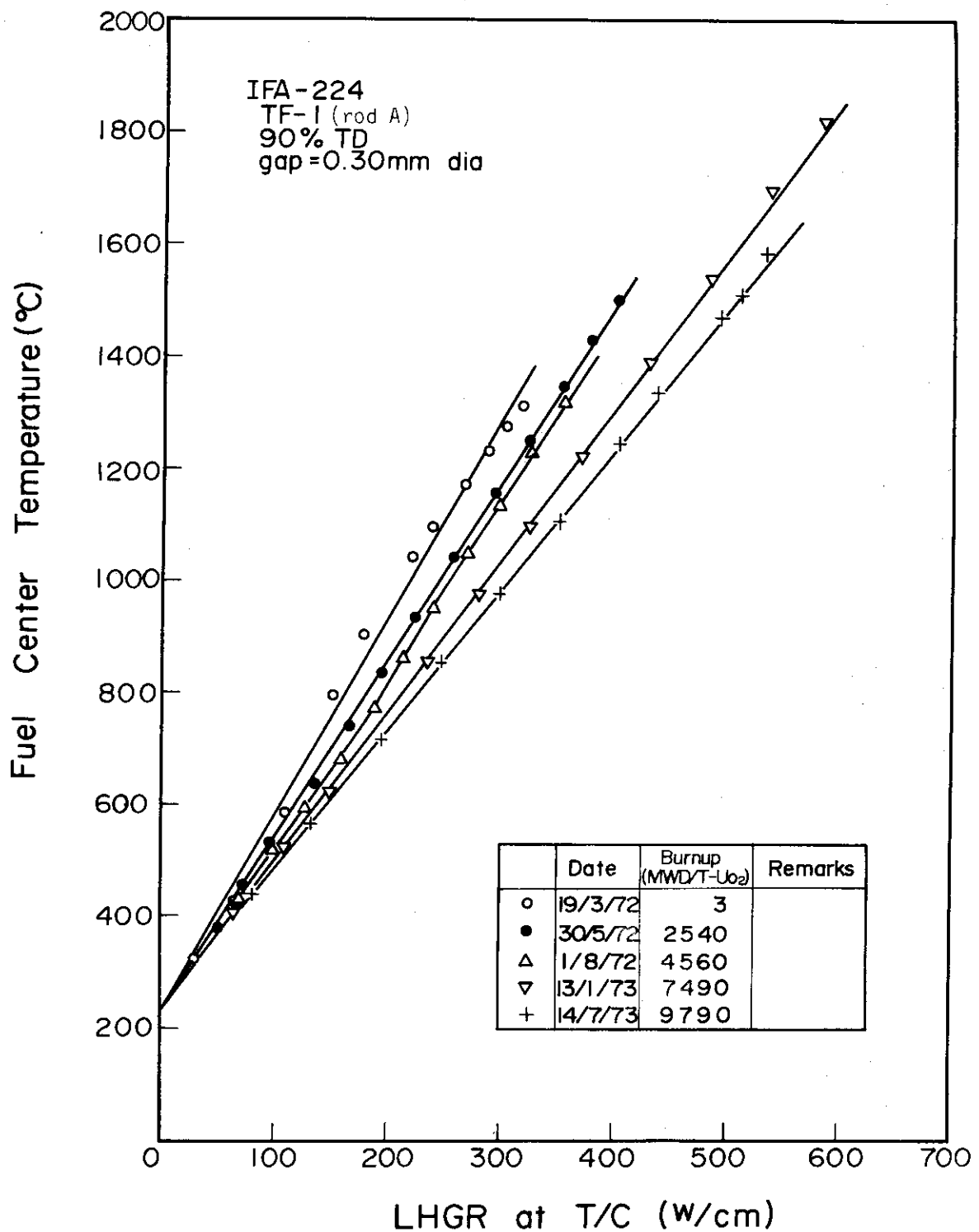


Fig. 68 Fuel centre temperature for rod A vs linear heat rating as a function of burnups, IFA-224

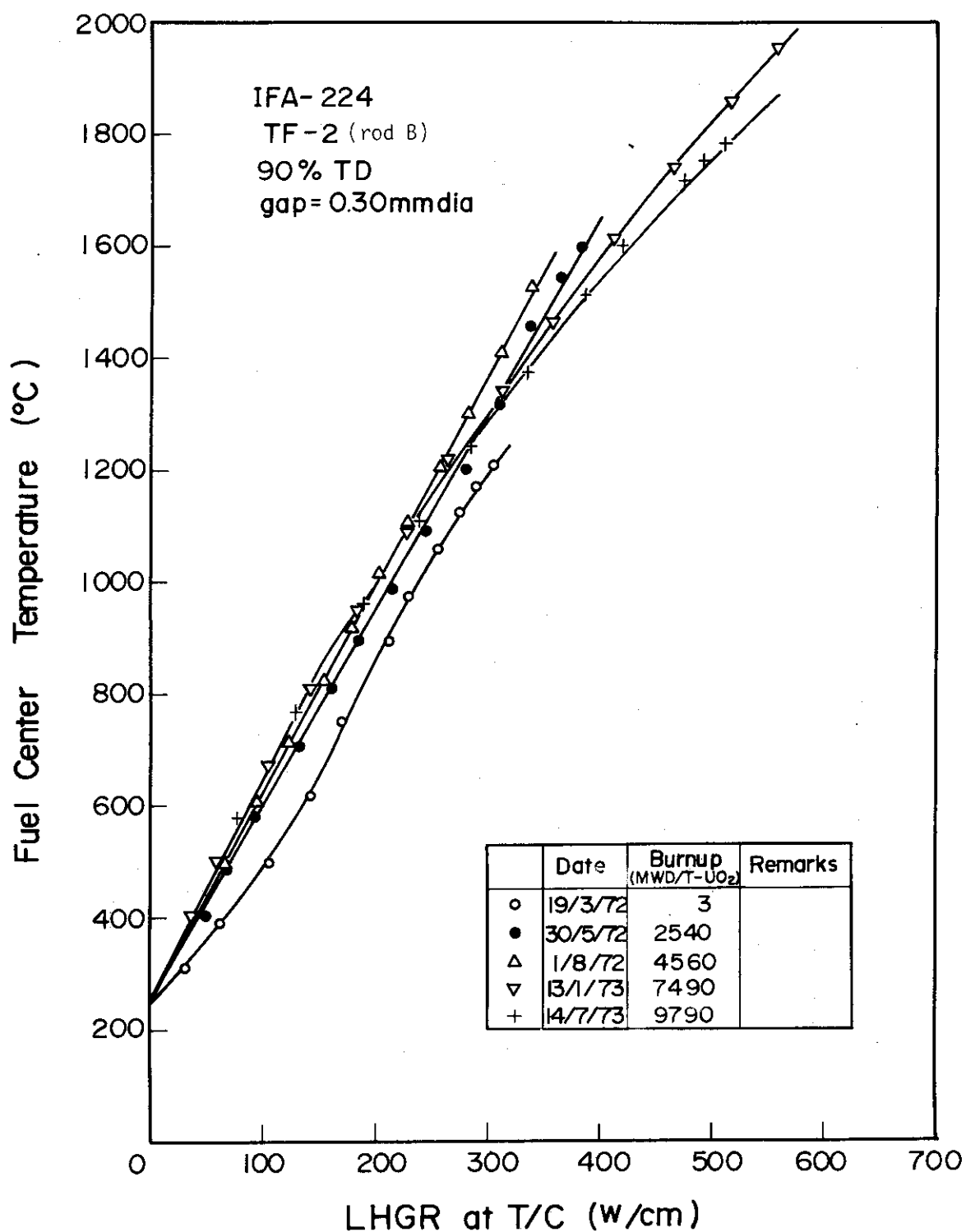


Fig. 69 Fuel centre temperature for rod B vs linear heat rating as a function of burnups, IFA-224

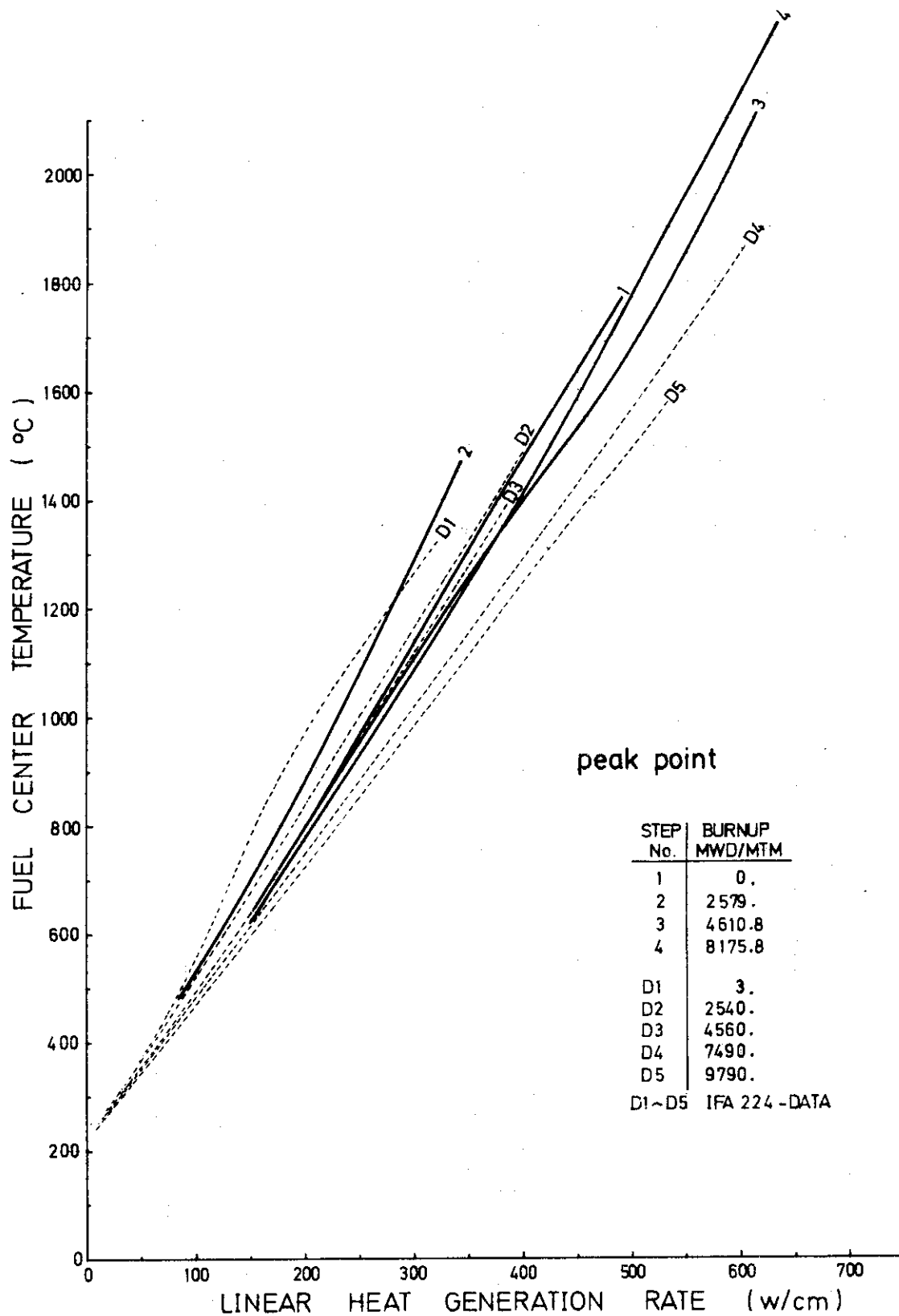


Fig. 70 Calculated fuel centre temperature with FREG-3 computer model and measured fuel centre temperature vs linear heat rating, IFA-224

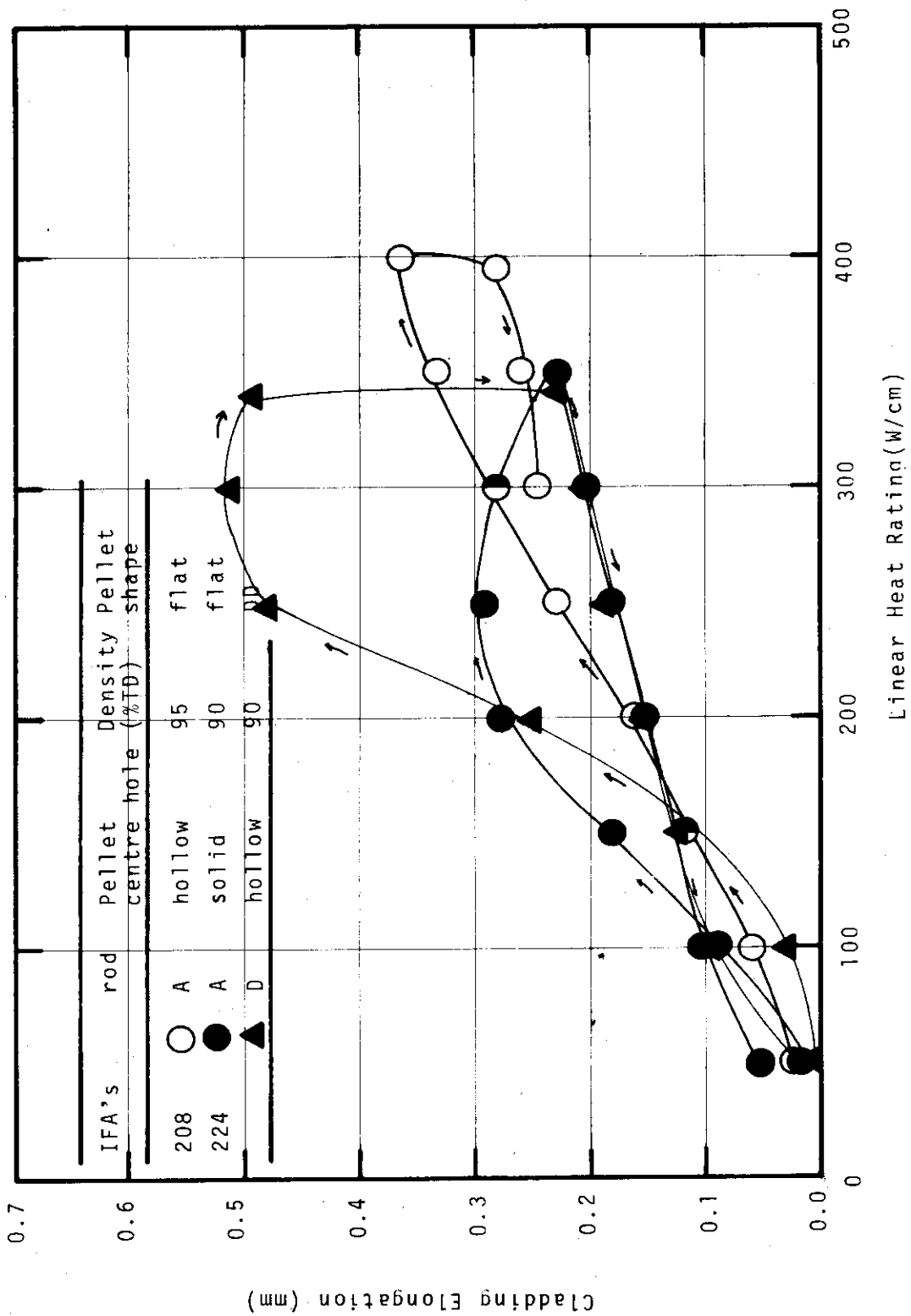


Fig. 71 Cladding elongation of IFA-208 (rod A) and of IFA-224 (rod A and rod D) vs linear heat rating

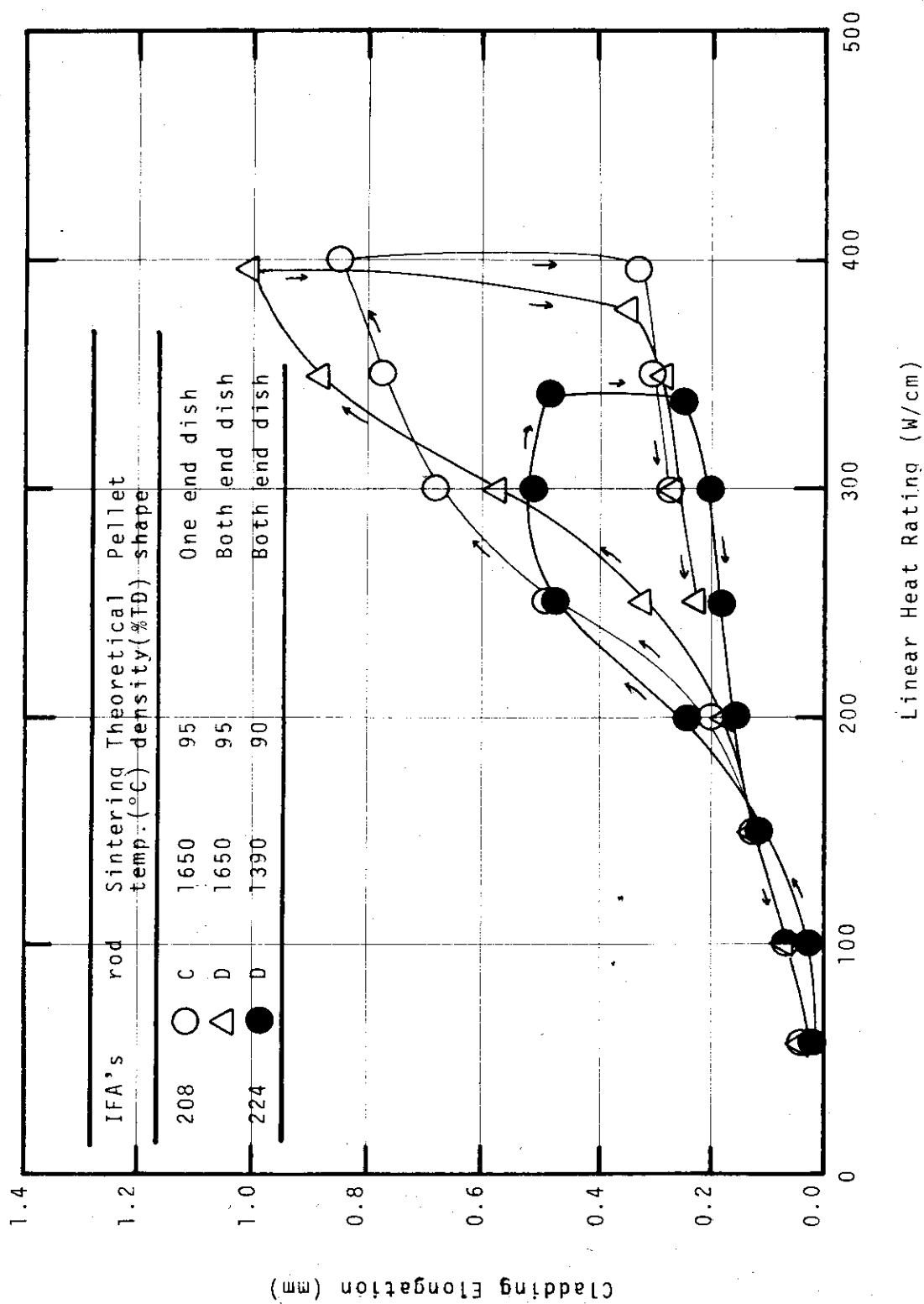


Fig. 72 Cladding elongation of IFA-208 (rod C and rod D) and of IFA-224 (rod D) vs linear heat rating

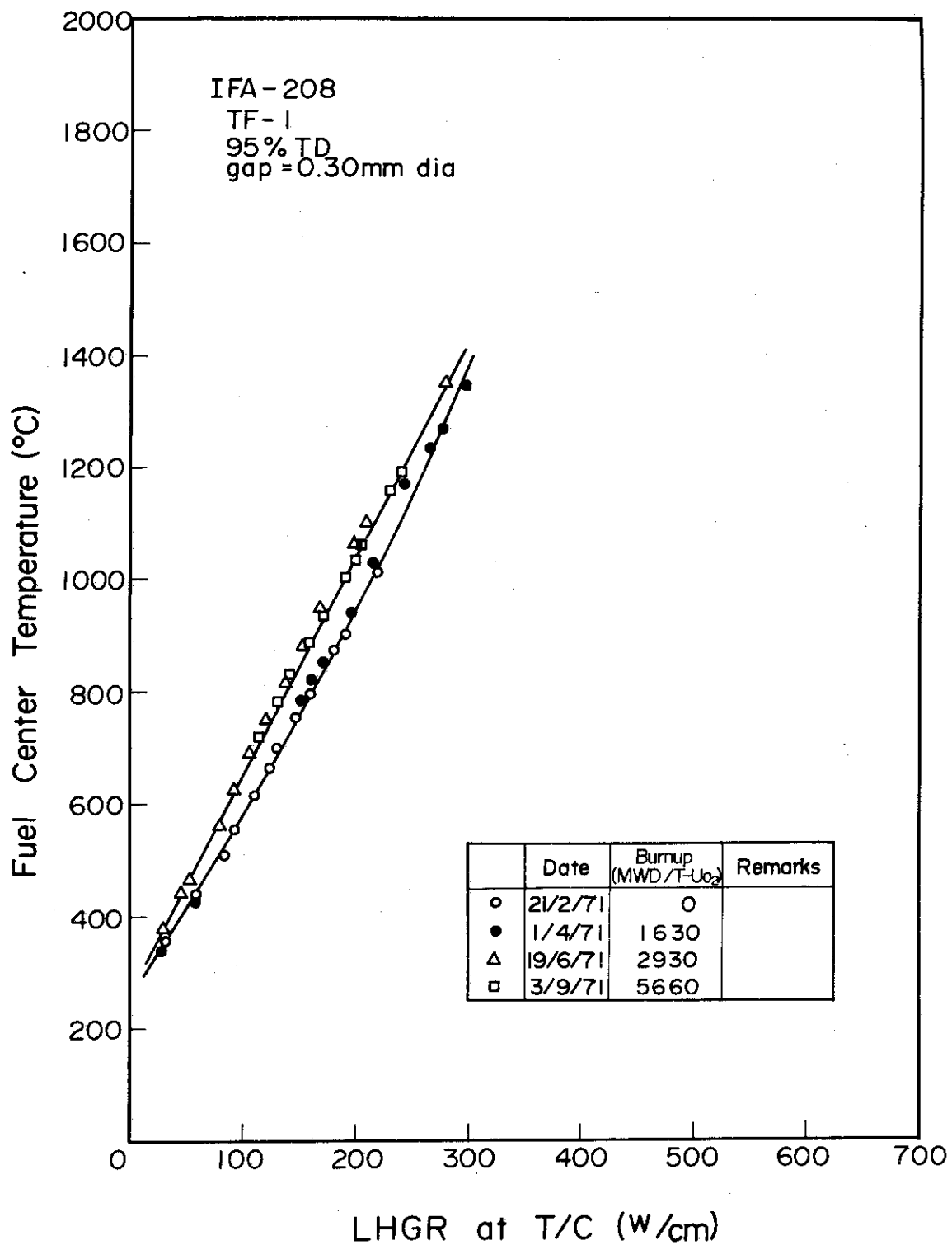


Fig. 73 Fuel centre temperature for rod A of IFA-208 vs linear heat rating as a function of burnups

付 録

IFA-208 および IFA-224 の運転データ、燃料集合体データシートおよび燃料集合体図面を Annex 1 ~ Annex 6 に示す。

Annex 1 IFA-208 Operational Data

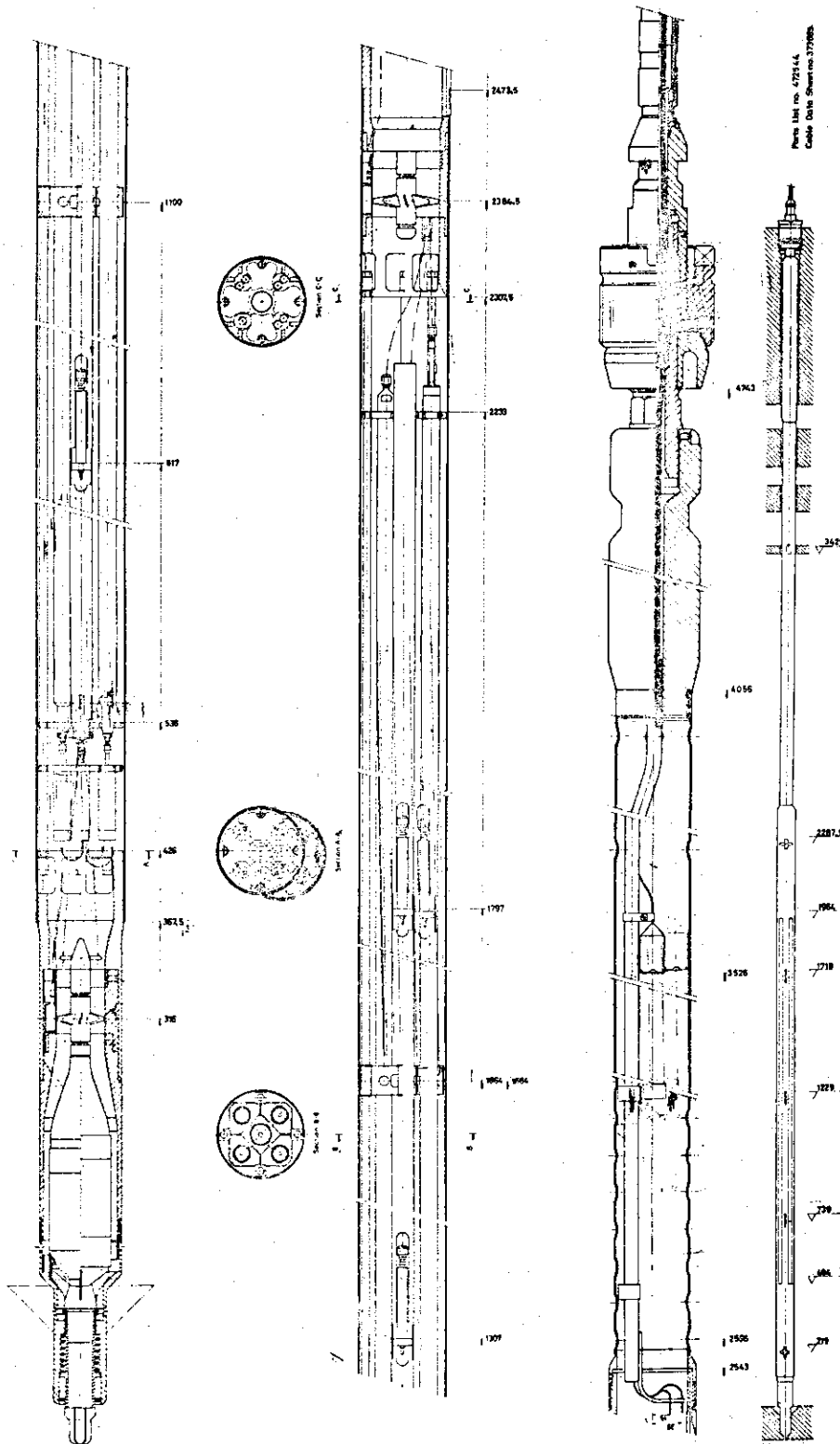
INSTITUTT FOR ATOMENERGI OSCD Halden Reactor Project.		DATA SHEET		ISSUE NO: 1	PAGE: 1
		IFA-208		SIGN: E. K.	DATE: 7/10-70
Supplier: JAERI, JAPAN					
OPERATIONAL DATA					
OBJECTIVES					
The main purpose of the experiment is to study the behaviour of fuel rods operating with heat ratings up to incipient melting conditions. Instrumentation is included to study fuel/clad interaction behaviour for dished and flat end pellets with a central hole.					
DESCRIPTION		PREDICTED		ACTUAL	REMARKS
Loading Date		1/71			
Unloading Date					
Burn-Up MWd/tUO ₂					
Reactor Position					
Rel. Flux Position		1.02	1.12		
Channel Power kW		330	360		
Avg. Lin. Heat Rating W/cm		565	620		
Max. Lin. Heat Rating W/cm		710	780		
Peak Surf. Heat Flux W/cm ²		156	171		10 ^W /o melting at peak
Peak /kd(-) W/cm		44.7	52.1		position
Peak Spec. Heat Rating W/gUO ₂		47.1	51.7		
Max. Centre Temp. °C		2640	2850		
Cooling Condition		Natural circulation			
Inlet Velocity m/sec		0.57			
Inlet Throttling v ² /2g		40			
Hydraulic Diam. mm		22.-			
Flow area mm ²		2940			
Assembly Dwg.		07353	Parts List Dwg.		472544
Cable Data Sheet		373665			
Experim. Procedure		1208			
INSTRUMENTATION					
1	Inlet turb. D=40, $\mu=32$	1	Outlet turb. D=55, $\mu=32$	1	Failure detector
1	Electromagnetic calibration valve			2	Inlet thermocouples
2	Outlet thermocouples			3	Neutron thermometers
3	Fuel stack elong. detectors, miniature type				
4	Clad elong. detectors (DTF)				
4	Fuel stack movement markers	1 T/C Central oxide thermocouple			
W 3% Re/W 25% Re, Mo/BeO, $\phi=1.6$ mm					

Annex 2 IFA-208 Test Assembly Data

DATA SHEET					ISSUE NO: 1	PAGE: 2
IFA-208					SIGN: E. K	DATE: 7/10-70
TEST ASSEMBLY DATA						
DESCRIPTION						
Fuel Form	Sintered, hollow UO_2 pellets, Ground					
Pin No. ¹⁾	2	2	4	3	1	Total
Fuel Weight kg ²⁾	1.786	1.784	1.710	1.750		7.030
End pellets	.034	.034	.034	.034		0.136
Fuel Density g/cm ³	10.41	(95 ^{+1.5%} of T. D.)				7.166
Fuel Diameter mm	12.38 ^{+0.02} Hole diam.: 2 ^{+0.1}					
Enrichment	7 ^w /o U-235 of active fuel					
Diam. Clearance mm	0.30					
Pellet Length mm	20	End pellets : 1.5				
Dishing	No	No	³⁾ Yes		⁴⁾ Yes	
Dishing Depth mm			1.0		1.0	
Land Width mm			0.94		0.94	
Cladding	Zr-2	Test Data at R. T.				
Cladding State	Autoclaved	Uts: 69 kp/cm ²				
		Ys: 56 kp/cm ² (0.2%)				
		El: 29%				
Welding	TIG					
Filler Gas	Helium					
Clad. Int. Diam. mm	12.68 ^{+0.04}					
Clad. Thickness mm	0.90					
No. Pins /Cluster	4	Four stay rods of diameter : 6 mm.				
Pitch Distance mm	46	(P.C.D.)				
Spacers	2 end plates and 2 spacers					
Fuel Length/Pin mm	Active fuel length : 1470					
Plenum	80 mm - 10 cm ³					
Shroud Material	Al x 8001 Removable					
Shroud Int. Diam. mm	71					
No. Of Clusters	1					
1) In each fuel pin two poisoned end pellets. (6 ^w /oU-235 / 4 ^w /o Gd ₂ O ₃) and two 10 mm long ZrO ₂ thermal insulator pellets 2) T/C Central oxide thermocouple in fuel pin A 3) Spherical one end 4) Spherical both ends						

Annex 3 IFA-208 Test Assembly Drawing

IFA - 208



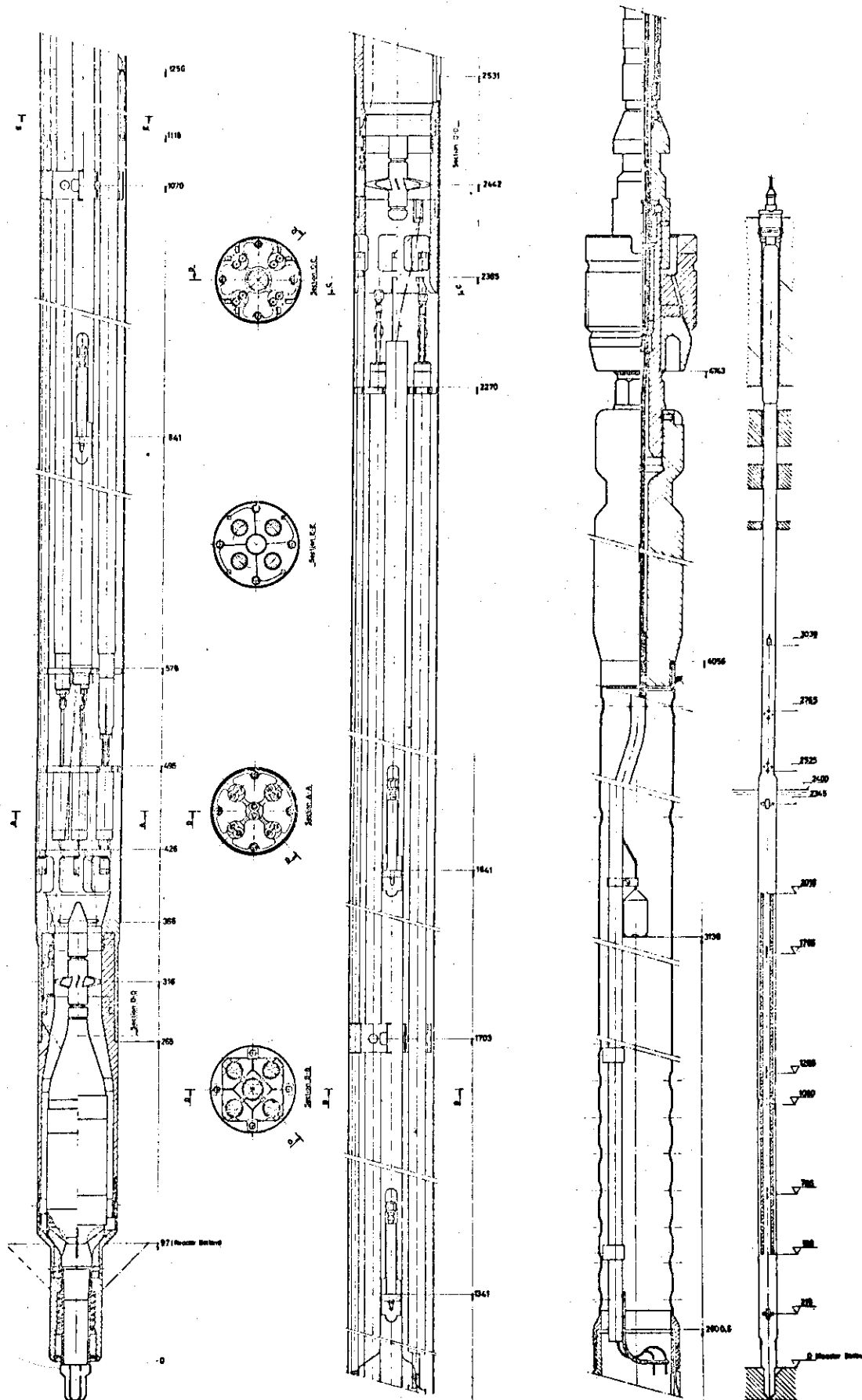
Annex 4 IFA-224 Operational Data

INSTITUTT FOR ATOMENERGI OECD Halden Reactor Project.		DATA SHEET		ISSUE NO: 1	PAGE: 1
				SIGN: TTo	DATE: 5/1-72
IFA-224					
Supplier: JAERI, JAPAN					
OPERATIONAL DATA					
OBJECTIVES					
- to study the behaviour of fuel rods operating with heat rating up to incipient melting conditions.					
DESCRIPTION		PREDICTED		ACTUAL	
Loading Date		2/72		18/ 3/ 72	
Unloading Date				29/ 9/ 73	
Burn-Up MWd/tUO ₂				11900	
Reactor Position				4-5 → 2-2	
Rel. Flux Position		1.02	0.96	1.02	
Channel Power kW		340	320	280 270	
Avg. Lin. Heat Rating W/cm		580	550	467 450	
Max. Lin. Heat Rating W/cm		750	700	605 648	
Peak Surf. Heat Flux W/cm ²		165	152		
Peak /kdθ W/cm		55.3	50.8		
Peak Spec. Heat Rating W/gUO ₂		64	51		
Max. Centre Temp. °C		2850	2850		
Cooling Condition		Natural Circulation			
Inlet Velocity m/sec		0.58			
Inlet Throttling v ² /2g		35			
Hydraulic Diam. mm		25.6			
Flow area mm ²		2932			
Assembly Dwg.		07373		Parts List Dwg.	472732
Cable Data Sheet		373914			
Experm. Procedure		EP-1224			
INSTRUMENTATION					
1	Inlet turb. D=40, n=32	1	Outlet turb. D=55, n=32		
2	Inlet thermocouples	2	Outlet thermocouples		
1	Electr. magn. calibration valve				1 Failure detector
3	Neutron thermometers	4	Local neutron detectors		
2	Central Oxide thermocouples (W 3% Re/W 25% Re)				
4	Fuel stack elongation detectors				
4	Cladding elongation detectors				1 ref. diff. transformer

Annex 5 IFA-224 Test Assembly Data

DATA SHEET					ISSUE NO: 1	PAGE: 2
IFA-224					SIGN: T70	DATE: 5/1-72
TEST ASSEMBLY DATA						
DESCRIPTION						
Fuel Form	Sintered UO_2 pellets, ground. ^{1), 2)}					
Pin No.	A	B	C	D	Total	
Fuel Weight kg	1.740	1.725	1.675	1.635	6.775	
End Pellets	0.035	0.036	0.035	0.035	0.141	
Fuel Density g/cm ³	9.88 (90% ± 2 of T.D.)					6.916
Fuel Diameter mm	12.38 ± 0.02					
Enrichment	7 w/o U-235 of active fuel					
Diam. Clearance mm	0.30					
Hole Diam. mm	← Solid Pellet →				2	
Pellet Length mm	20 Poisoned end pellet 15					
Dishing	No	No	Yes ³⁾	Yes ³⁾		
Dishing Depth mm			1.0	1.0		
Land Width mm			0.87	0.87		
Cladding	Zr-2		Test Data at R. T.			
Cladding State			UT kp/cm ²	65.5	64.3	
			YS kp/cm ²	49.7	49.0	
			EI %	26	28	
Welding	TIG					
Filler Gas	Argon gas, 99.99%					
Clad. Int. Diam. mm	12.68 ± 0.04					
Clad. Thickness mm	0.90					
No. Pins /Cluster	4					
Pitch Distance mm	40 (P.C.D.)					
Spacers	2 end plates and 2 spacers					
Fuel Length/Pin mm	Active Fuel Length = 1470 mm					
Plenum	80 mm - 10 cm ³					
Shroud Material	Zr-2					
Shroud Int. Diam. mm	70					
No. Of Clusters	1					
¹⁾ In each fuel pin two poisoned end pellets (6 w/o U-235/3.99 w/o Gd ₂ O ₃) and two 10 mm long zirconia pellet for thermal insulation. ²⁾ Pellets for A were sintered at high temperature (1600 - 1650°C) and those for B and C at low temperature (1350 - 1400°C). ³⁾ Spherically both sides.						

Annex 6 IFA-224 Test Assembly Drawing



JAPANESE TEST FUEL ASSEMBLY IFA-224