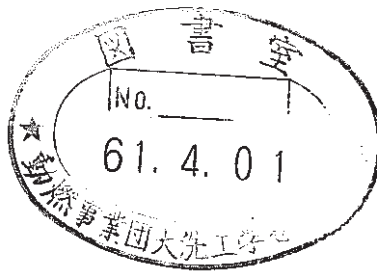


「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体(PFB000)の照射後試験(2)

燃料ピンの破壊試験



1986年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 86-143
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体(PFB000)の照射後試験(2)

燃料ピンの破壊試験

実施責任者[※] 山内 勘報告者[※] 滑川 卓志, 小部 昭, 桑島 幸夫

三次 岳志, 富永 功, 乾 俊彦

立花 利道

要 旨

「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体 PFB000(集合体平均燃焼度約5,100MWD/MTM)は、燃料ピンの製造時燃料-被覆管ギャップ寸法がパラメトリックに振ってありまた、プルトニウムスポットに関する製造仕様を緩和した燃料ペレットを用いている。照射燃料試験室(AGS)では、これらのパラメータが照射挙動に与える影響に注目して、燃料ピンの照射後試験を実施したことから、次の結果を得た。

- 1) 燃料の組織変化は、製造時の燃料-被覆管ギャップ寸法の差に対応して変化しており、製造時ギャップ寸法が最大の燃料ピン(6613ピン)については、軸方向最大燃焼位置で直径約0.5mmの中心空孔が観察されたが、その他の燃料ピンでは、ガスバブル領域内で部分的な柱状晶の形成が認められた程度であった。
- 2) ガスバブル領域内ではクラックヒーリングが認められた。
- 3) 燃料-被覆管残留ギャップ寸法は、製造時の50~80%に閉じている。
- 4) FCCIについては有意なものは認められない。
- 5) 被覆管硬さは、6613ピンの下端部では照射前に比べて約14%の増加が見られたが、上端側では照射前よりやや高い程度であった。
- 6) 被覆管密度は、未照射材に比べて有意な変化は認められなかった。
- 7) 6602ピンの軸方向最大燃焼位置(燃料カラム中央)での燃焼率測定結果は、0.616atom%(5,180MWD/MTM)であった。
- 8) 全体として、PFB000集合体の燃料ピンは健全に燃焼しており、プルトニウムスポットの影響と思われる特異な挙動も観察されなかった。

※ 大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料試験室

目 次

1. ま え が き	1
2. 燃 料 ピ ン	2
3. 照 射 条 件	3
4. 照 射 後 試 験	4
4.1 金相試験	4
4.1.1 試料調製方法	4
4.1.2 試験結果	4
4.2 被覆管硬さ測定試験	6
4.2.1 測定方法	6
4.2.2 測定結果	6
4.3 被覆管密度測定試験	6
4.3.1 測定方法	6
4.3.2 測定結果	7
4.4 燃焼率測定試験	7
4.4.1 試料調製方法	7
4.4.2 結 果	7
5. 結 論	8

1. ま え が き

「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体 PFB 000 は、炉心中心方向を E として、炉心位置 1A1 で 100 MW 出力上昇サイクル期間中に照射された集合体であり、集合体の平均燃焼度は約 5100MW D/MTM である。

本集合体には、炉心燃料集合体の燃料要素の製造を容易にし、その経済性を向上させるために製造仕様を一部変更した特殊燃料要素（燃料ペレットのプルトニウムスポットを最大 200 μ m まで許容してある）が組み込まれている。

照射後試験の目的は、1) B 型特殊燃料集合体の出力運転時における燃焼初期での健全性の確認、2) 特殊燃料要素の燃焼初期の照射挙動の把握、及び 3) 特殊燃料要素の健全性の確認である。

本集合体は、上記目的により昭和 58 年 11 月に照射燃料集合体試験室（FMF）から搬入され、昭和 59 年 5 月から試験を開始したが、この度、照射燃料試験室（以後 AGS と略す）における照射後試験が終了したので報告する。破壊試験の対象となったピンは下記の 4 本である。

			コンパート メント	No.	位置
(1)	6602	ピン（プレナム容積：10.699cc，S社製被覆管，	A		2
(2)	6605	ピン（" : 7.738cc，"	A		5
(3)	6613	ピン（" : 10.948cc，"	C		3
(4)	6614	ピン（" : 10.602cc，"	C		4

これらのピンについて、照射後試験として(a)金相試験（燃料組織観察）、(b)被覆管硬さ測定、(c)被覆管密度測定、及び(d)燃焼率測定を実施した。

2. 燃 料 ピ ン

PFB000 集合体中の本照射後試験に供された燃料ピンを Fig.1 - 1 に示し, またその仕様を Table1 - 1 に示す。

3. 照 射 条 件

本集合体の炉心装荷位置を Fig. 2-1 に示す。また本集合体において破壊試験を実施した燃料ピンの集合体内装荷位置を Fig. 2-2 に示す。さらに集合体の照射条件を以下に記す。

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| ① 燃焼度(集合体平均) | 5100 MWD/MTM |
| ② 照射サイクル | 100 MW 出力上昇サイクル |
| ③ 集合体ピークフルエンス ($E \geq 0.1$ MeV) | 6.0×10^{21} nvt |
| ④ 線出力(集合体平均) | 298 W/cm |
| ⑤ 照射位置 | 1 A 1 |

試験に供した各燃料ピンの燃焼度分布, 線出力分布, 温度分布及び中性子照射量分布を Fig. 2-3 ~ Fig. 2-14 に示す。

4. 照射後試験

4.1 金相試験

4.1.1 試料調製方法

金相試験工程を Fig. 4-1-1 に示す。また金相試験の実施内容を Table 4-1-1 に示す。

4.1.2 試験結果

製造時のギャップ寸法が異なる 4 本のピン

No. 6602 ピン (174 μm)

No. 6605 ピン (174 μm)

No. 6613 ピン (204 μm)

No. 6614 ピン (132 μm)

について、Photo 1 ~ 5 に断面マクロ写真を示す。また各試料断面の $\times 86$, $\times 100$, $\times 400$ の as Polished 及び etched 状態における光顕組織写真を Photo 6 ~ 30 に示す。これらの観察及び測定の結果から次のことが確認できた。

(1) 燃料組織

各ピン燃料カラム中央位置 (最大出力部) の

試料 No. 660222 (D.F.C.B^{*1} 267 mm, 341 W/cm, 6178 MWD/MTM)

試料 No. 660522 (D.F.C.B 265 mm, 343 W/cm, 6222 MWD/MTM)

試料 No. 661342 (D.F.C.B 266 mm, 340 W/cm, 6234 MWD/MTM)

試料 No. 661422 (D.F.C.B 265 mm, 337 W/cm, 6183 MWD/MTM)

において、試料 No. 661342 の燃料中心部に直径約 0.5 mm ϕ の中心空孔が認められ、その外側に柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域が存在し、最外周部には不変化領域が観察される。他の 3 試料、No. 660222, No. 660522, No. 661422 については、ガスバブル領域においてレンズ状ボイドやポアがスweepして出来た柱状晶が部分的に観察されるが、柱状晶領域の形成までには致っておらず、中心空孔も見られない。この柱状晶は、試料 No. 660222, No. 660522 では燃料中心部から直径で約 1.7 mm, また No. 661422 では約 1.5 mm の範囲内に存在している。組織変化領域は、燃料中央部にガスバブル領域、その外側に高密度化領域、不変化領域が存在している。

次に、試料 No. 661322 (306 W/cm, 5378 MWD/MTM), No. 661362 (291 W/cm, 5654 MWD/MTM) の組織変化領域は、ガスバブル領域、高密度化領域、不変化領域の 3 領域から成っている。No. 661322 の燃料中心部にはレンズ状ボイドや柱状晶が観察される。

*1 Distance from core bottom

以上の結果を Table 4-1-2 に示す。燃料カラム中央位置の 4 試料 (No.660222, No.660522, No.661342, No.661422) の燃料組織を比較した場合、製造時のギャップ寸法の差に対応して組織が変化しており、最大の製造時ギャップを有した試料 No.661342 (製造時ギャップ 203 μm) にのみ中心空孔が観察された。

次に、No.6613 ピンについて各組織領域径 (R) と燃料外径 (R_o) との比 (R/R_o) のピン軸方向依存及び線出力依存を Fig. 4-1-2~4-1-4 に示す。各領域径は、線出力の最も高い燃料カラム中央位置近辺で大きくなる傾向が見られる。

(2) クラックの観察

No.661322, No.661422 に貫通及び半径方向クラックが入っている。他の試料は、半径方向及び周方向クラックが観察される。軸方向最上部の No.661362 を除き全ての試料のガスバブル領域内においてクラックヒーリングが認められる。

(3) ギャップ寸法の観察

各試料位置でのギャップ寸法 (直径ギャップの平均値) の測定値を Table 4-1-2 に示す。ギャップ寸法は、各試料共に製造時のギャップに対して閉じていた。その変化量 (残留ギャップ / 製造時ギャップ $\times 100$) は、

試料 No.660222 (67 %)

試料 No.660522 (60 %)

試料 No.661322 (66 %)

試料 No.661342 (72 %)

試料 No.661362 (51 %)

試料 No.661422 (76 %)

である。No.661322 が製造時のギャップ寸法に対して最大で 51 % と閉じている。これはペレット内に発生した貫通クラックの影響によるものと考えられる。

(4) FCCI の観察

試料 No.661362 の被覆管内表面部にのみ、最大 5 μm 程度の荒れが観察されたが、FCCI 量としては有意なものであるとは云えない。その位置の写真を Photo 26 に示す。

4.2 被覆管硬さ測定試験

4.2.1 測定方法

測定は、L-2セル内設置の遠隔操作型微小硬さ計（マイクロビッカーズ法）により実施した。Table 4-2-1に測定条件及び測定位置を示す。

4.2.2 測定結果

ピン軸方向硬さ値は、Table 4-2-2及びFig. 4-2-1に示すように燃料下端側（D.F.C.B. = 136.9 mm）で323（Hv 500）と照射前硬さ値（283（Hv 500））より40（Hv 500）、変化率にして約14%高い値であった。一方、燃料上端側（D.F.C.B. = 412 mm）では照射前よりやや高い程度である。

次にTable 4-2-3に示す各測定点の硬さ値から、被覆管肉厚方向において内面側が外側にくらべ硬くなっている箇所がみられる。

4.3 被覆管密度測定試験

密度測定は、6613ピンの炉心中心部1点のみについて行なった。Fig. 4-3-1に試料採取位置を示す。

4.3.1 測定方法

(1) 試料調製及び測定

試料調製及び測定は、次のように行なった。

a) 試料切断

マイクロソーを用いて測定試料（24.5 mm長）を切断採取。

b) 脱ミート

脱ミート装置を用いて被覆管内の燃料を除去。

c) 被覆管端面研磨

耐水研磨紙# 120, #240, #600を用いて各5分程度被覆管の端面を研磨。

d) 被覆管酸洗浄及び乾燥

8モル硝酸90℃中で15分浸した後、純水による超音波洗浄を15分行ない自然乾燥。

e) 最終洗浄及び乾燥

測定直前に、アセトン、アルコールの順で各1分ごとの洗浄をし自然乾燥。

f) 測定

空気中での秤量、界面活性剤入り純水中秤量をくり返し測定。

g) 密度計算

測定データを測定温度条件等により補正し密度値を計算する。Reference材としてLot

No S 00089 のコールド材を用いた。尚測定に使用した電子天秤の読み取り限度は $1 \mu\text{g}$ である。

4.3.2 測定結果

試料の密度測定結果を Table 4-3-1 に示す。また、照射条件、 $3 \Delta\text{D}/\text{D}$ 及び密度変化を比較した結果を Fig. 4-3-2 に示す。

測定試料の密度変化は 0.17% であり測定誤差の範囲 ($\pm 0.2\%$) 以内である。したがって有異な差とは認められない。

4.4 燃焼率測定試験

^{148}Nd を指標核種として同位体希釈分析により燃焼率を求めた。

4.4.1 試料調製方法

試料の採取位置を Fig. 4-4-1 に、また試料の調製方法及び手順を Fig. 4-4-2 に示す。

4.4.2 結 果

Table-1 に今回同位体分析に使用したスパイク液の濃度及び組成等のデータ(質量分析値)を示す。Table 4-4-2 に燃焼率計算で使用した ^{148}Nd , ^{146}Nd 及び ^{145}Nd の実効核分裂収率を示す。

以上のデータ及び質量分析結果から求めた PFB000 の燃焼率は 0.616 atom% ($5180 \text{ MW D}/\text{MTM}$) であった。燃焼率計算結果の詳細を Table 4-4-3 に示す。

5. 結 論

「常陽」MK-IIのB型特殊燃料集合体PFD 000（集合体平均燃焼度 5,100 MWD/MTM）の4本の燃料ピンの照射後試験を実施した。これらの燃料ピンは、3種類の燃料-被覆管ギャップ寸法（132 μm 、174 μm 及び 204 μm ）を有しており、また燃料ペレットはプルトニウムスポットを通常の2倍の200 μm まで許容したものである。試験の結果、次のことが明らかになった。

1) 金相試験結果

- ① 試験対象の4本の燃料ピンのうち製造時ギャップ寸法が最大の燃料ピン（6613ピン）の最大燃焼位置（燃料カラム中央）付近で、直径約0.5mmの中心空孔が観察された。この中心空孔の外側には、柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域が順次存在し、最外周部には不変化領域が存在する。その他の3本の燃料ピンでは、最大燃焼位置でガスバブル領域内で部分的に柱状晶が見られる程度で、中心空孔や柱状晶領域は存在しない。これらの燃料組織変化は、製造時ギャップ寸法の差に対応して変化している。
- ② 製造時最大ギャップ寸法ピン（6613ピン）の燃料カラム最上端の試料を除いて、全ての試料でガスバブル領域内においてクラックヒーリングが認められる。
- ③ 燃料-被覆管の残留ギャップ寸法は、製造時寸法の80～50%に閉じている。
- ④ FCCIは、最大5 μm の荒れが観察されただけで、有意な内面腐食挙動は認められなかった。

2) 被覆管硬さ測定結果

製造時最大ギャップ寸法ピン（6613ピン）の燃料カラム上端側と下端側の2点を測定したところ、照射前に比べて下端側で約14%の増加が認められた。上端部については、照射前よりやや高い程度であった。

3) 被覆管密度測定結果

製造時最大ギャップ寸法ピン（6613ピン）の最大燃焼位置（燃料カラム中央）の測定の結果未照射材に比べて有意な密度変化は見られなかった。

4) 燃焼率測定結果

6602ピンの最大燃焼位置（燃料カラム中央）の測定の結果、0.616 atom%（5,180 MWD/MTM）であった。

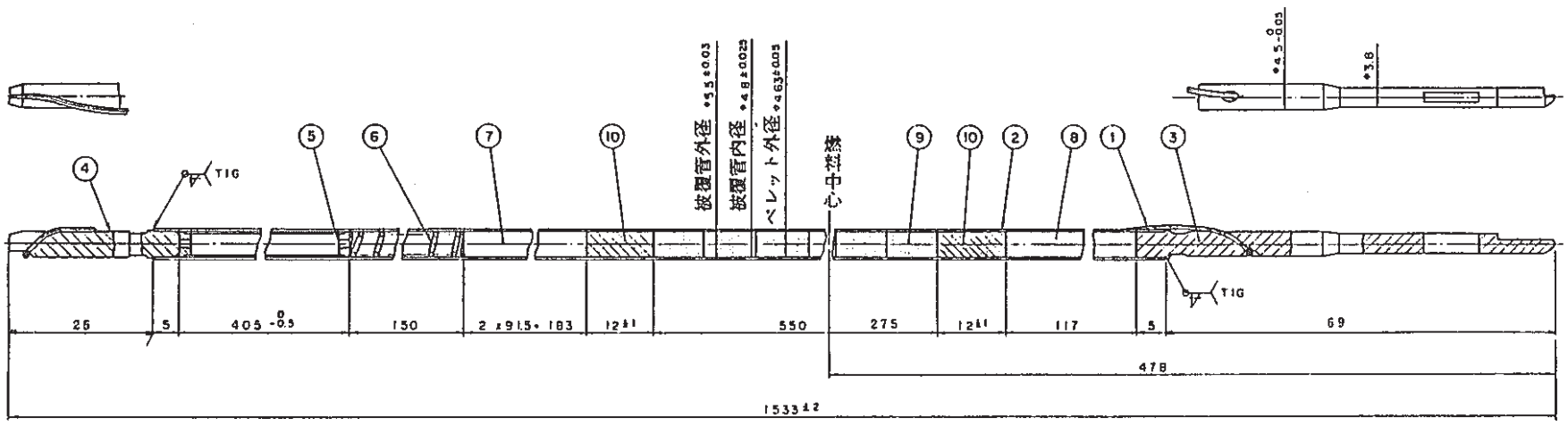
以上の結果から、PFB 000集合体の燃料ピンは、全体として健全に燃焼していることが確認され、プルトニウムスポットが影響したと思われる特異な挙動は見当らなかった。

データ集1 燃料ピンの製造仕様及び照射条件

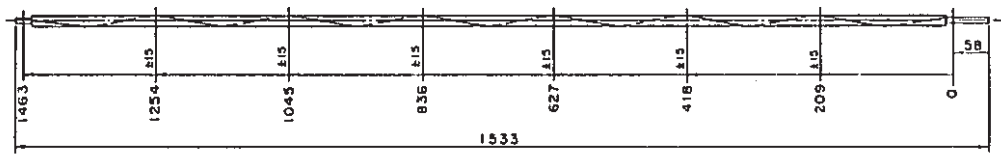
Table 1- 1	Fuel pin fabrication parameters
Fig. 1- 1	Schematic drawing of fuel pin
Fig. 1- 2	Irradiation position of PFB000 subassembly in JOYO MK- II core
Fig 2- 2	Fuel pin position in the PFB000 subassembly
Fig. 2- 3	Burnup distribution
2- 6	
Fig. 2- 7	Linear heat rate distribution
2-10	
Fig. 2-11	Fluence and cladding temperature distribution
2-14	

Table. 1-1 Fuel pin fabrication parameters

S/A name	PFBOOO	Pin No.	Na 6602, Na 6605, Na 6613, Na 6614
Fuel			
Fuel form	Flat end solid pellet		
Pellet diameter (mm)	Na 6602 } : 4.65 ± 0.05 Na 6605 }		Na 6613 : 4.60 ± 0.01 Na 6614 : 4.66 ± 0.01
Pellet density (% T.D)	93.0 ± 2.0		
Fuel composition	$29 \pm 1w/o$ PuO ₂ -UO ₂		
U-235 enrichment (%)	12.0 ± 0.3		
Pu isotopic composition (%)	Pu 239/240/241/242 75.7/20.7/2.8/0.7		
O/M ratio	$1.97 \pm \begin{matrix} 0.02 \\ 0.03 \end{matrix}$		
Cladding			
Type and work	SUS 316, 20% Cold work		
Outer/inner diameter (mm)	$5.5 \pm 0.030 / 4.8 \pm 0.025$		
Lot identification	Na 6602 : ST 0055 Na 6605 : ST 0035		Na 6613 : ST 0003 Na 6614 : ST 0037
Fuel pin			
Pin length (mm)	1533 ± 2		
Pin outer diameter (mm)	5.5 ± 0.030		
Fuel column length (mm)	550 ± 5		
Plenum length (mm)	Na 6602 : 150 Na 6613 : 154		Na 6605 : 153.5 Na 6614 : 155
Blanket length (mm)	{ Upper : 12 ± 1 Bottom : 12 ± 1		
Fuel/cladding dia. gap (mm)	Na 6602 : 0.174 Na 6613 : 0.205		Na 6605 : 0.174 Na 6614 : 0.132
Pin spacing & support	Wrapping wire		



(単位 mm)



ワイヤラッピング全体図(1/5)

Fig.1-1 Schematic Drawing of Fuel Pin

10	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	
9	炉心用ペレット	PuO ₂ -UO ₂	61	
8	要素反射体(下)	SUS316	1	
7	要素反射体(上)	SUS316	2	
6	プレナムスプリング	SUS304 WPB	1	
5	押え板付プレナムスリーブ	SUS316	1	
4	上部端栓	SUS316	1	
3	下部端栓	SUS316	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	
番号	品名	材質	個数	備考
名称	B型特殊燃料集合体 I型特殊燃料要素			

炉内照射位置

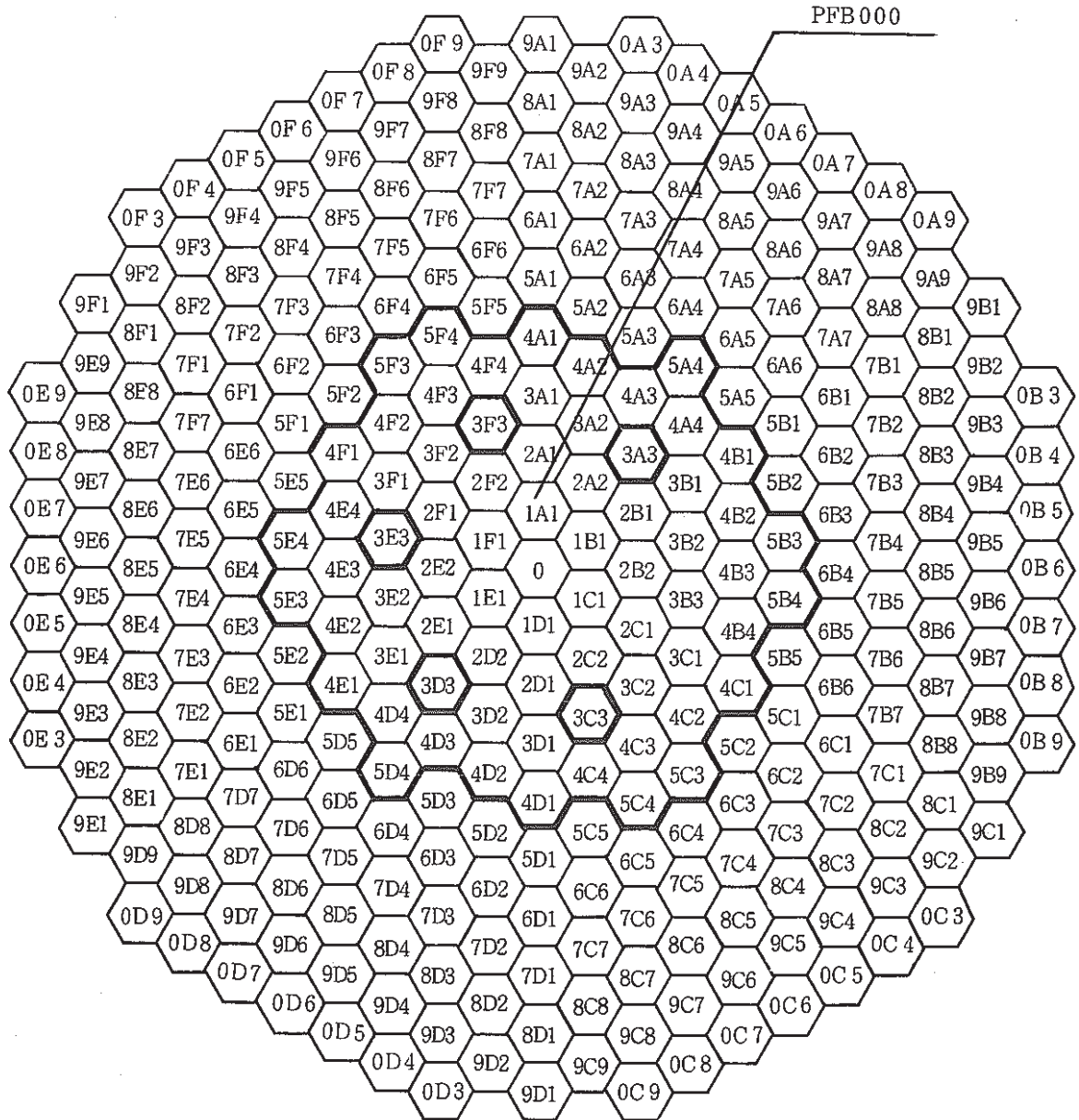
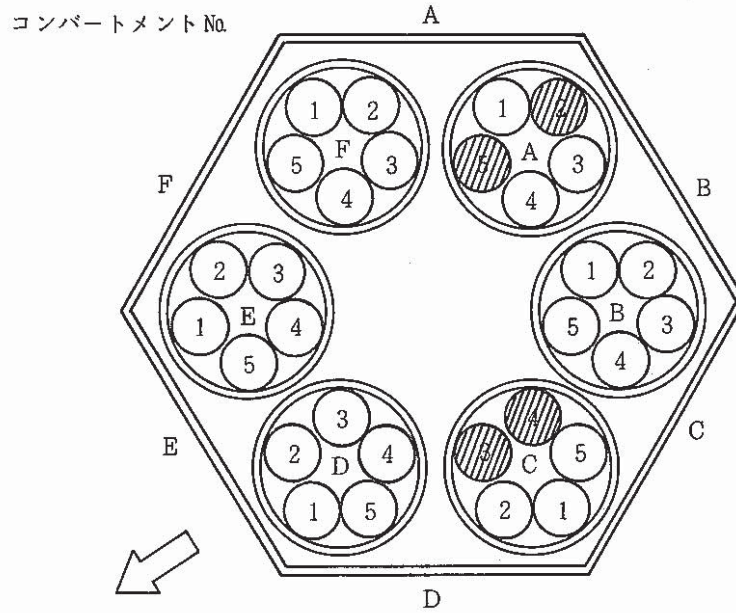


Fig.2 - 1 Irradiation position of PFB000 subassembly in JOYO MK-II core



注) ← : 炉心中心方向を示す

● : PIE 対象燃料ピン

A コンパートメント - No. 2 ピン = 6602 ピン

A コンパートメント - No. 5 ピン = 6605 ピン

C コンパートメント - No. 3 ピン = 6613 ピン

C コンパートメント - No. 4 ピン = 6614 ピン

Fig. 2 - 2 Fuel pin positions in PFB000 subassembly

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 02

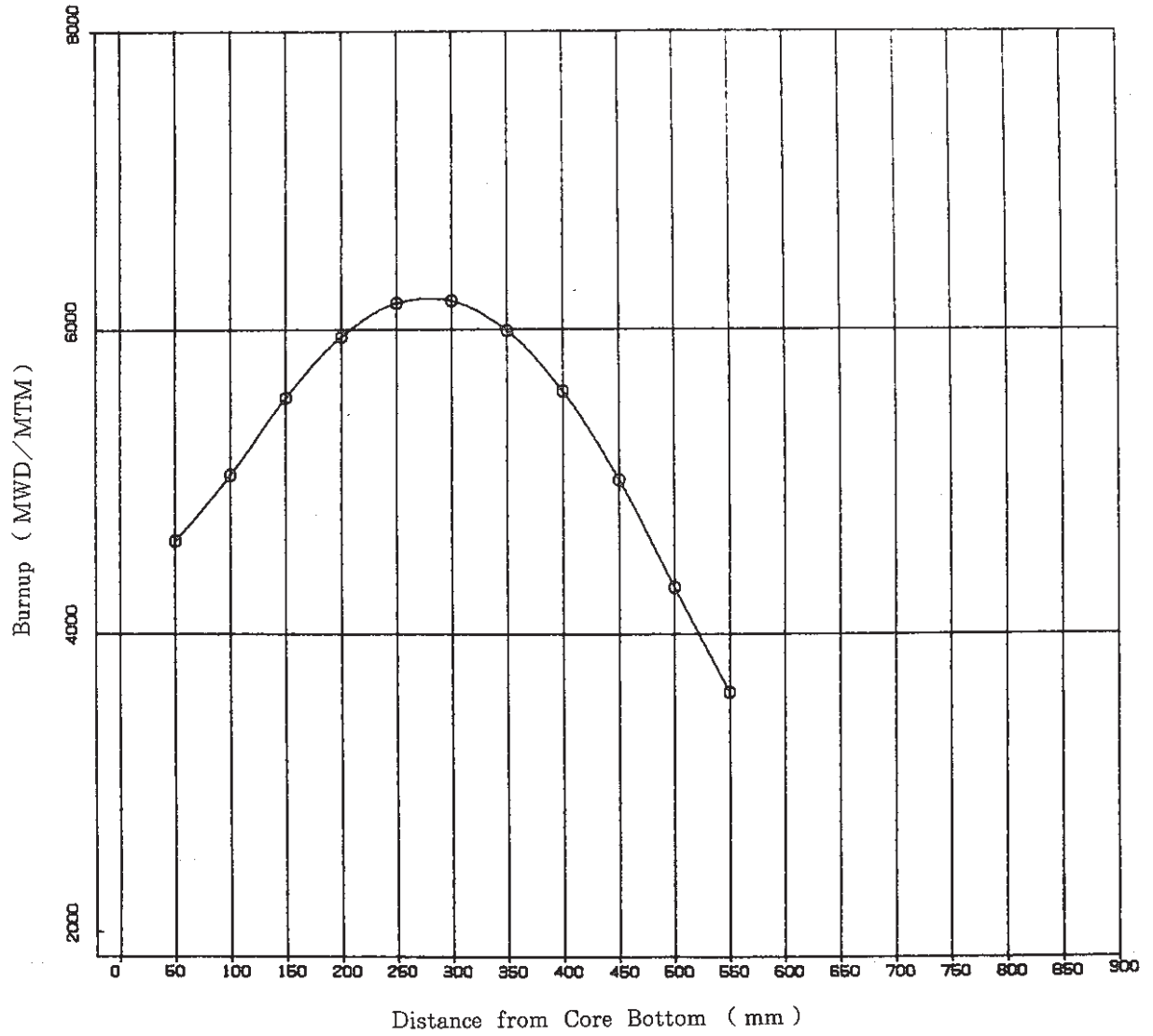


Fig.2 - 3 Burnup distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 05

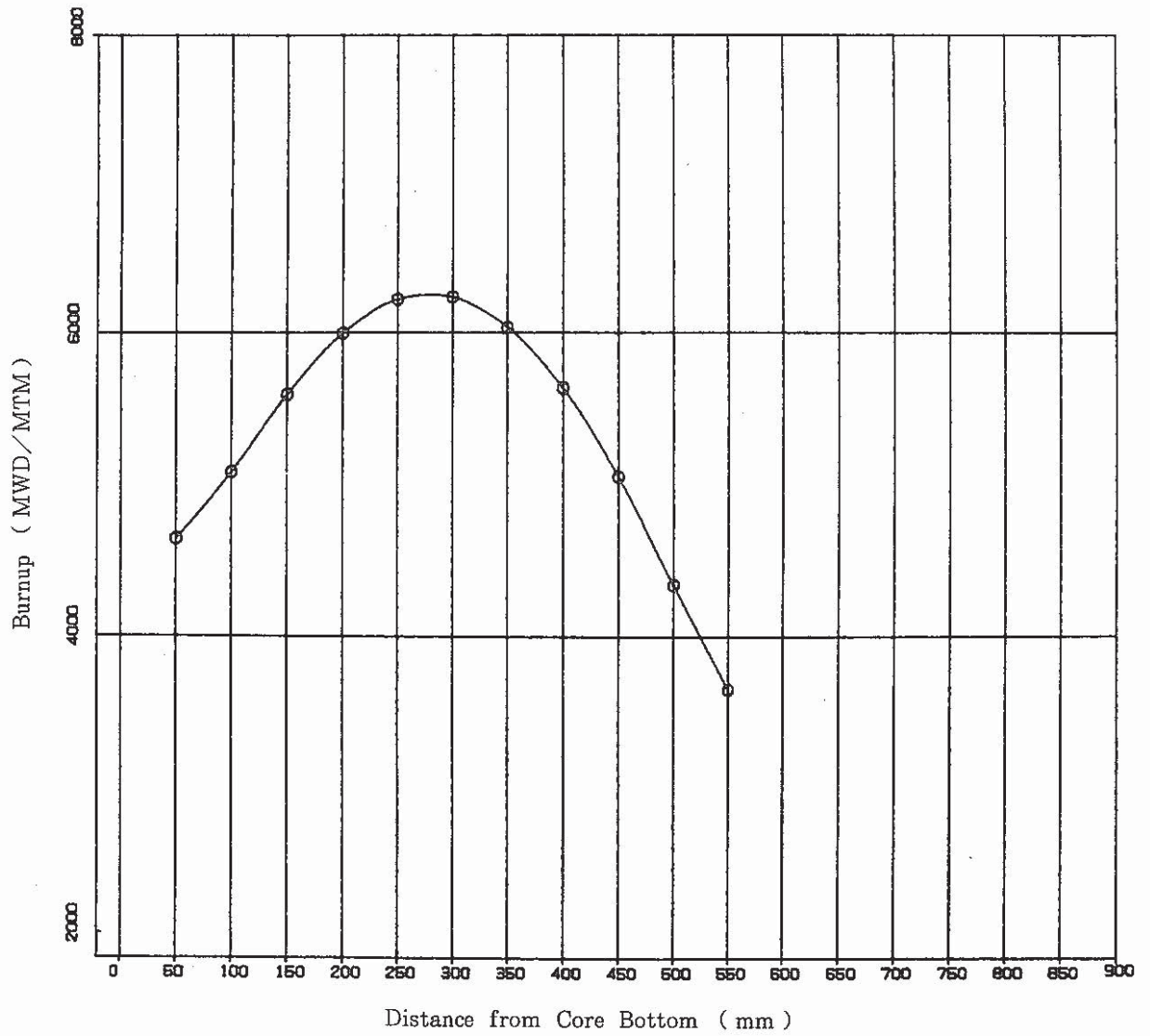


Fig.2 - 4 Burnup distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 13

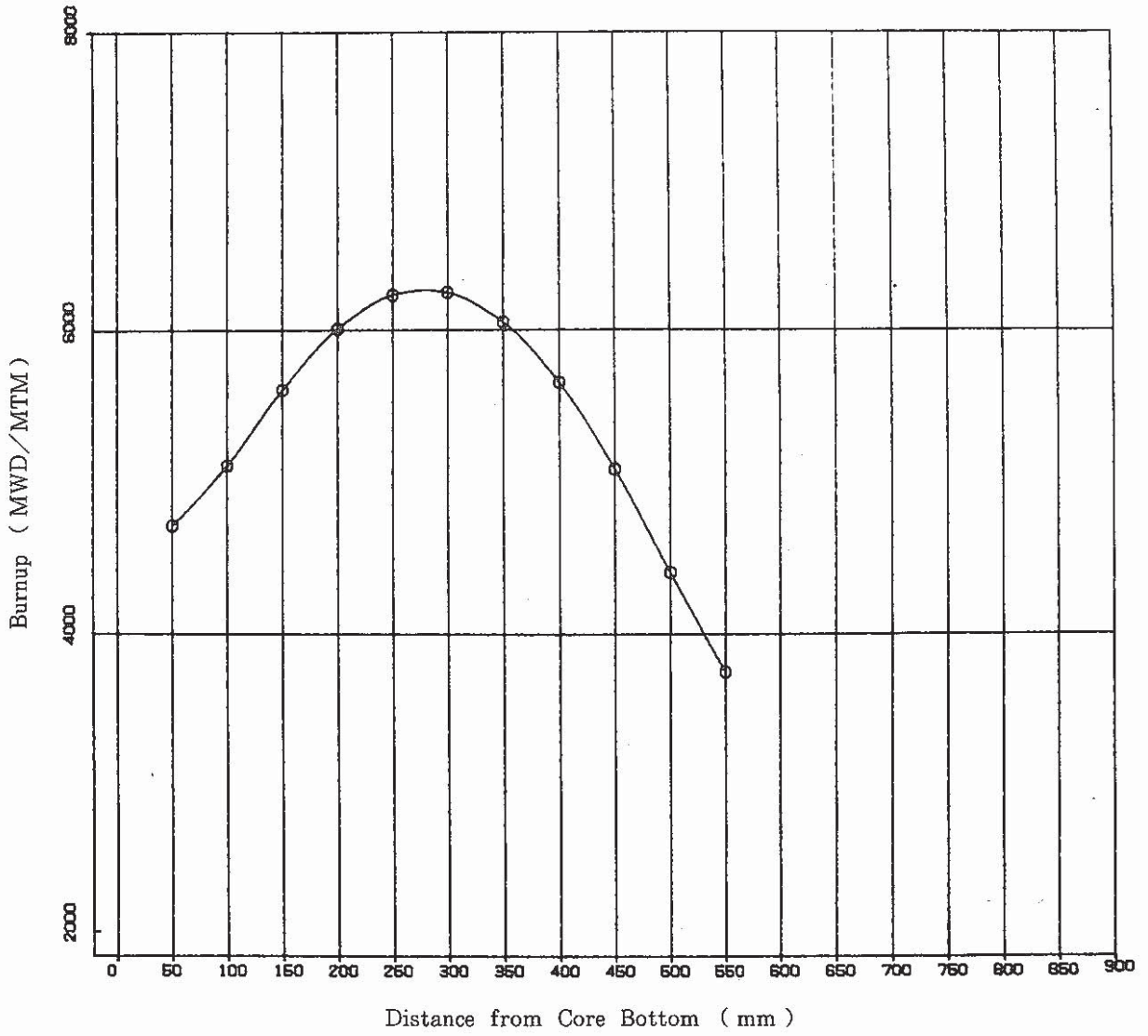


Fig.2 - 5 Burnup distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 14

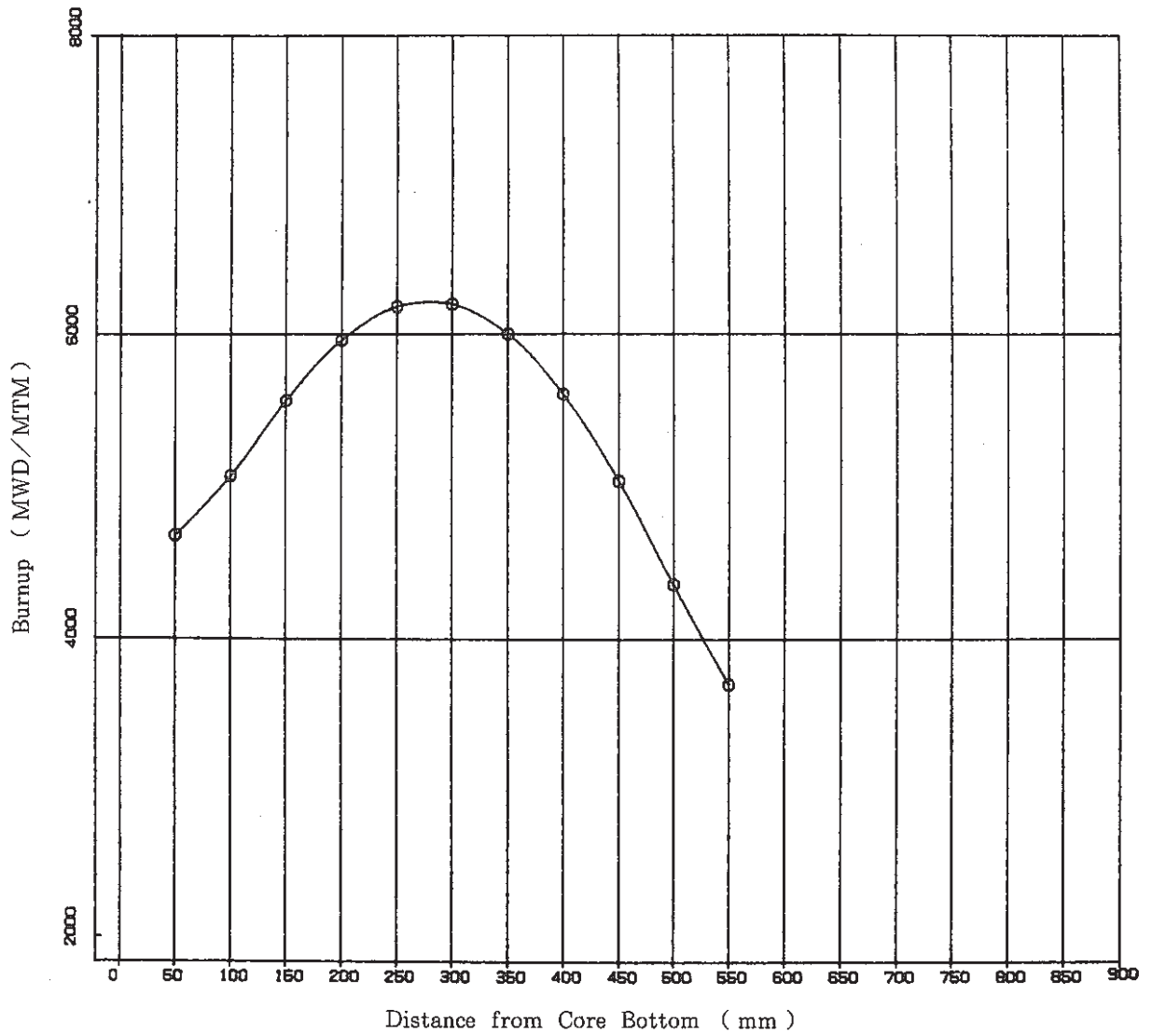


Fig.2 - 6 Burnup distribution

S/A FAB NO. : PF8000

PIN NO. : 02

MAX ϕ EQL Δ

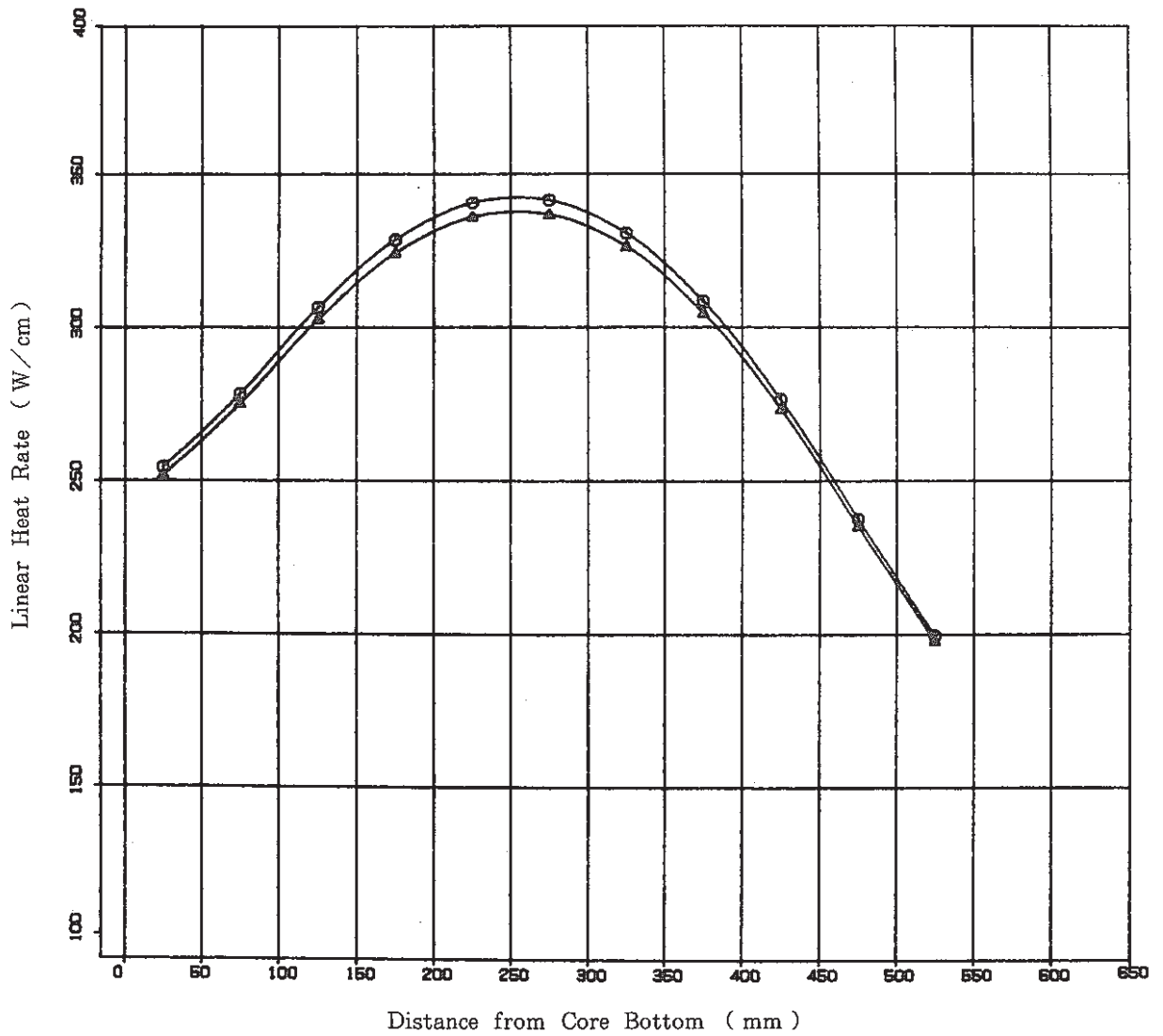


Fig.2 - 7 Linear heat rate distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 05

MAX ϕ EOL Δ

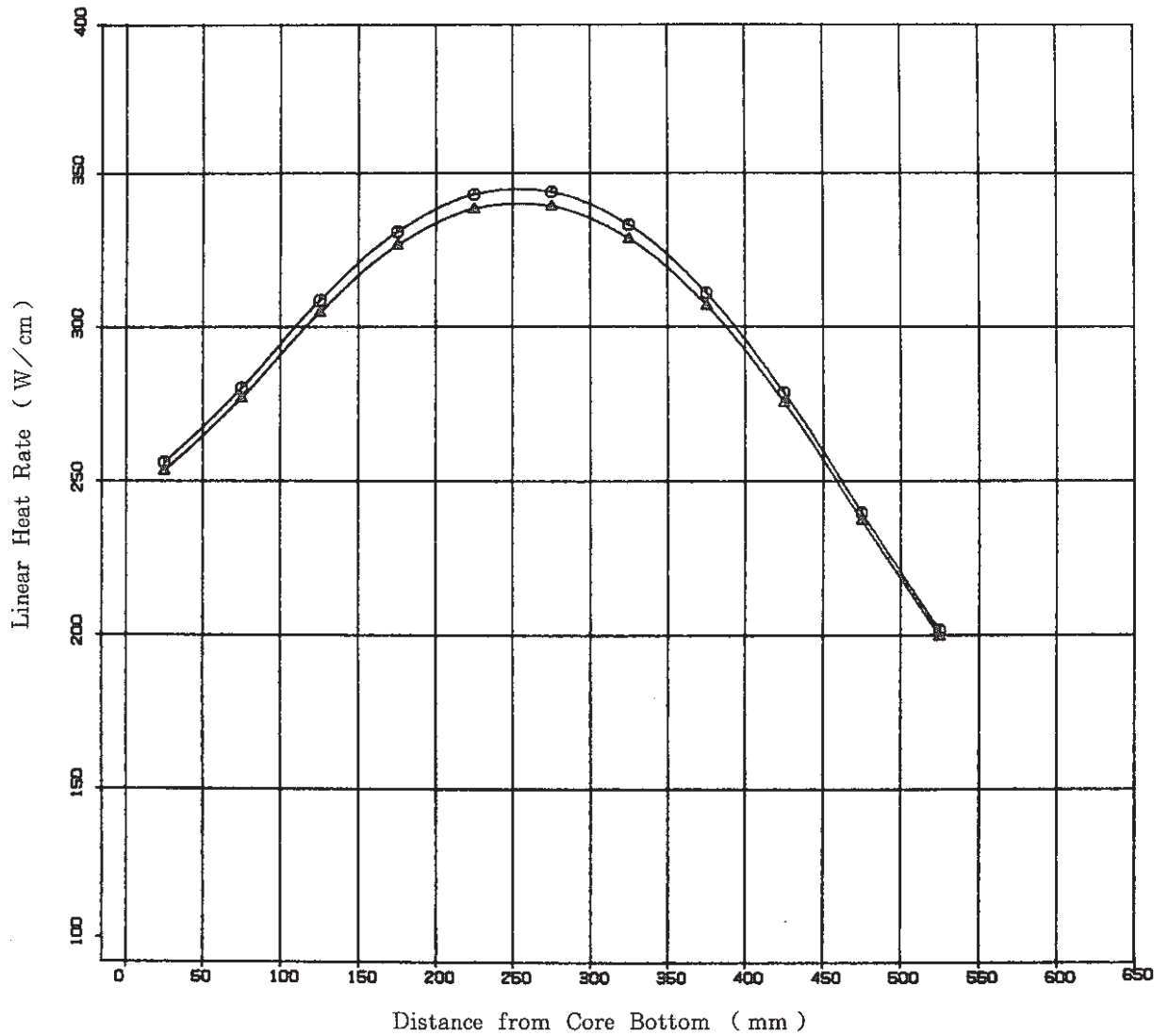


Fig.2 - 8 Linear heat rate distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 13

MAX \odot EOL \triangle

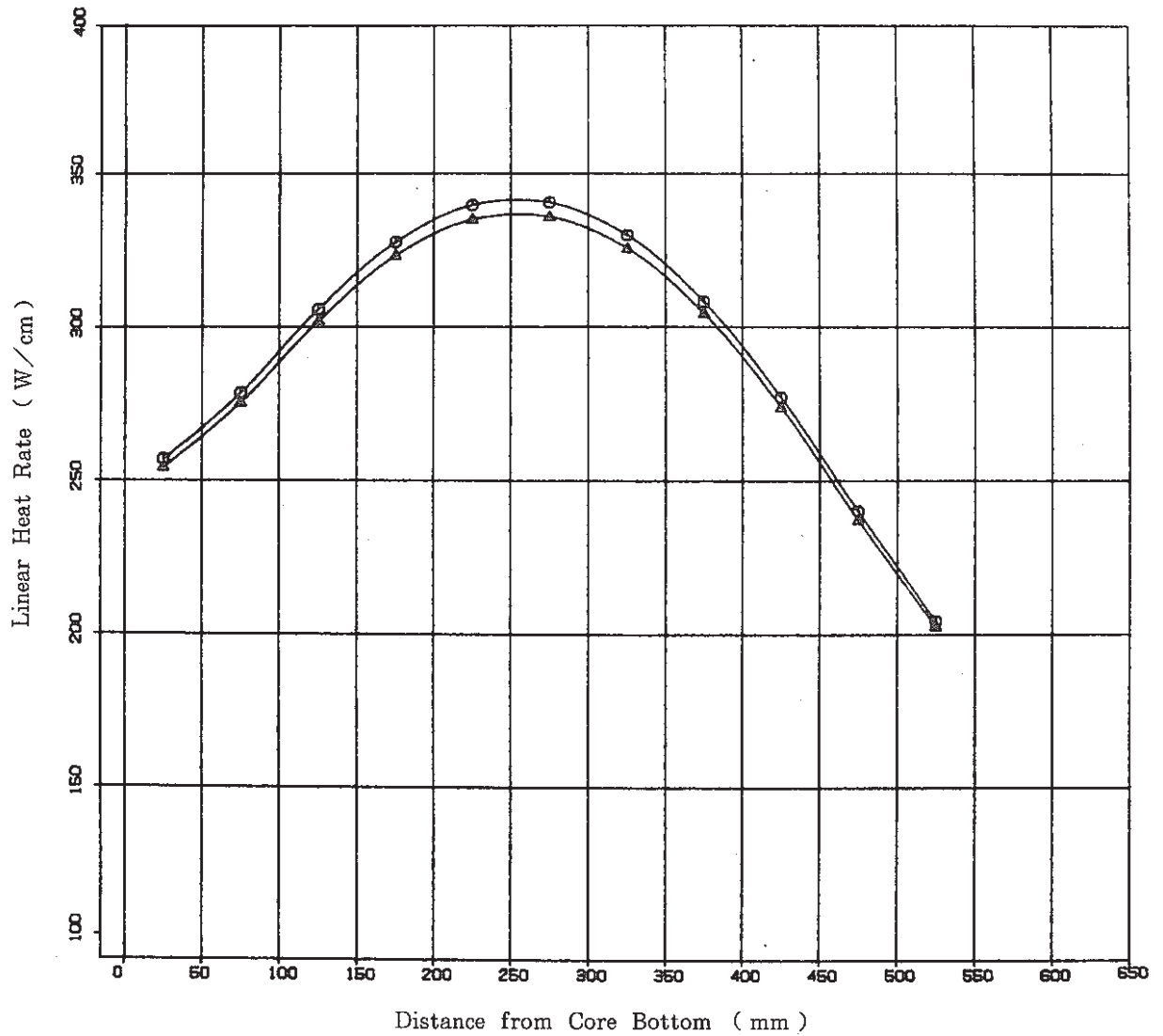


Fig.2 - 9 Linear heat rate distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 14

MAX \odot EOL \triangle

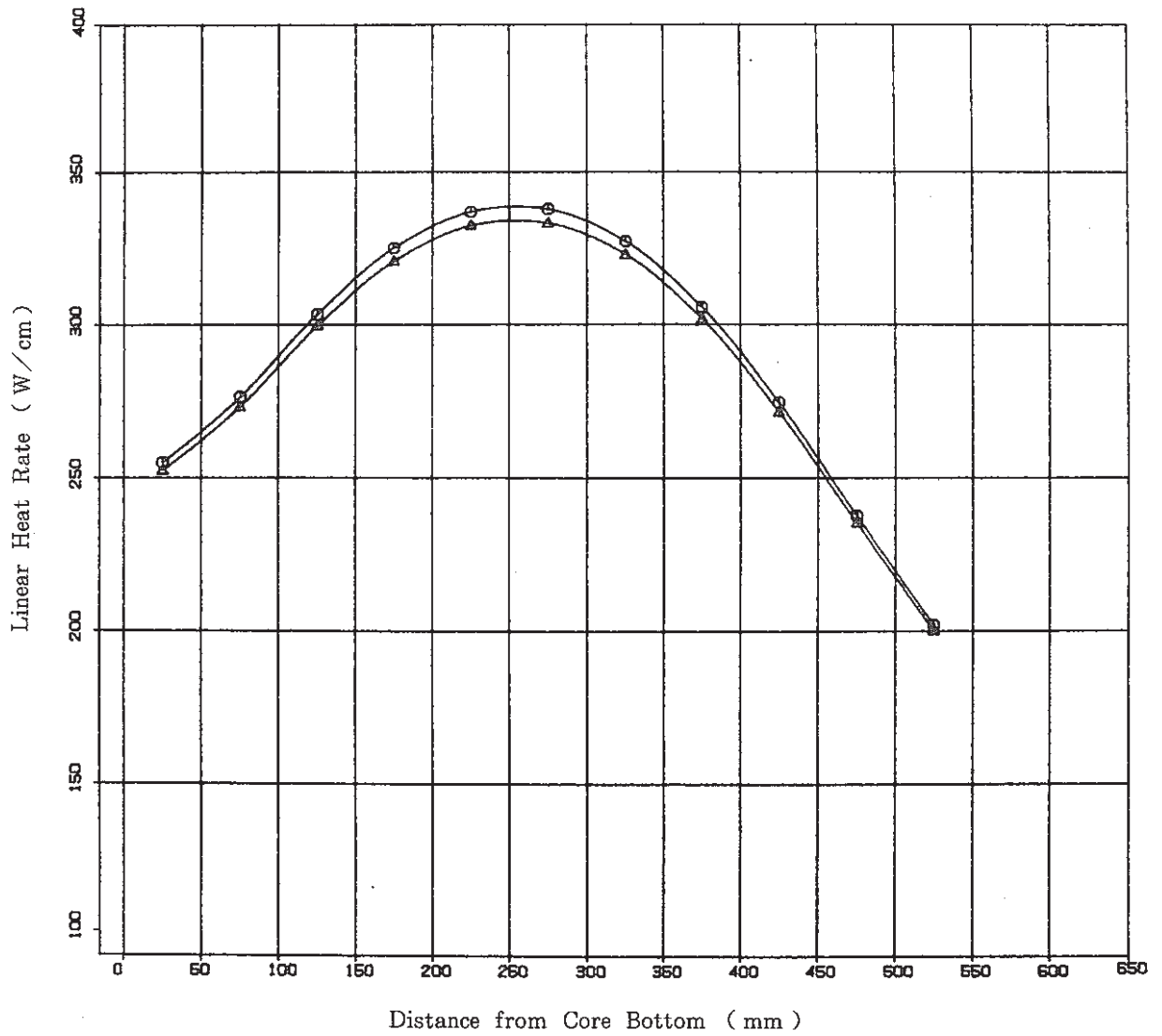


Fig.2 - 10 Linear heat rate distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 02

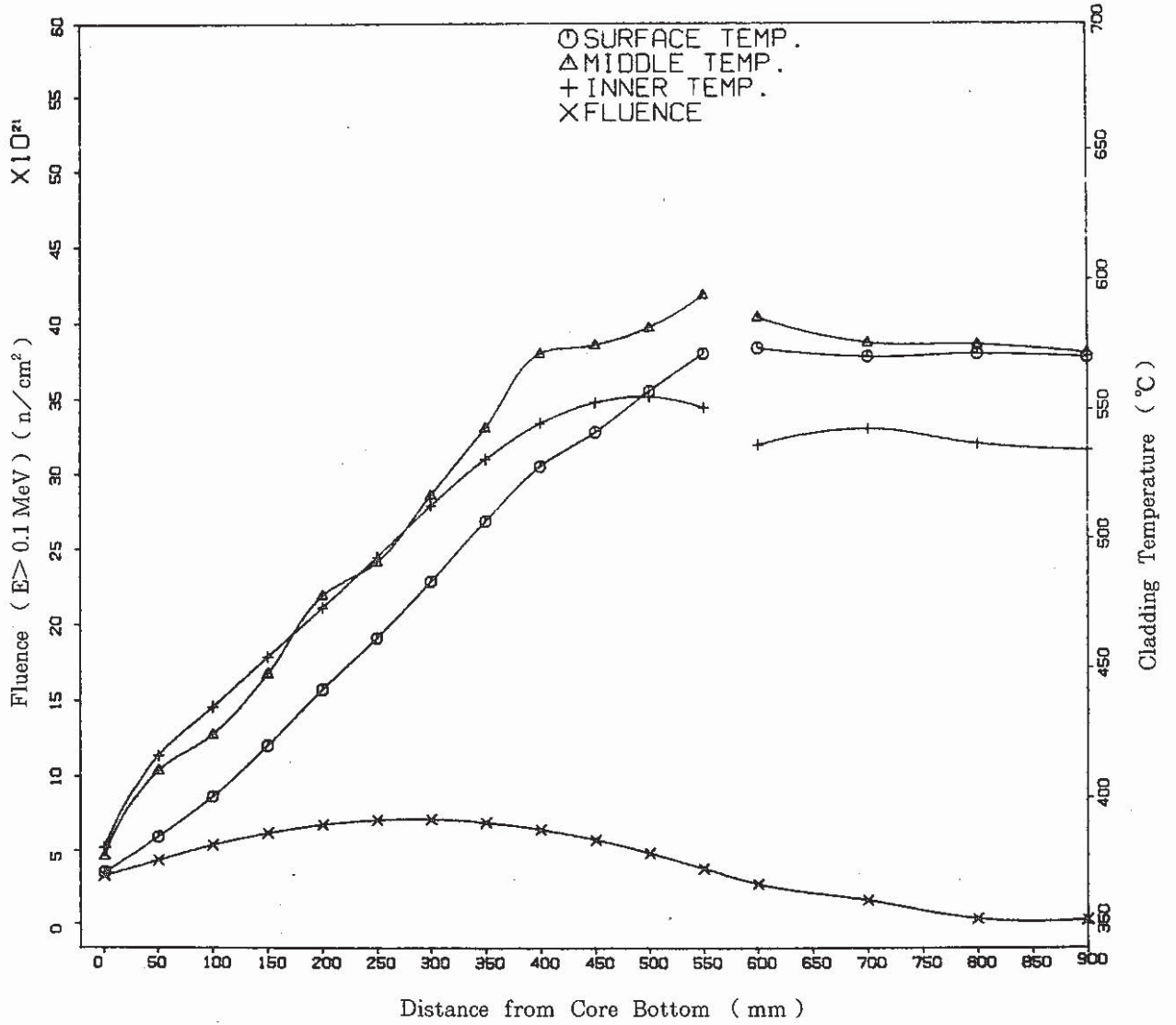


Fig.2 - 11 Fluence and cladding temperature distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 05

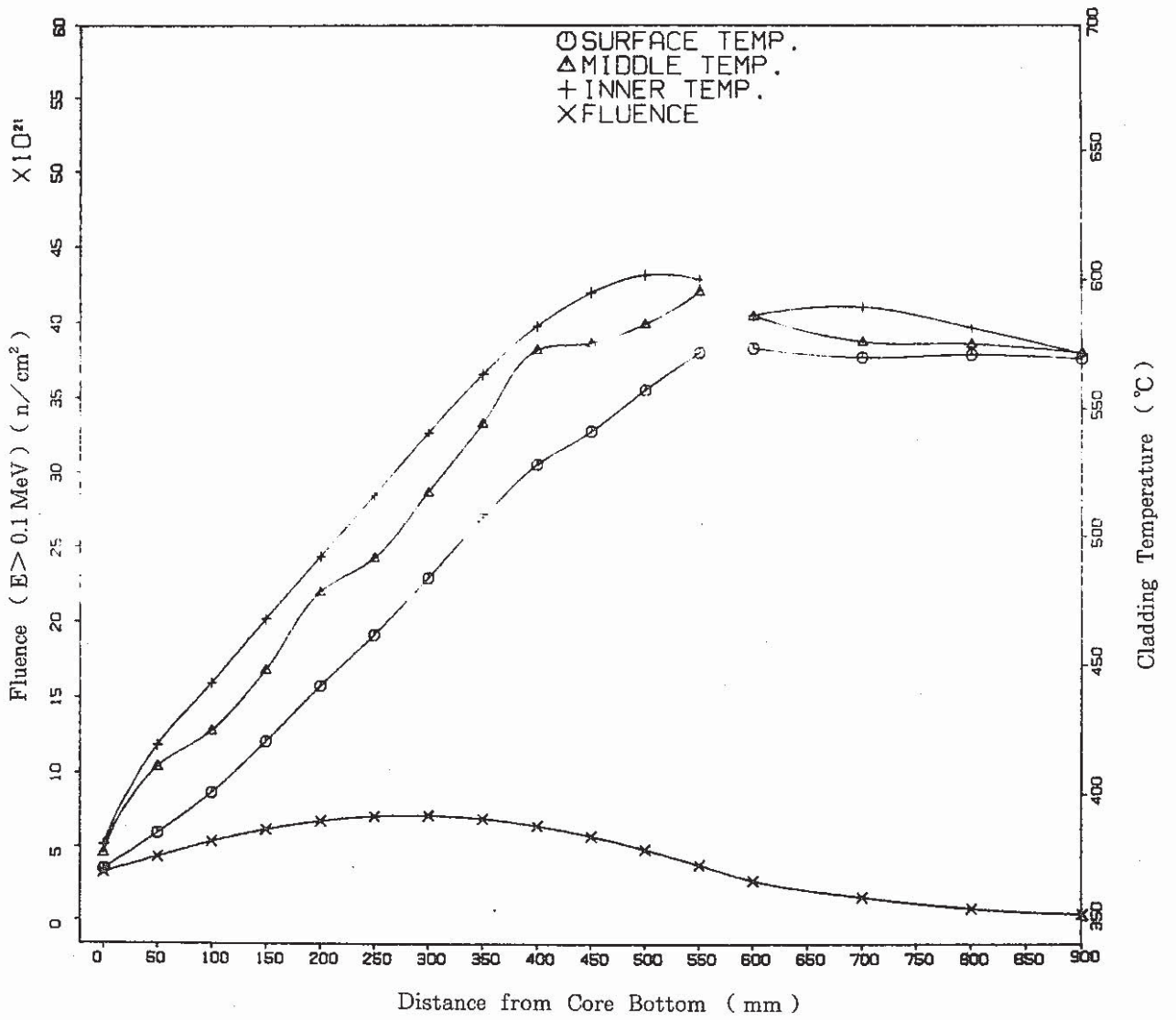


Fig.2 - 12 Fluence and cladding temperature distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 13

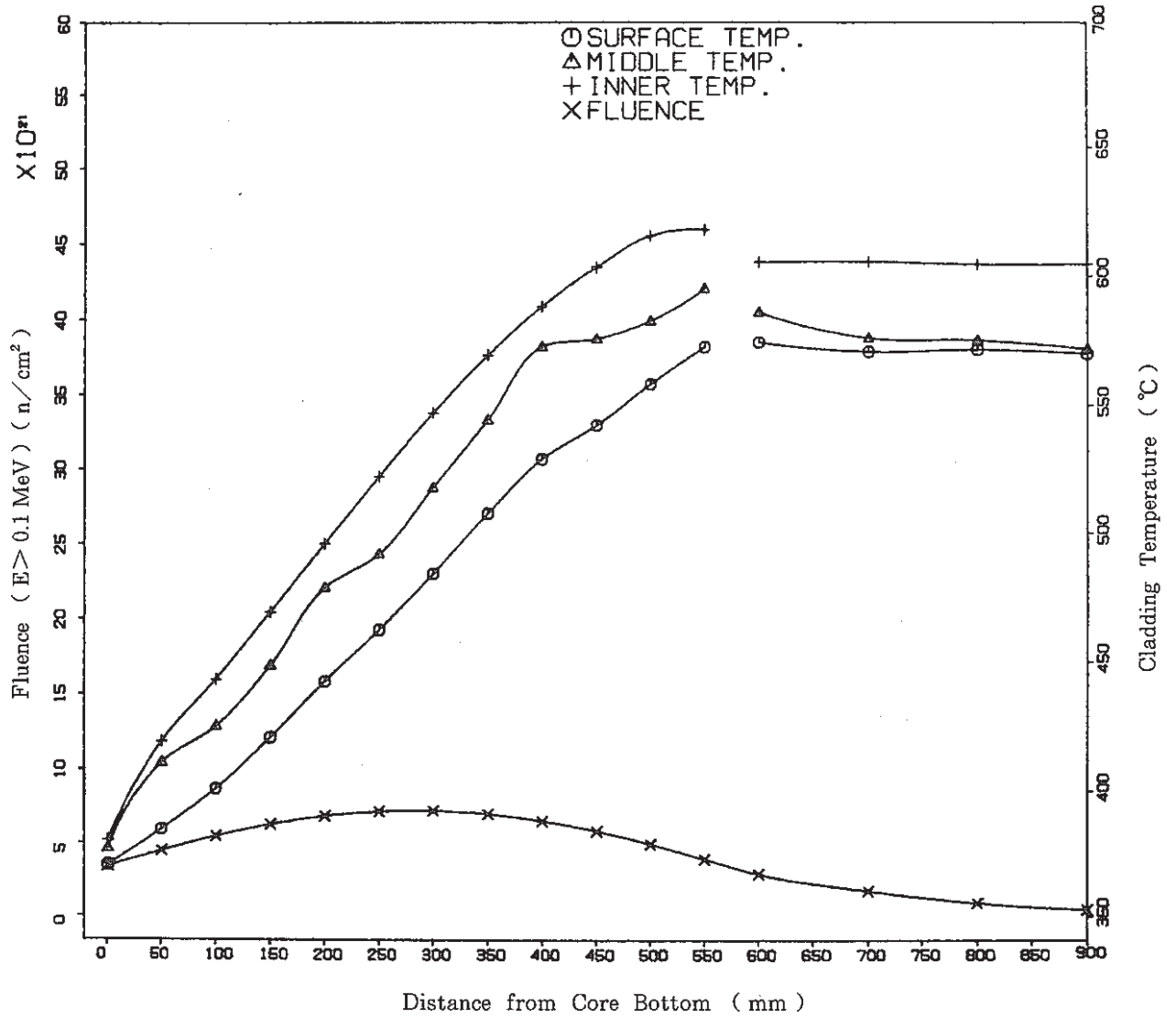


Fig. 2 - 13 Fluence and cladding temperature distribution

S/A FAB NO. : PFB000

PIN NO. : 14

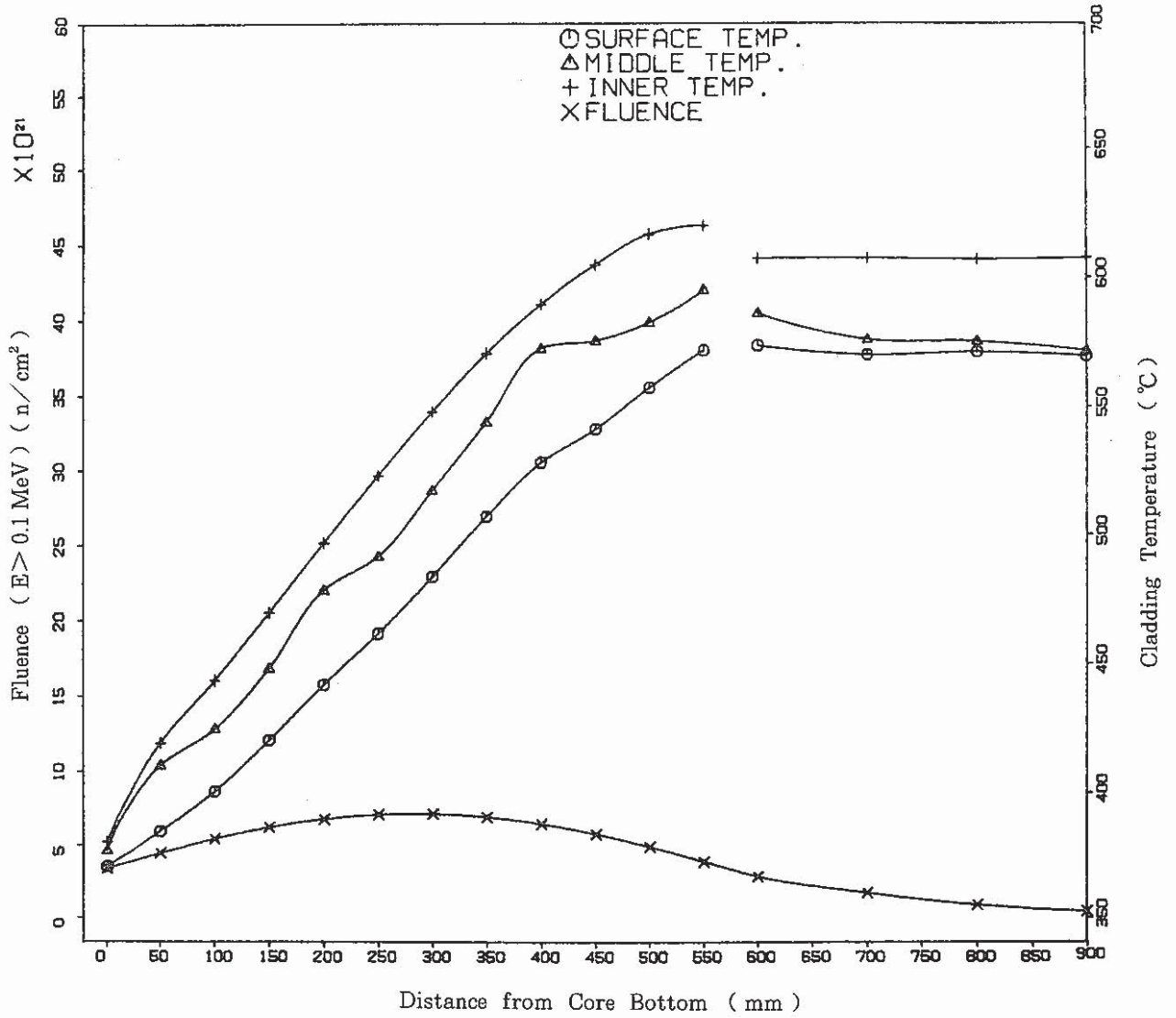


Fig.2 - 14 Fluence and cladding temperature distribution

データ集2 金相試験

- Table4-1-1 Metallographic examination in AGS
Table4-1-2 Summary data from ceramography of PFB000 subassembly
Fig. 4-1-1 Flow diagram of metallographic examination in AGS
Fig. 4-1-2 Axial profile of the restructured region (R/R_0)
Fig. 4-1-3 Gas bubble region (R/R_0) as a function of linear heat rate
Fig. 4-1-4 Densified region (R/R_0) as a function of linear heat rate
Photo 1~30 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel

Table 4-1-1 Metallographic examination in AGS

	as polished		etched	
	仕 様	目 的	仕 様	目 的
燃料/被覆管 共 通	× 200 部分写真	被覆管内厚 ギャップ観察		
燃 料	× 10.5 全面写真 × 86 全面写真 × 100 部分写真 × 400 部分写真	燃料全体組織観察 ボイド分布測定 ボイド分布測定	× 10.5 全面写真 × 86 全面写真 × 100 部分写真 × 400 部分写真	燃料全体組織観察 } 詳細燃料組織観察
被 覆 管	× 200 ~ 750 部分写真	FCCI		

Table 4-1-2 Summary data from ceramography of PFB000 subassembly

Pin No	Section No	Distance from Fuel Bottom (mm)	Fabricated Diametral Gap Size (μm)	Restructured Region (Dia. mm)					Pellet Outer Dia. (mm)	Residual Diametral Gap Size (μm)	Change of Gap Size (%)
				Central Void	Columnar Region	Gas Bubble Region	Densified Region	Dark Ring			
6602	660222	277	174			2.7	3.4		4.7	116	67
6605	660522	275	174			3.1	3.5		4.7	104	60
6613	661322	137	204			3.0	3.5		4.7	104	66
	661342	274	204	0.5	2.4	3.0	3.7		4.7	146	72
	661362	412	204			2.5	3.2		4.6	134	51
6614	661422	275	132			2.9	3.2		4.7	100	76

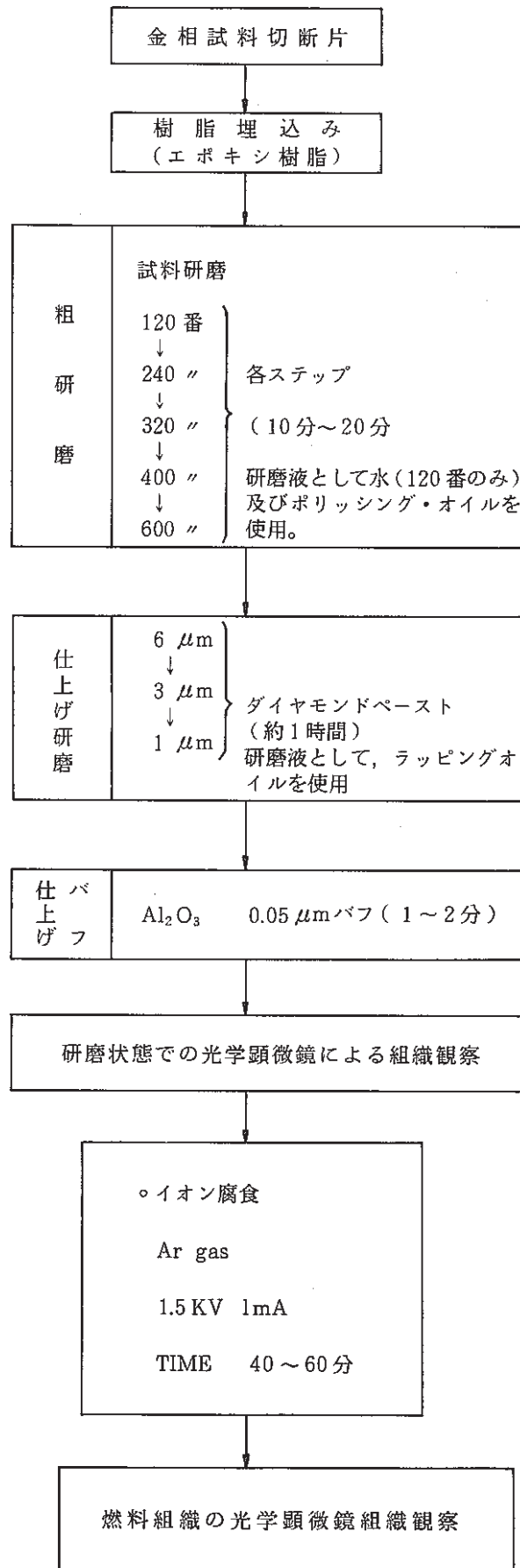


Fig. 4-1-1 Flow diagram of metallographic examination in AGS

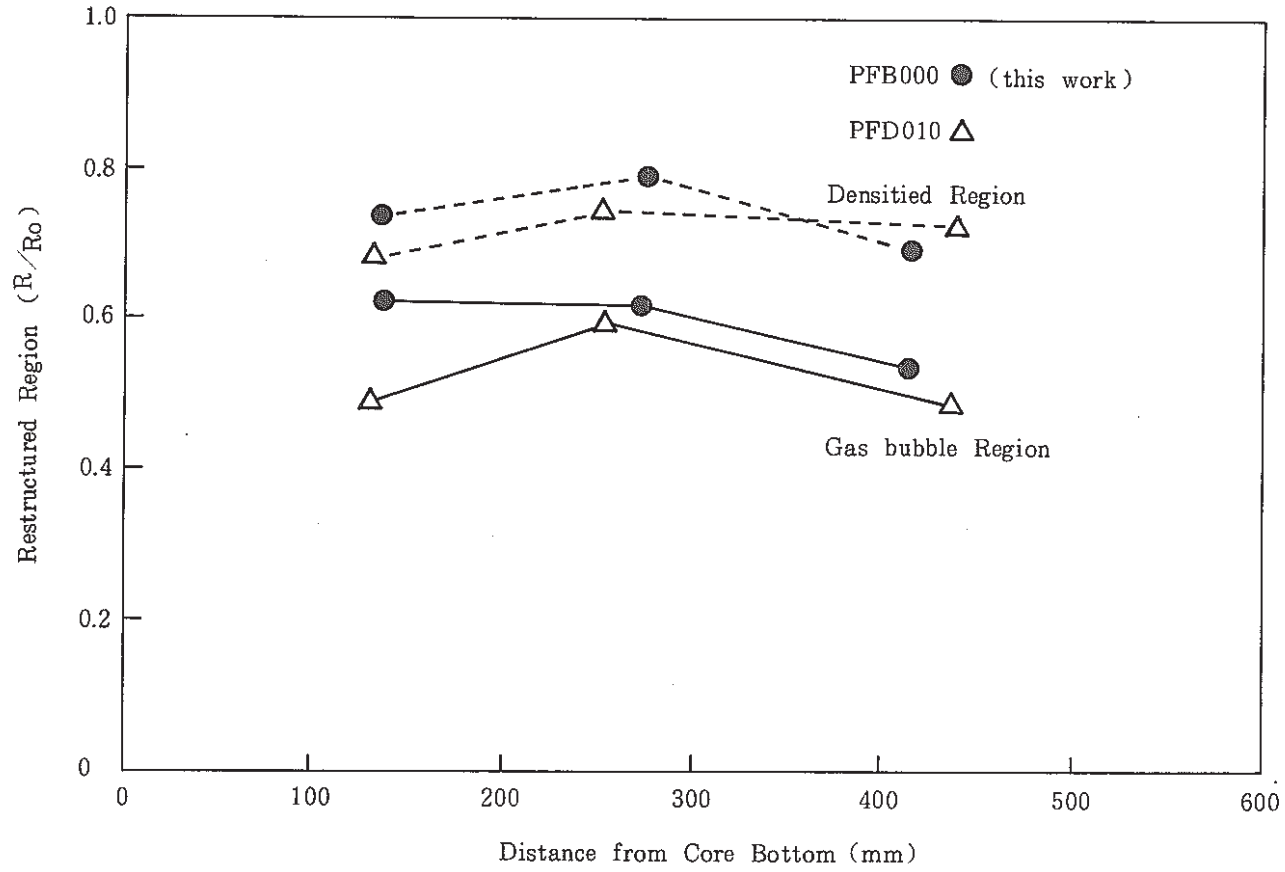


Fig. 4 - 1 - 2 Axial profile of the restructured region (R/R_0)

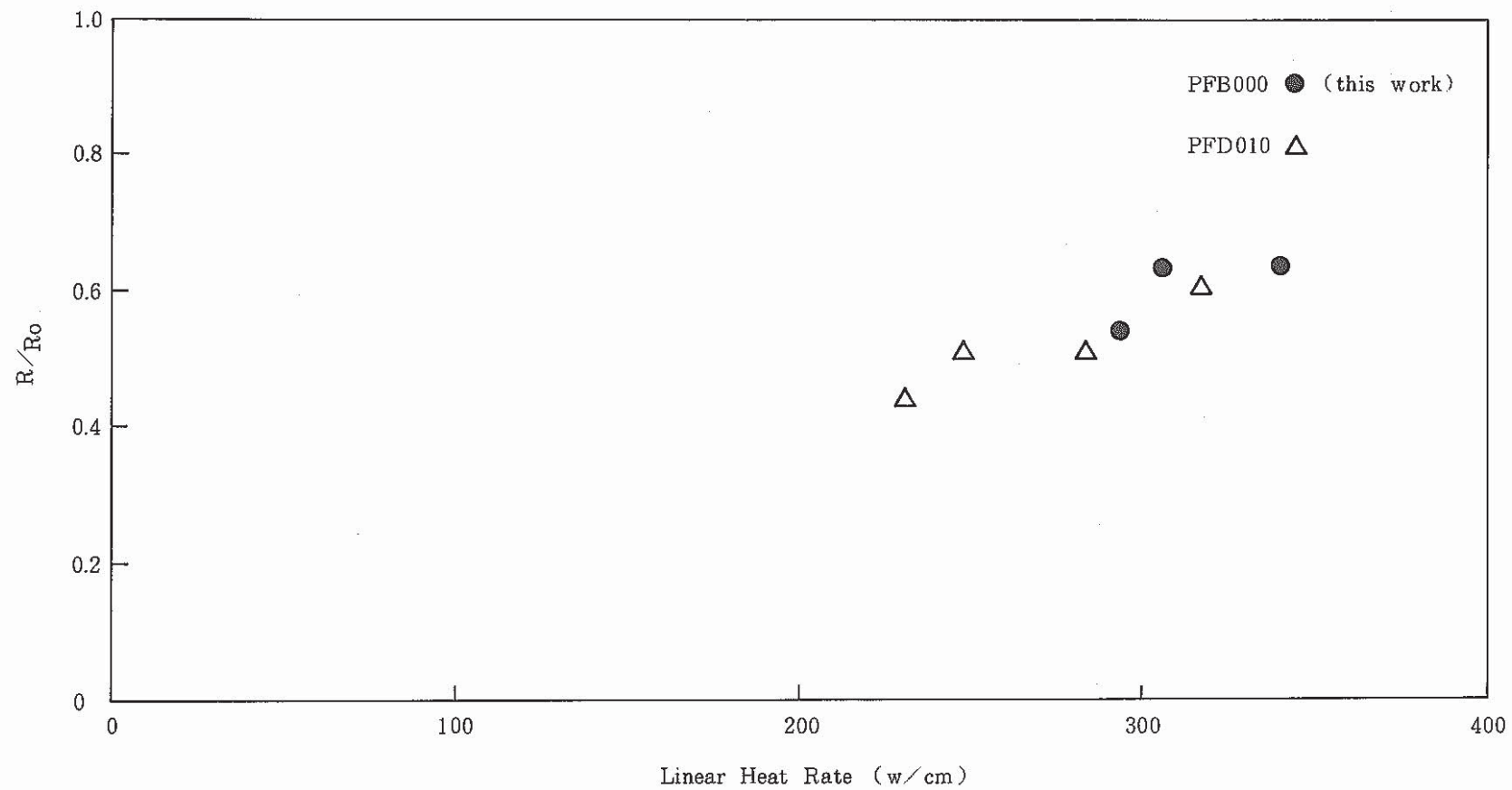


Fig. 4 -- 1 -- 3 Gas bubble region (R/R_0) as a function of linear heat rate

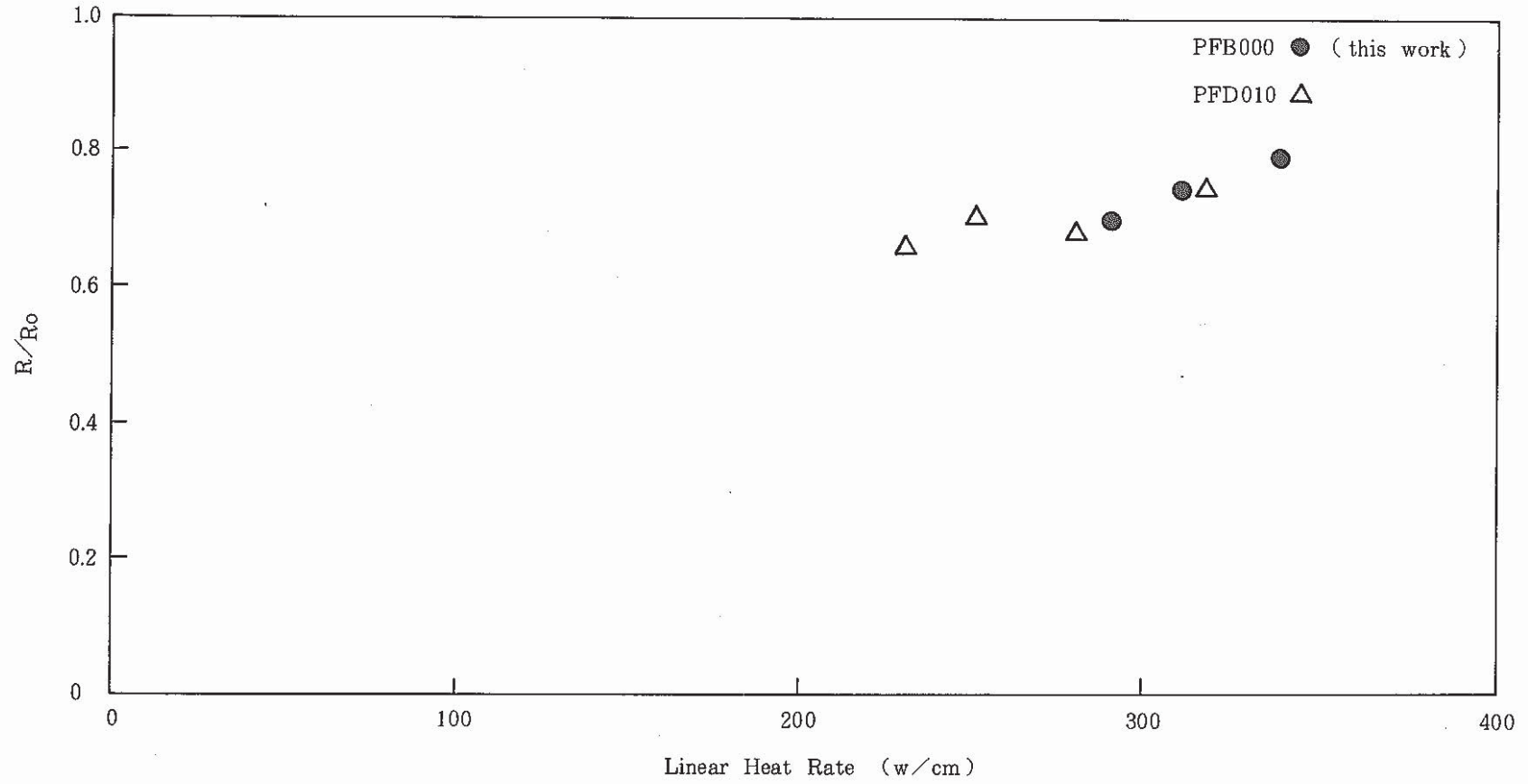


Fig. 4 - 1 - 4 Densified region (R/R_o) as a function of linear heat rate

S/A No.	JOYO-PFB000
Pin No.	6602
S/A Peak Burn up	5560MWD/MTM

As polished
etched

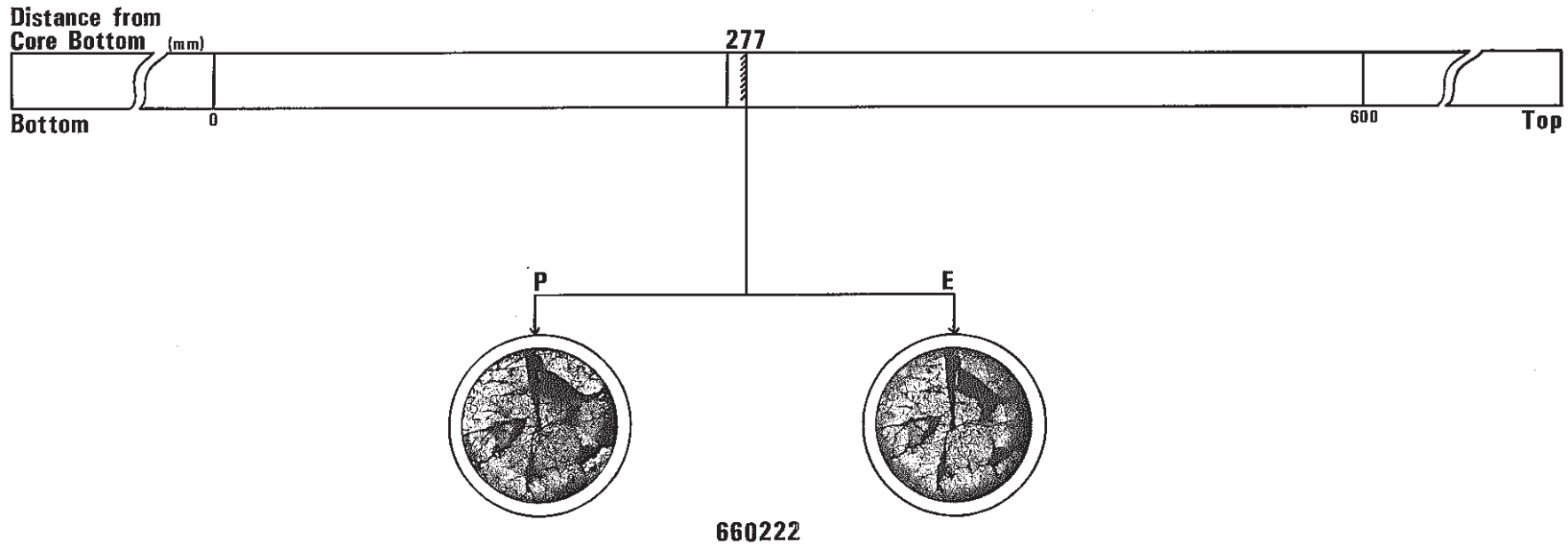
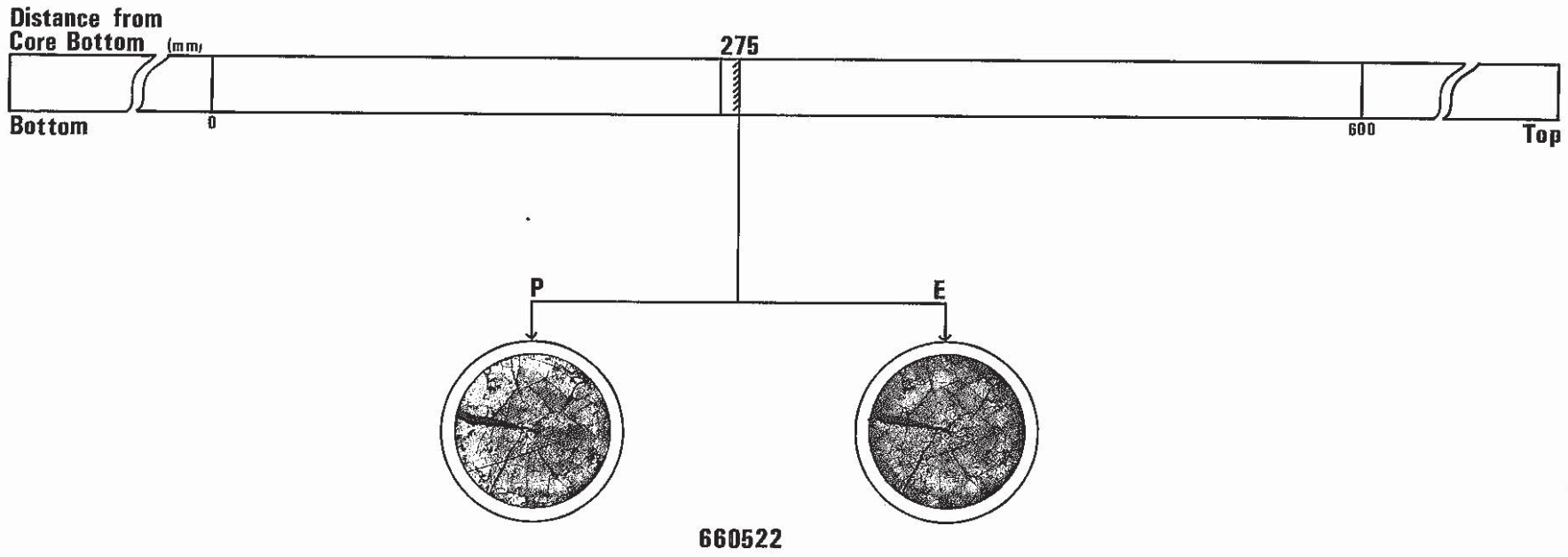


Photo 1 Macrography of JOYO MK-II core fuel (6602 Pin, as polished, etched)

S/A No.	JOYO - PFB000
Pin No.	6605
S/A Peak Burn up	5560MWD/MTM

As polished
etched

PNC-TN9410 86-143



- 32 -

Photo 2 Macrography of JOYO MK-II core fuel (6605 Pin, as polished, etched)

S/A No.	JOYO - PFB000
Pin No.	6613
S/A Peak Burn up	5560MWD/MTM

As polished

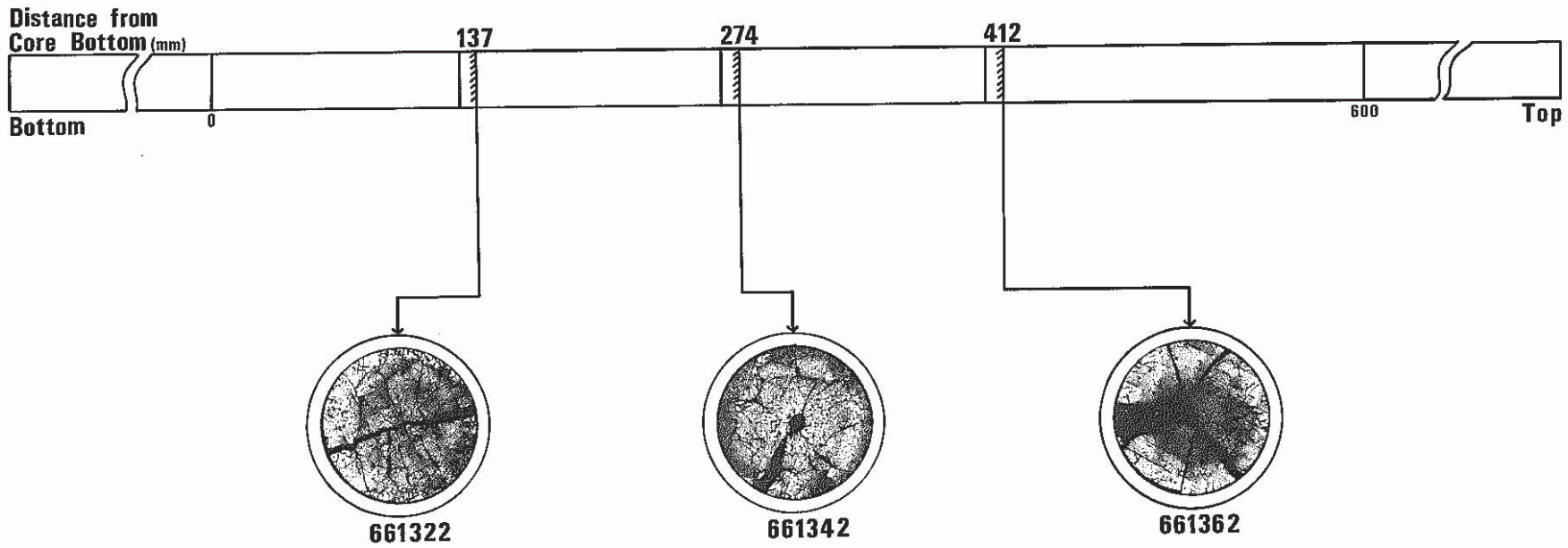


Photo 3 Macrography of JOYO MK-II core fuel (6613 Pin, as polished)

S/A No.	JOYO-PFB000
Pin No.	6613
S/A Peak Burn up	5560MWD/MTM

etched

PNC-TN9410 86-143

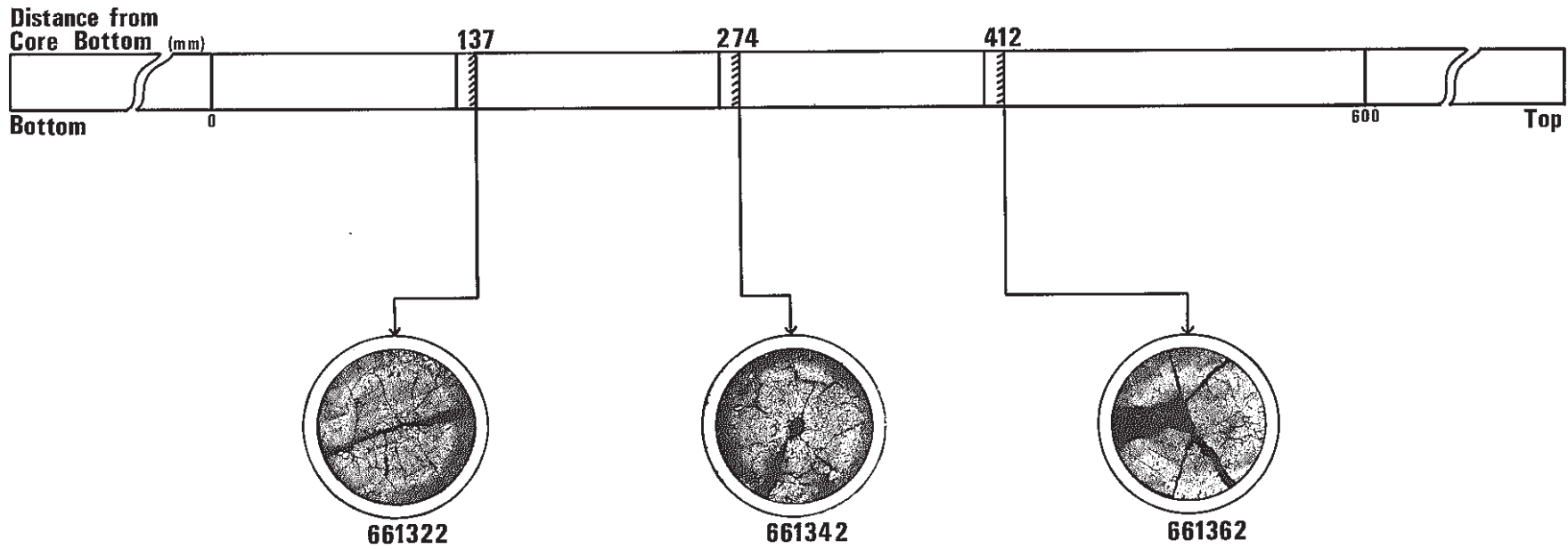
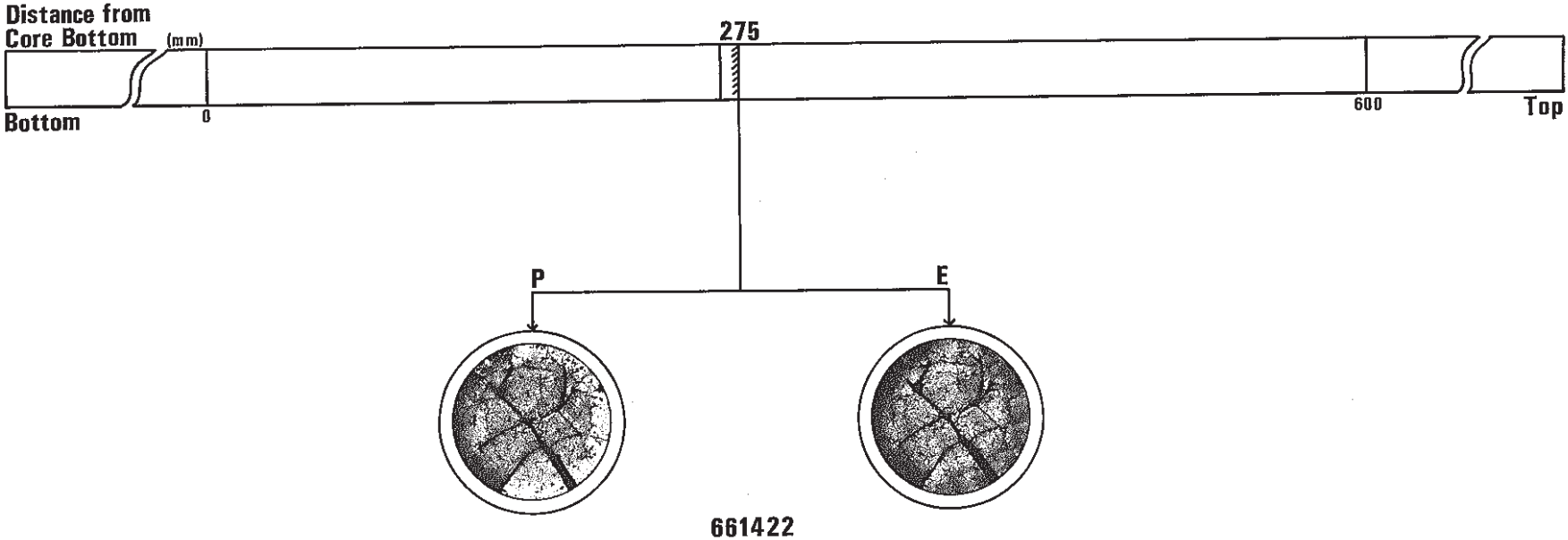


Photo 4 Macrography of JOYO MK-II core fuel (6613 Pin, as polished)

S/A No.	JOYO - PFB000
Pin No.	6614
S/A Peak Burn up	5560MWD/MTM

As polished
etched

PNC-TN9410 86-143



- 35 -

Photo5 Macrography of JOYO MK-II core fuel (6614 Pin, as polished, etched)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6602	
Section No.	660222	
Distance from bottom of pin		480mm
Distance from bottom of fuel column		277mm

As polished

1mm



Photo 6 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel (660222 sample, as polished)

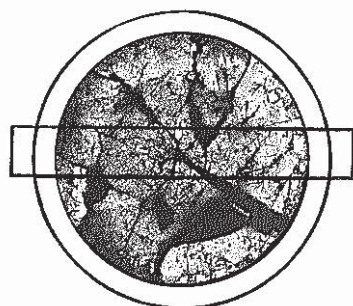
S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6602	
Section No.	660222	
Distance from bottom of pin		480mm
Distance from bottom of fuel column		277mm

etched

1mm



Photo 7 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel (660222 sample, etched)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6602	
Section No.	660222	
Distance from bottom of pin		480mm
Distance from bottom of fuel column		277mm

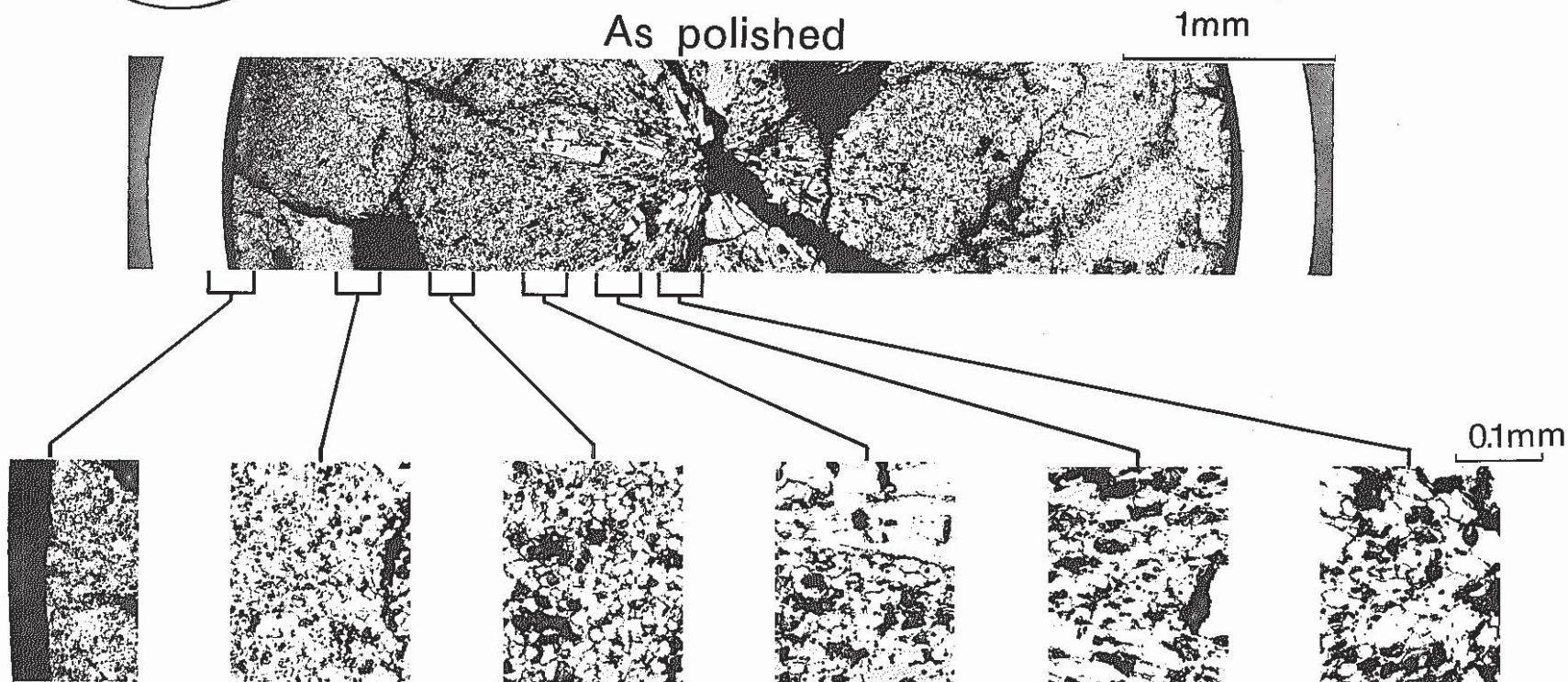
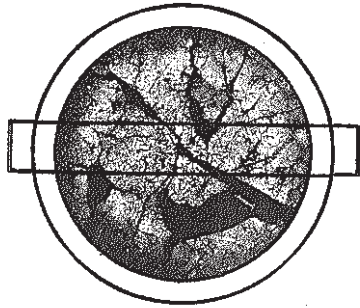


Photo 8 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel (660222 sample, as polished)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6602	
Section No.	660222	
Distance from bottom of pin	480mm	
Distance from bottom of fuel column	277mm	

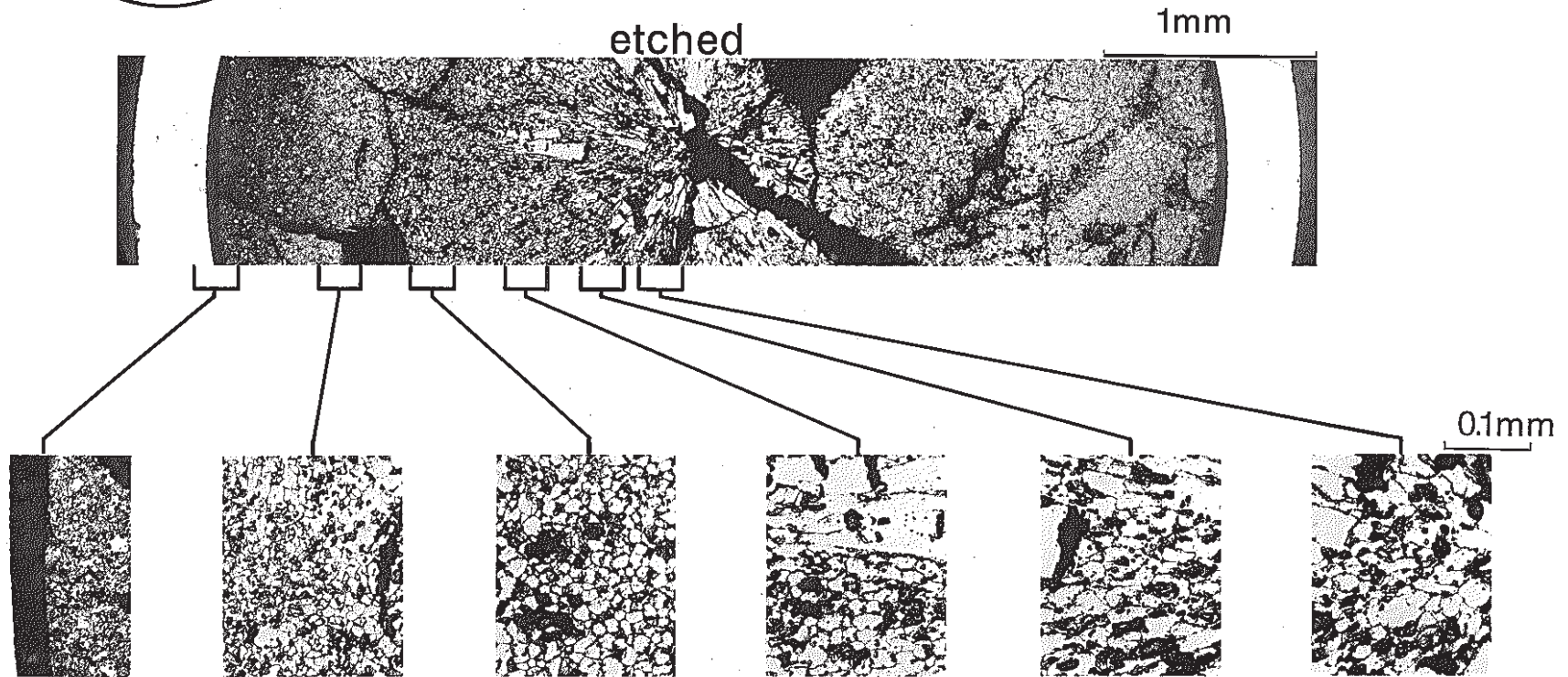


Photo 9 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(660222 sample, etched)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6605	
Section No.	660522	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

As polished

1mm



Photo 10 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(660522 sample, as polished)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6605	
Section No.	660522	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

etched

1mm

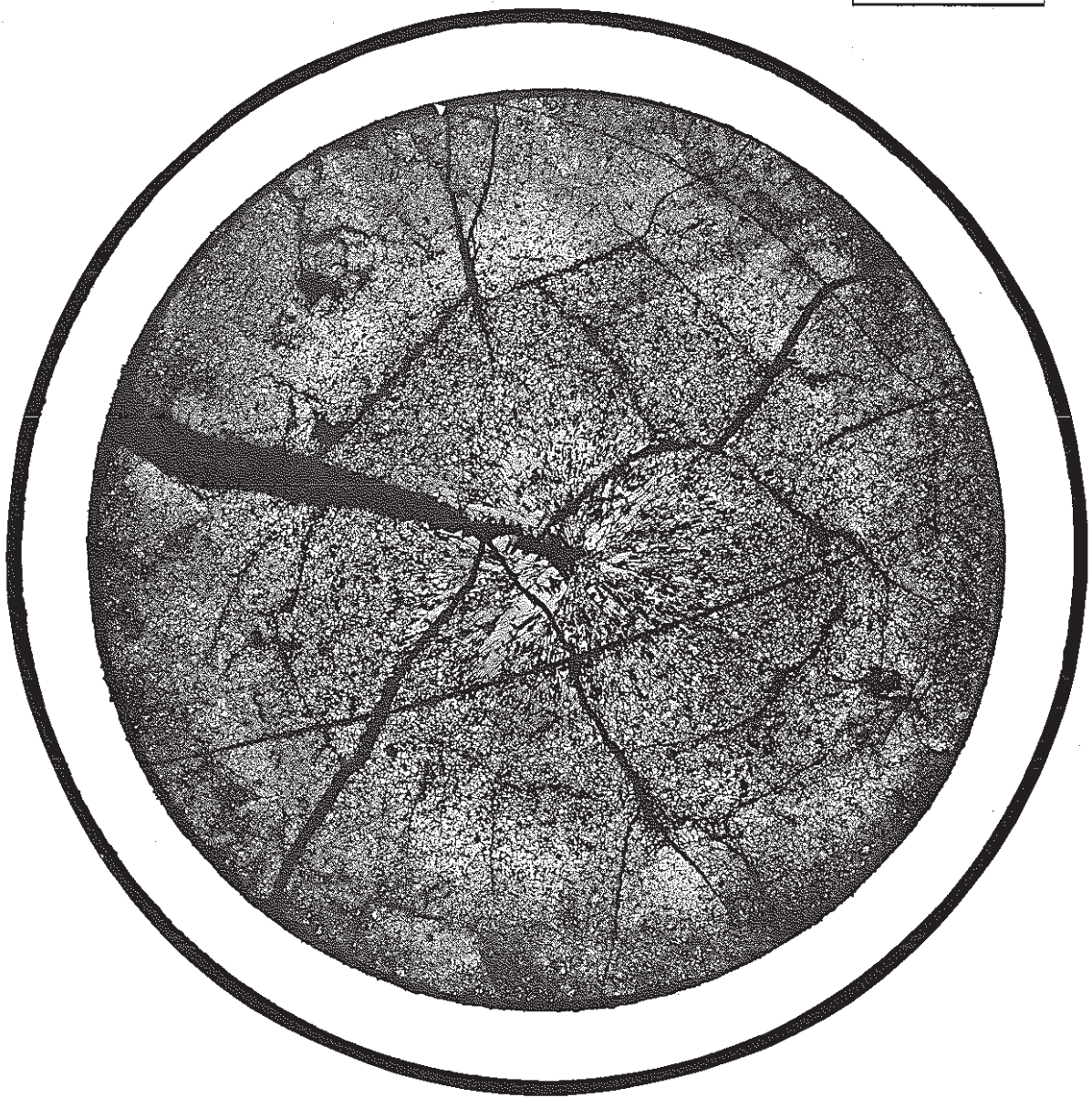
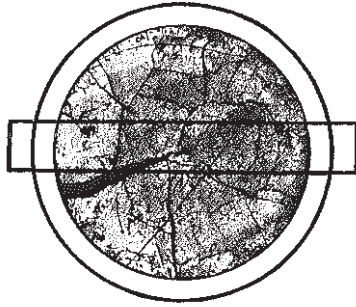


Photo 11 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(660522 sample, etched)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6605	
Section No.	660522	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

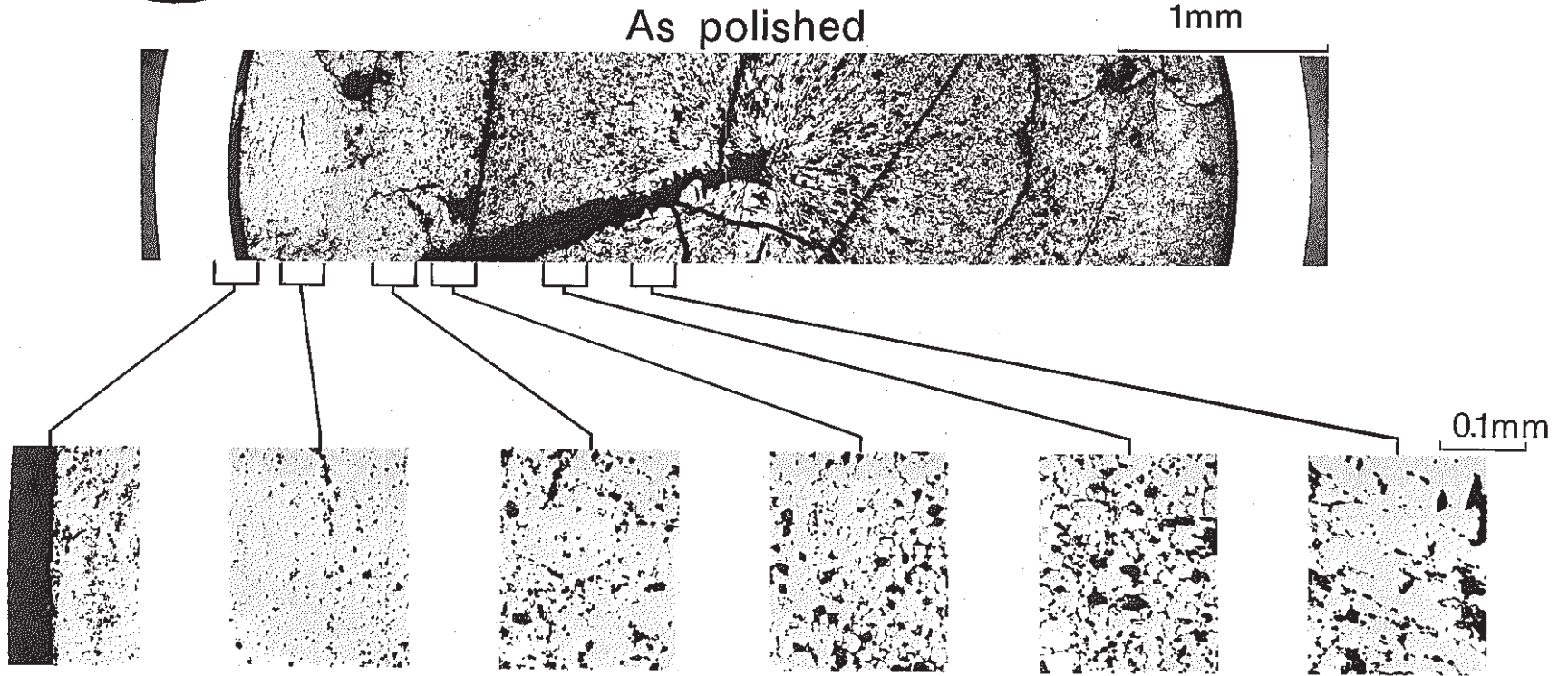
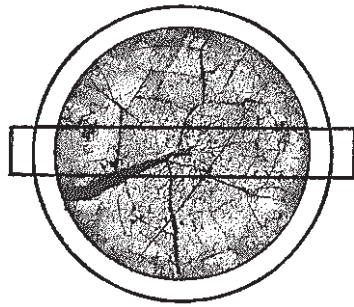


Photo 12 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(660522 sample, as polished)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6605	
Section No.	660522	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

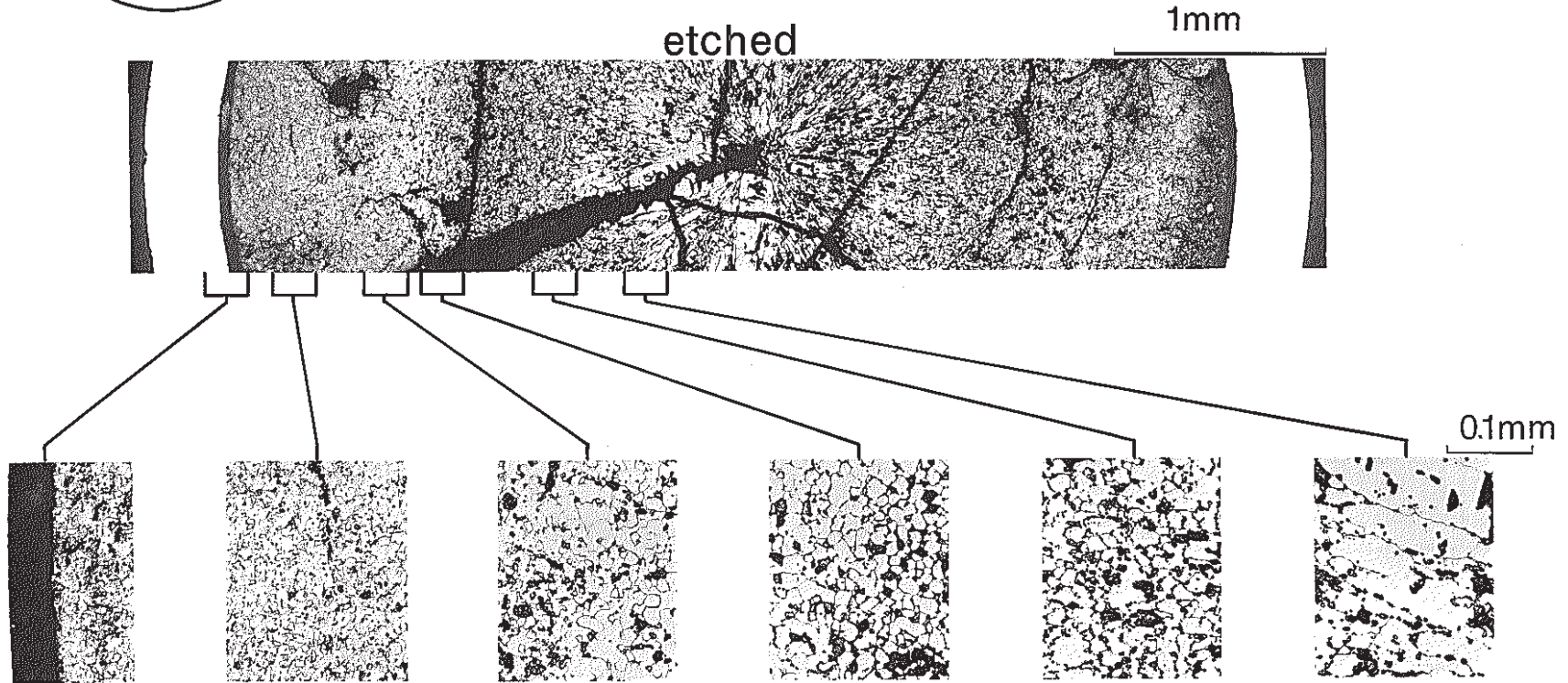


Photo 13 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(660522 sample, etched)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661322	
Distance from bottom of pin		340mm
Distance from bottom of fuel column		137mm

As polished

1mm

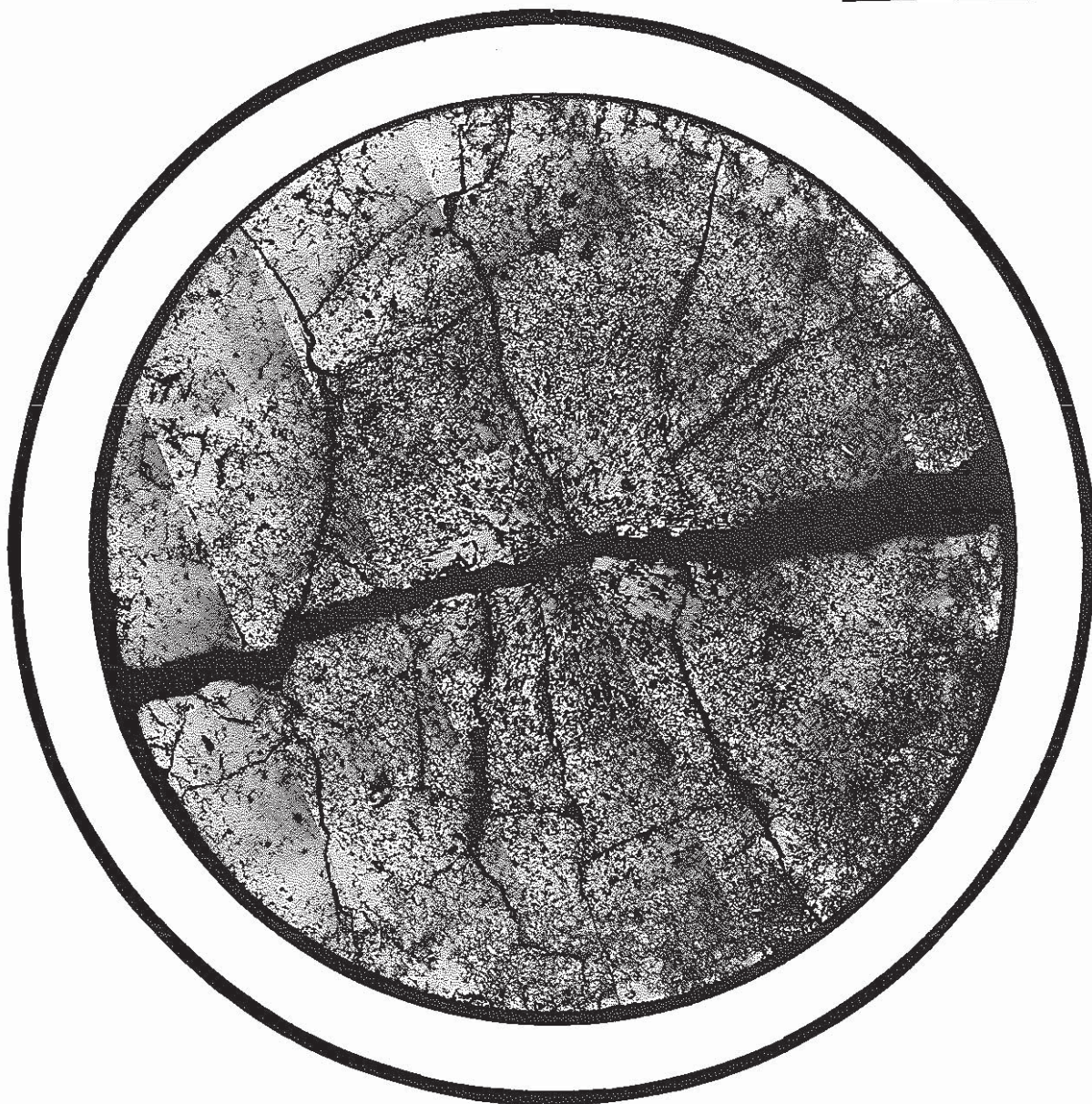


Photo 14 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661322 sample, as polished)

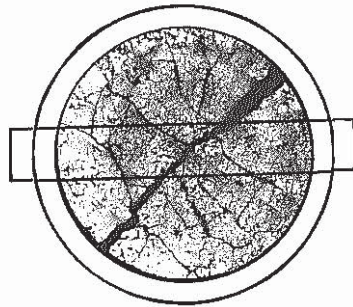
S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661322	
Distance from bottom of pin		340mm
Distance from bottom of fuel column		137mm

etched

1mm



Photo 15 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661322 sample, etched)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661322	
Distance from bottom of pin		340mm
Distance from bottom of fuel column		137mm

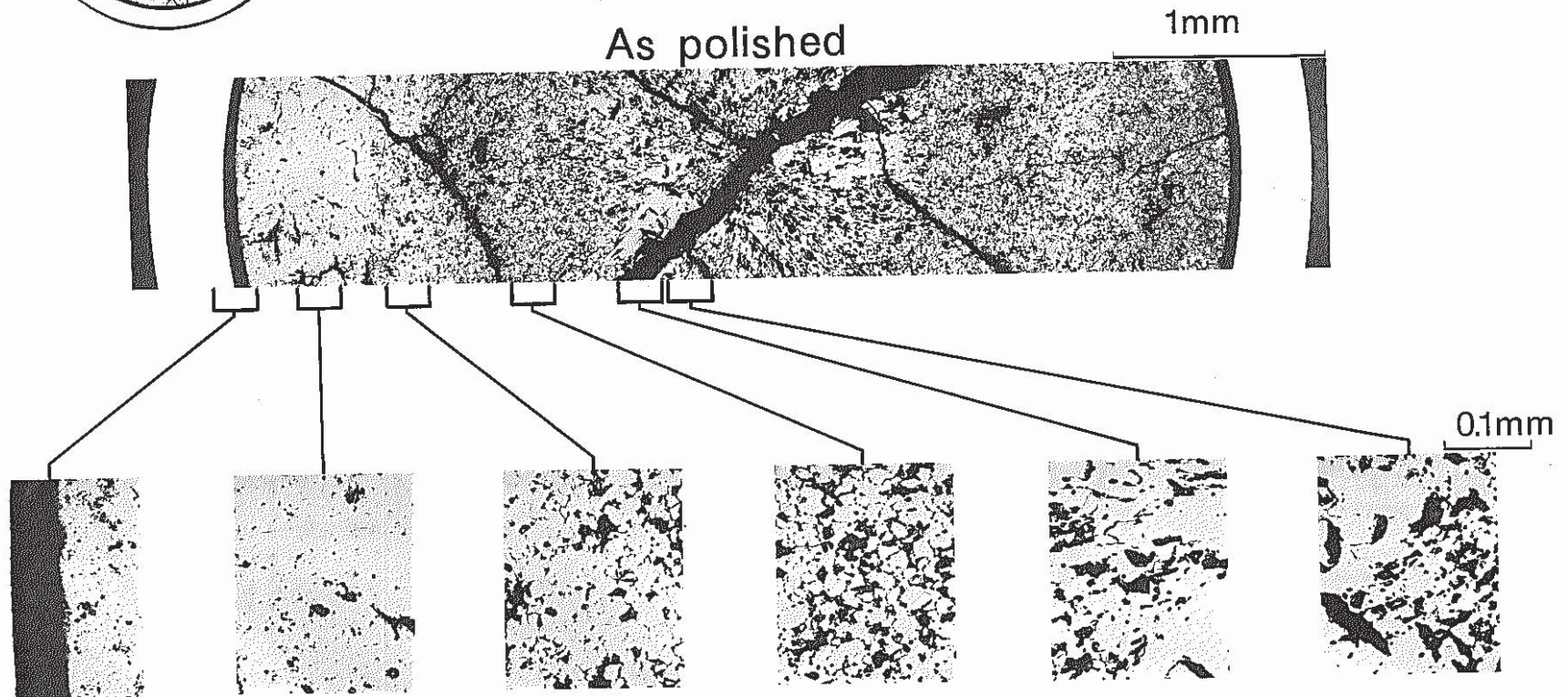
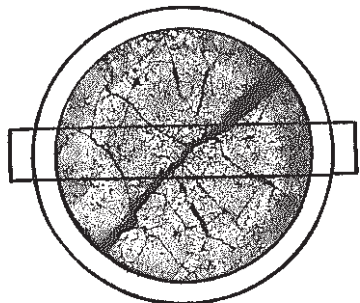


Photo 16 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661322 sample, as polished)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661322	
Distance from bottom of pin		340mm
Distance from bottom of fuel column		137mm

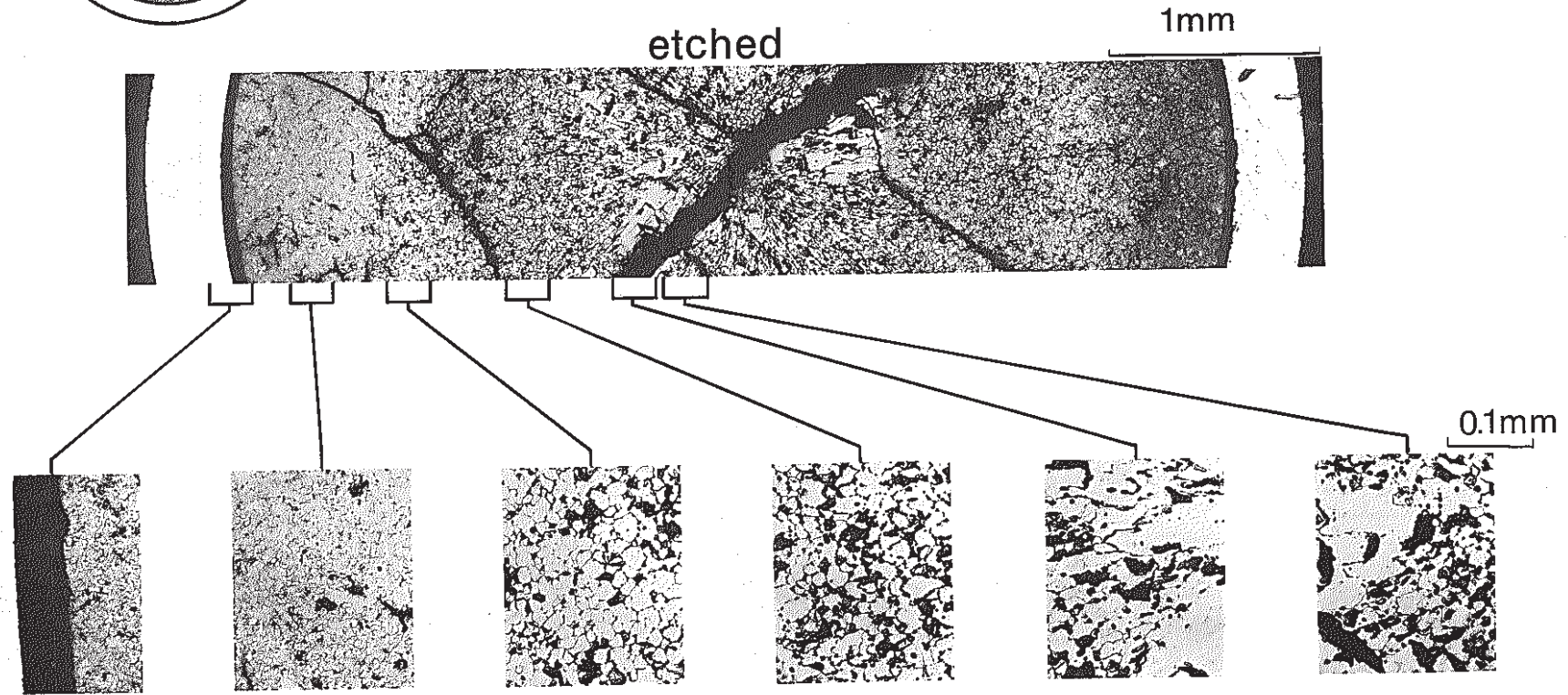


Photo 17 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661322 sample, etched)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661342	
Distance from bottom of pin		477mm
Distance from bottom of fuel column		274mm

As polished

1mm

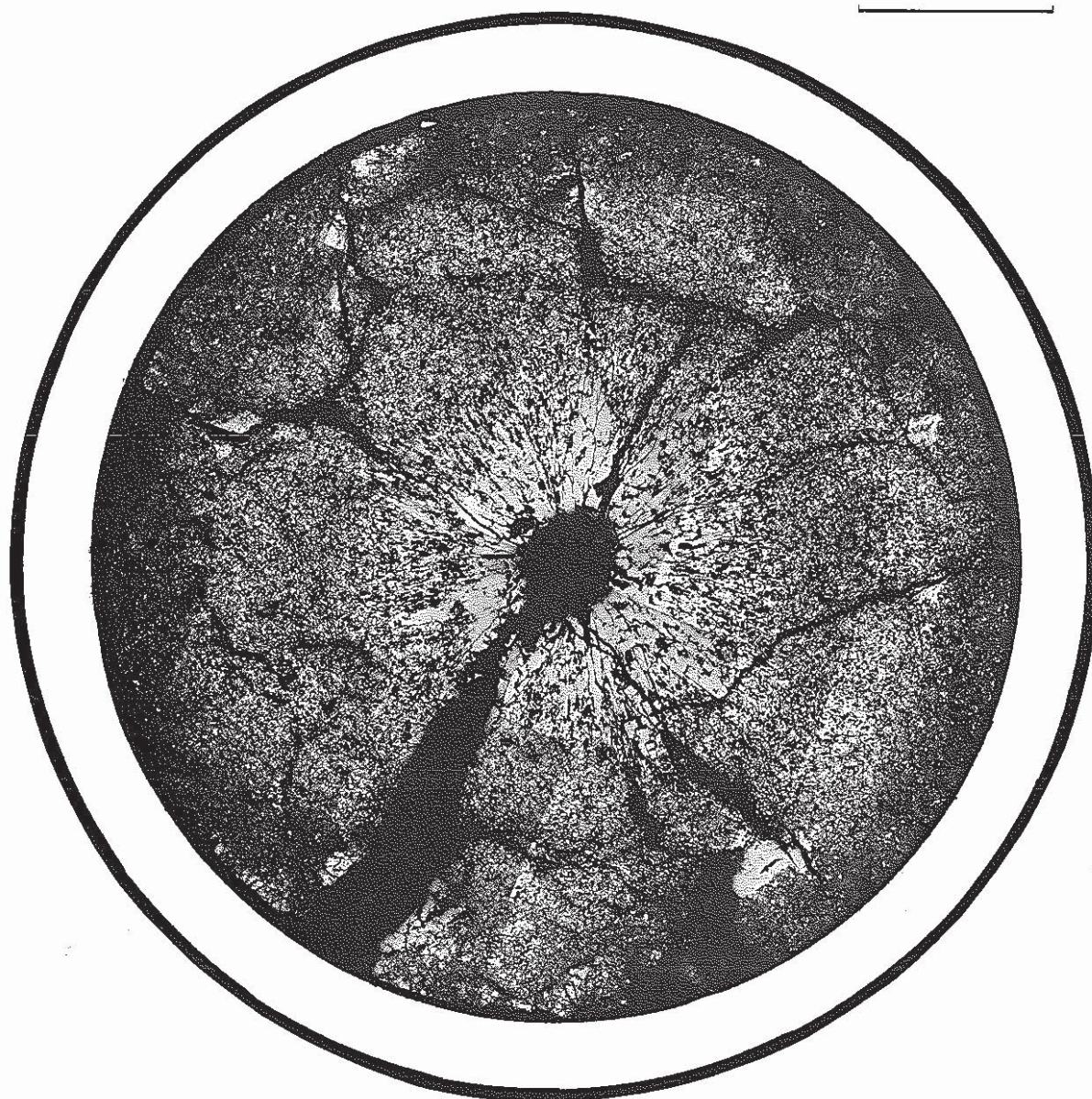


Photo 18 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661342 sample, as polished)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661342	
Distance from bottom of pin		477mm
Distance from bottom of fuel column		274mm

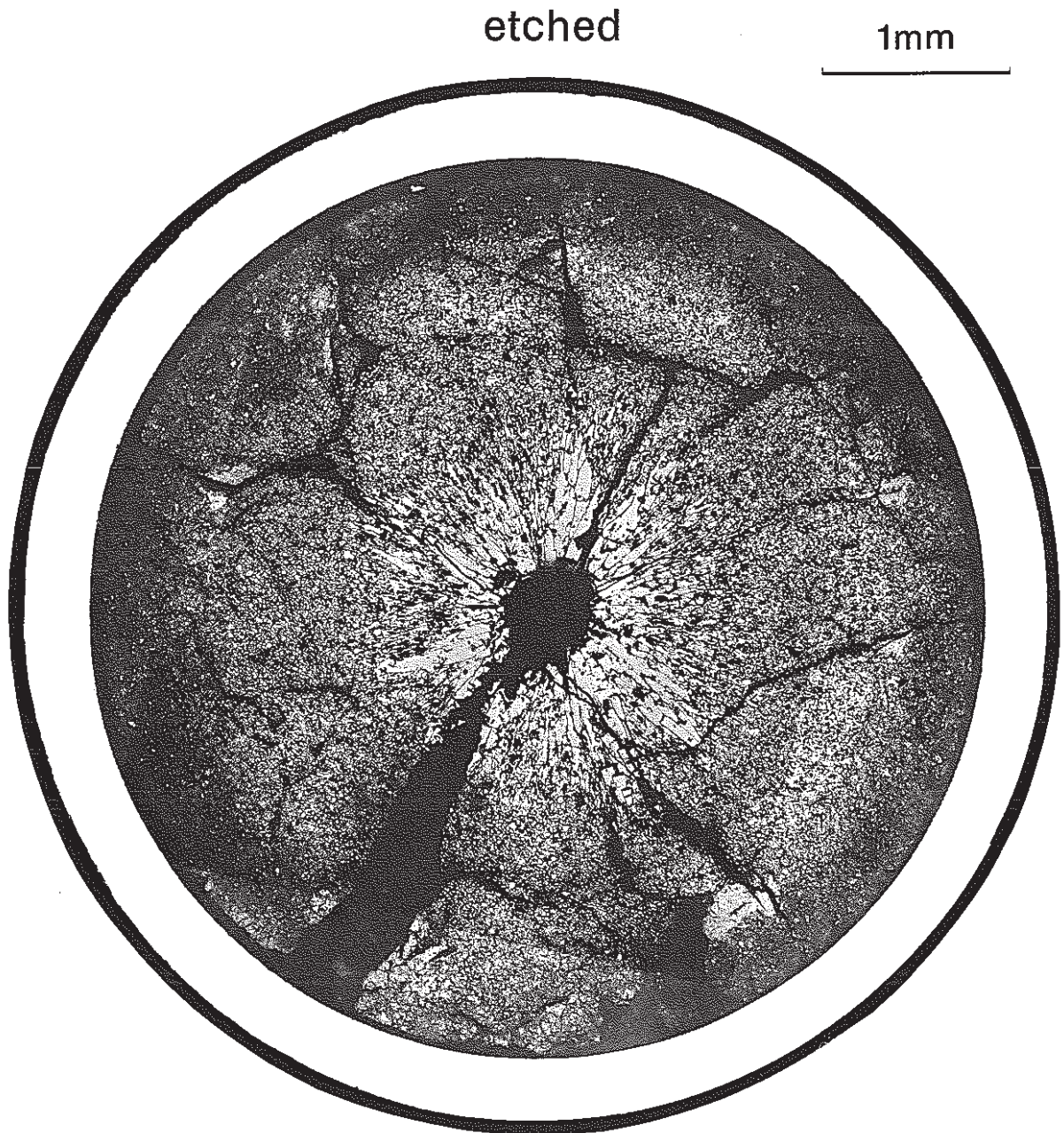
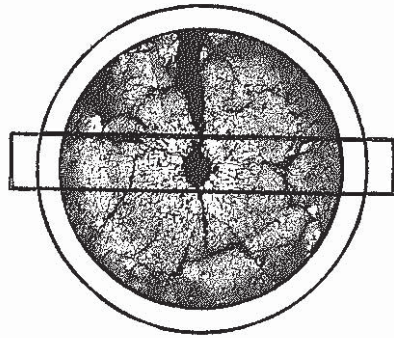


Photo 19 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661342 sample, etched)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661342	
Distance from bottom of pin		477mm
Distance from bottom of fuel column		274mm

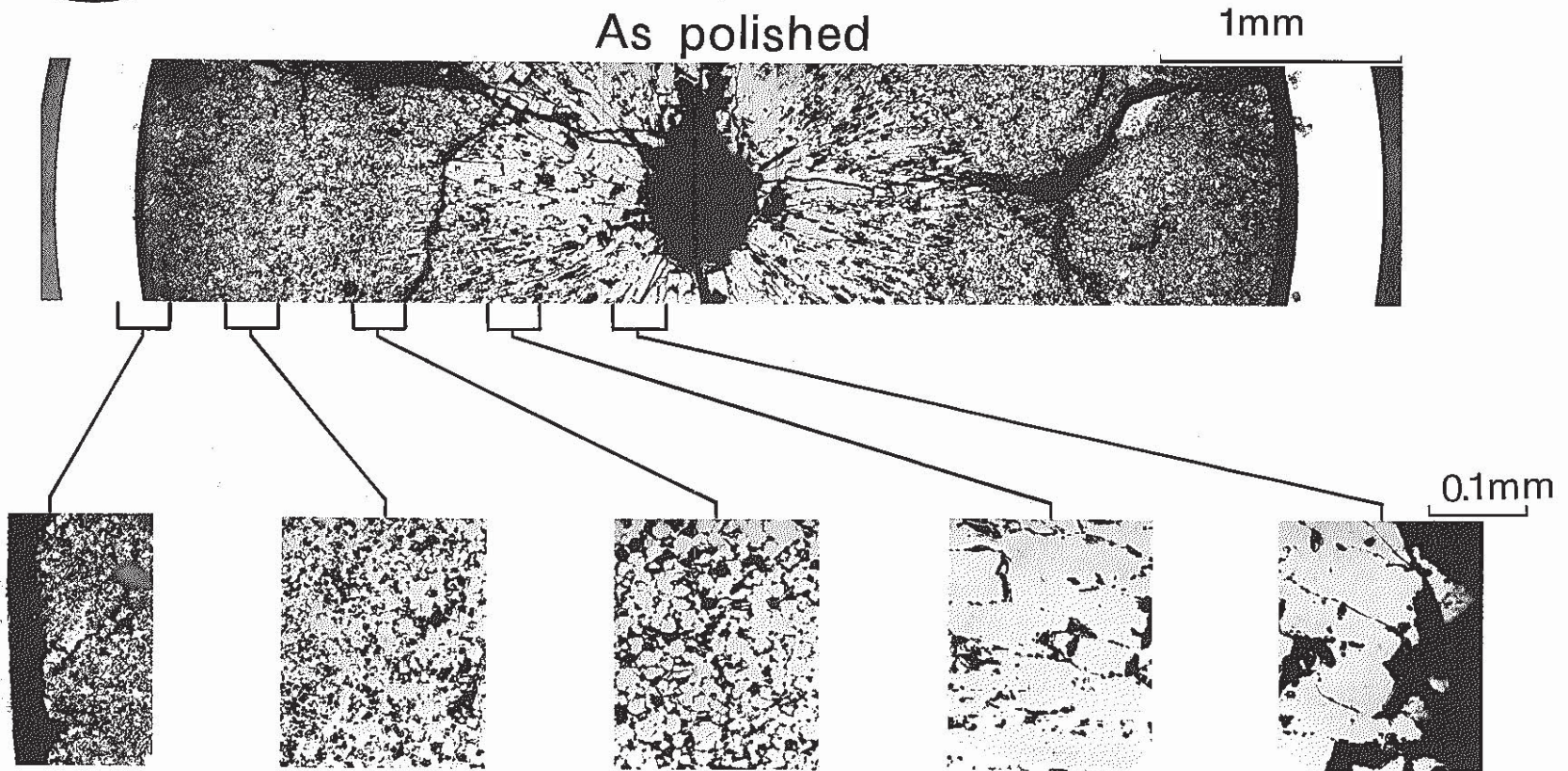
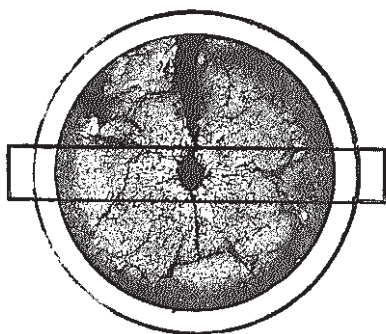


Photo 20 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661342 sample, as polished)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661342	
Distance from bottom of pin		477mm
Distance from bottom of fuel column		274mm

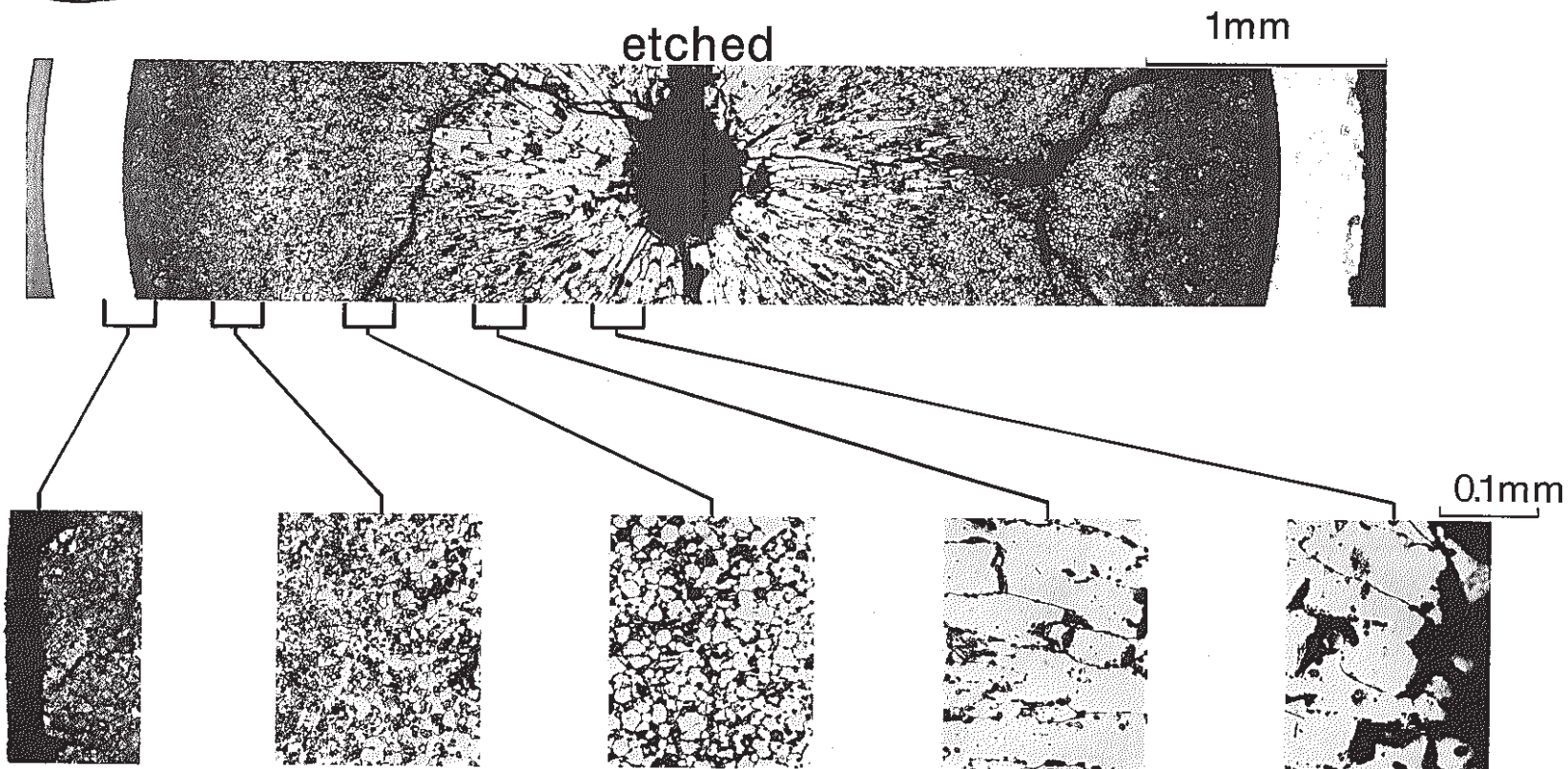


Photo 21 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661342 sample, etched)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661362	
Distance from bottom of pin		615mm
Distance from bottom of fuel column		412mm

As polished

1mm

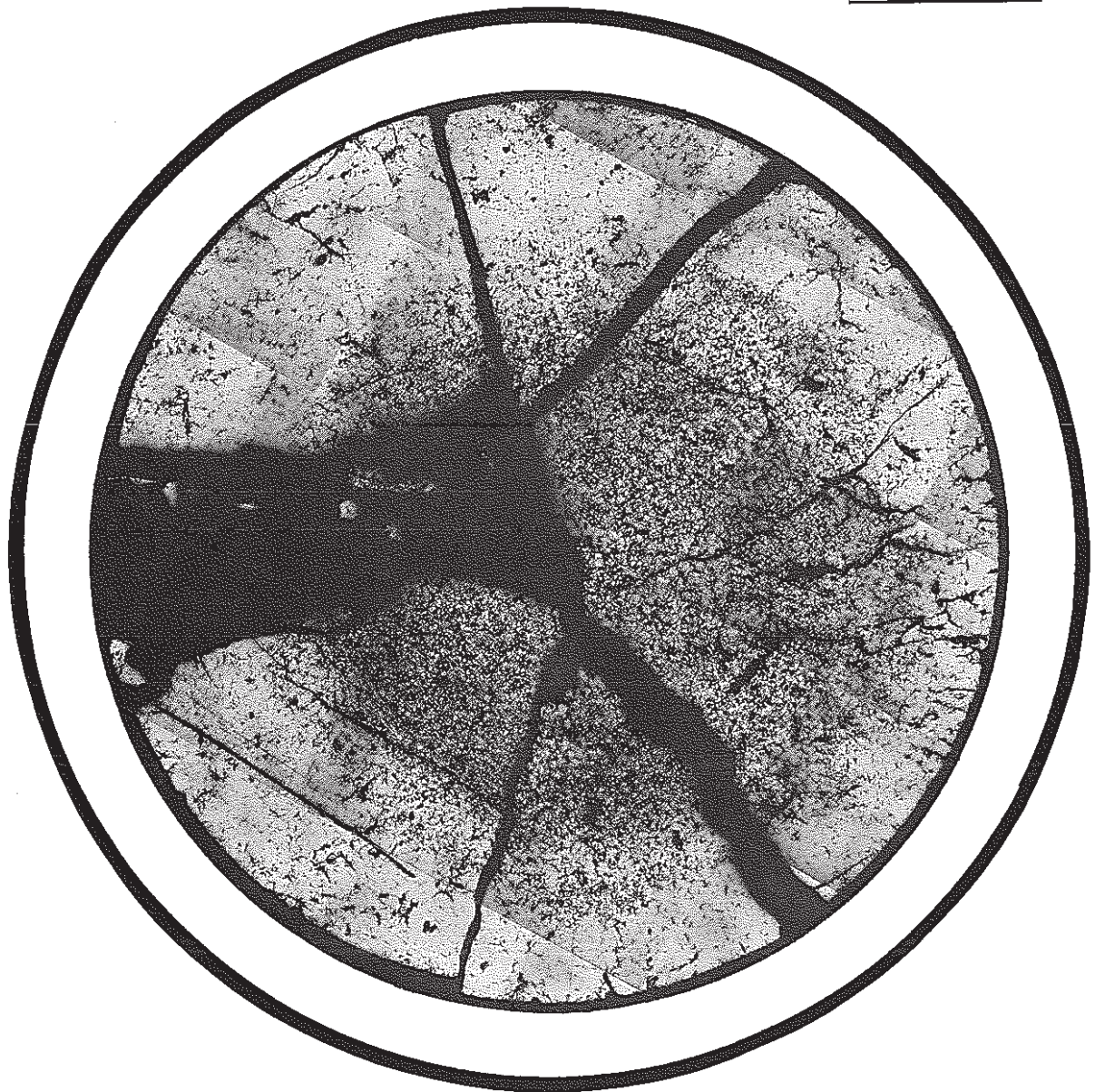


Photo 22 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel (661362 sample, as polished)

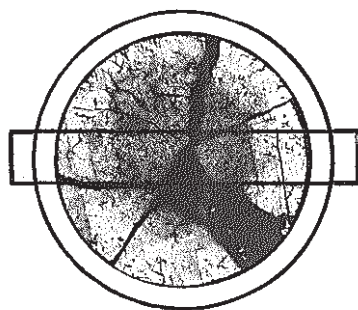
S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661362	
Distance from bottom of pin		615mm
Distance from bottom of fuel column		412mm

etched

1mm



Photo 23 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661362 sample, etched)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661362	
Distance from bottom of pin		615mm
Distance from bottom of fuel column		412mm

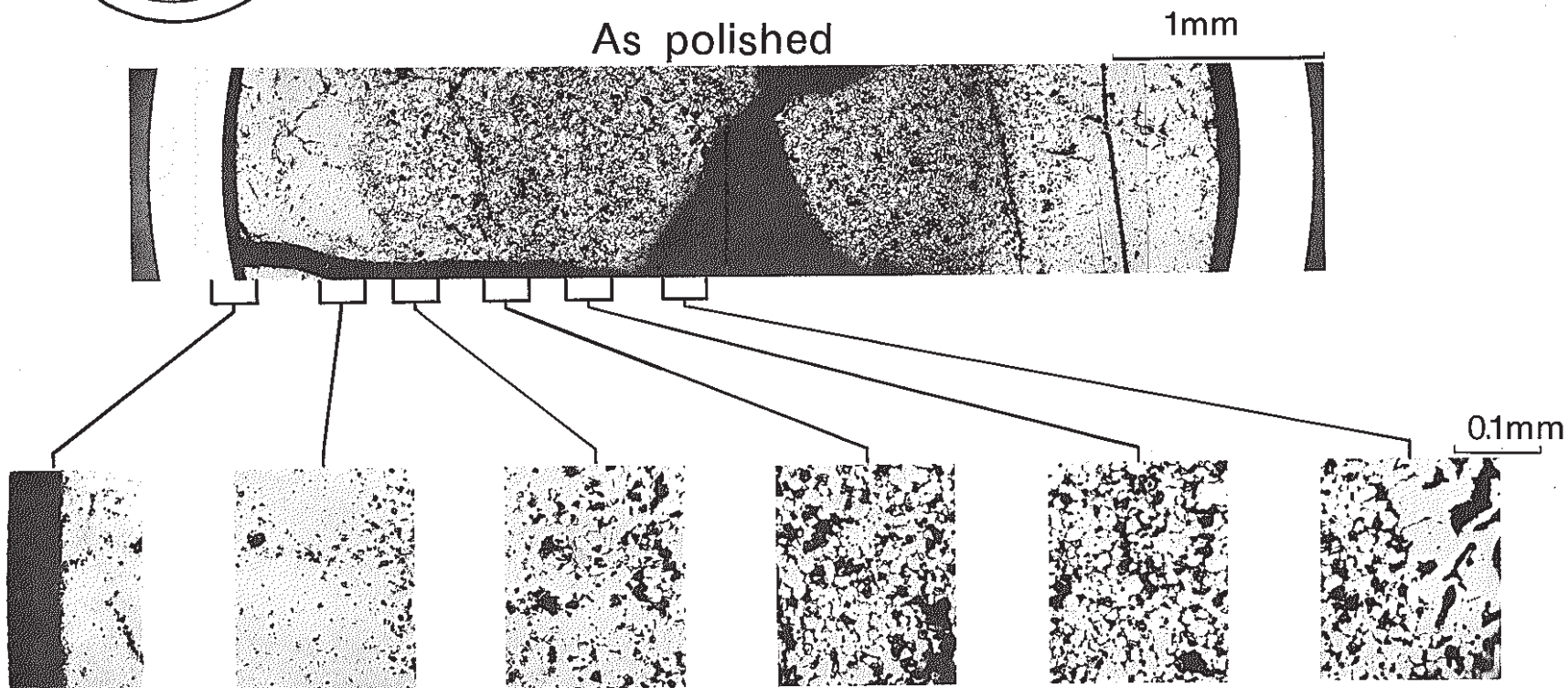
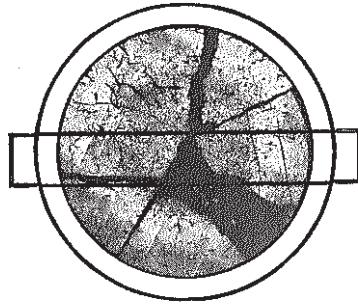


Photo 24 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661362 sample, as polished)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661362	
Distance from bottom of pin		615mm
Distance from bottom of fuel column		412mm

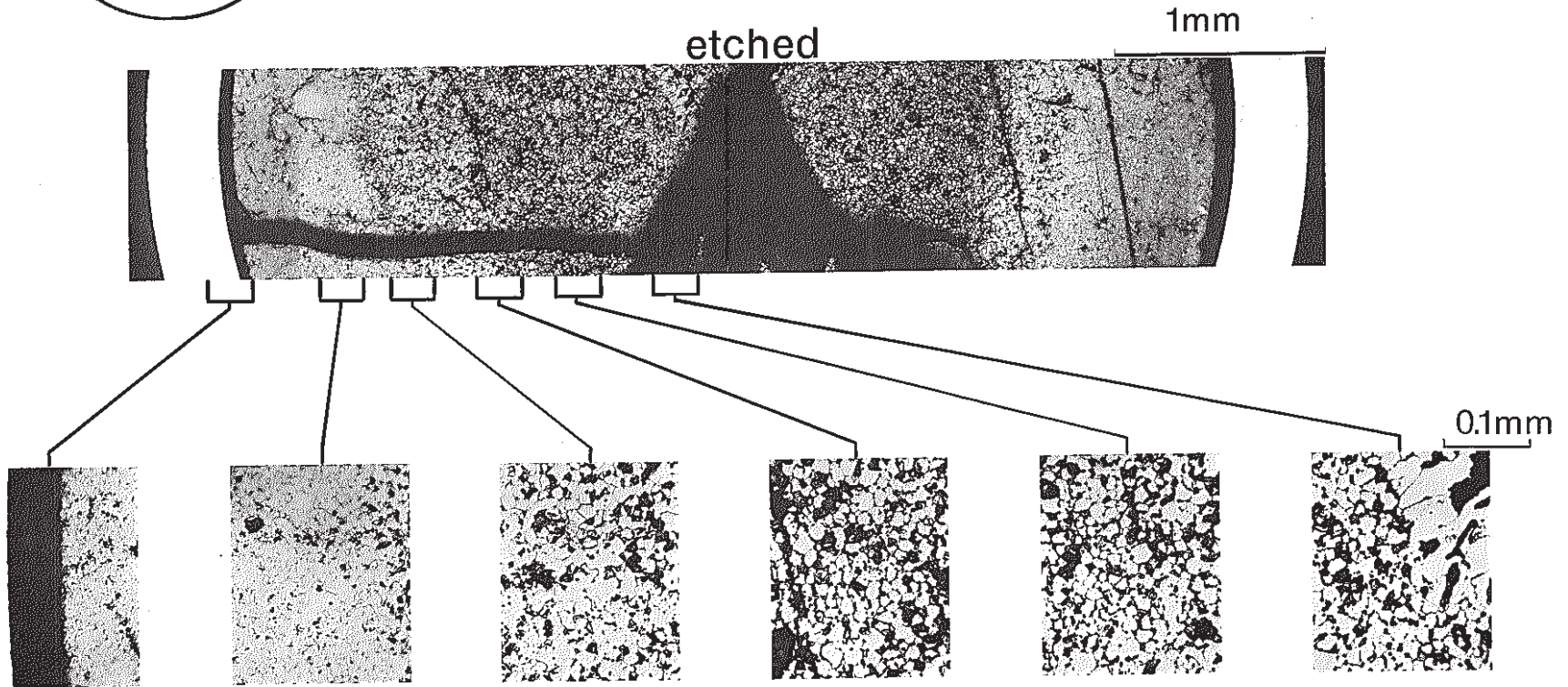
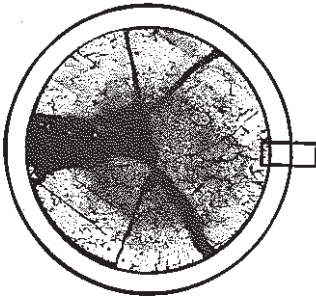


Photo 25 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661362 sample, etched)



S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6613	
Section No.	661362	
Distance from bottom of pin		615mm
Distance from bottom of fuel column		412mm

As polished

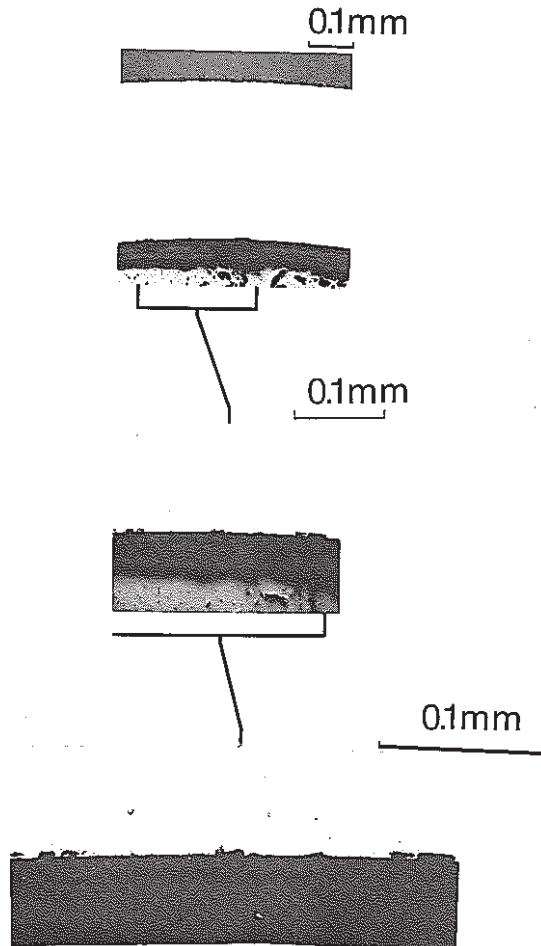


Photo 26 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel (661362 sample, as polished)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6614	
Section No.	661422	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

As polished

1mm

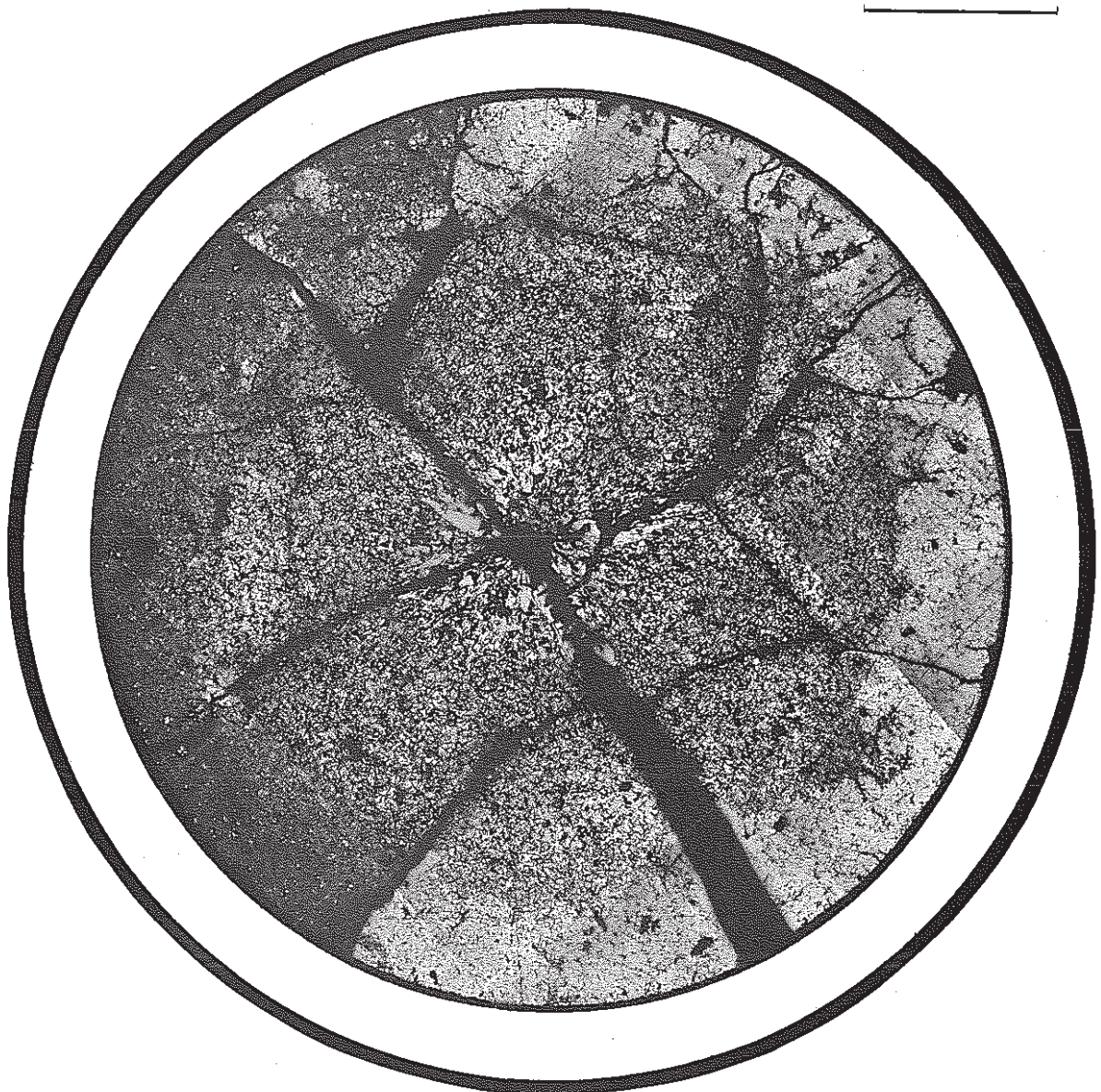


Photo 27 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661422 sample, as polished)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6614	
Section No.	661422	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

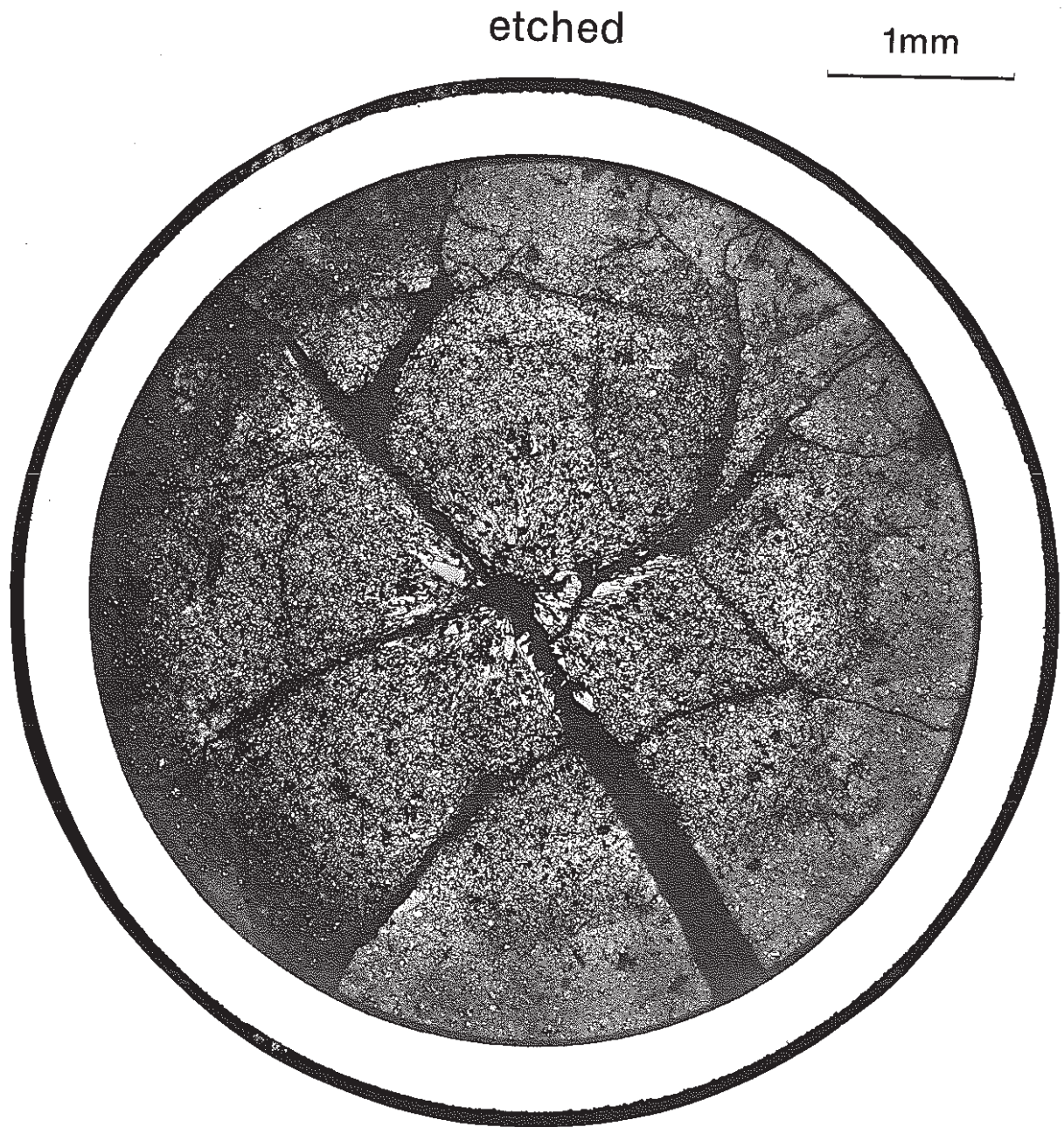


Photo 28 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661422 sample, etched)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6614	
Section No.	661422	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of fuel column		275mm

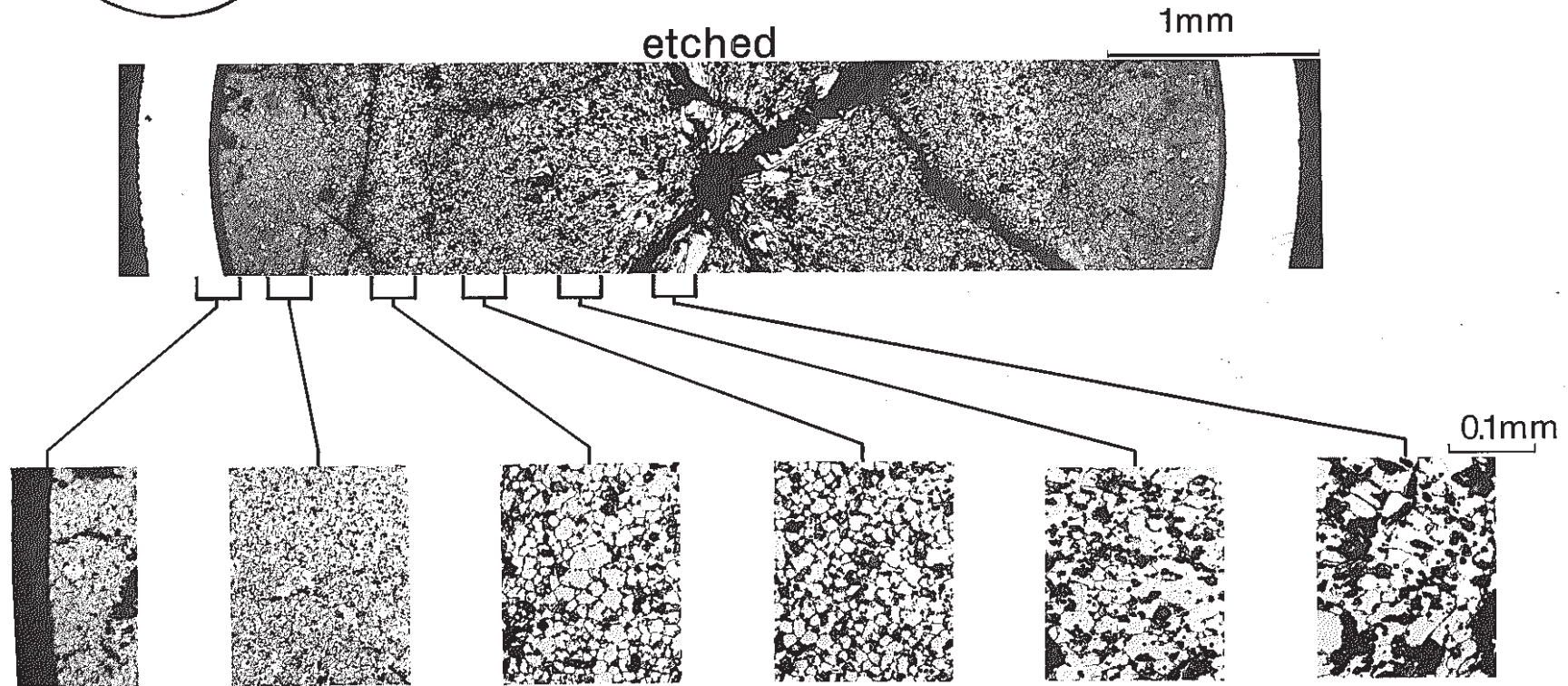
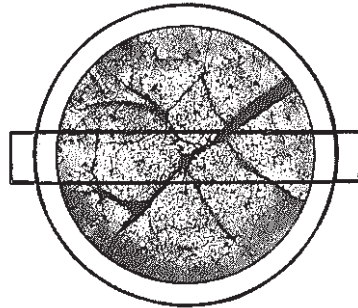
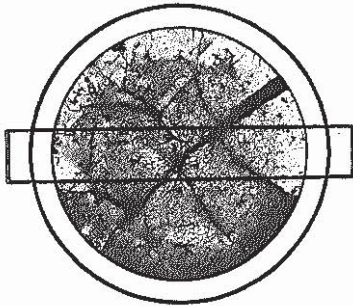


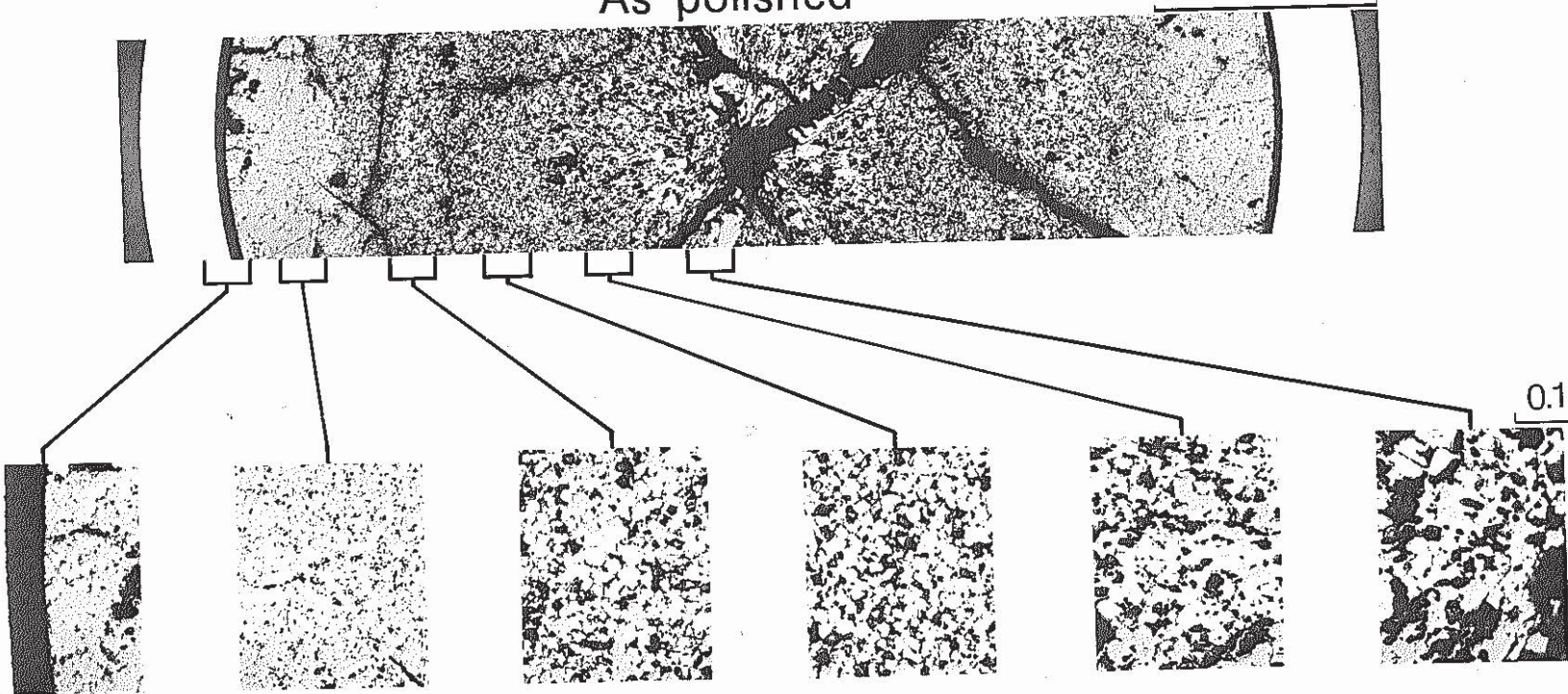
Photo 29 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II
(661422 sample, as polished)

S/A Name	JOYO-PFB000	
Pin No.	6614	
Section No.	661422	
Distance from bottom of pin	478mm	
Distance from bottom of fuel column	275mm	



As polished

1mm



0.1mm

Photo 30 Postirradiation ceramography of JOYO MK-II core fuel
(661422 sample, etched)

データ集 3 被覆管硬さ測定試験

Table 4-2-1 Measurement condition and indentation position

Table 4-2-2 Summary of cladding microhardness measurement of JOYO MK-II PFB000 No.6613 pin

Table 4-2-3 Cladding microhardness of JOYO MK-II PFB000 No.6613 pin

Fig. 4-2-1 Cladding microhardness distribution of JOYO MK-II PFB 000 No.6613 pin

Table 4-2-1 Measurement condition and indentation position

1) Measurement Condition

試験名	測定方法	圧子荷重(g)	保持時間(秒)
定常硬さ測定		500	30

2) Indentation Position

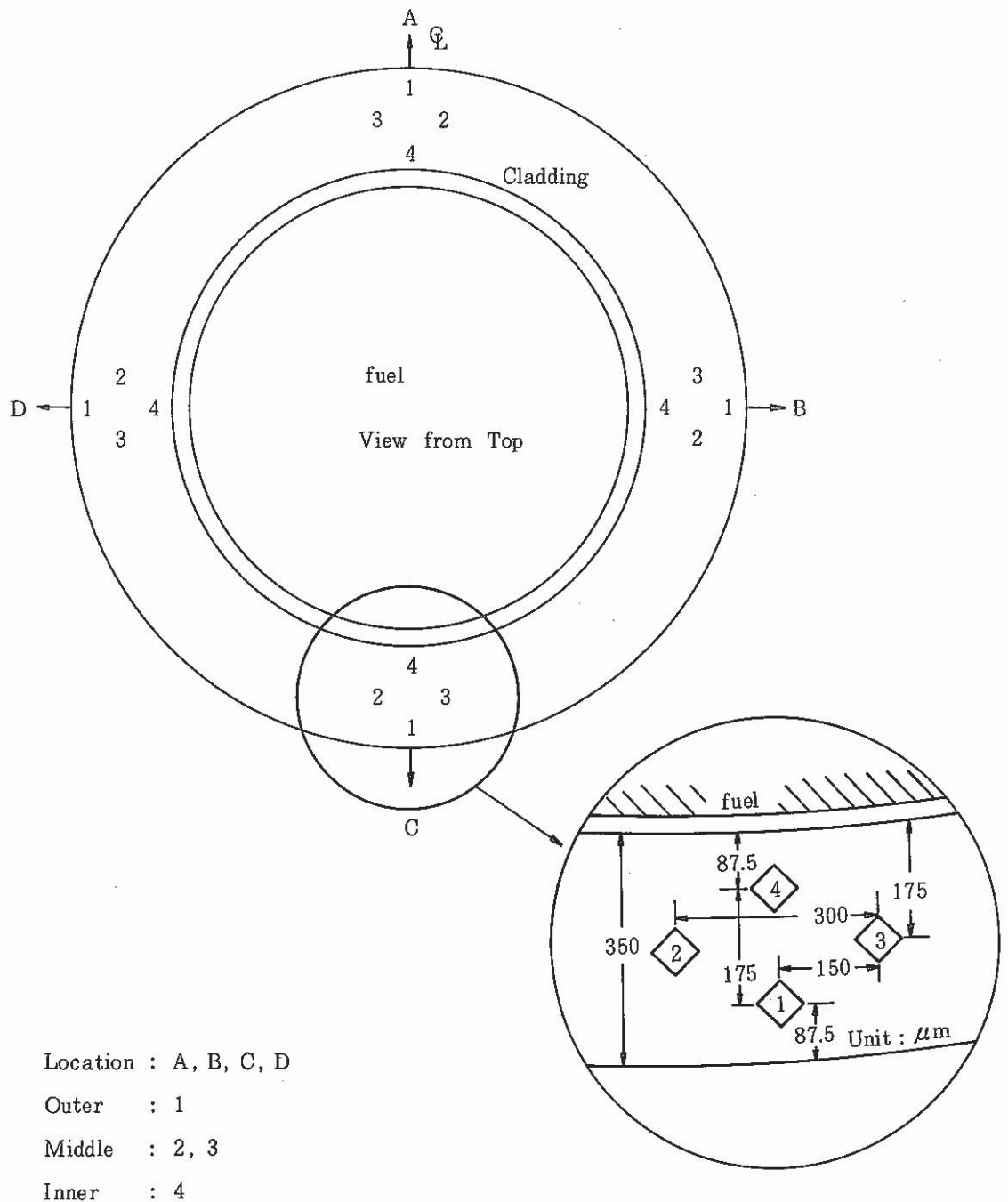


Table 4-2-2 Summary of cladding microhardness measurement of JOYO MK-II PFB000 No.6613 pin

Pin No.	6613 - PFB000 -	
Specimen No.	661322	661362
D.F.C.B.(mm)	136.9	412.0
Hardness (Hv 500)	323	289
(*1) ΔH_v (Hv 500)	40	6
(*2) $\Delta H_v / H_v$ (%)	14.1	1.1
(*3) 照射条件	Clad Midwall Temp. (°C)	442
	Fluence ($\times 10^{22} n/cm^2$)	0.607

(*1) : $\Delta H_v = \text{Hardness} - \text{Unirrad. Hardness}$

(*2) : $H_v = \text{Unirrad. Hardness} = 283 (\text{Hv } 500)$

(*3) : Fluence : $E \geq 0.1 \text{ MeV}$

Cladding Lot No. = S551

冷間加工度 = 20 (%)

Table 4-2-3 Cladding microhardness of JOYO MK-II PFB000 No.6613 pin

S/A Name	PFB000		Pin No.	6613	
Specimen No.	661322				
D.F.C.B.	136.9 (mm)		D.F.P.B.	339.9 (mm)	
Location	Outer	Middle		Inner	Average
	1	2	3	4	
A	312	333	326	318	322
B	318	326	324	330	325
C	324	318	318	324	321
D	320	330	324	324	325
Ring Average	319	327	323	324	323

S/A Name	PFB000		Pin No.	6613	
Specimen No.	661362				
D.F.C.B.	412.0 (mm)		D.F.P.B.	615.0 (mm)	
Location	Outer	Middle		Inner	Average
	1	2	3	4	
A	287	296	287	298	292
B	287	287	282	301	289
C	280	282	280	285	282
D	298	285	287	296	292
Ring Average	288	288	284	295	289

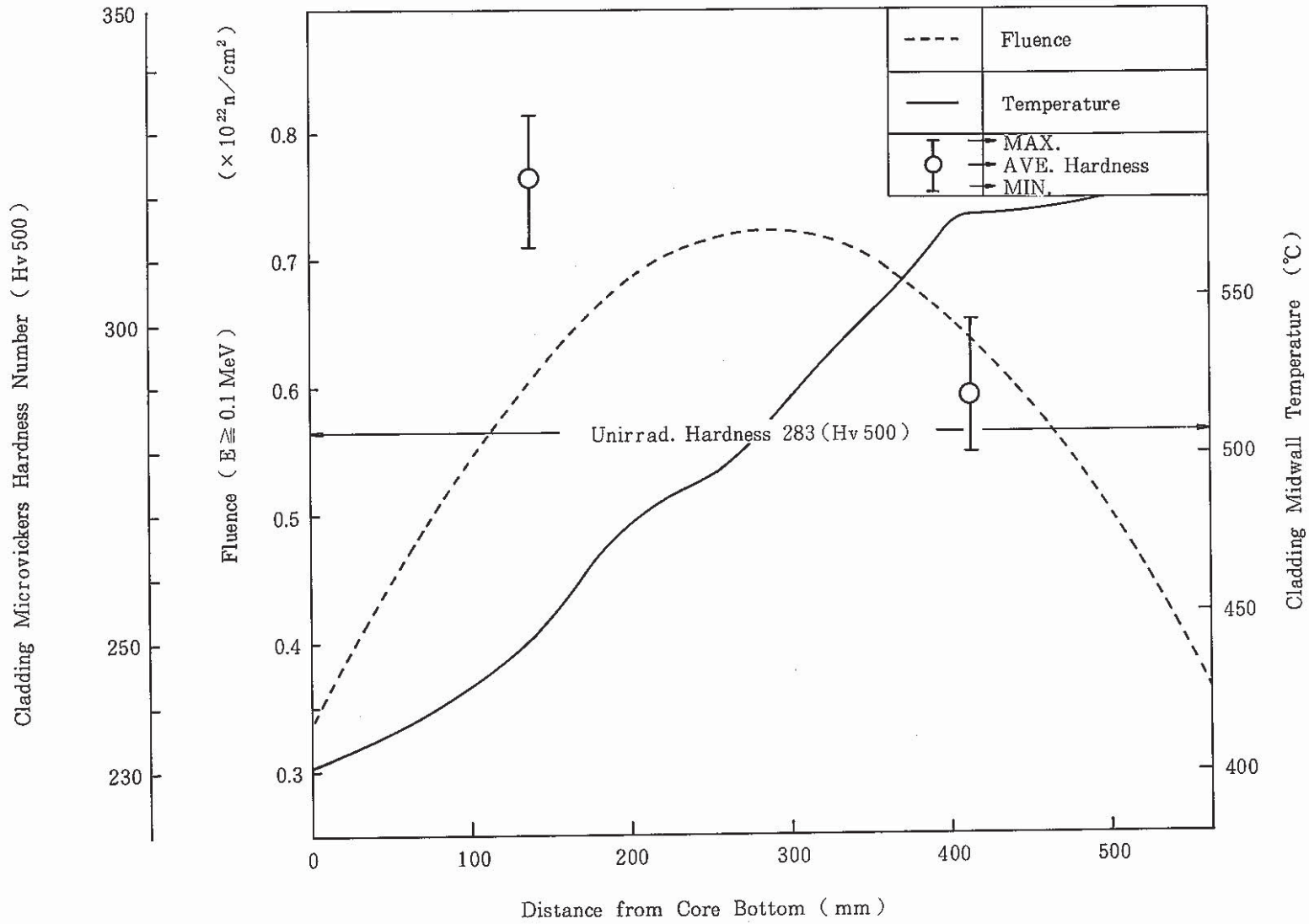


Fig. 4 - 2 - 1 Cladding microhardness distribution of JOYO MK-II PFB000 6613 pin

データ集 4 被覆管密度測定試験

Table 4-3-1 Summary of density measurement

Fig. 4-3-1 Pin cutting diagram for density measurement (Special assembly type B)

Fig. 4-3-2 Cladding density distribution of PFB000 No.6613 pin

Table4-3-1 Summary of density measurement

Pin No.	Section No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Fast Fluence ($n/cm^2 \times 10^{22}$)	Cladding Mid-Wall Temp. ($^{\circ}C$)	Density (g/cc)	Density Change $-\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
PFB000 6613	MK-II Cold材 S00089	—	—	—	7.966	Base
	661344 (S551)	479.0 - 503.5	0.716		7.952	0.17

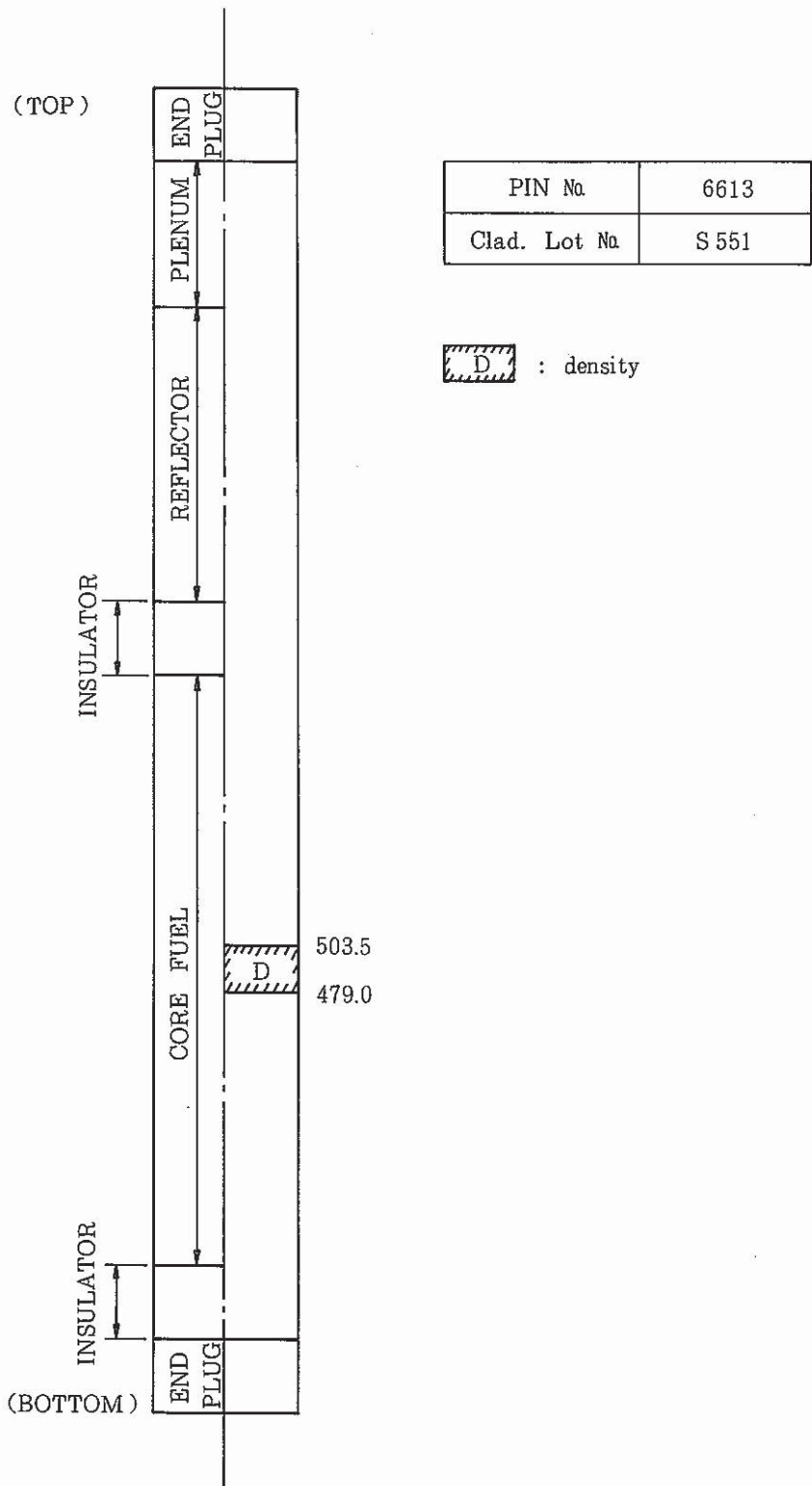


Fig. 4 - 3 - 1 Pin cutting diagram for density measurement (Special assembly type B)

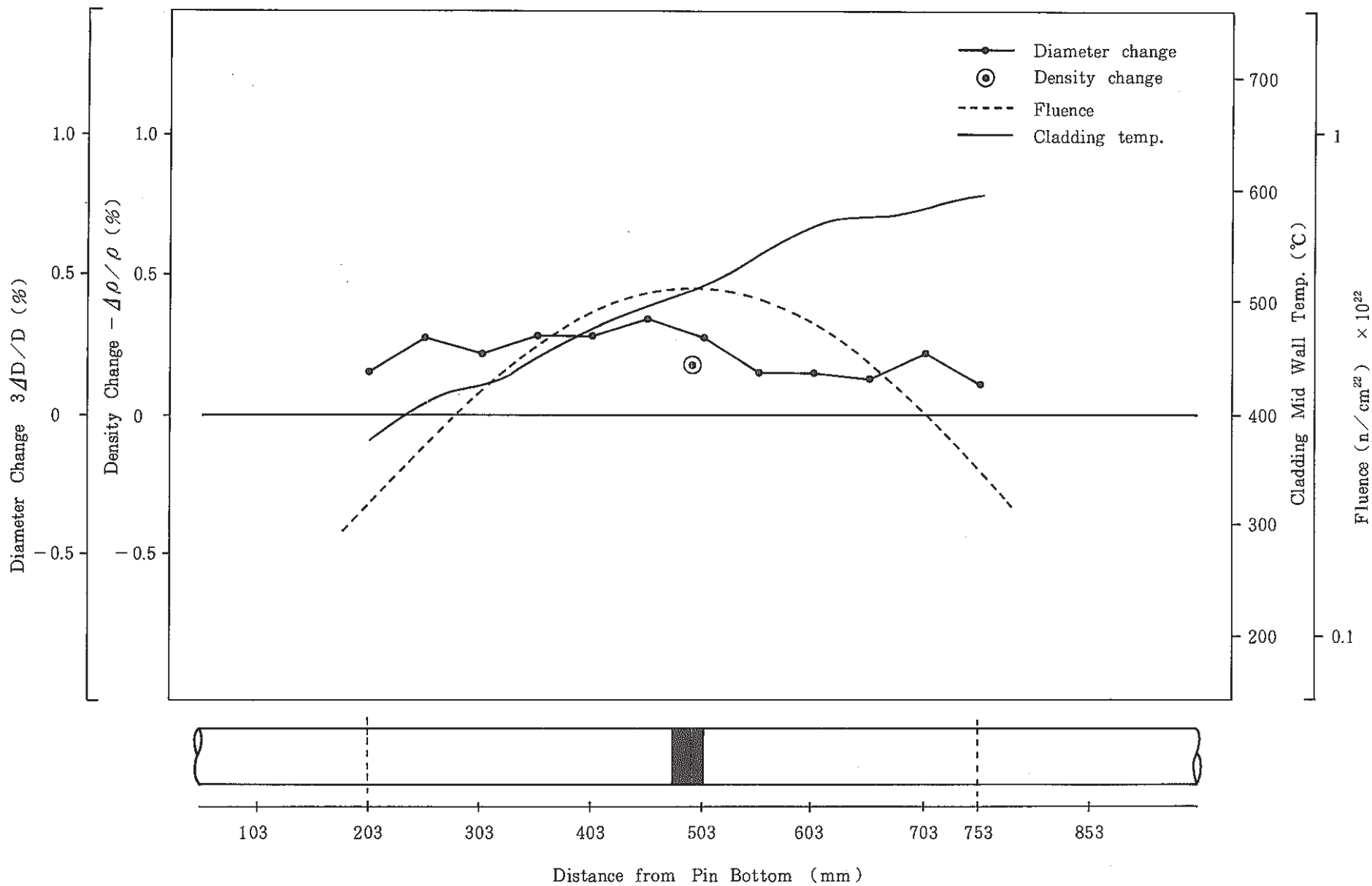


Fig. 4 - 3 - 2 Cladding density distribution of PFB000 Na 6613 pin.

データ集5 燃焼率測定試験

- Table4-4-1 Composition of spike solution and natural Neodymium
- Table4-4-2 Calculation of effective fission yield for 660223 sample
- Table4-4-3 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB
000 660223 sample
- Fig. 4-4-1 Cutting diagram of PFB000 6602 pin for burnup measurement
- Fig. 4-4-2 Specimen preparation process for burnup measurement in
AGS

Table4-4-1 Composition of spike solution and natural Neodymium

スパイク中の原子数 (atoms/ml)	U 233	4.3914×10^{18}	S 3 ※
	Pu 242	7.9674×10^{17}	A 242
	Nb 150	7.1740×10^{15}	A 50
天然ネオジムの同位体比	Nd 142 / Nd 150	4.824980	C 42 / 50
	Nd 145 / Nd 150	1.472180	C 45 / 50
	Nd 146 / Nd 150	3.050830	C 46 / 50
	Nd 148 / Nd 150	1.021325	C 48 / 50
ネオジムスパイクの 同位体比	Nd 142 / Nd 150	0.008937	S 42 / 50
	Nd 145 / Nd 150	0.004336	S 45 / 50
	Nd 146 / Nd 150	0.009122	S 46 / 50
	Nd 148 / Nd 150	0.007046	S 48 / 50
ウランスパイクの 同位体比	U 234 / U 233	0.014108	S 43
	U 235 / U 233	0.000401	S 53
	U 238 / U 233	0.006410	S 83
プルトニウムスパイクの 同位体比	Pu 239 / Pu 242	0.001309	S 92
	Pu 240 / Pu 242	0.013696	S 02
	Pu 241 / Pu 242	0.000859	S 12

※ 計算コードで使用している記号

Table 4 - 4 - 2 Calculation of effective fission yield for 660223 sample

Nuclide	Composition (Atom Fraction)	Fission Cross Section [barn]	Nd-148		Nd-146		Nd-145	
			Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield	Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield	Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield
U 233	nd	- ¹⁾	1.14 ²⁾	-	3.20 ²⁾	-	4.10 ²⁾	-
U 234	0.000710	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.08 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.086372	1.72E+00 ¹⁾	1.68 ³⁾	0.407	2.94 ³⁾	0.711	3.76 ⁴⁾	0.910
U 236	nd	1.51E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.000	3.06 ²⁾	0.000	3.77 ²⁾	0.000
U 238	0.520020	6.73E-02 ¹⁾	2.00 ³⁾	0.143	3.40 ³⁾	0.234	3.50 ²⁾	0.241
Pu238	0.000335	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu239	0.215067	1.75E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	1.000	2.46 ³⁾	1.505	3.01 ³⁾	1.841
Pu240	0.058677	5.03E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.088	2.83 ²⁾	0.136	3.34 ²⁾	0.161
Pu241	0.007779	2.23E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.055	3.01 ²⁾	0.085	3.52 ²⁾	0.099
Pu242	0.001853	4.00E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.003	3.10 ²⁾	0.004	3.70 ²⁾	0.005
Effective Fission Yield [%]			1.70		2.68		3.28	

Note; nd=not detected

Fractional Fission Yield=(AF)(CS)(FY)/SUM(AF)(CS)

AF:atom fraction of U and Pu(PIE data) CS:fission cross Section

FY:fission yield

Effective Fission yield=SUM(Fractional Fission yield)

1)MAGI code

2)TRG-2143-R

3)ICP-1050-1

4)HERE-R-8753

Table 4 - 4 - 3 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB000 660223 sample

S/A NO.(FAB) ; PFB000	PIN NO.(PIE) ; 6602
SAMPLE NO. ; 660223	SAMPLE POSITION ; 277.3~282.2 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 0.800

ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001129	0.137354	0.000602	-(a)	
0.139341	0.002731	0.137680	0.000615	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001557	0.272933	0.036172	0.000615	-(a)	
0.001557	0.273689	0.036039	0.002591	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.002803	4.892882	3.506621	3.397826	2.779798	1.793269
0.007539	1.432925	1.032485	0.993681	0.817025	0.526722

ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0991	12.0583	0.0528	87.7898		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1180	75.8048	20.6821	2.7420	0.6531		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0161	28.1634	20.1841	19.5579	16.0005	10.3220	5.7560

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 28.371 / 28.492

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.2018E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;	1.2663E+17	1.9682E+17	2.4067E+17
EFFECTIVE FISSION YIELD ;	1.70E-02	2.68E-02	3.26E-02
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;	7.4489E+18	7.3439E+18	7.3826E+18
BURNUP (atom%)#	0.616	0.607	0.611
SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##	5180	5100	5130

NOTE ; nd=not detected

- * Distance from core fuel bottom
- ** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
- # BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)
- ## 1.19 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

atom % - MWD/MTM 換算係数は、燃料組成分析値と MAGI コードに使用されている核分裂反応断面積及び核分裂放出エネルギー値から算出した。

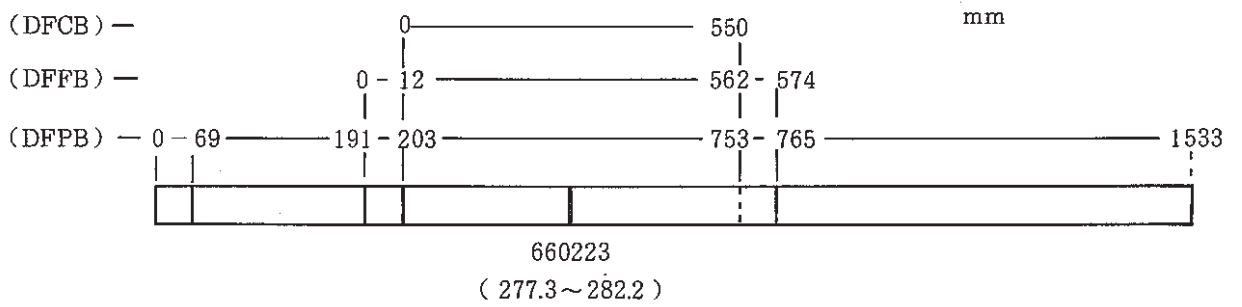
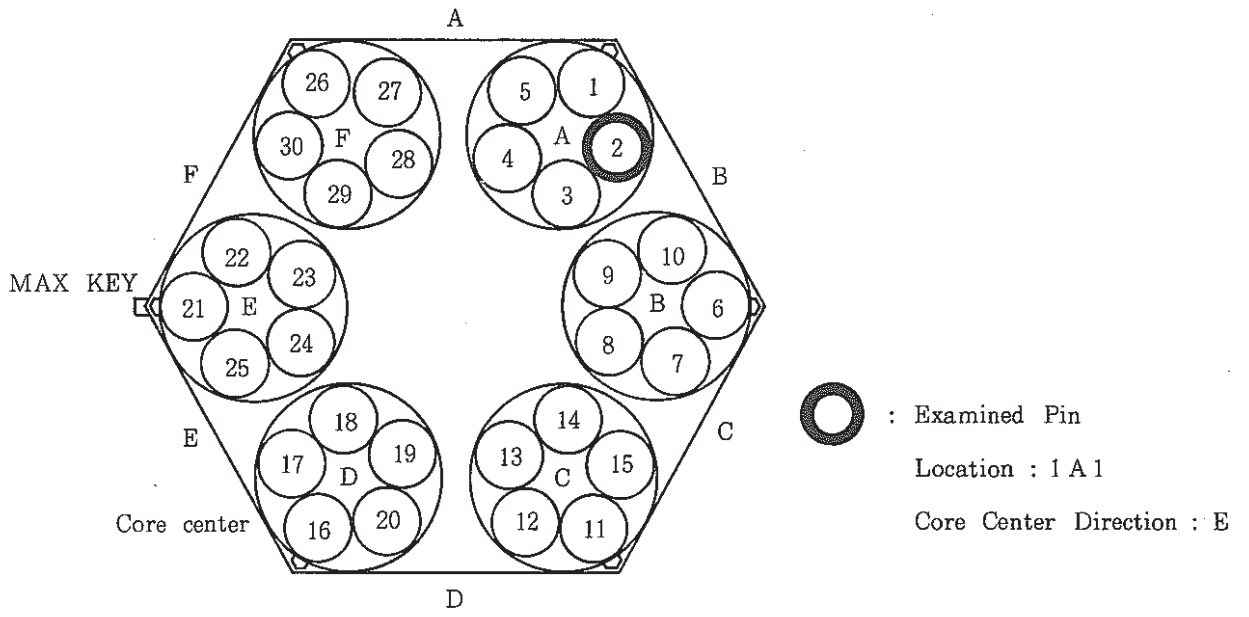


Fig. 4-4-1 Cutting diagram of PFD000 6602 pin for burnup measurement

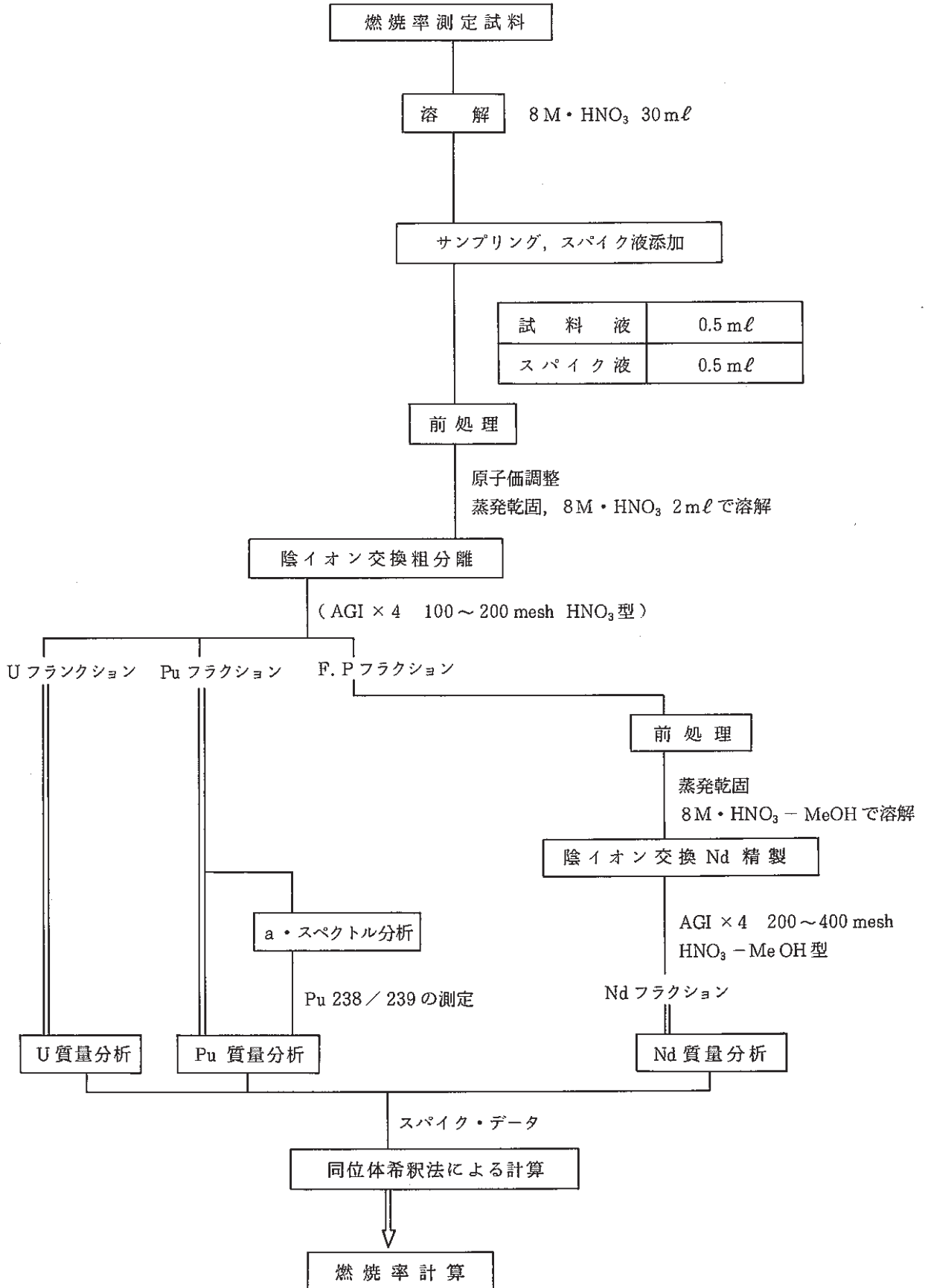


Fig. 4-4-2 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS