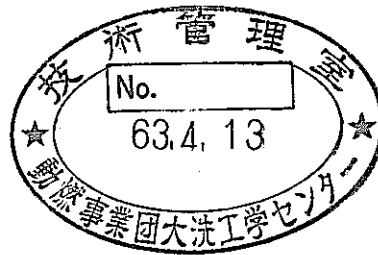


「常陽」MK-II炉心燃料集合体(PFD003)

の照射後試験

—燃料要素の破壊試験—



1988年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 88-191
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
燃料材料開発部

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炉心燃料集合体(PFD003)の照射後試験

—燃料要素の破壊試験—

実施責任者 *谷 賢

報告者 *小部 昭 滑川 卓志

桑島 幸夫 吉川 勝則

川澄 清一 橋口 正弘

富永 功 立花 利道

要 旨

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD003(集合体平均燃焼度は約13,300MWd/t)は、MK-II初装荷炉心燃料集合体のうちで2番目に照射後試験に供されたものである。照射燃料試験室(AGS)では、1) MK-II炉心燃料の照射挙動の把握、及び2)燃料ピンの健全性の確認を目的として4本の燃料ピンを対象に、金相試験(燃料組織観察及び被覆管組織観察)、被覆管硬さ測定、被覆管密度測定、及び燃焼率測定を実施した。その結果をまとめて以下に示す。

- 1) 燃料組織は、中心部より中心空孔、柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域、及び不変化領域が観察された。
- 2) 残留ギャップ幅は、製造時の170 μm から38 μm まで減少していた。
- 3) FCCIは、観察されなかった。
- 4) 軸方向上部の被覆管内面で炭化物析出が多かった。
- 5) 被覆管の硬さは、軸方向下端側で硬化しており、上端側で照射前と同程度であった。
- 6) 被覆管のスエリングは、認められなかった。
- 7) 燃焼率のピン軸方向分布及び集合体内径方向分布に関して実測値とESPRIT-J計算値が良く一致していた。

* 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	5
4.2.1	測 定 方 法	5
4.2.2	測 定 結 果	5
4.3	被覆管密度測定試験	5
4.3.1	試料調製及び測定方法	5
4.3.2	測 定 結 果	6
4.4	燃焼率測定試験	6
4.4.1	試料調製方法	6
4.4.2	測 定 結 果	6
5.	ま と め	7

List of table

		Page
Table 1	Fuel pin fabrication parameters	11
Table 2	Metallographis examination in AGS	12
Table 3	Irradiation parameters of PFD003	13
Table 4	Summary data from ceramographs (PFD003)	14
Table 5	Measurement condition and indentation position	15
Table 6	Microhardness results of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (1) (7064 pin)	16
Table 7	Microhardness results of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (2) (7087 pin)	17
Table 8	Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (1) (7064 pin)	18
Table 9	Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (2) (7064 pin)	19
Table 10	Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (3) (7087 pin)	20
Table 11	Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (4) (7087 pin)	21
Table 12	Summary of density measurement	22
Table 13	Summary of burnup measurement by Nd-method for PFD003 ..	23
Table 14	Calculation of effective fission yield for 706474 sample	24
Table 15	Composition of spike solution and natural Neodymium	25
Table 16	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 700722 sample	26
Table 17	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 706424 sample	27
Table 18	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 706443 sample	28
Table 19	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 706474 sample	29

	Page
Table 20	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 7064A2 sample 30
Table 21	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 7064C2 sample 31
Table 22	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD003 70C122 sample 32

List of figure

	Page
Fig. 1	Schematic drawing of Fuel pin 33
Fig. 2	Irradiation position of PFD003 subassembly in JOYO MK-II core 34
Fig. 3	Fuel pin positions in PFD003 subassembly 35
Fig. 4	Cladding temperature and fluence distribution (7064 pin) 36
Fig. 5	Fuel temperature distribution (7064 pin) 37
Fig. 6	Cladding temperature and fluence distribution (7087 pin) 38
Fig. 7	Burnup distribution (7064 pin) 39
Fig. 8	Burnup distribution (70C1 pin) 40
Fig. 9	Burnup distribution (7007 pin) 41
Fig. 10	Linear heat rate distribution (7064 pin) 42
Fig. 11	Linear heat rate distribution (7087 pin) 43
Fig. 12	Sampling of specimens (PFD003) 44
Fig. 13	Flow diagram of metallographic examinations in AGS 45
Fig. 14	Axial profile of restucted region 46
Fig. 15	Relation between hardness, clad temperature and fluence at various position for JOYO MK-II fuel pin (7064 pin) 47
Fig. 16	Relation between hardness, clad temperature and fluence at various position for JOYO MK-II fuel pin (7087 pin) 48
Fig. 17	Cladding density change (7064 pin) 49
Fig. 18	Cladding density change (7087 pin) 50
Fig. 19	Cutting diagram of PFD003 fuel pins for burnup measurement 51
Fig. 20	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS 52
Fig. 21	Burnup axial distribution of PFD003 53
Fig. 22	Burnup radial distribution of PFD003 (7064 pin) 54

List of photograph

	Page
Photo. 1 Macrographs of JOYO MK-II core fuel (7064 pin)	55
Photo. 2 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706422 sample)	56
Photo. 3 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (706423 sample)	57
Photo. 4 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706423 sample)	58
Photo. 5 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (706442 sample)	59
Photo. 6 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706442 sample)	60
Photo. 7 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706472 sample)	61
Photo. 8 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (706473 sample)	62
Photo. 9 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706473 sample)	63
Photo. 10 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (7064A3 sample)	64
Photo. 11 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (7064A3 sample)	65
Photo. 12 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (7064C4 sample)	66
Photo. 13 Optical micrograph of fuel cladding (7064 pin)	67

1. ま え が き

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD003は、炉心方向をE面方向として、炉内位置1B1で100 MW出力上昇サイクルから100 MW第1サイクルまで照射された集合体であり、集合体の平均燃焼度は約13,300 MWd/tである。本集合体は、MK-II初装荷炉心燃料集合体のうちでPFD010に続いて2番目に照射後試験に供されたものである。

照射後試験の目的は、1) MK-II炉心の照射挙動の把握、及び2)燃料ピンの健全性の確認である。

照射燃料試験室(AGS)では、燃料ピンの破壊試験を実施した。対象とした燃料ピンは下記の4本である。

- (1) 集合体代表ピン (No. 7064 pin, S社製被覆管)
- (2) 内部ピン (No. 7087 pin, K社製被覆管)
- (3) 高出力コーナープイン (No. 70C1 pin, 同上)
- (4) 低出力コーナープイン (No. 7007 pin, S社製被覆管)

上記のピンについて、照射後試験として、(a)金相試験(燃料組織観察及び被覆管組織観察)、(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

本集合体中の照射後試験に供された燃料ピンを Fig 1, またその仕様を Table 1 に示す。

3. 照射条件

本集合体の炉心装荷位置を Fig.2 に示す。また破壊試験を実施した燃料ピンの集合体内装荷位置を Fig.3 に示す。さらに本集合体の照射条件を以下に記す。

- ① 燃焼度（集合体平均）：13,300 MWd/t
- ② 照射サイクル：100 MW出力上昇サイクル～100 MW第1サイクル
- ③ 集合体ピークフルエンス（ $E \geq 0.1$ MeV）： 1.65×10^{22} n/cm²
- ④ 線出力（集合体平均）：283.3～286.6 w/cm
- ⑤ 照射位置：1B1（Fig. 2 を参照）

試験に供した各燃料ピンの燃焼度分布，中性子照射量分布，温度分布及び線出力分布について燃材部MK-II照射情報検索システムの出力結果を Fig. 4～Fig. 11に示す。

4. 照射後試験

AGSで実施した照射後試験項目とその試料採取位置をFig.12に示す。

4.1 金相試験

4.1.1 試料調製方法

金相試験工程をFig.13に示す。また、金相試験の実施内容をTable 2に示す。

4.1.2 試験結果

7064ピンから採取した上部・下部インシュレータペレットを含む8試料の代表的な金相写真をPhoto 1～Photo 12に示す。これらの金相写真より以下の結果が得られた（Table 3に同試料の切断位置及び照射履歴を示す）。

1) 燃料組織観察

7064ピンの軸方向中央部付近の試料における燃料組織は、断面中心部より中心空孔、柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域そして最外周部に不変化領域の5領域で構成されているのが観察された。また、中央部付近以外の試料には、ガスバブル領域、高密度化領域及び不変化領域の3領域で構成されているのが観察された。さらに、上部及び下部インシュレータペレットには組織変化は認められず、炉心燃料ペレットとの境界部のディッシュは、そのまま観察された。

金相断面写真から、タブレットデジタイザーを用いて各燃料組織変化領域径、ペレット外径、被覆管内径及び外径を測定した結果をTable 4に示す。Fig.14に燃料組織変化領域と残留ギャップ幅の軸方向分布を示す。各組織変化領域の軸方向分布は、線出力分布に対応しており軸方向中心部で組織変化が大きい。また線出力が350 w/cmを超えると中心空孔及び柱状晶を生じることが認められる。さらに、残留ギャップ幅は、軸方向中心部で製造時の170 μm から38 μm まで減少している。これは、ペレットのスエリングによりギャップ幅が減少したものと考えられる。

2) FCCI 観察

燃料-被覆管の化学的相互作用（FCCI）は、観察されなかった。

3) 被覆管組織観察

7064ピン（S材）の電解腐食後の被覆管組織写真を、Photo.13に示す。706442及び706473試料の炭化物は、マトリックス内にはほぼ均一に分布しており、内・外面側とも析出量にほとんど変化は認められない。また7064C3試料の炭化物析出状況は、粒内より粒界に多く析出し、内面側の析出量が多い。

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・ビッカース法）により実施した。Table 5に測定条件及び横割試料の測定位置を示す。

4.2.2 測定結果

Table 6及びTable 7に、ピン軸方向硬さ値と照射前硬さ値の比較を示し、Fig.15及びFig.16に軸方向硬さ値分布と照射量及び照射温度との関係を示す。軸方向硬さ値分布は、7064ピン及び7087ピンとも燃料下端側で最大値（照射前より、7064ピンでは81(Hv(0.5))、7087ピンでは75(Hv(0.5))高い)を示し、燃料上端側では照射前と同程度の硬さ値を示している。

次に、Table 8～Table 11に各測定点の硬さ値を示す。これらの表からは、被覆管の内側と外側の硬さ値の間には、差異は認められない。

4.3 被覆管密度測定試験

被覆管密度の測定は、7064ピン及び7087ピンの炉心部3点について行った。Fig.17及びFig.18に照射条件等とともに試料採取位置を示す。

4.3.1 試料調製及び測定方法

試料調製及び測定は、次のように行った。

1) 試料切断

マイクロソーを用いて測定試料を切断採取。試料長さは、約25mm。

2) 脱ミート

脱ミート装置を用いて被覆管内の燃料を除去。

3) 被覆管端面研磨

被覆管の切断端面を耐水研磨紙を用いて研磨。研磨条件は#120、#240、#600の各研磨紙にて5分間ずつ研磨した。

4) 被覆管酸洗浄及び乾燥

8モル硝酸90℃中で15分間酸洗いした後、純水による超音波洗浄を15分間行いその後自然乾燥した。

5) 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分間ずつの脱脂洗浄を行いその後自然乾燥した。

6) 測定

読み取り限度1μgの電子天秤により、空気中での秤量及び界面活性剤入りの純水中秤

量をくり返し実施した。

7) 密度計算

測定データを、測定温度及び気圧等の条件により補正し密度値を算出した。

4.3.2 測定結果

測定試料の密度変化は、7064ピンで最大0.1%、7087ピンで最大-0.11%であり、測定誤差の範囲(±0.2%)内にあり有意差は認められなかった。各測定試料及びReference材の密度測定結果をTable 12に示す。また照射条件と共に密度測定結果をFig.17及びFig.18に示す。

4.4 燃焼率測定試験

^{148}Nd を指標核種とした同位体希釈法により、集合体代表ピンについて燃焼率の軸方向分布を、また高出力及び低出力コーナーピンについて軸方向中心位置における燃焼率の集合体内径方向分布を求めた。

4.4.1 試料調製方法

試料の採取位置をFig.19に、また試料調製の方法及び手順をFig.20に示す。

4.4.2 測定結果

今回得られた測定データとESPRIT-Jコードによる計算値をまとめた結果をTable 13に示す。燃焼率計算で使用した ^{148}Nd 、 ^{146}Nd 、及び ^{145}Nd の実効核分裂収率の計算例(試料No.706474)をTable 14に示す。今回の同位体希釈分析計算に使用したスパイク液の濃度及び組成のデータ(質量分析値)をTable 15に示す。また質量分析から得られた同位体組成及び同位体希釈分析から得られた各同位体原子数、さらにこれらのデータを基にして得られた燃焼率等の計算結果をTable 16～Table 22に示す。

次に燃料ピン(代表ピン)の軸方向における燃焼率分布をESPRIT-Jコードによる計算値及び照射燃料集合体試験室(FMS)での γ -スキャン測定結果と比較して最大値で規格化したものをFig.21に示す。また集合体内径方向における燃焼率分布を64ピンの値を1として規格化したものをFig.22に示す。その結果、以下のことがわかった。

- 1) PFD003炉心燃料集合体の中心ピンの軸方向中心位置(試料No.706474)での燃焼率は、1.77 atom% (16,100 MWd/t)であった。
- 2) 燃焼率の実測値とESPRIT-Jコード計算値を比較すると実測値の方が計算値より最大1.8% (試料No.700722)大きい。
- 3) 燃焼率の軸方向分布は、実測値とESPRIT-Jコード計算値は良い一致を示している。
- 4) 燃焼率の集合体内径方向分布は、実測値とESPRIT-Jコード計算値とは良い一致を示している。また形状は山形分布となっている。

5. ま と め

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD003の照射後試験（破壊試験）結果の概要を以下に示す。

1) 金相試験

代表ピンを対象に試験を実施した。

- 燃料組織は、中心部より中心空孔、柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域及び不変化領域から構成されている。
- 残留ギャップ幅は、製造時の170 μm から38 μm まで減少している。これはペレットのスエリング等によりギャップ幅が減少したものと考えられる。
- FCCIは、観察されなかった。
- 被覆管組織は、軸方向上部の被覆管内面で炭化物析出が多かった。

2) 被覆管硬さ測定試験

代表ピンと内部ピン（7087ピン）を対象に試験を実施した。

- 7064ピン及び7087ピンの軸方向下端側の硬さ値がそれぞれ81 [Hv(0.5)]及び75[Hv(0.5)]硬化しており、軸方向上端側では照射前と同程度の硬さ値を示している。

3) 被覆管密度測定試験

測定したいずれの試料も密度変化は、測定誤差範囲（ $\pm 0.2\%$ ）に入っており代表ピン、内部ピンともスエリングは認められなかった。

4) 燃焼率測定試験

代表ピン、高出力コーナーピン、及び低出力コーナーピンの3本を対象に試験を実施した。

- 燃焼率のピン軸方向及び集合体内径方向分布は、実測値とESPRIT-J計算値とは良く一致していた。

データ集

Table 1 Fuel pin fabrication parameters

S/A name	PFD003	Pin no 7007, 7064 7087, 70C1
Fuel		
Fuel form	Flat end solid pellet	
Pellet diameter (mm)	4.63	
Pellet density (% T. D)	93 ± 2.0	
Fuel composition	30 W/O PuO ₂ -UO ₂	
U-235 enrichment (%)	12.0 ± 0.3	
Pu isotopic composition (%)	Pu 239/240/241/242 75.6/20.9/2.7/0.7	
O/M ratio	1.97 + 0.02 - 0.03	
Cladding		
Type and work	SUS 316, 20% cold work	
Outer/inner diameter (mm)	5.5 / 4.8	
Lot identification	7007 } : S003 ; 7087 } : K002 7064 } : S003 ; 70C1 } : K002	
Fuel pin		
Pin length (mm)	1533	
Pin outer diameter (mm)	5.5	
Fuel column length (mm)	550 ± 5	
Plenum length (mm)	150	
Insulator pellet length (mm)	{ upper 12 bottom 12	
Fuel/cladding dia. gap (mm)	0.17	
Pin spacing & support	Wrapping wire	

Table 2 Metallographis 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	被覆管肉厚 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 ポイド分布測定 ポイド分布測定	×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	× 200 部分写真 × 400 部分写真 × 750 部分写真	位置の同定 結晶粒測定 炭化物観察

Table 3 Irradiation parameters of PFD003

Pin No.	Section No.	Distance from core bottom (mm)	Burnup (MWd/t)	Linear heat rate (W/cm)	Fuel center temp. (°C)	Clad, inner temp. (°C)	Comment
7064	706423	14	11019	239	1467	410	
"	706442	115	14150	310	1863	458	
"	706473	240	16165	354	2107	515	
"	7064A3	425	12910	280	1957	577	

Table 4 Summary data from ceramographs (PFD003)

Pin No.	Section No.	Restructured region dia. (mm)					Residual diametral gap size (μm)	Pellet outer dia. (mm)	Clad dia. (mm)	
		Central void	Columnar region	Gas bubble region	Densified region	Dark ring region			Outer	Inner
7064	706423	—	—	2.4	3.3	—	51	4.7	5.5	4.8
"	706442	—	—	2.5	3.5	—	44	4.7	5.5	4.8
"	706473	0.42	2.3	3.1	3.7	—	38	4.7	5.5	4.8
"	7064A3	—	—	2.3	3.3	—	43	4.7	5.5	4.8

Table 5 Measurement condition and indentation position

1) Measurement condition

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

2) Indentation position

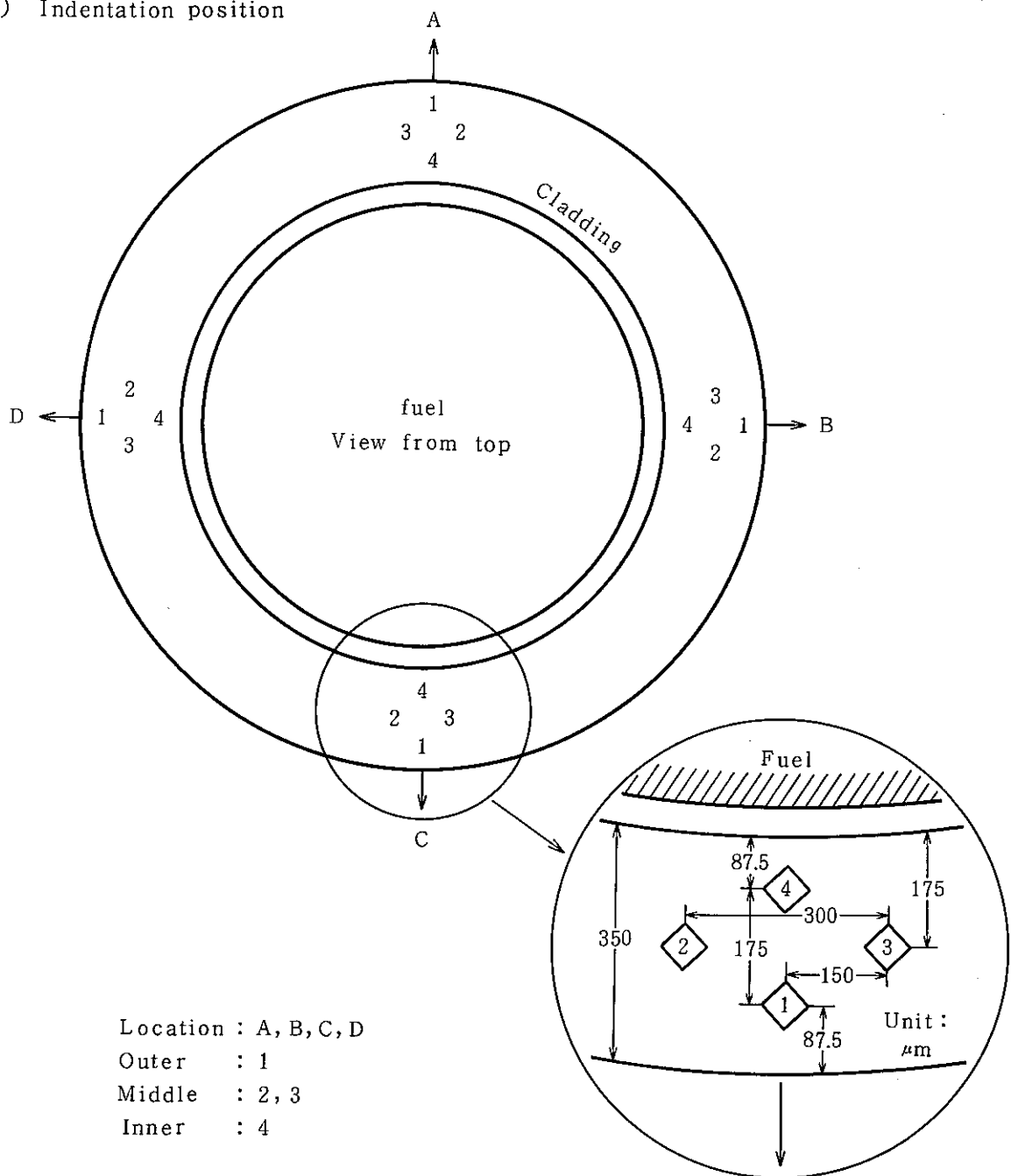


Table 6 Microhardness results of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (1) (7064 pin)

Pin No.		7064				
		Lot No. S003 (Unirrad. hardness 264 (Hv 0.5))				
Specimen No.		706423	706442	706473	7064A3	7064C3
D. F. C. B. (mm)		23.8	124.3	250.0	434.8	535.0
Hardness (Hv 0.5)		345	344	318	280	267
Δ Hv (Hv 0.5)		81	80	54	16	3
(*1) Δ Hv/Hv (%)		30.7	30.3	20.5	6.1	1.1
(*2)	Clad. midwall temp. (°C)	401	443	500	565	580
	Fluence ($\times 10^{22}$ n/cm ²)	1.18	1.76	2.01	1.55	0.96

(*1) : Hv = Unirrad. hardness

 Δ Hv : Hardness-Unirrad. hardness(*2) : Fluence ($E \geq 0.1$ MeV)

冷間加工度=20 (%)

Table 7 Microhardness results of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (2) (7087 pin)

Pin No.		7087	Lot No K002 (Unirrad. hardness 270 (Hv 0.5))			
Specimen No		708722	708742	708762	708782	7087A2
D. F. C. B. (mm)		22.6	124.5	250.2	434.9	534.8
Hardness (Hv 0.5)		345	331	310	272	263
Δ Hv (Hv 0.5)		75	61	40	2	-7
(*1) Δ Hv/Hv (%)		27.8	22.6	14.8	0.7	-2.6
(*2)	Clad. midwall temp. (°C)	401	444	501	568	583
	Fluence ($\times 10^{22}$ n/cm ²)	1.19	1.77	2.03	1.57	0.98

(*1) : Hv = Unirrad. hardness

 Δ Hv : Hardness - Unirrad. hardness(*2) : Fluence ($E \geq 0.1$ MeV)

冷間加工度 = 20 (%)

Table 8 Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (1) (7064 pin)

S/A NAME		PFD003		PIN No		7064	
SPECIMEN No		706423					
D. F. C. B.		23.8 (mm)		D. F. P. B.		109.8 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	336	352	350	346	346		
B	346	343	339	343	343		
C	346	339	343	343	343		
D	350	343	343	350	347		
RING AVERAGE	345	344	344	346	345		

S/A NAME		PFD003		PIN No		7064	
SPECIMEN No		706442					
D. F. C. B.		124.3 (mm)		D. F. P. B.		210.3 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	343	356	346	339	346		
B	346	352	346	336	345		
C	326	346	343	339	339		
D	350	343	336	352	345		
RING AVERAGE	341	349	343	342	344		

S/A NAME		PFD003		PIN No		7064	
SPECIMEN No		706473					
D. F. C. B.		250.0 (mm)		D. F. P. B.		336.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	318	324	309	312	316		
B	312	315	320	307	314		
C	324	330	320	307	320		
D	326	320	326	318	323		
RING AVERAGE	320	322	319	311	318		

Table 9 Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (2) (7064 pin)

S/A NAME		PFD003		PIN No.		7064	
SPECIMEN No.		7064A3					
D. F. C. B.		434.8 (mm)		D. F. P. B.		520.8 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	276	301	273	282	283		
B	264	287	266	259	269		
C	291	285	287	280	286		
D	278	287	285	273	281		
RING AVERAGE	277	290	278	274	280		

S/A NAME		PFD003		PIN No.		7064	
SPECIMEN No.		7064C3					
D. F. C. B.		535.0 (mm)		D. F. P. B.		621.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	258	262	273	262	264		
B	264	271	262	264	265		
C	271	268	271	278	272		
D	258	271	271	258	265		
RING AVERAGE	263	268	269	266	267		

Table 10 Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (3) (7087 pin)

S/A NAME		PFD003		PIN No		7087	
SPECIMEN No		708722					
D. F. C. B.		22.6 (mm)		D. F. P. B.		108.6 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	339	351	343	346	345		
B	346	356	351	350	351		
C	339	324	343	343	337		
D	352	339	346	346	346		
RING AVERAGE	344	343	346	346	345		

S/A NAME		PFD003		PIN No		7087	
SPECIMEN No		708742					
D. F. C. B.		124.5 (mm)		D. F. P. B		210.5 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	346	339	324	336	336		
B	336	336	326	336	334		
C	333	320	315	336	326		
D	351	326	318	312	327		
RING AVERAGE	342	330	321	330	331		

S/A NAME		PFD003		PIN No		7087	
SPECIMEN No		708762					
D. F. C. B.		250.2 (mm)		D. F. P. B		336.2 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	309	312	312	309	311		
B	309	312	301	303	306		
C	320	309	303	318	313		
D	312	298	315	320	311		
RING AVERAGE	313	308	308	313	310		

Table 11 Microhardness of JOYO MK-II PFD003 fuel cladding (4) (7087 pin)

S/A NAME		PFD003		PIN No		7087	
SPECIMEN No		708782					
D. F. C. B		434.9 (mm)		D. F. P. B.		520.9 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	271	271	273	268	271		
B	268	278	276	271	273		
C	280	282	271	271	276		
D	259	266	271	266	266		
RING AVERAGE	270	274	273	269	272		

S/A NAME		PFD003		PIN No		7087	
SPECIMEN No		7087A2					
D. F. C. B		534.8 (mm)		D. F. P. B.		620.8 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE		
	1	2	3	4			
A	262	259	264	268	263		
B	258	266	268	266	265		
C	266	258	271	271	266		
D	258	253	259	264	259		
RING AVERAGE	261	259	266	267	263		

Table 12 Summary of density measurement

Pin No.	Section No.	Distance from pin bottom (mm)	Fast fluence ($\times 10^{22}$ n/cm ²)	Cladding midwall temp. (°C)	Density (g/cc)	Density change $-\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
7064	(S00089)	—	—	—	7.971	Base
	706475	341.8 — 365.5	2.0	507	7.965	0.08
	7064A1	481.5 — 505.2	1.7	558	7.963	0.1
	7064C1	586.5 — 605.9	1.1	579	7.967	0.05
7087	(K007)	—	—	—	7.967	Base
	708763	336.5 — 360.5	2.0	507	7.974	-0.09
	708781	481.5 — 511.0	1.7	561	7.976	-0.11
	7087A1	586.5 — 610.7	1.1	582	7.968	-0.01

Table 13 Summary of burnup measurement by Nd-method for PFD003

Pin No.	Sample No.	Distance from core fuel bottom ¹⁾ (mm)	Pu content ²⁾ (atom %)	Burn up			
				(MWd/t)		(atom %)	
				Calculated ³⁾	Measured ⁴⁾	Calculated ⁵⁾	Measured ⁶⁾
7007	700722	249.1 ~ 254.2	27.852	15260	15200	1.65	1.68
7064	706424	24.1 ~ 29.3	27.852	11410	11400	1.24	1.25
	706443	124.6 ~ 129.7	27.829	14500	14400	1.57	1.59
	706474	250.3 ~ 255.5	27.920	16170	16100	1.75	1.77
	7064A2	419.5 ~ 424.7	27.946	13000	12800	1.41	1.41
	7064C2	520.2 ~ 525.5	27.909	9020	8950	0.984	0.984
70C1	70C122	249.8 ~ 254.8	27.825	16470	16400	1.78	1.81

1) Distance from pin bottom -86 (mm)

2) $Pu / (Pu + U) \times 100$

3), 5) Calculated by ESPRIT-J code

4) atom% - MWd/t の換算係数は、核分裂放出エネルギー値と中性子発熱量、 r 発熱量から各試料毎に算出した。

6) Measured by ^{148}Nd monitor method

Table 14 Calculation of effective fission yield for 706474 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	0.000727	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.08 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.084763	1.71E+00 ¹⁾	1.66 ³⁾	0.401	2.94 ³⁾	0.701	3.76 ⁴⁾	0.897
U 236	0.000999	1.60E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.000	3.06 ²⁾	0.001	3.77 ²⁾	0.001
U 238	0.634307	7.33E-02 ¹⁾	2.08 ³⁾	0.159	3.40 ³⁾	0.260	3.50 ²⁾	0.260
Pu238	0.000392	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu239	0.209521	1.75E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	0.989	2.46 ³⁾	1.489	3.01 ³⁾	1.822
Pu240	0.059941	5.21E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.085	2.83 ²⁾	0.146	3.34 ²⁾	0.172
Pu241	0.007277	2.22E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.052	3.01 ²⁾	0.000	3.52 ²⁾	0.094
Pu242	0.001972	4.26E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.003	3.10 ²⁾	0.004	3.70 ²⁾	0.005
Effective Fission Yield [%]			1.71		2.68		3.26	

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

FY:fission yield

Effective Fission yield=SUM(Fractional Fission yield)

1)MAGI code

2)TRG-2143-R

3)ICP-1050-1

4)AERE-R-8753

Table 15 Composition of spike solution and natural Neodymium

スパイク液中の原子数 (atoms/ml)	U 233	2.7764×10^{18}
	Pu 242	5.0316×10^{17}
	Nd 150	4.9362×10^{15}
天然ネオジムの同位体比	Nd 142 / Nd 150	4.824980
	Nd 145 / Nd 150	1.472180
	Nd 146 / Nd 150	3.050830
	Nd 148 / Nd 150	1.021325
ネオジムスパイクの 同位体比	Nd 142 / Nd 150	0.017568
	Nd 145 / Nd 150	0.006446
	Nd 146 / Nd 150	0.014612
	Nd 148 / Nd 150	0.008769
ウランスパイクの 同位体比	U 234 / U 233	0.011521
	U 235 / U 233	0.000425
	U 238 / U 233	0.006425
プルトニウムスパイクの 同位体比	Pu 239 / Pu 242	0.001066
	Pu 240 / Pu 242	0.013671
	Pu 241 / Pu 242	0.000601

Table 16 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 700722 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003	PIN NO.(PIE) ; 7007
SAMPLE NO. ; 700722	SAMPLE POSITION ; 249.1~254.2 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001144	0.133158	0.001608	-(a)		
0.273243	0.004277	0.133493	0.001604	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.001791	0.286041	0.034897	0.009457	-(a)		
0.001791	0.288407	0.034940	0.160138	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.002712	4.952604	4.153653	3.421933	2.814215	1.801019	-(a)
0.015572	1.693898	1.437630	1.174732	0.976711	0.625084	-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1007	11.7226	0.1416	88.0351		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1344	75.0646	21.4716	2.6195	0.7099		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0149	27.2929	22.8900	18.8576	15.5086	9.9251	5.5108

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.052 / 27.971

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9163E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		5.5860E+17	8.7044E+17	1.0533E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	3.2666E+19	3.2479E+19	3.2309E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	1.68	1.67	1.66
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##</u>	;	15200	15200	15100

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.1 atom% BU=10000 MWd/t BU

Table 17 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 706424 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003	PIN NO.(PIE) ; 7064
SAMPLE NO. ; 706424	SAMPLE POSITION ; 24.1~29.3 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001151	0.135110	0.001352	-(a)	
0.293344	0.004510	0.134306	0.001353	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001756	0.284033	0.034522	0.009368	-(a)	
0.001756	0.286144	0.034477	0.170603	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.003050	5.009841	4.198520	3.454203	2.834263	1.814121
0.020526	1.332746	1.133098	0.919796	0.766843	0.486511
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]	
nd	0.1012	11.8766	0.1188	87.9034	
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]	
0.1321	75.2061	21.3610	2.5963	0.7045	
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]
0.0167	27.3553	22.9252	18.8610	15.4759	9.9057
					[Nd150]
					5.4603

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.852 / 27.971

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.7875E+21

		[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	3.8572E+17	6.0686E+17	7.3631E+17
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.70E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	2.2689E+19	2.2644E+19	2.2586E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	1.25	1.25	1.25
		-----	-----	-----
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/t)##</u>	;	11400	11400	11300

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.1 atom% BU=10000 MWD/tBU

Table 18 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 706443 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003	PIN NO.(PIE) ; 7064				
SAMPLE NO. ; 706443	SAMPLE POSITION ; 124.6~129.7 (mm)*				

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001143	0.134250	0.001464	-(a)	
0.269849	0.004237	0.133968	0.001461	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001755	0.284869	0.034544	0.009401	-(a)	
0.001755	0.286814	0.034491	0.158067	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	4.932735	4.128589	3.414173	2.811399	1.802413
0.018114	1.650842	1.399388	1.150459	0.955001	0.608741
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1005	11.0089	0.1288	87.9618		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1319	75.1558	21.4096	2.5962	0.7065		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	27.2688	22.8234	18.8740	15.5418	9.9640	5.5281

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.829 / 27.949

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9415E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
; 5.3589E+17	8.3981E+17	1.0215E+18	
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>			
; 1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02	
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>			
; 3.1339E+19	3.1336E+19	3.1333E+19	
<u>BURNUP (atom%)#</u>			
; 1.59	1.59	1.59	
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##</u>			
; 14400	14400	14400	

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.1 atom% BU=10000 MWd/t BU

Table 19 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 706474 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003		PIN NO.(PIE) ; 7064	
SAMPLE NO. ; 706474		SAMPLE POSITION ; 250.3~255.5 (mm)*	

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001146	0.133631	0.001575	-(a)		
0.266806	0.004206	0.133466	0.001572	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.001870	0.285949	0.034716	0.009409	-(a)		
0.001870	0.287845	0.034590	0.155949	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.001604	4.911546	4.112438	3.403818	2.800115	1.794707	-(a)
0.015397	1.785776	1.511907	1.238604	1.027361	0.657382	-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1008	11.7596	0.1386	88.0009		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1404	75.0782	21.4685	2.6064	0.7064		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0089	27.2497	22.8162	18.8947	15.5353	9.9572	5.5481

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.920 / 28.040

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9653E+21

NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
	6.0576E+17	9.4497E+17	1.1470E+18
EFFECTIVE FISSION YIELD	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**	3.5424E+19	3.5260E+19	3.5183E+19
BURNUP (atom%)#	1.77	1.76	1.76
SPECIFIC BURNUP (MMd/t)##	16100	16000	16000

NOTE ; nd=not detected
 * Distance from core fuel bottom
 ** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
 # BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)
 ## 1.1 atom% BU=10000 MMd/t BU

Table 20 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 7064A2 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003	PIN NO.(PIE) ; 7064
SAMPLE NO. ; 7064A2	SAMPLE POSITION ; 419.5~424.7 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001143	0.134922	0.001281	-(a)	
0.264231	0.004176	0.134831	0.001282	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001680	0.283328	0.034381	0.009343	-(a)	
0.001680	0.285142	0.034309	0.153809	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.001767	4.921167	4.115170	3.409390	2.800283	1.795322
0.016856	1.536342	1.302417	1.067449	0.886618	0.568279

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1005	11.8629	0.1126	87.9240		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1264	75.2597	21.3232	2.5875	0.7032		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0098	27.2745	22.8074	18.8958	15.5200	9.9502	5.5423

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.946 / 28.065

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9869E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		4.8431E+17	7.5314E+17	9.1435E+17
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	2.8322E+19	2.8102E+19	2.8047E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	1.41	1.39	1.39
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/t)##</u>	;	12000	12700	12700

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.1 atom% BU=10000 MWD/t BU

Table 21 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 7064C2 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003		PIN NO.(PIE) ; 7064	
SAMPLE NO. ; 7064C2		SAMPLE POSITION ; 520.2~525.5 (mm)*	

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]	
nd	0.001156	0.135479	0.001031	-(a)
0.277083	0.004321	0.135469	0.001026	-(b)

[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]	
0.001706	0.281045	0.034133	0.009243	-(a)
0.001706	0.283089	0.034153	0.161123	-(b)

[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.001271	4.993886	4.179359	3.444040	2.820610	1.806200	-(a)
0.019781	1.140228	0.971375	0.799992	0.666101	0.424437	-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]
nd	0.1016	11.9085	0.0906	87.8993

[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]
0.1286	75.4076	21.1929	2.5739	0.6970

[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0070	27.3707	22.9064	18.8762	15.4593	9.8995	5.4808

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.909 / 28.028

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.8887E+21

NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
	3.2105E+17	5.0208E+17	6.1137E+17

EFFECTIVE FISSION YIELD	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
-------------------------	----------	----------	----------

NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**	1.8775E+19	1.8734E+19	1.8754E+19
--	------------	------------	------------

BURNUP (atom%)#	0.984	0.982	0.983
-----------------	-------	-------	-------

SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##	8950	8930	8940
---------------------------	------	------	------

NOTE ; nd=not detected
 * Distance from core fuel bottom
 ** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
 # BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)
 ## 1.1 atom% BU=10000 MWd/t BU

Table 22 Result of isotope analysis and burnup calculation
for PFD003 70C122 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD003	PIN NO.(PIE) ; 70C1
SAMPLE NO. ; 70C122	SAMPLE POSITION ; 249.8~254.8 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 4.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001135	0.133329	0.001656	-(a)	
0.258226	0.004099	0.133183	0.001654	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001752	0.286610	0.034876	0.009479	-(a)	
0.001752	0.288568	0.034836	0.152087	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.002597	4.938523	4.132856	3.411564	2.807185	1.797965
0.015776	1.851907	1.567698	1.285320	1.065125	0.679419

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0999	11.7355	0.1458	88.0189		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1315	75.0347	21.5057	2.6169	0.7113		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0144	27.2665	22.8553	18.8665	15.5242	9.9430	5.5302

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.825 / 27.944

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.0276E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		6.3795E+17	9.9972E+17	1.2150E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	3.7307E+19	3.7303E+19	3.7269E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	1.81	1.81	1.80
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/t)##</u>	;	16400	16400	16400

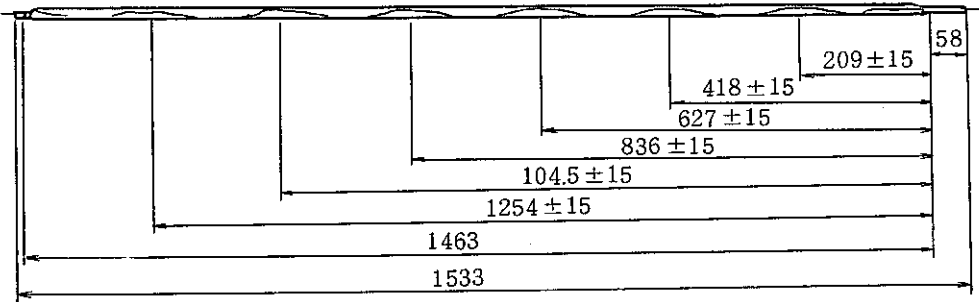
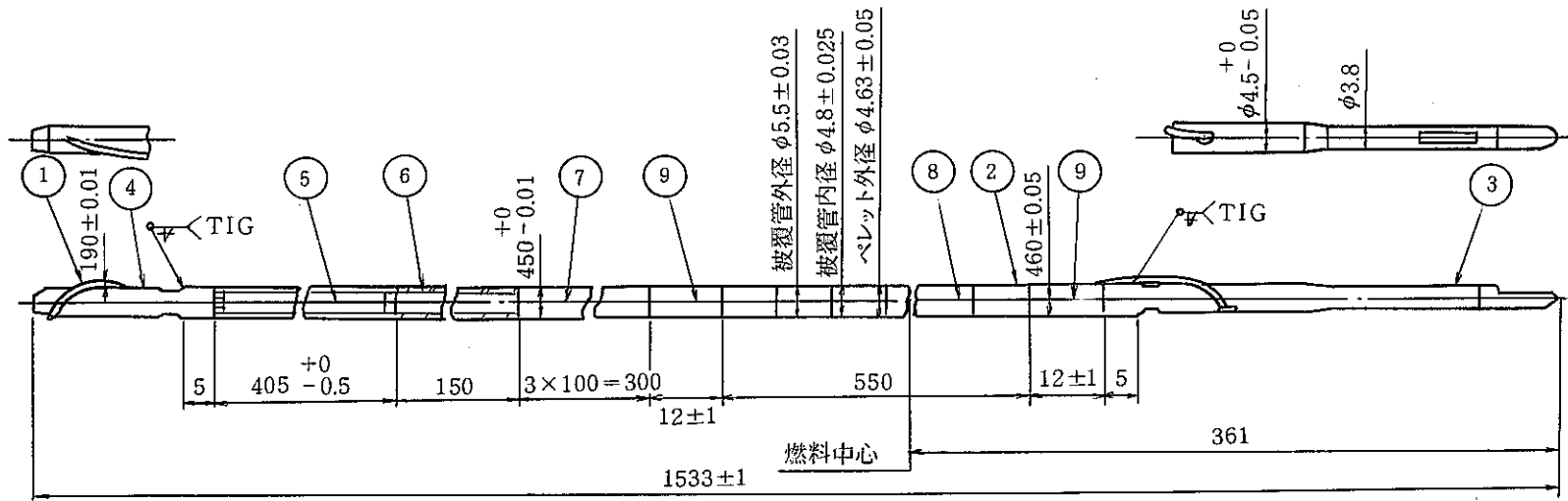
NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.1 atom% BU=10000 MWD/t BU



ワイヤラッピング全体図 (1/5)

9	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	
8	炉心ペレット	PuO ₂ UO ₂		
7	上部反射体	SUS316担当	3	
6	プレナムスプリング	SUS304WPB	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担当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316担当	1	
品番	品名	材質	個数	備考
名称	炉心燃料集合体燃料要素			

Fig. 1 Schematic drawing of Fuel pin

炉内照射位置

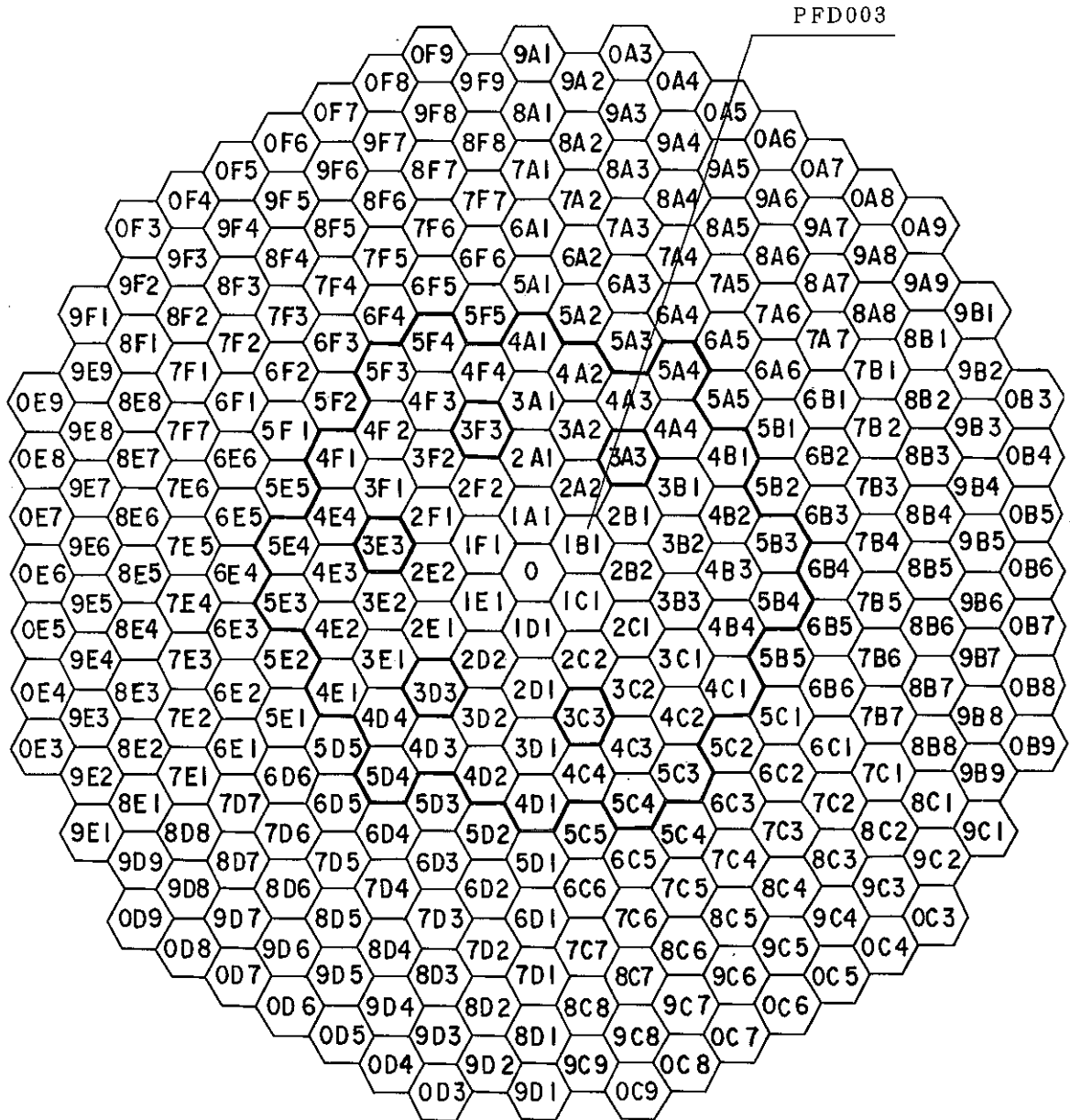


Fig. 2 Irradiation position of PFD003 subassembly in JOYO MK-II core

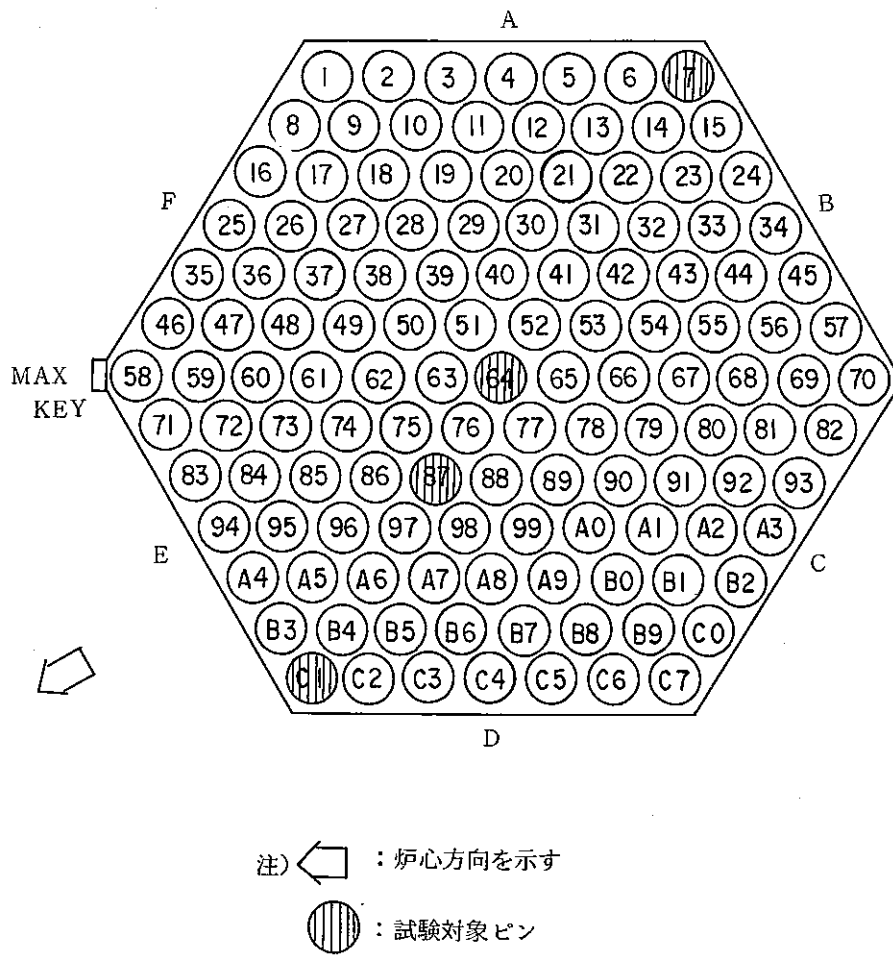


Fig. 3 Fuel pin positions in PFD003 subassembly

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : 64

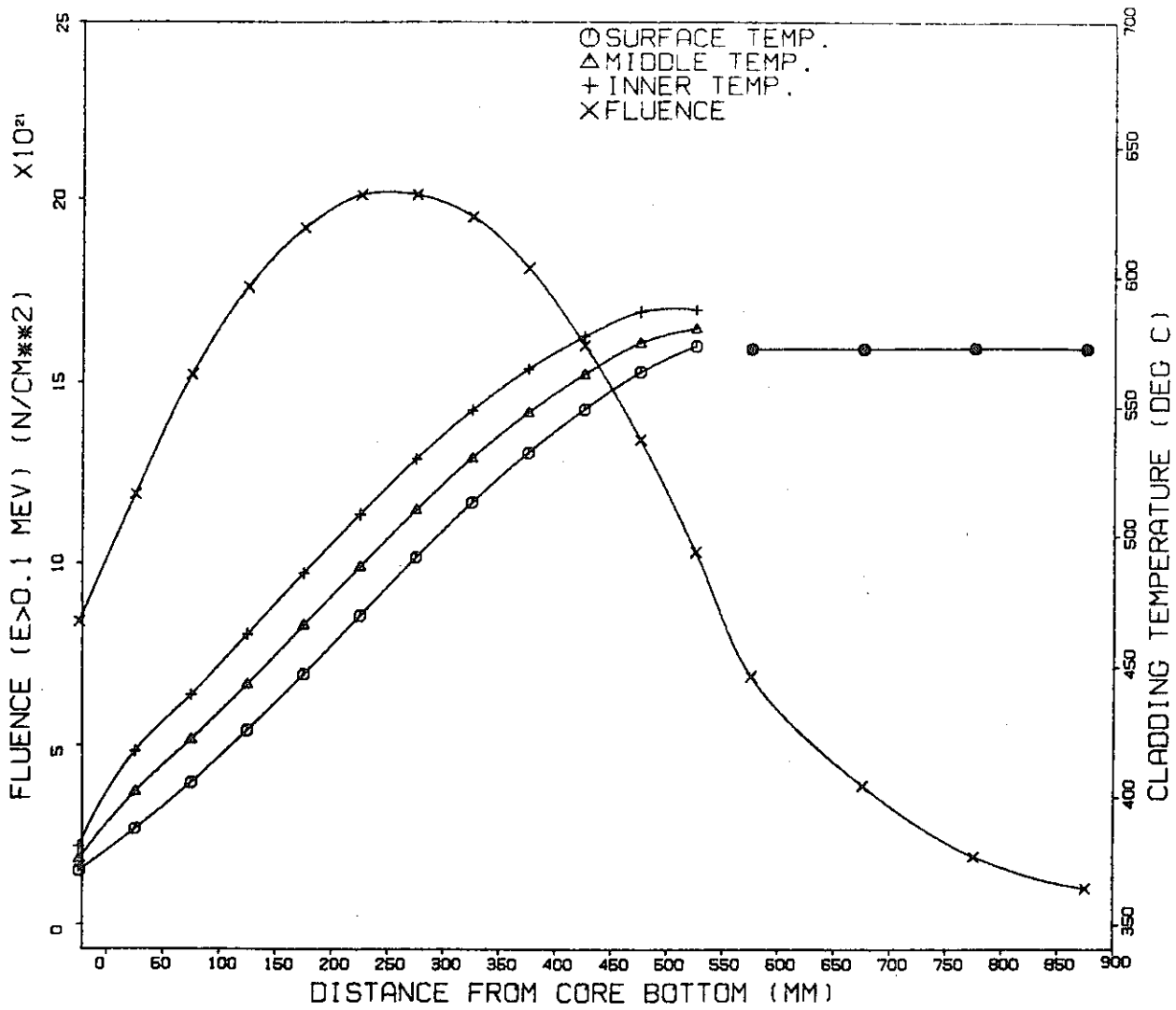


Fig. 4 Cladding temperature and fluence distribution (7064 pin)

S/A FAB NO. : PFD003 PIN NO. : 64

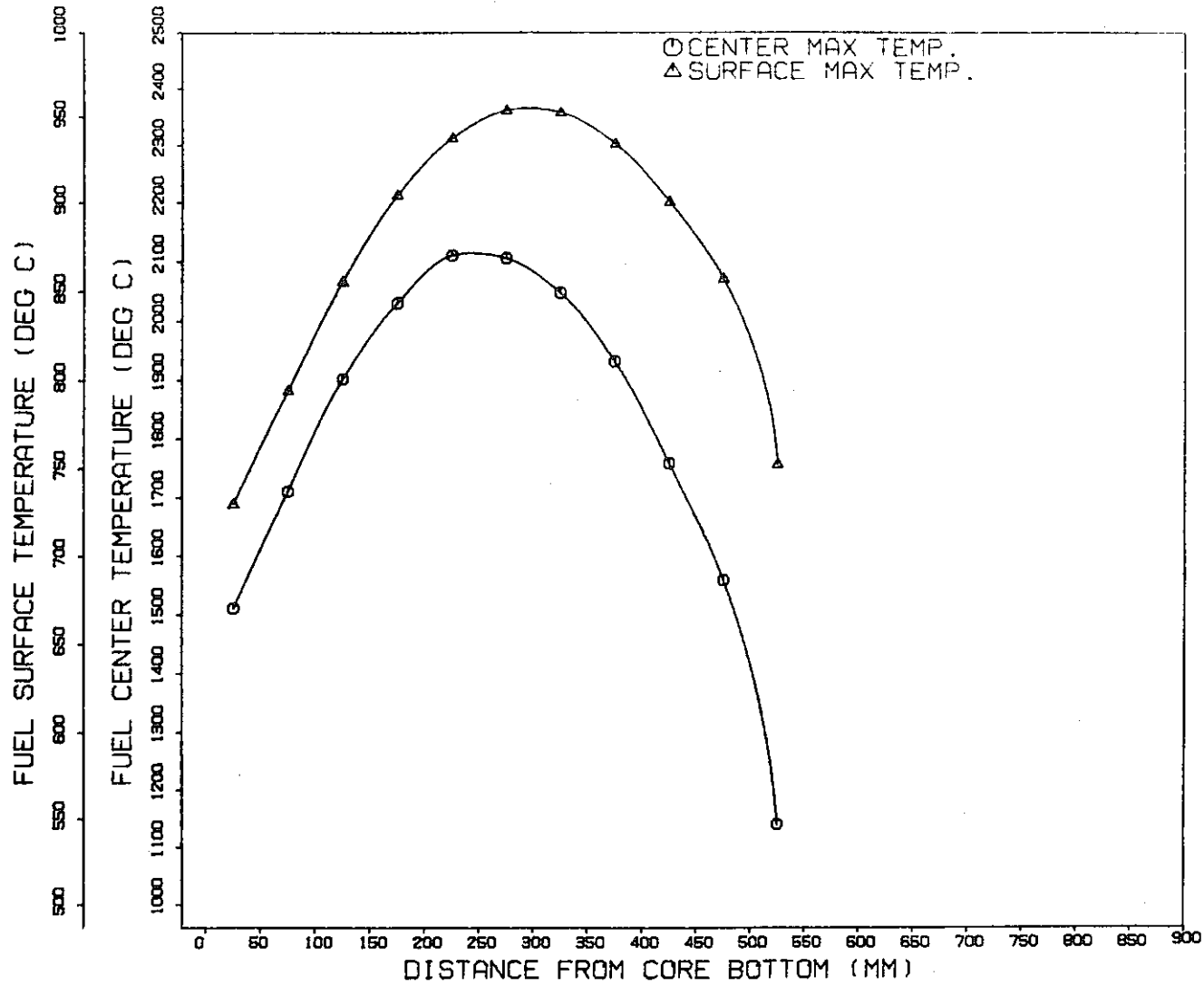


Fig. 5 Fuel temperature distribution (7064 pin)

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : 87

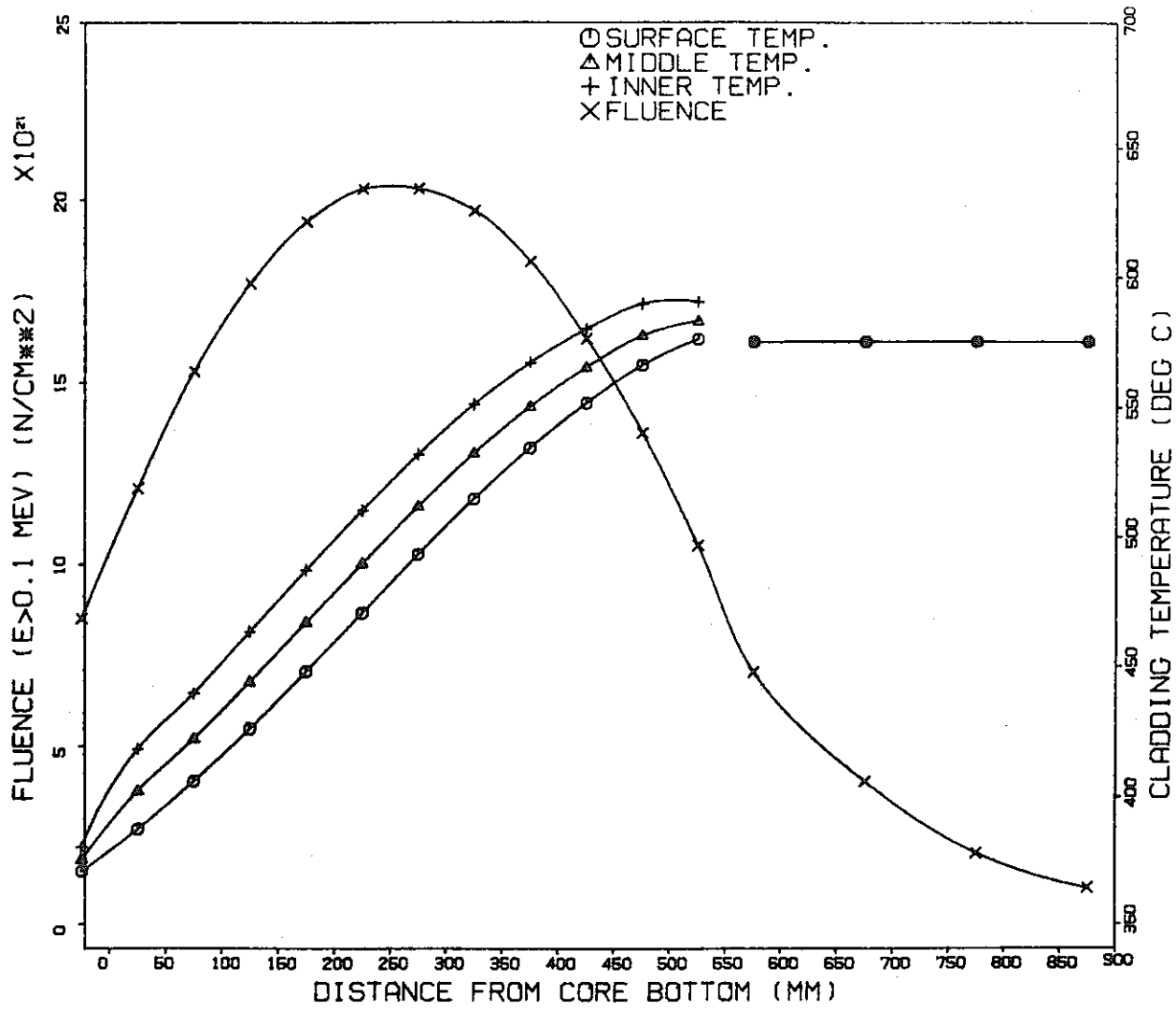


Fig. 6 Cladding temperature and fluence distribution (7087 pin)

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : 64

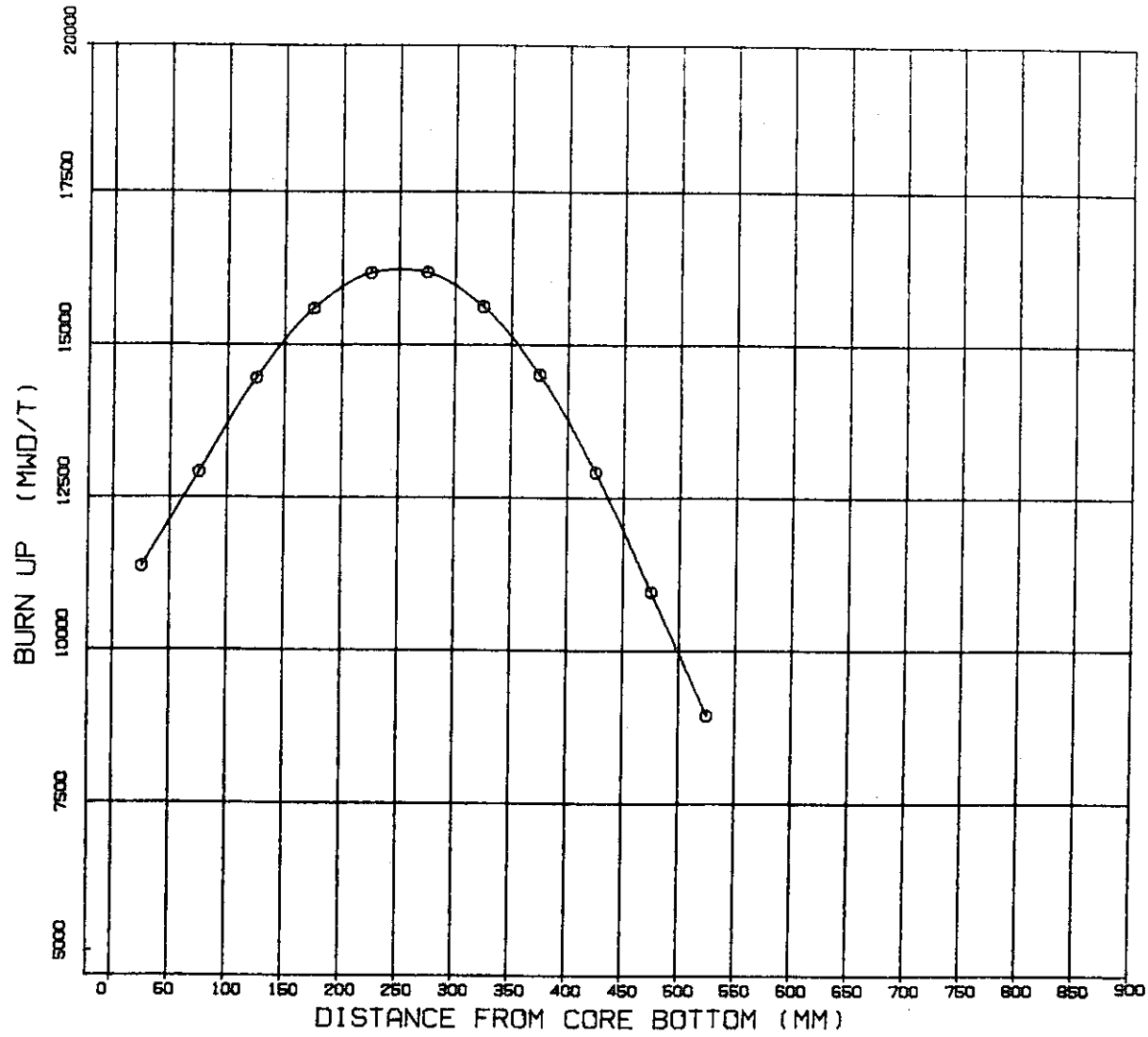


Fig. 7 Burnup distribution (7064 pin)

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : C1

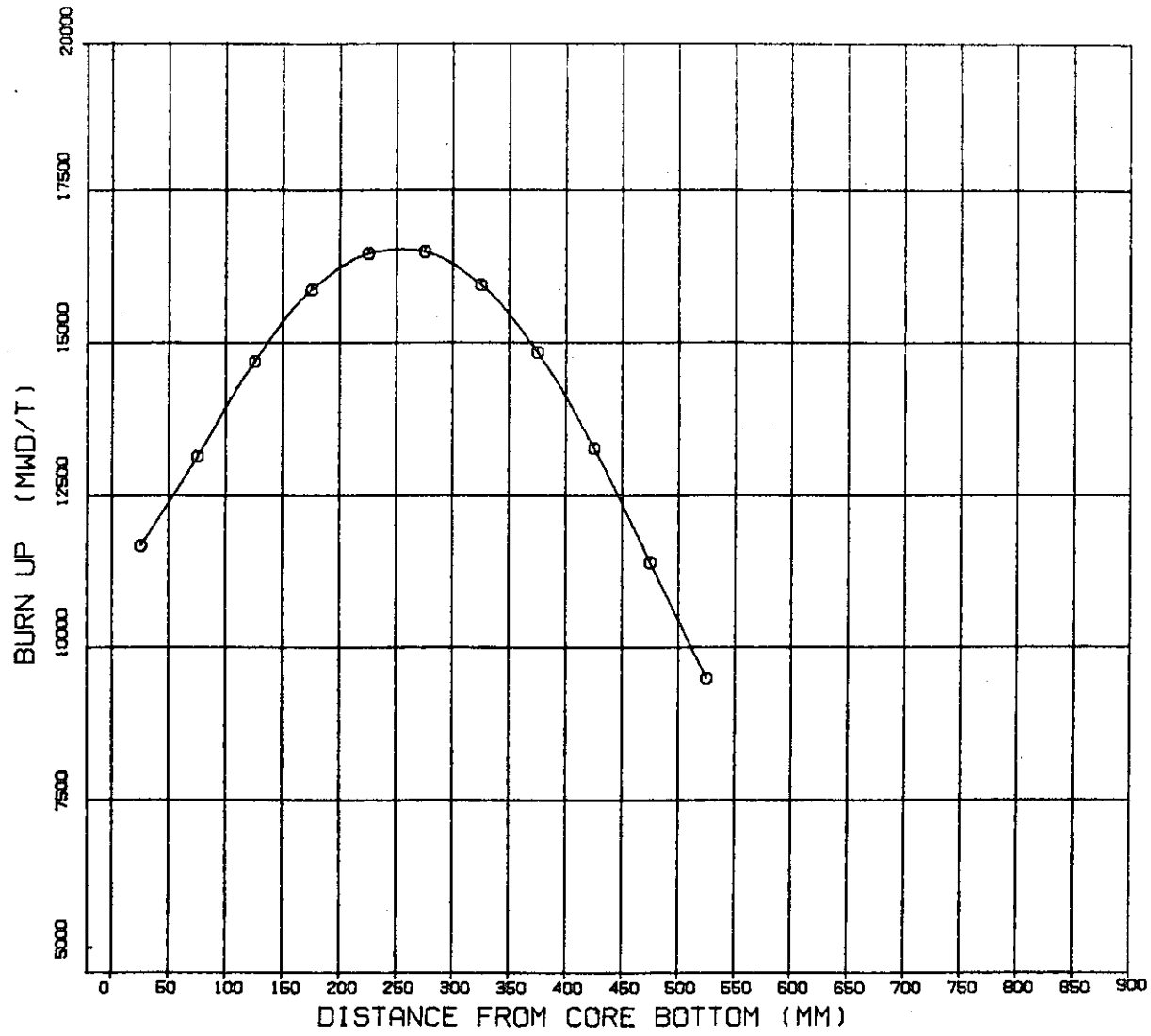


Fig. 8 Burnup distribution (70C1 pin)

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : 07

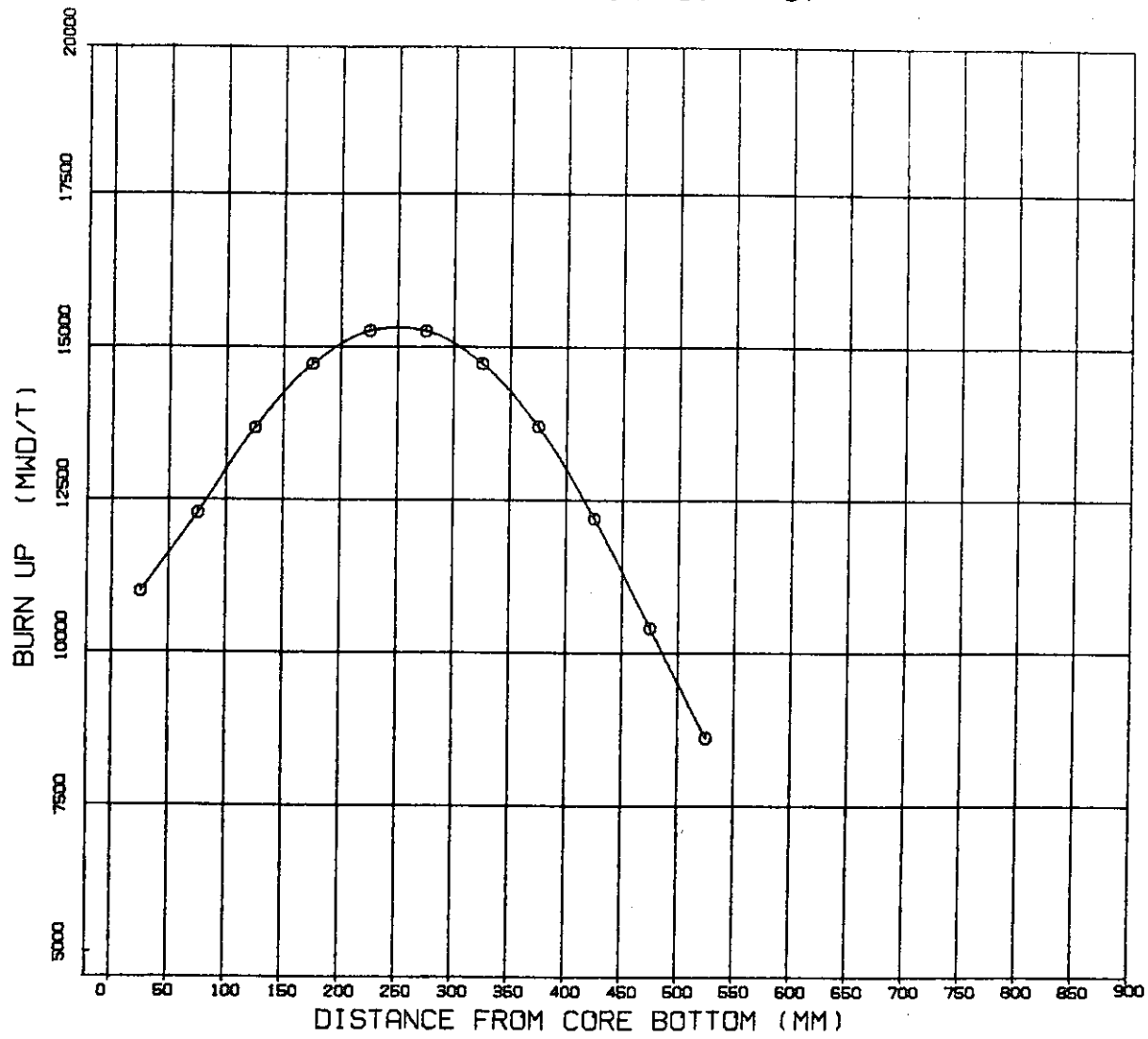


Fig. 9 Burnup distribution (7007 pin)

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : 64

MAX \odot EOL \triangle

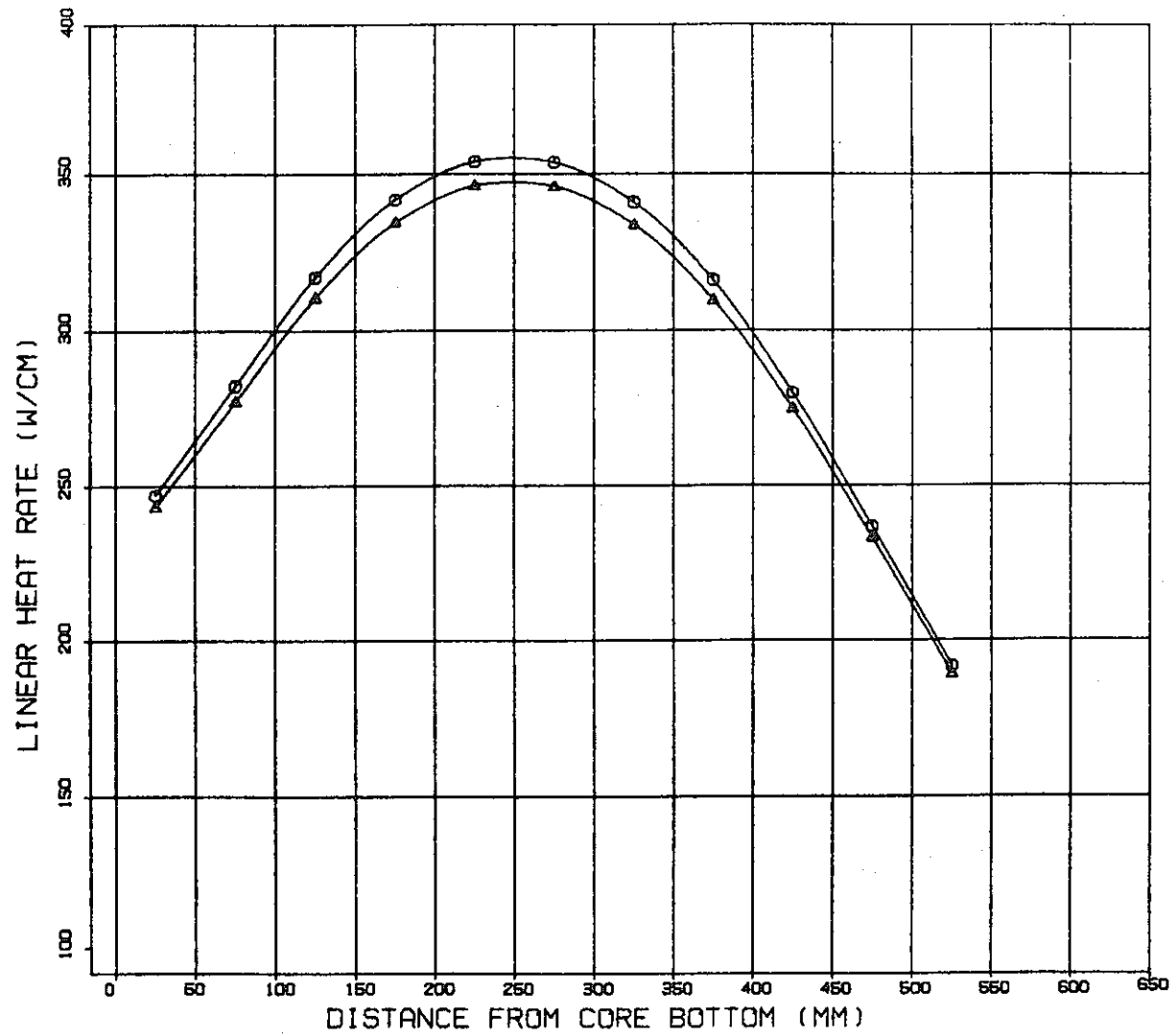


Fig. 10 Linear heat rate distribution (7064 pin)

S/A FAB NO. : PFD003

PIN NO. : 87

MAX \odot EOL \triangle

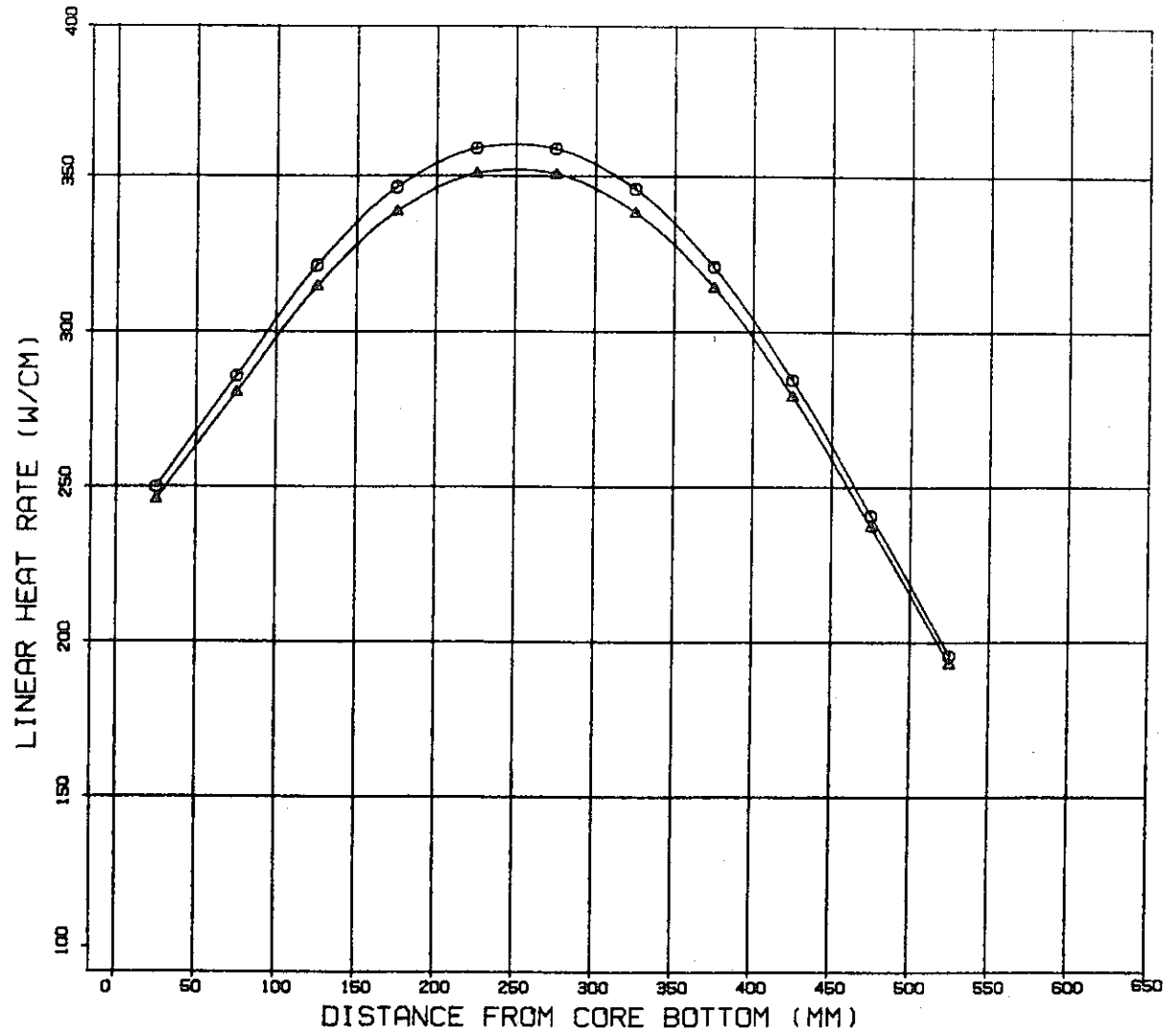


Fig. 11 Linear heat rate distribution (7087 pin)

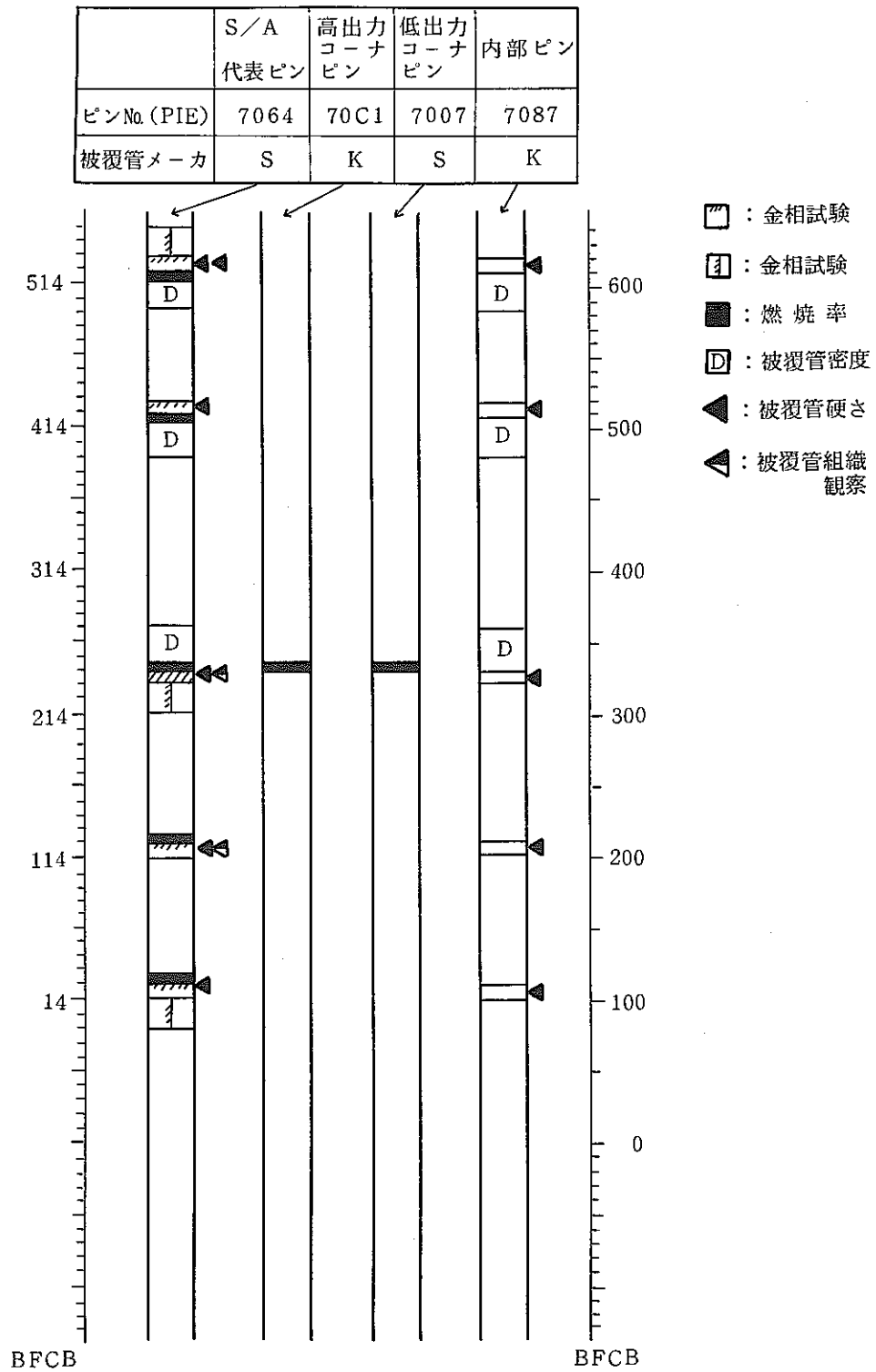


Fig. 12 Sampling of specimens (PFD003)

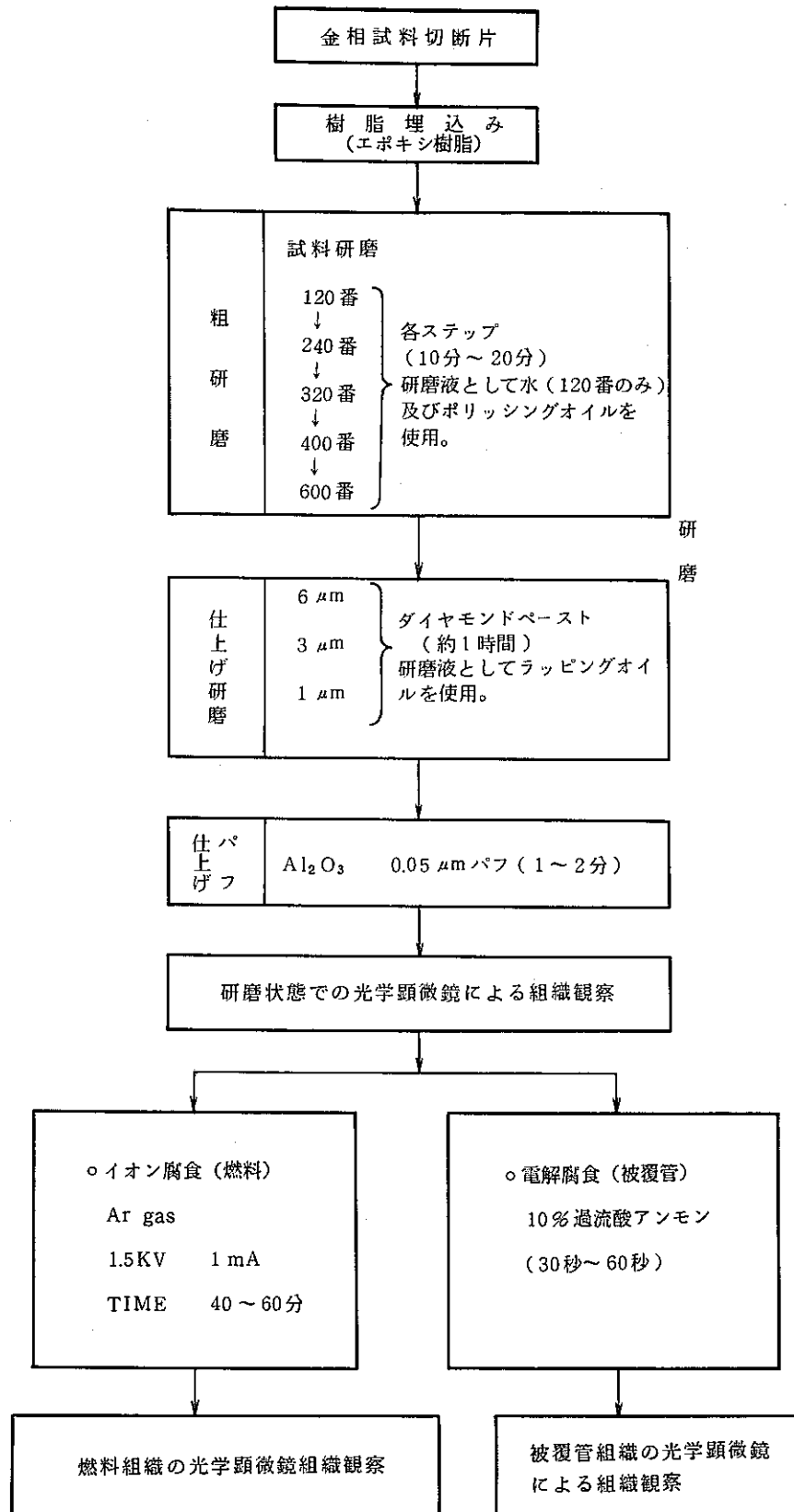


Fig. 13 Flow diagram of metallographic examinations in AGS

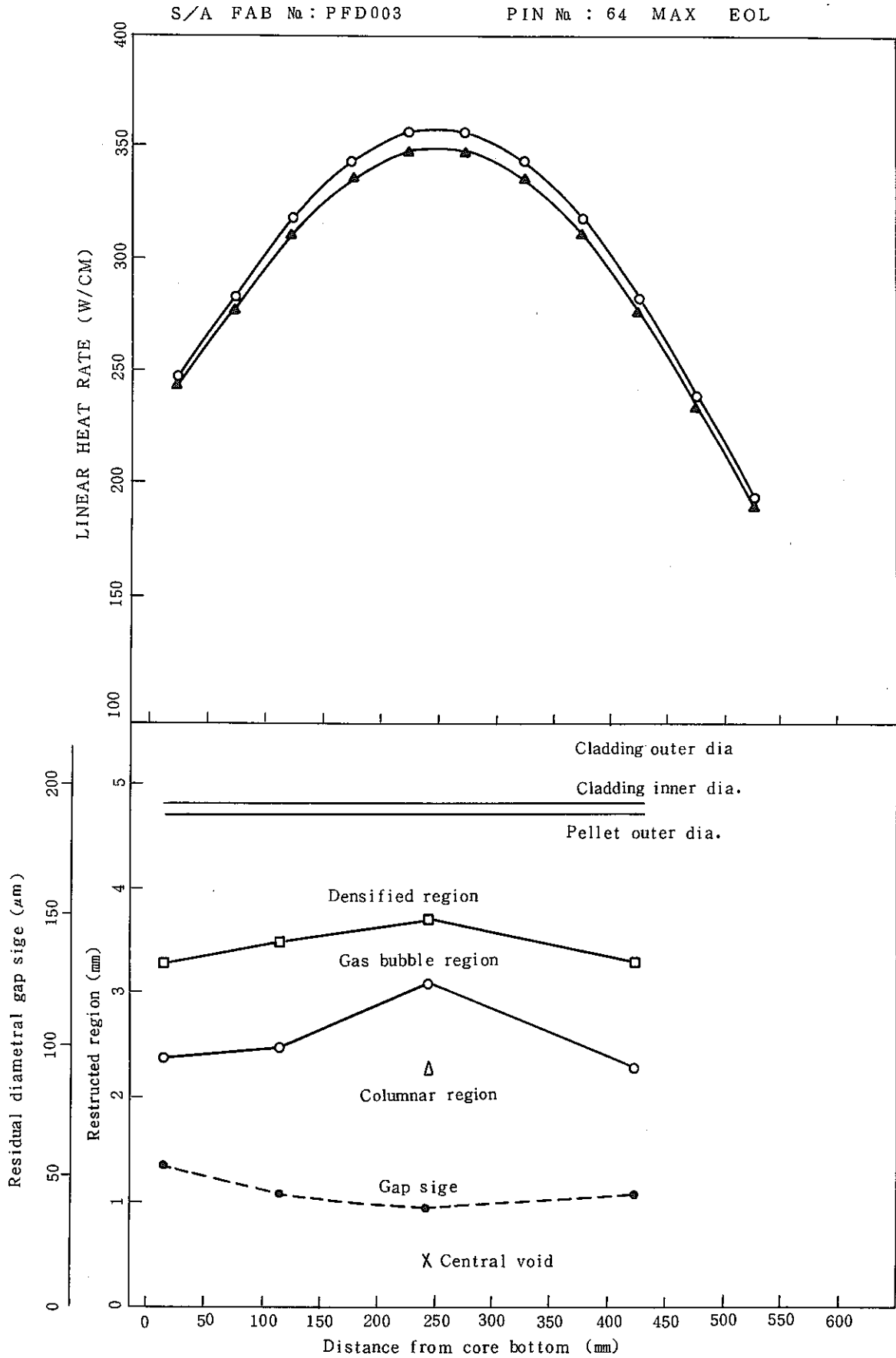


Fig. 14 Axial profile of restricted region

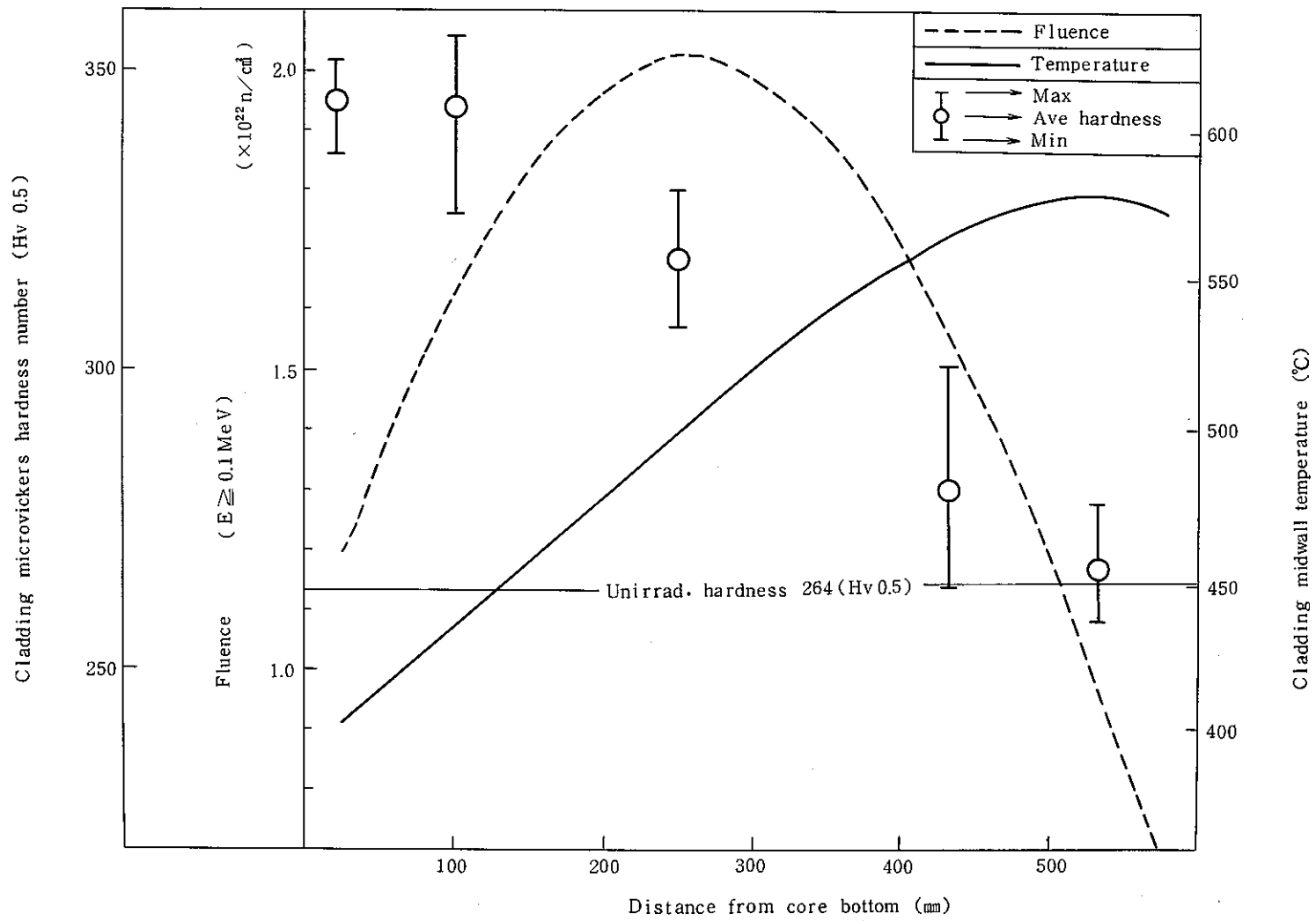


Fig. 15 Relation between hardness, clad temperature and fluence at various position for JOYO MK-II fuel pin (7064 pin)

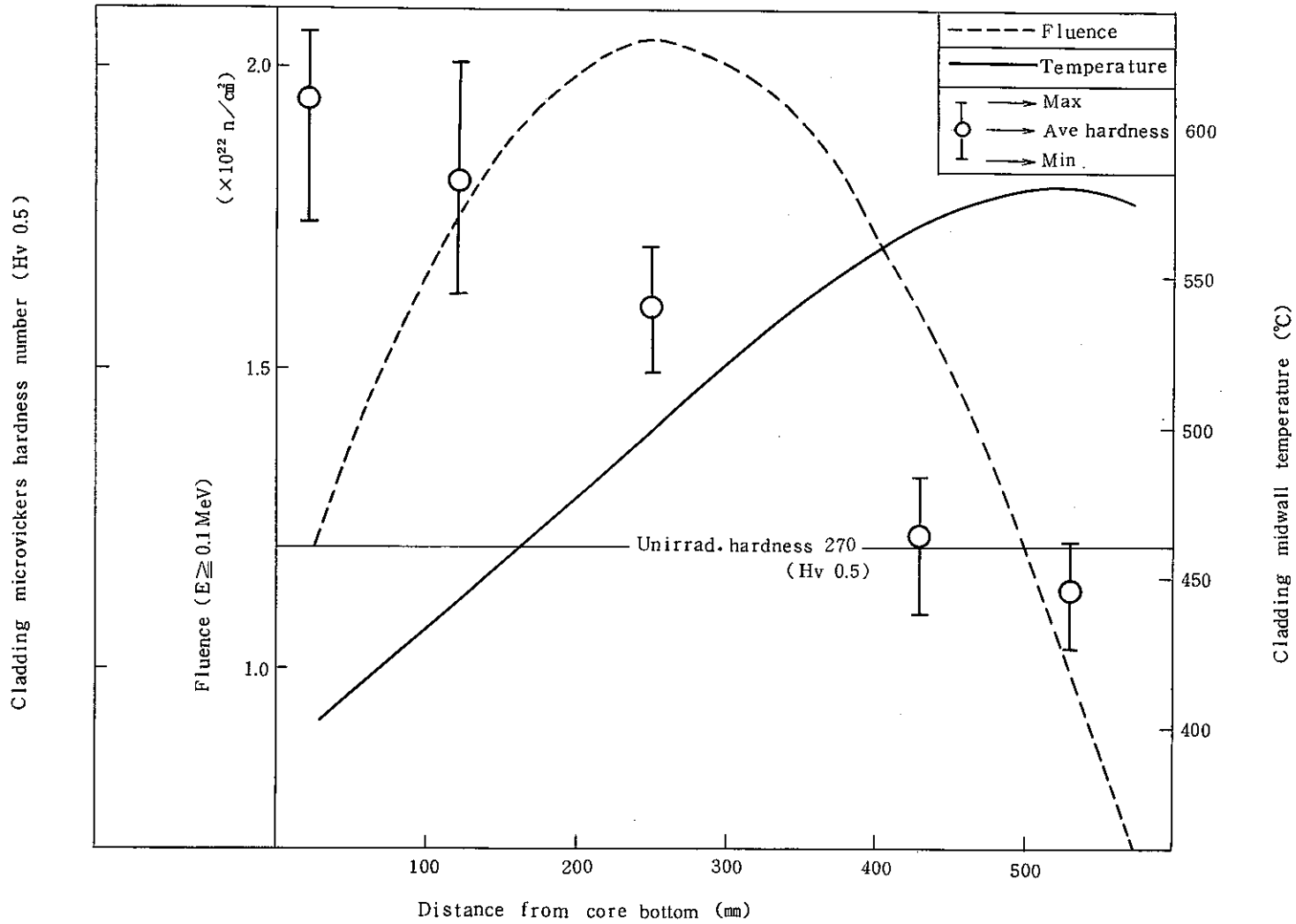


Fig. 16 Relation between hardness, clad temperature and fluence at various position for JOYO MK-II fuel pin (7087 pin)

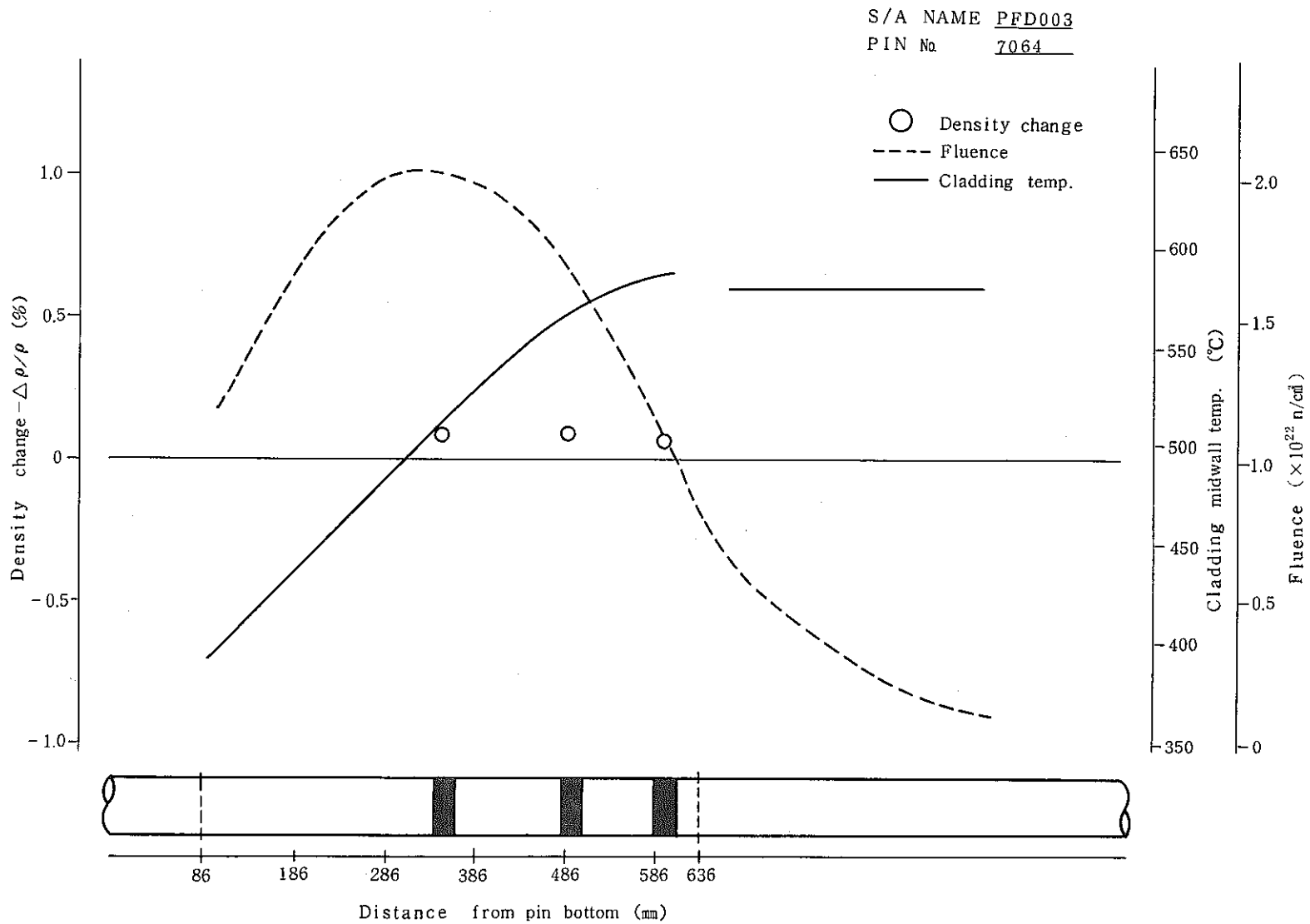


Fig. 17 Cladding density change (7064 pin)

S/A NAME PFD003
PIN No. 7064

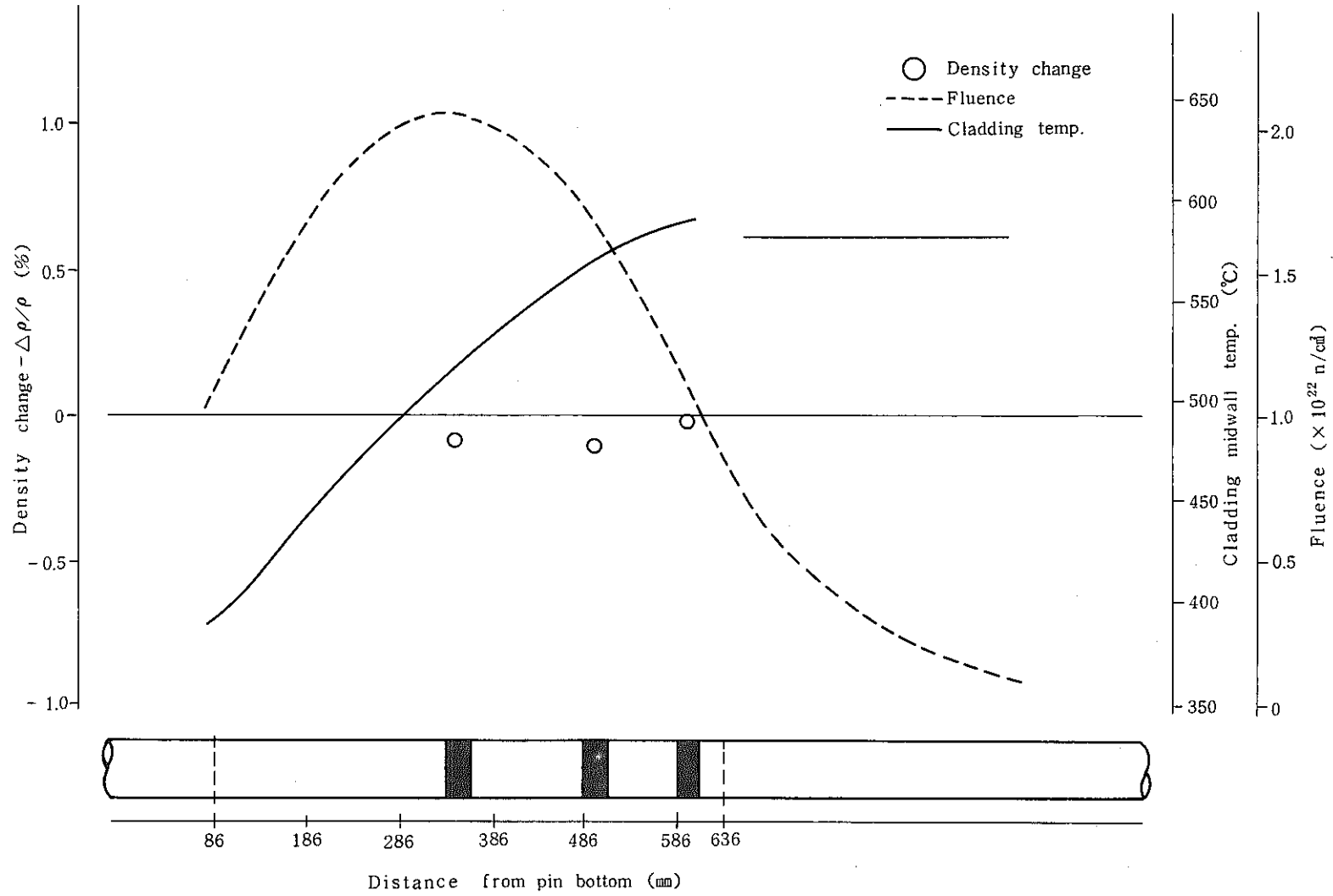


Fig. 18 Cladding density change (7087 pin)

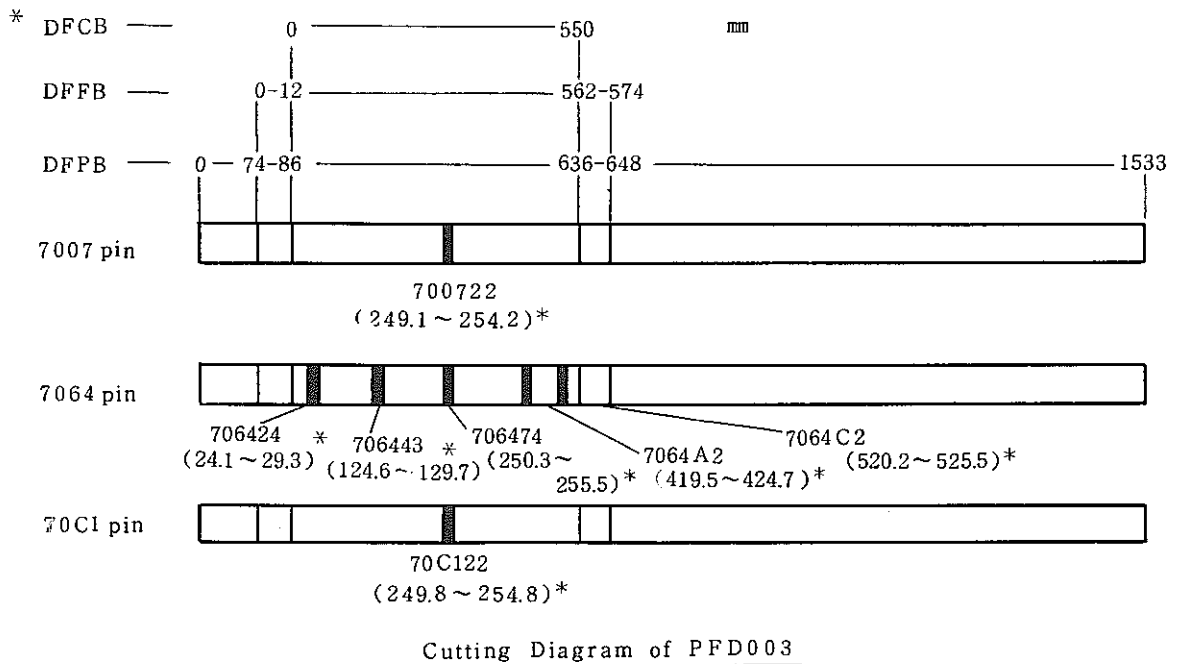
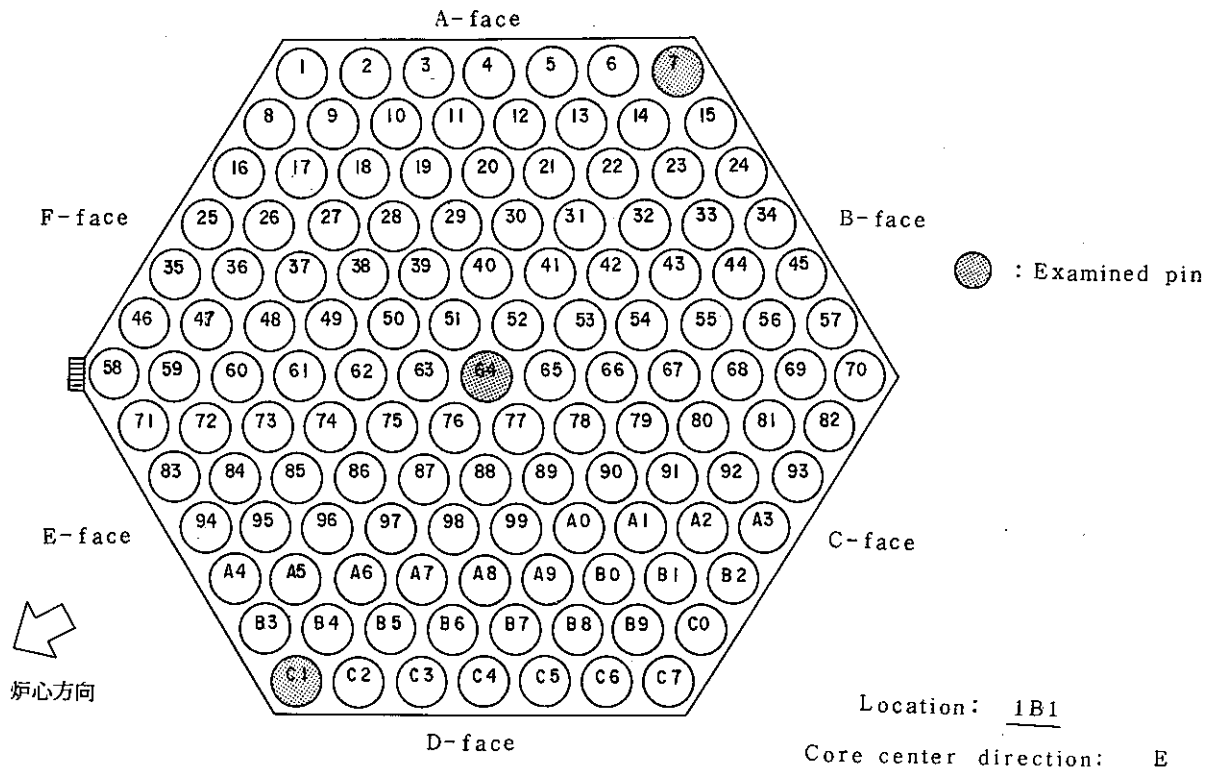


Fig. 19 Cutting diagram of PFD003 fuel pins for burnup measurement

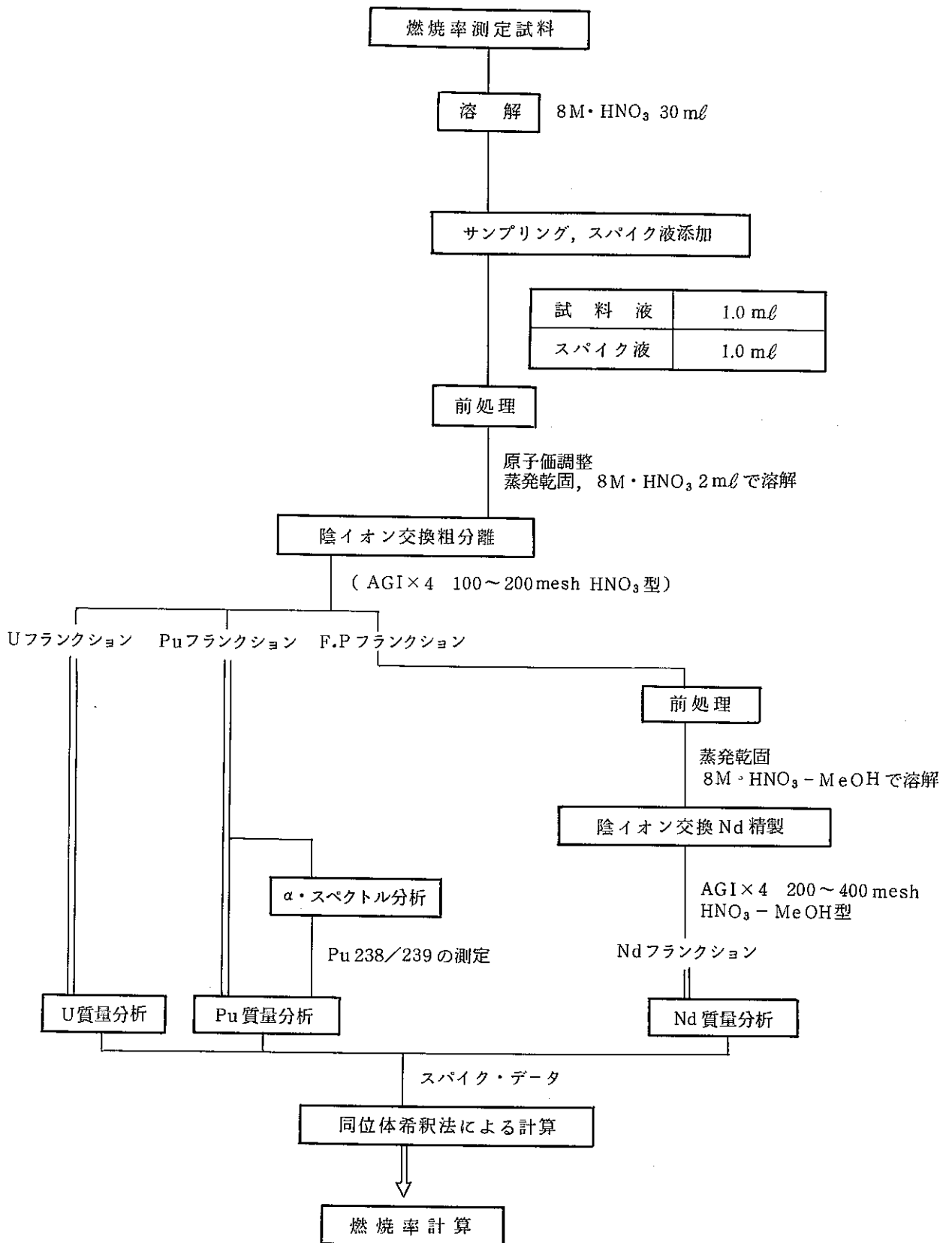


Fig. 20 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

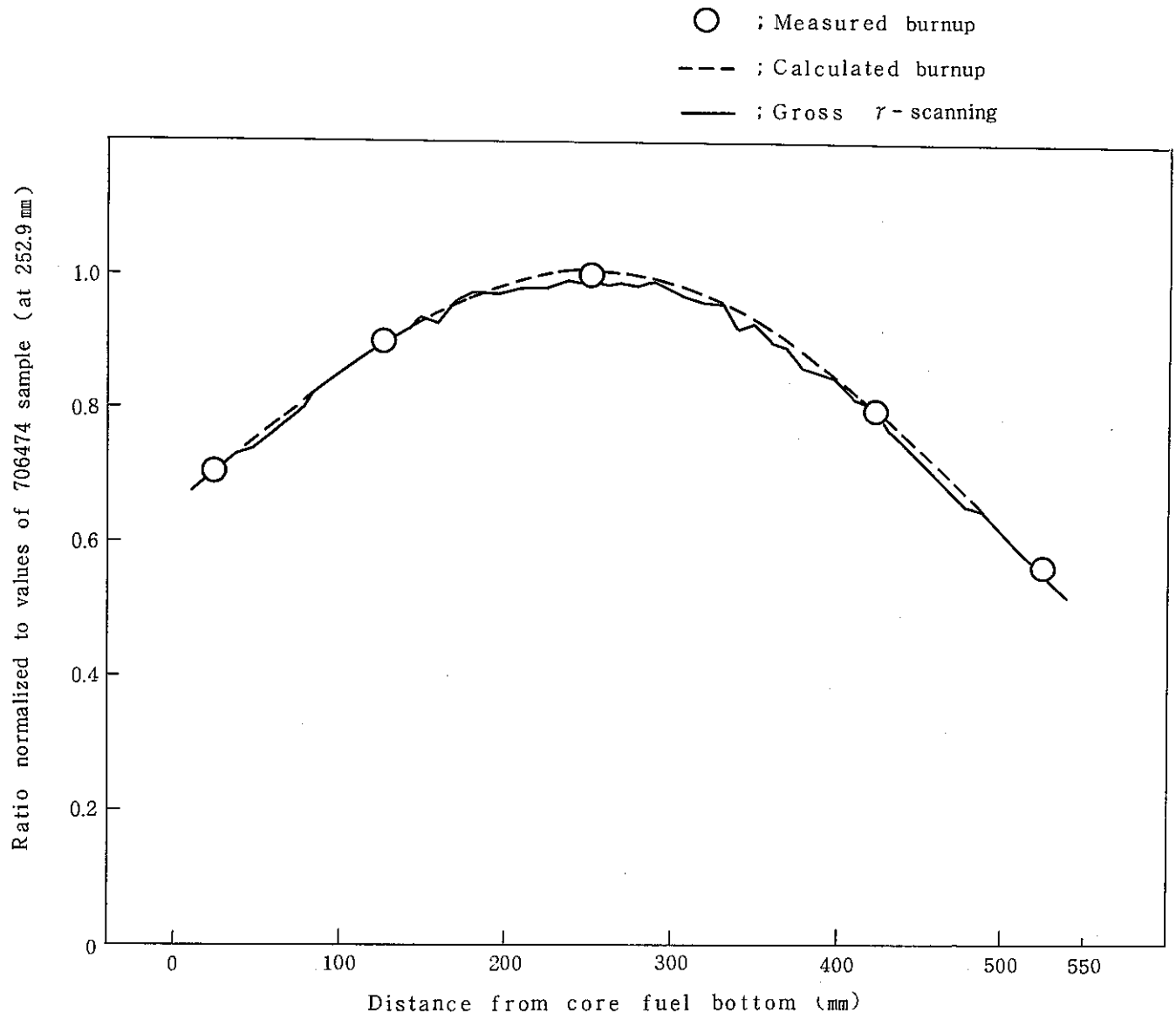


Fig. 21 Burnup axial distribution of PFD003

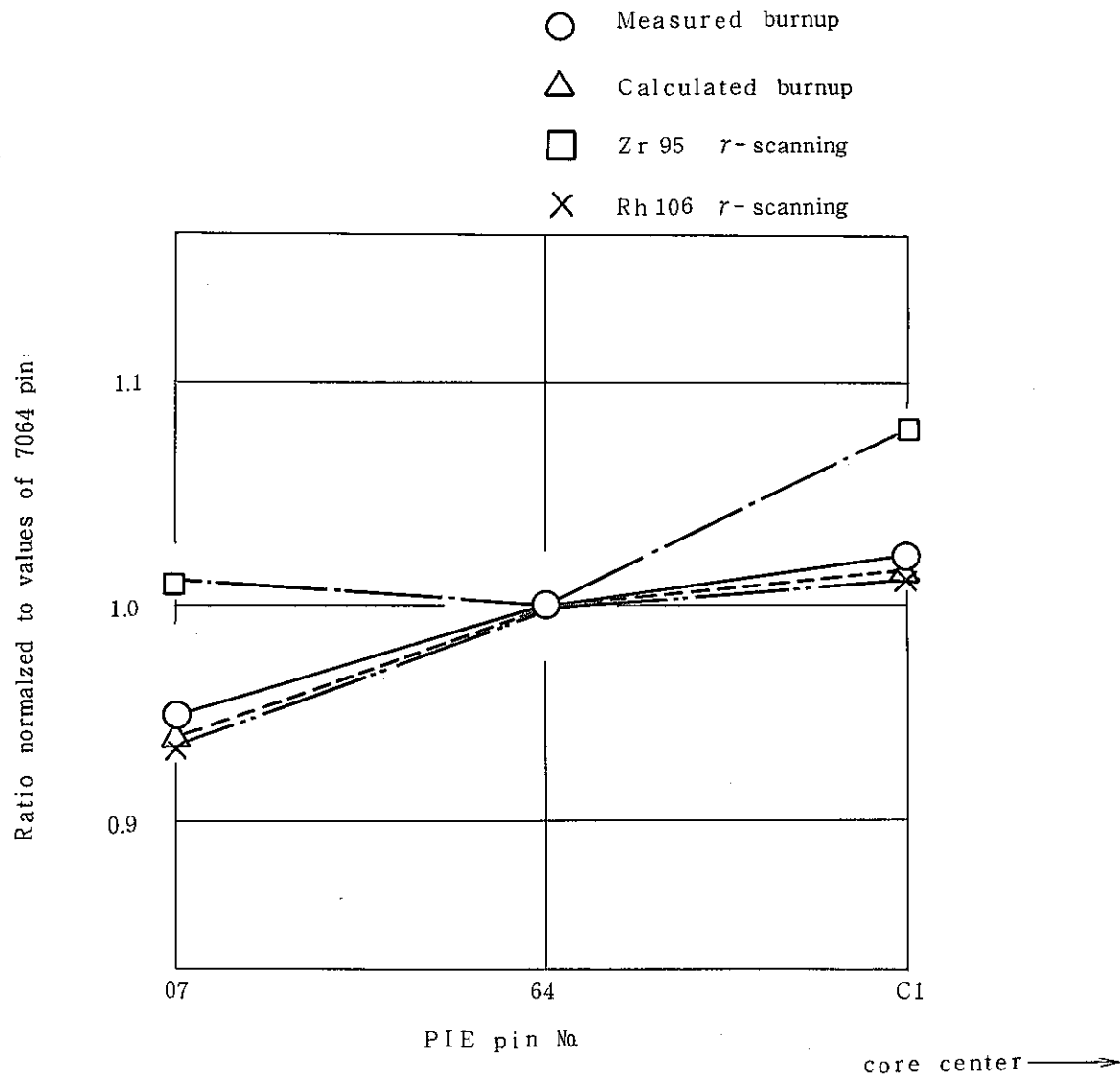


Fig. 22 Burnup radial distribution of PFD003 (7064 pin)

S/A No.	JOYO-PFD003
Pin No.	7064
S/A Peak Burn up	15800MWD/MTM

As polished

—55—

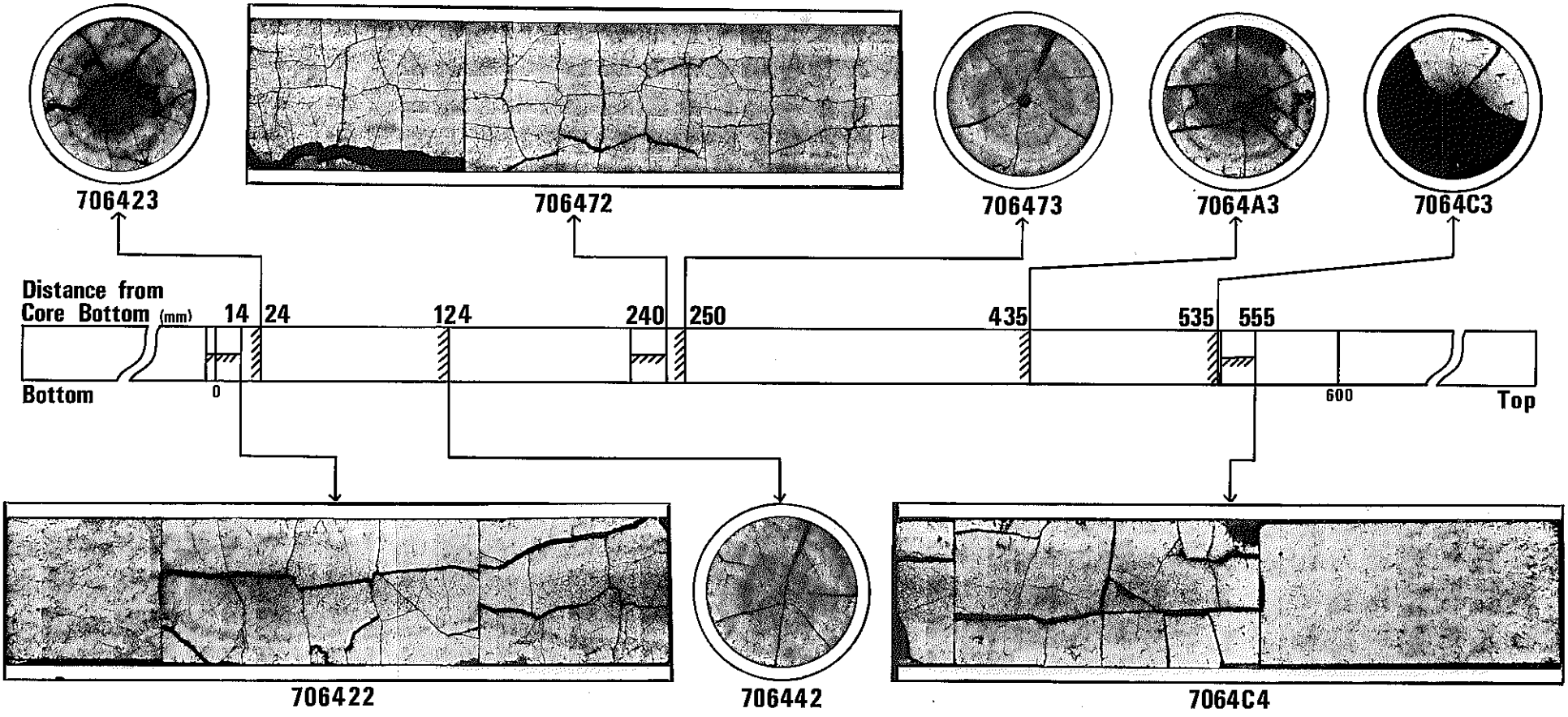


Photo. 1 Macrographs of JOYO MK-II core fuel (7064 pin)

S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706422	
Distance from bottom of pin	100mm	
Distance from bottom of core column	14mm	

1mm

As polished

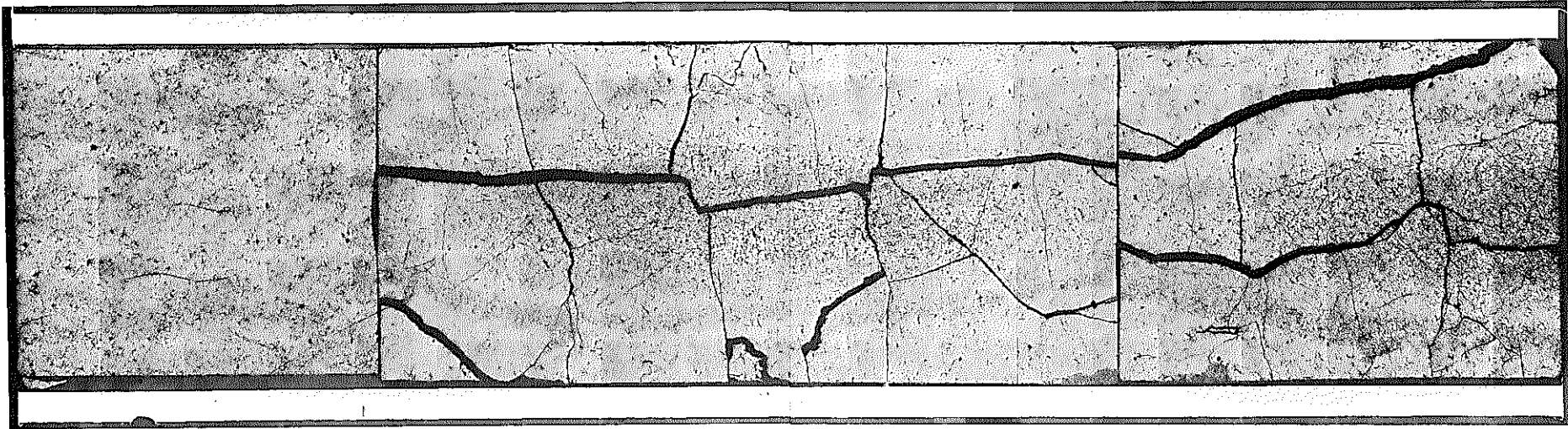


Photo. 2 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706422 sample)

S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706423	
Distance from bottom of pin		110mm
Distance from bottom of core column		24mm

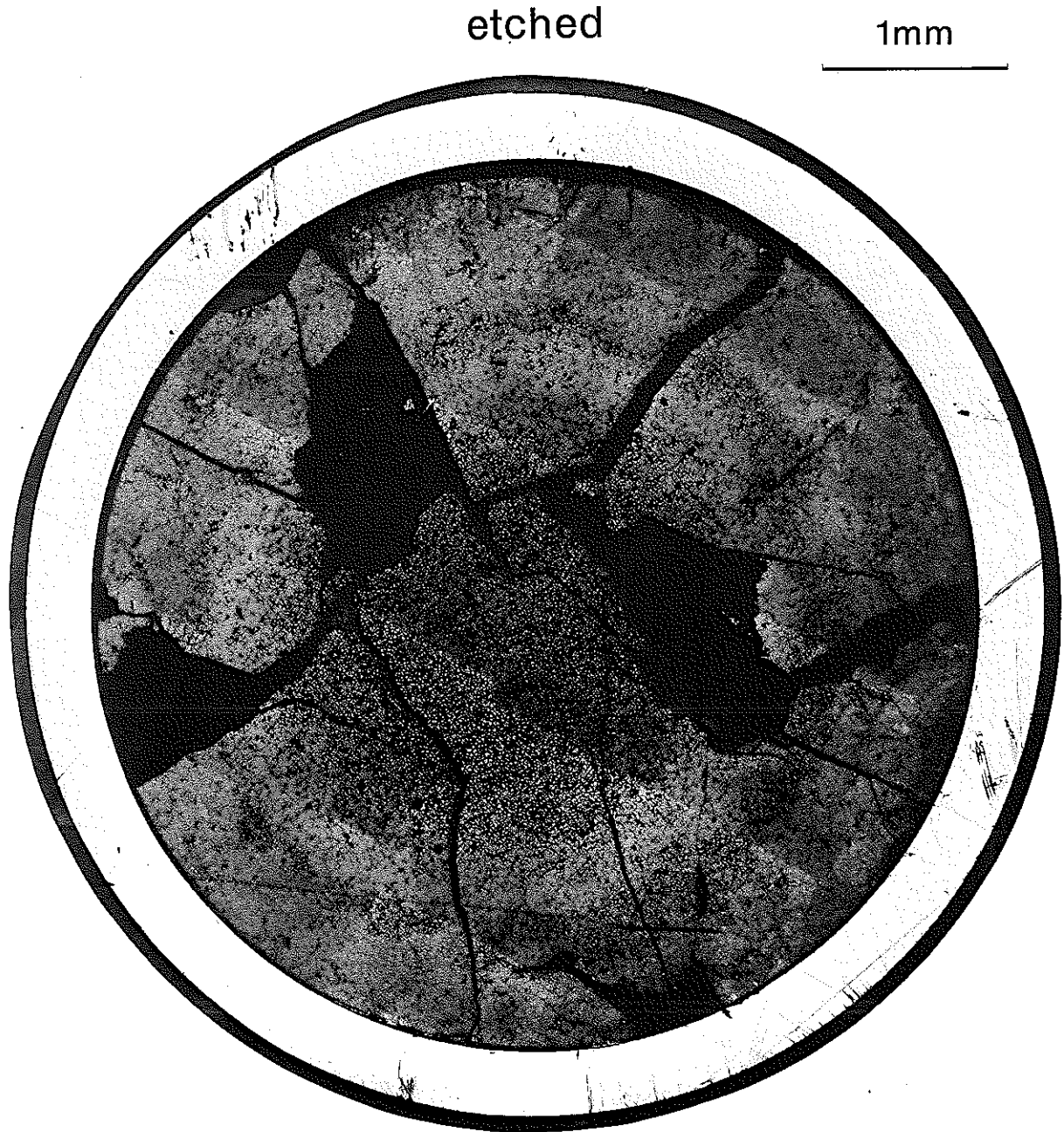
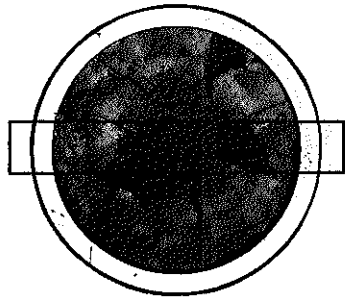


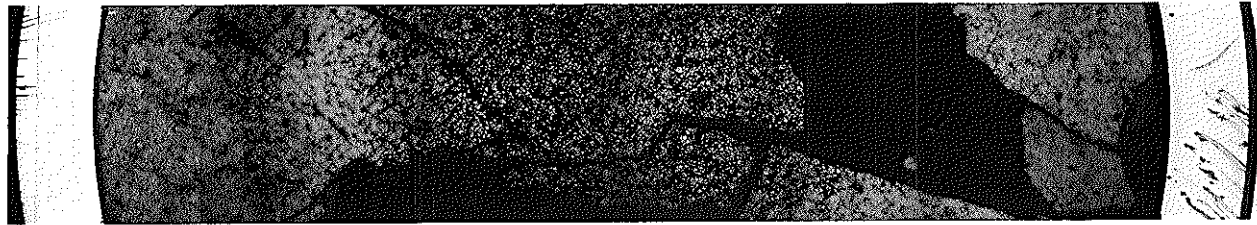
Photo. 3 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (706423 sample)



S/A Name	JOYO - PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706423	
Distance from bottom of pin		110mm
Distance from bottom of core column		24mm

etched

1mm



0.1mm

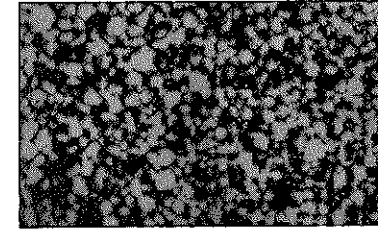
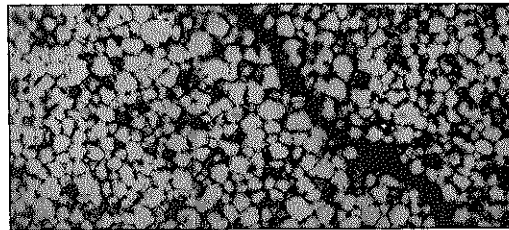
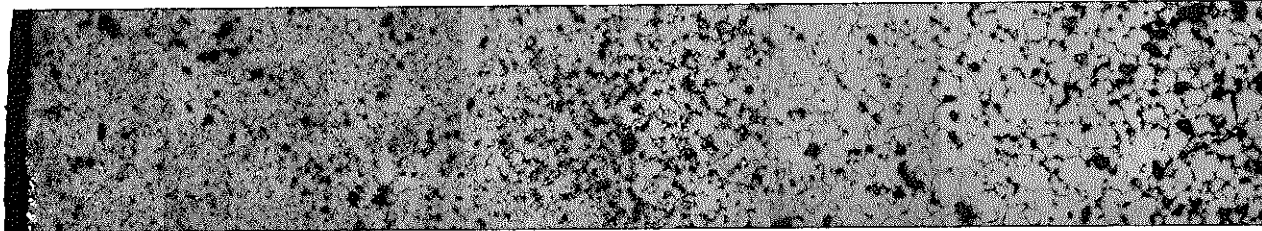
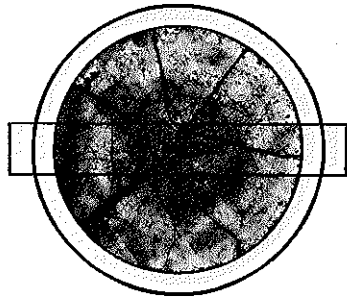


Photo. 4 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706423 sample)

S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706442	
Distance from bottom of pin		210mm
Distance from bottom of core column		124mm



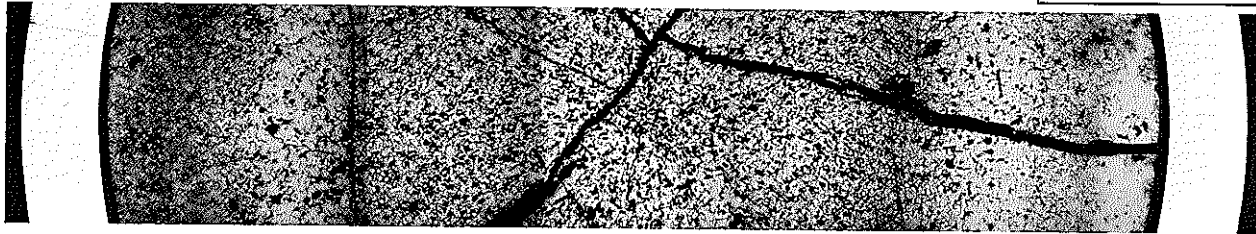
Photo. 5 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (706442 sample)



S/A Name	JOYO - PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706442	
Distance from bottom of pin	210mm	
Distance from bottom of core column	124mm	

As polished

1mm



0.1mm

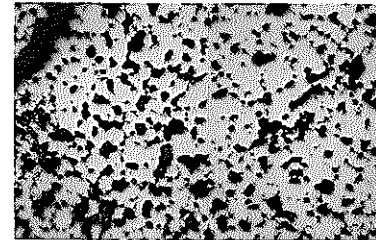
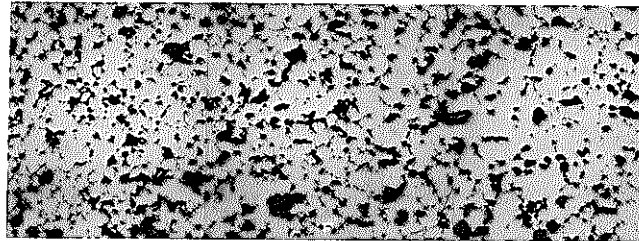
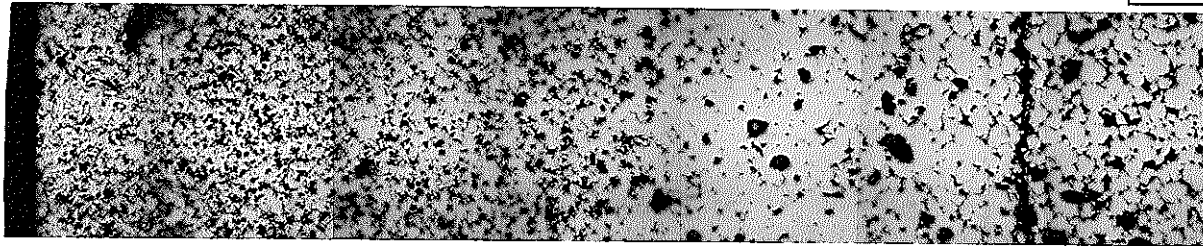


Photo. 6 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706442 sample)

S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706472	
Distance from bottom of pin		326mm
Distance from bottom of core column		240mm
		1mm

As polished

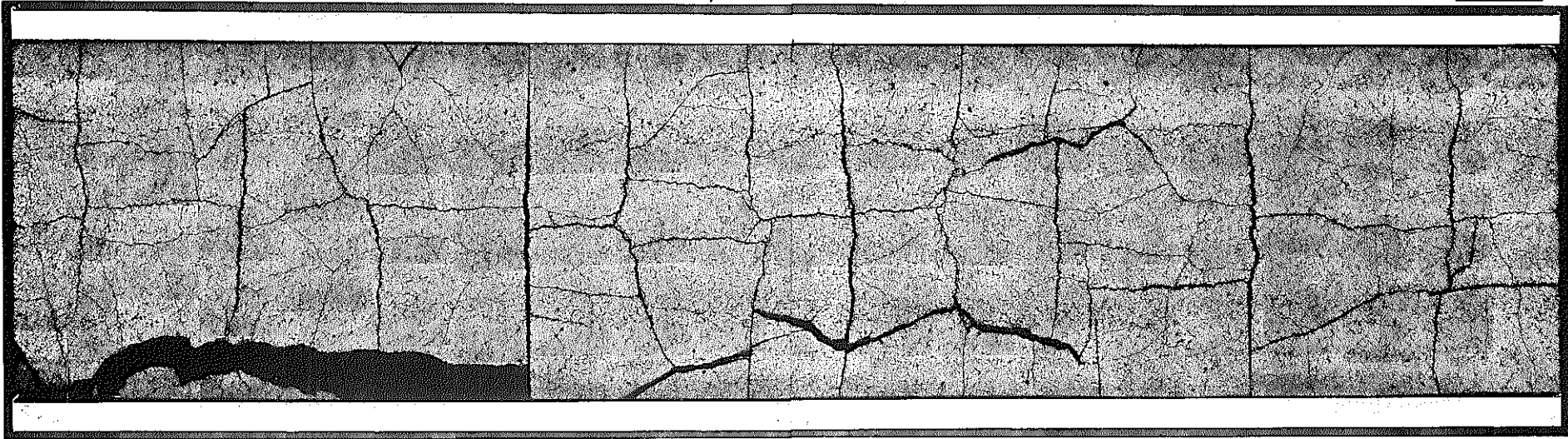


Photo. 7 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core_fuel (706472 sample)

S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706473	
Distance from bottom of pin		336mm
Distance from bottom of core column		250mm

As polished

1mm

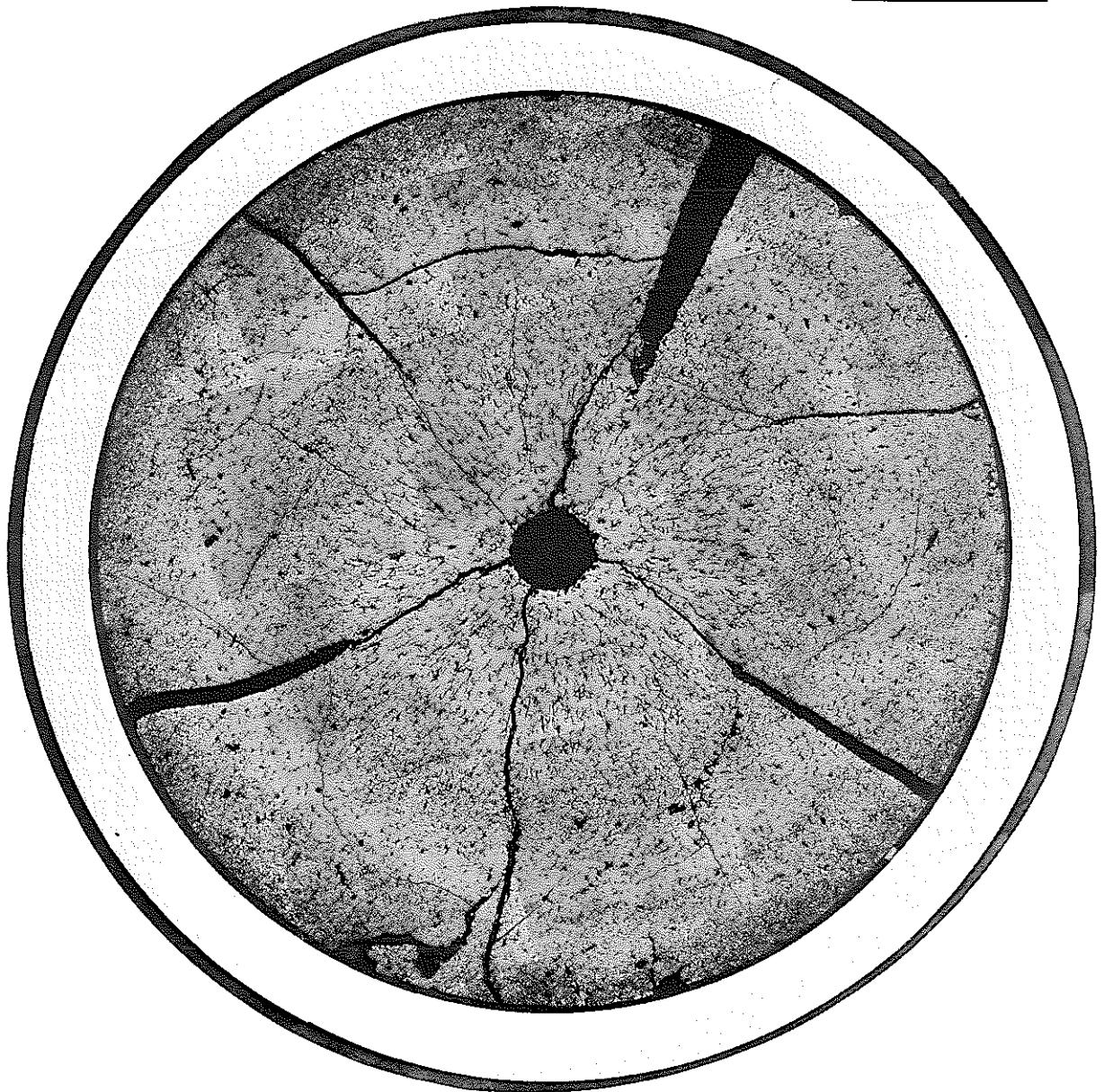
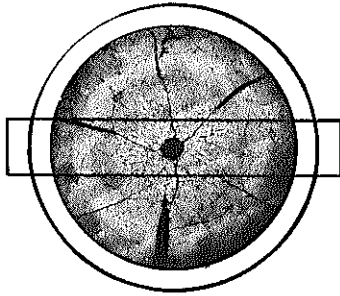


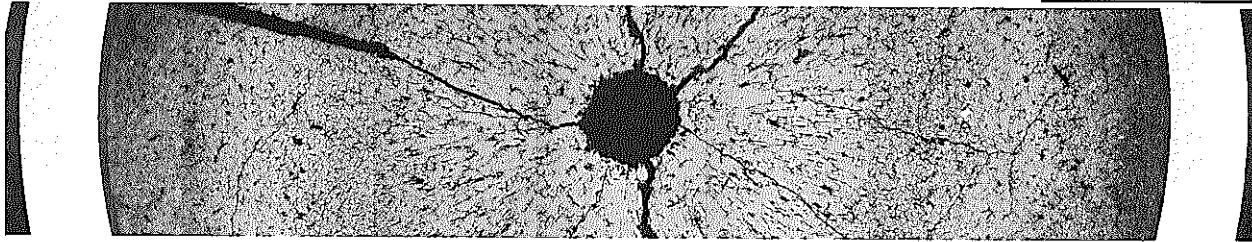
Photo. 8 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (706473 sample)



S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	706473	
Distance from bottom of pin		336mm
Distance from bottom of core column		250mm

etched

1mm



0.1mm

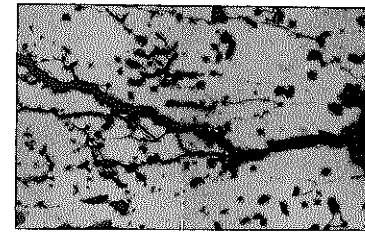
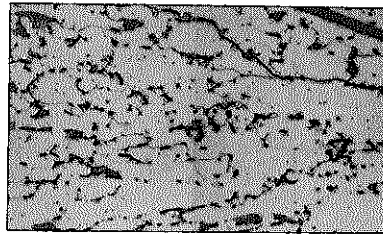
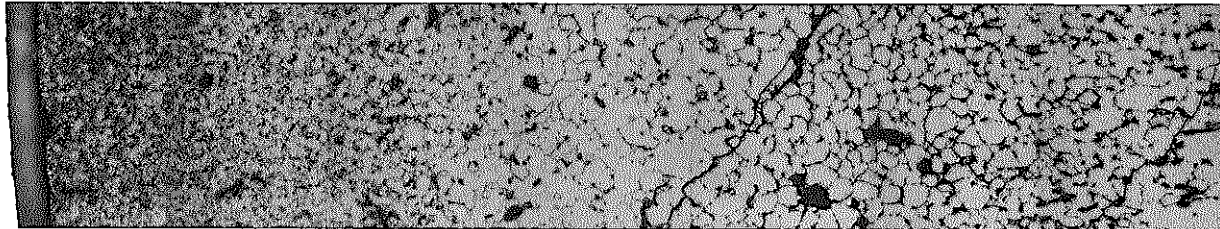


Photo. 9 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (706473 sample)

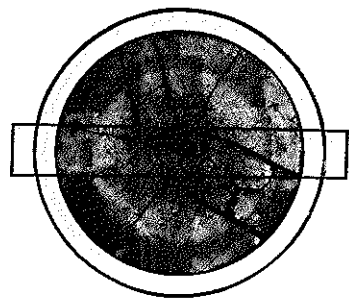
S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	7064A3	
Distance from bottom of pin		521mm
Distance from bottom of core column		435mm

As polished

1mm



Photo. 10 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-1U core fuel (7064A3 sample)



S/A Name	JOYO - PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	7064A3	
Distance from bottom of pin		521mm
Distance from bottom of core column		435mm

etched 1mm



0.1mm

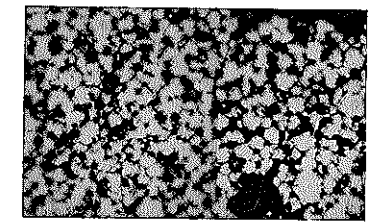
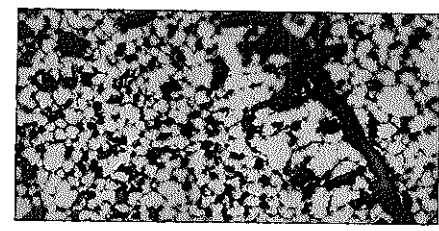
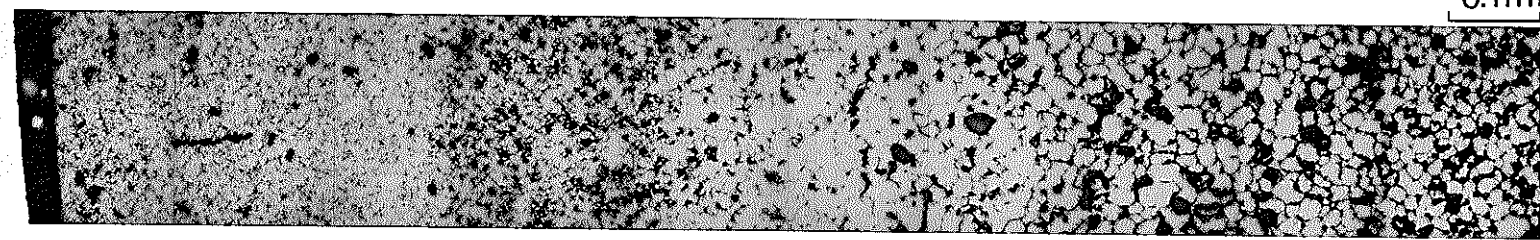


Photo. 11 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (7064A3 sample)

S/A Name	JOYO-PFD003	
Pin No.	7064	
Section No.	7064 C4	
Distance from bottom of pin		641mm
Distance from bottom of core column		555mm

1mm

As polished

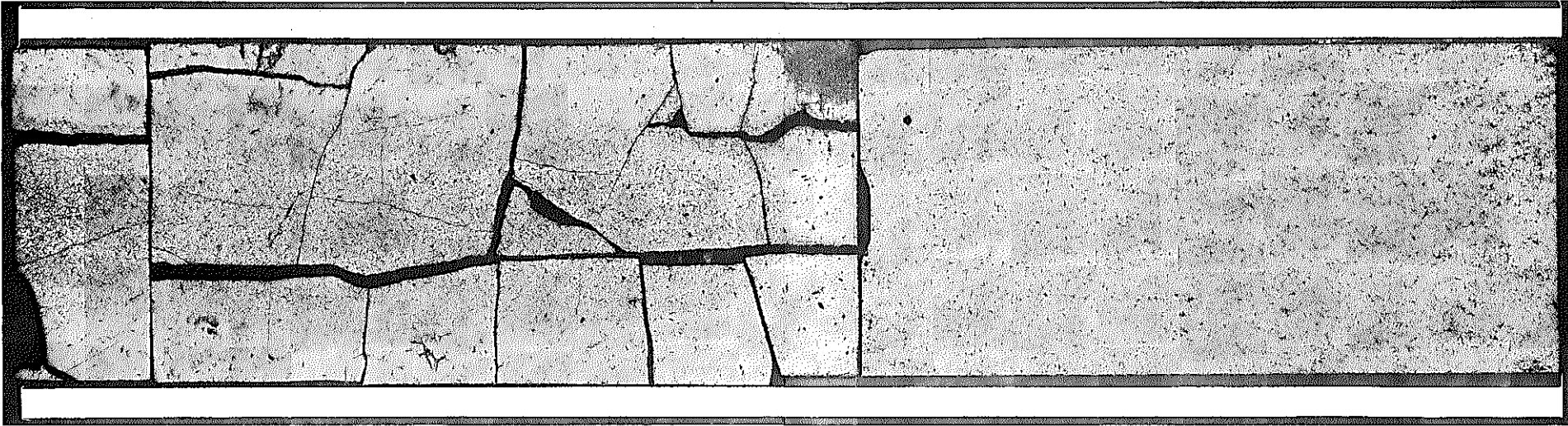
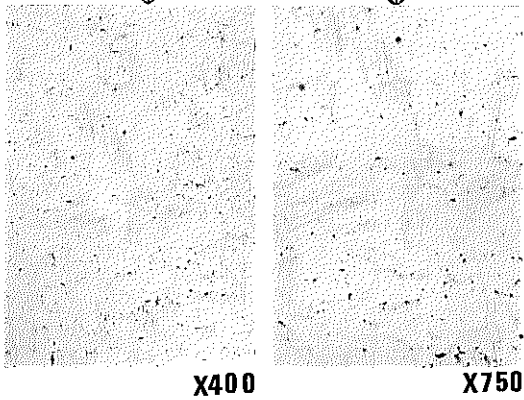
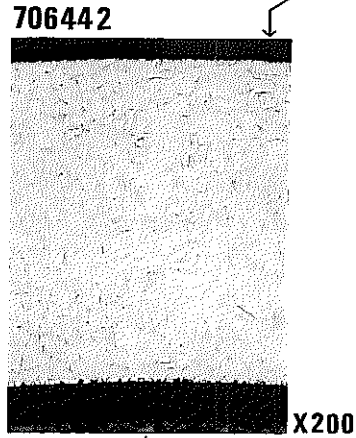
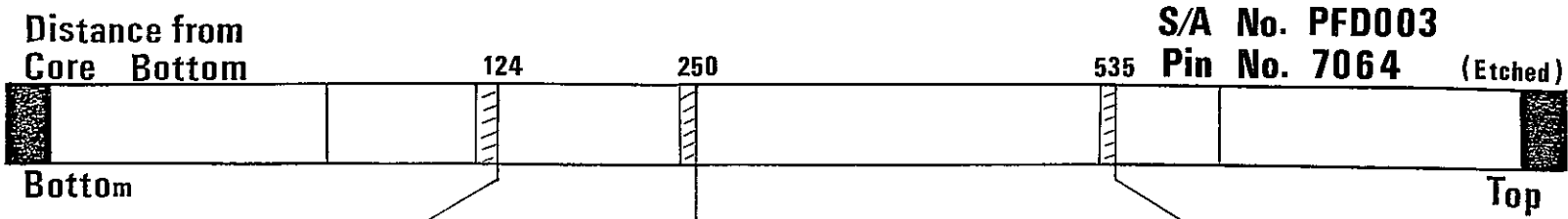
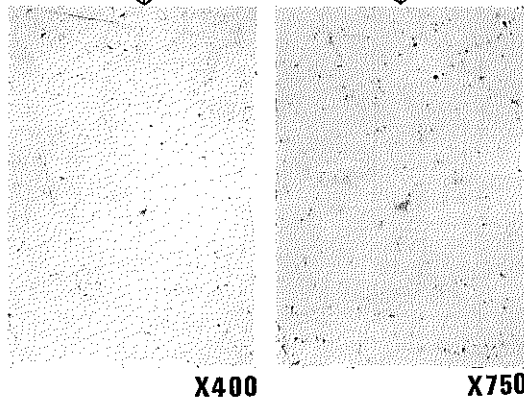
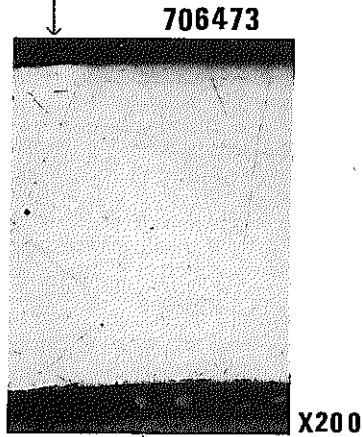


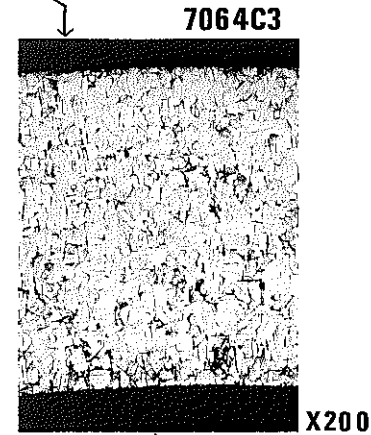
Photo. 12 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (7064C4 sample)



Irrad. Temp.(°C) :443
Fluence ($\times 10^{22}n/cm^2$): 1.8



Irrad. Temp.(°C) : 500
Fluence ($\times 10^{22}n/cm^2$): 2.0



Irrad. Temp.(°C) : 579
Fluence ($\times 10^{22}n/cm^2$): 0.96

Photo. 13 Optical micrograph of fuel cladding (7064 pin)