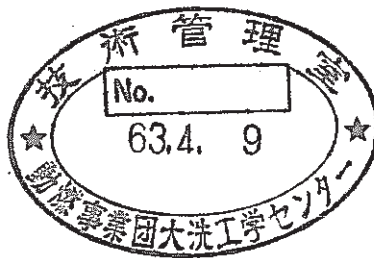


「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 (PFD029) の照射後試験

—— 燃料要素の破壊試験 ——



技術資料コード	
開示区分	レポート No.
	PNC-TN9410 88-185
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	

1988年1月

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 (PFD029) 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 橋口正弘 大森 雄

立花利道

要 旨

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 PFD029 (集合体平均燃焼度は約 43,700MWd/t) は、MK-II 初装荷炉心燃料集合体のうちで最高燃焼度に達したものである。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 3 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 35 μm まで減少していた。
- 3) FCCI は、全面腐食が観察され、最大約 11 μm であった。
- 4) 軸方向上部の被覆管内面近傍には炭化物折出がかなり多かった。
- 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。

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	8

List of Tables

Table 1	Fuel pin fabrication parameters	10
Table 2	Metallographic examination in AGS	11
Table 3	Irradiation parameters of PFD029	12
Table 4	Summary data from ceramographs (PFD029)	13
Table 5	Measurement condition and indentation position...	14
Table 6	Microhardness results of JOYO MK-II PFD029 fuel cladding	15
Table 7	Microhardness of JOYO MK-II PFD029 fuel cladding (1) (9164 pin)	16
Table 8	Microhardness of JOYO MK-II PFD029 fuel cladding (2) (9164 pin)	17
Table 9	Summary of density measurement	18
Table 10	Summary of burnup measurement by Nd-method for PFD029	19
Table 11	Calculation of effective fission yield for 916464 sample	20
Table 12	Composition of spike solution and natural Neodymium	21
Table 13	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 915822 sample	22
Table 14	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 916424 sample	23
Table 15	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 916464 sample	24
Table 16	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 9164A3 sample	25
Table 17	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 917022 sample	26

List of Figures

Fig. 1 Schematic drawing of fuel pin 27

Fig. 2 Irradiation position of PFD029 subassembly in
JOYO MK-II Core 28

Fig. 3 Fuel pin positions in PFD029 subassembly 29

Fig. 4 Cladding temperature and fluence distribution
(9164 pin) 30

Fig. 5 Linear heat rate distribution (9164 pin) 31

Fig. 6 Fuel temperature distribution (9164 pin) 32

Fig. 7 Burnup distribution (9164 pin) 33

Fig. 8 Burnup distribution (9158 pin) 34

Fig. 9 Burnup distribution (9170 pin) 35

Fig. 10 Sampling of specimens (PFD029) 36

Fig. 11 Flow diagram of metallographic examination in
AGS 37

Fig. 12 Axial profile of restructured region 38

Fig. 13 Residual gap ratio as a function of burnup 39

Fig. 14 Restructured region (D/Do) as a function of
linear heat rate 40

Fig. 15 Relation between hardness, clad temperature and
fluence at various position for JOYO MK-II fuel
pin (PFD029, 9164 pin) 41

Fig. 16 Effect of fluence on cladding hardness of JOYO
MK-II driver fuel 42

Fig. 17 Relation between hardness and temperature for
JOYO MK-II fuel pin 43

Fig. 18 Cladding density change 44

Fig. 19 Cutting diagram of PFD029 fuel pins for burnup
measurement 45

Fig. 20	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS	46
Fig. 21	Burnup radial distribution of PFD029 subassembly	47
Fig. 22	Burnup axial distribution of PFD029 (9164 pin) ...	48

List of Photographs

Photo. 1	Macrographs of JOYO MK-II core fuel (9164 pin)....	49
Photo. 2	Postirradiation ceramographs of JOYO MK-II core fuel (916422 sample)	50
Photo. 3	Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916423 sample)...	51
Photo. 4	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916423 sample)	52
Photo. 5	Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916442 sample)...	53
Photo. 6	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916442 sample)	54
Photo. 7	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916462 sample)	55
Photo. 8	Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916463 sample)...	56
Photo. 9	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916463 sample)	57
Photo. 10	Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916483 sample)...	58
Photo. 11	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916483 sample)	59
Photo. 12	Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (9164A4 sample)...	60
Photo. 13	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (9164A4 sample)	61
Photo. 14	Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (9164A5 sample)	62
Photo. 15	Postirradiation metallograph of JOYO MK-II cladding (9164A4 sample, FCCI)	63

Photo. 16 Postirradiation metallograph of JOYO MK-II
cladding (9164A5 sample, FCCI)64

Photo. 17 Optical micrographs of fuel cladding (9164 pin)....65

Photo. 18 Optical micrographs of fuel cladding (9164 pin)....66

1. ま え が き

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD029は、炉内位置3E2で炉心方向をE面方向として、100MW出力上昇サイクルから100MW第6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43,700MWd/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最高燃焼度に達したものである。

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3本である。

- (1) 集合体代表ピン (No.9164pin, K社製被覆管)
- (2) 高出力コーナーピン (No.9158pin, ")
- (3) 低出力コーナーピン (No.9170pin, ")

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) : 43,700MWd/t
- ② 照射サイクル : 100MW出力上昇サイクル~100MW第6サイクル
- ③ 集合体ピークフルエンス ($E \geq 0.1\text{MeV}$) : $5.50 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$
- ④ 線出力(集合体平均) : 221~241W/cm
- ⑤ 照射位置 : 3 E 2 (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料部MK-II照射情報検索システムの出力結果を Fig. 4~Fig.9 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.10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.11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

9164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.18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

9164ピンの各試料における燃料組織は、断面中心部よりガスバブル領域、高密度化領域そして最外周部に不変化領域の3領域で構成されているのが観察された。燃料カラム軸方向中央部付近の試料において、ガスバブル領域内の結晶粒が径方向に伸長しているのが認められたが柱状晶領域までには到っておらず中心空孔も観察されなかった。また、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、タブレットディ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.12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、残留ギャップ幅は、軸方向中心部で製造時の170 μ mから35 μ m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。「常陽」MK-II初装荷燃料集合体のうちPFD010、PFD003、PFD001、PFD029について、Fig.13に、50W/cm幅の線出力レベルにおける残留ギャップ率(G/G_0 G_0 :製造時ギャップ幅)の燃焼度依存性を示す。また、Fig.14では、線出力と組織変化(D/D_0 D_0 :ペレット外径)の関係を示す。これらの結果より残留ギャップ率は、燃焼度の増加に伴ってペレットのスエリングにより徐々に減少しており約50,000MWd/tで、約0.2(35 μ m直径方向)まで閉じていた。中心空孔は、線出力約350W/cm(PFD003)以上で観察されている。

2) FCCIの観察

燃料-被覆管の化学的相互作用(FCCI)は、上端部の試料(9164A4, 9164A5)に認められ、その形態は全面腐食で最大腐食量は約11 μ mであった。(Photo.15およびPhoto.16)

3) 被覆管組織観察

電解腐食後の被覆管組織写真を、Photo.17 および Photo.18 に示す。9164 ピン (K 材) の被覆管組織は、下部側 (約 400℃ 以下) では未固溶の炭化物が多く結晶粒界は明確に観察されなかった。下部から中央部の間で被覆管温度が約 440℃ 付近では、結晶粒内及び粒界に若干炭化物の析出がみられるが被覆管外面及び内面側の析出量に差は認められなかった。中央部より上部 (約 490～570℃) においては、結晶粒界・双晶領域に炭化物の析出がみられ上部ほど被覆管内面側の炭化物析出量が多く鋭敏化が進んでいるのが認められた。また、中央部より上部において被覆管外表面に荒れが認められるが同履歴の PPJX13 と同じであり被覆管の健全性に問題はないと考えられる。

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 に、ピン軸方向硬さ値と照射前硬さ値の比較を示し、Fig.15 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、燃料下端より 25mm の位置に硬さのピーク (照射前より 87 (Hv (0.5) 高い) があり、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 7～Table 8 に示す各測定点の硬さ値では、被覆管の外側の方が内側に比較して、高い傾向が見られる。

Fig.16 に硬さ値の照射量による変化を示す。照射温度 500℃ 以下においては、照射により硬さ値が増加するが、照射温度 560～590℃ では、照射前に比べほとんど変化しなかった。

Fig.17 には、照射量が $3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$) 以上の試料について硬さの温度依存性を示した。照射温度が高くなるにつれて硬さ値変化 (硬化量) が小さくなっており、550℃ 以上では照射前と同程度の硬さとなっていることが確認された。

4.3 被覆管密度測定試験

被覆管密度の測定は、9164 ピンの炉心部 3 点について行った。Fig.18 に照射条件等と共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。

4) 被覆管酸洗浄及び乾燥

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

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。

6) 測定

界面活性剤入り含浸液を用いた液浸法により被覆管密度データを取得した。また、同一測定条件にてReference材として用いたロットNo. K005(コールド材)の密度データも取得した。

4.3.2 測定結果

測定試料の密度変化は、最大0.04%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 9に示す。また照射条件と共に密度測定結果を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ESPRIIT-Jコードによる計算値をまとめた結果をTable10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.916464)をTable11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Table12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Table13からTable17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最大値で規格化し、比較した結果を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として規格化し比較した結果をFig. 22に示す。

以上の結果から以下のことがわかった。

- 1) PFD029炉心燃料集合体の中心ピンの軸方向中心位置（試料No. 916464）での燃焼率は、5.60 atom% (50,900 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（Table 10参照）すると実測値の方がESPRIT-Jコード計算値より2.4%（試料No. 916464）～5.4%（試料No. 916424）小さい。
- 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が、燃料カラム2/3から上端における γ -スキャン値がいく分高い。またMK-Iに比べMK-IIのプロファイルは下部側へ移動している。
- 4) 燃焼率の集合体内径方向分布は、実測値とESPRIT-Jコード計算値が良く一致している。また形状は山形分布を示している。

5. ま と め

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD029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が、柱状晶領域及び中心空孔は観察されなかった。
- 残留ギャップ幅は、製造時の170 μm から35 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。
- FCCIは、軸方向上部試料で全面腐食が観察され、最大値は約11 μm であった。
- 被覆管組織は、軸方向上部の被覆管内面で炭化物析出がかなり多かった。

2) 被覆管硬さ測定試験

代表ピンを対象に試験を実施した。

- 軸方向下端側の硬さ値が100 (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

代表ピンを対象に試験を実施した。

- 測定試料の最大密度変化は0.04%であり、測定誤差の範囲内にあり、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 - タ 集

Table 1 Fuel pin fabrication parameters

S/A name	PFD029	Pin no 9158 9164 9170
Fuel		
Fuel form	Flat end solid pellet	
Pellet diameter(mm)	4.63	
Pellet density(% T.D)	93±2.0	
Fuel composition	30W/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	SUS316, 20% cold work	
Outer/inner diameter (mm)	5.5/4.8	
Lot identification	K005	
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 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	被覆管肉厚 ギャップ観察		
燃 料	×10.5 全面写真	燃料全体組織観察	×10.5 全面写真	燃料全体組織観察
	×86 全面写真		×86 全面写真	
	×100 部分写真	ボイド分布測定	×100 部分写真	詳細燃料組織観察
	×400 部分写真	ボイド分布測定	×400 部分写真	
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 PFD029

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
9164	916423	25	38820	212	1493	414	
"	916442	126	47550	262	1736	457	
"	916463	249	52810	292	1789	512	
"	916483	436	41640	226	1308	574	

Table 4 Summary data from ceramographs (PFD029)

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
9164	916423			2.232	3.643		47	4.750	5.501	4.797
"	916442			2.469	3.506		43	4.761	5.503	4.804
"	916463			2.639	3.687		35	4.769	5.502	4.804
"	916483			2.492	3.227		46	4.757	5.502	4.803
"	9164A4			2.471	3.789		93	4.705	5.497	4.798

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

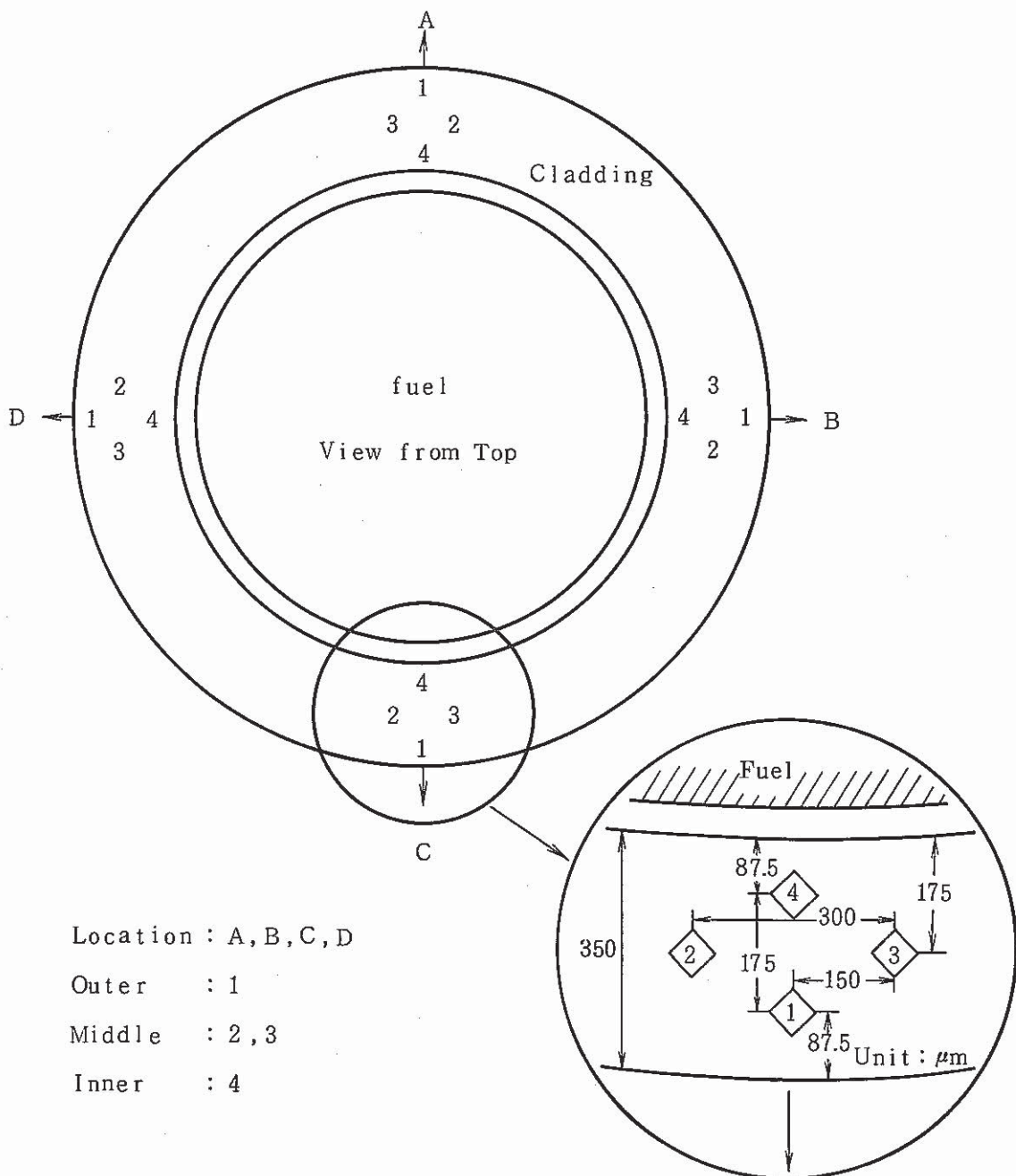


Table 6 Microhardness results of JOYO MK-II PFD029 fuel cladding

Pin No.	9164	Lot No. K005 (Unirrad. hardness 270 (Hv0.5))				
Specimen No.	916423	916442	916463	916483	9164A4	
D.F.C.B (mm)	25.0	125.0	250.0	435.0	540.0	
Hardness (Hv 0.5)	357	344	308	273	265	
Δ Hv (Hv 0.5)	87	74	38	3	-5	
(*1) Δ Hv/Hv (%)	32	27	14	1	-2	
(*2)	Clad midwall temp. (°C)	401	441	496	563	577
	Fluence ($\times 10^{22}$ n/cm ²)	4.05	5.89	6.75	5.29	3.13

(*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 of JOYO MK-II PFD 029 fuel
cladding(1) (No.9164 pin)

S/A NAME	PFD029		PIN No.	9164	
Specimen No.	916423				
D.F.C.B.	25.0 (mm)		D.F.P.B.	111.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	370	351	353	358	358
B	362	347	352	350	353
C	356	350	374	356	359
D	362	358	358	355	358
RING AVERAGE	362	352	359	355	357

S/A NAME	PFD029		PIN No.	9164	
Specimen No.	916442				
D.F.C.B.	125.0 (mm)		D.F.P.B.	211.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	342	343	361	342	347
B	343	336	350	351	345
C	336	356	343	338	343
D	334	347	344	336	340
RING AVERAGE	339	346	349	342	344

S/A NAME	PFD029		PIN No.	9164	
Specimen No.	916463				
D.F.C.B.	250.0 (mm)		D.F.P.B.	336.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	312	317	318	304	313
B	307	301	295	282	296
C	325	303	318	298	311
D	308	315	315	312	313
RING AVERAGE	313	309	312	299	308

Table 8 Microhardness of JOYO MK-II PFD029 fuel cladding(2) (No.9164 pin)

S/A NAME	PFD029		PIN No.	9164	
Specimen No.	916483				
D.F.C.B.	435.0 (mm)		D.F.P.B.	521.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	268	274	273	271	272
B	273	280	274	264	273
C	274	266	273	273	271
D	279	280	267	273	275
RING AVERAGE	274	275	272	270	273

S/A NAME	PFD029		PIN No.	9164	
Specimen No.	9164A4				
D.F.C.B.	540.0 (mm)		D.F.P.B.	626.0 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	266	258	278	259	265
B	264	266	273	267	267
C	262	256	266	266	263
D	264	260	266	268	265
RING AVERAGE	264	260	271	265	265

Table 9 Summary of density measurement

Pin No.	Specimen No.	Distance from pin bottom (mm)	Fast fluence ($n/cm^2 \cdot \times 10^{22}$)	Clad. midwall temp. (°C)	Density (g/cc)	Density change $-\frac{\Delta \rho}{\rho}$ (%)
9164	K005	—	—	—	7.971	Base
	916465	340.4—365.0	6.75	492	7.968	0.04
	916482	485.4—511.0	6.25	540	7.969	0.03
	9164A2	585.5—610.3	4.5	570	7.969	0.03

Table 10 Summary of burnup measurement by Nd-method for PFD029

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⁾
9158	915822	249.9~255.3	27.142	56,120	53,900	6.10	5.93
9164	916424	25.0~30.1	27.560	38,820	36,500	4.25	4.02
	916464	249.5~254.1	27.147	52,810	50,900	5.74	5.60
	9164A3	524.6~529.6	27.685	29,530	27,900	3.23	3.07
9170	917022	249.1~254.1	27.416	48,265	46,500	5.25	5.11

1) Distance from pin bottom-86 (mm)

2) $\text{Pu}/(\text{Pu}+\text{U})\times 100$

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、 γ 発熱量(62-JY支-34)から各試料毎に算出した。

6) Measured by ^{148}Nd monitor method

Table 11 Calculation of effective fission yield for
916464 sample - example -

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	0.000726	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.00 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.077399	1.72E+00 ¹⁾	1.68 ³⁾	0.389	2.94 ³⁾	0.681	3.76 ⁴⁾	0.871
U 236	0.003091	1.57E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.002	3.06 ²⁾	0.003	3.77 ²⁾	0.003
U 238	0.547317	7.10E-02 ¹⁾	2.00 ³⁾	0.160	3.40 ³⁾	0.275	3.50 ²⁾	0.283
Pu238	0.000456	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu239	0.195247	1.75E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	0.983	2.46 ³⁾	1.465	3.01 ³⁾	1.793
Pu240	0.065477	5.13E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.100	2.83 ²⁾	0.165	3.34 ²⁾	0.135
Pu241	0.007946	2.23E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.060	3.01 ²⁾	0.033	3.52 ²⁾	0.109
Pu242	0.002343	4.19E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.003	3.10 ²⁾	0.005	3.70 ²⁾	0.006
Effective Fission Yield [%]			1.71		2.69		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 12 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 13 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 915822 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD029	PIN NO.(PIE) ; 9158
SAMPLE NO. ; 915822	SAMPLE POSITION ; 249.9~255.3 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 10.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001128	0.118125	0.005160	-(a)		
0.668074	0.008791	0.117577	0.005120	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.002506	0.339076	0.041232	0.012109	-(a)		
0.002506	0.344466	0.041451	0.416861	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.016170	4.877420	4.070902	3.375326	2.829021	1.792905	-(a)
0.032727	2.127378	1.791573	1.489978	1.252201	0.790942	-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1003	10.5055	0.4589	88.9353		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1797	71.6885	24.3079	2.9559	0.8681		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0900	27.1545	22.6643	18.7917	15.7503	9.9818	5.5674

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.142 / 27.260

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9158E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>		[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
	;	2.0651E+18	3.2483E+18	3.9276E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>		1.71E-02	2.69E-02	3.26E-02
	;			
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>		1.2077E+20	1.2076E+20	1.2048E+20
	;			
<u>BURNUP (atom%)#</u>		5.93	5.93	5.92
	;	-----	-----	-----
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##</u>		53900	53900	53800

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 14 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 916424 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD029	PIN NO.(PIE) ; 9164
SAMPLE NO. ; 916424	SAMPLE POSITION ; 25.0~30.1 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 10.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001136	0.123507	0.004212	-(a)	
0.695570	0.009085	0.123395	0.004211	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002477	0.329321	0.040321	0.011582	-(a)	
0.002477	0.334742	0.040488	0.419364	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.015550	4.999179	4.159562	3.439135	2.875707	1.812281
0.035317	1.656190	1.395556	1.148954	0.968387	0.608351
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1006	10.9409	0.3731	88.5853		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1790	72.2699	23.8000	2.9140	0.8370		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0850	27.3158	22.7281	18.7916	15.7130	9.9024	5.4641

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.560 / 27.679

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.8577E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		1.3288E+18	2.0956E+18	2.5331E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.71E-02	2.69E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	7.7710E+19	7.7904E+19	7.7701E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	4.02	4.02	4.01
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##</u>	;	36500	36600	36500

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 15 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 916464 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD029	PIN NO.(PIE) ; 9164
SAMPLE NO. ; 916464	SAMPLE POSITION ; 249.5~254.1 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 10.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001121	0.119569	0.004775	-(a)	
0.786551	0.010138	0.119148	0.004763	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002336	0.335354	0.040695	0.011998	-(a)	
0.002336	0.341427	0.040905	0.486741	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.013277	4.900973	4.065469	3.388807	2.833651	1.795050
0.031413	1.884190	1.577663	1.305689	1.101025	0.694562
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0996	10.6240	0.4243	88.8522		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1680	71.9226	24.1195	2.9269	0.8629		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0738	27.2318	22.5894	18.8296	15.7449	9.9740	5.5564

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.147 / 27.265

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.6276E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		1.6498E+18	2.5987E+18	3.1241E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.71E-02	2.69E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	9.6480E+19	9.6607E+19	9.5831E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	5.60	5.60	5.56
<u>SPECIFIC BURNUP (MW d/t)##</u>	;	50900	50900	50500

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 MW d/t BU

Table 16 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD029 9164A3 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD029		PIN NO.(PIE) ; 9164				
SAMPLE NO. ; 9164A3		SAMPLE POSITION ; 524.6~529.6 (mm)#				
VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 10.000						
ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;						
[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001141	0.127749	0.002946	-(a)		
0.677606	0.008868	0.127836	0.002949	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.002243	0.316595	0.038528	0.011075	-(a)		
0.002243	0.321327	0.038708	0.400426	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.008856	4.972011	4.094066	3.430498	2.837105	1.804354	-(a)
0.035193	1.394353	1.166857	0.969517	0.812968	0.513866	-(b)
ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;						
[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1008	11.2869	0.2603	88.3520		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1639	73.0759	23.1355	2.8155	0.8093		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0488	27.3987	22.5607	18.9041	15.6341	9.9431	5.5106
Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.685 / 27.804						
NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9155E+21						
NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)		[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]		
		1.0386E+18	1.6269E+18	1.9004E+18		
EFFECTIVE FISSION YIELD		1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02		
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**		6.0738E+19	6.0704E+19	6.0749E+19		
BURNUP (atom%)#		3.07	3.07	3.07		
SPECIFIC BURNUP (Mwd/t)##		27900	27900	27900		
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 PFD029 917022 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD029	PIN NO.(PIE) ; 9170
SAMPLE NO. ; 917022	SAMPLE POSITION ; 249.1*254.1 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 10.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001230	0.121122	0.004536	-(a)	
0.745455	0.009660	0.120698	0.004512	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002570	0.332251	0.040351	0.011808	-(a)	
0.002570	0.338171	0.040618	0.453927	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.014451	4.917967	4.092196	3.396737	2.835521	1.797413
0.034150	1.837122	1.546360	1.278527	1.076852	0.679706

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1092	10.7484	0.4025	88.7400		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1853	72.0991	23.9550	2.9093	0.8513		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0800	27.2399	22.6661	18.8140	15.7055	9.9556	5.5389

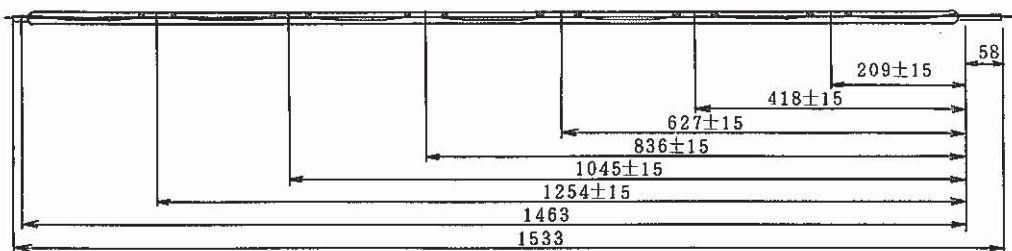
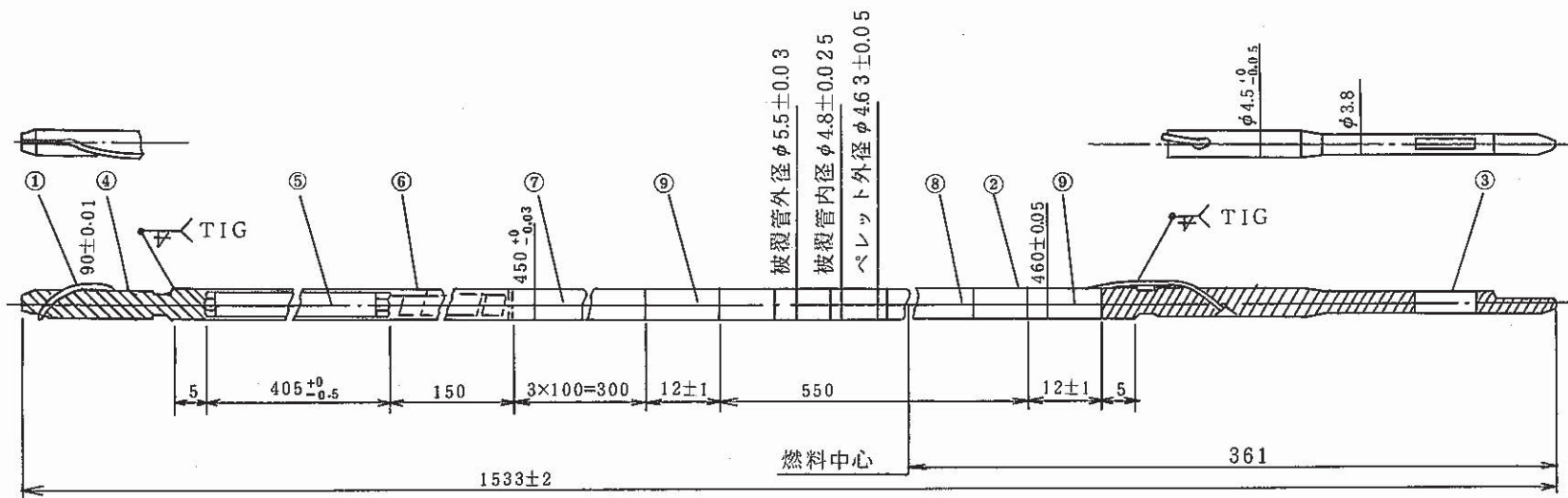
Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.416 / 27.533

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.7264E+21

		[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	1.5902E+18	2.5002E+18	3.0142E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.71E-02	2.69E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;</u>		9.2997E+19	9.2946E+19	9.2459E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	5.11	5.11	5.08
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/t)##</u>	;	46500	46400	46200

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 MW d/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

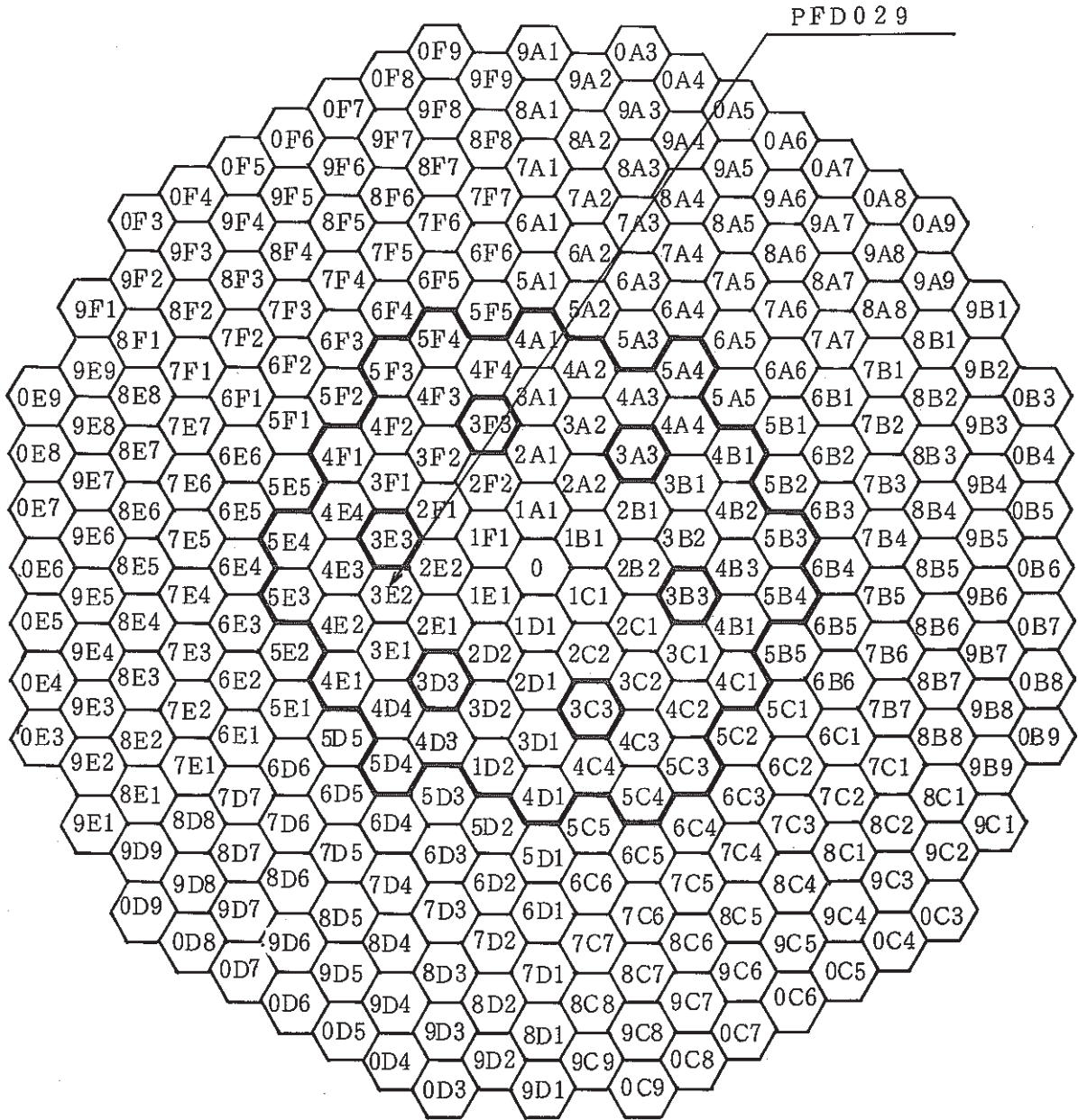


Fig. 2 Irradiation position of PFD029 subassembly in JOYO MK-II core

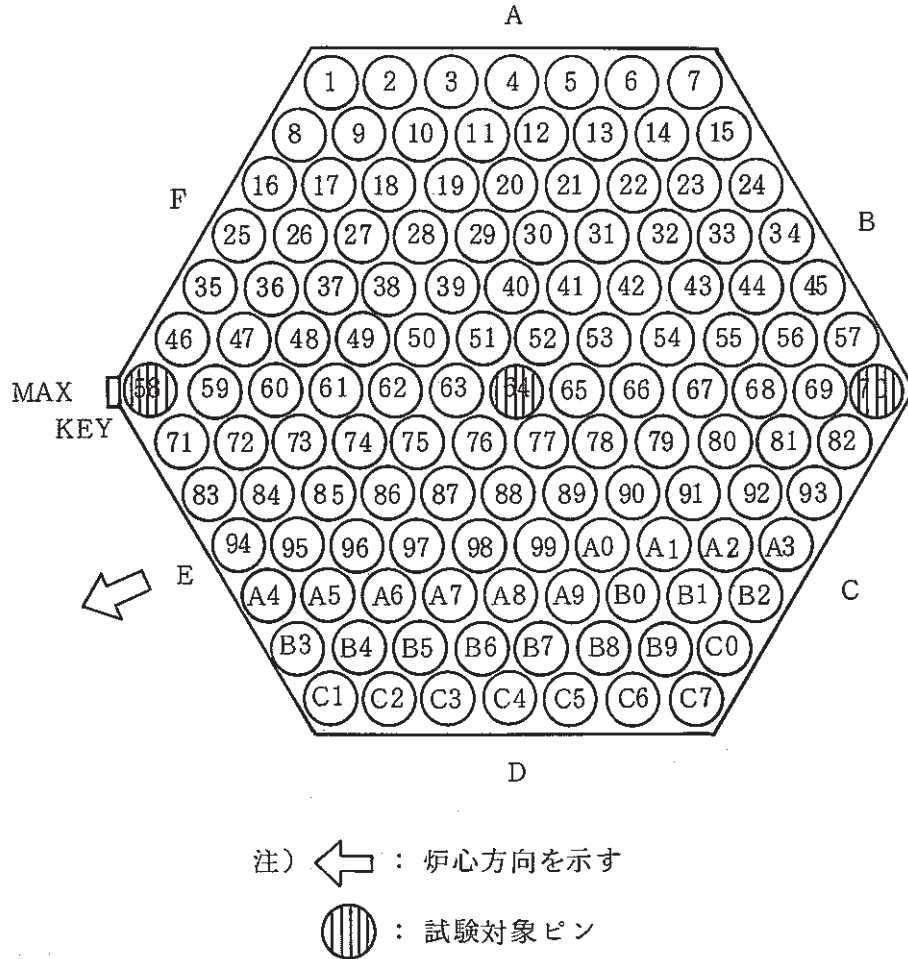


Fig.3 Fuel pin positions in PFD029 subassembly

S/A FAB NO. : PFD029

PIN NO. : 64

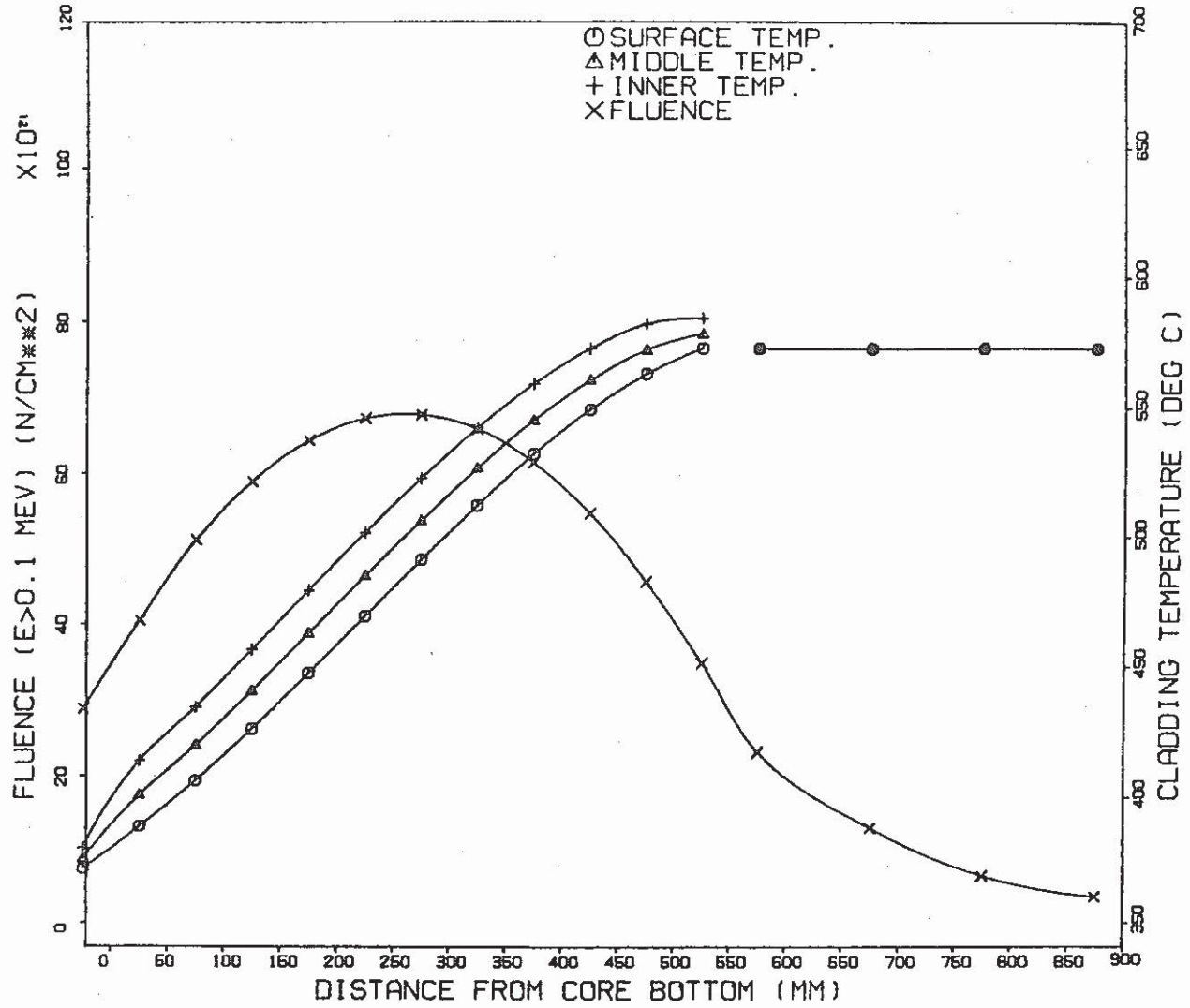


Fig. 4 Cladding temperature and fluence distribution (9164 pin)

S/A FAB NO. : PFD029

PIN NO. : 64

MAX ϕ EOL Δ

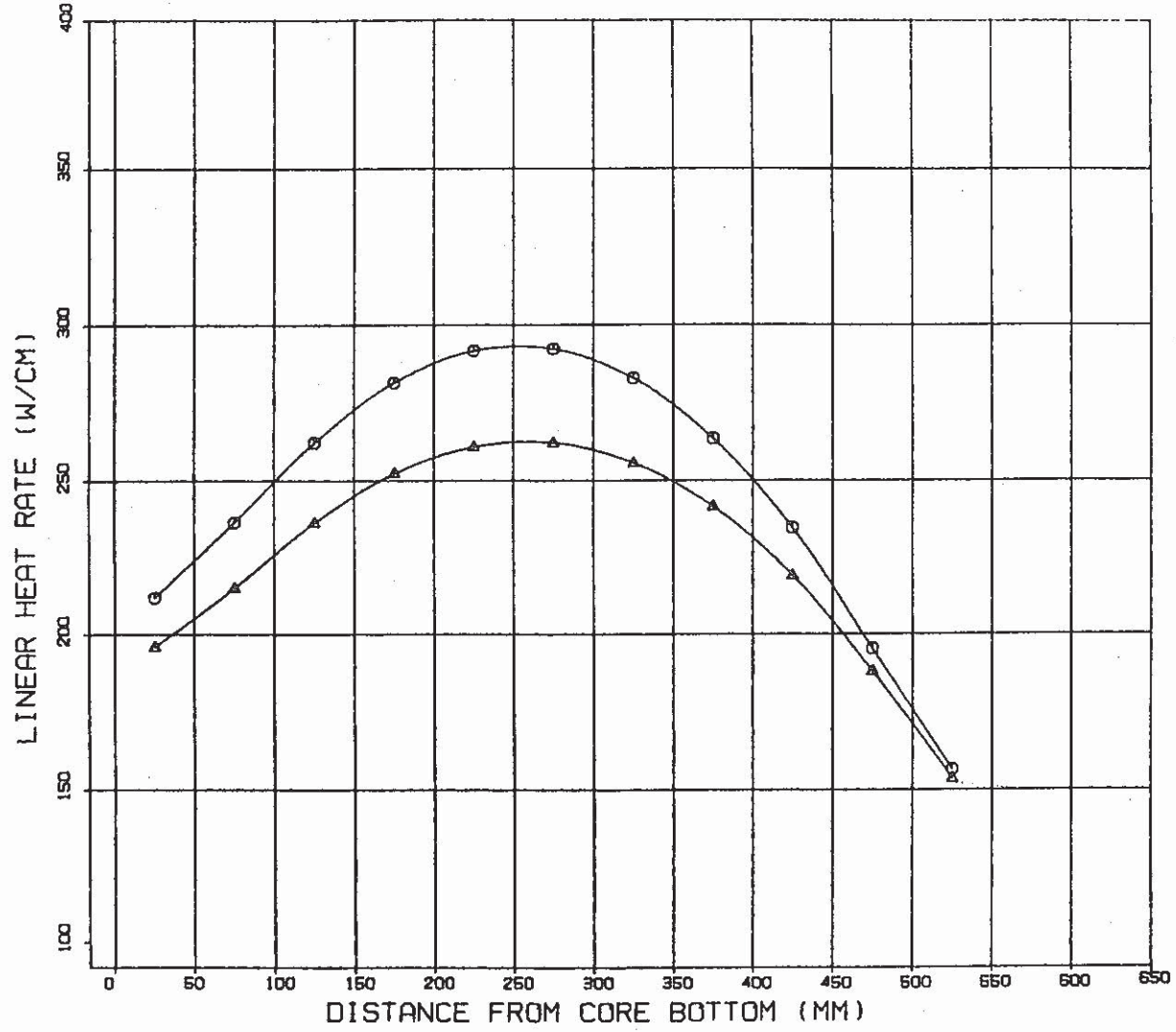


Fig.5 Linear heat rate distribution (9164 pin)

S/A FAB NO. : PF0029

PIN NO. : 64

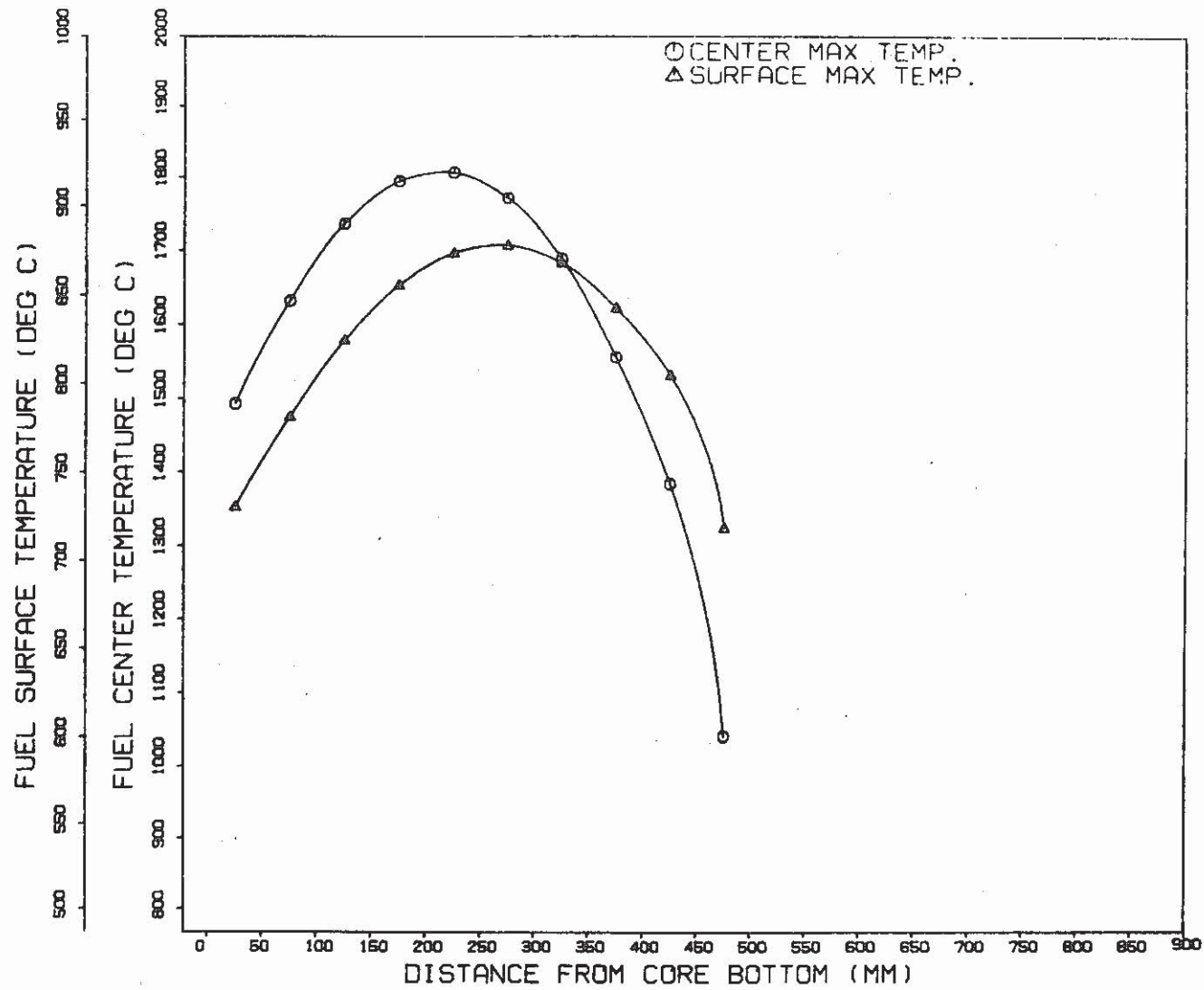


Fig.6 Fuel temperature distribution (9164 pin)

S/A FAB NO. : PFJ029 PIN NO. : 64

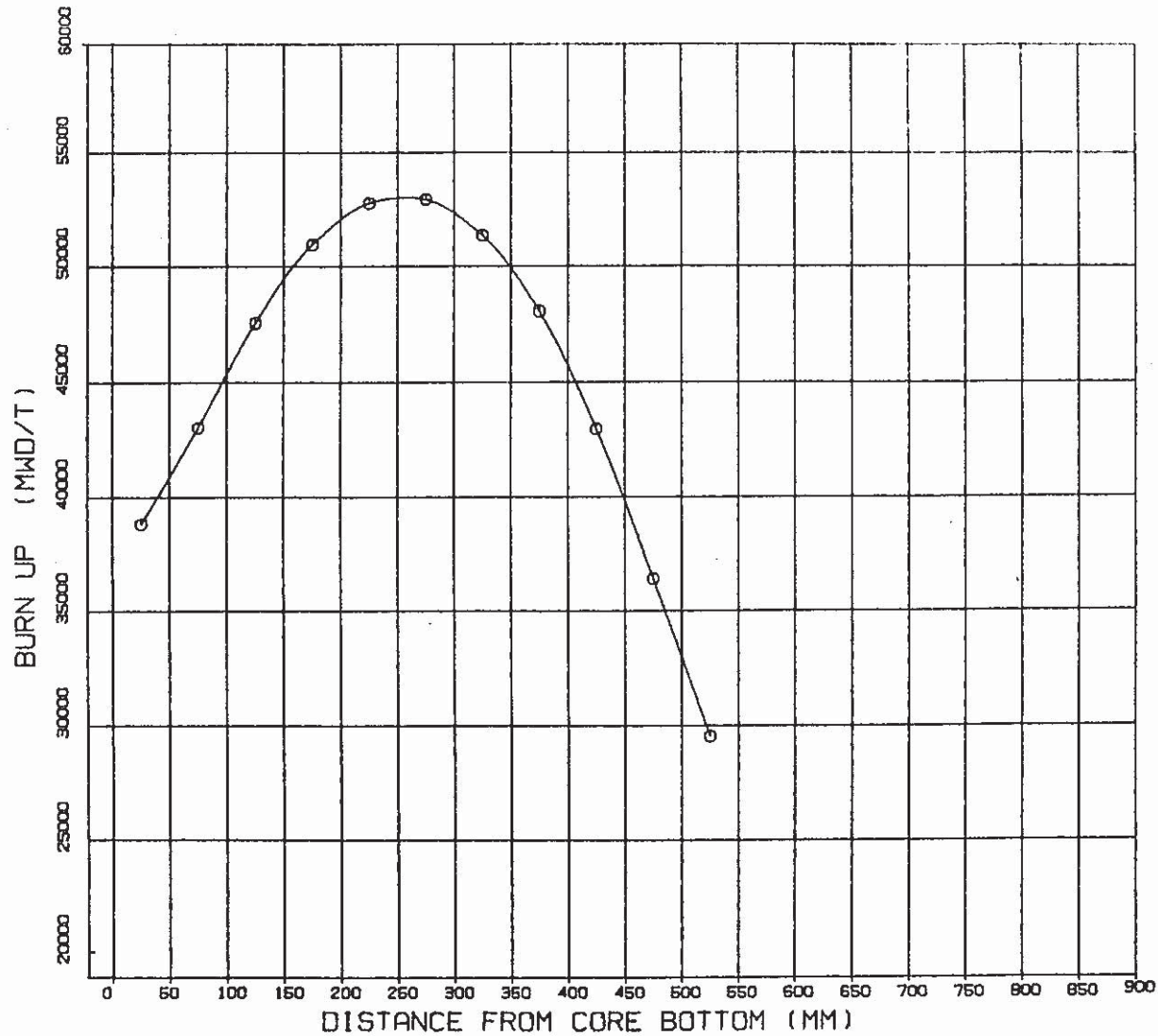


Fig.7 Burnup distribution(9164 pin)

S/A FAB NO. : PFD029 PIN NO. : 58

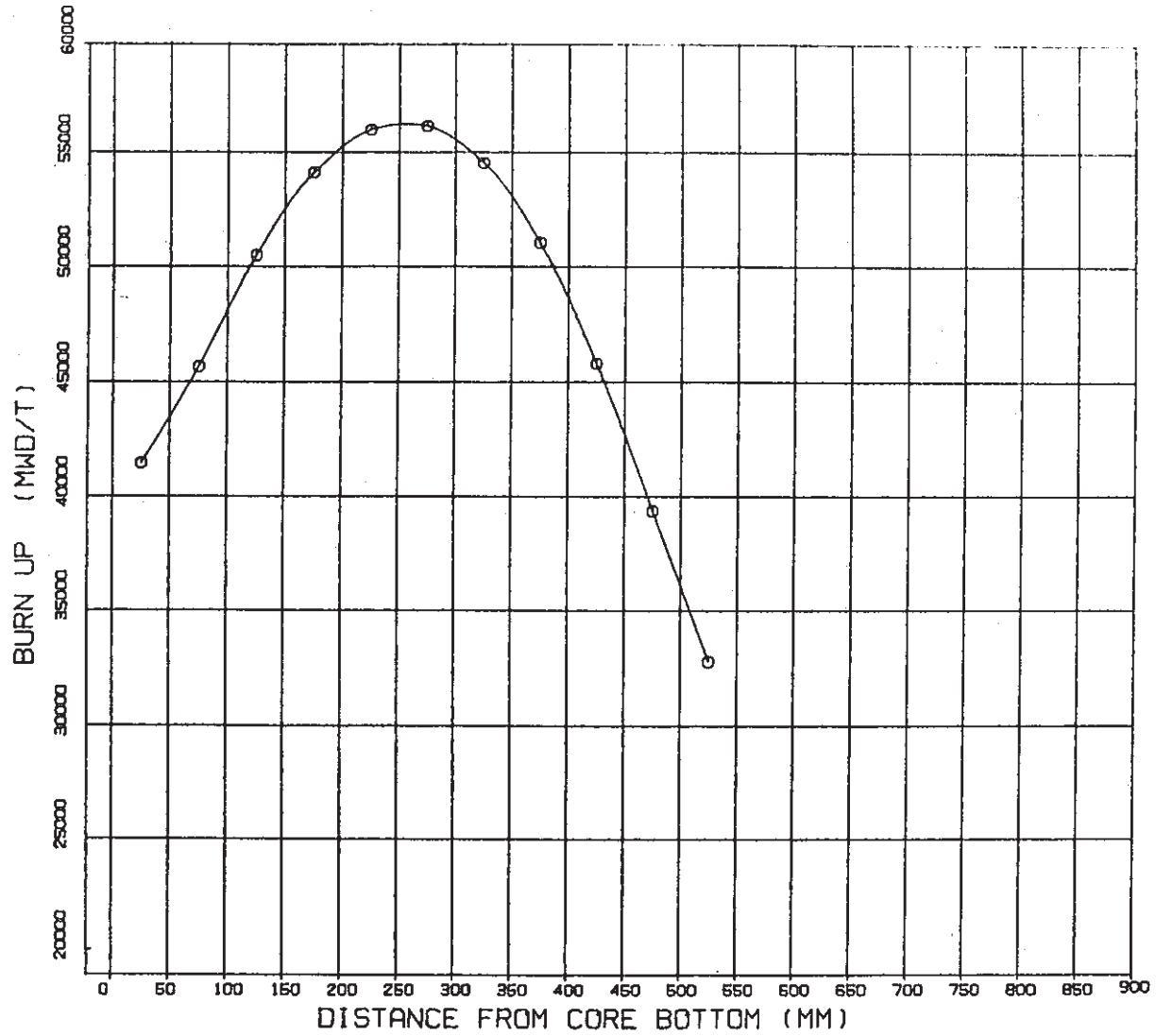


Fig.8 Burnup distribution (9158pin)

S/A FAB NO. · PFD029

PIN NO. : 70

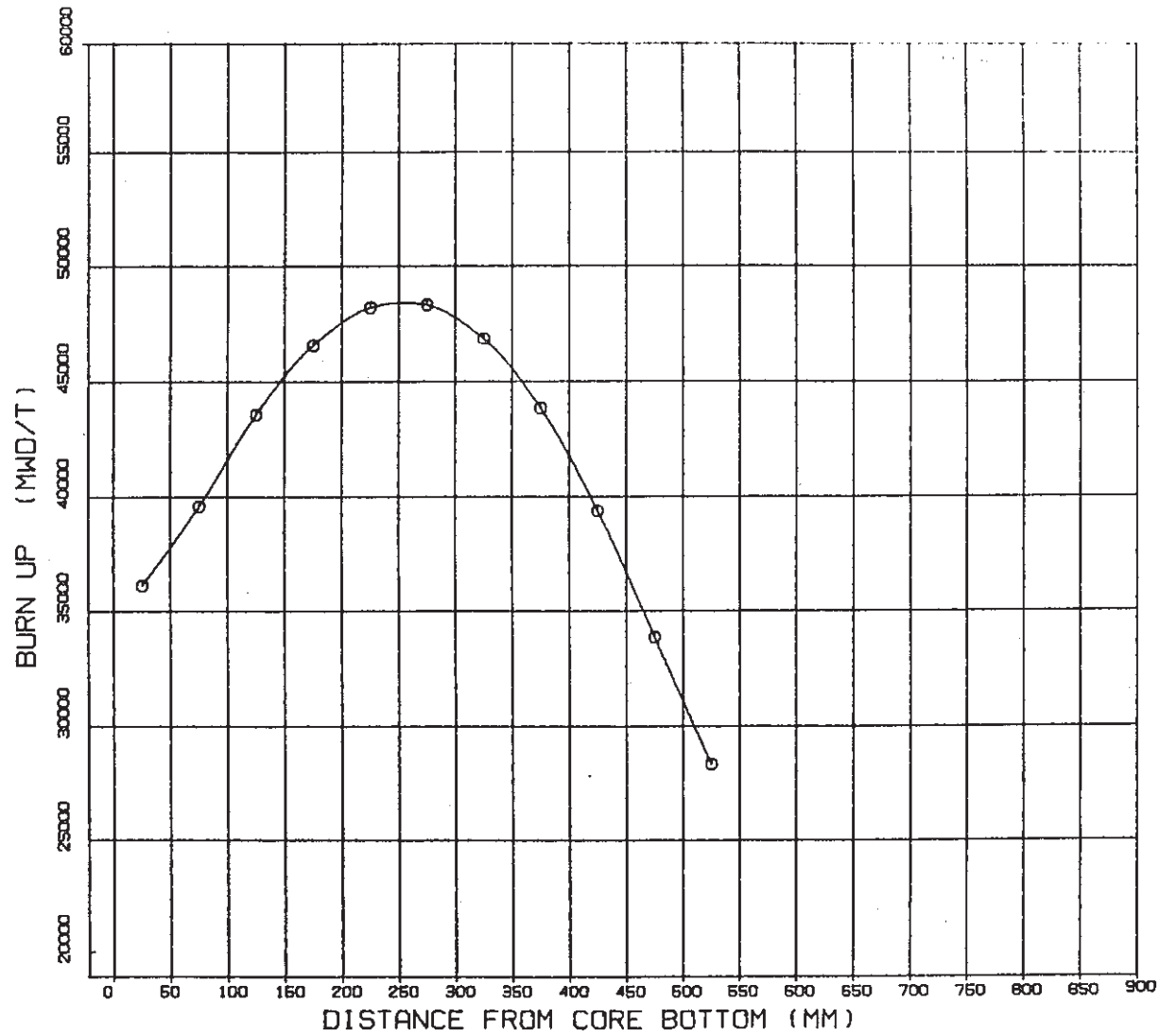


Fig.9 Burnup distribution (9170 pin)

ピン分類	代表ピン	高出力ピン	低出力ピン
ピン No.	9164	9158	9170
被覆管メーカー	K	K	K

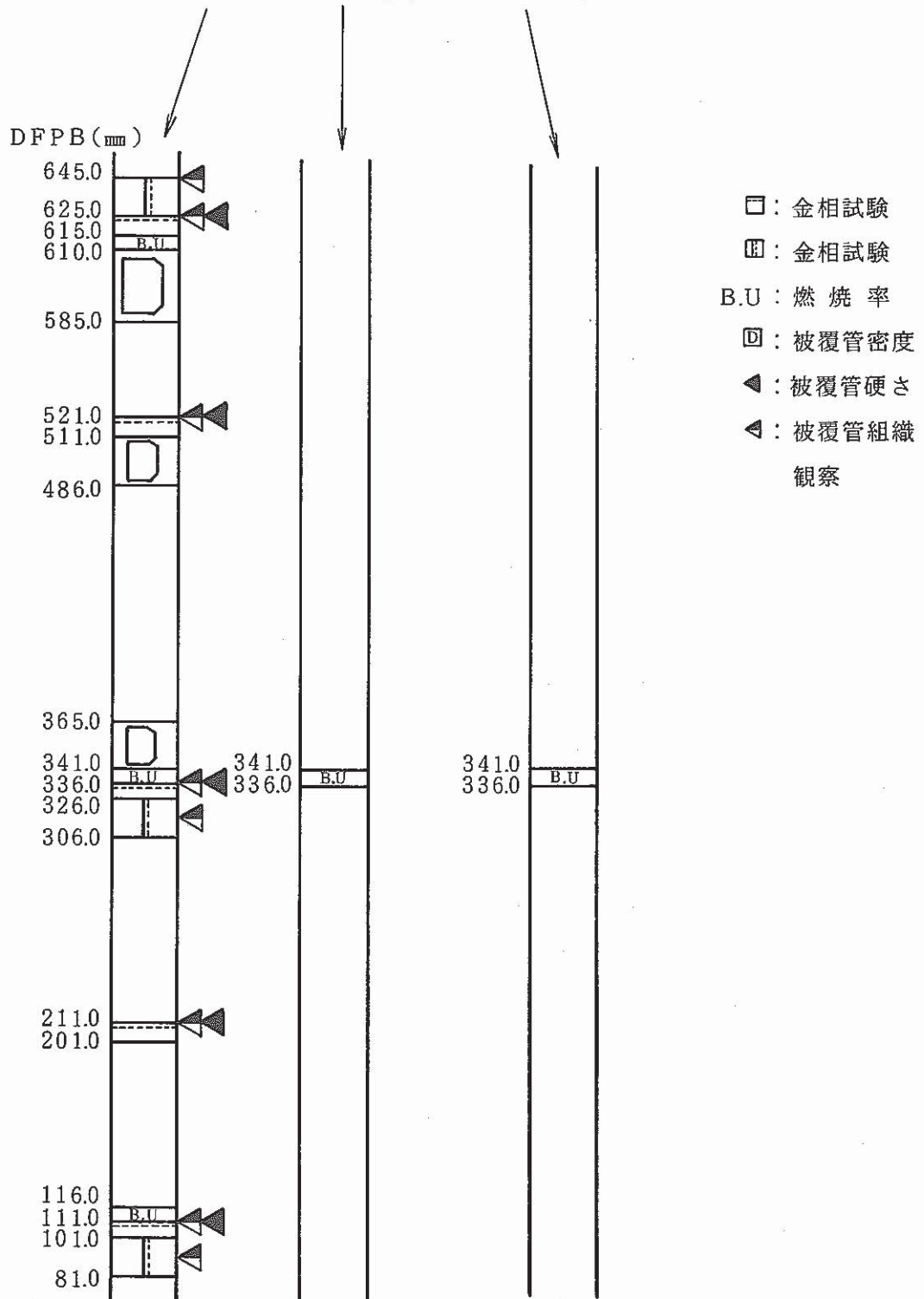


Fig. 10 Sampling of specimens (PFD029)

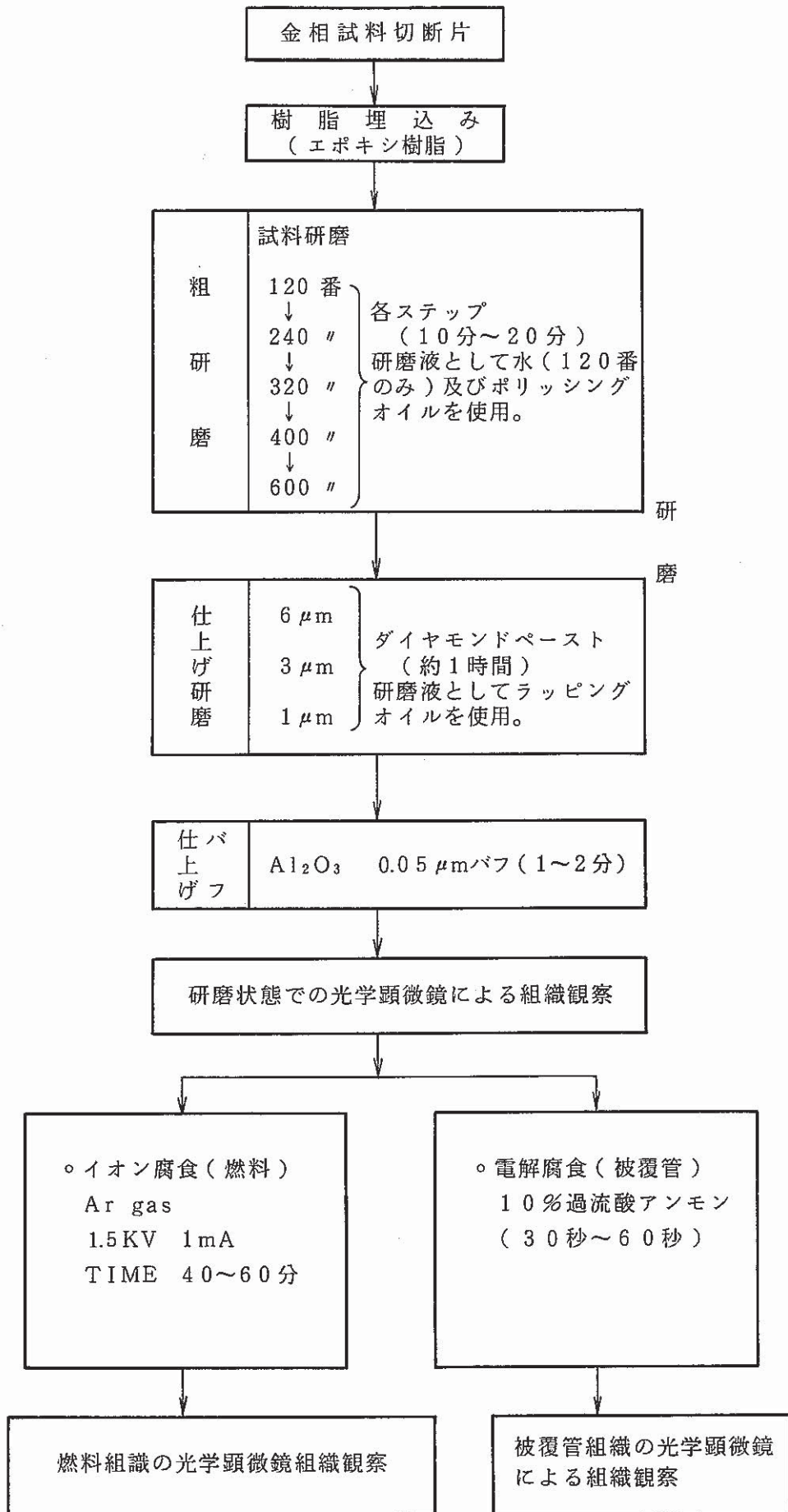


Fig. 11 Flow diagram of metallographic examination in AGS

S/R FAB NO. : PFD029 PIN NO. : 64 MAX ϕ EOL Δ

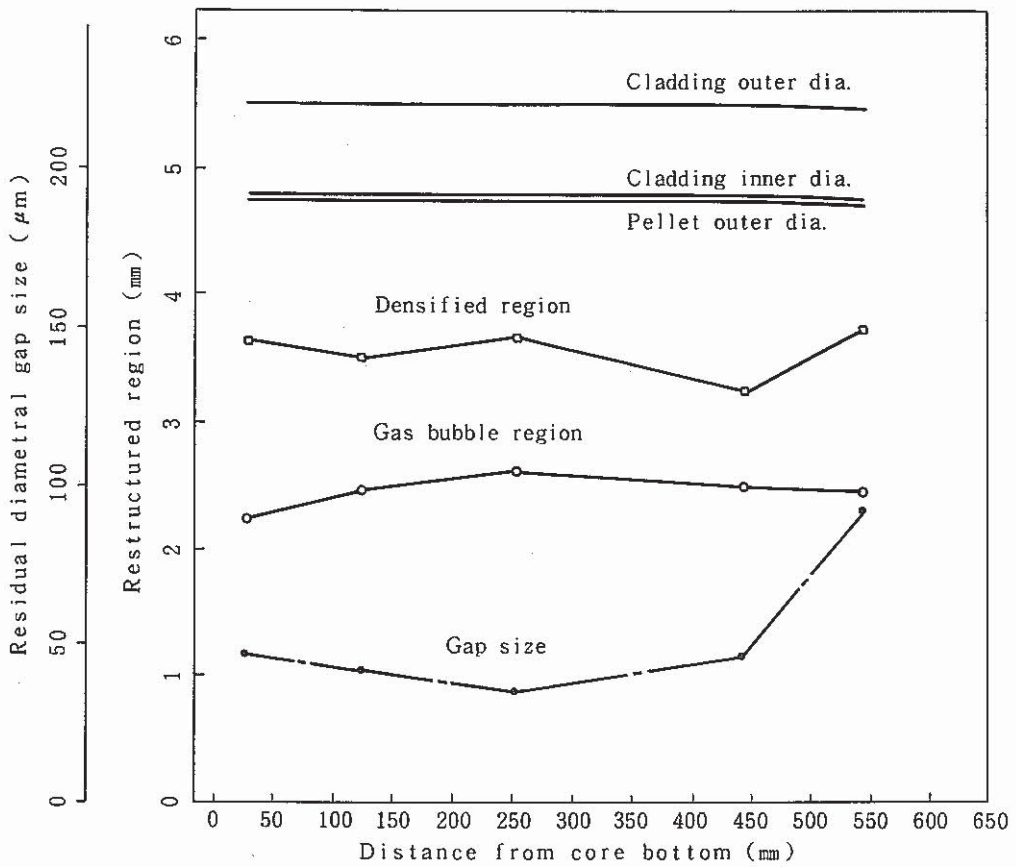
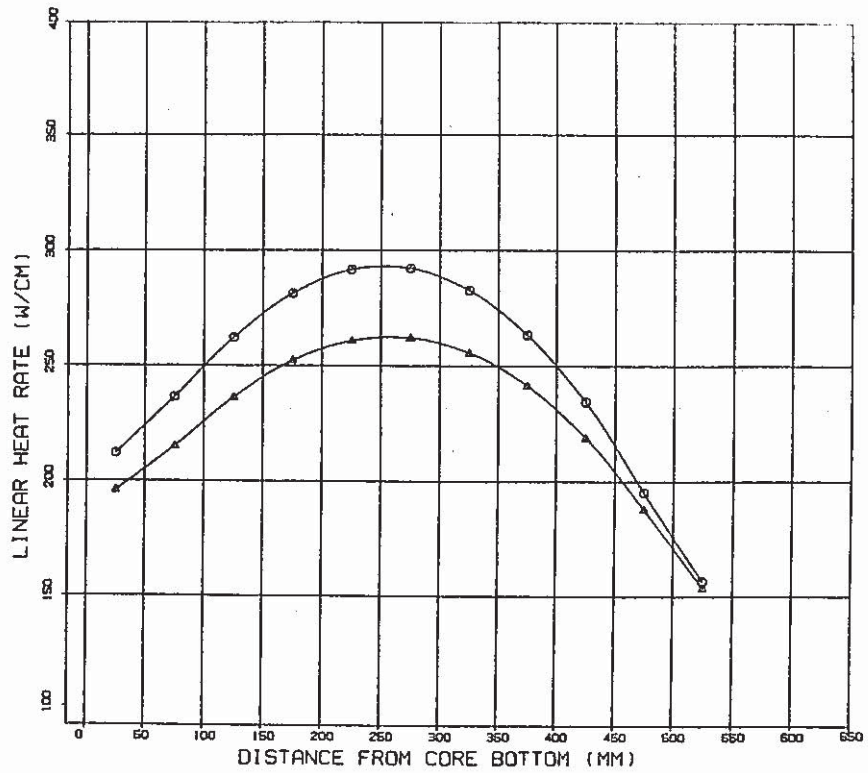


Fig. 12 Axial profile of restructured region

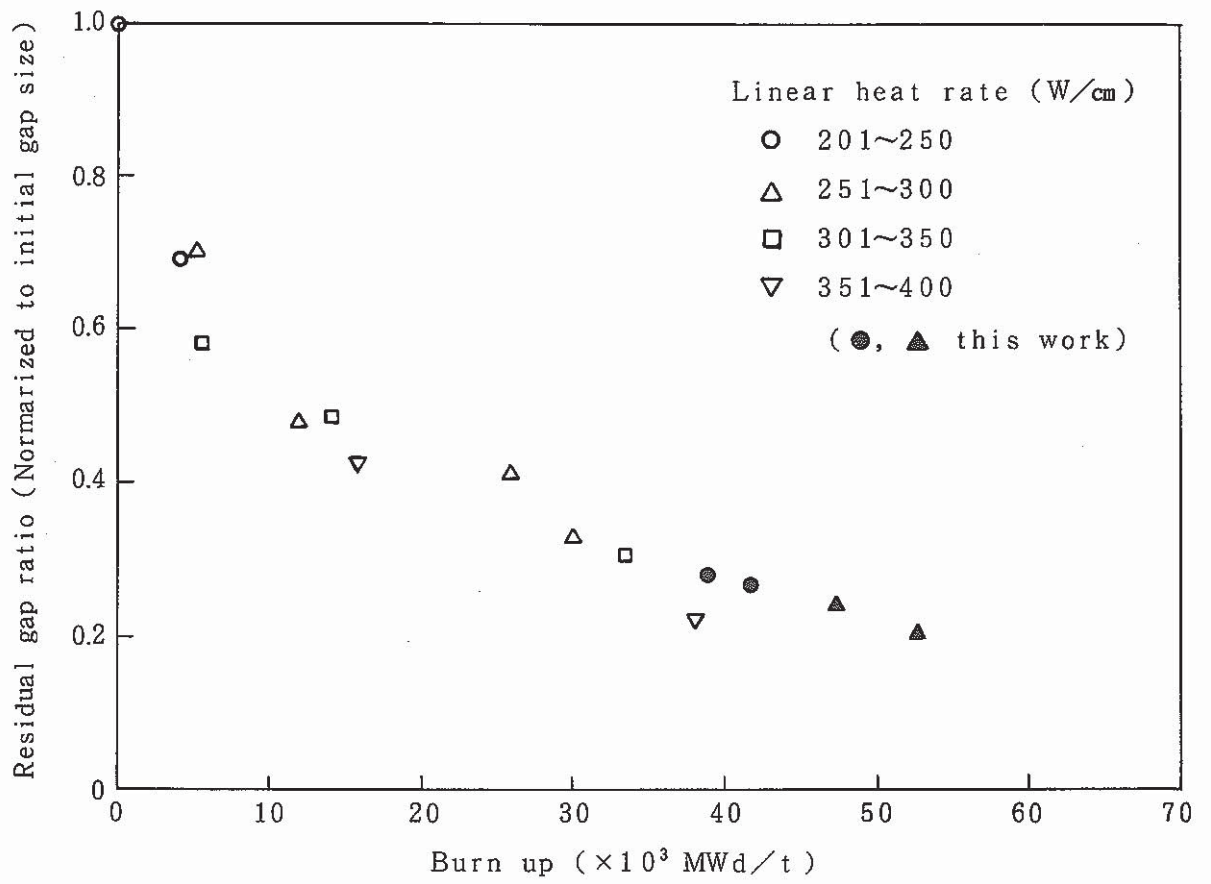


Fig. 13 Residual gap ratio as a function of burnup

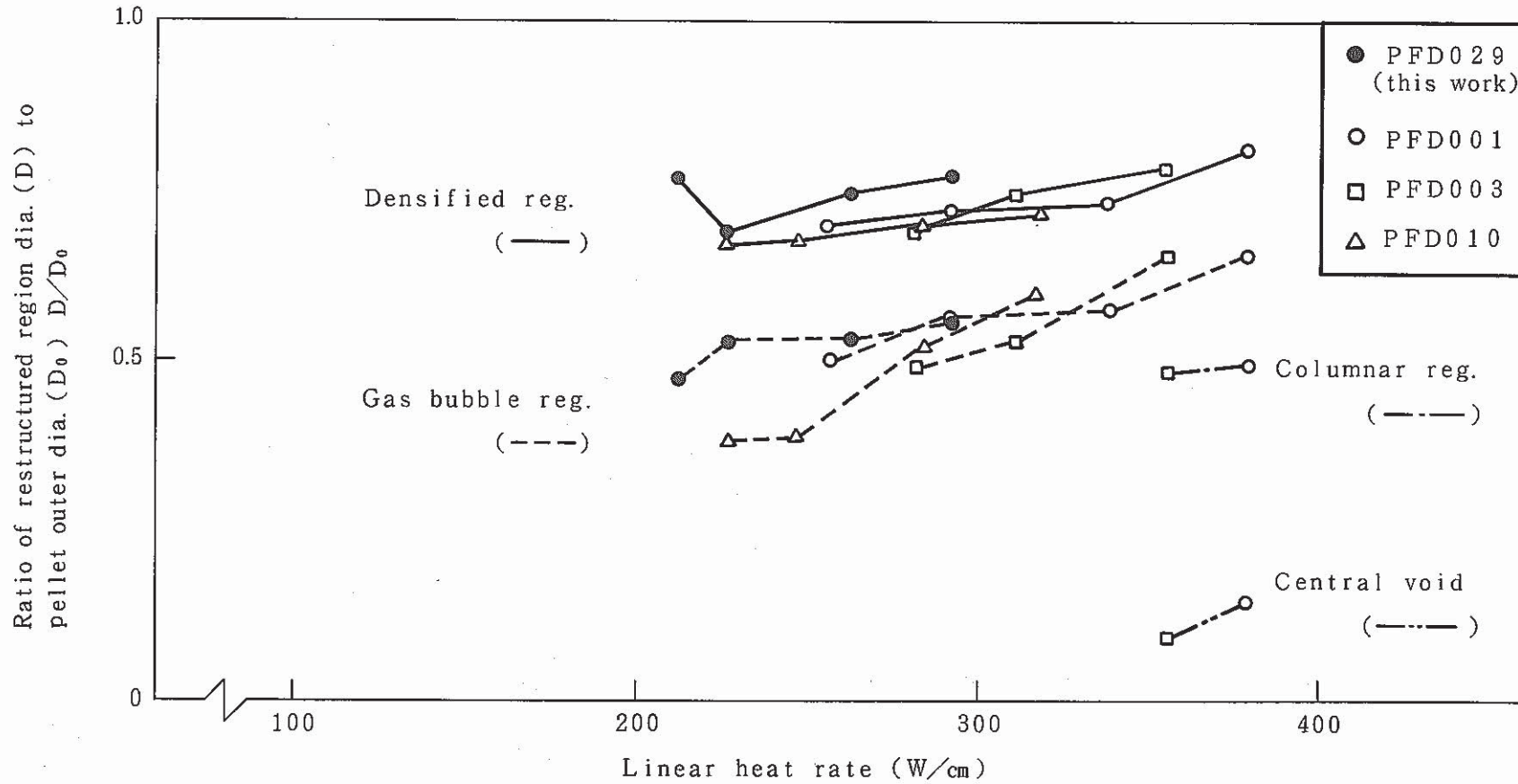


Fig. 14 Restructured region (D/D_0) as a function of linear heat rate

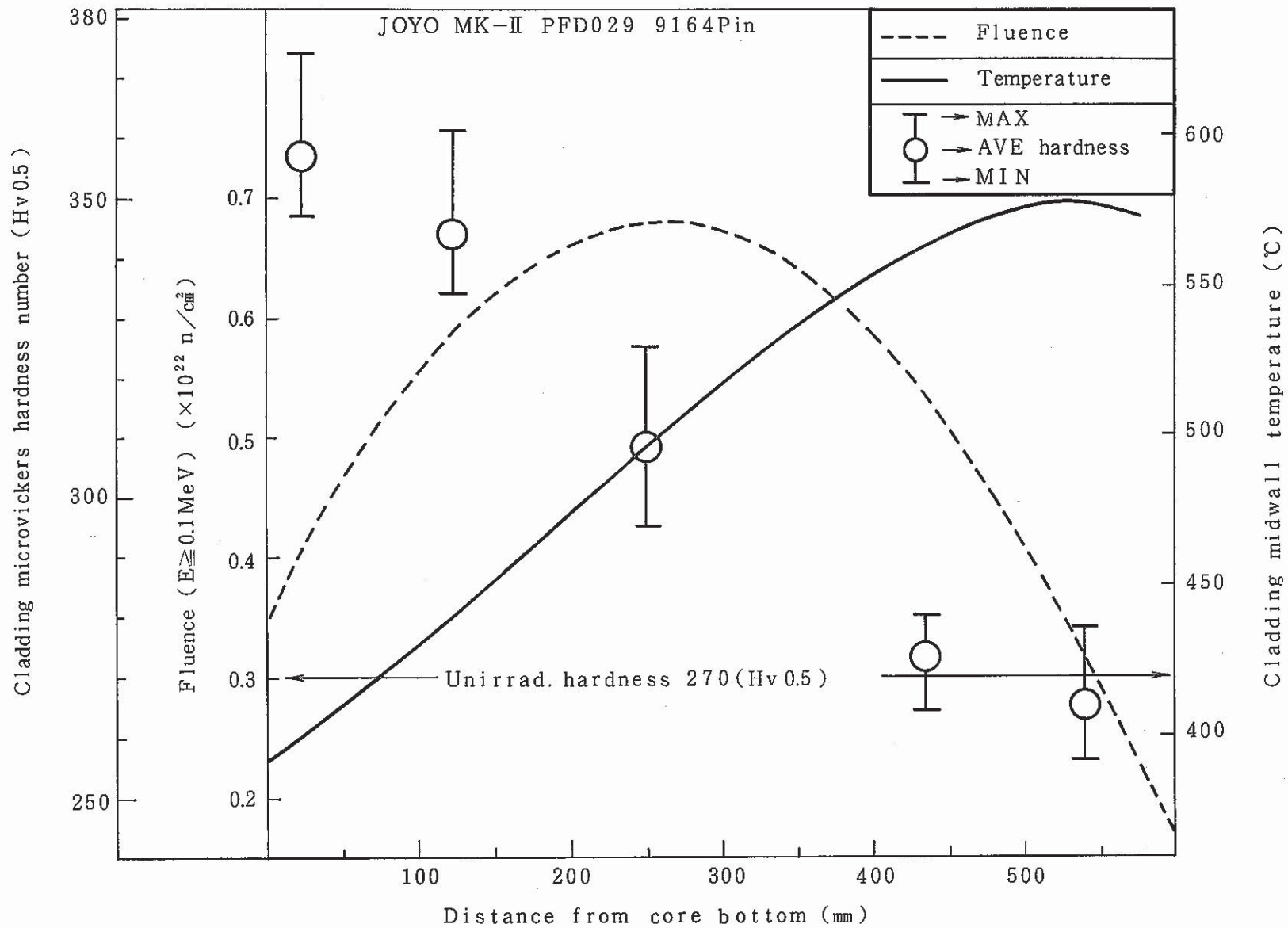


Fig. 15 Relation between hardness, clad temperature and fluence at various position for JOYO MK-II fuel pin (PFD029, 9164 pin)

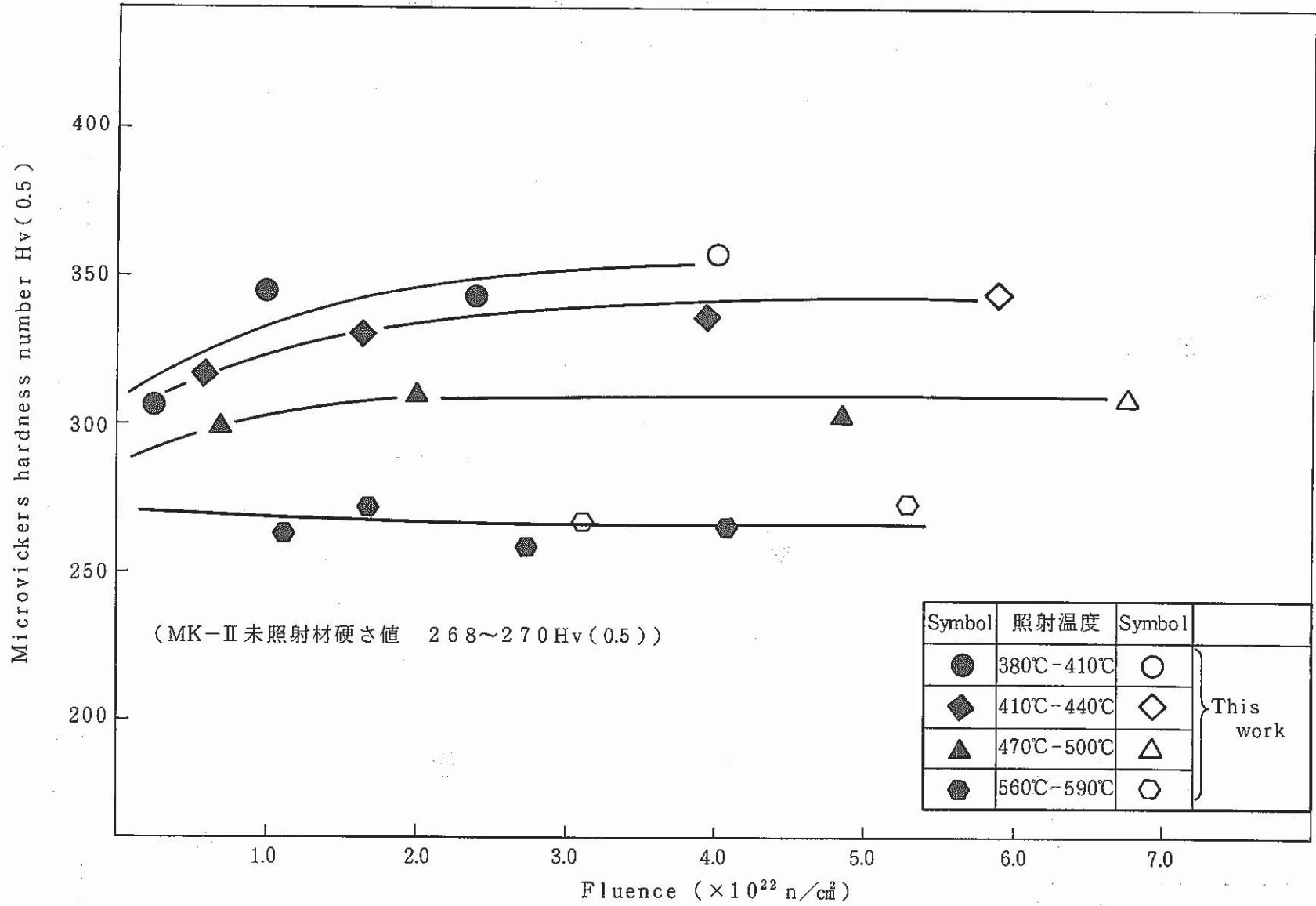


Fig.16 Effect of fluence on cladding hardness of JOYO MK-II driver fuel

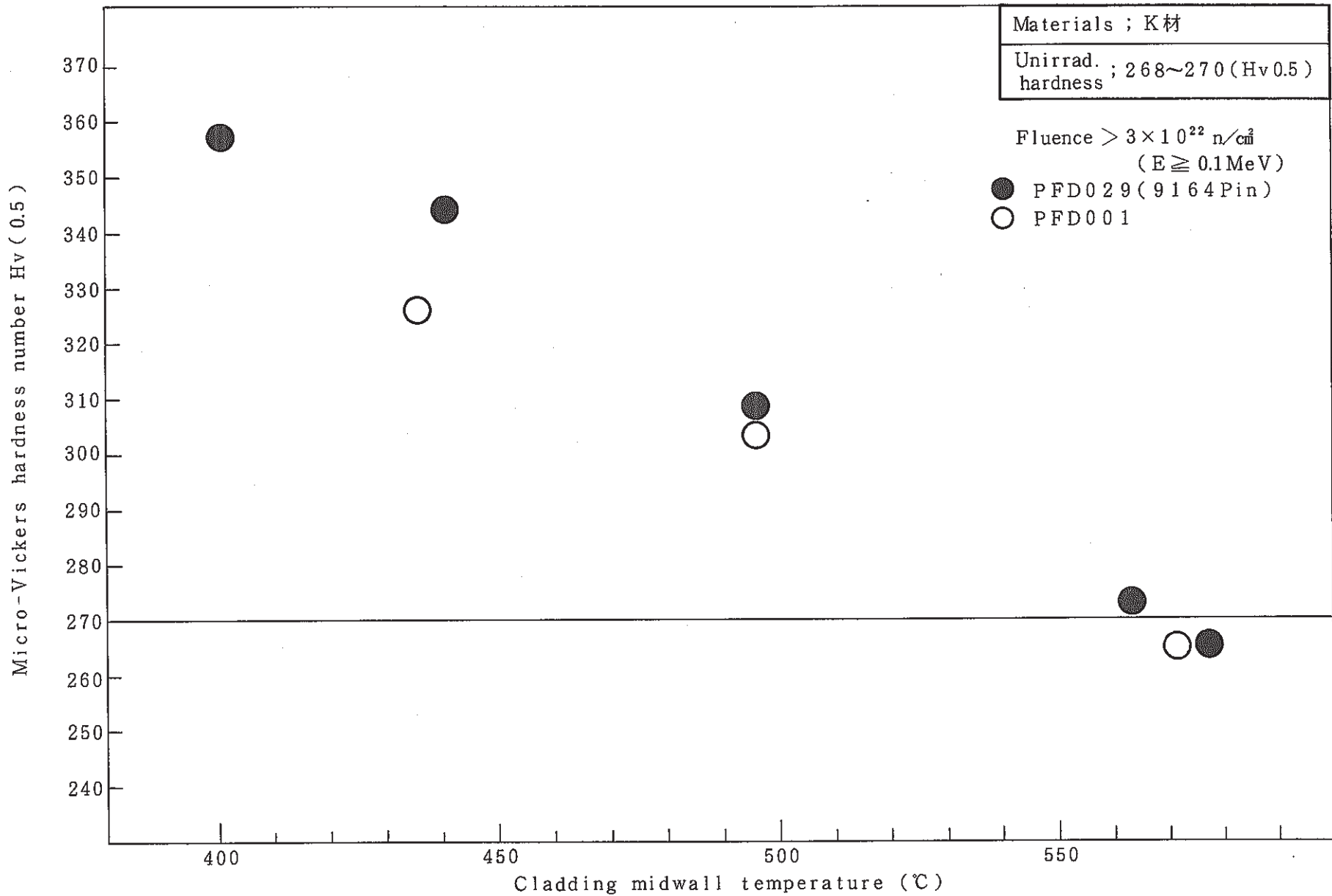


Fig. 17 Relation between hardness and temperature for JOYO MK-II fuel pin

S/A NAME PFD029
 PIN NO. 9164

-44-

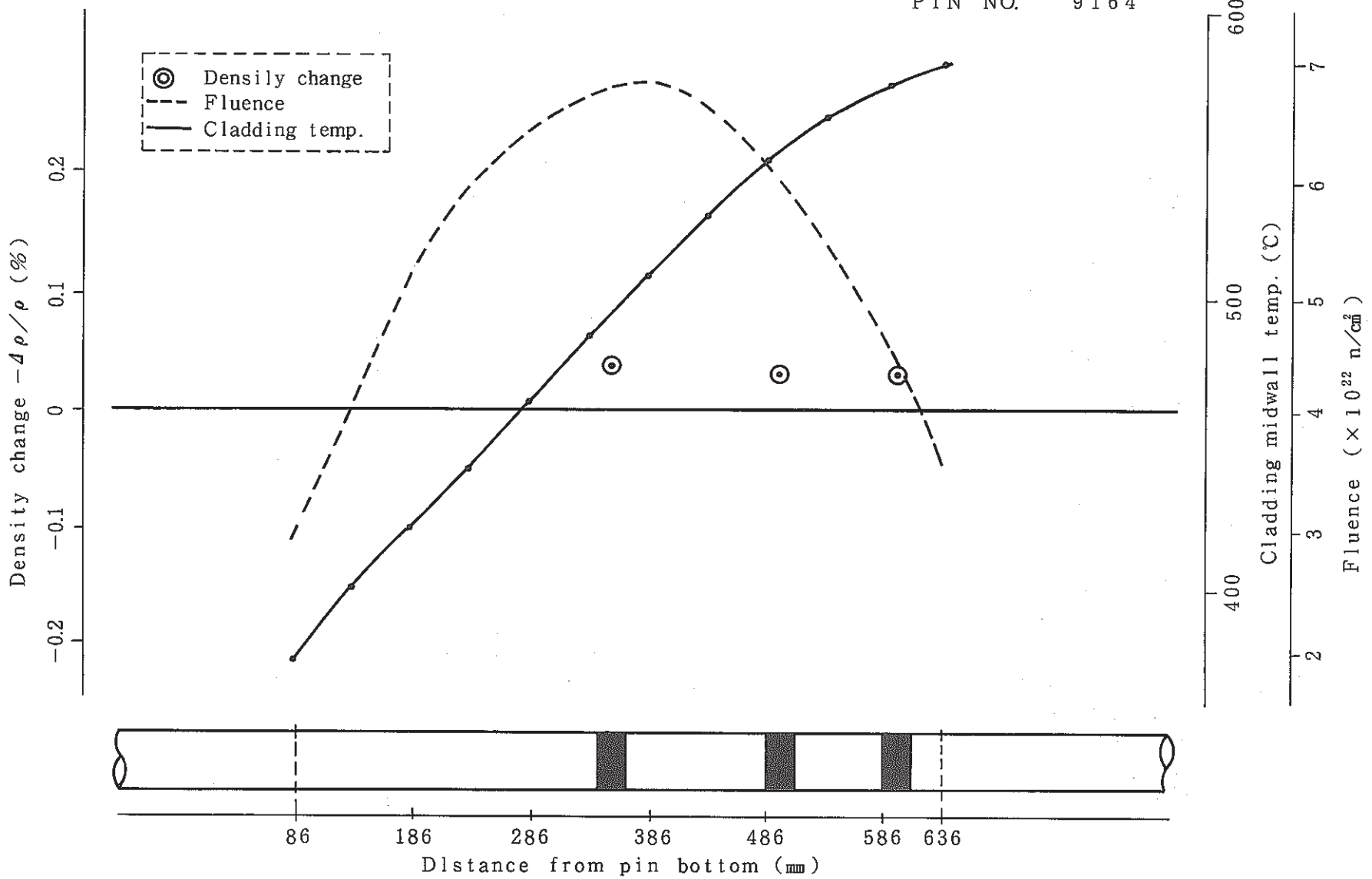
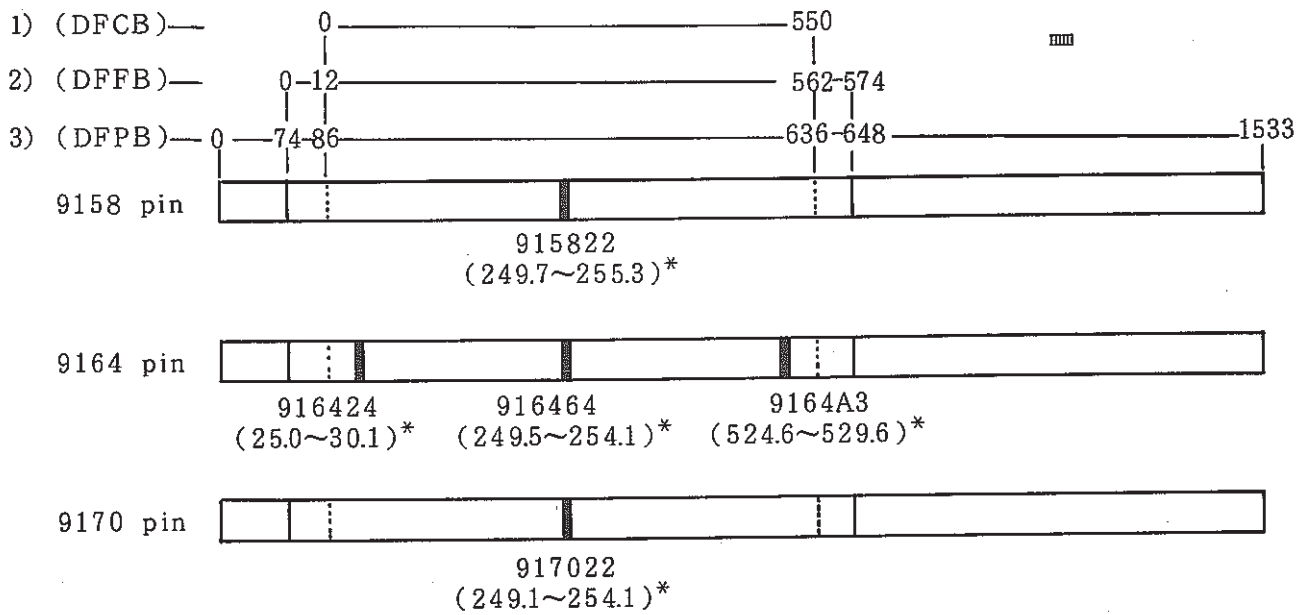
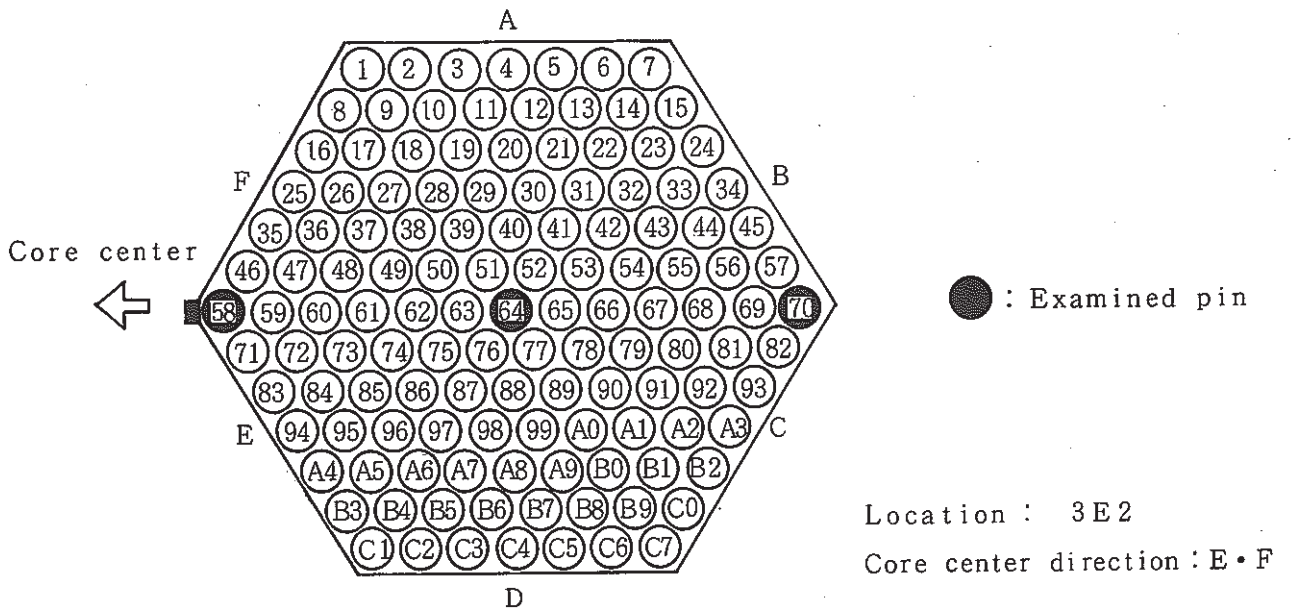


Fig.18 Cladding density change



* DFCB

- 1) Distance from core fuel bottom
- 2) Distance from fuel bottom
- 3) Distance from pin bottom

Fig. 19 Cutting diagram of PFD029 fuel pins for burnup measurement

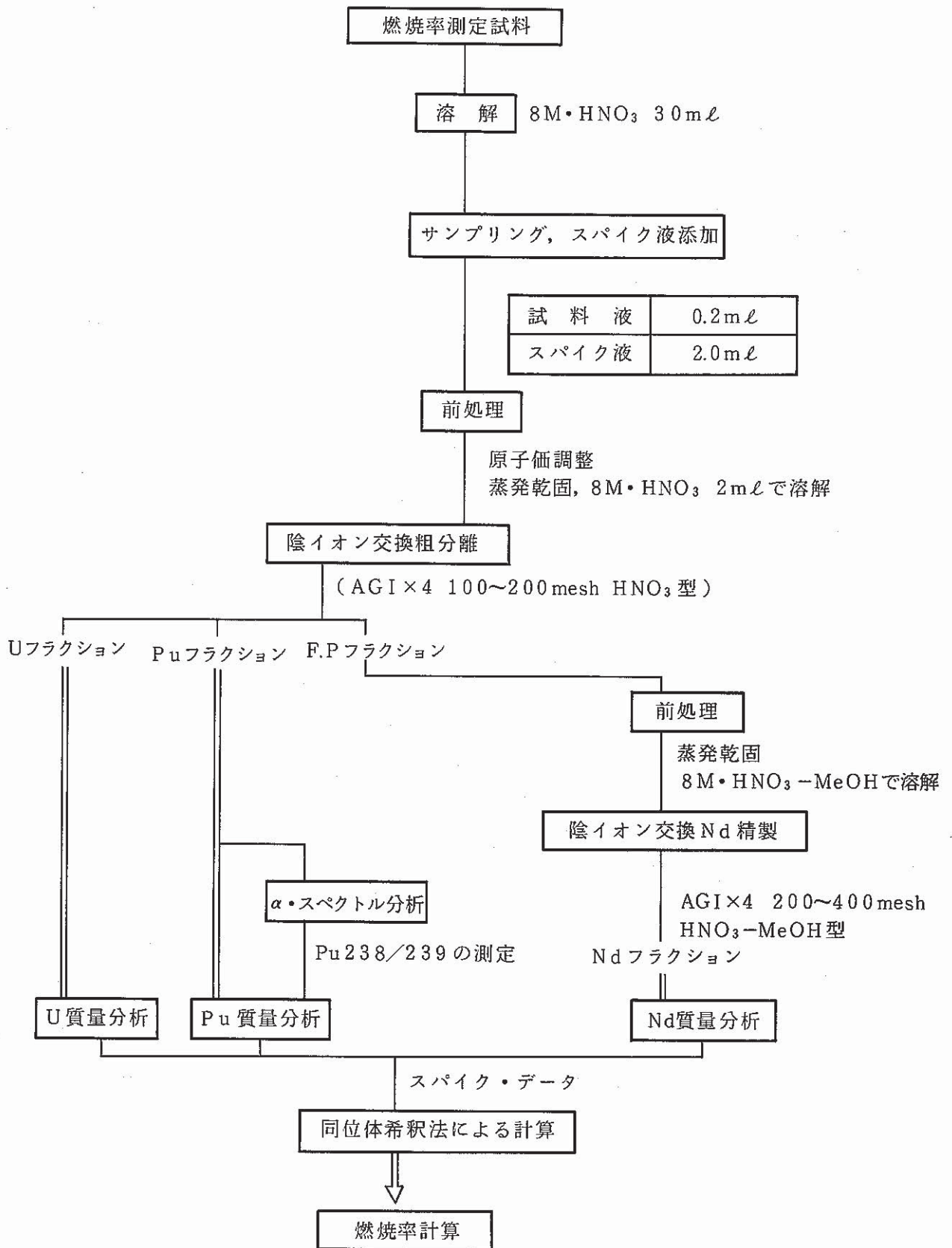


Fig. 20 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

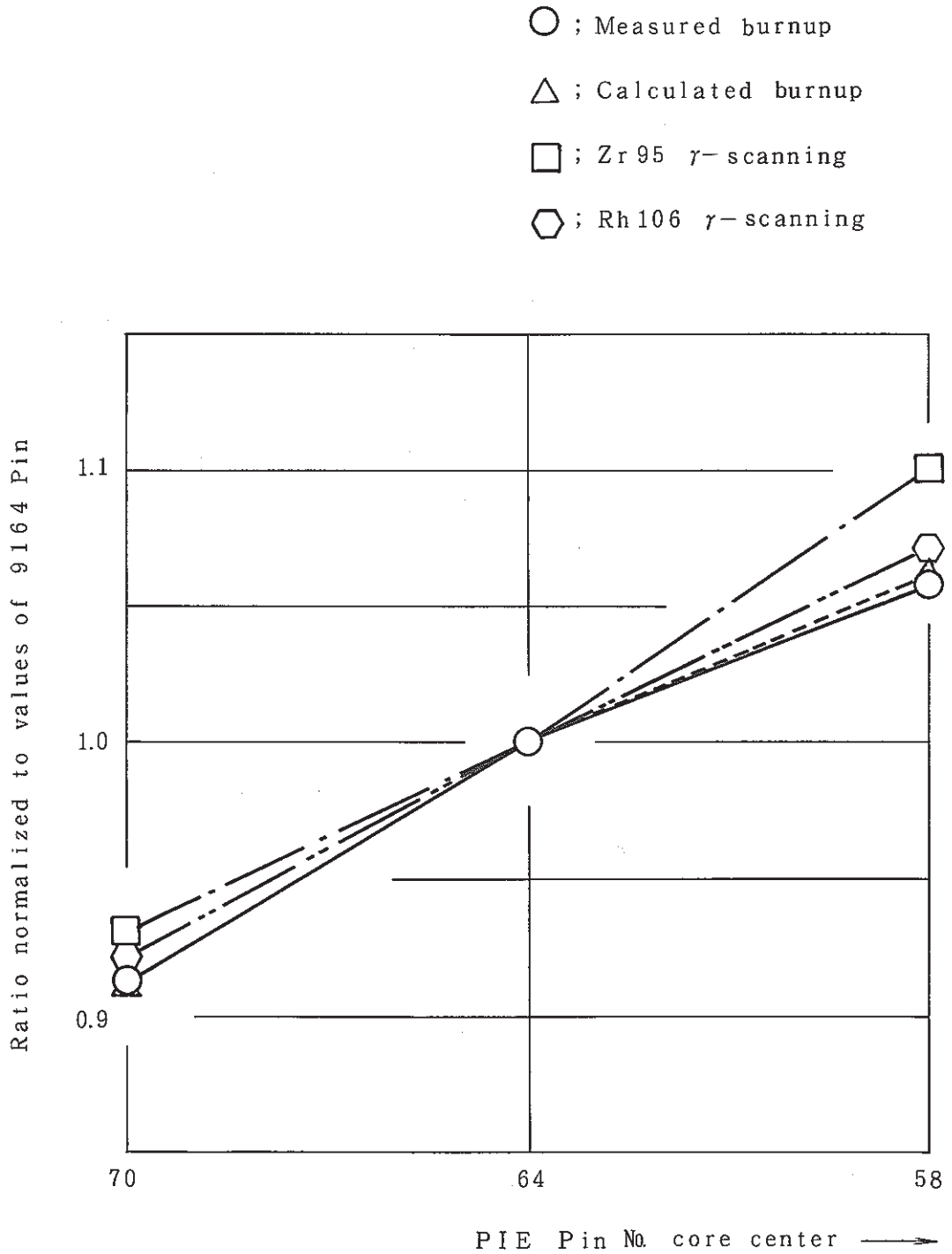


Fig. 21 Burnup radial distribution of PFD029 subassembly

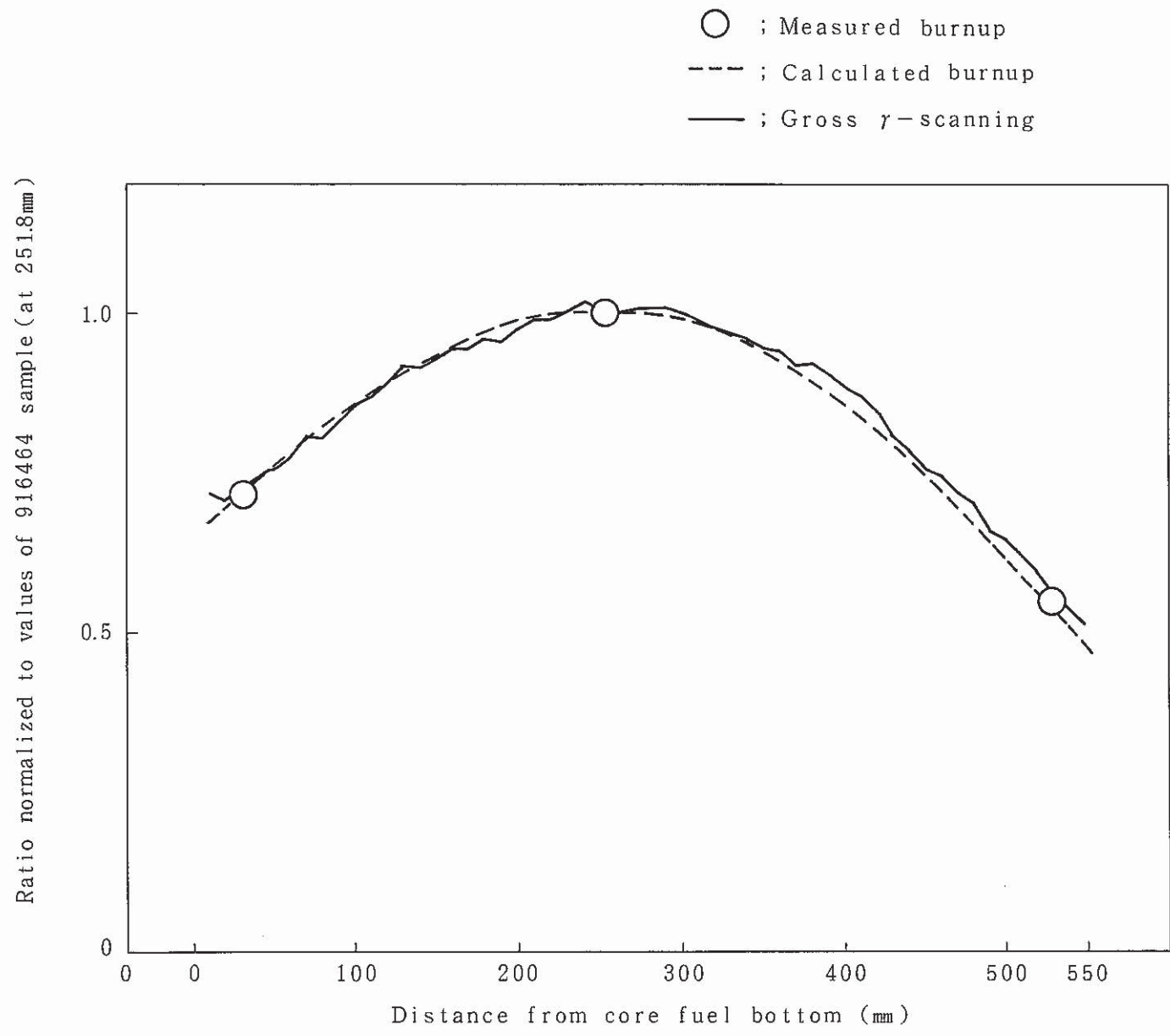


Fig. 22 Burnup axial distribution of PFD029 (9164 Pin)

S/A No.	JOYO-PFD029
Pin No.	9164
S/A Peak Burnup	56210MWD/MTM

As polished

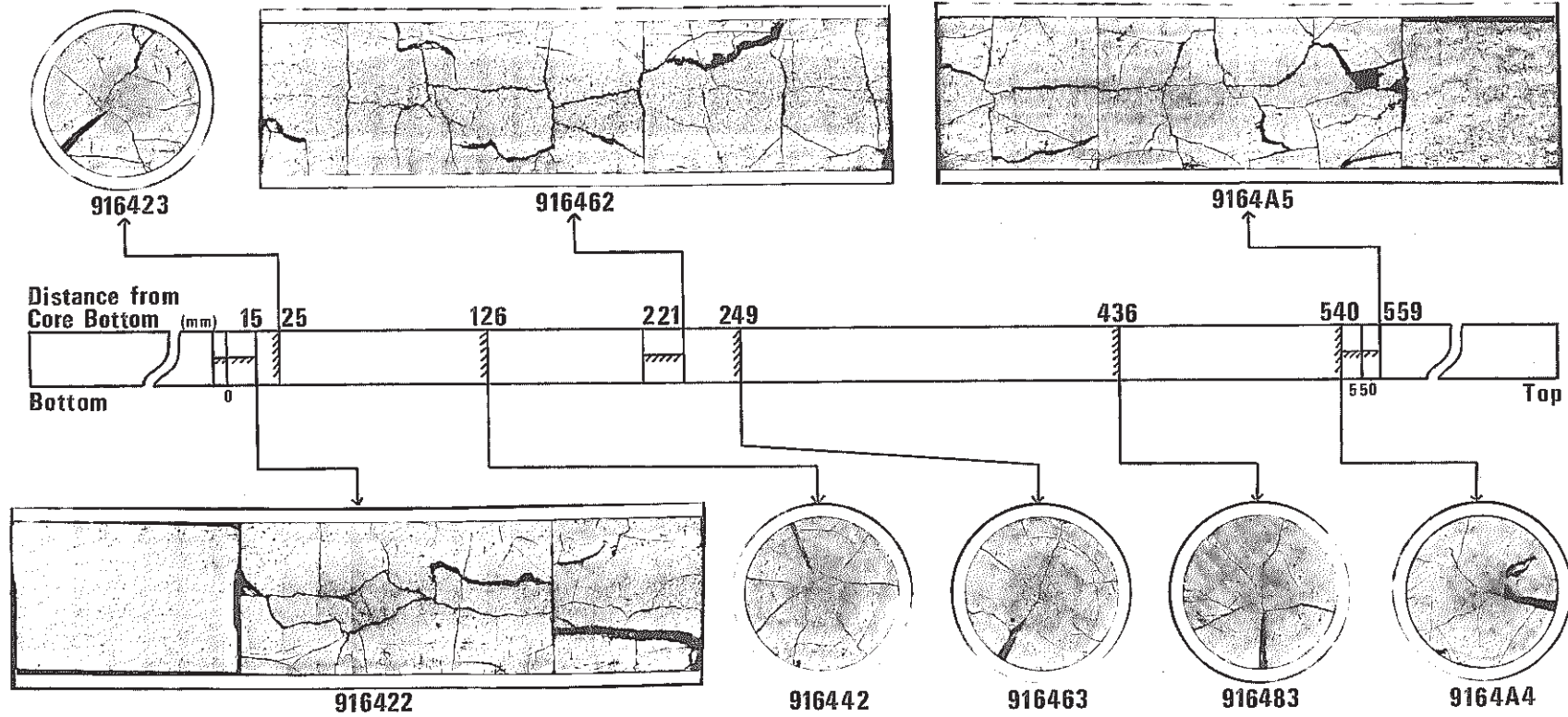
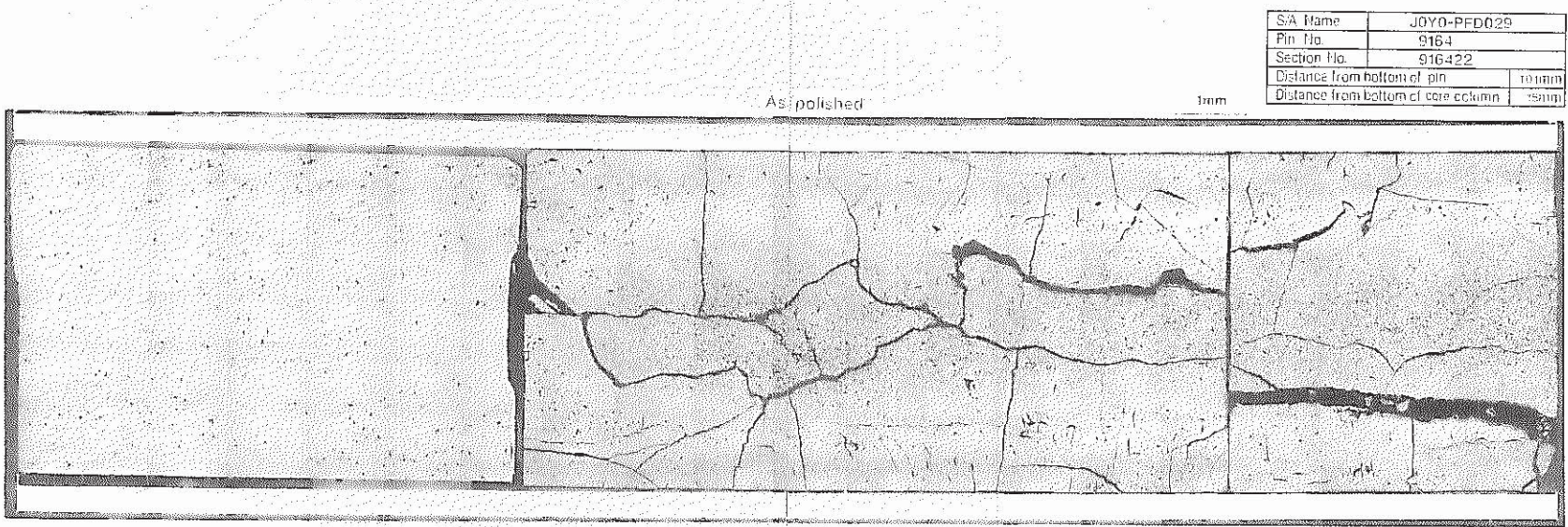


Photo. 1 Macrographs of JOYO MK-II core fuel (9164 pin)



- 5 0 -

Photo. 2 Postirradiation ceramographs of JOYO MK-II core fuel (916422 sample)

S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916423	
Distance from bottom of pin		111mm
Distance from bottom of core column		25mm

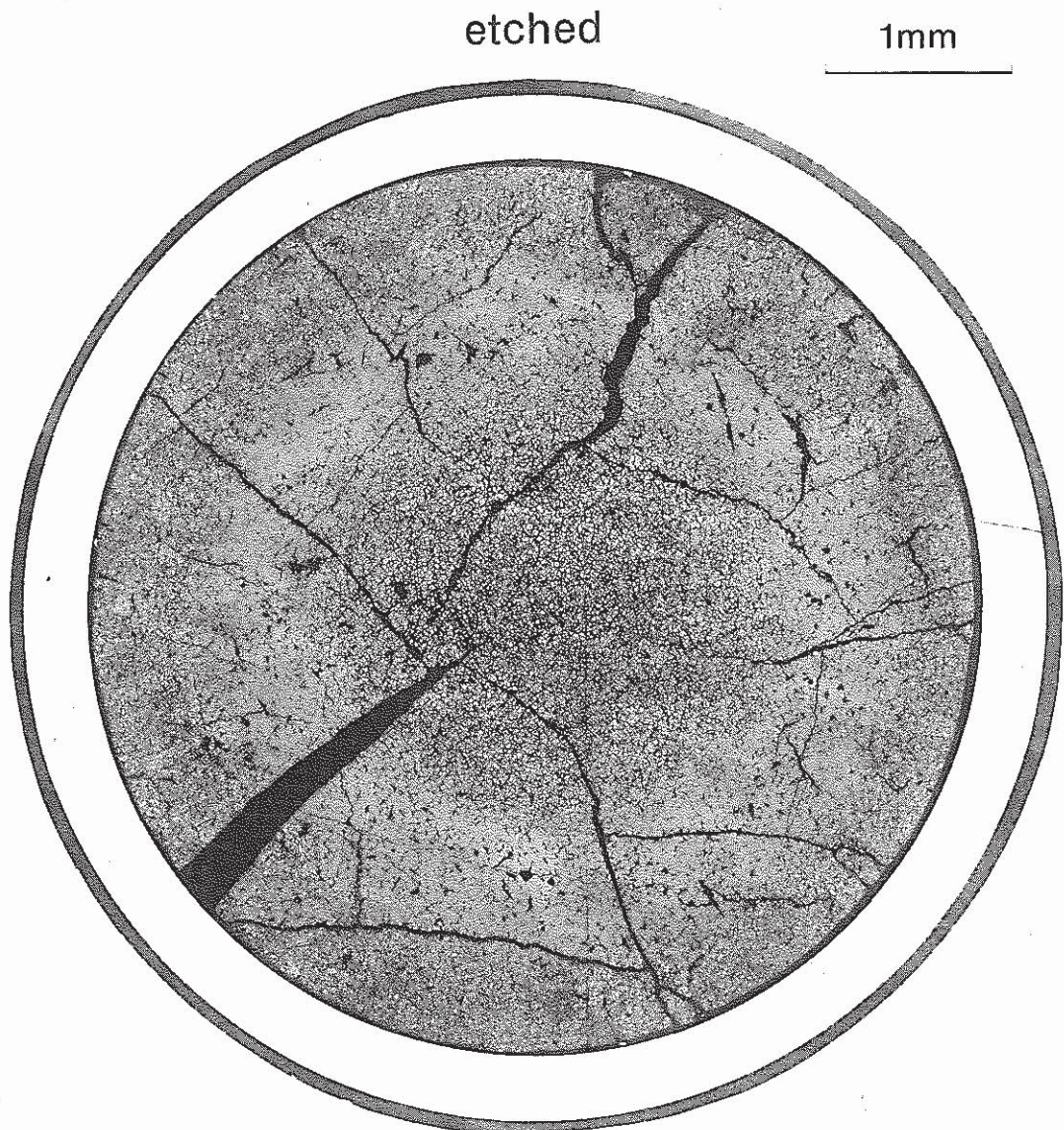
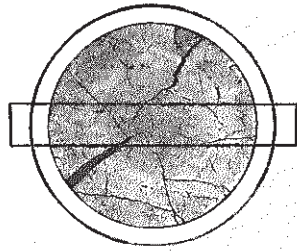


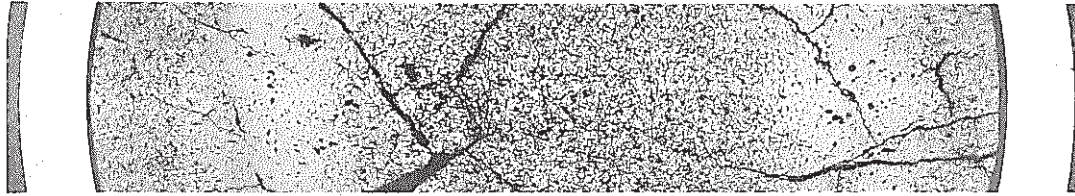
Photo. 3 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916423 sample)



S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916423	
Distance from bottom of pin	111mm	
Distance from bottom of core column	25mm	

etched

1mm



0.1mm

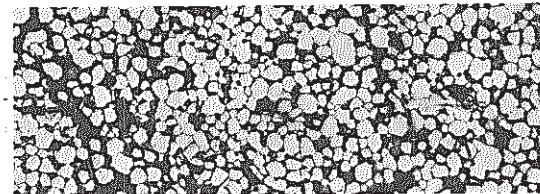
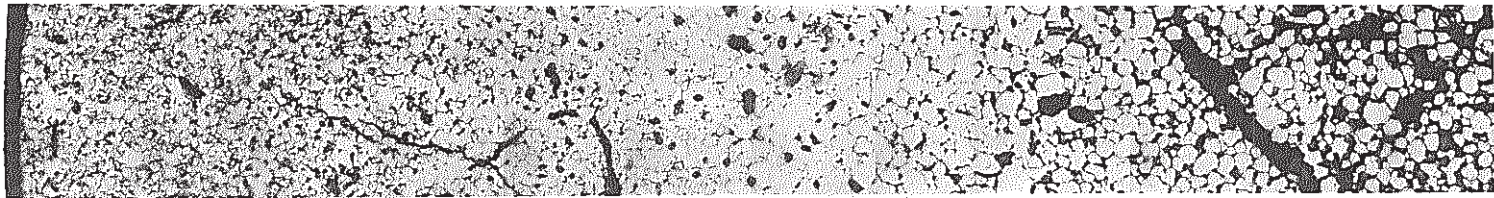


Photo. 4 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916423 sample)

S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916442	
Distance from bottom of pin		212mm
Distance from bottom of core column		126mm

As polished

1mm

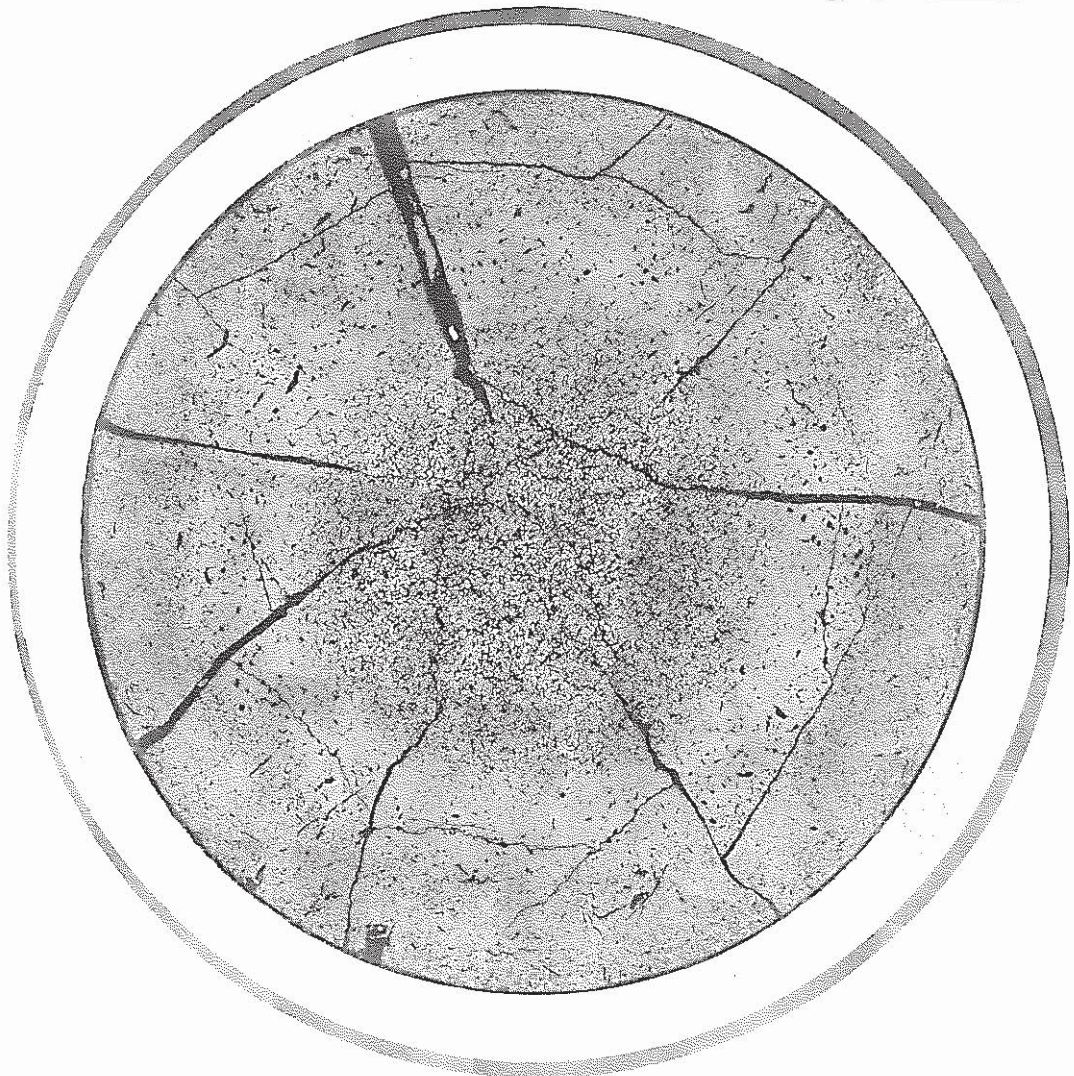
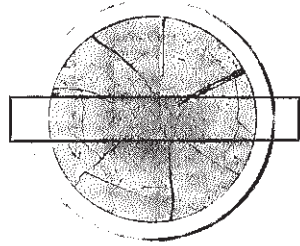


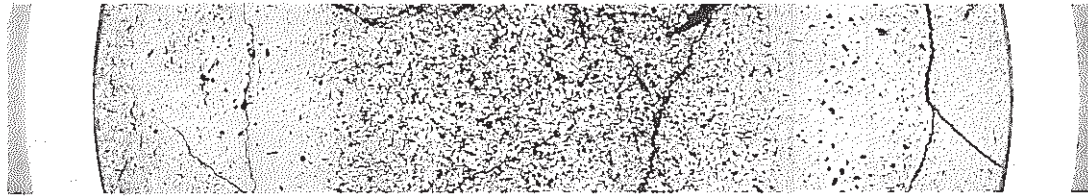
Photo. 5 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916442 sample)



S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916442	
Distance from bottom of pin		212mm
Distance from bottom of core column		126mm

As polished

1mm



0.1mm

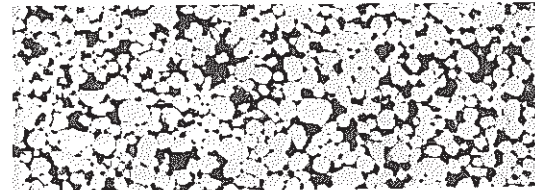
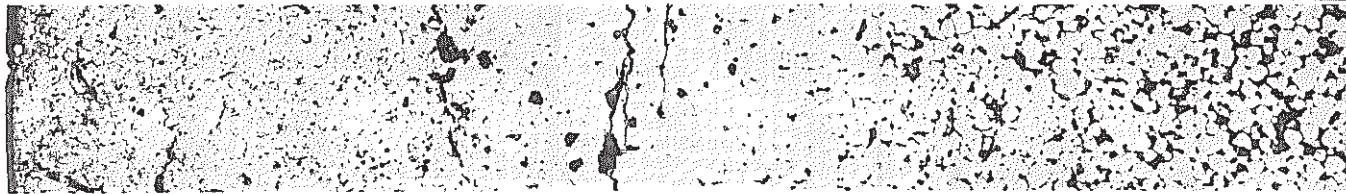


Photo. 6 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916442 sample)

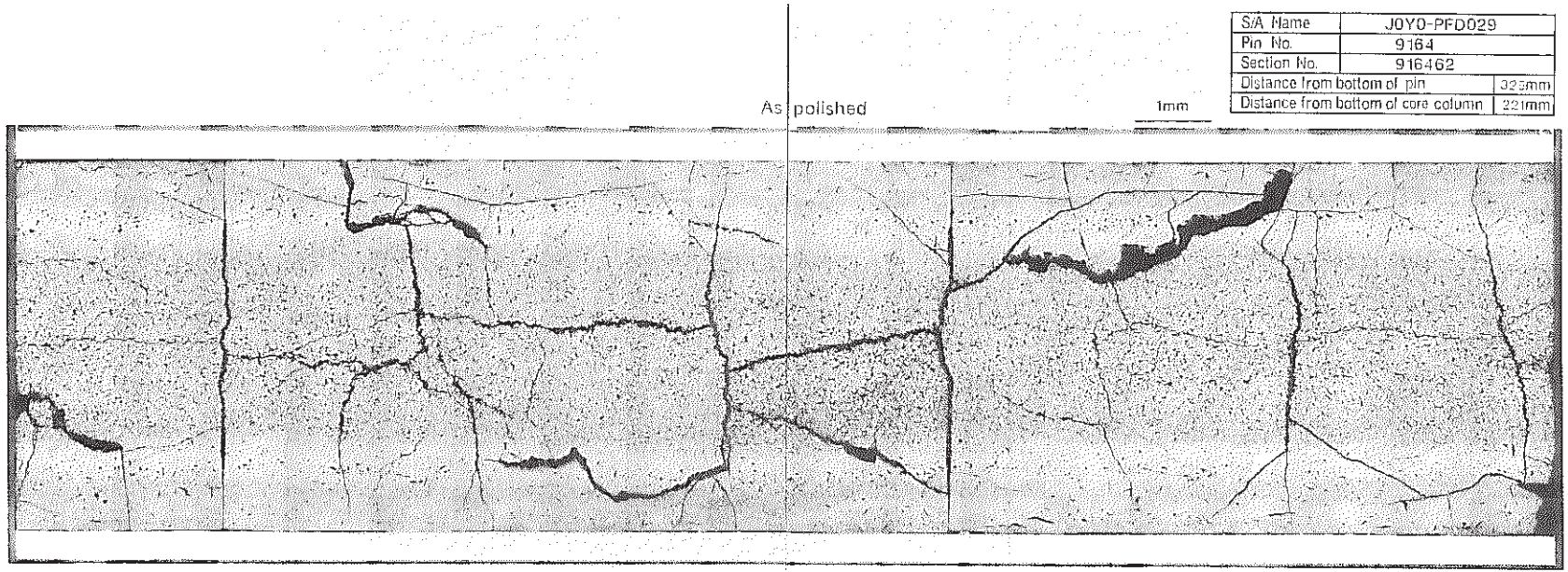


Photo. 7 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916462 sample)

S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916463	
Distance from bottom of pin		335mm
Distance from bottom of core column		249mm

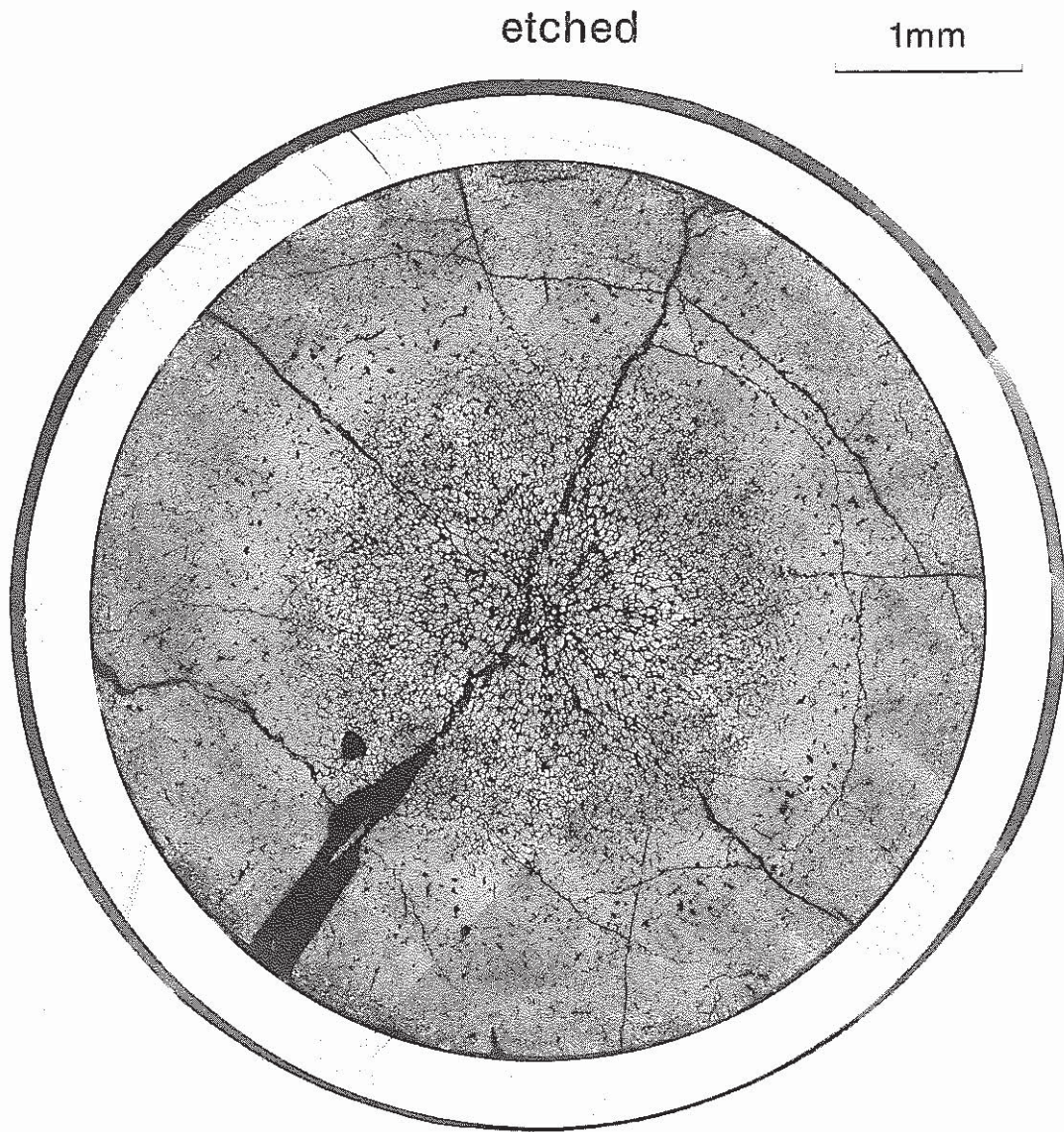
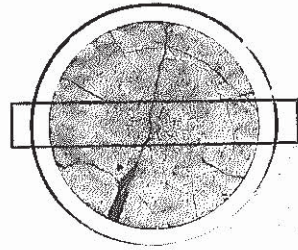


Photo. 8 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916463 sample)



S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916463	
Distance from bottom of pin		335mm
Distance from bottom of core column		249mm

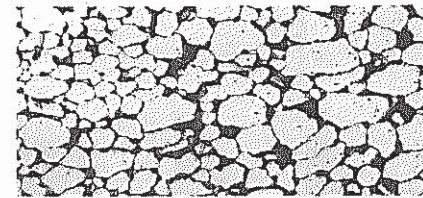
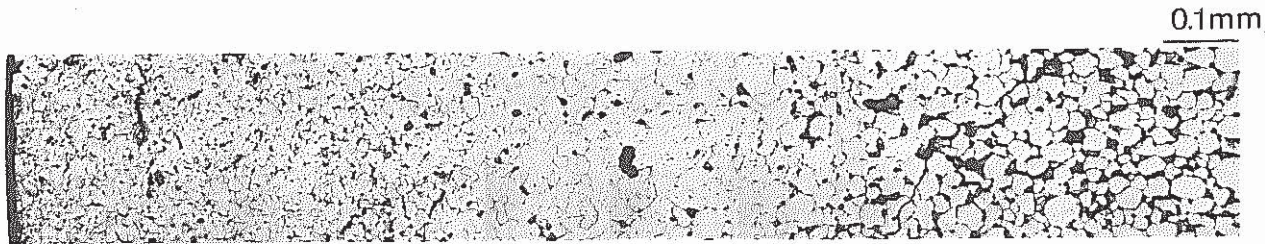
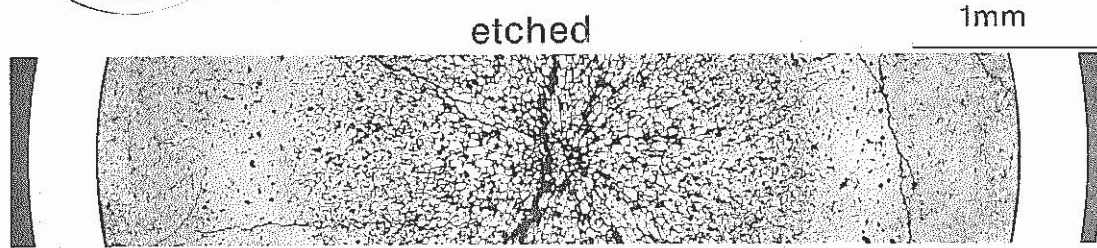


Photo. 9 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916463 sample)

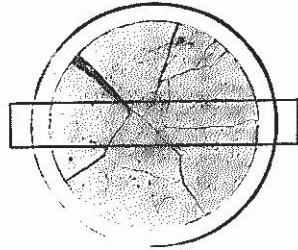
S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916483	
Distance from bottom of pin		522mm
Distance from bottom of core column		436mm

As polished

1mm



Photo. 10 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (916483 sample)



S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	916483	
Distance from bottom of pin		522mm
Distance from bottom of core column		436mm

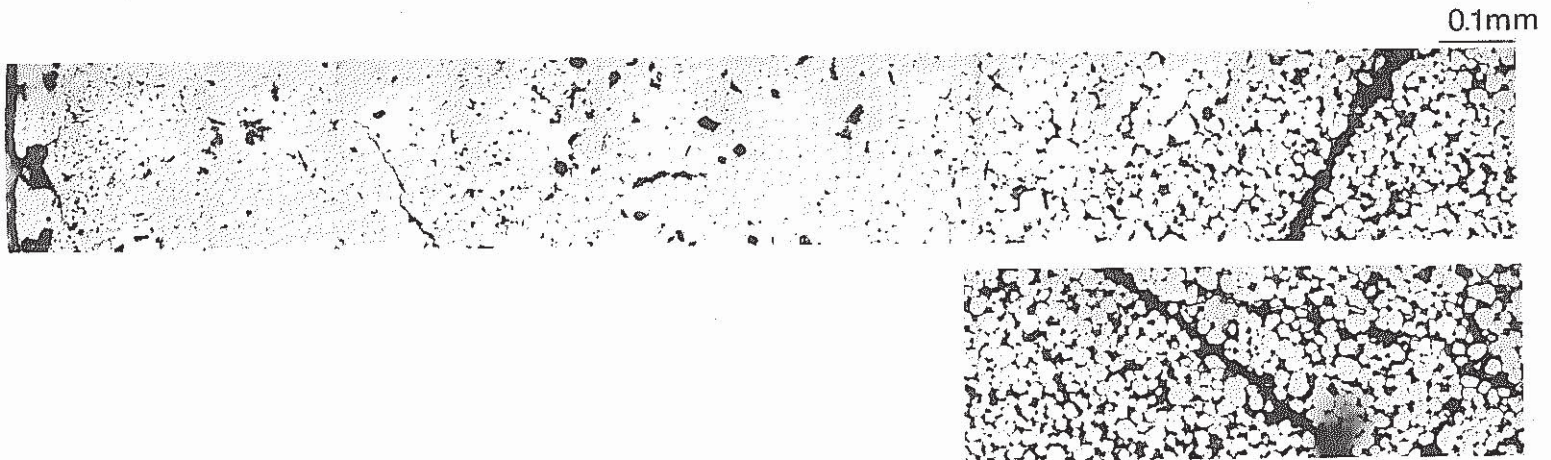
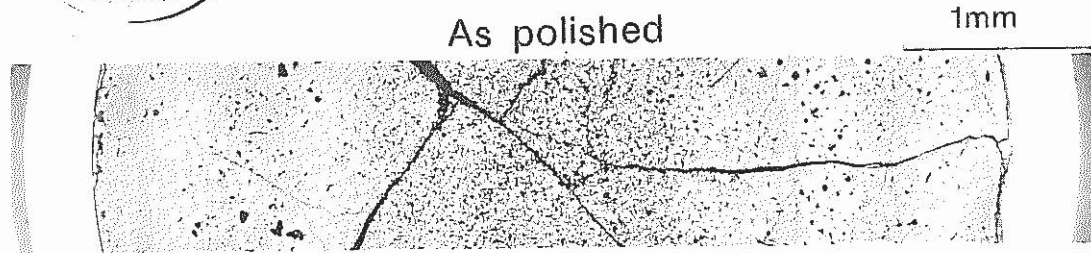
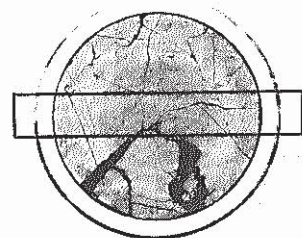


Photo. 11 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (916483 sample)

S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	9164A4	
Distance from bottom of pin		626mm
Distance from bottom of core column		540mm



Photo. 12 Postirradiation ceramograph of the transverse section of JOYO MK-II core fuel (9164A4 sample)



S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	9164A4	
Distance from bottom of pin	626mm	
Distance from bottom of core column	540mm	

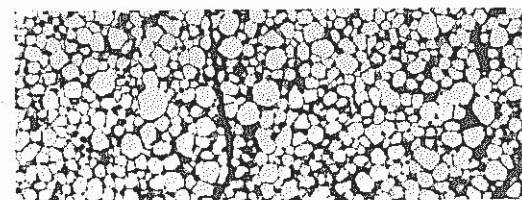
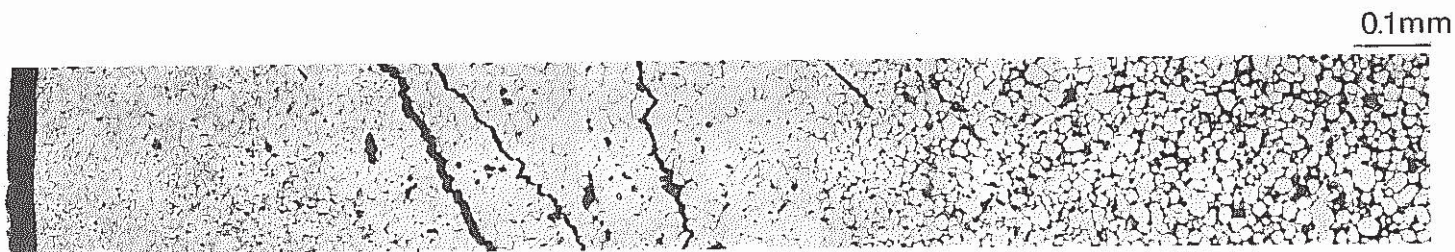
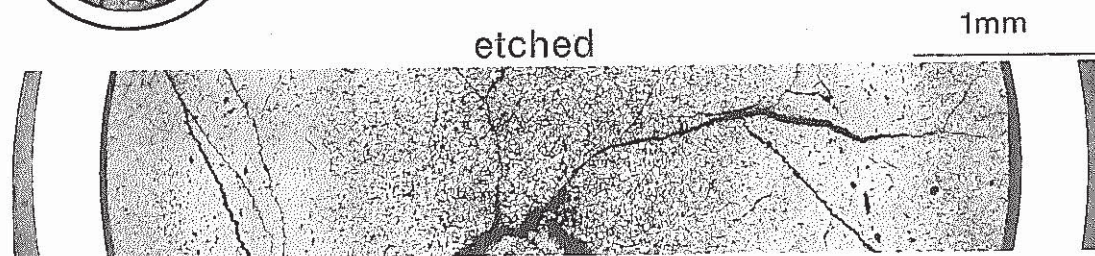
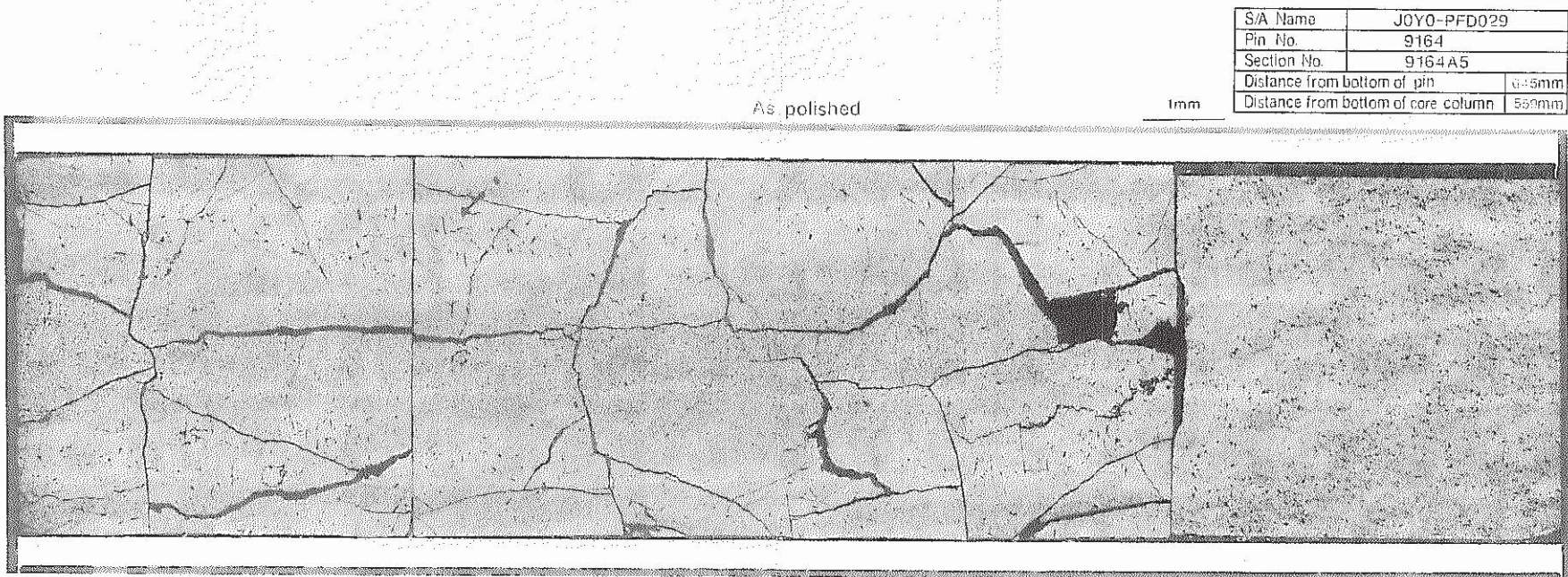
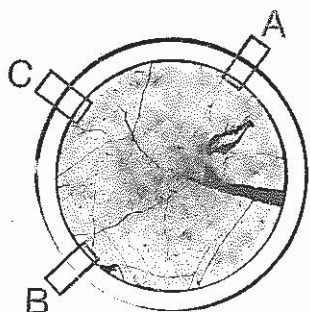


Photo. 13 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (9164A4 sample)



- 6 2 -

Photo. 14 Postirradiation ceramograph of JOYO MK-II core fuel (9164A5 sample)



S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	9164A4	
Distance from bottom of pin		626mm
Distance from bottom of core column		540mm

As polished

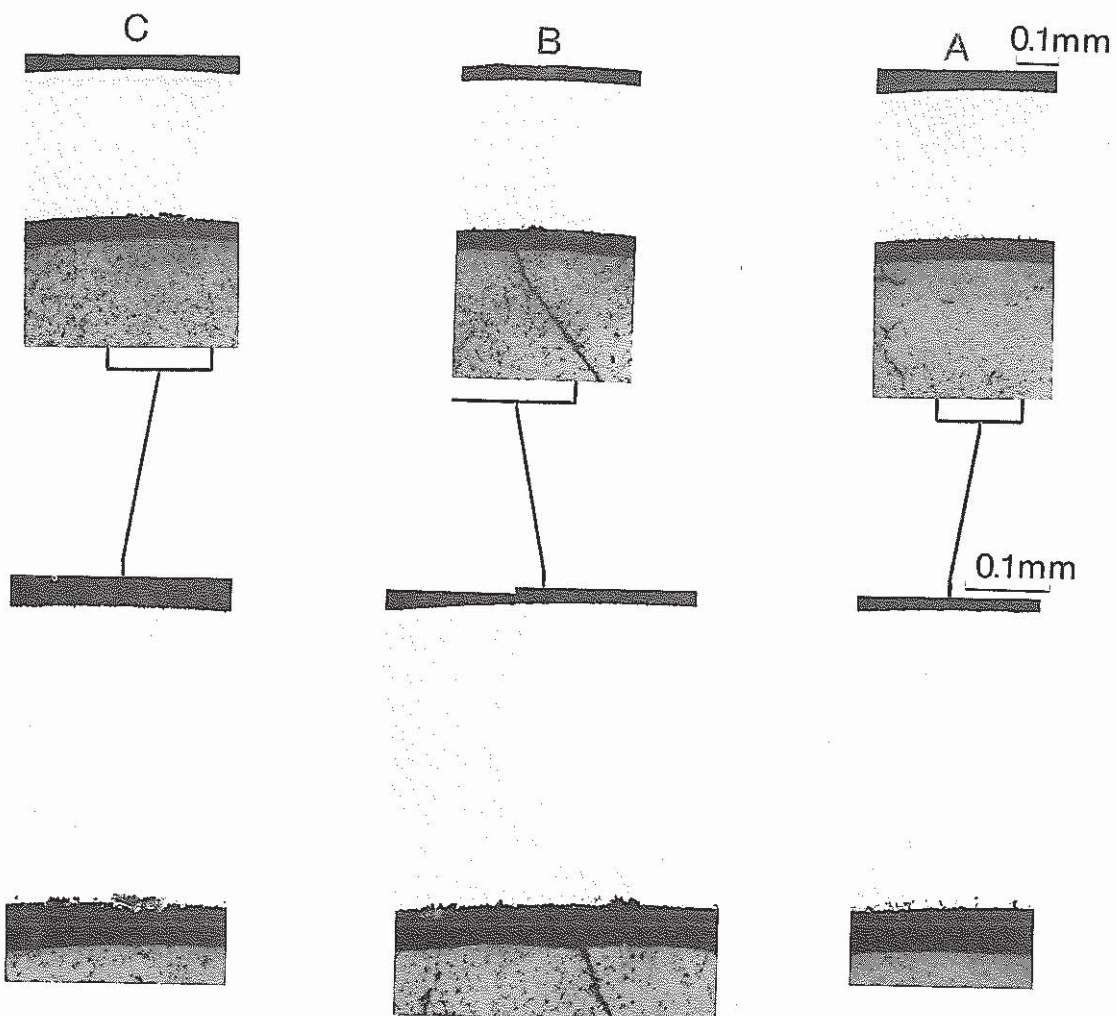


Photo. 15 Postirradiation metallograph of JOYO MK-II cladding (9164A4 sample, FCCI)

S/A Name	JOYO-PFD029	
Pin No.	9164	
Section No.	9164A5	
Distance from bottom of pin		645mm
Distance from bottom of core column		559mm

As polished

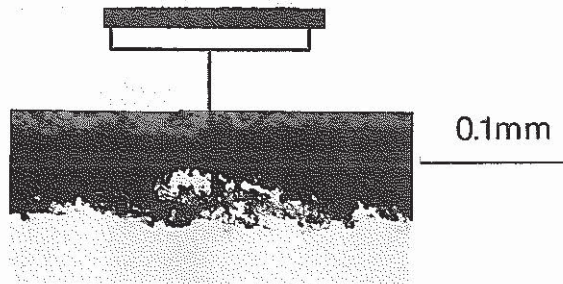
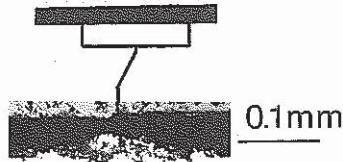
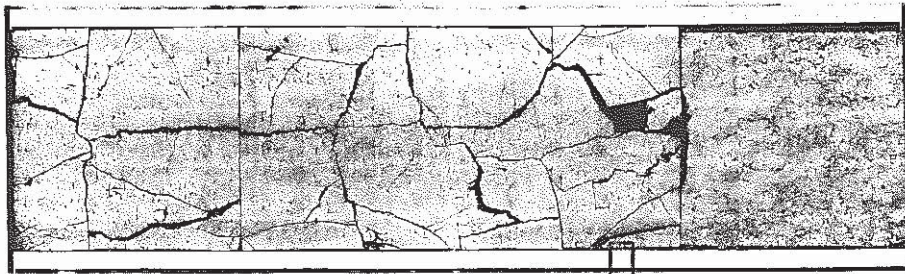


Photo. 16 Postirradiation metallograph of JOYO MK-II cladding (9164A5 sample, FCCI)

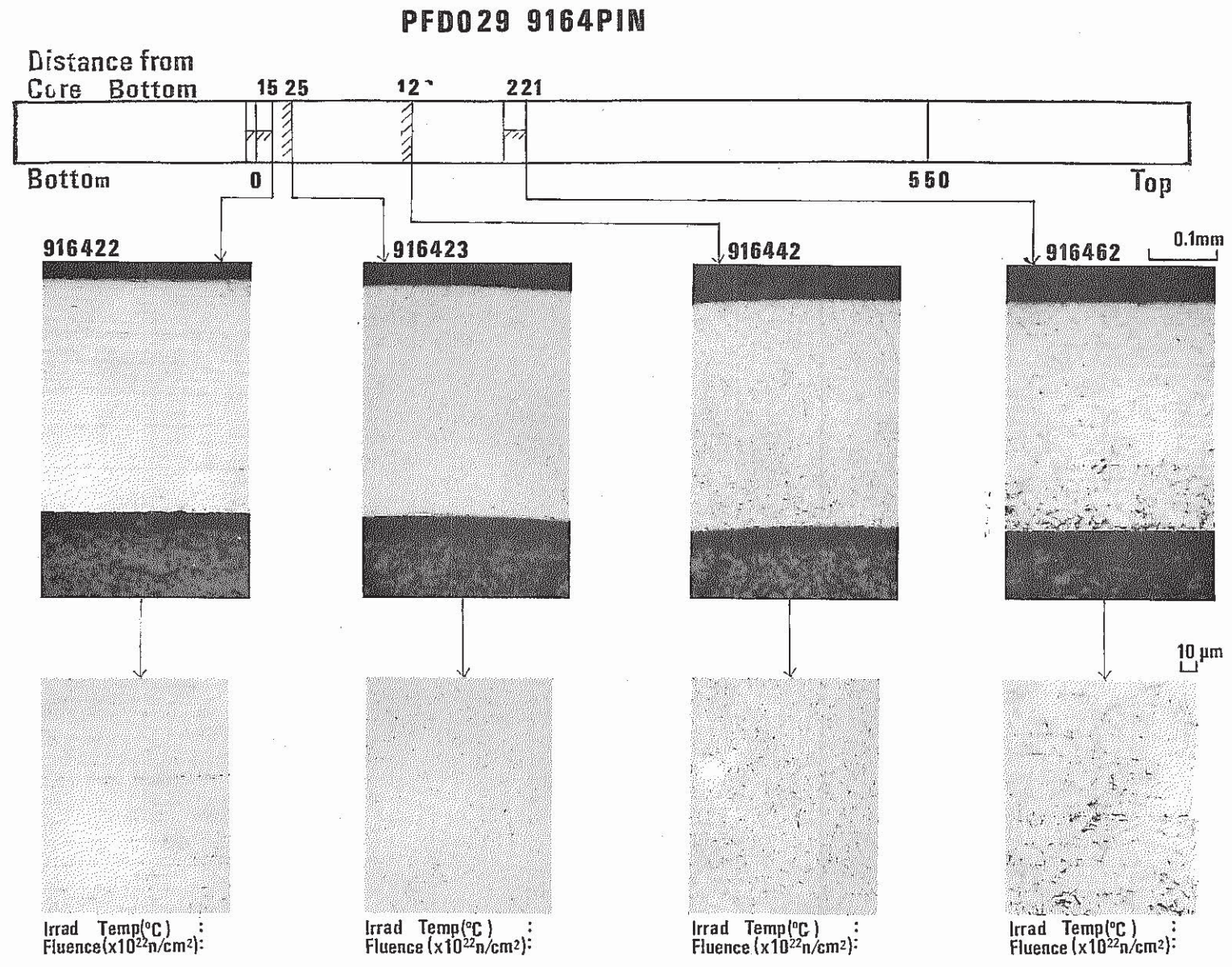


Photo. 17 Optical micrographs of fuel cladding (9164pin)

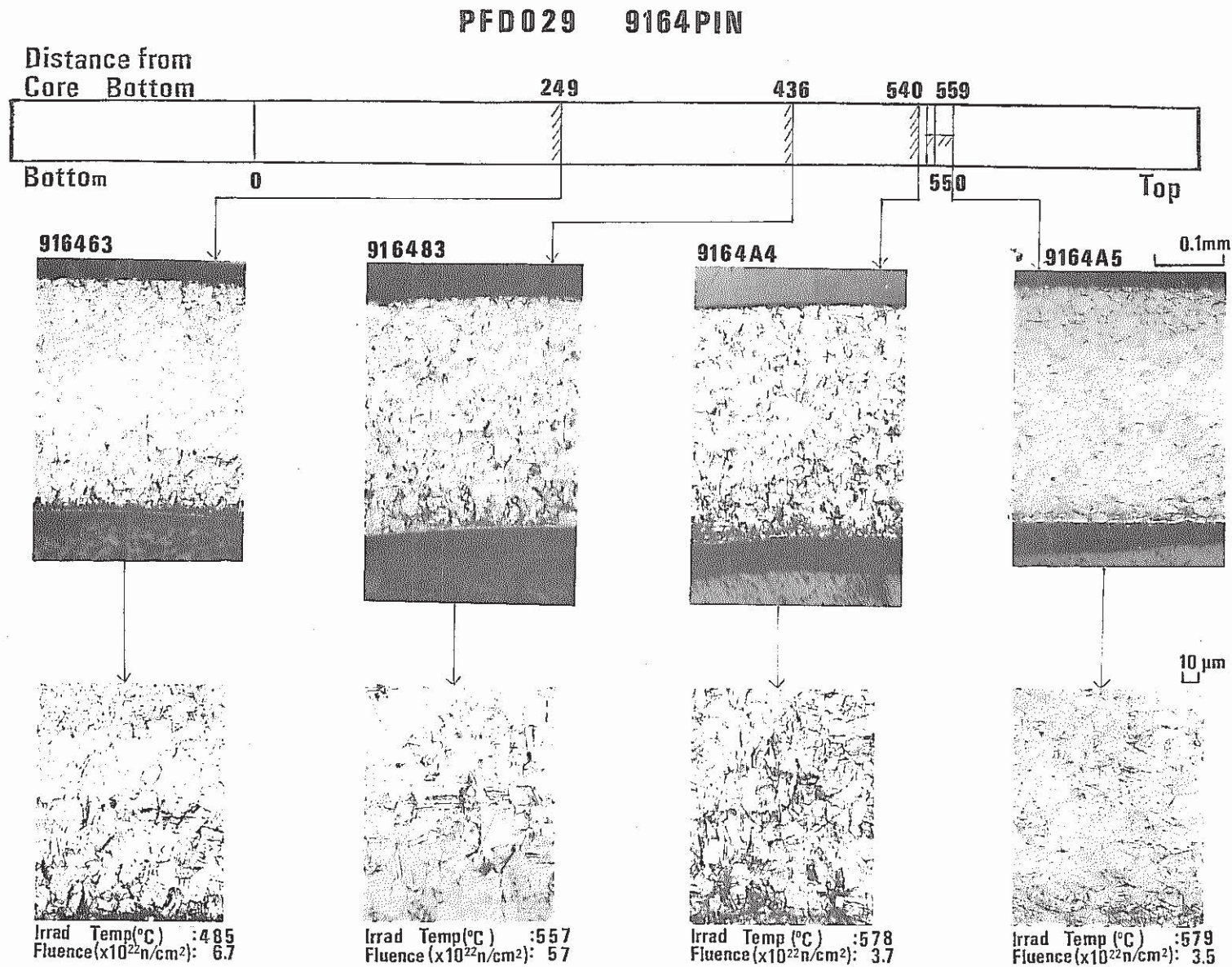


Photo. 18 Optical micrographs of fuel cladding (9164 pin)