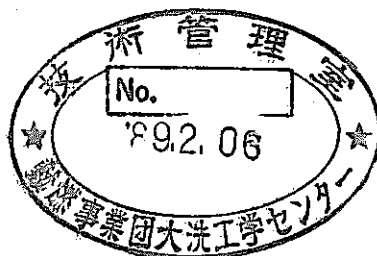


# 「常陽」MK-II炉心燃料集合体(PFD036)の照射後試験

## —— 燃料要素の破壊試験 ——



1988年11月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 88-204
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(PFD036)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 \*川澄 清一,\*\*滑川 卓志

\*桑島 幸夫,\*吉川 勝則

\*立花 利道

#### 要 旨

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD036(集合体平均燃焼度は約36,800MWd/t)は、MK-II初装荷炉心燃料集合体のうちでは最大炉内滞在燃料集合体でありA、B、Cの3面が反射体と隣接した集合体である。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170μmから48μmまで減少していた。
- 3) FCCIは、観察されなかった。
- 4) 燃焼率の集合体内径方向分布を実測値とESPRIT-Jコード計算値と比較すると中心ピンと反射体隣接ピン間で実測値の方が緩やかな減衰になっている。

---

\* 大洗工学センター 燃料材料開発部照射燃料試験室

\*\* 1988年10月まで同上

## 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 燃焼率測定試験 .....	5
4.2.1 試料調整方法 .....	5
4.2.2 測定結果 .....	5
5. ま と め .....	7

## List of table

Table 1	Fuel pin fabrication parameters .....	9
Table 2	Metallographic examination in AGS .....	10
Table 3	Irradiation parameters of PFD036 .....	11
Table 4	Summary data from ceremograph of PFD036 .....	12
Table 5	Summary of burnup measurement by Nd-method for PFD036 ....	13
Table 6	Calculation of effective fission yield for 936421 (example) .....	14
Table 7	Composition of spike solution and natural neodymium .....	15
Table 8	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD036 937021 sample .....	16
Table 9	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD036 936421 sample .....	17
Table 10	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD036 935821 sample .....	18

## List of figure

Fig. 1	Schematic drawing of fuel pin .....	19
Fig. 2	Irradiation position of PFD036 subassembly in "JOYO" MK-II core .....	20
Fig. 3	Fuel pin positions in PFD036 subassembly .....	21
Fig. 4	Burnup distribution (9358 Pin) .....	22
Fig. 5	Burnup distribution (9364 Pin) .....	23
Fig. 6	Burnup distribution (9370 Pin) .....	24
Fig. 7	Cladding temperature and fluence distribution (9358 Pin) .	25
Fig. 8	Cladding temperature and fluence distribution (9364 Pin) .	26
Fig. 9	Cladding temperature and fluence distribution (9370 Pin) .	27
Fig. 10	Fuel temperature distribution (9358 Pin) .....	28
Fig. 11	Fuel temperature distribution (9364 Pin) .....	29
Fig. 12	Fuel temperature distribution (9370 Pin) .....	30
Fig. 13	Linear heat rate distribution (9358 Pin) .....	31
Fig. 14	Linear heat rate distribution (9364 Pin) .....	32
Fig. 15	Linear heat rate distribution (9370 Pin) .....	33
Fig. 16	Sampling of specimens (PFD036) .....	34
Fig. 17	Flow diagram of metallographic examination in AGS .....	35
Fig. 18	Effects of pin location on fuel structure .....	36
Fig. 19	Residual gap ratio as a function of burnup .....	37
Fig. 20	Cutting diagram of PFD036 fuel pins for burnup measure- ment .....	38
Fig. 21	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS .....	39
Fig. 22	Burnup radial distribution of PFD036 subassembly .....	40
Fig. 23	Radial distribution of $\gamma$ -ray intensity on PFD036 subassembly .....	41

## List of photograph

Photo. 1	Macrography of "JOYO" MK-II core fuel (9358 Pin) .....	43
Photo. 2	Macrography of "JOYO" MK-II core fuel (9364 Pin) .....	45
Photo. 3	Macrography of "JOYO" MK-II core fuel (9370 Pin) .....	47
Photo. 4	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel (935822 sample) .....	49
Photo. 5	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel (936422 sample) .....	51
Photo. 6	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel (936422 sample) .....	53
Photo. 7	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel (937022 sample) .....	55
Photo. 8	Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (935822 sample) .....	57
Photo. 9	Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (936422 sample) .....	59
Photo. 10	Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (936422 sample) .....	61
Photo. 11	Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (937022 sample) .....	63

## 1. ま え が き

「常陽」MK-II炉心燃料集合体 PFD 036 は、集合体の A, B, C 3面が反射体と隣接し、E面を炉心方向として、炉内位置 4 B 1 で 100 MW出力上昇サイクルから 100 MW第 7 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 36,800 MWd/t である。なお集合体は、MK-II 初装荷炉心燃料集合体では最大炉内滞在燃料集合体である。

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 9364 Pin, K 社製被覆管)
- (2) 高出力コーナーピン (No 9358 Pin, " )
- (3) 低出力コーナーピン (No 9370 Pin, " )

上記の燃料ピンについて、照射後試験としては、(a) 金相試験 (燃料組織観察)、及び (b) 燃焼率測定を実施した。



## 2. 燃 料 ピ ン

本集合体の照射後試験に供された燃料ピンを Fig. 1 に、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、また破壊試験を実施した燃料ピンの集合体内位置を Fig. 3 にそれぞれ示す。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）： 36,800MWd / t
- ② 照 射 サ イ ク ル ： 100 MW出力上昇サイクル～100 MW第7サイクル
- ③ 集合体ピークフルエンス ( $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ )：  $5.12 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$
- ④ 線出力（集合体平均）： 179 w/cm
- ⑤ 照 射 位 置 ： 4 B 1 (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実験結果を Fig. 4～Fig. 15 に示す。

## 4. 照射後試験

AGSで実施した照射後試験項目と試料採取位置を Fig. 16 に示す。

### 4.1 金相試験

#### 4.1.1 試料調整方法

金相試験工程を Fig. 17 に、また実施内容を Table 2 に示す。

#### 4.1.2 試験結果

集合体の A, B, C 3面が反射体と隣接し、炉内位置 4B 1 で 100 MW (0) ~ (7) サイクル照射された集合体の中から以下に示す燃料ピン

9358

9364

9370

の合計 3 本より燃料のほぼ中央部各 1 個ずつ試料を採取して試験を実施した。Photo. 1 ~ 3 に各燃料ピンからの試料採取位置及びその断面のマクロ写真を、Photo. 4 ~ 11 に各試料の断面全体写真とスリット写真を示す。また試験を実施した燃料ピンの照射履歴を Table 3 に示す。

#### ① 燃料組織

中心空孔、柱状晶領域は認められず、燃料中心部よりガスバブル領域、高密度化領域、不変領域の 3 領域から構成されているのが観察された。Table 4 に断面全体写真より画像解析装置を使って測定したデータを示す。ガスバブル領域径は炉心方向に面した 9358 ピンが最も大きく反射体側に面した 9370 ピンが最も小さい。また高密度化領域径は 9358 ピンと中心ピンの 9364 がほぼ同じで 9370 ピンがガスバブル領域径と同様最も小さくなっている。これらの値を燃料中心温度とともに表わしたグラフを Fig. 18 に示す。

各領域径は燃料中心温度にほぼ対応して変化している。ペレット外径については製造時の 4.63 mm  $\phi$  に対して 3 試料とも約 4.75 mm  $\phi$  と約 0.12 mm 増加していた。

#### ② ペレット-被覆管ギャップの観察

各試料の製造時ギャップ、照射後の残留ギャップ及びギャップ変化率を以下に示す。

	製造時ギャップ	残留ギャップ	*ギャップ変化率
9358 ピン	170 $\mu\text{m}$	48 $\mu\text{m}$	72 %
9364 ピン	170 $\mu\text{m}$	56 $\mu\text{m}$	67 %
9370 ピン	170 $\mu\text{m}$	57 $\mu\text{m}$	66 %

## \* ギャップ変化率

$$\frac{(\text{製造時ギャップ} - \text{残留ギャップ})}{\text{製造時ギャップ}} \times 100$$

高出力ピン(9358)のギャップ変化率が約72%と最も大きく他の2ピンは同程度であった。また、残留ギャップ率( $G/G_0$   $G$ : 残留ギャップ,  $G_0$ : 製造時ギャップ)の燃焼度依存性を「常陽」MK-II初装荷燃料集合体のうち既に試験が終了しているPFD010, PFD003, PFD001, PFD029の結果と合わせてFig. 19に示す。残留ギャップ率は燃焼度の増加に伴って徐々に減少しているのが観察された。これはペレットのスエリングによるものと考えられる。

## ③ FCCI の観察

3試料ともFCCIは観察されず被覆管は健全であった。

## 4.2 燃焼率測定試験

$^{148}\text{Nd}$ を指標核種とした同位体希釈法により、集合体代表ピンと反射対隣接ピン(低出力コーナーピン)及び高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。

## 4.2.1 試料調整方法

試料の採取位置をFig. 20に、また試料調整の方法及び手順をFig. 21に示す。

## 4.2.2 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 5に示す。燃焼率計算で使用した $^{148}\text{Nd}$ ,  $^{146}\text{Nd}$ 及び $^{145}\text{Nd}$ の実効核分裂収率の計算例(試料No.936421)をTable 6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 7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 8からTable 10に示す。

次に集合体内径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 $\gamma$ -スキャン測定結果を64ピンの値を1として規格化し比較した結果Fig. 22に示す。同様に $^{58}\text{Co}$ と $^{60}\text{Co}$ の $\gamma$ -スキャンのみの結果をFig. 23に示す。

以上の結果から以下のことがわかった。

- 1) PFD 036 炉心燃料集合体の中心ピンの軸方向中心位置(試料No.936421)での燃焼率は、4.72 atom % (42,900 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 4参照)すると反射体隣接ピン(70ピン)は、実測値の方が計算値より2.7%大きい。中心ピン(64ピン)と高出力コ

ーナピン(58ピン)は、実測値の方が計算値より、それぞれ7.8%、9.7%小さい。

3) 燃焼率の集合体内径方向分布は、実測値とアスキャン及び ESPRIT-J コードで計算値を比較すると、中心ピンと反射体隣接ピン間で、実測値とアスキャンの方が、ESPRIT-J コード計算値よりも緩やかな減衰率になっている。

本試験では、燃料カラム上部、下部の径方向分布測定は行っていないので、上部、下部の傾向をアスペクトルデータから考察する。Fig. 23 に、 $^{58}\text{Co}$  と  $^{60}\text{Co}$  の径方向分布を示す。 $^{58}\text{Co}$  は、 $^{58}\text{Ni}(n, p)$  反応より生成し、主に高速中性子による生成反応核種である。また、 $^{60}\text{Co}$  は、 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)$  反応より生成し、主に熱中性子による生成反応核種である。このことから、中心ピンと反射体隣接ピン間を見ると、反射体隣接ピン側で  $^{60}\text{Co}$  の生成が高いことがわかる。これは、反射側で中性子スペクトルが軟化しているためと考えられる。また、Fig. 22 の燃焼率分布からも同様の傾向がわかる。これらのことから、反射体隣接ピンの上部、下部は、反射体の影響で中性子スペクトルが軟化したことにより、燃焼が促進されていると推定される。

## 5. ま と め

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 PFD 036 の照射後試験（破壊試験）結果の概要を以下に示す。なお金相試験，燃焼率測定いずれも試験を実施した燃料ピンは代表ピン（9364 ピン），高出力コーナーピン（9358 ピン）及び低出力コーナーピン（9370 ピン）の 3 本である。

### 1) 金相試験

- 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が柱状晶領域，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  $\mu\text{m}$  から最大で 48  $\mu\text{m}$  まで減少しているのが観察された。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 は観察されなかった。

### 2) 燃焼率測定試験

- 燃焼率の集合体内径方向分布を実測値と ESPRIT-J コード計算値と比較すると中心ピンと反射体隣接ピン間で実測値の方が緩やかな減衰になっているという測定結果が得られた。

# データ集

Table 1 Fuel pin fabrication parameters

S / A name	PFD 036	Pin no	9358, 9364 9370
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 <sub>2</sub> - UO <sub>2</sub>		
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 <sup>+ 0.02</sup> - 0.03		
Cladding			
Type and work	SUS 316, 20 % cold work		
Outer / inner diameter (mm)	5.5 / 4.8		
Lot identification	9358 } 9364 } : K 007 9370 }		
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 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		

Table 3 Irradiation parameters of PFD 036

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
9358	935822	278	51510	249	1564	485	
9364	936422	278	46330	224	1462	500	
9370	937022	278	39880	192	1263	460	

Table 4 Summary data from ceremograph of PFD036

Pin No	Section No	Restructured region dia. (mm)					Residual diametral gap size ( $\mu\text{m}$ )	Pellet outer dia. (mm)	Clad dia. (mm)	
		Central void	Columnar region	Gas bubble region	Densified region	Dark ring region			Outer	Inner
9358	935822	—	—	1.533 *	3.735 *	—	48	4.753	5.496	4.801
9364	936422	—	—	1.357	3.748	—	56	4.752	5.504	4.808
9370	937022	—	—	0.834 *	3.533 *	—	57	4.751	5.500	4.808

\* As polished で組織領域径を測定した。

Table 5 Summary of burnup measurement by Nd - method for PFD 036

Pin No	Sample No	Distance from core fuel bottom <sup>1)</sup> (mm)	Pu content <sup>2)</sup> (atom %)	Burn up			
				MWd/t		atom %	
				Calculated <sup>3)</sup>	Measured <sup>4)</sup>	Calculated <sup>5)</sup>	Measured <sup>6)</sup>
9370	937021	262.5 ~ 267.8	27.710	39,900	40,900	4.38	4.50
9364	936421	262.5 ~ 267.9	27.416	46,360	42,900	5.09	4.72
9358	935821	262.5 ~ 268.5	27.278	51,550	46,900	5.66	5.16

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、 $\gamma$ 発熱量から各試料毎に算出した。

6) Measured by <sup>148</sup>Nd monitor method

Table 6 Calculation of effective fission yield for 936421 (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	- <sup>1)</sup>	1.14 <sup>2)</sup>	-	3.20 <sup>2)</sup>	-	4.10 <sup>2)</sup>	-
U 234	0.000726	- <sup>1)</sup>	1.44 <sup>2)</sup>	-	3.08 <sup>2)</sup>	-	4.00 <sup>2)</sup>	-
U 235	0.078257	1.83E+00 <sup>1)</sup>	1.66 <sup>3)</sup>	0.403	2.94 <sup>3)</sup>	0.705	3.76 <sup>4)</sup>	0.902
U 236	0.002960	1.47E-01 <sup>1)</sup>	1.01 <sup>2)</sup>	0.001	3.06 <sup>2)</sup>	0.002	3.77 <sup>2)</sup>	0.003
U 238	0.643073	6.66E-02 <sup>1)</sup>	2.00 <sup>3)</sup>	0.119	3.40 <sup>3)</sup>	0.244	3.50 <sup>2)</sup>	0.251
Pu238	0.000495	- <sup>1)</sup>	1.76 <sup>2)</sup>	-	2.79 <sup>2)</sup>	-	3.24 <sup>2)</sup>	-
Pu239	0.197531	1.82E+00 <sup>1)</sup>	1.65 <sup>3)</sup>	0.990	2.46 <sup>3)</sup>	1.476	3.01 <sup>3)</sup>	1.806
Pu240	0.065833	4.90E-01 <sup>1)</sup>	1.84 <sup>2)</sup>	0.099	2.83 <sup>2)</sup>	0.153	3.34 <sup>2)</sup>	0.180
Pu241	0.007879	2.10E+00 <sup>1)</sup>	1.91 <sup>2)</sup>	0.062	3.01 <sup>2)</sup>	0.096	3.52 <sup>2)</sup>	0.113
Pu242	0.002327	3.95E-01 <sup>1)</sup>	2.04 <sup>2)</sup>	0.003	3.10 <sup>2)</sup>	0.005	3.70 <sup>2)</sup>	0.006
Effective Fission Yield [ % ]			1.71		2.68		3.26	

Note; nd=not detected

$$\text{Fractional Fission Yield} = (\text{AF})(\text{CS})(\text{FY}) / \text{SUM}(\text{AF})(\text{CS})$$

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

FY:fission yield

$$\text{Effective Fission yield} = \text{SUM}(\text{Fractional Fission yield})$$

1)MAGI code

2)TRG-2143-R

3)ICP-1050-1

4)AERE-R-0753

Table 7 Composition of spike solution and natural Neodymium

スパイク液中の原子数 (atoms/ml)	U 233	$2.7764 \times 10^{18}$
	Pu 242	$5.0316 \times 10^{17}$
	Nd 150	$4.9362 \times 10^{15}$
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

Table8 Result of isotope analysis and burnup calculation for  
PFD036 937021 sample

S/R NO.(FAB) ; PFD036	PIN NO.(PIE) ; 9370
SAMPLE NO. ; 937021	SAMPLE POSITION ; 262.5~267.8 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 10.000

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

[ U233/238]	[ U234/238]	[ U235/238]	[ U236/238]		
nd	0.001104	0.120291	0.005626	-(a)	
0.672073	0.008793	0.119946	0.005615	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002784	0.342835	0.043924	0.012035	-(a)	
0.002784	0.348151	0.044168	0.408737	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd149/150]
0.025312	5.080361	4.254557	3.463118	2.939411	1.828672
0.031954	1.848612	1.563766	1.269886	1.081201	0.673533
					-(a)
					-(b)

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.0980	10.6734	0.4992	88.7295		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1986	71.3482	24.4606	3.1339	0.8587		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.1361	27.3264	22.8845	18.6275	15.8106	9.8361	5.3788

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.710 / 27.831

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9238E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	1.5508E+18	2.4675E+18	2.9459E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	9.0608E+19	9.2070E+19	9.0365E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	4.50	4.57	4.49
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##</u>	40900	41500	40800

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

Table9 Result of isotope analysis and burnup calculation for  
PFD036 936421 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD036	PIN NO.(PIE) ; 9364
SAMPLE NO. ; 936421	SAMPLE POSITION ; 262.5~267.9 (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	0.001127	0.121541	0.004629	-(a)	
0.659913	0.008652	0.121246	0.004629	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002504	0.333280	0.040392	0.011779	-(a)	
0.002504	0.338523	0.040639	0.403101	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.011601	4.988430	4.133036	3.432153	2.868407	1.808736
0.018312	1.894052	1.577427	1.310427	1.099908	0.696442
					-(b)

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.1000	10.7816	0.4106	88.7078		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1804	72.0484	24.0123	2.9102	0.8487		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0636	27.3453	22.6563	18.8142	15.7239	9.9150	5.4818

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.416 / 27.535

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9520E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	1.6529E+18	2.5954E+18	3.1200E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	9.6662E+19	9.6842E+19	9.5707E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	4.72	4.73	4.67
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##</u>	42900	43000	42500

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 10. Result of isotope analysis and burnup calculation for  
 PFD036 935821 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD036	PIN NO.(PIE) ; 9358
SAMPLE NO. ; 935821	SAMPLE POSITION ; 262.5~268.5 (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	0.001132	0.120442	0.004770	-(a)	
0.568220	0.007620	0.120161	0.004781	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002585	0.334824	0.040553	0.011879	-(a)	
0.002585	0.339299	0.040729	0.351751	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.012519	4.956036	4.098660	3.416051	2.851812	1.803088
0.015667	2.181929	1.811859	1.514813	1.265007	0.800165
					-(a)
					-(b)

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.1005	10.6932	0.4235	88.7828		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1860	71.9507	24.0908	2.9178	0.8547		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0690	27.3238	22.5969	18.8335	15.7227	9.9409	5.5132

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.278 / 27.396

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.2621E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	2.1038E+18	3.3180E+18	4.0089E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	1.2303E+20	1.2381E+20	1.2297E+20
<u>BURNUP (atom%)# ;</u>	5.16	5.19	5.16
<u>SPECIFIC BURNUP (MMd/t)## ;</u>	46900	47200	46900

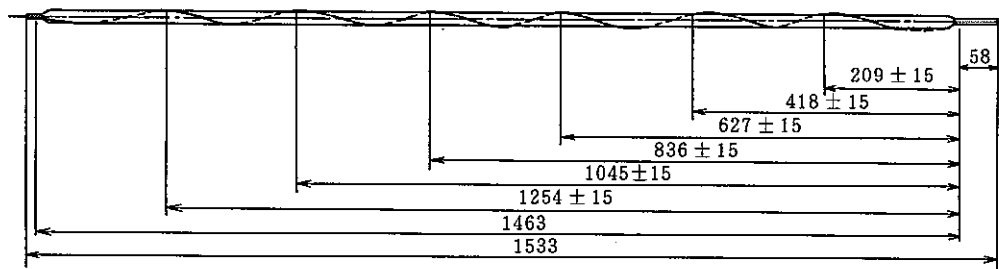
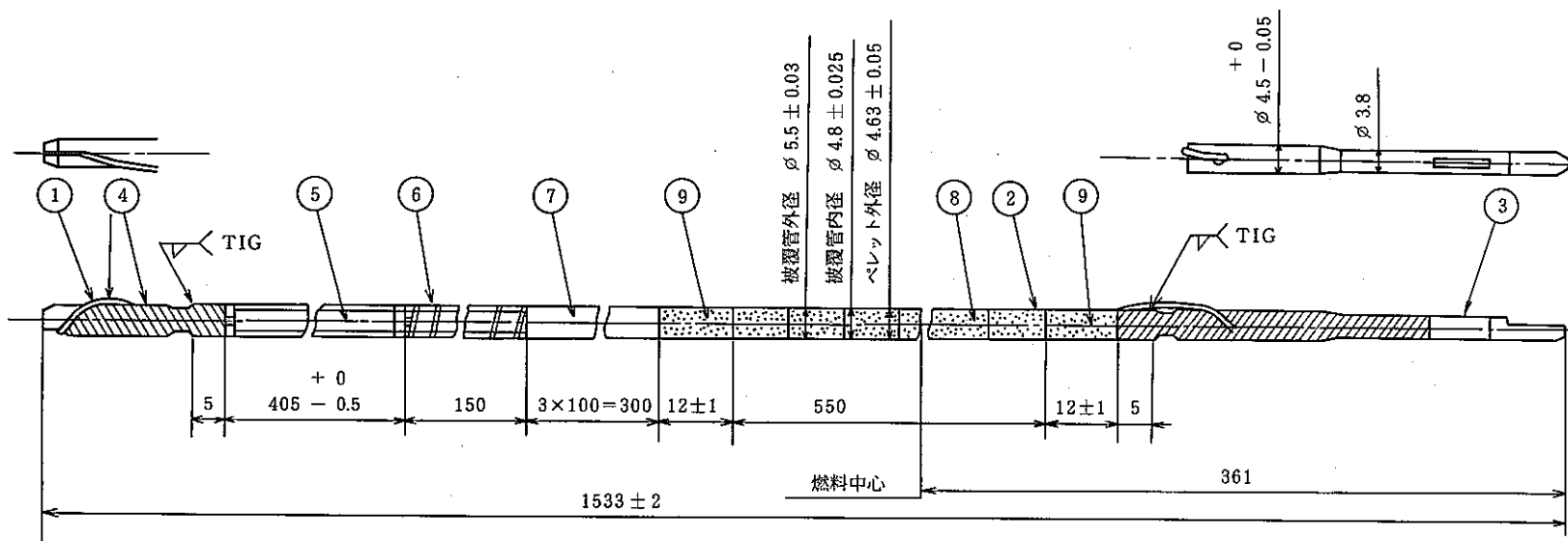
NOTE ; nd=not detected

\* 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



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	$PuO_2UO_2$		
7	上部反射体	SUS 316 相当	3	
6	プレナムスプリング	SUS 304 WPB	1	
5	押え板付プレナムスリーブ	SUS 316	1	
4	上部端栓	SUS 316	1	
3	下部端栓	SUS 316	1	
2	被覆管	SUS 316 相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS 316 相当	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

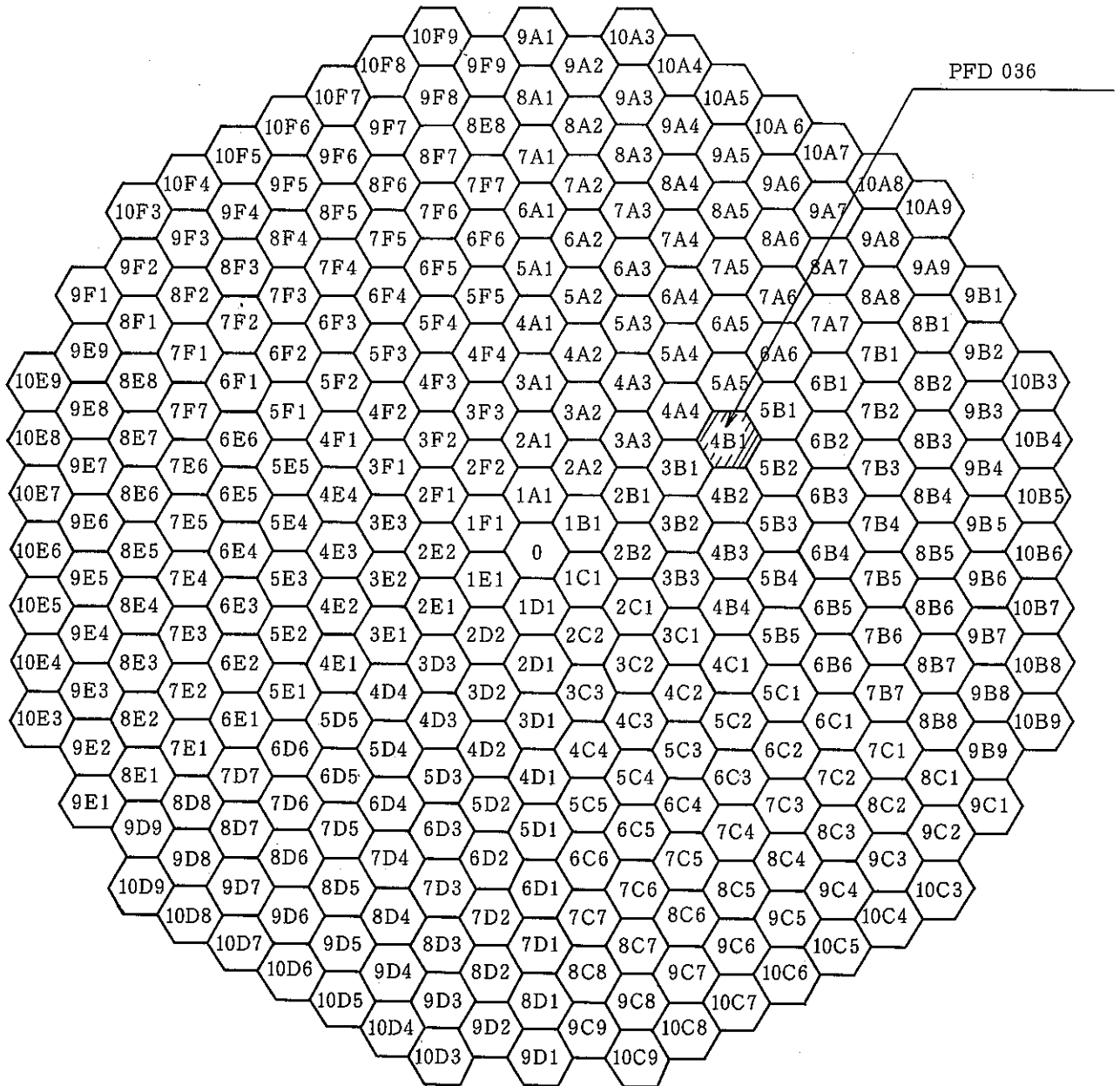


Fig.2 Irradiation position of PFD 036 subassembly in "JOYO" MK-II core

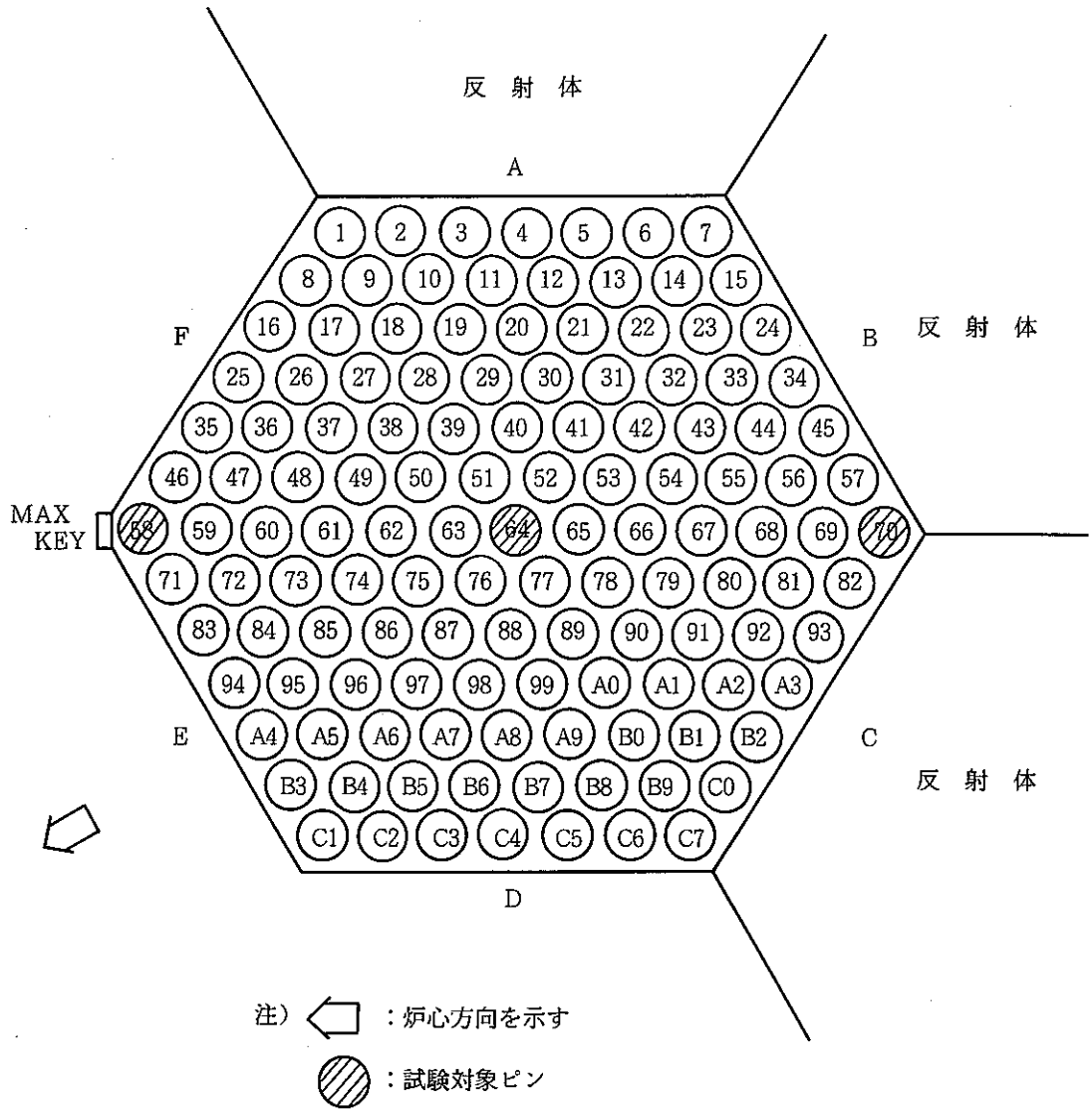


Fig.3 Fuel pin positions in PFD036 subassembly

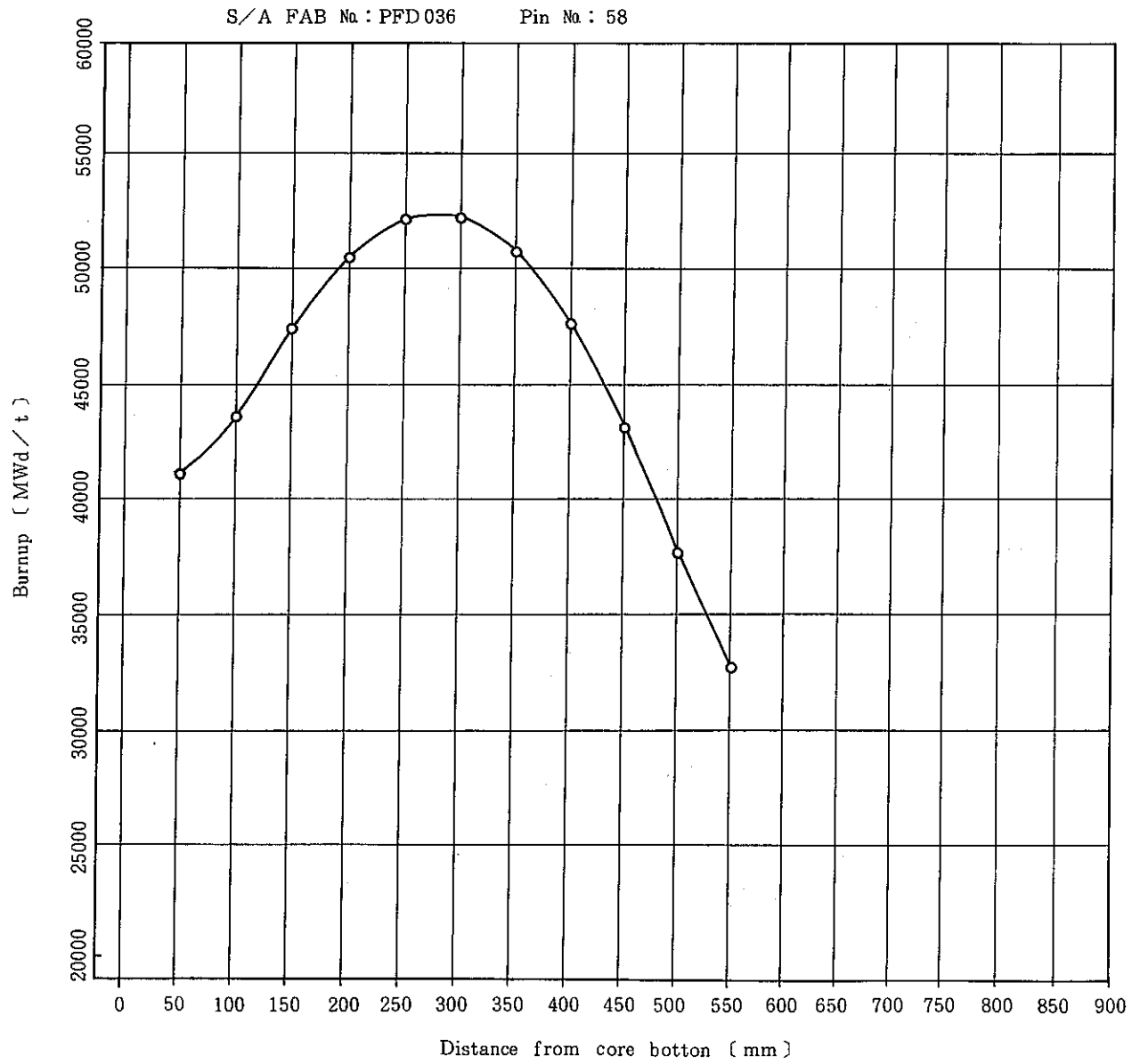


Fig.4 Burnup distribution ( 9358 Pin )

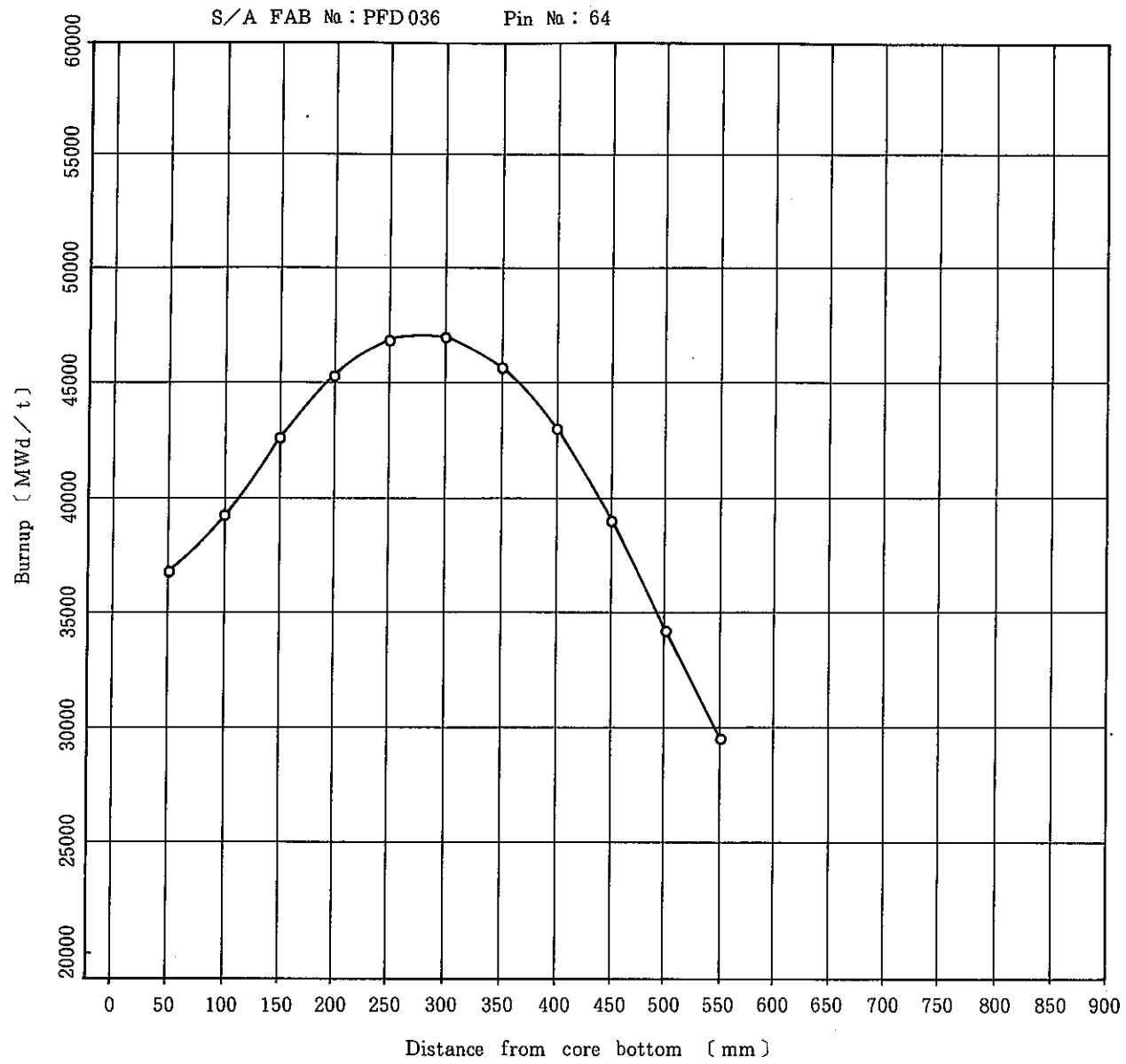


Fig.5 Burnup distribution ( 9364 Pin )

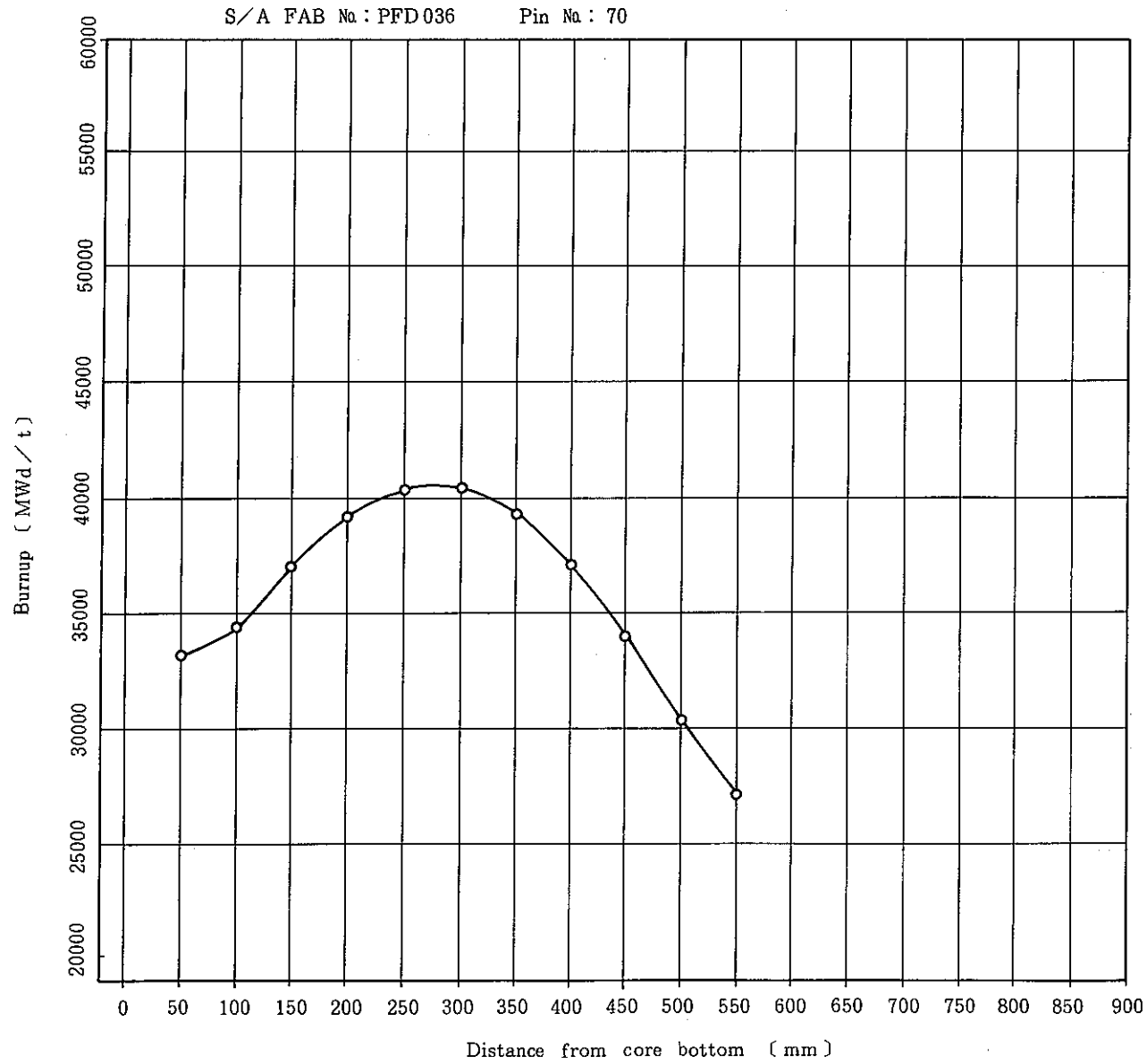


Fig.6 Burnup distribution ( 9370 Pin )

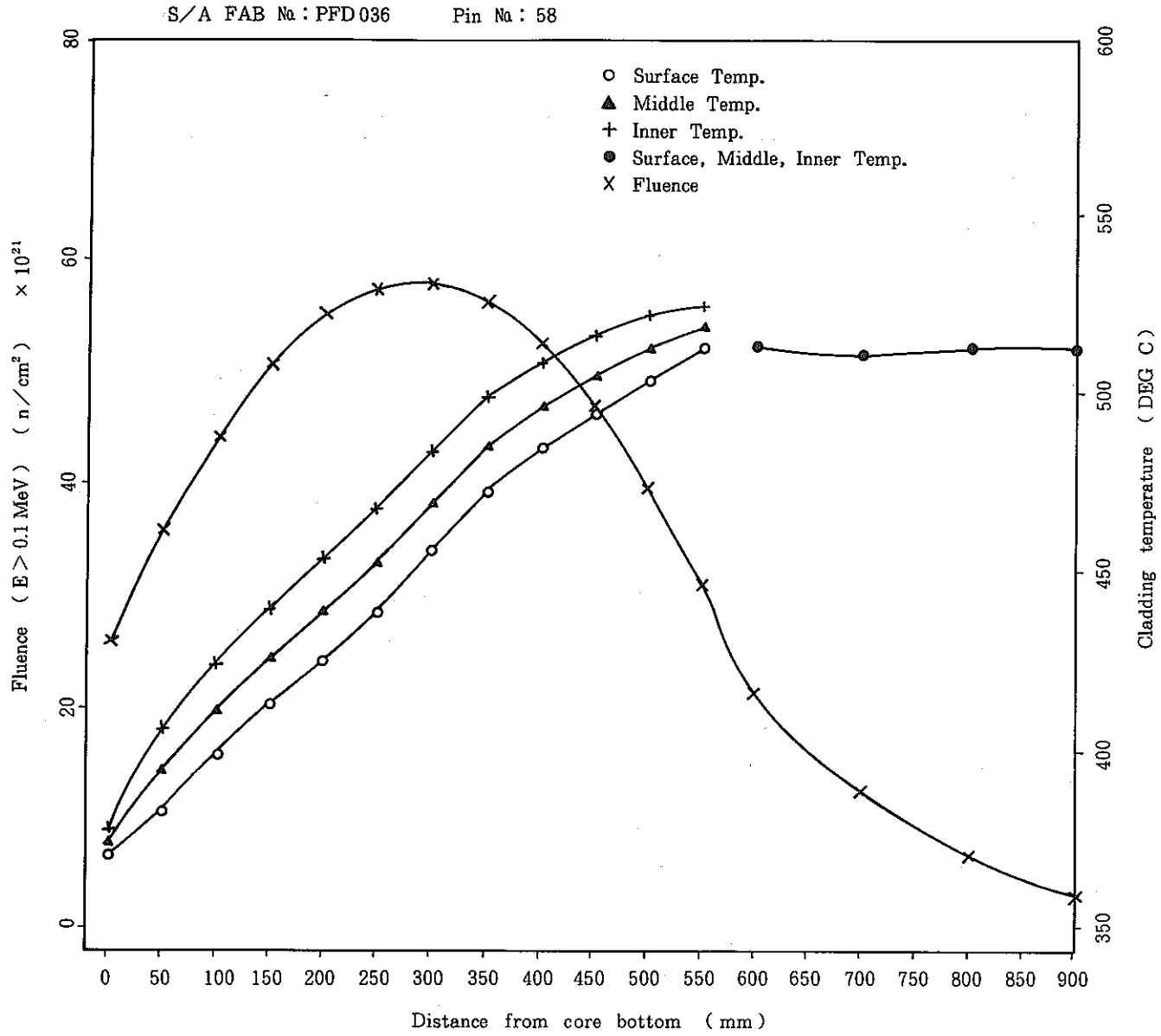


Fig.7 Cladding temperature and fluence distribution ( 9358 Pin )



S/A FAB No : PFD 036 Pin No : 64

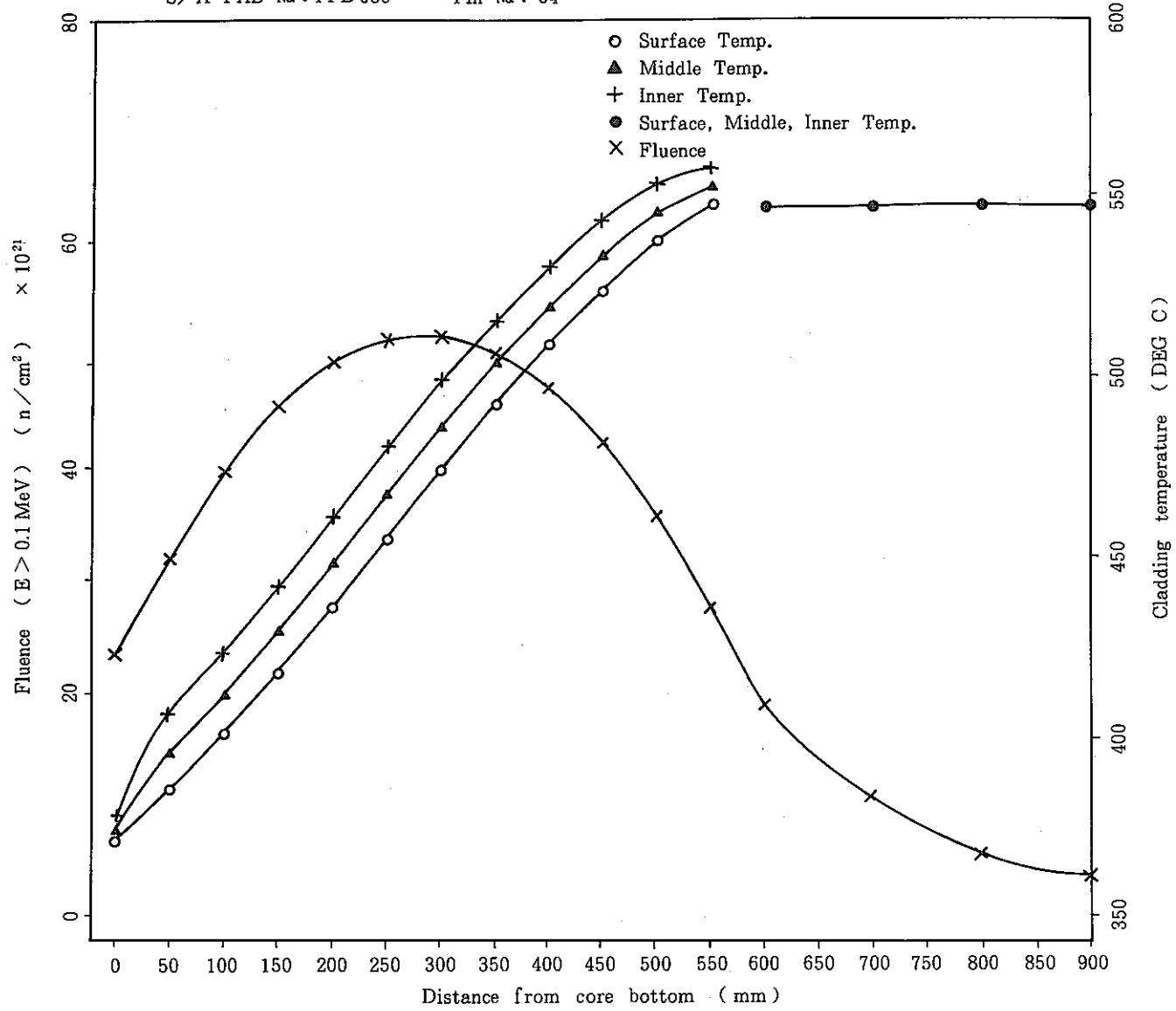


Fig.8 Cladding temperature and fluence distribution ( 9364 Pin )

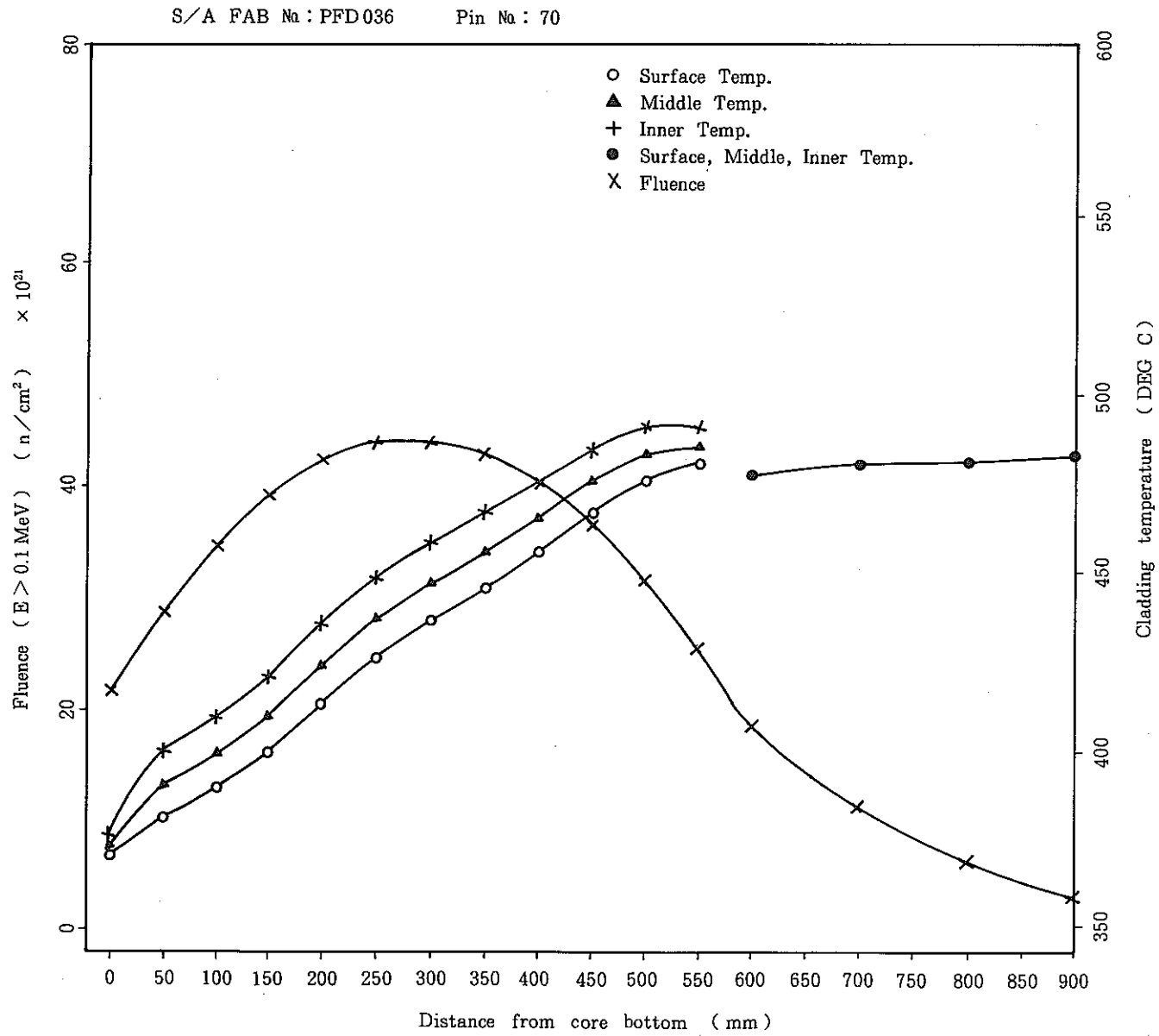


Fig.9 Cladding temperature and fluence distribution ( 9370 Pin )

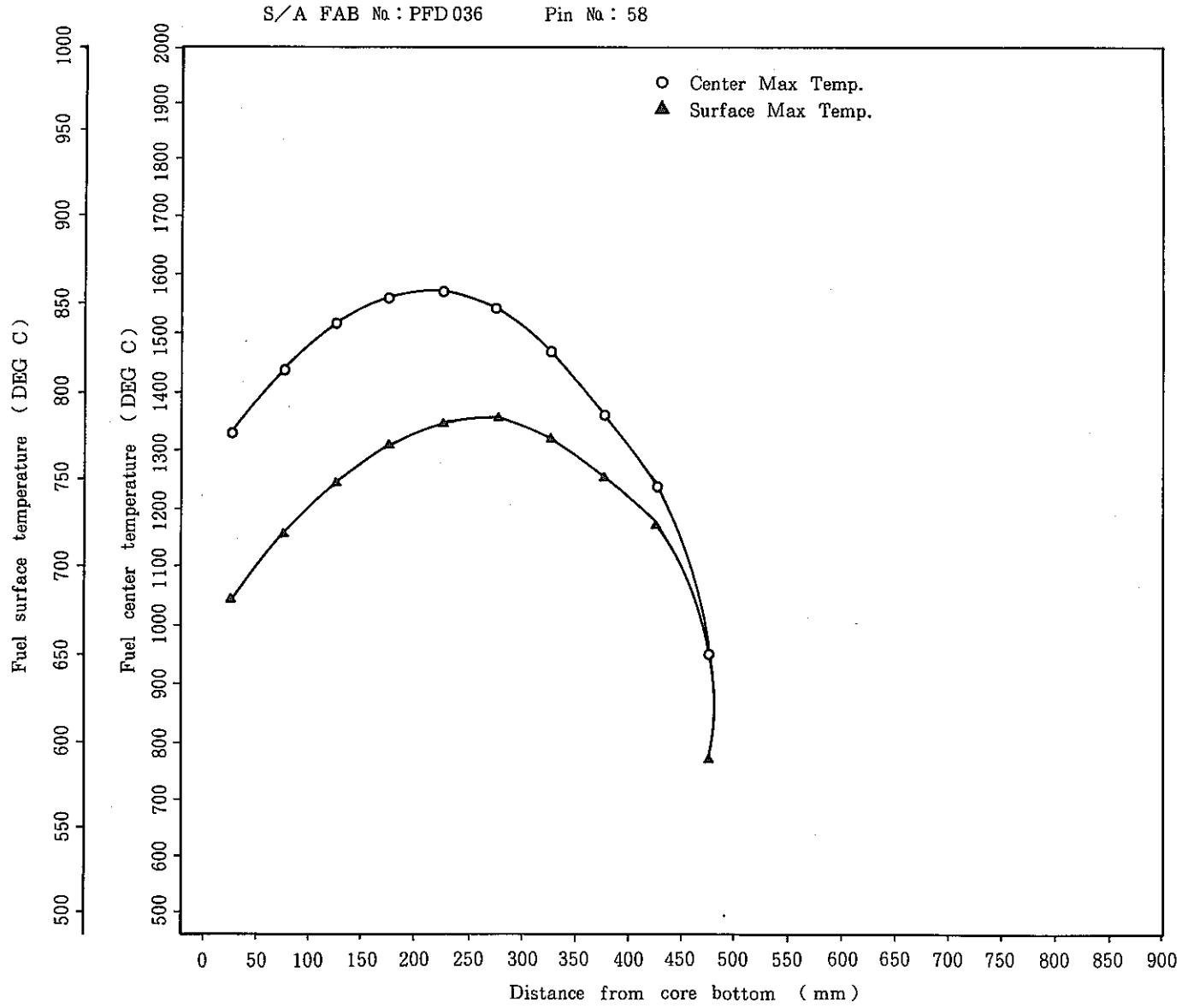


Fig.10 Fuel temperature distribution ( 9358 Pin )

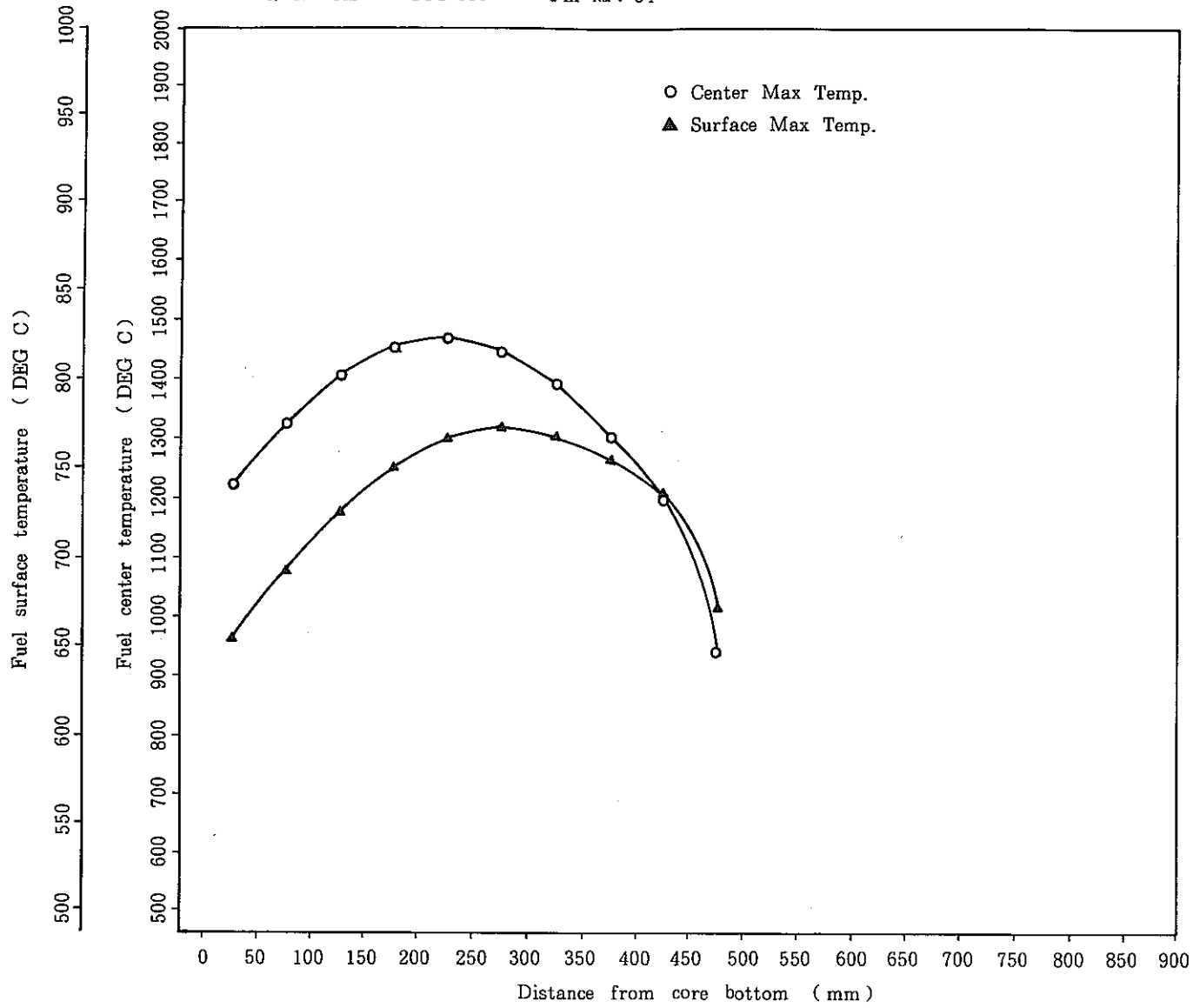


Fig.11 Fuel temperature distribution ( 9364 Pin )

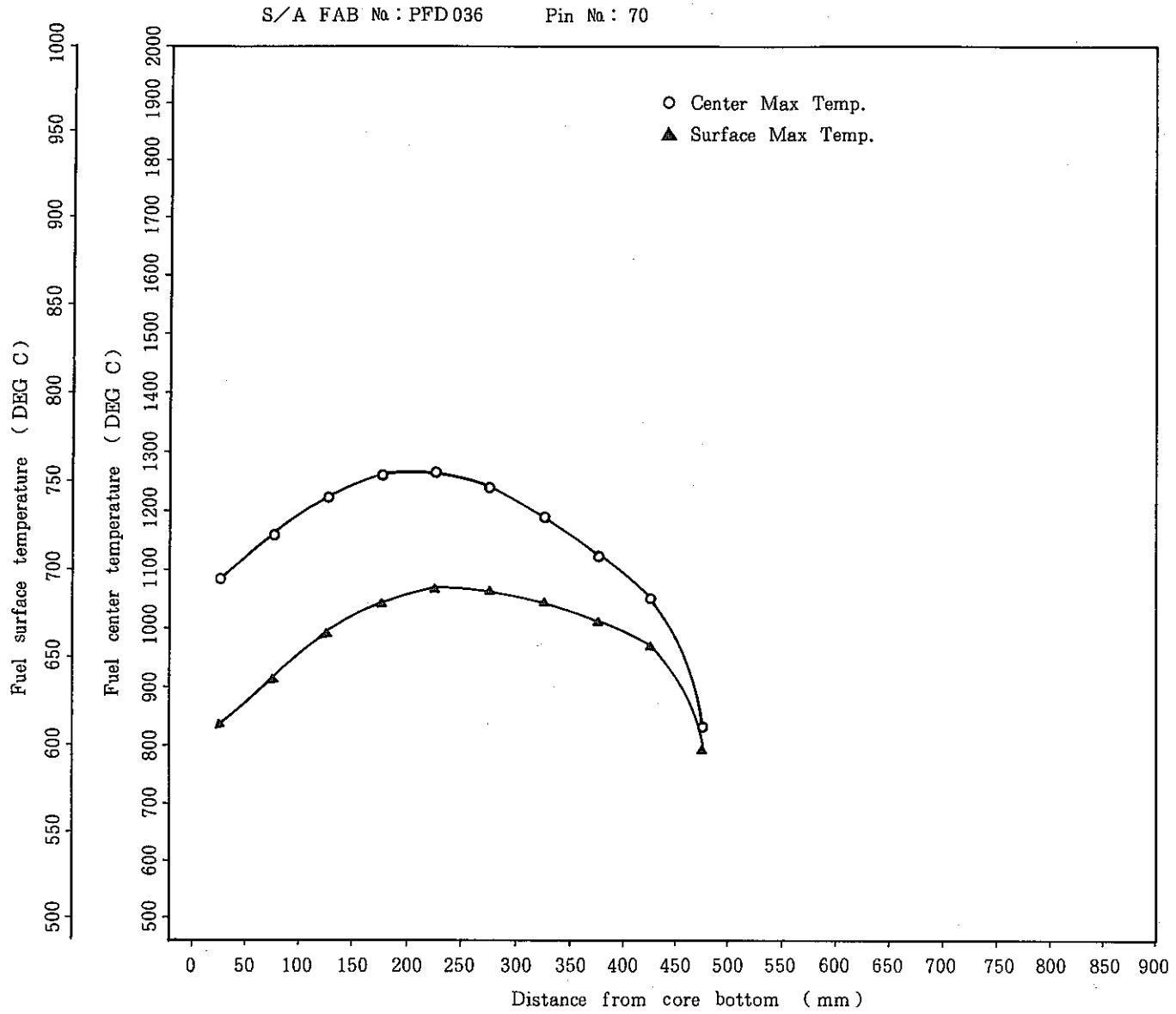


Fig.12 Fuel temperature distribution ( 9370 Pin )

S/A FAB No: PFD 036 Pin No: 58 Max O

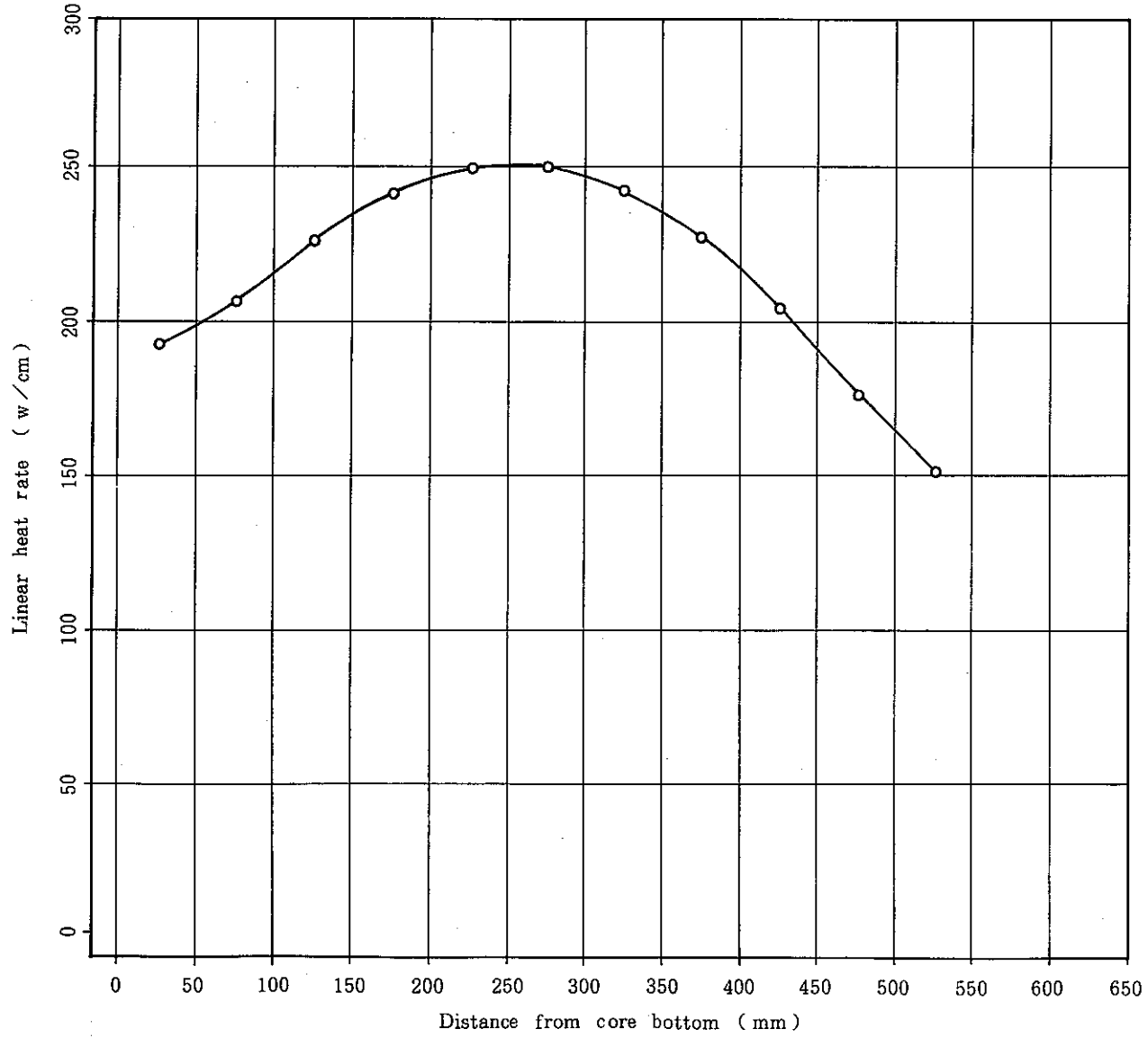


Fig.13 Linear heat rate distribution ( 9358 Pin )

S/A FAB No : PFD036 Pin No : 64 Max ○

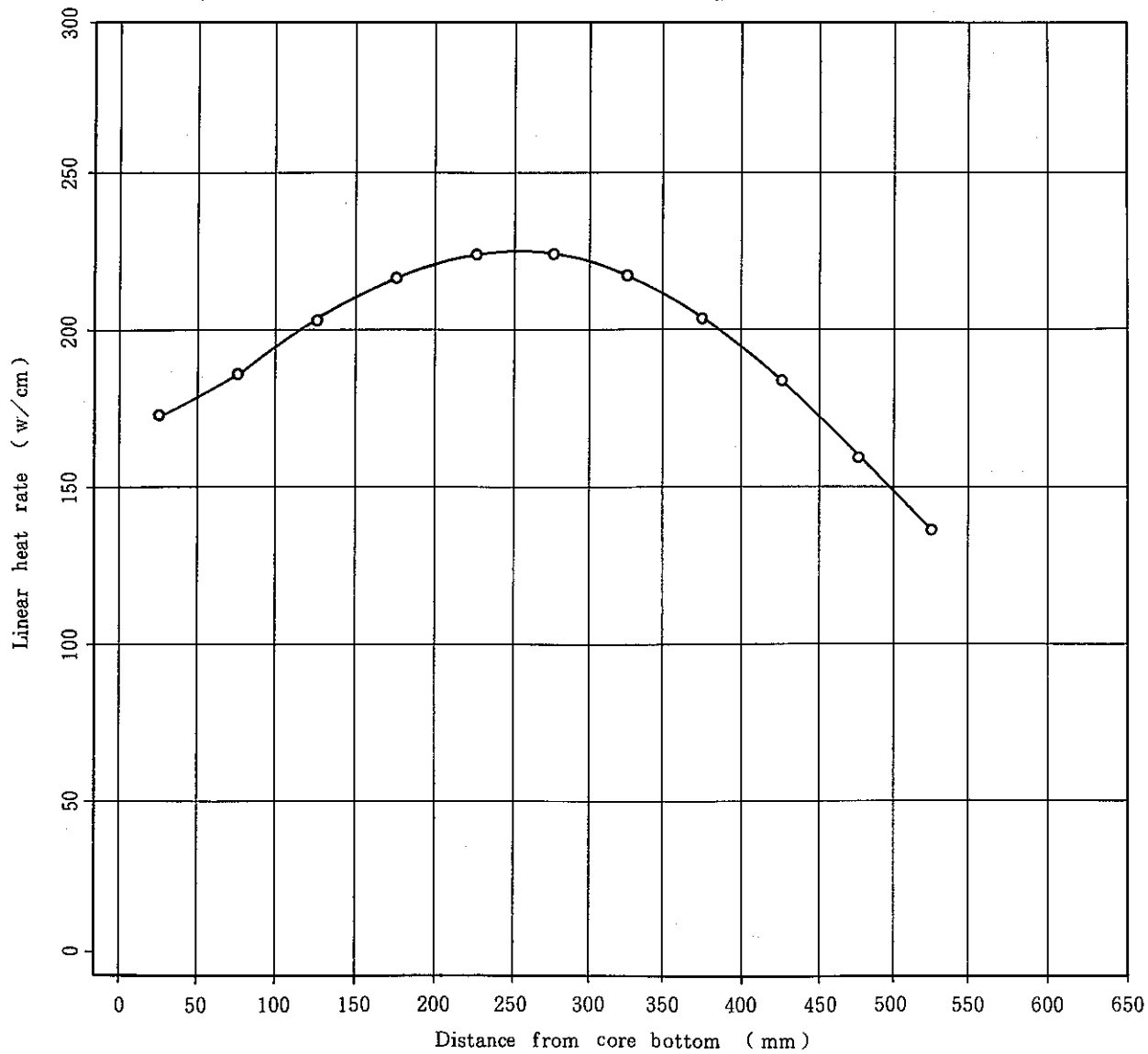


Fig.14 Linear heat rate distribution ( 9364 Pin )

S/A FAB No : PFD 036

Pin No : 70

Max ○

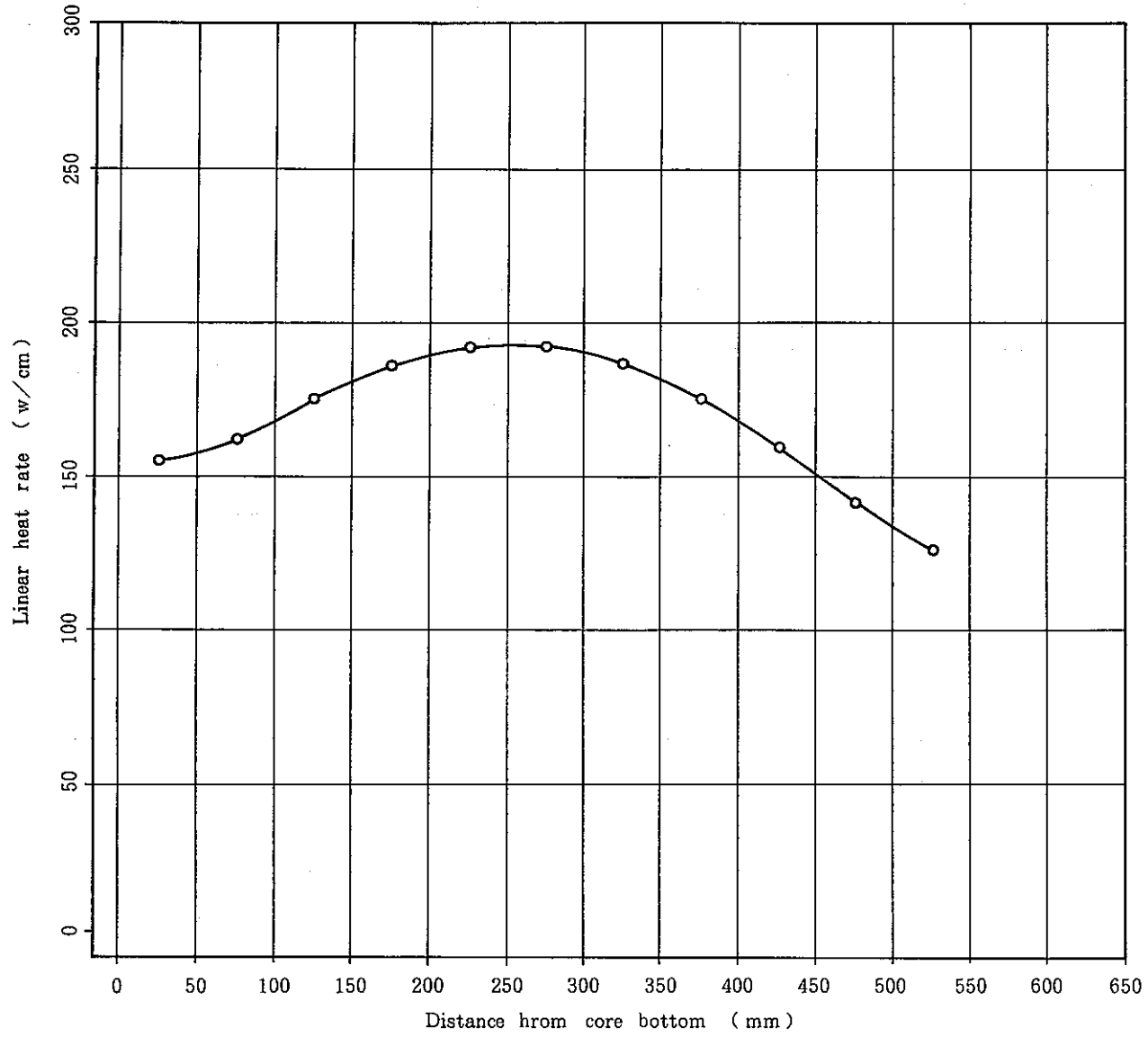


Fig.15 Linear heat rate distribution ( 9370 Pin )



	代表ピン	高出力ピン	低出力ピン
ピン No.	9364	9358	9370
被覆管メーカー	K	K	K

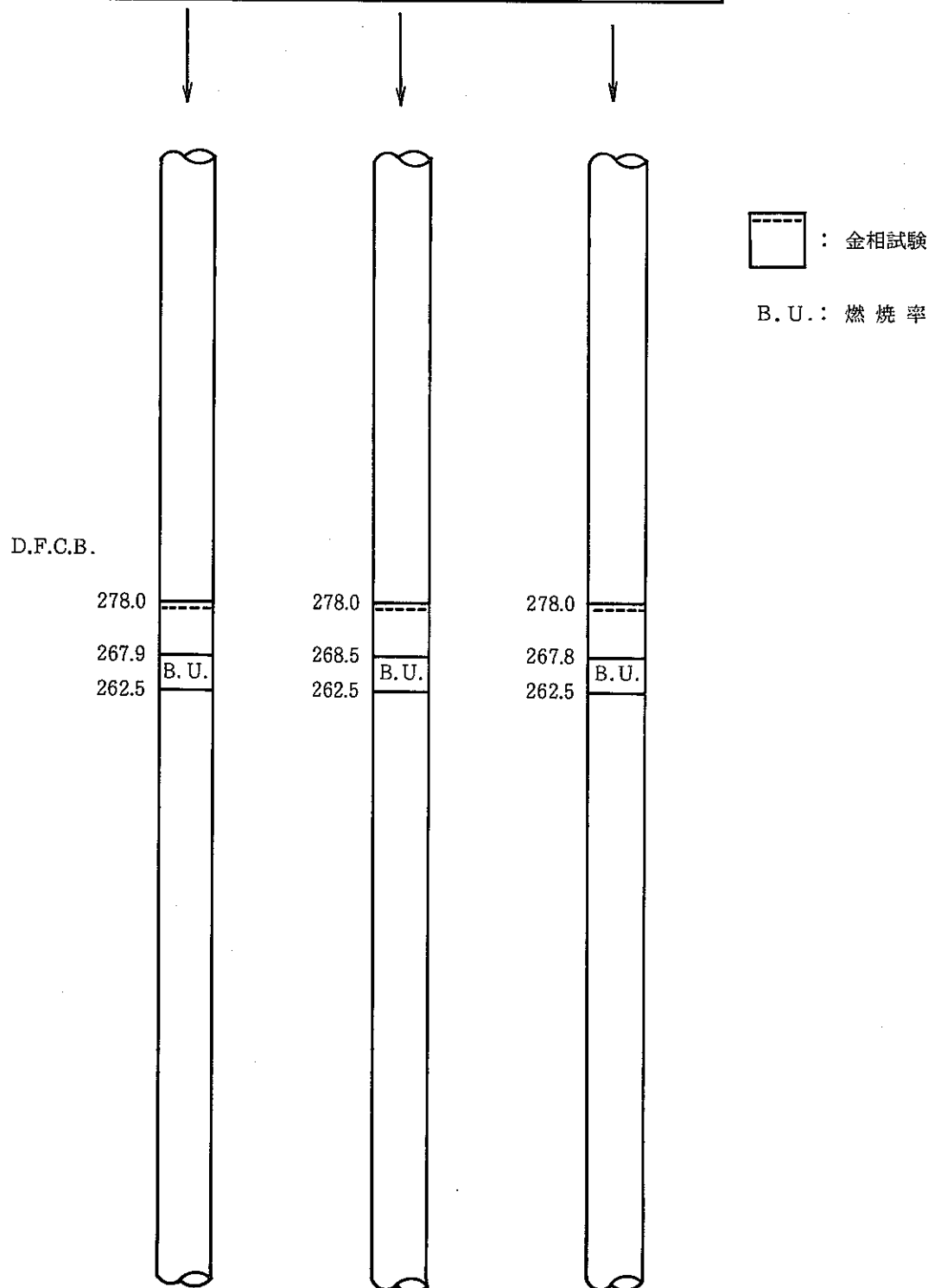


Fig. 16 Sampling of specimens ( PFD 036 )

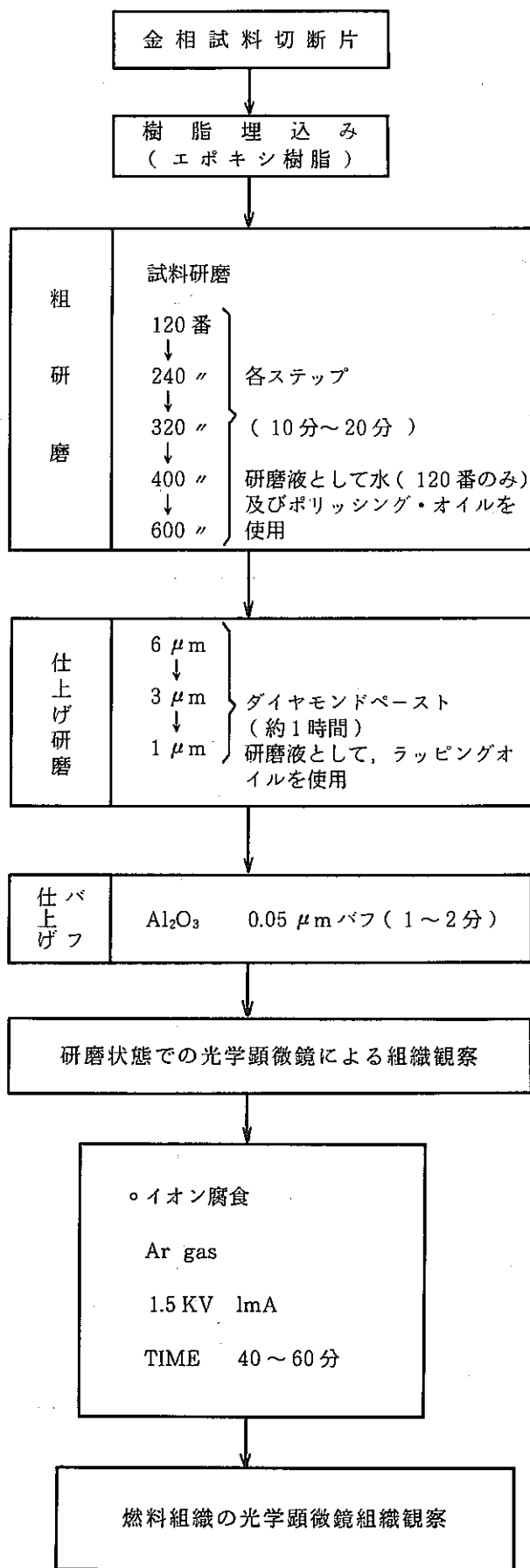


Fig.17 Flow diagram of metallongraphic examination in AGS

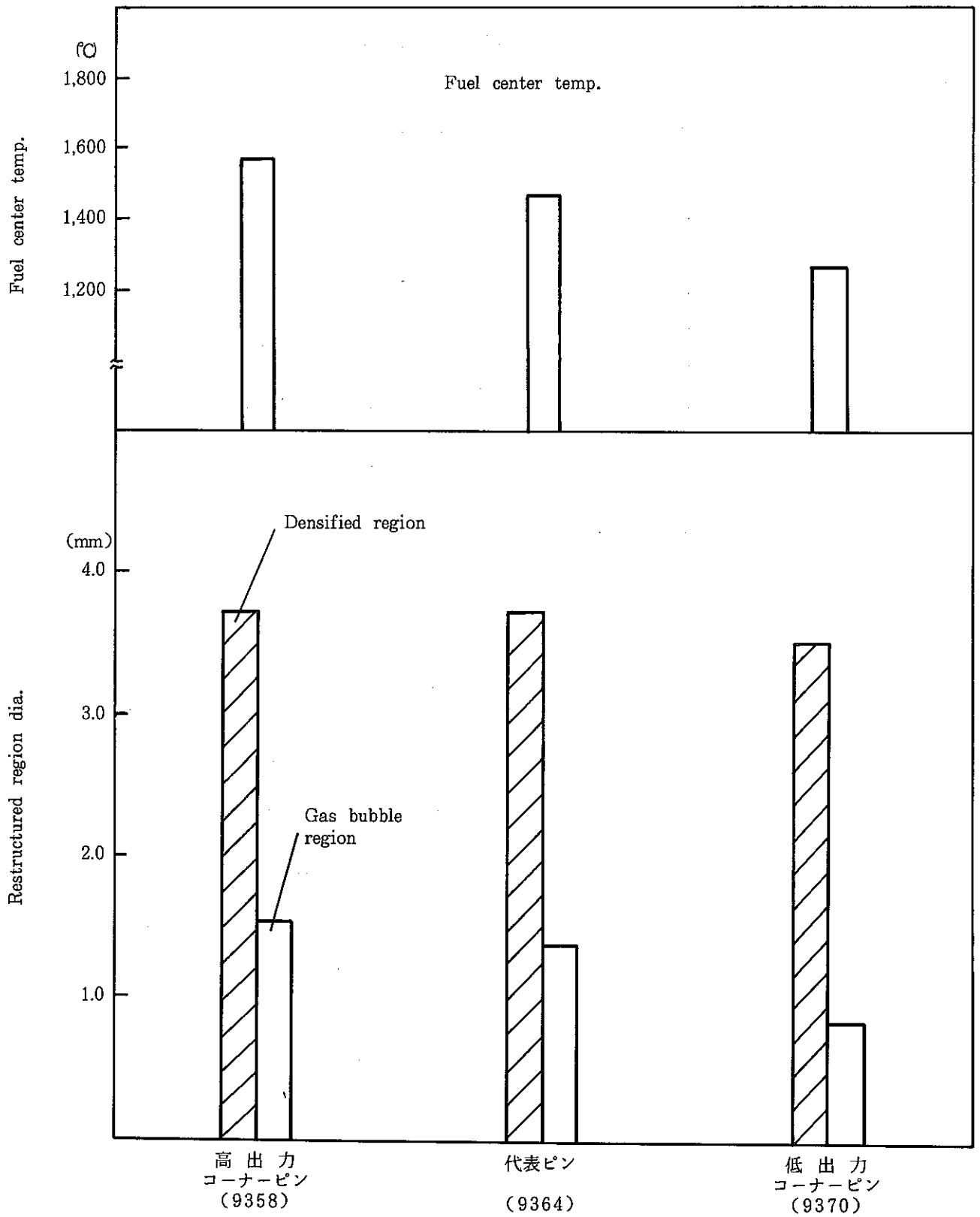


Fig.18 Effects of pin location on fuel structure

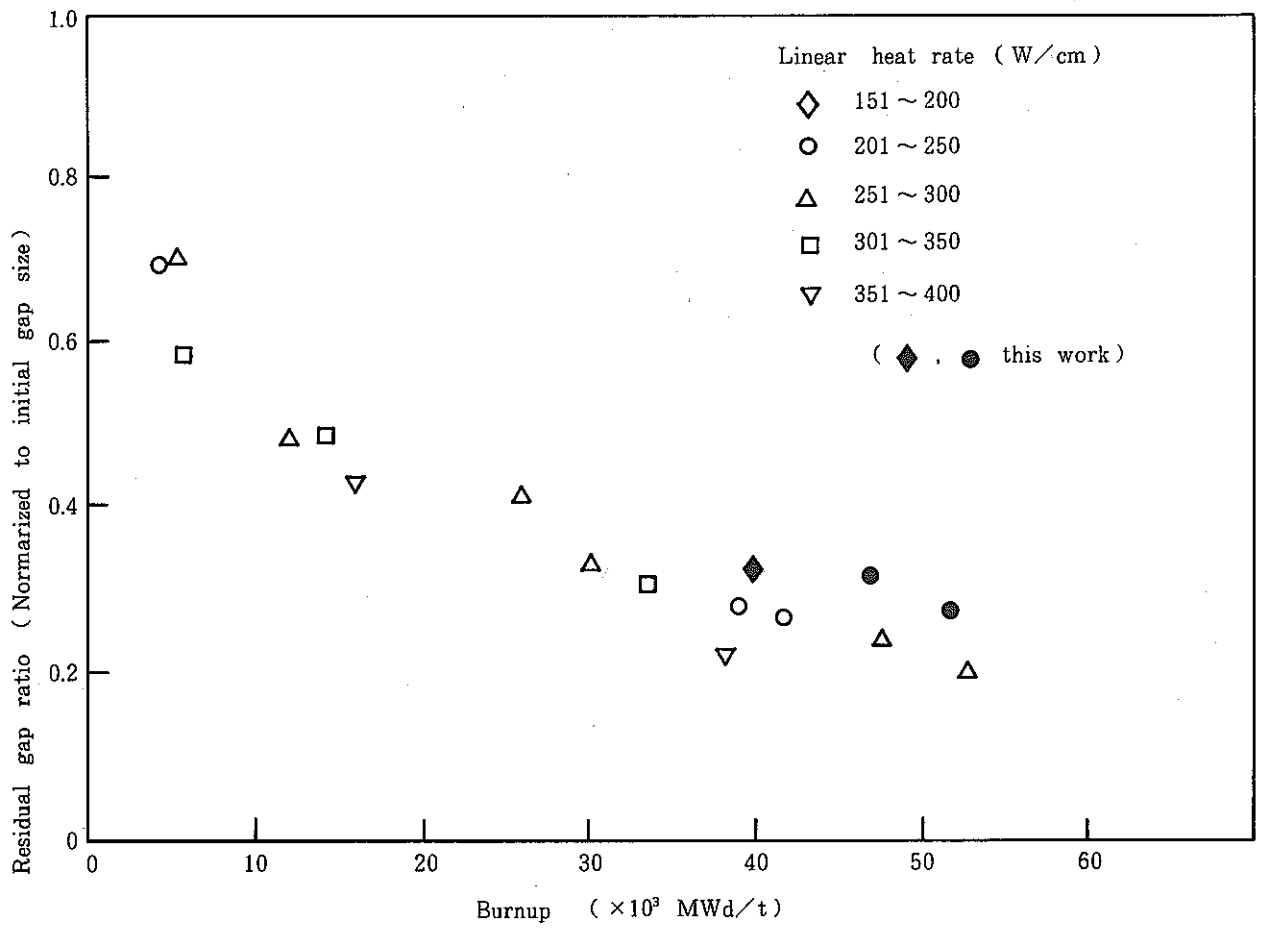
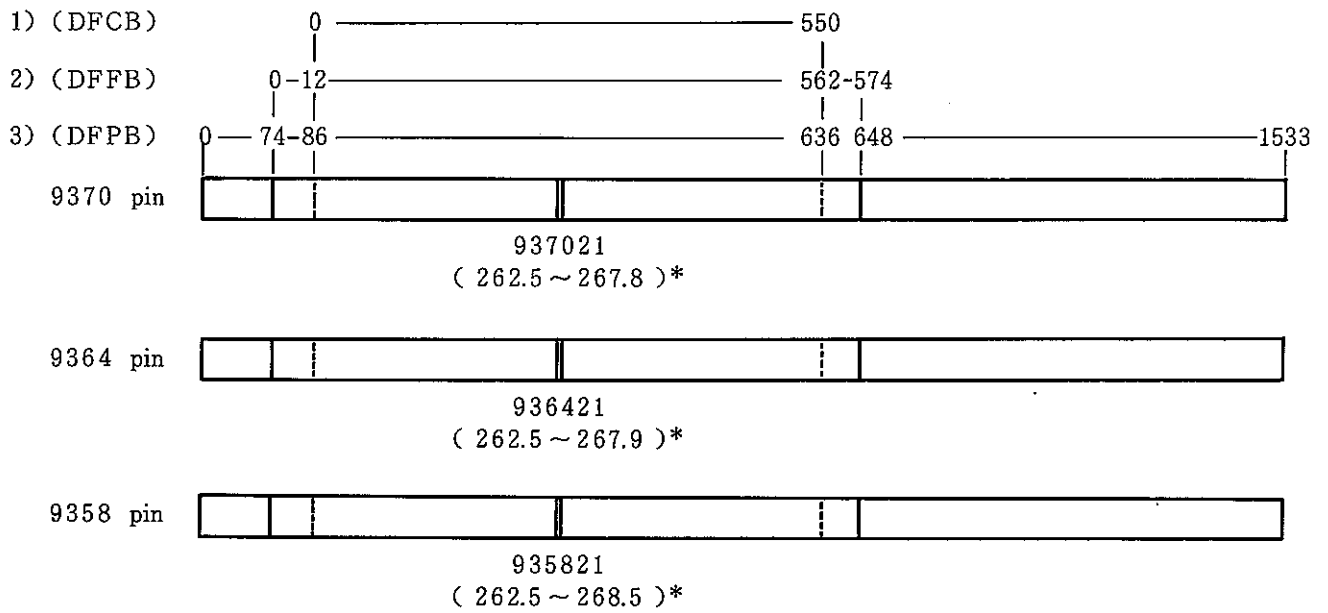
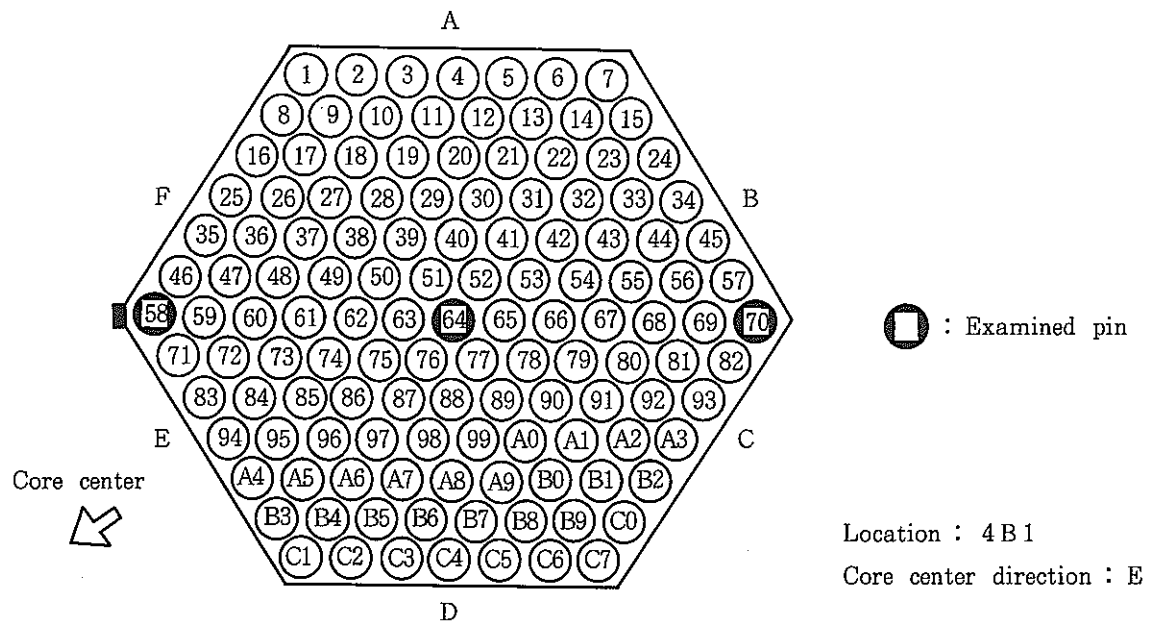


Fig.19 Residual gap ratio as a function of burnup



\* DFCB

1) Distance from core fuel bottom

2) Distance from fuel bottom

3) Distance from pin bottom

Fig. 20 Cutting diagram of PFD 036 fuel pins for burnup measurement

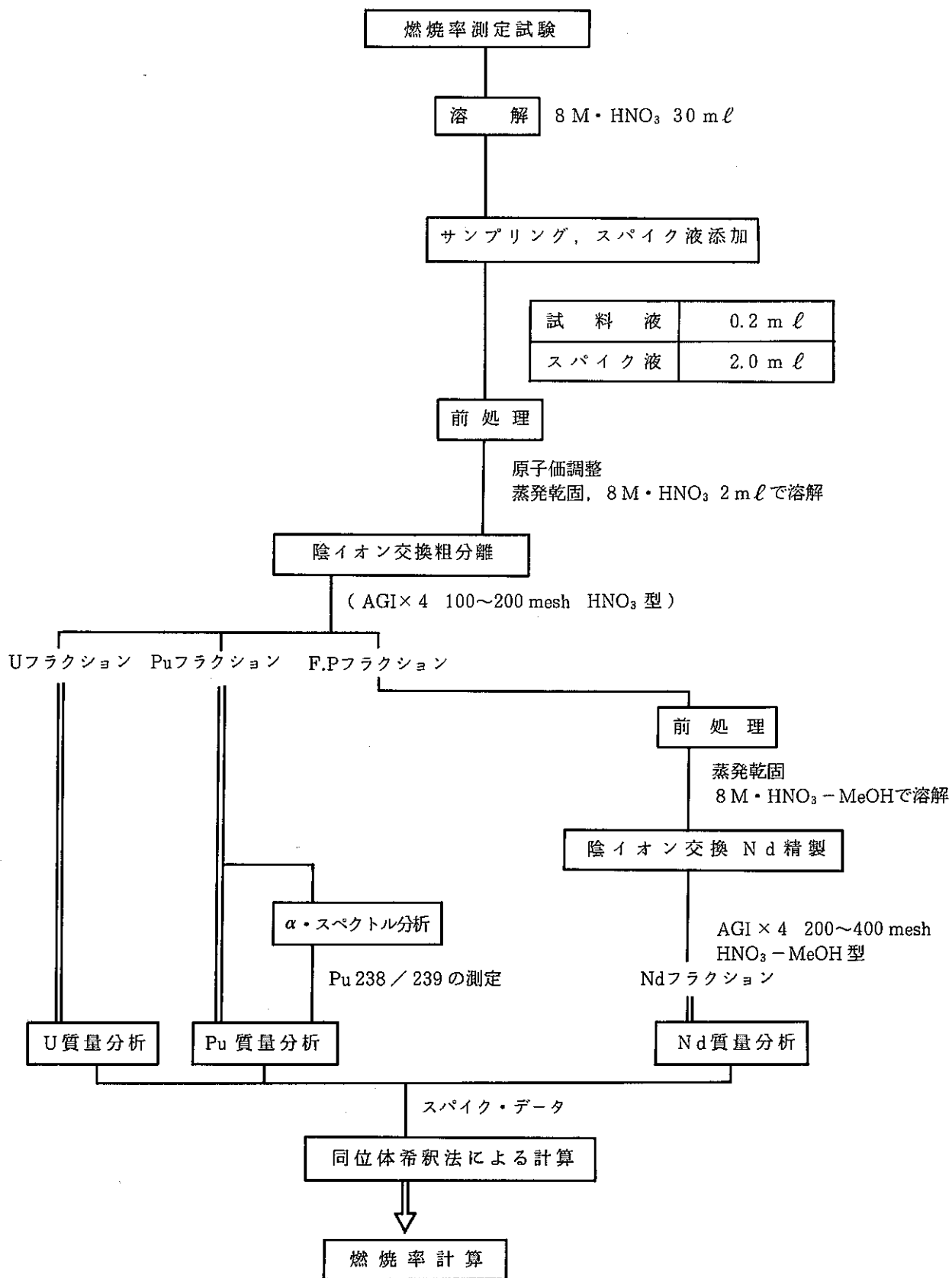


Fig.21 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

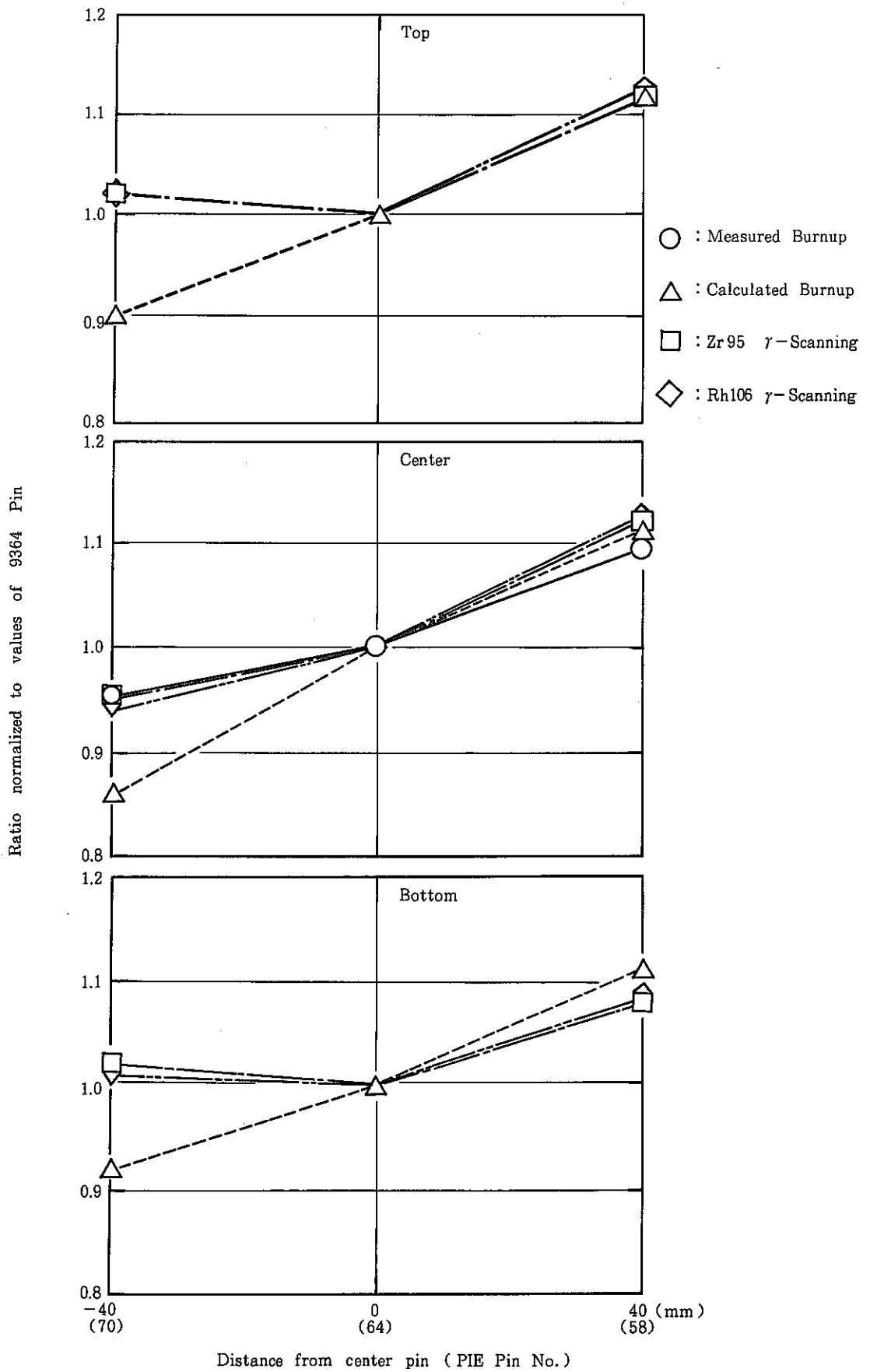


Fig.22 Burnup radial distribution of PFD 036 subassembly

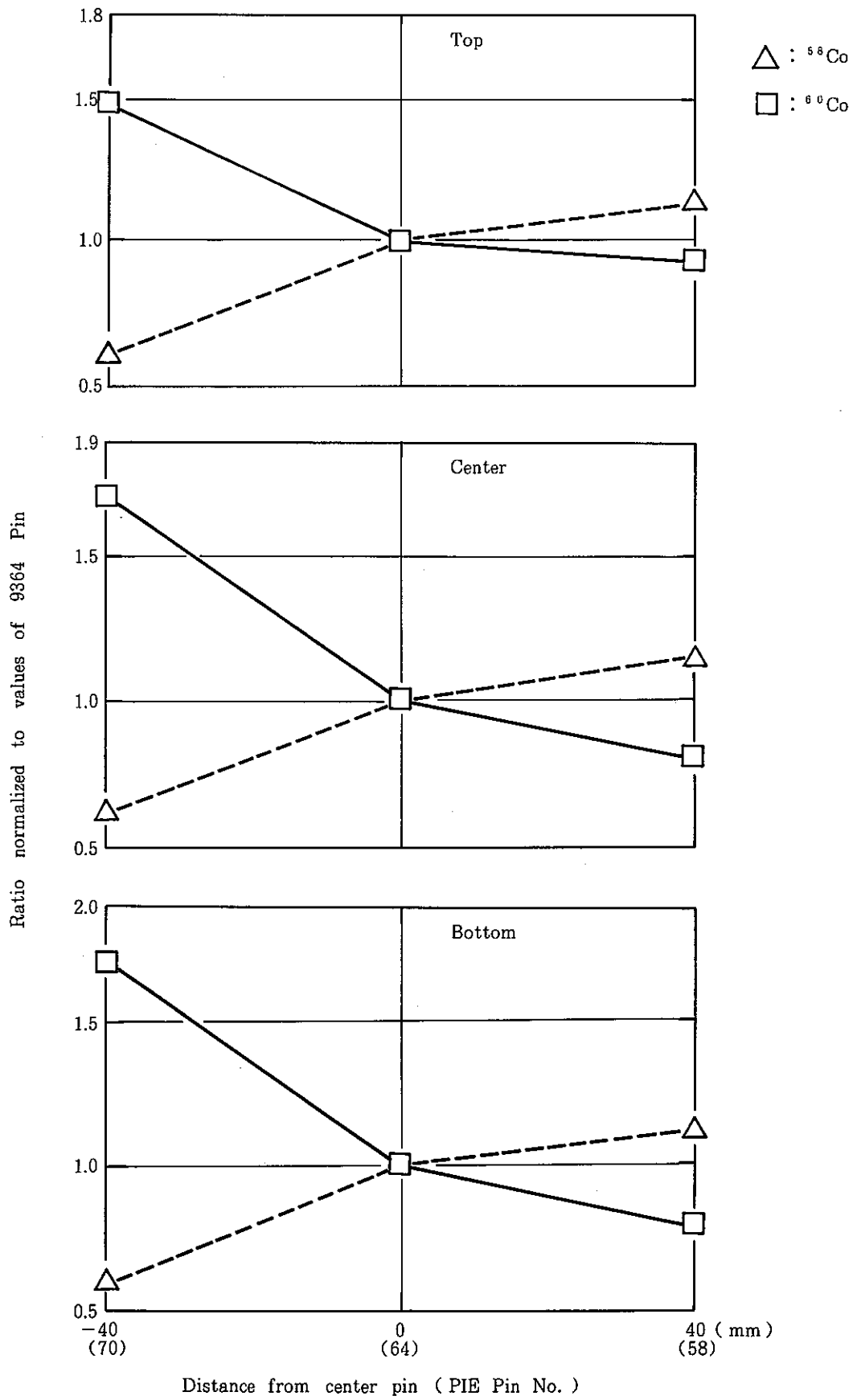


Fig. 23 Radial distribution of  $\gamma$ -ray intensity on PFD036 subassembly



S/A No.	<b>JOYO-PFD036</b>
Pin No.	<b>9358</b>
S/A Peak Burnup	<b>42600MWD/MTM</b>

As polished

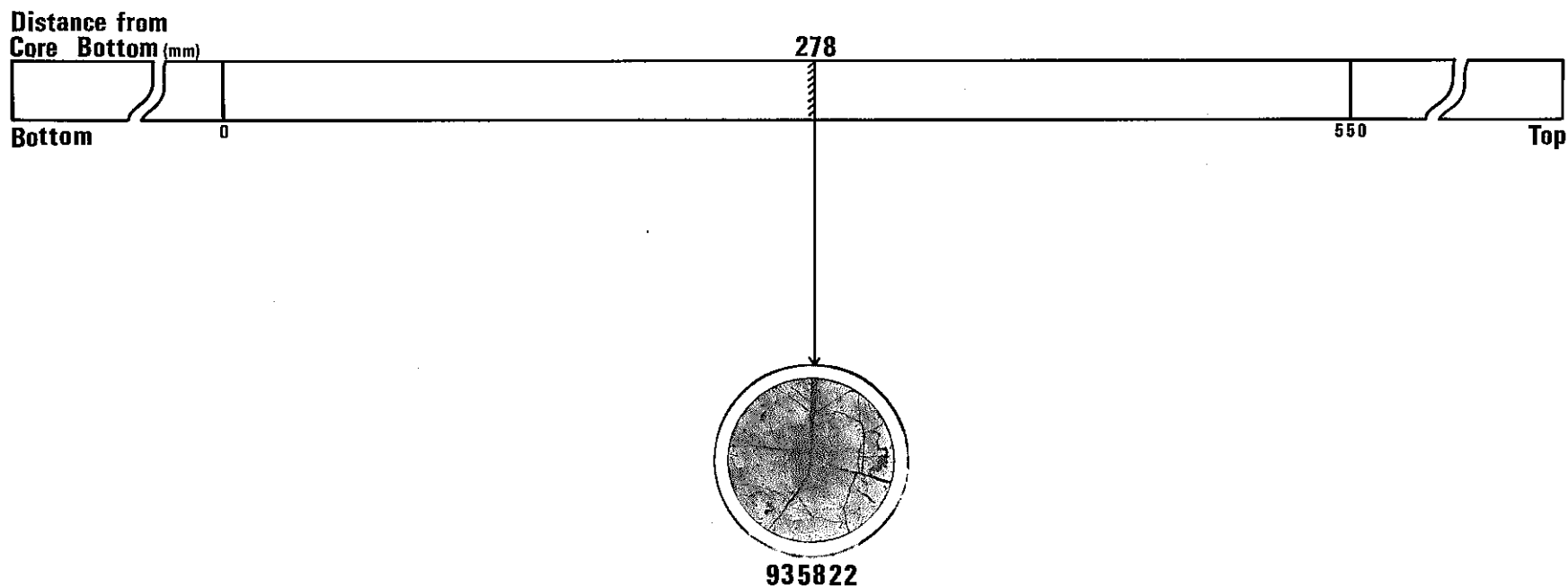


Photo.1 Macrographs of "JOYO" MK-II core fuel ( 9358 Pin )

S/A No.	<b>JOYO-PFD036</b>
Pin No.	<b>9364</b>
S/A Peak Burnup	<b>42600 MWD/MTM</b>

As polished  
etched

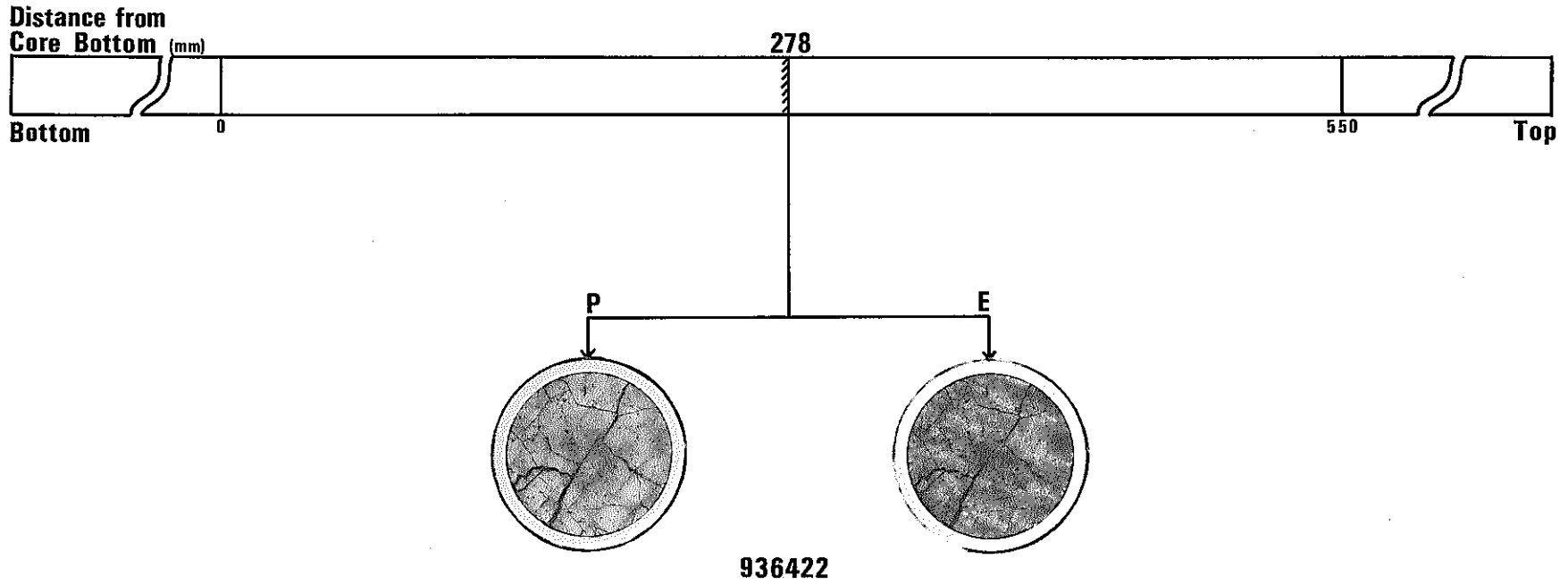


Photo.2 Macrographs of "JOYO" MK-II core fuel (9364 Pin)

S/A No.	<b>JOYO-PFD036</b>
Pin No.	<b>9370</b>
S/A Peak Burnup	<b>42600MWD/MTM</b>

As polished

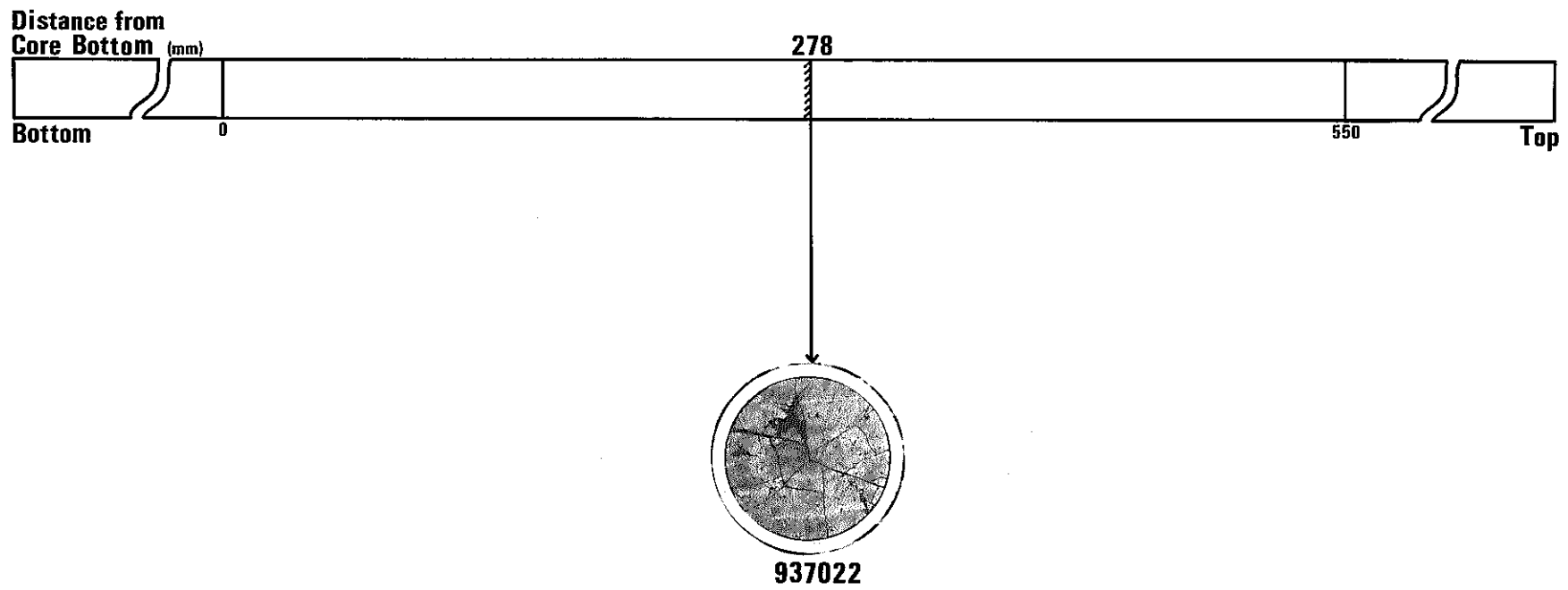


Photo.3 Macrographs of "JOYO" MK-II core fuel ( 9370 Pin )

S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9358	
Section No.	935822	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

As polished

1mm



Photo.4 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel (935822 sample)

S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9364	
Section No.	936422	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

As polished

1mm

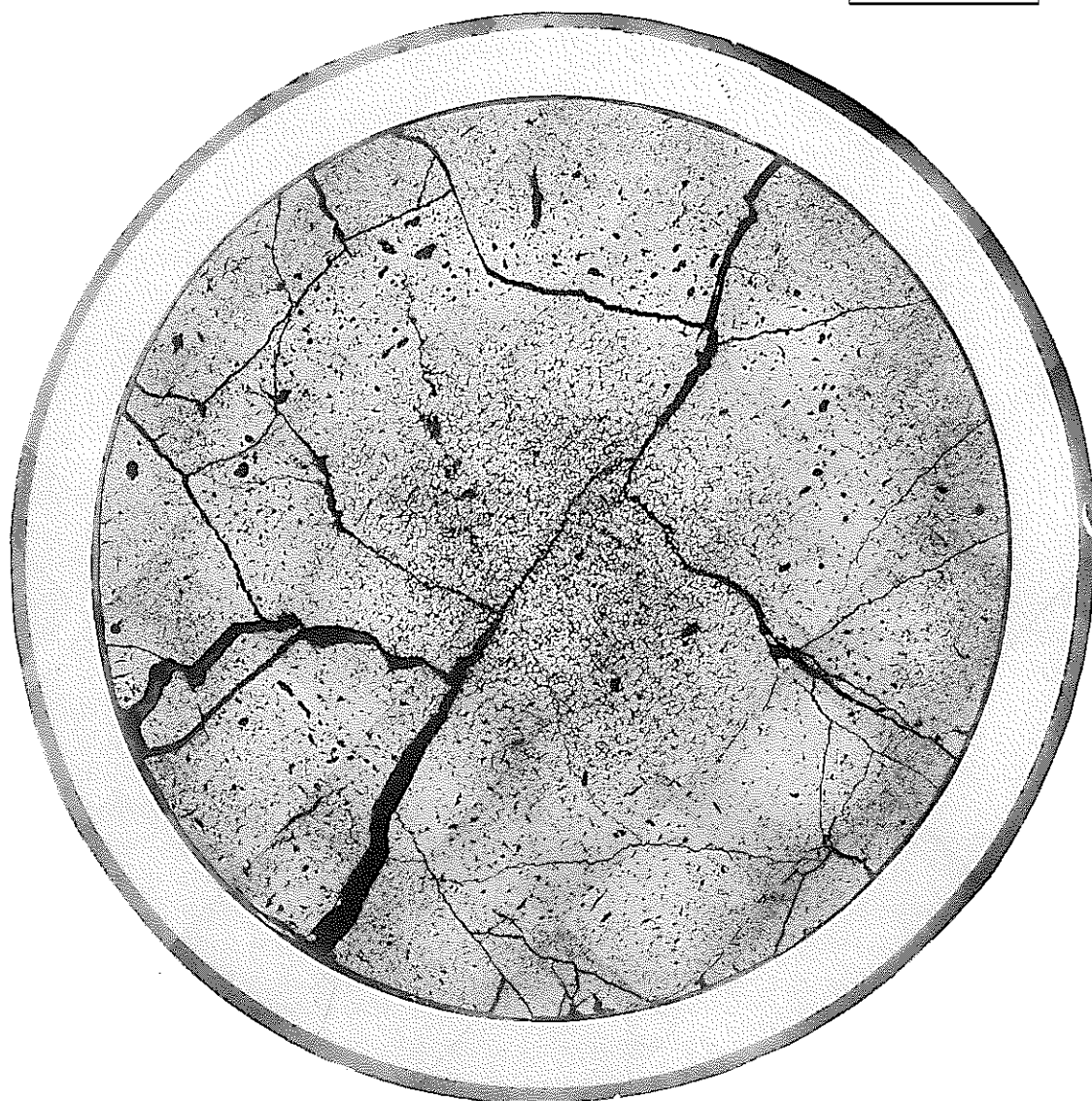


Photo.5 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel ( 936422 sample )

S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9364	
Section No.	936422	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

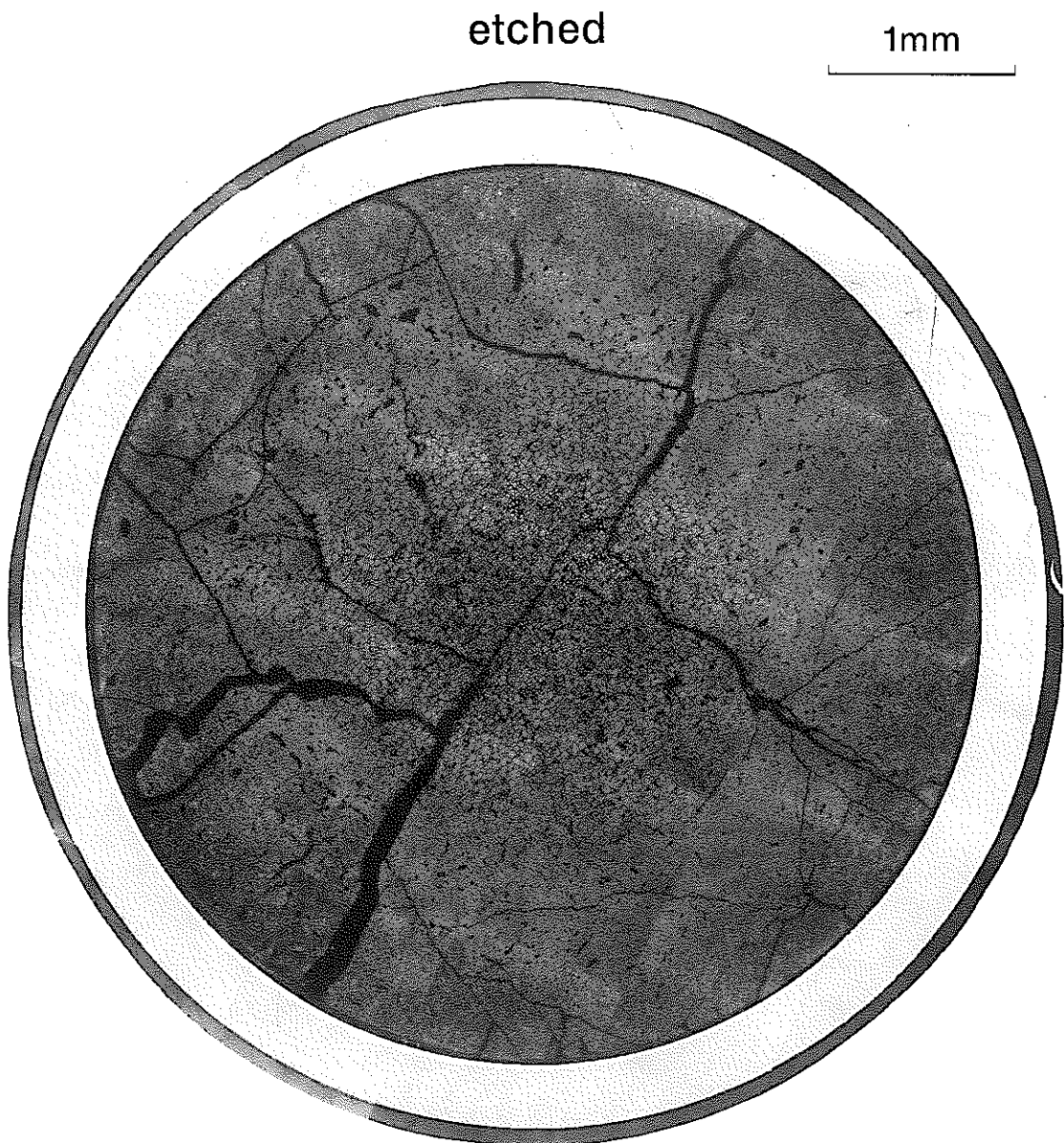


Photo.6 Postirradiation ceramograph of the transverse section of  
 "JOYO" MK-II core fuel ( 936422 sample )

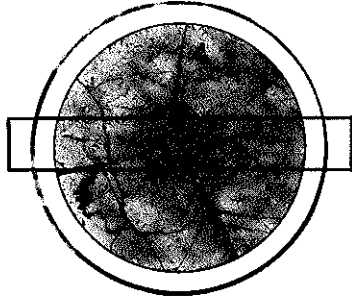
S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9370	
Section No.	937022	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

As polished

1mm



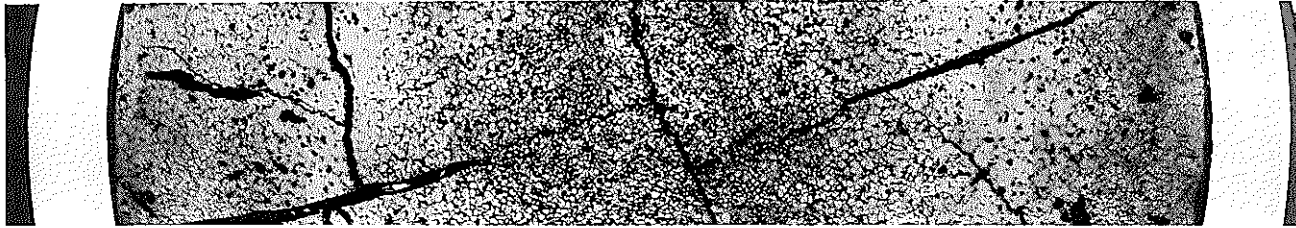
Photo.7 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" MK-II core fuel ( 937022 sample )



S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9358	
Section No.	935822	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

As polished

1mm



0.1mm

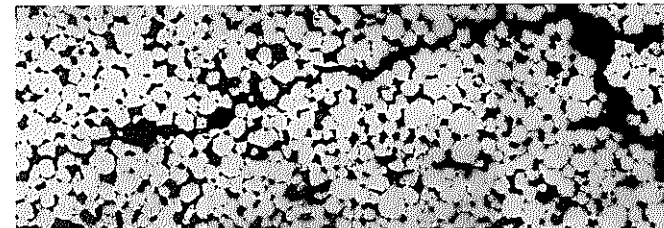
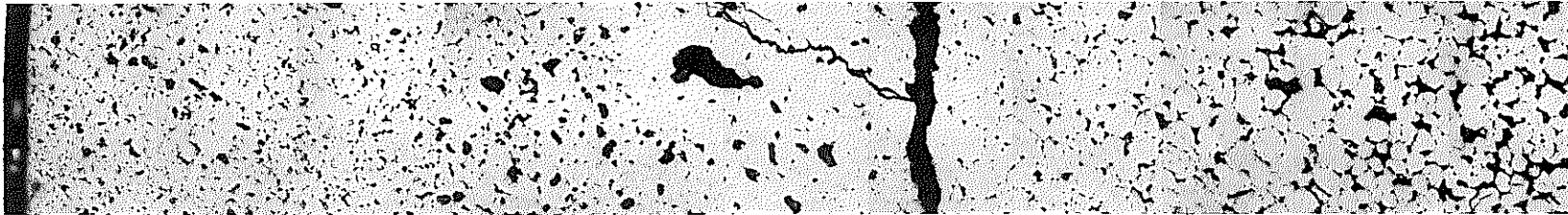
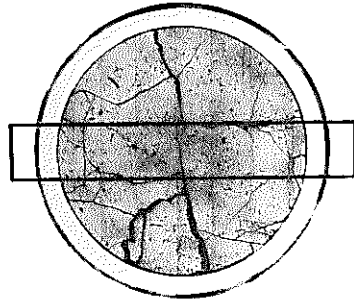


Photo.8 Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel ( 935822 sample )

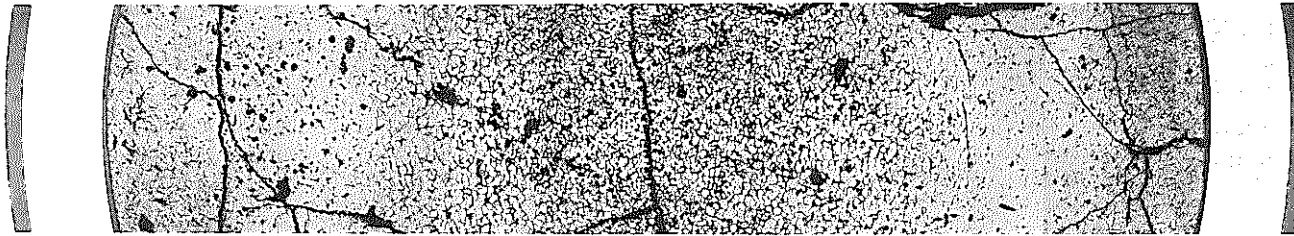




S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9364	
Section No.	936422	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

As polished

1mm



0.1mm

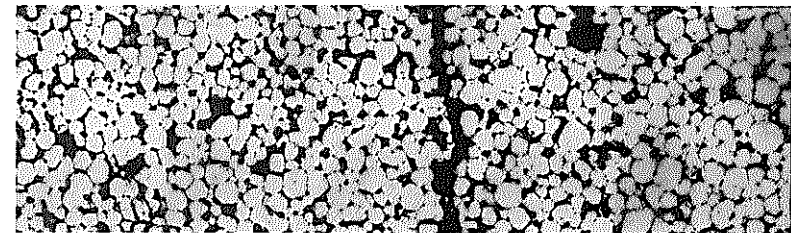
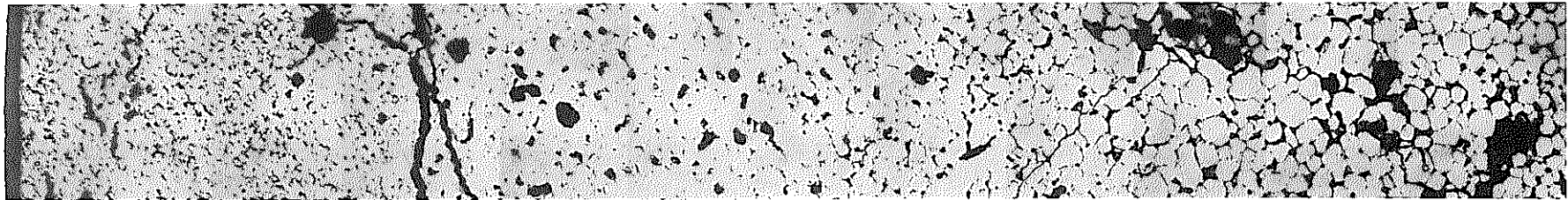
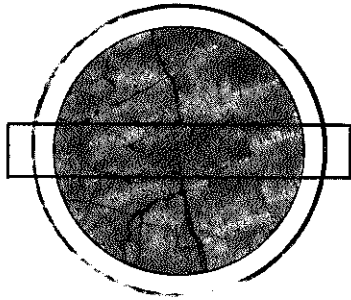


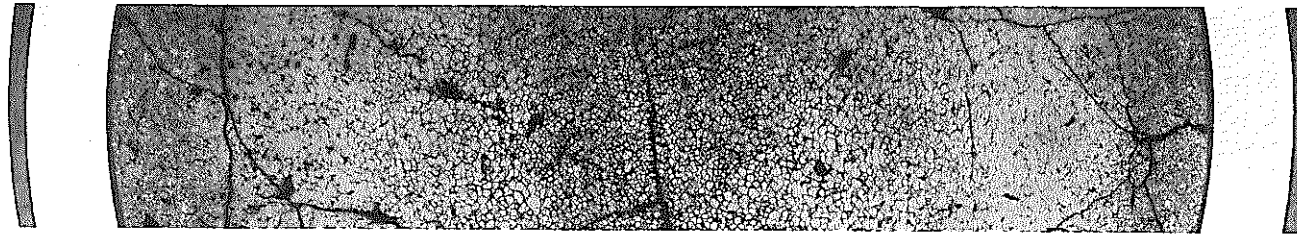
Photo.9 Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (936422 sample)



S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9364	
Section No.	936422	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

etched

1mm



0.1mm

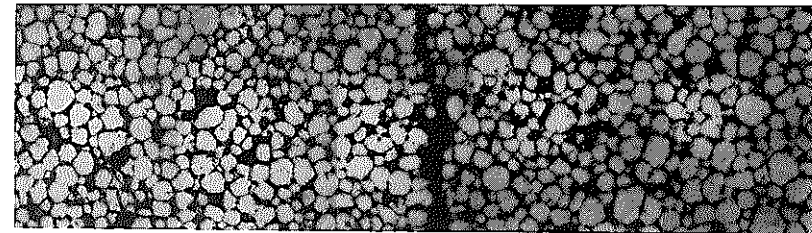
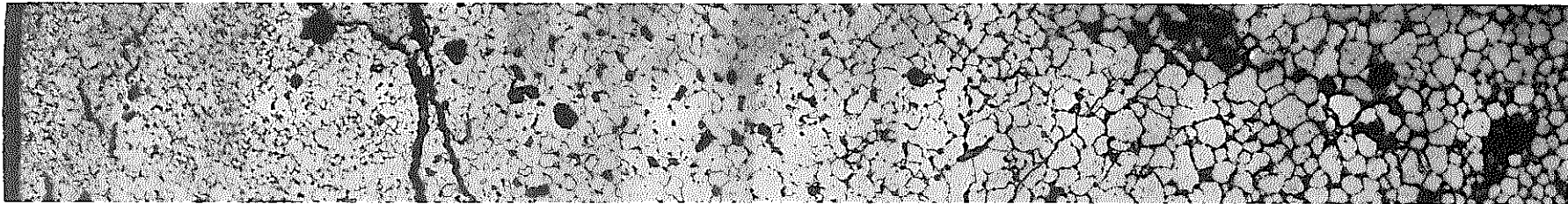
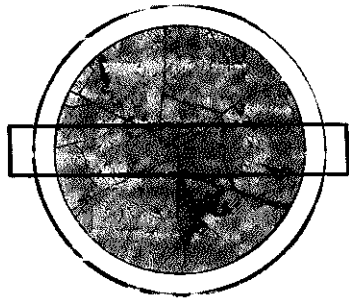


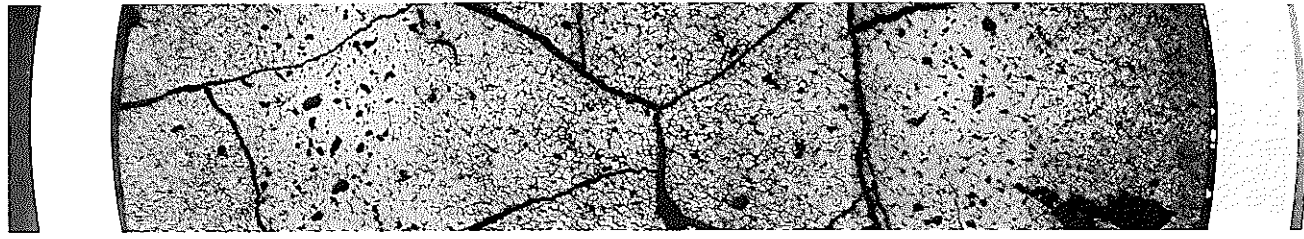
Photo.10 Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (936422 sample)



S/A Name	JOYO-PFD036	
Pin No.	9370	
Section No.	937022	
Distance from bottom of pin		364mm
Distance from bottom of core column		278mm

As polished

1mm



0.1mm

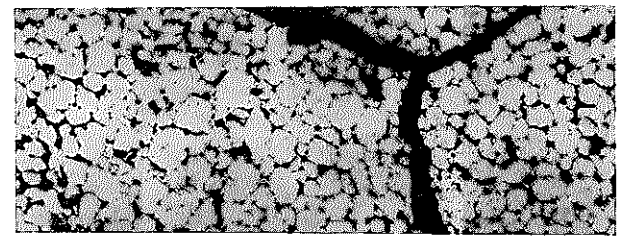
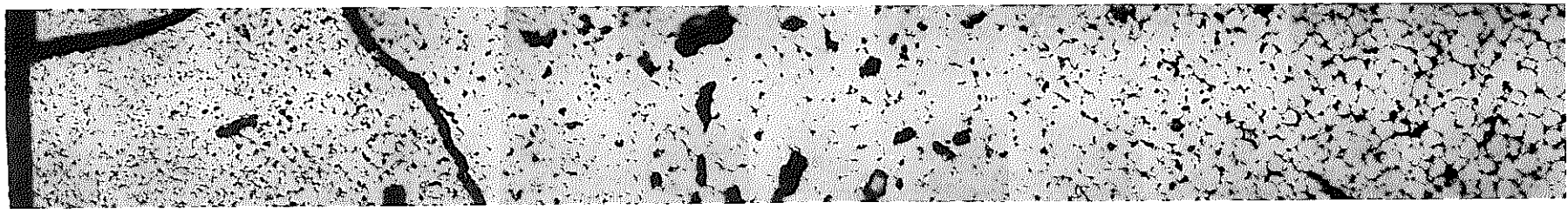


Photo.11 Postirradiation ceramograph of "JOYO" MK-II core fuel (937022 sample)