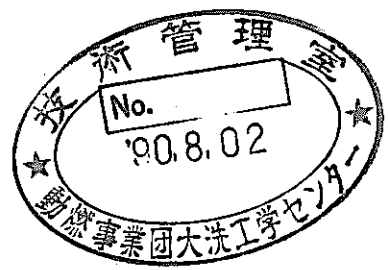


「常陽」MK-II計測線付特殊燃料集合体(INTA-1, PFI 010)の照射後試験

燃料要素の破壊試験



区分変更	
変更後資料番号	PNC TN9410 90-190
決裁年月日	平成 13年 7月 3日

1990年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



内 部 資 料
PNC ~~9410 90-007~~ 190
1 9 9 0 年 3 月

「常陽」MK-II 計測線付特殊燃料集合体 (INTA-1, PFI 010) の照射後試験
燃料要素の破壊試験

実施責任者 *横内 洋二
報告者 *川澄 清一, *吉持 宏
*吉川 勝則

要 旨

計測線付 C 型特殊燃料集合体 (PFI 010) は「常陽」における初めての計測線付の集合体であり、第 8 サイクルから第 12 サイクルまで照射された。照射燃料試験室 (AGS) では、計測線付特殊燃料集合体の計測データに対応する燃料挙動のデータ取得を目的として 6 本の計測線付燃料ピンを対象に、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) 中実ペレットの燃料組織は中心部より中心空孔、柱状晶領域、等軸晶領域及び不変化領域より構成されていた。一方、計測線が挿入されていた中空ペレットはいずれにも等軸晶、不変化領域は観察されたが柱状晶領域は一部の試料のみに観察された。
- 2) FCCI は観察した全試料に見られ、最大は約 30 μm であった。
- 3) 被覆管硬さは照射前と比較するといずれも 15 ~ 18 % 高くなっていた。また集合体半径方向の硬さ変化に有意な差は見られなかった。
- 4) 燃焼率測定した結果を MAGI コードの計算結果と比較すると計算値より約 5 % 小さかった。

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 試料調整方法	4
4.1.2 試験結果	4
4.2 被覆管硬さ測定	5
4.2.1 測定方法	5
4.2.2 測定結果	5
4.3 燃焼率測定試験	5
4.3.1 試料調整方法	5
4.3.2 測定結果	5
5. まとめ	7

List of Table

Table 1	Fuel pin fabrication parameters	8
Table 2	Calculation result by "SATURN-C"	9
Table 3	Metallographic examination in AGS	9
Table 4	Irradiation parameters of PF1010	10
Table 5	Summary data from ceramograph of PF1010	11
Table 6	Measurement condition and indentation position	12
Table 7	Microhardness result of "JOYO" MK-II PF1010 fuel cladding	13
Table 8	Cladding microhardness of "JOYO" MK-II PF1010	14,15
Table 9	Calculation of effective fission yield for A51923	16
Table 10	Composition of spike solution and natural Neodymium	17
Table 11	Result of isotope analysis and burnup calculation for PF1010 A51932 sample	18

List of Figure

Fig. 1	Schematic drawing of fuel pin	19
Fig. 2	Schematic drawing of fuel pin	20
Fig. 3	Schematic drawing of fuel pin	21
Fig. 4	Irradiation position of PFI010 subassembly in "JOYO" MK-II core	22
Fig. 5	Fuel pin position in PFI010 subassembly	23
Fig. 6	Burnup distribution (A504 pin)	24
Fig. 7	Burnup distribution (A508 pin)	25
Fig. 8	Burnup distribution (A513 pin)	26
Fig. 9	Burnup distribution (A517 pin)	27
Fig. 10	Burnup distribution (A519 pin)	28
Fig. 11	Burnup distribution (A532 pin)	29
Fig. 12	Fluence distribution (A504 pin)	30
Fig. 13	Fluence distribution (A508 pin)	31
Fig. 14	Fluence distribution (A513 pin)	32
Fig. 15	Fluence distribution (A517 pin)	33
Fig. 16	Fluence distribution (A519 pin)	34
Fig. 17	Fluence distribution (A532 pin)	35
Fig. 18	Linear heat late distribution(A504 pin)	36
Fig. 19	Linear heat late distribution(A508 pin)	37
Fig. 20	Linear heat late distribution(A513 pin)	38
Fig. 21	Linear heat late distribution(A517 pin)	39
Fig. 22	Linear heat late distribution(A519 pin)	40
Fig. 23	Linear heat late distribution(A532 pin)	41
Fig. 24	Sampling of specimens (PFI010)	42
Fig. 25	Flow diagram of metallographic examination in AGS	43
Fig. 26	Vickers micro hardness of fuel cladding as a function of irradiation temperature	44
Fig. 27	Cutting diagram of PFI010 subassembly fuel pins for burnup measurement	45
Fig. 28	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS	46

List of Photograph

Photo. 1	Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A508 pin)	47
Photo. 2	Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A513 pin)	48
Photo. 3	Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A517 pin)	49
Photo. 4	Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A519 pin)	50
Photo. 5	Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A532 pin)	51
Photo. 6	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A50822 sample)	52
Photo. 7	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A51322 sample)	53
Photo. 8	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A51722 sample)	54
Photo. 9	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A51922 sample)	55
Photo. 10	Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A53222 sample)	56
Photo. 11	Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A50822 sample)	57
Photo. 12	Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A51322 sample)	58
Photo. 13	Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A51722 sample)	59
Photo. 14	Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A59222 sample)	60
Photo. 15	Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A53222 sample)	61
Photo. 16	Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A50822 sample, FCCI)	62
Photo. 17	Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A51322 sample, FCCI)	63
Photo. 18	Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A51722 sample, FCCI)	64
Photo. 19	Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A51922 sample, FCCI)	65
Photo. 20	Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A53222 sample, FCCI)	66
Photo. 21	Optical micrographs of fuel cladding (A504 pin)	67
Photo. 22	Optical micrographs of fuel cladding (A508 pin)	68
Photo. 23	Optical micrographs of fuel cladding (A519 pin)	69
Photo. 24	Optical micrographs of fuel cladding (A519 pin)	70

1. ま え が き

計測線付特殊燃料集合体 (INTA-1, PFI 010) は照射中の燃料中心温度, FP ガス圧力, 冷却材温度等をオンラインで計測出来るように制作された C 型の特殊燃料集合体であり「常陽」MK-II の第 8 ~ 12 サイクルの間これらのデータ取得のため照射された。(集合体平均燃焼度 32, 200 Mwd/t)

照射後試験では計測データに対応する燃料挙動データを取得すると共に計測線付特殊燃料集合体としての構造等の設計の妥当性を確認することを目的として実施された。

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 6 本であり, 実施した照射後試験は, (a) 金相試験 (燃料及び被覆管組織観察), (b) 被覆管硬さ測定, 及び (c) 燃焼率測定である。

- I 1301 (A 504) 冷却材温度測定用燃料ピン
- I 1103 (A 508) 燃料温度測定, 冷却材温度測定用燃料ピン
- I 1104 (A 513) 燃料温度測定, 冷却材温度測定用燃料ピン
- I 1201 (A 517) FP ガス圧力測定用燃料ピン
- I 1105 (A 519) 燃料温度測定, 冷却材温度測定用燃料ピン
- I 1202 (A 532) FP ガス圧力測定用燃料ピン

2. 燃 料 ピ ン

本集合体の照射後試験に供された燃料ピン形状をFig. 1～3に、またその仕様をTable-1に示す。Fig. 1はF. P. ガス圧力測定用燃料ピンであり、燃料ピン内にはF. P. ガス圧力測定器が挿入されている。Fig. 2は燃料温度、冷却材温度測定用燃料ピンでありペレット内には熱電対が挿入されている。Fig. 3は冷却材温度測定用燃料ピンである。

3. 照 射 条 件

本集合体の炉心装荷位置をFig. 4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. 5にそれぞれ示す。さらに集合体の照射条件を以下に示す。

- ① 燃焼度 (集合体平均) : 32,200 Mwd/t
- ② 照射サイクル : 100 Mw (8)~(12)
- ③ 集合体ピークフルエンス ($E \geq 0.1 \text{ Mev}$) : $2.06 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$
- ④ 線出力 (集合体平均) : 290 w/cm
- ⑤ 照 射 位 置 : 5 F 2

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. 6~Fig. 23 に示す。

また燃料部の中心である軸方向ノード (NO. 28) での被覆管肉厚中心及び燃料中心温度の計算結果 (SATURN-Cによる) を Table-2 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. 24 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. 25 にまた実施内容を Table. 3 に示す。

4.1.2 試験結果

Fig. 24 に示す燃料ピンより 5 試料採取して金相試験を実施した。Photo. 1～5 に各燃料ピンからの試験採取位置及びその断面のマクロ写真を、Photo. 6～15 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 4 に示す。なお 5 試料のうち 3 試料 (A 50822, A 51322, A 51922) は計測線が挿入されていたため中空ペレットである。

① 燃料組織

中実ペレットは 2 個の試料とも中心空孔、柱状晶、等軸晶及び不変化領域から構成されていた。一方、中空ペレットの中心空孔は製造時の $1.9 \pm 0.2 \text{ mm } \phi$ に対して A 51322 が $1.841 \text{ mm } \phi$ 、A 51922 が $1.905 \text{ mm } \phi$ と製造時の許容範囲内であったが A 50822 は $2.204 \text{ mm } \phi$ と若干大きくなっていた。また柱状晶領域は A 50822 に観察され A 51922 は柱状晶に至る途中の伸長晶が観察された。A 51322 には柱状晶領域は見られなかった。これらの燃料組織変化を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 Table 5 に示す。

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
A 508 ピン	160 μm	21 μm	87 %
A 513 ピン	160 μm	24 μm	85 %
A 517 ピン	160 μm	29 μm	82 %
A 519 ピン	160 μm	55 μm	66 %
A 532 ピン	160 μm	38 μm	76 %

③ 燃料-被覆管の化学的相互作用 (FCCI) の観察

FCCI は観察した 5 試料全てに見られ最大腐食量は A 51722 の約 $30 \mu\text{m}$ (粒界腐食) であった。なお他の 4 試料の腐食量は、いずれも $10 \mu\text{m}$ (全面腐食) 程度であった。

Photo 16～20 に各試料の代表的な FCCI の写真を示す。

④ 被覆管組織観察

A 504, A 508, A 513, A 519 の各燃料ピンのほぼ燃料中央部より 1 試料ずつ、計 4 試料を採取して被覆管組織観察を実施した。Photo. 21～24 に試料採取位置及び光学顕微鏡による写真を示す。4 試料供、被覆管中心温度は約 530 °C であり、被覆管の外側と内側を比較するといずれも内面の粒界に多くの炭化物析出がみられ、また鋭敏化が進んでいるのが観察された。

4.2 被覆管硬さ測定

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 6 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 7 に軸方向硬さ値と照射前硬さ値を、Table 8 に各測定点の硬さ値を示す。また Fig. 26 に硬さと照射温度との関係を示す。

今回、試験に供した被覆管はほぼ同一照射量及び照射温度であり、測定した 4 試料共、同程度の硬さ値（Hv 299～Hv 309）を示していた。また照射前と照射後の硬さを比すると照射前より約 15～18% 高い値であった。なお集合体半半径方向のピンの硬さの変化については有意な差は認められなかった。

4.3 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燃焼率測定を実施した。

4.3.1 試料調整方法

試料の採取位置を Fig. 27 に、また試料調整の方法及び手順を Fig. 28 に示す。

4.3.2 測定結果

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を Table 9 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 10 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 11 に示す。

今回得られた測定データと計算結果を以下に示す。

Pin NO.	Sample NO.	Pu content ¹⁾	Burnup	
			Calculated ²⁾	Measured ³⁾
A 519	A 51923	28.512 atom%	4.06 atom%	3.85 atom%

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

2) Calculated by MAGIコード

3) Measured by ^{148}Nd monitor method

以上のように実測値は 3.85 atom% (35, 300 MWd/t) であり計算値より約 5% 小さかった。

5. ま と め

計測線付特殊燃料集合体 PFI 010 の照射後試験（被壊試験）結果の概要を以下に示す。なお金相試験は A 508, A 513, A 517, A 519, A 532 ピンについて、また被覆管硬さ測定および被覆管組織観察は A 504, A 508, A 513, A 519 ピンを、燃焼率測定は A 519 ピンをそれぞれ実施した。

1) 金相試験

- 中実ペレットの燃焼組織は中心部より中心空孔、柱状晶領域、等軸晶領域及び不変化領域より構成されていた。一方計測線が挿入されていた中空ペレットはいずれにも等軸晶領域、不変化領域は観察されたが柱状晶領域は一部の試料のみに観察された。
- 残留ギャップ巾は、製造時の 160 μm から中実ペレットで 29 μm まで、中空ペレット 21 μm までそれぞれ閉じていた。これはペレットのスエリング等によりギャップ巾が減少したものと考えられる。
- FCCI の最大は約 30 μm であった。
- 被覆管組織は、被覆管内面で炭化物析出が多かった。

2) 被覆管硬さ測定

- 被覆管硬さは照射前と比較するといずれも 15 ~ 18 % 高くなっていた。また集合体半径方向の硬さ変化に有意な差は見られなかった。

3) 燃焼率測定試験

- 燃焼率測定した結果は 3.85 atm% で MAGI コードの計算結果と比較すると計算値より約 5% 小さいが、これは通常のドライバー燃料の測定でみられる差の範囲内である。

Table-1 Fuel pin fabrication parameters

燃料ピン	
全長	1,555 mm
外径	6.5 mm
燃料部長さ	550 mm
ペレット	
材質	(Pu, U)O ₂
直径	5.4 mm
長さ	8 mm
密度	85% T. D.
Pu 富化度	30 W/O 以下
U 濃縮度	35 W/O 以下
O/M 比	1.97
被覆管	
外径	6.5 mm
内径	5.56 mm
材質	SUS316

Table 2 Calculation result by 'SATURN-C'

燃料要素 No.	計算結果 軸方向ノード No.	被覆管肉厚中心温度 (°C)	燃料中心温度 (°C)
I 1301 (A 504)	28	534	1976
I 1103 (A 508)	28	535	1960
I 1104 (A 513)	28	529	1918
I 1201 (A 517)	28	522	1920
I 1105 (A 519)	28	525	1910
I 1202 (A 532)	28	508	1876

Table 3 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	} 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		×100 部分写真	} 詳細燃料組織観察
	×400 部分写真		×400 部分写真	
被 覆 管	×200 ~ 750 部分写真	FCCI		

Table 4 Irradiation parameters of PFI 010

Pin No.	Section No.	Distance from core bottom (mm)	Burnup (MWd/t)	Linear heat rate (W/cm)	Fuel center temp. (°C)	Clad. MIDDLE temp. (°C)	Comment
A 508	A 50822	270	37,500	325	1960	535	中空ペレット
A 513	A 51322	272	36,250	314	1918	529	中空ペレット
A 517	A 51722	275	36,488	316	1920	522	中実ペレット
A 519	A 51922	270	36,136	313	1910	525	中空ペレット
A 532	A 53222	276	35,361	307	1876	508	中実ペレット

Table 5 Summary data from ceremograph of PFI 010

Pin No	Section No	Re&structured region dia. (mm)				Residual diametral gap size (μ m)	Pellet outer dia. (mm)	Clad dia (mm)		Comment
		Central Void	Columnar region	Equiaxed region	Dark ring region			Outer	Inner	
A 508	A 50822	2.204	4.060	4.738	4.856	21	5.552	6.497	5.573	中空ペレット
A 513	A 51322	1.841	—	3.950	4.073	24	5.547	6.494	5.571	中空ペレット
A 517	A 51722	1.306	3.493	3.899	4.118	29	5.544	6.497	5.573	中実ペレット
A 519	A 51922	1.905	3.211 (伸長晶領域)	4.625	4.383	55	5.516	6.492	5.571	中空ペレット
A 532	A 53222	1.292	3.554	4.094	4.213	38	5.535	6.495	5.573	中実ペレット

Table 6 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

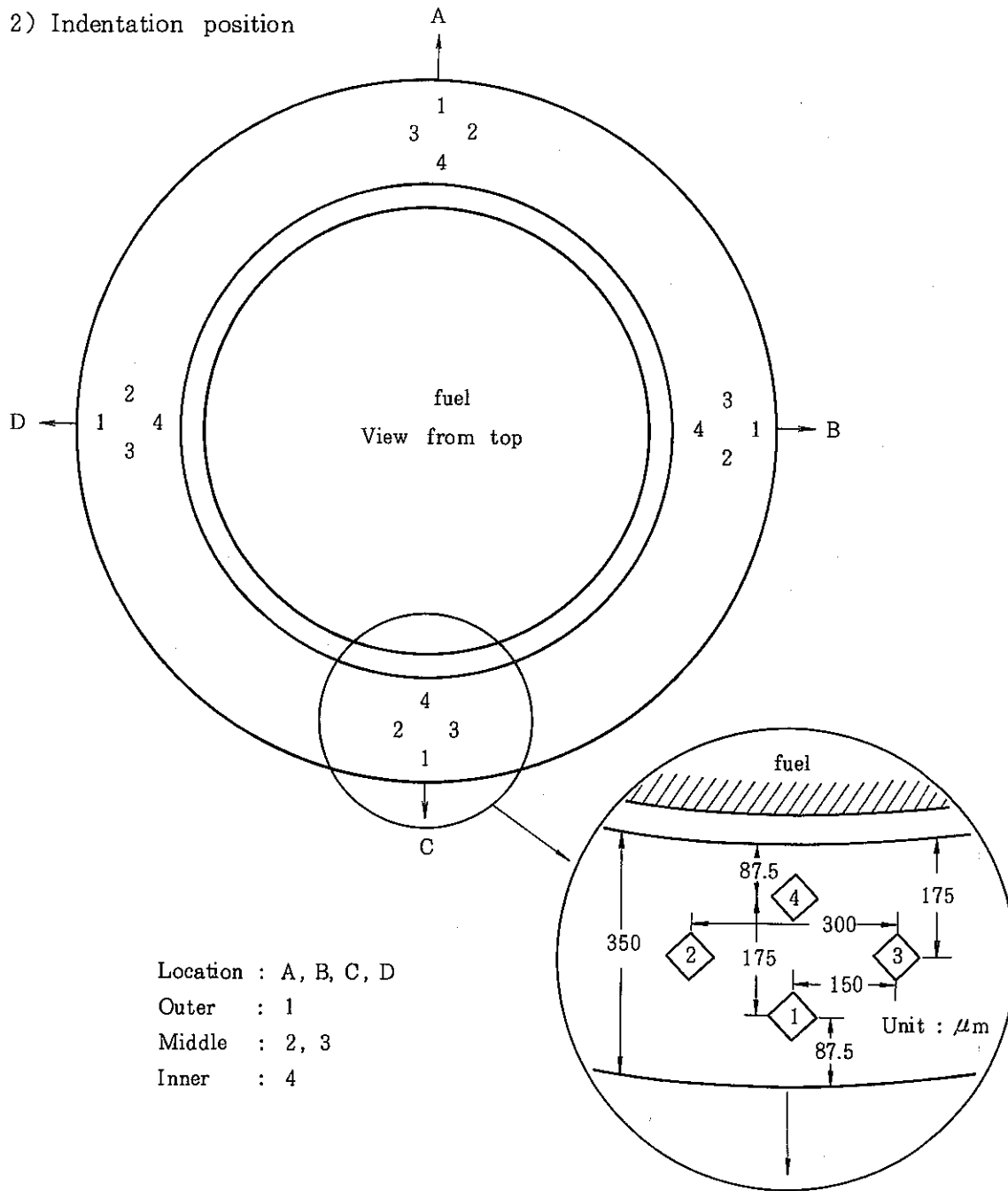


Table 7 Microhardness results of "JOYO" MK-II PFI010 fuel cladding.

Pin No.	I 1301	I 1103	I 1104	I 1105
Specimen No.	A5042	A 50822	A 51322	A 51922
DFCB (mm)	275	270	271	270
Hardness Number Hv (0.5)	299	299	309	304
Δ Hv Hv (0.5)	+ 38	+ 38	+ 48	+ 43
$\frac{\Delta \text{Hv}}{\text{Hv (Unirradiated)}} \times 100(\%)$	+ 15	+ 15	+ 18	+ 16

Cladding	K 573
LOT No.	
Unirradiated Hardness Hv(0.5)	261

Table 8 Cladding microhardness of Joyo MK-II PFI010

S/A NAME	PFI 010		PIN No.	I 1301	
Specimen No.	A 5042				
D. F. P. B	445 (mm)		D. F. C. B	275 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	302	298	298	311	302
B	311	307	302	307	307
C	291	304	297	280	293
D	296	284	301	288	292
RING AVERAGE	300	298	300	297	299

S/A NAME	PFI 010		PIN No.	I 1103	
Specimen No.	A 50822				
D. F. P. B	440.4 (mm)		D. F. C. B	270.4 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	295	305	292	293	296
B	301	294	300	309	301
C	300	302	297	300	300
D	300	302	299	299	300
RING AVERAGE	299	301	297	300	299

S/A NAME	PFI 010		PIN No.	I 1104	
Specimen No.	A 51322				
D. F. P. B	441.6 (mm)		D. F. C. B.	271.6 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	299	328	300	308	309
B	308	297	309	313	307
C	313	317	304	317	313
D	308	313	298	310	307
RING AVERAGE	307	314	303	312	309

Table 8 (つづき) Cladding microhardness of Joyo MK-II PFI010

S/A NAME	PFI 010		PIN No.		I 1105
Specimen No.	A51922				
D. F. P. B	440 (mm)		D. F. C. B		270 (mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	322	308	296	302	307
B	309	299	304	299	303
C	307	304	310	300	305
D	298	300	289	308	299
RING AVERAGE	309	303	300	302	304

Table 9 Calculation of effective fission yield for A51923

Nuclide	Composition (Atom Fraction)	Fission Cross Section [barn]	Nd-144		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	0.001983	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.08 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.223979	2.06E+00 ¹⁾	1.68 ³⁾	0.824	2.94 ³⁾	1.443	3.76 ⁴⁾	1.845
U 236	0.006830	1.28E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.002	3.06 ²⁾	0.003	3.77 ²⁾	0.004
U 238	0.482685	5.70E-02 ¹⁾	2.08 ³⁾	0.061	3.40 ³⁾	0.100	3.50 ²⁾	0.103
Pu238	0.003012	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu239	0.187316	1.94E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	0.638	2.46 ³⁾	0.952	3.01 ³⁾	1.164
Pu240	0.066224	4.48E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.058	2.83 ²⁾	0.089	3.34 ²⁾	0.106
Pu241	0.019372	2.77E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.111	3.01 ²⁾	0.172	3.52 ²⁾	0.201
Pu242	0.009199	3.54E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.007	3.10 ²⁾	0.011	3.70 ²⁾	0.013
Effective Fission Yield [%]			1.70		2.77		3.44	

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) HXGI code

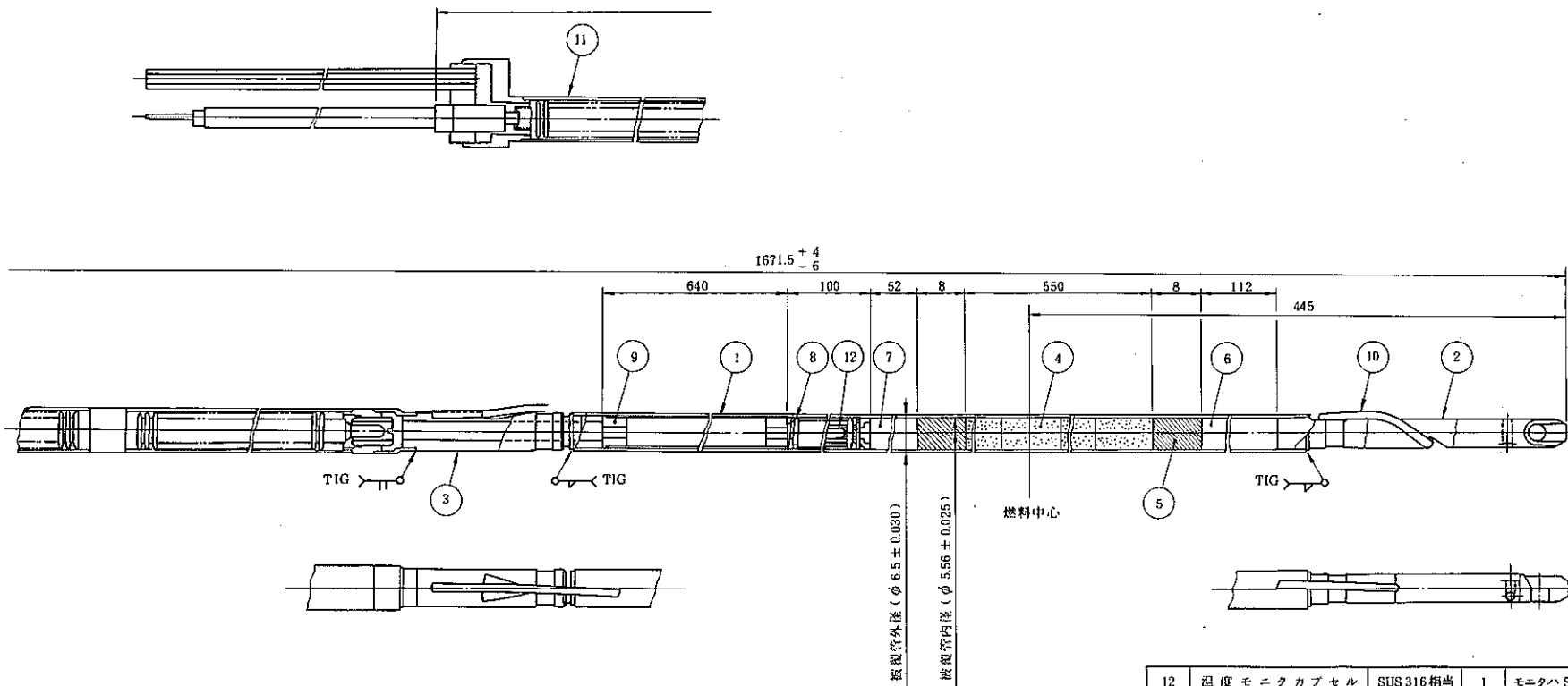
2) TRG-2143-R

3) ICP-1050-1

4) AERE-R-8753

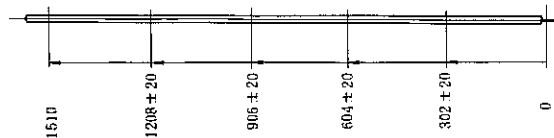
Table 10 Composition of spike solution and natural Neodymium

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



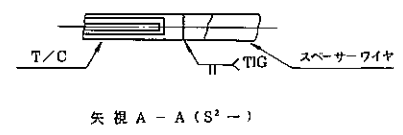
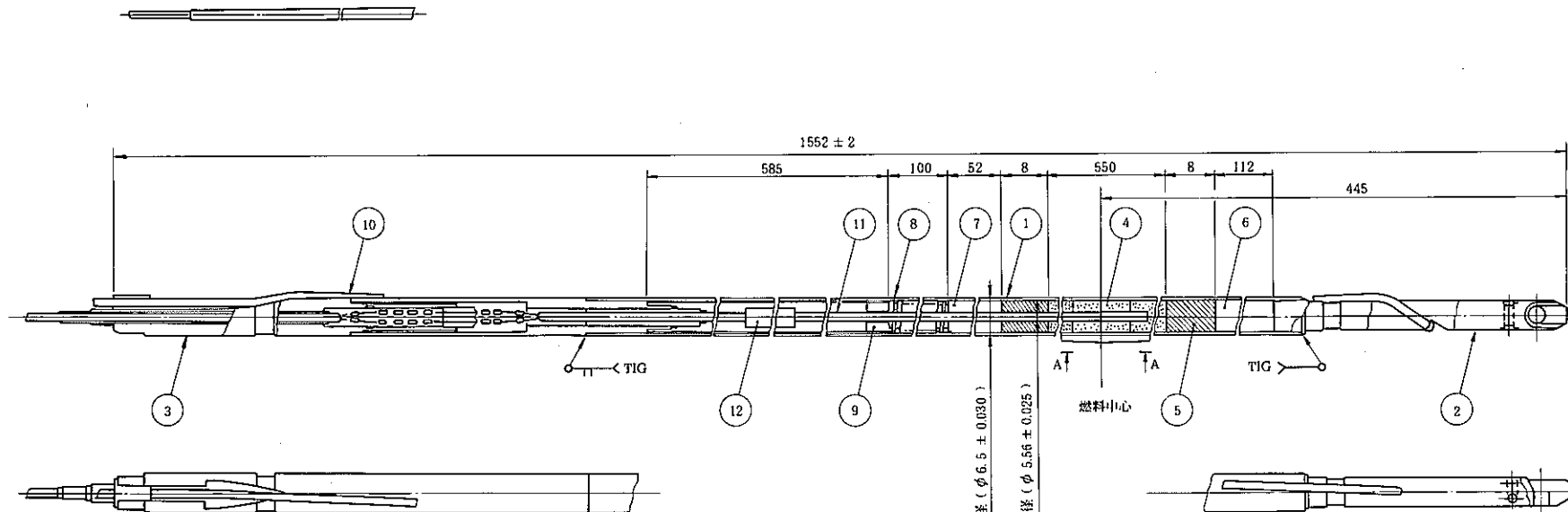
F P ガス圧力測定用燃料要素

12	温度モニタカプセル	SUS 316相当	1	モニタハSiC
11	F P ガス圧力測定器		1	
10	スペーサーワイヤ	SUS 316相当	1	
9	抑え板プレナムスリーブ	SUS 316	1	
8	プレナムスプリング	SUS 304 WPR	1	
7	燃料反射体(上)	SUS 316相当	1	
6	燃料反射体(下)	SUS 316相当	1	
5	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	
4	燃料ペレット	PuO ₂ -UO ₂		
3	上部端栓	SUS 316相当	1	
2	下部端栓	SUS 316相当	1	
1	被覆管	SUS 316相当	1	
品番	品名	材質	個数	

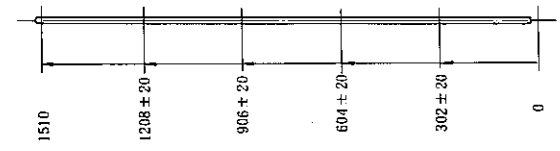


ラッピングワイヤ配置図

Fig.1 Schematic drawing of fuel Pin



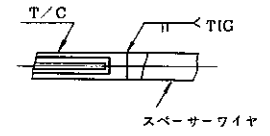
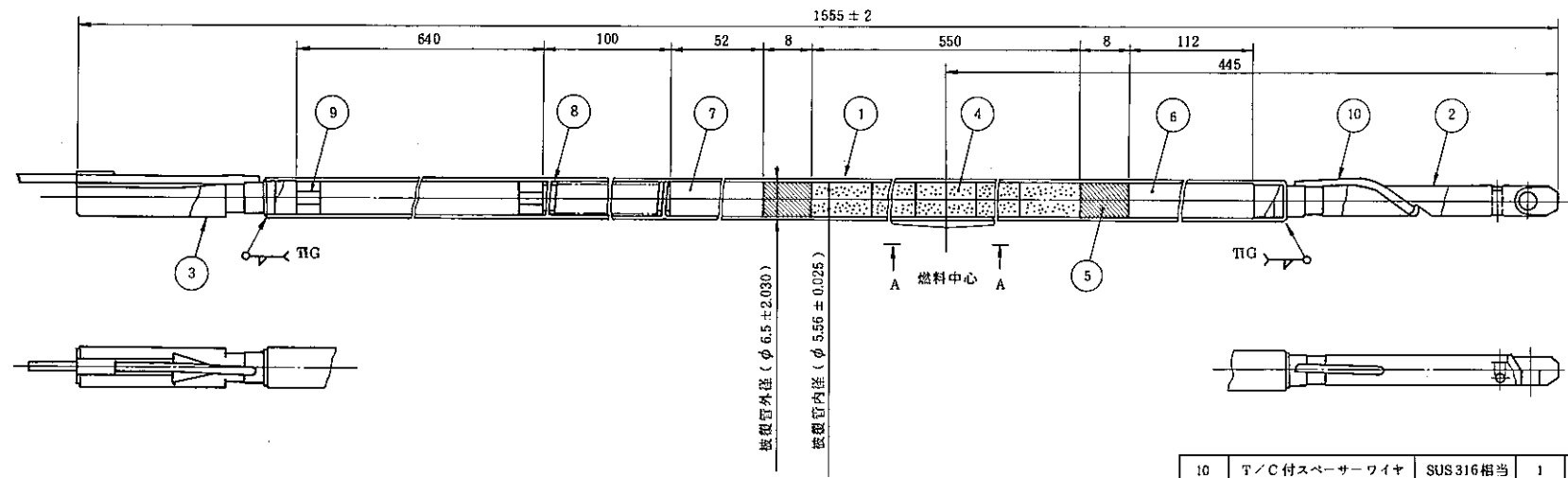
中心及び冷却材温度測定用燃料要素



ラッピングワイヤ配置図

12	トランジション	SUS316	1	
11	熱電対	Mo 50% Re	1	
10	T/C付スペーサーワイヤ	SUS316相当	1	
9	抑え板プラチナスリーブ	SUS316	1	
8	プラチナスプリング	SUS304 WPB	1	
7	要素反射体(上)	SUS316相当	1	
6	要素反射体(下)	SUS316相当	1	
5	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	
4	燃料ペレット	PuO ₂ -UO ₂		
3	上部計装端栓		1	
2	下部端栓	SUS316相当	1	
1	被覆管	SUS316相当	1	
品番	品名	材質	個数	備考

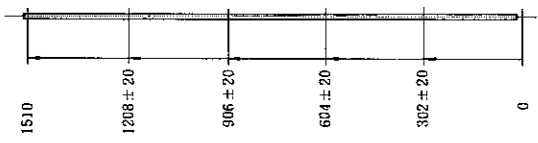
Fig.2 Schematic drawing of fuel Pin



矢視 A - A (S²~)

冷却温度測定用燃料要素

10	T/C付スペーサーワイヤ	SUS 316相当	1	
9	抑え板プレナムスリーブ	SUS 316	1	
8	プレナムスプリング	SUS 304 WPB	1	
7	炭素反射体(上)	SUS 316相当	1	
6	炭素反射体(下)	SUS 316相当	1	
5	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	
4	燃料ペレット	PuO ₂ -UO ₂		
3	上部端栓	SUS 316相当	1	
2	下部端栓	SUS 316相当	1	
1	被覆管	SUS 316相当	1	
品番	品番	材質	個数	備考



ラッピングワイヤ配置図

Fig. 3 Schematic drawing of fuel Pin

炉内照射位置

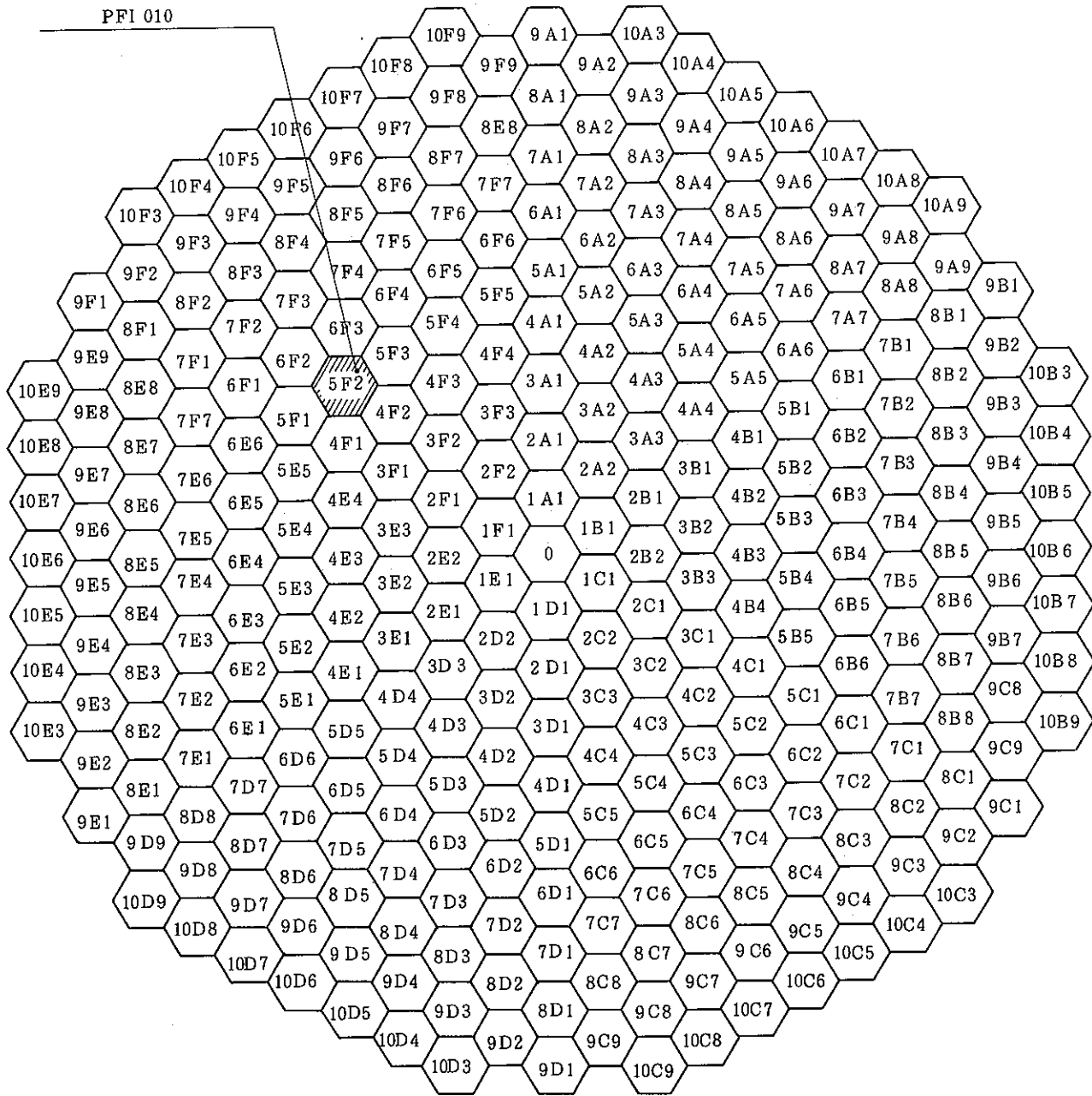


Fig. 4 Irradiation position of PFI010 subassembly in "JOYO" MK-II core

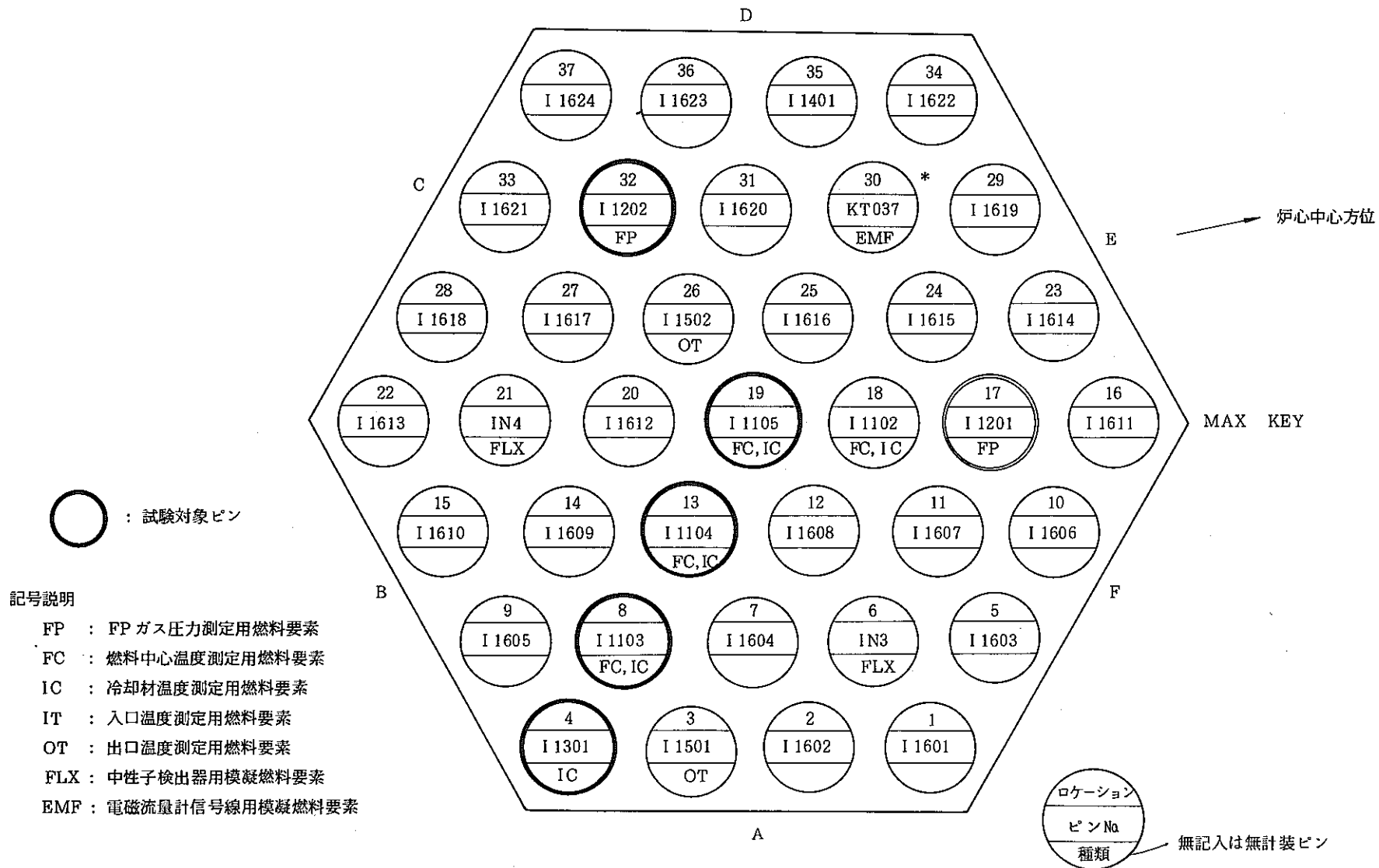


Fig. 5 Fuel Pin position in PFI010 Subassembly

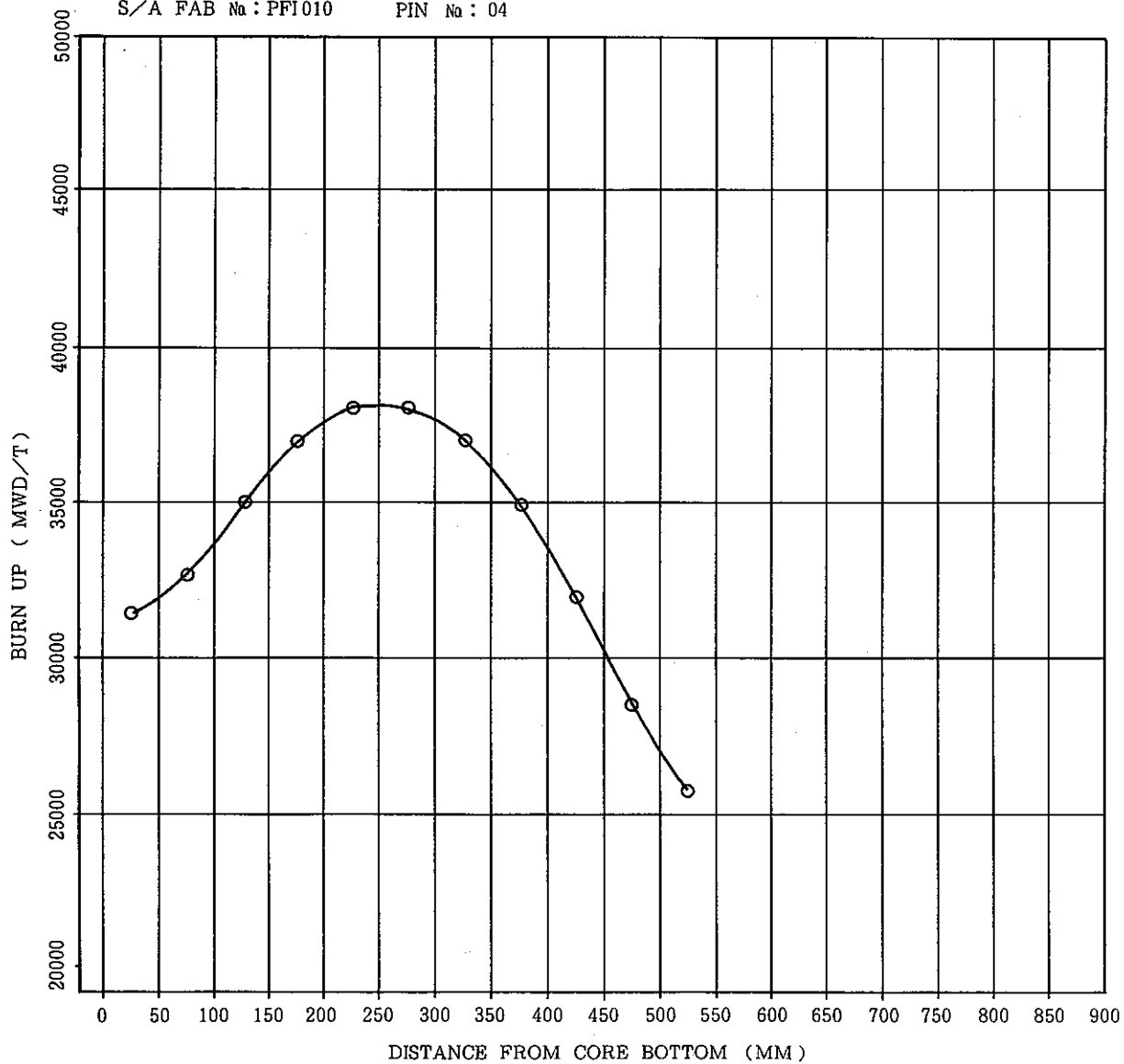


Fig.6 Burnup distribution (A 504 Pin)

S/A FAB No : PFI010 PIN No : 08

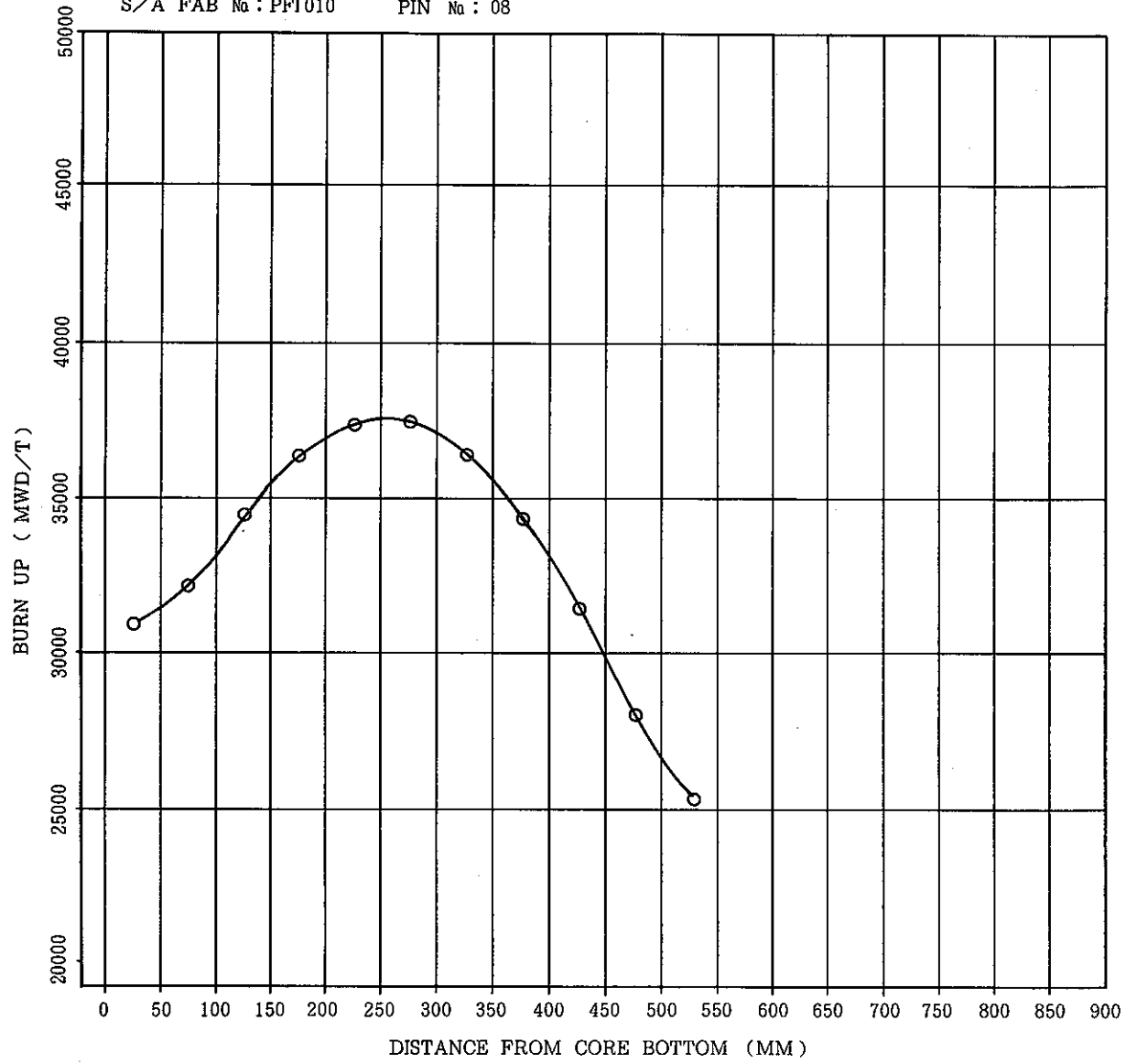


Fig.7 Burnup distribution (A 508 Pin)

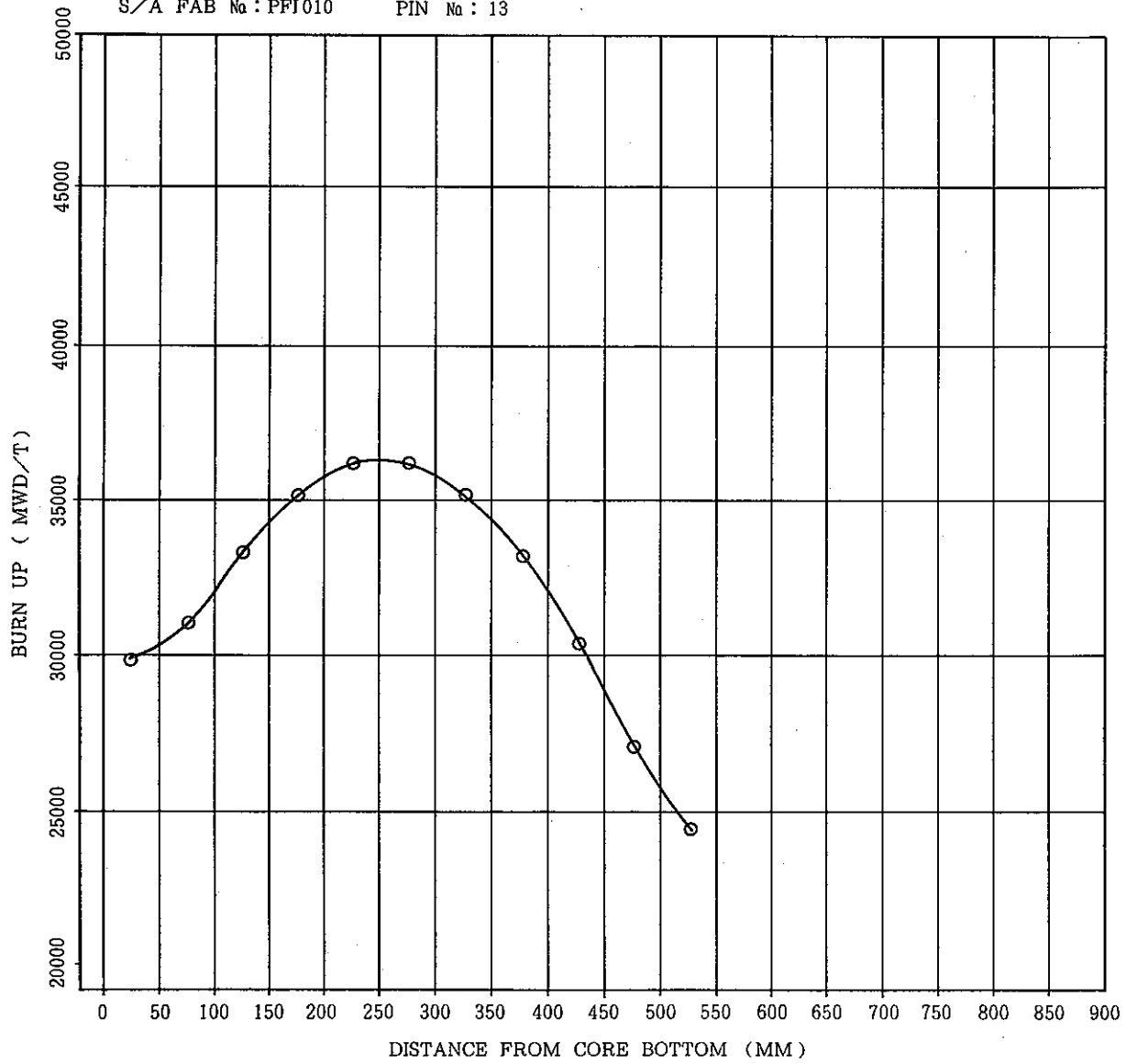


Fig.8 Burnup distribution (A 513 Pin)

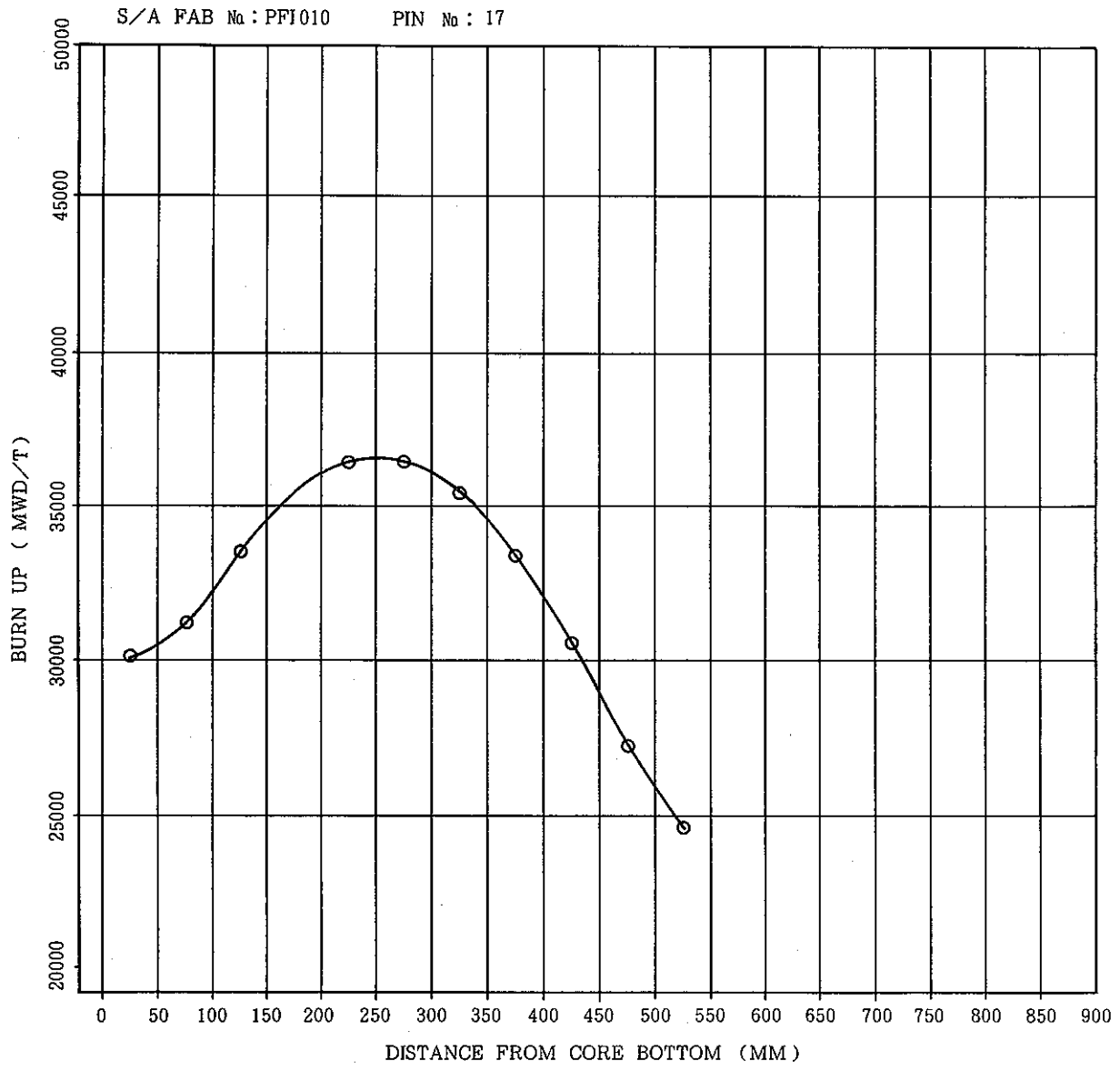


Fig.9 Burnup distribution (A 517 Pin)

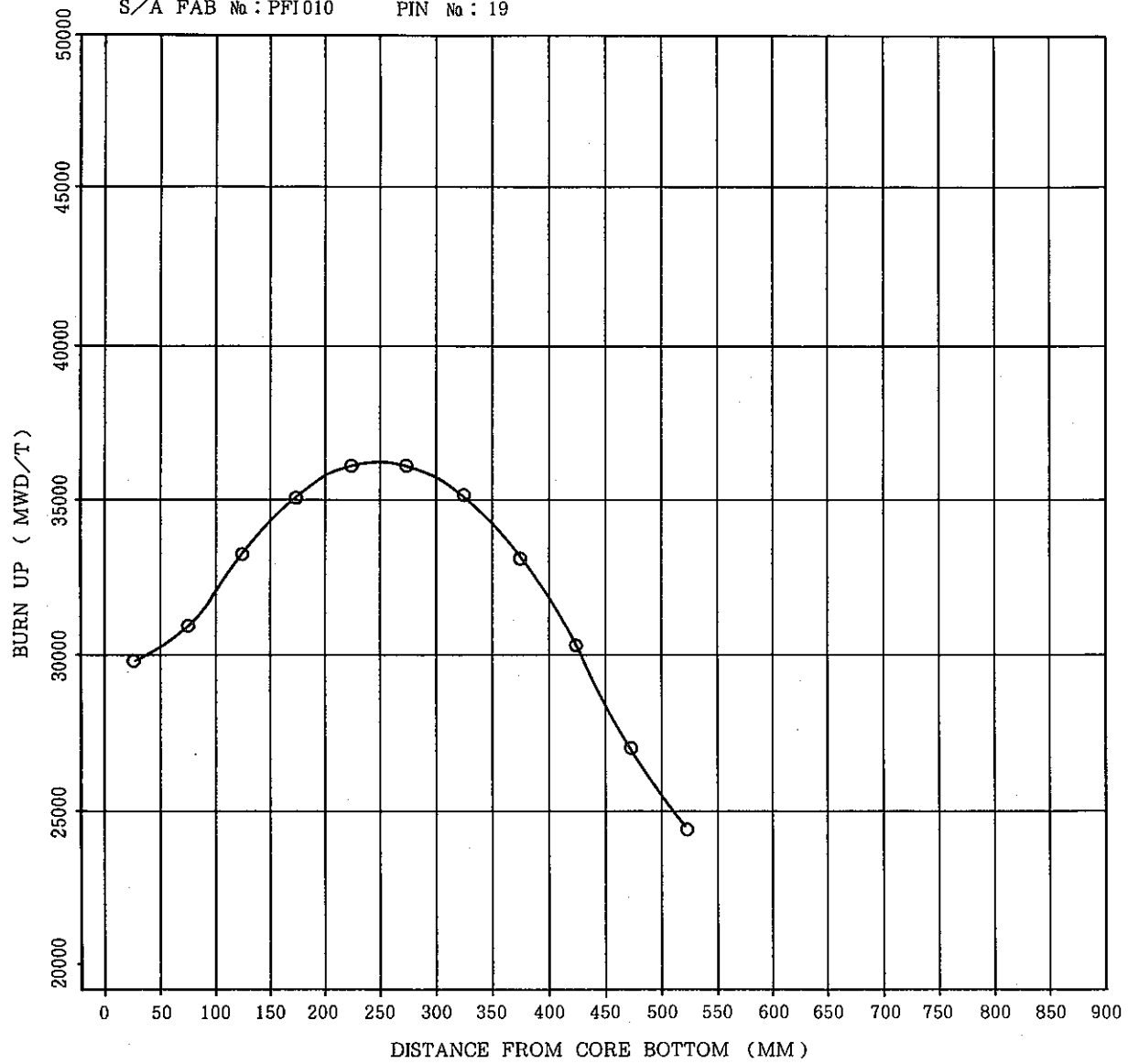


Fig.10 Burnup distribution (A519 Pin)

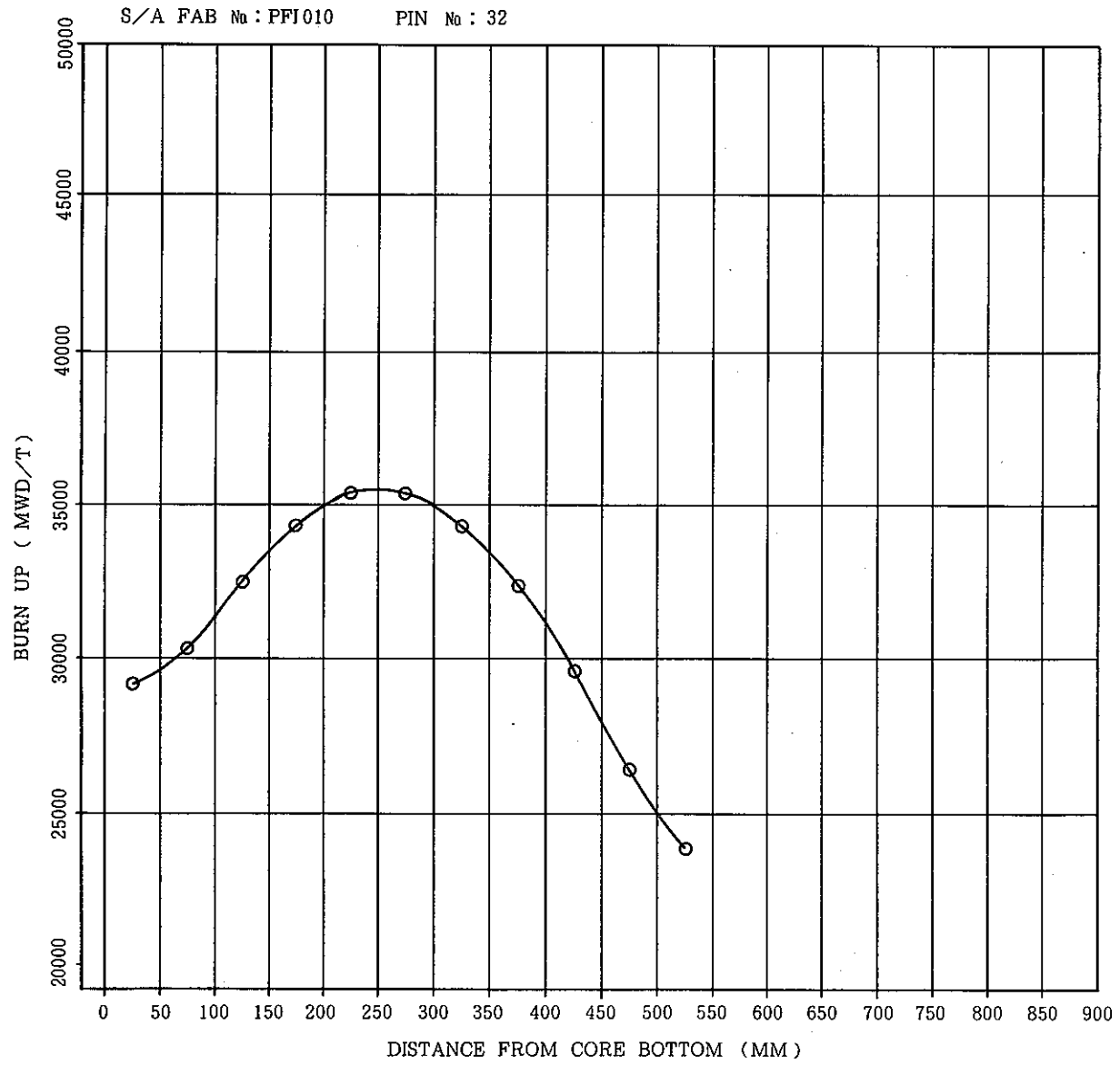


Fig.11 Burnup distribution (A 532 Pin)

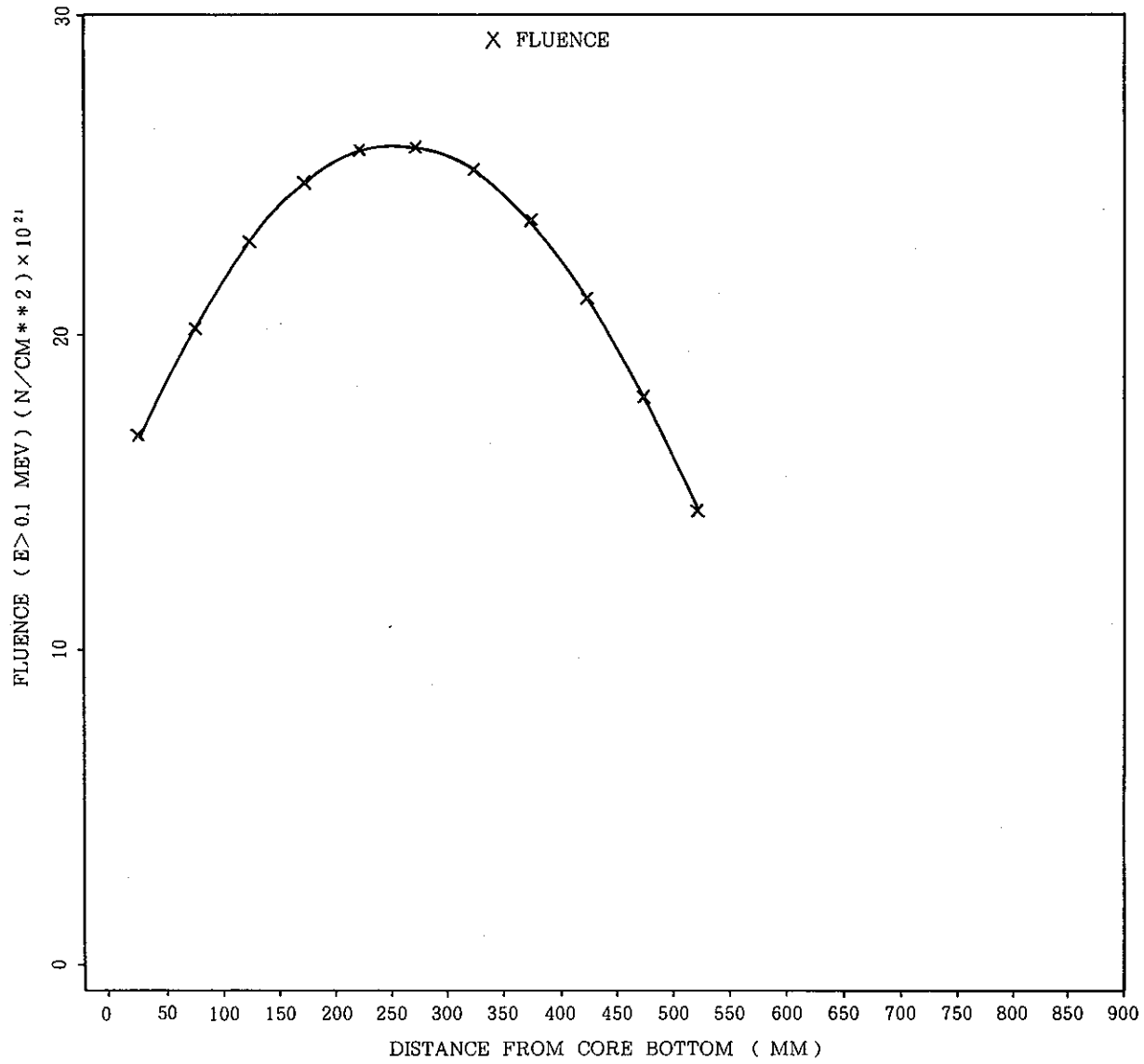


Fig.12 Fluence distribution (A 504 Pin)

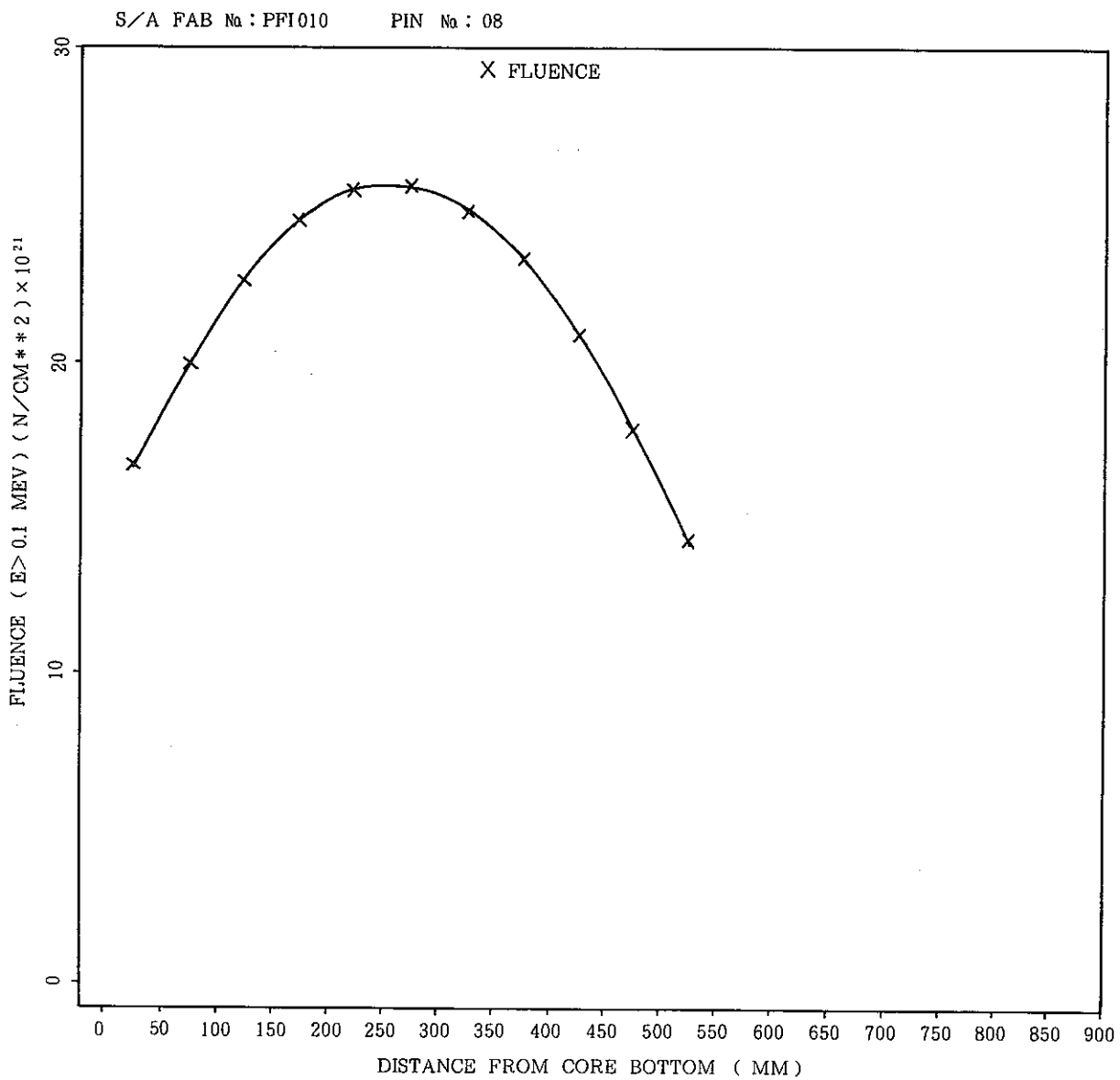


Fig.13 Fluence distribution (A 508 Pin)

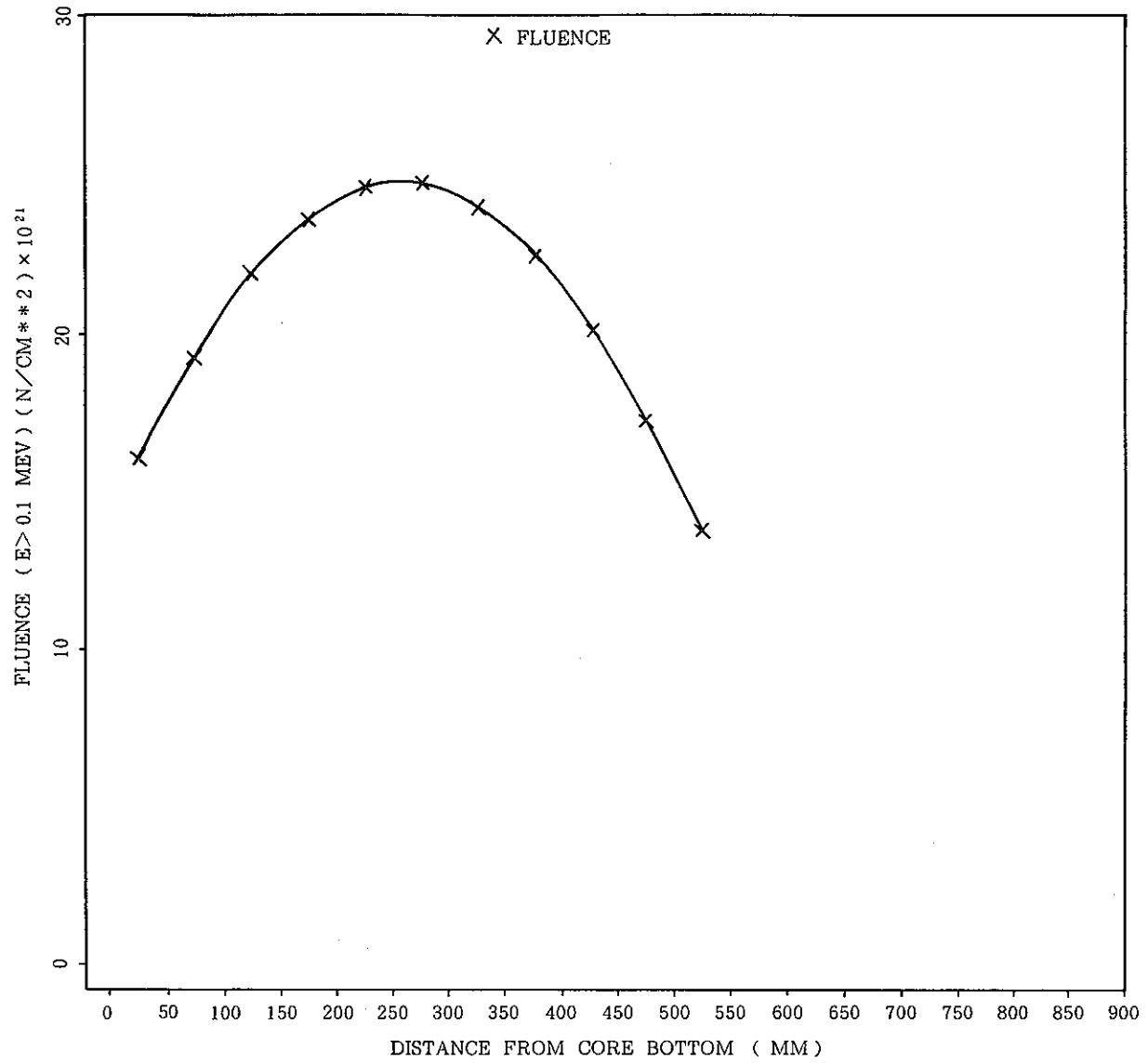


Fig.14 Fluence distribution (A513 Pin)

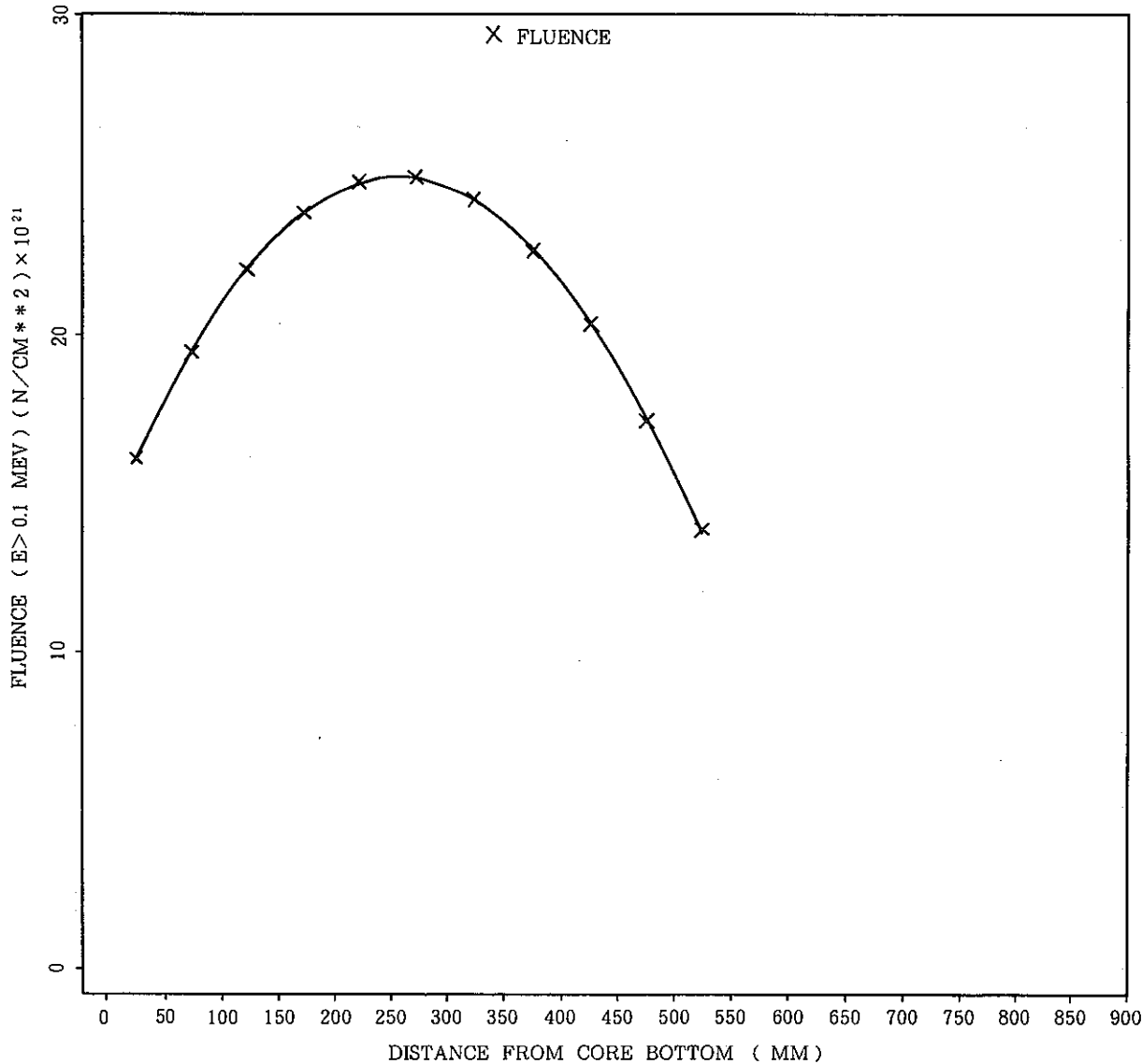


Fig.15 Fluence distribution (A 517 Pin)

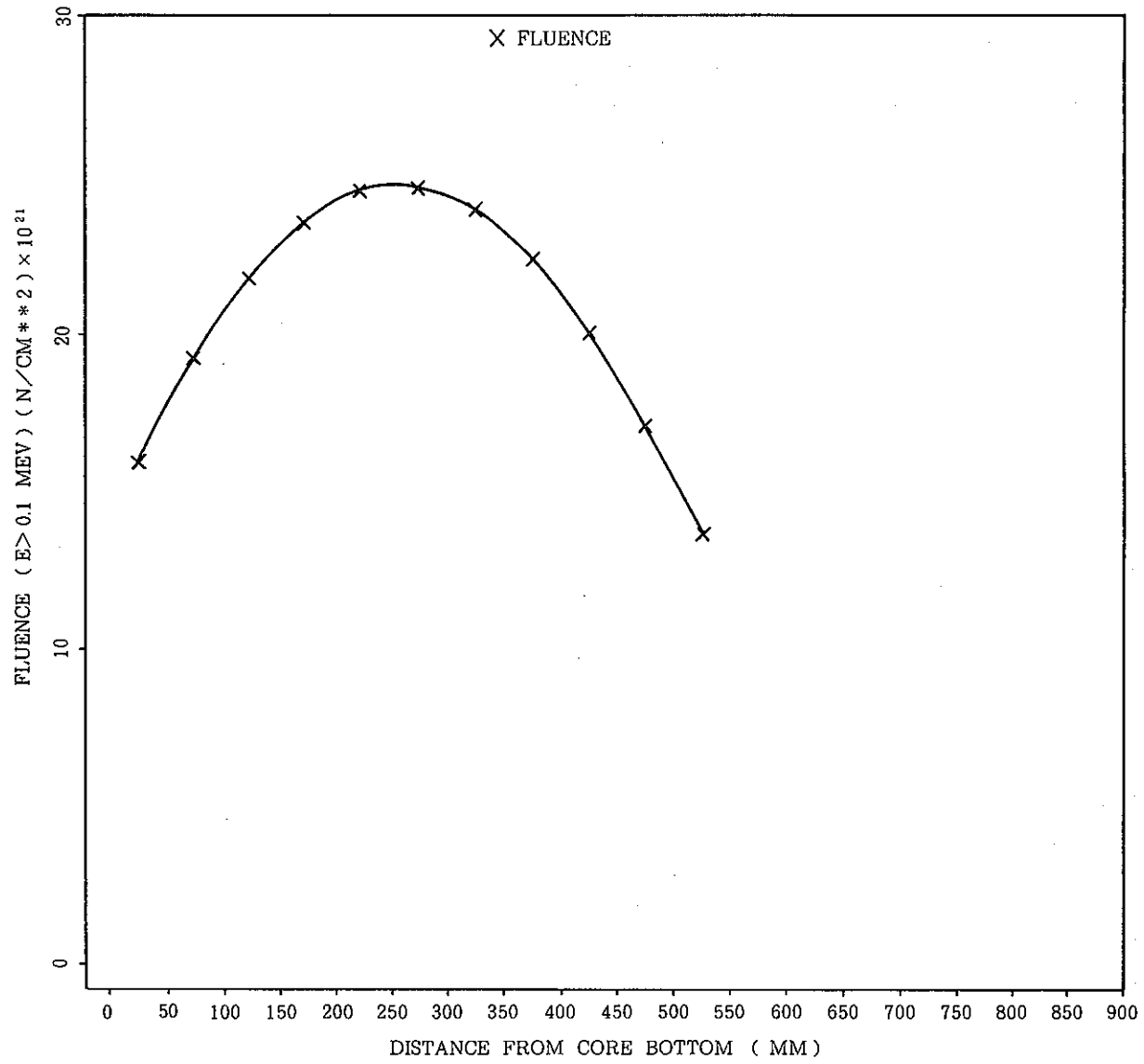


Fig.16 Fluence distribution (A519 Pin)

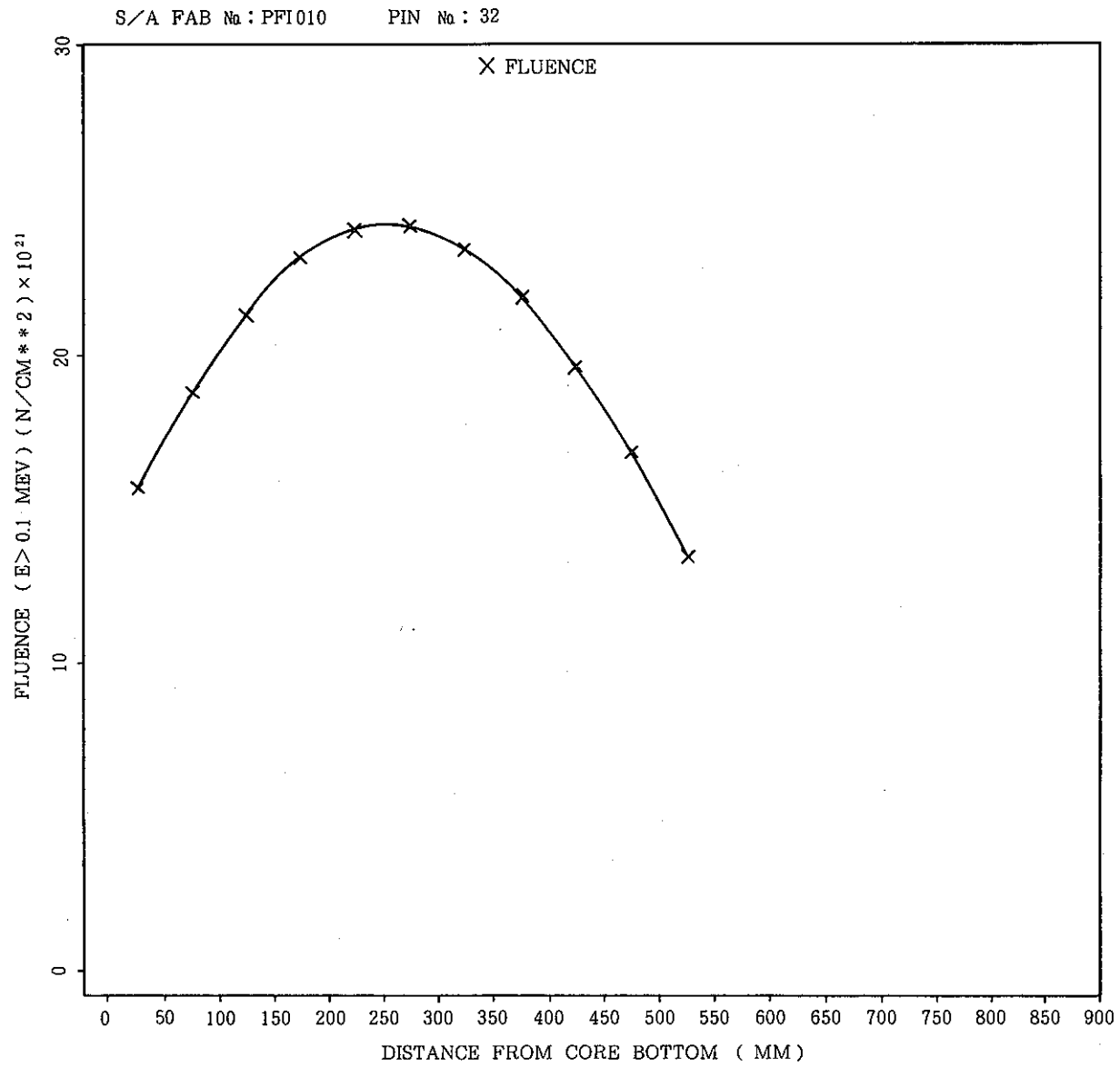


Fig.17 Fluence distribution (A 532 Pin)

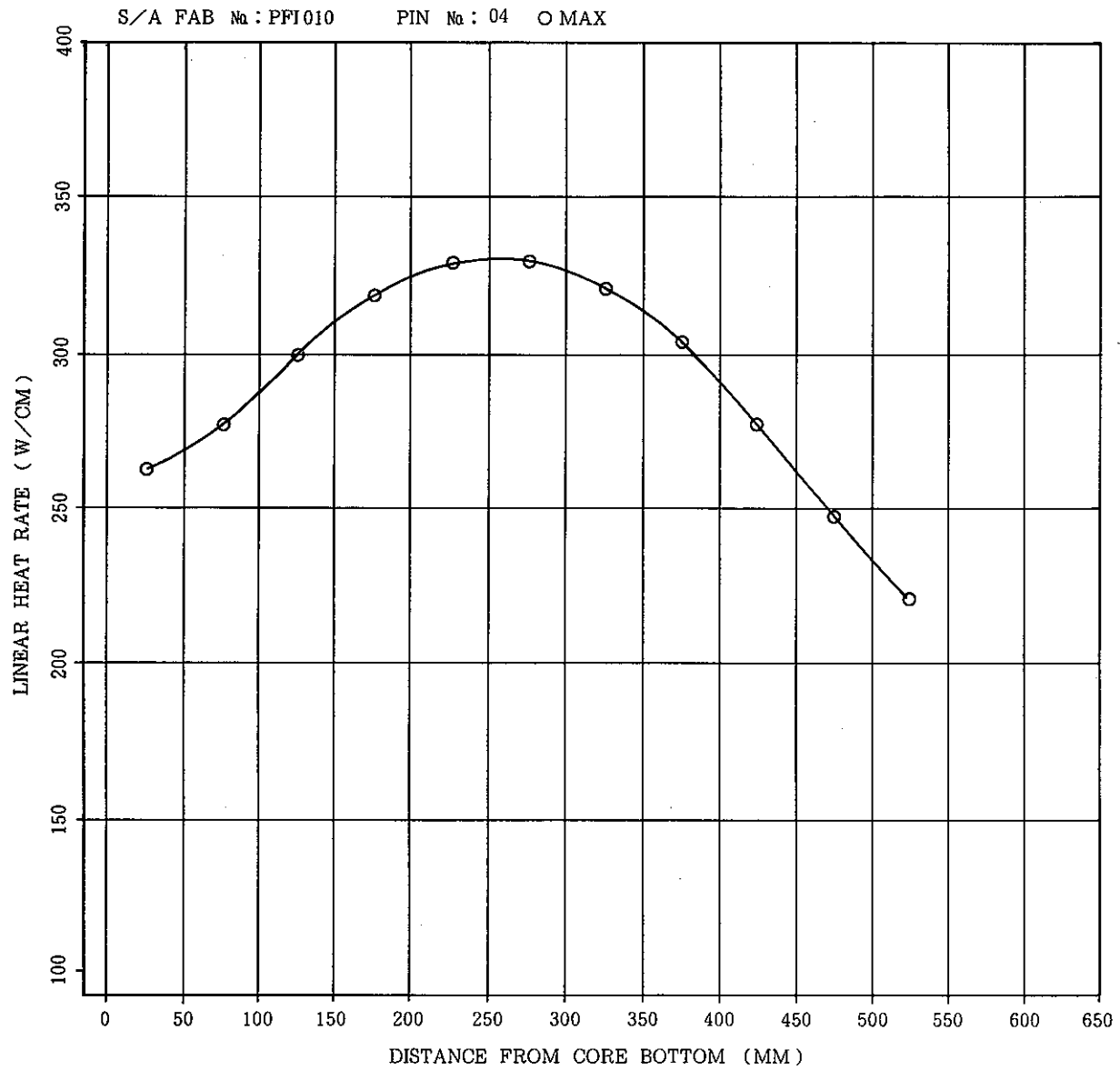


Fig.18 Linear heat rate distribution (A 504 Pin)

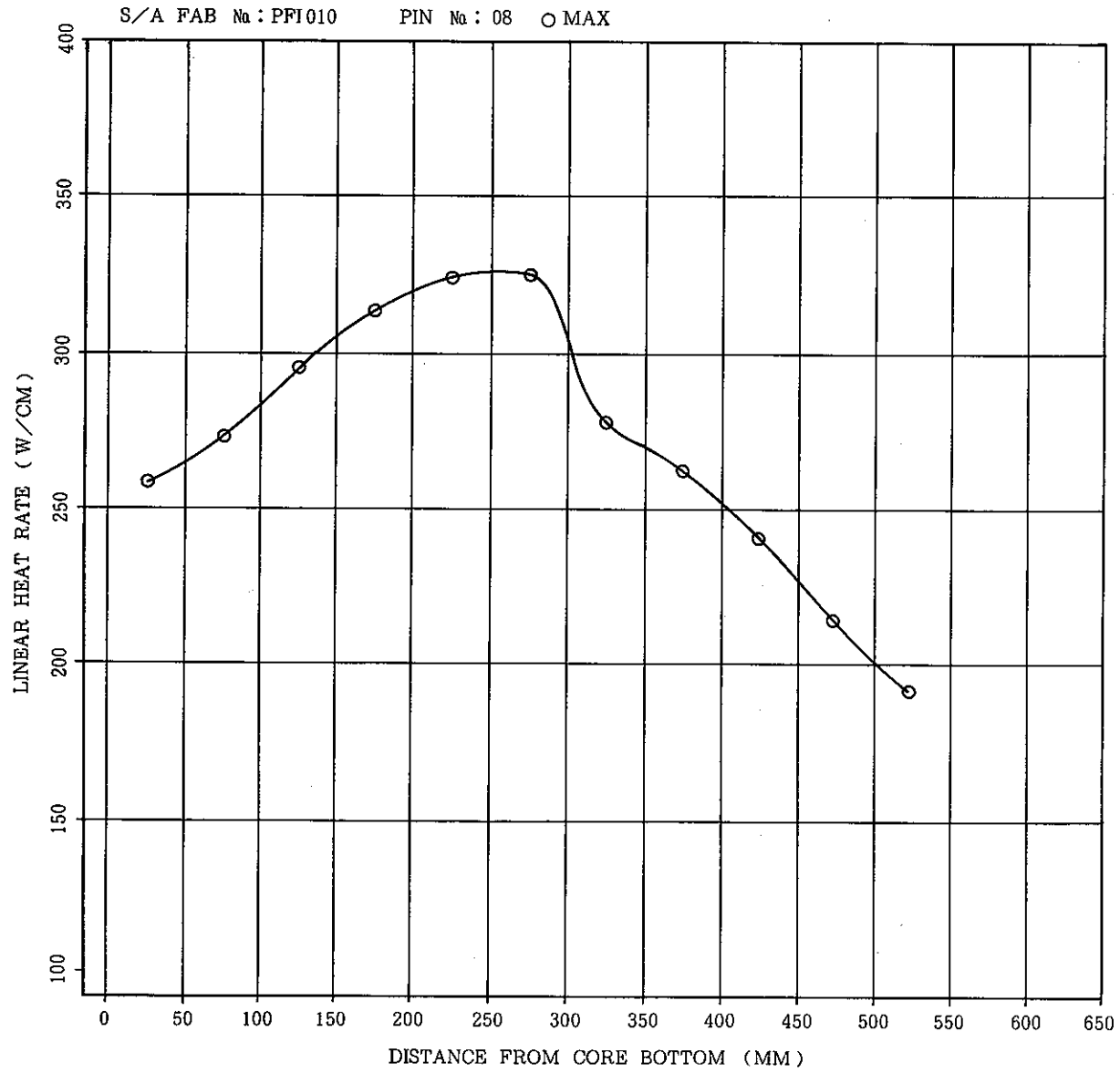


Fig.19 Linear heat rate distribution (A 508 Pin)

S/A FAB No: PFI010 PIN No: 13 O MAX

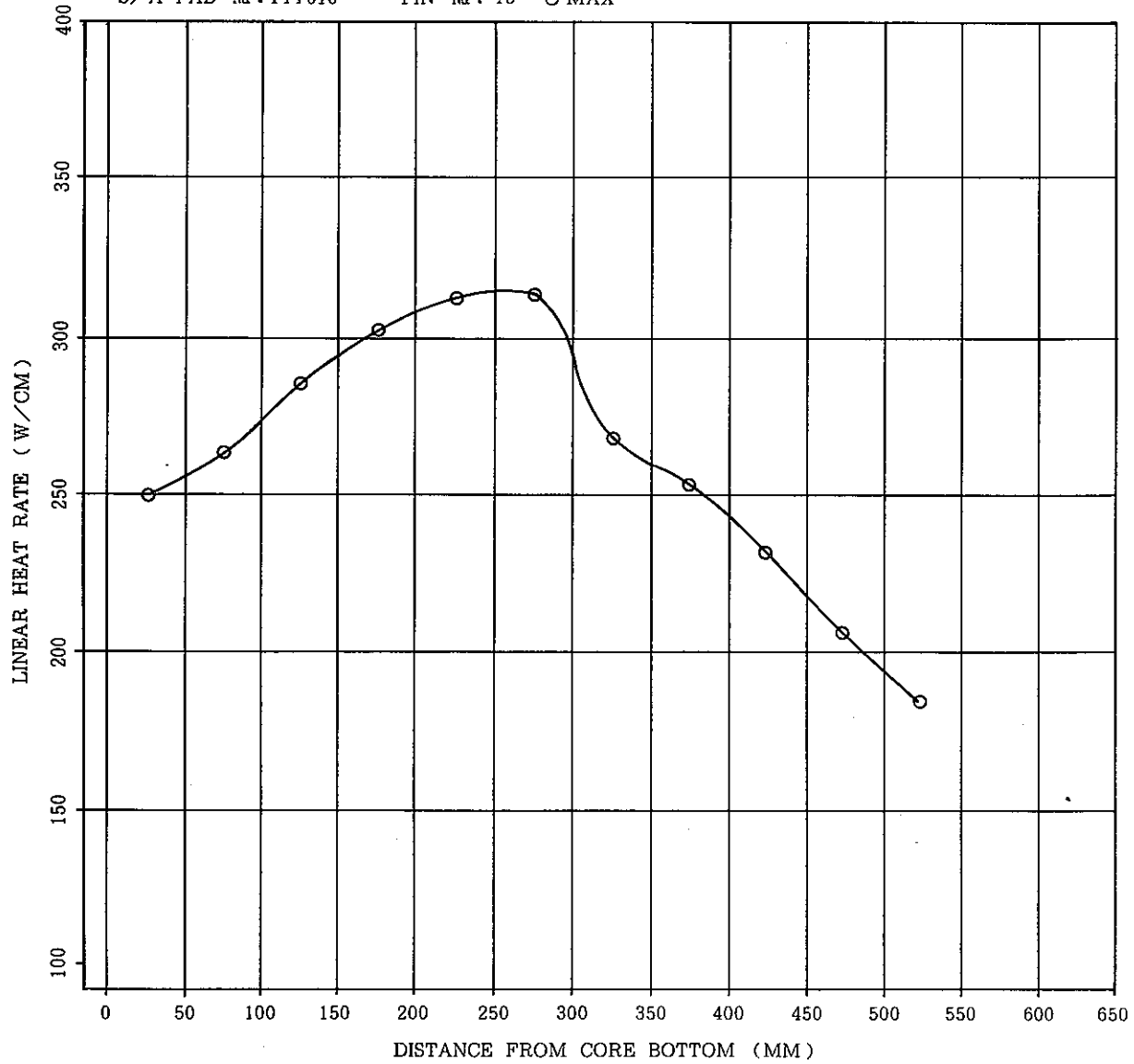


Fig.20 Linear heat rate distribution (A 513 Pin)

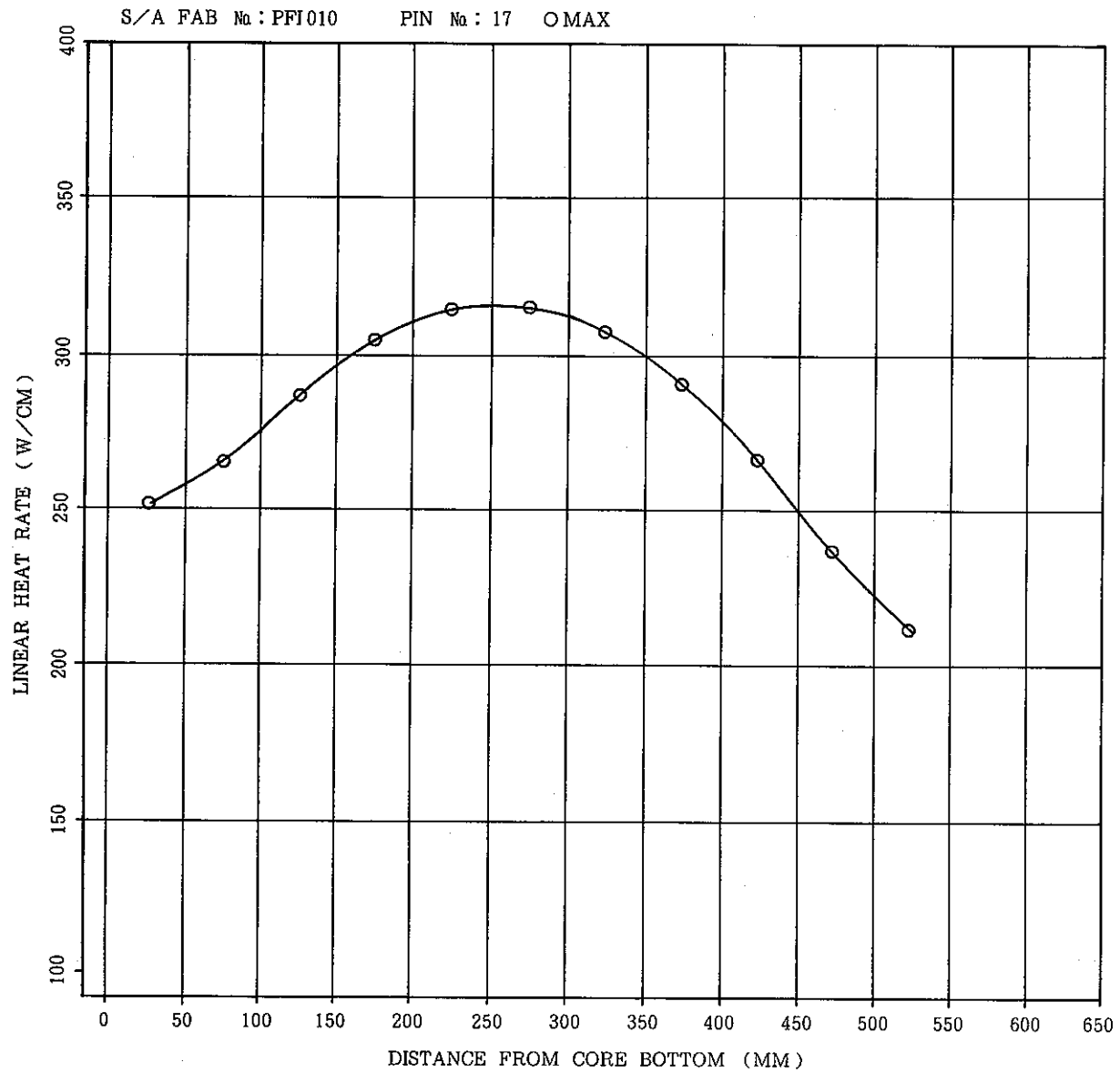


Fig.21 Linear heat rate distribution (A 517 Pin)

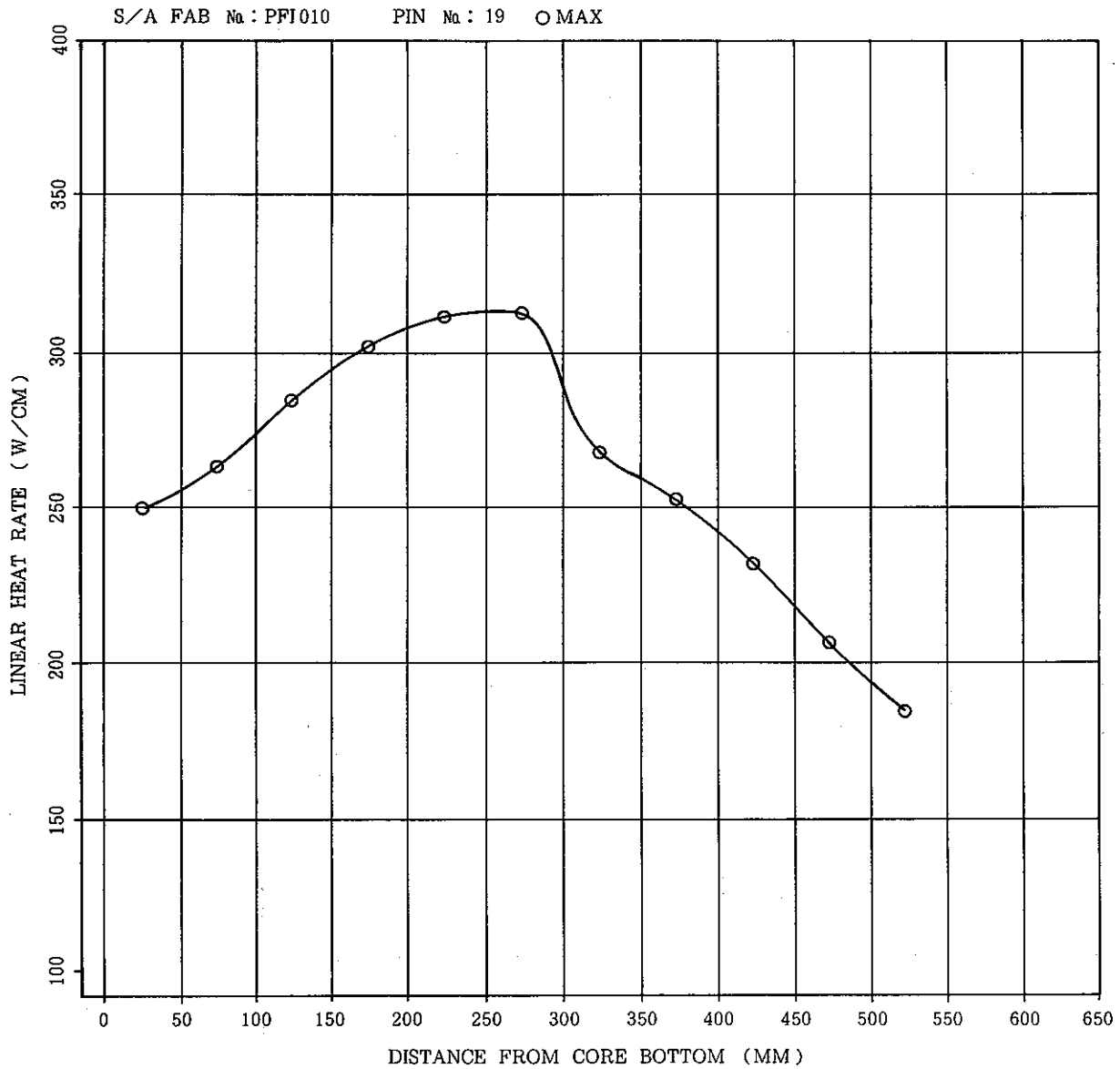


Fig. 22 Linear heat rate distribution (A 519 Pin)

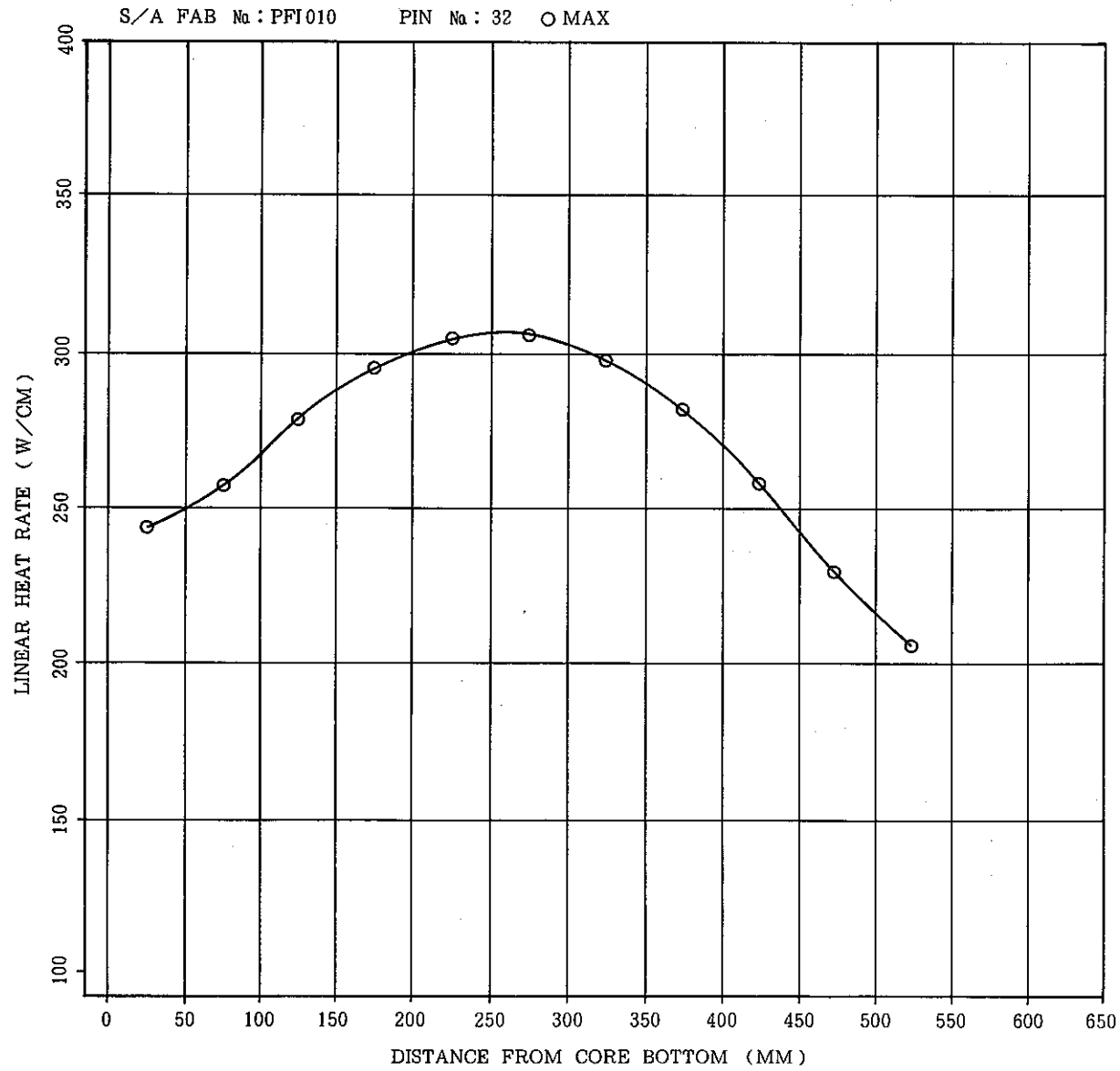


Fig. 23 Linear heat rate distribution (A 532 Pin)

ピンの種類	冷却材温度測定用	燃料温度測定用 冷却材温度測定用	燃料温度測定用 冷却材温度測定用	F. P. ガス圧力測定用	燃料温度測定用 冷却材温度測定用	F. P. ガス圧力測定用
ピン No	I 1301 (A504)	I 1103 (A508)	I 1104 (A513)	I 1201 (A517)	I 1105 (A519)	I 1202 (A532)
被覆管メーカー	K	K	K	K	K	K

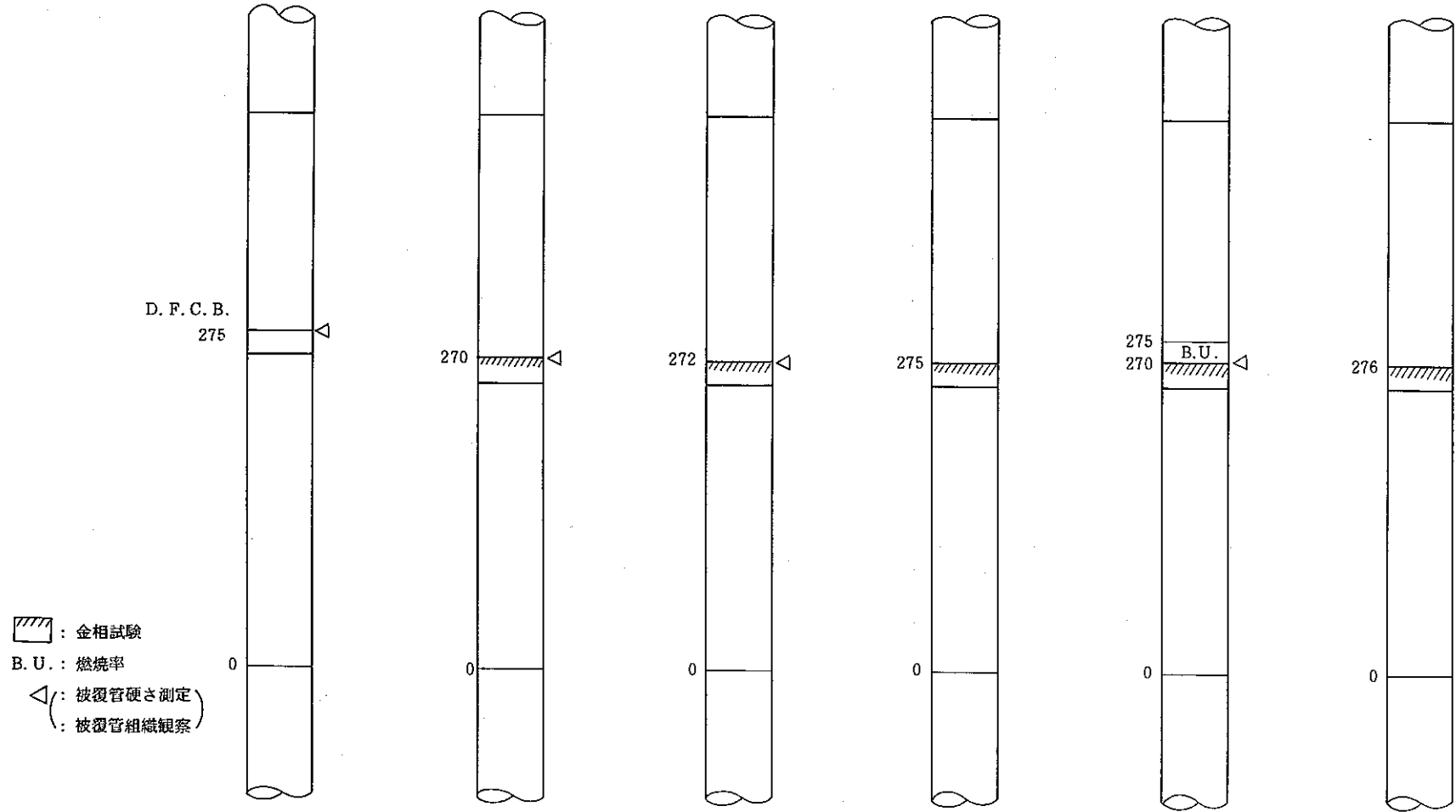


Fig.24 Sampling of Specimens (PFI010)

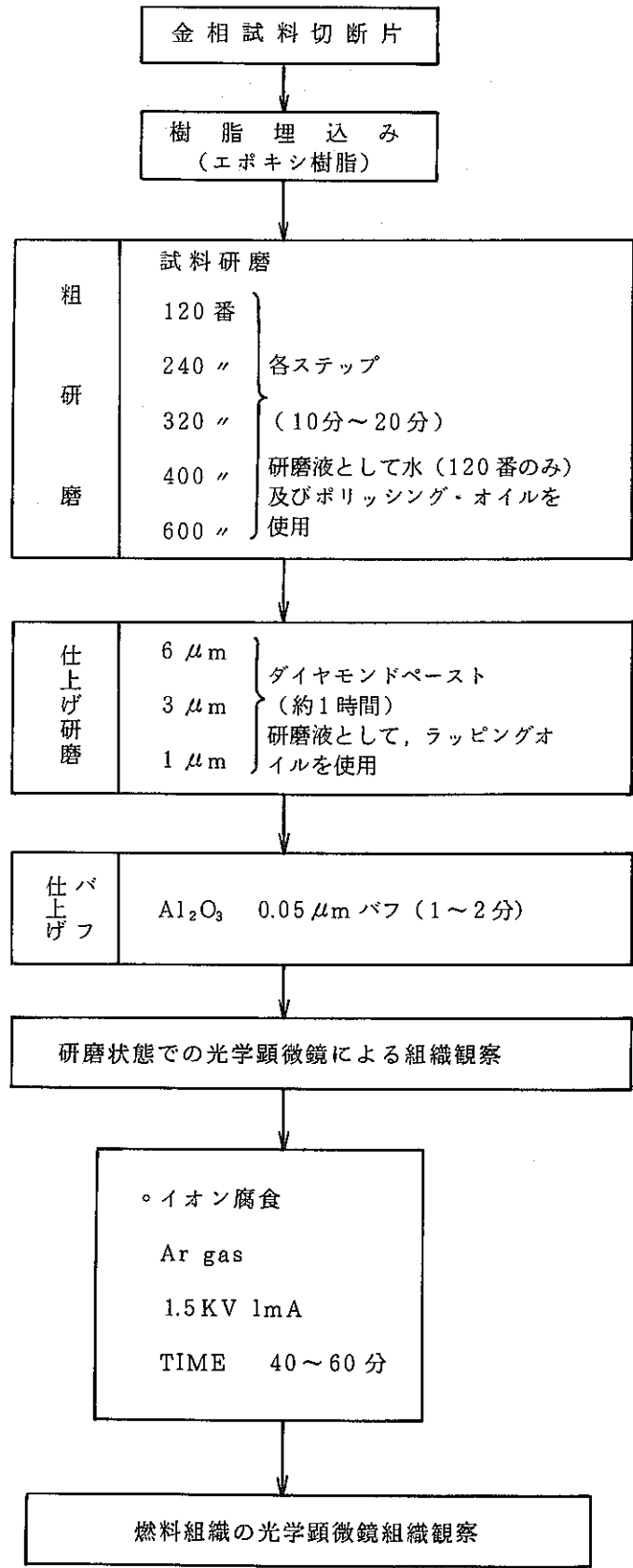


Fig.25 Flow diagram of metallurgical examination in AGS

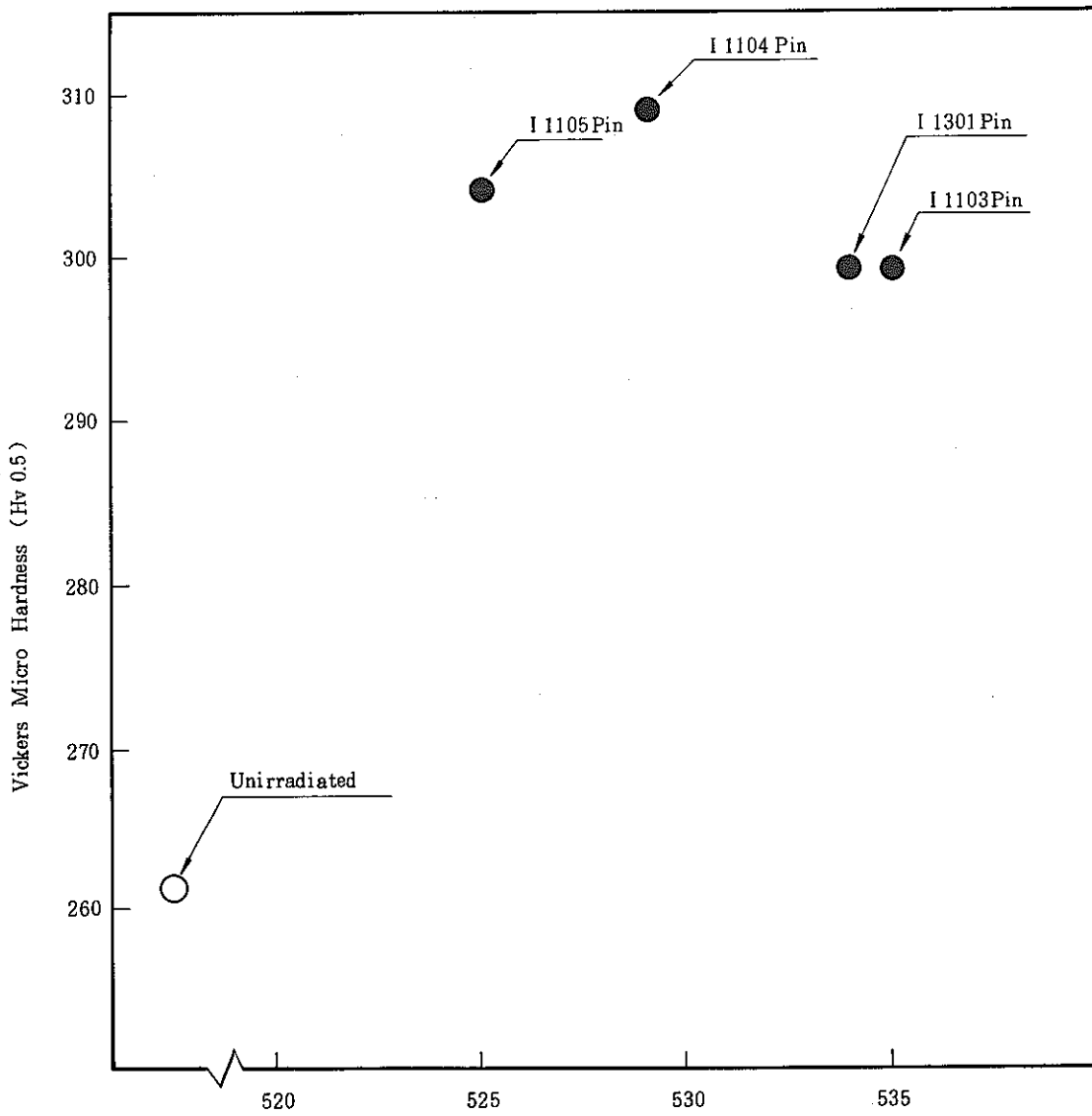
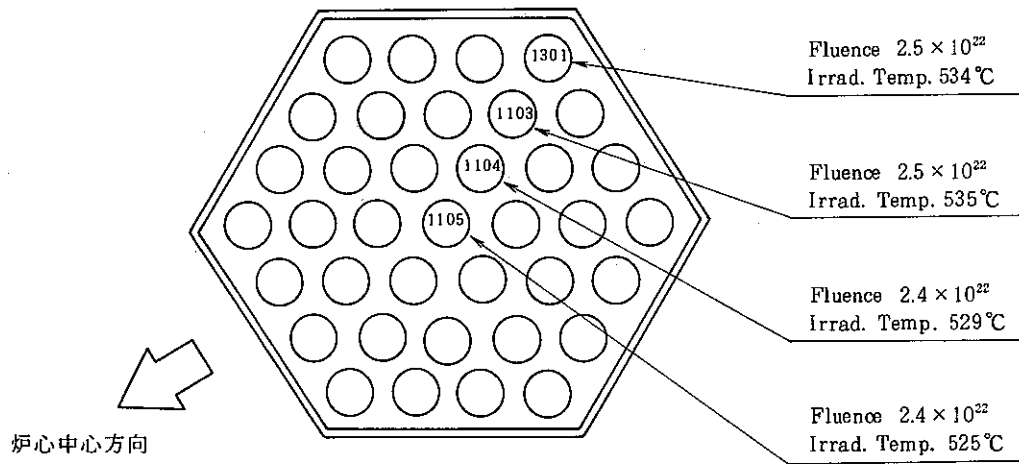


Fig. 26 Vickers Micro Hardness of Fuel Cladding as a Function of Irradiation Temperature

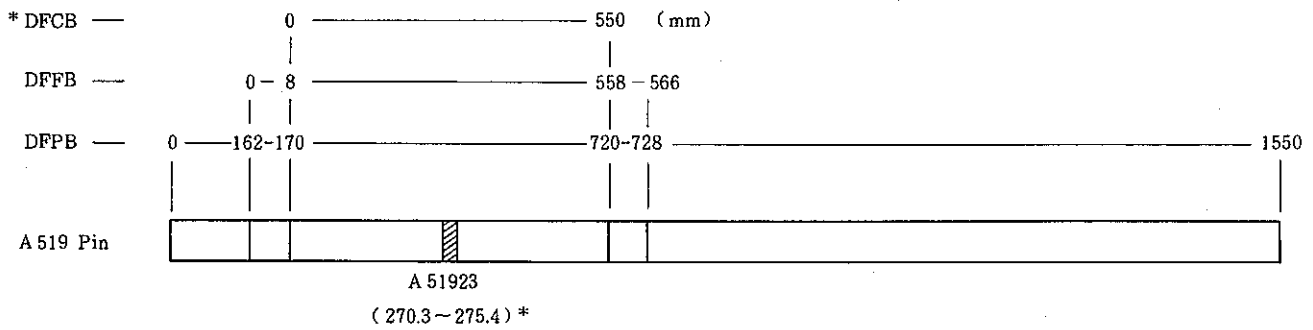
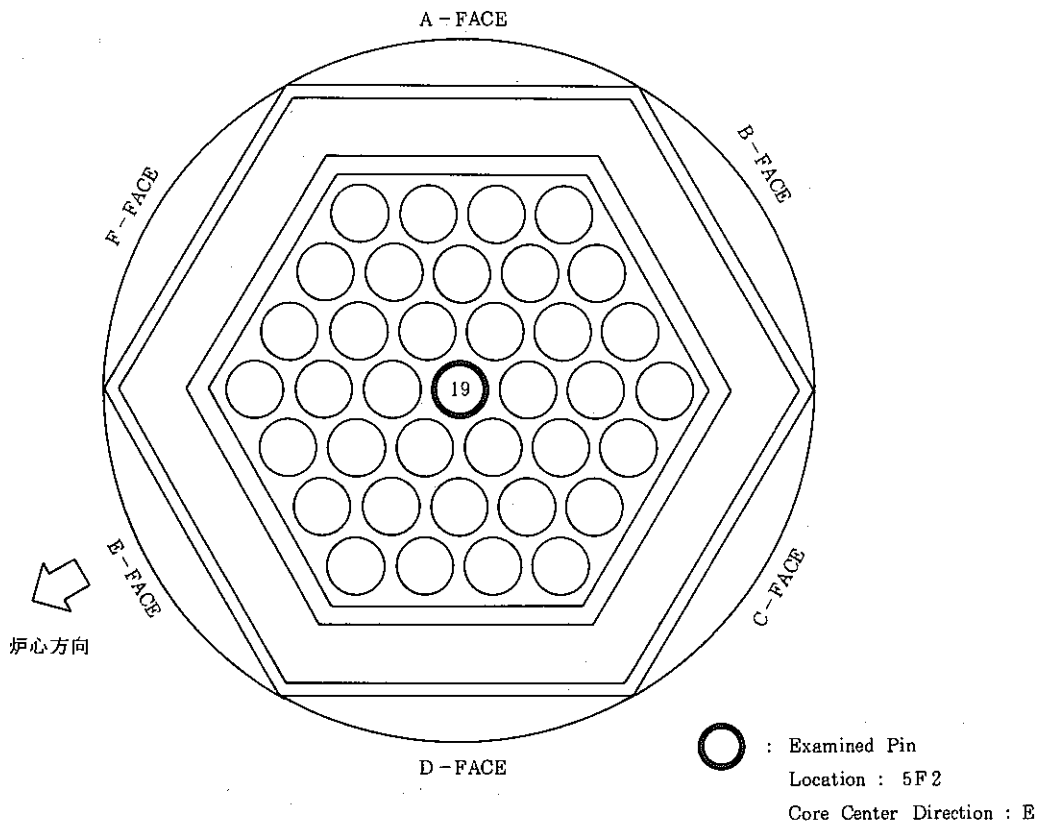


Fig. 27 Cutting diagram of PFI 010 subassembly fuel pins for burnup measurement

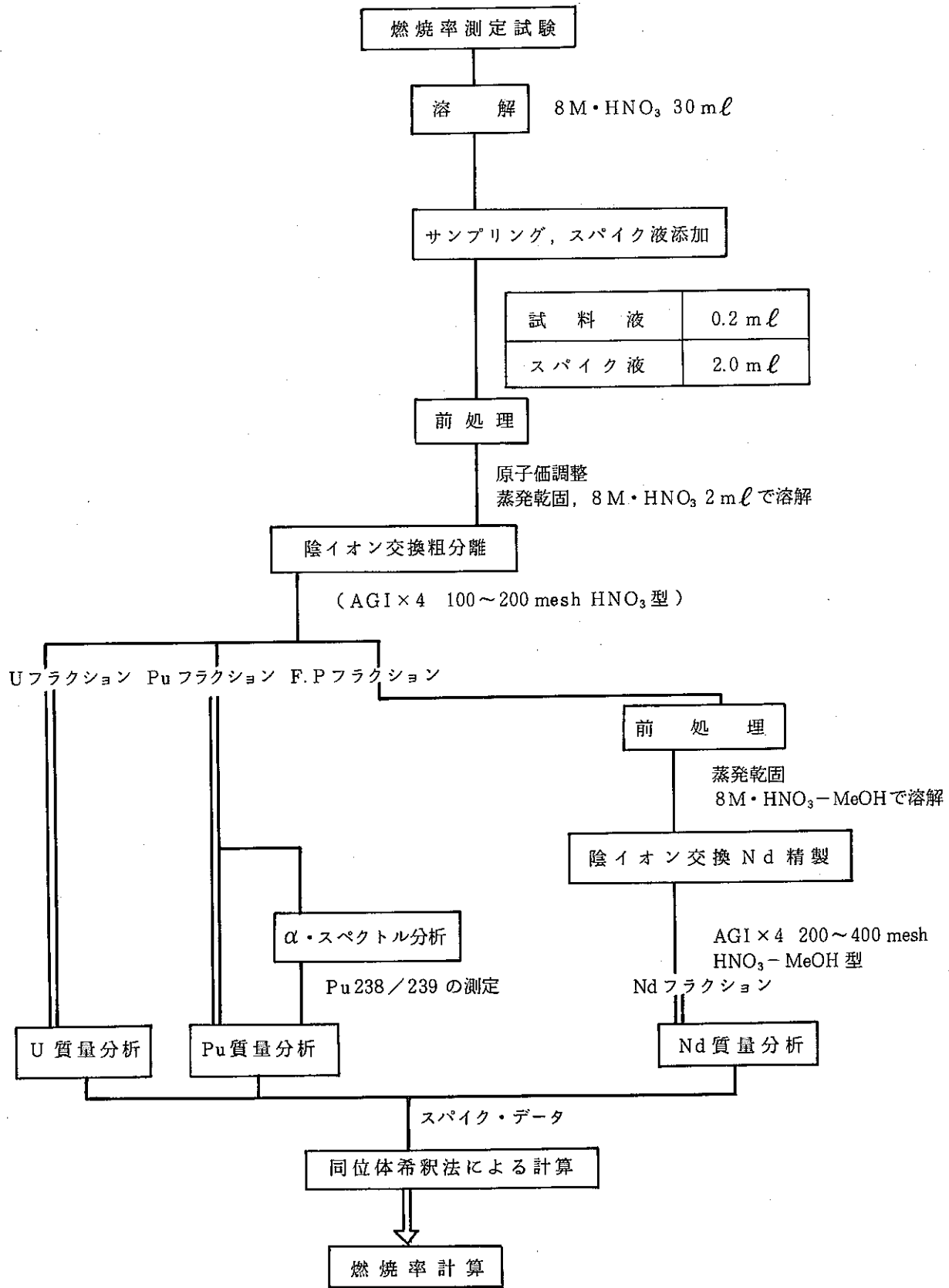
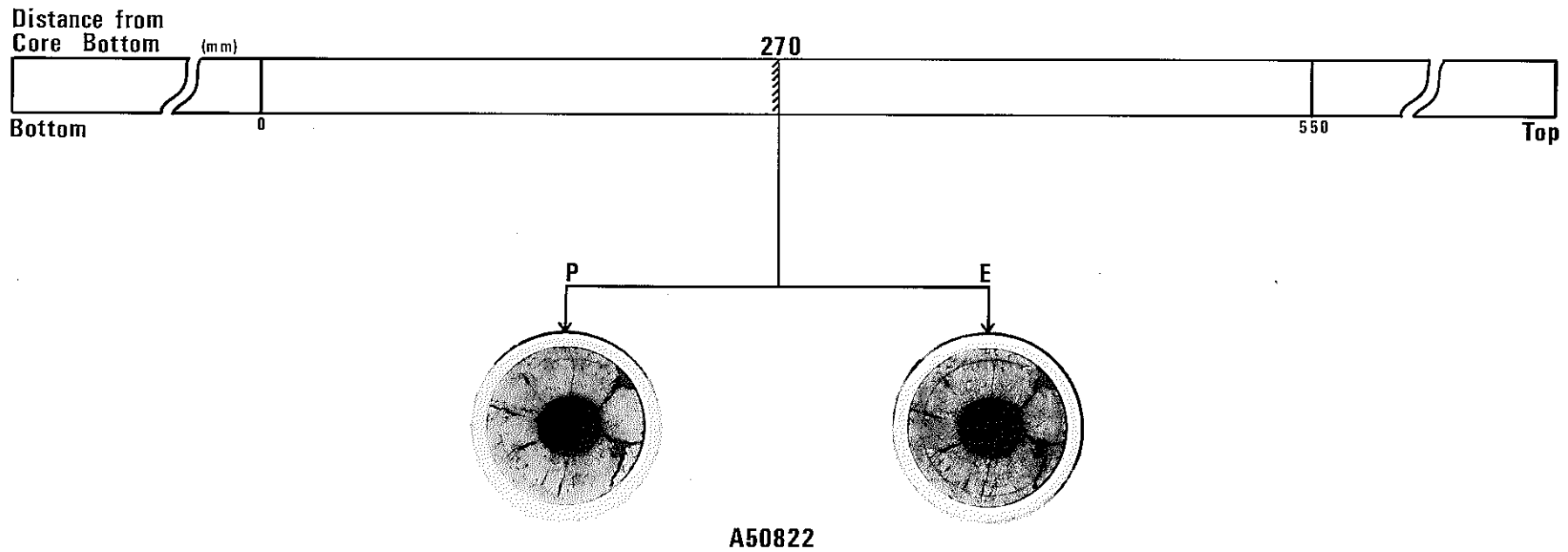


Fig. 28 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

S/A No.	JOYO-PFI010
Pin No.	A508
S/A Peak Burnup	37500MWd/t

As polished
etched



- 47 -

Photo.1 Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A508 pin)

S/A No.	JOYO-PF1010
Pin No.	A513
S/A Peak Burnup	36360MWd/t

As polished
etched

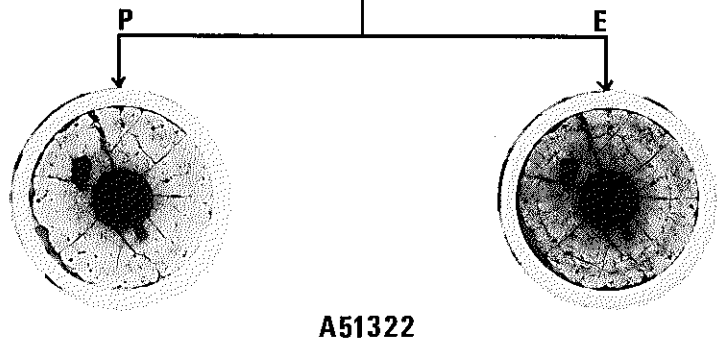
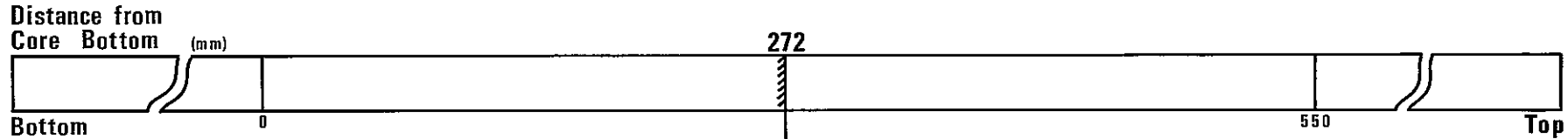
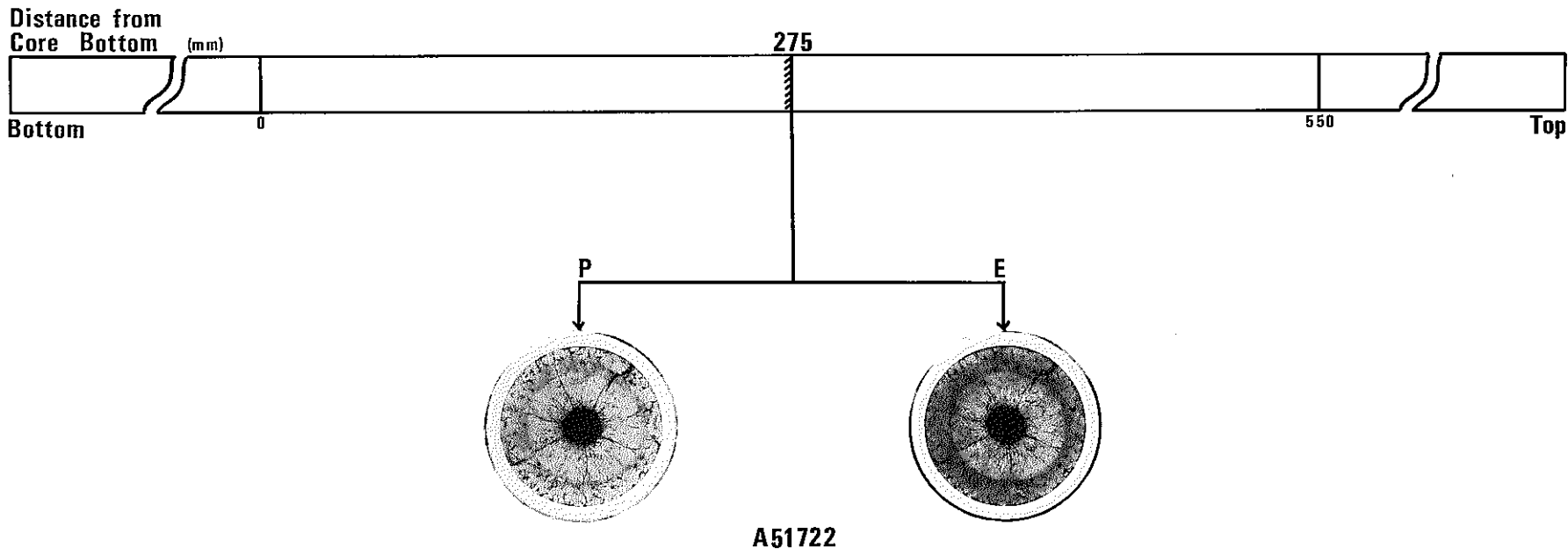


Photo.2 Macrographs of "JOYO" PF1010 core fuel (A513 pin)

S/A No.	JOYO-PFI010
Pin No.	A517
S/A Peak Burnup	36590MWd/t

As polished
etched

PNC 19410 90-007



- 51 -

Photo.3 Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A517 pin)

S/A No.	JOYO-PFI010
Pin No.	A519
S/A Peak Burnup	36140M Wd/t

As polished
etched

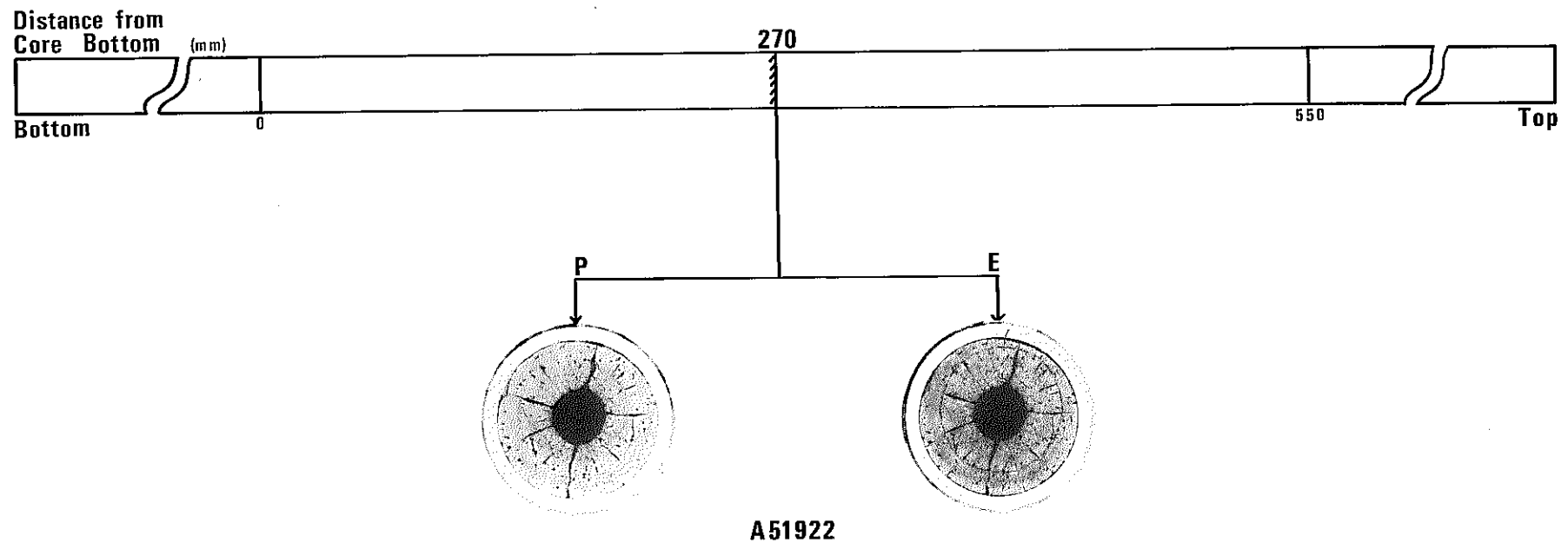
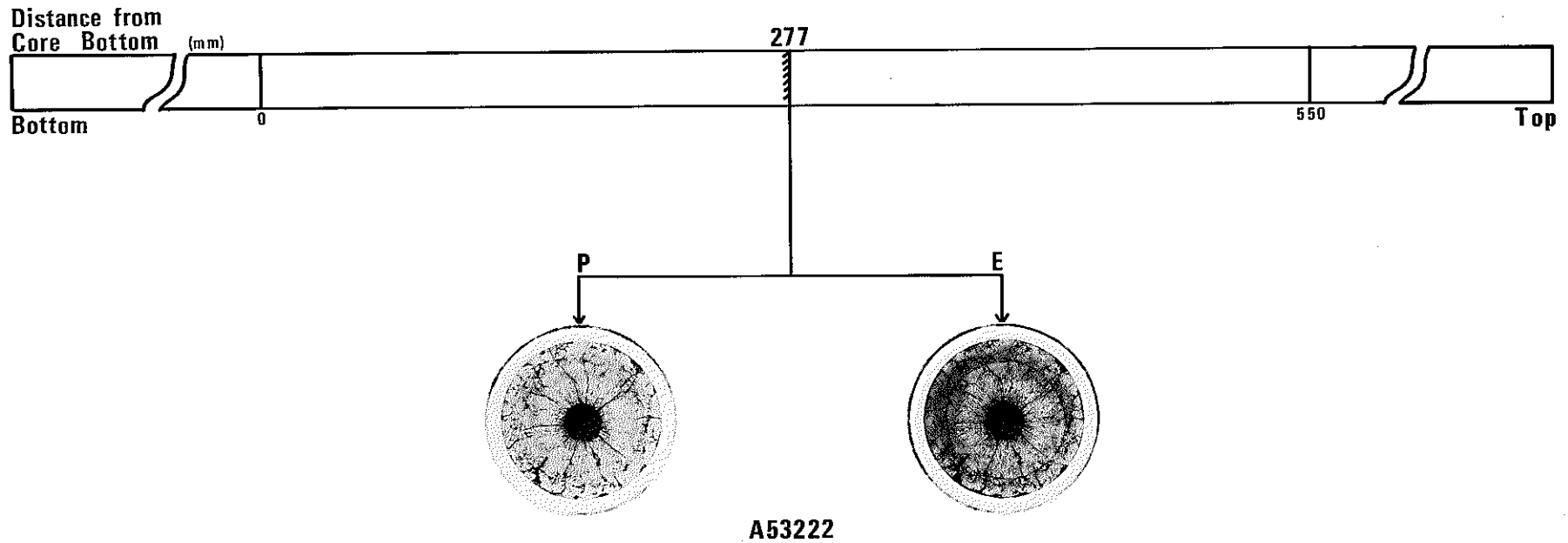


Photo.4 Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A519 pin)

S/A No.	JOYO-PFI010
Pin No.	A532
S/A Peak Burnup	35450MWd/t

As polished
etched



- 55 -

Photo.5 Macrographs of "JOYO" PFI010 core fuel (A532 pin)

S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A508	
Section No.	A50822	
Distance from bottom of pin		440mm
Distance from bottom of core column		270mm

etched

1mm

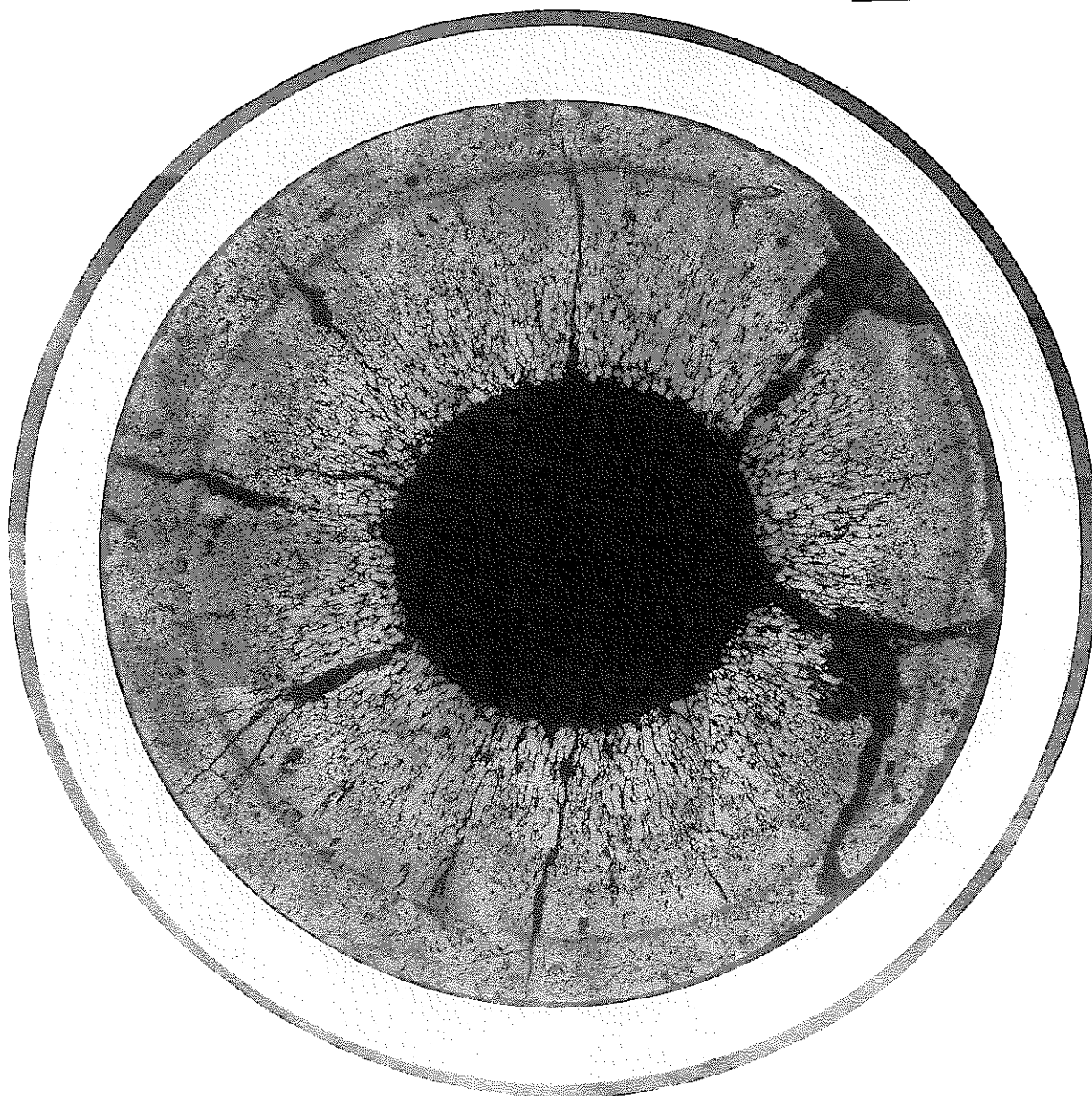


Photo.6 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A50822 sample)

S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A513	
Section No.	A51322	
Distance from bottom of pin		442mm
Distance from bottom of core column		272mm

etched

1mm

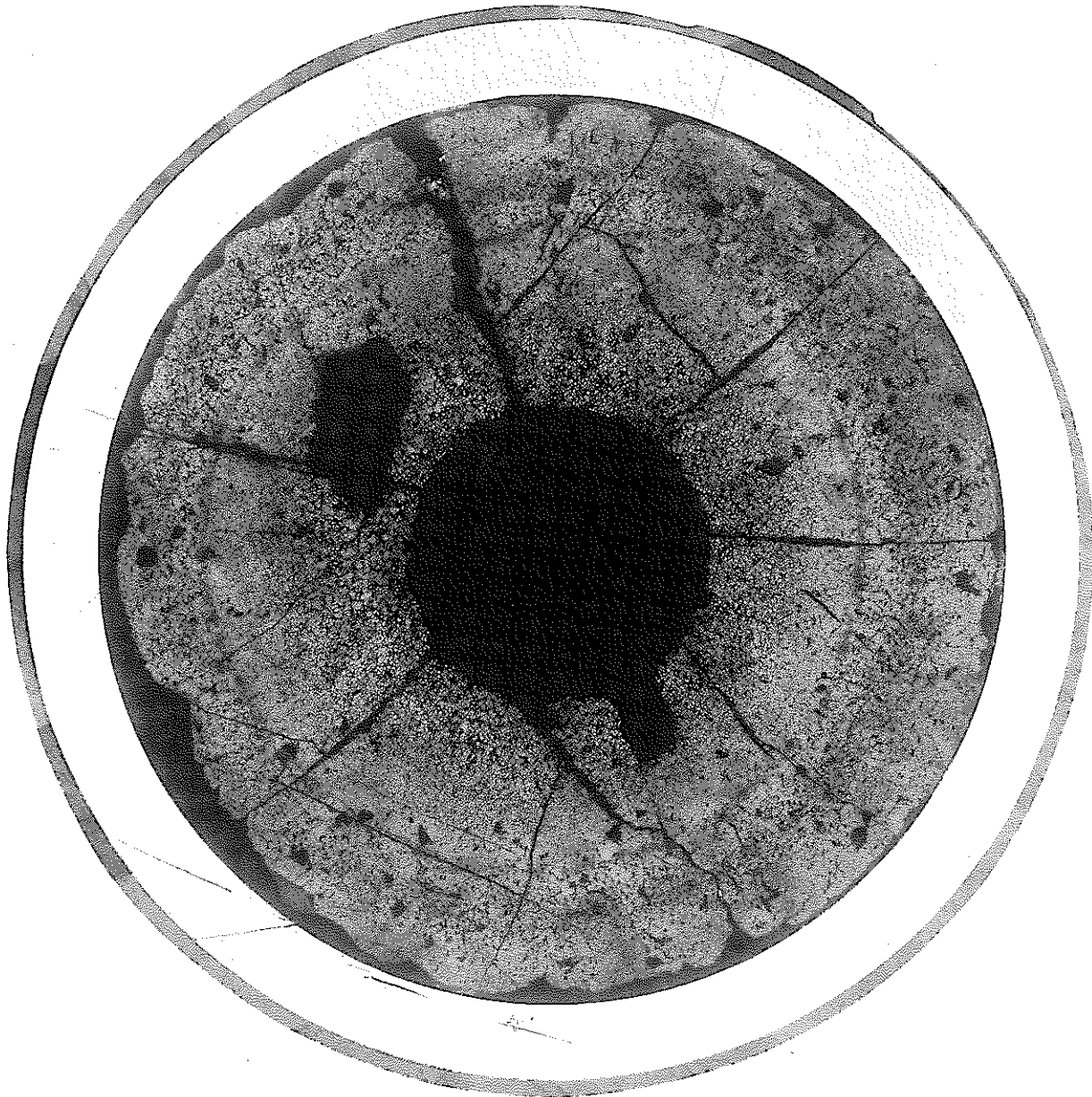


Photo.7 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A51322 sample)

S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A517	
Section No.	A51722	
Distance from bottom of pin		445mm
Distance from bottom of core column		275mm

etched

1mm

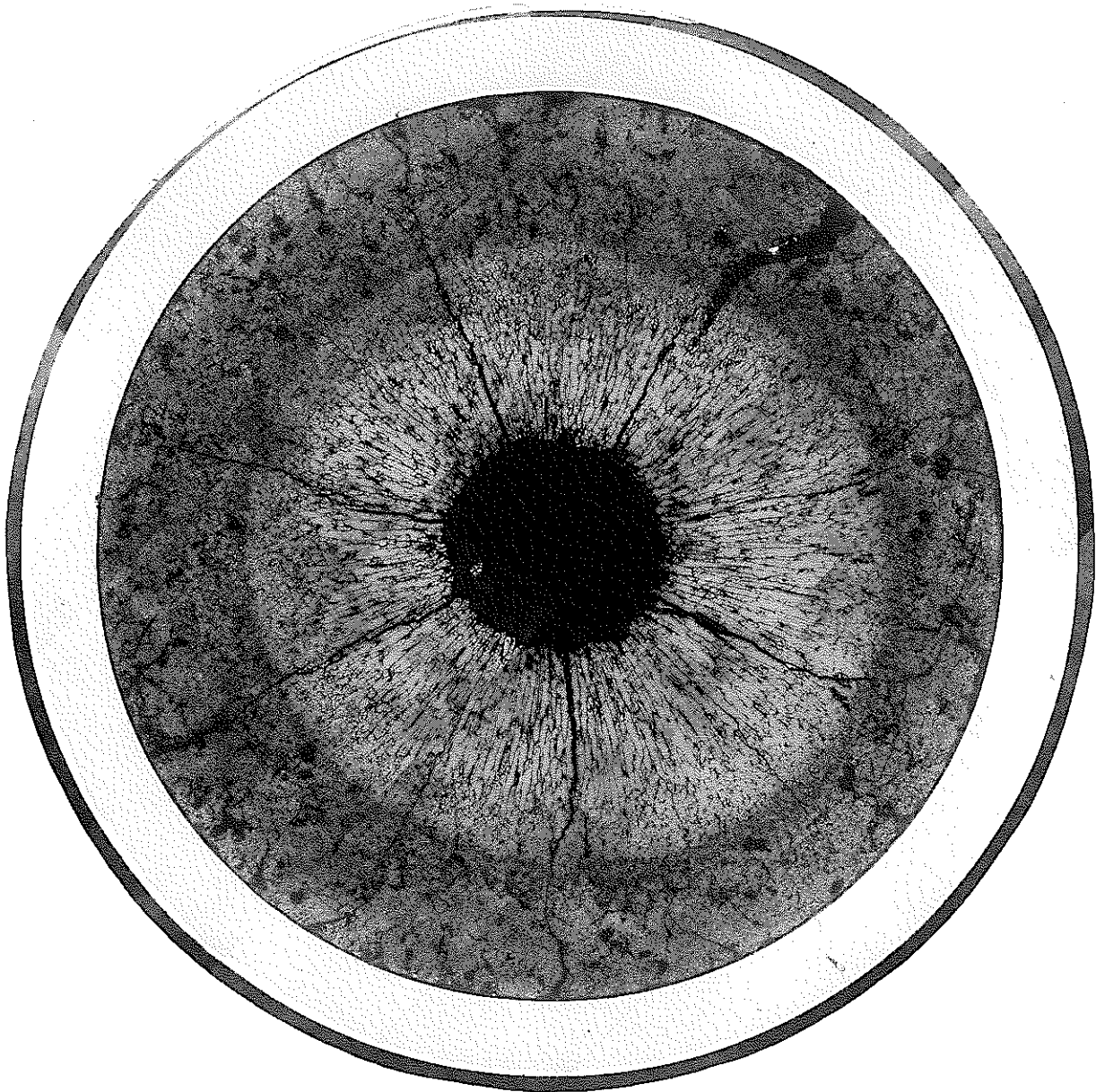


Photo.8 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A51722 sample)

S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A519	
Section No.	A51922	
Distance from bottom of pin		440mm
Distance from bottom of core column		270mm

etched

1mm

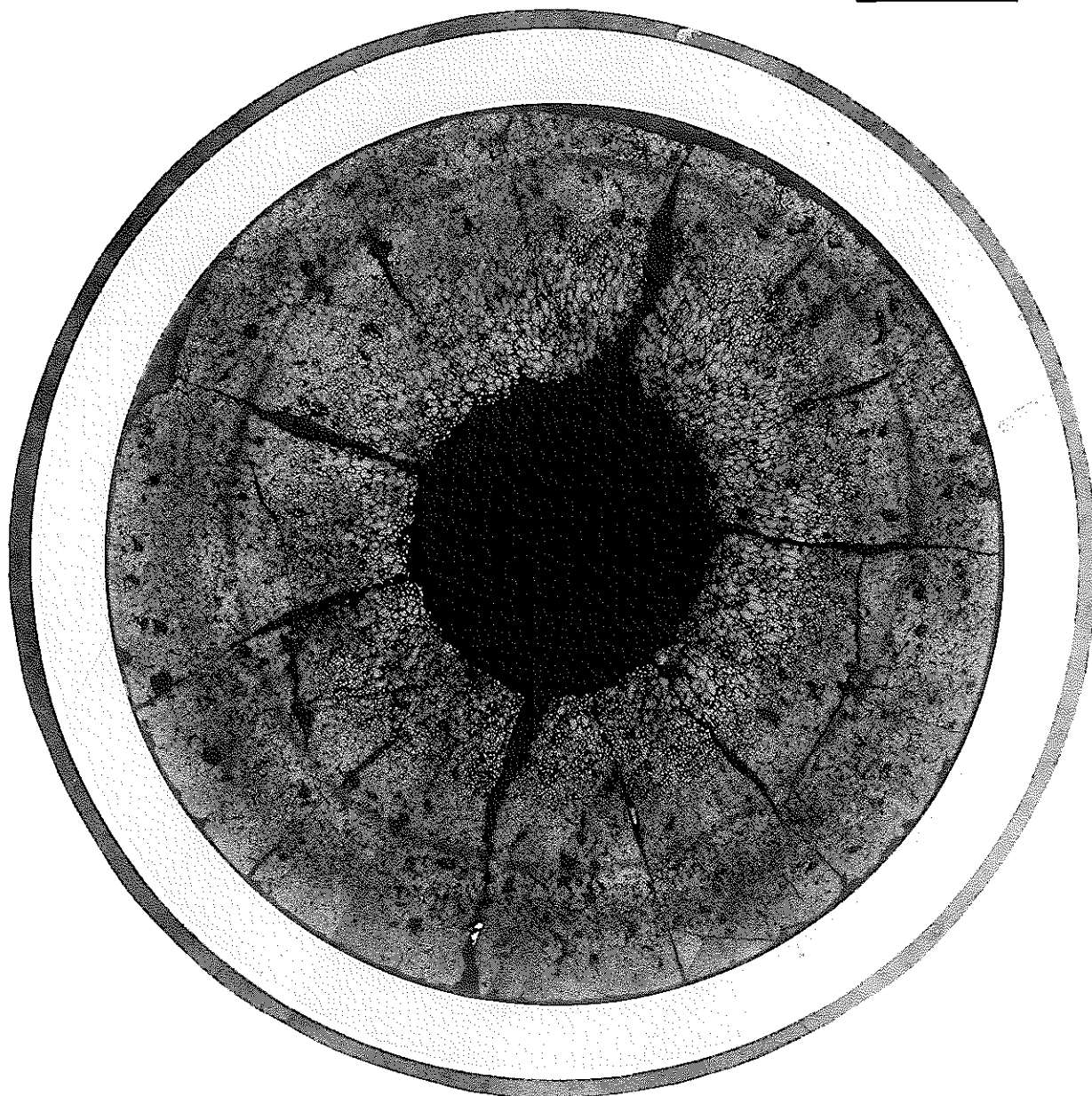


Photo.9 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A51922 sample)

S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A532	
Section No.	A53222	
Distance from bottom of pin		447mm
Distance from bottom of core column		277mm

etched

1mm

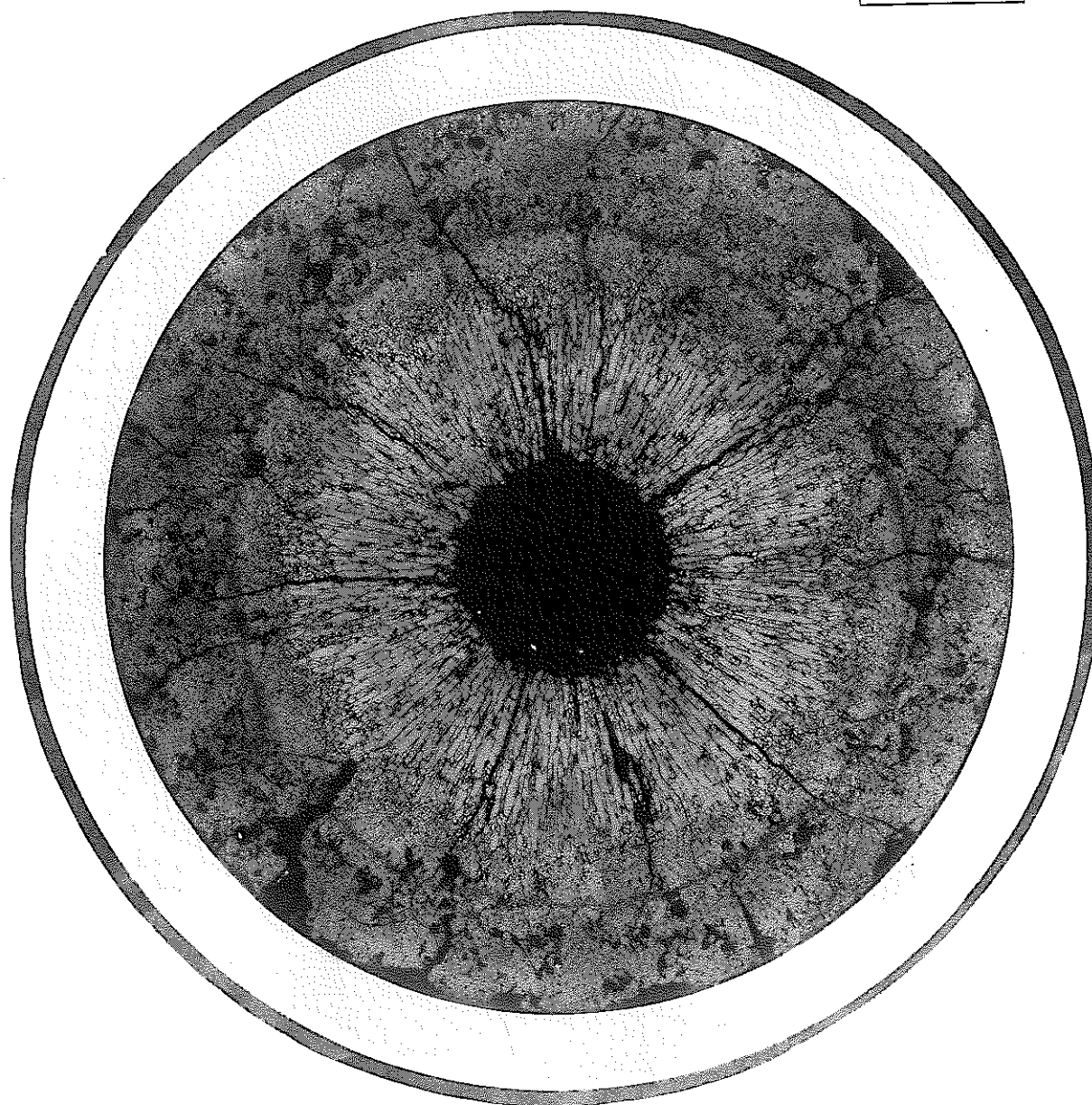
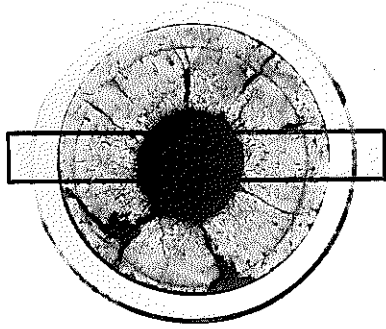


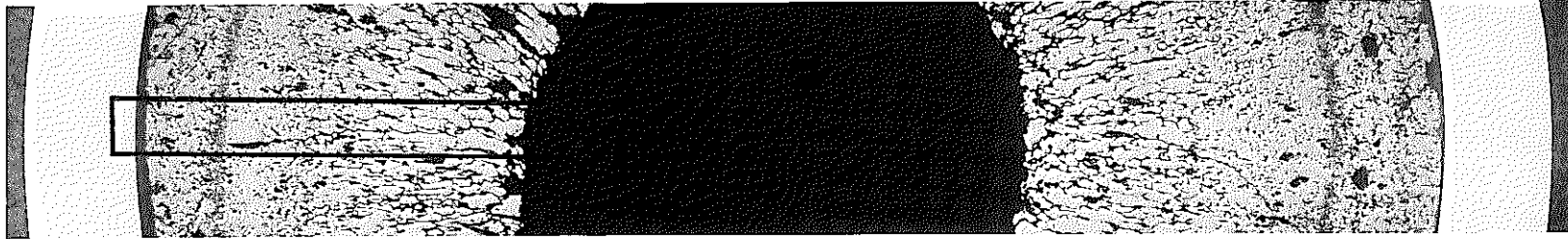
Photo.10 Postirradiation ceramograph of the transverse section of "JOYO" PFI010 core fuel (A53222 sample)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A508	
Section No.	A50822	
Distance from bottom of pin		440mm
Distance from bottom of core column		270mm

etched

1mm



0.1mm

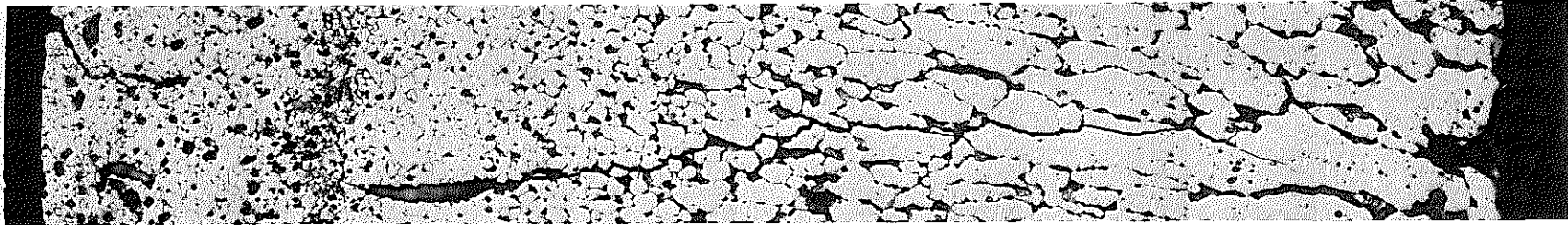
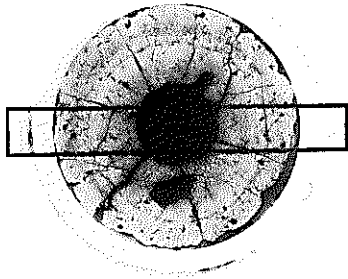


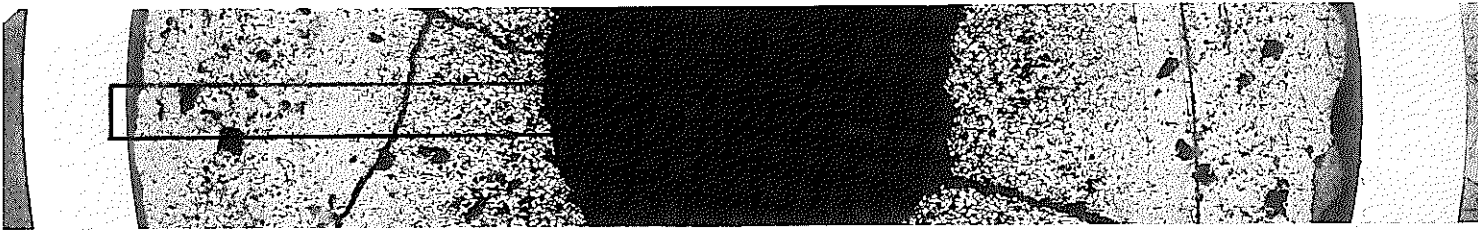
Photo.11 Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A50822 sample)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A513	
Section No.	A51322	
Distance from bottom of pin		442mm
Distance from bottom of core column		272mm

etched

1mm



0.1mm

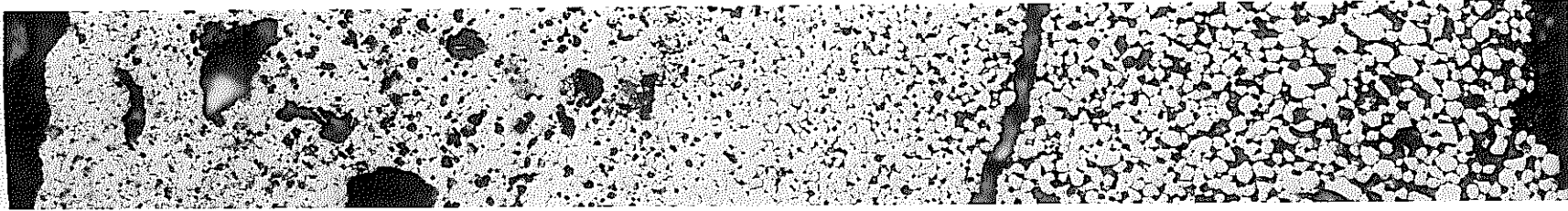
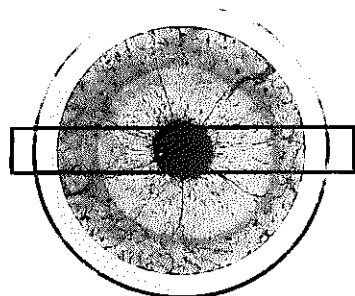


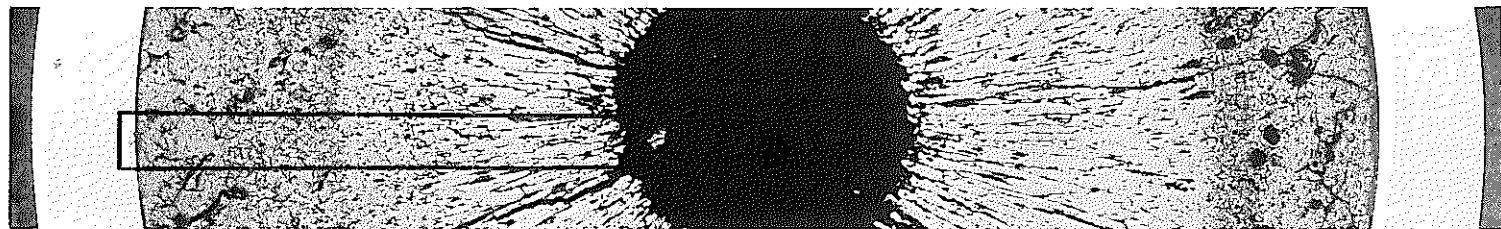
Photo.12 Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A51322 sample)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A517	
Section No.	A51722	
Distance from bottom of pin		445mm
Distance from bottom of core column		275mm

etched

1mm



0.1mm

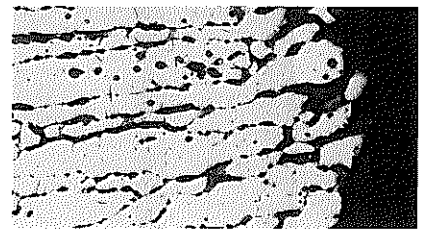
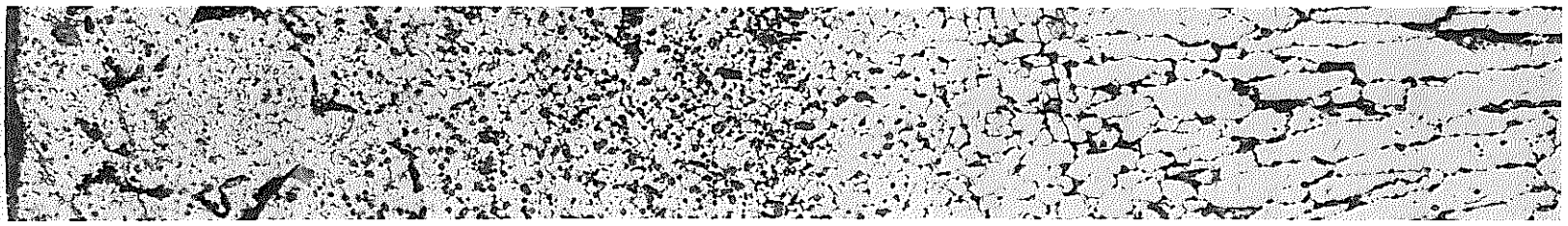
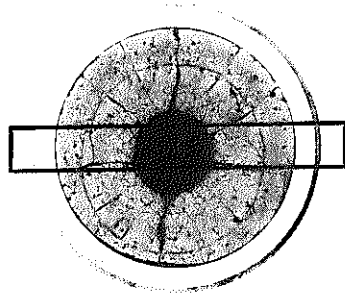


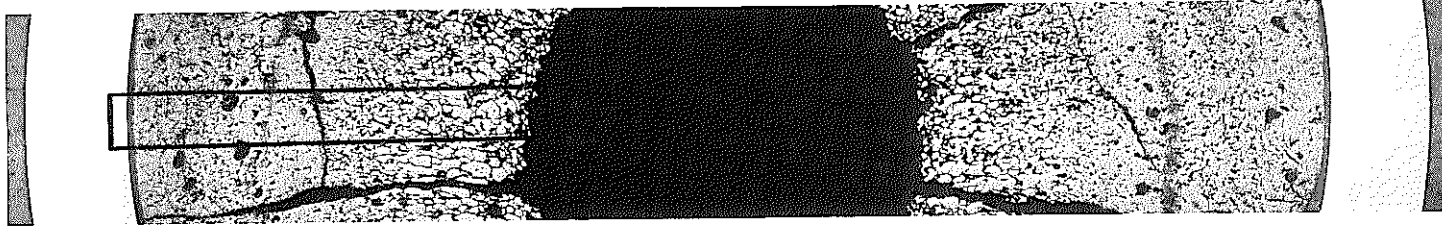
Photo.13 Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A51722 sample)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A519	
Section No.	A51922	
Distance from bottom of pin		440mm
Distance from bottom of core column		270mm

etched

1mm



0.1mm

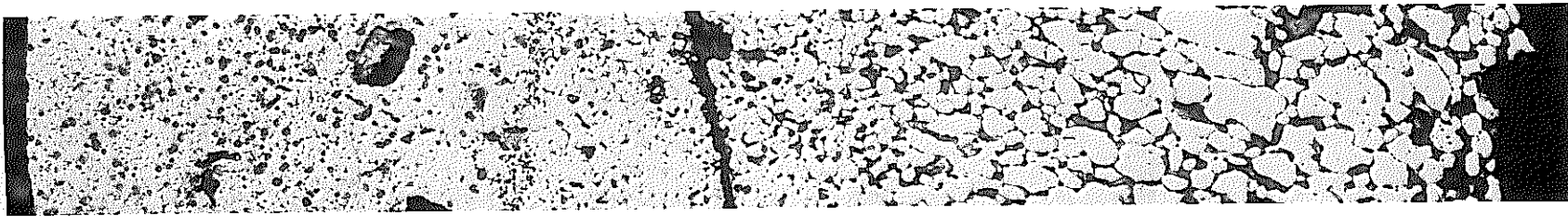
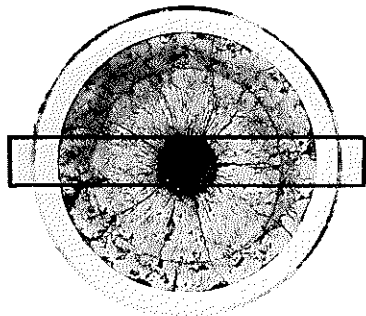


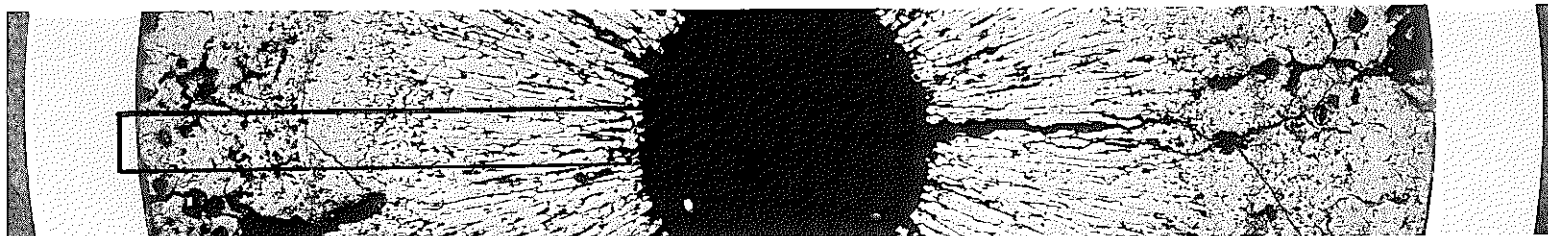
Photo.14 Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A51922 sample)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A532	
Section No.	A53222	
Distance from bottom of pin	447mm	
Distance from bottom of core column	277mm	

etched

1mm



0.1mm

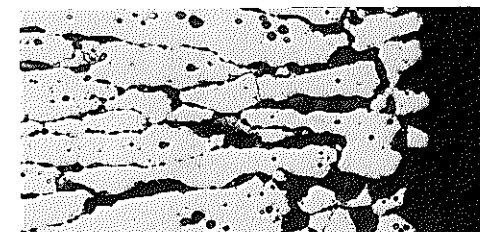
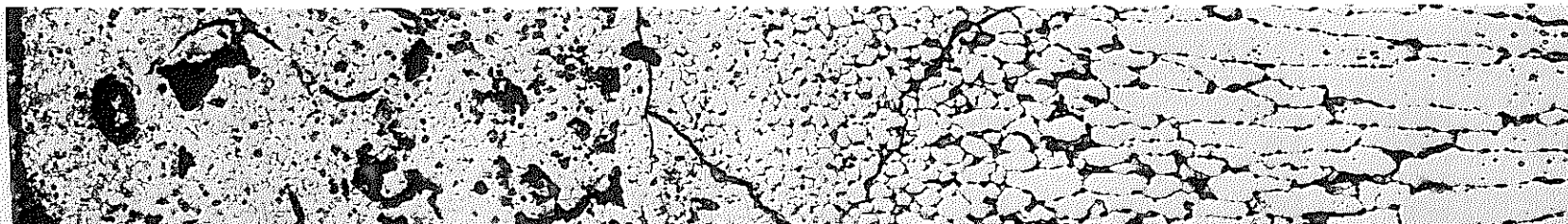
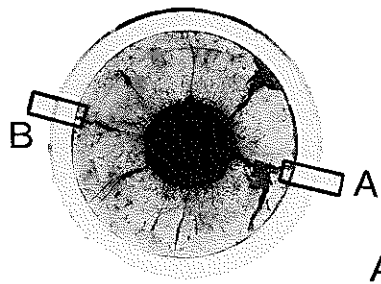


Photo.15 Postirradiation ceramograph of "JOYO" PFI010 core fuel (A53222 sample)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A508	
Section No.	A50822	
Distance from bottom of pin		440mm
Distance from bottom of core column		270mm

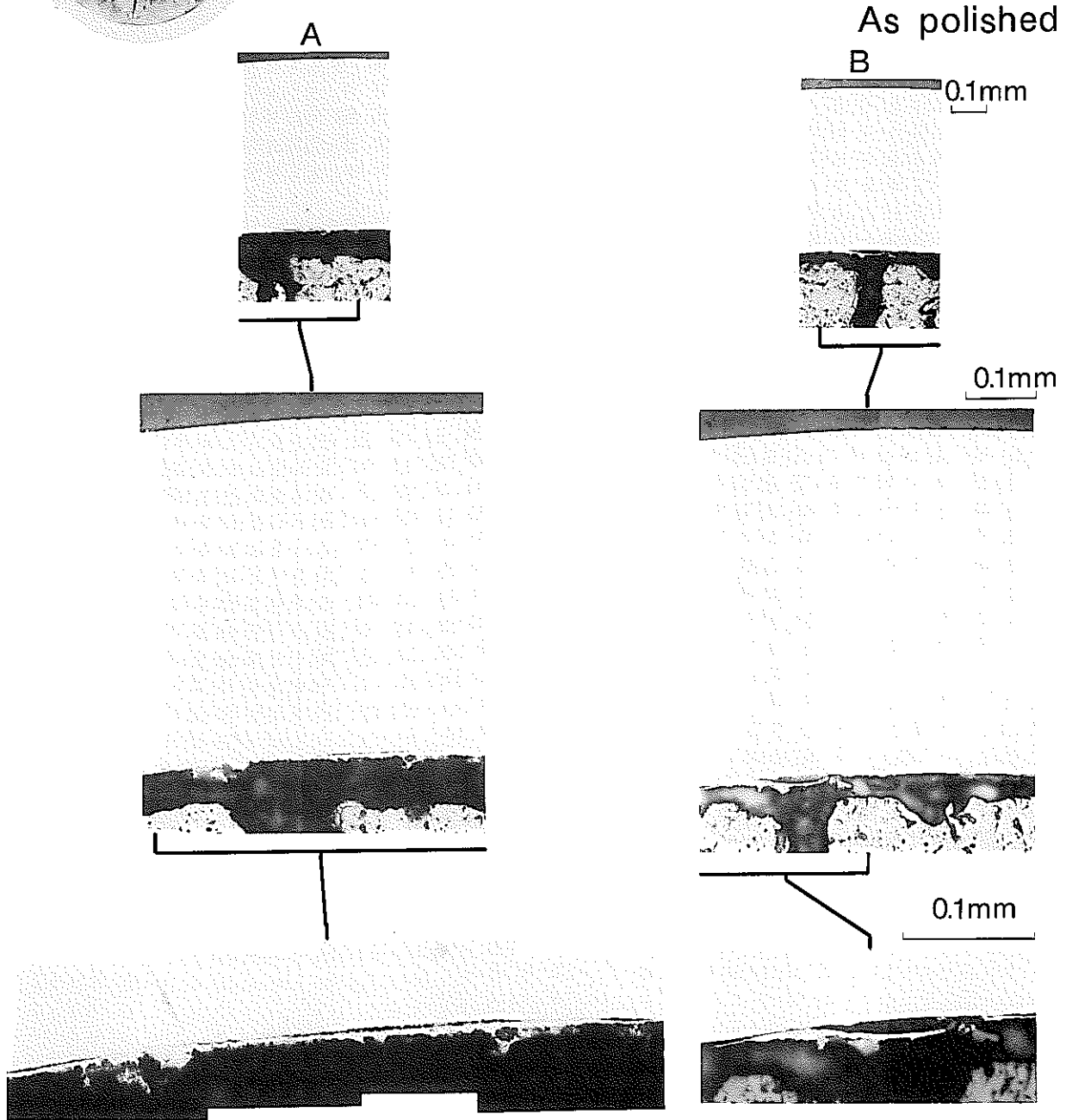
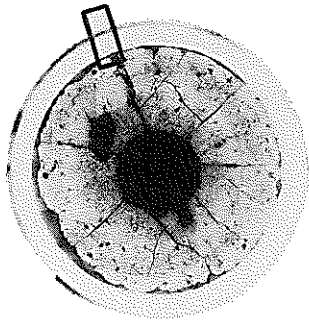


Photo.16 Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding
 (A50822 sample, FCCI)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A513	
Section No.	A51322	
Distance from bottom of pin	442mm	
Distance from bottom of core column	272mm	

As polished

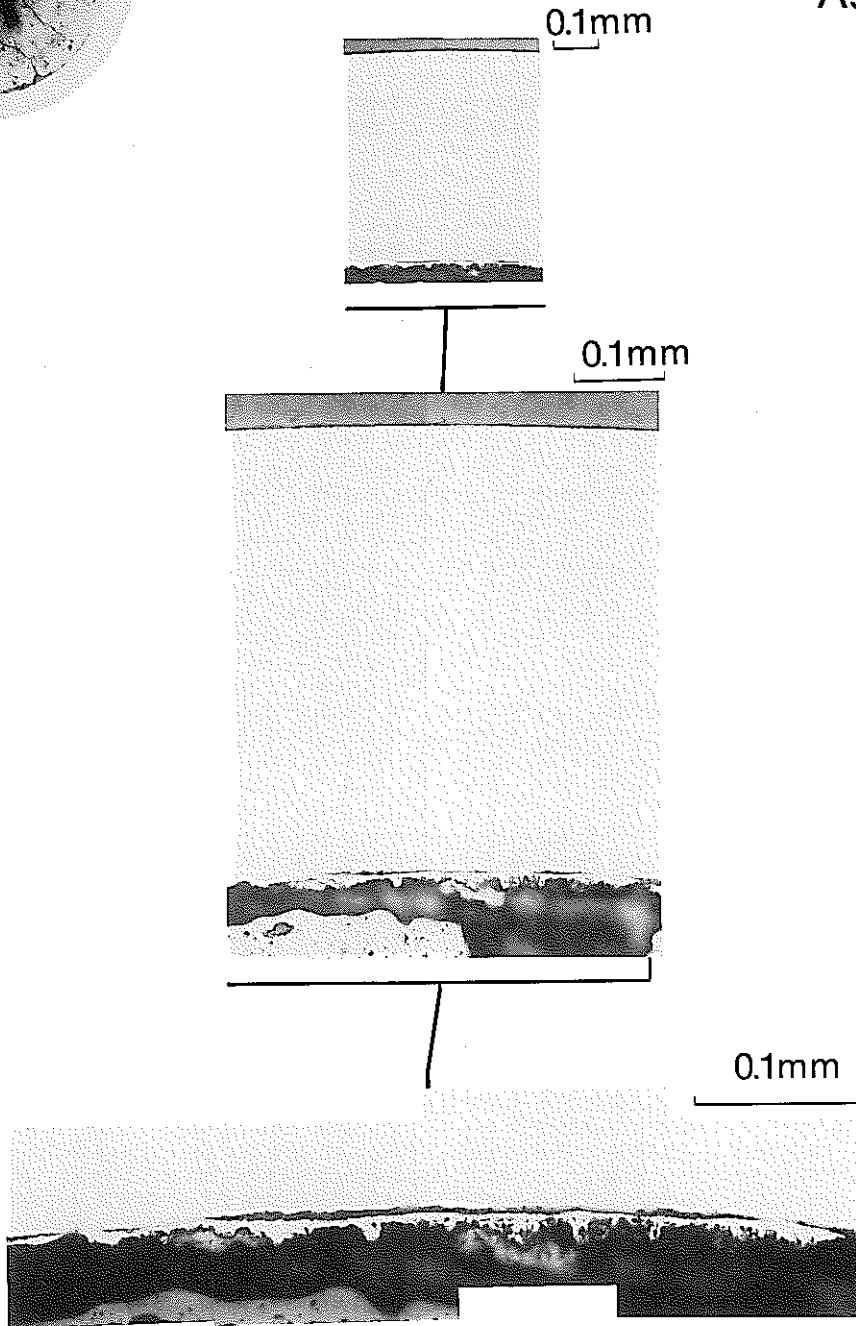
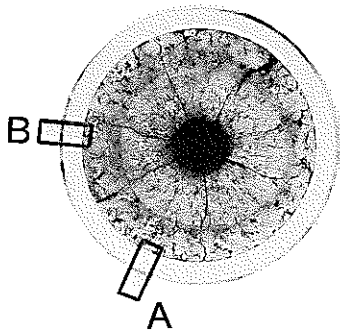


Photo.17 Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A51322 samole, FCCI)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A517	
Section No.	A51722	
Distance from bottom of pin		445mm
Distance from bottom of core column		275mm

As polished

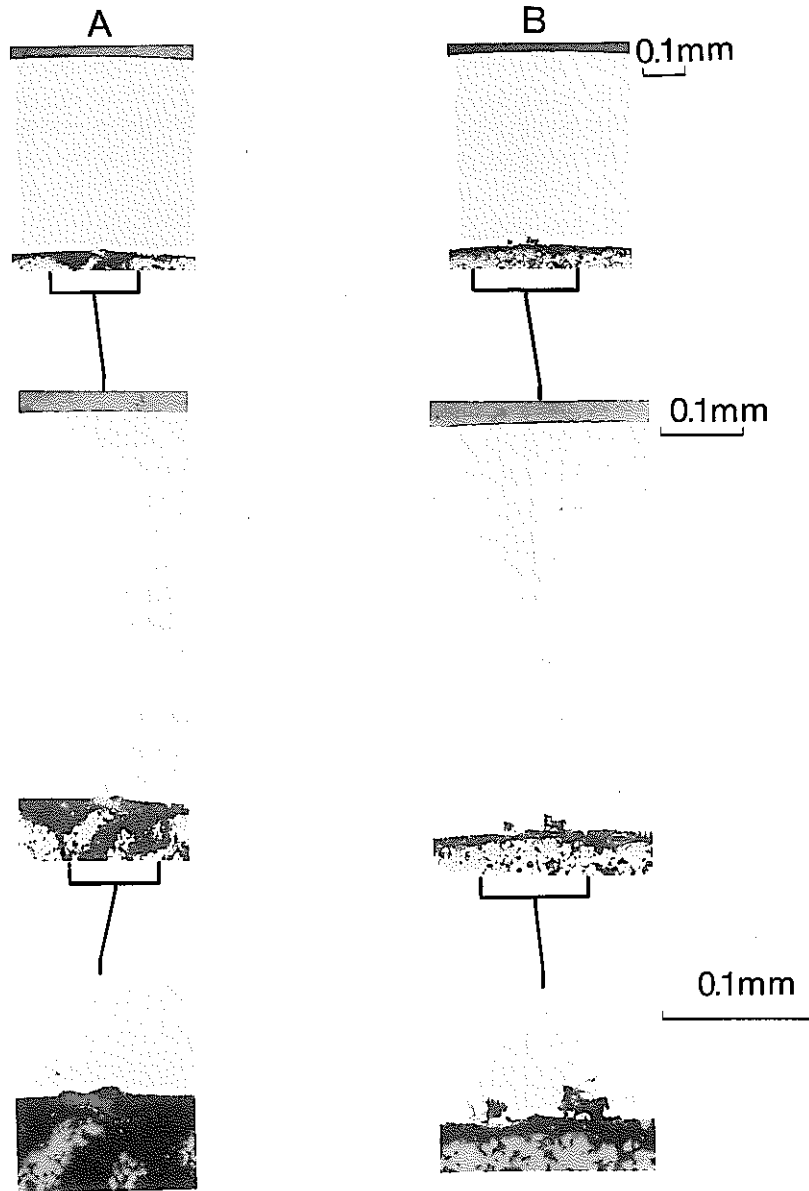
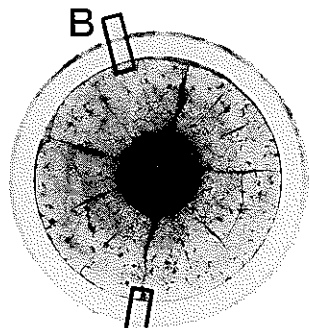


Photo.18 Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A51722 sample, FCCI)



S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A519	
Section No.	A51922	
Distance from bottom of pin	440mm	
Distance from bottom of core column	270mm	

As polished

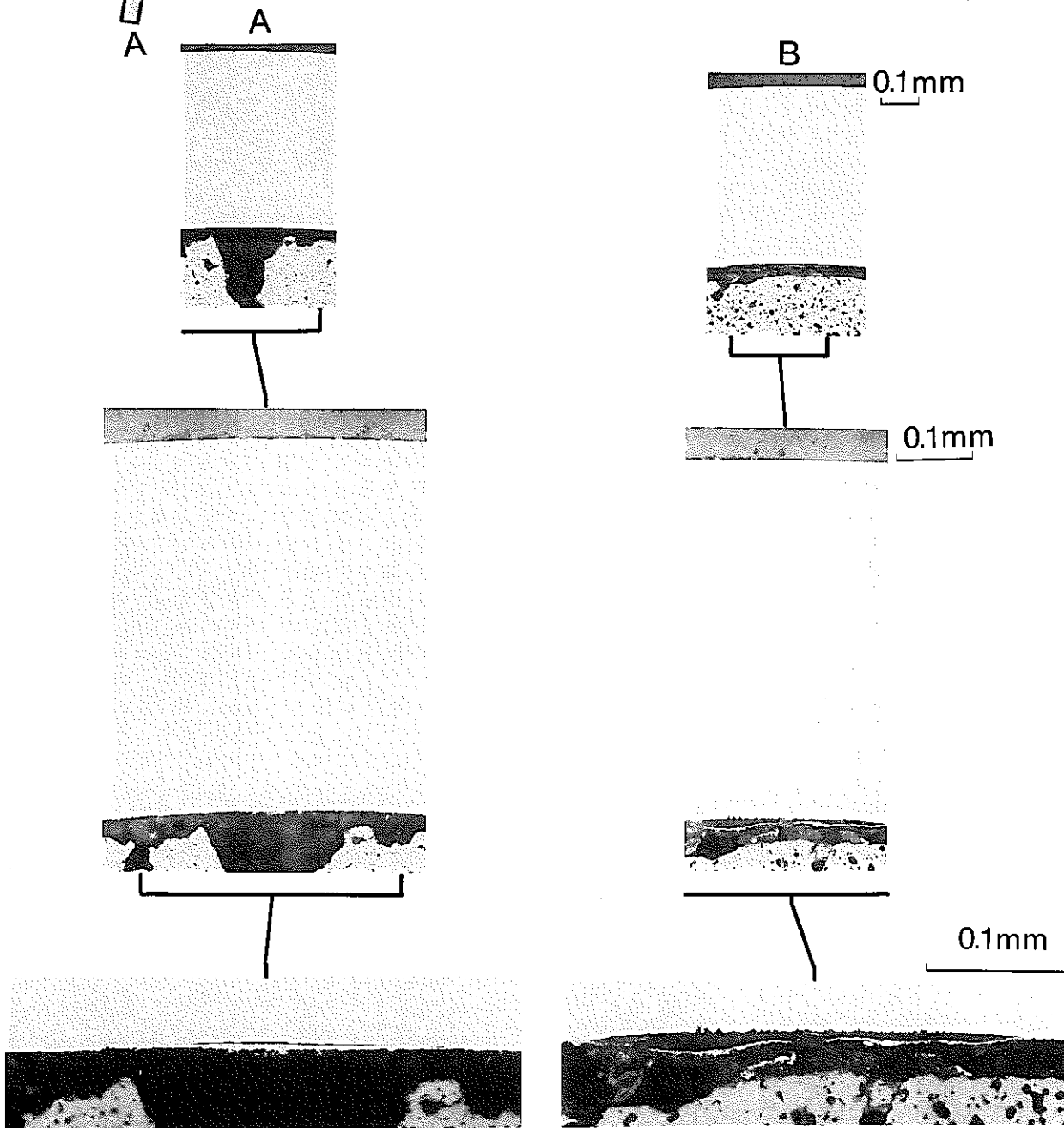
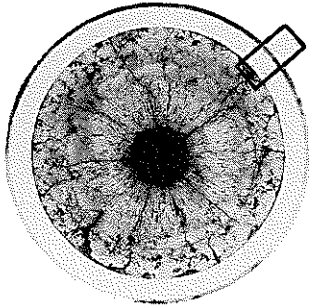


Photo.19 Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding
(A51922 sample, FCCI)

S/A Name	JOYO-PFI010	
Pin No.	A532	
Section No.	A53222	
Distance from bottom of pin		447mm
Distance from bottom of core column		277mm



As polished

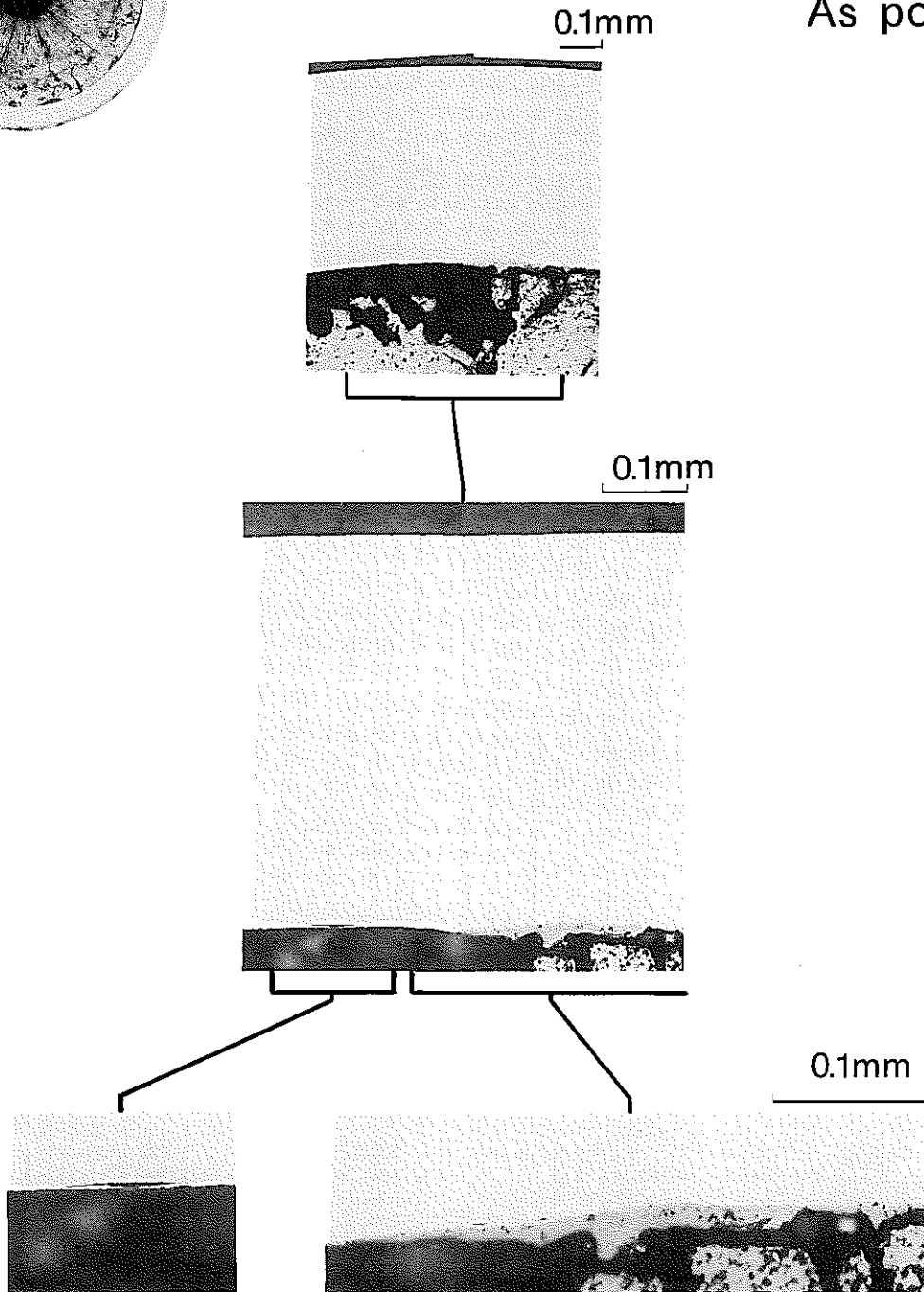
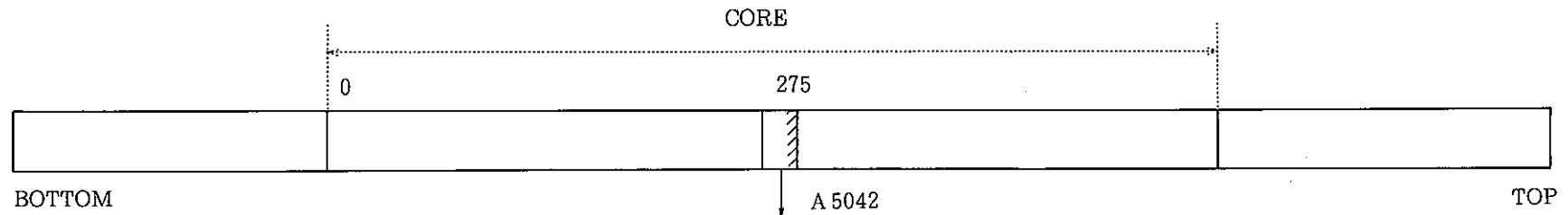
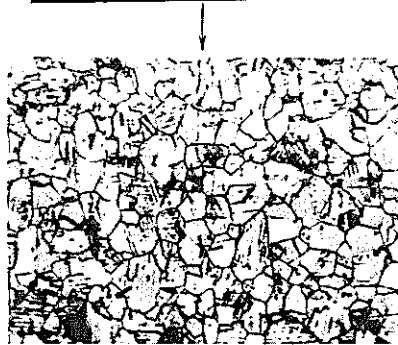


Photo.20 Postirradiation metallograph of "JOYO" PFI010 cladding (A53222 sample, FCCI)



0.1 mm



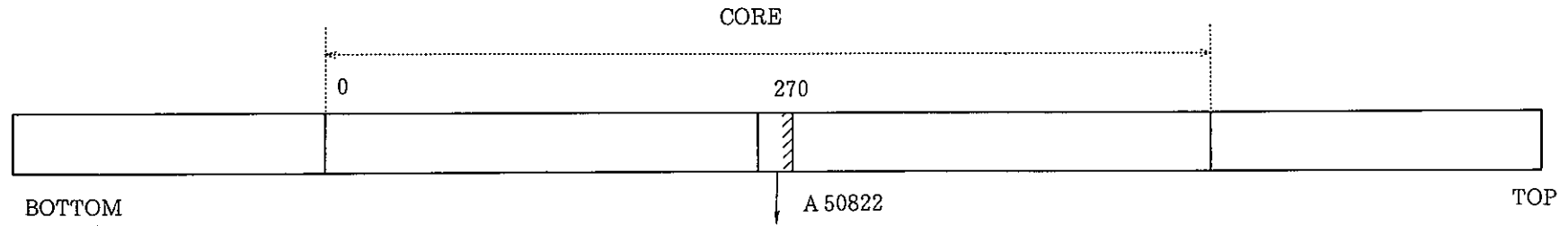
10 μm

IRRAD. TEMP. (°C) : 534
FLUENCE (× 10²² n/cm²) : 2.58

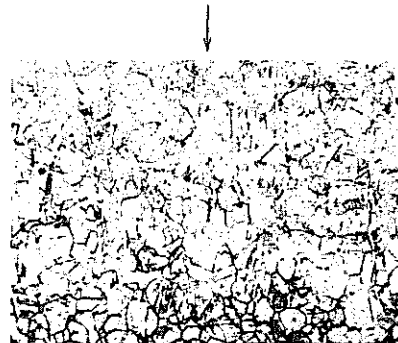
Photo.21 Optical micrographs of fuel cladding (A504 pin)

JOYO MK-II

PFI010
A 508 ピン



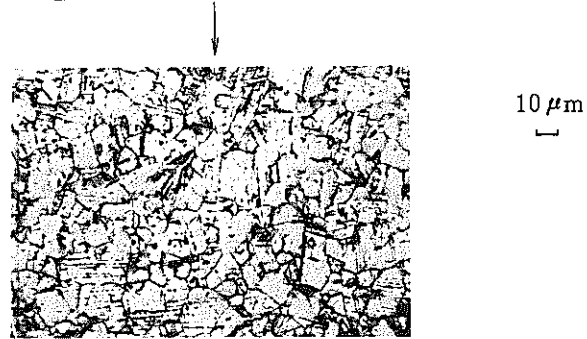
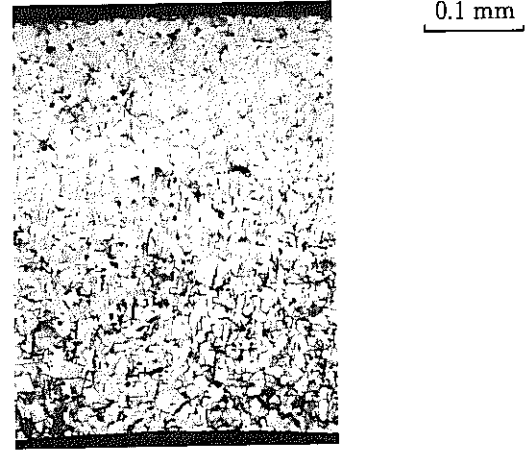
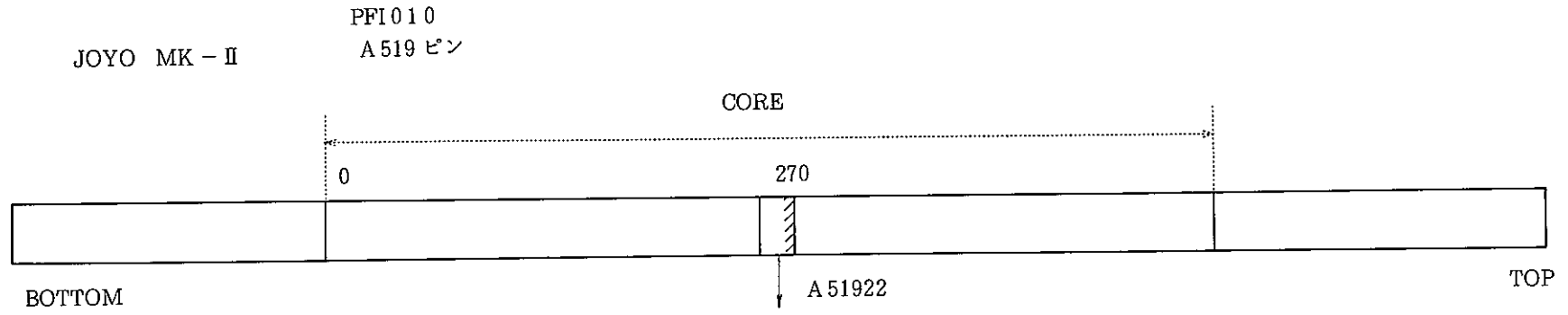
0.1 mm



10 μm

IRRAD. TEMP. (°C) : 535
FLUENCE ($\times 10^{22}$ n/cm²) : 2.55

Photo.22 Optical micrographs of fuel cladding (A508 pin)

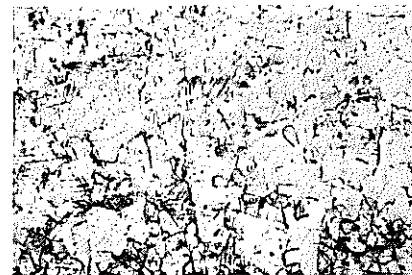
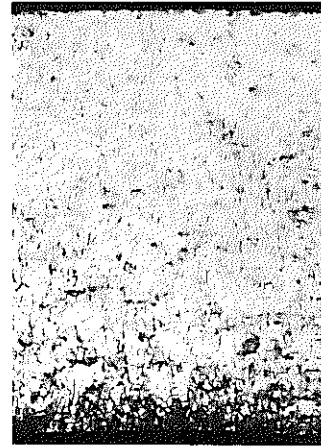
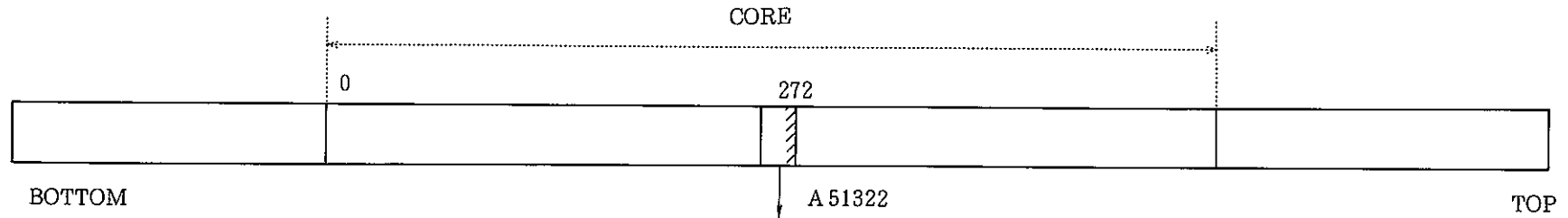


IRRAD. TEMP. (°C) : 529
FLUENCE ($\times 10^{22}n/cm^2$) : 2.46

Photo.23 Optical micrographs of fuel cladding (A513 pin)

JOYO MK-II

PFI010
A 513 ピン



IRRAD. TEMP. (°C) : 525
FLUENCE ($\times 10^{22}$ n/cm²) : 2.45

Photo.24 Optical micrographs of fuel cladding (A 519 pin)