

「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体 (PFB031) の照射後試験

—出力上昇試験用燃料要素の破壊試験—



区分変更	
変更後資料番号	PNC TN9410 90-189
決裁年月日	平成 13年 7月 31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 ^{TV} 手9410 90-~~006~~¹⁸⁹
1 9 9 0 年 3 月

「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体（PFB031）の照射後試験

－出力上昇試験用燃料要素の破壊試験－

実施責任者 横内 洋二*
報 告 者 吉持 宏* 川澄 清一*
吉川 勝則* 廣沢 孝志*
小沢 隆之*

「常陽」MK-II B特殊燃料集合体PFB031（集合体平均燃焼度約71MWd/t）は、出力上昇時の燃料挙動を把握することを目的に12サイクル時に照射されたものである。

照射燃料試験室（AGS）では、「常陽」仕様燃料の出力上昇時における燃料組織変化データの取得を目的として、金相試験（燃料組織観察）を実施し、また、「もんじゅ」仕様燃料の照射初期挙動を把握することを目的として、融点測定、X線回折測定及び燃焼率測定を実施した。その結果を要約すると、下記のとおりである。

- (1) 「常陽」仕様燃料は、中心空孔及び柱状晶領域は観察されず、等軸晶及び不変化領域のみ観察された。
- (2) 燃料-被覆管の残留ギャップ幅は、製造時と比較して約11～14%閉じている。
- (3) 「もんじゅ」仕様燃料の融点は、従来の設計値（2650℃）を十分上回っていた。また、燃料のO/M比は、製造時と比較して0.029の増加が認められた。
- (4) 「もんじゅ」仕様燃料ピンの軸方向中心位置での燃焼率は0.011atom%であった。

* 大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料試験室

目 次

1. まえがき	1
2. 燃料ピン	2
3. 照射条件	3
4. 照射後試験	4
4.1 金相試験	4
4.1.1 試料調製方法	4
4.1.2 試験結果	4
4.2 融点測定	5
4.2.1 測定方法	5
4.2.2 測定結果	5
4.3 X線回折測定	5
4.3.1 測定方法	5
4.3.2 測定結果	6
4.4 燃焼率測定	6
4.4.1 試料調製方法	6
4.4.2 測定結果	6
5. まとめ	8
6. データ集	9
7. 付録	51

List of Tables

Table 1	Fuel pin fabrication parameters	9
Table 2	Metallographic examination in AGS	10
Table 3	Irradiation condition of specimens	11
Table 4	Summary data from ceramography of PFB031	12
Table 5	Specimen parameters and results of melting point measurement	13
Table 6	Result of mass analysis for Nd (Unirradiated)	14
Table 7	Summary of burnup measurement by Nd-method for PFB031	15
Table 8	Calculation of effective fission yield for A602342 sample	16
Table 9	Composition of spike solution and natural Neodymium	17
Table 10	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB031 A602342 sample	18
Table 11	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB031 A603342 sample	19
Table 12	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB031 A604342 sample	20

List of Figures

Fig. 1	Schematic drawing of JOYO type fuel pins (B0J, B1J).....	21
Fig. 2	Schematic drawing of MONJU type fuel pin	22
Fig. 3	In-reactor location of the subassembly	23
Fig. 4	Location of fuel pin in the PFB031 subassembly	24
Fig. 5	Irradiation history of PFB031 experiment	25
Fig. 6	Axial profile of burnup for A607 pin	26
Fig. 7	Axial profile of linear heat rate for A607 pin	27
Fig. 8	Axial profile of fluence and cladding temperature for A607 pin	28
Fig. 9	Axial profile of burnup for A602 pin	29
Fig. 10	Axial profile of burnup for A603 pin	30
Fig. 11	Axial profile of burnup for A604 pin	31
Fig. 12	Sampling of specimens for PIE in AGS	32
Fig. 13	Flow diagram of metallographic examination in AGS	33
Fig. 14	Restructured region as a function of linear heat rate	34
Fig. 15	Heating curve of irradiated mixed-oxide fuel (PFB031 A60322)	35
Fig. 16	Heating curve of unirradiated ($U_{0.7}, Pu_{0.3}$) O_2	36
Fig. 17	Comparison of phase diagram for (U_y, Pu_{1-y}) O_2 (Unirradiated).....	37
Fig. 18	Melting temperature of irradiated mixed oxide fuel with burnup	38
Fig. 19	Cutting diagram of PFB031 subassembly fuel pins for burnup measurement	39
Fig. 20	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS	40

List of Photographs

Photo. 1	Macrography of PFB031 core fuel(A607pin, as polished and etched) ..	41
Photo. 2	Macrography of PFB031 core fuel(A609pin, as polished and etched) ..	42
Photo. 3	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin(specimen No. A60722) as polished	43
Photo. 4	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (specimen No. A60722) etched	44
Photo. 5	Optical microstructures of the core fuel(specimen No. A60722) as polished	45
Photo. 6	Optical microstructures of the core fuel(specimen No. A60722) etched	46
Photo. 7	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin(specimen No. A60922) as polished	47
Photo. 8	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (specimen No. A60922) etched	48
Photo. 9	Optical microstructures of the core fuel(specimen No. A60922) as polished	49
Photo. 10	Optical microstructures of the core fuel(specimen No. A60922) etched	50

1. ま え が き

B型特殊燃料集合体PFB031(B4M)は、出力上昇時における「もんじゅ」及び「常陽」仕様の新燃料の燃料組織変化を確認し、燃料温度解析手法の検証データを得ることを目的に照射されたものである。

照射燃料試験室(AGS)では、「もんじゅ」で計画されている出力上昇速度(0.4%/min)条件下での「常陽」仕様燃料の組織変化データの取得及び「もんじゅ」仕様燃料の照射初期の照射挙動を把握するため、金相試験(燃料組織観察)、融点測定、X線回折測定及び燃焼率測定を実施した。

本報告書は、これらの成果をまとめたものである。

2. 燃料ピン

B型特殊燃料集合体PFB031(B4M)の試験用コンパートメント内には、2種類の「常陽」仕様燃料ピン、1種類の「もんじゅ」仕様燃料ピンの他2種類のダミーピンが設置されている。燃料ピンの諸元及び構造図をTable 1、Fig. 1及びFig. 2にそれぞれ示す。

試験に供した燃料ピンは、Table 1に示すようにペレットと被覆管のギャップ幅及びプレナム有効容積の違いが織り込まれている。この内、「常陽」仕様燃料ピン(B0J、B1Jの2種類)は、20%冷間加工SUS316相当鋼被覆管に「常陽」MK-II炉心に合わせた550mm長の燃料ペレットを装填している。B0JとB1Jピンの構造上の相違点は、体積の異なる抑え板付プレナムスプリングを使用し、プレナム有効容積を変えている点である。また、「もんじゅ」仕様燃料ピンでは、主に製造時ギャップ幅の大小がパラメータとして織り込まれている。

3. 照射条件

本集合体の出力上昇試験は、「常陽」MK-II炉心第12サイクル（特殊試験）時に実施された。集合体の炉心装荷位置をFig. 3、また、本集合体において破壊試験を実施した燃料ピンの集合体内の装荷位置をFig. 4にそれぞれ示す。なお、このうち金相試験はコンパートメント2に収納されているB0J02(A607ピン)及びB1J25(A609ピン)であり、融点測定、X線回折測定及び燃焼率測定はコンパートメント5に収納されているB3M05(A602ピン)、B3M09(A603ピン)及びB3M25(A604ピン)である。

この出力上昇試験は、原子炉の出力を「もんじゅ」で計画されている出力上昇速度0.4%/minを模擬するため、50MWまでは通常の出力上昇速度（0.1%/min）で上昇し、50MWから100MWまでは0.4%/minで2.1時間で上昇した。その後、100MWで3.05時間保持された後、制御棒を原子炉内に急速に挿入し、短時間に50MWまで降下させ、通常の出力降下速度で原子炉の出力を下けている。Fig. 5にその時の原子炉熱出力履歴を示す。

本集合体の照射条件は以下のとおりである。

- (1) 照射期間：昭和61年11月13日及び14日の第12サイクル
- (2) 燃焼度（集合体平均）：約71MWd/t
- (3) 線出力（ポイント最大）
 - (イ) 試験用コンパートメント2（I型）：323 W/cm
 - (ロ) 試験用コンパートメント5（II型）：379 W/cm
- (4) 最大中性子照射量： $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$)
- (5) 照射位置：1 A 1

「常陽」仕様燃料ピン（A607）の到達燃焼度、線出力、中性子照射量及び被覆管温度の軸方向分布をFig. 6～Fig. 8にそれぞれ示す。また、Fig. 9～Fig. 11に「もんじゅ」仕様燃料ピンの到達燃焼度の軸方向分布を示す。

4. 照射後試験

A G Sにおいて実施した各試験の項目と試料採取位置をFig. 12に示す。

4.1 金相試験

4.1.1 試料調製方法

金相試料切断片（約10mm）を、エポキシ樹脂によりステンレス製金相マウントに埋め込んだ後、120番から順次600番までの耐水研磨紙にて粗研磨を行い、6 μ mから順次1 μ mまでダイヤモンドペーストを用いて、仕上げ研磨を実施した。研磨終了後、組織観察をAs-polished、Etched状態で各々行った。金相試験工程をFig. 13に、金相試験の実施内容をTable 2に示す。

4.1.2 試験結果

金相試験では、タイプの異なる「常陽」仕様燃料ピンB0J02(A607)、B1J25(A609)の2種類の燃料ピンについて、燃料組織観察を実施した。この金相試料の照射履歴をTable 3に示す。金相試料採取位置は、熱的に最も厳しいと推定される燃料中央位置(D.F.C.B.=275mm)から採取した。各ピンの試料採取位置及びマクロ写真をPhoto. 1及びPhoto. 2に示す。

金相試料のAs-polished及びEtchedの金相写真をそれぞれPhoto. 3～Photo. 10に示す。燃料組織観察結果からA607(試料No. A60722)、A609(試料No. A60922)ピンとも中心空孔及び柱状晶領域は観察されず、等軸晶及び不変化領域が観察された。

金相横断面写真からタブレットディジタイザを用いて、組織変化領域径、被覆管内径及び外径等を測定した結果をTable 4に示す。この内、燃料-被覆管の残留ギャップ幅は、製造時と比較して、A60722試料で約25 μ m(製造時:184 μ m)、A60922試料で約20 μ m(製造時:179 μ m)閉じており、約11～14%減少していた。燃料材料技術開発室(ADS)において測定された同じ照射履歴の「もんじゅ」仕様燃料(85%T.D.)は、約17%(製造時:184 μ m)であり、ほぼ同程度の値であった。

出力上昇時(0.4%/min)における燃料組織変化と線出力依存性をFig. 14

に示す。この結果からも線出力約330W/cmでの「常陽」仕様燃料の燃料組織変化では、「もんじゅ」仕様燃料と同じく等軸晶領域が認められる。

4.2 融点測定

4.2.1 測定方法

測定法は、キャプセル封入式のサーマルアレスト法を用いた。この方法は、タングステン製キャプセルに封入した燃料を高周波誘導加熱により昇温し、二色温度計で連続测温し、得られた昇温曲線から燃料溶融時の潜熱を検出することにより融点を測定するものである。

4.2.2 測定結果

融点測定試料は、「もんじゅ」仕様燃料ピンのB3M05、B3M09及びB3M25ピンより、各々1ヶ所から採取した。1回の融点測定には、この3試料を同時に使用した。

測定により得られた熱分析曲線をFig.15に示す。また、比較のため、同じ富化度の未照射燃料の熱分析曲線をFig.16に示す。この熱分析曲線から求めた融点測定結果を燃焼度、Pu富化度及びO/M比とともにTable 5に示す。

未照射燃料のPu富化度と融点の関係をFig.17に示す。30%Pu富化度の未照射燃料の融点は、 $2691 \pm 10^{\circ}\text{C}$ でありLyonらのデータと良く一致していた。また、燃焼度約80MWd/tにおける燃料(Pu富化度:30%)の融点は、 $2735 \pm 36^{\circ}\text{C}$ であり、未照射燃料と同様に従来の設計値(2650°C)を十分に上回っていた。今までに得られている融点測定結果とともに本データをプロットしたものをFig.18に示す。この結果から、出力上昇時における燃料の融点は、未照射燃料の誤差範囲内にあり、燃焼に伴う融点降下は認められなかった。

4.3 X線回折測定

4.3.1 測定方法

燃料を縦割り切断後、専用ホルダーにマウントし、表面を研磨した後、平行ビーム法(コリメータ $2\text{mm}\phi$)によりX線回折測定を実施した。な

お、X線源としては、40KV、50mAのCuK α 線を用いた。

4.3.2 測定結果

X線回折測定は、融点測定試料のO/M比を推定するため、A602ピンの融点測定試料の近傍から採取した燃料を測定し、格子定数を求めた。

MOX燃料では、燃料中に含まれるPu原子が放出する α 線により、結晶格子が損傷を受け（自己照射*）、燃料保管中に格子定数が増加する現象がある。このため α 照射からの格子定数補正を行った。補正後の格子定数は、5.4517Åであった。また、得られた格子定数からH.Kley-kampらの実験式（次式）を用いて、燃料のO/M比を求めた。

$$a = \frac{1}{100} [545 - 7.4X + 30(2 - O/M) - 0.083B]$$

a : (U, Pu) O_{2-x} の格子定数 (Å)

X : Pu/U + Pu

B : 燃焼度 (at %)

O/M比は1.979であり、製造時(O/M:1.95)と比べ約0.029のO/M比変化が認められた。

4.4 燃焼率測定

^{148}Nd を指標核種とした同位体希釈法により燃焼率を求めた。

4.4.1 試料調製方法

試料の採取位置をFig.19にまた、試料の調製方法及び手順をFig.20に示す。

4.4.2 測定結果

燃焼率測定には、「もんじゅ」仕様燃料ピンのB3M05、B3M09及びB3M25ピンより各々1試料を採取し、燃焼率及びPu富化度を測定した。なお、本試験燃料ピンは、到達燃焼度が約80MWd/tと低いため、指標核種であるNd量の把握が必要であり、そのため装荷燃料と同種の未照射燃料ペレットを用いて、ペレット中の不純物Ndの測定を実施した。Table 6に未照射ペレ

*) Self-irradiation

ットの質量分析結果 (Ndの定量) を示す。また、このNdの算出結果を付録に示す。

今回得られた測定データとMAGIコードによる計算値をまとめた結果をTable 7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. A602342)をTable 8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 9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、更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 10~Table 12に示す。

その結果、PFB031B型特殊燃料集合体の「もんじゅ」仕様燃料ピンの燃料軸方向中心位置での燃焼率は、0.011atom%であった。また、未照射ペレット中のNdが測定結果に与える影響は、燃焼率で0.003atom%に相当することが判った。

5. ま と め

「常陽」仕様燃料の出力上昇時における燃料の組織変化データの取得を目的として、金相試験（燃料組織観察）を実施し、また、「もんじゅ」仕様燃料の照射初期挙動を把握することを目的として、融点測定、X線回折測定及び燃焼率測定を実施した。本試験により得られた結果は以下のとおりである。

(1) 金相試験（燃料組織観察）

- ① 試験対象の「常陽」仕様燃料ピンは、中心空孔及び柱状晶領域は観察されず、等軸晶領域及び不変化領域のみ観察された。
- ② 燃料-被覆管の残留ギャップ幅は、製造時と比較して約11~14%閉じており、同じ照射履歴の「もんじゅ」仕様燃料（85% T.D.）での約17%とほぼ同程度の値であった。

(2) 融点測定

「もんじゅ」仕様燃料の融点は、 $2735 \pm 36^{\circ}\text{C}$ であり、従来の設計値（ 2650°C ）を十分上回っていた。測定値は未照射燃料の誤差範囲内にあり、燃焼に伴う融点降下は認められなかった。

(3) X線回折測定

融点測定試料の近傍から採取した試料の格子定数からO/M比を求めると1.979であり、製造時と比較して0.029のO/M比の増加が認められた。

(4) 燃焼率測定

「もんじゅ」仕様燃料ピンの軸方向中心位置での燃焼率は、0.011atom %であった。

データ集

Table 1 Fuel pin fabrication parameters

S/A Name : PFB031	FAB No.	BOJ02	B1J25	B3M05	B3M09	B3M25
	PIE No.	A607	A609	A602	A603	A604
被覆管外径 (mm)	5.499	5.497	6.492	6.50	6.502	
被覆管内径 (mm)	4.804	4.799	5.557	5.549	5.553	
ギャップ幅 (μm)	184	179	184	160	135	
ペレット外径 (mm)	4.620	4.620	5.373	5.389	5.418	
ペレット密度 (%T.D)	93.53	93.53	85.88	86.04	84.63	
ペレット高さ (mm)	9.321	9.321	7.798	7.79	7.86	
ペレット結晶粒径 (μm)	5.0		—			
ペレット O / M 比	1.97		1.95		1.96	
ペレット Pu 富化度 (w/o)	28.47		29.88		29.56	
ペレット U 濃縮度 (w/o)	12.1		8.0			
蒸発性不純物 ($\mu\text{l/g}$)	<100		< 30			
水分 (ppm)	< 30		< 10			
プレナム有効容積 (cc)	7.883	10.801	16.810	16.596	12.291	
タグガスキャプセル	無		有	有	有	

Table 2 Metallographic examination in AGS

	腐食前 (as polished)		腐食後 (etched)	
	仕 様	目 的	仕 様	目 的
燃料/被覆管 共 通	×200 部分写真	被覆管肉厚キップ観察	/	
燃 料	×10.5 全面写真	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	燃料全体組織観察 } 詳細燃料組織観察
	×86 全面写真		×86 全面写真	
	×100 部分写真		×100 部分写真	
	×400 部分写真		×400 部分写真	
被 覆 管	×200~×750 部分写真	F C C I	×200 部分写真	位置の同定
			×400 部分写真	結晶粒測定
			×750 部分写真	炭化物観察

Table 3 Irradiation condition of specimens

Pin No.	Specimen No.	Distance from fuel bottom (mm)	Burnup (MWd/t)	Linear heat rate (W /cm)	Fluence $E>0.1\text{MeV}$ (n/cm ²)	Fuel center temperature (°C)	Cladding inner temperature (°C)
B0J02	A60722	275	79	326	0.94×10^{20}	2034	527
B1J25	A60922	275	80	326	0.95×10^{20}	2057	527

Table 4 Summary data from ceramography of PFB031

Pin No.	Specimen No.	Restructured region dia. (mm)			Residual diametral gap size (μ m)	Pellet outer diameter (mm)	Clad dia. (mm)	
		Central void	Columnar region	Equiaxied region			Outer	Inner
B0J02	A60722	—	—	2.74	159	4.649	5.501	4.808
B1J25	A60922	—	—	2.59	159	4.646	5.503	4.805

Table 5 Specimen parameters and results of melting point measurement

集 合 体 名	試料 No.	燃 焼 度 (MWd/t)	Pu富化度 *1 (wt%)	O/M 比 *2	融 点 (固相温度) °C
(未 照 射)	YZ1811	0	30.0	1.97	2691±10
PFB031	A06322	80	29.6	1.98	2735±36

*1 照射済燃料のPu富化度についてはAGSの燃焼率測定結果

*2 " O/M についてはAGSのX線回折測定による測定値

Table 6 Result of mass analysis for Nd (Unirradiated)

	Nd142/150	Nd143/150	Nd144/150	Nd145/150	Nd146/150	Nd148/150
Ndの同位体比	4.478147	2.133698	4.022410	1.449234	2.983548	1.014034

	Nd142	Nd143	Nd144	Nd145	Nd146	Nd148	Nd150
Ndの同位体組成 (atom %)	26.22	12.49	23.55	8.48	17.47	5.94	5.85
天然Ndの ¹⁾ 同位体組成 (atom %)	27.2	12.2	23.8	8.3	17.2	5.7	5.6
P. P. Ndの ²⁾ 同位体組成 (atom %)	—	27.55	22.03	18.99	15.86	10.02	5.55

1) Table of isotopes

2) PFD105

Table 7 Summary of burnup measurement by Nd-method for PFB031

Pin No.	Sample No.	Distance from core fuel bottom ¹⁾ (mm)	Pu content ²⁾ (atom%)	Burnup (atom%)	
				Calculated ³⁾	Measured ⁴⁾
A602	A602342	282.0 ~ 287.3	29.576	0.009	0.0112
A603	A603342	282.3 ~ 287.3	29.564	0.009	0.0114
A604	A604342	281.6 ~ 287.0	29.526	0.009	0.0112

1) Distance from pin bottom - 435 (mm)

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

3) Calculated by MAGI code

4) Measured by ^{148}Nd monitor method

Table 8 Calculation of effective fission yield for A602342 sample

Nuclide	Composition (Atom Fraction)	Fission Cross Section [barn]	Nd-148		Nd-146		Nd-145	
			Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield	Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield	Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield
U 233	nd	- ¹⁾	1.14 ²⁾	-	3.20 ²⁾	-	4.10 ²⁾	-
U 234	0.000488	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.08 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.058157	1.74E+00 ¹⁾	1.68 ³⁾	0.289	2.94 ³⁾	0.506	3.78 ⁴⁾	0.647
U 236	0.000042	1.47E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.000	3.06 ²⁾	0.000	3.77 ²⁾	0.000
U 238	0.645553	6.53E-02 ¹⁾	2.09 ³⁾	0.149	3.40 ³⁾	0.244	3.50 ²⁾	0.251
Pu238	0.000285	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu239	0.227112	1.75E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	1.118	2.46 ³⁾	1.568	3.01 ³⁾	2.848
Pu240	0.059544	4.97E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.093	2.89 ²⁾	0.142	3.34 ²⁾	0.168
Pu241	0.007006	2.25E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.052	3.01 ²⁾	0.081	3.52 ²⁾	0.094
Pu242	0.001811	4.02E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.003	3.18 ²⁾	0.004	3.70 ²⁾	0.005
Effective Fission Yield [%]			1.70		2.64		3.21	

Note; nd=not detected

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

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

FY:fission yield

Effective Fission Yield=SUM(Fractional Fission Yield)

1)MAGI code

2)TRG-2143-R

3)ICP-1050-1

4)AERE-R-8753

Table 9 Composition of spike solution and natural Neodymium

S3 ;	2.9051E+18	U233 in spike (atoms/ml)
R242 ;	5.2649E+17	Pu242 in spike (atoms/ml)
R50 ;	5.1651E+15	Nd150 in spike (atoms/ml)
C42/50 ;	4.478147	Nd142/Nd150 of natural Nd
C45/50 ;	1.449234	Nd145/Nd150
C46/50 ;	2.983548	Nd146/Nd150
C48/50 ;	1.014034	Nd148/Nd150
S42/50 ;	0.017568	Nd142/Nd150 of spike
S45/50 ;	0.006446	Nd145/Nd150
S46/50 ;	0.014612	Nd146/Nd150
S48/50 ;	0.008769	Nd148/Nd150
S43 ;	0.011521	U234/U233 of spike
S53 ;	0.000425	U235/U233
S83 ;	0.006425	U238/U233
S92 ;	0.001066	Pu239/Pu242 of spike
S02 ;	0.013671	Pu240/Pu242
S12 ;	0.000601	Pu241/Pu242

Table 10 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB031
A602342 sample

S/A NO.(FAB) ; PFB031	PIN NO.(PIE) ; A602
SAMPLE NO. ; A602342	SAMPLE POSITION ; 282.0~287.3 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 8.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.000756	0.090089	0.000065	-(a)	
0.419117	0.005546	0.090016	0.000049	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001257	0.262179	0.030850	0.007976	-(a)	
0.001247	0.265017	0.030920	0.224409	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.033239	4.788269	1.851733	3.335422	2.725380	1.763024
0.023069	0.021658	0.026879	0.015716	0.024563	0.013939
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0693	8.2582	0.0060	91.6666		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.0965	76.7895	20.1326	2.3690	0.6125		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.2145	30.8979	11.9489	21.5229	17.5864	11.3765	6.4528

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 29.576 / 29.709

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.5700E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	4.9023E+15	7.8329E+15	9.3202E+15
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	1.70E-02	2.64E-02	3.21E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	2.8837E+17	2.9670E+17	2.9035E+17
<u>BURNUP (atom%)#</u>	0.0112	0.0115	0.0113

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

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

Table 12 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFB031
A604342 sample

S/R NO.(FAB) ; PFB031	PIN NO.(PIE) ; A604
SAMPLE NO. ; A604342	SAMPLE POSITION ; 281.6~287.0 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 8.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.000753	0.090263	0.000072	-(a)	
0.423577	0.005581	0.090271	0.000047	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001276	0.262183	0.030834	0.007964	-(a)	
0.001276	0.265236	0.030982	0.227199	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.049347	4.768480	1.854152	3.305627	2.723761	1.760252
0.022940	0.021378	0.026957	0.015570	0.024553	0.013874

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0690	8.2728	0.0066	91.6516		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.0980	76.7898	20.1330	2.3677	0.6116		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.3192	30.8408	11.9920	21.3796	17.6163	11.3847	6.4676

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 29.526 / 29.658

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.5415E+21

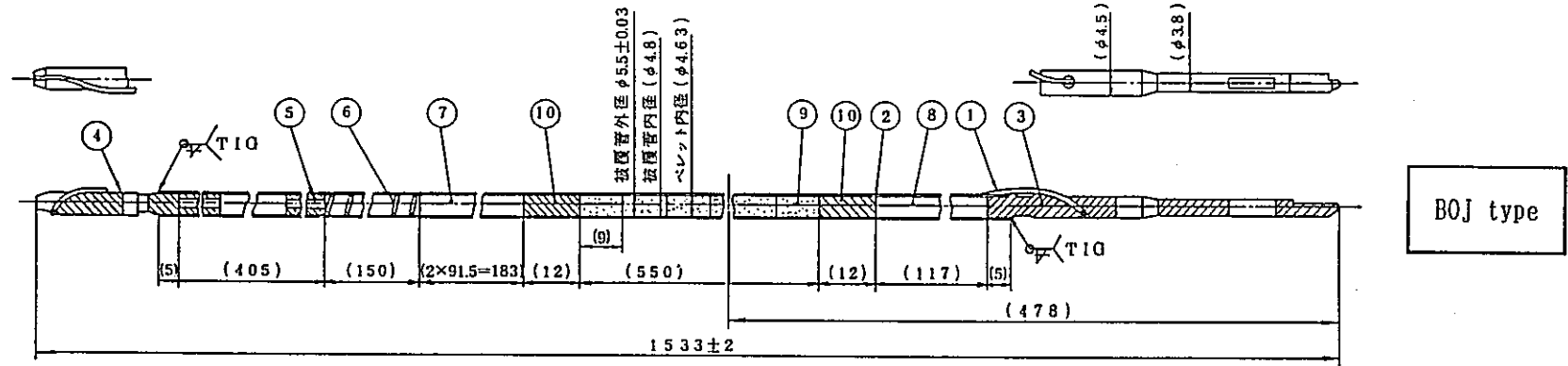
	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	; 4.8573E+15	7.9274E+15	9.1900E+15
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	; 1.70E-02	2.64E-02	3.21E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;</u>	2.8572E+17	3.0028E+17	2.8629E+17
<u>BURNUP (atom%)#</u>	; 0.0112	0.0118	0.0113

NOTE ; nd=not detected

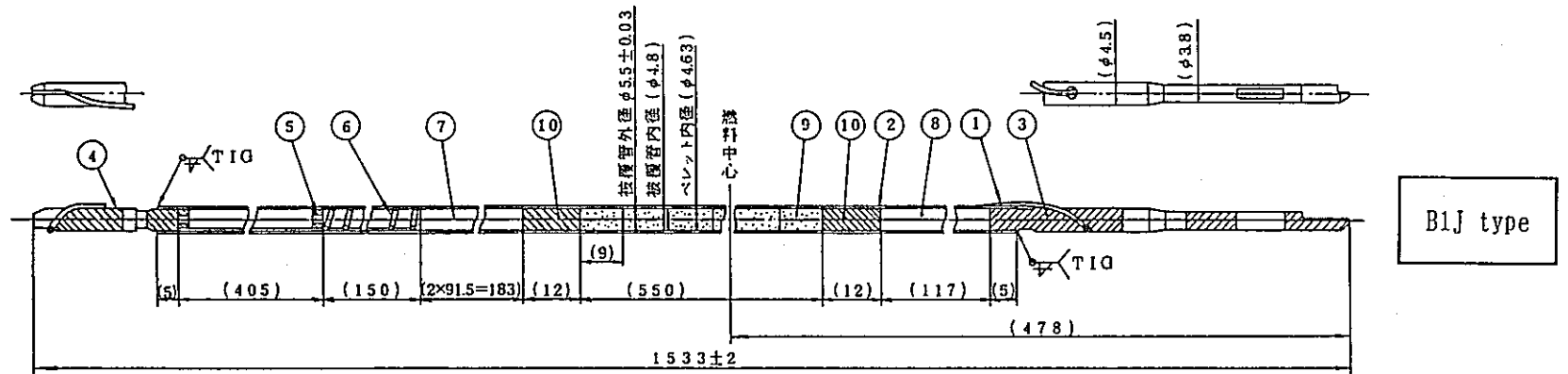
* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

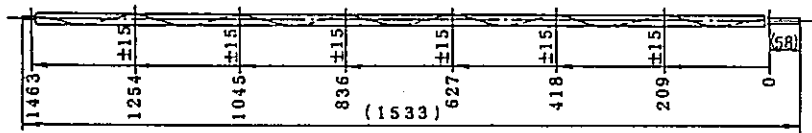
BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)



B0J type



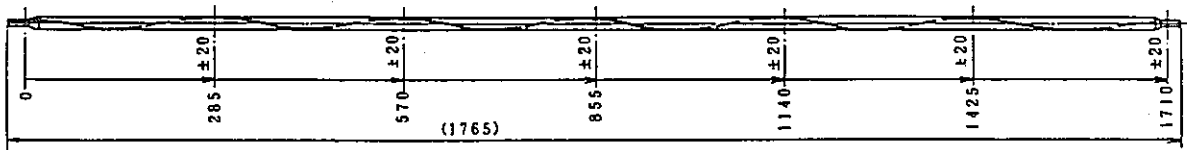
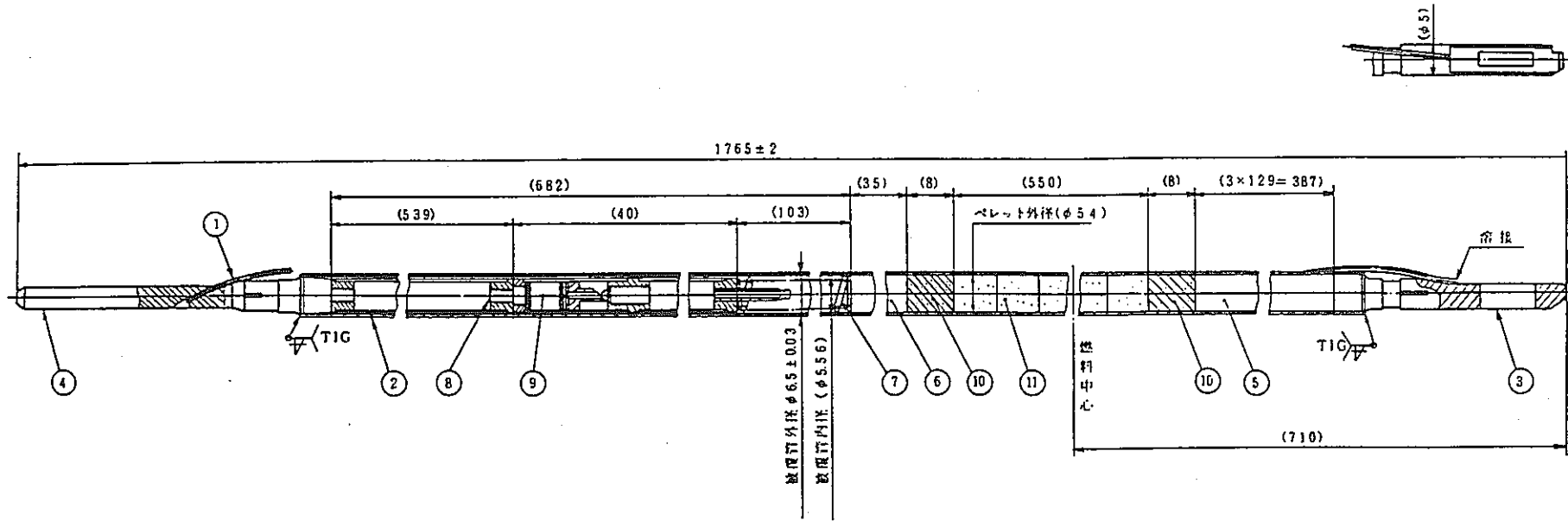
B1J type



ワイヤラッピング全体図

10	インシュレータベレット	劣化UO ₂	2	
9	燃料ベレット	PuO ₂ -UO ₂	61	
8	反射体(下)	SUS316相当	1	
7	反射体(上)	SUS316相当	2	
6	プレナムスプリング	SUS304WPB	1	
5	抑え板付プレナムスリーブ(II)	SUS316	1	
4	上部端栓	SUS316相当	1	
3	下部端栓	SUS316相当	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	φ0.9 ± 0.01
品番	品名	材質	個数	備考

Fig.1 Schematic drawing of JOYO type fuel pins (B0J,B1J)



ラッピングワイヤ配置図 (1/5)

11	燃料ペレット	PuO ₂ - UO ₂		
10	インシュレータペレット	劣化 UO ₂	2	
9	タグカスケードセル			
8	抑圧板(プラチナムスリーブ (1), (2), (3))	SUS 316	1	
7	プラチナムスプリング	SUS 304 WPB	1	
6	燃料反射体 (上)	SUS316相当	1	
5	燃料反射体 (下)	SUS316相当	3	
4	上部端栓	SUS316相当	1	
3	下部端栓	SUS316相当	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	φ 1 ± 0.01
品名	品名	材質	個数	備考

Fig.2 Schematic drawing of MONJU type fuel pin

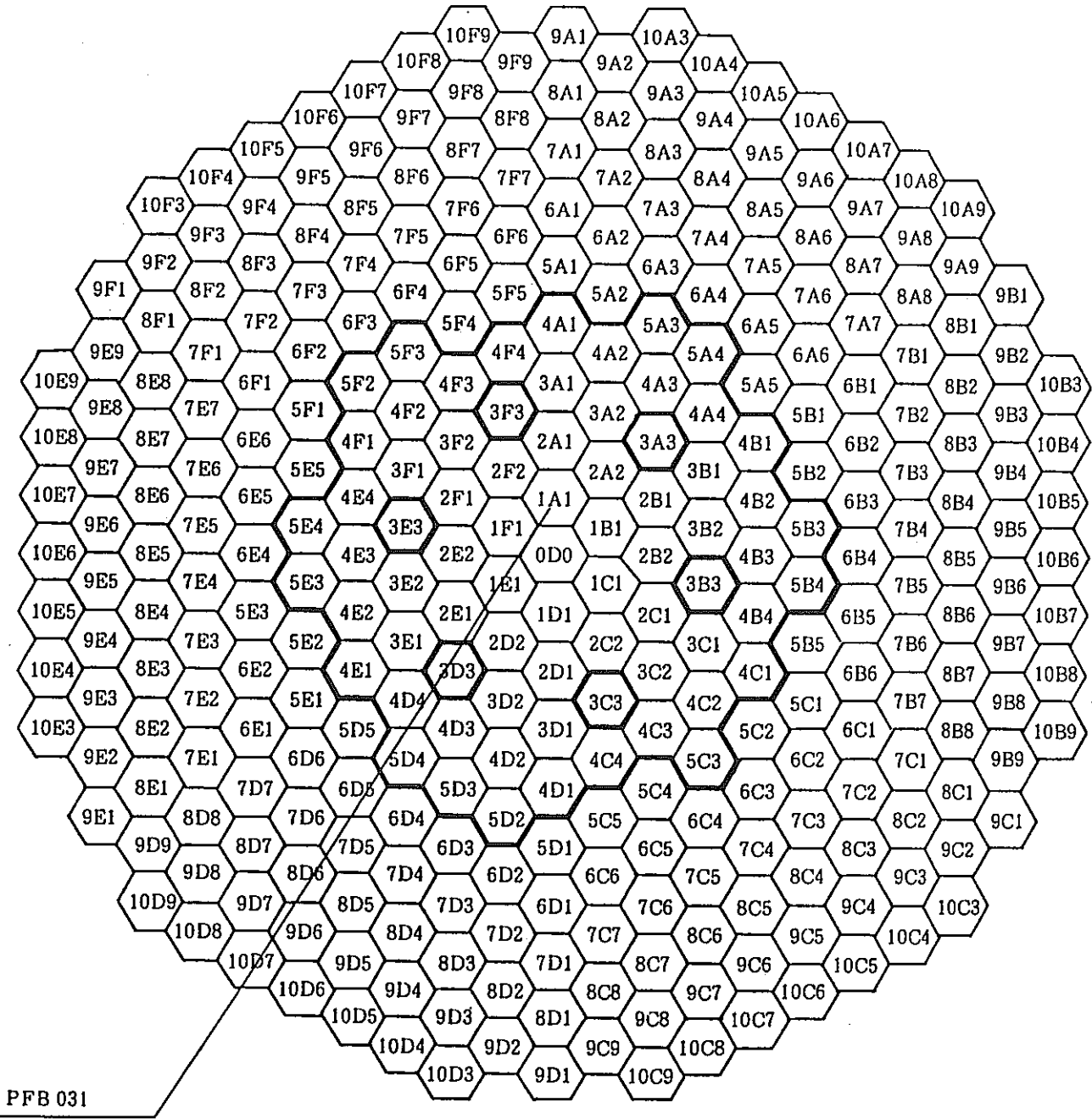


Fig. 3 In-reactor location of the subassembly

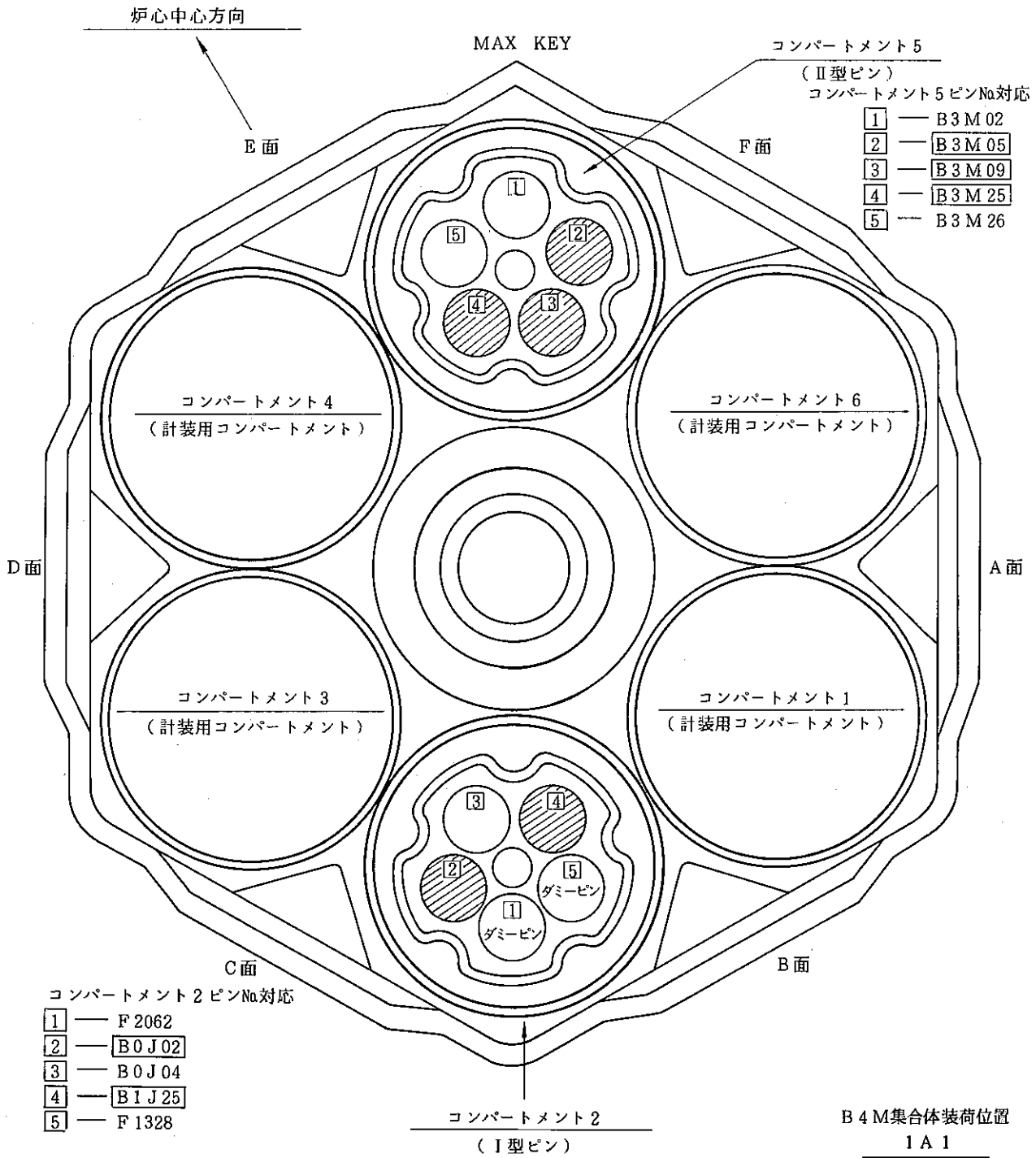


Fig. 4 Location of Fuel Pin in the PEB031 Subassembly

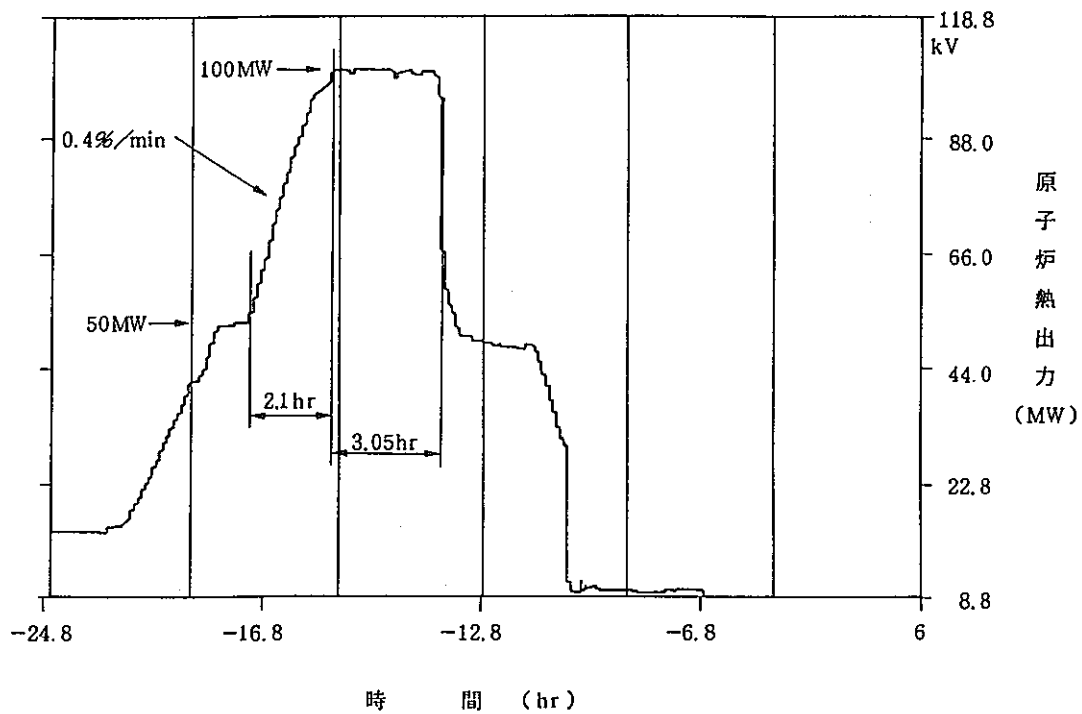


Fig.5 Irradiation history of PFB031 experiment

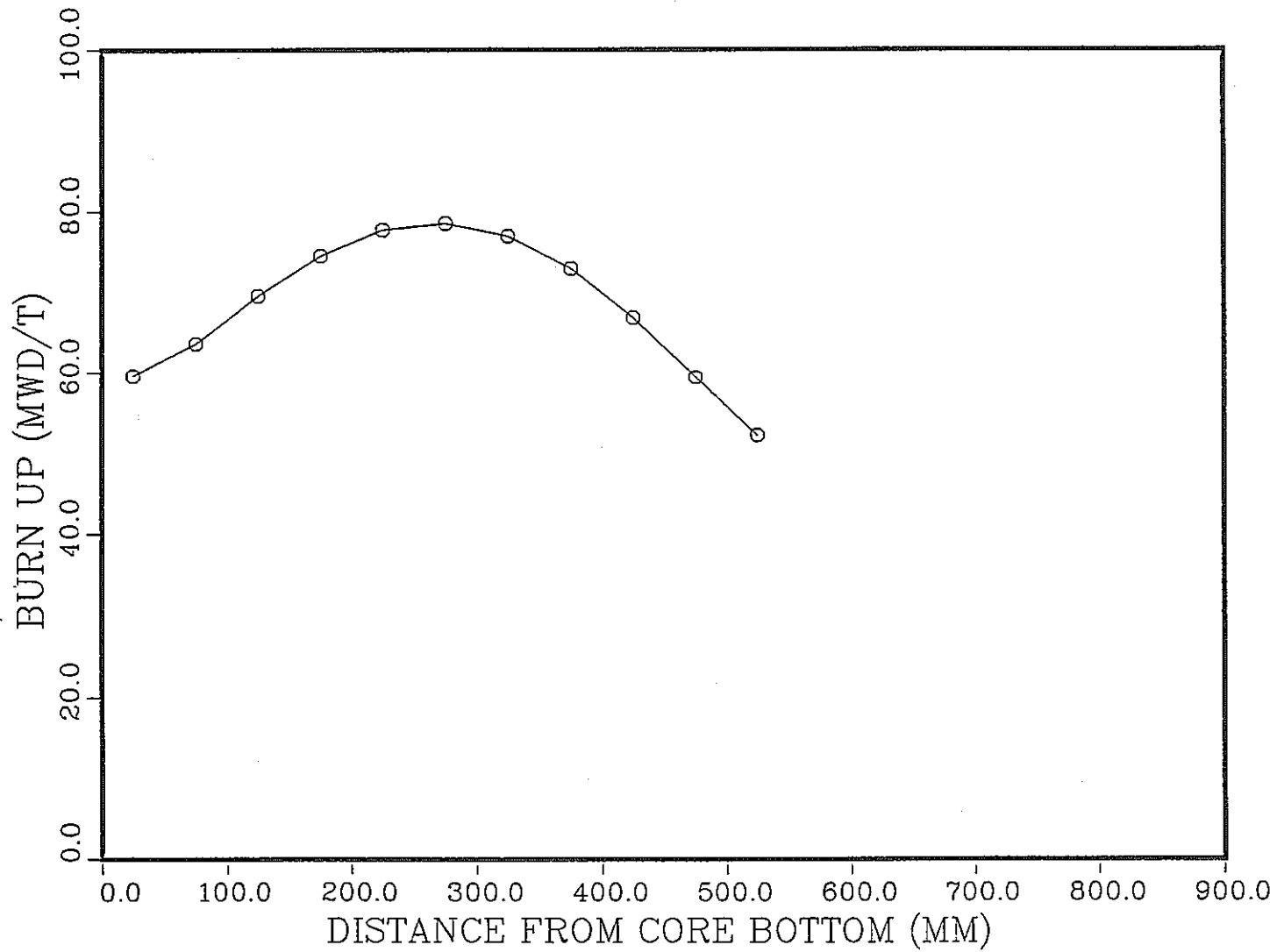


Fig.6 Axial profile of burnup for A607 pin

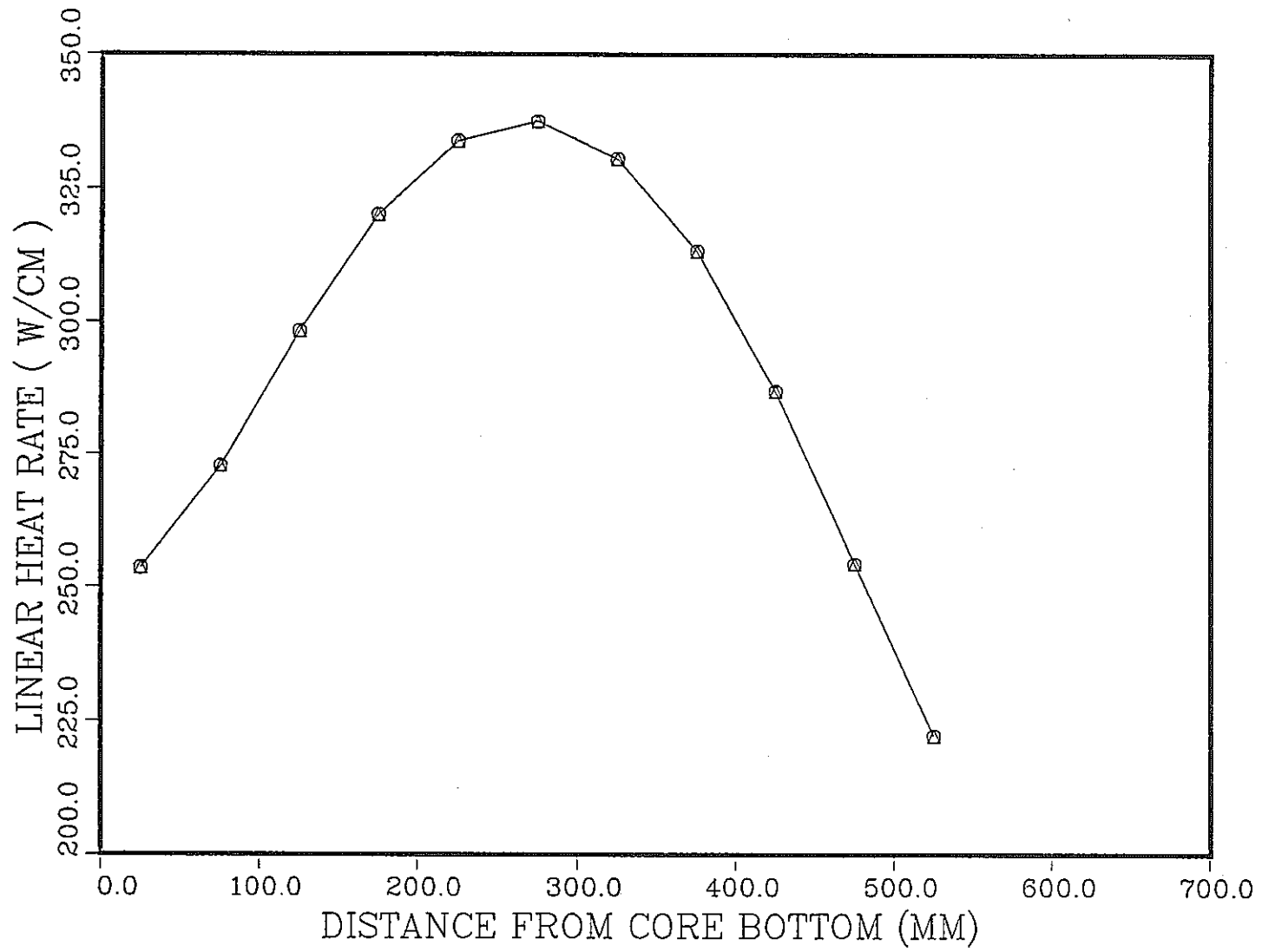


Fig.7 Axial profile of linear heat rate for A607 pin

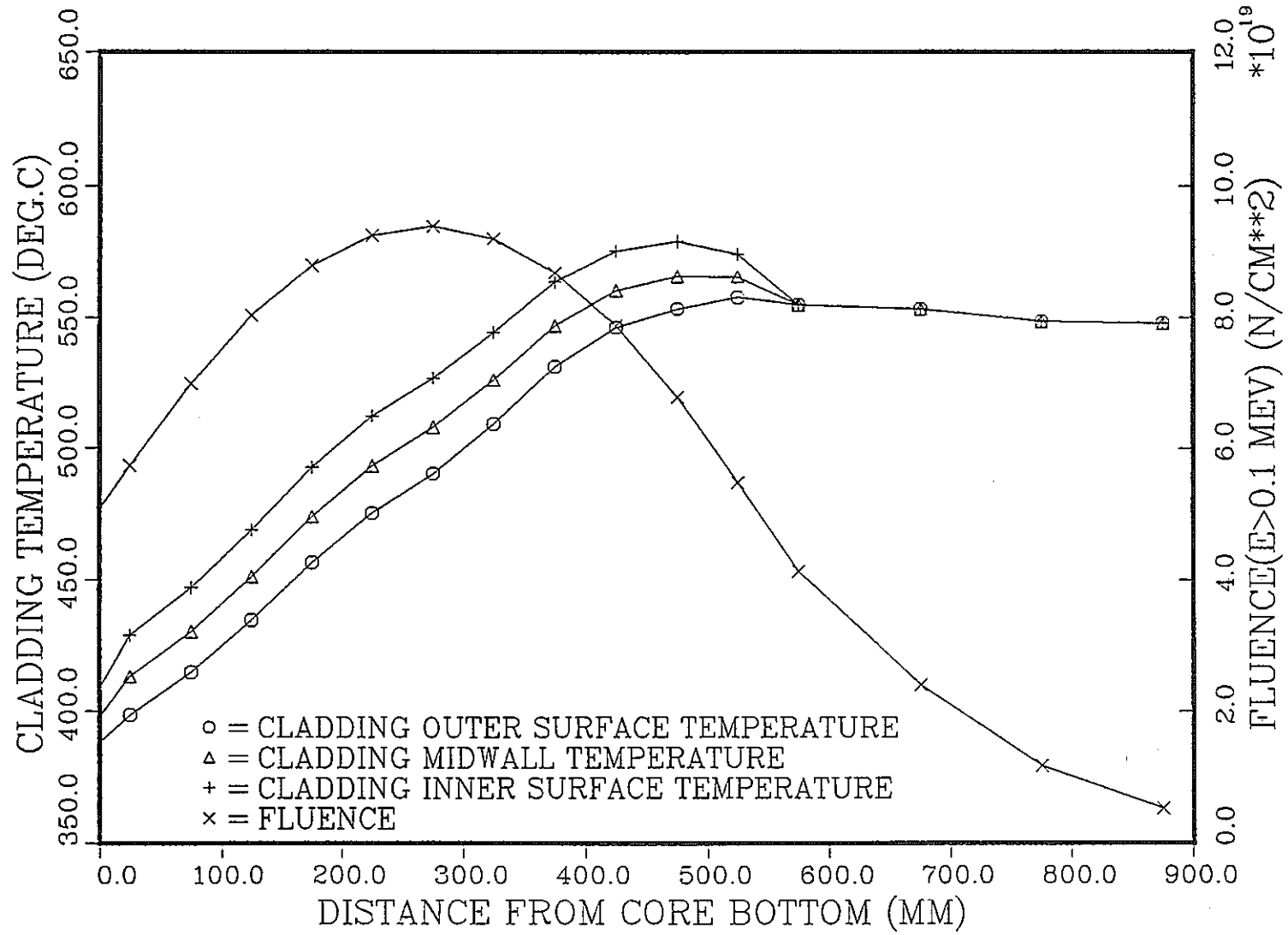


Fig.8 Axial profile of fluence and cladding temperature for A607 pin

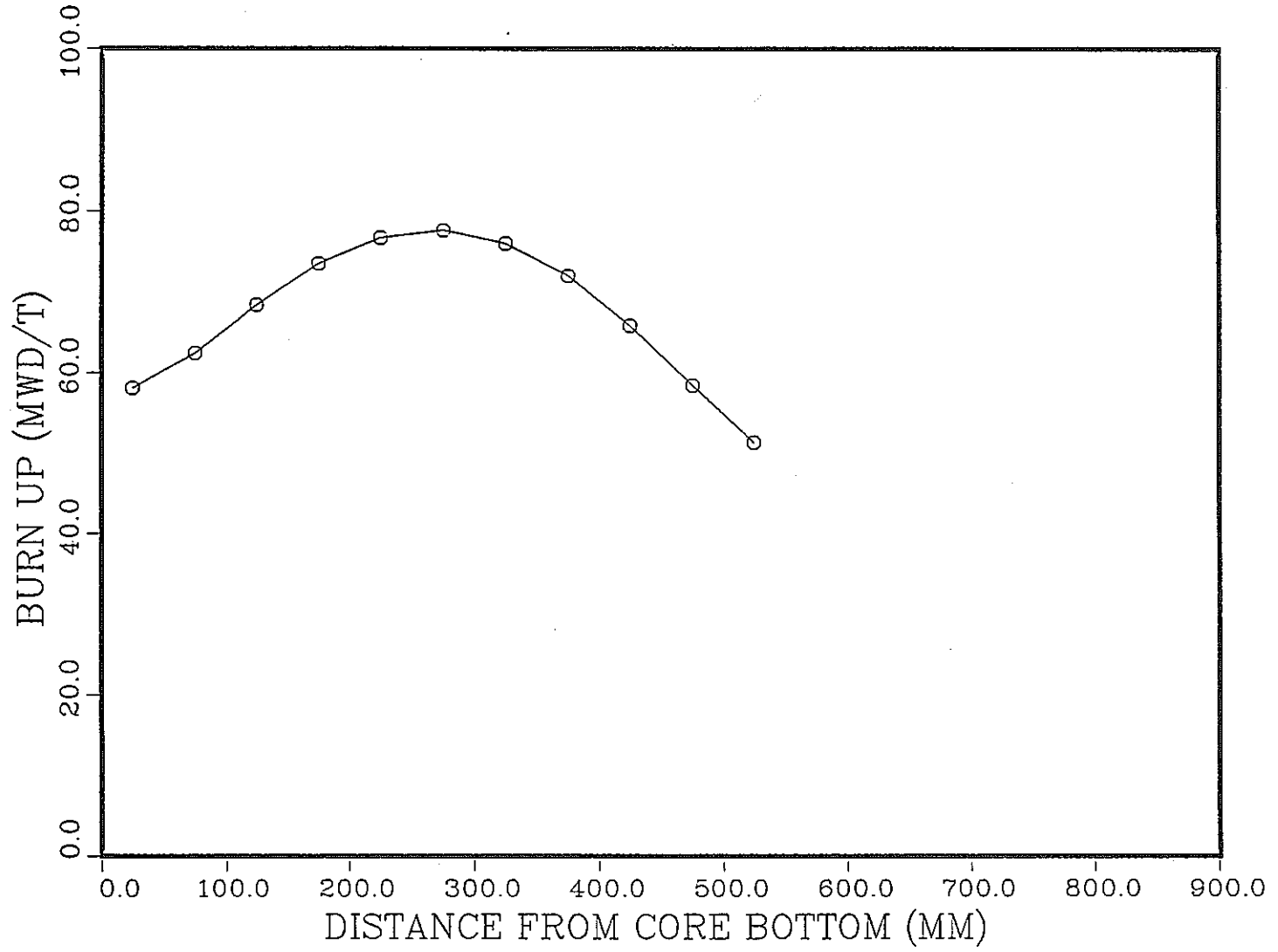


Fig.9 Axial profile of burnup for A602 pin

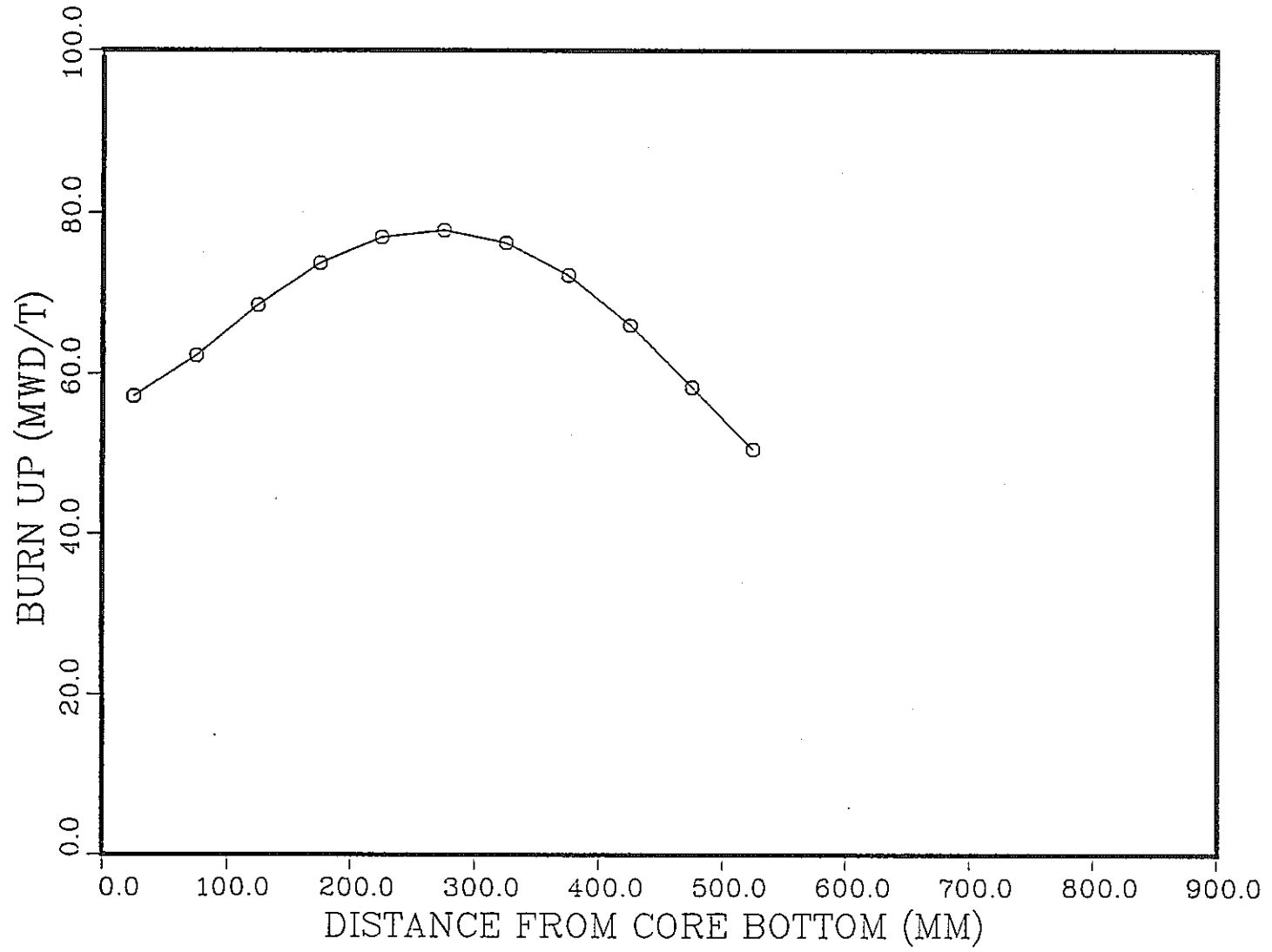


Fig.10 Axial profile of burnup for A603 pin

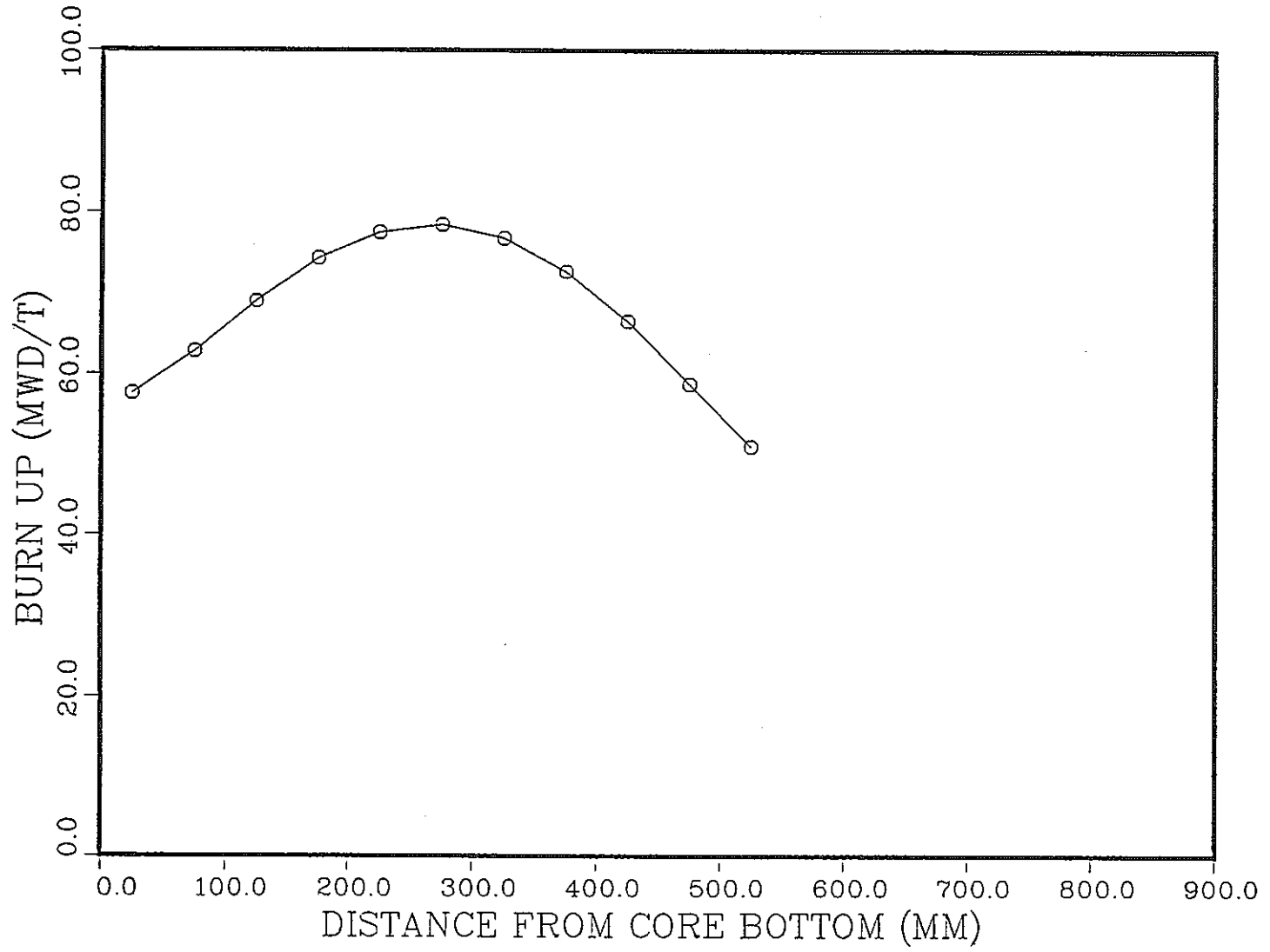


Fig.11 Axial profile of burnup for A604 pin

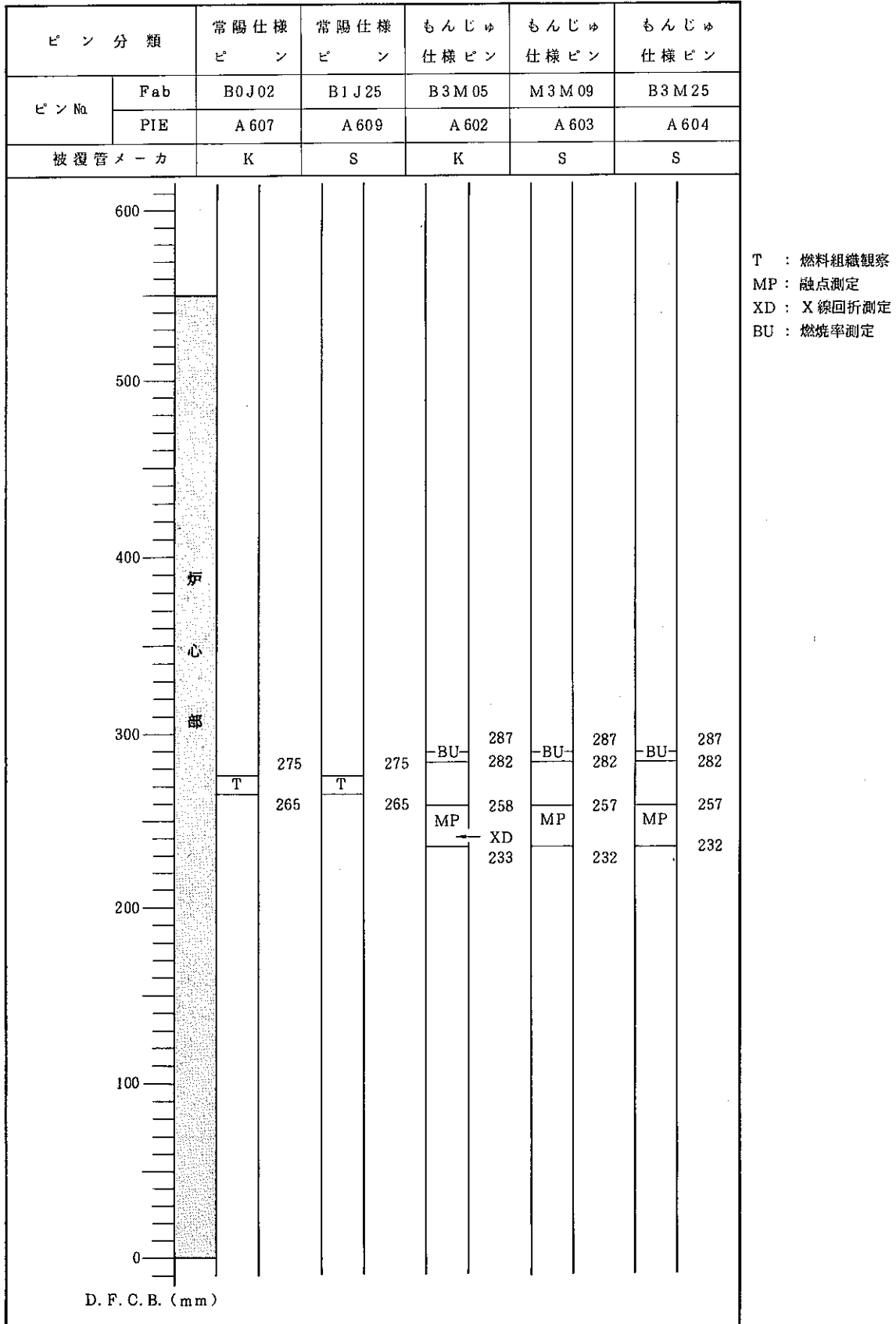


Fig. 12 Sampling of specimens for PIE in AGS

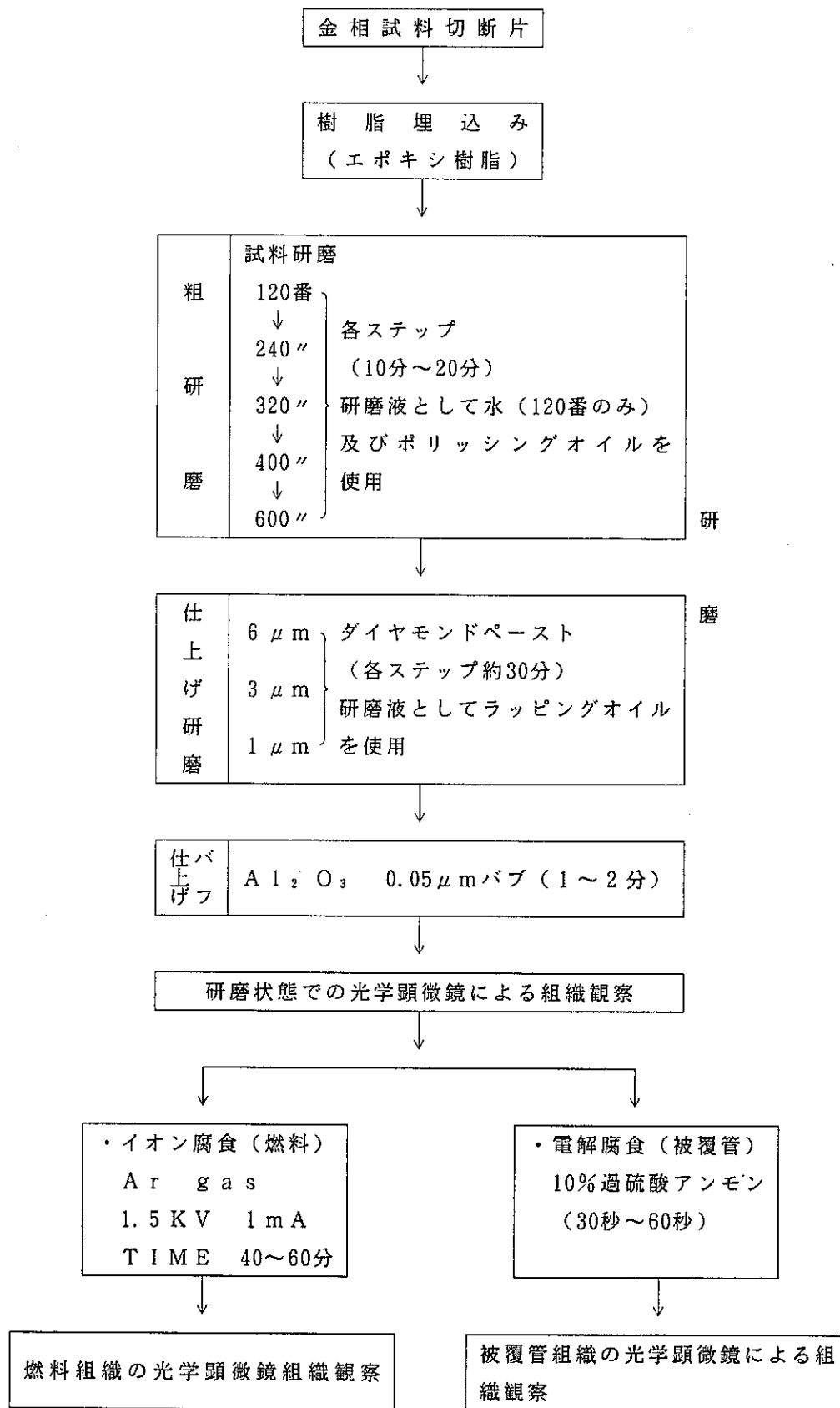
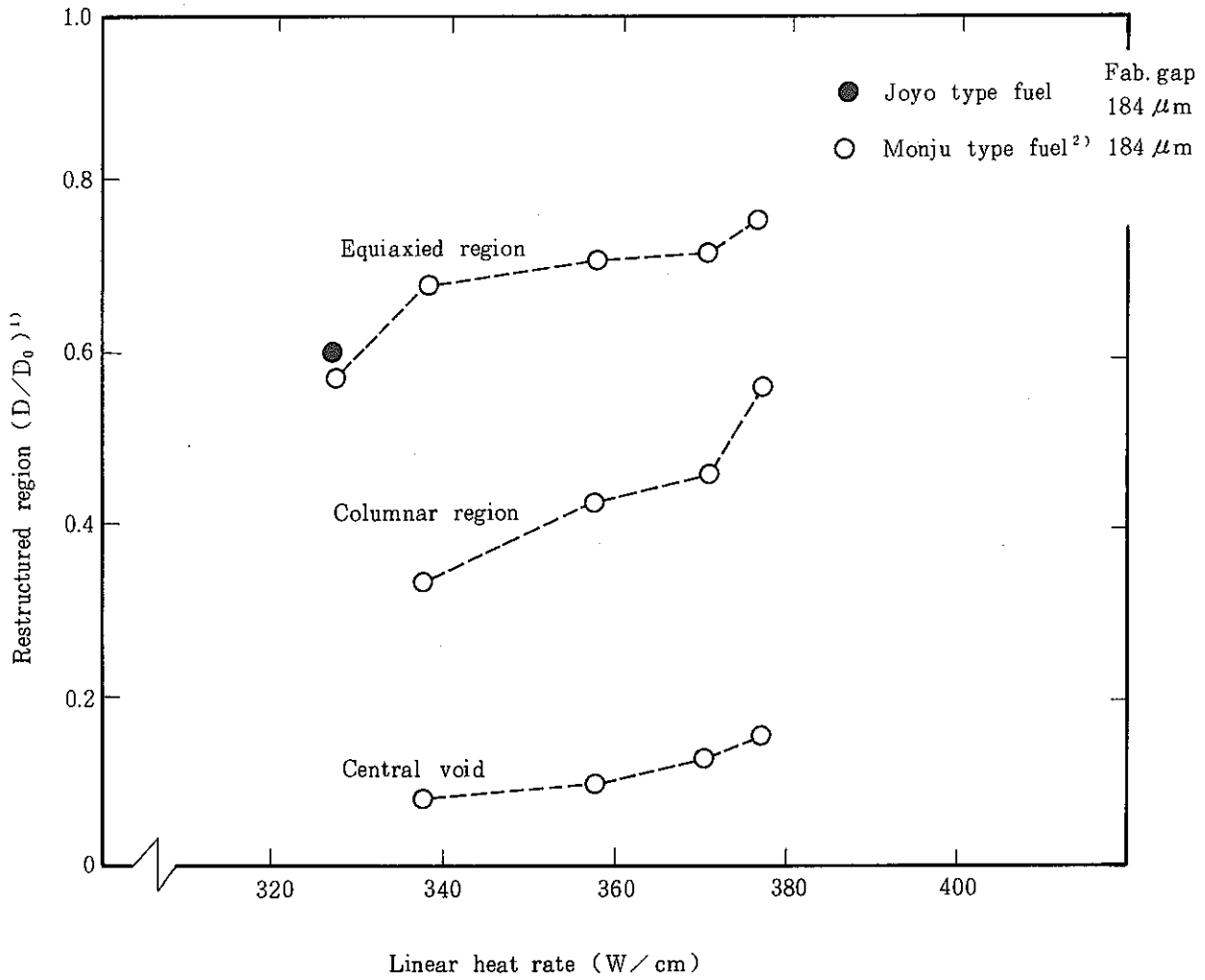


Fig.13 Flow diagram of metallographic examination in AGS



- 1) Restructured region dia. / Fuel dia.
- 2) Measurement by ADS

Fig 14 Restructured region as a function of linear heat rate

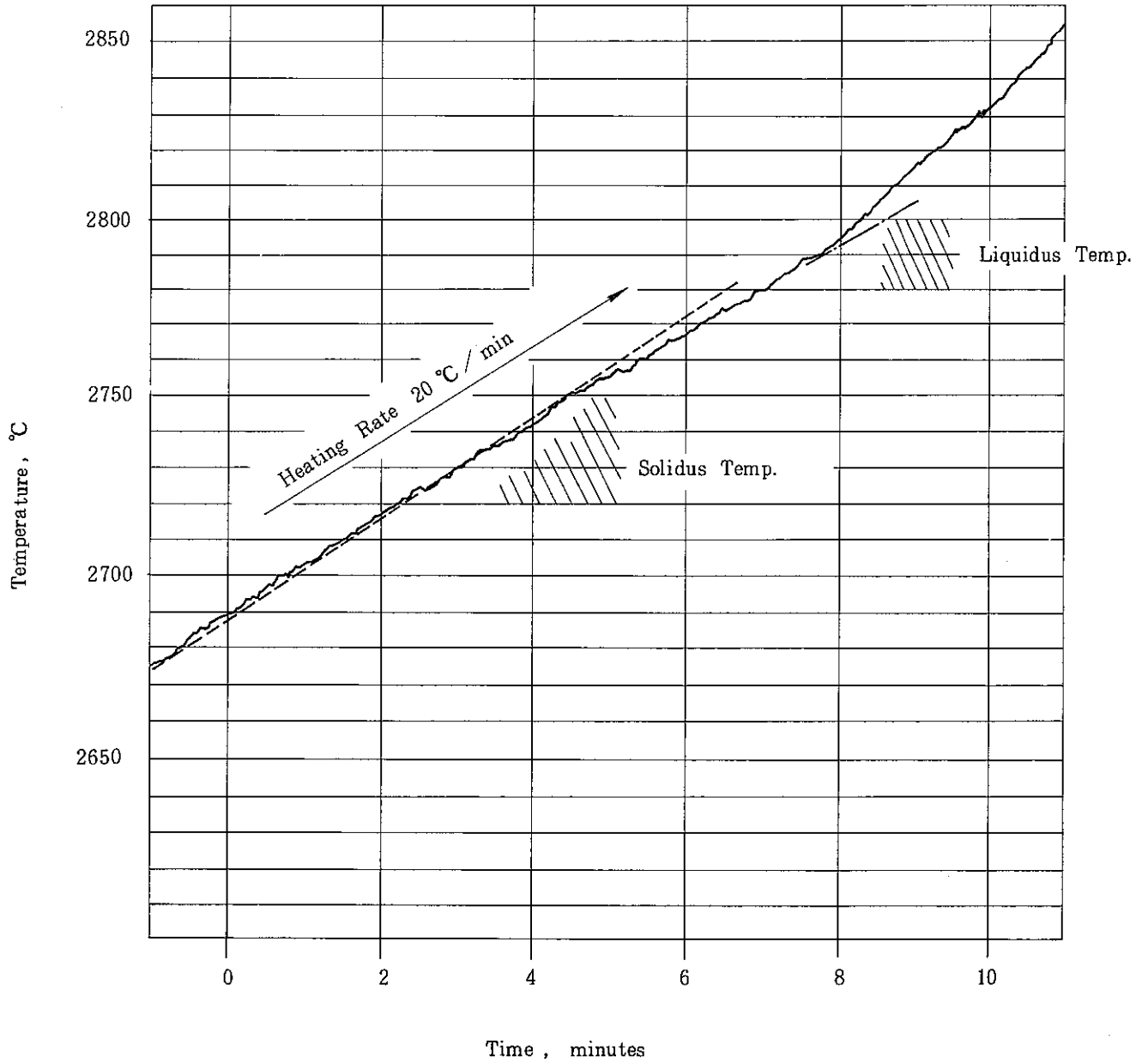


Fig.15 Heating curve of irradiated mixed-oxide fuel
(PFB031 A06322, BU 80 MWd/T)

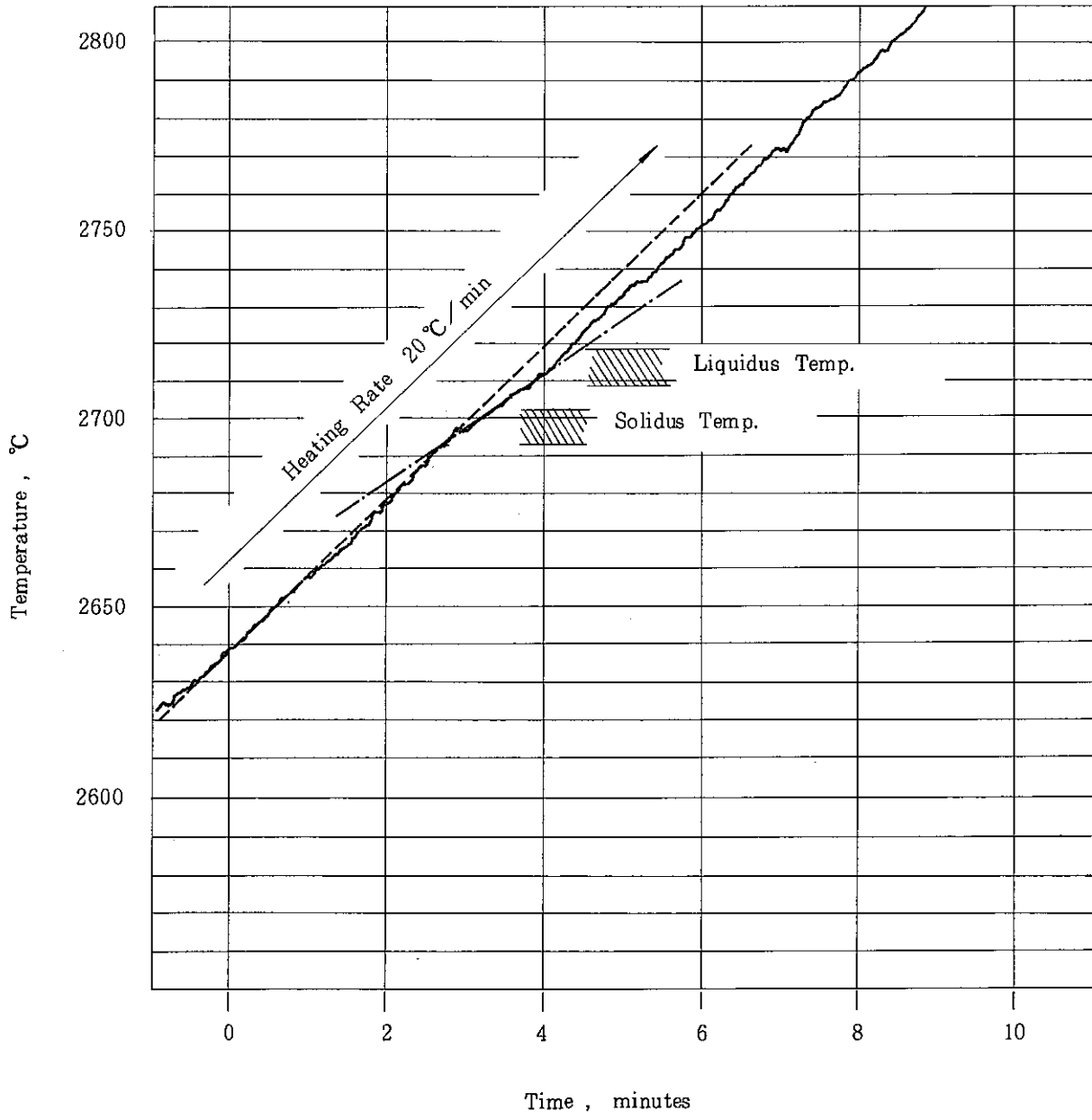


Fig. 16 Heating curve of unirradiated $(U_{0.7}, Pu_{0.3})O_2$

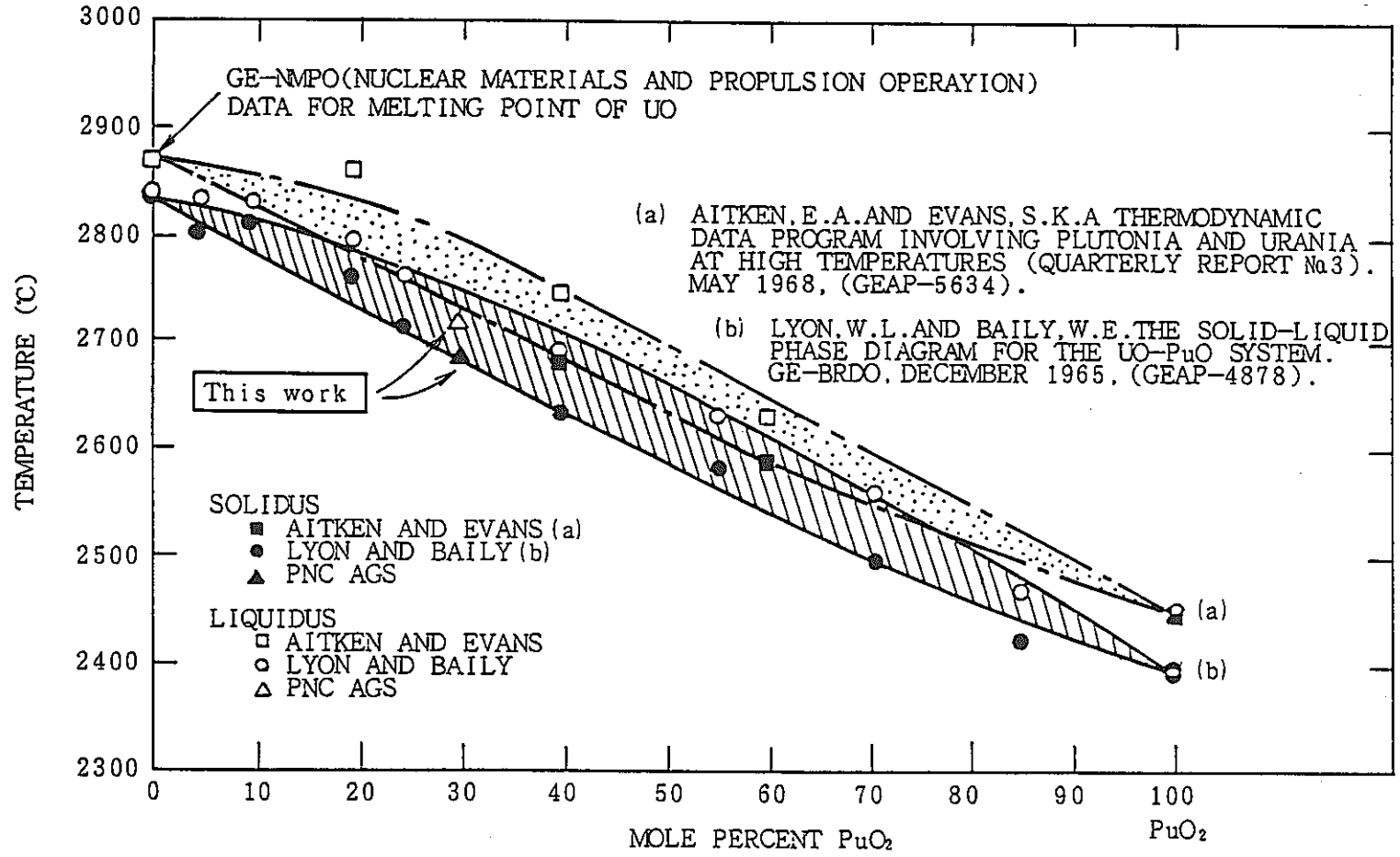
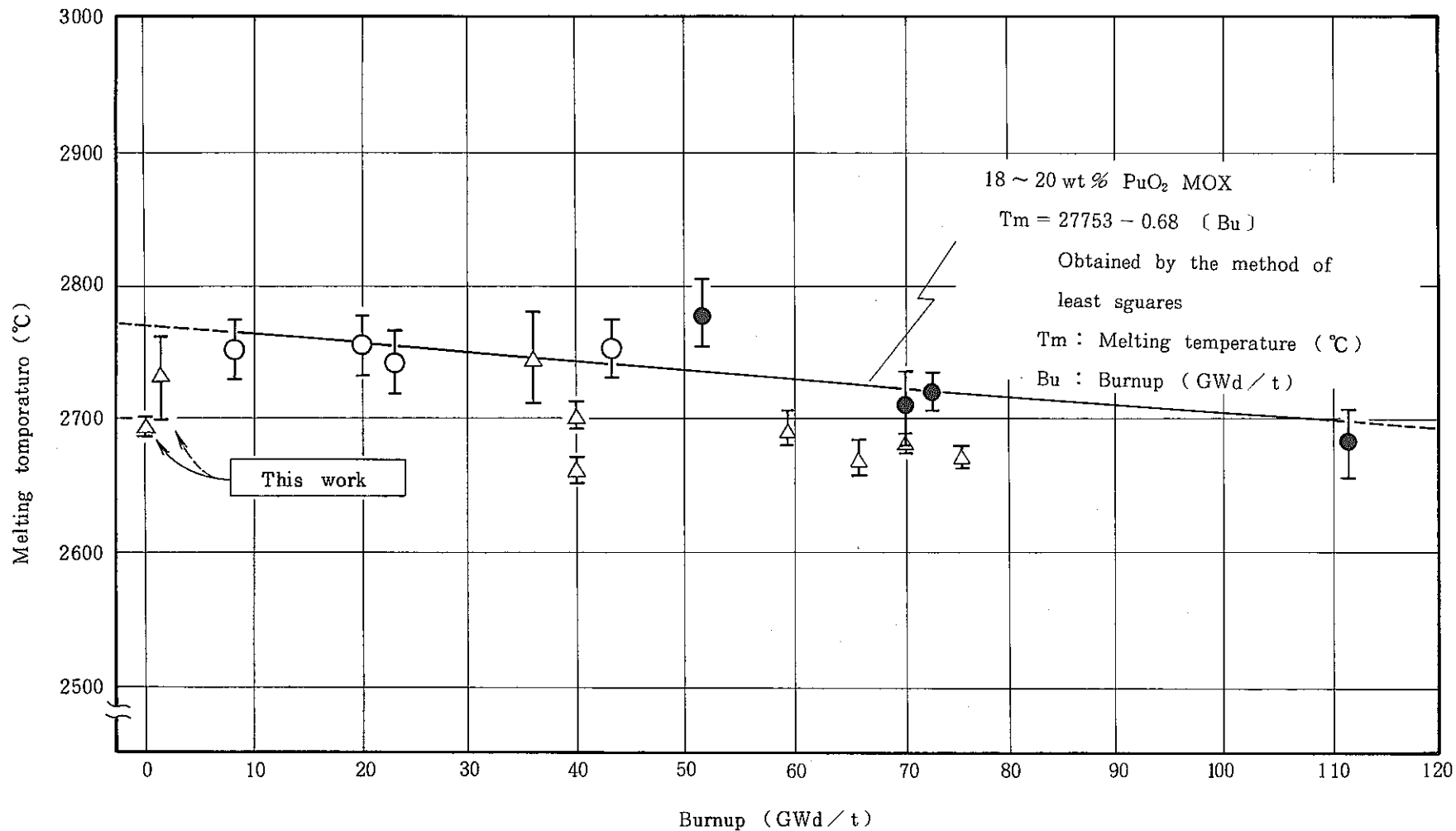


Fig.17 Comparison of phase diagram for (U_yPu_{1-y})O₂ (Unirradiated)



Mixed oxide fuel	Method
○ : UO ₂ - 18 wt % PuO ₂	Thermal arrest method
● : UO ₂ - 20 wt % PuO ₂	using seeded tungsten
△ : UO ₂ - 30 wt % PuO ₂	capsule

Fig.18 Melting temperature of Irradiated mixed oxide fuel with burnup

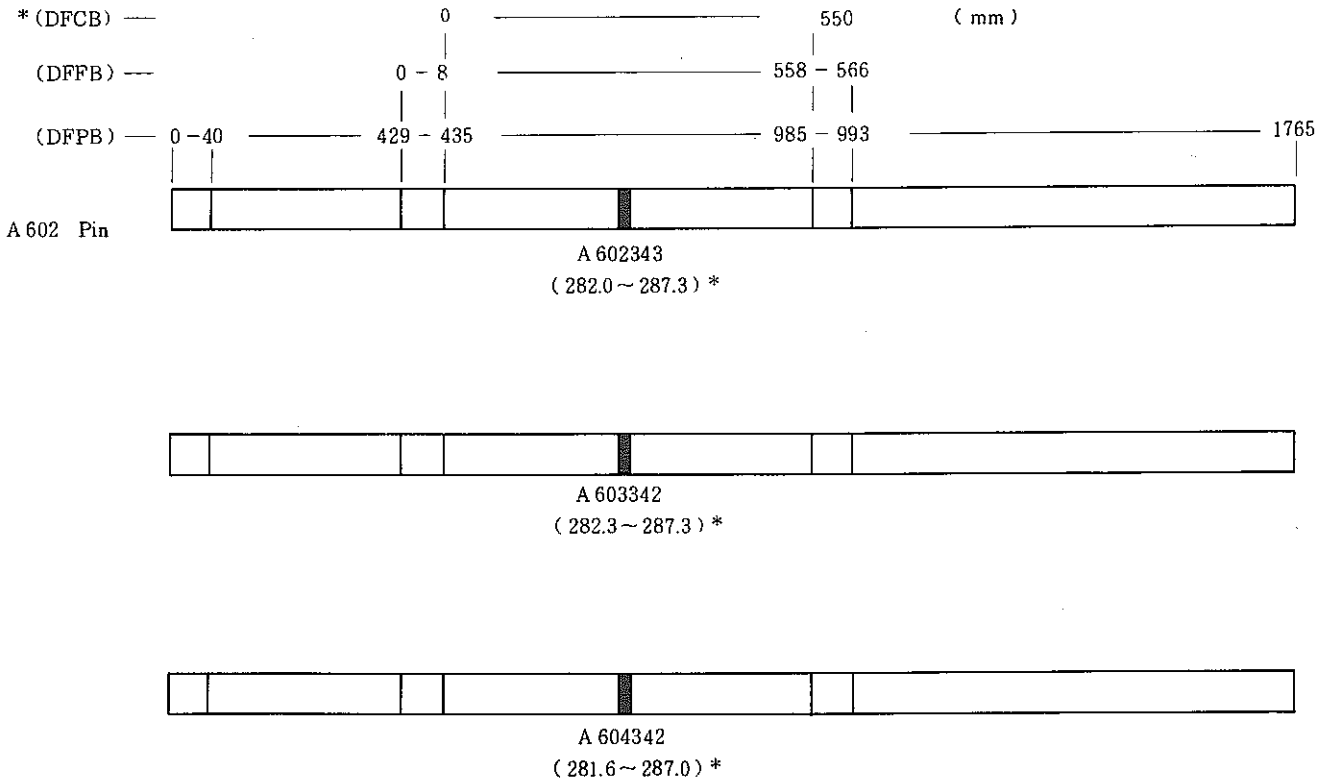
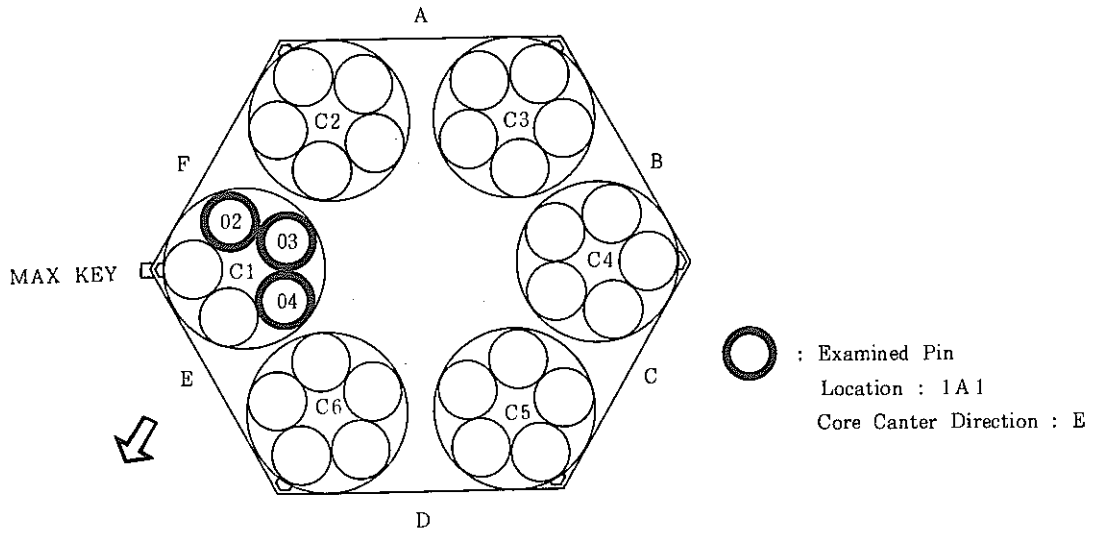


Fig.19 Cutting diagram of PFBO31 subassembly fuel pins for burnup measurement

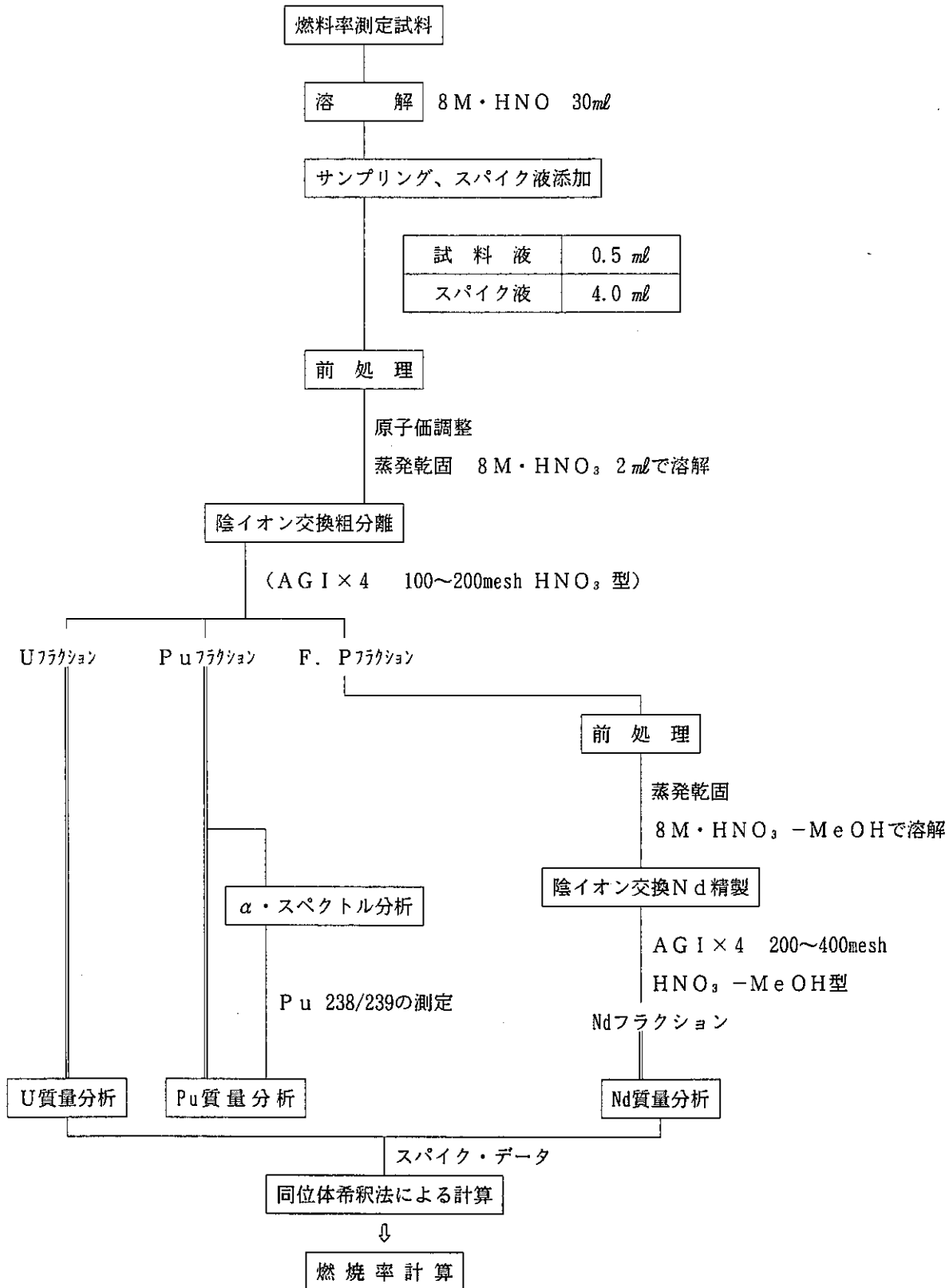


Fig. 20 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

S/A No.	JOYO-PFB031
Pin No.	A607
S/A Peak Burnup	82MWd/t

As polished
etched

41

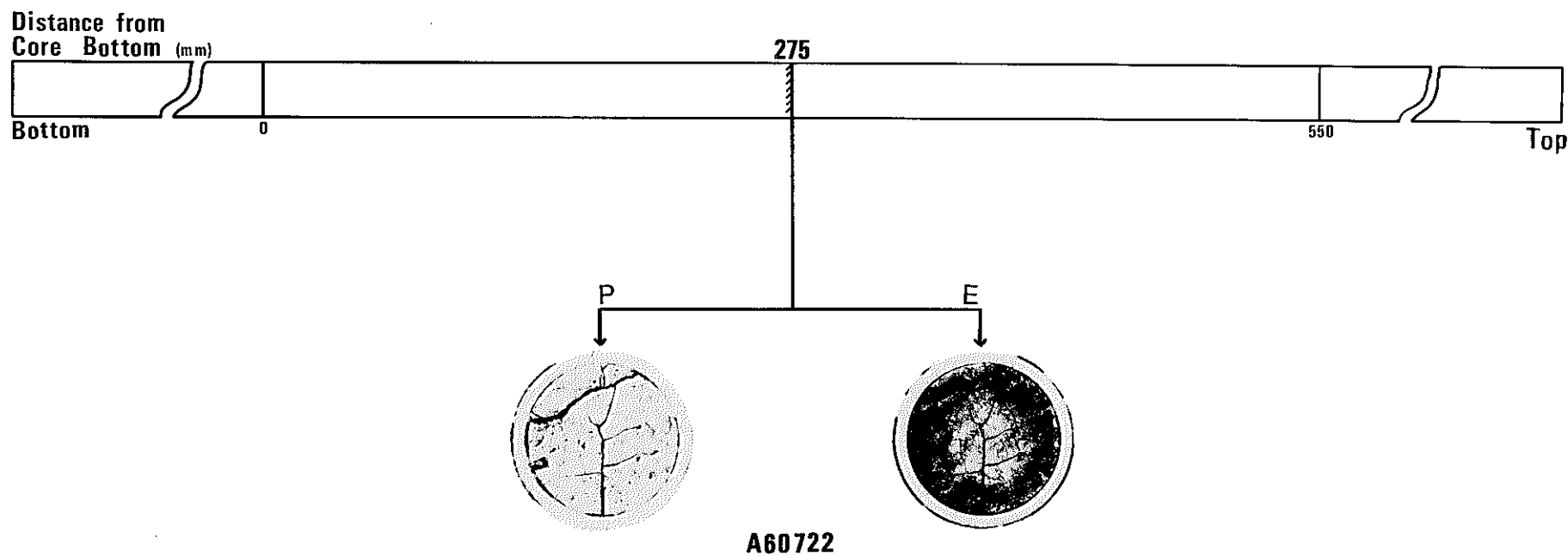
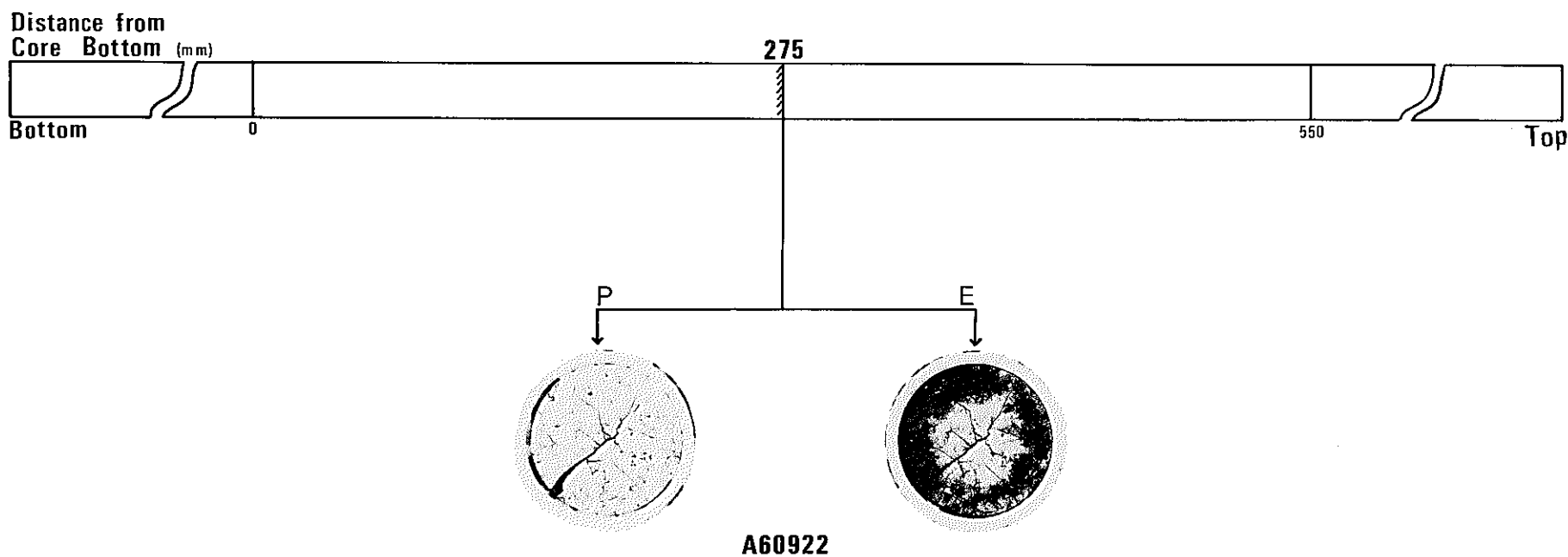


Photo.1 Macrography of PFB031 core fuel (A 607 pin , as polished and etched)

S/A No.	JOYO-PFB031
Pin No.	A609
S/A Peak Burnup	80MWd/t

As polished
etched



- 42 -

Photo.2 Macrography of PFB031 core fuel (A 609 pin, as polished and etched)

S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A607	
Section No.	A60722	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

As polished

1mm

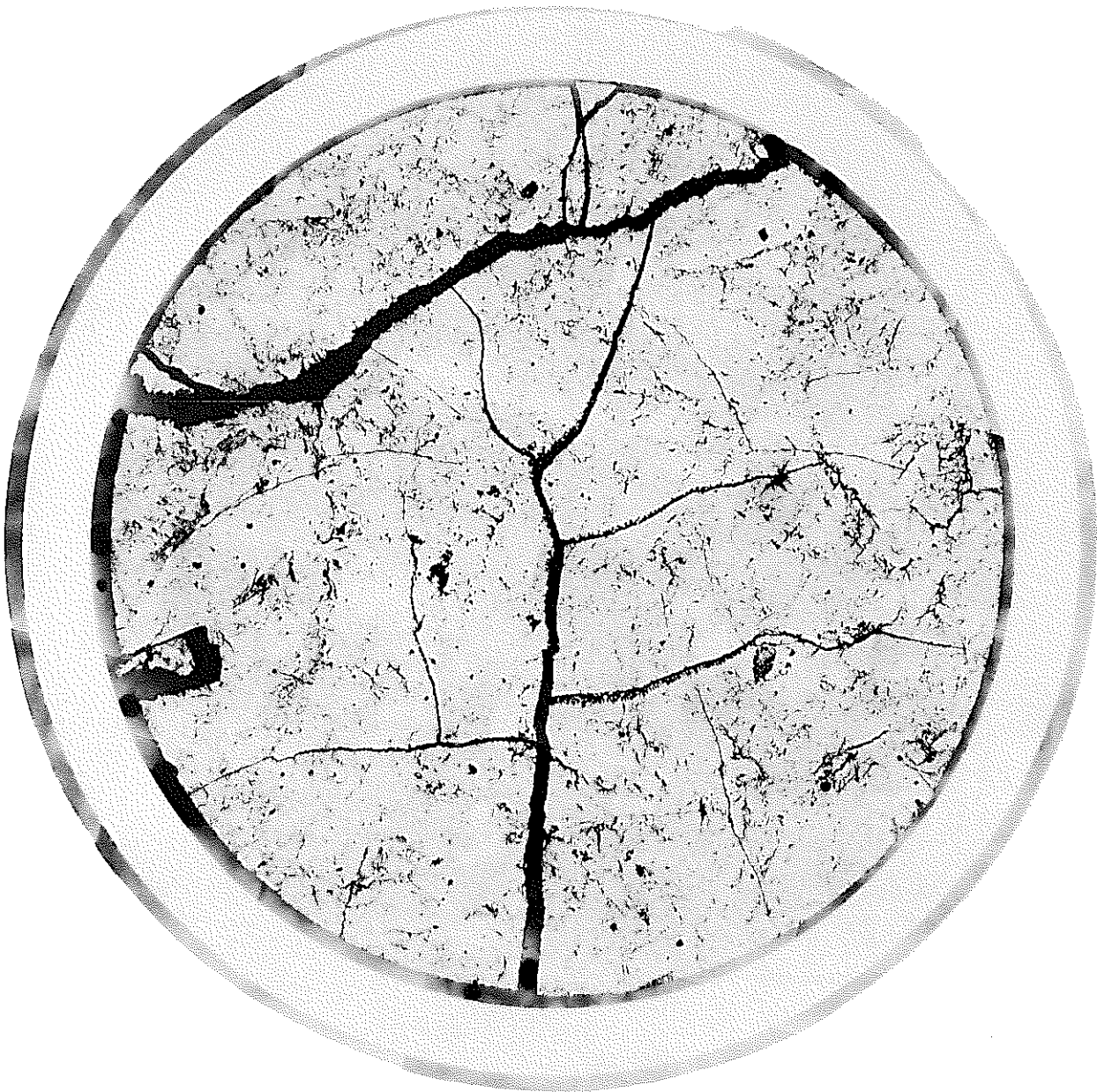


Photo.3 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (specimen No. A 60722) as polished

S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A607	
Section No.	A60722	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

etched

1mm

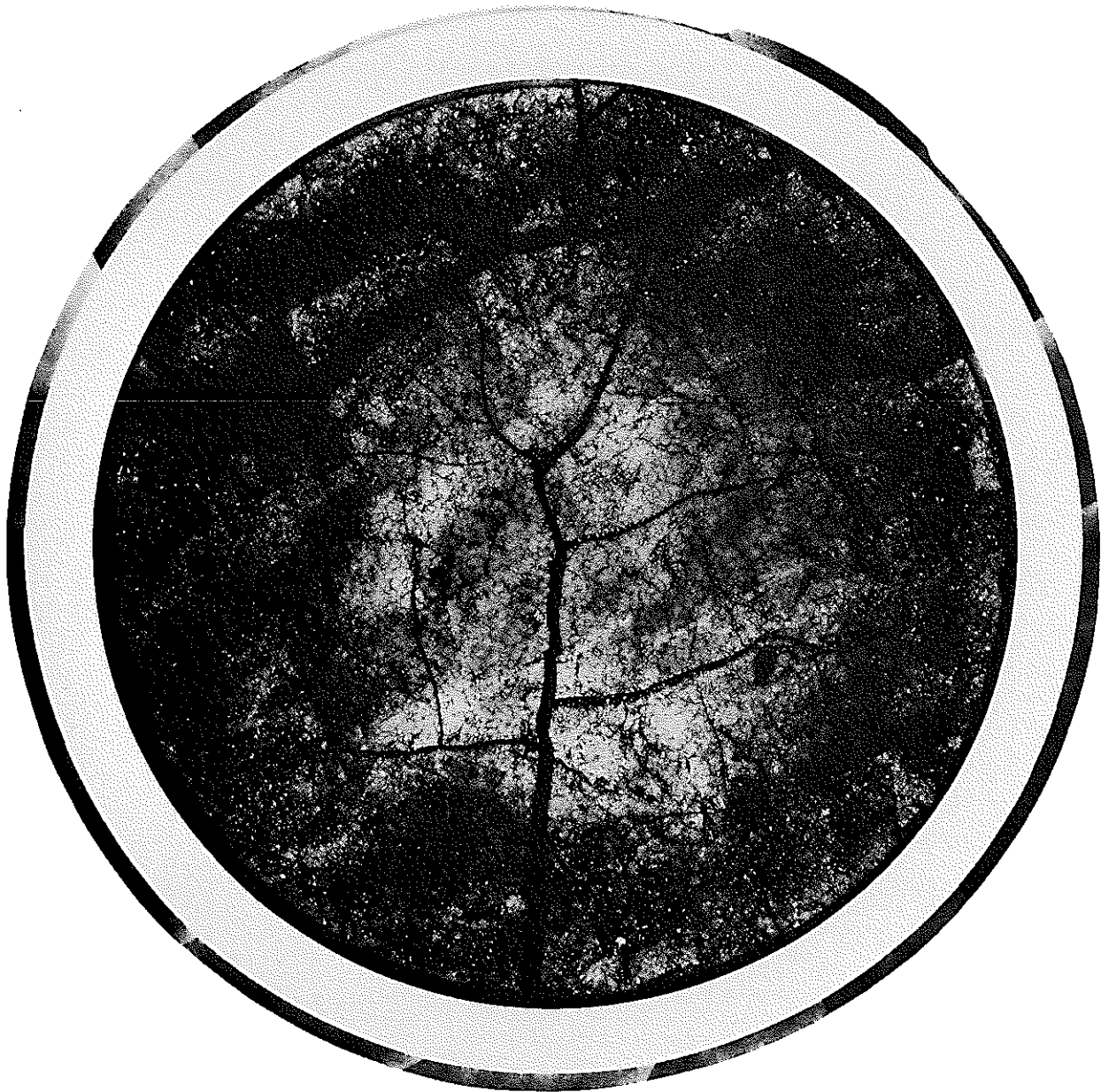
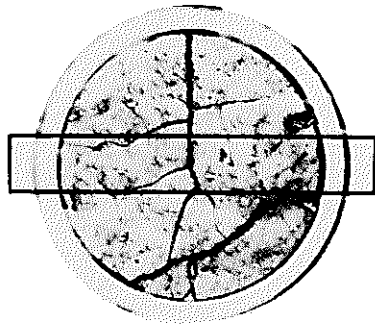


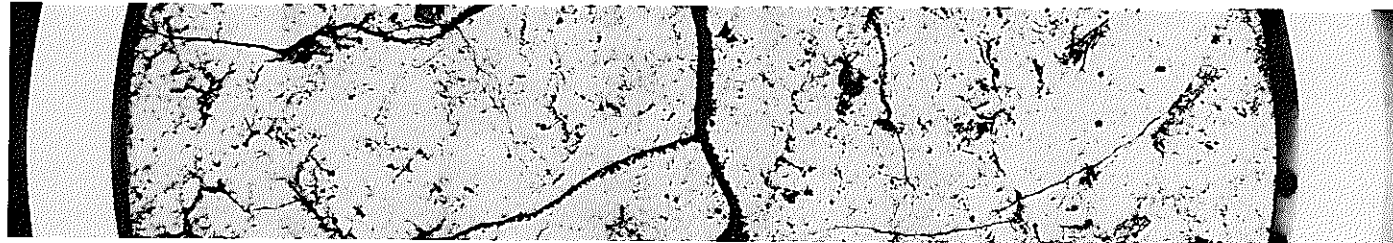
Photo.4 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (specimen No. A 60722) etched



S/A Name	JOYO-PFB031	
Pin No.	A607	
Section No.	A60722	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

As polished

1mm



0.1mm

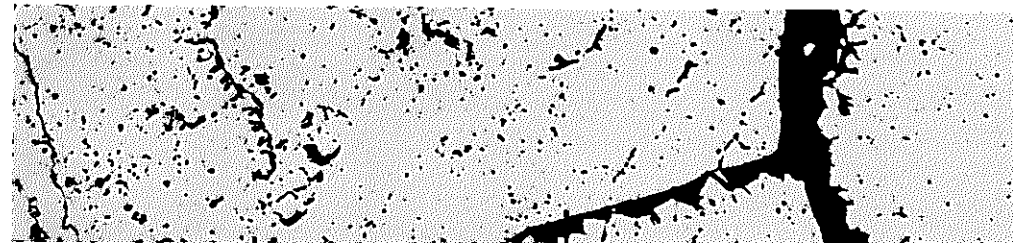
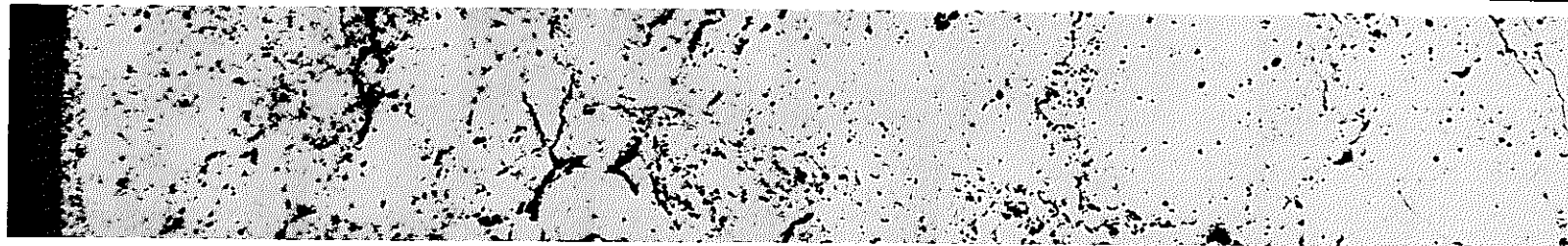
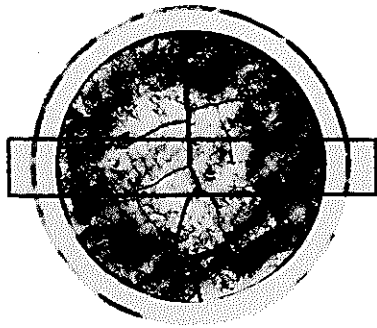


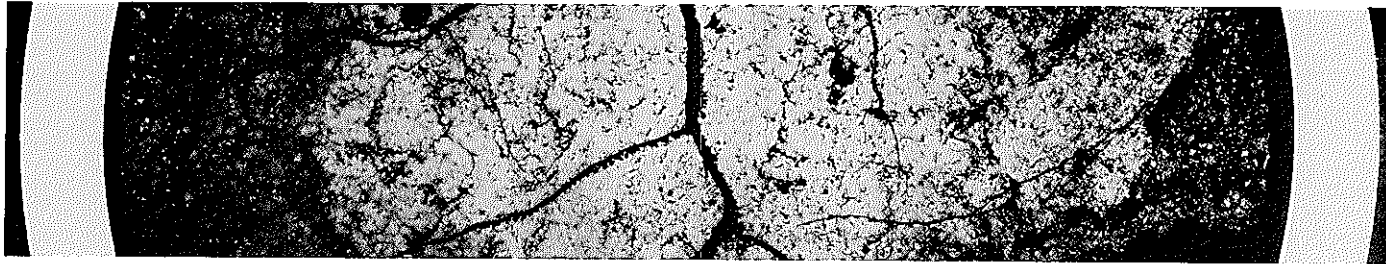
Photo.5 Optical microstructures of the core fuel (specimen No. A60722) as polished



S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A607	
Section No.	A60722	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

etched

1mm



0.1mm

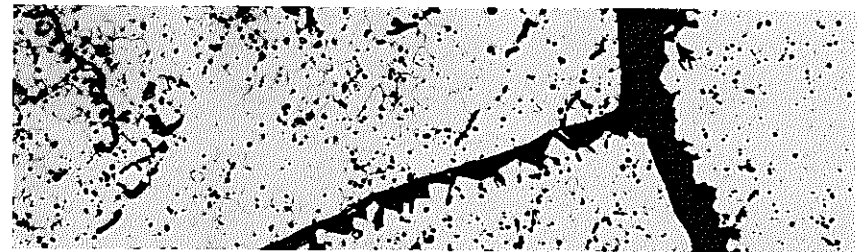
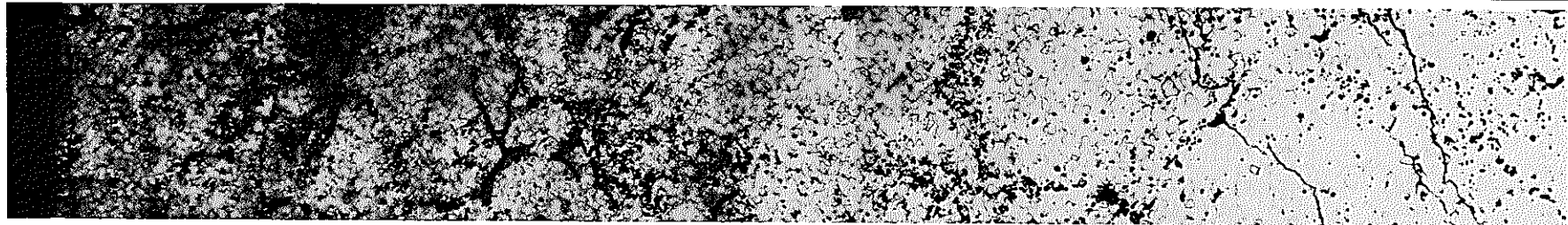


Photo.6 Optical microstructures of the core fuel (specimen No. A60722) etched

S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A609	
Section No.	A60922	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

As polished

1mm



Photo.7 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (specimen No. A 60922) as polished

S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A609	
Section No.	A60922	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

etched

1mm

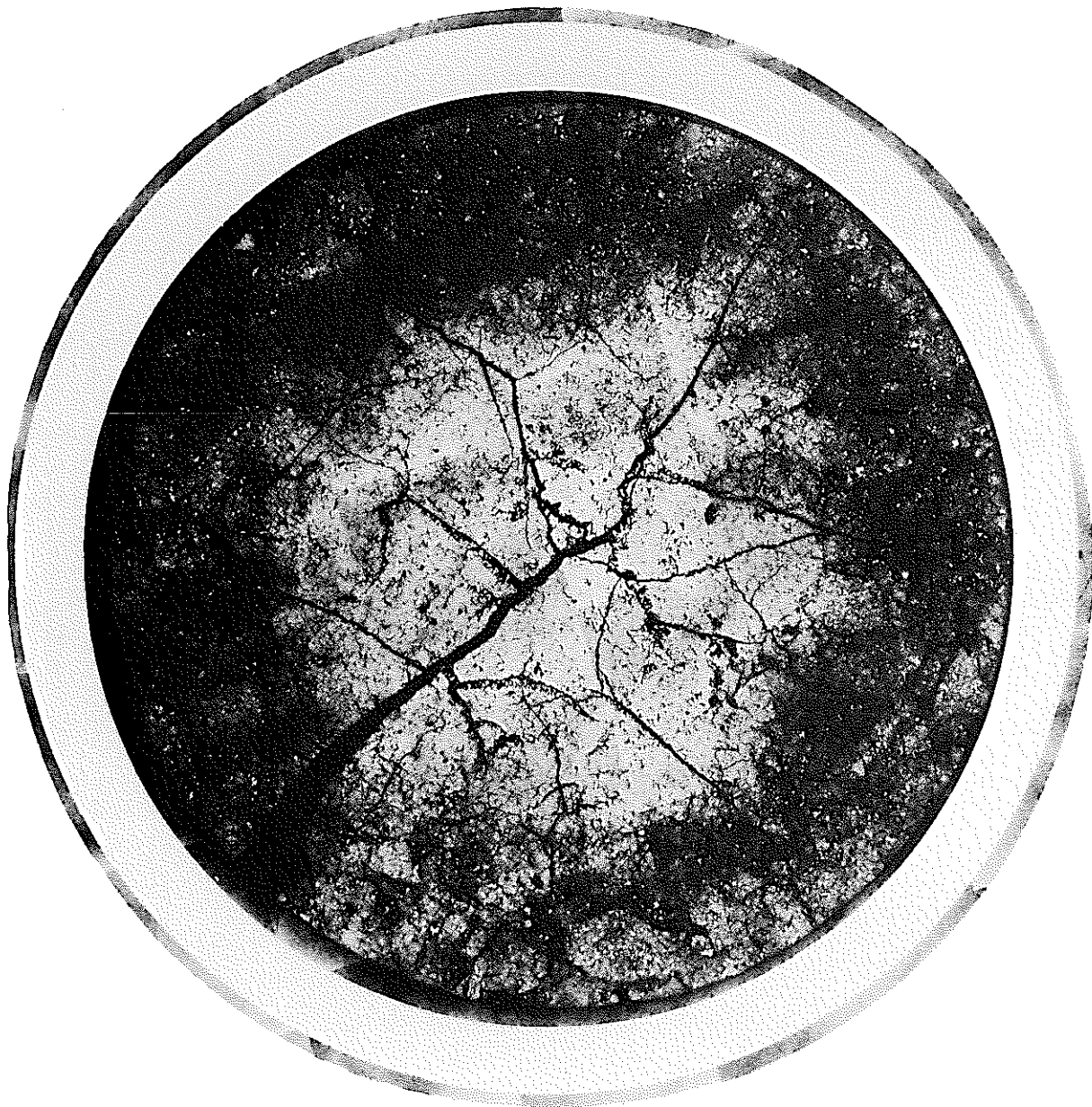
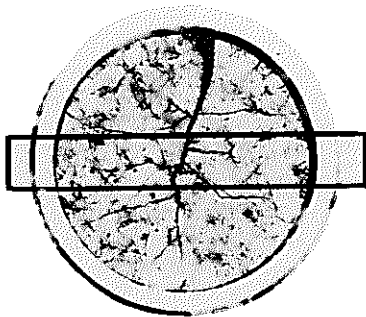


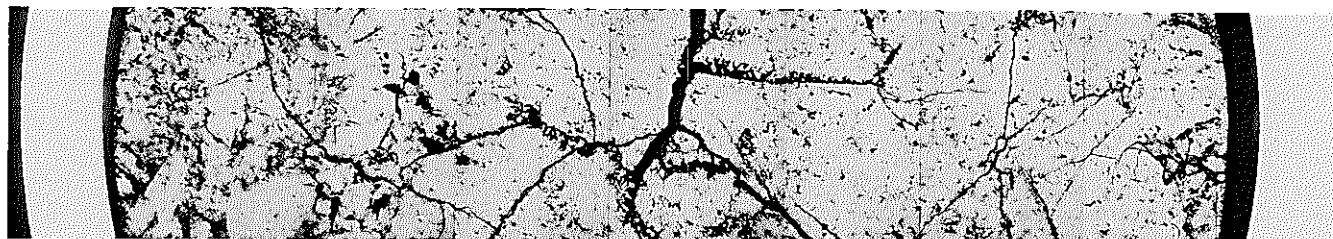
Photo.8 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (specimen No. A 60922) etched



S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A609	
Section No.	A60922	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

As polished

1mm



0.1mm

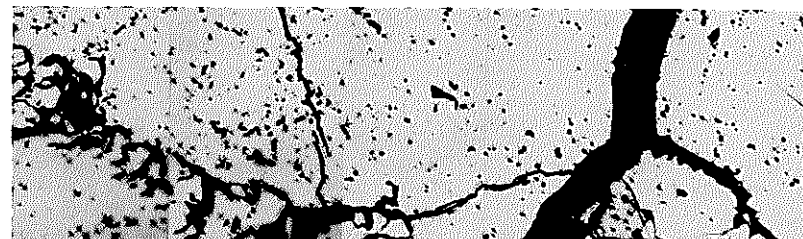
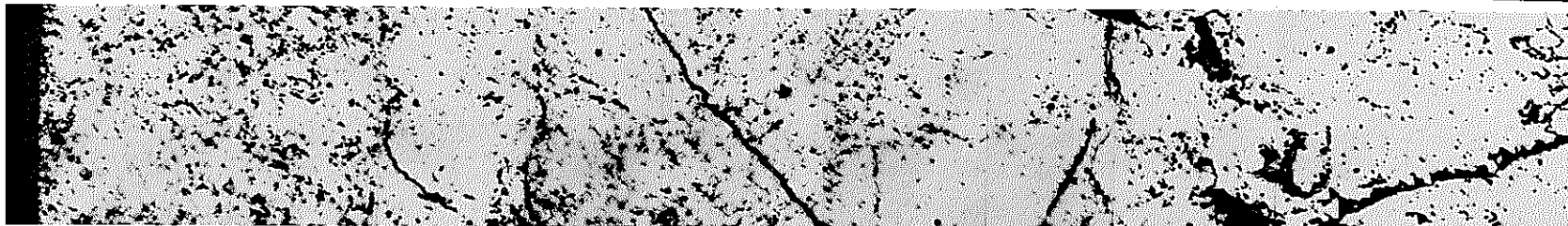
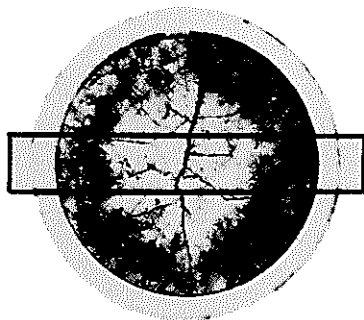


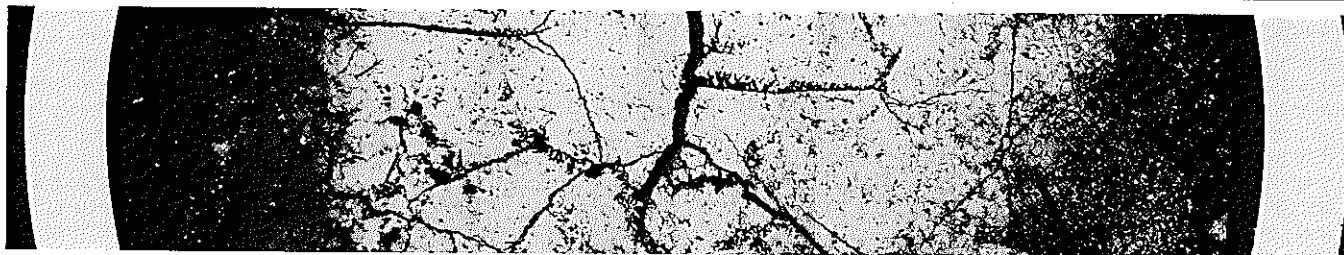
Photo.9 Optical microstructures of the core fuel (specimen No. A 60922) as polished



S/A Name	JOY0-PFB031	
Pin No.	A609	
Section No.	A60922	
Distance from bottom of pin		478mm
Distance from bottom of core column		275mm

etched

1mm



0.1mm

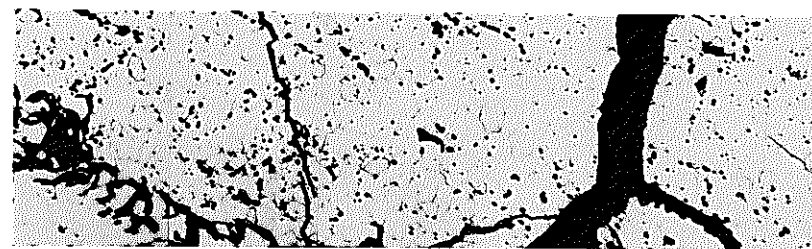
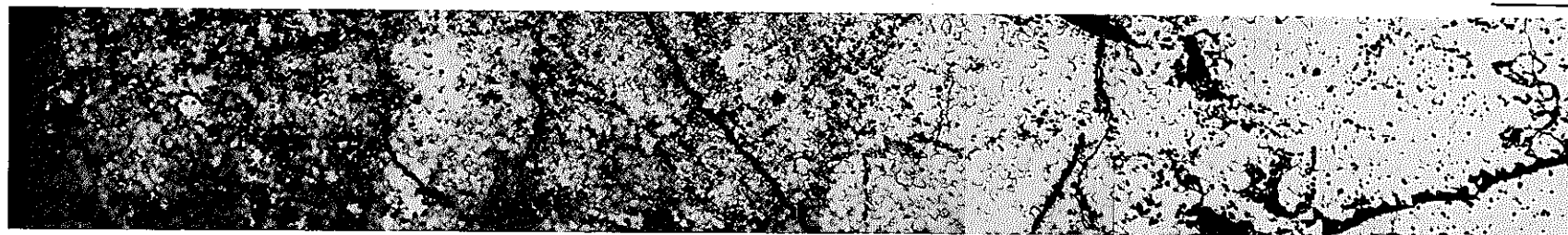


Photo.10 Optical microstructures of the core fuel (specimen No. A 60922) etched

付 録

付録

Ndの定量は、照射済燃料（PFB031）の質量分析データから未照射ペレットのNdを補正し、Ndを求めた。以下に算出結果を示す。

1. 未照射ペレット中にNdが含まれていないと仮定した場合の試料液1ml当たりの¹⁴⁸Ndの原子数

$$A_{48} = \frac{V_{SP}}{V_{SA}} \times A_{50} \times \frac{(M^{148}/150 - S^{148}/150)}{(1 - M^{148}/150 / R^{148}/150)} \dots\dots\dots (1)$$

- A₄₈ : 試料中の¹⁴⁸Ndの原子数
- A₅₀ : ミックススパイク1ml当たり¹⁵⁰Ndの原子数 (5.1651 × 10¹⁵)
- V_{SA}, V_{SP} : 試料とミックススパイクの体積 (V_{SP}/V_{SA} = 8)
- M¹⁴⁸/₁₅₀ : 試料とミックススパイクの混合液中における¹⁵⁰Ndに対する¹⁴⁸Ndの同位体比
- R¹⁴⁸/₁₅₀ : 試料中の¹⁵⁰Ndに対する¹⁴⁸Ndの同位体比
- S¹⁴⁸/₁₅₀ : ミックススパイク中における¹⁵⁰Ndに対する¹⁴⁸Ndの同位体比

(1)式より各サンプルの¹⁴⁸Ndの原子数を求めた。

試料No.	¹⁴⁸ Nd (個)
A602342	6.4599 × 10 ¹⁵
A603342	6.1919 × 10 ¹⁵
A604342	6.3785 × 10 ¹⁵

2. 未照射ペレット中に含まれていたNdを補正した場合、試料液1ml当たりの¹⁴⁸Ndの原子数

$$A_{48} = \frac{V_{SP}}{V_{SA}} \times A_{50} \times \frac{(a M^{148}/150 - b S^{142}/150 - c)}{d - e M^{148}/150 / f M^{142}/150} \dots\dots\dots (2)$$

$M^{148}/_{150}$, $M^{142}/_{150}$: 試料とミックススパイクの混合液中における ^{150}Nd に対する ^{148}Nd 、 ^{142}Nd の同位体比

$$a = c^{142}/_{150} - S^{142}/_{150}$$

$$b = c^{148}/_{150} - S^{148}/_{150}$$

$$c = (c^{142}/_{150} \times S^{148}/_{150}) - (S^{142}/_{150} \times c^{148}/_{150})$$

$$d = c^{142}/_{150}$$

$$e = E^{150}/_{148} \times c^{142}/_{150}$$

$$f = 1 - E^{150}/_{148} \times c^{148}/_{150}$$

$E^{150}/_{148}$: ^{148}Nd に対する ^{150}Nd の核分裂収率の比

$c^{142}/_{150}$, $c^{148}/_{150}$: 未照射ペレット中における ^{150}Nd に対する ^{142}Nd 、 ^{148}Nd の同位体比

$S^{142}/_{150}$, $S^{148}/_{150}$: ミックススパイク中における ^{150}Nd に対する ^{142}Nd 、 ^{148}Nd の同位体比

(2)式より各サンプルの ^{148}Nd の原子数を求めた。

試料No.	^{148}Nd (個)
A602342	4.9023×10^{15}
A603342	4.769×10^{15}
A604342	4.8573×10^{15}

(1)、(2)式より未照射ペレット中の ^{148}Nd と ^{148}Nd の未照射ペレット中の存在比より全Nd量を求めた。

^{148}Nd の重量は

$$\frac{(1) - (2)}{\text{アボガドロ数}} \times ^{148}\text{Ndの質量数} \dots\dots\dots (3)$$

全Nd量は

$$\frac{^{148}\text{Ndの重量}}{^{148}\text{Ndの存在比}} \dots\dots\dots (4)$$

未照射ペレット1個当たりのNd量は

$$\frac{\text{サンプルのNd重量} \times \text{未照射ペレット1個の長さ}}{\text{サンプルの試料長さ}} \dots\dots\dots (5)$$

3. 未照射ペレット1個当たりのNd量

(3)、(4)、(5)式より未照射ペレット1個当たりのNd量を求めた。

試料No.	ペレット1個当たりのNd量 (μg)	MOX 中のNd濃度(ppm) *
A602342	10.95	7.06
A603342	10.6	6.84
A604342	10.5	6.77
平均	10.7	6.89

* B4M ペレット1個当たりの重量=1.55g (理論密度:11.02, O/M 1.97, Pu29%として)

$$\pi D^2/4 \times h \times \text{理論密度} \times \text{TD}\%$$