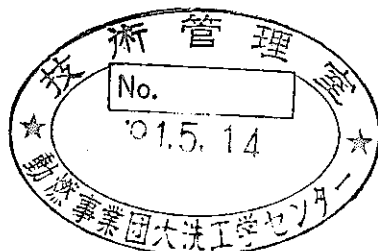


「常陽」MK-II 炉心燃料集合体(PFD105)の

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 90-191
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

です。
社外に

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

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体(PFD105)の 照 射 後 試 験



燃料要素の破壊試験

桑島幸夫，川澄清一，吉持 宏
吉川勝則，広沢孝志，横内洋二

要 旨

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 PFD105 は，炉心装荷位置 1D1 において 100MW 第 3 サイクルより第 8 サイクルまで照射されたもので，集合体平均燃焼度は約 48,300MWd/t，集合体最大中性子照射量は約 $7.68 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{MeV}$) である。

照射燃料試験室 (AGS) では，1 次取替燃料集合体の中で最大燃焼度を有する PFD105 の燃料，被覆管の健全性確認及び照射挙動を把握するために 3 本のピンを対象として金相試験，被覆管硬さ試験，被覆管密度測定，燃焼率測定，融点測定及び X 線回折測定を実施した。その結果を要約すると，下記のとおりである。

- (1) 燃料組織は，燃料カラム中央付近に中心空孔 (約 0.64mm) 及び柱状晶領域が観察された。残留ギャップ幅は，製造時の 170 μm (直径) から約 14 μm まで減少していた。
- (2) 被覆管内面に，最大 25 μm の複合腐食が観察され燃料-被覆管化学的相互作用 (FCCI) が認められた。
- (3) 被覆管硬さと照射温度の関係は，照射温度 510 $^{\circ}\text{C}$ 以下においては照射により硬さ値が増加するが，570~600 $^{\circ}\text{C}$ では照射前に比べほとんど変化が認められなかった。
- (4) 燃焼率のピン軸方向分布及び集合体径方向分布は，実測値と ESPRIT-J 計算値が良く一致していた。
- (5) 燃焼度 59,000MWd/t における Pu 富化度 30% の燃料の融点は， $2692 \pm 13^{\circ}\text{C}$ であり，O/M 比は 1.986 ± 0.002 (製造時 O/M: 1.97 ± 0.002) であった。

目 次

1. ま え が き	1
2. 燃 料 ピ ン	2
3. 照 射 条 件	2
4. 照 射 後 試 験	3
4.1 金 相 試 験	3
4.1.1 試料調製方法	3
4.1.2 試 験 結 果	3
4.2 被覆管硬さ試験	4
4.2.1 測 定 方 法	4
4.2.2 測 定 結 果	4
4.3 被覆管密度測定	5
4.3.1 試料調製及び測定方法	5
4.3.2 測 定 結 果	5
4.4 燃 焼 率 測 定	5
4.4.1 試 験 調 製 方 法	5
4.4.2 測 定 結 果	5
4.5 融 点 測 定	6
4.5.1 測 定 方 法	6
4.5.2 測 定 結 果	6
4.6 X線回折測定	6
4.6.1 測 定 方 法	6
4.6.2 測 定 結 果	6
5. ま と め	8

List of Tables

Table 1	Specification of PFD105 subassembly -----	10
Table 2	Fuel pin fabrication parameters -----	11
Table 3	Chemical composition cladding -----	12
Table 4	Metallographic examination in AGS -----	20
Table 5	Irradiation parameters of PFD105 -----	21
Table 6	Summary data from ceremographs of PFD105 -----	22
Table 7	FCCI data sheel of PFD105 -----	23
Table 8	Measurement condition and indentation position -----	40
Table 9	Microhardness of PFD105 Cladding (A064 pin) -----	41
Table 10	Cladding microhardness of JOYO MK-II PFD-105 (A064 pin) -----	42
Table 11	Summary of Density Measurement -----	46
Table 12	Summary of Burnup measurement by Nd-method -----	49
Table 13	Calculation of effective fission yield for A06443 (example) -----	50
Table 14	Composition of spike solution and natural Neodymium -----	51
Table 15	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A05823 sample -----	52
Table 16	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A06423 sample -----	53
Table 17	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A06443 sample -----	54
Table 18	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A06483 sample -----	55
Table 19	Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A07022 sample -----	56
Table 20	Summary of Melting point measurement (PFD105) -----	62

List of Figures

Fig. 1	Specification of MK-II driver Fuel Pin -----	13
Fig. 2	Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab. No. PFD105) in "JOYO" MK-II -----	14
Fig. 3	Location of the fuel Pin (Pin No. A064, A058,A070) in the Driver Fuel Subassembly ----	15
Fig. 4	Axial profile of burnup (64pin) -----	16
Fig. 5	Axial profile of linear heat rate (64pin) ----	17
Fig. 6	Axial profile of fluence and cladding temperature (64pin) -----	18
Fig. 7	Sampling of specimens (PFD105) -----	24
Fig. 8	Flow diagram of metallographic examination in AGS -----	25
Fig. 9	Axial profile of restructured region -----	26
Fig. 10	Axial profile of fuel-cladding gapsize -----	26
Fig. 11	Summary of Depth of Cladding Inner Corrosion -----	27
Fig. 12	Variation of cladding hardness with fluence and cladding temperature (A064 pin) -----	43
Fig. 13	Effect of fluence on cladding hardness of JOYO MK-II driver fuel -----	44
Fig. 14	Cladding Density change -----	47
Fig. 15	Cutting diagram of PFD105 subassembly fuel pins for burnup measurement -----	57
Fig. 16	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS -----	58
Fig. 17	Burnup axial distribution of PFD105 (A064 Pin) -----	59
Fig. 18	Burnup radial distribution of PFD105 subassembly -----	60
Fig. 19	Heating curve of irradiated mixed-oxide fuel -----	63
Fig. 20	Melting temperature of Irradiated mixed oxide fuel with burnup -----	64

List of Photographs

Photo. 1	Macrography of PFD105 core fuel (64 Pin) ----	28
Photo. 2	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (Specimen No.A06422) etched -----	29
Photo. 3	Optical microstructures of the core fuel (Specimen No.A06422) etched -----	30
Photo. 4	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (Specimen No.A06442) etched -----	31
Photo. 5	Optical microstructures of the core fuel (Specimen No.A06442) etched -----	32
Photo. 6	Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (Specimen No.A06484) etched -----	33
Photo. 7	Optical microstructures of the Core fuel (Specimen No.A06484) etched -----	34
Photo. 8	Optical microstructures of the longitudinal section of the core fuel pin (Specimen No.A06485) etched -----	35
Photo. 9	Fuel/cladding gap and FCCI of the core fuel pin (specimen No.A06484) as polished ---	36
Photo. 10	Fuel/cladding gap and FCCI of the core fuel pin (Specimen No.A06485) as polished ---	37
Photo. 11	Optical micrograph of fuel cladding (specimen No.A06422,A06442,A06484) -----	38

1. ま え が き

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD105は、1)MK-II炉心燃料集合体の炉内での健全性確認、2)MK-II第2次取替以降の燃料材料設計への反映、3)照射データベースの拡充、4)原子炉規制法第29条の定期検査受検のためのデータ取得を目的として照射された。PFD105は、1次取替燃料集合体として炉心装荷位置「1D1」の位置において100MW第3サイクルより第8サイクルの間照射されたもので、集合体平均燃焼度は約48,300MWd/t、集合体最大中性子照射量は約 $7.86 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$)である。

照射燃料試験室(AGS)では、1次取替燃料集合体の中で最大燃焼度を有するPFD105の燃料、被覆管の健全性確認及び照射挙動を把握するために、3本のピンを対象として、金相試験(燃料組織及び被覆管組織観察)、被覆管硬さ試験、被覆管密度測定、燃焼率測定、融点測定及びX線回折測定を実施した。本報告書は、これらの結果をまとめたものである。

2. 燃 料 ピ ン

集合体の主要な仕様を Table 1 に示す。また、燃料ピンの仕様及び構造図をそれぞれ Table 2, Fig. 1 に示す。被覆管は、20%冷間加工改良 SUS 316 鋼 (55 年度材) であり、その化学成分を Table 3 に示す。

3. 照 射 ピ ン

PFD105 集合体は、炉心位置 1E1 にて「常陽」MK-II 第 3 サイクルから第 8 サイクルまで照射された。集合体の炉心装荷位置を Fig. 2, 燃料ピンの集合体内装荷位置を Fig. 3 にそれぞれ示す。

本集合体の照射条件は以下の通りである。

- (1) 燃焼度 (集合体平均) : 48,300 MWd/t
- (2) 線出力 (集合体平均) : 295 W/cm
- (3) 中性子照射量 (集合体最大 $E > 0.1 \text{ MeV}$) : $7.68 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$

64 (代表ピン) の燃焼度, 線出力, 被覆管温度および中性子照射量分布を Fig. 4~6 に示す。これらの値は、「常陽」MK-II 炉心燃料要素照射評価システム (ESPRIT-J) による計算結果である。

4. 照射後試験

AGSにおいて実施した各試験の項目と試料採取位置をFig. 7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 $10\mu\text{m}$)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、 $6\mu\text{m}$ から順次 $1\mu\text{m}$ 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. 8に、金相試験の実施内容をTable 4に示す。

4.1.2 試験結果

金相試験では、A064ピンから3試料を採取し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 5に示す。金相試料採取位置及びマクロ写真をPhoto. 1に示す。

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 6に示す。

(1) 燃料組織 Photo. 2~Photo. 8

燃料カラム中央付近の試料に、中心空孔(約 0.64mm)及び柱状晶領域が観察された。他の試料は、ガスバブル領域、高密度化領域及び不変化領域で構成されていた(Fig. 9参照)。カラム中央付近の試料の燃料外周部にクサビ状のクラックが観られるが、これは燃料中心部でのガススエリングと外周部の焼きしまりによる体積変化により生じたと考えられている。縦断面試料では、インシュレータペレットの境界部で試料調製時に生じたと考えられる燃料の欠けおちが観られる。燃料にはガスバブル領域が形成されているが、インシュレータペレットでは組織変化およびクラックの発生が観られず製造時の状態であった。

残留ギャップ幅は、カラム中央付近で約 $14\mu\text{m}$ (直径)まで減少しており、照射中に燃料と被覆管の機械的相互作用(FCMI)が一部に生じていたと推察された。(Fig. 10参照)

(2) FCCIの観察

燃料カラム上端部に最大腐食量 $25\mu\text{m}$ の複合腐食(全面腐食と粒界腐食の混合型)が観察された。FCCIデータをTable 7に、金相写真をPhoto. 9~10にそれぞれ示す。また、これまでにMK-IIドライバー燃料で観察されたFCCIデータとの比較をFig. 11に示す。

(3) 被覆管組織観察

被覆管組織は、カラム中央及び上端部において被覆管外面側より内面側に炭化物の析出

量が多い。また、結晶粒界や双晶領域に炭化物の析出量が多く、被覆管内面側で鋭敏化が進んでいるのが認められた。(Photo. 11 参照)

4.2 被覆管硬さ試験

4.2.1 測定方法

被覆管硬さ試験は、L-2セル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。測定は、定常硬さ測定として、被覆管横断面の硬さを1試料につき16点(4点×4)の測定を実施した。Table 8に測定条件及び測定位置を示す。

4.2.2 測定結果

A064ピンの軸方向3ヶ所の位置から採取した試料について、硬さ試験を実施した。

Table 9にピン軸方向硬さ値と照射前硬さ値の比較を示す。各試料の硬さ測定結果をTable 10に、被覆管軸方向硬さ分布と照射量及び照射温度との関係をFig. 12にそれぞれ示す。未照射材と比べ、照射温度の低い燃料下端側で最大100 Hv(0.5)の硬さの増加が認められた。一方、照射温度の高い燃料中央部より上端側では、未照射材と同じ硬さ値であった。

Fig. 13に今までに得られた「常陽」MK-II炉心燃料用被覆管の硬さと照射温度の関係を示す。但し、中性子照射量が約 3×10^{22} n/cm²(E>0.1 MeV)以上のものをプロットした。

「常陽」MK-II炉心燃料用被覆管の照射温度を3領域に分け比較したところ、照射温度510℃以下においては照射により硬さ値が増加するが、570～600℃では照射前に比べほとんど変化しなかった。

4.3 被覆管密度測定試験

被覆管密度の測定は、A064ピンの炉心部3点について行った。Table 11に各測定試料およびレファレンス材の密度測定結果、Fig. 14に照射条件とともに試料採取位置を示す。

4.3.1 試料調製及び測定方法

試料調製及び測定は、次のように行った。

(1) 試料切断

マイクロソーを用いて測定試料を切断採取した。試料の長さは、約25mmである。

(2) 脱ミート

脱ミート装置を用いて被覆管内の燃料を除去した。

(3) 被覆管端面研磨

被覆管の切断端面を耐水研磨紙を用いて研磨した。研磨は、#120、#24及び#600の各研磨紙を用いて5分間ずつ行った。

(4) 被覆管酸洗浄及び乾燥

8モル硝酸90℃中で15分間酸洗い後、純水による超音波洗浄を15分間行いその後自然に乾燥させた。

(5) 最終洗浄及び乾燥

測定直前にアセトン、アルコールの順で各1分間ずつ脱脂洗浄を行いその後自然に乾燥させた。

(6) 測定

読み取り限度1 μ gの電子天秤を用いて空気中での重量及び界面活性剤入りの純水中での重量を繰り返し測定した。

(7) 密度計算

測定データを、測定温度及び気圧等の条件により補正し密度値を算出した。

4.3.2 測定結果

測定試料の密度変化は、最大で0.06%であり、測定誤差の範囲(±0.2%)内にあり有意差は認められなかった。

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 試料調整方法

試料の採取位置をFig. 15にまた、試料の調製方法及び手順をFig. 16に示す。

4.4.2 測定結果

今回得られた測定データとESPRIIT-Jコードによる計算値をまとめた結果をTable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

Na A602342)をTable 13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 14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 15~19に示す。その結果、以下のことが分かった。

PFD105炉心燃料集合体の各ピンの軸方向中央部の燃焼率は、6.36 atom% (A058ピン)、6.22 atom% (A064ピン)、5.99 atom% (A070ピン)であった。軸方向及び径方向の燃焼率分布は、実測値と計算値のプロファイルがほぼ一致した。(Fig. 17, 18参照)

4.5 融点測定

4.5.1 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。

4.5.2 測定結果

融点測定試料は、A058ピン(高出力ピン)より2ヶ所から採取した。

測定により得られた熱分析曲線をFig. 19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 20に示す。

燃焼度59.000 MWd/tにおける燃料(Pu富化度:30%)の融点は、 $2692 \pm 13^\circ\text{C}$ であり従来の設計値(2643°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. 20に示す。

4.6 X線回折測定

4.6.1 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。

4.6.2 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、A058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、 5.4485\AA であった。また、得られた格子定数か

ら H. Kleykamp 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%)

計算の結果、O/M 比は 1.986 ± 0.002 (製造時 O/M : 1.97 ± 0.002) であった。

5. ま と め

「常陽」MK-II炉心燃料集合体PFD105の照射後試験結果を要約すると、下記のとおりである。

(1) 金相試験

- 燃料組織は、燃料カラム中央付近に中心空孔（約0.64mm）及び柱状晶領域が観察された。残留ギャップ幅は、製造時の170 μ m（直径）から約14 μ mまで減少していた。
- 被覆管内面に、最大25 μ mの複合腐食が観察され燃料-被覆管化学的相互作用（FCCI）が認められた。
- 被覆管組織は、燃料カラム中央及び上端部において被覆管外面側より内面側に炭化物の析出量が多く観察された。

(2) 被覆管硬さ試験

- 被覆管軸方向硬さ分布は、燃料下端側で未照射材と比べ最大100Hv（0.5）の硬さ増加が認められ、燃料中央部より上端側では未照射材と同じ硬さ値であった。
- 被覆管硬さと照射温度の関係は、照射温度510 $^{\circ}$ C以下においては照射により硬さ値が増加するが、570 \sim 600 $^{\circ}$ Cでは照射前に比べほとんど変化しなかった。

(3) 被覆管密度試験

- 測定試料の密度変化は、測定誤差の範囲（ $\pm 0.2\%$ ）内にありスエリングは認められなかった。

(4) 燃焼率測定

- 代表ピン、高出力ピン及び低出力ピンの3本対象に試験を実施した結果、ピン軸方向及び集合体径方向の燃焼率分布は、実測値とESPRIT-J計算値が良く一致した。

(5) 融点測定

- 燃焼度59,000MWd/tにおけるPu富化度30%の燃料の融点は、2692 \pm 13 $^{\circ}$ Cであった。

(6) X線回折測定

- 融点測定試料のO/M比を測定するため実施した。その結果、O/M比は1.986 \pm 0.002（製造時O/M：1.97 \pm 0.002）であった。

1. データ集

Table 1 Specification of PFD105 Subassembly

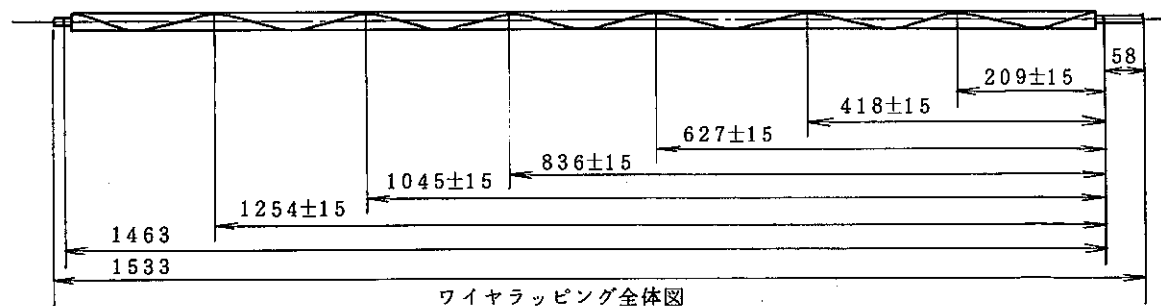
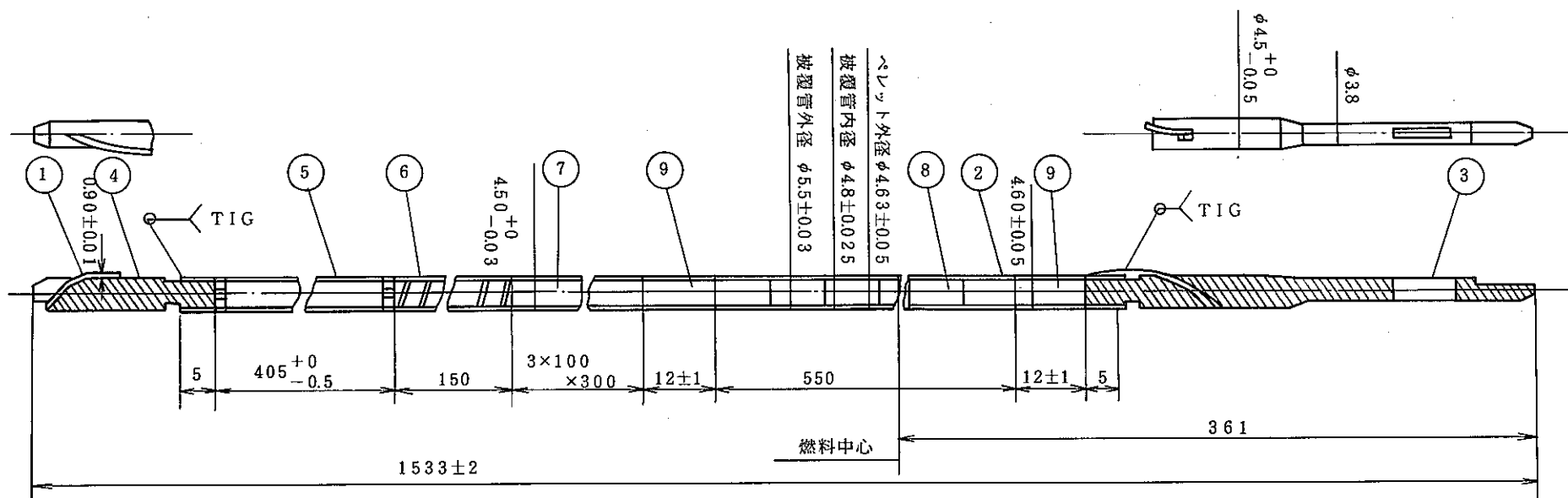
	MK-II 炉心燃料集合体
燃料ピン全長 (mm)	1533
燃料ピン本数	127
ラッパ管内対面距離 (mm)	74.7
Porosity/Ring (mm)	0.127 (MK-I: 0.175)
内部オリフィス	無
下部反射体	スクリュウ型ブロック
ワイヤ径 (mm)	0.90
ワイヤピッチ (mm)	209 MK-I: 266

Table 2 Fuel pin fabrication parameters

S/A name	PFD105	Pin no A064, A0C1, A007
Fuel		
Fuel form	Flat end solid pellet	
Pellet diameter(mm)	4.63	
Pellet density(% T.D)	93±2.0	
Fuel composition	30W/O PuO ₂ -UO ₂	
U-235 enrichment (%)	12.0±0.3	
Pu isotopic composition(%)	Pu 239/240/241/242 75.6/20.9/2.7/0.7	
O/M ratio	1.97 ^{+0.02} _{-0.03}	
Cladding		
Type and work	SUS 316, 20% cold work	
Outer/inner diameter (mm)	5.5/4.8	
Lot identification	S556	
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 3 Chemical Composition Cladding

項 目		仕 様
ロッドNo.		S556
冷間加工度 (%)		20
化学成分 (wt %)	C	0.035~0.064
	Si	≤0.75
	Mn	0.5~2.00
	P	0.015~0.035
	S	≤0.01
	Ni	13~14
	Cr	16~18
	Mo	2~8
	Co	≤0.1
	B	0.0005~0.003
	N	≤0.01
	Cu	≤0.2
	Ti	≤0.1
	V	≤0.2
	Nb+Ta	≤0.05
As	≤0.03	
Al	≤0.05	



名称	炉心燃料集合体燃料要素			
品番	品名	材質	個数	備考
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
3	下部端栓	SUS316	1	
4	上部端栓	SUS316	1	
5	押え板付プレナムスリーブ	SUS304WPB	1	
6	プレナムスプリング	SUS304WPB	1	
7	上部反射体	SUS316相当	3	
8	炉心ペレット	PuO ₂ UO ₂		
9	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	

Fig. 1 Specification of MK-II Driver Fuel Pin

炉内照射位置

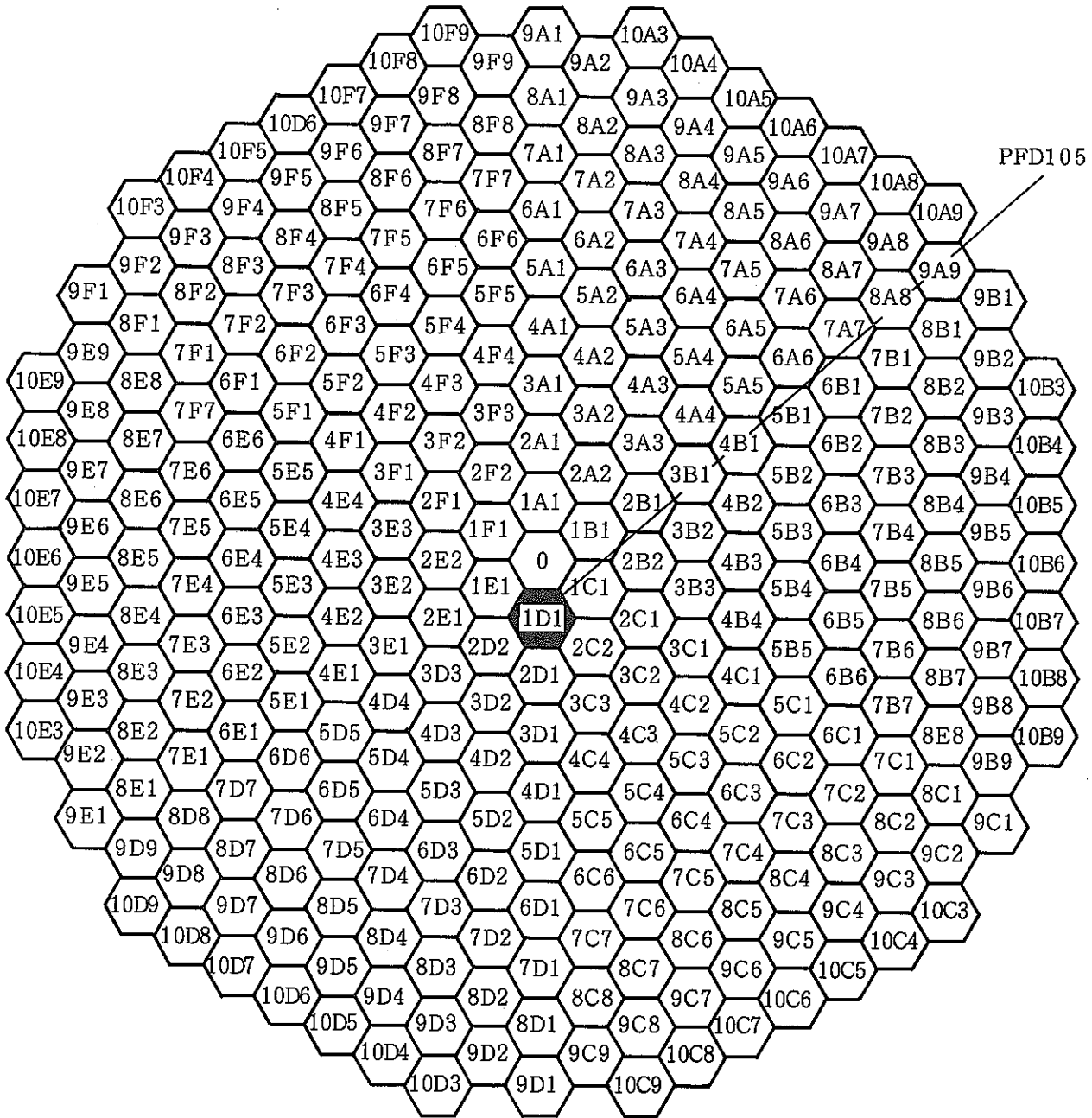


Fig. 2 Location of the Driver Fuel Subassembly
(Fab. No PFD105) in "JOYO" MK-II

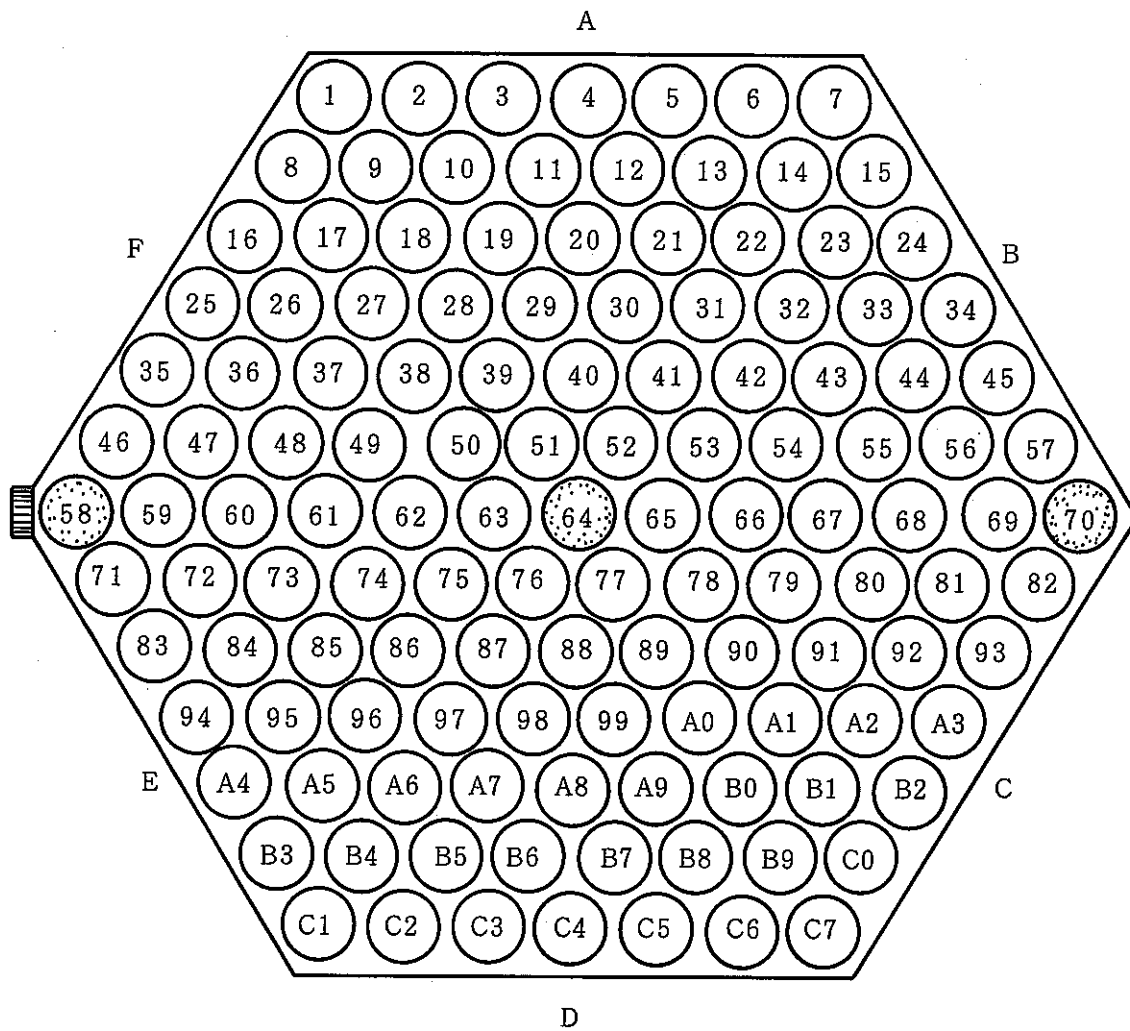


Fig. 3 Location of the Fuel Pin (Pin No A064, A058, A070) in the Driver Fuel Subassembly

S/A FAB No : PFD105 PIN No : 64

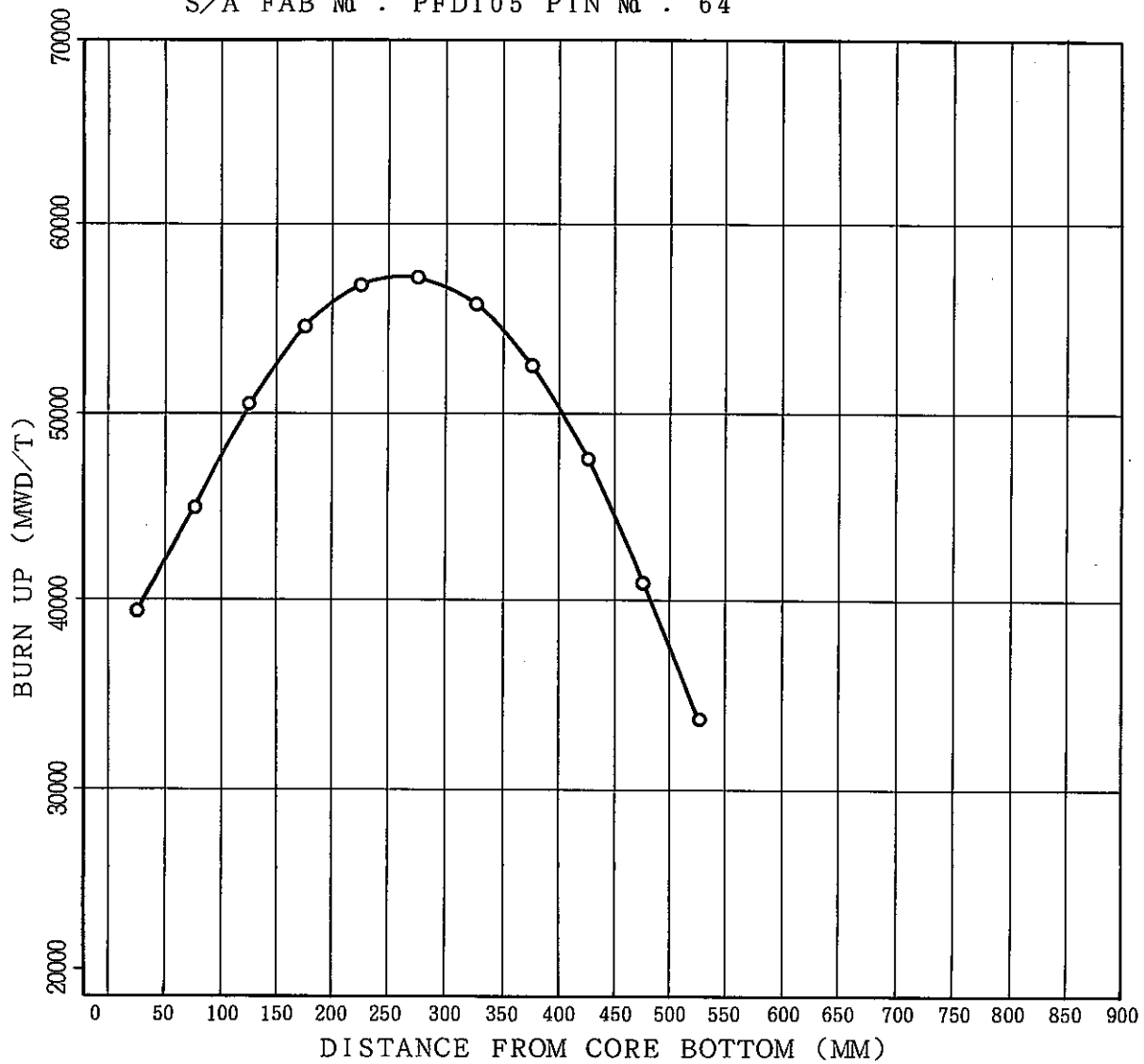


Fig. 4 Axial profile of burnup (64pin)

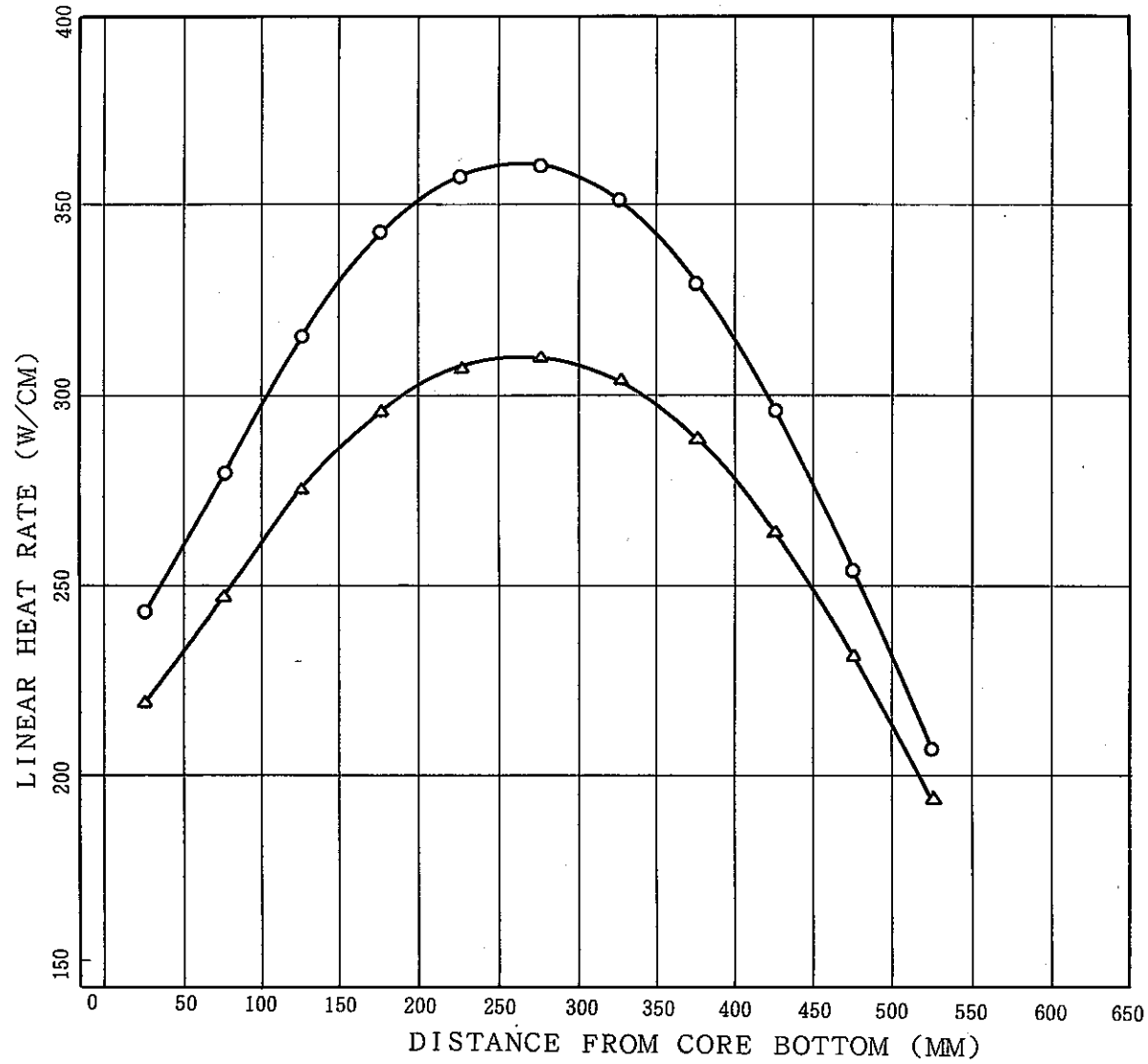


Fig. 5 Axial profile of linear heat rate (64pin)

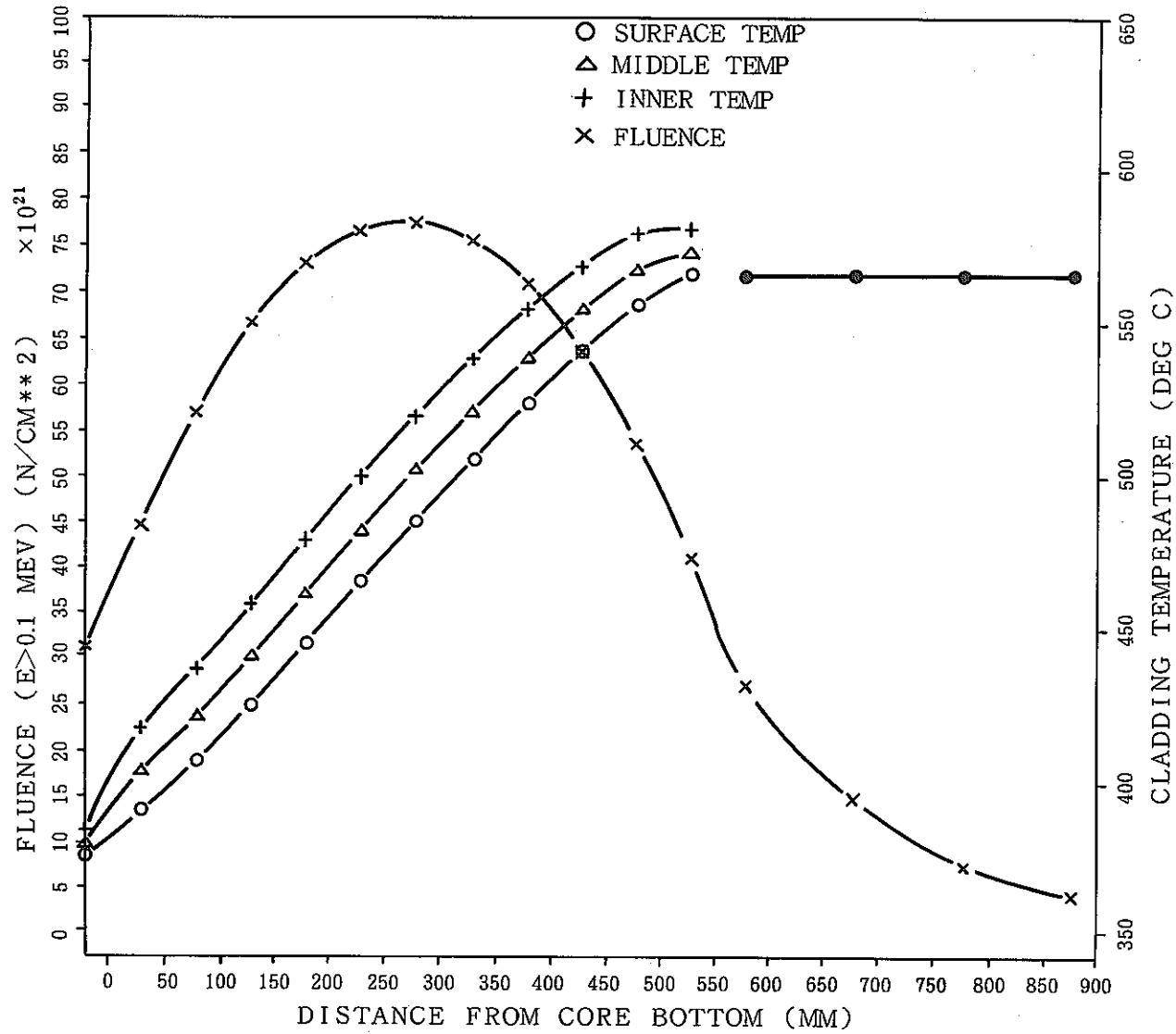


Fig. 6 Axial profile of fluence and cladding temperature (64pin)

2. 金 相 試 験

Table 4 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 ギャップ観察	/	/
燃 料	×105 全面写真	燃料全体組織 観察 ポイド分布測定	×105 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	FCCI	×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 5 Irradiation parameters of PFD105

Pin No	Section No	Distance from core bottom (mm)	Burnup (YWD/MTM)	Linear heat rate (W/cm)	Fuel center temp. (°C)	Clad. inner temp. (°C)
A064	A06422	25	39430	242	1415	416
	A06442	249	57060	365	1914	510
	A06484	531	32740	207	1130	577

Table 6 Summary data from ceremographs of PFD105

Pin No	Section No	Restructured region dia. (mm)					Residual diametral gap size (μm)	Pellet outer dia. (mm)	Clad dia. (mm)	
		Central void	Columnar region	Gas bubble region	Densified region	Dark ring region			Outer	Inner
A064	A06422	—	—	2.625	3.241	—	56	4.740	5.491	4.796
	A06442	0.641	2.640	3.047	3.776	—	14	4.785	5.501	4.799
	A06484	—	—	2.474	3.530	—	91	4.723	5.498	4.814

Table 7 FCCI data sheet of PFD105

Pin No	Specimen No	D.F.C.B (mm)	Local Burnup (MWd/t)	Clad. Inner Temp (°C)	Attack Type *	Max attack	Comment
A064	A06484	531	32.740	577	C	20	Photo. 9 (A)
					C	20	Photo. 9 (B)
					C	25	Photo. 9 (C)
	A06485	532	32.740	577	C	20	Photo. 10 (A)
		553	30.000	567	C	20	Photo. 10 (B)

* M: Matrix attack

C: Combine attack

I: Intergranular attack

ピン分類		代表ピン	高出力ピン	低出力ピン	
ピンNo (PIE)		A064	A058	A070	
被覆管ロットNo		S556	S556	S556	
試験数	燃料組織観察	4	0	0	
	被覆管	組織観察	3	0	0
		硬 さ	3	0	0
		密 度	3	0	0
	燃 焼 接 測 定	3	1	1	
	物 性	0	2	0	
	合 計	16	3	1	

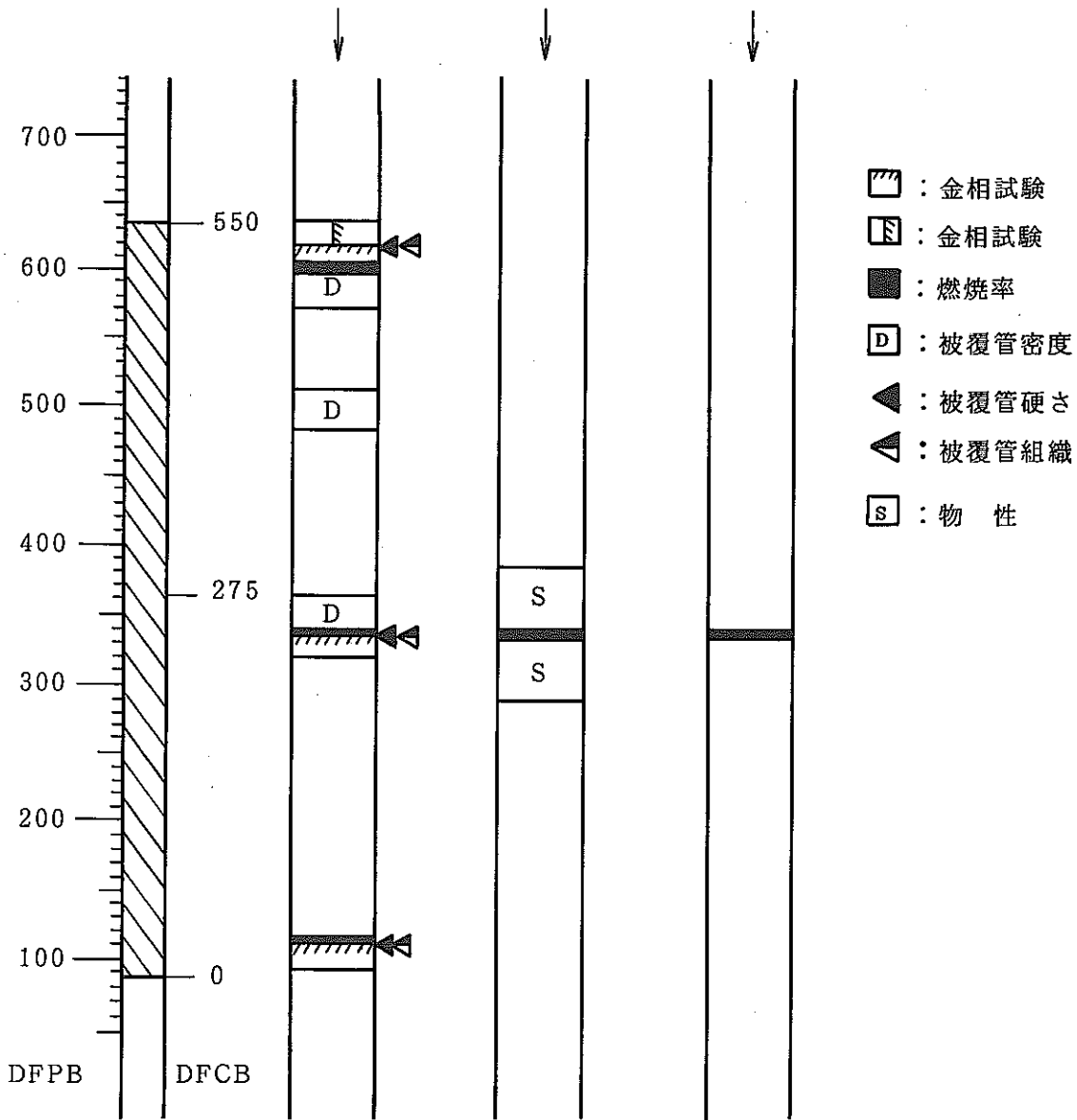


Fig. 7 Sampling of specimens (PFD105)

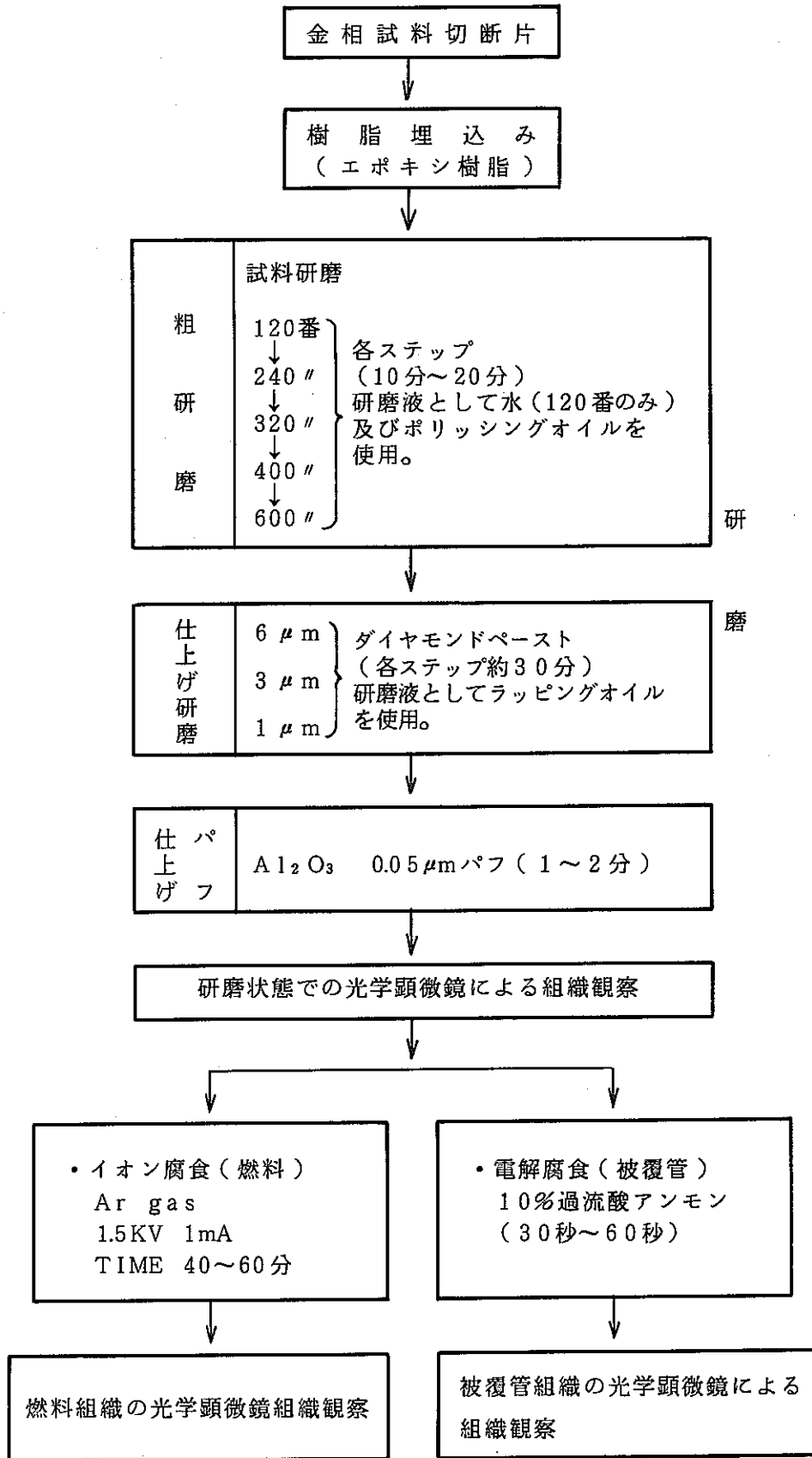


Fig. 8 Flow diagram of metallographic examination in AGS

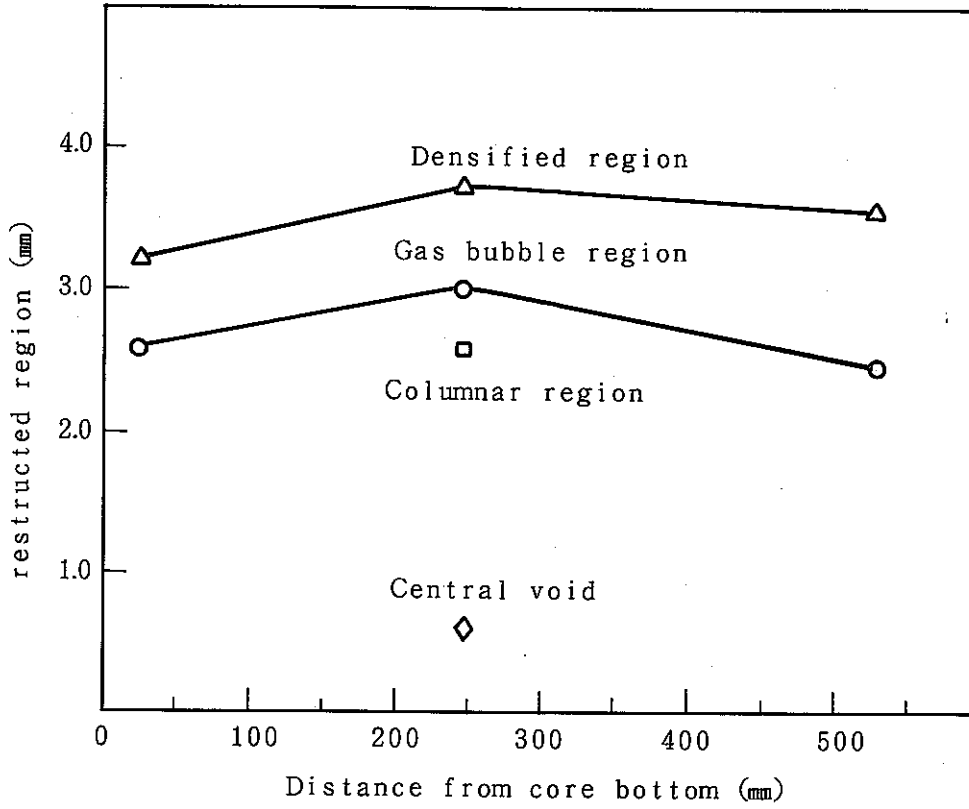


Fig. 9 Axial profile of restricted region

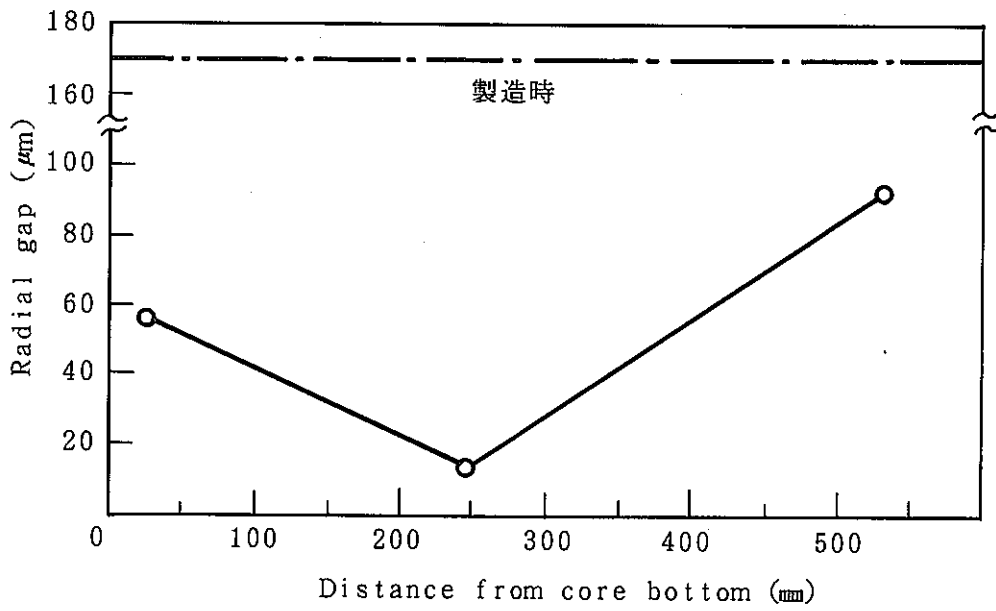


Fig. 10 Axial profile of fuel-cladding gap size

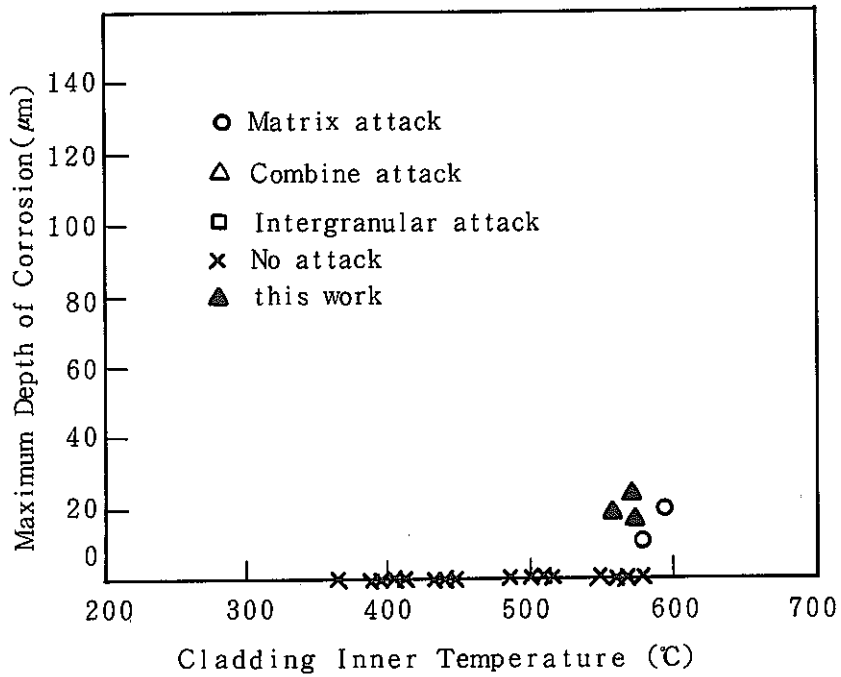
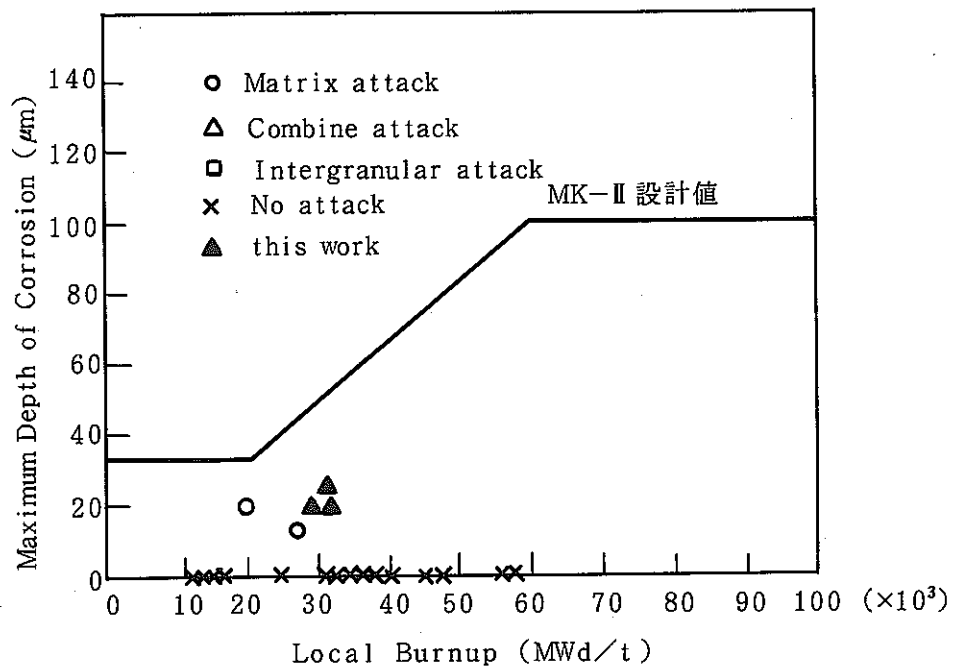
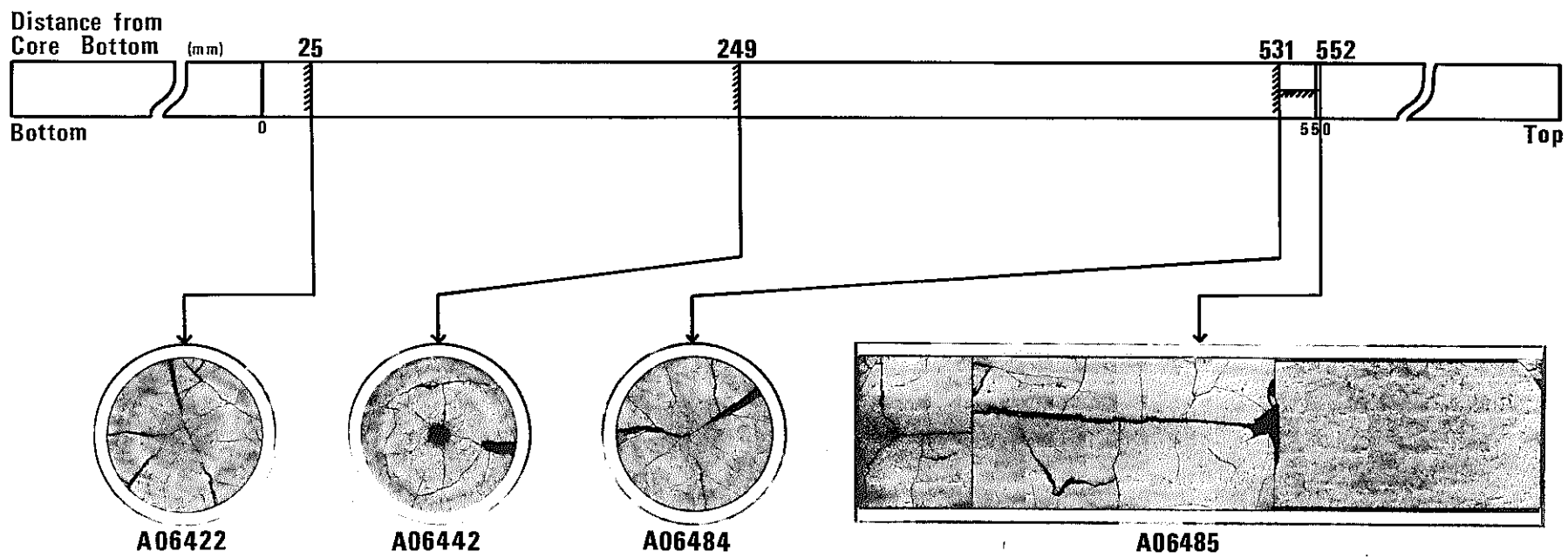


Fig. 11 Summary of Depth of Cladding Inner Corrosion

S/A No.	JOY0-PFD105
Pin No.	A064
S/A Peak Burnup	59000MWd/t



- 28 -

Photo.1 Macrography of PFD105 core fuel (64Pin)

S/A Name	JOY0-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06422	
Distance from bottom of pin		111mm
Distance from bottom of core column		25mm

etched

1mm

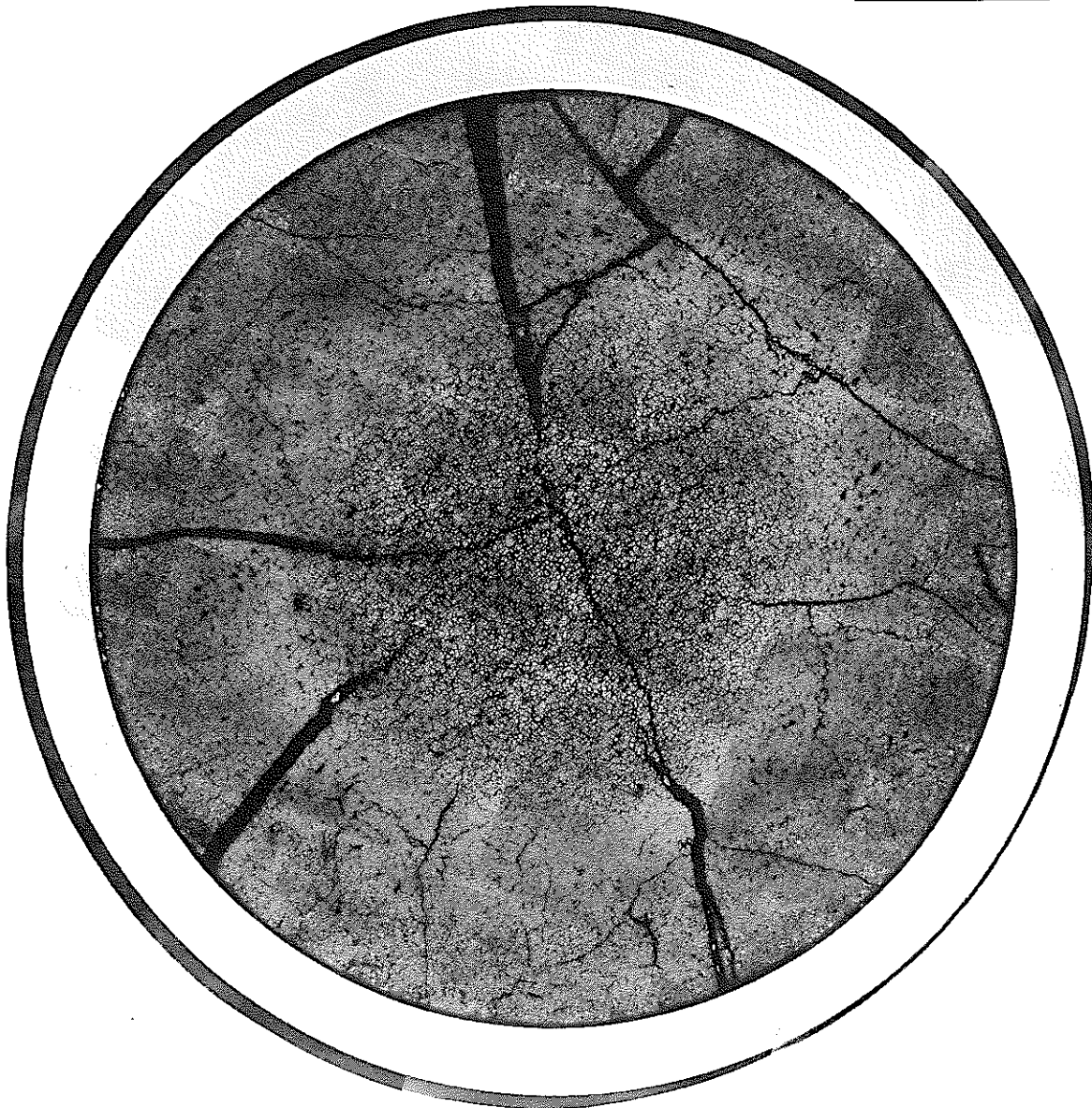
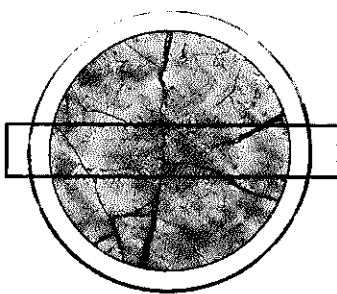


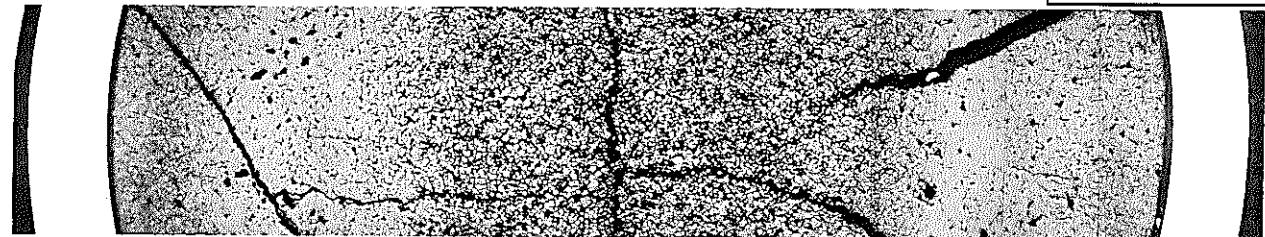
Photo. 2 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (Specimen No A06422) etched



S/A Name	JOY0-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06422	
Distance from bottom of pin		111mm
Distance from bottom of core column		25mm

etched

1mm



0.1mm

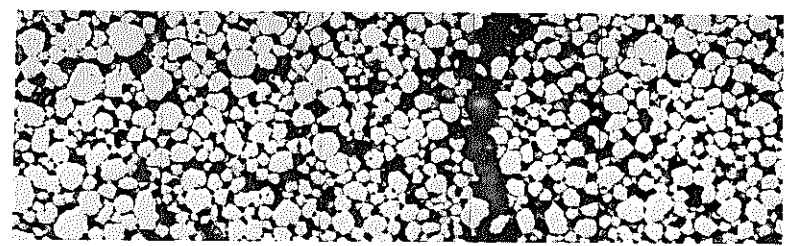
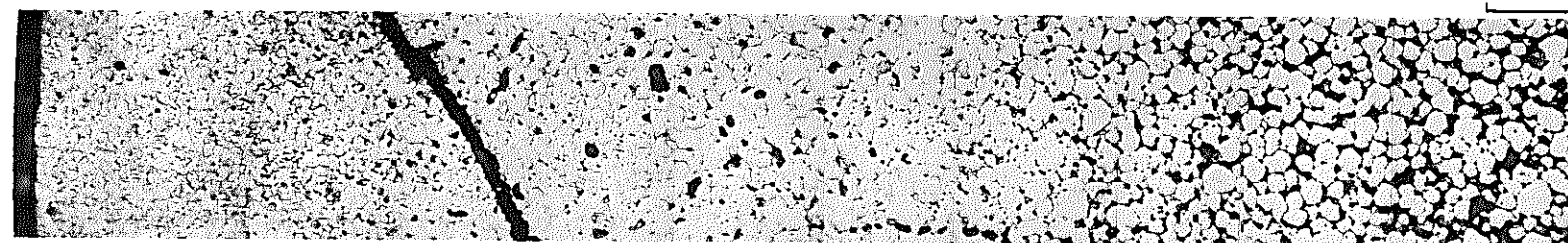


Photo. 3 Optical microstructures of the core fuel (Specimen No. A06422) etched

S/A Name	JOYO-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06442	
Distance from bottom of pin		335mm
Distance from bottom of core column		249mm

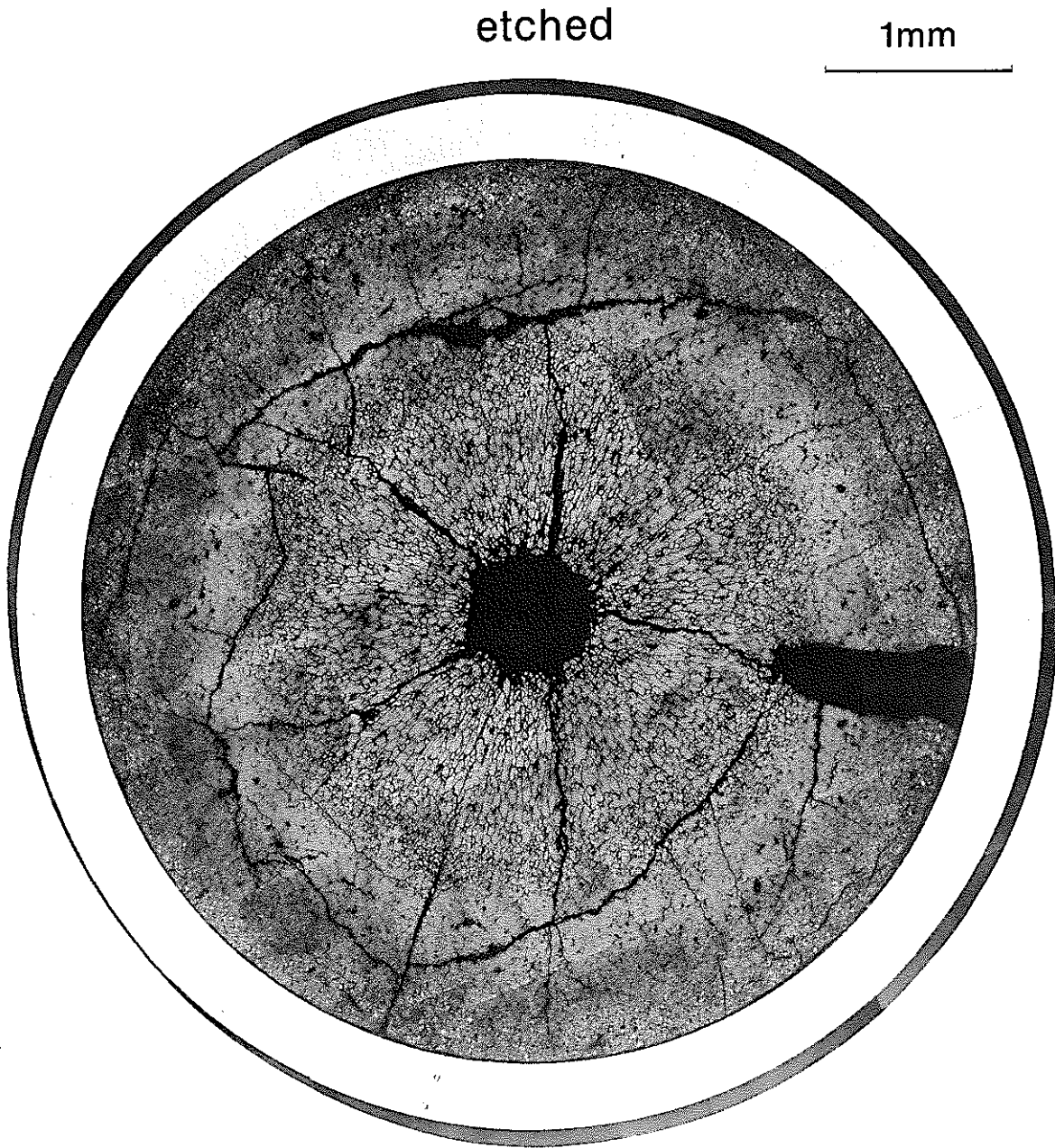
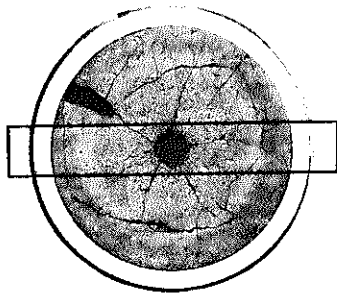


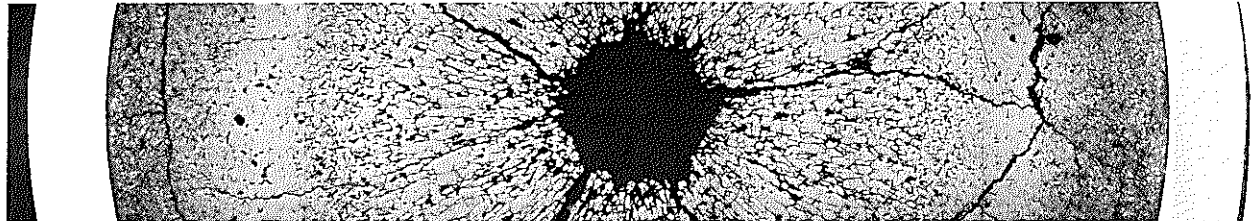
Photo. 4 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (Specimen No. A06442) etched



S/A Name	JOY0-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06442	
Distance from bottom of pin		335mm
Distance from bottom of core column		249mm

etched

1mm



0.1mm

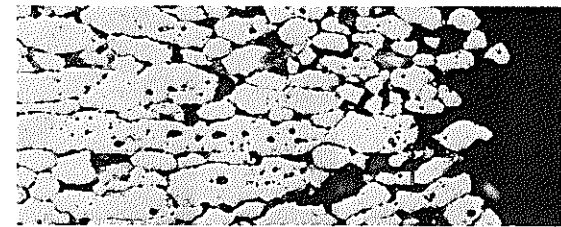
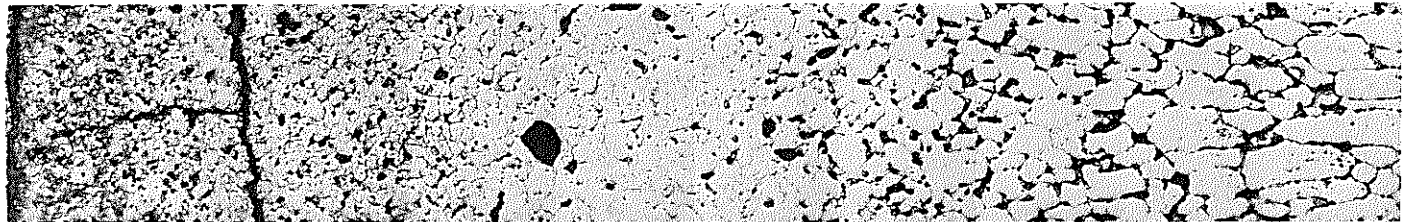
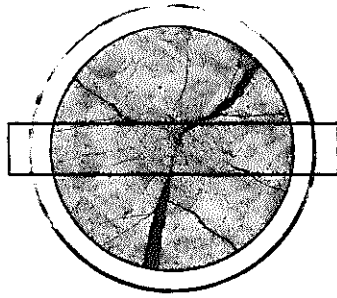


Photo. 5 Optical microstructures of the core fuel (Specimen No. A06442) etched

S/A Name	JOY0-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06484	
Distance from bottom of pin		617mm
Distance from bottom of core column		531mm



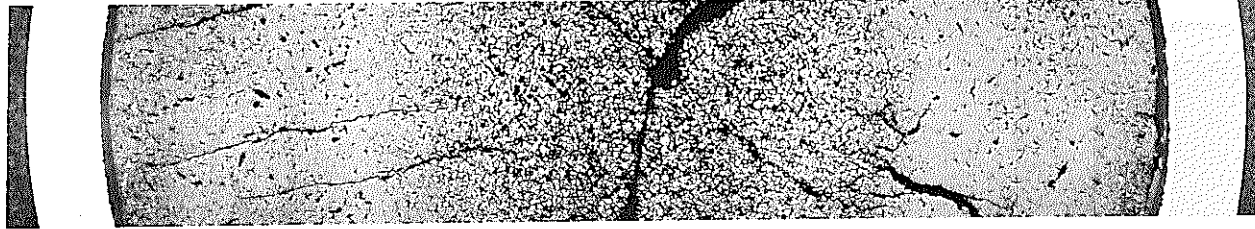
Photo. 6 Optical micrograph of the transverse section of the core fuel pin (Specimen No. A06484) etched



S/A Name	JOYO-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06484	
Distance from bottom of pin		617mm
Distance from bottom of core column		531mm

etched

1mm



0.1mm

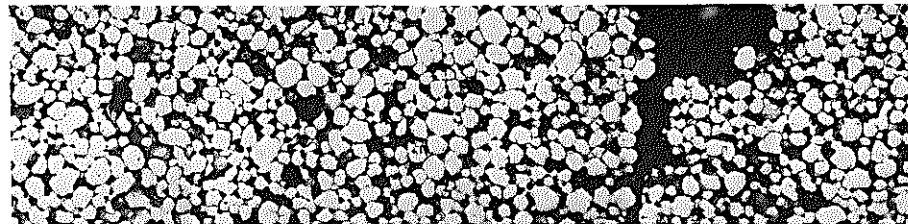
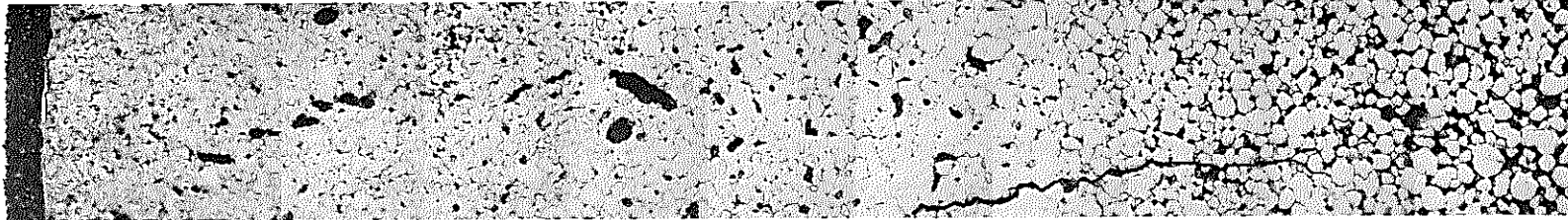


Photo.7 Optical microstructures of the Core fuel (Specimen No A06484) etched

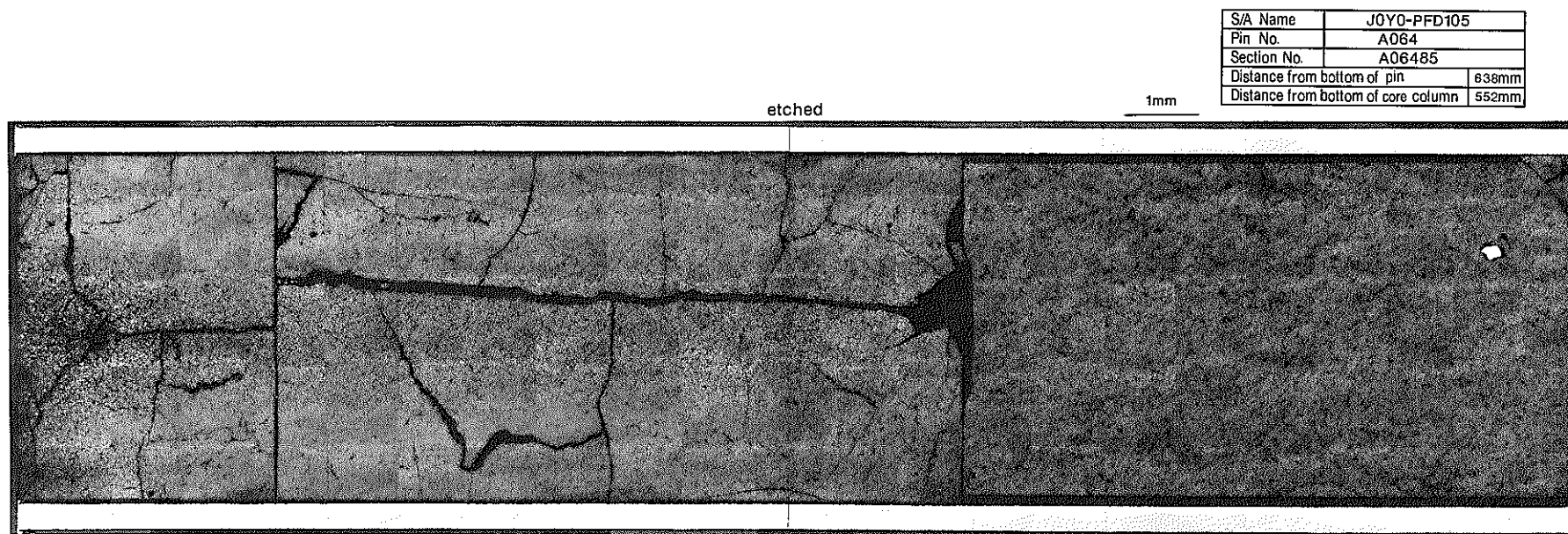
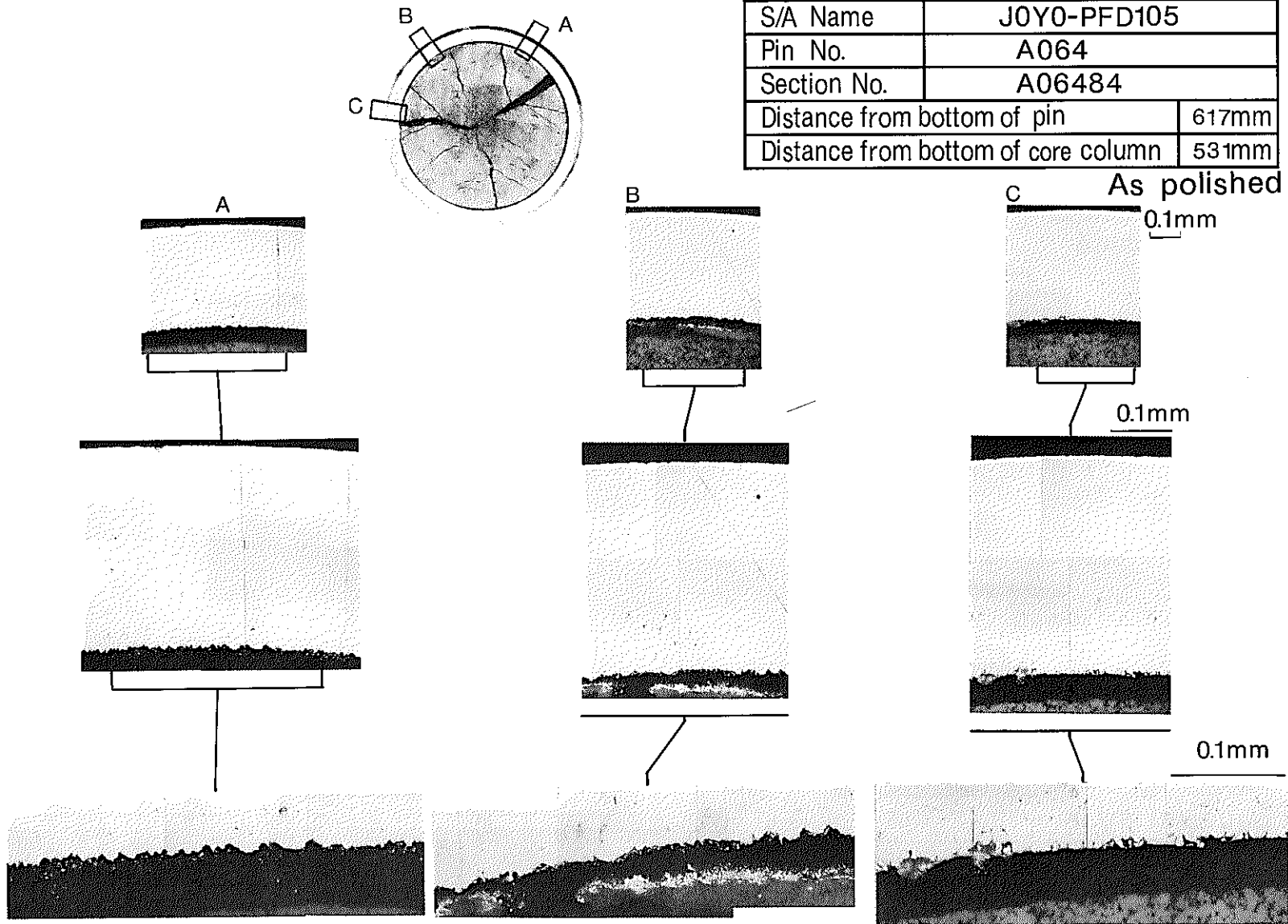


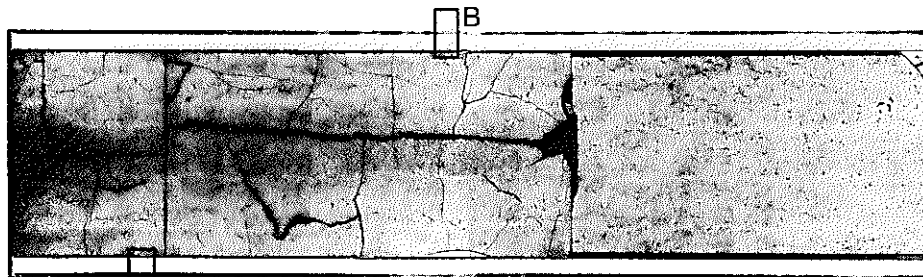
Photo. 8 Optical microstructures of the longitudinal section of the core fuel pin
(Specimen No. A06485) etched

S/A Name	JOY0-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06484	
Distance from bottom of pin		617mm
Distance from bottom of core column		531mm



- 36 -

Photo. 9 Fuel/cladding gap and FCCI of the core fuel pin (Specimen No. A06484) as polished



S/A Name	JOYO-PFD105	
Pin No.	A064	
Section No.	A06485	
Distance from bottom of pin	638mm	
Distance from bottom of core column	552mm	

As polished

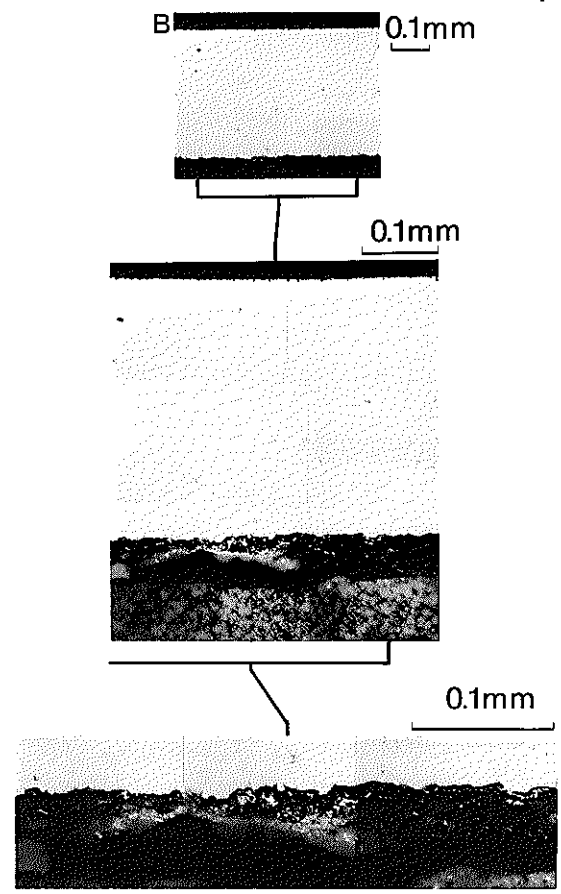
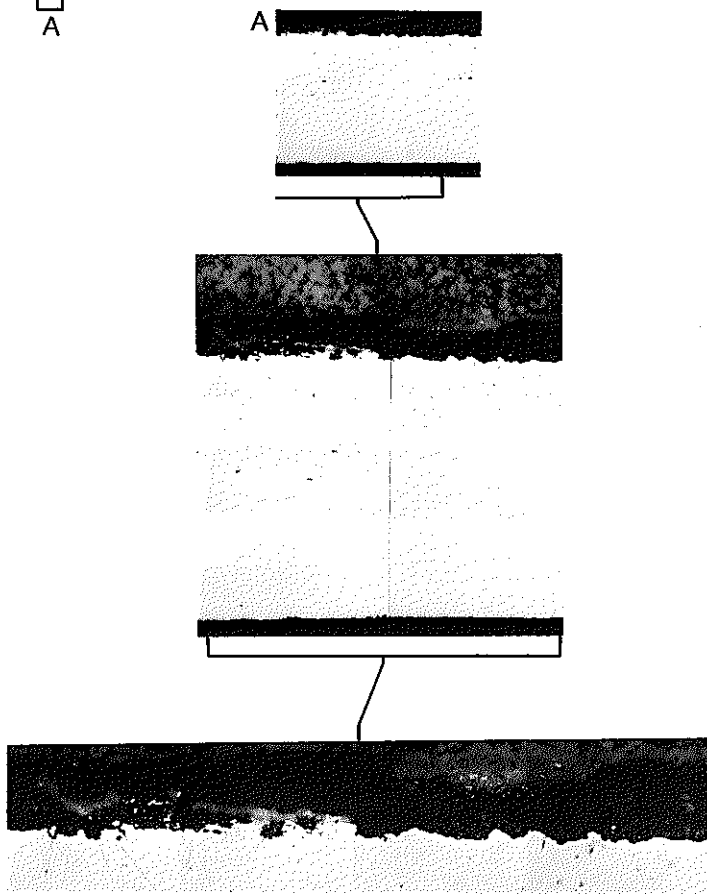
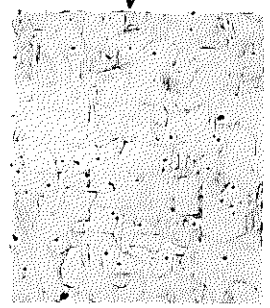
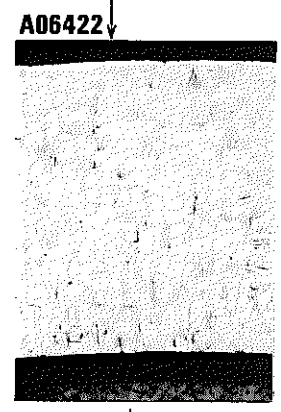
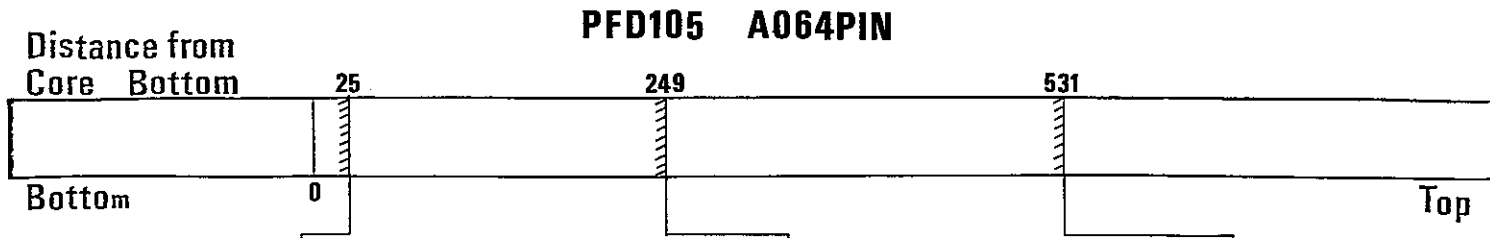


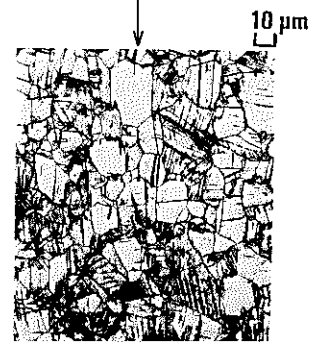
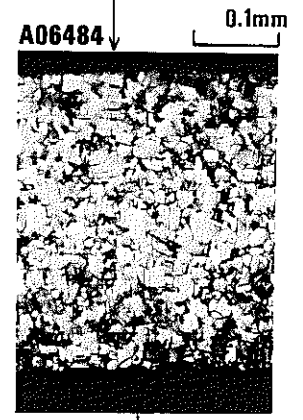
Photo. 10 Fuel/cladding gap and FCCI of the core fuel pin (Specimen No. A06485) as polished



Irrad Temp (°C) : 403
 Fluence (x10²²n/cm²): 4.4



Irrad Temp (°C) : 504
 Fluence (x10²²n/cm²): 7.7



Irrad Temp (°C) : 593
 Fluence (x10²²n/cm²): 3.9

Photo.11 Optical micrograph of fuel cladding
 (Specimen No. A06422, A06442, A6484)

3. 被覆管硬さ測定試験

Table 8 Measurement condition and indentation position

1) Measurement Condition

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

2) Indentation Position

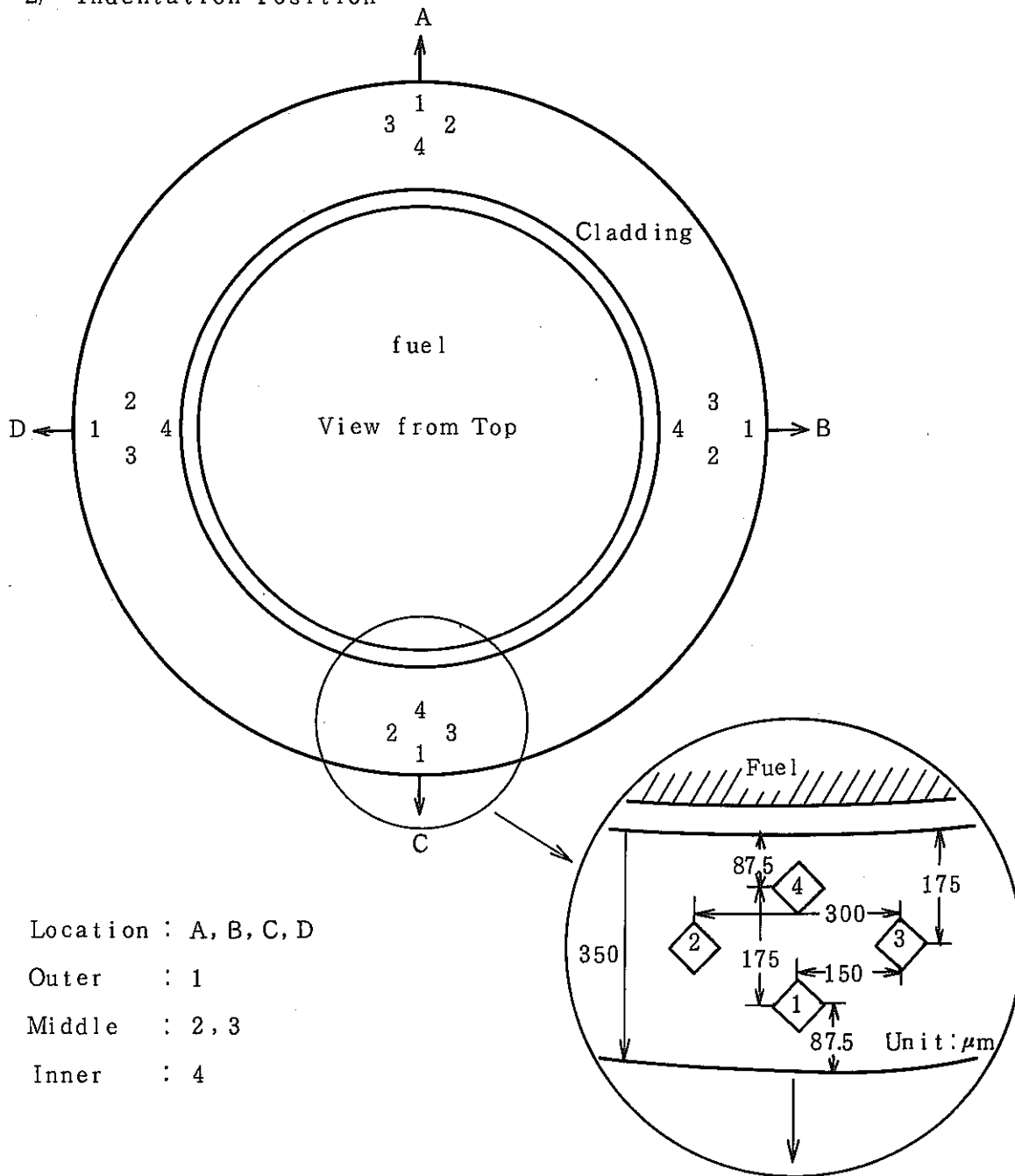


Table 9 Microhardness of PFD105 Cladding (A064 pin)

Pin No	A064		
Specimen No	A06422	A06442	A06484
D.F.C.B (mm)	25	249	531
Hardness Number Hv (0.5)	368	316	268
Δ Hv Hv (0.5)	+100	+ 48	0
$\frac{\Delta \text{Hv}}{\text{Hv (Unirradiated)}} \times 100(\%)$	+ 37	+ 18	0

Cladding LOT No	C556
Unirrad Hardness Hv(0.5)	268

Table 10 Cladding microhardness of JOYO MK-II PFD-105 (A064 pin)

S/A NAME	PFD-105		PIN No.	A064	
Specimen No.	A06422				
D.F.P.B.	111.4 (mm)		D.F.C.B.	25.4 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	355	377	364	358	364
B	364	364	355	373	364
C	368	378	375	374	374
D	373	358	380	371	370
RING AVERAGE	365	369	369	369	368

S/A NAME	PFD-105		PIN No.	A064	
Specimen No.	A06442				
D.F.P.B.	335.4 (mm)		D.F.C.B.	249.4 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	316	309	307	307	310
B	325	317	333	329	326
C	318	304	319	307	312
D	319	309	323	309	315
RING AVERAGE	320	310	320	313	316

S/A NAME	PFD-105		PIN No.	A064	
Specimen No.	A06484				
D.F.P.B.	617.2 (mm)		D.F.C.B.	531.2 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	269	257	270	275	268
B	262	245	277	263	262
C	263	289	258	267	269
D	265	281	272	271	272
RING AVERAGE	265	268	269	269	268

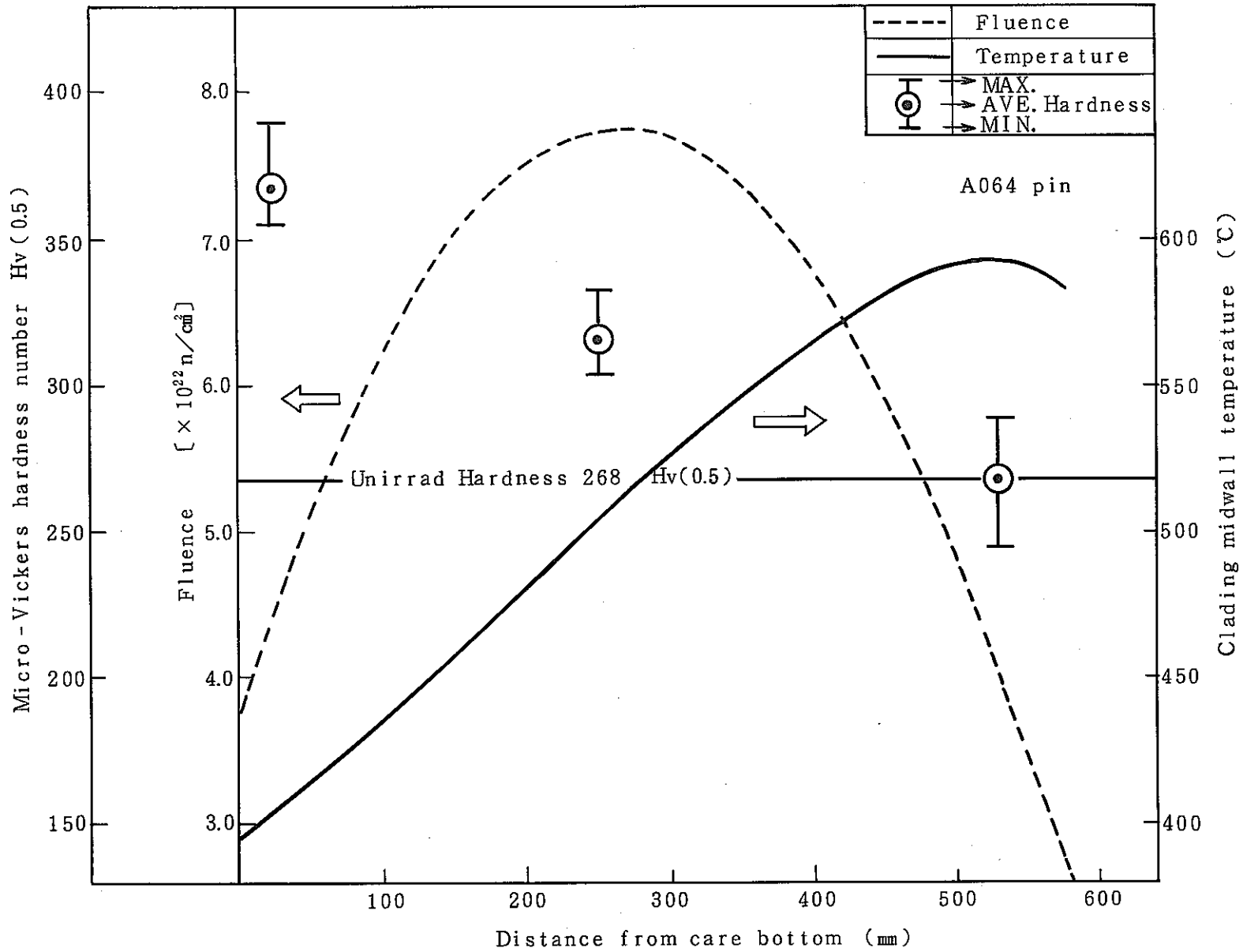


Fig.12 Variation of cladding hardness with fluence and cladding temperature (A064 pin)

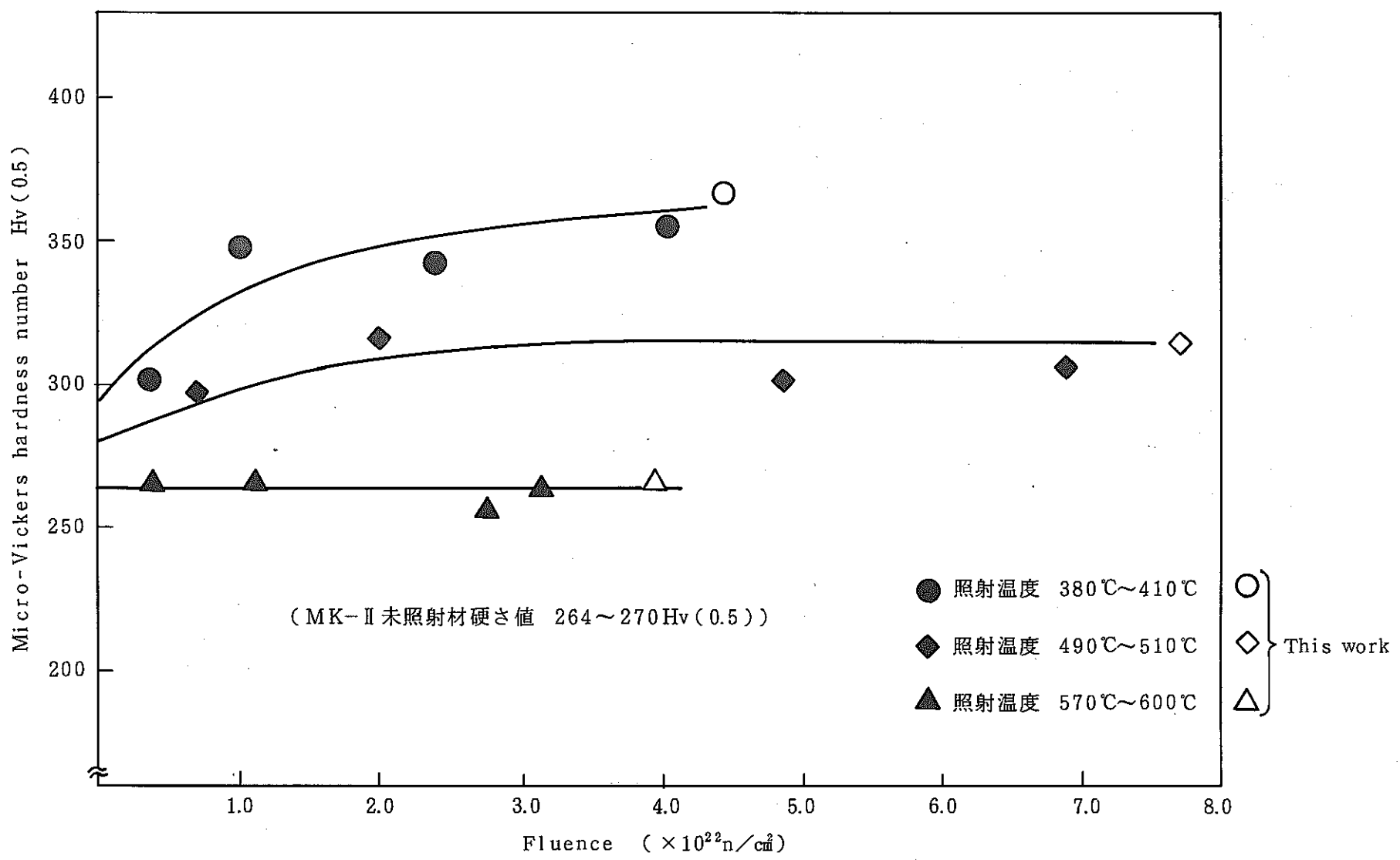


Fig.13 Effect of fluence on cladding hardness of JOYO MK-II driver fuel

4. 被覆管密度測定試験

Table 11 Summary of Density Measurement

Pin No.	Specimen No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Fast Fluence ($n/cm^2 \cdot 10^{22}$)	Clad. Temp. Midwall (°C)	Density (g/cc)	Density Change $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
A064	S556	—	—	—	7.953	Base
	A06444	340.5 - 364.5	7.7	505	7.958	-0.06
	A0646	486.5 - 510.5	6.5	565	7.955	-0.03
	A06482	576.0 - 600.9	4.6	588	7.948	0.06

S/A NAME PFD105

PIN NO. A064

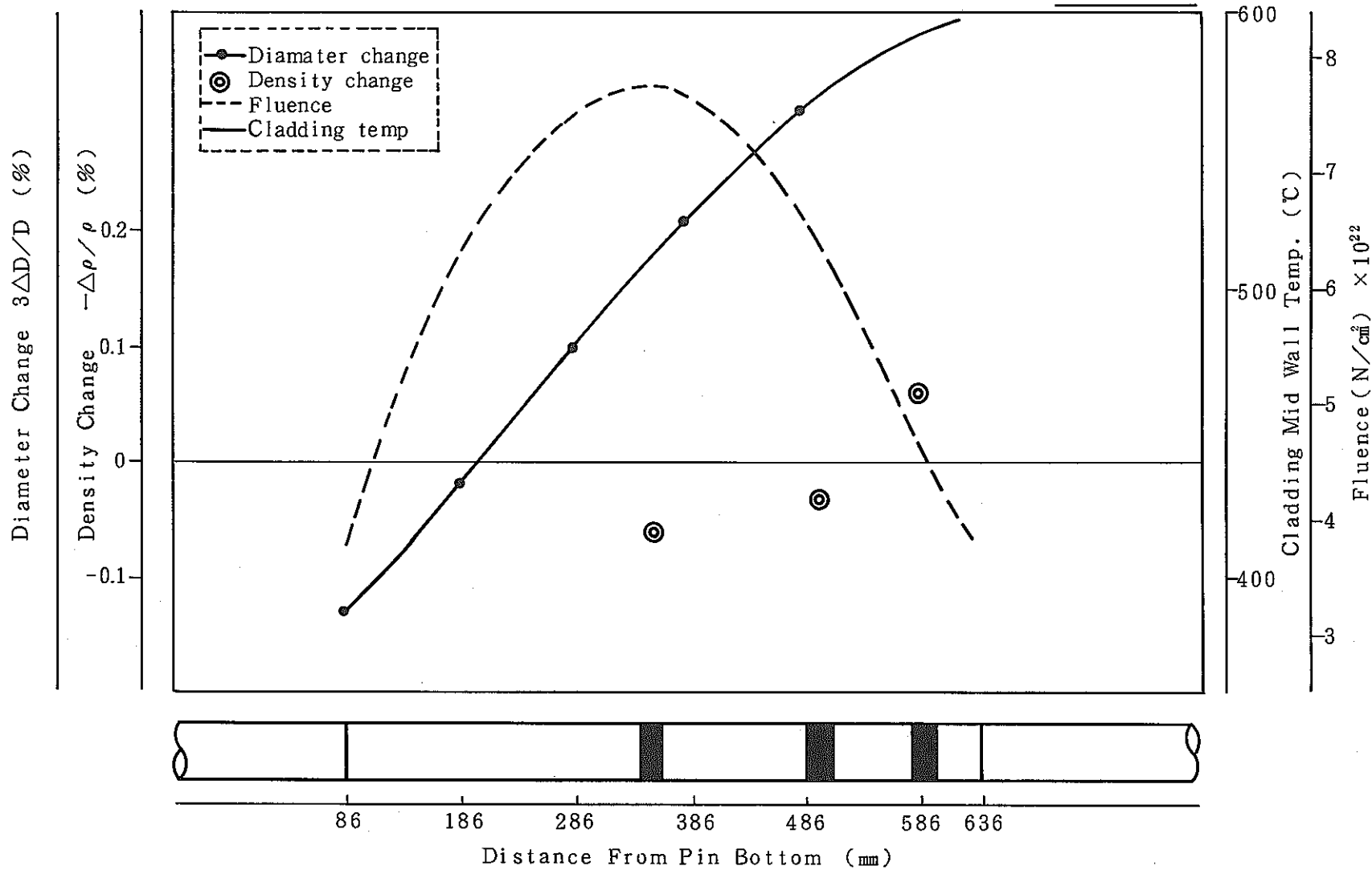


Fig.14 Cladding Density Change

5. 燃 燒 率 測 定 試 驗

Table 12 Summary of Burnup measurement by Nd-method

Pin No	Sample No	Distance from ¹⁾ core fuel bottom (mm)	Pu content ²⁾ (atom %)	Burnup (atom %)	
				Calculated ³⁾	Measured ⁴⁾
A058	A05823	250.5 ~ 255.9	27.479	6.441	6.36
A064	A06423	25.7 ~ 31.0	27.937	7.393	4.33
	A06443	249.7 ~ 254.2	27.172	6.328	6.22
	A06483	515.2 ~ 520.4	28.007	3.770	3.80
A070	A07022	248.8 ~ 254.0	27.561	6.019	5.99

- 1) DFCB = DFPB - 86 (mm)
- 2) $\text{Pu} / (\text{Pu} + \text{U}) \times 100$
- 3) Calculated by ESPRIT-J code
- 4) Measured by ^{148}Nd monitor method

Table 13 Calculation of effective fission yield for A06443
(example)

Nuclide	Composition (Atom Fraction)	Fission Cross Section (barn)	Nd-148		Nd-146		Nd-145	
			Fission Yield (%)	Fractional Fission Yield	Fission Yield (%)	Fractional Fission Yield	Fission Yield (%)	Fractional Fission Yield
U 233	nd	- ¹⁾	1.14 ²⁾	-	3.20 ²⁾	-	4.10 ²⁾	-
U 234	0.000828	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.08 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.076258	1.70E+00 ¹⁾	1.68 ³⁾	0.382	2.94 ³⁾	0.668	3.76 ⁴⁾	0.855
U 236	0.003300	1.59E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.002	3.06 ²⁾	0.003	3.77 ²⁾	0.003
U 238	0.647899	7.28E-02 ¹⁾	2.08 ³⁾	0.172	3.40 ³⁾	0.282	3.50 ²⁾	0.290
Pu 238	0.000422	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu 239	0.194020	1.74E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	0.981	2.46 ³⁾	1.463	3.01 ³⁾	1.790
Pu 240	0.066631	5.18E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.112	2.83 ²⁾	0.172	3.34 ²⁾	0.203
Pu 241	0.008131	2.20E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.061	3.01 ²⁾	0.095	3.52 ²⁾	0.111
Pu 242	0.002512	4.23E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.004	3.18 ²⁾	0.006	3.70 ²⁾	0.007
Effective Fission Yield (%)			1.71		2.69		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-8753

Table 14 Composition of spike solution and natural Neodymium

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

Table 15 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A05823 sample

S/A NO.<FAB> ; PFD105	PIN NO.<PIE> ; A058
SAMPLE NO. ; A05823	SAMPLE POSITION ; 250.5~255.9 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 15.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001275	0.117167	0.005279	-(a)	
0.977581	0.012477	0.116751	0.005247	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.003087	0.345054	0.042428	0.013019	-(a)	
0.003087	0.352980	0.042775	0.600343	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.004191	4.879677	3.891151	3.372973	2.828847	1.791363
0.042269	1.791700	1.451239	1.242151	1.056649	0.663738
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1135	10.4267	0.4698	88.9901		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.2199	71.2460	24.5837	3.0228	0.9276		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0236	27.4630	21.8995	18.9832	15.9208	10.0818	5.6280

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.479 / 27.618

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9679E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	2.2978E+18	3.6224E+18	4.3354E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.72E-02	2.69E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;</u>	1.3359E+20	1.3466E+20	1.3299E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	6.36	6.40	6.33
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/t)##</u>	57800	58200	57500

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 16 Result of isotope analysis and burnup calculation for
PFD105 A06423 sample

S/R NO.(FAB) ; PFD105	PIN NO.(PIE) ; A064
SAMPLE NO. ; A06423	SAMPLE POSITION ; 25.7~31.0 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 15.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001283	0.122864	0.004232	-(a)		
0.991551	0.012650	0.122433	0.004237	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.002477	0.334225	0.040984	0.012379	-(a)		
0.002477	0.341793	0.041308	0.586715	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.002439	4.963080	3.967696	3.419371	2.857238	1.805290	
0.050232	1.360397	1.114340	0.949562	0.808237	0.550505	
						-(a)
						-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1137	10.8885	0.3751	88.6227		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1782	71.9391	24.0438	2.9484	0.8905		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0135	27.5495	22.0243	18.9806	15.8602	10.0210	5.5509

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.937 / 28.077

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.9604E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	1.5169E+18	2.3833E+18	2.8826E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	8.8707E+19	8.8930E+19	8.8425E+19
<u>BURNUP (atom%)# ;</u>	4.33	4.34	4.32
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/t)## ;</u>	39400	39400	39200

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

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

1.1 atom% BU=10000 MWD/t BU

Table 17 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A06443 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD105	PIN NO.(PIE) ; A064
SAMPLE NO. ; A06443	SAMPLE POSITION ; 249.7~254.2 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 15.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001278	0.117700	0.005093	-(a)	
1.226552	0.015532	0.115530	0.005005	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002175	0.343426	0.041907	0.012947	-(a)	
0.002175	0.353234	0.042319	0.760523	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.002453	4.872606	3.893799	3.373798	2.819509	1.787062
0.051165	1.512271	1.231974	1.047001	0.895314	0.560871
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1137	10.4709	0.4531	88.9624		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1553	71.4054	24.5225	2.9924	0.9245		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0138	27.4525	21.9379	19.0081	15.8852	10.0684	5.6341

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.172 / 27.310

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.5598E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	1.7695E+18	2.7838E+18	3.3348E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.69E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	1.0348E+20	1.0349E+20	1.0230E+20
<u>BURNUP (atom%)# ;</u>	6.22	6.22	6.15
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)## ;</u>	56600	56600	56000

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 18 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A06483 sample

S/A NO.(FAB) ; PFD105	PIN NO.(PIE) ; A064
SAMPLE NO. ; A06483	SAMPLE POSITION ; 515.2~520.4 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 15.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001293	0.125580	0.003486	-(a)	
1.056855	0.013386	0.125081	0.003463	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002457	0.326443	0.039927	0.012102	-(a)	
0.002457	0.334430	0.040221	0.617301	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.006416	4.941556	3.920060	3.412189	2.830041	1.799416
0.052871	1.173890	0.959290	0.825927	0.699158	0.438973
					-(a)
					-(b)

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1144	11.1097	0.3084	88.4675		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1779	72.4150	23.6394	2.8913	0.8764		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0358	27.5915	21.8879	19.0522	15.8017	10.0472	5.5836

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 28.007 / 28.148

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.8435E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;	1.2452E+18	1.9445E+18	2.3805E+18
EFFECTIVE FISSION YIELD ;	1.71E-02	2.68E-02	3.26E-02
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;	7.2817E+19	7.2554E+19	7.3020E+19
BURNUP (atom%)#	3.80	3.79	3.81
SPECIFIC BURNUP (MWd/t)##	34500	34400	34600

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

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

1.1 atom% BU=10000 MWd/t BU

Table 19 Result of isotope analysis and burnup calculation for PFD105 A07022 sample

S/R NO.(FAB) ; PFD105	PIN NO.(PIE) ; A070
SAMPLE NO. ; A07022	SAMPLE POSITION ; 248.8~254.0 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 15.000

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

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001282	0.118445	0.005009	-(a)	
1.057905	0.013412	0.117892	0.004967	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.002868	0.342024	0.042019	0.012868	-(a)	
0.002868	0.350456	0.042308	0.643868	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	4.893184	3.898505	3.378632	2.826063	1.792241
0.047225	1.637066	1.326419	1.134371	0.954695	0.605199

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1140	10.5309	0.4453	88.9098		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.2049	71.4398	24.4341	3.0018	0.9193		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	27.5074	21.9157	18.9932	15.8869	10.0752	5.6216

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 27.561 / 27.700

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.0212E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	1.9848E+18	3.1259E+18	3.7592E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.69E-02	3.26E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	1.1607E+20	1.1620E+20	1.1531E+20
<u>BURNUP (atom%)# ;</u>	5.99	6.00	5.95
<u>SPECIFIC BURNUP (MWd/t)## ;</u>	54500	54500	54100

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

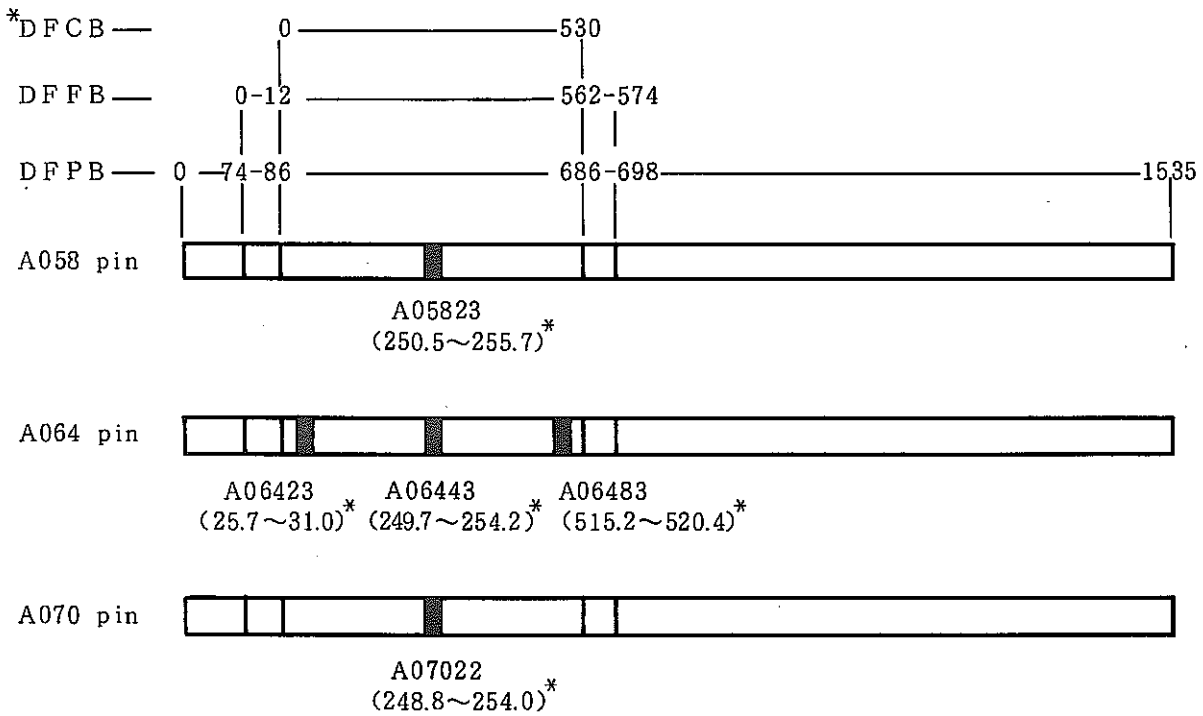
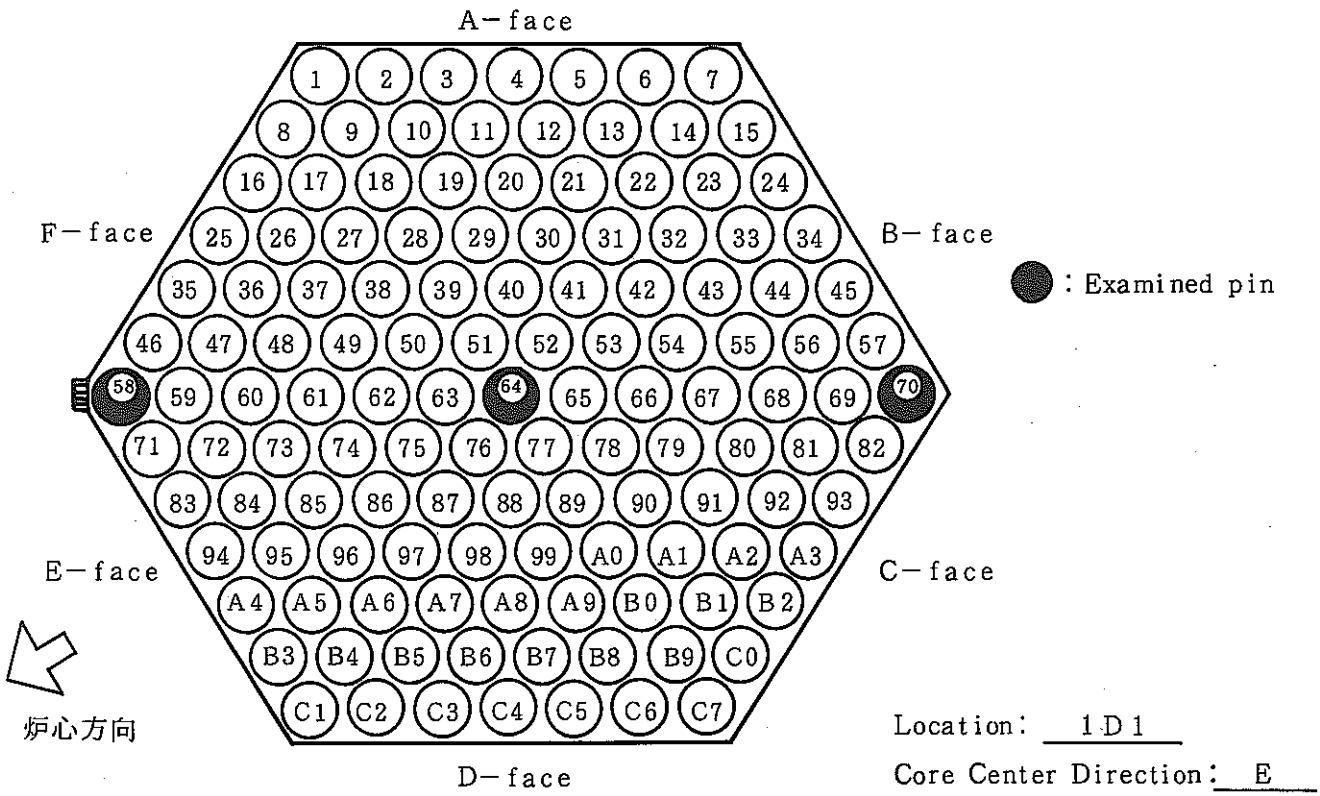


Fig.15 Cutting diagram of PFD105 subassembly fuel pins for burnup measurement

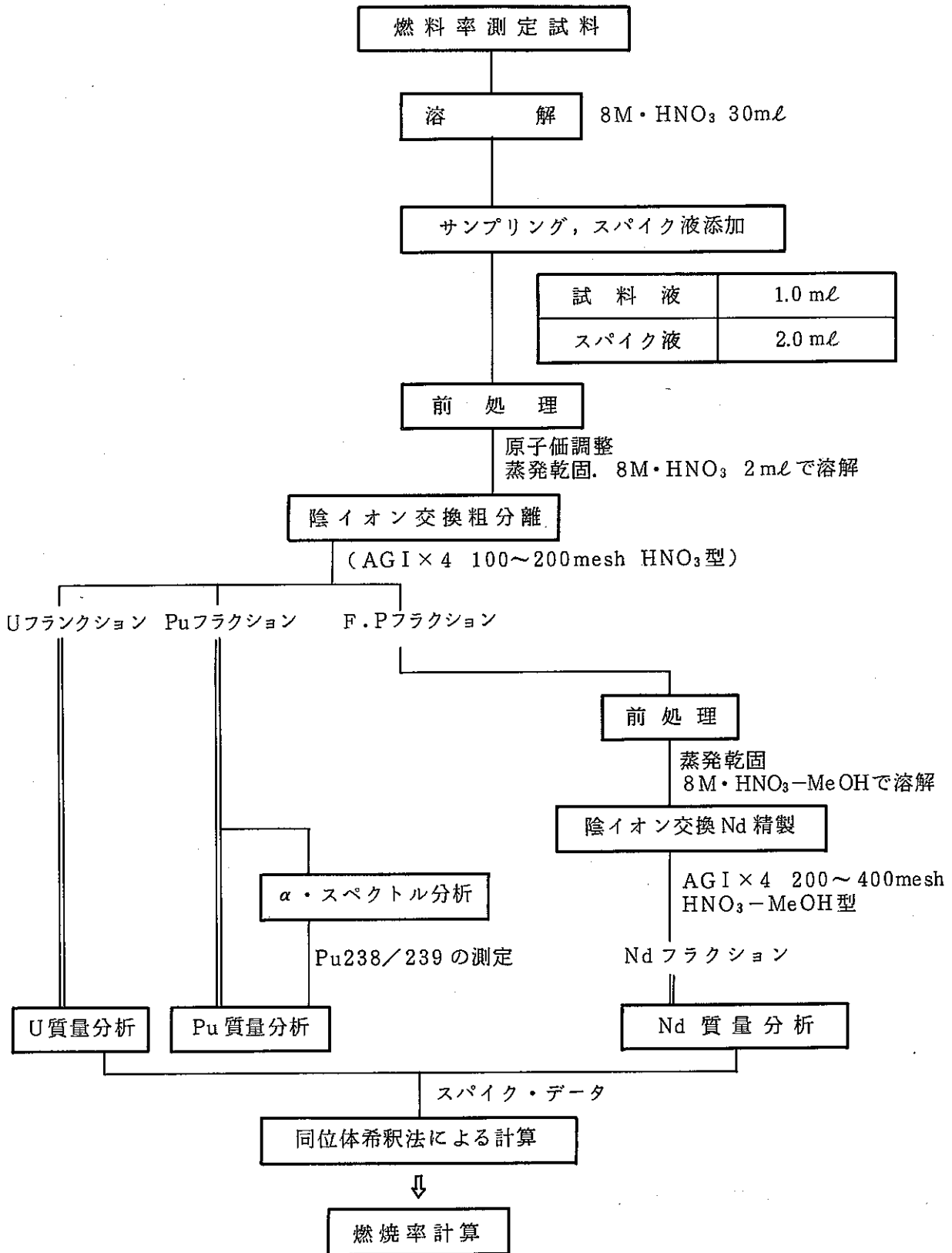


Fig.16 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

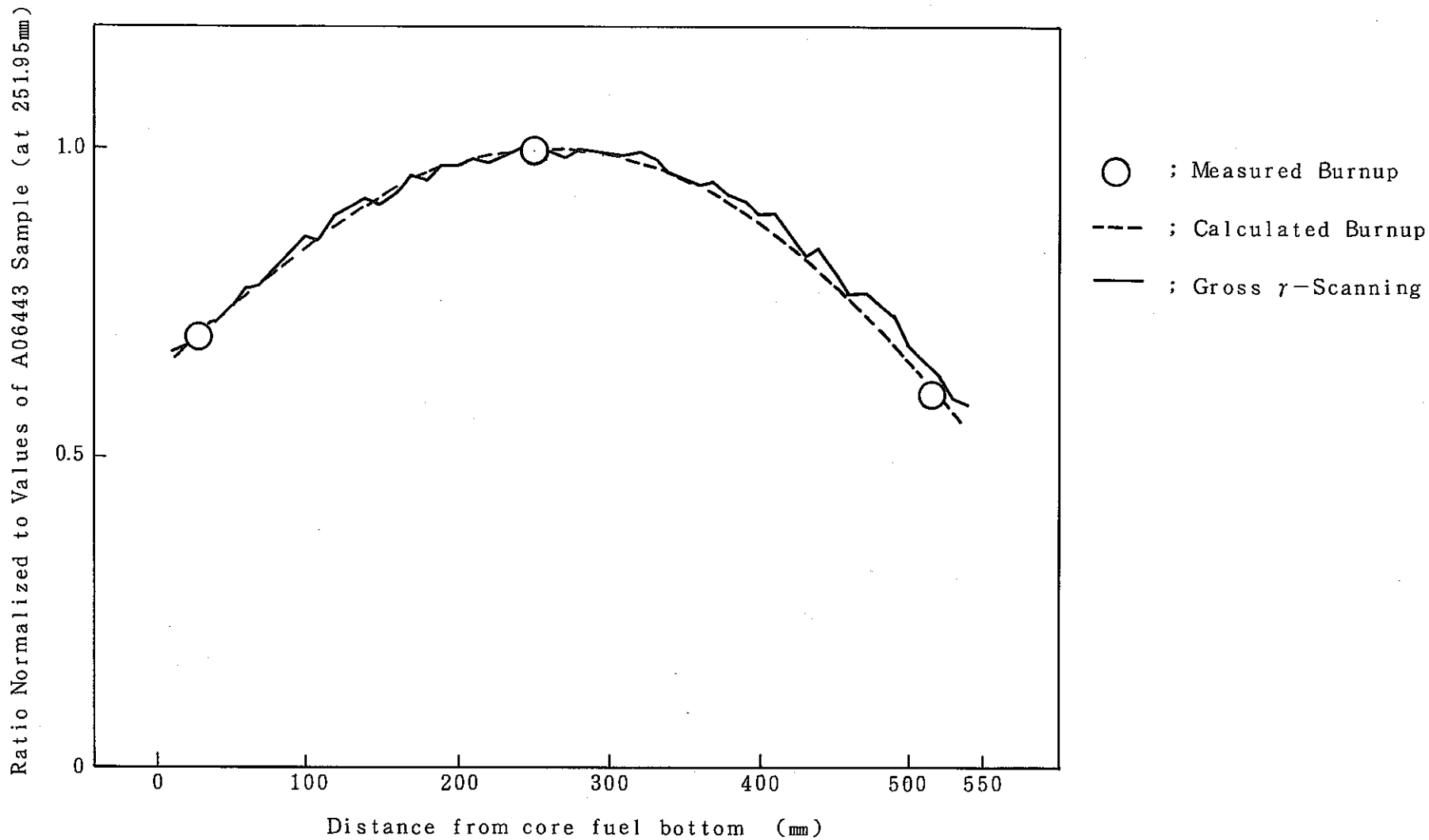


Fig.17 Burnup axial distribution of PFD105 (A064 Pin)

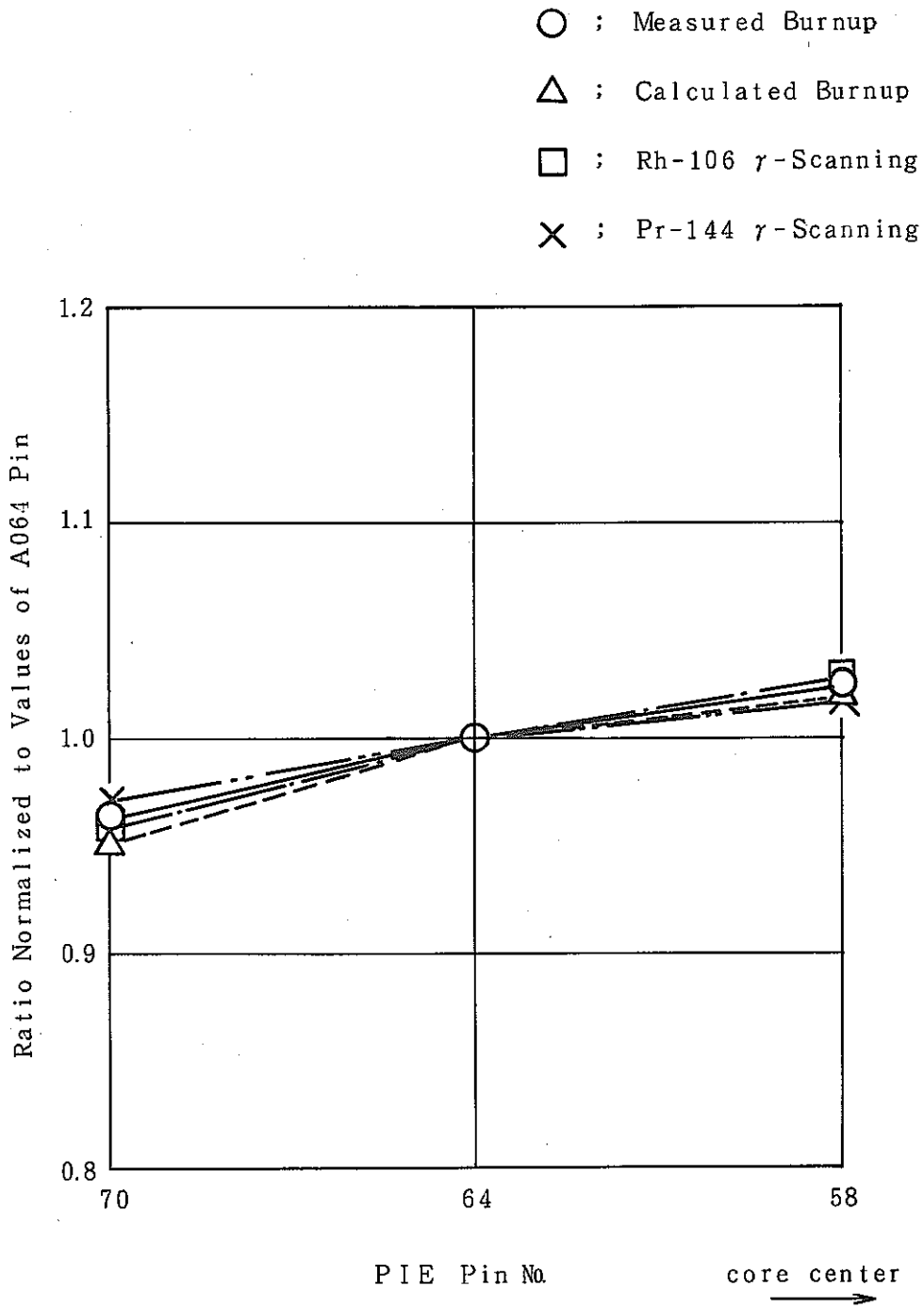


Fig.18 Brunup radial distribution of PFD105 subassembly

6. 融点測定試験

Table 20 Summary of Melting point measurement (PFD105)

Specimen No.	燃 烧 度 (MWD/t)	Pu 富 化 度 (w/o)	固相温度 (°C) (融 点)	液相温度 (°C)	O / M 比
A05824P	59,000	29 ± 1	2692 ± 13	2740 ± 12	1.986 ± 0.002

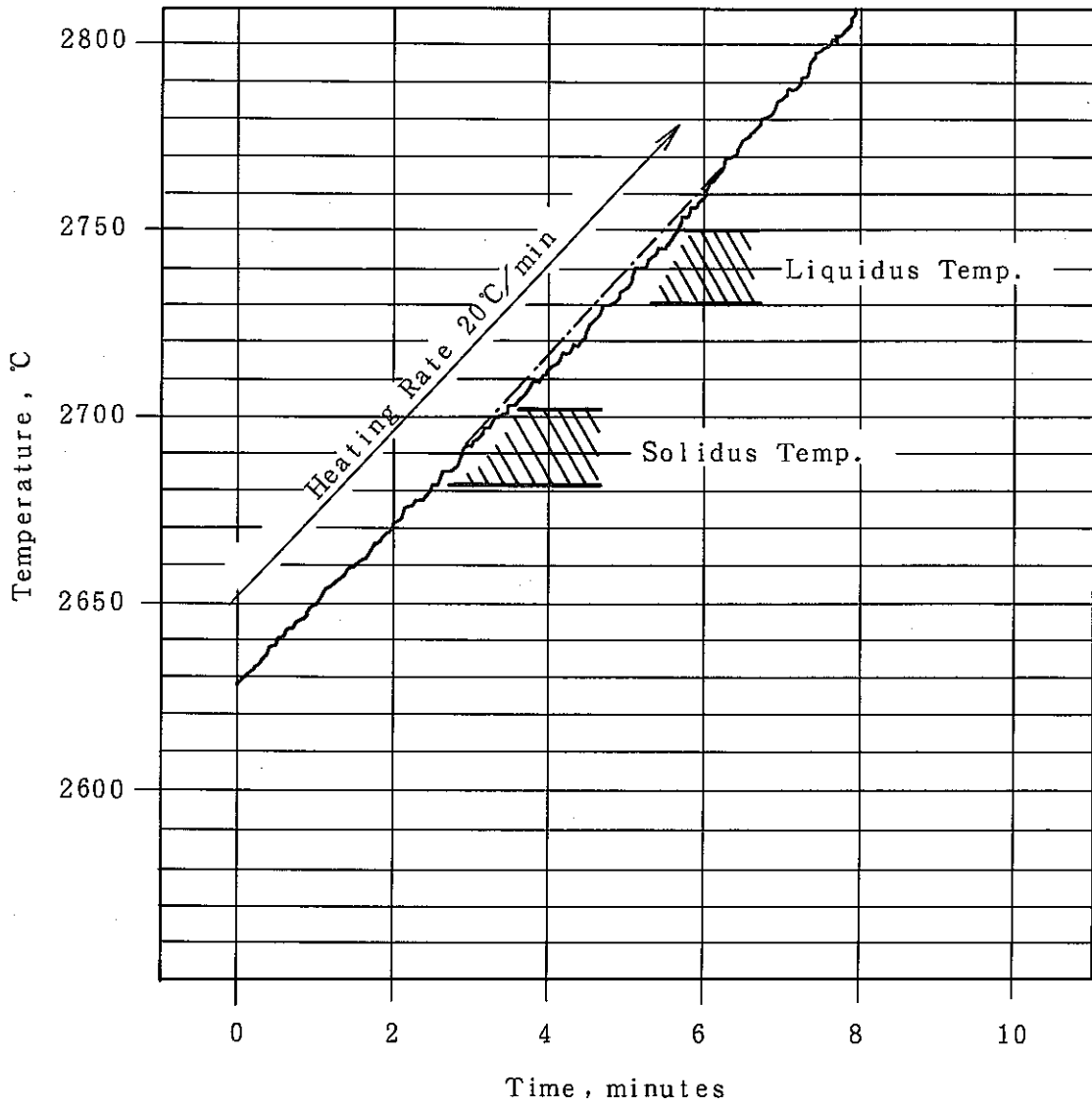
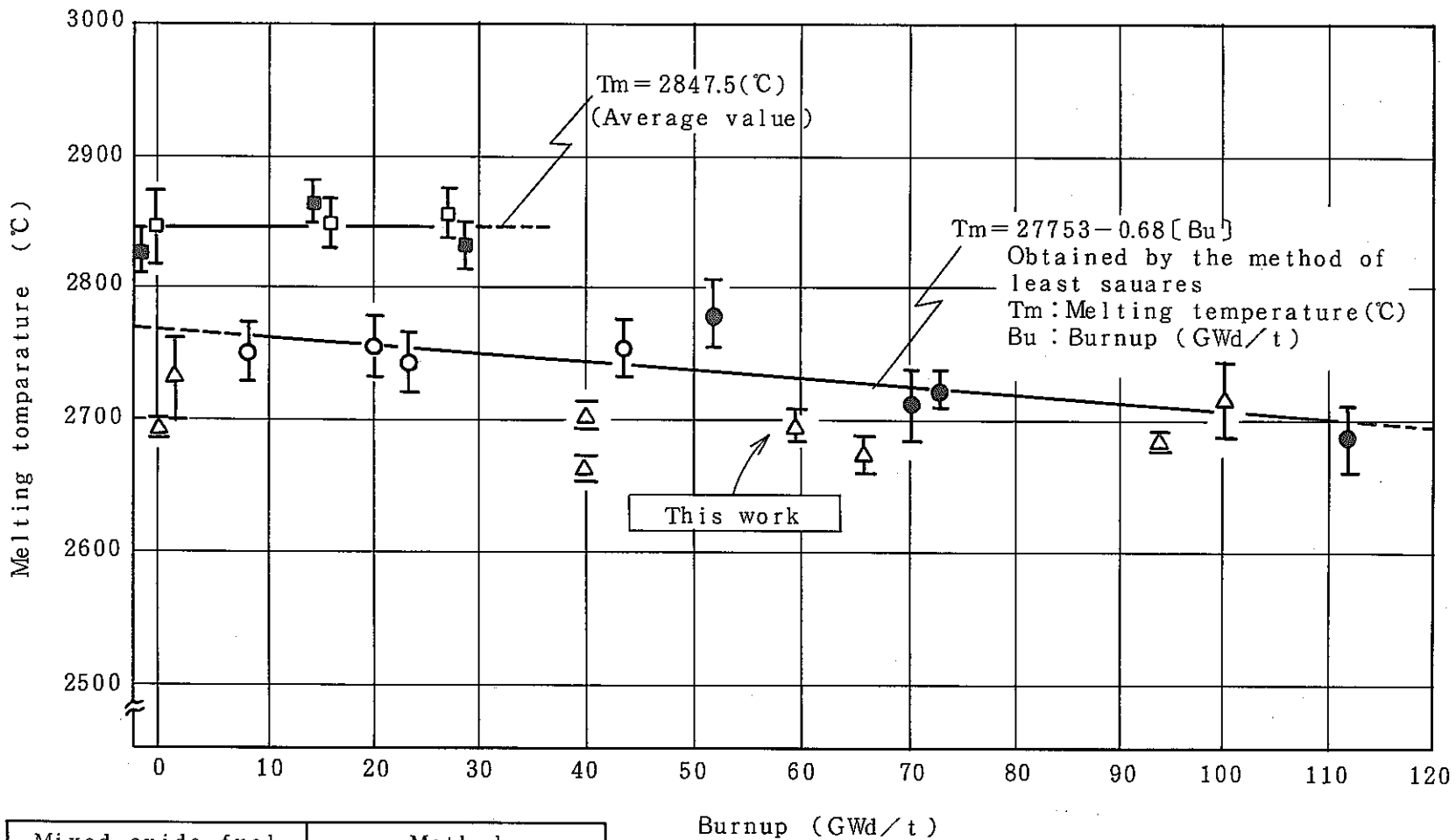


Fig.19 Heating curve of irradiated mixed-oxide fuel



Mixed oxide fuel	Method
□ UO ₂	Thermal arrest method using sealed tungsten capsule
▣ UO ₂ - 2wt% Gd ₂ O ₃	
○ UO ₂ - 18wt% PuO ₂	
● UO ₂ - 20wt% PuO ₂	
△ UO ₂ - 30wt% PuO ₂	

Fig.20 Melting temperature of Irradiated mixed oxide fuel with burnup