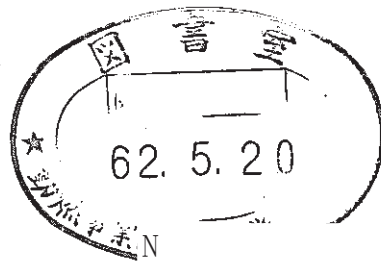


「常陽」MK-II炉心燃料(PFD001)の 照射後試験(2)

燃料要素の組織観察及び機器分析
(Vol.1 要約編)



1987年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 87-189 Vol.1
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

「常陽」MK-II炉心燃料(PFD001)の照射後試験(2)

燃料要素の組織観察及び機器分析

(Vol.1 要約編)

実施責任者 甲野 啓一 **

報告者 櫛田 尚也 * 鶴飼 重治 *

吽野 一郎 * 熊倉 忠夫 *

柴原 格 * 榎戸 裕二 *

要 旨

炉心燃料集合体 (Fab. No. PFD001) は、初装荷燃料集合体として「常陽」MK-II炉心中心に装荷され、100 MW 第3サイクルまで照射されたものであり、集合体平均燃焼度は、約31,300 MWD/MTMである。本試験では、燃料、被覆管の健全性並びに照射挙動を把握するため、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察、X線マイクロアナライザー (EPMA) による元素分析並びにイオンマイクロアナライザー (IMA) による質量分析を実施した。

本試験により得られた結果は、以下のとおりである。

- 1) 試料カラム軸方向中心部の、およそ86mm長さになわって直径0.56mmの中心空孔と柱状晶が観察された。燃料-被覆管ギャップ部には、Csが蓄積し被覆管成分の溶出が認められた。被覆管内面最大腐食量は、17 μ mであった。
- 2) EPMAによるU, Puの径方向濃度分布測定により、中心空孔を有するペレットでは、中心空孔端のPu濃度は製造時の30 wt%から34 wt%に増加していることが確認された。
- 3) EPMAによるペレット内に保持されているXe及びCsの径方向分布測定より、FPガスは、製造時領域ではほぼ一定に保持されているが、高密度化領域で急激に放出が開始していることが確認された。Csの径方向分布は、Xeとまったく同様であり、その放出機構はFPガスと類似していると考えられる。

* 大洗工学センター 燃料材料開発部、技術解析室

** 現・東海事業所 プルトニウム燃料部

- 4) IMAによるペレット径方向燃焼度分布の測定から、中心空孔を有するペレットでは、中心空孔端で燃焼度が増加していることが確認された。これは、Puの再分布に起因するものと推察された。
- 5) 被覆管外表面の性状については、450℃以下の低温部ではMn、Niの高濃度化した付着物が認められ、一方、500℃以上の高温部ではMn、Niの溶出が観察された。Siは炉心全域から、Crは570℃以上で溶出している。各合金元素が溶出している深さは表面から1.5μm以内の極く表面層に限られることがわかった。

目 次

1. ま え が き	1
2. 供 試 体	2
2.1 燃料ピンの仕様	2
2.2 被覆管の仕様	2
2.3 燃料の仕様	3
3. 照 射 履 歴	4
4. 試 験 方 法	5
4.1 試料調製	5
4.2 光学顕微鏡による観察	5
4.3 走査型電子顕微鏡による観察	6
4.4 X線マイクロアナライザーによる元素分析	6
4.5 イオンマイクロアナライザーによる質量分析	6
5. 結 果 と 考 察	8
5.1 光顕による燃料組織観察	8
5.2 EPMA, IMAによる燃料内元素分析	8
5.2.1 ウラン, プルトニウムの再分析	8
5.2.2 金属状FPの析出	9
5.2.3 Xe, Csのペレット径方向分布の測定	9
5.2.4 燃料-被覆管ギャップ部の元素分析	9
5.3 IMAによるペレット内径方向の燃焼度分布の測定	10
5.4 被覆管外表面の観察及び定量元素分析	10
6. 試 験 結 果 の ま と め	12
7. 謝 辞	13

8. 参 考 文 献 14

LIST OF TABLE

	Page
Table 1 Irradiation Condition of PFD001 Subassembly during Zero and Three cycle of "JOYO" MK - II	15
Table 2 Summary Data from Ceramography (Fab. No.PFD001)	16

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Specification of MK-II Core Fuel Pin	17
Fig. 2 Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab. No.PFD001) in "JOYO" MK-II	18
Fig. 3 Location of the Fuel Pin (Pin No.8152) in the Driver Fuel Subassembly	19
Fig. 4 Axial Profile of the Fluence and Cladding Temperature of 8152 Pin	20
Fig. 5 Axial Profile of the He Linear Heat Rate of 8152 Pin	21
Fig. 6 Axial Profile of Burnup of 8152 Pin	22
Fig. 7 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin	23
Fig. 8 Axial Profile of the Gap & Fuel Structure	24
Fig. 9 Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by EPMA	25
Fig.10 Radial Distribution of Mo, Ru, Rh, Pd and Tc Content in Metallic Inclusion (Specimen No.815244)	26
Fig.11 Relative Radial Profiles of Retained Xe, Cs Measured by EPMA	27
Fig.12 Relative Radial Distribution of Retained Xe and Cs Isotopes Measured by IMA	29
Fig.13 Axial Distribution of Measured Burnup of PFD001	30
Fig.14 Radial Burnup Distribution Measured by the IMA	31
Fig.15 Composition Change of Cladding Constituents as a Function of Distance from Core Bottom and Cladding Outer Temperature	32

Fig.16 Results of Line Analyses Across the Transverse Section
Sample (No.815284) 33

Fig.17 Depth Analysis of Cladding Outer Surface by IMA
(Pin No.8152) 35

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo.1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen
Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No.8152) 37

Photo.2 Optical Micrograph of the Transverse Section of
the Axial Midplane of the Pin No.8152 39

Photo.3 Optical Microstructures of the Core Fuel at the
Axial Midplane of the Pin No.8152 41

Photo.4 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the
Fuel (Specimen No.815244) 43

Photo.5 Various X-ray Images of the Gap Part between the
Core Fuel and Cladding (Specimen No.815285) 45

Photo.6 Secondary Electron Micrographs of the Core Fuel
Cladding Outer Surface (Pin No.8152) 47

1. ま え が き

高速実験炉「常陽」は、1981年12月に増殖炉心MK-Iの定格運転を終了し、1982年1月から照射用炉心MK-IIへの移行作業を行い、1983年11月に、MK-II炉心は臨界に達した。

MK-II炉心での燃料集合体の認可燃焼度は、50,000 MWD/MTMでありこの燃焼度に達するまでの初装荷燃料の健全性評価のための照射後試験が実施されている。本炉心燃料集合体PFD001は、PFD010、PFD003に続く3体目の試験であり、「常陽」炉心装荷位置、000(炉心中心)において、100MW、0サイクルから第3サイクルの間照射され、集合体平均燃焼度は、約31,300 MWD/MTMの照射履歴を有するものである。照射燃料集合体試験施設(FMF)において各種非破壊検査が実施された後、集合体内の1本のピンから金相試験用と被覆管外表面分析用試料を採取した。金相試料に供した燃料の中心最高温度は約2190°C、被覆管最高温度は、約610°Cと推定される。

本試験では、「常陽」MK-II炉心で100MW第3サイクルまで照射された集合体内の燃料、被覆管の健全性並びに照射挙動を把握するため、光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、X線マイクロアナライザーによる元素分析並びにイオンマイクロアナライザーによる質量分析を実施した。本報告書は、AES全相セルにおいて実施した上記試験結果の要約を記したもので、詳細データについては、Vol.2に集録した。

2. 供 試 体

2.1 燃料ピンの仕様

燃料ピンの仕様は以下のとおりであり、その概略図をFig. 1に示す。

項 目	
全 長 (mm)	1533±2
ペレットスタック長 (mm)	550±5
被 覆 管 外 径 (mm)	5.500±0.030
“ 内 径 (mm)	4.800±0.025
“ 肉 厚 (mm)	0.35±0.030
ギ ャ ッ プ 幅 (μm)	170
ワイヤー巻付ピッチ (mm)	209±15

2.2 被覆管の仕様

被覆管の製造仕様及び試験に供した被覆管の熱処理条件並びに化学成分値を示す。

	LOT NO.	HEAT TEMP (°C)	TREATMENT TIME(MIN)	COLD WORK (%)	CHEMICAL COMPOSITION(W/O)							
					C	Si	Mn	P	S	Ni	CR	Mo
SPEC.	-			20	0.064 } 0.035	<0.75	2.00 } 1.50	0.035 } 0.015	<0.010	14.00 } 13.00	18.00 } 16.00	3.00 } 2.00
KOBE STEEL	K001	1070	0.5	20	0.048	0.35	1.73	0.026	0.006	13.52	17.43	2.17

CHEMICAL COMPOSITION (W/O)									
Co	B	N	CU	Ti	V	NB+TA	AS	AL	O
<0.10	0.0030 } 0.0005	<0.010	<0.20	<0.100	<0.20	<0.050	<0.030	0.050	-
0.04	0.0028	0.005	0.02	0.006	0.04	0.010	0.004	0.031	0.0008

2.3 燃料の仕様

炉心ペレット及びインシュレータペレットの仕様は以下のとおりである。

	項 目	
炉 心 ペ レ ッ ト	PuO ₂ /PuO ₂ +UO ₂ (wt%)	30±1
	O/M	1.96
	外 径 (mm)	4.64
	高 さ (mm)	9±1
	Pu 同位体組成 (²³⁹ Pu + ²⁴¹ Pu)/Pu	0.782
	²³⁵ U濃縮度 (wt%)	12.0
	理論密度 (g/cm ³)	11.07
	相対密度 (%T・D)	93.8
イ ン シ レ ー タ ペ レ ッ ト	外 径 (mm)	4.60±0.05
	高 さ (mm)	12
	²³⁵ U濃縮度 (wt%)	0.2
	理論密度 (g/cm ³)	10.96
	相対密度 (%T・D)	94
	スタック長 (mm)	550±5

3. 照射履歴

炉心燃料集合体 (Fab. No. PFD001) は、「常陽」MK-II炉心中心「000」において100MW 0サイクルから第3サイクルの間照射され、集合体平均燃焼度は、31,300 MWD/MTMである。集合体の炉心装荷位置を Fig. 2 に示す。

本集合体は、炉内貯蔵ラック「R-6」に43日間 (S 59年6月30日～8月11日) 冷却保管された後炉外に取り出され、同年10月26日にキャスクでFMFに搬入された。

金相試験及び被覆管外表面分析に供した燃料ピンは、Pin No. 8152 (K材) である。本燃料ピンの集合体内位置を Fig. 3 に示す。本集合体の照射条件を Table. 1 に示す。また、試験に供した Pin No. 8152 ピンの被覆管温度と中性子束の軸方向分布、線出力の軸方向分布及び燃焼度の軸方向分布をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 に示す。

4. 試験方法

4.1 試料調製

炉心燃料ピンPin No. 8152 は、照射燃料集合体試験室（FMF）において、Fig. 7 に示すとおり炉心燃料下部から48mm、中心部から43mm、中間から28mm、上端部からインシュレータペレットを含む56mm、最上部（ガスプレナム部）から45mm、の長さの試験片（5ヶ）に切断された。

金相セルでは、各試験片からケロシンを潤滑剤として、ダイヤモンドホイールカッターを用いて被覆管外表面観察試料を切断採取した。また、金相断面試料は、前処理として真空容器内でエポキシ樹脂を注入し、ギャップやクラック内に樹脂を十分浸透させ燃料を固定した後切断採取した。切断採取した試料は、さらにエポキシ樹脂によりステンレス製埋込みリング（外径21mm ϕ \times 10mm H）に埋め込んだ後、ステンレスホルダー（外径32mm ϕ \times 20mm H）内にネジ止めした。

研磨は、自動回転研磨機を使用し、ケロシンを滴下しながら耐水研磨紙による粗研磨後、仕上げとしてラッピングオイルを潤滑剤としてダイヤモンドペーストによる研磨を行った。研磨の完了した試料は、キシレンを用い超音波洗浄した後、十分乾燥させ、As-Polished状態による観察並びに分析を行った。燃料及び被覆管のエッチングは、イオン腐食装置を使用し、その後Etched状態の組織観察を行った。なおX線微小分析及び質量分析を行うための試料導電処理は、イオン腐食装置を用いて、C、Auコーティングにより行った。Photo. 1 に金相断面試料の光顕マクロ写真及び観察位置を示す。

4.2 光学顕微鏡による観察

組織観察は、低倍率光学顕微鏡（ROM）を用いて12.5倍のAs-Polished状態のマクロ観察を行った。その後高倍率光学顕微鏡（FAROM）による65倍全体コンポーズ写真撮影、130倍帯状コンポーズ写真撮影、さらに径方向8ヶ所の520倍コンポーズ及び帯状コンポーズの写真撮影をAs-Polished、As-Etched状態において各々行った。

燃料横断面写真は、タブレットデジタイザーを用いた「燃料ピン輪切写真解析コードPINATED」により画像解析を実施した。

画像解析項目は、次項の通りである。

- (1) 中心空孔の直径、面積、中心位置
- (2) 燃料ペレットの直径、面積
- (3) 被覆管の内径、外径、肉厚

- (4) ペレット内クラックの数, 面積, パターン
- (5) 柱状晶, F・Pガスバブル, 高密度化等各領域の内外直径及び面積

4.3 走査型電子顕微鏡による観察

燃料ピン被覆管外表面の性状を日本電子社製の遮蔽型走査電子顕微鏡 (JSM-50A)により観察した。観察条件は, 下記のとおりである。

- 加速電圧 : 25 Kv
- プローブ電流 : $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-10}$ A
- 観察像 : 二次電子線像 (SEI)
- 写真倍率 : $\times 240 \sim \times 8,000$

4.4 X線マイクロアナライザーによる元素分析

燃料内の核分裂生成物, ウラン, プルトニウム, 被覆管構成元素等につき, 定性分析, 面分析, 線分析, 半定量分析等を実施した。分析に使用した装置は, マテリアル・アナリシス社製遮蔽型X線マイクロアナライザー (MAC-450型) である。

分析条件は, 下記の通りである。

- 加速電圧 : 25 Kv
- 試料吸収電流 : $0.07 \mu\text{A} \sim 0.15 \mu\text{A}$ (Xeの検出時は約 $1 \mu\text{A}$ とした)
- 波長可変範囲 : $1.400 \text{ \AA} \sim 3800 \text{ \AA}$
- 使用分光結晶 : LIF (No. 3 分光器), PET (No. 2 分光器)
- 試料駆動速度 : $40 \mu\text{m}/\text{MIN}$
- チャート速度 : $1/2 \text{ inch}/\text{MIN}$

4.5 イオンマイクロアナライザー (IMA) による質量分析

遮蔽型イオンマイクロアナライザー (HITACHI IMA-2RI型) を用いて, 質量分析を実施した。測定内容は①金相断面試料のF・P分布, 燃焼率測定, ②被覆管外表面の各成分元素の深さ方向濃度分布である。

測定条件を次項に示す。

測定内容 条件	燃料半径方向の線分析	燃料内深さ方向の 測定(燃焼率測定)	ピン表面深さ方 向の測定	面 分 析 (ギャップ部)
使 用 ガ ス	O ₂	O ₂	O ₂	N ₂
一次イオン加速電圧	15 kv	15 kv	15 kv	15 kv
一次イオンスポット径	150 μm φ	1 mm φ	1 mm φ	500 μm φ
二次イオン加速電圧	3 kv	3 kv	3 kv	3 kv
質量測定範囲	1~280 M/Z	1~280 M/Z	1~200 M/Z	1~280 M/Z
カソード電極	SUS	SUS	SUS	Ni
深さ方向測定回数	1回 (半径方向 16 点)	10回	50回	—

5. 結果と考察

5.1 顕微鏡による燃料組織観察結果

Photo. 1 に示すとおり、燃料ピン軸方向中心部（試料No. 815244）に最大約 0.56 mm ϕ の中心空孔が観察され、それに接する下側の縦割試料（試料No. 815243）において、中心空孔の下端が認められた。そこで、中心空孔は、軸方向に対称であるとする Photo. 1 に示した写真から中心空孔の存在位置は、燃料カラム下端から 232 mm ~ 318 mm の約 86 mm であると推定される。

中心空孔の観察された試料断面金相写真を Photo. 2 に、その高倍スリット写真を Photo. 3 に示す。燃料組織は、中心部から中心空孔、柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域、及び最外周部の製造時領域から構成されている。このうちガスバブル領域と高密度化領域は、等軸晶領域に相当する。ペレット外周部のくさび形のクラックは、炉の起動時に入ったクラックであるが、これがペレット中心部ではヒーリングにより消失し、外周部ではペレットの焼きしまりによる体積増加のため広がったものと考えられる。中心空孔の大きさは、直径約 0.56 mm ϕ で PFD003 の 0.43 mm ϕ より成長している。柱状晶の長短軸比は、PFD003 の 33:1 に対し、本試料では、6.9:1 であり約 2 倍細長くなっている。なお PFD003 と PFD001 のこれらの試料位置の局所燃料度はそれぞれ 15,800 MWD/MTM 及び 38,000 MWD/MTM である。

各断面金相写真をタブレットディジタイザを用いて解析することにより得られたギャップ幅、燃料組織変化各領域、ペレット外径及び被覆管内・外径測定値を Table. 2 に示す。また Fig. 8 に、これらの燃料カラム軸方向分布を示す。軸方向中心部で中心空孔、柱状晶が形成され、またガスバブル領域、高密度化領域もペレット外側に広がっていることがわかる。

一方、ギャップ幅は、ペレットのスエリングにより軸方向中心部で狭くなっている。軸方向中心部の径方向残留ギャップ幅（Cold 状態）は、約 28 μm であり炉内においてもペレットと被覆管の強固な接触は生じていなかったと推察される。燃料カラム軸方向上部の試料 No. 815262, 815282 においては、被覆管内面に全面腐食が認められ、最大内面腐食量は 17 μm であった。

5.2 EPMA, IMA による燃料内元素分析

5.2.1 ウラン・プルトニウムの再分布

中心空孔、柱状晶が形成されている軸方向中心部の試料（No. 815243）と、炉心下端からの距離が 422 mm の中心部がガスバブル領域である試料（No. 815262）について、ペレット径方向の U, Pu 定量線分析を実施した。測定は、EPMA を用いて径方向 19 点につき、各々の位置で U,

Puの特性X線を10秒間計数することにより、U、Pu強度の径方向分布を求めた。測定結果をFig. 9に示す。軸方向中心部の試料については、柱状晶領域内で中心空孔に近づくに従いPu強度が増加し、U強度は低下していることがわかる。Pu濃度は、製造時の30wt%から中心空孔のエッジでおよそ34wt%に増加していることがわかった。一方、中心空孔、柱状晶が形成されていない試料(No. 815262)では、U、Puの強度が径方向で、ほぼ一定で再分布が生じていないことがわかる。

5.2.2 金属状FPの析出

金属状FP析出物には、2種類認められており、1つはペレット外周部のクラックに沿って存在するPdを主成分とする析出物で、そのX線像をPhoto. 4に示す。他の1つは、ペレット中心部から高密度化領域にかけて存在する10 μm ϕ 以下の球状の析出物でその組成をペレット径方向位置に対して測定した結果をFig. 10に示す。主成分は、Mo、Ruから成る合金で、その他、Tc、Rh、Pdが含まれていることがわかる。

5.2.3 Xe、Csのペレット径方向分布の測定

EPMAを用いて、燃料組織変化に対応したペレット径方向の保持XeとCsの分布を測定した結果をFig. 11に示す。

Xeは、不変領域においてペレット内にほぼ均一に保持されているが、高密度化領域では、急激に強度が低下し、ペレットから放出していることがわかる。ガスバブル領域及び柱状晶領域では、検出限界以下であった。これらの結果は、すでに報告したPFD003⁽¹⁾やPPJX13(MK-I燃料)⁽²⁾と同様である。また、Csの径方向分布は、Xeときわめて良く類似しているが、ただペレット最外周部で強度が増加している点が異なっている。これは、燃料-被覆管ギャップ中に存在しているCsと燃料の反応生成物によるものと考えられる。

次にIMAを用いてペレット内に保持されているXeとCsのうち安定同位体の強度を測定した結果をFig. 12に示す。Xeについては、燃料中を移動しないNd-145の強度で規格化した値である。これをみると核分裂収率の大きいXe-134、136は、やはり高密度化領域で急激に強度が低下していることがわかる。また、Csについては、Cs-133、135、137が同程度の強度で測定されており、特にギャップ部とペレット不変領域で強度が高くなっていることがわかる。IMAは、EPMAに比べ検出感度が高いため、柱状晶領域においても、Xe同位体、Cs同位体の検出が可能である。

5.2.4 燃料・被覆管ギャップ部の元素分析

被覆管内面温度が最も高い炉心燃料カラム上端部の試料(No. 815285)のギャップ部のEPMA

による面分析結果を Photo. 5 に示す。Fe, Ni, Cr, Mn の被覆管構成元素は、ペレット外表面に移行し、ギャップ中には、Cs, U が存在していることがわかる。被覆管内面腐食は、炉心燃料カラム上部の試料 (No. 815262, 815282, 815285) において認められ、その形態は、一部剥離を伴う全面腐食であり最大の肉厚減少量は、 $17\ \mu\text{m}$ であった。

5.3 IMAによるペレット内径方向の燃焼度分布の測定

IMAを用いて、各試料の燃焼度を測定した結果を、燃料カラム軸方向位置に対してプロットした関係を Fig. 13 に示す。また、一次イオンビームを $150\ \mu\text{m}$ 径に絞り、 $100\ \mu\text{m}$ ステップ幅で試料ステージを移動することにより求めた燃料カラム中心部試料 (No. 815244) の径方向燃焼度分布測定結果を Fig. 14 に示す。図中には、10回のスパッタリングに伴う測定精度範囲も示してある。Fig. 14 において柱状晶領域内で、中心空孔に近づくに従い燃焼度が増加しており、この分布は、Fig. 9 に示した EMPA 分析結果の Pu 分布とよく類似している。EPMAによる測定では、中心部の Pu 濃度が 30 wt% から 34 wt% に増加し、U 濃度は 70 wt% から 66 wt% に減少している。これに伴う中心部の核分裂密度は、外周部に比べ約 5.8% 増加することになる。従って、Fig. 13 に示した中心部での燃焼度の増加分は、Pu の再分布が原因しているものと考えられる。

5.4 被覆管外表面の観察及び定量分析

1) SEMによる観察

Photo. 6 に被覆管外表面の走査型電子顕微鏡写真を示す。約 $400\ ^\circ\text{C}$ 以下の低温部では、K 材特有の製造時加工跡 (母材) が観察され、その表面には約 $1\ \mu\text{m}$ ϕ 程度の微粒子が多数付着している。 $450\ ^\circ\text{C}$ 付近の中温部において微粒子はほとんど観察されず、表面には製造時加工跡 (ピン周方向のミゾ) が見られる。約 $500\ ^\circ\text{C}$ 以上の高温部では、母材の表面荒れが著しく製造時加工跡は見られなく、腐食、溶出により発生した溝状の部分と $1\ \mu\text{m}$ ϕ 程度のピットが、多数観察される。

2) EPMA及びIMAによる被覆管外表面定量分析結果

燃料部軸方向各位置から採取した被覆管外表面試料につき、EPMAによる定量分析を実施した。Fig. 15 に炉心下端からの位置に対して、各元素の表面組成を製造時組成からの増減 (wt%) でプロットした関係を示す。炉心中心から下側の低温部で認められた微粒子は、Mn, Ni が高濃度化したものであり、母材でも若干 Mn, Ni 濃度が高くなっていることがわかる。炉心中心の中温部では、組成の変化は少ない。一方、炉心中心から上側の高温部では、逆に Mn, Ni が溶出し、低濃度化していることがわかる。炉心上端では、Cr の溶出も認められ

る。また、Siは炉心全域から溶出している。

次に、被覆管表面温度が最も高い試料（No. 815284）につき、被覆管の横断面試料を作製し、表面から5 μ mの深さまでの定量線分析を行った。その結果をFig.16に示す。一方、IMAにより被覆管外表面からスパッタを繰り返すことにより、深さ方向の各元素の定量分析を行った結果をFig.17に示す。これらの結果から、Ni, Mn, Crの溶出が生じている領域は表面から約1.5 μ mの範囲の極く表面層に限られていることがわかる。

6. 試験結果のまとめ

本試験により以下の結果が得られた。

- 1) 試料カラム軸方向中心部の、およそ86mm長さにわたって直径0.56mmの中心空孔と柱状晶が観察された。燃料-被覆管ギャップ部には、Csが蓄積し被覆管成分の溶出が認められた。被覆管内面最大腐食量は、17 μ mであった。
- 2) EPMAによるU, Puの径方向濃度分布測定より、中心空孔を有するペレットでは、中心空孔端のPu濃度は製造時の30 wt%から34 wt%に増加していることが確認された。
- 3) EPMAによるペレット内に保持されているXe及びCsの径方向分布測定より、FPガスは、製造時領域ではほぼ一定に保持されているが、高密度化領域で急激に放出が開始していることが確認された。Csの径方向分布は、Xeとまったく同様であり、その放出機構はFPガスと類似していると考えられる。
- 4) IMAによるペレット径方向燃焼度分布の測定から、中心空孔を有するペレットでは、中心空孔端で燃焼度が増加していることが確認された。これは、Puの再分布に起因するものと推察された。
- 5) 被覆管外表面の性状については、450 $^{\circ}$ C以下の低温部ではMn, Niの高濃度化した付着物が認められ、一方、500 $^{\circ}$ C以上の高温部ではMn, Niの溶出が観察された。Siは炉心全域から、Crは570 $^{\circ}$ C以上で溶出している。各合金元素が溶出している深さは表面から1.5 μ m以内の極く表面層に限られることがわかった。

7. 謝 辞

燃料集合体からの試料の採取などの準備作業にあたり，照射燃料集合体試験室（FMS）の田地室長をはじめとする関係室員に，また放射線管理に当っては安全管理部放射線管理課平野亨係長をはじめとする係員に御支援いただいた。また試験遂行に際しては，日本放射線エンジニアリング(株)の林幸雄氏並びに原子力技術(株)の大里行弘，額賀貞芳の両氏に御支援いただきましたことを付記し，これらの方々に感謝の意を表わします。

8 参考文献

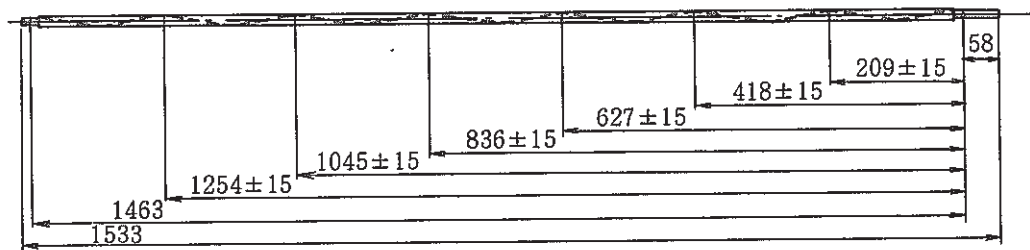
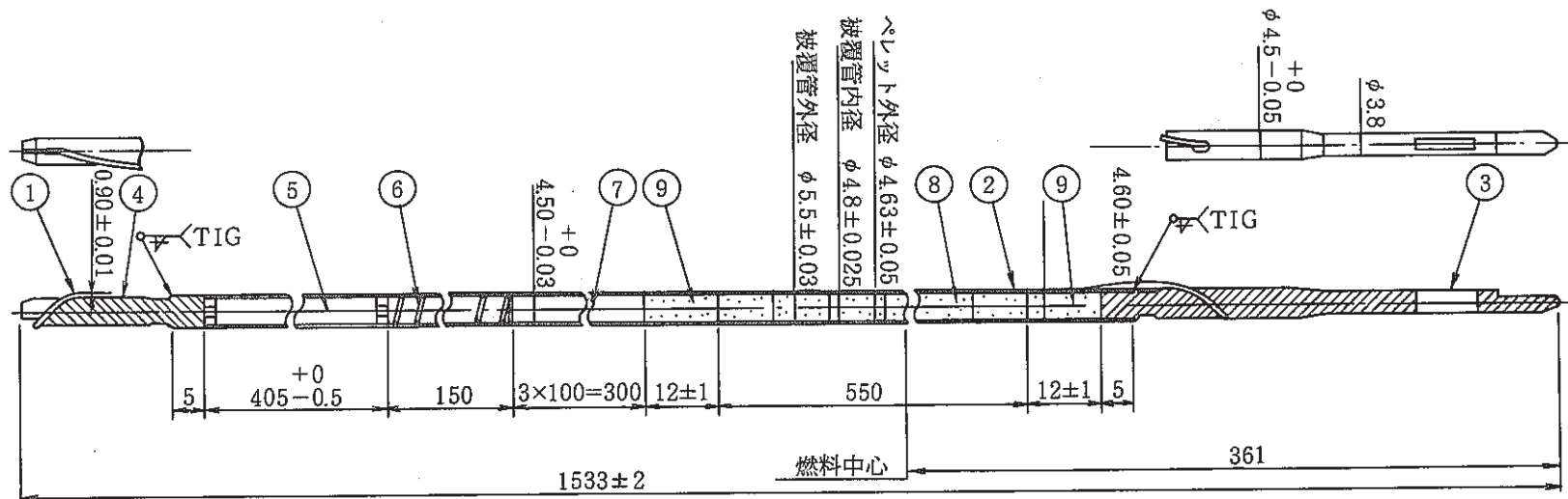
- (1) 杉山ら, 「常陽」MK-II炉心燃料(PFD003)照射後試験(2)(燃料要素の組織観察及び機器分析) PNC 1941 85-05 Vol.1 and Vol.2
- (2) 鵜飼ら, 照射燃料中の保持Xe濃度の測定とFPガス放出挙動の評価. PNC SN941 85-141

Table.1 Irradiation Condition of PFD001 Subassembly during Zero and Three Cycle of "JOYO" MK-II

サイクル			0	1	2	3	
装荷位置			000				
燃 焼 度	ポイント最大	MWD/T	6300	16600	27200	37300	
	集合体平均	MWD/T	5300	13900	22800	31300	
積算中性子 照射量	En ≥ 0.1MeV	ポイント最大	$\times 10^{20} \text{ n/cm}^2$	77.8	213	354	492
		集合体平均	$\times 10^{20} \text{ n/cm}^2$	64.2	175	290	402
	Total	ポイント最大	$\times 10^{20} \text{ n/cm}^2$	111	300	496	690
		集合体平均	$\times 10^{20} \text{ n/cm}^2$	93.2	249	411	572
線 出 力	B O C	ポイント最大	W/cm	349	376	363	359
		集合体平均	W/cm	292	309	301	300
	E O C	ポイント最大	W/cm	346	368	355	351
		集合体平均	W/cm	291	306	297	295
被覆管最高温度	B O C		°C	601	608	605	604
	E O C		°C	601	606	602	602
燃料最高温度	B O C		°C	2076	2191	2139	2120
	E O C		°C	2065	2159	2102	2083
集合体出口温度	B O C		°C	551	555	553	552
	E O C		°C	550	553	551	550
キープ係数	B O C	径 方 向	——	1.009	1.012	1.009	1.010
		軸 方 向	——	1.184	1.202	1.195	1.187
	E O C	径 方 向	——	1.009	1.011	1.009	1.010
		軸 方 向	——	1.180	1.193	1.186	1.176
冷却材流量	B O C		kg/sec	8.9	9.2	9.1	9.1
	E O C		kg/sec	8.9	9.2	9.1	9.1
備 考							

Table. 2 Summary Data from Ceramography (Fab. No. PFD001)

Specimen No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Clad Dia. (mm)		Fuel outer Dia. (mm)	Restructured Region Dia. (mm)						Residual Dia. Gap size (μm)
		Outer	Inner		Central Void	Coluamna Region	Gas Bable Region	Densified Region	Dark Region Inner Outer		
815226	114.8	5.508	4.816	4.731	0	0	2.654	3.487	0	0	85
815244	336.8	5.506	4.810	4.755	0.561	2.415	3.182	3.807	0	0	55
815262	508.0	5.506	4.820	4.743	0	0	2.827	3.494	0	0	77
815282	607.5	5.506	4.817	4.715	0	0	2.489	3.559	0	0	102



ワイラッピング全体図

9	インシュレーダペレット	劣化 UO ₂	2	
8	炉心ペレット	PuO ₂ UO ₂		
7	上部反射体	SUS 316相当	3	
6	プレナムスプリング	SUS 304 WPB	1	
5	抑工板付プレナムスリーブ	SUS 304 WPB	1	
4	上部端栓	SUS 316	1	
3	下部端栓	SUS 316	1	
2	被覆管	SUS 316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS 316相当	1	
品番	品名	材質	個数	備考
名称	炉心燃料集合体燃料要素			

Fig. 1 Specification of MK-II Core Fuel Pin

炉内照射位置

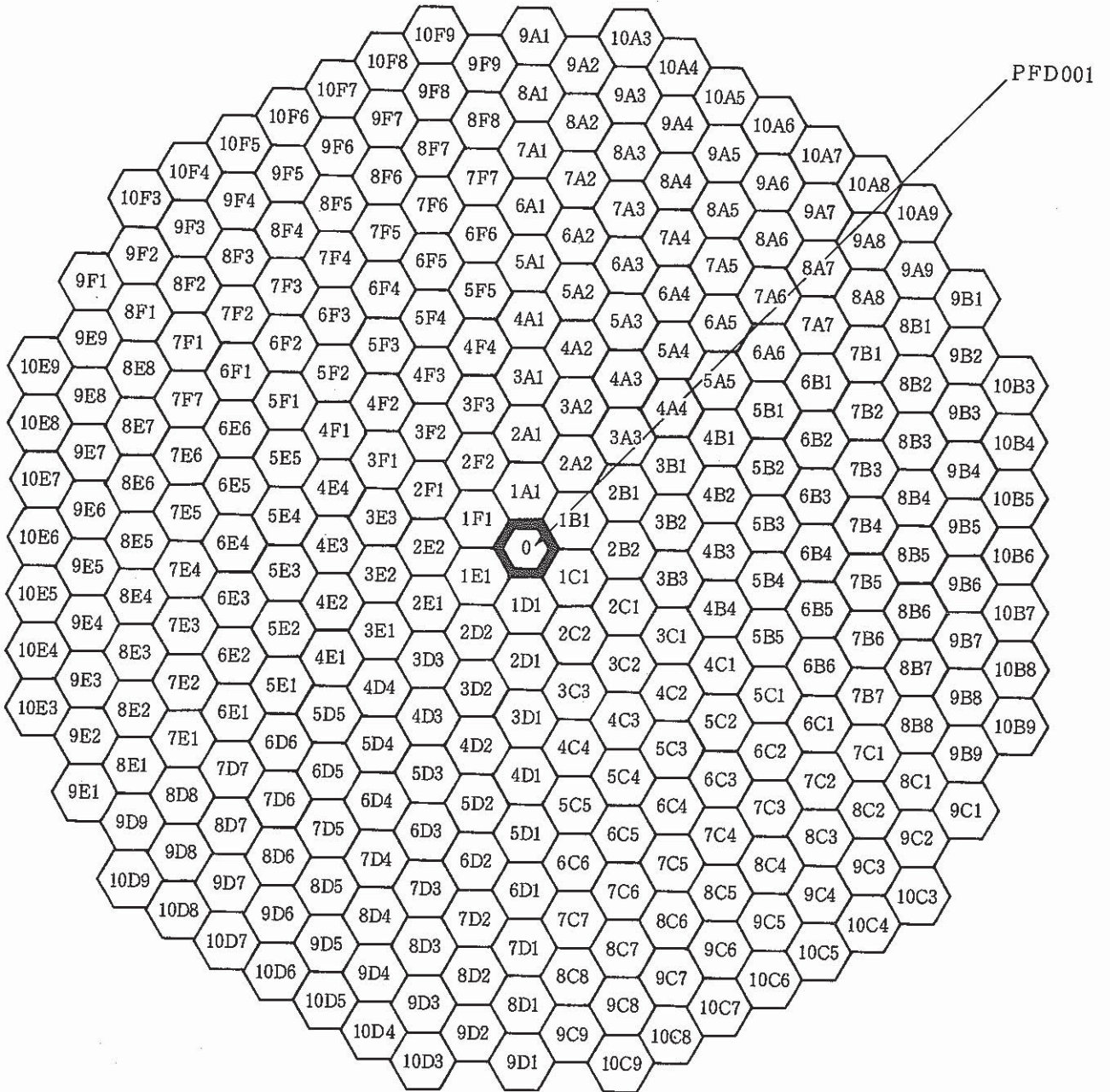


Fig. 2 Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab. No. PFD001) in "JOYO" MK-II

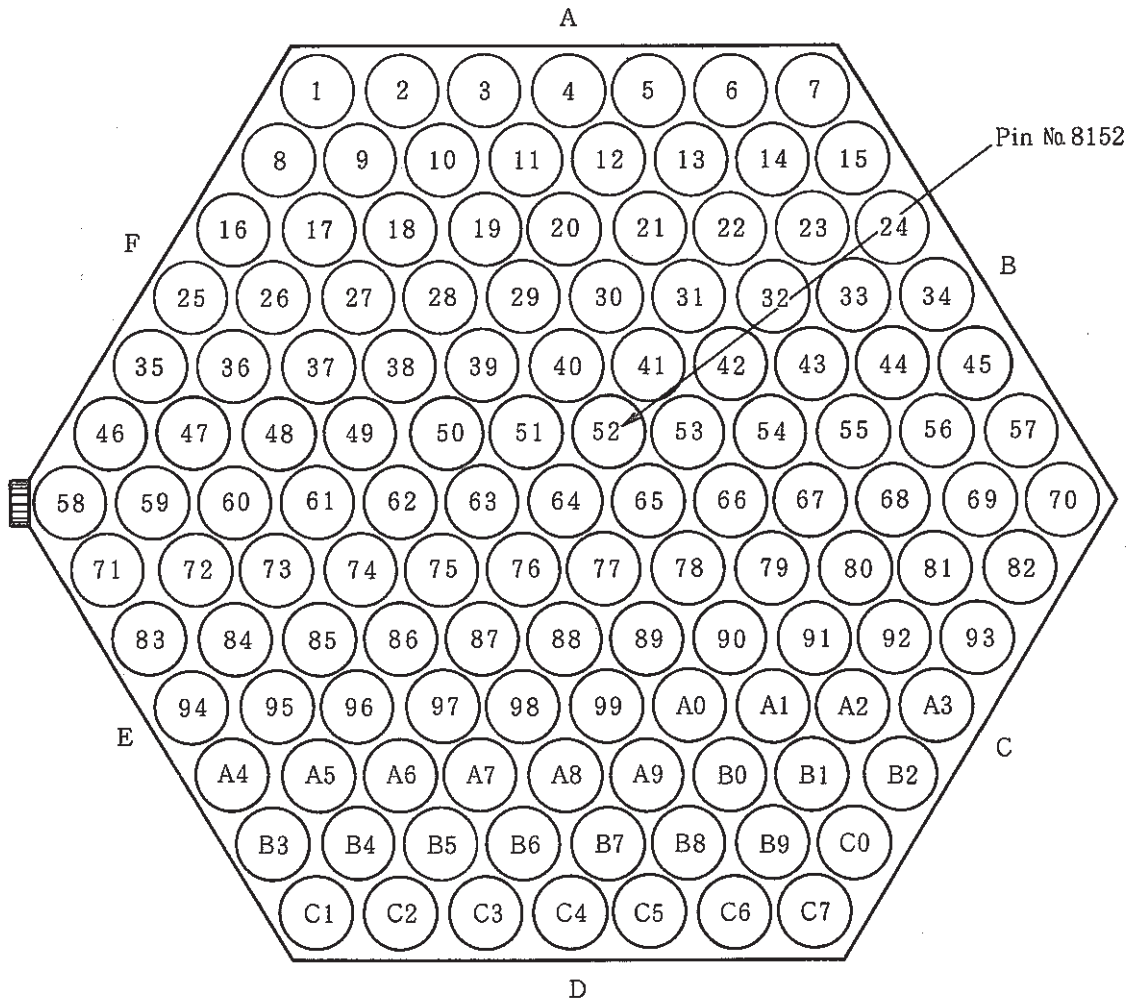


Fig. 3 Location of the Fuel Pin (Pin No. 8152) in the Driver Fuel Subassembly

S/A FAB NO. : PFD001 PIN NO. : 52

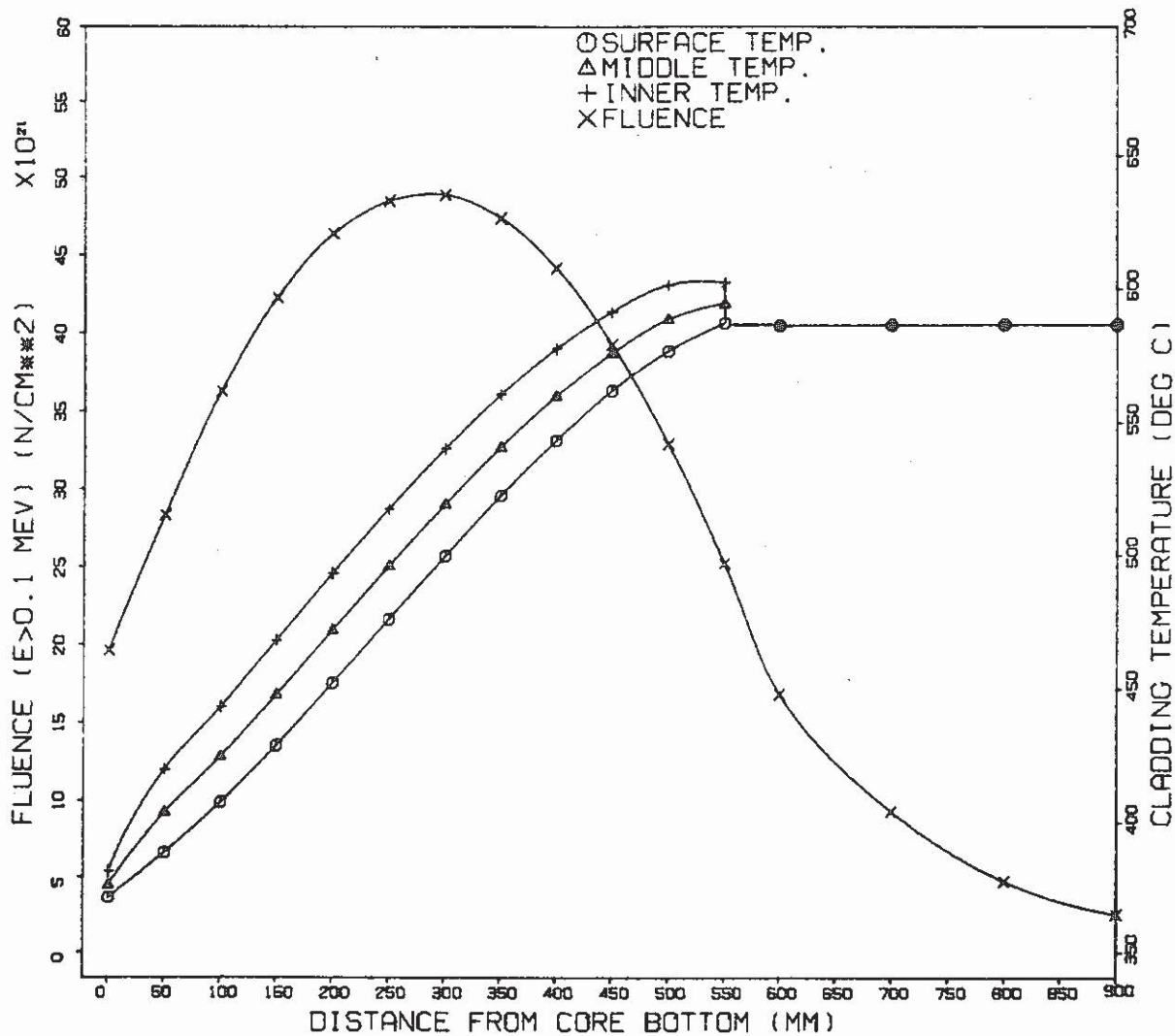


Fig. 4 Axial Profile of the Fluence and Cladding Temperature of 8152 Pin

S/A FAB NO. : PFDC01

PIN NO. : 52

MAX ϕ EGL Δ

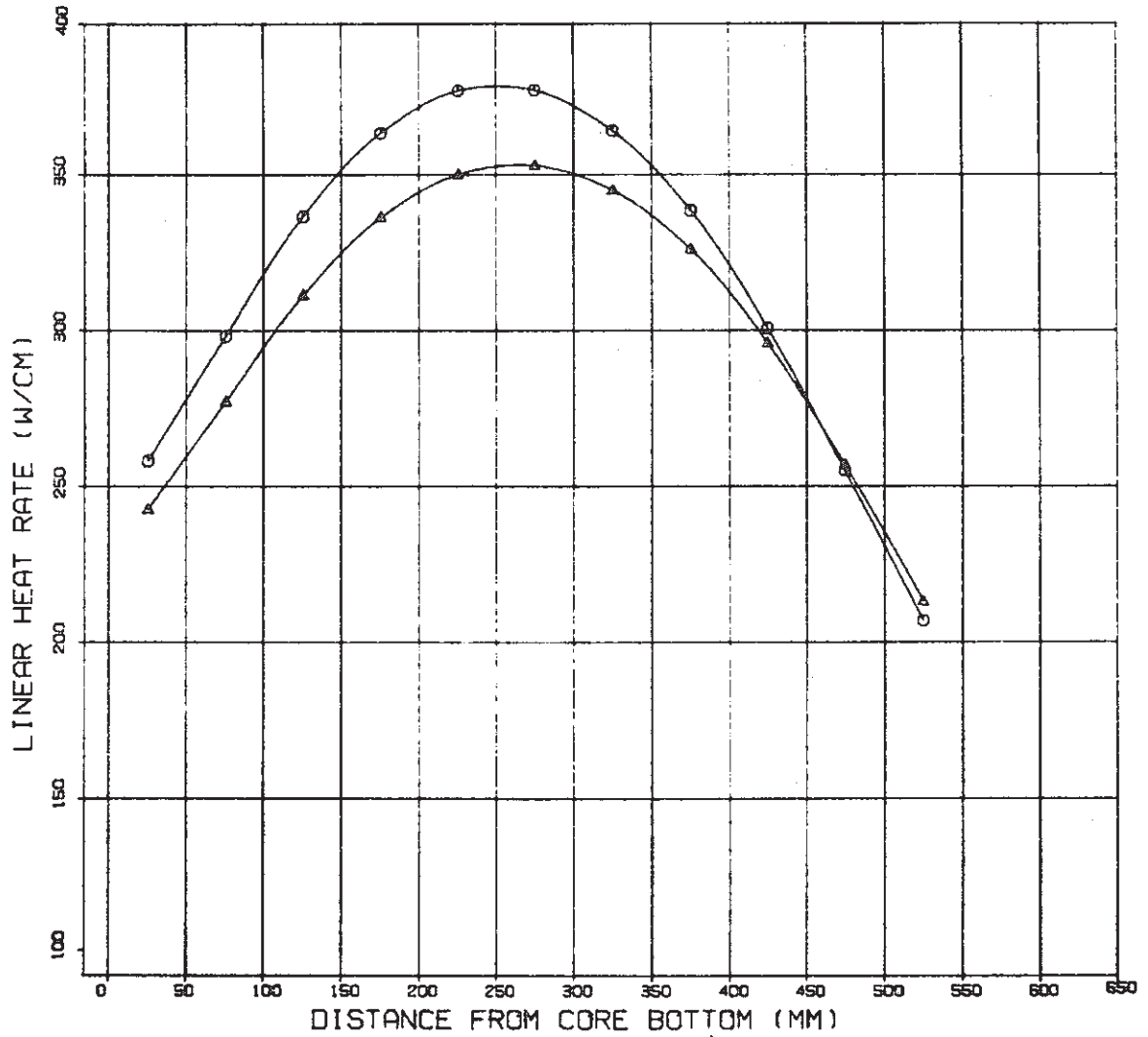


Fig. 5 Axial Profile of the He Linear Heat Rate of 8152 Pin

S/A FAB NO. : PFD001 PIN NO. : 52

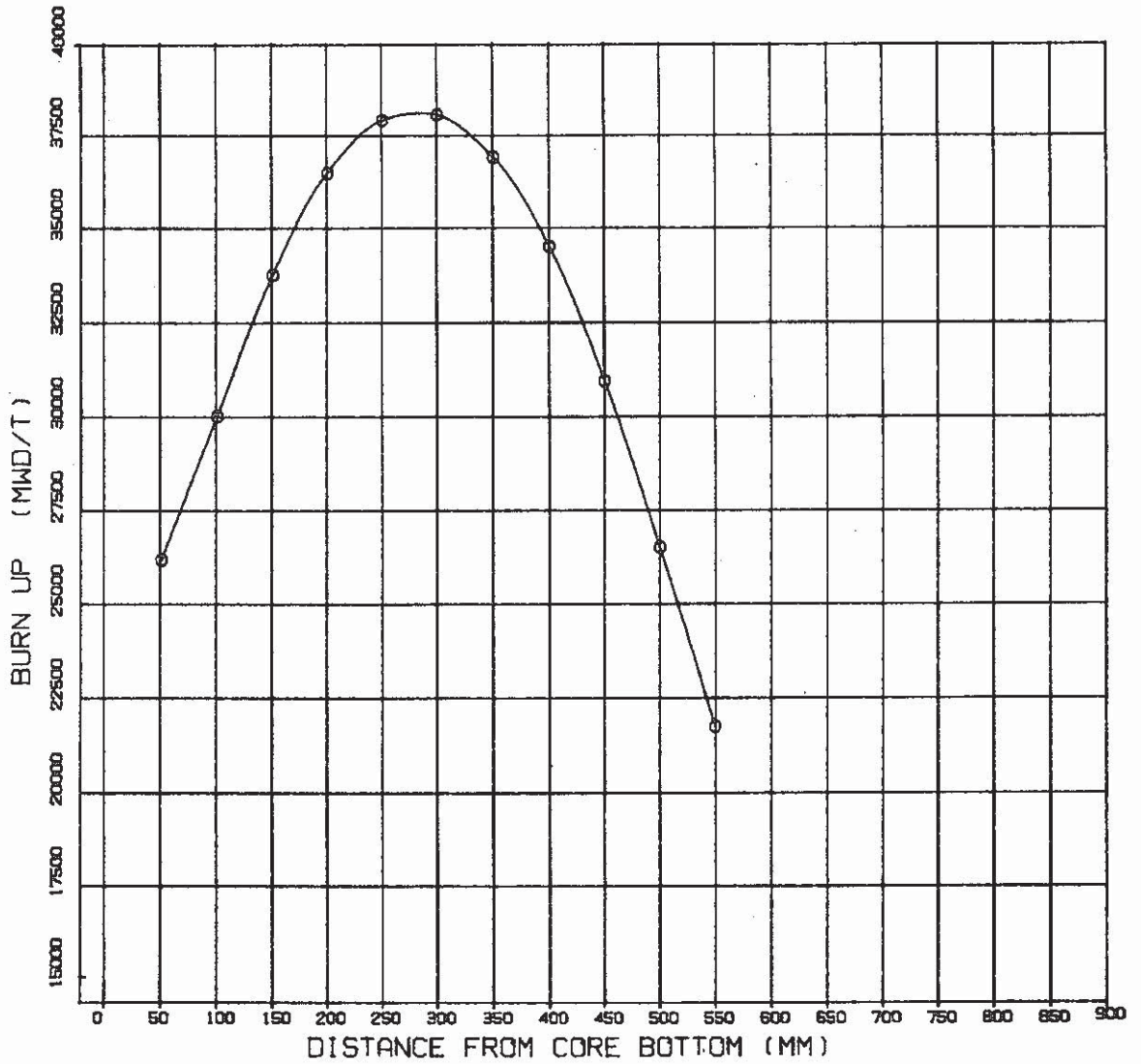


Fig. 6 Axial Profile of Burnup of 8152 Pin

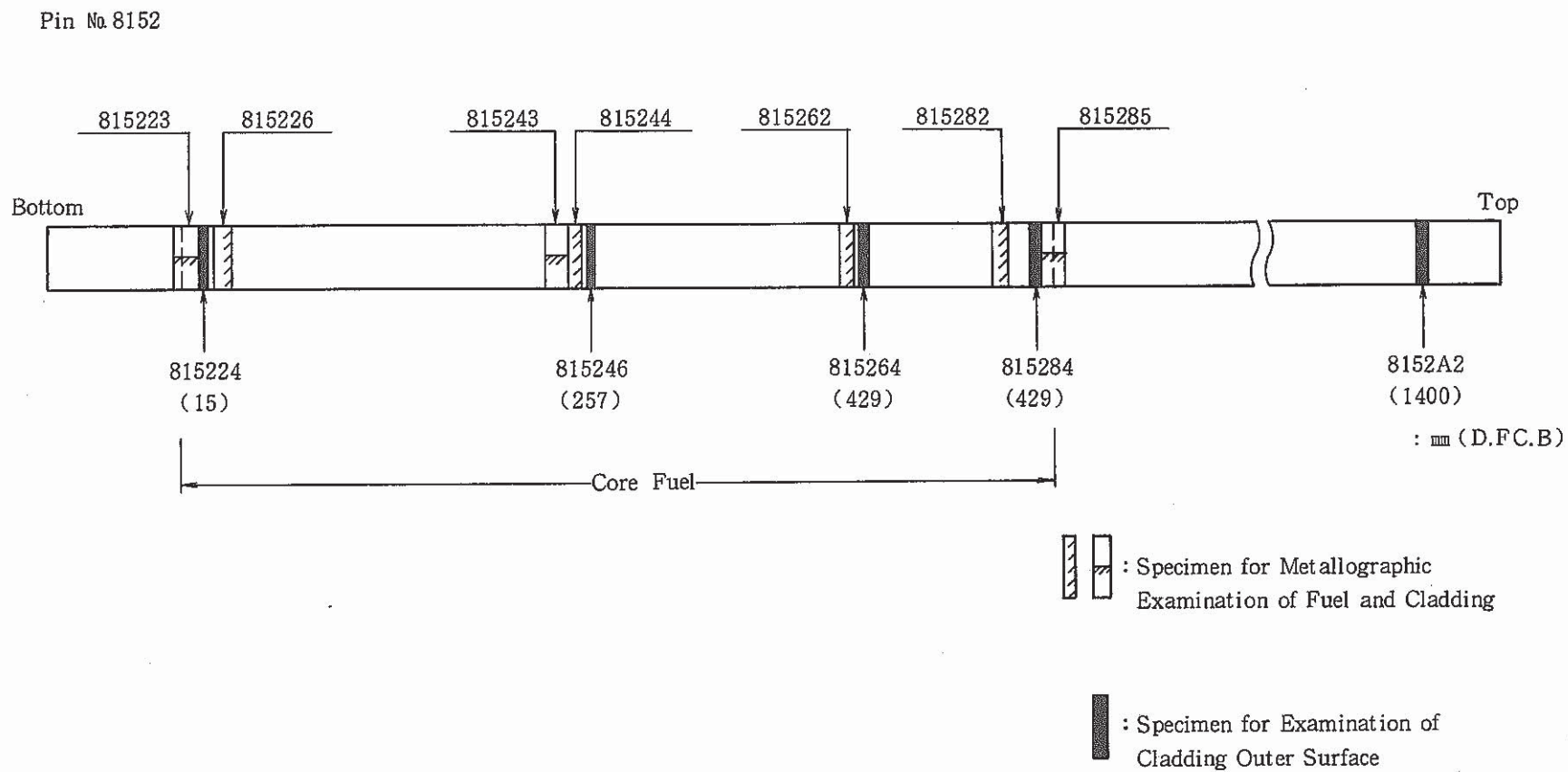


Fig. 7 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin

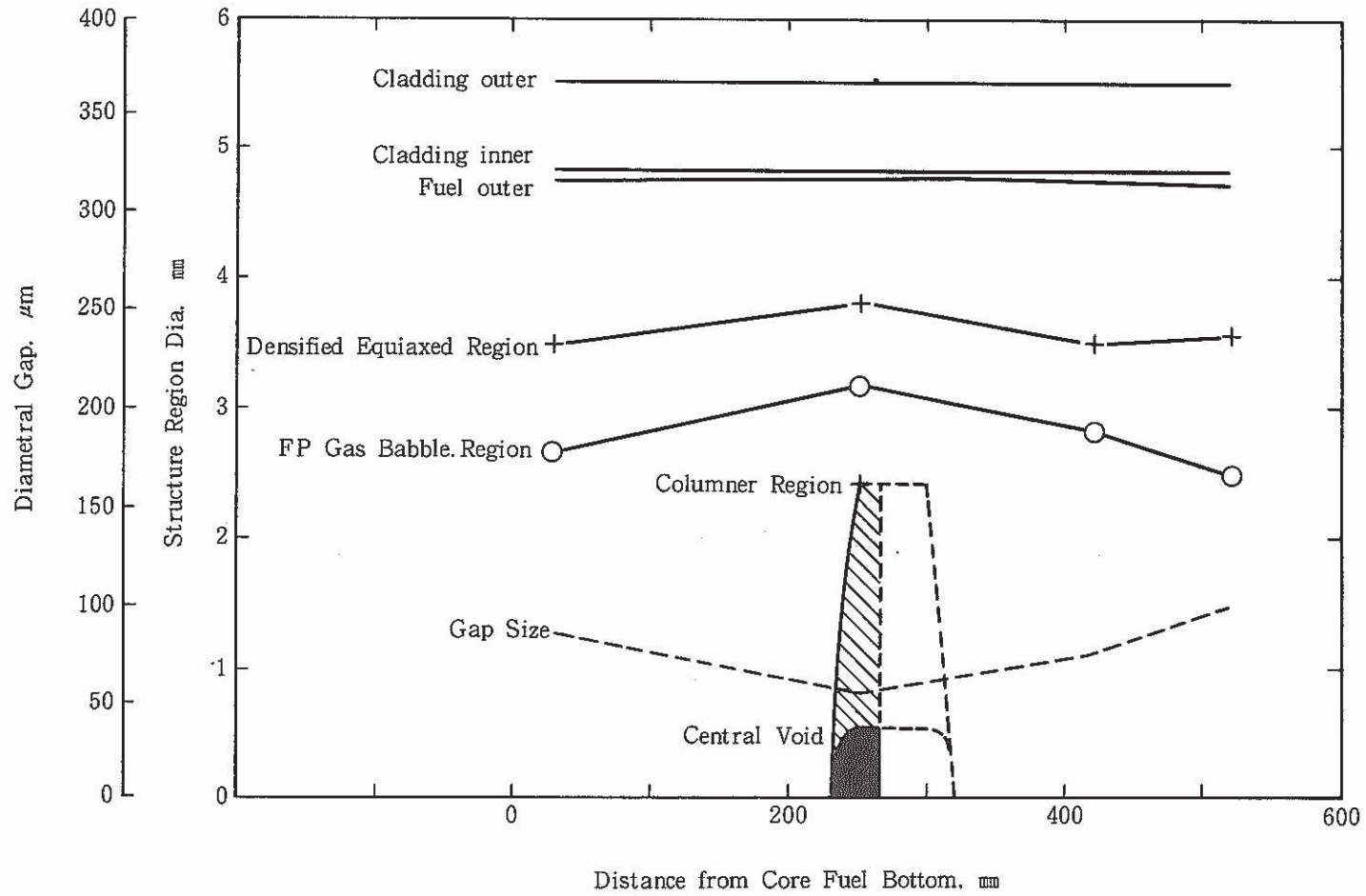
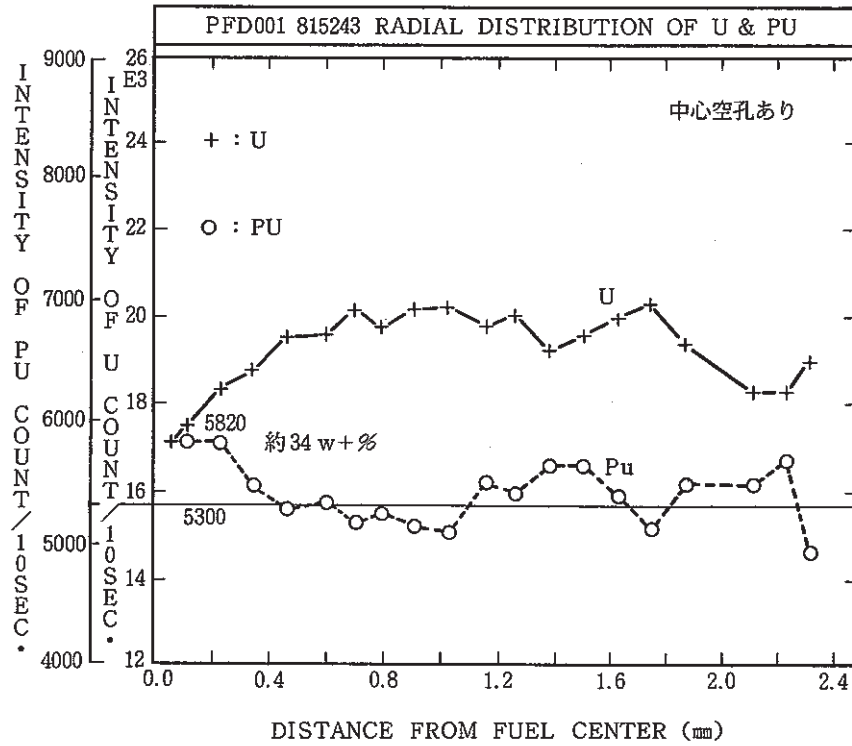
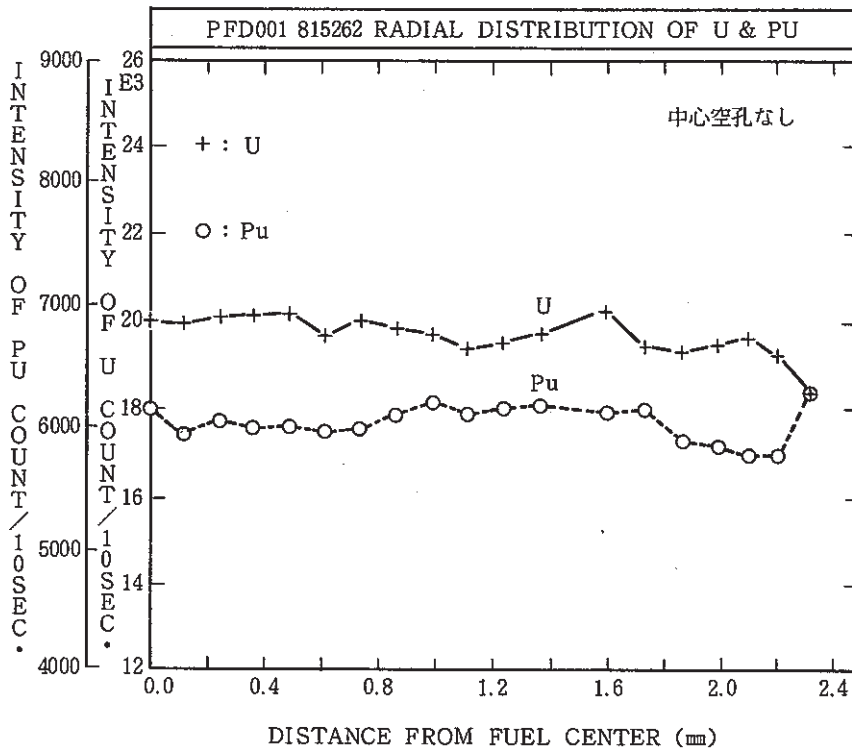


Fig. 8 Axial Profile of the Gap and Fuel Structure



(Specimen No 815243)



(Specimen No 815262)

Fig. 9 Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by EPMA

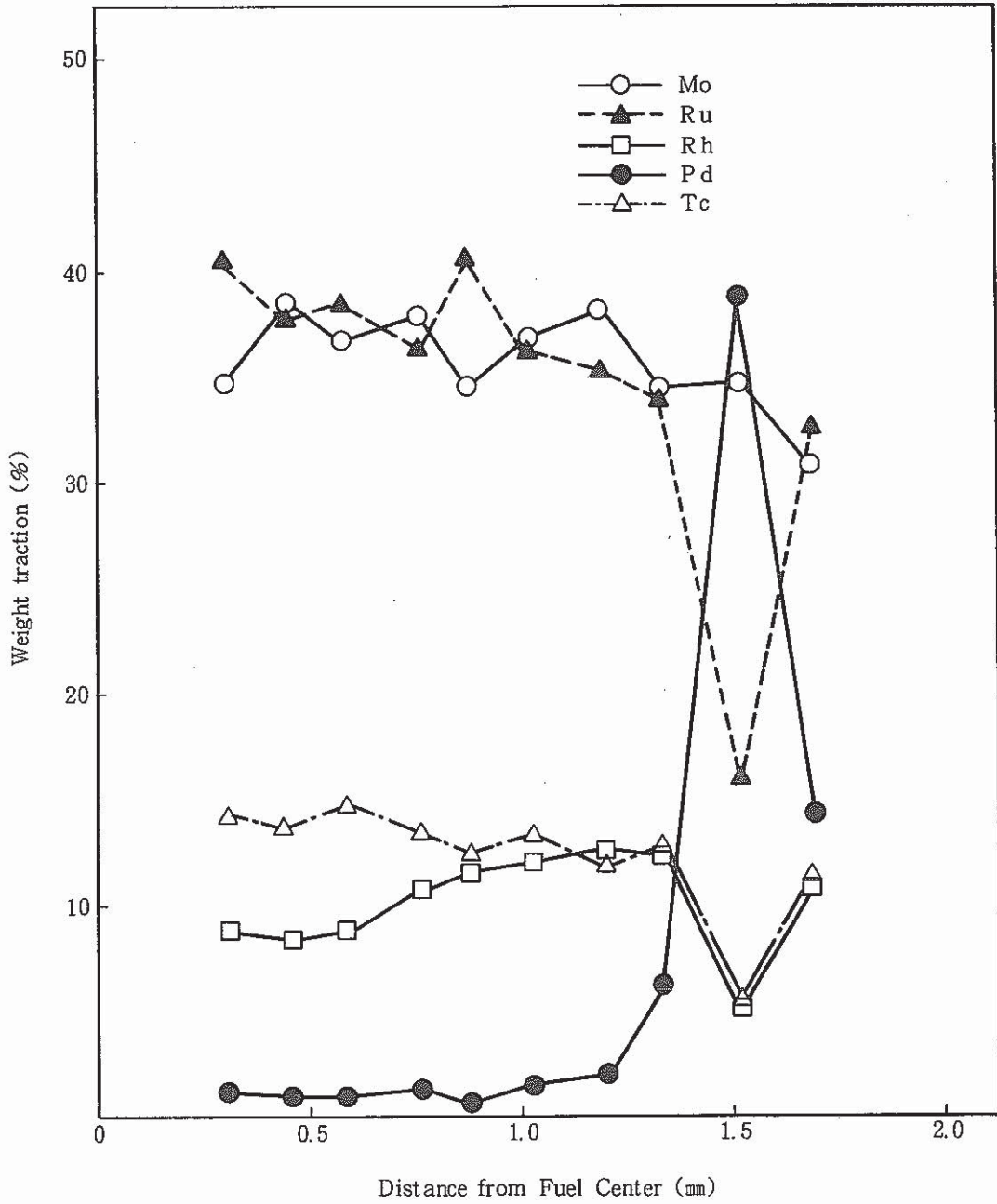


Fig.10 Radial Distribution of Mo, Ru, Rh, Pd, and Tc Contents in Metallic Inclusion (Specimen No.815244)

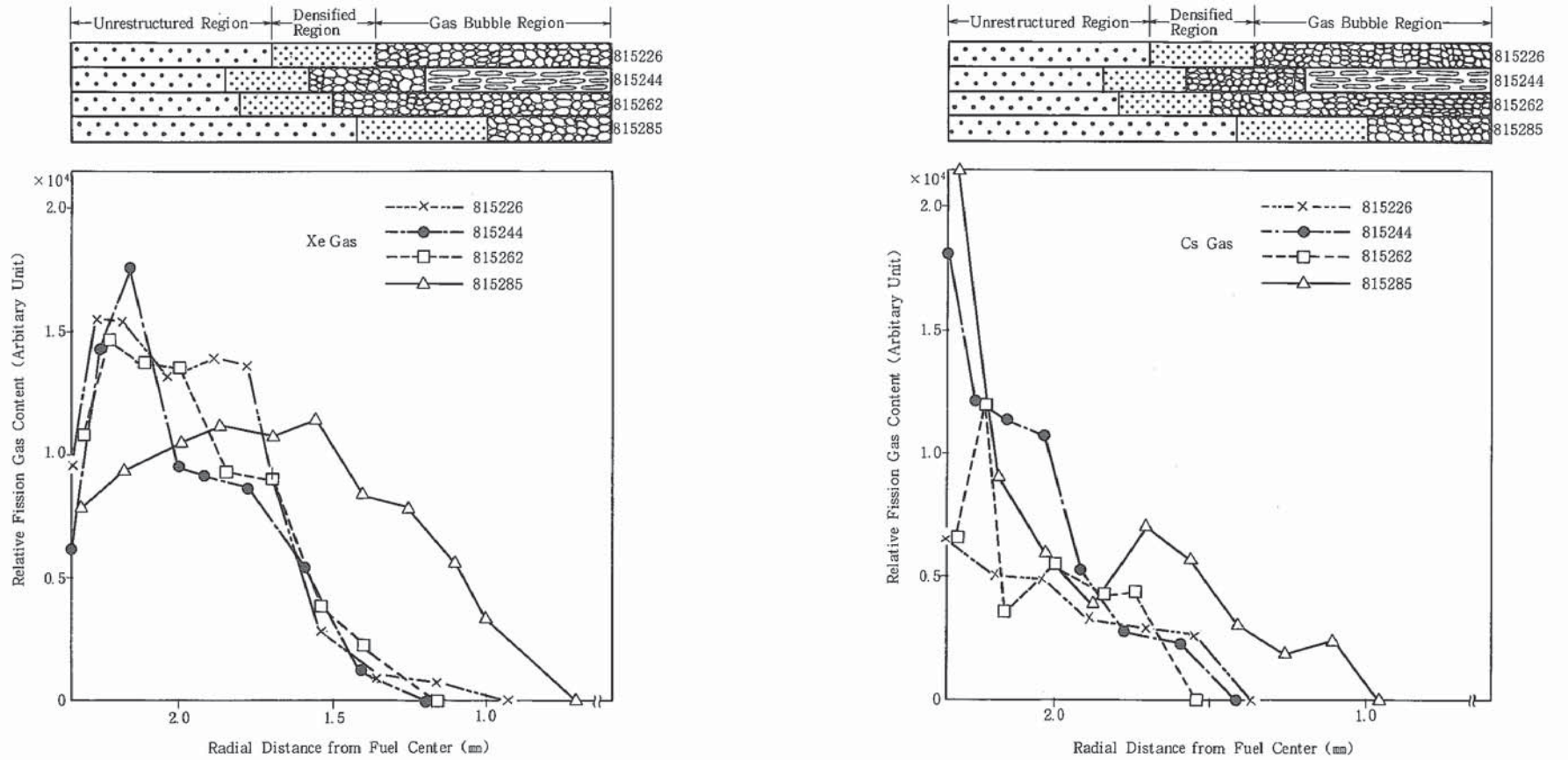


Fig.11 Relative Radial Profiles of Retained Xe, Cs Measured by EPMA

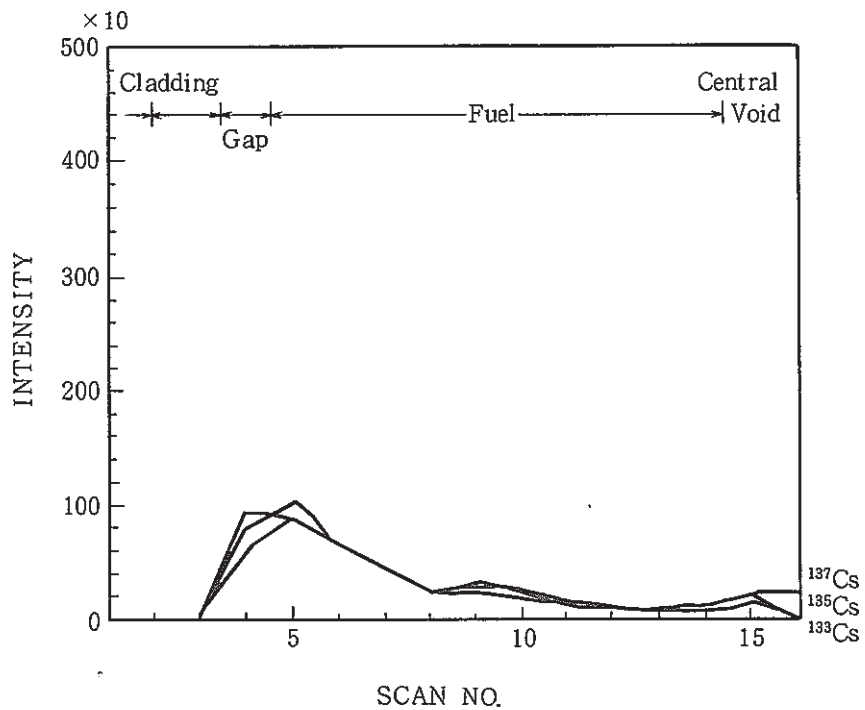
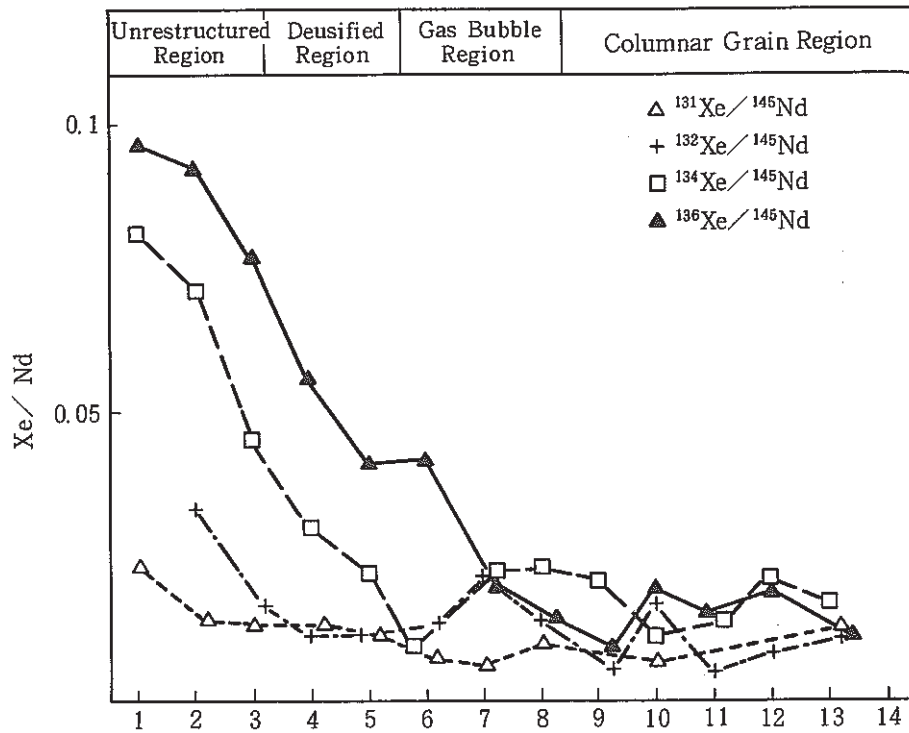


Fig.12 Relative Radial Distribution of Retained Xe and Cs Isotopes Measured by IMA

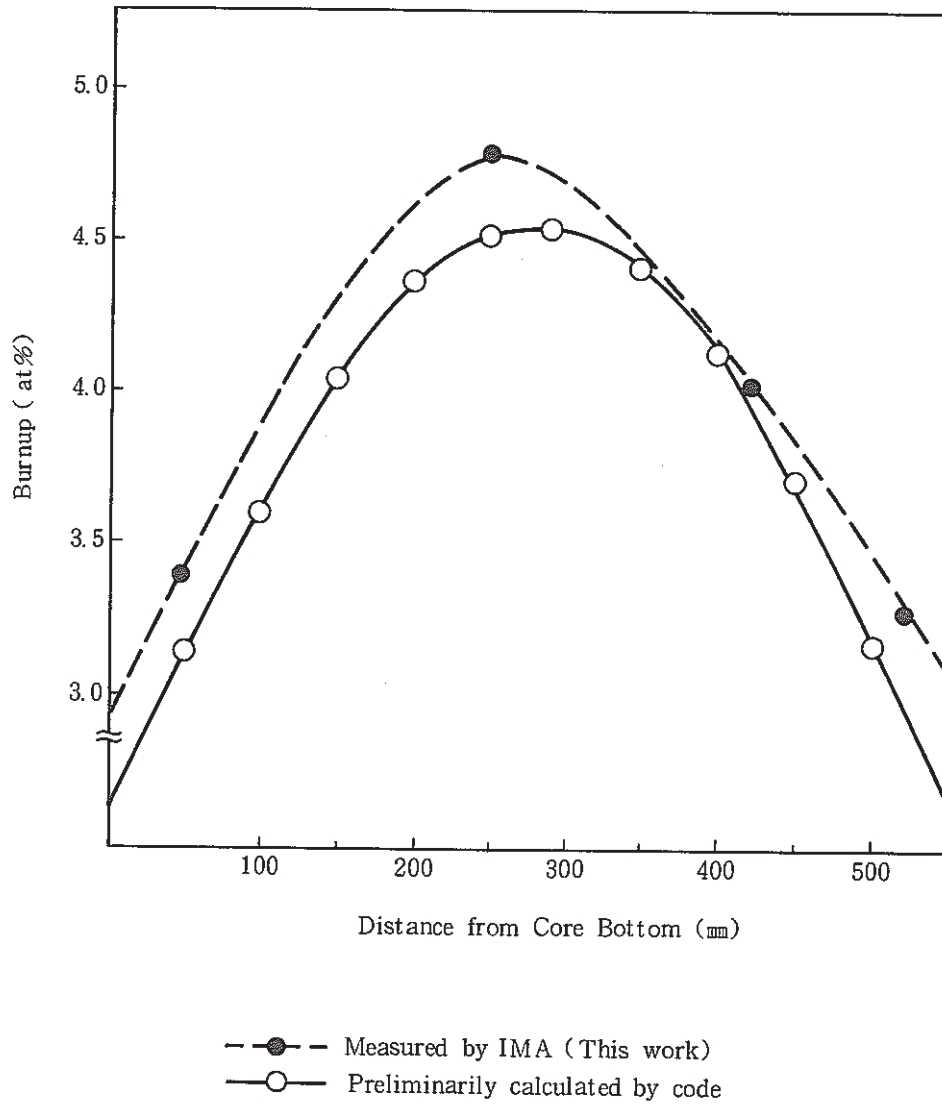


Fig.13 Axial Distribution of Measured Burnup of PFD001 (Pin No.8152)

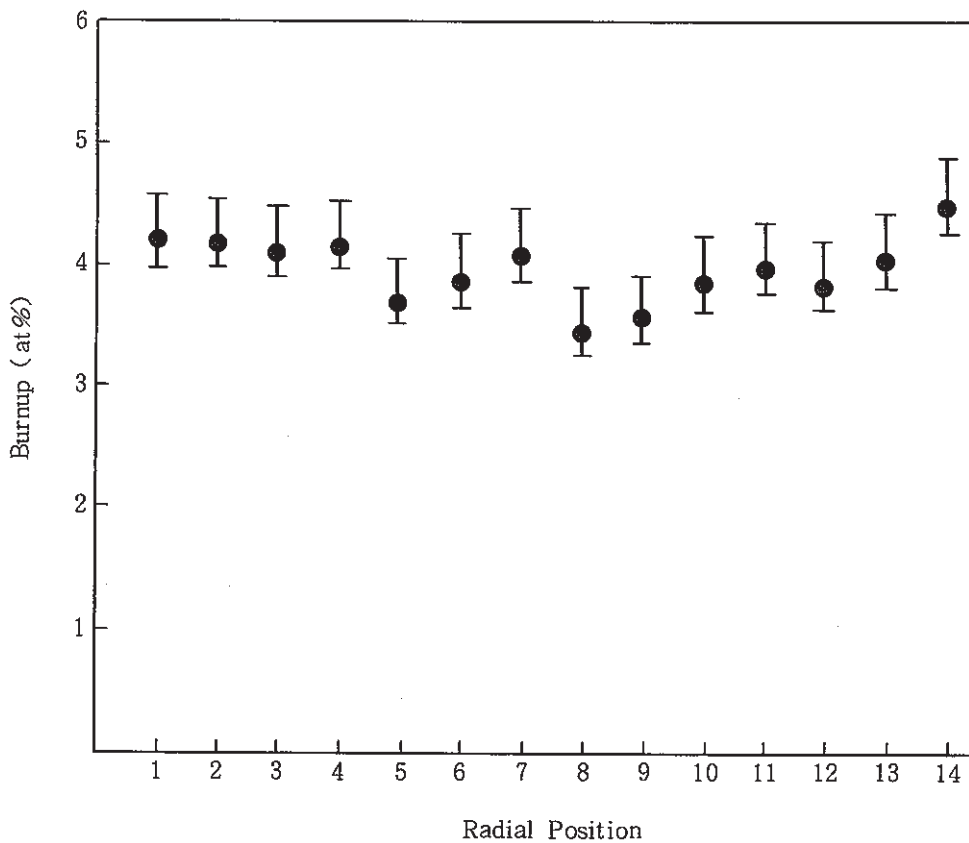
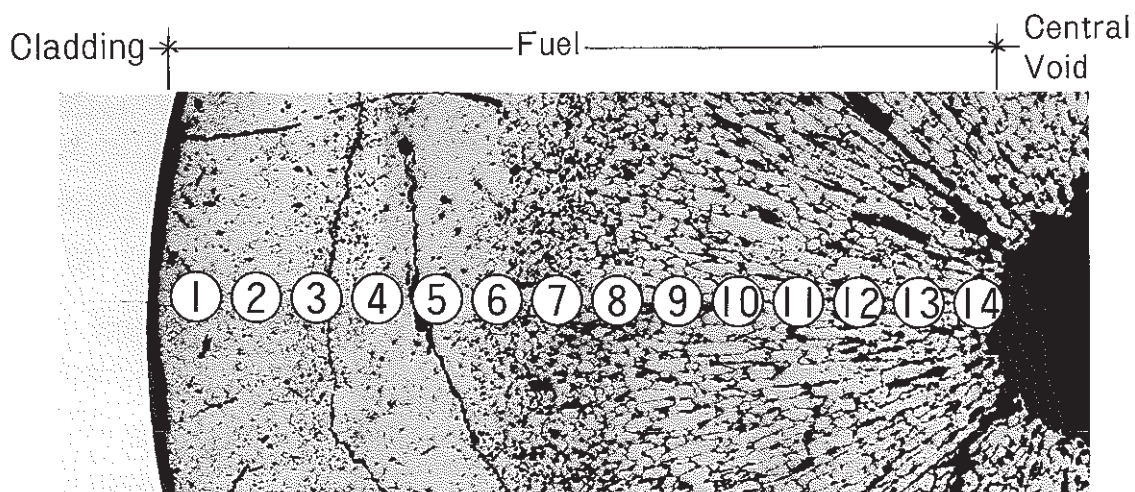


Fig.14 Radial Burnup Distribution Measured by the IMA (815244)

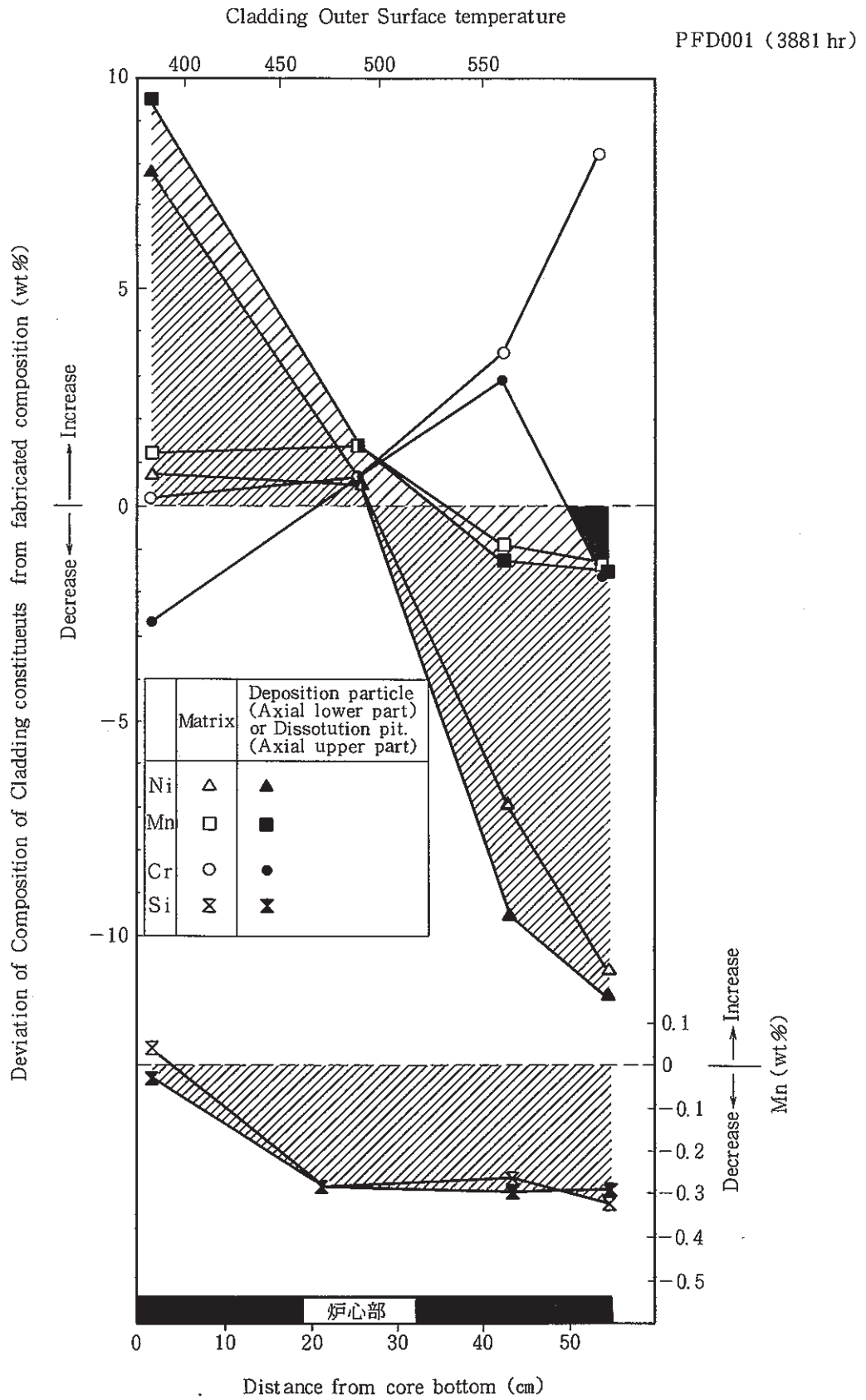


Fig.15 Composition Change of Cladding Constituents as a Function of Distance from Core Bottom and Cladding Outer Temperature

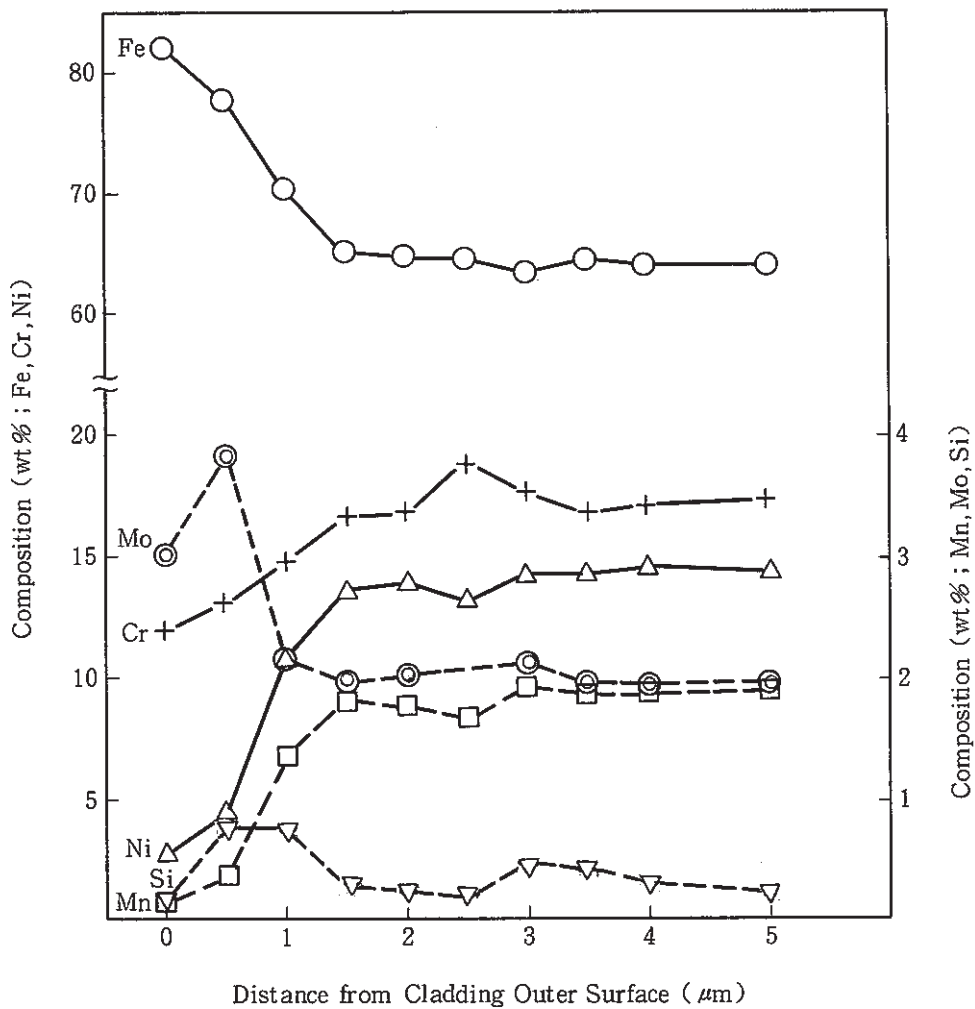


Fig.16 Results of Line Analyses Across the Transverse Section Sample (No.815284)

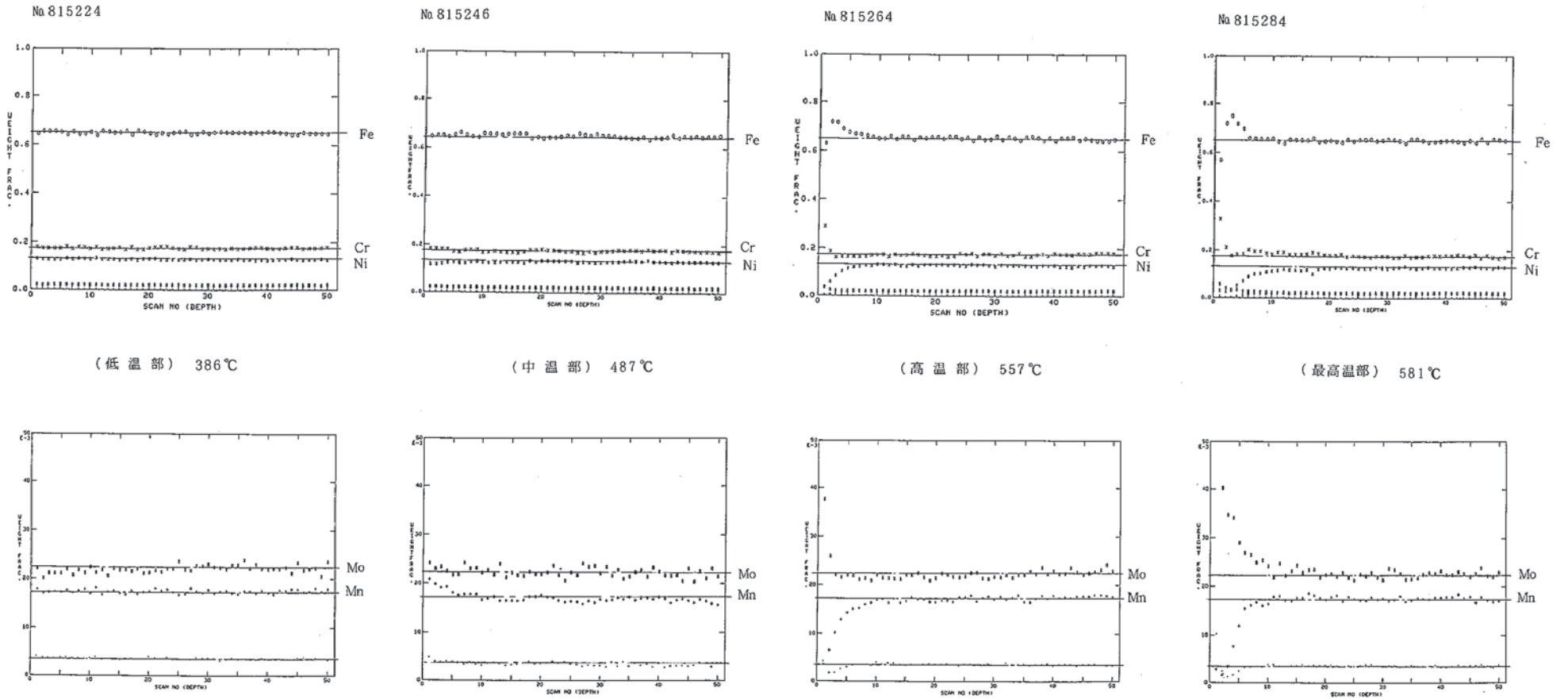


Fig.17 Depth Analysis of Cladding Outer Surface by IMA
(Pin No.8152 S-Tube)

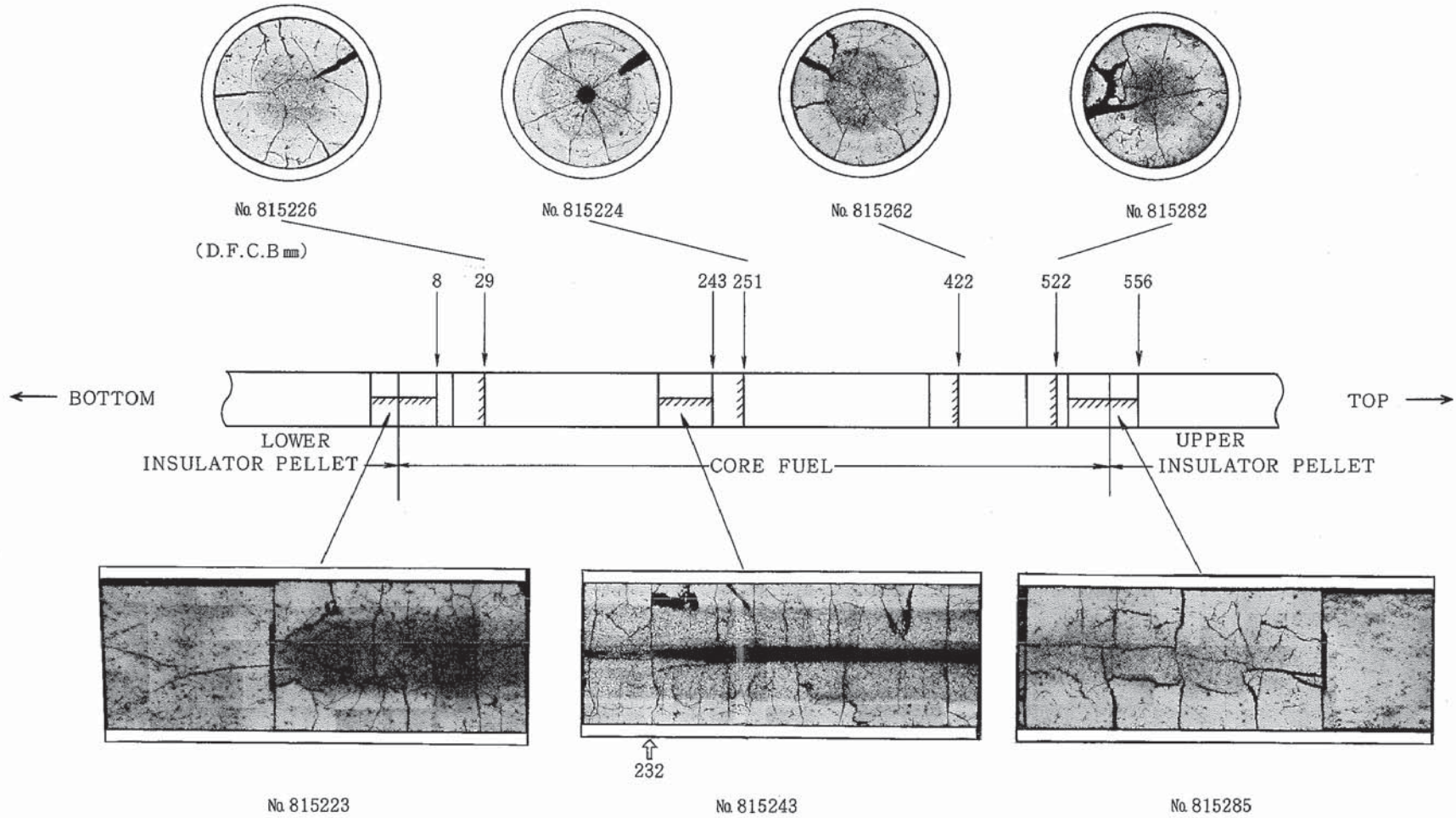


Photo.1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No.8152)

"JOYO" MK-II PFD001

Specimen NO. 815244

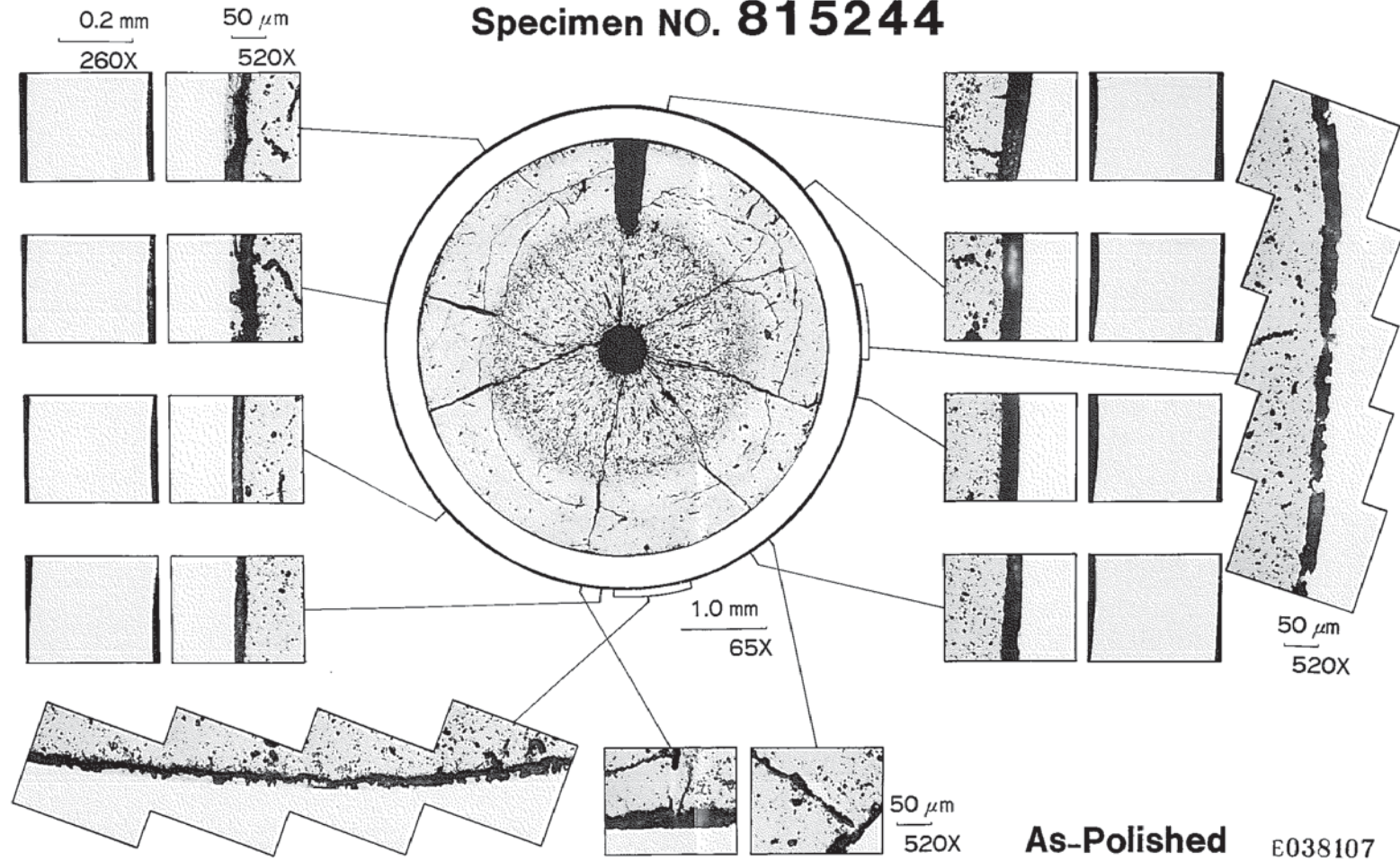
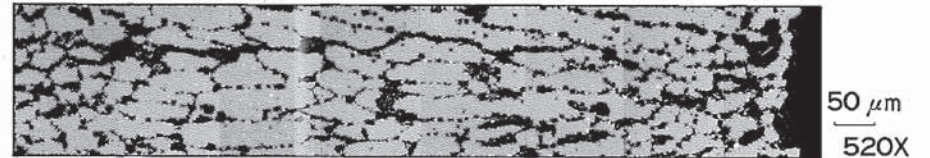
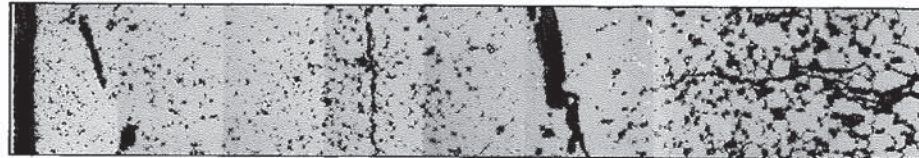
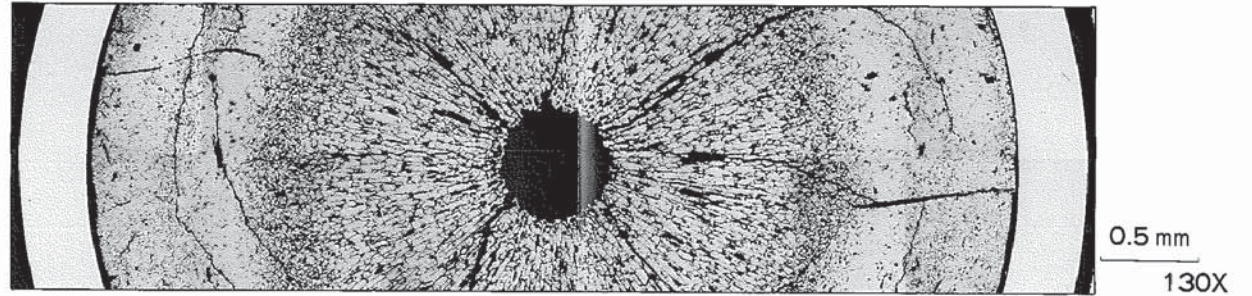


Photo.2 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Axial Midplane of the Pin No.8152

"JOYO" MK-II PFD001
Specimen NO. 815244



As-Polished

E038108

Photo.3 Optical Microstructure of the Core Fuel at the Midplane of the Pin No.8152

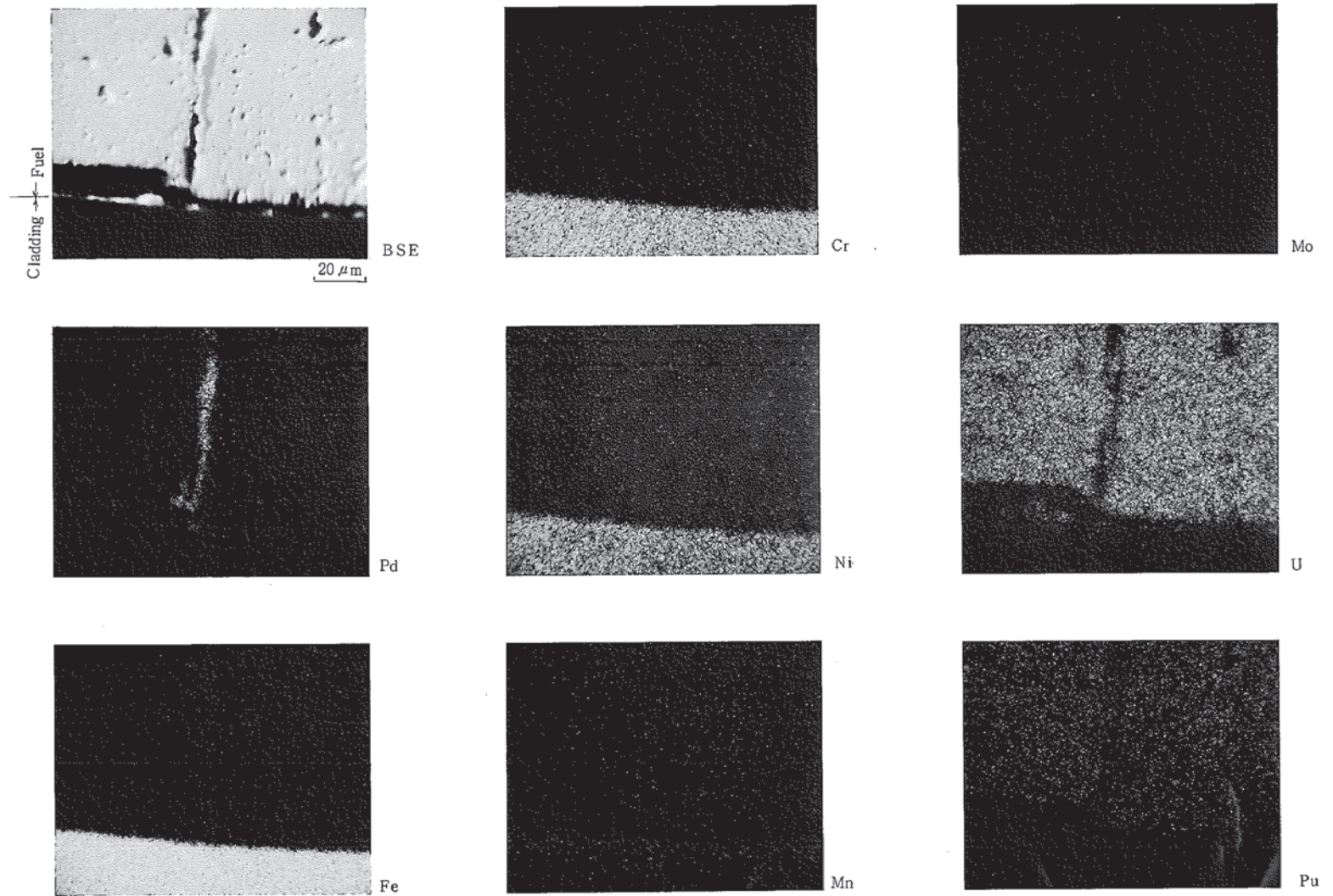


Photo.4 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Fuel (Specimen No.815244)

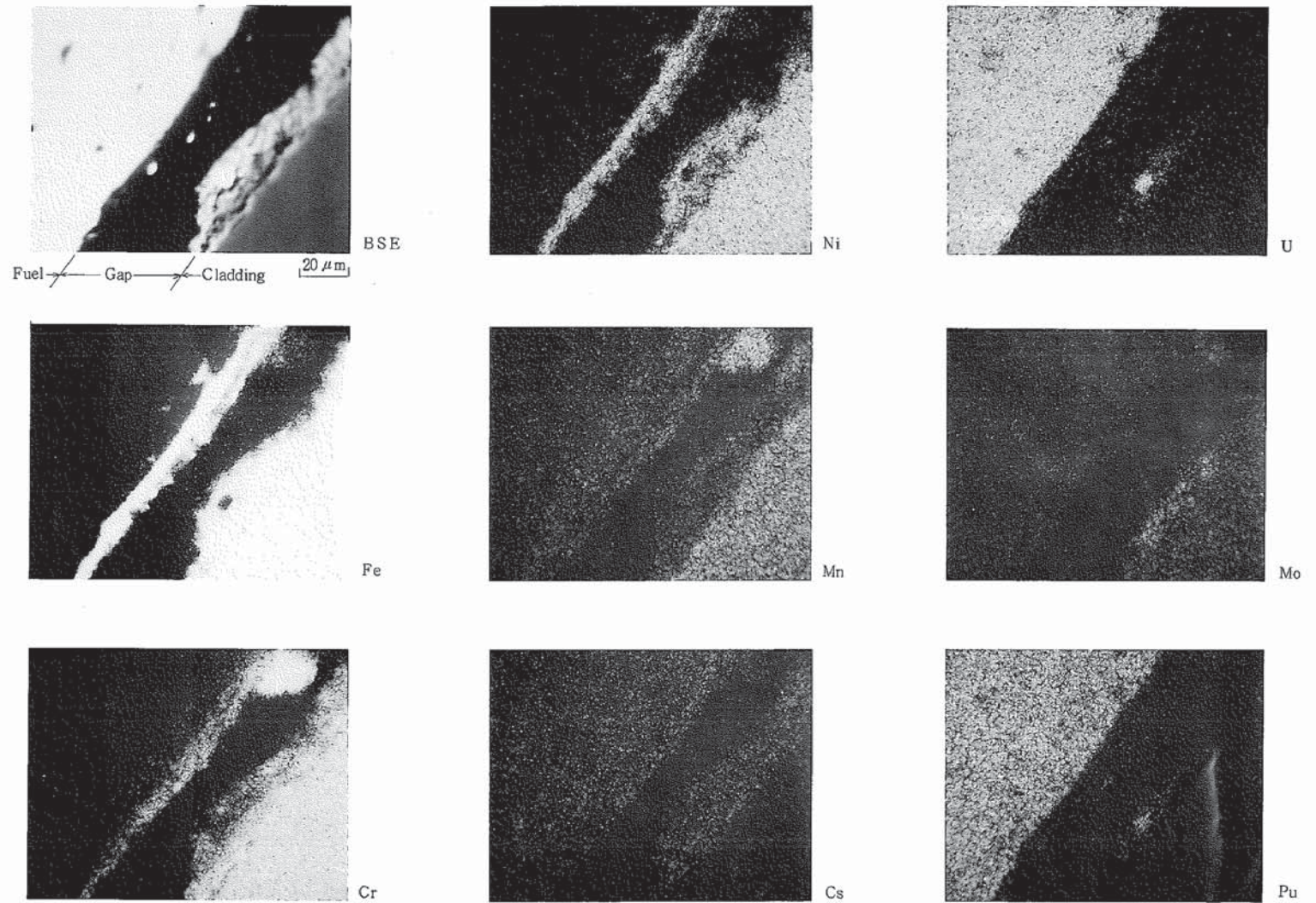


Photo.5 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No.815285)

この頁は PDF 化されていません。

内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理
担当箇所を参照して下さい。