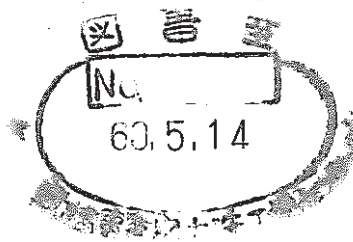


# 「常陽」MK-II炉心燃料(PFD003)の照射後試験 (2)

燃料要素の組織観察及び機器分析

データ編



1985年2月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

燃料材料試験部

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 「常陽」MK-II炉心燃料(PFD003)の照射後試験 (2)

燃料要素の組織観察及び機器分析

(Vol.2 データ編)

実施責任者 甲野啓一\*

報告者 杉山忠夫\* 鶴飼重治\*

畔野一郎\* 榎田尚也\*

水野峰雄\*\* 柴原 格\*

### 要 旨

Vol.1 ではPFD003燃料ピンの照射試験結果の要約を記した。

本報は下記の詳細データを集録したものである。

- 光学顕微鏡による燃料組織観察
- EPMAによる燃料及びギャップ部の元素分析
- IMAによる燃料内質量分析
- 被覆管外表面の観察及び質量分析

---

\* 大洗工学センター, 燃料材料試験部, 技術解析室

\*\* (現) 三菱原子力工業(株)

List of Figures

- Fig. 1 Comparison of Microstructure between Specimen No.533564 (PPJX13) and Specimen No.70A644 (PFD003).
- Fig. 2 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A625)
- Fig. 3 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter. (Specimen No.70A625)
- Fig. 4 Width of Gap to Circumferential Distribution (Specimen No.70A625)
- Fig. 5 Circumferential Distribution of Densified Equiaxed Grains Region Diameter and Porous Equiaxed Region Diameter. (Specimen No.70A625)
- Fig. 6 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio. (Specimen No.70A625)
- Fig. 7 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A644)
- Fig. 8 Circumferential Distribution of Central Void Area Diameter. (Specimen No.70A644)
- Fig. 9 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter. (Specimen No.70A644)
- Fig. 10 Width of Gap to Circumferential Distribution (Specimen No.70A644)
- Fig. 11 Circumferential Distribution of Columnar Grains Region Diameter, Densified Equiaxed Grains Region Diameter and Porous Equiaxed Grains Region Diameter (Specimen No.70A644)
- Fig. 12 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio (Specimen No.70A644)
- Fig. 13 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A662)
- Fig. 14 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter (Specimen No.70A662)

- Fig. 15 Width of Gap to Circumferential Distribution  
(Specimen No.70A662)
- Fig. 16 Circumferential Distribution of Densified Equiaxed Grains  
Region Diameter and Porous Equiaxed Region Diameter.  
(Specimen No.70A662)
- Fig. 17 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio  
(Specimen No.70A662)
- Fig. 18 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD  
(Specimen No.70A682)
- Fig. 19 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter,  
Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter  
(Specimen No.70A682)
- Fig. 20 Width of Gap to Circumferential Distribution  
(Specimen No.70A682)
- Fig. 21 Circumferential Distribution of Densified Equiaxed Grains  
Region Diameter and Porous Equiaxed Region Diameter  
(Specimen No.70A682)
- Fig. 22 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio  
(Specimen No.70A682)
- Fig. 23 Axial Profile of the Gap & Fuel Structure
- Fig. 24 Radial Distribution of Mo and Ru and Rh and Pd Content in  
Metallic Inclusion (Specimen No.70A644)
- Fig. 25 Radial Distribution of Pu-M $\beta$  and U-M $\alpha$  in the Fuel  
(Specimen No.70A644)
- Fig. 26 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray Line  
(Specimen No.70A625)
- Fig. 27 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray Line  
(Specimen No.70A644)
- Fig. 28 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray line  
(Specimen No.70A662)
- Fig. 29 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray line  
(Specimen No.70A682)
- Fig. 30 Relative Radial Profiles of Retained Xe Gas
- Fig. 31 Ion Mass Spectrum of the Fuel-Cladding Interface  
(Specimen No.70A625)
- Fig. 32 Ion Mass Spectrum of the Half Radius Position  
(Specimen No.70A625)

- Fig. 33 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A625,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ )
- Fig. 34 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A625,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )
- Fig. 35 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A625,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )
- Fig. 36 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A624,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )
- Fig. 37 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A625,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ )
- Fig. 38 Ion Mass Spectrum of the Fuel-Cladding Interface  
(Specimen No.70A644)
- Fig. 39 Ion Mass Spectrum of the Half Radius Position  
(Specimen No.70A644)
- Fig. 40 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A644,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ )
- Fig. 41 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A644,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )
- Fig. 42 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A644,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )
- Fig. 43 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A644,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )
- Fig. 44 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A644,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ )
- Fig. 45 Ion Mass Spectrum of the Fuel-Cladding Interface  
(Specimen No.70A662)
- Fig. 46 Ion Mass Spectrum of the Half Radius Position  
(Specimen No.70A662)
- Fig. 47 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A662,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ )
- Fig. 48 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A662,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )
- Fig. 49 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A662,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )
- Fig. 50 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A662,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )
- Fig. 51 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A662,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ )

- Fig. 52 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A682,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ )
- Fig. 53 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A682,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )
- Fig. 54 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A682,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )
- Fig. 55 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A682,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )
- Fig. 56 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center  
(Specimen No.70A682,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ )
- Fig. 57 Axial Distribution of Measured Burnup of PFD003  
(Pin No.70A6)
- Fig. 58 Depth Analysis of Cladding Outer Surface by IMA  
(Pin No.70A6, 70B4)

List of Photographs

- Photo. 0-1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No.70A6)
- Photo. 0-2 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core and Blanket Fuel Pin (Specimen No.70A623) As-Polished
- Photo. 0-3 Optical Microstructure of the Core and Blanket Fuel Pin (Specimen No.70A623) As-Polished
- Photo. 0-4 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A625) As-Polished
- Photo. 0-5 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.70A625) As-Polished
- Photo. 0-6 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of Core Fuel Pin (Specimen No.70A643) As-Polished
- Photo. 0-7 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.70A643)
- Photo. 0-8 Optical Micrograph of Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A644) As-Polished
- Photo. 0-9 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.70A644) As-Polished
- Photo. 0-10 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A662) As-Polished
- Photo. 0-11 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.70A662) As-Polished
- Photo. 0-12 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A682) As-Polished
- Photo. 0-13 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.70A682) As-Polished
- Photo. 0-14 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core and Blanket Fuel Pin (Specimen No.70A685) As-Polished
- Photo. 0-15 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A625) As-Etched
- Photo. 0-16 Optical Microstructure of the Core (Specimen No.70A625) As-Etched
- Photo. 0-17 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A644) As-Etched



- Photo. 0-18 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A644) As-Etched
- Photo. 0-19 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core  
Fuel Pin (Specimen No.70A662) As-Etched
- Photo. 0-20 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A662) As-Etched
- Photo. 0-21 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core  
Fuel Pin (Specimen No.70A682) As-Etched
- Photo. 0-22 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A682) As-Etched
- 
- Photo. E-1 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Crack  
(Specimen No.70A625)
- Photo. E-2 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Fuel  
(Specimen No.70A644)
- Photo. E-3 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Fuel  
(Specimen No.70A644)
- Photo. E-4 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel  
and Cladding (Specimen No.70A625)
- Photo. E-5 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel  
and Cladding (Specimen No.70A625)
- Photo. E-6 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel  
and Cladding (Specimen No.70A644)
- Photo. E-7 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel  
and Cladding (Specimen No.70A662)
- Photo. E-8 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel  
and Cladding (Specimen No.70A682)
- Photo. E-9 U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  X-ray Images of the Fuel Outer Region  
(Specimen No.70A625)
- Photo. S-1 Secondary Electron Micrographs of the Core Fuel Cladding  
Outer Surface (Pin No.70A6)
- Photo. S-2 Secondary Electron Micrographs of the Core Fuel Cladding  
Outer Surface (Pin No.70B4)

List of Charts

- Chart 1 Spectral Analyses of the Metallic Inclusion in the Fuel  
(Specimen No.70A644)
- Chart 2 Line Analyses by Zr-L $\alpha$  and Ba-L $\alpha$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A644)
- Chart 3 Line Analyses by Pd-L $\alpha$  and Cs-L $\alpha$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A644)
- Chart 4 Line Analyses by Si-K $\alpha$  and Nd-L $\alpha$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A644)
- Chart 5 Line Analyses by Fe-K $\alpha$  and Mo-L $\alpha$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A644)
- Chart 6 Line Analyses by Ru-L $\alpha$  and Cr-K $\alpha$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A644)
- Chart 7 Line Analyses by U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A625)
- Chart 8 Line Analyses by U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A644)
- Chart 9 Line Analyses by U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  from the Fuel Center to  
Cladding (Specimen No.70A662)

List of Table

- Table 1 Summary Data from Ceramography (Fab. No.PFD003)

## 目 次

1. 光学顕微鏡による燃料組織観察結果 .....	1
1.1 燃料組織観察結果 .....	1
1.2 画像解析システムによる解析結果 .....	2
2. EPMAによる燃料・ギャップ部の元素分析結果 .....	3
2.1 燃料内F・P分布 .....	3
2.2 燃料-被覆管境界部の元素分布 .....	3
2.3 金属状析出物の燃料径方向の組成変化 .....	3
2.4 半径方向U, Puの分布 .....	4
2.5 燃料内に保持されているXeの分布 .....	4
3. IMAによる燃料内質量分析結果 .....	6
3.1 燃料内スペクトル分析 .....	6
3.2 燃焼度測定結果 .....	7
4. 被覆管外表面の観察及び質量分析結果 .....	8
4.1 走査電子顕微鏡による被覆管外表面観察結果 .....	8
4.2 IMAによる被覆管外表面質量分析 .....	9

## 1. 光学顕微鏡による燃料組織観察結果

### 1.1 燃料組織観察結果

Photo O-1 に 70A6 ピンからの金相試料の切断位置とマクロ写真を示す。

#### (1) 試料No.70A623 (縦割り, 下部インシュレーター境界)

Photo O-2, 3 に As-Polished 状態における顕微鏡写真を示す。本試料は下部ブランケット燃料を含む縦断面試料である。ブランケット燃料の組織変化及びクラックは無く、製造時のディッシュもそのまま観察される。炉心燃料の組織は、中央部より FP ガスバルブ領域、高密度化領域、不変領域の三層に区分される。一方被覆管は、内外面共に異状は認められない。

#### (2) 試料No.70A625 (輪切り)

本試料の As-Polished 及び As-Etched 状態における顕微鏡写真を、それぞれ Photo O-4, 5, Photo O-15, 16 に示す。燃料組織状態は、MK-I 燃料組織に類似しており、断面中央部より FP ガスバルブ領域、高密度化領域、最外周部が不変領域の三層の組織から成る。白色析出物は、FP ガスバルブ領域と高密度化領域の境界部に多く見られる。一方被覆管は、内外面共に異状は認められない。

#### (3) 試料No.70A643 (縦割り)

Photo O-6, 7 に As-Polished 状態における顕微鏡写真を示す。本試料はペレット間境界を含む縦割り試料であるが、その境界部は、ヒーリングの為明確ではない。燃料組織は、中心空孔、柱状晶領域、FP ガスバルブ領域・高密度化領域・不変領域の五層から成る。

#### (4) 試料No.70A644 (輪切り)

本試料の As-Polished 及び As-Etched 状態における顕微鏡写真を、それぞれ Photo O-8, 9, Photo O-17, 18 に示す。本試料において“JOYO”MK-II 燃料で初めて、中心空孔及び柱状晶が明瞭に観察された。本試料を“JOYO”MK-I 中、最も燃焼が進み、組織変化の著しい PPJX13 集合体の試料 533564 の画像解析結果と比較した図を Fig. 1 に示す。この図から、70A644 (PFD003) では、中心空孔の大きさが 0.43mm $\phi$  と大きく、且つほぼ円形で輪部がハッキリしている。また柱状晶長短軸比が 70A644 で 3.3 : 1, 533564 では 1.7 : 1 と約 2 倍になっている。白色析出物は FP ガスバルブ領域外側から柱状晶領域まで観察され中心に向かうほど粒成長が認められる。一方被覆管は、内外面共に異状は認められない。

#### (5) 試料No.70A662 (輪切り)

本試料の As-Polished 及び As-Etched 状態における顕微鏡写真を、それぞれ Photo O-10・

\* Photo O-6 の写真において、中心空孔は Pin Top 側の一部でしか観察されないが、粗研磨の過程では軸方向全域で観察された。

11, Photo 0-19・20に示す。燃料組織は70A625と同様に三層から成るが、本試料の高密度化領域においては燃料結晶粒の発達認められる。又FPガスバルブ領域のクラックで若干のヒーリングが起っている。被覆管は、内外面共に異状は認められない。

(6) 試料No.70A682

本試料のAs-Polished及びAs-Etched状態における光顕写真を、それぞれPhoto 0-12・13, Photo 0-21・22に示す。燃料組織及び被覆管状態は70A625と同様である。

(7) 試料No.70A685 (縦割り, 上部インシュレター部)

Photo 0-14にAs-Polished状態における光顕写真を示す。本試料は上部ブランケット燃料と炉心燃料境界部を含む縦割り試料である。ブランケット燃料には組織変化並びにクラックは認められない。

## 1.2 画像解析システムによる解析結果

輪切り試料, 70A625, 70A644, 70A662, 70A682につき, ライトペンにより, 各領域を入力することにより, ダブレット・ディジタイザーが描いた燃料ピン断面図をそれぞれFig. 7, Fig. 13及びFig. 18に示す。この図を共に各試料につき円周方向が $0^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$ の範囲での被覆管内, 外径, ペレット外径(直径値)それぞれFig. 3, Fig. 9, Fig. 14及びFig. 19に示す。同じくギャップ幅をFig. 4, Fig. 10, Fig. 15及びFig. 20に示す。高密度化領域, ガスバルブ領域の直径値をFig. 5, Fig. 11, Fig. 16及びFig. 21に示す。なお, 試料No. 70A644の中心空孔径, 柱状晶領域の直径値はFig. 8とFig. 11に示す。半径方向のクラック面積と, クラック面積がペレット面積に占める割合をFig. 6, Fig. 12, Fig. 17及びFig. 22に示す。

これらの値から各試料につき各領域径を $0^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$ の平均値で整理した表をTable 1に, またピン軸方向位置に対応させた図をFig. 23に示す。

## 2. EPMAによる燃料・ギャップ部の元素分析結果

### 2.1 燃料内F・P分布

ピン最高線出力位置の横断面試料No.70A644につき、燃料内のF・P分布を調べた。

燃料内には、Pd,Fe相とMo,Ru,Rh,Tc,Pd相の2種の金属状F・P析出物が観察される。Pd・Fe相の観察される位置は、燃料クラック内であり、その面分析結果をPhoto E-1に示す。Mo,Ru,Rh,Tc,Pd相は燃料内中央部から、高密度化領域に10 $\mu$ m $\phi$ 以下の大きさで多数析出しており、その定性分析結果をChart 1に、面分析結果をPhoto E-2, E-3に示す。

燃料内におけるBa,Zr,Cs,Pd,Nd,Si,Fe,Mo,Cr,Ru等の分布を調べるため、中心空孔より被覆管方向への線分析結果をChart 2, Chart 3, Chart 5, Chart 6に示す。Ba,Zr,Cs及びNdは燃料内にピーク箇所は観察されない。Pd,Mo,Ruは、燃料内に析出している金属状析出物に対応しピークがみられる。その他Feについては燃料外周部に多く観察される。

### 2.2 燃料-被覆管境界部の元素分布

#### (1) No.70A625

Photo E-4, E-5に面分析結果を示す。ギャップ内に被覆管成分元素(Fe,Cr,Ni,Mn)の溶出は観察されないが、主にCs,Te,U,Puが存在している。その他,Ba,Agが存在する箇所も観察された。

#### (2) No.70A644

Photo E-6に面分析結果を示す。ギャップ内に被覆管成分元素(Fe,Cr,Ni,Mn)の溶出は観察されないが、Cs,Siが観察される。

#### (3) No.70A662

Photo E-7に面分析結果を示す。ギャップ内に被覆管成分元素の溶出は観察されないが、Cs,Te,Ag,Uが観察される。

#### (4) No.70A682

Photo E-8に面分析結果を示す。ギャップ内に被覆管成分元素であるCr,Fe,Niが観察される。それらの濃度は被覆管濃度の約48%,4%,4%である。その他ギャップ内には,Cs,Uが観察される。

### 2.3 金属状析出物(Mo-Ru-Rh-Tc-Pd相)の燃料径方向の組成変化

ピン最高線出力位置、横断面試料(No.70A644)につき測定した。測定対象とした金属状析

出物は、顕微鏡写真520X 半径方向スリット内の、中心部から高密度化領域までの比較的大きい析出物（合計8個）を対象とした。

測定は先づ標準試料（Pure Mo, Ru, Rh, Pd）を測定し、次に同条件で、No.70A644試料を測定し、標準試料に対する相対強度比を求めた。各元素の相対強度比を燃料半径方向位置に対応し、プロットしたグラフをFig. 24に示す。

金属状析出物の主成分はMoとRuであり、燃料外周部ではPdの濃度が高くなっている。

## 2.4 半径方向のPu, Uの分布

### (1) No.70A625

U, Puについて、中心部より被覆管方向へ実施した線分析結果をChart 7に示す。線分析結果から、高密度化領域及び不変領域にU, PuのSpot的な増減が多数観察される。Photo E-9に燃料最外周部のU, Puの面分析結果を示す。

### (2) No.70A644

U, Puについて、中心空孔内より被覆管方向へ実施した線分析結果をChart 8に示す。線分析結果からPuの再分布と思われる濃度変化は認められない。しかし、前述試料と同様に外周部においてU, PuのSpot的な増減が観察される。

次に半径方向各位置（12点）における、Pu及びUの特性X線強度を測定した結果を、半径方向位置に対応しプロットしたグラフをFig. 25に示す。U, Puは半径方向において相反する増減しているものの、ほぼ一定濃度である。外周部の不変領域では濃度のバラッキが多く、不均一となっている。

### (3) No.70A682

U, Puについて中心部より被覆管方向へ実施した線分析結果をChart 9に示す。No.70A625と同様の傾向である。

## 2.5 燃料内に保持されているXeの分布

### (1) 測定方法

燃料内に保持されているXeは微量であるため、照射電子線の吸収電流値を約 $1\mu\text{A}$ （通常測定時 $0.1\mu\text{A}$ ）に増加させまた、ビーム直径も約 $50\mu\text{m}$ に広げて測定した。Xe $L\alpha$ -X線波長は、 $3.015\text{\AA}$ である。そこでスペクトロメータを $3.000\text{\AA}$ ～ $3.040\text{\AA}$ まで $0.001\text{\AA}$ ステップ毎に変化させ、各ステップで10秒間計測し波長スペクトルをとることによりXe $L\alpha$ -X線の有無及び強度を測定した。

### (2) 測定結果

試料No.70A625, No.70A644, No.70A662, No.70A682につきそれぞれ、燃料中央部からペレット外周部へ8Point測定した。波長スペクトルをFig. 26～Fig. 29に示す。製造時

領域でXeのピークがみられるが、高密度化領域及びF・Pガスバルブ領域からほとんど検出されない。

それぞれの計数値からバックグラウンド(B・G)を差し引くことにより求めた図中斜線が施された正味ピーク面積を、ペレット半径方向に対応させプロットしたグラフをFig. 30に示す。ピーク面積はペレット内特に結晶粒内に保持されているXe量に対応する。Fig. 30から次のことがわかる。1) ペレット半径方向でみたXe濃度は、製造時領域でほぼ一定値であるのに対して高密度化領域では急激に低下し、さらにF・Pガスバルブ領域では検出されない。2) 燃料カラム軸方向で比較してみると中央の高線出力位置(No. 70 A 644)でXe濃度は最高値となっている。



### 3. IMAによる燃料内質量分析結果

#### 3.1 燃料内スペクトル分析

##### (1) No.70A625

燃料-被覆管境界部（イオンビーム径100 $\mu\text{m}\phi$ ）の質量スペクトルをFig. 3 1に、燃料半径方向中間部（イオンビーム径1mm $\phi$ ）の質量スペクトルをFig. 3 2に示す。燃料-被覆管境界部スペクトルから、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ のF・Pが観察される。燃料中間部からは、質量数90、140および160近辺にピークが観察される。これは、核分裂収率曲線と同じ傾向である。但し、160近辺のピークについては、140近辺希土類元素の酸化物と思われる。

次に、イオンビーム径100 $\mu\text{m}\phi$ で100 $\mu\text{m}$ 間隔に被覆管外側より燃料中央部まで連続スキヤンを行ない、質量スペクトルを求めた。 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{52}\text{Cr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{239}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}$ 、 $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}$ 、 $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}$ 、 $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ 、 $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}_2$ 、 $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ の線分析結果をFig. 3 3～Fig. 3 7に示す。

$^{56}\text{Fe}$ 、 $^{52}\text{Cr}$ は燃料内にピークは観察されない、Csは質量数137、135、133共にGap内と、燃料外周部にピークが観察される。

##### (2) No.70A644〔中心空孔有り〕

燃料-被覆管境界部（イオンビーム径100 $\mu\text{m}\phi$ ）の質量スペクトルをFig. 3 8に、燃料半径方向中間部（イオンビーム径1mm $\phi$ ）の質量スペクトルをFig. 3 9に示す。燃料-被覆管境界部スペクトルから $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ のF・Pが観察される。燃料中間部のスペクトルからは、質量数90、140及び160近辺にピークが観察される。

次にイオンビーム径100 $\mu\text{m}\phi$ で100 $\mu\text{m}$ 間隔に被覆管外側より燃料中心空孔まで連続スキヤンを行ない質量スペクトルを求めた、 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{52}\text{Cr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}$ 、 $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}$ 、 $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}$ 、 $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ 、 $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}_2$ 、 $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ の線分析結果をFig. 40～Fig. 44に示す。

$^{137}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ についてはGap内の他、燃料内外周部においても観察される。

##### (3) No.70A662

燃料-被覆管境界部（イオンビーム径100 $\mu\text{m}\phi$ ）の質量スペクトルをFig. 4 5に示す。また燃料半径方向中間部（イオンビーム径1mm $\phi$ ）の質量スペクトルをFig. 4 6に示す。燃料-被覆管境界部からは $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ のF・Pが観察される。燃料中間部のスペクトルからは、質量数90、140及び160近辺にピークが観察される。

次にイオンビーム径100 $\mu\text{m}\phi$ で100 $\mu\text{m}$ 間隔に被覆管外側より燃料中央部まで連続スキヤンを行ない求めた、 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{52}\text{Cr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}$ 、 $^{239}\text{Pu}$

$+^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}$ ,  $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}_2$  の線分析結果を Fig. 47 ~ Fig. 51 に示す。 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$  は Gap 内と燃料内外周部に観察される。

(4) No.70A682

イオンビーム径を  $100\ \mu\text{m}\phi$  にて  $100\ \mu\text{m}$  間隔に被覆管外径側より中央部まで連続スキヤンを行ない質量スペクトルを求めた、 $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}$ ,  $^{238}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U}+^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu}+^{16}\text{O}_2$  の線分析結果を Fig. 5 2 ~ Fig. 5 6 に示す。Cs は Gap 部及び燃料内においても観察されない。

3.2 燃焼度測定結果

燃料ペレット中間部（半径方向）をビーム径が約  $1\ \text{mm}\phi$  にて、深さ方向に 10 回測定し、その平均値から求めた燃焼度を下表に示す。

試料No \ 計数值	Iu	Ipu	Ind	燃焼度 a %
70A625	2652144	1277310	4335	1.22
70A644	2205123	1095801	5616	1.87
70A662	2038240	1006362	3372	1.23
70A682	1274802	701480	1650	0.93

燃焼度 (a %) の算出には、次式を用いた。

$$a \% = \frac{\text{Ind} / (2.966 \times 0.0343)}{\text{Iu} + \text{Ipu} / 1.290 + \text{Ind} / (2.966 \times 0.0343)} \times 100$$

1.290 …… U, Pu のイオン化効率比

2.966 …… U, Nd のイオン化効率比

0.0325 …… Nd の核分裂収率

IMA 測定より求めた燃焼度と、計算値を燃料ピン軸方向位置に対応しプロットしたグラフを Fig. 5 7 に示す。

#### 4. 被覆管外表面の観察及び質量分析結果

被覆管外表面性状及び表面成分元素変化を調べるため、PIN No.70A6 (S Tube) 及びPIN No.70B4 (K Tube)よりそれぞれ、軸方向に5ヶ、8ヶの試料を採取した。各試料のピン下端部からの位置及び被覆管外表面温度(参考データ)を下表に示す。

Specimen No.	Position (mm) D・F・P・B	Clad Temperature (°C) - Outer -	
※ 70A627	110 ~115.5 (5.5)	380	S. Tube
※ 70A646	336.2~340.5 (4.3)	470	
※ 70A661	506.5~513.8 (7.3)	525	
※ 70A681	606.5~614.5 (8.0)	565	
70A6A	1480.5~1484.5 (4.0)	560	
※ 70B42C	81.5~ 90.5 (9.0)	370	K. Tube
70B44C	173.5~182.5 ( " )	410	
※ 70B46	265.5~274.5 ( " )	455	
70B48	356.5~365.5 ( " )	480	
※ 70B4A	438.5~447.5 ( " )	500	
70B4C	530.5~539.5 ( " )	535	
※ 70B4EC	631.5~640.5 ( " )	565	
70B4G	950.5~959.5 ( " )	560	

※ 1 MA による質量分析を実施した試料

##### 4.1 走査電子顕微鏡による被覆管外表面観察結果

###### (1) PiN No.70A6 (S. Tube)

Phot S-1 に走査電子顕微鏡写真(800X, 2400X, 8000X)を示す。低温度部 (No.70A627) では、表面全体が微小な付着物に覆われているがその上部試料中温度部 (No.70A646) ではS材において特有の加工跡がみられ、母材が露出しているものと思われる。高温度部 (No.70A661, No.70A681, No.70A6A)においては、母材の荒れが著しく進行し、表面には粒子状の付着物が多数みられ、その周辺は腐食によりできたと思われる溝が多数観察される。

## (2) PiN No.70B4 (K.Tube)

Photo S-2に走査電子顕微鏡(800X, 2400X, 8000X)を示す。

低温部 (No.70B42C)では約0.4 $\mu$ m以下の粒子が多数母材上に付着している。母材はK材において特有の周方向の加工跡がみられる。その上部 (No.70B4C)にいくと表面粒子は減少している。

中温部 (No.70B46)では、表面粒子はほとんど観察されない。その上部 (No.70B48, No.70B4A, No.70B4C)にいくにしたがい母材の荒れが進行している。母材上には微細粒子が全体に観察される。また部分的には腐食による溝が観察される。

高温部 (No.70B4EC, No.70B4G)では、母材の荒れは更に進行し、腐食により発生したと思われる粒子が多数観察され、その周囲は溝になっている。

## 4.2 IMAによる被覆管外表面質量分析結果

被覆管外表面の成分元素濃度変化を調べるため、70A6ピン(S材)、70B4ピン(K材)より、それぞれ4試料を選び測定した。

Fig. 58にFe, Cr, Ni, Mnの深さ方向(ビーム径1mm $\phi$ , 50回スキャン)プロファイルを示す。それらの結果を整理したものを下表に示す。

試料位置 / PiN No.	PiN No. 70A 6 (S Tube)	PiN No. 70B 4 (K Tube)
低温部 No. 70A627 (S) (380 $^{\circ}$ C) No. 70B42C(K) (370 $^{\circ}$ C)	Fe: 表面より0.4 $\mu$ m深さまで濃度が減少 Cr: 表面より0.4 $\mu$ m深さまで濃度が減少 Ni: 変化なし Mn: 表面から0.4 $\mu$ m深さまで濃度が増加	Fe: 同 左 Cr: 表面より0.4 $\mu$ m深さまで濃度が減少 Ni: 表面から0.4 $\mu$ m深さまで濃度が減少 Mn: 表面から0.4 $\mu$ m深さまで濃度が増加
中温部 No. 70A646(S) (470 $^{\circ}$ C) No. 70B46(K) (455 $^{\circ}$ C)	Fe, Ni, Cr, Mn 共に深さ方向への濃度変化なし。	同 左
高温部 No. 70A661(S) (525 $^{\circ}$ C) No. 70B4A(K) (500 $^{\circ}$ C)	Fe: 変化なし Cr: 表面から1 $\mu$ m深さまで濃度が増加 Ni: 表面から1 $\mu$ m深さまで濃度が減少 Mn: 表面から1 $\mu$ m深さまで濃度が減少	Fe: 同 左 Cr: 表面から0.6 $\mu$ m深さまで濃度が増加 Ni: 表面から0.6 $\mu$ m深さまで濃度が減少 Mn: 変化なし

PiN No. 試料位置	PIN No.70A 6 (S Tube)	PIN No.70B 4 (K Tube)
最高温部  No.70A 681(S) (565°C) No.70B 4EC(K) (565°C)	Fe: 変化なし Cr: 表面から 1.8 μm 深さまで濃度が増加 Ni: 表面から 1.8 μm 深さまで濃度が減少 Mn: 表面から 1.8 μm 深さまで濃度が減少	Fe: 表面から 0.9 μm 深さまで濃度減少 Cr: 表面から 0.9 μm 深さまで濃度増加 Ni: 表面から 0.9 μm 深さまで濃度減少 n: 表面から 0.9 μm 深さまで濃度減少

上表より低温部, 中温部, 高温部の各温度領域の違いによって, 被覆管表面 (< 2 μm) において各元素の濃度に変化がみられる。

ピンBottom 側, 低温部において, Fe, Crの減少のMnの増加が認められる。中温度においては, 深さ方向の濃度変化はほとんど認められない。500°C以上の高温部においては, Crの増加, Ni, Mnの減少が認められる。この傾向は, S材及びK材共に同様である。

Table 1 Summary Data from Ceramography (PFD003)

Specimen No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Clad Dia. (mm)		Fuel Outer Dia. (mm)	Restructured Region Dia. (mm)					Residual Diametral Gap Size ( $\mu\text{m}$ )	
		Outer	Inner		Central Void	Columnar Region	Gas Bubble Region	Densified Region	Dark Region Inner		Dark Region Outer
70A625	107.9	5.491	4.787	4.706	0	0	2.481	3.000	0	0	81
70A644	333.9	5.491	4.794	4.707	0.438	2.195	3.189	3.699	0	0	87
70A662	520.6	5.491	4.791	4.721	0	0	2.594	3.211	0	0	72
70A682	621.5	5.491	4.795	4.680	0	0	2.556	2.995	0	0	115

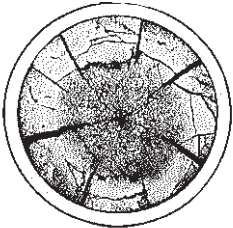
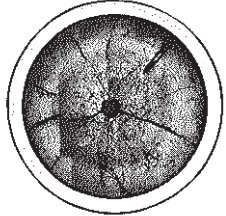
	Metallography Peak Linear Power (w/cm) Peak Burnup (MWD/MTM)	Restructured Region Dia. (mm)			Axial Ratio of Columnar Grain Longer:Shorter
		Central Void	Columnar Region	Densified Region	
MK-I PPJX13 533564	 280 w/cm 48,000 MWD/MTM	0.18 mm ( 3%)	2.68 mm (49%)	4.91 mm (90%)	1.7:1
MK-II PFD003 70A644	 360 w/cm 15,800 MWD/MTM	0.43 mm (10%)	2.19 mm (47%)	3.69 mm (80%)	3.3:1

Fig. 1 Comparison of Microstructure between Specimen No.533564 (PPJX13) and Specimen No.70A644 (PFD003)

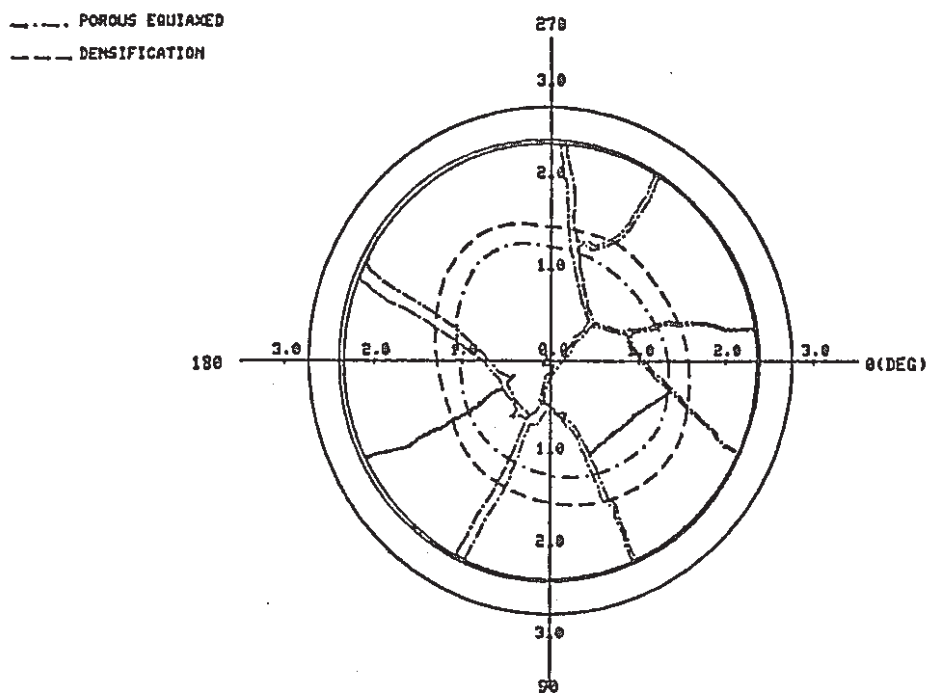


Fig. 2 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A625)



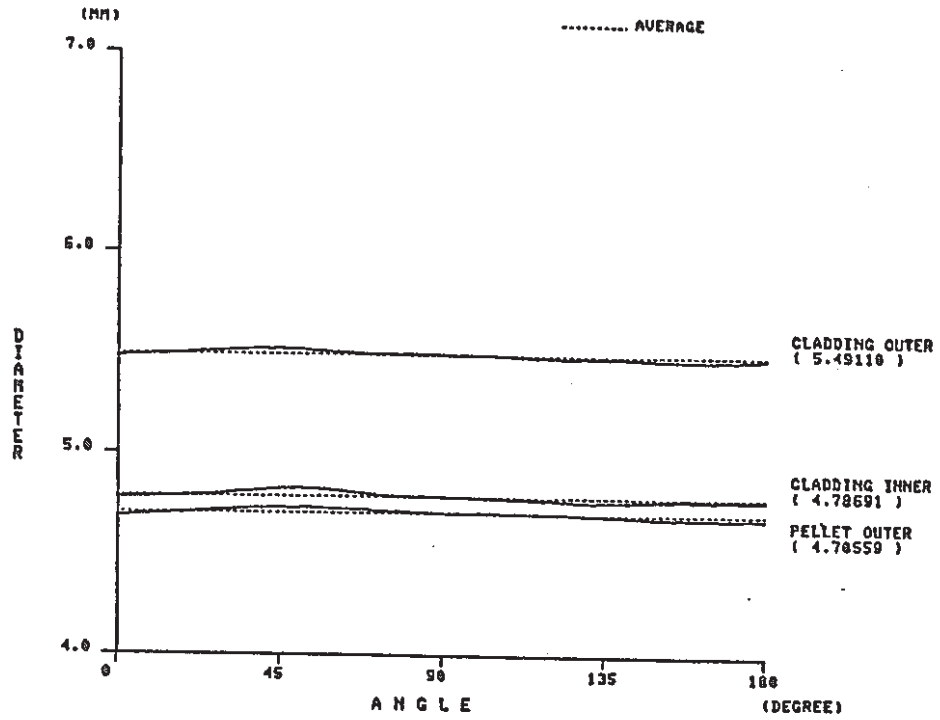


Fig. 3 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter (Specimen No.70A625)

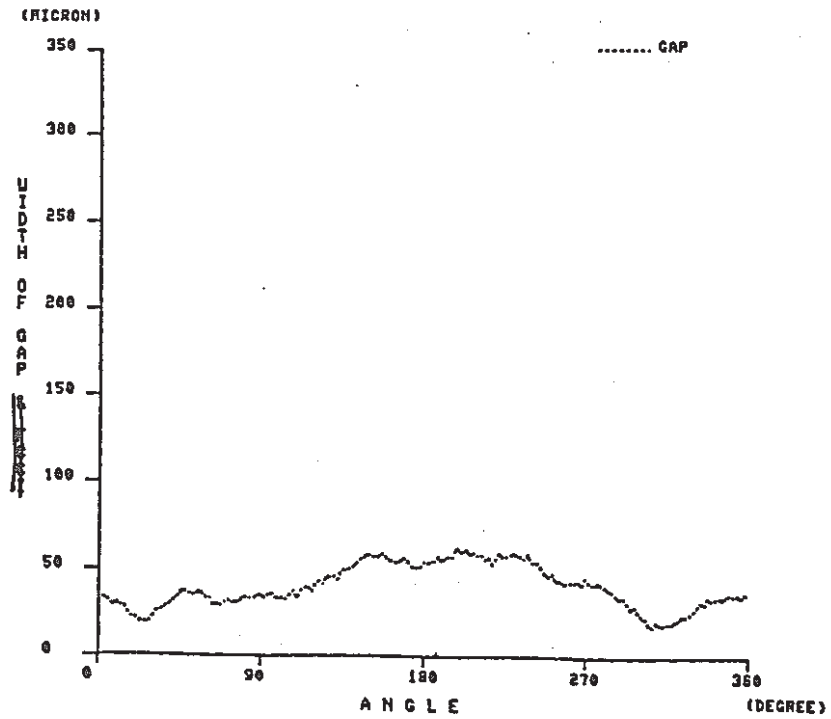


Fig. 4 Width of Gap to Circumferential Distribution (Specimen No.70A625)

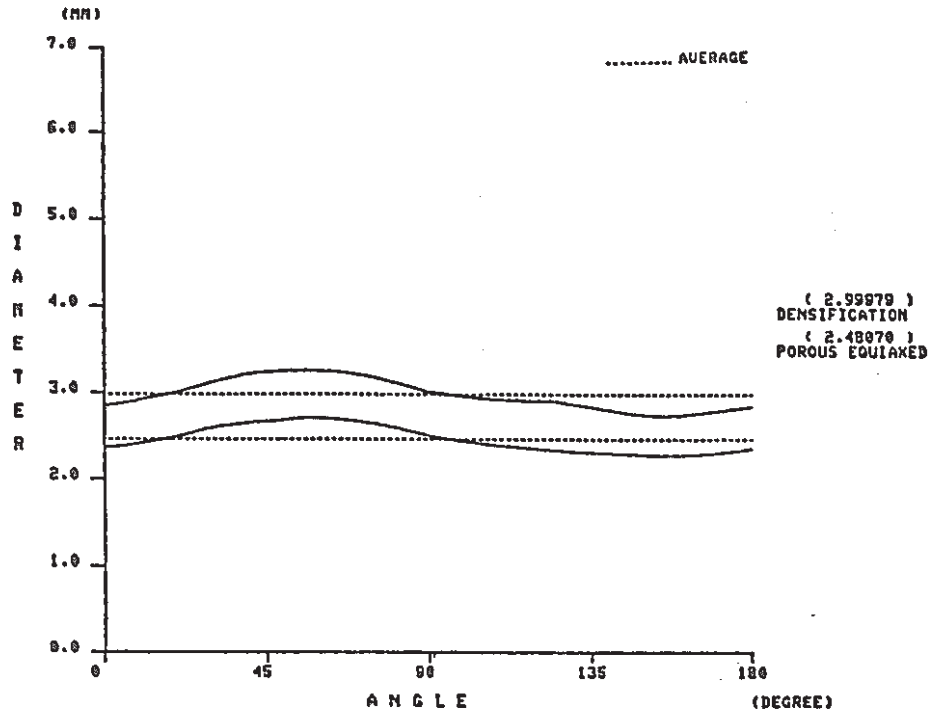


Fig. 5 Circumferential Distribution of Densified Equiaxed Grains Region Diameter and Porous Equiaxed Region Diameter (Specimen No.70A625)

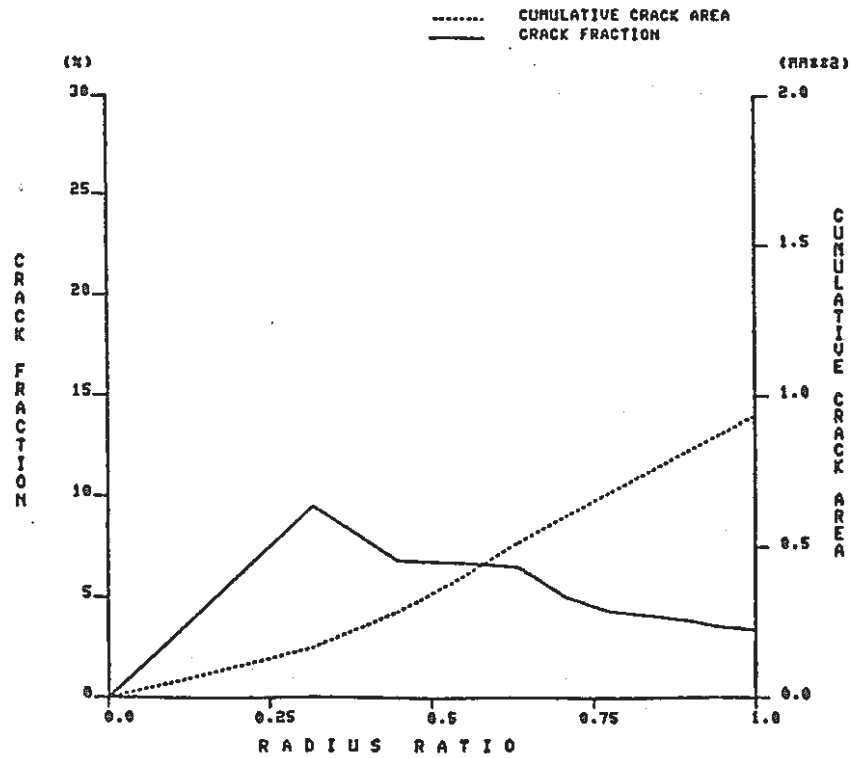


Fig. 6 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio (Specimen No.70A625)

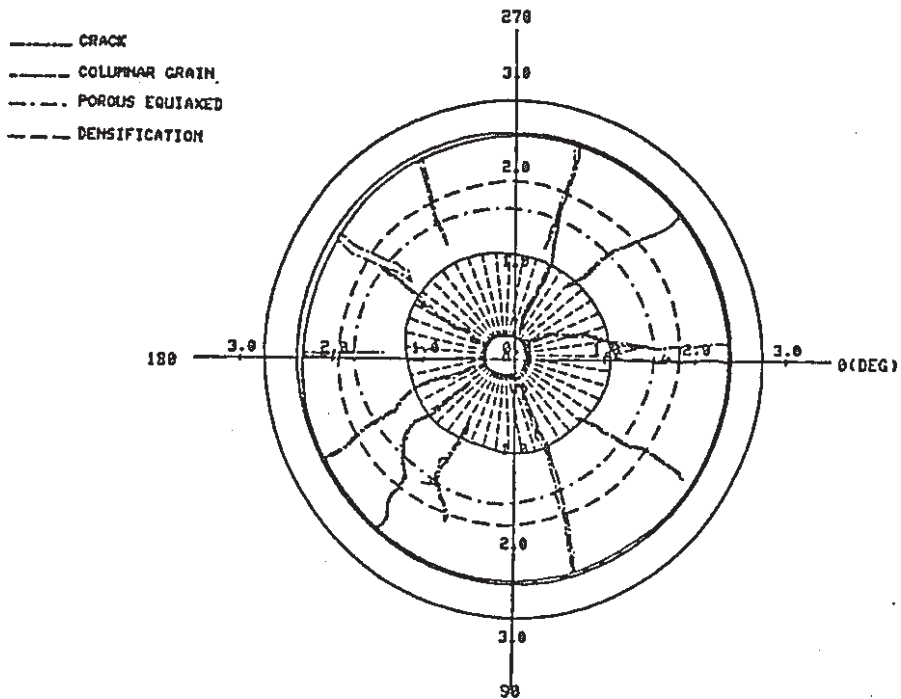


Fig. 7 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A644)

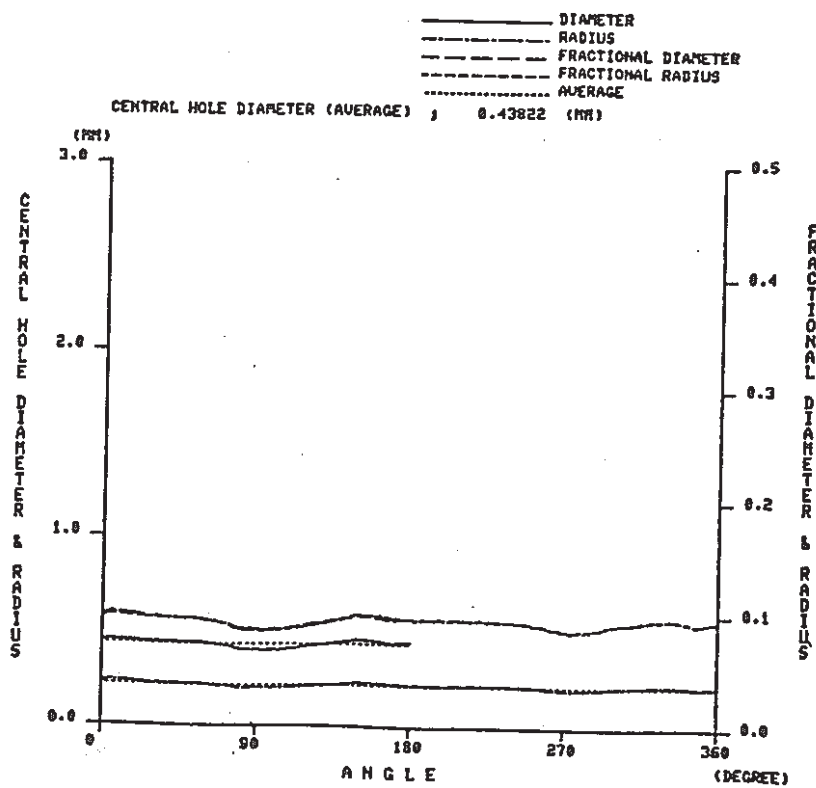


Fig. 8 Circumferential Distribution of Central Void Area Diameter (Specimen No.70A644)

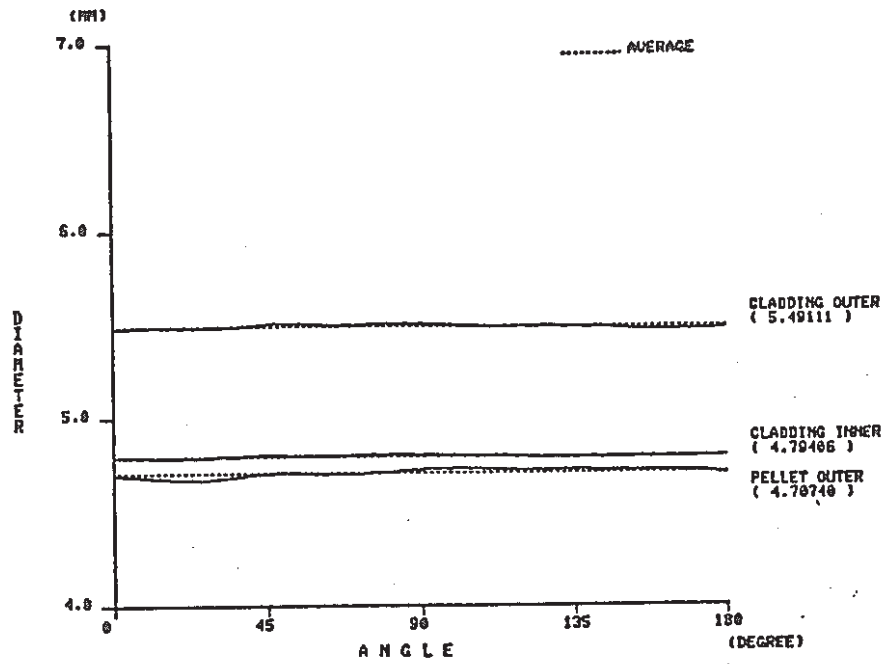


Fig. 9 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter (Specimen No.70A644)

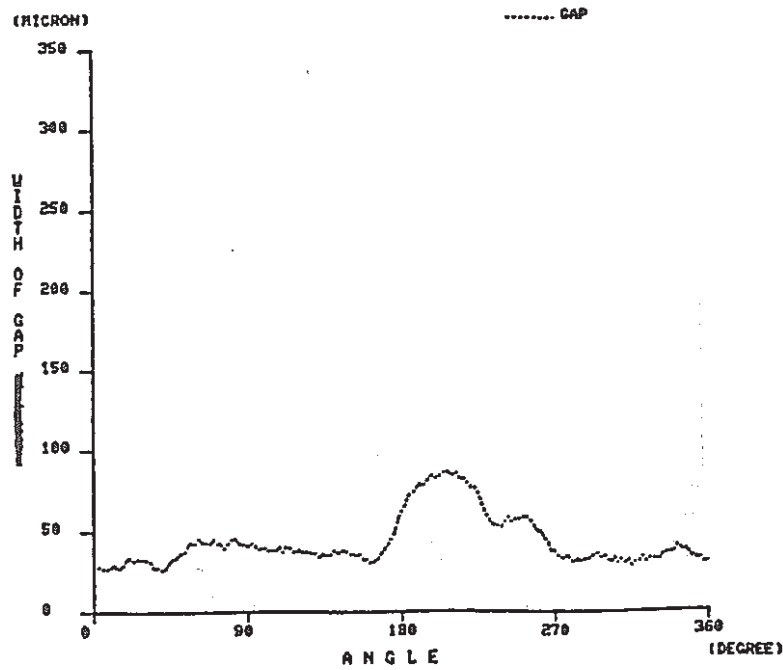


Fig. 10 Width of Gap to Circumferential Distribution (Specimen No.70A644)

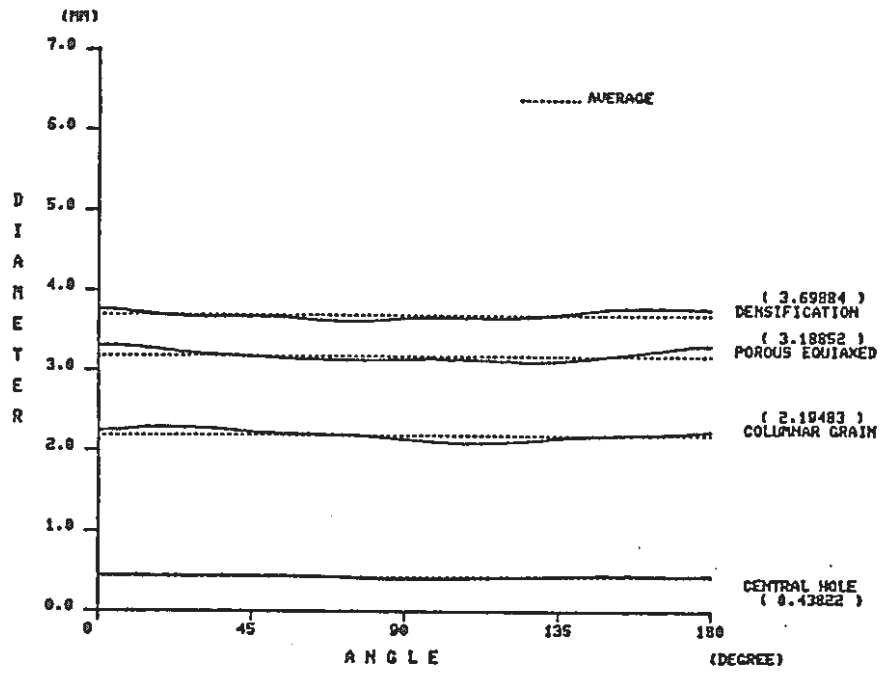


Fig. 11 Circumferential Distribution of Columnar Grains Region Diameter, Densified Equiaxed Grains Region Diameter and Porous Equiaxed Grains Region Diameter (Specimen No.70A644)

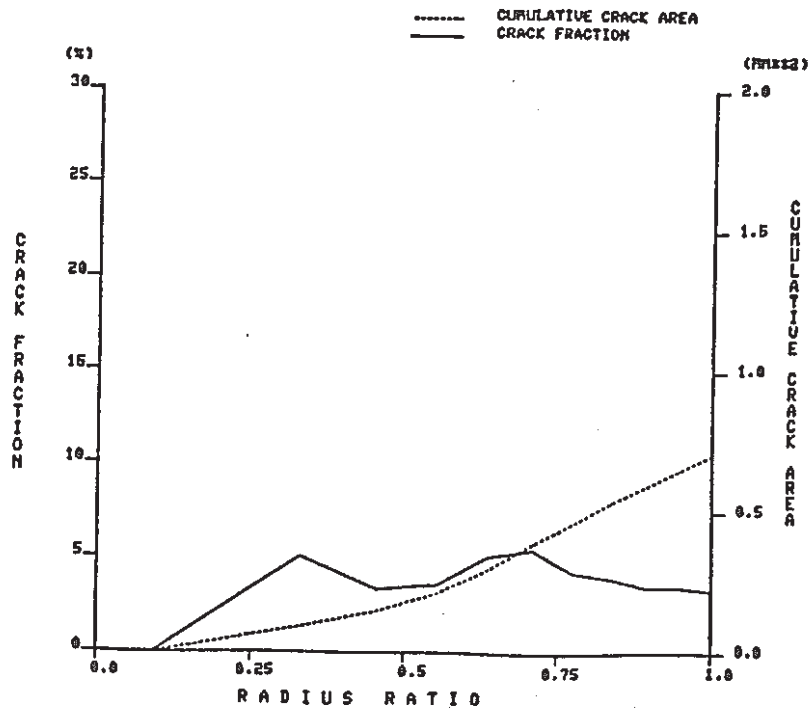


Fig. 12 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio (Specimen No.70A644)

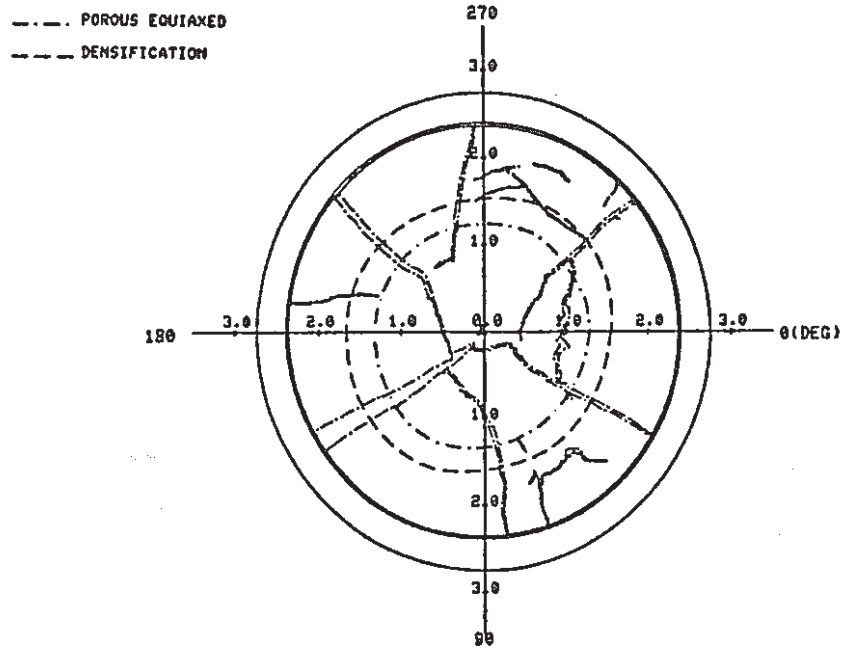


Fig. 13 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A662)

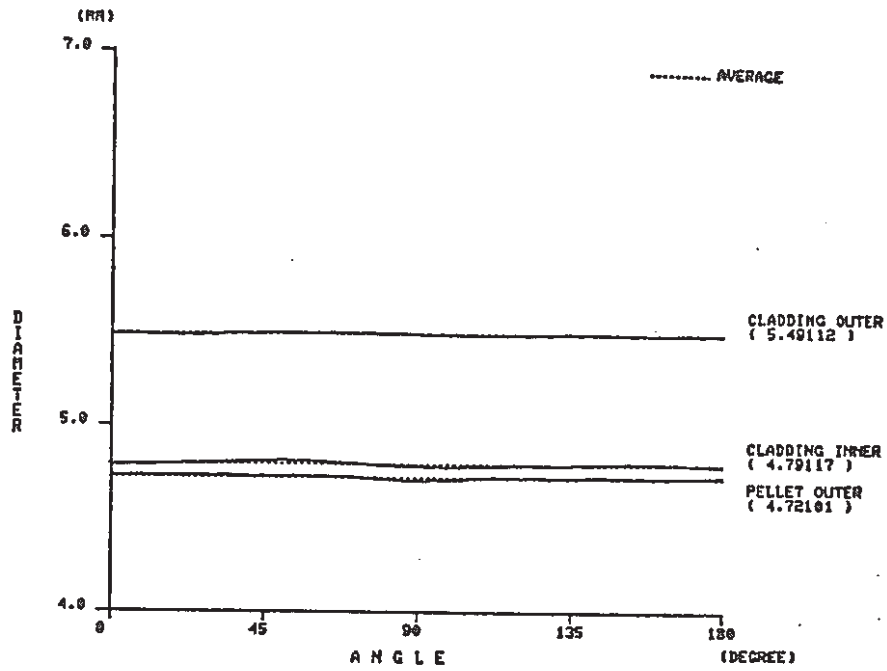


Fig. 14 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter (Specimen No.70A662)

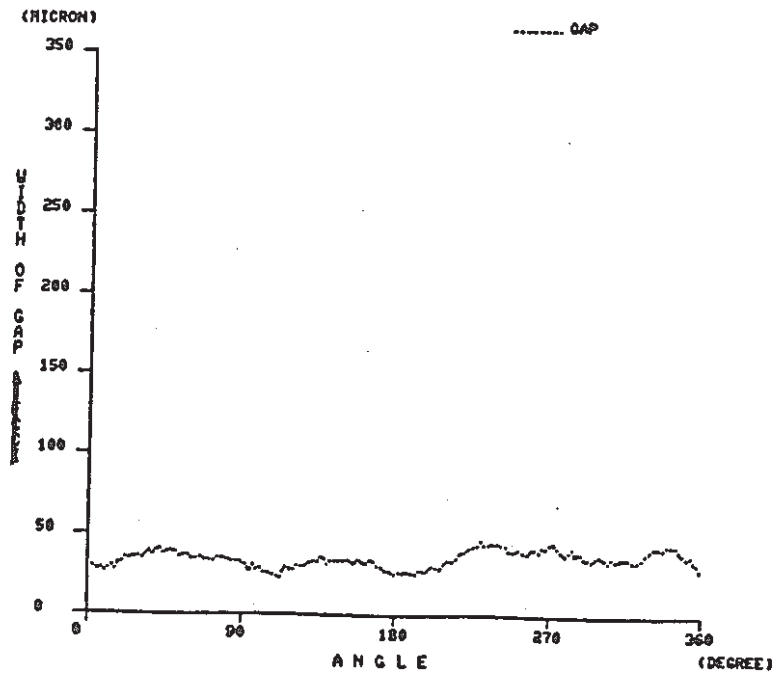


Fig. 15 Width of Gap to Circumferential Distribution (Specimen No.70A662)

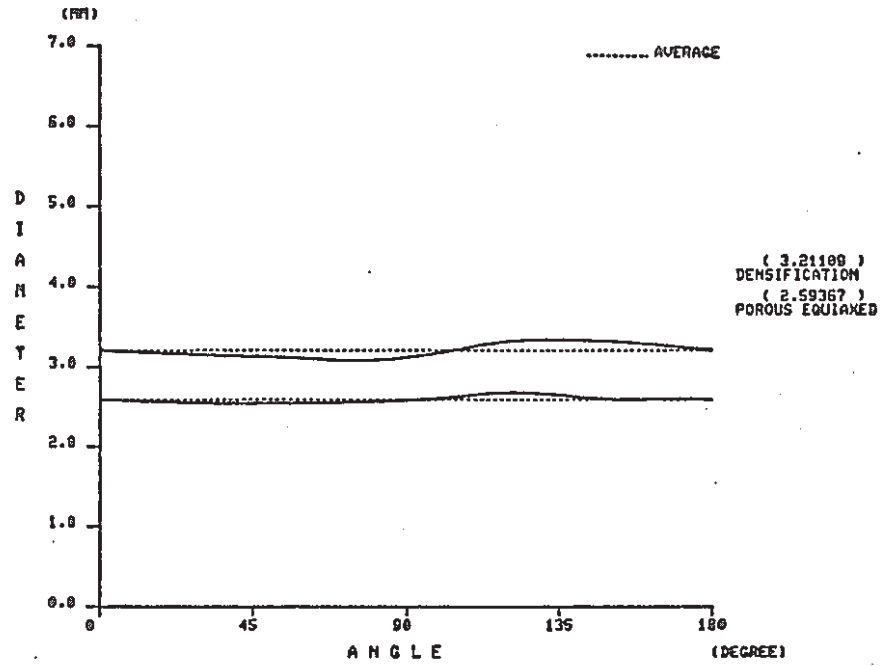


Fig. 16 Circumferential Distribution of Densified Equiaxed Grains Region Diameter and Porous Equiaxed Region Diameter (Specimen No.70A662)

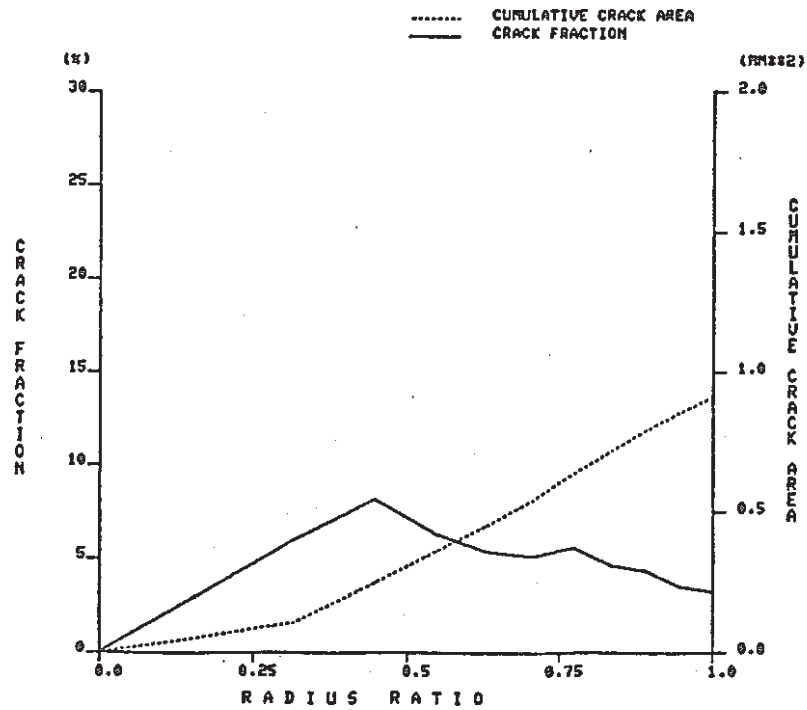


Fig. 17 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio (Specimen No.70A662)



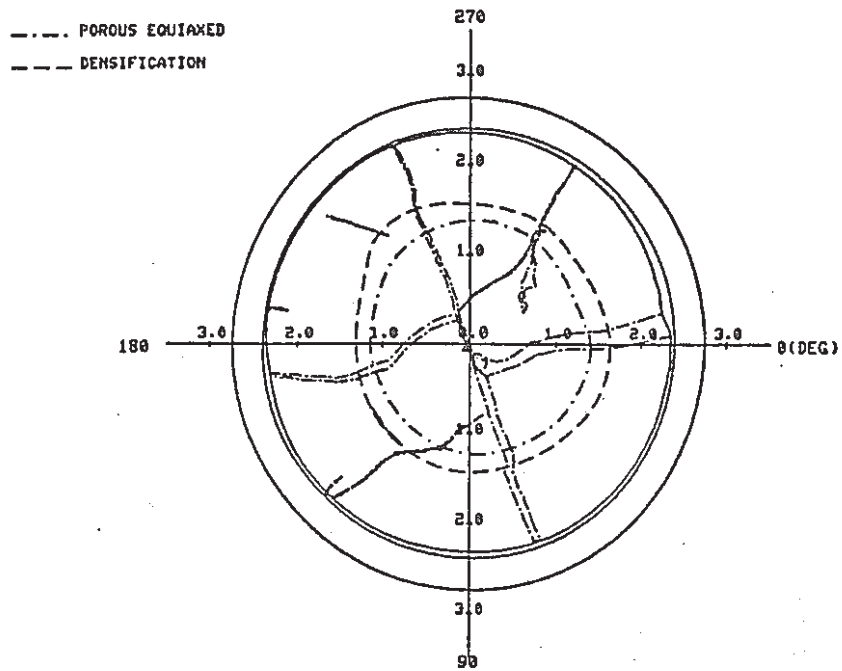


Fig. 18 A Transverse Section of a Core Fuel Pin Illustrated by PINATD (Specimen No.70A682)

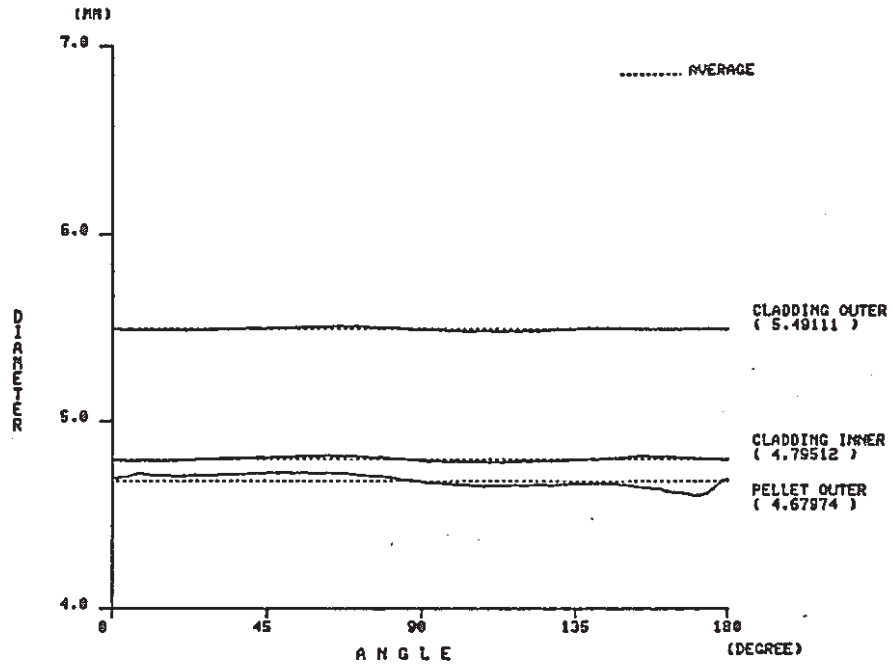


Fig. 19 Circumferential Distribution of Cladding Outer Diameter, Cladding Inner Diameter and Pellet Outer Diameter (Specimen No.70A682)

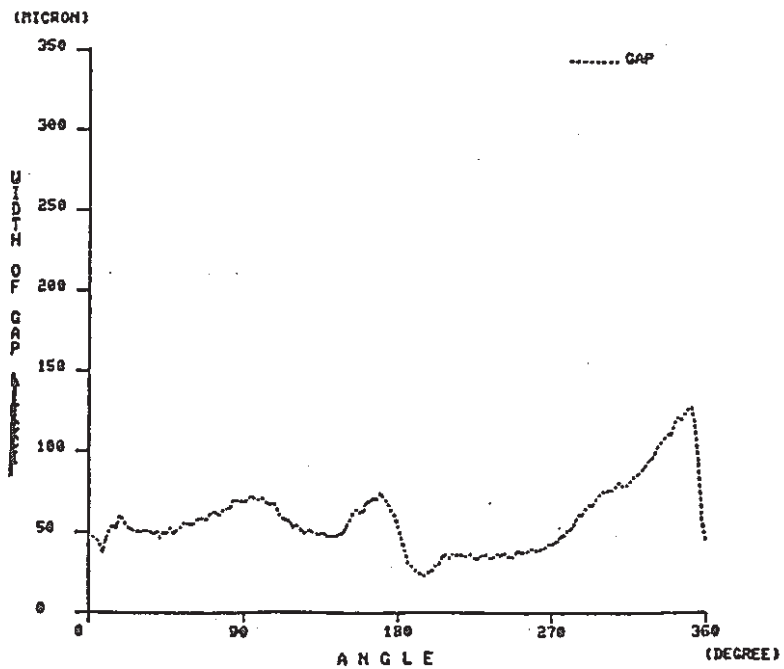


Fig. 20 Width of Gap to Circumferential Distribution (Specimen No.70A682)

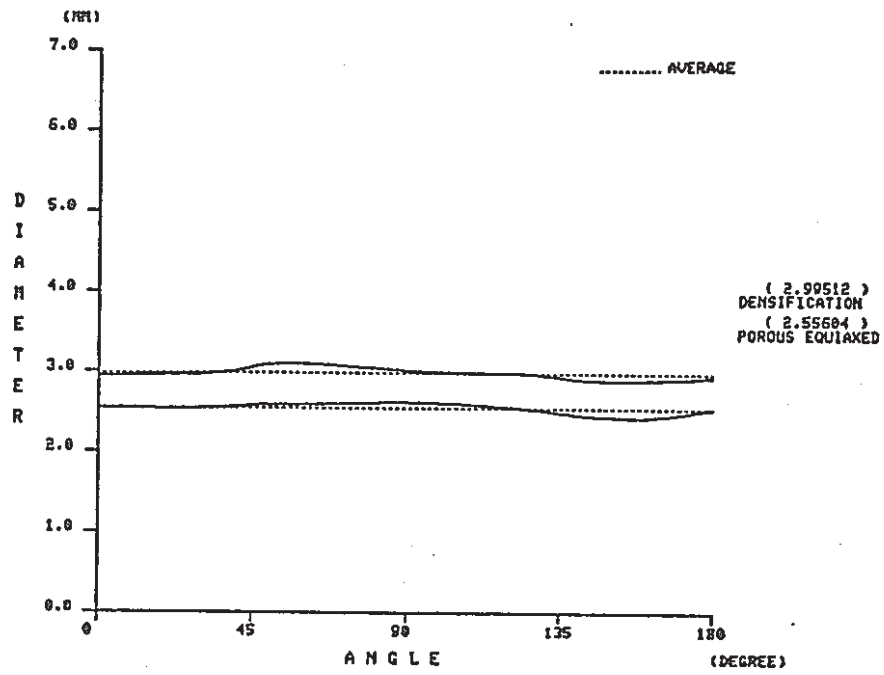


Fig. 21 Circumferential Distribution of Densified Equiaxed Grains Region Diameter and Porous Equiaxed Region Diameter (Specimen No.70A682)

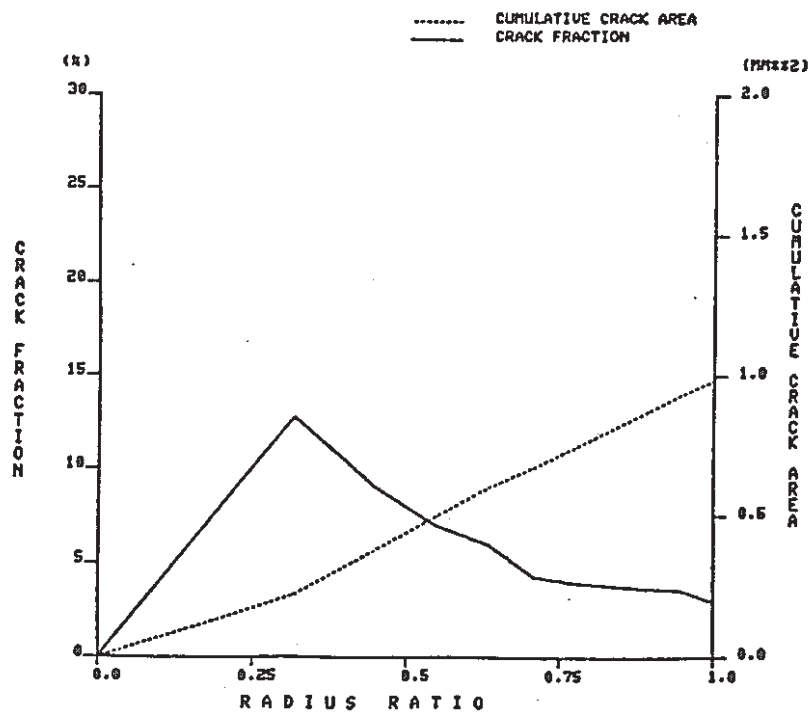


Fig. 22 Crack Fraction and Cumulative Crack Area to Radius Ratio (Specimen No.70A682)

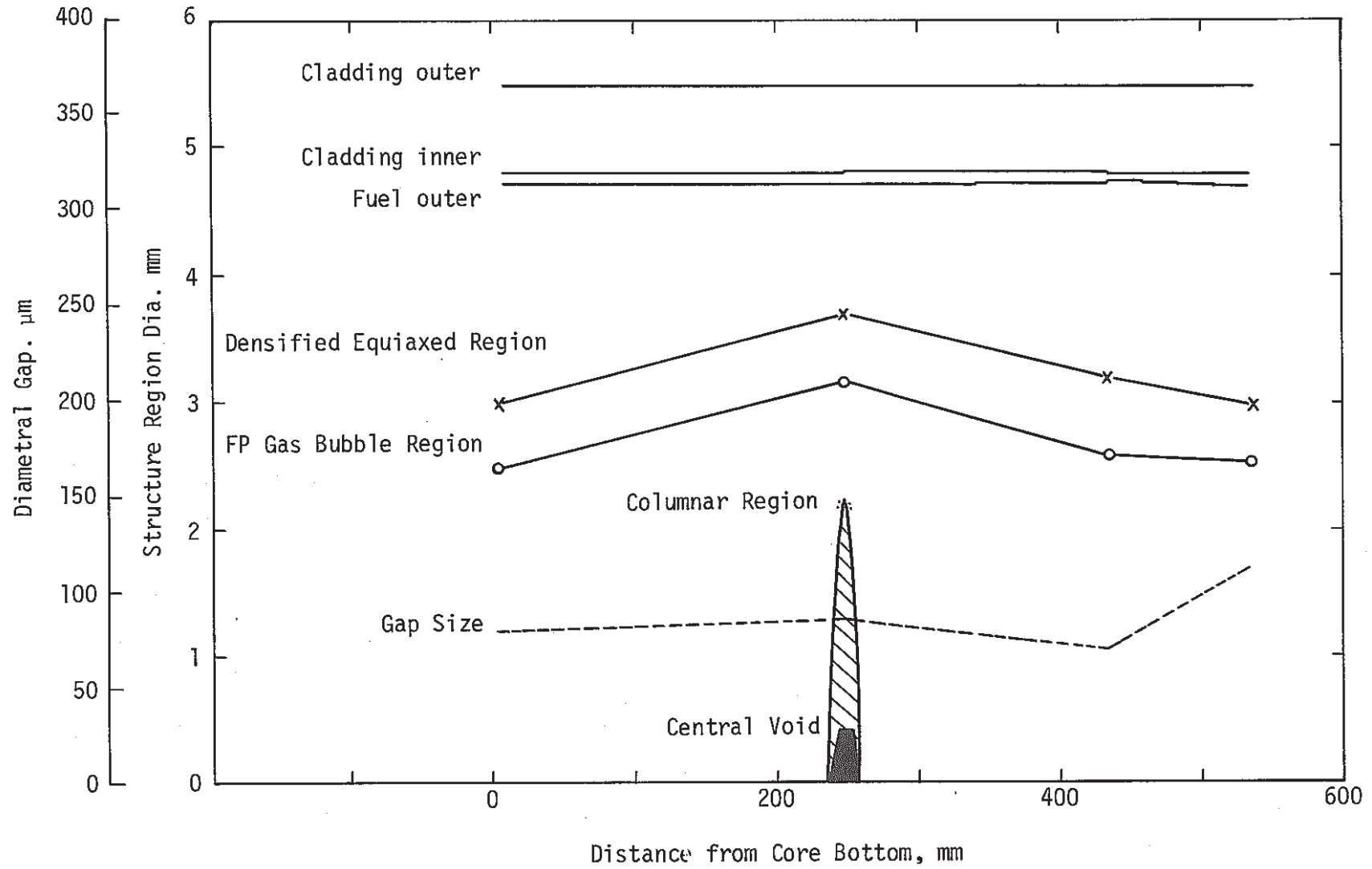


Fig. 23 Axial Profile of the Gap & Fuel Structure

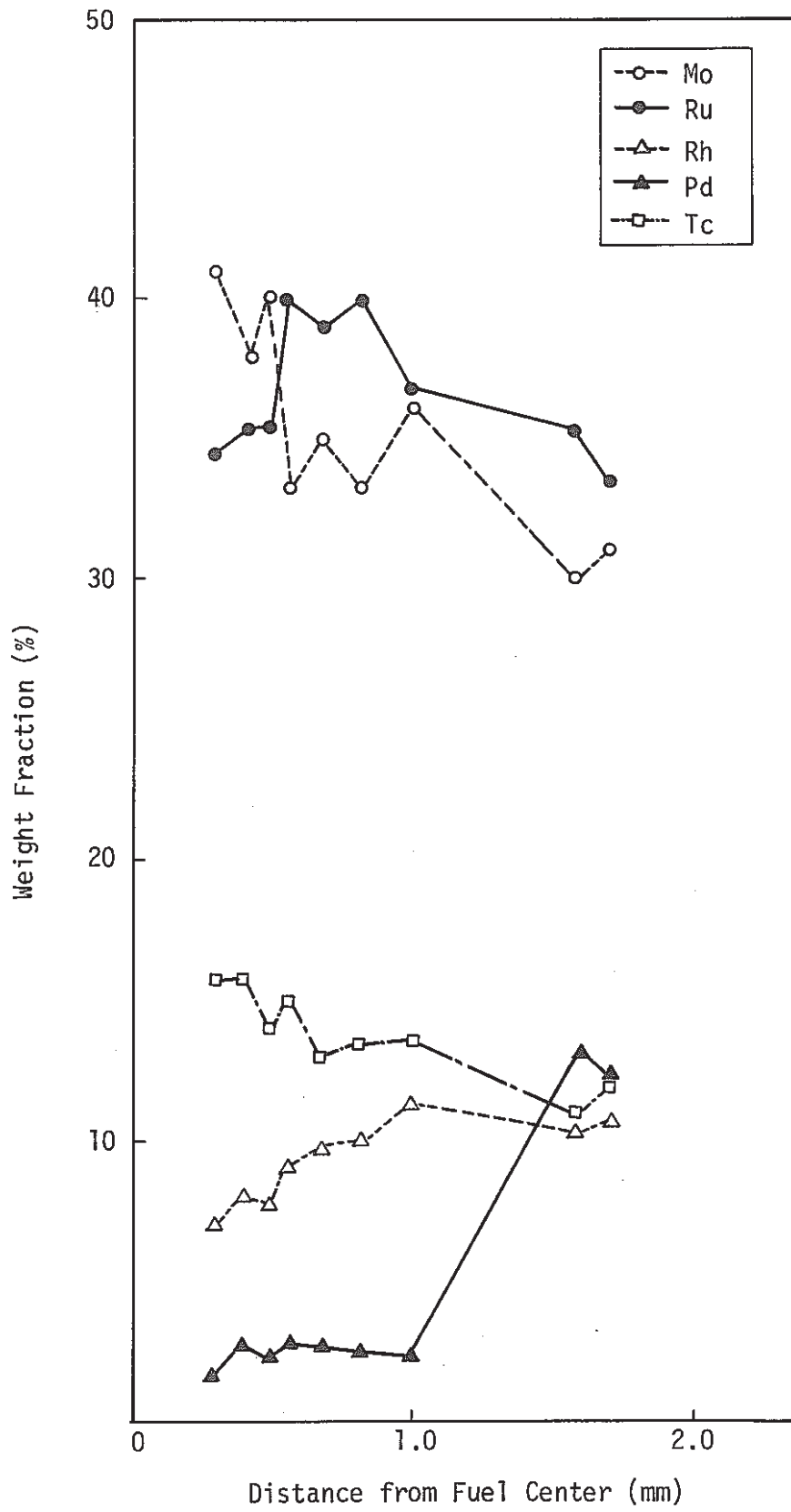


Fig. 24 Radial Distribution of Mo and Ru and Rh and Pd and Tc Content in Metallic Inclusion (Specimen No.70A644)

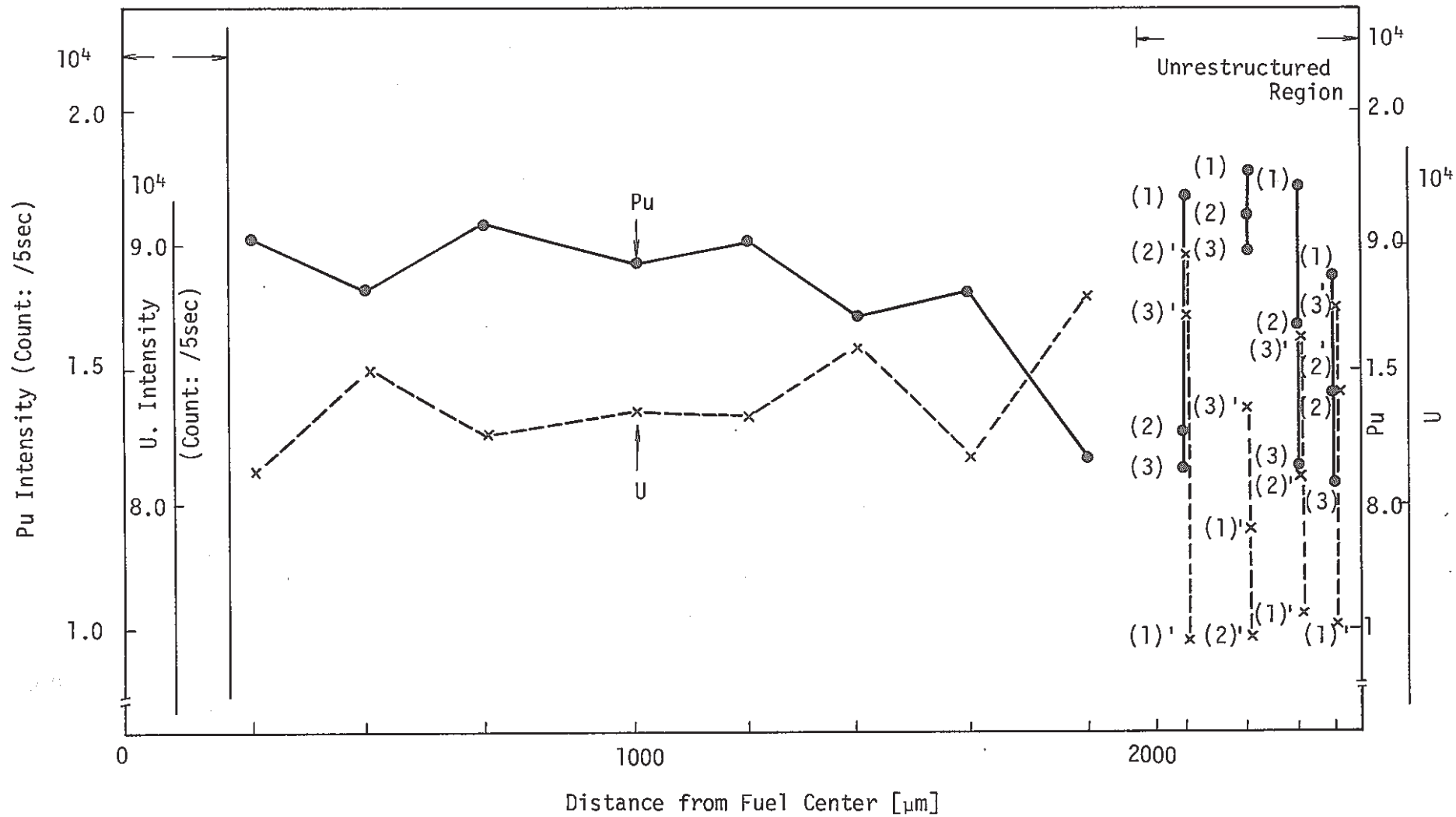


Fig. 25 Radial Distribution of Pu-Mβ and U-Mα in the Fuel (Specimen No.70A644)

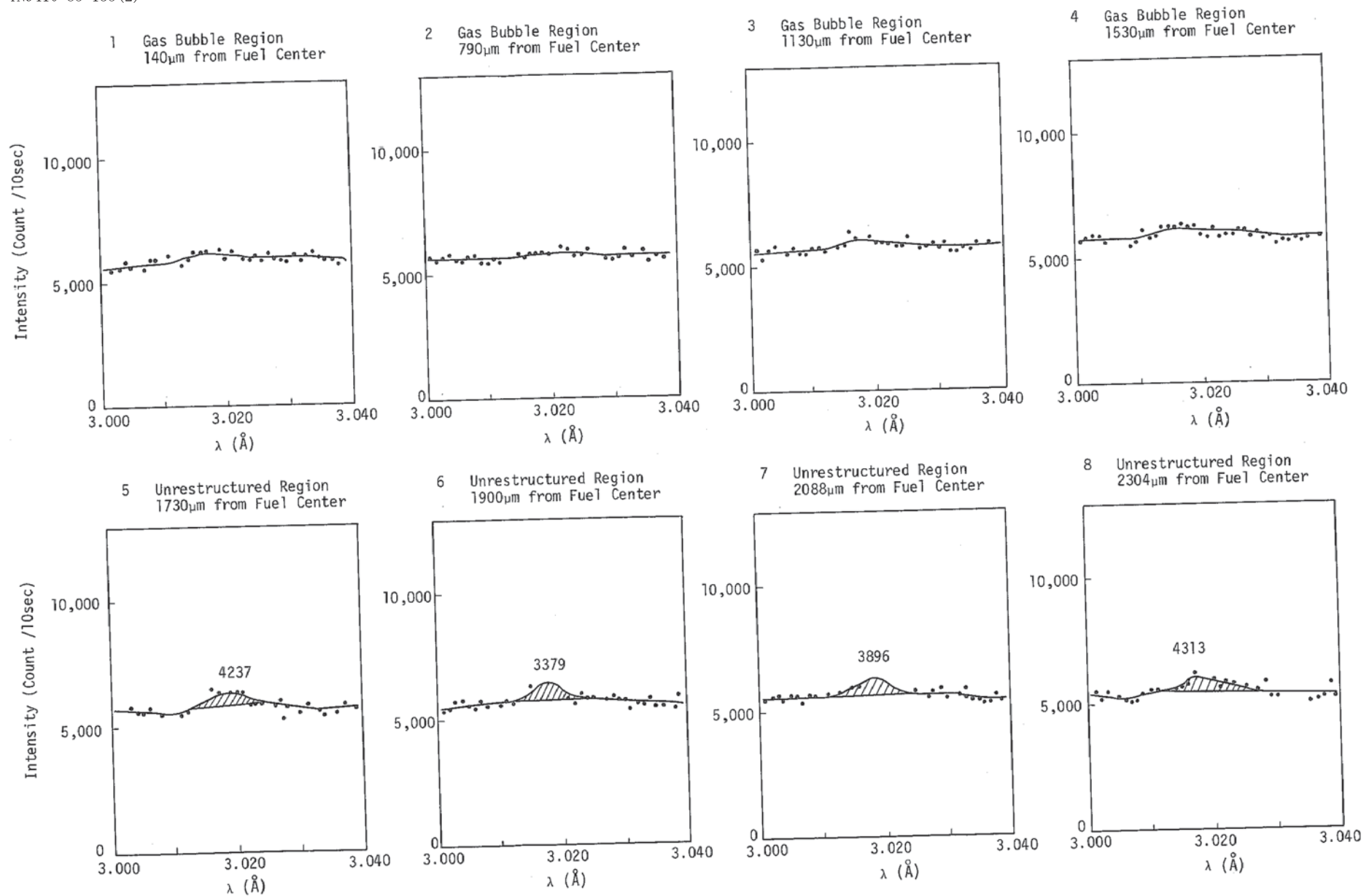


Fig. 26 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray Line (Specimen No.70A625)

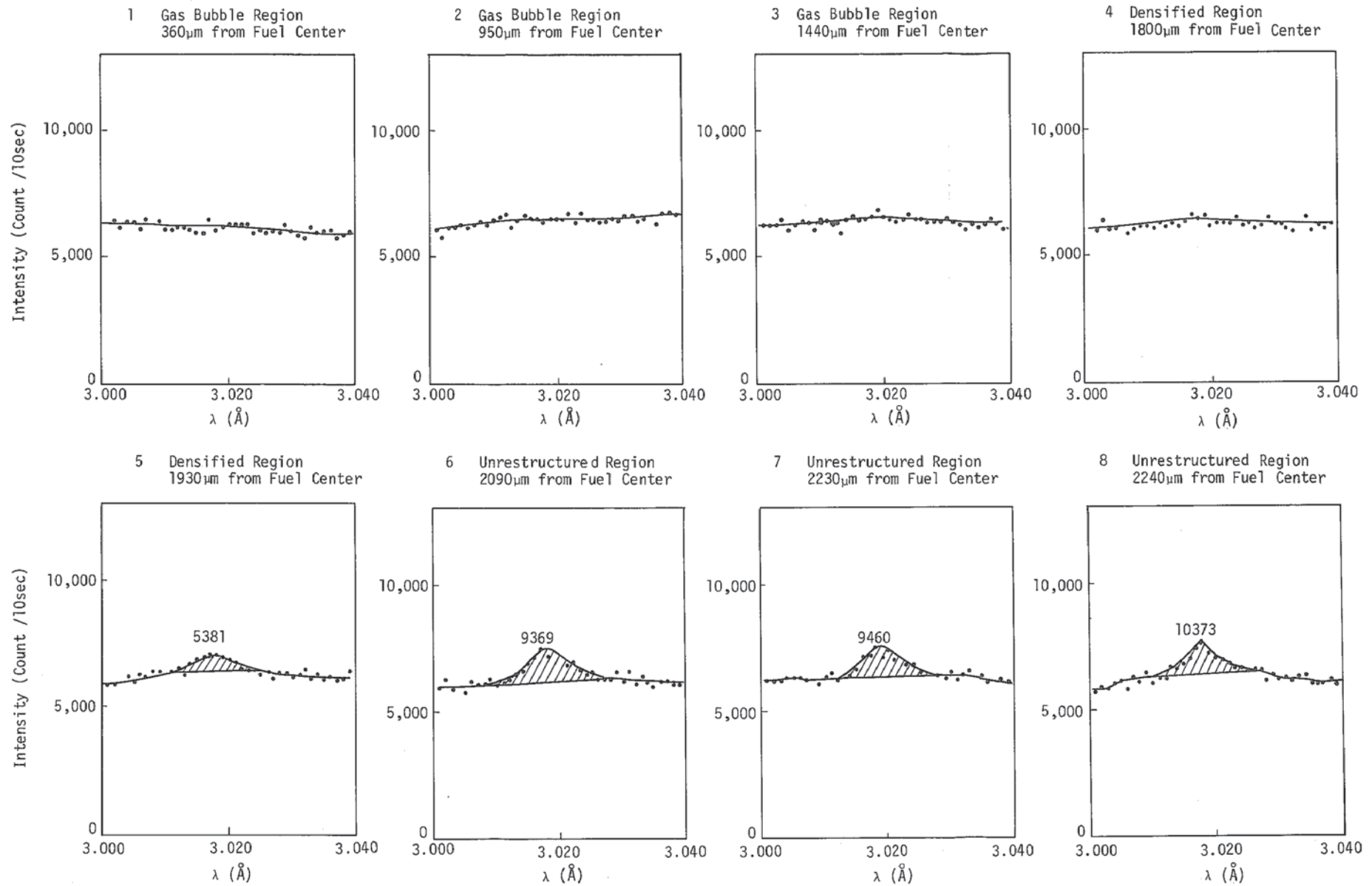


Fig. 27 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray Line (Specimen No.70A644)



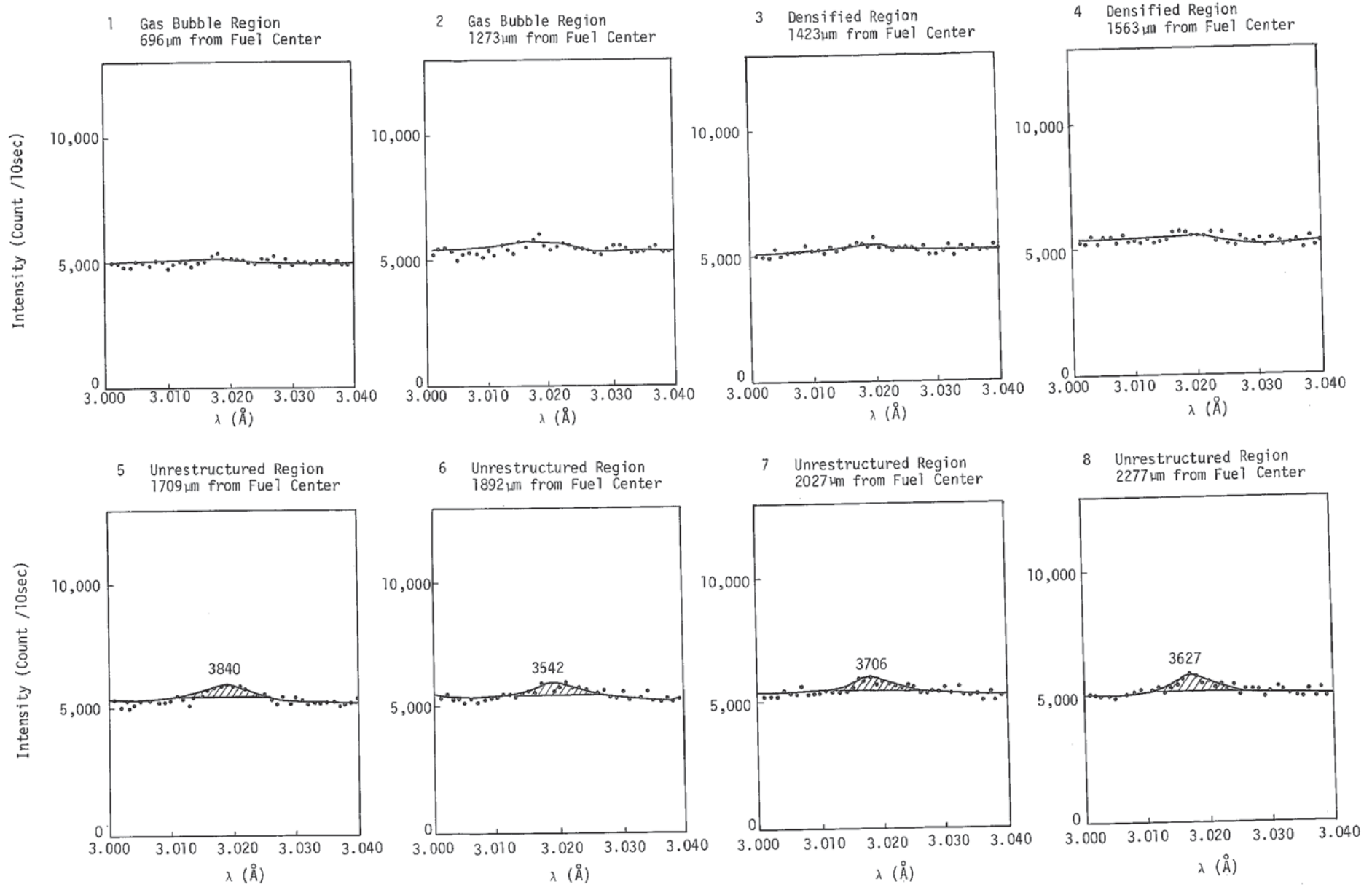


Fig. 28 Raw Counting Data Over Xe-L $\alpha$  X-ray Line (Specimen No.70A662)

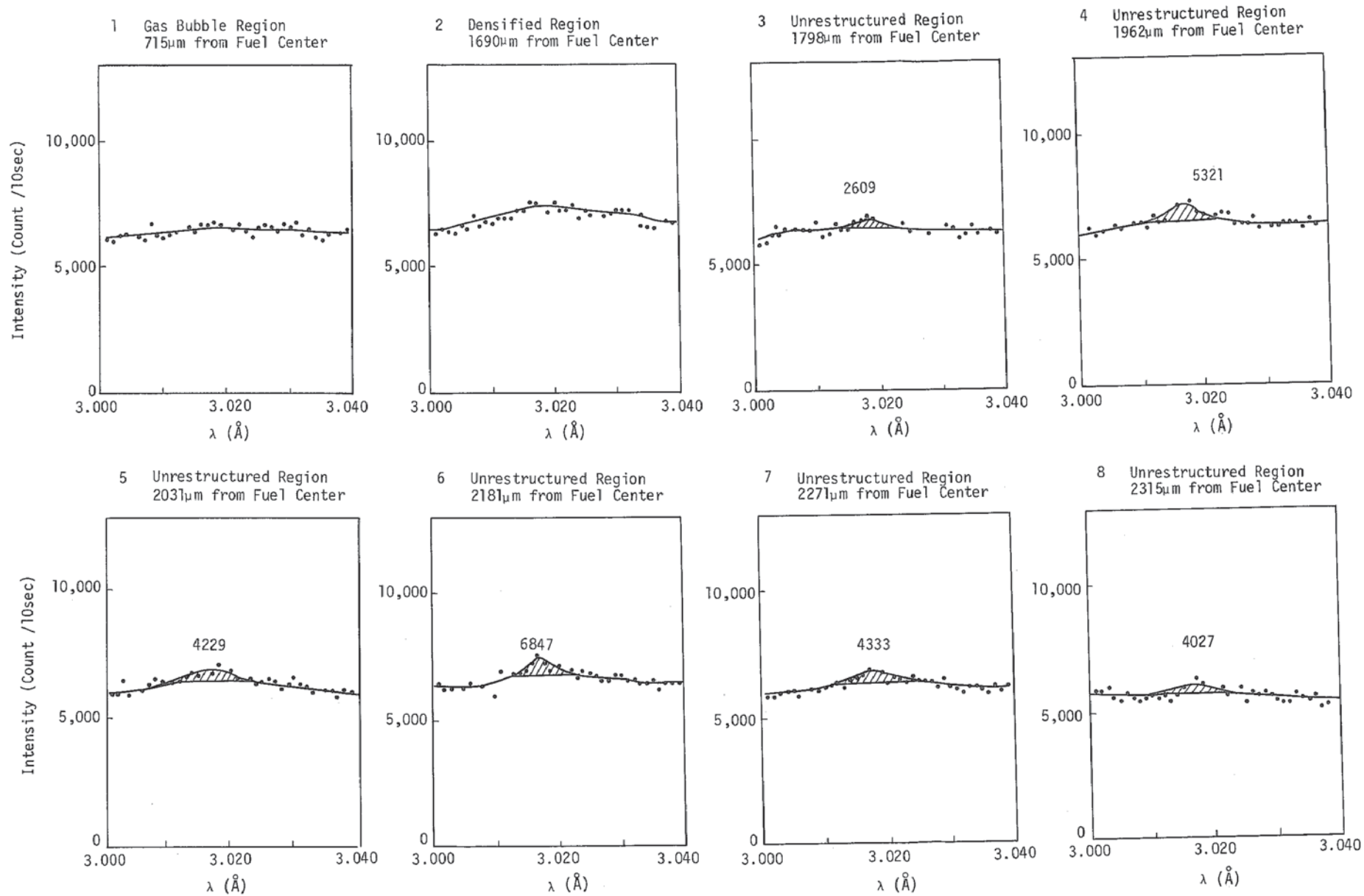


Fig. 29 Raw Counting Data Over Xe-La X-ray Line (Specimen No.70A682)

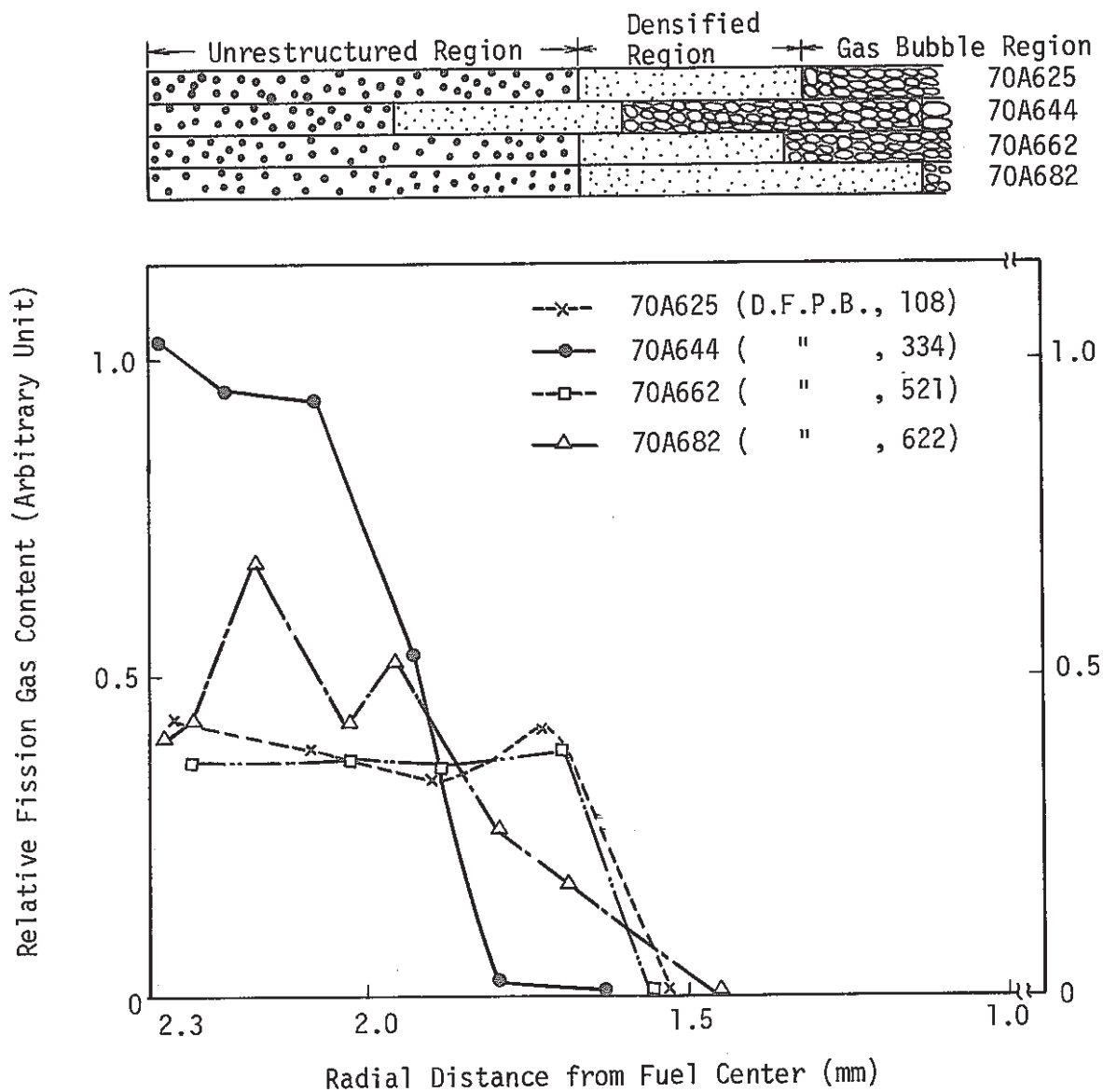


Fig. 30 Relative Radial Profiles of Retained Xe Gas (PFD003)

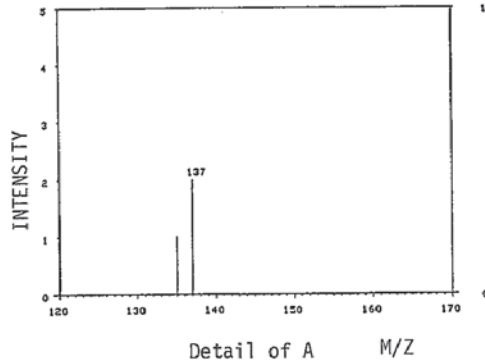
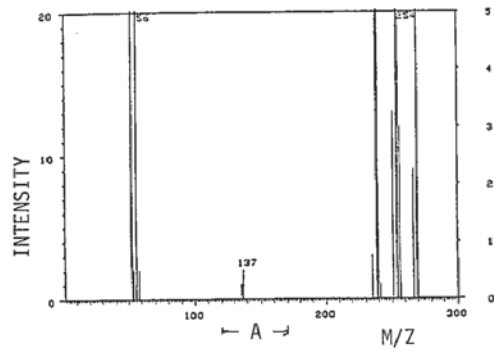


Fig. 31 Ion Mass Spectrum of the Fuel-Cladding Interface (Specimen No.70A625)

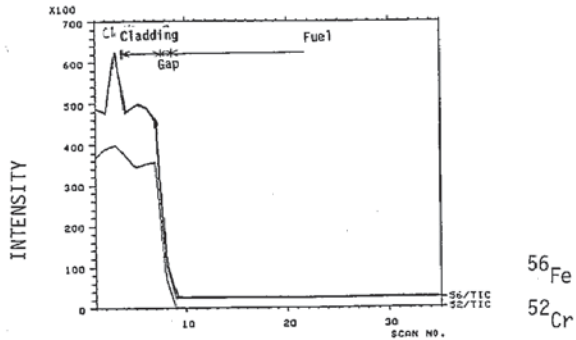


Fig. 33 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A625,  $^{56}\text{Fe}$ ;  $^{52}\text{Cr}$ )

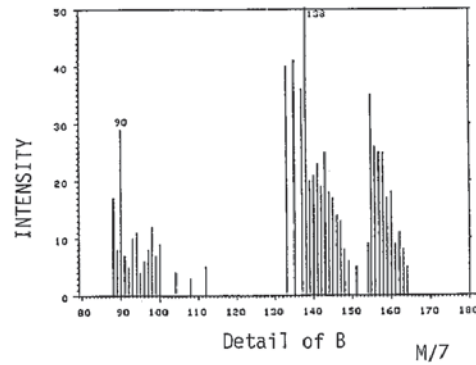
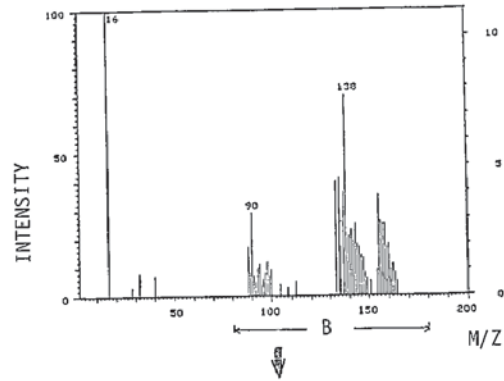


Fig. 32 Ion Mass Spectrum of the Half Radius Position (Specimen No.70A625)

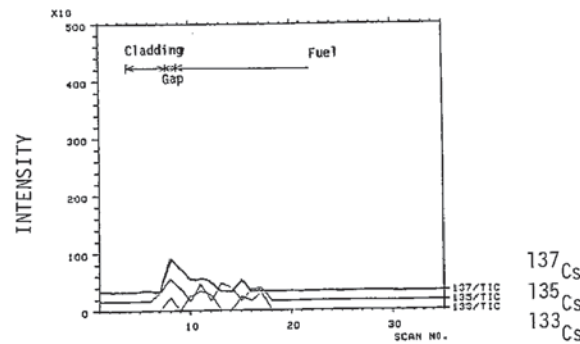


Fig. 34 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A625,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )

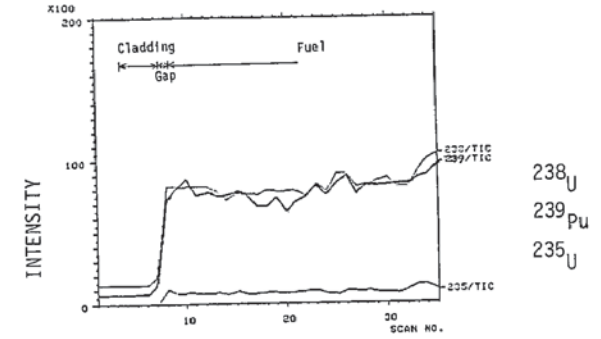


Fig. 35 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A625,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )

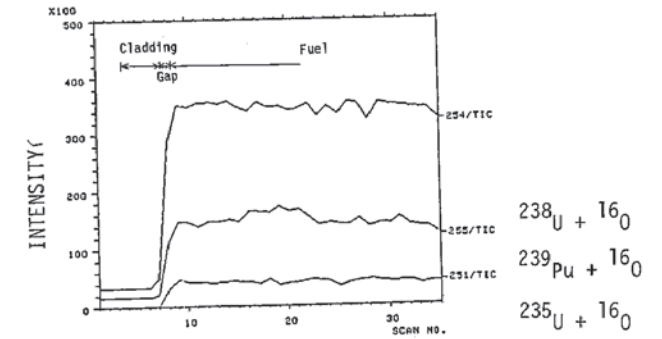


Fig. 36 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A625,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )

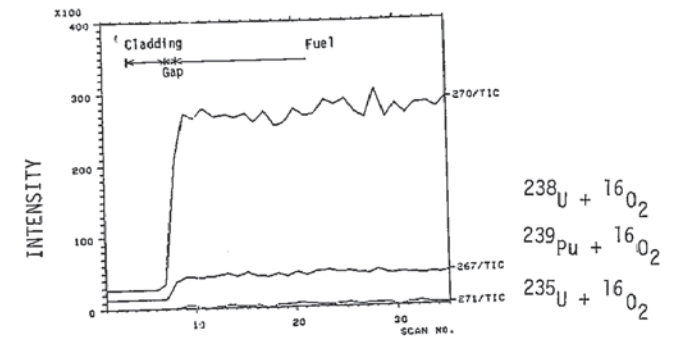


Fig. 37 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A625,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ )

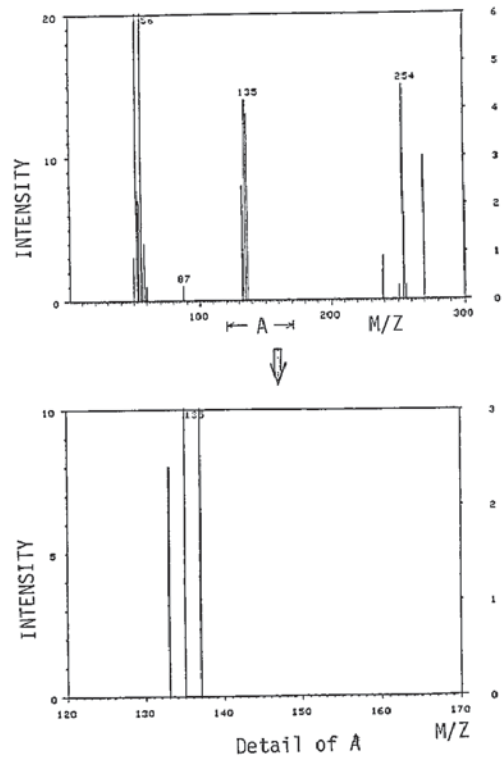


Fig. 38 Ion Mass Spectrum of the Fuel-Cladding Interface (Specimen No.70A644)

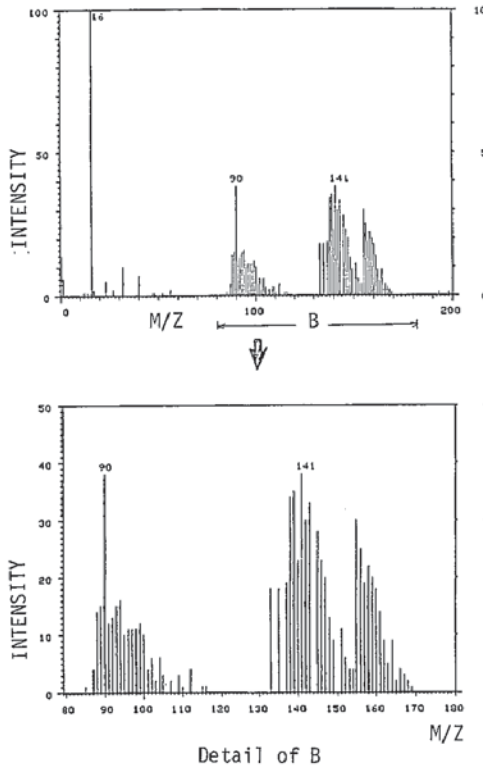


Fig. 39 Ion Mass Spectrum of the Half Radius Position (Specimen No.70A644)

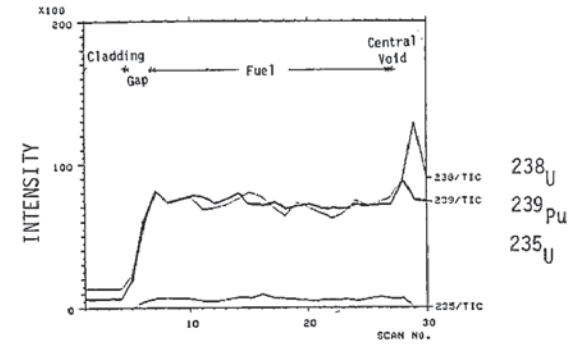


Fig. 42 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A644,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )

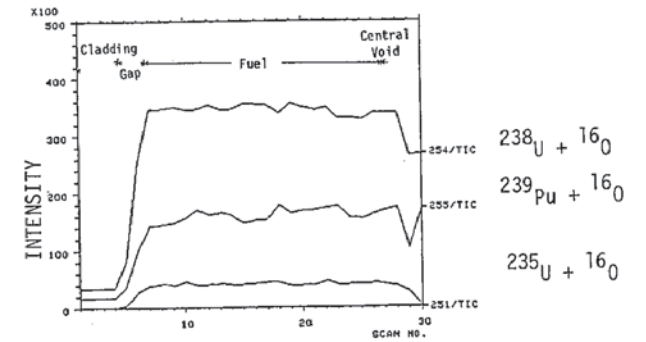


Fig. 43 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A644,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )

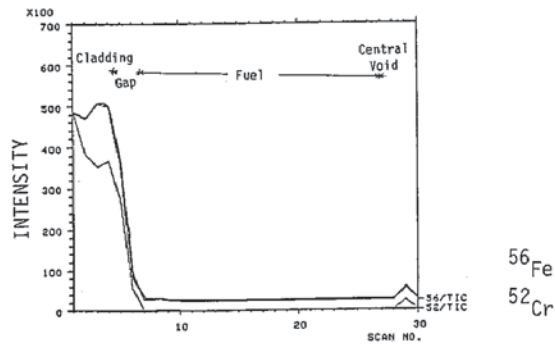


Fig. 40 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A644,  $^{56}\text{Fe}$ ;  $^{52}\text{Cr}$ )

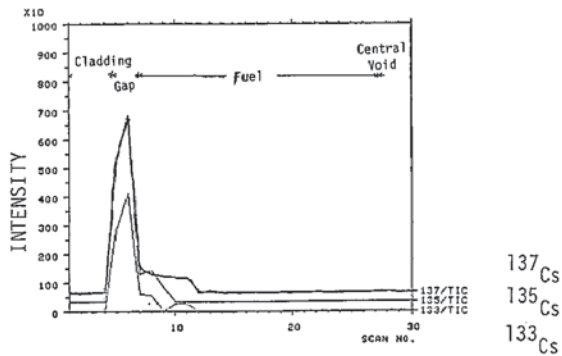


Fig. 41 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A644,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )

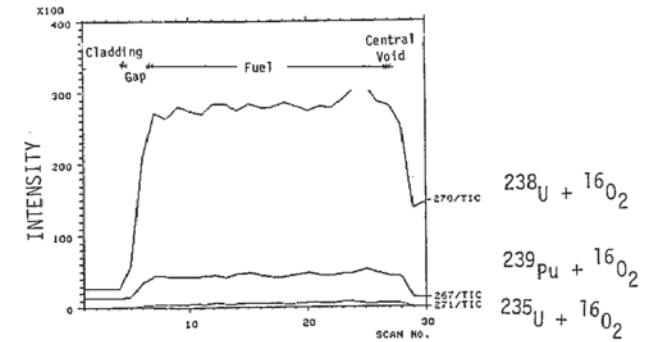


Fig. 44 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A644,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ )

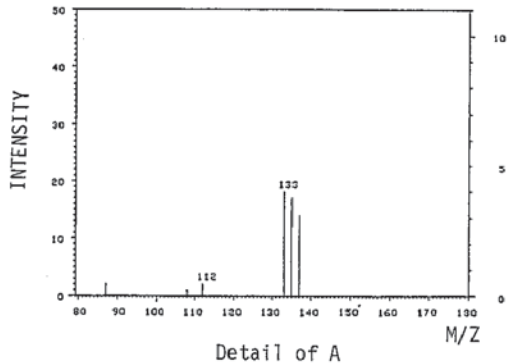
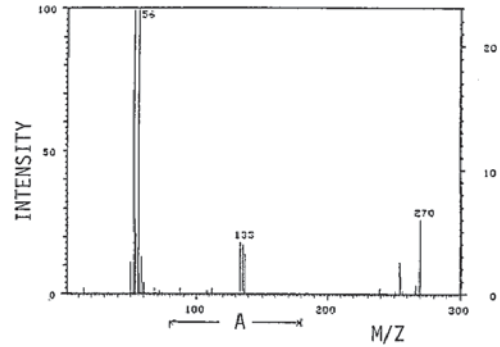


Fig. 45 Ion Mass Spectrum of the Fuel-Cladding Interface (Specimen No.70A662)

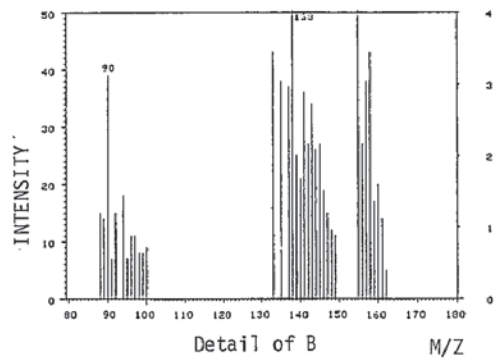
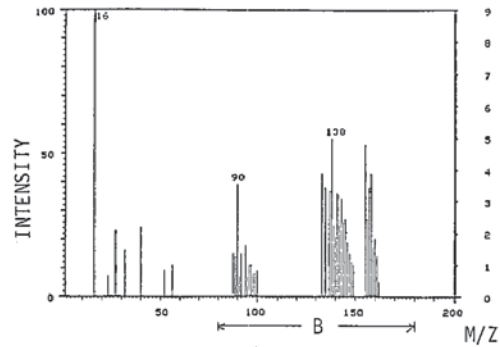


Fig. 46 Ion Mass Spectrum of the Half Radius Position (Specimen No.70A662)

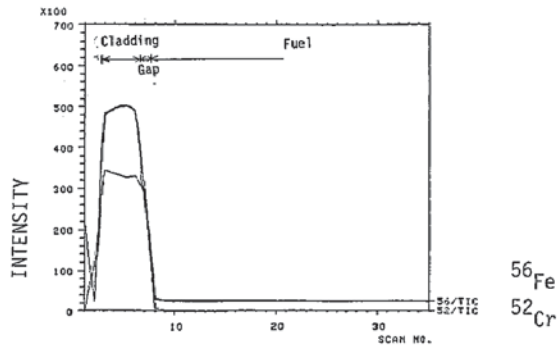


Fig. 47 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A662,  $^{56}\text{Fe}$ ;  $^{52}\text{Cr}$ )

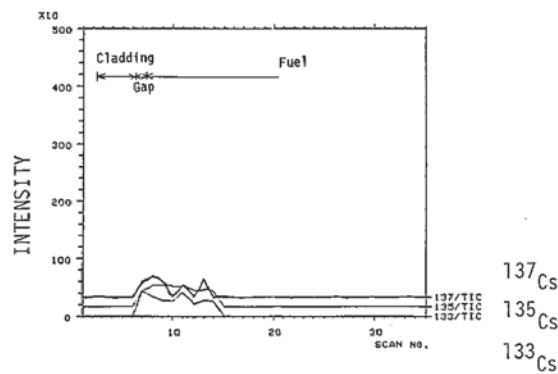


Fig. 48 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A662,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )

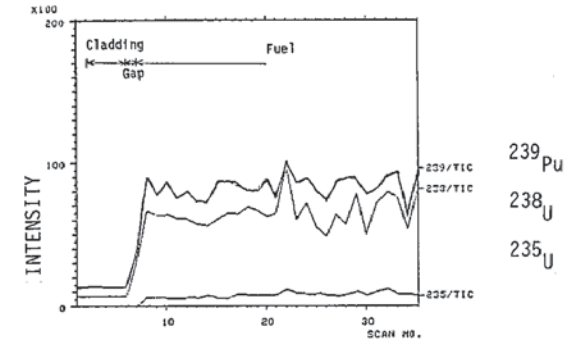


Fig. 49 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A662,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )

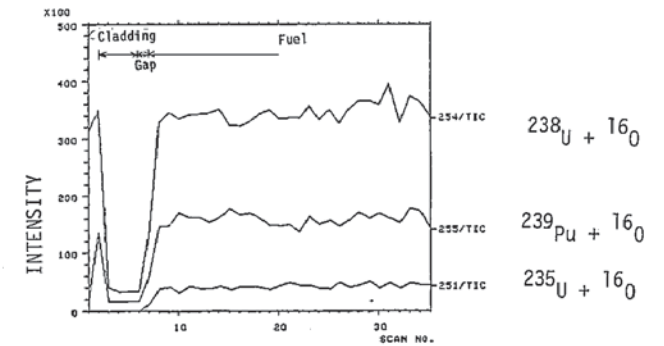


Fig. 50 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A662,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )

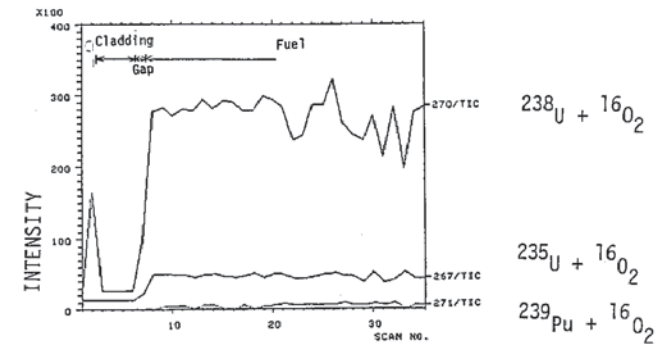


Fig. 51 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A662,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ )

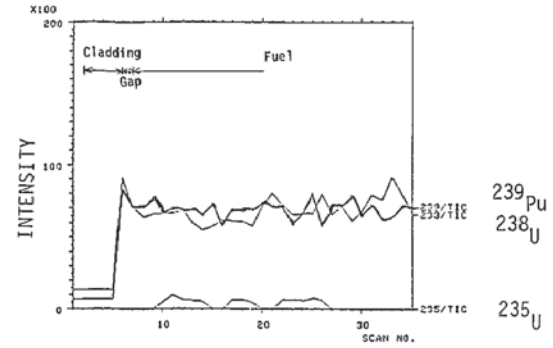


Fig. 54 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A682,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )

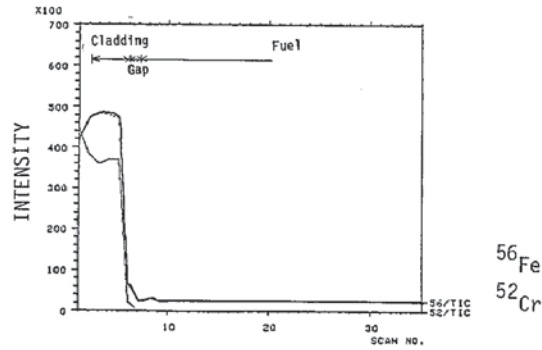


Fig. 52 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A682,  $^{56}\text{Fe}$ ;  $^{52}\text{Cr}$ )

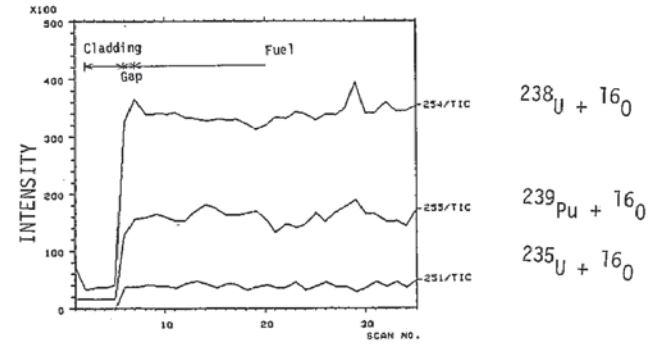


Fig. 55 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A682,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}$ )

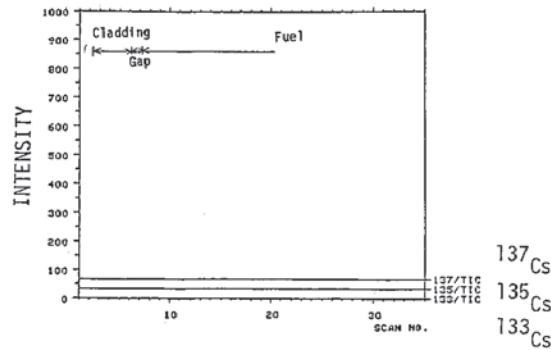


Fig. 53 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A682,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ )

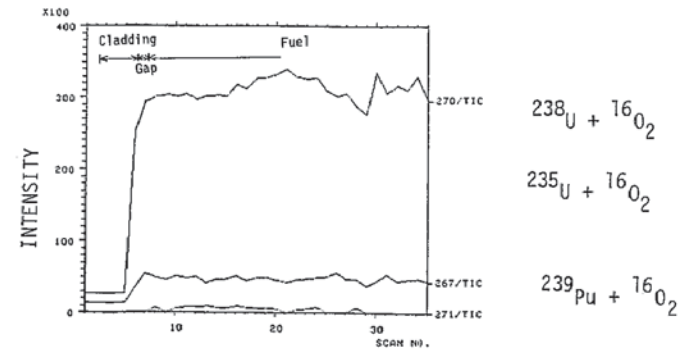


Fig. 56 Ion Mass Profile from the Cladding Outside to Fuel Center (Specimen No.70A682,  $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{235}\text{U} + ^{16}\text{O}_2$ ,  $^{239}\text{Pu} + ^{16}\text{O}_2$ )

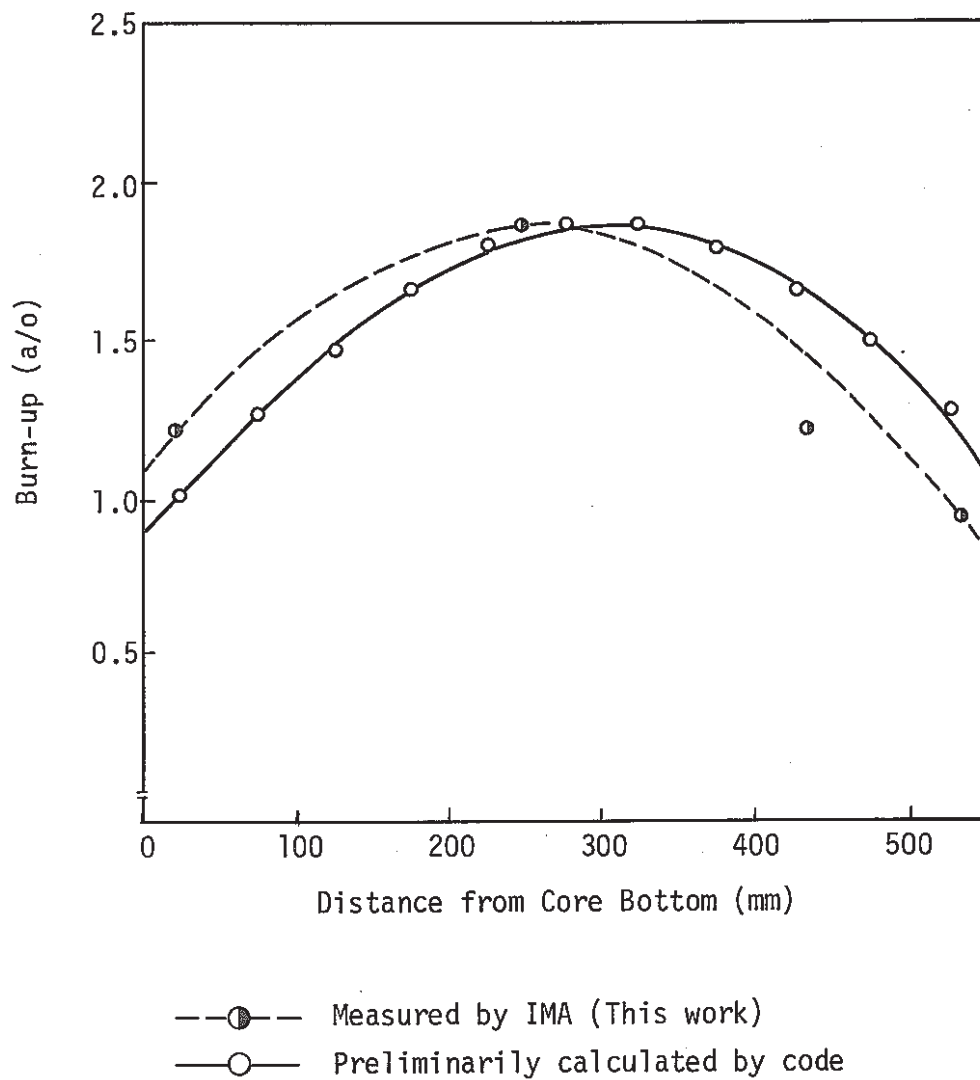


Fig. 57 Axial Distribution of Measured Burnup of PFD003 (Pin No.70A6)



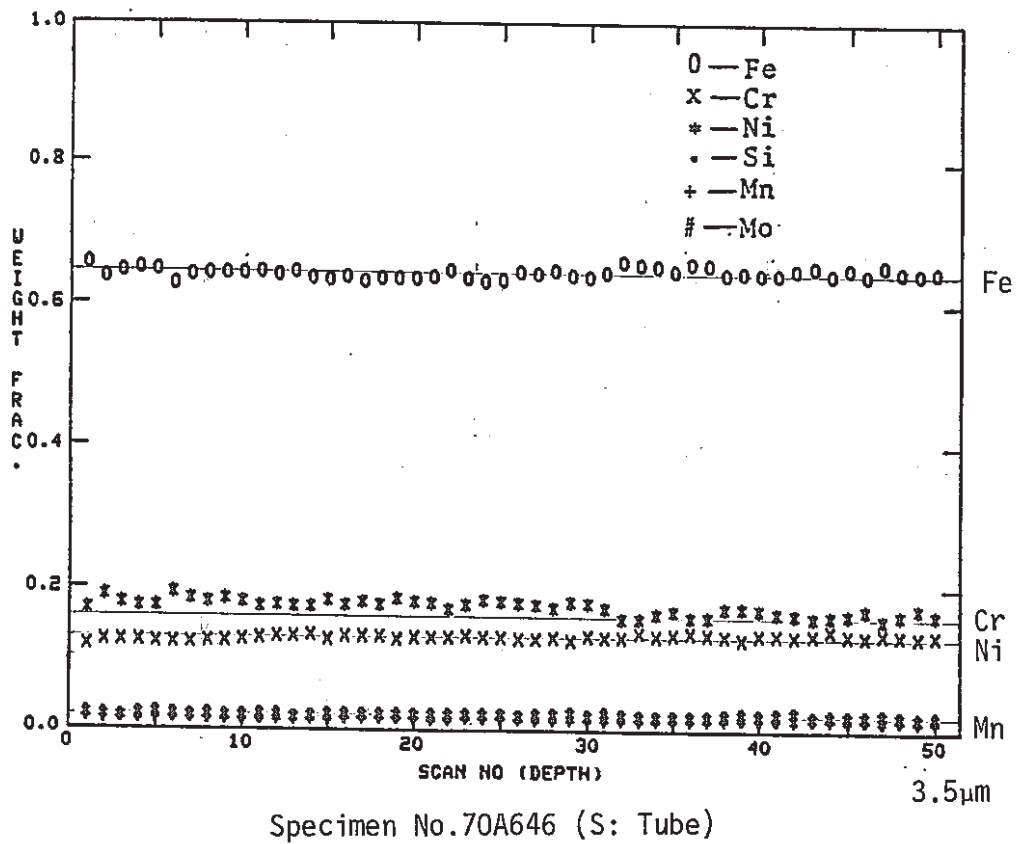
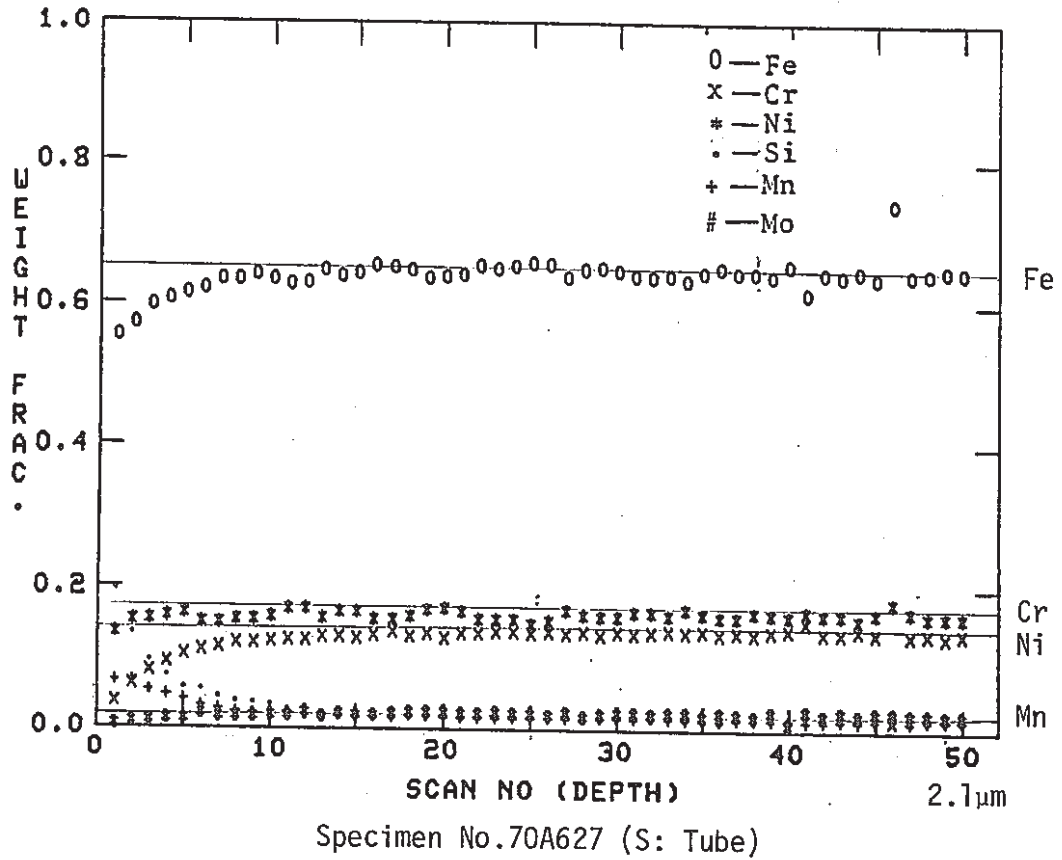


Fig. 58 Depth Analysis of Cladding Outer Surface by IMA

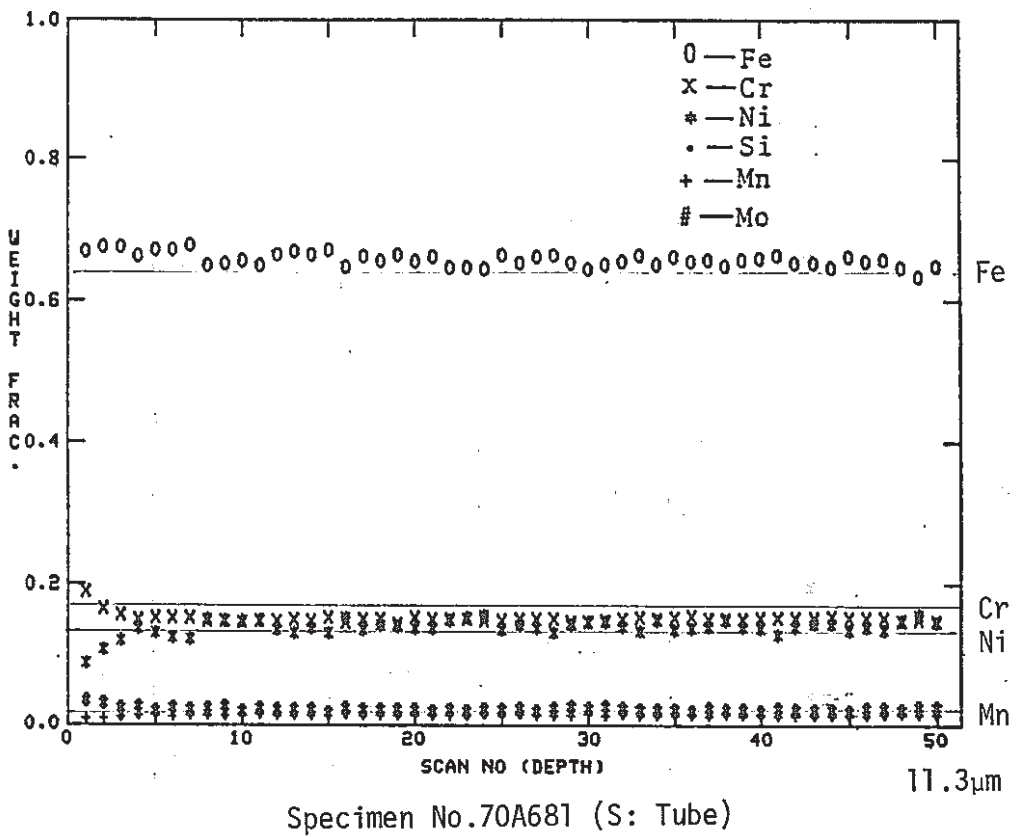
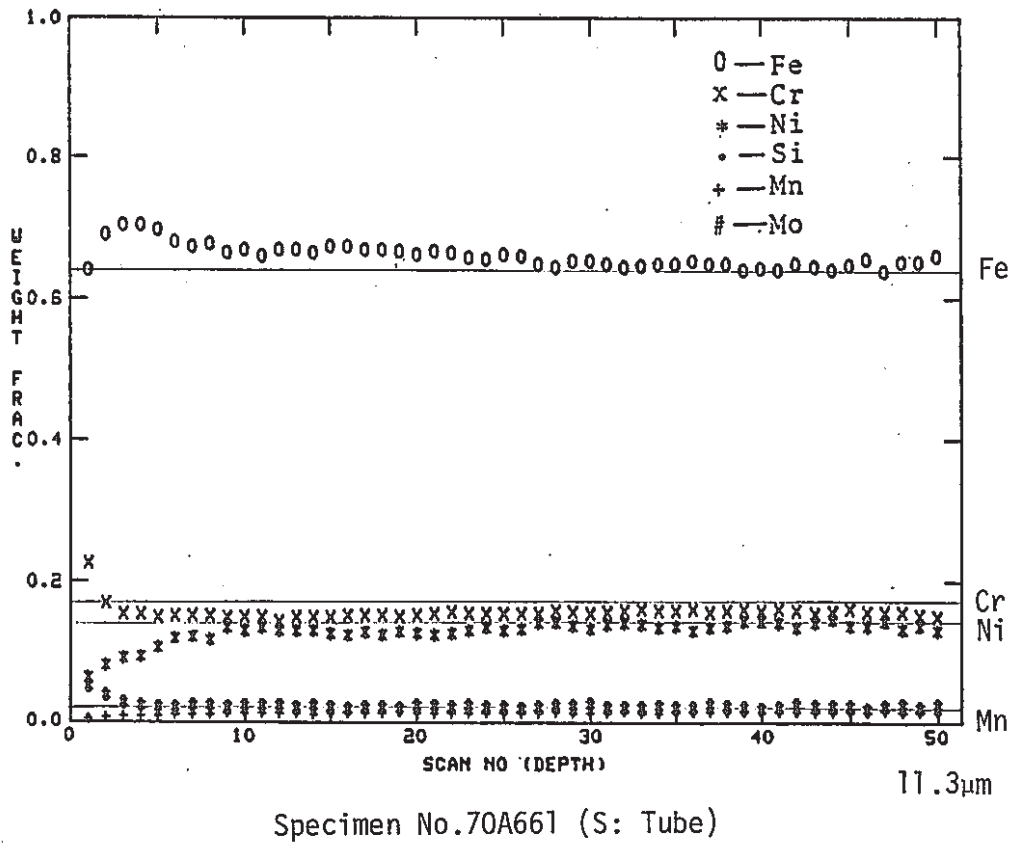


Fig. 58 Continued

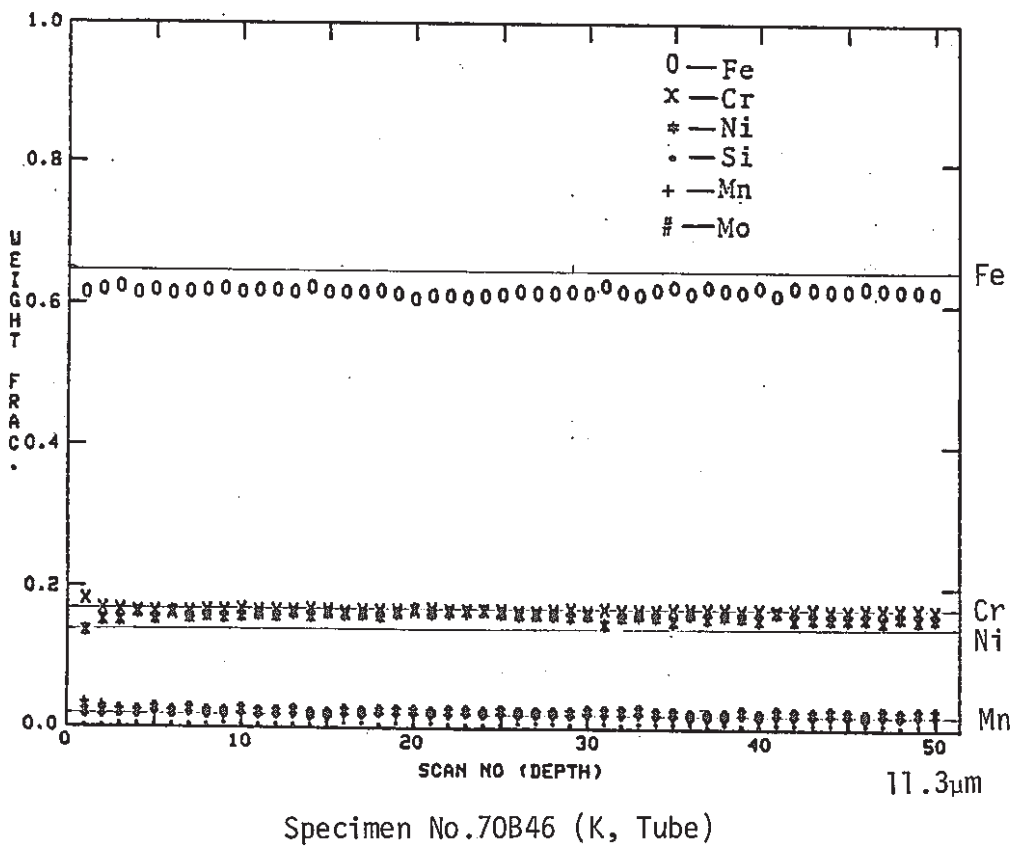
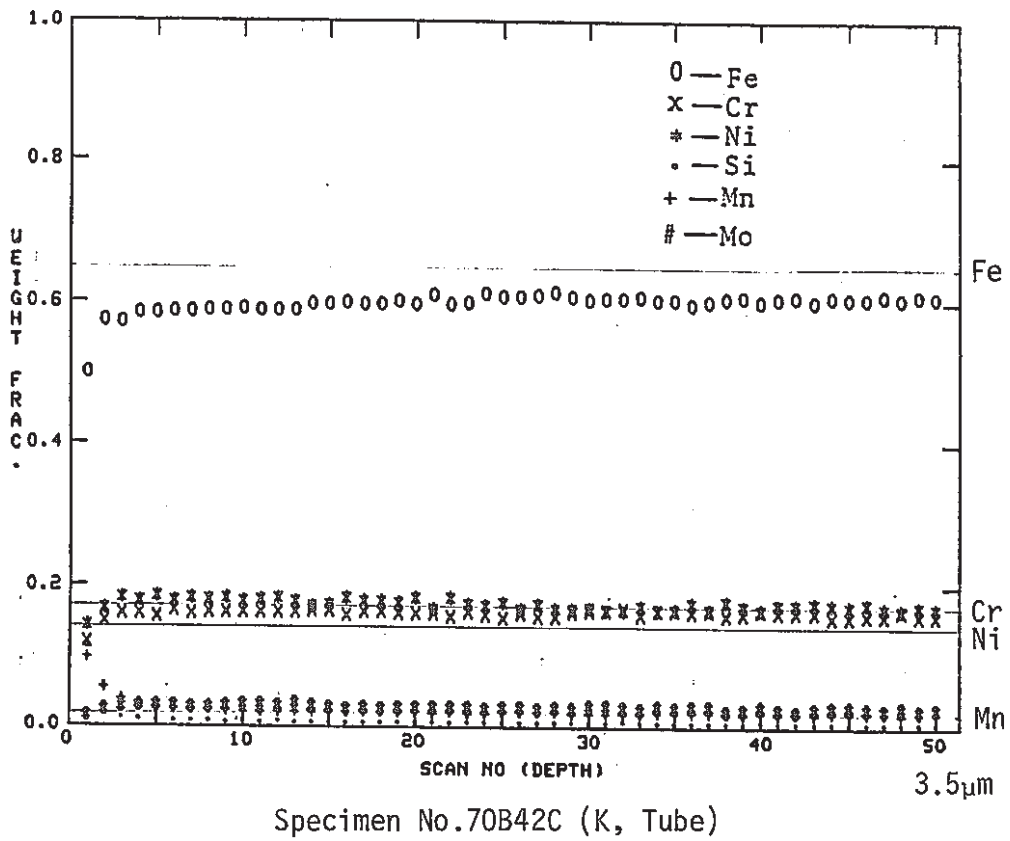


Fig. 58 Continued

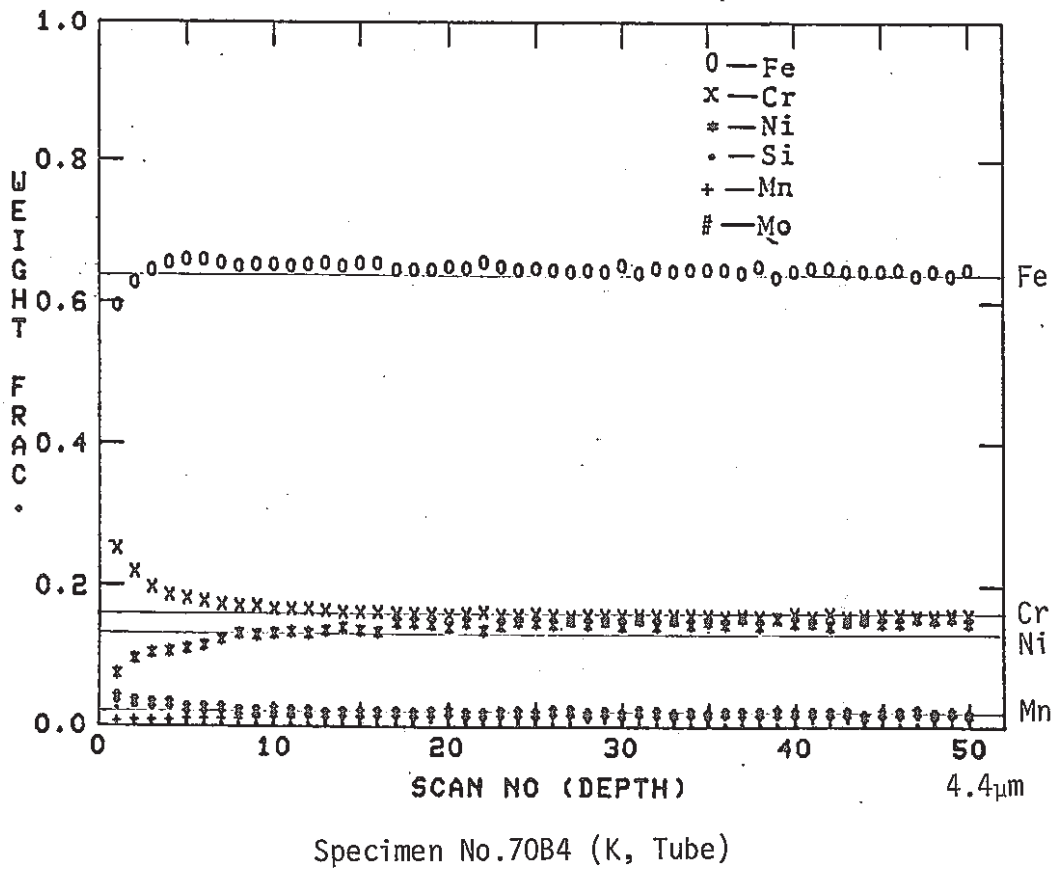
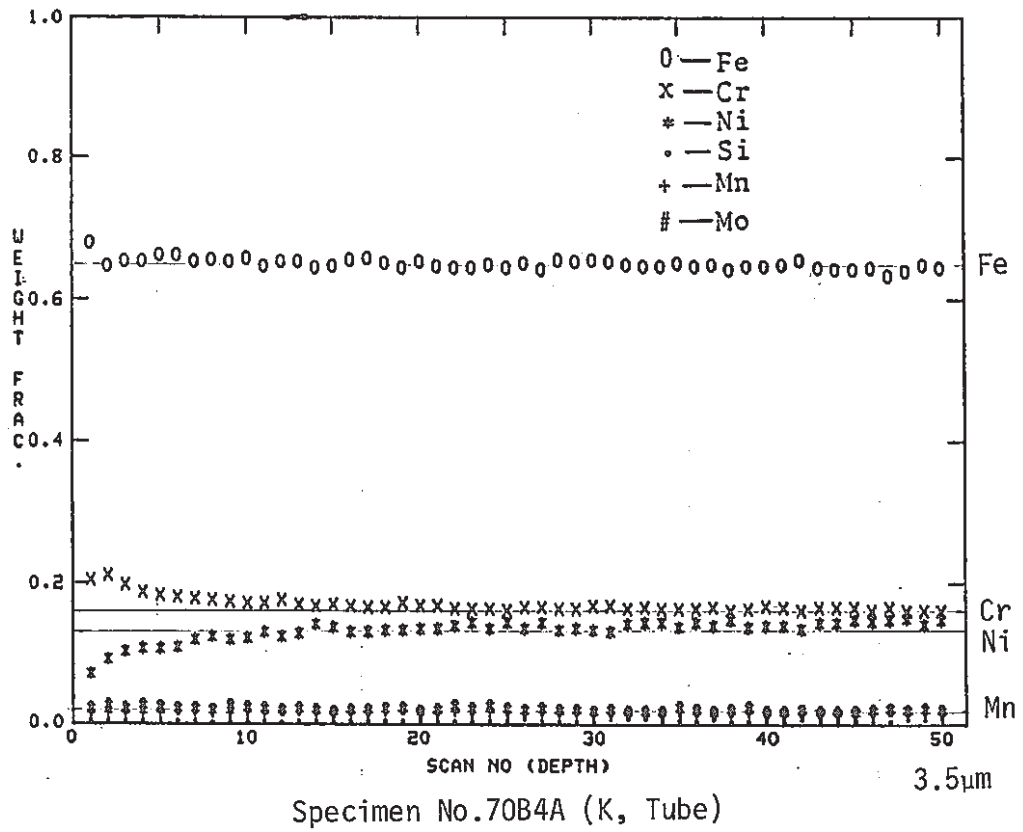


Fig. 58 Continued

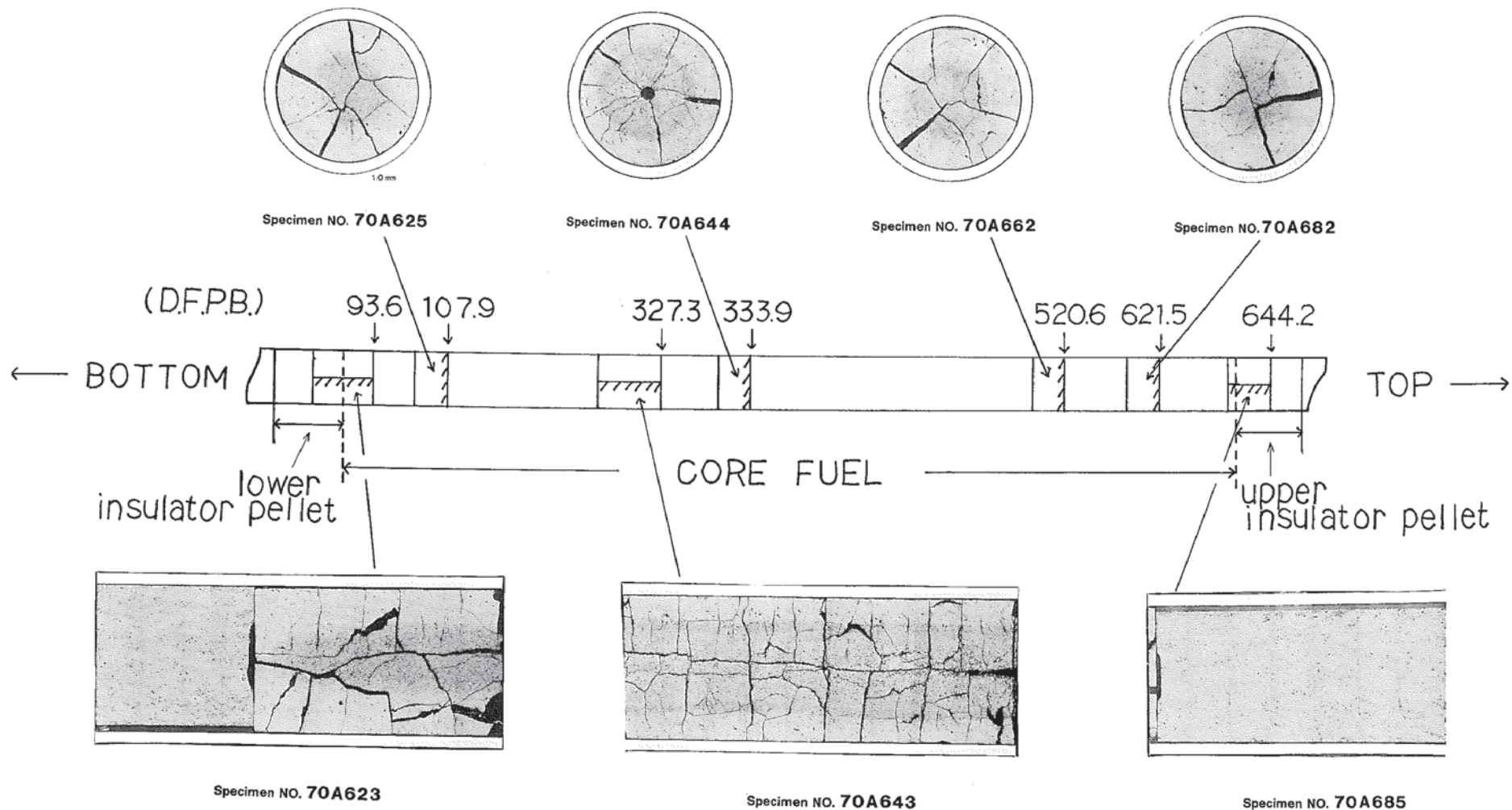
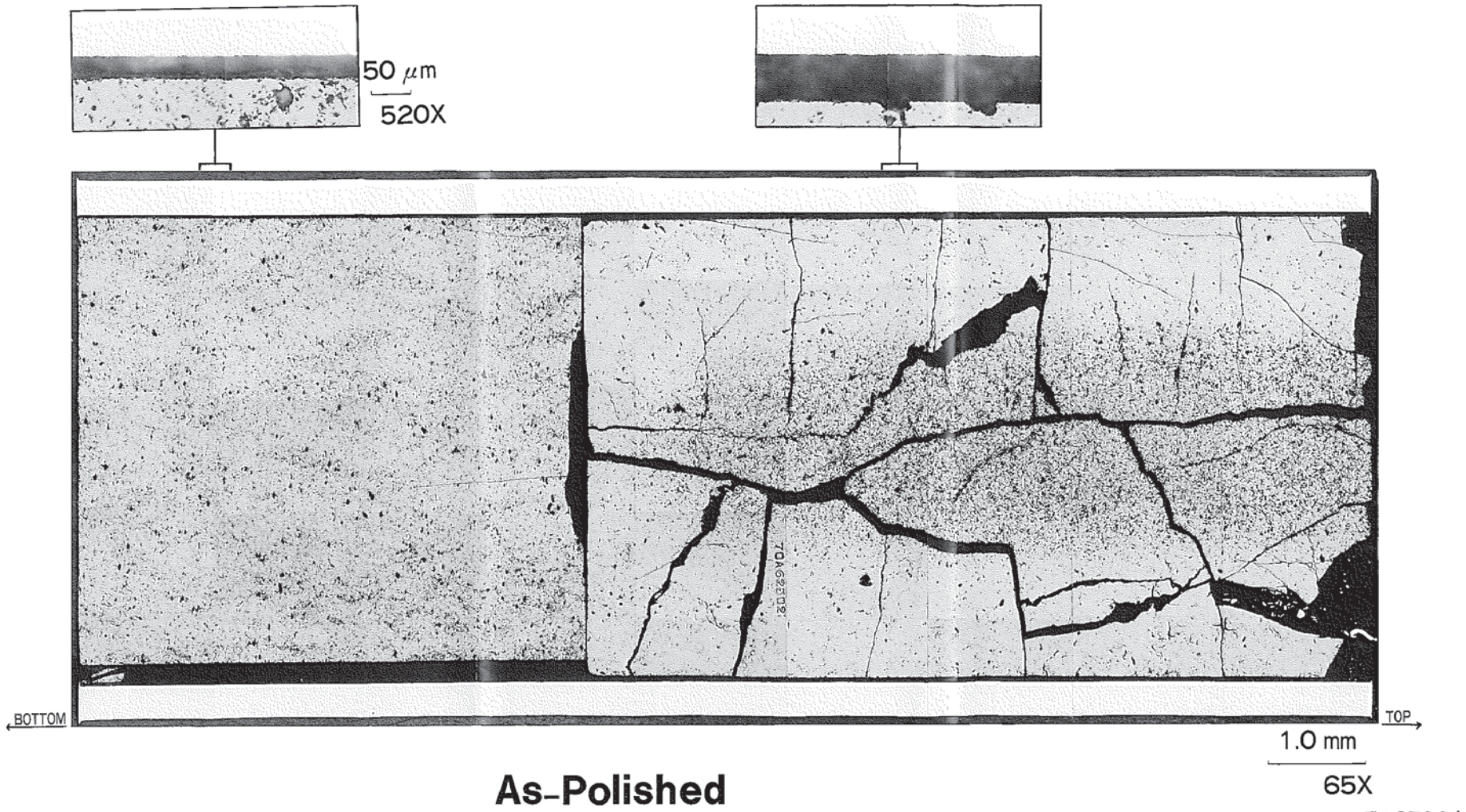


Photo.0-1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No.70A6)

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A623

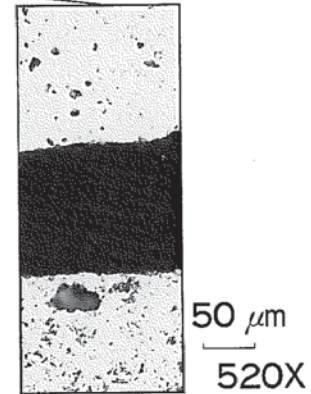
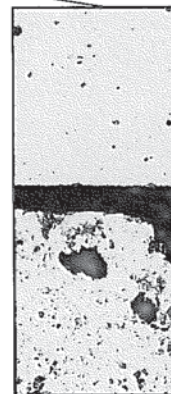
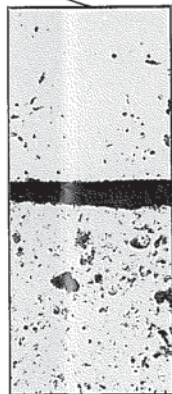
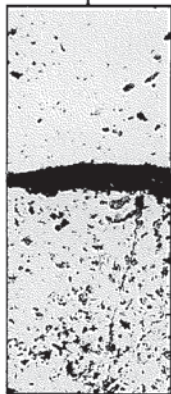
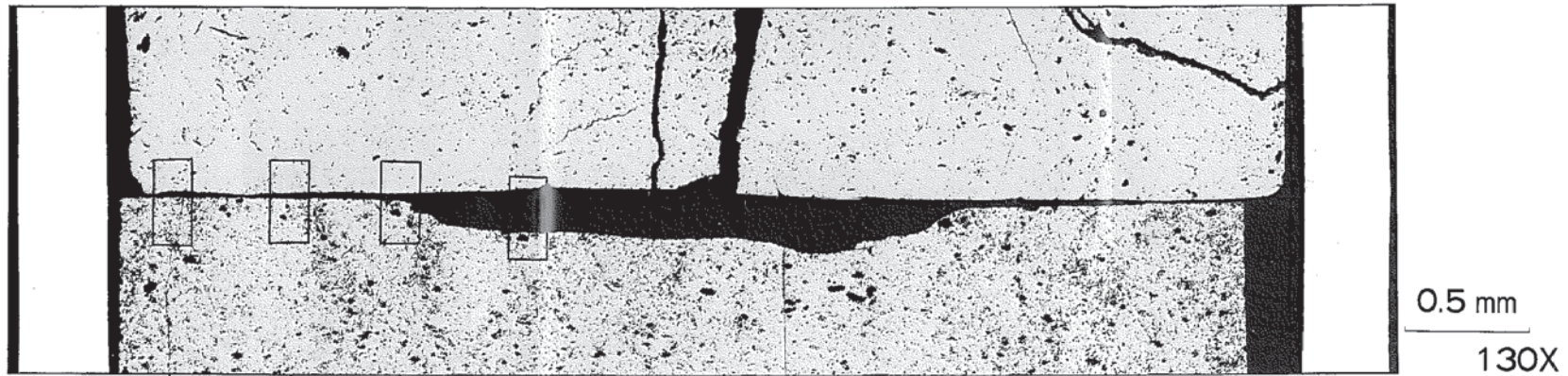


E037001

Photo.0-2 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core and Blanket Fuel Pin (Specimen No.70A623) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A623



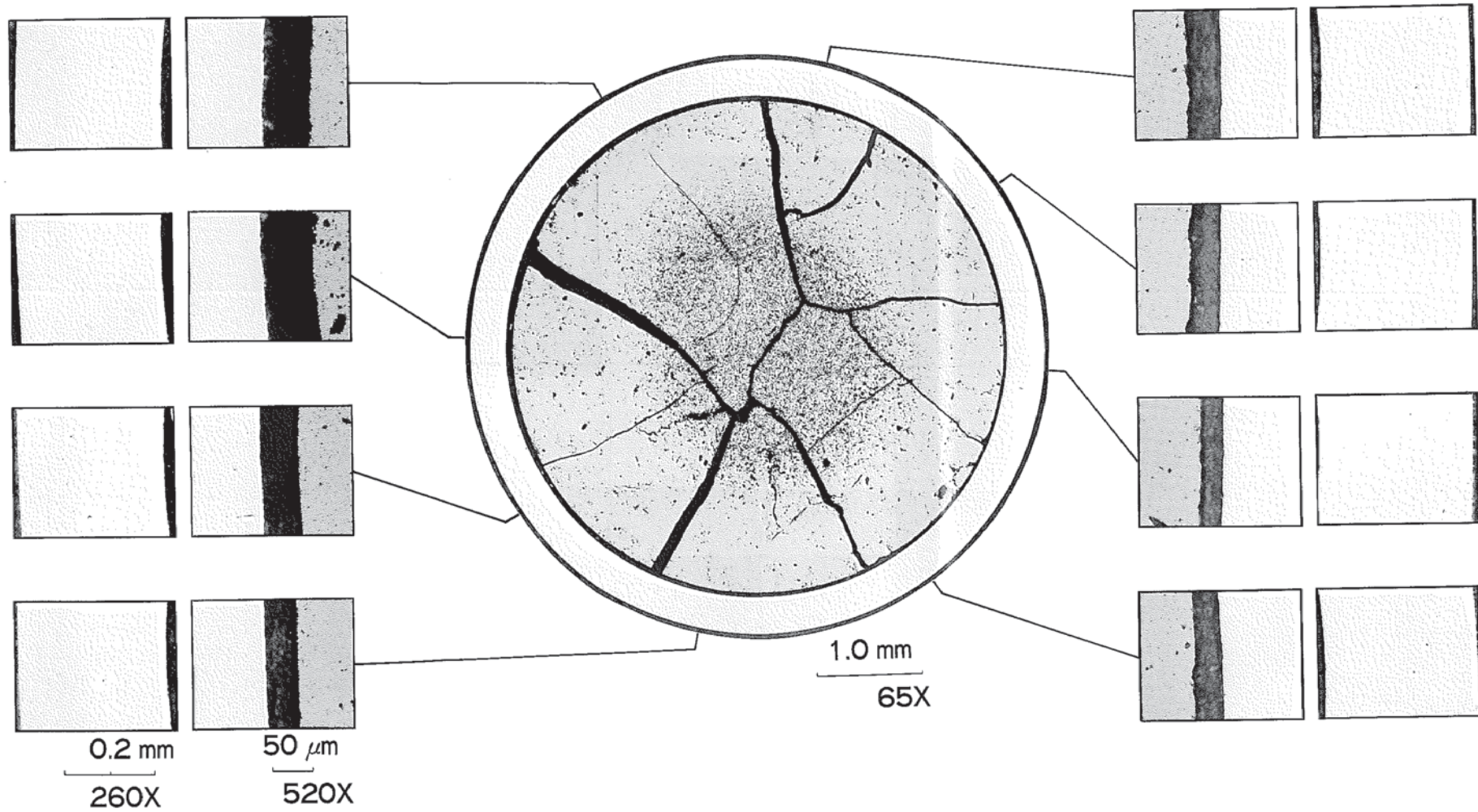
**As-Polished**

E037002

Photo.0-3 Optical Microstructure of the Core and Blanket Fuel Pin  
(Specimen No.70A623) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A625



**As-Polished**

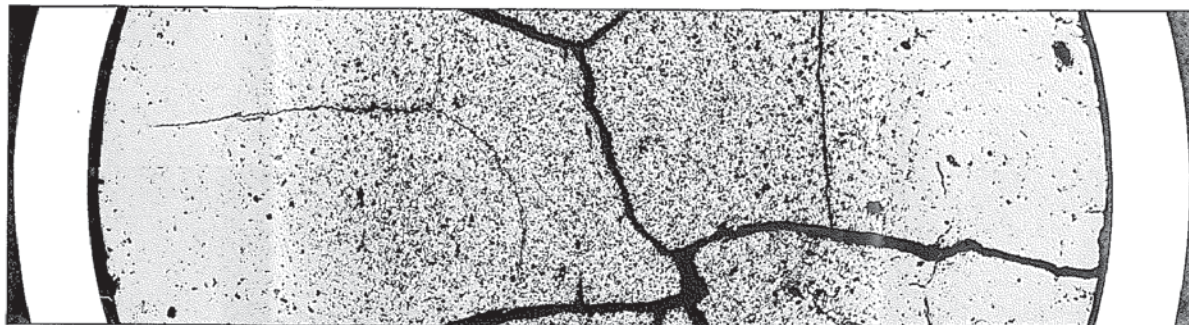
E037003

Photo.0-4 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A625) As-Polished

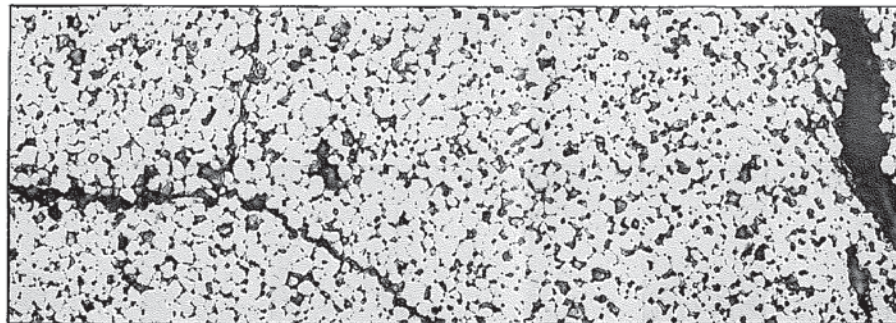
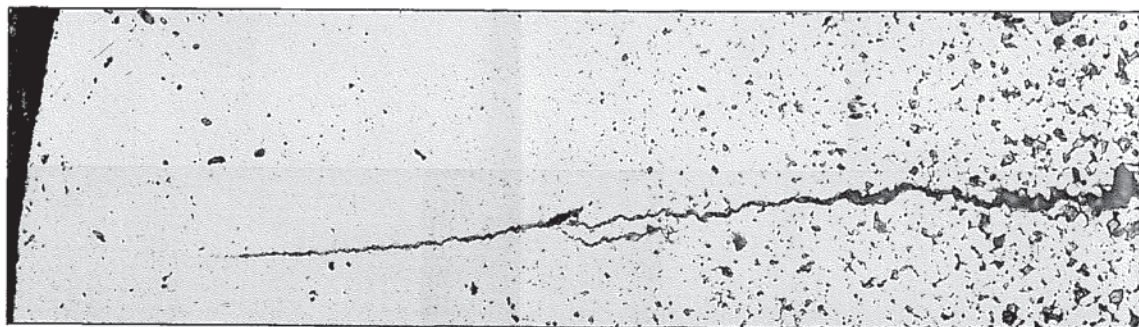


# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A625



0.5 mm  
130X



50  $\mu$ m  
520X

**As-Polished** E037004

Photo.0-5 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A625) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A643

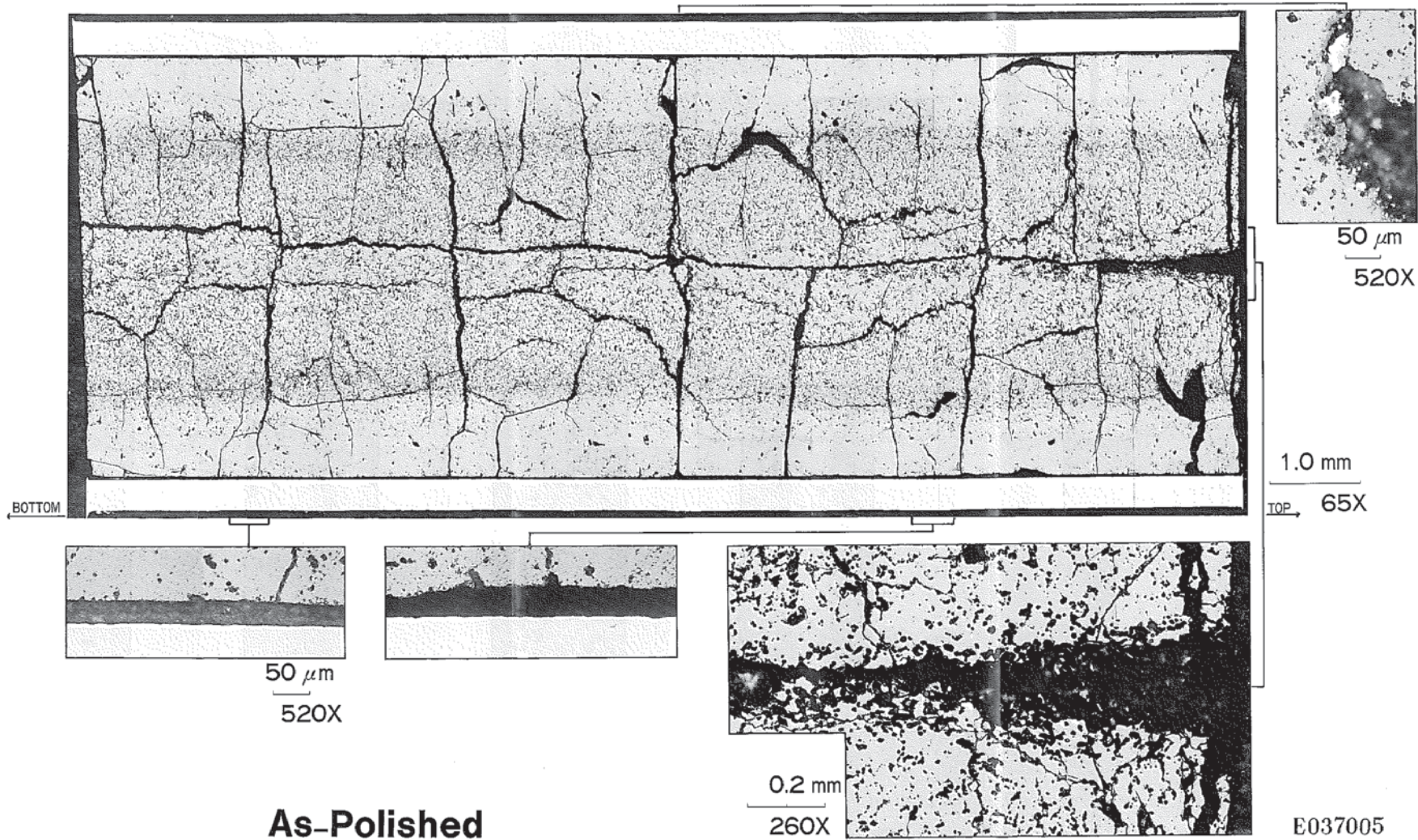
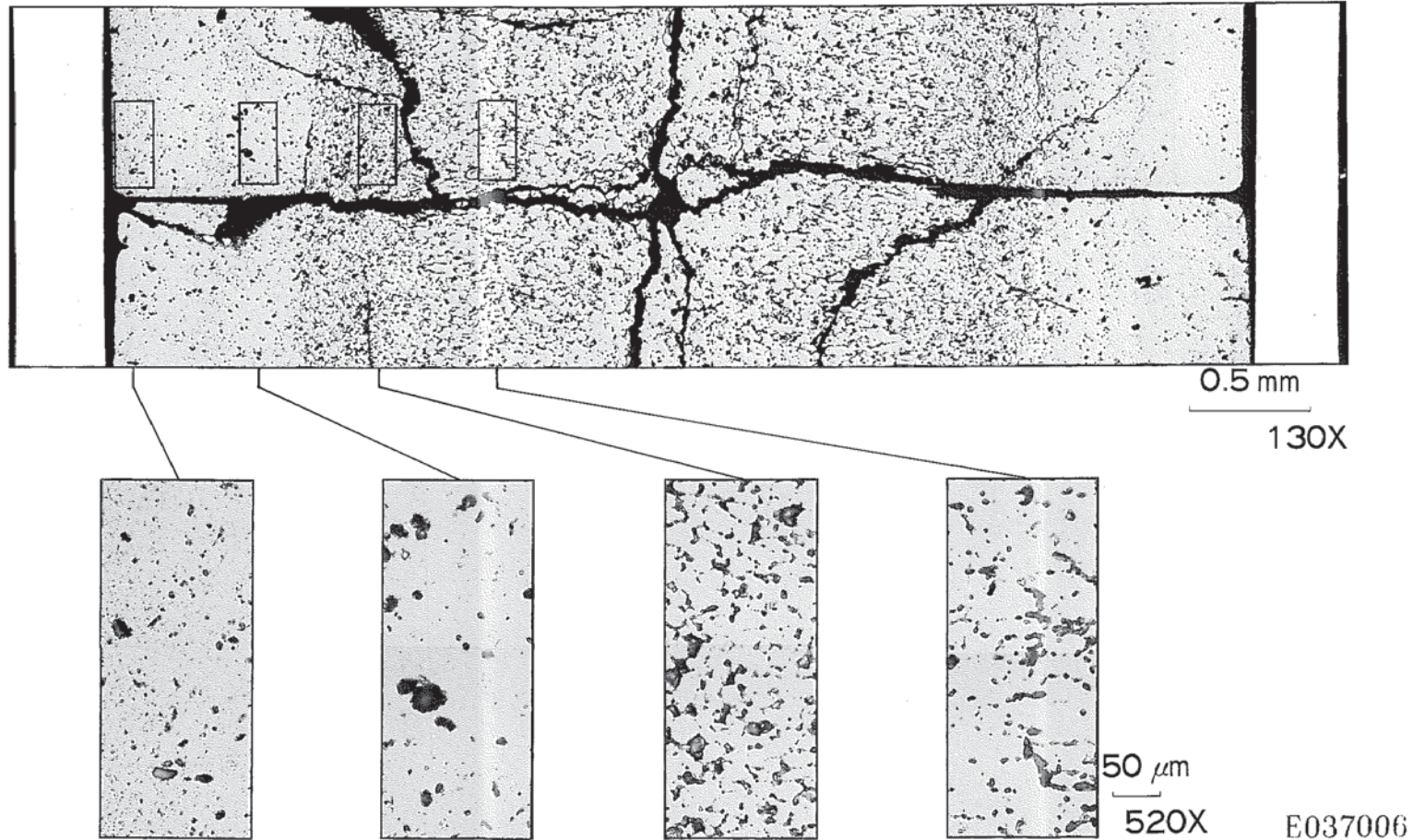


Photo.0-6 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of Core Fuel Pin (Specimen No.70A643) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A643

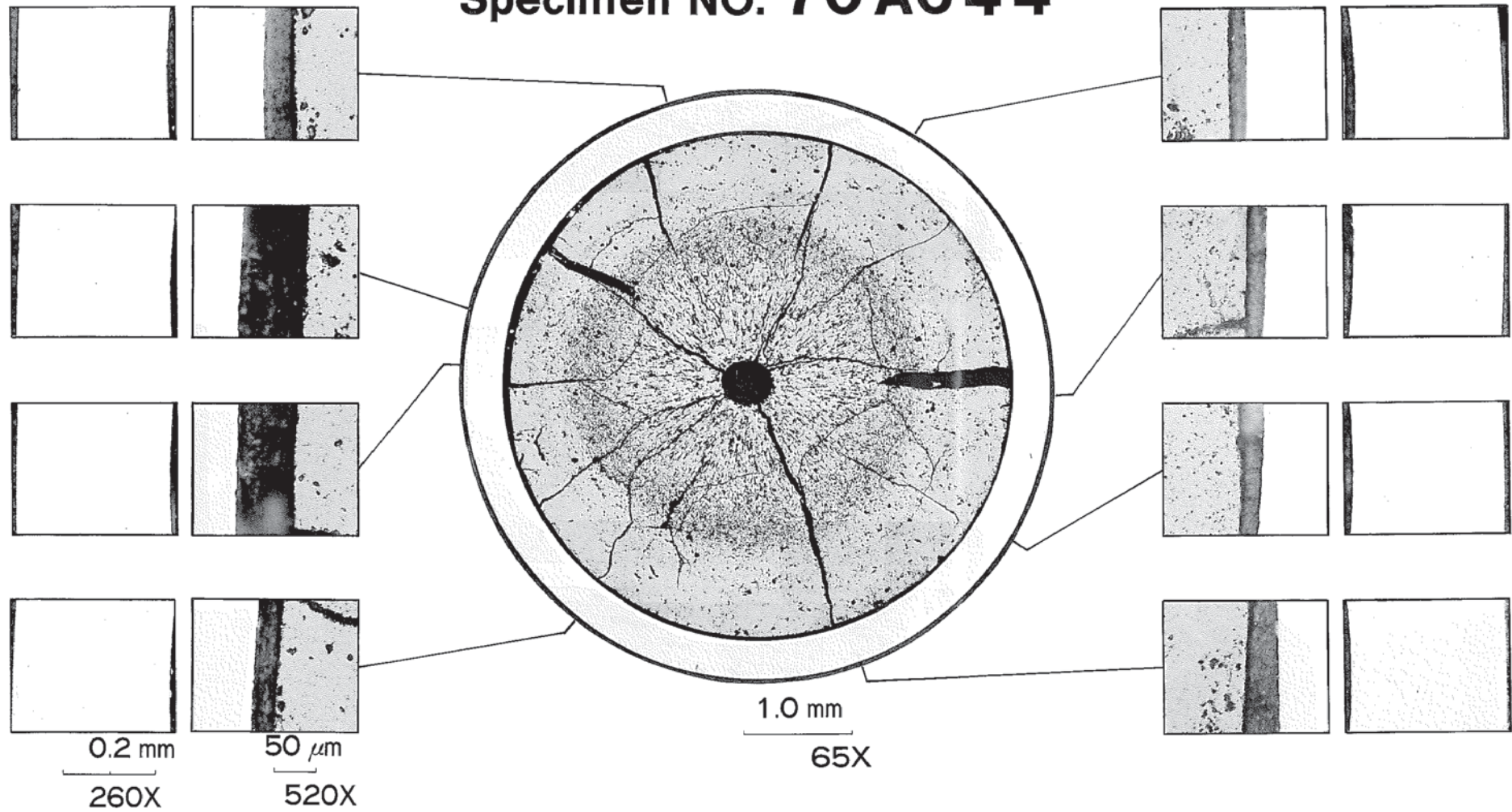


**As-Polished**

Photo.0-7 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A643) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A644



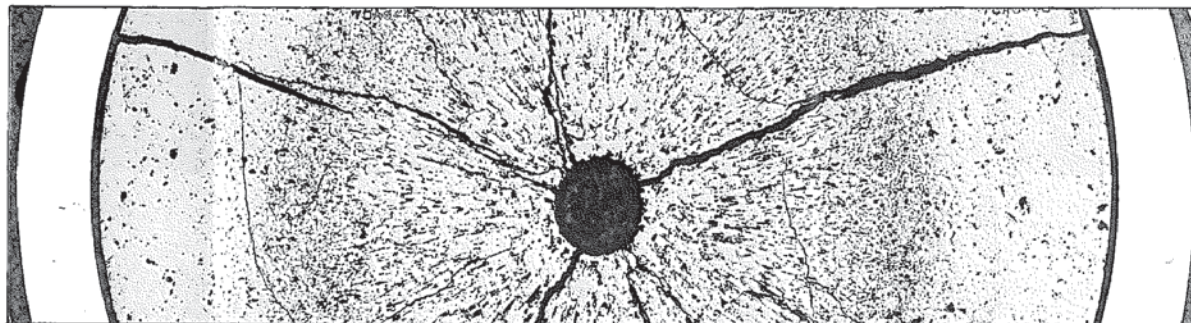
**As-Polished**

E037007

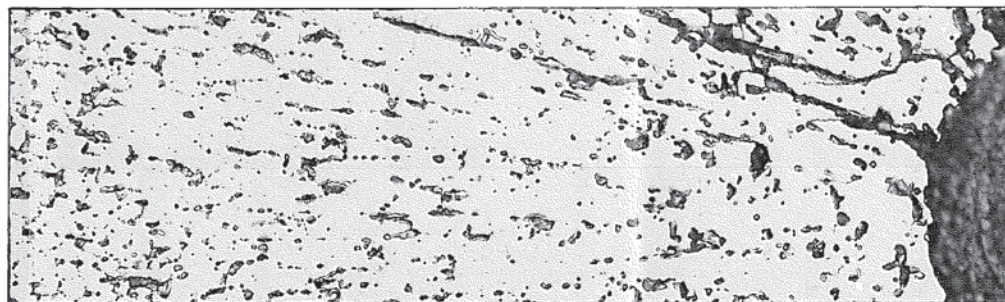
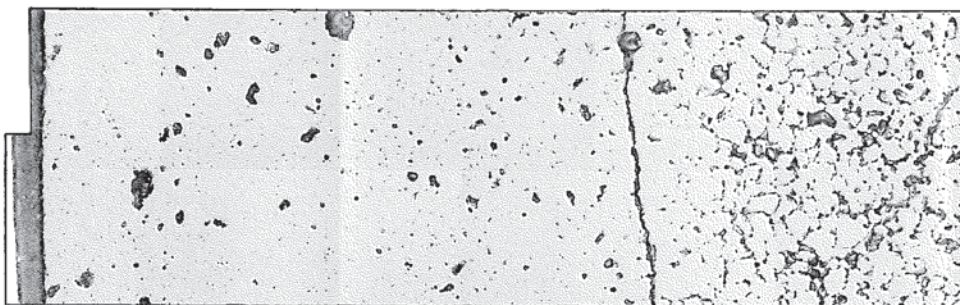
Photo.0-8 Optical Micrograph of Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A644) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A644



0.5 mm  
130X



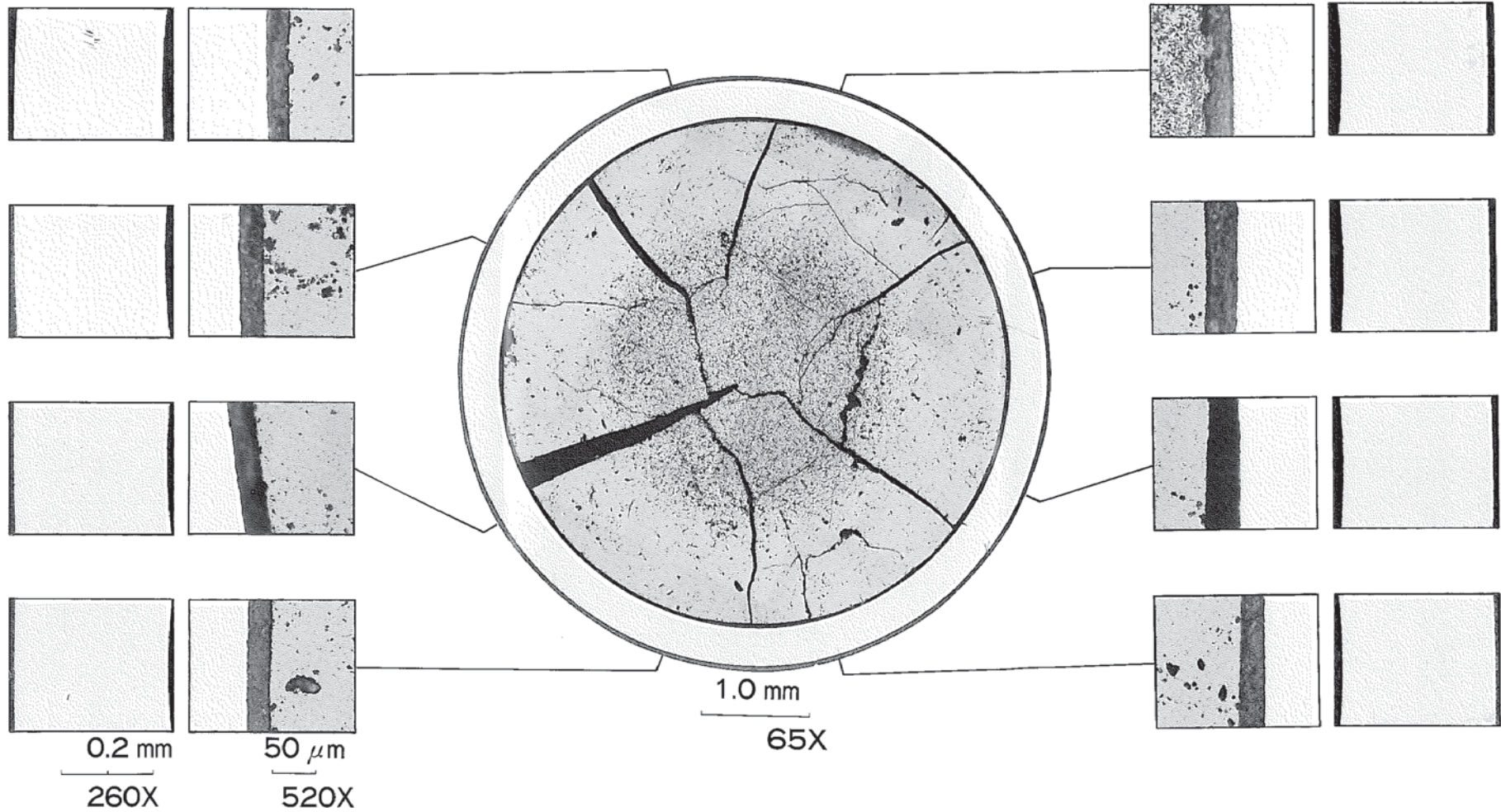
50  $\mu$ m  
520X E037008

**As-Polished**

Photo.0-9 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A644) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A662



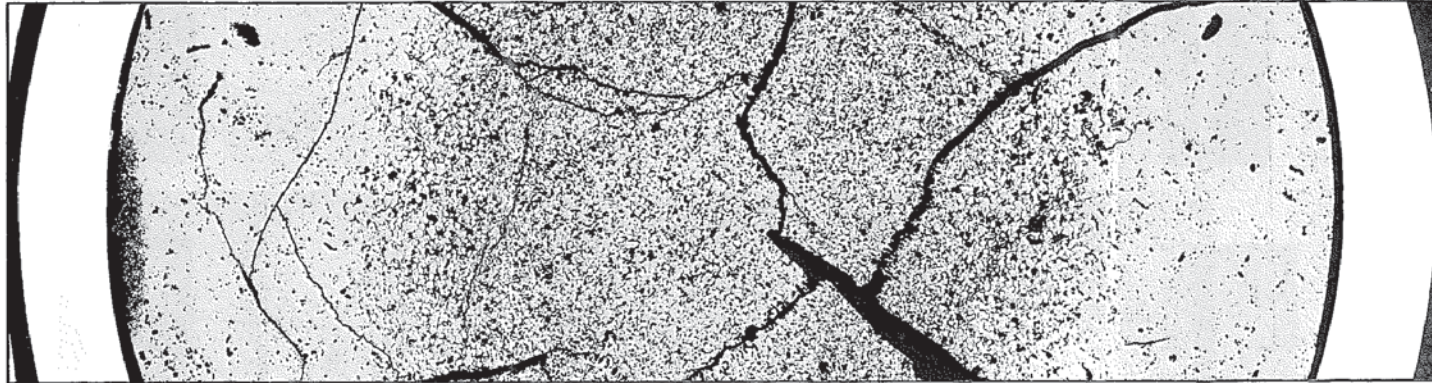
**As-Polished**

E037009

Photo.0-10 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A662) As-Polished

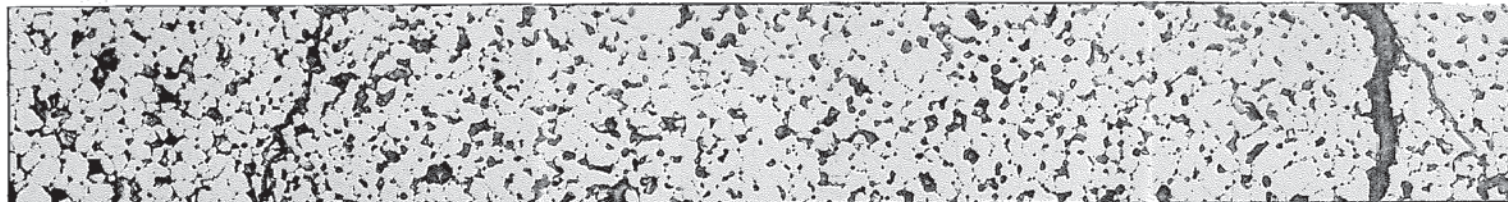
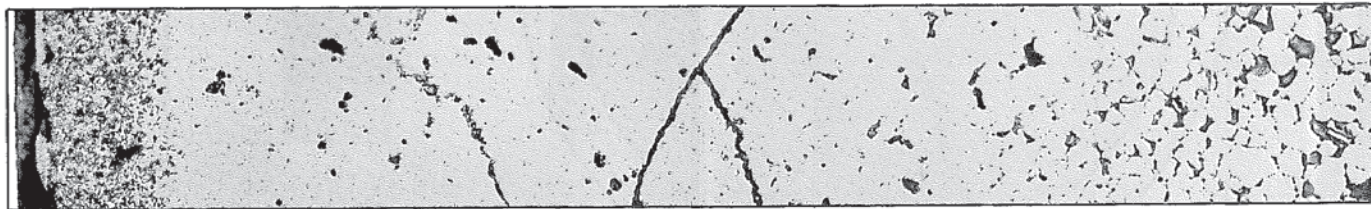
# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A662



0.5 mm

130X



50  $\mu$ m

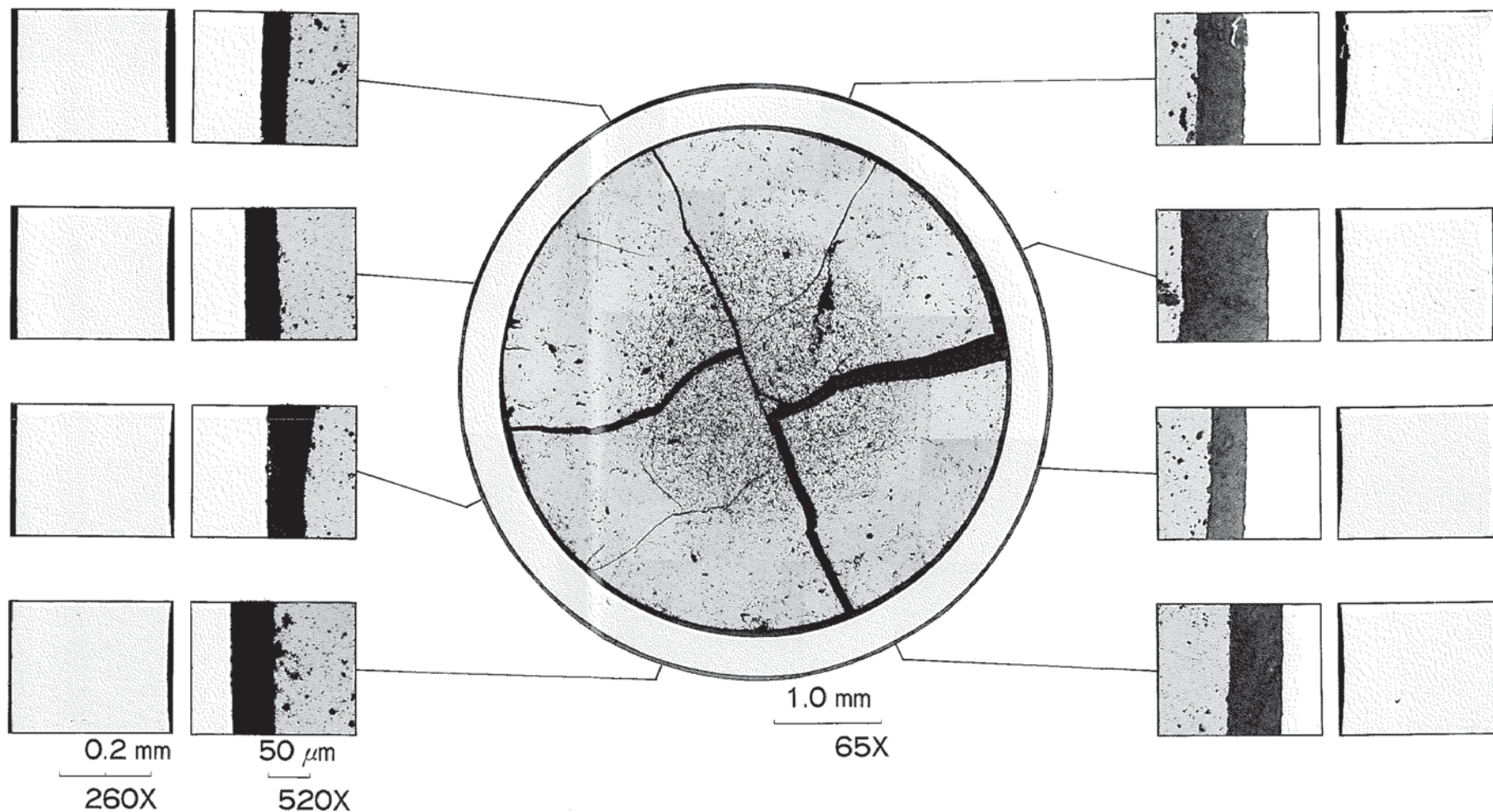
520X E037010

**As-Polished**

Photo. 0-11 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No. 70A662) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A682



**As-Polished**

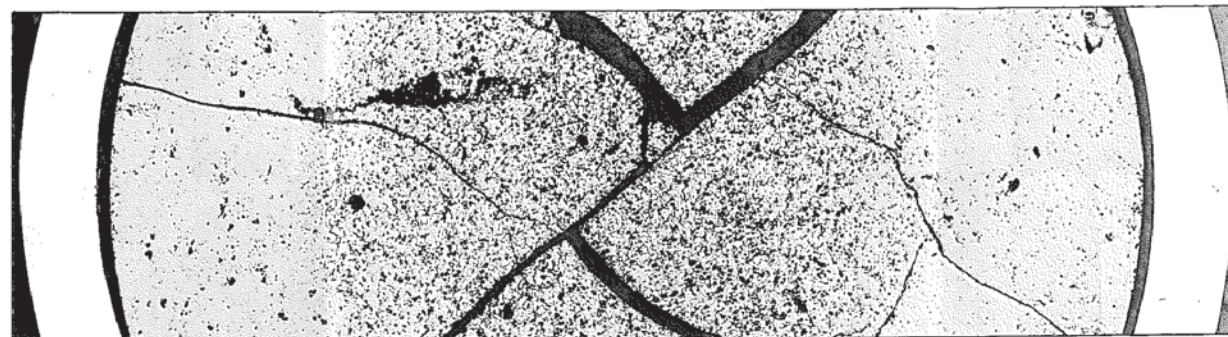
E037011

Photo.0-12 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A682) As-Polished

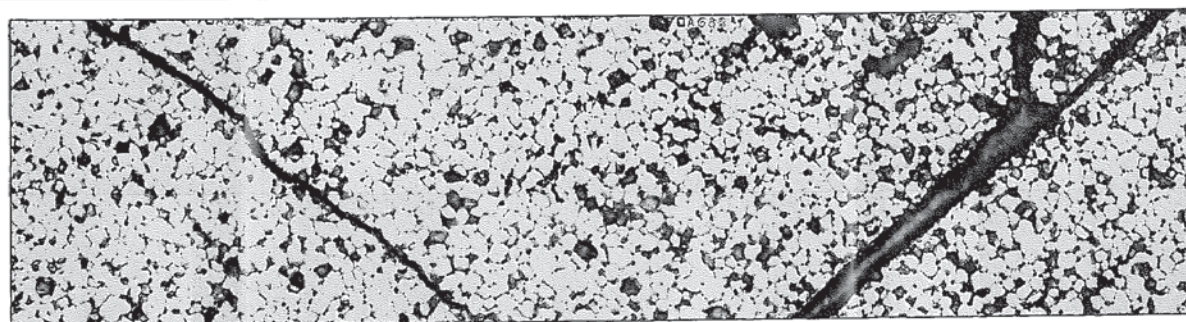
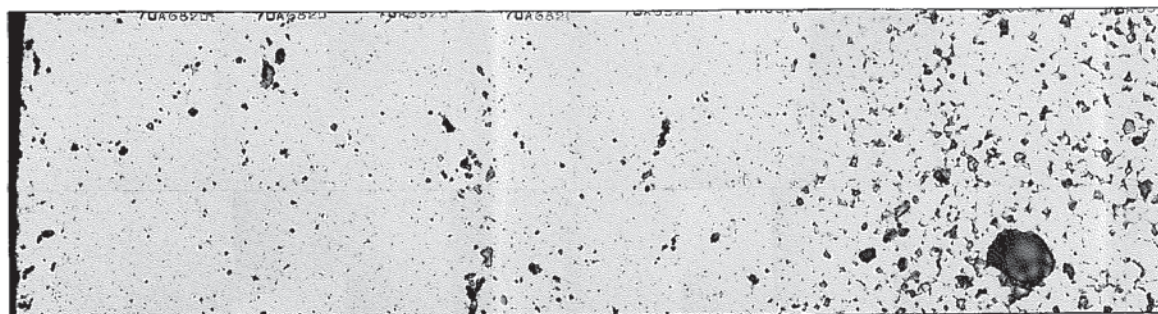


# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A682



0.5 mm  
130X



50  $\mu$ m  
520X  
E037012

As-Polished

Photo.0-13 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A682) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A685

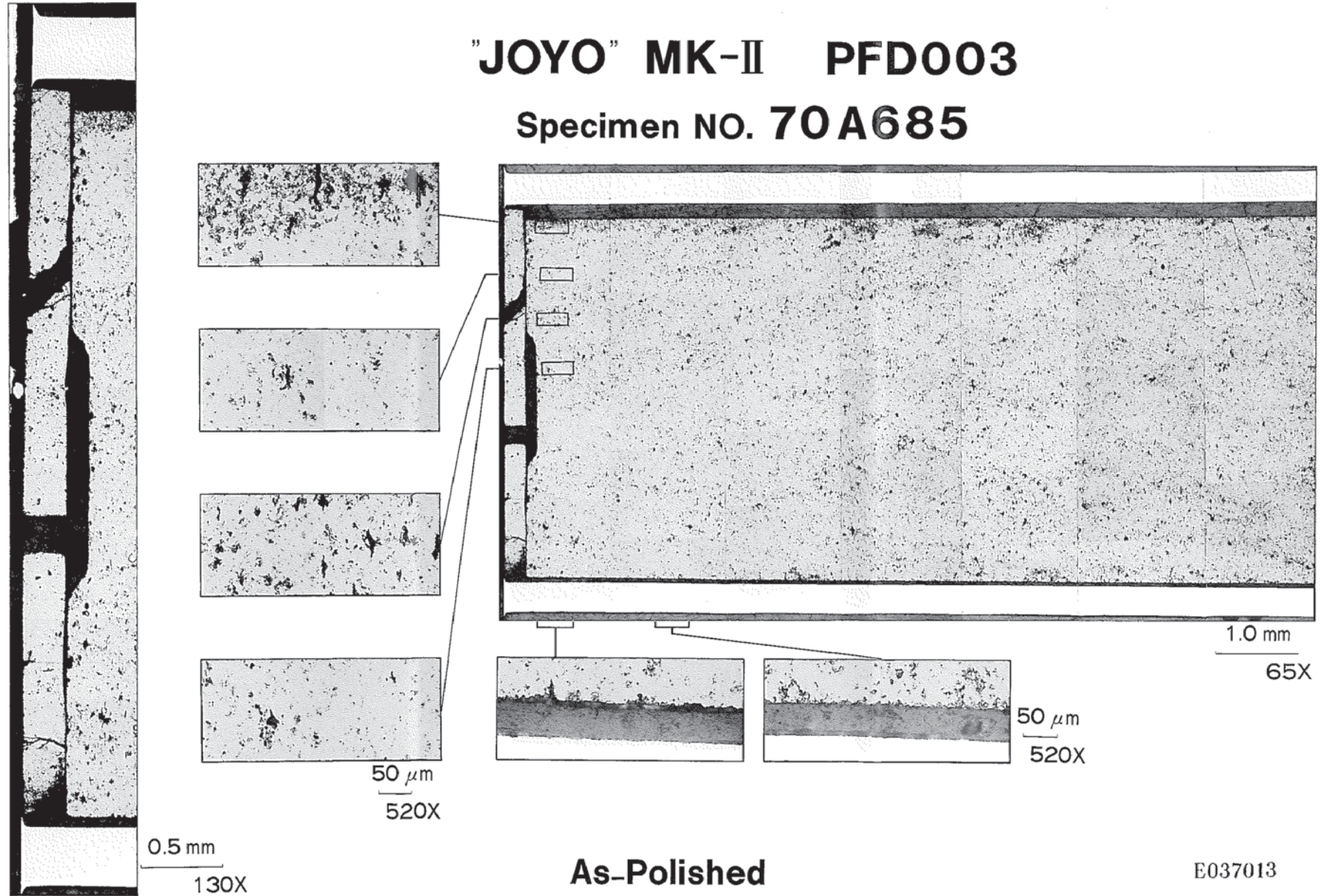
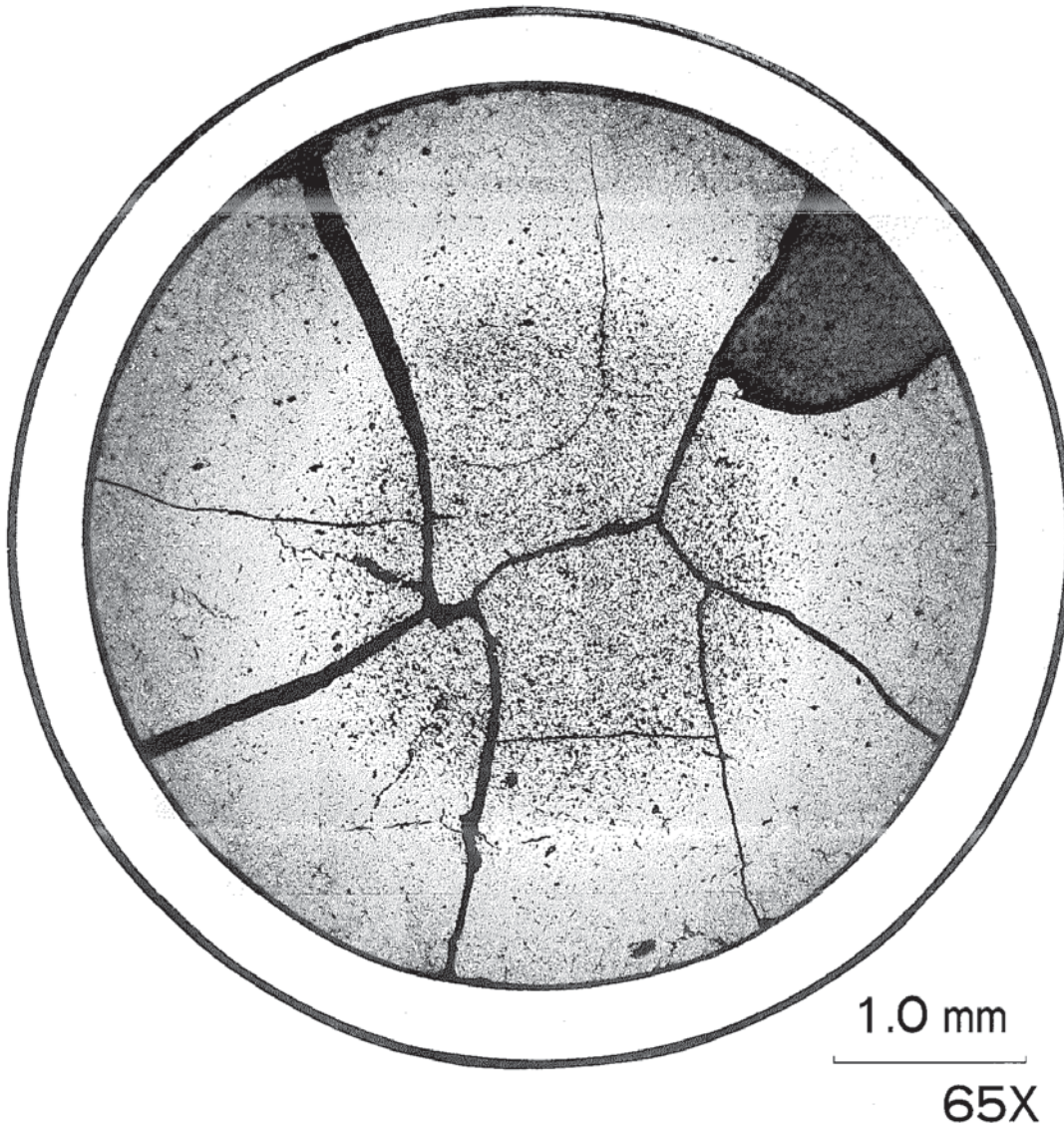


Photo.0-14 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core and Blanket Fuel Pin (Specimen No.70A685) As-Polished

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A625



**As-Etched**

E037014

# "JOYO" MK-II PFD003

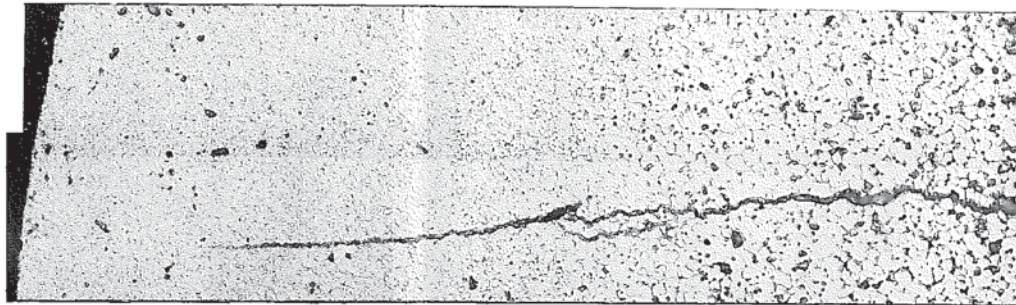
## Specimen NO. 70A625



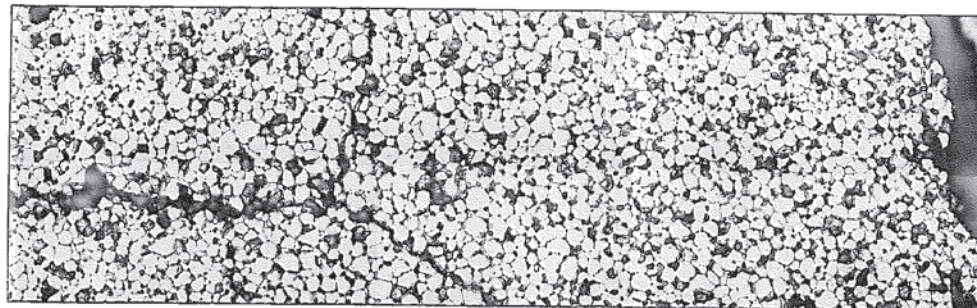
50  $\mu$ m  
520X



0.5 mm  
130X



**As-Etched** E037015

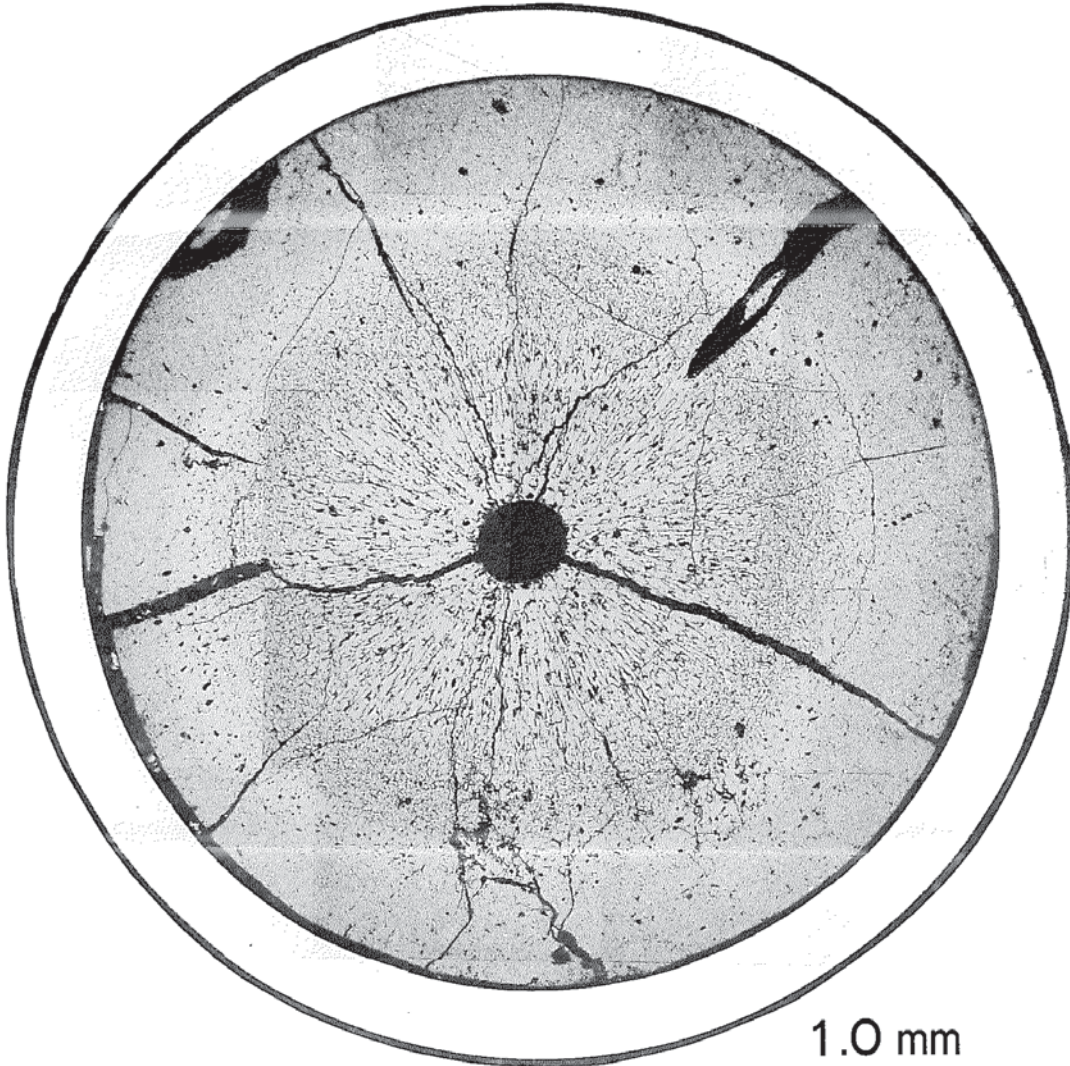


50  $\mu$ m  
520X

Photo.0-16 Optical Microstructure of the Core  
(Specimen No.70A625) As-Etched

# "JOYO" MK-II PFD003

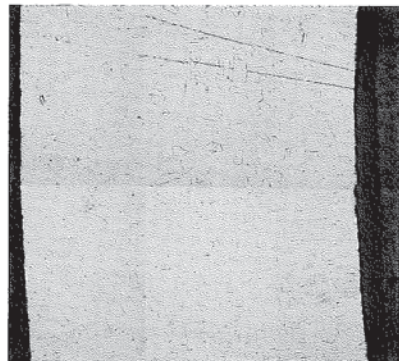
## Specimen NO. 70A644



65X

**As-Etched**

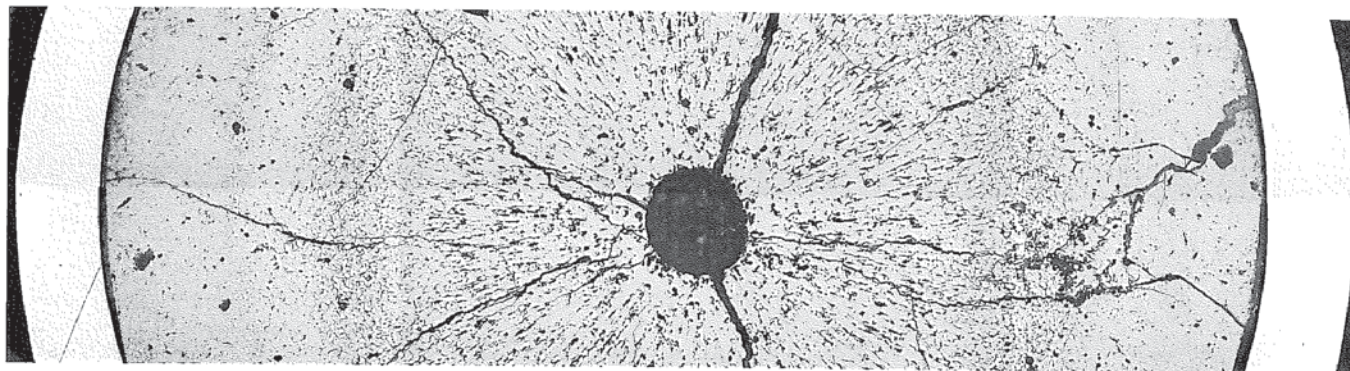
Photo.0-17 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.70A644) As-Etched



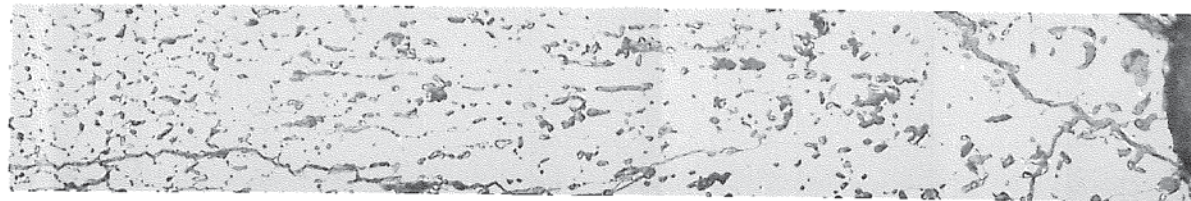
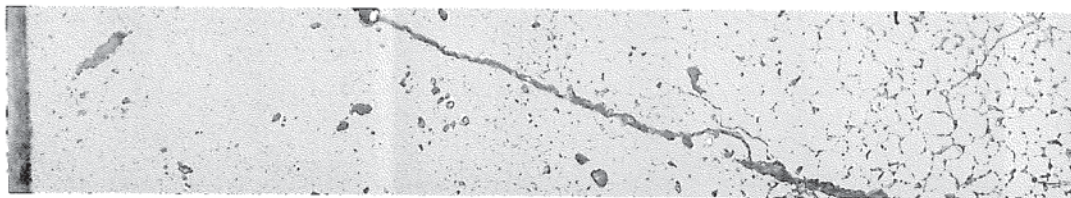
50  $\mu$ m  
520X

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A644



0.5 mm  
130X



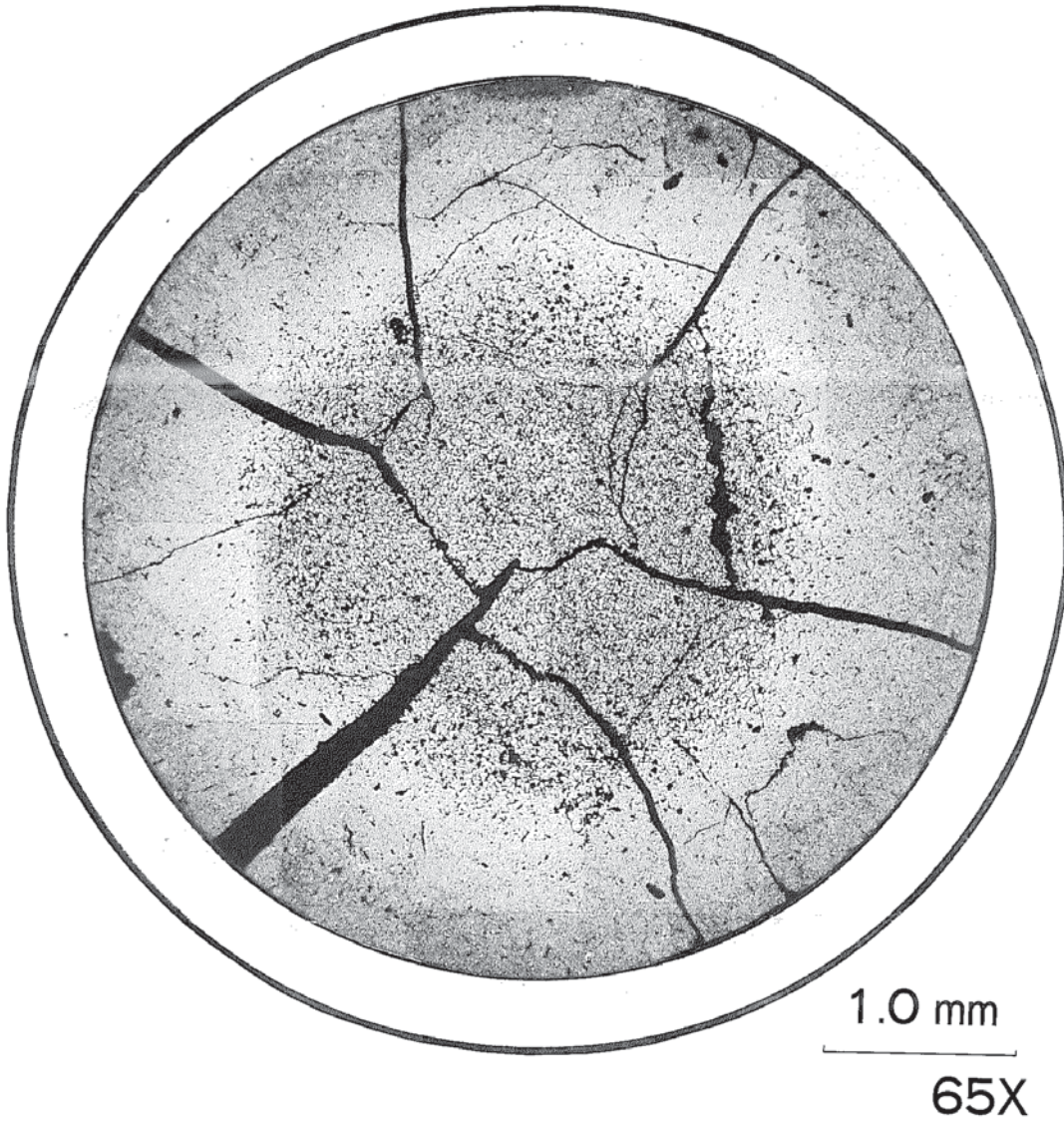
50  $\mu$ m  
520X

**As-Etched**

Photo.0-18 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A644) As-Etched

# "JOYO" MK-II PFD003

## Specimen NO. 70A662



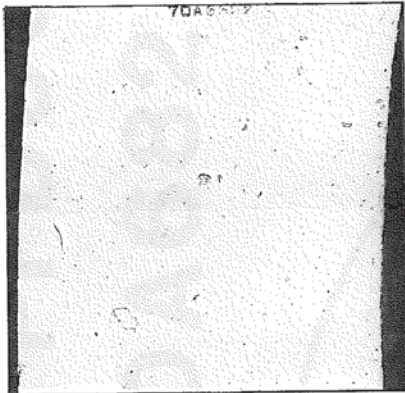
— 50 —

**As-Etched**

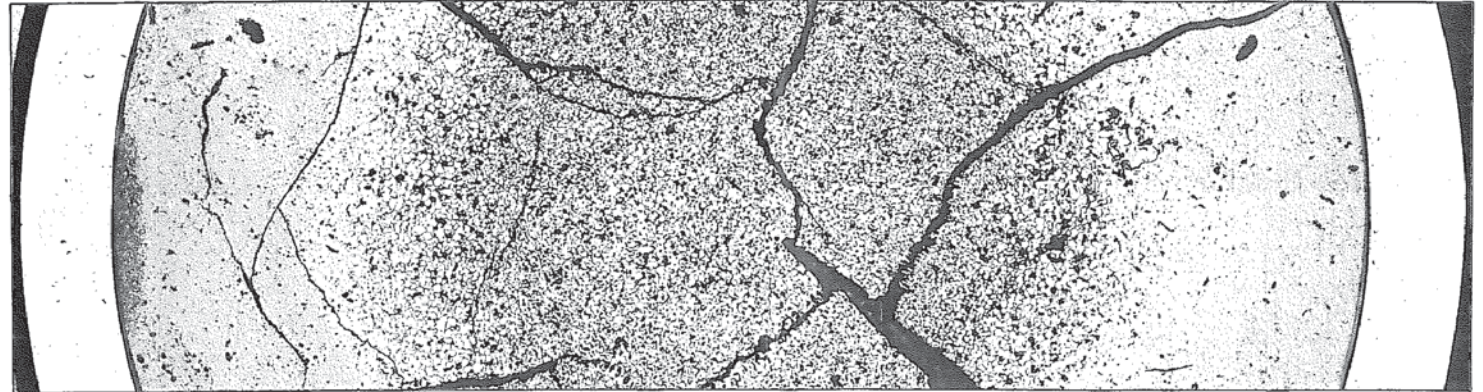
E037018

# "JOYO" MK-II PFD003

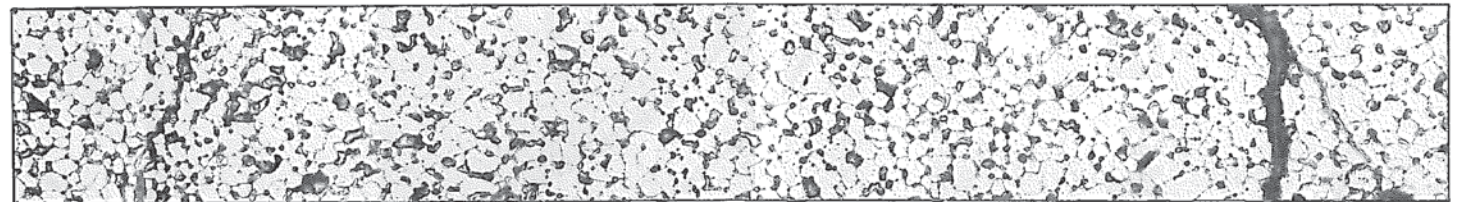
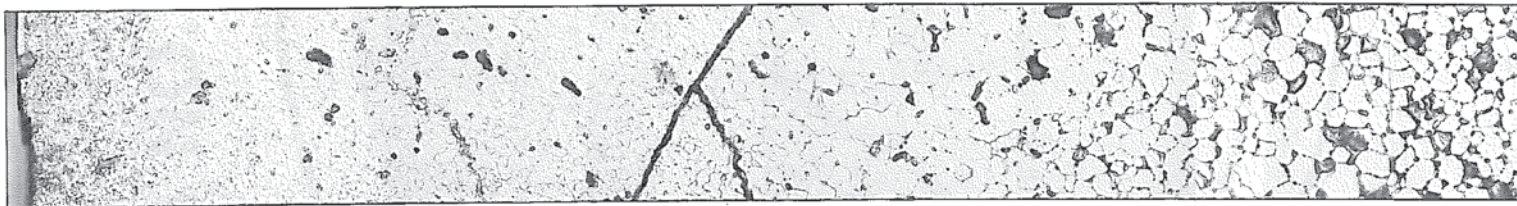
## Specimen NO. 70A662



50  $\mu$ m  
520X



0.5 mm  
130X



50  $\mu$ m  
520X

**As-Etched**

Photo.0-20 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A662) As-Etched

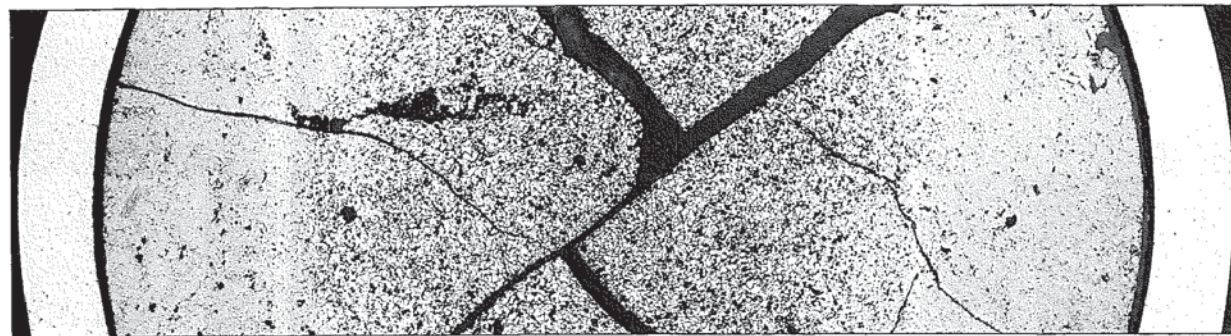


# "JOYO" MK-II PFD003

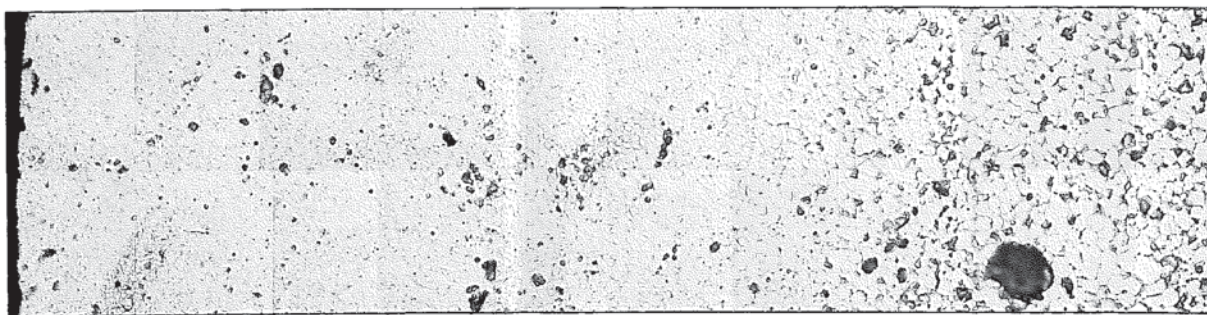
## Specimen NO. 70A682



50  $\mu$ m  
520X

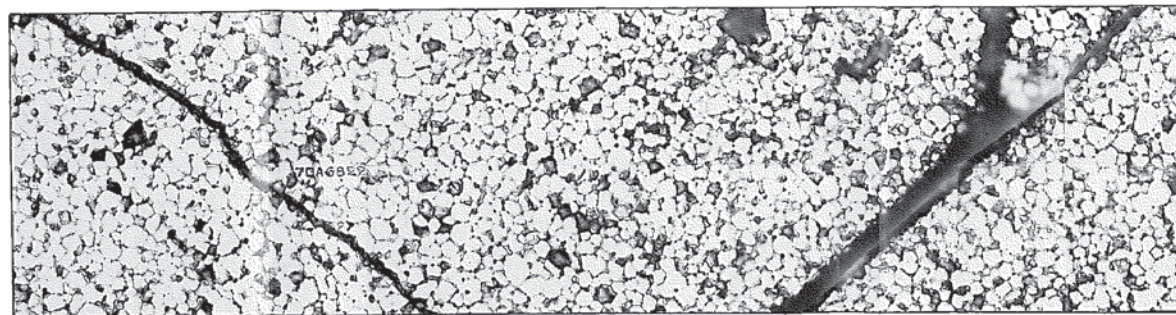


0.5 mm  
130X



50  $\mu$ m  
520X

**As-Etched**



E037021

Photo.0-22 Optical Microstructure of the Core Fuel  
(Specimen No.70A682) As-Etched

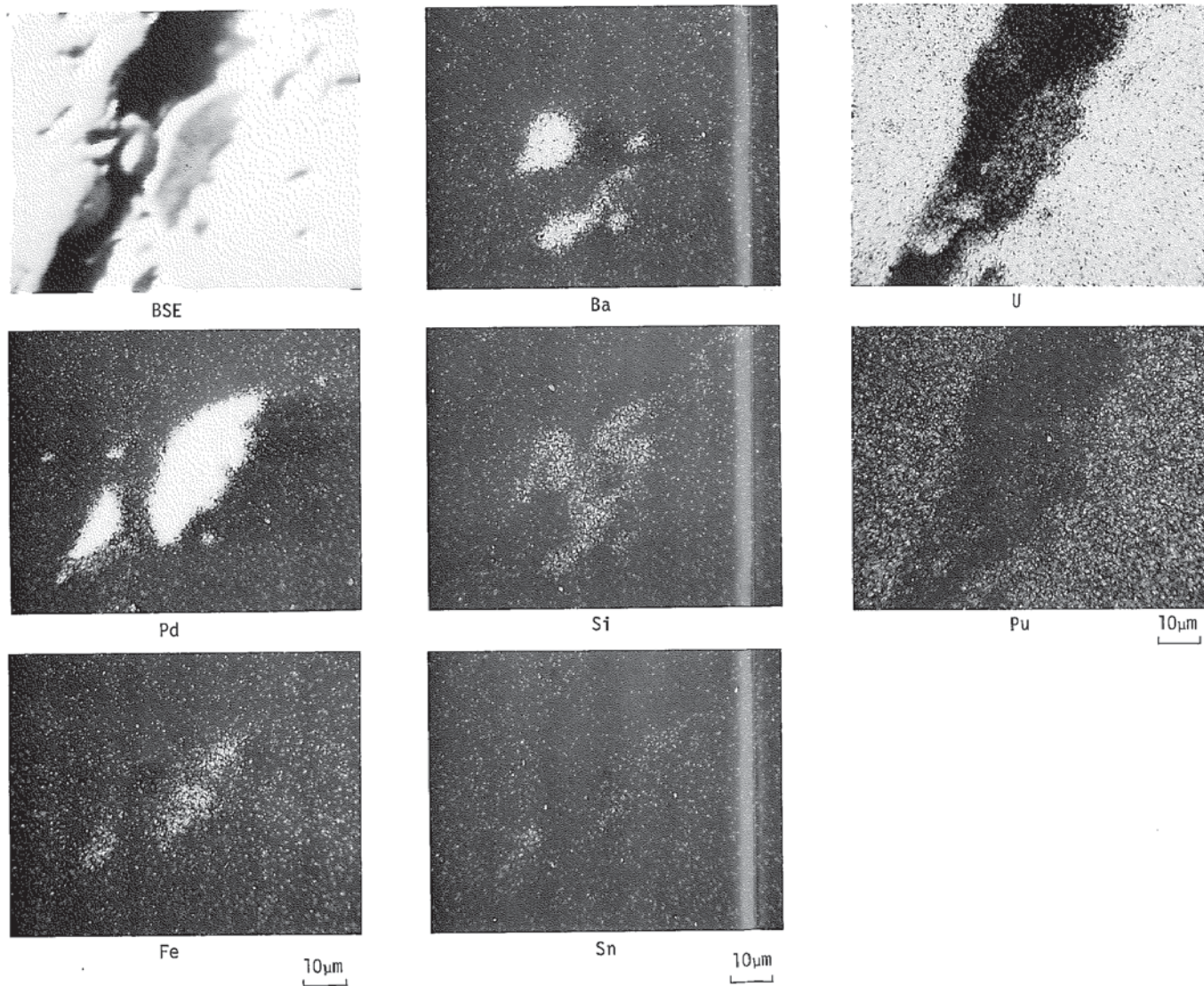
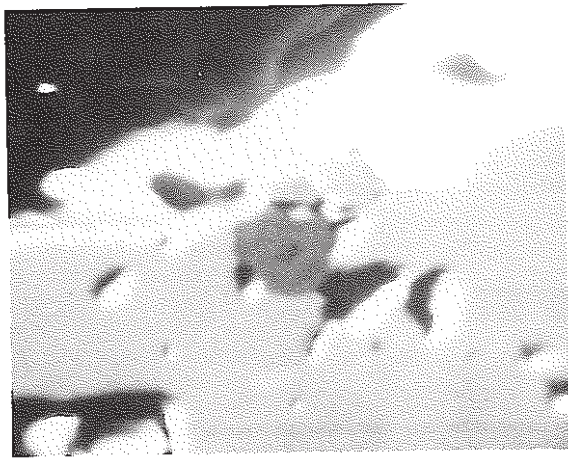
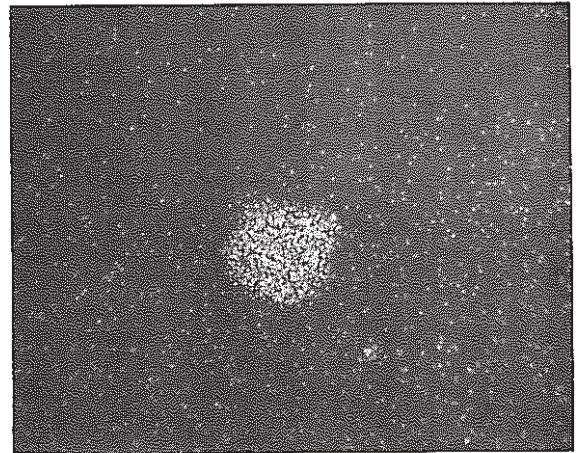


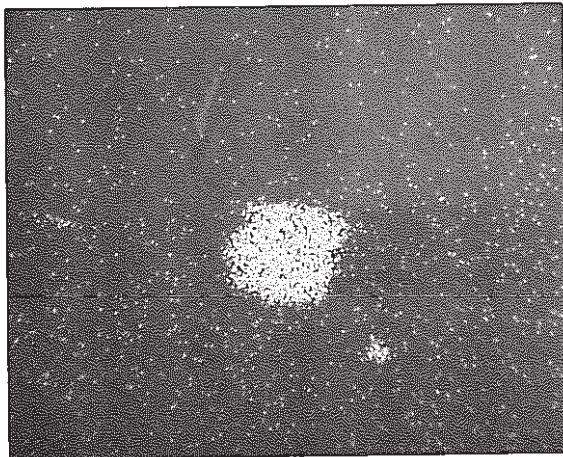
Photo.E-1 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion  
in the Crack (Specimen No.70A625)



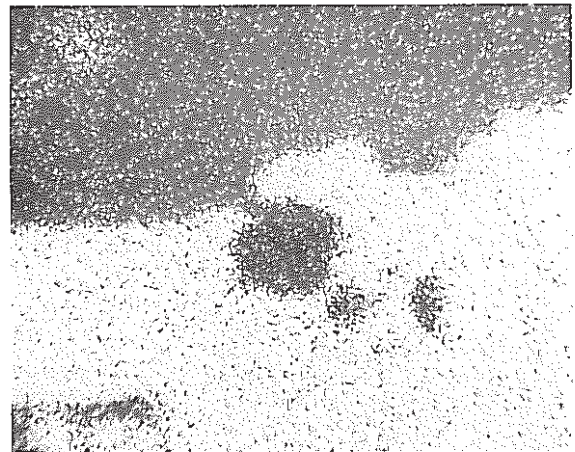
BSE



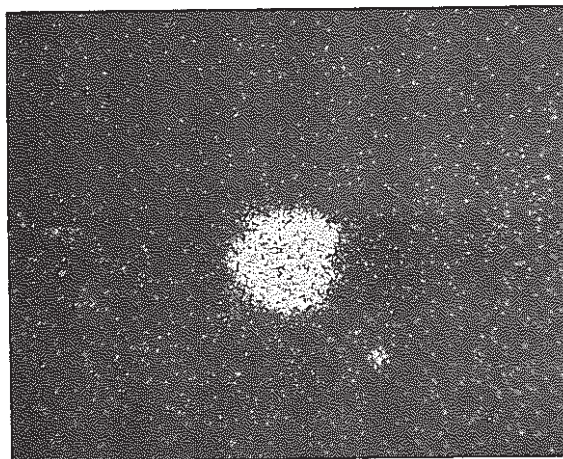
Tc



Mo

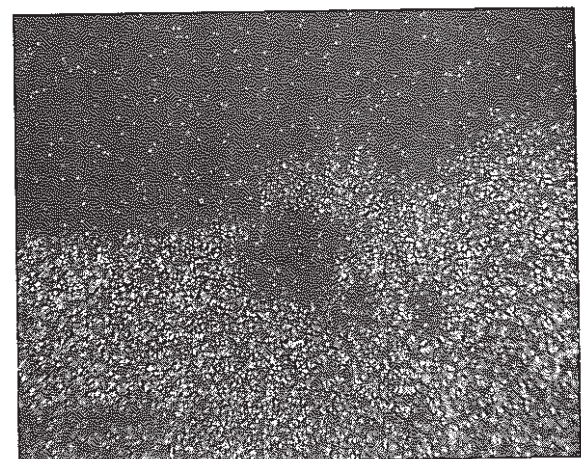


U



Ru

20μm



Pu

20μm

Photo.E-2 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Fuel (Specimen No.70A644)

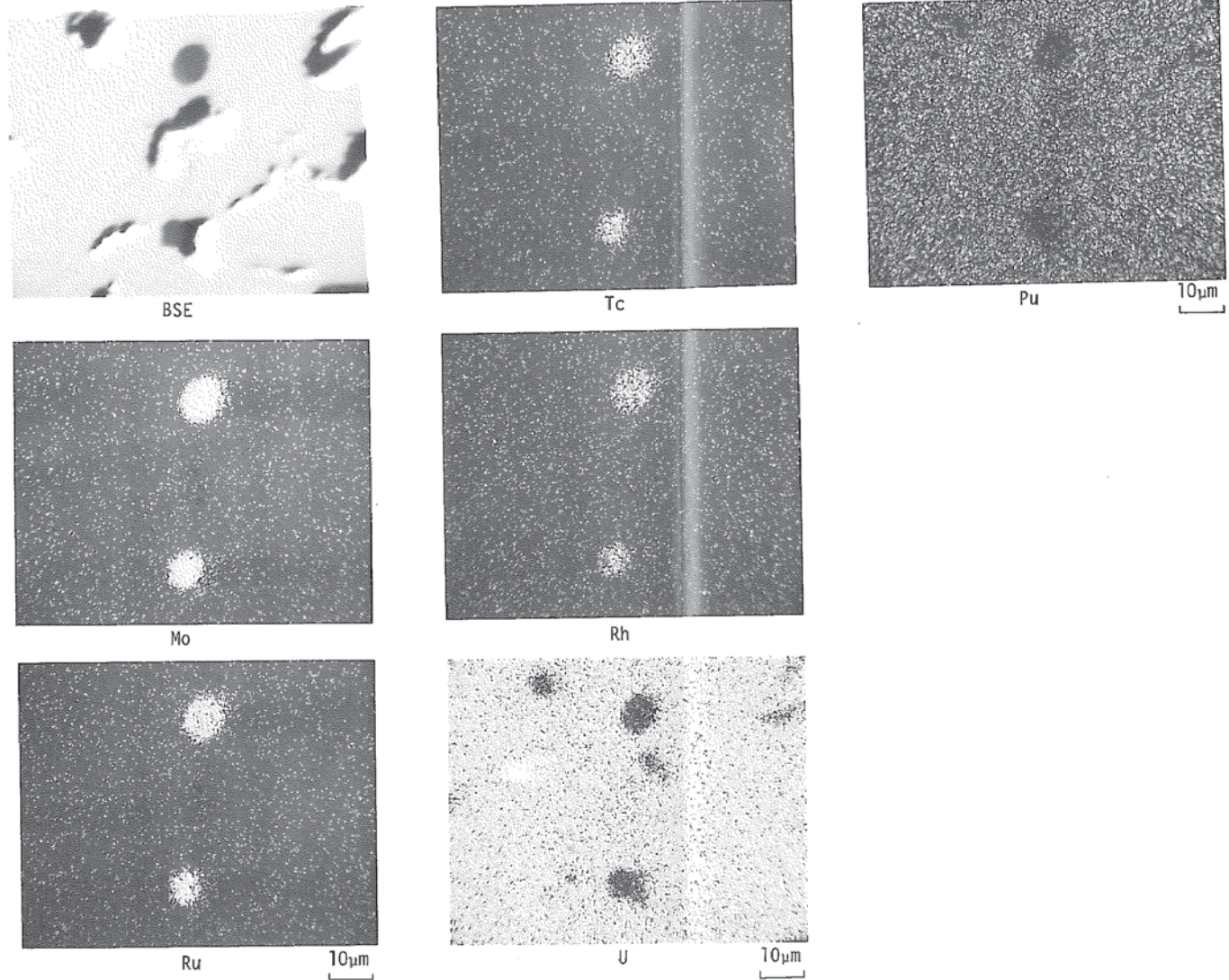


Photo.E-3 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Fuel (Specimen No.70A644)

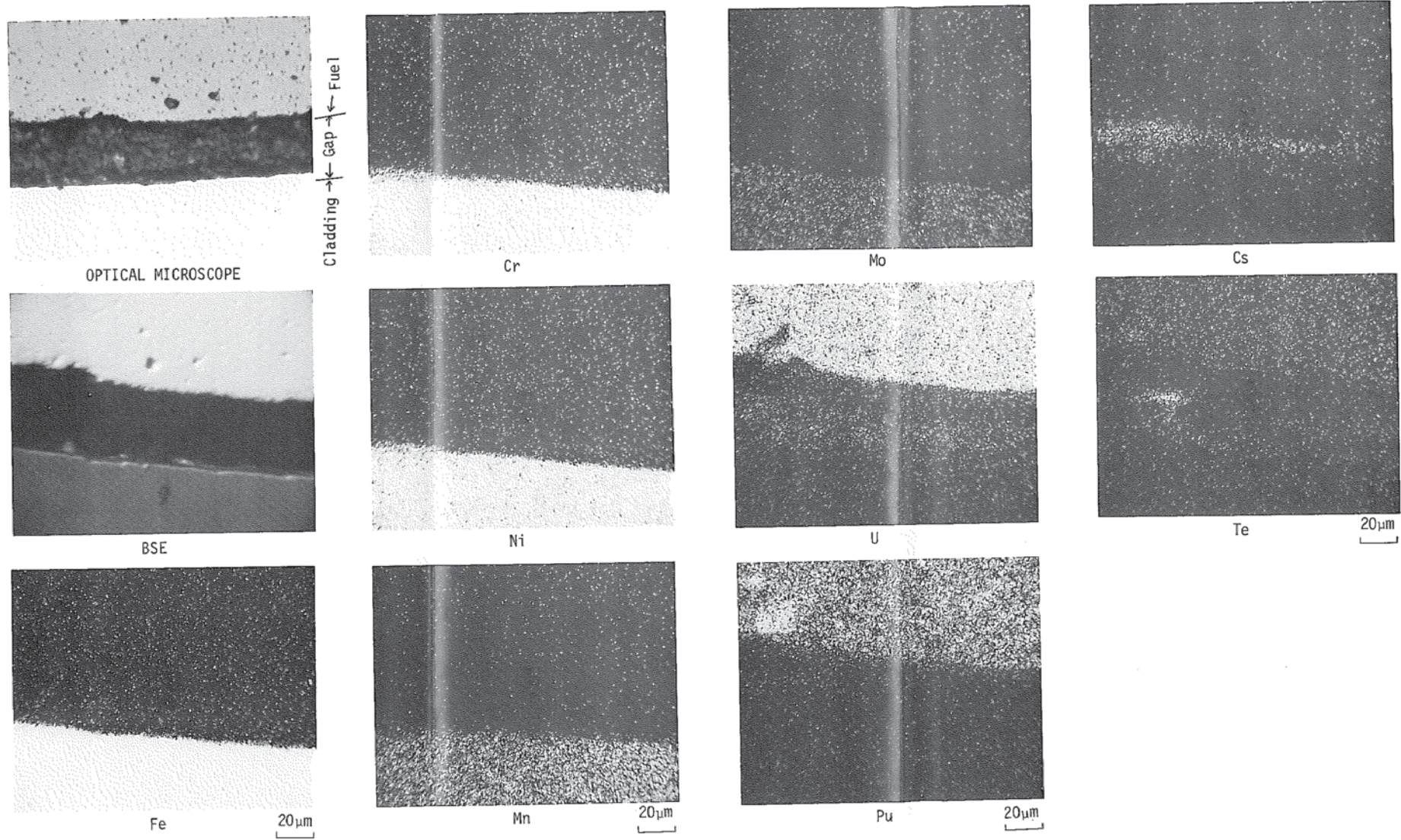


Photo.E-4 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No.70A625)

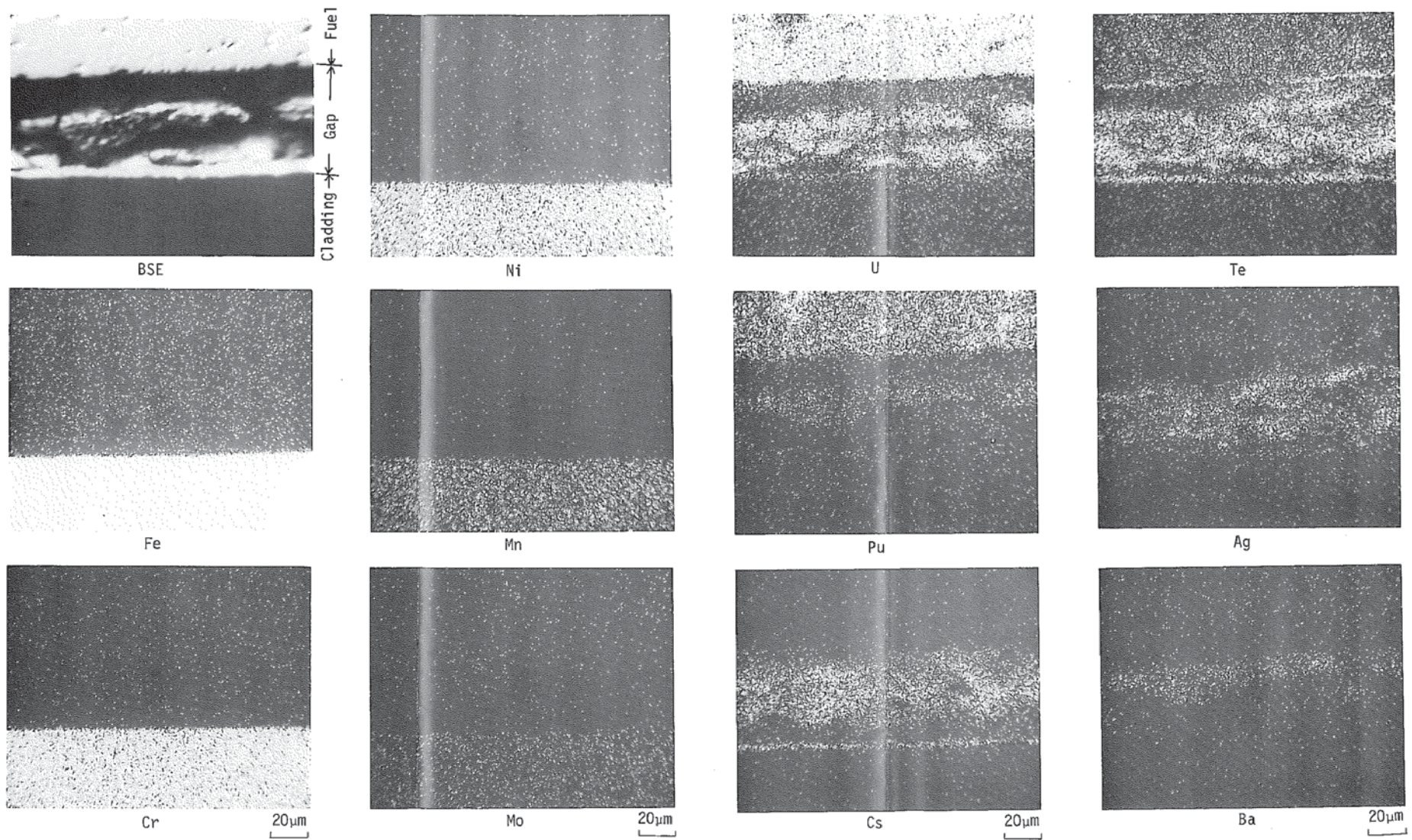


Photo.E-5 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No.70A625)

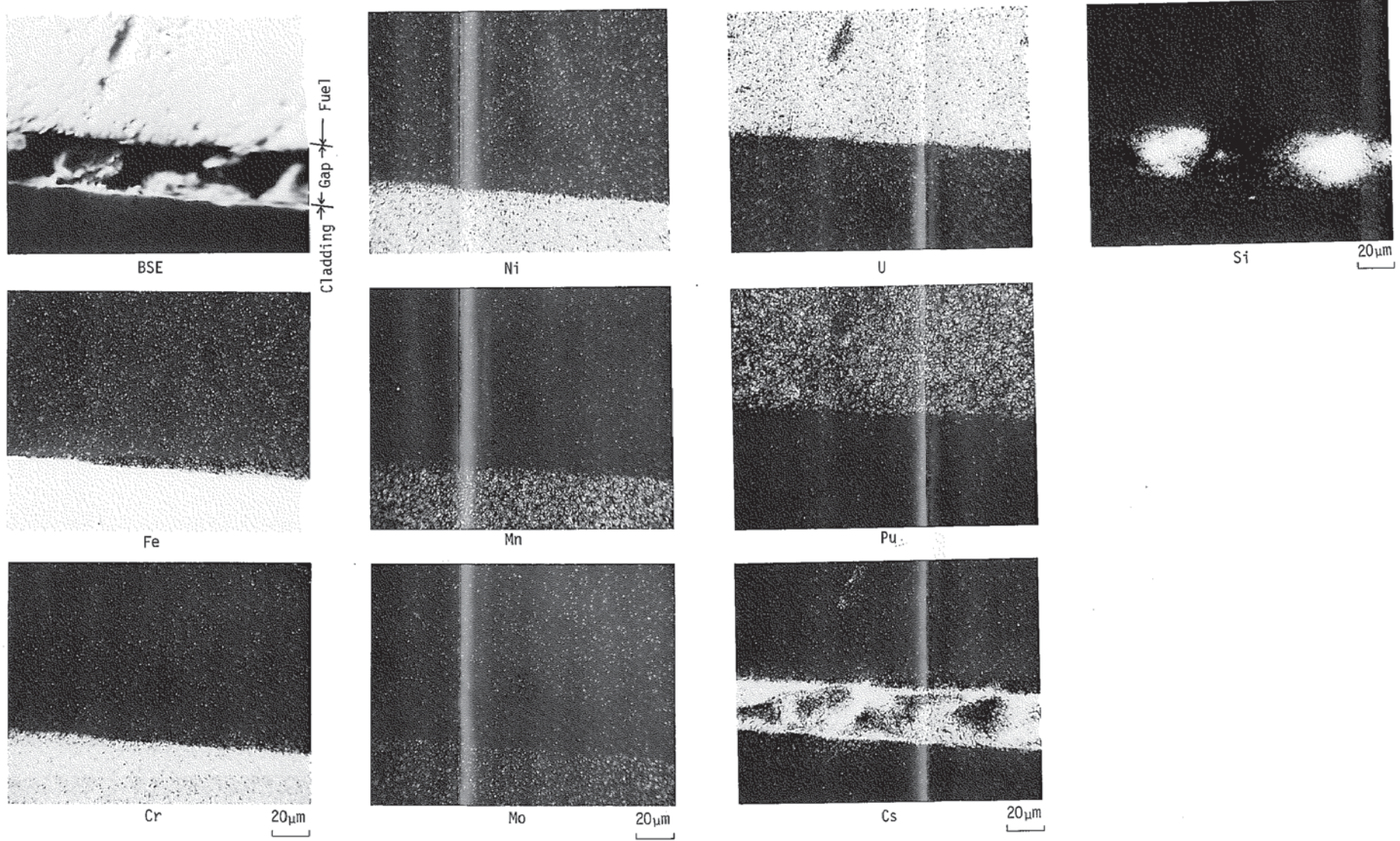


Photo.E-6 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No.70A644)

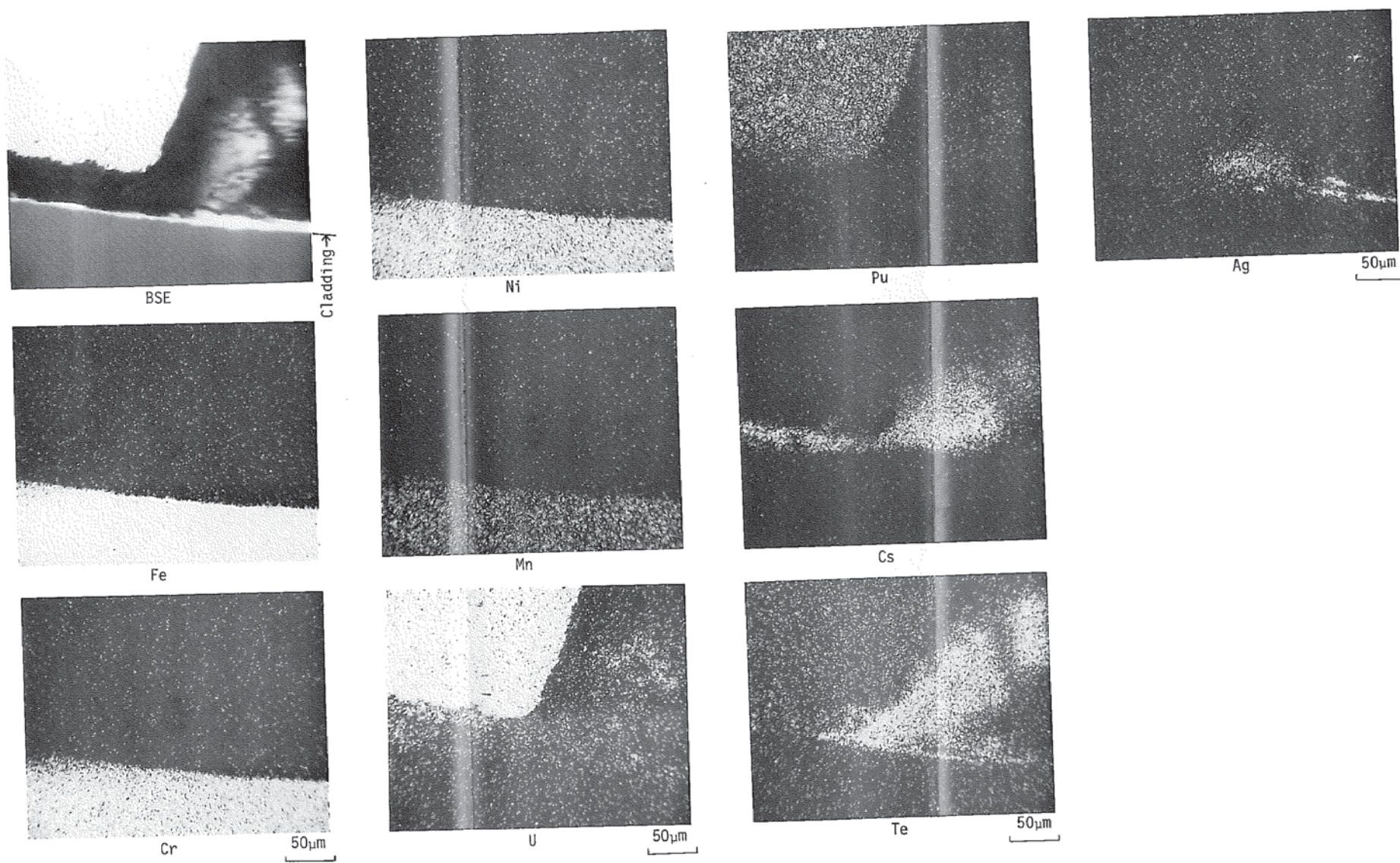


Photo.E-7 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No.70A662)



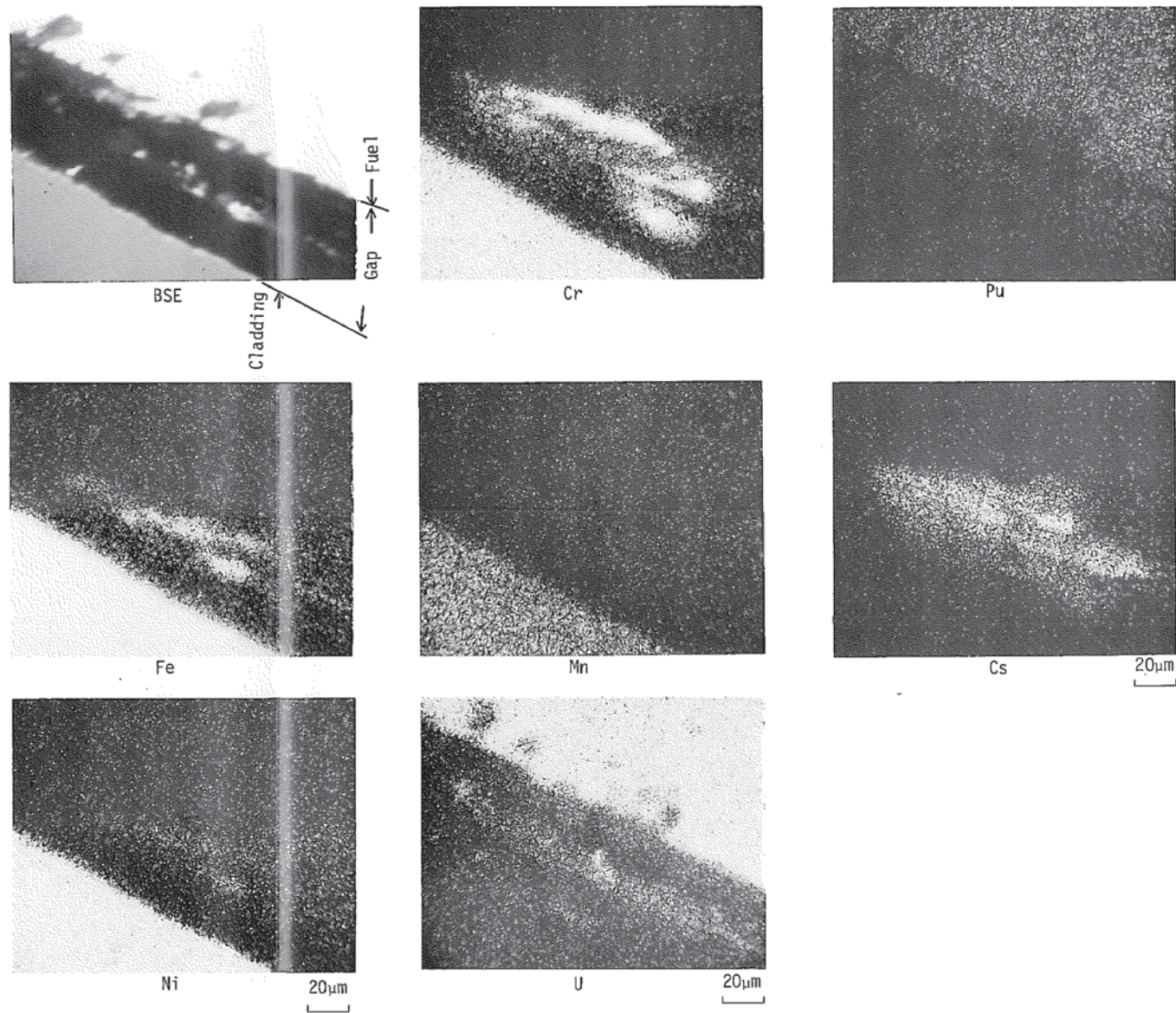


Photo.E-8 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No.70A682)

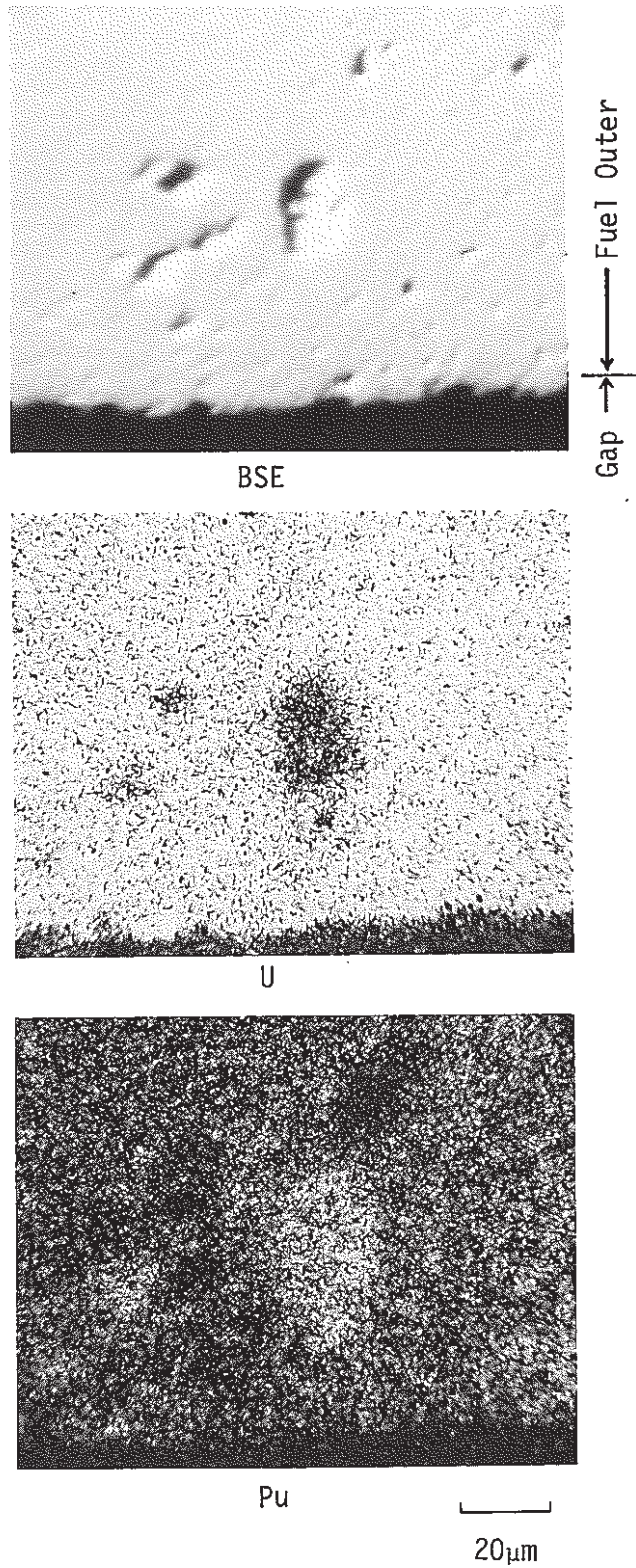
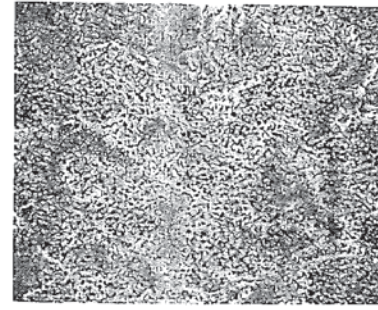
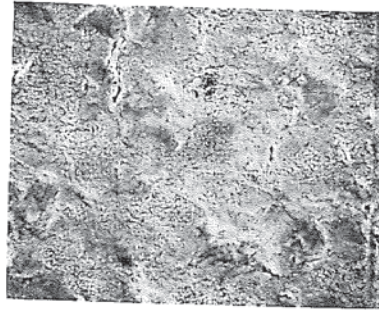
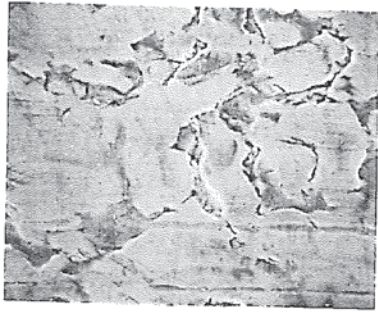
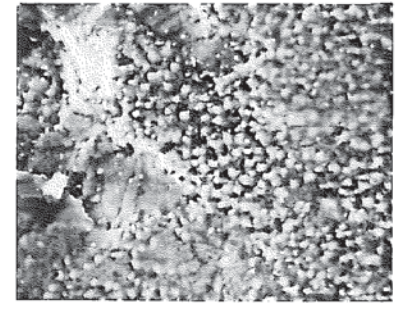
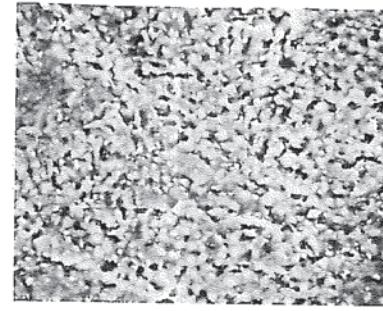
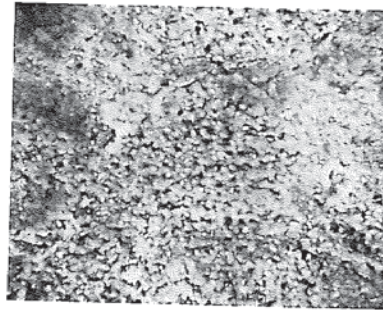
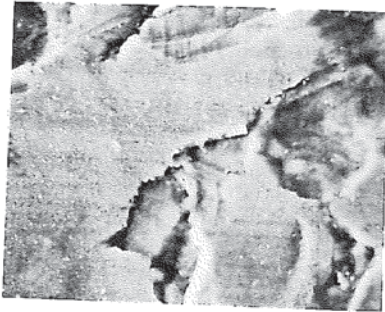
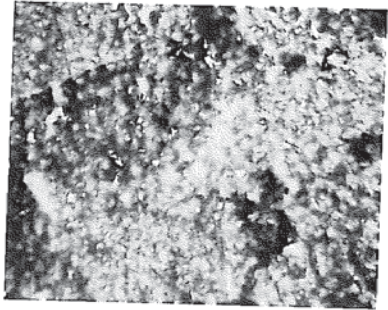


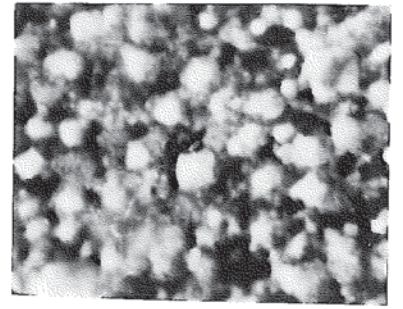
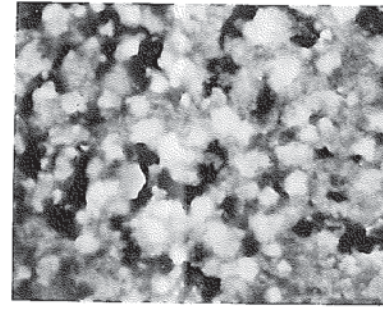
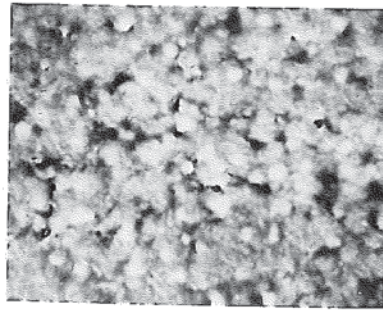
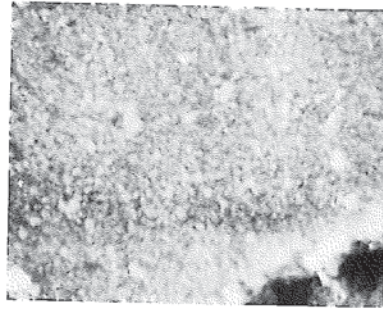
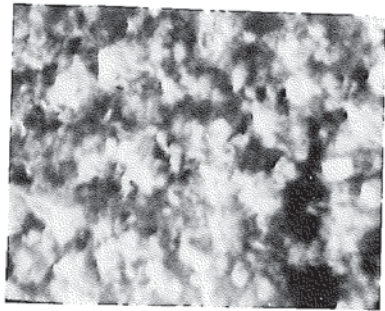
Photo.E-9 U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  X-ray Images of the Fuel Outer Region (Specimen No.70A625)



20  $\mu$ m



5  $\mu$ m



2  $\mu$ m

Temp. 380°C  
Fluence  
No.70A627

470°C  
No.70A646

525°C  
No.70A661

565°C  
No.70A681

560°C  
No.70A68A

Photo.S-1 Secondary Electron Micrographs of the Core Fuel Cladding Outer Surface (Pin No.70A6)

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。

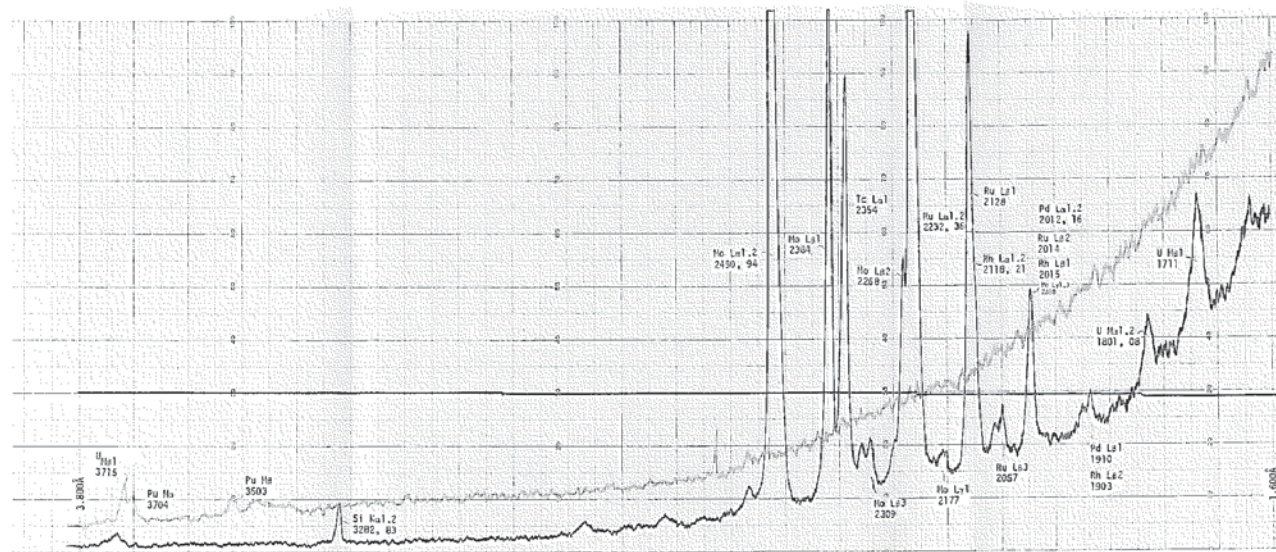


Chart 1 Spectral Analyses of the Metallic Inclusion in the Fuel (Specimen No.70A644)



Chart 2 Line Analyses by Zr-La and Ba-La from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A644)

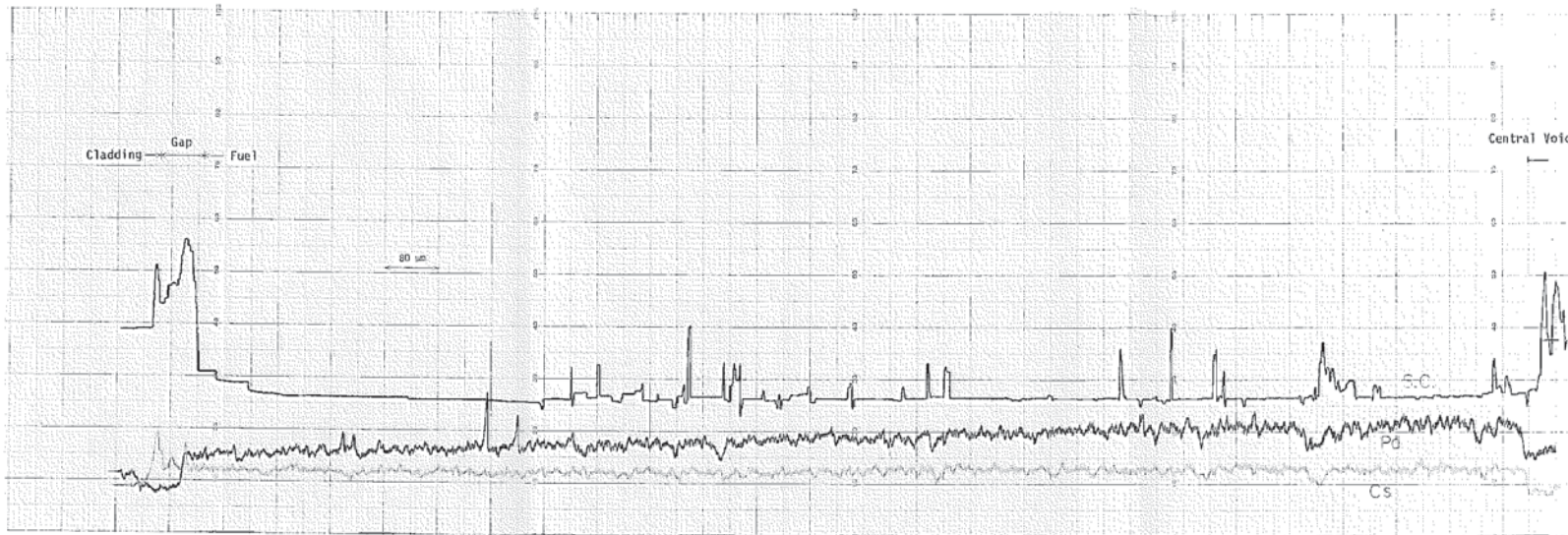


Chart 3 Line Analyses by Pd-L $\alpha$  and Cs-L $\alpha$  from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A644)



Chart 4 Line Analyses by Si-K $\alpha$  and Nd-L $\alpha$  from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A644)



Chart 5 Line Analyses by Fe-K $\alpha$  and Mo-L $\alpha$  from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A644)



Chart 6 Line Analyses by Ru-L $\alpha$  and Cr-K $\alpha$  from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A644)

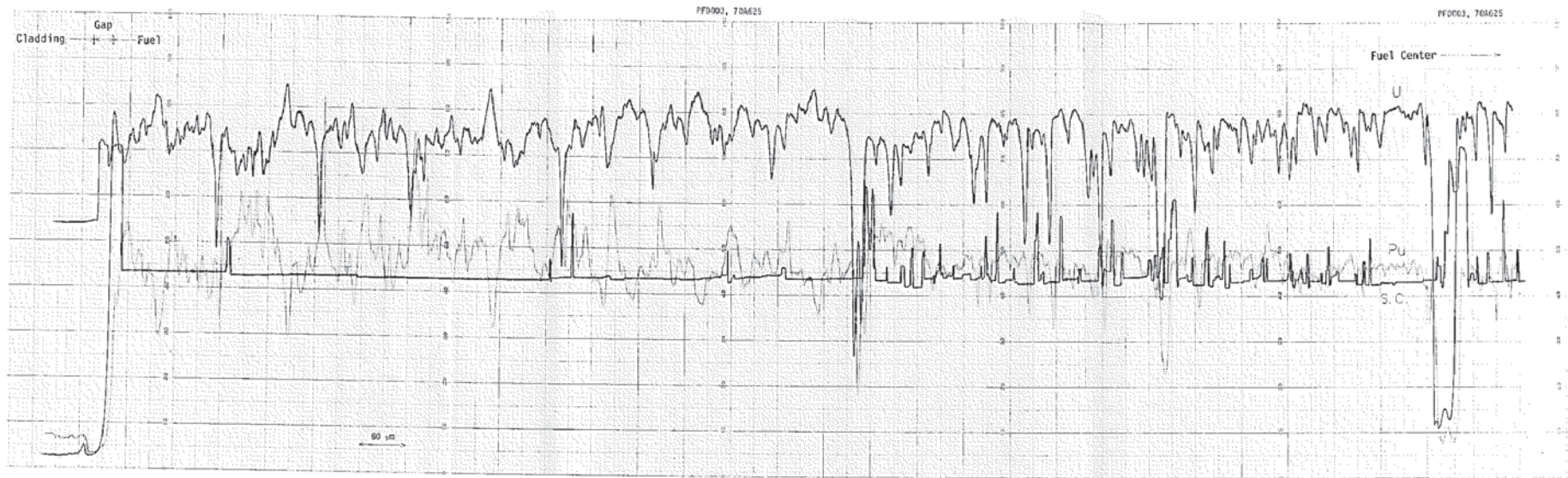


Chart 7 Line Analyses by U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  from the fuel Center to Cladding (Specimen No. 70A 625)

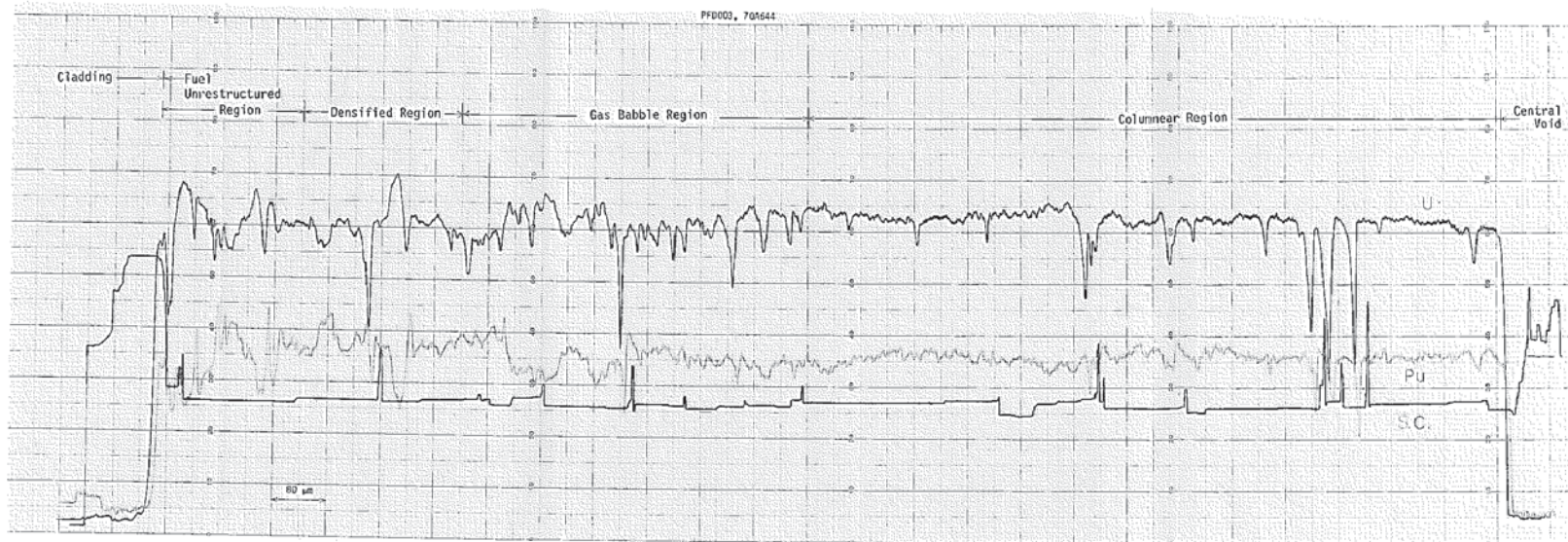


Chart 8 Line Analyses by U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A644)





Chart 9 Line Analyses by U-M $\alpha$  and Pu-M $\beta$  from the Fuel Center to Cladding (Specimen No.70A662)