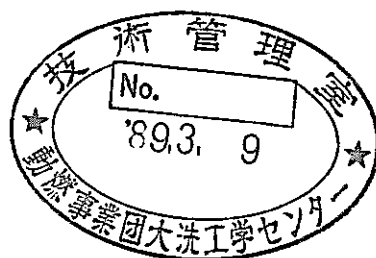


「常陽」MK-II C型特殊燃料集合体(PFC020)の照射後試験

燃料要素の組織観察及び機器分析



1988年12月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
	PNC TN9410 88-206
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 C型特殊燃料集合体(PFC 020)の照射後試験

燃料要素の組織観察及び機器分析

実施責任者 榎戸裕二*

報告者 熊倉忠夫* 鶴飼重治* 叶野一郎*

榎田尚也* 柴原 格*

要 旨

「常陽」MK-II C型特殊燃料集合体(PFC 020)は、「もんじゅ」の炉心燃料要素とほぼ同一仕様の燃料要素を、定格最大線出力と被覆管ホットスポット温度が「もんじゅ」実機条件と同等となる条件下で照射したものである。本試験では、燃料要素の照射挙動を把握するため、光学顕微鏡観察、走査電子顕微鏡観察、X線マイクロアナライザによる元素分析並びにイオンマイクロアナライザ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通りである。

- 1) 燃料組織は、燃料カラム軸方向中心部で中心空孔(約1.25 mm 径)と柱状晶が観察された。ギャップ巾は、製造時ギャップ巾である80 μ m から8 μ m にまで減少していることから照射中において燃料と被覆管の機械的相互作用(FCMI)が生じていた可能性がある。被覆管内面腐食量は、最大26 μ m であった。
- 2) 画像解析により求めた燃料ペレットの体積増加率は、燃料カラム中心部で焼しまり状態から、スエリングに伴う体積増加を示していた。
- 3) ペレット内に保持されているXe濃度と燃料組織との間に明瞭な対応が認められた。Xe濃度は等軸晶領域で急激に低下し、ペレット中心部ではXeはほとんど放出していた。
- 4) 燃料カラム軸方向中心部の中心空孔端でPu濃度が製造時の29.86%から31.42%に増加しており、これに伴い中心空孔端で若干の燃焼度の増加が認められた。
- 5) 被覆管外表面の性状は、被覆管温度が400 $^{\circ}$ C以下の低温度部では、製造時状態を保持しているが、約500 $^{\circ}$ C以上では、温度が高くなるに従い表面荒れが著しくなっている。特に低温度部において従来観察されているような付着物が認められなかった。これは本集合体では意図的にNa流速を低くしたことが原因しているものと考えられる。

* 大洗工学センター, 燃料材料開発部, 燃料材料技術開発室(ADS)

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 燃料ペレットの仕様	2
3. 照射履歴	3
4. 試験方法	4
4.1 試料調製	4
4.2 光学顕微鏡による観察	4
4.3 走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察	5
4.4 X線マイクロアナライザ (SXMA) による元素分析	5
4.5 イオンマイクロアナライザ (IMA) による質量分析	5
5. 試験結果と考察	6
5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察	6
5.2 被覆管内面腐食	7
5.3 画像解析によるペレットスエリング評価	8
5.4 SXMA による燃料内 FP 挙動及び U, Pu の濃度測定	9
5.5 IMA による燃焼率測定	10
5.6 SEM による被覆管外表面の形態観察	11
6. 結果のまとめ	12
7. 謝 辞	13
8. 参考文献	14

List of Tables

Table 1	Specification of Fuel Pin.	15
Table 2	Chemical Composition of Cladding Material.	15
Table 3	Charcteristic of Fuel Pin.	16
Table 4	Chemical Composition of Fuel Pellet.	17
Table 5	Polishing Condition of Specimen.	18
Table 6	Conditions of Ionic Etching and Evapolation.	18
Table 7	Irradiation Condition of Each Sample.	19
Table 8	Summary Data from Ceramography.	19
Table 9	FCCI Measuerd Data of Each Sample.	20
Table10.	Volume Change of Each Sample from Ceramography.	20
Table11.	Calculational Results Conversion Coefficient from Xe-La Intensity to Xe-Concentration. (S/A No. PFD 003)	21
Table12.	Results of Calculation on Fission Gas Release Rate in Unrestructured Region and Restructured Region Based on SXMA Measurements.	22
Table13.	Results of Measured Burnup by IMA.	23
Table14.	Results of Radial Burnup Measurement by IMA.(Specimen A 42944) ...	23
Table15.	Irradiation Conddition of Cladding Outer Surface Examination Samples.	23

List of Figures

Fig. 1	Structure of II-Type Fuel Pin of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly.	24
Fig. 2	Location of the Fuel Subassembly (PFC020) in "JOYO" MK-II.	25
Fig. 3	Location of the Fuel Pin (A429) in the Subassembly.	26
Fig. 4	Axial Profile of Linear Heat Rate. (Pin No. A429)	27
Fig. 5	Axial Profile of Burnup. (Pin No. A429)	28
Fig. 6	Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature. (Pin No. A429) ...	29
Fig. 7	Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin.	30
Fig. 8	Axial Profile of Fuel Structure.	31
Fig. 9	Residual Radial Gap Width of "JOYO" MK-II Irradiated Fuel as a Function of Burnup.	32
Fig.10	Cladding Wastage as a Function of Cladding Inner Temperature. (PFC020)	33
Fig.11	Results of Analyses of Fission Product Compound in the Fuel-Cladding Gap. (Specimen No. A42944) ...	34
Fig.12	Results of Analyses of Fission Product Compound in the Fuel-Cladding Gap. (Specimen No. A42944) ...	35
Fig.13	X-ray Images and Results of analyses of FCCI. (Specimen No. A42985)	36
Fig.14	Pellet Volume Change as a function of burnup.	37
Fig.15	Relative Radial Profile of Retained Xe Measured by SXMA.	38
Fig.16	Relative Radial Profile of Retained Cs, I, Xe Measured by SXMA. (Specimen No. A42922) ...	39
Fig.17	Relative Radial Profiles of Retained Cs, I, Xe Measured by SXMA. (Specimen No. A42944) ...	39
Fig.18	Relative Radial Profiles of Retained Cs, I, Xe Measured by SXMA. (Specimen No. A42983) ...	39
Fig.19	Burnup Dependency of Xenon Release Rate in Restructured and Unrestructured.	40
Fig.20	Radial Distribution of Mo, Ru, Rh, Tc and Pd Contents in Metallic Inclusion. (Specimen No. A42944)	41
Fig.21	Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by SXMA. (Specimen No. A42944) ...	42

Fig.22	Axial Distribution of Measured Burnup of PFC020.	
	(Pin No. A429)	43
Fig.23	Radial Burnup Distribution Measured by the IMA.	
	(Specimen No. A42944) ...	44

List of Photographs

Photo. 0-1	Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin. (Pin No. A 429)	45
Photo. 0-2	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin. (Specimen No. A 42922) As -Polished.	47
Photo. 0-3	Optical Microstructure of the Core Fuel. (Specimen No. A 42922) As -Polished.	49
Photo. 0-4	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin. (Specimen No. A 42944) As -Polished.	51
Photo. 0-5	Optical Microstructure of the Core Fuel. (Specimen No. A 42944) As -Etched.	53
Photo. 0-6	Optical Microstructure of the Core Fuel. (Specimen No. A 42944) As -Polished.	55
Photo. 0-7	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin. (Specimen No. A 42983) As -Polished.	57
Photo. 0-8	Optical Microstructure of the Core Fuel. (Specimen No. A 42983) As -Etched.	59
Photo. 0-9	Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core Fuel Pin. (Specimen No. A 42985) As -Polished.	61
Photo. E-1	Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding. (Specimen No. A 42944)	63
Photo. E-2	Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding. (Specimen No. A 42944)	65
Photo. E-3	Optical Macrograph and X-ray Image of Cs-L α in Interface between Upper Insulator Pellet and Cladding. (Specimen No. A 42985) ...	67
Photo. E-4	Various X-ray Images of Metallic Inclusion in the Fuel. (Specimen No. A 42944) ...	69
Photo. S-1	Secondary Electron Micrographs of the Core Fuel Cladding Outer Surface. (Pin No. A 429)	71

1. ま え が き

燃料集合体 PFC020 は「もんじゅ」の炉心燃料要素とほぼ同一仕様の燃料要素を C 型特殊燃料集合体に組み込んだものである。本照射試験の目的は定格最大線出力及びホットスポット温度が「もんじゅ」実機条件と同等な条件下における燃料要素の健全性を確認することにより、燃料設計の妥当性を立証することにある。本集合体は「常陽」炉内装荷位置 3A2 において 100MW3 サイクルから 11 サイクルの間照射され、集合体平均燃焼度は 54,100 MWD/T を有するものである。本集合体は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、集合体内の最高温度ピンより金相試料が採取された。

本試験では燃料要素の照射挙動を把握することを目的に光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、X 線マイクロアナライザによる元素分析並びにイオンマイクロアナライザによる質量分析を実施した。

2. 供 試 体

2.1 燃料ピンの仕様

燃料ピンの仕様を Table1 に示すとともに外観図を Fig.1 に示す。ペレットスタック長は「もんじゅ」燃料ピンの 93cm に対して 55 cm と短かいが、被覆管寸法、ギャップ巾、ワイヤ巻付ピッチは「もんじゅ」と同一である。

2.2 被覆管の仕様

被覆管は 55 年度試作「もんじゅ」実機相当材（改良 SUS316 ステンレス鋼）であり、その化学成分値を Table2 に示す。本試験に供した燃料要素は A429 ピンであり（Fig.3）、その被覆管は K 材である。

2.3 燃料ペレットの仕様

A429 ピンに装填されている燃料ペレットのロット No. は TCM04 であり、その検査結果を Table3 に示す。燃料は「もんじゅ」と同様 85 % TD の低密度ペレットであり、寸法も同様であるが、O/M 比が 1.94 と「もんじゅ」仕様 $1.97 \pm \frac{0.02}{0.03}$ の下限値である。燃料ペレットの化学成分値を Table4 に示す。

3. 照 射 履 歴

炉心燃料集合体（PFC020）は「常陽」MK-II炉心内「3A2」位置にて、100 MW 第3サイクルから第11サイクルの間照射され、集合体平均燃焼度は 54,100 MWD/T を有する。

集合体炉内装荷位置を Fig.2 に示す。

本集合体は炉内貯蔵ラック「R-21」に 63 日間（S61.9.6～11.7）冷却保管された後、炉外に取り出され、同年 11 月 12 日にキャスクで FMF に搬入された。

金相試験に供した燃料ピンは Pin No. A 429 ピン（被覆管は K 材）である、燃料ピンの集合体内装荷位置を Fig.3 に示す。Fig.4, Fig.5, Fig.6 に、A429 の線出力、燃焼度、中性子照射量及び被覆管温度の軸方向分布を示す。ピーク線出力は 363 W/cm であり、「もんじゅ」の定格最大線出力 360 W/cm は満足しているものの、被覆管肉厚中心最高温度は 630 °C と「もんじゅ」の被覆管ホットスポット温度 675 °C より低温度で照射されたことになる。ピーク燃焼度は 67,800 MWD/T であり、最大中性子照射量は $8.8 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ Mev}$) である。

4. 試 験 方 法

4.1 試料調製

燃料ピン A429 は照射燃料集合体試験施設 (FMF) において Fig.7 に示すとおり炉心燃料下部から 28mm 長, 中心部から 72mm 長, 上部から 18mm 長, 上端部からインシュレーターベレットを含む 38mm 長及び最上部 (プレナム部) から 9mm 長の試料片を 5ヶ切断採取した。

金相セルでは, さらに各試験片から被覆管外表面観察用試料を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。このように採取した被覆管外表面観察試料 4ヶと金相試料 4ヶの燃料ピン下端からの位置は Fig.7 に示すとおりである。金相試料について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, ステンレス製ホルダー (外径 32mm ϕ $\times$ 20mm H) 内にネジ止めし, 研磨した。

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。Table 5 に研磨過程を示す。研磨を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た C, Au コーティングにより行った。Table 6 に蒸着条件及びイオン腐食条件を示す。

4.2 光学顕微鏡による観察

組織観察は高倍率光学顕微鏡 (FAROM) による 65 倍全体コンポーズ写真撮影, 130 倍直径方向帯状コンポーズ写真撮影, さらに 520 倍半径方向帯状コンポーズ写真撮影を As-Polished 及び Etched 状態において行った。

燃料横断面写真は, タブレットディジタイザーを用いた「燃料ピン輪切り写真解析コード PINATED」により画像解析を実施した。画像解析には主として 65 倍全体コンポーズ写真を用いた。

画像解析項目は下記の通りである。

- (1) 中心空孔の直径, 面積, 中心位置
- (2) 燃料ベレットの直径, 面積
- (3) 被覆管の内径, 外径, 肉厚
- (4) ベレット内クラックの数, 面積, パターン
- (5) 柱状晶, 等軸晶各領域の内外直径及び面積

4.3 走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察

燃料ピン A 429 (K 材) の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。観察条件は下記の通りである。

- 加速電圧 : 25 KV
- 試料吸収電流 : 2×10^{-10} A
- 観 察 像 : 二次電子像 (SEI)
- 写真倍率 : X 240 ~ X 8000

4.4 X線マイクロアナライザ (SXMA) による元素分析

遮蔽型 X 線マイクロアナライザ (仏, CAMECA 社, CAMEBAX-R 型) を用いてペレット内に保持されている Xe, I, Cs の径方向分布, U, Pu の径方向定量分析及び燃料内の析出金属状 FP の径方向定量分析を実施した。分析条件は以下のとおりである。

条 件 \ 分析内容	Xe, I, (Cs) の分析	U, Pu 及び金属状 FP の分析
加速電圧 (KV)	25	20
ビーム電流 (nA)	1000 (100)	50
ビーム径 ($\mu\text{m}\phi$)	50 (25)	1 以下
カウンター	ガスフロー比例計数管	←
分光結晶	LiF	PET, LiF

4.5 イオンマイクロアナライザ (IMA) による質量分析

遮蔽型イオンマイクロアナライザ (HITACHI IMA-2RI 型) を用いて、燃焼度測定を実施した。測定条件は以下の通りである。

条 件 \ 測 定 内 容	燃料内中間位置の 燃 焼 率 測 定	径方向の燃焼率 測 定
使 用 ガ ス	O ₂	←
一次イオン加速電圧 (KV)	15	←
一次イオンスポット径 (mm ϕ)	1	0.2
二次イオン加速電圧 (KV)	3	←
質量測定範囲 (M/Z)	1 ~ 300	←
カソード電極	SUS	←
深さ方向測定回数 (回)	10	5
径方向測定点数 (点)	1	13

5. 試験結果と考察

5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察

A429 ピンの燃料部から採取した4ケの金相試料の軸方向位置とそれぞれの照射条件をTable 7にまとめて示す。各試料の線出力と燃焼度はそれぞれおよそ $180\text{ W/cm} \sim 360\text{ W/cm}$, $37,000\text{ MWD/T} \sim 68,000\text{ MWD/T}$ の範囲にある。各金相試料の低倍写真を軸方向位置に対応させてPhoto. 0-1に示す。

Photo. 0-2, Photo. 0-3に試料A42922のPolished状態の光顕写真を示す。この位置では線出力が 257 W/cm と低いため中心空孔は形成されておらず、中央部には粒界にFPガスバブルが析出しているガスバブル領域、そのまわりに製造時気孔が消失している高密度化領域と周辺部の不変領域が観察される。残留ギャップ幅の半径は平均で $28\text{ }\mu\text{m}$ であった。

燃料カラム中央部(試料A42944)のPolished状態の光顕写真をPhoto. 0-4に示す。線出力が 363 W/cm で燃焼度が $67,700\text{ MWD/T}$ と高いため、中心空孔とそのまわりに柱状晶が観察される。ペレット周辺部には $150\text{ }\mu\text{m}$ 径程度の製造時ボイドが残存している。平均残留ギャップ幅は半径で $8\text{ }\mu\text{m}$ にまで減少しており、照射末期では被覆管との機械的相互作用が発生していたものと考えられる。イオン腐食により燃料の結晶粒界を出現させた状態における直径方向の高倍率光顕写真をPhoto. 0-5に示す。柱状晶領域においても、粒界にFPガスバブルが認められ、これらは照射初期に形成された柱状晶の粒界に、燃焼とともに粒内で生成したFPガスが粒界に拡散して析出することにより生成したものである。その外側領域には、結晶粒が明瞭に成長している等軸晶が観察され、ここでは主に粒界の3重点にガスバブルが析出していることがわかる。ペレット外周部の不変領域では多くのボイドが認められる。ギャップ部を含むペレット外周部の組織をPhoto. 0-6に示す。クラックに沿ってギャップ部に移行したFPが燃料と反応していることがわかる。元素分布については5.2節に述べる。

試料A42983の光顕写真をPhoto. 0-7, Photo. 0-8に示す。線出力が 176 W/cm と低いため中心空孔は形成されておらず、製造時ボイドがそのままペレット全域に認められる。平均残留ギャップ幅は半径で $42\text{ }\mu\text{m}$ である。Photo. 0-8に示した腐食後の光顕写真において、特に注目すべき点はペレット外周部の不変領域で微細なガスバブルの析出が認められることである。

Photo. 0-9は、炉心燃料と上部インシュレータを含む縦割試料(A42985)の金相写真である。最大約 $26\text{ }\mu\text{m}$ の被覆管内面腐食が観察された。インシュレータペレットにはクラックが認められるものの製造時の組織を保持している。

各試料について測定した中心空孔径、柱状晶領域、等軸晶領域直径及び残留ギャップ幅半径をTable 8に示す。Fig. 8は、これらの軸方向分布を示したものであり、炉心中央部でのみ中心空孔と柱状晶の形成が認められる。一方ギャップ幅は $8\text{ }\mu\text{m}$ (半径)にまで減少しており、炉心中

中央ではオンパワー中にペレットと被覆管の機械的な相互作用が発生していたものと予測される。Fig.9は「常陽」MK-II燃料でこれまでに得られているギャップ幅の燃焼度による変化を示したものであり、燃焼度の増加にともないギャップ幅が減少していることがわかる。50,000 MW D/T以上の燃焼度になると、オンパワー中にペレットと被覆管の機械的相互作用が発生するものと予測される。

5.2 被覆管内面腐食

各試料について測定した被覆管内面腐食量をTable 9にまとめて示す。被覆管内面温度が636°Cで、平均6 μ m、最大で26 μ mの内面腐食が認められた。これらの腐食形態は、全面腐食と粒界腐食がCombineしたものである。最大腐食量を被覆管内面温度に対してプロットした関係をFig.10に示す。被覆管内面腐食は、500°C近傍で生じ、600°C以上になると急激に増加する傾向にあることがわかる。

次に被覆管内面腐食部及びギャップ内の元素分析結果(SXMA)について述べる。

Photo.E-1, Photo.E-2に試料A42944のギャップ部の面分析結果を示す。Photo.E-1のギャップ内には、Cs, U, Pu, Pd, O等の元素で構成されるFP化合物が存在している。化合物の定量分析結果をFig.11に示すが、これらは酸素を約50at%含む燃料とFPの酸化物である。Photo.E-2のギャップ内には、Fe, Cr, Ni, Mn, Cs, Te, Pd, U等で構成される化合物が存在していることがわかる。化合物の代表的な位置の定量分析結果をFig.12に示す。化合物はFeの多い部位とCrの多い部位がみられるがSiが多く存在していることがわかる。それらの部位のCs, Teは8%以下である。U, Puについては1%以下である。被覆管内面では、Te, Csが多く存在している。

Fig.13に試料A42985のFCCI部の元素分析結果を示す。SEI, Cs X線像, Te X線像は同一位置である。X線像から、Cs, Teの分布は概ね同じであるが異なる部位も存在することがわかる。同図上方に代表的部位の定量分析結果を示した。ギャップ内ではTeが多く約63%存在する。FCCI部のギャップ近くでは、Cs, Teの存在割合は約1対1の比率で約30%存在し、その他Fe, Cr, Ni, Mnが10%以下で存在する。被覆管側の、Te, Csの含有量は、11%以下である。

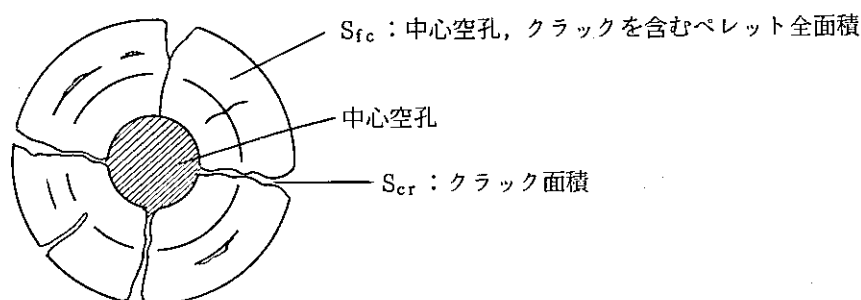
Photo.E-3に試料A42985のインシュレータペレットと炉心燃料の境界のCsの観察結果を示す。Csは、炉心燃料内の表面に通じたボイド内に多く観察されるとともに、炉心燃料/インシュレータペレットの境界に堆積していることがわかる。インシュレータギャップ部にも存在しているが、ペレットとは極く表面でしか反応していないことがわかる。

5.3 画像解析によるペレットスエリング評価

タブレットディジタイザを用いて照射燃料ペレットの面積を測定することによりペレットスエリング挙動を評価した。

(1) ペレットスエリングの算出法

照射燃料ピンの65倍断面金相写真をタブレットディジタイザにより解析することにより、下図に示すようなクラックを除くペレット全面積（中心空孔を含む）を求めた。



一方、照射前のペレット面積（ S° ）は製造時データ（ペレット直径測定値）に基づき算出した。これらのデータから照射によるペレット体積変化の算出は以下の式により行った。

$$\Delta V/V = \frac{3}{2} \times \frac{S - S^\circ}{S^\circ} \times 100$$

$\Delta V/V$ 体積変化 (%)

S° 製造時ペレット面積 (mm^2)

S 照射後ペレット面積 (mm^2)

$$S = S_{fc} - S_{cr}$$

(2) 結 果

Table 10 に各試料の製造時ペレット面積及び照射後ペレット面積、クラック面積測定結果、及びこれらの値を用いて算出したペレット体積変化を示す。また、同様の方法で求めたMK-IIドライバー、特燃、Phenix P-3、MK-I 燃料の体積変化も合わせて燃焼度に対応してプロットした結果をFig.14に示す。

照射によるペレット体積は、一端焼しまりにより低下した後、製造時密度にはそれほど依存せず、燃焼に伴い増加している。燃焼度37,000 MWD/Tの試料A 42983では、焼しまりがスエリング（固体+FP）を上まわっている結果、全体としては体積減少（-3.36%）が生じている。燃焼度50,000 MWD/T以上では、スエリング（固体+FP）による体積増加が顕著であり、燃焼度67,800 MWD/Tの試料A 42944では、3.13%の体積増加が認められた。

5.4 SXMAによる燃料内FP及びU, Puの濃度測定

5.4.1 ペレット内保持Xeガス及びI, Csの測定

(1) 測定方法

XeL α の特性X線強度から燃料中のXe濃度を算出するには、濃度が既知の標準試料が必要である。燃焼度2at%以下の「常陽」MK-II照射ドライバー燃料PFD003のペレット最外周部のXeL α の計数値とその位置の生成濃度(モル/cm³)の計算値からXeの濃度とXeL α の特性X線強度の関係式を導出し $(-5.3264 \times 10^{-6}) + (3.8568 \times 10^{-8}) \times (\text{count})$ モル/cm³を得た。Table 11に使用した標準試料の燃焼度, Xe生成濃度, XeL α 強度値を示した。

実際の測定試料であるPFC020照射燃料についても、SXMAの測定条件を同一にして、ここで求めた前述の関係式を用いて計数値からXe濃度(モル/cm³)に変換した。このようにして求めたXe濃度は燃料内に固溶しているXeに相当するため、パンクチャーにより求めたペレット内全保持量を用いて、Xeのペレット内保持形態を評価した。即ちピンあたりのXe保持量を求め(SXMA)、これとパンクチャーにより求めた保持量から全保持量に対する固溶ガスの割合を算出した。A429ピンにおいては、SXMAで求めたピンあたりのXe保持量は 1.592×10^{-3} モルであり、一方、ピンあたりのXe生成量(6.3696×10^{-3} モル)とピンパンクチャーにより求めた、Xe放出率(56.3%)から求めたピンあたりの総Xe保持量は 2.78×10^{-3} モルである。従ってSXMAにより求めたXe保持量に1.749を乗ずることに

$$(1.749 = \frac{6.3696 \times 10^{-3} (1 - 0.563)}{1.592 \times 10^{-3}})$$

より、総保持量のペレット内分布を求めることが可能となる。

I, Csの測定については、CsL α 特性X線強度をからバックグラウンドを差し引き、真の強度とした。

(2) 測定結果

1) Xe, Cs, Iのペレット径方向分布

Fig.15にペレット内に保持されているXe濃度の径方向分布測定結果を示す。中心空孔が生成されている試料(A42944)では、等軸晶領域よりXeの放出が急激に開始していることがわかる。一方中心空孔が生成されていない試料(A42922, A42983)では、等軸晶領域内において除々にXeが放出していることが認められる。この等軸晶領域内において保持Xe濃度がペレット内側に向かって除々に低下している領域は、Photo.0-7に示した。金相写真で高密度化領域に相当し、粒界にFPガスバブルの析出が徐々に生じている部分である。さらに内側ではFPガスバブルが互いに連結しているためFPガス放出が高くなっていることがわかる。このようにXe保持濃度と燃料組織の間には明瞭な対応が

あることがわかる。

Fig.16, 17, 18 にペレット内に保持されている I, Cs の径方向分布測定結果と Xe 濃度分布測定結果を合わせて示す。(Cs, I は X 線強度値) Cs, I のペレット径方向分布は Xe の分布と傾向が一致していることから、これらの元素のペレットからの放出形態は互いに類似しているものと考えられる。

2) 不変領域及び組織変化領域での FP ガス放出機構

Table 12 に不変領域と組織変化領域における Xe 放出率測定結果を示す。Fig.19 には Xe 放出率を燃焼度に対応させプロットした結果を示す。不変領域における Xe の放出は燃焼度が約 50,000 MWD/T あたりより生じ、燃焼度が 67,800 MWD/T の試料では約 16 % 放出していることがわかる。組織変化領域では、3 ケの試料とも 80 % ~ 90 % の放出が生じており等軸晶と柱状晶で大差がない。

5.4.2 燃料内金属状 FP 析出物の組成

燃料内に析出している金属状 FP 析出物には 2 種類認められた。1 つはペレット外周部のクラックに沿って存在する Pd, Fe を主成分とする析出物である。その X 線像及び濃度測定結果を Photo.E-4 に示す。析出物の組成は、Pd : 52.4 wt %, Fe : 33.4 wt %, Ni : 13.6 wt %, Mo : 0.6 wt % であった。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、これは Mo, Ru, Rh, Tc, Pd 元素で構成されている。析出物の組成をペレット径方向位置に対応して測定した結果を Fig.20 に示す。Mo, Ru の濃度はペレット中心部で高く、ペレット外側に向かって低下しているのに対し、Pd 濃度はペレット中心部から外周部方向に増加する傾向がみられる。このような傾向は「常陽」MK-II 燃料 PFD003 及び PFD001 においても認められている。

5.4.3 燃料径方向 U, Pu の濃度測定

燃料ペレット径方向に約 100 μm 間隔で U, Pu の定量分析を実施した。Fig.21 にピン軸方向ピーク燃焼度位置 (No. A42944) の測定結果を示す。ペレット中心空孔近くで Pu 濃度が製造時の 29.86 % から 31.42 % に増加していることが確認された。

5.5 IMA による燃焼度測定結果

1) 測定方法

燃料ペレットの燃焼度は、ペレット径方向中間部に約 1 mm 径のビームを照射し、深さ方向に 10 回測定を繰り返した時の U, Pu 及び ^{145}Nd の二次イオン強度の平均値 I_u , I_{pu} , I_{Nd} から求めた。燃料ペレット半径方向の燃焼度分布は、ビーム径約 200 μm ϕ で燃料外側より中心部まで 13 点測定することにより求めた。

燃焼度 (at%) の算出には、次式を用いた。

$$\text{燃焼度 (at\%)} = \frac{I_{Nd} / (\alpha_{Nd/u} \times f_{Nd})}{(I_u + I_{Pu} / \alpha_{Pu/u}) + \{I_{Nd} / (\alpha_{Nd/u} \times f_{Nd})\}} \times 100$$

$\alpha_{Pu/u}$ U に対する Pu のイオン化効率比 (1.472)
 $\alpha_{Nd/u}$ U に対する Nd のイオン化効率比 (3.838)
 f_{Nd} ^{145}Nd の核分裂収率 (0.0325)

2) 測定結果

各試料の燃焼度測定結果を Table 13 に示す。燃料カラム軸方向 3 ケ所で測定した結果を ES PRIT-J による計算値と比較して Fig. 22 に示す。ピーク燃焼度はおよそ 6.769 at% となり計算値とほぼ一致する結果が得られた。次に試料 A 42944 のペレット半径方向の燃焼度測定結果を Table 14 に示す。この結果を径方向位置に対応してプロットした関係を Fig. 23 に示す。径方向燃焼度分布は、等軸晶領域から柱状晶領域に向かって低下し中心部で増加している。これは、Pu 再分布に起因する核分裂密度の変化を反映しているものと考えられる。

5.6 SEM による被覆管外表面の観察結果

A 429 ピンから軸方向 4 ケの試料を採取し、被覆管外表面の性状を調べた。各試料のピン下端からの位置及び被覆管外表面温度は、Table 15 に示すとおりである。

Photo.S-1 に外表面の走査型電顕観察結果を示す。400°C の低温度では、製造時加工傷の間に微粒子が若干付着しているものの、製造時状態を保持している。現在まで試験を行ってきたドライバー燃料要素 (Na 流速 5 ~ 6 m/sec) 及び PFC010 燃料要素 (Na 流速 5.1 m/sec) では 400°C においては表面全域に付着物が認められたのに対し、今回実施した PFC020 燃料要素 (Na 流速 3.1 m/sec) では付着物は全く認められなかった。PFC020 燃料要素の Na 浸漬時間は 9550 時間に対し、これまでに試験を行った燃料要素では 7000 時間以下の Na 浸漬で付着物が明瞭に認められている。従って PFC020 燃料要素被覆管の外表面に付着物が観察されなかった原因は被覆管温度を上げるため Na 流速を意図的に低下させたことにより、元素の沈着による付着物の生成が少なくなったものと考えられる。508°C では表面荒れが生じ 600°C 以上の高温領域では Coral-like Structure (さんご構造) が発達しており、これらの形態はこれまでに観察されたものと同様である。

6. 結果のまとめ

- 1) 燃料組織は、燃料カラム軸方向中心部で中心空孔（約 1.25 mm 径）と柱状晶が観察された。
ギャップ巾は、製造時ギャップ巾である 80 μm から最大 8 μm にまで減少していることから
照射中において燃料と被覆管の機械的相互作用（FCMI）が生じていた可能性がある。被覆管
内面腐食量は、最大 26 μm であった。
- 2) 画像解析により求めた燃料ペレットの体積増加率は、燃料カラム中心部で 3.13 % であり、焼し
まり状態から、スエリングに伴う体積増加を示していた。
- 3) ペレット内に保持されている Xe 濃度と燃料組織とに明瞭な対応が認められた。Xe 濃度は、等
軸晶領域で急激に低下し中心部ではほとんど放出していた。
- 4) 燃料カラム軸方向中心部の中心空孔端で Pu 濃度が製造時の 29.86 % から 31.42 % に増加して
おり、これに伴い中心空孔端で若干の燃焼度の増加が認められた。
- 5) 被覆管外表面の性状は、被覆管温度 400 °C 以下の低温度部では、製造時状態を保持している
が、約 500 °C 以上では、温度が高くなるに従い表面荒れが著しくなっている。特に低温部
において従来観察されているような付着物が認められなかった。これは本集合体では Na 流速が
遅かったことと関係しているものと考えられる。

7. 謝 辞

燃料集合体からの試料採取などの準備作業にあたり、照射燃料集合体試験室（FMS）の松島室長をはじめとする関係室員に御支援いただいた。また試験遂行に際しては、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いたことを付記し，これらの方々に感謝の意を表わします。

8. 参 考 文 献

- (1) 鶴飼ら, 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 SN 941 85-141
- (2) 櫛田ら, 「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD001) の照射後試験 (2), PNC I 9410 87-004
- (3) 鶴飼ら, 「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD029) の照射後試験 PNC I 9410 87-008
- (4) 杉山ら, 「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD003) の照射後試験 (2) PNC 1941 85-05
- (5) 鶴飼ら, 「常陽」MK-II C型特殊燃料集合体 (PFC010) の照射後試験 PNC I 1940 86-004

Table 1 Specification of Fuel Pin

項 目	仕 様
全 長 (mm)	1.867 ± 2
ペレットスタック長 (mm)	550 ± 5
被 覆 管 外 径 (mm)	6.5 ± 0.030
“ 内 径 (mm)	5.56 ± 0.025
“ 肉 厚 (mm)	0.47 ± 0.030
ギ ャ ッ プ 幅 (μm)	80 (半径)
ワイヤー巻付ピッチ (mm)	307 ± 20

Table 2 Chemical composition of cladding Material

不 純 物	規 格	S 材	K 材
	%	%	%
C	0.045 ~ 0.085	0.045	0.052
Si	≤ 1.00	0.87	0.73
Mn	≤ 2.00	1.74	1.70
P	≤ 0.040	0.036	0.026
S	≤ 0.010	0.004	0.006
Ni	13.00 ~ 14.00	13.77	13.72
Cr	16.00 ~ 18.00	16.29	16.75
Mo	2.00 ~ 3.00	2.55	2.50
Co	≤ 0.10	< 0.01	< 0.01
B	≤ 0.0100	0.0039	0.0029
N	≤ 0.010	0.008	0.005
Cu	≤ 0.20	< 0.01	0.02
Ti	≤ 0.10	0.099	0.073
V	≤ 0.20	< 0.01	< 0.01
Nb+Ta	≤ 0.10	0.073	0.056
Zr	≤ 0.10	0.003	0.004
As	≤ 0.010	0.003	0.004
Al	≤ 0.050	0.039	0.012

↑
A429 Pin

Table.3 Characteristic of Fuel Pellet

項 目	検 査 値
Pu 富 化 度 (wt%)	29.86
O/M	1.94
U ²³⁵ 濃 縮 度 (%)	8.3
ペレット直径 (mm)	5.412
ペレット高さ (mm)	7.793
ペレット密度 (%TD)	85.16

Table.4 Chemical composition of Fuel pellet

検 査 項 目	仕 様 値	TCM-02	TCM-03	TCM-04	TCM-05
1. 核分裂性物質 含有率％ $\left(\frac{\text{Pu}^{239} + \text{Pu}^{241} + \text{U}^{235}}{\text{Pu} + \text{U}} \right)$	29.5 ± 1.0	29.58	29.40	29.50	29.48
2. プルトニウム 富化度％	30 ± 1	29.98	29.72	29.86	29.83
3. U^{235} 濃縮度％	約 8	8.30	8.30	8.30	8.30
4. O/M 比	$1.97^{+0.02}_{-0.03}$	1.95	1.95	1.94	1.94
5. 蒸発性不純物 $\mu\text{g/g}$	≤ 100	< 30	< 30	< 30	< 30
6. 水分 PPM	≤ 30	< 10	< 10	< 10	< 10
7. 不 純 物					
A ℓ	< 500	< 100	< 100	< 100	< 100
B	< 20	< 5	< 5	< 5	< 5
C	< 150	< 30	< 30	< 30	< 30
Ca	< 120	< 30	< 30	< 30	< 30
Cd	< 20	< 5	< 5	< 5	< 5
Cl	< 25	< 10	< 10	< 10	< 10
Cr	< 500	< 50	< 50	< 50	< 50
F	< 25	< 10	< 10	< 10	< 10
Mg	< 50	< 15	< 15	< 15	< 15
N	< 200	55	100	130	130
Fe	< 800	< 100	< 100	< 100	< 100
Ni	< 500	< 50	< 50	< 50	< 50
V	< 500	< 50	< 50	< 50	< 50
Cu + Zn + Si	< 700	520	410	400	570
Ag + Mn + Mo + Pd + Sn	< 200	< 135	< 135	< 135	< 135
total	< 3000	< 1165	< 1100	< 1120	< 1290



A429 Pin

Table.5 Polishing Condition of Specimen

Specimen No. Polishing Condition		A 42922	A 42944	A 42983	A 42985
Grinding Polishing	Diamond 220	—	—	—	—
	# 240	3 0	3 0	3 0	6 0
	# 320	3 0	3 0	3 0	5 0
	# 400	3 0	3 0	3 0	3 0
	# 600	3 0	3 0	3 0	3 0
	# 800	3 0	3 0	3 0	3 0
	# 1000	3 0	3 0	3 0	3 0
Final Polishing Diamond past + Nylon Cloth	6 μ	3 0	3 0	3 0	3 0
	3 μ	3 0	3 0	3 0	3 0
	1 μ	3 0	3 0	3 0	3 0

unit : min

Table.6 Conditions of Ionic Etching and Evapolation

Operation	Etching	Evaporation	
Ion Source	Ar	Ar	Ar
Degree of Vacuum	1.8×10^{-4} (Torr)	1.8×10^{-4} (Torr)	1.8×10^{-4} (Torr)
Accelerating Voltage	1.5 (KV)	1.5 (KV)	1.5 (KV)
Cathode Voltage	10.5 (V)	10.5 (V)	10.5 (V)
Magnet Current	0.95 (mA)	0.95 (mA)	0.95 (mA)
Emission Current	6 ~ 7 (mA)	6 ~ 7 (mA)	6 ~ 7 (mA)
Suppression Voltage	230 (V)	230 (A)	230 (A)
Exposure Duration	20 (min)	5 (min)	3 (min)
Matrrial of Evaporation	————	C ——— SXMA	Au ——— IMA

Table.7 Irradiation Condition of Each Sample.

Pin No.	被覆管 メーカー	O/M比	密 度 (%TD)	Pu富化度 (%wt)	試 料 No.	DFCB (mm)	被覆管内面 温度 (°C)	線 出 力 (w/cm)	燃 焼 度 (MWD/T)
						X/L			
A429 (TCM04)	K 材	1.94	85	29.86	A42922	13 0.02	424	257	54,400
					A42944	249 0.45	550	363	67,800
					A42983	548 0.996	636	176	37,000
					A42985	548~561 0.996~1.02	636	176	36,600

Table.8 Summary Data from Ceramography

Pin No.	試 料 No.	被覆管外径 直径 (mm)	被覆管内径 直径 (mm)	中心空孔内径 直径 (mm)	柱状晶領域 直径 (mm)	等軸晶領域 直径 (mm)	ペレット外径 直径 (mm)	残留ギャップ幅 半径 (μm)
A429	A42922	6.505	5.577	—	—	4.337	5.497	28
	A42944	6.530	5.587	1.272	3.356	4.965	5.550	8
	A42983	6.522	5.587	—	—	4.324	5.492	42

*¹ 被覆管外径は光顕デジタルスケラーにより直接測定*² コンボーズ写真の画像解析結果は被覆管外径で基格化した値

Table.9 FCCI Measuerd Data of Each Sample.

Pin No.	試料 No.	被覆管内面 温度 (°C)	基準肉厚 (mm)	8方向平均残 留肉厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	最大腐食量 (mm)	腐食タイプ
A 429 (TCM04)	A 42922	424	467	467	0	0	—
	A 42944	550	468	466	2	7	全 面
	A 42983	636	465	459	6	25	全面+粒界
	A 42985	636	—	—	—	26	全 面

Table.10 Volume Change of Each Sample from Ceramography

Pin No.	試料 No.	線出力 (W/cm)	燃 焼 度 (MWD/T)	製 造 時	照 射 後		体 積 変 化 $\Delta V/V$ (%)
				ペレット面積 S° (mm ²)	ペレット面積 S_{fc} (mm ²)	クラック面積 S_{cr} (mm ²)	
A 429	A 42922	257	54,400	22.860	23.778	0.66944	1.24
	A 42944	363	67,800	23.098	24.297	0.71655	3.13
	A 42983	176	37,000	23.038	23.712	1.1899	-3.36

$$\Delta V/V (\%) = \frac{3}{2} \times \frac{S - S^{\circ}}{S^{\circ}} \times 100$$

S° : 製造時ペレット面積

S : 照射後ペレット面積 ($S = S_{fc} - S_{cr}$)

S_{fc} ……中心空孔, クラックを含むペレット面積

S_{cr} ……クラック面積

Table.11 Calculational Results Conversion Coefficient from Xe-L α Intensity to
Xe-Concentration. (S/A No. PFD 003)

Specimen No.	70A625	70A644	70A662	70A682
Burnup (at %)	1.249	1.785	1.388	0.967
Xe Concentration (mol/cm ³)	1.083×10^{-4}	1.547×10^{-4}	1.203×10^{-4}	0.8381×10^{-4}
Xe-L α Intensity at Pellet Rim (counts)	3019	4088	3320	2247
(mol/cm ³)	$(-5.3264 \times 10^{-6}) + (3.85368^{-8}) \times (\text{Count})$			

Table.12 Results of Calculation on Fission Gas Release Rate in Unrestructured Region and Restructured Region
Based on SXMA Measurements.

試料 No.	燃 焼 度 at % (MWD/T)	Xe 生成濃度 理 論 値 (モル/cc)	不 変 領 域		組 織 変 化 領 域	
			Xe 保持濃度(モル/cc) <放出率%>	Xe 保持濃度(モル/cc) <放出率%>	Xe 保持濃度(モル/cc) <放出率%>	Xe 保持濃度(モル/cc) <放出率%>
A 42922	5.49 (54,400)	4.403×10^{-4}	$2.447 \times 10^{-4} < 44.4 >$	$4.279 \times 10^{-4} < 2.5 >$	$2.8239 \times 10^{-5} < 93.6 >$	$4.939 \times 10^{-5} < 88.8 >$
A 42944	7.28 (66,800)	5.838×10^{-4}	$2.8135 \times 10^{-4} < 51.8 >$	$4.921 \times 10^{-4} < 15.5 >$	$2.4655 \times 10^{-5} < 95.8 >$	$4.312 \times 10^{-5} < 92.6 >$
A 42983	4.02 (37,000)	3.224×10^{-4}	$2.3292 \times 10^{-4} < 25.8 >$	$4.074 \times 10^{-4} < -26.7 >$	$3.1608 \times 10^{-5} < 90.2 >$	$5.528 \times 10^{-5} < 82.9 >$
			(マトリックス固溶)	(マトリックス固溶)+ガス気泡	(マトリックス固溶)	(マトリックス固溶)+ガス気泡

Table.13 Results of Measured Burnup by IMA.

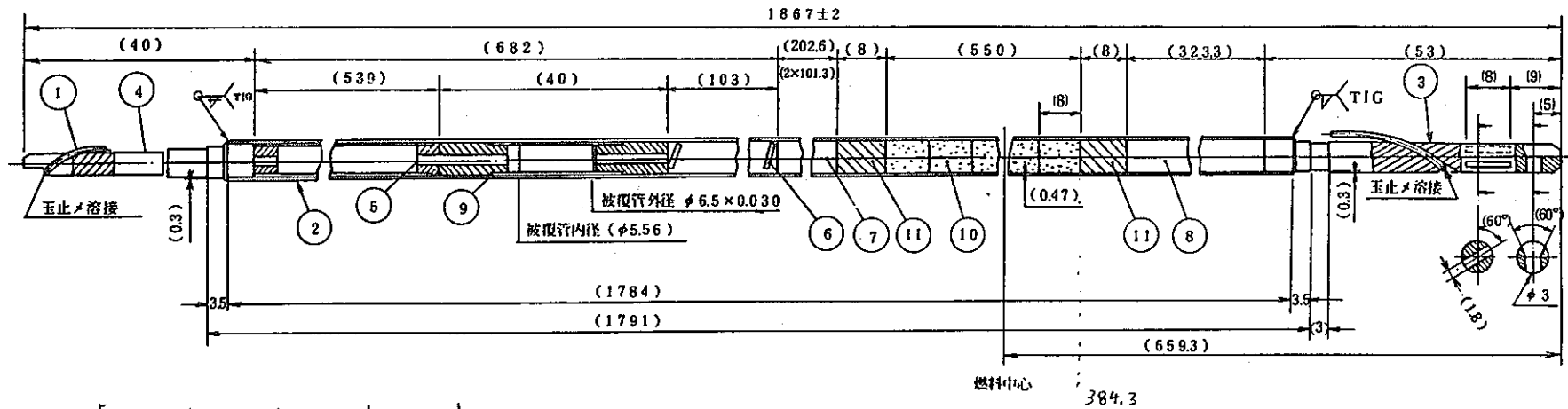
試料 No. / 計数值	Secondary Ion Intensity			燃 燒 度 <at %>
	Iu	Ipu	INd	
A 4 2 9 2 2	6603050	5097649	89184	4.843
A 4 2 9 4 4	6841480	5270451	131762	6.769
A 4 2 9 8 3	6262753	536644	70214	3.953

Table.14 Results of Radial Burnup Measurement by IMA.

分析点 No. / 計数值	Secondary Ion Intensity			燃 燒 度 <at %>
	Iu	Ipu	INd	
No. 1 (外側)	6650402	2727689	151739	7.78
2	5930947	2944772	142137	7.869
3	6834826	3556729	155246	7.420
4	7518978	4123525	187461	8.001
5	7237841	4296675	180829	7.882
6	6989421	4304593	154802	6.99
7	5575016	3226372	121518	6.986
8	6742596	4262671	139681	6.531
9	4251917	2488091	98266	7.358
10	6491893	4230549	135786	6.54
11	6658716	4630549	147736	6.8
12	6829274	4235434	140105	6.5
13 (中心)	5248027	3303519	127179	7.57

Table.15 Irradiation Condition of Cladding Outer Surface Examination Samples.

試 料 No.	Position D.F.P.B (mm)	Cladding Outer Temperature (°C)	Pin Lot No.
A 4 2 9 2 4	406.1	394	K Tube
A 4 2 9 4 6	636.1	508	
A 4 2 9 8 2	917.3	621	
A 4 2 9 A	1390.5	614	



11	インシュレータベレット	劣化 UO_2	2	
10	燃料ベレット	PuO_2-UO_2	71	
9	クガスカプセルゲミ	SUS 316	1	
8	下部要素反射板	SUS 316相当	1	
7	上部要素反射板	SUS 316相当	1	
6	プラナムスプリング	SUS 304WPB	1	
5	抑エ板付プラナムスリーブ	SUS 316	1	
4	上部端栓	SUS 316相当	1	
3	下部端栓	SUS 316相当	1	
2	被覆管	SUS 316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS 316相当	1	C2用 $\phi 1.320 \pm 0.005$
品番	品名	材質	個数	備考

Fig.1 Structure of II-Type Fuel Pin of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly

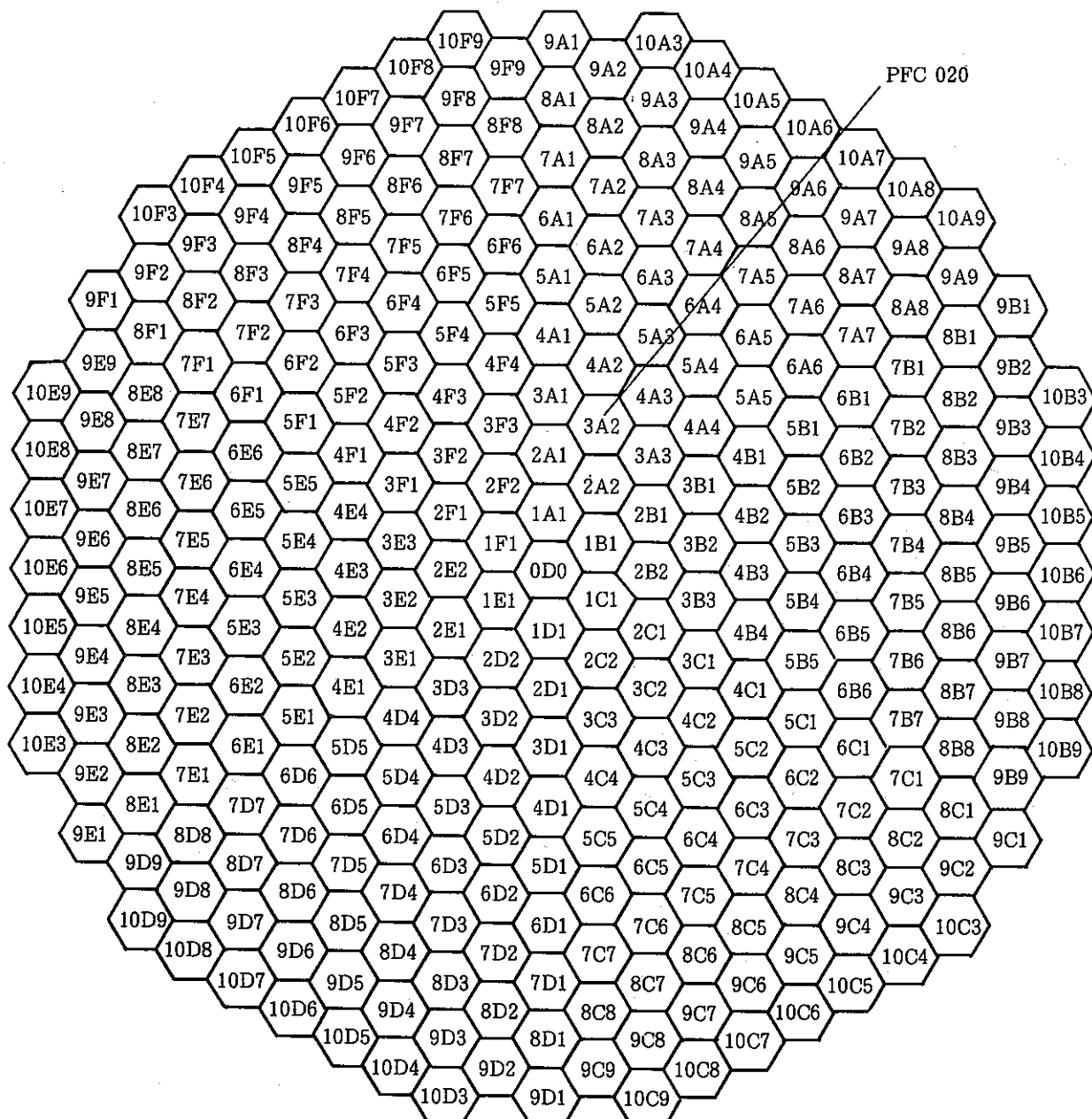
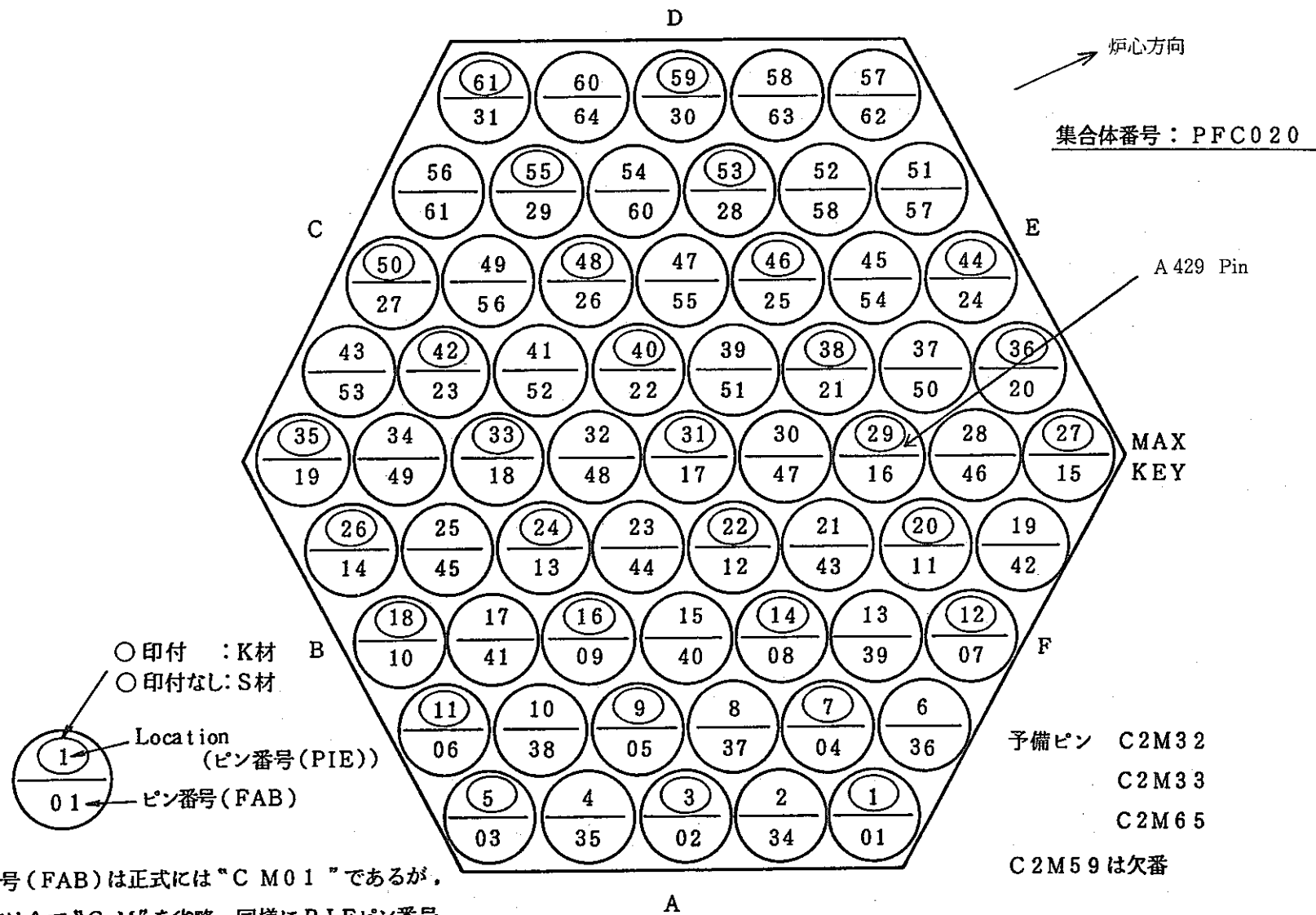


Fig.2 Location of the Fuel Subassembly (Fab.No. PEC 020) in "JOYO" MK-II



ピン番号(FAB)は正式には“C M01”であるが、
 図中では全て“C M”を省略、同様にPIEピン番号
 は“A401”であるが図中では全て“A4”を省略

Fig. 3 Location of the Fuel Pin (Pin No. A 429) in the Subassembly

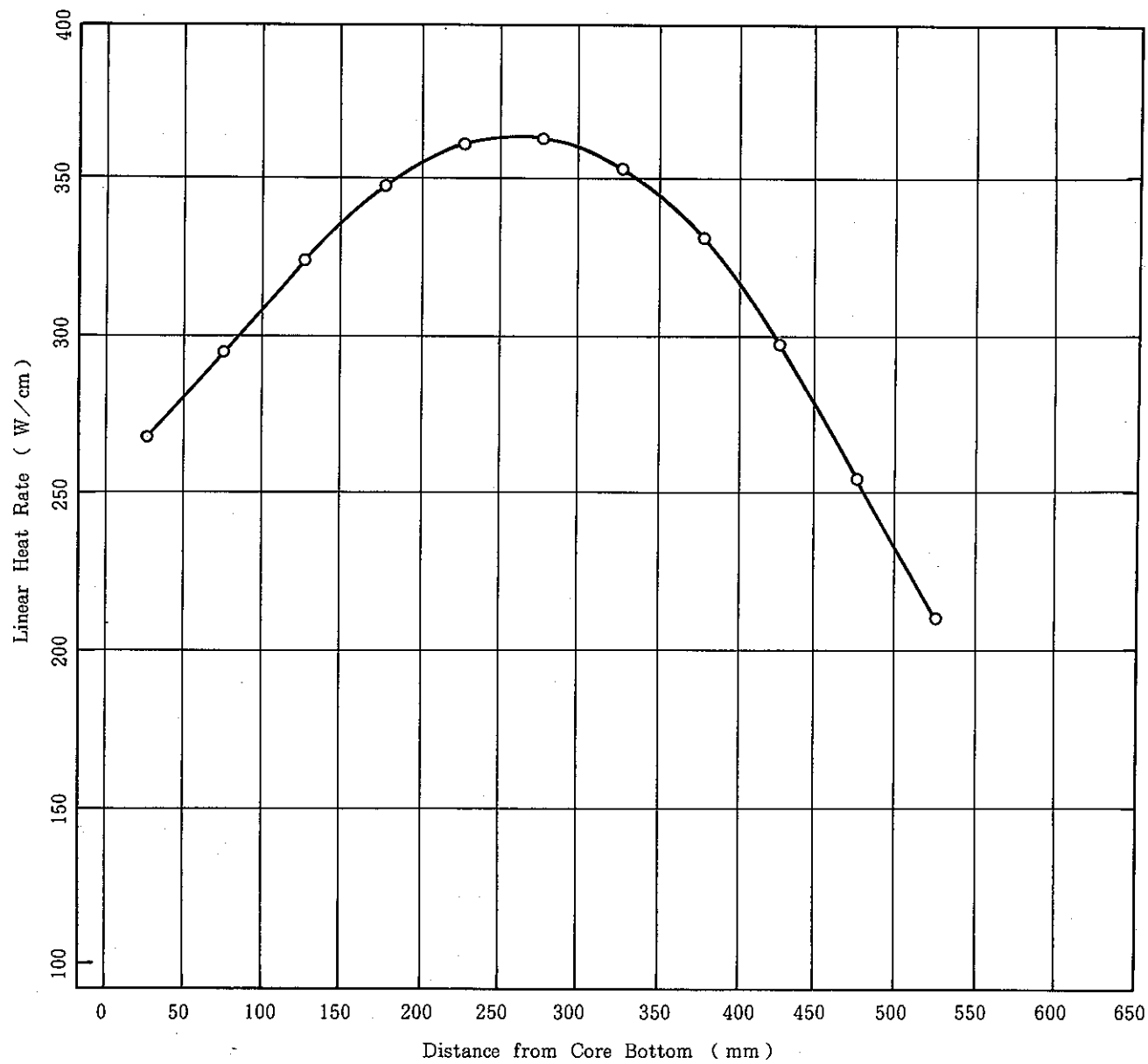


Fig.4 Axial Profile of Linear Heat Rate. (Pin No. A429)

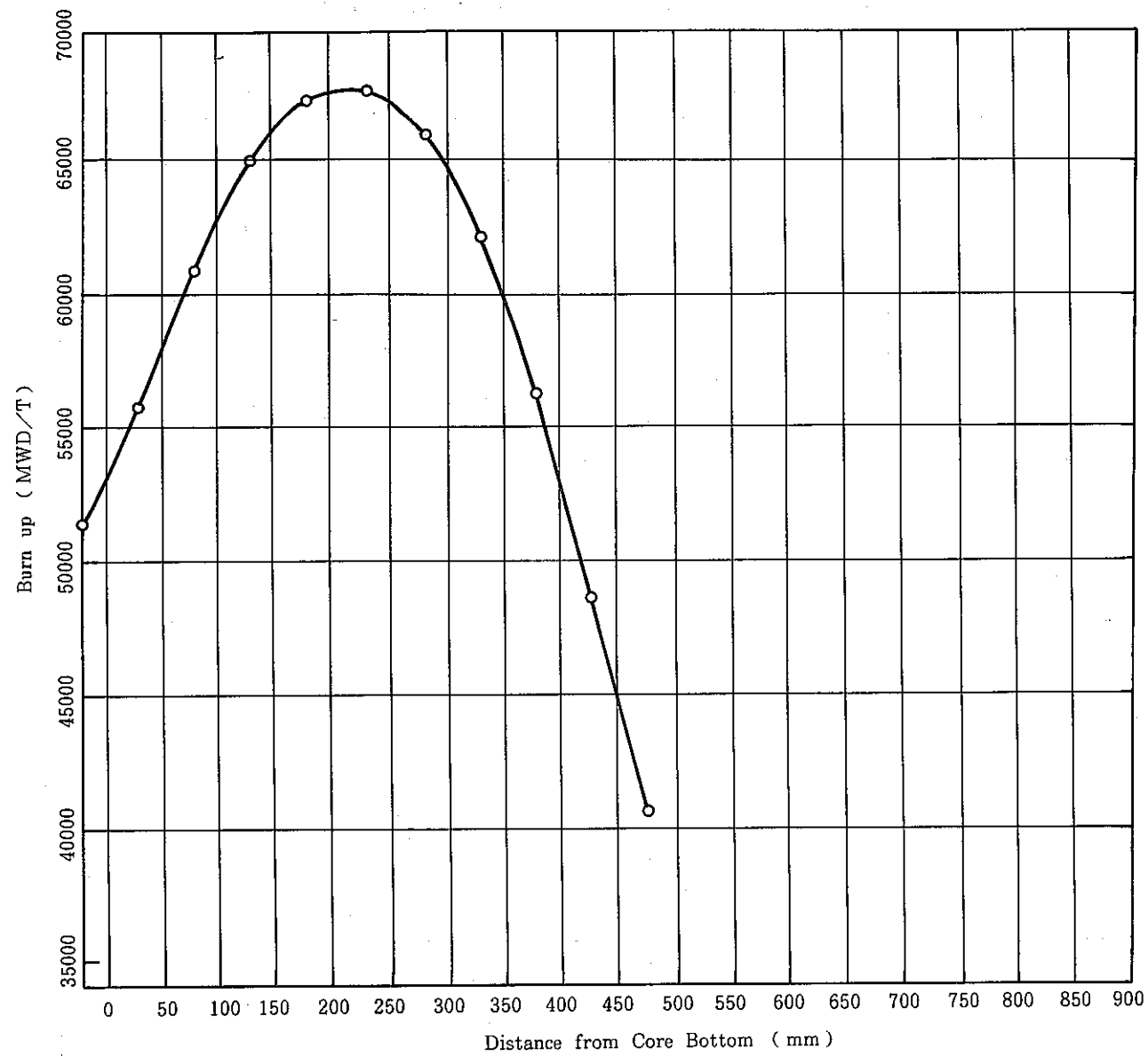


Fig.5 Axial Profile of Burnup (Pin No. A429)

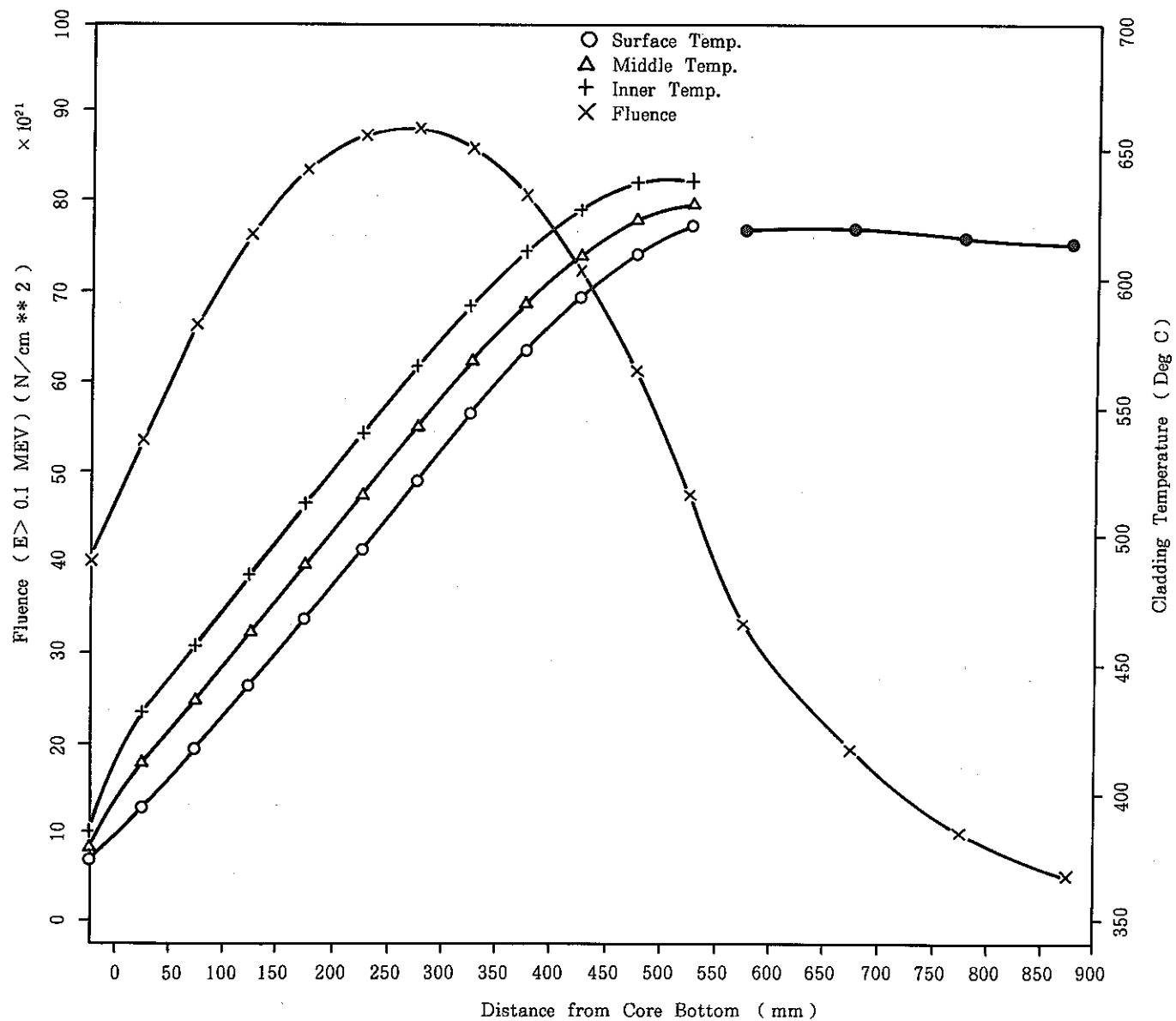


Fig.6 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No. A 429)

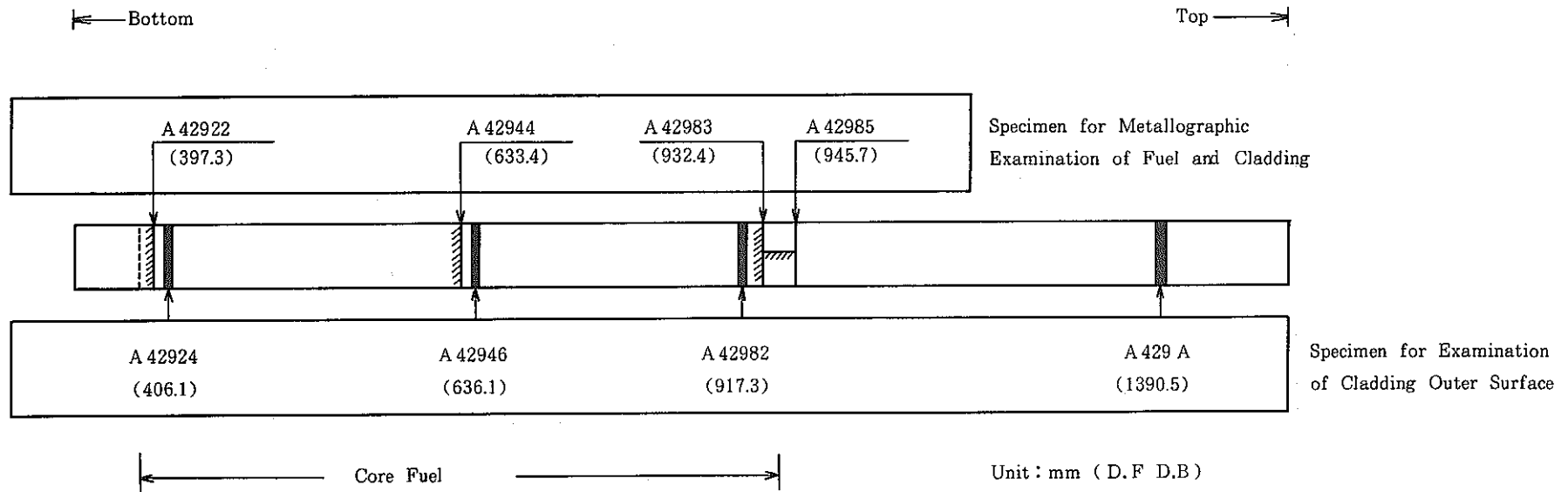


Fig.7 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin

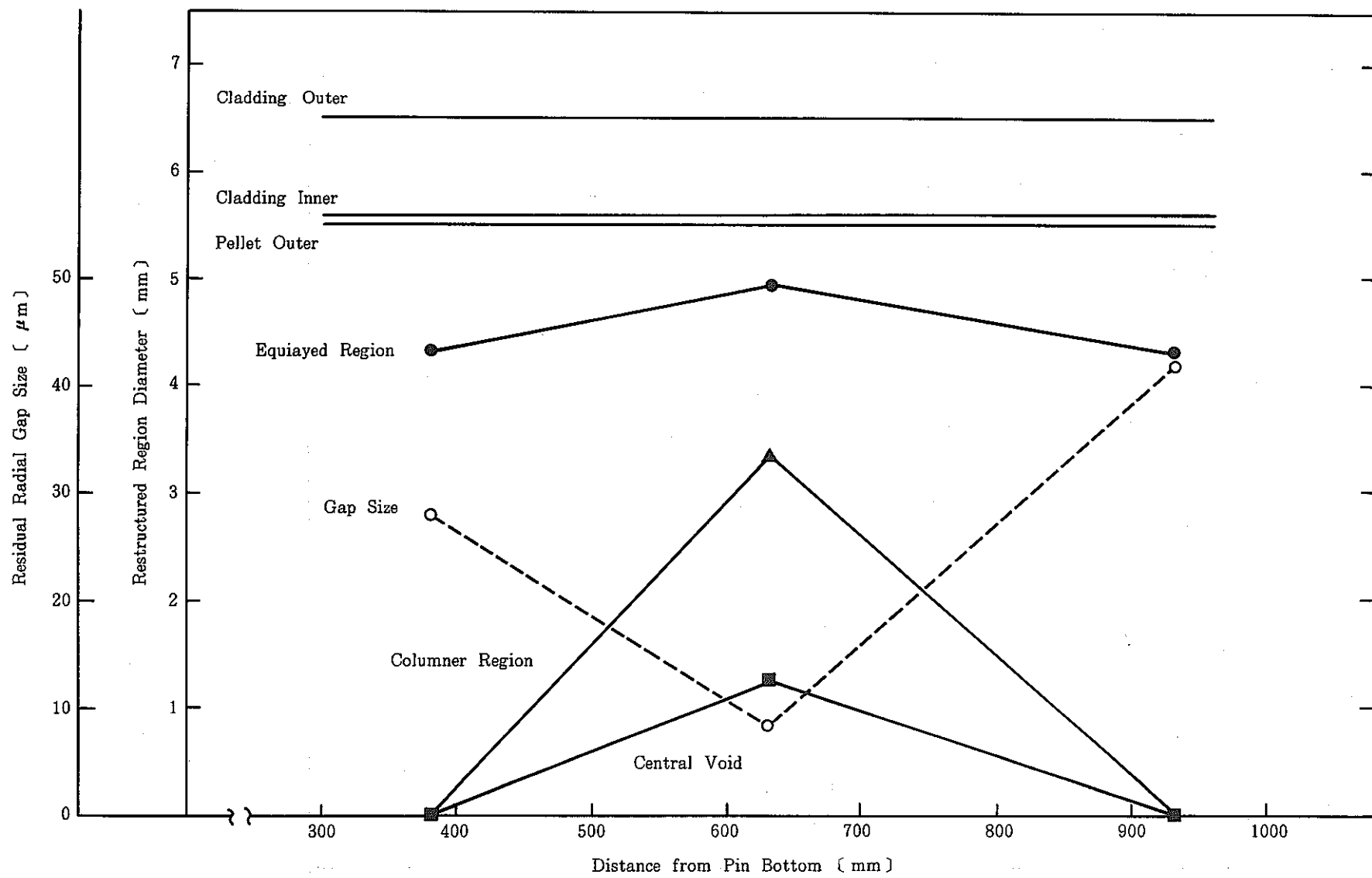


Fig.8 Axial Profile of Fuel Structure

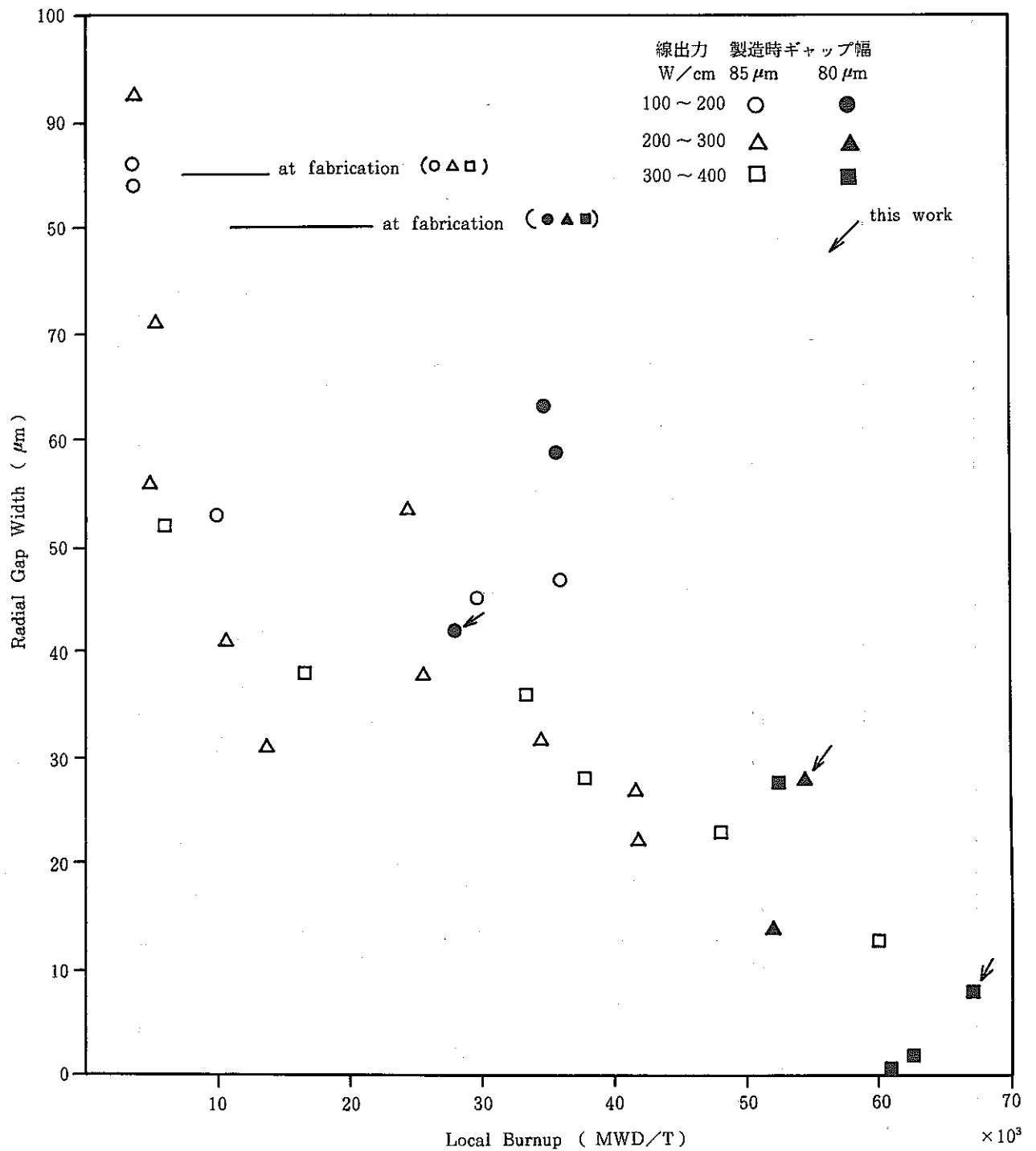


Fig.9 Residual Radial Gap Width of "JOYO" MK-II Irradiated Fuel as a Function of Burnup.

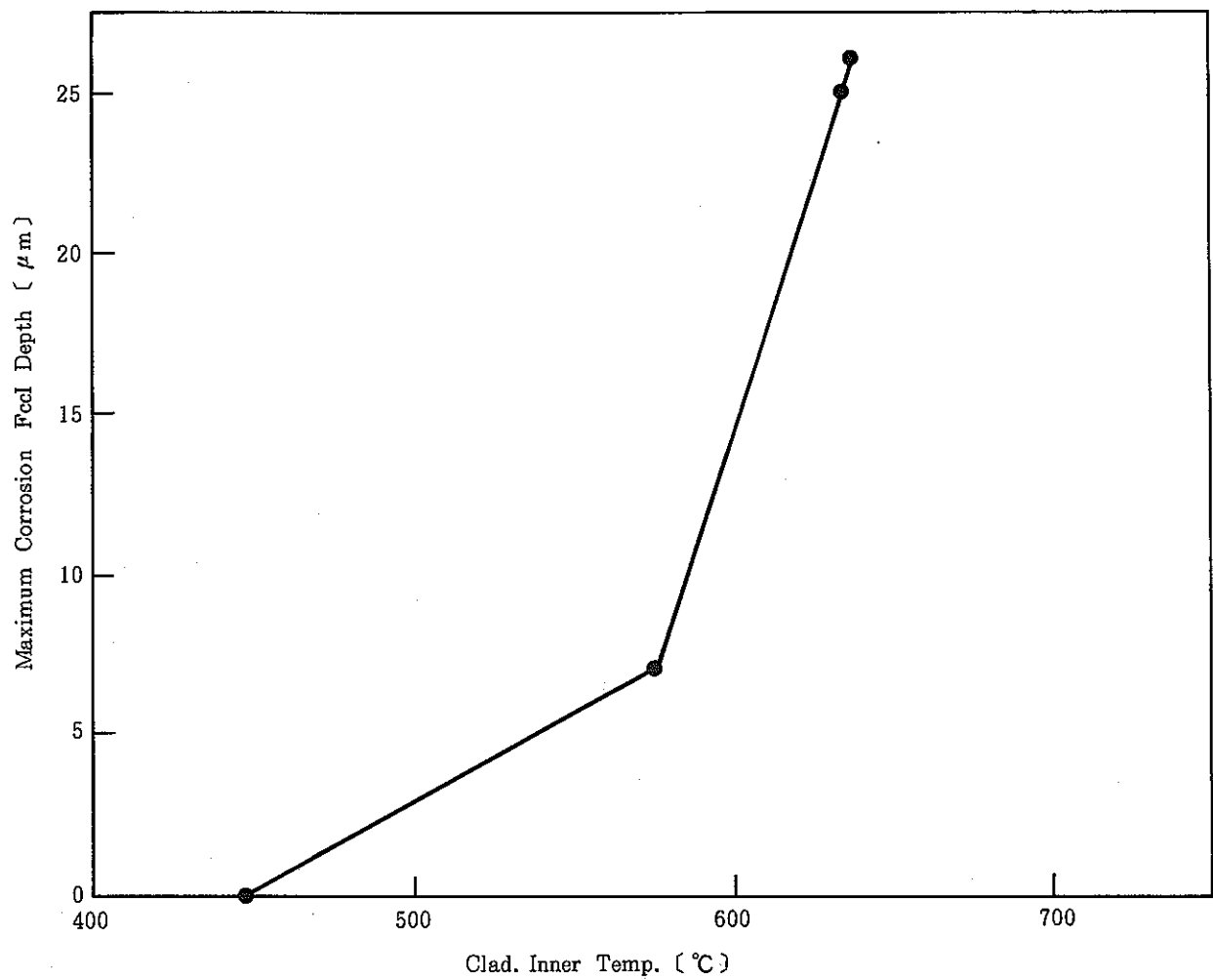


Fig.10 Cladding Wastage as a Function of Cladding Inner Temperature.
(PFC020)

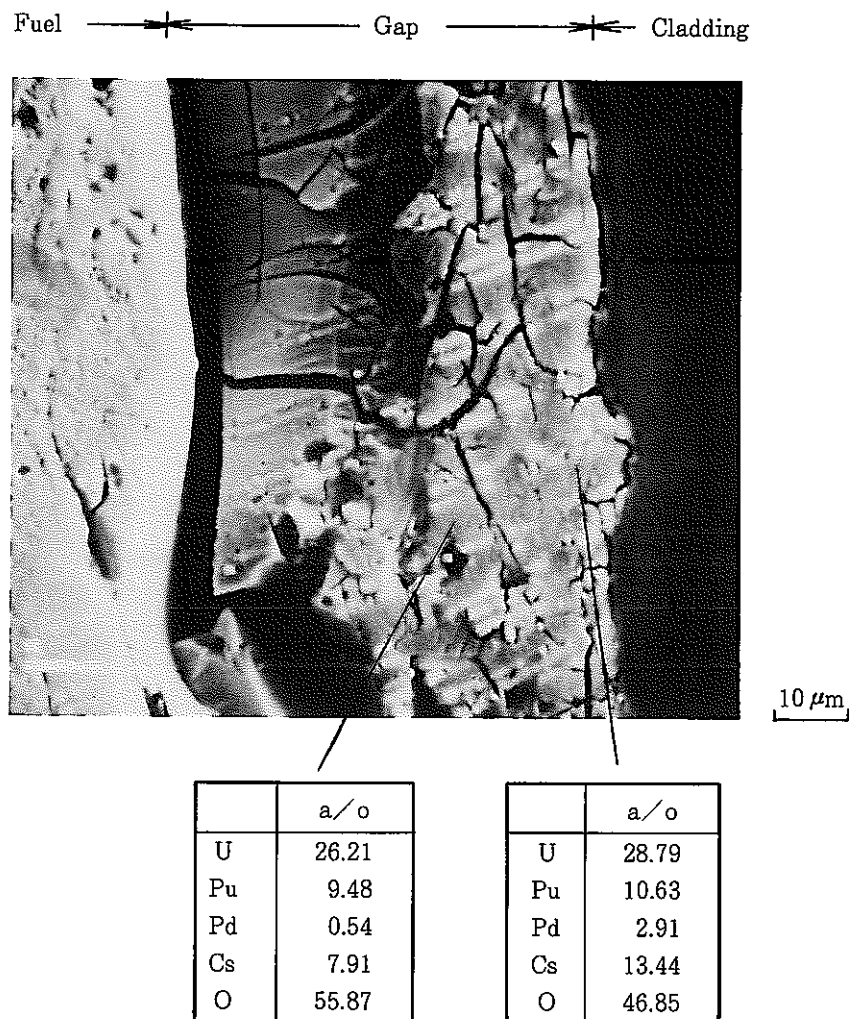


Fig.11 Results of Analyses of Fission Product Compound in the Fuel - Cladding Gap. (Specimen No. A 42944)

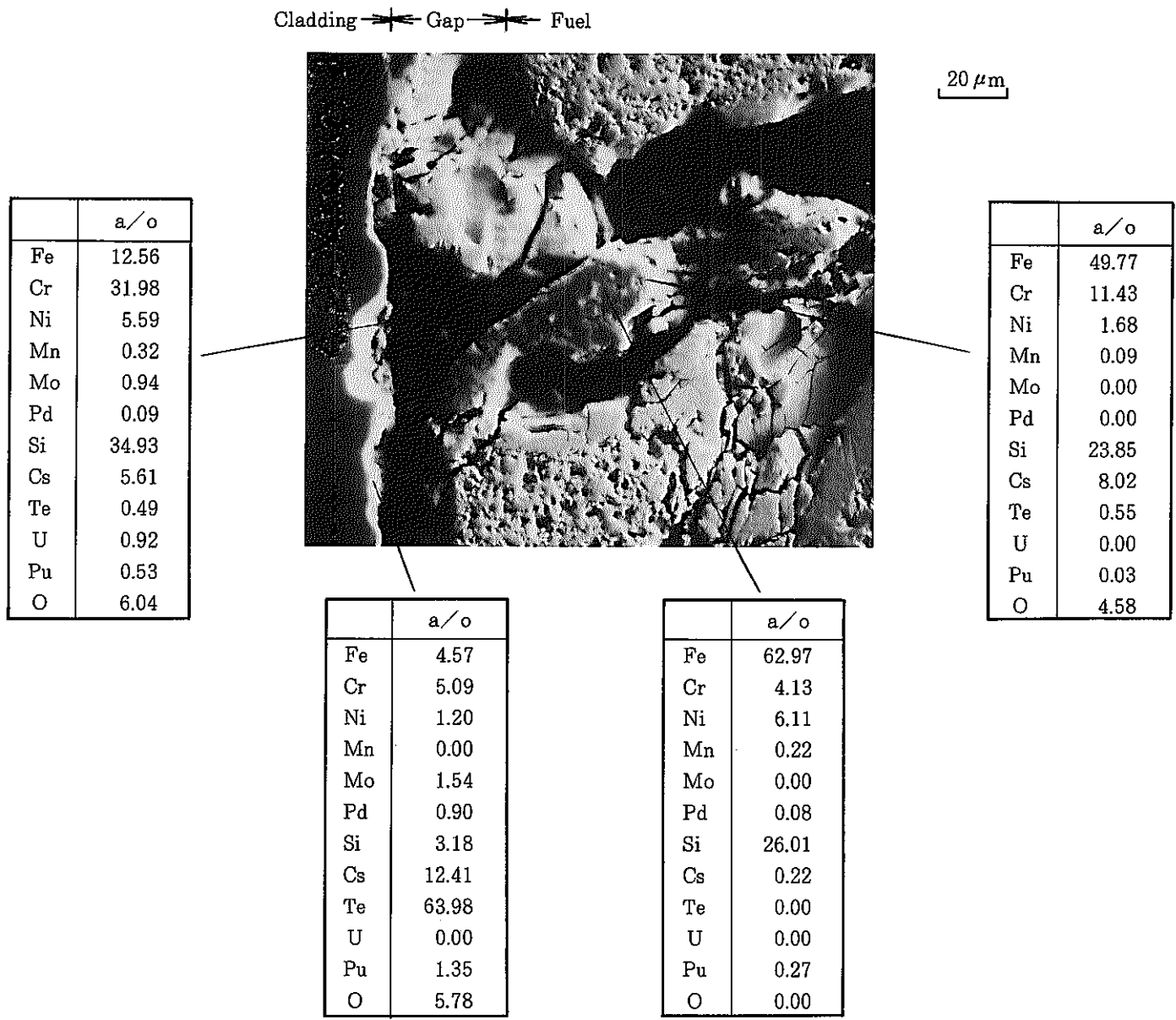


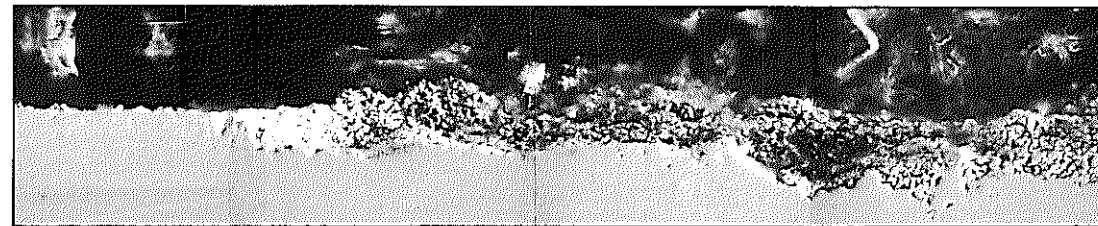
Fig.12 Results of Analyses of Fission Product Compound in the Fuel-cladding Gap. (Specimen No A42944)

分析元素	AVE (AT%)
O	25.226
Te	62.918
Cs	0.315
Fe	6.584
Cr	2.137
Ni	1.213
Mn	0.024
Mo	0.288
Si	1.296

分析元素	AVE (AT%)
O	3.538
Te	10.537
Cs	5.121
Fe	55.929
Cr	10.807
Ni	11.509
Mn	2.019
Mo	0.019
Si	0.522

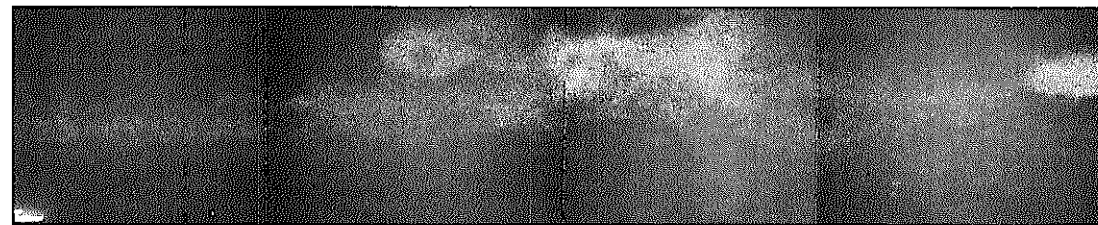
分析元素	AVE (AT%)
O	15.941
Te	31.014
Cs	29.814
Fe	8.757
Cr	9.815
Ni	2.113
Mn	1.701
Mo	0
Si	0.845

分析元素	AVE (AT%)
O	13.339
Te	26.399
Cs	34.491
Fe	7.692
Cr	10.124
Ni	6.117
Mn	1.209
Mo	0
Si	0.629

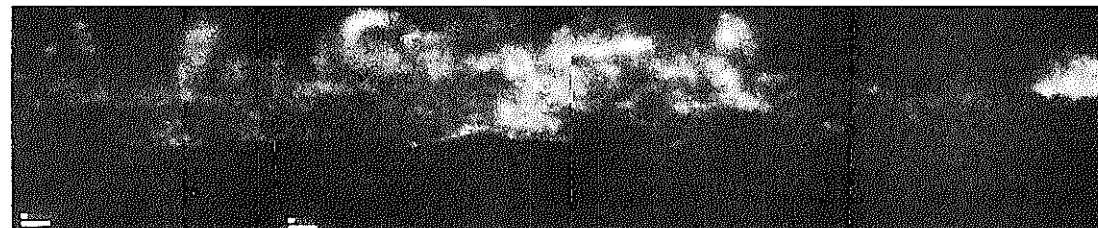


Cladding * FCCI * Gap

SEI



Cs La



Te La

20 μ m

Fig.13 X-ray Images and Results of Analyses of FCCI. (Specimen No.A42985)

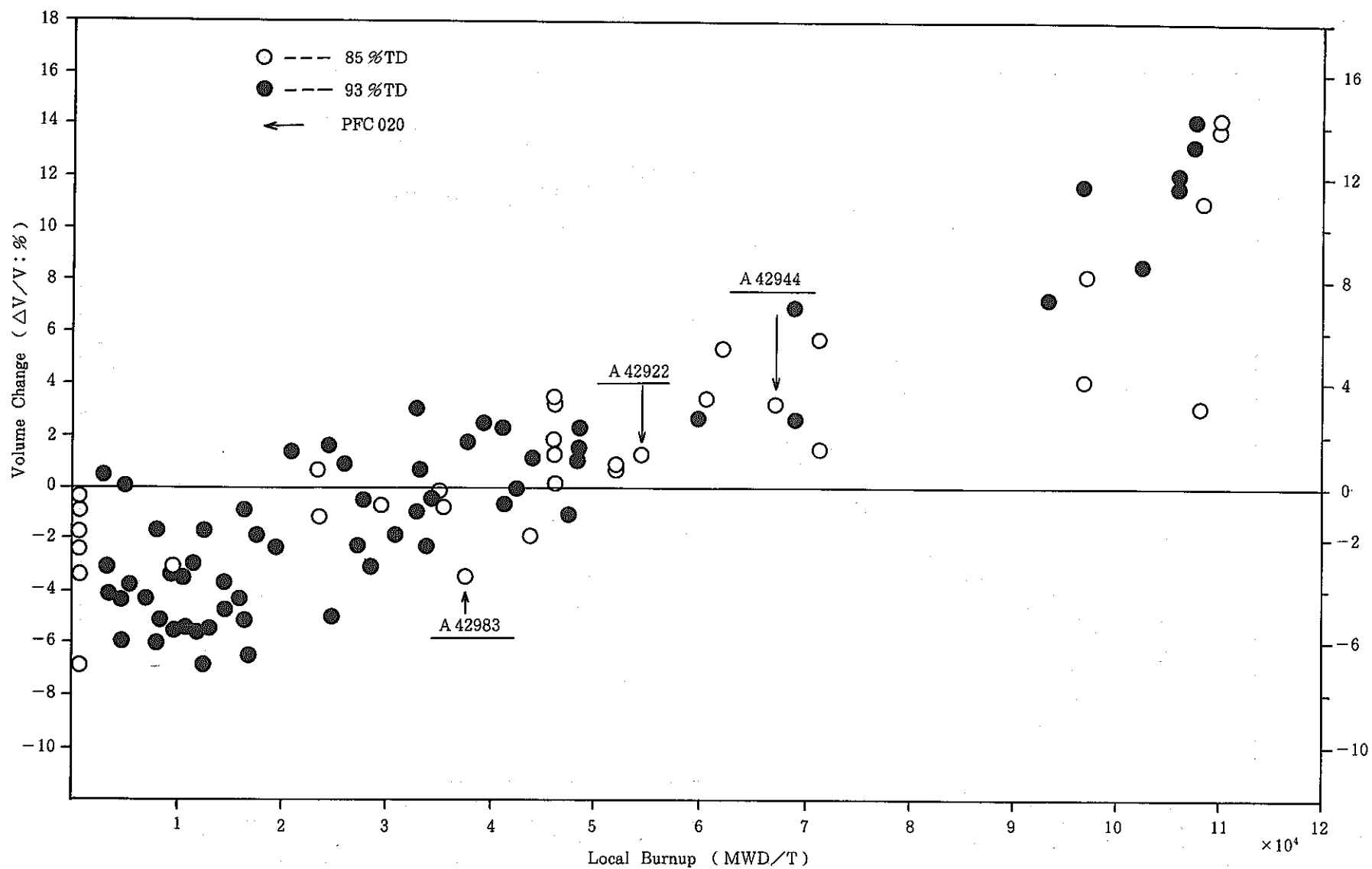


Fig.14 Pellet Volume Change as a Function of Burnup.

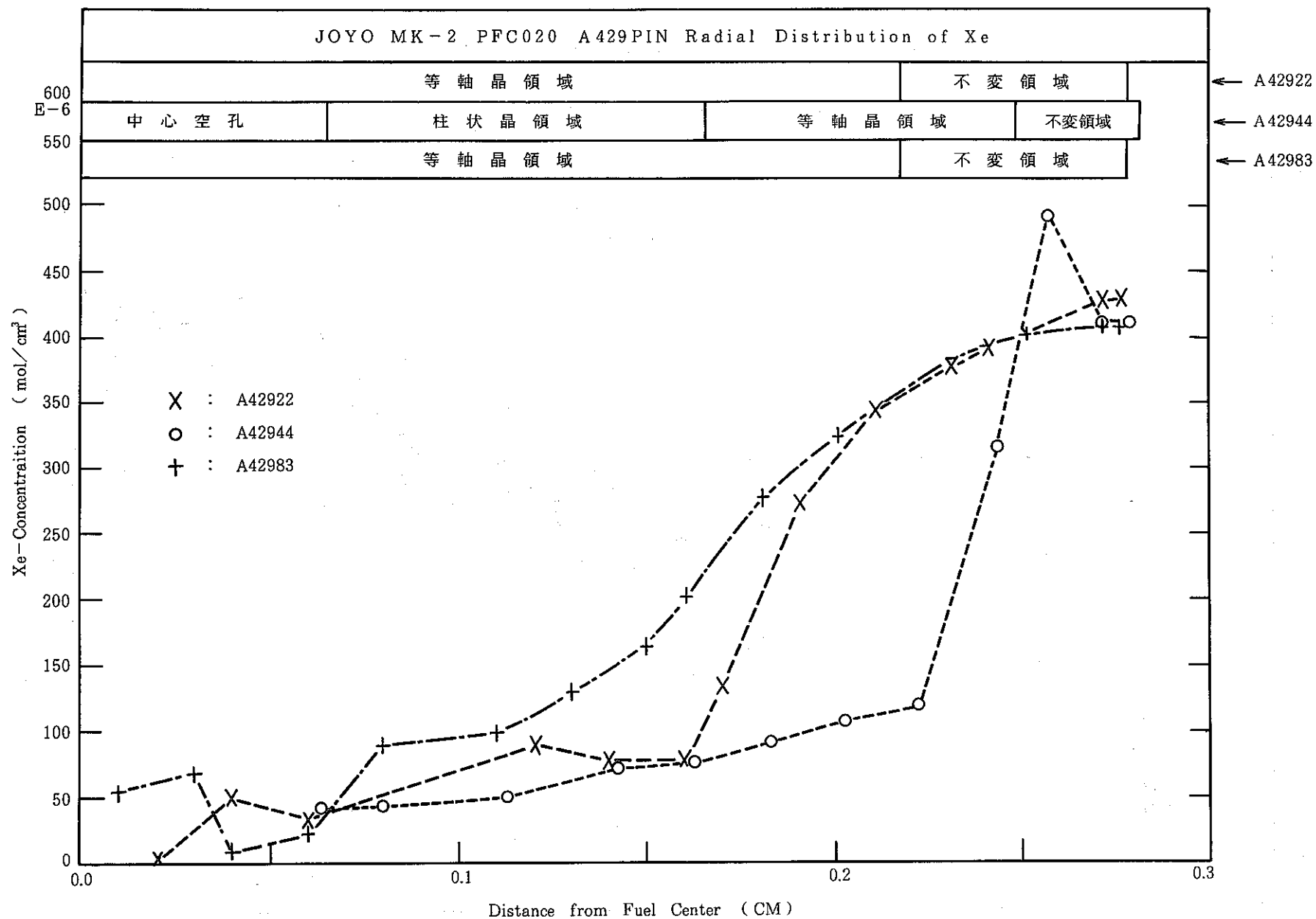


Fig.15 Relative Radial Profile of Retained Xe Measured by SXMA.

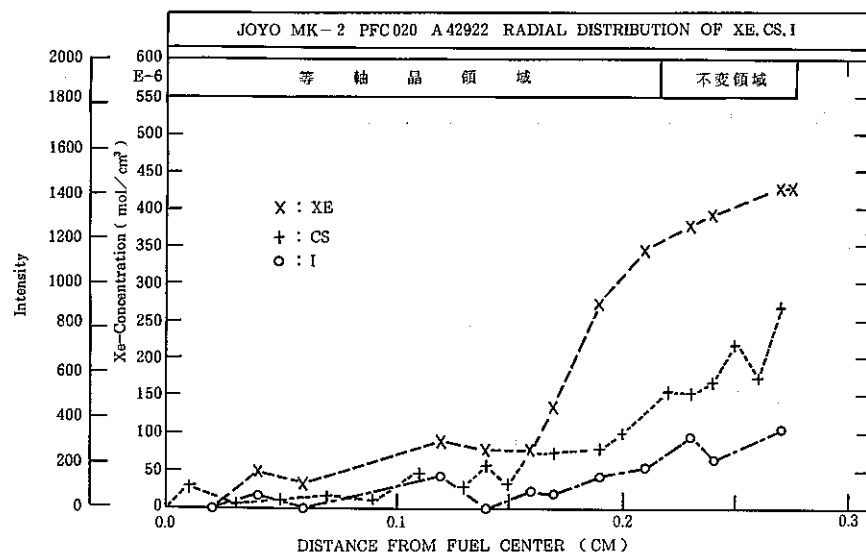


Fig.16 Relative Radial Profiles of Retained Cs,I,Xe Measured by SXMA.
(Specimen No.A 42922)

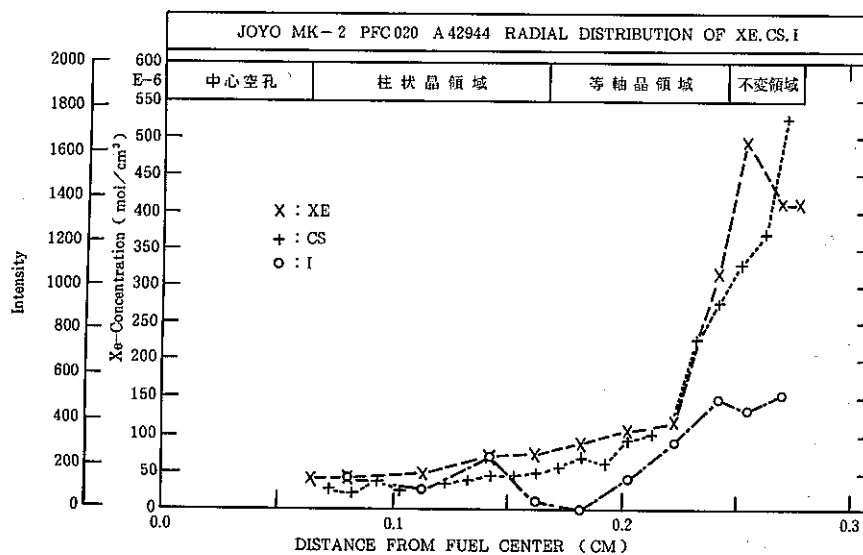


Fig.17 Relative Radial Profiles of Retained Cs,I,Xe Measured by SXMA.
(Specimen No.A 42944)

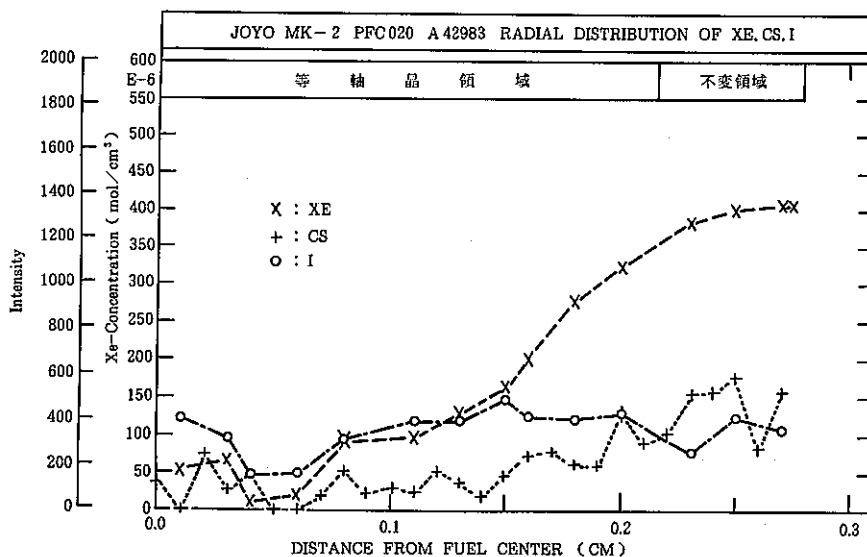


Fig.18 Relative Radial Profiles of Retained Cs,I,Xe Measured by SXMA.
(Specimen No.A 42983)

- 40 -

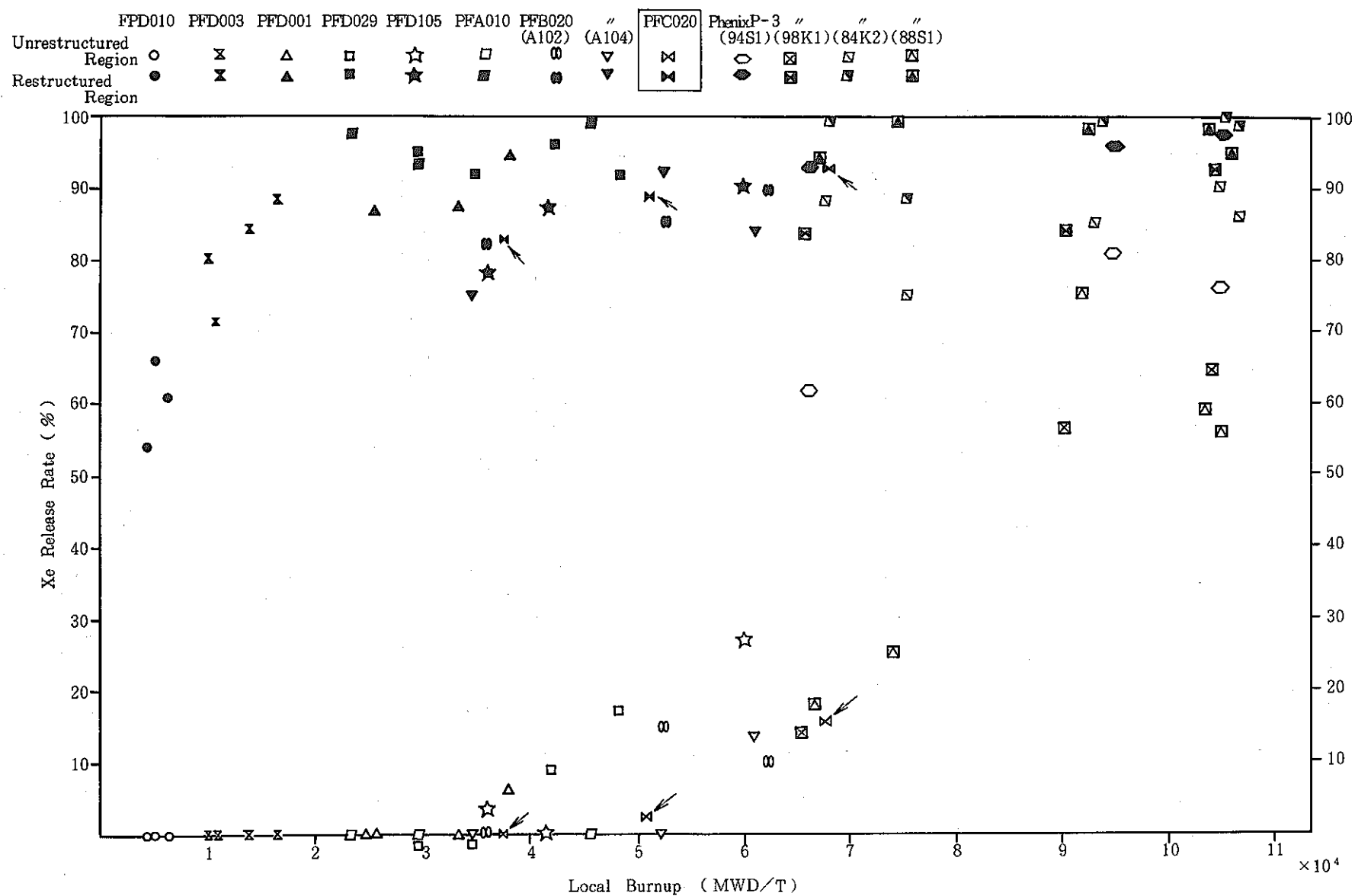


Fig.19 Burnup Dependency of Xenon Release Rate in Restructured and Unrestructured Region

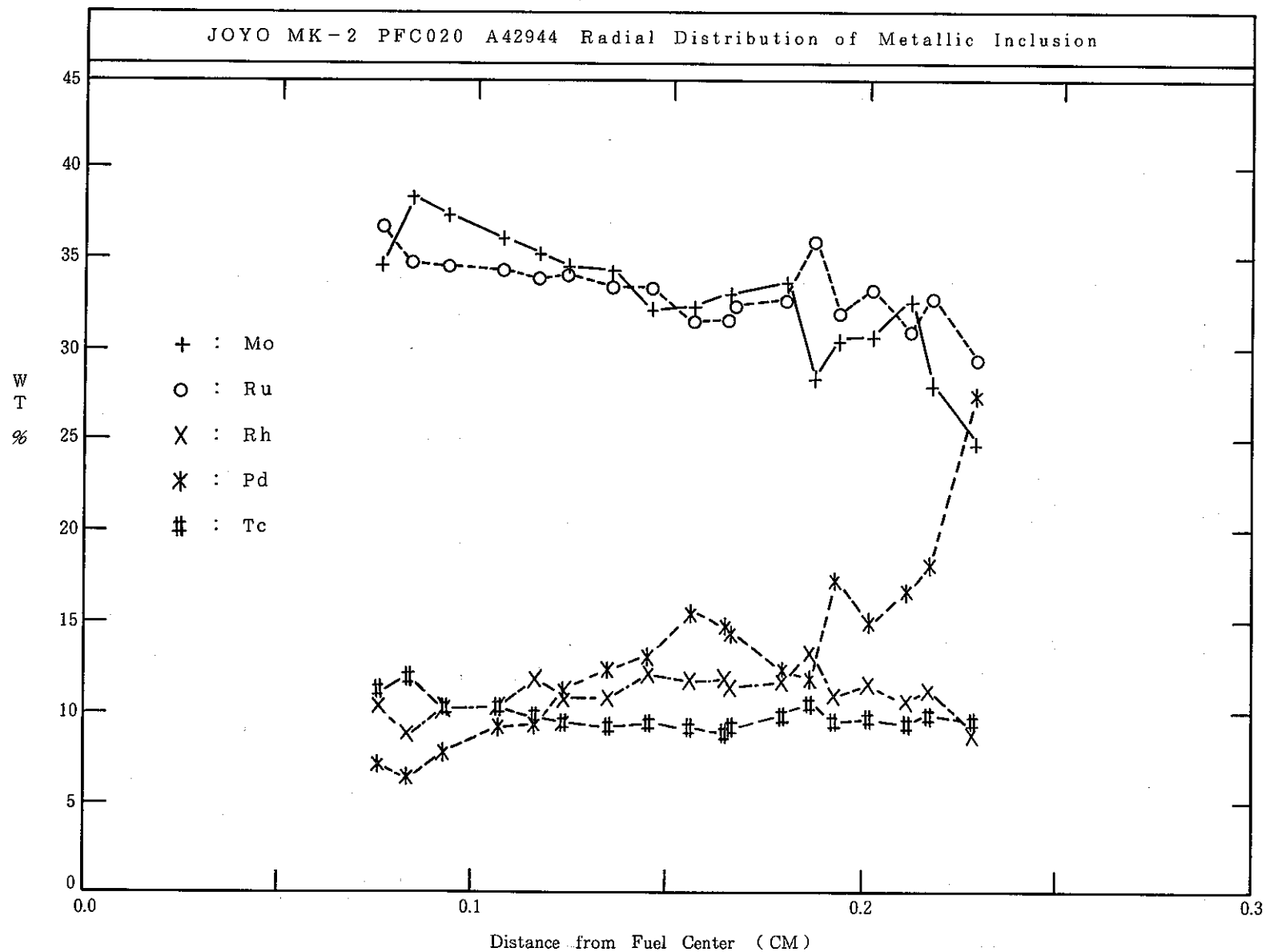


Fig.20 Radial Distribution of Mo, Ru, Rh, Tc and Pd Consents in Mettallic Inclusion. (Specimen No. A42944)

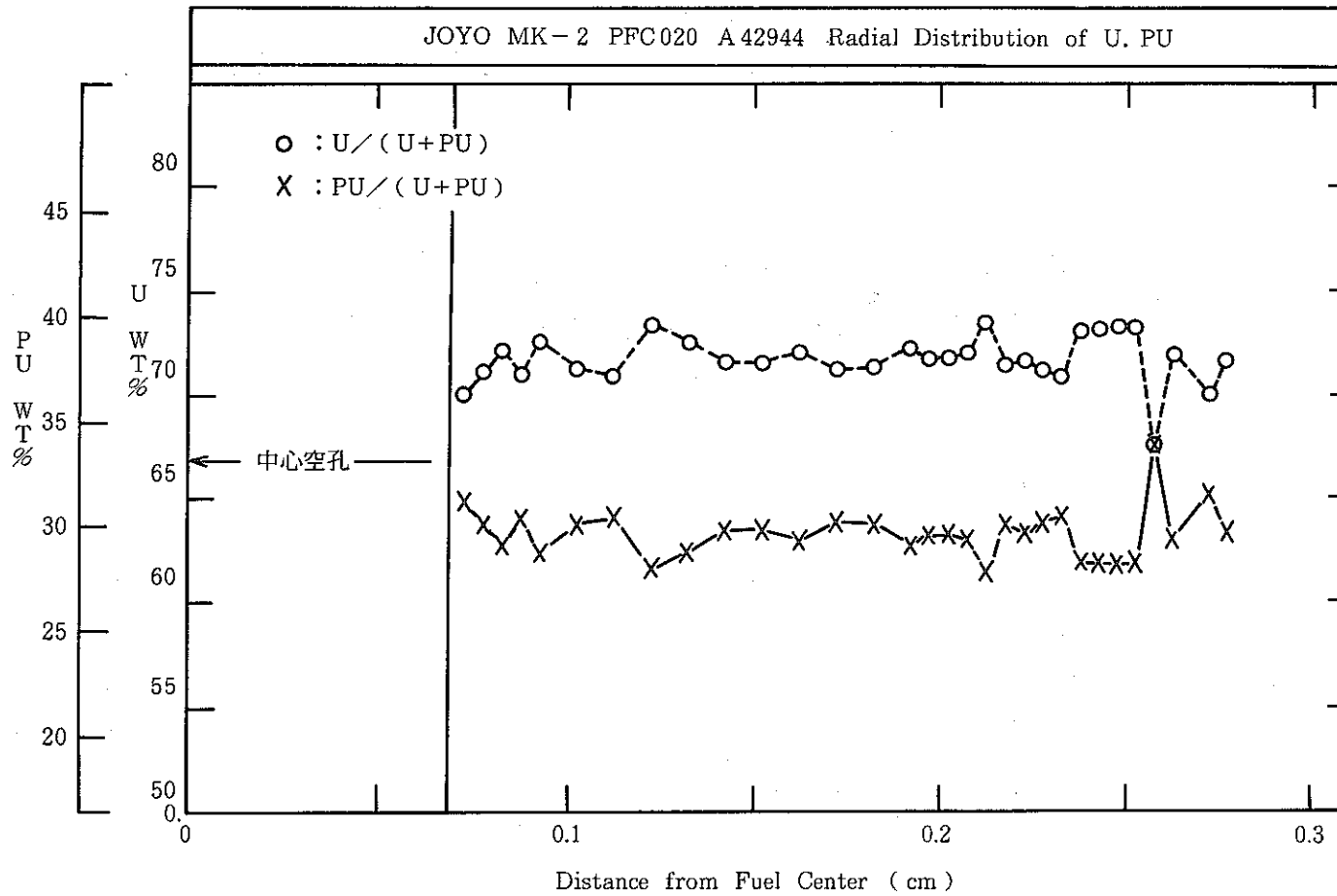


Fig.21 Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by SXMA.
 (Specimen No. A42944)

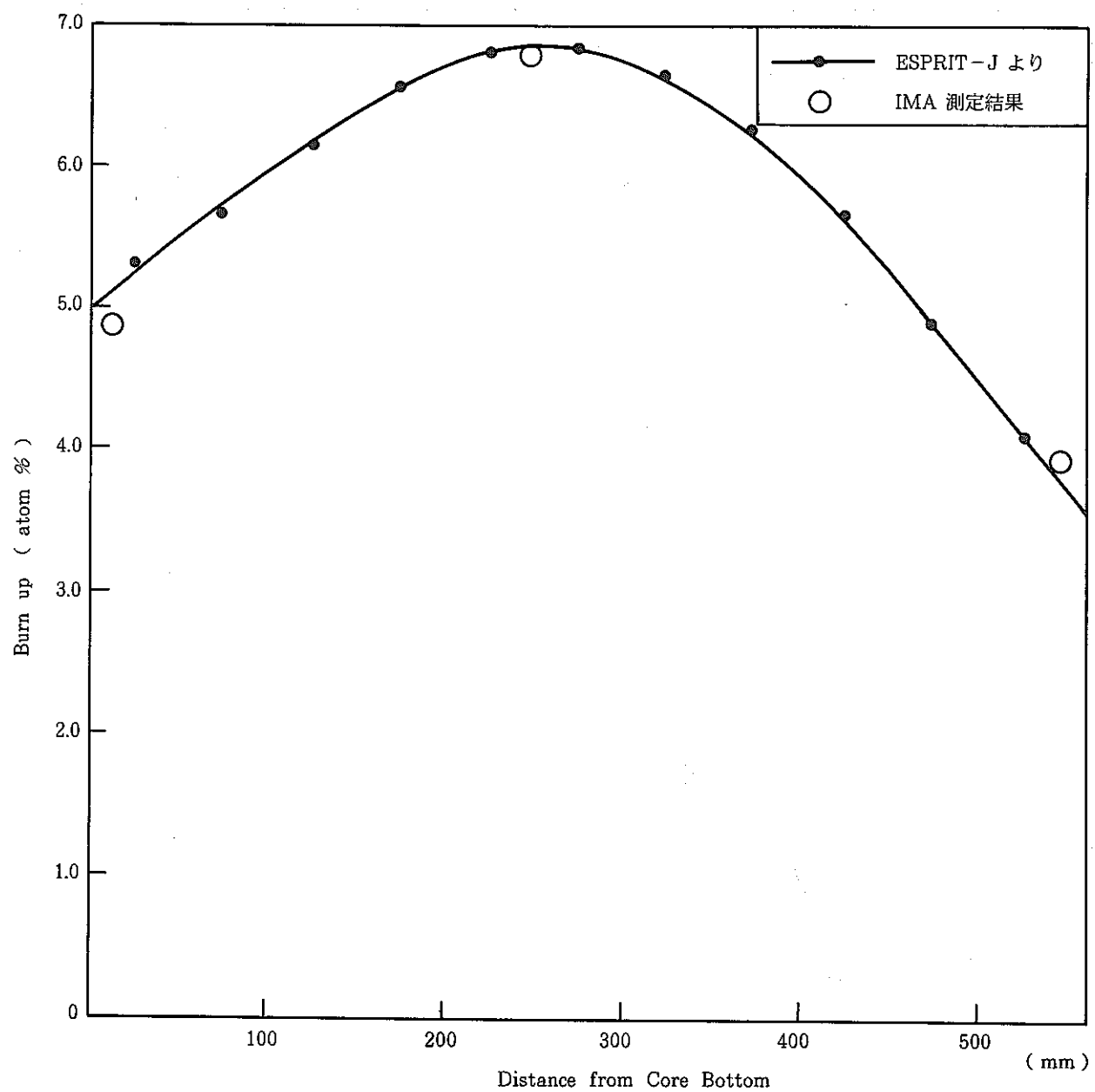


Fig.22 Axial Distribution of Measured Burnup of PFC020 (Pin No.A429)

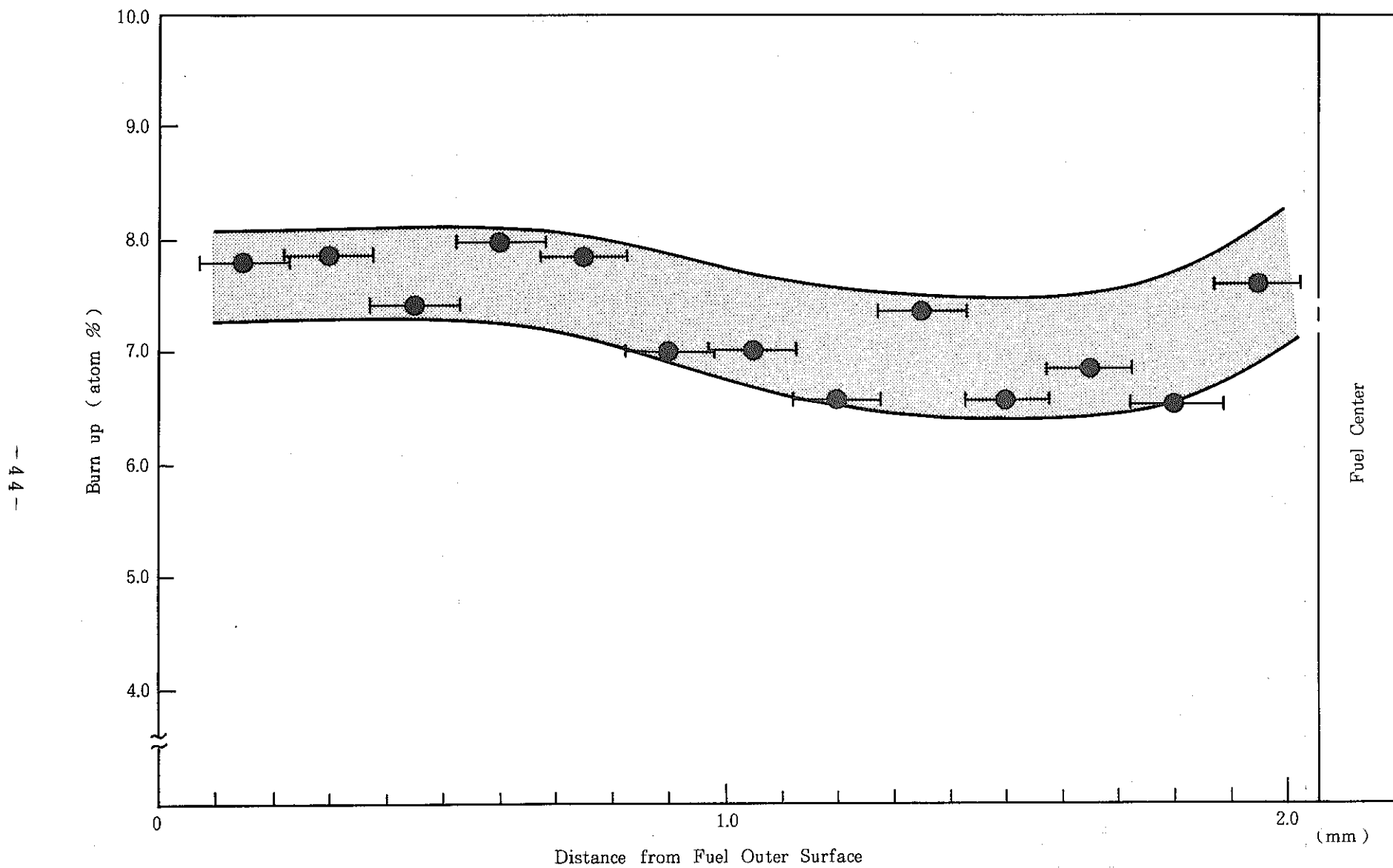


Fig.23 Radial Burn up Distribution Measured by the IMA. (Specimen No. A 42944)

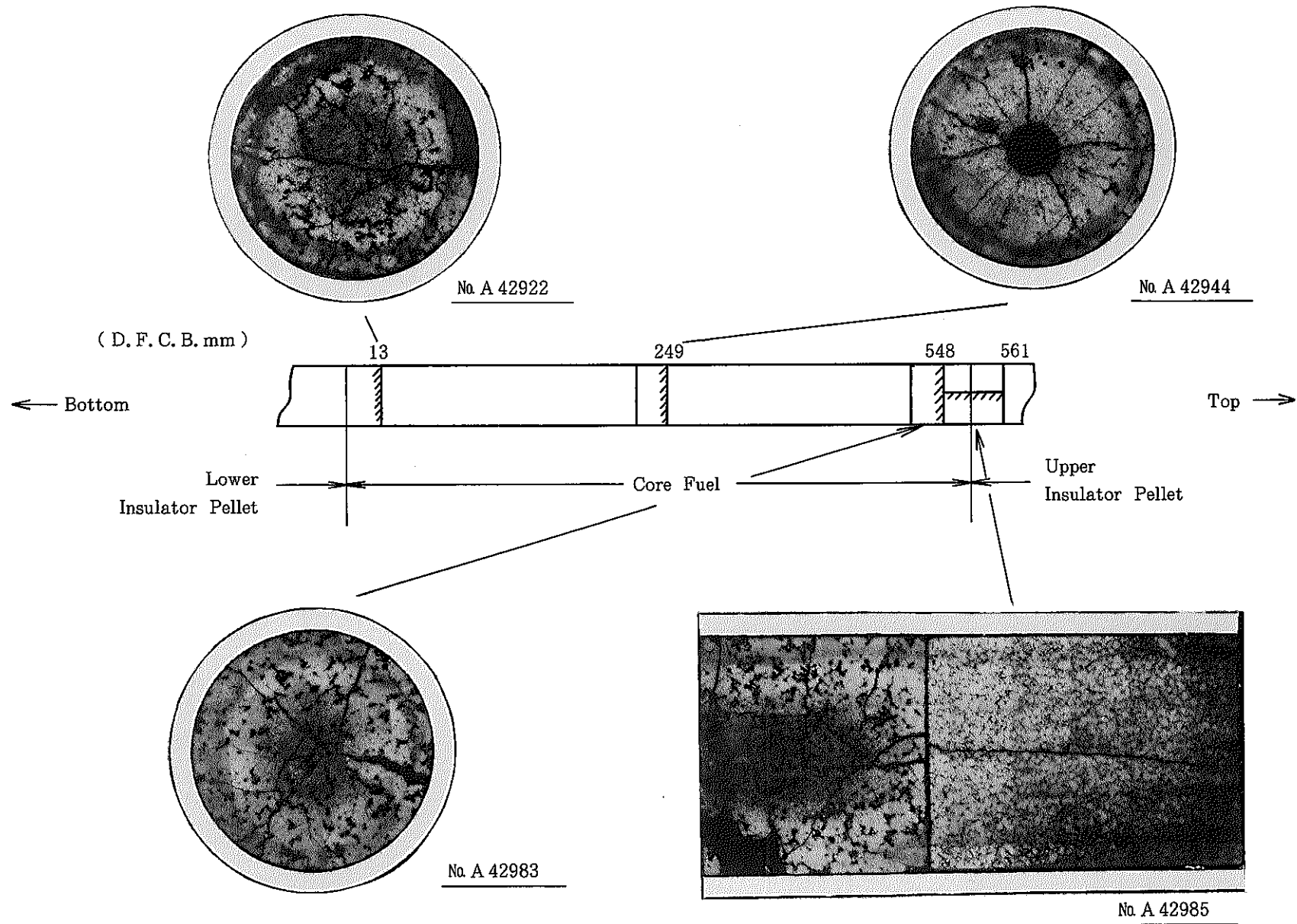


Photo.O - 1 Optical Macrographs of the Mettalographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin. (Pin No A 429)

"JOYO" MK-II PFC020

Specimen NO. A42922

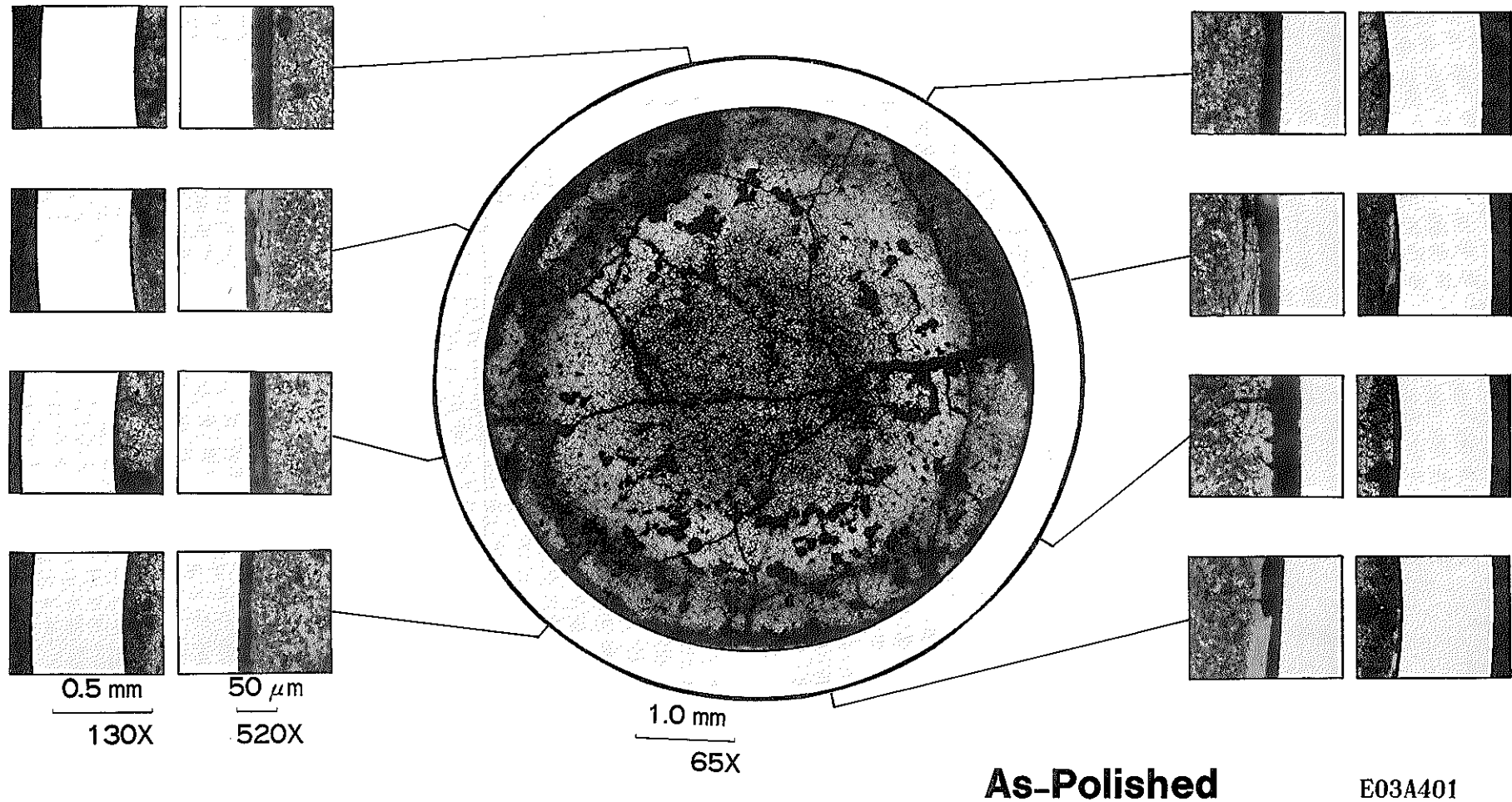
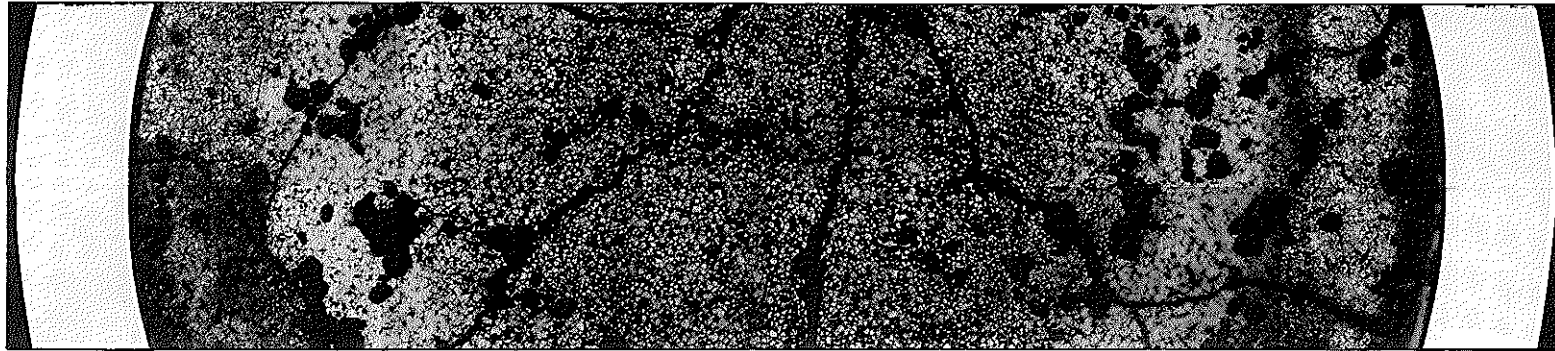


Photo.O-2 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin.
(Specimen No A 42922) As - Polished

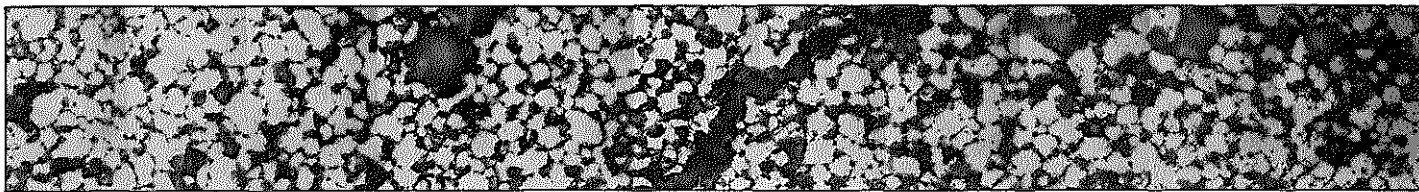
"JOYO" MK-II PFC020

Specimen NO. A42922



0.5 mm

130X



50 μ m

520X

As-Polished

E03A403

Photo.O-3 Optical Microstructure of the Core Fuel. (Specimen No.A42922) As-Polished

"JOYO" MK-II PFC020

Specimen NO. A42944

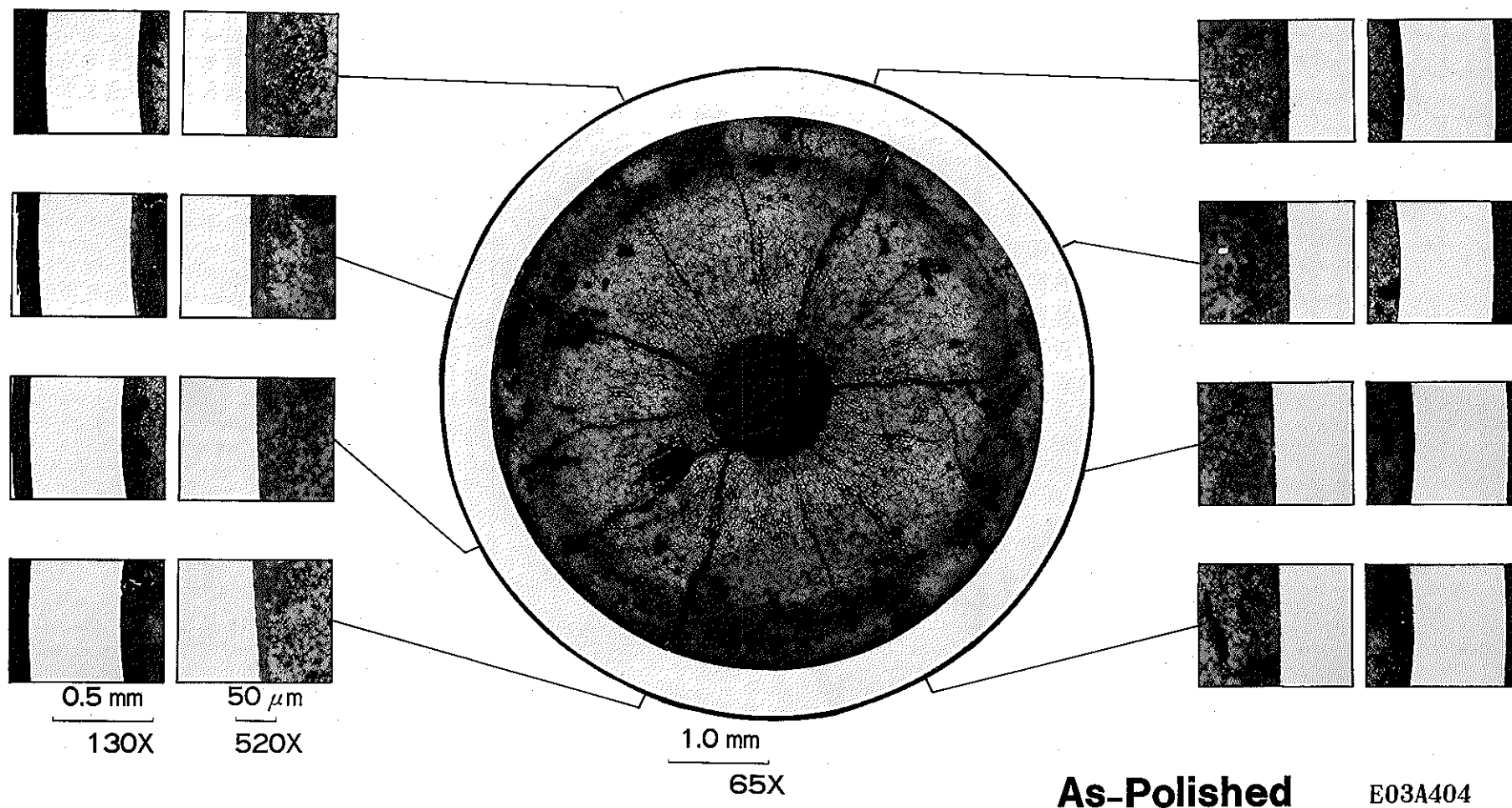
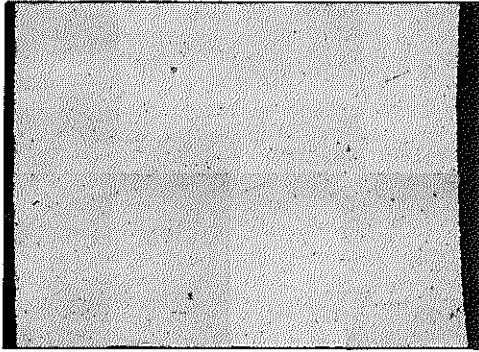


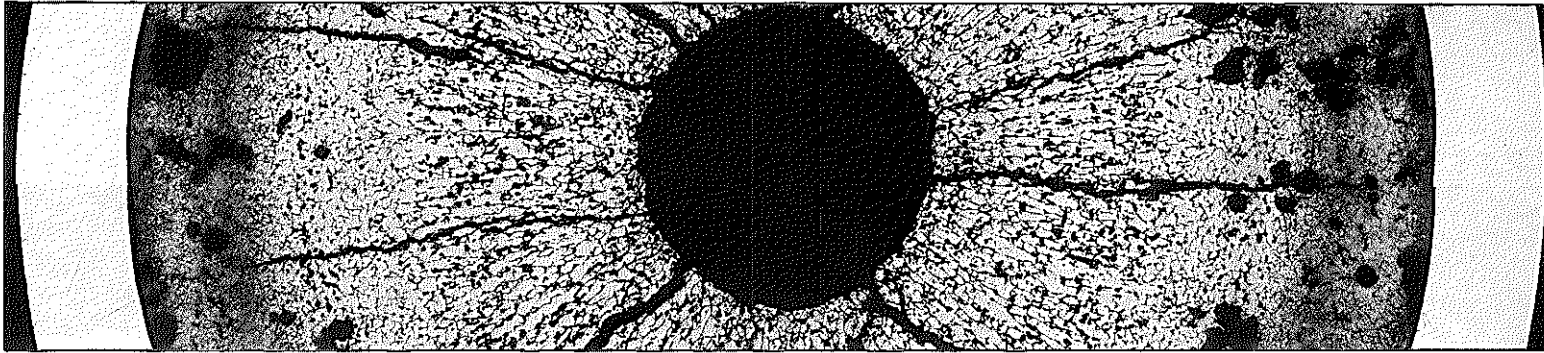
Photo. O - 4 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin.
(Specimen No. A 42944) As - Polished

"JOYO" MK-II PFC020

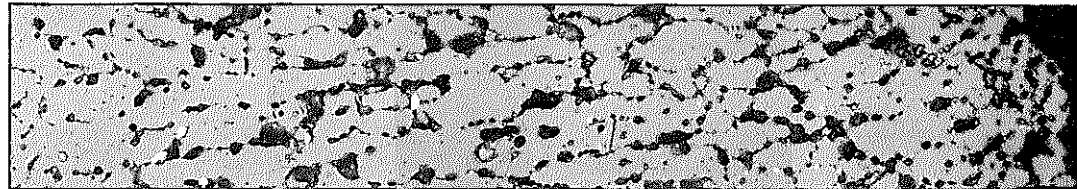
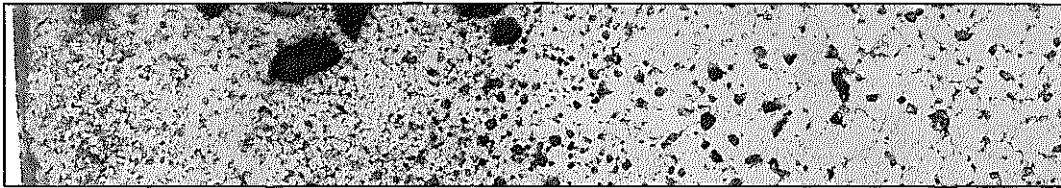
Specimen NO. A42944



50 μ m
520X



0.5 mm
130X

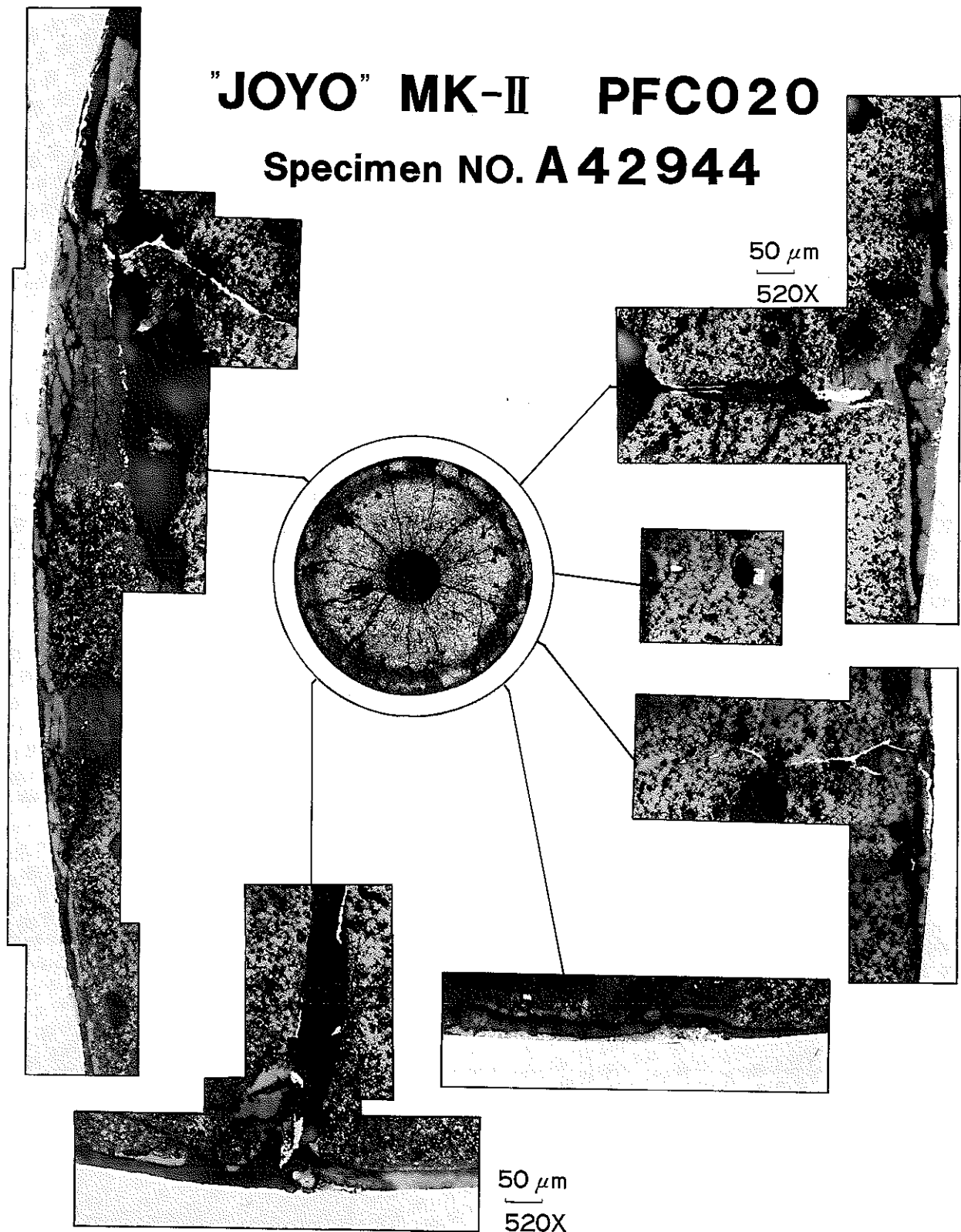


50 μ m
520X

As-Etched

E03A413

Photo.O-5 Optical Microstructuer of the Core Fuel, (Specimen No. A 42944) As - Etched



As-Polished

E03A405

Photo.O-6 Optical Microstructure of the Core Fuel.
(Specimen No. A42944) As - Polished)

"JOYO" MK-II PFC020

Specimen NO. A42983

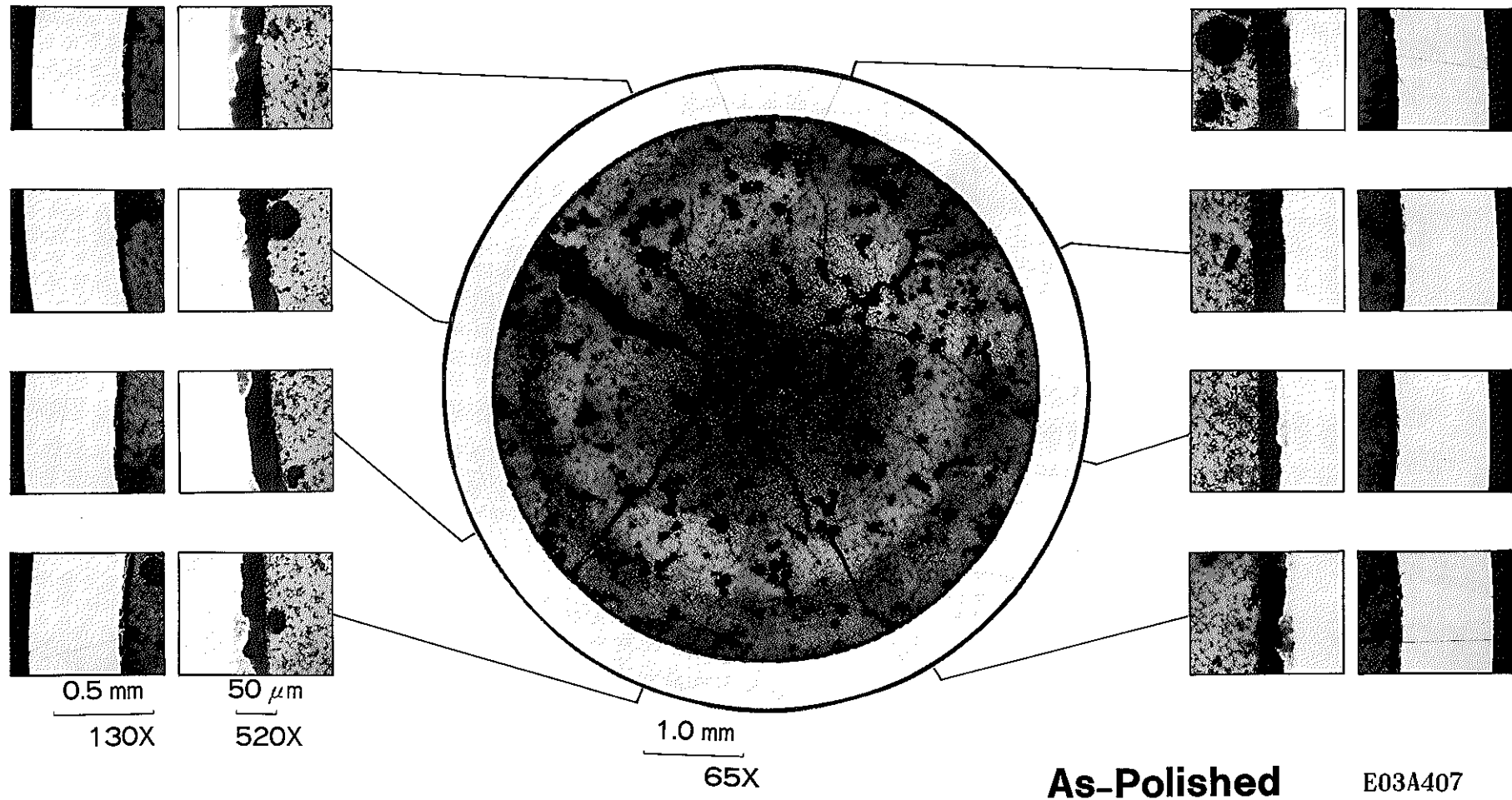
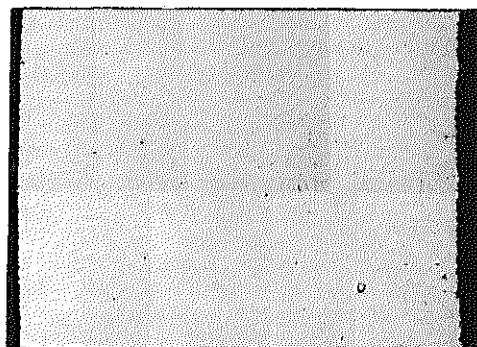


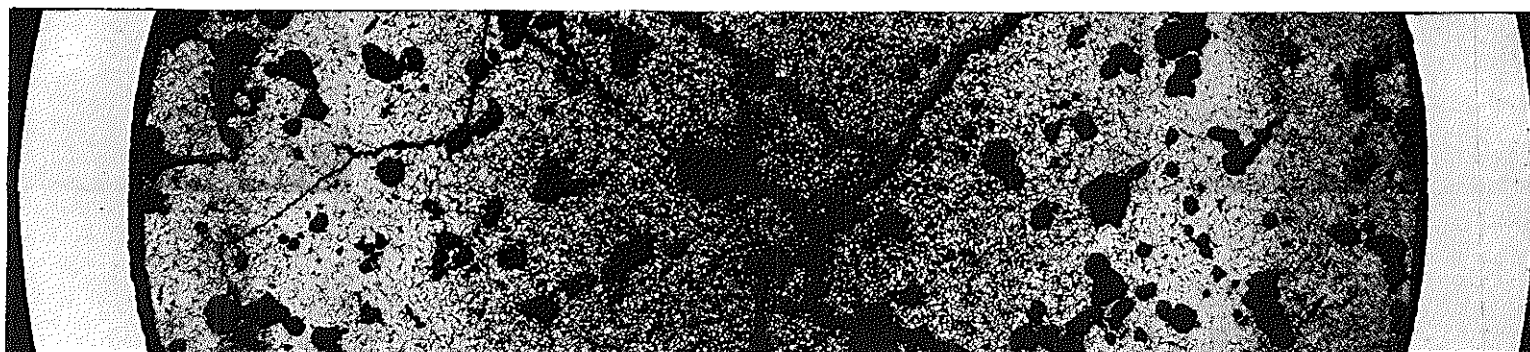
Photo.O - 7 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin.
(Specimen No. A 42983) As - Polished

"JOYO" MK-II PFC020

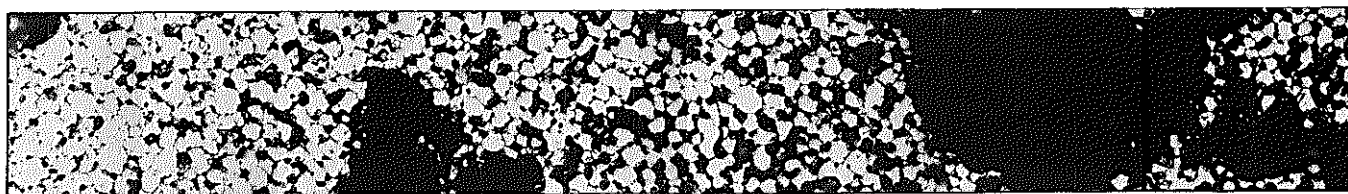
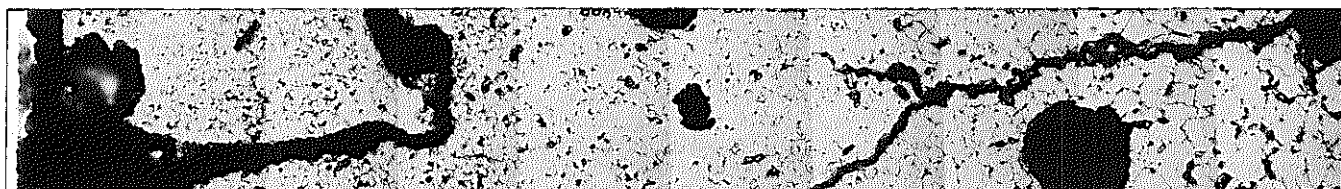
Specimen NO. A42983



50 μ m
520X



0.5 mm
130X



50 μ m
520X

As-Etched

E03A415

"JOYO" MK-II PFC020

Specimen NO. A 42 985

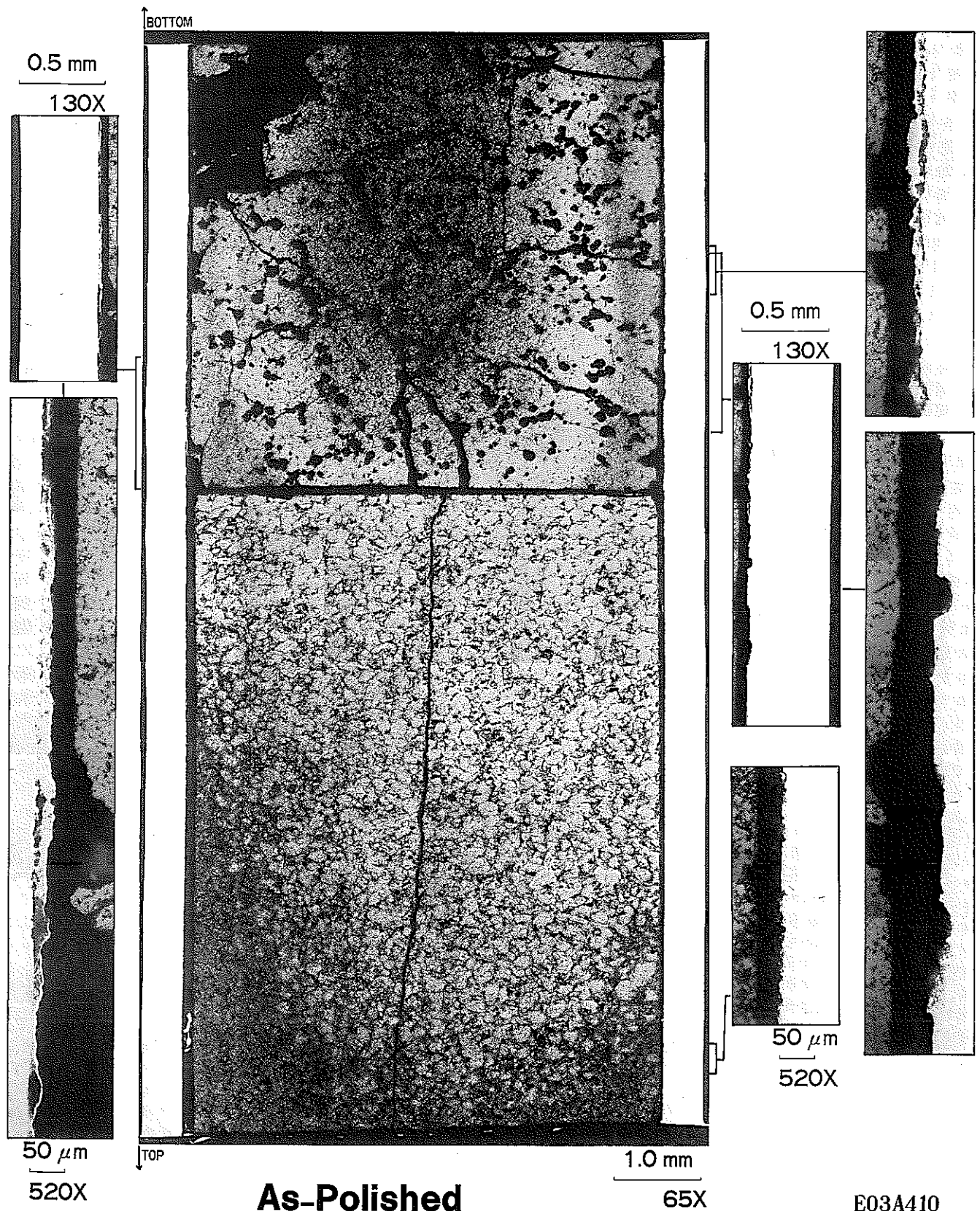


Photo. O - 9 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core Fuel Pin.

(Specimen No. A 42985) As - Polished

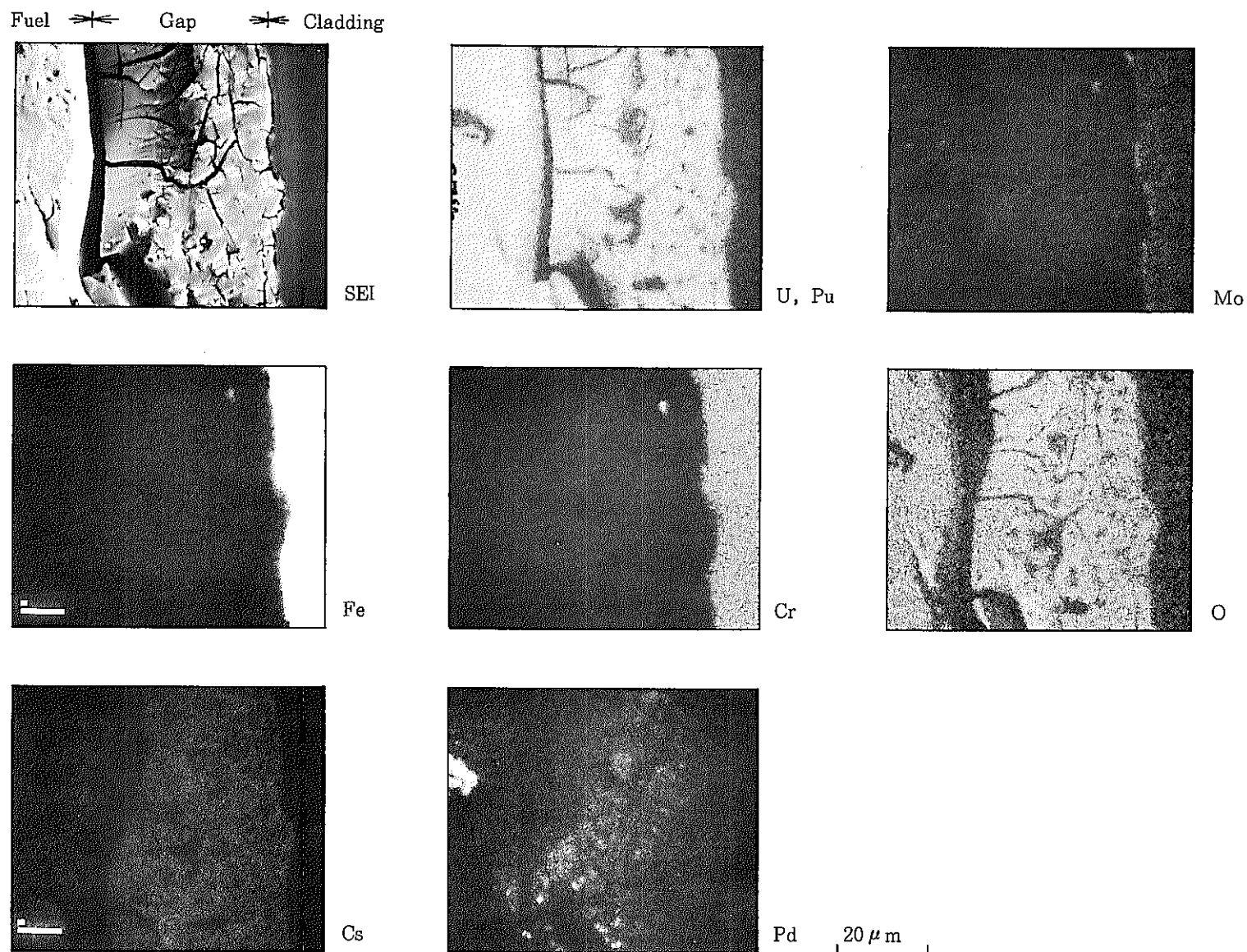


Photo.E- 1 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding.
(Specimen No. A 42944)

Cladding *Gap* Fuel

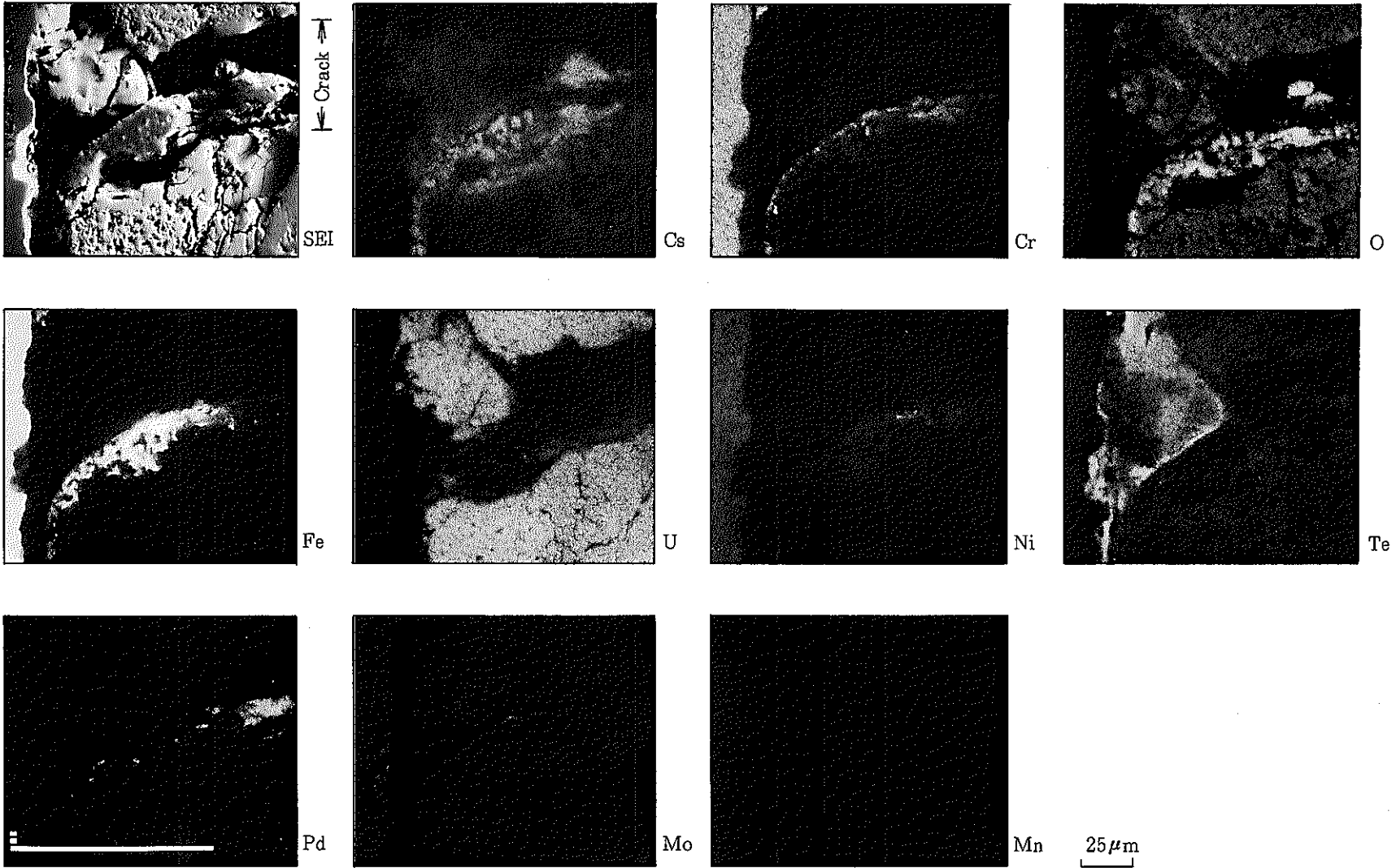


Photo.E-2 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding.
(Specimen No A 42944)

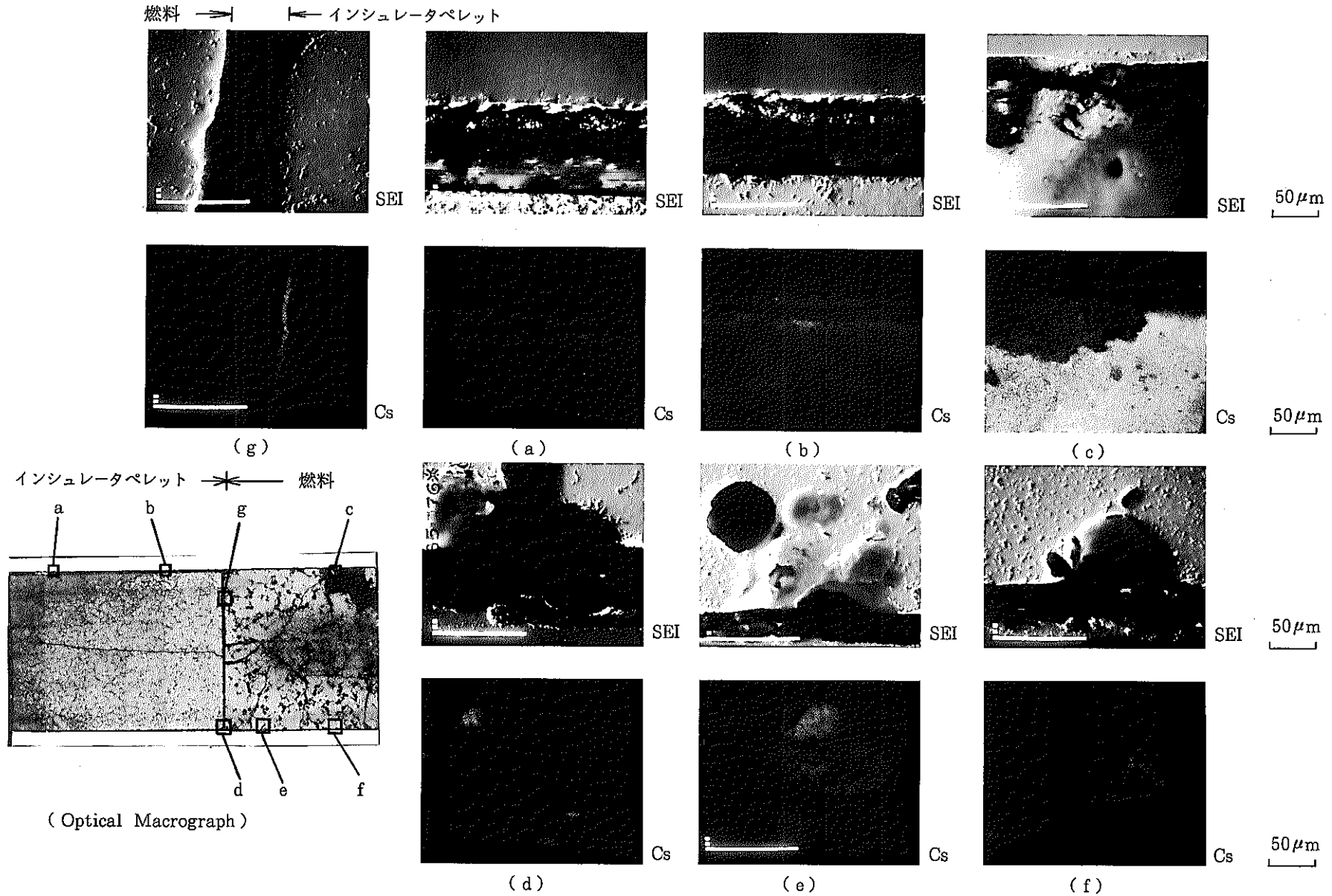
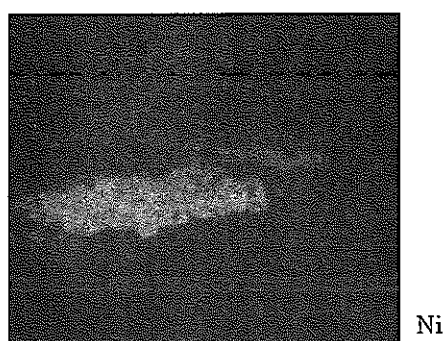
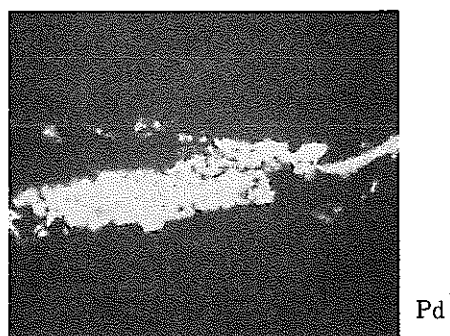
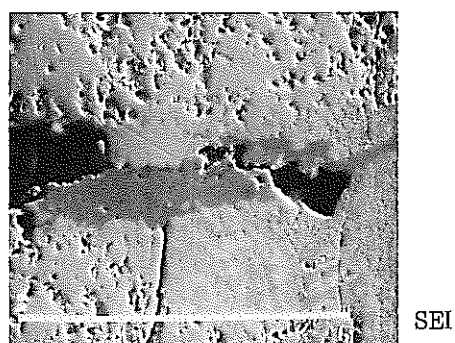


Photo.E-3 Optical Macrograph and X-ray Image of Cs-L α in Interface between
Upper Insulator Pellet and Cladding. (Specimen No A 42985)



25 μ m

Photo.E-4 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion
in the Fuel. (Specimen No. A 42944)

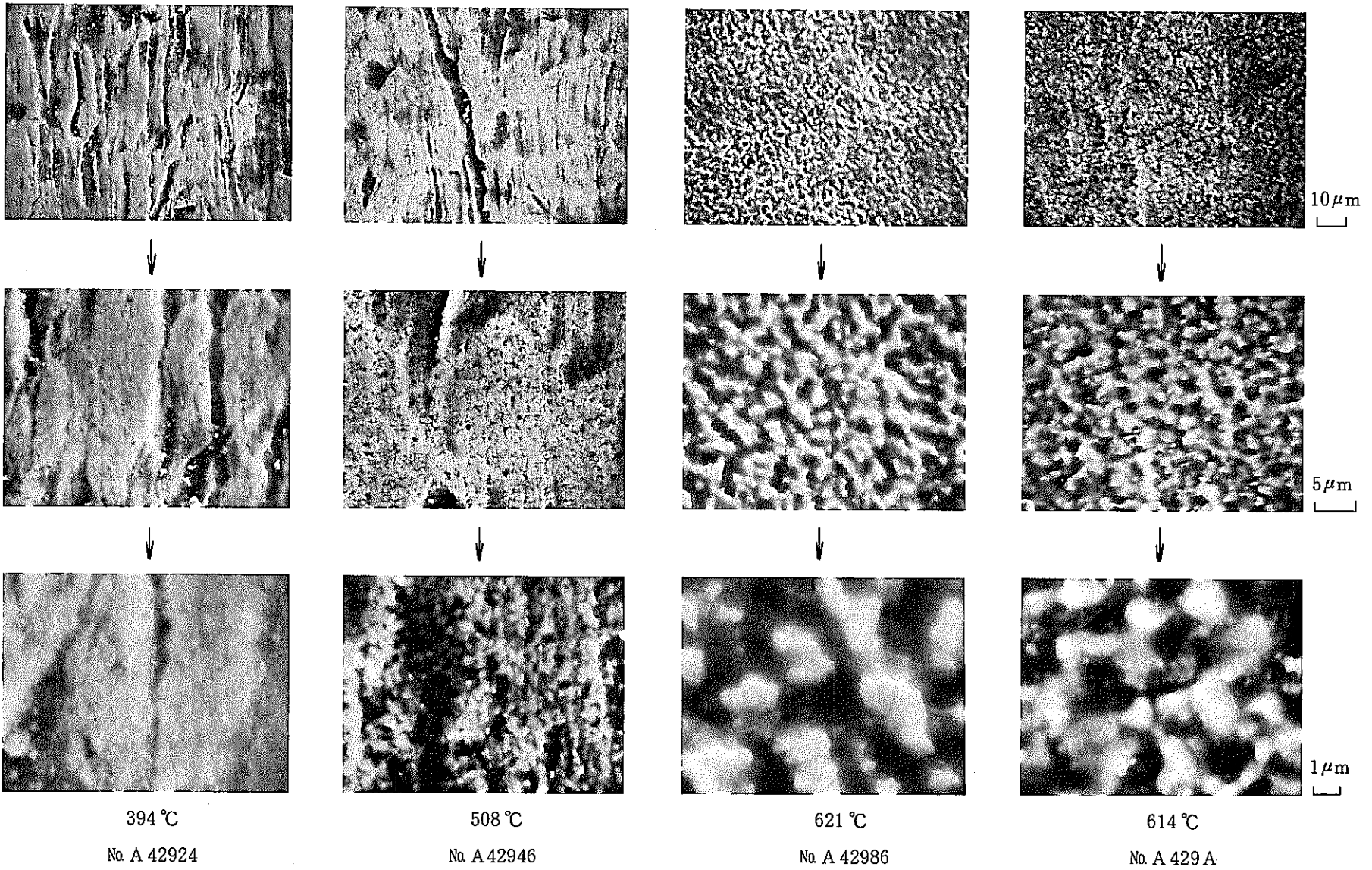


Photo.S - 1 Secondary Electron Micrographs of the Core Fuel Cladding Outer Surface. (Pin No. A 429)