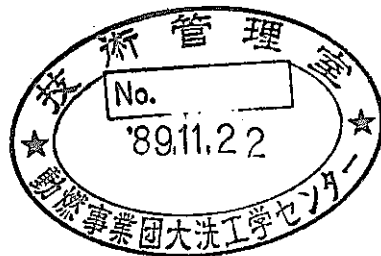


「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体(PFB020)の照射後試験

燃料要素の組織観察及び機器分析



1989年8月

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 B型特殊燃料集合体(PFB020)の照射後試験

燃料要素の組織観察及び機器分析

楢田尚也* 鶴飼重治*
叶野一郎* 熊倉忠夫*
野村茂雄* 鹿倉 栄*

要 旨

B型特殊燃料集合体 (Fab. No PFB020) は, 「常陽」MK-II 炉心の装荷位置3C2において100 MW, 第3サイクルから第10サイクルまで照射され, 集合体平均燃焼度は48,300 MWd/tである。本試験の目的は, 高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の炉心構成要素とほぼ同一仕様のII型特殊燃料要素を用い「もんじゅ」の実機条件に近い照射条件での燃料要素及び被覆管の健全性並びに照射挙動を把握することである。本報告書では, 光学顕微鏡観察, 走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察, 遮蔽型X線マイクロアナライザ (SXMA) による元素分析並びにイオンマイクロアナライザ (IMA) による質量分析結果を述べる。

本試験により以下の結果が得られた。

- 1) 燃料組織は, 燃料カラム軸方向中心部で中心空孔 (約1.2 mm径) と柱状晶が観察された。ギャップは, 閉塞しており照射中に機械的相互作用 (FCMI) が生じていたと推測されるが燃料ピンは, 健全であった。また, タグガス封入の有無による燃料組織に及ぼす影響は, ほとんど無いと判断される。なお, 被覆管内面腐食量は, 最大14 μm (被覆管内面温度600 $^{\circ}\text{C}$) 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5.12%であり照射初期の焼きしまり状態から燃焼にともなう燃料のスエリングによる体積増加が認められた。
- 3) 燃料内に保持されているXe, Csは, 不変領域でほぼ一定に保持されているが等軸晶領域において放出が開始されていることが確認された。また, Iは, 燃料内においてほぼ一定に保持されていることも確認された。
- 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26.69%から30.47%に増加

* 大洗工学センター燃料材料開発部 燃料材料技術開発室

しており、これに伴い中心空孔端で若干の燃焼度増加が認められた。

- 5) 被覆管外表面の性状は、低温部（385℃）で冷却材ナトリウム中からの付着物が多数認められるものの製造時状態を保持している。一方、高温部（585℃以上）では、各元素の腐食、溶出によって形成された表面の凹部が多数認められた。

目 次

1. まえがき	1
2. 供試体	2
2.1 燃料ピンの仕様	2
2.2 被覆管の仕様	2
2.3 燃料の仕様	2
3. 照射履歴	3
4. 試験方法	4
4.1 試料調整	4
4.2 光学顕微鏡による観察	4
4.3 走査型電子顕微鏡による観察	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. 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 画像解析システムによるペレットスエリング評価	7
5.3 SXMAによる燃料内FP及びU, Puの濃度測定	8
5.4 IMAによる燃焼度測定	10
5.5 SEMによる被覆管外表面の観察	10
6. 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	Characteristic of Fuel Pellet	16
Table 4	Irradiation Condition of PFB020 Subassembly from Three to Ten Cycle of "Joyo" MK-II	17
Table 5	Summary Data from Ceramography (Fab.No.PFB020)	18
Table 6	Volume Change of Each Sample from Ceramography	19
Table 7	Calculational Results Conversion Coefficient from Xe-L α Intensity to Xe-Concentration (S/A No.PFD003)	19
Table 8	Results of Calculation on Fission Gas Release Rate in Unrestructured Region and Restructured Region Based on SXMA Measurements	20
Table 9	Results of Radial Burnup Measurement by IMA	21
Table 10	Irradiation Condition of Cladding Outer Surface Examination Samples	22

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Structure of II-Type Fuel Pin (with Tag Gas Capsule) of B-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly	23
Fig. 2	Structure of II-Type Fuel Pin (with Tag Gas Capsule) of B-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly	24
Fig. 3	Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab.No.PFB020) in "Joyo" MK-II	25
Fig. 4	Location of the Fuel Pin (Pin No.A102, Pin No.A104) in the Uninstrumented Fuel Pin II-Type	26
Fig. 5	Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No.A102)	27
Fig. 6	Axial Profile of Burn up (Pin No.A102)	28
Fig. 7	Axial Profile of Linear Heat Rate (Pin No.A102)	29
Fig. 8	Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No.A104)	30
Fig. 9	Axial Profile of Burn up (Pin No. A104)	31
Fig. 10	Axial Profile of Linear Heat Rate (Pin No.A104)	32
Fig. 11	Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No.A103)	33
Fig. 12	Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No.A106)	34
Fig. 13	Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin	35
Fig. 14	Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin	36
Fig. 15	Axial Profile of the Fuel Structure	37
Fig. 16	Axial Profile of the Gap	37
Fig. 17	Pellet Volume Change as a Function of Burnup	38
Fig. 18	Relative Radial Profile of Retained Xe Measured by SXMA	39
Fig. 19	Relative Radial Profile of Retained Xe Measured by SXMA	40
Fig. 20	Relative Radial Profile of Retained C_s, I, X_e Measured by SXMA .	41
Fig. 21	Relative Radial Profile of Retained C_s, I, X_e Measured by SXMA .	42
Fig. 22	Burnup Dependency of Xenon Release Rate in Restructured and Unrestructured Region	43
Fig. 23	Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by SXMA	44

Fig. 24	Axial Distribution of Measured Burnup of PFB020 (Pin No. A104)	45
Fig. 25	Radial Burnup Distribution Measured by the IMA (Specimen No. A10441)	46

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 0-1	Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. A102)	47
Photo. 0-2	Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. A104)	48
Photo. 0-3	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10251) As-Polished ...	49
Photo. 0-4	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A10251) As-Polished	50
Photo. 0-5	Optical Micrograph of the Tranverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10251) As-Etched	51
Photo. 0-6	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A10251) As-Etched	52
Photo. 0-7	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10282) As-Polished	53
Photo. 0-8	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A10282) As-Polished	54
Photo. 0-9	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A102B2) As-Polished	55
Photo.0-10	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A102B2) As-Polished	56
Photo.0-11	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A102B2) As-Etched	57
Photo.0-12	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A102B2) As-Etched	58
Photo.0-13	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10441) As-Polished	59
Photo.0-14	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A10441) As-Polished	60
Photo.0-15	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10441) As-Etched	61
Photo.0-16	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A10441) As-Etched	62

Photo. 0-17	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10472) As-Polished	63
Photo. 0-18	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A10472) As-Polished	64
Photo. 0-19	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A104A2) As-Polished	65
Photo. 0-20	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A104A2) As-Polished	66
Photo. 0-21	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A104A2) As-Etched	67
Photo. 0-22	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. A104A2) As-Etched	68
Photo. S-1	Secondary Electron Micrographs of the Cladding Outer Surface (Pin No. A103, A106)	69

1. まえがき

本試験は、B型特殊燃料集合体PFB020(B2M)として「もんじゅ」の炉心燃料要素とほぼ同一仕様の燃料を「常陽」炉内装荷位置「3C2」にて照射したものである。

B2M燃料要素は、定格最大線出力及びホットスポット温度が「もんじゅ」実機条件に近い条件で照射され、集合体平均燃焼度としては48.300 MWd/tである。照射燃料集合体試験施設(FMF)において各種非破壊検査が実施された後、タグガスの有無の異なる2本の燃料ピンより金相試料を採取した。

本試験では、燃料及び被覆管の照射挙動を把握するため光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、X線マイクロアナライザによる元素分析、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。本報告書は、ADS金相セルにおいて実施した上記試験結果をまとめたものである。

2. 供 試 体

2.1 燃料ピンの仕様

燃料ピンの仕様を Table.1 に示す。燃料ピンの全長及びスタック長は「常陽」照射の制約から「もんじゅ」に比べて短い。ピン径、肉厚、ギャップ幅は、「もんじゅ」仕様にあわせてある。燃料ピンにはタグガスが入っているピンと入っていないピンがあり、それらの概略図を Fig.1 と Fig.2 に示す。今回金相試験を行った A102 ピン (B2M21)* はタグガスが入っており、A104 ピン (B2M27)* にはそのダミーが装填されている。プレナム容積は、両者とも 10.2 cc である。

2.2 被覆管の仕様

被覆管は、「もんじゅ」実機相当の 55 年度試作改良 SUS 316 鋼であり、その製造仕様及び熱処理条件並びに化学成分値を Table.2 に示す。

2.3 燃料の仕様

A102 ピンと A104 ピンに装填されている燃料ペレットのロット No. は、それぞれ TBM-04, TBM-05 である。これらの製造検査結果を Table.3 に示す。

ペレット密度は、「もんじゅ」と同様 85% TD の低密度ペレットであり、O/M 比は TBM-05 では「もんじゅ」仕様 $O/M 1.97 \begin{matrix} +0.02 \\ -0.03 \end{matrix}$ の下限に近い値となっている。

*PIE No. (製造 No.)

3. 照射履歴

特殊燃料集合体 PFB 020 は、「常陽」MK-II 炉内装荷位置「3C2」にて 100 MW 3 サイクルから 10 サイクルの間照射され、集合体平均燃焼度は 48.300 MWd/t である。集合体の炉内装荷位置を Fig.3 に示す。

本集合体は、炉内貯蔵ラック「R-17」に 69 日間 (S.61.6.27~9.3) 冷却保管された後炉外へ取り出され同年 9 月 9 日にキャスクにより、F.M.F. に搬入された。

金相試験に供した燃料ピンは、A102 ピン (タグガス有り K 材) 及び A104 ピン (タグガス無し K 材) であり、被覆管外表面観察は、A103 ピン (K 材)、A106 ピン (S 材) につき実施した。

試験に供した燃料ピンの集合体内位置を Fig.4 に示す。本集合体の照射条件を Table.4 に示す。また、金相試験に供した A102 ピンと A104 ピンの中性子フルエンスと被覆管温度、燃焼度、線出力の軸方向分布をそれぞれ Fig.5~7 及び Fig.8~10 に示す。また、被覆管外表面観察を行った A103 ピンと A106 ピンの中性子フルエンスと被覆管温度の軸方向分布を Fig.11 と Fig.12 に示す。

4. 試験方法

4.1 試料調整

金相試験用燃料ピン A102 と A104 は、照射燃料集合体試験施設 (FMF) において Fig.13 に示すように燃料軸方向中心部から 9mm 長、中間部から 23mm 長、及び上端部インシュレータペレットを含む 17mm の試験片 3 枚に切断した後、これらは気送管により金相セルに搬入された。また、被覆管外表面観察用試料は、A103 と A106 ピンから Fig.14 に示すように燃料ピンの下端と上端部から 2 枚の試料をそれぞれ採取した。

金相セルでは、被覆管外表面観察用試料については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し、走査型電子顕微鏡用試料を作成した。一方、金相断面観察用試料は、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十分樹脂を浸透させた状態で切断した後、ステンレス製埋込みリング (外径 21mm ϕ \times 10mm H) に埋込み研磨した。

研磨は、自動回転研磨機を用いてケロシンを滴下しながら耐水研磨紙による粗研磨後、仕上げ研磨としてラッピングオイルを潤滑剤としてダイヤモンドペーストによる研磨を行った。研磨の終了した試料は、キシレンを用いて超音波洗浄した後、十分乾燥させ As-Polished 状態による観察並びに分析を行った。燃料及び被覆管のエッチングはイオン腐食装置を使用し、その後 As-Etched 状態の組織観察を行った。なお、X線微小分析及び質量分析を行うため試料表面導電処理は、イオン腐食装置を用いた C 及び Au コーティングにより行った。

4.2 光学顕微鏡による観察

組織観察は、高倍率顕微鏡 (FAROM) による 65 倍全体コンポーズ写真撮影、130 倍直径帯状コンポーズ写真撮影、520 倍半径帯状コンポーズ写真撮影、さらに周方向 8 ヶ所の被覆管 130 倍、ギャップ幅 520 倍での写真撮影を As-Polished, As-Etched 状態において行った。燃料横断面写真は、タブレットデジタイザを用いた燃料ピン輪切り解析コード「PINA TD」により画像解析を実施した。画像解析には、主として 65 倍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
- (2) 燃料ペレットの直径、面積
- (3) 被覆管の内径、外径、肉厚
- (4) ペレット内のクラックの数、面積、パターン
- (5) 柱状晶、等軸晶等各領域の外径及び面積

4.3 走査型電子顕微鏡による観察

A103 ピン (K材) 及び A106 ピン (S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
- プローブ電流 : $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-10}$ A
- 観察像 : 二次電子像 (SEI)
- 写真倍率 : $\times 240 \sim \times 8000$

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) を用いて元素分析を実施した。測定内容は, ペレット径方向保持 Xe, Cs 及び I の分布測定と U, Pu の再分布である。分析条件は以下に示すとおりである。

- 加速電圧 : 25 Kv
- ビーム電流 : 50 nA (Xe, I の分析時 1 μ A)
- ビーム径 : $\phi 1 \mu\text{m}$ 以下 (Xe 分析時 $\phi 50 \mu\text{m}$)
- カウンター : ガスフロー比例計数管
- 分光結晶 : LiF, PET

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。測定条件を以下に示す。

測定内容 条件	燃料内 1 箇所測定	燃料内ペレット径方向の測定
使用条件	O ₂	←
一次イオン加速電圧	15 Kv	←
一次イオンスポット径	$\phi 600 \mu\text{m}$	$\phi 250 \mu\text{m}$
二次イオン加速電圧	3 Kv	←
質量測定範囲	M/Z 1 ~ 300	←
カソード電極	Ni カソード	←
深さ方向測定回数	10 回	5 回

5. 結果と考察

5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察

Photo. 0-1 と Photo. 0-2 に A102 ピン（タグガス有り）と A104 ピン（タグガス無し）の金相マイクロ写真を示す。各試料の特徴は以下のとおりである。

(1) 試料 No. A10251（輪切り，炉心燃料中央部 $X/L = 0.5$ ）

本試料は，炉心燃料中央部の試料であり，その As-Polished 状態及び As-Etched 状態における燃料組織を Photo. 0-3，0-4 及び Photo. 0-5，0-6 に示す。燃料中央部には，製造時ボイドと F P ガスの中心部へのスweepによって形成された柱状晶と中心空孔が認められ，そのまわりに等軸晶が観察される。等軸晶は，粒界に F P ガスバブルが集積しているガスバブル領域と粒成長に伴い粒界コーナー部に F P ガスが集まりだしている高密度化領域に分けられる。ペレット外周部の不変領域には微細な気泡の析出が観察され，これらは F P ガス気泡と考えられる。このようなガススエリングによるペレットの体積増加によって，燃料-被覆管のギャップは閉塞しており，照射中には燃料と被覆管の機械的相互作用が生じていたものと推察される。

(2) 試料 No. A10282（輪切り $X/L = 0.76$ ）

Photo. 0-7，0-8 に As-Polished 状態における顕微鏡写真を示す。燃料組織は，試料 No. A10251 とほぼ同様であるが，中心空孔径が小さく， $27.6 \mu\text{m}$ のギャップ幅（半径）が認められる。また，最大腐食量は， $14 \mu\text{m}$ であった。

(3) 試料 No. A102B2（輪切り $X/L = 1.0$ ）

本試料は，上部インシュレータペレットとの境界部近傍の試料であり，その As-Polished 状態及び As-Etched 状態の燃料組織を Photo. 0-9，0-10 及び Photo. 0-11，0-12 に示す。燃料中央部には粒成長と粒界への F P ガスバブルの析出によってできたガスバブル領域が観察されるが，中心空孔は形成されていない。径方向の平均ギャップ幅は， $58.7 \mu\text{m}$ であり，ギャップ部には F P との反応生成物が観察される。被覆管内面には，全面腐食が生じており最大腐食量は， $14 \mu\text{m}$ であった。

(4) 試料 No. A10441（輪切り 炉心燃料中央部 $X/L = 0.55$ ）

本試料は，炉心燃料中央部の試料であり，As-Polished 状態及び As-Etched 状態における顕微鏡写真を Photo. 0-13，0-14 と Photo. 0-15，0-16 に示す。燃料組織は，試料 No. A10251 と同様であり，径方向のギャップ幅も閉塞している。また，ギャップ部には，F P との反応生成物が観察され，被覆管内面は全面腐食が観察された。最大腐食量は $3 \mu\text{m}$ であった。

(5) 試料No. A10472 (輪切り $X/L = 0.76$)

Photo. 0-17, 0-18 に As-Polished 状態の光顕写真を示す。燃料組織は、A10441 と同様である。また、径方向のギャップ幅は、 $14.4 \mu\text{m}$ でギャップ部には FP との反応生成物と一部剥離による白色金属が観察された。被覆管内面は、全面腐食が観察され、最大腐食量は $6 \mu\text{m}$ であった。

(6) 試料No. A104A2 (輪切り $X/L = 1.0$)

本試料は、上部インシュレータペレットとの境界部近傍の試料であり As-Polished 状態及び As-Etched 状態の光顕写真を Photo. 0-19, 0-20 と Photo. 0-21, 0-22 に示す。燃料組織は、試料No. A102B2 と同様である。また、径方向の平均ギャップ幅は、 $62.6 \mu\text{m}$ でありギャップ部には FP との反応生成物が観察される。被覆管内面は、全面腐食が生じており、最大腐食量は $11 \mu\text{m}$ であった。

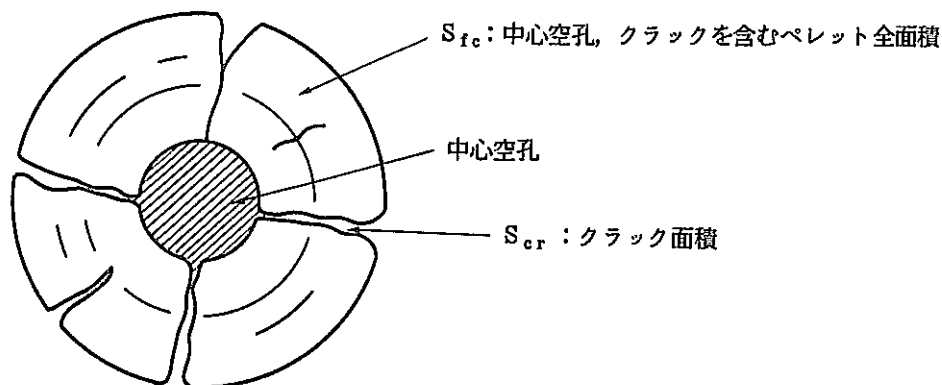
なお、各試料について測定した中心空孔径、等軸晶領域、柱状晶領域直径及び残留ギャップ幅半径を Table. 5 に示す。また、これらの燃料カラム軸方向分布を Fig.15 及び Fig.16 に示す。

5.2 画像解析システムによるペレットスエリング評価

タブレットデ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^0) 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)

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

12) 結 果

Table.6 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.17に示す。

照射によるペレット体積は，一端焼き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 35,000 MWd/t の試料A10B2 では，焼き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（-0.69%）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 62,000 MWd/t の試料A10251 では 5.12%の体積増加が認められた。

5.3 SXMAによる燃料内FP及びU, Puの濃度測定

5.3.1 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 2 at%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/ cm^3 ）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き出し $(7.597 \times 10^{-6}) + (3.5539 \times 10^{-8}) \times (\text{Count})$ モル/ cm^3 を得た。Table.7 に使用した標準試料の燃焼度，Xe生成濃度，XeL α 強度値を示す。

実際の測定試料であるPFB020の照射済燃料も，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/ cm^3 ）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，ピン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），これとピン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割合を算出した。A102ピンにおいては、SXMAで求めたピンあたりのXe保持量は 1.5126×10^{-3} である。また、ピンあたりのXe生成量(5.86×10^{-3} モル)とピンバンクチャーにより求めたFP放出率(51.75%)から求めたピンあたりの総Xe保持量は 2.827×10^{-3} モルである。従ってSXMAにより求めたXe保持量に 1.869^{**} を乗じることにより

$$\left(1.869^{**} = \frac{5.86 \times 10^{-3} (1 - 0.5175)}{1.5126 \times 10^{-3}} \right)$$

総保持量のペレット内分布を求めることが可能となる。

一方、A104ピンにおいては、SXMAで求めたピンあたりのXe保持量は 1.7128×10^{-3} モルである。また、ピンあたりのXe生成量(5.635×10^{-3} モル)とピンバンクチャーにより求めたXe放出率(49.93%)から求めたピンあたりの総Xe保持量は 2.821×10^{-3} モルである。従ってSXMAにより求めたXe保持量に 1.647^{*1} を乗じることにより

$$\left(1.647^{*1} = \frac{5.635 \times 10^{-3} (1 - 0.4993)}{1.7128 \times 10^{-3}} \right)$$

総保持量のペレット内分布を求めた。

また、I, Csの測定はCsL α 特性X線強度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) Fig.18とFig.19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(A10251, A10282及びA10441, A10472)では、等軸晶領域よりXe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(A102B2, A104A2)では、等軸晶領域において徐々にXeが放出されていることが認められる。

Fig.20とFig.21にペレット内に保持されているCs, I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(Cs, IはX線強度値)のペレット内径方向分布は、Xe分布と同様な傾向を示すことから、これらの元素のペレット放出形態は互いに類似していると考えられる。

2) 不変領域及び組織変化領域でのFPガス放出挙動

Table.8に不変領域と組織変化領域におけるXeの放出率測定結果を示す。Fig.22にはXeの放出率を燃焼度に対し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あたりから生じ、燃焼度が約60,000~62,000 MWd/t

の試料では、約10%～13%の放出があることがわかる。一方、組織変化領域では、全試料とも70%～90%弱の放出があり、等軸晶と柱状晶で大きな違いはない。

5.3.2 燃料径方向のU, Puの濃度測定

燃料径方向に約100 μ m間隔でU, Puの定量分析を実施した。Fig.23に燃料ピン軸方向ピーク燃焼度位置試料(A10251)の測定結果を示す。ペレット中心空孔近傍でPu濃度が製造時の29.67%から30.47%と若干増加していることが確認された。

5.4 IMAによる燃焼度測定

1) 測定方法

燃料ペレットの燃焼度測定は、ペレット径方向中間部に約1mm ϕ 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¹⁴⁵Ndの二次イオン強度の平均値IU, IPu, INdから求めた。また、ペレット径方向燃焼度分布は、ビーム径を約250 μ m ϕ に絞り、燃料外表面から中心部まで9点測定することにより求めた。

燃焼度(atom%)は、以下の算出式を用いた。

$$\text{燃焼度 (atom\%)} = \frac{INd / (\alpha Nd / U \times fNd)}{(IU + IPu / \alpha Pu / U) + \{ INd / (\alpha Nd / U \times fNd) \}} \times 100$$

$\alpha Pu / U$ …… Uに対するPuのイオン化効率比(1.9010)

$\alpha Nd / U$ …… Uに対するNdのイオン化効率比(3.8796)

fNd …… ¹⁴⁵Ndの核分裂収率(0.0325)

2) 測定結果

各試料の燃焼度測定結果とペレット半径方向の燃焼度測定結果(試料No.A10441)をTable 9に示す。また、燃料カラム軸方向3ヶ所で測定した結果を「ESPRIT-J」コードによる計算値と比較してFig.24に示す。ピーク燃焼度は、およそ6.45 atom%となり、計算値と良い一致を示す結果が得られた。次に試料No. A10441のペレット半径方向位置に対しプロットした関係をFig.25に示す。半径方向燃焼度は、等軸晶領域から柱状晶領域に向かって低下し、中心部(中心空孔近傍)で増加している。これは、Puの再分布による核分裂密度の変化を反映したものと考えられる。

5.5 SEMによる被覆管外表面の観察

ピンNo. A103(K材)及びA106(S材)の軸方向位置から各2ヶの試料を採取し、被覆管外表面の性状を観察した。各試料のピン下端からの位置及び被覆管外表面温度をTable.10に示す。

Photo. S-1 に外表面の走査型電子顕微鏡観察結果を示す。A103 ピンの低温部 385℃では、約 0.4～1.0 $\mu\text{m}\phi$ の微粒子が均一に付着しているものの、K材特有の製造時状態を保持している。また、高温部 590℃では、母材表面に腐食、溶出により発生した凹部が多数観察された。一方、A106 ピンの低温部 385℃では、A103 ピンの低温部と同様に微粒子が均一に母材に付着し、S材特有の製造時加工跡も明瞭に観察される。また、高温部 585℃では、表面状態が一変し、母材表面に腐食、溶出により発生した凹部が多数観察され、周辺には腐食ピットが均一に形成されている。

6. 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 1.2 mm 径）と柱状晶が観察された。ギャップ幅は、閉塞しており照射中に機械的相互作用（FCMI）が生じていたと推測されるが燃料ピンは、健全であった。また、タグガス封入の有無による燃料組織に及ぼす影響は、ほとんど無いと判断された。なお被覆管内面腐食量は、最大 14 μm （被覆管内面温度 600°C）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 5.12% であり、焼きしまり状態からスエリングによる体積増加が認められた。
- 3) 燃料内に保持されている Xe, Cs は、不変領域でほぼ一定に保持されているが、等軸晶領域において放出が開始されていることが確認された。また、I は、燃料内においてほぼ一定に保持されていることも確認された。
- 4) 燃料カラム軸方向中心部の中心空孔端で Pu 濃度が 29.67% から 30.47% に増加しており、これに伴い中心空孔端で若干の燃焼度増加が認められた。
- 5) 被覆管外表面の性状は、低温部（385°C）で付着物が多数認められるものの製造時状態を保持している。一方、高温部（585°C 以上）では、各元素の腐食、溶出による凹部が多数認められた。

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）の松島室長を始めとする関係室員に、また放射線管理にあたっては、安全管理部放射線管理課の大内忍係長を始めとする係員に御支援いただいた。また、試験遂行に際しては、原子力技術欄の大里行弘、額賀貞芳の両氏並びに原子力システム欄の根本潤一氏に御支援をいただきましたことを付記し、これらの方々に感謝の意を表わします。

8. 参考文献

- 1) 清水ら, 「常陽」炉心要素照射評価システムの整備 (ESPRIT-J) ST 901 83-01
- 2) 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 SN941 85-141
- 3) 杉山ら, 「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD003) の照射後試験(2) PNC 1941 85-05
- 4) 櫛田ら, 「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD001) の照射後試験(2) PNC I 9410 87-004
- 5) 鶴飼ら, 「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD029) の照射後試験 PNC I 9410 87-008

Table 1 Specification of Fuel Pin

項	目	
全	長 (mm)	1765.0 ± 2
ペレットスタック長	(mm)	500 ± 5
被覆管外径	(mm)	6.500 ± 0.030
被覆管内径	(mm)	5.5600 ± 0.025
被覆管肉厚	(mm)	0.47 ± 0.030
ギャップ幅	(μm)	170
ワイヤー巻付ピッチ	(mm)	285 ± 20

Table 2 Chemical Composition of Cladding Material

	COLD WORK (%)	CHEMICAL COMPOSITION (W/O)																	
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Cu	Ti	V	Nb+ Ta	Zn	As	Al
SPEC	20	0.045 ? 0.085	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.010	13.00 ? 14.00	16.00 ? 18.00	2.00 ? 3.00	≤0.10	≤0.0100	≤0.010	≤0.20	≤0.10	≤0.20	≤0.10	≤0.10	≤0.010	≤0.050
KOBE STEEL	20	0.051	0.78	1.81	0.032	0.010	13.69	16.26	2.53	<0.01	<0.0035	0.003	-	0.08	-	0.080	-	-	-
SUMITOMO STEEL	20	0.046	0.87	1.75	0.037	0.005	13.80	16.33	2.57	<0.01	<0.0036	0.009	-	0.10	-	0.074	-	-	-

Table 3 Characteristic of Fuel Pellet

項	目	ペレットロット TBM-04	ペレットロット TBM-05
炉 心 ペ レ ッ ト	PuO ₂ / PuO ₂ + UO ₂ (wt%)	30.23	29.82
	O / M	1.97	1.95
	外 径 (mm)	5.4	5.4
	高 さ (mm)	8	8
	²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	8.17	8.17
	理 論 密 度 (g/cm ³)		
	相 対 密 度 (%T・D)	85	85
イ ベ ン シ レ ュ レ ッ ト	外 径 (mm)	5.4 ± 0.05	←
	高 さ (mm)	8 ± 1	←
	²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	0.2	←
	理 論 密 度 (g/cm ³)	10.96	←
	相 対 密 度 (%T・D)	94	←
	スタック長 (mm)	550 ± 5	←

Table 4 Irradiation Condition of PFB020 Subassembly from Three to Ten Cycle of "Joyo" MK-II

集合体番号 PFB 020

サ イ ク ル			3	4	5	6	7	7' & 7"	8	9	10	
装 荷 位 置			3 C 2					R 17	3 C 2	3 C 2		
燃 焼 度	ポイント最大		MWD / T							52.400	59.400	
	集合体平均		MWD / T	6600	12800	18800	25000	31000	—	36900	42500	48300
積算中性子照射量	En ≥ 0.1 MeV	ポイント最大	× 10 ²⁰ n/cm ²	92.5	192	287	474	479	—	575	668	795
		集合体平均	× 10 ²⁰ n/cm ²	76.3	150	224	370	373	—	448	521	597
	Total	ポイント最大	× 10 ²⁰ n/cm ²	138	287	428	713	717	—	861	997	1146
		集合体平均	× 10 ²⁰ n/cm ²	115	227	339	564	566	—	681	792	907
線 出 力	B O C	ポイント最大	W / cm								313	307
		集合体平均	W / cm	293	287	285	277	274	—	272	269	264
	E O C	ポイント最大	W / cm								310	304
		集合体平均	W / cm	294	289	285	278	274	—	274	271	265
被覆管最高温度	B O C		°C									
	E O C		°C									
燃料最高温度	B O C		°C									
	E O C		°C									
集合体出口温度	B O C		°C	462	462	461	458	457	—	459	458	456
	E O C		°C	463	462	461	459	458	—	459	458	456
ピーキング係数	B O C	径 方 向	—									
		軸 方 向	—	1.181	1.178	1.176	1.175	1.172	—	1.165	1.164	1.164
	E O C	径 方 向	—									
		軸 方 向	—	1.161	1.164	1.161	1.161	1.158	—	1.147	1.146	1.164
冷却材流量	B O C		kg / sec	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0		4.0	4.0	4.1
	E O C		kg / sec	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0		4.0	4.0	4.1
備 考												

Table 5 Summary Data from Ceramography (Fab.No.PFB020)

PIN No.	Specimen No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Clad Dia (mm)		Fuel Outer Dia (mm)	Restructured Region Dia (mm)				Residual Dia Gap Size (μ m)
			Outer	Inner		Centrel Void	Colmmar Region	Gas Bable Region	Densifed Region	
A 102	A10251	709.8	6.508	5.589	5.585	1.181	3.144	4.070	—	2.0
	A10282	854.0	6.493	5.587	5.479	0.657	2.389	4.475	—	27.6
	A102B2	984.9	6.499	5.591	5.475	—	—	3.380	—	58.0
A 104	A10441	737.2	6.502	5.589	5.539	1.195	3.404	4.266	—	0.0
	A10472	854.2	6.502	5.578	5.529	0.699	2.537	4.677	—	14.4
	A104A2	984.5	6.498	5.583	5.453	—	—	3.691	—	62.6

Table 6 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 102	A10251	361	62.300	22.817	24.257	0.66024	5.12
	A10282	304	52.000	22.792	23.654	0.752	0.72
	A102B2	194	35.500	22.75	23.471	0.82603	-0.69
A 104	A10441	354	60.700	23.013	24.258	0.71747	3.43
	A10472	293	51.900	22.699	24.083	1.0378	2.28
	A104A2	183	34.800	22.733	23.399	0.66891	-0.02

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

S° : 製造時ペレット面積

S_{fc} : 中心空孔, クラックを含むペレット面積

S : 照射後ペレット面積 ($S = S_{fc} - S_{cr}$)

S_{cr} : クラック面積

Table 7 Calculational Results Conversion Coefficient from Xe-L α Intensity to Xe-Concentration (S/A No.PFD003)

Specimen No	70A644	70A662	70A682
Burn up (atom %)	1.775	1.436	1.017
Xe Concentration (mol/cm ³)	1.538×10^{-4}	1.239×10^{-4}	0.8814×10^{-4}
Xe-L α Intensity at Pellet Rim (Counts)	4088	3320	2247
(mol/cm ³)	$(7.597 \times 10^{-6}) + (3.5539 \times 10^{-8}) \times \text{Counts}$		

Table 8 Results of Calculation on Fission Gas Release Rate in
Unrestructured Region and Restructured Region Based
on SXMA Measurements

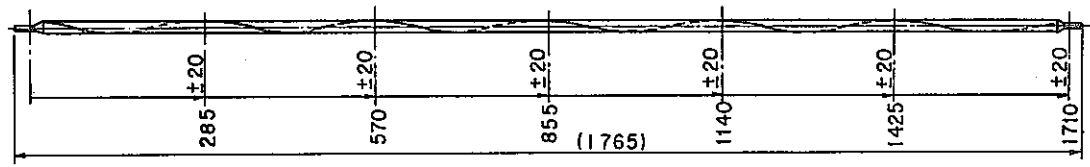
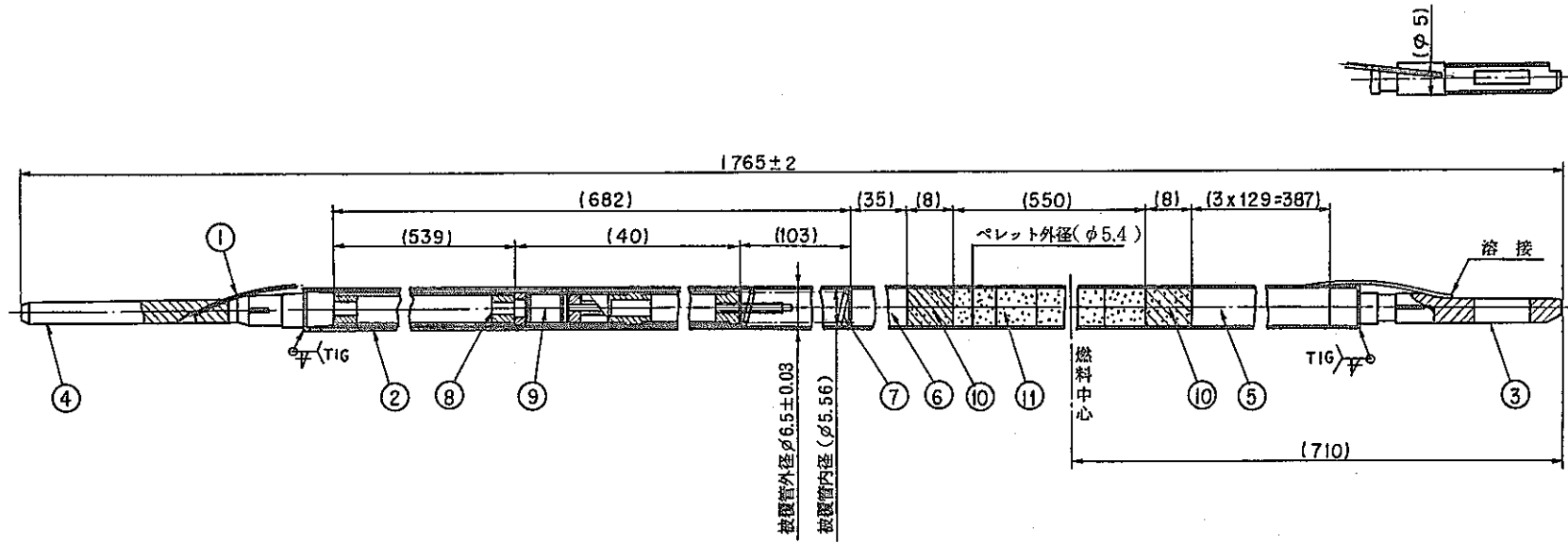
試験名	試料 No.	燃 焼 度 at % (MWd/t)	Xe 生成濃度 理 論 値 (モル/cc)	不 変 領 域		組 織 変 化 領 域	
				Xe 保持濃度 (モル/cc) <放出率 (%)>	補正後Xe保持濃度 (モル/cc) <放出率 (%)>	Xe 保持濃度 (モル/cc) <放出率 (%)>	補正後Xe保持濃度 (モル/cc) <放出率 (%)>
PFB 020	A10251	6.608 (62381)	5.367×10^{-4}	2.588×10^{-4} < 51.8 >	4.837×10^{-4} < 9.9 >	2.961×10^{-5} < 94.5 >	5.534×10^{-5} < 89.7 >
	A10282	5.566 (52143)	4.521×10^{-4}	2.057×10^{-4} < 54.5 >	3.845×10^{-4} < 14.9 >	3.575×10^{-5} < 92.1 >	6.682×10^{-5} < 85.2 >
	A102B2	3.83 (35595)	3.111×10^{-4}	2.021×10^{-4} < 35.0 >	3.777×10^{-4} < - 21.4 >	2.986×10^{-5} < 90.4 >	5.580×10^{-5} < 82.1 >
	A10441	6.412 (60714)	5.11×10^{-4}	2.690×10^{-4} < 47.4 >	4.431×10^{-4} < 13.4 >	5.005×10^{-5} < 90.2 >	8.243×10^{-5} < 83.9 >
	A10472	5.479 (51905)	4.366×10^{-4}	2.872×10^{-4} < 34.2 >	4.730×10^{-4} < - 8.3 >	4.512×10^{-5} < 89.7 >	7.431×10^{-5} < 83.0 >
	A104A2	3.67 (34881)	2.925×10^{-4}	1.802×10^{-4} < 38.4 >	2.968×10^{-4} < - 1.5 >	4.469×10^{-5} < 84.7 >	7.361×10^{-5} < 74.8 >

Table 9 Results of Radial Burnup Measurement by IMA

Sample No.		Secondary Ion Intensity			B.U (atom%)
		145 (INd)	251+254 (IU)	255+256 (IPu)	
A 10441		66684	5611745	3916111	6.45
A 10472		75525	7700015	5248733	5.42
A 104A2		46519	7429667	5867463	3.39
A 10441	Fuel	84285	7009716	4020168	6.82
	Outer	75081	6533465	3848308	6.51
		70578	5727976	3469062	6.89
		70141	5643506	3231493	7.04
		67971	6769948	4261813	5.64
		64924	6244018	3685857	5.94
		56731	5181588	2872122	6.30
	Fuel	55399	5503296	3304198	5.72
	Center	62832	5038172	2730983	7.17

Table 10 Irradiation Condition of Cladding Outer Surface
Examination Samples

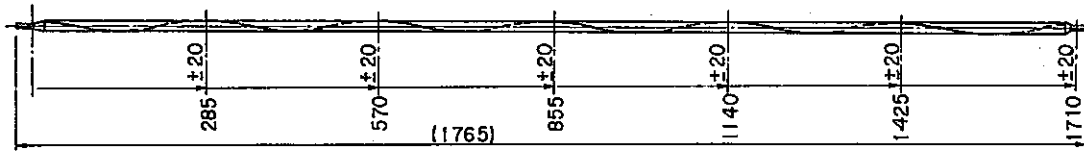
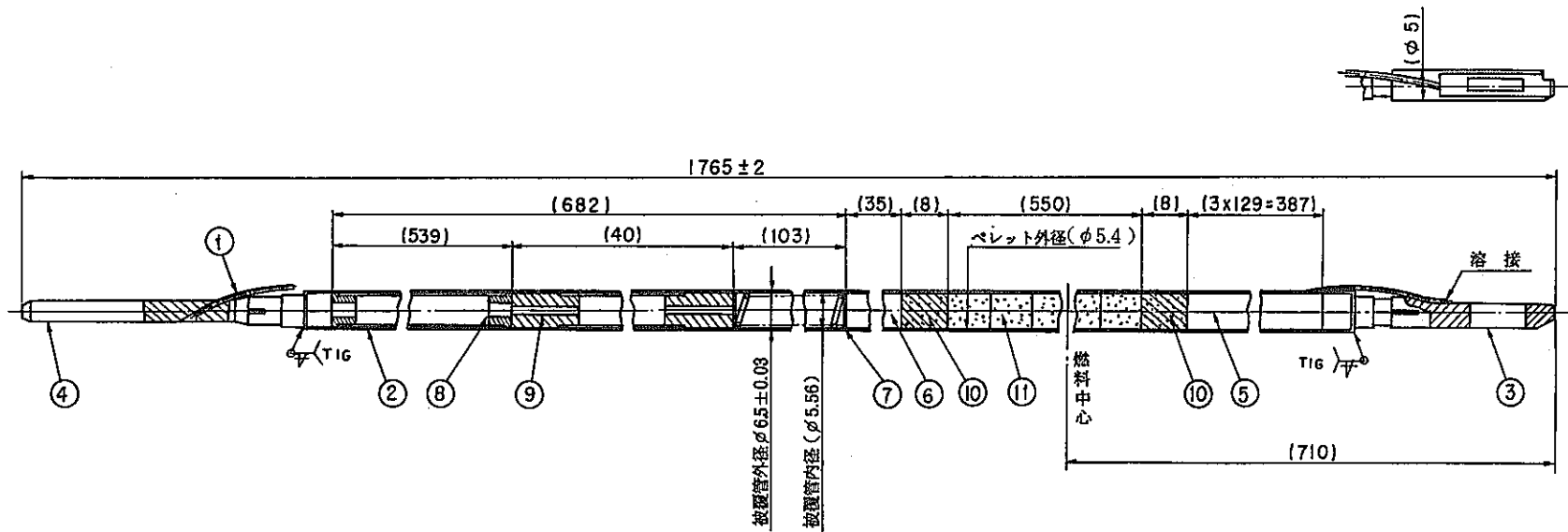
Specimen No	Position D.F.P.B (mm)	Cladding Outer Temperature (°C)	Pin Lot No
A1032	429.5	385	K Tube
A103C2	1,034.7	590	
A1062	429.5	385	S Tube
A106A2	1,034.6	585	



ラッピングワイヤ配置図(1/5)

11	燃料プレート	PuO ₂ -UO ₂		
10	インシュレータペレット	劣化 UO ₂	2	
9	タグガスカプセル			
8	節工板付プレナムスリーブ (1, 2, 3)	SUS316	1	
7	プレナムスプリング	SUS304WPB	1	
6	要素反射体(上)	SUS316相当	1	
5	要素反射体(下)	SUS316相当	3	
4	下部端栓	SUS316相当	1	
3	上部端栓	SUS316相当	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	φ1 ± 0.01
品番	品名	材質	個数	備考

Fig. 1 Structure of II-Type Fuel Pin (with Tag Gas Capsule) of B-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly



ラッピングワイヤ配置図 (1/5)

11	燃料ペレット	PuO ₂ -UO ₂		
10	インシュレータペレット	劣化 UO ₂	2	
9	タグガスカプセルグミ	SUS316	1	
8	加工板付プレナムスリーブ (1), (2), (3)	SUS316	1	
7	プレナムスプリング	SUS304WPB	1	
6	要素反射体 (上)	SUS316相当	1	
5	要素反射体 (下)	SUS316相当	3	
4	下部端栓	SUS316相当	1	
3	上部端栓	SUS316相当	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	φ1 ± 0.01
品番	品名	材質	個数	備考

Fig. 2 Structure of II-Type Fuel Pin (without Tag Gas Capsule) of B-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly

炉内照射位置

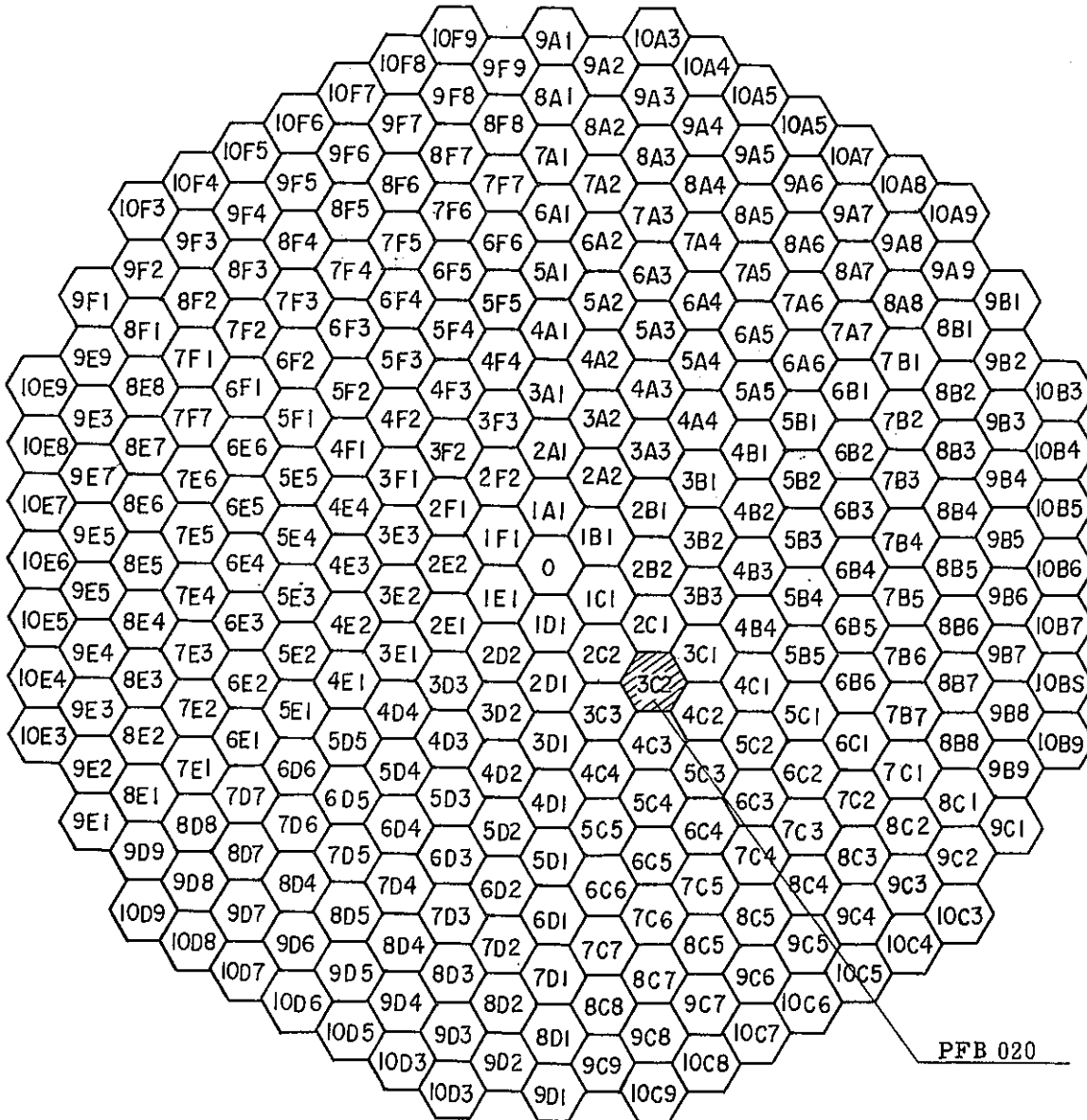


Fig. 3 Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab.No.PFB020) in "Joyo" MK-II

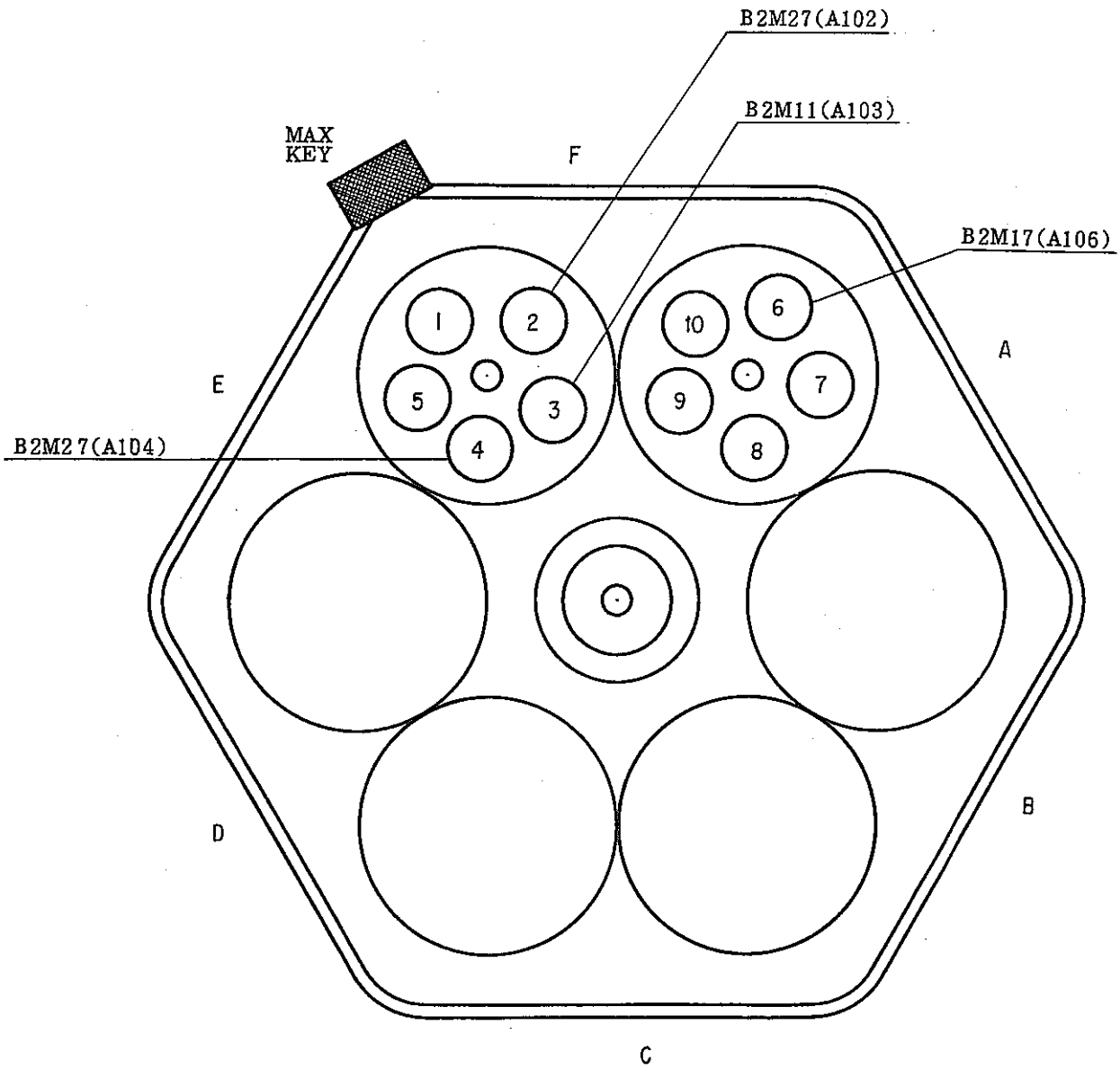


Fig. 4 Location of the Fuel Pin (Pin No.A102, Pin No.A104) in the Uninstrumented Fuel Pin II-Type

S/A FAB NO. : PFB020 PIN NO. : 02

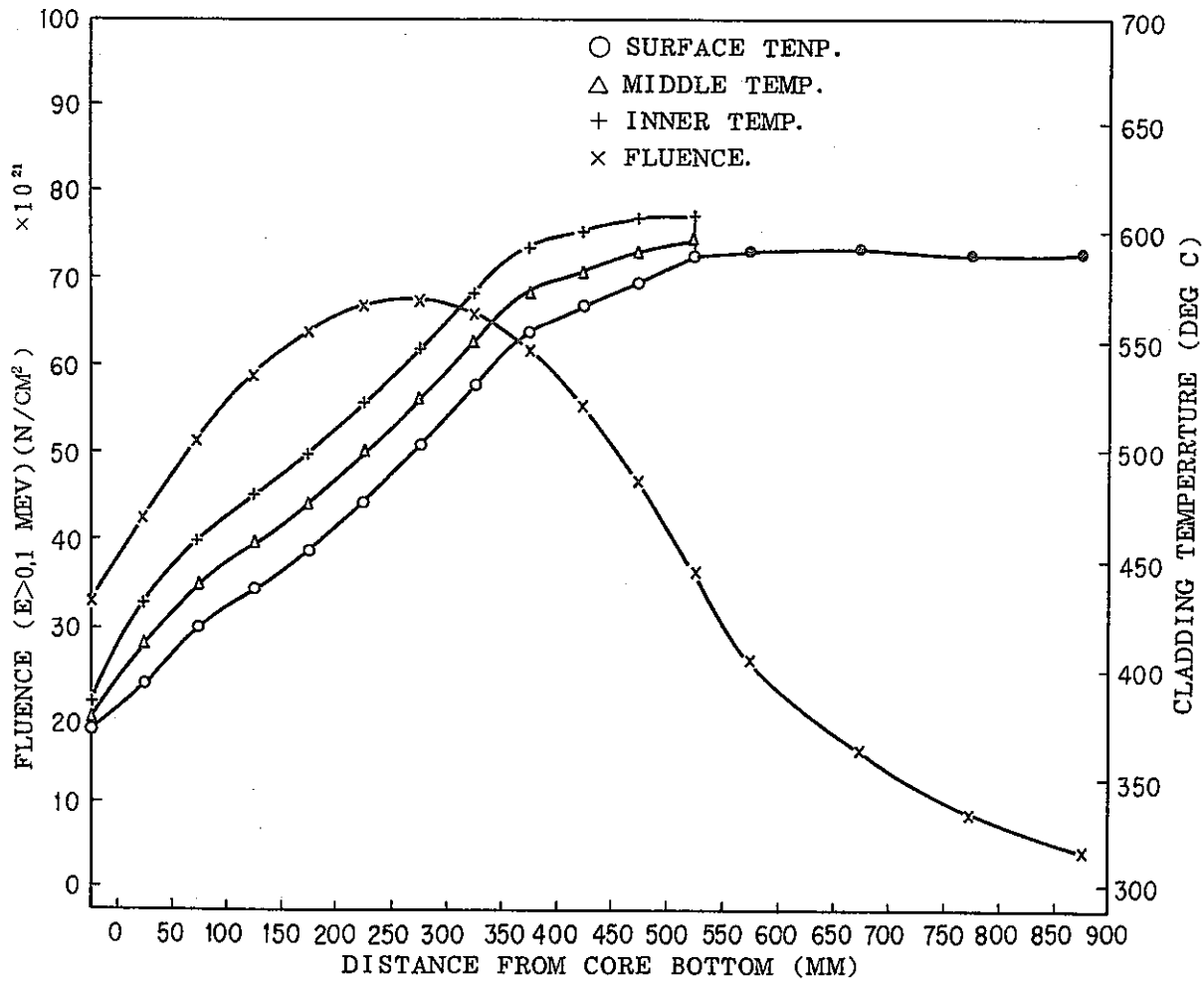


Fig. 5 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature
 (Pin No. A102)

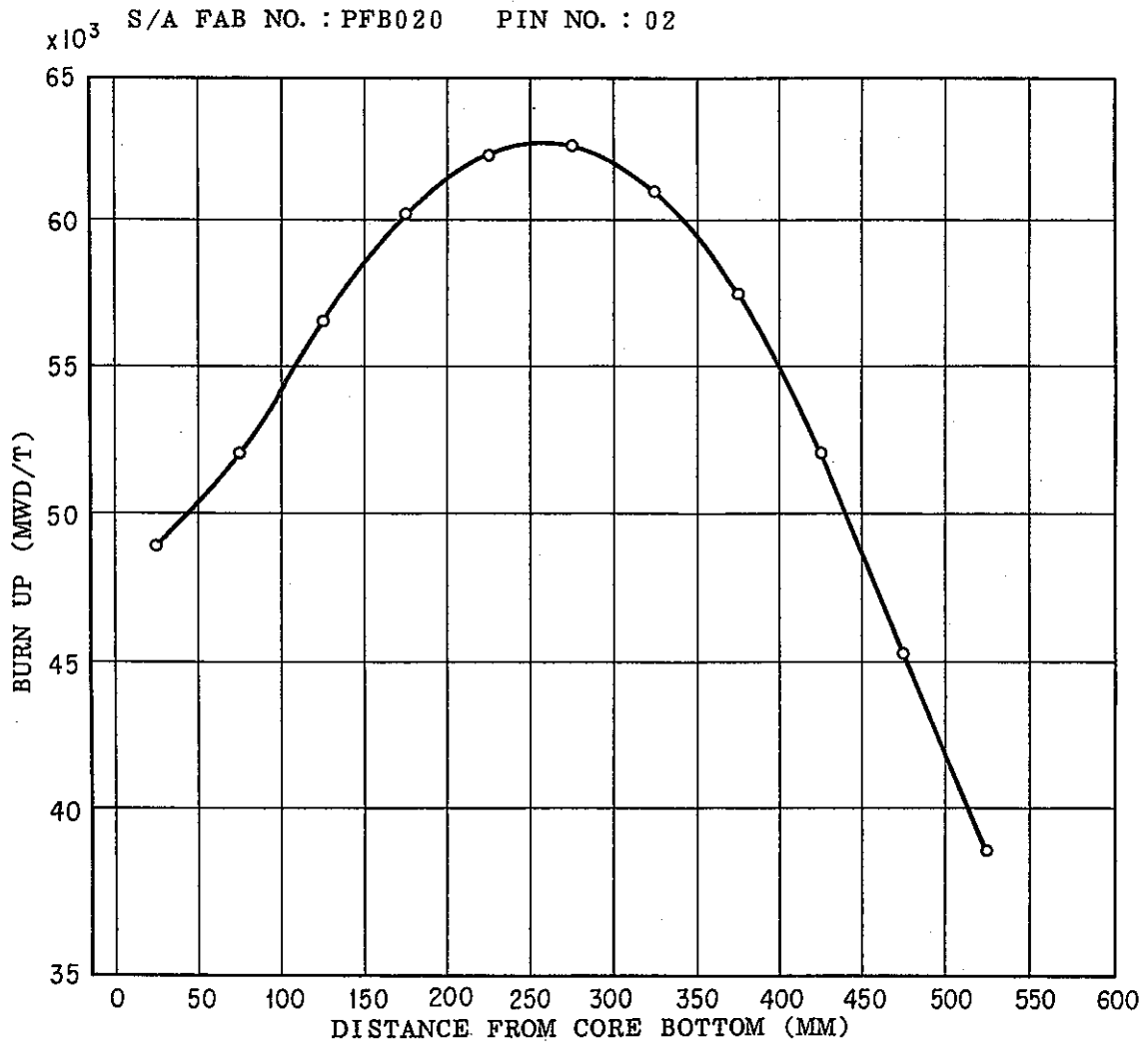


Fig. 6 Axial Profile of Burn up (Pin No.A102)

S/A FAB NO. : PFB020 PIN NO. : 02

MAX ○ EOL △

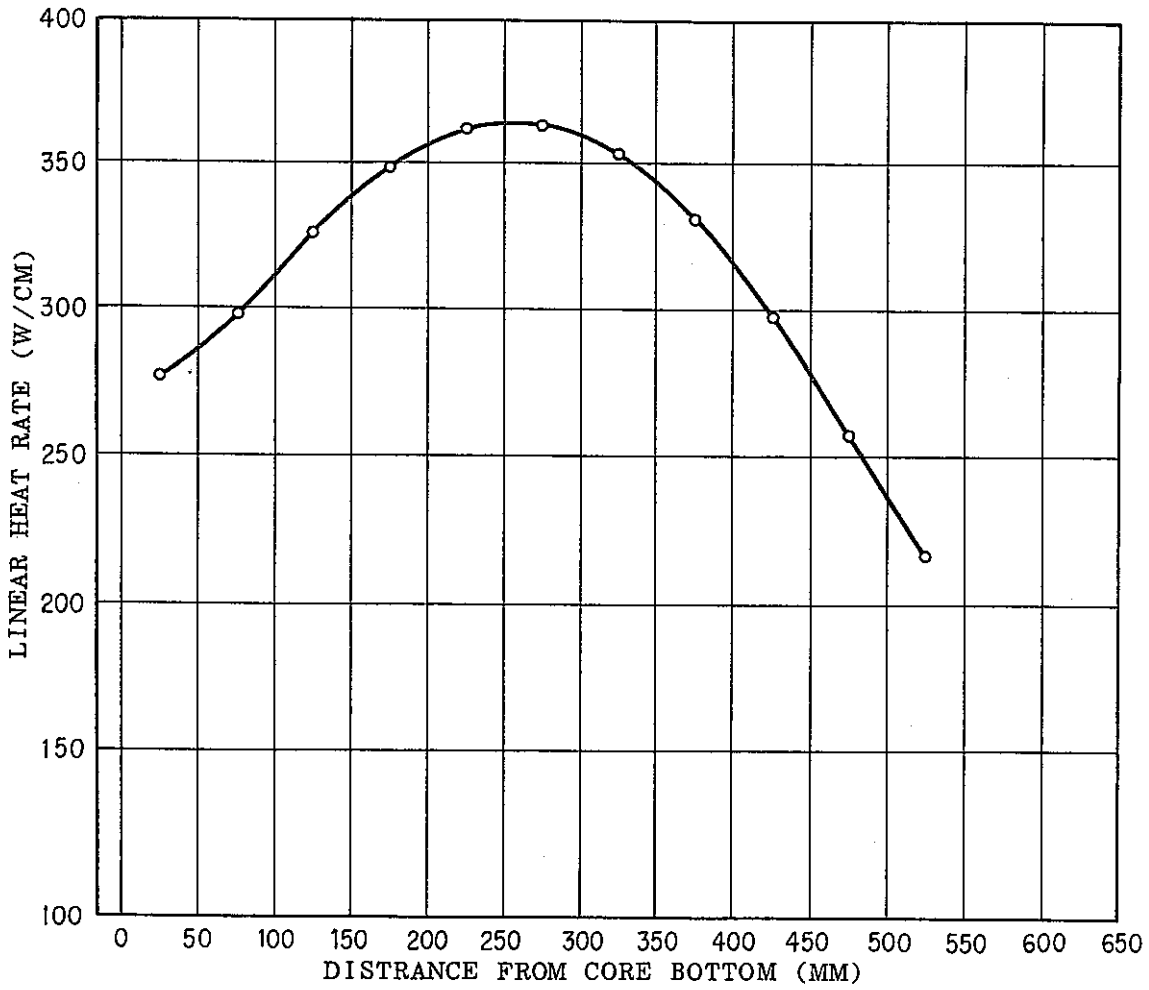


Fig. 7 Axial Profile of Linear Heat Rate (Pin No.A102)

S/A FAB NO. : PFB020 PIN NO. : 04

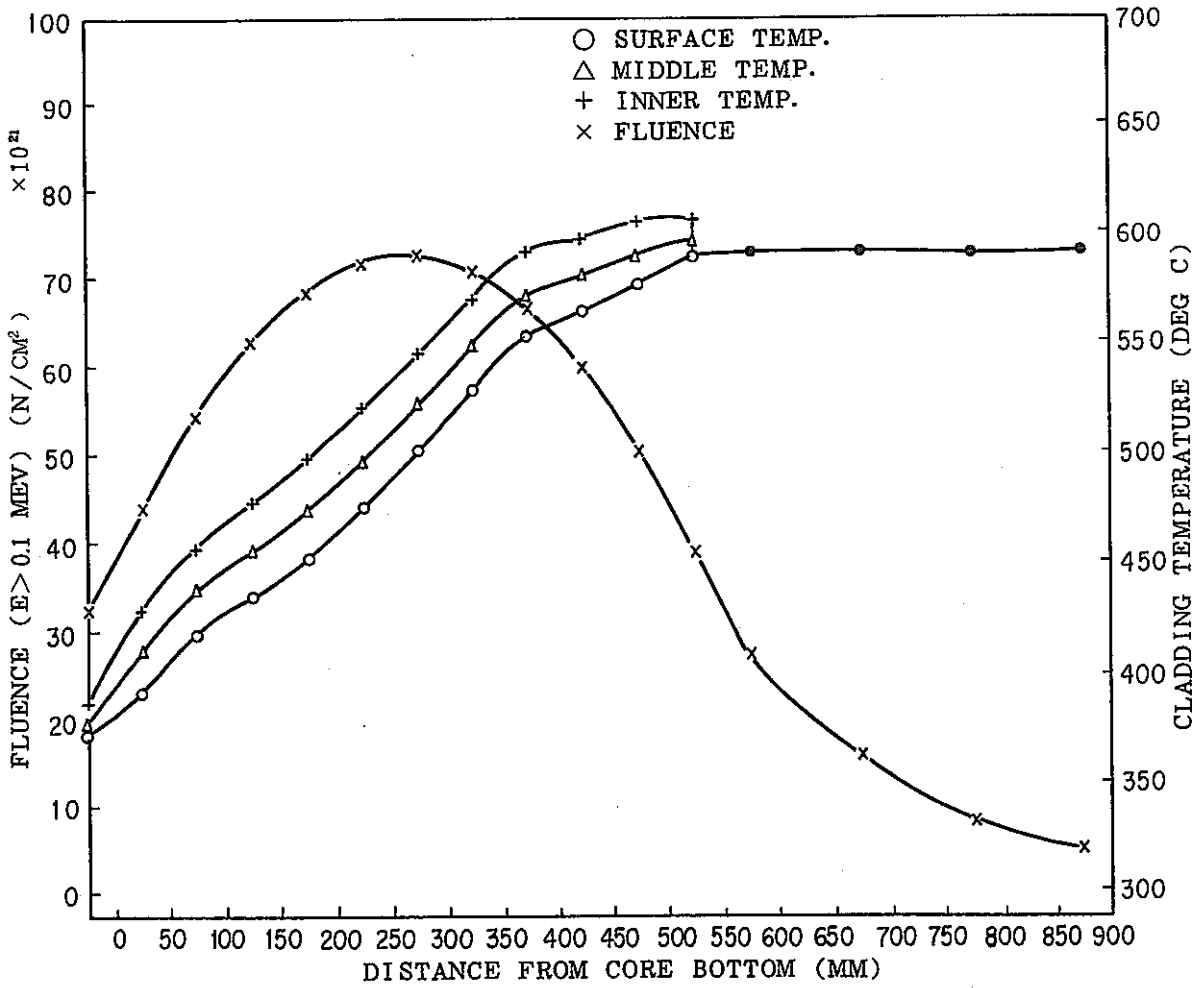


Fig. 8 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature
 (Pin No. A104)

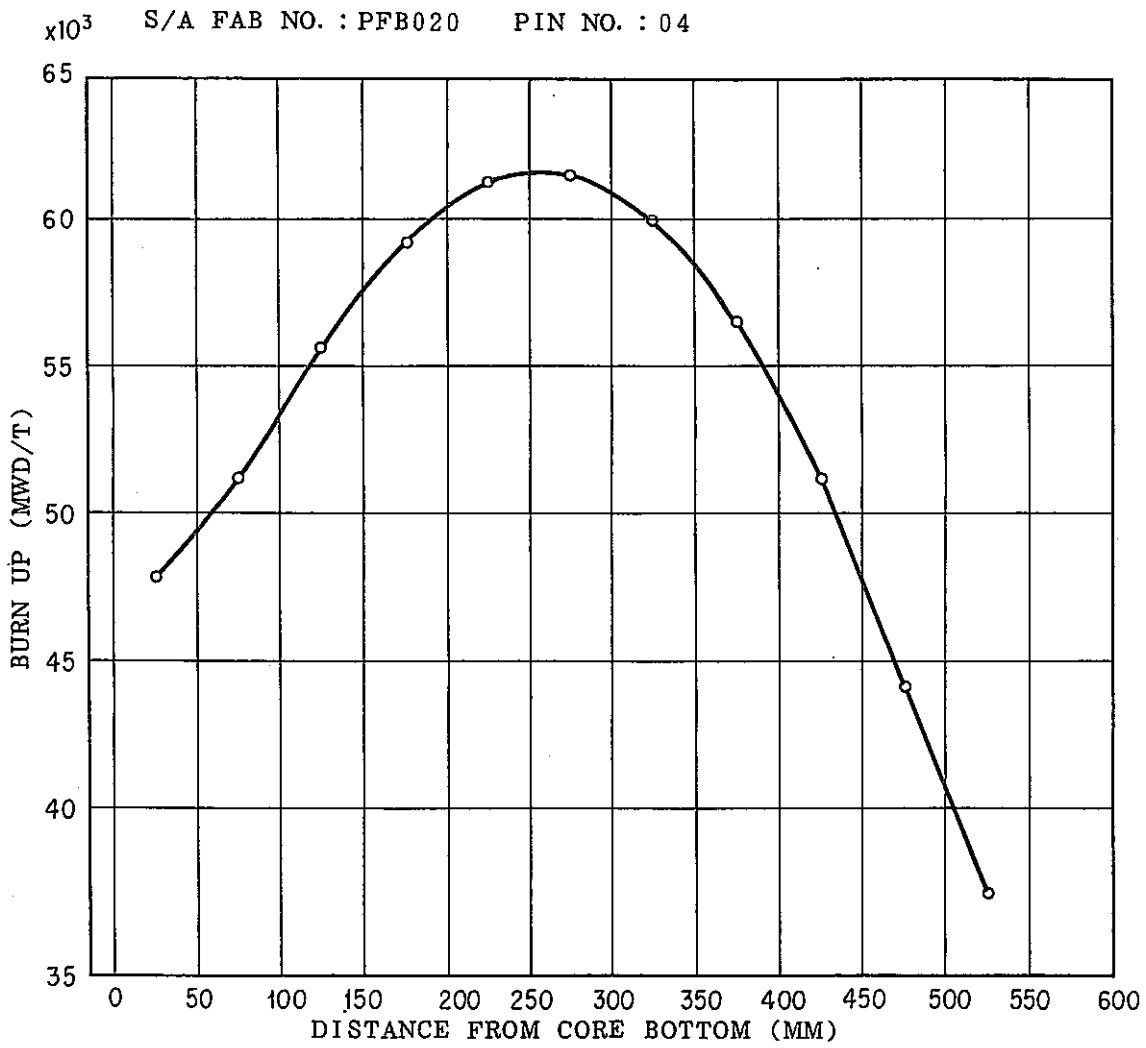


Fig. 9 Axial Profile of Burn up (Pin No. A104)

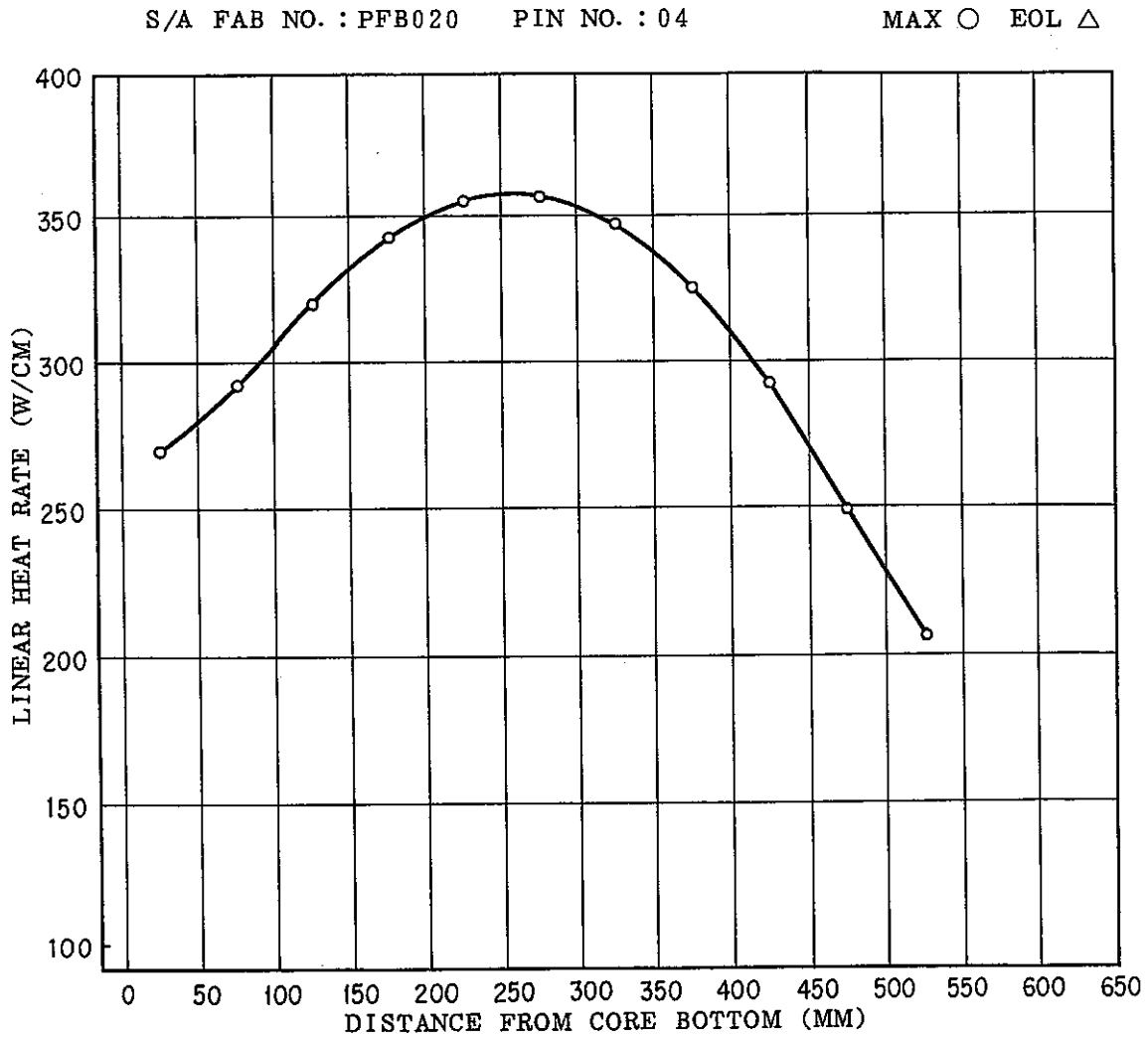


Fig. 10 Axial Profile of Linear Heat Rate (Pin No.A104)

S/A FAB NO. : PFB020 PIN NO. : 03

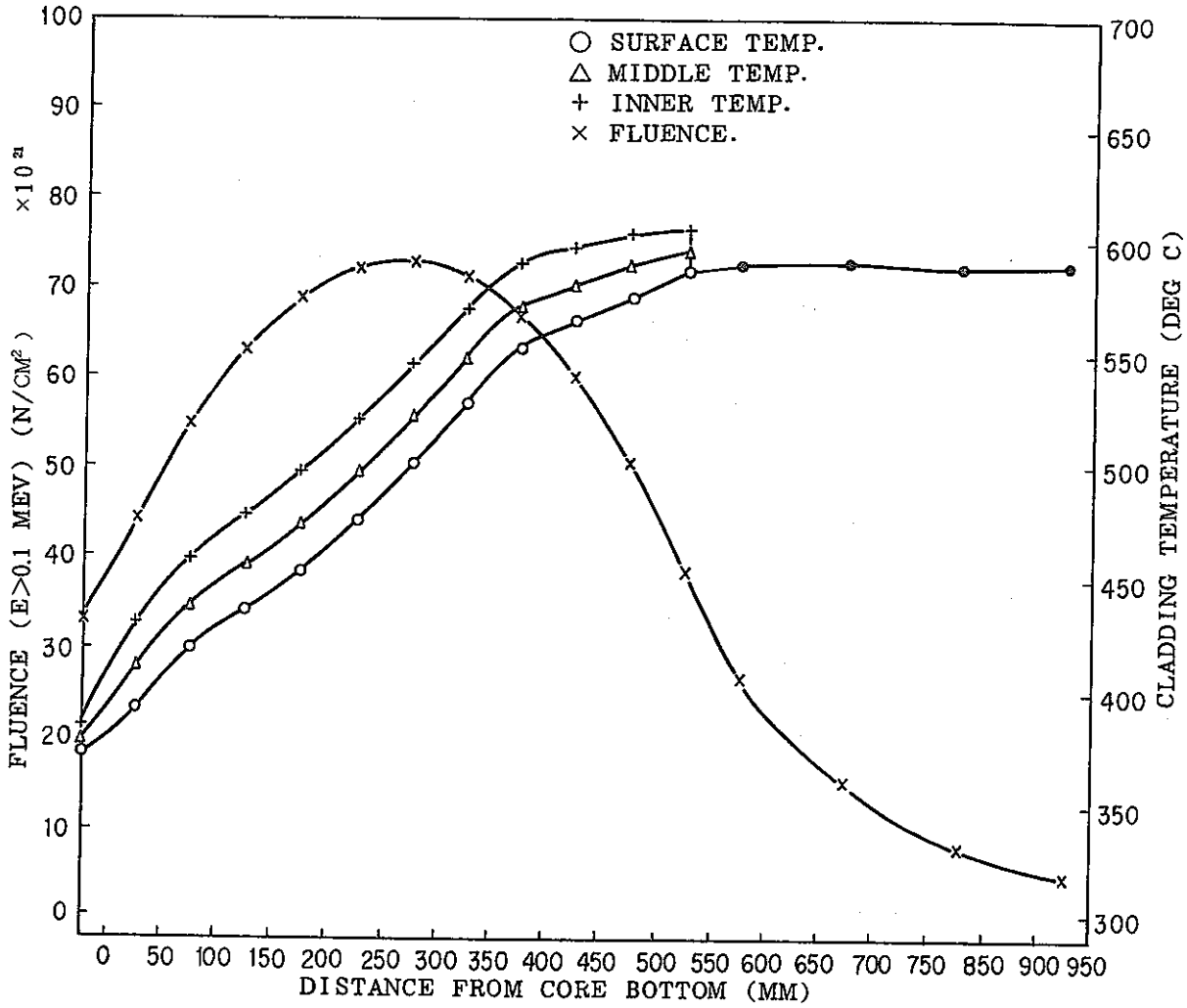


Fig. 11 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature
 (Pin No. A103)

S/A FAB NO. : PFB020 PIN NO. : 06

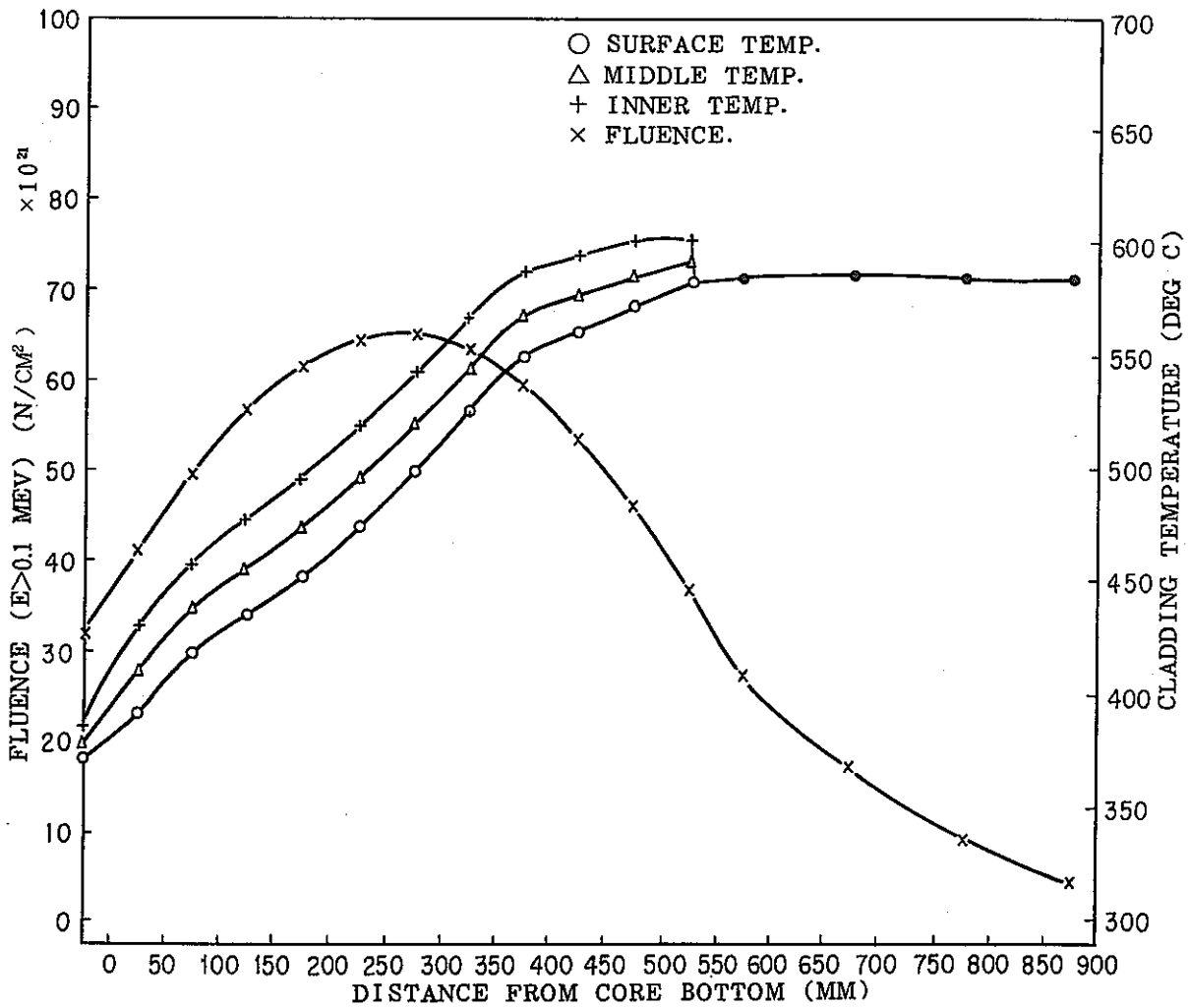


Fig. 12 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature
 (Pin No.A106)

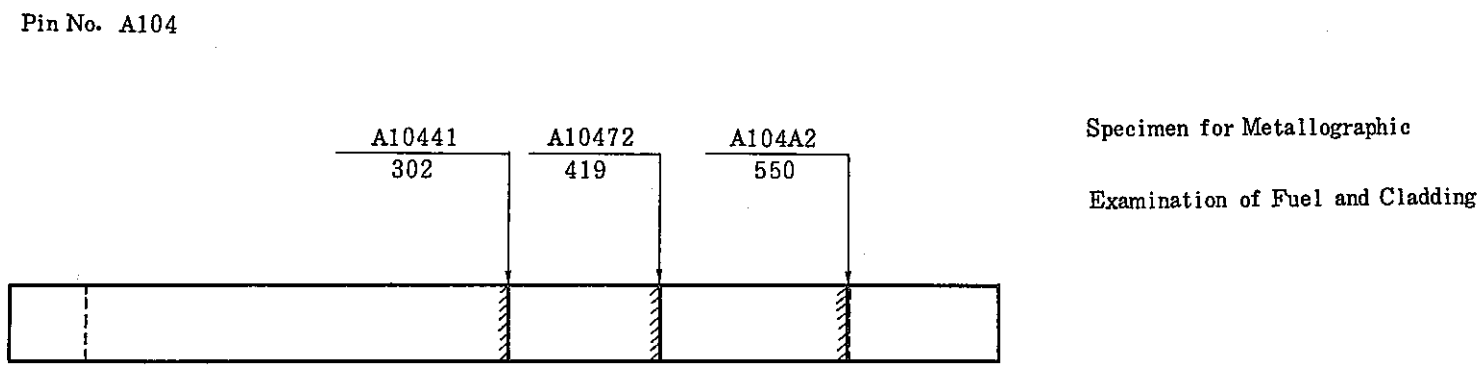
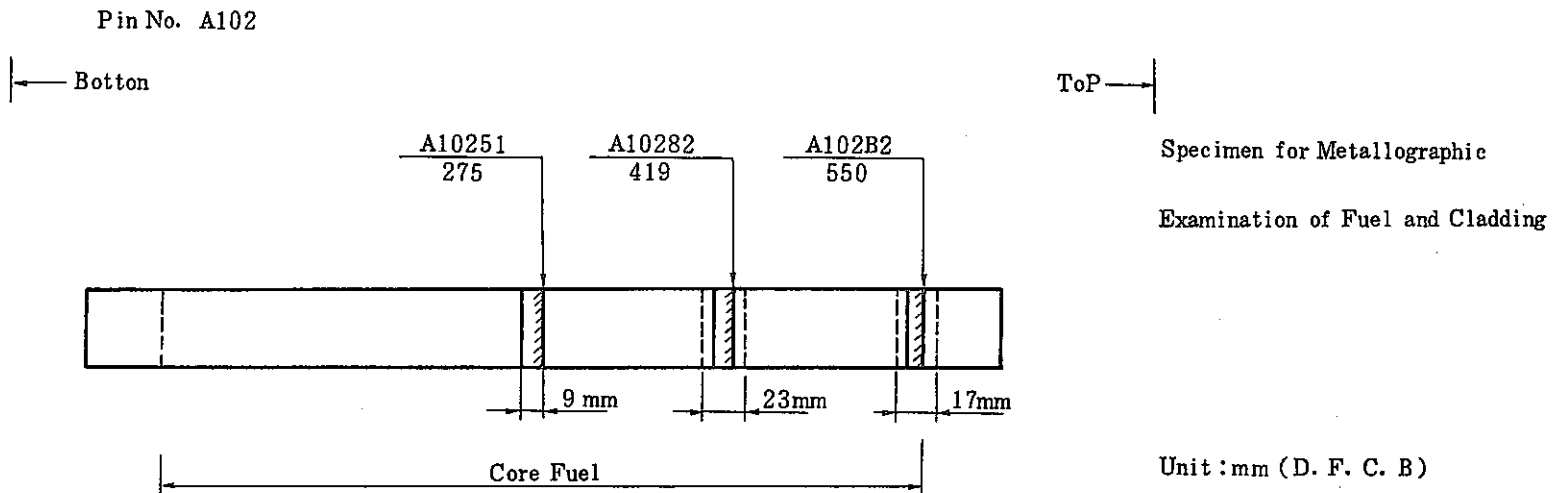


Fig. 13 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin

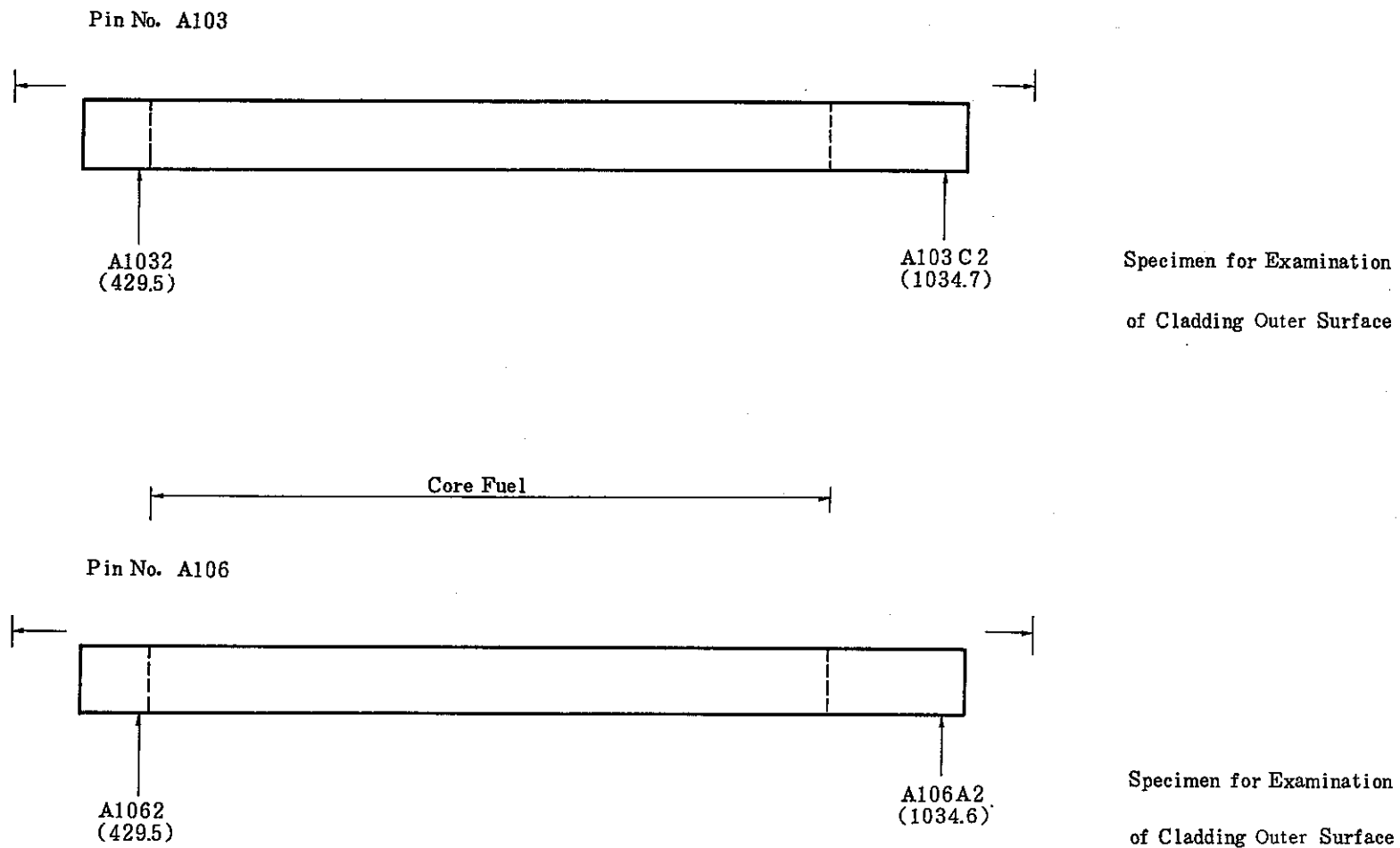


Fig. 14 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin

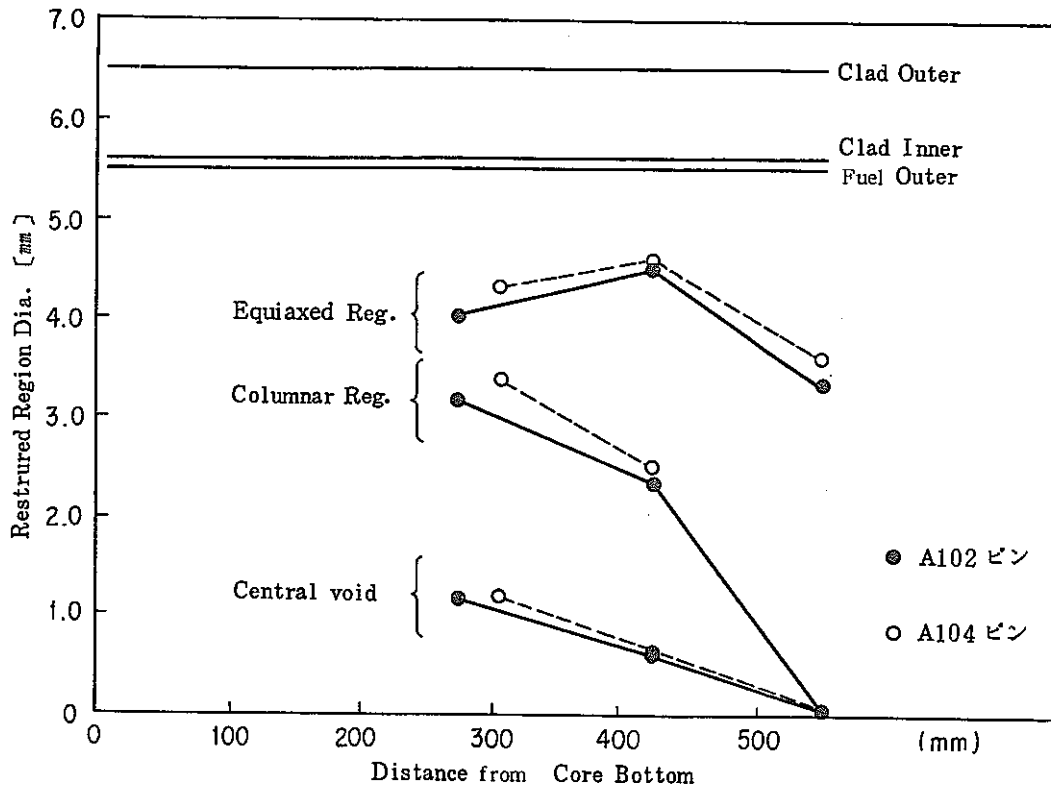


Fig. 15 Axial Profile of the Fuel Structure

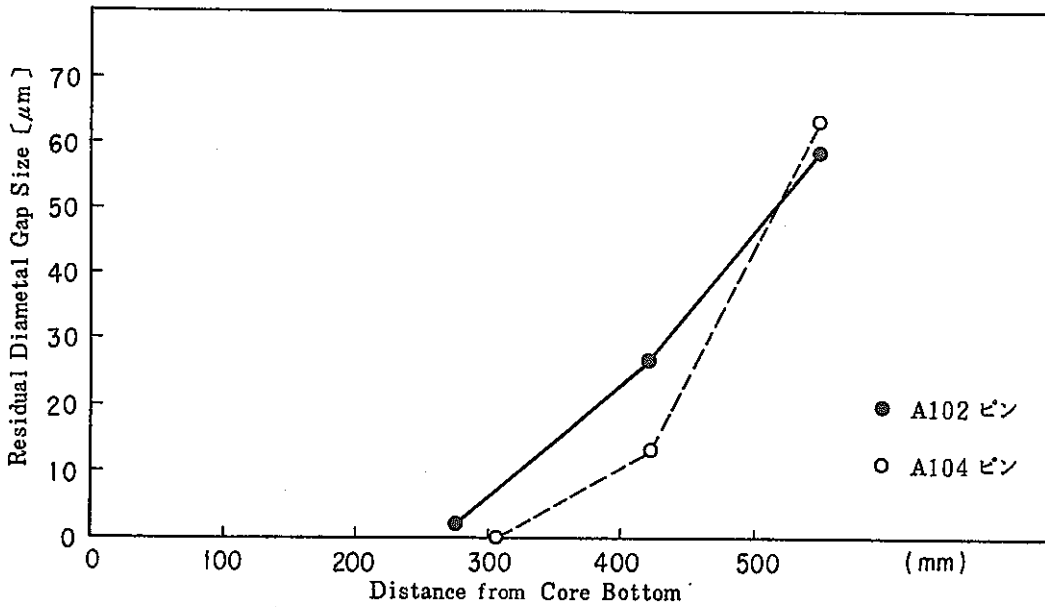


Fig. 16 Axial Profile of the Gap

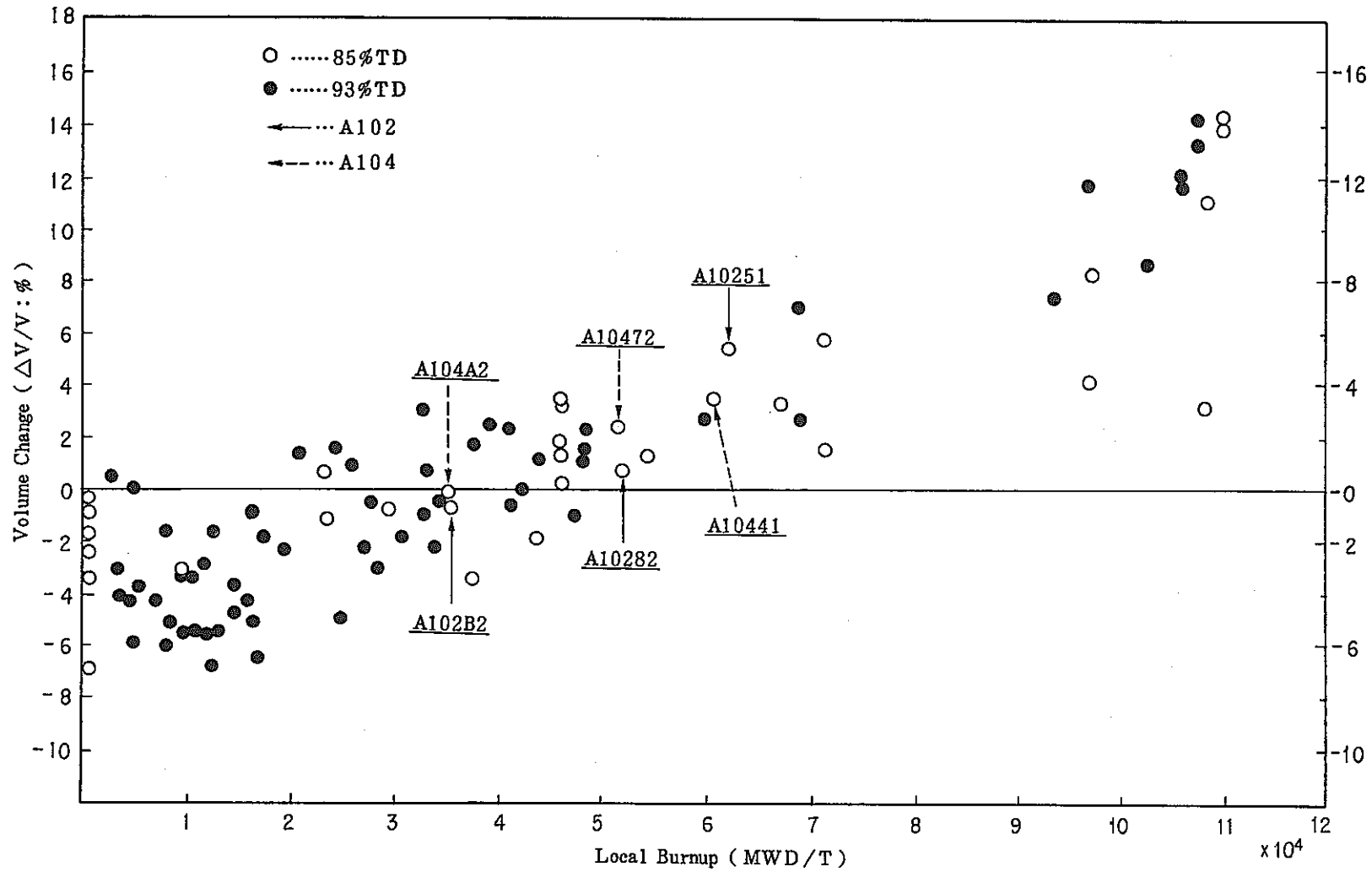


Fig. 17 Pellet Volume Change as a Function of Burnup

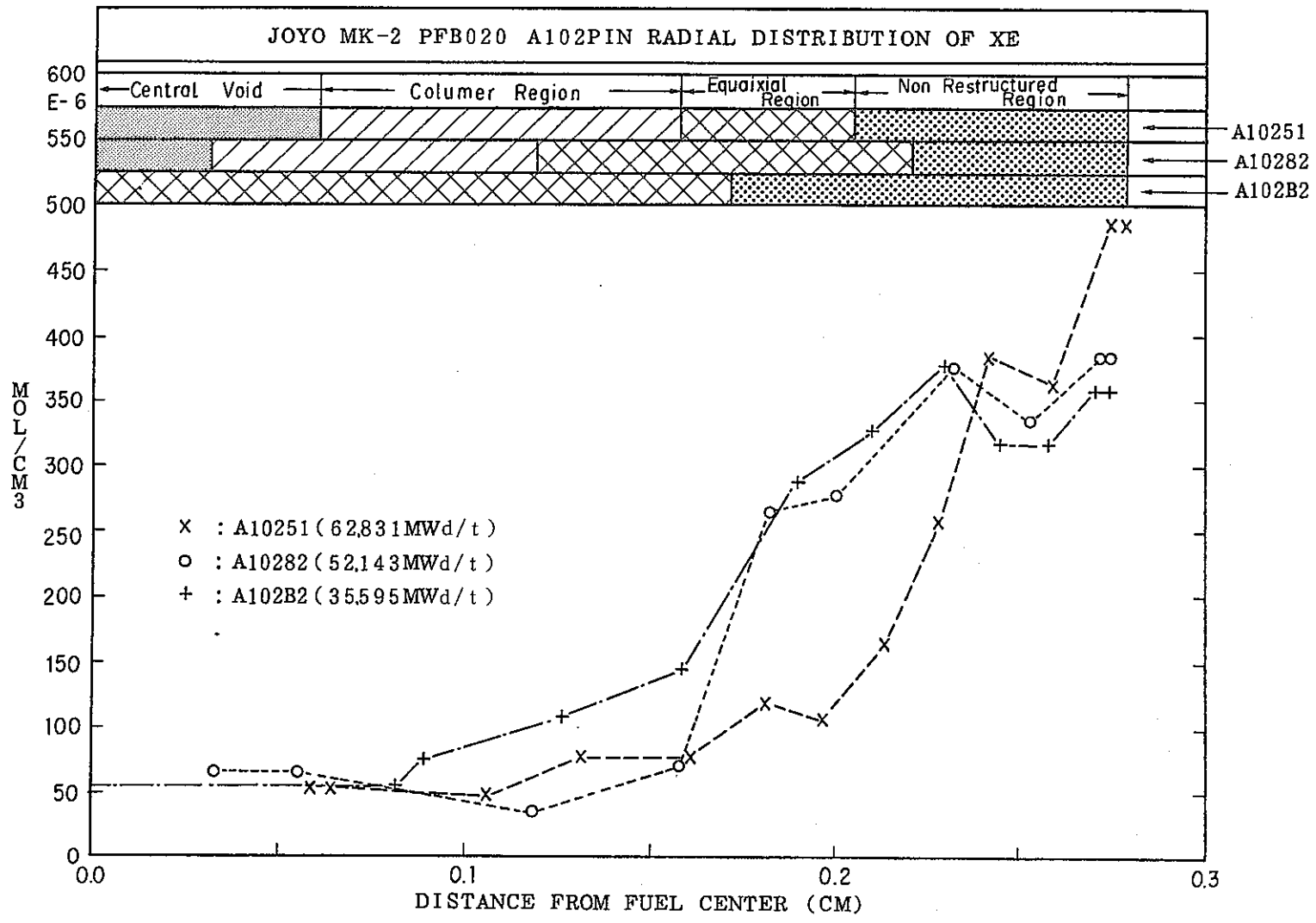


Fig. 18 Relative Radial Profile of Retained Xe Measured by SXMA

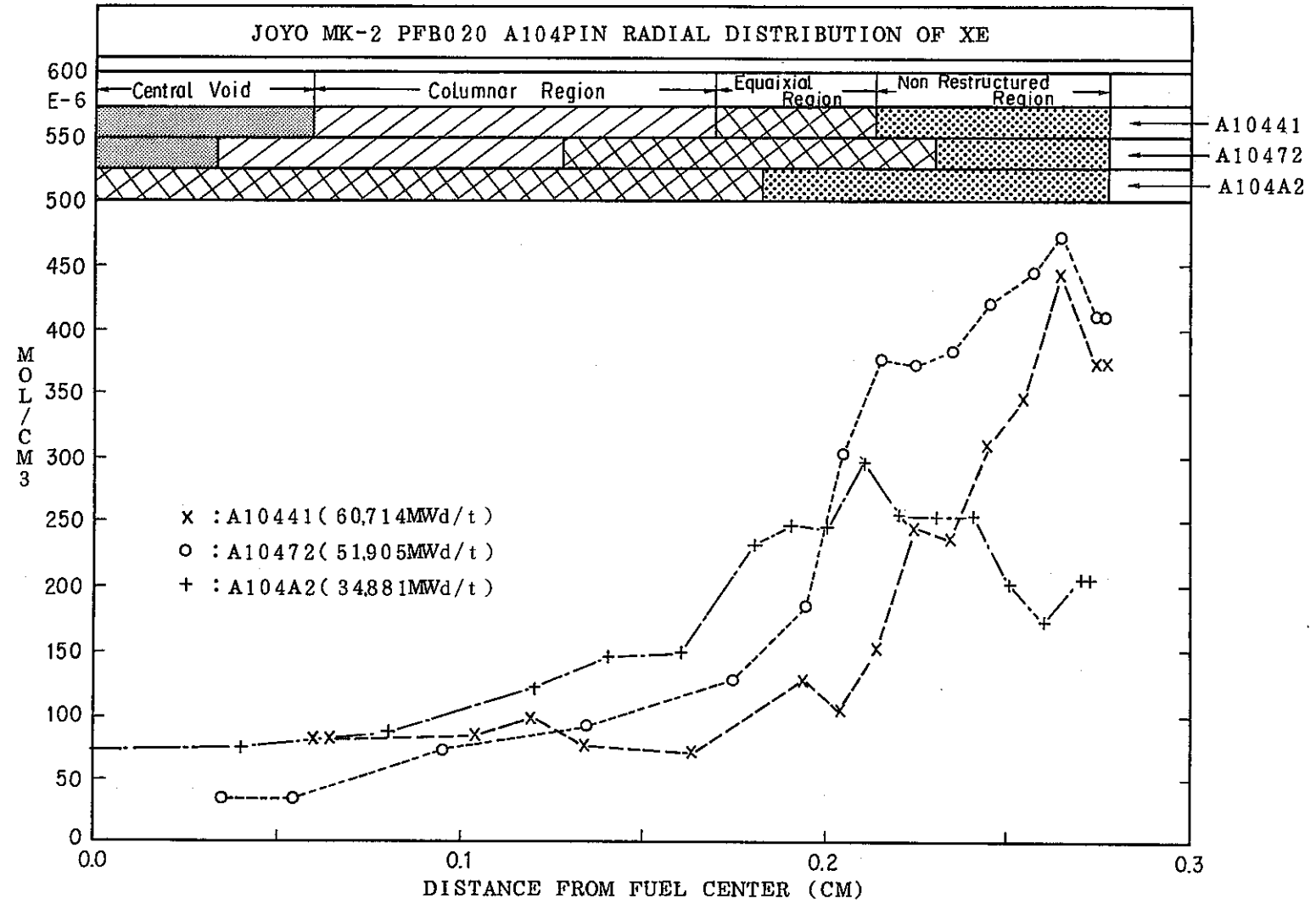


Fig. 19 Relative Radial Profile of Retained Xe Measured by SXMA

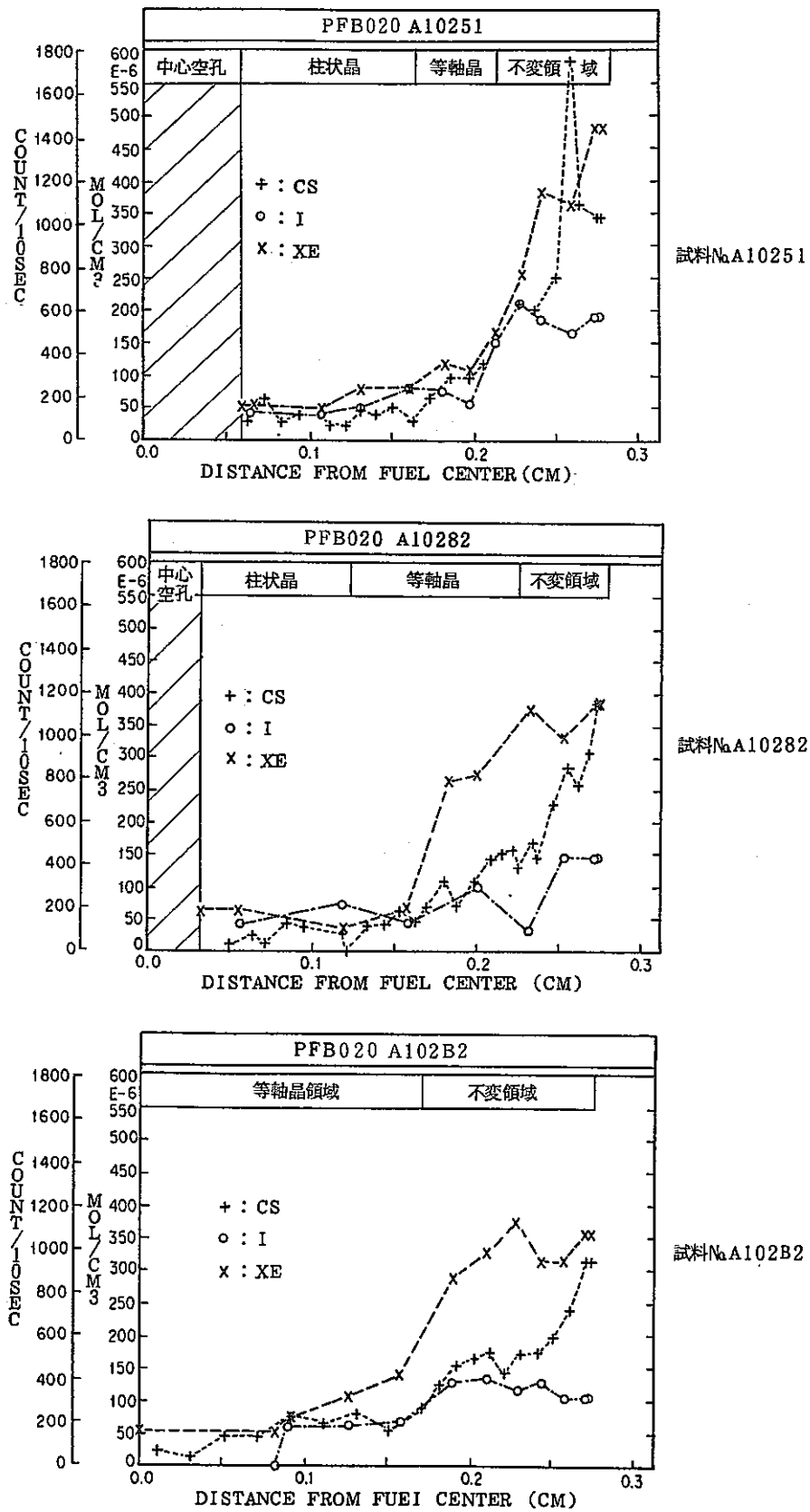


Fig. 20 Relative Radial Profile of Retained Cs, I, Xe Measured by SXMA

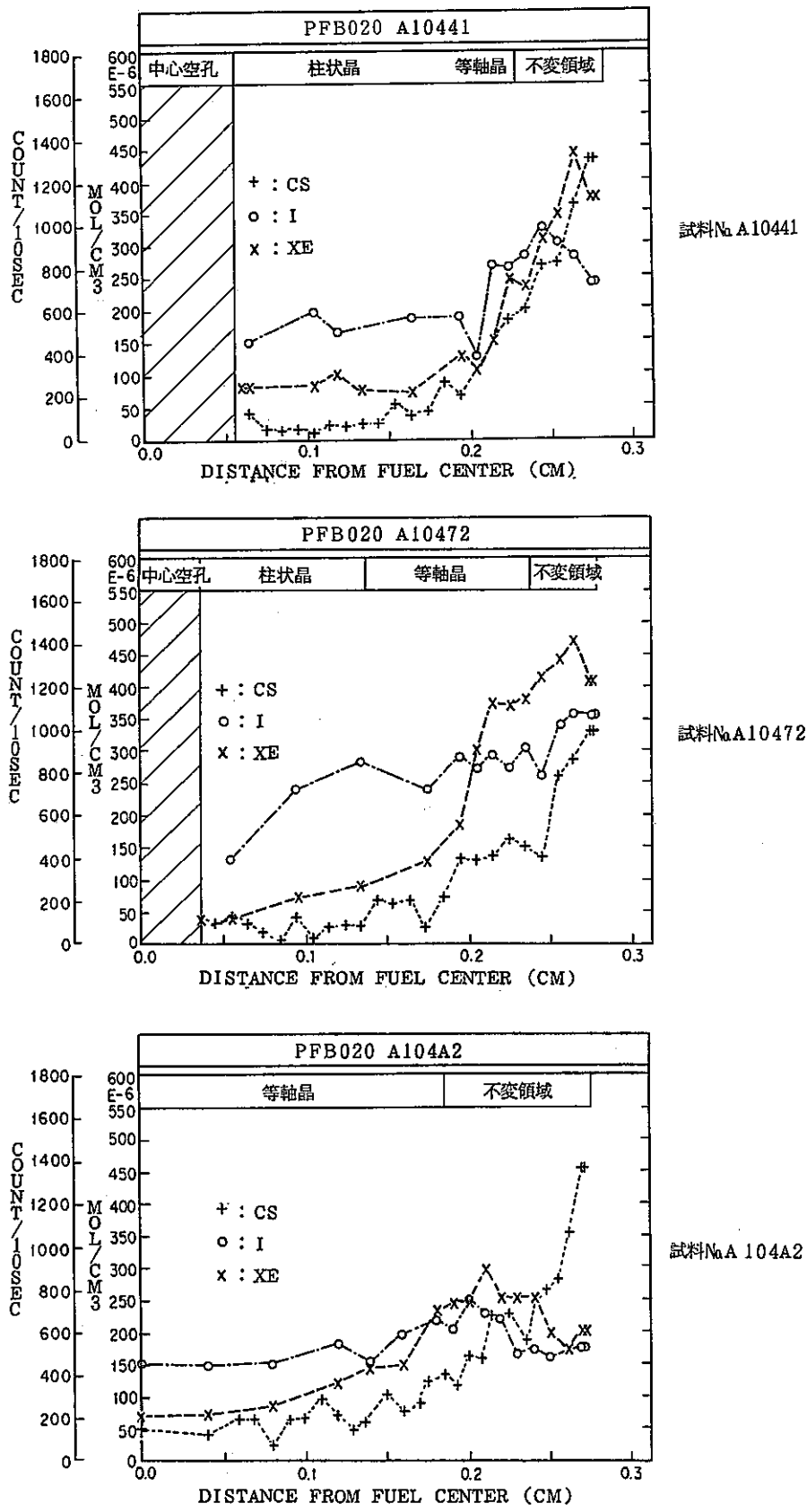


Fig. 21 Relative Radial Profile of Retained Cs, I, Xe Measured by SXMA

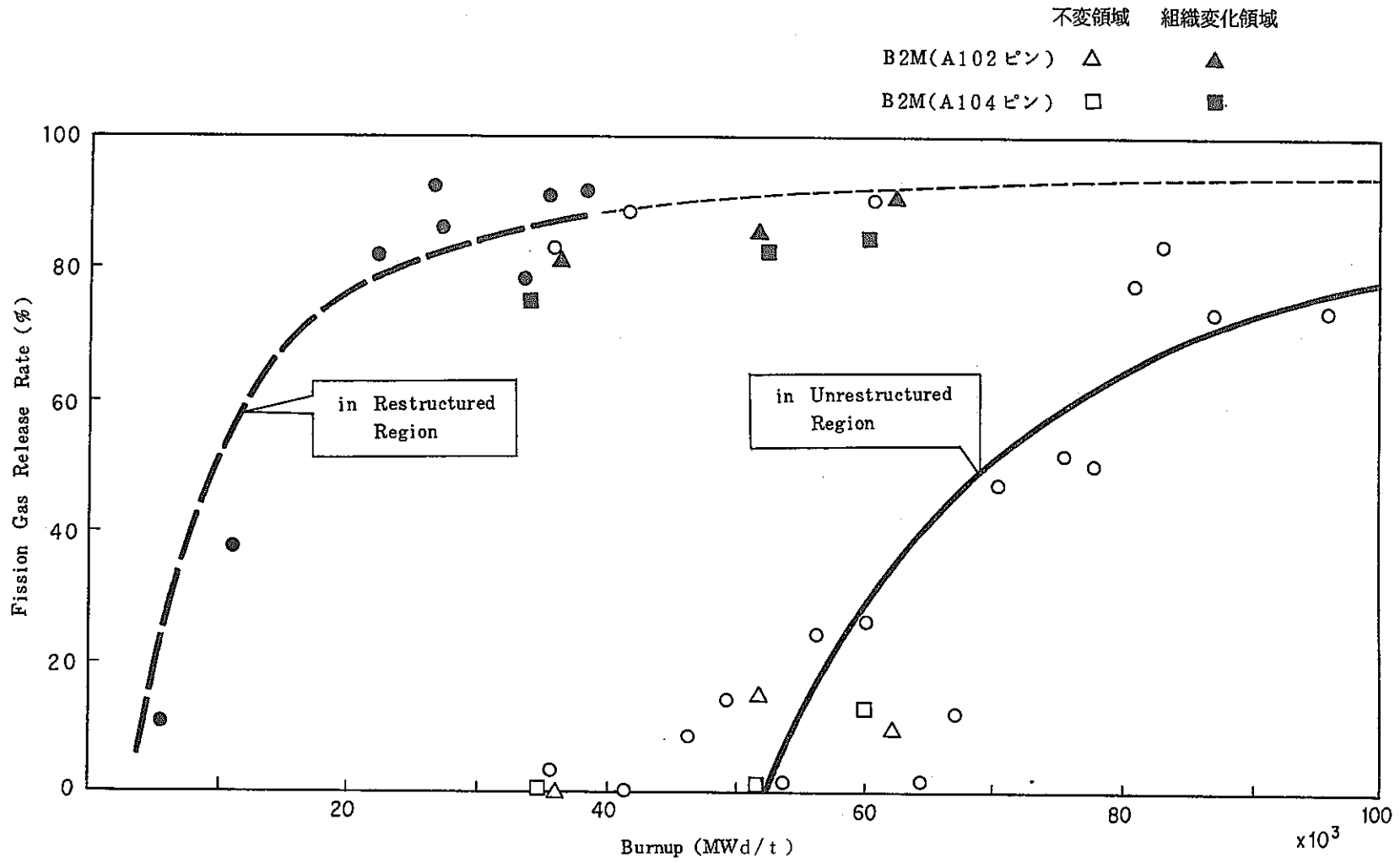


Fig. 22 Burnup Dependency of Xenon Release Rate in Restructured and Unrestructured Region

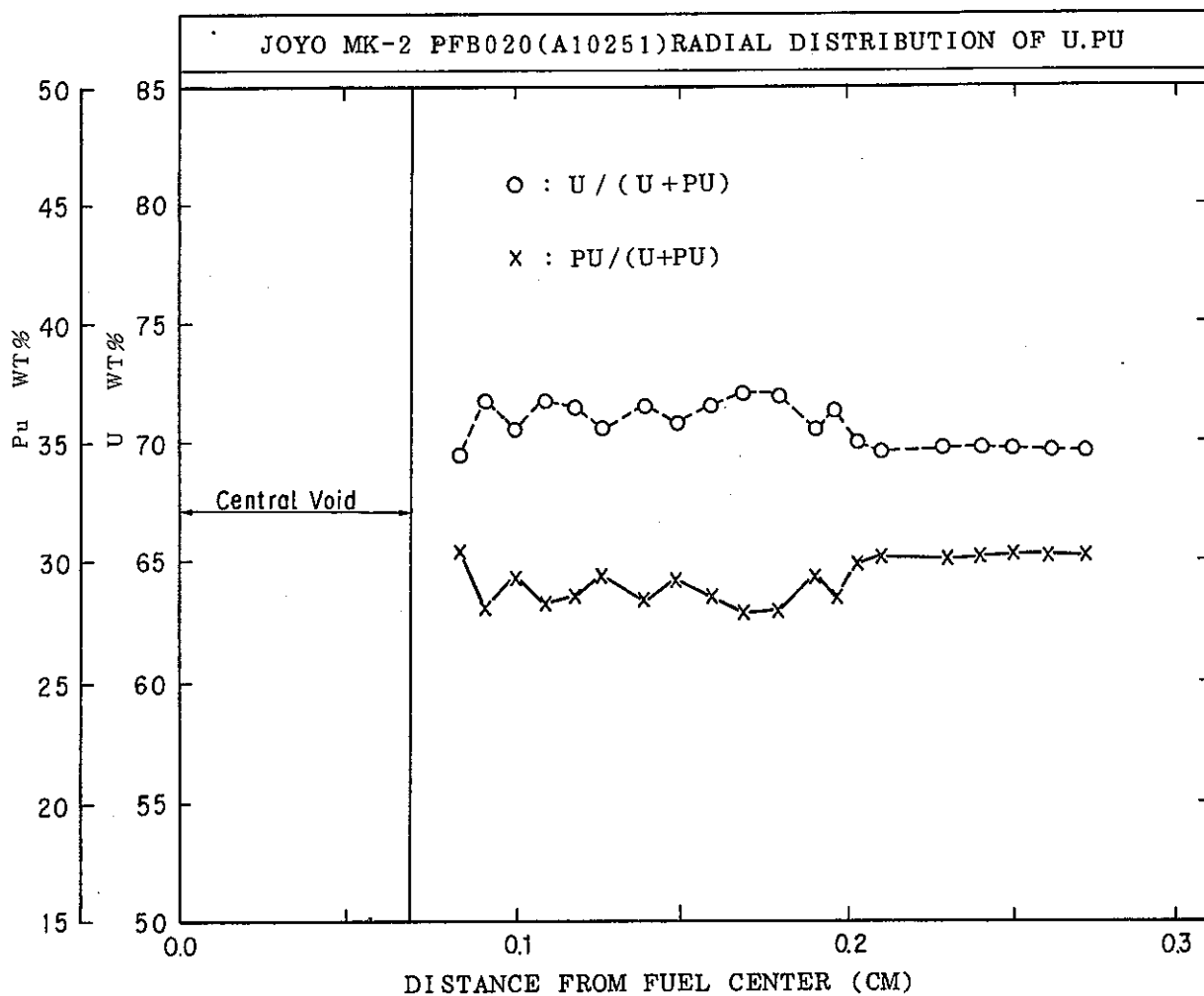


Fig. 23 Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by SXMA (Specimen No. A10251)

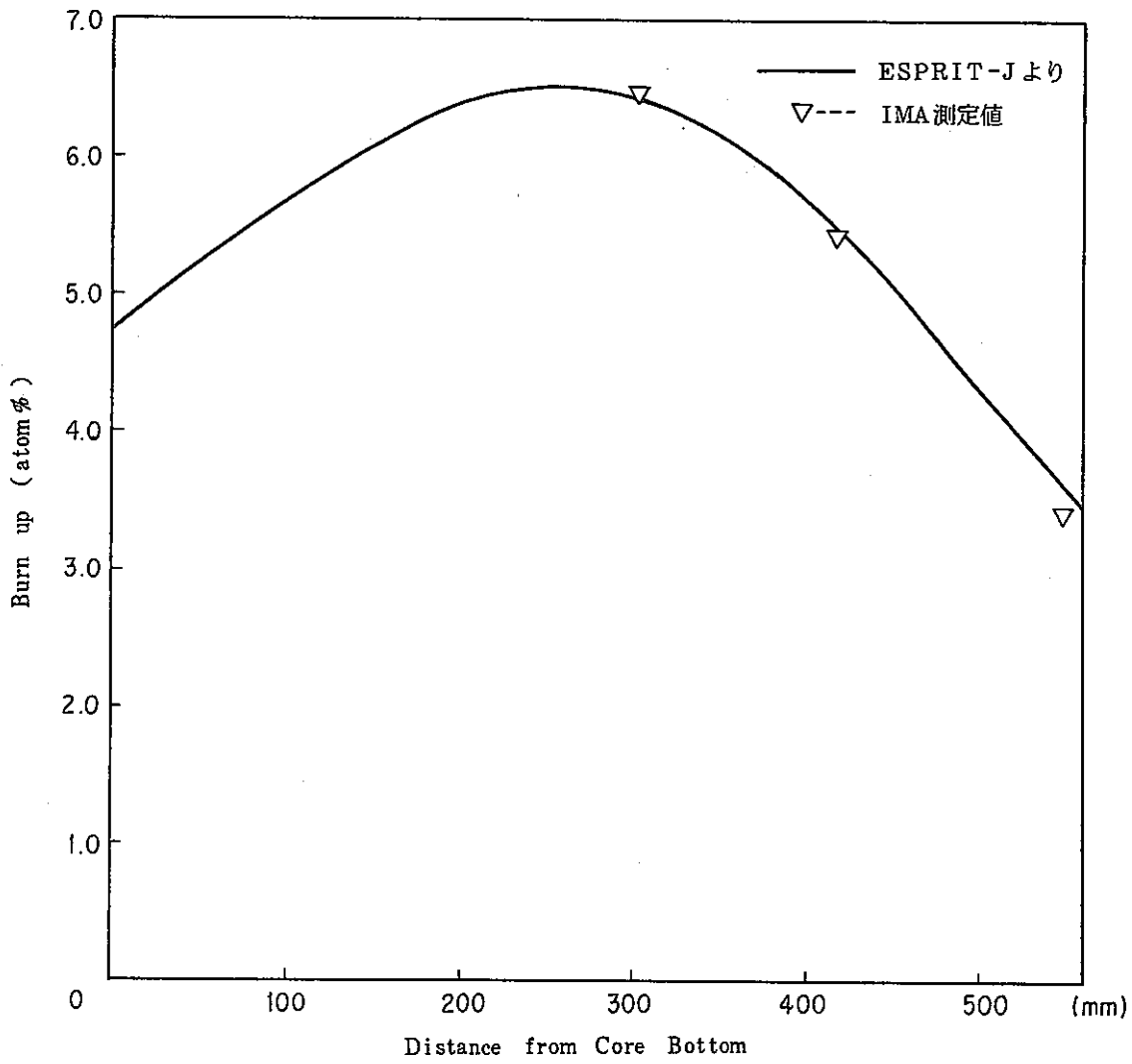


Fig. 24 Axial Distribution of Measured Burnup of PFB020
(Pin No.A104)

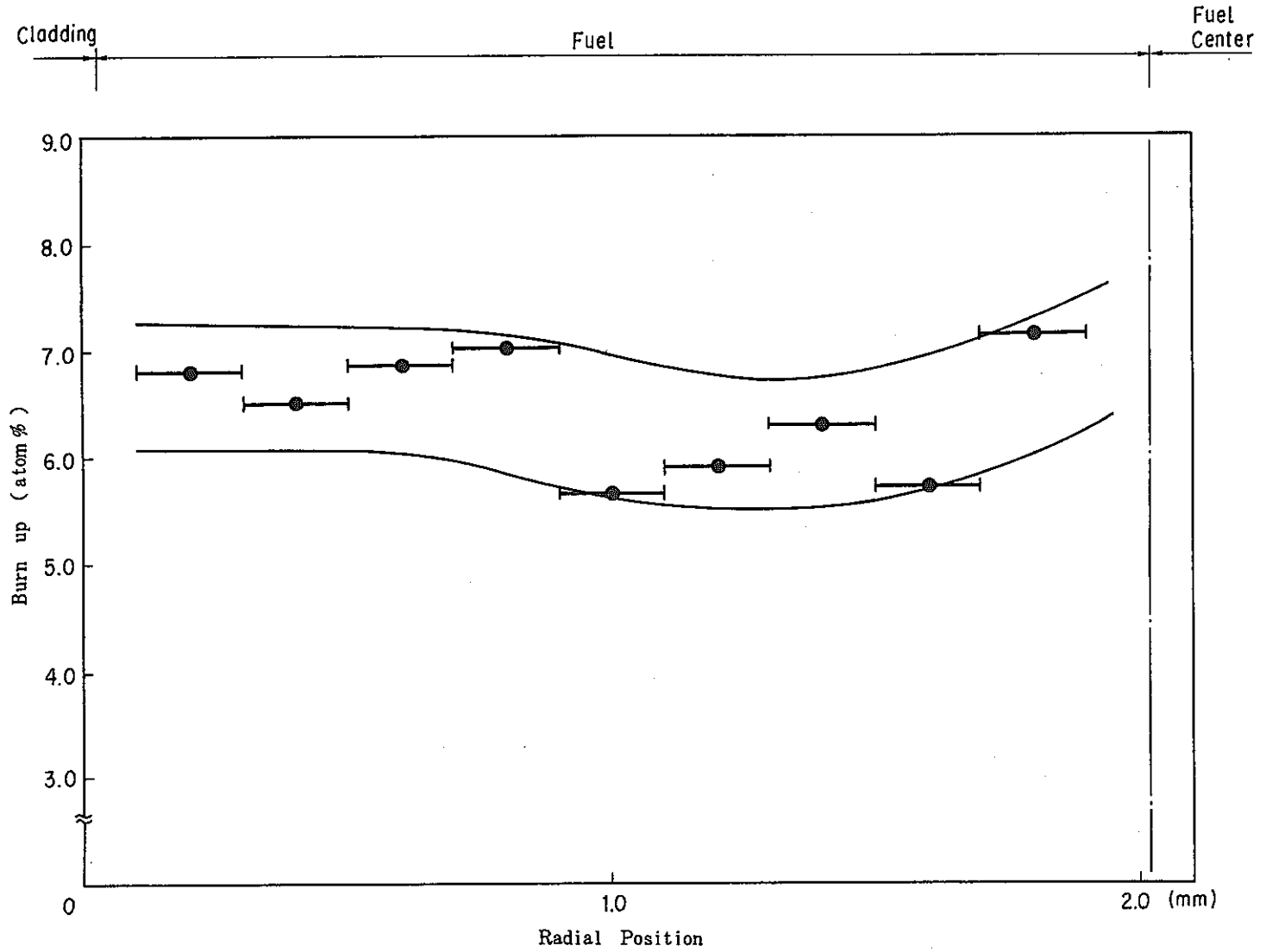


Fig. 25 Radial Burnup Distribution Measured by the IMA
(Specimen No. A10441)

PFB020_(A102)の切断位置及び低倍写真

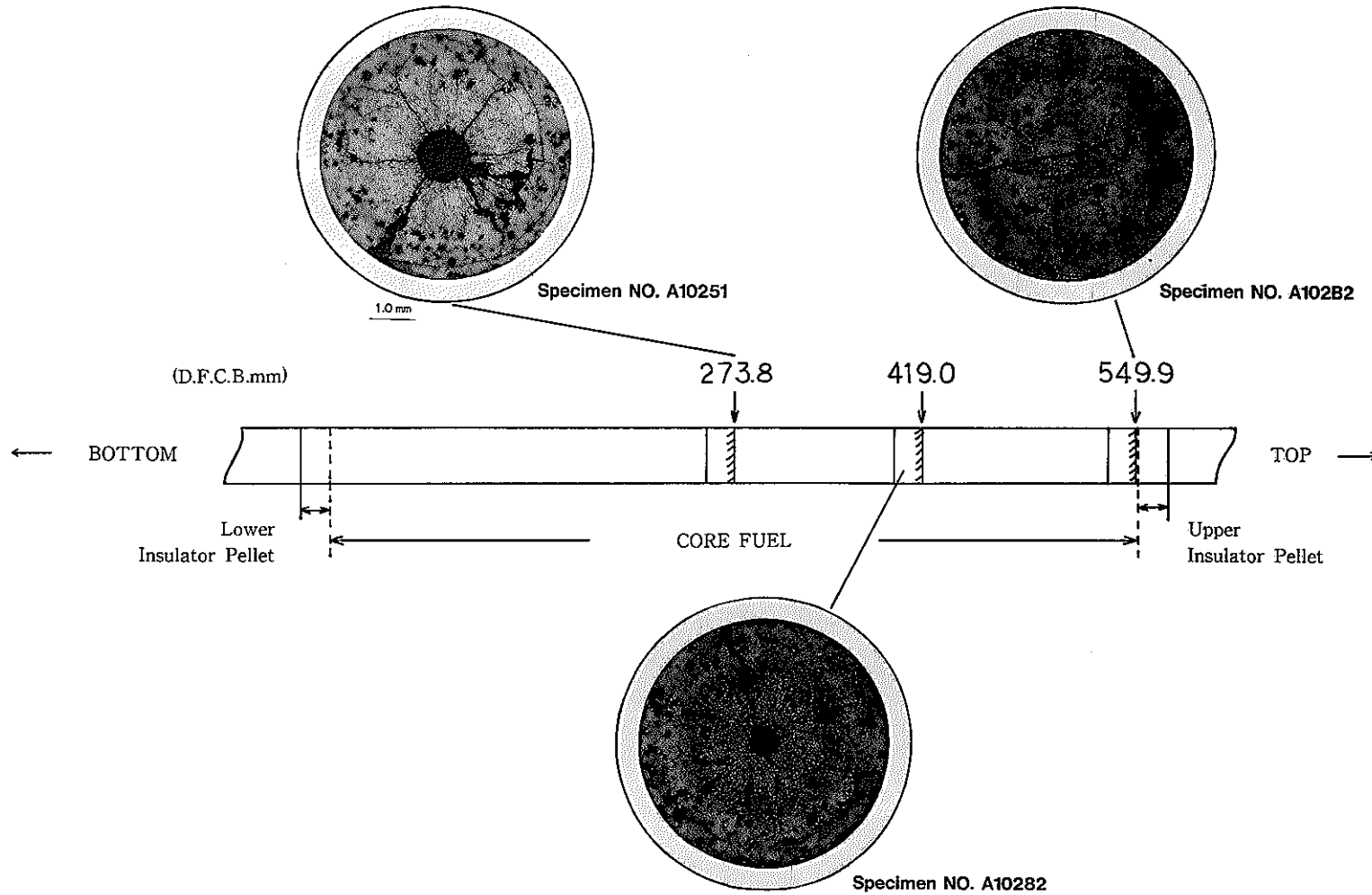


Photo. 0-1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. A102)

PFB020_(A104)の切断位置及び低倍写真

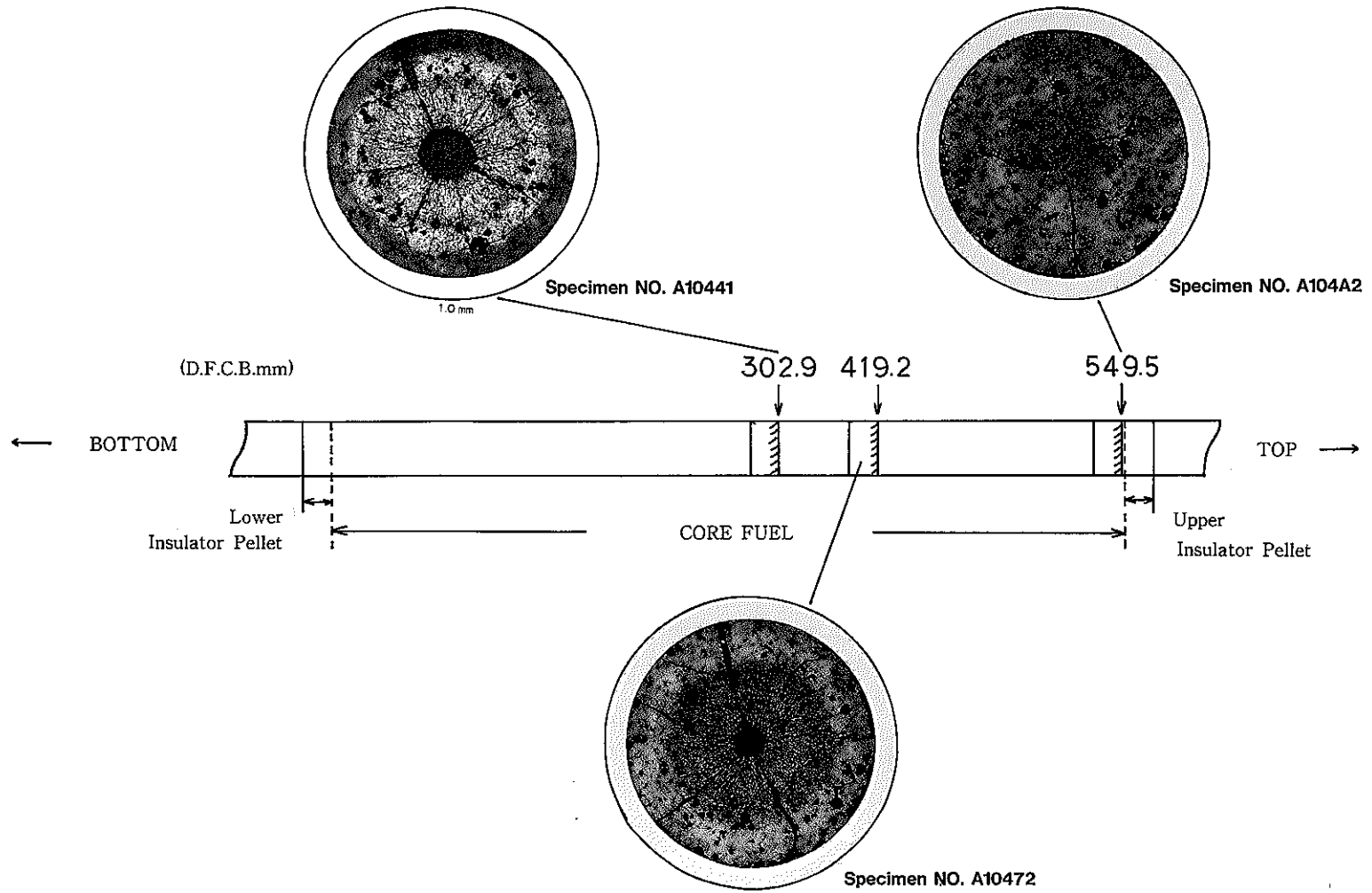
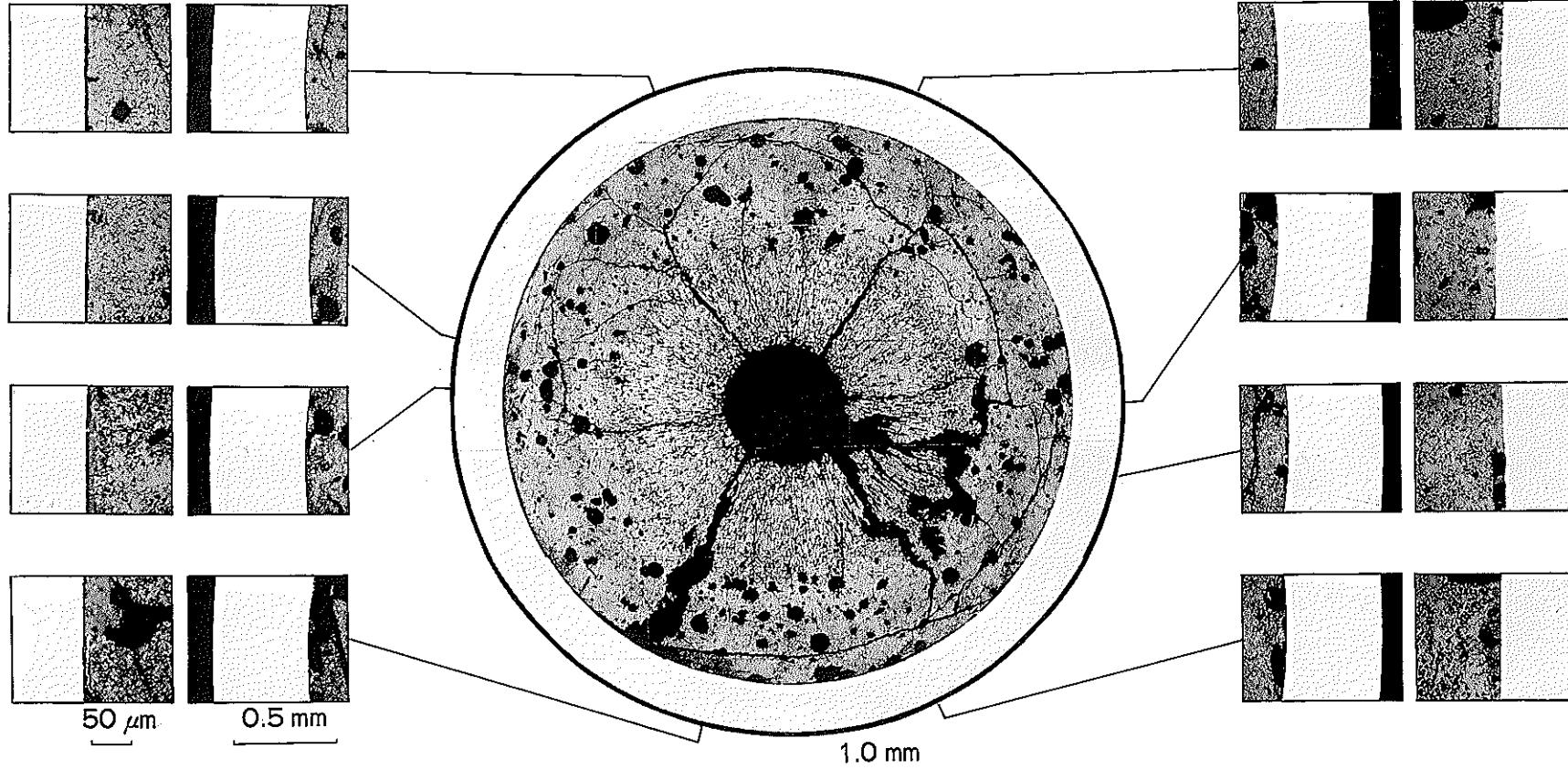


Photo. 0-2 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. A104)

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10251



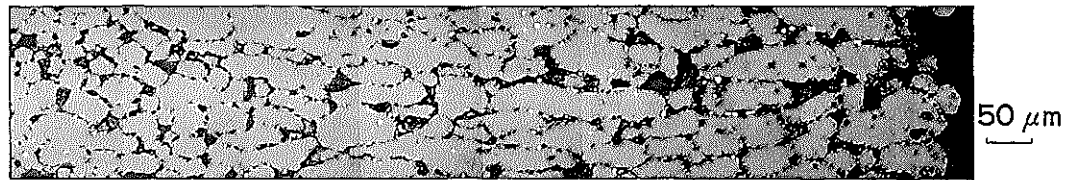
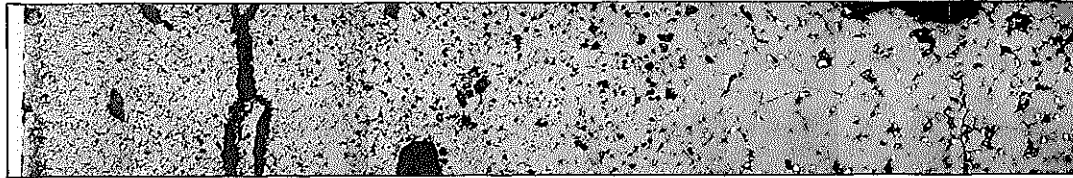
As-Polished

E03A101

Photo. 0-3 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10251) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10251



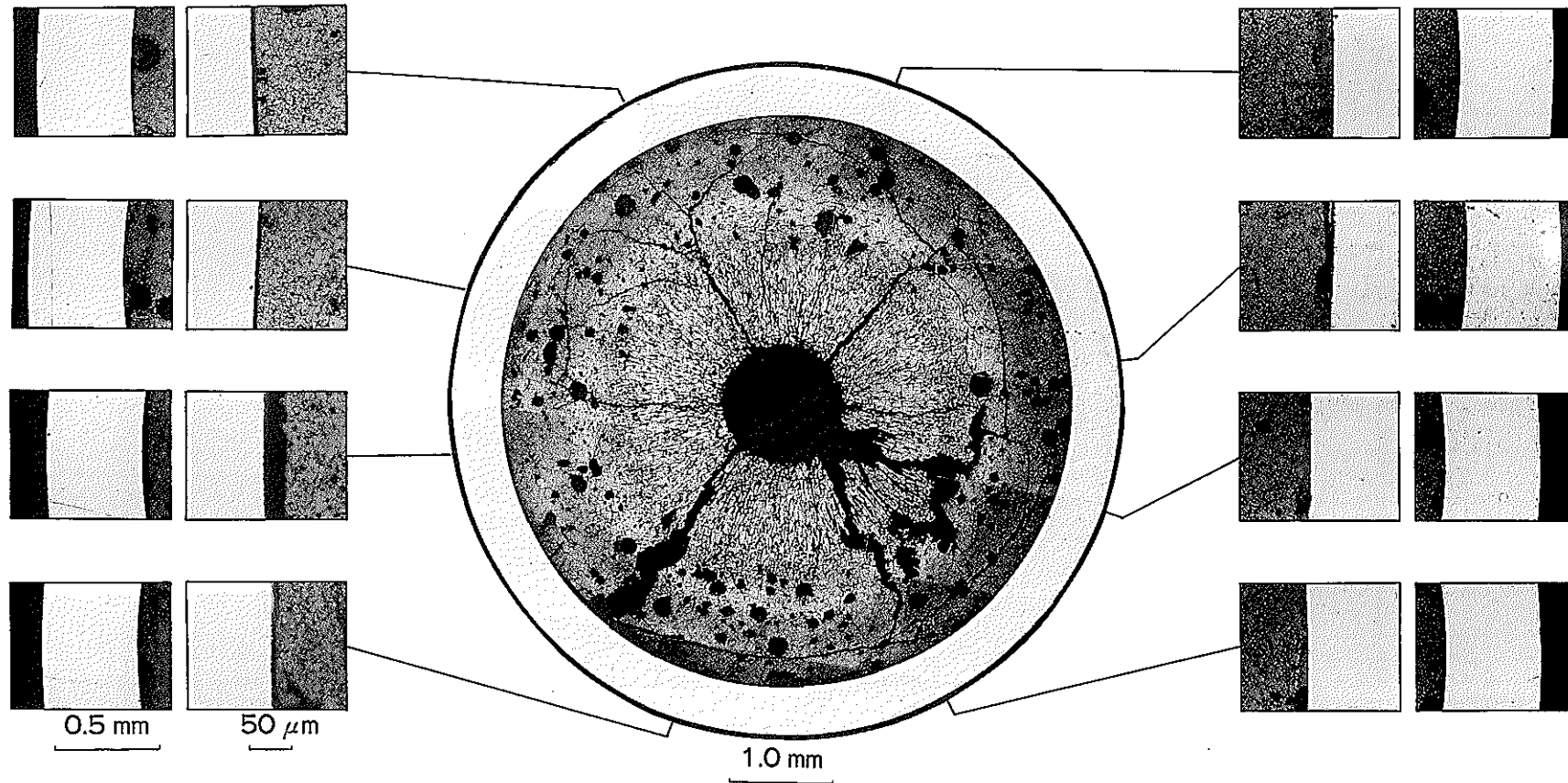
As-Polished

E03A103

Photo. 0-4 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A10251) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen No. A10251



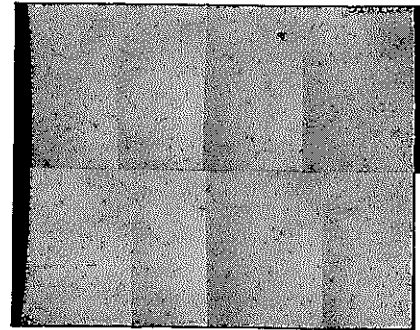
As-Etched

E03A119

Photo. 0-5 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10251) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB020

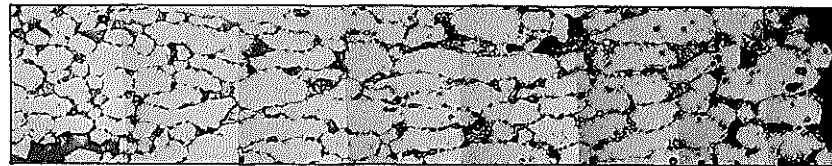
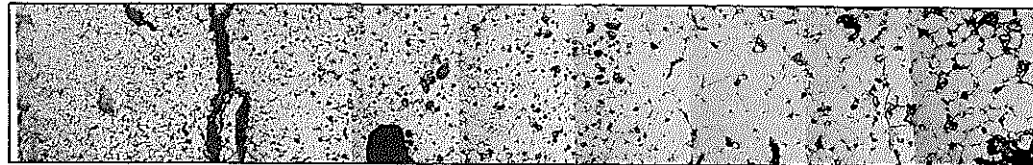
Specimen NO. A10251



50 μ m



0.5 mm



50 μ m

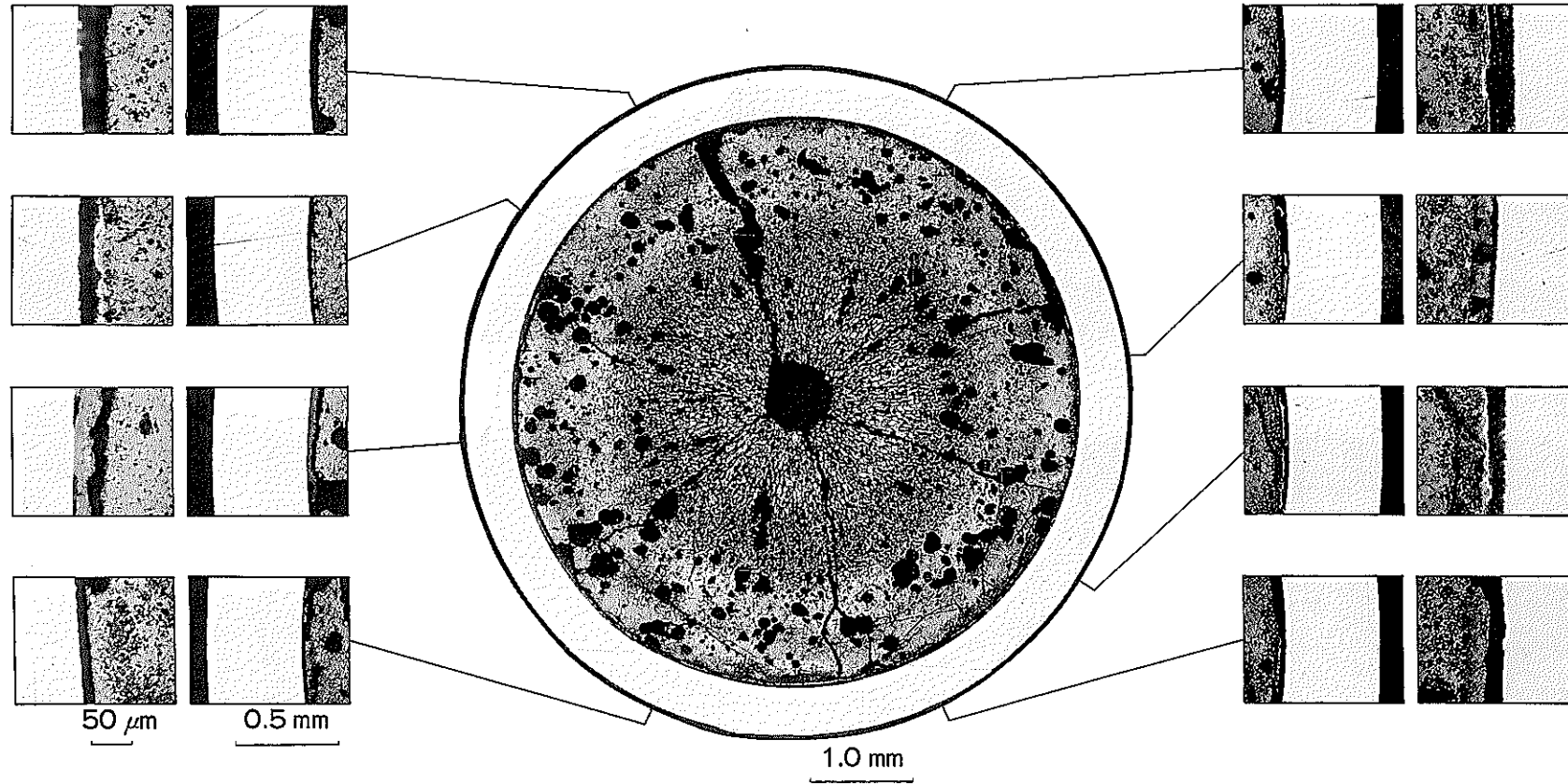
As-Etched

E03A120

Photo. 0-6 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A10251) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10282



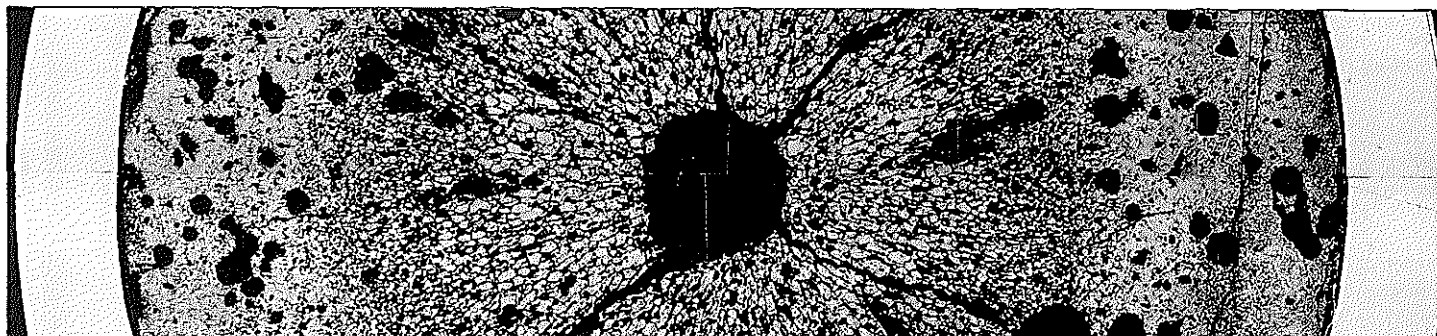
As-Polished

E03A104

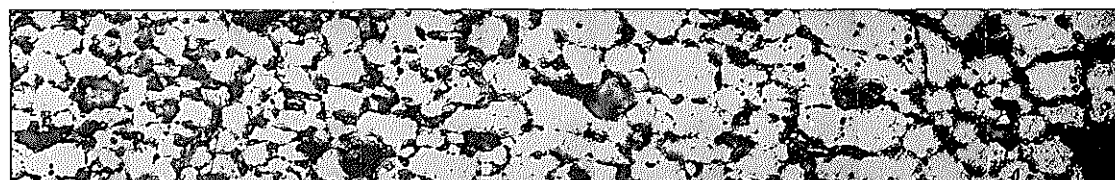
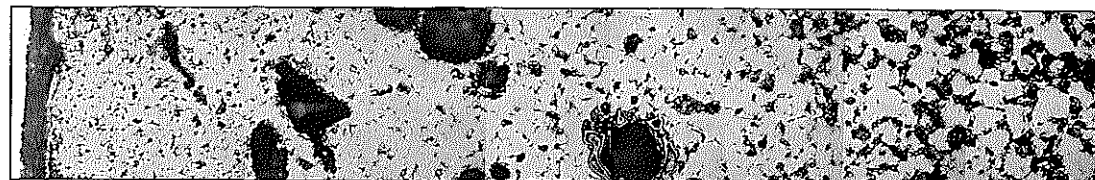
Photo. 0-7 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10282) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10282



0.5 mm



50 μ m

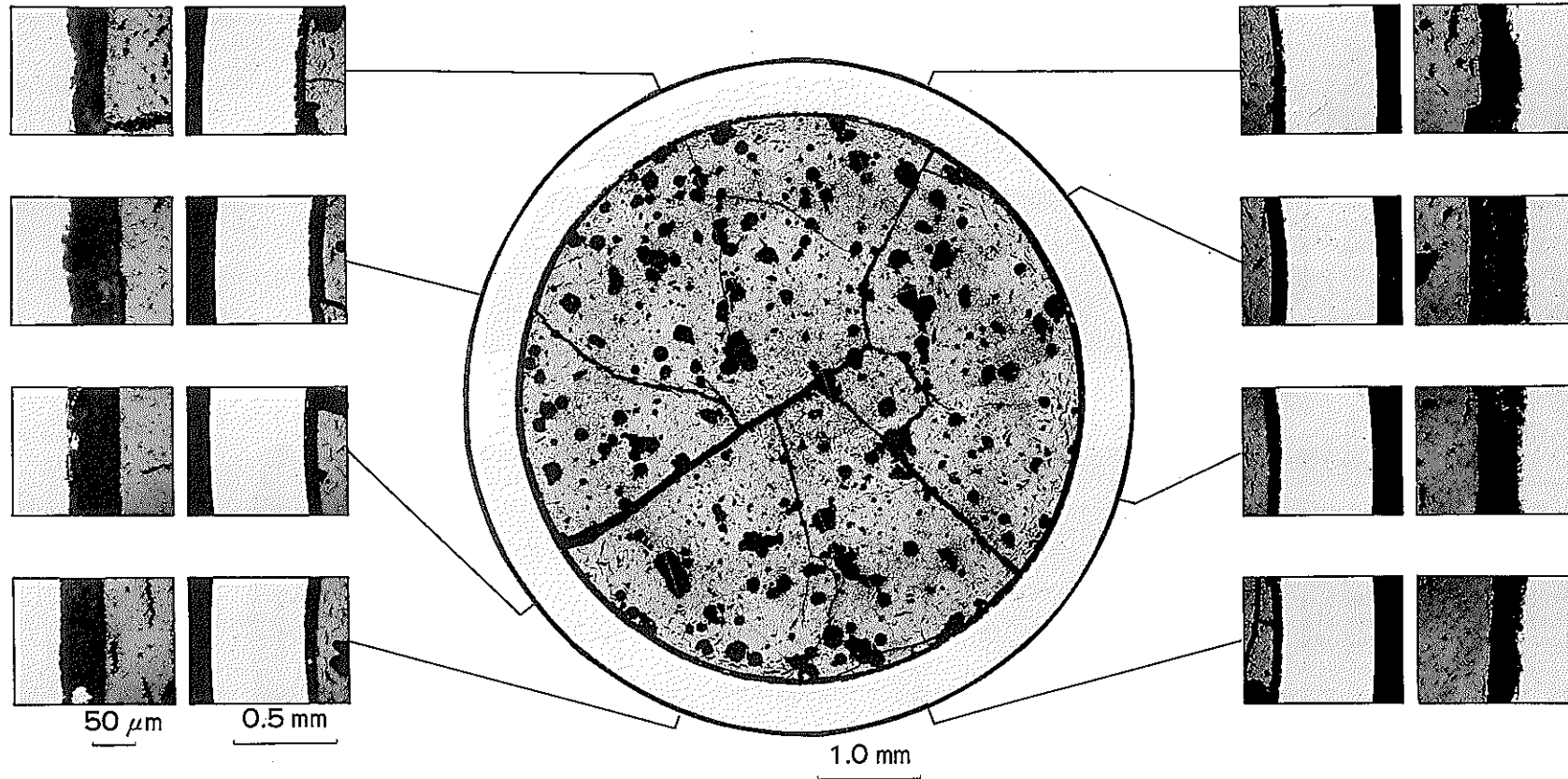
As-Polished

E03A106

Photo. 0-8 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A10282) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A102B2



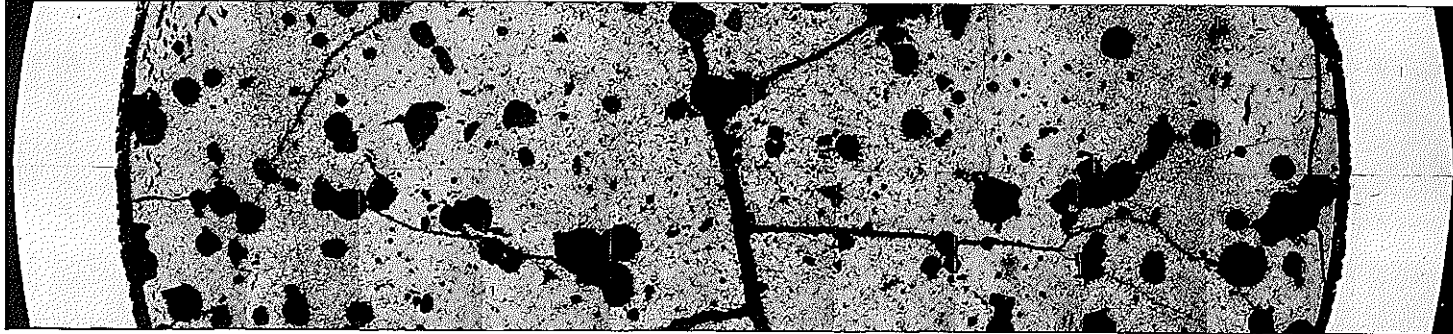
As-Polished

E03A107

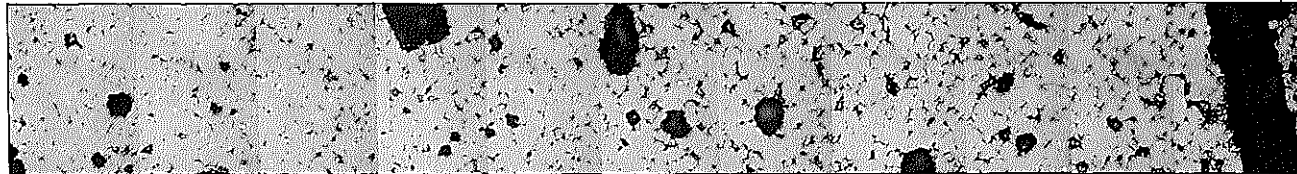
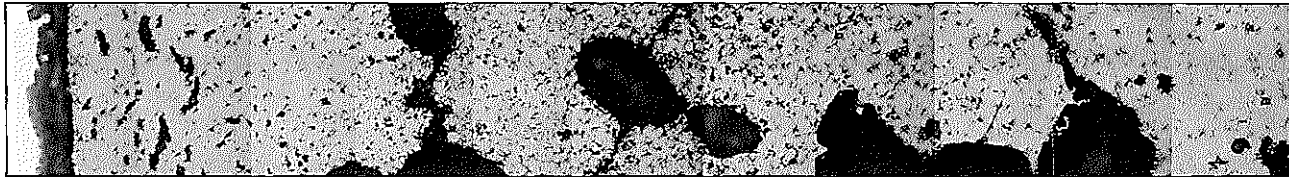
Photo. 0-9 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A102B2) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A102B2



0.5 mm



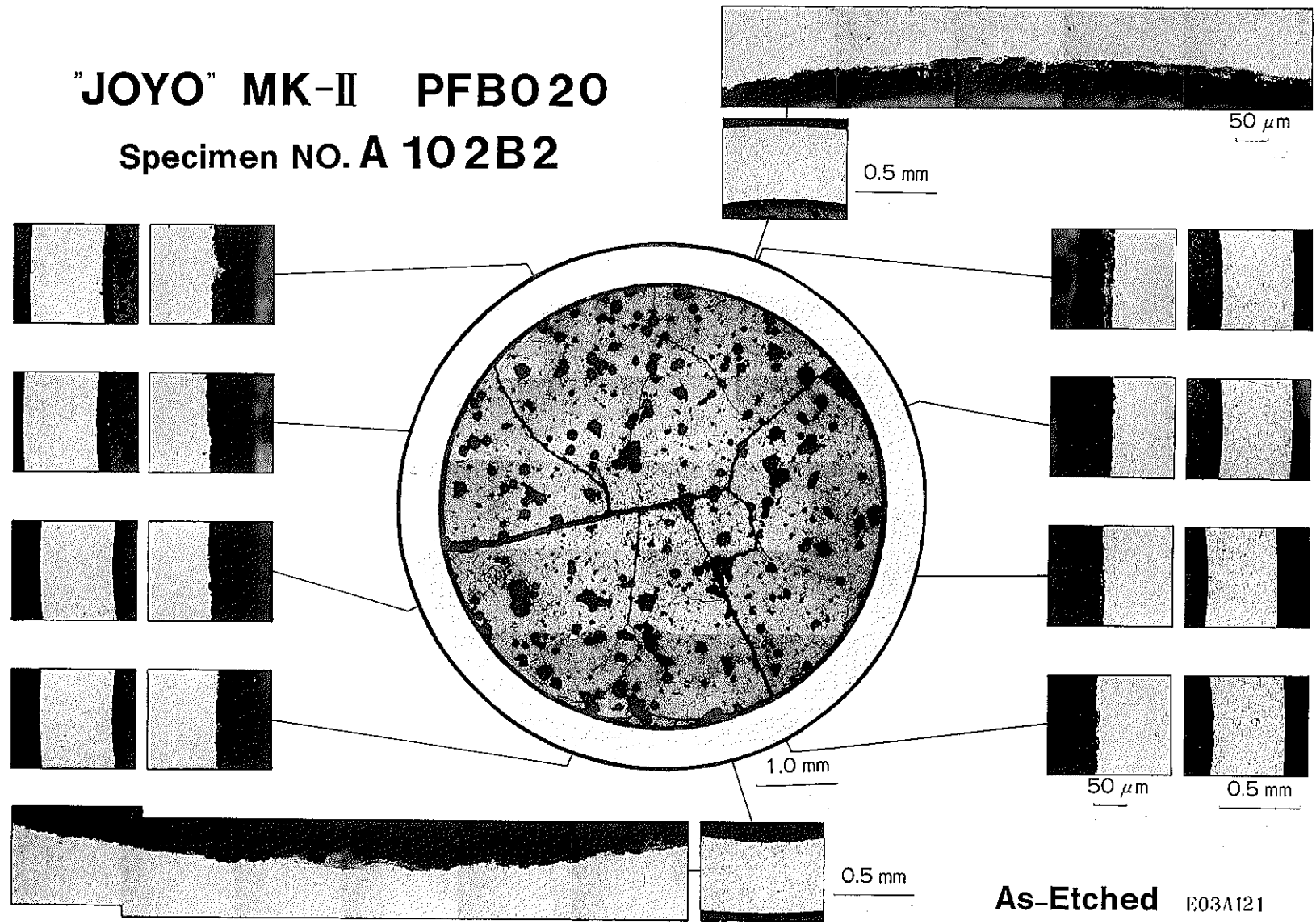
50 μ m

As-Polished

E03A109

Photo.0-10 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A102B2) As-Polished

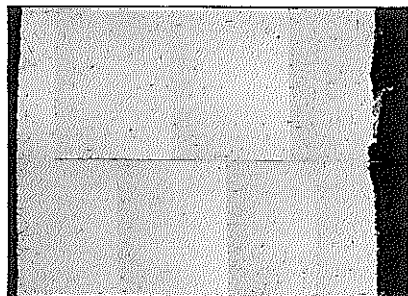
"JOYO" MK-II PFB020 Specimen NO. A 102B2



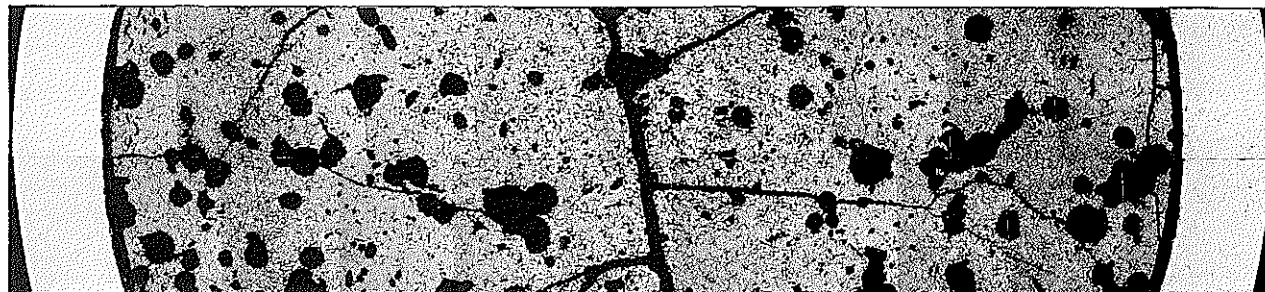
As-Etched E03A121

Photo. 0-11 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A102B2) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB020
Specimen NO. A 102B2



50 μ m



0.5 mm



50 μ m

As-Etched

E03A122

Photo. 0-12 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A102B2) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10441

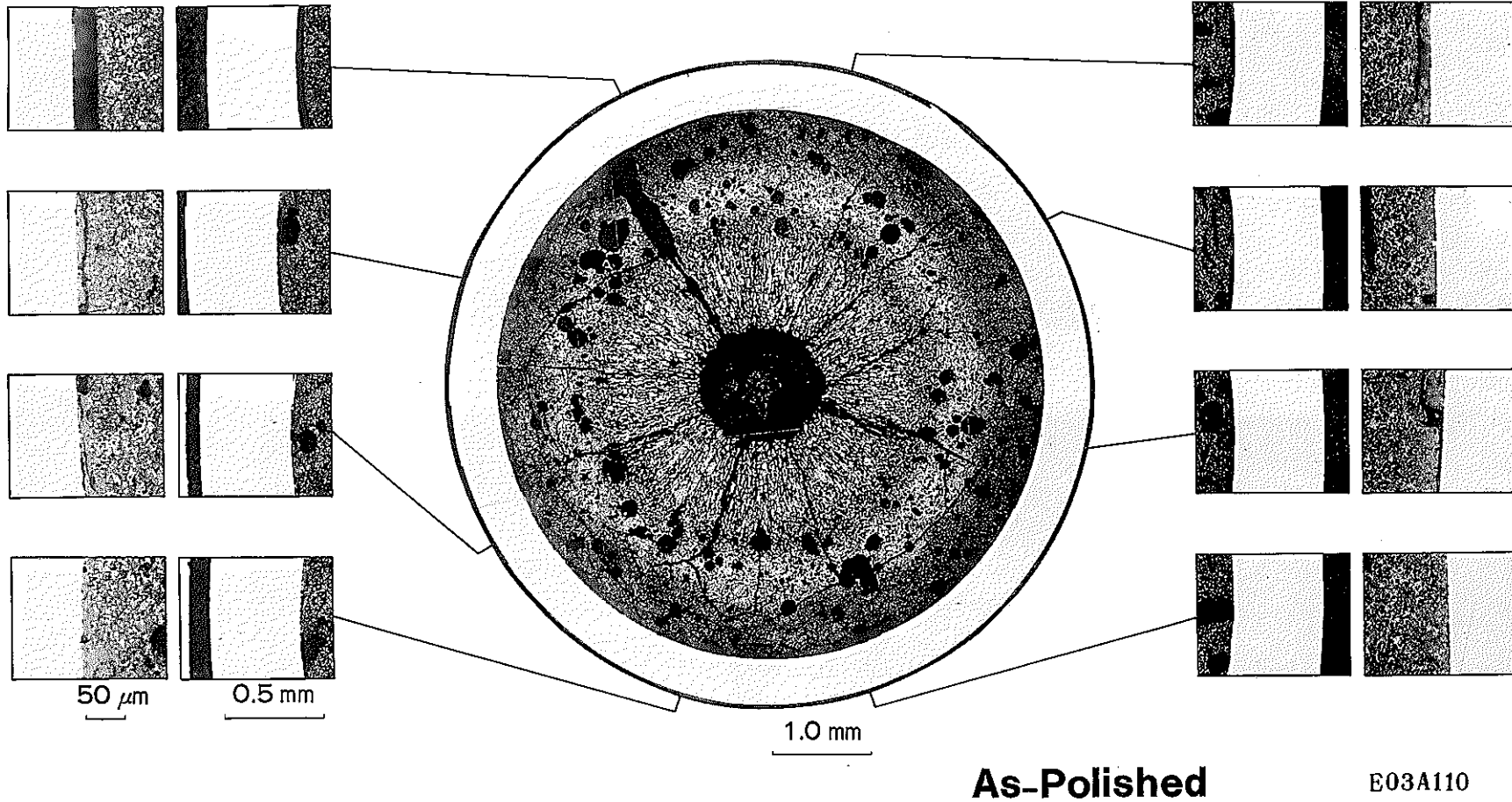
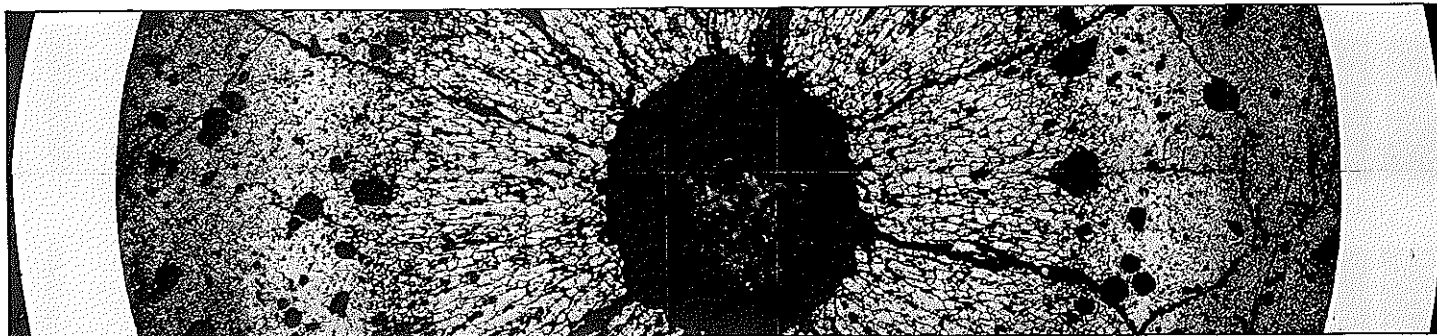


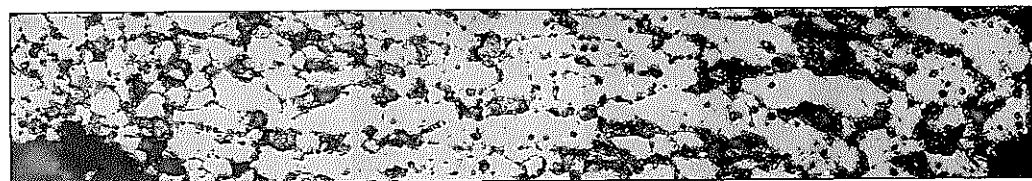
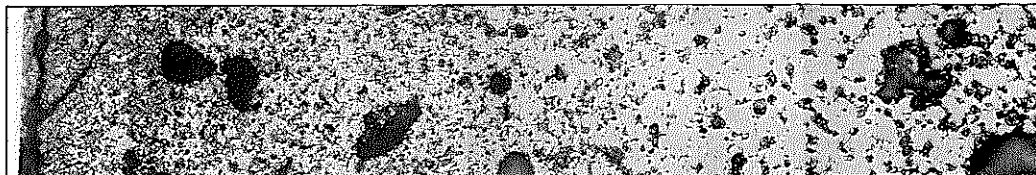
Photo. 0-13 Optical Micrograph of the Transverse Section of the
Core Fuel Pin (Specimen No. A10441) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10441



0.5 mm



50 μm

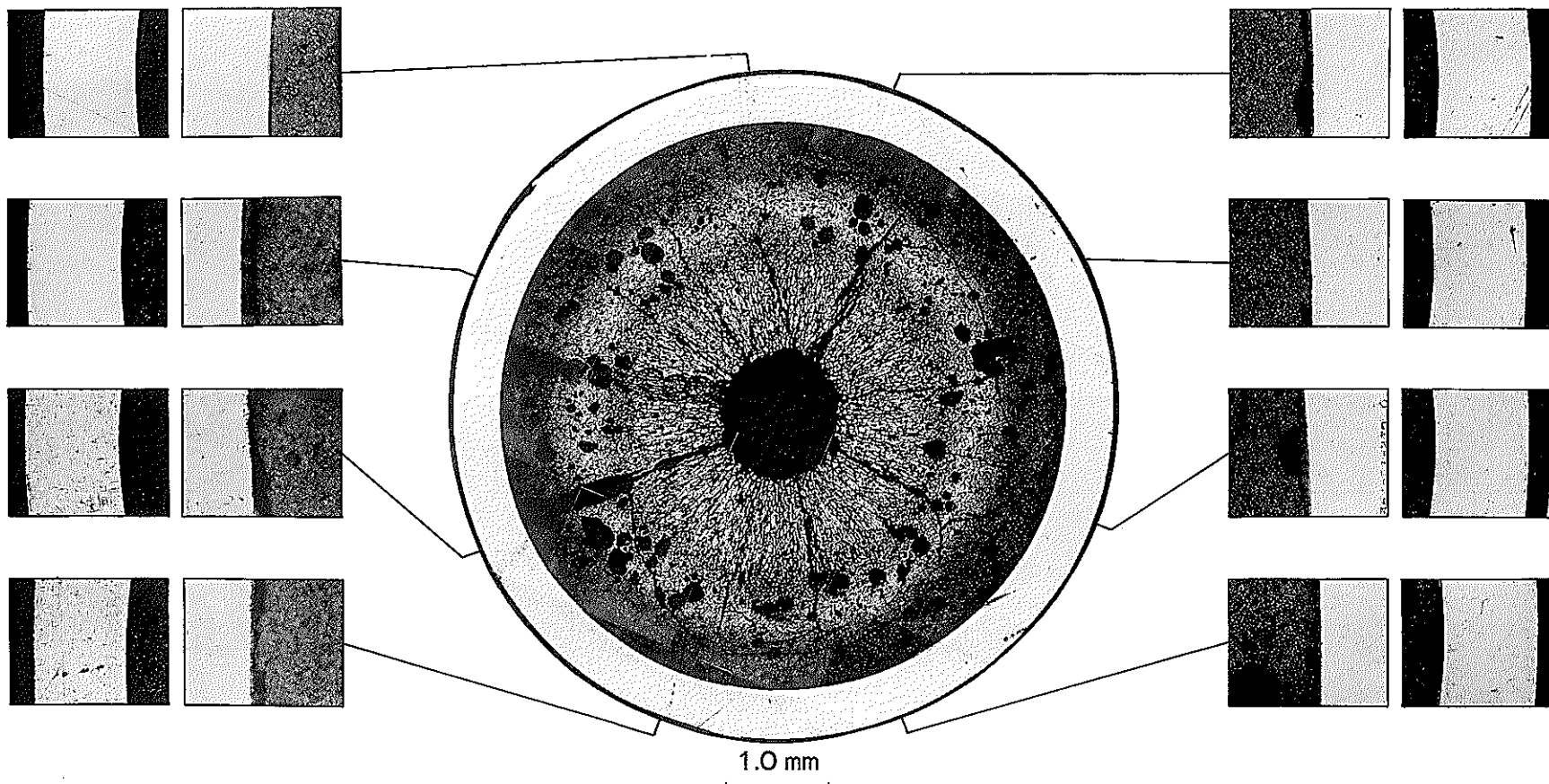
As-Polished

E03A112

Photo.0-14 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A10441) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10441



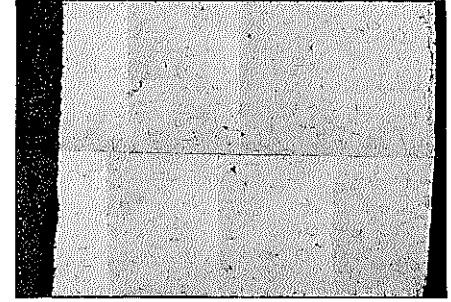
— 61 —

As-Etched

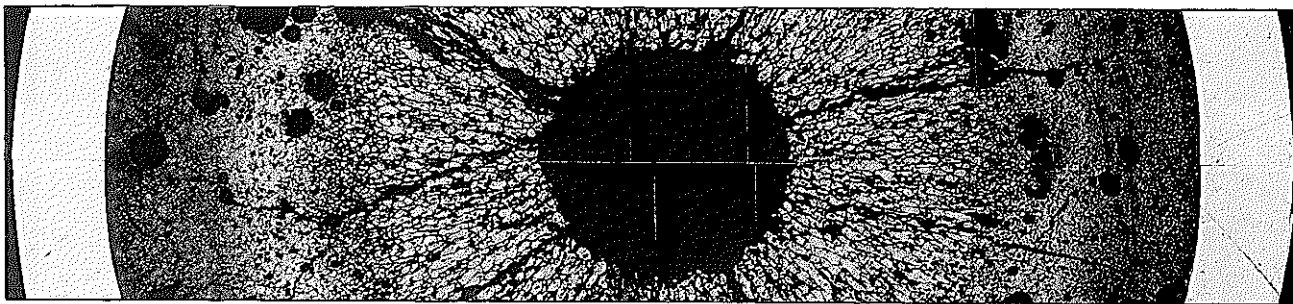
E03A123

Photo. 0-15 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A10441) As-Etched

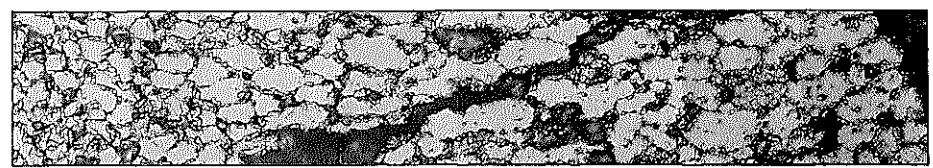
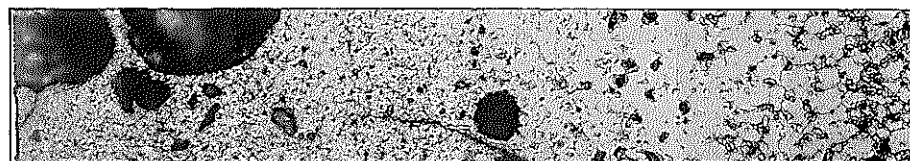
"JOYO" MK-II PFB020 Specimen NO. A10441



50 μm



0.5 mm



50 μm

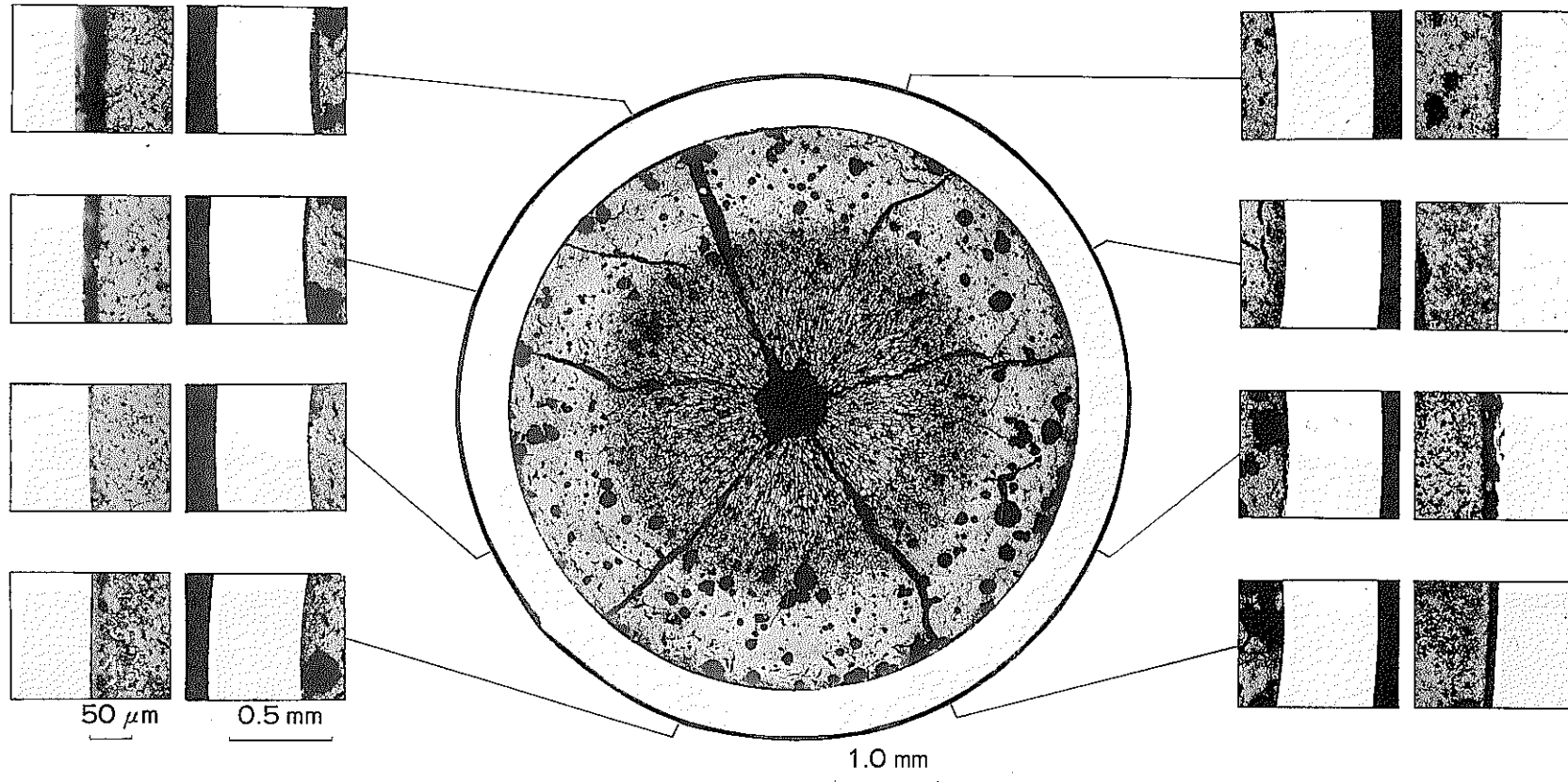
As-Etched

E03A124

Photo. 0-16 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A10441) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10472



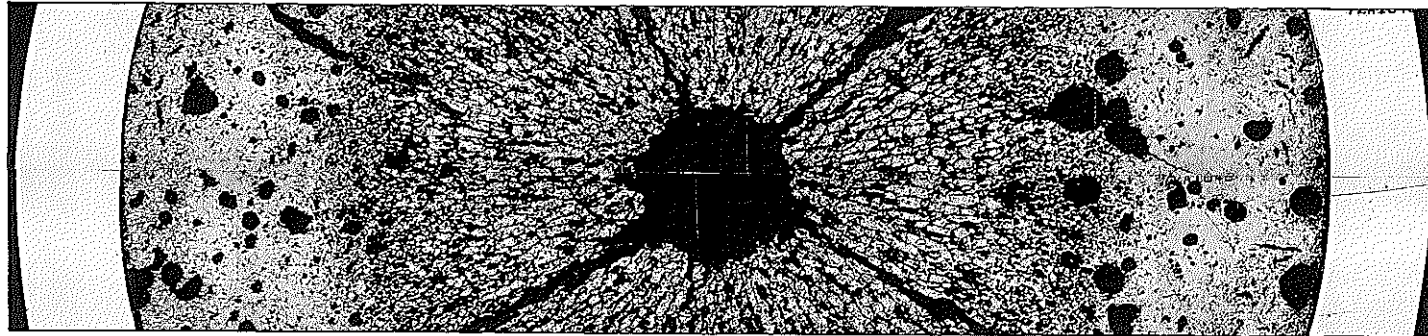
As-Polished

E03A113

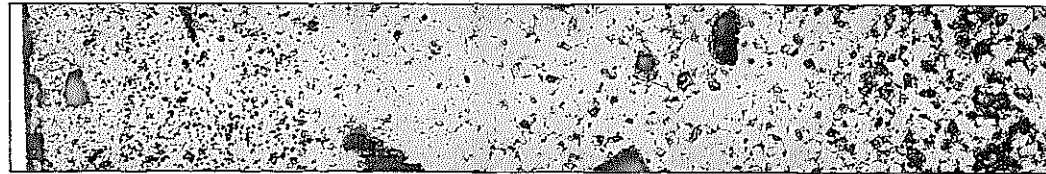
Photo. 0-17 Optical Micrograph of the Transverse Section of the
Core Fuel Pin (Specimen No. A10472) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A10472



0.5 mm



50 μ m

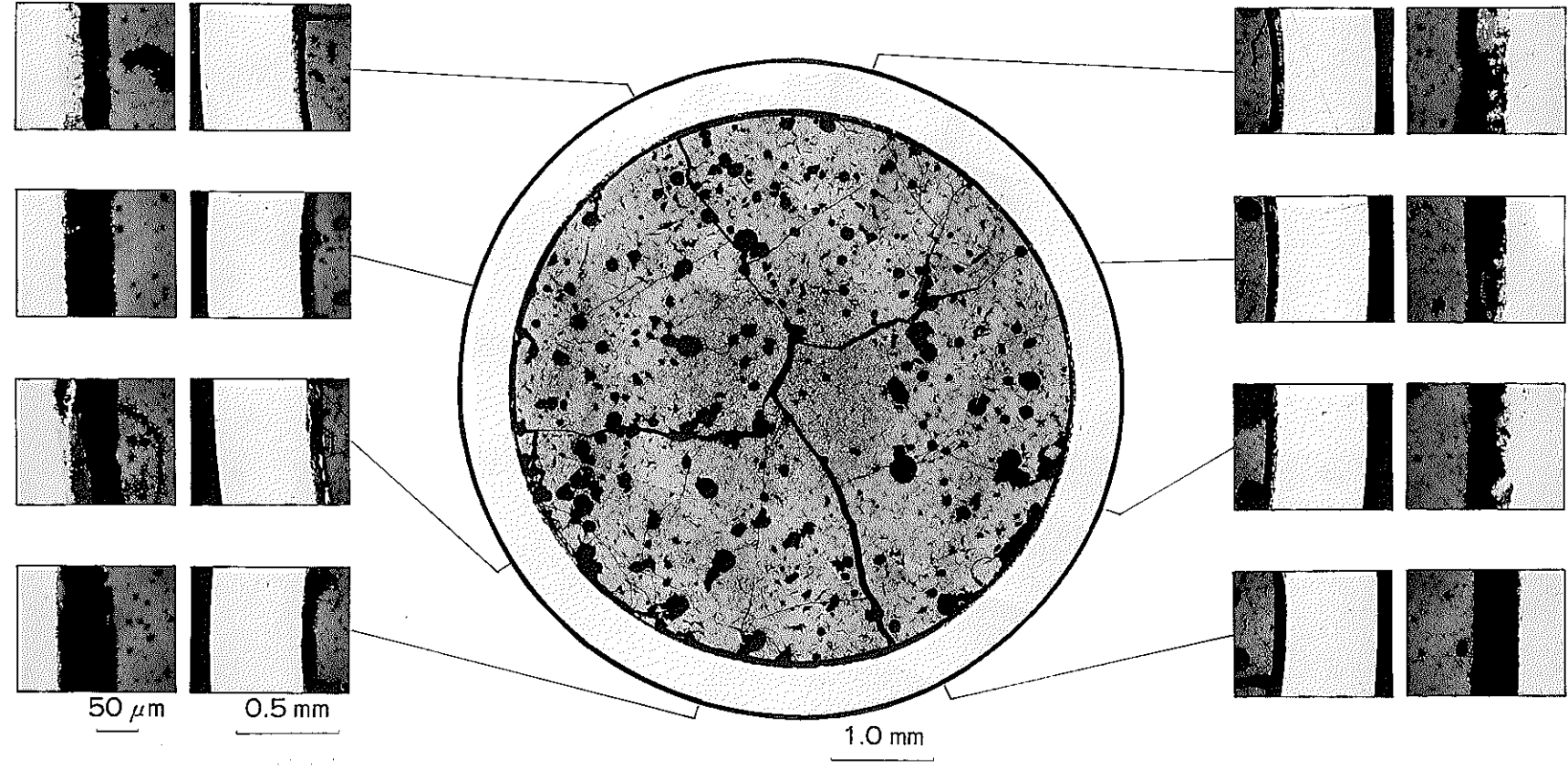
As-Polished

E03A115

Photo. 0-18 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A10472) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A104A2



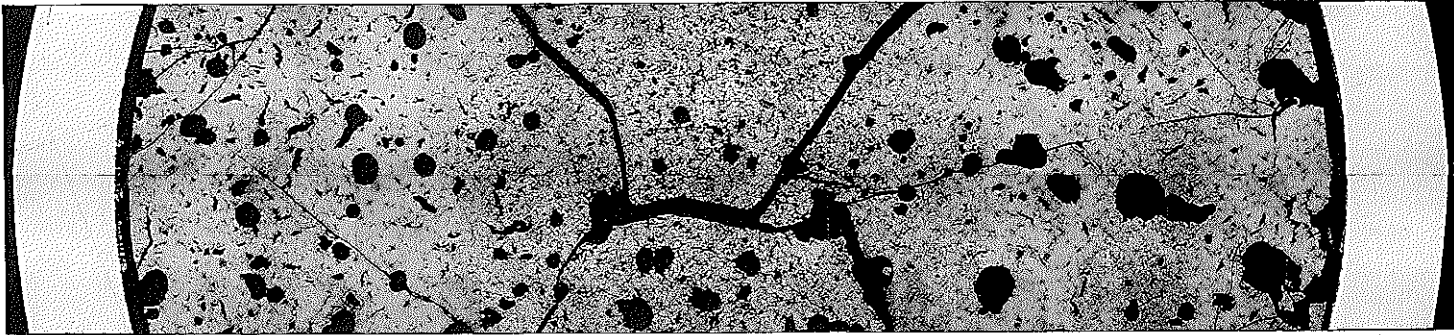
As-Polished

E03A116

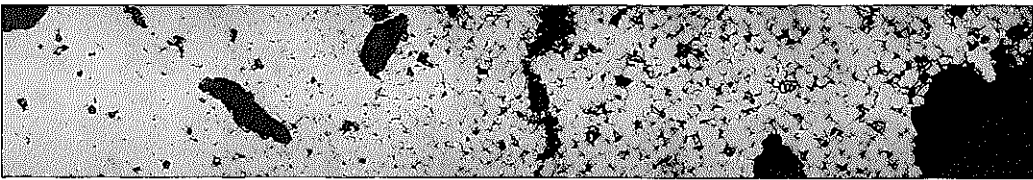
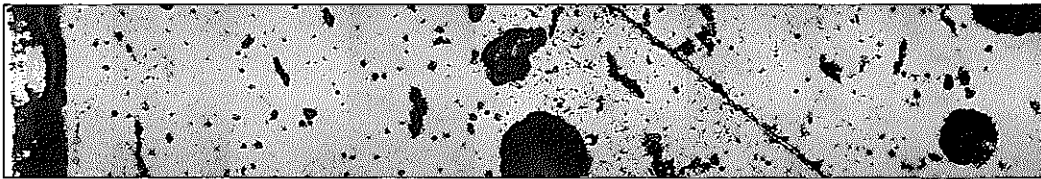
Photo. 0-19 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A104A2) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A104A2



0.5 mm



50 μ m

As-Polished

E03A118

Photo. 0-20 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A104A2) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB020

Specimen NO. A104A2

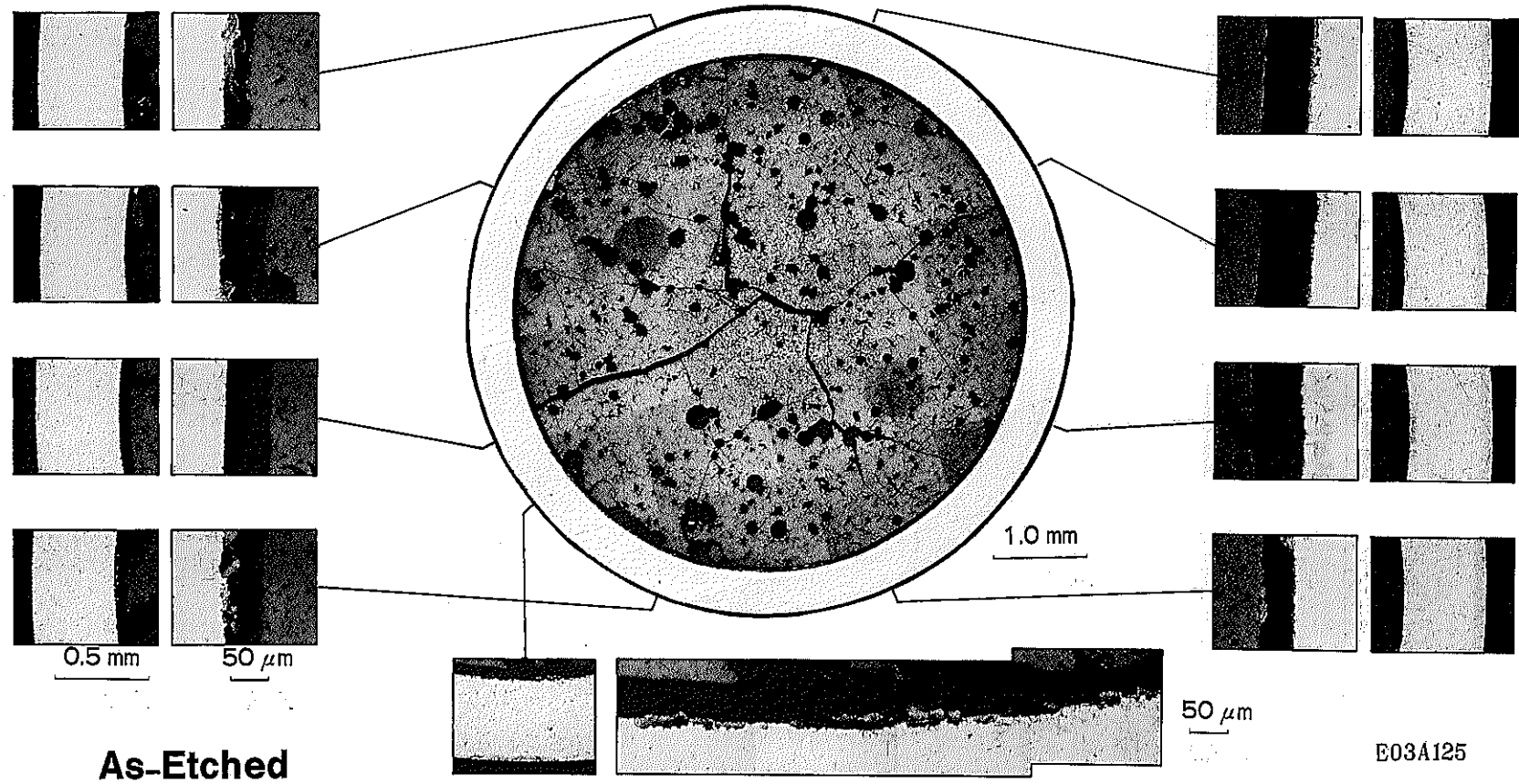
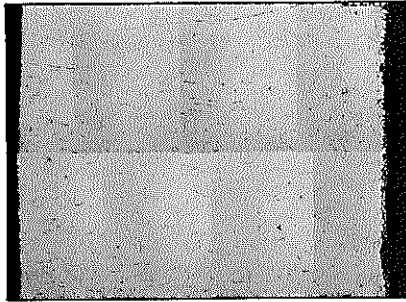


Photo. 0-21 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. A104A2) As-Etched

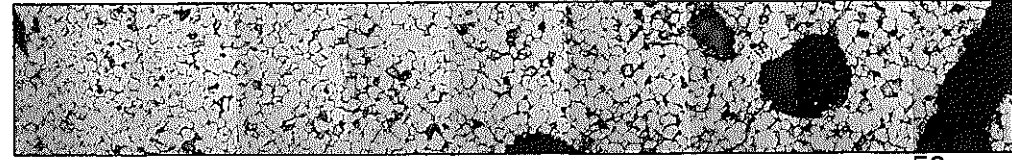
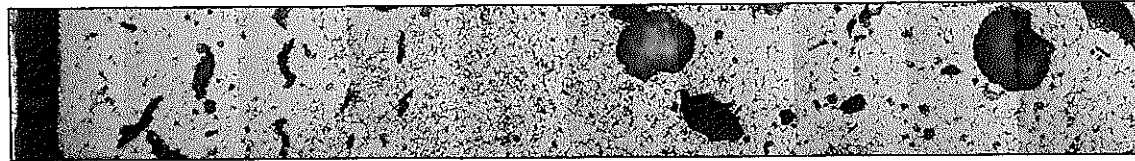
"JOYO" MK-II PFB020
Specimen NO. A104A2



50 μ m



0.5 mm

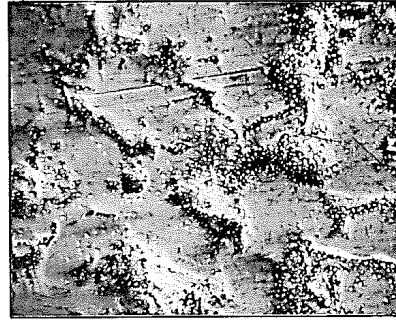
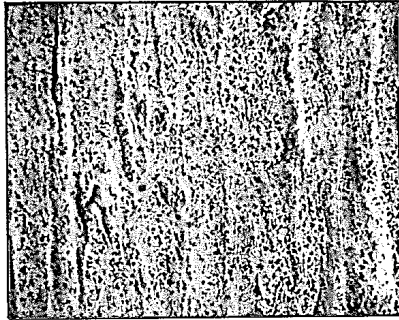


50 μ m

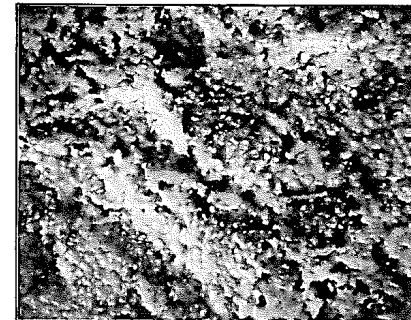
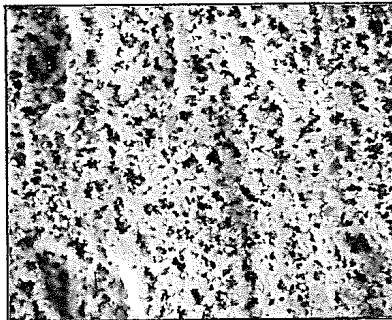
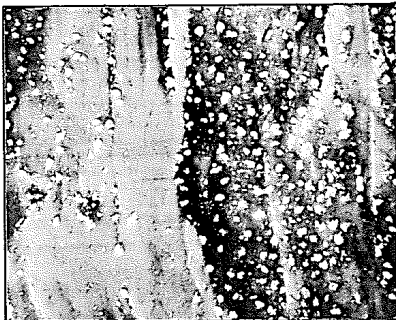
As-Etched

E03A126

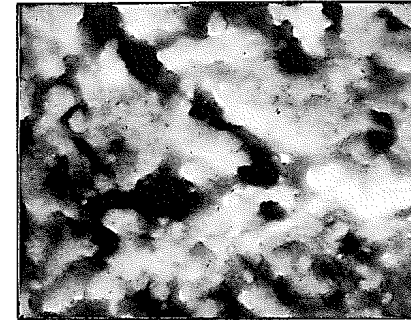
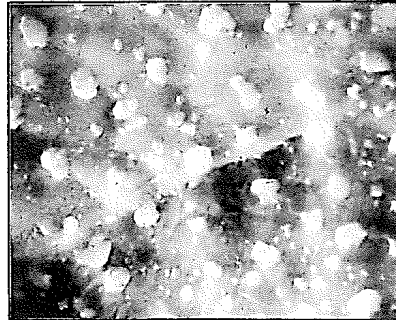
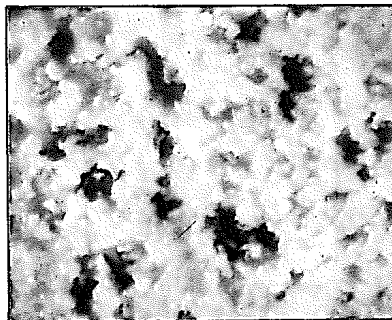
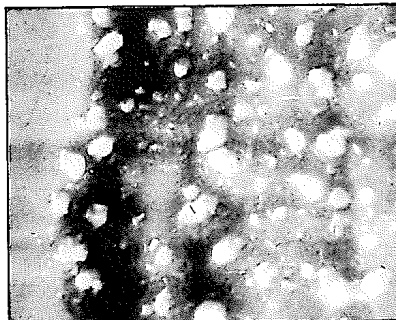
Photo. 0-22 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. A104A2) As-Etched



20 μm



10 μm



2 μm

Temp 385 °C
No. A1032

590 °C
A103C2

385 °C
A1062

585 °C
A106A2

Photo. S-1 Secondary Electron Micrographs of the Cladding
Outer Surface (Pin No. A103, A106)