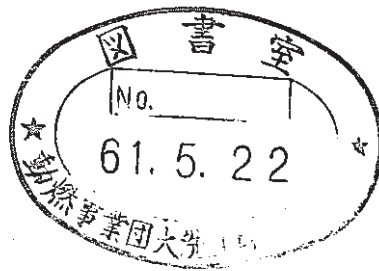


「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体(PFB011)の照射後試験(2)

プレナム人工欠陥付燃料要素の組織観察及び機器分析



1986年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 86-139
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 B型特殊燃料集合体(PFB011)の照射後試験(2)

プレナム人工欠陥付燃料要素の組織観察及び機器分析

実施責任者 甲野 啓一*
報告者 鵜飼 重治,* 杉山 忠夫,* 畔野 一郎*
 梶田 尚也,* 柴原 格*

要 旨

高速実験炉「常陽」において、破損燃料集合体検出装置(FFDL)の性能確認のためプレナム人工欠陥付燃料ピンの照射試験が実施された。本試験に供された集合体はB型特殊燃料集合体“PFB011”であり、プレナム人工欠陥付燃料ピン2本、校正用燃料ピン及びステンレス製ダメージピンが装填されている。本集合体は炉内装荷位置「1D1」において、100MW出力でおよそ1.5日間照射された。AES金相セルでは、2本のプレナム人工欠陥付燃料ピンの組織観察と機器分析を実施した。

本試験により以下の結果が得られた。

- (1) 2本のプレナム人工欠陥付燃料ピンのうち、1本(8922ピン)にはNa-燃料反応がペレット外周部の粒界に沿って観察された。8922ピンのペレット中心部には明瞭な組織変化は生じていなかった。
- (2) Na-燃料反応は8922ピンの燃料カラム中央部から下部にかけて著しく、カラム中央部の径方向ギャップ幅の平均値は製造時の85 μ mから11 μ mにまで減少していた。
- (3) 8922ピンの燃料カラム中央部のペレット長は製造仕様値である9 \pm 1mmから9.56mmに増加しており、X線ラジオグラフィで測定された9.5mmのスタック長の増加はNa-燃料反応によるスエリングに起因していることが確認された。
- (4) Naとインシュレータペレット(UO₂)との反応は認められなかった。
- (5) 他のピン(8927ピン)には、Na浸入は認められたものの、Na-燃料反応はまったく認められなかった。
- (6) 8927ピンのペレット中央部には、いびつな形状をした中心空孔と柱状晶が観察された。
- (7) 8927ピンの燃料カラム中央部の径方向ギャップ幅の平均値は68 μ mであった。

* 大洗工学センター，燃料材料開発部，技術解析室

- (8) 以上の結果から、8927ピンでは出力運転中にピン内へのNa 浸入はなかったと推定された。8922ピンと8927ピンの燃料組織の差は、8922ピンの運転中のピン内へのナトリウム浸入と、Na - 燃料反応に伴うペレットスエリングで生じたギャップの閉塞による燃料ペレットの温度低下によるものと推定された。

Irradiation Test of B Type Irradiation Subassembly
(PFB011) in "JOYO" MK-II

Metallographic Examination of Plenum Prefected Fuel Pins

Shigeharu Ukai*, Tadao Sugiyama*,
Ichiro Unno* , Naoya Kushida*,
Itaru Shibahara* and Keiichi Kono*

Abstract

Irradiation Test of plenum predefected pin was conducted to confirm the ability of failed fuel detection and location (FFDL) system in "JOYO". The B type irradiation subassembly "PFB011" was used for this test, which contained two plenum predefected pins, sibling pin and stainless steel dummy rods. This subassembly was irradiated for one and half days at reactor position 1D1 during 100 MW reactor power. Ceramographic observation and elemental analyses of both plenum predefected pins were carried out in metallography cell of Fuels Monitoring Facility (FMF).

Following results were obtained in this test.

- (1) The sodium fuel reaction was observed along the grain boundary of outer surface of the pellet in one of plenum predefected pin (8922 pin). The fuel restructuring did not appear clearly in center region of this fuel pin. The sodium fuel reaction was not identified in the other plenum predefected pin (8927 pin).

*Analysis and Evaluation Section, Fuels and Materials Division,
O-arai Engineering Center.

- (2) It was observed that sodium reacted considerably with fuel in the region from middle toward bottom of fuel column of 8922 pin, and average radial gap width at middle of fuel column reduced from 85 μm to 11 μm .
- (3) The pellet length at middle of fuel column of 8922 pin increased from 9.0 mm (Fabrication Spec.) to 9.56 mm. The fuel stack length increase of 9.5 mm measured by X-ray radiograph was confirmed to be caused by fuel swelling due to the sodium fuel reaction.
- (4) Sodium-UO₂ (insulator pellet) reaction was not observed at all.
- (5) The asymmetrical shapes of central void and columnar region were observed at middle of fuel column of 8927 pin, in which the sodium fuel reaction was not identified.
- (6) The average gap width at middle of fuel column of 8927 pin remained 68 μm in radius.
- (7) Based on above results, it was supposed that sodium did not enter into the 8927 pin during reactor operation. The difference of fuel microstructure between 8922 pin and 8927 pin was supposed to be caused by fuel temperature decrease of 8922 pin due to sodium ingress and gap closure induced by fuel-sodium reaction swelling during reactor operation.

List of Tables

Table 1	Specification of JOYO MK-II Fuel Pin	17
Table 2	Polishing Condition of Specimen	18
Table 3	Conditions of Ionic Etching and Evaporation ..	18
Table 4	Measured Gap Width of Each Specimen	19
Table 5	Summary of Results on Non Destructive and Destructive Examination of the Plenum Predefected Pins	19

List of Figures

Fig. 1	Location of Fuel Pins (Pin No.8922, Pin No. 8927) in the Fuel Subassembly	20
Fig. 2	Structure of Fuel Pin in B-Type Irradiation Subassembly	21
Fig. 3	Location of the Fuel Subassembly (Fab. No. PFB011) in "JOYO" MK-II	22
Fig. 4	Irradiation History of FFDL Irradiation Cycle .	23
Fig. 5	Axial Distribution of Linear Heat Rate on the Plenum Predefected Pins	24
Fig. 6	Axial Distribution of Cladding Middle Wall Temperature on the Plenum Predefected Pins ...	25
Fig. 7	Analyses Positions by EPMA	26
Fig. 8	Distribution on Intensity of $Na_{K\alpha}$, $U_{M\alpha}$ and Pu_{MB} in the Sodium-Fuel Reaction Region	27
Fig. 9	Ion Mass Spectrum of the Fuel Outer Region (Specimen No. 892242)	28

Lists of Photographs

Photo. 0-1	Optical Macrographs of the Metallographic Specimens Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. 8922)	29
Photo. 0-2	Optical Macrograph of the Metallographic Specimens Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. 8922)	30
Photo. 0-3	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892222) As-Polished	31
Photo. 0-4	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.892222) As-Polished	32
Photo. 0-5	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892222) As-Etched	33
Photo. 0-6	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No.892222) As-Etched	34
Photo. 0-7	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892242) As-Polished	35
Photo. 0-8	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892242) As-Polished	36
Photo. 0-9	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892242) As-Etched	37
Photo. 0-10	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892242) As-Etched	38
Photo. 0-11	Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892243) As-Polished	38
Photo. 0-12	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892243) As-Polished	40

Photo. 0-13	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892243) As-Polished	41
Photo. 0-14	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892243) As-Polished	42
Photo. 0-15	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892282) As-Polished	43
Photo. 0-16	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892282) As-Polished	44
Photo. 0-17	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892282) As-Etched	45
Photo. 0-18	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892282) As-Etched	46
Photo. 0-19	Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892285) As-Polished	47
Photo. 0-20	Optical Microstructure of the Core Fuel and Upper Insulator UO ₂ Fuel (Specimen No. 892285) As-Polished	48
Photo. 0-21	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892285) As-Polished	49
Photo. 0-22	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892722) As-Polished	50
Photo. 0-23	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892722) As-Polished	51
Photo. 0-24	Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892722) As-Etched	52
Photo. 0-25	Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. 892722) As-Etched	53

Photo. 0-26	Optical Microstructure of the Core Fuel Showing that Sodium covered the Specimen Surface (Specimen No. 892242) As-Polished	54
Photo. E-1	X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No. 892222)	55
Photo. E-2	Na _{Kα} X-ray Image of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No. 892222) ...	56
Photo. E-3	X-ray Images in the Crack of the Pellet (Specimen No. 892222)	57
Photo. E-4	X-ray Images in the Void of the Pellet (Specimen No. 892222)	58
Photo. E-5	X-ray Images in the Crack of the Pellet (Specimen No. 892222)	59
Photo. E-6	X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No. 892242)	60
Photo. E-7	Na _{Kα} X-ray Image in the Crack of the Pellet (Specimen No. 892242)	61
Photo. E-8	X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No. 892243)	62
Photo. E-9	X-ray Images of the Interface between the Core Fuel and Insulator UO ₂ (Specimen No. 892285)	63
Photo. E-10	X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No. 892285)	64
Photo. E-11	Na _{Kα} X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No. 892722)	65
Photo. E-12	Na _{Kα} X-ray Images in the Core Fuel (Specimen No. 892722)	66
Photo. I-1	Ion Images of the Core Fuel Outer Region (Specimen No. 892242)	67
Photo. I-2	Ion Images of the Crack in the Fuel (Specimen No. 892242)	68

List of Chart

Chart 1 Spectral Analyses of the Metallic Inclusion
in the Fuel 69

目 次

1. はじめに	1
2. 試験用集合体と燃料要素の概要	2
2.1 集合体の概要	2
2.2 燃料要素の概要	2
3. 照射条件	3
4. 試験方法	4
4.1 試料調整	4
4.2 光学顕微鏡観察	4
4.3 X線マイクロアナライザによる元素分析	5
4.4 イオンマイクロアナライザによる質量分析	5
5. 試験結果	6
5.1 試料No.892222	6
5.2 試料No.892242	6
5.3 試料No.892243	7
5.4 試料No.892282	8
5.5 試料No.892285	8
5.6 試料No.892722	8
6. 試験結果のまとめ	10
7. スリット付試験用燃料要素内へのナトリウムの浸入挙動に関する考察	11
7.1 照射試験前の予備解析結果	11
7.2 100MW出力運転中において、8922ピンにナトリウムが浸入していた原因…	12
8. まとめ	14
9. 謝 辞	15
10. 参考文献	16

1. はじめに

高速実験炉「常陽」において、破損燃料集合体検出装置（FFDL）、カバーガスオンライン γ 線検出装置及びタギング法の性能確認のため、プレナム人工欠陥付燃料ピンの照射試験が実施された。これまで「常陽」では燃料破損が一回も発生していないため、意図的に人工欠陥付燃料ピンを照射して上記性能確認を行うことは破損燃料検出に係わるプラント固有の条件に関するデータを取得する上で、きわめて貴重な実験であった。本試験に供された集合体はB型特殊燃料集合体“PFB011”であり、プレナム人工欠陥付燃料ピン2本、校正用標準燃料ピン1本、タグガスクャプセル入りダミーピン1本及びステンレス製ダミーピンが装填されている。本集合体は「常陽」における性能試験終了後、照射燃料集合体試験施設（FMF）に搬入され、各種非破壊試験が実施された。

非破壊試験において⁽¹⁾、2本のプレナム人工欠陥付燃料ピンに3g程度の重量増加が認められ、そのうち1本には、9.5mmのスタック長の増加と最大0.2%のピン外径増加が認められた。そのためAES金相セルでは、Na-燃料反応の有無及びその形態を調べるため、2本のプレナム人工欠陥付燃料ピンの組織観察と機器分析を実施した。なお、照射燃料試験施設（AGF）では物性試験が実施され、また校正用標準燃料ピンについても燃焼率測定と金相試験が実施されている。本報告書はAES金相セルで実施した2本のプレナム人工欠陥付燃料ピンの組織観察と機器分析結果について述べたものである。

2. 試験用集合体と燃料要素の概要

2.1 集合体の概要

集合体の寸法、構造はB型特殊燃料集合体と同じである。集合体には、燃料要素及びダミー要素が計30本組み込まれている。燃料要素及びダミー要素の内分けは、イ) プレナム人工欠陥付燃料ピン(2本)、ロ) 校正用標準燃料ピン(1本)、ハ) ステンレス製ダミーピン(26本)、ニ) スリット付タグガスキャプセル入りダミーピン(1本)となっている。Fig.1に集合体内の要素配置図を示す。3本の燃料ピンは各々1本ずつ3ケのコンパートメントに配置され、残り3ケのコンパートメントにはステンレスダミーピンのみが装填されている。

2.2 燃料要素の概要

Table 1に燃料要素の製造仕様を示す。プレナム人工欠陥付燃料ピンと校正用燃料ピンに使用された燃料ペレットはMK-II炉心燃料と同様の組成である。また、Fig.2に燃料要素の概略図を示す。プレナム人工欠陥付燃料ピンの被覆管には、照射に伴って生成される核分裂生成物(FP)のうちガス状のもののみをピン外へ放出させ、またFFDL運転時にピン内のFPをFFDL内にサンプリングするためのスリット(巾0.5mm、長さ1mm)がプレナムスプリング位置に設けてある。スリットは照射前の密封性を確保するため、ステンレスハンダ(熔融温度約300℃)にて密封されている。ダミー要素には、燃料ペレットのかわりにステンレス製(SUS316相当)のロッドが装填されている。

3. 照 射 条 件

B型特殊燃料集合体PFB011は、MK-II100MW第7サイクル終了後、炉内位置「1D1」に装荷され、1985年4月17日から4月19日の期間照射された。Fig. 3に炉内装荷位置を、Fig. 4に照射履歴を示す。100MW出力運転中のプレナム人工欠陥ピン8927ピン、8922ピンの軸方向線出力分布と被覆管肉厚中心温度分布をそれぞれFig. 5, 6に示す。同集合体はFFDL性能試験終了後、4月24日に炉外に取出され、FMFに搬入された。

4. 試験方法

4.1 試料調整

(1) 切断, 埋込み

AES金相セルでは、プレナム人工欠陥付燃料ピン8922ピンと8927ピンにつき組織観察と機器分析を実施するため、FMF試験セルにおいて、8922ピンからCore燃料下部側より23mm, 中心部から35mm, 上部側より57mmの長さの試験片が切断採取された。また8927ピンからは、Core燃料中心部から23mm長さの試験片が切断採取され、気送管を通じて金相セルに搬入された。金相セルでは、これらの試験片から試料を切断採取する前に真空容器内で、エポキシ樹脂を注入しギャップ、クラック内に樹脂を十分浸透させ燃料を固定した。その後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（刃厚0.3mm）を用いて切断し試料を採取した。試料はさらにエポキシ樹脂によりSUS製埋込みリング（ $21\phi\text{mm} \times 10\text{mm}^{\text{H}}$ ）内に埋込んだ後、SUS製研磨ホルダー（ $32\text{mm}\phi \times 20\text{mm}^{\text{H}}$ ）内にネジ止めした。なお、金相セルは窒素雰囲気であり、酸素濃度は1000ppm前後になるよう管理されている。

(2) 研 磨

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 $\#240$ による表面出し研磨後 $\#320$, $\#400$, $\#600$, $\#800$, $\#1000$ により各々約30分間、さらに仕上げとしてラッピングオイルを潤滑剤として $6\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを使用して各々約20分間研磨した。Photo. 0-1, Photo. 0-2に低倍光顕写真とその軸方向位置を示す。またTable 2に研磨条件を示す。

(3) イオン腐食及び蒸着

研磨が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た。燃料及び被覆管の腐食はイオン腐食装置を用いて行った。なお、イオン腐食を行った際、一部の試料でクラック中に存在し燃料と反応していないナトリウムが試料表面に浸み出てきたため、このような試料については、As-Polishedの観察のみ実施した。

X線マイクロアナライザによる元素分析及びイオンマイクロアナライザによる質量分析を行うための試料表面導電処理は、同装置を用いたカーボン、Auコーティングにより行った。

Table 3にイオン腐食条件、蒸着条件を示す。

4.2 光学顕微鏡観察

高倍率顕微鏡（株ユニオン光学社製、FAROM）を用いて、65倍全体コンポーズ写真撮影を実施した後、燃料-被覆管ギャップ幅及びNa-燃料反応の有無と形態を詳細に観察するため、周方向 45° 毎の8ヶ所（輪切試料）につき520倍、260倍スポット写真撮影を行った。

4.3 X線マイクロアナライザによる元素分析

遮蔽型X線マイクロアナライザ(MAC-450型)を使用して、Na-燃料反応の形態とクラック内へのNaの浸入状況について観察した。分析の際の使用条件を下表に示す。

加速電圧	: 25 kV
試料吸収電流	: 0.07 μ A ~ 0.15 μ A
波長可変範囲(LIF換算)	: 1.400 Å ~ 3.800 Å
分光結晶及び検出器	: KAP (ガスフロー比例計数管)
	PET (" ")
	LIF (ガス封入比例計数管)

4.4 イオンマイクロアナライザによる質量分析

遮蔽型イオンマイクロアナライザ(日立, IMA-2RI型)を用いてクラック内へのNaの浸入状況を観察するためスペクトル分析, 面分析を実施した。測定に際して使用した条件を下表に示す。

使用ガス	: N ₂
一次イオン加速電圧	: 15 kV
一次イオンビーム径	: 200 μ m ϕ
二次イオン加速電圧	: 3 kV
質量測定範囲	: 1 ~ 300 M/e
カソード電極	: SUS
深さ方向測定回数	: 10回

5. 試験結果

5.1 試料No.892222 (8922ピン下端横断面試料 DFCB:25.9mm X/L=0.046)

(1) 光学顕微鏡による観察

本試料のAs - Polished 及びAs - Etched 状態の顕微鏡写真を、Photo.0-3からPhoto.0-6に示す。燃料外周部で、Na - 燃料反応が結晶粒界に沿って観察される。特に外周部より中心方向へ入るクラック周辺での反応が顕著である。反応領域と未反応領域の境界には、周方向マイクロクラックの集合が部分的に認められる。結晶粒径は、燃料中央部の未反応部と外周部の反応部で差は認められない。燃料内に約 $130\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ の大きさの金属片が観察される。燃料/被覆管ギャップ幅測定値をTable 4に示すが、半径方向平均で約 $19\mu\text{m}$ と、製造時 $85\mu\text{m}$ に比べ著しく減少している。

(2) EPMAによる分析

Fig. 7にEPMAによる面分析位置を示す。Photo. E-1に燃料外表面の面分析結果を示す。Naがギャップ部燃料表面に蓄積し、燃料結晶粒界に沿ってNa - 燃料反応が生じていることがわかる。Photo. E-2は周方向マイクロクラックに隣接する燃料内の面分析結果であり、結晶粒界に沿ってNa - 燃料反応が進行している様子が明瞭に観察される。Photo. E-3に反応領域と未反応領域の境界の周方向マイクロクラック部の面分析結果を示す。クラックの一部にNaが観察される。Photo. E-4とE-5は、燃料外周部と中心部に存在するボイドとクラック位置の面分析結果であるが、これらの一部にNaが存在していることがわかる。

5.2 試料No.892242 (8922ピン軸方向中心部横断面試料 DFCB:246.8mm X/L=0.44)

(1) 光学顕微鏡による観察

本試料のAs - Polished 及びAs - Etched 状態の顕微鏡写真をPhoto. O-7~Photo. O-10に示す。本試料は他の試料に比べNa - 燃料反応が最も顕著である。ペレット内にリング状クラックとその外側にボイドと周方向のマイクロクラックから成る集合組織が観察される。燃料-被覆管のギャップよりクラックに沿って侵入したNaは、粒界上で燃料と反応している。またNa - 燃料反応は前述のボイドと周方向マイクロクラックの集合領域にまで進行している。ペレット外周部の径方向クラックは反応によるスエリングによりヒーリングしていることがわかる。ペレット中央部からリング状クラックの領域では高密度化の傾向が認められる。

Table 4に示すとおり燃料-被覆管ギャップ幅は、半径方向平均で約 $11\mu\text{m}$ であり、製造仕様 $85\mu\text{m}$ に比べ著しく減少している。またペレット内には $100\mu\text{m}$ 前後のボイドが多数認められるが、これらは製造時から存在していたものである。(製造時の金相写真と比較することにより確認)

(2) EPMAによる分析

Fig. 7にEPMAによる面分析位置を示す。Photo. E-6に燃料-被覆管境界部の面分析結果を示す。Na-燃料反応は粒界だけでなく部分的に粒内にまで進行していることがわかる。またFig. 8にNa-燃料反応部燃料結晶粒界を横切るNa, U, Puの強度分布を示す。粒界上でNaの強度は強く、粒内ではほぼバックグラウンドレベルにある。一方、U, Puは粒界上でも強度は若干弱いもののかなりの量が存在していることから、粒界上のNaは燃料との反応生成物であることが確認された。Photo. E-7に、ペレット中央部のクラック内に存在しているNaの面分析結果を示す。燃料内に観察された金属片の定性分析結果をChart 1に示す。金属片はFe, Cr, Niが主成分でその強度比はSUS316の組成に近いものであり、通常高燃焼度燃料中に見られる金属状析出物とは異なっている。

EPMA分析中に試料表面にNaが染み出した状況をPhoto. O-26に示す。目視では白く見えたものが、顕微鏡では黒く見える。ポイドやクラック内に存在していた未反応のNaが、長時間セル内に放置している間に徐々に浸み出てきたものと考えられる。

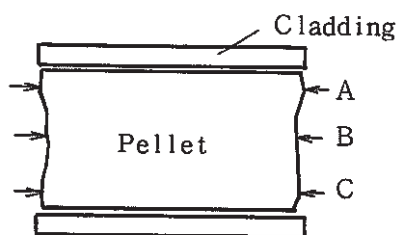
(3) IMAによる分析

Fig. 9にNa-燃料反応部の質量スペクトル結果を示す。Photo. I-1にNa-燃料反応部の面分析結果を顕微鏡写真と合わせて示す。またPhoto. I-2には燃料外周部リング状クラック部の面分析結果を顕微鏡写真と合わせて示す。IMAでは特にNa-燃料反応部の酸素の分布を調べることを目的として実施したが、十分な分解能が得られなかった。

5.3 試料No.892243 (8922 ピン軸方向中心部縦断面試料 DFCB: 247.1mm~264.8mm X/L=0.44~0.47)

(1) 光学顕微鏡による観察

本試料のAs-Polished状態の顕微鏡写真をPhoto. O-11~Photo. O-14に示す。燃料組織は、前述試料(Na892242)と同様な形態である。本試料はペレット長を測定するため、ペレット1ヶ分の縦割試料となっている。製造時における個々のペレット長さは測定されていないため、参考として製造仕様である 9 ± 1 mmを採用する。そうすると顕微鏡写真に基づき測定したペレット長さから求まる伸び率は次のようになる。



- A. $9.561\text{mm} - 9.0\text{mm} = 0.561\text{mm}$ (約6.2%の伸び)
 B. $9.389\text{mm} - 9.0\text{mm} = 0.389\text{mm}$ (約4.3%の伸び)
 C. $9.310\text{mm} - 9.0\text{mm} = 0.310\text{mm}$ (約3.4%の伸び)

本試料は燃料カラム中心部の位置で、Na-燃料反応が最も著しく観察された試料であり、ペレット長は最大で6.2%伸びていることになる。一方、X線ラジオグラフィで測定されたPIEでのスタック長は、563.5mmであり、製造時のスタック長は554mmであるからその伸び率は $(563.5-554) \div 554 \times 100 = 1.7\%$ である。このような軸方向伸びは、Na-燃料反応によるペレットのスエリングによるものと考えられる。

(2) EPMAによる分析結果

Fig. 7に面分析位置を示す。Photo. E-8に燃料-Na反応部のU, Pu, Naの面分析結果を示す。反応は粒界に沿って生じているが、粒内全域に広がっているものも部分的に認められる。

5.4 試料No.892282(8922ピン軸方向上端横断面試料 DFCB: 535.1mm, X/L=0.95)

(1) 光学顕微鏡による観察

本試料のAs-Polished及びAs-Etched状態の顕微鏡写真をPhoto. O-15~Photo. O-18に示す。本試料は、燃料カラム下部及び中心部試料に比べNa-燃料反応の割合は少なく、燃料外周部は反応している部分と反応していない部分が存在している。燃料-被覆管ギャップ幅は半径方向平均で約51 μ mである。

5.5 試料No.892285(8922ピン上部インシュレータ/炉心燃料境界部縦断面試料)

(1) 光学顕微鏡による観察

本試料のAs-Polished状態の顕微鏡写真をPhoto. O-19~Photo. O-21に示す。炉心燃料側では、燃料外周部クラック周辺及びインシュレータ境界部で、Na-燃料反応が観察される。しかし、インシュレータUO₂とNaの反応はまったく認められない。

(2) EPMAによる分析

Fig. 7に面分析位置を示す。Photo. E-9に燃料/インシュレータ境界のNa, U, Puの面分析結果を示す。炉心燃料とNaの反応が観察されるが、インシュレータUO₂とは反応していないことがわかる。また、Photo. E-10に炉心燃料反応部のNa, U, Puの面分析結果を示す。

5.6 試料No.892722(8927ピン軸方向中心部横断面試料 DFCB: 246.5mm X/L=0.45)

本試料は8927ピンの燃料カラム中央部から採取した試料で、8922ピンの試料No.892-242とほぼ同一軸方向位置に相当する。

(1) 光学顕微鏡による観察

As-Polished及びAs-Etched状態の顕微鏡写真をPhoto. O-22~Photo. O-25に

示す。本試料の燃料外周部には、8922ピンにみられたNa-燃料反応はまったく認められず、燃料/被覆管ギャップ幅は半径方向平均で約68 μ mである。また明瞭な中心空孔。柱状晶が観察されるが、その形状はいびつであり柱状晶領域の結晶粒の大きさにもバラツキがみられる。柱状晶内に明瞭なレンズ状ボイドが観察されることから、中心空孔はレンズ状ボイドの中心部へのスweepによって形成されたことはまちがいない。

8922ピンと比較すると、線出力が10W/cm程度高かったことを考慮しても、燃料温度は明らかに高く、このことはNa-燃料反応が生じていないことに起因していると考えられる。

(2) EPMAによる分析

燃料/被覆管ギャップ部のNa分布を観察した結果をPhoto. E-11に示す。Naはギャップ部のほぼ全周にわたり存在しているが、燃料との反応はまったく認められない。燃料ペレット内、クラック、中心空孔等におけるNa分布状況を観察した結果をPhoto. E-12に示す。Naは中心空孔内にはほとんど存在せず、主にクラック内に存在していることがわかる。

6. 試験結果のまとめ

8922ピンと8927ピンの軸方向中心部の試料につき光学顕微鏡による組織観察、EPMAとIMAによる元素分析結果を比較してTable 5⁽¹⁾に示す。両ピンの試験結果をまとめると次のようになる。

8922ピン(プレナム人工欠陥ピン)

- (1) プレナム部のスリットからピン内に浸入したNaは燃料-被覆管ギャップを満たした後ペレット外周部のクラックにそってペレット内に浸入している。このようにしてペレット内に浸入したNaは燃料結晶粒界に沿って燃料と反応している。しかし照射期間が1.5日と短期間であったため反応は粒界にとどまり、部分的にしか粒内へは進行していない。
- (2) ペレット径方向で見ると、Na-燃料反応が生じている領域はペレット外周部に限られ、その内側に周方向マイクロクラックの集合とリング状クラックが形成されている。ペレット中心部は高密度化現象が若干現われている程度で、明瞭な組織変化は生じていない。
- (3) 軸方向で見ると、Na-燃料反応は燃料カラム中心部から下部にかけて著しい。カラム中心部のコールドギャップ幅は11 μ m(径方向)にまで減少しており、照射中にはNa-燃料反応に伴うペレットの膨張により燃料-被覆管の機械的相互作用(PCMI)が発生していたと予測される。ピン外径測定で得られている0.2%の増加量はこのPCMIにより生じたものと考えられる。またペレット長を測定した結果、カラム中心部では最大9.56mmにまで増加していた。X線ラジオグラフィによるスタック長増加量の測定値+9.5mmはNa-燃料反応によるスエリングに起因していると考えられる。
- (4) NaとインシュレータペレットUO₂との反応は認められない。

8927ピン(プレナム人工欠陥ピン)

- (1) 燃料-被覆管ギャップ内にNaは存在しているが、燃料との反応は全く認められない。ピン重量測定でも8922ピンと同様約2.6gの重量増加が認められており、このようなNaは、照射末期かあるいは炉停止後に実施されたFFDL性能試験中にピン内に浸入したものと予測される。
- (2) ペレット中心部に中心空孔、柱状晶が観察された。これらの形状はいびつであるものの、燃料温度が8922ピンよりかなり高かったことを示している。
- (3) 燃料-被覆管径方向ギャップ幅は平均で68 μ m存在している。

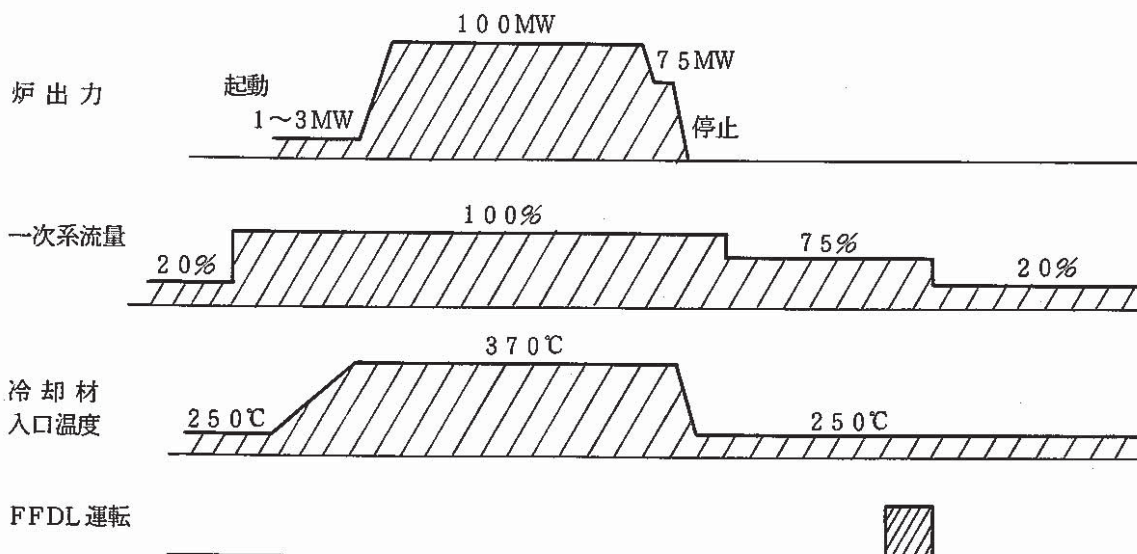
7. スリット付試験用燃料要素内へのナトリウムの 浸入挙動に関する考察

スリットが設けられた2本の試験用燃料要素には、あらかじめハンダシールが施されている。しかしその融点は300℃であるため、冷却材温度が300℃に上昇した時点でスリットは開封し、要素内のガスが冷却材中に放出するよう設計されている。照射試験前の予備解析⁽²⁾において、100MW出力運転中にはガスは放出してもピン内にナトリウムは浸入しないという予測であった。しかし2本の燃料要素の照射後試験結果によると、一方の要素(8927ピン)には炉停止後にナトリウムが浸入したと考えられ当初の予測と一致する。しかし他の要素(8922ピン)はNa-燃料反応が進行しピン径増加も認められることから、100MW照射中にすでにナトリウムがピン内に浸入していたと考えられる。そこでプレナム人工欠陥付燃料ピン内にナトリウムが浸入した原因につき検討する。

7.1 照射試験前の予備解析結果

照射前の予備解析⁽²⁾によると、ナトリウムは100MW運転中にはピン内に浸入せず、炉停止時及びFFDL運転時にスリットから浸入し、照射後試験時においてはスリット位置までナトリウムがピン内を満たしているという予測であった。

以下に「常陽」運転履歴とプラント状態の概略を示し、予備解析結果の概要を述べる。



原子炉起動後、核加熱により冷却材入口温度は250℃から370℃に上昇する過程でハンダシールは溶ける。その時の要素内圧は1.91kg/cm²である。一方、一次系流量は100%であるためスリット部外圧は1.565kg/cm²となり、要素内ガスが冷却材中に放出される。その後の100MW出力への上昇中に要素内圧力は上昇するが、その圧力上昇分のガスは冷却材中に放出され、1.565 kg/cm²の値でバランスするため要素内へのナトリウムの浸入はない。

スリット部外圧の変化の要因として、一次主ポンプの吐出圧力の変動があるが、これによるスリット部圧力変動幅は 3.7×10^{-3} kg/cm²であり、ナトリウム浸入に必要な差圧0.0296kg/cm²に比べ約1ケタ低いため、100MW運転中における要素内へのナトリウムの浸入はないと予測された。一方、100MWから75MWへの出力降下及び炉停止時においては、ガスプレナム温度が417℃から250℃に低下する。これに伴いピン内圧を100%一次系流量時の外圧1.565 kg/cm²に維持するため、スリット部よりナトリウムが浸入する。浸入するナトリウム量 ΔV_1 は、プレナム容積が7.5 cm³であるため次のようになる。

$$\Delta V_1 = V_1 - V_0 = V_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) = 7.5 \left(1 - \frac{250 + 273}{417 + 273} \right) = 1.82 \text{ cm}^3$$

ここで V_1 、 T_1 ；100MW出力時のプレナム容積と温度

V_0 、 T_0 ；炉停止時のプレナム容積と温度

また炉停止後FFDL運転が実施され、この時には一次系ナトリウム外圧は3.1kg/cm²にまで上昇するため、これに相当するナトリウムがスリットより浸入する。その量 ΔV_2 は次のようになる。

$$\Delta V_2 = V_2 - V_3 = V_2 \left(1 - \frac{P_2}{P_3} \right) = (7.5 - 1.82) \left(1 - \frac{1.476}{3.10} \right) = 2.98 \text{ cm}^3$$

ここで V_2 、 P_2 ；炉停止中のプレナム容積とプレナム圧力（1次系流量75%時）

V_3 、 P_3 ；FFDL運転時のプレナム容積とプレナム圧力

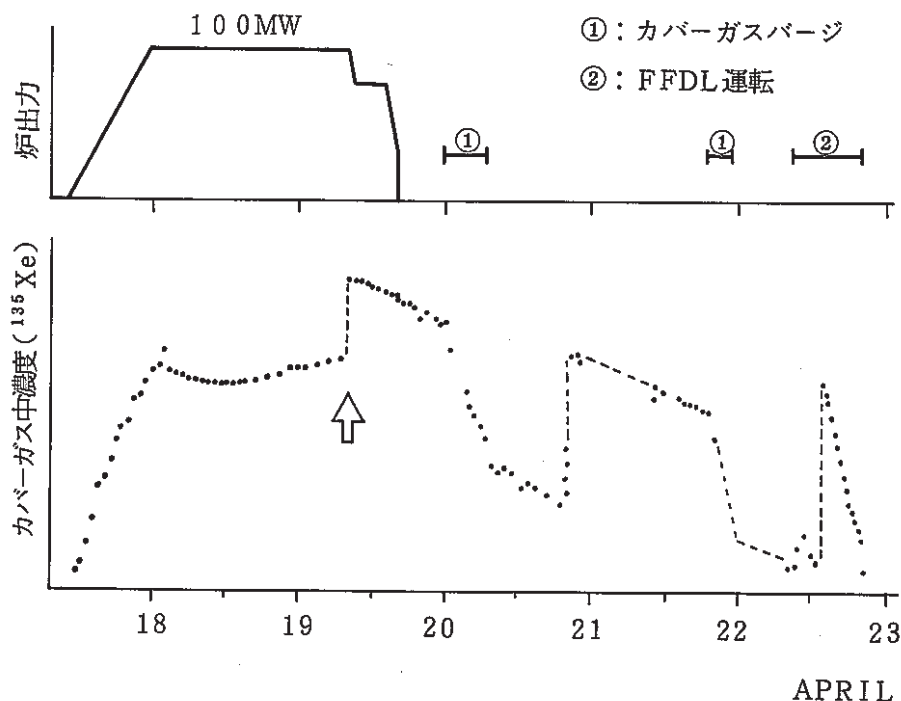
即ち、炉停止時及びその後のFFDL運転時において4.8 cm³（1.82 + 2.98）のナトリウムがピン内に浸入することになる。しかしこの量に相当するナトリウムレベルは、スリットより上側に位置するため、FFDL操作中にスリット位置より上側のナトリウムは排出され、照射後試験時にピン内に残留しているナトリウム量は、スリットより下側のピン内空間容積となる。その体積は2.9 cm³であり、照射後試験で得られている重量増加量とほぼ一致する。

7.2 100MW出力運転中において、8922ピンにナトリウムが浸入した原因

照射後試験結果によると、8922ピンでは100MW出力時の線出力373W/cmで生じると予測される燃料組織変化を示しておらず、100MWの照射初期にピン内にナトリウムが浸入

したことによりギャップ熱伝達率が改善され、燃料温度が低下したものと推察される。予備解析では、100MW運転中の冷却材外圧の変動要因として一次主ポンプの吐出圧力の変動だけを考慮し、その場合には $3.7 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$ の変動幅となる。一方スリットからナトリウムが浸入するに必要なピン内外の差圧は 0.0296 kg/cm^2 であり、圧力変動の方が十分小さいためピン内にナトリウムは浸入しないと考えられた。

100MW出力運転の初期にピン内にナトリウムが浸入した原因については現状明確になっていないが予備解析で考慮しなかった燃料ピンの流力振動による圧力バランスの変動が原因している可能性が考えられる。試験結果で記述したように、Na-燃料反応は燃料カラム部の中心から下部で著しいことから、ピン内に浸入したナトリウムは燃料-被覆管ギャップ部の下部から徐々に留まっていたものと推察される。しかし燃料カラム上部でも若干のNa-燃料反応が生じていることから、100MW運転末期では燃料カラム軸方向全域にナトリウムが浸入していたものと予測される。ピン下端から炉心燃料上端までのピン内自由空間はおよそ0.85ccであり、この程度のナトリウムは流力振動等による圧力バランスの変動によりピン内に浸入する可能性は十分ありうると考えられる。一方8927ピンでは、燃料組織は100MW出力(383W/cm)で予測される組織を示しており、Na-燃料反応は生じていないことから、ピン内へのナトリウムの浸入は100MW運転の末期か、あるいは炉停止後に生じたものと予想される。オンラインγ線モニタによるカバーガス中の ^{135}Xe の測定⁽³⁾によると、100MWから75MWに出力降下する直前で ^{135}Xe のカバーガス放射能濃度がステップ状に増加している。この様子を下図に示す。



参考文献(3)より

8927ピンについては、このステップ状に ^{135}Xe がピンから放出した時に、Naがピン内に浸入した可能性も考えられる。

8. ま と め

本試験により以下の結果が得られた。

- 1) 2本のプレナム人工欠陥付燃料ピンのうち1本(8922ピン)には、Na-燃料反応がペレット外周部の粒界に沿って観察された。8922ピンのペレット中心部には明瞭な組織変化は認められない。
- 2) Na-燃料反応は8922ピンの燃料カラム中央部から下部にかけて著しく、カラム中心部のコールドギャップ幅平均値(半径)は燃料-Na反応によるペレットのスエリングにより、製造時の85 μ mから11 μ mにまで減少しており、照射中ペレット-被覆管機械的相互作用が生じていたものと推察される。
- 3) 8922ピンの燃料カラム中央部のペレット長は製造仕様の9 \pm 1mmから9.56mmに増加しており、X線ラジオグラフィで測定された9.5mmのスタック長の増加はNa-燃料反応によるスエリングに起因していると考えられる。
- 4) NaとインシュレータUO₂との反応は認められなかった。
- 5) 8922ピンへのナトリウムの浸入は、100MWの照射初期に生じたものと推察され、燃料ピンの流力振動による圧力バランスの変動が原因しているものと考えられる。
- 6) 他のピン(8927ピン)には、Na-燃料反応は全く認められなかった。
- 7) 8927ピンのペレット中心部には、いびつな形状をした中心空孔と柱状晶が観察された。
- 8) 8927ピンの燃料カラム中央部の径方向ギャップ幅平均値は68 μ mであった。
- 9) 8922ピンと8927ピンの燃料組織の相違は、8922ピンの運転中のピン内へのナトリウム浸入による燃料ペレットの温度低下によるものと予測される。

9. 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）の田地室長をはじめとする関係室員に、又照射線管理に当っては安管部放射線管理課平野係長以下の係員に御支援いただいた。又試験遂行に際しては原子力技術協の大里行弘、額賀貞芳の両氏に御協力いただきましたことを付記し、これらの方々に感射の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) 燃料材料開発部試験研究成果速報, 60年度第1四半期, PNC I943 85-03
1985年9月
- (2) 高速実験炉「常陽」FFDL炉内試験実施要領, 参考資料集
高速実験炉部, 昭和60年2月
- (3) 高速実験炉部試験研究成果速報, 60年度第1四半期, PNC SN941 85-160

Table 1 Specification of JOYO MK-II Fuel Pin

	項 目	仕 様		項 目	仕 様
1.	ピ ン		3.	インシュレータ ペレット	
	全 長	1 5 3 3 ± 2 mm		組 成	UO ₂
	燃料ペレットスタック長	5 5 0 ± 5 mm		外 径	4.6 0 ± 0.5 mm
	被覆管内径	4.8 0 0 ± 0.0 2 5 mmφ		高 さ	1 2 ± 1 mm
	“ 外径	5.5 0 0 ± 0.0 3 0 mmφ		²³⁵ U濃縮度	0.2 w/o
	“ 肉厚	0.3 5 0 ± 0.0 3 0 mm		密 度	9 4 ± 1 %TD
	ギャップ(ノミナル)	1 7 0 μm			
2.	燃料ペレット		4.	被覆管	
	組 成	PuO ₂ + UO ₂		材 質	AISI-316相当
	高 さ	9 ± 1 mm		溶解法	真空二重溶解
	直 径	4.6 3 ± 0.0 5 mmφ		熱処理及び冷間	溶体化処理後
	密 度	9 3 ± 2 %TD		加工	2 0 %冷間加工
	プルトニウム富化率	2 8.5 ± 1 %		化学成分	
	核分裂性物質含有率	3 0.9 ± 1.0		C	0.0 4 5 ~ 0.0 8 5 w/o
	²³⁵ U濃縮度	1 2.0 ± 0.3 %		Si	≤ 1.0 0
	O/M比	1.9 7 ^{+0.0 2} _{-0.0 3}		Mn	≤ 2.0 0
	蒸発性不純物	≤ 1 5 0 μl/g Mo		P	≤ 0.0 4
	水 分	≤ 3 0 ppm		S	≤ 0.0 1 0
	不純物 Al	≤ 5 0 0 ppm		Ni	1 3.0 0 ~ 1 4.0 0
	B	≤ 2 0		Cr	1 6.0 0 ~ 1 8.0 0
	C	≤ 3 0 0		Mo	2.0 ~ 3.0
	Ca	≤ 1 2 0		Co	≤ 0.1 0
	Cd	≤ 2 0		B	≤ 0.0 1 0
	Cl	≤ 2 5		N	≤ 0.0 1 0
	Cr	≤ 5 0 0		Cu	≤ 0.2 0
	F	≤ 2 5		Ti	≤ 0.1 0
	Mg	≤ 1 5 0		V	≤ 0.2 0
	N	≤ 2 0 0		Nb+Ta	≤ 0.1 0
	Fe	≤ 1 6 0 0		Zr	≤ 0.1 0
	Ni	≤ 5 0 0		As	≤ 0.0 1 0
	V	≤ 5 0 0		Al	≤ 0.0 5 0
	Cu+Zn+Si	≤ 7 0 0			
	Ag+Mn+Mo+Pb+Si	≤ 4 0 0			
	全不純物量	≤ 3 0 0 0			
	プルトニウム・スポット	≤ 2 0 0 μm			

Table 2 Polishing Condition of Specimen

Specimen No.			892222	892242	892243	892282	892285	892722
Polishing Condition								
Grinding Polishing	Emery Paper #240	Weigh 800g	60	60	30	60	210	30
	#320	"	30	30	30	30	30	30
	#400	"	30	30	30	30	30	30
	#600	"	30	30	30	30	30	30
	#800	500g	30	30	30	30	30	30
	#1000	"	30	30	30	30	30	30
Final Polishing (Nylon Cloth)	Diamond Past 6 μ	300g	20	20	20	20	20	20
	3 μ	"	20	20	20	20	20	20
	1 μ	200g	20	20	20	20	20	20

Table 3 Conditions of Ionic Etching and Evaporation

	Etching	Evaporation
Ion Source	Ar	Ar
Degree of Vacuum	1.4×10^{-4} (Torr)	1.4×10^{-4} (Torr)
Accelerating Voltage	1.5 (kV)	1.5 (kV)
Cathode Voltage	8~8.5 (V)	9~11.5 (V)
Magnet Current	1 (mA)	0.7 (mA)
Emission Current	3~4 (mA)	7 (mA)
Suppression Voltage	230 (V)	300 (V)
Exposure Duration	12~18 (min)	5 (min)
Material of Evaporation	Carbon (EPMA) Au (IMA)	

Table 4 Measured Gap Width of Each Specimen

(単位: μm)

測定位置 試料No.	1	2	3	4	5	6	7	8	8ヶ月 平均値
892222	28.7	9.8	19.5	6.3	9.4	11.2	28.4	36.8	18.8
892242	9.3	19.4	13.5	10.8	8.7	12.1	8.0	7.8	11.2
892282	56.9	77.6	91.3	82.7	36.2	17.1	13.7	35.3	51.4
892722	80.3	65.5	51.2	42.1	53.1	63.0	93.7	94.9	68.0

製造時仕様: $85\ \mu\text{m}$

Table 5 Summary of Results on Non Destruction and Destructive Examinations of the Plenum Prefected Pins

項目	試料 試料No.892242 (DFCB: 246.8mm)	試料No.892722 (DFCB: 246.5mm)
中心空孔の有無	無し	有り { 中心空孔はいびつであり, 直 径約 $0.34\ \text{mm}\ \phi$ }
燃料組織	中央部で粒界へポーアの移動がみられる。	中心空孔周囲に, 柱状晶領域が不規則にあり結晶粒内にレンズ状ポイドが存在する。
燃料-Na反応の有無	ペレット外周部でクラック周辺に顕著な反応が認められる。	燃料-Na反応はない Naは, 燃料-被覆管ギャップ内に留まっている
燃料-被覆管の残留ギャップ幅 (半径方向)	$11\ \mu\text{m}$	$68\ \mu\text{m}$

項目	Pin No.	8922	8927
ピン重量変化		+ 3.0 g	+ 2.6 g
X線ラジオグラフィによる スタック長変化		+ 9.5 mm	有意な変化なし (+ 1 mm)
ピン外径変化		Core燃料部で0.2%程度の 外径増加	有意な変化なし

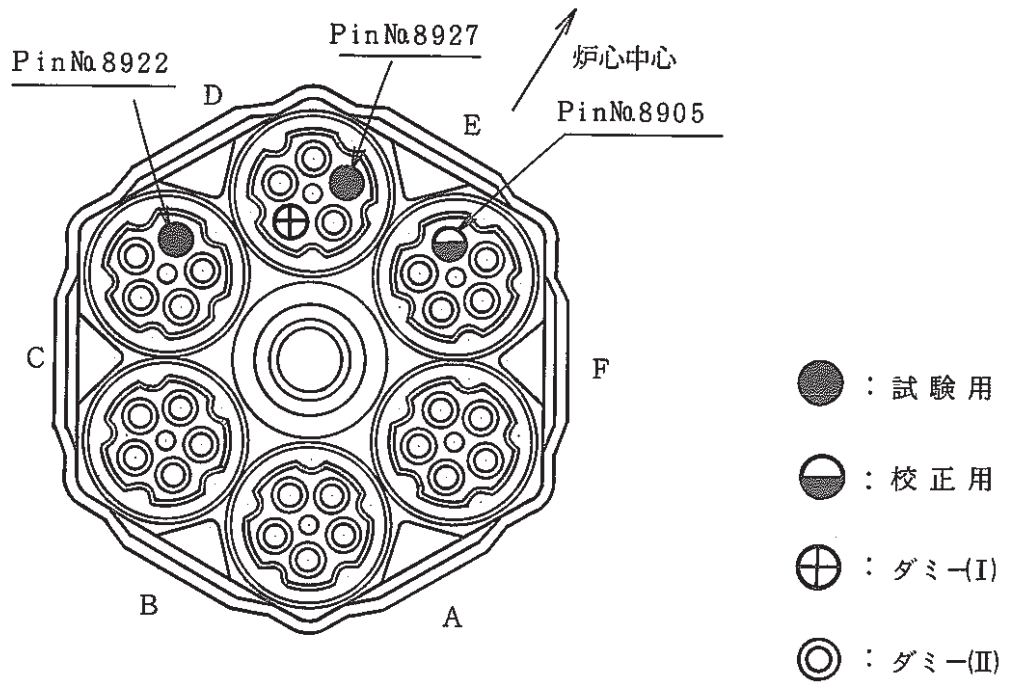
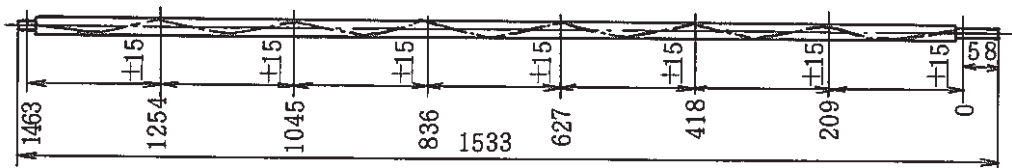
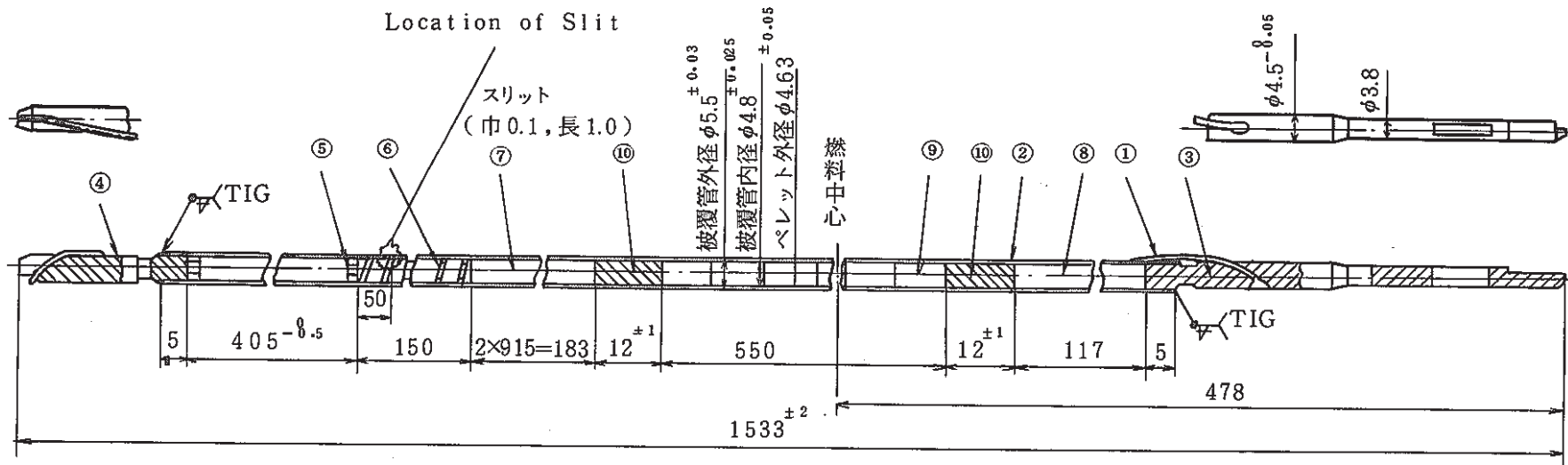


Fig.1 Location of Fuel Pins (Pin No.8922, Pin No.8927) in the Fuel Subassembly.



ワイヤラッピング全体図(1/5)

10	インシュレータペレット	劣化 UO ₂	2	
9	炉心用ペレット	PuO ₂ -UO ₂	61	
8	要素反射体(下)	SUS316	1	
7	要素反射体(上)	SUS316	2	
6	プレナムスプリング	SUS304WPB	1	
5	抑圧板付プレナムスリーブ	SUS316	1	
4	上部端栓	SUS316	1	
3	下部端栓	SUS316	1	
2	被覆管	SUS316相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS316相当	1	φ0.9±0.01
品番	品名	材質	個数	備考

Fig.2 Structure of Fuel Pin in B-Type Irradiation Subassembly.

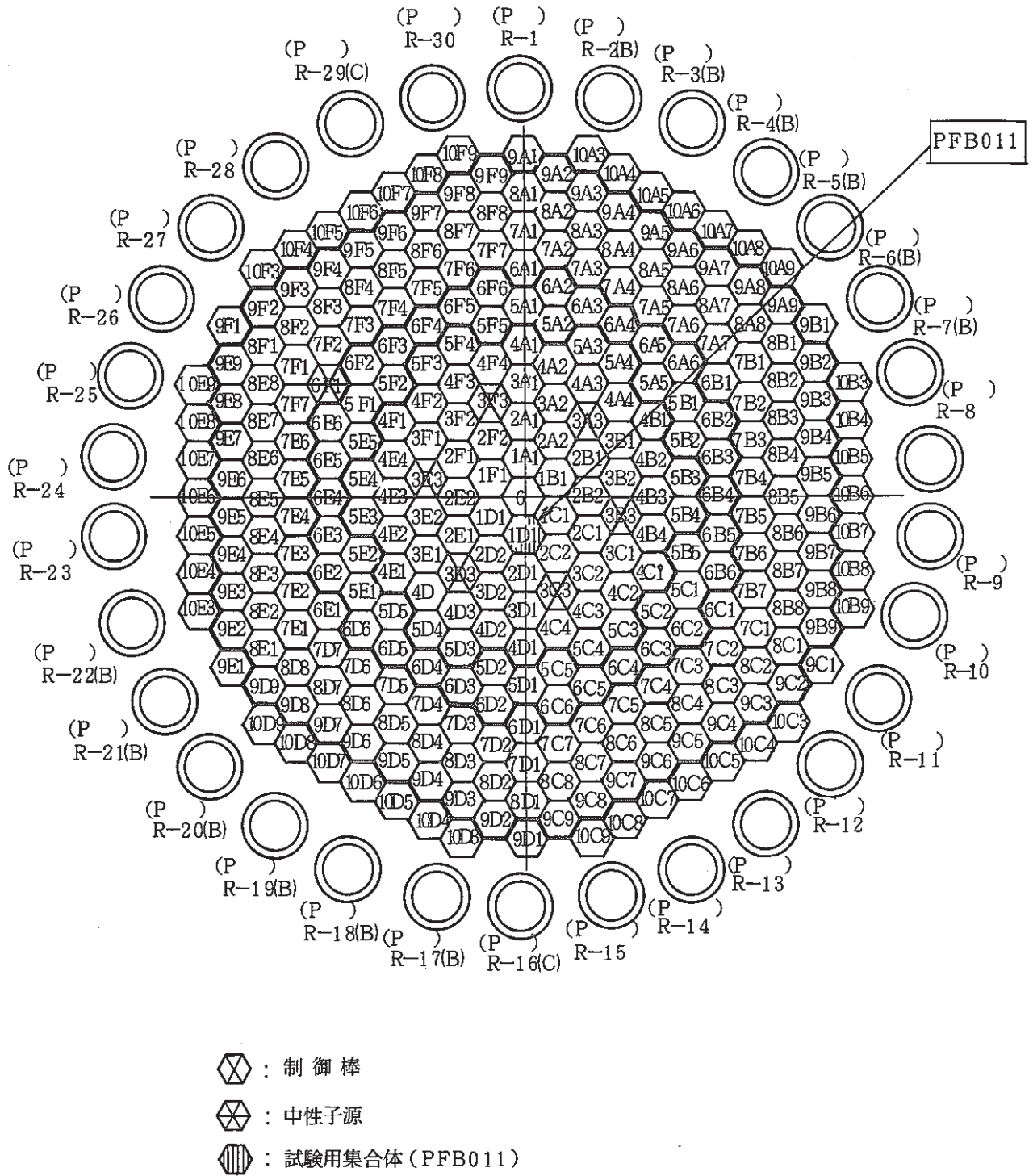


Fig.3 Location of the Fuel Subassembly (Fab.No.PFB011) in "JOYO" MK-II.

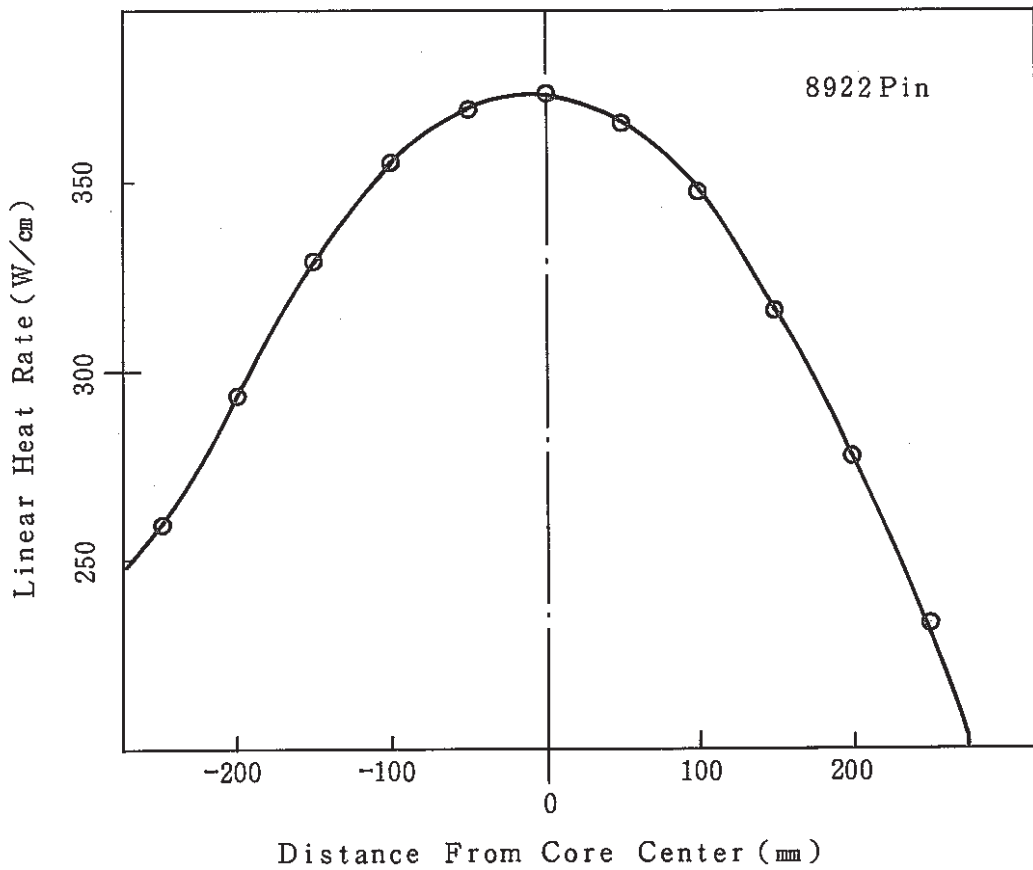
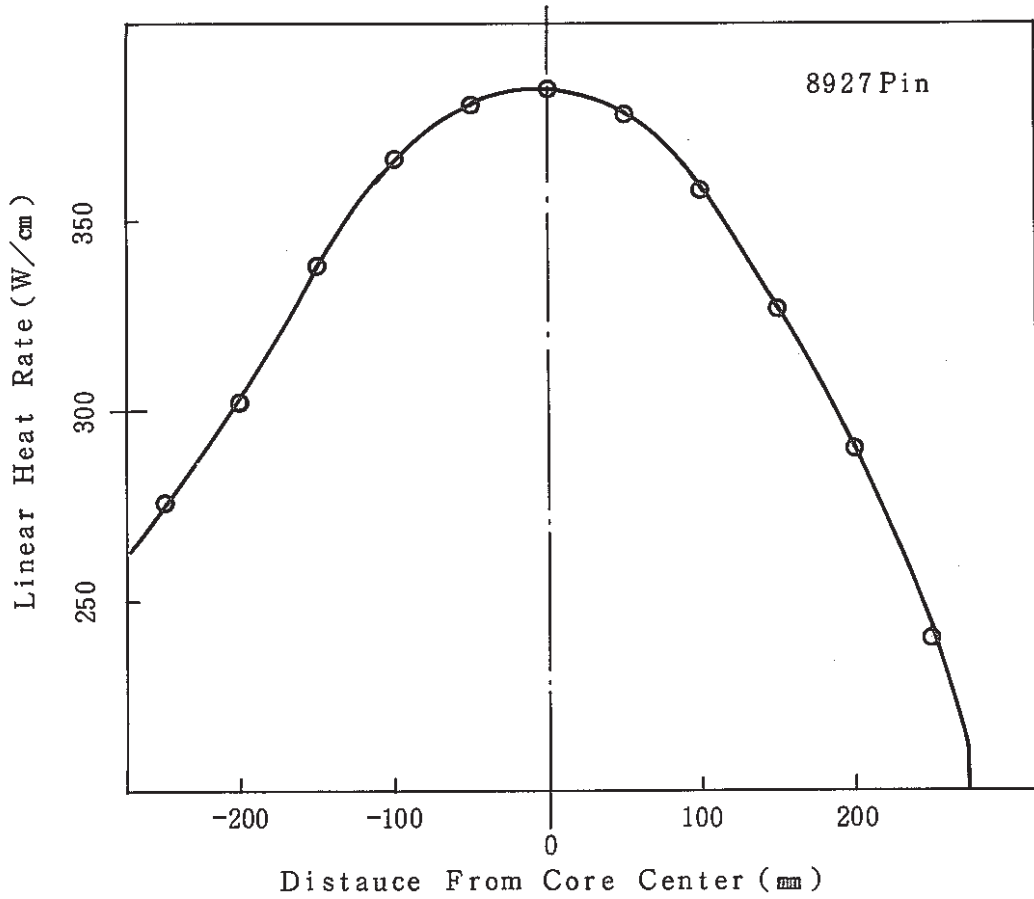


Fig. 5 Axial Distribution of Linear Heat Rate on the Plenum Prefected Pins.

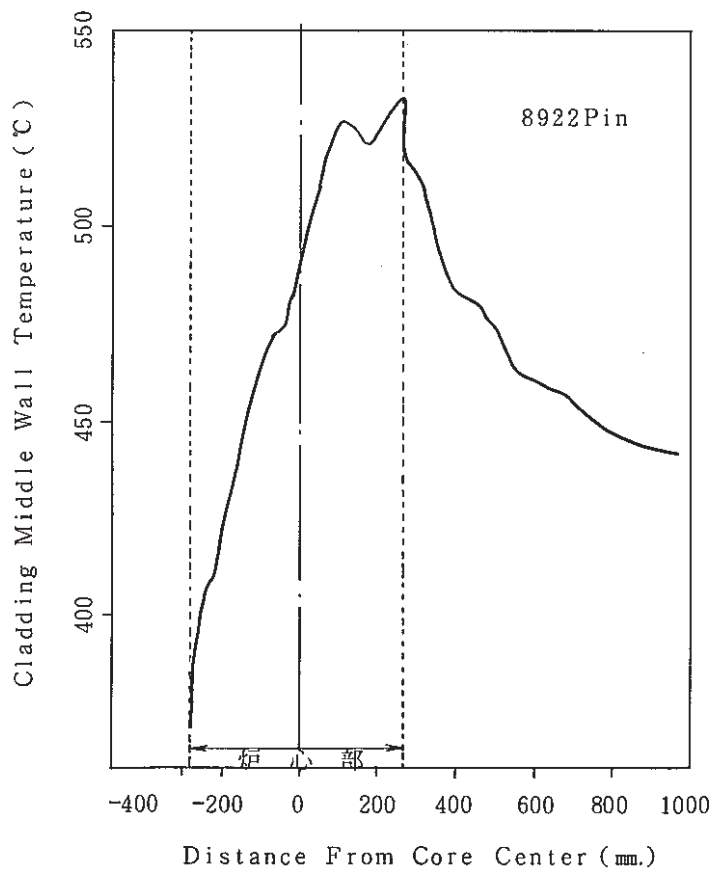
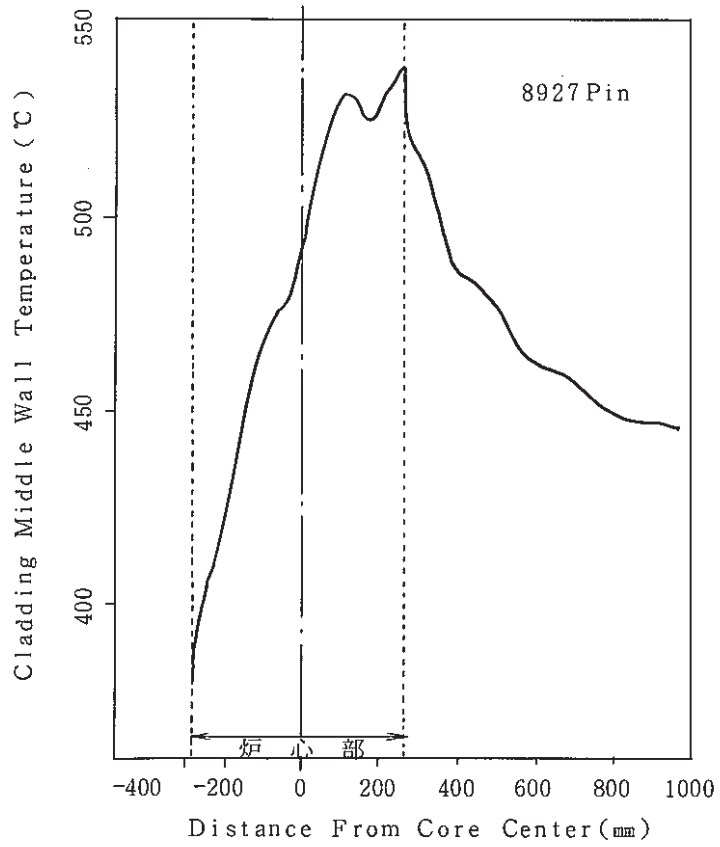
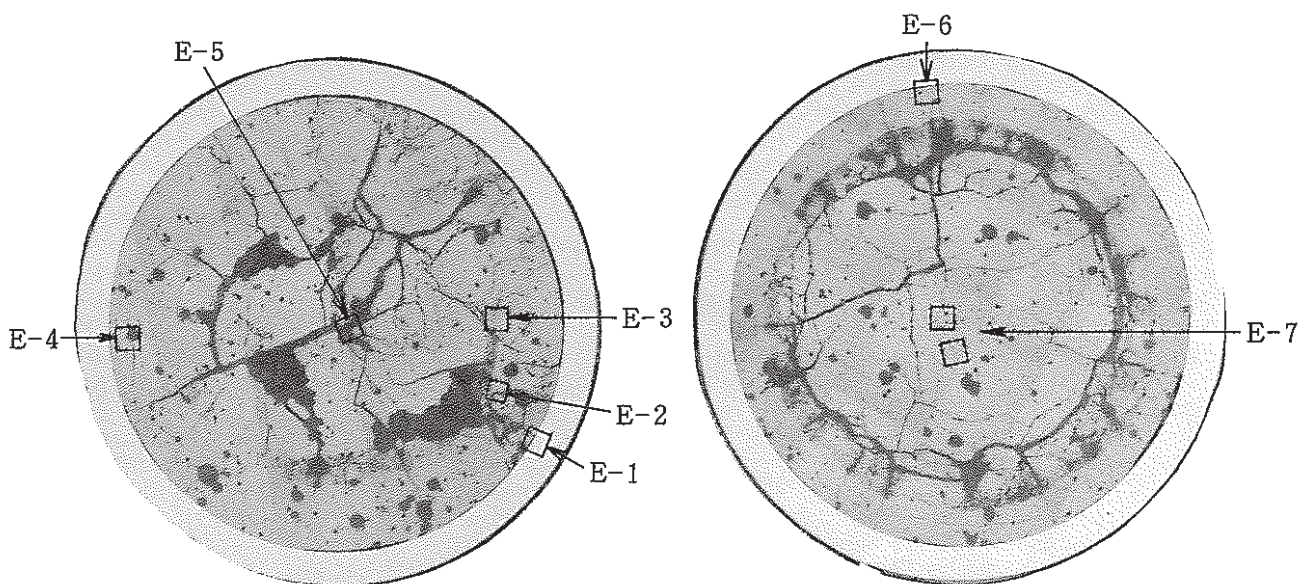
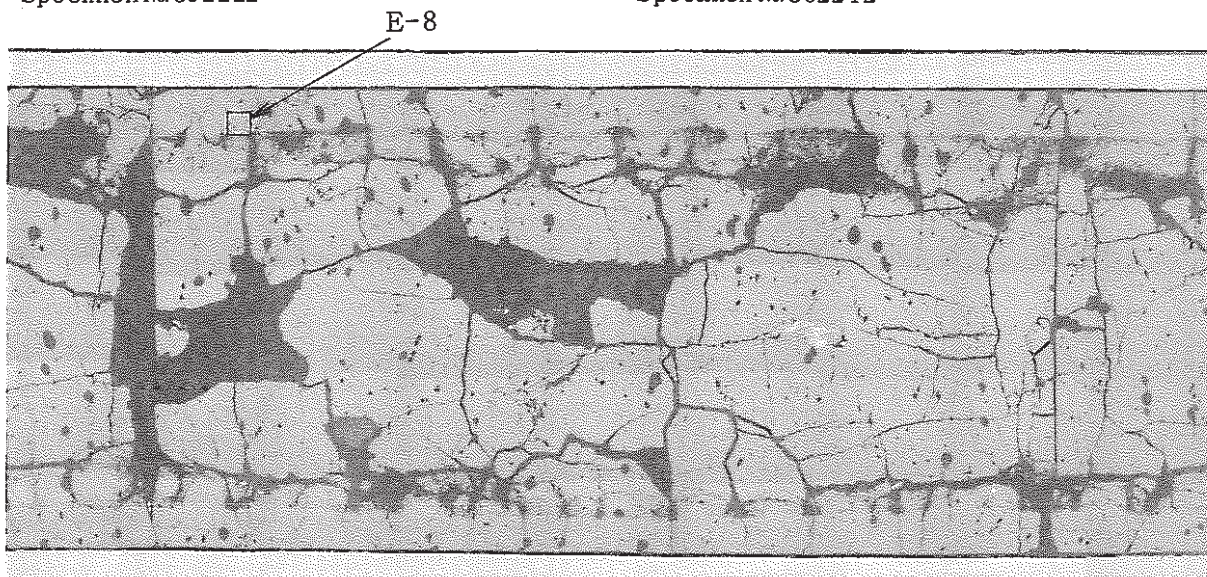


Fig.6 Axial Distribution of Cladding Middle Wall Temperature on the Plenum Prefected Pins.

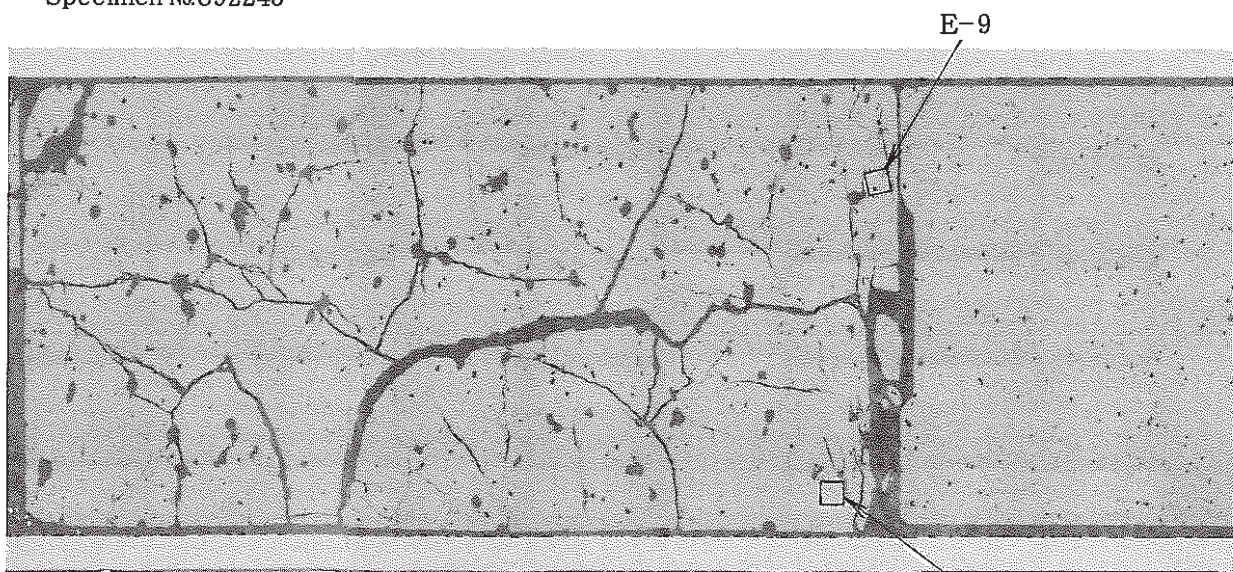


Specimen No. 892222

Specimen No. 892242

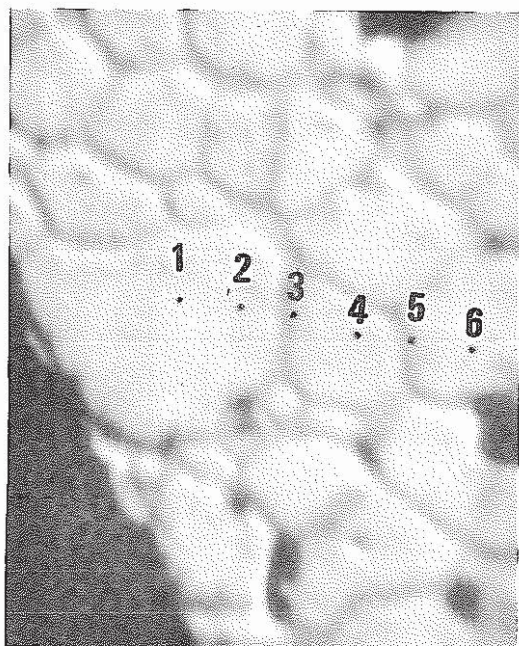


Specimen No. 892243



Specimen No. 892285

Fig. 7 Analyses Positions by EPMA.



89224210

BSE

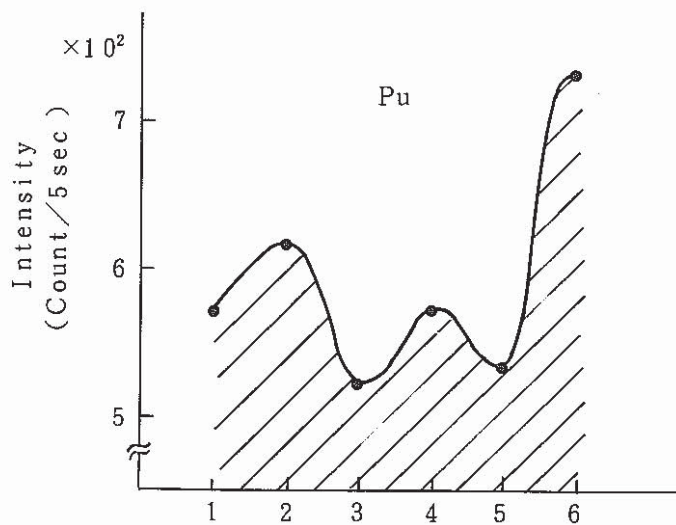
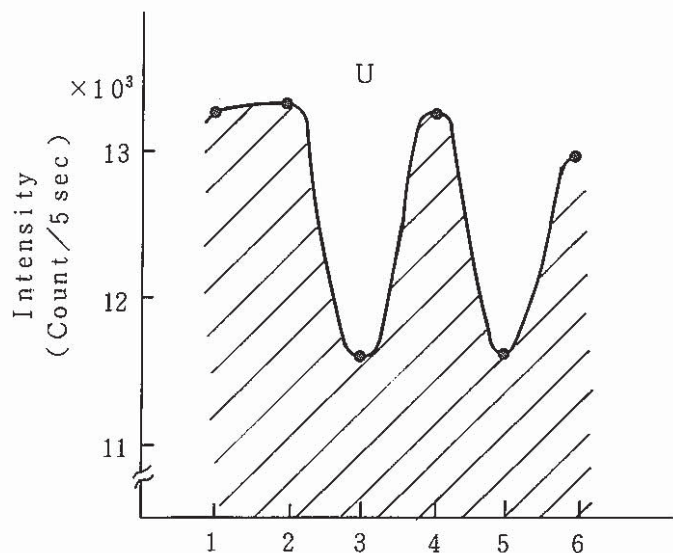
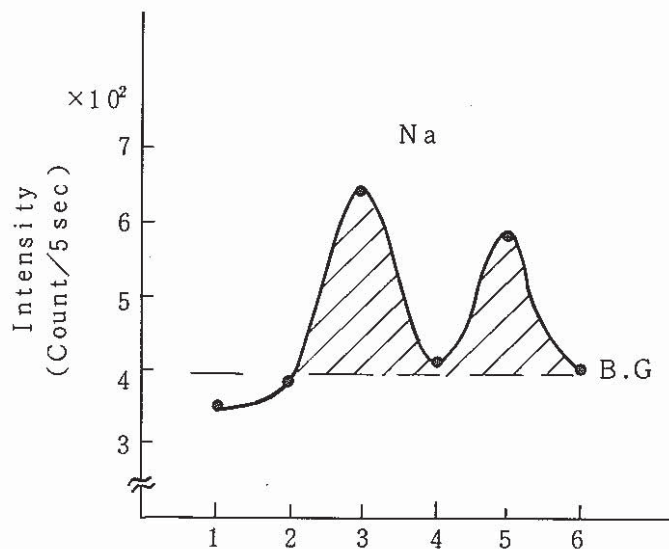


Fig.8 Distribution on Intensity of Nak α , UM α and PuM β in the Na-Fuel Reaction Region.

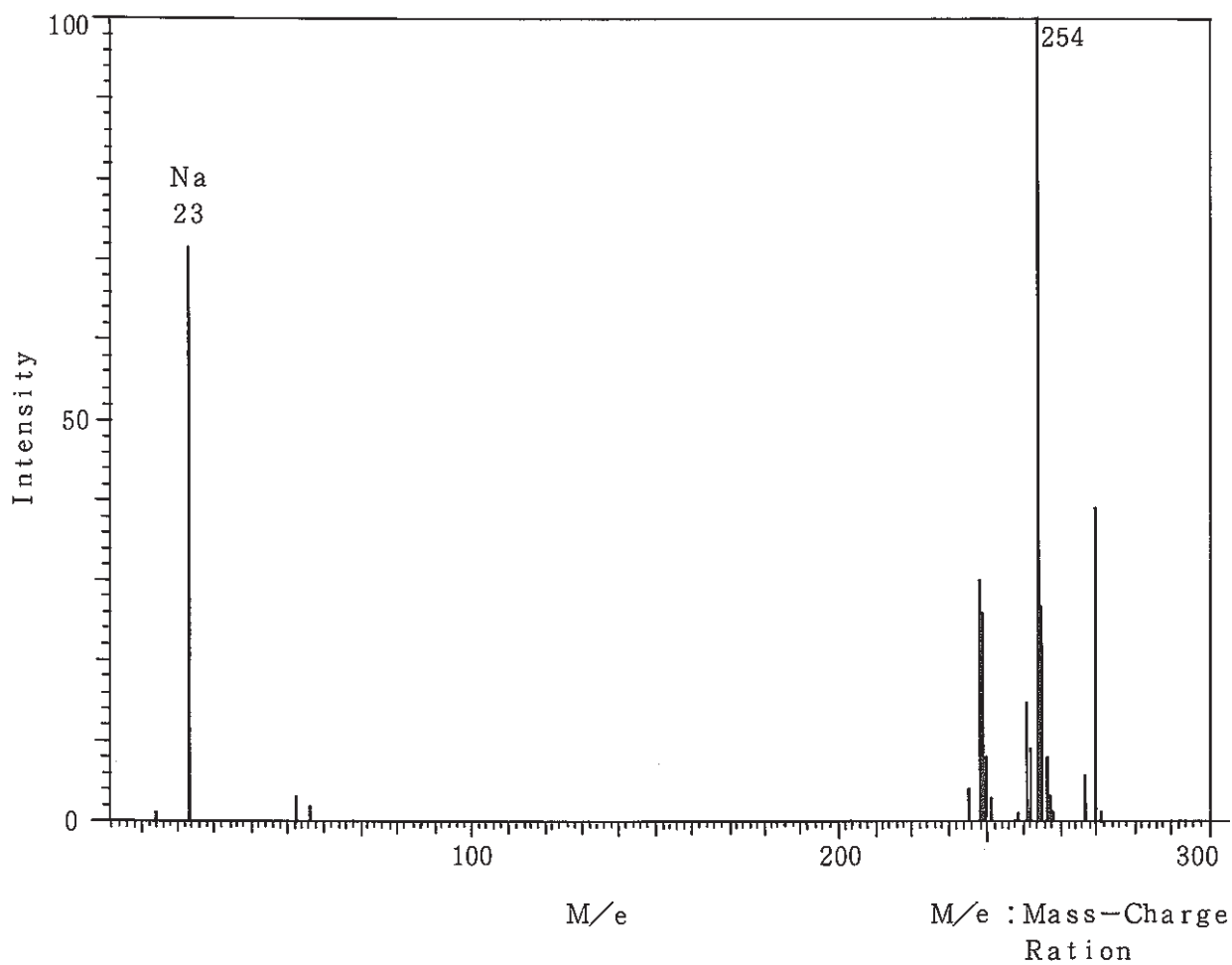


Fig.9 Ion Mass Spectrum of the Fuel Outer Regim.
(Specimen No 892242)

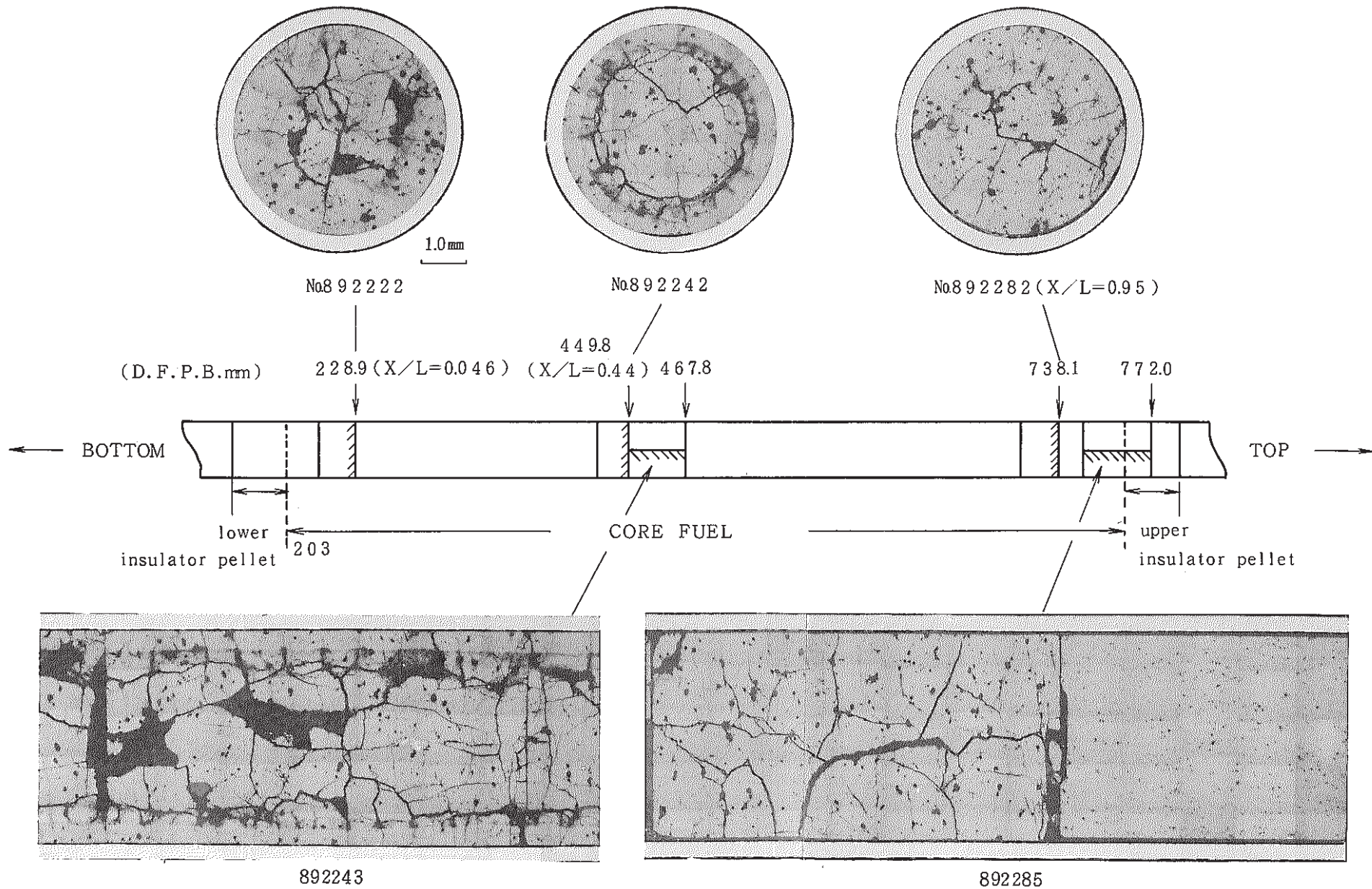


Photo.0-1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimens Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No. 8922)

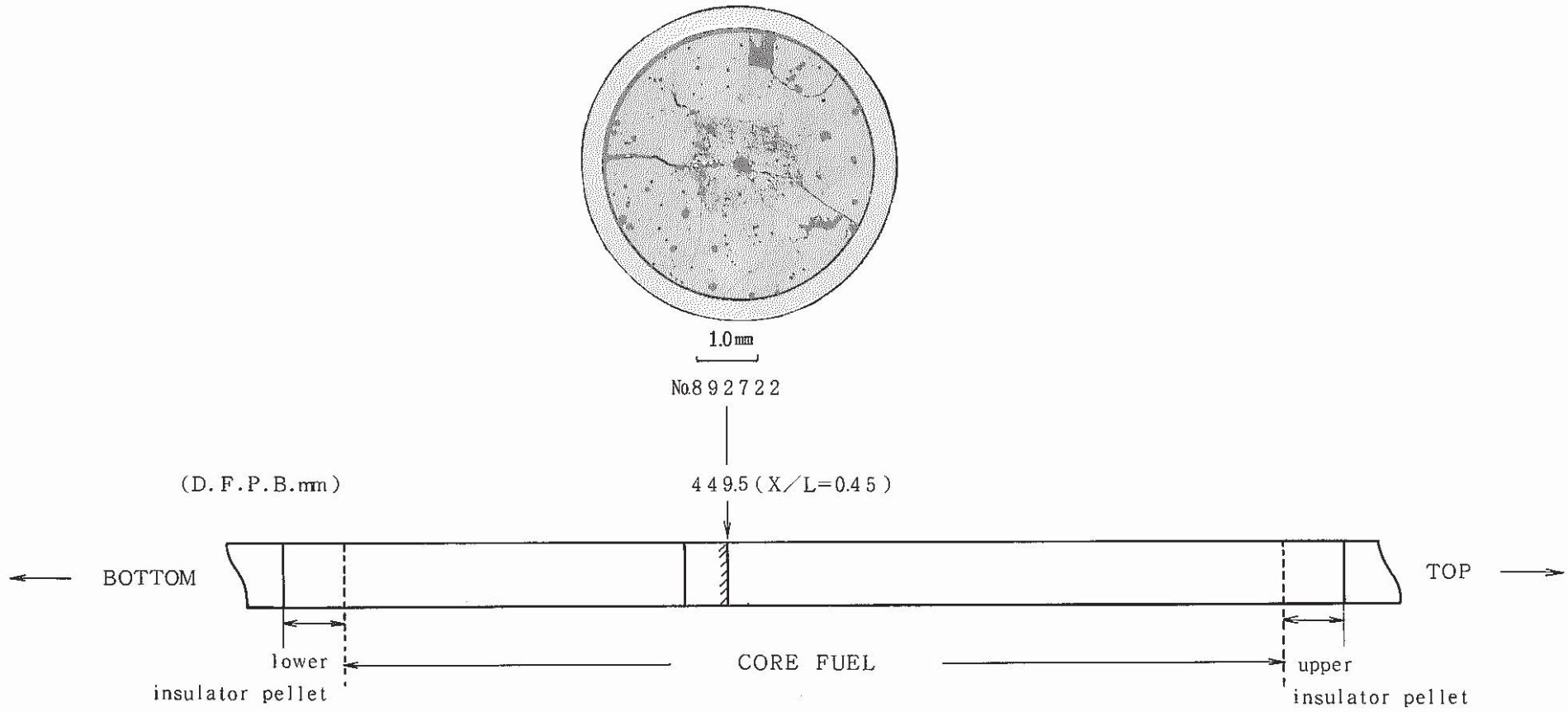
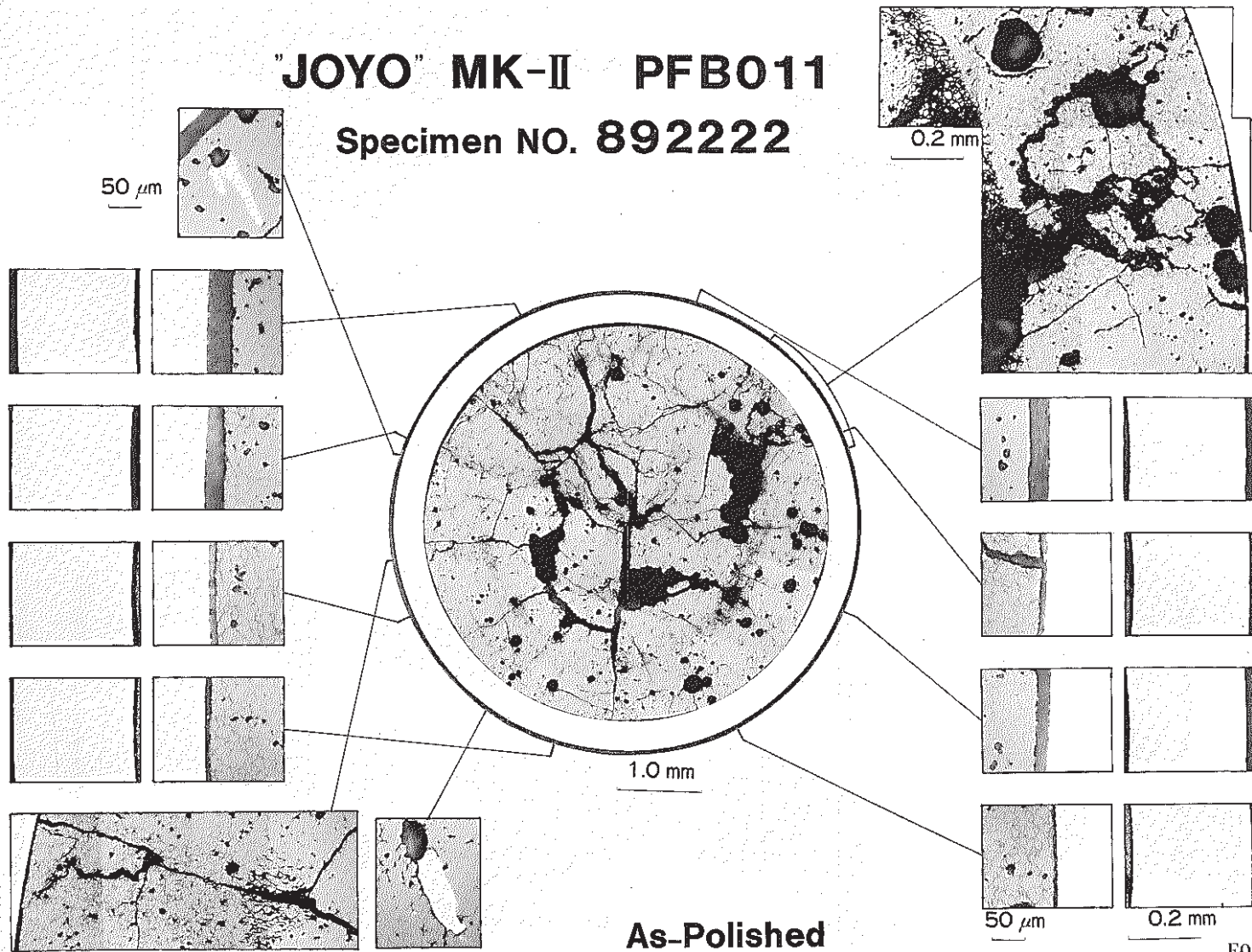


Photo.0-2 Optical Macrograph of the Metallographic Specimen
Cutted from the Core Fuel Pin (Pin No.8927)

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892222

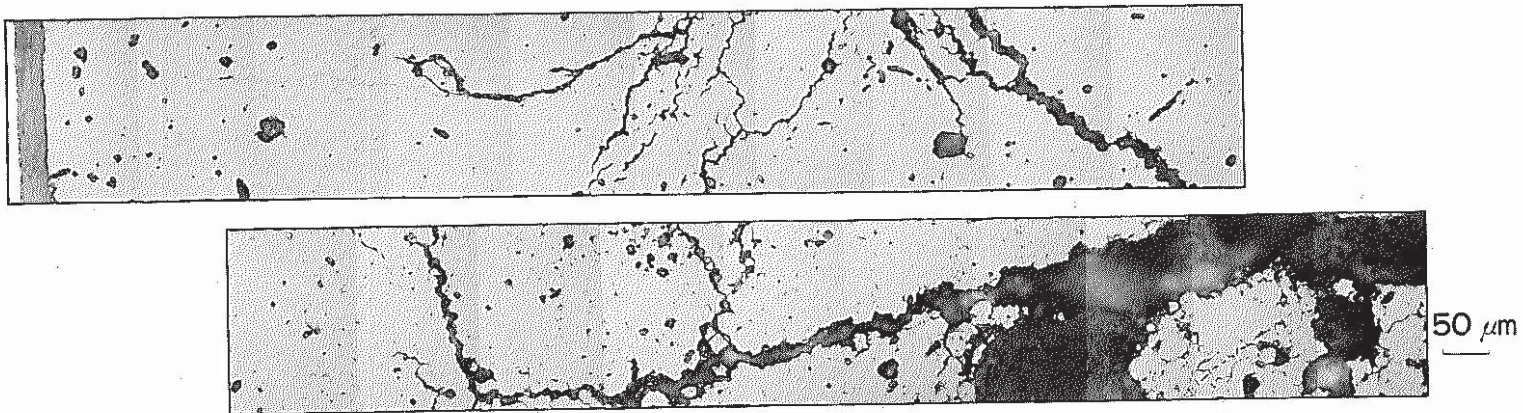
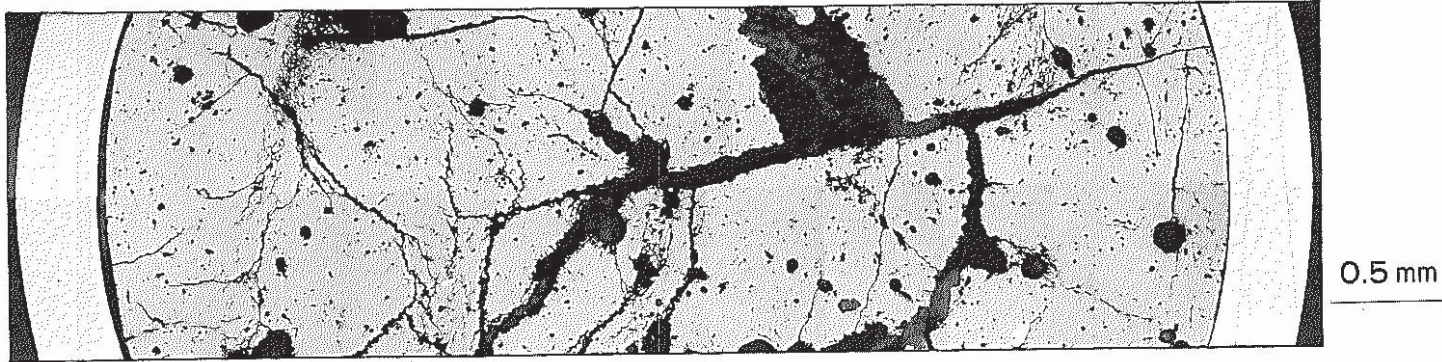


E038901

Photo.0-3 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.892222)As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892222



As-Polished

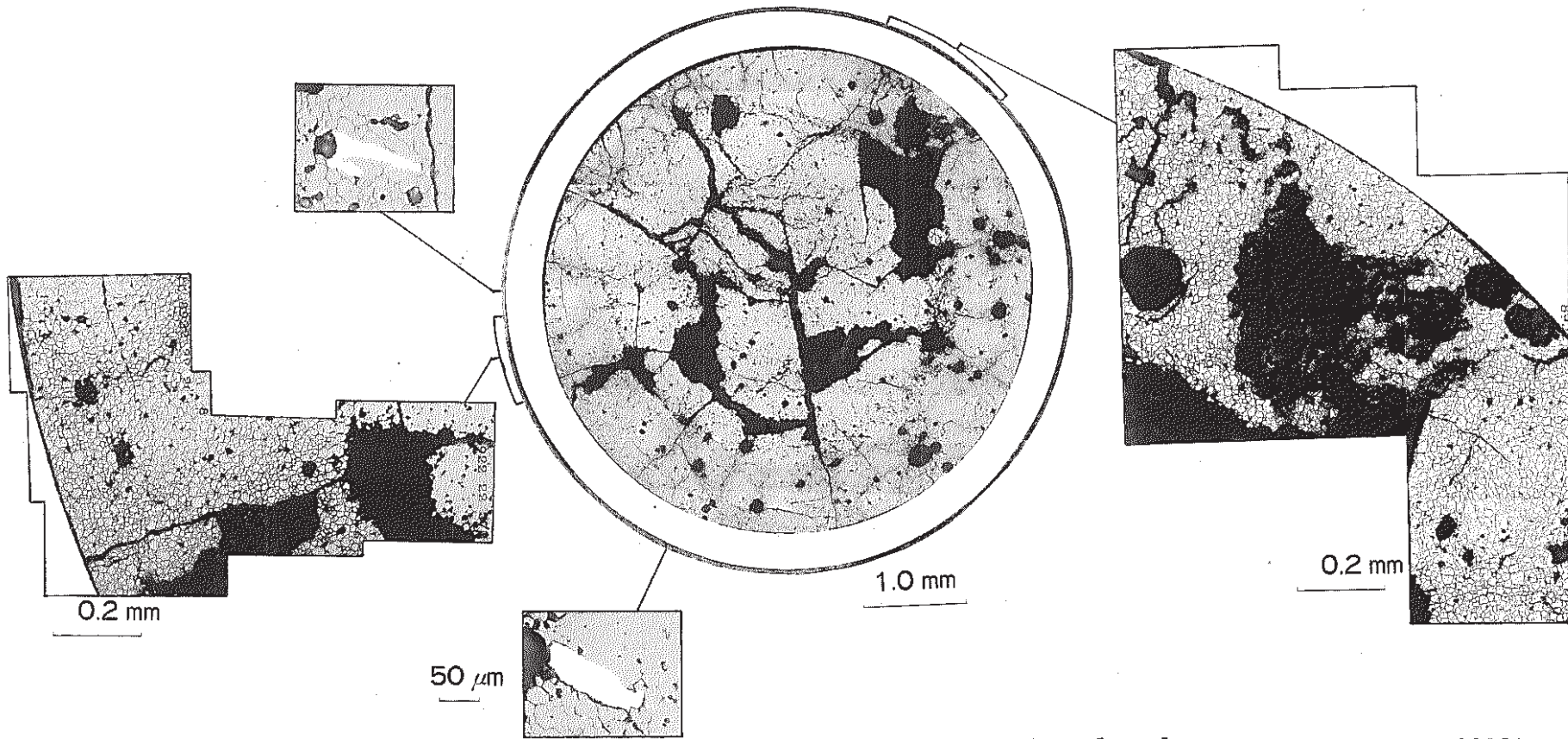
E038902

Photo.0-4 Optical Microstructure of Core Fuel
(Specimen No.892222) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892222

- 33 -



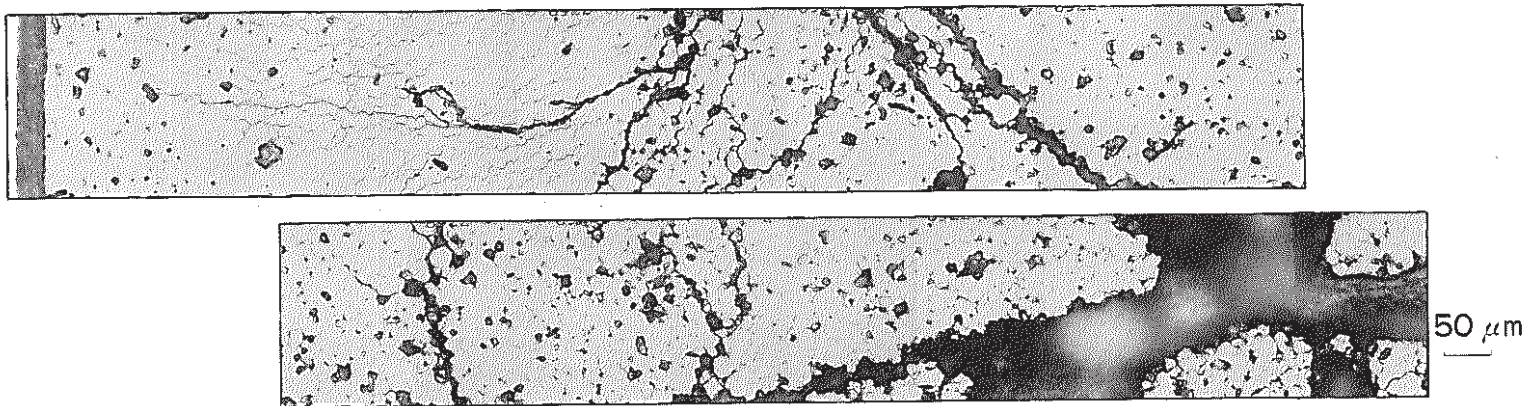
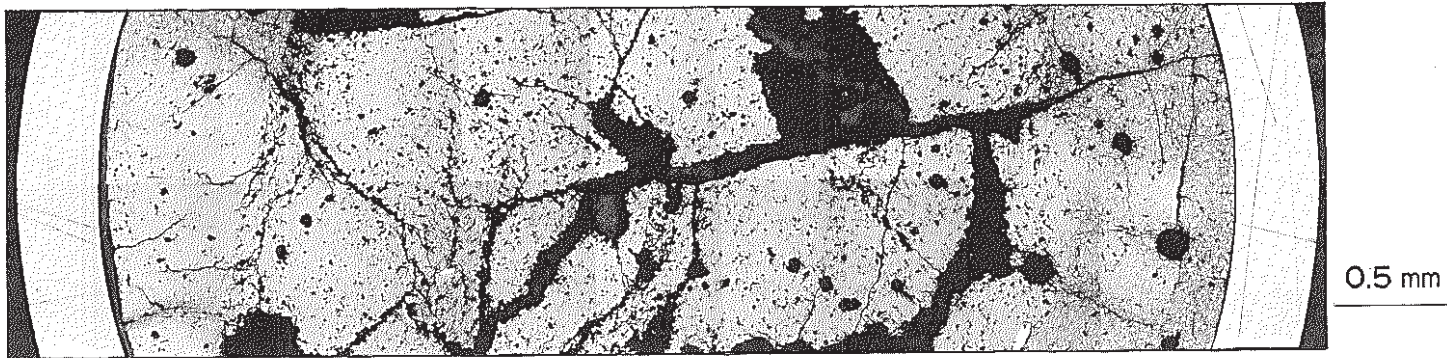
As-Etched

E038921

Photo.0-5 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No 892222) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892222

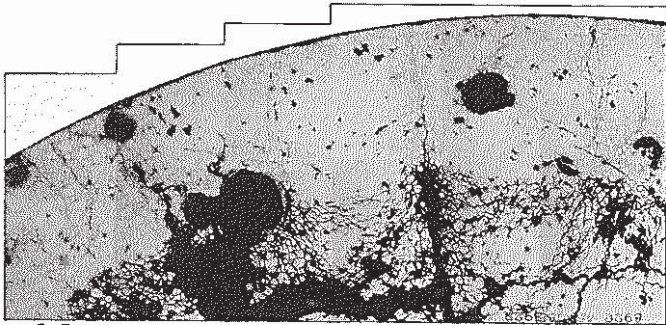


As-Etched

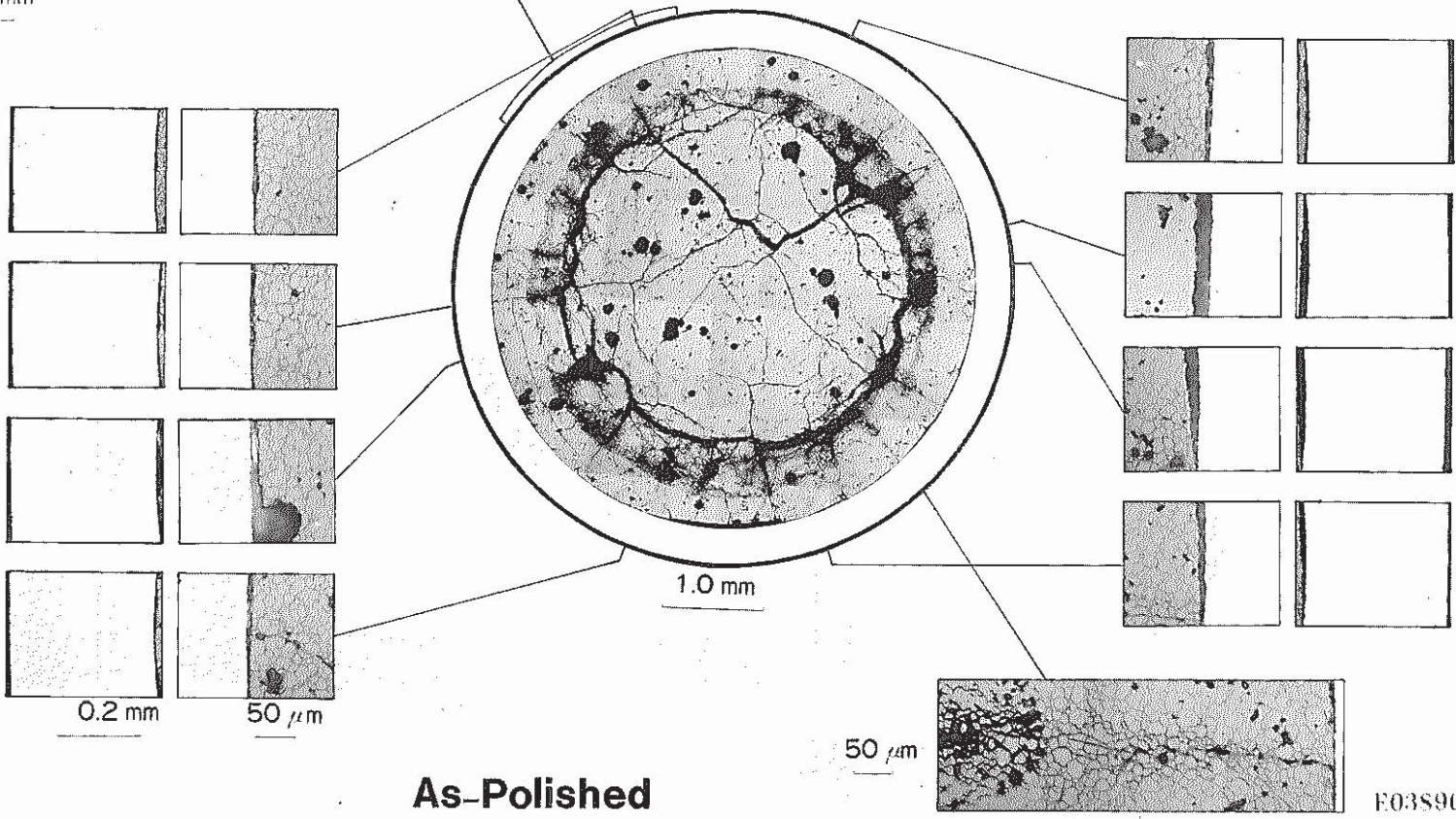
E038922

Photo.0-6 Optical Microstrure of the Core Fuel
(Specimen No.892222) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB011
Specimen NO. 892242



0.2 mm



1.0 mm

0.2 mm

50 μm

50 μm

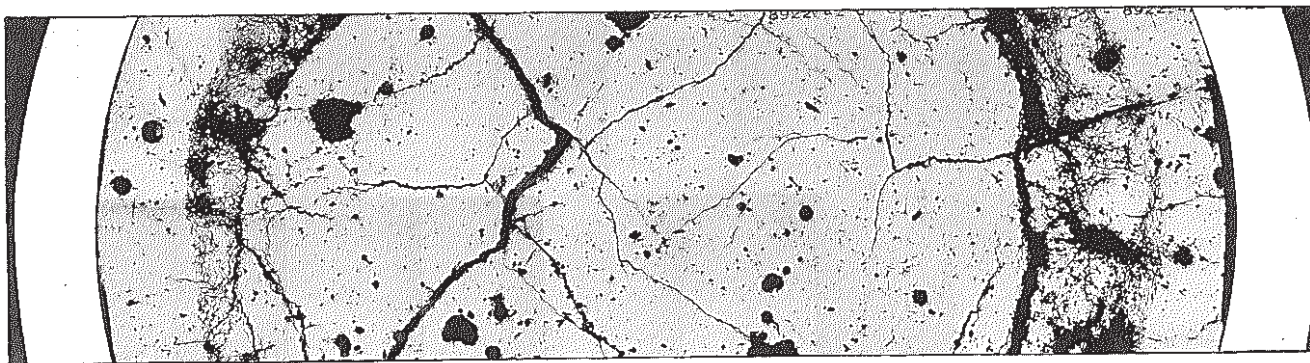
As-Polished

F03S903

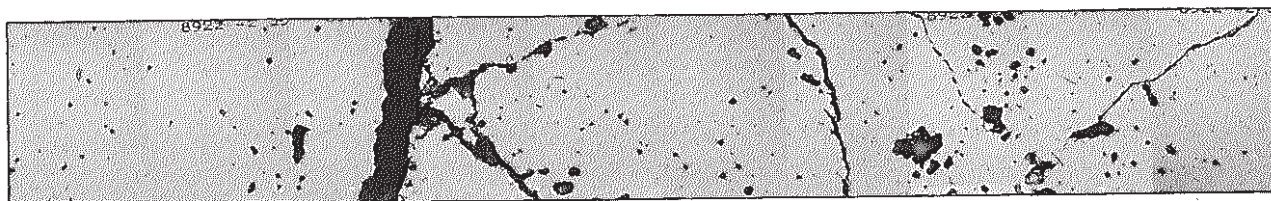
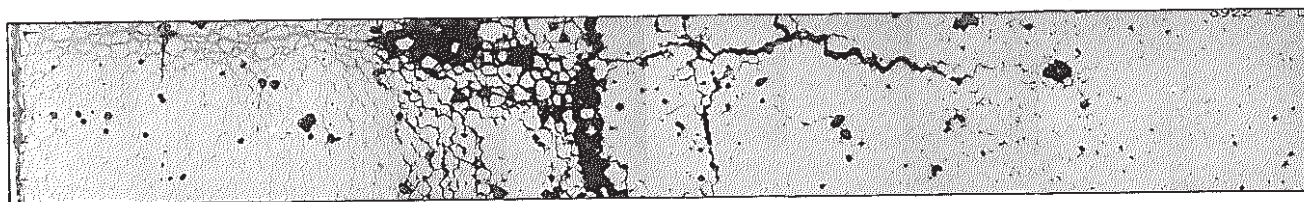
Photo.0-7 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892242) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892242



0.5 mm



50 μ m

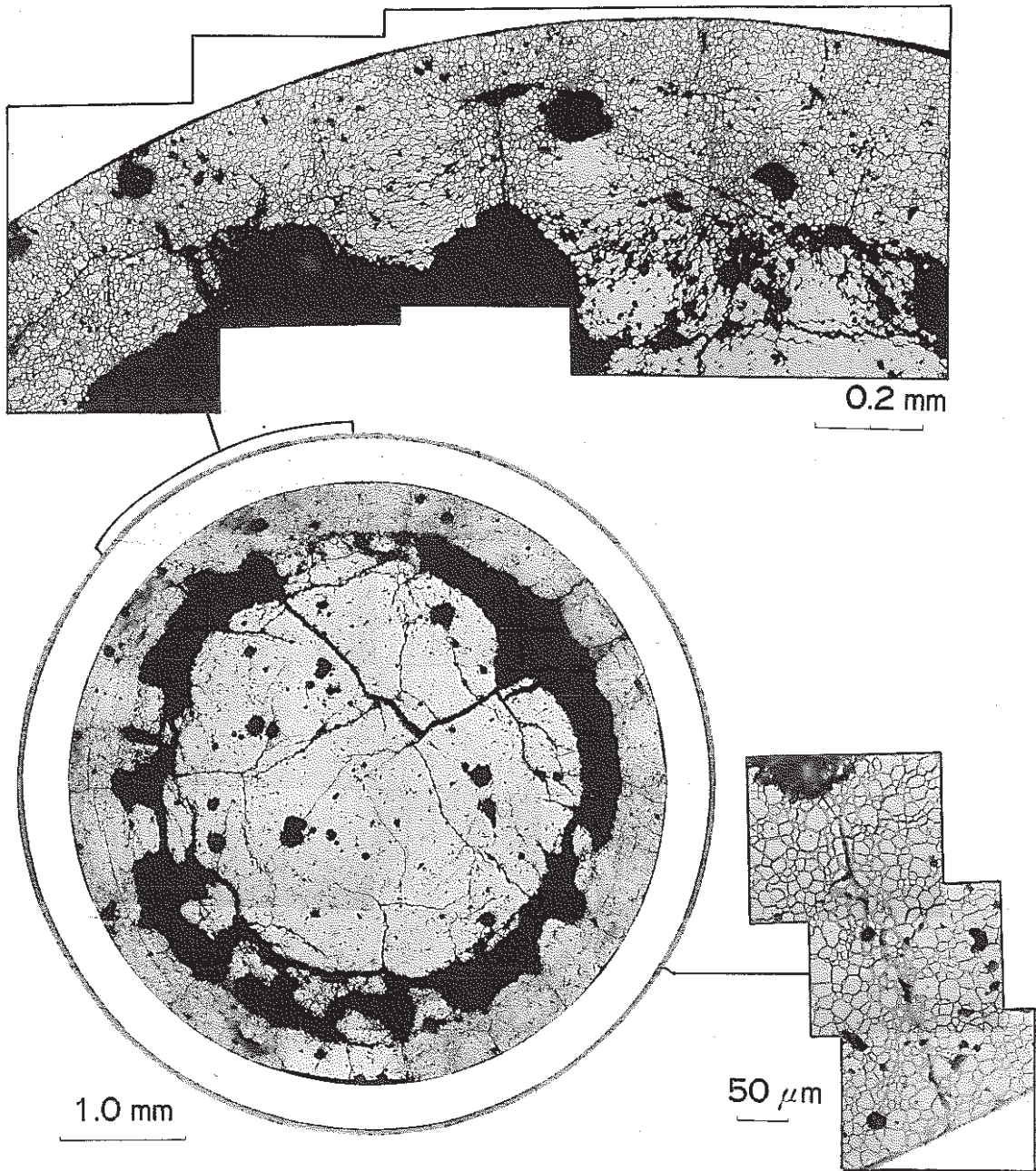
As-Polished

E038904

Photo.0-8 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892242) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892242

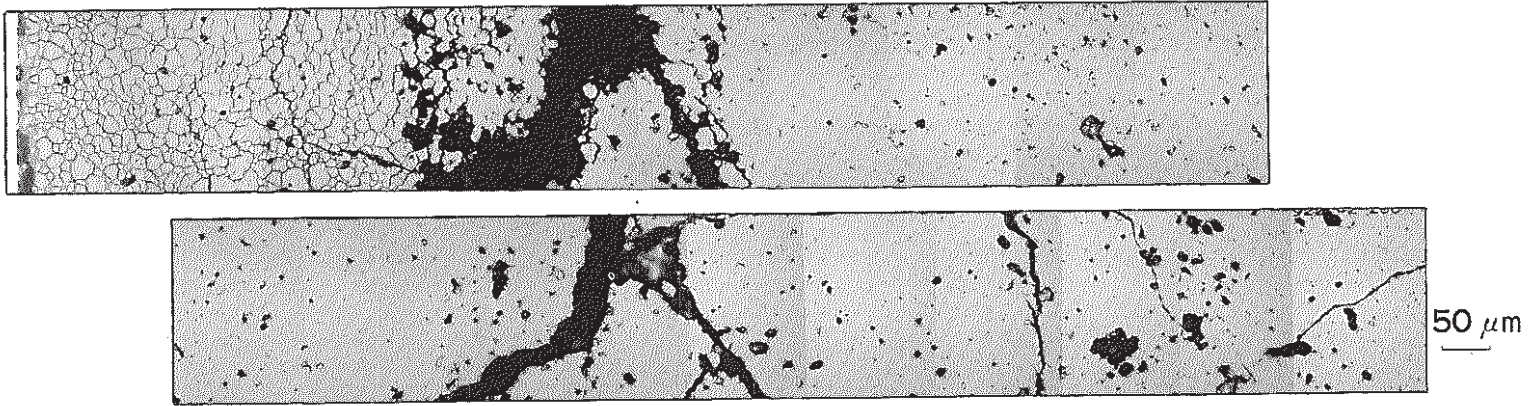
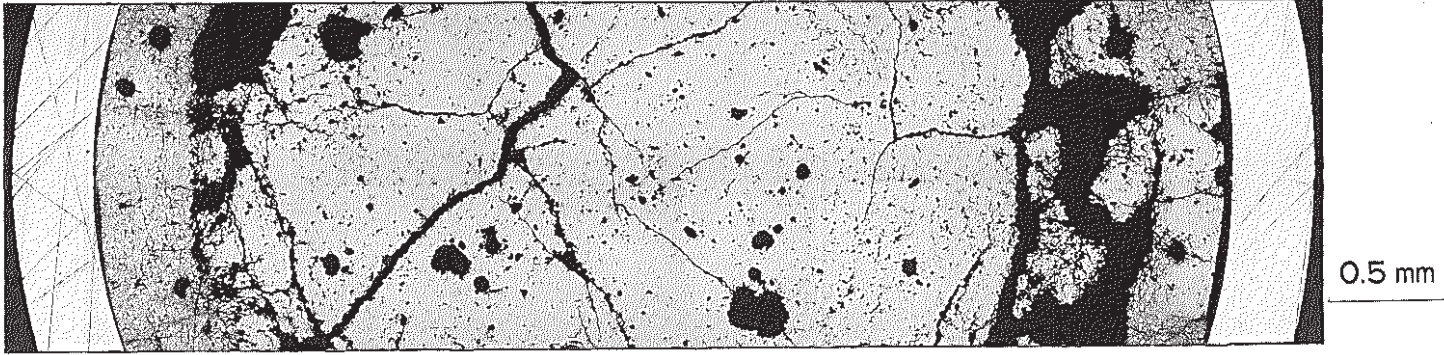


As-Etched

E038923

Photo.0-9 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892242) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB011
Specimen NO. 892242



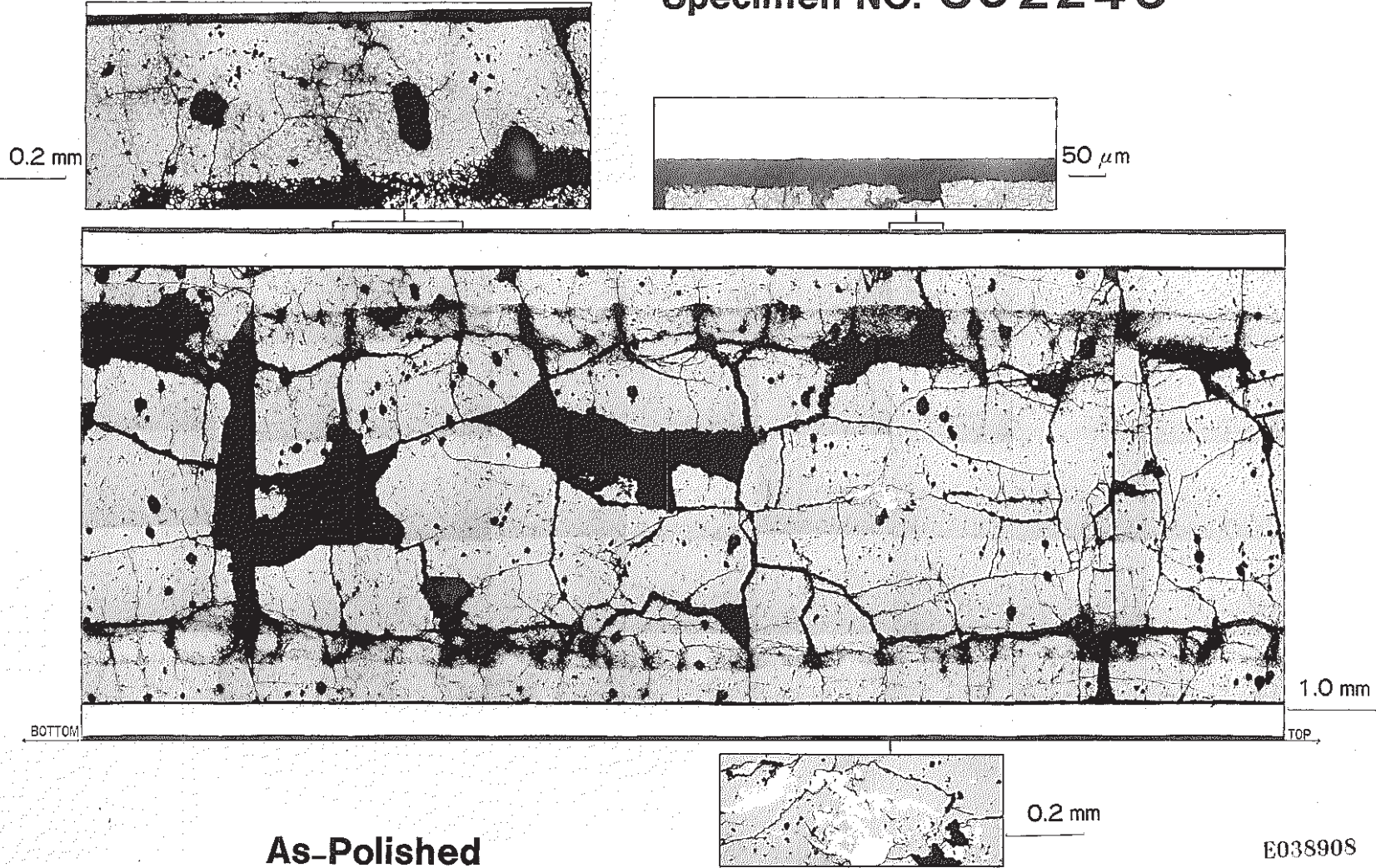
As-Etched

E038924

Photo.0-10 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892242) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB001

Specimen NO. 892243

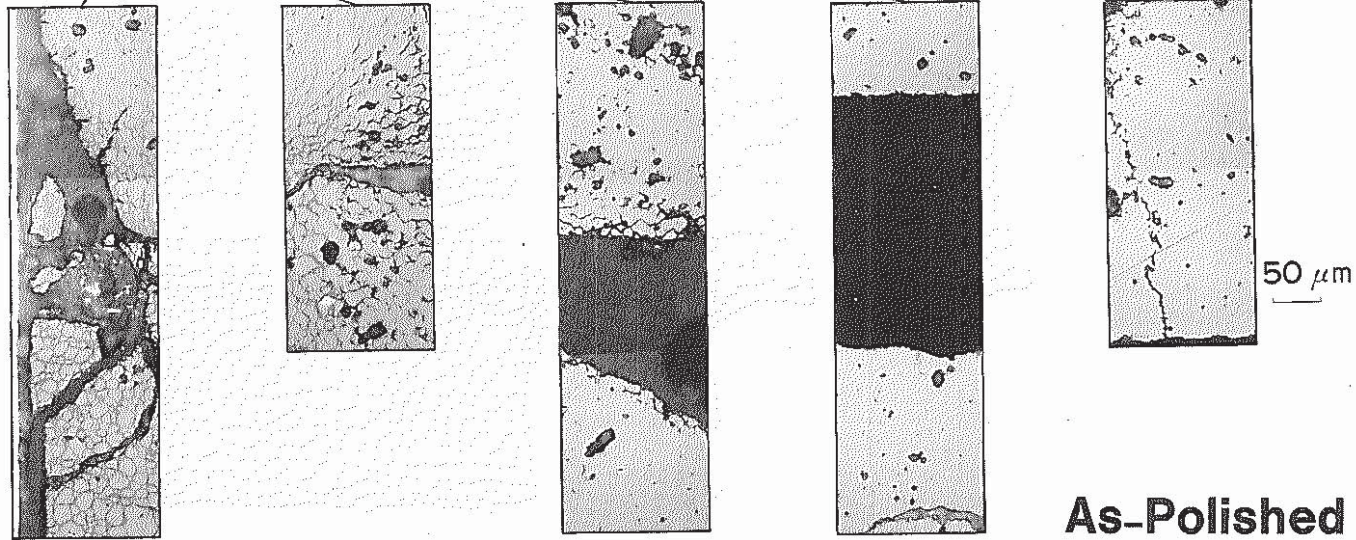
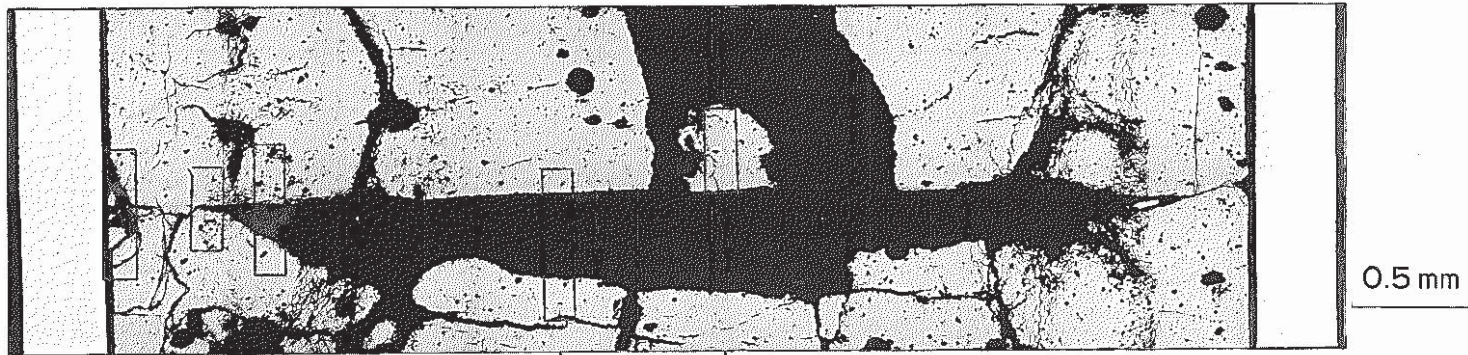


- 39 -

Photo.0-11 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core Fuel Pin (Specimen No.892243) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892243

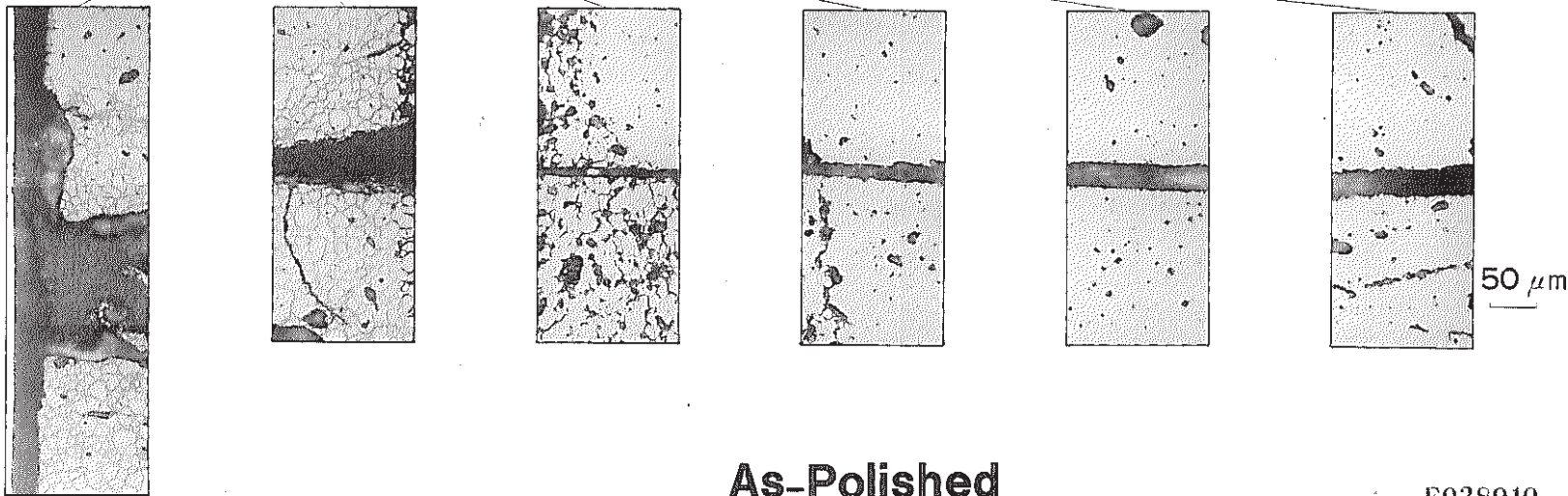
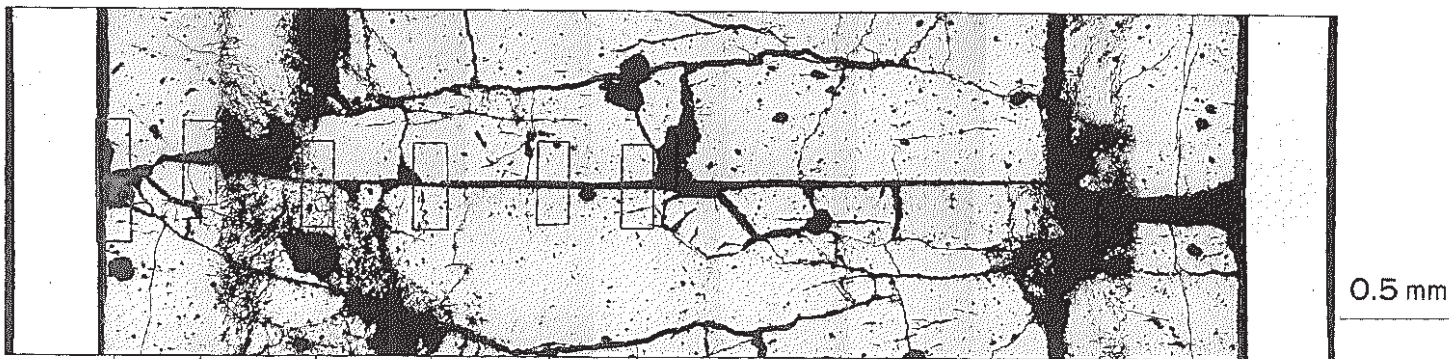


As-Polished E038909

Photo.0-12 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892243) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892243



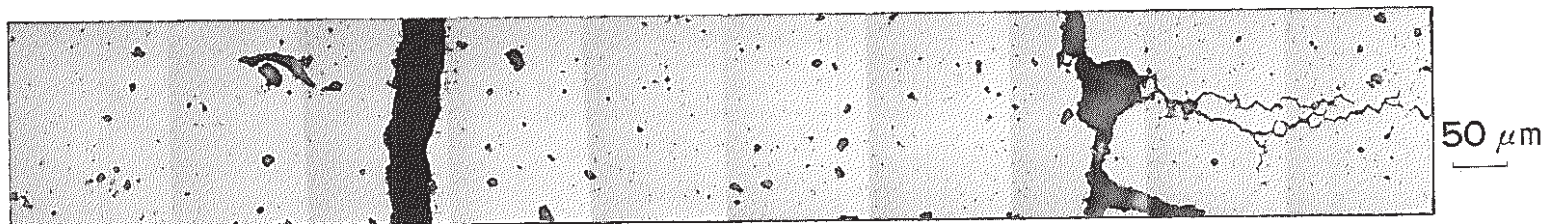
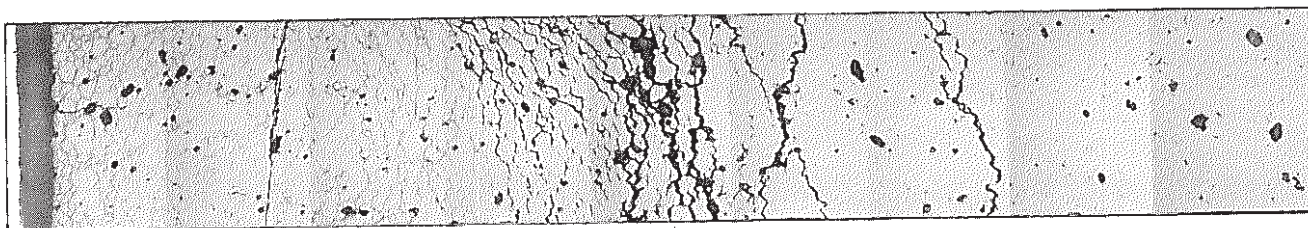
As-Polished

E038910

Photo.0-13 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No.892243)As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892243



- 42 -

As-Polished

E038911

Photo.0-14 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No.892243)As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892282

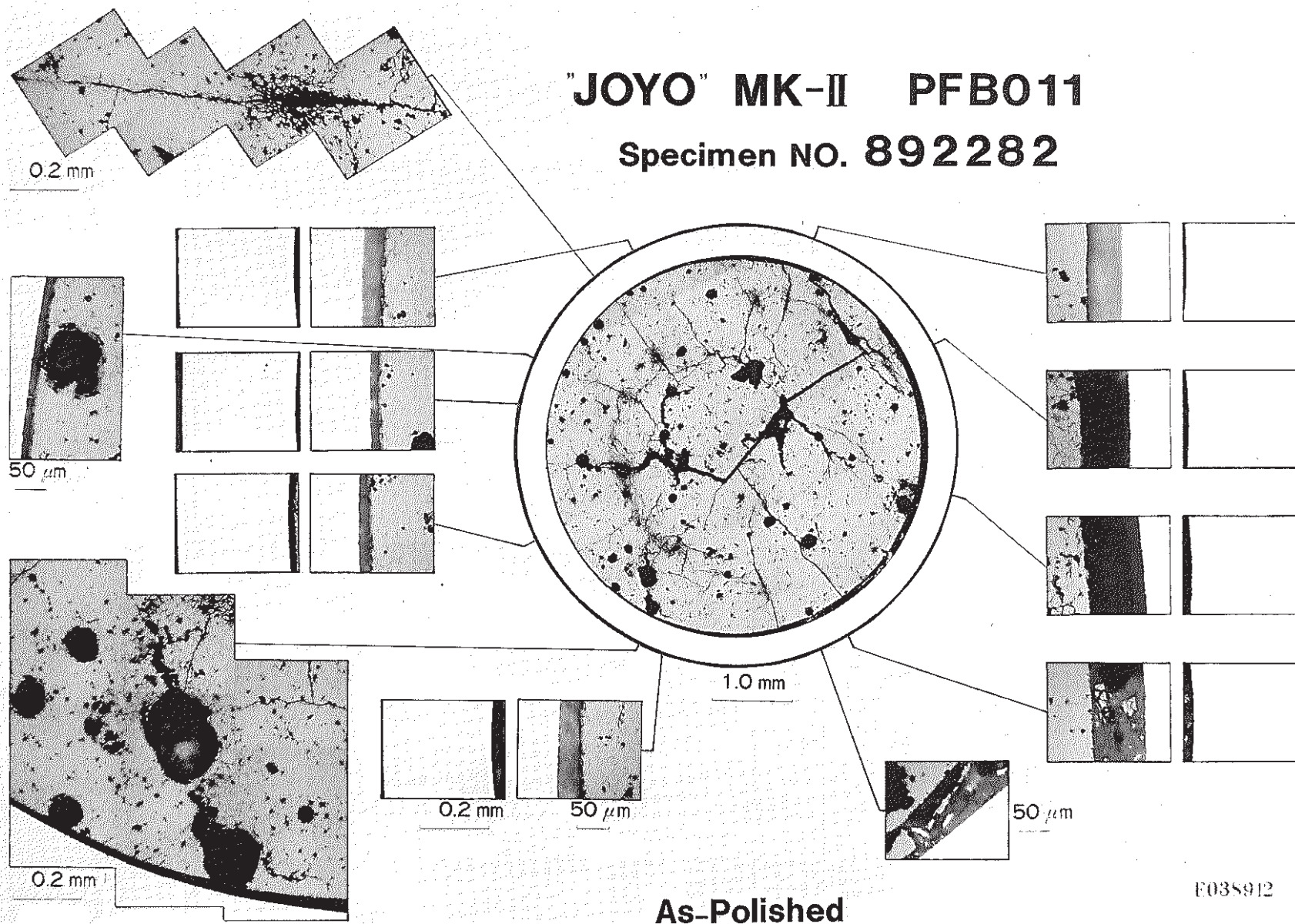
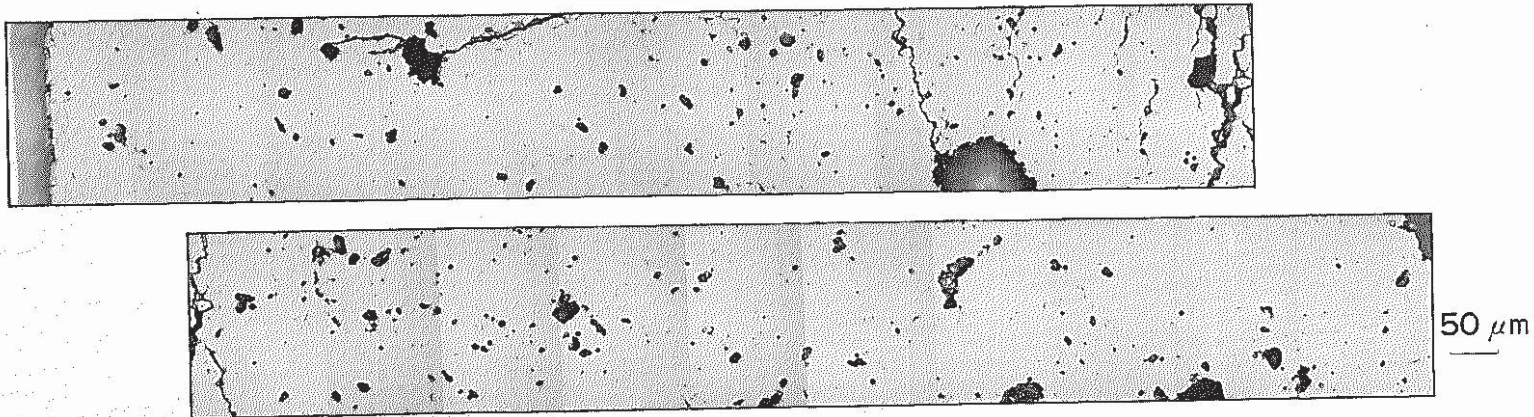
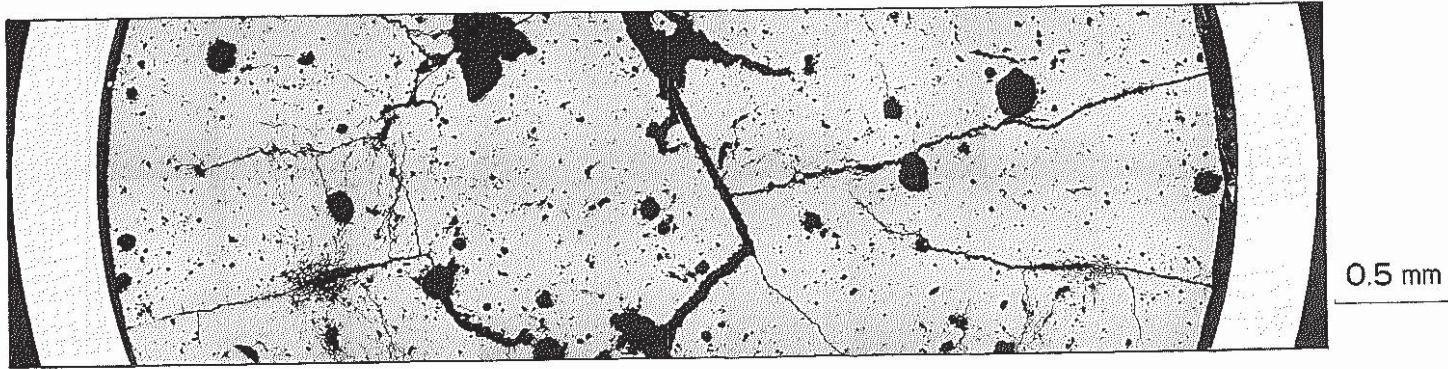


Photo.0-15 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892282) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011
Specimen NO. 892282



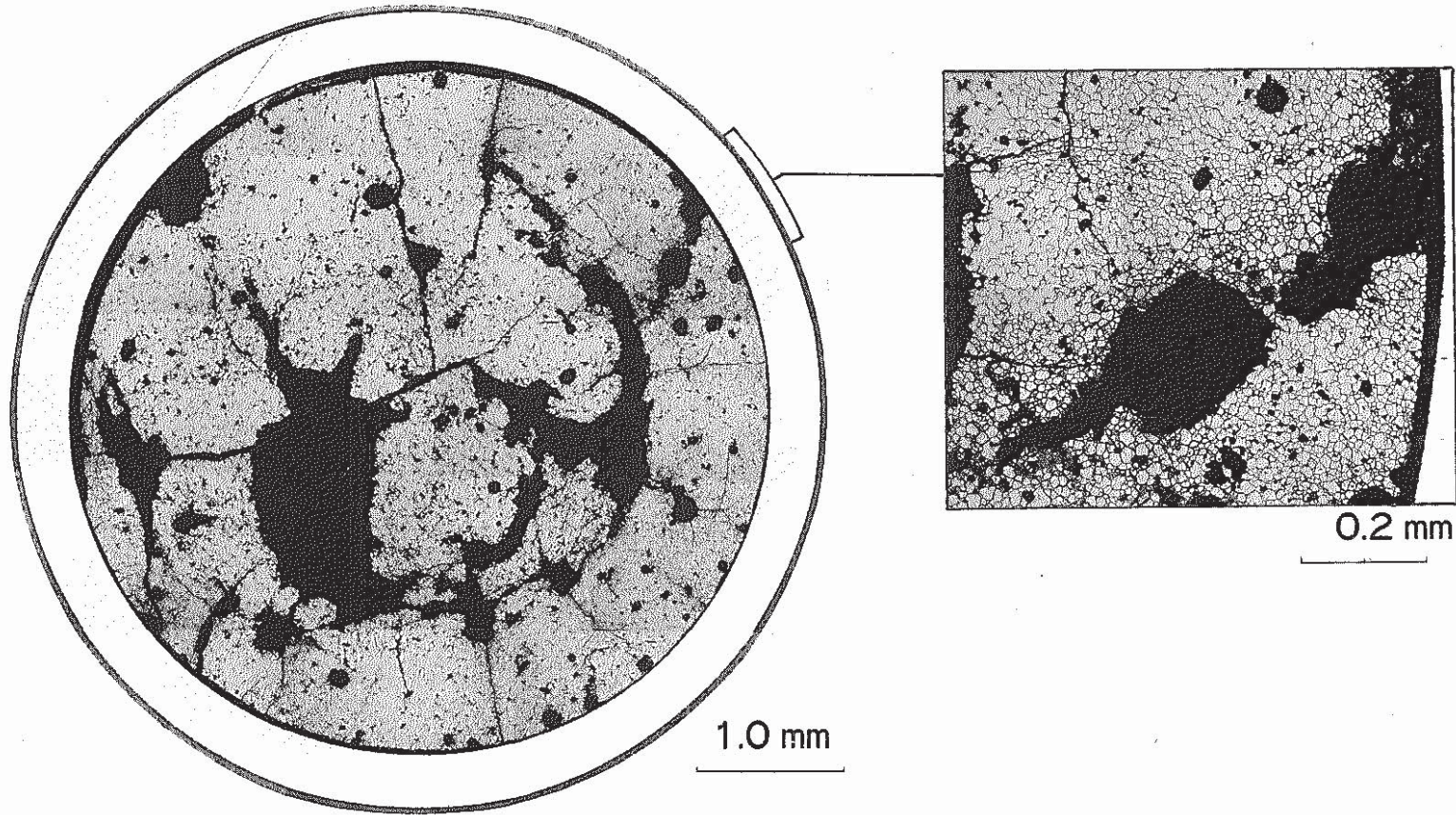
As-Polished

E038913

Photo.0-16 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892282) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892282



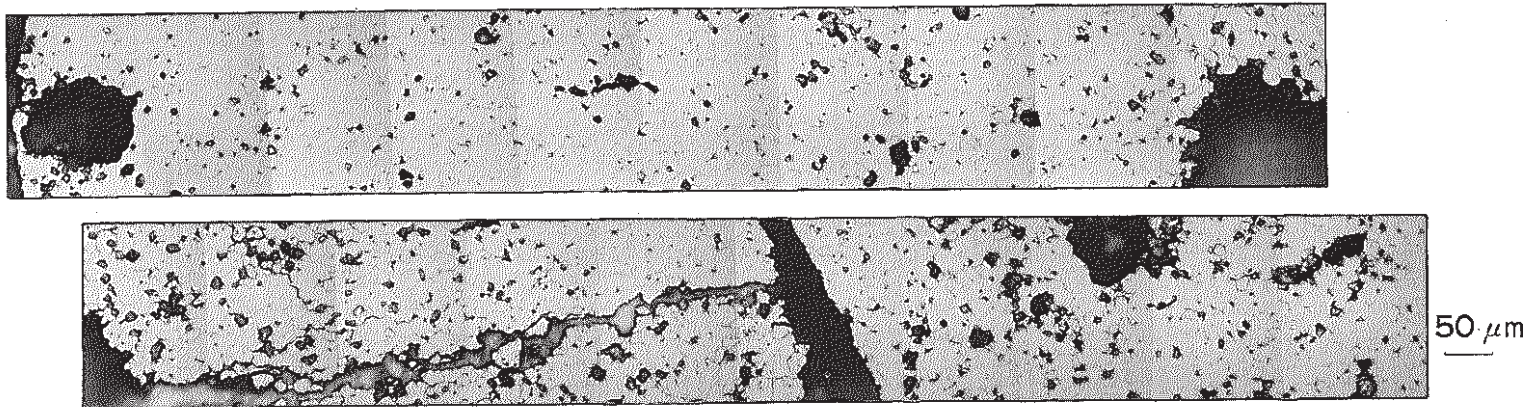
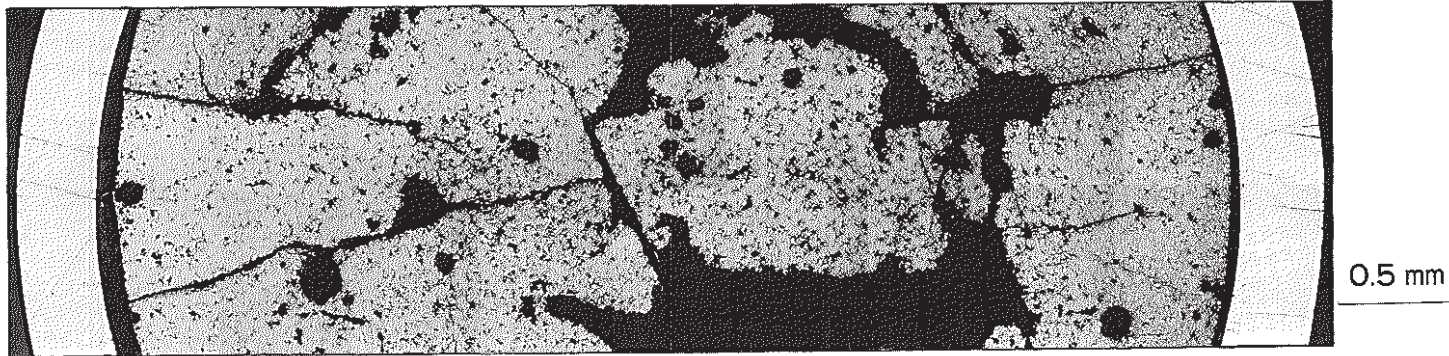
-- 45 --

As-Etched

E038925

Photo.0-17 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892282) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB011
Specimen NO. 892282



As-Etched

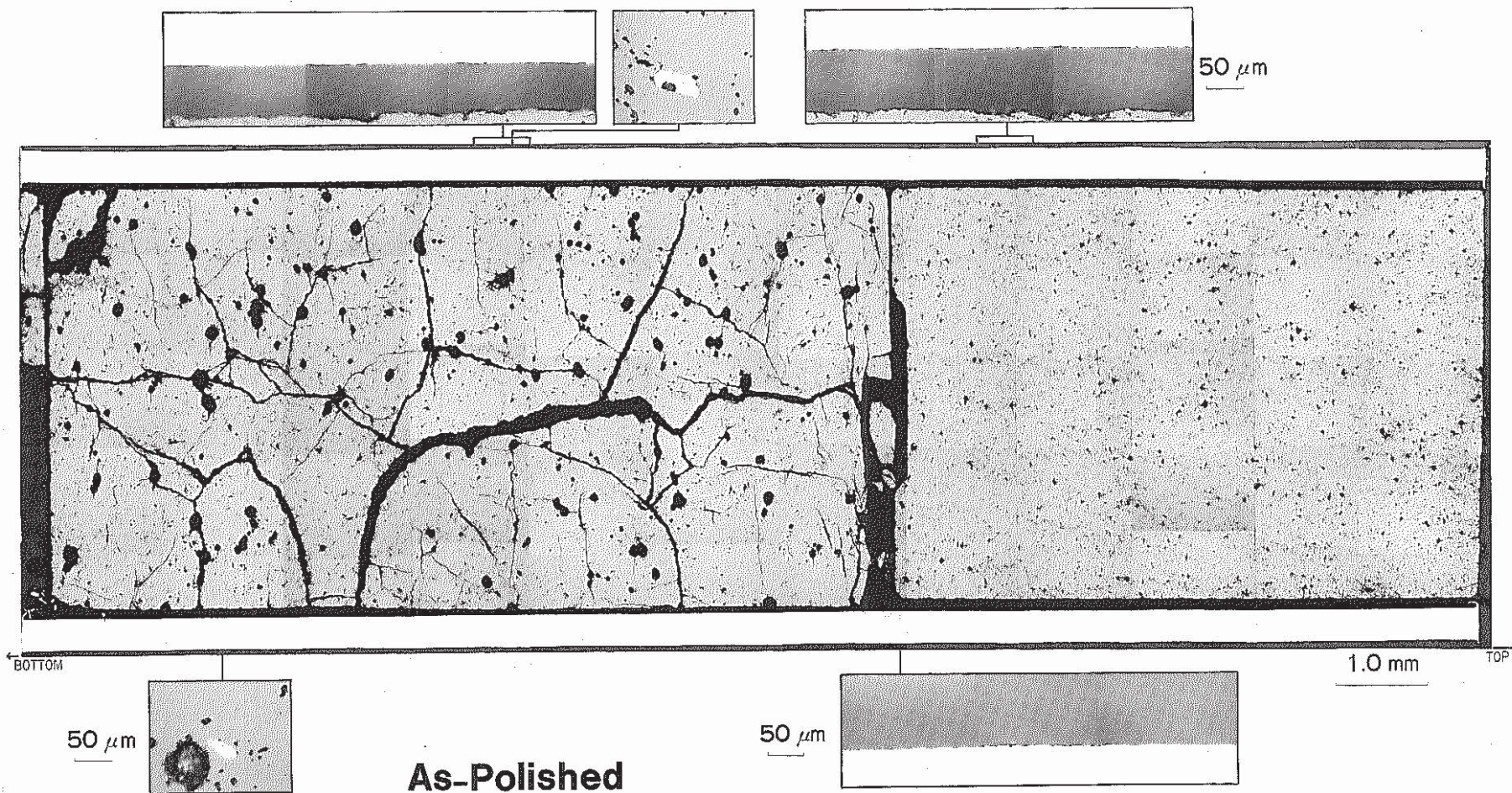
E038926

Photo.0-18 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892282) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892285

— 47 —

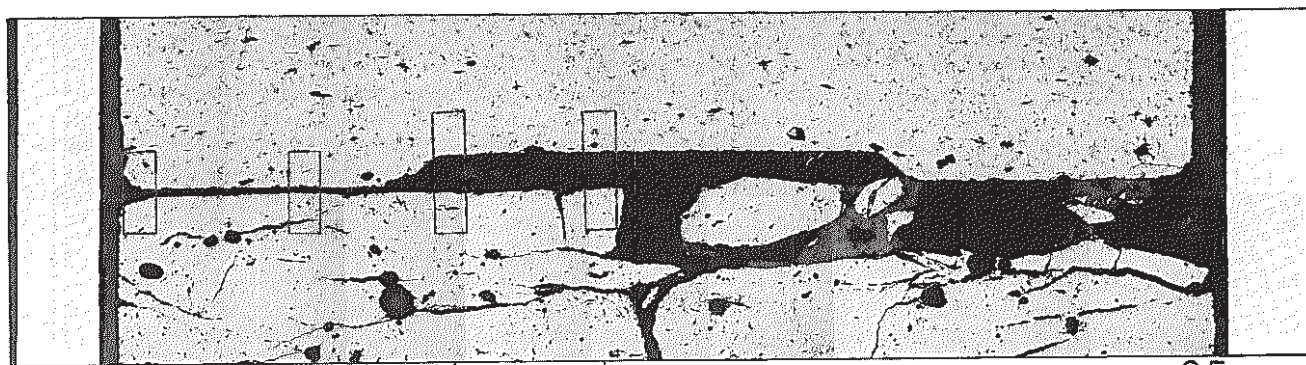


E03S914

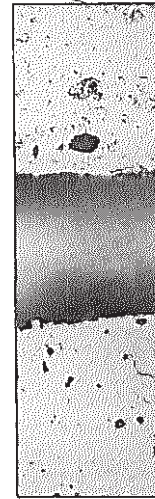
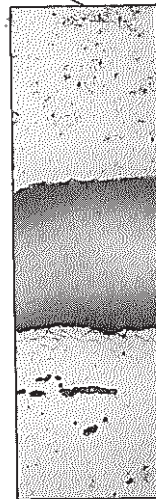
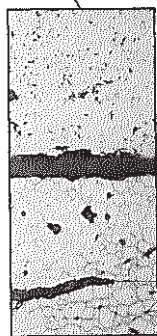
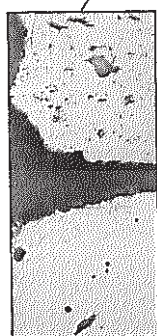
Photo.0-19 Optical Micrograph of the Longitudinal Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892285) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892285



0.5 mm



50 μ m

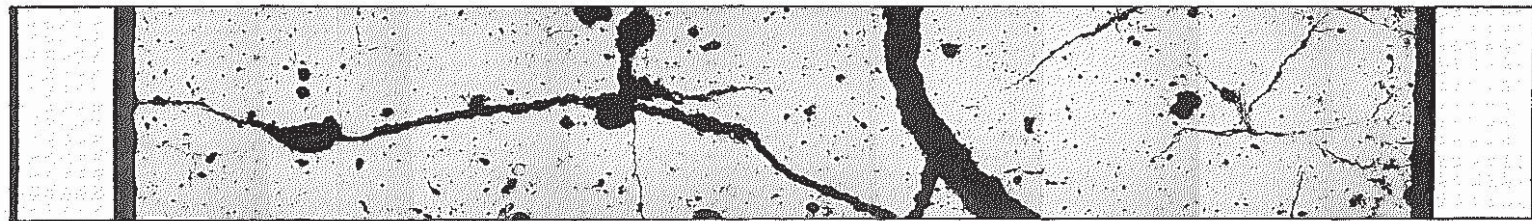
As-Polished

E038915

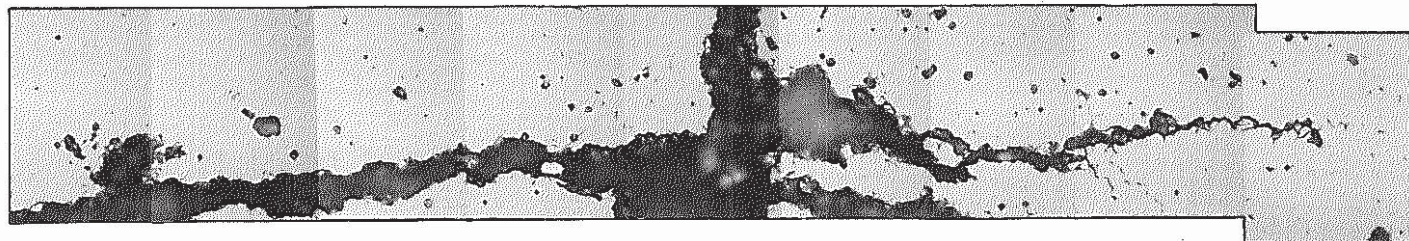
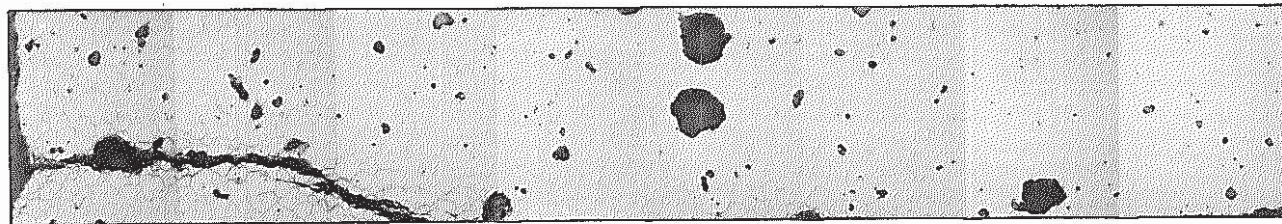
Photo.0-20 Optical Microsture of the Core Fuel and Upper Insulator
UO₂ Fuel (Specimen No. 892285) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892285



0.5 mm



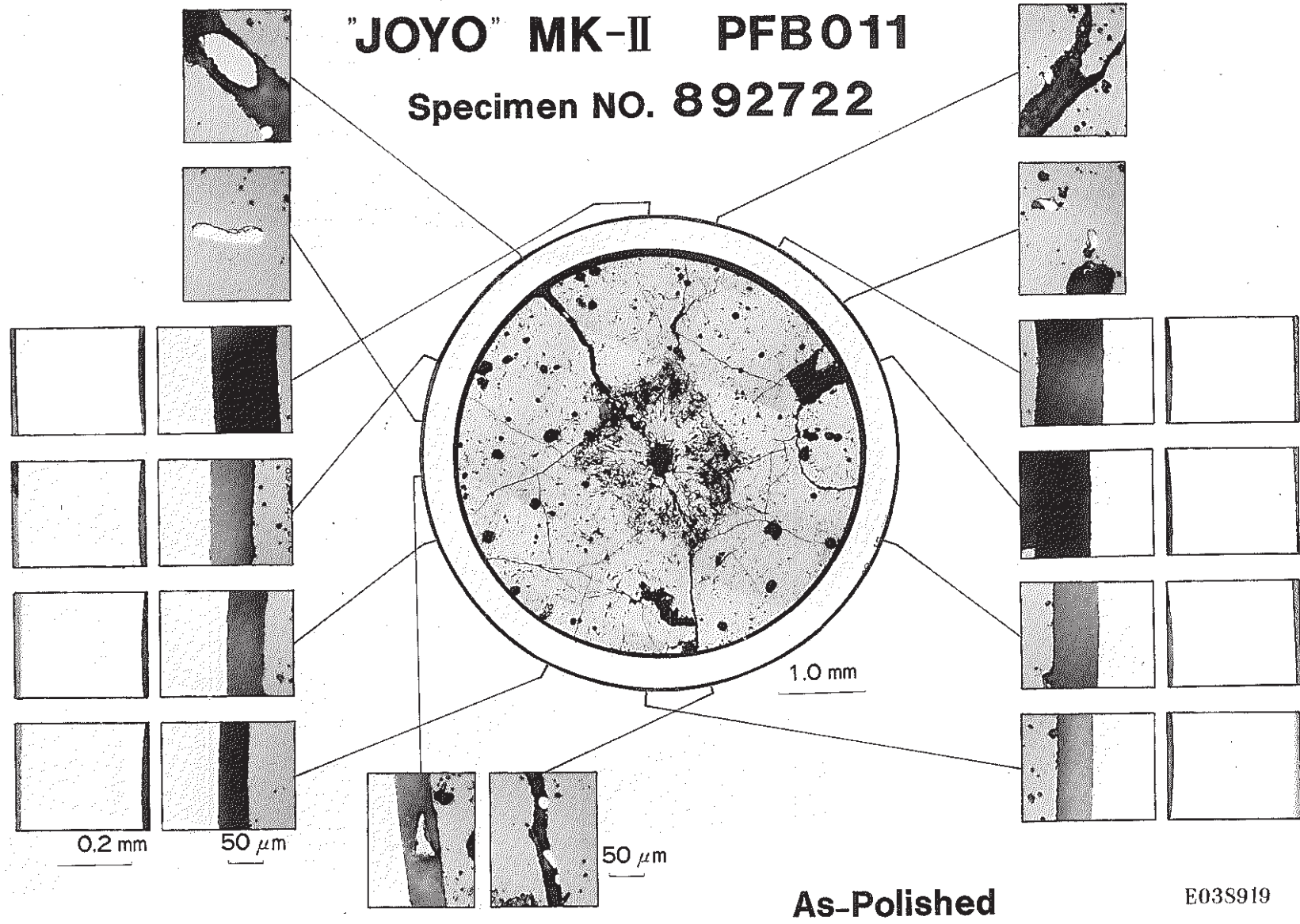
50 μ m

As-Polished

E038916

Photo.0-21 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892285) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011
Specimen NO. 892722

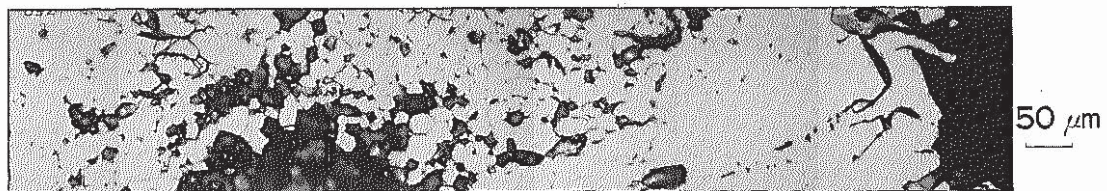
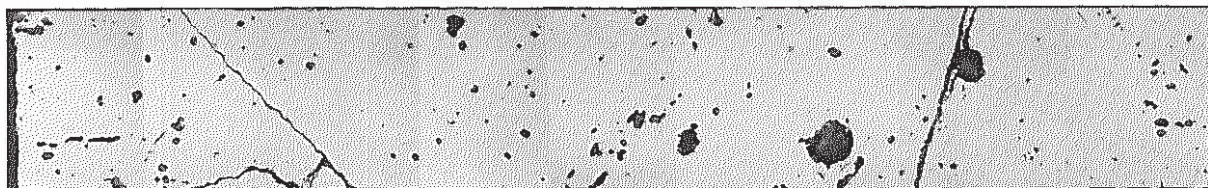
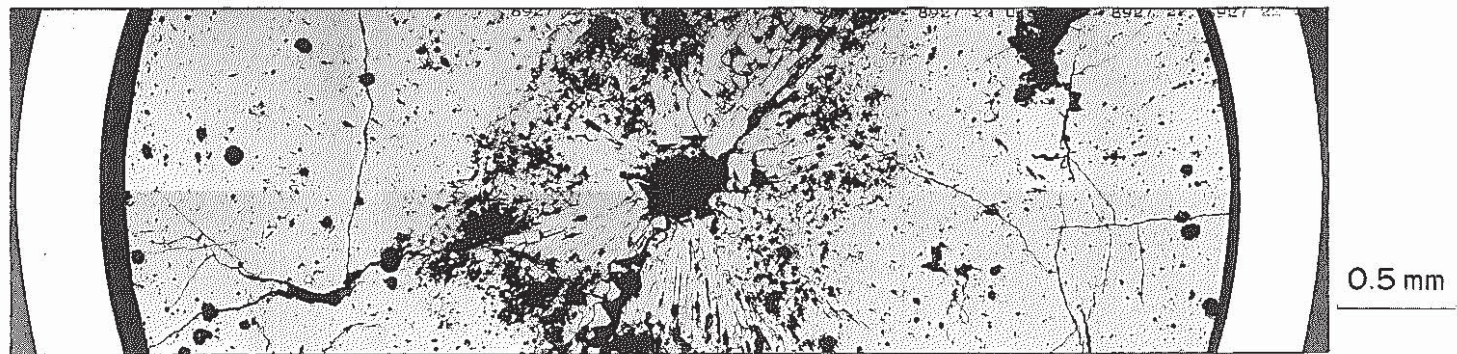


- 50 -

Photo.0-22 Optical Micrograph of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 892722) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892722



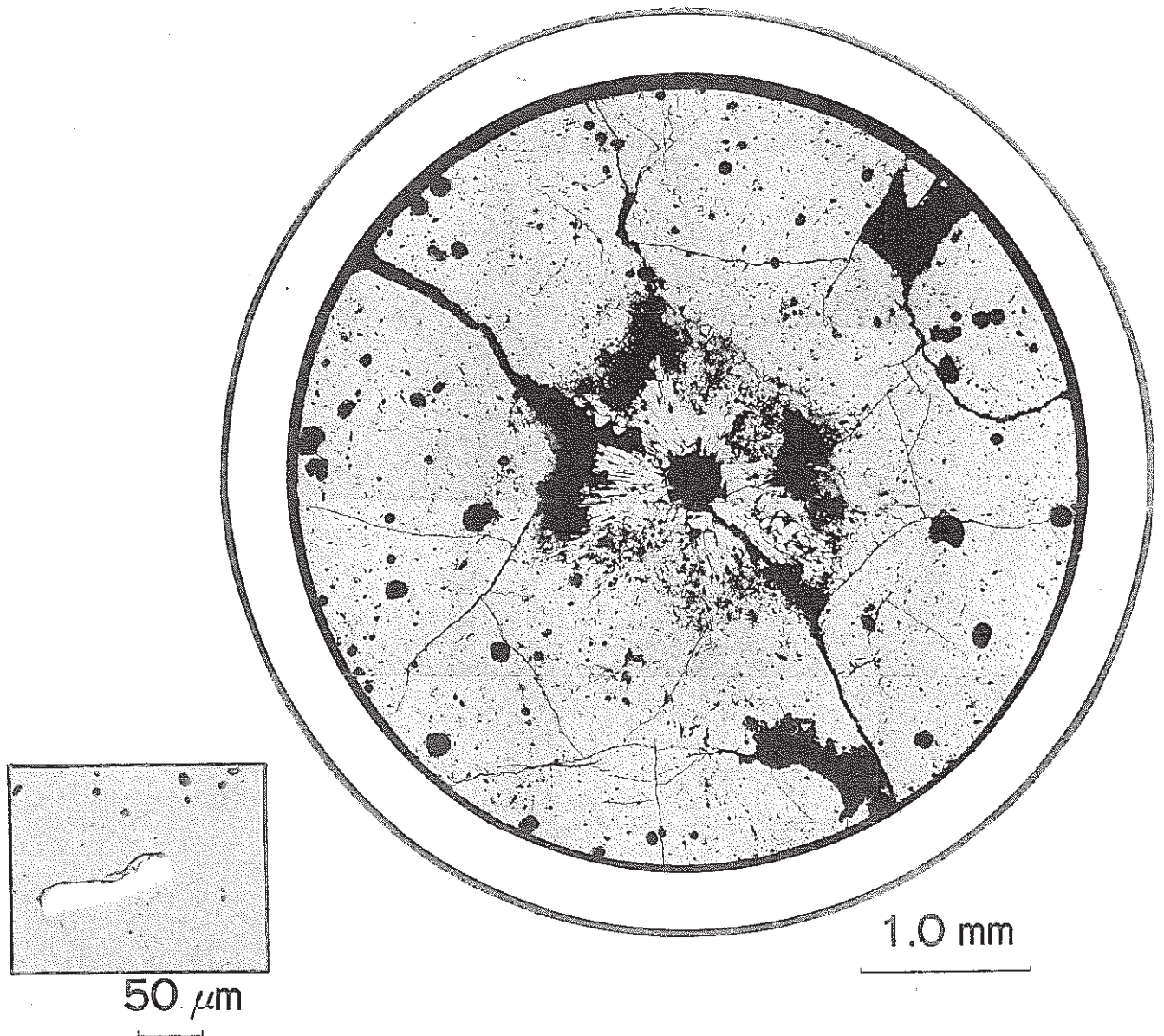
As-Polished

E038920

Photo.0-23 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892722) As-Polished

"JOYO" MK-II PFB011

Specimen NO. 892722



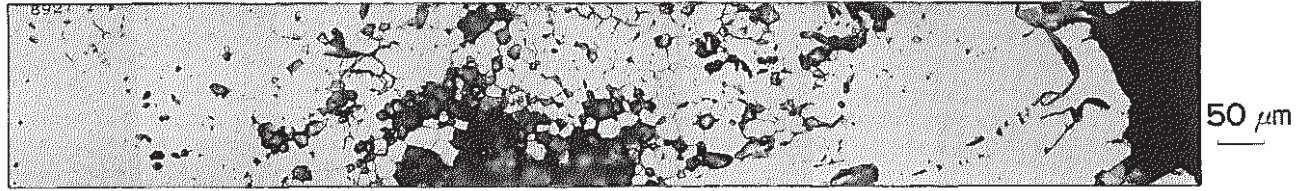
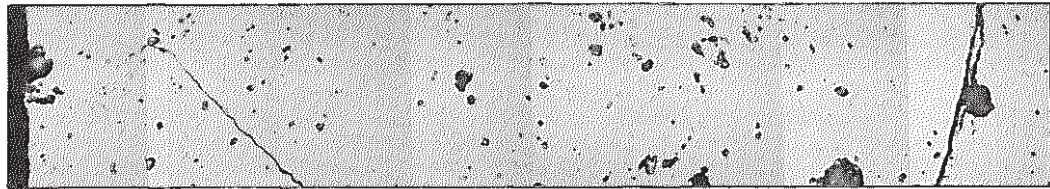
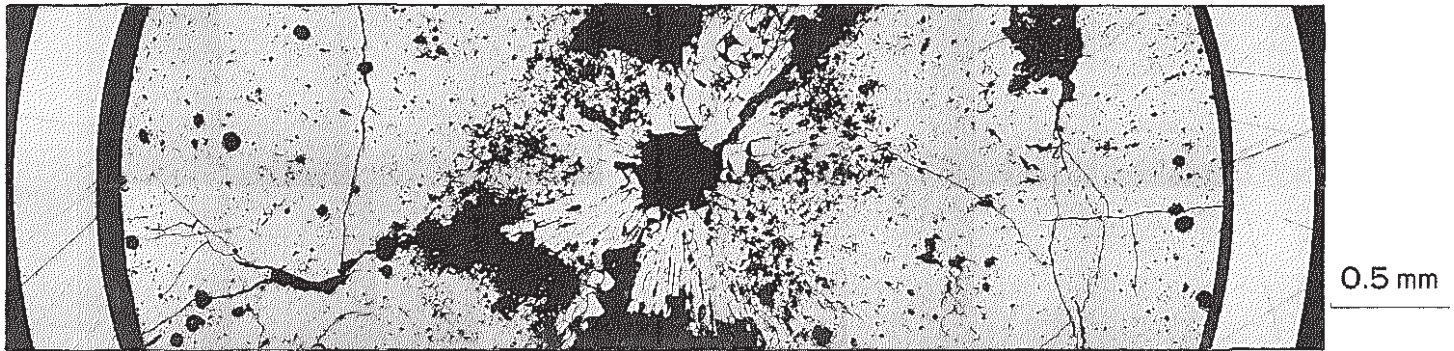
As-Etched

E038927

Photo.0-24 Optical Micrograph of the Transvers section of the Core Fuel (Specimen No. 892722) As-Etched

"JOYO" MK-II PFB011

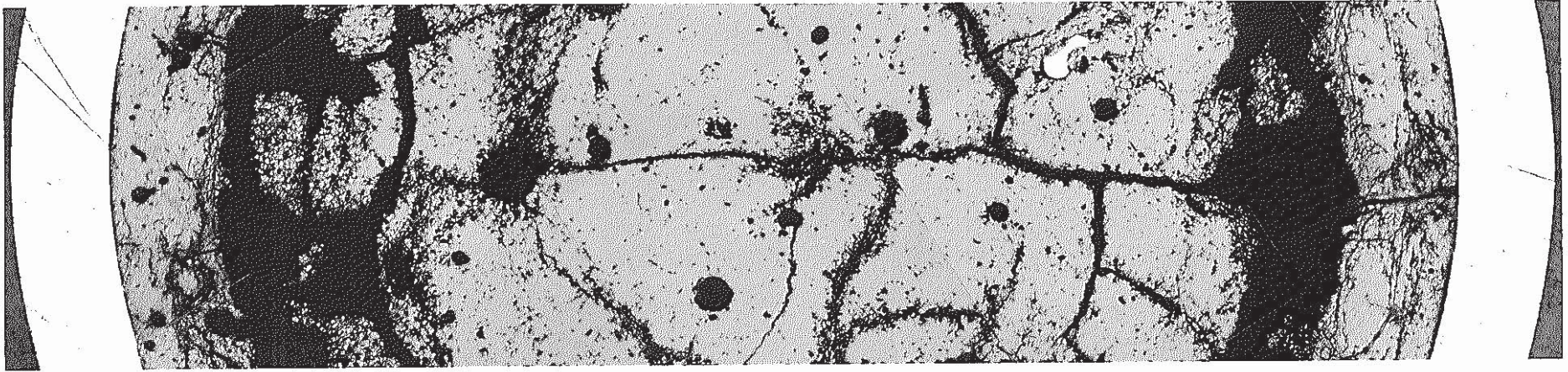
Specimen NO. 892722



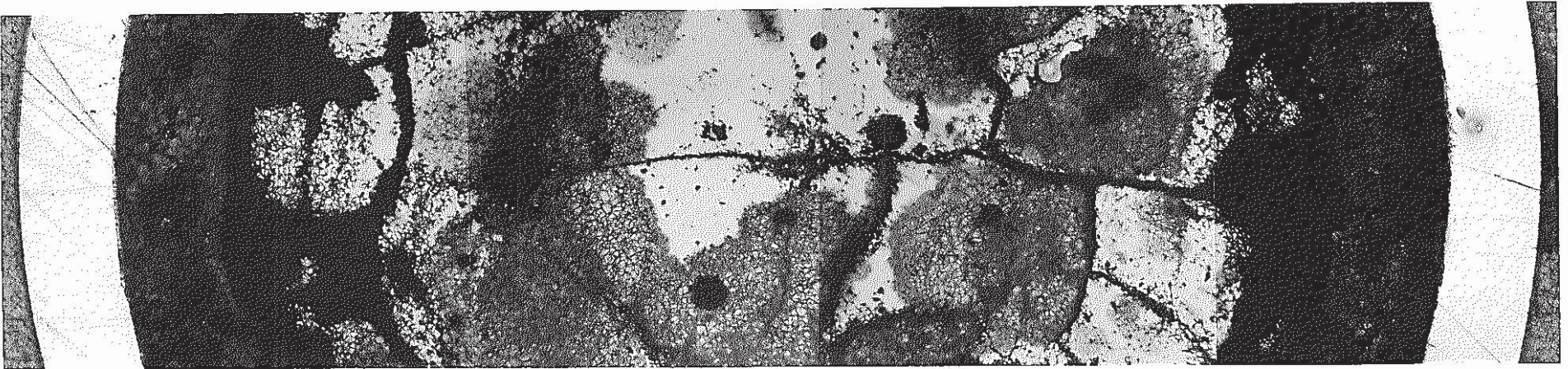
As-Etched

E038928

Photo.0-25 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. 892722) As-Etched



Na が浸み出た初期の状態

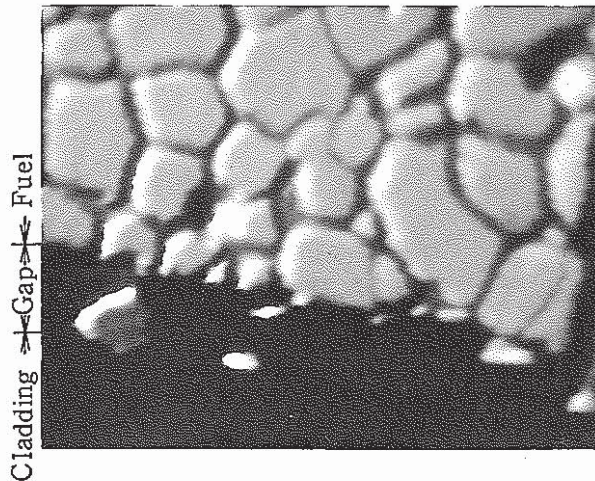


Na

Na が浸み出た後の状態

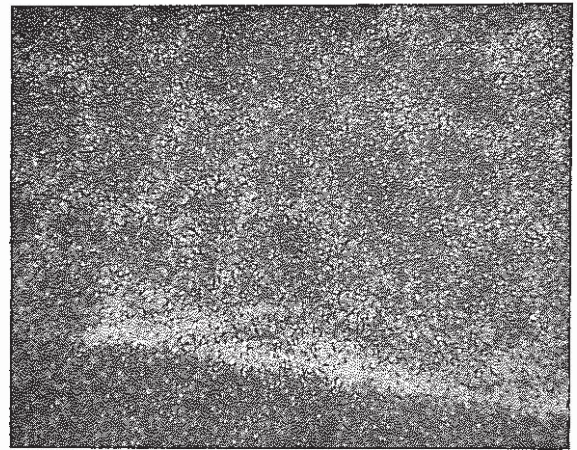
Na

Photo.0-26 Optical Microstructure of the Core Fuel Showing that Sodium Covered the Specimen Surface. (Specimen No.892242) As-Polished



89222211

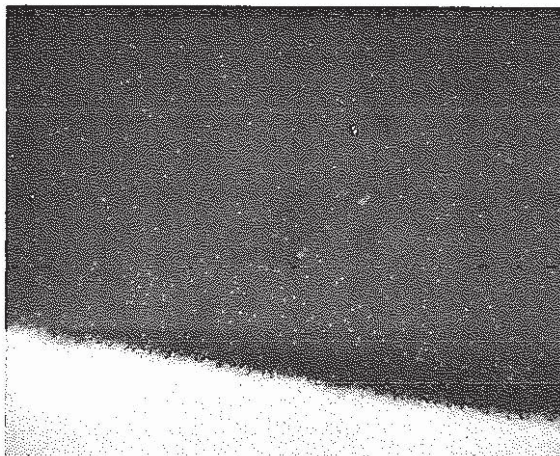
BSE



89222212

Na

10μm



89222213

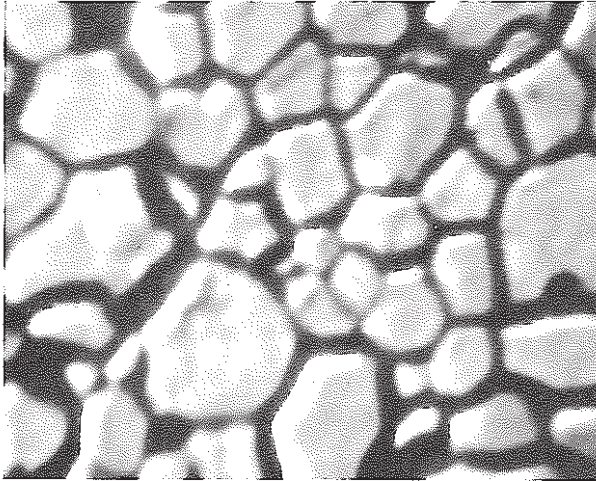
Fe



89222214

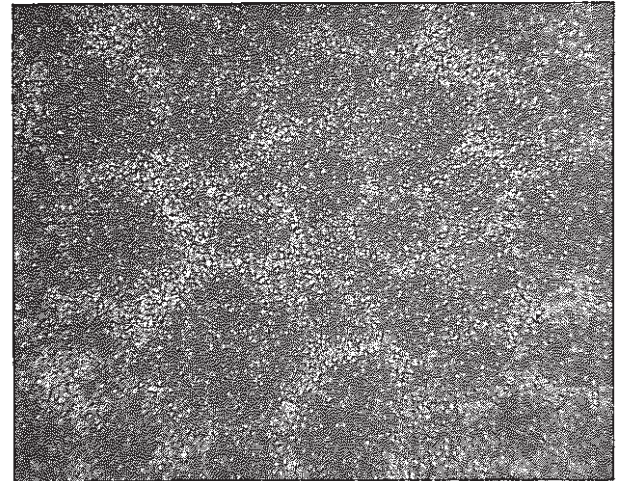
U

Photo.E - 1 X-ray Images of the Sodium-Fuel
Reaction Region (Specimen No. 892222)



89222215

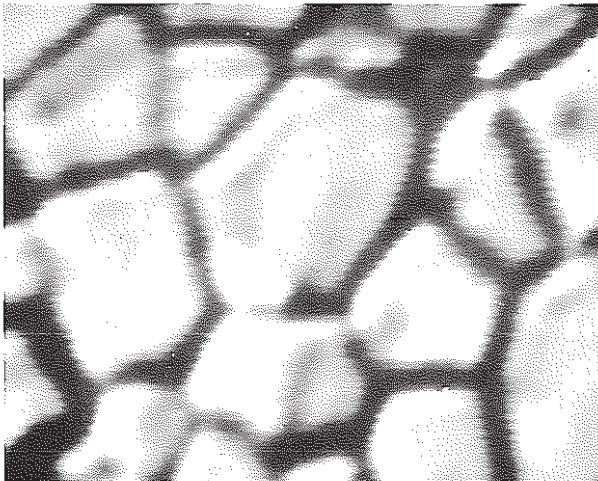
BSE



89222216

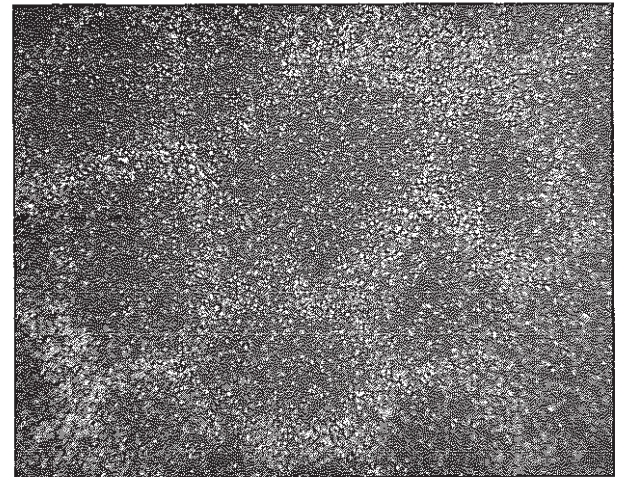
Na

10 μ m



89222217

BSE

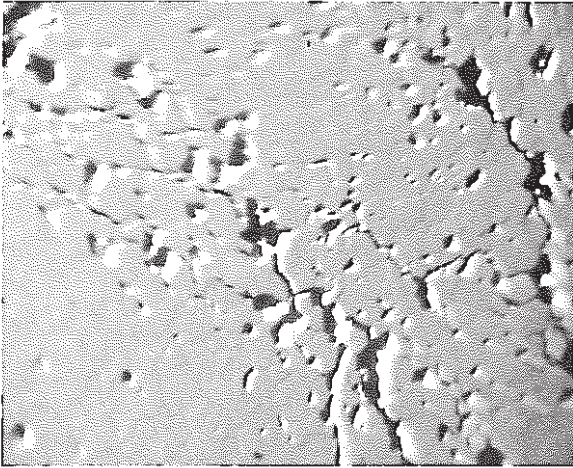


89222218

Na

5 μ m

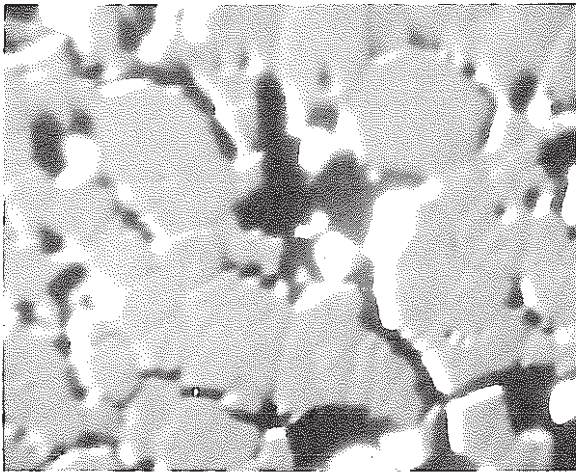
Photo. E-2 Naka X-ray Image of the Sodium-Fuel
Reaction Region (Specimen No. 892222)



89222219

BSE

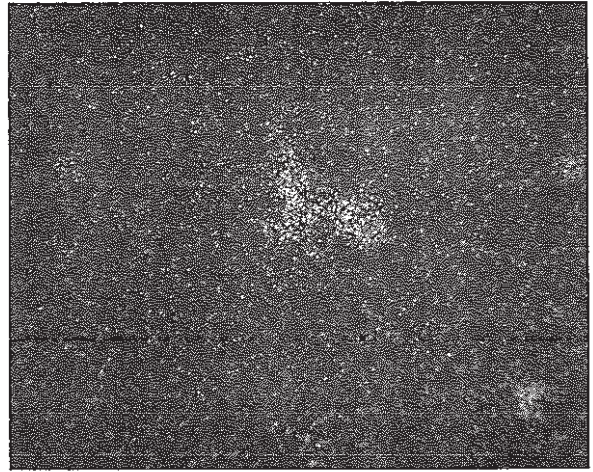
50 μ m



89222220

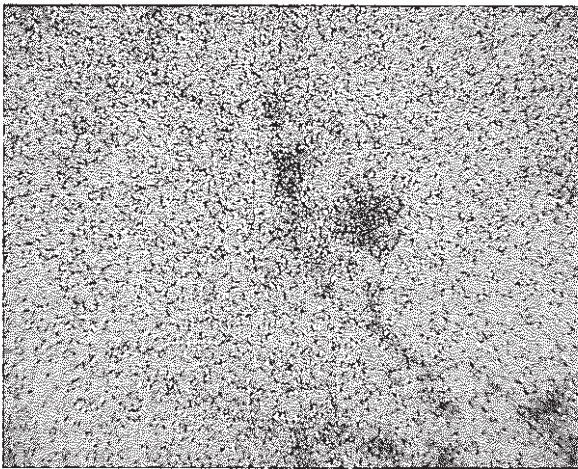
BSE

20 μ m



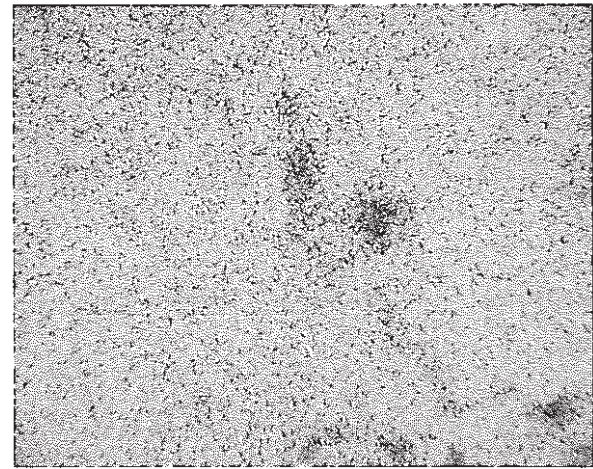
89222221

Na



89222222

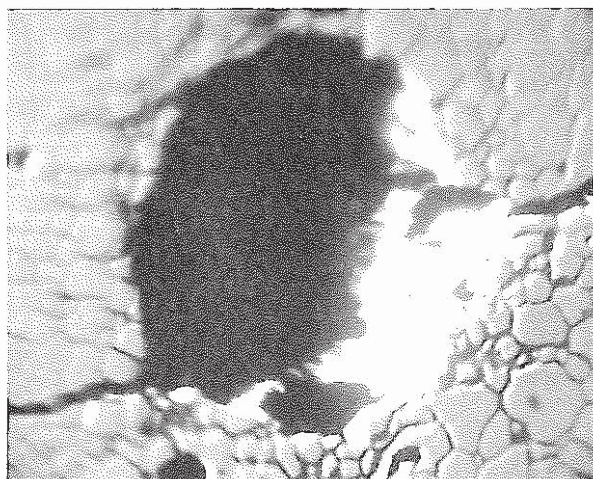
U



89222223

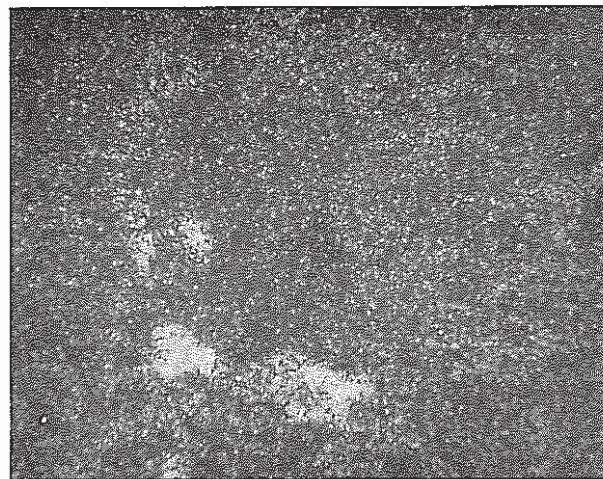
Pu

Photo.E-3 X-ray Images in the Crack of the Pellet
(Specimen No 892222)



89222205

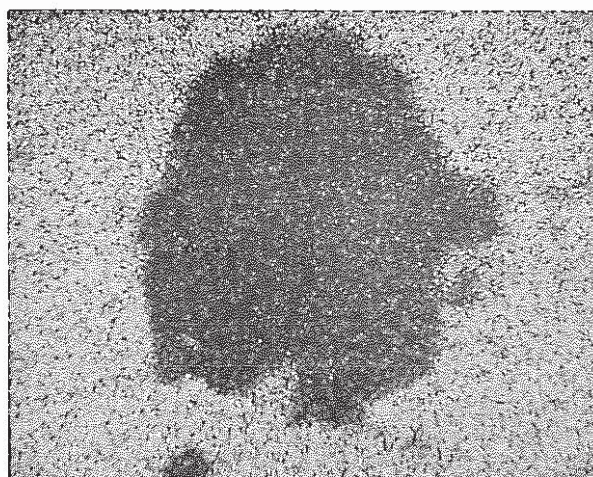
BSE



89222206

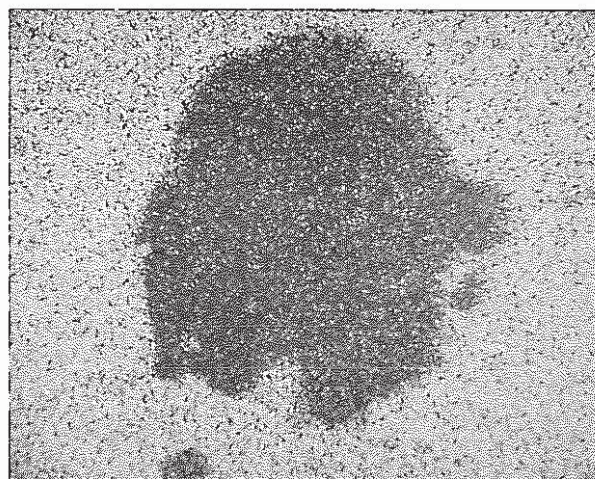
Na

50 μ m



89222207

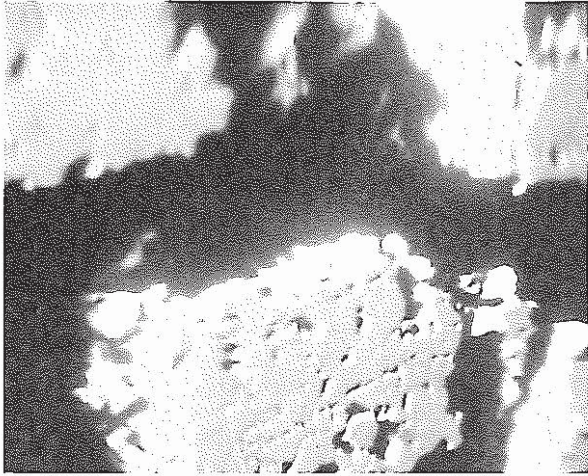
U



89222208

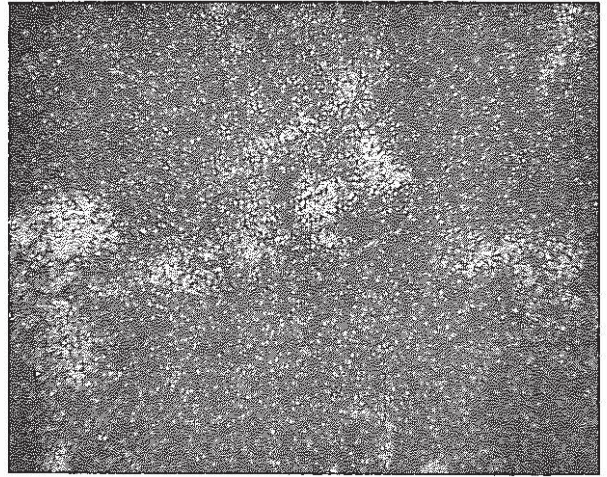
Pu

Photo.E-4 X-ray Images in the Void of the Pellet
(Specimen No. 892222)



89222201

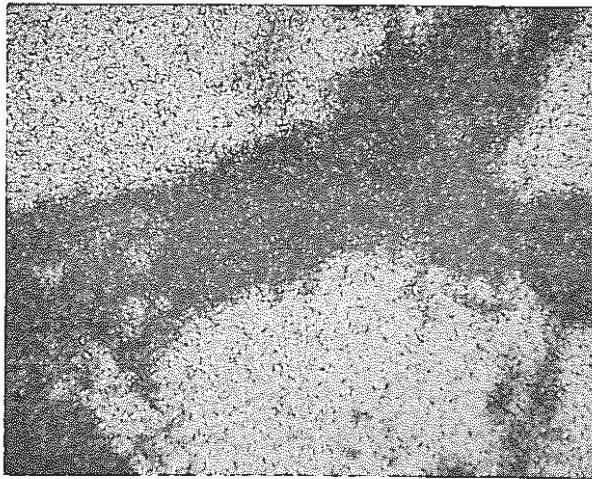
BSE



89222202

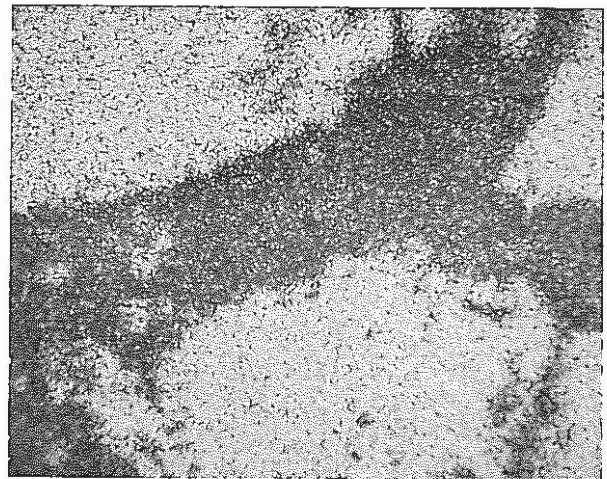
Na

100μm



89222203

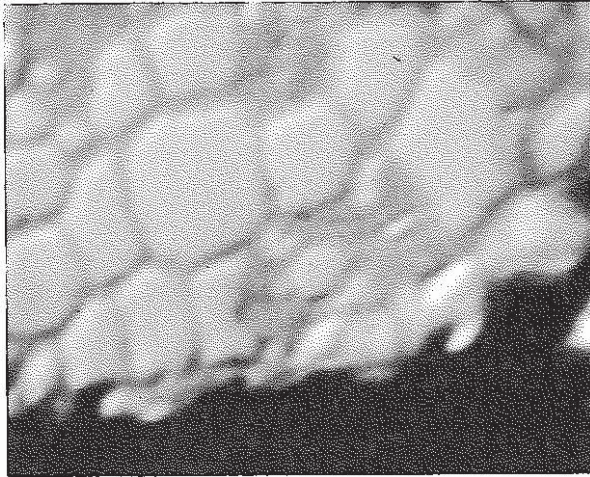
U



89222204

Pu

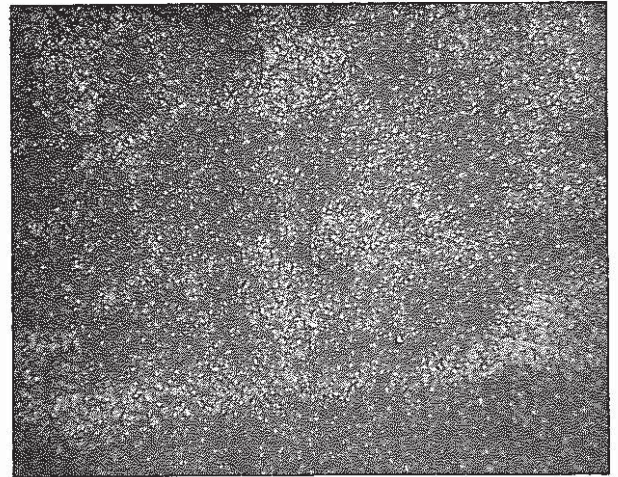
Photo.E-5 X-ray Images in the Crack of the Pellet
(Specimen No. 892222)



89224203

BSE

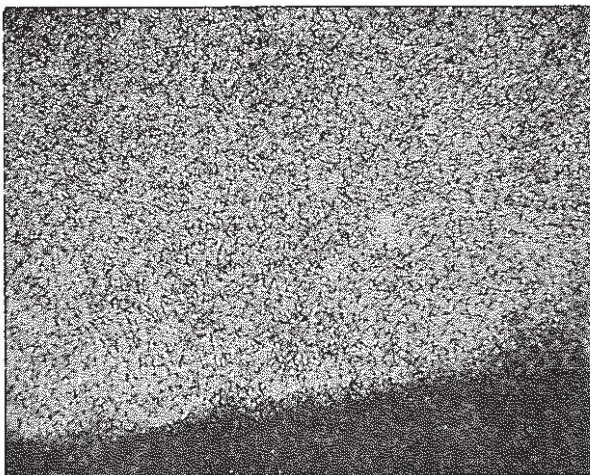
Gap
Cladding ← Fuel



89224204

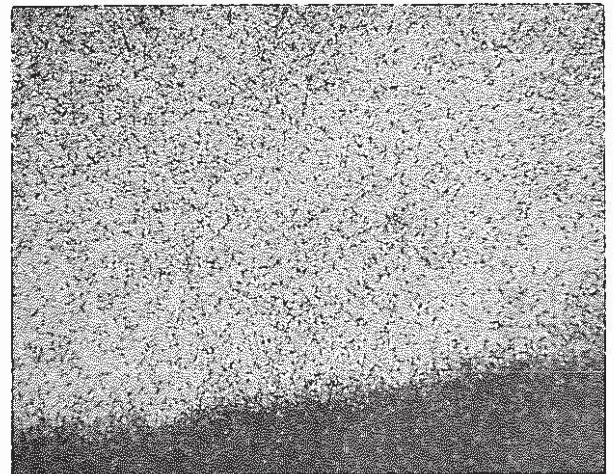
Na

10 μm



89224205

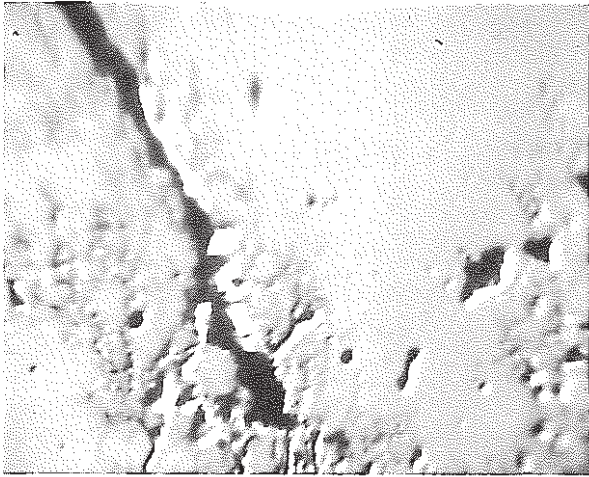
Pu



89224206

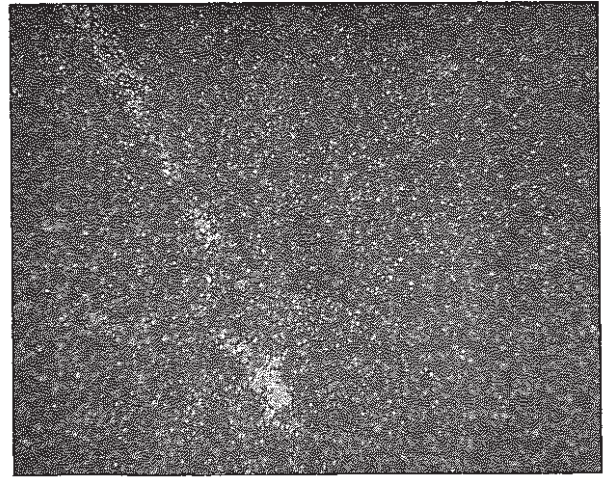
U

Photo.E-6 X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No. 892242)



89224211

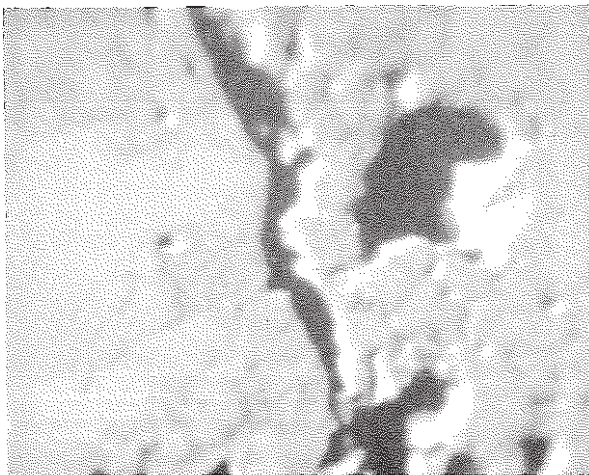
BSE



89224212

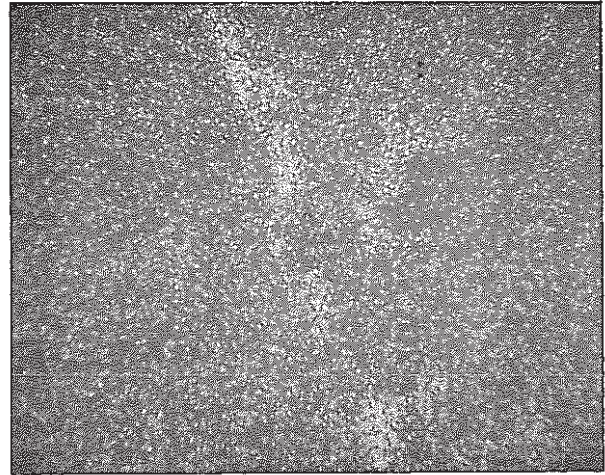
Na

50 μ m



89224213

BSE



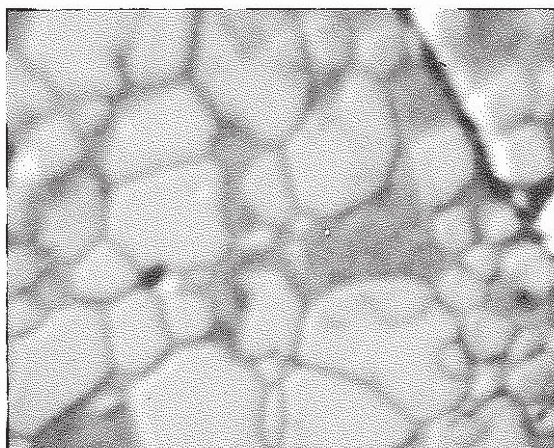
89224214

Na

20 μ m

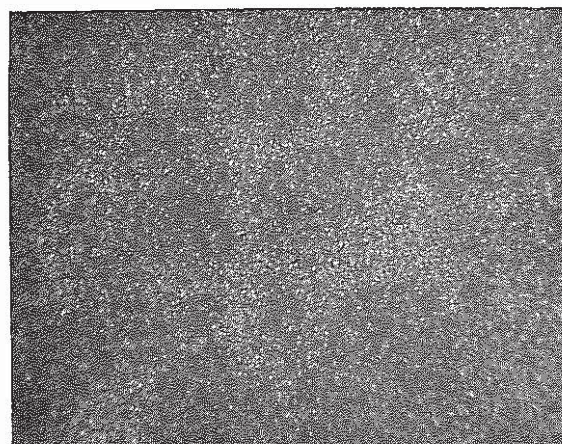
Photo.E-7 $\text{NaK}\alpha$ X-ray Image in the Crack of the Pellet (Specimen No 892242)

A11



98224327

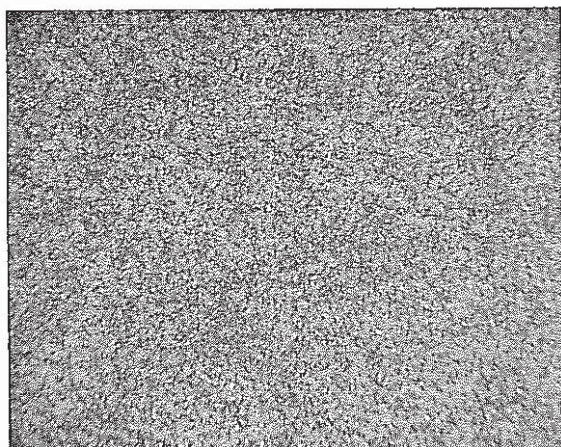
BSE



89224328

Na

10 μ m



89224329

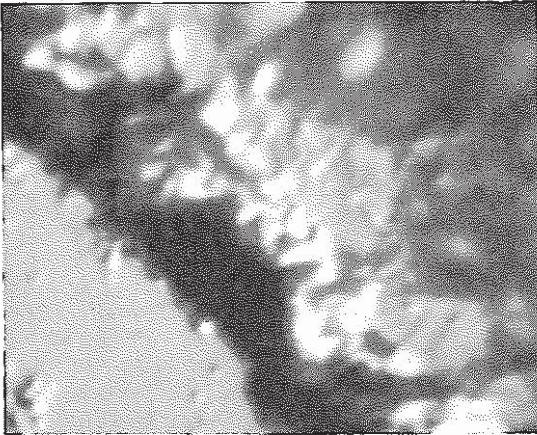
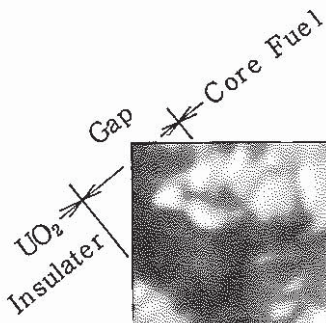
Pu



89224330

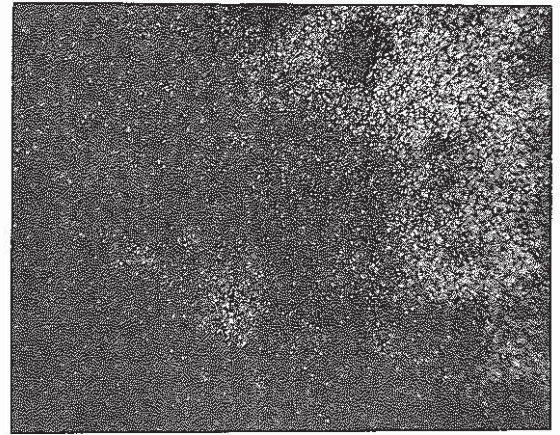
U

Photo.E-8 X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No 892243)



89228505

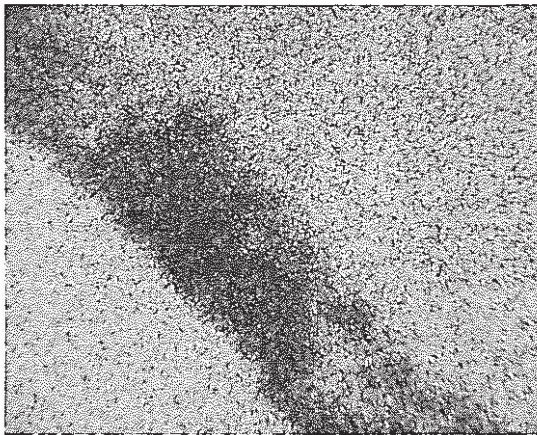
BSE



89228506

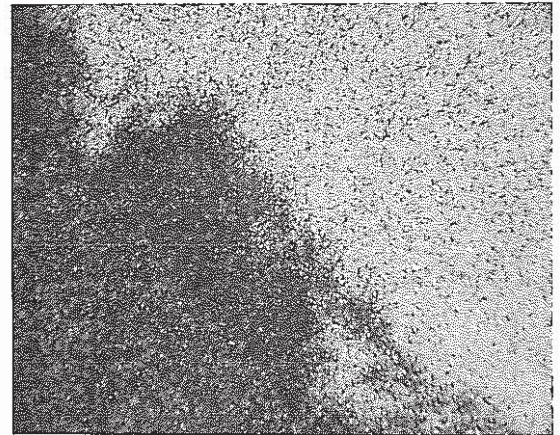
Na

20 μ m



89228507

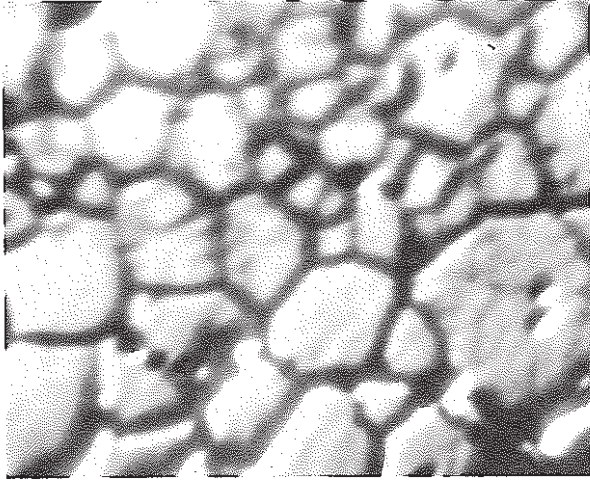
U



89228508

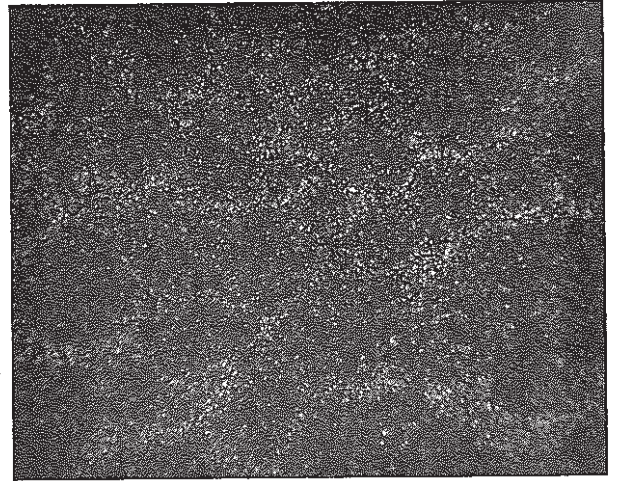
Pu

Photo.E-9 X-ray Images of the Interface between the Core Fuel and Insulator UO₂ (Specimen No. 892285)



89228501

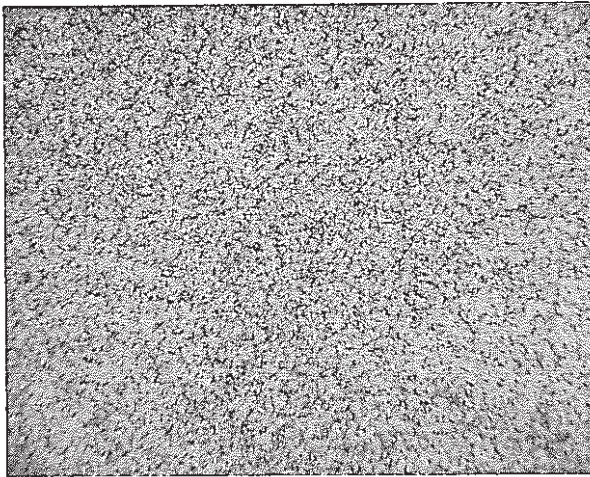
BSE



89228502

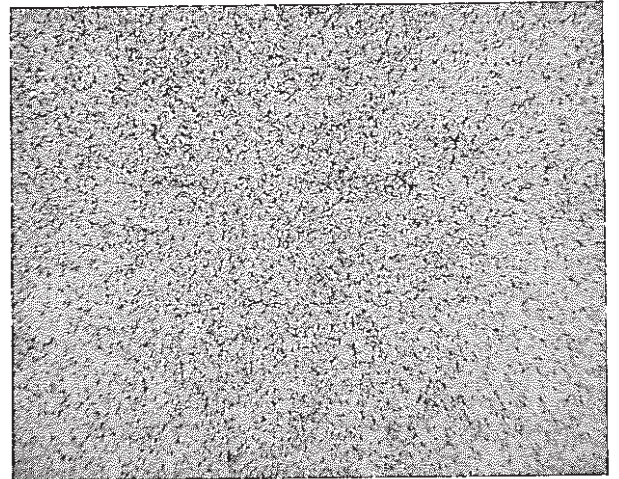
Na

10μm



89228503

U



89228504

Pu

Photo.E-10 X-ray Images of the Sodium-Fuel Reaction Region (Specimen No 892285)

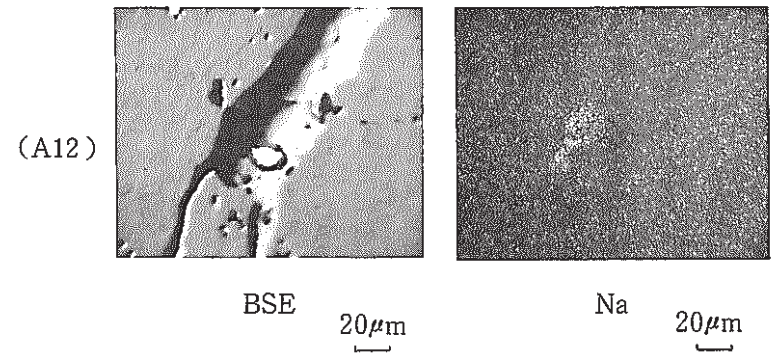
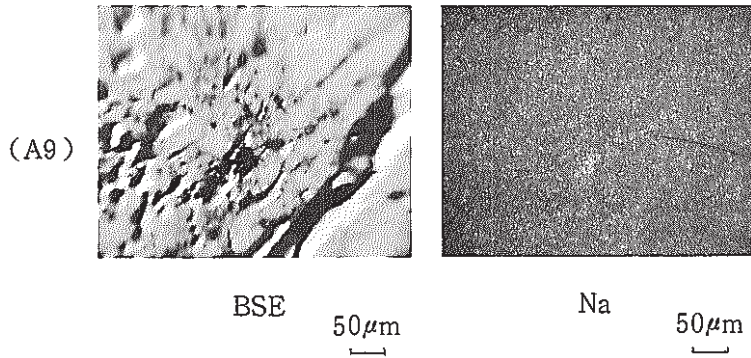
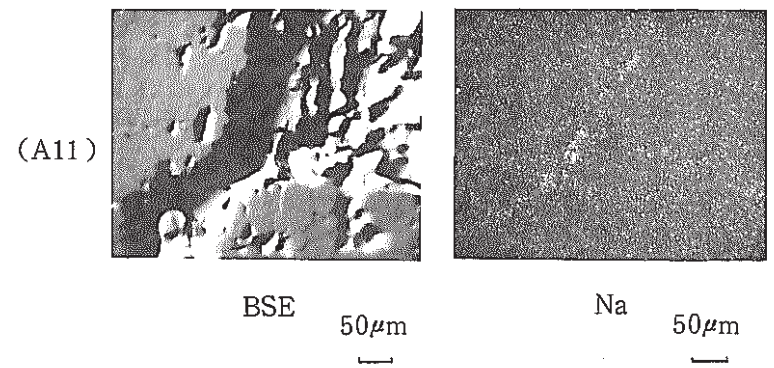
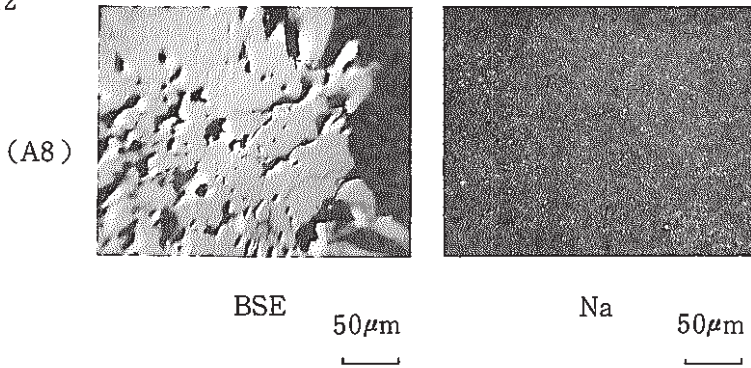
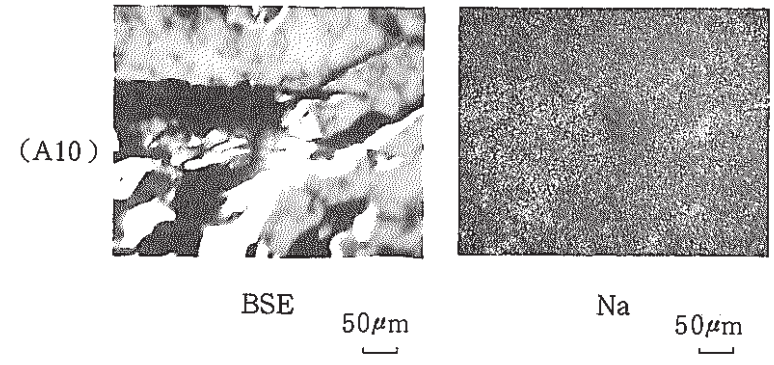
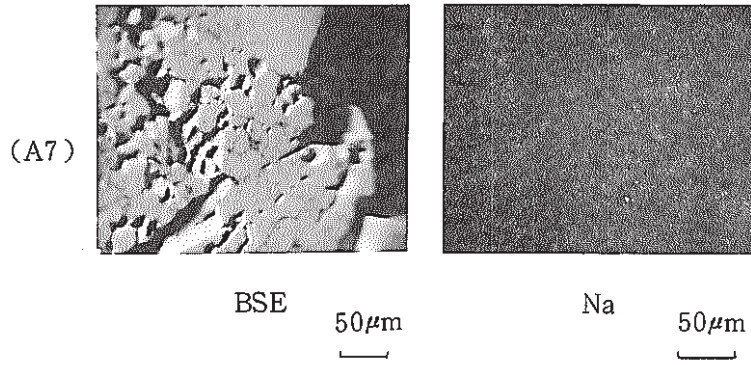
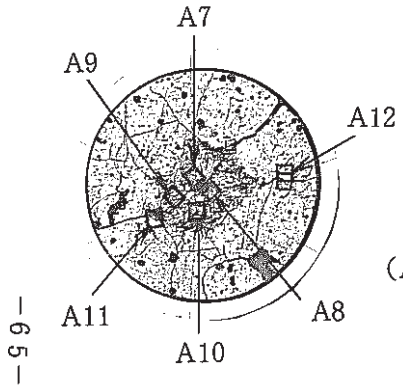


Photo.E-11 Nak α X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No. 892722)

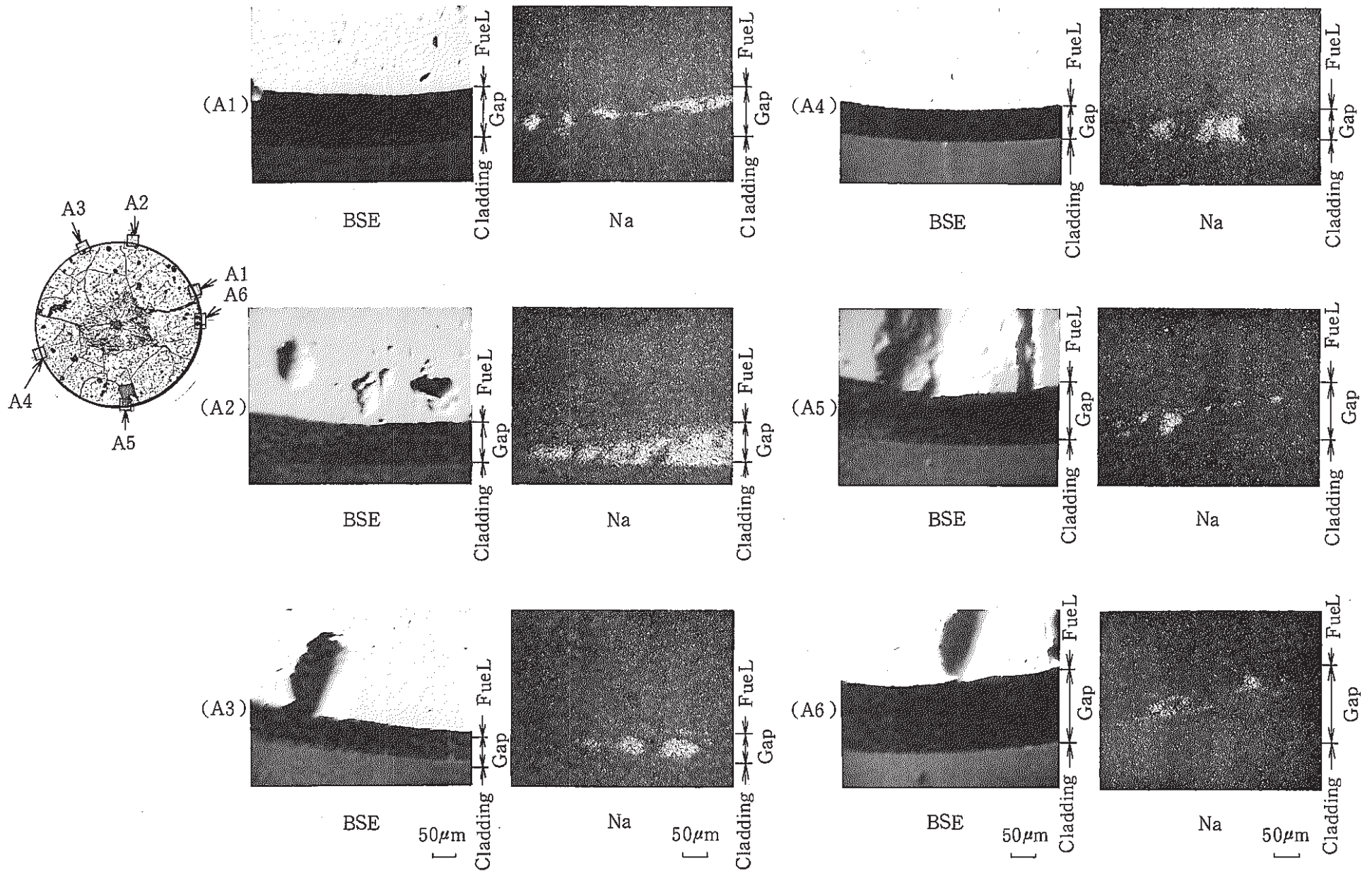


Photo.E-12 Nak α X-ray Images in the Core Fuel (Specimen No. 892722)

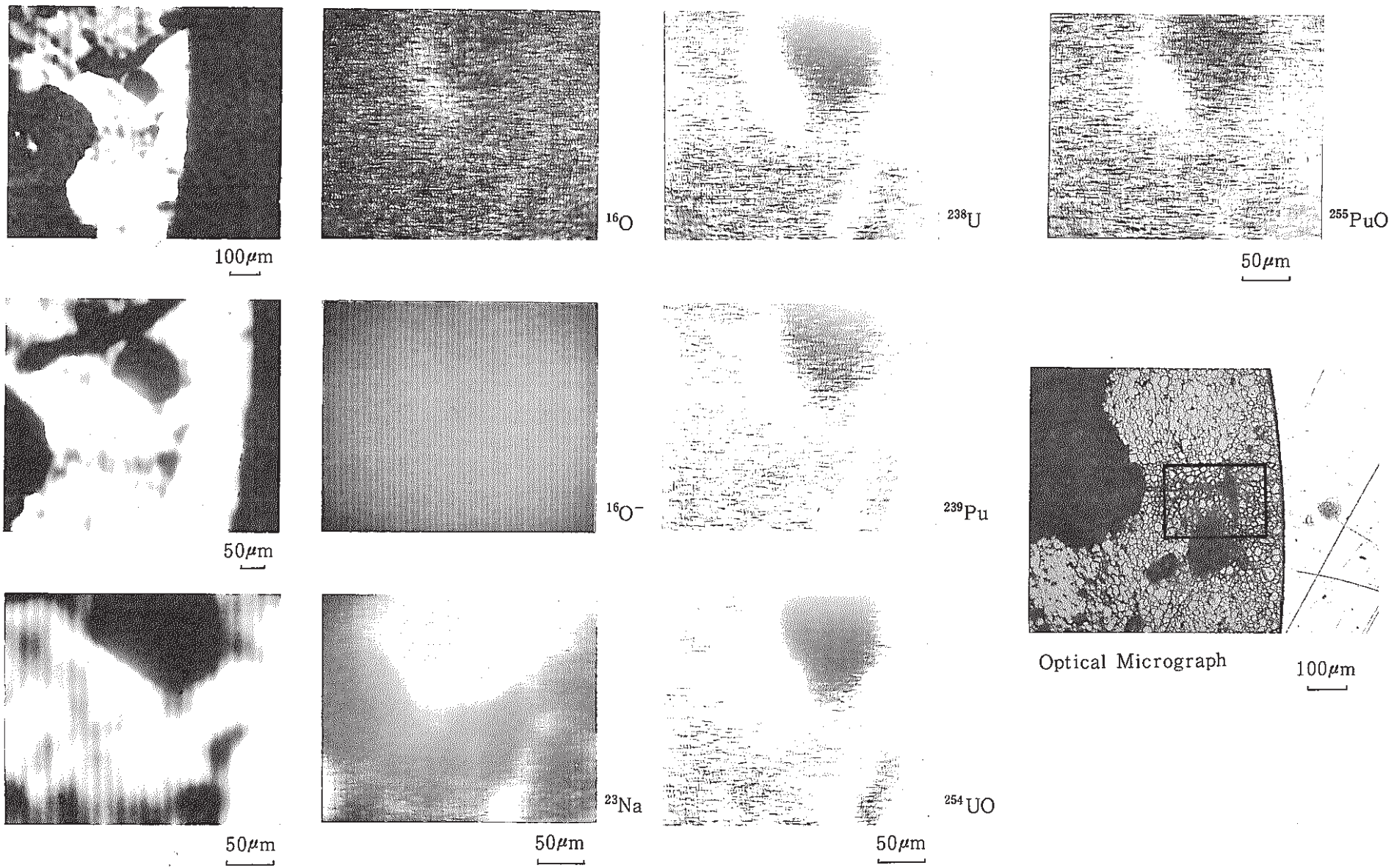


Photo.I-1 Ion Images of the Core Fuel Outer Region. (Specimen No. 892242)

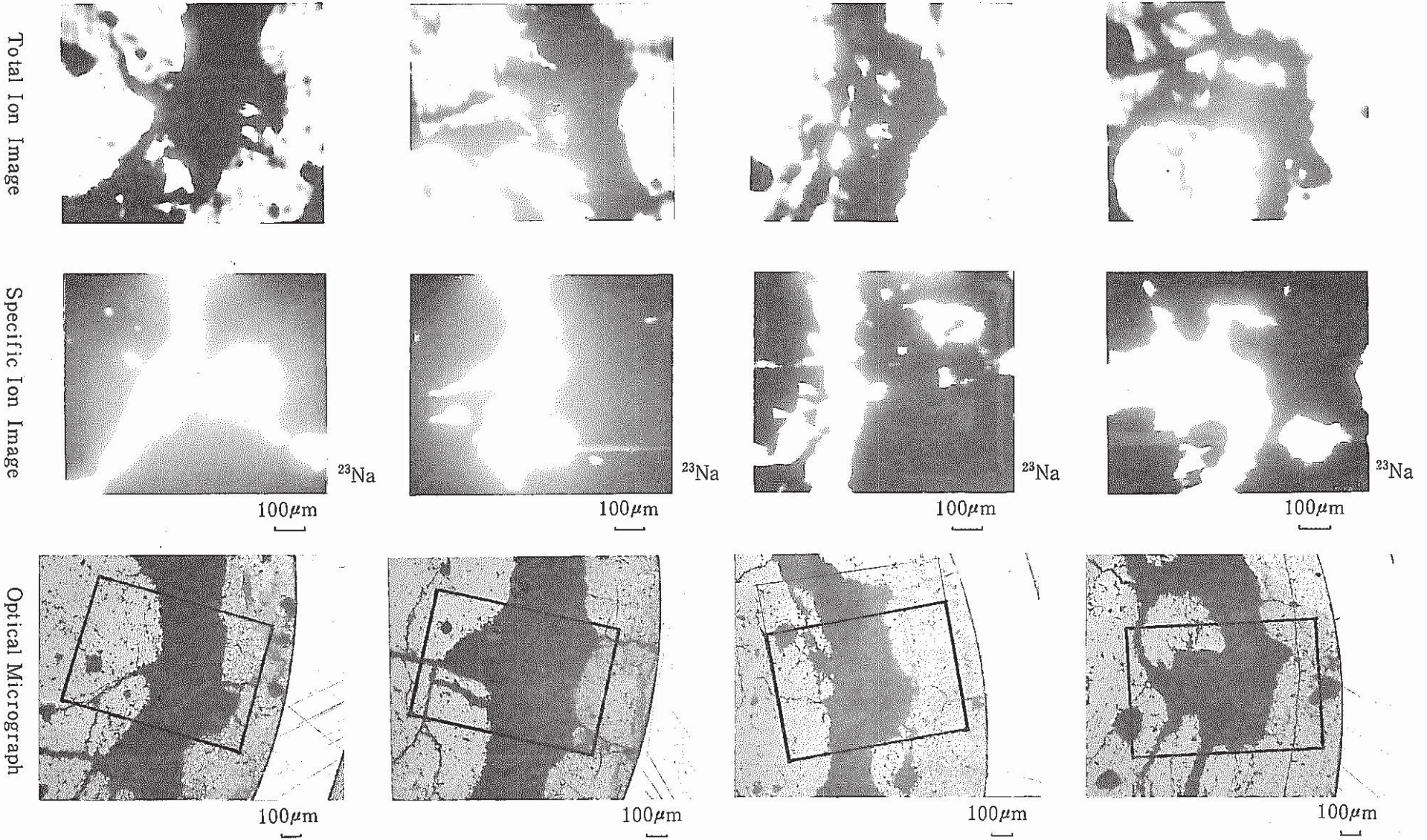


Photo. I-2 Ion Images of the Crack in the Fuel (Specimen No. 892242)

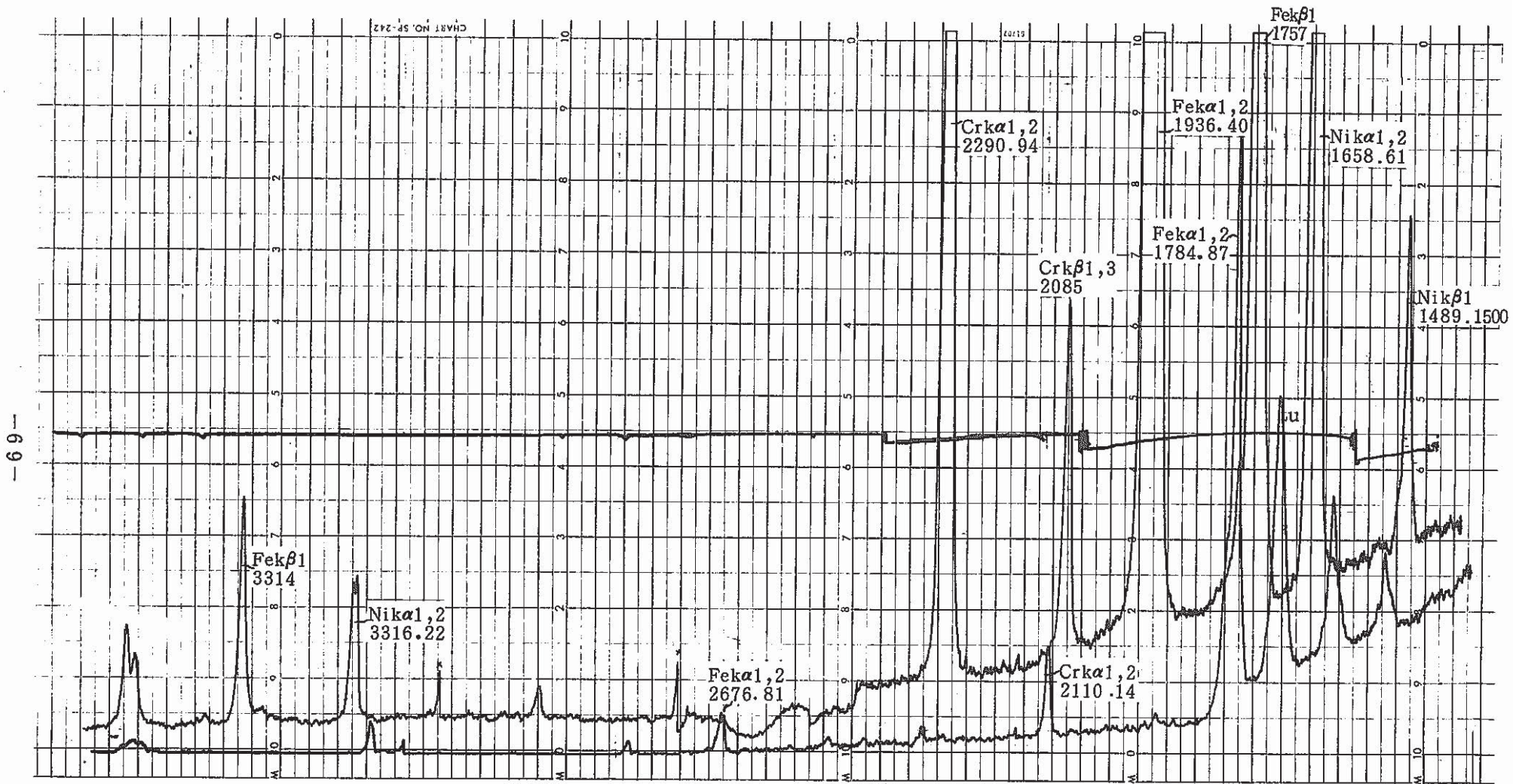


Chart 1 Spectral Analyses of the Metallic Inclusion in the Fuel. (Specimen No 892242)