TN 187
PNC ＴＮ9410 90-003

内部資料

「常陽」MK-Ⅱ炉心燃料集合体(PFD209)の照射後試験

——燃料要素の組織観察及び機器分析——

技術管理室
No.
'90.7.12
動燃事業団大洗工学センター

区分変更
変更後資料番号 ~~PNC~~TN9410 90-187
決裁年月日 平成13年 7月31日

1990年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

Ⓦ

登録区分
2001.2.21
変更表示

内 TN部 資 料
PNC ※9410 90-003/87
1 9 9 0 年 3 月

「常陽」MK－Ⅱ炉心燃料集合体（PFD209）の照射後試験
――燃料要素の組織観察及び機器分析――

実施責任者 鹿倉 栄*
報 告 者 叶野 一郎*，額賀 貞芳**
熊倉 忠夫*，櫛田 尚也*
立辺 和明*，野村 茂雄*

要 旨

炉心燃料集合体（Fab. No. PFD209）は，J1燃料として「常陽」MK－Ⅱ炉心「3D1」の位置に装荷され100MW8サイクルから100MW15サイクルの間照射された最初の2次取替集合体（混合転換燃料）であり，集合体平均燃焼度は約54,700MWd／tである。本試験では燃料ピンの健全性及び照射挙動を把握するため，光学顕微鏡，走査型電子顕微鏡（SEM）による組織観察，X線マイクロアナライザ（SXMA）による元素分析並びにイオンマイクロアナライザ（IMA）による質量分析を実施した。

本試験により得られた結果は，以下の通りである。

1）燃料カラム軸方向中心部において粒成長は認められるものの，明瞭な中心空孔が出来るまでには至っていない。径方向残留ギャップ幅の平均値は，製造時の85 μmから8μmにまで減少しており，燃料カラム中央部では運転中においてペレットと被覆管の機械的相互作用（FCMI）が生じている。また，被覆管の最大内面腐食量は7 μmである。

2）燃料断面では，ガス気泡が粒界エッヂやコーナーに移動し，それぞれの結晶粒が明瞭に識別できる。また，中心部の粒界面には0.5 μm～3 μmφ程度のガス気泡の析出も認められる。

3）ペレット内に保持されているXe濃度は，不変領域の内側の黒色リング部で急激に増加している。その他の試料では高密度化領域より除々に増加している。

4）UとPuの濃度は径方向で増減がみられるが，明瞭な再分布は認められない。

5）IMAにより測定した燃料カラム軸方向最大燃焼度は，7.54 atom%であり，計算値と良い一致を示した。

＊ 大洗工学センター 燃料材料開発部 燃料材料技術開発室
＊＊ 原子力技術（株）

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 燃料の仕様 …… 2

3. 照射履歴 …… 3

4. 試験方法 …… 4

4.1 試料調製 …… 4

4.2 光学顕微鏡による観察 …… 4

4.3 走査型電子顕微鏡（SEM）による観察 …… 5

4.4 X線マイクロアナライザ（SXMA）による元素分析 …… 5

4.5 イオンマイクロアナライザ（IMA）による質量分析 …… 5

5. 試験結果 …… 6

5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察結果 …… 6

5.2 SEMによる燃料破断面の組織観察結果 …… 6

5.3 SXMAによる元素分析結果 …… 7

5.4 IMAによる燃焼度測定結果 …… 8

6. 謝辞 …… 9

7. 参考文献 …… 10

List of Tables

Table 1 Irradiation Condition of PFD209 Subassembly 11
Table 2 Summary Data from Ceramography (Fab. No. PFD209) 12
Table 3 Results of Fission Gas Release Rate in Unrestructured Region and Restructured Region 13
Table 4 Results of Xe Release Rate in Core Fuel Pellet 14
Table 5 Results of Cs Release Rate in Core Fuel Pellet 14

List of Figures

Fig. 1 Specification of MK-II Driver Fuel Pin 15

Fig. 2 Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab. No. PFD209) in "JOYO" MK-II 16

Fig. 3 Location of the Fuel Pin (Pin No. C7A6) in Driver Fuel Subassembly 17

Fig. 4 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No. C7A6) 18

Fig. 5 Axial Profile of Burn up (Pin No. C7A6) 19

Fig. 6 Axial Profile of Linear Heat Late (Pin No. C7A6) 20

Fig. 7 Axial Profile of Fuel Temperature (Pin No. C7A6) 21

Fig. 8 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin 22

Fig. 9 Axial Profile of the Gap Width and Fuel Restructure 23

Fig. 10 Relative Radial Profiles of Retained Xe, Cs Measured by SXMA (Pin No. C7A6) 25

Fig. 11 Burnup Dependency of Fission Gas Release Rate in Restructured Region and Unrestructured Region 27

Fig. 12 Relationship between Xe Release Rate and Cs Release Rate .. 28

Fig. 13 Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by SXMA (Pin No. C7A6) 29

Fig. 14 Radial Distribution of Metallic Inclusion (Specimen No. C7A662) 31

Fig. 15 Mo-Ru-Rh System Phase Diagram 32

Fig. 16 Axial Distribution of Measured Burnup (Pin No. C7A6) 33

Fig. 17 Radial Burnup Distribution of Measured by the IMA (Specimen No. C7A662) 33

List of Photographs

Photo. 0- 1 Optical Macrographs of the Metallographic Specimen (Pin No. C7A6) 34

Photo. 0- 2 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A622) As-Polished 35

Photo. 0- 3 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A622) As-Polished 36

Photo. 0- 4 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A642) As-Polished 37

Photo. 0- 5 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A642) As-Polished 38

Photo. 0- 6 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A662) As-Polished 39

Photo. 0- 7 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A662) As-Polished 40

Photo. 0- 8 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A662) Etched 41

Photo. 0- 9 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A662) Etched 42

Photo. 0-10 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A682) As-Polished 43

Photo. 0-11 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A682) As-Polished 44

Photo. 0-12 Optical Micrograph of the Transverse Section (SpecimenNo. C7A682) Etched 45

Photo. 0-13 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A682) Etched 46

Photo. 0-14 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A6A2) As-Polished 47

Photo. 0-15 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A6A2) As-Polished 48

Photo. 0-16 Optical Micrograph of the Transverse Section (Specimen No. C7A6A2) Etched. 49

Photo. 0-17 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A6A2) Etched 50

Photo. 0-18 Optical Micrograph of the Longitudinal Section (Specimen No. C7A6A3) As-Polished 51

Photo. 0-19 Optical Microstructure of the Core Fuel and Insulator Pellet (Specimen No. C7A6A3) As-Polished 52

Photo. 0-20 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A6A3) As-Polished 53

Photo. O-21 Optical Micrograph of the Longitudinal Section (Specimen No. C7A6A3) Etched 54

Photo. O-22 Optical Microstructure of the Core Fuel and Insulator Pellet (Specimen No. C7A6A3) Etched 55

Photo. O-23 Optical Microstructure of the Core Fuel (Specimen No. C7A6A3) Etched 56

Photo. S-1 Scanning Electron Micrographs of the Core Fuel Fracture Surface (Specimen No. C7A624) 57

Photo. S-2 Scanning Electron Micrographs of the Core Fuel Fracture Surface (Specimen No. C7A6641) 58

Photo. S-3 Scanning Electron Micrographs of the Core Fuel Fracture Surface (Specimen No. C7A6641) 59

Photo. X-1 Various X-ray Images of the Metallic Inclusion in the Crack (Specimen No. C7A642) 61

1. まえがき

炉心燃料集合体PFD 209は，「常陽」MK−Ⅱ炉内装荷位置「3D1」において100MW8サイクルから15サイクルの間照射され，集合体平均燃焼度は54,700MWd／tの照射履歴を有するものである。照射燃料集合体試験室（FMS）において各種非破壊検査が実施された後，集合体内の1本のピンから金相試料を採取し，破壊試験に供した。

試験では，集合体内の燃料，被覆管の健全性並びに照射挙動を把握するため，光学顕微鏡観察，走査型電子顕微鏡観察，X線マイクロアナライザ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。本報告はADS金相セルにおいて実施した上記試験の結果を記したものである。

2. 供　試　体

2.1 燃料ピンの仕様

項　　目	
全　　長（mm）	1,533 ± 2
ペレットスタック長（mm）	550 ± 5
被覆管外径（mm）	5.500 ± 0.030
〃　内径（mm）	4.800 ± 0.025
〃　肉厚（mm）	0.35 ± 0.030
ギャップ幅（μm）	170
ワイヤー巻付ピッチ（mm）	209 ± 15

Fig. 1 に燃料ピンの外観図を示す。

2.2 燃料の仕様

	項　　目	
炉心ペレット	$PuO_2/(PuO_2+UO_2)$（wt%）	$29.3 \pm \begin{matrix}0.7\\1.3\end{matrix}$
	O / M	$1.97 \pm \begin{matrix}0.02\\0.03\end{matrix}$
	外　径（mm）	4.63 ± 0.05
	高　さ（mm）	9 ± 1
	Pu同位体組成	
	$(^{239}Pu + ^{241}Pu)/Pu$	75 ± 2
	^{235}U濃縮度（wt%）	13.4 ± 1
	理論密度（g/cm^3）	11.07
	相対密度（%T・D）	93 ± 2
ペレットインシュレータ	外　径（mm）	4.60 ± 0.05
	高　さ（mm）	12
	^{235}U濃縮度（wt%）	0.2
	理論密度（g/cm^3）	10.96
	相対密度（%T・D）	94
	スタック長（mm）	550 ± 5

3. 照 射 履 歴

炉心燃料集合体（Fab. No. PFD209）は「常陽」MK－Ⅱ炉心内「3D1」において100MW 8サイクルから15サイクルの間照射され，集合体平均燃焼度は54,700MWd／t（ポイント最大71,400MWd／t）である。集合体の炉内装荷位置をFig. 2に示す。本集合体は，炉内貯蔵ラック「R－6」に116日間（S. 63. 5月27日～9月20日）冷却保管された後炉外に取出され，同年9月20日にキャスクでFMFに搬入された。

金相試験に供した燃料ピンは，Pin No. C7 A6（S材）である。燃料ピンの集合体内位置をFig. 3に示す。本集合体の照射条件をTable 1に示す。また金相試験に供したC7 A6ピンの，中性子照射量と被覆管温度，燃焼度，線出力及び燃料温度の軸方向分布をそれぞれFig. 4～Fig. 7に示す。これらの値はESPRIT－Jによる出力結果である。

4. 試 験 方 法

4.1 試 料 調 製

炉心燃料ピン（Pin No. C7A6）は照射燃料集合体試験施設（FMF）において各種非破壊試験を終了した後，試験セル内のピン切断機によりFig.8に示す通り炉心下端がら上端まで23mmから43mmの試験片（5ケ）に切断し，金相セルに搬入された。

金相断面試料は前処理として真空容器内でエポキシ樹脂を注入し，ギャップやクラック内に樹脂を十分浸透させ燃料を固定した後，ケロシンを潤滑剤としてダイヤモンドホイールカッターを用いて切断採取した。切断採取した金相断面試料は，さらにエポキシ樹脂によりステンレス製埋込みリング（外径21mmØ×10mmH）に埋込んだ後，ステンレス製ホルダー（外径31.5mmØ×20mmH）内にネジ止めし研磨した。

研磨は，自動回転研磨機を使用し，ケロシンを滴下しながら耐水研磨紙による粗研磨後，仕上げとしてラッピングオイルを潤滑剤としてダイヤモンドペーストによる研磨を行った。研磨の完了した試料は，キシレンを用い超音波洗浄した後十分乾燥させ，As－Polished状態による観察並びに分析を行った。なお，X線微小分析及び質量分析を行なうための試料導電処理は，イオン腐食装置を用いてそれぞれBe及びAuコーティングにより行った。

また，燃料破断面試料については，被覆管から燃料を脱ミートし砕いて試料採取した。

4.2 光学顕微鏡による観察

組織観察は，ユニオン光学社製の高倍率光学顕微鏡（FAROM）による65倍全体コンポーズ写真撮影，直径方向130倍帯状コンポーズ写真撮影，さらに半径方向の520倍帯状コンポーズ写真撮影をAs－Polished及びEtched状態において各々行なった。

燃料横断面写真は，タブレットディジタイザを用いて画像解析処理を施こすことにより，以下の項目についての定量データを取得した。

(1) 燃料ペレットの直径，面積
(2) 被覆管の外径，内径，肉厚
(3) ペレット内のクラックの面積，パターン
(4) ガスバブル，高密度化等各領域径

4.3 走査型電子顕微鏡（SEM）による観察

燃料破断面部の性状を日本電子社製の遮蔽型走査型電子顕微鏡（JSM－50 A）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　：　$1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-10}$ A
- 観察像　：　2次電子像（SEI）
- 写真倍率　：　× 240 ～ × 7,200

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，ペレット内保持Xe，Csの径方向分布の測定，U，Puの径方向分布の測定および白色金属組成の径方向分布の定量分析である。測定条件を下記に示す。

- 加速電圧　：　25 kV
- ビーム電流　：　100nA（Xe分析時1000 nA）
- ビーム径　：　1 μmφ以下（Xe分析時50 μmφ）
- 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（日立製作所製　IMA－2RI型）を用いて，燃焼度の測定をした。測定条件を下表に示す。

測定内容 / 条件	燃料内深さ方向の測定(燃焼率測定)
使用ガス	O_2
一次イオン加速電圧	15 kv
一次イオンスポット径	1 mmφ
二次イオン加速電圧	3 kv
質量測定範囲	1～300 M／Z
カソード電極	SUS
深さ方向測定回数	10回

5. 試 験 結 果

5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察結果

Photo.O-1にC7A6ピンから切断採取した金相試料のマクロ写真を示す。

C7A6ピンの上部インシュレータを含む6ケの金相試料のAs-Polished及びEtched状態の光顕写真をそれぞれPhoto.O-2からO-23に示す。各試料の燃料組織は中心部からFPガスバブル領域，高密度化領域及び不変領域で構成されている。燃料カラム軸方向中心部近傍の横断面試料（C7A662）において，燃料中央部で粒成長は認められるものの明瞭な中心空孔が形成されるまでには至っていない。C7A6ピンのピーク線出力は289 w/cmである。これは以前試験を行なった「常陽」MK-1全運転期間中に0列で照射されたPPJX 13[(1)]（試料No.533564）と同程度で，燃料中央部の組織は良く似ており伸長晶のすべての粒界はガスバブルで覆われており，明瞭な粒界線が現われていない。ここで認められる両試料の伸長晶は，ポアの1ないし2結晶粒程度の移動により形成された粒成長の一種と考えられる。ポアがさらに中心部までスイープすれば，明瞭な柱状晶並びに中心空孔が形成されたものと思われる。断面金相写真からタブレットディジタイザーを用いて，各組織変化領域径を測定した結果をTable 2に示す。このうち残留ギャップ幅については，燃料-被覆管ギャップ部を含む520倍の光顕写真から周方向8ケ所についてノギスを用いて測定した値の平均値である。Fig.9に組織変化領域と残留ギャップ幅の燃料カラム軸方向分布を示す。各燃料組織変化領域径の軸方向分布は，線出力分布に対応して，燃料カラム中心部で外側に広くなっていることがわかる。一方，残留ギャップ幅半径値はカラム中心部で製造時の85 μmから8 μmにまで減少しており，ペレット-被覆管の機械的相互作用（FCMI）が生じている。そして，その軸方向分布は組織変化領域径の広がりとは逆の分布を示している。これはギャップ幅の減少がペレットのスエリングに支配されているためであると考えられる。

被覆管内面腐食は燃料カラム上部の試料（No. C7A6A2）で認められ，最大腐食量は7 μmであった。

5.2 SEMによる燃料破断面の組織観察結果

Photo.S-1～Photo.S-3に燃料カラム下端部（No. C7A624）と中心部（No.C7A6641）から採取した燃料破断面部をSEMにより立体的に観察した写真を示す。

ガス気泡が粒界エッヂやコーナーに移動し，それぞれの結晶粒が明瞭に識別できる。また，燃料径方向中心部の粒界面には0.5～3 μmϕ程度のガス気泡の析出も認められる。球状の析出物はMo, Ru, Rh, Pd, Tcからなる白色金属析出物（Metallic Inclusion）である。

5.3 SXMAによる元素分析結果

(1) Xe，Csの放出挙動

横断面試料5ケにつき，ペレット中心部から外周部にかけて径方向に保持Xe，Cs濃度の測定を行った（Xeの測定：9～14点，Csの測定：24～32点）。Fig.10に径方向保持XeとCsの濃度分布測定結果を合わせて示す。製造時領域の内側に黒色リングが明瞭に出現している試料（№C7A662）では，Xeは黒色リング部で急激に放出されている。その他の試料は高密度化領域より除々に放出している。Table 3に不変領域と組織変化領域のFPガス放出率測定結果を示す。またFPガス放出率を燃焼度に対してプロットした結果をFig.11に示す。この結果Xeは不変領域で放出されていない。一方Csの径方向濃度分布は径方向にバラツキが見られるが，ペレット中央方向に低下する傾向にあることがわかる。Table 4，Table 5に各試料毎に測定結果から算出したXe，Csの放出率結果を示す。またFig.12にXeとCsの放出率の関係を示す。Xeの放出率はCsの放出率より高い傾向にあることがわかる。

(2) U，Puの再分布

Fig.13に径方向U，Puの濃度分布測定結果を示す。U，Pu濃度は径方向で増減が見られるが，明瞭な再分布は認められない。これは，中心空孔，柱状晶等の組織変化がないことと，それに関連して線出力及び燃料温度が低いためと考えられる。

(3) 白色金属の組成

燃料内には2種の金属状析出物が観察される。その1つは燃料外周部クラック内に存在するPd，Feを主成分とする析出物でその代表的な試料のX線像をPhoto.X－1に示す。他の1つは燃料中心部から高密度化領域にかけて存在する10 μmø以下の球状のMo，Ru，Rh，Tc，Pd相である。Fig.14にカラム中心部の試料№C7A662の白色金属組成を径方向位置に対してプロットした結果を示す。ガスバブル領域と高密度化領域の境界部近傍でPd，Rh濃度が高く，Ru，Mo，Tc濃度が低い傾向にある。Fig.15にMo，Ru（＋Tc），Rh（＋Pd）三元系合金状態図に白色金属組成をプロットした結果を示す。本試料を含むMK－Ⅱ燃料は，Phenix P－3燃料に比べMo濃度が高い傾向にあることが分かる。これには，燃料仕様の影響が考えられる。たとえば，Pu富化度はいずれも29%前後であるが，Phenix P－3燃料は天然ウランであり，本試料（PFD 209）では，^{235}U濃縮度が13.4%となっている。これは，核分裂収率の違いによるもので^{235}Uの方が質量数90周辺で高くなるためと考えられる。

5.4 IMAによる燃焼度測定結果

燃料ペレット内径方向中間部に約1mmφのビームを照射し，深さ方向に10回の測定をくり返した時のU，Pu及び^{145}Ndの二次イオン強度の平均値I_u，I_{Pu}，I_{Nd}から，燃焼度を求めた。

燃焼度（at.％）の算出には(1)式を用いることにより求めた各試料の測定結果を下表に示す。

$$\text{燃焼度（at\％）} = \frac{I_{Nd} / (3.4774 \times 0.0325)}{I_u + I_{Pu} / 1.6490 + I_{Nd} / (3.4774 \times 0.0325)} \times 100 \qquad (1)$$

1.6490　U，Puのイオン化効率比

3.4774　U，Ndのイオン化効率比

0.0325　^{145}Ndの核分裂収率

計数値 / 試料No.	Secondary Ion Intensity			Bu(a/o)	$\frac{\sigma Bu}{Bu}$ (％)	$\frac{\delta Bu}{Bu}$ (％)	$\frac{\sigma Bu}{Bu} + \frac{\delta Bu}{Bu}$ (％)
	I_u	I_{Pu}	I_{Nd}				
C7A622	5620485	4050756	54629	5.65	±2.89	2.11～4.1	−0.78～6.99
C7A662	5090917	2940222	63357	7.54	±2.55	2.10～3.41	−0.45～5.96
C7A6A2	4899199	3609899	28600	3.45	±2.96	2.30～4.23	−0.66～7.19

IMA測定より求めた燃焼度の燃料カラム軸方向分布をESPRIT−Jによる計算値と比較してFig.16に示す。ピーク燃焼度は，およそ7.54a／oとなり計算値とほぼ一致する結果が得られた。なお，ここで求めた測定値の誤差は，偶発誤差で±2.96％，系統誤差で2.30～4.23％である。

また，燃料カラム軸方向中心部試料（C7A662）の径方向燃焼度測定結果をFig.17に示す。特に変化は見られずほぼ一定である。

6. 謝　　辞

燃料集合体からの試料の採取などの準備作業にあたり，照射燃料集合体試験室（FMS）の松島室長をはじめとする関係室員に，また放射線管理に当っては安全管理部放射線管理課の大内係長をはじめとする係員に御支援いただいた。また試験遂行に際しては，原子力技術(株)の大里行弘氏並びに原子力システム(株)の根本潤一氏に御支援いただきましたことを付記し，これらの方々に感謝の意を表します。

7. 参 考 文 献

1）榎戸ら，「常陽」MK－Ⅰ炉心燃料（PPJX 13）の照射後試験(2) PNC I941 84-01

Table 1 Irradiation Condition of PFD 209 Subassembly

サイクル				8	9	10	11	12	13	14	15
装荷位置				3D1							
燃焼度	ポイント最大		MWd/t	8500	16600	24800	33000	40500	50000	59900	71400
	集合体平均		MWd/t	6500	12700	19000	25200	31000	38400	45900	54700
中性子照射量	En≧0.1MeV	ポイント最大	$\times 10^{20}$ n/cm^2	90.7	178	269	362	450	563	681	823
		集合体平均	$\times 10^{20}$ n/cm^2	75.1	147	223	299	371	464	561	677
	Total	ポイント最大	$\times 10^{20}$ n/cm^2	132	258	391	524	650	814	985	1190
		集合体平均	$\times 10^{20}$ n/cm^2	111	217	327	438	543	679	821	991
線出力	BOC	ポイント最大	W/cm	297	292	285	282	273	266	248	247
		集合体平均	W/cm	227	224	218	216	207	203	192	191
	EOC	ポイント最大	W/cm	293	288	281	279	270	262	245	243
		集合体平均	W/cm	228	224	219	217	208	204	193	193
被覆管最高温度	BOC		℃	595	590	585	584	569	566	559	558
	EOC		℃	597	593	587	586	570	567	560	560
燃料最高温度	BOC		℃	1860	1840	1810	1790	1740	1710	1620	1610
	EOC		℃	1840	1820	1790	1780	1730	1700	1600	1590
集合体出口温度	BOC		℃	536	532	528	528	523	520	515	515
	EOC		℃	537	533	529	529	524	521	516	516
出力ピーキング係数	BOC	径方向	—	1.106	1.106	1.107	1.103	1.105	1.106	1.103	1.103
		軸方向	—	1.182	1.179	1.179	1.184	1.189	1.185	1.174	1.172
	EOC	径方向	—	1.104	1.105	1.105	1.103	1.104	1.104	1.101	1.101
		軸方向	—	1.163	1.161	1.160	1.167	1.172	1.166	1.153	1.144
冷却材流量	BOC		kg/sec	7.7	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
	EOC		kg/sec	7.7	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6

Table 2 Summary Data from Ceramography (Fab. No. PFD 209)

Specimen No.	Distance from Core Bottom (mm)	Burn up (MWd/t)	Maximum Linear Heat Rate (W/cm)	Clad Dia. (mm)		Fuel Outer Dia. (mm)	Restructured Region Dia. (mm)				Residual Radial Gap Size (μm)
				Outer	Inner		Central Void	Columnar Region	Gas Bubble Region	Densified Region	
C7A 622	25.5	52,240	210	5.506	4.822	4.771	0	0	1.285	3.879	19
C7A 642	138.2	64,100	263	5.510	4.816	4.793	0	0	1.947	4.235	8
C7A 662	250.2	69,870	289	5.508	4.821	4.783	0	0	2.343	4.321	10
C7A 682	395.0	61,650	258	5.513	4.816	4.786	0	0	2.360	4.210	21
C7A 6A2	545.5	37,950	193	5.509	4.818	4.682	0	0	1.863	3.623	57

Table 3 Results of Fission Gas Release Rate in Unrestructured Region and Restructured Region

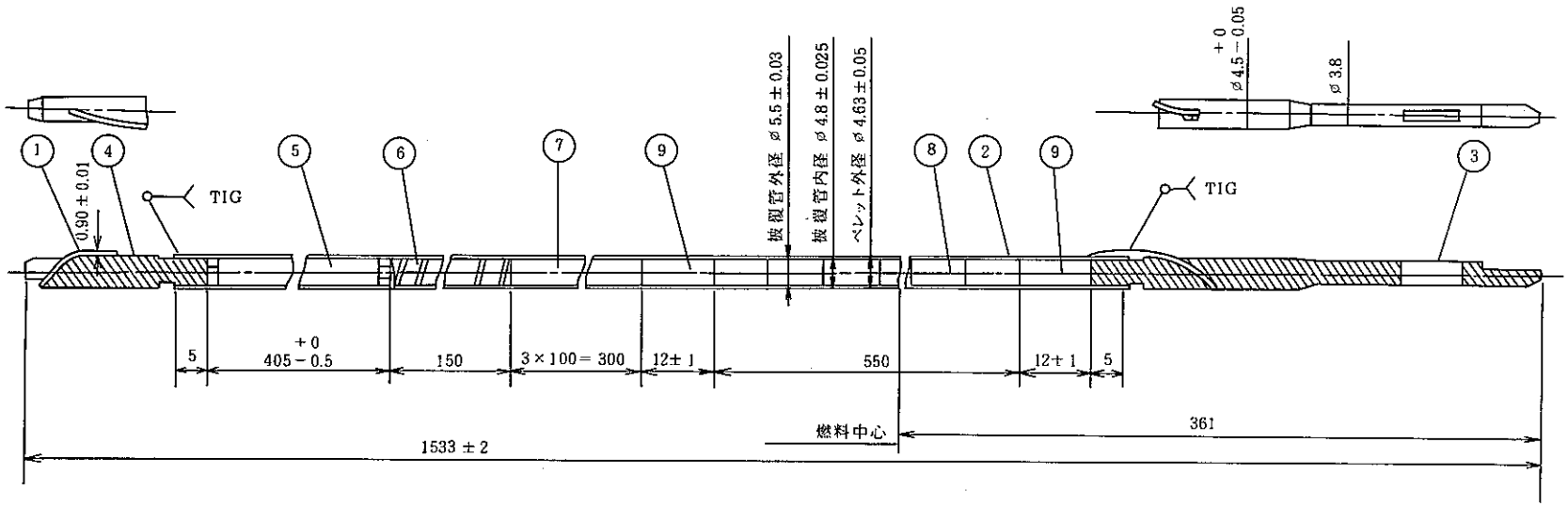
集合体 No. (Pin. No.)	試料 No.	燃焼度 at.% (MWd/t)	Xe生成濃度 理論値 (モル/cc)	不変領域		組織変化領域	
				SXMA Xe保持濃度(モル/cc) 〔放出率%〕	総保持濃度 (モル/cc) 〔放出率%〕	SXMA Xe保持濃度(モル/cc) 〔放出率%〕	総保持濃度 (モル/cc) 〔放出率%〕
PFD 209 (C7A6)	C7A622	5.75 (52,240)	4.999×10^{-4}	3.125×10^{-4}〔37.49〕	6.938×10^{-4}〔-38.79〕	4.223×10^{-5}〔91.55〕	9.375×10^{-4}〔81.25〕
	C7A642	7.00 (64,100)	6.086×10^{-4}	3.496×10^{-4}〔42.56〕	7.761×10^{-4}〔-27.52〕	2.954×10^{-5}〔95.15〕	6.558×10^{-5}〔89.22〕
	C7A662	7.62 (69,870)	6.625×10^{-4}	3.140×10^{-4}〔52.60〕	6.971×10^{-4}〔 -5.22〕	3.176×10^{-5}〔95.21〕	7.051×10^{-5}〔89.36〕
	C7A682	6.76 (61,650)	5.878×10^{-4}	3.322×10^{-4}〔43.48〕	7.375×10^{-4}〔-25.47〕	4.185×10^{-5}〔92.88〕	9.291×10^{-5}〔84.19〕
	C7A6A2	4.70 (37,950)	3.652×10^{-4}	2.163×10^{-4}〔40.77〕	4.802×10^{-4}〔-31.49〕	2.260×10^{-5}〔93.81〕	5.017×10^{-5}〔86.26〕

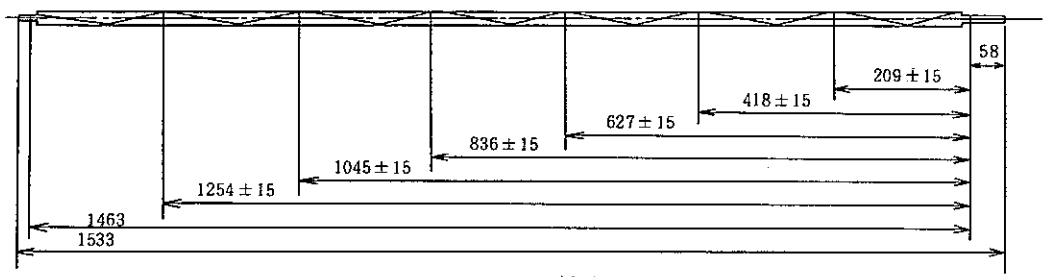
Table 4 Results of Xe Release Rate in Core Fuel Pellet

集合体No (Pin No.)	試料 No	燃焼度 at.% (MWd/t)	① Xe生成濃度 理論値 (モル/cc)	② 燃料ペレット 面積 (cm^2)	①×② Xe 生成物 (モル/cm)	Xe 保持量 SXMA 測定値 (モル/cm)	Xe 保持量 総保持量 (モル/cm)	放出率 (%)
PFD209 (C7A6)	C7A622	5.75 (52,240)	4.999×10^{-4}	0.1684	8.4183×10^{-5}	3.2683×10^{-5}	7.2556×10^{-5}	13.81
	C7A642	7.00 (64,100)	6.086×10^{-4}		1.0249×10^{-4}	2.7968×10^{-5}	6.2089×10^{-5}	39.42
	C7A662	7.62 (69,870)	6.625×10^{-4}		1.1157×10^{-4}	2.8182×10^{-5}	6.2564×10^{-5}	43.92
	C7A682	6.76 (61,650)	5.878×10^{-4}		9.8986×10^{-5}	2.5946×10^{-5}	5.7600×10^{-5}	41.81
	C7A6A2	4.70 (37,950)	3.652×10^{-4}		6.1499×10^{-4}	1.3275×10^{-5}	2.9471×10^{-5}	52.08

Table 5 Results of Cs Release Rate in Core Fuel Pellet

集合体 No (Pin. No)	試料 No	燃焼度 at.% (MWd/t)	① Cs生成濃度 理論値 (モル/cc)	② 燃料ペレット 面積 (cm^2)	①×② Cs 生成量 (モル/cm)	SXMA測定値 保持量 (モル/cm)	放出率 (%)
PFD209 (C7A6)	C7A622	5.75 (52,240)	4.3127×10^{-4}	0.1684	7.2626×10^{-5}	7.2864×10^{-5}	−0.33
	C7A642	7.00 (64,100)	5.2502×10^{-4}		8.8413×10^{-5}	7.4199×10^{-5}	16.08
	C7A662	7.62 (69,870)	5.7153×10^{-4}		9.6246×10^{-5}	8.3401×10^{-5}	13.35
	C7A682	6.76 (61,650)	5.0702×10^{-4}		8.5382×10^{-5}	7.0997×10^{-5}	16.85
	C7A6A2	4.70 (37,950)	3.1501×10^{-4}		5.3048×10^{-5}	3.0622×10^{-5}	42.27





ワイヤラッピング全体図

9	インシュレータペレット	劣化 UO_2	2	
8	炉心ペレット	PuO_2 UO_2		
7	上部反射体	SUS 316 相当	3	
6	プレナムスプリング	SUS 304 WPB	1	
5	抑工板付プレナムスリーブ	SUS 304 WPB	1	
4	上部端栓	SUS 316	1	
3	下部端栓	SUS 316	1	
2	被覆管	SUS 316 相当	1	
1	ラッピングワイヤ	SUS 316 相当	1	
品番	品名	材質	個数	備考
名称	炉心燃料集合体燃料要素			

Fig. 1 Specification of MK−Ⅱ Driver Fuel Pin

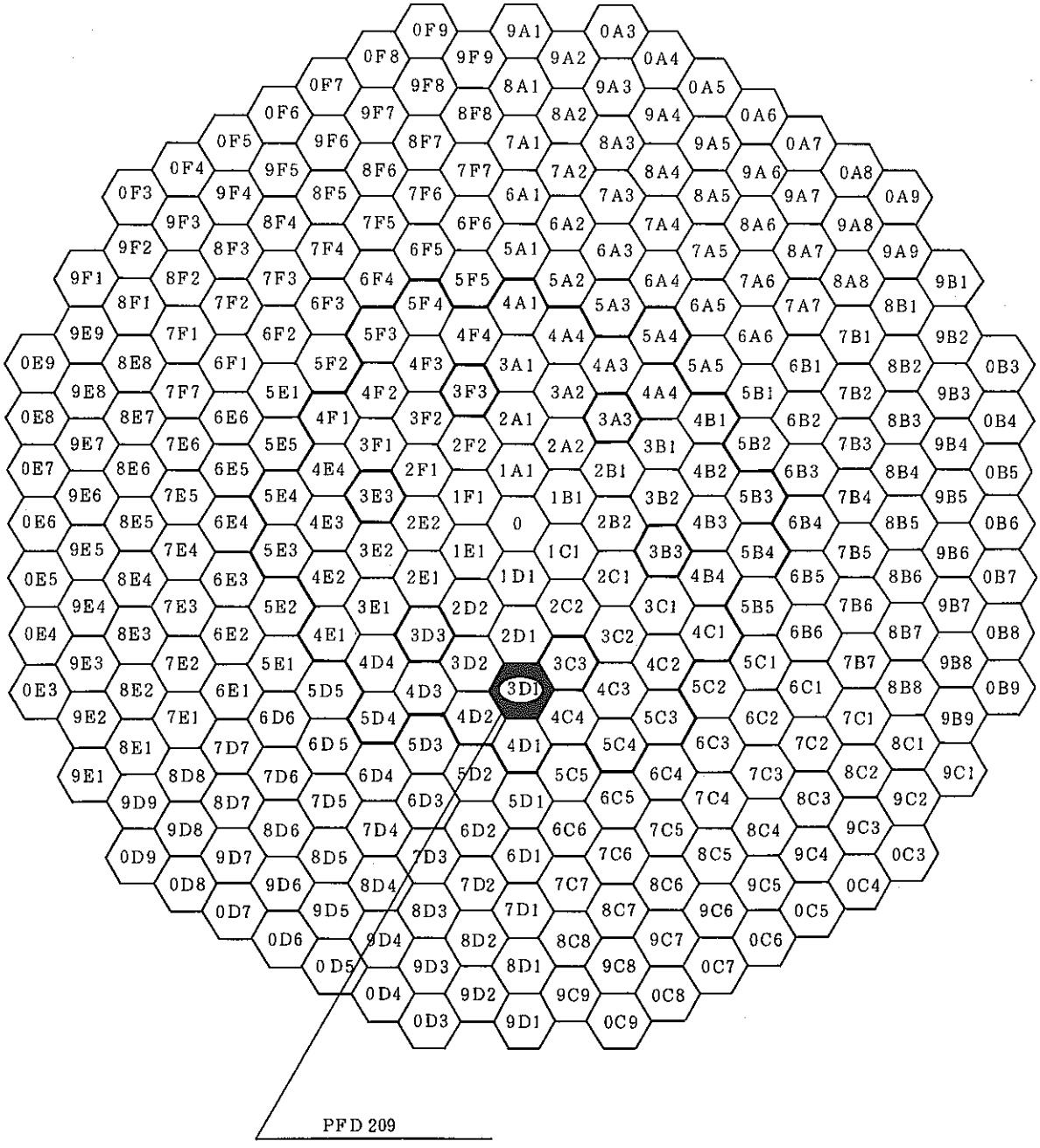


Fig. 2 Location of the Driver Fuel Subassembly (Fab. No. PFD209) in "JOYO" MK-II

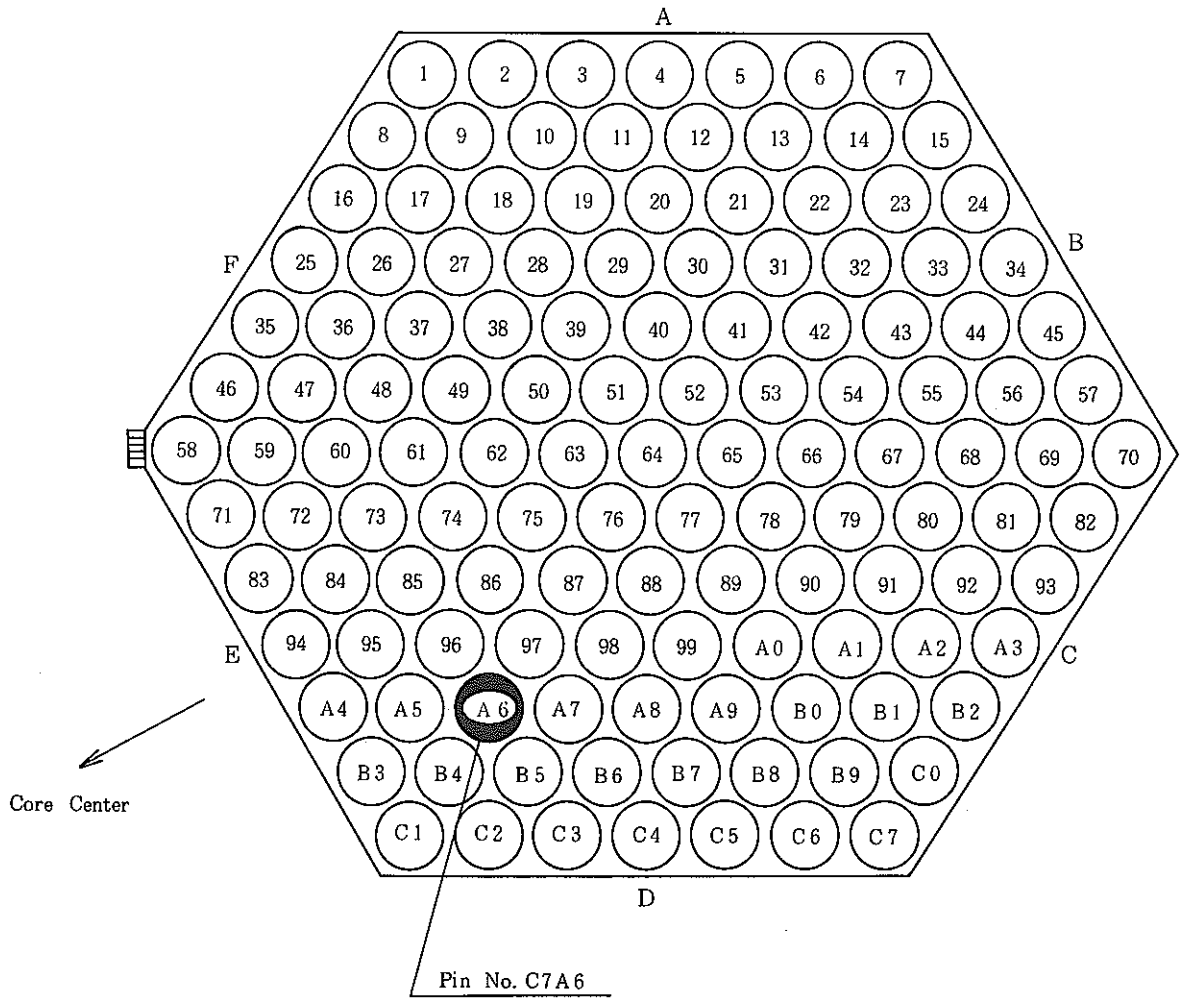


Fig. 3 Location of the Fuel Pin (Pin No. C7A6) in Driver Fuel Subassembly

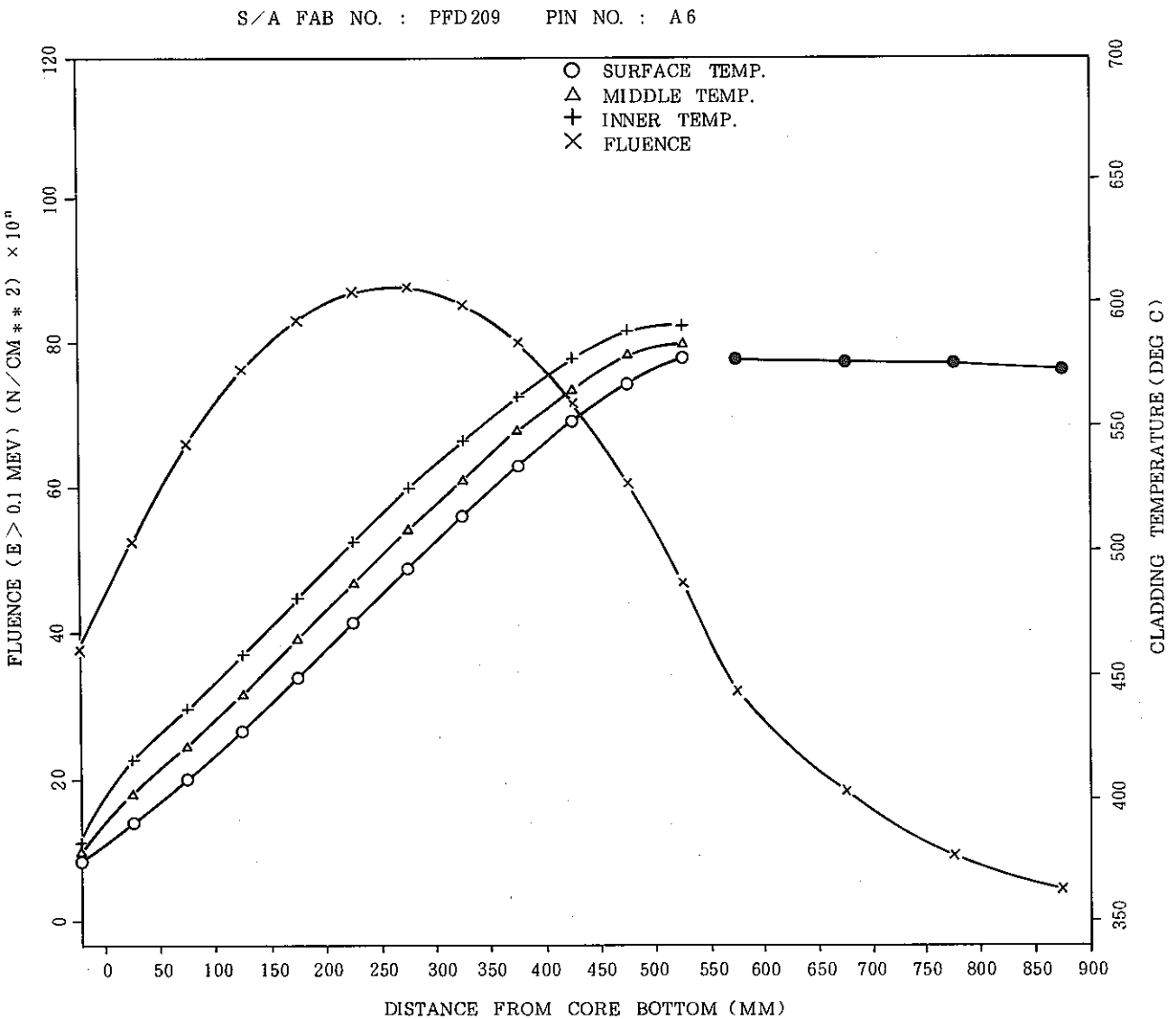


Fig. 4 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature (Pin No. C7A6)

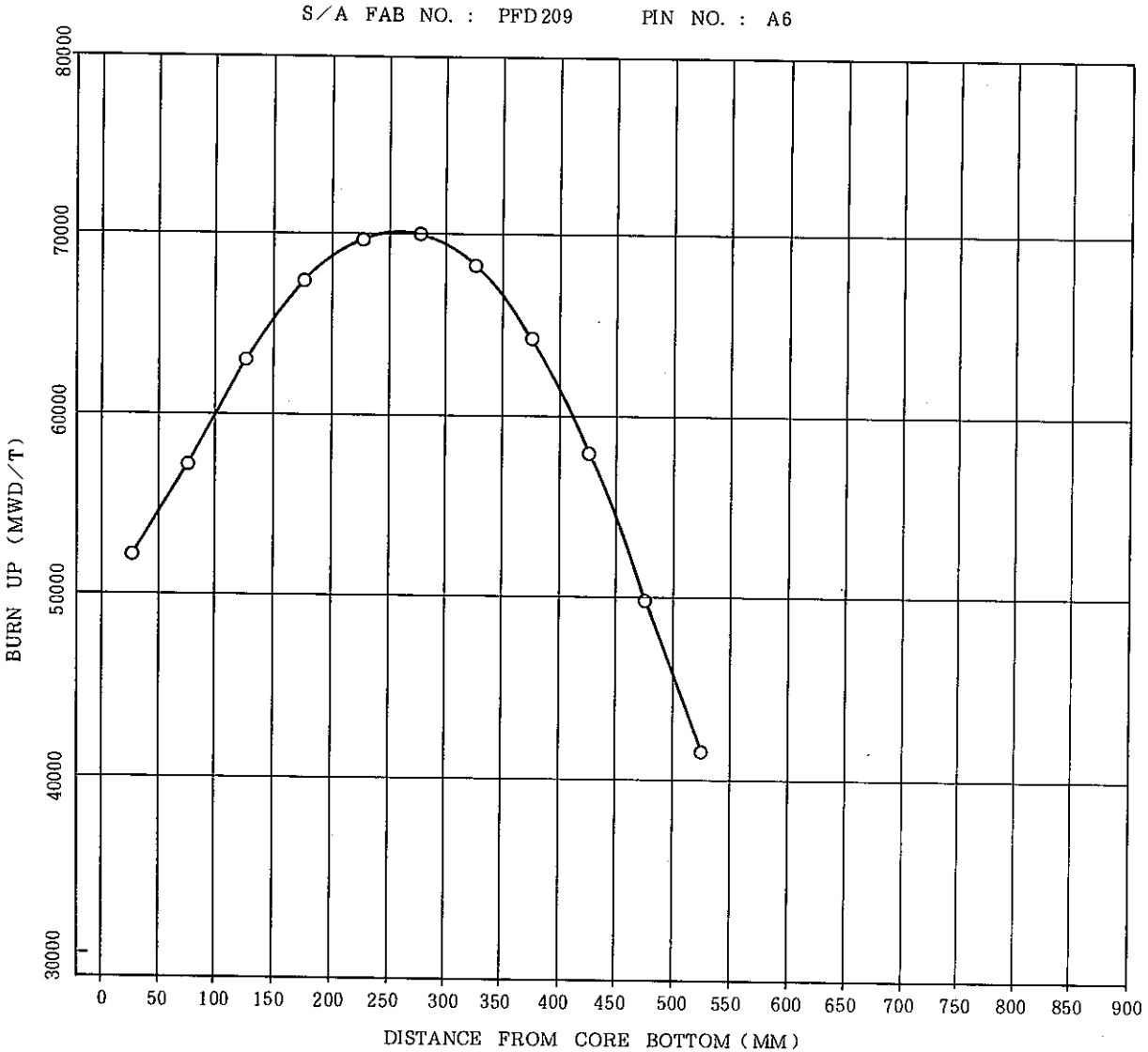


Fig. 5 Axial Profile of Burn up (Pin No. C7A6)

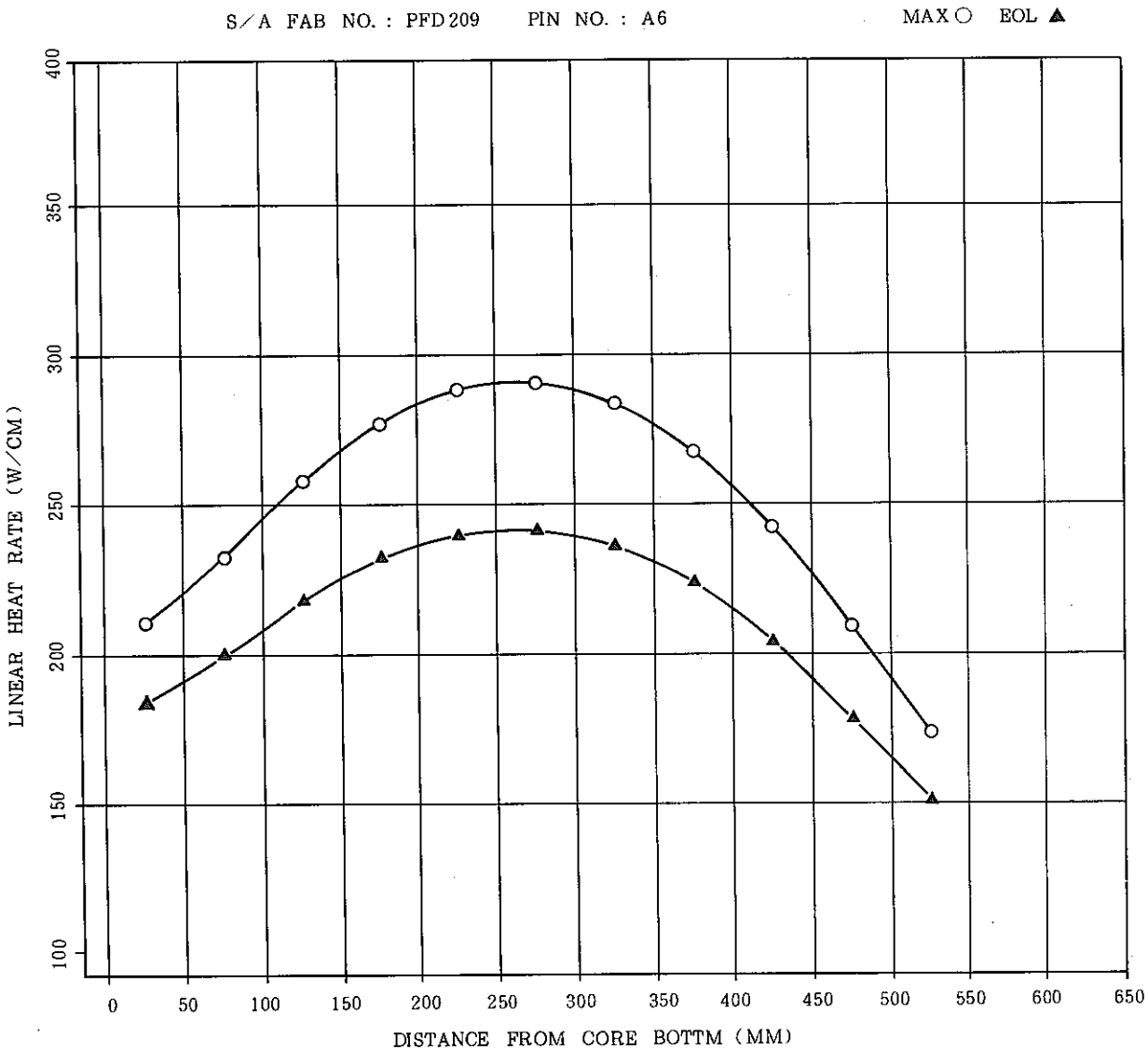


Fig. 6 Axial Profile of Linear Heat Late (Pin No. C7A6)

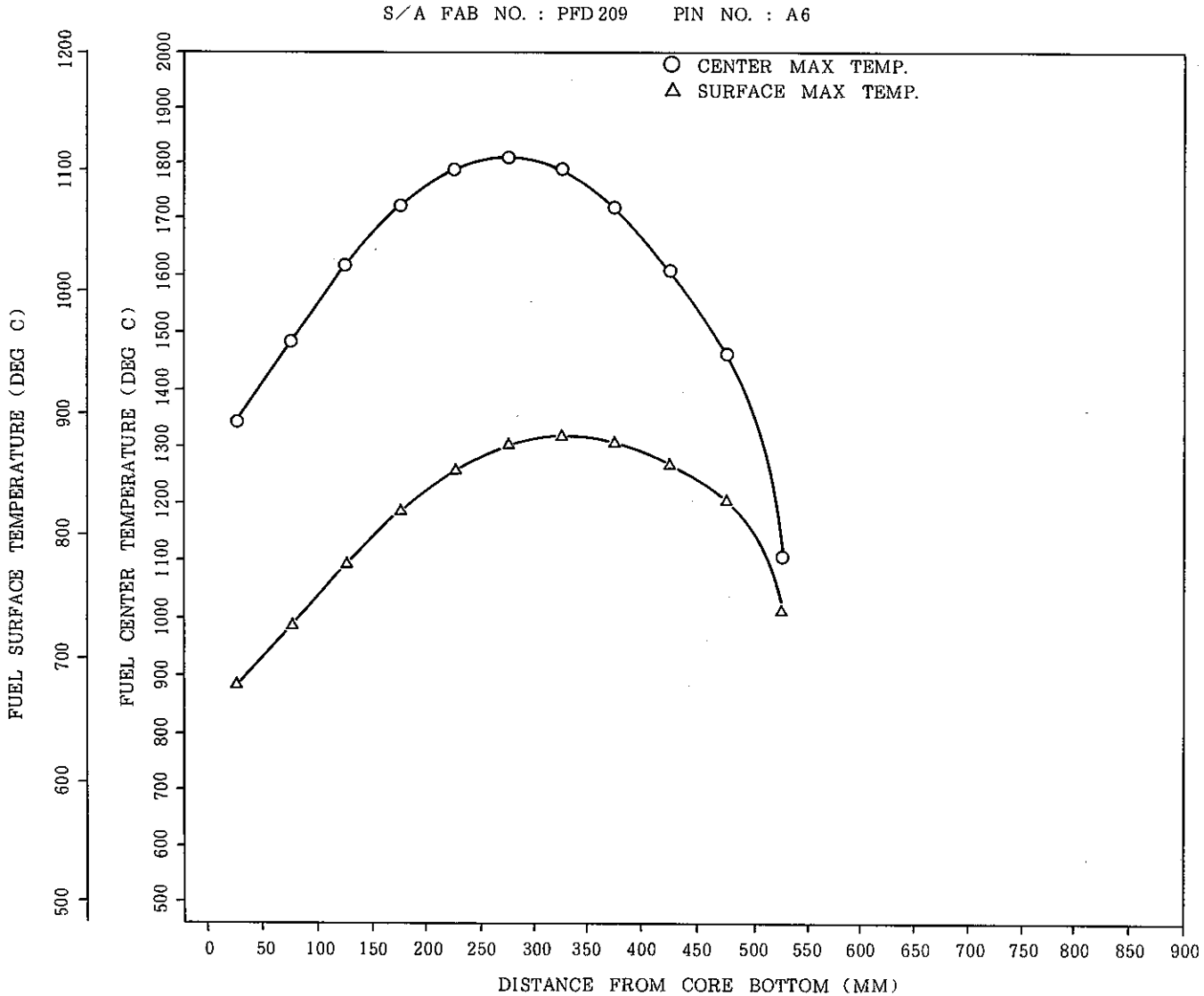


Fig. 7 Axial Profile of Fuel Temperature (Pin No. C7A6)

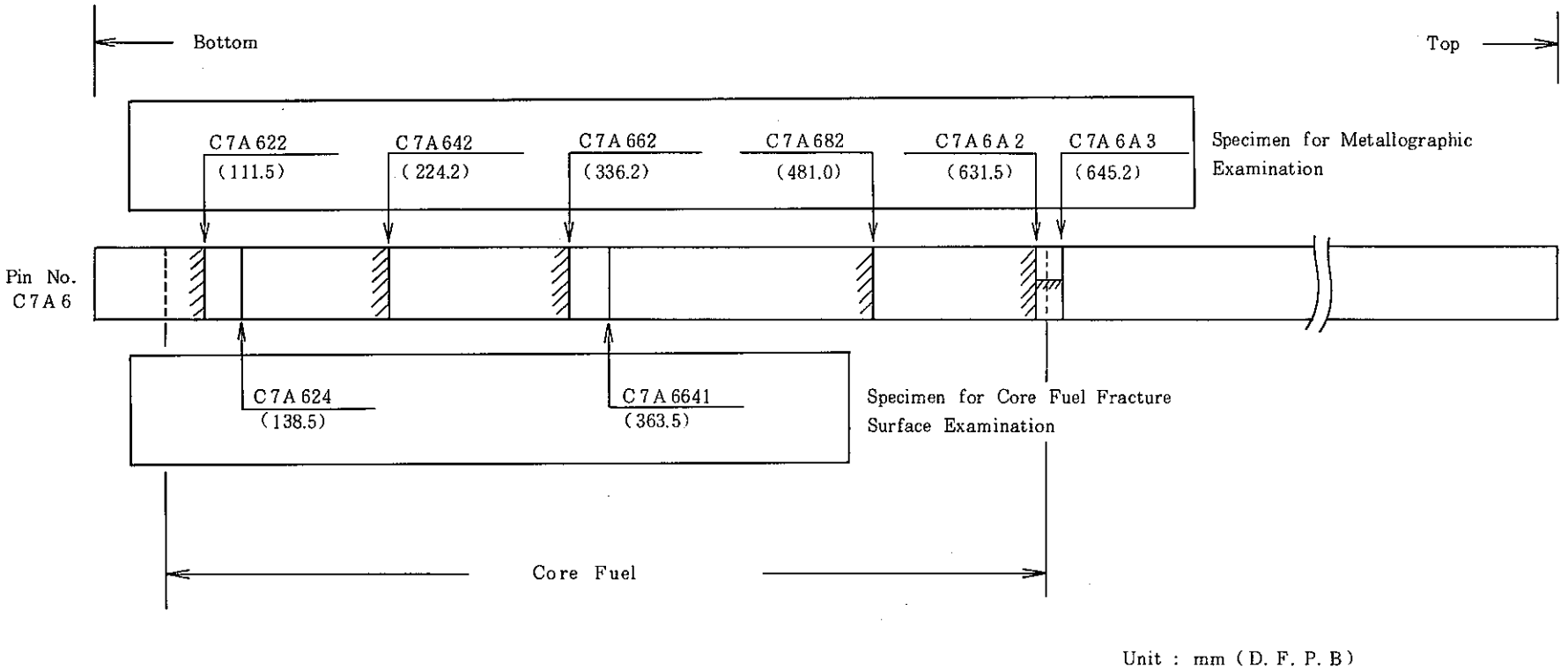


Fig. 8 Cutting Position of Specimen from the Core Fuel Pin

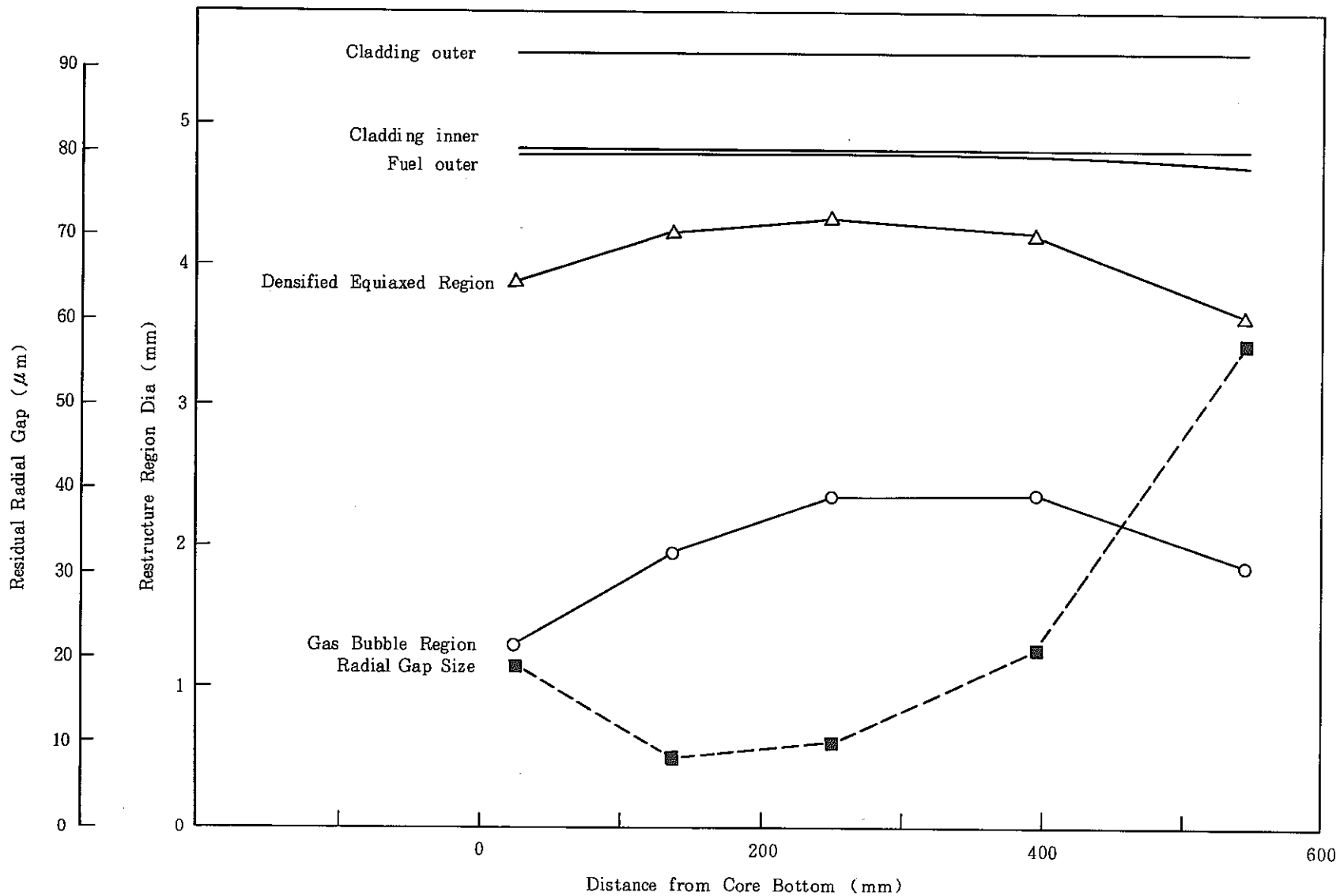
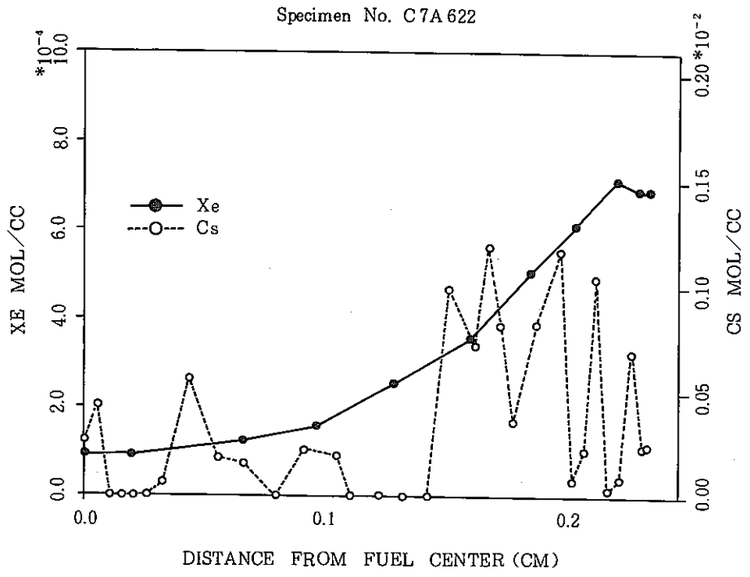
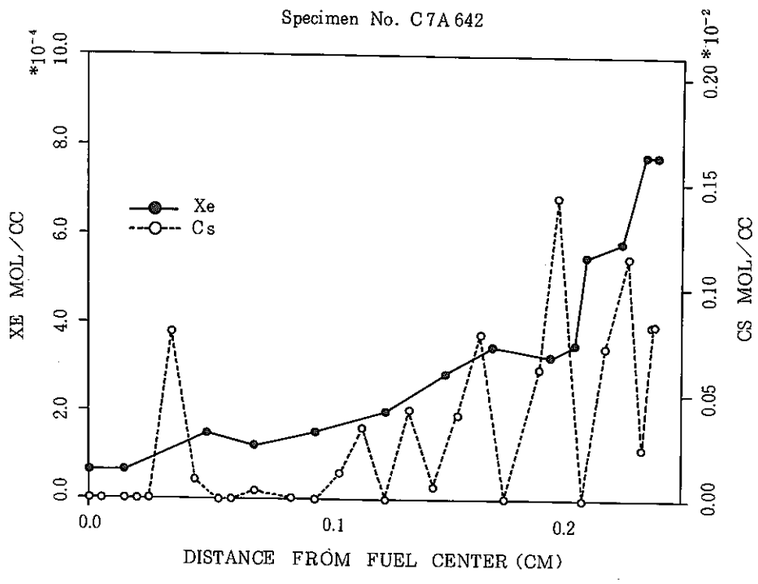
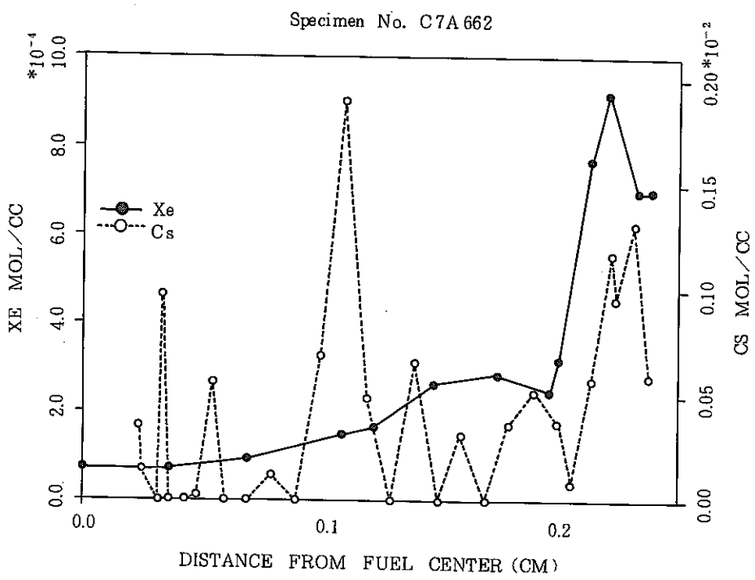
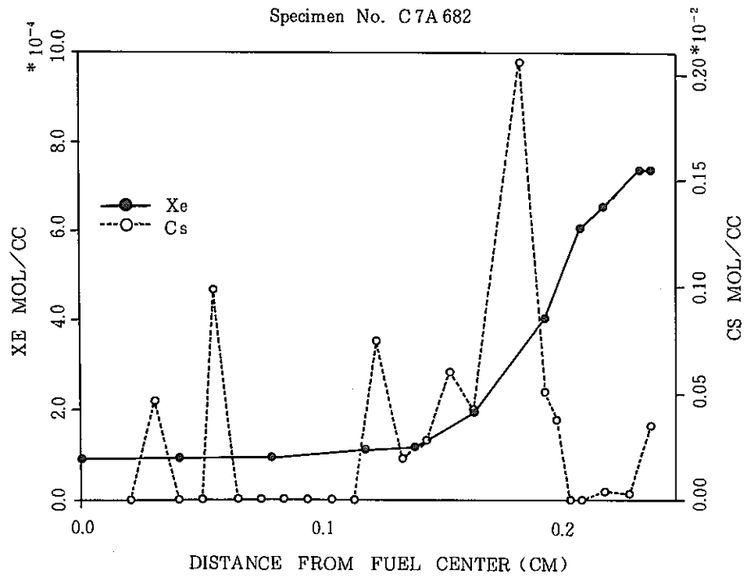


Fig. 9 Axial Profile of the Gap Width and Fuel Restructure









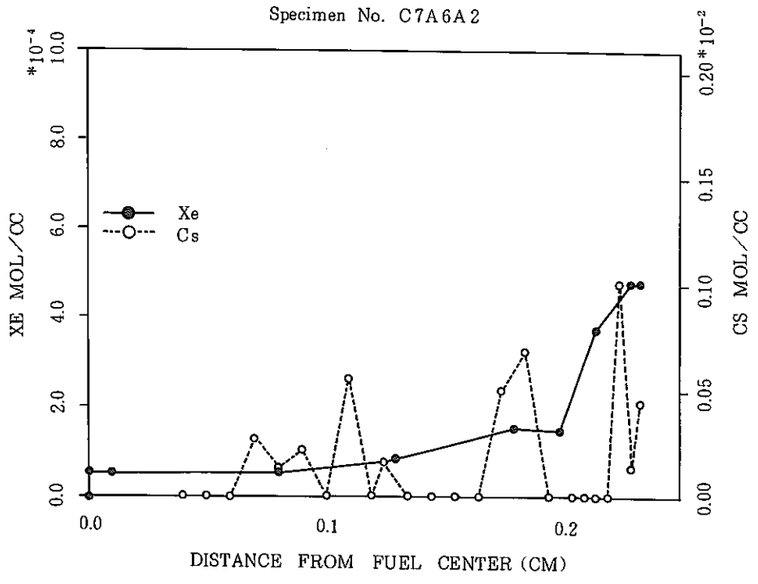


Fig. 10 Relative Radial Profiles of Retaind Xe, Cs Measured by SXMA (Pin No.. C7A6)

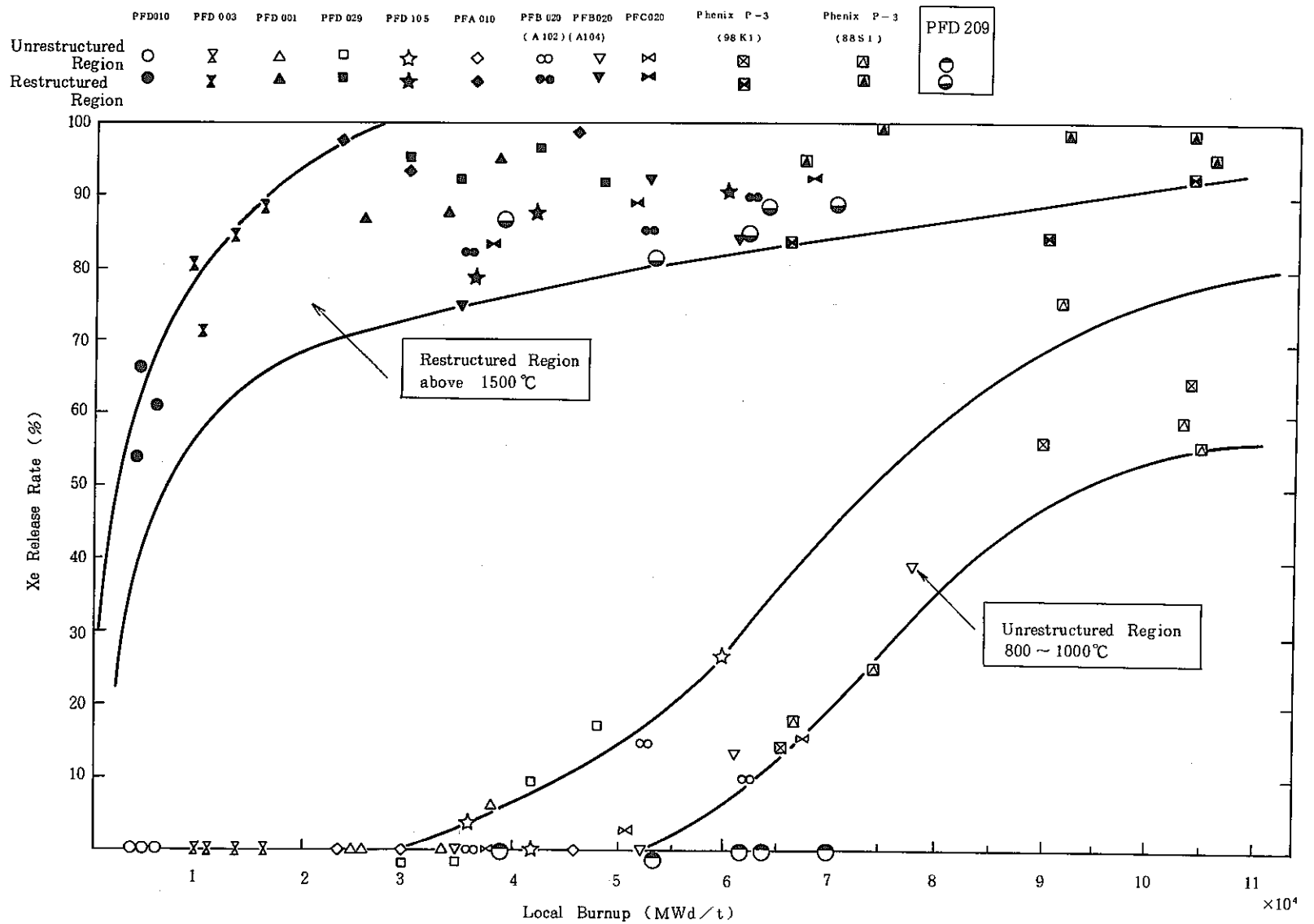


Fig. 11 Burnup Dependency of Fission Gas Release Rate in Restructured Region and Unrestructured Region

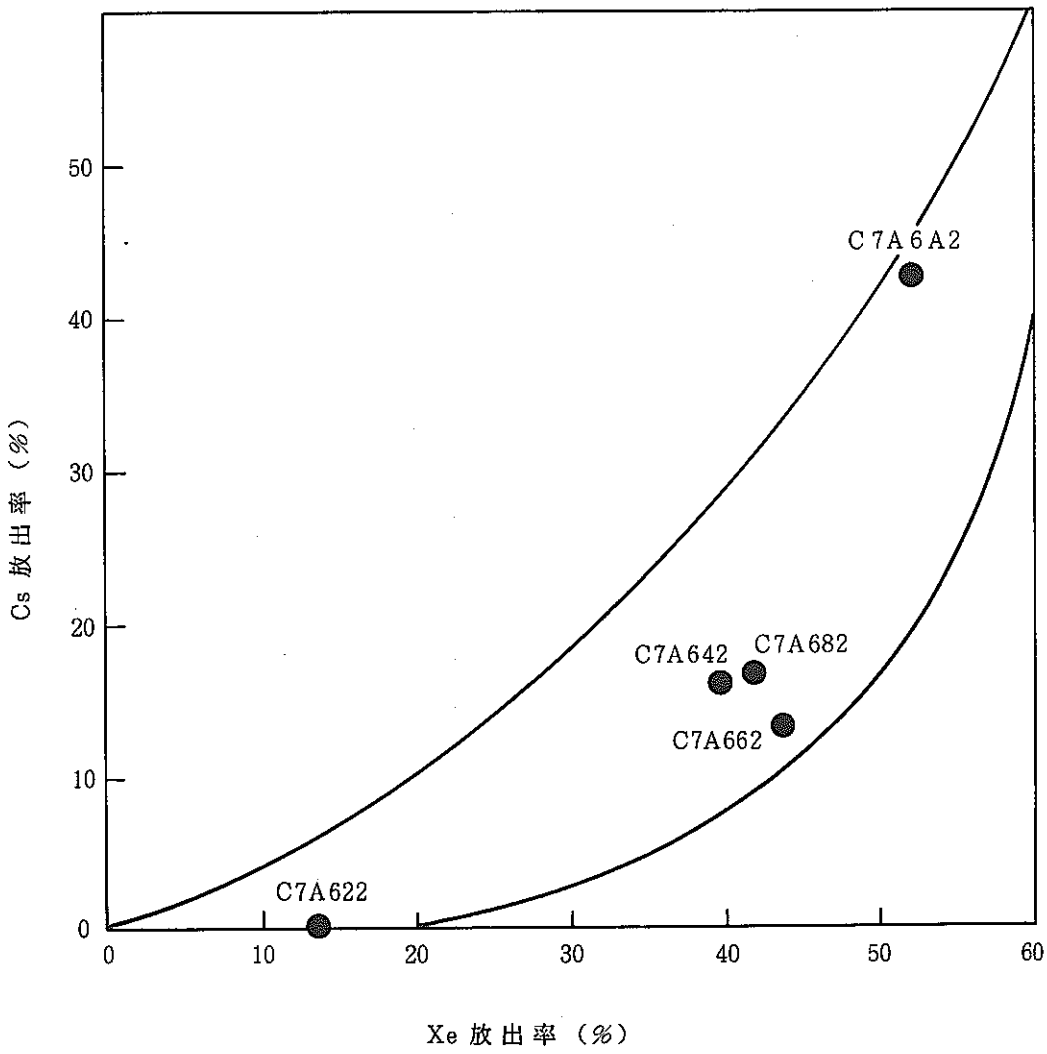
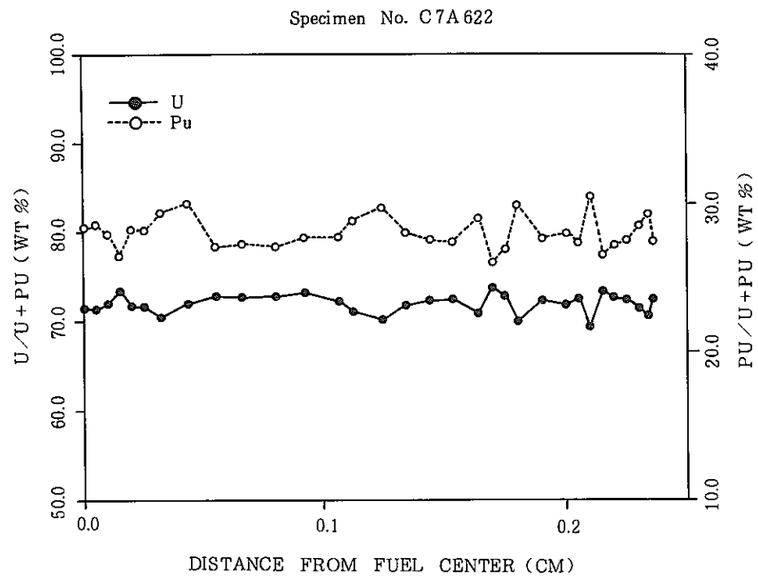
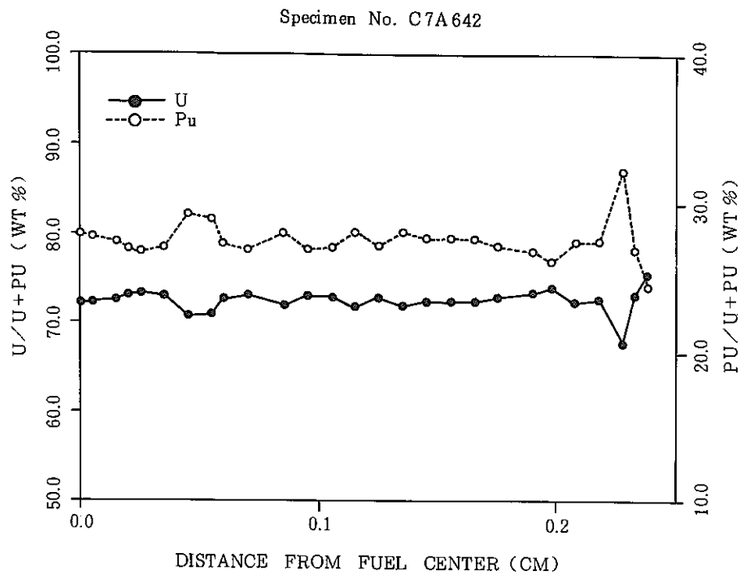
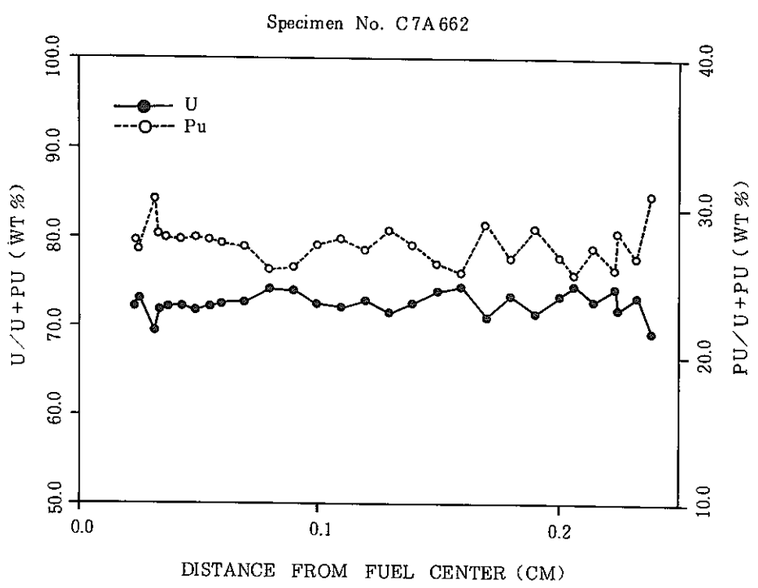
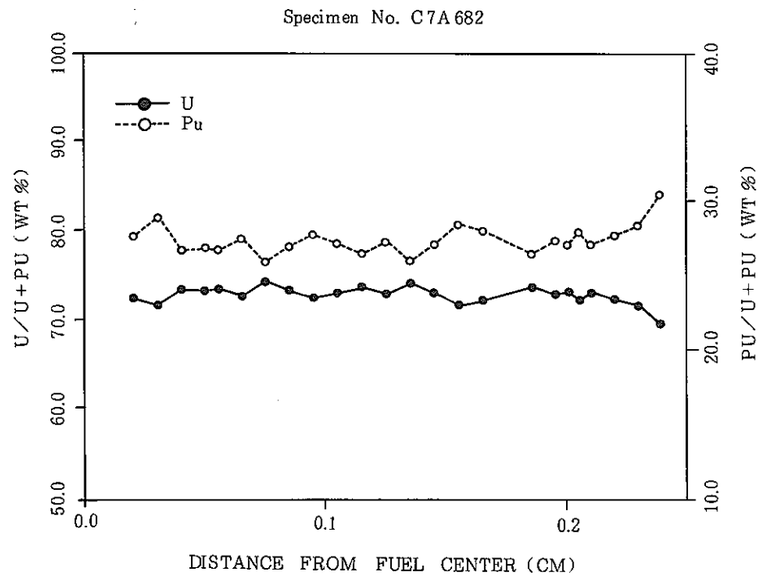


Fig. 12 Relationship between Xe Release Rate and Cs Release Rate









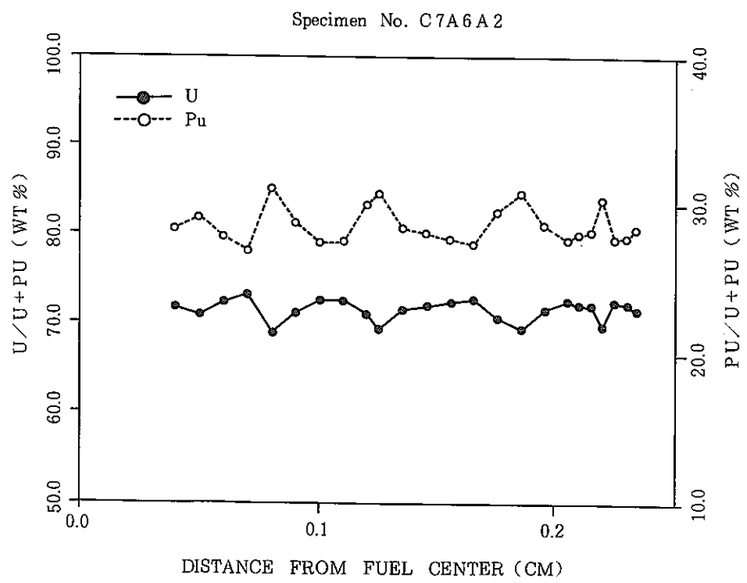


Fig. 13 Radial Distribution of Uranium and Plutonium Measured by SXMA (Pin No. C7A6)

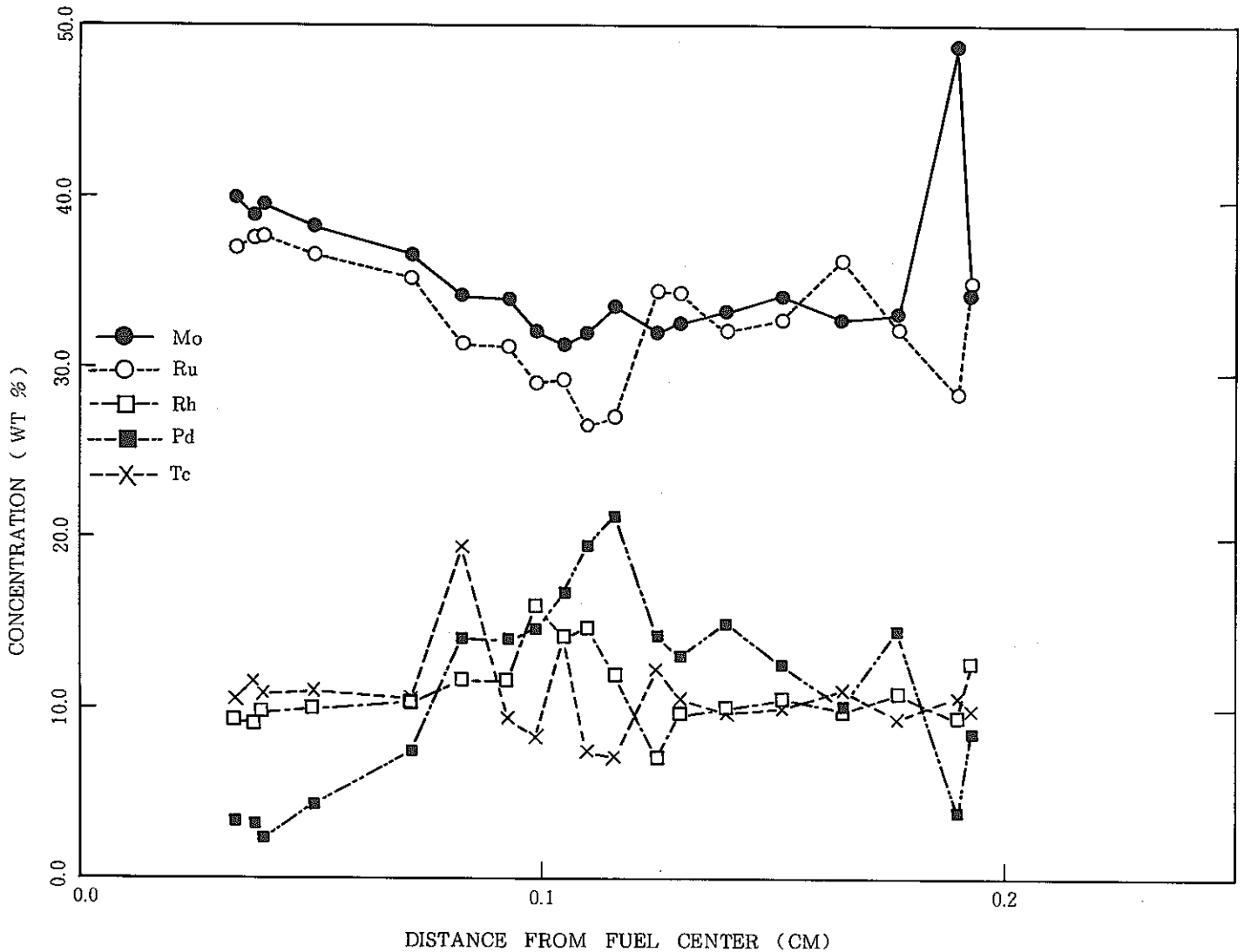


Fig. 14 Radial Distribution of Metallic Inclusion (Specimen No. C7A662)

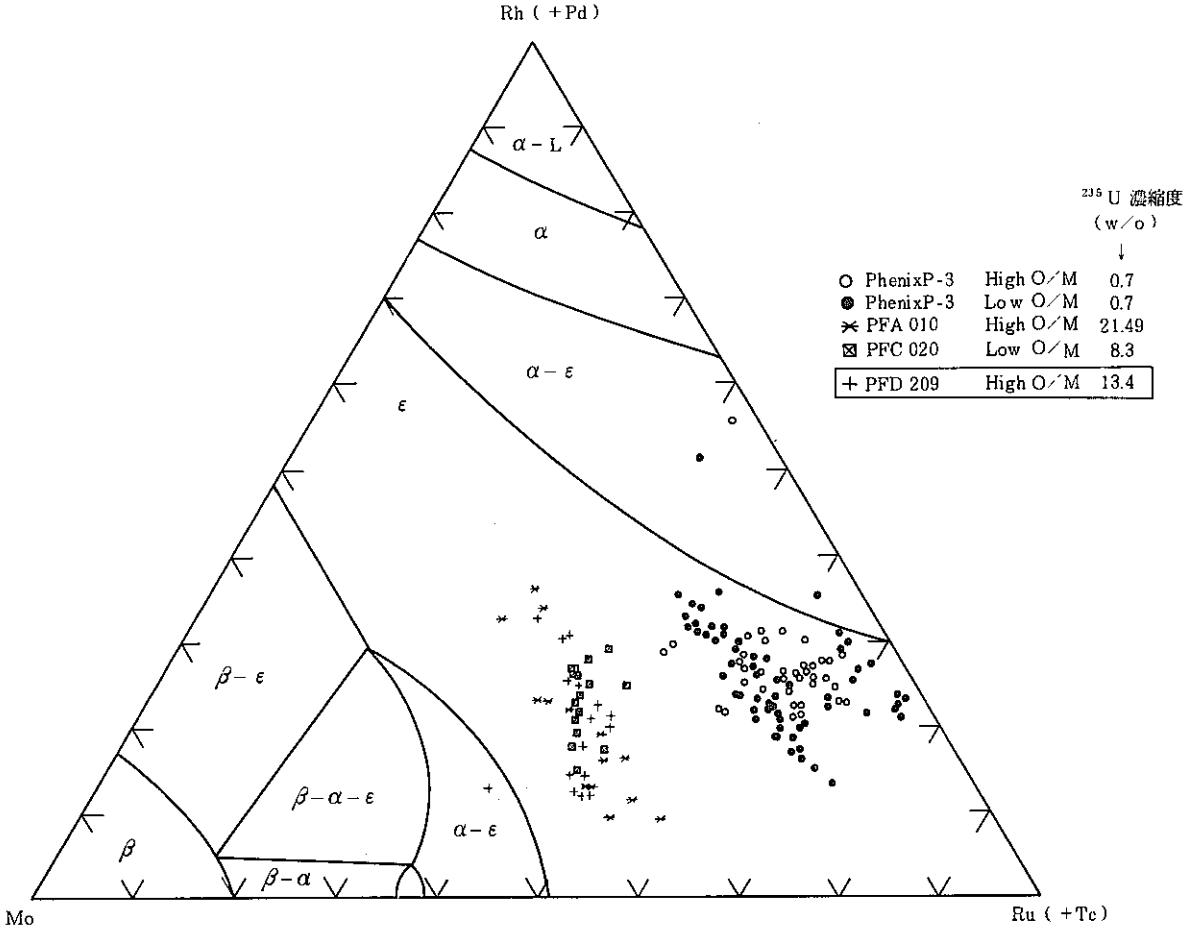


Fig. 15 Mo − Ru − Rh System Phase Diagram

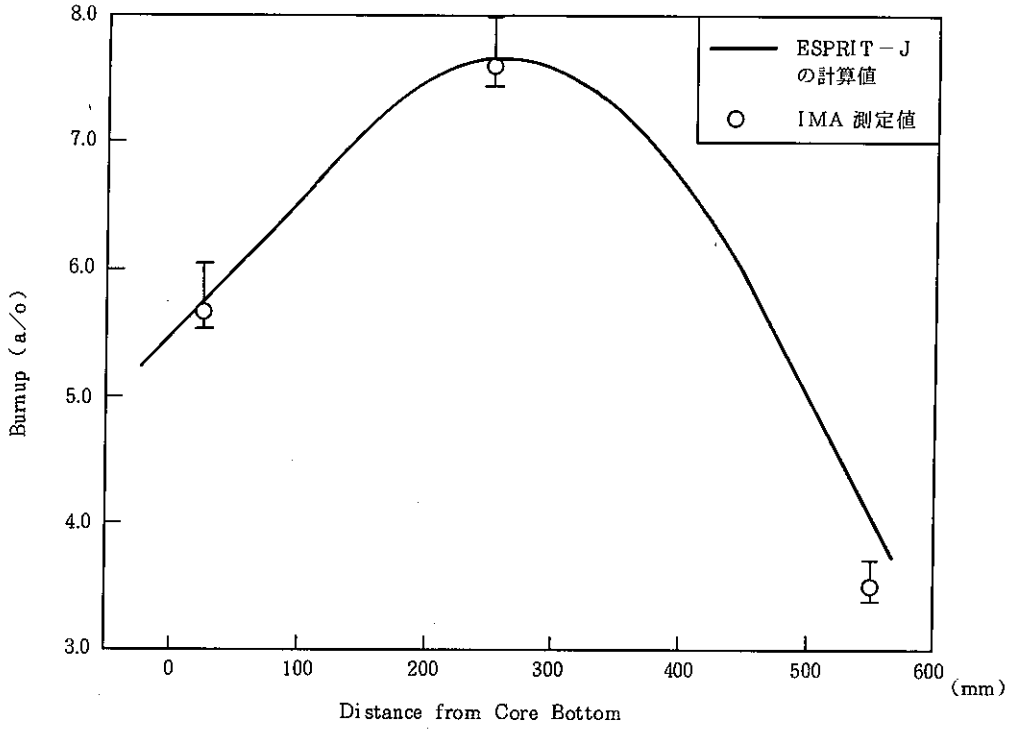


Fig. 16 Axial Distribution of Measured Burnup (Pin No. C7A6)

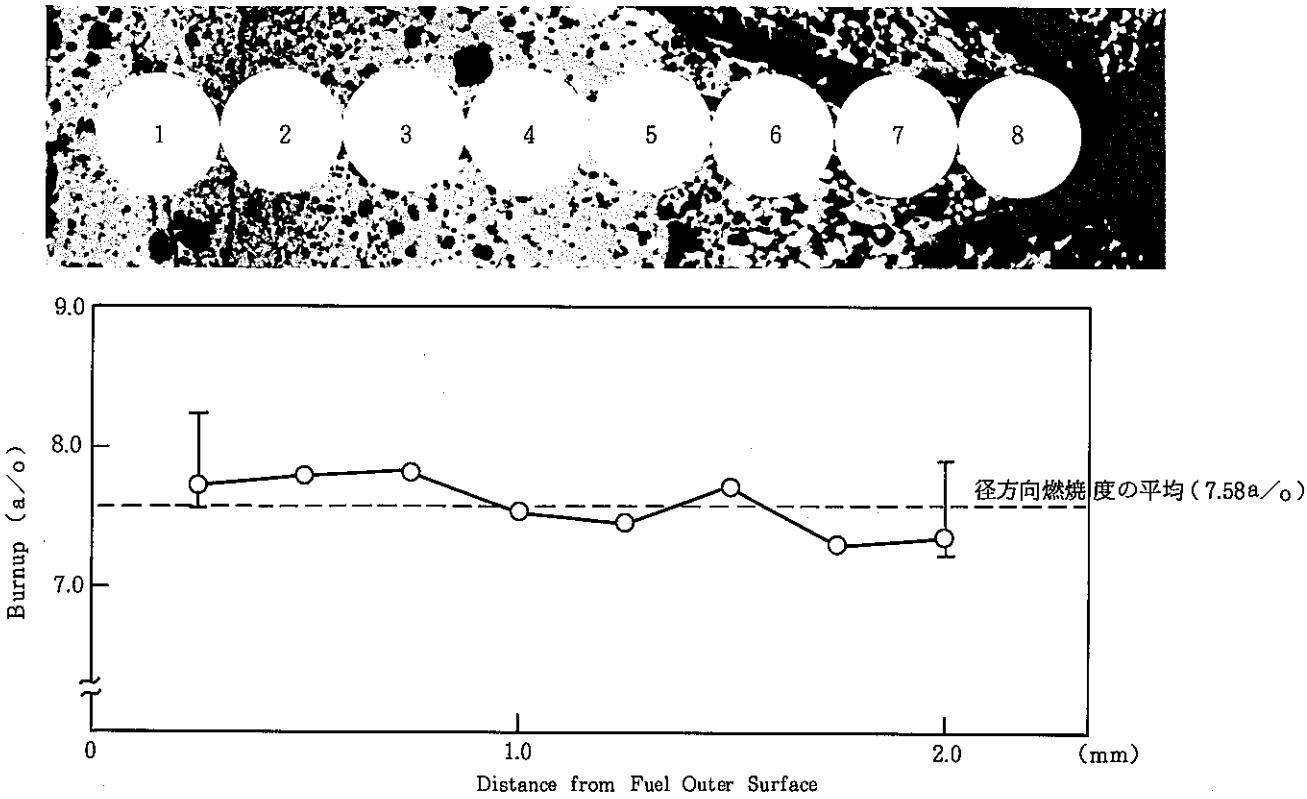


Fig. 17 Radial Burnup Distribution of Measured by the IMA (Specimen No. C7A662)

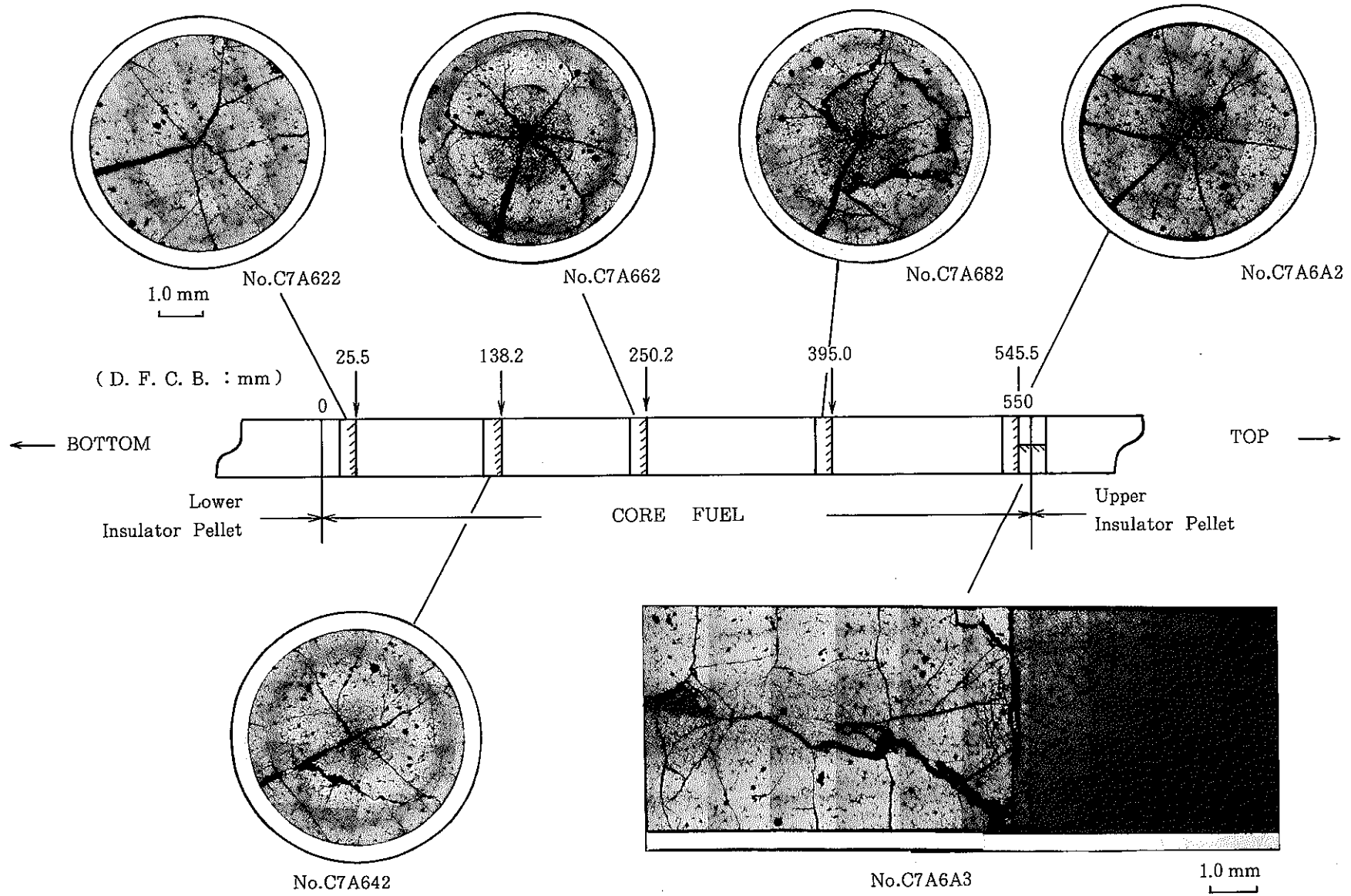


Photo. 0 − 1　Optical Macrographs of the Metallographic Specimen
（Pin No. C7A6）

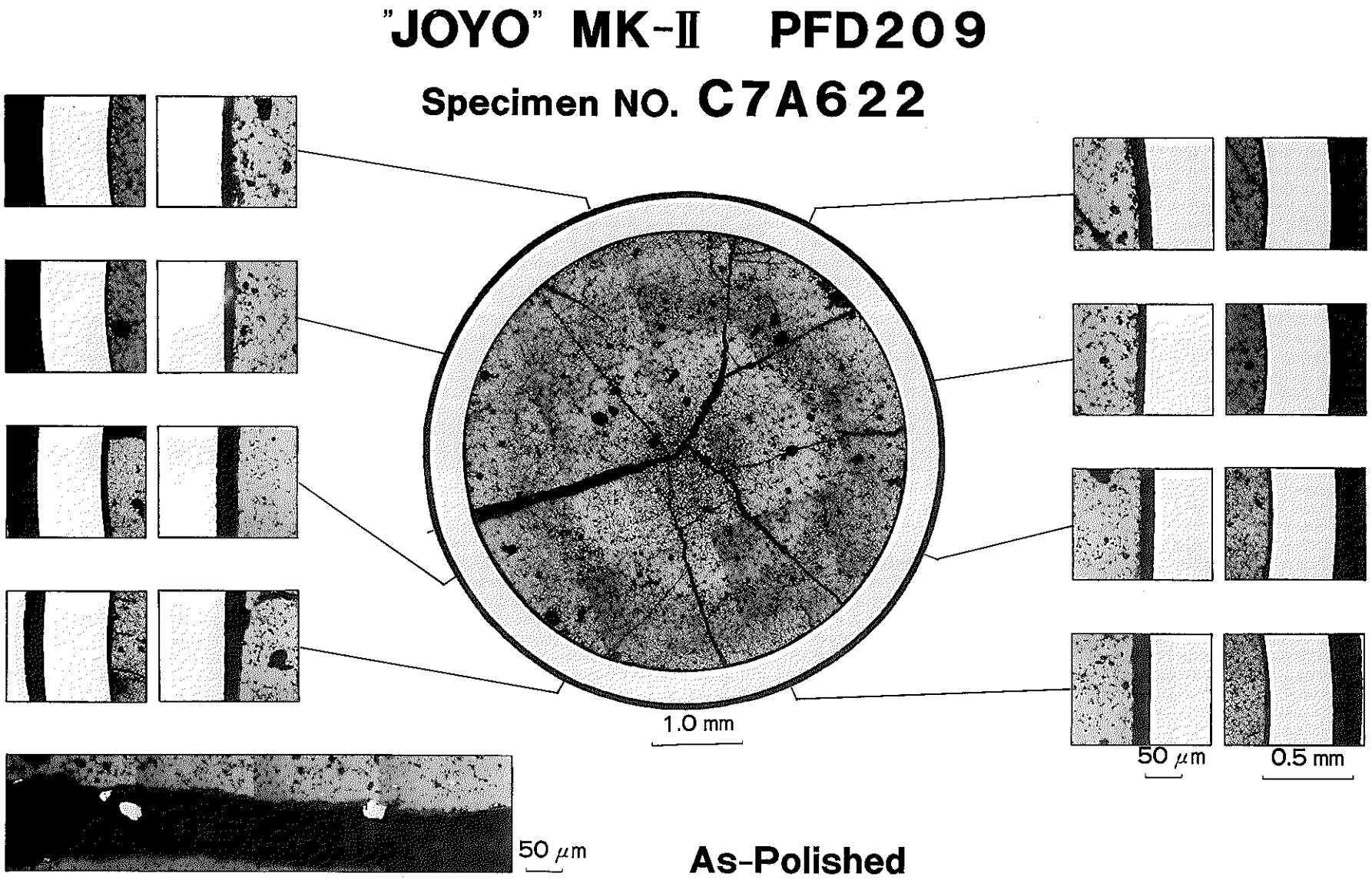
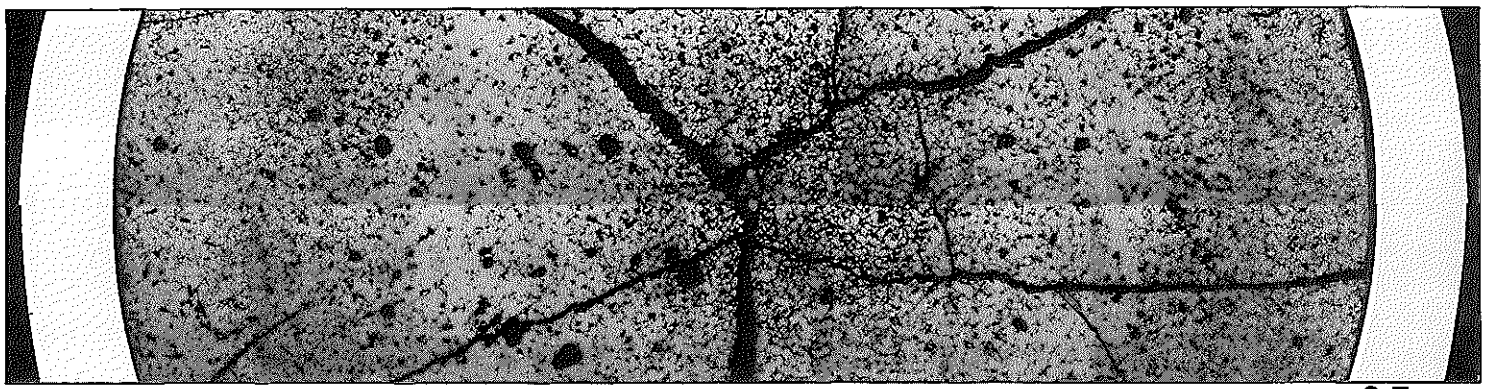
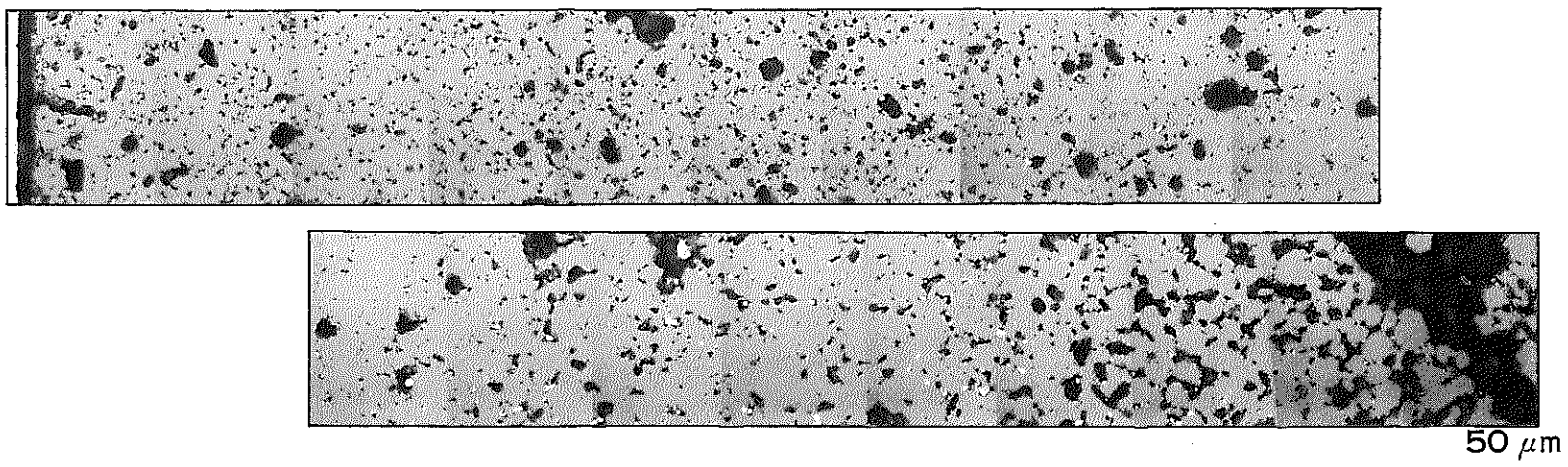


Photo. 0 − 2 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A622) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A622





As-Polished

Photo. 0 − 3 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A622) As−Polished

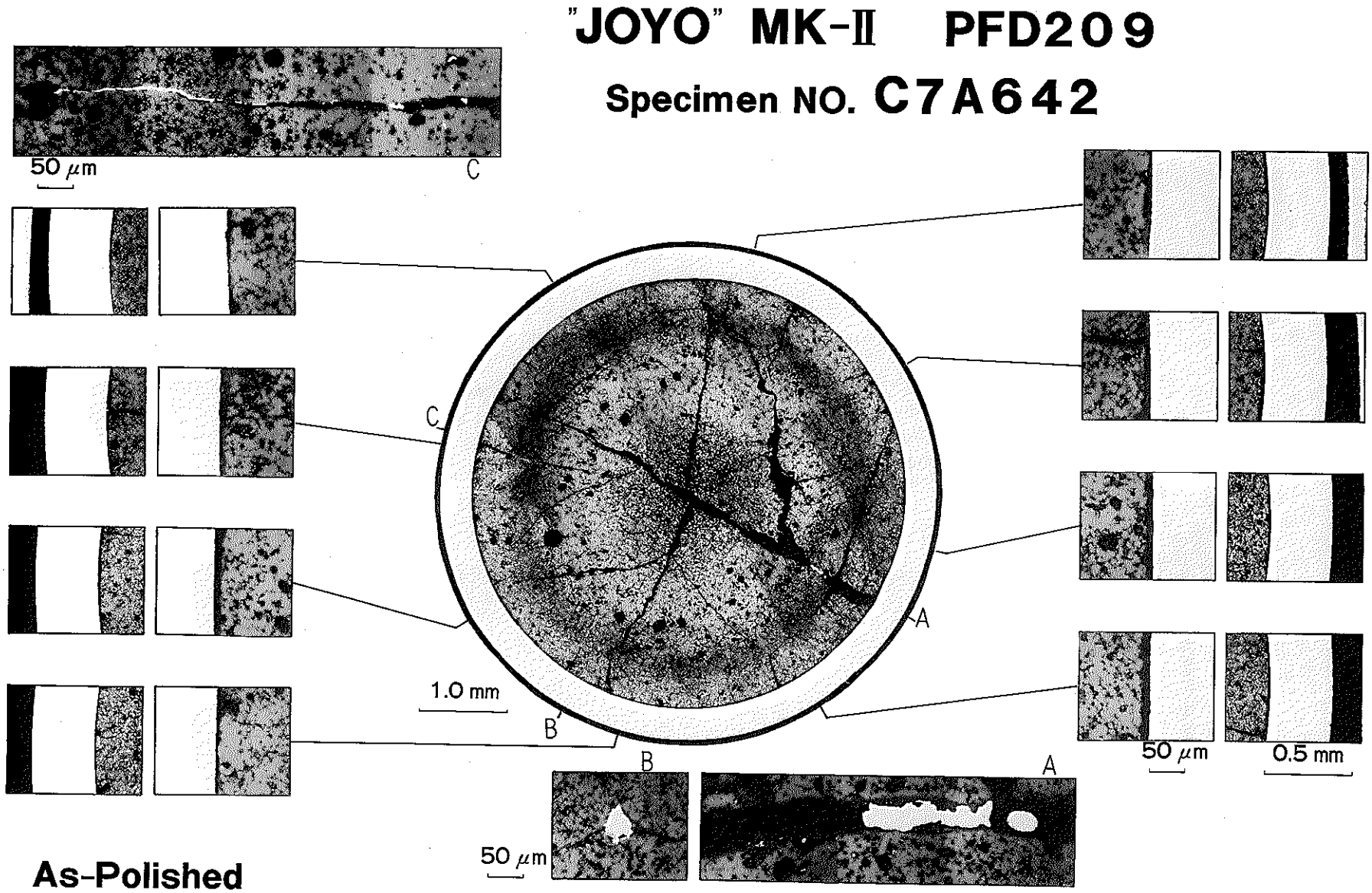
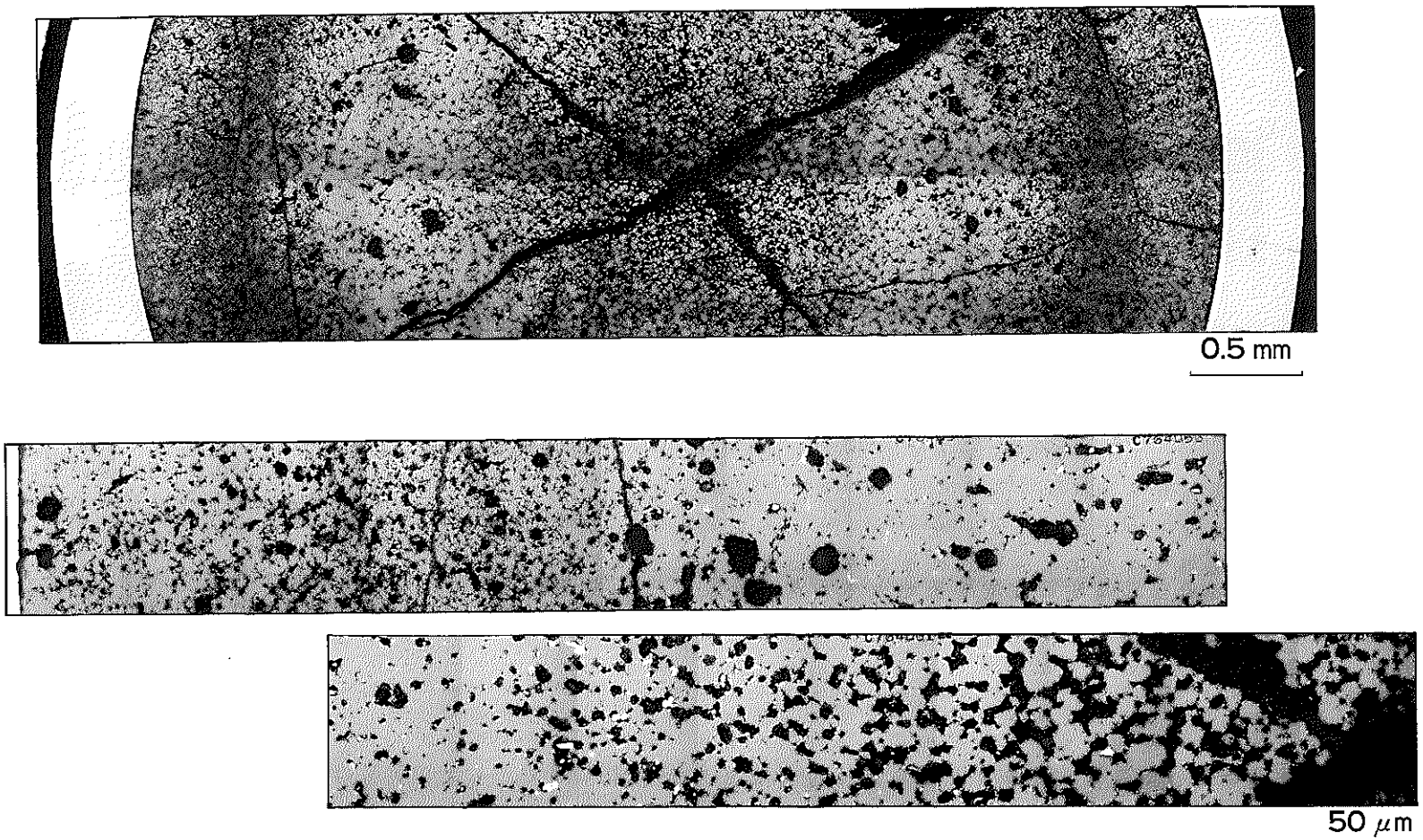


Photo. 0 − 4 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A642) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A642



As-Polished

Photo. 0 − 5 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A642) As−Polished

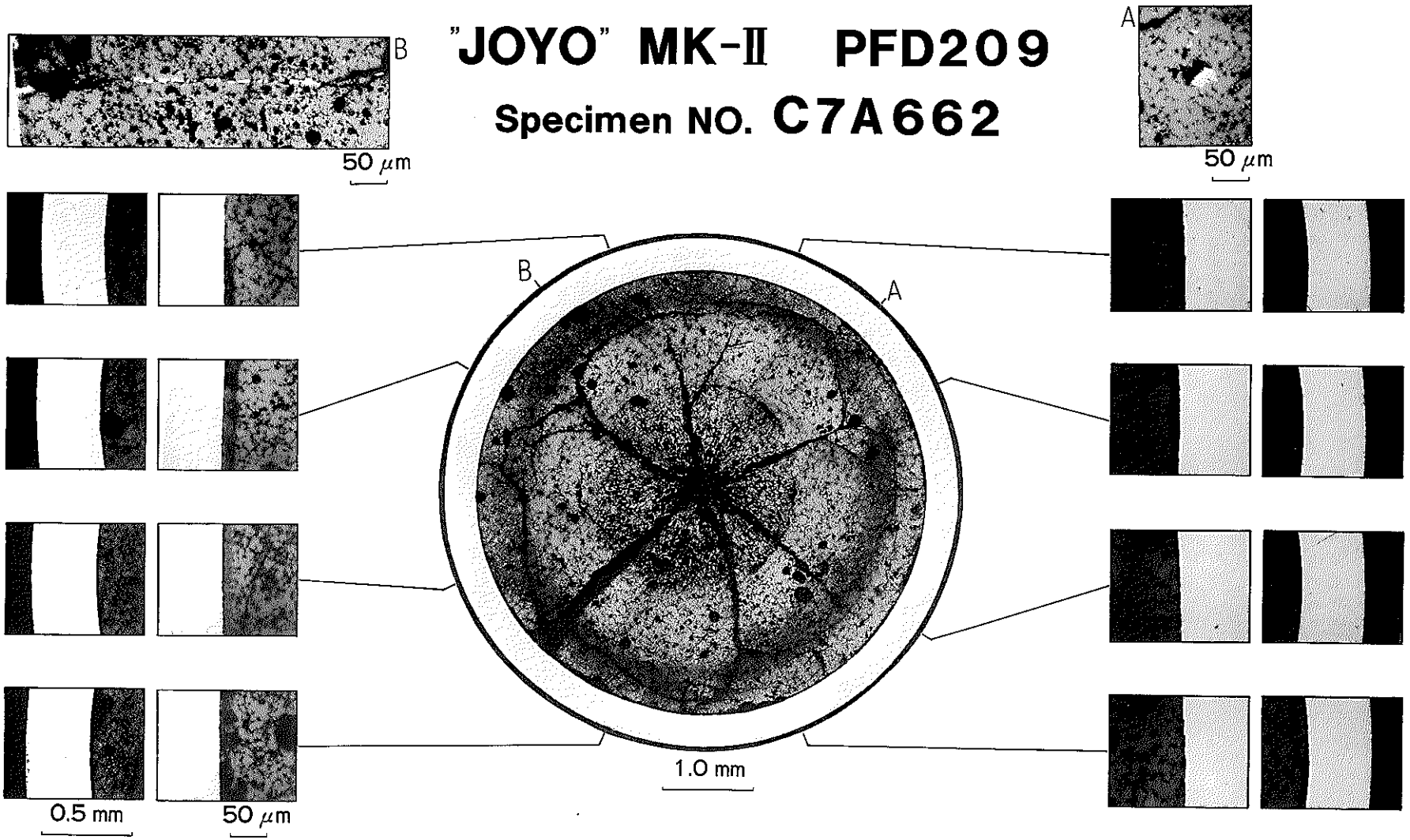
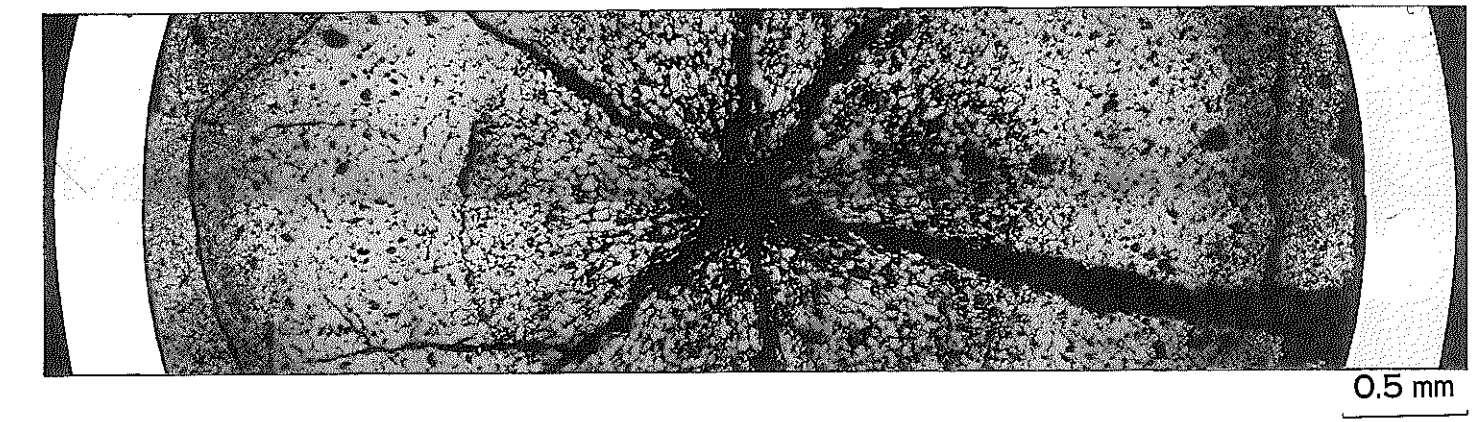
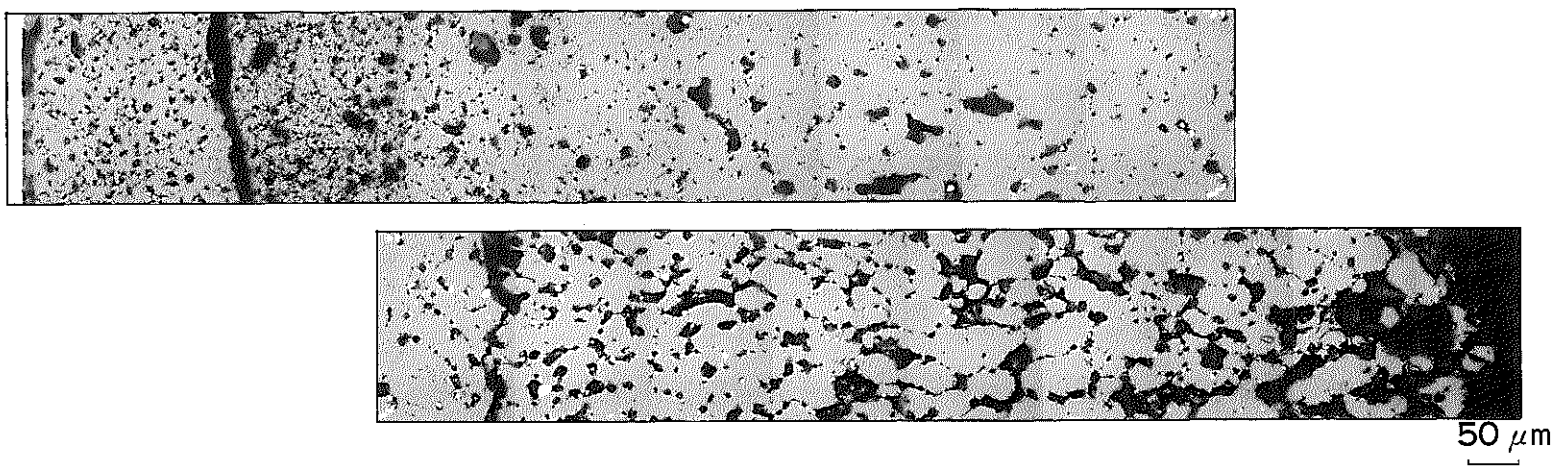


Photo. 0 − 6 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A662) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A662



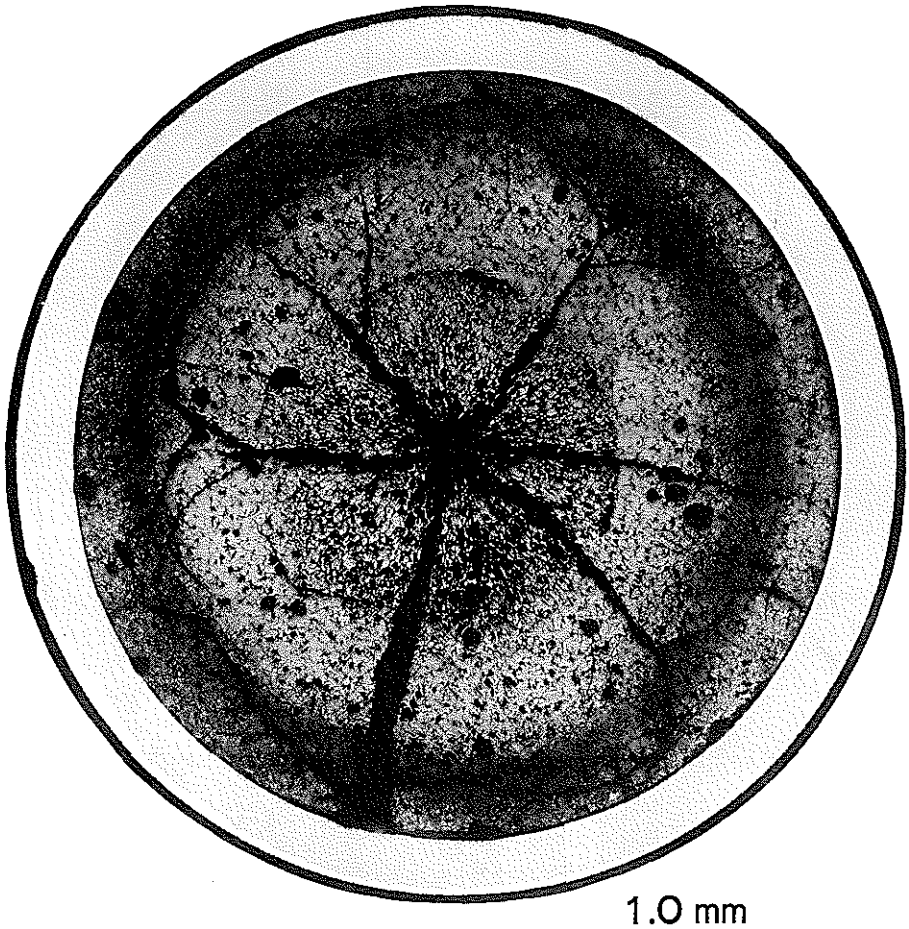


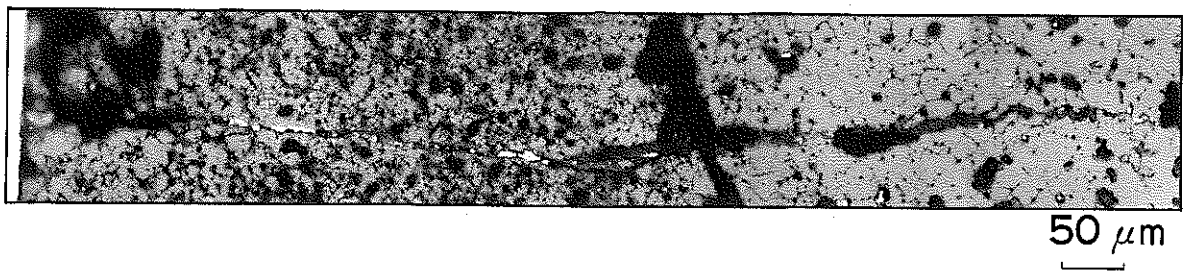
As-Polished

Photo. 0 − 7 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A662) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A662



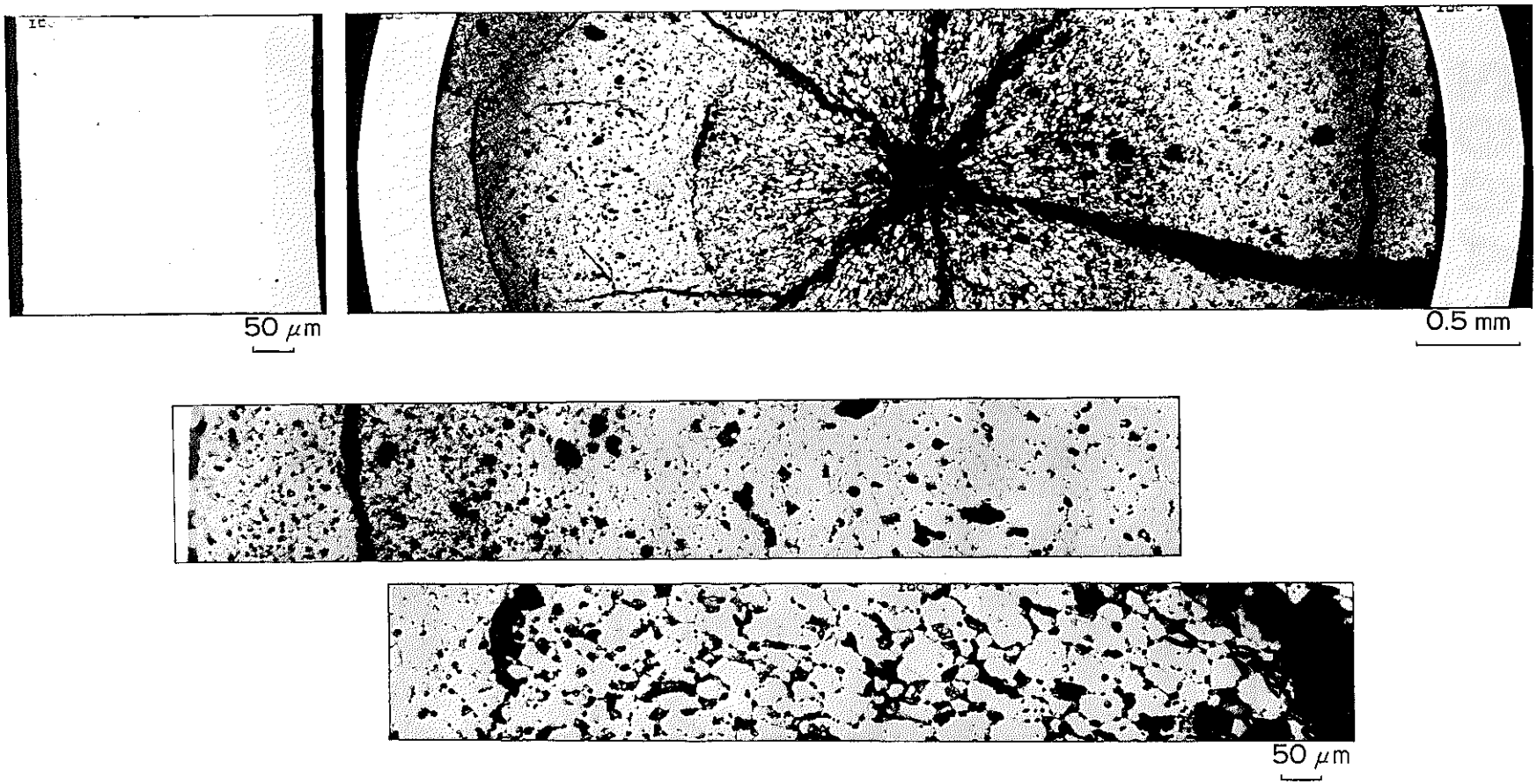


As-Etched

Photo. 0 − 8 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A662) Etched

"JOYO" MK-II PFD209

Specimen NO. C7A662



As-Etched

Photo. 0 − 9 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A662) Etched

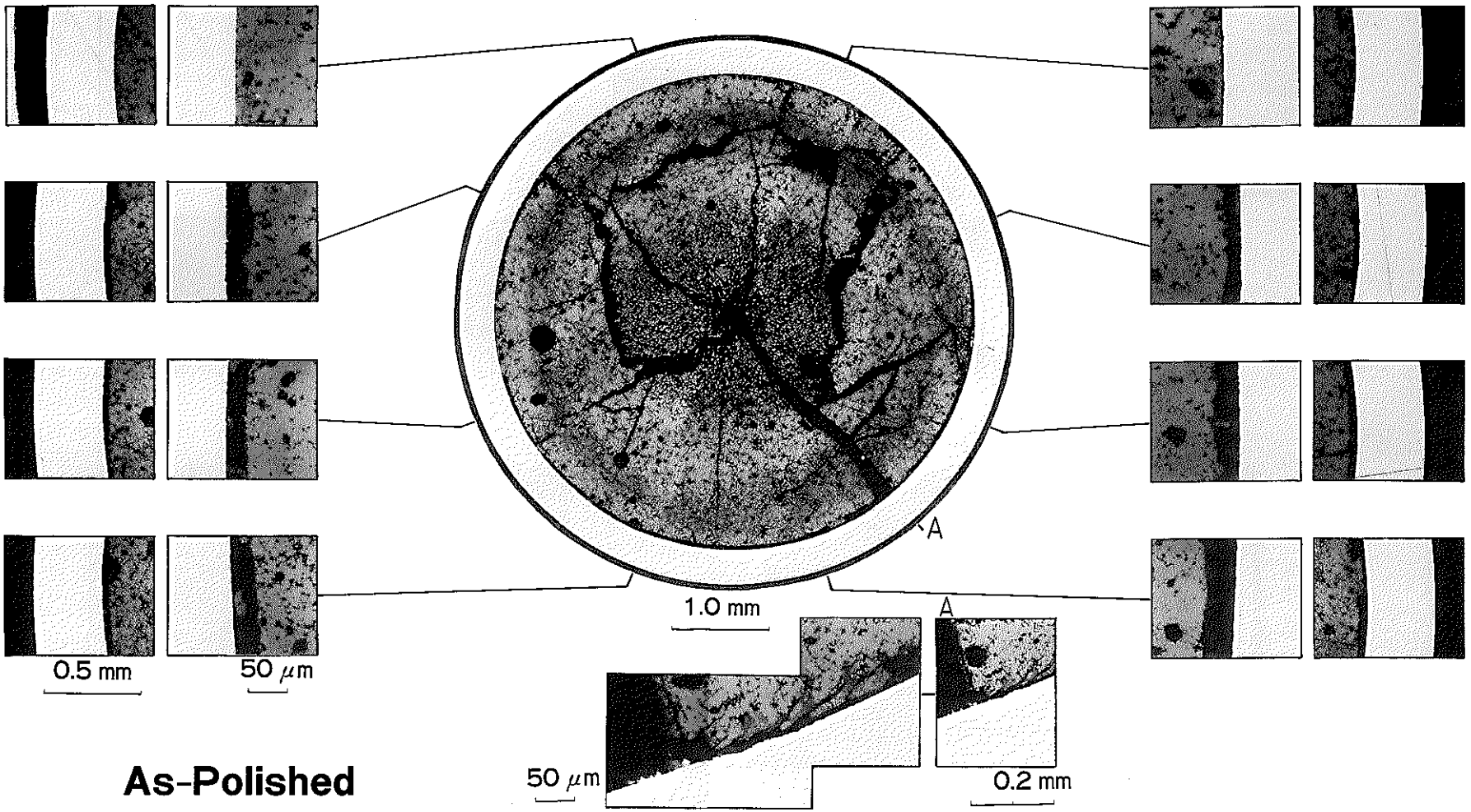
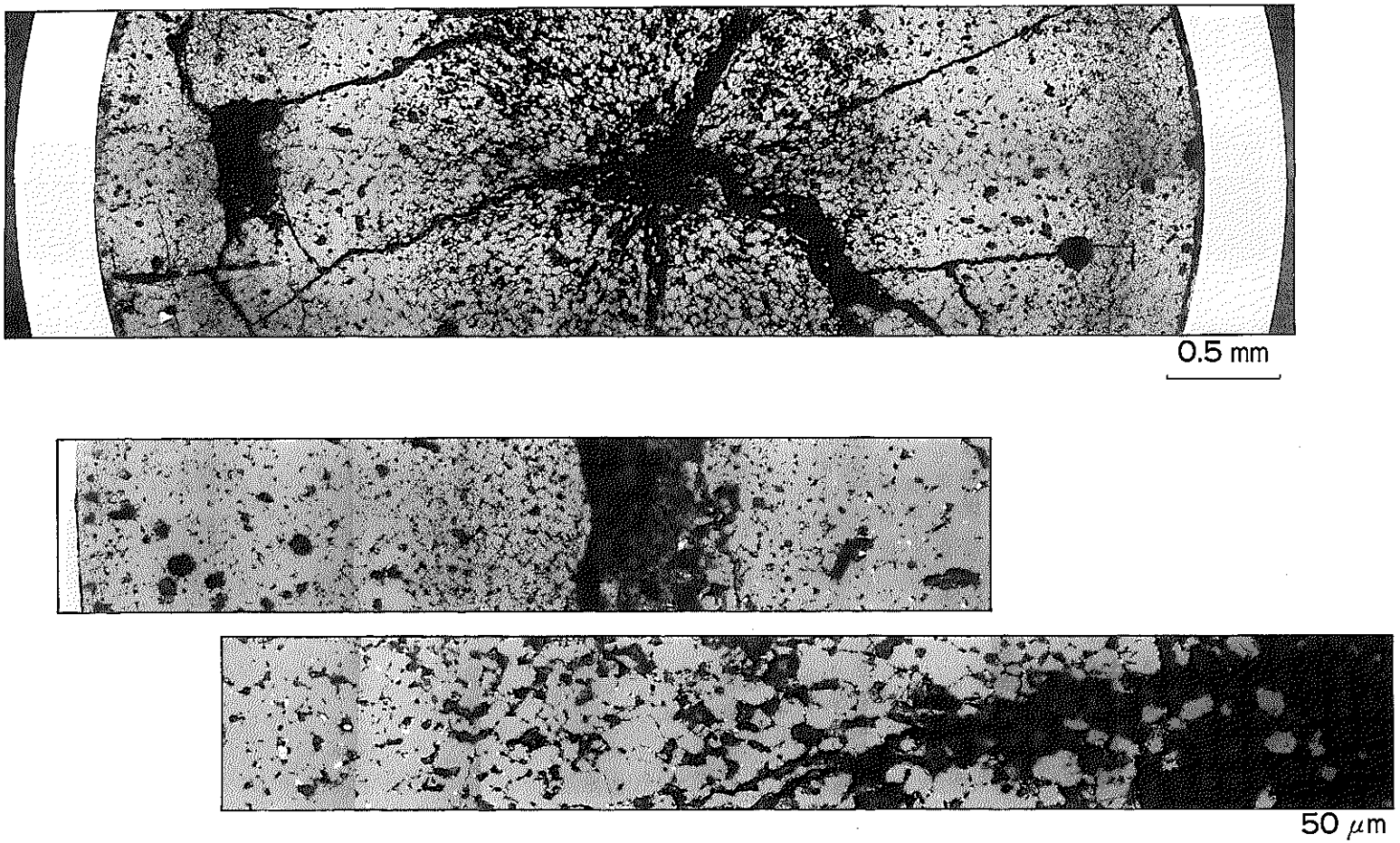


Photo. 0 − 10 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A682) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A682

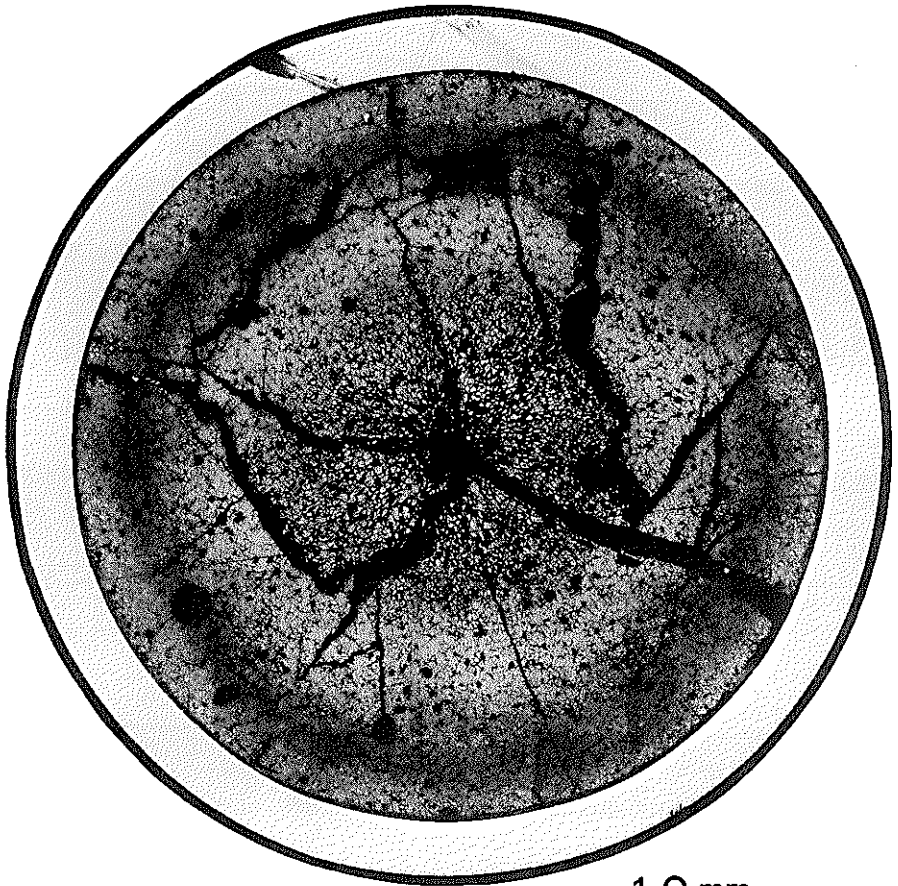


As-Polished

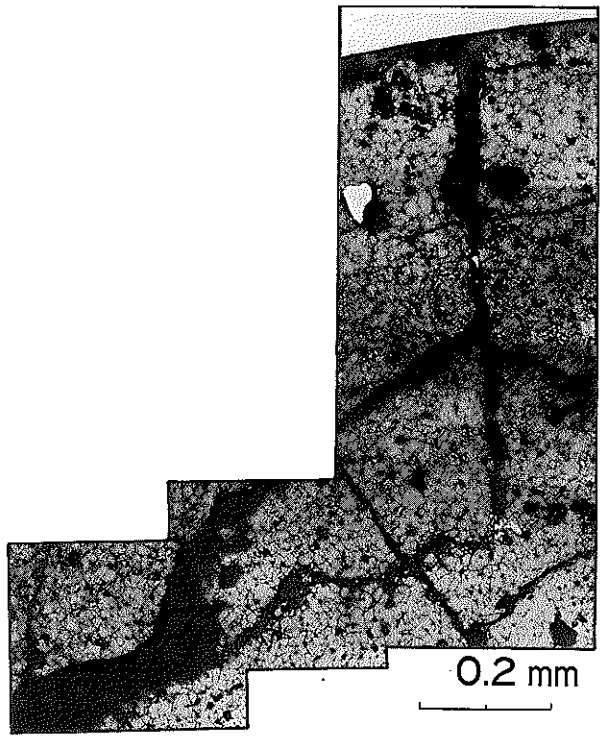
Photo. 0 − 11 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A682) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A682



As-Etched



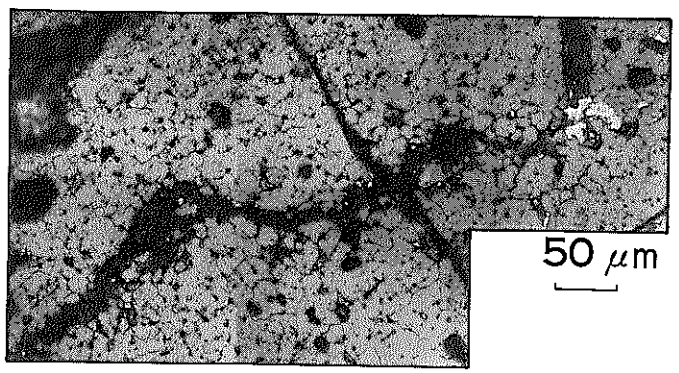
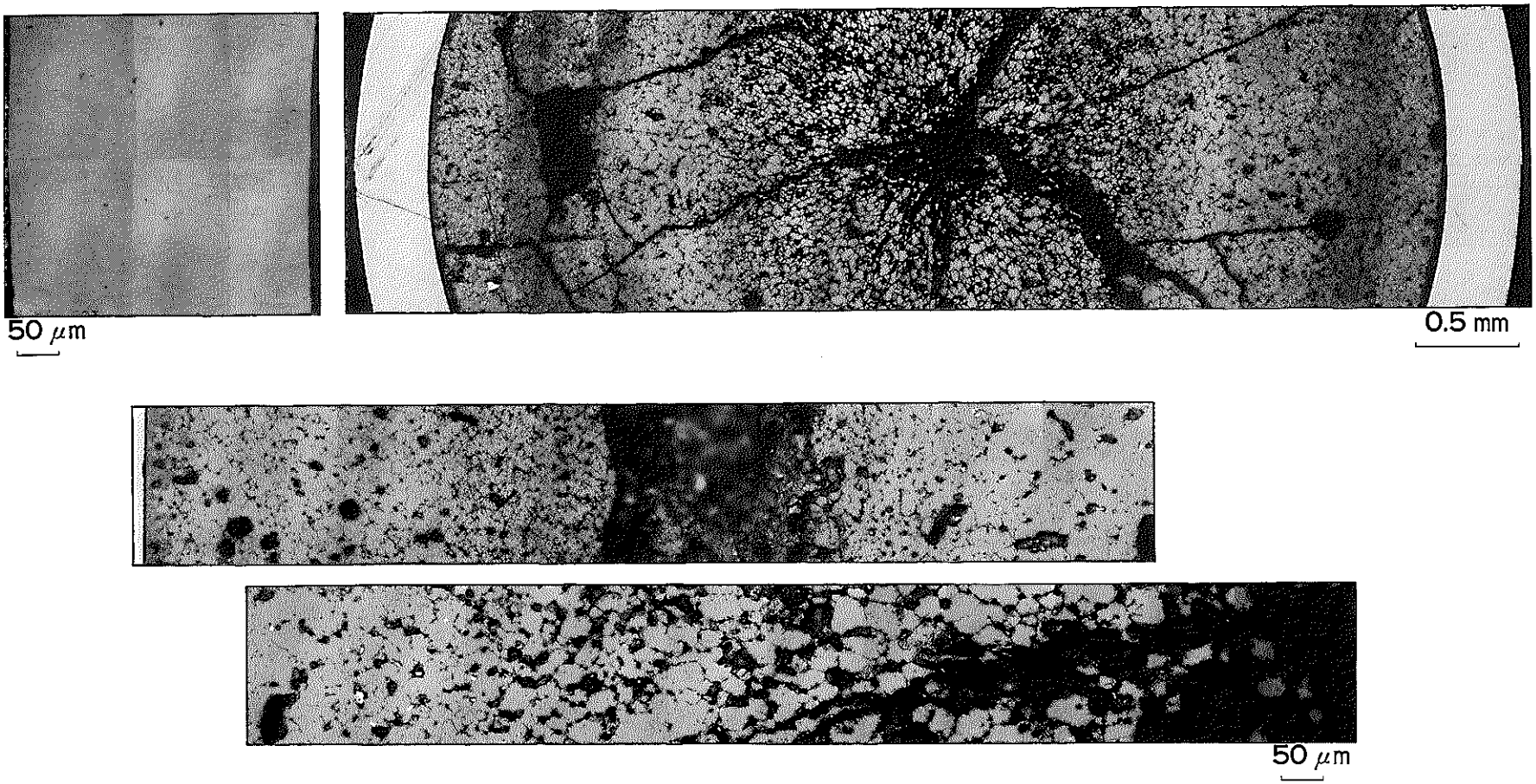


Photo. 0 － 12 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A682) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A682



As-Etched

Photo. 0 − 13 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A682) As−Etched

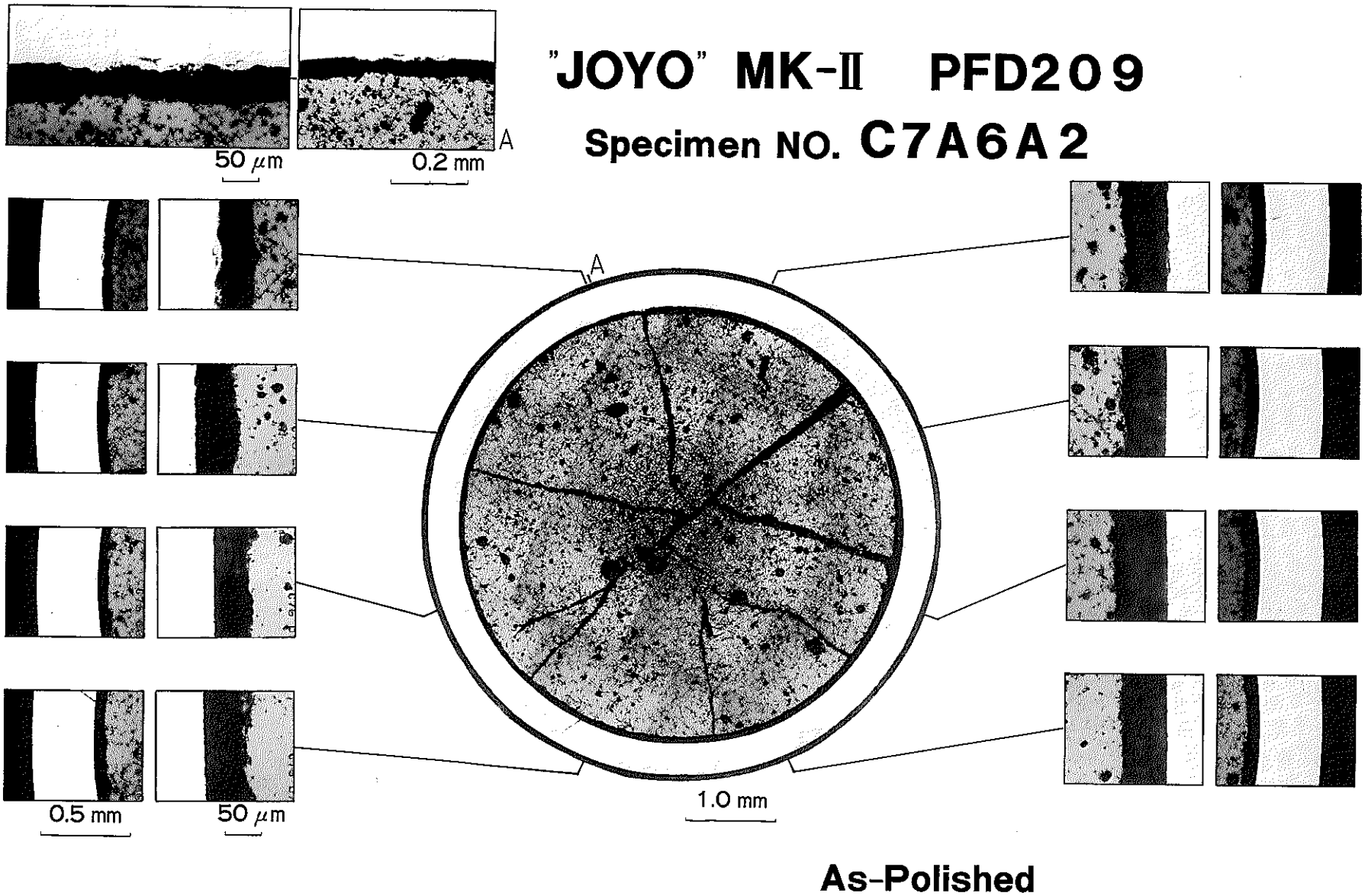
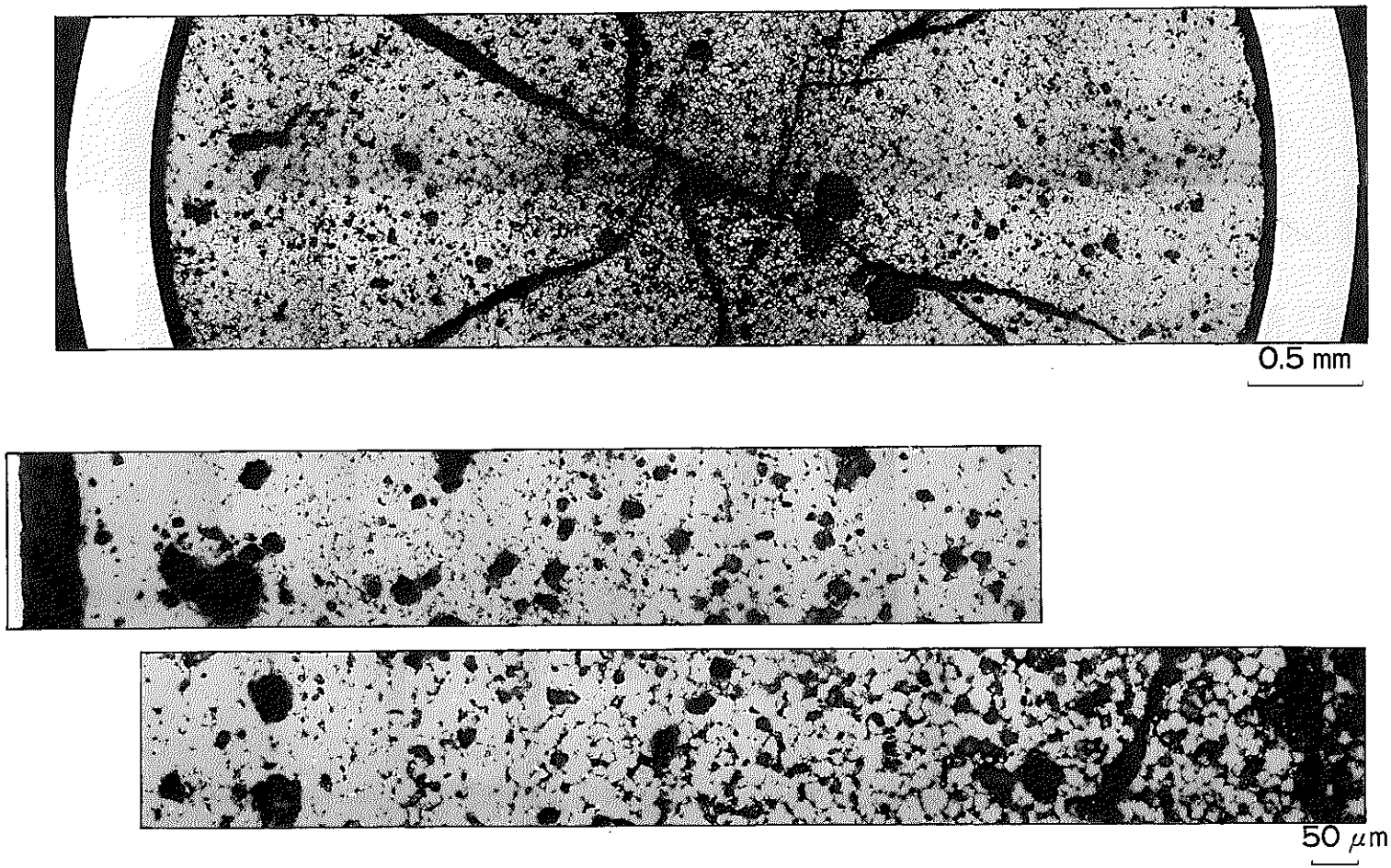


Photo. 0 − 14 Optical Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A6A2) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A2

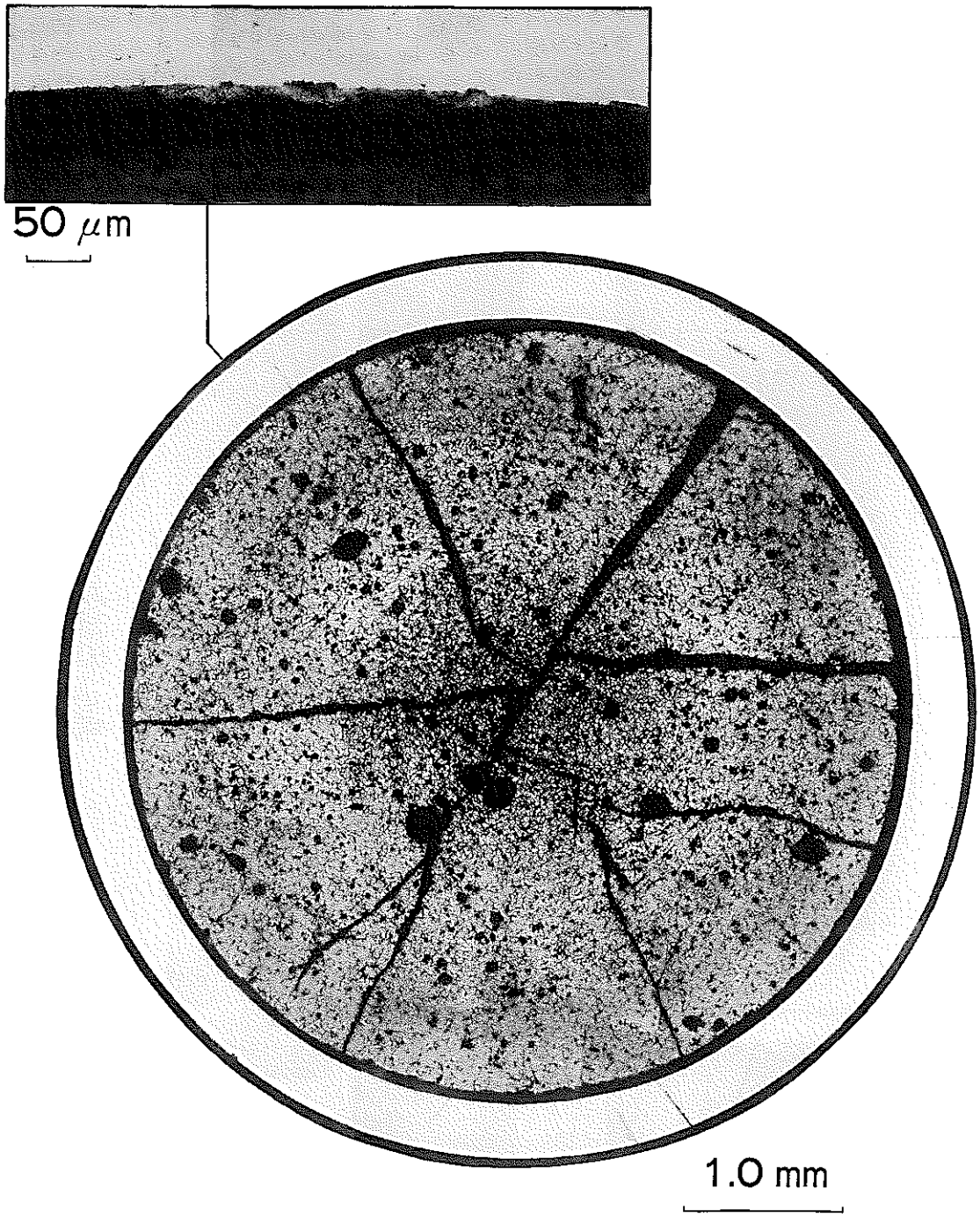


As-Polished

Photo. 0 − 15 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A6A2) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A2

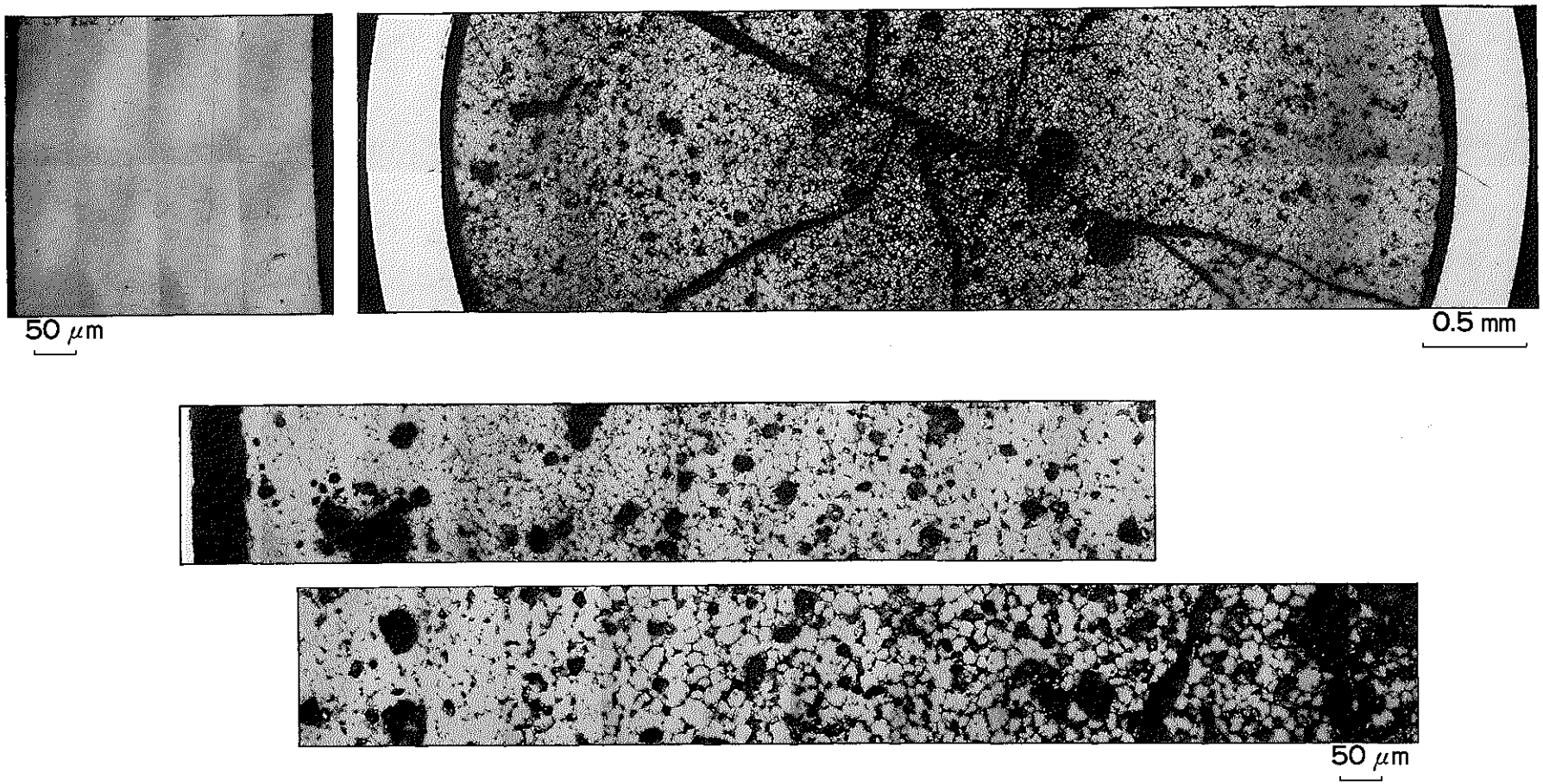


As-Etched

Photo. 0 − 16 Optocal Micrograph of the Transverse Section
(Specimen No. C7A6A2) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A2

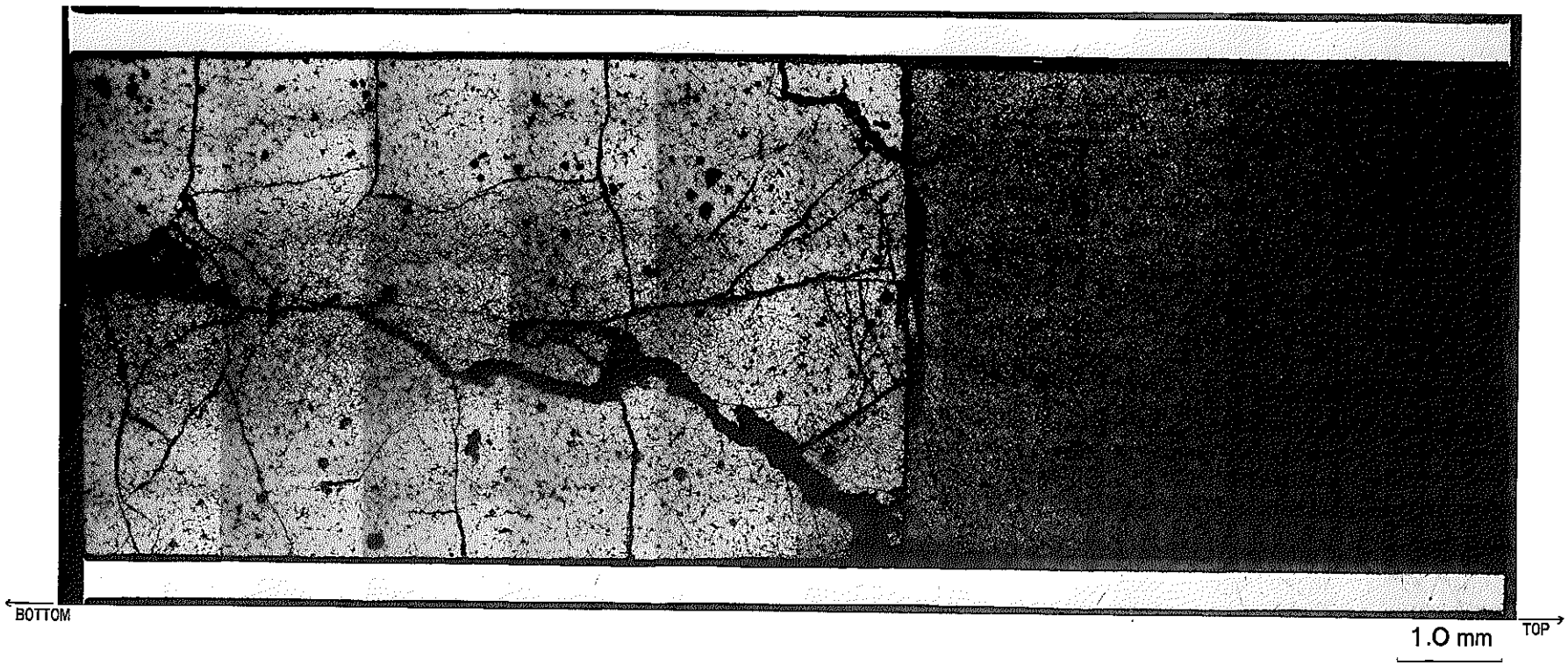


As-Etched

Photo. 0 − 17 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A6A2) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3



As-Polished

Photo. 0 − 18 Optical Micrograph of the Longitudinal Section
(Specimen No. C7A6A3) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3

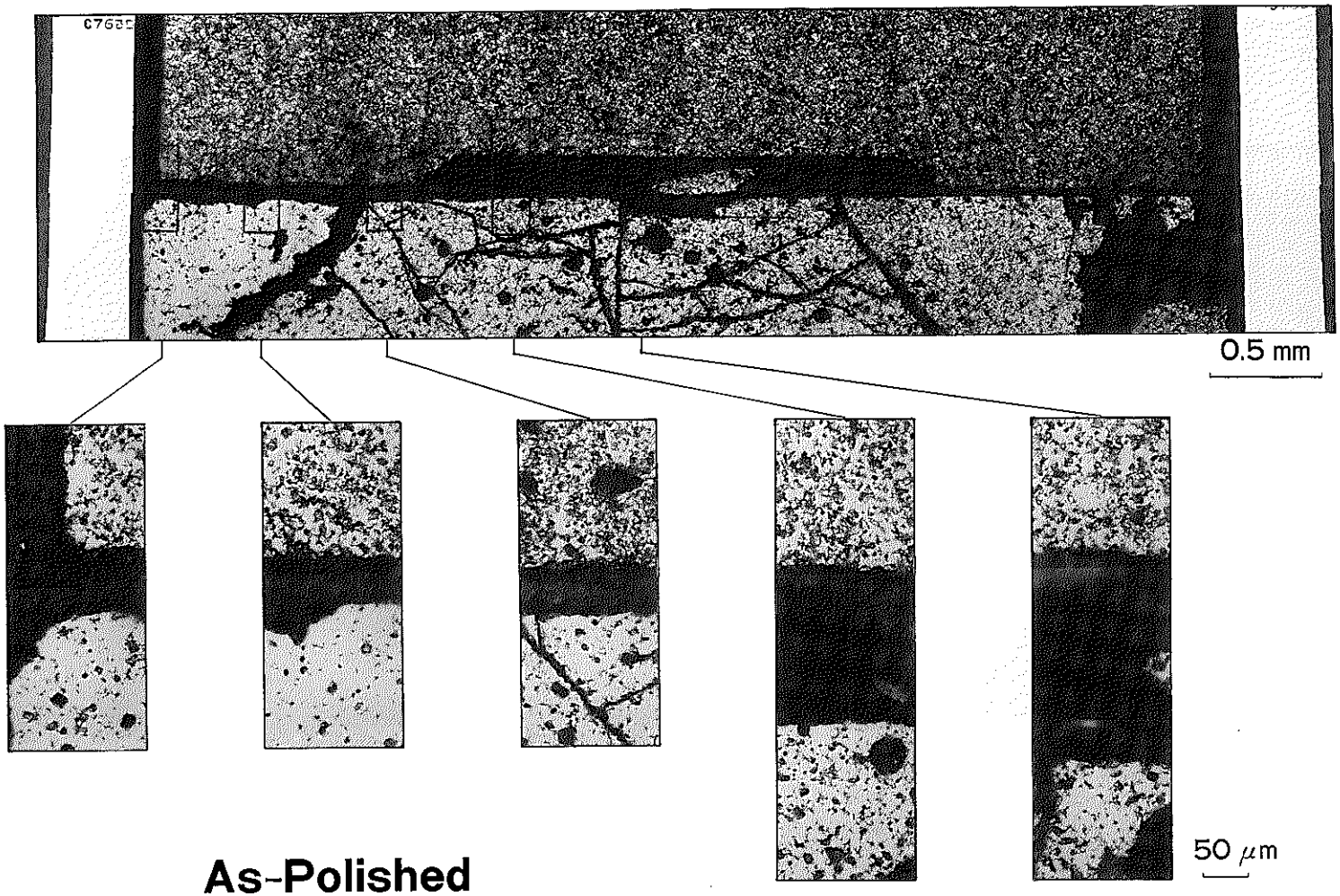
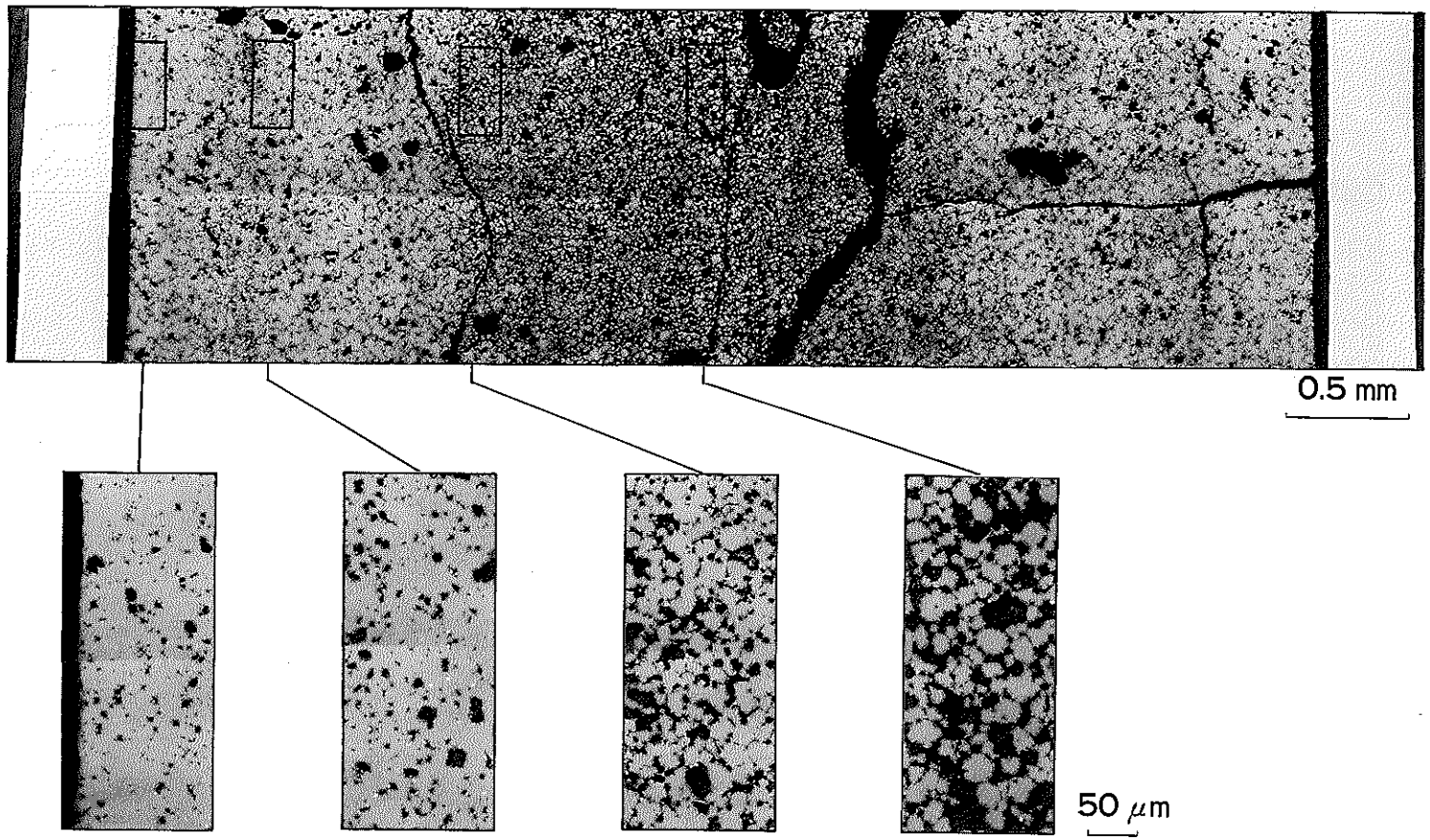


Photo. 0 − 19 Optical Microstructure of the Core Fuel and Insulator Pellet
(Specimen No. C7A6A3) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3

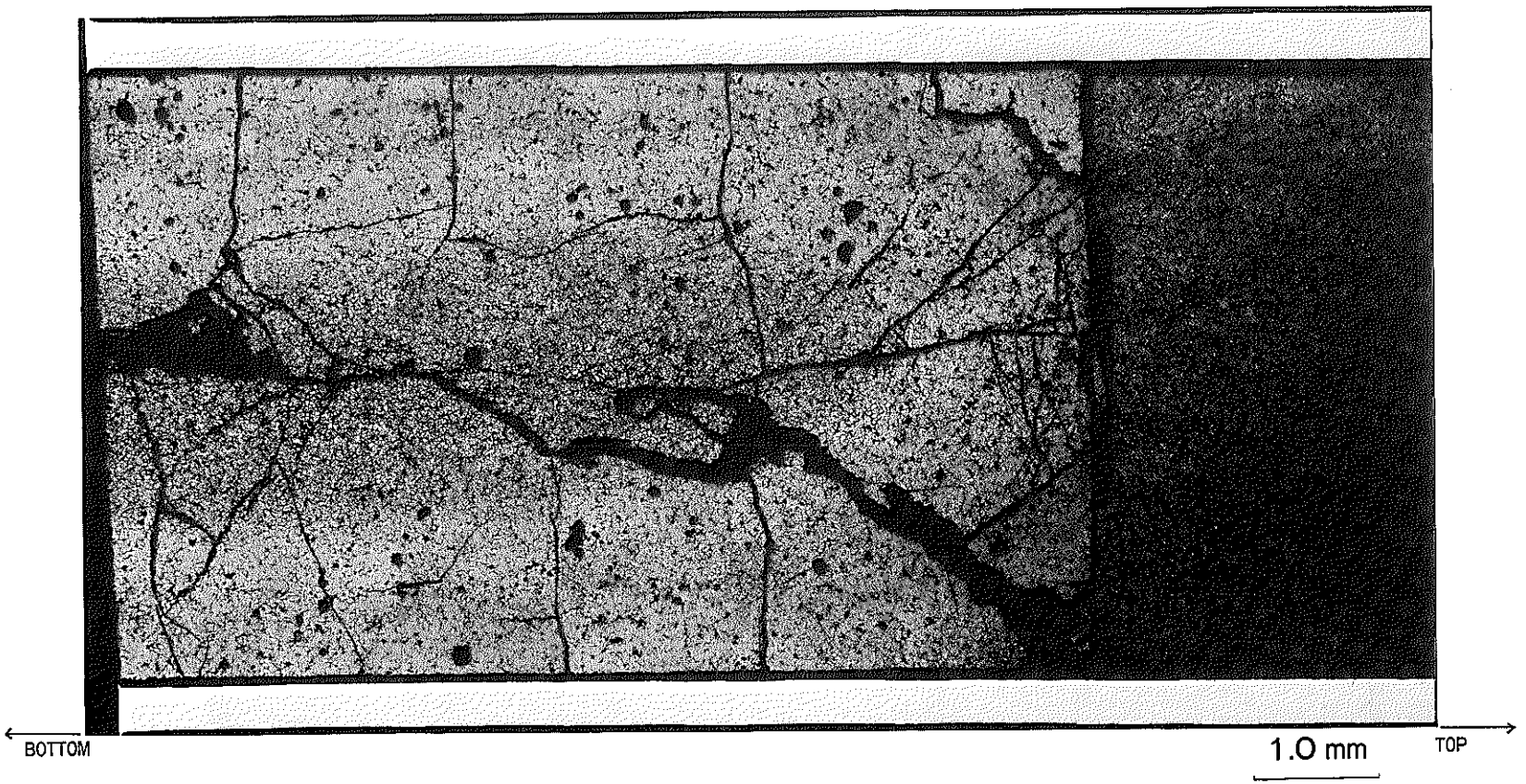


As-Polished

Photo. 0 − 20 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A6A3) As−Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3

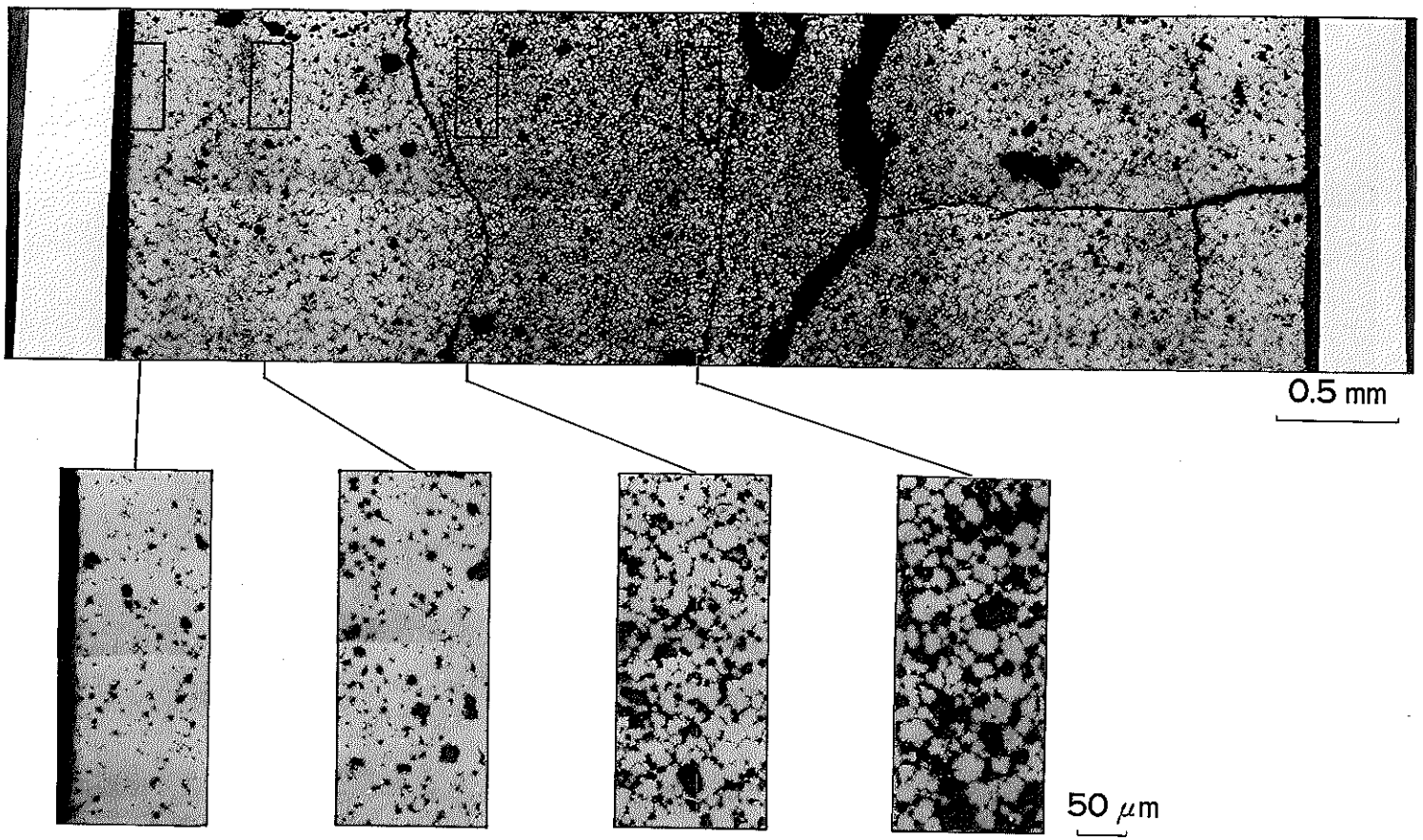


As-Etched

Photo. 0 − 21 Optical Micrograph of the Longitudinal Section
(Specimen No. C7A6A3) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3

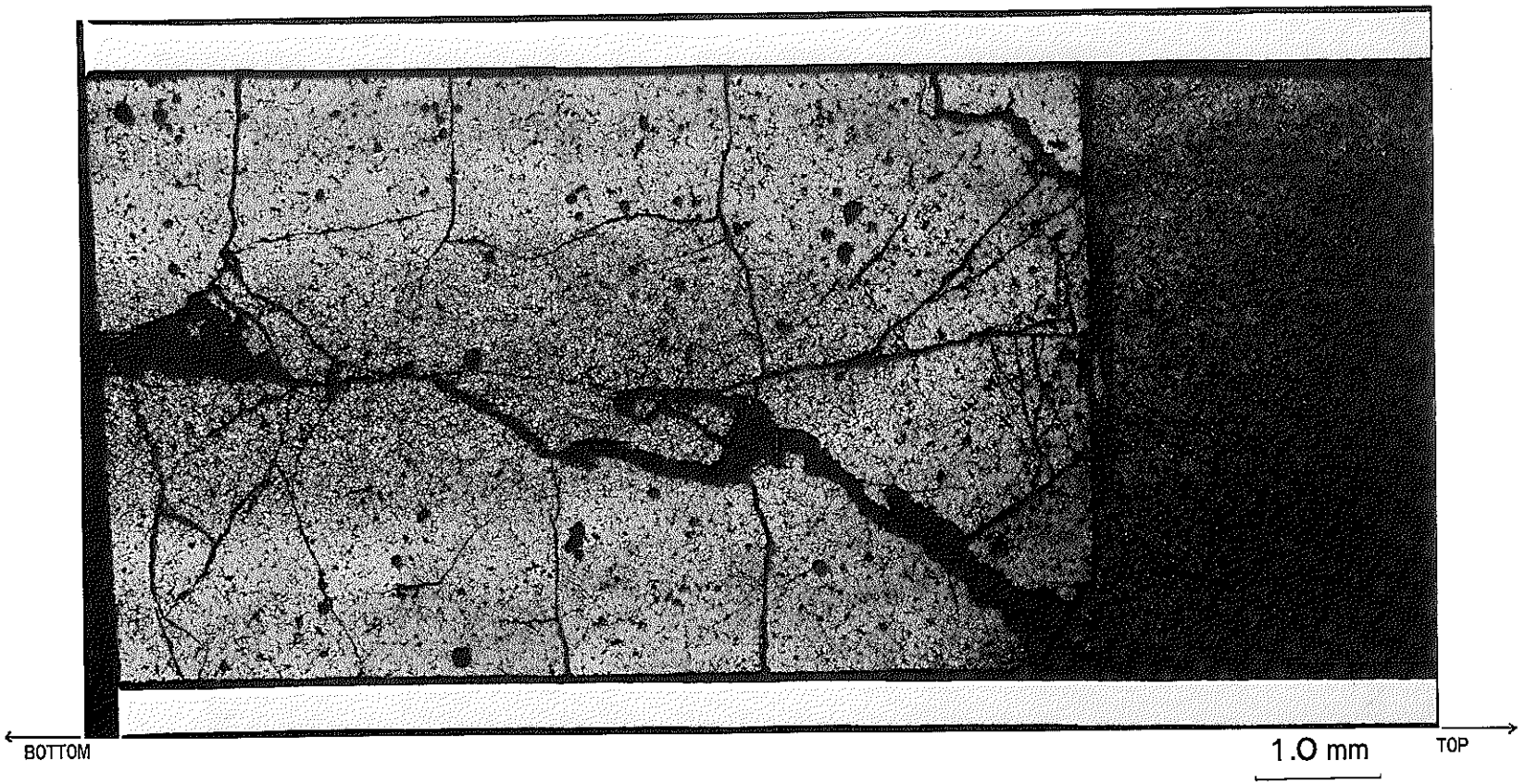


As-Polished

Photo. 0 – 20 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A6A3) As–Polished

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3



As-Etched

Photo. 0 − 21 Optical Micrograph of the Longitudinal Section
(Specimen No. C7A6A3) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3

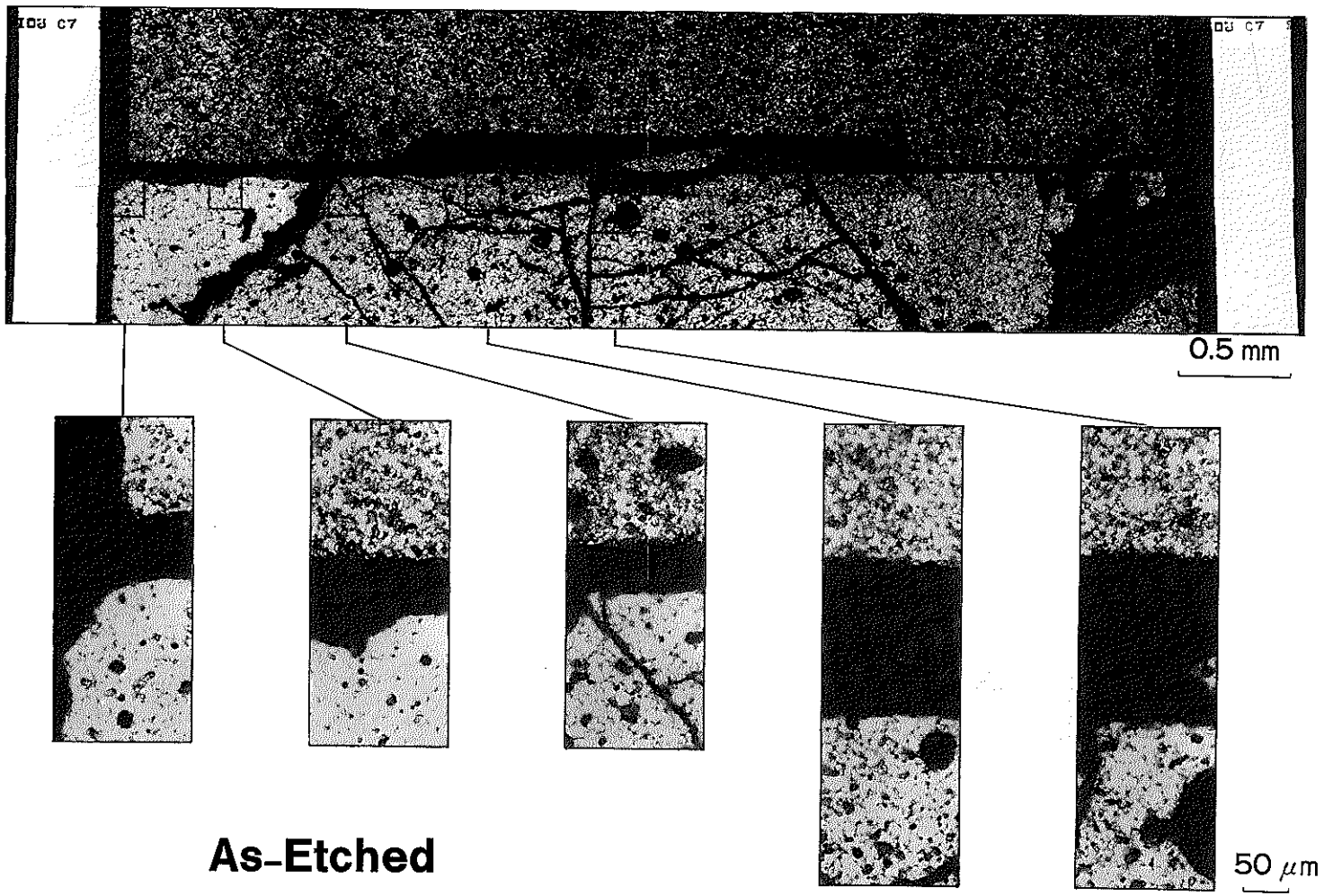
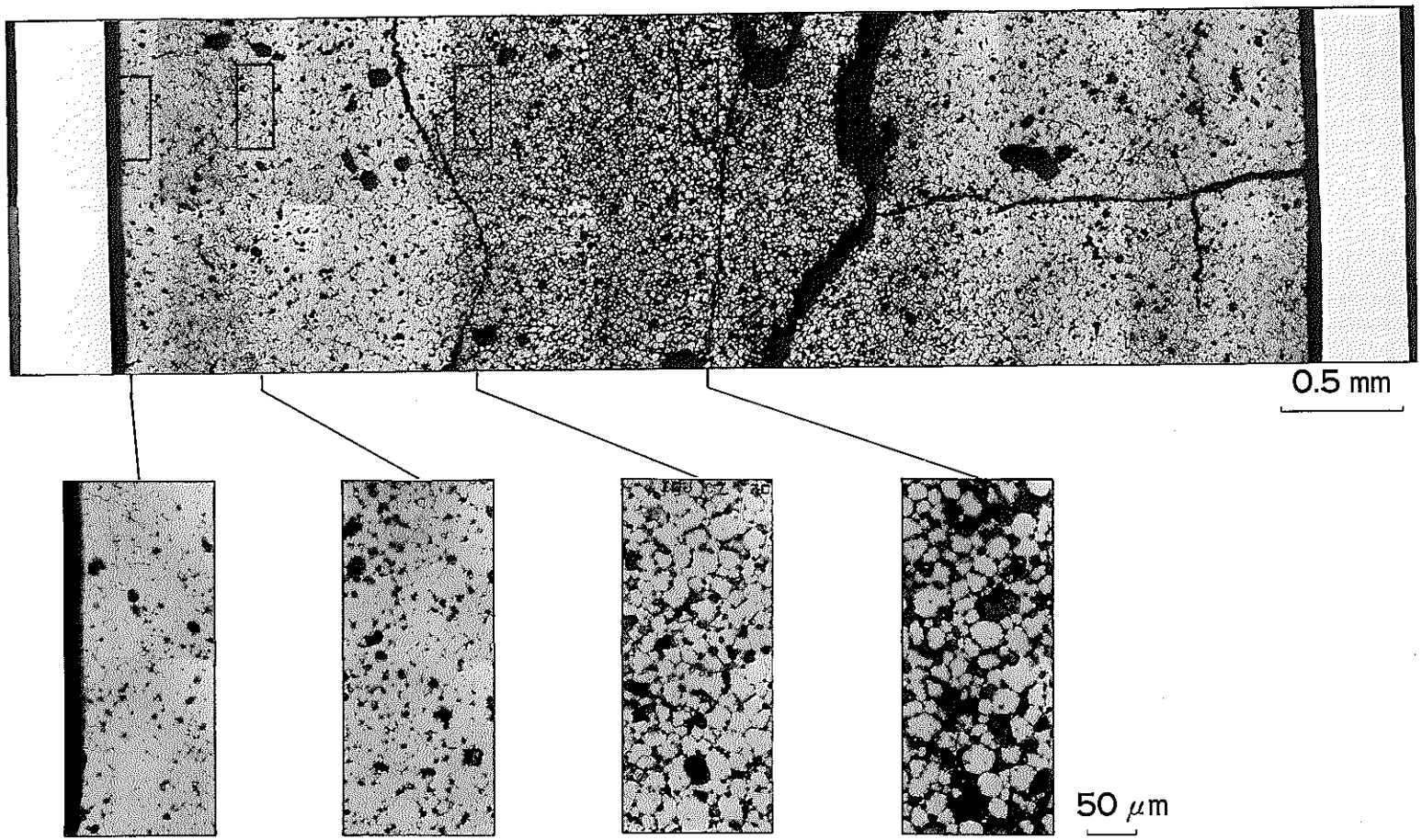


Photo. 0 − 22 Optical Microstructure of the Core Fuel and Insulator Pellet
(Specimen No. C7A6A3) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6A3



As-Etched

Photo. 0 − 23 Optical Microstructure of the Core Fuel
(Specimen No. C7A6A3) Etched

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A624 (SEM)

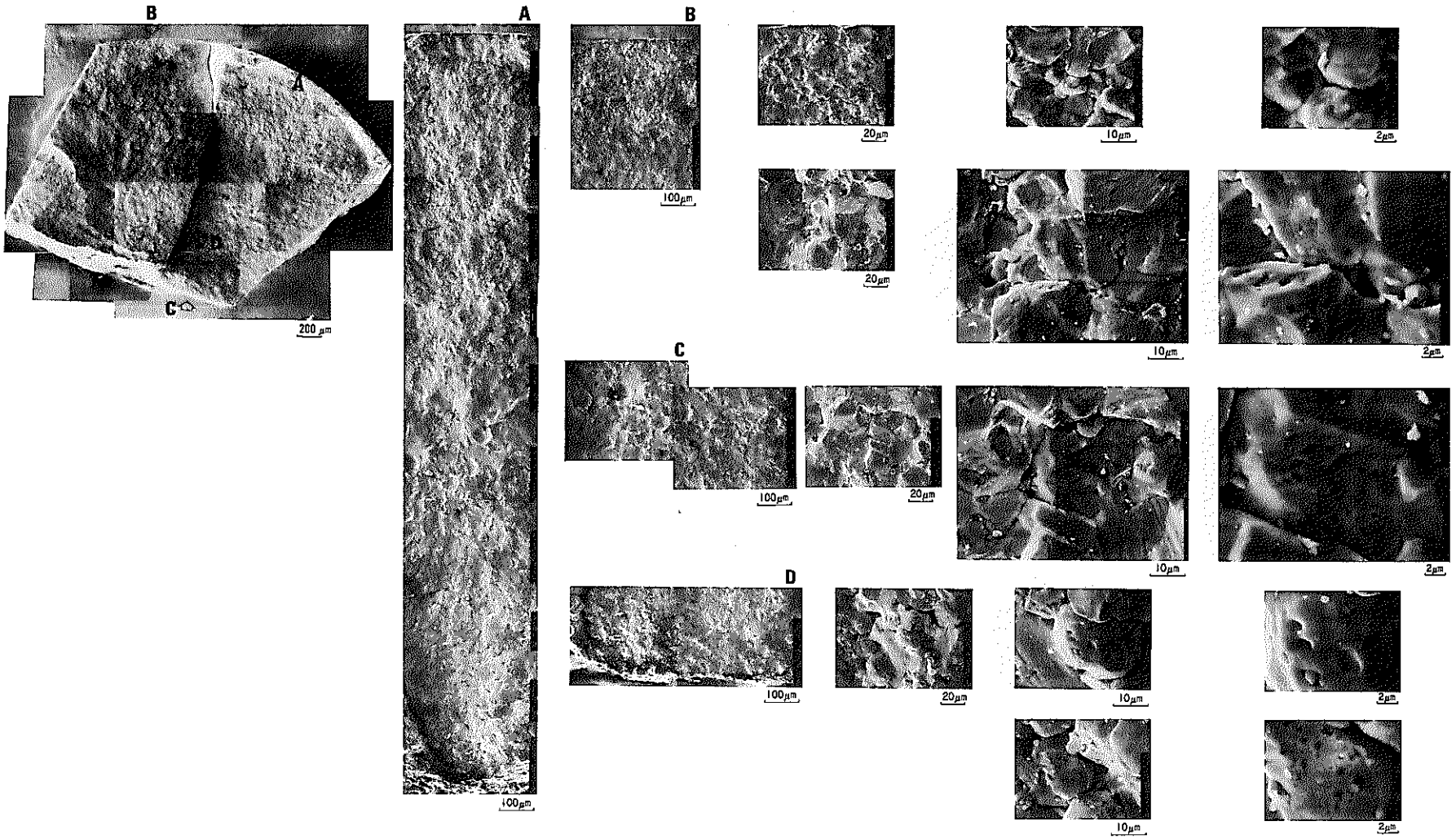
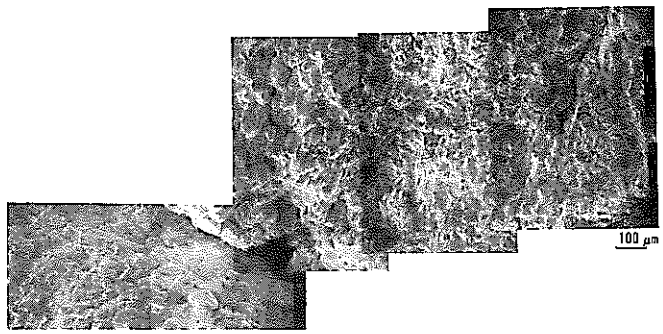


Photo. S－1 Scanning Electron Micrographs of the Core Fuel Fracture Surface
(Specimen No. C7A624)

"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6641 (SEM)



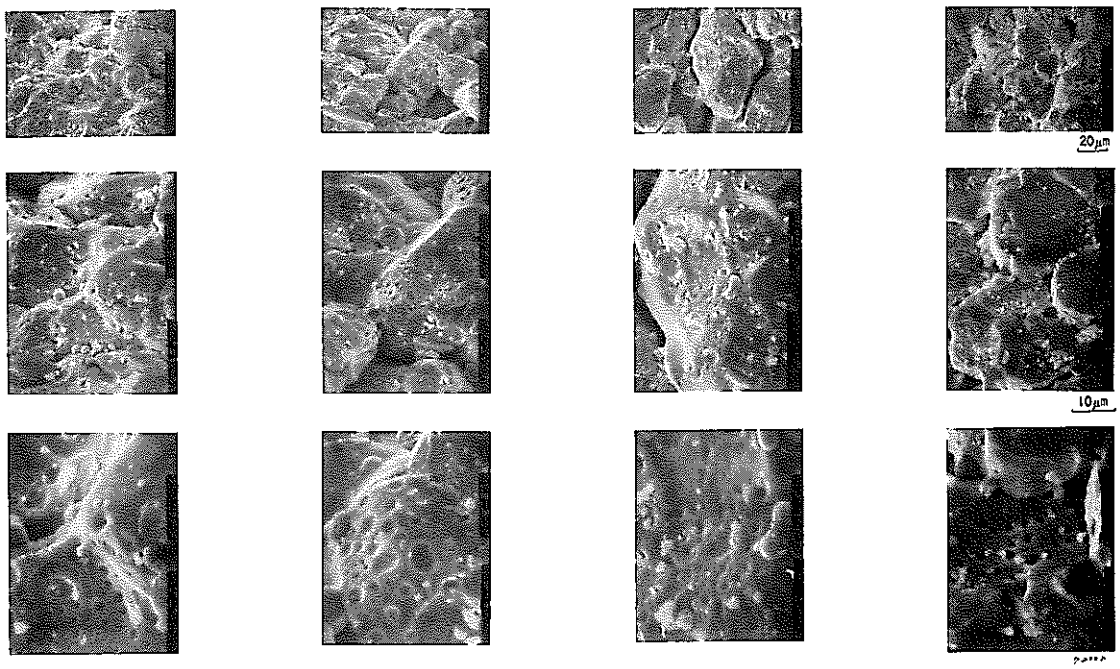
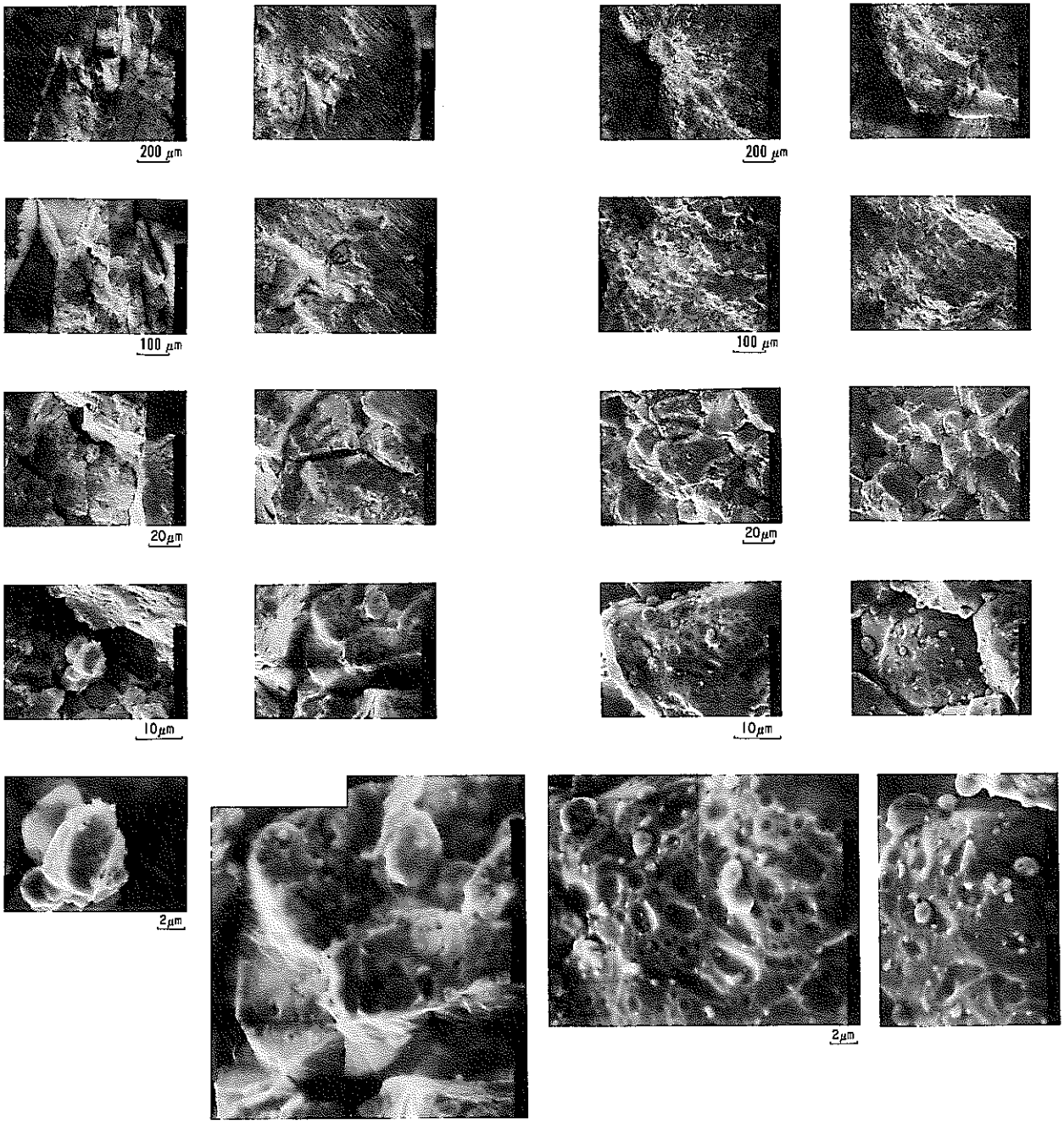


Photo. S－2 Scanning Electron Micrographs of the Core Fuel Fracture Surface
(Specimen No. C7A6641)

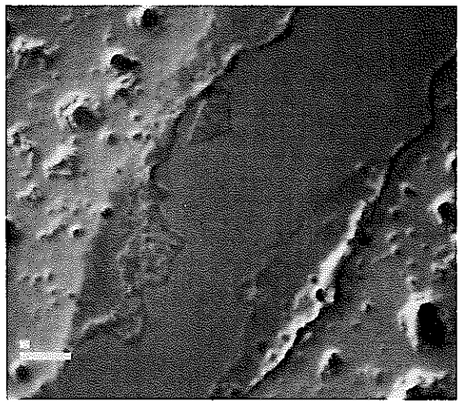
"JOYO" MK-Ⅱ PFD209

Specimen NO. C7A6641

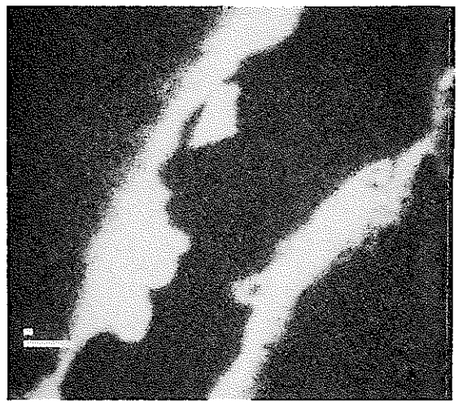


(SEM)

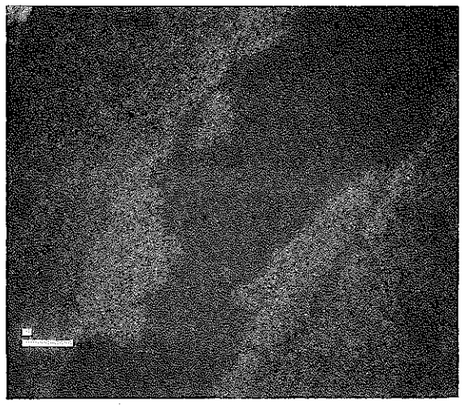
Photo. S－3 Scanning Electron Micrographs of the Core Fuel Fracture Surface
(Specimen No. C7A6641)



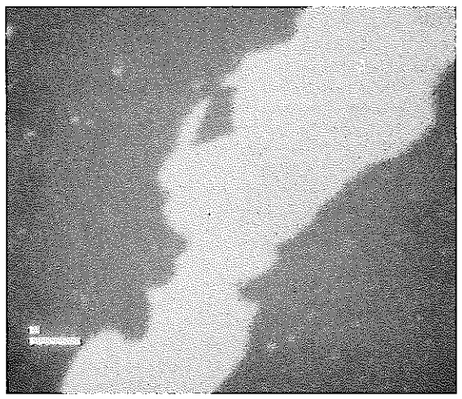
SEI



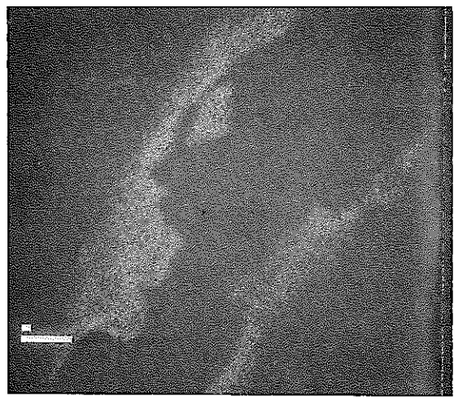
Ba



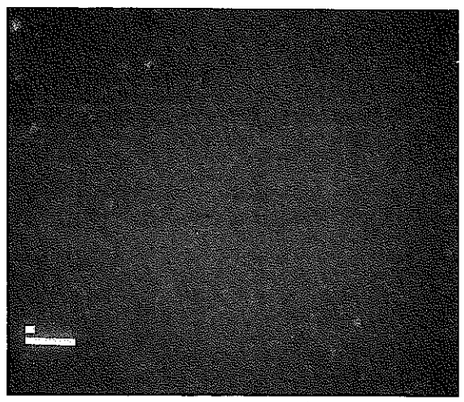
O



Pd

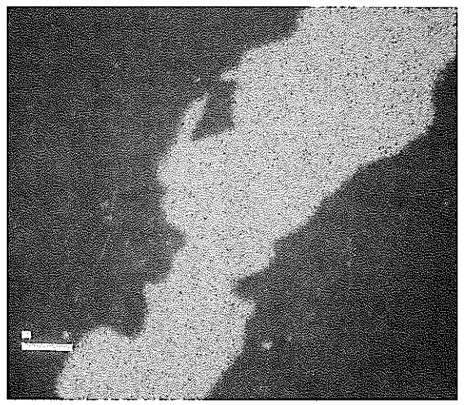


Zr

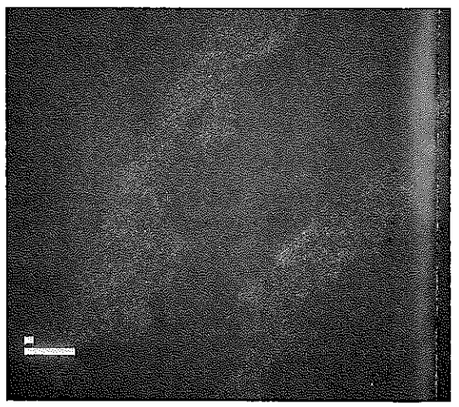


Mo

10 μm



Fe



Ce

Photo. X－1 Various X－ray Images of the Metallic Inclusion in the Crack
(Specimen No. C7A642)