

**新型転換炉実証炉燃料の
HBWRにおける負荷追従試験 (V)**

IFA-555ロッド1の照射後試験結果 (その1)

1995年7月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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)
2001

新型転換炉実証炉燃料のHBWRにおける負荷追従試験（V）

IFA-555ロッド1照射後試験結果（その1）

実施責任者 上村 勝一郎*

報告者 河野 秀作*、矢野 総一郎*、加藤 正人*
菊池 圭一**

要 旨

OECDハルデンプロジェクトとしてATR実証炉燃料の負荷追従試験（IFA-554/555）を実施している。IFA-555ロッド1の照射後試験項目のうち、(a) 金相試験、(b) SEM試験、(c) 燃料棒の α 及び β/γ オートラジオグラフィの結果について解析したので報告する。

結果は、以下の4点である。

- (1)燃料棒の上部において、酸化及び水素化により被覆管に顕著な腐食損傷が認められた。
- (2)冷却材側の酸化により被覆管厚さが、周方向の数カ所かで、特に509mm（燃料棒下端Vノッチからの距離）部分で著しく減少している。
- (3)Zrライナーの内面が著しく水素化しており、その部分が燃料の大きなクラックの発生に結びついている。
- (4)509mm部分では、照射により燃料中の微細構造の変化が見られた。たとえば、燃料端から中心に向かう結晶粒径の増加、中心空孔、柱状晶、結晶粒界での大きな金属核分裂生成物等である。

以上の結果から、照射初期に燃料温度が上昇したことは確認できたが、燃料破損孔は見いだすことができなかった。

* 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

** 技術開発推進部 炉心・燃料設計室

目 次

1. はじめに	1
1.1 試験と試験方法	1
2. 結果と考察	5
2.1 燃料棒の横断面、縦断面のマクロ観察	5
2.2 被覆管の水素化物	7
2.3 被覆管の酸化膜－水側、燃料側	19
2.4 燃料ペレットのミクロ観察	32
2.5 燃料ペレットのレプリカのSEM観察	64
2.6 燃料ペレットの α 及び β/γ オートラジオグラフィ	69
3. 結論	73

1.はじめに

OECDハルデンプロジェクトとしてATR実証炉燃料の負荷追従試験 (IFA-554/555) を実施している。以下の項目についてはすでに報告書として取りまとめた。

- (1) IFA-554/555燃料の設計 (PNC ZN841 85-29)
- (2) IFA-554/555燃料要素製造 (PNC I843 85-38)
- (3) IFA-554/555燃料集合体の照射データ中間報告 (PNC PN8450 92-010)
- (4) IFA-554/555照射試験及び照射後試験結果 (登録中)
 - ① 非破壊試験 (全7ロッド)
 - ② 破壊試験 (IFA-554ロッド5のみ)

なお、今後は、残る6ロッド (IFA-554ロッド1,2,3,4,6, IFA-555ロッド1) の破壊試験を実施・解析することとしている。

今回は、IFA-555ロッド1の照射後試験項目のうち、(a) 金相試験、(b) SEM試験、(c) 燃料棒の α 及び β/γ オートラジオグラフィの結果について解析したので報告する。 IFA-555-1の非破壊試験結果に関する前報のIFEレポート1においてK.Bryhn-Ingebrigtsen、H.K.Jenssen、O.M.Pareliusは、燃料棒が、特に燃料上部において顕著な照射損傷を受けていると結論した。中性子ラジオグラフィでは、この位置で、被覆管に大きな水素化物が生じていた。また、燃料棒のパンクチャ中にFPガスは採取されなかった。これらのことから、被覆管は欠陥を有すると結論された。この欠陥を通してFPガスが放出された。

IFA-555-1の最初の破壊試験はすでに終了している。破壊試験の項目は、燃料ペレットおよび被覆管の金相、 α 及び β/γ オートラジオグラフィ、燃料ペレットのSEM観察である。これらの試験は、主として燃料棒の上部について実施している。試験の目的は、被覆管と燃料ペレットの微細構造、腐食および金属核分裂生成物について、照射による変化を調べることである。

1.1 試料と試験方法

IFA-555燃料棒はATR実証炉サイズの燃料棒である。ATR模擬照射試験のための最初の燃料装荷は、1985年の10月である。照射リグは、冷却水圧力が73.5気圧、冷却水温度が288℃のATR条件下での強制循環ループで照射された。

この照射試験の目的は、高燃焼度でのペレット/被覆管の相互作用とFPガス放出率を調べることである。

IFA-555燃料棒はPu富化度4.48%のMOXペレットとZrライナー付のZry-2被覆管からなる。燃料ペレットの直径は12.41mmで高さは13mmである。理論上の直径ギャップは300 μ mである。被覆管内径は12.71mm、肉厚は0.875mmである。

燃料棒下部のVノッチから232, 401および513mmの位置で、横断面試料と縦断面試料お

よび462～478mmの位置で、軸方向断面の試料が採取された。また、試料の角度は 0° から 360° まで計測されている。顕微鏡写真上の黒点が 0° であることを示し、角度は燃料を上部から見て、時計方向に増加する。図1.1に燃料棒の切断位置を中性子ラジオグラフ写真のコピーの上を示す。

Zry被覆管中の水素化物およびZry被覆管の燃料側のZrライナー中の水素化物はエッチングにより調べた。エッチングは、水を加えた Al_2O_3 懸濁液5滴とエッチング液2滴からなる混合液で10分間行われた。なお、エッチング液は45mlの H_2O_2 と4.5mlの HNO_3 および1.5mlのHFの混合液である。

燃料のポアサイズ、酸化物層の形状および被覆管の肉厚についての測定試験は研磨試料について行われた。また、結晶粒径および燃料中のポア分布の測定試験はエッチング試料について行われた。エッチング液は、 H_2O_2 と H_2SO_4 が8:2の混合溶液である。エッチング時間は数秒である。

研磨されエッチングされた状態で、燃料ペレット表面のレプリカが作られた。このレプリカについて、燃料ペレットの組織観察がSEMにより行われた。

α および β/γ オートラジオグラフィ試験は、燃料棒の2つの部分について行われた。オートラジオグラフ結果は、232mmと401mmの位置での α 及び β/γ 核種のアクティビティを示している。

表1 試料の定義について：燃料棒下端Vノッチからの距離、試料No、横断面／縦断面

Position on fuel rod measured (mm) from lower V-groove	Specimen no.	Type of cross-section
232	H28	transversal
401	H26	transversal
462-478	H27	longitudinal
509	H29	transversal

表2 略号について

VS	Visual inspection and SEM clad inner wall
H	Hydrogen analysis
T	Tensile test
MH	Microhardness
Burst Test	Burst test
Bu	Burn up test
RF	Retained fission gas
Mic. gamma	Micro γ -scanning
Aut.	α , β/γ autoradiography
LM	Light microscopy
•	fuel rod orientation: 0°

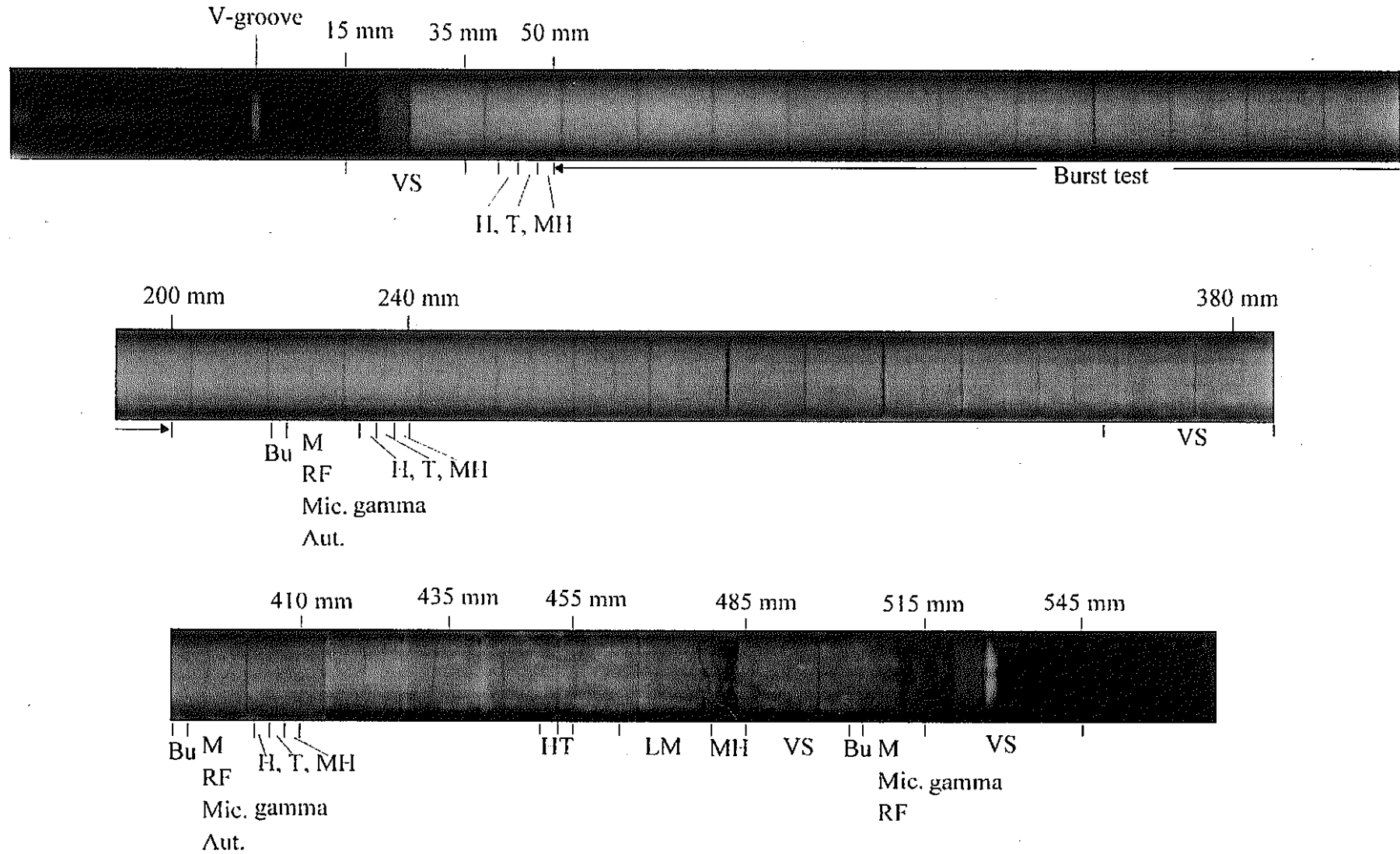


図1.1 燃料棒の中性子ラジオグラフィ上での切断位置

2.結果と考察

2.1 燃料棒の横断面、縦断面のマクロ観察

図2.1.1に各断面のマクロ写真を示す。

232mmの横断面観察には燃料ペレットの断面全体に径方向クラックが見られる。ペレット/被覆管のギャップは、はっきりと観察できる。また、被覆管の冷却材側に腐食による減肉が観察できる。

401mmの横断面観察では、径方向中間部で周方向の円形クラックが観察でき、その外側では径方向のクラックが、内側では大きな径方向クラックの痕跡が観察できる。この円形クラックを境に内側では組織が大きく変化している。また、ペレット/被覆管のギャップは、はっきりと観察できる。被覆管は冷却材側で大きな腐食があり、最大のところで被覆管は1/3以下に減肉している。

462～478mmの燃料ロッドの中心を通る縦断面観察では、径方向中間部に軸方向のクラックが存在している。このクラックは、ペレット全長に対して軸方向に平行に貫通しており、このクラックの中心側では燃料組織が大きく変化している。また、ペレットのディッシュ部は観察できなく、チャンファ部は大きくなっているようである。被覆管は冷却材側で腐食による減肉が観察できる。

509mmの横断面観察でも、径方向中間部に円形クラックが観察できる。その外側では径方向クラックによりペレットは砕け、一部は移動している。さらに、燃料ペレット中心部には数mmの中心空孔が観察できる。被覆管は、冷却材側で、全周にわたって腐食しており、最大のところで被覆管の1/2程度まで減肉している。

513mmの横断面観察は、燃料棒内に樹脂を真空充填した後、4mmの厚さにスライスして試料とした。ペレットは径方向及び周方向のクラックにより砕け、大きく動いている。被覆管は冷却材側で腐食による減肉が観察できる。

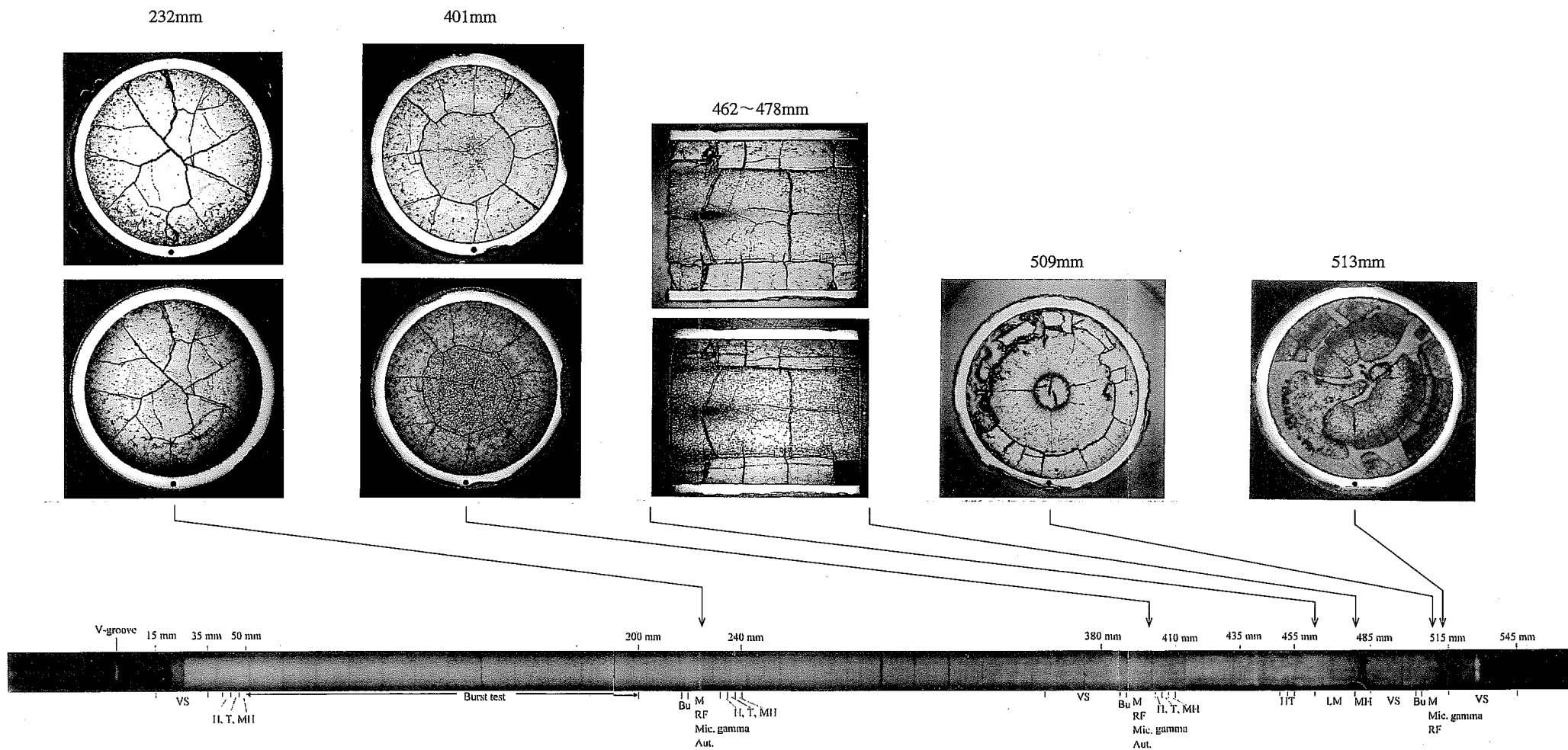


図2.1.1 燃料断面のマクロ観察

2.2 被覆管の水素化物

金相試料を準備し、エッチングして被覆管内の水素化物の分布及びその量に関して調査した。大変興味深いことは、Zrライナー層での水素化物の形態についてである。

IFA-555 ロット-1断面金相写真を、試料採取位置232mm (図2.2.1及び2.2.2), 401mm (図2.2.3~2.2.5), 462から478mm (図2.2.6~2.2.8) そして513mm (図2.2.9及び2.2.10) について示す。被覆管の水素化物のミクロ観察を、0度, 90度, 180度, 270度に関し実施した。その結果から、大変興味深いことが観察された。ミクロ観察写真は、マクロ観察写真と関連付けて示した。

これらの金相写真から、次のような特徴が見られた。

- ・水素化物は、被覆管外周部に凝集している。
- ・被覆管の水素化物濃度は、被覆管壁の冷却材側が急激に増加する。被覆管肉厚の10~15%程度の被覆管外周部の水素化物体積率は、約30vol.%と推定される。
- ・スポット的に生じた腐食の下の水素化物の量は、被覆管外周部の領域で観察されたものと同様である。これは、被覆管酸化膜形成が水素化物凝集量に影響されないということの意味しているのかもしれない。酸化膜形成が始まる前に、水素化物が凝集したように見える。
- ・Zrライナー層のZry被覆管からの剥離は観察されなかった。Zrライナー層の厚さは、製造時の厚さと同様である。Zrライナー層は、なめらかな表面をしている。Zrライナー層に、水素化物の凝集が観察される。それらは、Zrライナー層とZry被覆管接触面のZrライナー層側で見られている。Zrライナー層にある著しい局所腐食(水素化物)は、燃料ペレットの大きなクラック部に対応している。(図2.2.6A-D)

232mm位置の被覆管の水素化物を、図2.2.1及び2.2.2に示す。水素化物は、被覆管外周部に見られる。Zrライナー層とZry被覆管接触面から被覆管肉厚の15~20%の部分にある水素化物は、自由な状態にあるため、水素化物は、被覆管壁の冷却材側へ急激に移動し、濃度が増加する。被覆管肉厚の10~15%の被覆管外周部分の水素化物体積率は、約30vol.%まで増加している。

被覆管の燃料側に面しているZrライナー層に水素化物が見られる。それらは、Zrライナー層とZry被覆管接触面付近で濃くなっている。

冷却材側腐食部で、被覆管外周部の減肉が数カ所観察される。しかし、被覆管減肉をもたらした腐食部の水素化物は、図2.2.2に示すように一般的な水素化物模様と変わりはない。

図2.2.2を見ると、被覆管肉厚部の相対的な水素化物濃度は、スポット状に生じた腐食部の下や他の領域の被覆管外周部と大差はない。

462から478mm間の被覆管の水素化物の縦断面金相写真を図2.2.6に、図2.2.6の被覆管内外面詳細観察結果を図2.2.7及び2.2.8にそれぞれ示す。水素化物濃度は、被覆管の水側付

近で濃くなっている。

Zrライナー層に数カ所、局所的な著しい腐食（水素化物）が観察された。このZrライナーの腐食部分は、燃料ペレットの大きなクラックに対応して観察されている。

図2.2.6及び2.2.7を見ると、著しい酸化が被覆管の冷却材側で見られ、約30%の酸化による被覆管肉厚減少が観察される。プリスタの成長が始まり、拡大し、水素化物濃度が高い領域が観察された。プリスタ周囲の水素化物濃度は、図2.2.7Aに見られるとおりであり、参考文献(2)で述べているプリスタと同様である。

401mm及び513mm位置の被覆管水素化物を、図2.2.3～2.2.5, 2.2.9及び2.2.10にそれぞれ示す。水素化物と冷却材側の酸化物は、前述したものと同様の形態である。被覆管金相試験の結果、図2.2.3の90度方向で最大70%の減肉が見られた。図2.2.10を見るとZrライナーに水素化物が観察される。

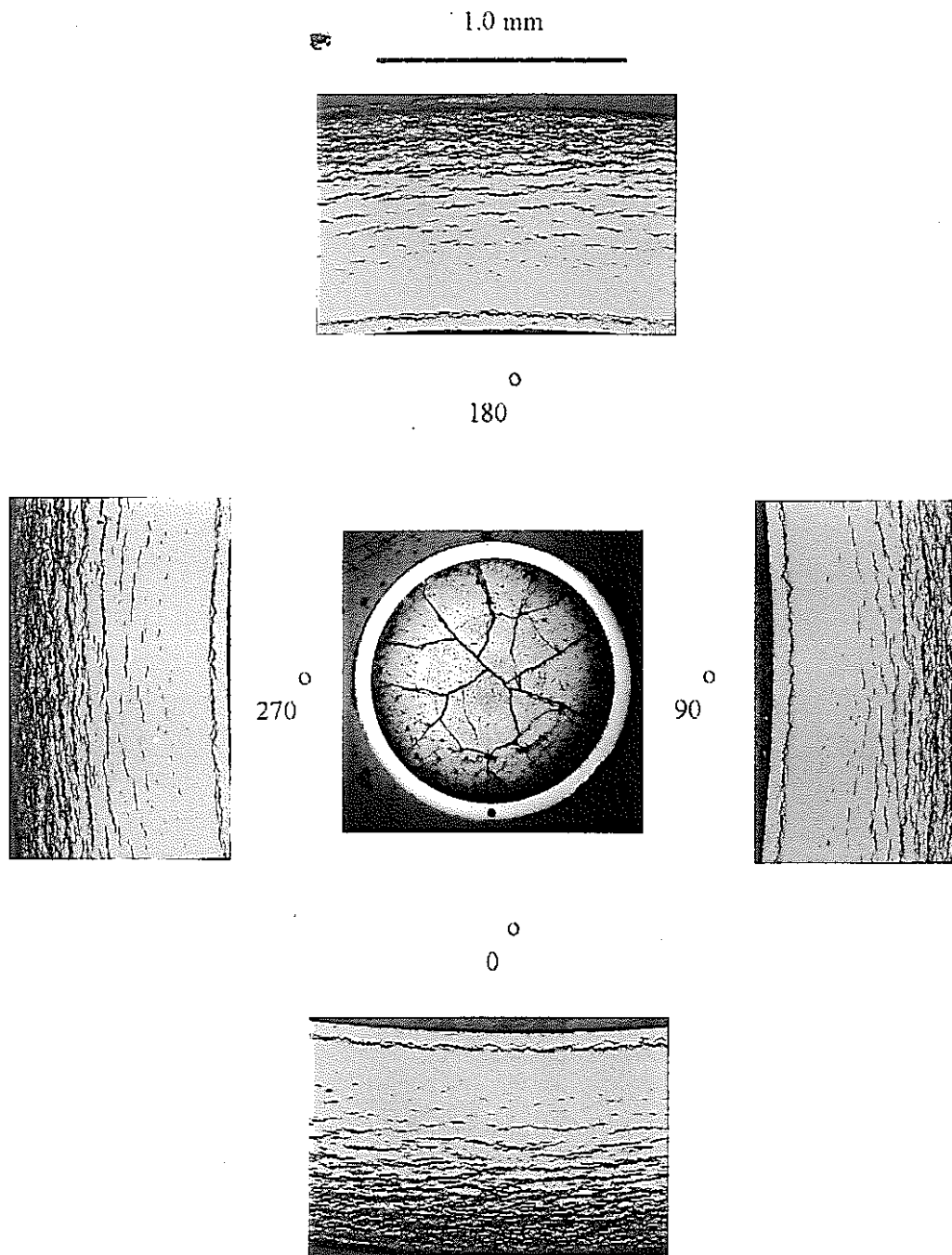


図2.2.1 被覆管の水素化物 横断面、エッチング研磨 IFA-555-1, 232mm位置

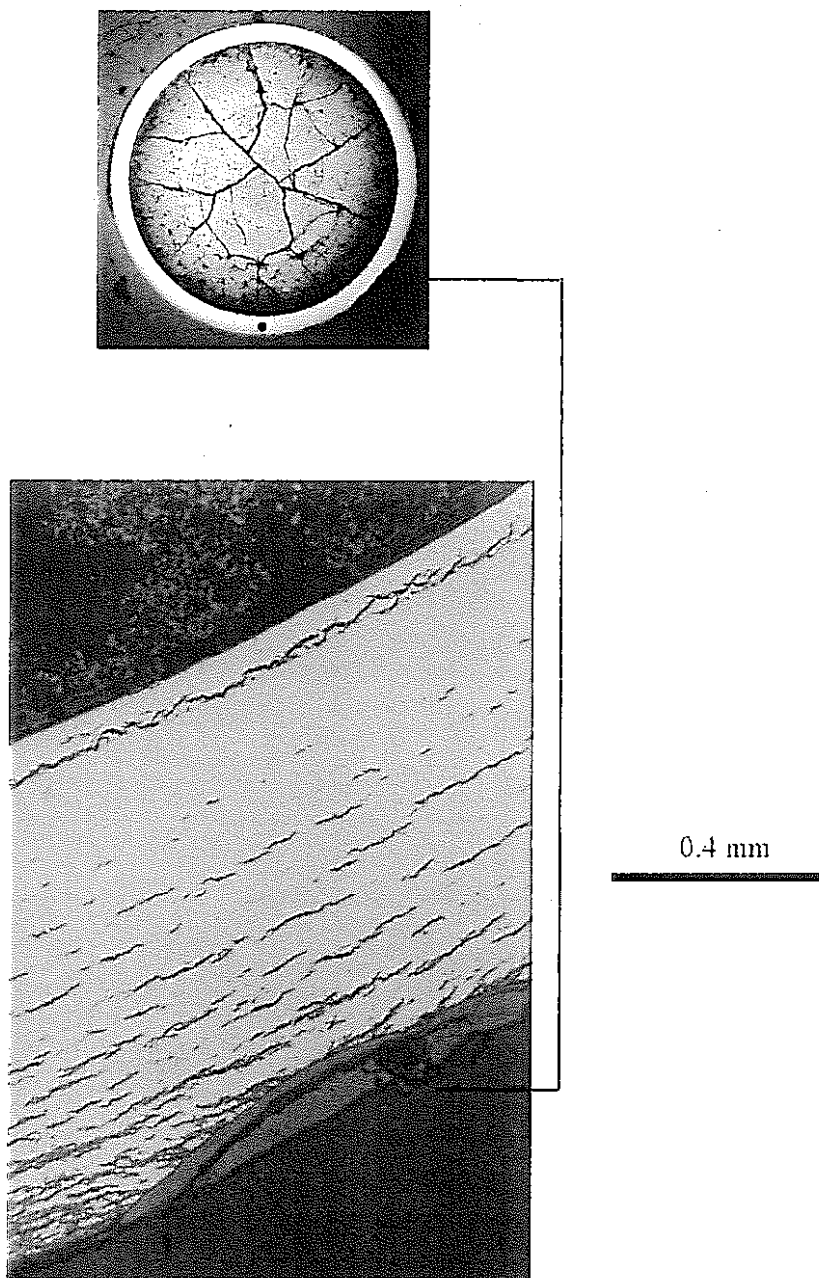


図2.2.2 被覆管の水素化物 図2.2.1の詳細 IFA-555-1, 232mm位置

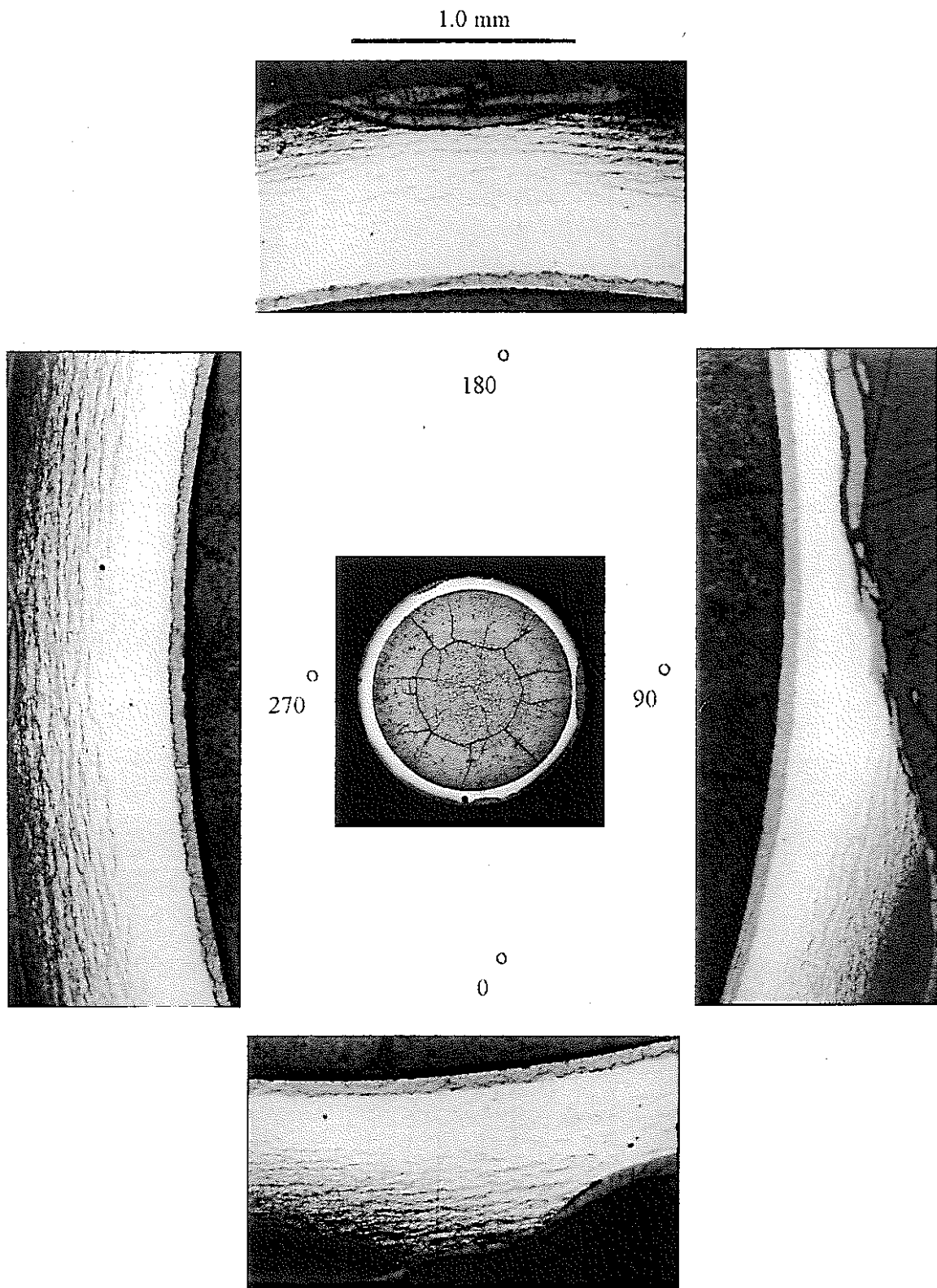
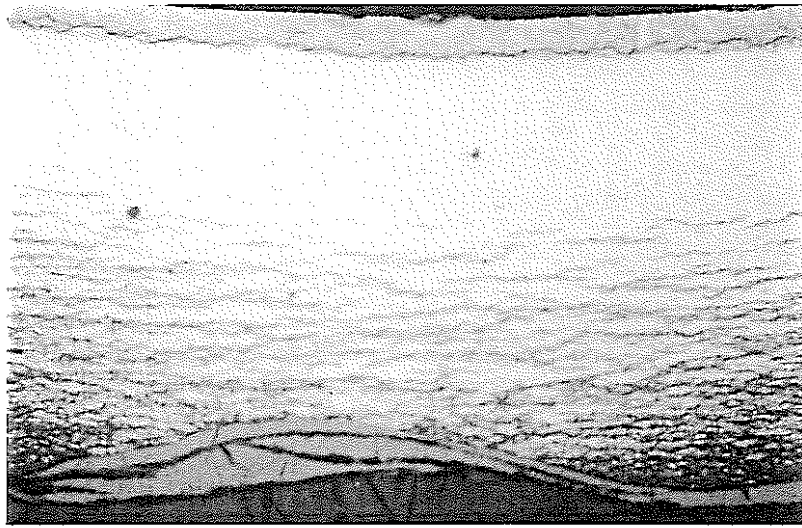
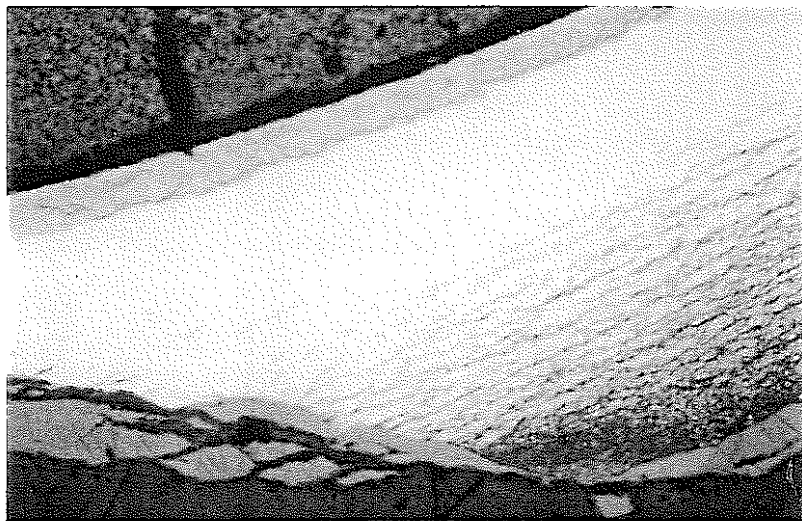


図2.2.3 被覆管の水素化物 横断面、エッチング研磨 IFA-555-1, 401mm位置

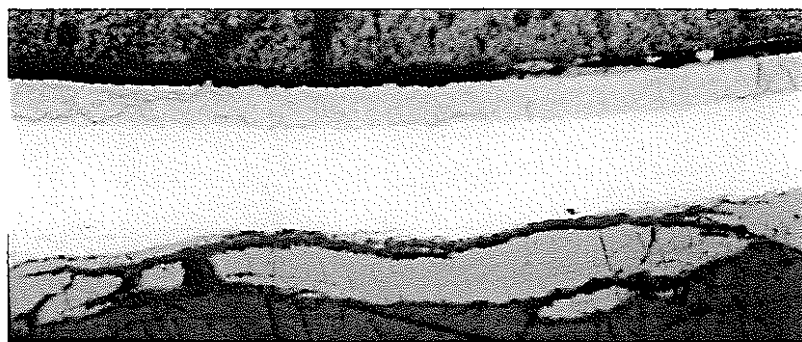
0.4 mm



○
270



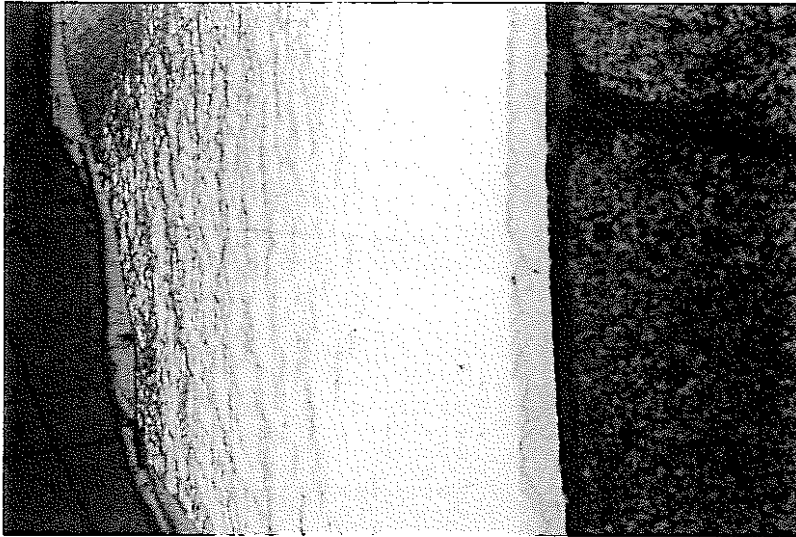
○
90



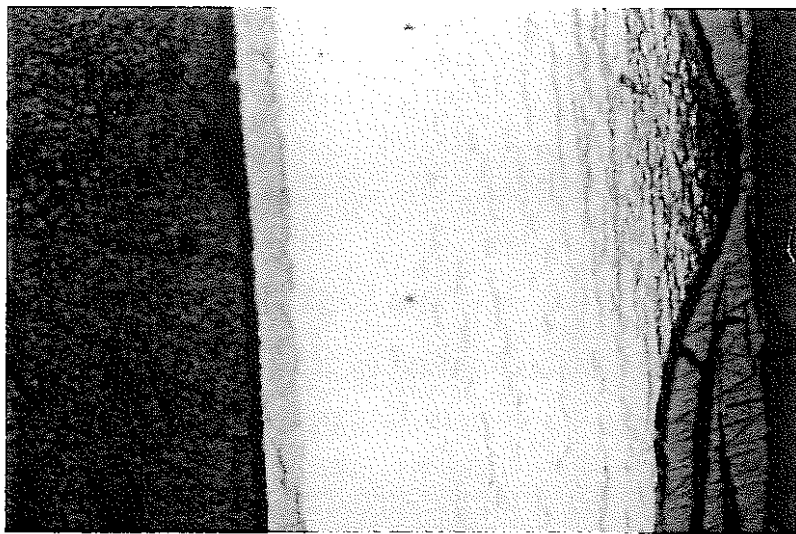
○
90

図2.2.4 被覆管の水素化物 図2.2.3の詳細 IFA-555-1, 401mm位置

0.5 mm



0



180

図2.2.5 被覆管の水素化物 図2.2.3の詳細 IFA-555-1, 401mm位置

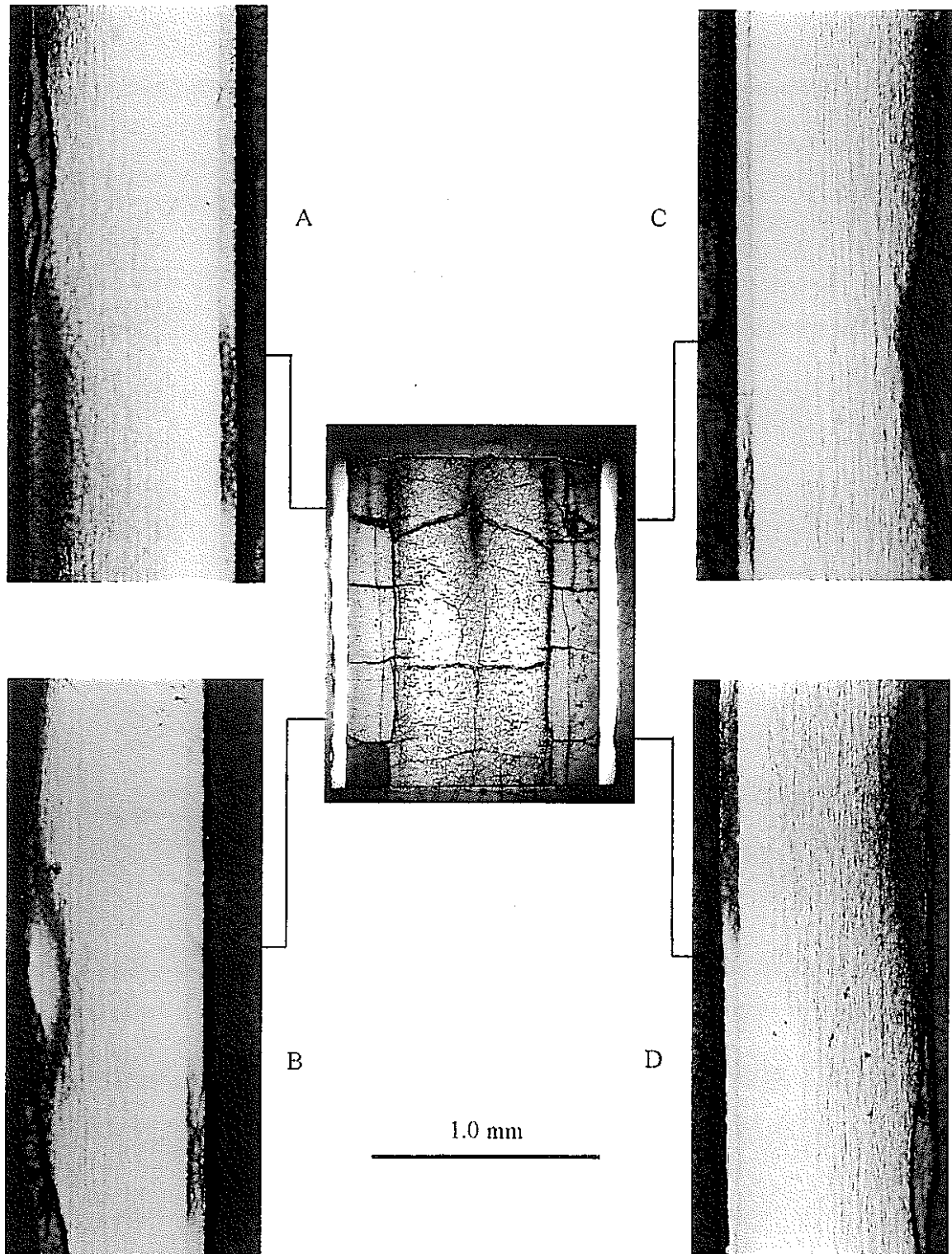
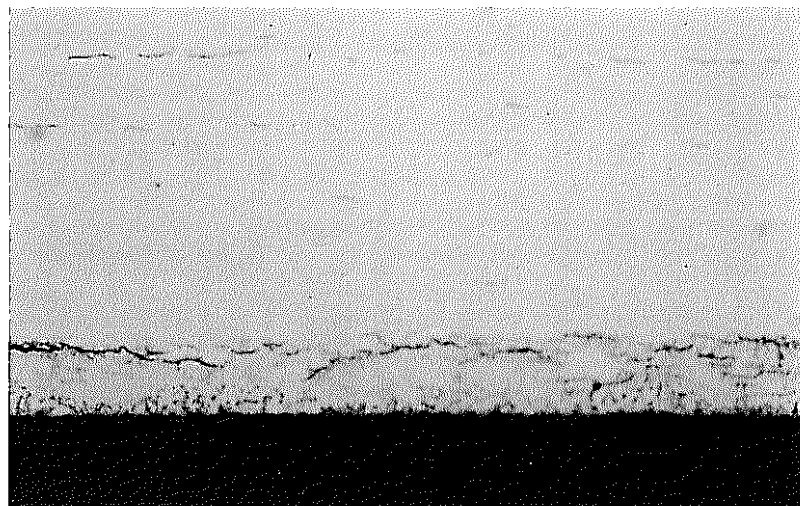
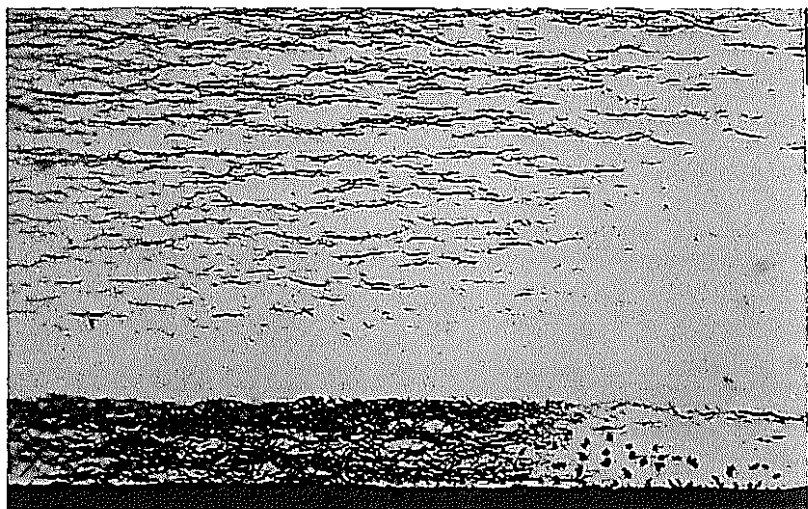
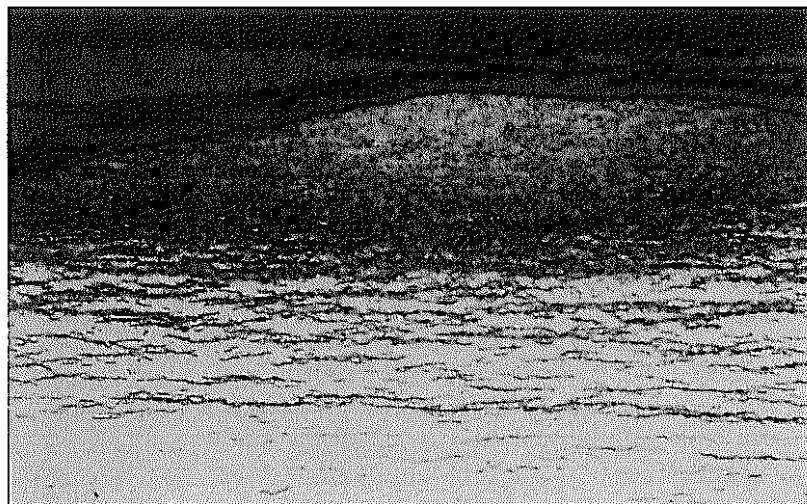
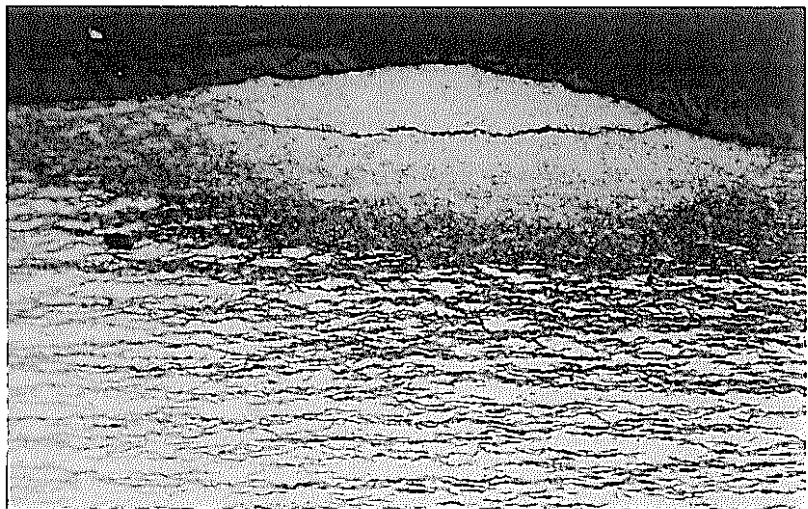


図2.2.6 被覆管の水素化物 縦断面、エッチング研磨 IFA-555-1, 462-478mm位置



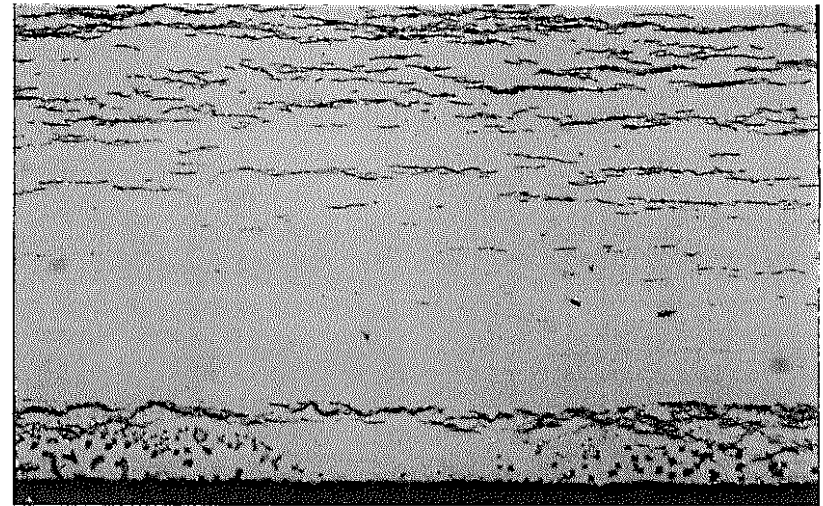
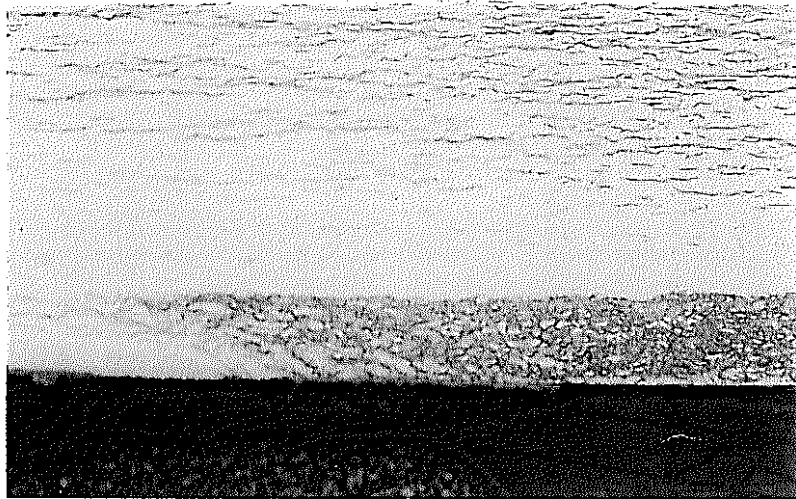
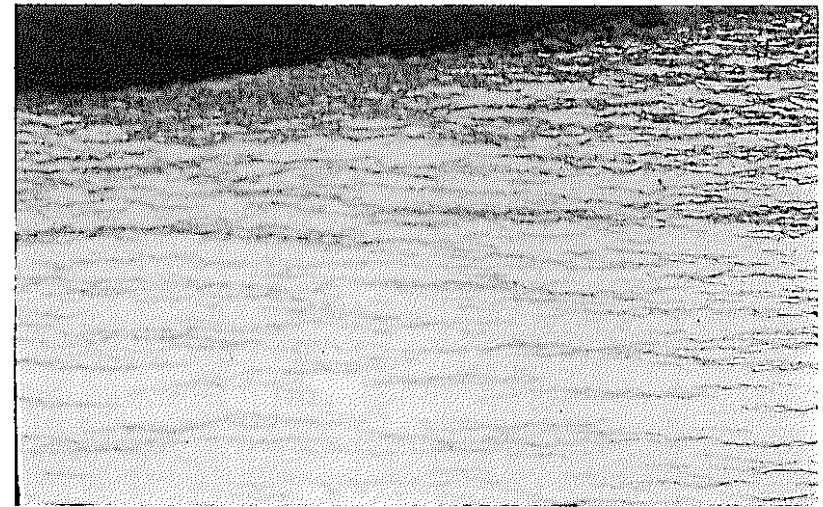
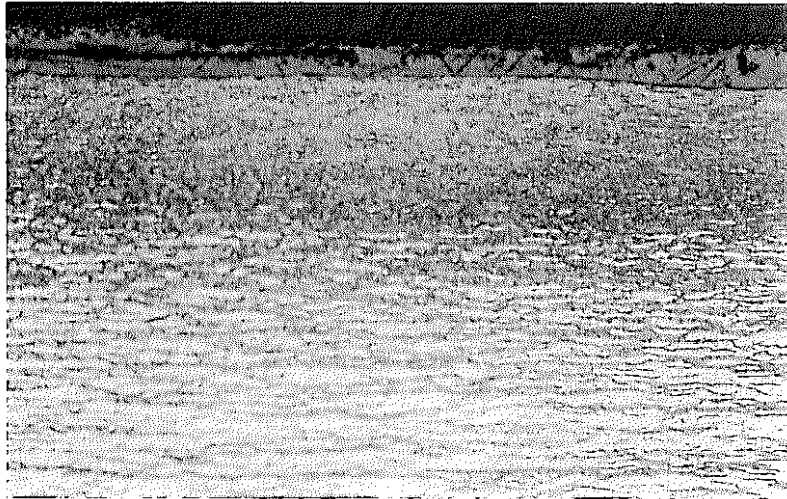
A

B

PNC TN8410 95-211

0.25 mm

図2.2.7 被覆管の水素化物 図2.2.6の詳細 IFA-555-1, 462-478mm位置



C

D

0.25 mm



図2.2.8 被覆管の水素化物 図2.2.6の詳細 IFA-555-1, 462-478mm位置

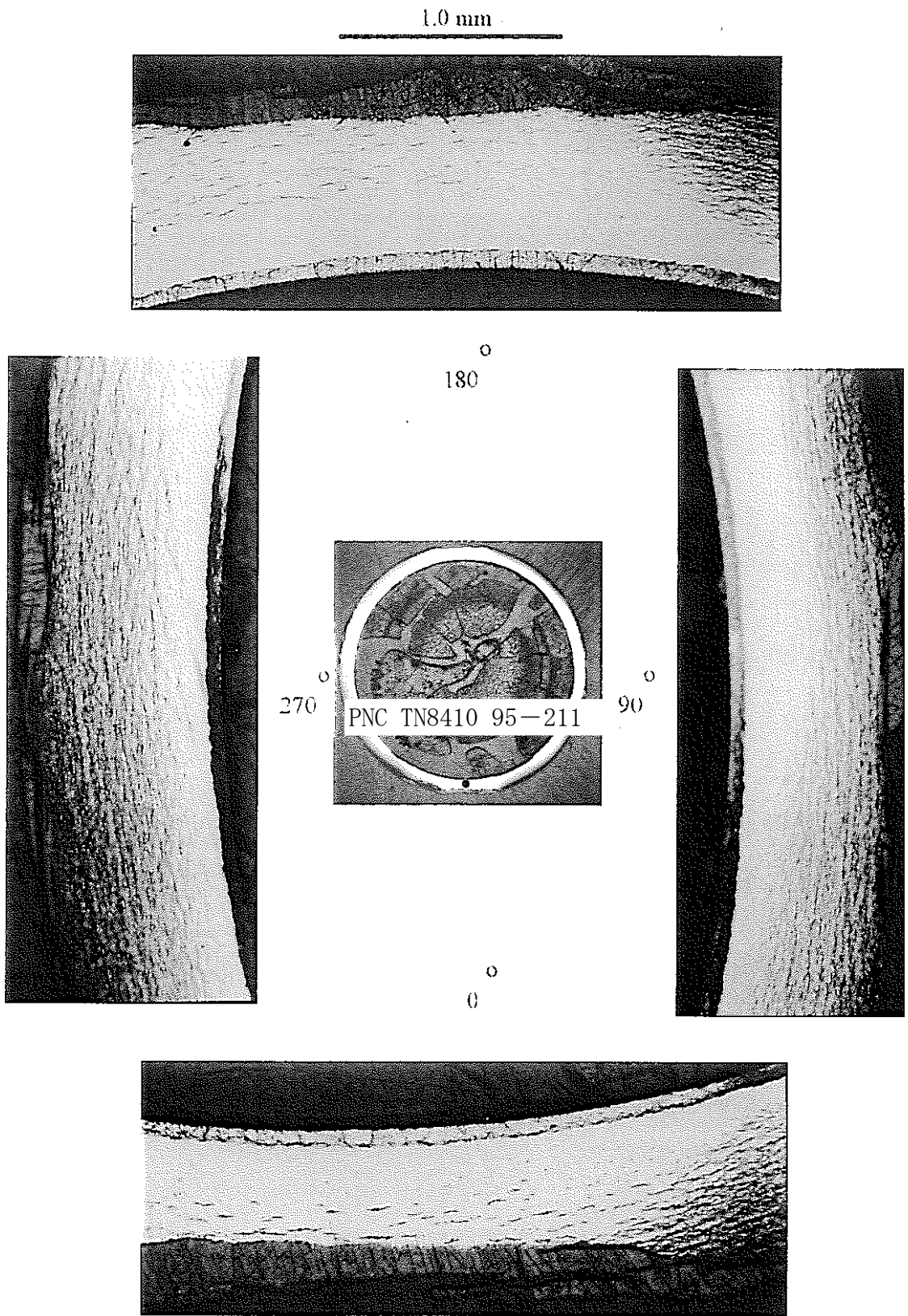
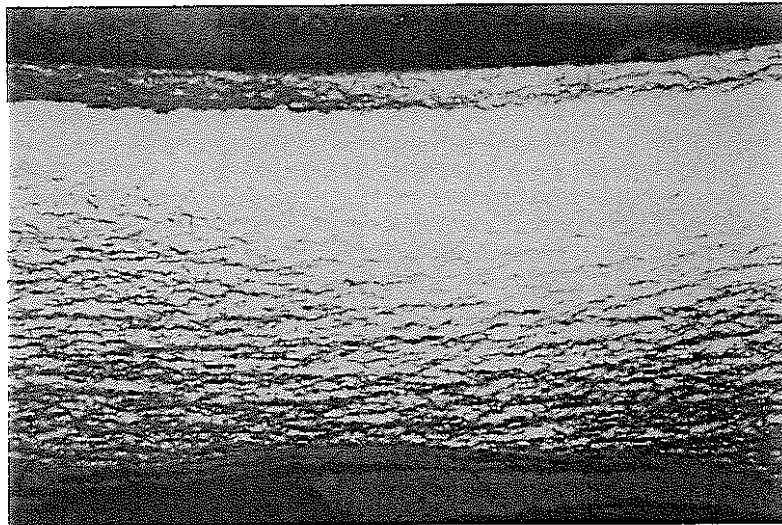
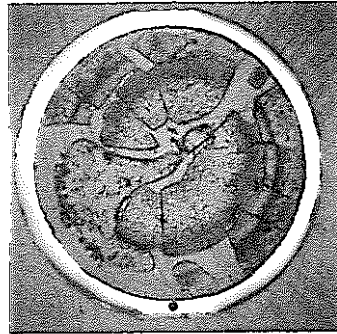
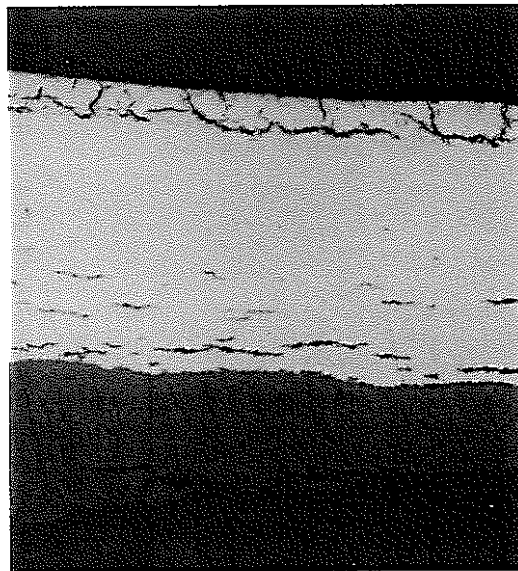


図2.2.9 被覆管の水素化物 横断面、エッチング研磨 IFA-555-1, 513mm位置



0
90



0
0

0.5 mm

図2.2.10 被覆管の水素化物 図2.2.9の詳細 IFA-555-1, 513mm位置

2.3 被覆管の酸化膜—冷却材側、燃料ペレット側

燃料棒IFA 555-1の研磨した断面として、232mm（横断面）、401mm（横断面）、465-478mm（縦断面）、509mm（横断面）を準備した。冷却材側酸化膜を示す顕微鏡写真に燃料ペレット断面写真を添付し、位置関係が分かるようにした。酸化膜の詳細を、たとえば厚さの変化及びノジュラー腐食（発見時点で）のような、顕微鏡写真に示した。特筆すべきは、Zrライナーの燃料ペレット側に酸化が見られることである。

232mmでの横断面には、全般的に被覆管外周にかなり均一で、濃い冷却材側の酸化膜が見られる（図2.3.1）。酸化物とジルカロイ界面及び酸化皮膜が剥離している近くで、酸化膜にクラックが発生している。腐食を受けて被覆管の厚さが減少した大きな領域と2、3の小さな領域及びレンズ状酸化物（ノジュラー腐食）が見られる。図2.3.2に詳細を示す。同様の部分には、白い酸化物（図中矢印で示す）も見られる他、レンズ状の酸化物の中にクラックが見られる。あるものは被覆管の周方向に平行に、またあるものは半径方向に見られる。232mm横断面のZrライナーの燃料ペレット側に、非常に薄く、不連続で、多孔質な酸化膜が見られる。図2.3.3に詳細を示す。燃料ペレット側には、酸化物が燃料ペレットと干渉（結合）したと思われる部分がある（図2.3.3b,c,d）。また別の部分では、小さなレンズ状の酸化物が、Zrライナー厚さを僅かに減少させている（図2.3.3b,e,f）。

図2.3.4、2.3.5に401mm横断面の冷却材側の酸化膜を詳細に示す。形成される酸化物のタイプはほとんどの場合、黒く濃い酸化物である。腐食の厳しい部分（レンズ状酸化物）では、白い酸化物の薄膜（図中矢印で示す）が、多くの場合クラックの近くで、もしくは、クラックにつながって、黒い酸化物の中に見られる。酸化物は、232mmで見られたものと同様である。しかしながら、冷却材側の腐食及び酸化物の形態は、232mmよりも401mmにおける方が遥かに厳しいように考えられる。3つは厳しく、5つは大きな腐食が見られる。それらの腐食はレンズ状の酸化物を伴い、被覆管の厚さをかなり減少させている。401mmの横断面の燃料ペレット側の酸化膜については、前述の図2.3.3と同様である。

図2.3.6、2.3.7に462-478mmの縦断面での被覆管の冷却材側の酸化膜を詳細に示した。被覆管のこの部分は、基本的には2種類の酸化膜で覆われている。1種類は、Zry2被覆管に密着した酸化膜で、顕微鏡写真上、黒く濃くなって現れている。最上層は、薄く、多孔質で、白っぽい（図中矢印で示す）。しかしながら、この試料では、被覆管のかなりの部分が相当に腐食しており、その部分では、被覆管厚さが特徴的に減少し、レンズ状の酸化物がある。クラックはレンズ状の酸化物の中にあり、あるものは被覆管の周方向に平行に、またあるものは半径方向を向いている。509mmにおいても酸化特性は同様である。

図2.3.8に462-478mmでの縦断面の燃料ペレット側Zrライナー上の酸化膜を詳細に示した。縦断面での燃料ペレット側の酸化膜は、図2.3.3に詳細を示したものと同一である。酸化膜と燃料ペレットの相互作用が、いくつかの場所で観察される（図2.3.8a, c, f 参照）。

図2.3.9、2.3.10に509mmの横断面の冷却材側の酸化膜を詳細に示した。2つの異なる酸化膜が観察される。主たる酸化膜は顕微鏡写真上、黒く、濃く現れている。薄い方の酸化膜（図中矢印で示す）が、黒い方の酸化膜の最上に、あるいは、中間の薄層として現れている。この酸化膜は、白く多孔質である。濃い層には、縦方向及び半径方向のクラックが見られる。酸化膜は厚さが非常に不均一である。分厚いスポット、レンズ状酸化物、次にくる被覆管厚さの減少が観察される。

図2.3.11に509mm横断面の燃料ペレット側の酸化膜を詳細に示した。Zrライナーの燃料ペレット側は薄い酸化膜に覆われている。酸化膜は燃料ペレットと相互作用していると考えられる。スポットでは、非常に薄い燃料ペレットの膜が、燃料ペレット側の酸化膜に結合していると考えられる。酸化物と燃料ペレットの結合が、燃料ペレット中のクラック（の発生に）につながっていることがしばしば観察されている。

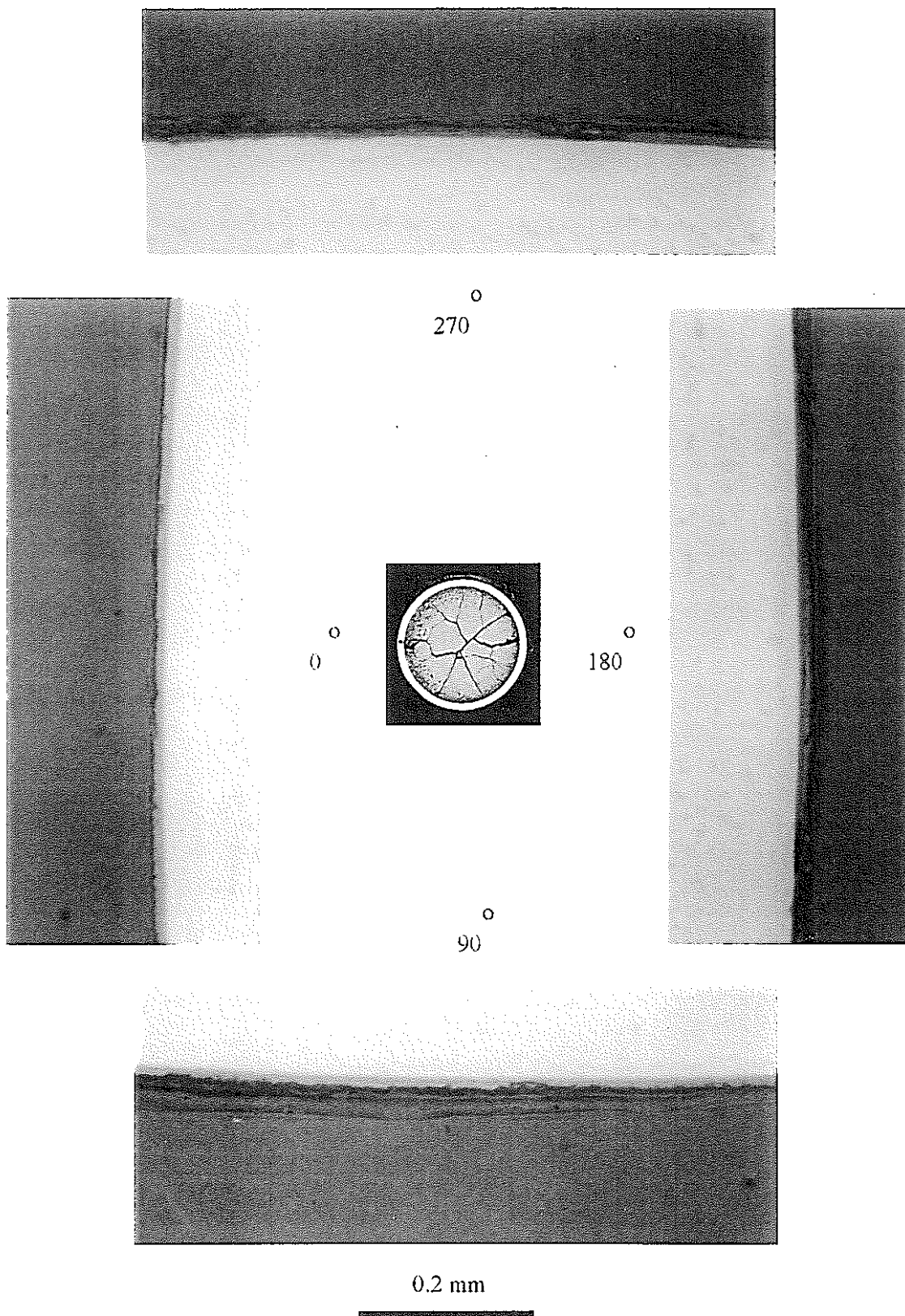
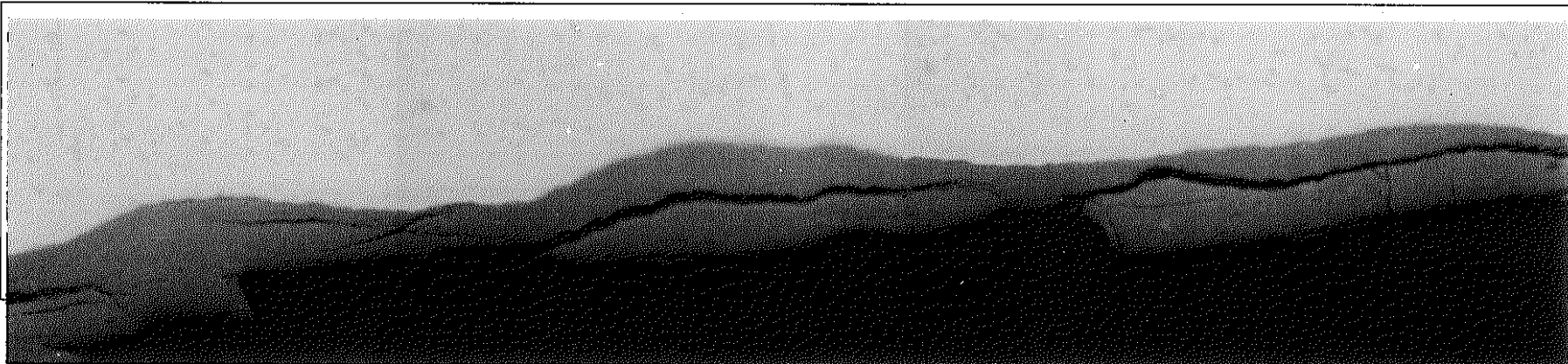
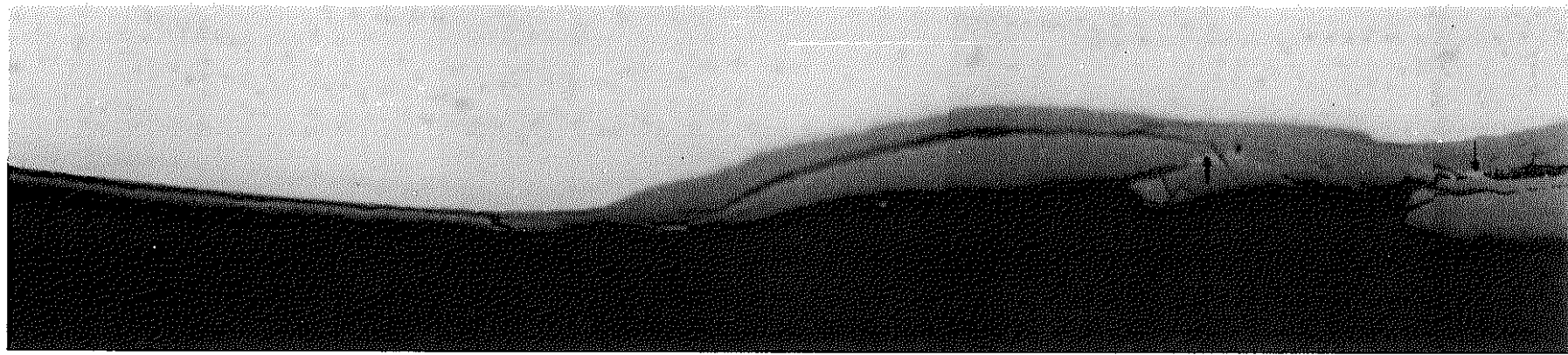
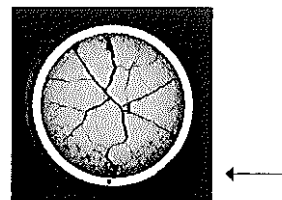


図2.3.1 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 232mm位置



0.2 mm

図2.3.2 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 232mm位置

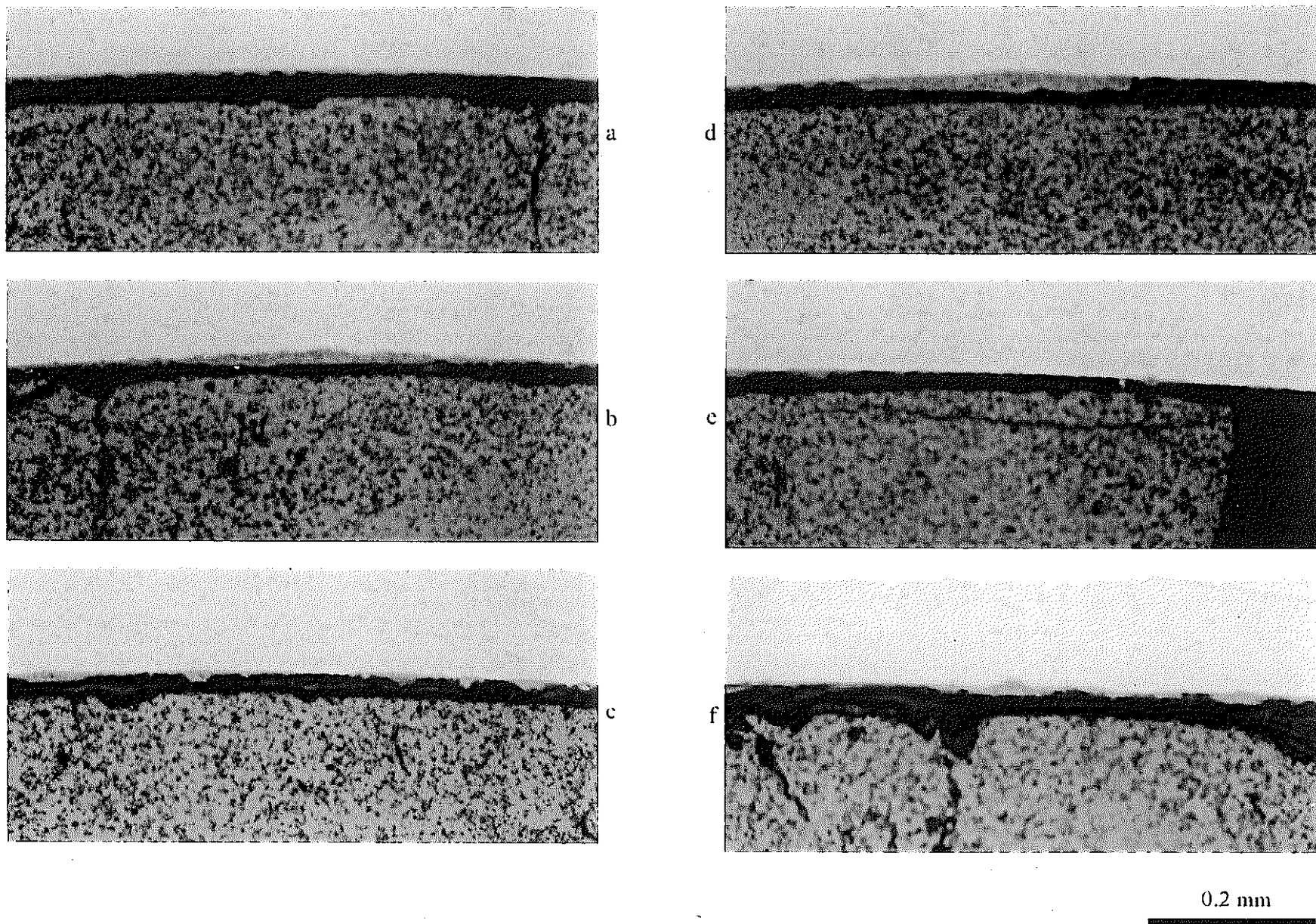


図2.3.3 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 232mm位置

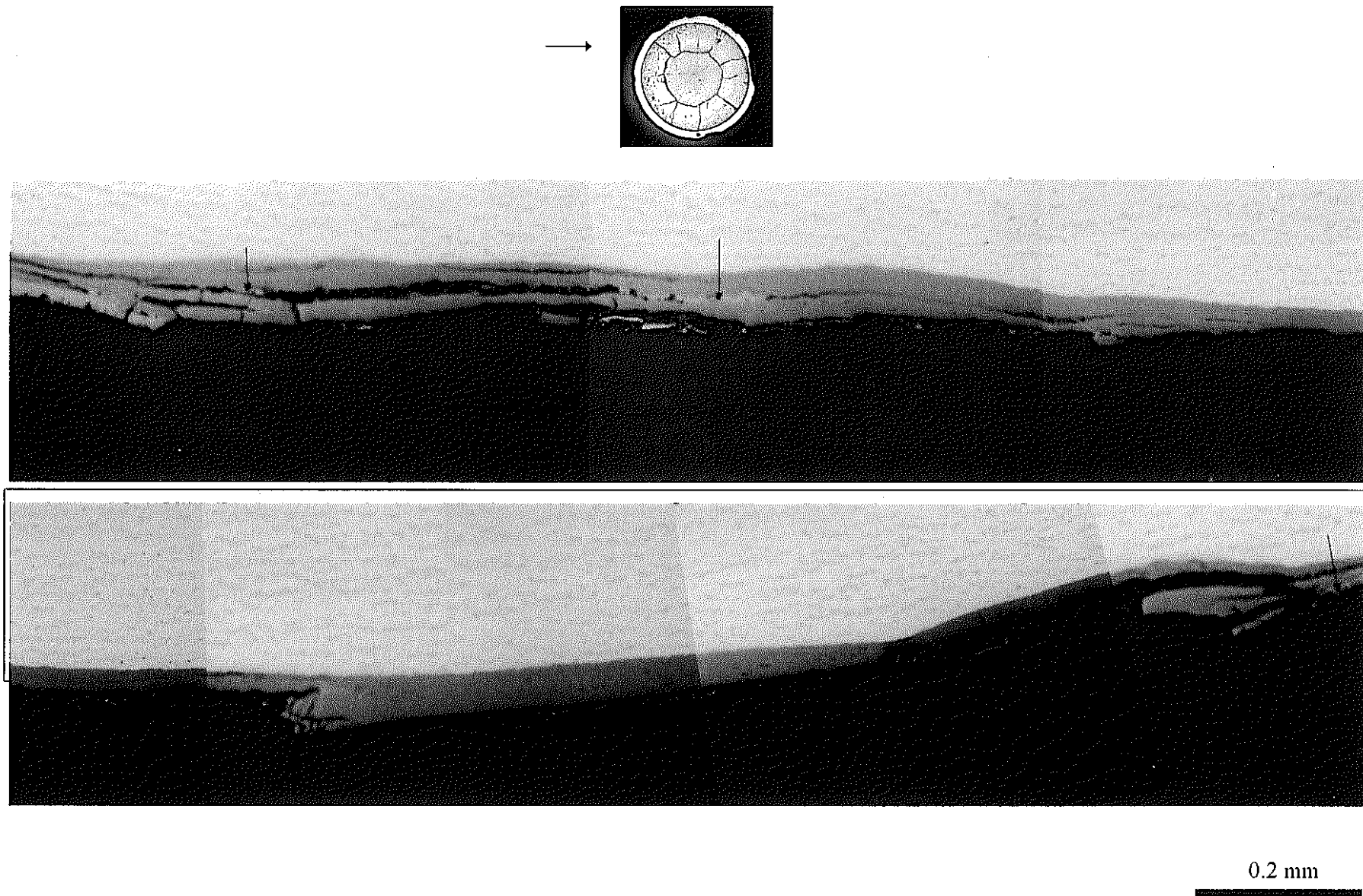
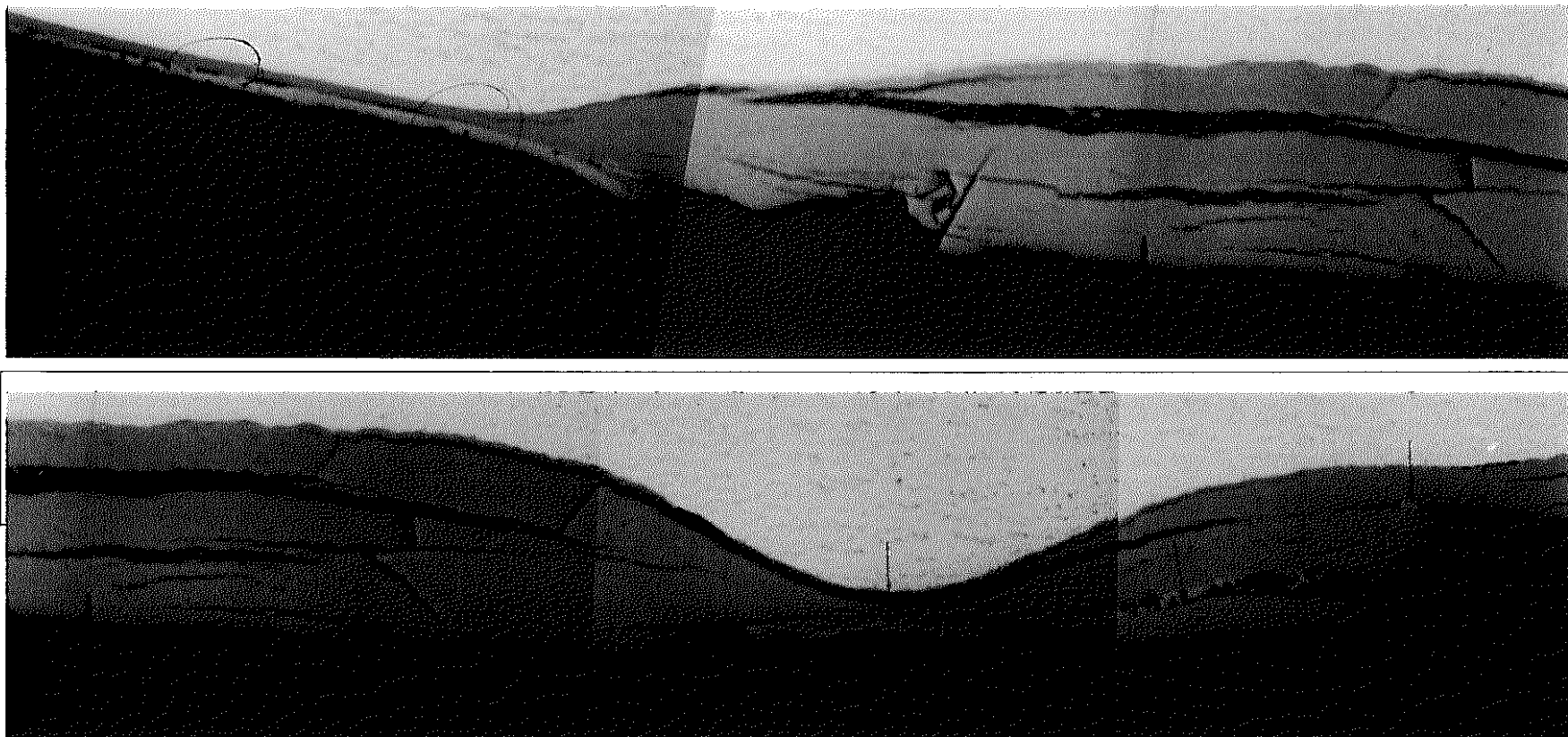
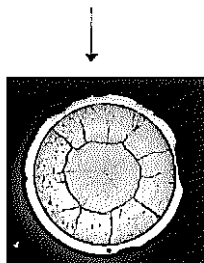


図2.3.4 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 401mm位置



0.2 mm




図2.3.5 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 401mm位置

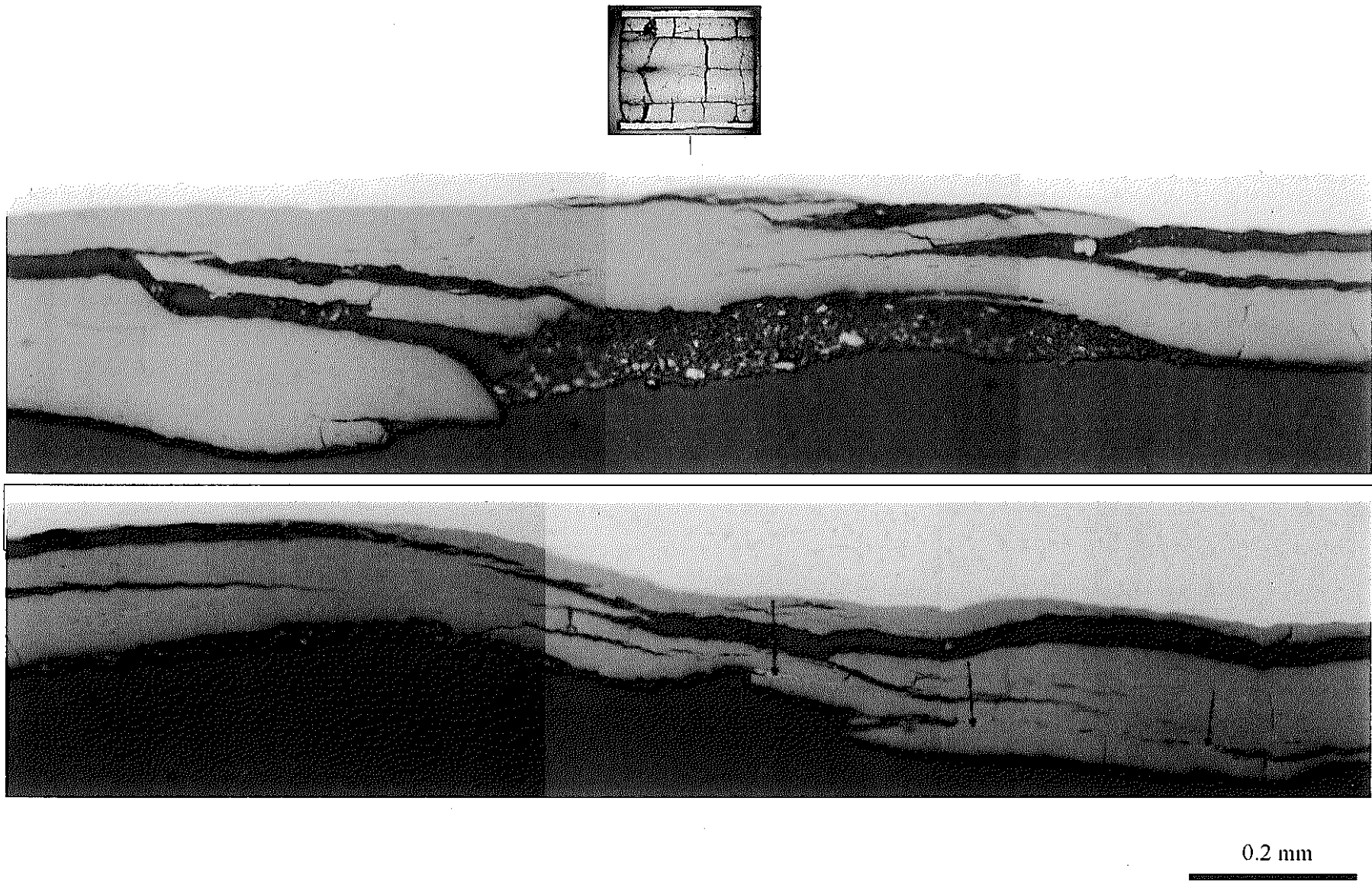


図2.3.6 被覆管の冷却材側の酸化物層 縦断面、研磨 IFA-555-1, 462-478mm位置

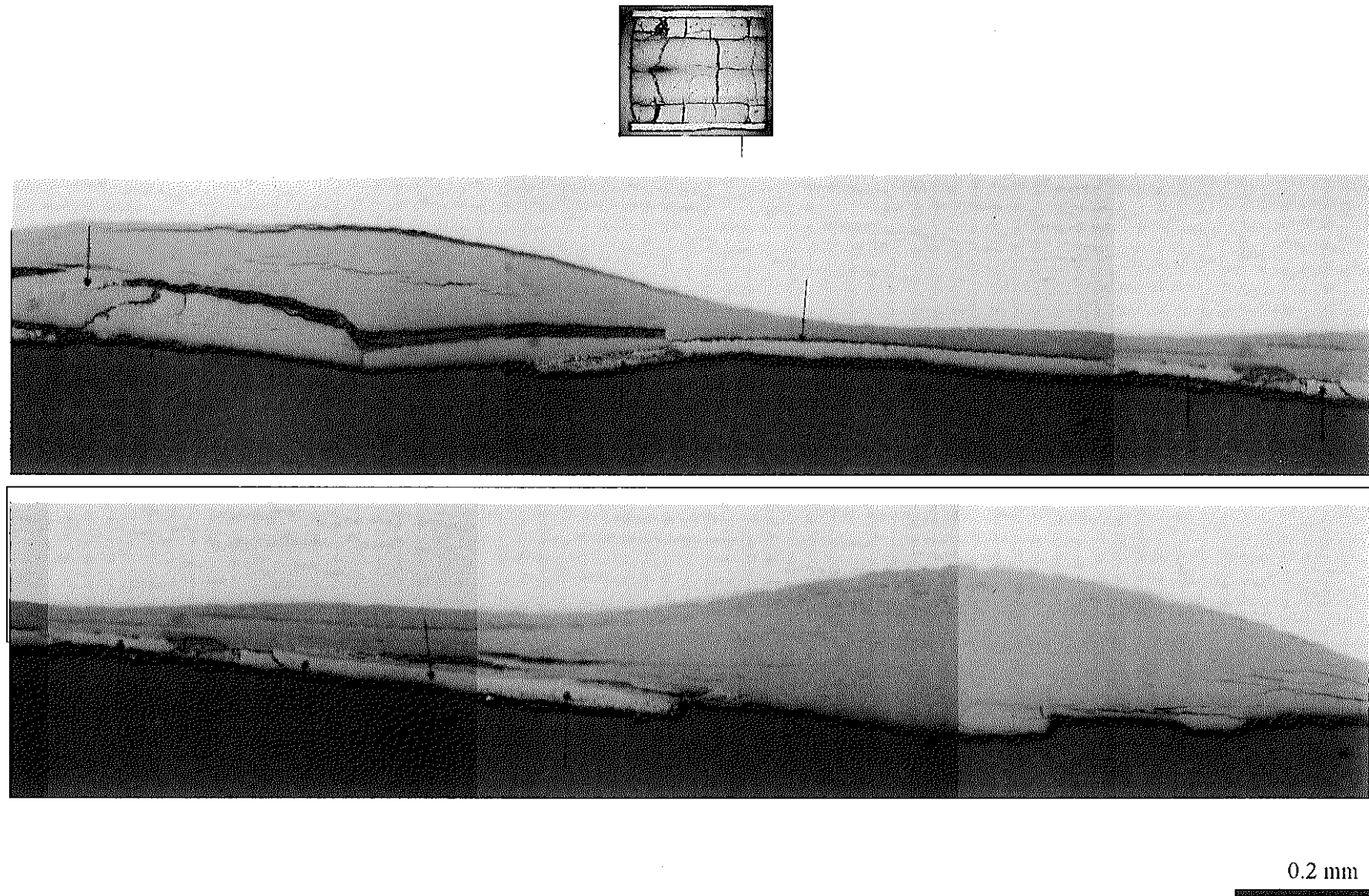


図2.3.7 被覆管の冷却材側の酸化物層 縦断面、研磨 IFA-555-1, 462-478mm位置

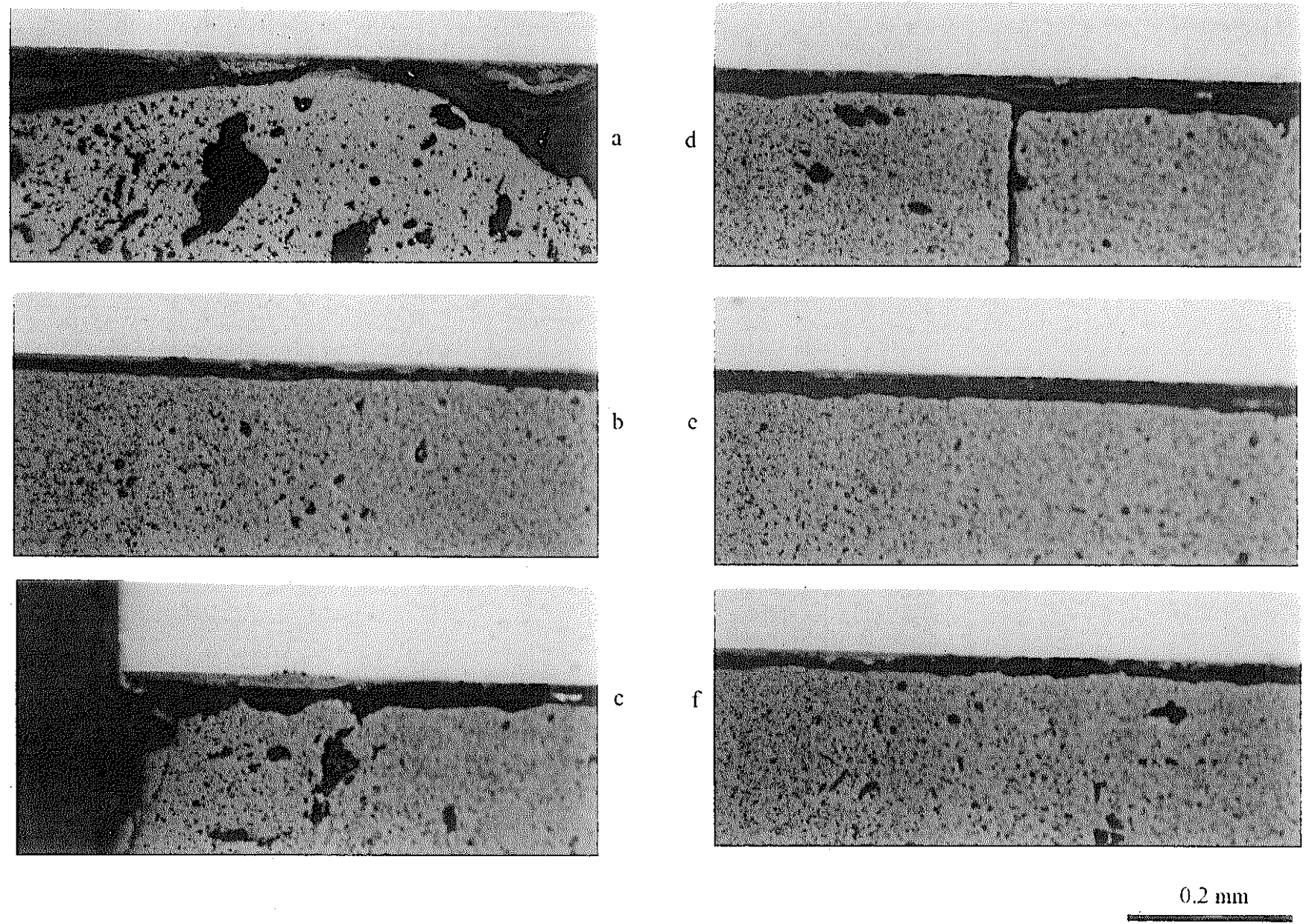


図2.3.8 被覆管の冷却材側の酸化層 縦断面、研磨 IFA-555-1, 462-478mm位置

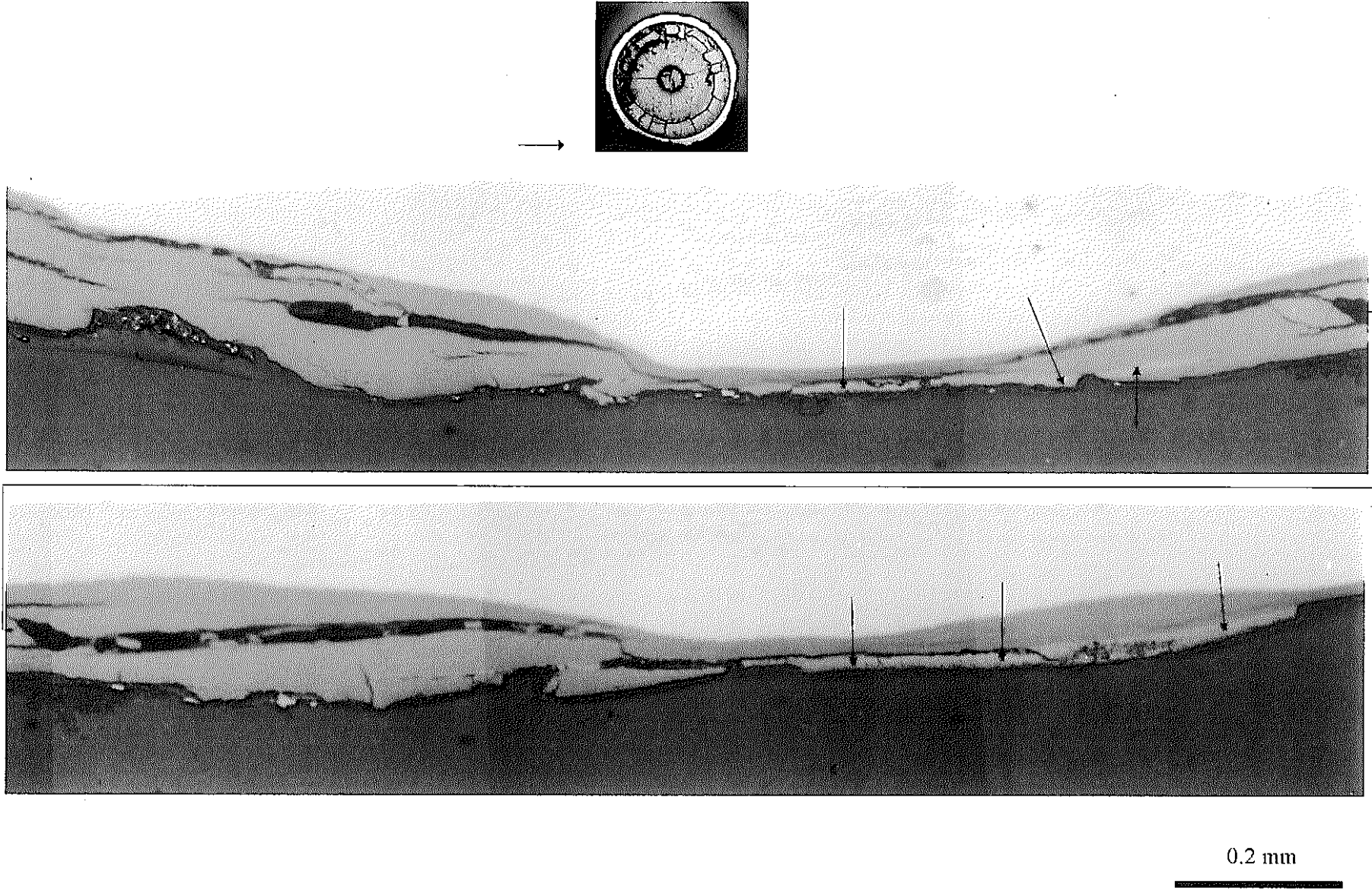


図2.3.9 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 509mm位置

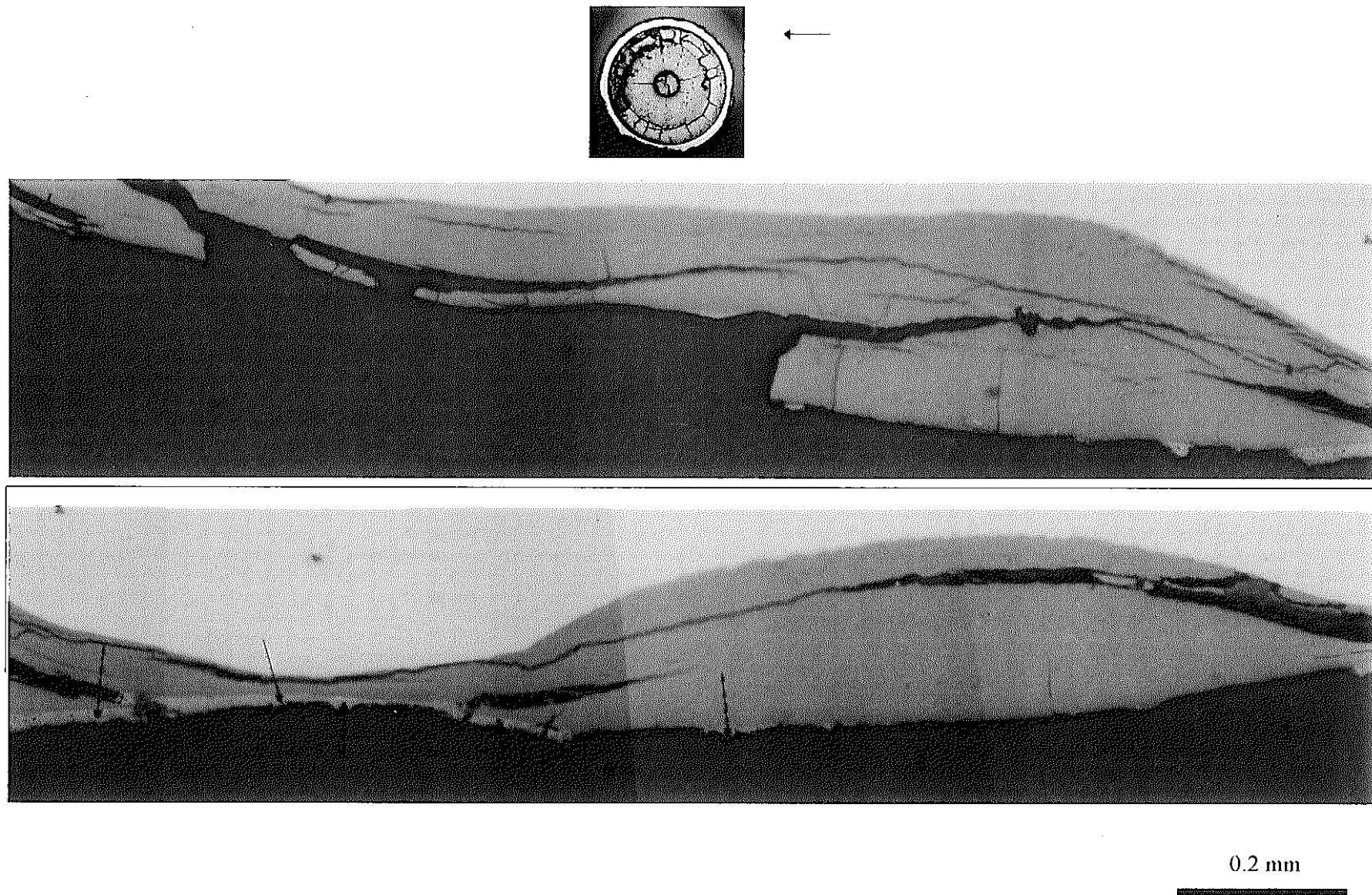


図2.3.10 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 509mm位置

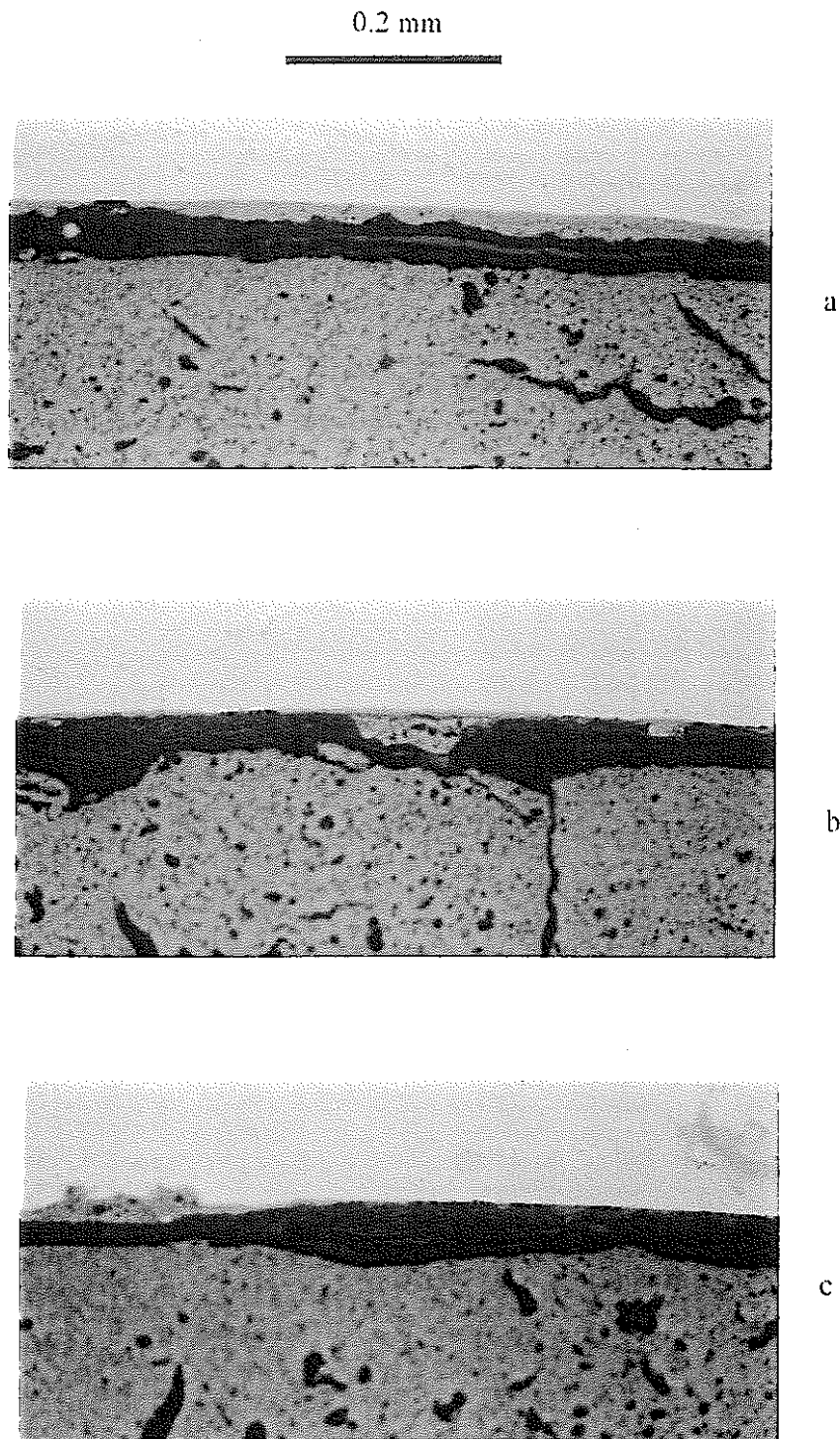


図2.3.11 被覆管の冷却材側の酸化物層 横断面、研磨 IFA-555-1, 509mm位置

2.4 燃料ペレットのミクロ観察

燃料ペレット中のポア、ボイド、クラック及び核分裂生成物を研磨した半径方向の断面の外観顕微鏡写真に示す。半径方向の興味ある部分について、微細構造の詳細写真を得た。232mm (図2.4.1-2.4.5)、401mm (図2.4.8-2.4.12)、462-478mm (図2.4.15-2.4.19) 及び509mm (図2.4.22-2.4.26) における断面の微細構造の変化を以下に示す。半径方向にペレットの端から中心へ向かって、ポアのサイズ、形状、分布、金属核分裂生成物のサイズ、濃度、及びセンターボイドの直径の変化を観測した。

エッチングするとMOX燃料ペレット中に結晶粒界が現れる。これを図2.4.6-2.4.7 (232mm)、図2.4.13-2.4.14 (401mm)、図2.4.20-2.4.21 (462-278mm)、及び図2.4.27-2.4.28 (509mm) に示した。エッチングしたMOX燃料ペレットの顕微鏡写真の番号付け(例えば図2.4.1のC1-C5)は、燃料ペレットの半径方向の写真(B)における位置に対応する。しかしながら、詳細写真(C1-C5)は、研磨した燃料ペレットの半径方向のイメージ位置(B)よりわずかに外側にある。

4つの断面には以下の著しい特徴がある：

ポアサイズは、燃料ペレットの端部付近から中心に向かって大きくなる。ポアとボイドは結晶粒界上にある。結晶粒界の3重点に、ガスバブルに起因する小さいポアが析出しやすい。232mm (図2.4.1) 断面から509mm (図2.4.22) 断面に向かって、ポアサイズがかなり大きくなる。4つの断面を比較すると、下端のVノッチから燃料簿棒の上端に行くに従い、ポアサイズが著しく大きくなっている。しかしながら、このことはペレット外周部の未変化領域には当てはまらない。ペレット外周部の未変化領域は、半径の約15-20%に対応する厚さを有している。

結晶粒界及び3重点に選択的に析出している金属核分裂生成物は、以下のように、ポアと同様の挙動を示す。金属核分裂生成物のサイズは、ペレット外周部の未変化領域の内側から燃料ペレット中心に向かって明らかに大きくなる。しかしながら、燃料ペレットの端から燃料ペレット半径に測って最初の15-20%においては、極僅か、微少な金属核分裂生成物しか観察されなかった。燃料棒の上端での断面、すなわち462-478mm及び509mmでは、クラック付近に金属核分裂生成物が濃縮することが分かった(図2.4.24参照)。これらの微細構造の特徴は、555-1の非破壊試験に関する既報“IFEレポートNo. IFE/KR/ F-94/095, 1993”で報告したように、燃料棒の上端で測定されたアイソトープCs-137の γ 線強度の増加とよく一致している(図2.4.29-2.4.30参照)。

結晶サイズ、結晶形状、結晶中の小ポアの分布を調べた。ポアが小さいと、ほとんど残留した核分裂ガスがバブルの形態となっている。縦方向及び断面方向（509mm）の両方ともに、燃料ペレット中心近傍の細長い柱状晶のゾーン及び中心ボイドがある。細長い結晶が、低温の領域から中心の高温の領域に向かう明らかな結晶の成長方向を示している。

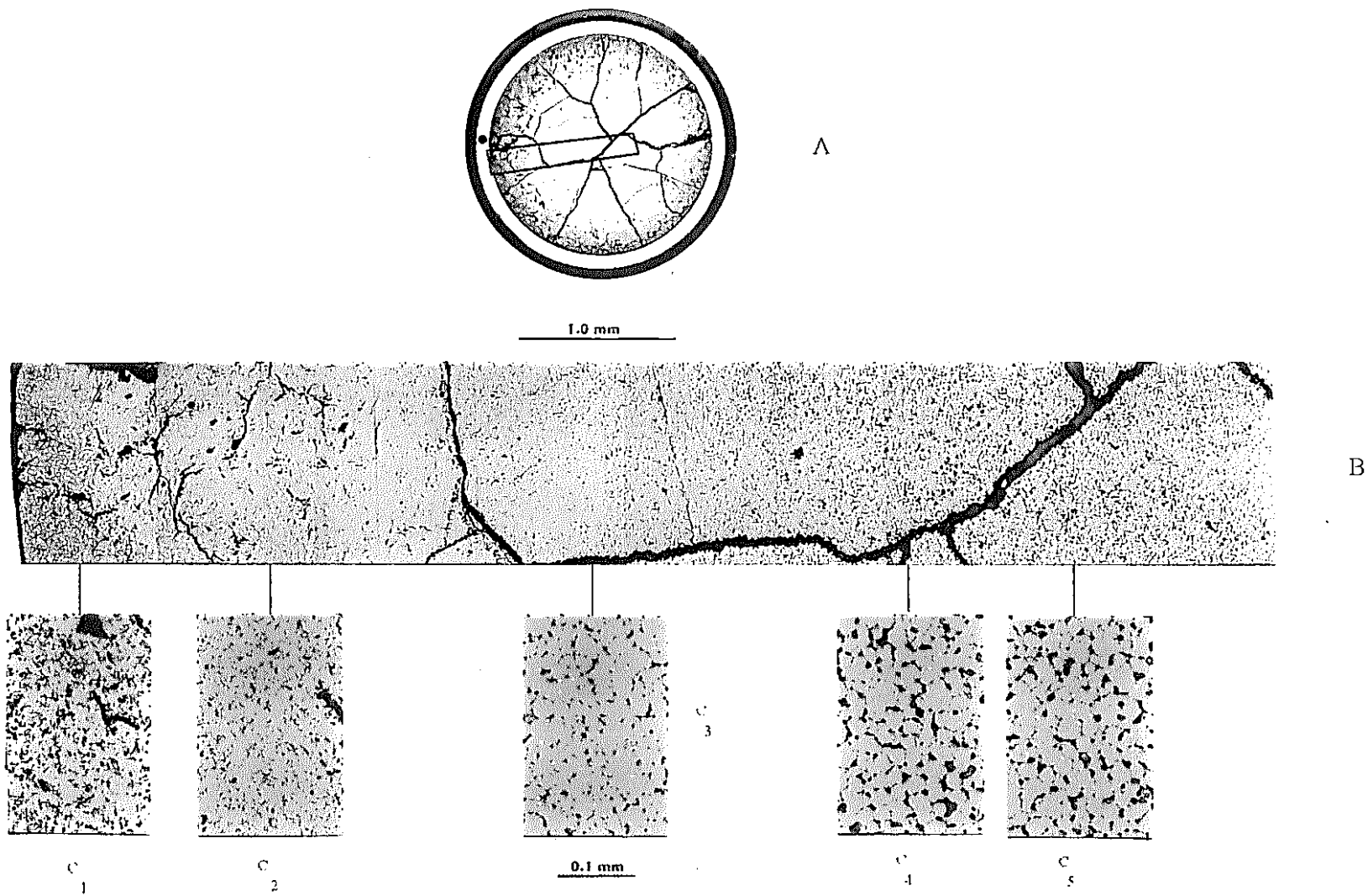


図2.4.1 燃料ペレット中のポア、ボイド、FP 横断面、研磨 IFA-555-1, 232mm位置
 (A)全体、(B)燃料ペレット半径方向、(c)詳細

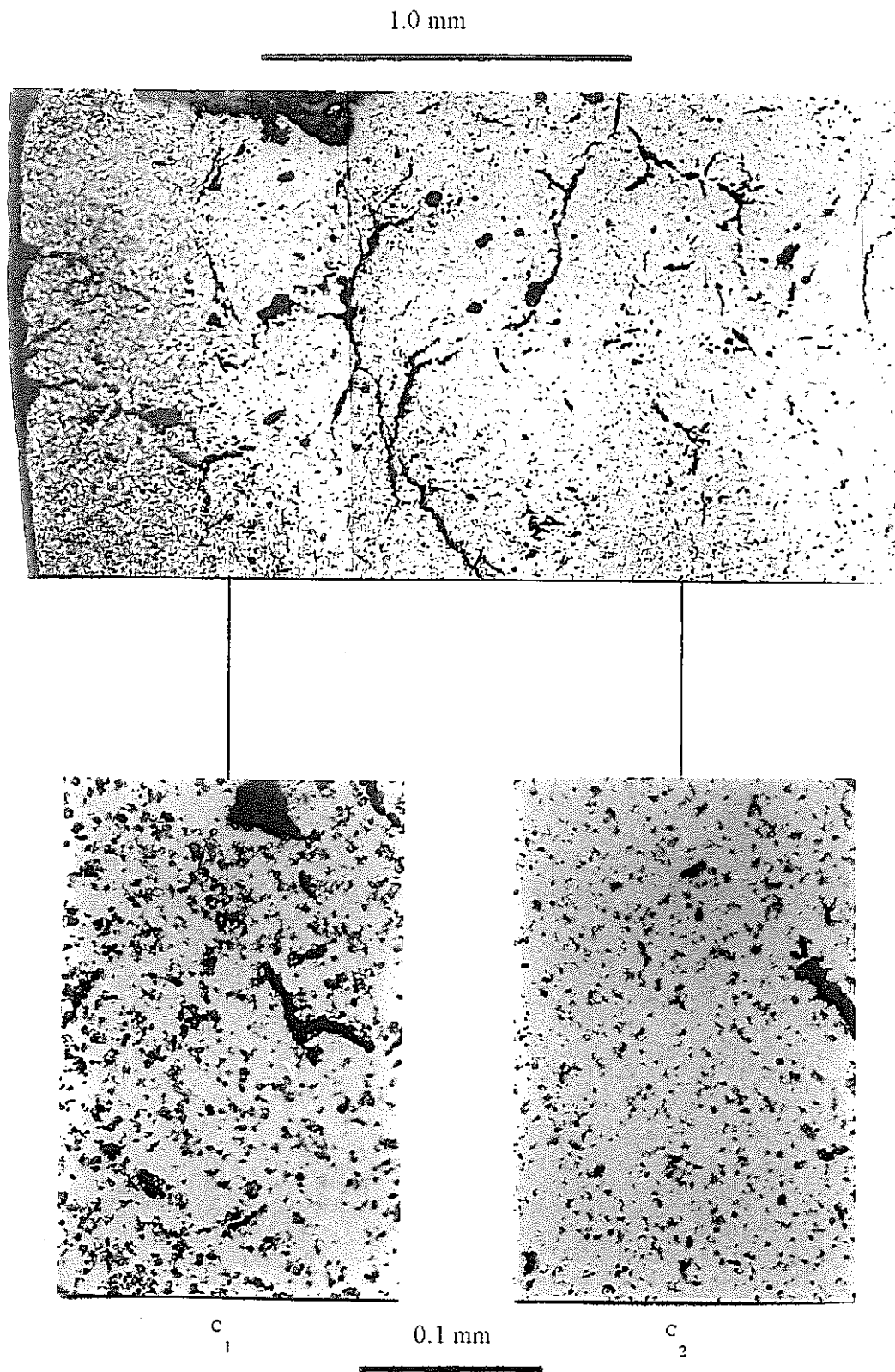


図2.4.2 図2.4.1の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 232mm位置

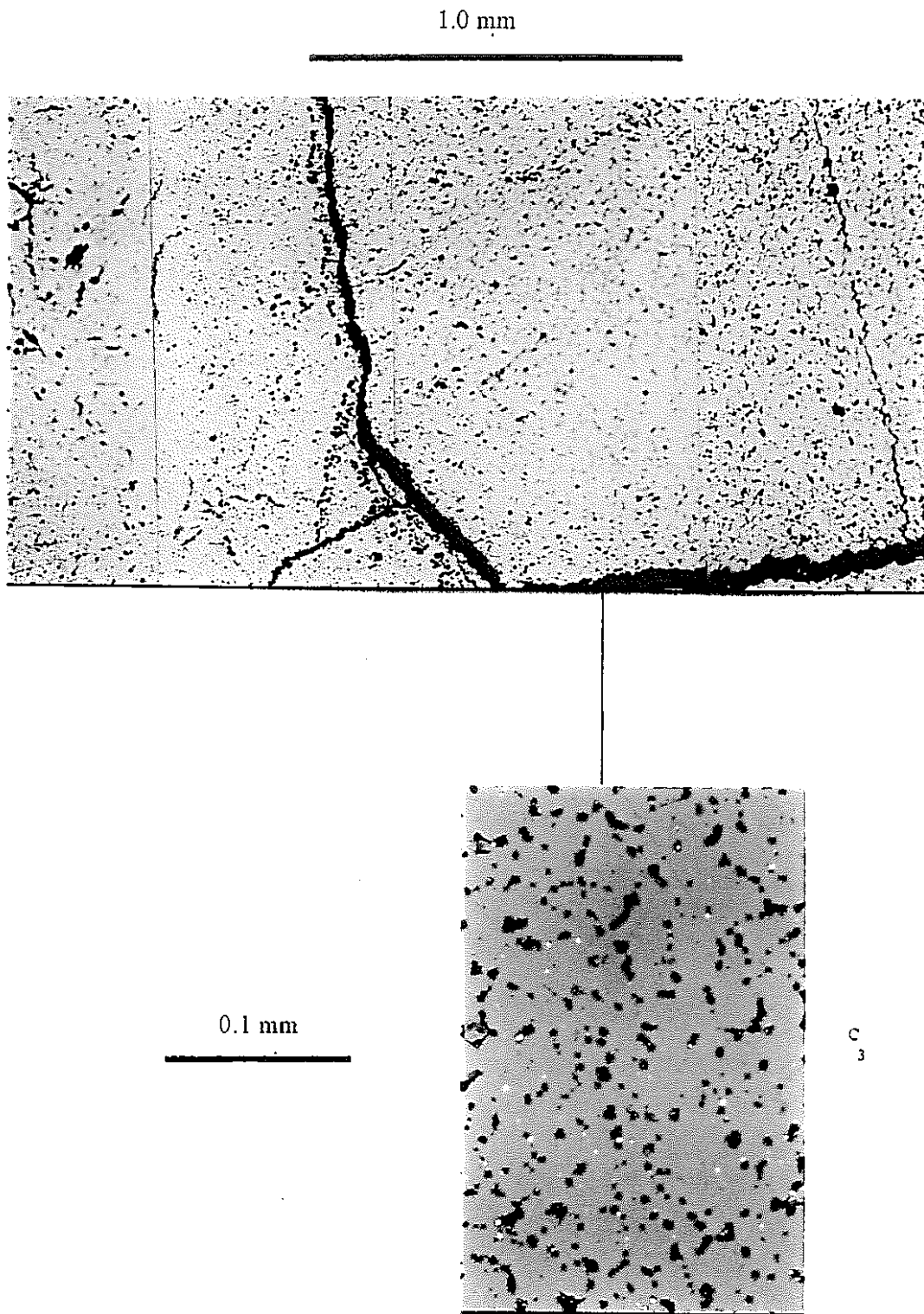


図2.4.3 図2.4.1の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 232mm位置

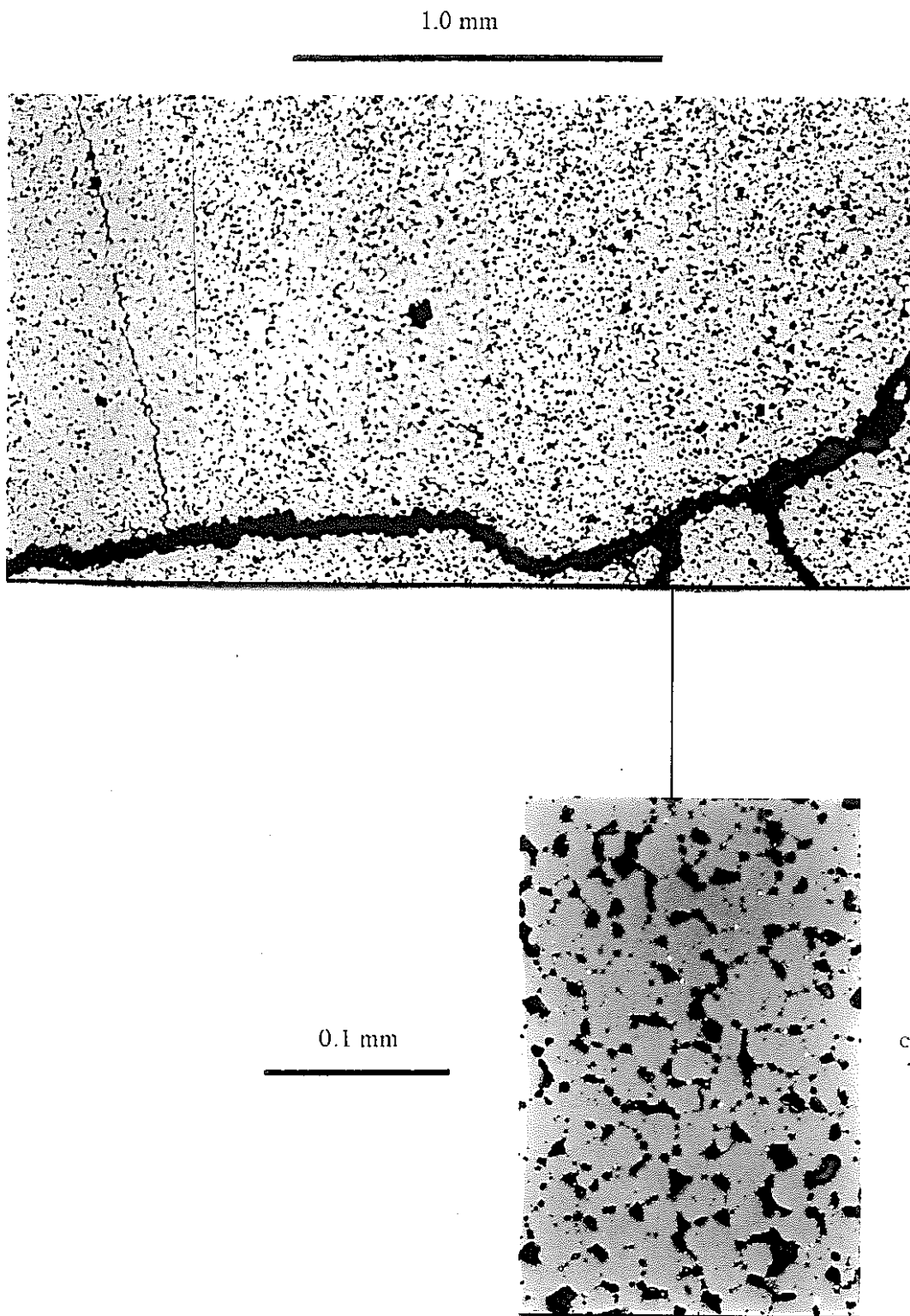


図2.4.4 図2.4.1の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 232mm位置

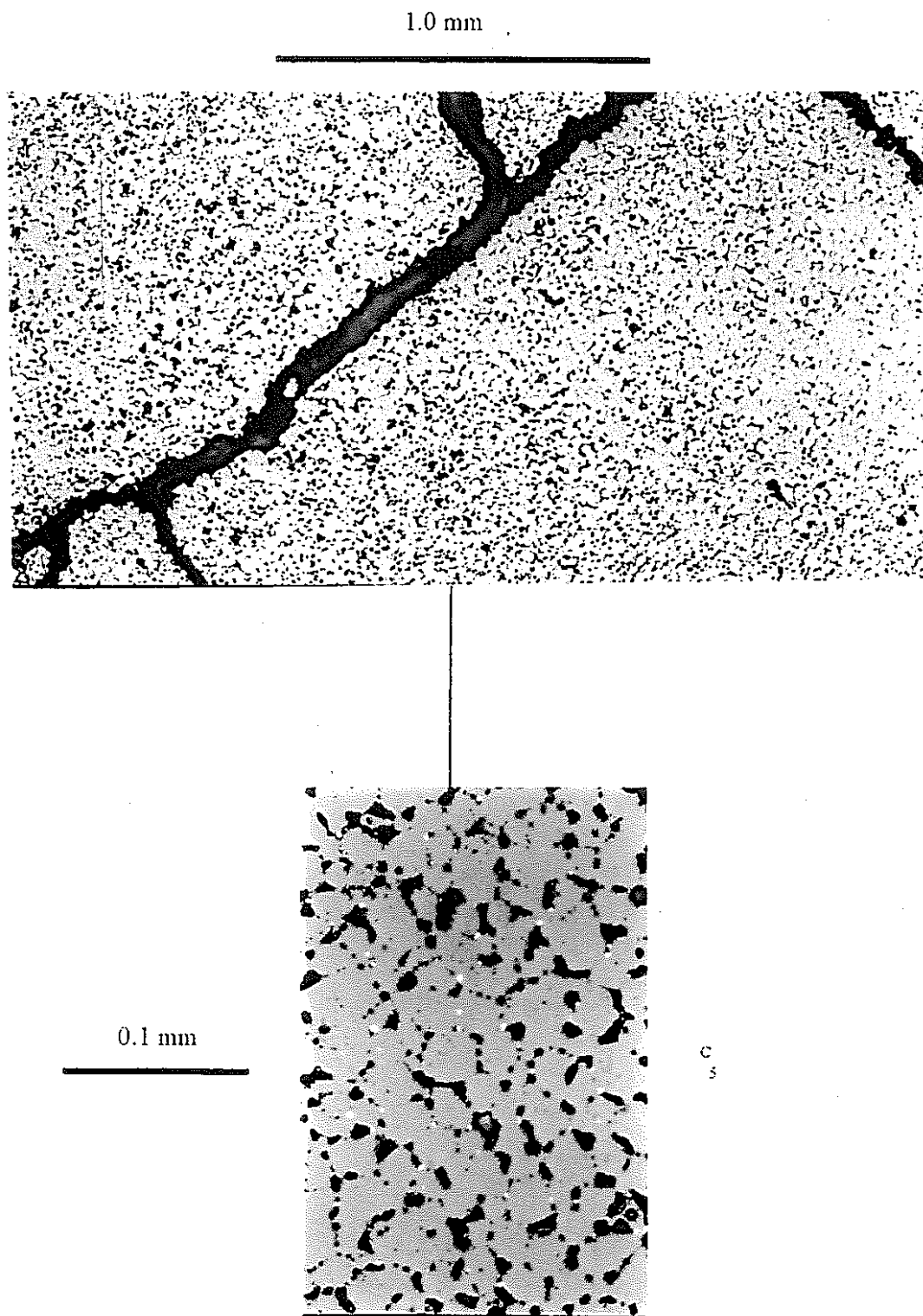


図2.4.5 図2.4.1の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 232mm位置

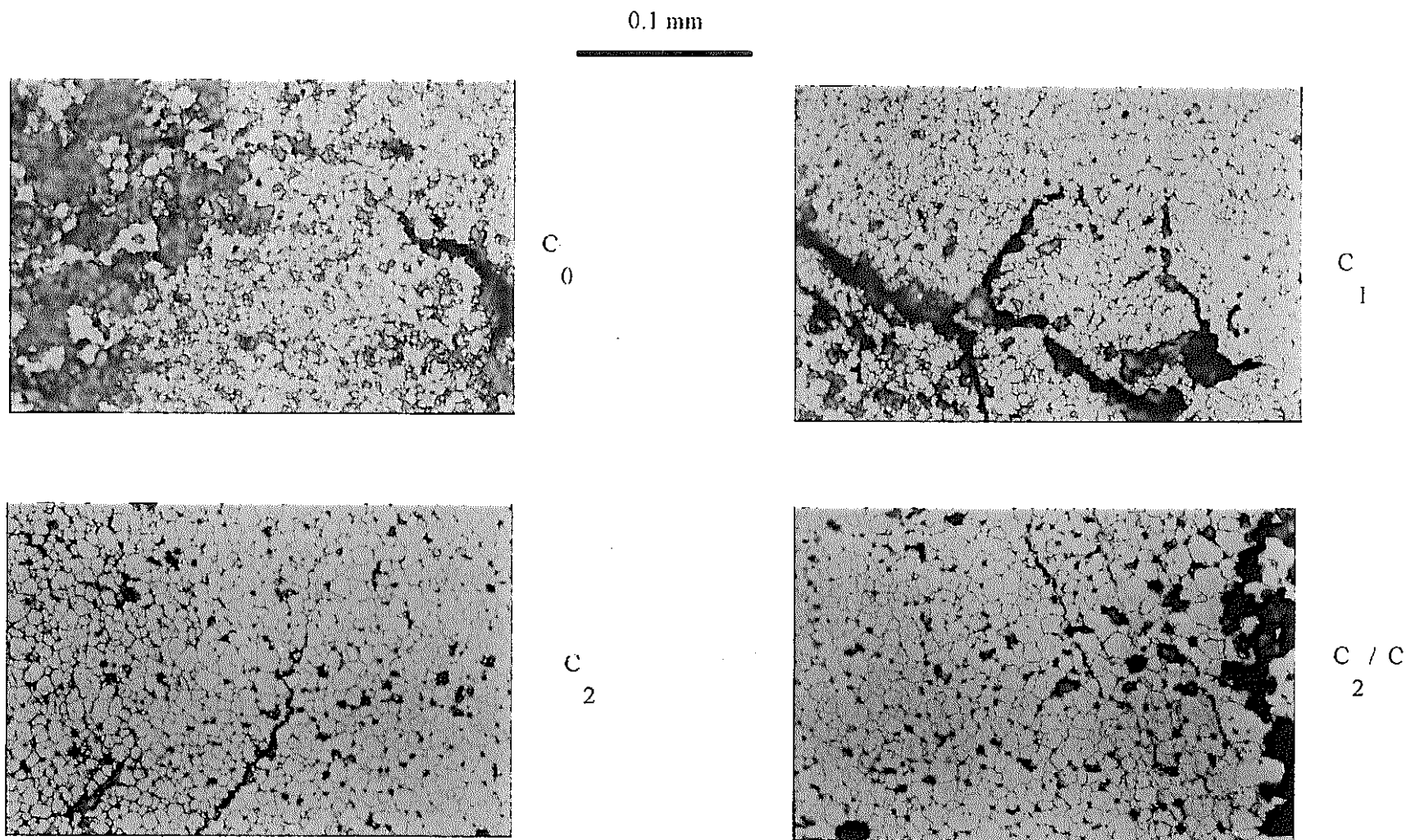


図2.4.6 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 232mm位置

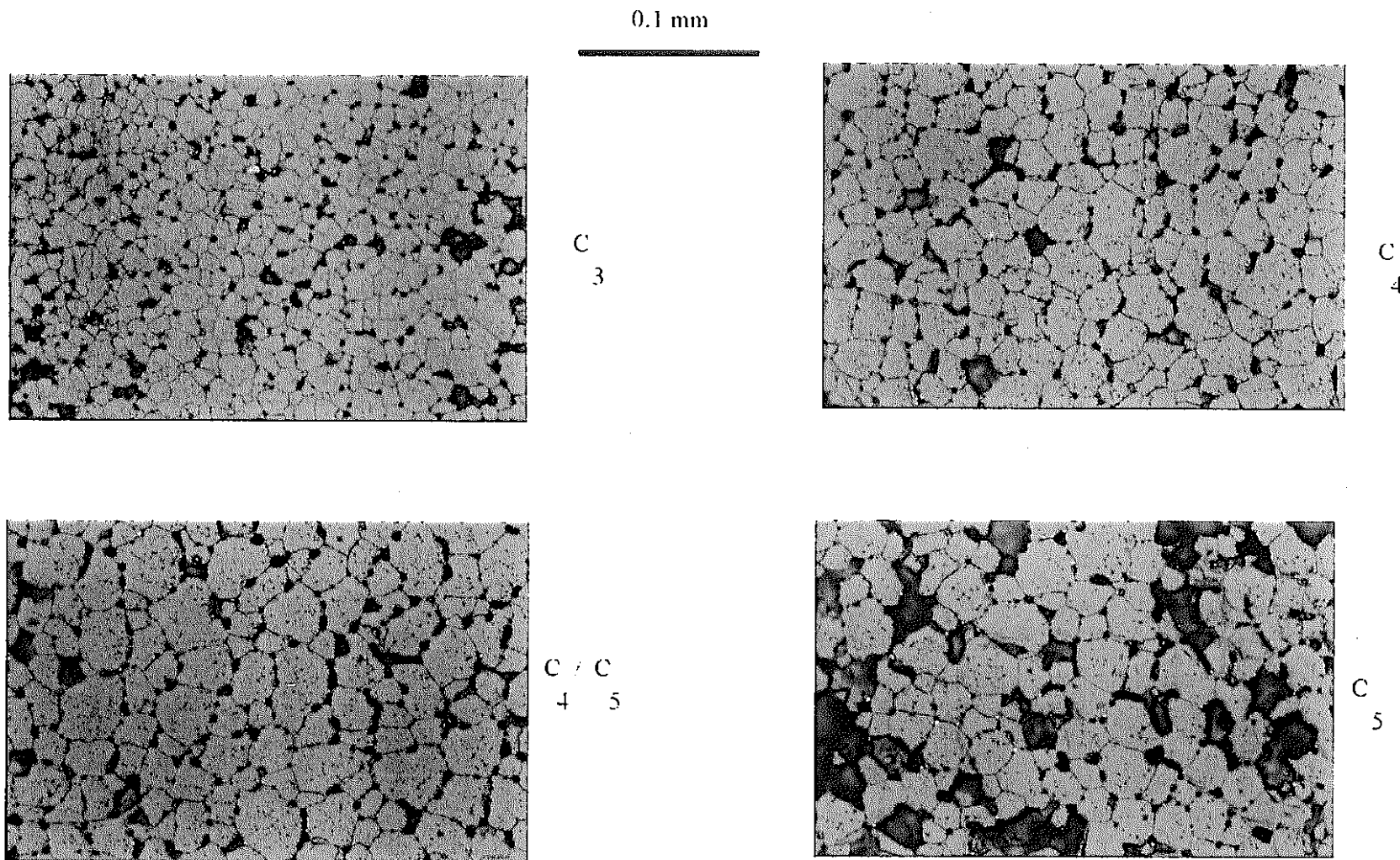


図2.4.7 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 232mm位置

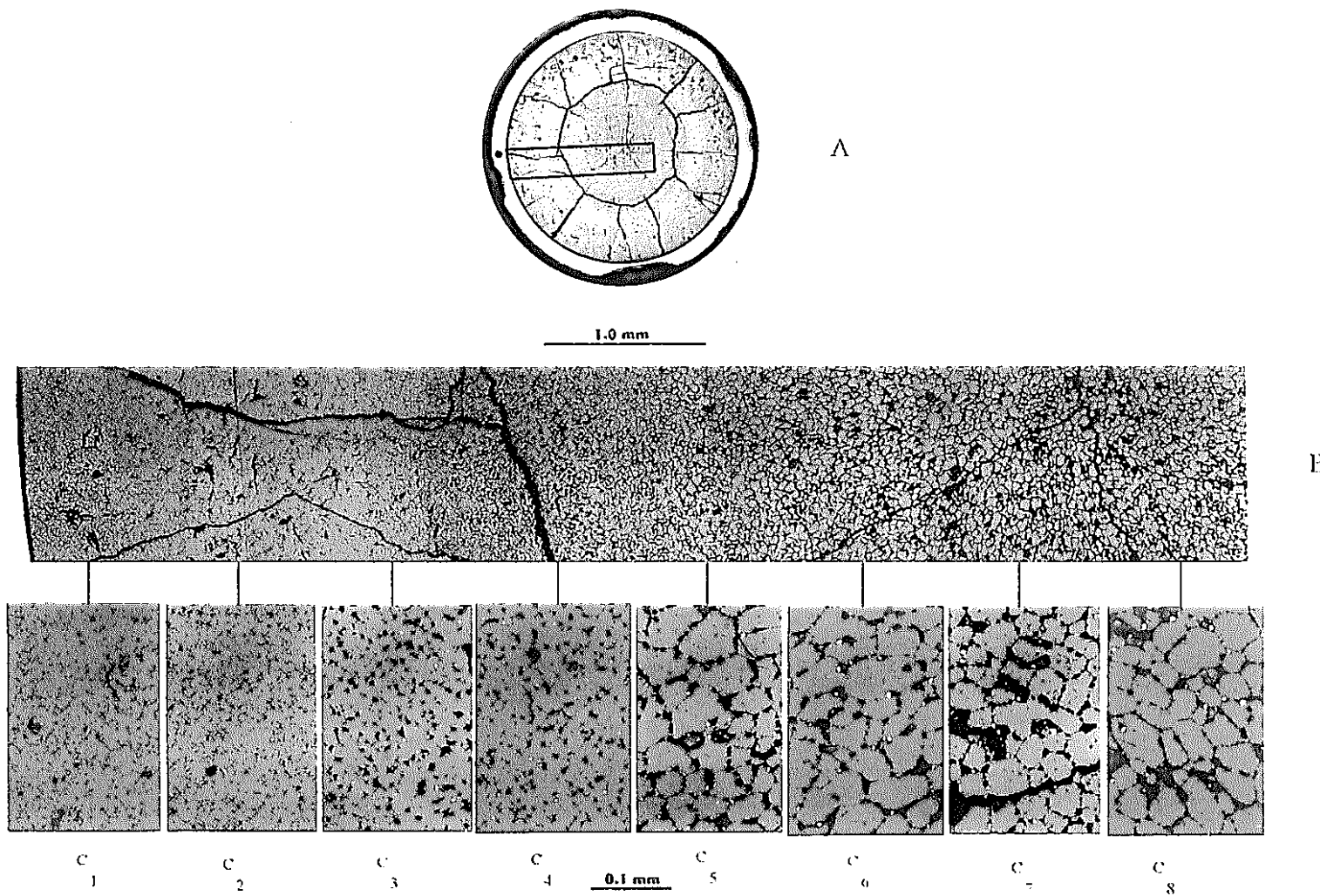


図2.4.8 燃料ペレット中のポア、ボイド、FP 横断面、研磨 IFA-555-1, 401mm位置
 (A)全体、(B)燃料ペレット半径方向、(c)詳細

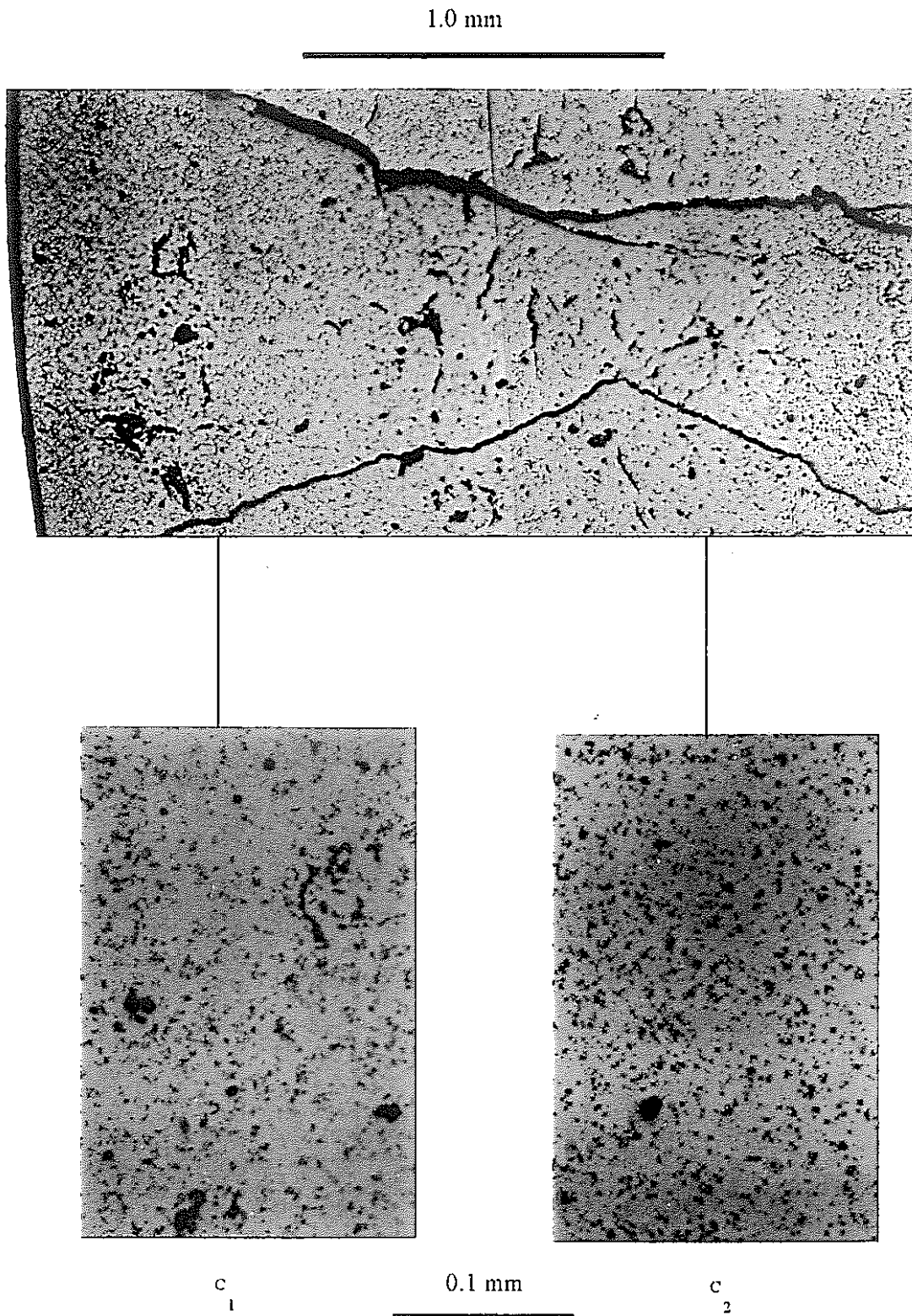


図2.4.9 図2.4.8の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 401mm位置

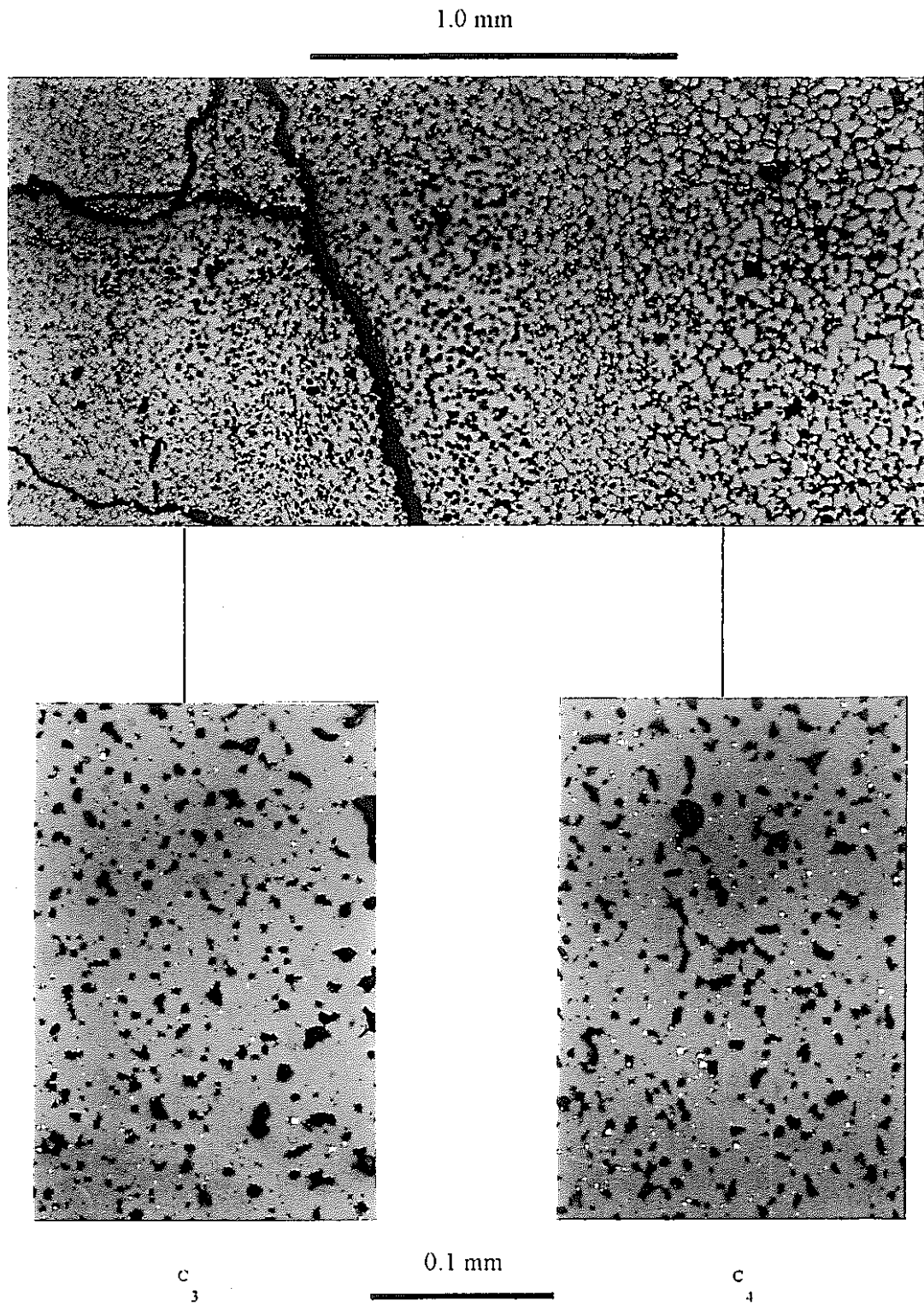


図2.4.10 図2.4.8の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 401mm位置

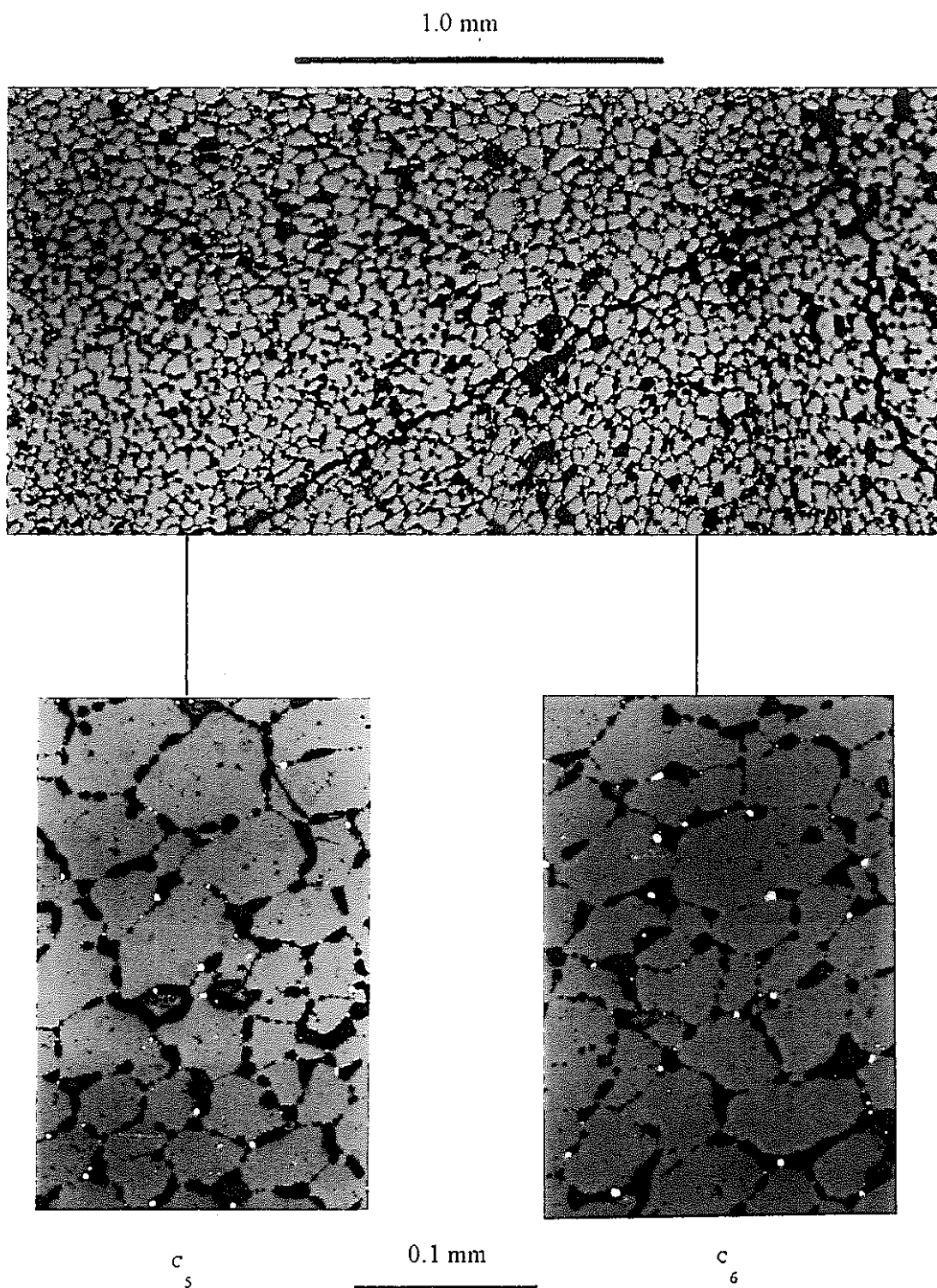


図2.4.11 図2.4.8の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 401mm位置

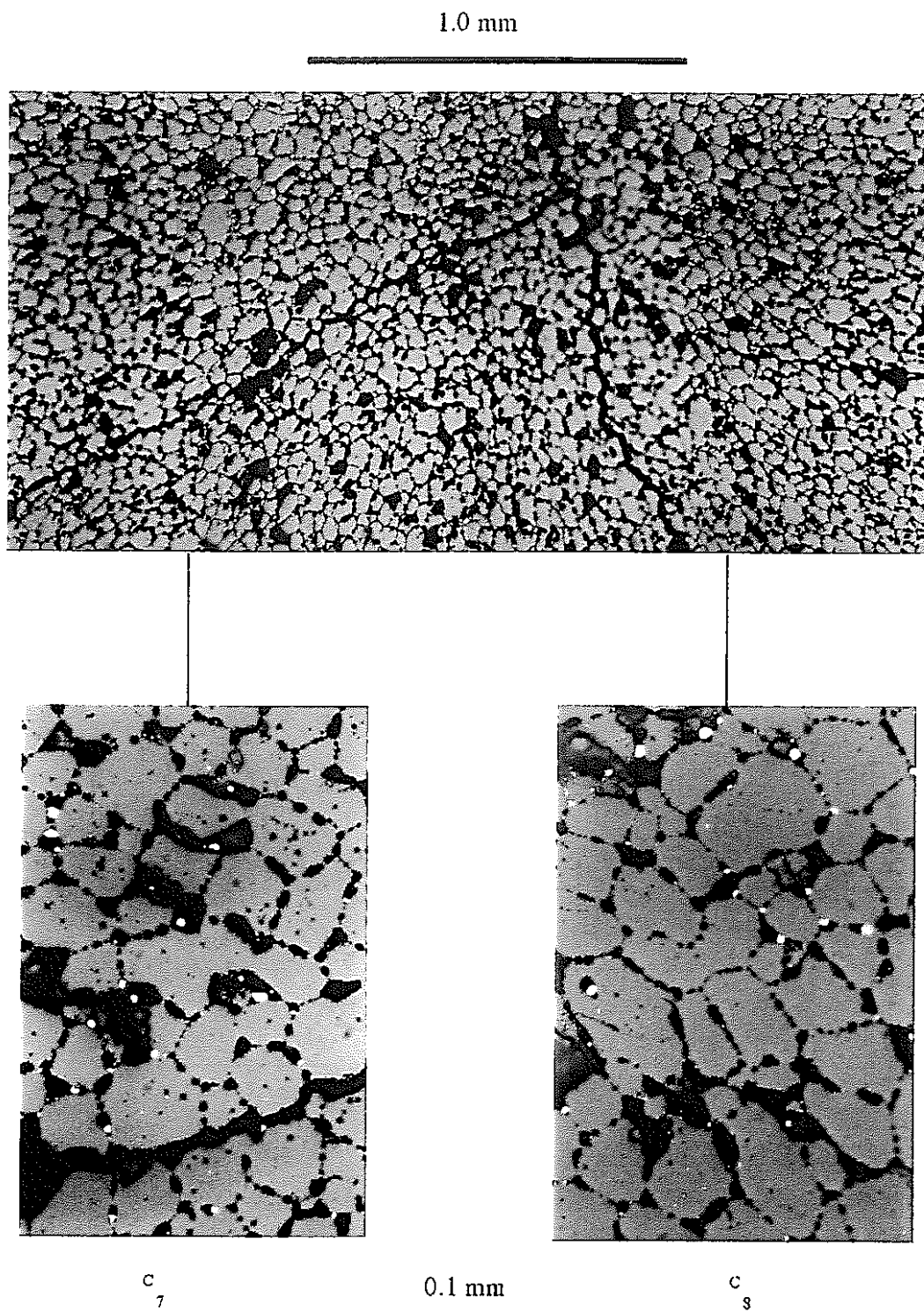


図2.4.12 図2.4.8の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 401mm位置

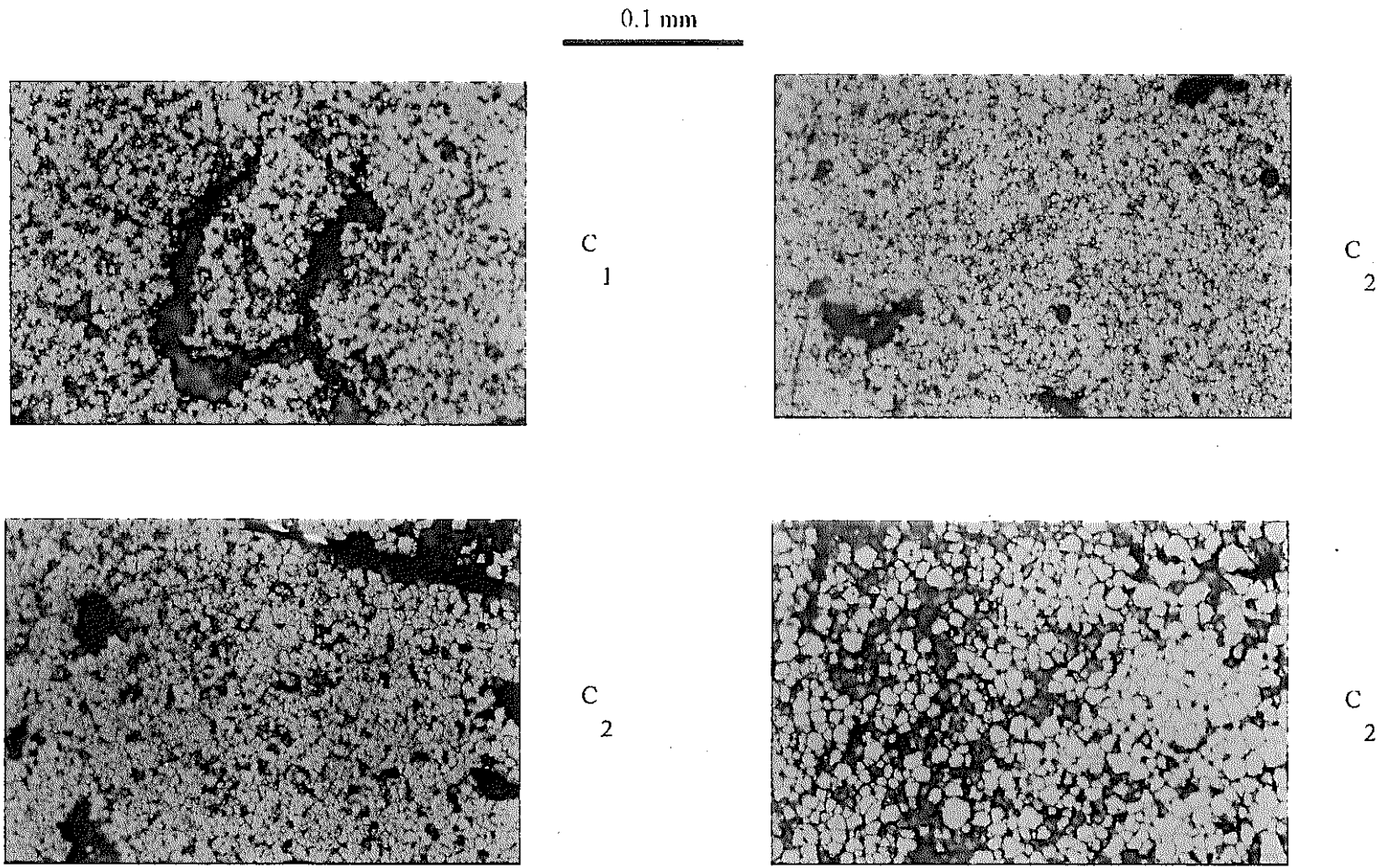


図2.4.13 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 401mm位置

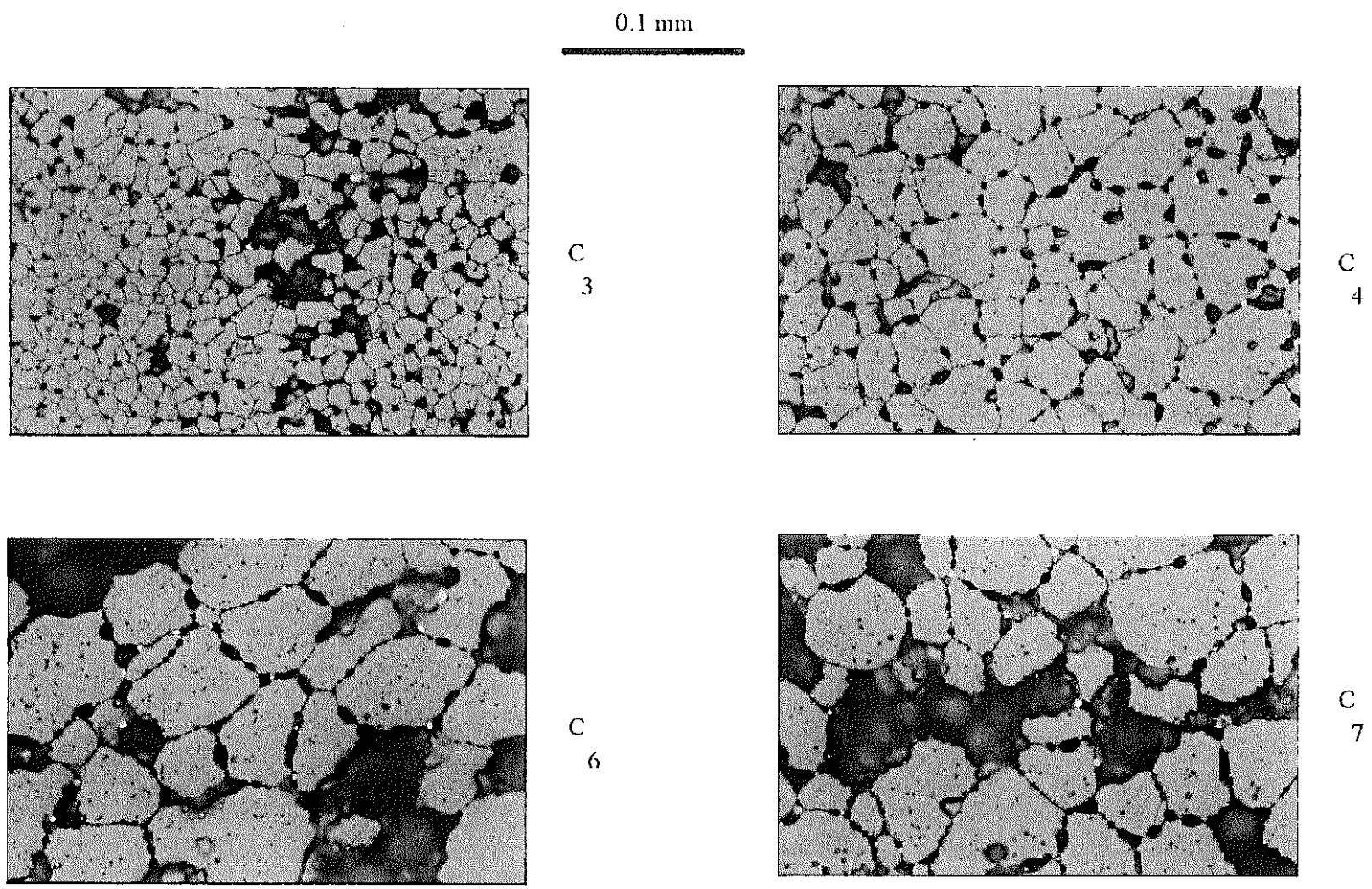


図2.4.14 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 401mm位置

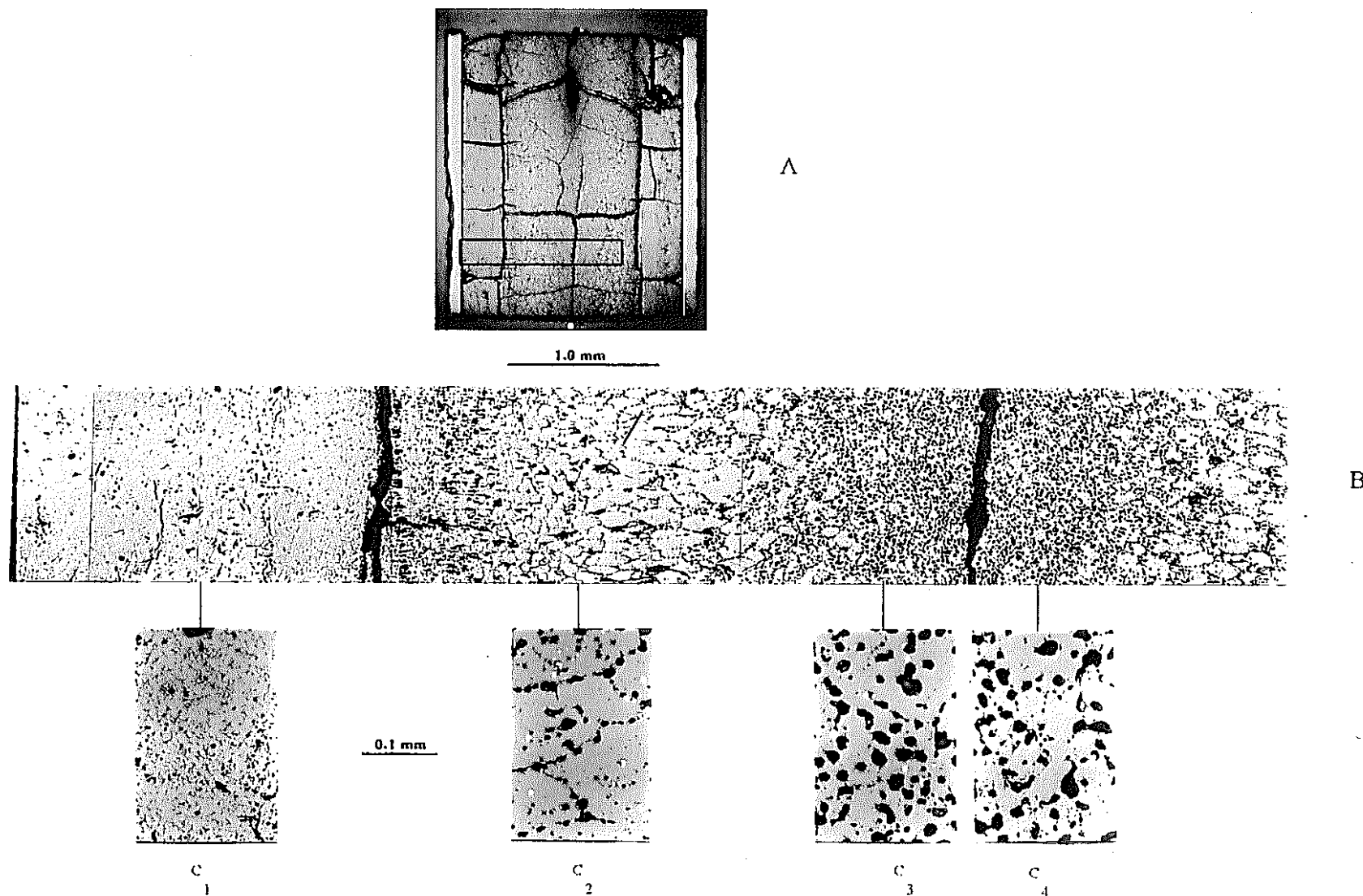


図2.4.15 燃料ペレット中のポア、ボイド、FP 縦断面、研磨 IFA-555-1, 462-478mm位置
 (A)全体、(B)燃料ペレット半径方向、(c)詳細

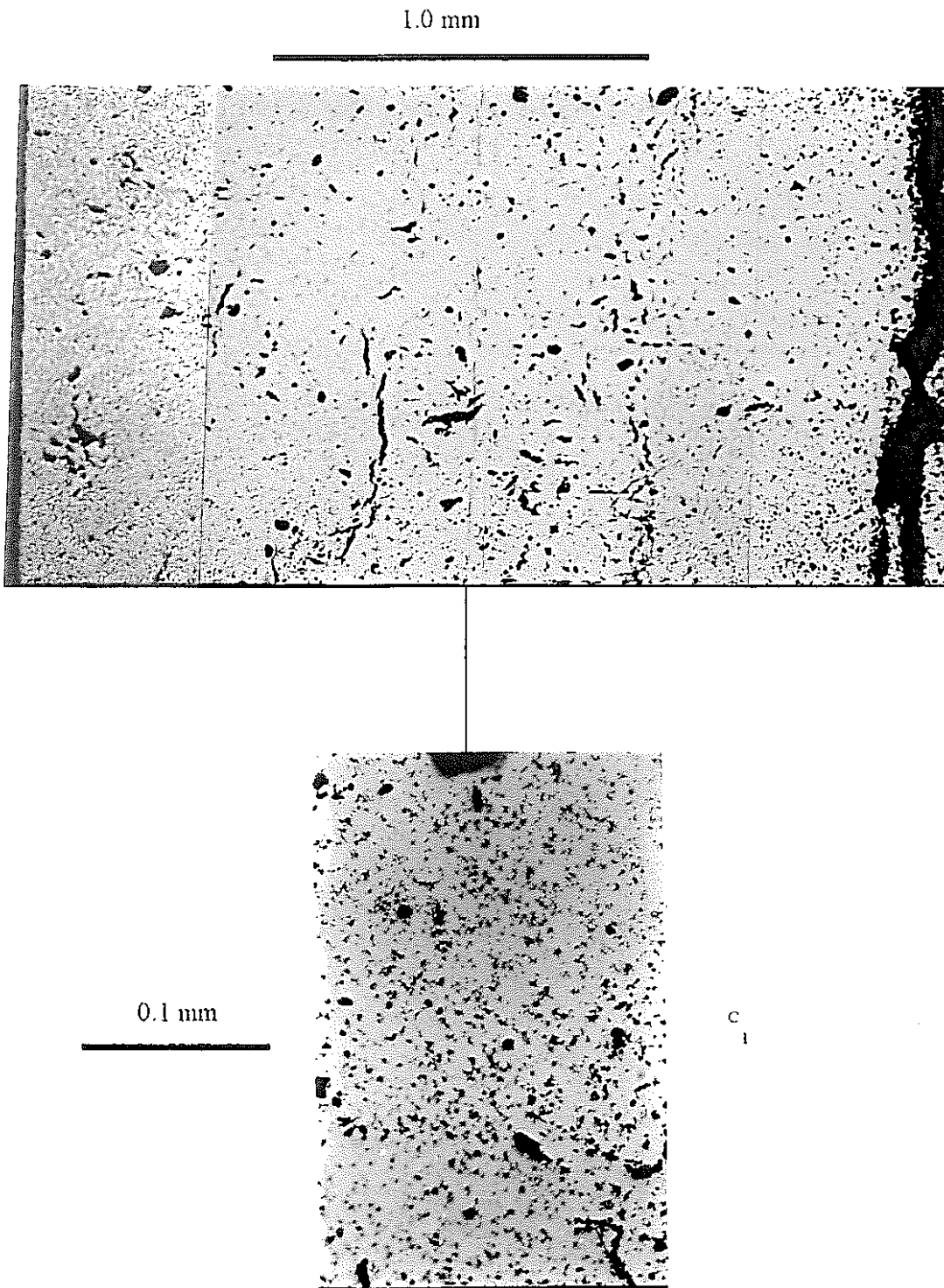


図2.4.16 図2.4.15の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 462-478mm位置

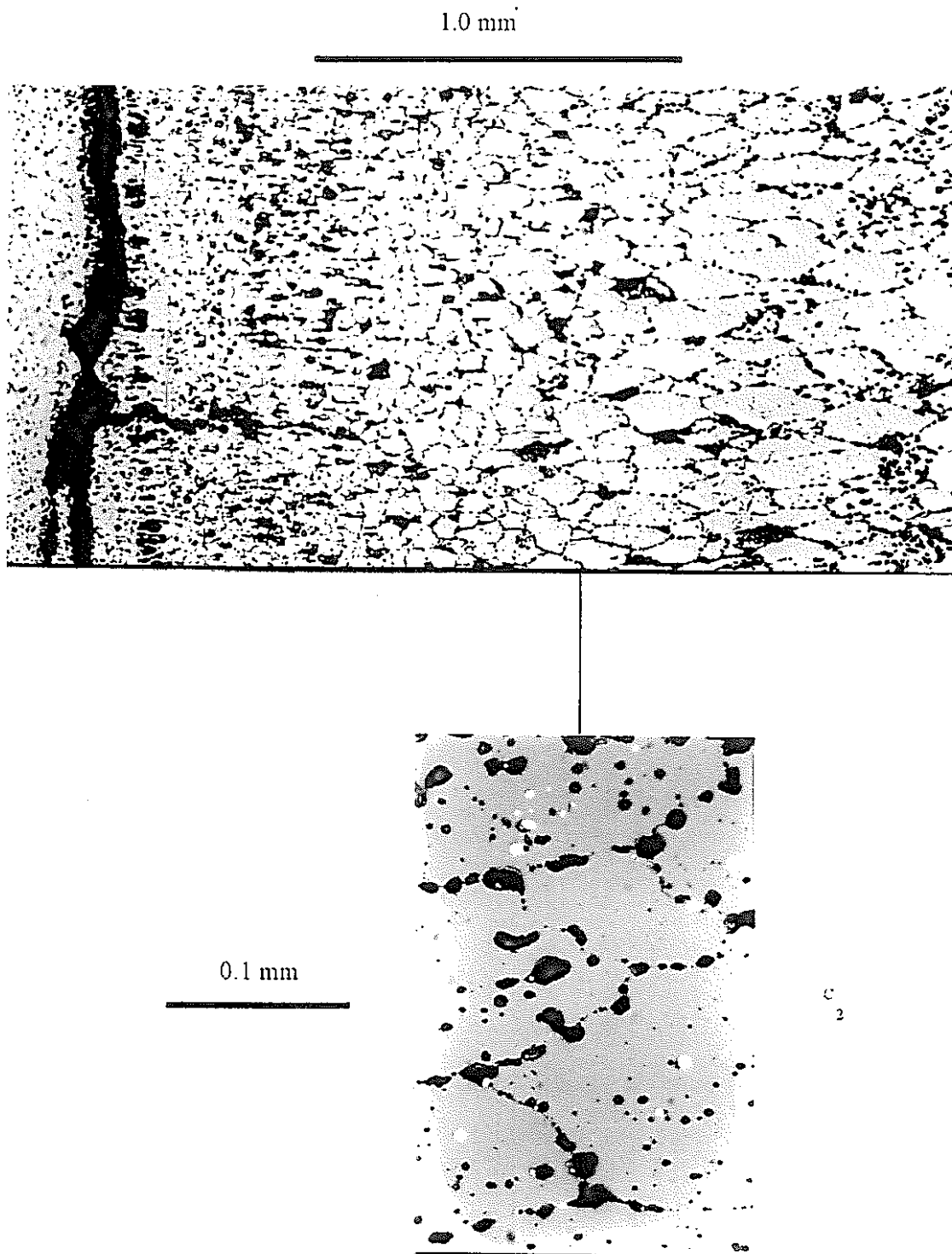


図2.4.17 図2.4.15の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 462-478mm位置

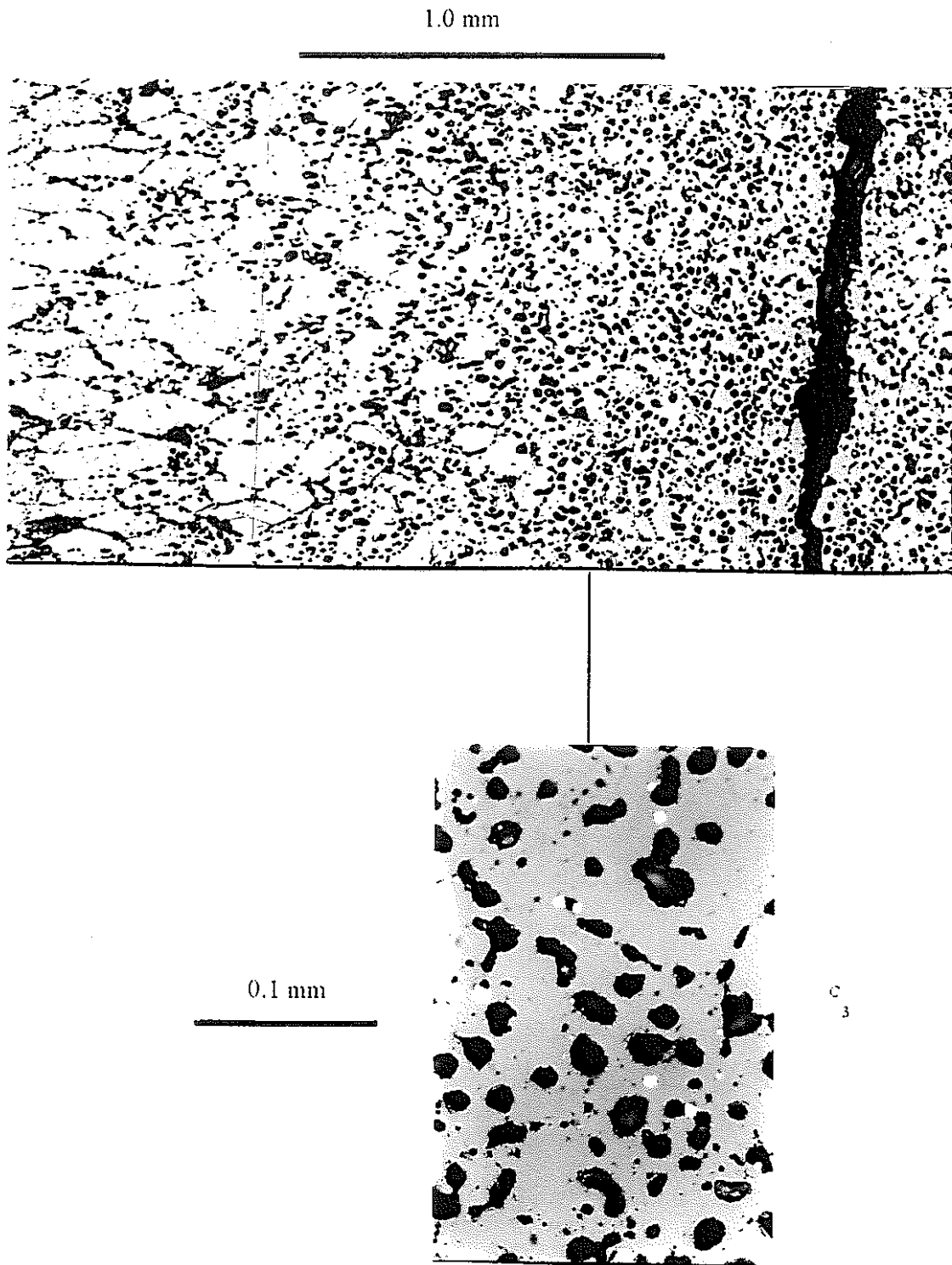


図2.4.18 図2.4.15の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 462-478mm位置

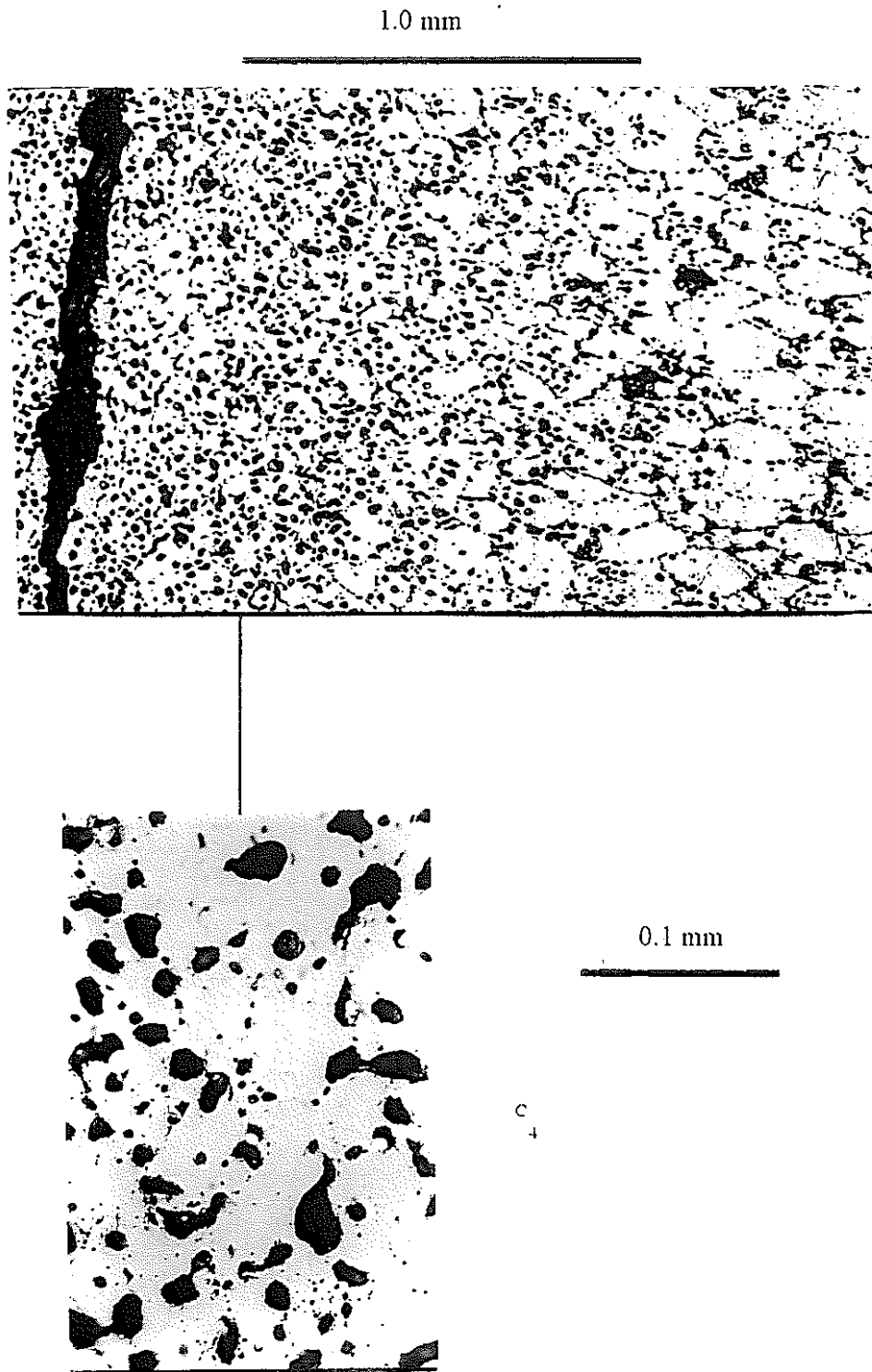


図2.4.19 図2.4.15の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 462-478mm位置

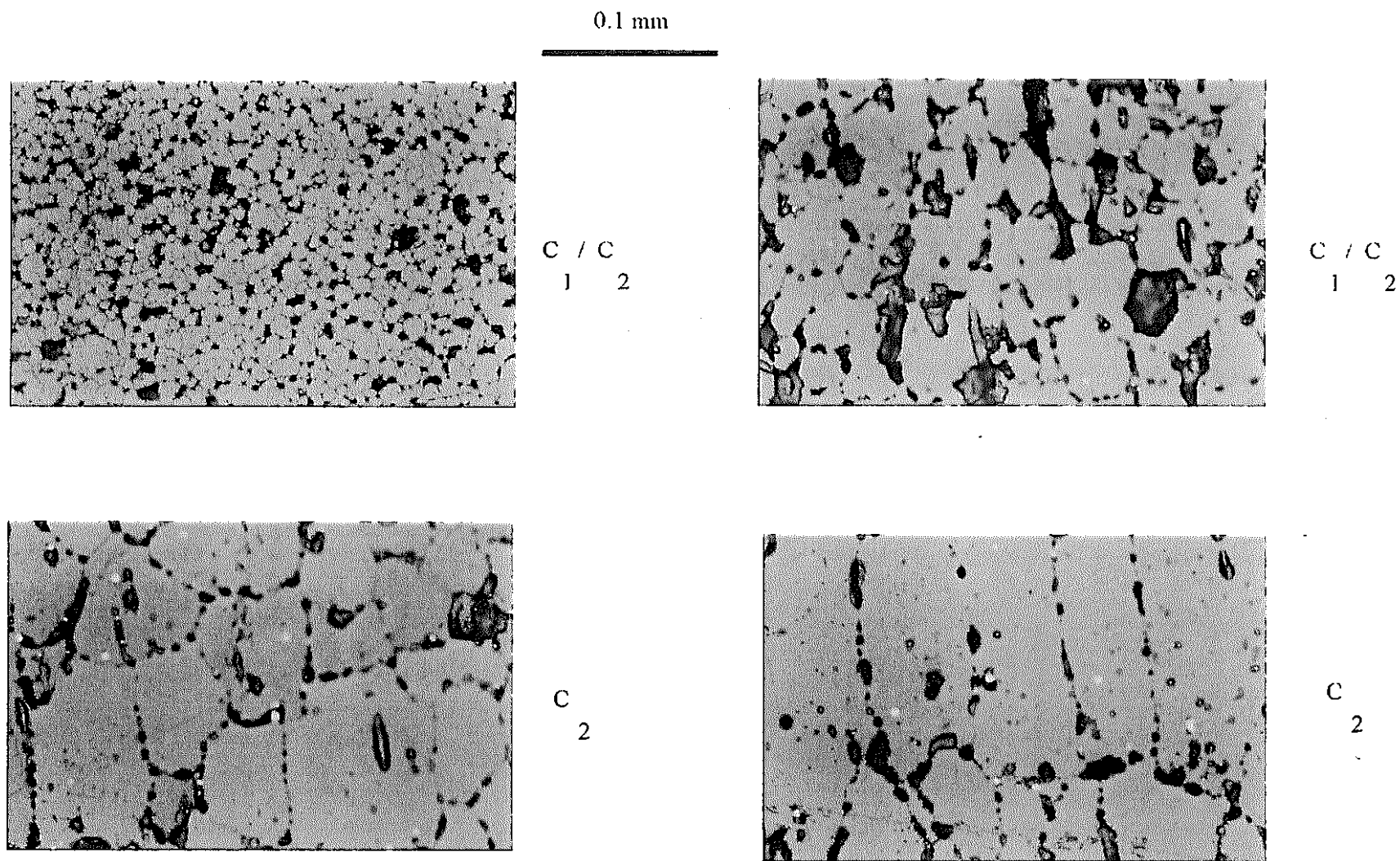


図2.4.20 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 462-478mm位置

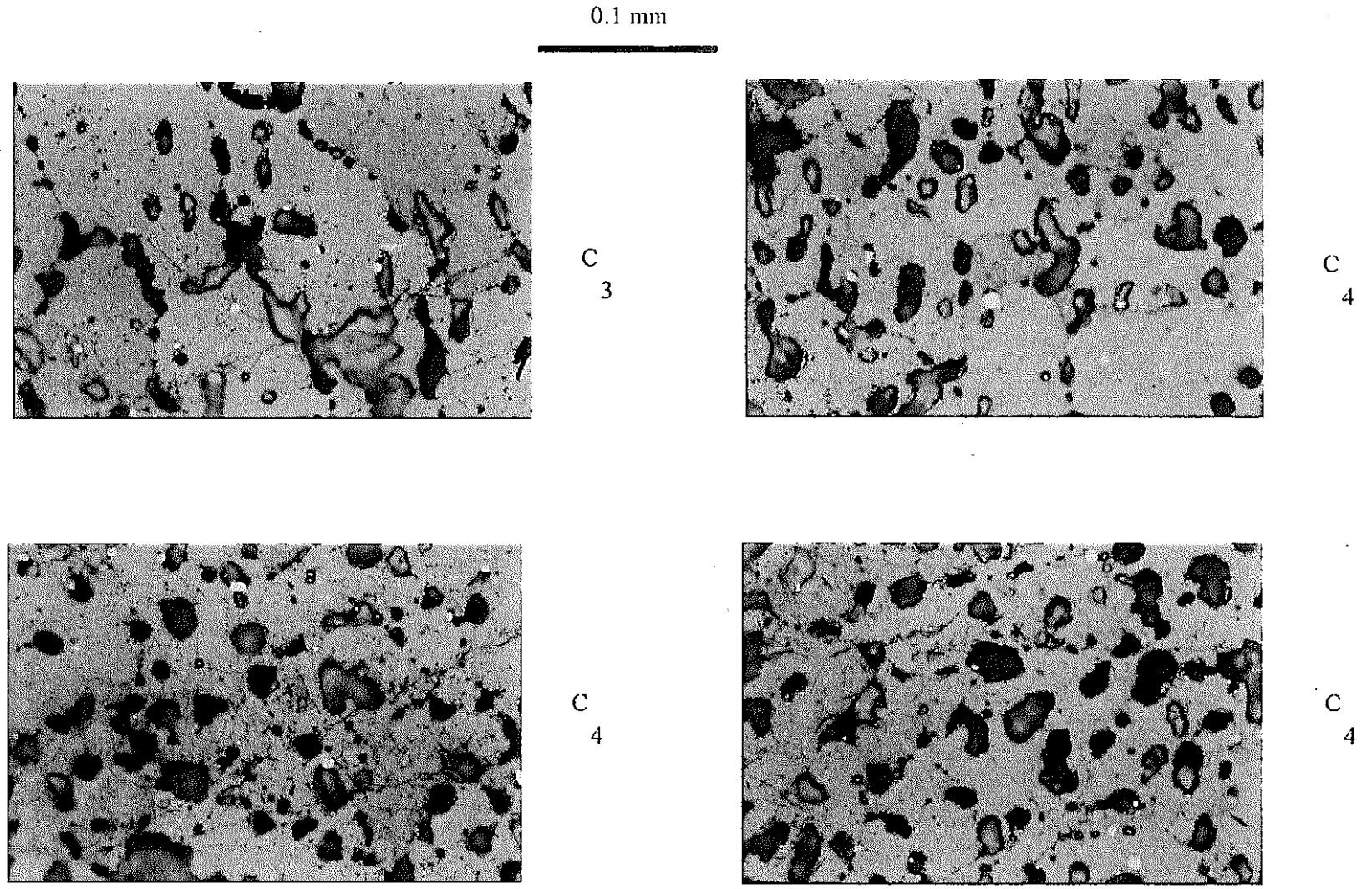


図2.4.21 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 462-478mm位置

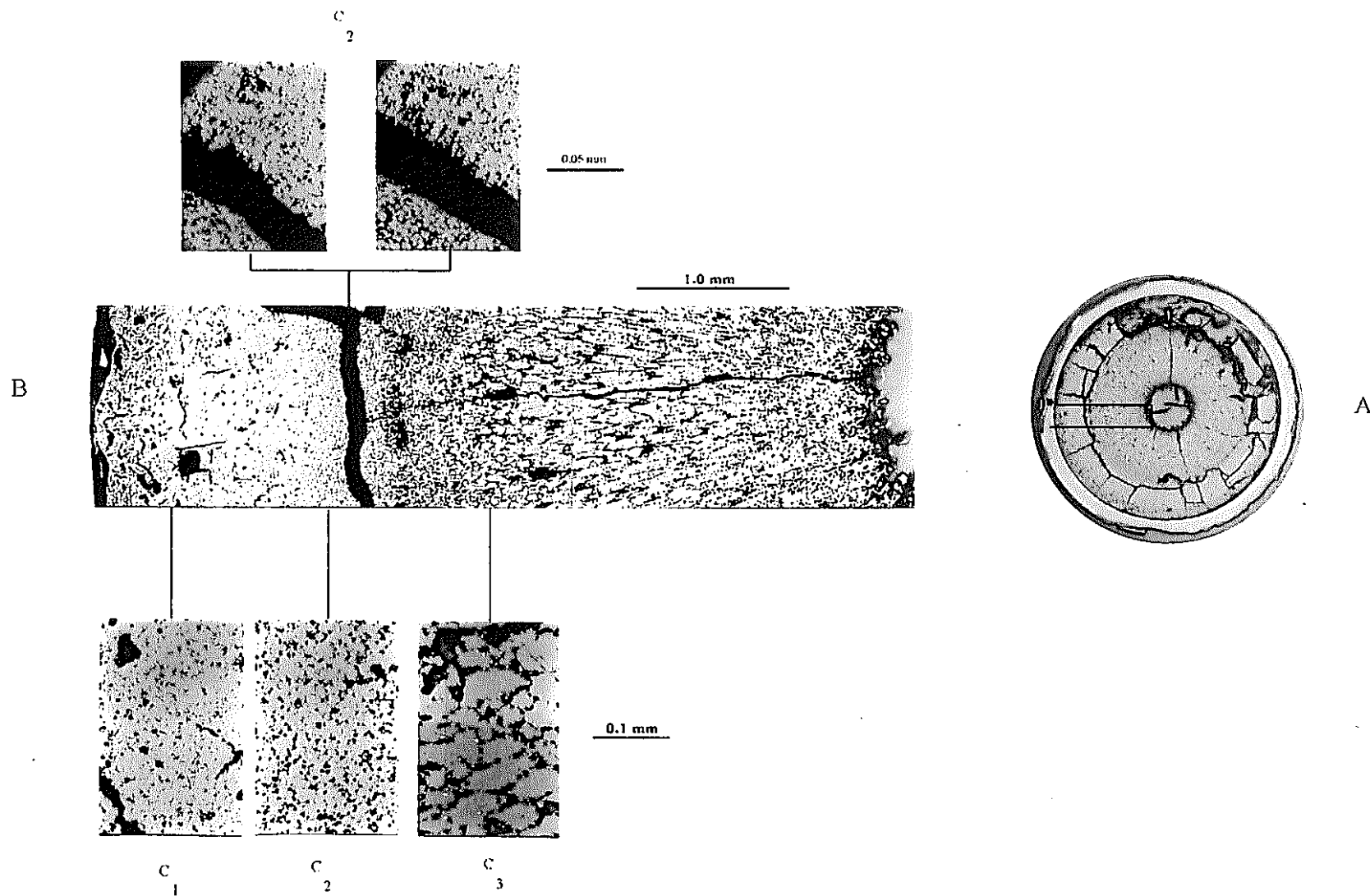


図2.4.22 燃料ペレット中のポア、ボイド、FP 縦断面、研磨 IFA-555-1, 462-478mm位置
(A)全体、(B)燃料ペレット半径方向、(c)詳細

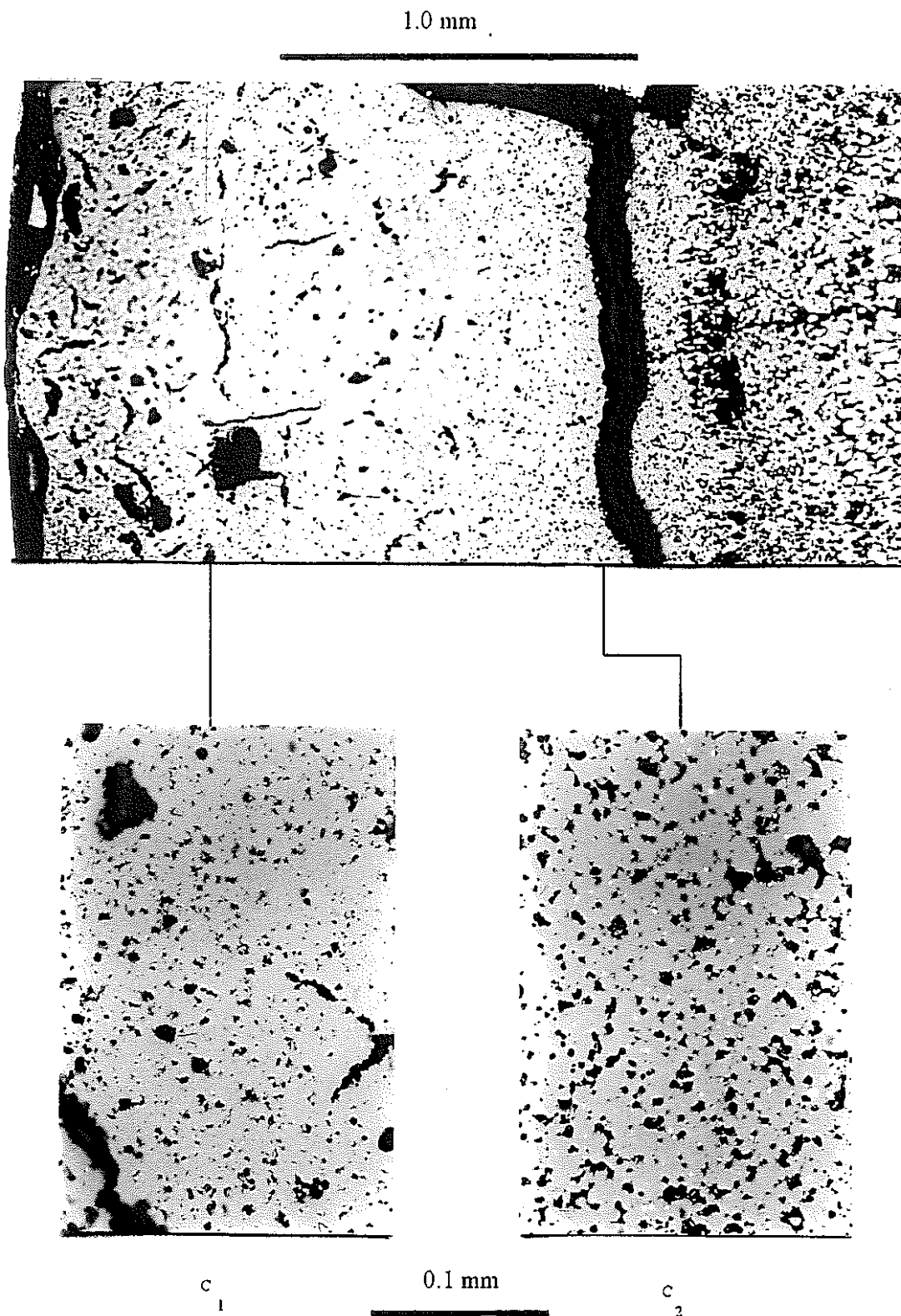


図2.4.23 図2.4.22の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 509mm位置

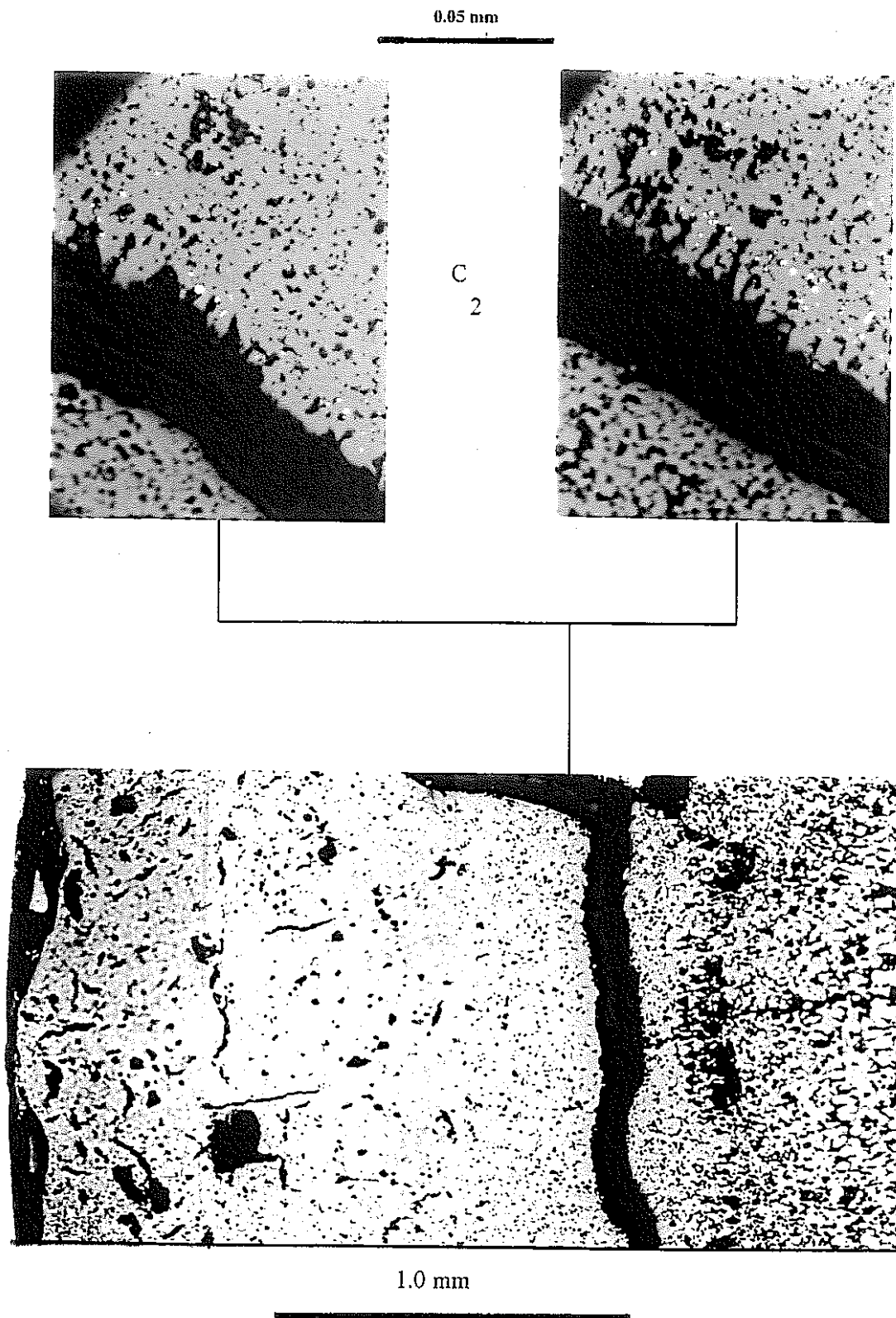


図2.4.24 図2.4.22の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 509mm位置

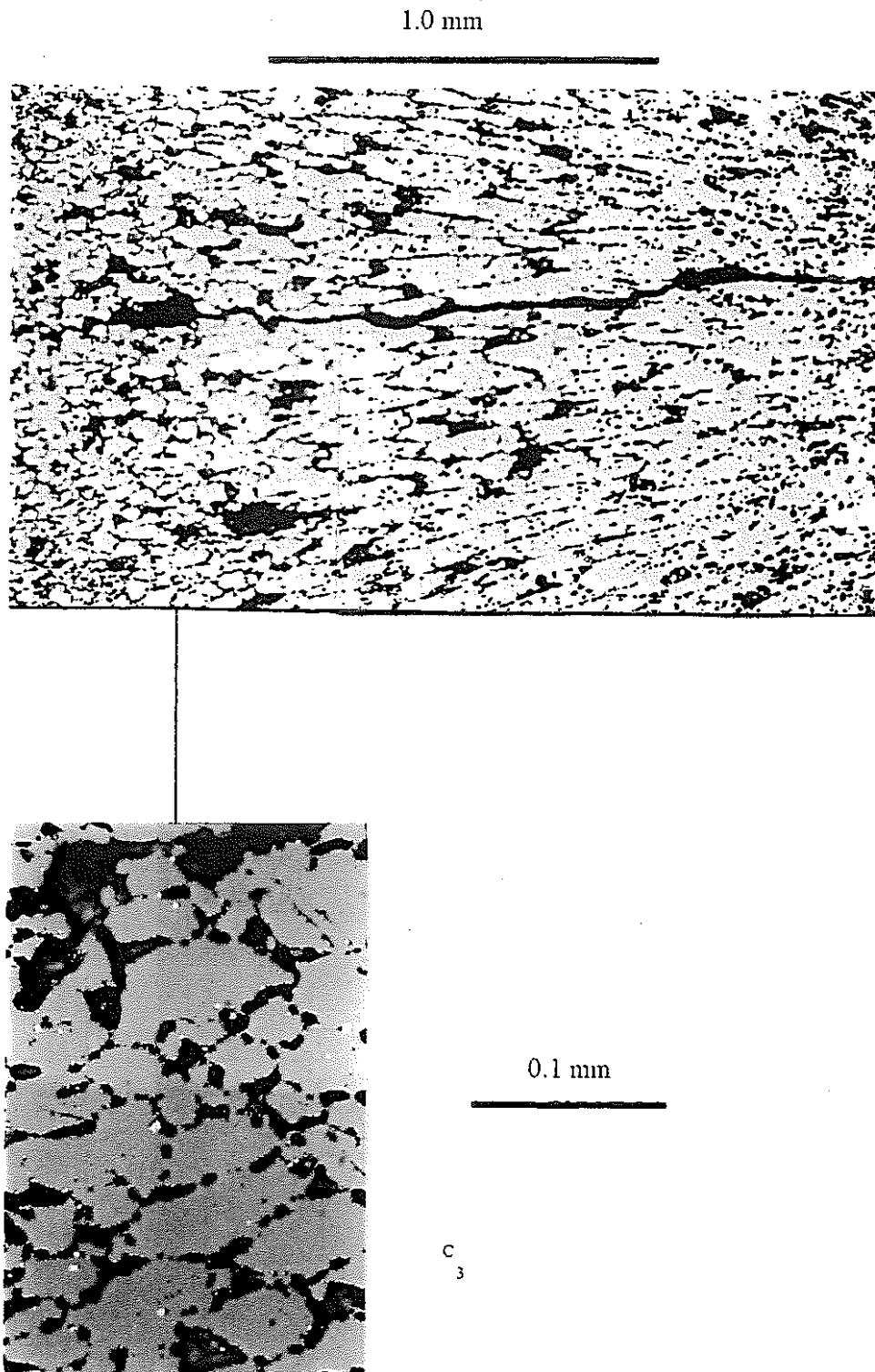


図2.4.25 図2.4.22の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 509mm位置

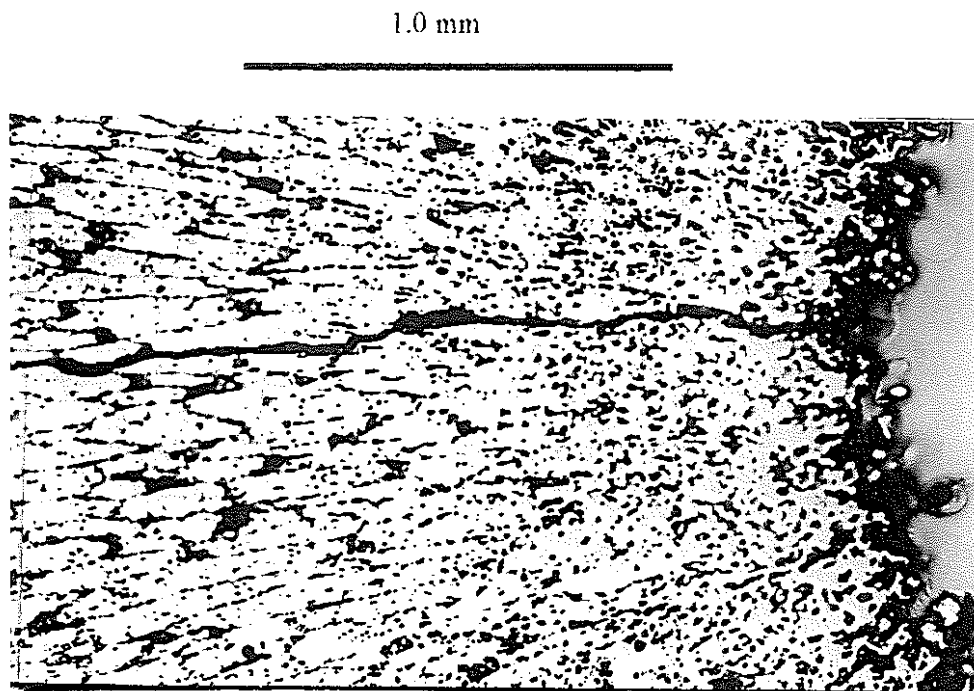


図2.4.26 図2.4.22の燃料ペレット半径方向の詳細 IFA-555-1, 509mm位置

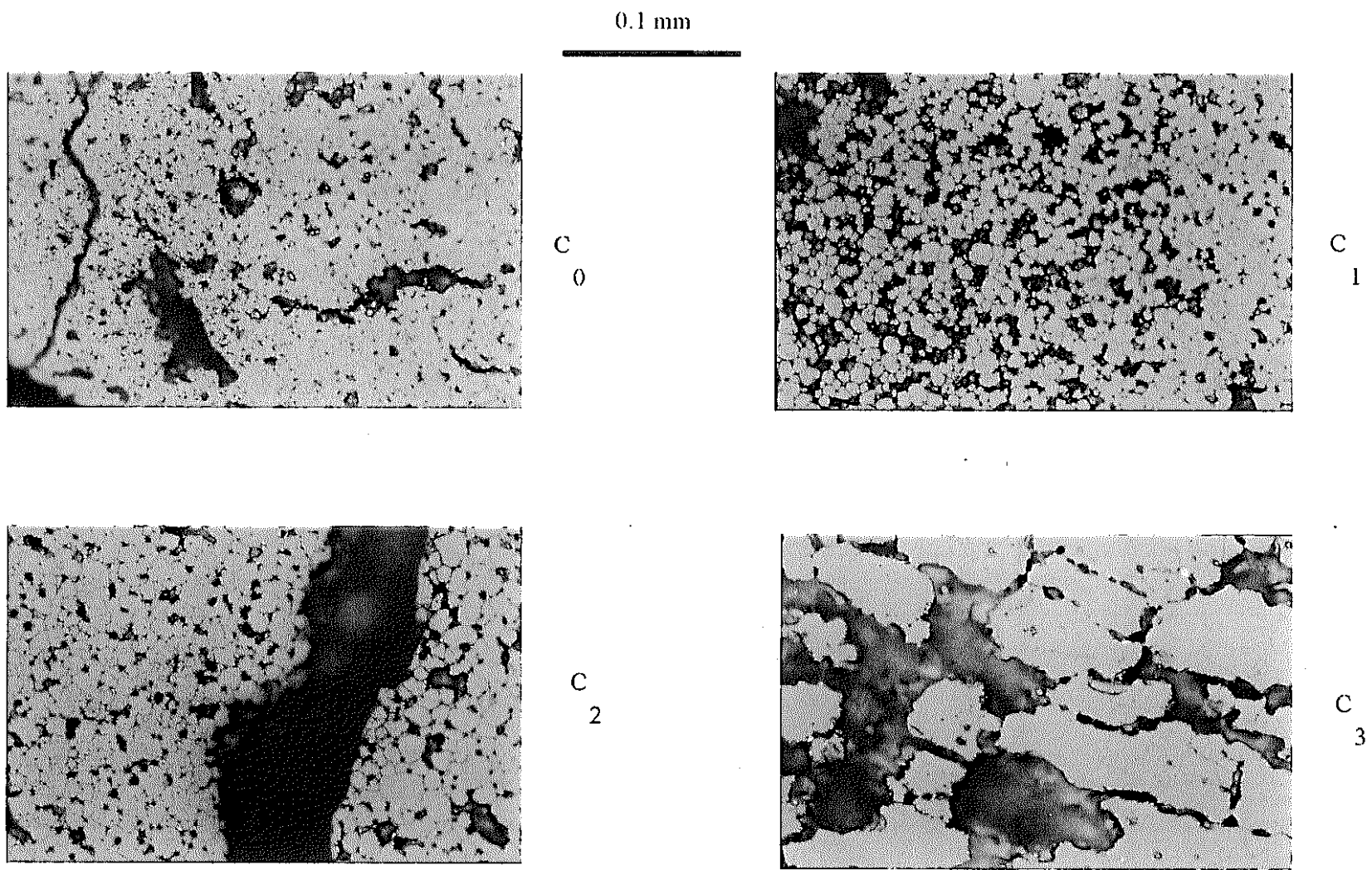


図2.4.27 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 509mm位置

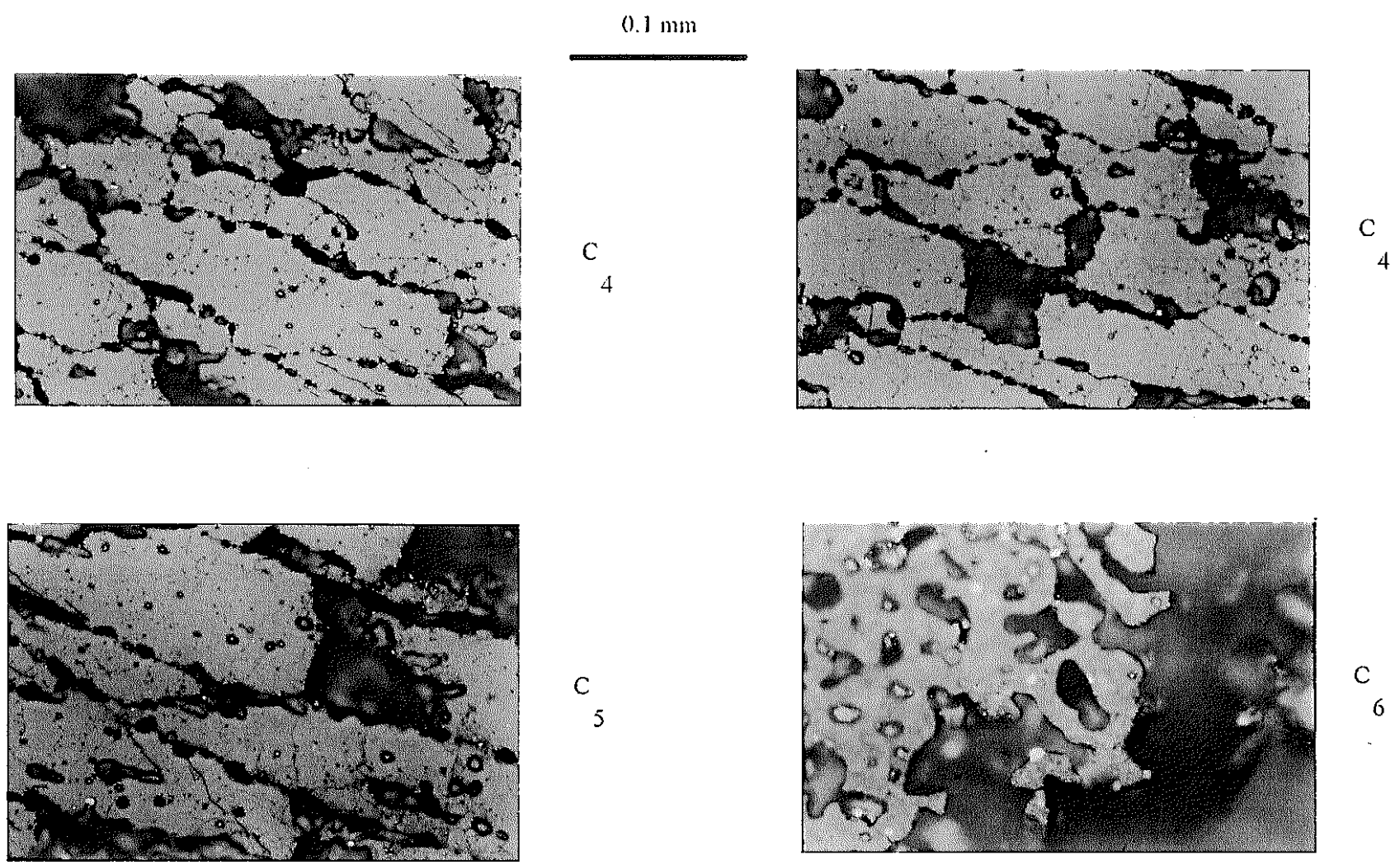


図2.4.28 燃料ペレット半径方向の詳細 エッチング IFA-555-1, 509mm位置

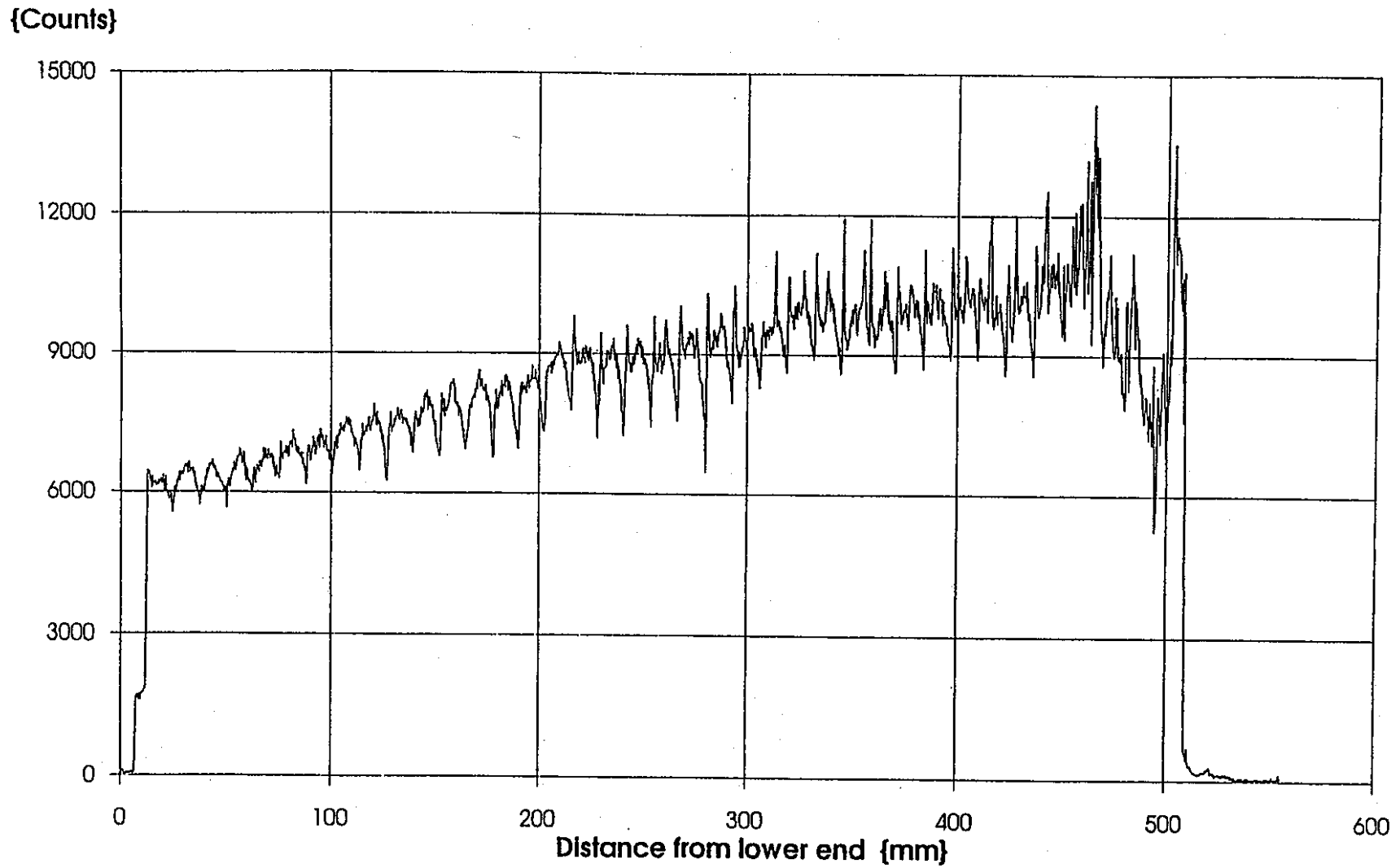


図2.4.29 上部クラスタ中の燃料棒IFA-555-1のCs-137の γ 強度 参考文献(1)

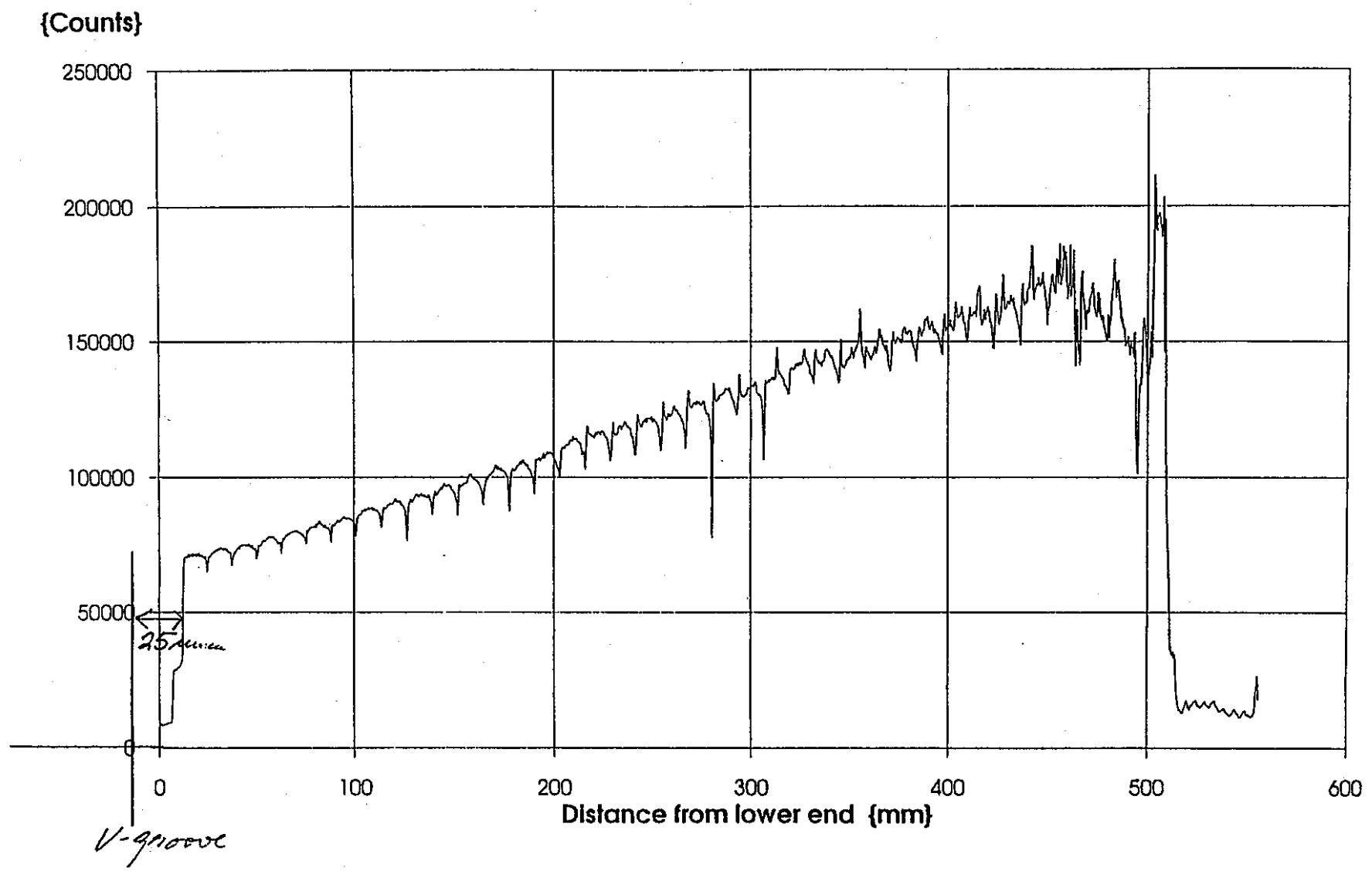


図2.4.30 燃料棒IFA-555-1の全 γ 強度 参考文献(1)

2.5 燃料ペレットのレプリカのSEM観察

燃料ペレットの232、401、509mmの位置の断面のレプリカをSEM観察した。(図2.5.1～2.5.3) レプリカはエッチング前後のペレット断面を観察した。レプリカは燃料ペレット断面の表面をよく再現している。写真は同一場所で3種類の倍率で撮影した。

研磨後のSEM観察は、ボイド、ポア、析出物が観察できる。エッチングの観察では結晶粒の形状、大きさ、分布が観察できる。

図中にはSEM写真、金相観察と α 及び β/γ オートラジオグラフを示す。写真の位置は図2.5.4の β/γ オートラジオグラフに示した。SEM写真は燃料ペレット外周部、径方向中間部、中心部の観察結果を示す。

図2.5.1に232mmの断面の研磨後及びエッチング後の写真を示す。径方向の中間の位置では結晶粒界の3重点にボイドが観察できる。燃料ペレット中心では、3重点に加えて結晶粒界に沿って連なってボイドが観察でき、研磨後の写真でも結晶粒の形状がわかる。燃料ペレット中心ほどボイドが大きくなっている。結晶粒径は外周部に比べ燃料ペレット中心で2倍以上に成長しており、 $20\mu\text{m}$ 以上に達している。

図2.5.2に401mmの位置の研磨後及びエッチング後の写真を示す。研磨後の写真で径方向中間部の写真で結晶粒内に析出物が観察できる。燃料ペレット中心では結晶粒界に沿って連なってボイドが観察できる。結晶粒径は燃料ペレットの外周部に比べ、中心部では4.5倍に成長しており、 $30\mu\text{m}$ 以上に達している。

図2.5.3に509mmの位置の研磨後及びエッチング後の写真を示す。径方向中間部では結晶粒界に沿って連なってボイドが観察できる。燃料ペレット中心部のボイドは径方向に細長くのびた形状である。燃料ペレット中心の結晶粒界はわからず、結晶粒径は識別できない。

外周部

中心部

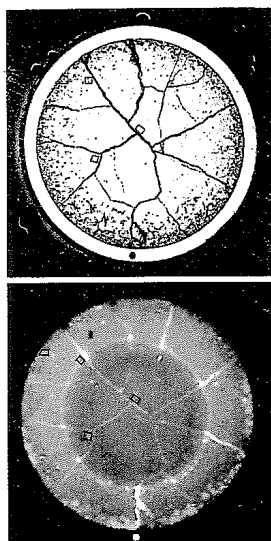


Fig. 3.1.1. SEM overview of fuel replica, polished condition. The positions of the detail SEM are indicated in the macrograph and β/γ autoradiograph. IFA 555-1, position 232 mm.

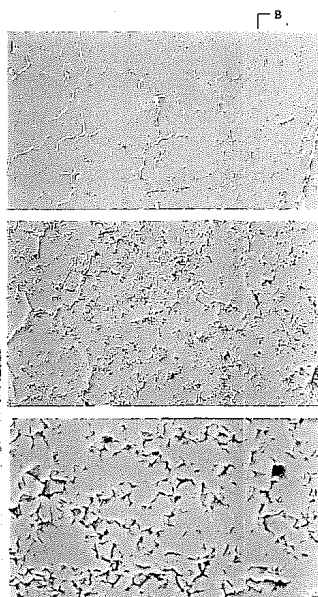


Fig. 3.1.4. SEM of fuel replica, polished, periphery. IFA 555-1, position 232 mm.

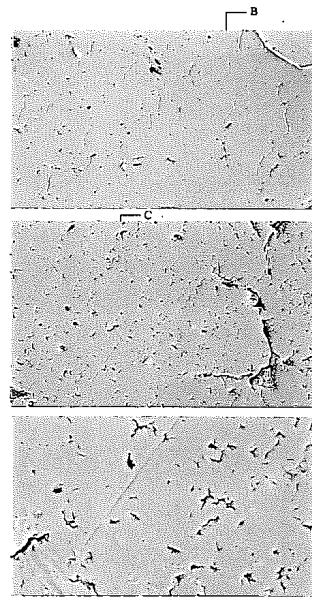


Fig. 3.1.5. SEM of fuel replica, polished, near mid radius. IFA 555-1, position 232 mm.

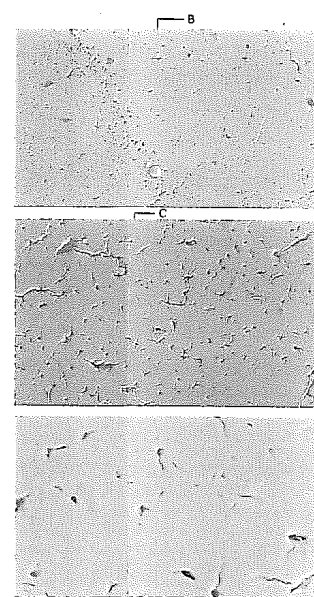


Fig. 3.1.6. SEM of fuel replica, polished, mid radius. IFA 555-1, position 232 mm.

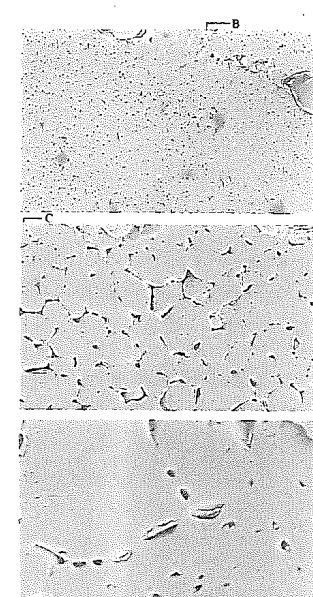


Fig. 3.1.7. SEM of fuel replica, polished, centre. IFA 555-1, position 232 mm.

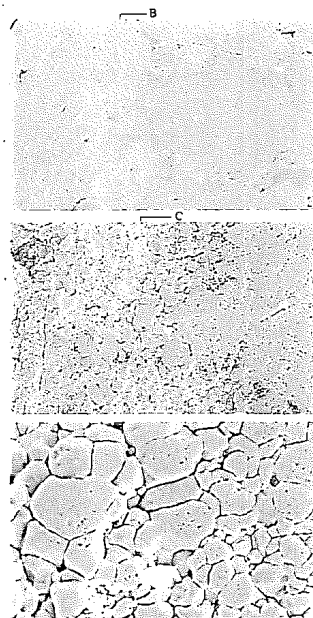


Fig. 3.2.1. SEM of fuel replica, etched, periphery. IFA 555-1, position 232 mm.

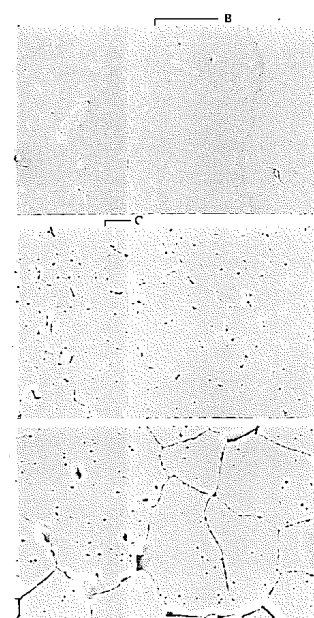


Fig. 3.2.2. SEM of fuel replica, etched, mid radius. IFA 555-1, position 232 mm.

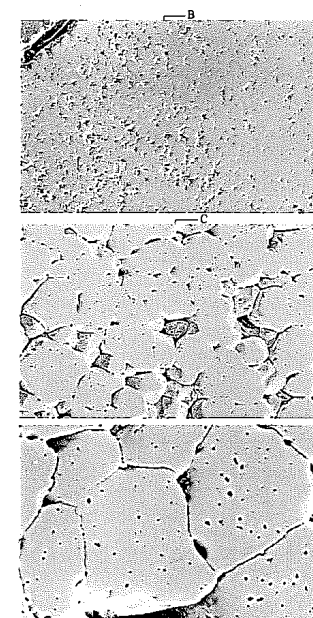


Fig. 3.2.3. SEM of fuel replica, etched, centre. IFA 555-1, position 232 mm.

外周部

中心部

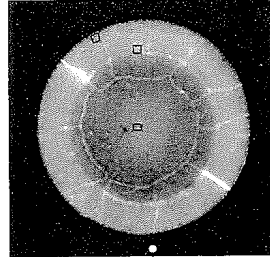
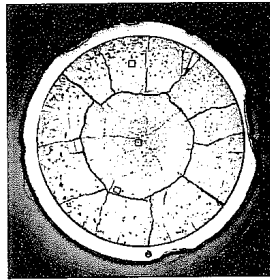


Fig. 3.1.2. SEM overview of fuel replica, polished condition. The positions of the detail SEM are indicated in the macrograph and β/γ autoradiograph.
IFA 555-1, position 401 mm.

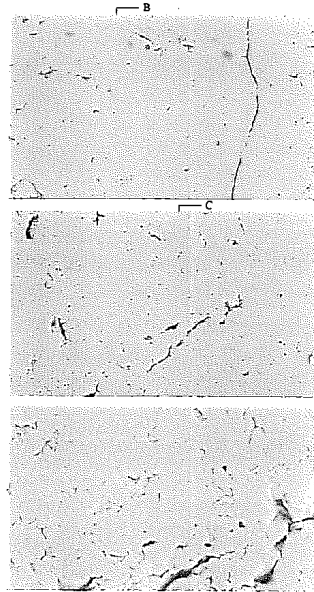


Fig. 3.1.8. SEM of fuel replica, polished, periphery.
IFA 555-1, position 401 mm.

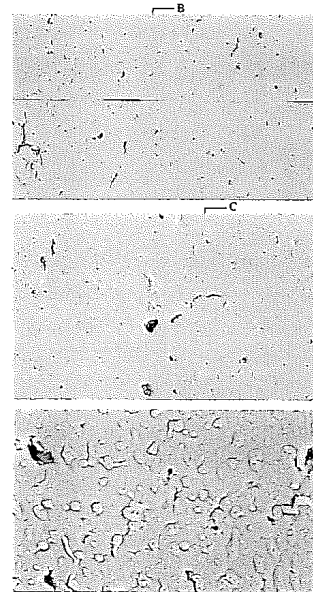


Fig. 3.1.9. SEM of fuel replica, polished, near mid radius.
IFA 555-1, position 401 mm.

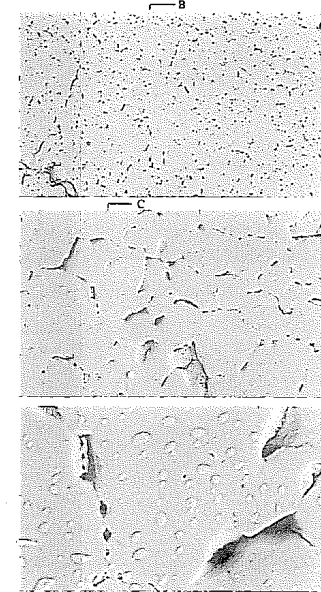


Fig. 3.1.10. SEM of fuel replica, polished, mid radius.
IFA 555-1, position 401 mm.

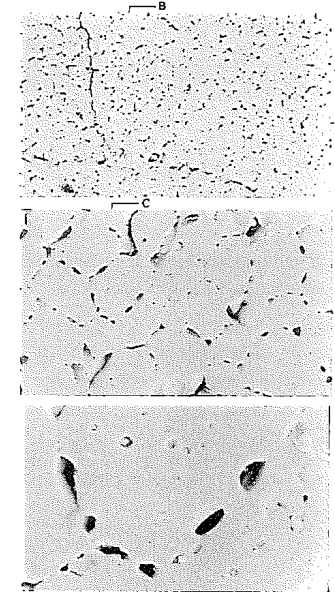


Fig. 3.1.11. SEM of fuel replica, polished, centre.
IFA 555-1, position 401 mm.

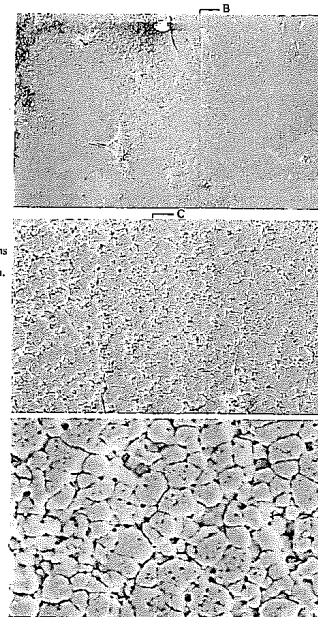


Fig. 3.2.4. SEM of fuel replica, etched, periphery.
IFA 555-1, position 401 mm.

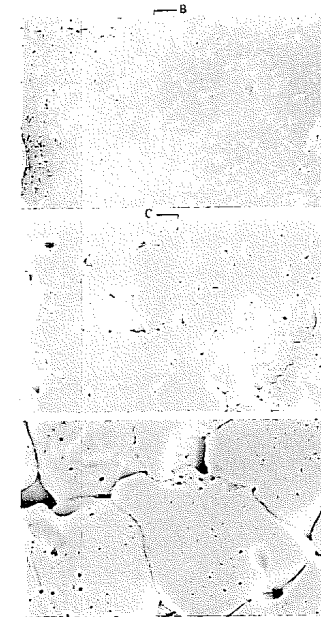


Fig. 3.2.5. SEM of fuel replica, etched, mid radius.
IFA 555-1, position 401 mm.

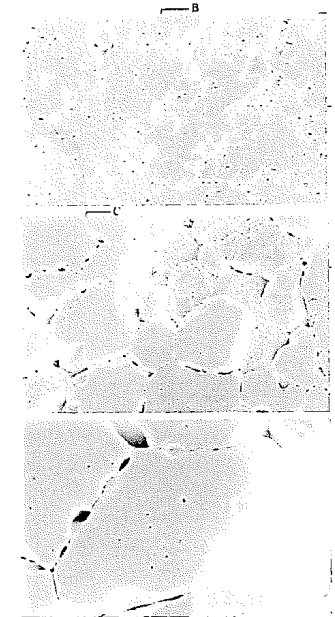


Fig. 3.2.6. SEM of fuel replica, etched, centre.
IFA 555-1, position 401 mm.

外周部

中心部

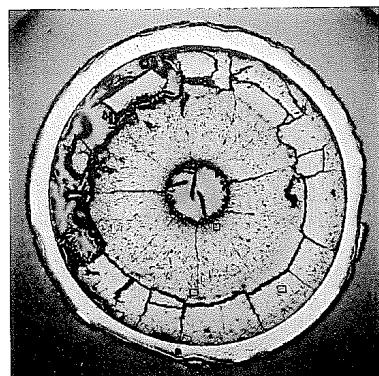


Fig. 3.1.3. SEM overview of fuel replica, polished condition.
The positions of the detail SEM are indicated in the micrograph.
IFA 555-1, position 509 mm.

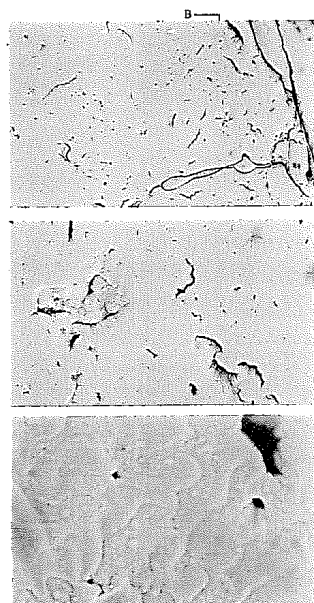


Fig. 3.1.12. SEM of fuel replica, polished, periphery.
IFA 555-1, position 509 mm.

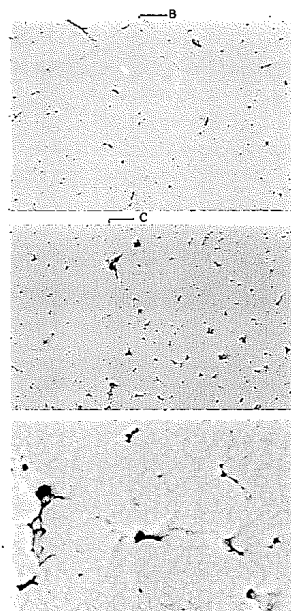


Fig. 3.1.13. SEM of fuel replica, polished, near mid radius.
IFA 555-1, position 509 mm.

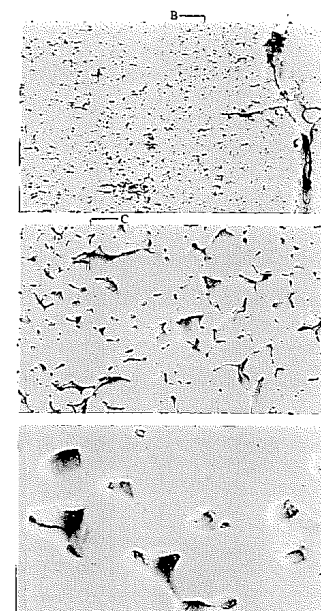


Fig. 3.1.14. SEM of fuel replica, polished, mid radius.
IFA 555-1, position 509 mm.

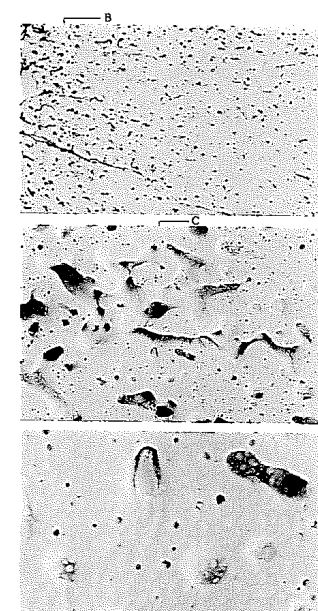


Fig. 3.1.15. SEM of fuel replica, polished, centre.
IFA 555-1, position 509 mm.

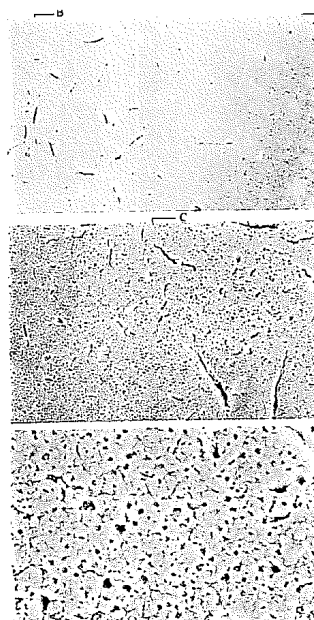


Fig. 3.2.7. SEM of fuel replica, etched, periphery.
IFA 555-1, position 509 mm.

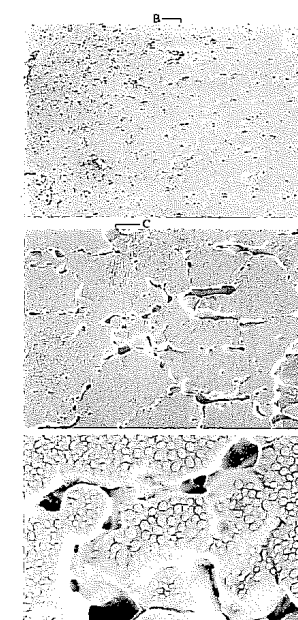


Fig. 3.2.8. SEM of fuel replica, etched, mid radius.
IFA 555-1, position 509 mm.

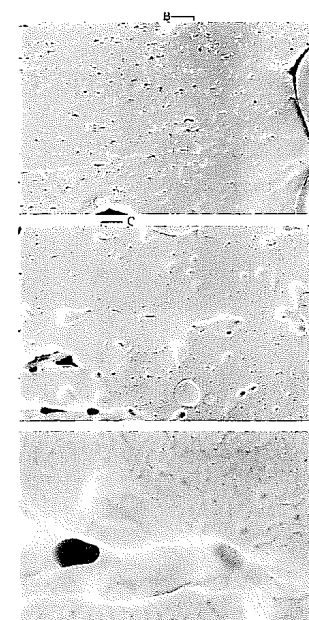
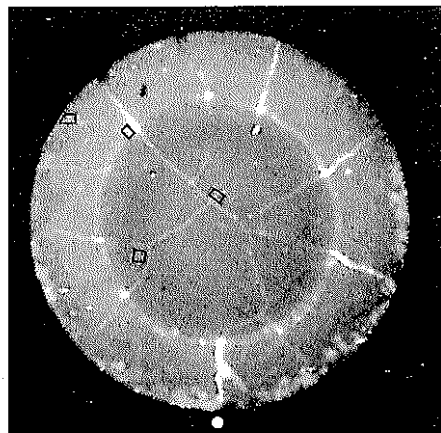
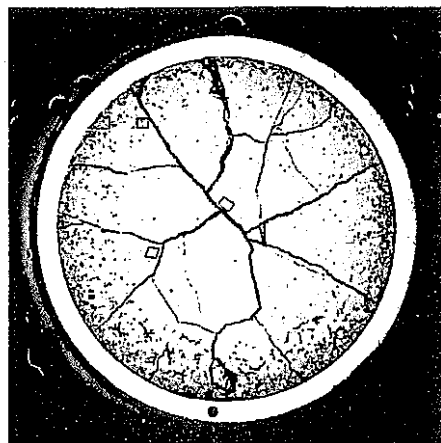
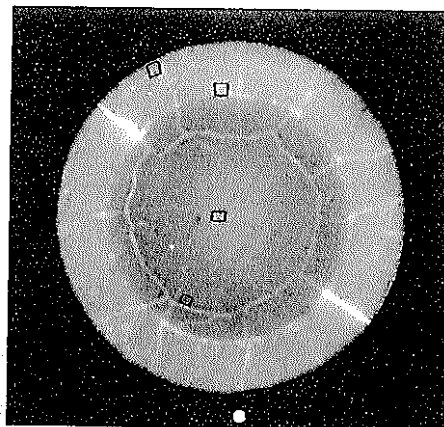
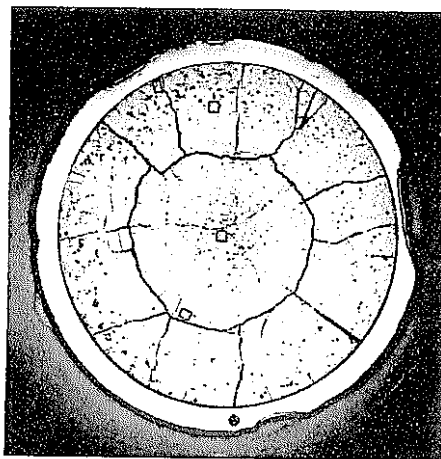


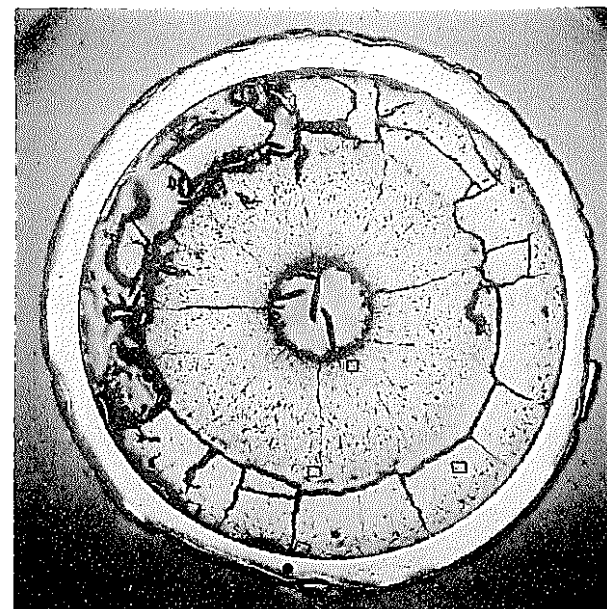
Fig. 3.2.9. SEM of fuel replica, etched, centre.
IFA 555-1, position 509 mm.



(a) 232mm位置の α オートラジオグラフ (上図)
及び β/γ オートラジオグラフ (下図)



(b) 401mm位置の α オートラジオグラフ (上図)
及び β/γ オートラジオグラフ (下図)



(c) 509mm位置の α オートラジオグラフ

図2.5.4 レプリカ観察したペレット断面位置

2.6 燃料ペレットの α 及び β/γ オートラジオグラフィ

(1) α オートラジオグラフィ

α 及び β/γ オートラジオグラフィ写真を、各々の横断面金相マクロ写真と共に図4.1及び4.2に示す。 α 及び β/γ オートラジオグラフィ写真は、燃料棒下部から232mm及び401mmの位置から採取した。

232mm位置(図4.1)の横断面マクロ写真において、 α 線強度が高い部分は、 α オートラジオグラフィ写真上で白点/白い領域で示される。写真から α 線源は、燃料ペレット内に比較的均一に分布している。クラックやボイドは黒い領域で示されている。燃料ペレット外周部において、わずかに α 線強度が高い。この α 線強度が高い領域は、燃料ペレット外周部の組織がポーラスな領域と一致している。

401mm位置(図4.2)の α 線強度は、外縁で高い傾向が見られる。 α 線強度の高い部分が数カ所、燃料ペレット外周付近に観察される。これらの α 線強度の高い部分は、燃料ペレット金相断面の組織がポーラスな位置と一致している。

(2) β/γ オートラジオグラフィ

232mm位置(図4.1)の横断面 β/γ オートラジオグラフィ写真は、 β 線源と γ 線のコンビネーションによる典型的なものであった。 β/γ 線強度が高い部分は、 β/γ オートラジオグラフィ写真上で白点/白い領域で示されており、クラックやボイドも白くなっている。しかし、必ずしもそこに β/γ 線源が蓄積されているとは限らない。これらの強度の高い場所は、クラックやボイドといった燃料ペレット横断面表面積と比較し、より大きな表面積からもたれされたものである。

このオートラジオグラフィ写真の特徴は、燃料ペレット外周の燃料ペレット組織未変化領域において、 β/γ 線源強度が高いことである。 β/γ 線源強度が高い領域の幅は燃料ペレット半径の37%である。この β/γ 線源強度が高い領域の内外縁に、更に強度が高い部分が観察され、その幅は、ペレット端と円周クラックが生じ始めた部分(燃料ペレット半径の40%相当)との幅の10%程度に相当する。燃料ペレット中央部にも、わずかに β/γ 線源強度が高い領域が観察される。その直径は、燃料ペレット全直径の40%に相当する。これらの β/γ 線源強度の高い領域は、燃料ペレット金相横断面に見られる組織のポーラスな領域と一致している。

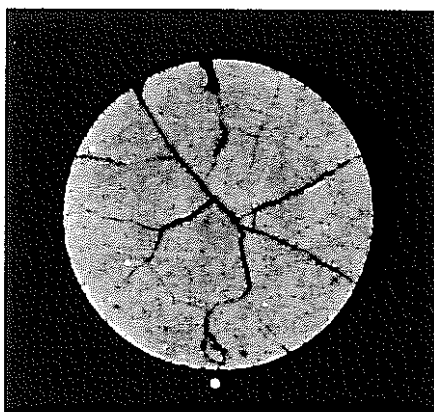
401mm位置(図4.2)の燃料ペレット横断面 β/γ オートラジオグラフィ写真には、2つの特徴が見られる。これらは、 β/γ 線源強度の違いによって、明確に定義できる2つの β/γ 線源強度が高い領域である。1つは、燃料ペレット外周部の β/γ 線源強度が高い領域であり、その幅は燃料ペレット半径の30%に相当する。この β/γ 線源強度が高い領域の内縁に、更に強度が高い部分が観察される。この更に強度が高い部分の位置は、円

周クラックの位置と同一ではない。もう一つは、燃料ペレットの中央部でありその幅は、燃料ペレット中心から燃料ペレット半径の35%に相当する。これらの β/γ 線源強度の高い領域は、燃料ペレット金相横断面に見られる組織のポーラスな領域と一致している。

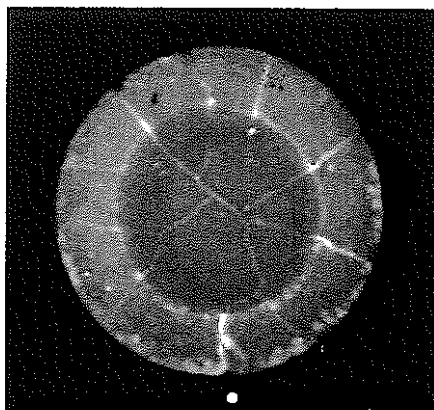
燃料ペレット外周部の β/γ 線源強度が高い領域の幅は、燃料棒下端付近(232mm位置)より上端(401mm位置)の方が狭い。



Macro

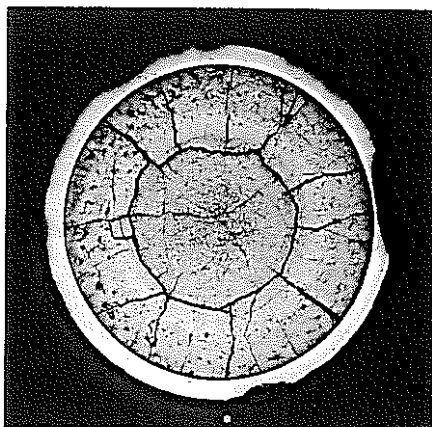


α

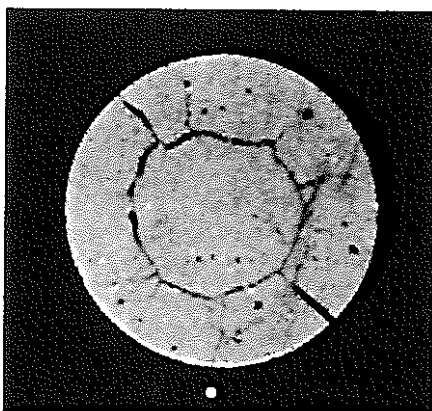


β/γ

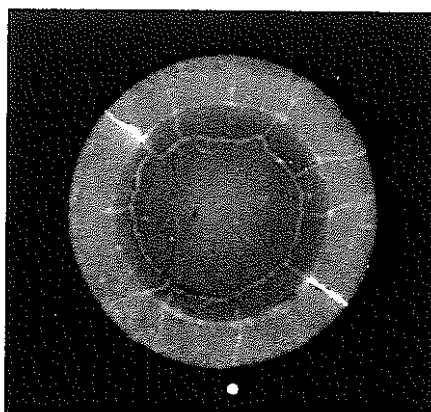
図4.1 マクロ写真、 α 及び β/γ オートラジオグラフィ IFA-555-1, 232mm位置



Macro



α



β, γ

図4.2 マクロ写真、 α 及び β/γ オートラジオグラフィ IFA-555-1, 401mm位置

3. 結論

試験の結果、燃料棒上部で、被覆管に顕著な腐食損傷が認められた。冷却材側での酸化による被覆管肉厚の著しい減少が被覆管外面の数カ所で、特に509mmの位置で顕著に認められた。また、Zrライナーの内壁部で燃料ペレットの大きなクラックと対応した著しい水素化が認められた。509mmの位置ではまた、燃料ペレット中に著しい微細構造変化が認められた。それは、燃料の端部から中心部に向かっての結晶粒径の増加や中心空孔、柱状晶および結晶粒界での大きな金属核分裂生成物などである。

参考文献

- (1) K-Bryhn-Ingebrigtsen, H.K.Jenssen, O.M.Parelius, "NDT of 555-1" IFE/KR/F-94/057
(1993)
- (2) M.Leger, G.D.Moan, A.C.Wallace, N.J.Watson, "On hydride bristers", ASTM, STP 1023
Baltimore (1989)