PNC TN8410 97-067

「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR照射試験（Ⅷ）

IFA－565燃料集合体の照射データ及び照射後試験結果報告

１９９７年２月

動力炉・核燃料開発事業団
東　海　事　業　所

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下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－３３
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所　技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC TN8410 97-067
1 9 9 7 年 2 月

「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR照射試験（Ⅷ）
IFA-565燃料集合体の照射データ及び照射後試験結果報告

実施責任者　上村　勝一郎*
報告者　矢野　総一郎*、河野　秀作*、加藤　正人*
森平　正之*、森本　恭一*
菊池　圭一**

要　旨

ハルデン炉において、「軽水炉用」プルトニウム富化燃料（Puf富化度　4.6w/o）の高燃焼度照射試験（IFA-565）を実施した。IFA-565は、IFA-514照射試験として照射した６本の燃料棒のうち、３本について同一リグにて継続照射したものである。IFA-514については既報にまとめられており、本報告では、継続照射した照射データ及び照射後試験結果について解析・評価を行った。

得られた結果は、以下の５点である。

(1) ペレットピーク燃焼度で61GWd/tMOXの高燃焼度まで健全に燃焼することを確認した。

(2) FPガス放出挙動はBWRUO2及びATR用MOX燃料の挙動と類似しており、FPガス放出率に差は認められない。また、中空ペレットのFPガス放出率 (13.0%) は中実ペレット (17.3%) より低い。

(3) 金相観察結果及びペレット長の変形量からいずれの燃料棒にも大きなPCMIは生じておらず、ペレット形状（中実と中空）がPCMI挙動に与える影響に明確な差は認められない。しかし、中空ペレットの方が中実ペレットに比べて燃料棒外径変化率がやや小さく、外径変化の抑制に効果がある。

(4) 燃料棒の伸びはBWRUO2燃料棒及びATR用MOX燃料棒に比べてやや小さく、約0.15%である。

(5) 製造時に存在したペレットの造粒界が照射中に消失することにより、ペレットスウェリングの緩和に効果のあったことが推察される。

---

* 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

2. 試験燃料棒の仕様 …… 5
2.1 試験燃料棒 …… 5
2.2 照射燃料集合体（リグ）構造 …… 5

3. 製造データ …… 12

4. 照射データ …… 42
4.1 照射履歴 …… 42
4.1.1 燃料棒線出力履歴 …… 42
4.2 計装データ …… 43
4.2.1 燃料棒内圧の変化 …… 43
4.2.2 スタック長の変化 …… 43
4.2.3 燃料棒長の変化 …… 45

5. 照射後試験結果 …… 62
5.1 照射後試験サンプル選定根拠 …… 62
5.2 外観観察 …… 68
5.3 プロフィロメトリー測定結果 …… 93
5.4 γスキャニング試験結果 …… 117
5.4.1 IFA-514 …… 117
5.4.2 IFA-565 …… 118
5.5 渦電流探傷試験結果 …… 168
5.6 中性子ラジオグラフィ試験結果 …… 177
5.7 パンクチャ試験及びFPガス分析 …… 205
5.8 金相観察 …… 210
5.8.1 マクロ観察 …… 212
5.8.2 被覆管　水素化物 …… 224
5.8.3 被覆管　酸化物 …… 234
5.8.3.1 被覆管の水側の酸化膜 …… 251
5.8.3.2 被覆管の燃料側の酸化膜 …… 257
5.8.4 燃料ペレットの微細構造 …… 258
5.8.5 ノジュラー腐食 …… 311
5.9 α及びβ/γオートラジオグラフィ …… 315
5.10 断面γスキャニング …… 319

5.11 残留FPガス …… 337
5.12 燃焼度分析 …… 343
5.13 被覆管内面観察 …… 370
5.14 被覆管の水素分析 …… 379
5.15 バースト試験 …… 381

6. 結果の検討 …… 386
6.1 燃料挙動解析コードによる解析 …… 386
6.1.1 燃料中心温度及び被覆管温度解析結果 …… 386
6.1.2 燃料棒内圧及びFPガス放出率解析結果 …… 387
6.1.3 被覆管応力及び外径変化率解析結果 …… 387
6.1.4 ペレット-被覆管ギャップ解析結果 …… 388
6.2 線出力と燃焼度の評価 …… 420
6.3 燃料棒の外観・形状変化 …… 424
6.4 燃料ペレットの微細組織変化と燃料温度評価 …… 427
6.4.1 マクロ組織について（造粒界の影響） …… 427
6.4.2 組織と燃料温度 …… 428
6.4.3 リム組織 …… 428
6.5 FPガス放出挙動 …… 433
6.6 PCMI挙動 …… 438
6.7 被覆管の健全性 …… 441
6.7.1 被覆管内面観察 …… 441
6.7.2 被覆管の水素分析 …… 441
6.7.3 被覆管の酸化物 …… 443
6.7.4 バースト試験 …… 444
6.7.5 被覆管の健全性のまとめ …… 446

7. 結論 …… 448

参考文献 …… 449

1. はじめに

IFA-514/565 照射試験は、プルサーマル技術開発の一環として、ＢＷＲ８×８燃料と同一仕様を有するＭＯＸ燃料(Puf富化度4.6wt%) について、

(1) プルサーマル燃料の設計を確認すること。

(2) 動燃で製造する水炉用ＭＯＸ燃料の信頼性を高めること。

を目的として実施された。また、本照射試験は、原電敦賀炉におけるＢＷＲプルサーマル燃料照射試験に先行して実施され、ペレット形状（中実／中空）とペレットの表面状態（研削／非研削）を試験パラメータとして、1979年７月よりハルデン炉において照射を開始し、1988年11月に照射を終了した。燃焼度はペレットピークで49GWd/tMOXに達した[1]～[8]。引き続き、IFA-514 リグに装荷していた６本のＭＯＸ燃料棒のうちIFA-565 ロッド3, 4, 6 （以下、「IFA-565-3, 4, 6 」という。）の３本をそのままIFA-565 リグとして再装荷し、1990年11月から1993年10月まで継続照射を行った。燃焼度はペレットピークで59GWd/tMOXに達し、1995年10月に照射後試験（以下、「ＰＩＥ」という。）を終了した。表1.1に照射試験計画を、表1.2に試験燃料データを、表1.3にハルデン炉運転データをそれぞれ示した。

本報告書では、これまでに破損が無く健全に照射試験及びＰＩＥを終了したIFA-565 の３本の試験燃料棒の製造から照射後試験までの試験結果についてまとめるとともに、これらの結果をもとに、プルサーマル用高燃焼度ＭＯＸ燃料の照射挙動について解析・評価した結果についてとりまとめた。

燃焼度及び線出力については、炉内計装と燃焼度分析による２つの値があり、後者の方が約７％低い値となった。第１～５章では前者を採用し、結果の評価を実施した第６章以降は、分析値を正として後者を採用した。

表1.1　IFA-565 照射試験スケジュール

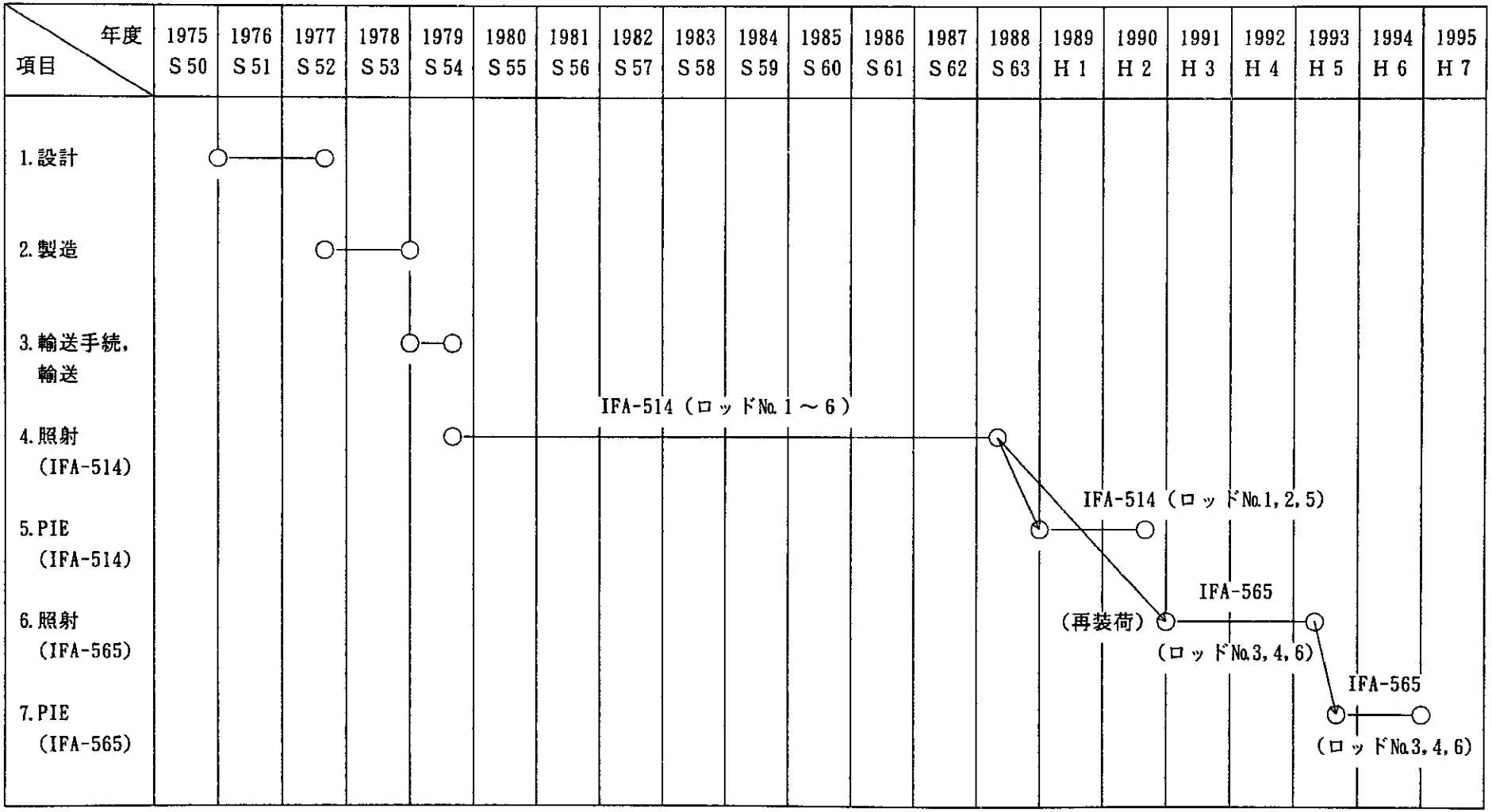


表1.2 試験燃料データ

DATA SHEET

IFA- 565

ISSUE NO:	PAGE: 2
SIGN: M. Ito	DATE: 11/10-90

TEST ASSEMBLY DATA

	DESCRIPTION				
	Fuel Form	UO_2 - PuO_2 pellet, mechanically blended, sintered and ground			
	Rig Pos. No.	2	3	1	
	Fuel Weight kg	1.252	1.107	1.105	Total: 3.464
	Rod No.	514-3	514-4	514-6	
	Fuel Density g/cm³	10.39	10.36	10.34	
	Fuel Diameter mm	10.57	10.55 (3.5)	10.55 (3.5)	
	Enrichment	Pu:4.64 w/o	Pu fiss.	U: 0.71 w/o U-235	
	Instrumentation	EF2/EC2	PF4/EC3	EF1/EC1 (upper/lower rod en	
	Diam. Clearance mm	0.23	0.25	0.25	
	Pellet Length mm	10	10	10	
	Dishing				
	Dishing Depth mm				
	Land Width mm				
	Cladding	Zircaloy-2			
	Cladding State	Tensile strength	Yield strength	Elong	
		RT 55.3 - 55.8	37.1 - 38.0	33-34	Burst
		343°C 26.0~26.4	13.5 - 13.7	42-44	791-800
	Welding				
	Filler Gas	He			
	Clad. Int. Diam. mm	10.80	10.80	10.80	
	Clad. Thickness mm	0.88	0.88	0.88	
	No. Pins /Cluster	3			
	Pitch Distance mm	46.0			
	Spacers	2 spacers, Zircaloy-2			
1)	Burnup MWd/t MOX	37,785	38,650	39,071	
	Fuel Length/Pin mm	1379.91	1379.18	1379.36	
	Plenum	80	80	80	
	Shroud Material	Zircaloy-4			
	Shroud Int. Diam. mm	71			
	No. Of Clusters	1			
1)	Plenum Pressure(bar)	10.47 (at 121°C)			

1) at start of irradiation in IFA-565

表1.3 ハルデン炉運転データ

DATA SHEET

ISSUE NO:	PAGE: 1
SIGN: M. Ito	DATE: 11/10-90

IFA-565

Supplier: JAERI/PNC

OPERATIONAL DATA

OBJECTIVES

To investigate the in-reactor behaviour and reliability of MOX fuel rods with long fuel stack at high burnup, especially the effects of pellet design on fuel cladding mechanical interaction, through in-reactor measurements of fuel stack length and fuel rods length change and plenum gas pressure.

DESCRIPTION	PREDICTED	ACTUAL	REMARKS
Loading Date	10/90		
Unloading Date			
Burn-Up MWd/t MOX	50,000		(rod average burnup)
Reactor Position	6-21		
Ref. Flux Position			
Channel Power kW	104/94		
Avg. Lin. Heat Rating W/cm	250		
Max. Lin. Heat Rating W/cm	310		
Peak Surf. Heat Flux W/cm²	79		
Peak $\int kd\Theta$ W/cm	22.5		f = 0.91
Peak Spec. Heat Rating W/gUO_2	34.2		
Max. Centre Temp. °C	1,730		
Cooling Condition	Nat.circulation		
Inlet Velocity m/sec	0.49		
Inlet Throttling $v^2/2g$	30		
Hydraulic Diam. mm	29.9		
Flow area mm²	3408		
Assembly Dwg.	07585	Parts List Dwg.	481685
Cable Data Sheet	382398		
Experim. Procedure	EP-1565		

INSTRUMENTATION

1	calibration valve type II	2	EF differential transformer
1	inlet turbine D=40, μ=32	2	Inlet Coolant T/C
1	outlet turbine D=55, μ=32	2	Outlet Coolant T/C
3	EC differential transformer	5	Neutron Detectors
1	PF differential transformer	1	Failure Detector

2. 試験燃料棒の仕様

試験燃料棒仕様は、ＢＷＲ８×８型のアイランド型ＭＯＸ燃料と同一の仕様にするとともに、次に示す試験的要素を取り入れている。

(1) 照射中の燃料挙動特性を見るため燃料棒に計装を取付ける。

(2) 中空（Hollow）ペレットを試作開発して、本照射試験に組入れる。

なお、IFA-514 まではペレット表面粗さを試験パラメータとしていたが、IFA-565 ではペレット表面未研磨のもののみを使用したので、試験パラメータから外した。

以下に試験燃料棒と照射燃料集合体（リグ）の主要な仕様を示す。

2.1 試験燃料棒

本試験燃料棒の概略構造を図2.1.1に、試験燃料棒仕様を表2.1.1に示す。

燃料棒は、被覆管に燃料ペレット、断熱体（UO_2 ペレット；上下各１個）、上部プレナム・スプリングを充填し、管端を端栓または計装用端栓で密封された構造としている。燃料棒の種類は、計装及び充填するペレットの種類により次の３種に分けられる。部材等の組合せを表2.1.2に示す。

燃料棒	ペレット種類	上部計装	下部計装
IFA-565-3	中実ペレット	ＥＦ	ＥＣ
IFA-565-4	中空ペレット	ＰＦ	なし
IFA-565-6	中空ペレット	ＥＦ	ＥＣ

注）計装種類　ＰＦ：燃料棒内圧計測器
ＥＦ：燃料有効長計測器
ＥＣ：燃料被覆管伸び計測器

2.2 照射燃料集合体（リグ）構造

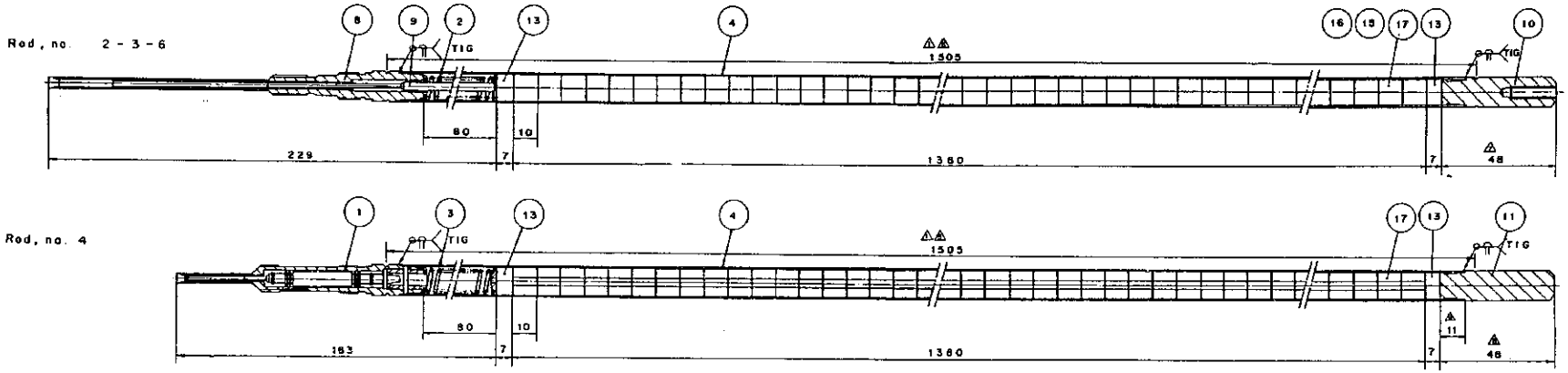
試験で使用するリグは、正六角形の頂点に１本ずつ燃料棒が配置された形状の燃料棒クラスタ構造となっている。ハルデン炉では、この構造以外の構造を有するリグの使用も可

能であるが、最も典型的で、しかも照射実績の多いのが、本試験で採用したリグである。

本試験で使用するリグの概略を図2.2.1～2に示す。

IFA-565-3, 6の燃料棒は、その上下端に燃料有効長伸び計測器及び燃料被覆管伸び計測器が取付けられている。IFA-565-4 の燃料棒は上端に燃料棒内圧計測器が取付けられている。また、リグ内には3本の燃料棒以外に、各燃料棒出力を測定する中性子検出器、さらに冷却材温度を測定する熱電対等が取付けられている。

MARK	NOTE	DESCRIPTION	DATE
⚠		1507 → 1504	77.5.31
⚠		Hole removed	〃
⚠		EH4-223M Added.	〃
⚠		Numbers Added.	77.6.23
⚠		1504 → 1505	〃
⚠		Item ⑲ Added.	〃
⚠		50 → 48	〃
⚠		49 → 48	〃
⚠		10 → 11	〃
⚠		Item ⑳ Added.	〃
⚠		EH4-231M Added.	〃
⚠		EH4-223M Added.	〃
⚠		EH4-232M Added.	〃



⚠	1				1		20	EH4-260M	Disc Hollow	Zry-2	2	
⚠					(22)		19	〃 -111M	Fuel Pellet (E)	PuO_2-UO_2		Hollow (TE) (AS)
⚠	(22)						18	〃 -111M	〃 (D)	〃		Hollow (TE) (G)
⚠				138		138	17	〃 -111M	〃 (C)	〃		Hollow ϕ3.5
⚠	116	138					16	〃 -110M	〃 (B)	〃		Solid (Grinded)
⚠			138		116		15	〃 -110M	Fuel Pellet (A)	PuO_2-UO_2		Solid (as sintered)
	1				1		14	〃 -131M	Thermal Insulator (B)	N, UO_2	2	
	1	2	2	2	1	2	13	〃 -130M	Thermal Insulator (A)	N, UO_2	10	
					1		12	〃 -220M	Top End Plug	Zry-2	1	
				1			11	〃 -230M	Bottom End Plug	〃	1	
		1	1			1	10	⚠ 〃 -223M	EC End Plug	Zry-2	3	
		1	1			1	9	⚠ 〃 -232M	Core Assembly		3	
		1	1			1	8	⚠ 〃 -232M	EF End Plug Assembly		3	
	1				1		7	⚠ 〃 -222M	TF Assembly		2	
	1				1		6	⚠ 〃 -222M	Filler Body	Zry-2	2	
	1				1		5	⚠ 〃 -222M	T.F End Plug	Zry-2 Inconel 600	2	
	1	1	1	1	1	1	4	〃 -210M	Cladding	Zry-2	6	
	1			1	1		3	〃 -251M	Spring (B)	AISI 304 WPB	3	
		1	1			1	2	〃 -250M	Spring (A)	AISI 304 WPB	3	
	1			1			1	⚠ EH4-231M	End Plug Assembly		2	
							ITEM	DRAWING NO.	NAME	MATERIAL	NUMBERS	REMARKS

	PF-TE	EF-EC	EF-EC	PF-TE		EF-EC
Fuel Rod no.	1	2	3	4	5	6

ANGLE	SCALE		DESIGN	DWG.	CHECK	APPR
THIRD	1/1( )	NAME	M.Hirasawa	S.Kirihara	T.OMATA	R.Yumoto
		DATE	77-5-6	77 5 12	77 5 14	77 5 21

DIVISION: Pu-Thermal-A1

TITLE: Fuel Rod

CODE NO: 405715

DWG. NO: EH4-200M

SEQ. NO: 770098

図2.1.1 ＩＦＡ－５６５照射試験燃料棒の概略図

表2.1.1　ＩＦＡ－５６５照射試験燃料棒の仕様

燃料棒タイプ			中空ペレット (IFA-565-4, 6)	中実ペレット (IFA-565-3)
ペレット	直径	(mm)	$10.55\ ^{+0.03}_{-0.05}$	←
	高さ	(mm)	10.0 ± 0.5	←
	密度	(%T.D.)	94.0 ± 1.5	←
	中空径	(mm)	3.5 ± 0.2	—
	Pu^f 富化度	(wt%)	4.64	←
	PuO_2径	(μm)	≦500	←
	(U+Pu)含有率	(%)	≧87.7	←
	O／M比		1.98 ～ 2.01	←
インシュレータペレット	材料		天然UO_2	←
	直径	(mm)	10.55 ± 0.05	←
	高さ	(mm)	7.0 ± 0.5	←
	密度	(%T.D.)	94.0 ～ 95.0	←
被覆管	内径	(mm)	10.80	←
	外径	(mm)	12.52	←
	肉厚	(mm)	0.86	←
燃料棒	有効長	(mm)	1380	←
	全長	(mm)	1625及び1671	1630及び1671
	封入ガス圧力	(kg/cm^2)	He：1.0	←

表2.1.2　燃料ロッドと計装の組合せ

ロッドパーツ ＼ ロッドNo.			燃料ロッド IFA-565-3	燃料ロッド IFA-565-3	燃料ロッド IFA-565-6	数量	備考
ペレット	燃料スタック	中空（3.5φ）		○ 138	○ 138	276	4.64 w/oPu-fissile
		中実（A.S）	○ 138			138	
		中空（A.S）　TF用				0	
	断熱ペレット	中実（A.S）	○ 2	○ 2	○ 2	6	天然UO_2
		中空（A.S）　TF用				0	
ディスク						0	Zry-2
スプリング		プレート付きスプリング		○ 1		1	SUS-304 WPB
プレナム		スプリング	○ 1		○ 1	2	
端栓	上部	PF		○ 1		1	計装
		EF	○ 1		○ 1	2	
		N				0	
	下部	TF				0	計装
		EC	○ 1		○ 1	2	
		N		○ 1		1	

注）A.S →未研磨ペレット
　　N→標準端栓（計装なし）

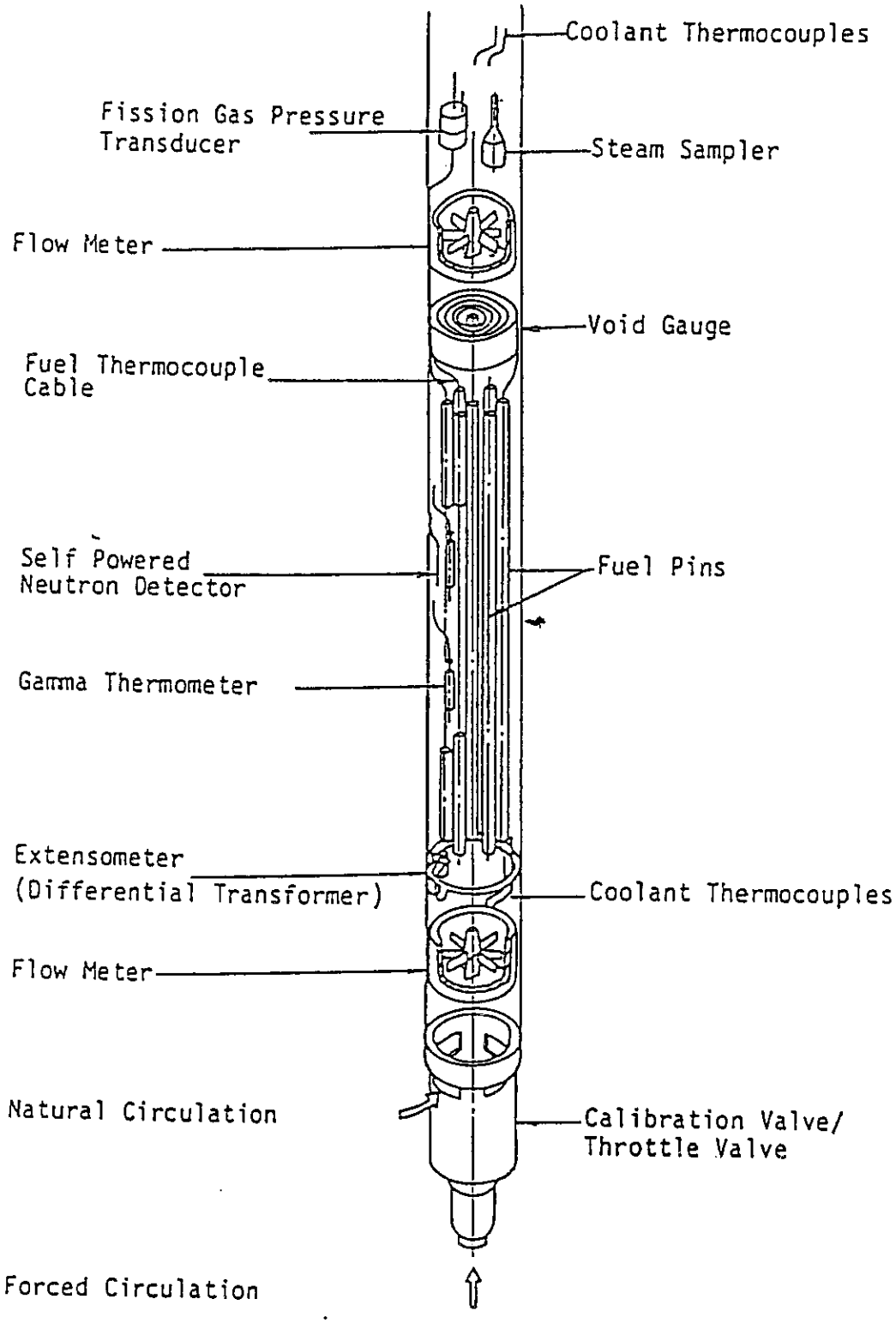


図2.2.1　計装付ＨＢＷＲ燃料集合体

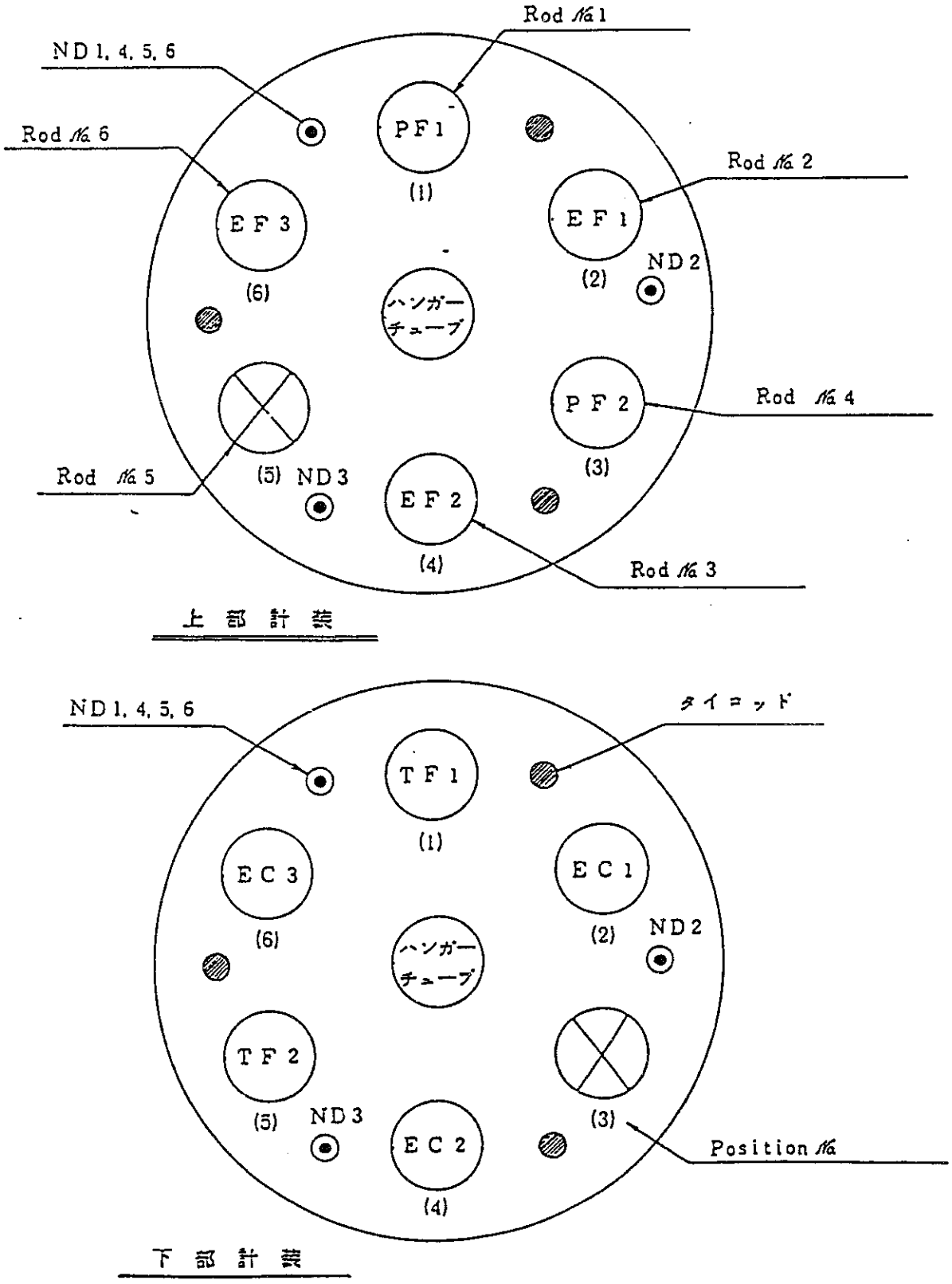


図2.2.2　ＩＦＡ－５６５燃料棒配置と計装配置（Top View）

3. 製造データ

表3.1に各ロッド毎の製造時データを示す。

PuO_2原料粉は、常陽燃料を旧プル燃部製造一課にて湿式回収したものが使用され、湿式回収工程は7ロットに分けて行われた。その後、ばい焼による粒径調節後、1ロットに均一混合されている。表3.2にPuO_2粉末の分析値を示す。

また、UO_2 原料粉は、住友金属鉱山（株）製のふげん用UO_2 が使用され、2ロットに分けて製造されている。表3.3にUO_2 粉末の物性及び分析値を示す。

本照射試験で用いられた中空ＭＯＸ燃料ペレットの製造は、初めての試みであったため、本番製造に先立ち、製造条件を決定するための先行試験が行われている。本番製造と同一工程条件で実施された先行試験の製造フローを図3.1に示す。製造時における特徴として、使用したPuO_2, UO_2 原料粉の平均粒径が小さく、凝集しやすい粉末であるため、そのままでは十分混合されず、PuO_2とUO_2 の偏析が起こった。そのため、混合前に 700℃のばい焼還元による受入原料粉の不活性化処理を行うとともに粉砕用Ｓ型ブレンダーへのMO_2 粉のチャージ量を最適化（10～20w/o）したところ、偏析はなくなったことが報告されている。

また、先行試験結果から製品の密度調整は成型圧力を2 ton/cm² とすることでポアフォーマーの添加なしにスペックを満たすことがわかったため、この条件で成型されている。しかし、回収MO_2 粉を原料粉に混合したため、粉末の活性が低下し、プレス圧力を下げたこととあいまって、製品ペレット外表面に造粒跡を残し、製品歩留りも低下した。さらに、焼結炉内の温度分布等の把握が十分でなく、各ロット毎に製造条件を変えて製造したことが問題点として報告されている。造粒方法、造粒条件を図3.1と表3.4に示す。

また、表3.4に製品ロット製造条件を、表3.5～7に各燃料要素の製品ロット構成を示す。

上記の条件で製造したペレットロット毎の製造時データ（製品ペレット検査結果）を表3.8～9に、各製品ロットのペレットのαオートラジオグラフと金相写真を図3.2～14に示す。また、燃料被覆管の化学成分分析結果を表3.10に、機械強度試験結果を表3.11に、寸法検査結果を表3.12に、試験燃料棒の検査結果を表3.13に、それぞれ示す。

表3.1　ＩＦＡ－５６５各ロッドの製造時データのまとめ

			IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
試験パラメータ		中実／中空	中実	中空 3.5φ	中空 3.5φ
		研磨／非研磨	非	非	非
計装		上	ＥＦ	ＰＦ	ＥＦ
		下	ＥＣ	——	ＥＣ
ペレット*1	密度／(g／cc)		10.387±0.056	10.357±0.016	10.340±0.062
	／%／TD		94.514±0.513	94.239±0.555	94.086±0.569
	外径／mm		10.566±0.014	10.549±0.015	10.549±0.014
	内径／mm		——	3.49	3.49
	高さ／mm		10.14	10.14	10.21
	O／M		1.981	1.985	1.984
	吸着ガス／(μℓ／gMO)		19.9	22.2	24.1
	水分／(μℓ／gMO)		10	10	10
	Pu 富化度／(w／o)		4.67	4.72	4.72
	PuO_2富化度／(w／o)				
	U^{235} 濃縮度／(w／o)				
スタック	有効長／mm		1378.75	1377.95	1378.05
	重量／g		1254.7	1107.6	1108.1
	使用ペレットロッド(個数)		HB-301 (122)	HB-201 (68)	HB-201 (70)
			302 (14)	202 (68)	202 (55)
	(ｲﾝｼｭﾚｰﾀ 上下各１個)		HP-202 (2)	HP-202 (2)	? (2)
	カラム長／mm		1392.85	1391.91	1392.06
被覆管	外径	平均／mm	12.526	12.533	12.530
		σ	0.002	0.001	0.002
		最大	12.533	12.533	12.537
		最小	12.519	12.530	12.526
	内径	平均／mm	10.795	10.793	10.796
		σ	——	——	——
		最大	10.804	10.797	10.799
		最小	10.791	10.787	10.791

＊1　各ロッドのうち代表的なペレットロット（詳細は表2.1.2参照）

表 3.1　IFA-565 各ロッドの製造時データのまとめ（続き）

			IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
被覆管	肉厚	平均／mm	0.866	0.870	0.867
		σ	——	——	——
		最大	0.888	0.884	0.884
		最小	0.863	0.856	0.861
	楕円度	平均／μm	3.29	2.14	2.55
		σ	2.60	1.70	1.69
		最大／μm	10	6	7
		最小／μm	0	0	0
	ミルシート情報		不純物／ppm （H：14.7, 13.6, N：35, 47, O：1195, 1172） Fn＝0.20 熱処理温度　577℃ インゴット組成％ Sn：1.54 Fe：0.14 Cr：0.10 N：0.05		
ロッド	全長（V溝間距離）／mm		1505.7	1505.7	1505.7
	全重量／g		1671.0	1508.3	1527.3
	プレナム体積／cm³		9.977	12.174	9.973
	（プレナム部体積／cm³		4.256	6.456	4.256
	ギャップ部体積／cm³）		5.721	5.716	5.717
	プレナム体積／cm³		5.68	7.74	5.69
	中空部体積		——	13.21	13.21
	ペレット・被覆管ギャップ／μm		230	244	246
	初期内圧（20℃）／kg／cm²		1.033	1.033	1.033
	内部ガス（トータル／mol）		2.264×10^{-3}	2.641×10^{-3}	2.542×10^{-3}
	He／mol		0.455×10^{-3}	0.543×10^{-3}	0.445×10^{-3}
	吸着ガス／mol		1.809×10^{-3}	2.098×10^{-3}	2.097×10^{-3}
	ガス／（μℓ／g）		＜32	＜42	＜42
	水分／（μℓ／g）				
	プレナムスプリング 体積／cc		1.069	1.187	1.069
	〃ばね定数／（kg／cm）		0.23	0.23	0.23

表 3. 2　PuO_2原料粉分析結果

分析項目	分析値	備考
Pu同位体組成		
Pu - 238	0.102 %	
Pu - 239	77.143	
Pu - 240	19.415	
Pu - 241	2.782	
Pu - 242	0.558	
Pu fissile (Pu-239+241)	79.925 %	
Am含有率	2420 ppm*	*1976.11.11測定
不純物**		
Ag	< 5	**PuO_2粉末は7ロットあるが、この値は、各々の分析値の最大値を用いた。
Aℓ	60	
B	< 1.0	
Cd	< 5	
Cr	65	
Cu	< 5	
Fe	170	
Mg	15	
Mn	< 10	
Ni	60	
Si	140	
V	< 50	
PuO_2原料総重量	1299 g	

表 3.3　UO_2 原料粉分析結果および焼結試験結果

	分析項目	分析結果 Lot-R	分析結果 Lot-S	分析法	備考
粉末	不純物	ppm	ppm		
	Ag	< 0.2	< 0.2	分光分析	
	Aℓ	< 5	< 5		
	B	< 0.1	< 0.1		
	Cd	< 0.5	< 0.5		
	Cr	< 2	< 2		
	Cu	< 1	< 1		
	Fe	<13	<13		
	Mg	< 1	< 1		
	Mo	< 2	< 2		
	Si	< 5	< 5		
	Ni	< 6	< 6		
	Sn	< 1.2	< 1.2		
	C	26	22	電量滴定法	
	Ca	< 2	< 2	原子吸光法	
	Cℓ	< 2	< 2	比濁法	
	F	< 1	< 1	吸光光度法	
	N	15	16	〃	
	Dy+Eu+Gd+Sm	< 0.3	< 0.3	分光分析法	
	Uメタル含有率	87.48 %	87.61 %	酸化重量法	
	O／U比	2.11	2.09	酸化重量法 ポーラログラフ法	
	水　分	0.23 %	0.18 %	CEC Coulometry	
	平均粒度	2.24 μ	2.05 μ	F.SSS 法	
	高密度	2.6 g/cm³	2.5 g/cm³	Fill Volume 測定法	
	比表面積	6.03m²/g	6.00m²/g	ＢＥＴ法	
	タップ密度	3.4 g/cm³	3.2 g/cm³	充填密度測定器法	
焼結ペレット	水　分	<10μℓ/g	<10μℓ/g		
	ガ　ス	10μℓ/g	12μℓ/g		
	密　度	95.9%T.D	96.1%T.D		
	UO_2 原料総重量	24,384 g	25,138 g		

表3.4　製品ロット製造条件

工程 / ロット	均一化混合	粉　砕	バインダー添加 造　粒	整　粒 乾　燥	成　型	予備焼結	本　焼　結	研　磨	脱ガス
HB-201	ニーダー2hr (HB-02 とペア)	W.C ボール入S型混合機にて8hr粉砕	ニーダーにMO_2を装荷し，攪拌し，MO_2 比2w/oのNS−40を溶かしたアルコール溶液を添加	生乾きになった造粒粉を20メッシュアンダーにふるう	成型圧　2 t/cm² 充填量　21.1 mm ダイス径　12.30 mm	800 ℃×2hr NH gas	1770℃×2hr, NH	なし	1100℃×2hr 10^{-4}〜10^{-5}Torr
HB-202	同上			乾燥機にチャージし，NHガスを流し一夜放置後80℃×4hr，真空で乾燥	成型圧　1.5t/cm² 1.0t/cm² 充填量　20.9 mm 20.9 mm ダイス径　12.02 mm		①1700℃×2hr, NH ②1700℃×4hr, NH ③1770℃×2hr, NH	なし	〃
HB-301					成型圧　1.5t/cm² 充填量　20.9 mm ダイス径　12.04 φmm		①1700℃×2hr, NH ②1700℃×2hr, NH	なし	〃
HB-302	同上				成型圧　1.0t/cm² 1.3t/cm² 充填量　20.9 mm ダイス径　12.04 φmm		①1770℃×2hr, NH	なし	〃

表3.5　IFA-565-3の構成

IFA－565－3

	下部端栓	ディスク	燃料ペレット	スプリング	上部端栓
パーツ　No.	EC－1	スタック調整用	No.3	14	EF－3
長　さ（mm）	37.10	1.05	1378.75	93.6	139.30
重　量（g）	34.24	0.55	1254.7	8.33	52.31

MOXペレット個数

136 個

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ペレットロット No.→	HP-0202	←												HB－301																→
ペレット No.→	1	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	70	73	74	75	76	77	78	79	
														HB－301																
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	104	105	106	109	110	111			
														HB－301																
	113	114	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	138	141	142	146	147		
														HB－301																
	148	149	150	151	152	153	154	155	156	158	159	160	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177		
	HB－301	→										HB－302	→														HP-0202			
	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1086	2				

表3.6　IFA-565-4の構成

IFA－565－4

	下部端栓	ディスク	燃料ペレット	スプリング	上部端栓
パーツ　No.	N－4		No.4	4	PF－4
長　さ（mm）	37.14		1377.95	94.5	92.80
重　量（g）	35.98		1107.6	9.22	31.54

MOXペレット個数　136 個

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ペレットロット No.→	HP-0202	←																	HB－201											→
ペレット No.→	3	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053		
	HB－201																													
	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080			
	HB－201														HB－202															
	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	3031	3032	3033	3034	3035	3036	3037	3038	3039	3040	3041	3042	3043			
	HB－202																													
	3044	3045	3046	3047	3049	3050	3052	3053	3054	3055	3056	3057	3058	3059	3062	3063	3064	3065	3066	3067	3069	3070	3071	3073	3074	3075	3076	3077		
	HB－202																											HP-0202		
	3078	3079	3080	3081	3082	3083	3084	3085	3086	3087	3088	3089	3090	3091	3093	3094	3095	3096	3097	3098	3099	3100	3101	3102	3103	3104	3105	4		

表3.7　IFA-565-6の構成

IFA-565-6

	下部端栓	ディスク	燃料ペレット	スプリング	上部端栓
パーツ No.	EC－4	スタック調整用	No.6	13	EF－6
長さ（mm）	37.08	2.03	1378.05	93.5	139.30
重量（g）	34.26	1.13	1108.1	8.30	52.17

MOXペレット個数
135 個

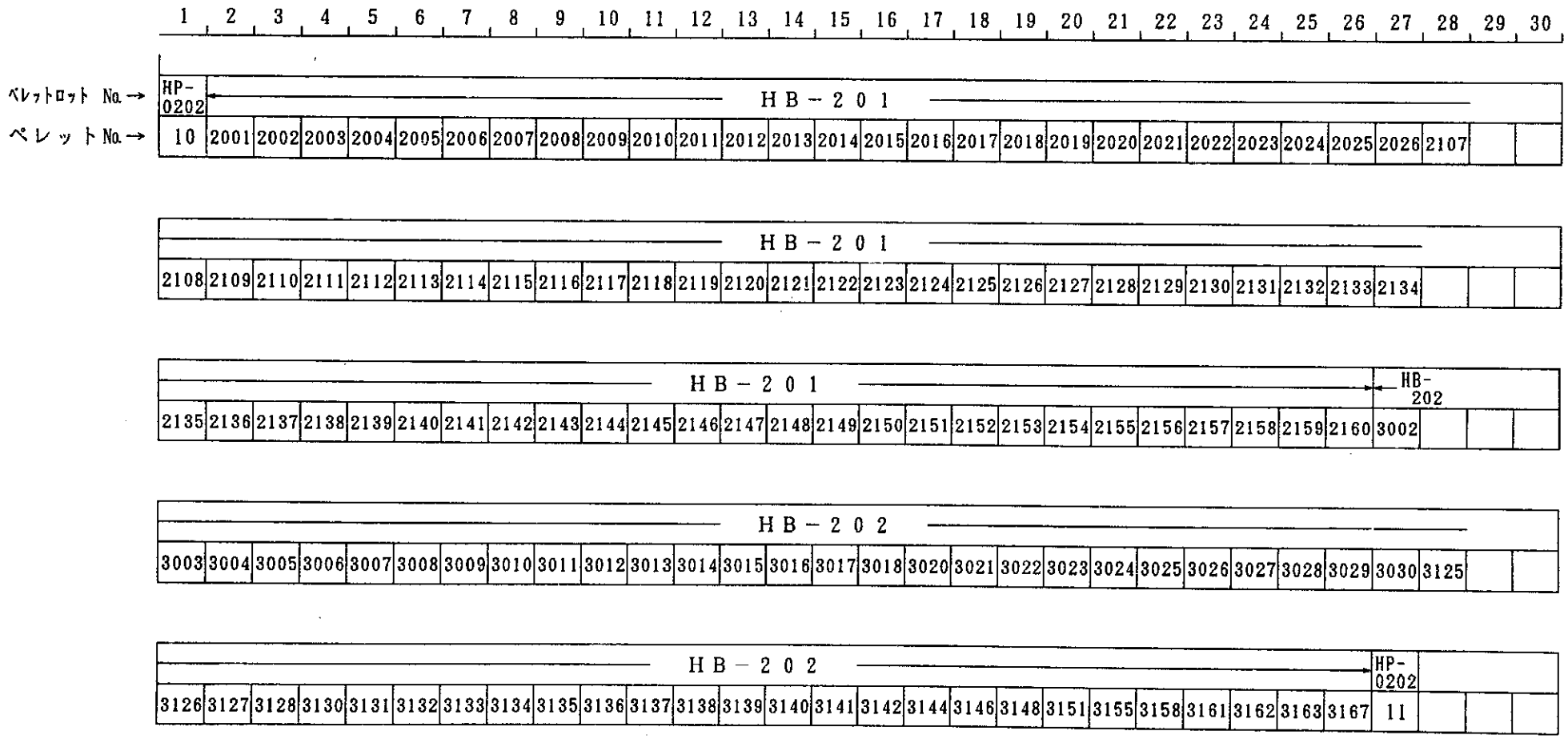


表3.8　製品ペレット検査結果－1

区分	項目	規格	検査結果			
			HB-201	HB-202	HB-301	HB-302
ウラン原料粉末	U-235含有量	天然ウラン組成				
プルトニウム原料粉末	同位体組成 Am含有率	測定値	Pu 238　0.102 (%)　Pu 241　2.782 (%) Pu 239　77.143　Pu 242　0.558 Pu 240　19.415 Am：2420〔ppm〕　(Nov. 1976)			
製品ペレット	プルトニウム富化率	4.64±0.14 fissil w/o	4.76	4.68		4.63
	Pu＋U含有率	87.7w/o 以上	88.3	88.3	88.3	88.3
	O／M比	1.98 ～ 2.01	1.98	1.99	1.98	1.99
	蒸発性不純物	50μℓ／g・MO_2 以下	32	12	22, 20	＜ 10
	水分	10μℓ／g・MO_2 以下	＜ 10	＜ 10	＜ 10	
	プルトニウムスポット	≦ 500 μm	別添写真参照			
	寸法及び密度		表2.9　参照			
	金相試験		図3.3～14　参照			
	不純物	Ag≦ 10　〔ppm〕 Aℓ≦ 300 B　≦ 1.0 Ca≦ 200 Cd≦ 1.0 Cr≦ 200 Cu≦ 50	＜ 0.2 20 ＜ 0.3 ＜ 10 ＜ 1.0 15 ＜ 1	＜ 0.2 20 ＜ 0.3 ＜ 10 ＜ 1.0 ＜ 10 ＜ 1	＜ 0.2 ＜ 10 0.8 15 ＜ 1.0 ＜ 10 ＜ 1	＜ 0.2 ＜ 10 ＜ 0.3 10 ＜ 1.0 ＜ 10 ＜ 1

表3.8　製品ペレット検査結果－1（続き）

区分	項目	規格	検査結果			
			HB-201	HB-202	HB-301	HB-302
製品ペレット	不純物	Fe≦ 400	110	< 10	40	15
		Mg≦ 100	< 2	< 2	< 2	< 2
		Mn≦ 200	< 6	< 6	< 6	< 6
		Mo≦ 300	< 10	< 10	< 10	< 10
		Ni≦ 300	20	< 10	< 10	< 10
		Pb≦ 100	< 10	< 10	< 10	< 10
		Si≦ 300	< 10	< 10	< 10	< 10
		Sn≦ 100	< 10	< 10	< 10	< 10
		Dy+Eu+Gd+Sm≦ 2.0			< 1.2	
		C ≦ 200	80, 50	45	80	30
		F ≦ 15	< 10	< 10	< 10	< 10
		Cl≦ 25	< 25	< 25	< 25	< 25
		N ≦ 100	< 50	< 50	< 50	< 50
		全不純物量≦ 1500				

表3.9　製品ペレット検査結果－2

Lot No.	グリーンペレット						焼結ペレット						備考
	サンプル数／母集団	外径 (mmφ) σ	内径 (mmφ) σ	高さ (mm) σ	重量 (g) σ	ρ.T.D. (%) σ	サンプル数／母集団	外径 (mmφ) σ	内径 (mmφ) σ	高さ (mm) σ	重量 (g) σ	ρ.T.D. (%) σ	
HB-201 (中空)	10／196	12.12 0.00	4.02 0.00	11.76 0.31	8.550 0.296	65.1 0.43	10／196	10.52 0.01	3.48 0.00	10.38 0.29	8.332 0.268	94.6 0.3	
HB-202-01 中空	20／	12.10 0.00	4.02 0.00	11.32 0.09	8.259 0.120	65.4 0.3	20／	10.57 0.01	3.50 0.00	9.97 0.10	8.049 0.119	94.8 0.5	
HB-202-02 中空	10／	12.11 0.00	4.02 0.00	10.94 0.08	8.282 0.068	67.4 0.1	10／	10.62 0.00	3.52 0.00	9.74 0.07	8.072 0.070	96.0 0.2	
HB-301 (中実)	10／196	12.11 0.00	—	11.65 0.09	96.88 0.100	65.9 0.2	5／192	10.57 0.00	—	10.33 0.10	9.369 0.087	94.8 0.2	・再焼結
HB-302-01 (中実)	10／170	12.12 0.00	—	11.25 0.22	9.168 0.247	64.5 0.5	10／170	10.51 0.02	—	9.90 0.20	8.890 0.241	94.3 0.4	
HB-302-02 (中実)	10／60	12.12 0.00	—	11.64 0.18	9.647 0.151	65.5 0.3	10／60	10.56 0.02	—	10.29 0.16	9.355 0.147	94.6 0.4	

表3.10　被覆管の化学成分

	仕　様	結　　果		
インゴット				
	%	上部	中部	下部
1. 組　成				
Sn	1.20 ～ 1.70	1.54	1.54	1.59
Fe	0.07 ～ 0.20	0.14	0.14	0.16
Cr	0.05 ～ 0.15	0.10	0.10	0.11
Ni	0.03 ～ 0.08	0.05	0.05	0.06
Fe+Cr+Ni	0.18 ～ 0.38	0.29	0.29	0.33
Zn				
2. 不純物	ppm			
Al	≦ 75	54	54	54
B	≦ 0.5	< 0.25	< 0.25	< 0.25
Cd	≦ 0.5	< 0.25	< 0.25	< 0.25
C	≦ 270	130	100	120
Co	< 20	< 10	< 10	< 10
Cu	≦ 50	14	14	17
Hf	≦ 100	54	62	50
H	≦ 25	5	7	9
Mn	≦ 50	< 25	< 25	< 25
N	≦ 80	36	34	28
Ca	≦ 30	< 10	< 10	< 10
Si	≦ 120	52	57	69
Pb	≦ 130	< 25	< 25	< 25
Ti	≦ 50	< 25	< 25	< 25
Cl	≦ 20	< 5	< 5	< 5
W	≦ 100	< 25	< 25	< 25
Mg	≦ 20	< 10	< 10	< 10
U	≦ 3.5	1.6	1.9	0.9
O	700 ～ 1500	1210	1210	1160

表3.11　被覆管の機械的特性

	仕　様	試験結果
バースト圧力（kg／cm²）	≧ 640	791, 800
周方向伸び（%）	≧ 20	30.9, 33.4
耐　力（kg／mm²）	≧ 33.8	37.16, 37.95
引張強度（kg／mm²）	≧ 49.2	55.32, 55.76
伸　び（%）	≧ 30	33.6, 34.0
650° F 耐　力（kg／mm²）	≧ 11.3	13.51, 13.65
〃 引張強度（kg／mm²）	≧ 25.3	26.09, 26.38
〃 伸　び（%）	≧ 30	42.5, 44.0
結晶粒径（ASTM No.）	No.11より細いこと	12.5, 12.5
腐　食（mg／dm²）	≦22mg/dm²/72hr (ASTM B353-71)	15.93, 16.59
水素化物方位（Fn）	≦ 0.45	0.20
硬　度（HR－30T）	≦ 83	77.8
押拡げ（%）	≧ 15 of O.D.	合格

表3.12　被覆管の検査結果

項目 ＼ 燃料棒番号	仕　様	IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
1. 外　径　(mm)	12.523			
最大		12.533	12.538	12.537
最小		12.519	12.530	12.526
2. 内　径　(mm)	10.795±0.037			
最大		10.804	10.797	10.799
最小		10.791	10.787	10.791
3. 厚　さ　(mm)	0.864±0.076			
最大		0.888	0.884	0.884
最小		0.863	0.856	0.861
4. 欠陥検査（超音波）	最小肉厚の５％未満			
軸方向		合格	合格	合格
周方向		合格	合格	合格
5. 外　観	・有害なスケールや酸化物がないこと ・50μm を超えるピット，へこみ及びへアクラックがないこと	合格	合格	合格
6. 真　直　度	＜0.4 mm	合格	合格	合格

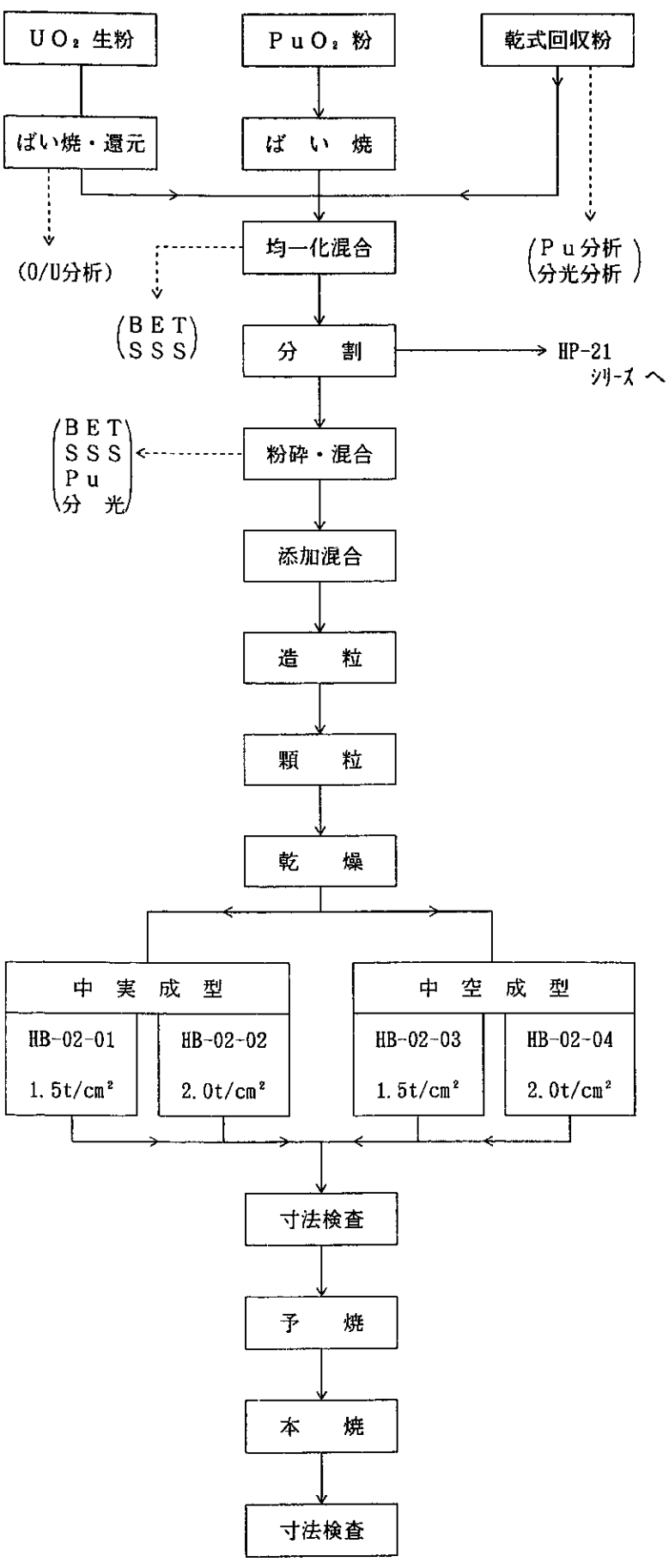
表3.13　燃料棒検査結果

〔 〕内は規格

項目 燃料棒番号	被覆管番号	MO+UO₂ スタック長 [1380±5.0] (mm)	MO+UO₂ 重量 (g)	溶接部健全性 外観 上・下	溶接部健全性 X線 上・下	漏れ試験 ×10⁻⁸ (atm cc/s)	表面汚染 ルーズ [<20] (dpm)	表面汚染 フィックス [<1000] (dpm)	燃料棒外観	寸法 プレナム長 [80±5.0] (mm)	寸法 真直度 [<0.4] (mm)	寸法 V溝間長 [1505±1.5] (mm)
IFA-565-3	10	1378.75 1392.85	1254.7 1266.3	合 合	合 合	< 0.06	< 3	7	合	78.5	合	1505.7
IFA-565-4	5	1377.95 1391.80	1107.6 1119.0	合 合	合 合	< 0.06	< 3	7	合	83.5	合	1505.7
IFA-565-6	6	1378.05 1392.00	1108.1 1118.6	合 合	合 合	< 0.06	< 3	7	合	78.5	合	1505.7

ビード外径 上 下 [<12.9φ] (mm)	スプリング タイプ No.	ディスク 有 無 厚	端栓種類 下部	端栓種類 上部
12.7 12.7	A 14	有・上* 1.05	EC No.1	EF 3
12.7 12.7	B 4	無	NI・L No.4	PF 4
12.7 12.7	A 13	有・上* 2.03	EC No.4	EF 6

＊有・上は検出器位置調整のため入れた（EF用スタック長を揃える）



・乾式回収粉の混合率は25%
・回収粉は，12ℓ S型ブレンダーにて4 hr 粗砕し，100メッシュアンダーに整粒した。

・UO_2 700℃ CA 2 hr + NH 4 hr 10ℓ/min
・PuO_2 700℃ CA 3 hr 10ℓ/min

・ニーダー 2 hr
4.0kgMO_2

・2 kg + 2 kgに分割した。

・12ℓ S型ブレンダー × 8 hr
Al_2O_3 ボール + WCボール

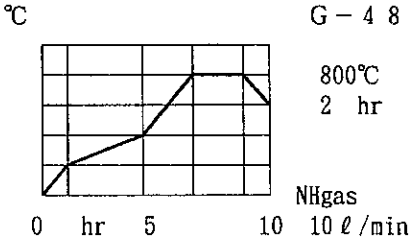
・12ℓ S型ブレンダー 30min
15μポリエチレン 0.1w/o

・ニーダー，ノニオン NS-40 2 w/o
水+アルコール (1:1) 6.5cc/100gMO_2

・20メッシュアンダー

・一晩NH常温乾燥した後に，
80℃真空 × 4 hr

・中実用 ダイス内径 12.28 φmm
・中空用 ダイス内径 12.33 φmm
コアロッド 外径 4.21 φmm



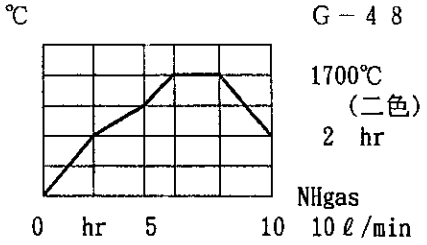
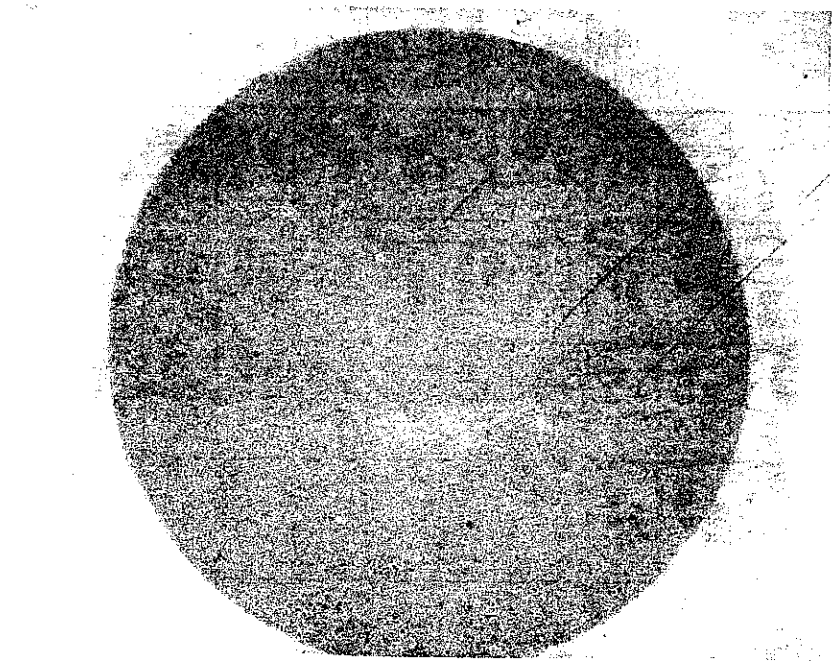


図3.1 HB－02シリーズ製造フローチャート



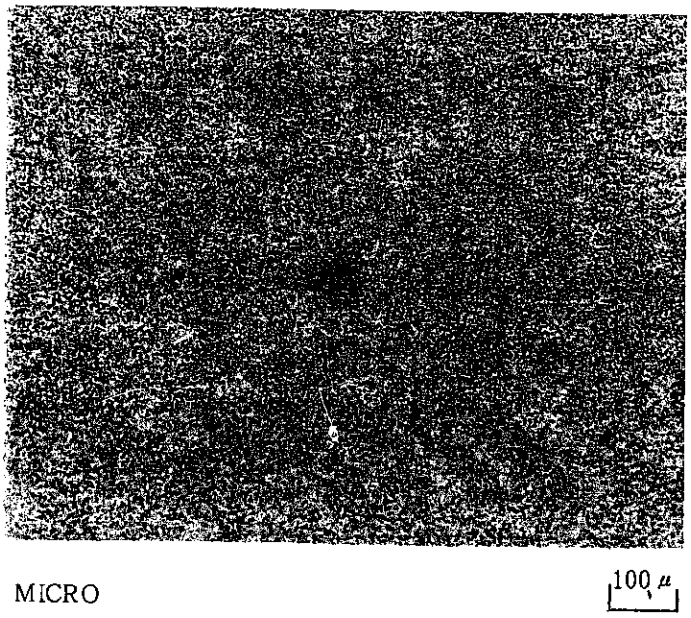
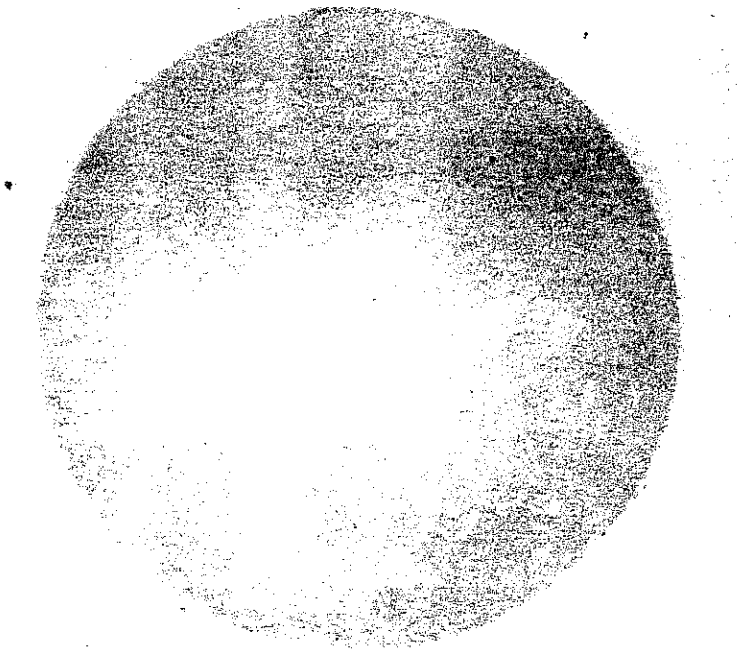


図3.2　ＨＢ－２０１ペレットのα－オートラジオグラフ



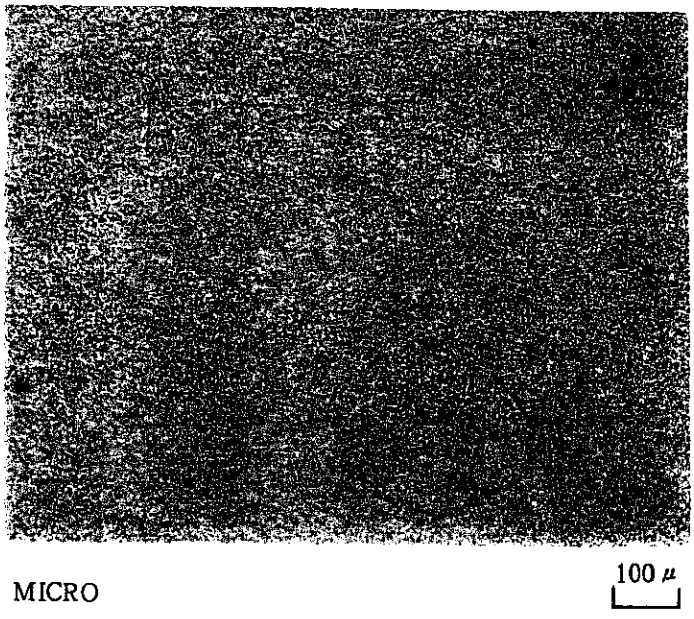
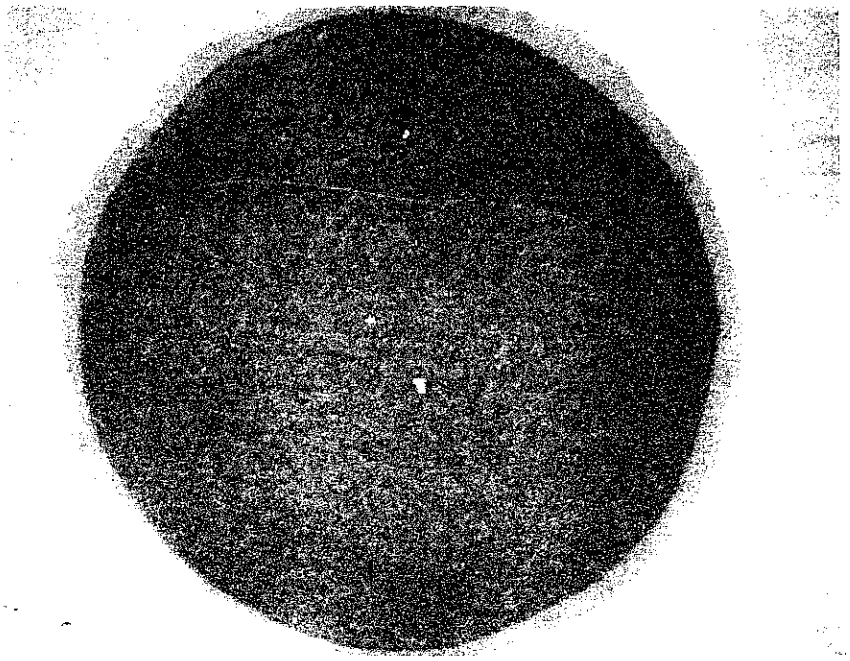


図3.3　ＨＢ－２０２ペレットのα－オートラジオグラフ



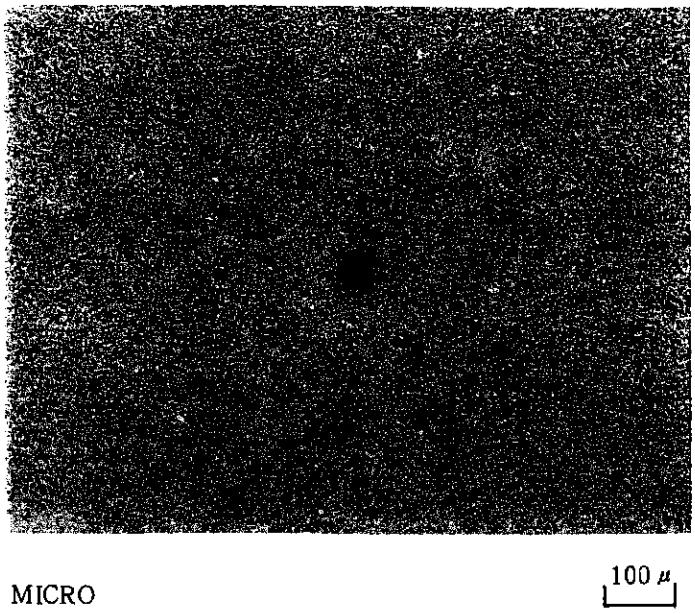
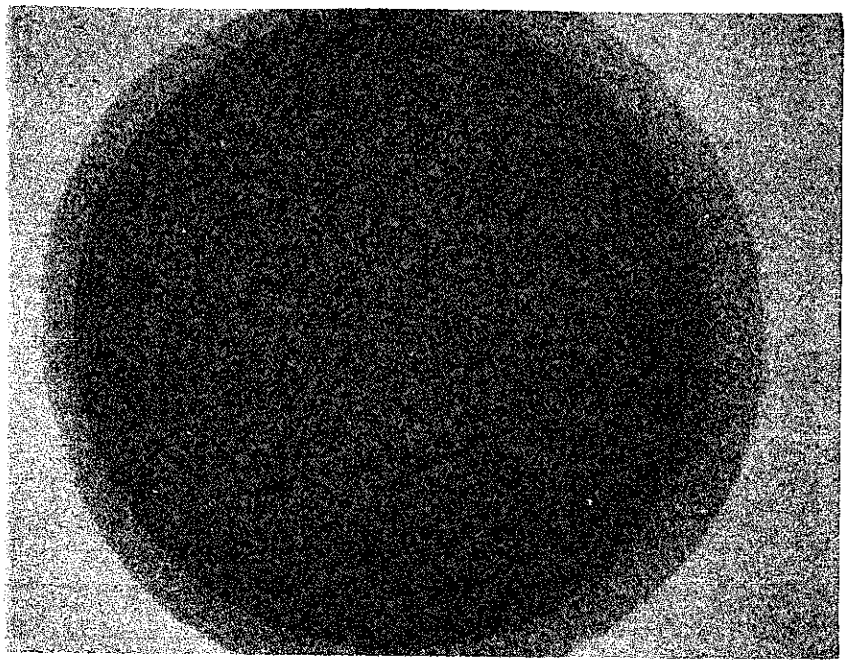
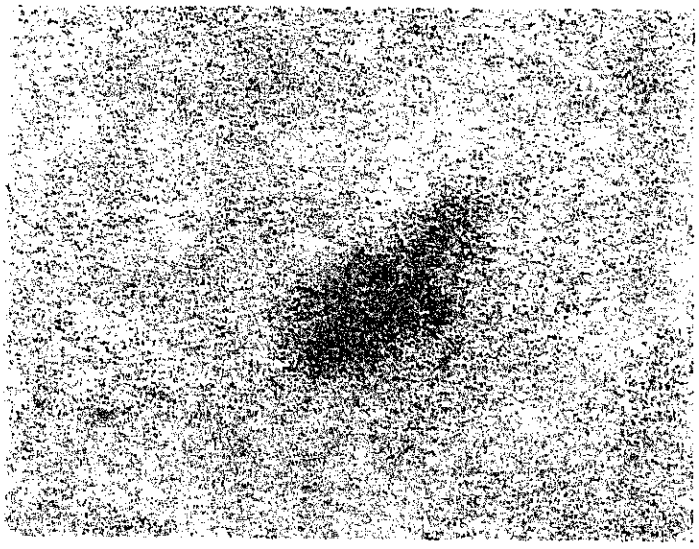


図3.4　ＨＢ－３０１ペレットのα－オートラジオグラフ



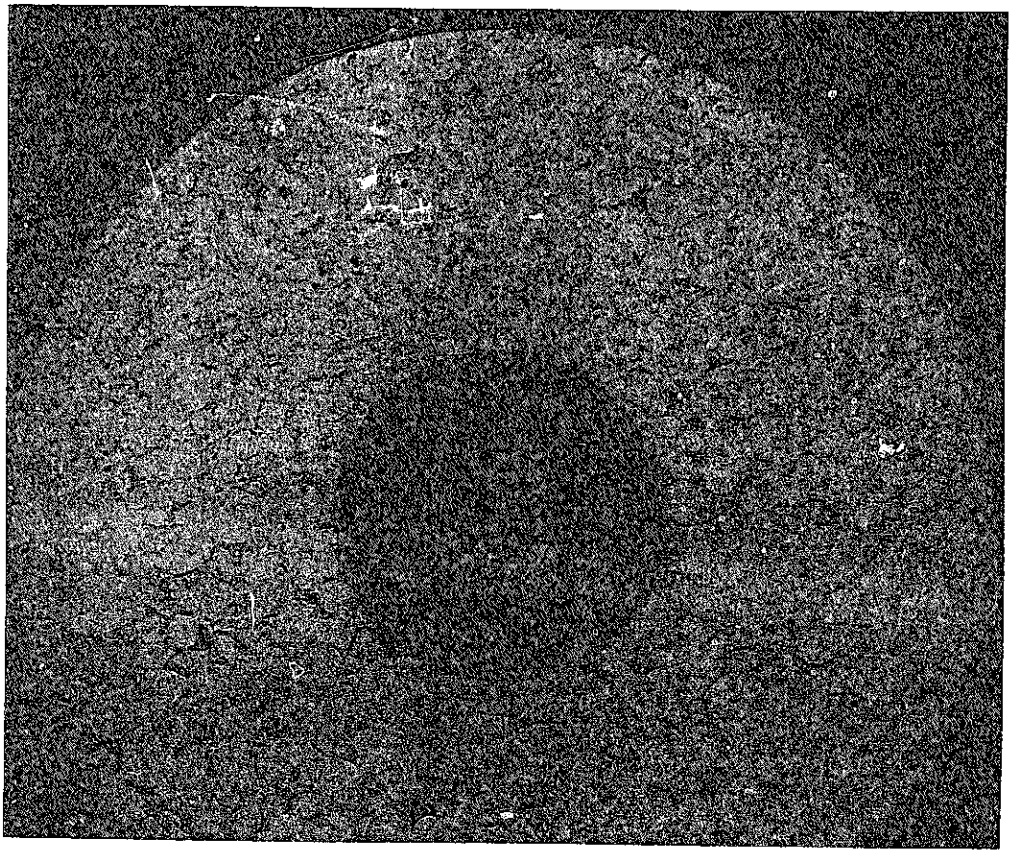
MACRO　　2mm



MICRO　　100 μ

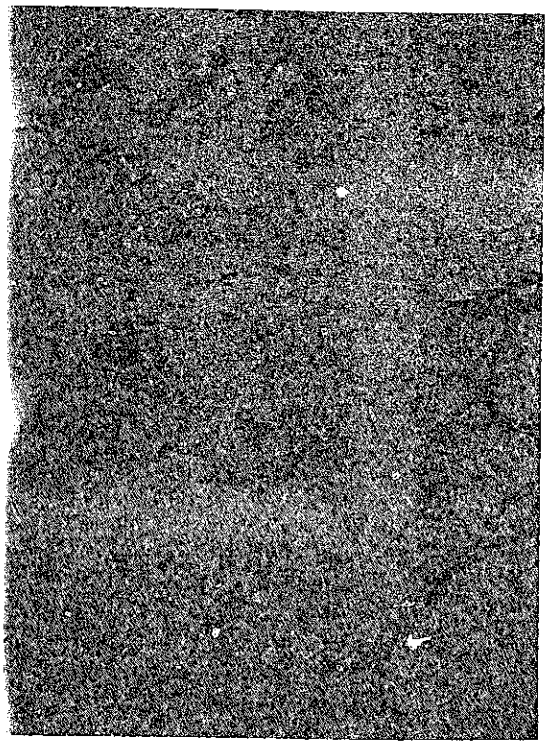
図3.5　ＨＢ－３０２ペレットのα－オートラジオグラフ

As Polished



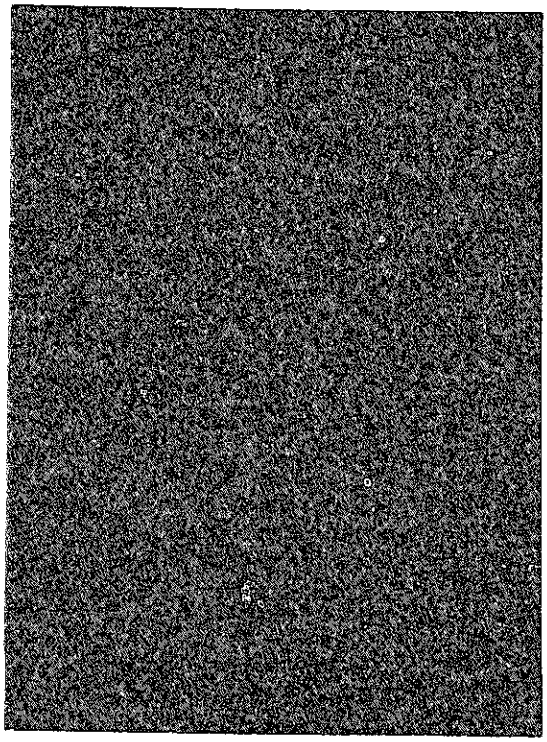
MACRO

1mm



MICRO

100 μ

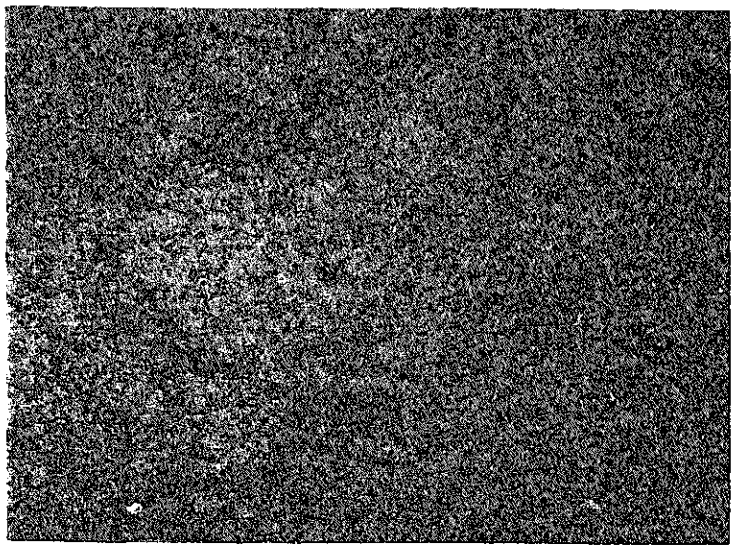


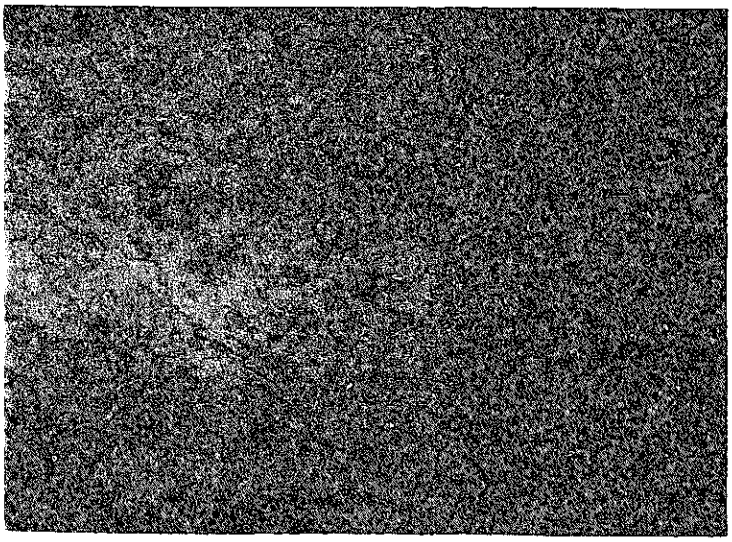
25 μ

図3.6　ＨＢ－２０１金相写真(1)

As Etched

MICRO





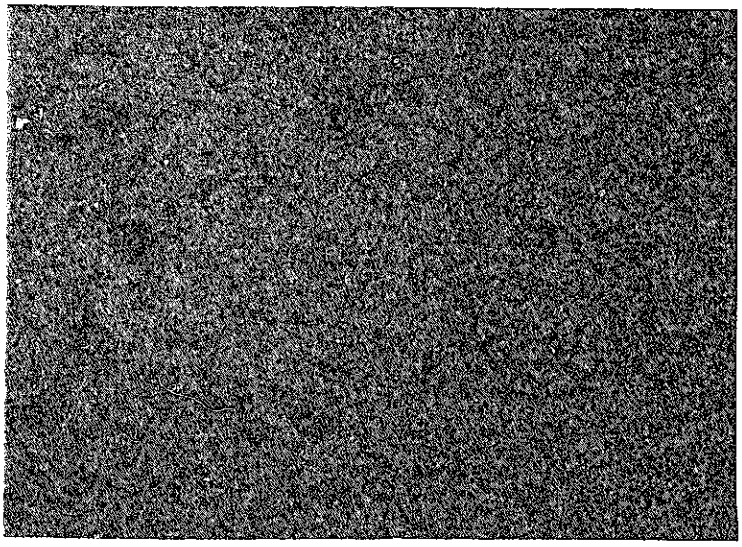
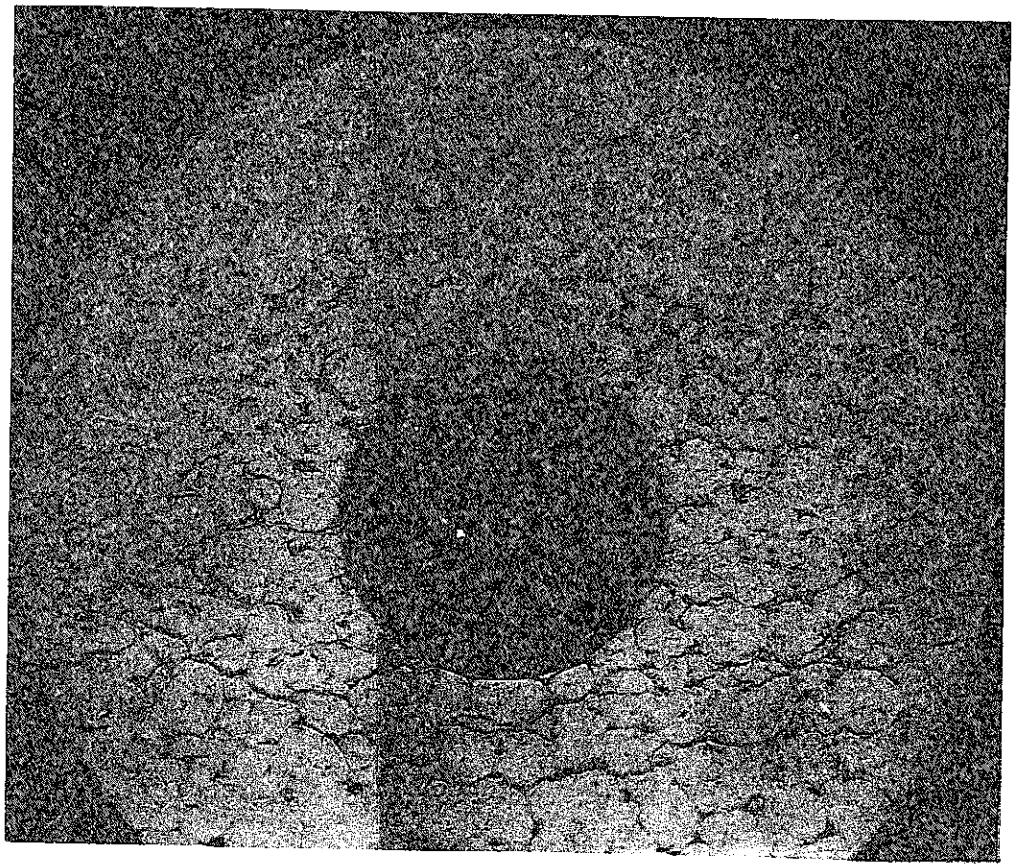


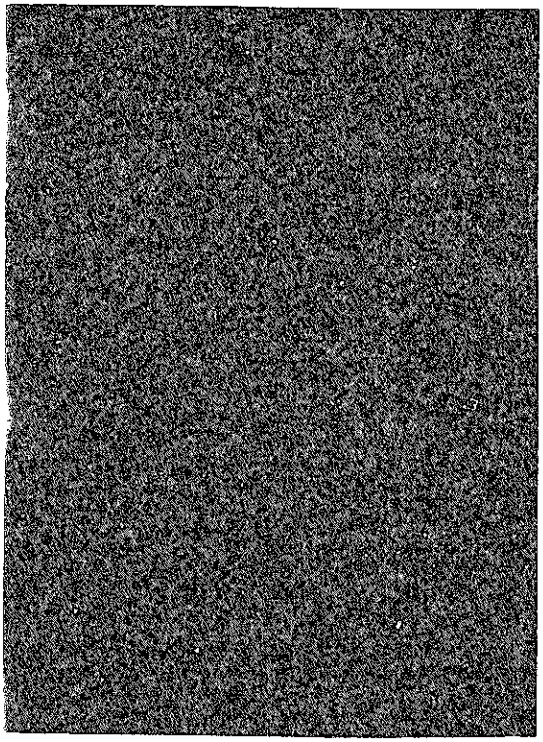
図3.7　ＨＢ－２０１金相写真(2)

As Polished



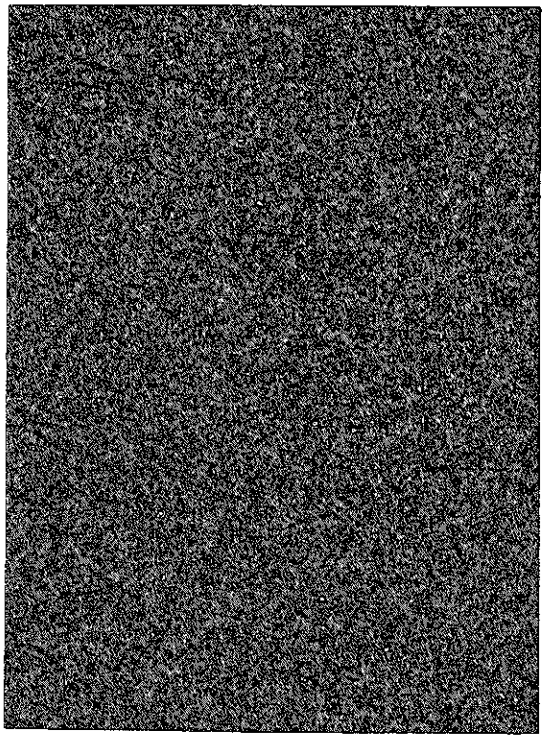
MACRO

1mm



MICRO

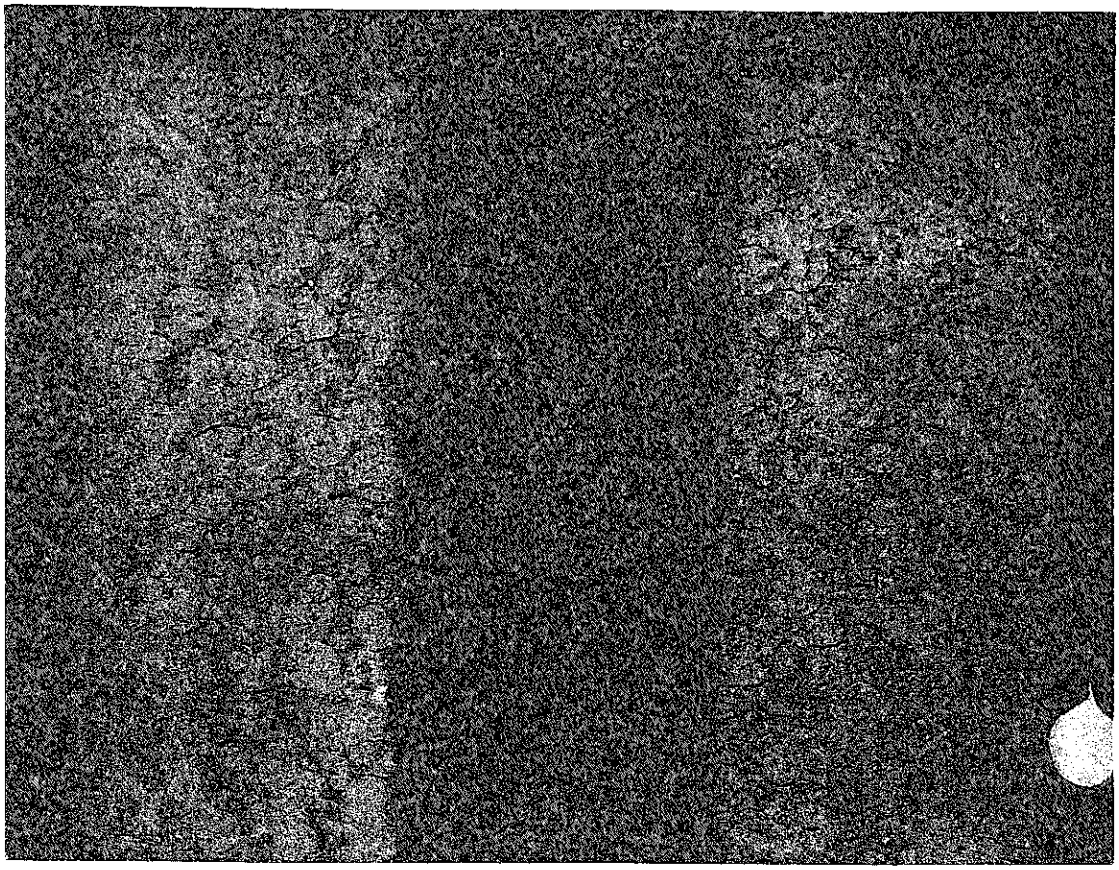
100 μ



25 μ

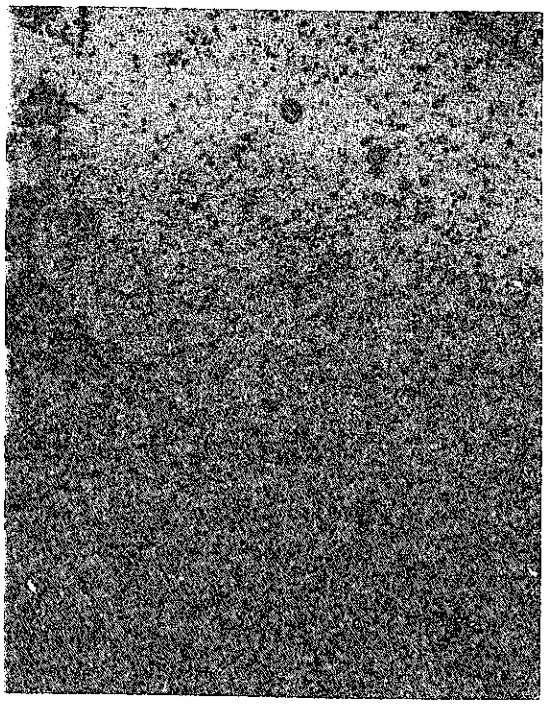
図3.8　ＨＢ－２０２金相写真(1)

As Polished

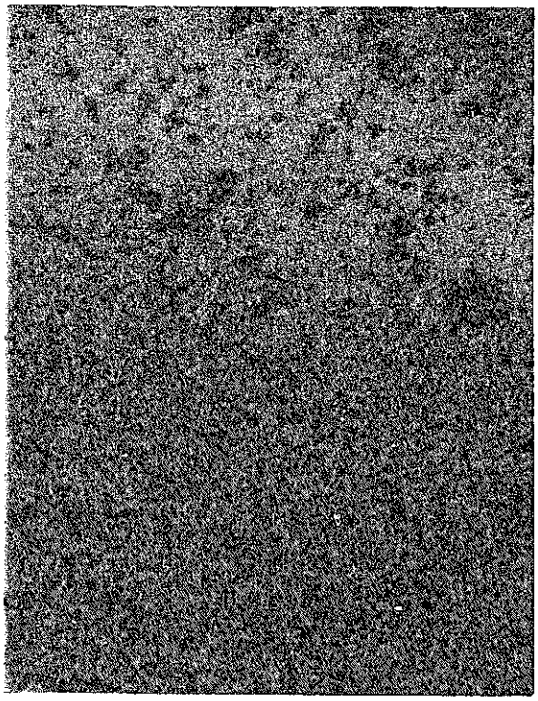


MACRO

1mm



100 μ



25 μ

MICRO

図3.9　ＨＢ－２０２金相写真(2)

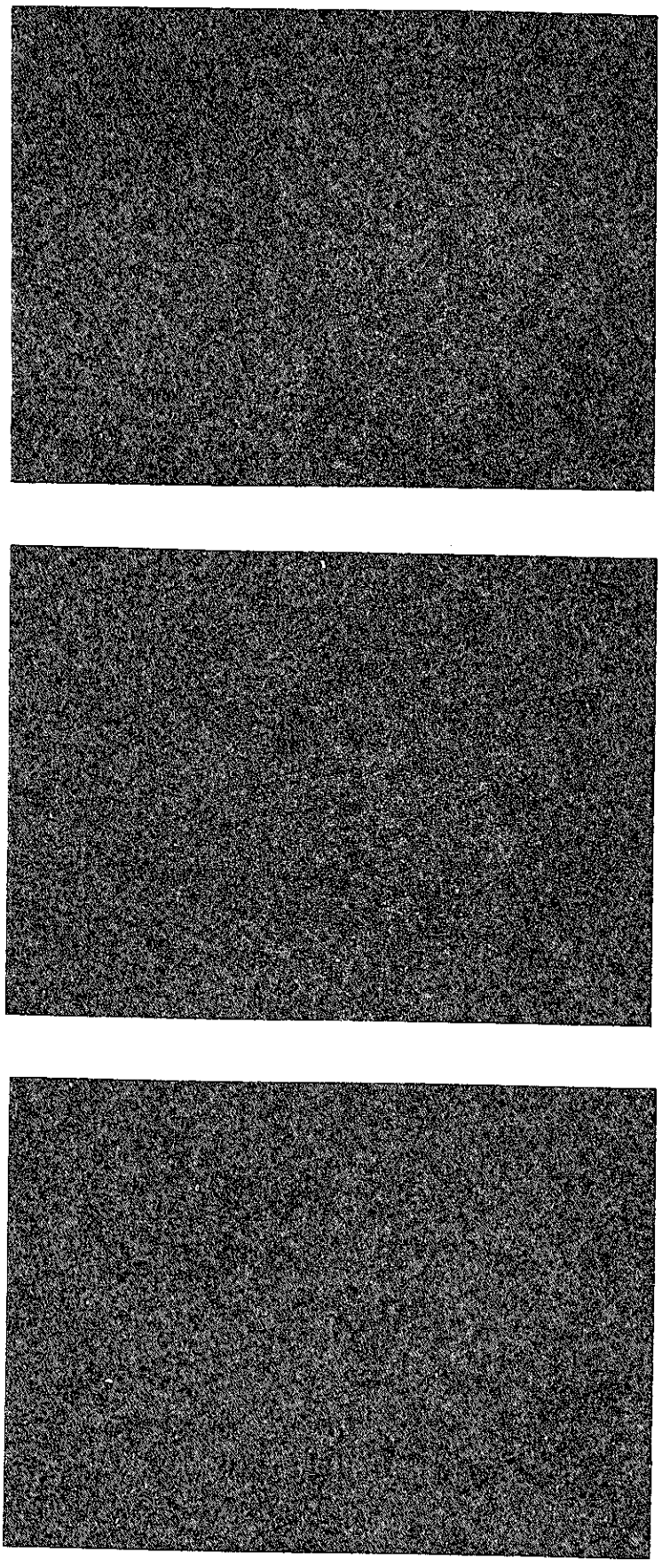
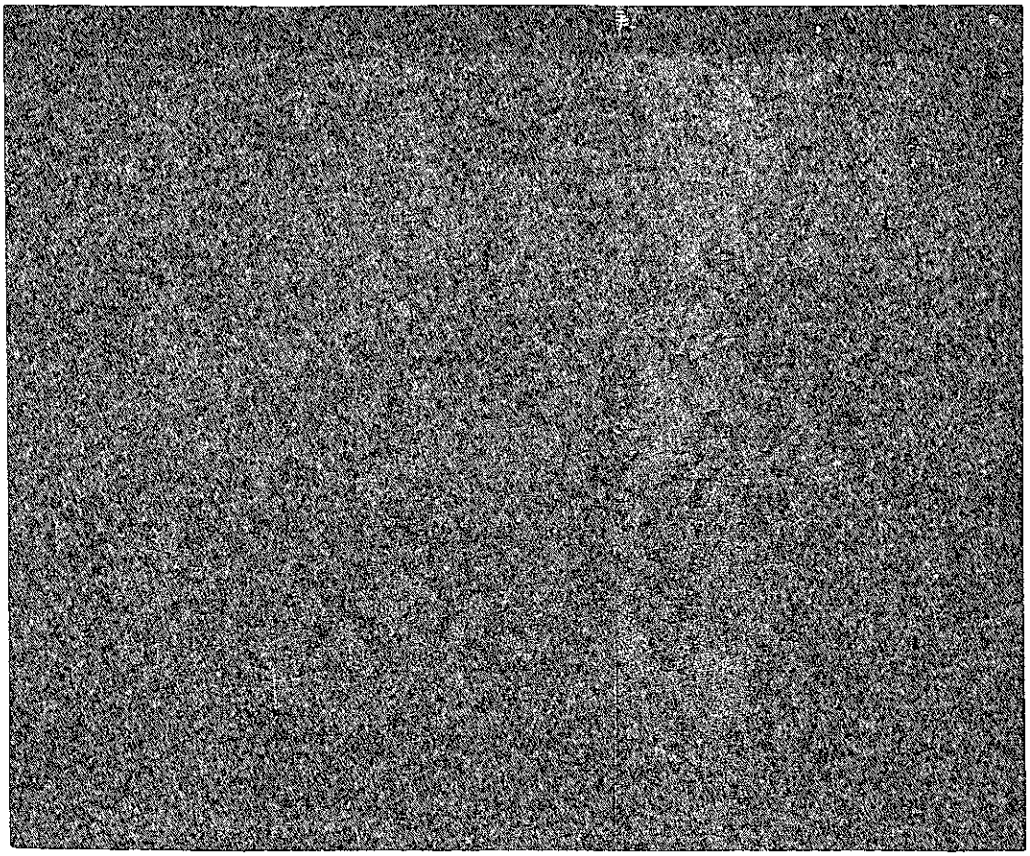


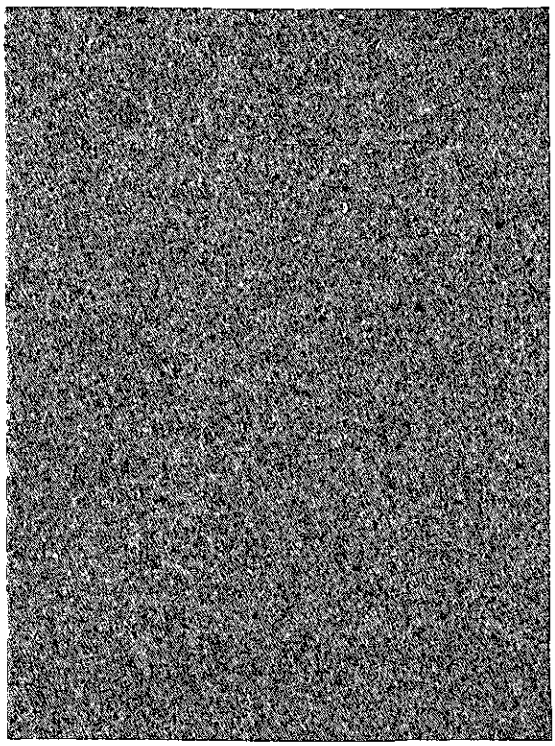
図3.10　ＨＢ－２０２金相写真(3)

As Polished



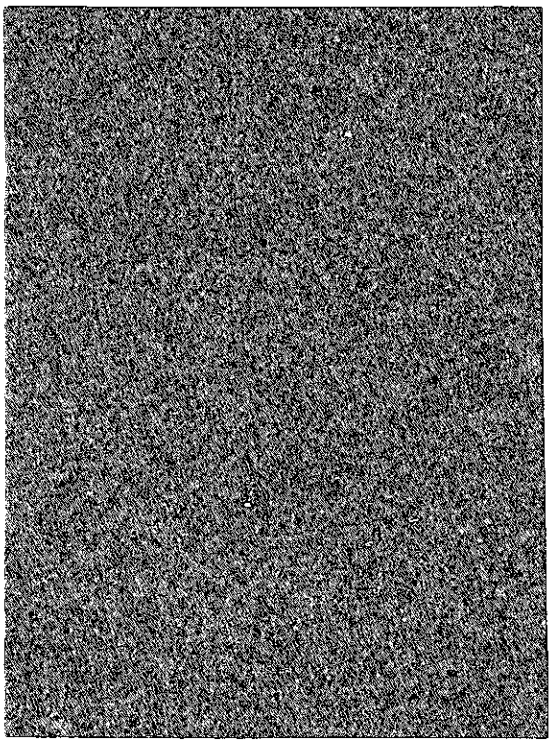
MACRO

1mm



MICRO

100 μ



25 μ

図3.11　ＨＢ－３０１金相写真(1)

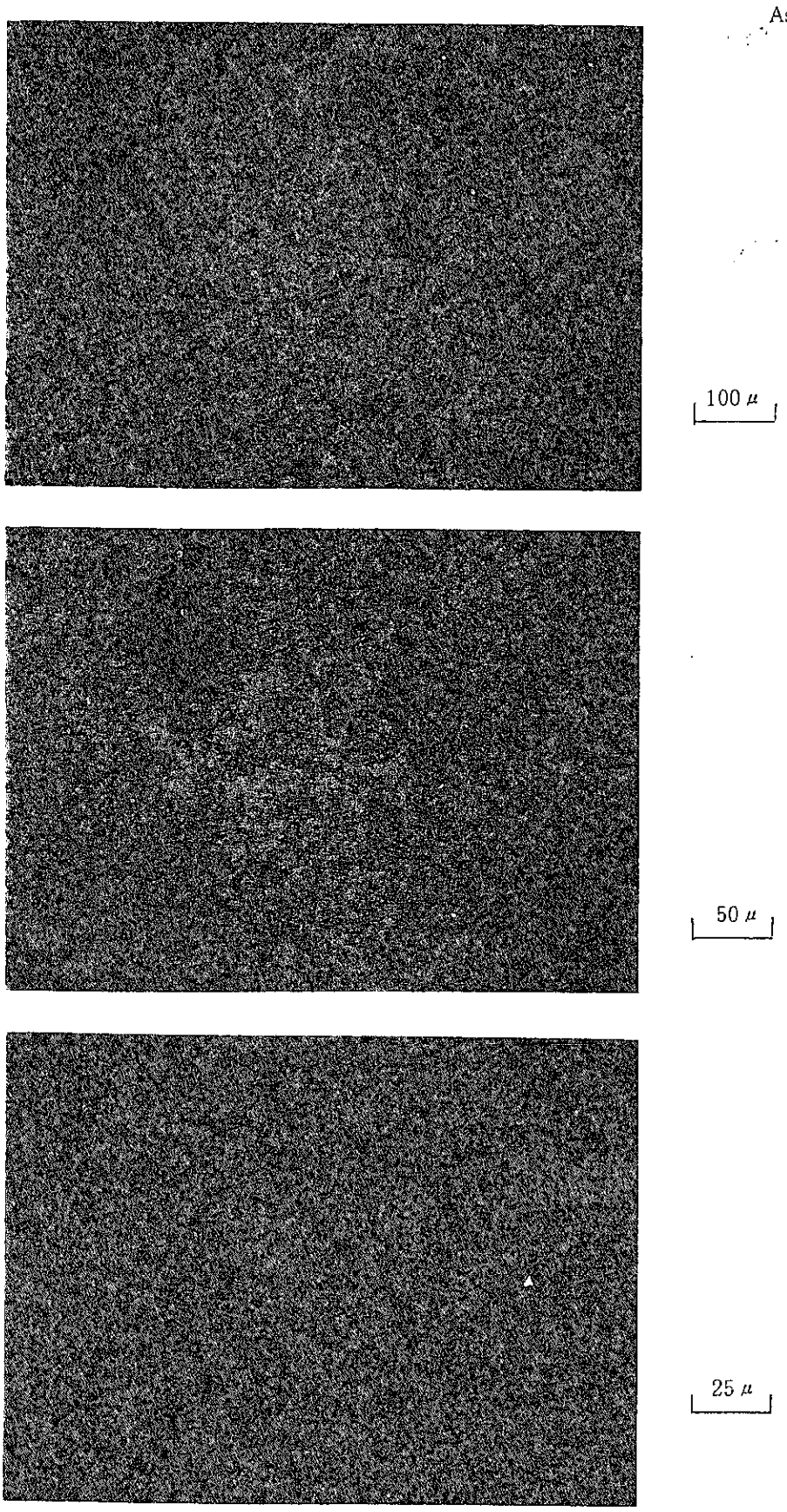
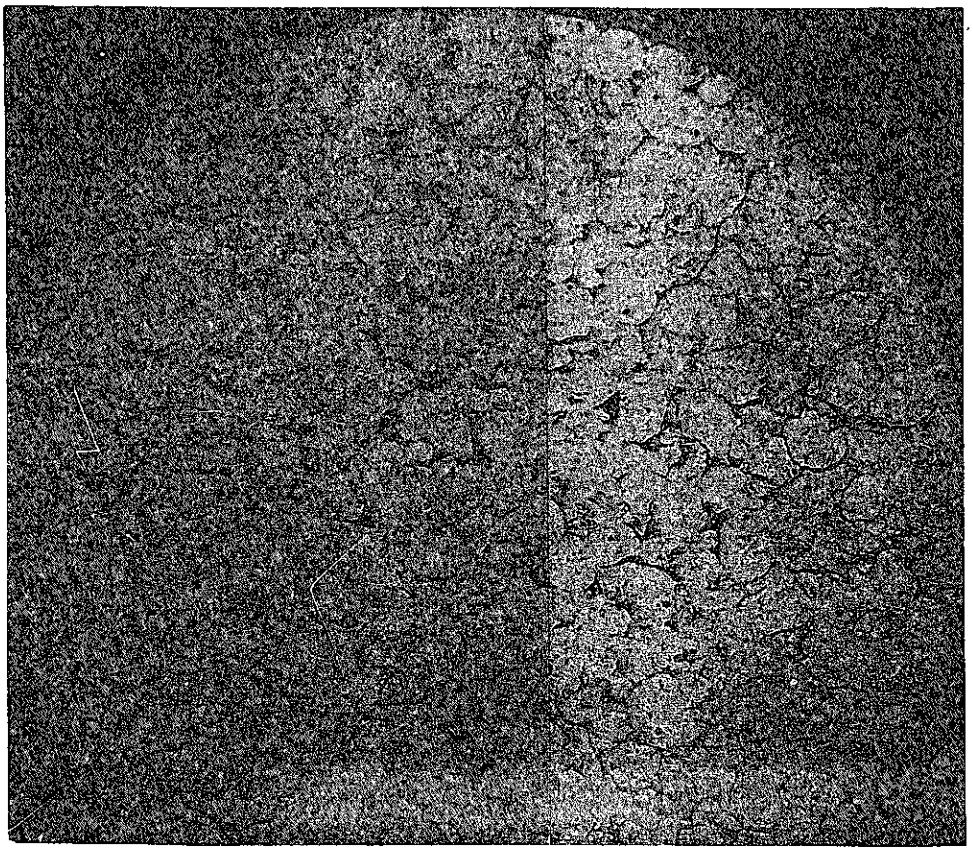


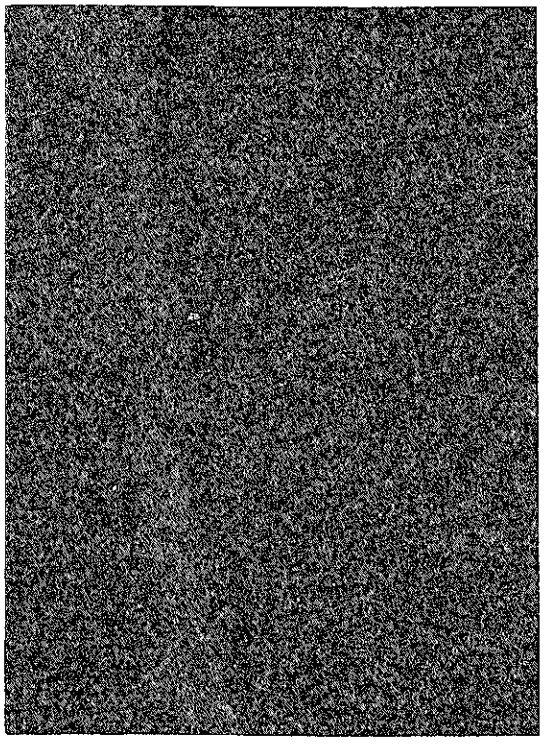
図3.12　ＨＢ－３０１金相写真(2)

As Polished



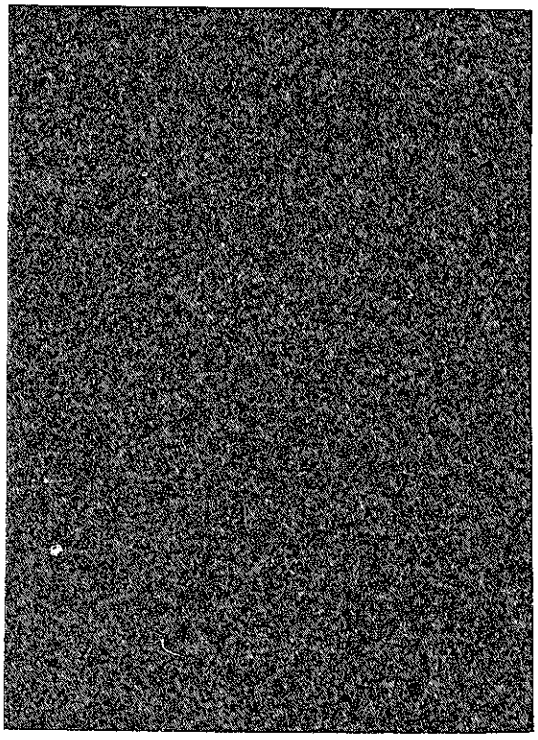
MACRO

1mm



MICRO

100 μ

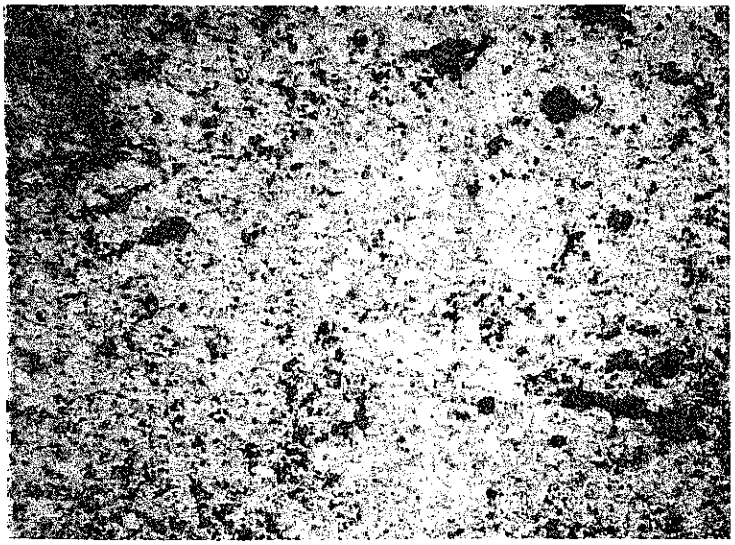


25 μ

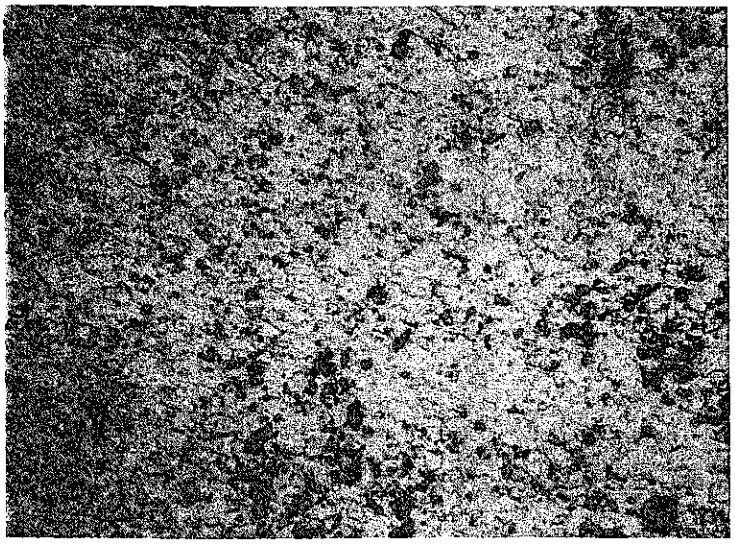
図3.13　ＨＢ－３０２金相写真(1)

As Etched

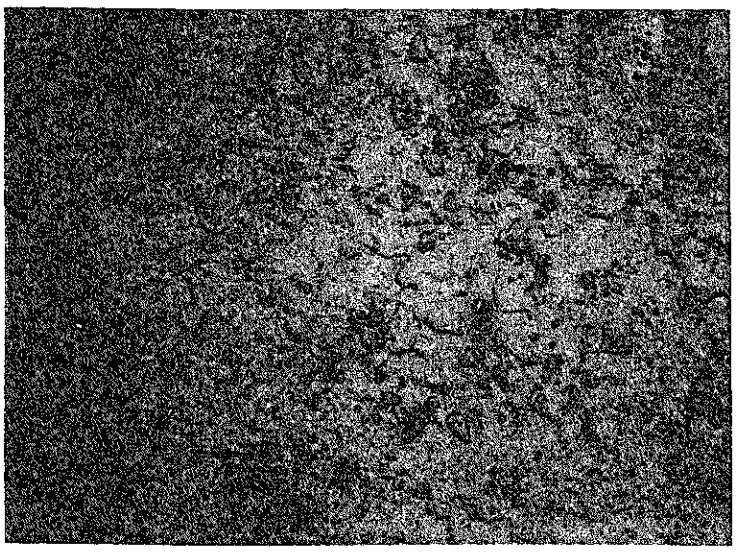
MICRO



100 μ



50 μ



25 μ

図3.14　ＨＢ－３０２金相写真(2)

4. 照射データ

IFA-565燃料集合体は、1979年７月７日から照射が開始され、1993年10月１日に燃焼度49.7GWd/tMOX（照射日数5200日）を達成し照射を終了した。IFA-565燃料集合体は、寿命平均高速中性子束約5.0×10^{12}n/cm^2 s, 寿命平均線出力約25.4kW/mで照射されており、この間、炉運転時における燃料挙動データ等を入手したので、以下に報告する。

4.1 照射履歴

照射を開始した1979年７月７日から、照射終了までに採取したデータについて、以下にまとめる。

4.1.1 燃料棒線出力履歴

図4.1.1.1に燃料棒毎の燃焼度と線出力の関係を示す。各燃料棒の線出力の間に差はなく、線出力16～40kW/mの間で照射されている。また、照射が順調に継続され、燃焼度が順調に延びているが、燃料棒線出力履歴で特徴的なのは、寿命末期で線出力密度が、燃料棒平均線出力で15～20kW/mまで徐々に増加していることである。なお、表4.1.1.1に各燃料棒の到達燃焼度及び経験した最大線出力を示す。

表4.1.1.1 各燃料棒の燃焼度及び線出力について

	燃料棒平均燃焼度〔MWd/t MOX〕	ﾍﾟﾚｯﾄﾋﾟｰｸ燃焼度〔MWd/t MOX〕	最大線出力密度〔kW/m〕	燃料棒平均高速中性子照射量〔n/cm^2, ＞1 Mev〕
IFA-565-3	49,000	59,600	50.0	2.218×10^{21}
IFA-565-4	50,000	60,800	48.4	2.261×10^{21}
IFA-565-6	50,000	61,100	40.0	2.261×10^{21}

4.2 計装データ

IFA-565燃料棒に取付られている炉内計装の種類は、燃料棒内圧計、燃料スタック伸び計及び燃料棒伸び計である。これらの炉内計装データを整理し、燃料棒照射挙動について検討したので、その内容を以下にまとめる。

4.2.1 燃料棒内圧の変化

図4.2.1.1に燃料棒内圧と燃焼度の関係を示す。燃料棒内圧計装が取付られている燃料棒は、IFA-565-4の１本のみである。図より、IFA-565-4の炉運転中の燃料棒内圧は、燃焼度の増加に伴い、FPガスの放出等により増加している。燃焼度44,000MWd/tMOX付近で、燃料棒内圧の指示値が一定になっているが、これは、燃料棒内圧が、内圧計装の計測上限に達したためである。従って、寿命末期では、炉運転中における燃料棒内圧は測定されていない。

図4.2.1.2に炉出力０付近における燃料棒内圧の燃焼度依存性を示す。照射初期から、FPガスの放出によるものと考えられる内圧の増加が見られ、燃焼度約15,000及び約39,000MWd/tMOX付近で、それまでとは異なった内圧の増加傾向が観察される。この時期の燃料棒線出力密度を見ると、図4.1.1.1（2/3）より、直近の線出力密度より高い線出力密度を経験した時期と一致していることから、この時期において、FPガス放出のしきい温度を燃料ペレット温度が超え、FPガスの追加放出があったためであると考えられる。寿命末期の炉出力０付近（冷却材温度200～240℃）における燃料棒内圧は、図4.2.1.2より約23.5kg/cm^{2}である。

4.2.2 燃料スタック長の変化

図4.2.2.1に炉運転中における燃料スタック長と燃焼度の関係を示す。燃料スタック伸び計装が取付られている燃料棒は、IFA-565-3とIFA-565-6の２本である。図4.2.2.1より、IFA-565-3（中実ペレット）及びIFA-565-6（中空ペレット）共に、燃焼が進むにつれ燃料スタック長が減少する傾向が見られる。この燃料スタック長の減少には、線出力の低下による燃料ペレットの熱膨張量の減少と、燃料ペレットの焼きしまりによる燃料スタック長

の減少が含まれているものと考えられる。ペレットの熱膨張等によるスタック長の伸び量は、最大でIFA-565-3（中実ペレット）が約9.1mm、IFA-565-6（中空ペレット）が約8.0mmである。なお、燃焼度16,000MWd/ t 付近から、IFA-565-3（中実ペレット）のスタック長の変動幅が線出力の上下変動幅に追従していない傾向が見られるが、これは、燃料スタックが、この時期に被覆管とスティックを起こしたためによるものと考えられる。なお、この時期は、高い線出力を経験した時期に一致している。また、この燃料スタックのスティックは、炉出力０付近におけるスタック長変化の燃焼度依存性を見た図4.2.2.2にも現れている。また、計装データが、一部間欠している部分が見られるが、これは計装信号の異常により、この間のデータを削除したためである。

図4.2.2.2に炉出力０付近におけるスタック長変化の燃焼度依存性を示す。 IFA-565-3(中実ペレット）は、燃焼が進むにつれ燃料スタック長は減少する傾向にあり、燃料スタック長の減少傾向は、寿命末期まで見られる。また、燃焼度17,000MWd/tMOX付近で、燃料スタック長が３㎜程度急激に増加し、その後、これまでの燃料スタック長減少率とほぼ同様の減少率で燃料スタック長が減少している。なお、この時期は、高い線出力を経験した時期に一致している。この原因は、前にも述べたとおり、燃料ペレットのスティックであると考えられるが、詳細については、照射後試験の章で照射後試験結果と合わせて検討する。また、IFA-565-6（中空ペレット）は、燃焼が進むにつれ燃料スタック長は減少する傾向にあるが、燃焼度25,000MWd/tMOX付近から燃料スタック長が増加する傾向にある。これは、燃焼度約25,000MWd/tMOXまでは焼きしまりにより燃料スタックが減少し、その後は、スウェリングにより燃料スタックが増加しているものと考えられる。

両燃料棒共に寿命末期においても、初期の燃料スタック長に達しておらず、このことから、本照射試験燃料のペレット照射挙動は、焼きしまりが支配的であると推定される。

照射初期のスタック長減少率は、IFA-565-6（中空ペレット）の方がIFA-565-3（中実ペレット）より大きい。

4.2.3 燃料棒長の変化

図4.2.3.1に炉運転中における燃料棒長と燃焼度の関係を示す。炉運転中の燃料棒最大伸び量は、IFA-565-3（中実ペレット）が約1.2mm、IFA-565-6（中空ペレット）が約1.1mmである。また、IFA-565-3（未研磨中実ペレット）において、燃焼度 17,000MWd/ tMOX 付近から燃料棒長の減少傾向が見られる。

図4.2.3.2に炉出力0付近における燃料棒長変化の燃焼度依存性を示す。IFA-565-3（中実ペレット）及びIFA-565-6（中空ペレット）共に、照射初期においてはほぼ一定か若干減少傾向にあり、IFA-565-3（中実ペレット）に関しては、燃焼度16,000　MWd/tMOX付近から減少する傾向が見られる。燃料棒は一般的に、被覆管の照射成長により燃焼度が進むにつれ伸びるが、図からは、その傾向が見られない。本件に関しては、照射後試験結果を踏まえて、計装のドラフト等の影響を考慮する必要がある。

なお、図4.2.3.1のIFA-565-6（中空ペレット）において、燃焼度23,000MWd/ t 付近以降計装指示値が一定になっているが、これは計装にトラブルが発生し、データが得られなくなったためであり、その後、再計装を行い、燃焼度約39,000MWd/tMOX以降データが得られている。

次に、図4.2.3.3に示した二つの指標（PCMI量及びPCMI開始線出力）を用いて、ペレット－被覆管相互作用（PCMI）について検討する。すなわち、PCMI量を、線出力16kW/m時の燃料棒伸び計装値から被覆管熱膨張量を除した値と定義し、また、PCMI開始線出力を、PCMIフィッティング線と被覆管熱膨張フィッティング線の交点の燃料棒平均線出力と定義する。

図4.2.3.4にPCMI開始線出力の燃焼度依存性について示す。IFA-565-3（中実ペレット）及びIFA-565-6（中空ペレット）共に、照射初期において線出力25～28kW/mでPCMIを開始し、燃焼度が進むにつれPCMI開始線出力が低下する傾向が見られる。また、PCMI開始線出力に関しては、ペレットの種類による明確な差は認められない。

図4.2.3.5にPCMI量の燃焼度依存性について示す。IFA-565-3（中実ペレット）及びIFA-565-6（中空ペレット）共に、燃焼度が進むにつれPCMI量が増加する傾向にある。また、PCMI量に関しても、ペレットの種類による明確な差は認められない。

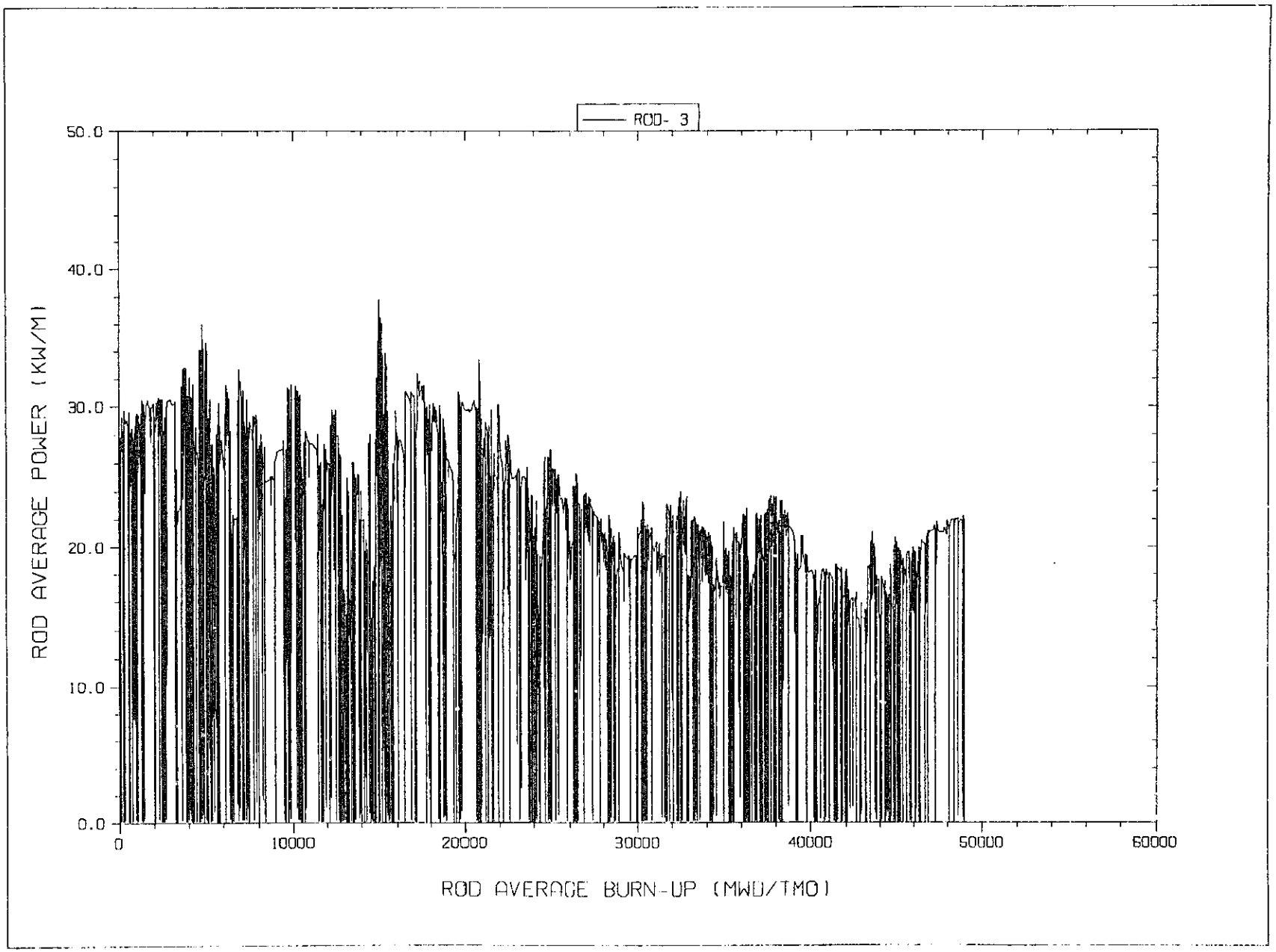


図4.1.1.1 (1/3)　IFA-565-3 燃料棒線出力－燃料棒平均燃焼度

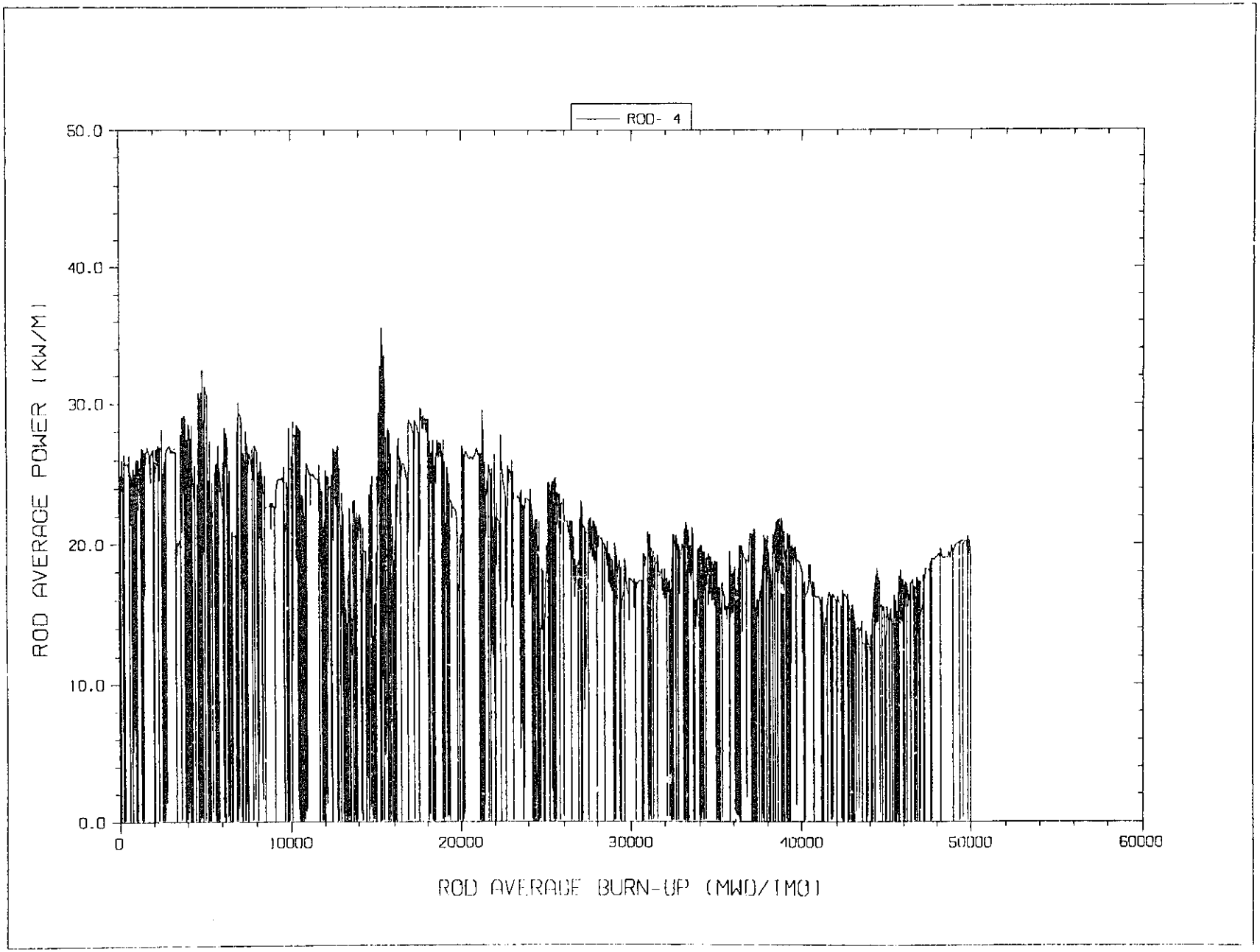


図4.1.1.1 (2/3)　IFA-565-4 燃料棒線出力－燃料棒平均燃焼度

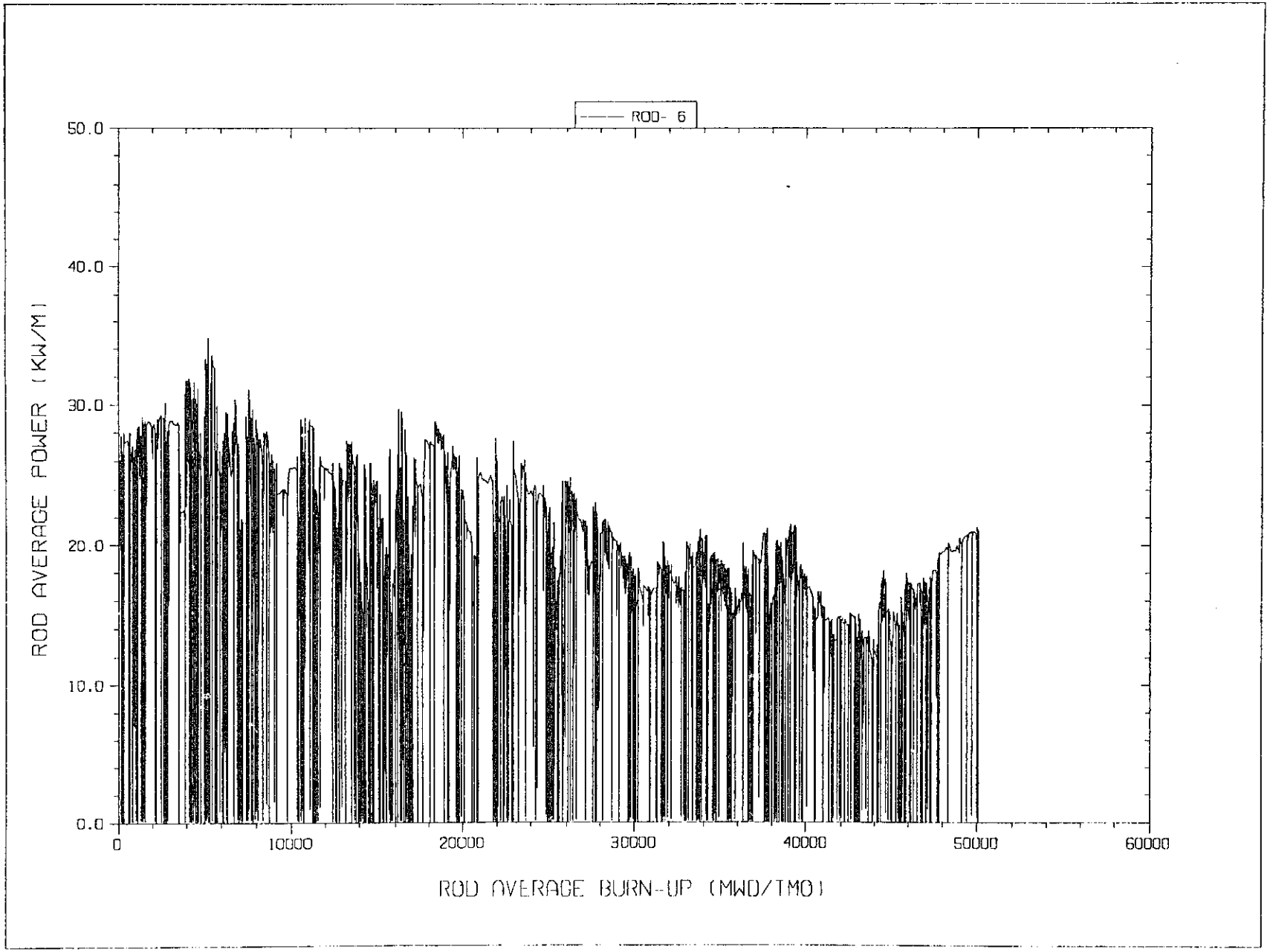


図4.1.1.1 (3/3)　IFA-565-6 燃料棒線出力－燃料棒平均燃焼度

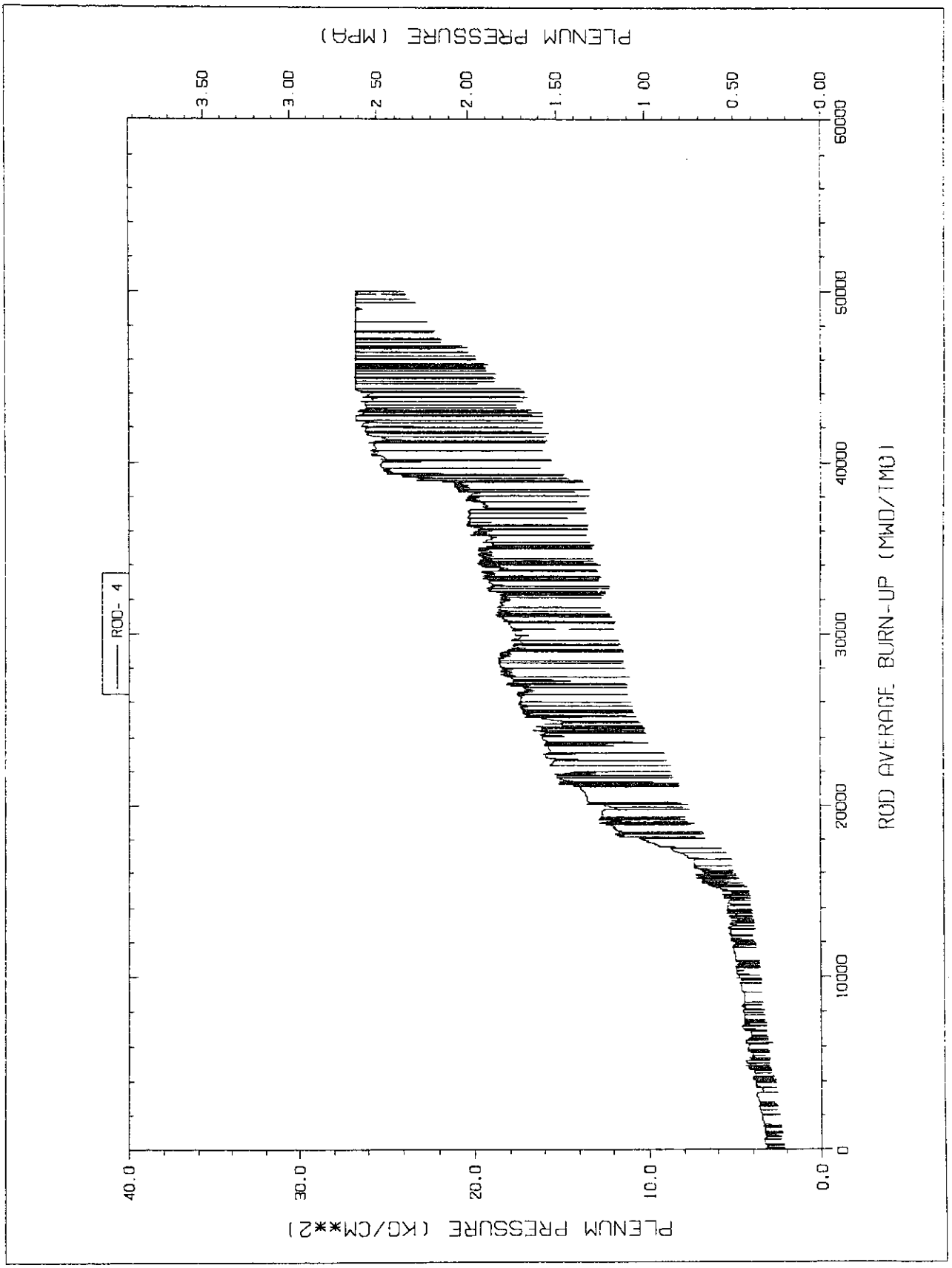


図4.2.1.1 IFA-565-4 燃料棒内圧－燃料棒平均燃焼度

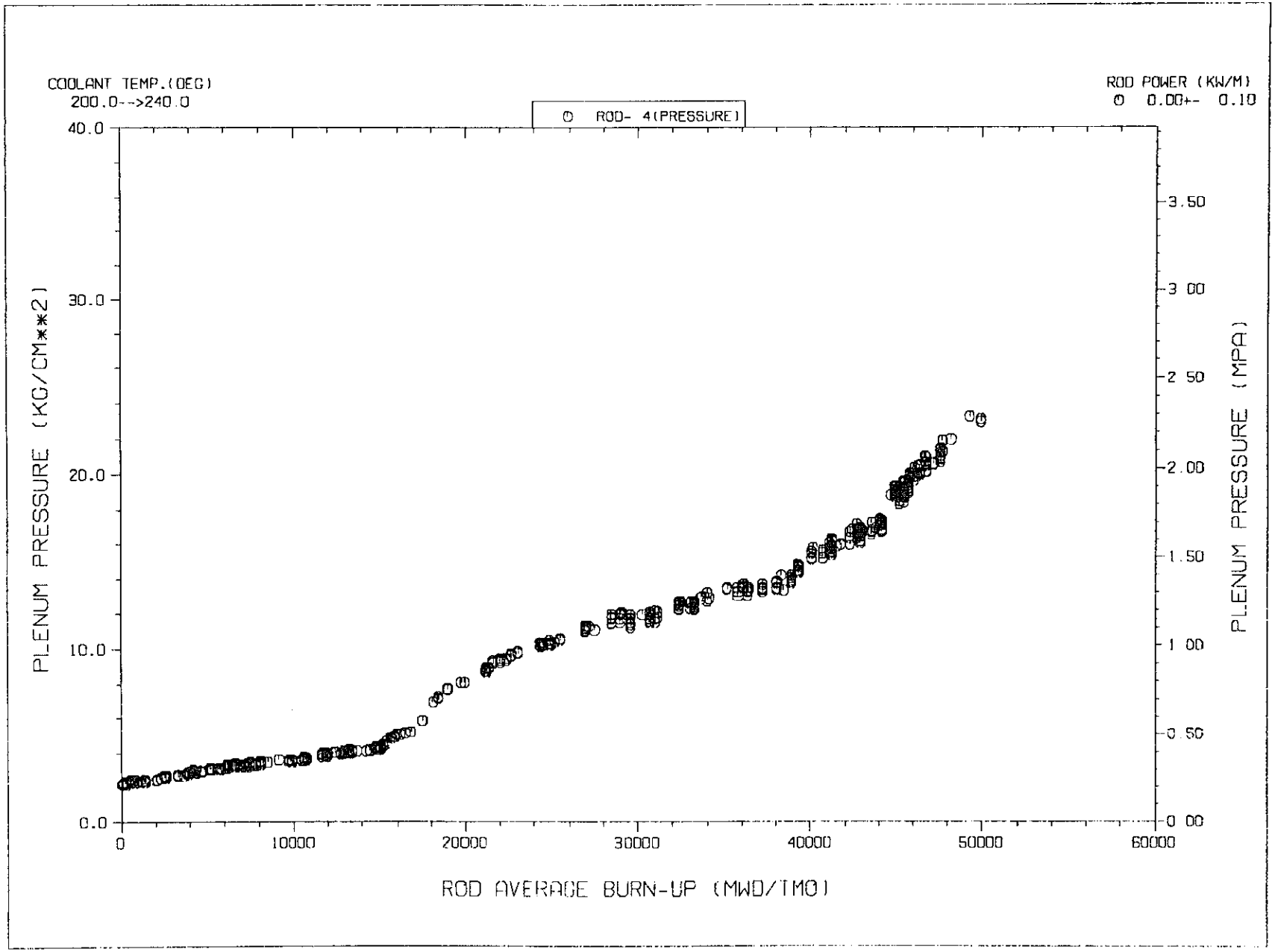


図4.2.1.2　IFA-565-4 燃料棒内圧－燃料棒平均燃焼度（炉出力0）

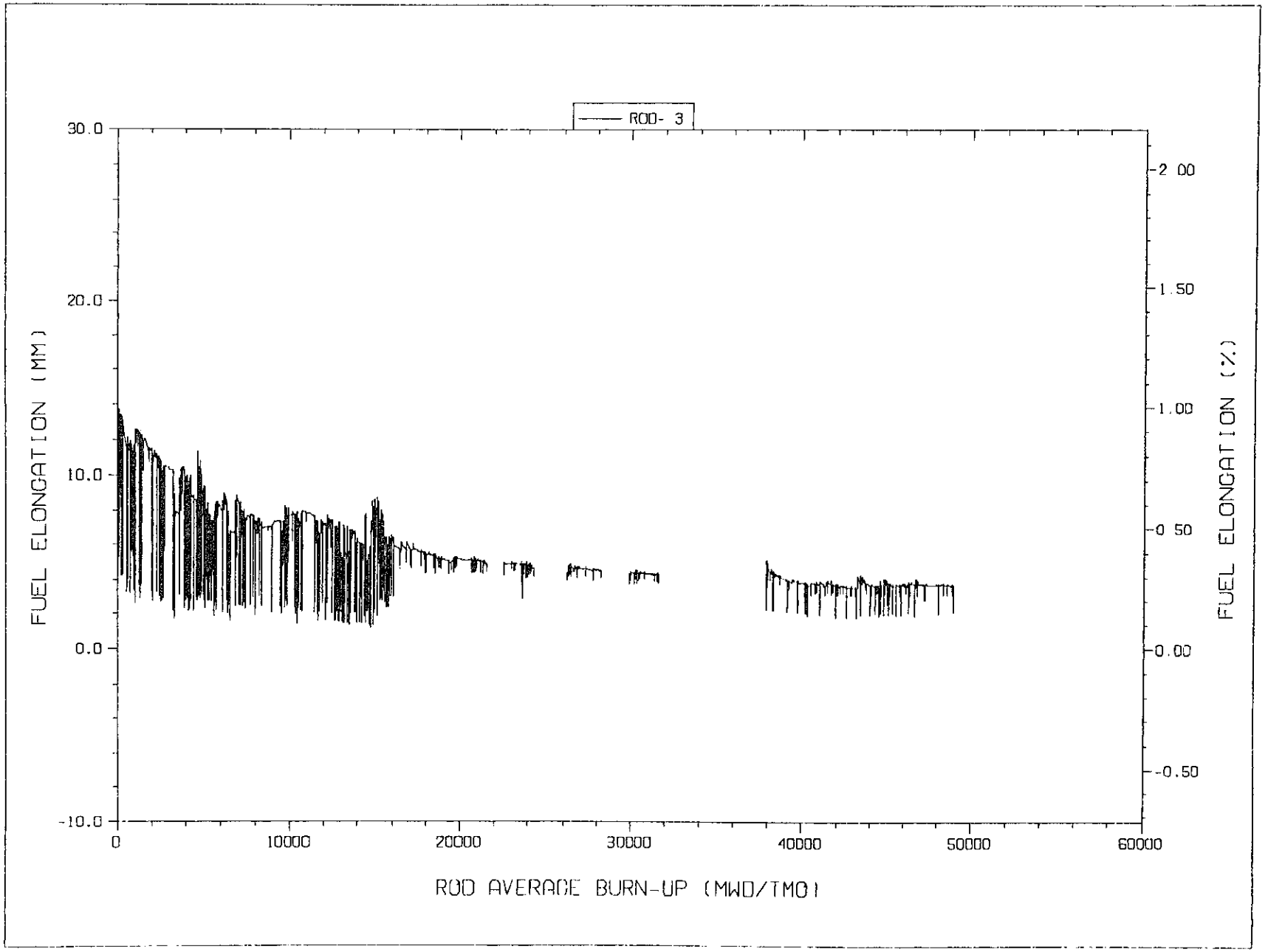


図4.2.2.1 (1/2)　IFA-565-3 スタック長変化－燃料棒平均燃焼度

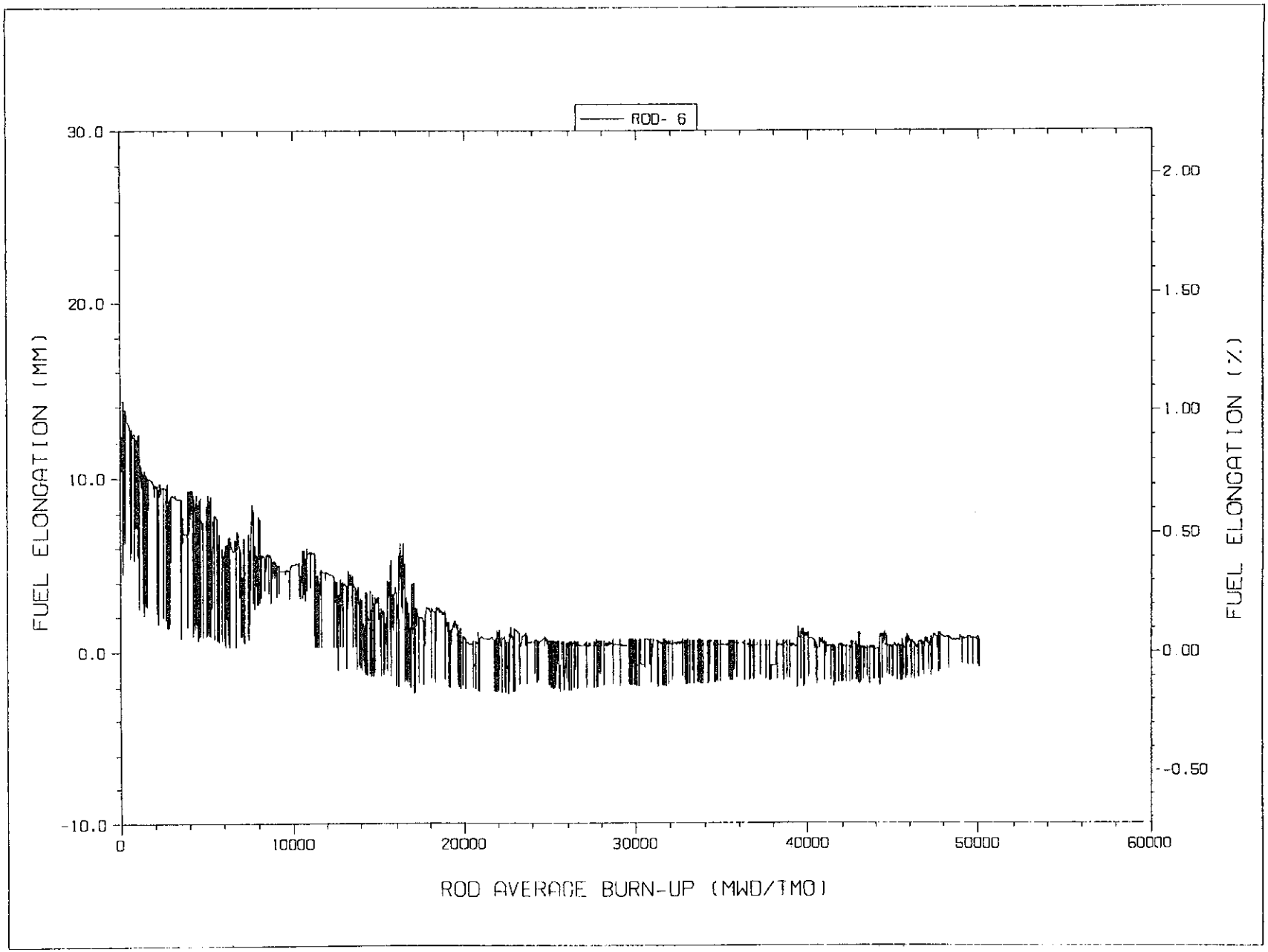


図4.2.2.1 (2/2)　IFA-565-6 スタック長変化－燃料棒平均燃焼度

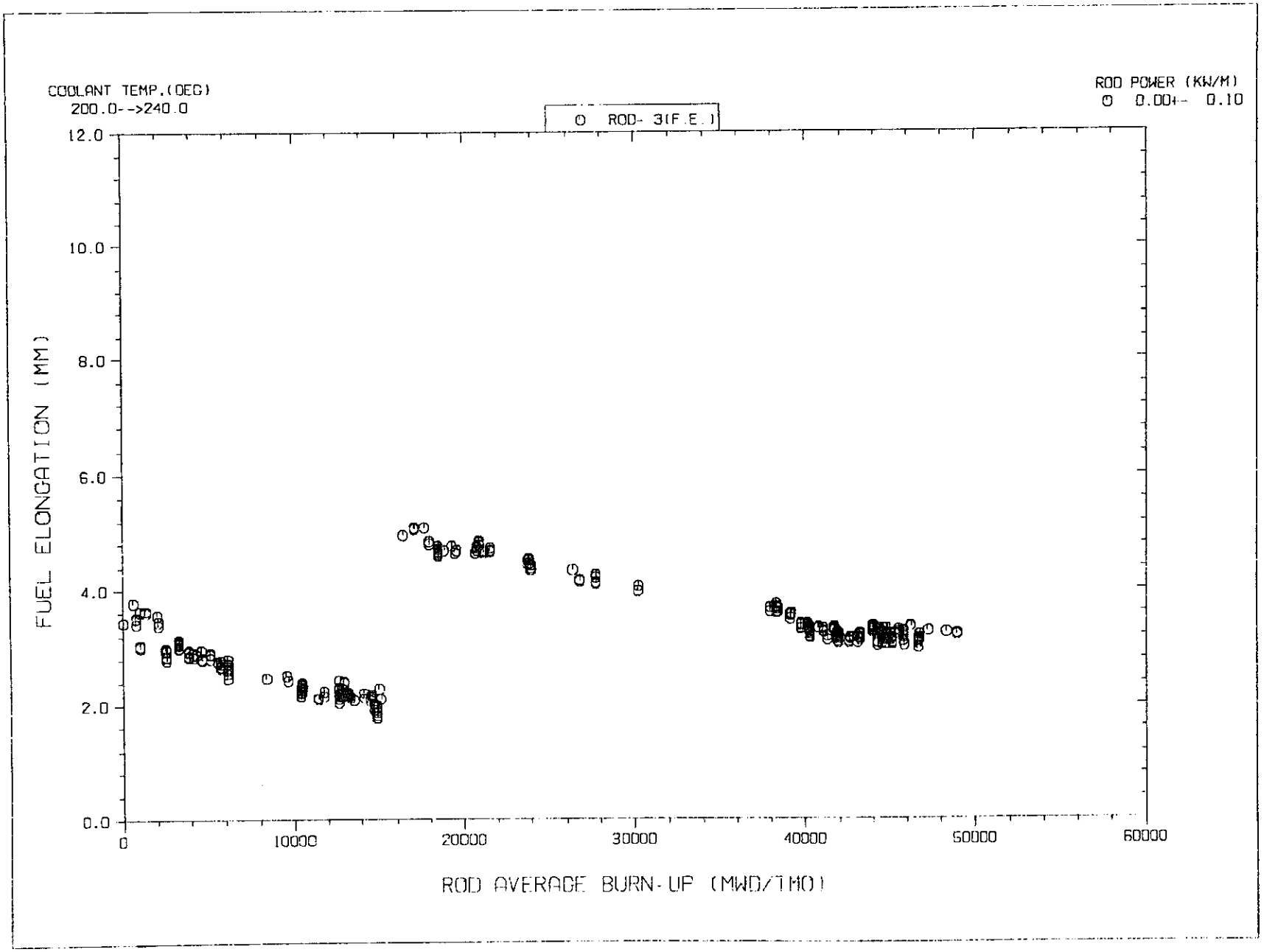


図4.2.2.2(1/2)　IFA-565-3 スタック長変化－燃料棒平均燃焼度（炉出力０）

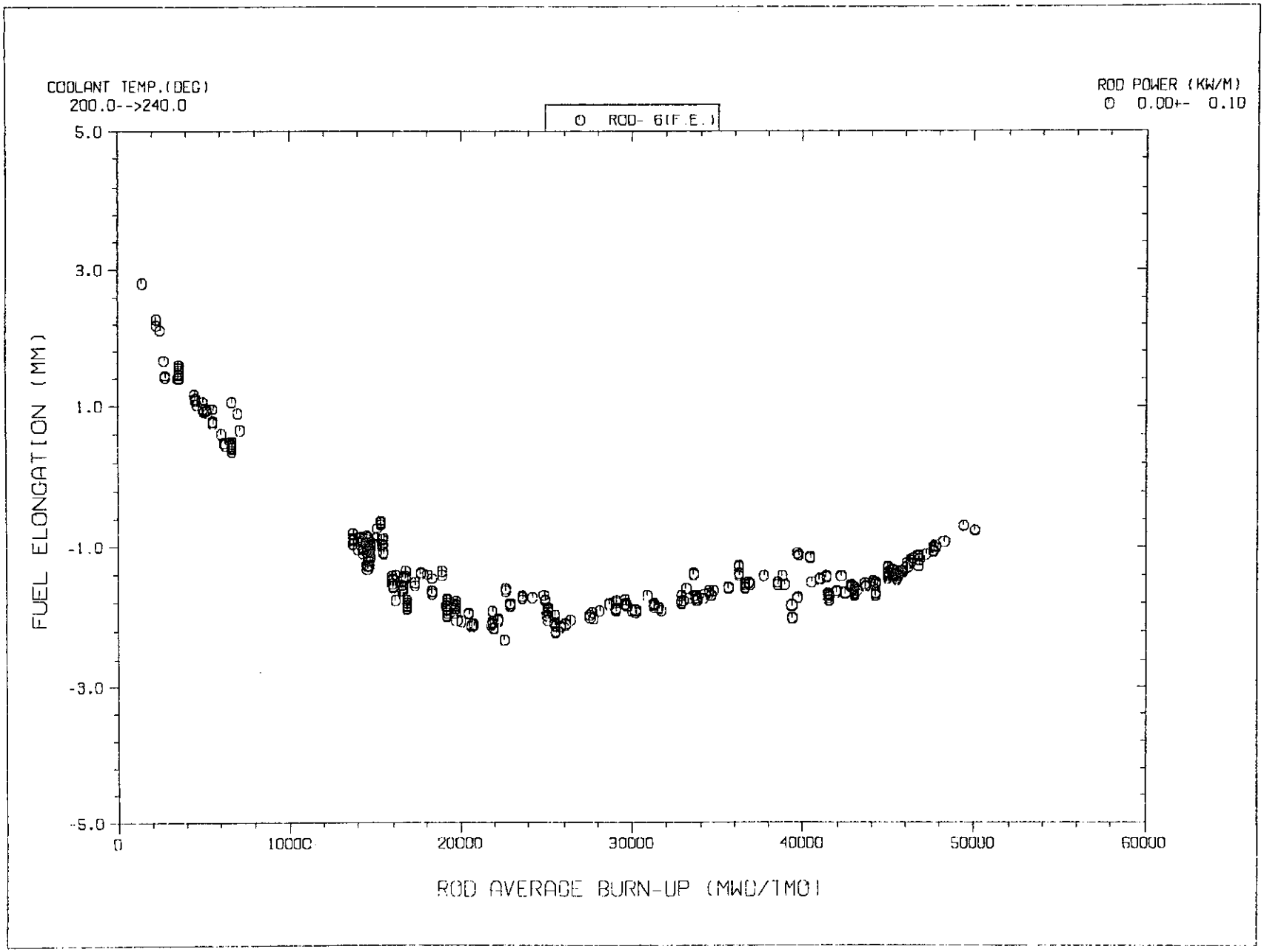


図4.2.2.2 (2/2) IFA-565-6 スタック長変化－燃料棒平均燃焼度（炉出力０）

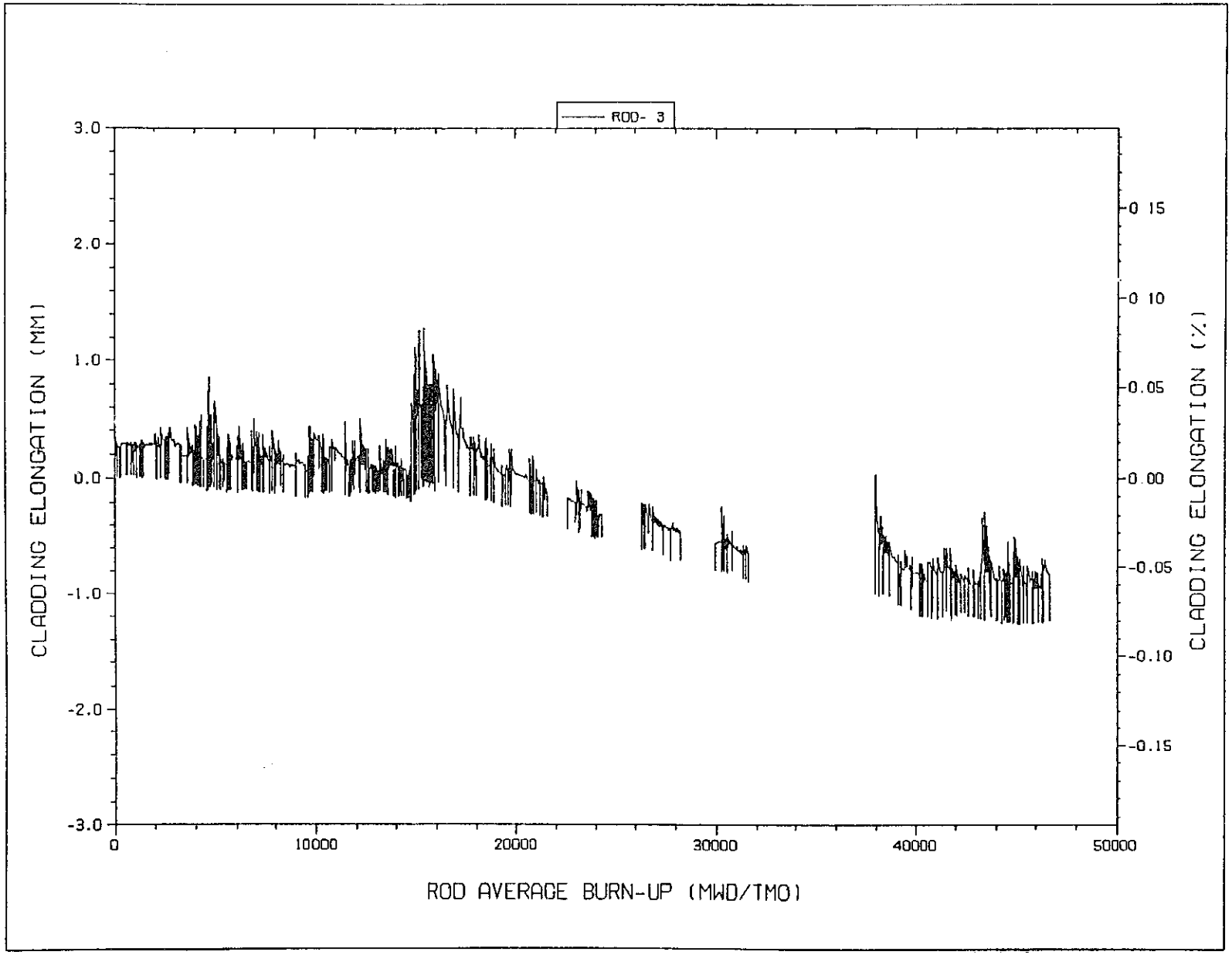


図4.2.3.1 (1/2)　IFA-565-3 燃料棒長変化－燃料棒平均燃焼度

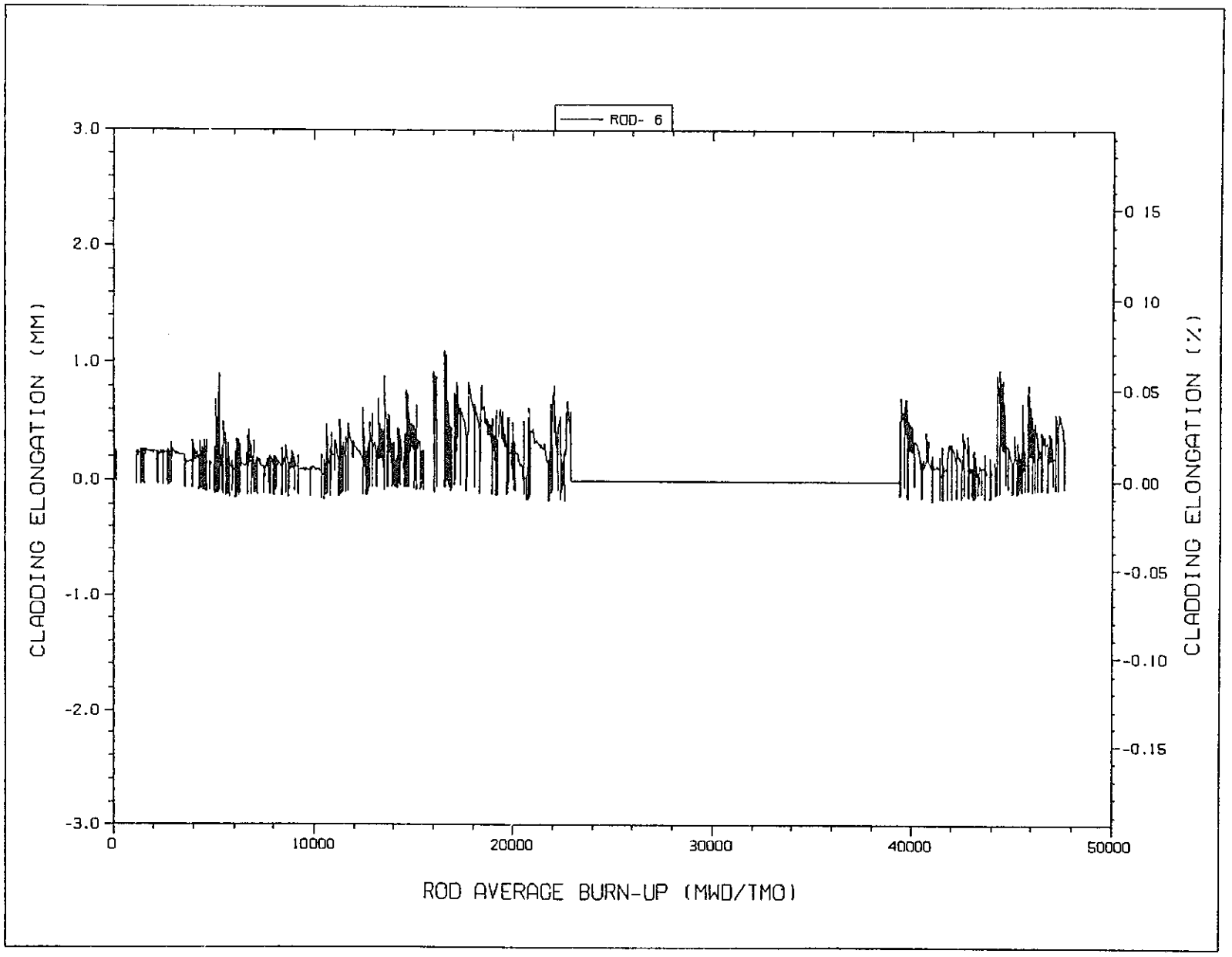


図4.2.3.1 (2/2)　IFA-565-6 燃料棒長変化－燃料棒平均燃焼度

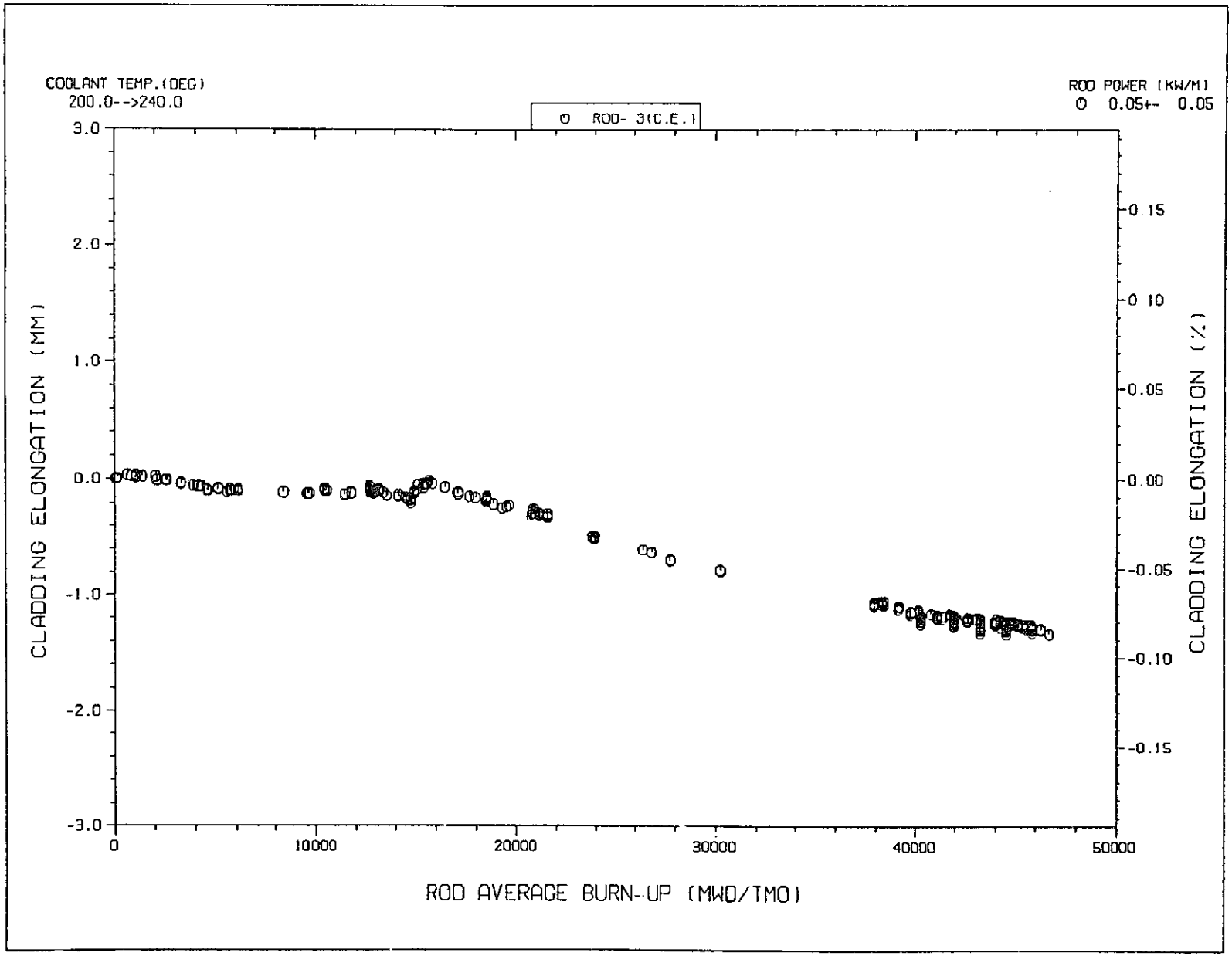


図4.2.3.2 (1/2) IFA-565-3 燃料棒長変化－燃料棒平均燃焼度（炉出力０）

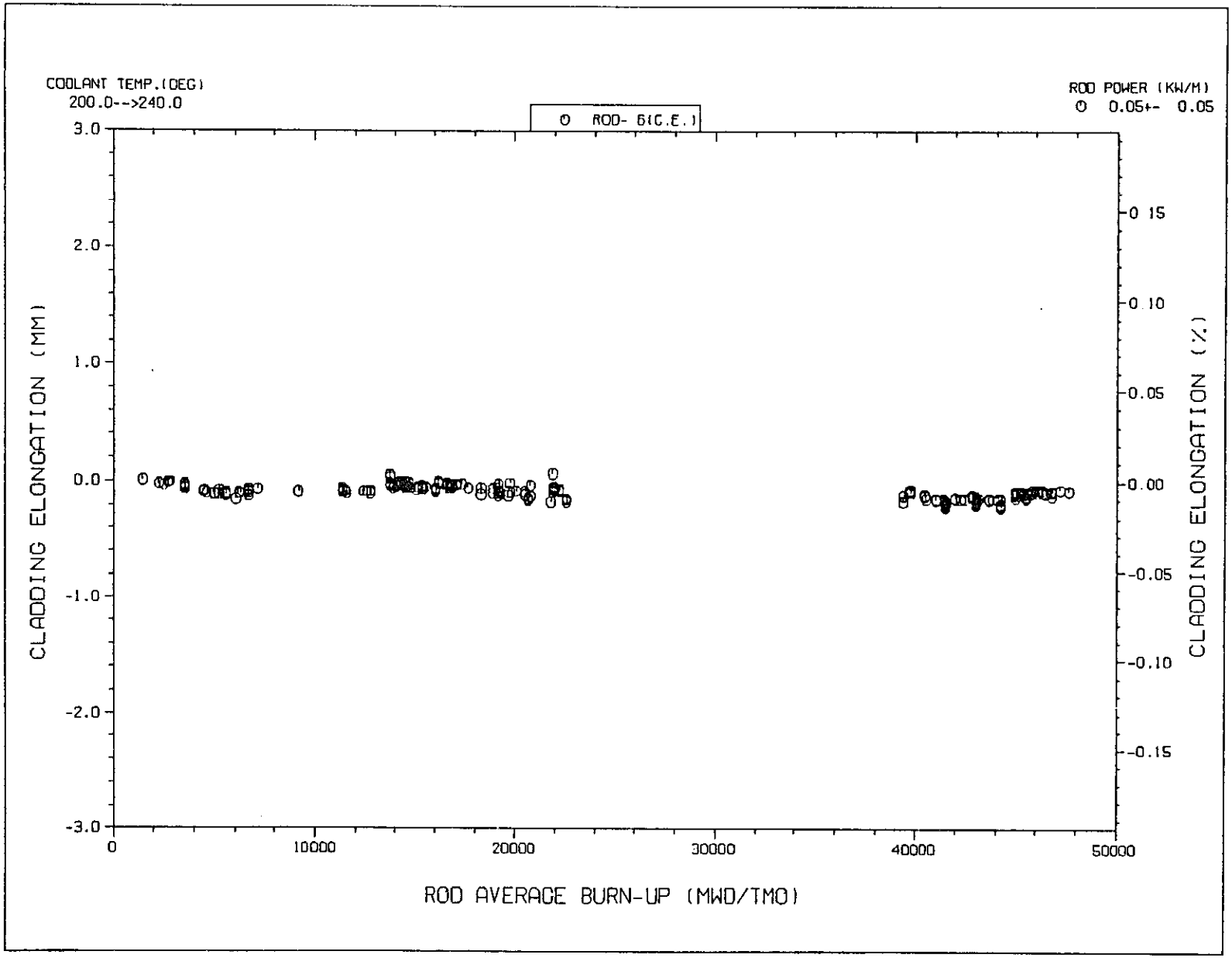


図4.2.3.2 (2/2) IFA-565-6 燃料棒長変化－燃料棒平均燃焼度（炉出力0）

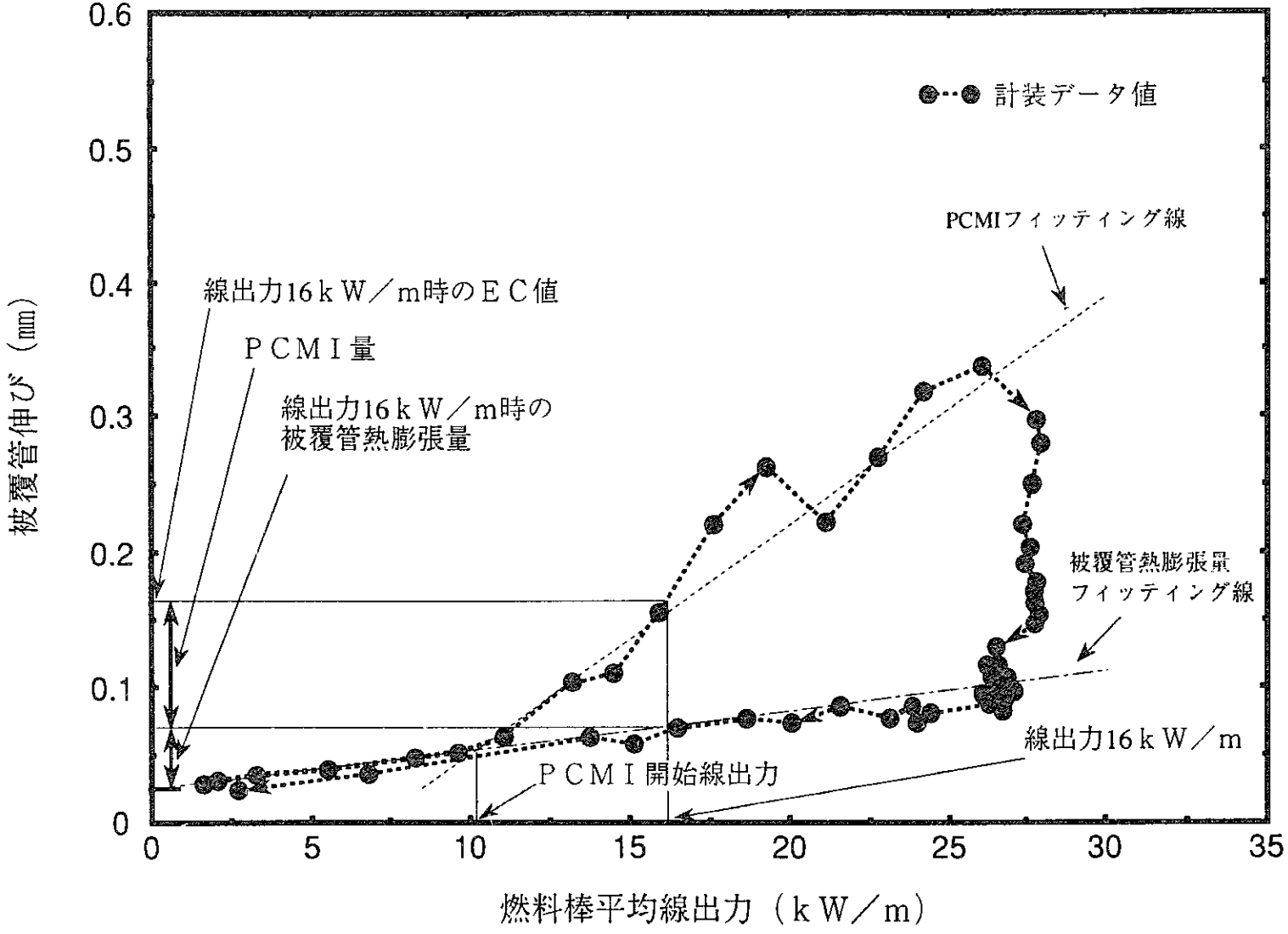


図4.2.3.3　PCMI量及びPCMI開始線出力の定義

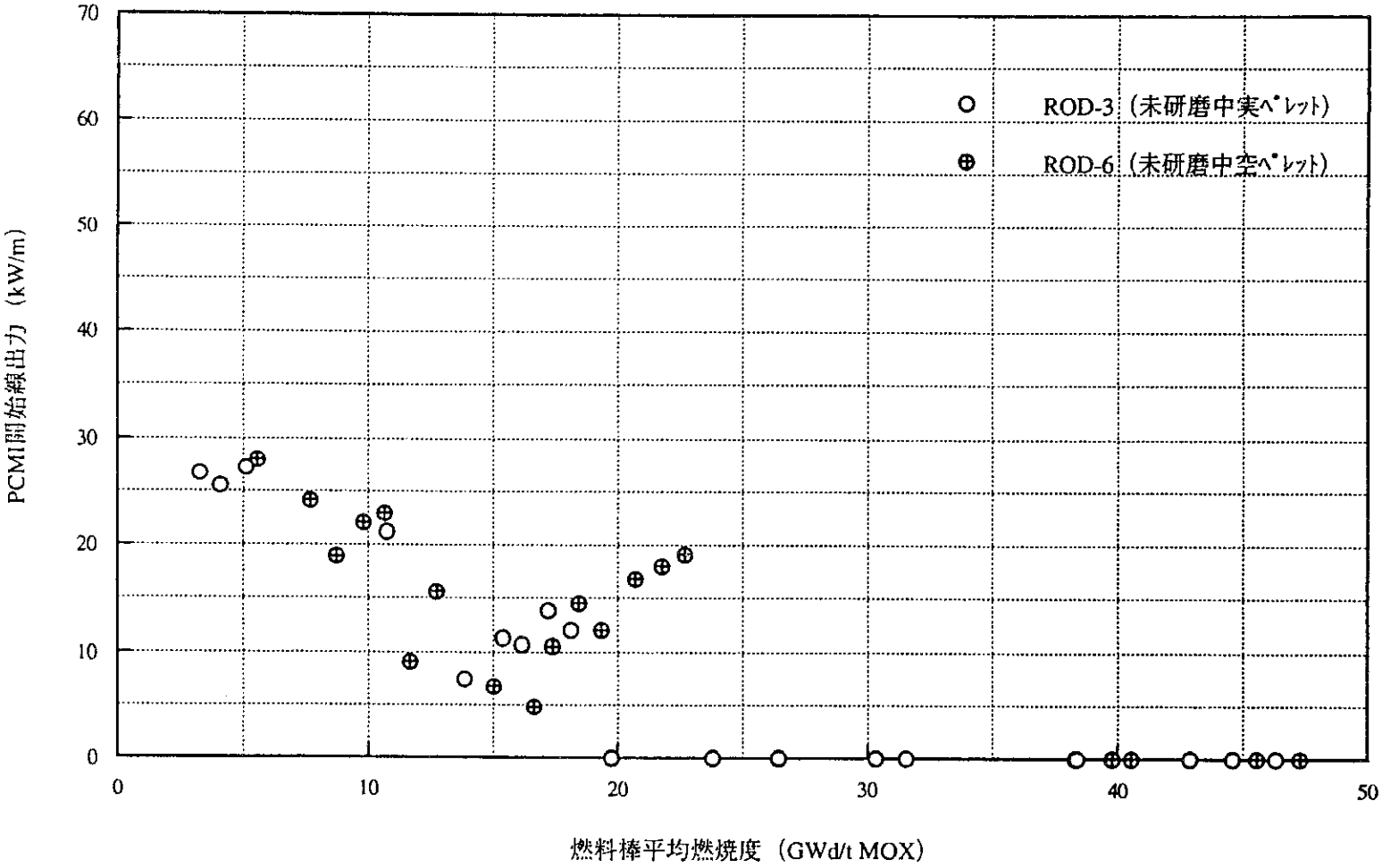


図4.2.3.4　PCMI開始線出力の燃焼度依存性

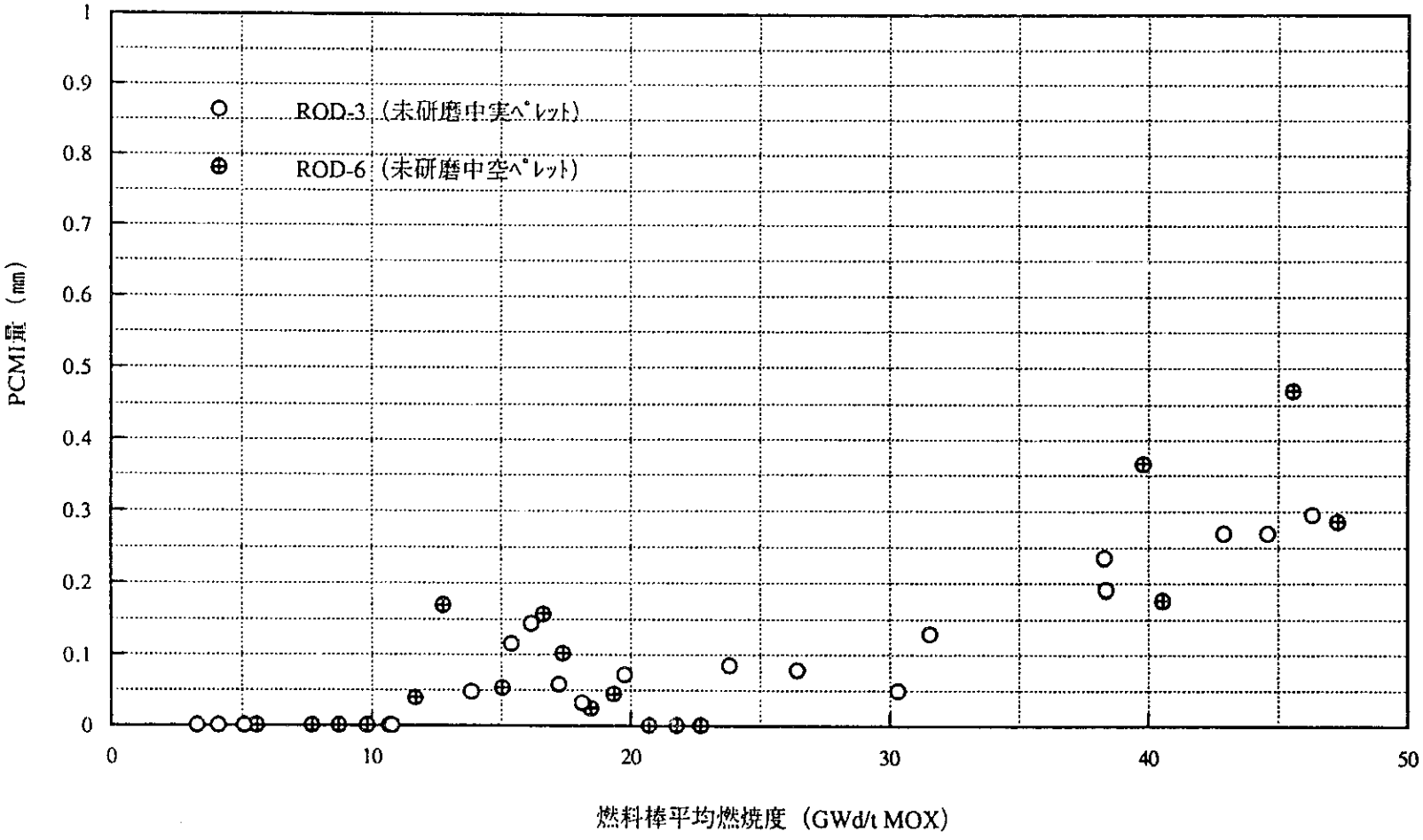


図4.2.3.5　PCMI量（16kW/m時）の燃焼度依存性

5. 照射後試験結果

非破壊試験としては、IFA-565-3, 4, 6 の３本の燃料棒に対して、照射中に得られた照射挙動データの確認と解析評価を行うことを目的として、外観観察、プロフィロメトリ測定、ガンマースキャニング、渦電流探傷試験及び中性子ラジオグラフィ試験の各試験を実施した。

また、破壊試験については、以上の非破壊試験結果と平均燃焼度が 46GWd/tに達して先に行ったIFA-514-1, 2, 5 の破壊試験結果をもとに、水炉用ＭＯＸ燃料の高燃焼度における燃料挙動、特に、ペレット表面付近におけるU-238の中性子共鳴吸収の結果、Pu-239濃度の増加により、局所的に燃焼度の上昇するリム効果を中心に燃料挙動評価を行うことを目的として実施した。平均燃焼度が約56GWd/tに達したIFA-565-3, 4, 6についてパンクチャ試験、IFA-565-3, 6の 2本について、被覆管の内圧バースト、ノジュラー腐食、水素化物分析、内面観察、ペレットの金相試験、αオートラジオグラフ、マイクロγスキャン、残留ガス分析、燃焼度分析の各試験を実施した。

5.1 照射後試験サンプル選定根拠

照射後破壊試験項目の詳細について示す。

(1) パンクチャ試験

３本の照射燃料棒について、パンクチャ試験を行い、ＦＰガス放出率を求める。また、炉内計装で得られた内圧データとの比較を行う。

さらに、放出ガスについて、マス・スペクトル解析によるKr, Xe, He, Ar, O_2, CO_2, H_2, N_2+CO, H_2Oの成分分析を行う。Kr, Xeは同位体分析を行う。

(2) 被覆管の内圧バースト試験

高燃焼度における燃料被覆管の機械強度データの取得を目的として、 340℃における内圧バースト試験を中実及び中空ペレット燃料棒（IFA-565-3, 6）の２試料について行う。

また、バースト後の破裂孔の状況についても観察する。

(3) 被覆管のノジュラー腐食試験

非破壊試験で観察されたスペーサとの接触部における酸化膜を含む部分のノジュラー腐食深さとカバー率の測定を２本の燃料棒（IFA-565-3, 6）について２試料ずつ行い、高燃焼度における被覆管の腐食状況を調べる。

(4) 被覆管の水素化物分析

２本の燃料棒（IFA-565-3, 6）について、それぞれ被覆管横断面２ヵ所のエッチング前後の水素化物の状態観察と水素分析を行う。

(5) 被覆管の内面観察

前記と同様に２本の燃料棒（IFA-565-3, 6）について、軸方向２ヵ所の被覆管内面の観察を行う。

(6) ペレットの金相試験

２本の燃料棒（IFA-565-3, 6）についてそれぞれ代表的な軸方向３ヵ所、縦断面１ヵ所の計４ヵ所について、研磨後の全体的な割れの観察、エッチング後の結晶粒径、ポア分布と、特に横断面観察では、ペレットリム部におけるサブ・グレインとボイドの分布状態（約1000倍の金相写真）と、中空ペレットの中空部の詳細観察を中心に行う。

(7) ペレットのαオートラジオグラフ

前項(6)の金相横断面試料を用いて、IFA-565-3, 6から２試料について測定を行う。

(8) ペレットのマイクロγスキャン

前項(6)の金相横断面試料を用いて、IFA-565-3, 6から２試料についてGrossγとCs-137, -134, Ru-106, Ce-144及びZr/Nb-95の５核種について、径方向でのＦＰ元素の分布を評価する。

(9) ペレットの残留ガス分析

IFA-565-3, 6の２本の燃料棒から横断面試料をサンプリングし、リム部とその他の部分の２ヵ所について、残留ガス分析を行う。

特に、リム部については、Xeの減少等の確認を中心に分析を行う。

(10) ペレットの燃焼度分析

IFA-565-3, 6の2本の燃料棒について、それぞれ軸方向3ヵ所の6試料及び軸方向3ヵ所それぞれについて、径方向からリム部とその他の部分の2ヵ所の6試料について燃焼度分析を行う。

以上の各破壊試験項目の試料切断箇所を燃料棒毎に図5.1.1～3に示す。

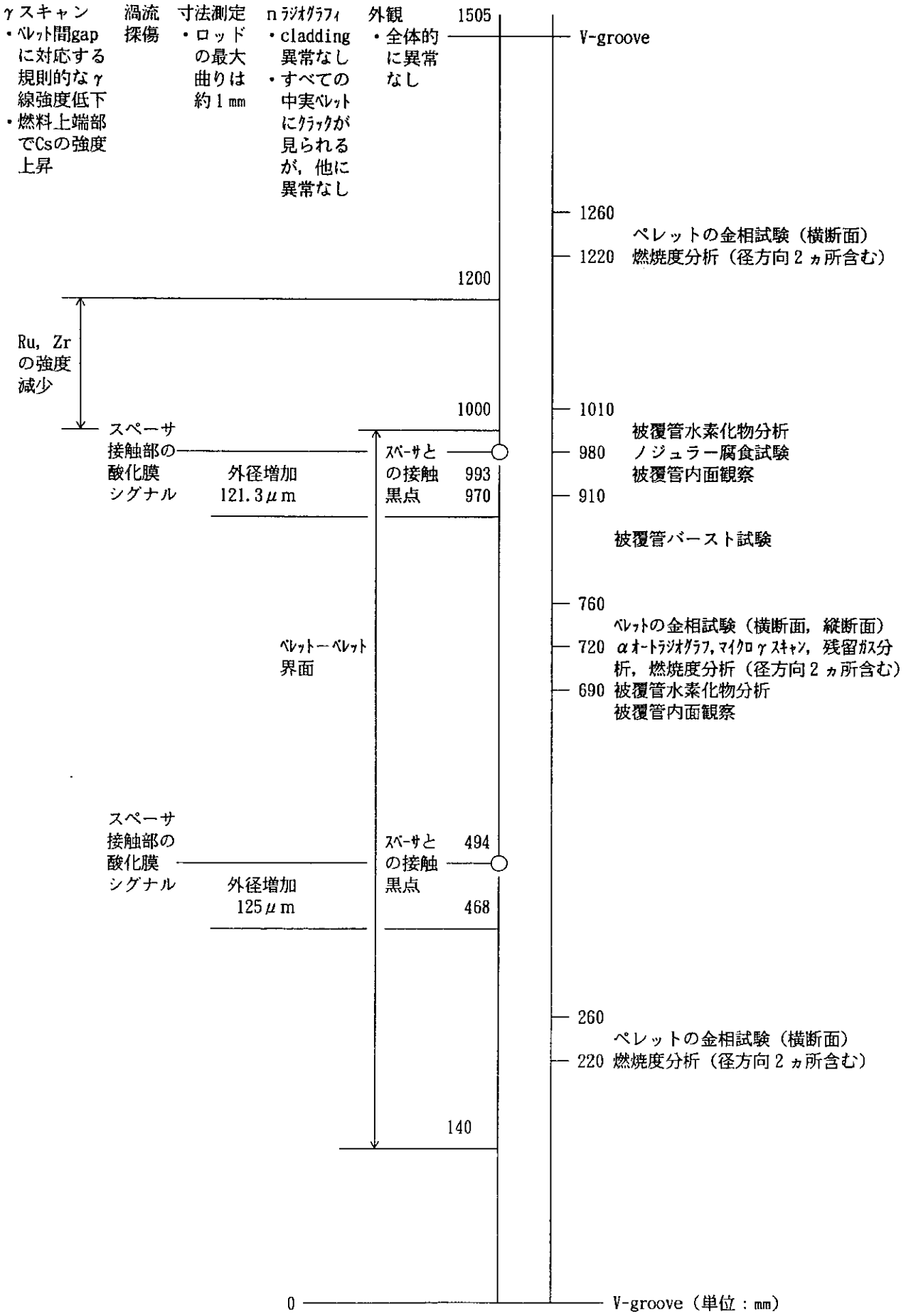


図5.1.1　IFA-565-3の非破壊試験結果と破壊試験試料の切断位置

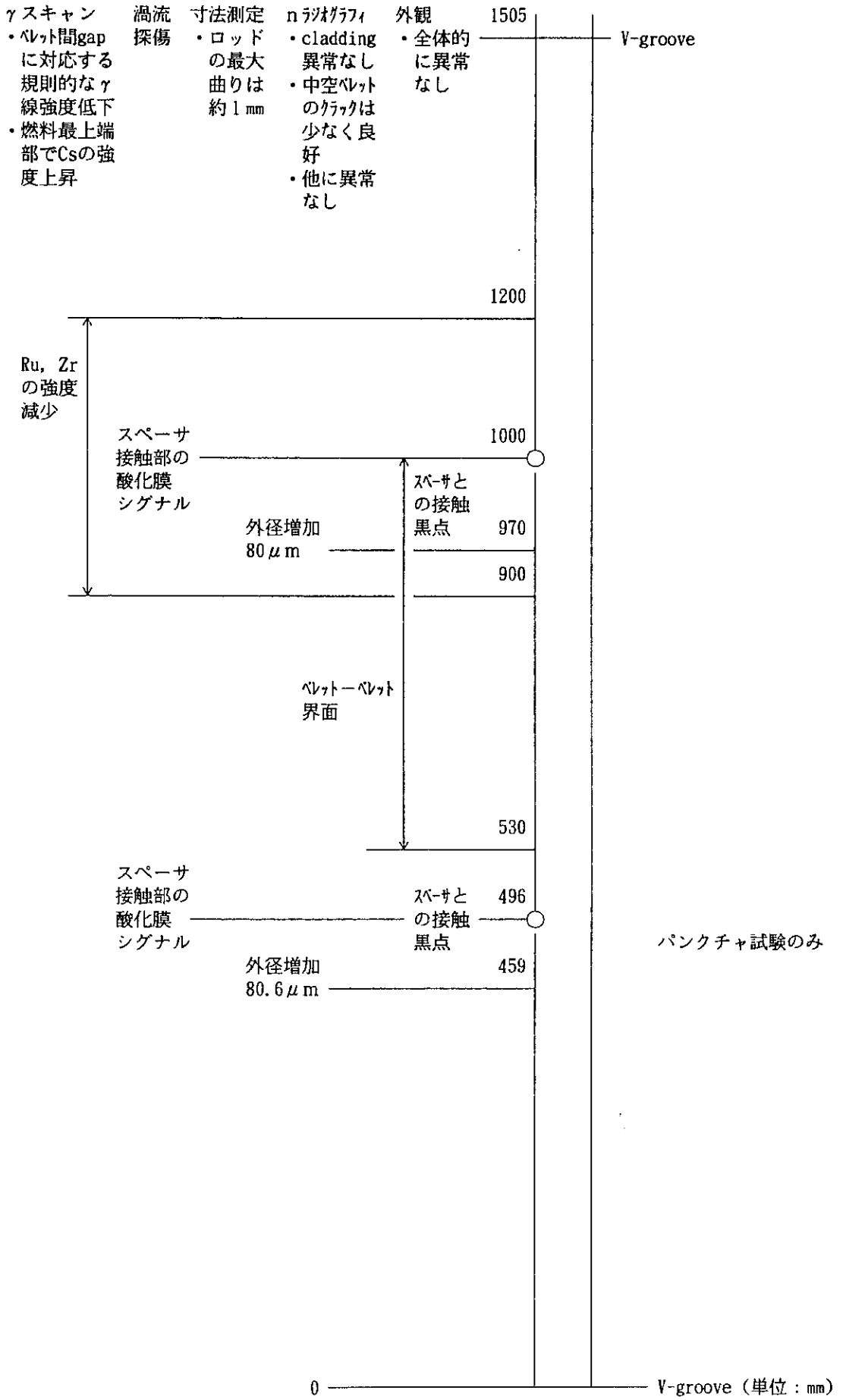


図5.1.2 IFA-565-4の非破壊試験結果と破壊試験試料の切断位置

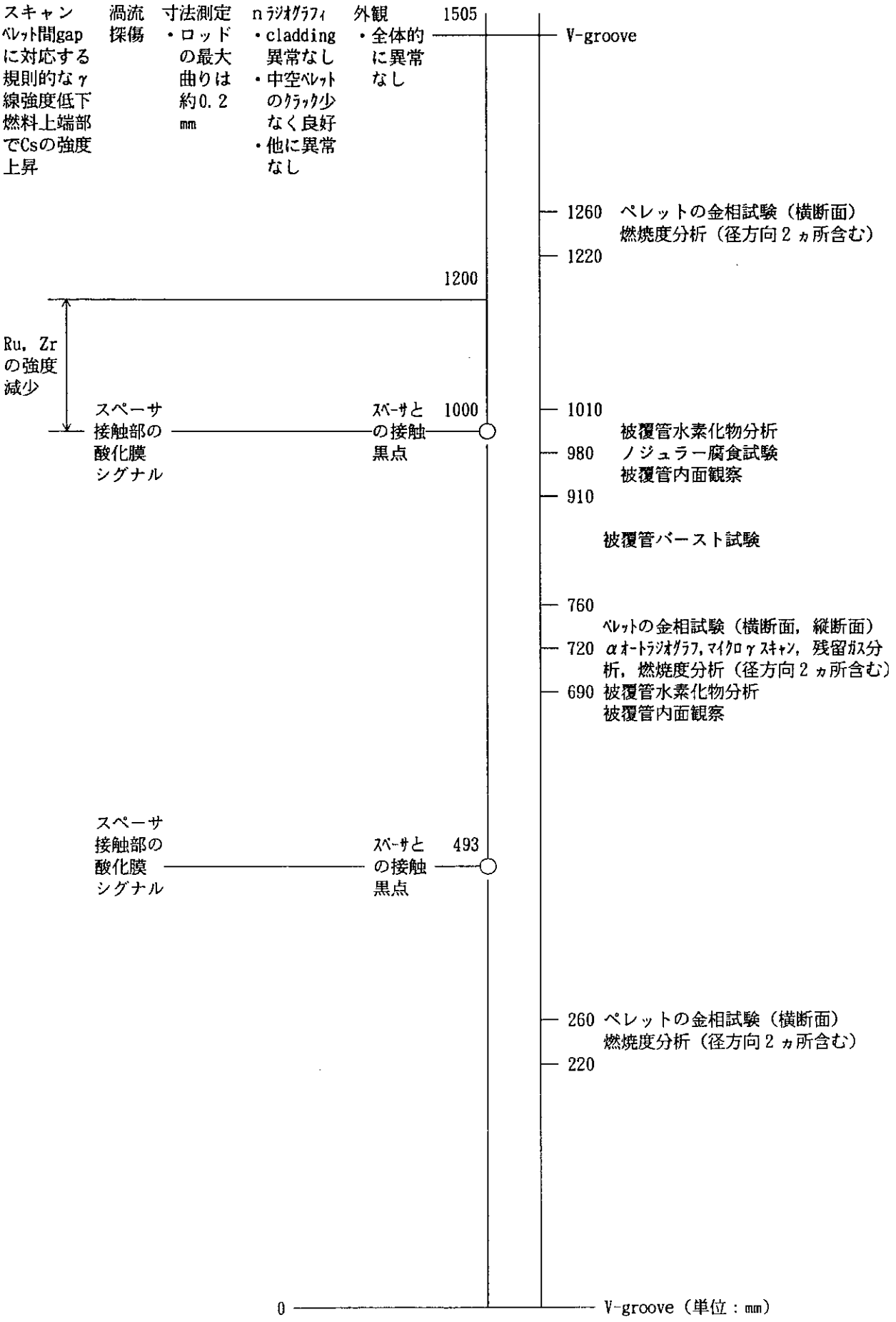


図5.1.3 IFA-565-6の非破壊試験結果と破壊試験試料の切断位置

5.2 外観観察

IFA-565-3, 4, 6の燃料棒についてセル窓から外観観察を行った。

観察方法

各燃料棒毎に、燃料棒外表面の全面をカバーするために4方向からの観察を行った。以下、軸方向位置は、下部ノッチからの距離を示し、また、0度方向は下部端栓の刻印番号を基準とし、角度方向は上部端栓を時計回りに回転させることにより設定した。

観察結果

(1)IFA-565-3の外観観察結果

セル窓を通して得られたIFA-565-3の外観写真を図5.2.1～4に示す。ペレット-ペレット界面が明瞭に観察されている。これは、写真に示すように、すべての角度について140mmから1000mmの部分で最も明瞭に観察されている。また、180度方向で被覆管外表面に2つの黒点が観察されている。図5.2.3に示すように、1つは494mmの位置で、もう1つは993mmの位置で見られる。さらに、いくつかの傷が被覆管表面に観察される。

(2)IFA-565-4の外観観察結果

セル窓を通して得られたIFA-565-4の外観写真を図5.2.5～8に示す。ペレット-ペレット界面が、特に530mmから1000mmの位置で最も明瞭に観察されている。また、図5.2.5～6に示すように、0度と90度の方向で496mmと1000mmの位置に、被覆管外表面に黒点が観察されている。

(3)IFA-565-6の外観観察結果

セル窓を通して得られたIFA-565-6の外観写真を図5.2.9～12に示す。写真のいくつかに白点と白線が観察されるが、これは試験前に角度の識別に用いたチョークの跡である。また、図5.2.11に示すように、180度の方向で2つの黒点が観察された。1つは493mmで、もう1つは1000mmの位置である。その他、特筆すべき現象は観察されていない。

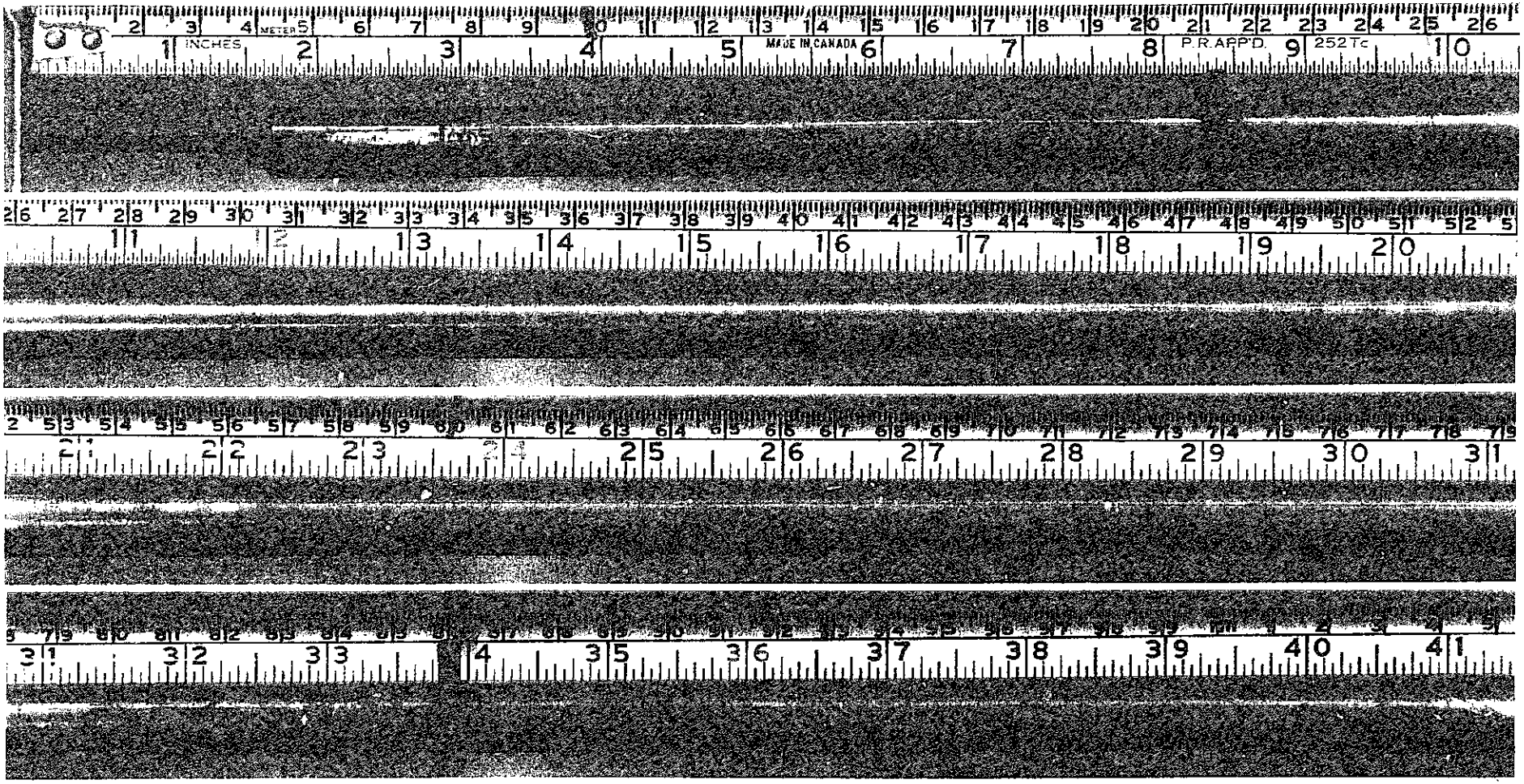


図5.2.1　IFA-565-3　0° 方向

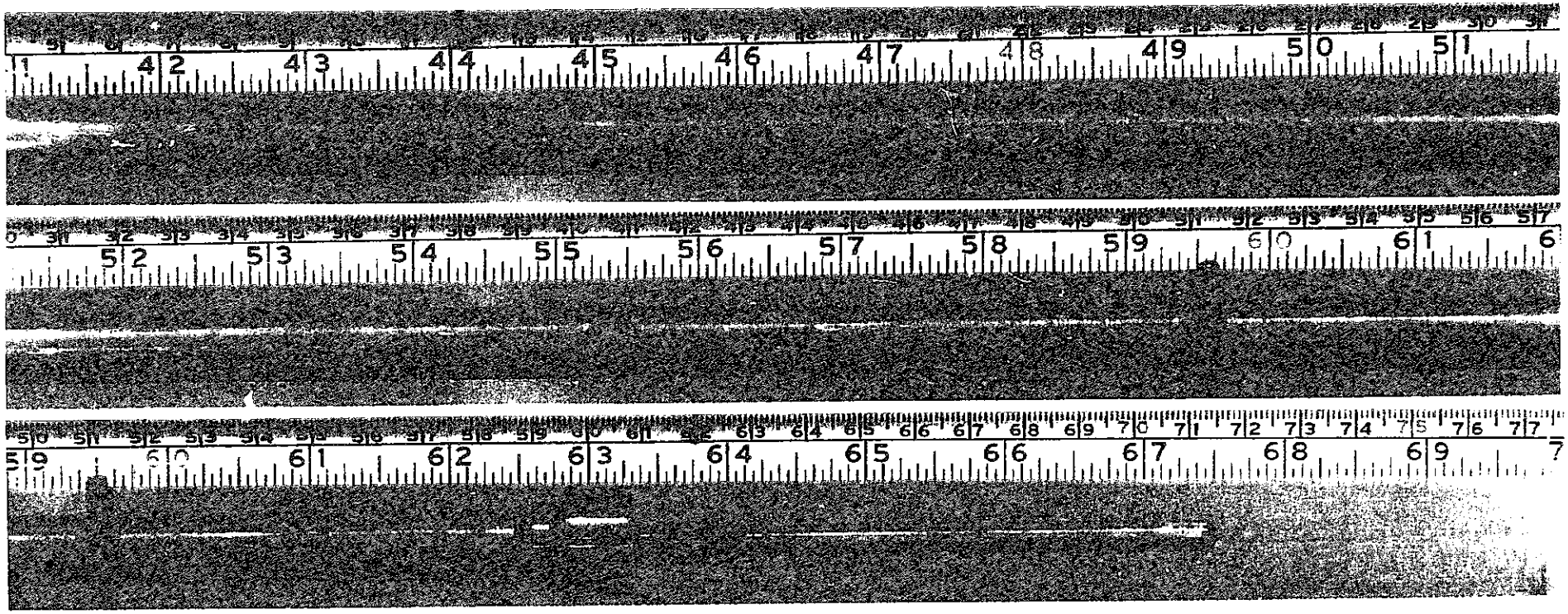


図5.2.1　IFA-565-3　0°方向（続き）

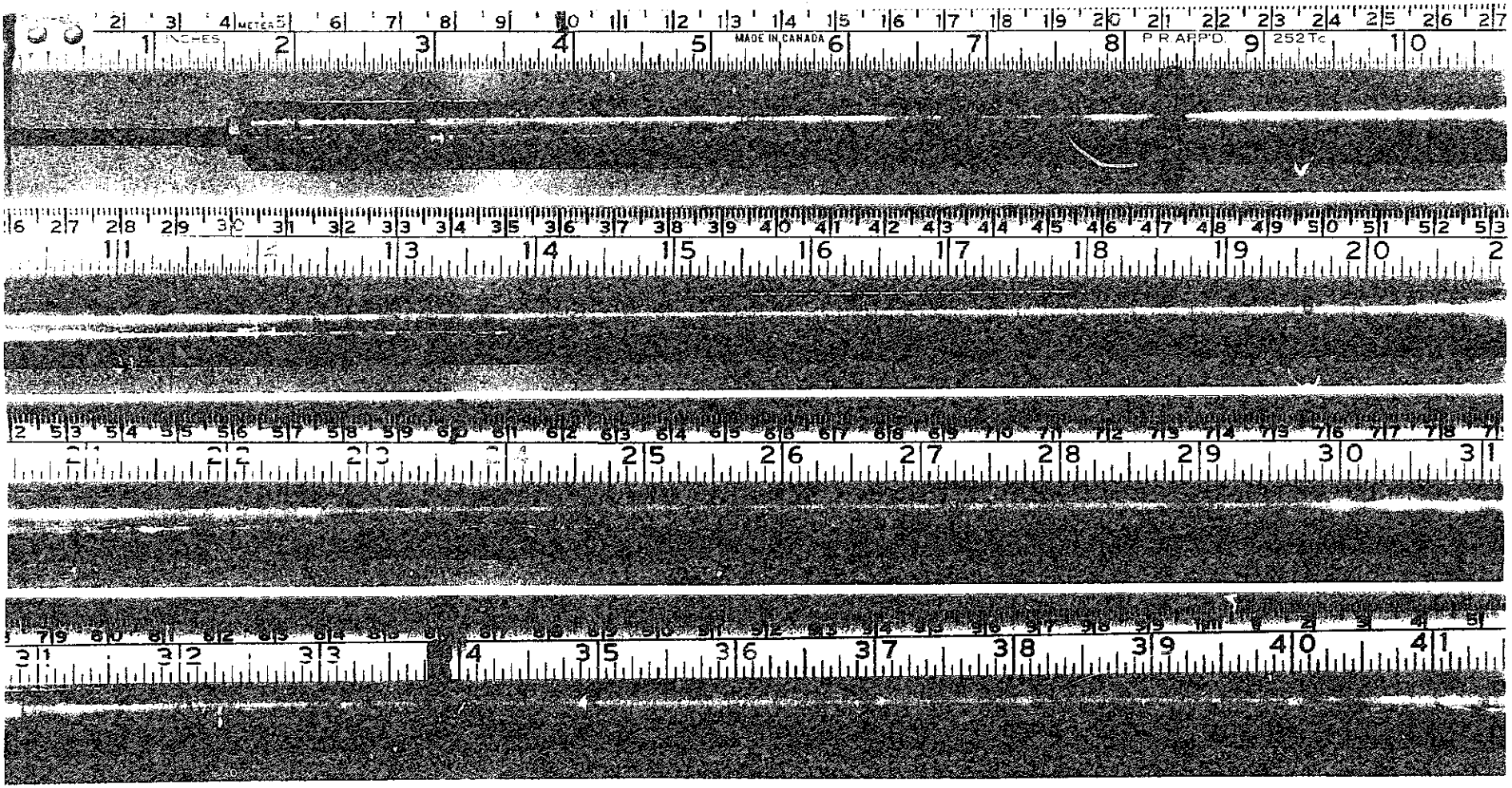


図5.2.2　IFA-565-3　90° 方向

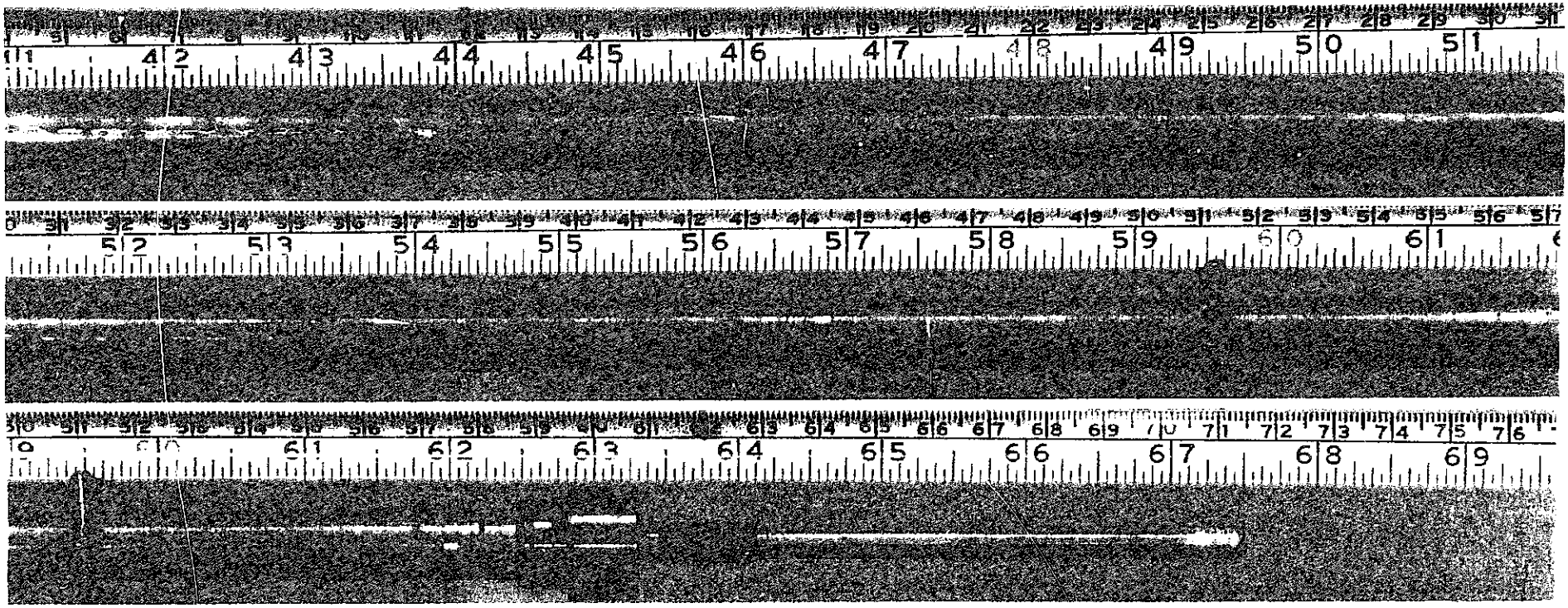


図5.2.2　IFA-565-3　90°方向（続き）

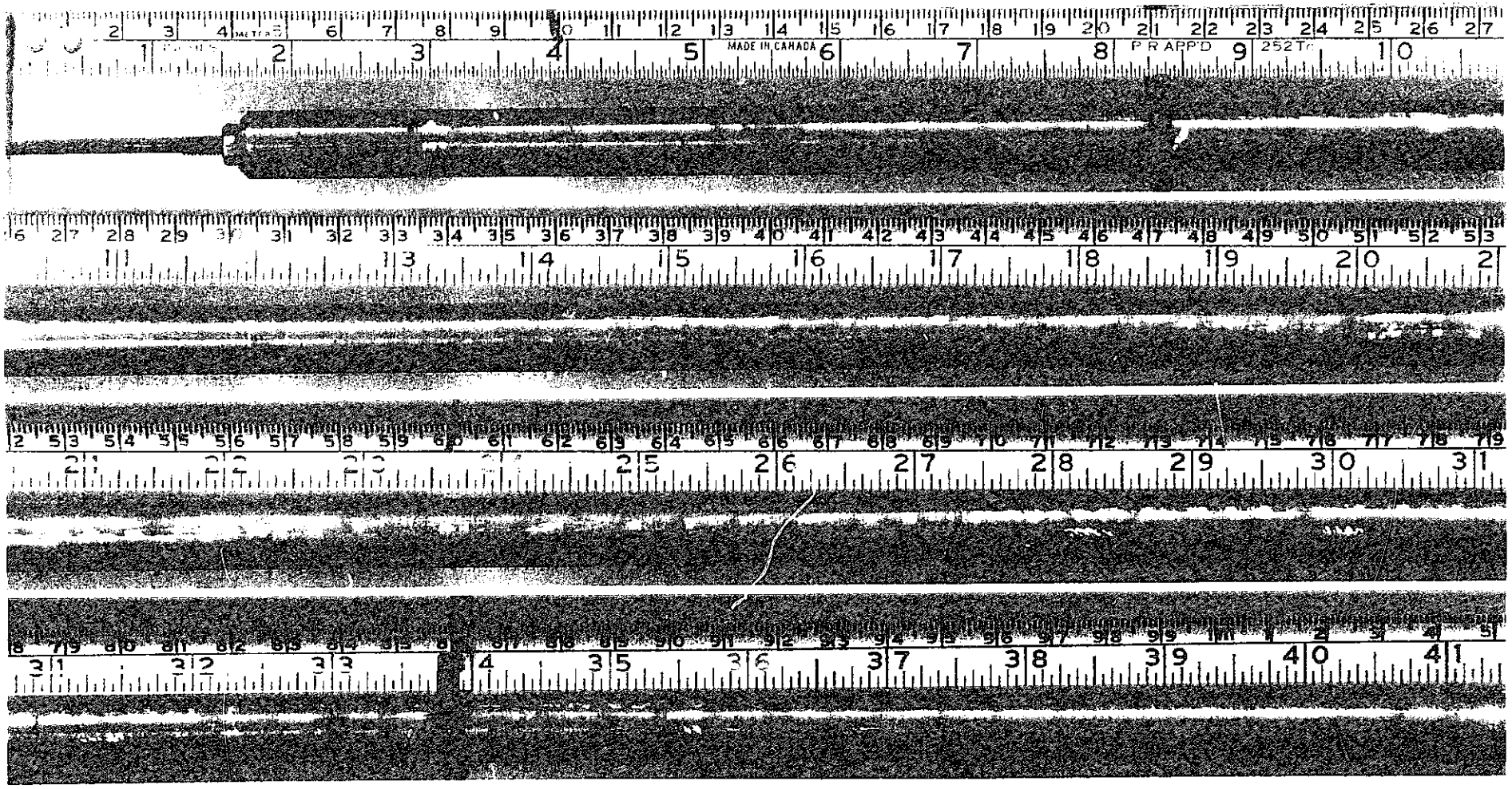


図5.2.3　IFA-565-3　180° 方向

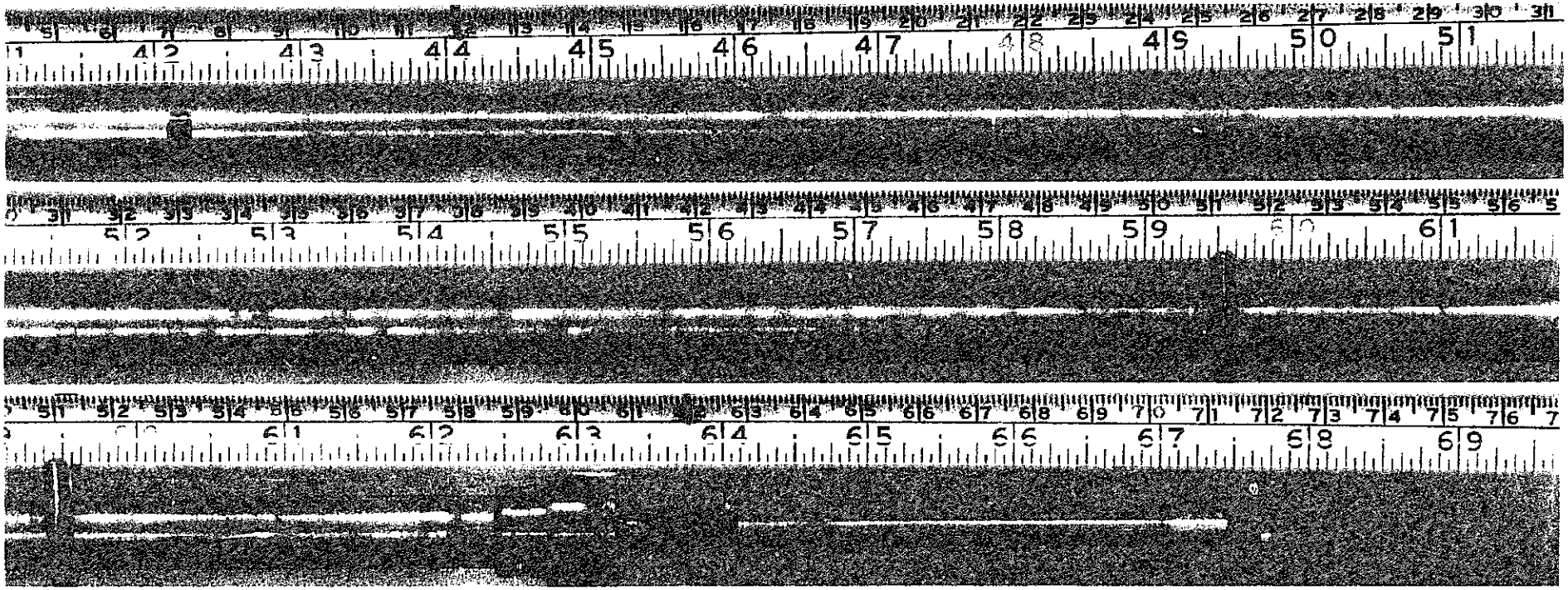


図5.2.3　IFA-565-3　180° 方向（続き）

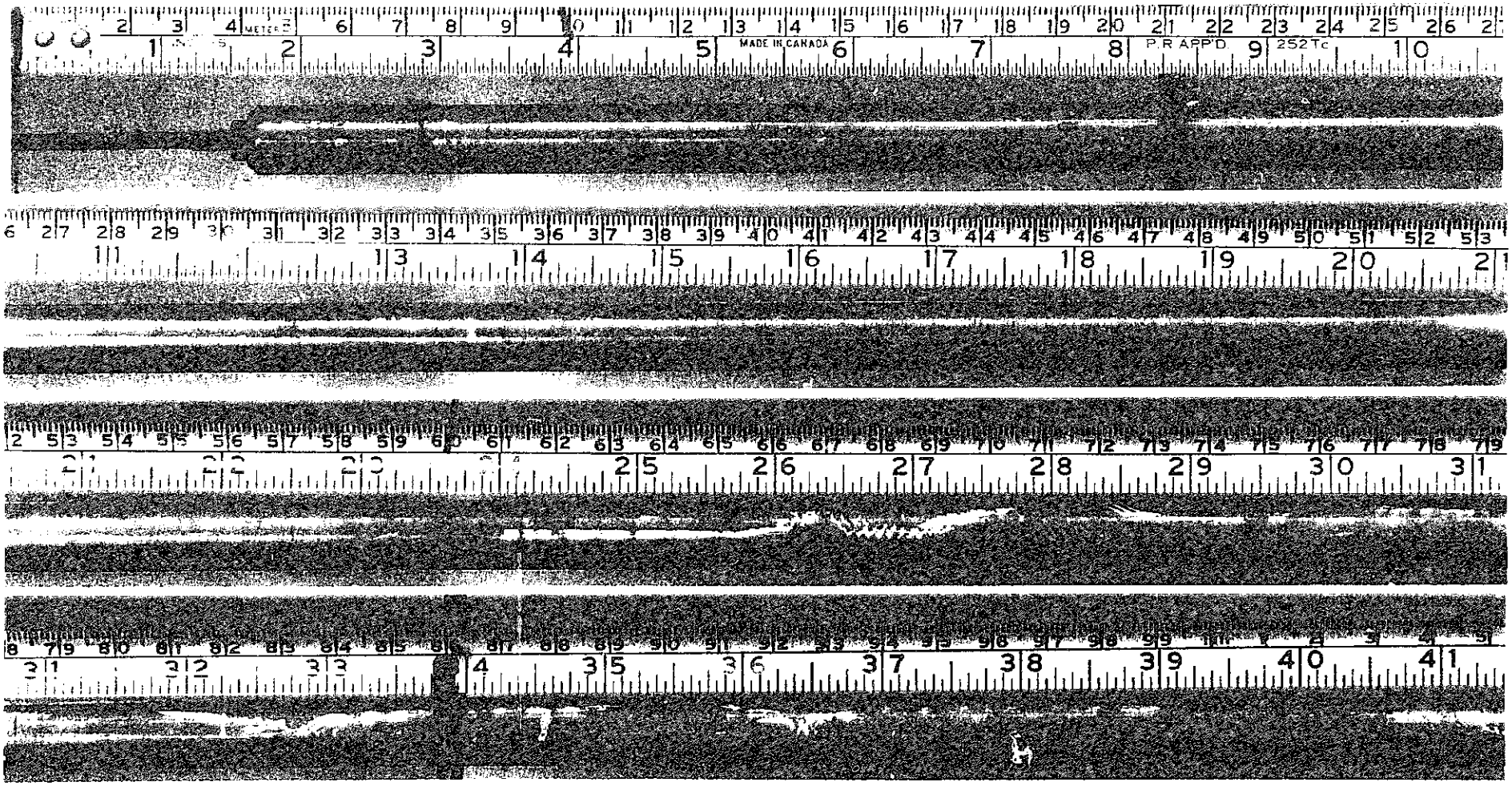


図5.2.4　IFA-565-3　270° 方向

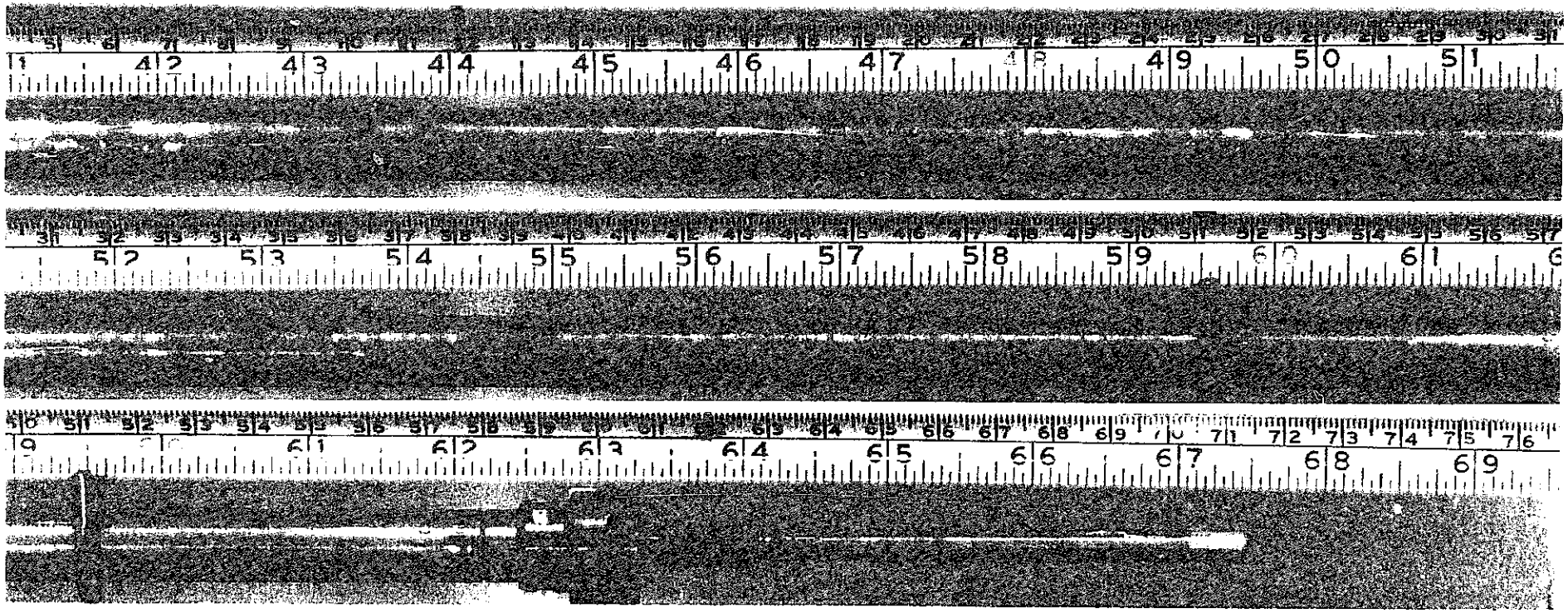


図5.2.4　IFA-565-3　270°方向（続き）

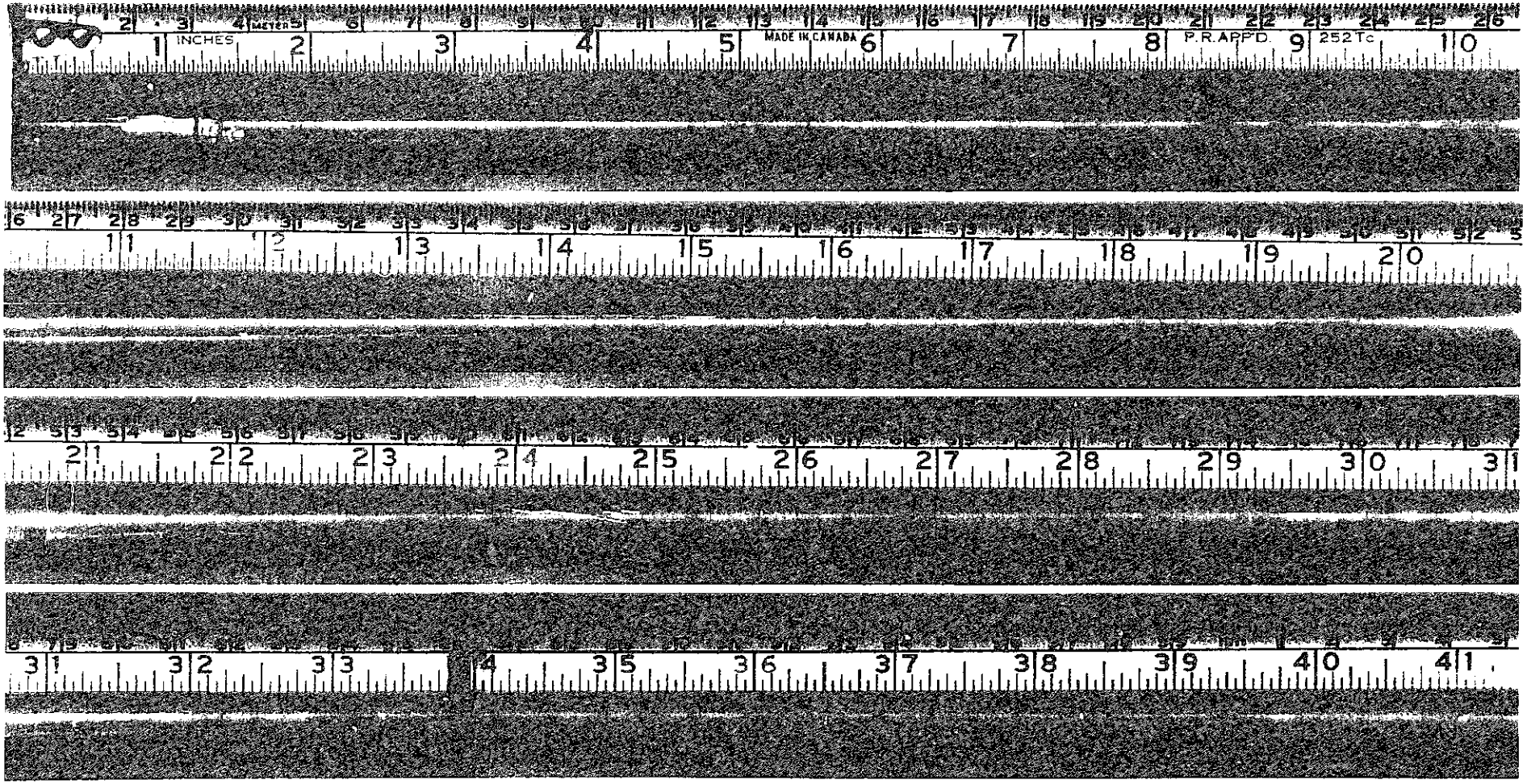


図5.2.5　IFA-565-4　0° 方向

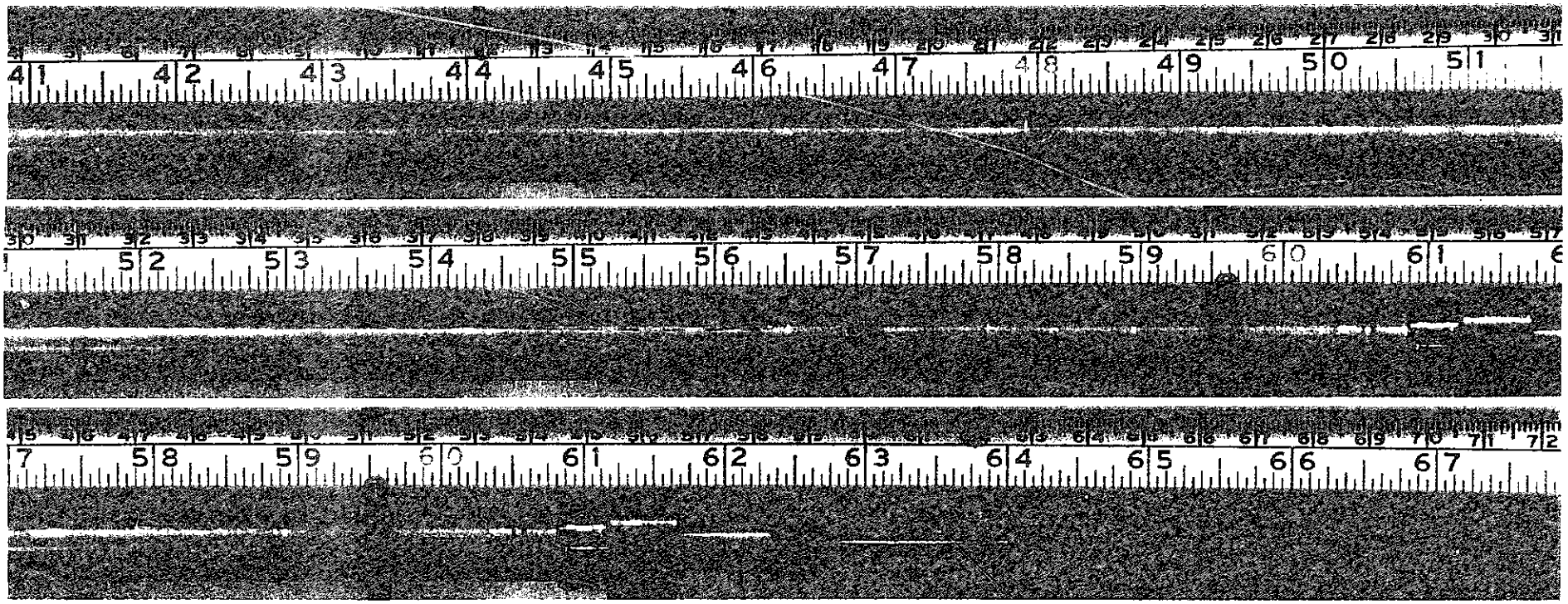


図5.2.5　IFA-565-4　0° 方向（続き）

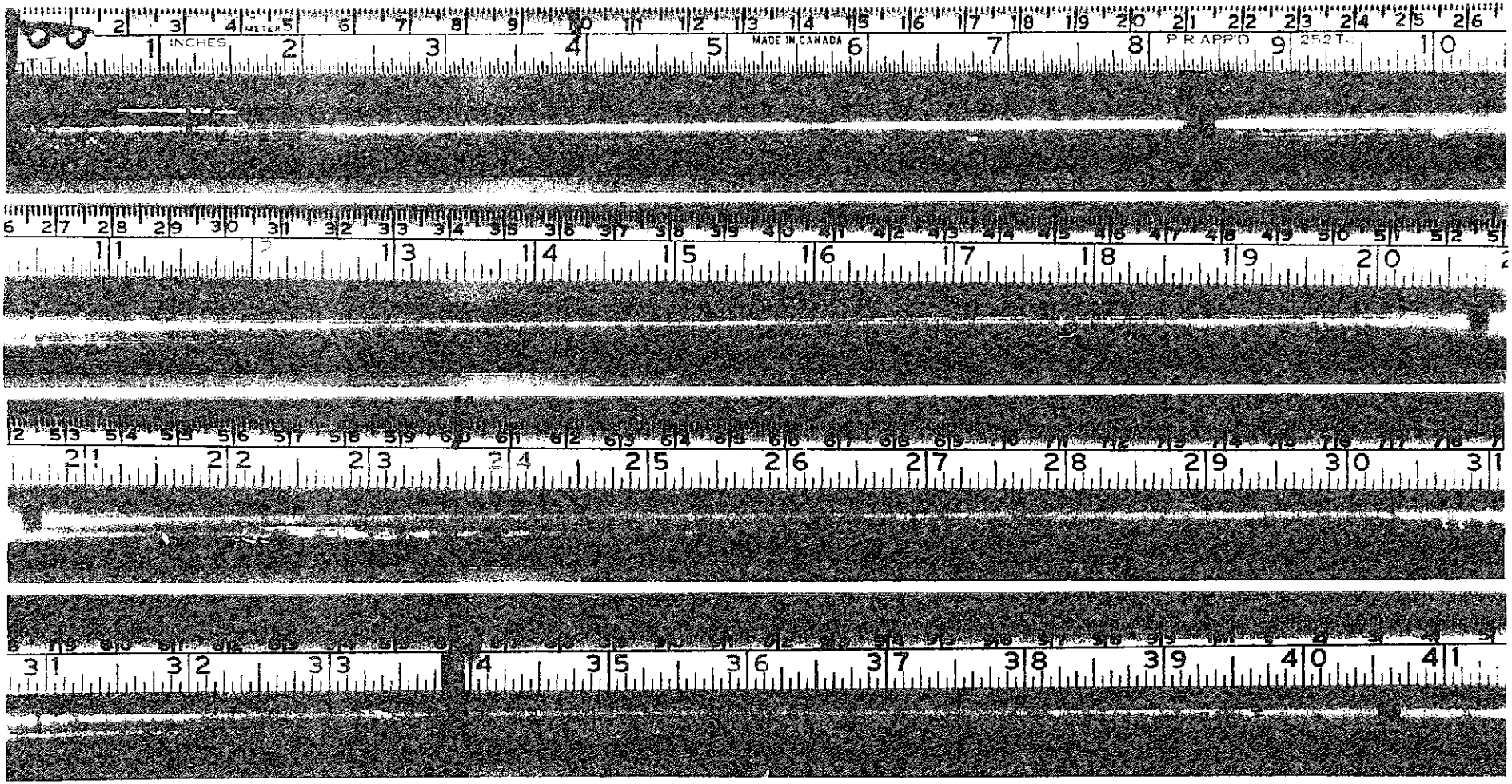


図5.2.6　IFA-565-4　90° 方向

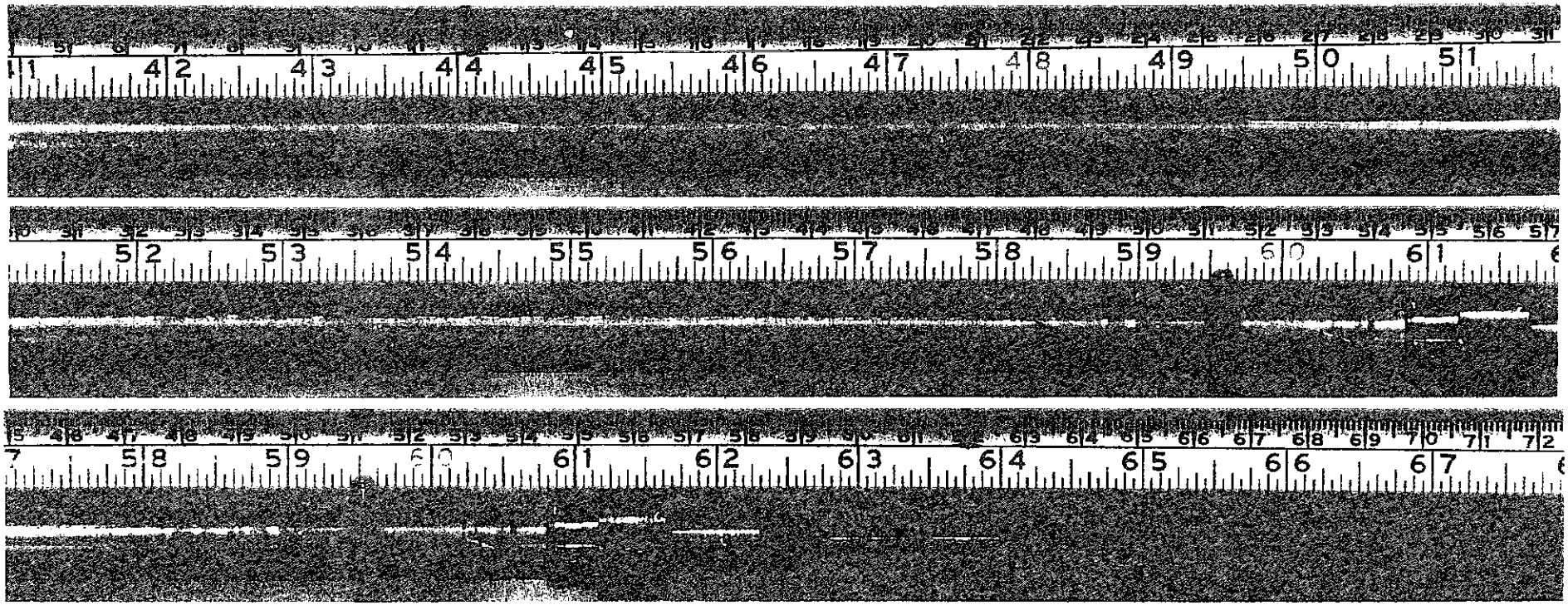


図5.2.6　IFA-565-4　90°方向（続き）

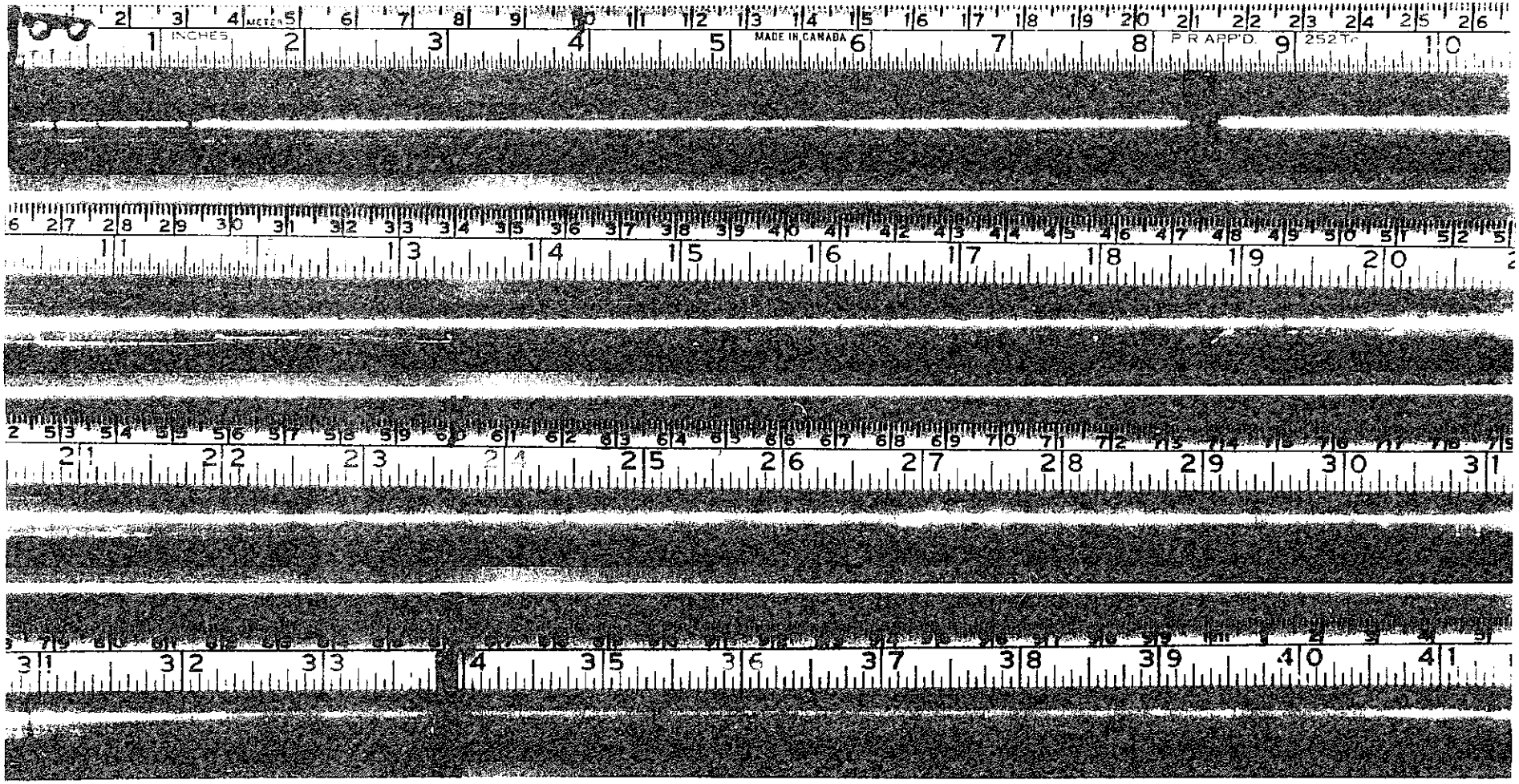


図5.2.7　IFA-565-4　180° 方向

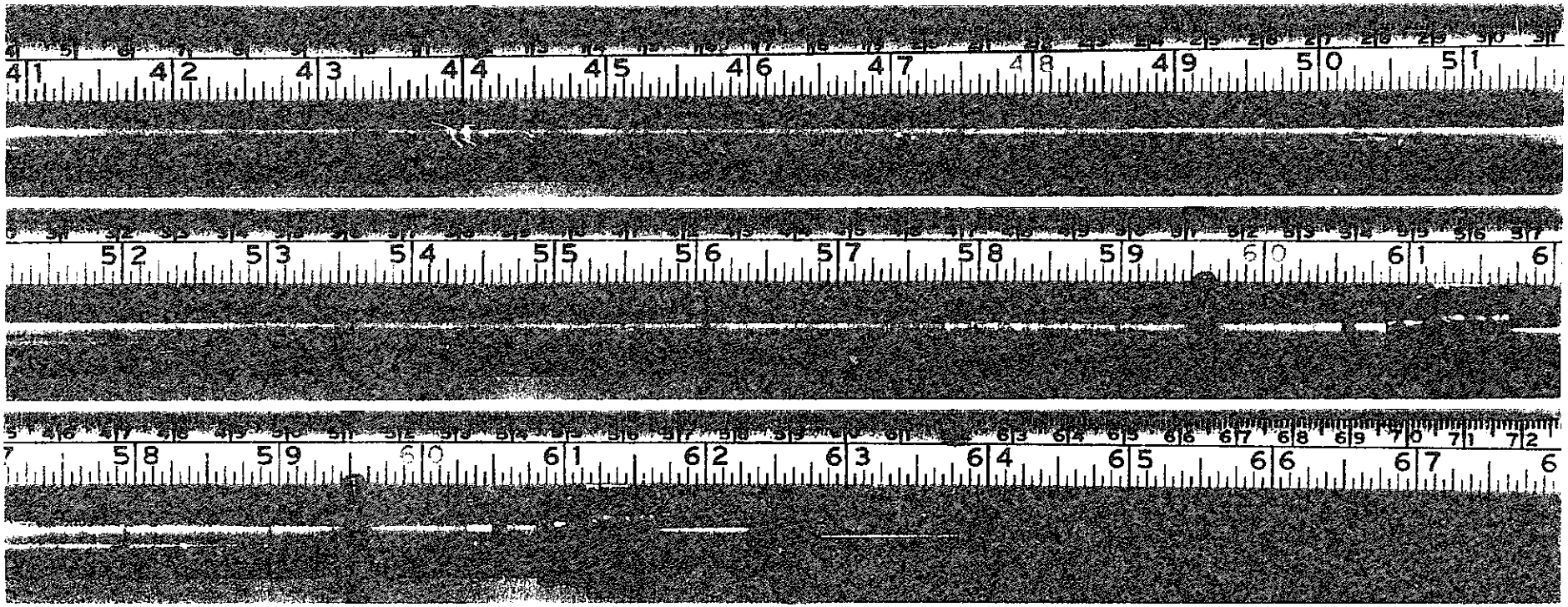


図5.2.7　IFA-565-4　180° 方向（続き）

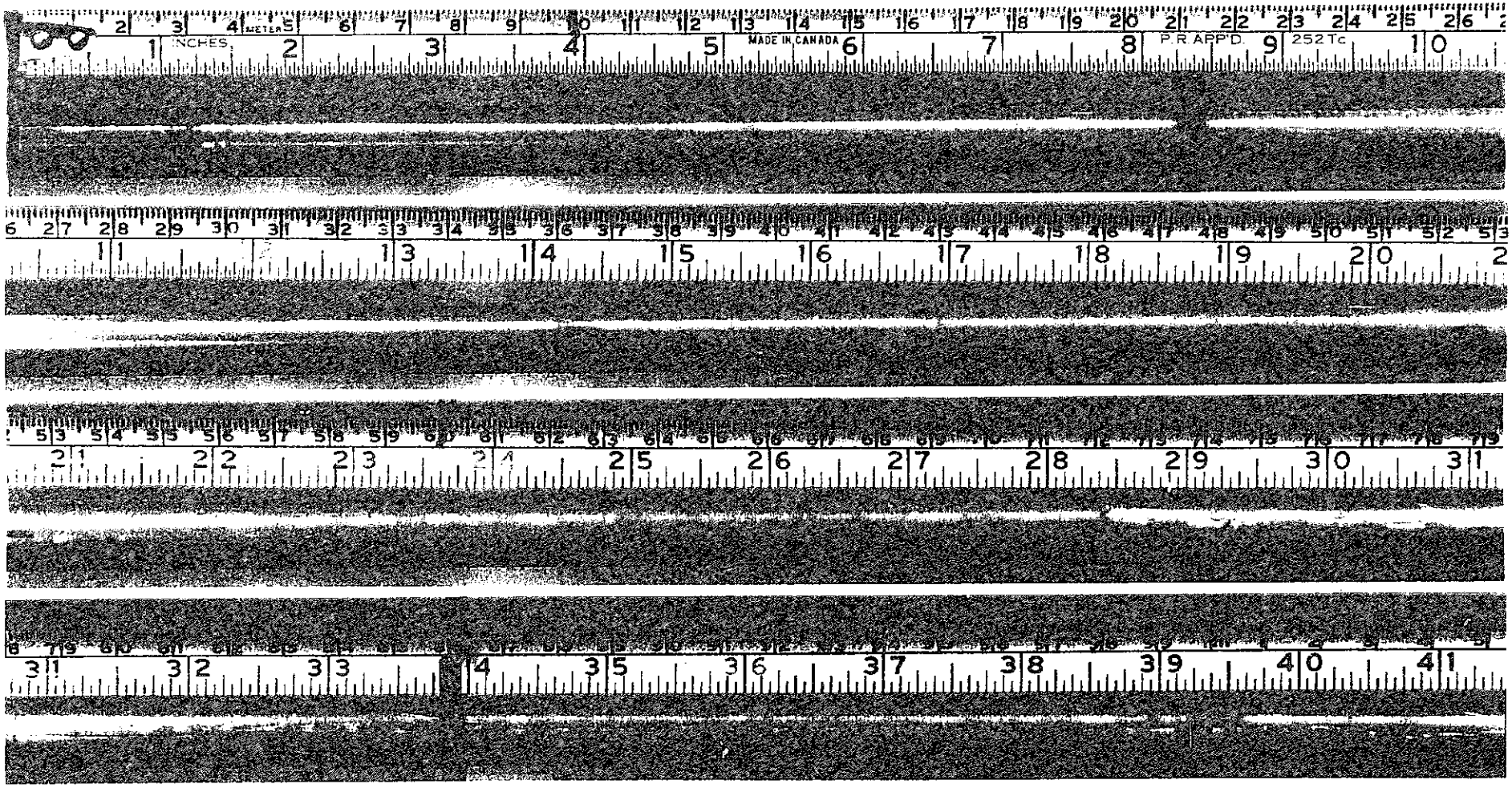


図5.2.8　IFA-565-4　270° 方向

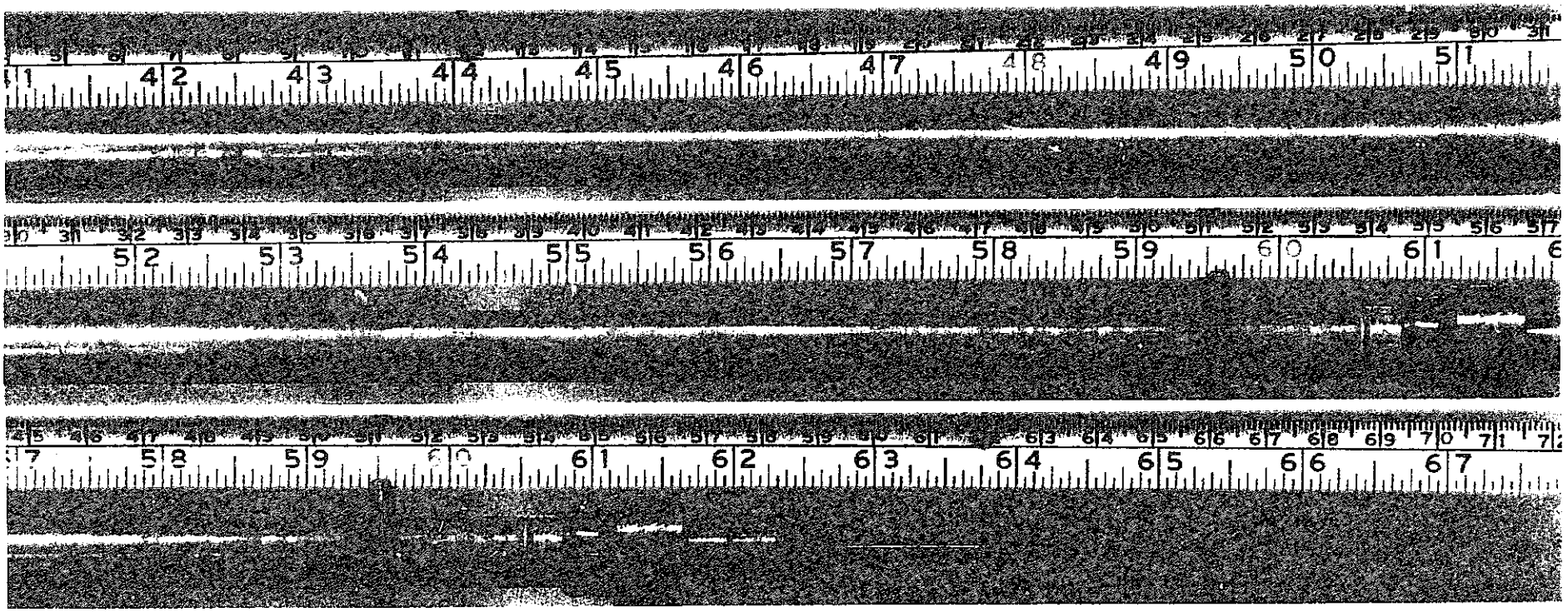


図5.2.8　IFA-565-4　270° 方向（続き）

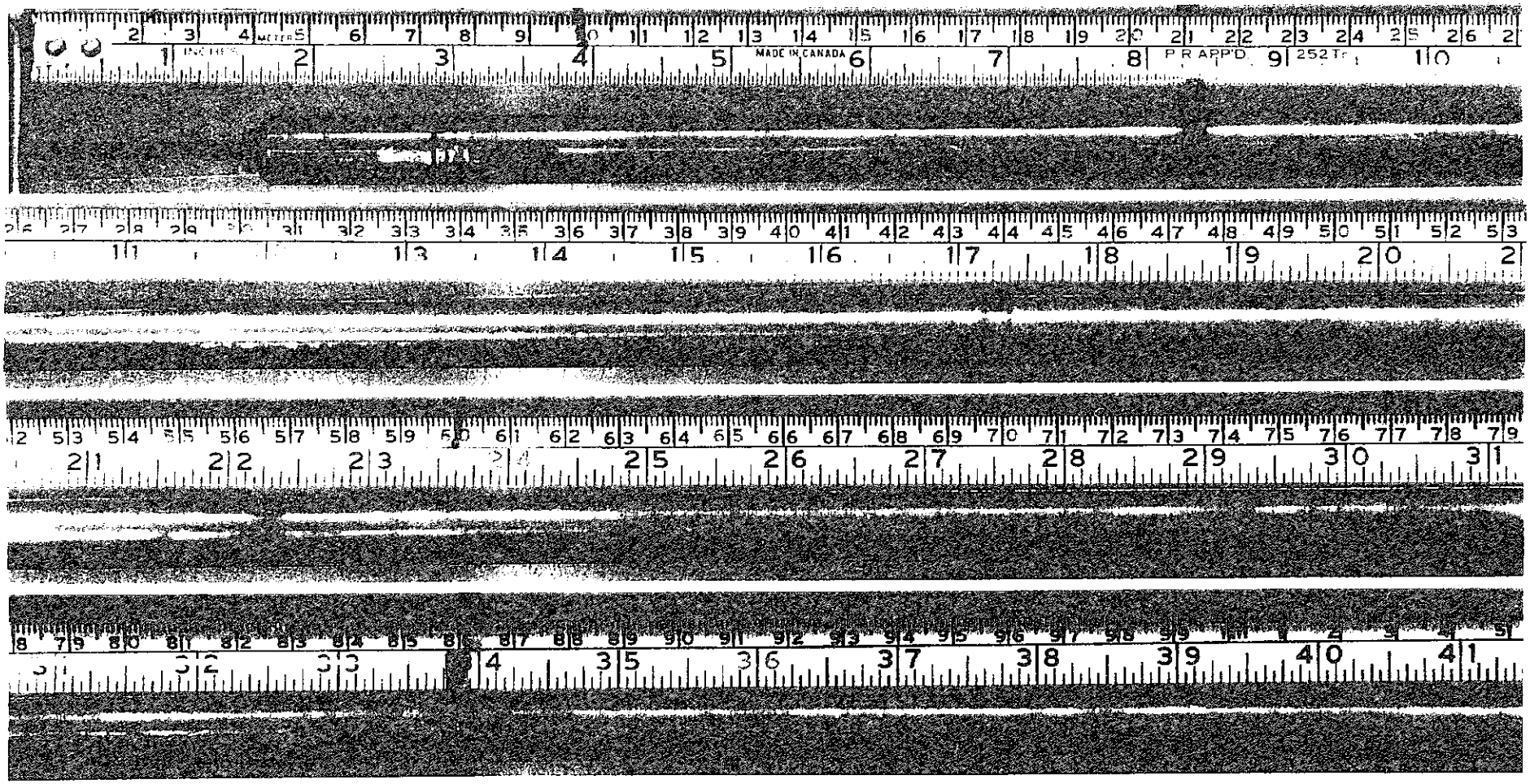


図5.2.9　IFA-565-6　0°方向

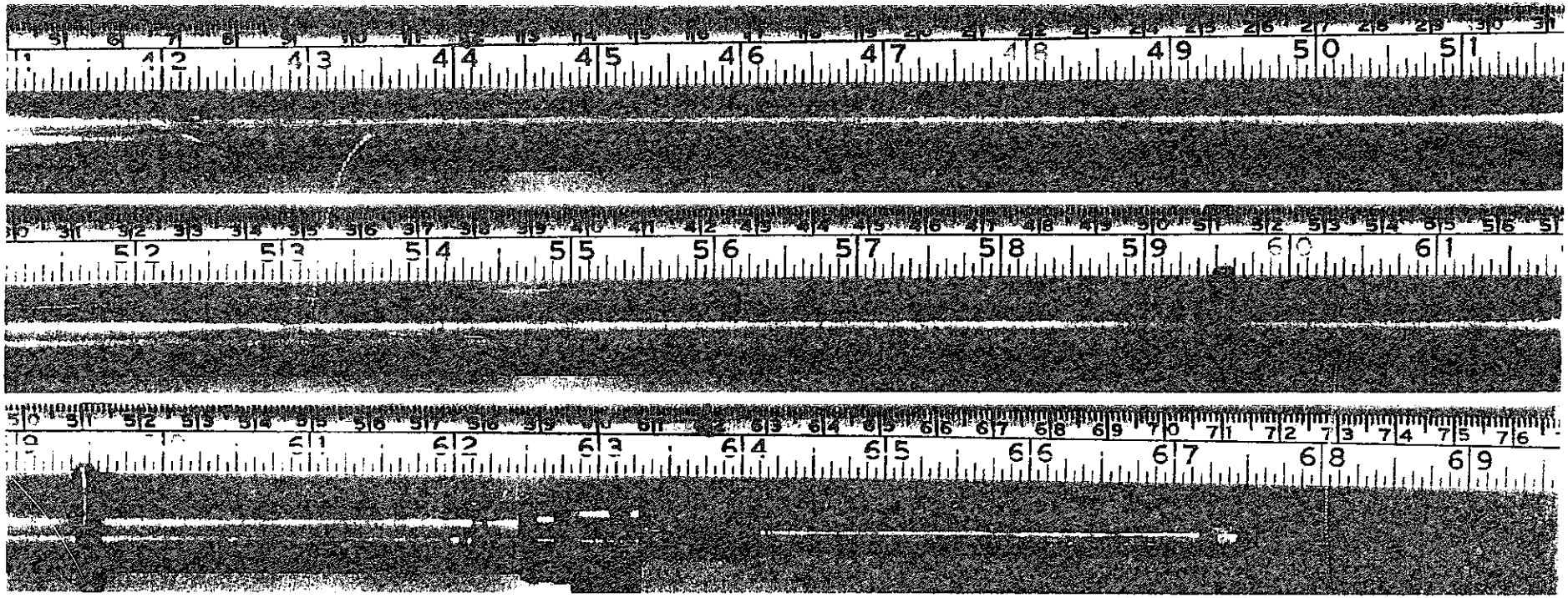


図5.2.9　IFA-565-6　0°方向（続き）

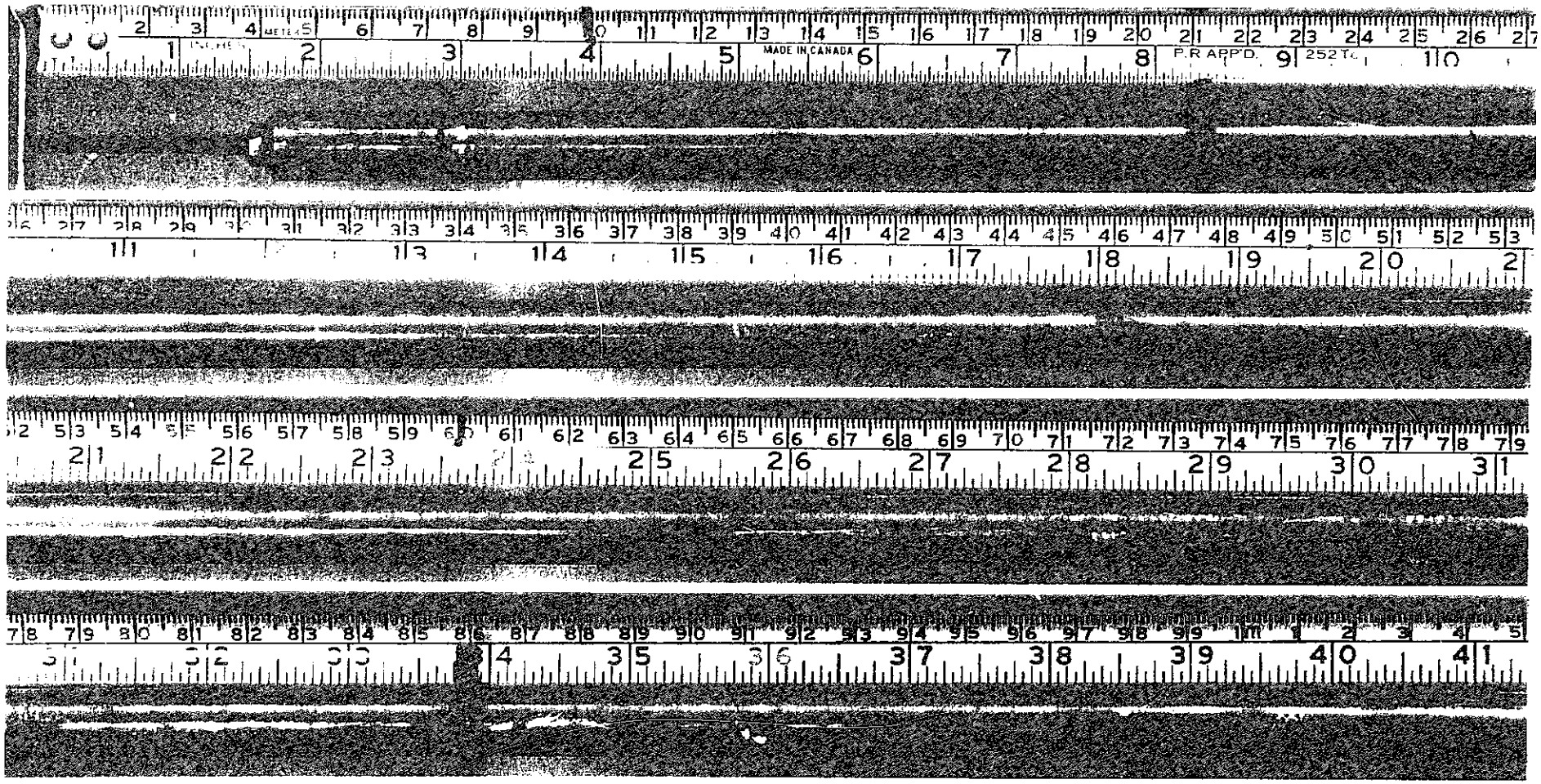


図5.2.10　IFA-565-6　90°方向

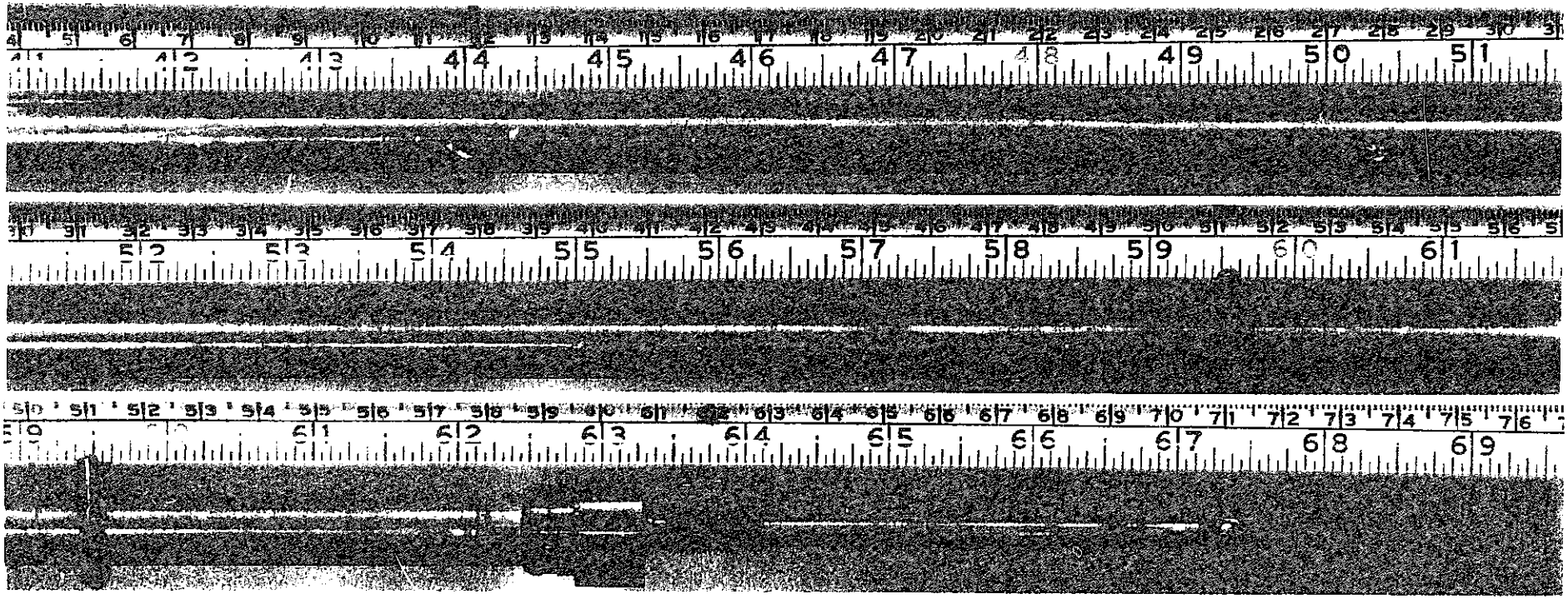


図5.2.10　IFA-565-6　90°方向（続き）

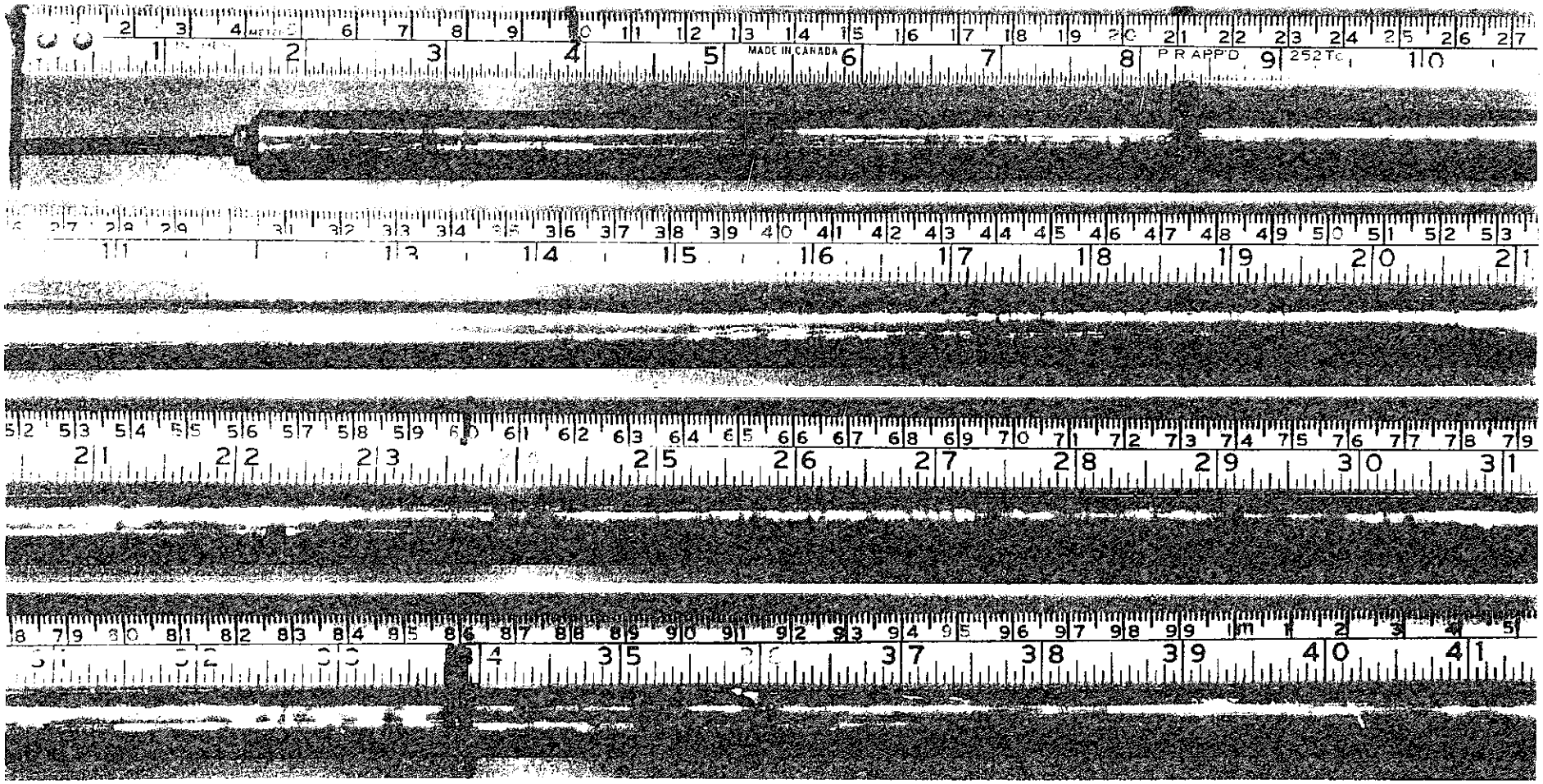


図5.2.11　IFA-565-6　180° 方向

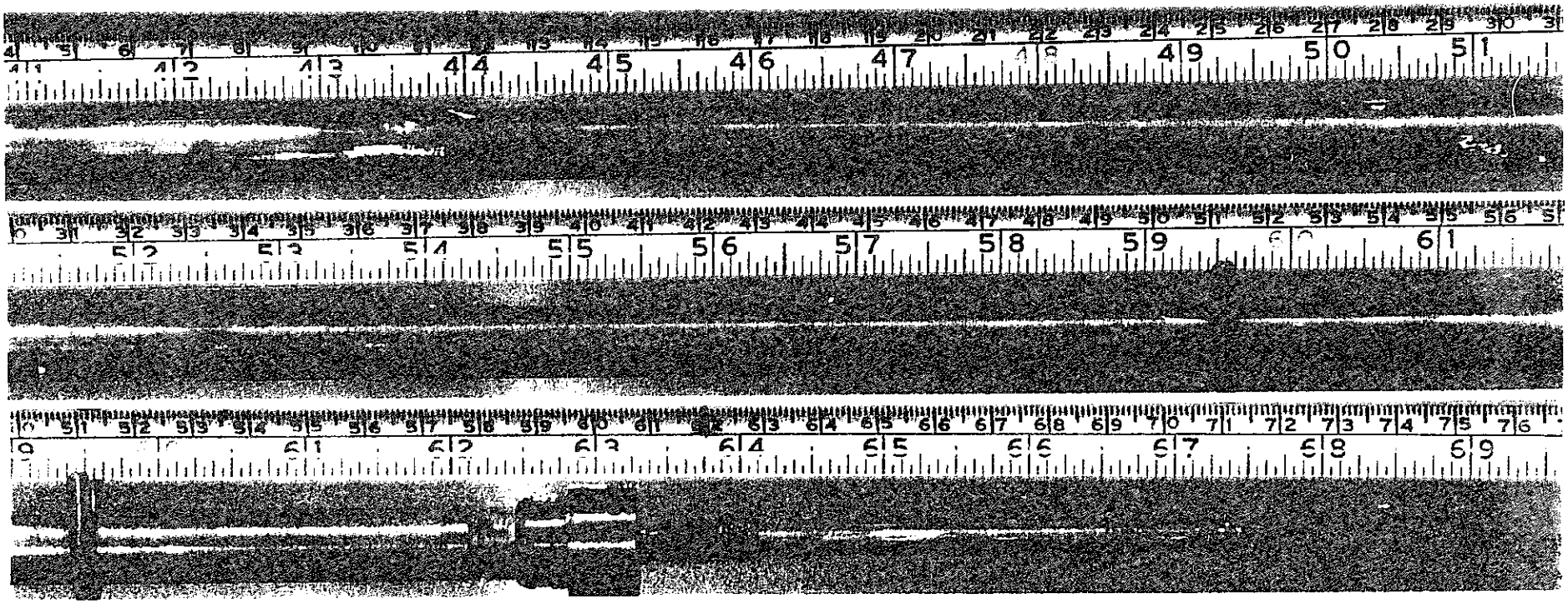


図5.2.11　IFA-565-6　180°方向（続き）

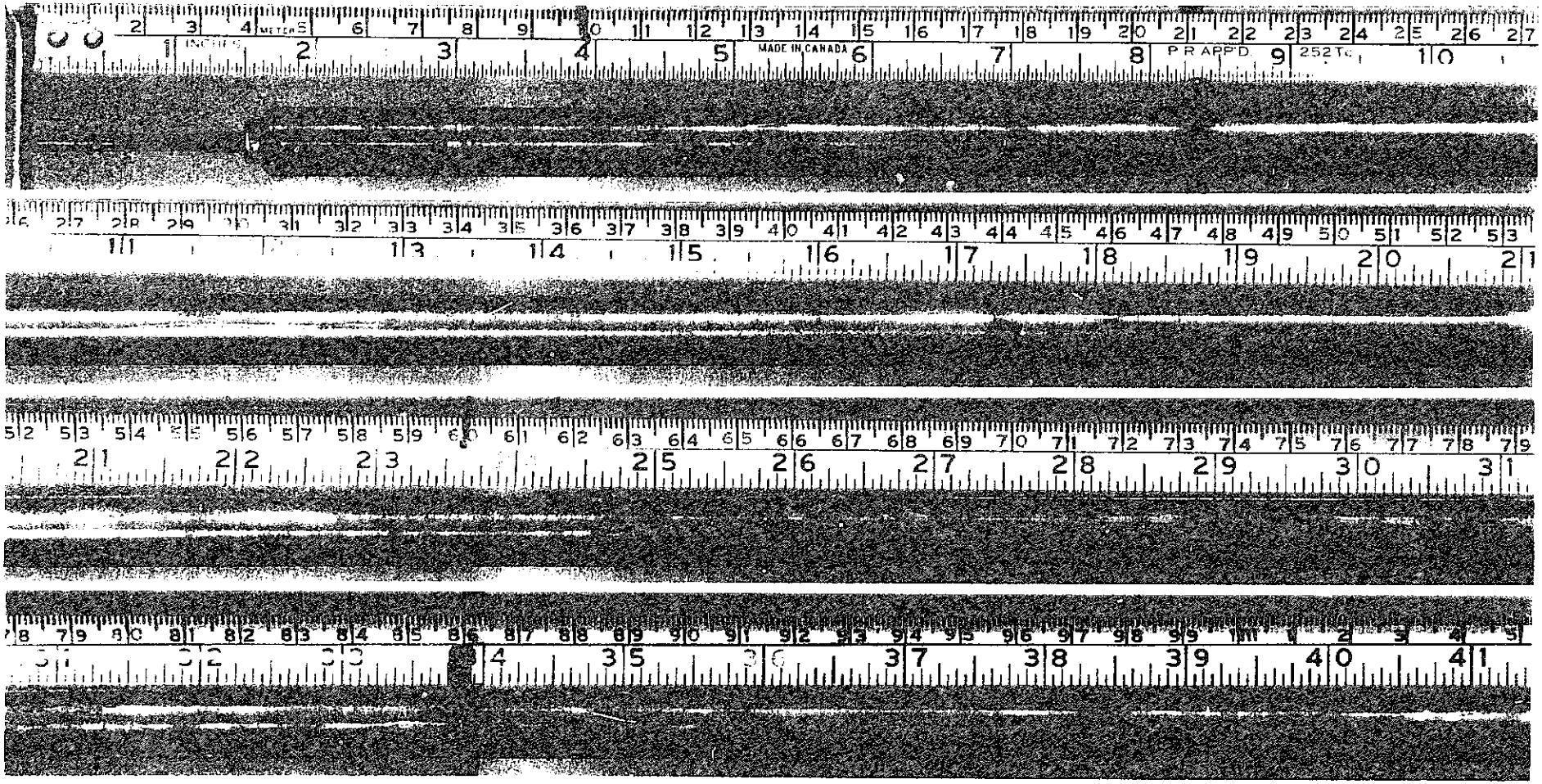


図5.2.12　IFA-565-6　270° 方向

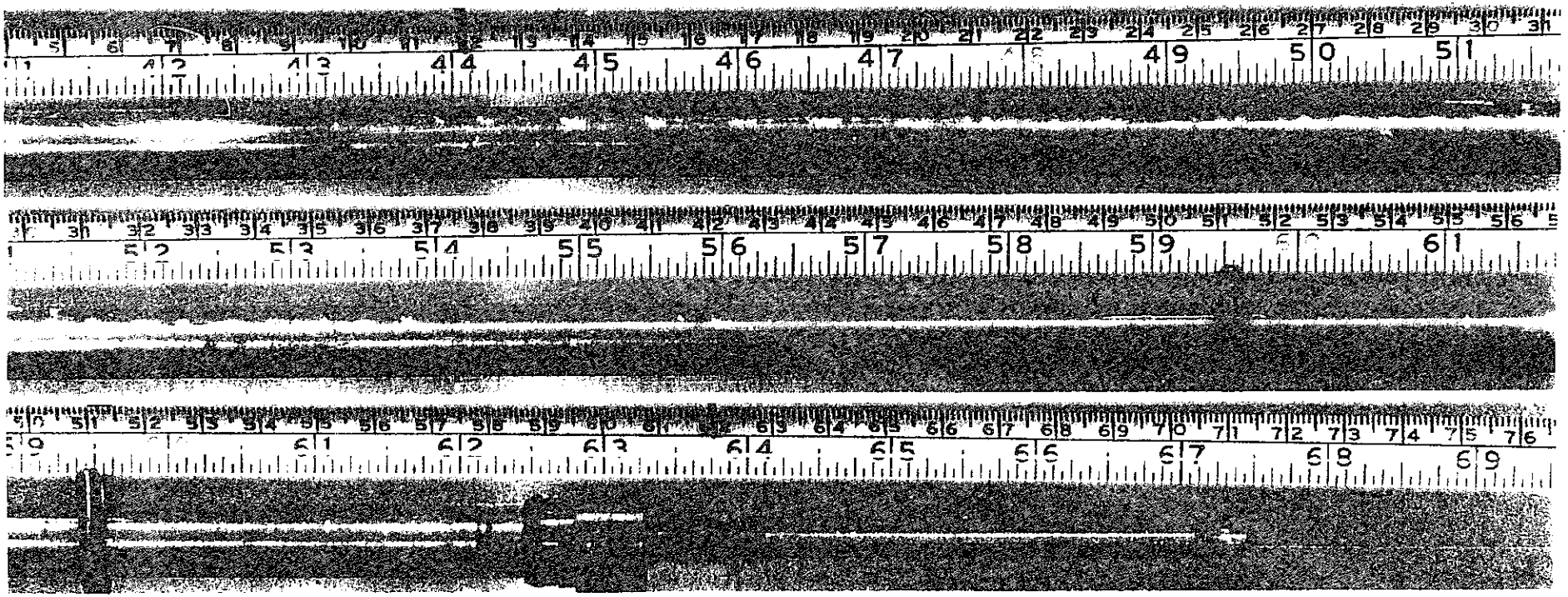


図5.2.12　IFA-565-6　270°方向（続き）

5.3 プロフィロメトリー測定結果

IFA-565-3，4，6を垂直のプロフィロメトリー測定装置上で0°及び90°方向に静的に測定した。

測定方法

燃料ロッドを垂直プロフィロメトリー測定装置に下端を下に挿入する。燃料ロッドの外径とプロファイルを2mm直径の研磨サファイアロッドからなる2つのナイフエッジに接続したLTDトランスデューサーによる方法で測定した。

トランスデューサーは、トロリーにより移動する。トロリーは、2本の真っ直ぐな円柱状の棒あるいはレールに沿って、燃料ロッドにほぼ平行に移動する。トランスデューサーの1方は、燃料ロッドの外径を測定し、もう一方は、プロファイルあるいは燃料ロッドから計測トロリーまでの距離を測定する。トロリーは、1ステップ0.005mmに対応してステップモーターにより上下する。燃料ロッド用の測定プログラムには、ROD MASTER ver 2.0というデータプログラムを使用し、ADCによるIBM互換コンピュータで処理した。ROD MASTERは、正確な測定位置を与える2台のステップモーターにパルスを発生し、次いで2台のトランスデューサーから測定値を読み込む。測定値は、発生数と軸方向位置とともにコンピュータハードディスクに記録される。燃料ロッドの測定が終了すると、必要なデータセットがディスクにファイルされている。

燃料ロッドに沿った軸方向位置は、燃料ロッドの下端Vノッチから、上方をプラスにカウントする。角度は、燃料ロッドを上から見て反時計方向に1～360°とカウントする。角度を示すマークは、燃料ロッドの下部端栓に刻まれたIFAと燃料ロッド番号に一致する。外径とプロファイを燃料ロッドの全長、すなわちVノッチ間を1mm/scanの頻度で測定する。つまり、測定トロリーが1mm上方に移動する度に外径とプロファイルを測定する。

外径センサーを2つの正確に仕上げられた部分、この場合12.404と12.565mmとなっている校正ロッドにより校正する。これら2つの校正部分の外径を外径測定の前と直後に測定する。この測定法の相対変化は、0～3μmであり、この変化の原因は接触点のすり減りあるいはナイフ上に燃料ロッド材料が付着するためである。

測定結果

実際の燃料ロッド長さを10等分する。どの領域に対応するか表中に示された値は、外径プロファイルのものと一致している。最大、最小、平均外径を、各領域毎に示している。さらに、表には燃料ロッド長も示した。Vノッチの位置は、リグ上に固定されたスケールで相対値 i mmが得られ、下端Vノッチは、表に示すように2度測定する。V-1はプロファイルと外径測定前に、V-2は測定後に決定する。燃料ロッド長さ（あるいは上下Vノッチ間距離）は、（上端V － 下端V-1）である。照射後の測定結果を表5.3.1～6、図5.3.1～12に示す。

(1)IFA-565-3について

測定結果を図5.3.1～4、表5.3.1～2に示す。被覆管とペレットペレット界面間での相互作用のためリッジが外径スキャンで観察される。加えて、大きなイレギュラーがスペーサーと被覆管の接触部にある（下記*参照）。プロファイルスキャンから推定した燃料ロッドの最大曲がりは、約1mmである。

(2) IFA-565-4について

測定結果を図5.3.5～8、表5.3.3～4に示す。被覆管とペレットペレット界面間での相互作用のためリッジが外径スキャンで観察される。加えて、大きなイレギュラーがスペーサーと被覆管の接触部にある（下記*参照）。プロファイルスキャンから推定した燃料ロッドの最大曲がりは、約1mmである。

(3)IFA-565-6について

測定結果を図5.3.9～12、表5.3.5～6に示す。被覆管とペレットペレット界面間での相互作用のためリッジが外径スキャンで観察される。加えて、大きなイレギュラーがスペーサーと被覆管の接触部にある（下記*参照）。プロファイルスキャンから推定した燃料ロッドの最大曲がりは、約0.2mmである。

燃料ロッドの楕円度（0°と90°の外径差）を表5.3.7にまとめた。途中取り出し時（燃焼度約40GWd/t）の燃料ロッド伸びデータ（IFA-514）を併記した。楕円度の最大値は、途中取り出し時で59μm、最終取り出し時で30μmである。

燃料ロッドの外径の変化を表5.3.8に、製造時との比較を、途中取り出し時も加えて示した。燃料ロッド平均値と最小値は、おおむね途中取り出し時よりも外径が大きくなる傾向であるが、燃料ロッド最大値は、逆に外径が小さくなる傾向がある。燃料ロッド平均での外径増加は、最大でも51μm、0.41%である。

燃料ロッド楕円度の変化を表5.3.9に、製造時との比較を、途中取り出し時も加えて示した。燃料ロッド3及び6では、途中取り出し時よりも楕円度が低下し、燃料ロッド4では逆に高い値となっている。

燃料ロッドの伸びについて表5.3.10に示す。燃料ロッドの伸び率は、0.123～0.151%の範囲にある。途中取り出した際の燃料ロッド伸びデータ（IFA-514）を併記した。

注：

(*) 2つの大きなバルジ（膨らみ）が、スペーサーと燃料ロッドの接触部で全ての外径とプロファイルスキャンに観察された。シェラー研では、この領域に（ジルコニウム被覆管厚さが減少し）堆積した酸化物層によるものだと考えている。渦電流探傷（第5.5節）の結果もあらゆるスペーサーと被覆管接触部でのジルコニウム被覆管の変形を示している。

このバルジは、IFA-514として燃焼度約40GWd/tで途中取り出し、非破壊試験を実施した際にも同じ位置に確認されている。バルジ部の直管部に対する高さの平均は、グラフから読みとると、途中取り出し時で約60μmである。一方、燃焼が進んだ今回の値は、約50μmである。スペーサー部の酸化膜厚さは、燃焼度の増加にかかわらずほとんど変化していない。

表5.3.1

IFA-565-3 外径及び長さ測定 0° 方向、照射後測定

POSITION [mm]	MINIMUM DIAMETER [mm]	MAXIMUM DIAMETER [mm]	AVERAGE DIAMETER [mm]
0.0-150.0	12.487	12.605	12.569
150.0-300.0	12.566	12.579	12.571
300.0-450.0	12.571	12.591	12.577
450.0-600.0	12.570	12.640	12.586
600.0-750.0	12.572	12.586	12.579
750.0-900.0	12.570	12.582	12.574
900.0-1050.0	12.560	12.638	12.582
1050.0-1200.0	12.553	12.569	12.560
1200.0-1350.0	12.550	12.566	12.556
1350.0-1500.0	12.536	12.558	12.544

燃料ロッド長さ決定のためのVノッチ位置

	0 DEG
LOWER V-1	102.83
UPPER V	1610.40
LOWER V-2	102.83
ROD LENGTH [mm]	1507.57

表5.3.2

IFA-565-3 外径及び長さ測定 90° 方向、照射後測定

POSITION [mm]	MINIMUM DIAMETER [mm]	MAXIMUM DIAMETER [mm]	AVERAGE DIAMETER [mm]
0.0-150.0	12.479	12.642	12.587
150.0-300.0	12.588	12.606	12.593
300.0-450.0	12.589	12.608	12.595
450.0-600.0	12.590	12.643	12.602
600.0-750.0	12.586	12.597	12.593
750.0-900.0	12.579	12.596	12.588
900.0-1050.0	12.576	12.637	12.588
1050.0-1200.0	12.567	12.580	12.575
1200.0-1350.0	12.559	12.572	12.566
1350.0-1500.0	12.533	12.563	12.553

燃料ロッド長さ決定のためのVノッチ位置

	90 DEG
LOWER V-1	102.83
UPPER V	1610.36
LOWER V-2	102.83
ROD LENGTH [mm]	1507.53

表5.3.3

IFA-565-4 外径及び長さ測定 0° 方向、照射後測定

POSITION [mm]	MINIMUM DIAMETER [mm]	MAXIMUM DIAMETER [mm]	AVERAGE DIAMETER [mm]
0.0-150.0	12.409	12.616	12.585
150.0-300.0	12.592	12.606	12.600
300.0-450.0	12.593	12.619	12.598
450.0-600.0	12.585	12.616	12.595
600.0-750.0	12.574	12.599	12.589
750.0-900.0	12.576	12.590	12.584
900.0-1050.0	12.568	12.615	12.581
1050.0-1200.0	12.566	12.580	12.573
1200.0-1350.0	12.563	12.575	12.569
1350.0-1500.0	12.550	12.574	12.561

燃料ロッド長さ決定のためのVノッチ位置

	0 DEG
LOWER V-1	108.30
UPPER V	1616.00
LOWER V-2	108.30
ROD LENGTH (mm)	1507.70

表5.3.4

IFA-565-4 外径及び長さ測定 90° 方向、照射後測定

POSITION [mm]	MINIMUM DIAMETER [mm]	MAXIMUM DIAMETER [mm]	AVERAGE DIAMETER [mm]
0.0-150.0	12.541	12.568	12.560
150.0-300.0	12.555	12.563	12.559
300.0-450.0	12.554	12.564	12.556
450.0-600.0	12.552	12.591	12.561
600.0-750.0	12.549	12.556	12.553
750.0-900.0	12.546	12.555	12.550
900.0-1050.0	12.547	12.586	12.556
1050.0-1200.0	12.548	12.555	12.552
1200.0-1350.0	12.549	12.555	12.552
1350.0-1500.0	12.548	12.555	12.551

燃料ロッド長さ決定のためのVノッチ位置

	90 DEG
LOWER V-1	108.30
UPPER V	1616.00
LOWER V-2	108.30
ROD LENGTH (mm)	1507.70

表5.3.5

IFA-565-6 外径及び長さ測定 0° 方向、照射後測定

POSITION [mm]	MINIMUM DIAMETER [mm]	MAXIMUM DIAMETER [mm]	AVERAGE DIAMETER [mm]
0.0-150.0	12.404	12.563	12.553
150.0-300.0	12.549	12.563	12.555
300.0-450.0	12.544	12.565	12.552
450.0-600.0	12.544	12.607	12.560
600.0-750.0	12.545	12.560	12.552
750.0-900.0	12.541	12.559	12.550
900.0-1050.0	12.538	12.603	12.555
1050.0-1200.0	12.537	12.547	12.544
1200.0-1350.0	12.534	12.548	12.540
1350.0-1500.0	12.534	12.542	12.537

燃料ロッド長さ決定のためのVノッチ位置

	0 DEG
LOWER V-1	102.97
UPPER V	1610.89
LOWER V-2	102.97
ROD LENGTH (mm)	1507.98

表5.3.6

IFA-565-6 外径及び長さ測定 90° 方向、照射後測定

POSITION [mm]	MINIMUM DIAMETER [mm]	MAXIMUM DIAMETER [mm]	AVERAGE DIAMETER [mm]
0.0-150.0	12.409	12.678	12.574
150.0-300.0	12.567	12.582	12.574
300.0-450.0	12.567	12.579	12.573
450.0-600.0	12.568	12.613	12.579
600.0-750.0	12.560	12.578	12.572
750.0-900.0	12.562	12.577	12.569
900.0-1050.0	12.555	12.607	12.572
1050.0-1200.0	12.556	12.567	12.562
1200.0-1350.0	12.554	12.566	12.561
1350.0-1500.0	12.561	12.561	12.556

燃料ロッド長さ決定のためのVノッチ位置

	90 DEG
LOWER V-1	102.97
UPPER V	1610.94
LOWER V-2	102.98
ROD LENGTH (mm)	1507.97

表5.3.7　軸方向位置での燃料ロッド外径及び楕円度（単位mm）

位置 mm	測定方向	ﾛｯﾄﾞ3		ﾛｯﾄﾞ4		ﾛｯﾄﾞ6	
		IFA-514-3	IFA-565-3	IFA-514-4	IFA-565-4	IFA-514-6	IFA-565-6
0-150	0°	12.557	12.569	12.564	12.585	12.547	12.553
	90°	12.591	12.587	12.572	12.560	12.586	12.574
	楕円度	0.034	0.018	0.008	0.025	0.039	0.021
150-300	0°	12.553	12.571	12.561	12.600	12.545	12.555
	90°	12.599	12.593	12.576	12.559	12.594	12.574
	楕円度	0.046	0.022	0.015	0.041	0.049	0.019
300-450	0°	12.549	12.577	12.556	12.598	12.542	12.552
	90°	12.600	12.595	12.574	12.556	12.600	12.573
	楕円度	0.051	0.018	0.018	0.042	0.058	0.021
450-600	0°	12.564	12.586	12.564	12.595	12.555	12.560
	90°	12.601	12.602	12.581	12.561	12.603	12.579
	楕円度	0.037	0.016	0.017	0.034	0.048	0.019
600-750	0°	12.544	12.579	12.545	12.589	12.539	12.552
	90°	12.599	12.593	12.575	12.553	12.598	12.572
	楕円度	0.055	0.014	0.030	0.036	0.059	0.020
750-900	0°	12.545	12.574	12.544	12.584	12.536	12.550
	90°	12.595	12.588	12.571	12.550	12.593	12.569
	楕円度	0.050	0.014	0.027	0.034	0.057	0.019
900-1050	0°	12.547	12.582	12.547	12.581	12.541	12.555
	90°	12.590	12.588	12.565	12.556	12.588	12.572
	楕円度	0.043	0.006	0.018	0.025	0.047	0.017
1050-1200	0°	12.554	12.560	12.553	12.573	12.550	12.544
	90°	12.584	12.575	12.569	12.552	12.584	12.562
	楕円度	0.030	0.015	0.016	0.021	0.034	0.018
1200-1350	0°	12.542	12.556	12.546	12.569	12.536	12.540
	90°	12.576	12.566	12.564	12.552	12.574	12.561
	楕円度	0.034	0.010	0.018	0.017	0.038	0.021
1350-1500	0°	12.543	12.544	12.549	12.561	12.536	12.537
	90°	12.571	12.553	12.561	12.551	12.566	12.556
	楕円度	0.028	0.009	0.022	0.010	0.030	0.019
楕円度	ﾛｯﾄﾞ平均	0.0408	0.0142	0.0189	0.0285	0.0459	0.0194
	σ	0.0090	0.0045	0.0059	0.0101	0.0098	0.0013
	ﾛｯﾄﾞ最大	0.055	0.022	0.030	0.042	0.059	0.021
	ﾛｯﾄﾞ最小	0.028	0.006	0.008	0.010	0.030	0.017

表5.3.8　燃料ロッド外径の変化（製造時、途中取り出し時(IFA-514)との比較）

外径及びその変化率			ロッド3		ロッド4		ロッド6	
			IFA-514-3	IFA-565-3	IFA-514-4	IFA-565-4	IFA-514-6	IFA-565-6
ロッド平均 mm	製造時 (a)		12.526		12.534		12.530	
	照射後	0° 方向	12.550	12.570	12.553	12.584	12.530	12.550
		90° 方向	12.591	12.584	12.571	12.555	12.589	12.569
		平均 (b)	12.571	12.577	12.562	12.570	12.566	12.560
	(b)－(a) / mm （変化率 / %）		0.045 (0.36)	0.051 (0.41)	0.028 (0.22)	0.036 (0.29)	0.036 (0.29)	0.030 (0.24)
ロッド最大 mm	製造時 照射後 (c)		12.533 12.673	12.533 12.602	12.538 12.620	12.538 12.600	12.537 12.636	12.537 12.579
	(c)－(a) / mm （変化率 / %）		0.147 (1.17)	0.076 (0.61)	0.086 (0.69)	0.066 (0.53)	0.102 (0.85)	0.049 (0.39)
ロッド最小 mm	製造時 照射後 (d)		12.519 12.536	12.519 12.544	12.530 12.533	12.530 12.550	12.526 12.527	12.526 12.540
	(d)－(a) / mm （変化率 / %）		0.010 (0.08)	0.018 (0.14)	-0.001 (-0.01)	0.016 (0.13)	-0.003 (-0.02)	0.01 (0.08)

表5.3.9　燃料ロッド楕円度の変化（製造時、途中取り出し時(IFA-514)との比較）

楕円度 *		ロッド3		ロッド4		ロッド6	
		IFA-514-3	IFA-565-3	IFA-514-4	IFA-565-4	IFA-514-6	IFA-565-6
ロッド平均 μm	製造時 照射後	3.29 40.8	3.29 14.2	2.14 18.9	2.14 28.5	2.55 45.9	2.55 19.4
	変化量	37.5	10.9	16.8	26.4	43.3	16.9
σ μm	製造時 照射後	2.60 9.0	2.60 4.5	1.70 5.9	1.70 10.1	1.69 9.8	1.69 1.3
	変化量	6.4	1.9	4.2	8.4	8.1	-0.39
ロッド最大 μm	製造時 照射後	10 55	10 22	6 30	6 42	7 59	7 21
	変化量	45	12	24	36	52	14
ロッド最小 μm	製造時 照射後	0 28	0 6	0 8	0 10	0 30	0 17
	変化量	28	6	8	10	30	17

*：製造時、IFA-514照射後の楕円度は文献 [1] を引用した。

表5.3.10　燃料ロッドの伸び

	照射前長さ mm	IFA-514			IFA-565		
		照射後長さ mm	伸び率 %	燃焼度 GWd/tMOX	照射後長さ mm	伸び率 %	燃焼度 GWd/tMOX
ロッド3	1505.7	1507.4	0.112	38.0	1507.55	0.123	49.0
ロッド4	1505.7	1507.4	0.112	38.9	1507.70	0.133	50.0
ロッド6	1505.7	1507.6	0.126	39.5	1507.98	0.151	50.0
平均	1505.7	1507.5	0.117	－	1507.74	0.136	－
最大－最小	－	－	0.014	－	－	0.028	－

＊0°及び90°方向の平均値とした

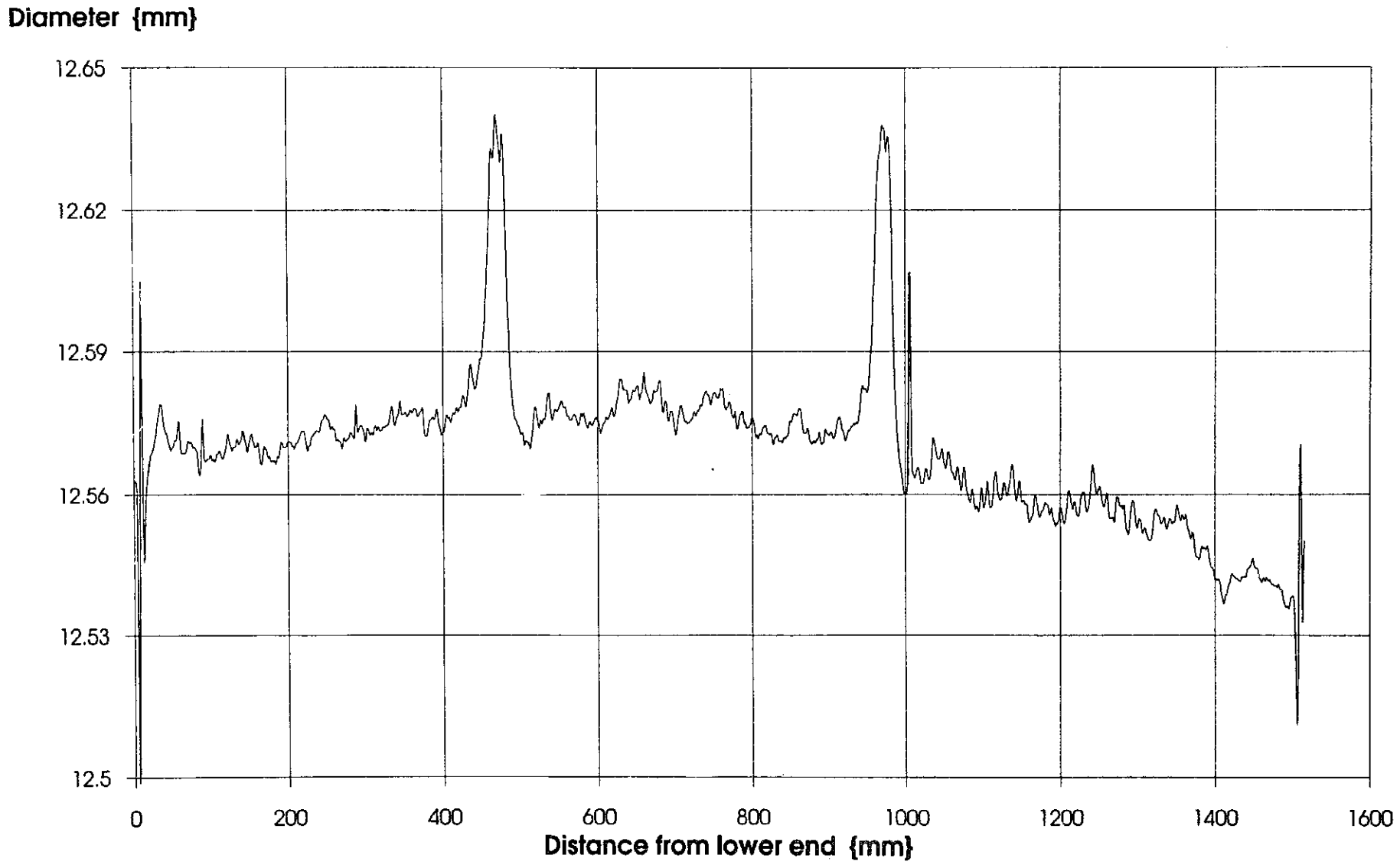


図5.3.1　IFA-565-3　0°方向の外径スキャン

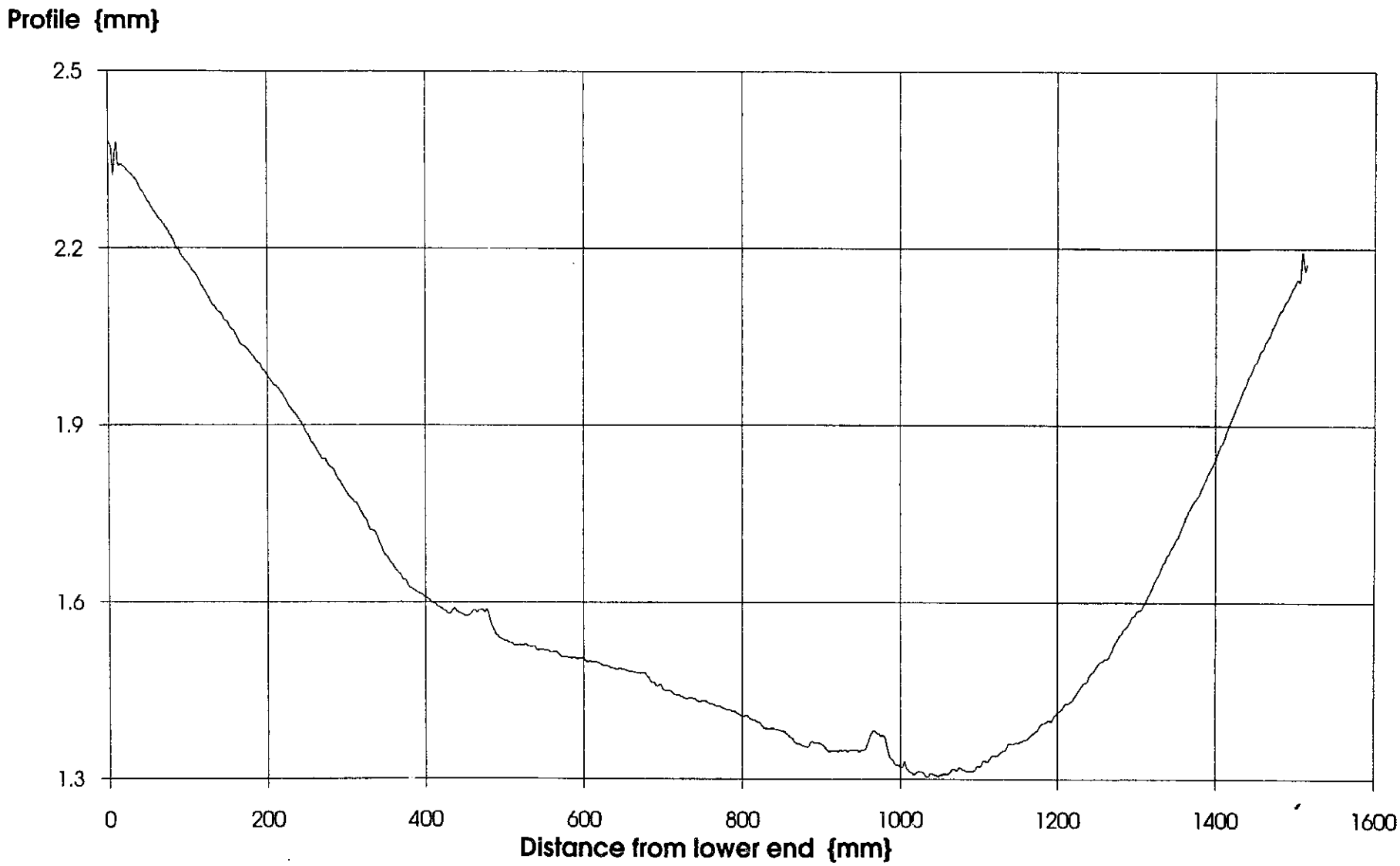


図5.3.2　IFA-565-3　0°方向のプロファイルスキャン

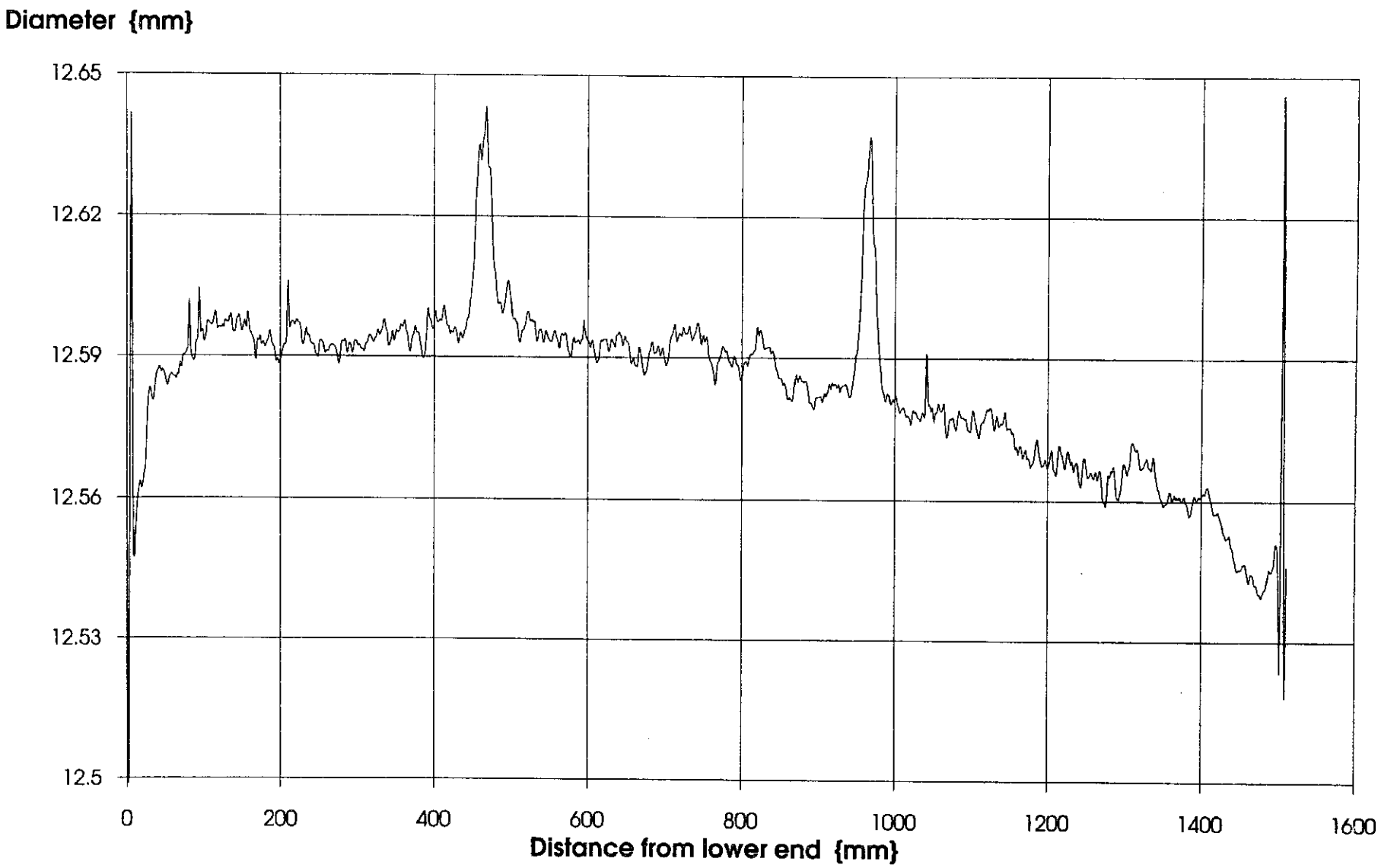


図5.3.3　IFA-565-3　90°方向の外径スキャン

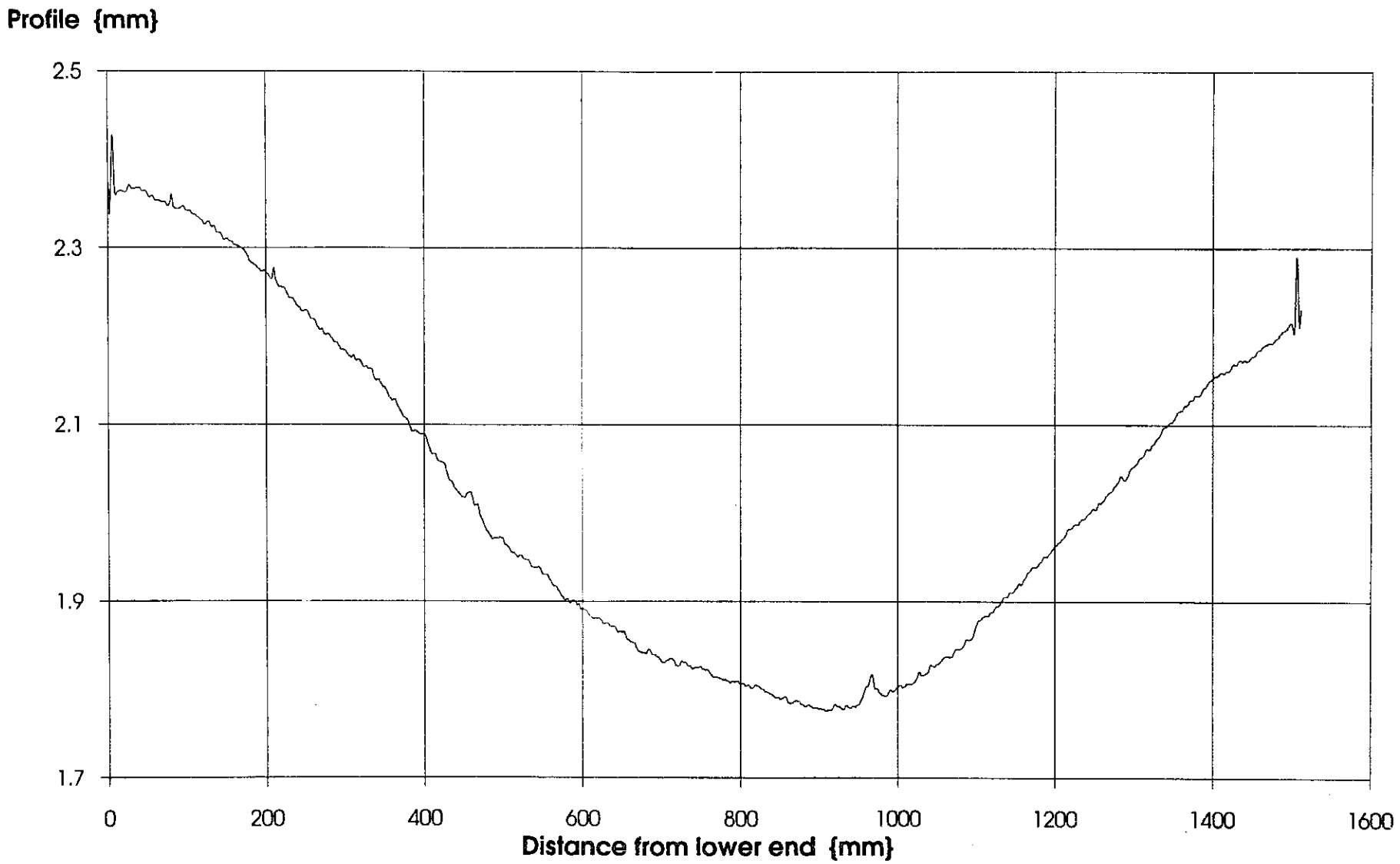


図5.3.4　IFA-565-3　90°方向のプロファイルスキャン

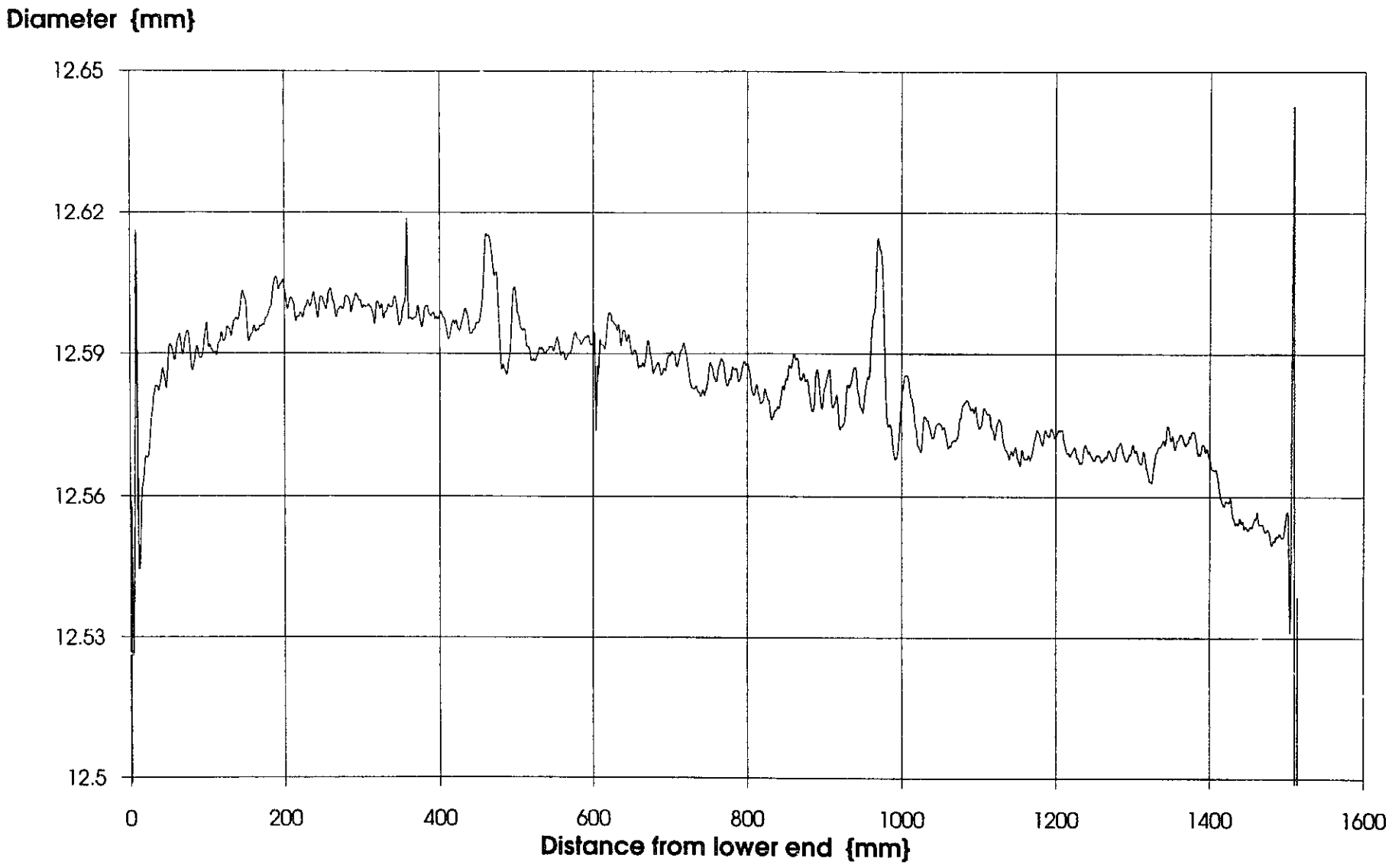


図5.3.5　IFA-565-4　0°方向の外径スキャン

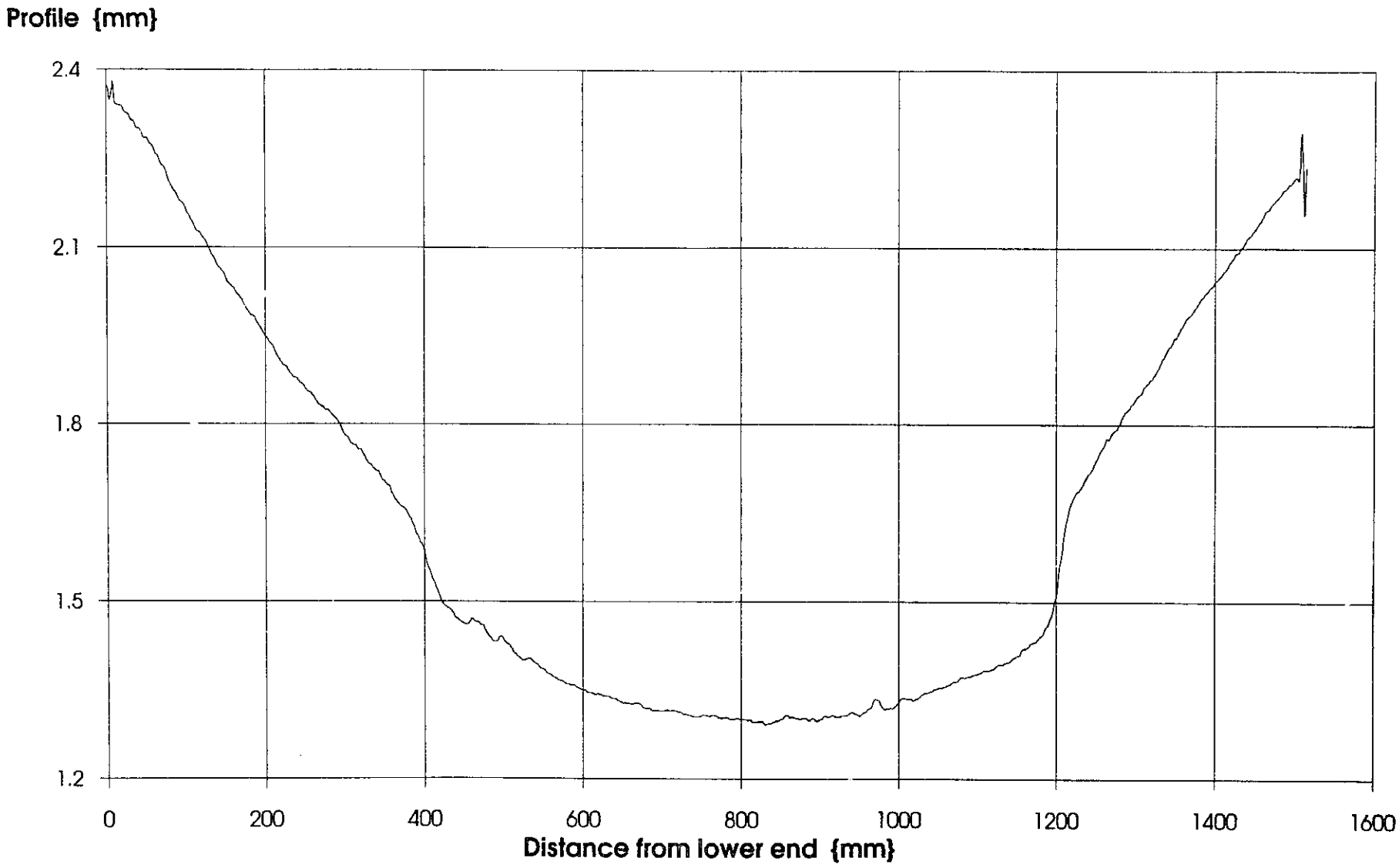


図5.3.6　IFA-565-4　0°方向のプロファイルスキャン

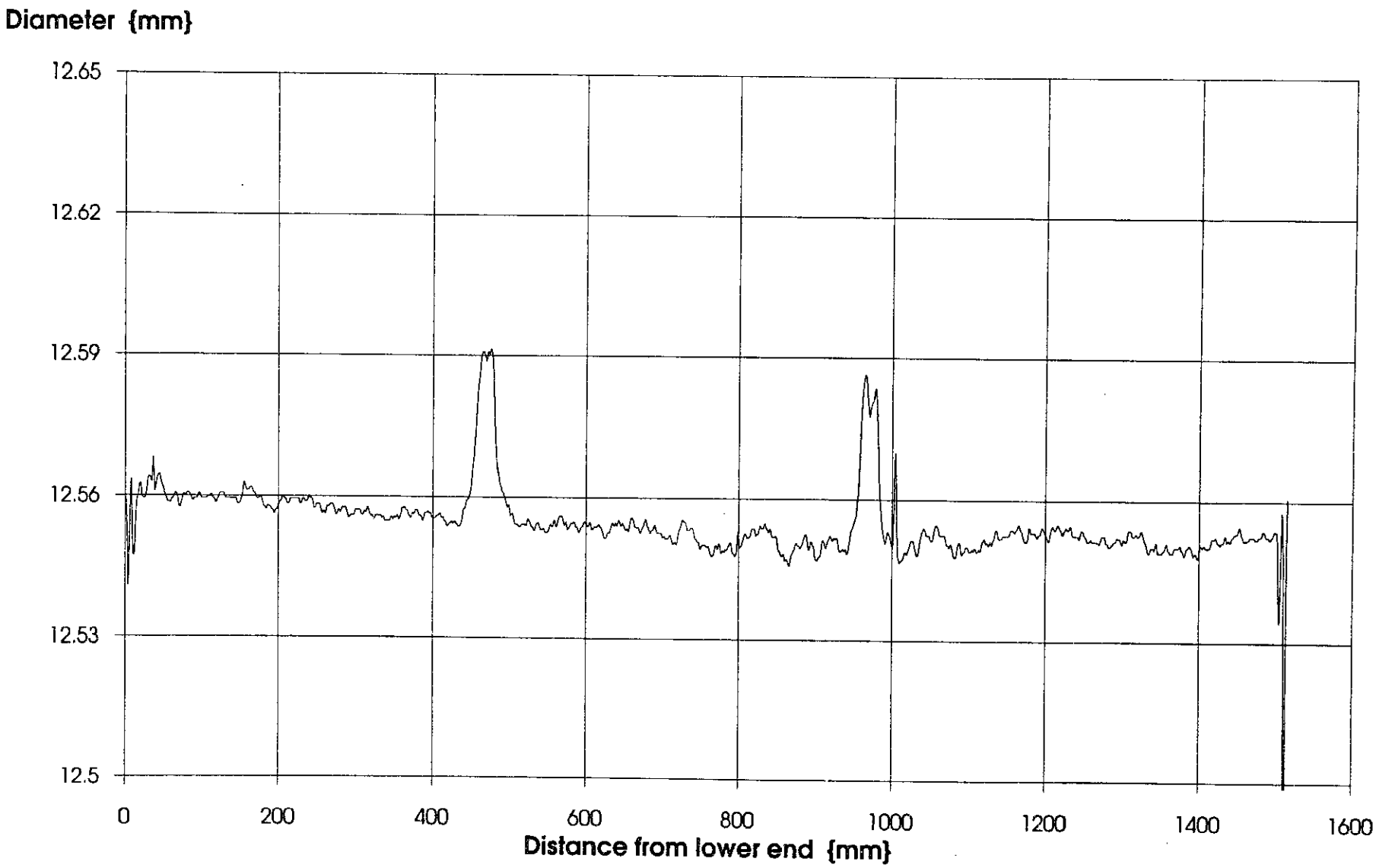


図5.3.7　IFA-565-4　90°方向の外径スキャン

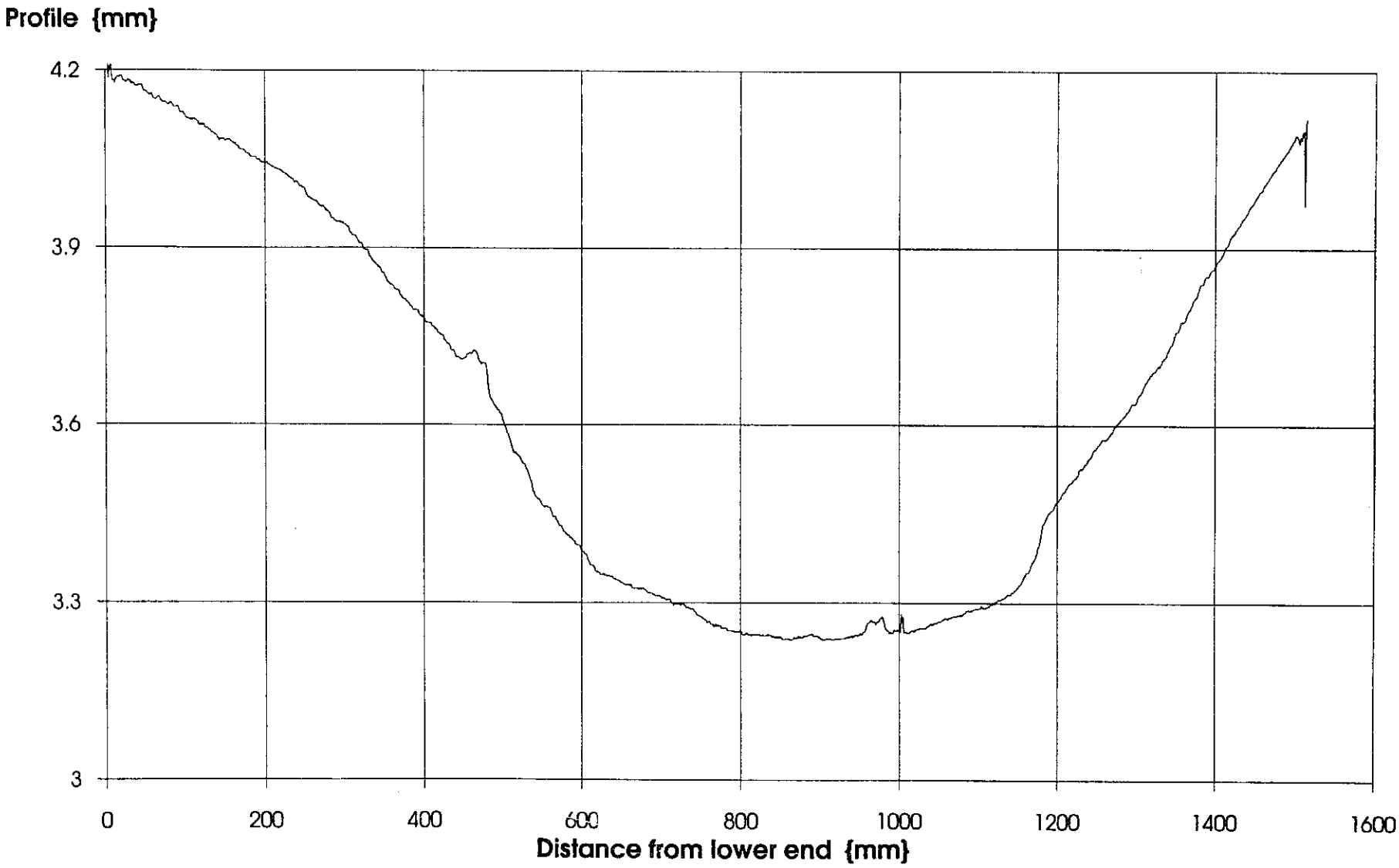


図5.3.8　IFA-565-4　90°方向のプロファイルスキャン

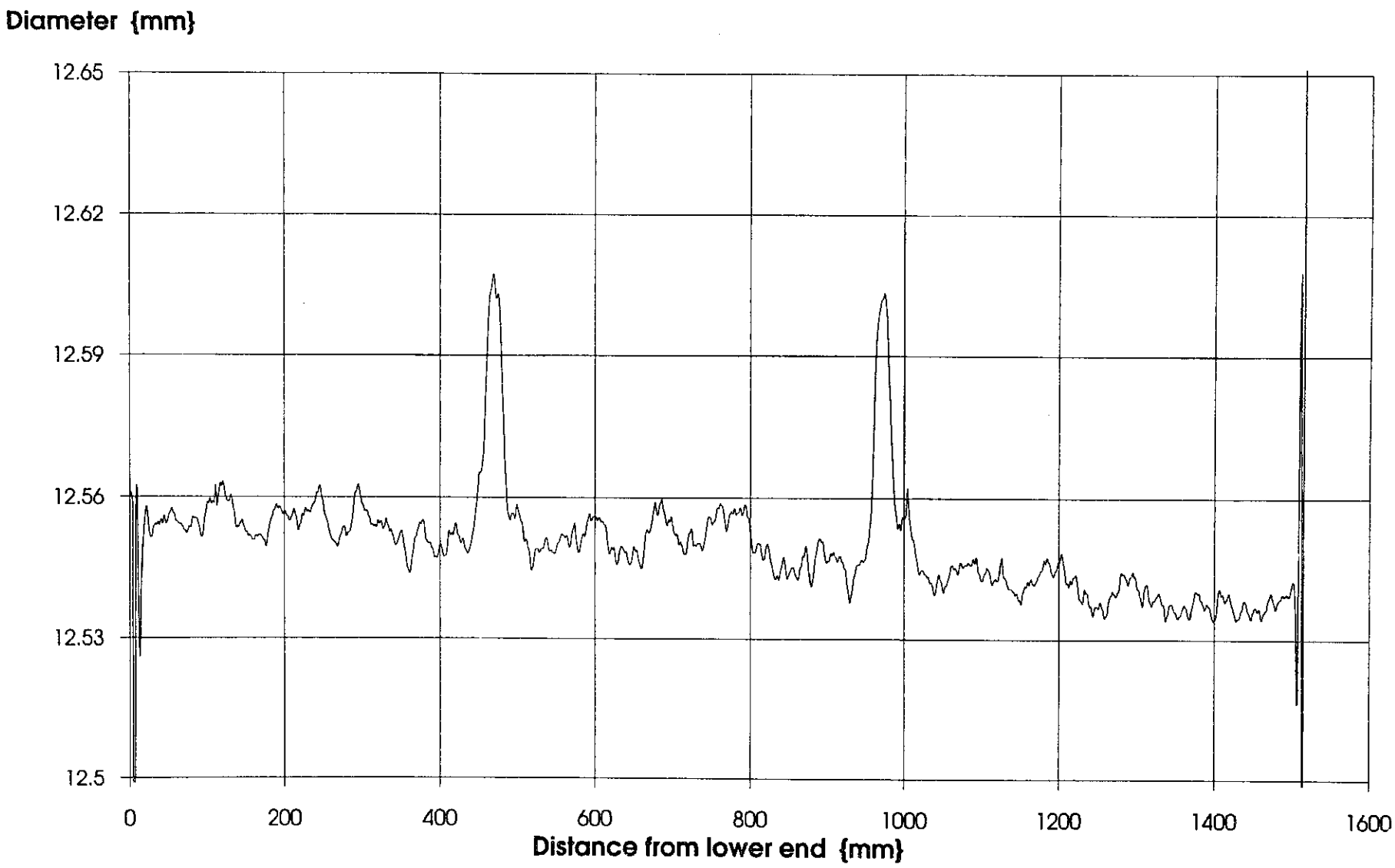


図5.3.9　IFA-565-6　0°方向の外径スキャン

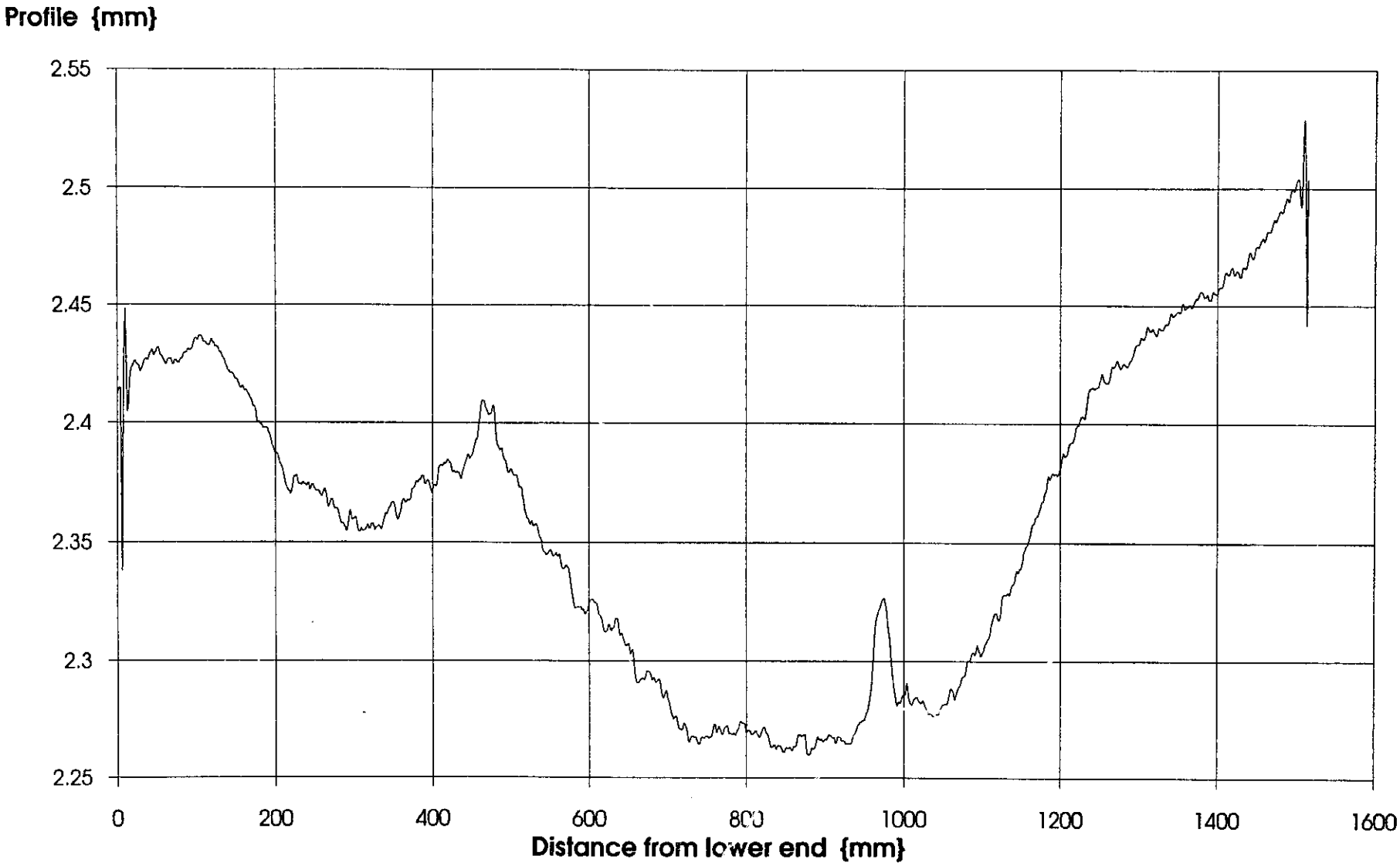


図5.3.10　IFA-565-6　0°方向のプロファイルスキャン

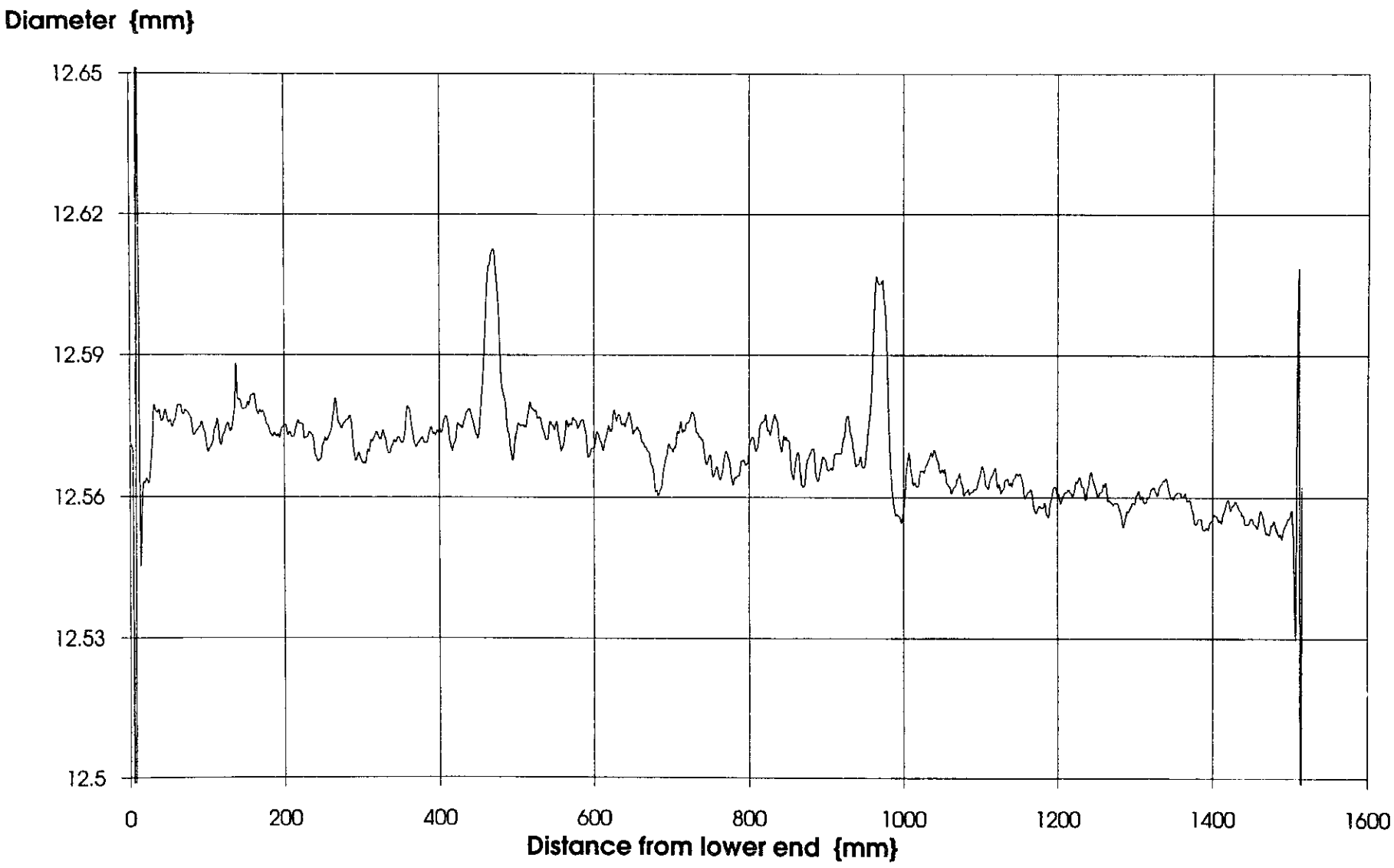


図5.3.11　IFA-565-6　90°方向の外径スキャン

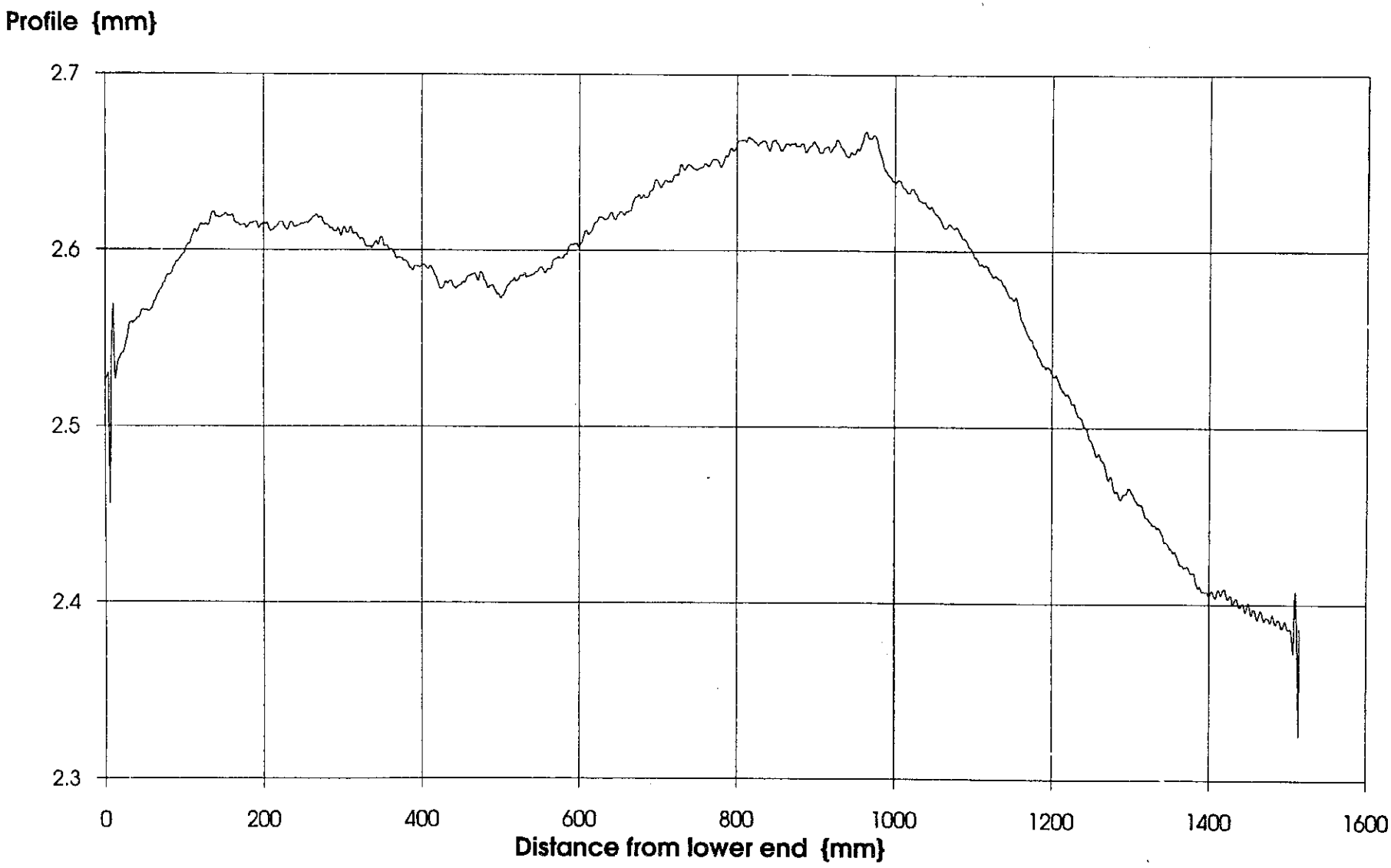


図5.3.12　IFA-565-6　90°方向のプロファイルスキャン

5.4 γスキャニング試験結果

IFA-565の燃料は、IFA-514として照射された6本の燃料のうち3本について、高燃焼度化のために再装荷された燃料である。以下にIFA-514照射後とIFA-565照射後のγスキャンの測定結果について示す。表5.4.1にグロスγスキャンから求めたスタック長を示す。照射前のデータは実測値である。

表5.4.1 各燃料のスタック長 (mm)

	ﾛｯﾄﾞ1	ﾛｯﾄﾞ2	ﾛｯﾄﾞ3	ﾛｯﾄﾞ4	ﾛｯﾄﾞ5	ﾛｯﾄﾞ6
照射前	1380.53	1379.99	1379.18	1379.91	1380.12	1379.36
IFA-514	1384.4	1374.2	1382.6	1377.8	1382.8	1377.2
IFA-565			1386.3	1379.4		1374.9

5.4.1 IFA-514

IFA-514-3, 4, 6の3本の燃料ロッドについてグロス、Cs-134、 Cs-137、Zr-95の4種類のウィンドでγスキャンを行った。各ウィンドのエネルギ範囲は以下の通りである。

ウィンド1 グロス　　200-1024keV
ウィンド2 Cs-134　　596-613keV
ウィンド3 Cs-137　　652-671keV
ウィンド4 Zr-95　　716-733keV

図5.4.1.1～12にIFA-514のガンマスキャンの結果を示す。

(1)IFA-514-3

グロスγスキャンではペレット間ギャップに対応するγ線強度の低下が規則的に観察できる。燃料上端部で強度が上昇しているが燃料最上端での強度の上昇は、Cs-134、Cs-137のデータと一致しており、Zr-95のデータには変化がない。

(2)IFA-514-4

グロスγスキャンではペレット間ギャップに対応するγ線強度の低下が規則的に観察できる。燃料上端部で強度が上昇しているが燃料最上端での強度の上昇は、Cs-134、Cs-137のデータと一致しており、Zr-95のデータには変化がない。Zr-95のデータでは600-900mmの範囲で強度の減少が見られる。

(3)IFA-514-6

グロスγスキャンではペレット間ギャップに対応するγ線強度の低下が規則的に観察できる。スペーサ位置に対応する300-400mmと900-1000mmの位置で強度の減少が見られる。燃料上端部で強度が上昇しているが燃料最上端での強度の上昇は、Cs-134、Cs-137のデータと一致しており、Zr-95のデータには変化がない。780mm付近のペレットギャップで大きな強度減少が観察できる。

5.4.2 IFA-565

IFA-565-3, 4, 6の3本の燃料ロッドについてグロス、Ru-103、Ru-106、Cs-134、Cs-137、Zr-95の6種類のウィンドでγスキャンを行った。各ウィンドのエネルギ範囲は以下の通りである。

ウィンド1	グロス	200-900keV
ウィンド2	Ru-103	491-505keV
ウィンド3	Ru-106	506-520keV
ウィンド4	Cs-134	596-614keV
ウィンド5	Cs-137	654-670keV
ウィンド6	Zr-95	750-774keV

定点スペクトルの結果を図5.4.2.1～3に、ガンマスキャンの結果を図5.4.2.4～21に示す。各燃料の核種毎の図番対応を表5.4.2.1に、グロスγスキャンの結果からペレット界面間距離を求め表5.4.2.2～4に示す。γスキャンの測定条件及びスタック長を表5.4.2.5～7にまとめた。

(1)IFA-565-3

グロスγスキャンではペレット間ギャップに対応するγ線強度の低下が規則的に観察できる。Ru、Zrのスキャン結果で、1000-1200mmの範囲で強度減少が観察できる。燃料上端部でCsの強度が上昇しているが、Ru、Zrのデータは逆に上部、下部の位置で減少する傾向にある。

(2)IFA-565-4

グロスγスキャンではペレット間ギャップに対応するγ線強度の低下が規則的に観察できる。燃料最上端でCsのデータのみが上昇している。Ru、Zrのデータでは900-1200mmの範囲で強度の減少が見られる。

(3)IFA-565-6

グロスγスキャンではペレット間ギャップに対応するγ線強度の低下が規則的に観察できる。Ru、Zrのスキャン結果で、1000-1200mmの範囲で強度減少が観察できる。燃料上端部でCsの強度が上昇しているが、Ru、Zrのデータは逆に上部、下部の位置で減少する傾向にある。

表5.4.1にグロスγスキャンから得たスタック長について示す。ロッド6は、IFA-514からスタック長が長くなっているが、IFA-514のデータが780mm付近の大きなペレット間ギャップを含んでいるためである。

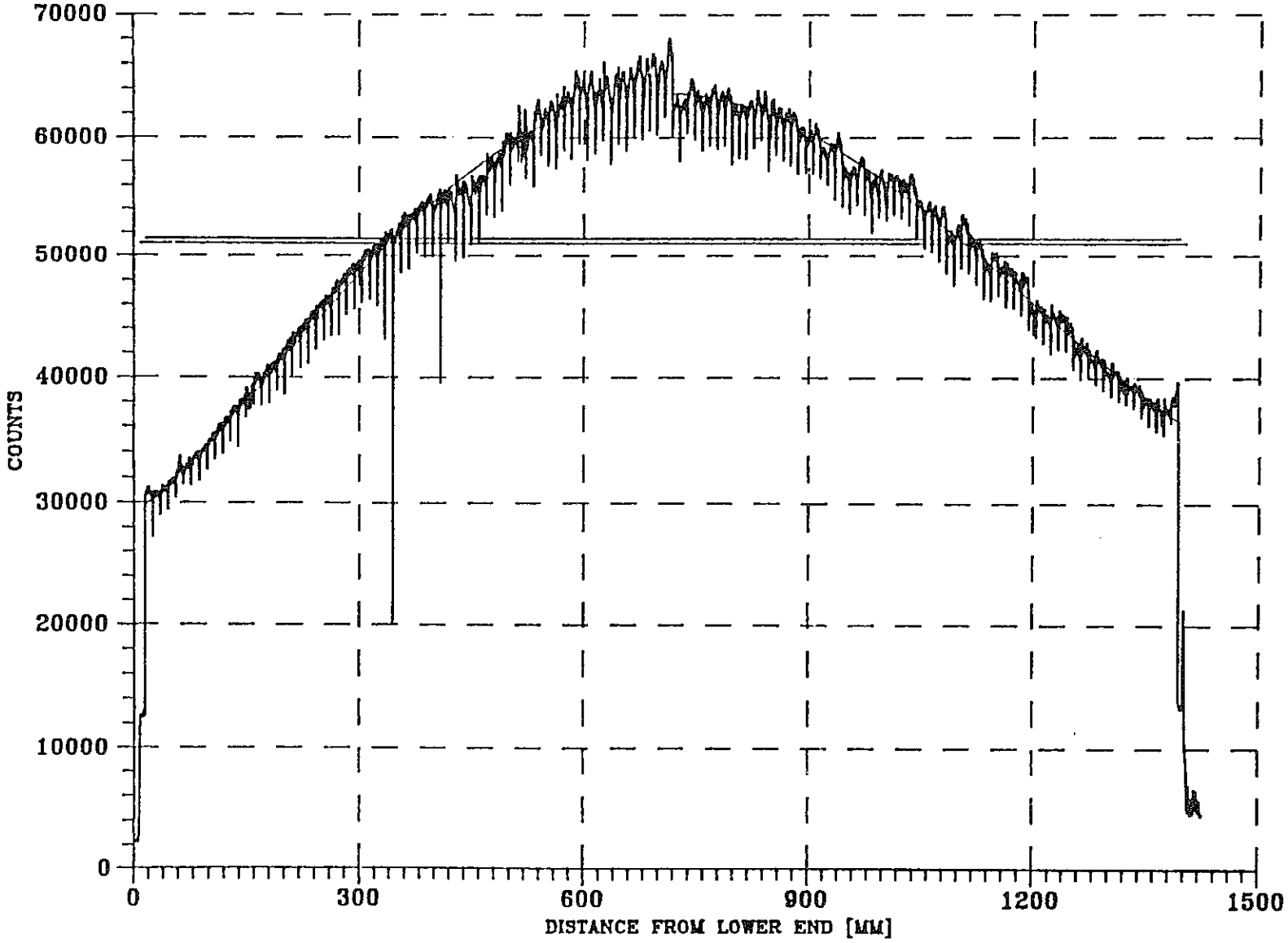


図5.4.1.1　　IFA-514-4のグロスガンマスキャン

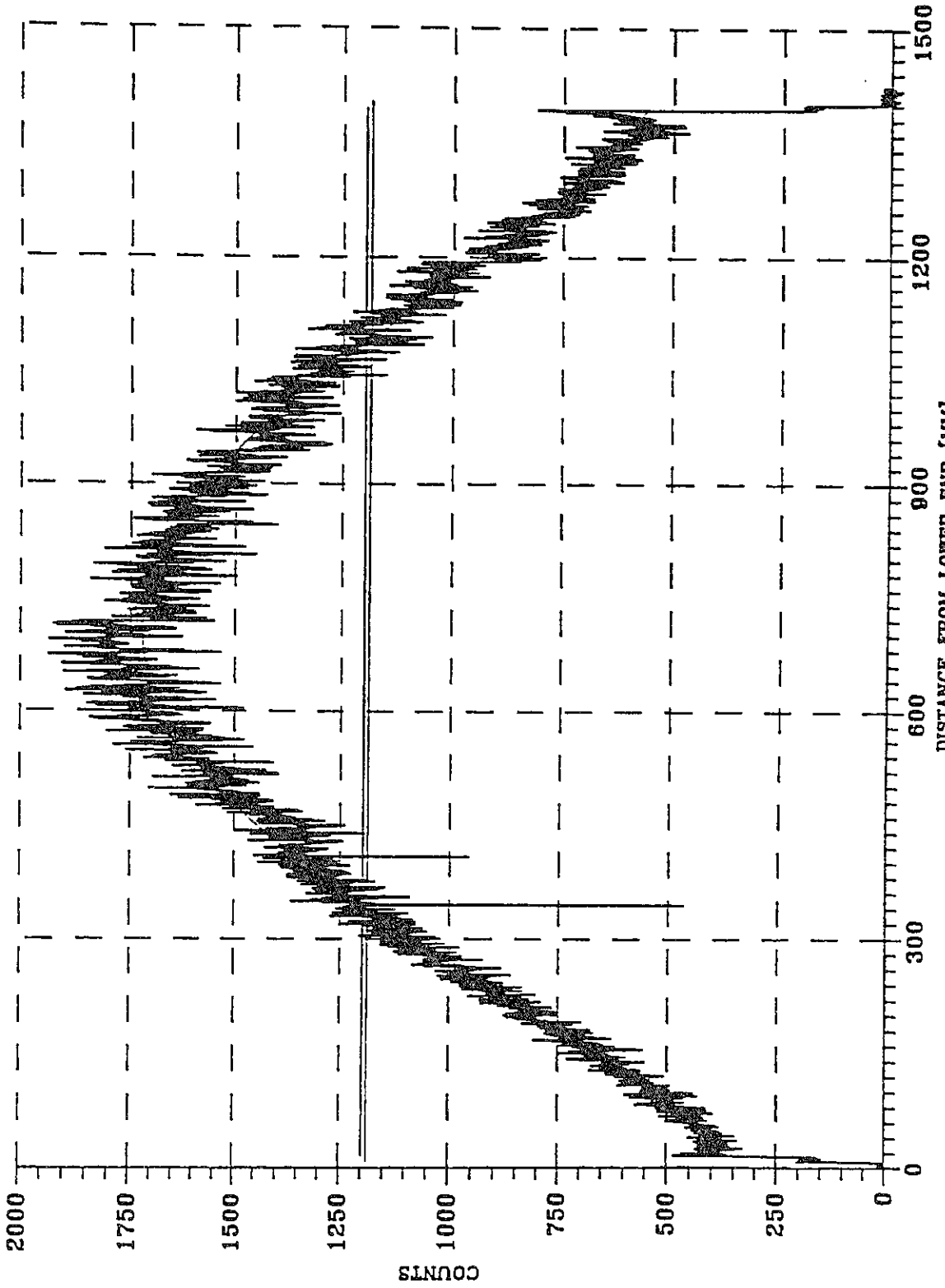


図5.4.1.2　IFA-514-4のCs-134ガンマスキャン

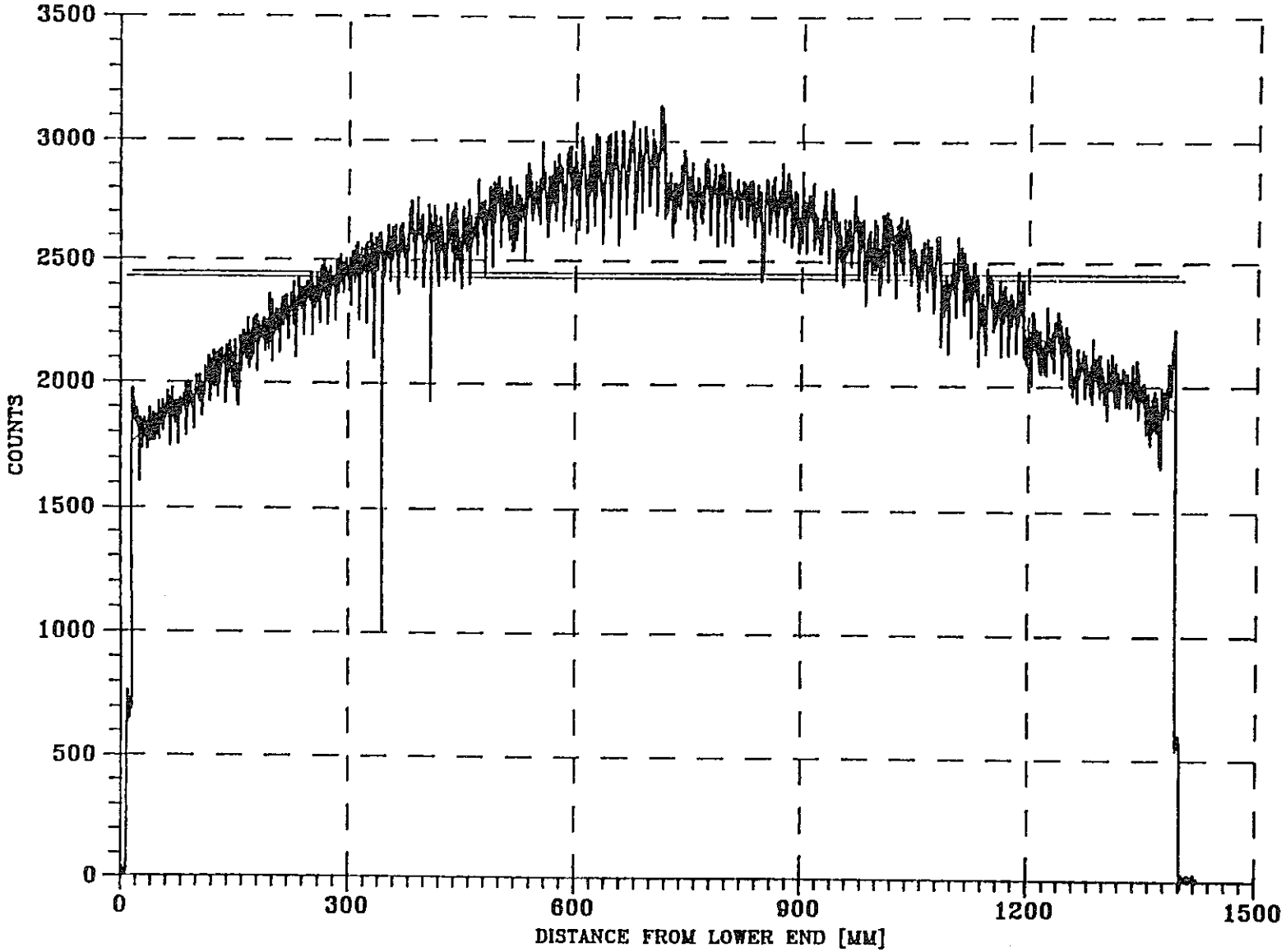


図5.4.1.3　　IFA-514-4のCs-137ガンマスキャン

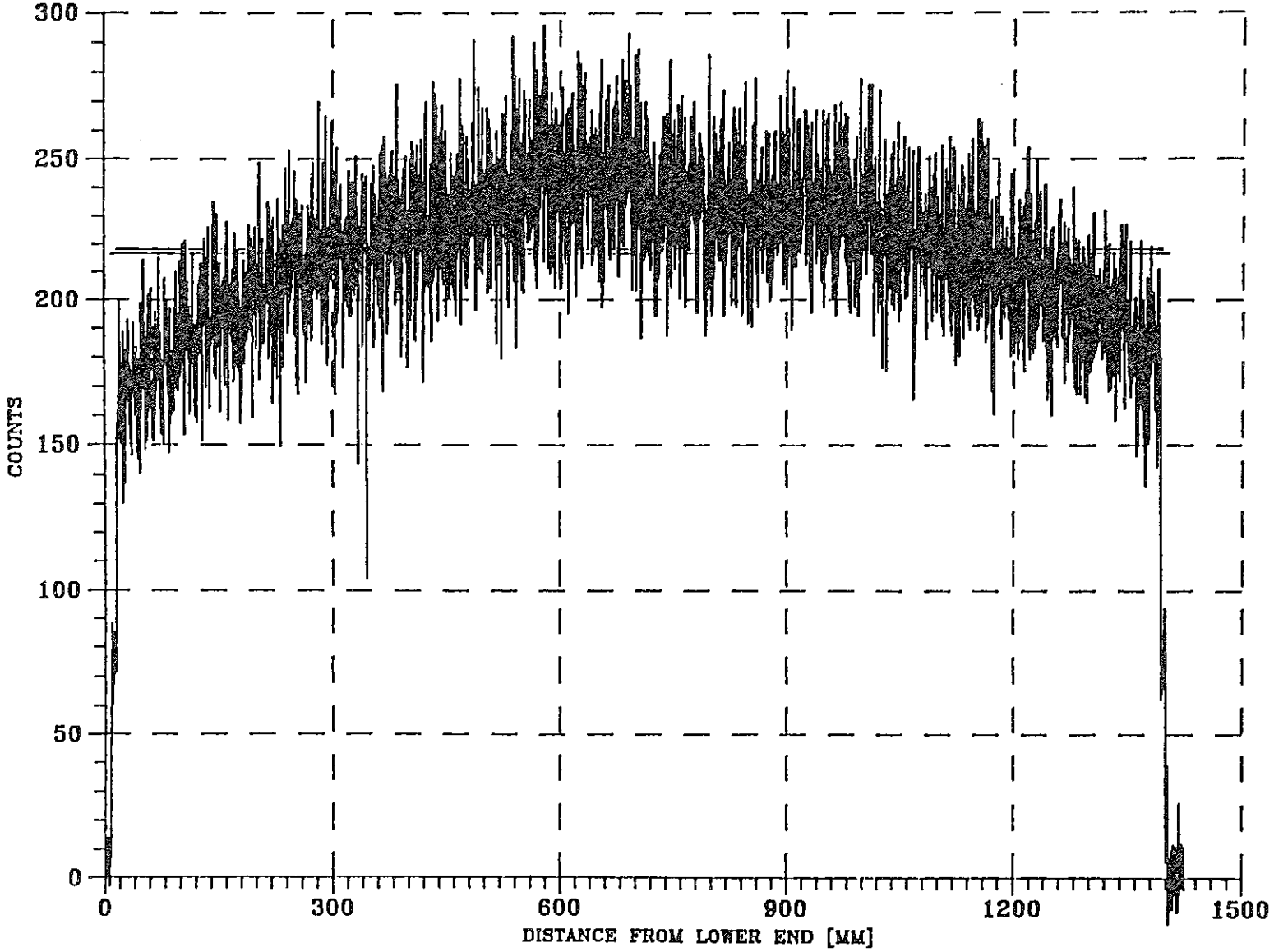


図5.4.1.4　IFA-514-4のZr/Nb-95ガンマスキャン

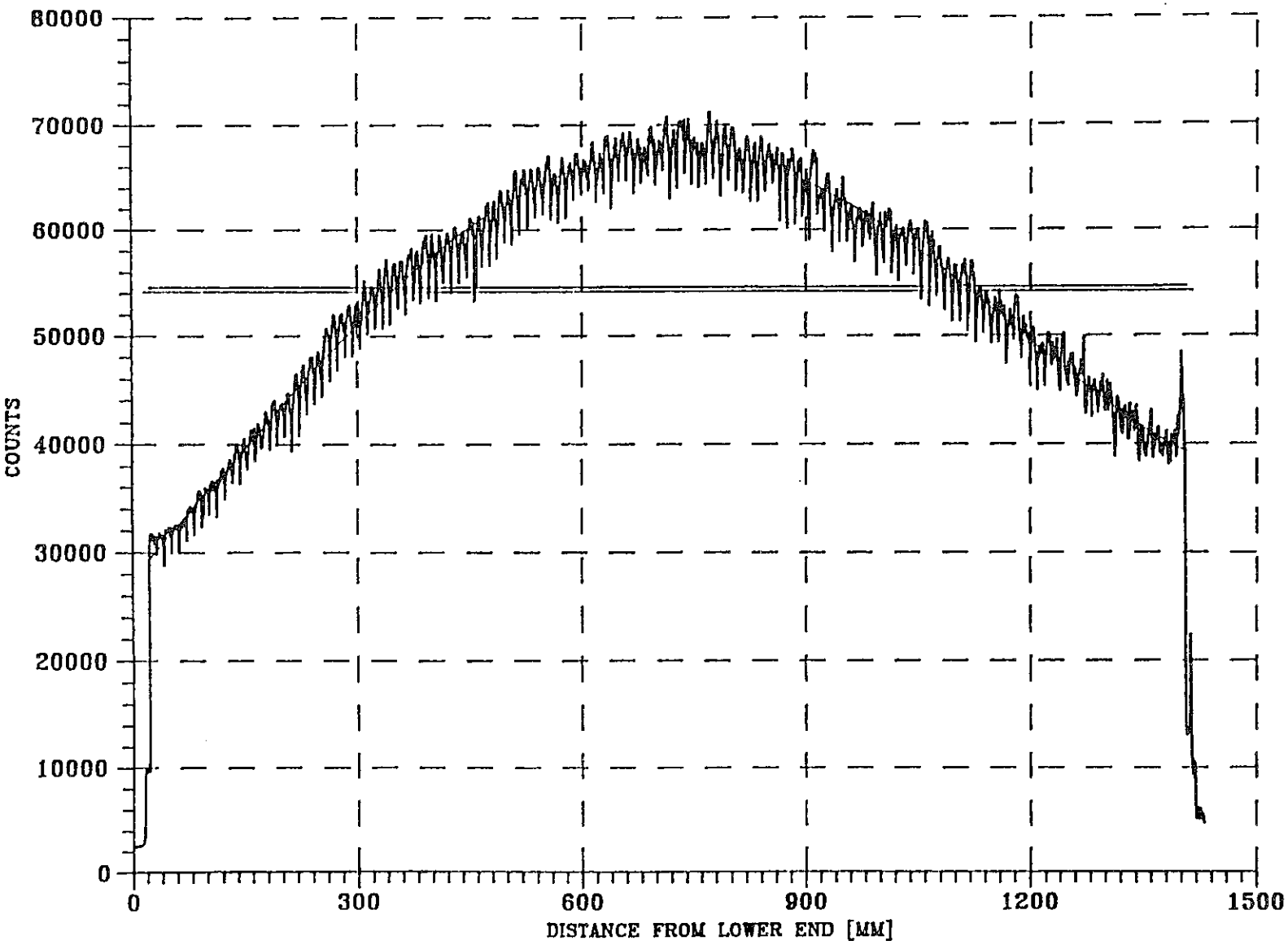


図5.4.1.5　　IFA-514-5のグロスガンマスキャン

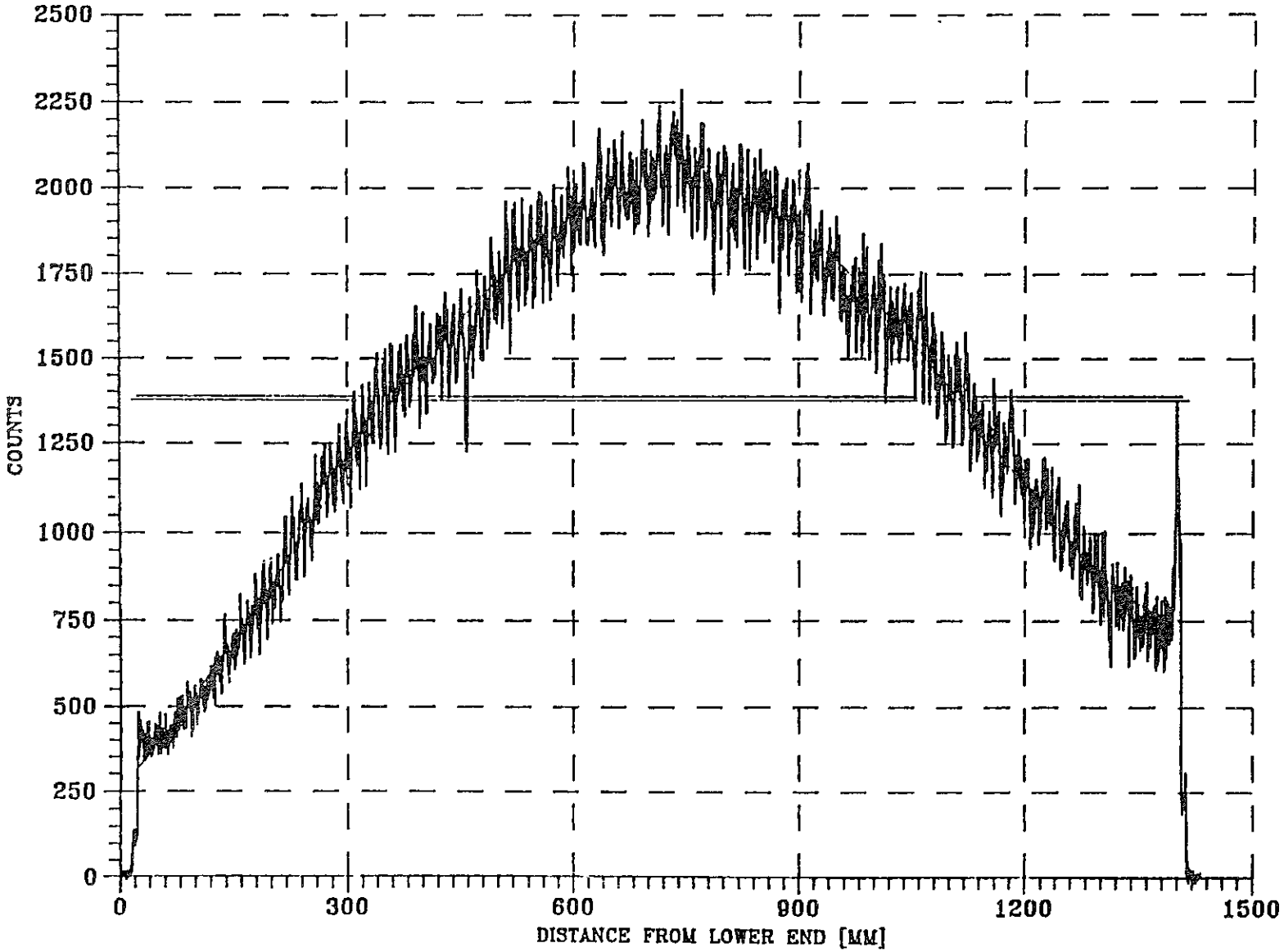


図5.4.1.6　　IFA-514-5のCs-134ガンマスキャン

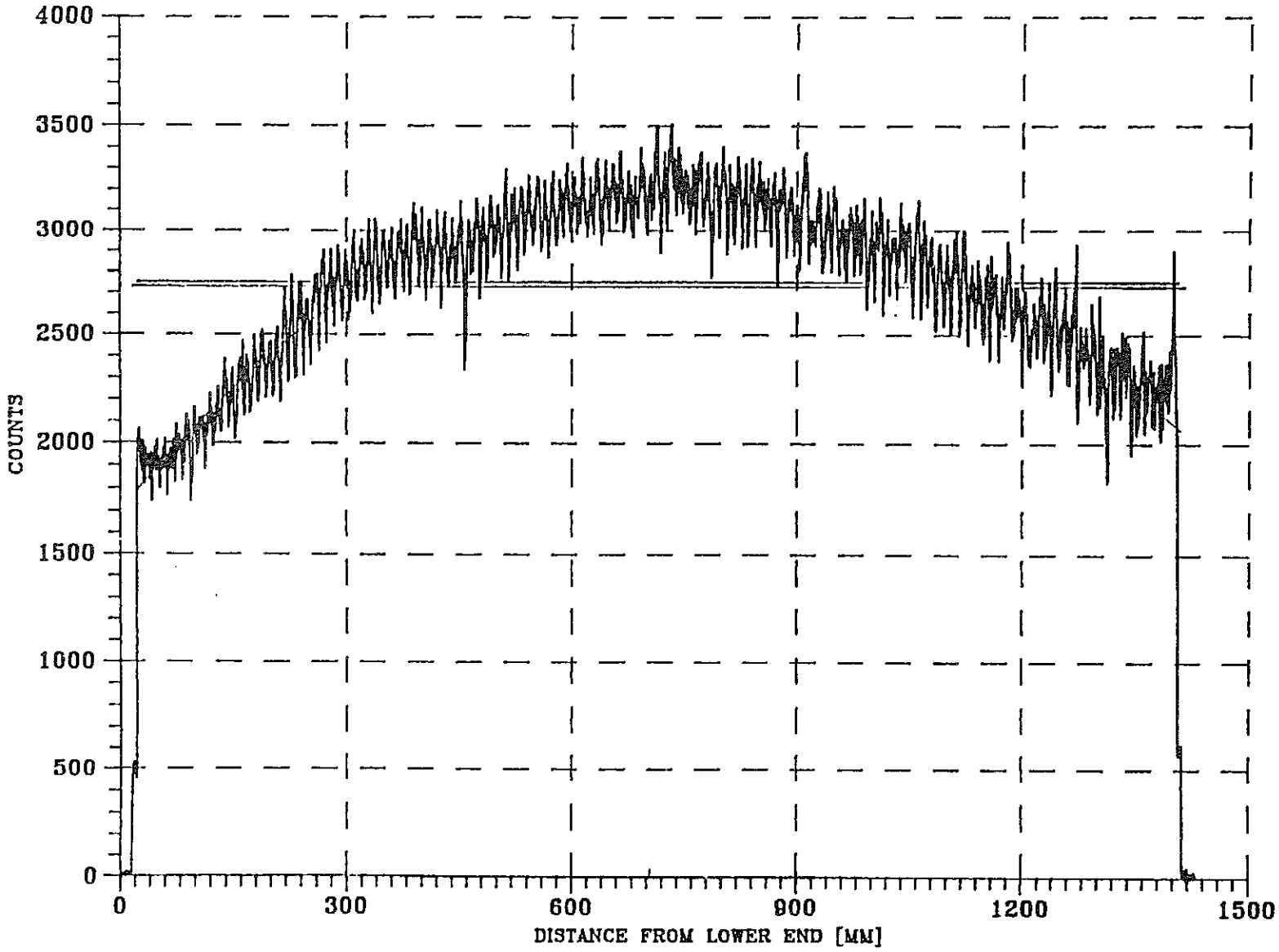


図5.4.1.7　　IFA-514-5のCs-137ガンマスキャン

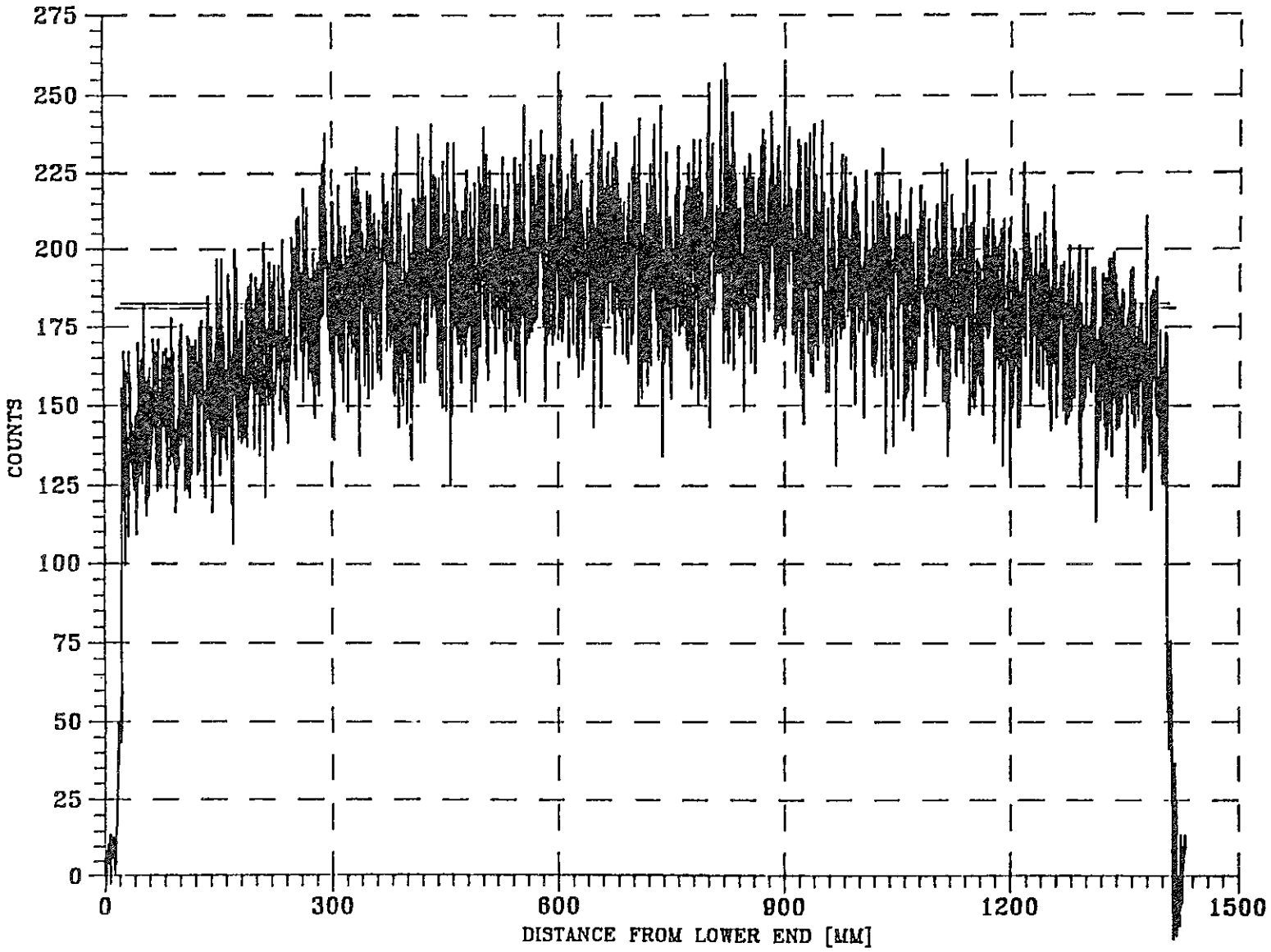


図5.4.1.8　IFA-514-5のZr/Nb-95ガンマスキャン

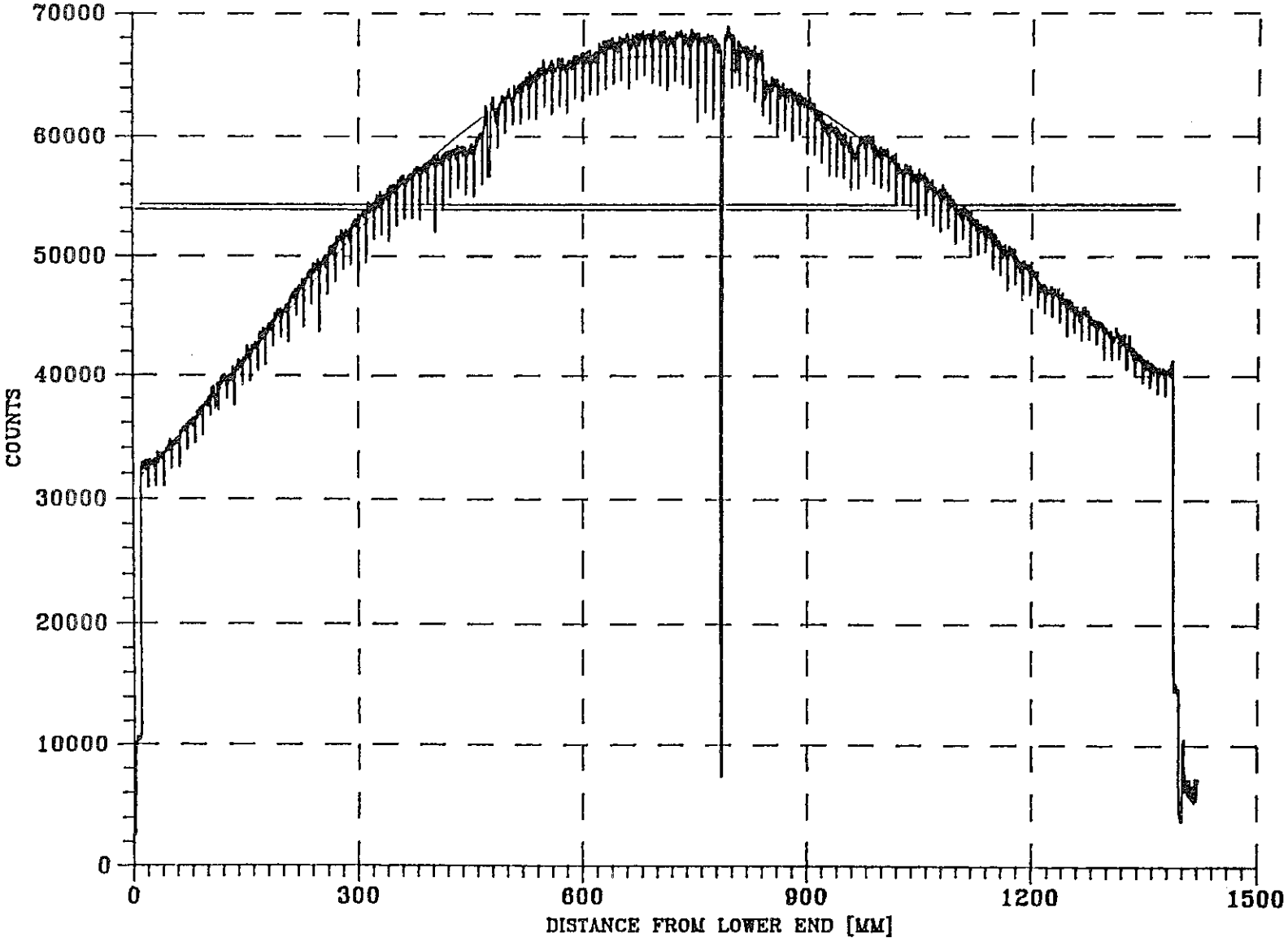


図5.4.1.9　IFA-514-6のグロスガンマスキャン

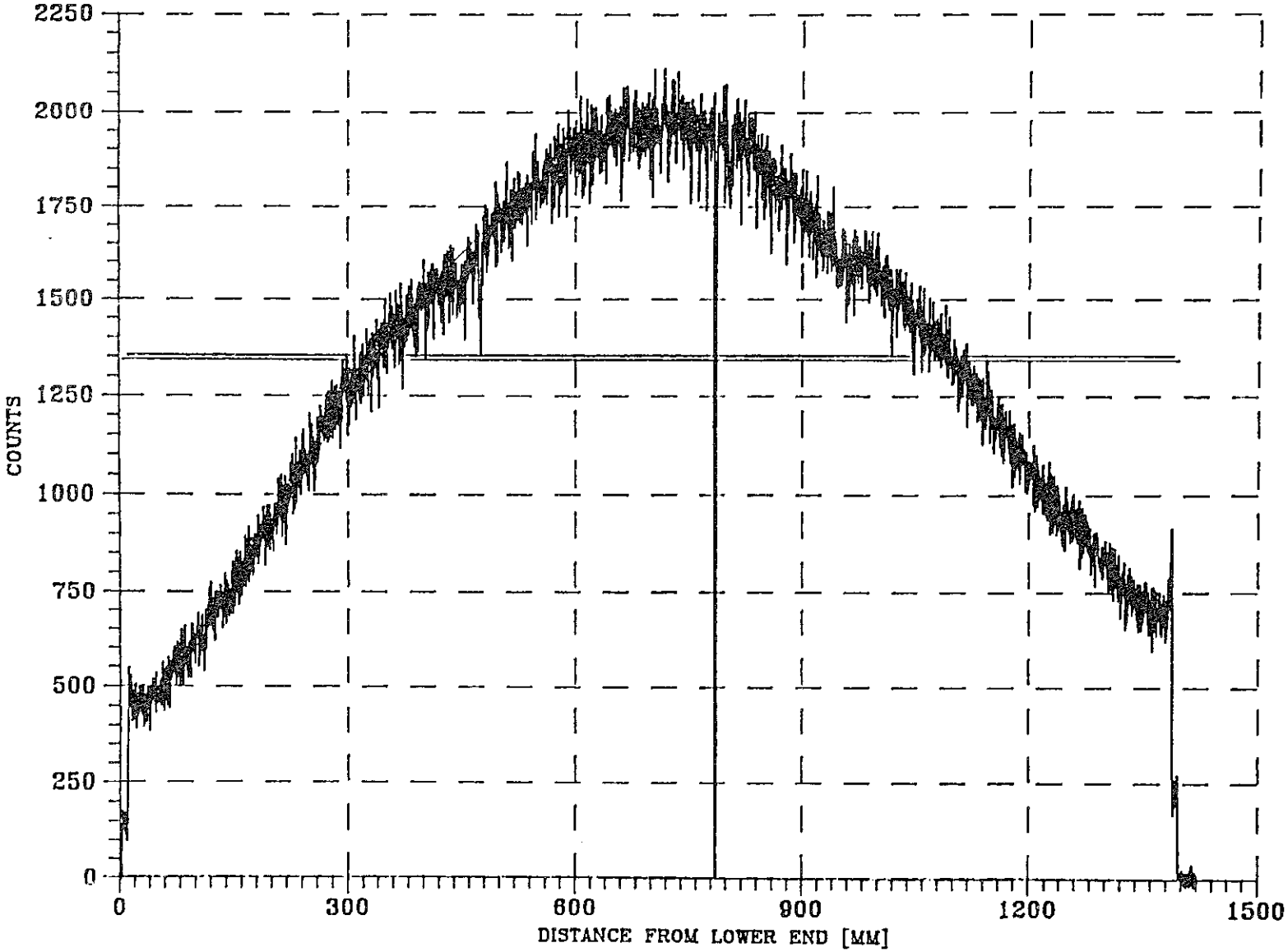


図5.4.1.10　IFA-514-6のCs-134ガンマスキャン

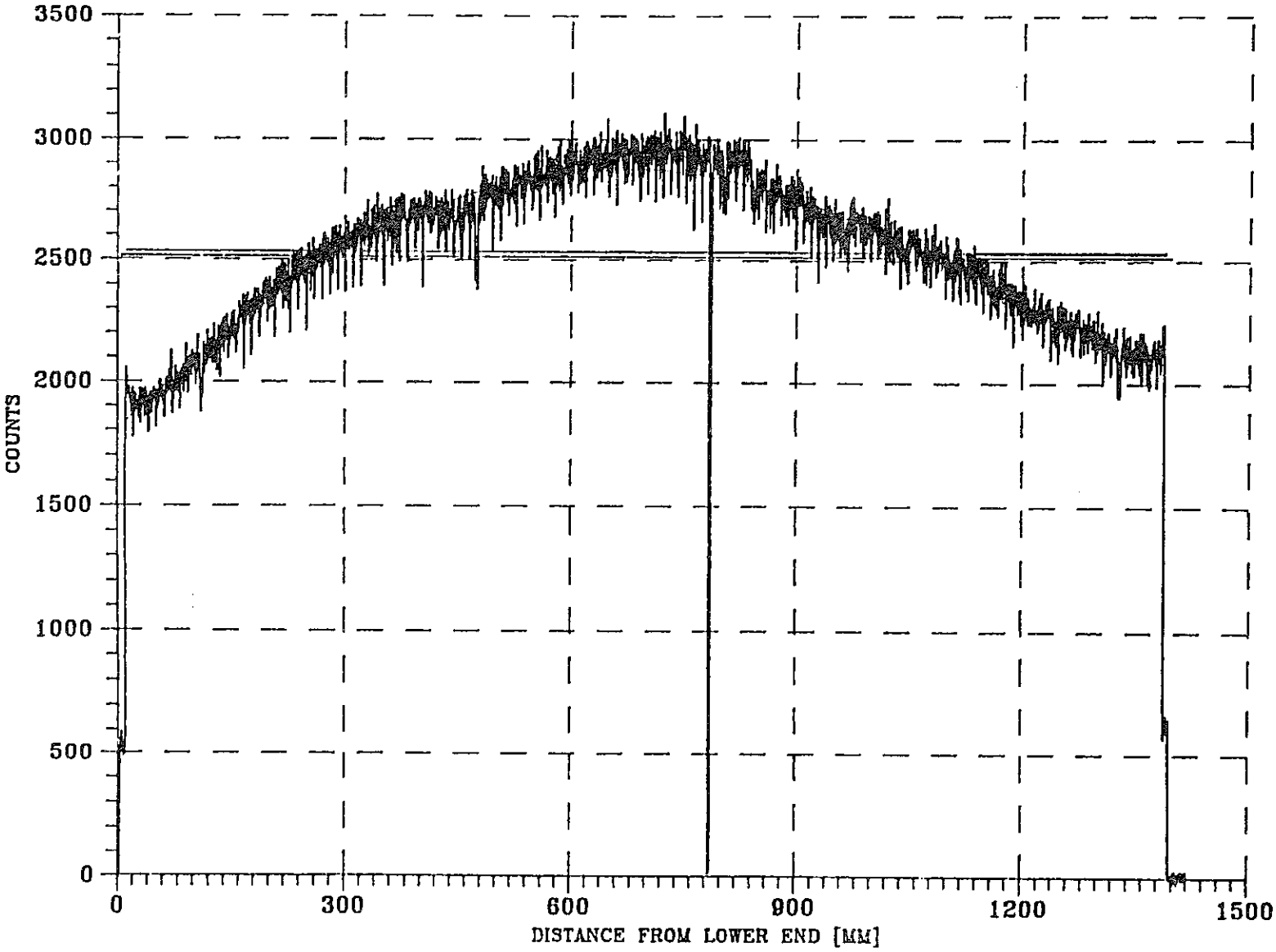


図5.4.1.11　IFA-514-6のCs-137ガンマスキャン

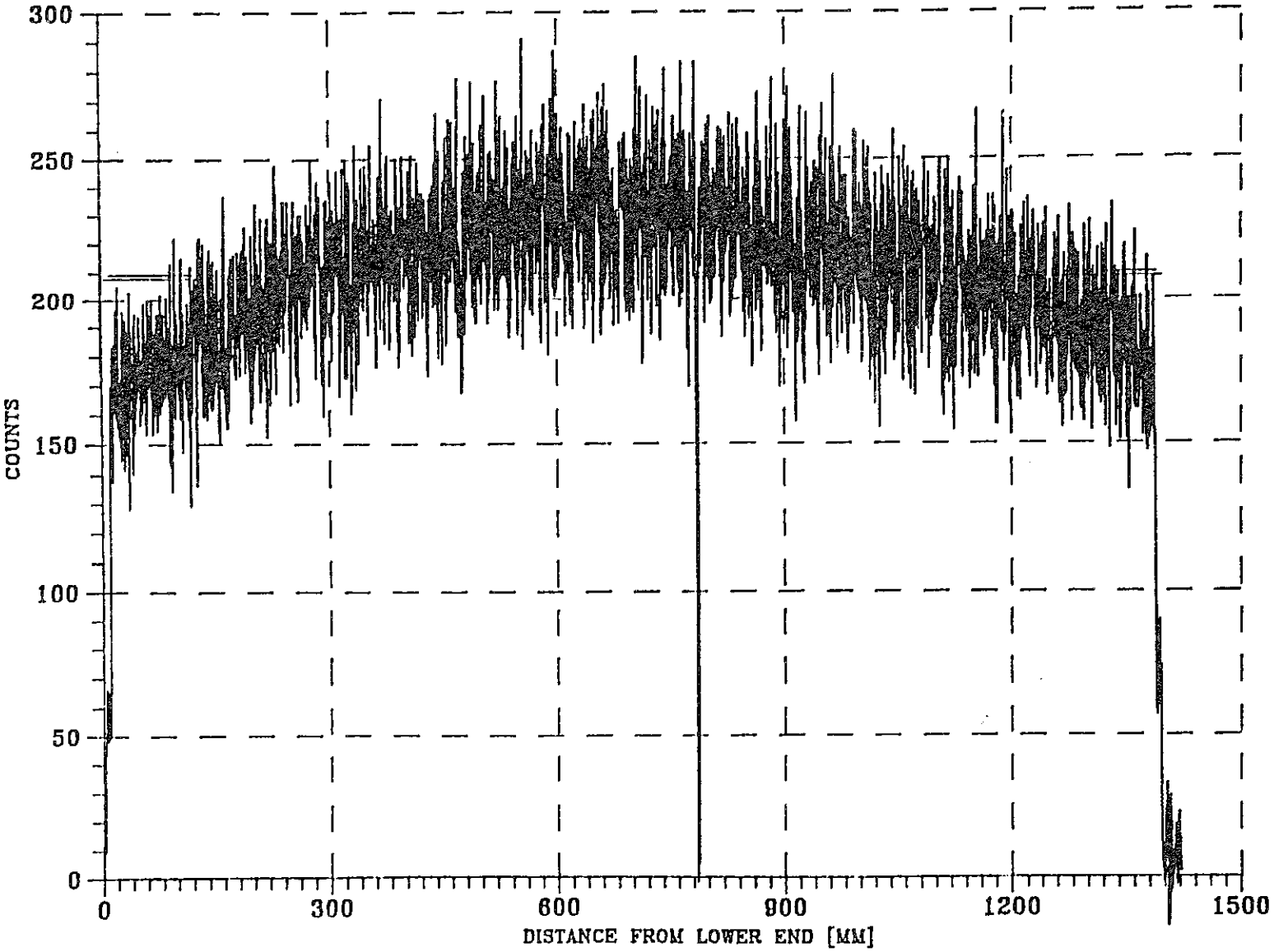


図5.4.1.12　IFA-514-6のZr/Nb-95ガンマスキャン

表5.4.2.1　IFA-565γスキャン結果の核種と図番の対応

核　種	燃料ロッド		
	IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
グロスγ	図5.4.2.4	図5.4.2.10	図5.4.2.16
Ru-103	図5.4.2.5	図5.4.2.11	図5.4.2.17
Ru-106	図5.4.2.6	図5.4.2.12	図5.4.2.18
Cs-134	図5.4.2.7	図5.4.2.13	図5.4.2.19
Cs-137	図5.4.2.8	図5.4.2.14	図5.4.2.20
Zr/Nb-95	図5.4.2.9	図5.4.2.15	図5.4.2.21

表5.4.2.2　IFA-565-3のグロスγスキャンによるペレット界面データ

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
1	21.9	41354	9.9	5.1	42492
2	31.5	43085	9.6	4.4	44064
3	41.4	44637	9.9	4.0	45822
4	51.6	45461	10.2	3.4	47016
5	61.5	46745	9.9	2.7	47259
6	71.7	46699	10.2	4.9	48673
7	82.2	47728	10.5	4.4	49452
8	92.4	48283	10.2	3.6	49991
9	102.6	49368	10.2	3.4	50435
10	112.8	49338	10.2	4.5	51364
11	123.0	50950	10.2	3.3	51958
12	133.2	51144	10.2	2.8	52783
13	143.1	52248	9.9	2.3	53016
14	153.0	53264	9.9	2.8	54083
15	162.9	53735	9.9	3.4	55148
16	173.4	53639	10.5	4.5	55822
17	183.9	54177	10.5	4.4	56226
18	193.8	55891	9.9	3.8	57541
19	204.3	56100	10.5	4.2	58187
20	214.5	56879	10.2	3.4	58573
21	222.6	54868	8.1 (*)	5.0	57976
22	234.3	57242	11.7 (*)	4.6	58935
23	244.2	58244	9.9	4.3	60544
24	254.7	60273	10.5	3.0	61393
25	264.6	59747	9.9	4.4	62099
26	274.8	61491	10.2	3.2	62811
27	285.6	63205	10.8	1.8	64061
28	295.8	62291	10.2	3.8	64432
29	306.0	62628	10.2	3.3	64751
30	315.9	63501	9.9	3.2	65273
31	326.1	63843	10.2	3.3	65679
32	336.0	64860	9.9	3.1	66331
33	346.2	66024	10.2	2.9	67402
34	356.4	65804	10.2	3.1	67878
35	366.6	66104	10.2	3.0	68125
36	376.8	67112	10.2	2.6	68299
37	387.0	68349	10.2	2.4	69358

(*) Error

表5.4.2.2（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
38	397.2	68339	10.2	2.9	70483
39	407.7	69297	10.5	2.3	70377
40	417.6	68696	9.9	2.7	70930
41	426.3	69477	8.7	1.9	70378
42	437.1	69870	10.8	3.4	71264
43	447.3	71761	10.2	1.8	73109
44	456.3	71651	9.0	2.0	72954
45	468.0	72825	11.7	1.7	73632
46	477.9	73140	9.9	1.5	74010
47	489.0	73285	11.1	2.1	74602
48	499.5	72586	10.5	3.3	74605
49	511.2	74744	11.7	1.8	75725
50	519.9	73814	8.7	2.1	75863
51	530.1	73912	10.2	2.5	75083
52	540.6	75209	10.5	1.7	76220
53	550.2	73979	9.6	3.1	76411
54	560.1	73979	9.9	3.4	76398
55	570.3	75809	10.2	2.7	77008
56	580.2	75624	9.9	2.8	77883
57	590.7	76396	10.5	2.3	78159
58	601.5	76894	10.8	1.7	77969
59	610.5	76546	9.0	2.5	78397
60	622.2	76993	11.7	1.7	78320
61	631.5	77420	9.3	2.0	78563
62	642.3	77332	10.8	2.0	79196
63	651.3	76551	9.0	3.2	78327
64	660.9	78249	9.6	1.6	796C1
65	671.7	77813	10.8	1.9	79319
66	682.2	76411	10.5	2.2	78471
67	691.8	77865	9.6	1.7	78652
68	702.3	77728	10.5	1.7	79238
69	712.8	77482	10.5	1.8	78569
70	723.0	77290	10.2	2.4	79248
71	732.2	73755	9.2 (*)	5.8	78917
72	743.4	77314	11.2 (*)	0.9	76735
73	758.4	76824	15.0 (*)	1.1	78319
74	768.0	76502	9.6 (*)	2.0	78031
75	777.9	76131	9.9	2.3	77839
76	787.8	75245	9.9	2.0	77423
77	798.0	75735	10.2	2.1	76771
78	808.2	76307	10.2	2.1	77729

(*) Error

表5.4.2.2（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
79	817.8	75717	9.6	1.5	77565
80	828.6	74271	10.8	2.4	76357
81	838.5	73655	9.9	3.8	76078
82	848.7	73066	10.2	2.9	76348
83	858.9	72704	10.2	3.0	74251
84	869.1	74321	10.2	1.8	75597
85	879.3	72914	10.2	2.7	75153
86	890.1	72372	10.8	2.5	74635
87	900.0	72487	9.9	1.8	73745
88	910.2	71024	10.2	3.5	73743
89	920.7	71263	10.5	2.6	73266
90	930.6	70744	9.9	2.4	73073
91	940.8	68943	10.2	3.4	71396
92	951.0	67882	10.2	3.9	70914
93	961.2	69154	10.2	2.3	70832
94	971.7	68431	10.5	2.4	70588
95	981.6	67151	9.9	3.1	69177
96	992.1	66271	10.5	3.4	69015
97	1002.6	65140	10.5	3.0	67824
98	1012.8	64836	10.2	3.3	67082
99	1023.0	63479	10.2	3.8	66184
100	1033.2	63918	10.2	2.8	65944
101	1043.4	62313	10.2	4.2	65269
102	1053.9	60070	10.5	5.0	64274
103	1063.2	59598	9.3	4.9	62138
104	1074.0	60799	10.8	3.7	63250
105	1083.9	58010	9.9	4.9	61978
106	1093.5	57233	9.6	5.8	60005
107	1103.7	58809	10.2	3.8	61027
108	1114.2	58176	10.5	4.1	61301
109	1124.7	55678	10.5	6.0	59589
110	1134.9	55656	10.2	4.9	58756
111	1144.8	55320	9.9	5.0	58069
112	1155.0	55852	10.2	3.8	58106
113	1165.5	54860	10.5	4.2	57979
114	1176.0	54151	10.5	5.4	57059
115	1186.2	54639	10.2	2.8	56773
116	1196.4	52657	10.2	4.3	55292
117	1206.3	51810	9.9	5.2	54584
118	1216.8	52581	10.5	3.9	54699

表5.4.2.2（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
119	1228.2	51716	11.4	4.4	54653
120	1237.5	50565	9.3	5.0	53558
121	1247.7	50050	10.2	5.1	52207
122	1259.1	50243	11.4	3.2	52785
123	1268.7	48778	9.6 (*)	----	51444
124	1278.6	47840	9.9	4.8	51061
125	1288.5	52007	9.9 (*)	----	50457
126	1298.7	48612	10.2 (*)	----	48978
127	1308.6	48151	9.9 (*)	----	48676
128	1318.8	47398	10.2 (*)	----	47043
129	1327.8	44638	9.0	1.6	46738
130	1338.0	45429	10.2	2.0	46857
131	1348.2	44787	10.2 (*)	----	45477
132	1358.1	45104	9.9 (*)	----	44725
133	1368.0	43190	9.9 (*)	----	44179
134	1378.2	42667	10.2 (*)	----	43372
135	1388.1	43642	9.9 (*)	----	42851
136			10.2		

(*) Error/not dip

表5.4.2.3　IFA-565-4のグロスγスキャンによるペレット界面データ

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
1	25.8	44106	10.2	4.7	45305
2	36.0	45820	10.2	2.9	46703
3	46.5	46234	10.5	3.6	47481
4	56.7	47810	10.2	3.0	48390
5	66.9	48531	10.2	2.0	49743
6	76.8	47774	9.9	3.4	49376
7	87.3	47620	10.5	3.7	49387
8	97.5	47208	10.2	5.5	49596
9	107.7	48858	10.2	3.7	50190
10	118.5	49715	10.8	3.0	51012
11	128.1	50089	9.6	3.1	51327
12	138.3	49511	10.2	5.3	51991
13	148.5	51619	10.2	2.9	52624
14	159.3	52077	10.8	3.2	53498
15	169.5	52445	10.2	3.4	53972
16	180.0	52620	10.5	4.0	54535
17	189.9	52964	9.9	4.2	54948
18	200.1	53666	10.2	4.3	55648
19	210.0	54809	9.9	3.7	56450
20	220.8	54646	10.8	5.2	57189
21	231.3	54090	10.5	5.9	57783
22	241.2	56750	9.9	3.5	57744
23	252.0	55445	10.8	6.4	59078
24	262.2	57166	10.2	3.6	58994
25	272.1	56888	9.9	5.0	59385
26	282.3	58851	10.2	5.1	61021
27	293.1	58811	10.8	5.7	62149
28	303.3	59677	10.2	5.1	62455
29	313.8	58152	10.5	8.1	63018
30	324.0	59965	10.2	4.9	63172
31	333.9	59447	9.9	6.7	62868
32	344.7	59947	10.8	6.3	64097
33	354.9	61960	10.2	5.7	64188
34	366.0	63938	11.1	4.4	66439
35	376.8	63958	10.8	4.9	66871
36	387.3	64910	10.5	4.4	67656
37	398.1	64530	10.8	4.5	67807

表5.4.2.3（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
38	408.3	63424	10.2	6.8	67540
39	418.8	67112	10.5	1.9	67977
40	429.0	65646	10.2	5.1	68333
41	439.5	68199	10.5	3.4	70330
42	449.7	68798	10.2	3.2	70538
43	460.2	69518	10.5	2.9	71607
44	470.4	70820	10.2	2.4	71720
45	480.6	68947	10.2	4.7	72733
46	490.5	70181	9.9	4.2	72436
47	501.3	72175	10.8	2.5	73688
48	511.8	71809	10.5	3.2	73974
49	522.6	72893	10.8	2.2	74357
50	532.5	71201	9.9	4.3	74211
51	542.4	71984	9.9	4.1	74796
52	552.9	73136	10.5	3.0	75052
53	562.8	71788	9.9	4.4	75098
54	573.3	73441	10.5	3.8	75802
55	583.5	73267	10.2	4.3	76347
56	594.0	74366	10.5	3.3	76627
57	604.5	73829	10.5	4.2	76870
58	615.3	74758	10.8	2.8	76877
59	625.2	76130	9.9	1.7	77021
60	635.7	74369	10.5	3.4	77475
61	645.9	74524	10.2	4.0	77145
62	656.7	73550	10.8	5.1	77443
63	666.9	75042	10.2	3.4	77334
64	678.6	74698	11.7	3.5	77647
65	688.5	75865	9.9	2.6	77395
66	698.4	75143	9.9	2.9	77559
67	708.6	75696	10.2	2.5	77301
68	718.8	73967	10.2	3.3	77910
69	728.7	72678	9.9	2.7	74796
70	737.7	73841	9.0	2.0	74805
71	748.8	73406	11.1	2.7	75401
72	758.7	71162	9.9	5.1	75243
73	768.6	71237	9.9	5.1	74607
74	778.8	70709	10.2	5.4	75111
75	788.7	69881	9.9	5.7	74117
76	798.3	69485	9.6	5.6	73956
77	807.9	68611	9.6	5.8	73060
78	817.5	69517	9.6	4.6	72533

表5.4.2.3（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
79	827.7	69199	10.2	5.1	72883
80	837.3	68994	9.6	4.8	72527
81	847.2	68199	9.9	5.6	72240
82	857.4	68639	10.2	4.2	71952
83	867.0	67742	9.6	4.5	71086
84	877.2	66624	10.2	5.8	70719
85	886.8	66420	9.6	5.1	70272
86	896.7	65674	9.9	5.7	69697
87	906.3	66233	9.6	4.6	69448
88	916.5	65338	10.2	4.9	69019
89	926.1	64865	9.6	4.6	68056
90	936.0	64437	9.9	5.1	67654
91	945.9	63988	9.9	5.0	68025
92	956.1	63489	10.2	5.0	66688
93	966.0	63100	9.9	5.0	66643
94	975.9	61075	9.9	6.3	65889
95	985.5	60052	9.6	6.1	64214
96	995.4	60890	9.9	4.7	63534
97	1005.0	60560	9.6	5.3	64018
98	1015.5	60337	10.5	5.6	63863
99	1025.4	59446	9.9	5.7	63364
100	1035.6	59150	10.2	5.5	62681
101	1045.5	58200	9.9	5.4	62108
102	1055.7	56776	10.2	6.0	60658
103	1065.6	55147	9.9	7.6	60158
104	1075.2	55788	9.6	5.3	58827
105	1085.4	55724	10.2	4.9	58810
106	1095.3	54305	9.9	5.2	57683
107	1104.9	55415	9.6	4.0	57182
108	1115.1	53318	10.2	6.0	57668
109	1125.3	53085	10.2	5.5	55865
110	1135.2	50723	9.9	8.2	56128
111	1145.1	52256	9.9	4.7	54428
112	1154.7	52575	9.6	4.2	54991
113	1164.9	51955	10.2	4.9	54611
114	1175.4	50628	10.5	6.6	54320
115	1185.3	51478	9.9	4.5	53935
116	1195.5	49559	10.2	6.3	53571
117	1205.1	49235	9.6	5.3	52047
118	1215.0	48731	9.9	5.4	51724
119	1224.9	48736	9.9	5.1	51218

表5.4.2.3（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
120	1235.1	47875	10.2	6.5	51244
121	1245.3	48502	10.2	4.8	51089
122	1255.2	47732	9.9	4.8	50740
123	1265.1	46502	9.9	5.6	49274
124	1275.3	46323	10.2	5.1	49255
125	1284.9	46640	9.6	3.8	48165
126	1295.1	45754	10.2	4.9	48588
127	1305.0	45024	9.9	4.5	47237
128	1315.2	43955	10.2	5.8	47092
129	1324.8	43505	9.6	5.1	46158
130	1335.0	43131	10.2	4.7	45379
131	1345.5	42568	10.5	4.1	44888
132	1355.4	41900	9.9	3.5	43752
133	1365.3	40804	9.9	3.8	42819
134	1374.9	40589	9.6	3.2	42007
135	1384.8	40297	9.9	3.8	41836
136			9.9		41399

表5.4.2.4　IFA-565-6のグロスγスキャンによるペレット界面データ

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
1	29.4	37440	10.2	1.3	36941
2	39.6	37578	10.2	2.9	38256
3	50.1	38066	10.5	3.2	39045
4	60.0	38878	9.9	3.0	39624
5	70.8	39329	10.8	3.4	40397
6	81.3	38687	10.5	6.1	40900
7	91.2	39611	9.9	5.2	41479
8	101.7	41145	10.5	3.2	42059
9	112.2	42204	10.5	2.4	42913
10	122.4	42893	10.2	2.6	43544
11	133.5	42553	11.1	4.5	44398
12	143.4	43643	9.9	3.1	44670
13	153.9	44721	10.5	2.6	45404
14	164.4	44820	10.5	3.0	46095
15	174.6	44726	10.2	3.8	46212
16	184.8	45523	10.2	3.2	46715
17	195.0	46896	10.2	1.8	47308
18	205.5	47596	10.5	1.7	48138
19	215.7	47092	10.2	4.0	48663
20	225.9	48548	10.2	2.5	49405
21	236.4	48998	10.5	0.7	50053
22	246.6	49746	10.2	2.4	49482
23	257.4	50035	10.8	3.3	51467
24	267.3	50826	9.9	2.9	51893
25	277.5	51712	10.2	3.0	52861
26	288.3	52770	10.8	2.2	53635
27	298.5	52904	10.2	3.0	54111
28	308.7	53514	10.2	2.9	54844
29	318.9	53092	10.2	4.6	55382
30	329.4	54552	10.5	3.1	55931
31	339.6	55032	10.2	3.1	56470
32	349.5	55522	9.9	3.1	57047
33	359.4	56416	9.9	2.7	57508
34	369.9	57245	10.5	2.4	58361
35	380.1	56650	10.2	3.9	58741
36	390.3	57430	10.2	3.2	59071
37	400.5	58321	10.2	2.6	59379

表5.4.2.4（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
38	410.4	58280	9.9	3.1	60069
39	420.9	58611	10.5	4.0	60460
40	431.1	58827	10.2	4.4	61278
41	441.6	60797	10.5	2.0	61778
42	451.8	60533	10.2	2.8	61866
43	462.3	60156	10.5	4.9	62774
44	473.1	61286	10.8	3.4	63342
45	483.6	62050	10.5	2.7	63548
46	493.5	61775	9.9	3.3	63891
47	503.7	61902	10.2	4.0	63933
48	514.2	63263	10.5	3.2	64981
49	524.7	63696	10.5	2.9	65470
50	534.9	64864	10.2	2.1	65696
51	544.8	64981	9.9	2.7	66486
52	555.6	65144	10.8	2.6	66817
53	565.5	65039	9.9	3.2	66991
54	576.3	65532	10.8	3.0	67310
55	585.9	65760	9.6	2.5	67585
56	596.4	67043	10.5	1.5	67685
57	606.6	65035	10.2	3.3	67648
58	616.8	66406	10.2	2.5	67379
59	627.0	66285	10.2	3.1	68306
60	637.5	66980	10.5	2.2	68275
61	648.0	65715	10.5	3.3	68150
62	657.9	67889	9.9	1.7	68564
63	668.1	65251	10.2	4.1	68498
64	680.1	65756	12.0 (*)	2.6	67767
65	688.8	67599	8.7 (*)	1.9	68053
66	699.6	66529	10.8	3.4	68874
67	709.8	67036	10.2	2.4	68614
68	720.0	65778	10.2	4.1	68619
69	730.2	66739	10.2	2.8	68421
70	740.1	65268	9.9	3.4	67955
71	751.8	64391	11.7	4.0	67637
72	760.8	66205	9.0	3.0	67210
73	771.0	65107	10.2	4.0	67771
74	781.5	66526	10.5	2.5	68185
75	792.3	65005	10.8	3.5	67796
76	802.8	65642	10.5	2.1	66970
77	813.3	63162	10.5	4.1	66650
78	823.8	64115	10.5	3.2	65868

(*) Error

表5.4.2.4（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
79	834.0	61592	10.2	4.7	65107
80	844.2	62401	10.2	4.5	65231
81	854.1	61844	9.9	4.5	64610
82	864.0	61972	9.9	4.0	64763
83	874.2	61404	10.2	4.2	64199
84	884.1	61469	9.9	3.5	63884
85	894.0	60457	9.9	4.7	63440
86	904.2	60336	10.2	4.3	63241
87	914.1	59804	9.9	4.0	62731
88	924.0	58236	9.9	5.3	61766
89	933.6	57504	9.6	5.6	60947
90	943.5	57440	9.9	5.5	60928
91	953.4	57437	9.9	5.1	60332
92	963.3	57322	9.9	4.4	60442
93	973.2	56723	9.9	4.9	59491
94	983.4	56798	10.2	4.3	59554
95	993.6	56124	10.2	3.9	58950
96	1003.5	54509	9.9	5.4	57762
97	1013.4	54629	9.9	4.2	57332
98	1023.6	54002	10.2	4.0	56486
99	1033.2	53048	9.6	4.7	55814
100	1043.1	53101	9.9	3.7	55395
101	1053.3	53276	10.2	3.0	54879
102	1063.5	52271	10.2	3.7	54686
103	1073.4	50837	9.9	4.9	53709
104	1083.3	50586	9.9	4.4	53109
105	1093.8	50476	10.5	3.7	52586
106	1103.7	49688	9.9	4.0	52118
107	1113.6	48791	9.9	4.5	51293
108	1123.8	48318	10.2	4.3	50796
109	1134.0	47604	10.2	4.6	50094
110	1143.9	47382	9.9	3.9	49513
111	1154.1	46986	10.2	3.7	49026
112	1164.0	46211	9.9	3.6	48381
113	1173.9	45559	9.9	4.0	47436
114	1184.1	45259	10.2	3.6	47408
115	1193.7	44248	9.6	4.2	46406
116	1203.9	44692	10.2	2.9	46007
117	1213.8	43620	9.9	3.5	45725
118	1223.4	42961	9.6	3.7	44664
119	1233.6	42210	10.2	4.5	44393

表5.4.2.4（続き）

DIP NO.	DIP POSITION [mm]	DIP VALUE [Counts]	DIP TO DIP DISTANCE [mm]	DEPTH [%]	AVER PEL VALUE [Counts]
120	1243.5	42112	9.9	3.2	43821
121	1253.4	41438	9.9	3.5	43133
122	1263.0	41124	9.6	2.8	42612
123	1272.9	39745	9.9	5.0	41862
124	1283.1	39761	10.2	3.9	41772
125	1293.0	38962	9.9	4.5	40940
126	1303.2	38902	10.2	3.5	40509
127	1313.1	38119	9.9	3.9	39975
128	1323.3	37710	10.2	3.6	39252
129	1332.9	37400	9.6	3.1	38899
130	1343.1	36465	10.2	3.8	38161
131	1353.6	35885	10.5	3.7	37535
132	1363.8	35202	10.2	3.8	36848
133	1374.0	34403	10.2	4.1	36148
134	1384.2	33425	10.2	4.8	35527
135			9.9		34433

表5.4.2.5　IFA-565-3ガンマスキャン分析結果（0°方向）

核　種	グロスγ	Ru-103	Ru-106	Cs-134	Cs-137	Zr/Nb-95
エネルギーチャンネル	1	2	3	4	5	6
測定日	94-3-22	94-3-21	94-3-21	94-3-21	94-3-22	94-3-22
スキャニングステップmm	0.3					
カウント時間 sec/step	20					
検出器	Ge					
コリメータスリット幅 mm	0.3					
燃料ｽﾀｯｸ長 mm						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	1400.7	1400.4	1400.4	1400.7	1400.7	1400.4
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	1386.6	1386.3	1386.3	1386.6	1386.3	1386.0
最大カウント数 counts/sec	79601	1527	1490	3080	2792	8168
平均カウント数 counts/sec						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	64304	1371	1301	1969	2379	7355
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	64773	1381	1311	1984	2395	7405
軸方向形状ファクタ						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	1.24	1.114	1.15	1.56	1.174	1.11
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	1.23	1.106	1.14	1.55	1.166	1.10

表5.4.2.6　IFA-565-4ガンマスキャン分析結果（0°方向）

核　種	グロスγ	Ru-103	Ru-106	Cs-134	Cs-137	Zr/Nb-95
エネルギーチャンネル	1	2	3	4	5	6
測定日	94-3-19	94-3-20	94-3-20	94-3-19	94-3-19	94-3-19
スキャニングステップmm	0.3					
カウント時間 sec/step	20					
検出器	Ge					
コリメータスリット幅 mm	0.3					
燃料ｽﾀｯｸ長 mm						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	1393.5	1393.8	1393.8	1393.5	1393.5	1393.5
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	1379.1	1379.4	1379.7	1379.1	1379.1	1379.1
最大カウント数 counts/sec	77647	1471	1433	3130	2691	7128
平均カウント数 counts/sec						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	62213	1262	1243	1992	2327	6256
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	62632	1270	1253	2010	2343	6295
軸方向形状ファクタ						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	1.25	1.17	1.15	1.57	1.16	1.14
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	1.24	1.16	1.14	1.56	1.15	1.13

表5.4.2.7　IFA-565-6ガンマスキャン分析結果（0°方向）

核　種	グロスγ	Ru-103	Ru-106	Cs-134	Cs-137	Zr/Nb-95
エネルギーチャンネル	1	2	3	4	5	6
測定日	94-4-14	94-4-14	94-4-14	94-4-14	94-4-13	94-4-13
スキャニングステップmm	0.3					
カウント時間 sec/step	20					
検出器	Ge					
コリメータスリット幅 mm	0.3					
燃料ｽﾀｯｸ長 mm						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	1389.3	1389.3	1389.3	1389.6	1389.6	1389.6
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	1374.9	1375.2	1375.2	1375.2	1375.2	1374.9
最大カウント数 counts/sec	68874	1484	1432	3164	2747	7768
平均カウント数 counts/sec						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	54805	1263	1233	2052	2416	6788
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	55199	1272	1268	2071	2433	6834
軸方向形状ファクタ						
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含む	1.26	1.18	1.16	1.54	1.14	1.144
ｴﾝﾄﾞﾍﾟﾚｯﾄ含まず	1.25	1.17	1.13	1.53	1.13	1.137

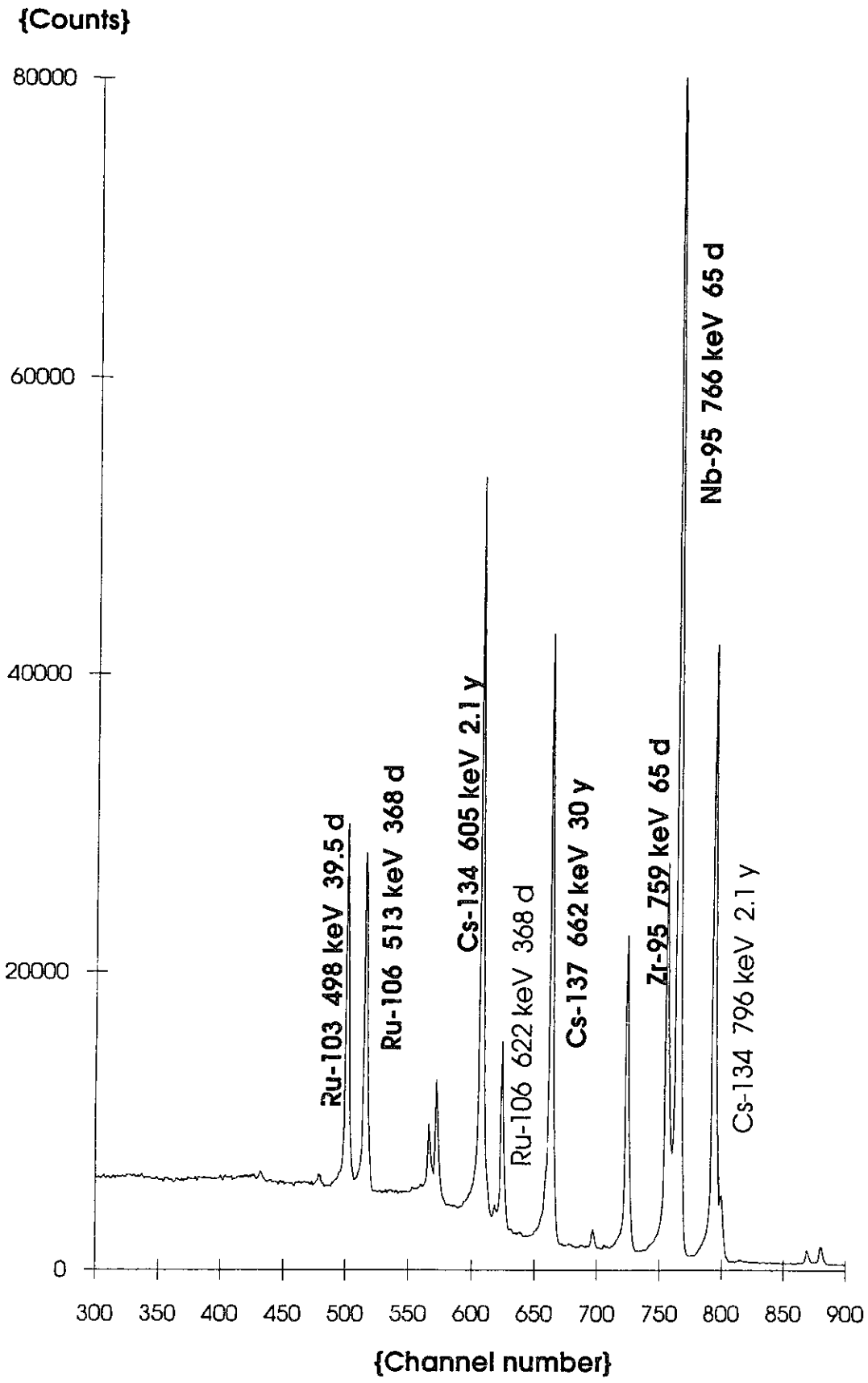


図5.4.2.1　　IFA-565-3の定点スペクトル

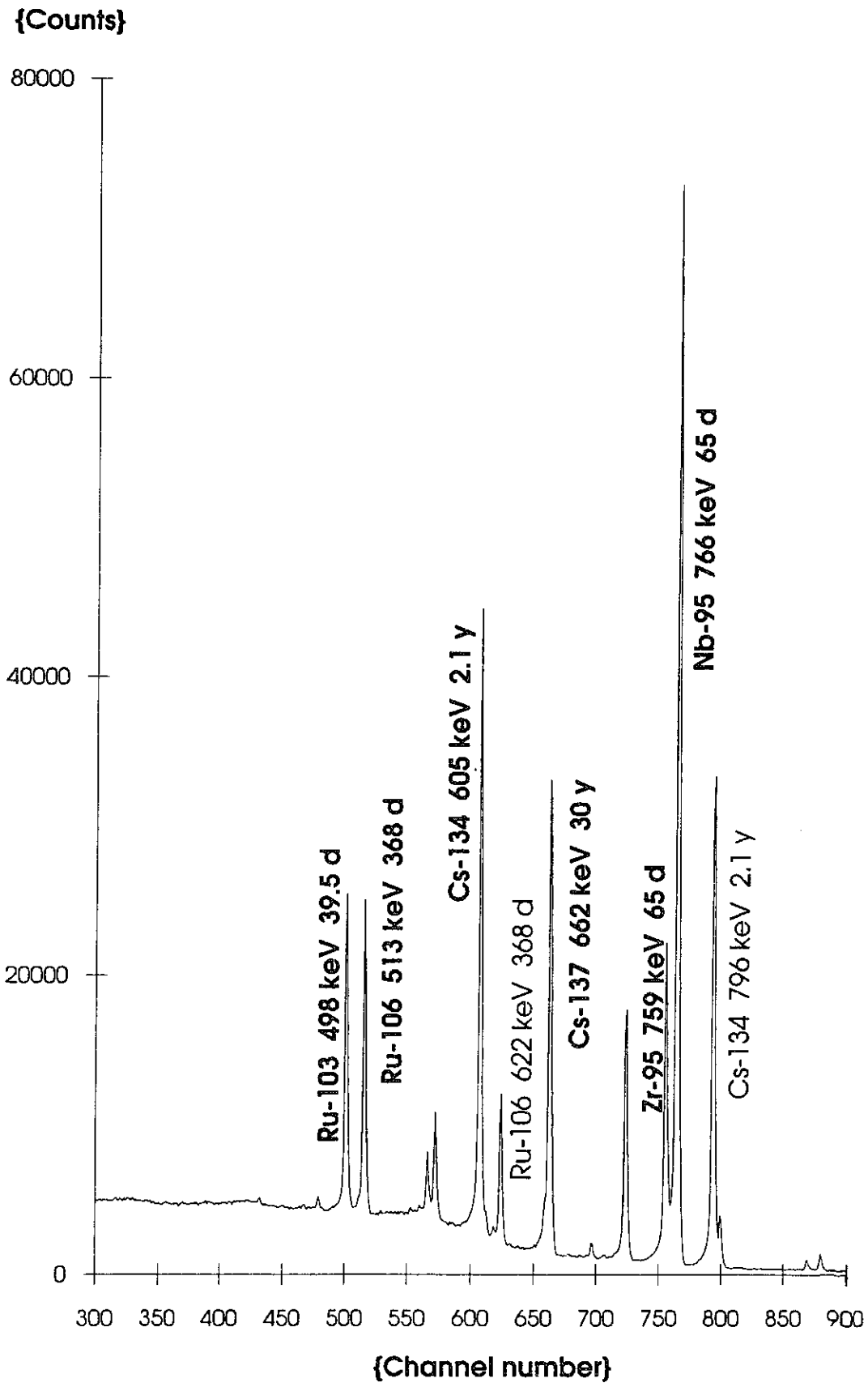


図5.4.2.2　　IFA-565-4の定点スペクトル

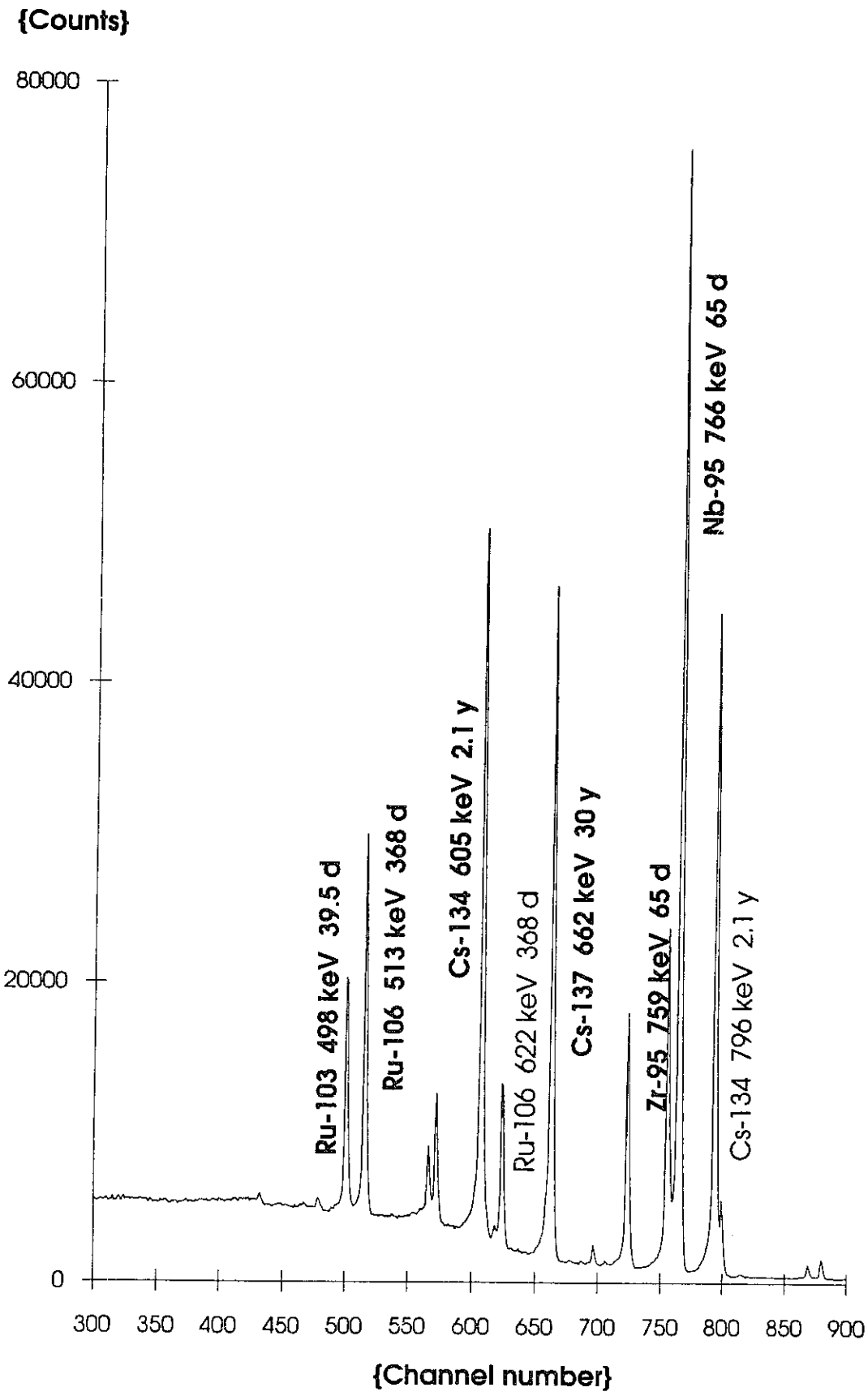


図5.4.2.3　　IFA-565-6の定点スペクトル

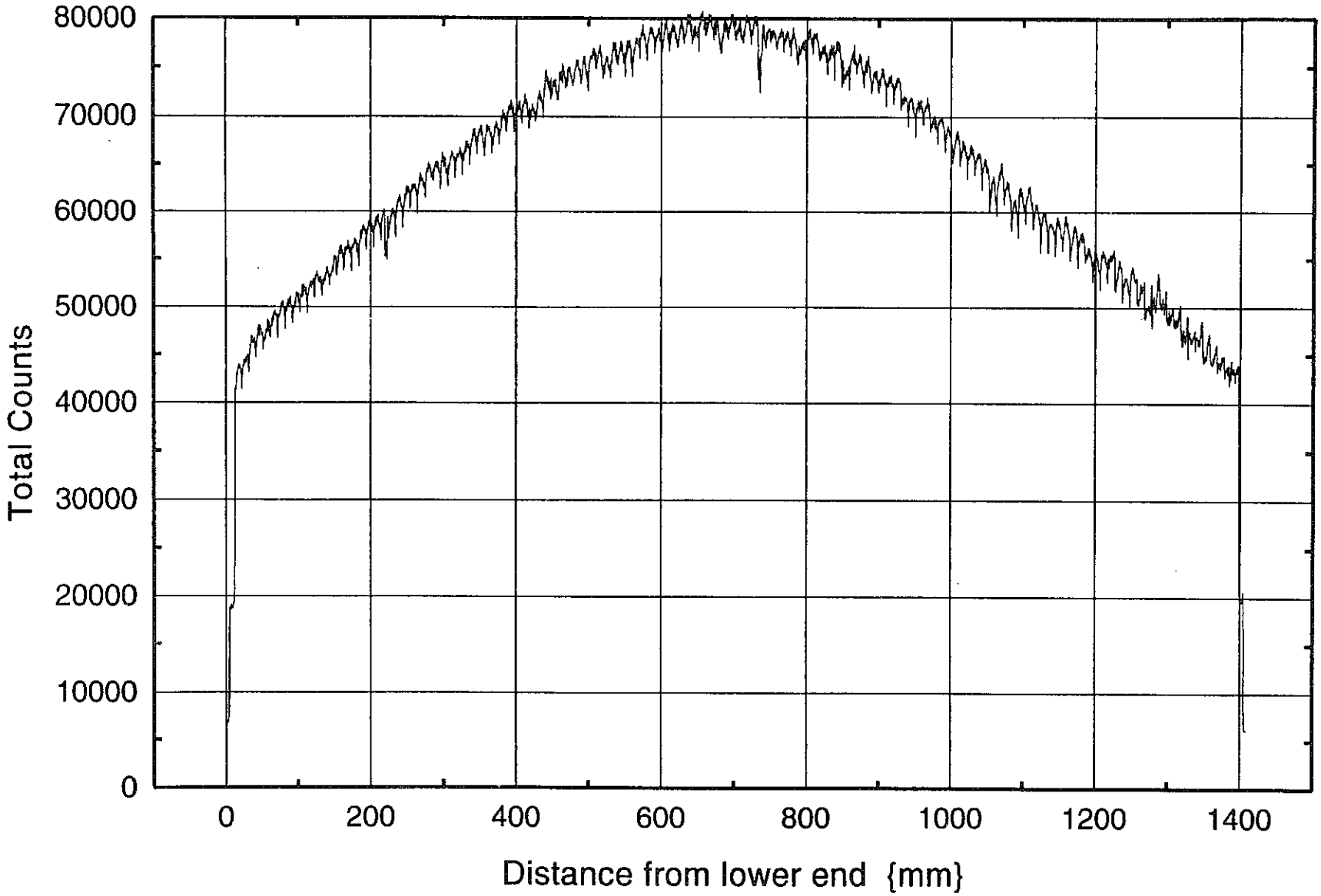


図5.4.2.4　IFA-565-3のグロスガンマスキャン

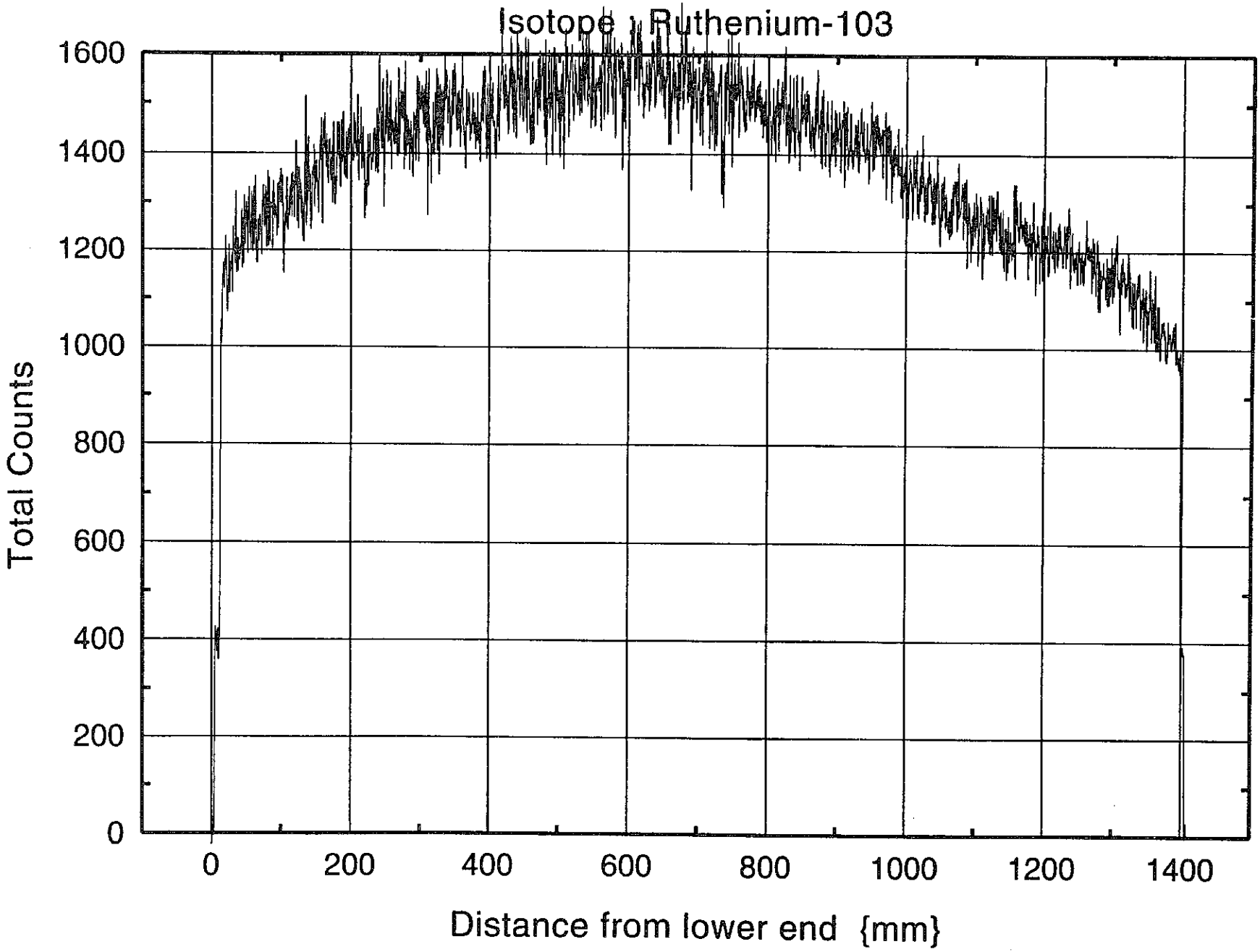


図5.4.2.5　IFA-565-3のRu-103ガンマスキャン

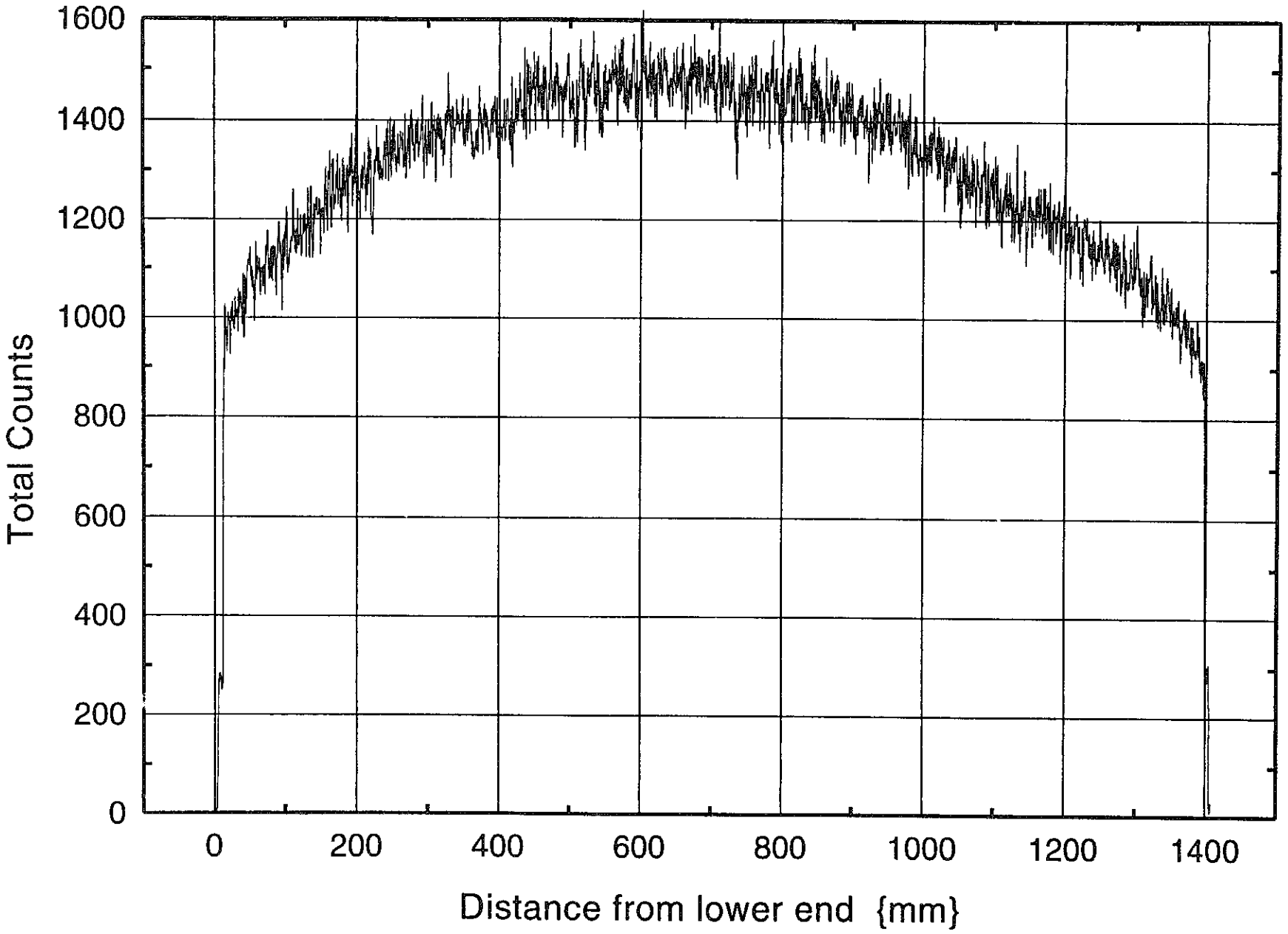


図5.4.2.6　IFA-565-3のRu-106ガンマスキャン

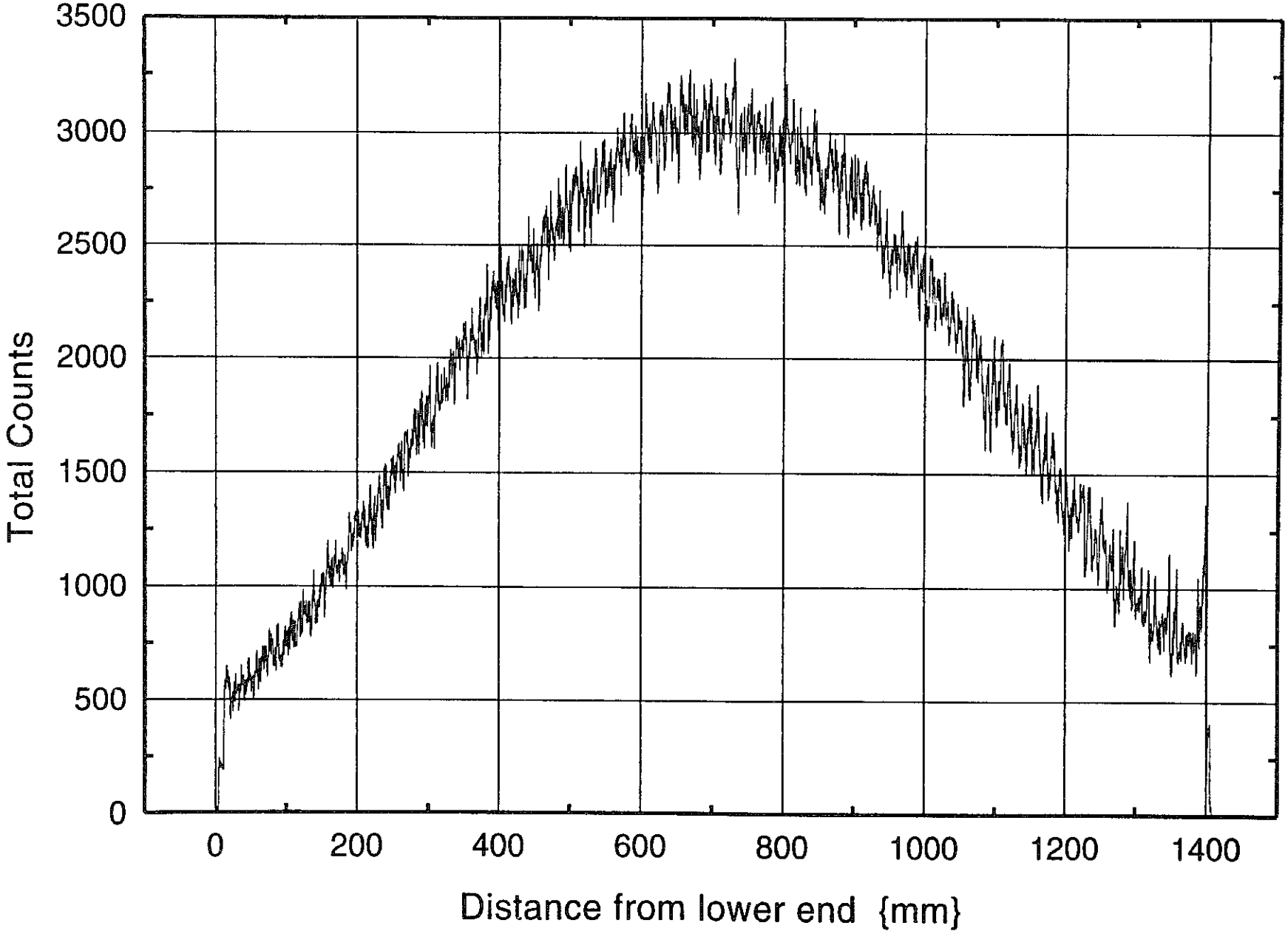


図5.4.2.7　IFA-565-3のCs-134ガンマスキャン

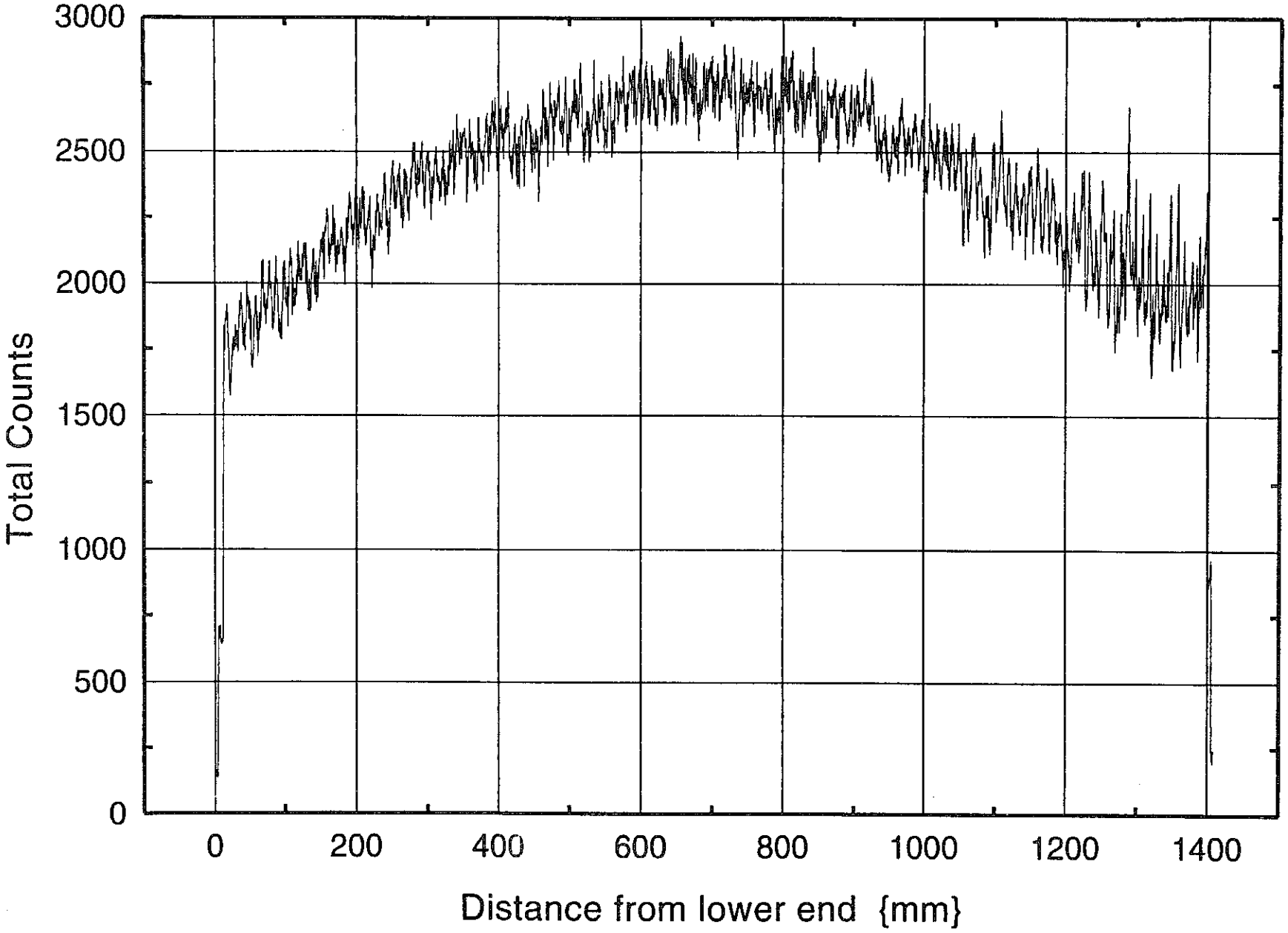


図5.4.2.8　IFA-565-3のCs-137ガンマスキャン

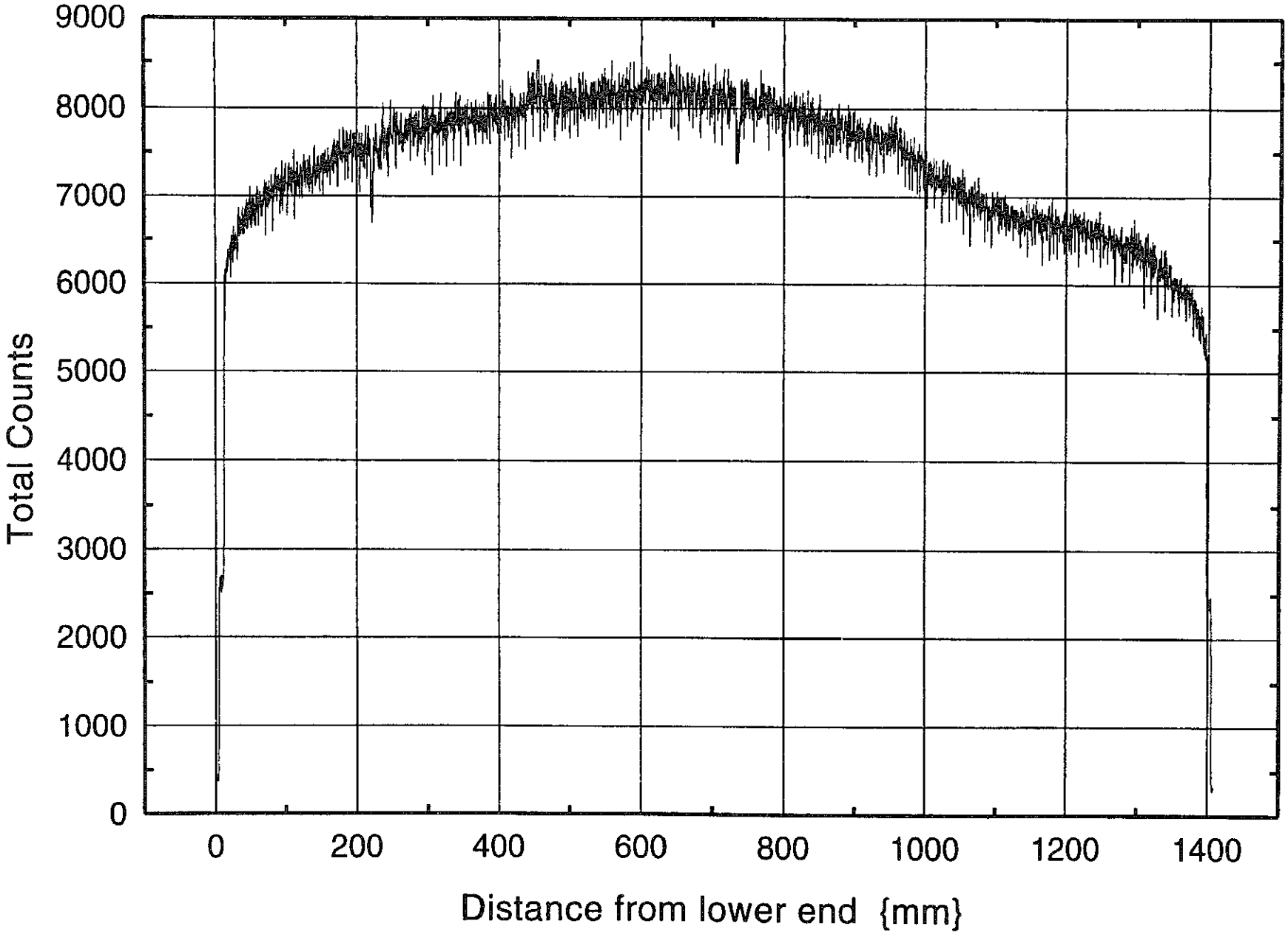


図5.4.2.9　IFA-565-3のZr/Nb-95ガンマスキャン

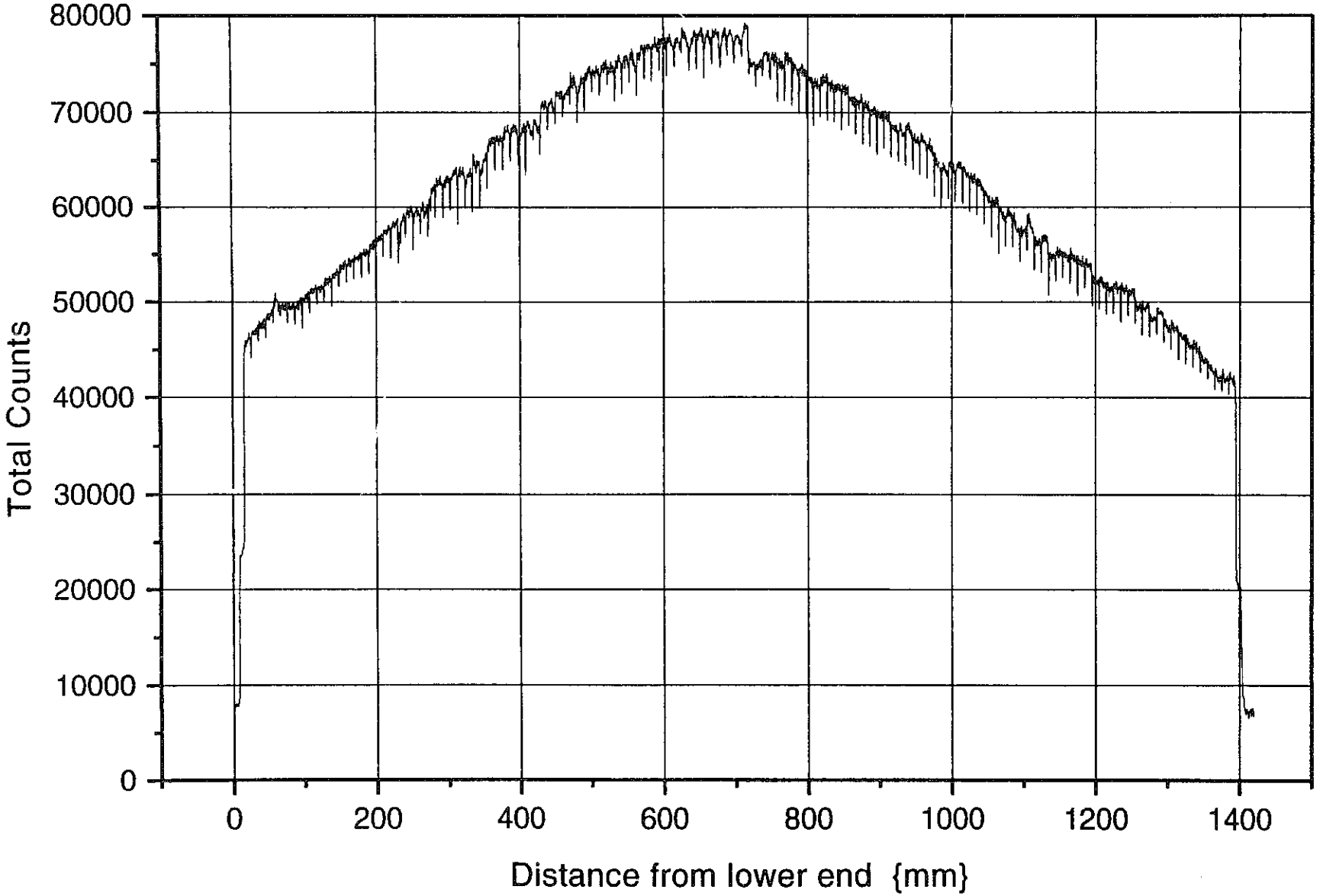


図5.4.2.10　IFA-565-4のグロスガンマスキャン

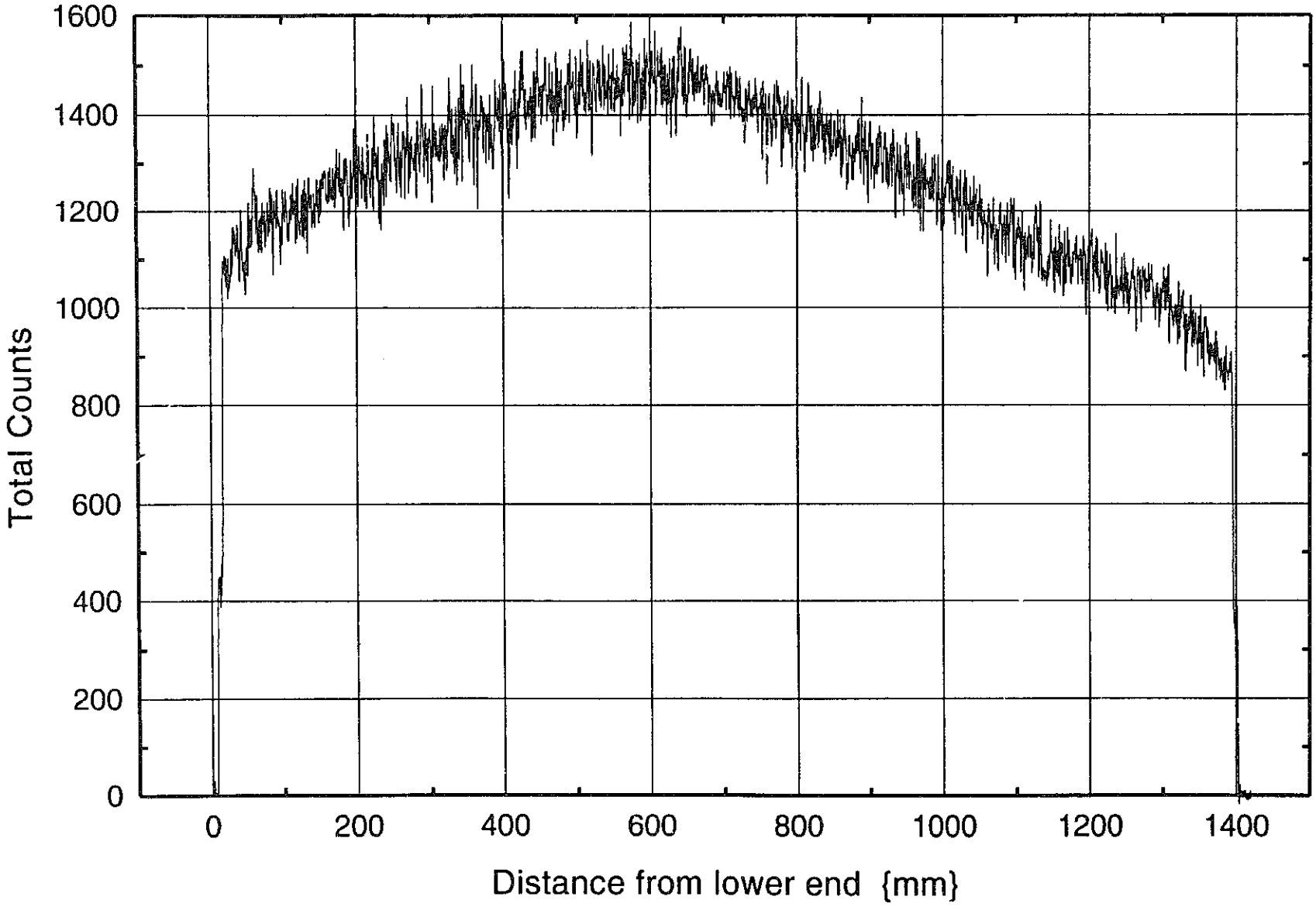


図5.4.2.11　IFA-565-4のRu-103ガンマスキャン

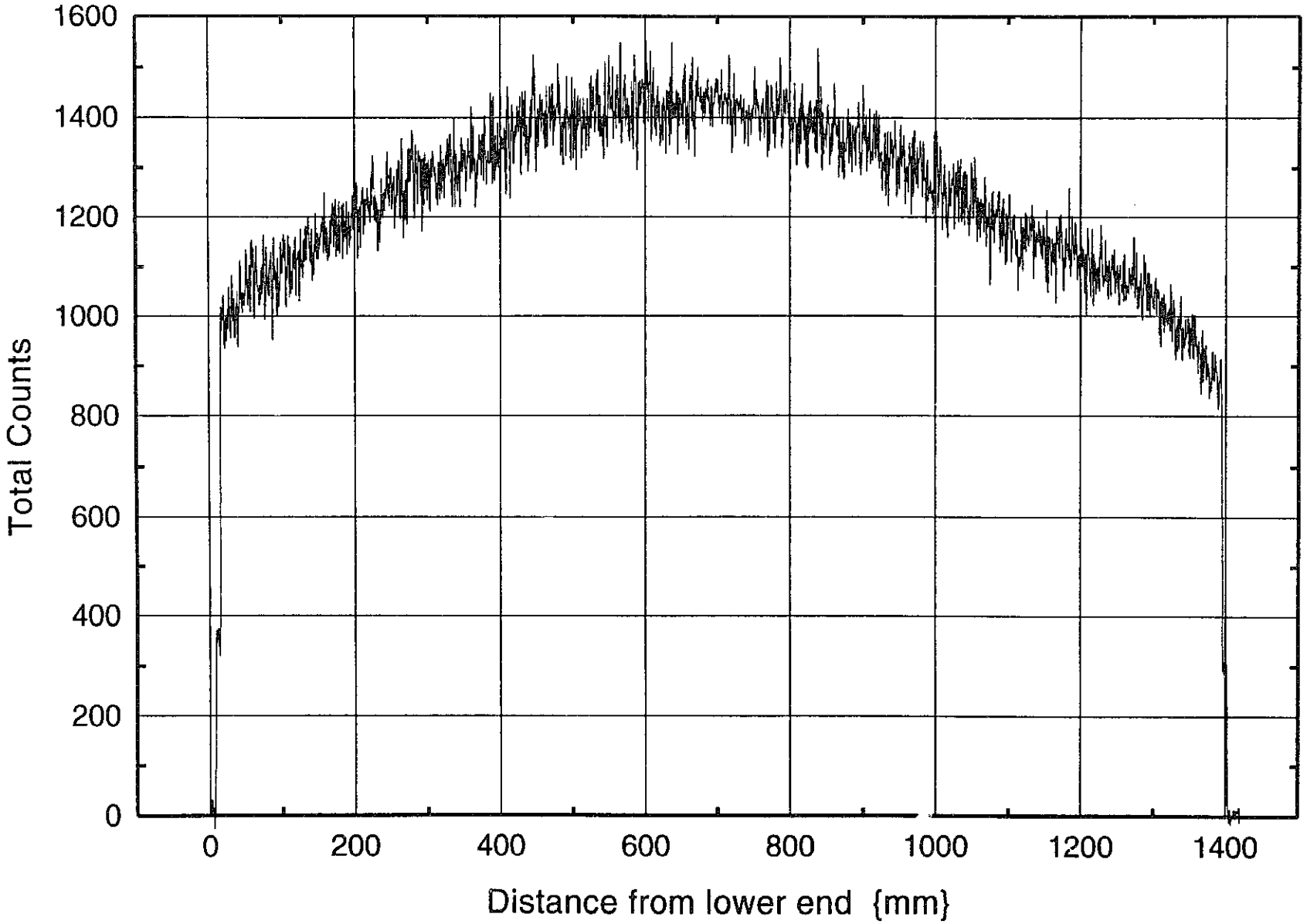


図5.4.2.12　IFA-565-4のRu-106ガンマスキャン

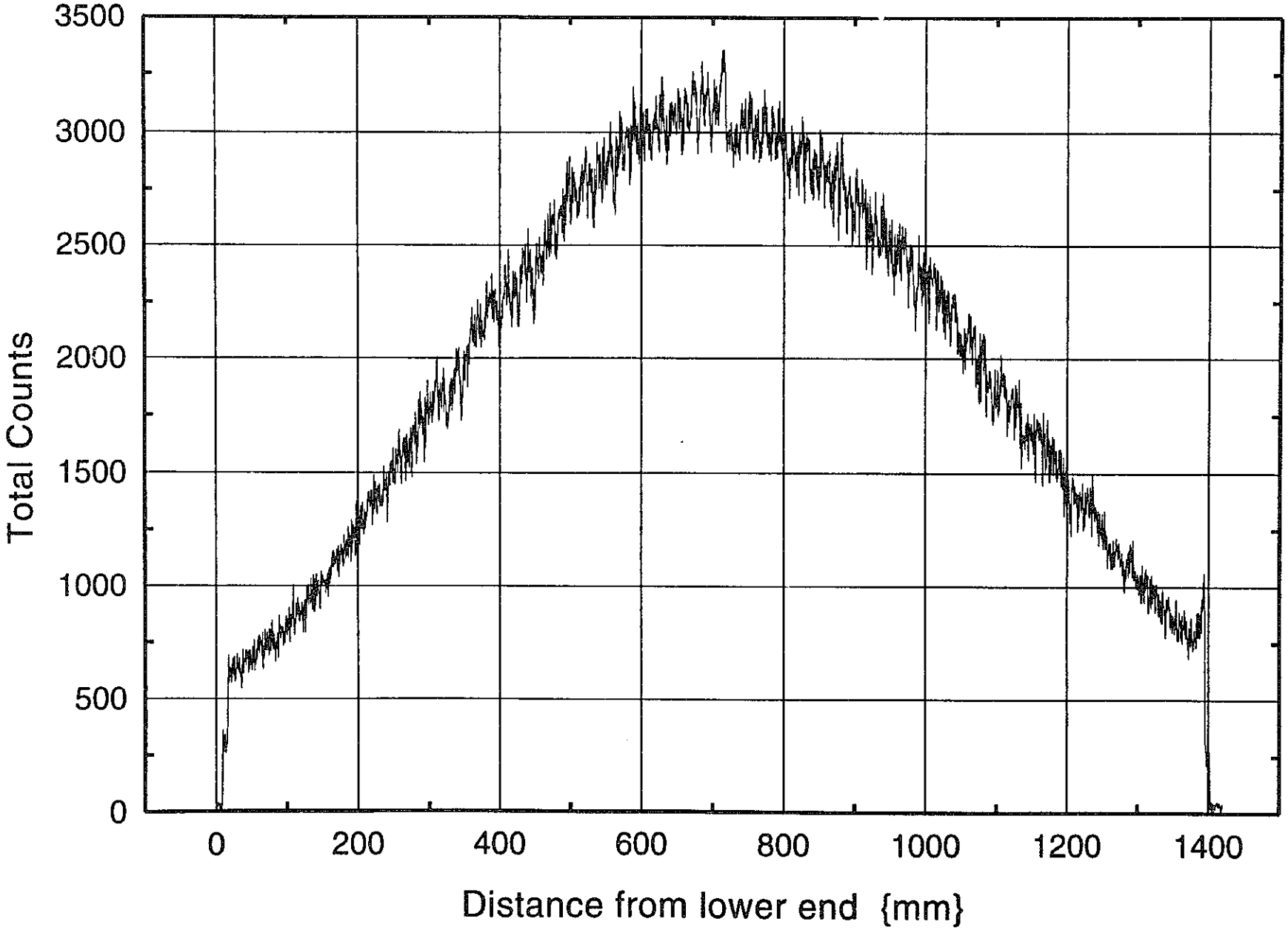


図5.4.2.13　IFA-565-4のCs-134ガンマスキャン

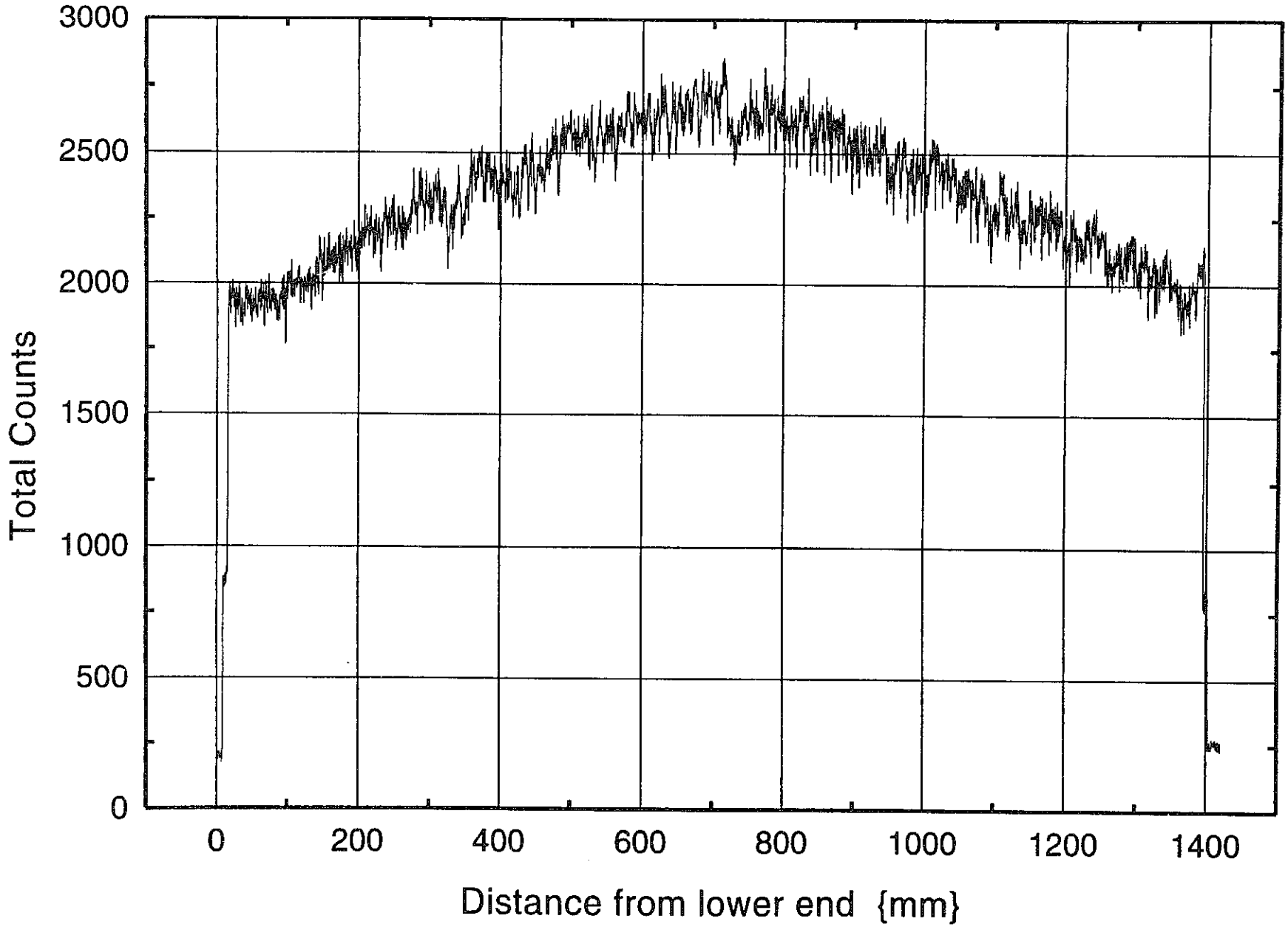


図5.4.2.14　IFA-565-4のCs-137ガンマスキャン

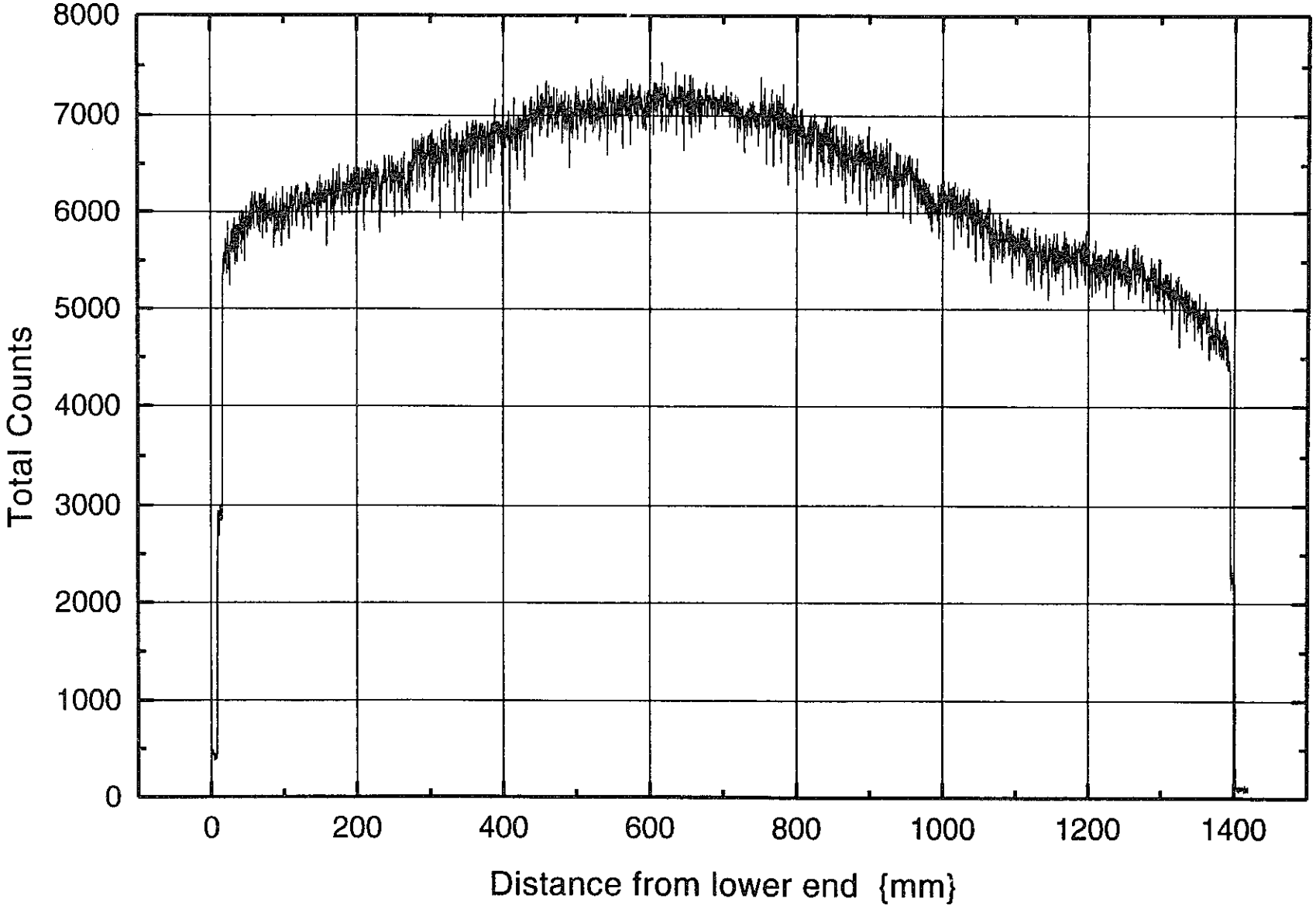


図5.4.2.15　IFA-565-4のZr/Nb-95ガンマスキャン

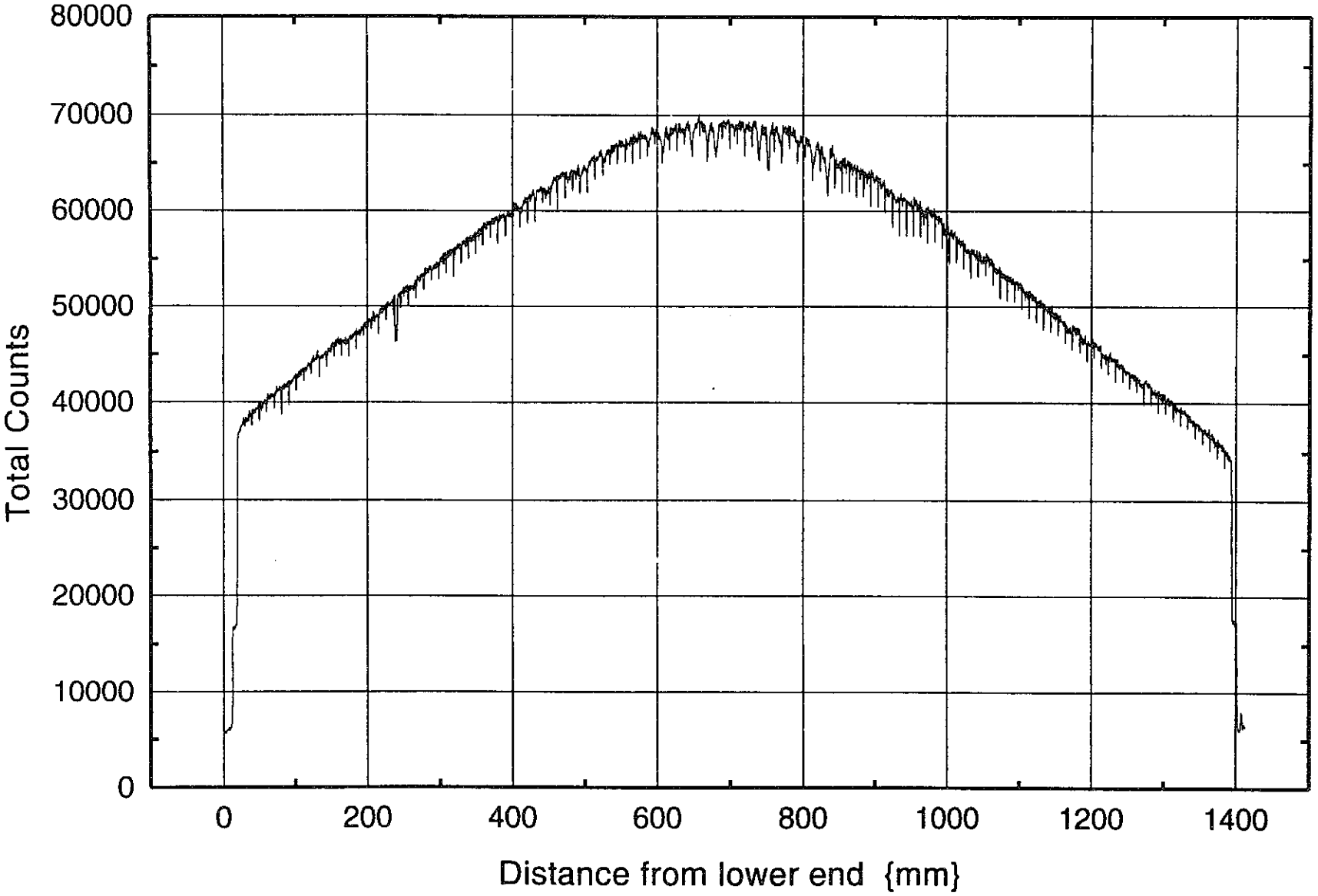


図5.4.2.16　IFA-565-6のグロスガンマスキャン

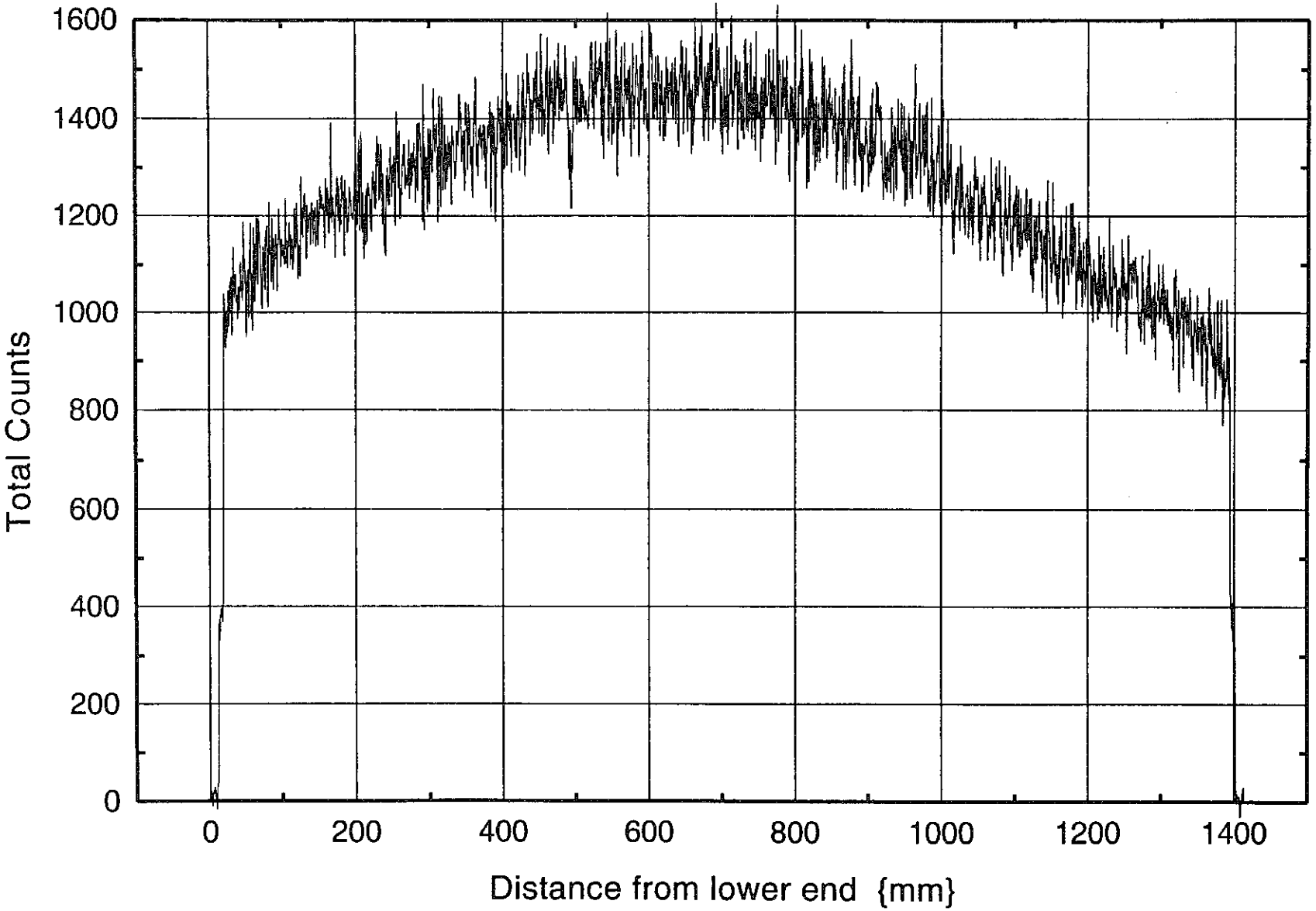


図5.4.2.17　IFA-565-6のRu-103ガンマスキャン

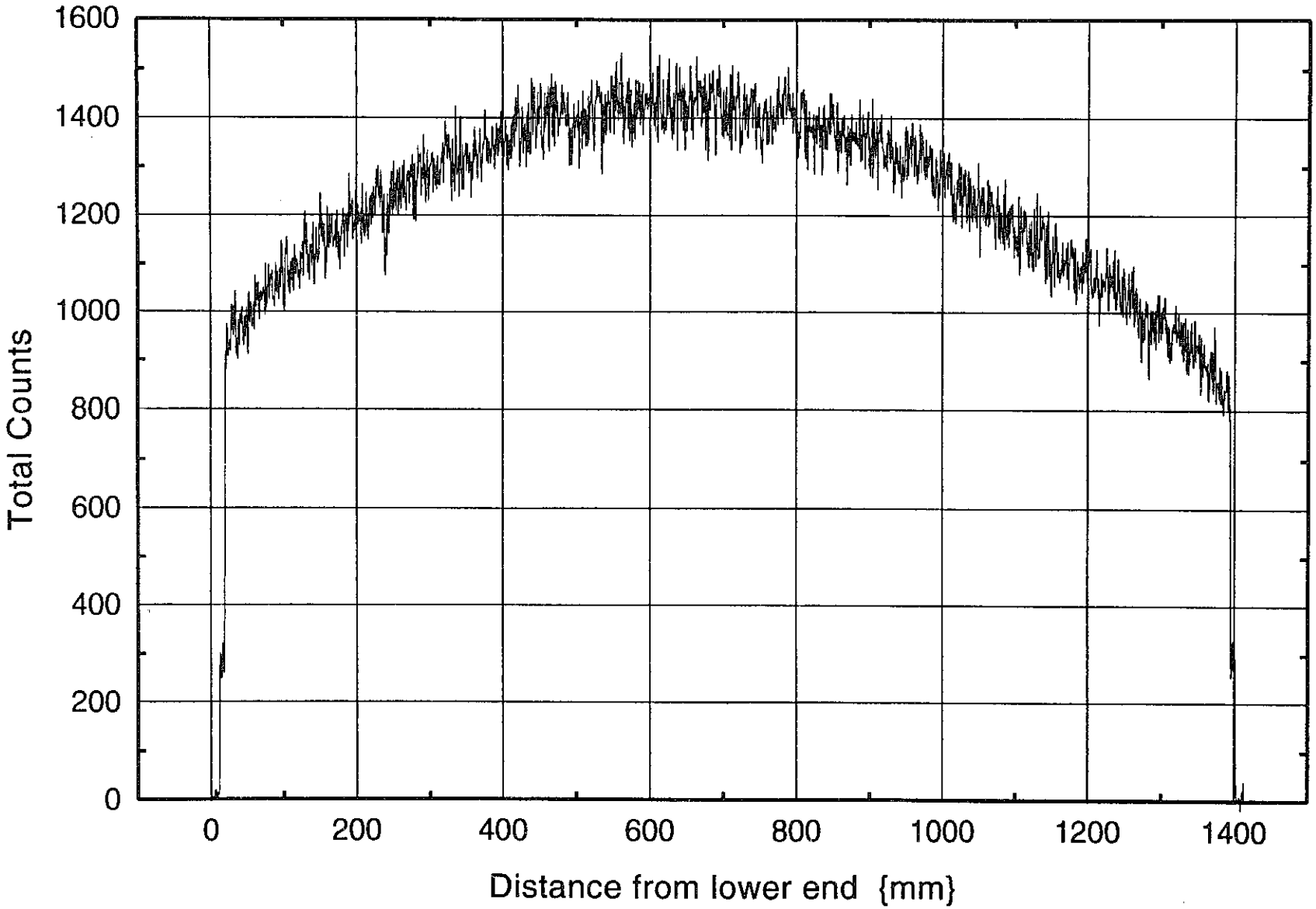


図5.4.2.18　IFA-565-6のRu-106ガンマスキャン

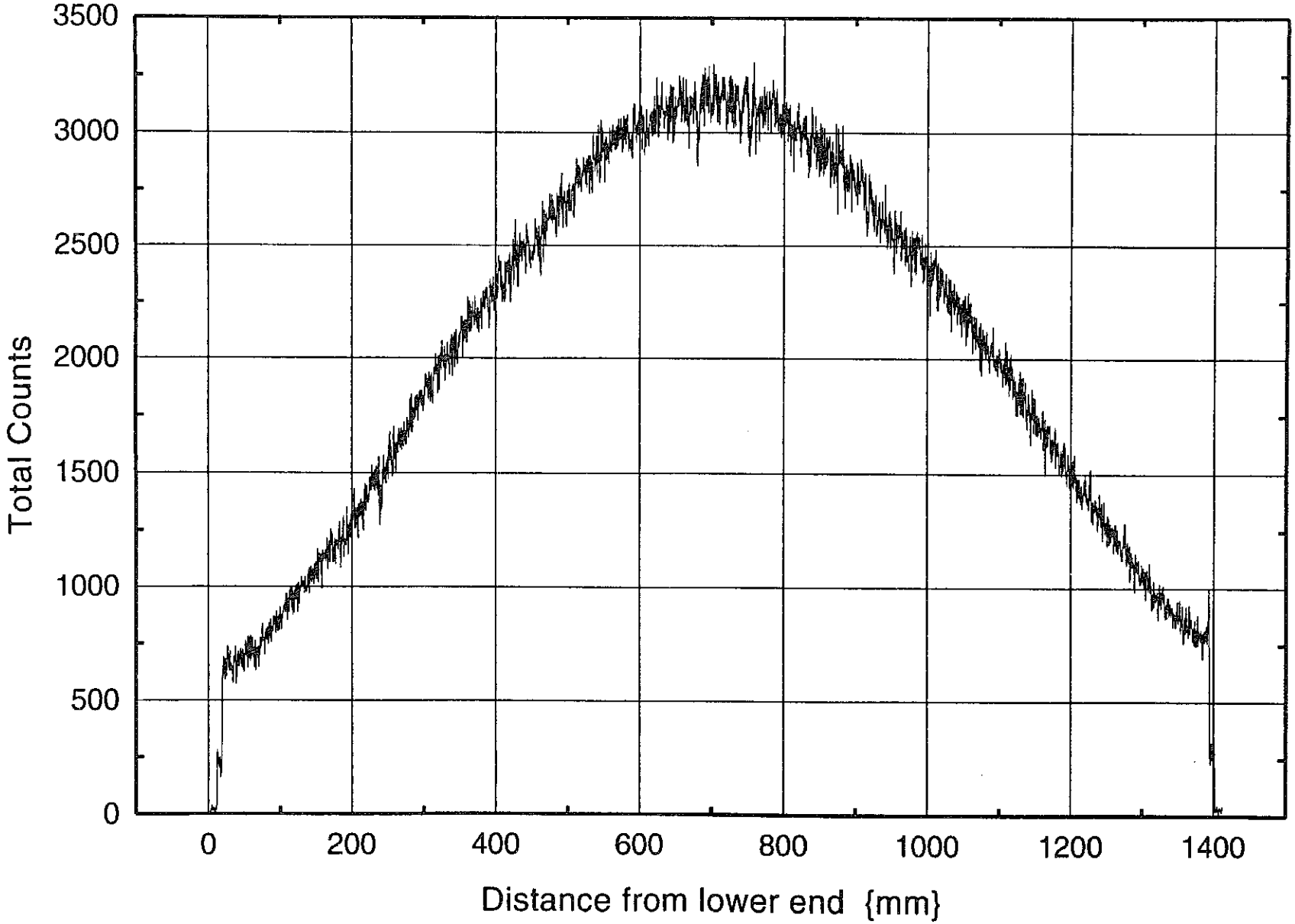


図5.4.2.19　IFA-565-6のCs-134ガンマスキャン

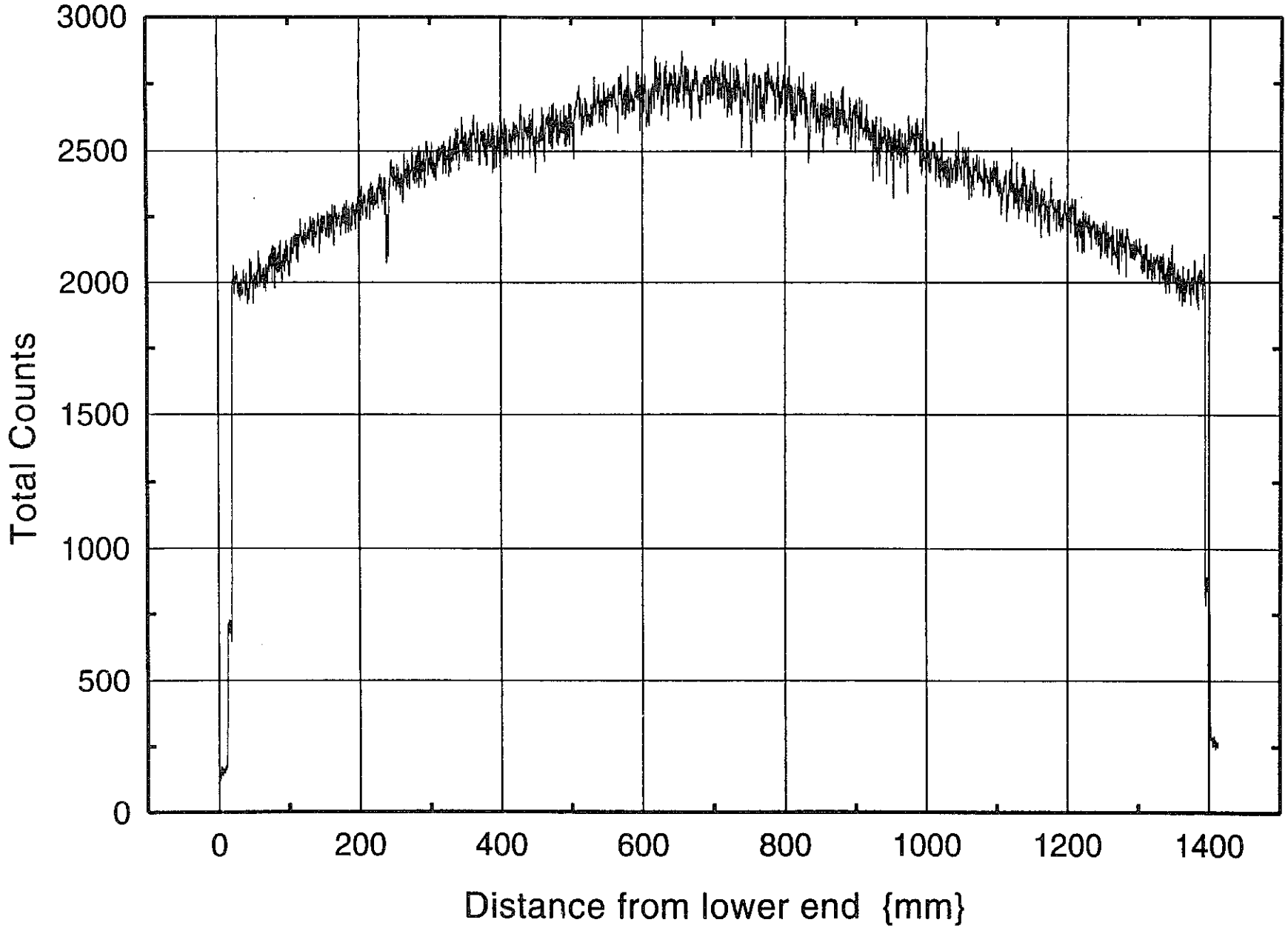


図5.4.2.20　IFA-565-6のCs-137ガンマスキャン

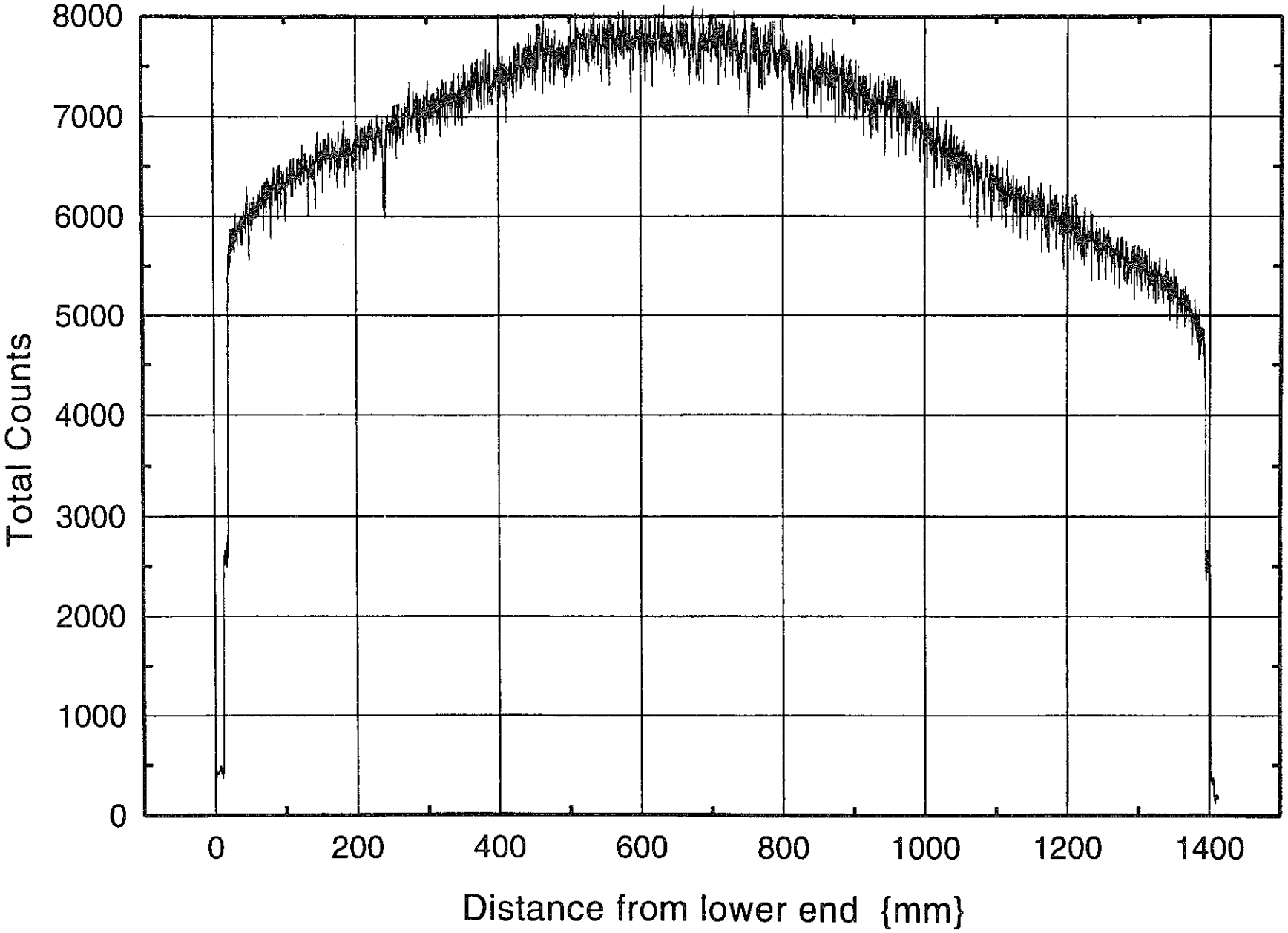


図5.4.2.21　　IFA-565-6のZr/Nb-95ガンマスキャン

5.5 渦電流探傷試験結果

IFA-565-3, 4, 6について、渦電流探傷試験を実施した。

測定方法

渦電流探傷試験は、検査される材料の中に生じる誘導電流と材料の相互作用を観察するものである。

この過程は、次のように生じる。周期的に変化している磁場が電気伝導体を横切るとき、渦電流がファラディの法則とオームの法則に従って生じる。誘導電流は、加えられた場界に対抗するように自分自身の磁場を形成する。平衡磁界は、コイルインピーダンスの変化の結果、減少する。コイルインピーダンスをモニタリングすることによって、試料の電気的、磁気的及び幾何学的な特性を測定する。

渦電流は、磁束に対し垂直に循環する誘導電流の閉じられた輪である。通常、コイルの巻き上げに対して平行に、そして、表面に対して平行である。渦電流の流れは、誘導する磁界の範囲に制限される。

材料の中への侵入の深さは、材料の電気抵抗、磁気の浸透性及びテスト周波数により、次式で与えられる。

$$\delta = 50\,[\,\rho / f^{*}ur]^{0.5}$$

ここで、ρは電気抵抗、fはテスト周波数、urは相対的な磁気の浸透性である。
渦電流は、材料の中への深度によっても位相が遅れる。位相の遅れは、浸透の深さに依存する幾つかの材料特性により、次式で与えられる。

$$\beta = x / \delta$$

ここで、x は表面下の距離である。

使用した装置は、市販の渦電流探傷試験装置（C.N.S. Instruments Ltd., London, unit type 702）で差動テストコイルが測定する燃料ロッドを取り巻いているものである。

試験に使用した周波数は、100kHzであり、コイルの径は、IFA-514については13.1mm、

IFA-565については15.8mmである。コイルは垂直のプロフィロメータのベンチに据え付けられ、燃料棒の長さに沿ってIFA-514が2.00mm/s、IFA-565が5.00mm/sの一定の速度で測定した。

IFA-514はゲイン1.4、位相4.5、IFA-565はゲイン4、位相3.25を選んだ。ゲイン調整は欠陥の感度で、位相は特別な欠陥を探知する感度で、最適になるように決定した。

試験結果

IFA-514及びIFA-565からの燃料棒計6本の渦電流探傷試験結果を図5.5.1～6に、ダミーロッドの渦電流探傷試験結果を図5.5.7に、位相及び振幅信号で示す。図中、上の曲線は、電圧位相の出力信号であり、下の曲線は、アンプの電圧振幅の出力信号である。左端を燃料ロッド上端とした。装置の出力を連続紙に記録した。

端栓、プレナムスプリング、V溝及び溶接に起因した一般的なエンド効果に加えて、軸方向2カ所に渦電流の膨らみが、電圧と位相の両曲線に、燃料ロッドのおおよそ1/3及び2/3位置に観察された。

この軸方向2カ所の膨らみは、スペーサにより燃料棒を支持している部位と一致しており、被覆管の酸化膜形成（IFA-565の場合、30~60 μm）か、あるいは、被覆管肉厚の減少によるものと考えられる。この現象は、直径測定結果でも観察されている。

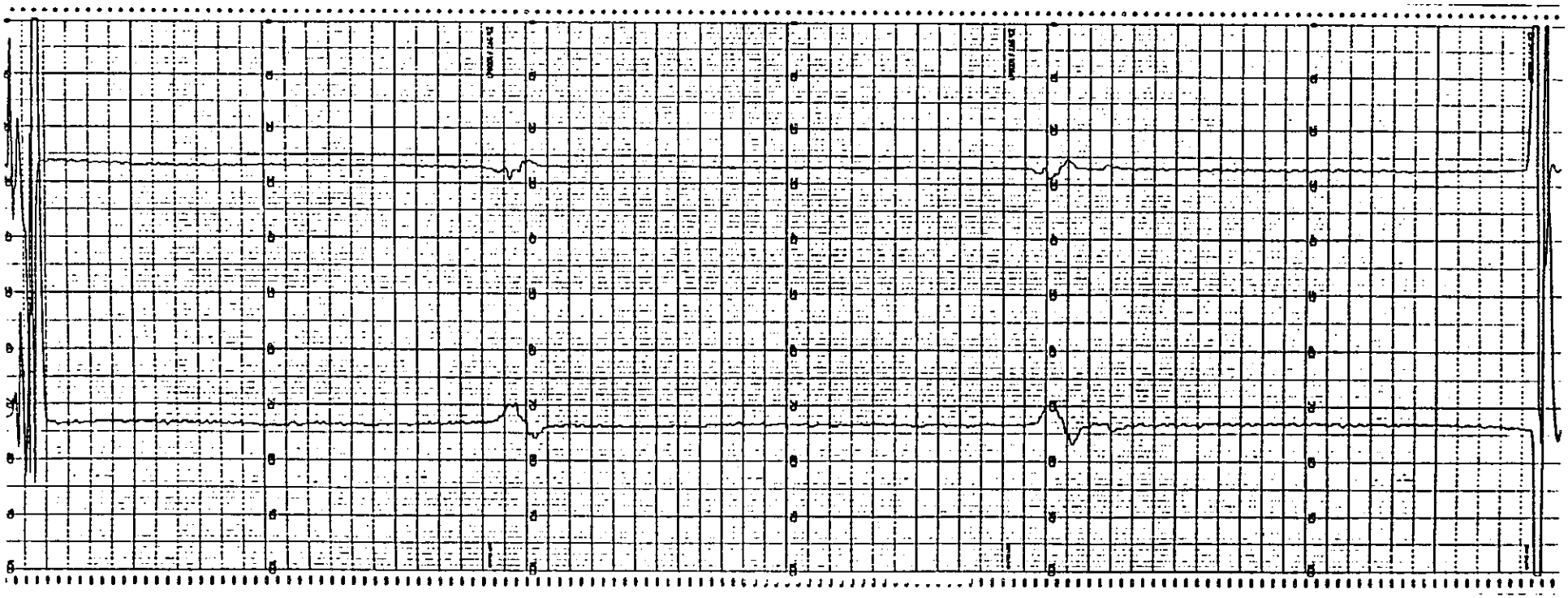


図5.5.1　渦電流探傷結果 IFA-514-3

Lower Curve: Phase Signal, Upper Curve: Amplitude Signal
Gain: 1.4, Phase: 4.25
Axial Scale: 20 mm/Sc.div. Lower end to the Left

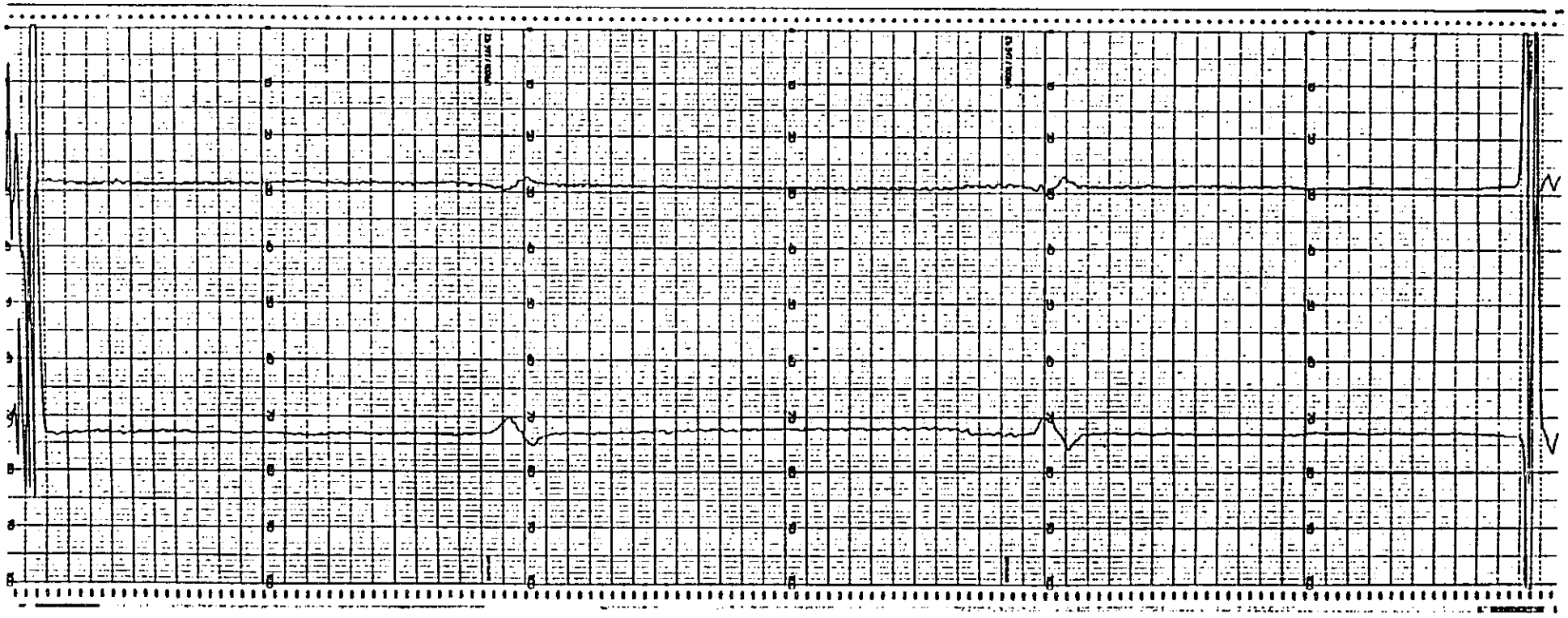


図5.5.2　渦電流探傷結果 IFA-514-4

Lower Curve: Phase Signal. Upper Curve: Amplitude Signal
Gain: 1.4, Phase: 4.25
Axial Scale: 20 mm/Sc.div. Lower end to the Left

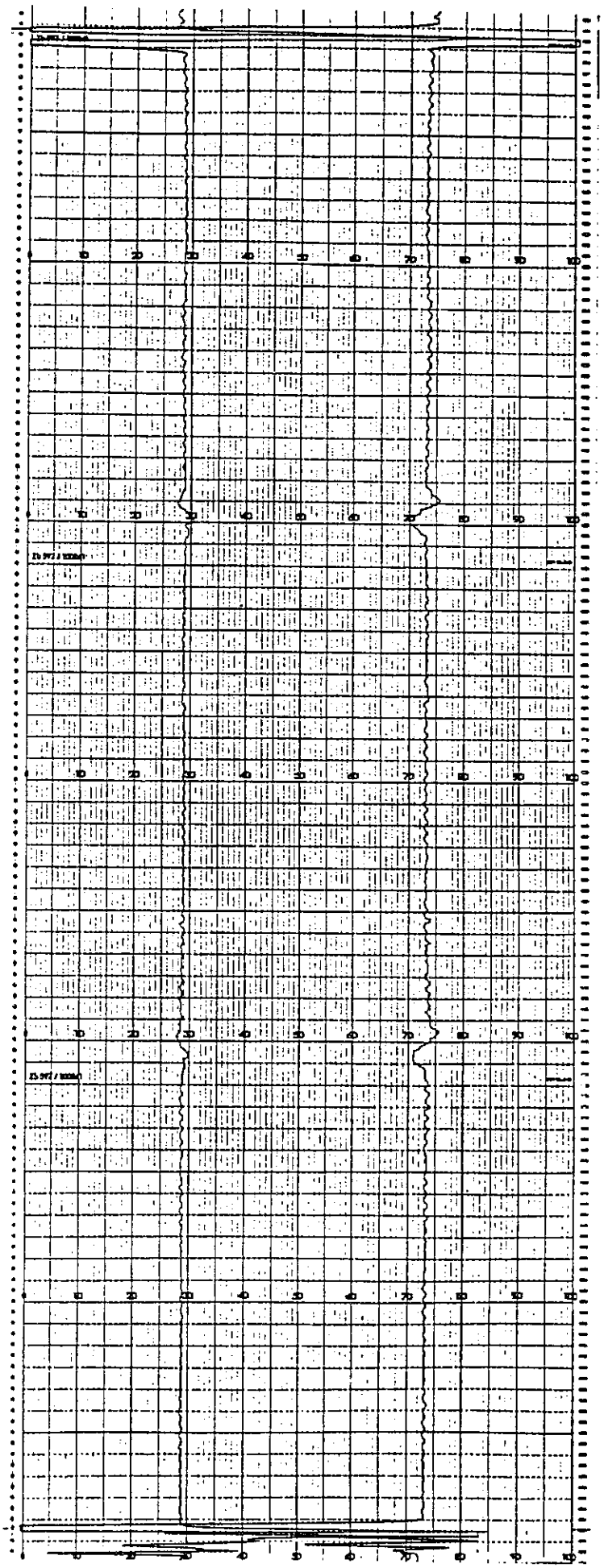
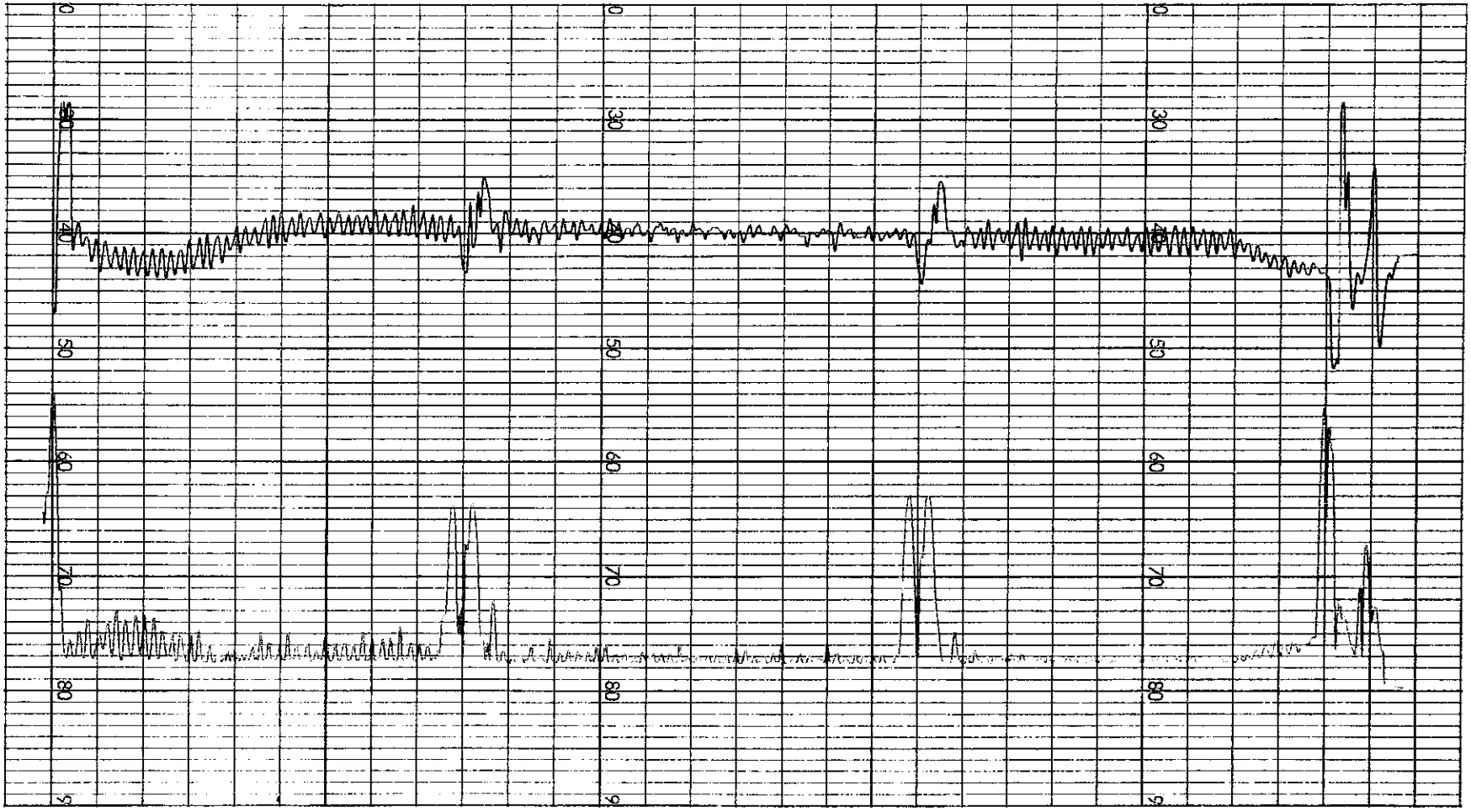


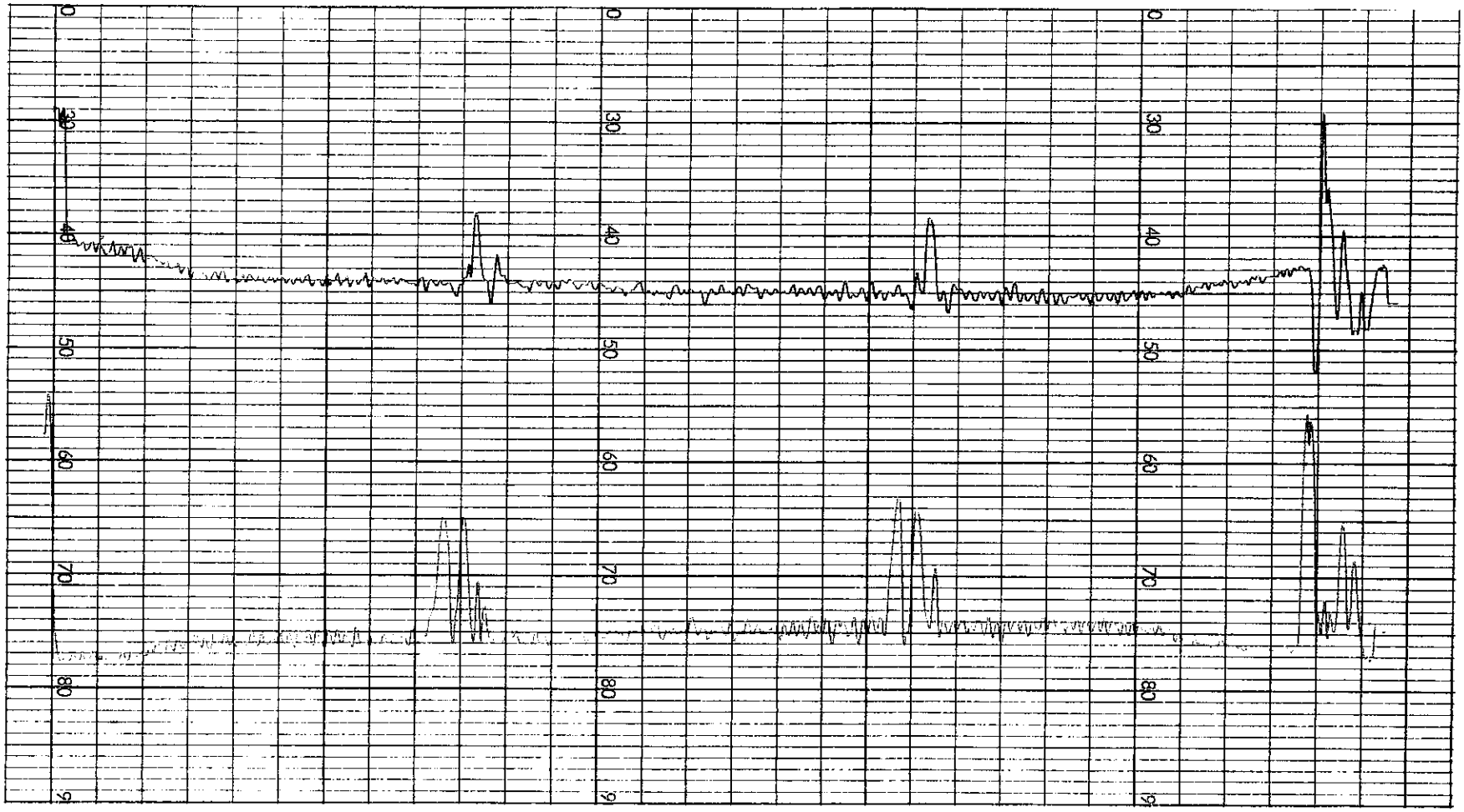
図5.5.3　渦電流探傷結果 IFA-514-6

Lower Curve: Phase Signal. Upper Curve: Amplitude Signal
Gain: 1.4, Phase: 4.25
Axial Scale: 20 mm/Sc.div. Lower end to the Left



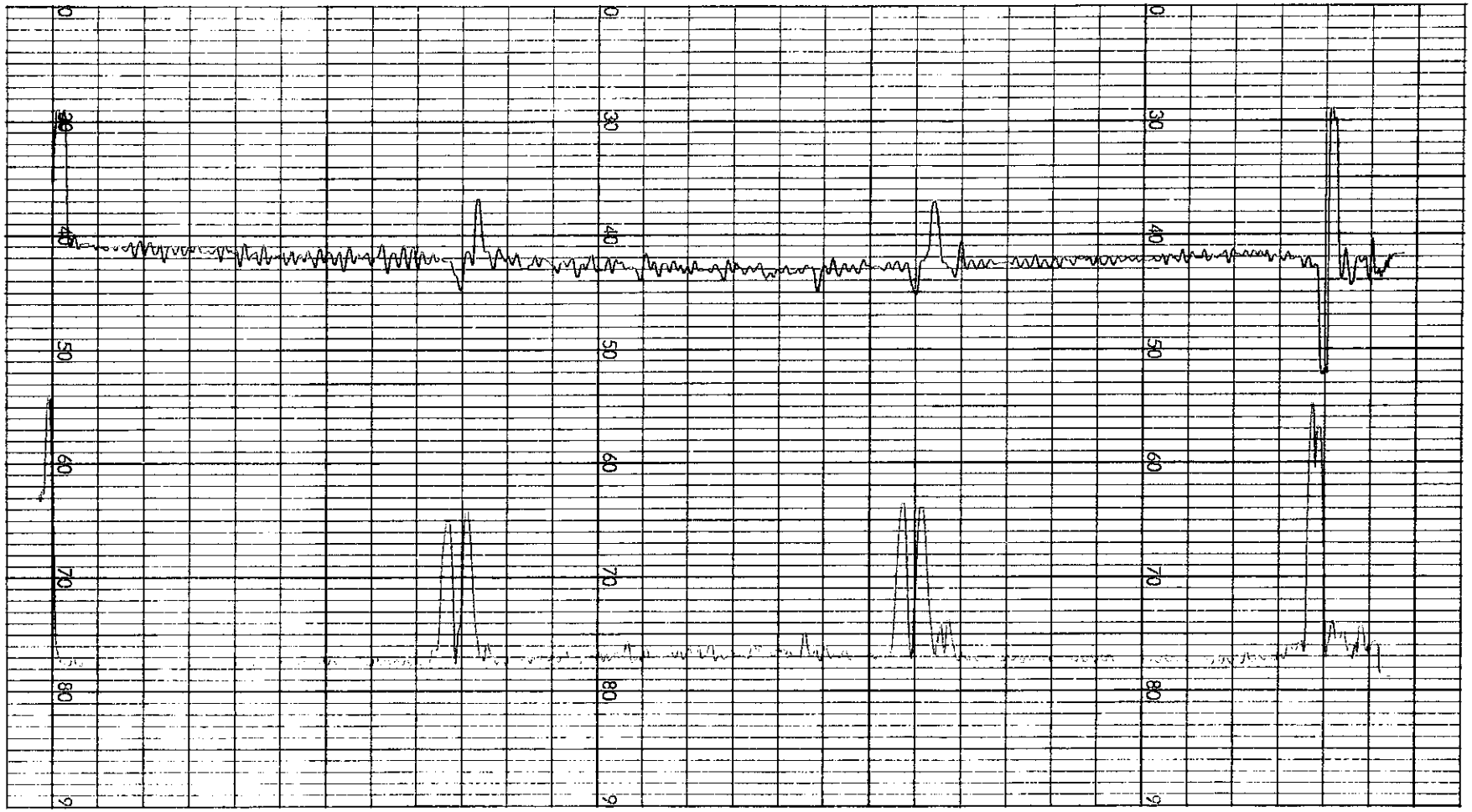
Eddy Current Scan of Rod No. 3, IFA-565
Upper Curve : Phase Signal, Lower Curve : Amplitude Signal
Gain : 4, Phase : 3.25
Axial Scale : 50.3 mm/Sc. div. Lower End to the Right

図5.5.4　渦電流探傷結果 IFA-565-3



Eddy Current Scan of Rod No. 4, IFA-565
Upper Curve : Phase Signal, Lower Curve : Amplitude Signal
Gain : 4, Phase : 3.25
Axial Scale : 50.3 mm/Sc. div. Lower End to the Right

図5.5.5　渦電流探傷結果 IFA-565-4



Eddy Current Scan of Rod No. 6, IFA-565
Upper Curve : Phase Signal, Lower Curve : Amplitude Signal
Gain : 4, Phase : 3.25
Axial Scale : 50.3 mm/Sc. div. Lower End to the Right

図5.5.6　渦電流探傷結果 IFA-565-6

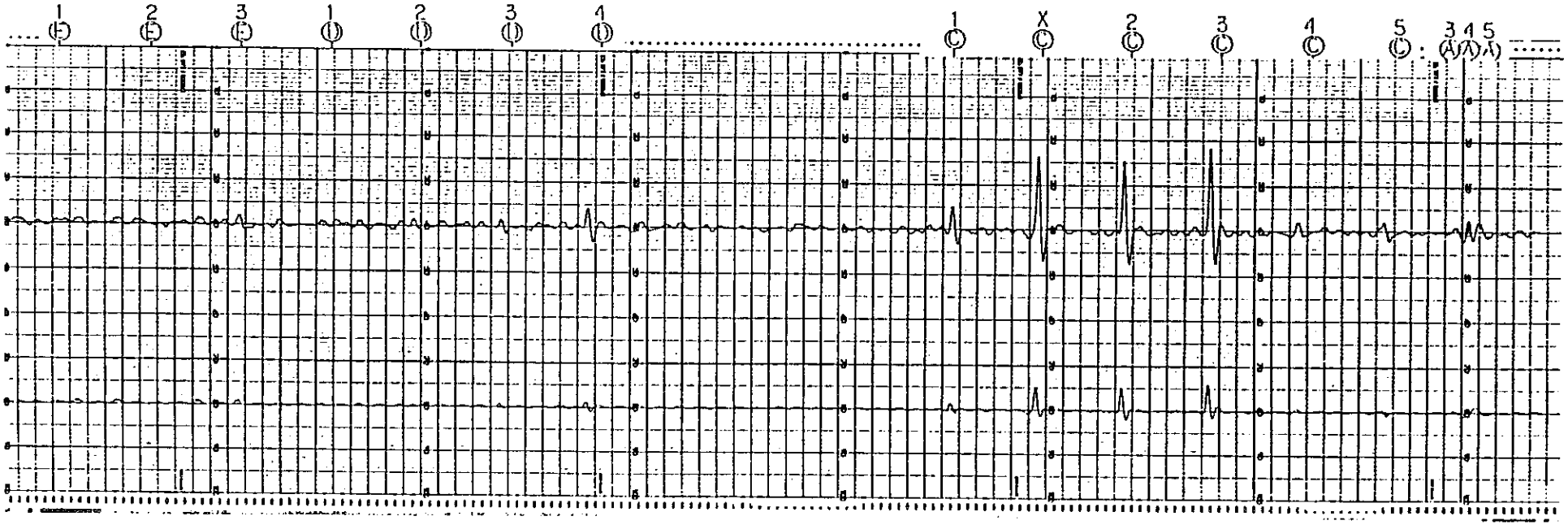


図5.5.7　ダミーロッドの渦電流探傷結果

Upper Curve: Phase Signal. Lower Curve: Amplitude Signal
Gain: 1,4　Phase: 4,25　Axial Scale: 10 mm/Sc. div.

5.6 中性子ラジオグラフィ試験結果

IFA-565-3, 4, 6の中性子ラジオグラフィを採取した。

測定方法

JEEPⅡ炉の中性子ラジオグラフィ施設は、10インチの水平なビームチャンネルからなり円錐のコリメータが差し込まれている。内面の口径、狭い方のコリメータ端は、直径1cmである。内面の端から活性化されたフォイルの位置までの距離は、390mmである。Dy-フォイルと共に装填されたカセットをアルミニウムのカセットの中に持ち込み、その中に燃料棒を挿入する。照射時間は、コリメータの出口にあるシャッターによってコントロールする。照射後、活性化されたDy-フォイルを取り出し、X線フィルムに接触させる。

照射時間は、燃料の寸法と研究対象によるが、IFA-565の場合、照射時間は3分とした。フィルムの露光時間は約20時間である。

燃料全長をカバーするため、5つの分割写真を撮った。1枚の写真は、燃料棒長さで21cmをカバーしている。各写真は、15cm動かして撮影しており、おおよそ6cmオーバーラップしている。

写真は、0度方向と90度方向から撮影した。

中性子ラジオグラフィの複写は困難であり、細かい部分のロスが起こりやすいので、オリジナルネガ（Agafa Gevaert Industrial X-ray Film D4）から、ネガのコピー（Kodak X-Omat Duplication Film）を作成した。3本の燃料ロッドについて2方向（0°、90°）軸方向に10枚の計60枚の写真を撮影した。

中性子ラジオグラフィ写真のリストを表5.6.1～2に示す。表5.6.1には照射時間を、表5.6.2には燃料ロッド位置の関係も合わせて示している。

写真のオーバーラップが容易に分かるように、各写真の下部左端か上部右端、あるいは両方に点がマークされている。ある写真の上部右端の点と、次の写真の下部左端の点は、同一の燃料棒軸方向位置を示している。

測定結果

(1)IFA-514

ほとんどのペレット／ペレット間ギャップは非常に狭いことがわかった。（0.25mm以下であった）主な結果を表5.6.3にまとめる。

(2)IFA-565

・IFA-565-4のスタック下部側で、中心空孔部にペレットNo.5の中央部より上でペレットの小片は、たぶん中心空孔部のかけが下部側へ移動したものであろう。これは、他にも2、3箇所みることができる。

・IFA-565-6のスタック下部側で、中心空孔部にペレットNo.12の上でペレットの小片がみられる。この小片は、上記したがたぶん中心空孔部のかけが下部側へ移動したものであろう。これは他にも多数みることができる。

・主な結果を表5.6.4にまとめる。

表5.6.1　中性子ラジオグラフ照射時間

燃料ロッドNo.	角度*	図番	照射時間 min
IFA-565-3	0° 90°	No.1~10 No.1~10	4 3
IFA-565-4	0° 90°	No.1~10 No.1~10	4 4
IFA-565-6	0° 90°	No.1~10 No.1~10	4 4

＊0°は任意方向

表5.6.2　中性子ラジオグラフと燃料ロッド位置

燃料ロッドNo.	写真No.	カバーしているおおよその位置
IFA-565-3 IFA-565-4 IFA-565-6 （0° 90°）	No.1	-10 ～ 11 cm *
	No.2	5 ～ 26 cm
	No.3	22 ～ 43 cm
	No.4	38 ～ 59 cm
	No.5	54 ～ 75 cm
	No.6	70 ～ 91 cm
	No.7	87 ～ 108 cm
	No.8	103 ～ 124 cm
	No.9	119 ～ 140 cm **
	No.10	130 ～ 151 cm

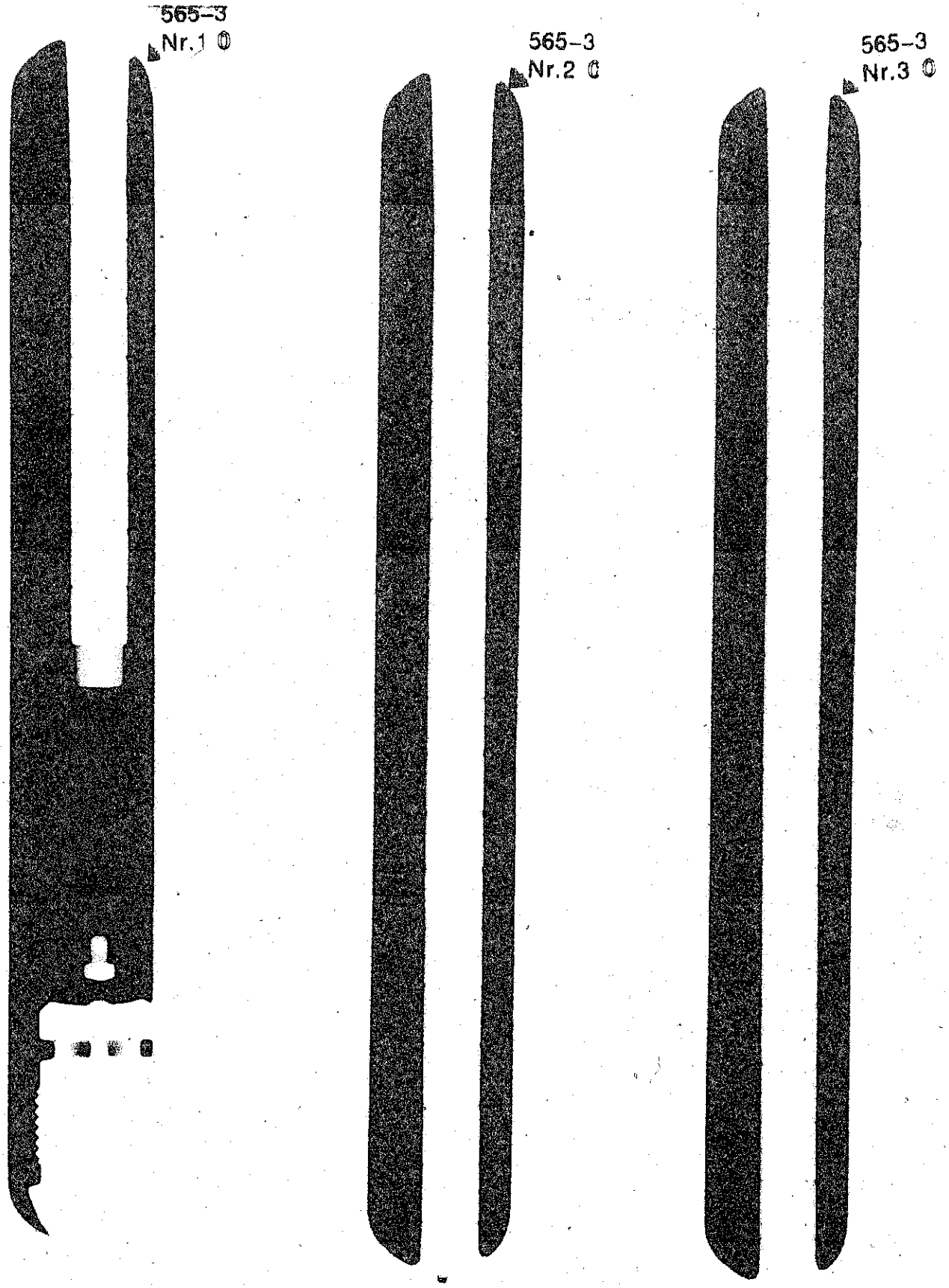
＊ 0 cmが、MOX燃料スタックの下端
＊＊ 125 cmが、MOX燃料スタックの上端

表5.6.3　中性子ラジオグラフ測定結果 (IFA-514)

	IFA-514-3	IFA-514-4	IFA-514-6
燃料ペレット	(中実) 若干のクラック 良好	(中空) 下部に若干のｸﾗｯｸ　良好	(中空) 非常に小さなｸﾗｯｸ　良好
ペレット間ギャップ	全て0.25mm以下	殆ど0.25mm以下、 0.4mm、0.3mmのgap （各１カ所）あり。 γスキャンで測定されたものと同位置	殆ど0.25mm以下、 3.0mm及び0.7mmのgap （各1カ所）あり。 3.0mmは、γスキャンでも確認されたもの。 0.7mmはγスキャン結果にはみられず、取扱中に動いたものと考えられる
エンドペレット	上部のものにｸﾗｯｸ	下部のものにｸﾗｯｸ	上、下部ともｸﾗｯｸ
プレナム長さ／mm	80.7±0.5	84.8±0.5	85.2±0.5
被覆管	異常なし	異常なし	異常なし

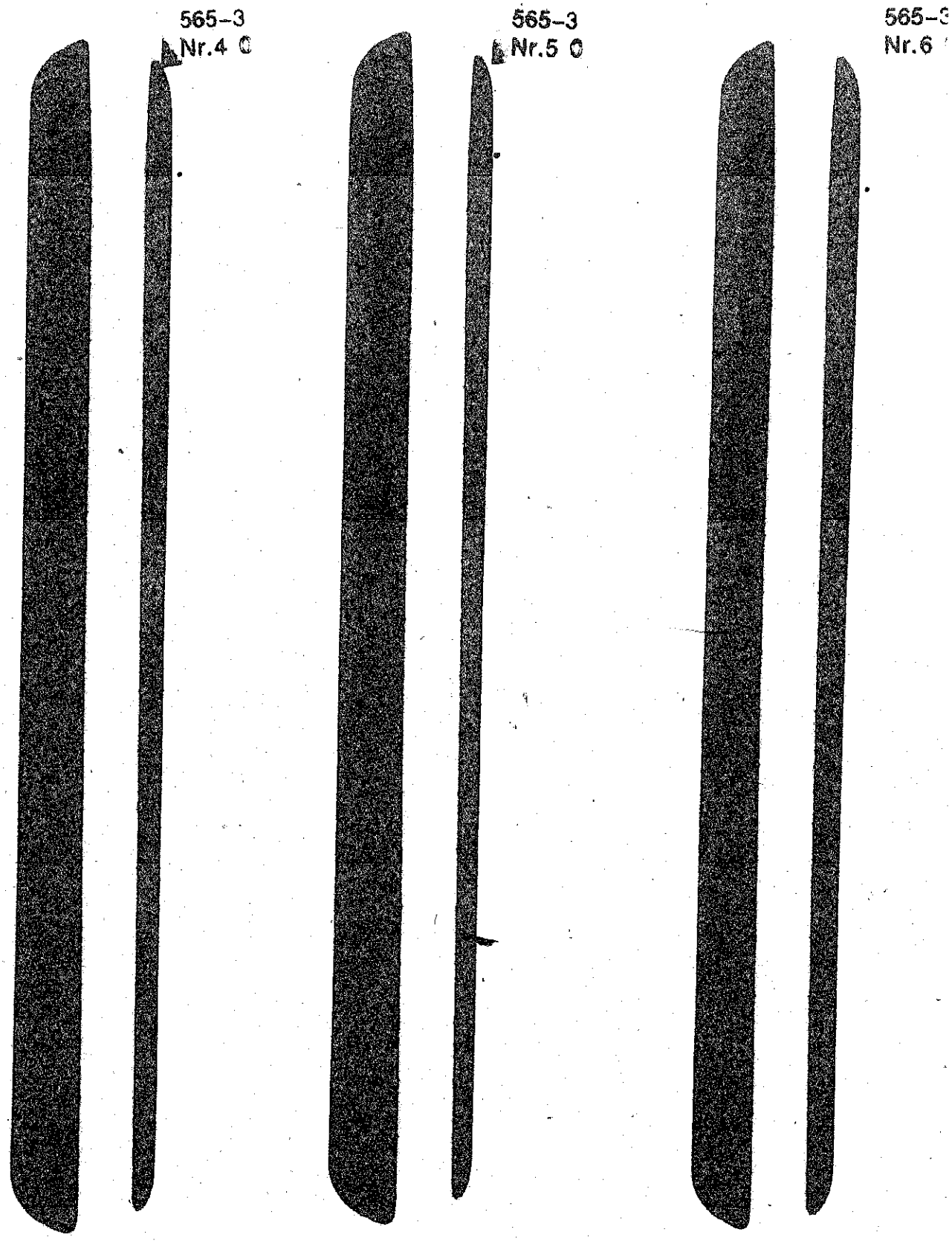
表5.6.4　中性子ラジオグラフ測定結果（IFA-565）

	IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
燃料ペレット	(中実) ﾍﾟﾚｯﾄ全てにクラック 良好	(中空) クラックは少ない 良好	(中空) クラックは少ない 良好
ペレット間ギャップ	全て普通	わずかなｷﾞｬｯﾌﾟあり	ギャップあり
エンドペレット	上部のものにｸﾗｯｸ	下部のものにｸﾗｯｸ	上、下部ともｸﾗｯｸ
被覆管	異常なし	異常なし	異常なし



No.1　　No.2　　No.3

図5.6.1 (1/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-3（0°方向）



No.4　　No.5　　No.6

図5.6.1 (2/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-3 (0° 方向)

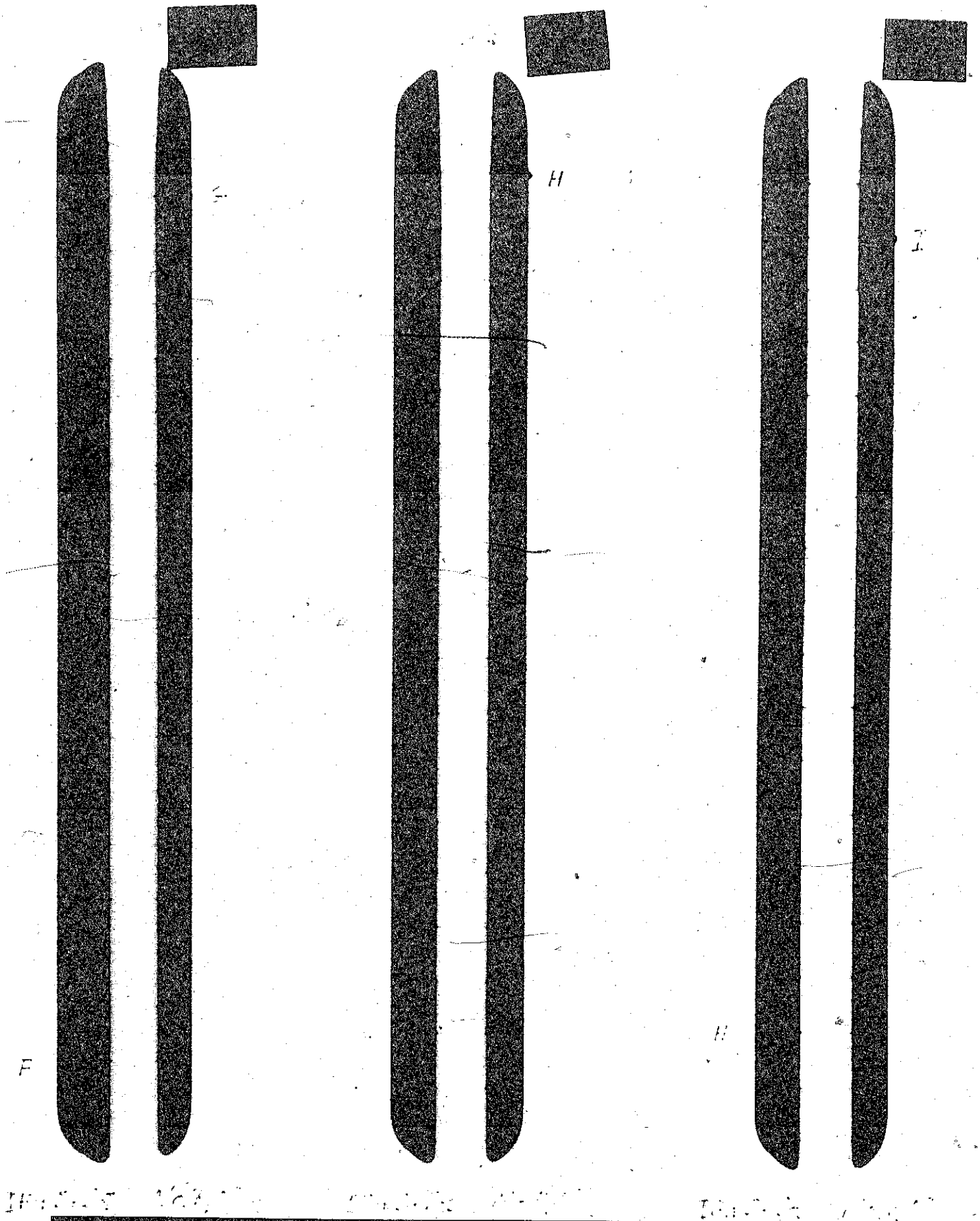
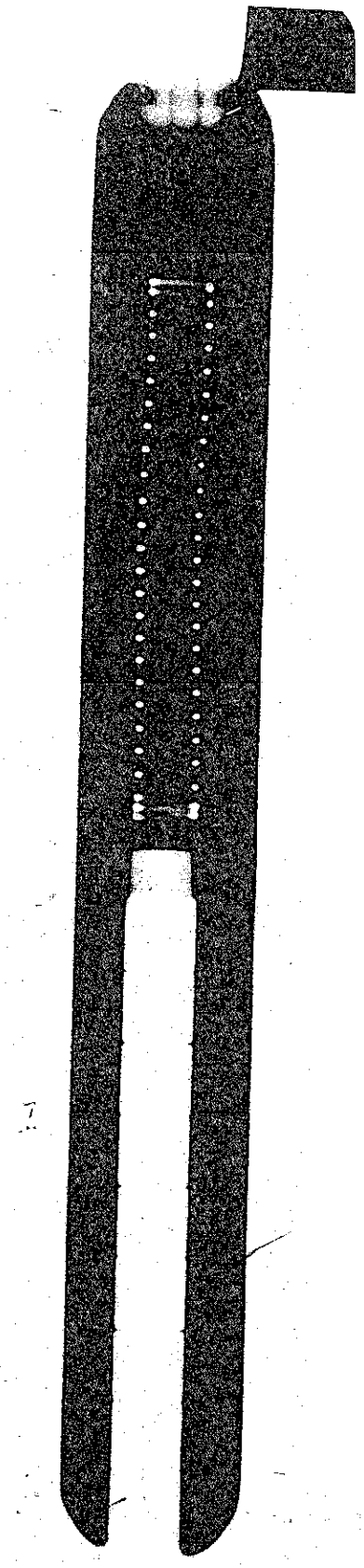
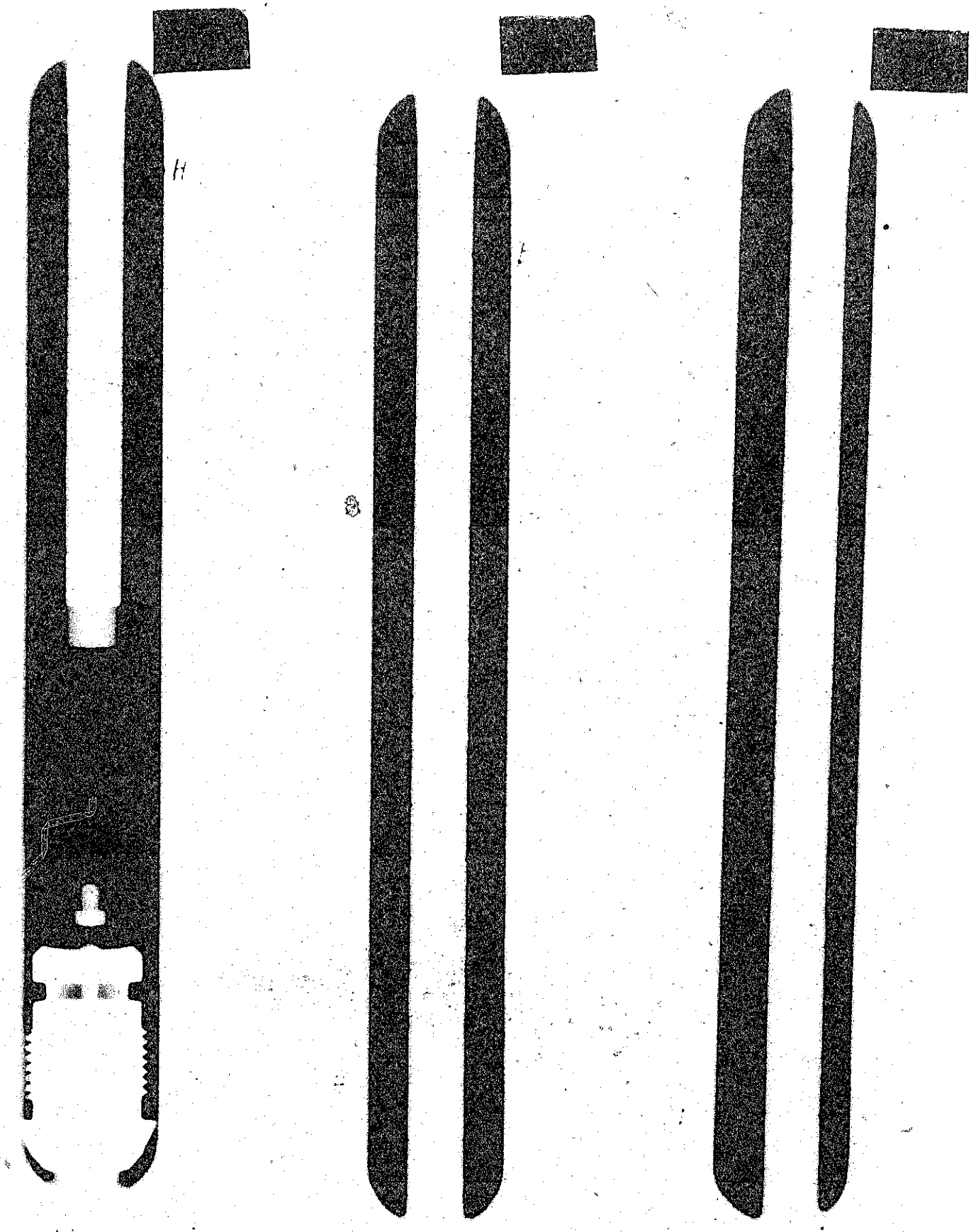


図5.6.1 (3/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-3（0°方向）



No.10

図5.6.1（4/4）　中性子ラジオグラフ IFA-514-3（0°方向）



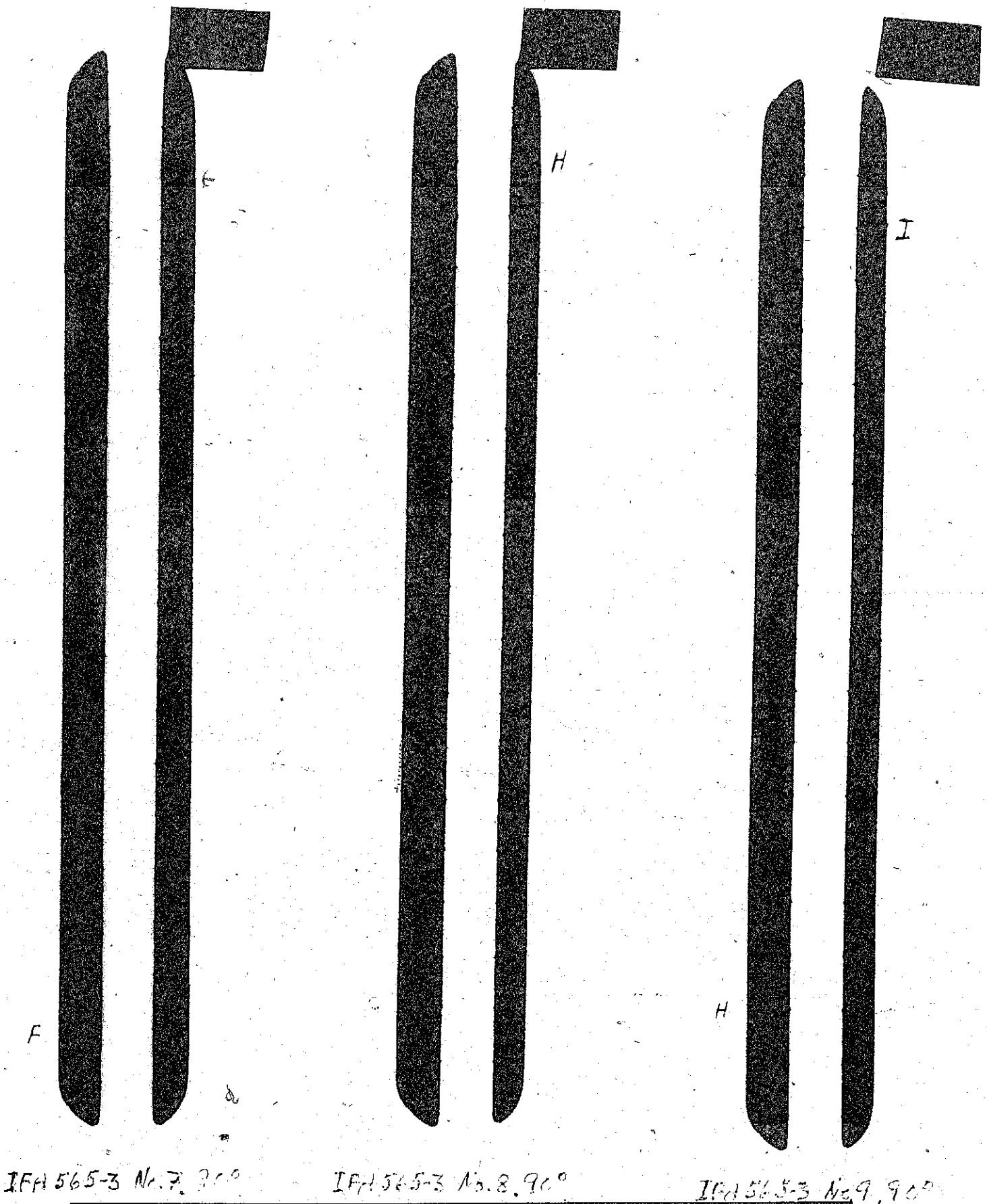
No.1　　No.2　　No.3

図5.6.2 (1/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514.3 (90° 方向)



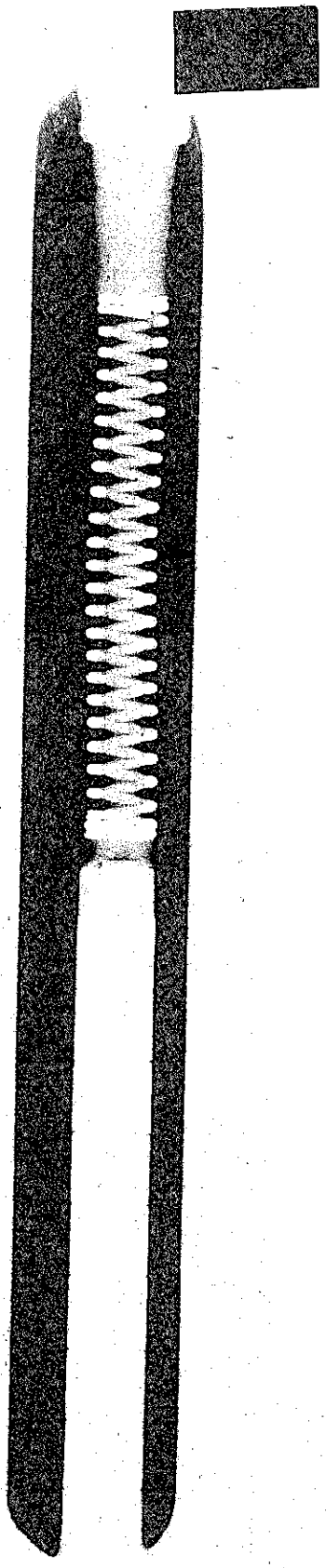
No.4　　No.5　　No.6

図5.6.2 (2/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-3 (90° 方向)



No.7　　No.8　　No.9

図5.6.2（3/4）　中性子ラジオグラフ IFA-514-3（90°方向）



No.10

図5.6.2 (4/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-3 (90° 方向)

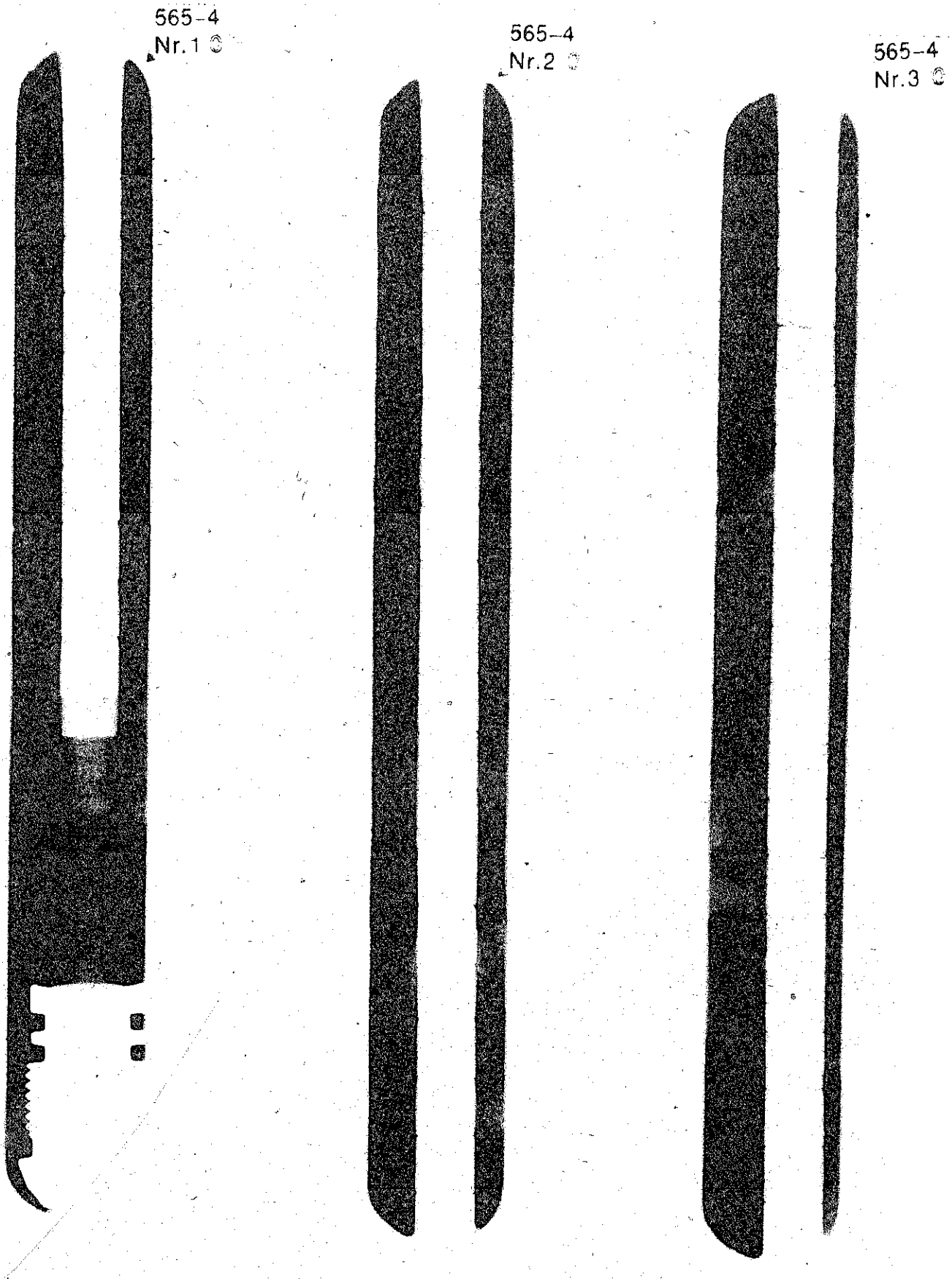
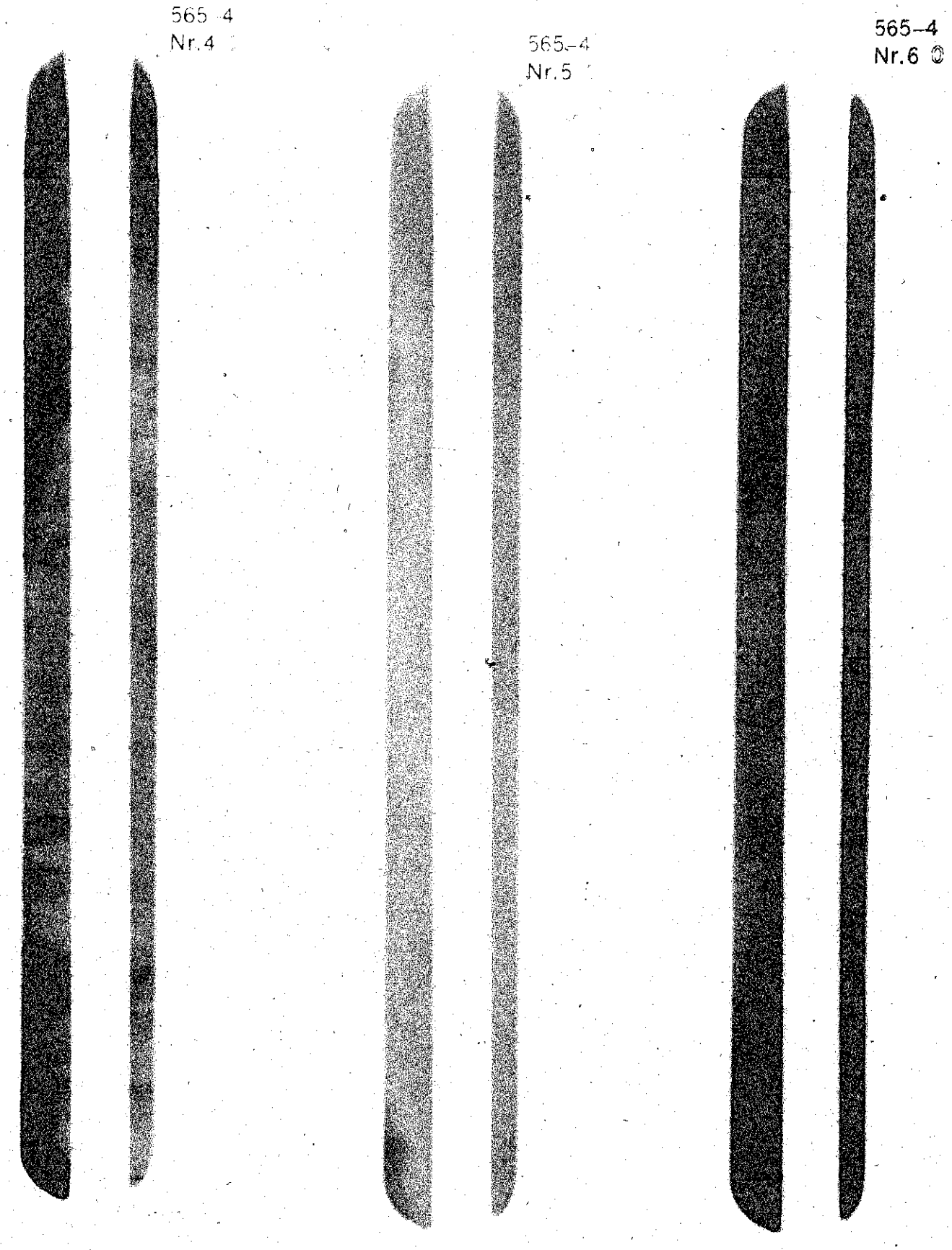


図5.6.3 (1/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-4 (0° 方向)



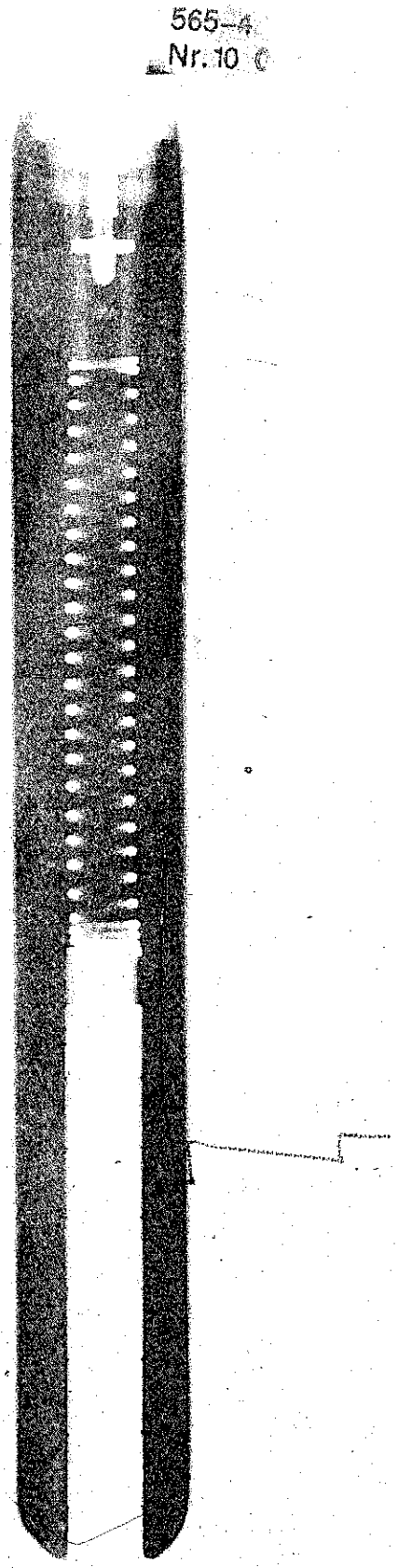
No.4 No.5 No.6

図5.6.3（2/4） 中性子ラジオグラフ IFA-514-4（0°方向）



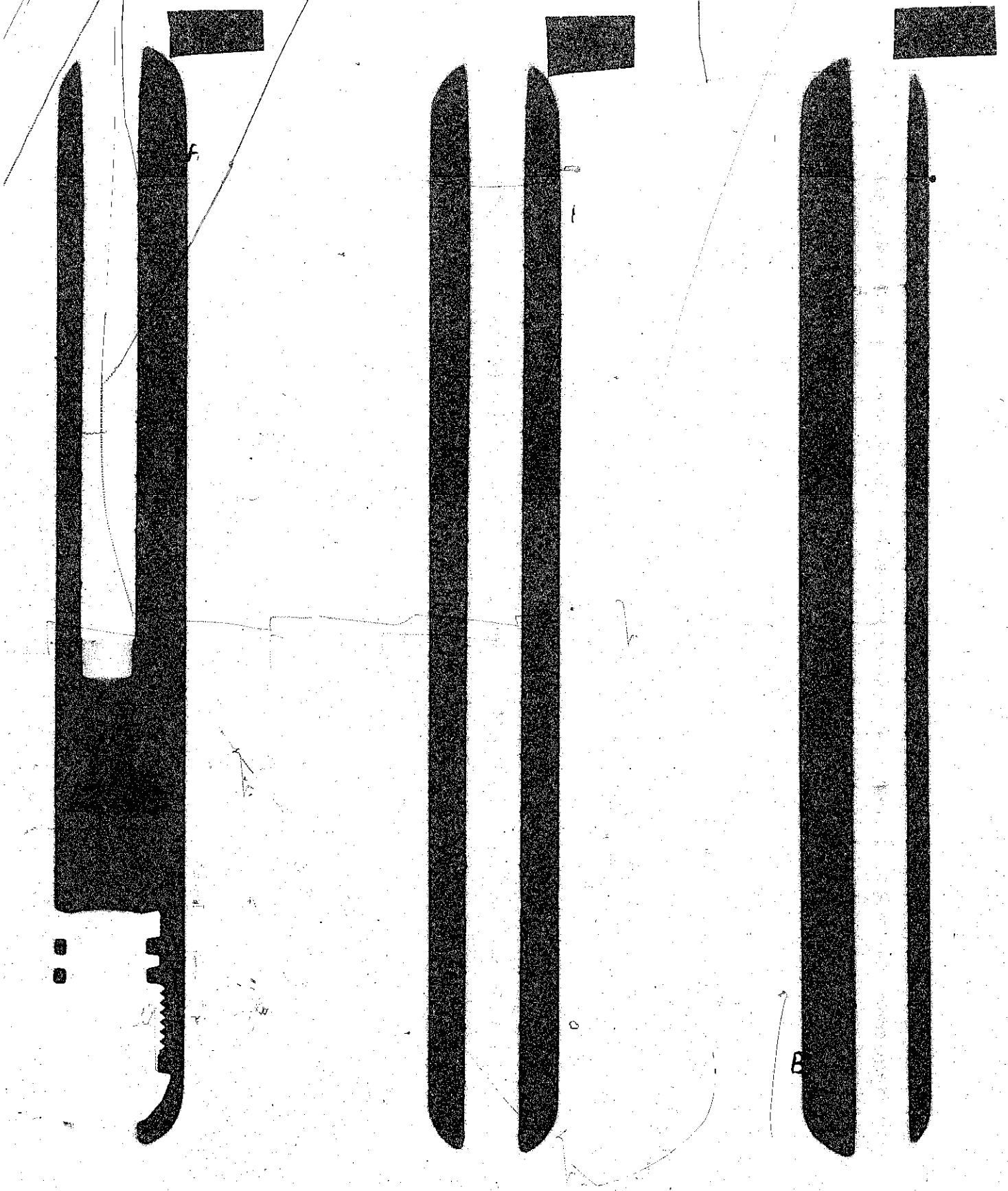
No.7　　No.8　　No.9

図5.6.3 (3/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-4 (0° 方向)



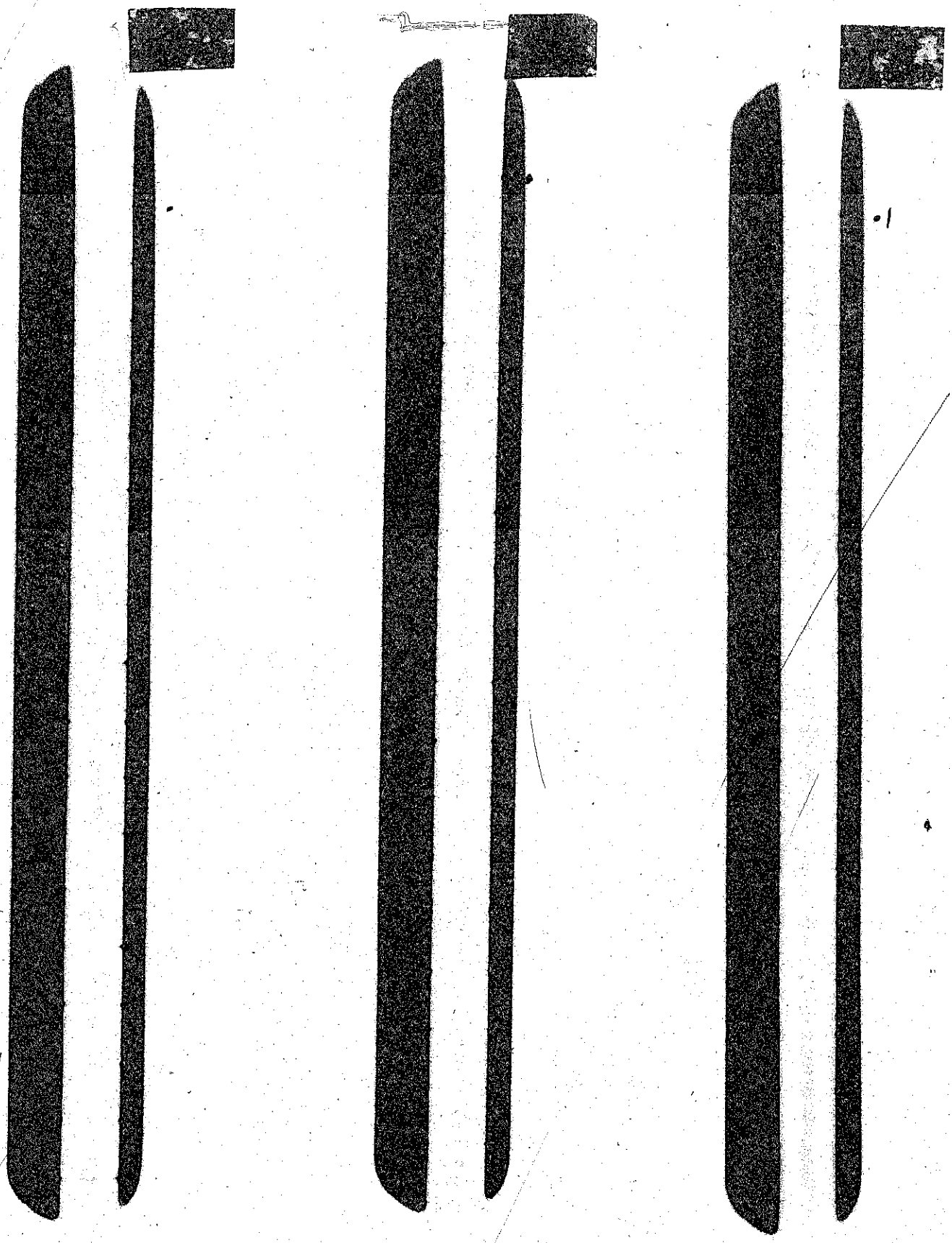
Nc.10

図5.6.3 (4/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-4 (0° 方向)



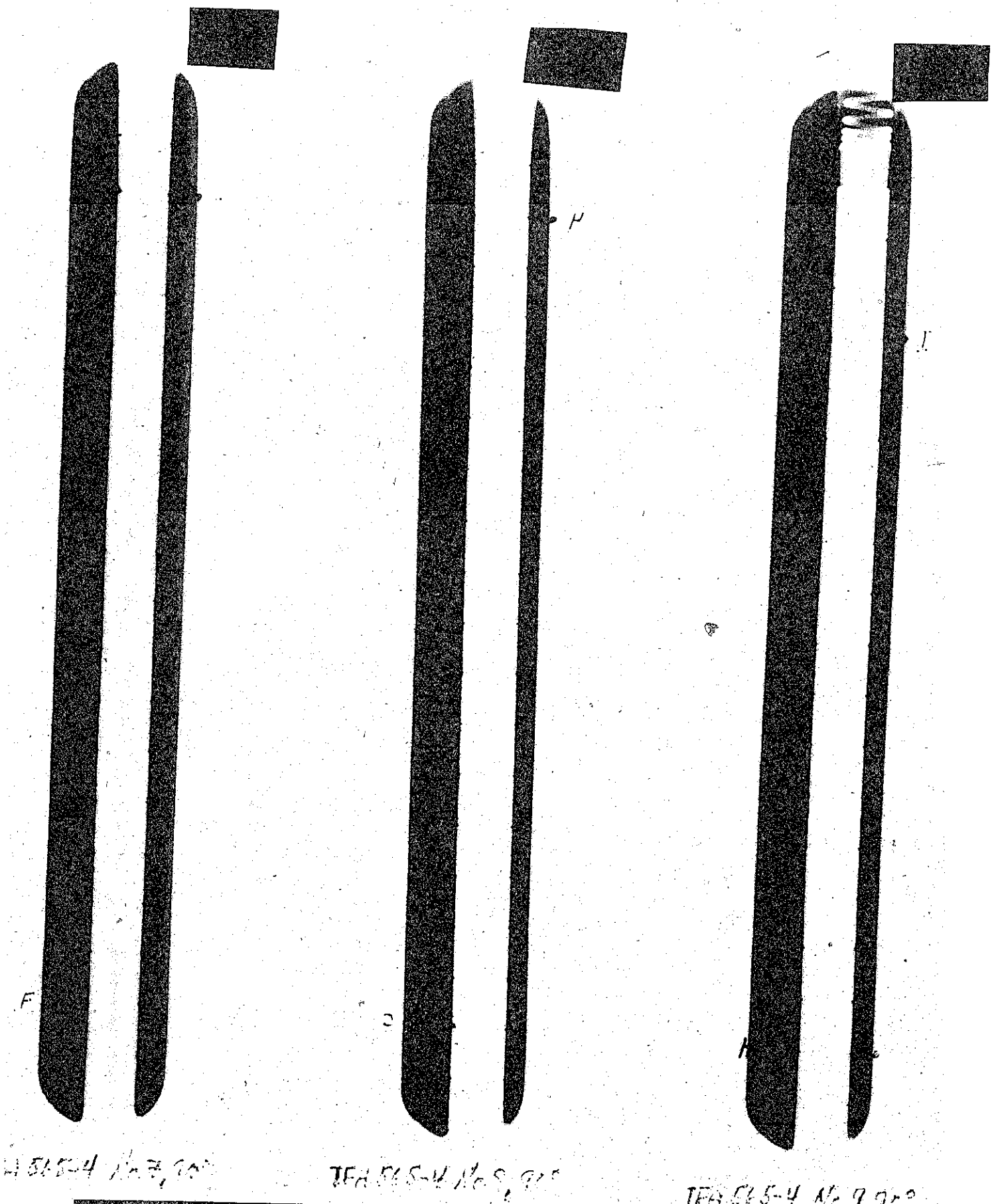
No.1　　No.2　　No.3

図5.6.4（1/4）　中性子ラジオグラフ IFA-514-4（90° 方向）



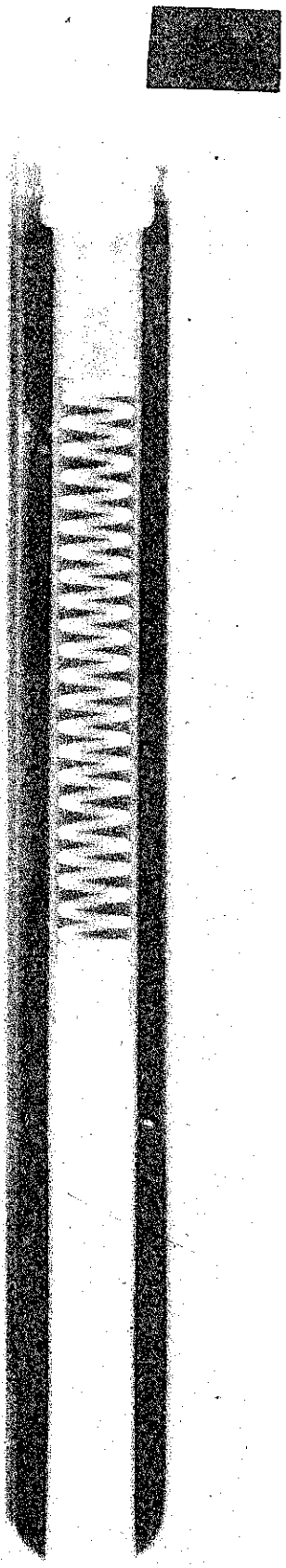
No.4　　No.5　　No.6

図5.6.4 (2/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-4 (90° 方向)



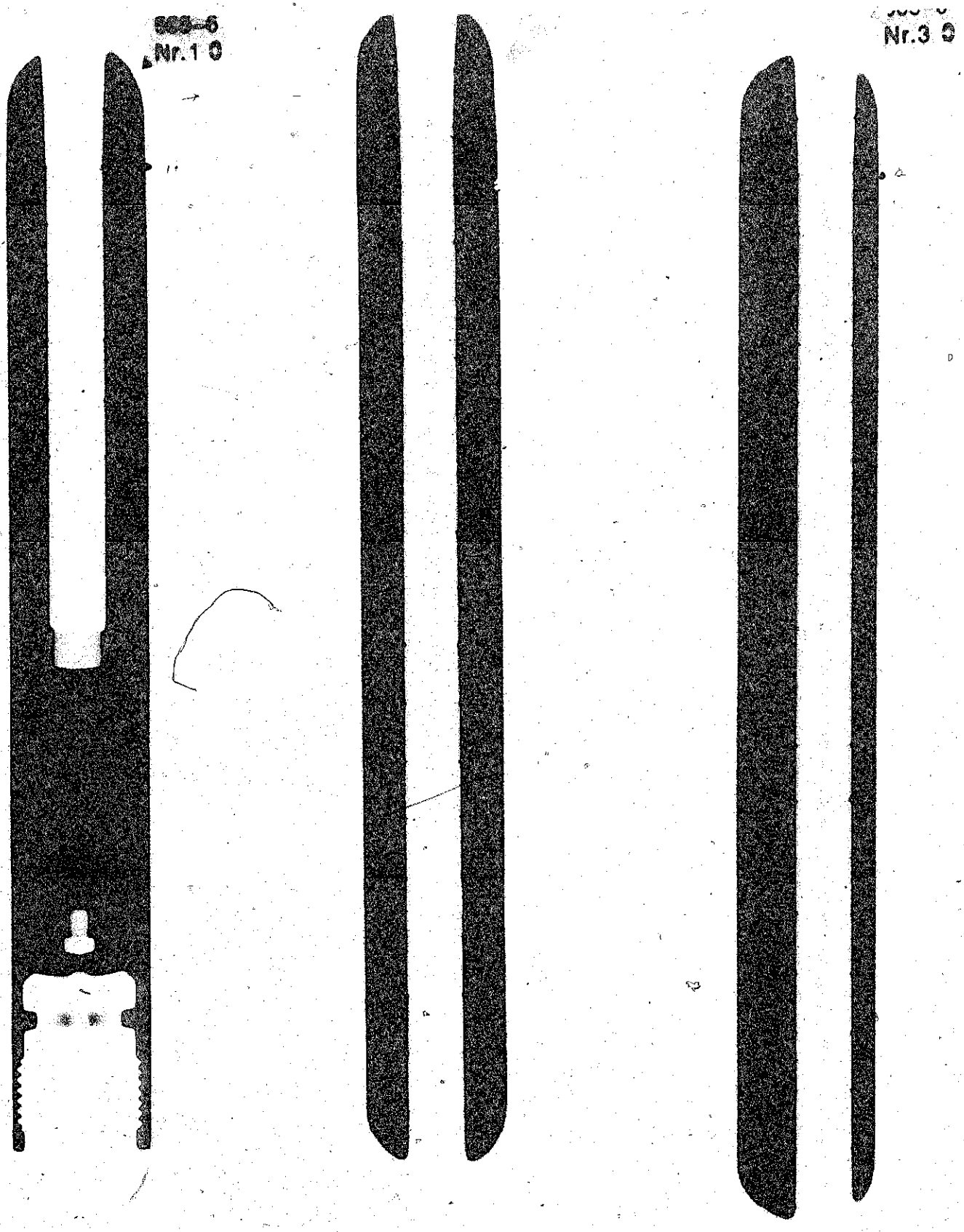
No.7　　No.8　　No.9

図5.6.4 (3/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-4 (90° 方向)



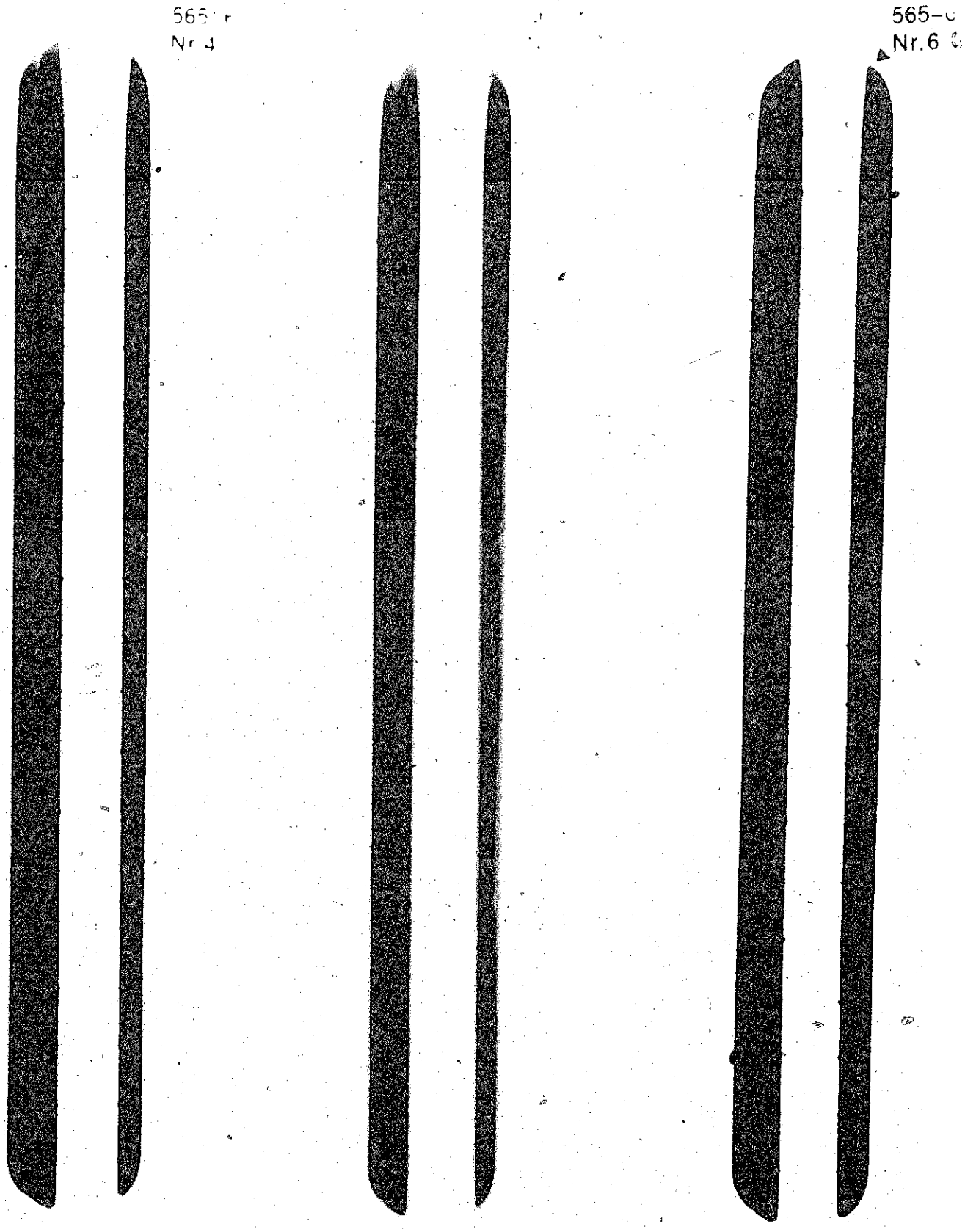
No.10

図5.6.4 (4/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-4 (90° 方向)



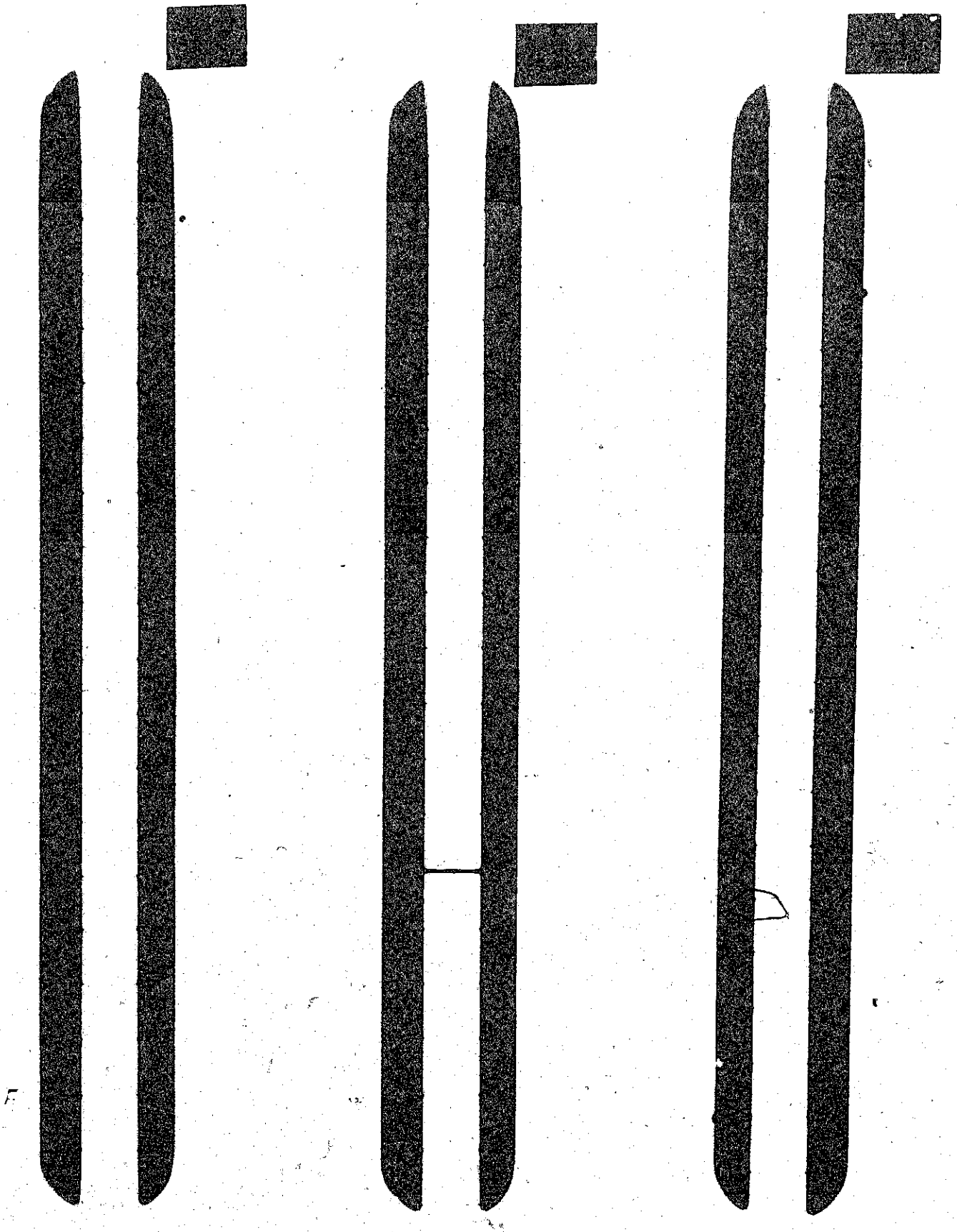
No.1　　No.2　　No.3

図5.6.5 (1/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6（0°方向）



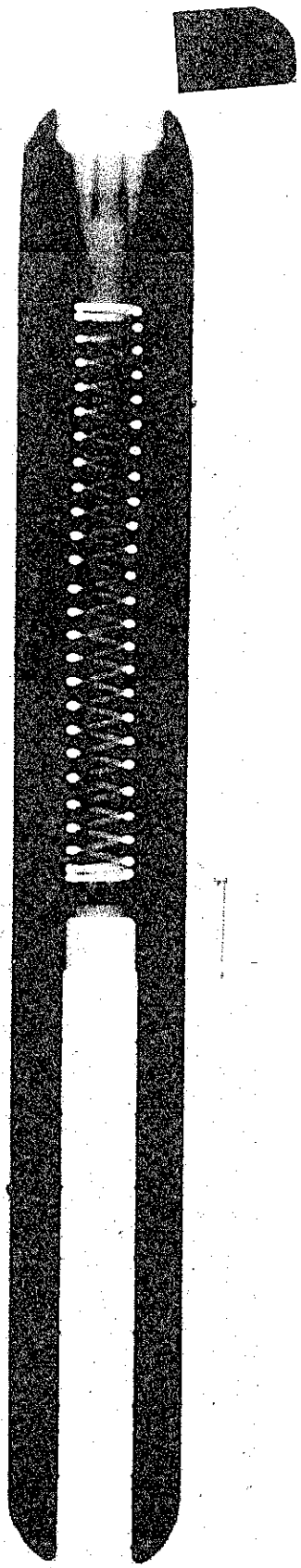
No.4　　No.5　　No.6

図5.6.5 (2/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6（0°方向）



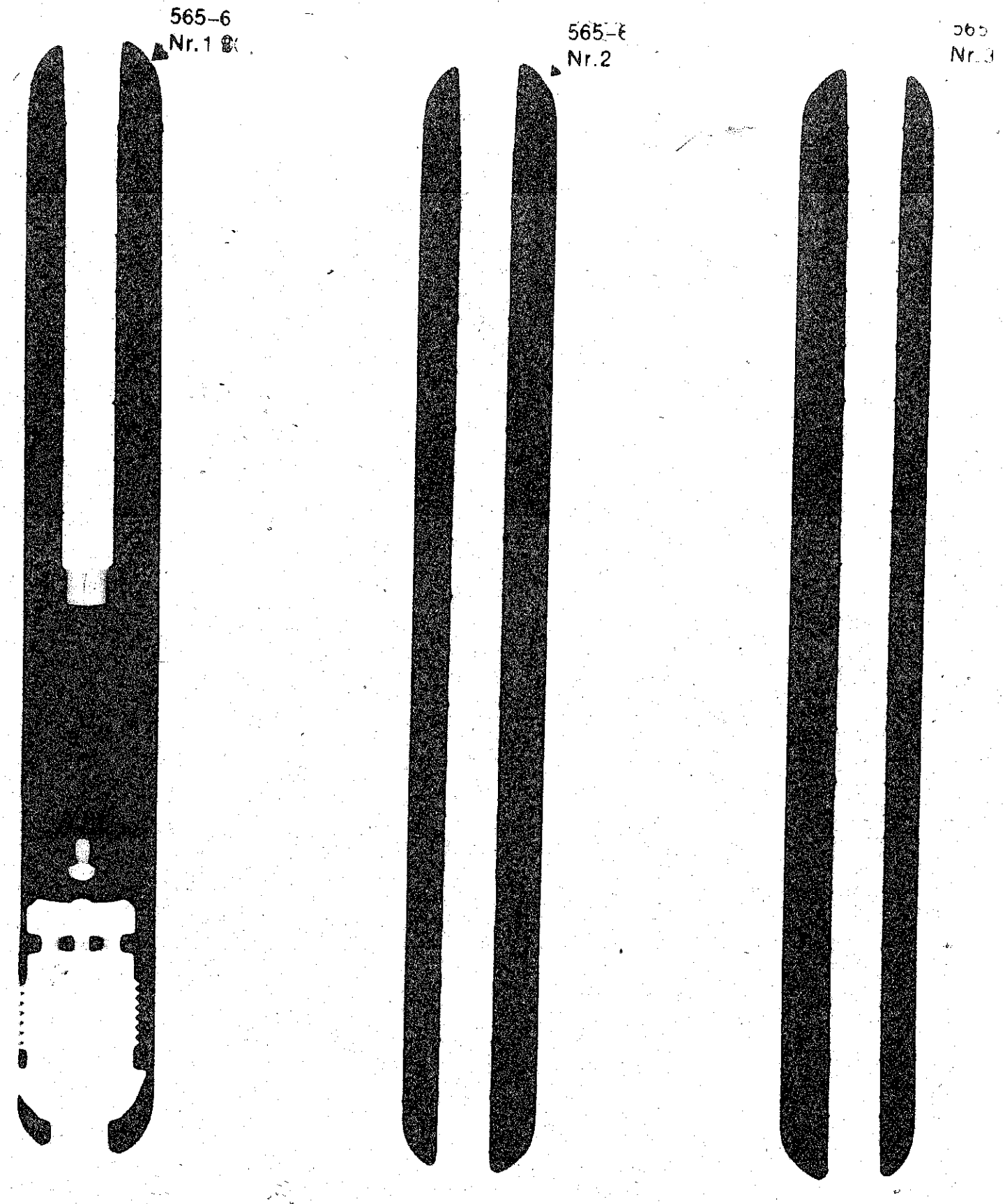
No.7　　No.8　　No.9

図5.6.5 (3/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6（0°方向）



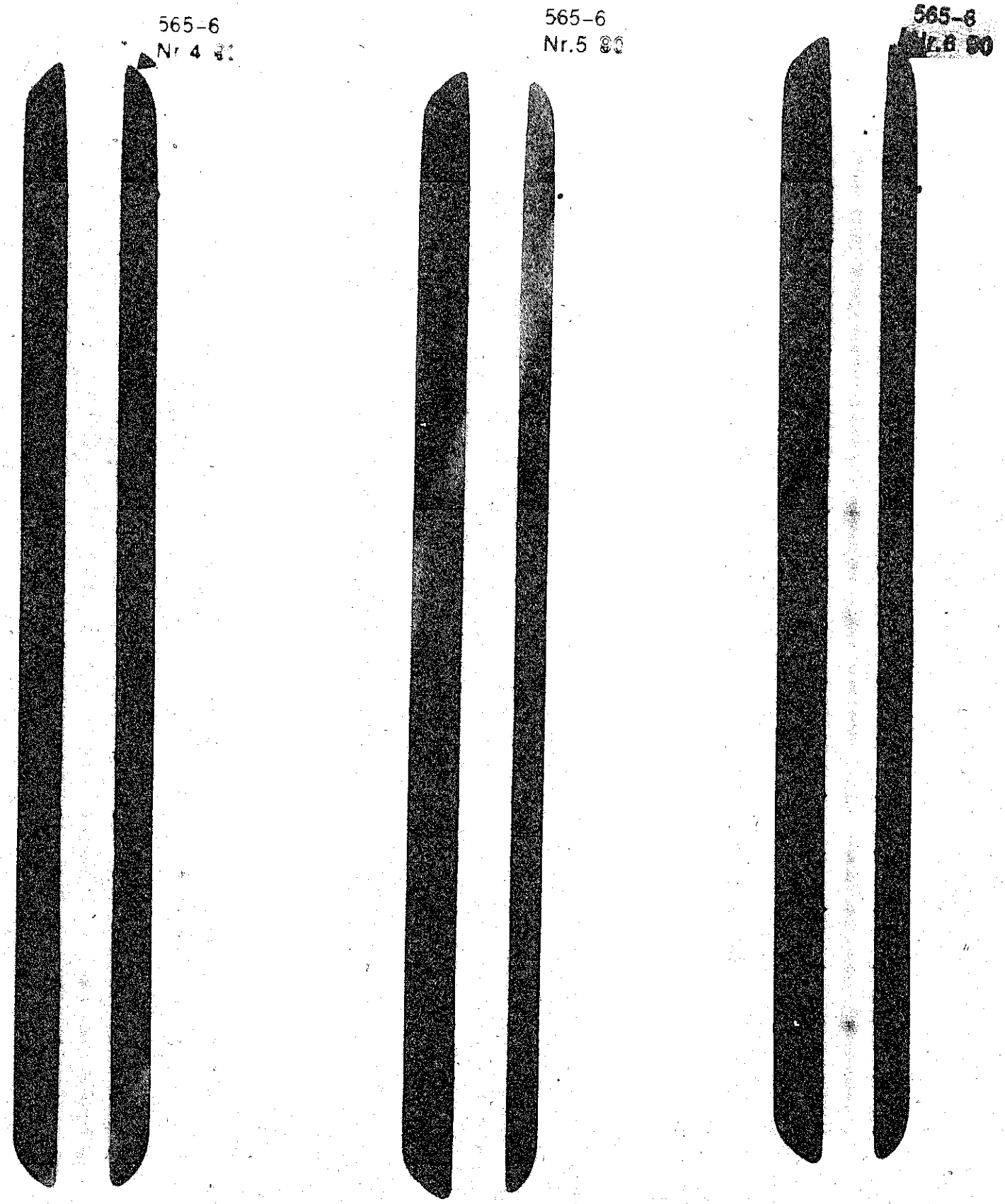
No.10

図5.6.5 (4/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6（0°方向）



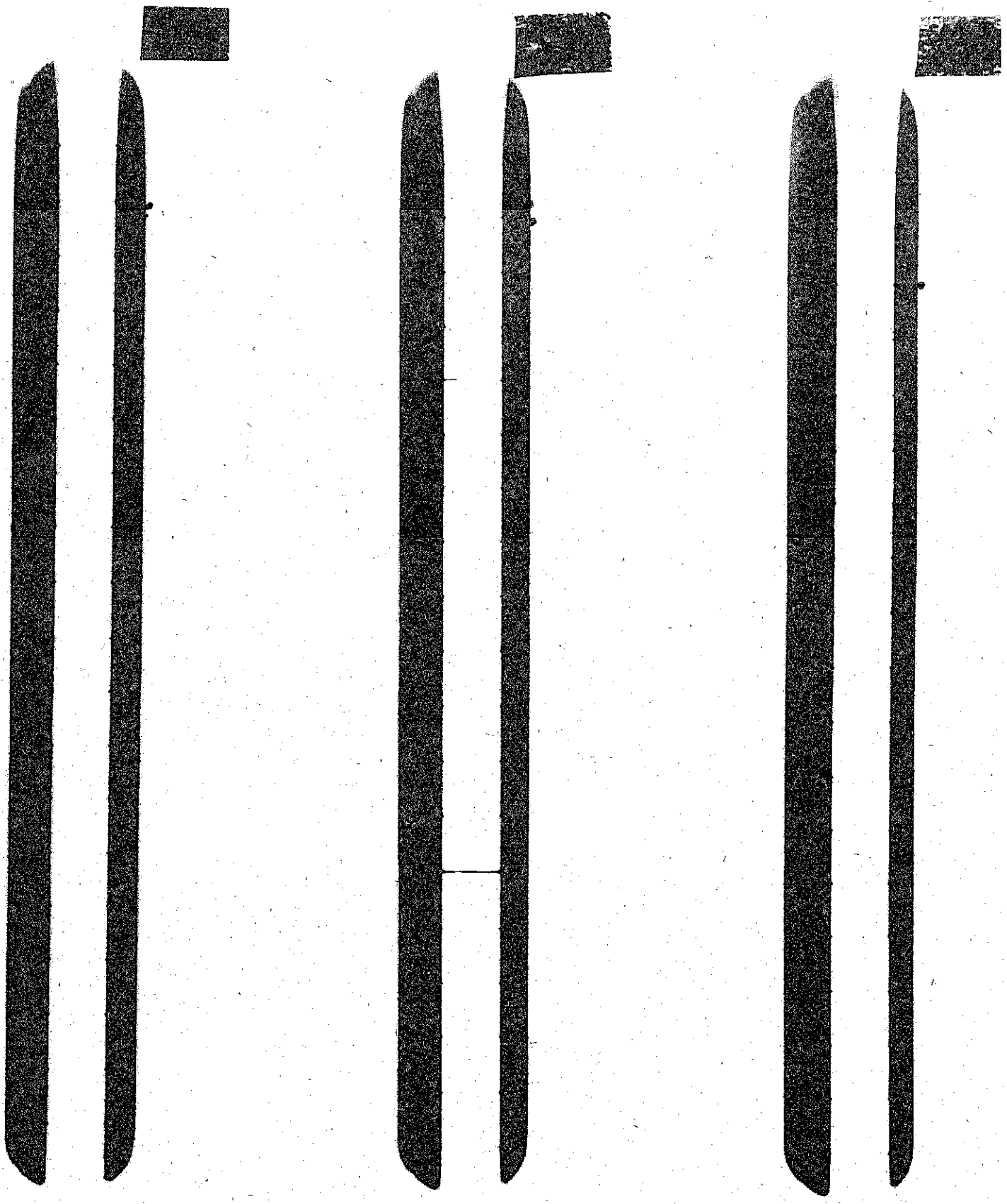
No.1　　No.2　　No.3

図5.6.6 (1/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6 (90° 方向)



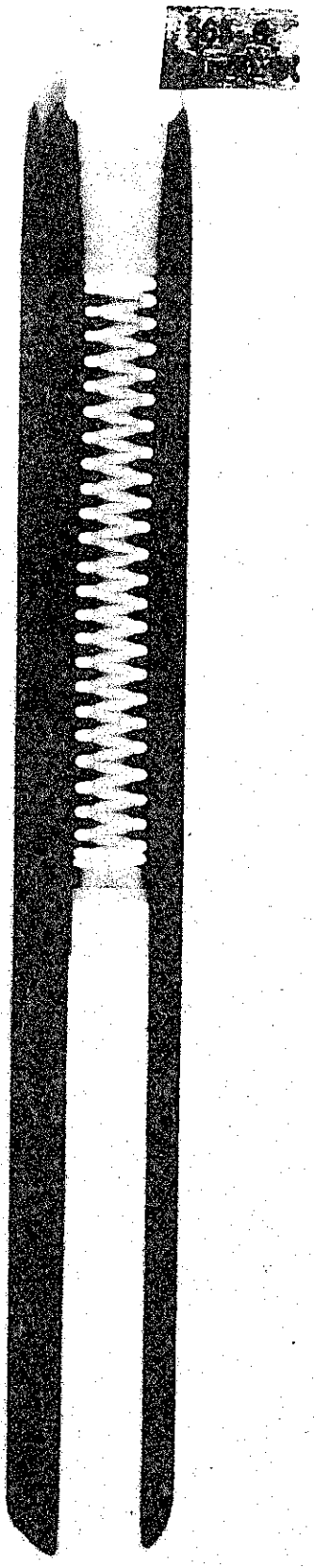
No.4　　No.5　　No.6

図5.6.6 (2/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6 (90° 方向)



No.7　　No.8　　No.9

図5.6.6 (3/4)　中性子ラジオグラフ IFA-514-6 (90° 方向)



No.10

図5.6.6（4/4）　中性子ラジオグラフ IFA-514-6（90°方向）

5.7 パンクチャ試験及びFPガス分析

IFA-565-3, 4, 6の３本についてパンクチャ試験を行い、FPガスを分析した。

測定方法

燃料ロッドをパンクチャ装置中に入れ、プレナム端をパンクチャする。真空排気後、パンクチャ前の体積を校正しておき、再度真空排気した後、回転ドリルでパンクチャする。燃料ロッドからのガスを既知体積中に膨張させ、圧力の増加を測定して、ガス総量を計算する。圧力及びガス体積が、これらの燃料ロッドではかなり高いため、約10分の１をバルブで切り放して移動できるサンプル容器に捕集し、質量分析にかける。燃料ロッドの内部も含めて真空排気して、校正ガスを再充填することで燃料ロッド内部の自由体積を計算する。

測定結果

パンクチャ試験の結果を、途中取り出しのIFA-514-1と合わせて、表5.7.1に示す。

表5.7.1　FPガスパンクチャ試験結果（標準状態）

燃料ロッドNo.	IFA-565-3	IFA565-4	IFA565-6	IFA514-1
全ガス量　Ncm^3	345.83	291.93	149.86	383.53
自由体積　cm^3	10.05	24.84	22.89	15.90
圧力　　MPa	3.488	1.191	0.663	2.366

質量分析の結果を、途中取り出しのIFA-514-1と合わせて、表5.7.2に示す。なお、IFA-514-2は、パンクチャ試験でFPガスがリークしたため、データが得られなかった。また、IFA-514-5は、寿命初期にリークが発生したものの、FPガス自身は捕集・分析できたが、値の信頼性が低いと判断し、評価に加えなかった。なお、FPガス用の質量分析計のイオン源及び検出ユニットは最も重要なKrとXeに最適化するように調整した。その他のガスの精度は落ちてしまい、N_2やO_2の分析値は半定量である。分析精度は以下の通りである。

5 mol%ガス　　：± 2%、ただしHeは±25%

0.15～5 mol%ガス　：± 5%

0.15 mol%以下のガス ：±20%

KrとXeの同位体分析の精度は±2%で、存在割合の大きい同位体はさらに精度が良くなり、少ない同位体は悪くなる。

得られた結果をまとめると、以下の通り。

(1)全ガス量についてパンクチャ測定結果と質量分析の結果を比較すると相互にかなりよく一致している。

(2)Kr 及び Xe 同位体組成は、IFA-565-3, 4, 6の間で大差ない。

(3)途中取り出しのIFA-514-1には、他の燃料ロッドと異なる以下の結果が得られている。

－IFA-565では、検出されていないAr、O_2、N_2+COが検出されている。

－製造時に常圧封入したHeが微量しか測定されていない。

－ガス放出量がどのIFA-565セグメントよりも高い。

これらの点について検討する。

①ガス組成について、以下を考慮すると空気が混入した可能性が高い。

・空気成分であるAr+O_2+N_2の３種類のみが測定されていること

・その体積割合が、0.09：35：65で、空気組成の0.93：21：78に近いこと

・これらの質量数がKr、Xeの質量数より小さく質量分析精度が落ちること

②空気混入時期として、製造時の端栓溶接時、熱電対のシール部の破損やパンクチャ・サンプリング時が考えられるが特定できなかった。なお、以下の理由から製造時ではないと考えられる。

・検出された　1.97Ncm^{3}のO_2が、燃料ロッド内自由体積15.90cm^{3}中に存在すれば常圧（このシリーズは加圧溶接でない）なら12vol%の酸素が溶接時燃料ロッド内に存在することになる。通常のTIG溶接条件は5～10ppmO_2であり、これを一桁超えると溶接箇所は黒色に変色する。一方、このような変色は端栓溶接時に確認されていない。

・ハルデン炉装荷時の初期圧力計装値は、内圧計装の付いたもう１本の燃料ロッド4と変わりないことから端栓溶接時の内圧が両者で異なるということもない。

・燃料ロッドにHe充填する際、片側から真空引きしても、ペレット等の介在物があるため、同程度には反対端の真空度が上がらず、酸素が残留することが知られているが、量的に問題ないことが確認されている。

③製造時に常圧封入したHeが、微量しか含まれいない点については、以下の点につい

て検討したが、原因が不明である。

・製造に端栓を溶接する際、He封入していないことが考えられるが、一旦、溶接チャンバ内で真空引き後、He置換により溶接チャンバ内を真空から解放しなければ溶接作業ができないことから、燃料ロッド内が真空ということは考えられない。さらに、IFA-514-1として炉装荷時点の内圧計装値がIFA-514-4と同程度であることからもHeの常圧封入が裏付けられる。

・照射中に発生するKr, Xeがきれいにを選択的に燃料ロッド外にパージしてしまうことも考えにくい。軽元素が選択的にパージされなければ、プレナムに存在するガス割合のままパージされるはずである。

以上から、混入時期は不明であるが、空気が混入した可能性が高く、IFA-514-1パンクチャ試験データは参考扱いとする。

(4)Xe/Kr比から質量分析データの信頼性について検討する。計算コードORIGEN-2によれば、核種毎のXe/Kr生成比は表5.7.3の通りである。MOX燃料の場合、照射全期間を通じてPu出力寄与率がほぼ100%であるため、Xe/Kr比は約13~18の間となるはずである。IFA-565-3, 4, 6のXe/Kr比は、それぞれ 17.9, 19.5, 19.9 であり、計算値に比べて若干高めであるものの信頼できる分析値であることを示している。一方、IFA-514-1のそれは、 23.1 とIFA-565に比べて高く、分析値の信頼性が若干低下する。

表5.7.2　ガス組成の質量分析結果

燃料ロッドNo	IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6	IFA-514-1
Kr 83 (%)	12.01	9.28	10.44	13.66
Kr 84 (%)	35.11	37.06	36.60	32.67
Kr 85 (%)	4.02	3.85	3.92	4.99
Kr 86 (%)	48.86	49.81	49.04	48.57
Kr total (mg)	57.15	35.56	13.10	60.98
Kr total (Ncm^3)	15.07	9.38	3.46	16.08
Xe 130 (%)	0.41	0.41	0.33	0.39
Xe 131 (%)	9.79	8.82	8.39	11.61
Xe 132 (%)	22.20	22.85	22.63	21.57
Xe 134 (%)	27.54	27.54	27.33	27.25
Xe 136 (%)	40.04	40.05	41.32	39.07
Xe total (mg)	1618.80	1095.40	411.80	2223.37
Xe total (Ncm^3)	270.50	183.04	68.81	371.52
He (mg)	8.51	15.11	13.10	微量
He (Ncm^3)	47.64	84.56	73.33	
Ar (mg)	ND	ND	ND	0.009
Ar (Ncm^3)				0.005
O_2 (mg)	ND	ND	ND	2.81
O_2 (Ncm^3)				1.97
H_2 (mg)	ND	ND	ND	ND
CO_2 (mg)	ND	ND	ND	ND
N_2+CO (mg)	ND	ND	ND	4.49
H_2O (mg)	ND	ND	ND	ND
プレナムガス total (Ncm^3)	333.21	276.98	145.6	389.57
Xe/Kr比	17.9	19.5	19.9	23.1

ND：未検出

表5.7.3　核分裂収率の比

		U235	U238	Pu239	Pu240	Pu241
Xe/Kr比	熱中性子	5.6		13.8		18.5
	高速中性子	5.6	8.4	13.5	12.8	14.6

5.8 金相観察

IFA-565-3及び6について金相観察を行った。観察位置は、表5.8.1に示す。ペレットの観察は、各断面について、研磨後、エッチング後について観察した。エッチングは8：2のH2O2：H2SO4溶液で数分間行った。その後、被覆管の観察のために、エッチング研磨を実施した。Al2O3の研磨剤に45mlH2O2-4.5mlHNO3-1.5mlHFの混合エッチング液を混ぜたものである。研磨剤とエッチング液は5：2の割合で、10分間エッチング研磨した。

表5.8.1　試験サンプルの位置（下端Vノッチからの距離）と試験種別

ロッドNo.	サンプル位置（mm）及び種別（T, L）	ホルダー	試験種別
IFA-565-3	246 T	H35	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造 ・燃焼度
	742 T	H36	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造 ・燃焼度 ・α、β/γオートラジオグラフ ・マイクロγスキャニング ・残留FPガス分析
	1245 T	H37	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造 ・燃焼度
	720-732 L	H41	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造
	1008 T	H43	・ノジュラー腐食
IFA-565-6	246 T	H38	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造 ・燃焼度
	742 T	H39	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造 ・燃焼度 ・α、β/γオートラジオグラフ ・マイクロγスキャニング ・残留FPガス分析
	1245 T	H40	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造 ・燃焼度
	720-732 L	H42	・水素化物、酸化物 ・燃料：ポアと結晶構造
	1008 T	H44	・ノジュラー腐食

L：軸方向縦断面、T：横断面

5.8.1マクロ観察

IFA-565-3及び6について246mm、742mm、1245mm及び720-732mmの位置の断面について観察した。観察した写真を図5.8.1.1、2に示す。横断面写真の被覆管上の黒点は0方向の位置である。縦断面写真は0-180度方向の断面である。研磨後とエッチング後の拡大したマクロ写真を図.5.8.1.3-10に示す。

IFA-565-3は中実ペレットである。クラックパターンは、246mmと1245mmの位置では、ペレット径方向のクラックが観察できる。742mm及び720-732mmの断面では径方向の中間部に周方向のクラックも観察できる。また、これらの位置は、ペレット-被覆管のギャップはほとんどなく、他の断面に比べポアが少ない。246mmと1245mmの位置ではギャップが観察できる。IFA-565-3にはHB301とHB302のロットのペレットが装荷されているが、これらのペレットは製造時には全面にわたって造粒界が観察される。照射後では、246mm及び1245mmの断面の一部に造粒界によるものと考えられる大きなポアが残っている。742mmの断面では、造粒界に起因すると考えられるような組織は観察できない。

IFA-565-6は中空ペレットである。径方向のクラックと中空径の変化が観察できる。各断面の写真から求めた中空径を表5.8.1.1に示す。いずれの断面でも中空径は製造時より大きくなっている。742mmの位置では製造時の1.38倍の直径になっている。ペレット/被覆管ギャップは、IFA-565-3同様、742mmと720-732mmではほとんど観察できない。また、ポアも他の断面に比べ少ない。IFA-565-6の燃料にはHB201のロットのペレットが装荷されているが、このペレットも製造時に全面にわたって造粒界が観察される。照射後においてもすべての断面で造粒界が観察できる。

これらの燃料のVノッチ間の距離は、約1505mmで、スタック長は約1378mmである。軸方向で、ギャップがなく、ポアが少なく、周方向クラックの存在または中空径の大きな増加がみられる742mm位置は、軸方向のほぼ中心部で燃料出力が他の断面に比べ高い位置である。

表5.8.1.1　IFA-565-6の各断面の写真から求めた中空径

位置	製造時	246mm	742mm	1245mm
中空径(mm)	3.49	3.65	4.85	3.57

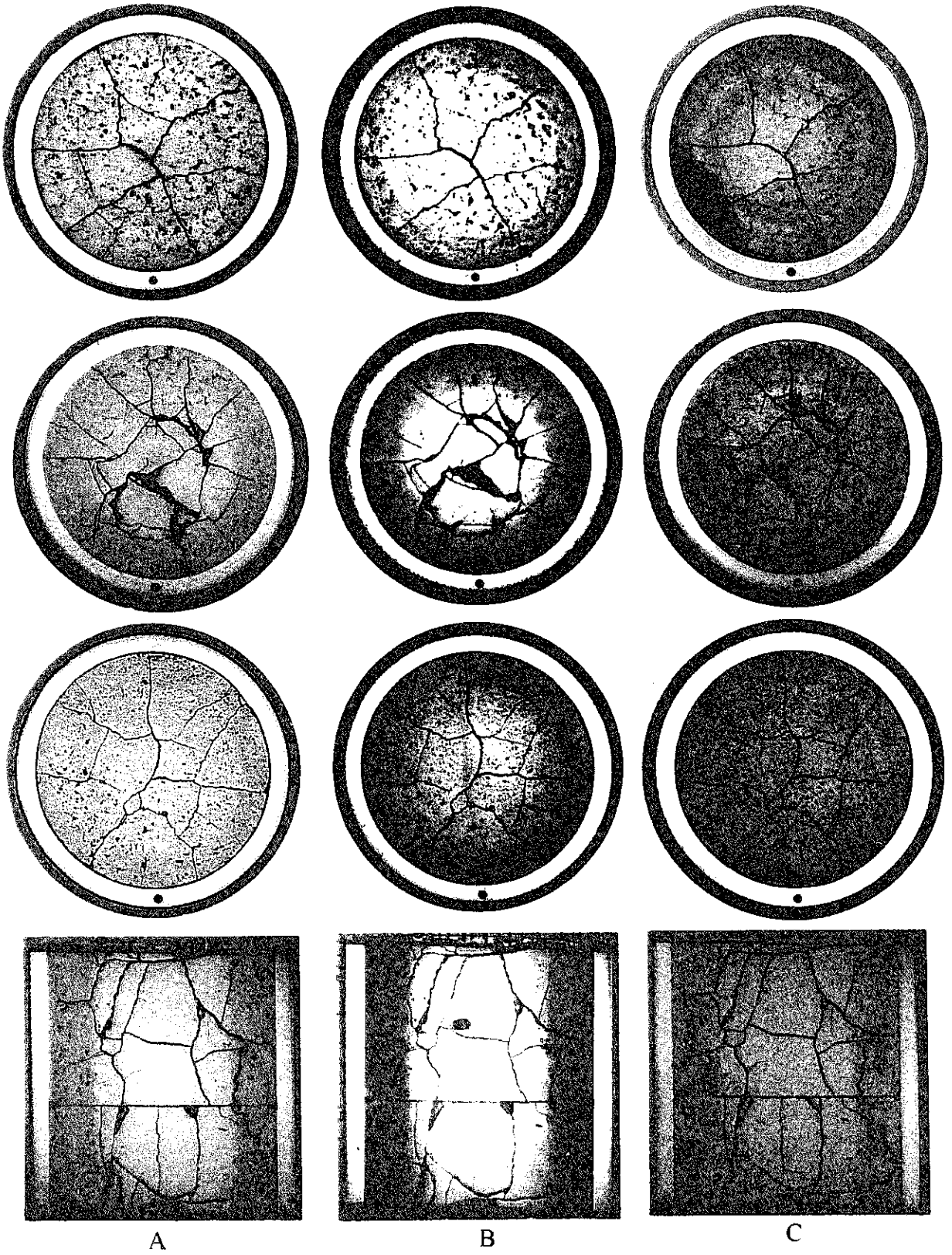


図5.8.1.1 IFA-565-3の金相写真

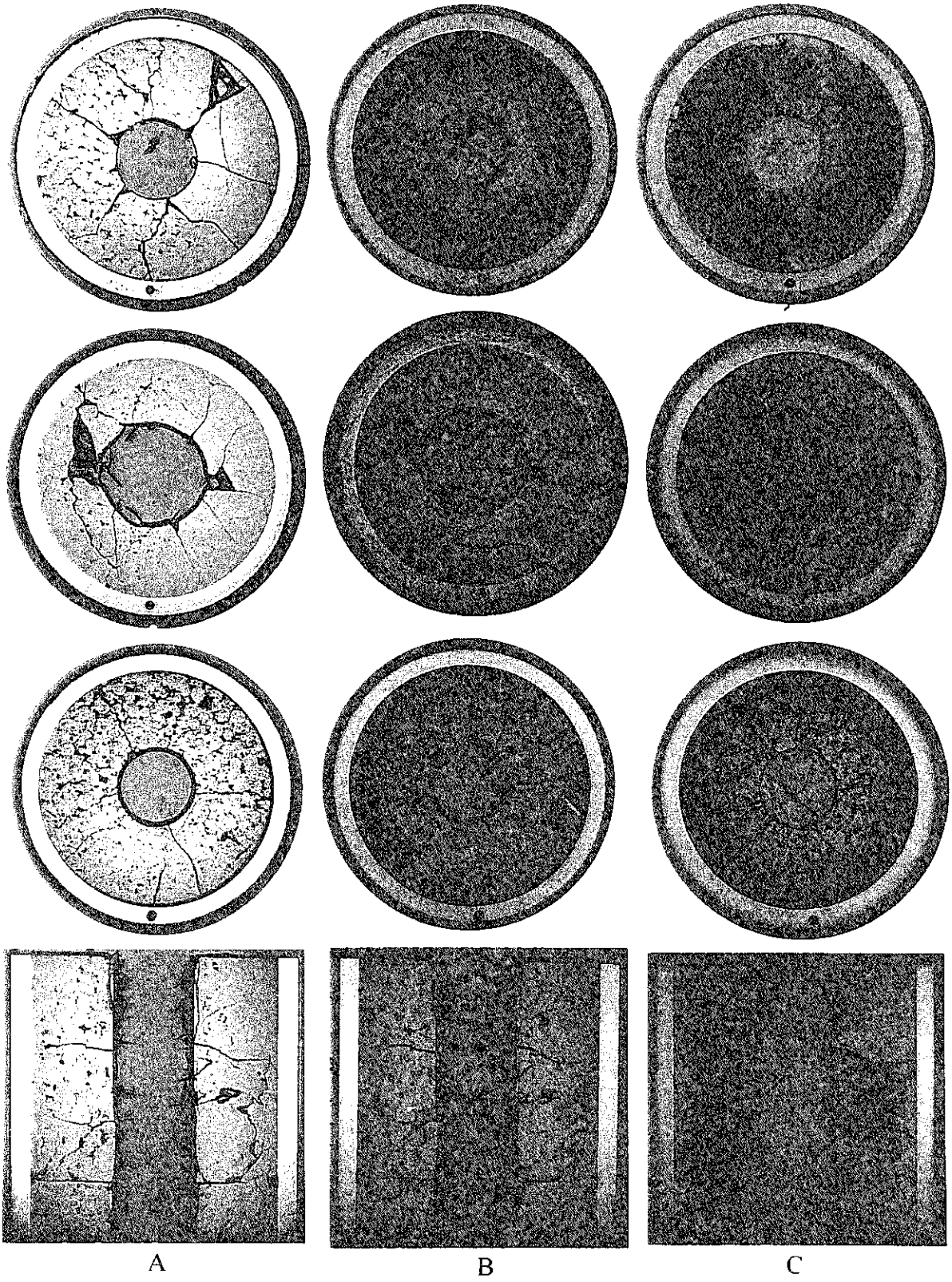


図5.8.1.2 IFA-565-6の金相写真

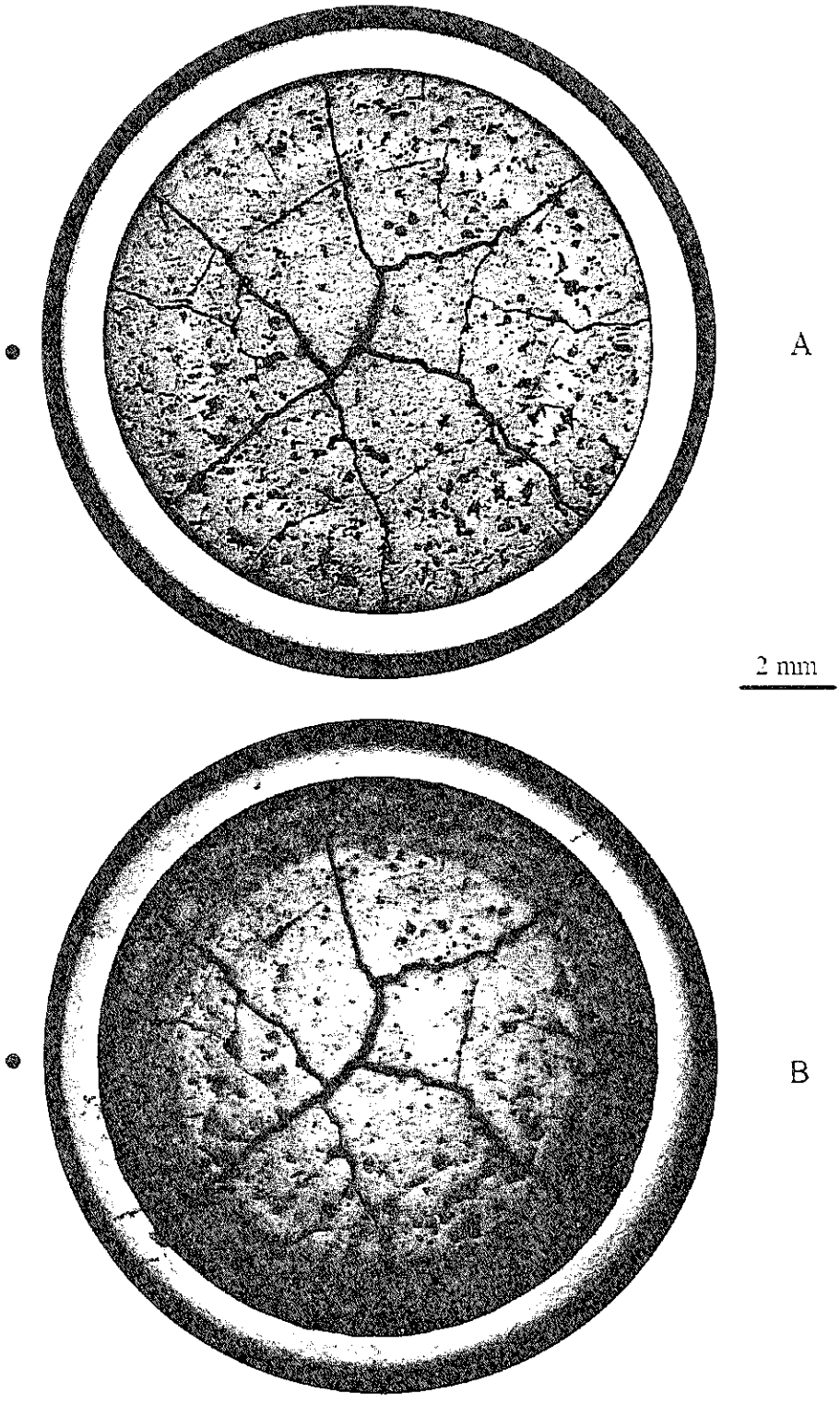


図5.8.1.3 IFA-565-3の金相写真（下部Vノッチから246mm）

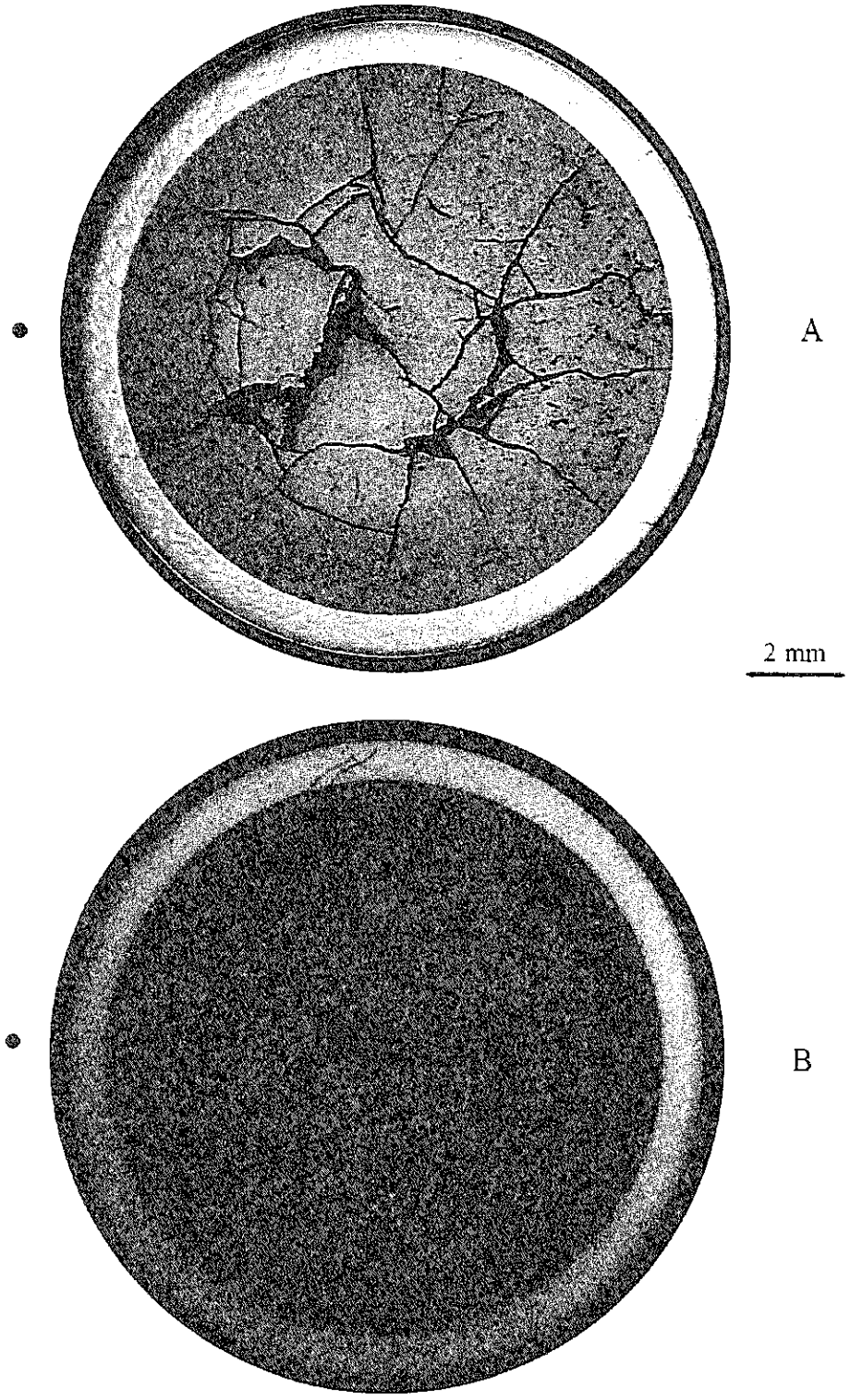


図5.8.1.4 IFA-565-3の金相写真（下部Vノッチから742mm）

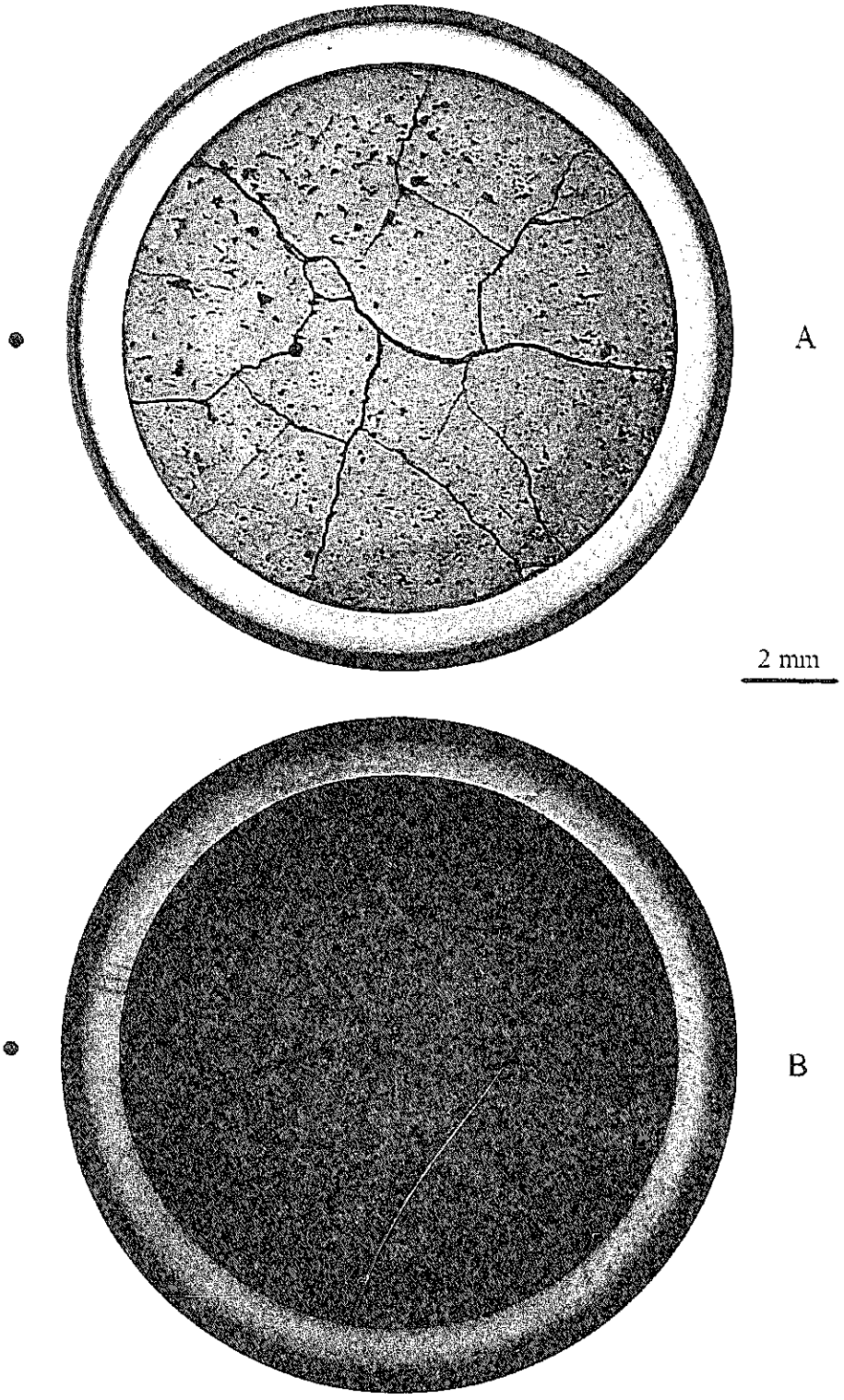


図5.8.1.5 IFA-565-3の金相写真（下部Vノッチから1245mm）

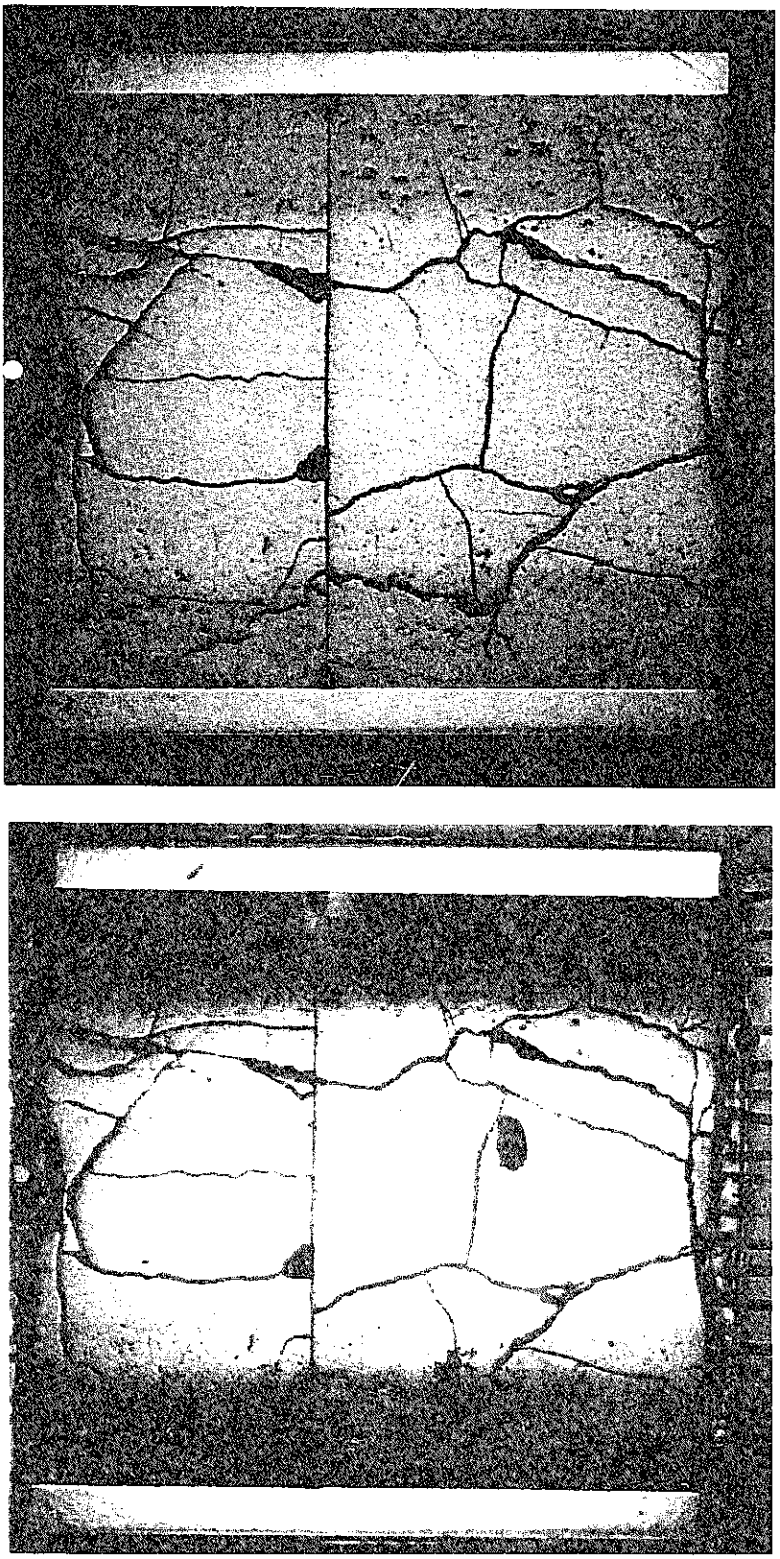


図5.8.1.6 IFA-565-3の金相写真（下部Vノッチから720-732mm）

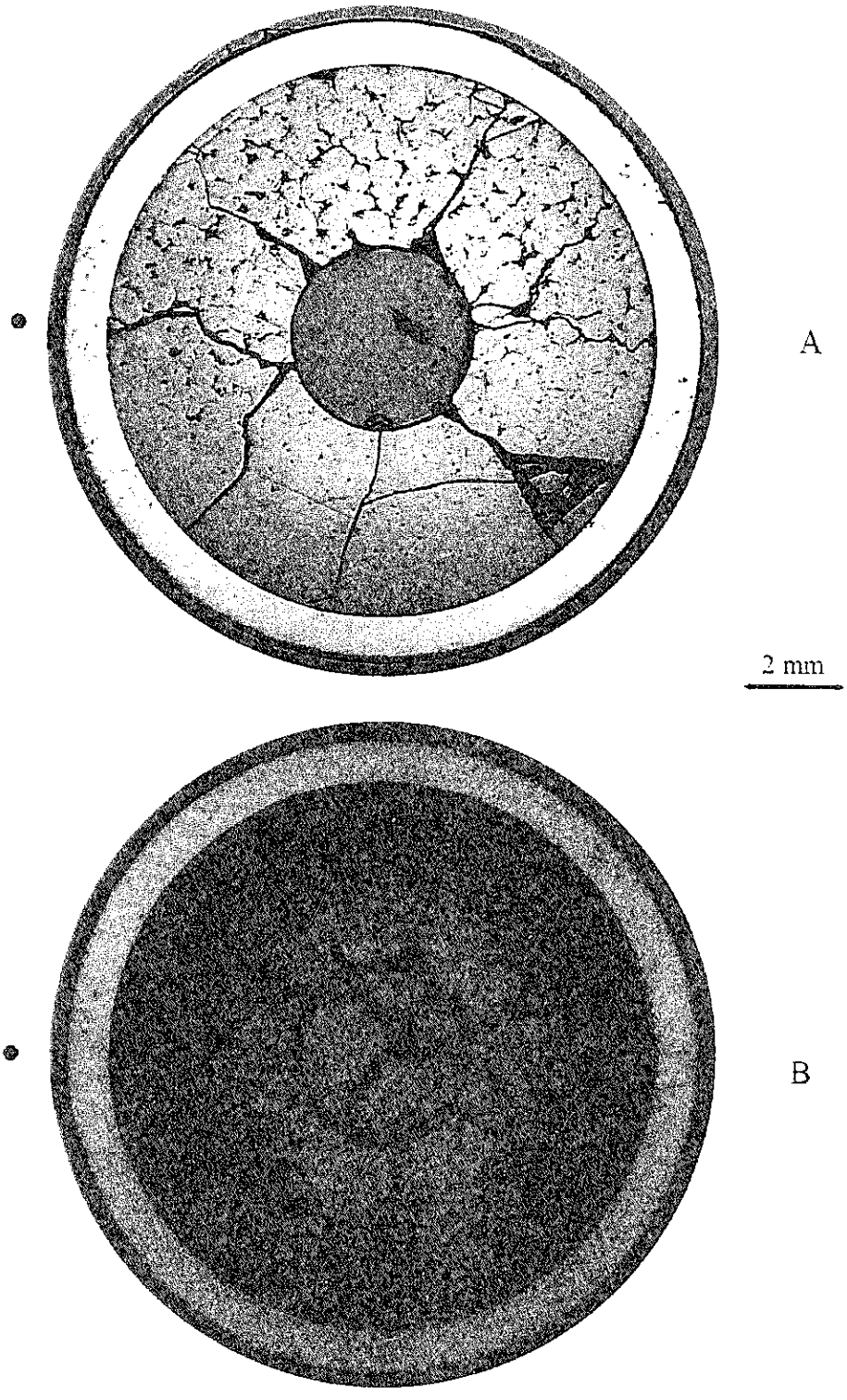


図5.8.1.7 IFA-565-6の金相写真（下部Vノッチから246mm）

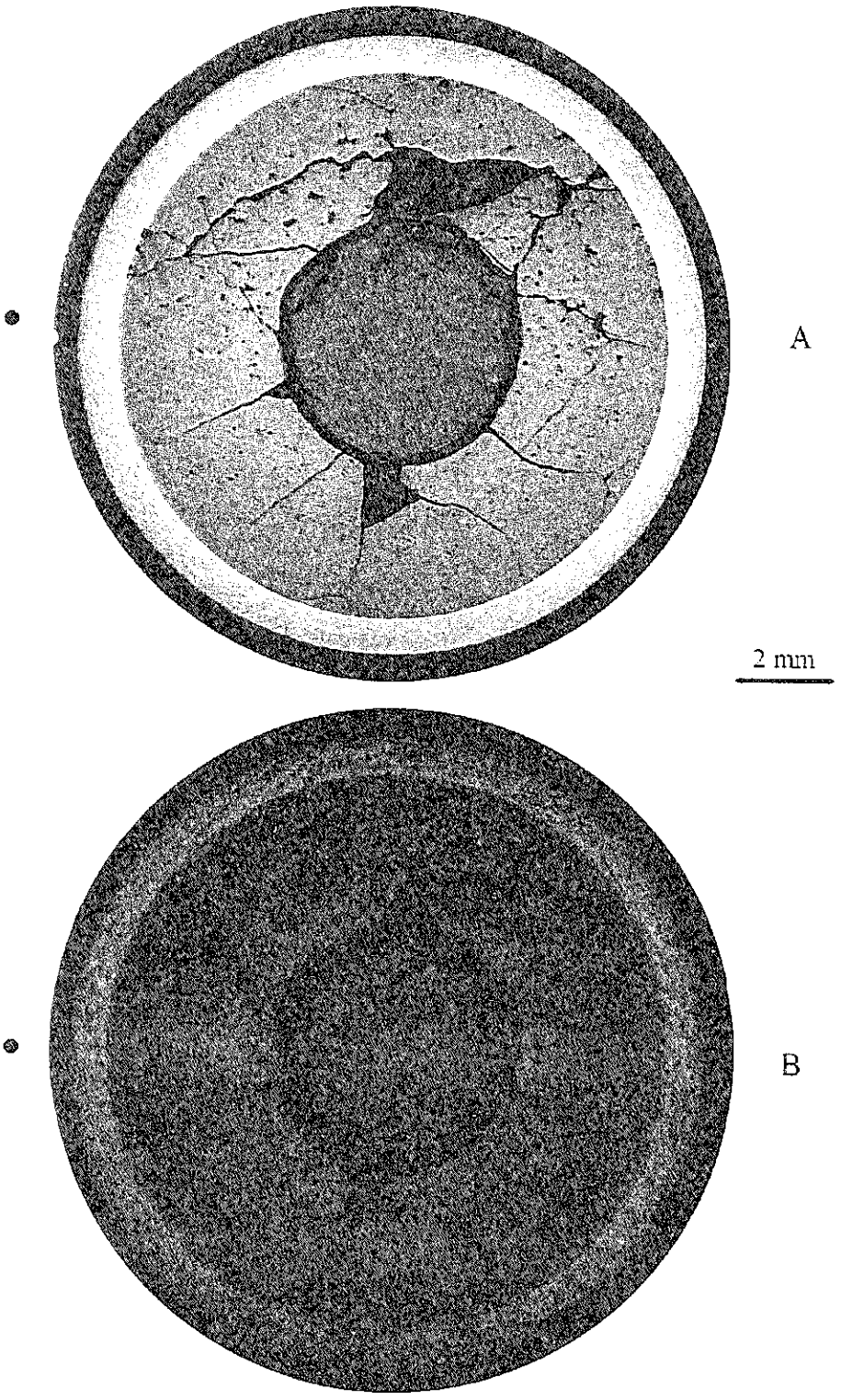


図5.8.1.8 IFA-565-6の金相写真（下部Vノッチから742mm）

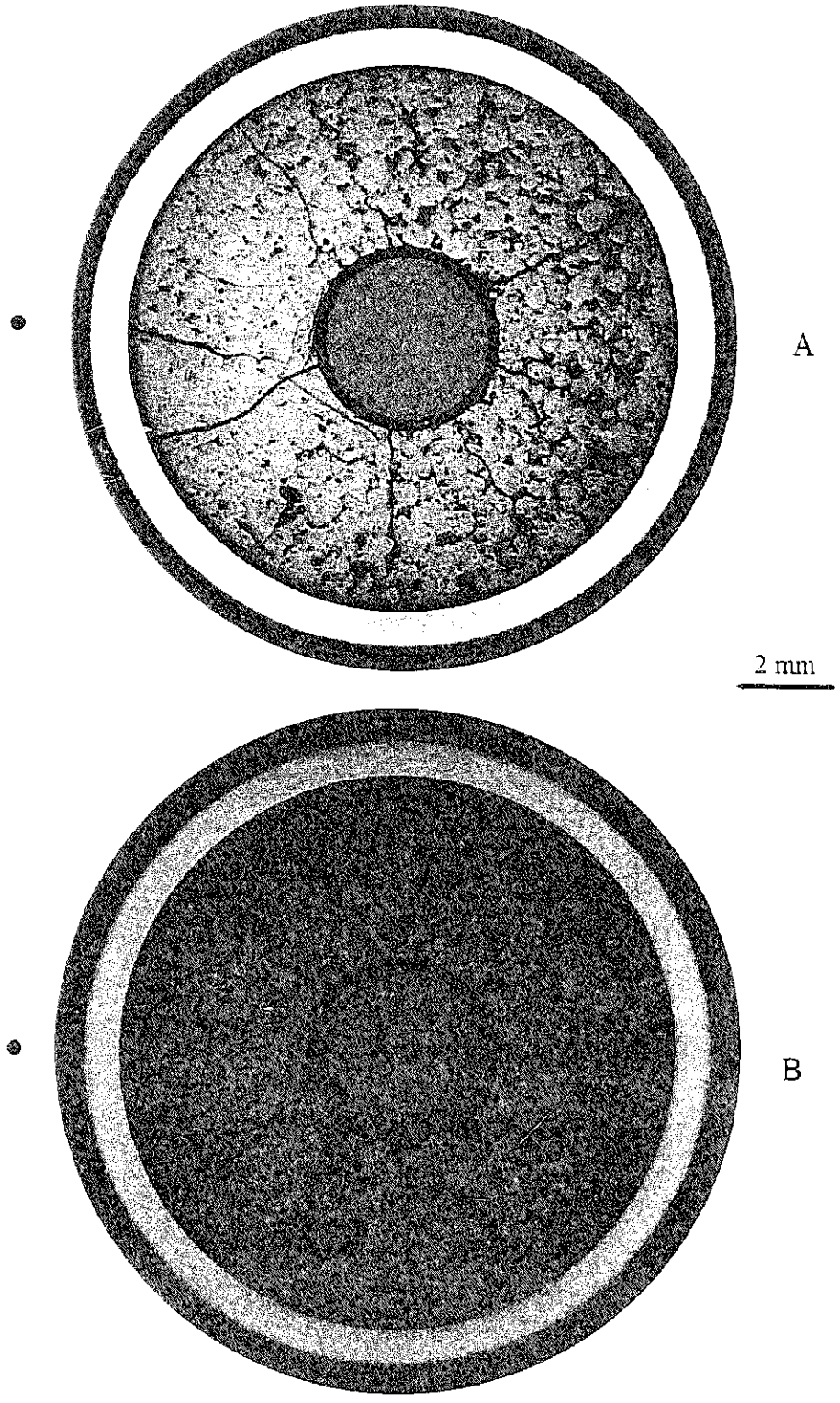


図5.8.1.9 IFA-565-6の金相写真（下部Vノッチから1245mm）

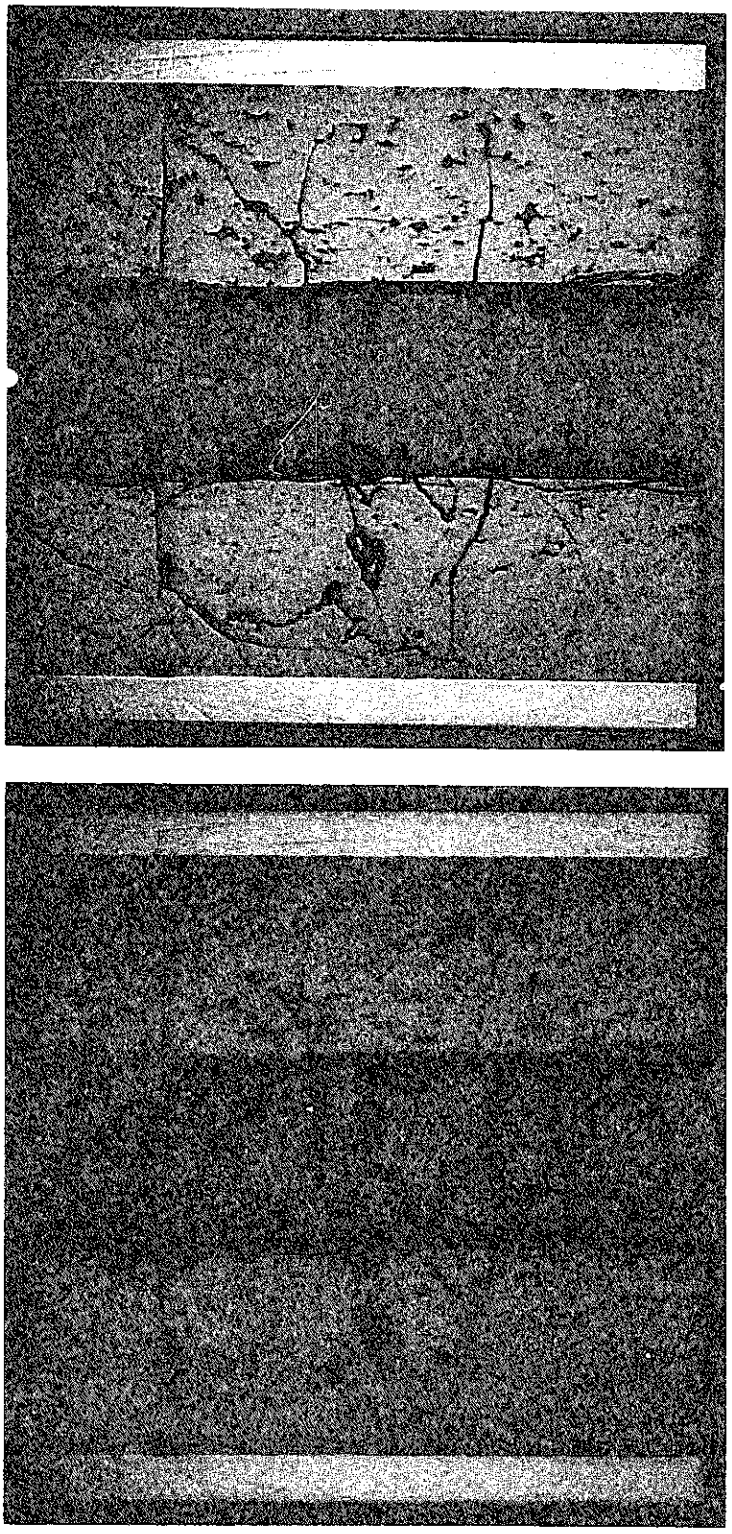


図5.8.1.10 IFA-565-6の金相写真（下部Vノッチから720-732mm）

5.8.2 被覆管　水素化物

ジルカロイ被覆管の水素化物は、エッチング研磨により現れる。この技術は、被覆管中の水素化物の定性的な分布、位置、方位を明らかにするために開発されたものである。エッチング研磨法は、水素化物量の定量には直接適用できない。さらに、燃料ロッドの周方向、軸方向の中性子フラックスが変動すると、生じた欠陥の総量が変動する。エッチング研磨すると、欠陥密度の高い部分がアタックされる。

金相用にエッチング研磨された横断面を、被覆管中の水素化物の総量と分布といった観点から定性的に検討した。被覆管中の水素化物の代表的な顕微鏡写真を0、90、180、270°方向で示した。顕微鏡写真に合わせて全体のロッド横断面のマクロ写真を示した。

246、742、1245mm（横断面）でのIFA-565-3の被覆管中に析出した水素化物を図5.8.2.1～3に示す。720～732mmの縦断面での水素化物を図5.8.2.4に示す。IFA-565-6の被覆管中の水素化物の析出も同様であり、246、742、1245mm（横断面）の被覆管中の水素化物を図5.8.2.5～7に示す。720～732mmの縦断面での水素化物を図5.8.2.8に示す。

断面観察から表5.8.2.1のように水素化物方位と現れ方に著しい特徴がある。

途中取り出しのIFA-514-1, 2, 5と比較すると、IFA-514-1の水素化物は、主として周方向のみに析出し、周方向位置や肉厚方向での差は見られない。IFA-514-2, 5の水素化物は、主として周方向に、水側で肉厚方向に析出しており、水側で密となっている。この水側で密となる傾向は、燃焼度が進んだIFA-565-3, 6ではさらに進んでいる。周方向位置での分布については、ほとんどの場合ほぼ均一であるが、継続照射したIFA-565のうちIFA-565-3だけは180°方向で最大密度となっており周方向位置による水素化物の粗密が生じている。また、IFA-514では水素化物分析が行われておらず、比較はできなかった。

表5.8.2.1水素化物の現れ方

	IFA-565-3	IFA-565-6
水素化物の析出方位	半径方向と周方向の混合	基本的に周方向のみ
周方向位置と水素化物の析出量	不均一に分布 最大密度：180° 方向	周方向に均一に分布
径方向分布と水素化物量	水側ほど増加	水側ほど増加
水素化物の現れ方	半径方向と周方向の両方どちらが支配的ということはない	周方向が支配的
水素分析結果との比較（表5.14.1参照）	148ppm (718- 720mm) 132ppm (1008-1010mm)	138ppm (718- 720mm) 125ppm (1008-1010mm)

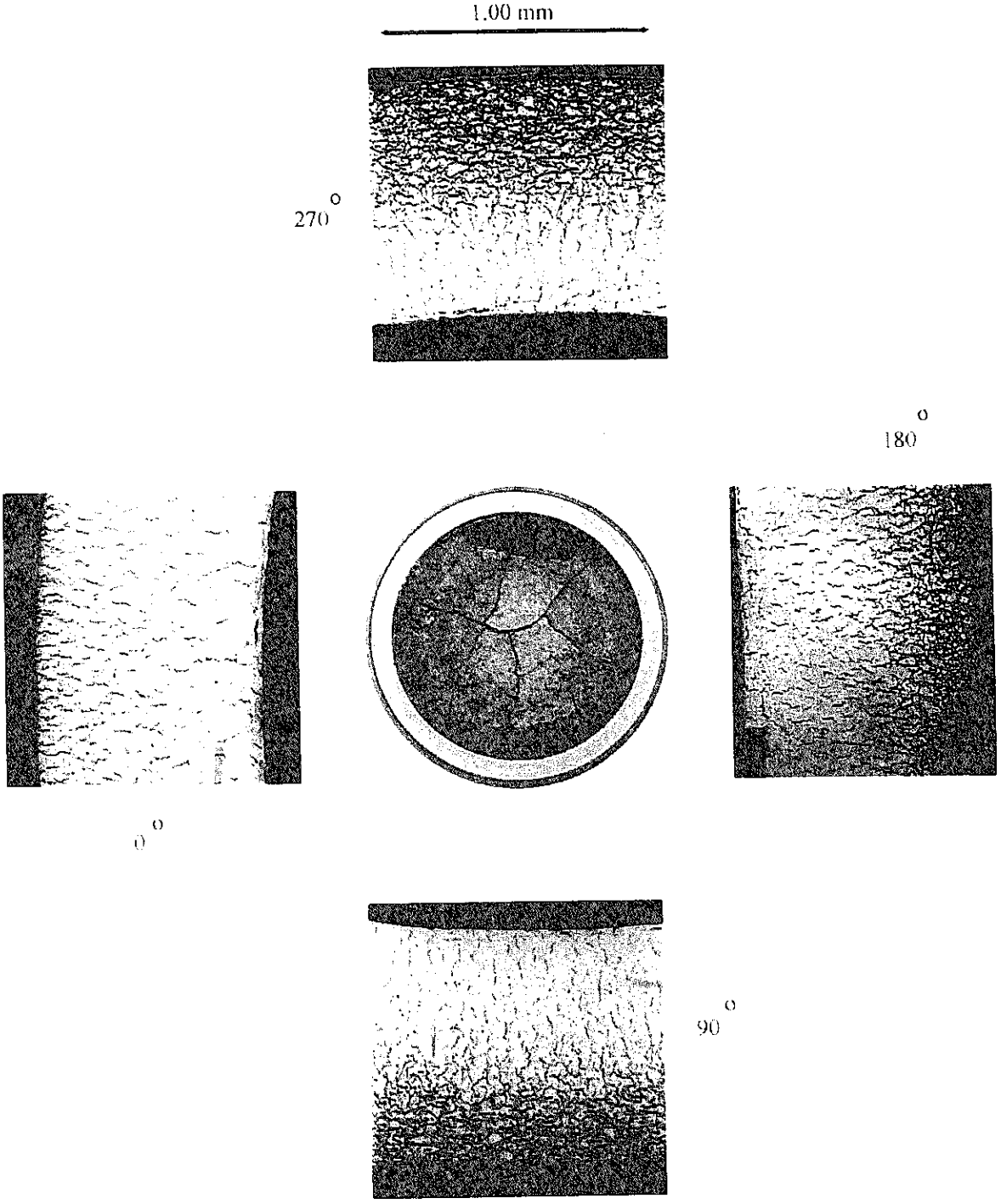


図5.8.2.1　IFA-565-3の被覆管水素化物（246mm位置　横断面、エッチング研磨）

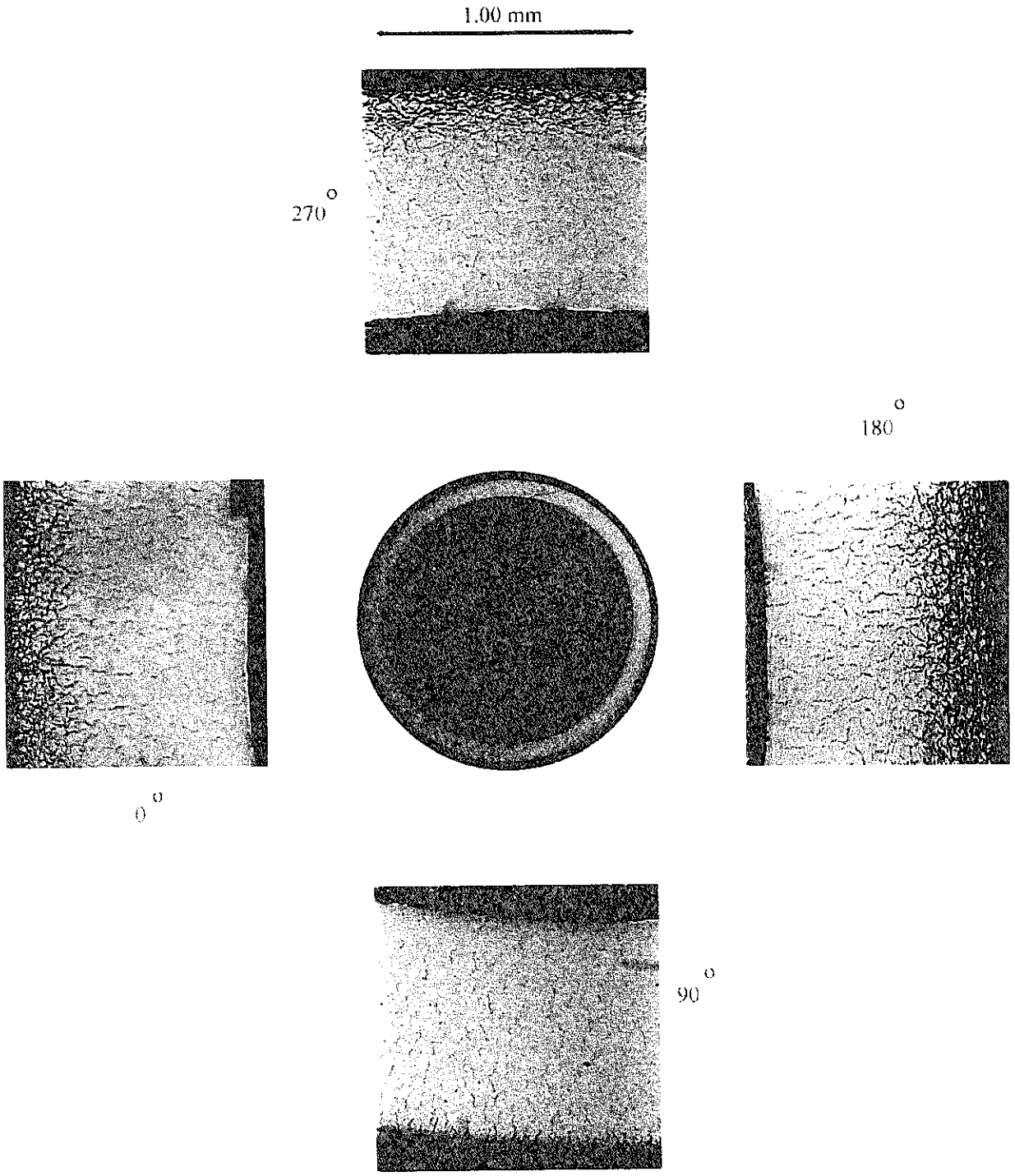


図5.8.2.2　IFA-565-3の被覆管水素化物（742mm位置　横断面、エッチング研磨）

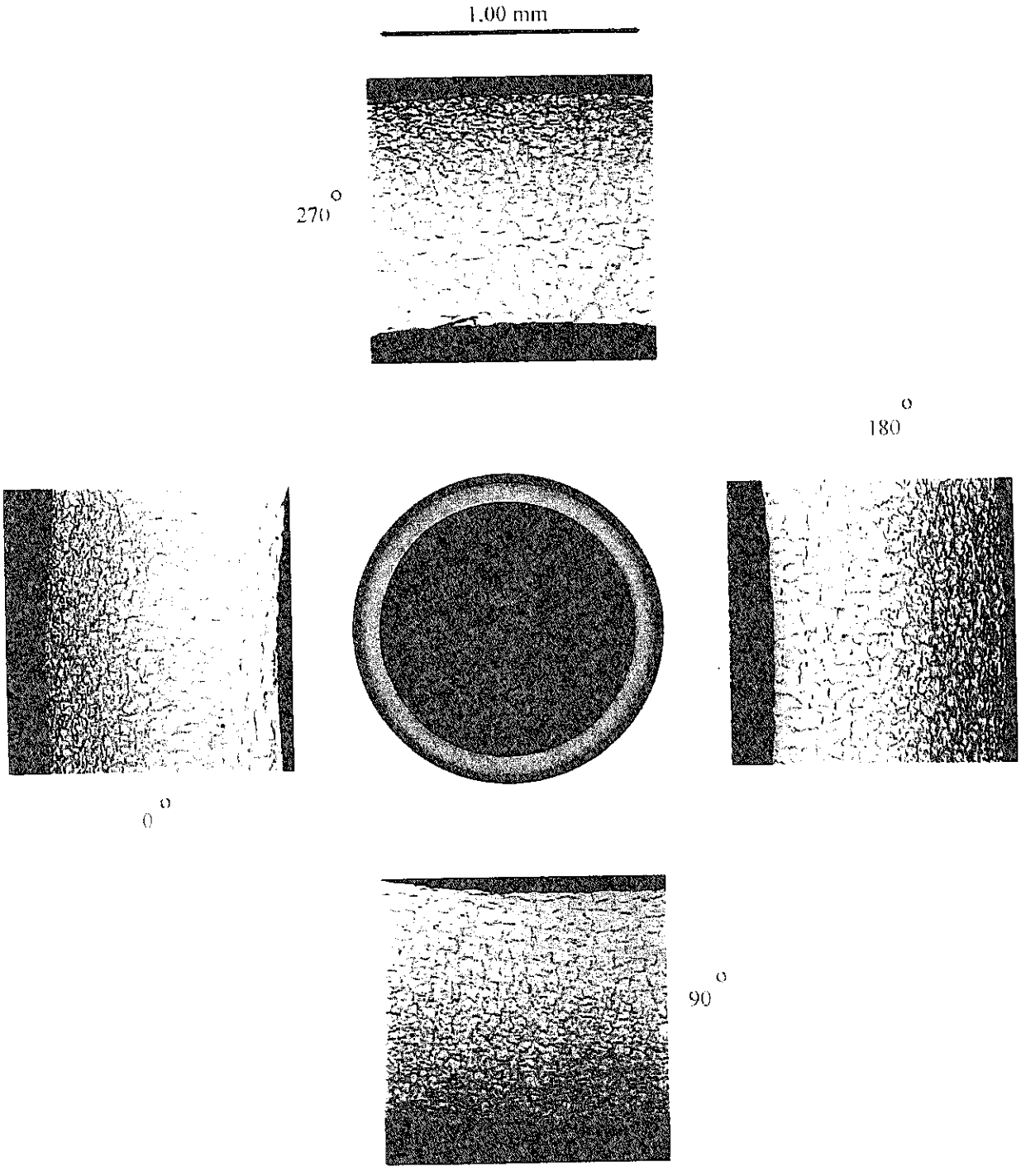


図5.8.2.3　IFA-565-3の被覆管水素化物（1245mm位置　横断面、エッチング研磨）

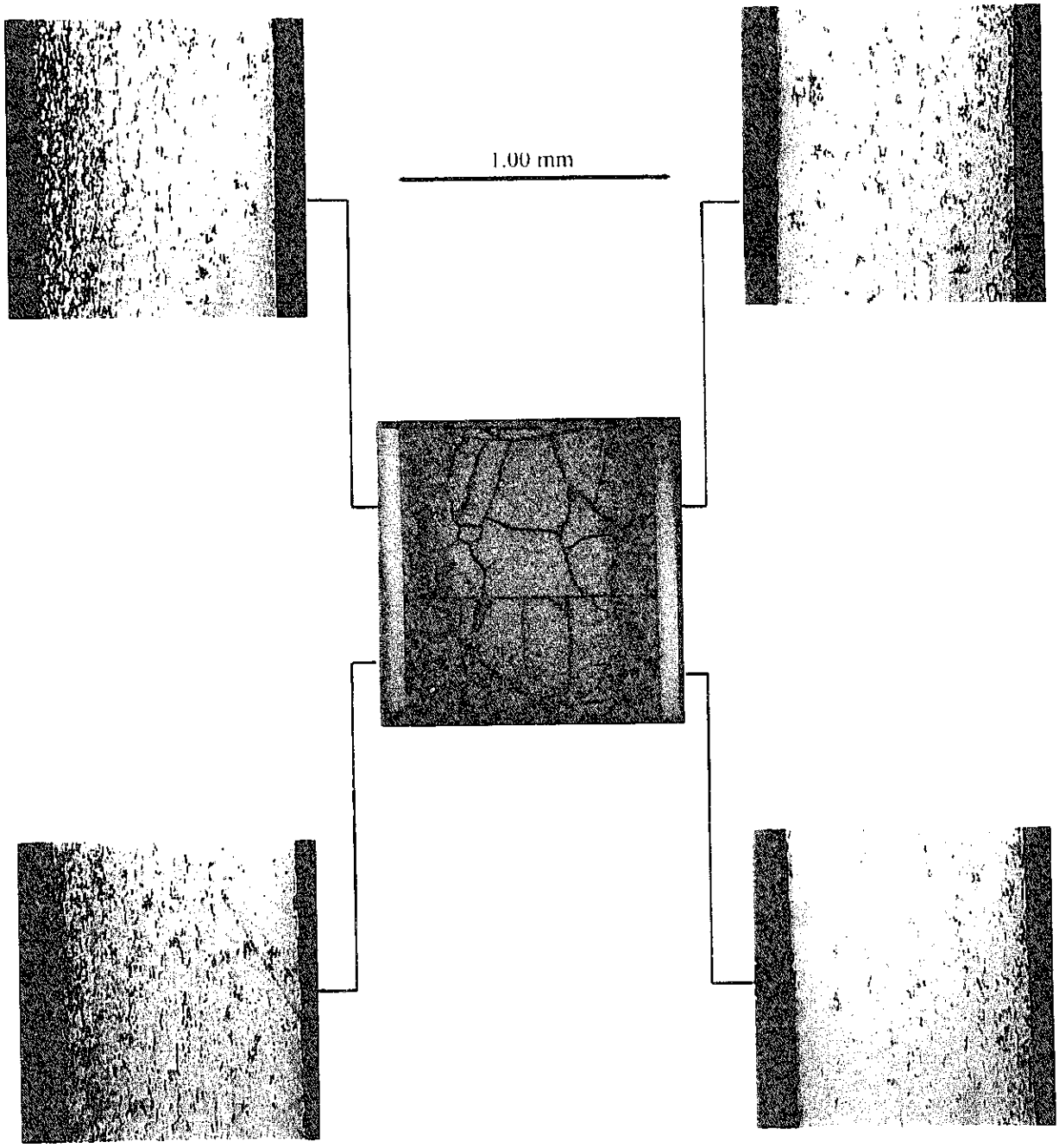


図5.8.2.4　IFA-565-3の被覆管水素化物（720-732mm位置　横断面、エッチング研磨）

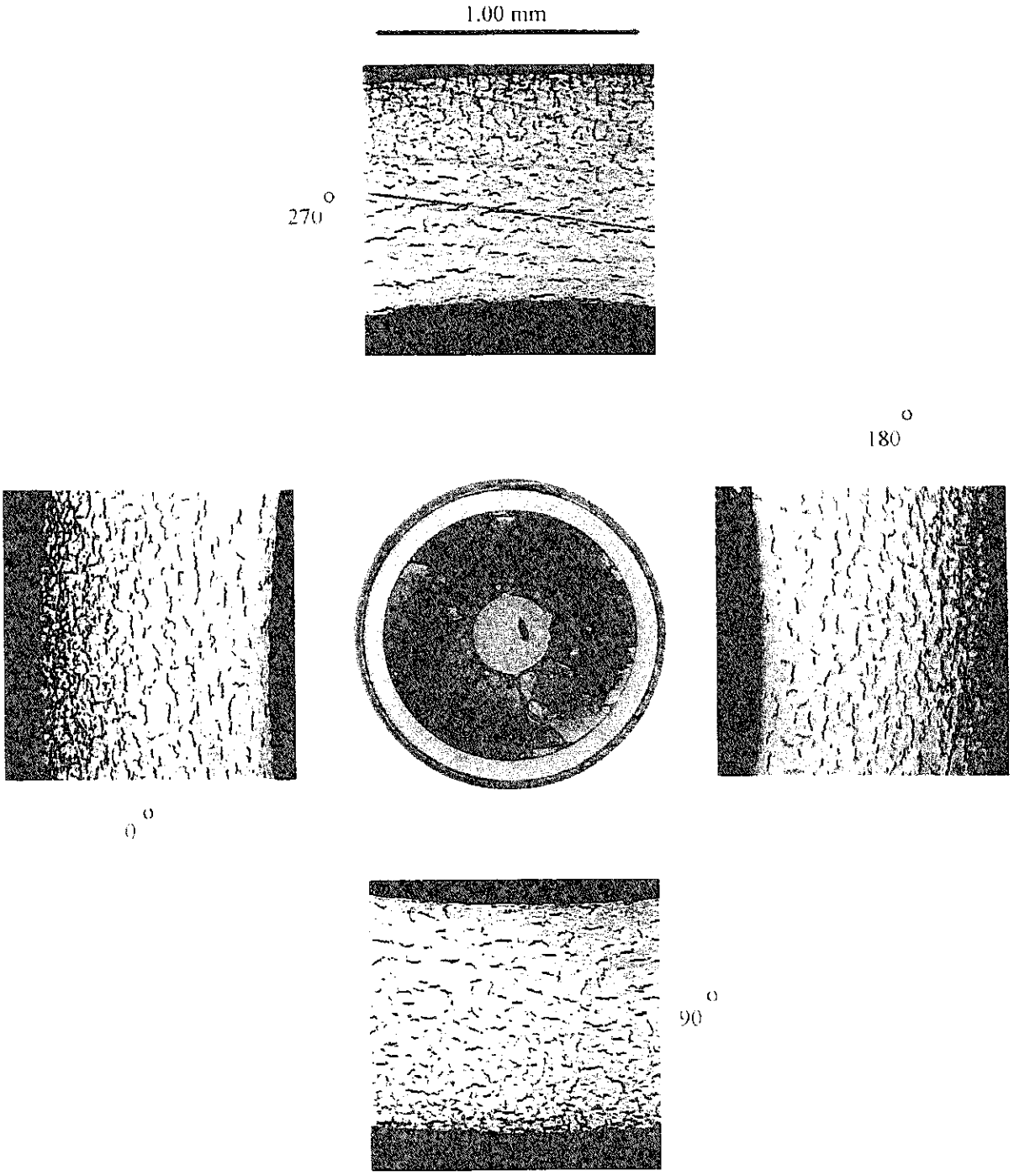


図5.8.2.5　IFA-565-6の被覆管水素化物（246mm位置　横断面、エッチング研磨）

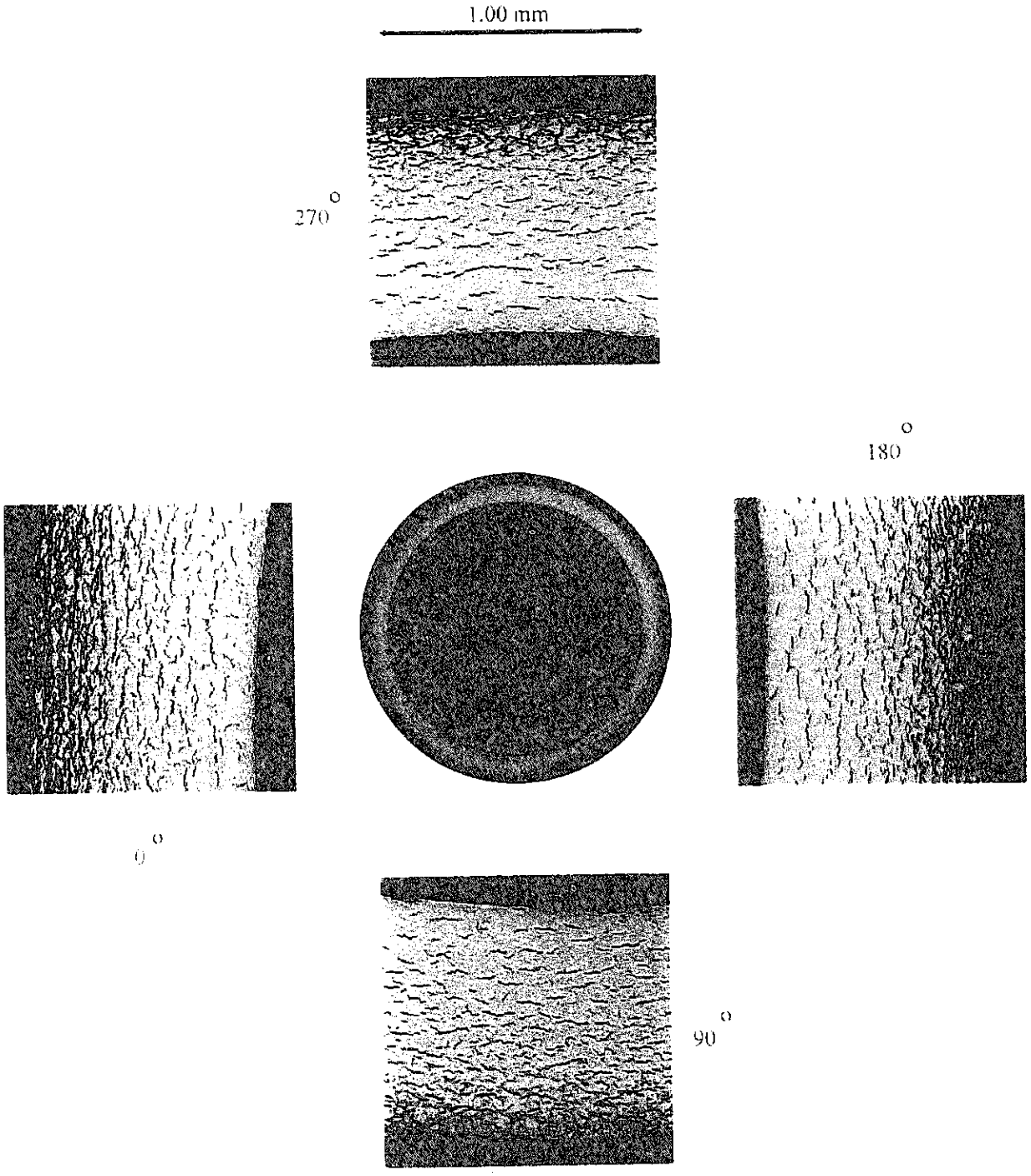


図5.8.2.6　IFA-565-6の被覆管水素化物（742mm位置　横断面、エッチング研磨）

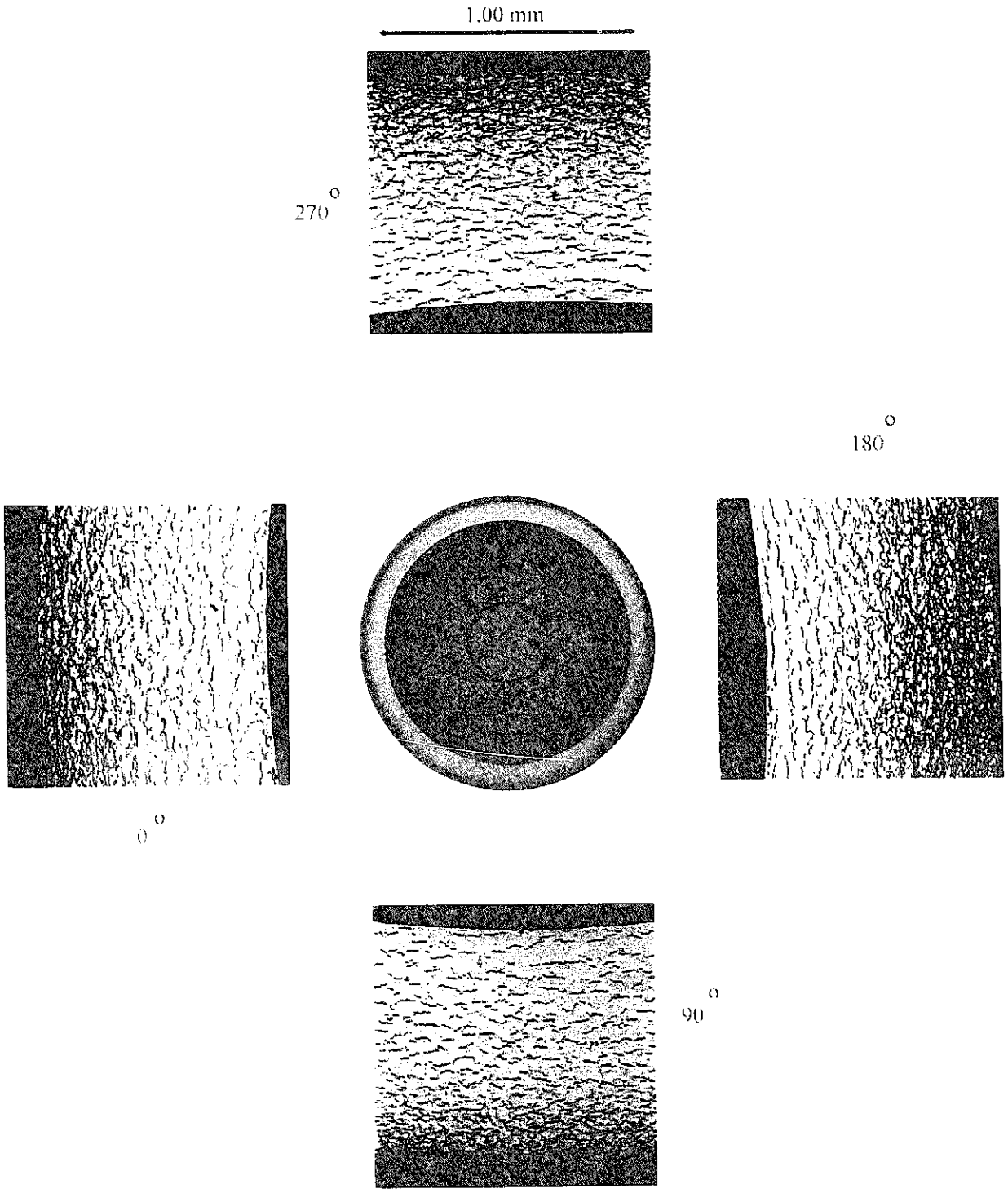


図5.8.2.7　IFA-565-6の被覆管水素化物（1245mm位置　横断面、エッチング研磨）

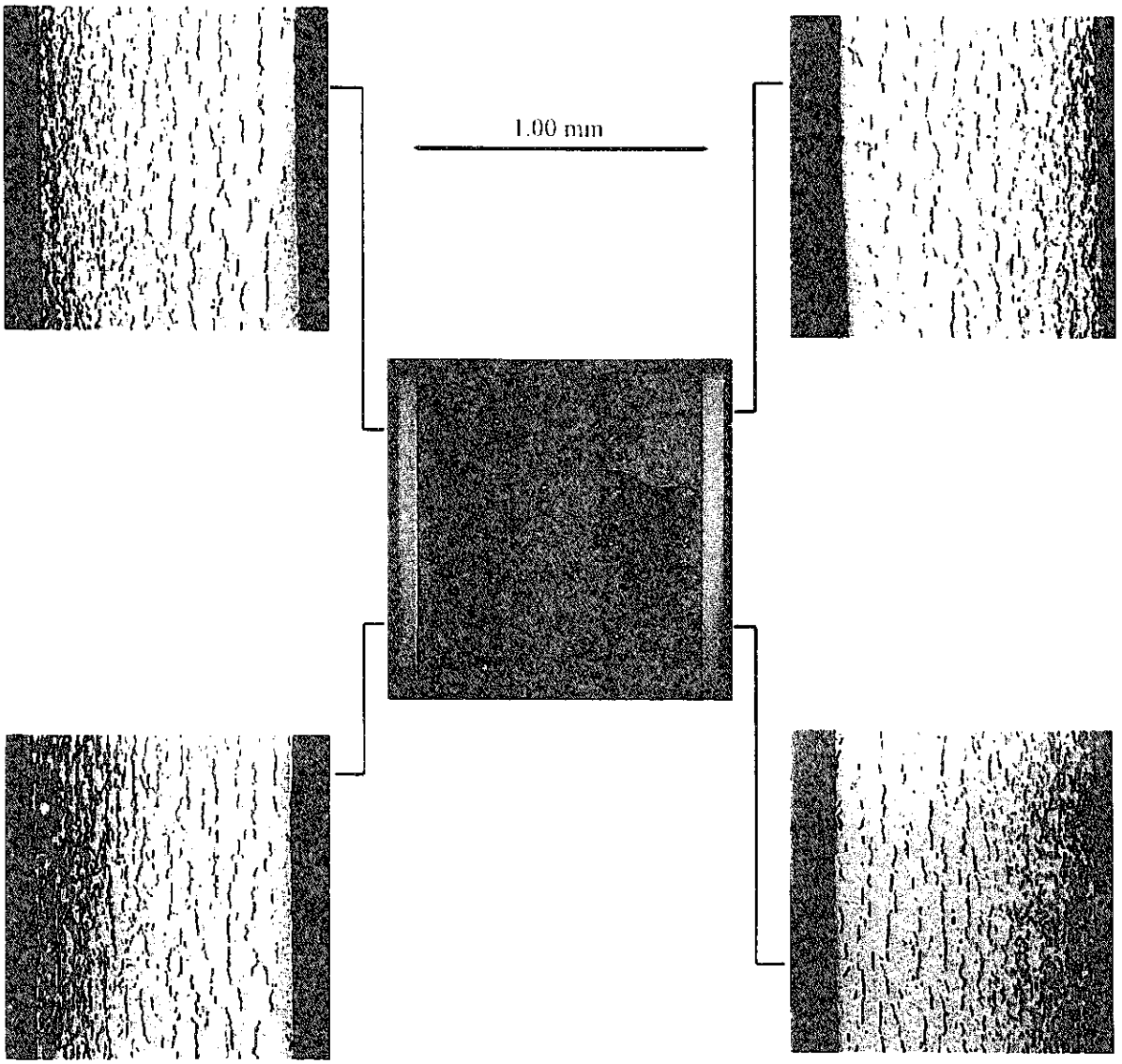


図5.8.2.8　IFA-565-6の被覆管水素化物（720-732mm位置　横断面、エッチング研磨）

5.8.3 被覆管　酸化物

IFA-565-3について、水側と燃料側の被覆管上の酸化膜をそれぞれ以下の軸方向位置の横断面で示した：246mm（図5.8.3.1～2）、742mm（図5.8.3.3～4）、1245mm（図5.8.3.5～6）。720-732mmの縦断面（図5.8.3.7～8）。
IFA-565-6についても同様に：246mm（図5.8.3.9～10）、742mm（図5.8.3.11～12）、1245mm（図5.8.3.13～14）。720-732mmの縦断面（図5.8.3.15～16）。
横断面の酸化膜を示す図には、上から下にそれぞれ0°,90°, 180° , 270° 方向の4つの写真を示した。

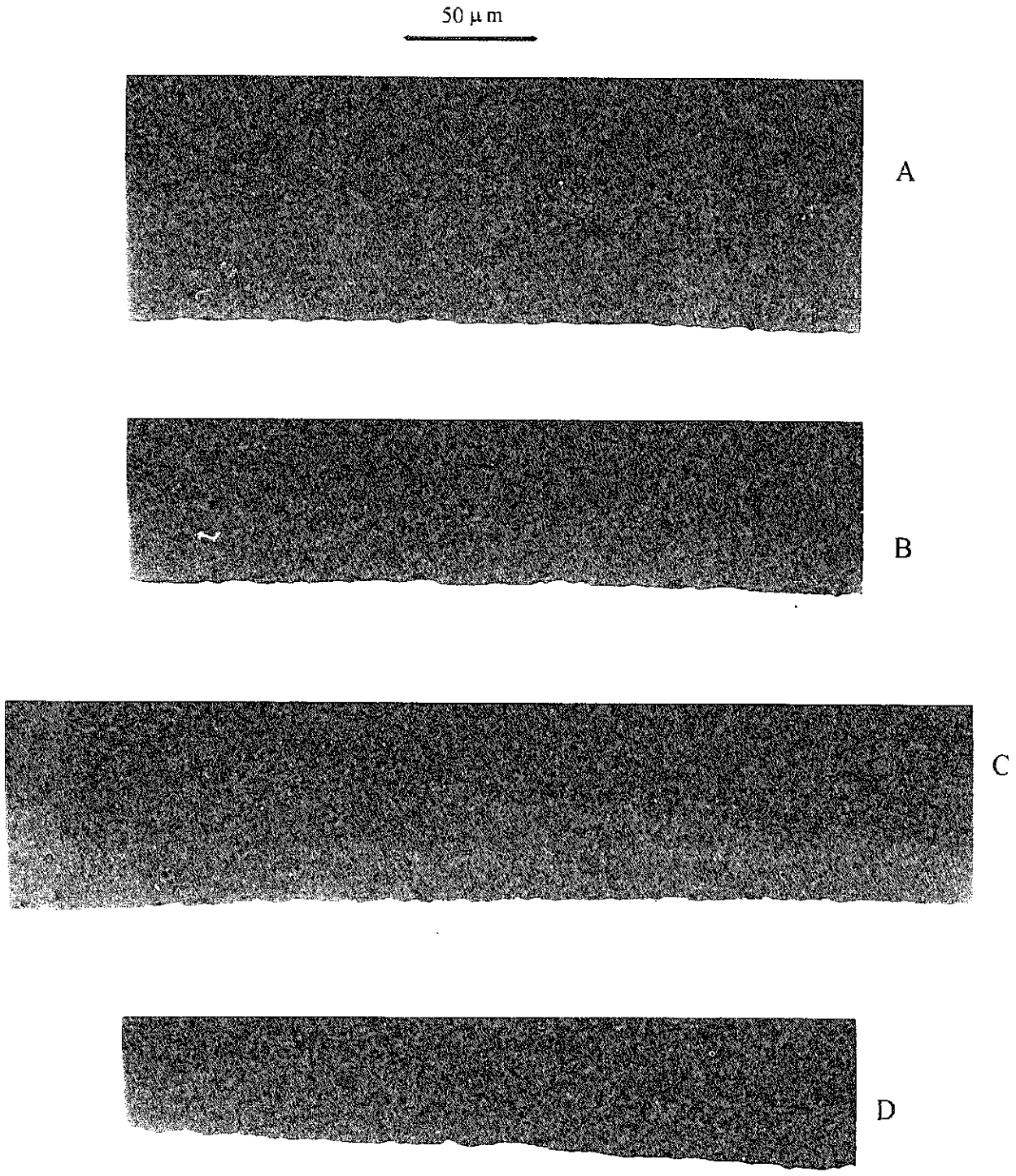


図5.8.3.1　IFA-565-3の水側酸化膜（246mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

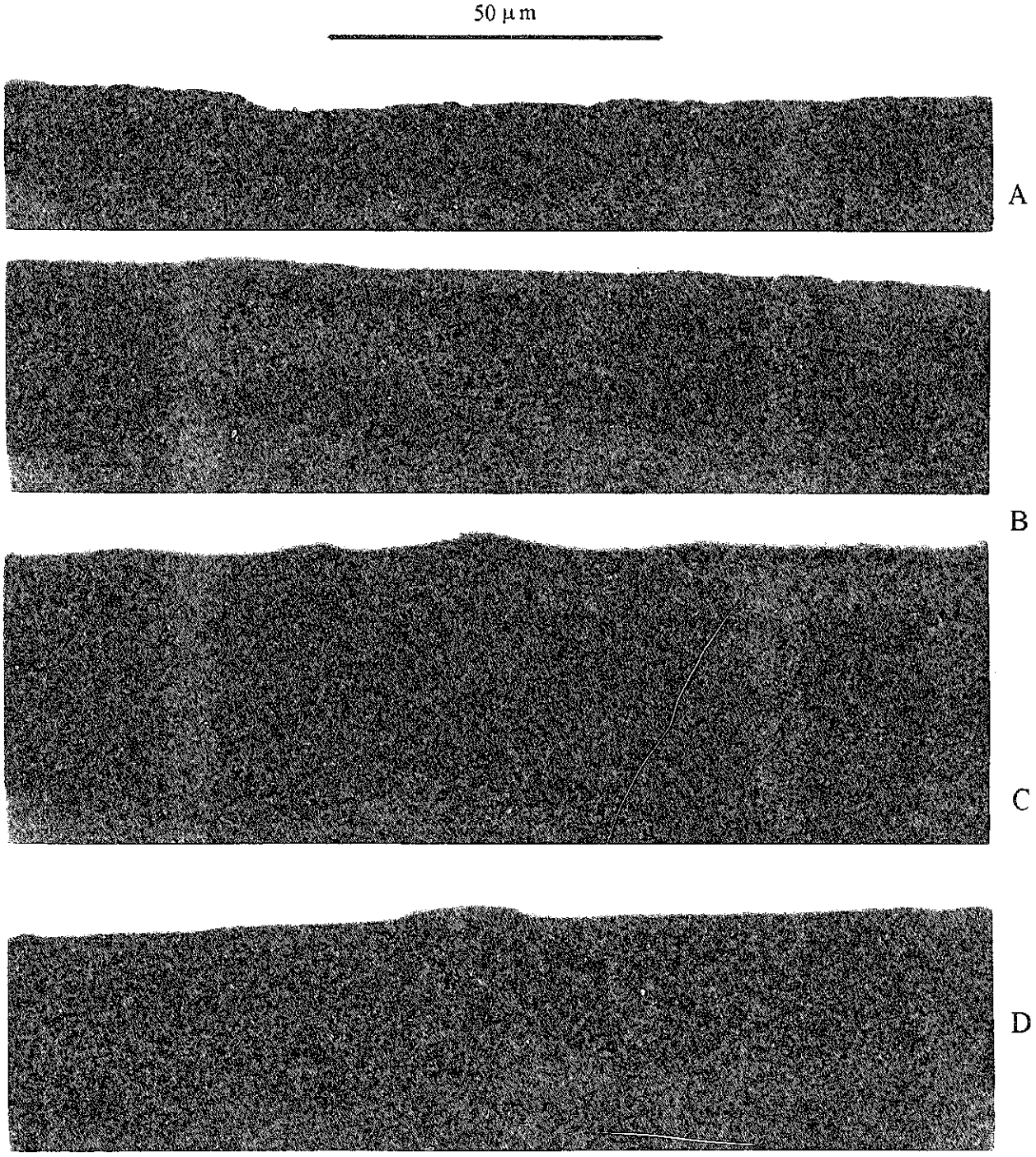


図5.8.3.2　IFA-565-3の燃料側酸化膜（246mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

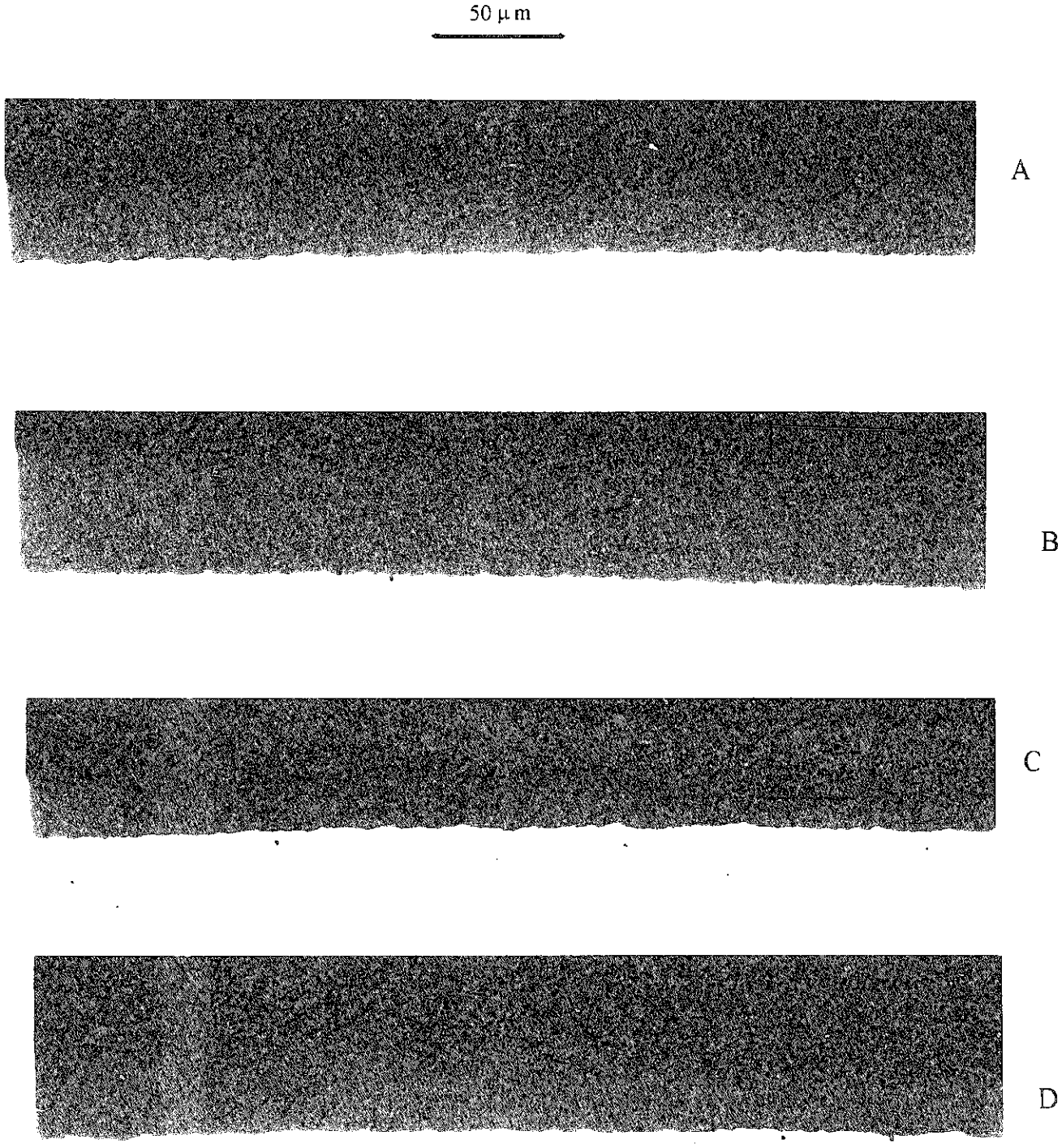


図5.8.3.3　IFA-565-3の水側酸化膜（742mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

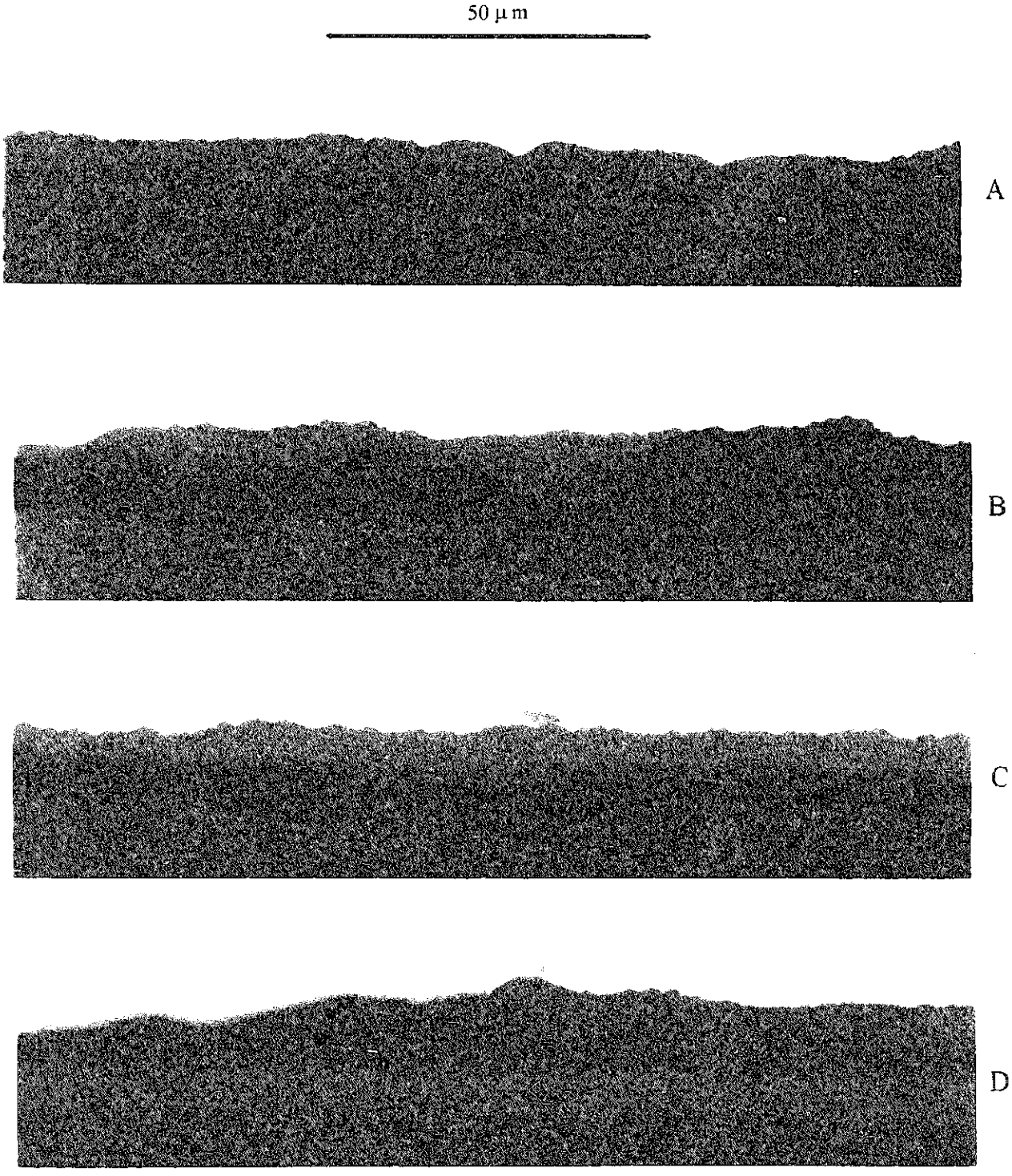


図5.8.3.4　IFA-565-3の燃料側酸化膜（742mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

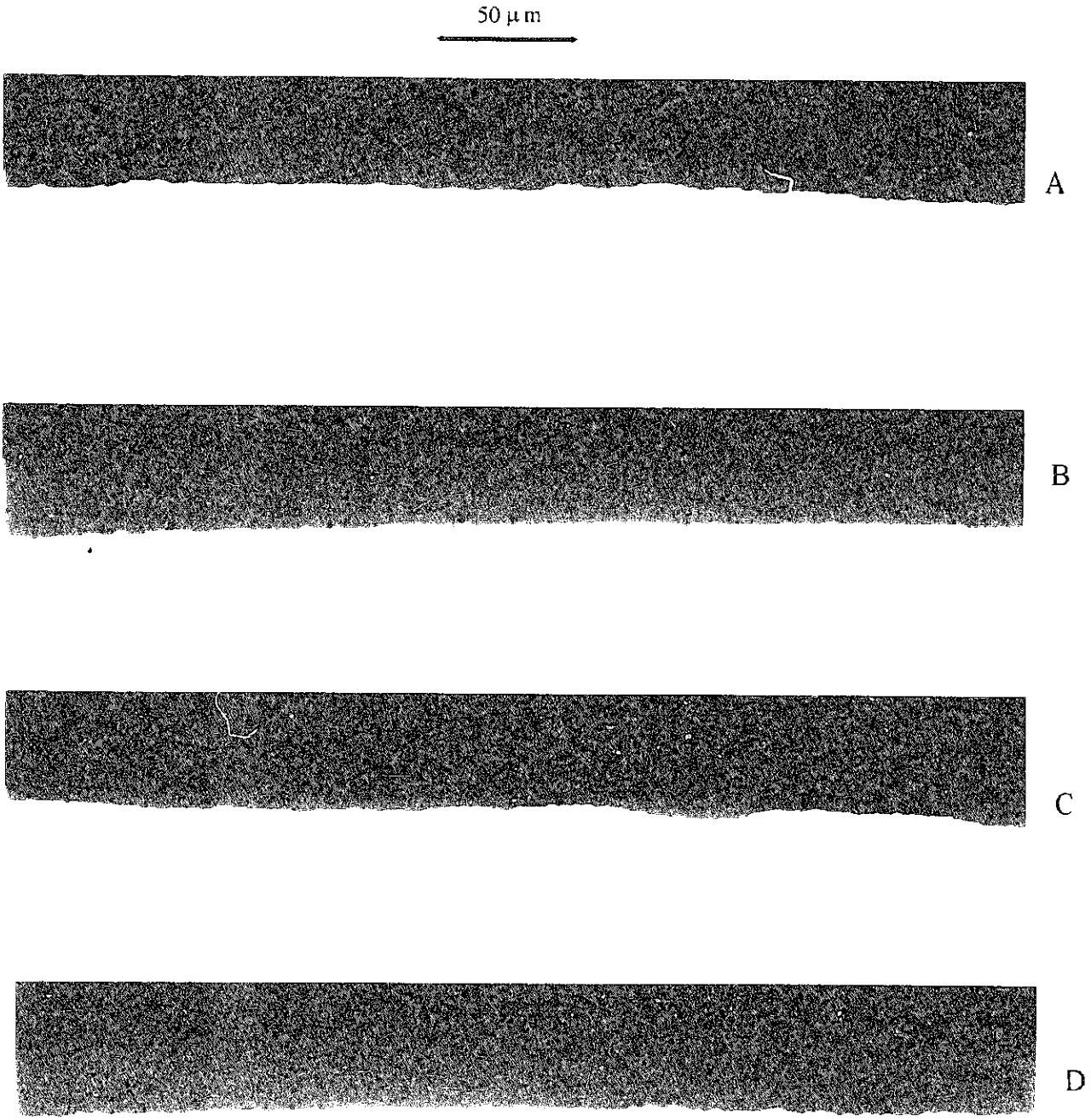


図5.8.3.5　IFA-565-3の水側酸化膜（1245mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

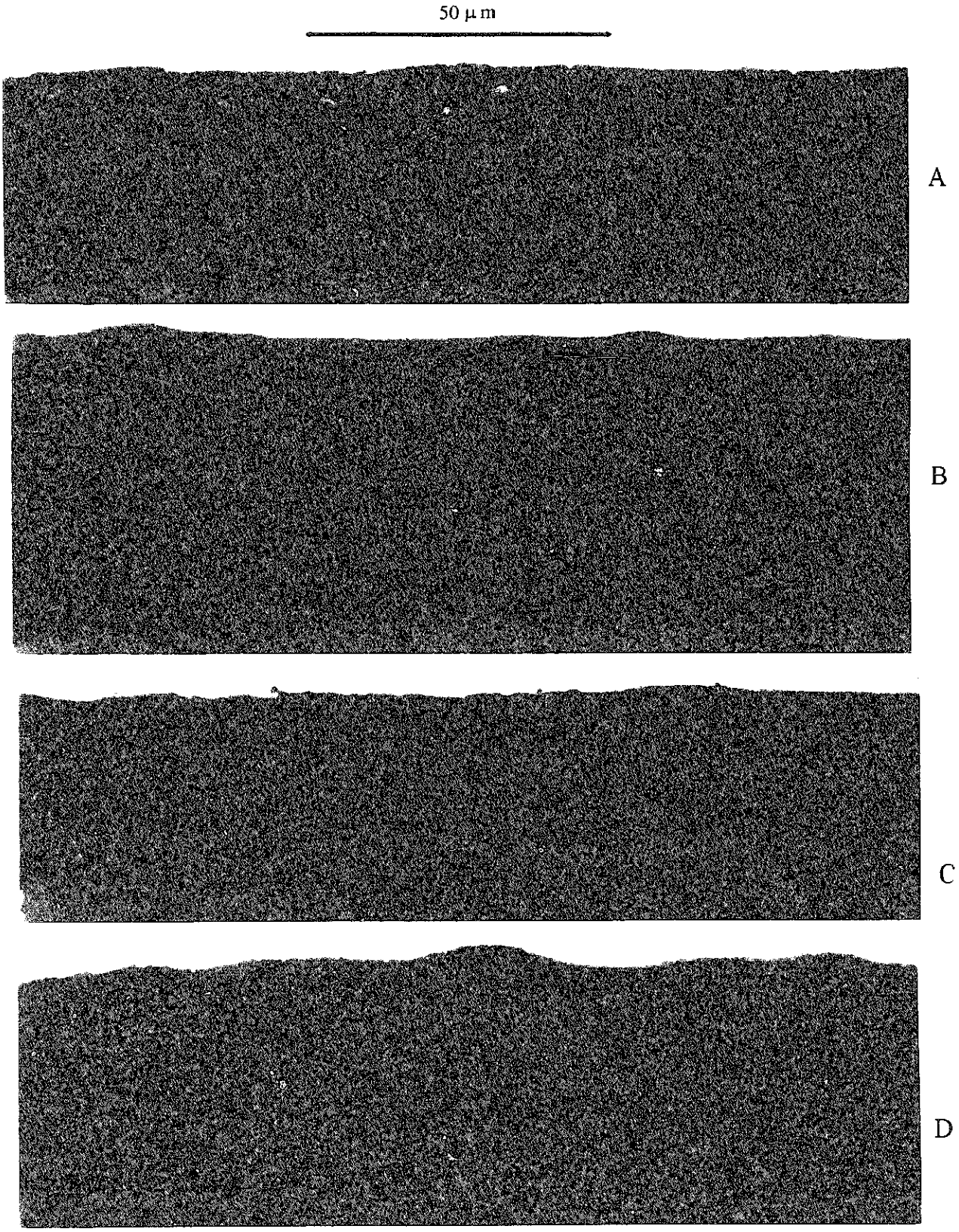


図5.8.3.6　IFA-565-3の燃料側酸化膜（1245mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

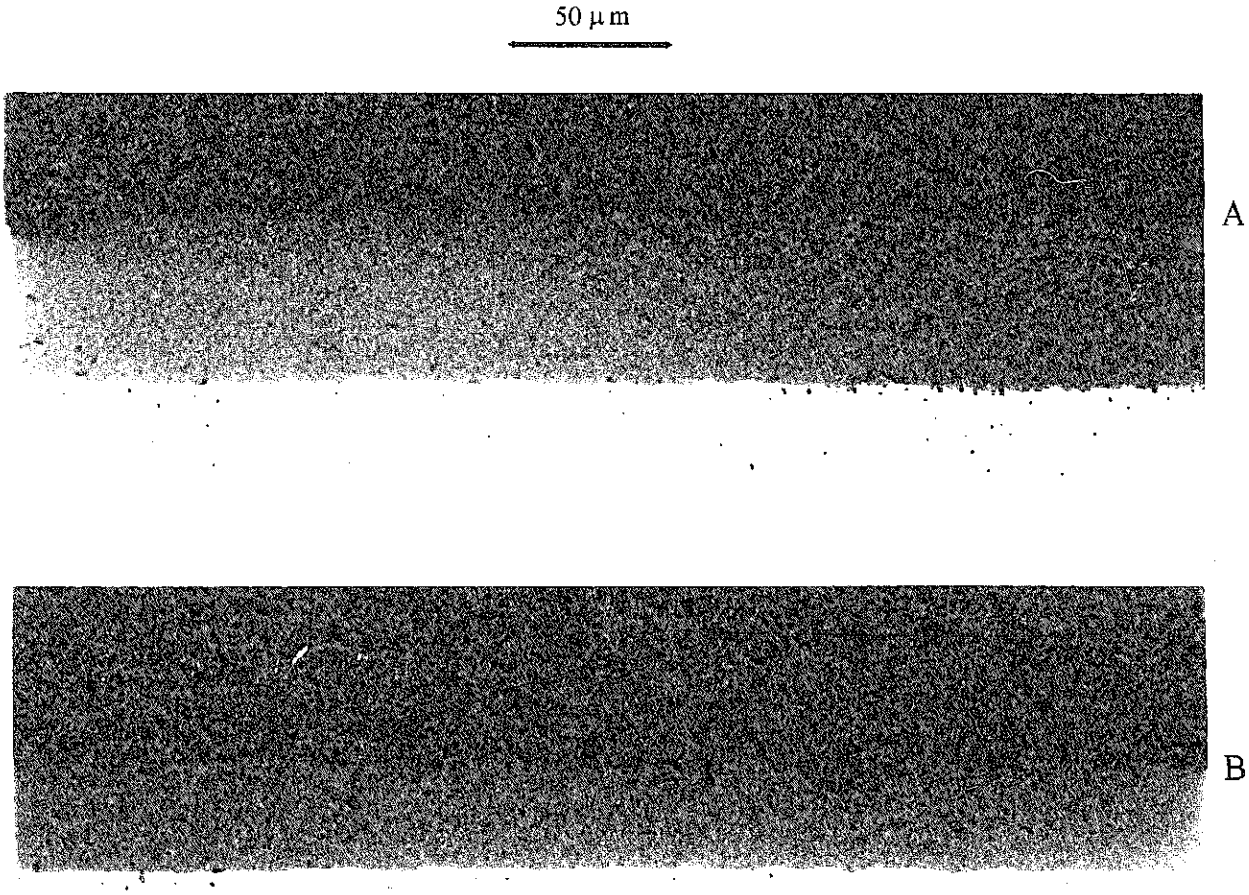


図5.8.3.7　IFA-565-3の水側酸化膜（720-732mm位置　縦断面、研磨）
A：90°、C：270°

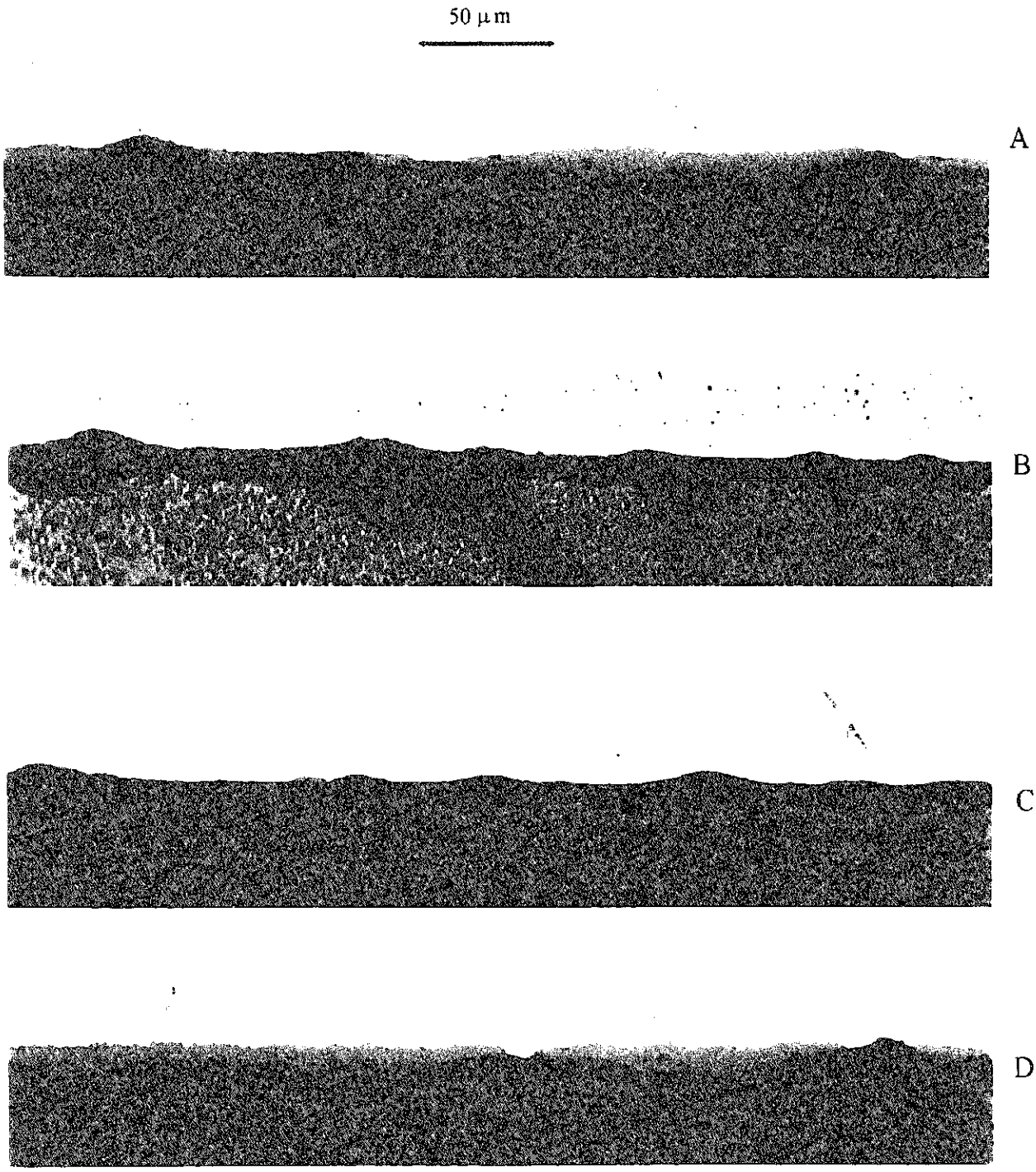


図5.8.3.8　IFA-565-3の燃料側酸化膜（720-732mm位置　縦断面、研磨）
A、B：90°、C、D：270°

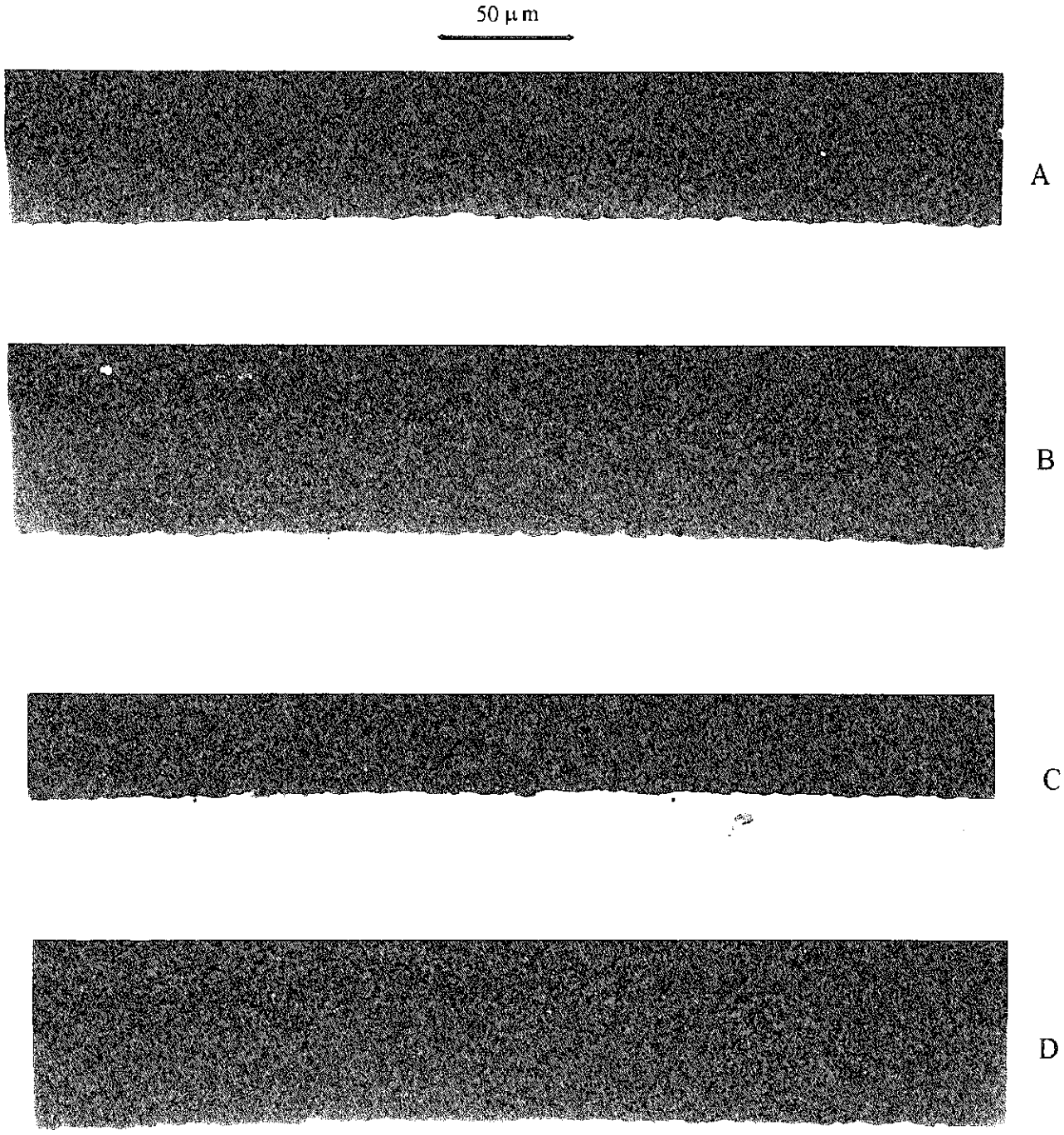


図5.8.3.9　IFA-565-6の水側酸化膜（246mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

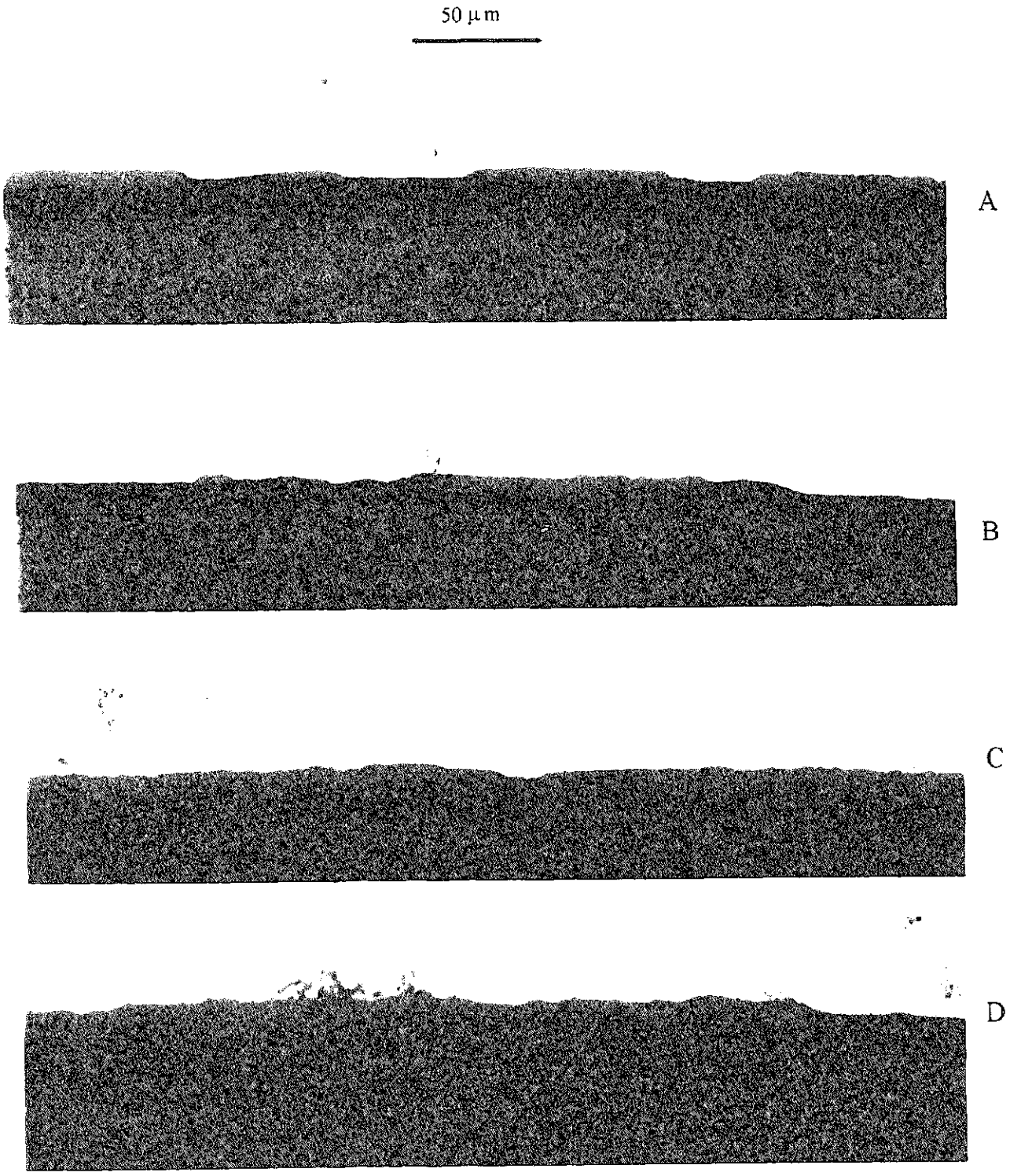


図5.8.3.10　IFA-565-6の燃料側酸化膜（246mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

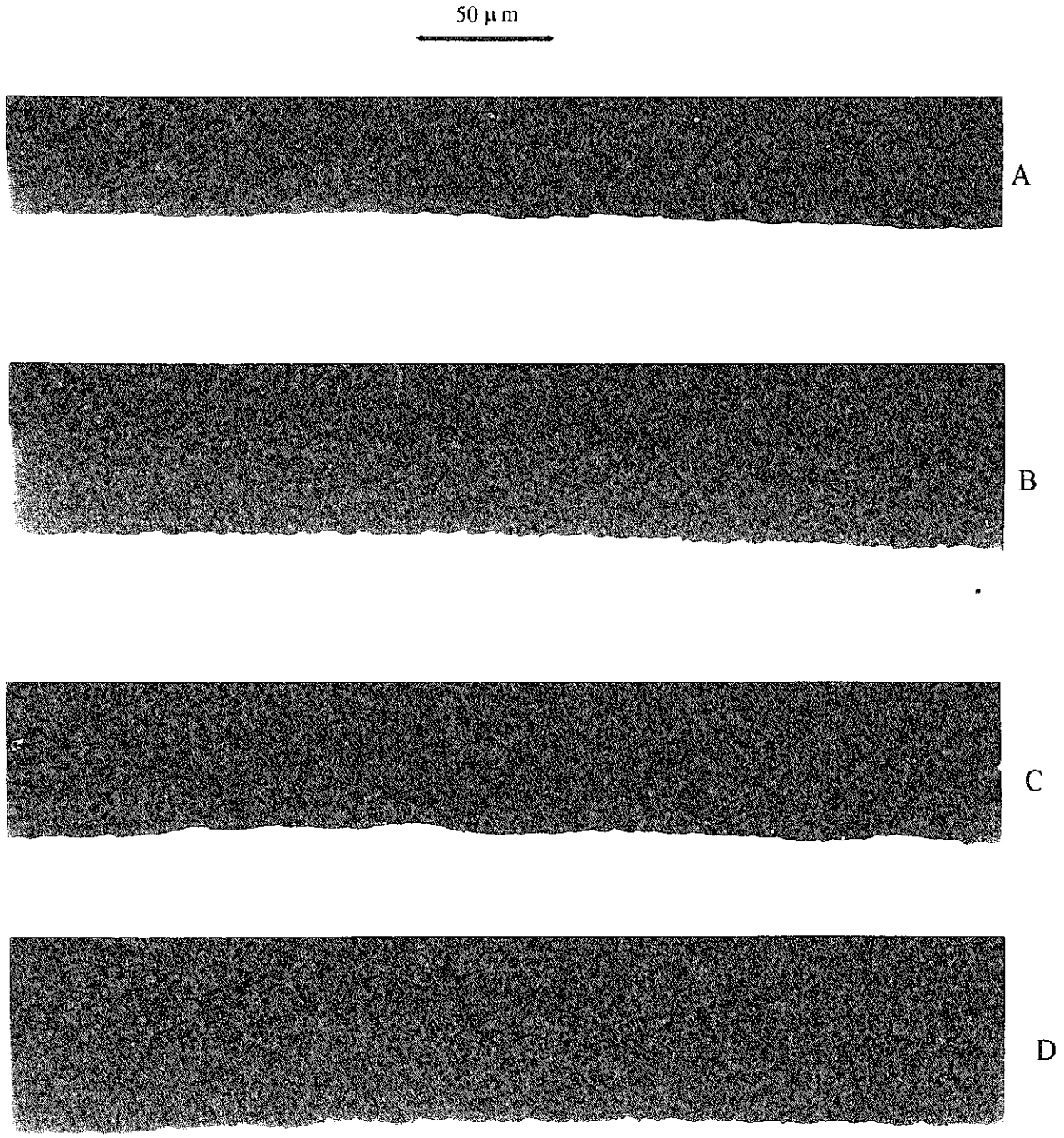


図5.8.3.11　IFA-565-6の水側酸化膜（742mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

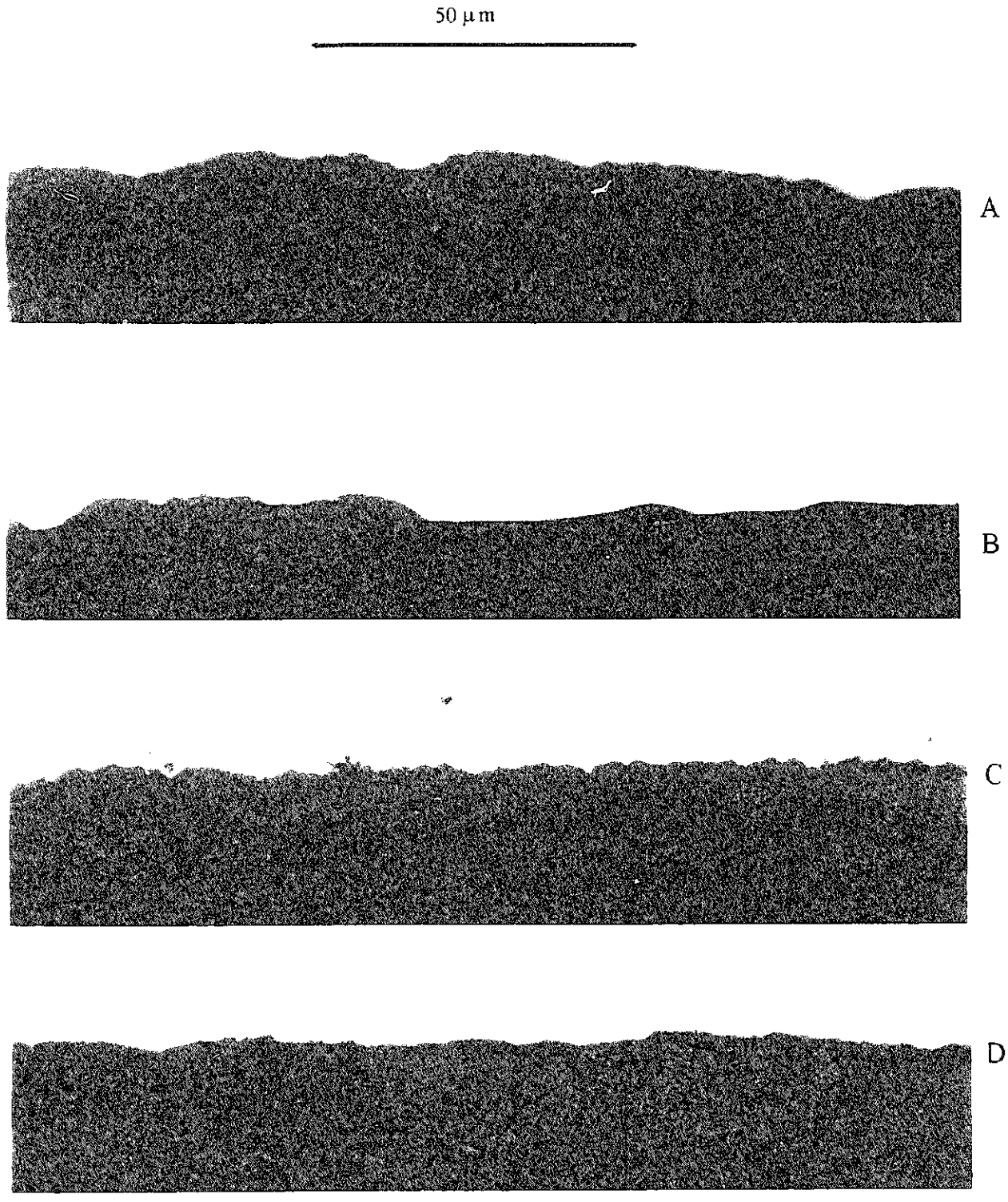


図5.8.3.12　IFA-565-6の燃料側酸化膜（742mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

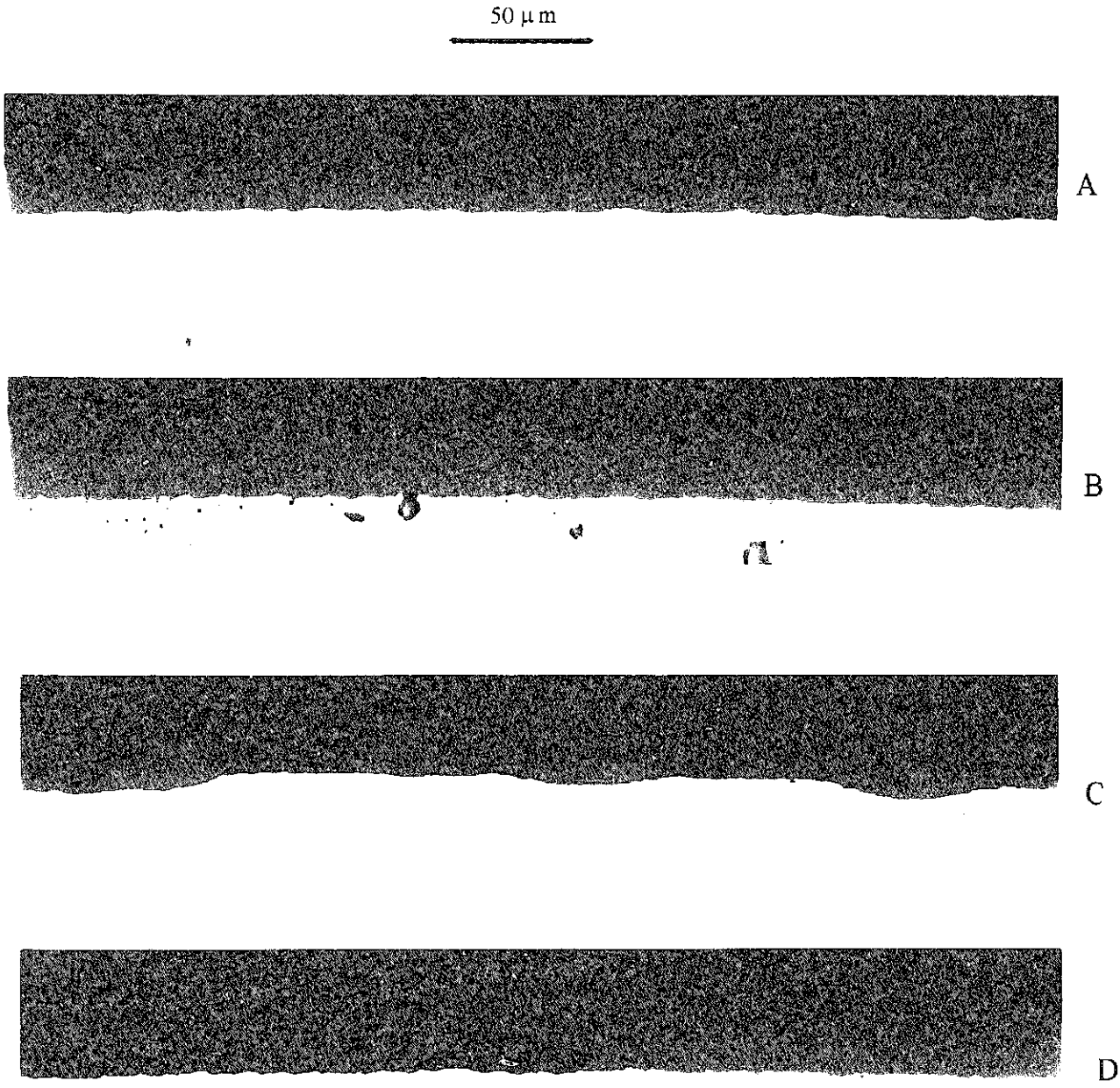


図5.8.3.13　IFA-565-6の水側酸化膜（1245mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

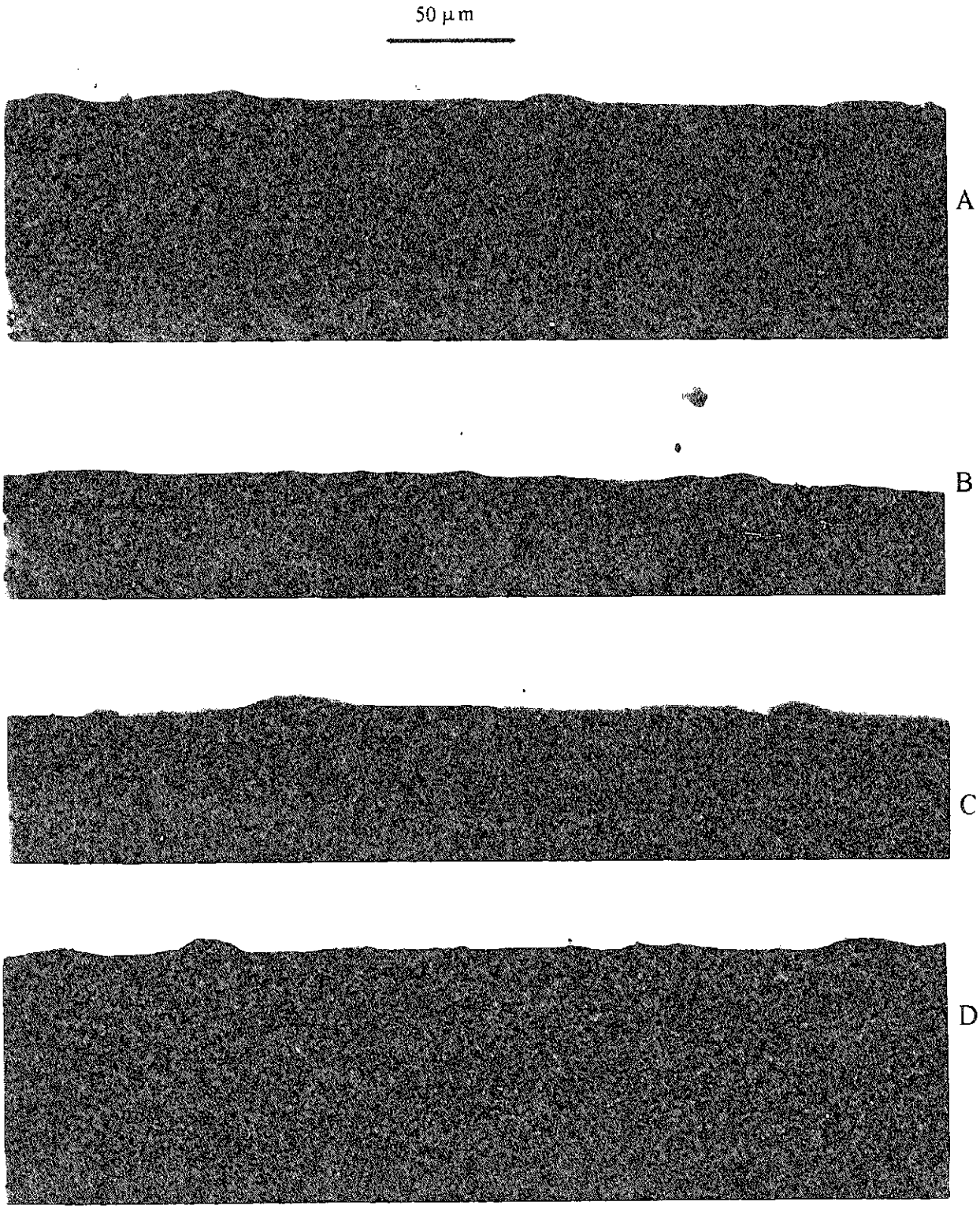


図5.8.3.14　IFA-565-6の燃料側酸化膜（1245mm位置　横断面、研磨）
A：0°、B：90°、C：180°、D：270°

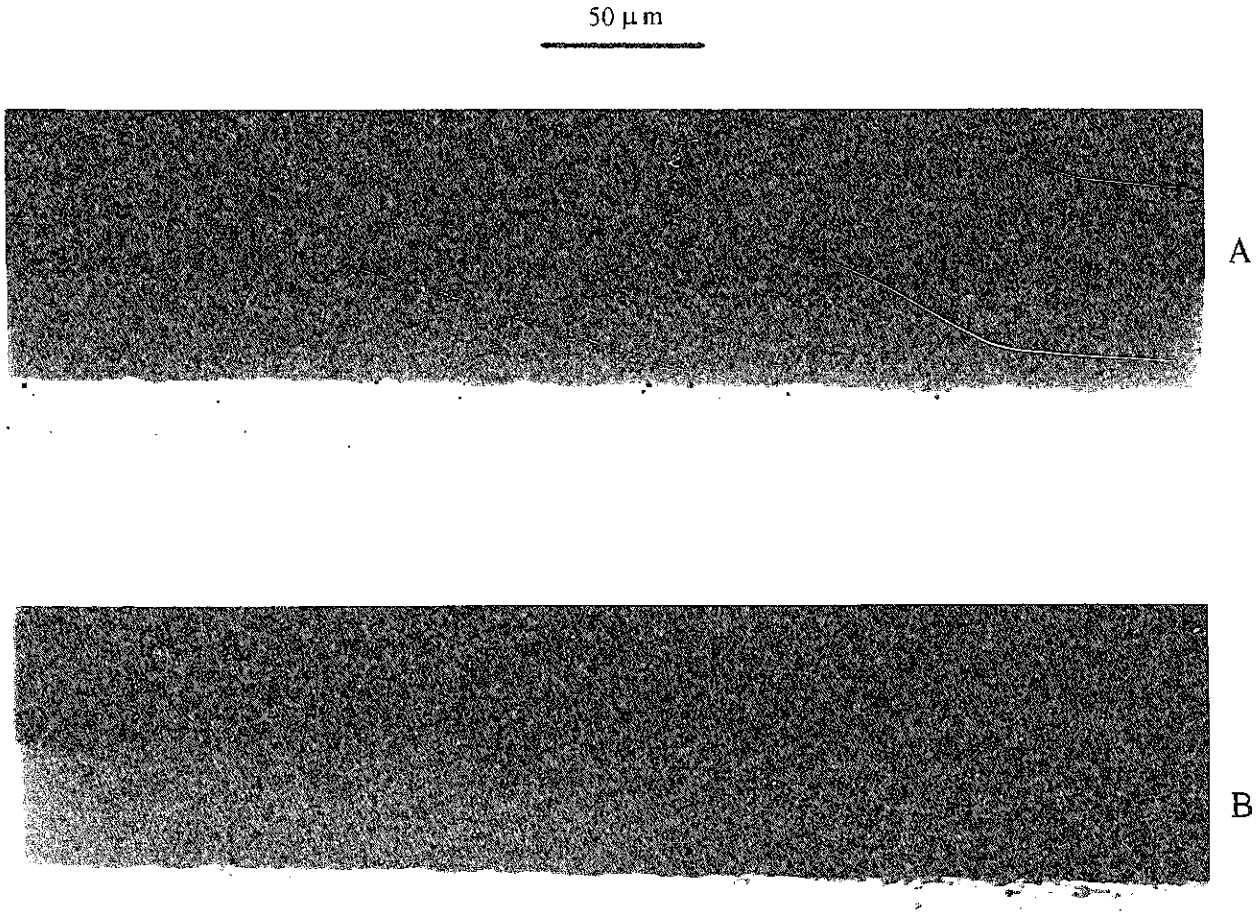


図5.8.3.15　IFA-565-6の水側酸化膜（720-732mm位置　縦断面、研磨）
A：90°、C：270°

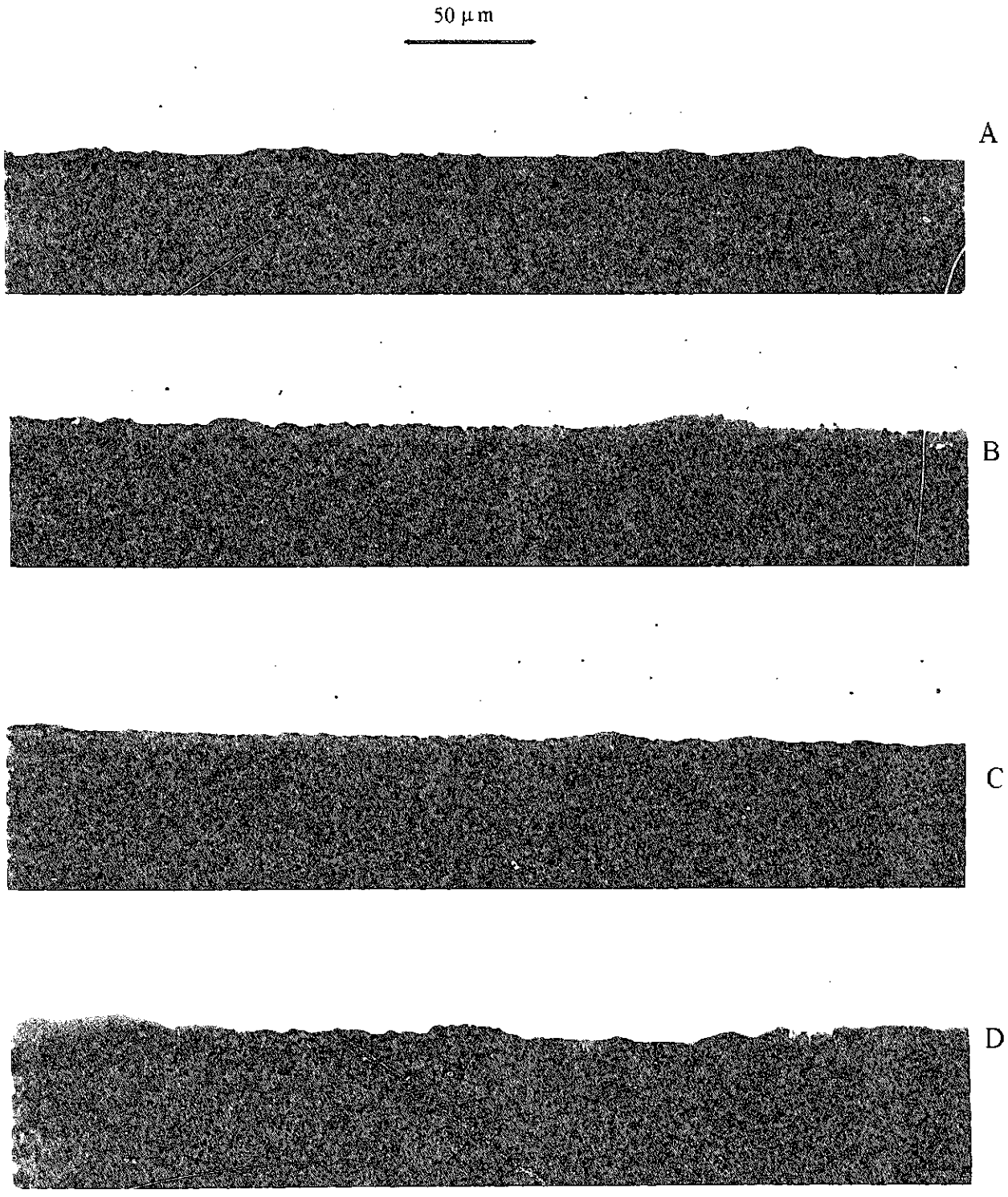


図5.8.3.16　IFA-565-6の燃料側酸化膜（720-732mm位置　縦断面、研磨）
A、B：90°、C、D：270°

5.8.3.1 被覆管の水側の酸化膜

試験の目的は、酸化膜について燃料ロッド軸方向の位置と角度に関連づけた酸化膜厚さとその形態を知ることにある。特にノジュラー腐食といった不均一性について述べる。

実験に供した燃料ロッドの水側での酸化膜には以下の著しい特徴がある。

(1)ジルカロイ被覆管上に形成した酸化膜は、両燃料ロッドとも、またどの位置でも連続的かつ均一である。

(2)酸化膜の厚さについては、軸方向位置と角度で変動することが分かった。IFA-565-3、6の厚さの平均値を表5.8.3.1.1～2及び図5.8.3.1.1～2に示す。両燃料ロッドの一般的な特徴は、どの角度でも燃料ロッドの上部に行くにしたがい酸化膜厚さが減少する傾向にあることである。

(3)IFA-565-3に初期ノジュラー腐食が、1245mm、180°で観察される、図5.8.3.5C参照。IFA-565-6では、742mmと1245mm、180°で観察される、それぞれ図5.8.3.11Cと5.8.3.13C参照。

途中取り出しのIFA-514-1, 2, 5の水側酸化膜厚さを表5.8.3.1.3、図5.8.3.1.3～4に示す。燃料ロッド上端部のデータがないが、下端から中央部に向けて概ね酸化膜厚さが減少する傾向にある。この減少傾向は、燃焼度の増加したIFA-565でも継続されている。なお、一部中央部で高い値を示す場合があるが、この原因としては炉出力が中央部で高いことがあげられる。酸化膜厚さの燃焼度依存性を軸方向位置250mm付近と750mm付近（燃料ロッド中央）の２カ所で比較（図5.8.3.1.5～6）した。なお、IFA-514-1のフレッティング用位置のデータ（約100μm）は除いた。250mm付近では酸化膜厚さはほとんど増加せず、750mm付近ではわずかに増加する傾向にあり、寿命末期での酸化膜厚さは、飽和あるいは微増傾向にあることを示している。IFA-514/565のデータ（750mm付近）を他のBWRで得られたUO_2燃料の結果 [9] と比較（図5.8.3.1.7）すると、図中実線で示された中間的な酸化膜厚さの増加曲線よりは下側にあり、高燃焼度において酸化膜厚さの成長が少ないという結果が得られた。

表5.8.3.1.1　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-565-3）

位置 (mm)	0° (μm)	90° (μm)	180° (μm)	270° (μm)
246	62	36	55	29
720-732		53		33
742	31	50	14	36
1245	13	29	5	28

表5.8.3.1.2　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-565-6）

位置 (mm)	0° (μm)	90° (μm)	180° (μm)	270° (μm)
246	24	50	4	44
720-732		36		62
742	10	38	10	40
1245	15	29	5	10

表5.8.3.1.3　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-514-1, 2, 5）

ロッドNo.	位置 (mm)	0° (μm)	90° (μm)	180° (μm)	270° (μm)
IFA-565-1	~235（縦断面）		34		39
	~250（縦断面）		36		38
	275	57	45	57	35
	720	48	29	48	20
	720（縦断面）		27		17
	736（縦断面）		18		28
1(ﾌﾚｯﾃｨﾝｸﾞ用)	965	102	115	102	102
IFA-565-2	715	43	20	46	16
IFA-565-5	260	49	55	41	47
	715	39	27	55	16

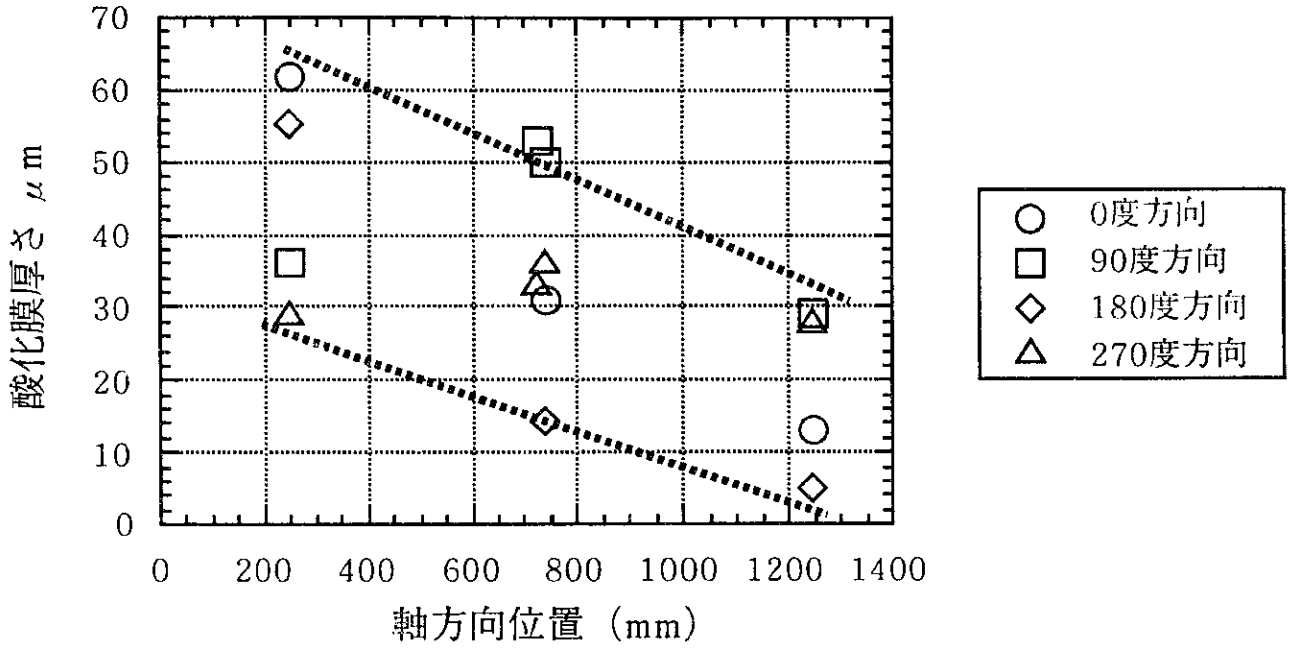


図5.8.3.1.1　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-565-3）

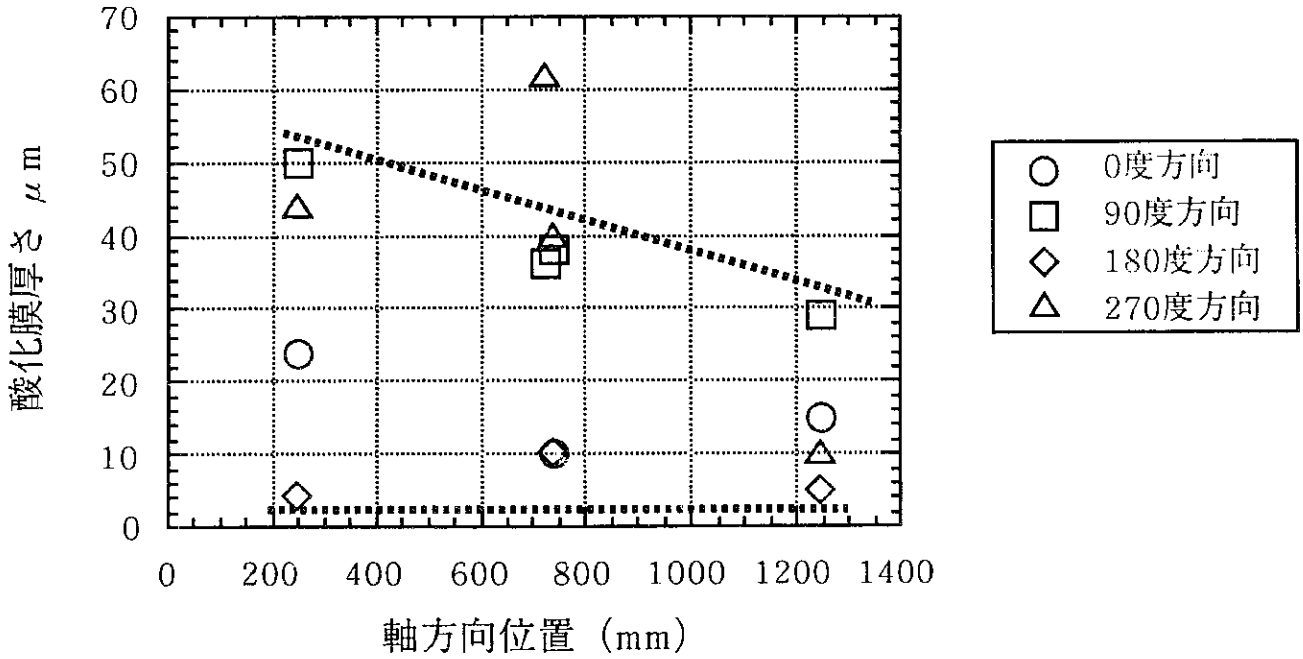


図5.8.3.1.2　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-565-6）

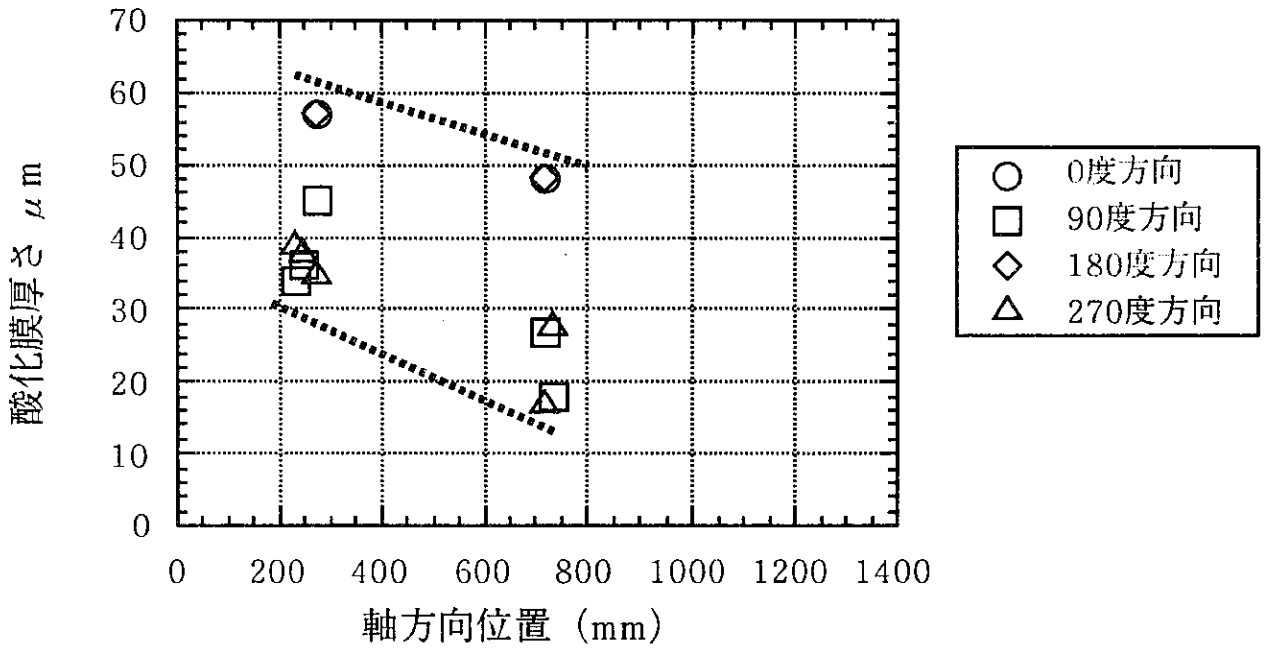


図5.8.3.1.3　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-514-1）

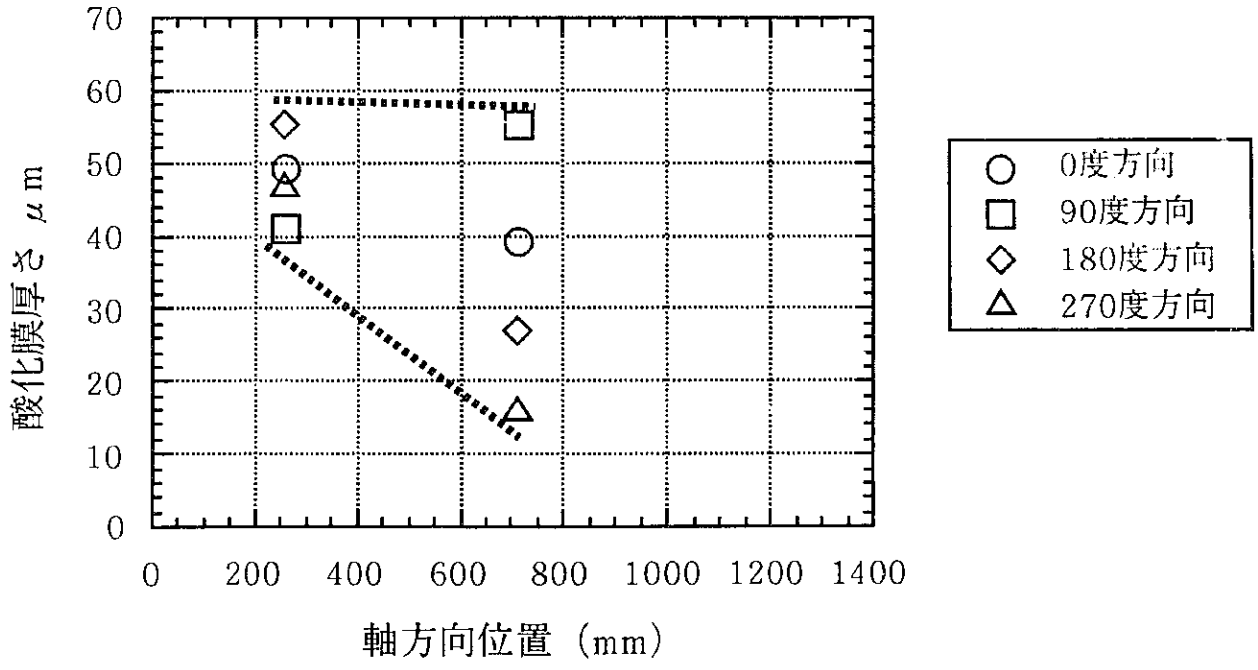


図5.8.3.1.4　酸化膜厚さと軸方向位置及び角度との関係（IFA-514-5）

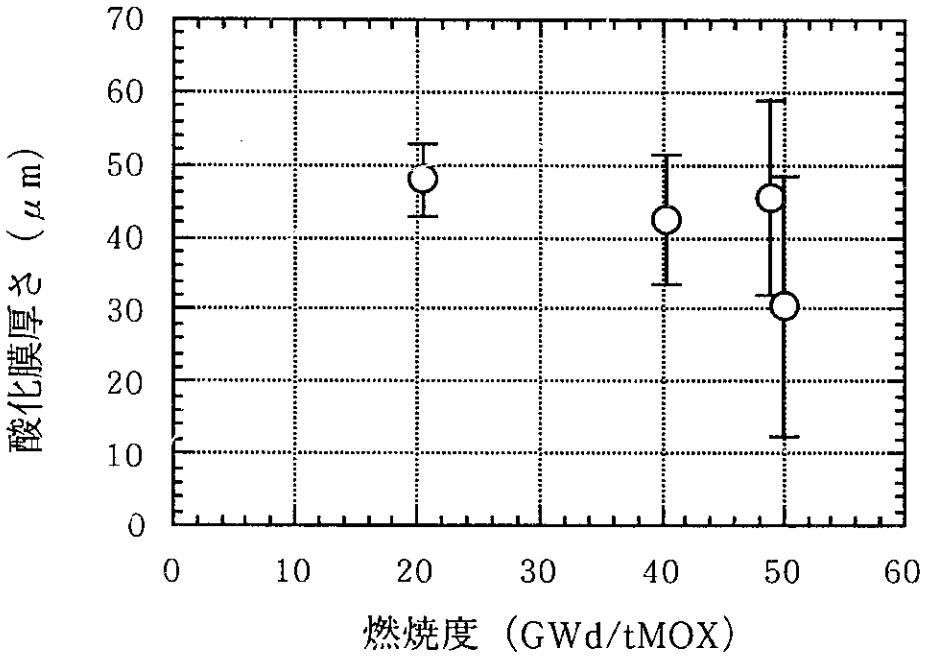


図5.8.3.1.5　酸化膜厚さの燃焼度依存性（軸方向位置250mm付近）

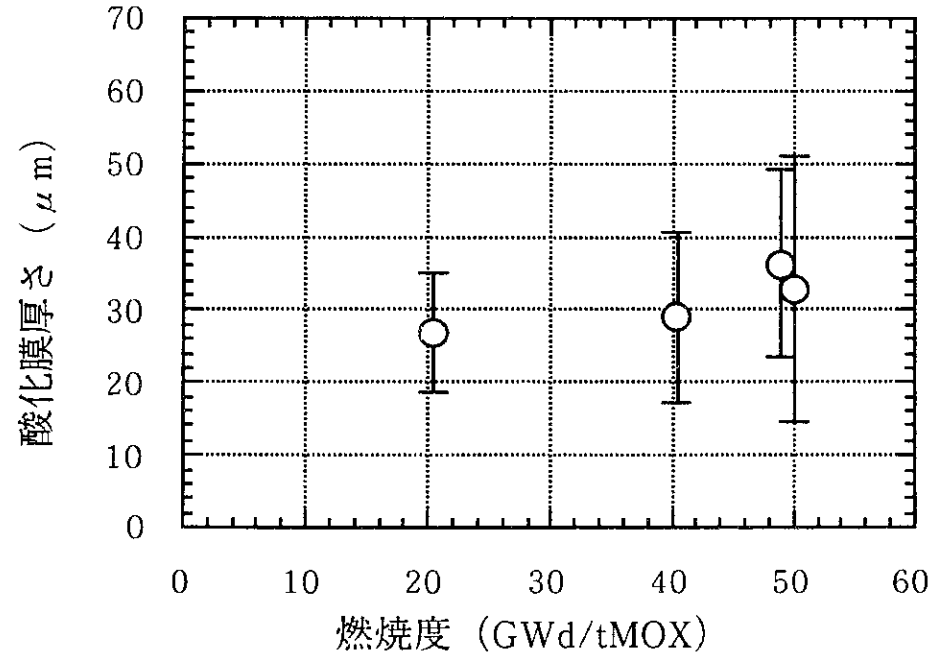


図5.8.3.1.6　酸化膜厚さの燃焼度依存性（軸方向位置750mm付近）

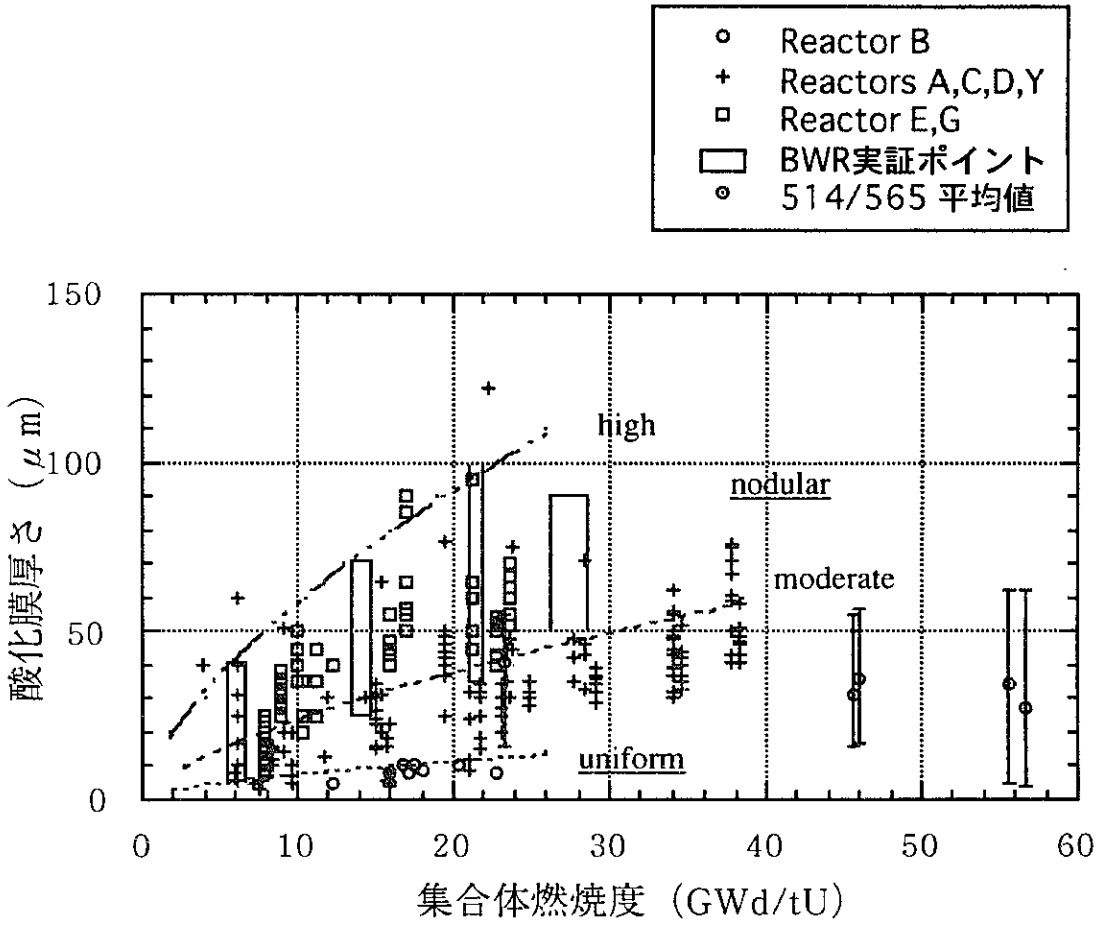


図5.8.3.1.7　酸化膜厚さの燃焼度依存性[9]

5.8.3.2 被覆管の燃料側の酸化膜

試験の目的は、燃料側酸化膜、燃料と被覆管間のギャップ幅、ジルカロイ被覆管上の酸化物と燃料とのボンディングに関する知見を得ることにある。燃料側酸化膜の横断面を角度0°、90°、180°、270°で示した。縦断面で軸方向位置を代表させた。

以下の著しい特徴が、IFA-565-3、6の両燃料ロッドに観察された：

(1)被覆管の燃料側に明らかな酸化膜がある。酸化物は、軸方向位置720-732mm（図5.8.3.8、5.8.3.16）及び742mm（図5.8.3.4、5.8.3.12）からのサンプルで最大厚さ約10μmとなっている。

(2)分厚い酸化膜が燃料と被覆管の間の狭いギャップ部に観察できる。軸方向位置720-732mm（図5.8.3.8、5.8.3.16）及び742mm（図5.8.3.4、5.8.3.12）からのサンプルにある。

(3)燃料と被覆管酸化物とのボンディングが軸方向位置720-732mm（図5.8.3.8、5.8.3.16）及び742mm（図5.8.3.4、5.8.3.12）からのサンプルにある。

(4)燃料と被覆管のギャップ幅は、軸方向位置と角度で変化している。両燃料ロッドとも、試験サンプルのギャップ幅は、軸方向位置246mm（図5.8.3.2、5.8.3.10）及び1245mm（図5.8.3.6、5.8.3.14）で最大約50～70μmとなった。

途中取り出しのIFA-514-1, 2, 5の燃料側酸化物膜厚さは、10μm前後、最大でも21μmであり、燃焼度が増加しても酸化膜厚さはほとんど変わっていない。一部サンプルで燃料側の酸化膜と燃料のボンディングが観察されている点も類似している。

5.8.4. 燃料ペレットの微細構造

IFA-565-3の各断面の写真を図5.8.4.1～24に、IFA-565-6の写真を図5.8.4.25～48に示す。図5.8.4.49、50に径方向のポア分布とポアの平均の面積の変化を示す。ポアの面積率は、246mmと743mmの断面では、ペレット外周部から3～4mmの位置でポア面積率が低下している。1245mmの断面ではペレット外周部から3～4mmの位置のポア面積率の低下はない。ペレット中心部でポア面積率が減少している。これは、743mmの断面の分布でも観察できる。ポア1個当たりの平均面積は、ペレット外周部から中心に向かって増加し、中心部では減少している。この中心部の平均面積の低下は、ポア面積率の低下と一致している。

写真上からポアを観察すると、外周部では、比較的小さい製造時に存在すると思われるポアが見られ、その内側に、ポアの少ない高密度領域が観察される。高密度領域の内側では内部ほどポアが大きくなる傾向にあり、結晶粒界に数十μmのポアが粒内に数μmのポアが存在する。また、金属析出物と考えられる白色相が高密度領域より中心側に観察され、中心ほど数が少なく、大きくなる傾向にある。結晶粒径は高密度領域より中心側で外周部に比べ大きくなっており、中心部では20-30μmと外周部の数倍の大きさになっている。

外周部から3～4mmでのポア面積率の低下は、高密度組織に関係し、中心部での面積率と平均面積の低下は結晶粒の成長に伴うポアの移動に起因していると考えられる。

図5.8.4.51、52にIFA-565-6の径方向のポア分布とポアの平均の面積の変化を示す。ポアの径方向の分布は、IFA-565-3と同じ様な傾向を示している。ポア面積率分布は246及び742mmの断面でIFA-565-3と同様に高密度領域と、結晶粒成長領域での面積率の低下が観察できる。高密度領域はIFA-565-3に比べ、ペレットの外周部に位置し、1～2mmの位置である。また、径方向中間部でポアの成長も観察できる。白色相は、わずかには認められるが、IFA-565-3よりかなり少ない。結晶粒径は中心部ほど大きくなる傾向にあるが、IFA-565-3の中実ペレットに比べると小さい。

IFA-565-3及び6で観察できるペレット径方向の組織変化は、前述のようにペレット外周部から未変化領域、高密度領域、結晶粒成長領域であり、結晶粒成長領域ではポア面積率及び径が増大している領域が存在している。

本試験の燃料ペレットにおける微細構造で、特に注目すべき点は、中実及び中空ペレットともにペレット中心部でポア面積率が低下する傾向にあることと、中空ペレットの中空径が製造時より大きくなっていることである。また、製造時に存在する造粒界が、このポ

アの変化とどのように関係しているかについて考える必要がある。ポア構造の変化は、照射初期に起こる焼きしまりや燃料温度に起因するような結晶粒成長やポアのマイグレーション、さらに、FPガスの蓄積によるポアの生成及び成長などがある。

燃料中心部の組織について、その変化に起因する要因について考えてみる。ペレット中心部では、FPガスによるポアの生成が大きい。また、結晶粒成長については、等軸粒で成長していることが観察されている。結晶粒成長は、結晶粒内のポアを粒界にトラップし、ポアを集めて大きくすることによってポア面積率を大きくする働きがある。ポアのマイグレーションによる変化は、ポアを燃料中心部に集めるが、ペレット径方向の温度差による蒸発及び凝集速度が律速となる。本試験の燃料は、組織が等軸粒であり、マイグレーションが起こるような温度には到達していない。マイグレーションの形跡も観察されていない。FPガスによるポアの存在形態は、燃料温度にも大きく影響し、一般に燃料温度の高い燃料中心部ほど大きく、多くなる。また、結晶粒界で連なって存在する場合もある。本試験の燃料では燃料中心部で、結晶粒界に多く存在する傾向があるが、それほど顕著ではなく、粒内及び粒界のいずれでも存在しており、ポアの存在形態に大きな違いが見られない。

これらの変化では、本試験の燃料で観察された燃料ペレット中心部の密度低下や中空径の増加をうまく説明することはできない。製造時に存在する造粒界が消失することとの関係を考える必要がある。造粒界が消失することにより、ポアの成長によるスウェリングを緩和すること考えられる。燃料ペレットの径方向のポア面積率分布は、焼きしまり量、造粒界の減少量とポアの生成及び成長などによるスウェリング率の割合により決まっていると思われる。中空径の増加は、造粒界の消失と焼きしまりの結果であると考えられる。

このように、造粒界はFPガスによるスウェリングを吸収する役割があるようである。また、これら造粒界とポア分布の関係を、よく理解するには、より詳細な微構造解析が必要であろう。

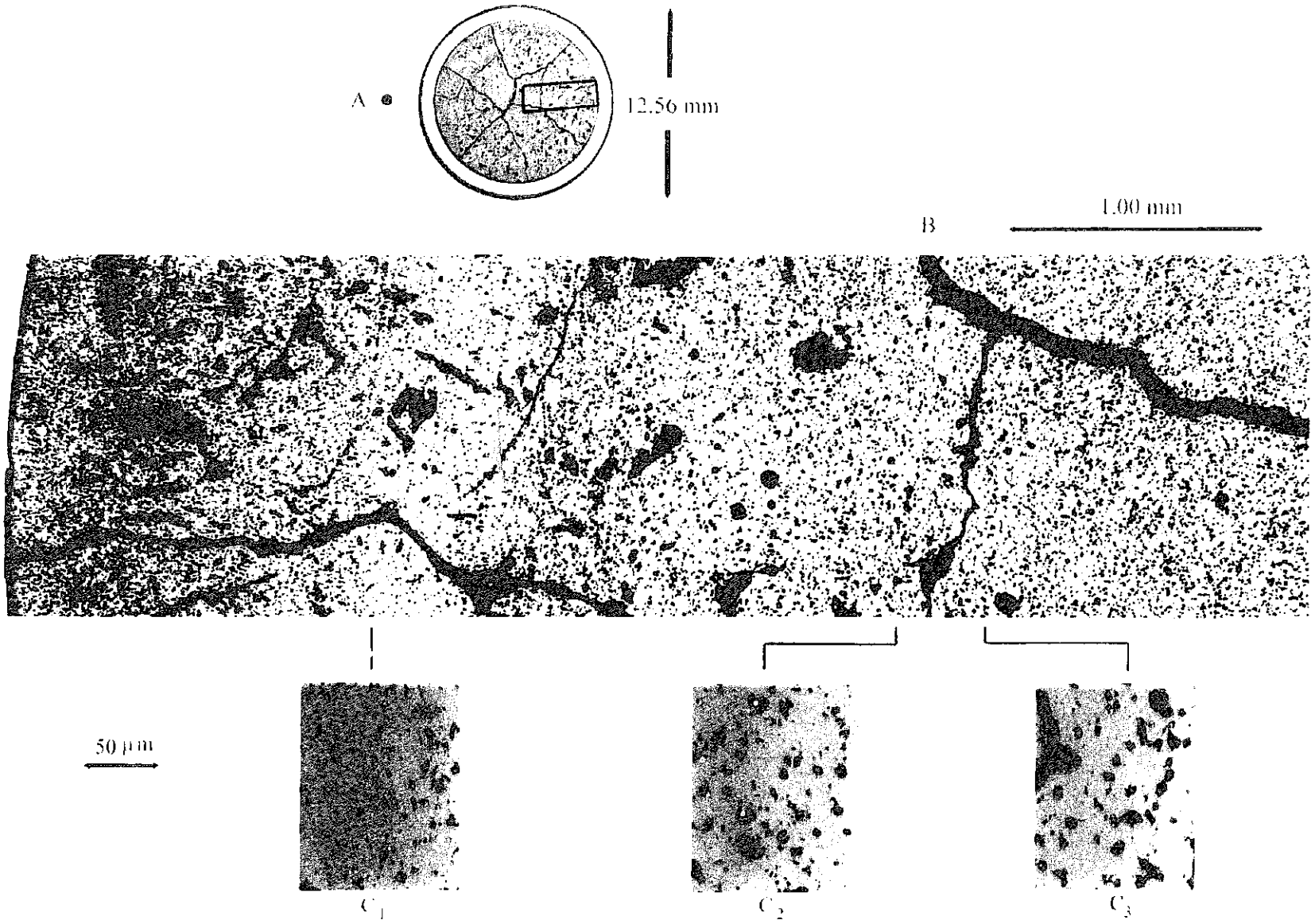


図5.8.4.1　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより246mm）

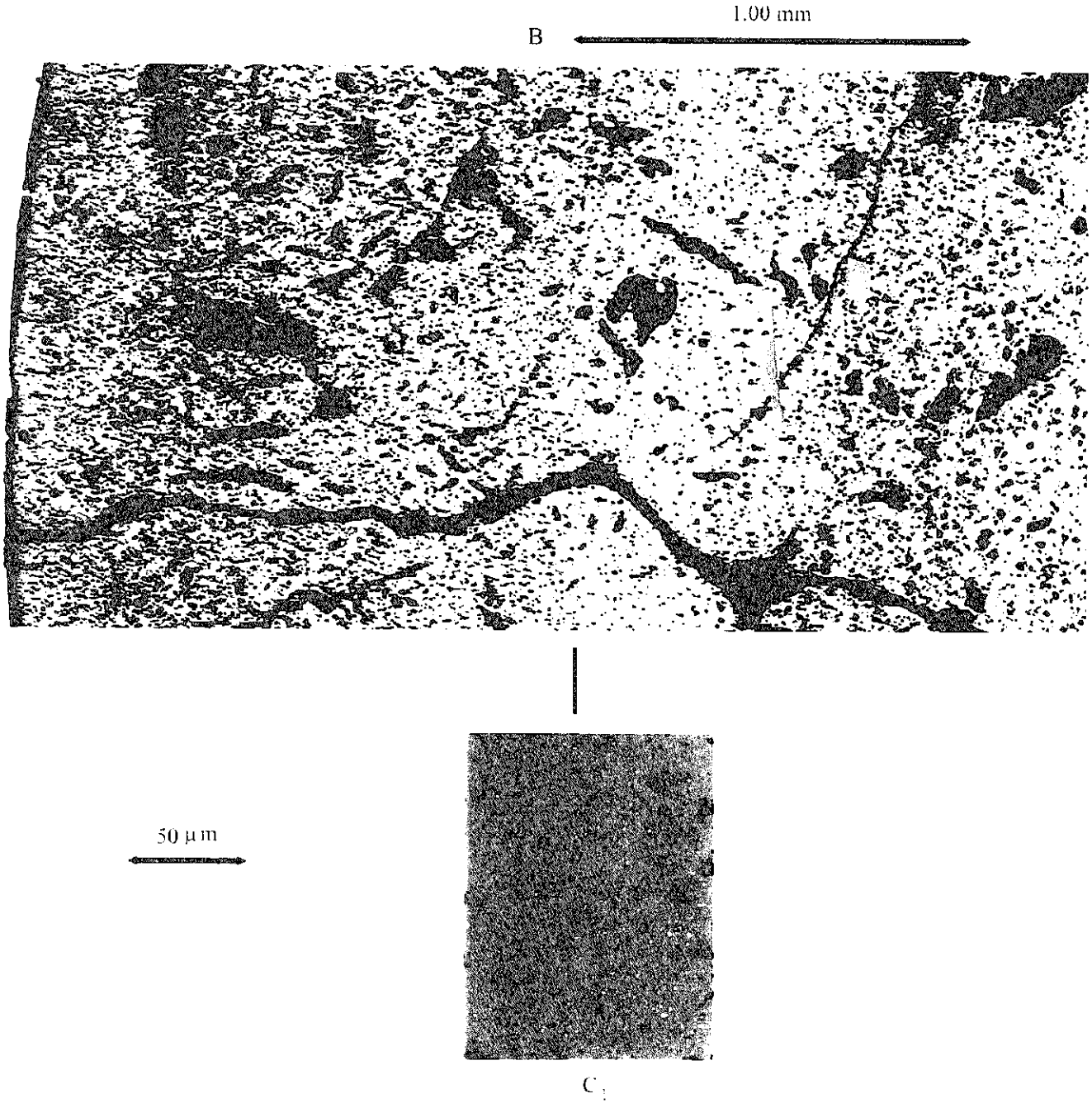


図5.8.4.2　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより246mm、周辺部）

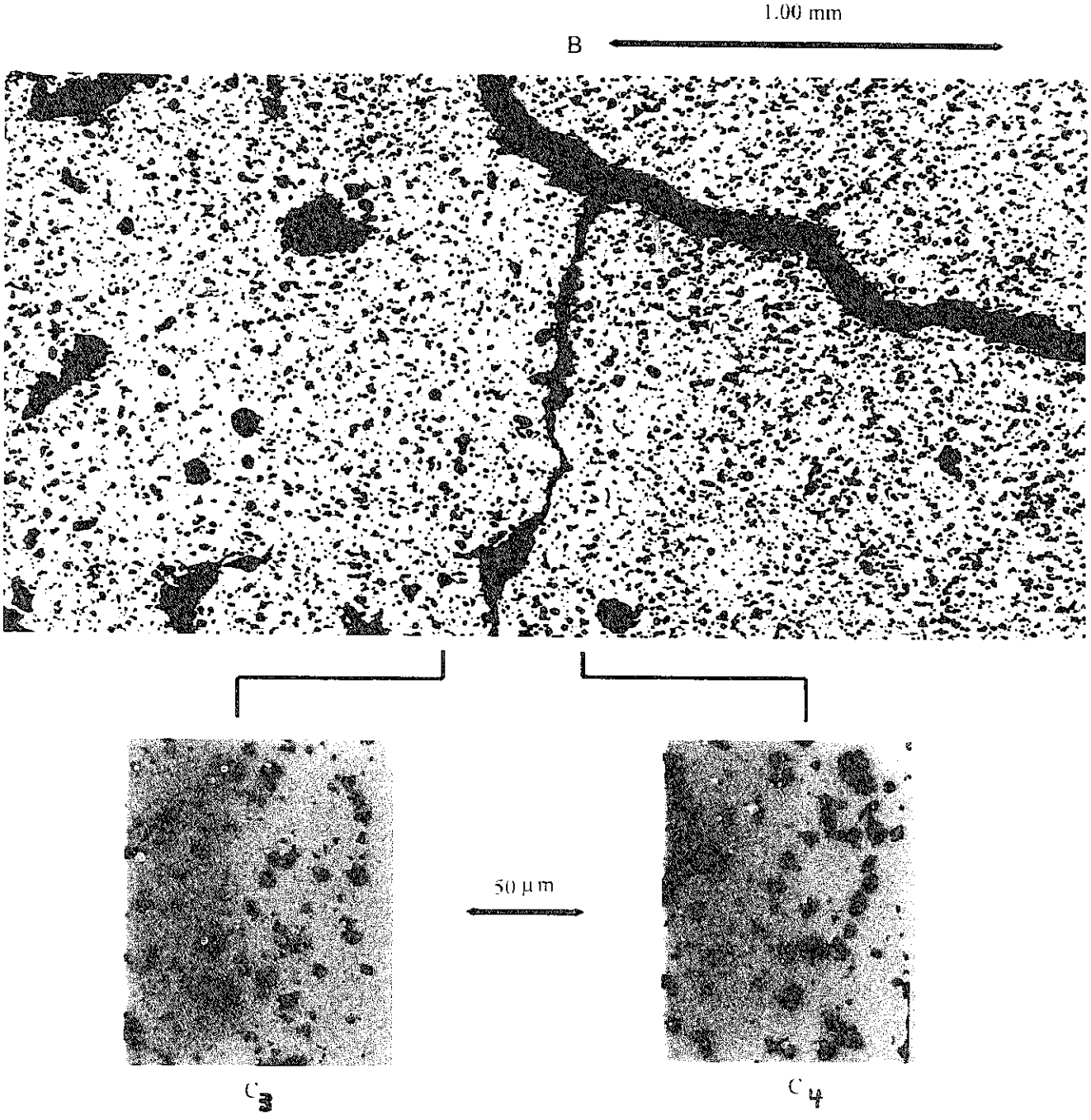


図5.8.4.3　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより246mm、中心部）

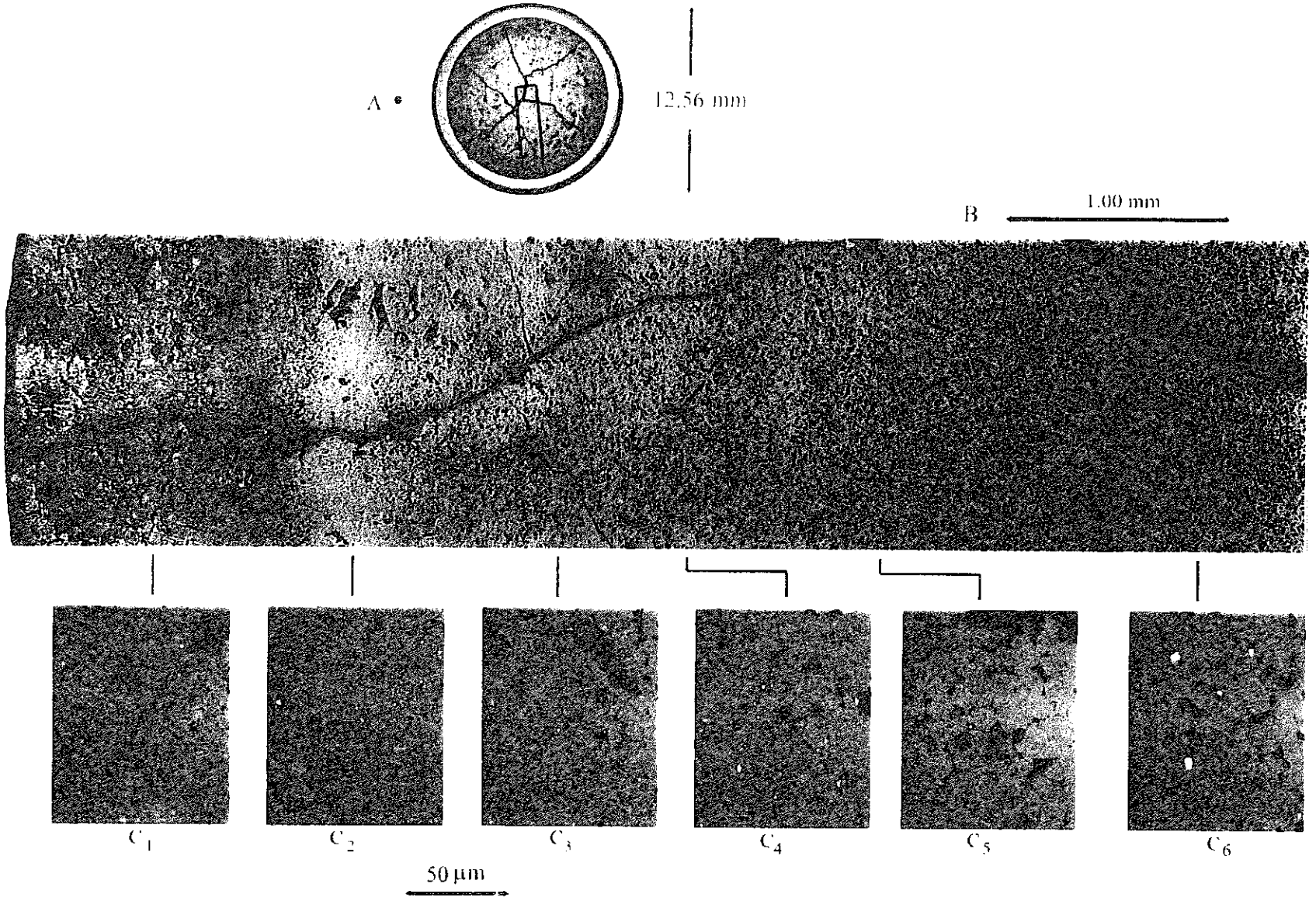


図5.8.4.4　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより246mm）

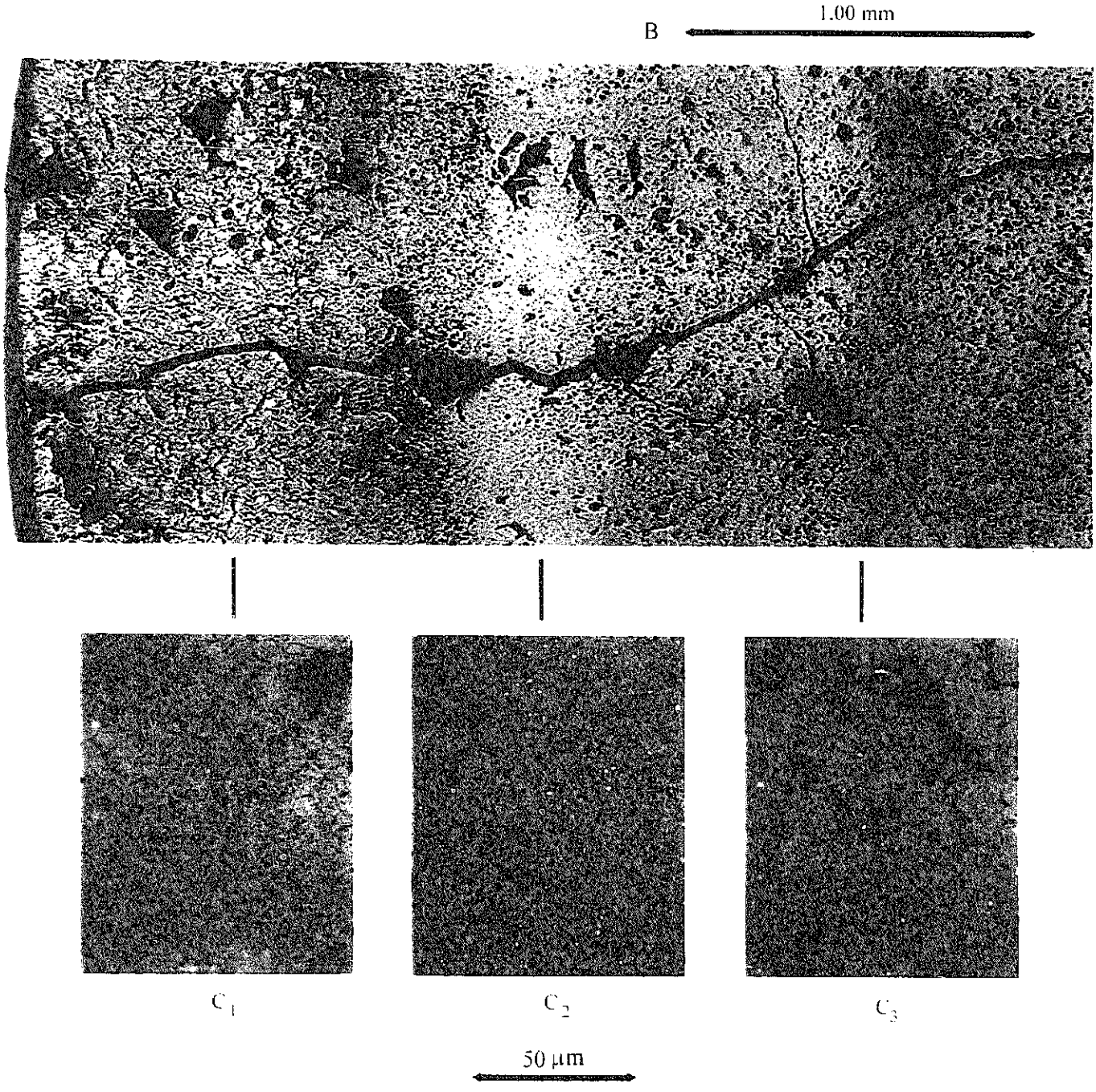


図5.8.4.5　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより246mm、周辺部）

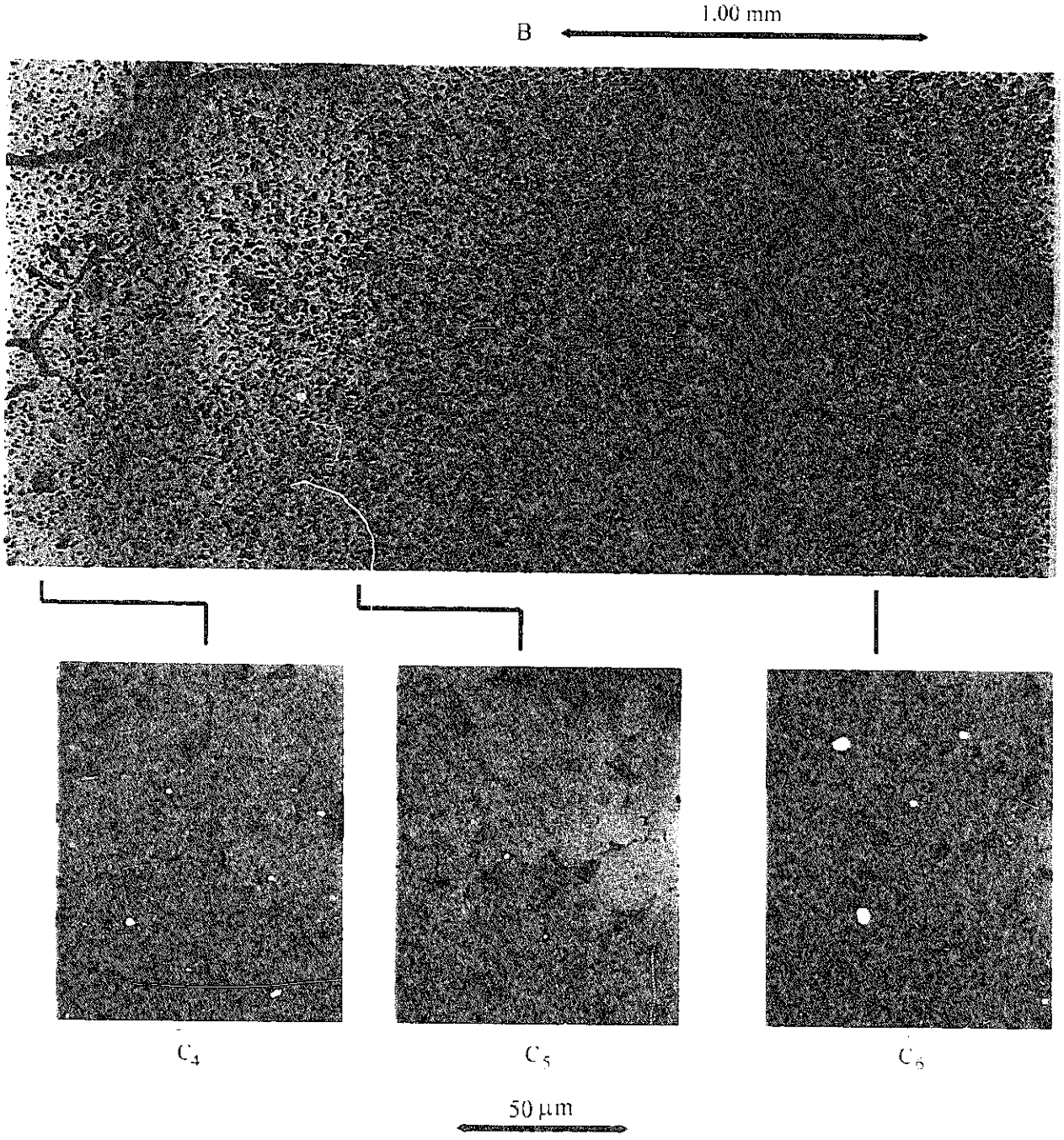


図5.8.4.6　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより246mm、中心部）

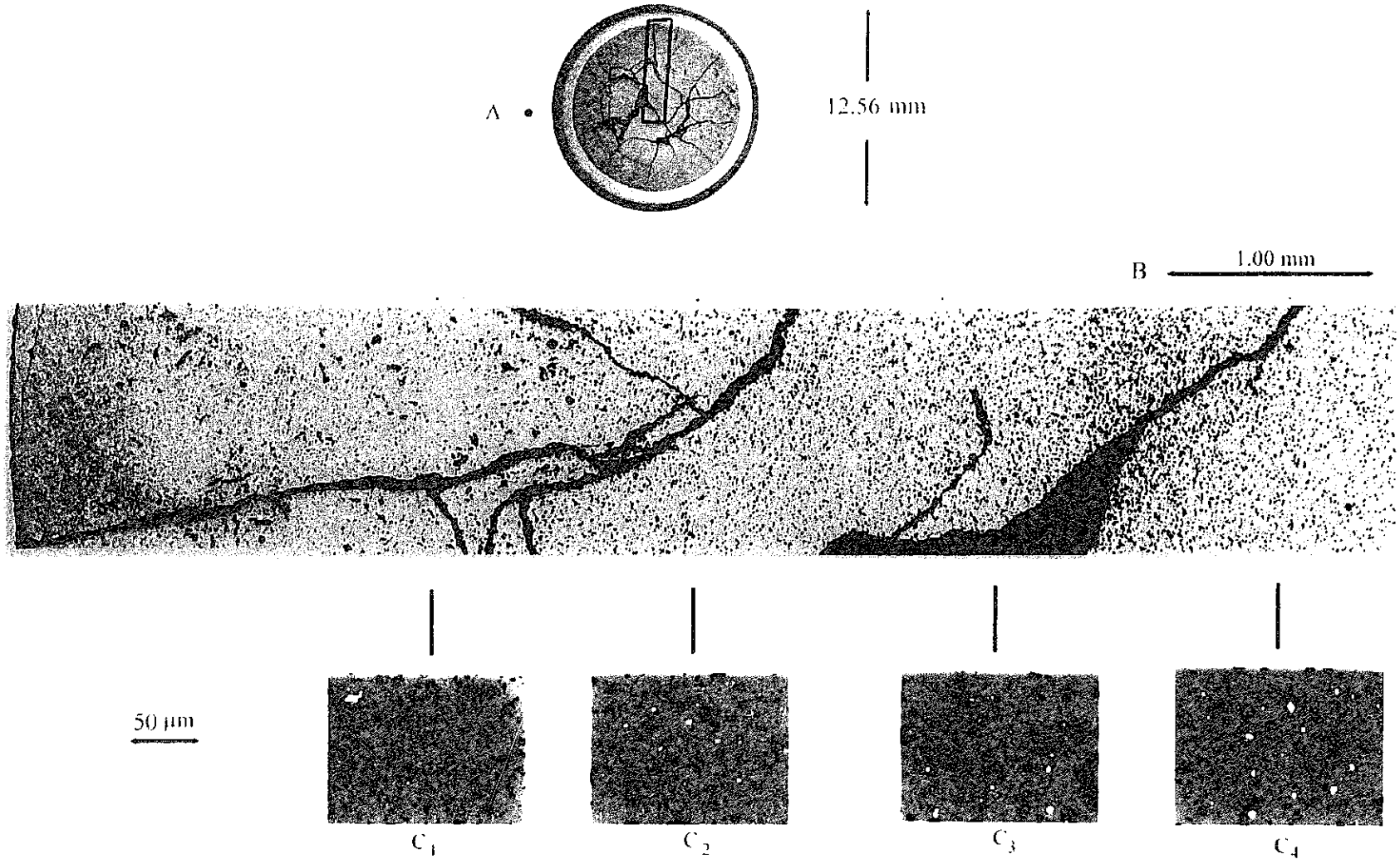


図5.8.4.7　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより742mm）

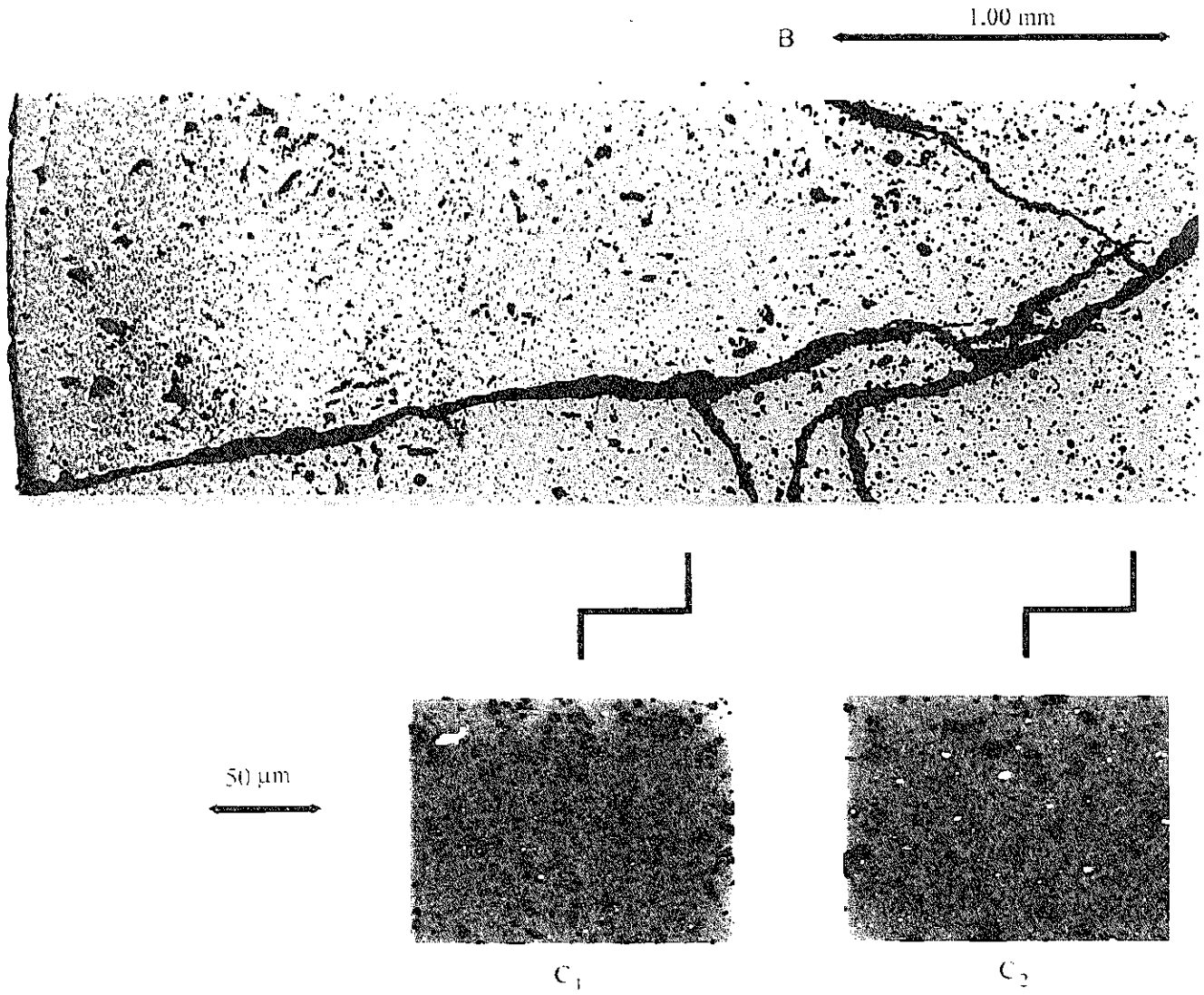


図5.8.4.8　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより742mm、周辺部）

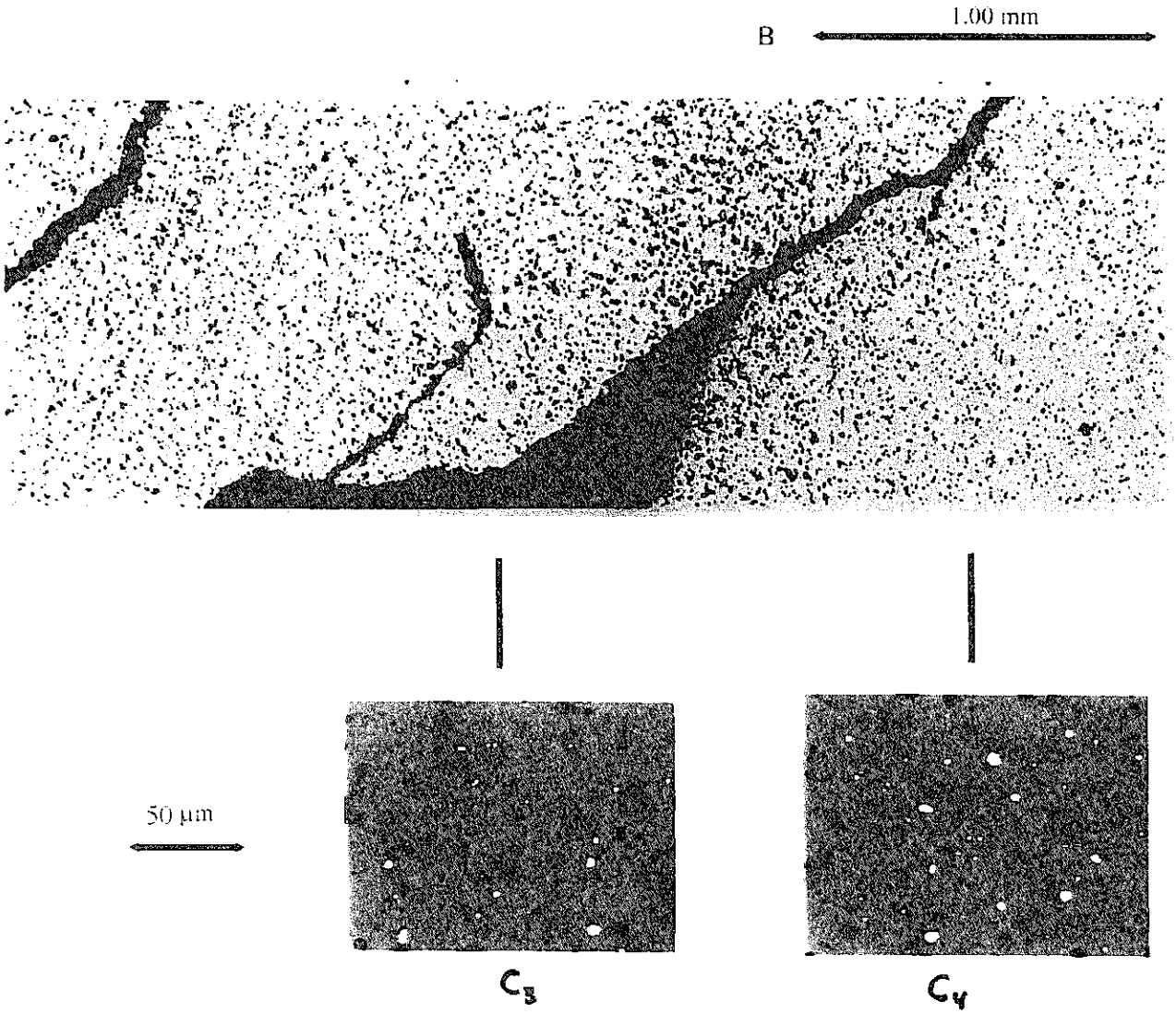


図5.8.4.9　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより742mm、中心部）

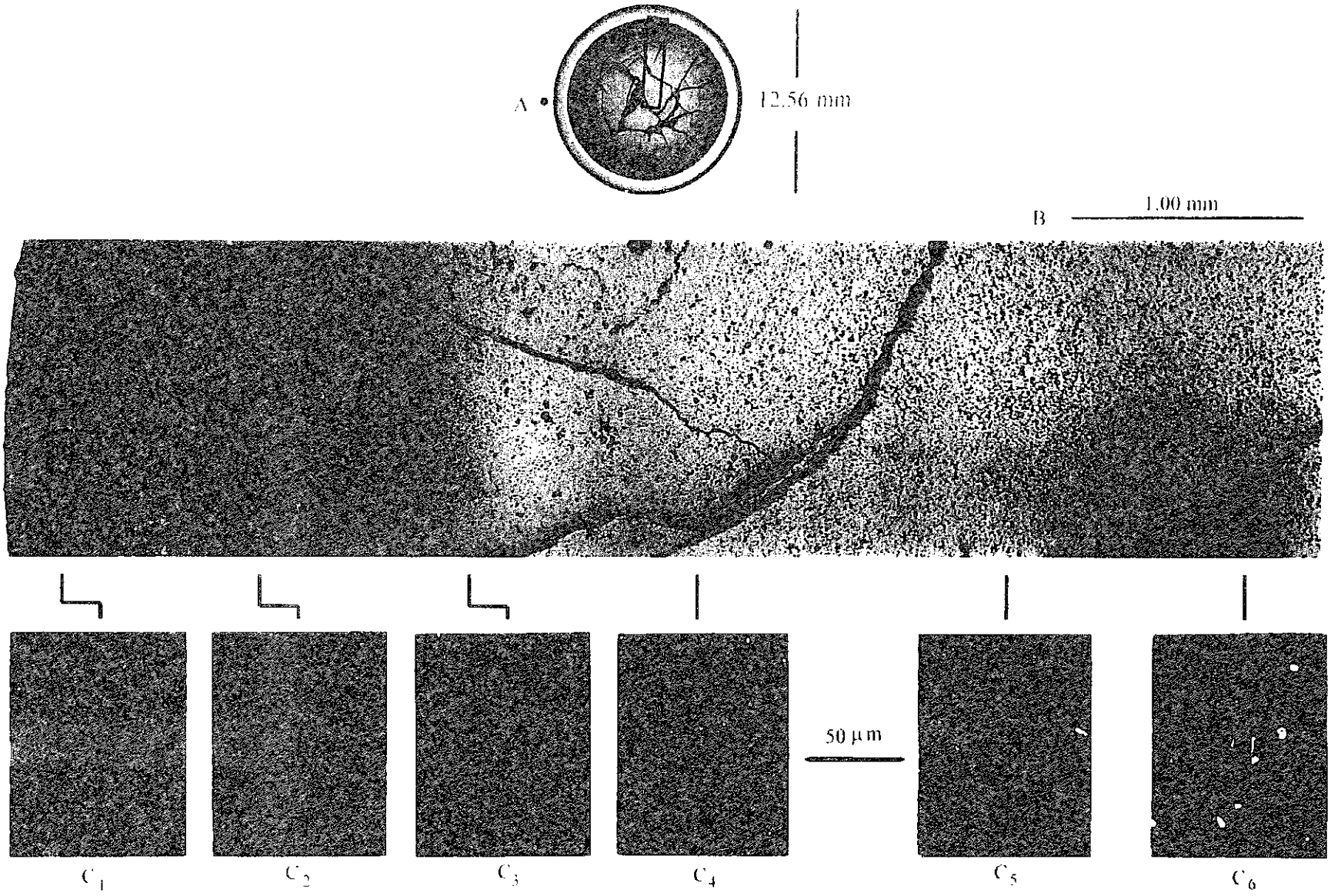


図5.8.4.10　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより742mm）

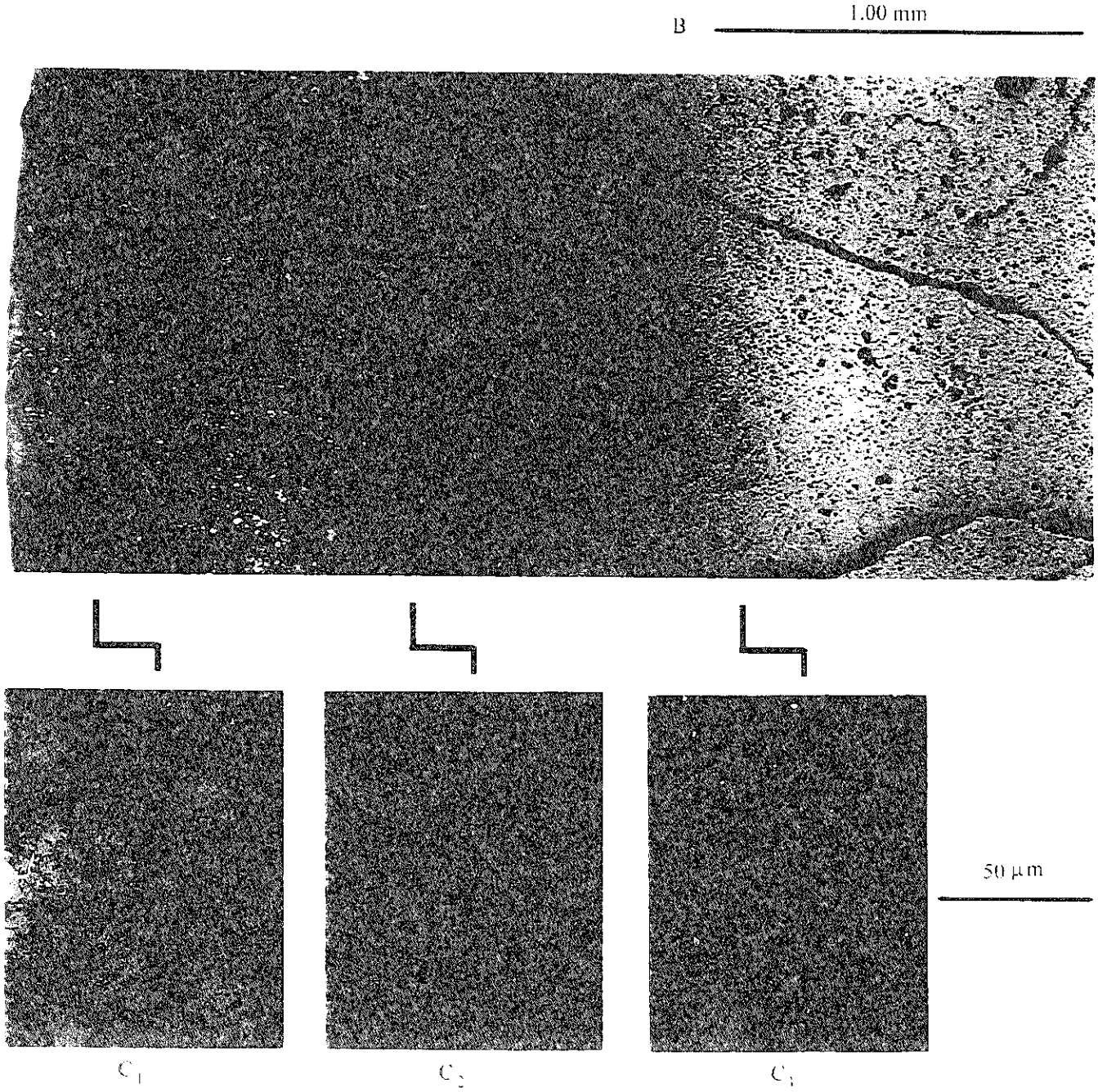


図5.8.4.11　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより742mm、周辺部）

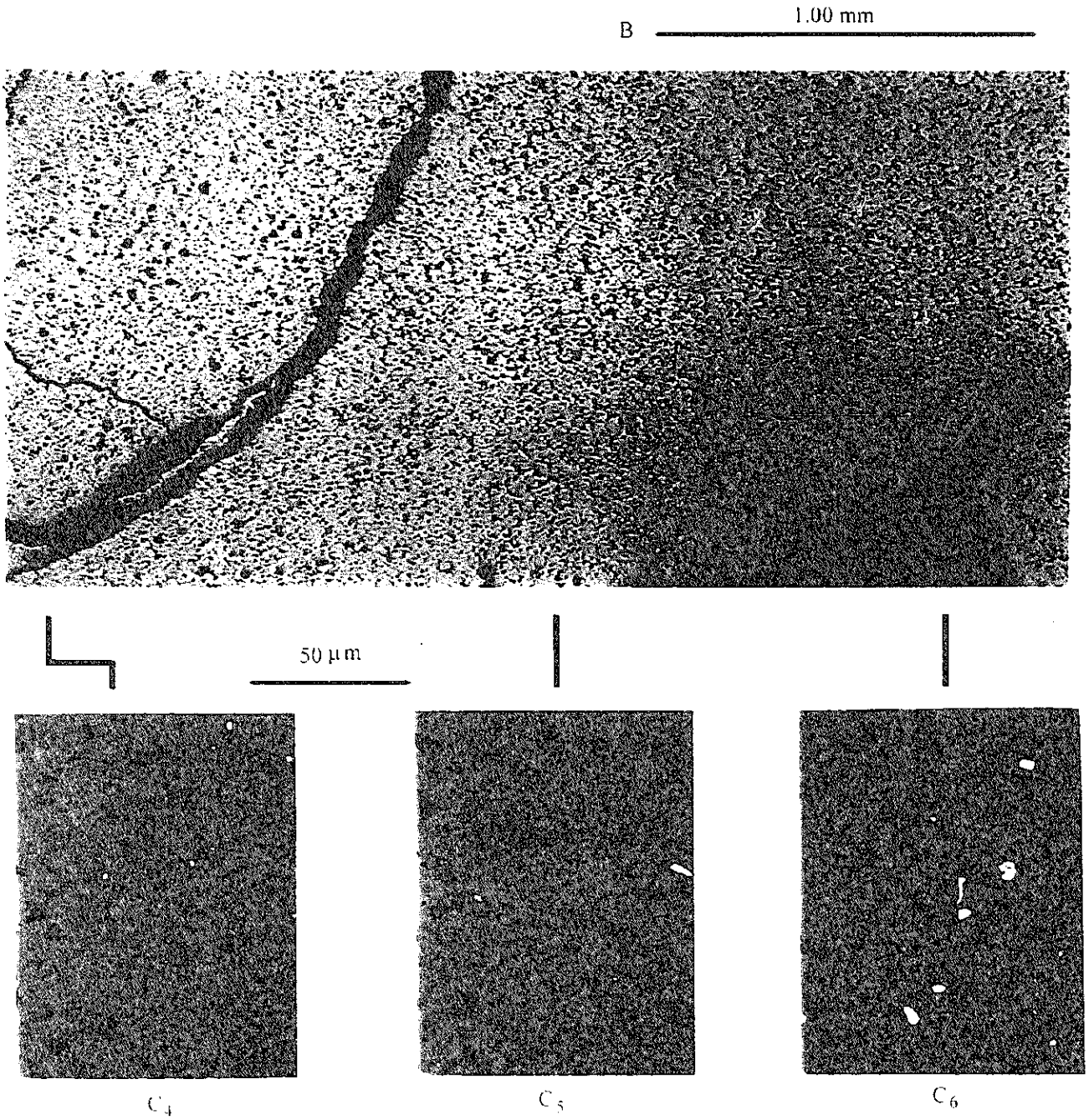


図5.8.4.12　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより742mm、中心部）

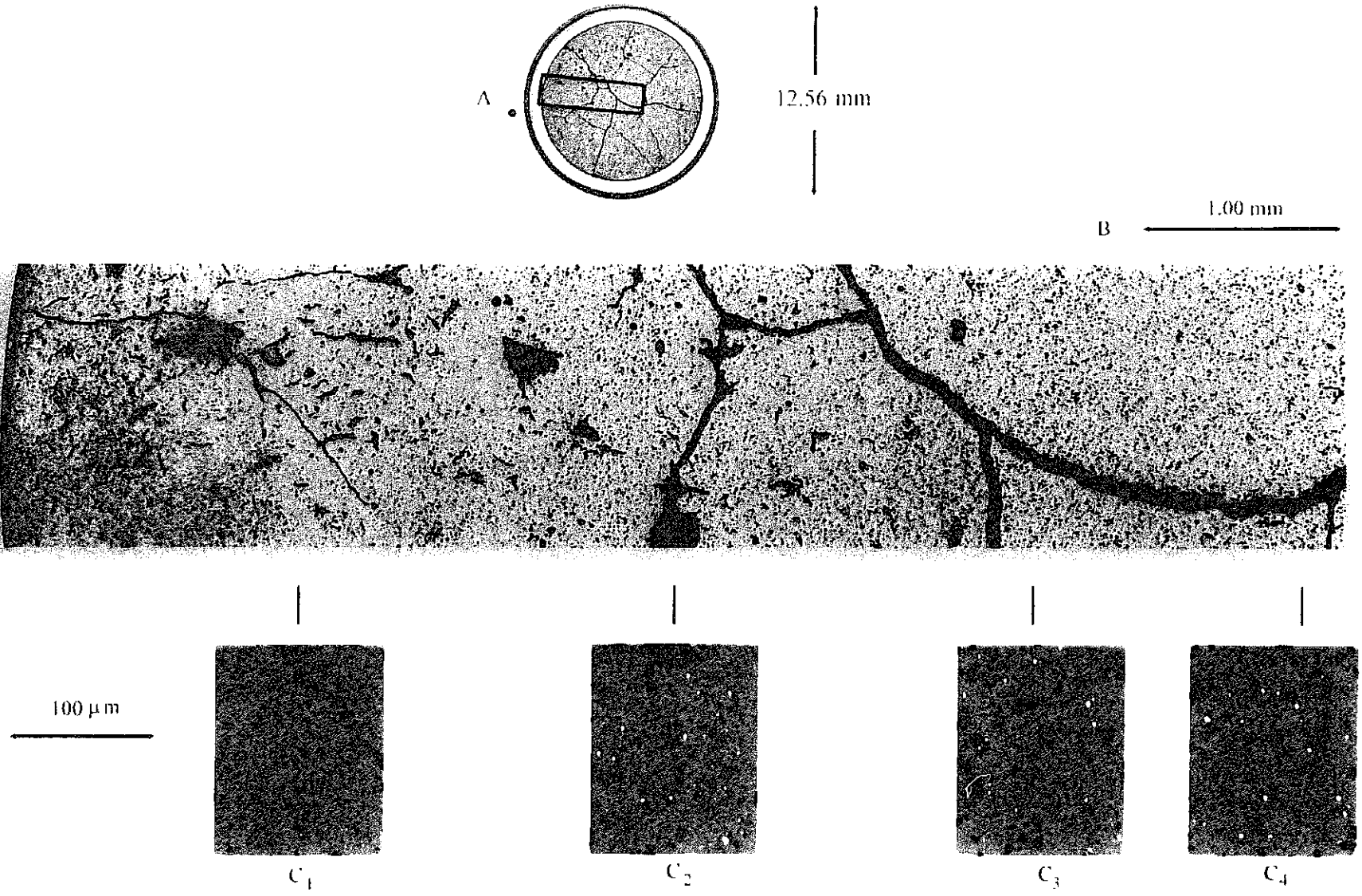


図5.8.4.13　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより1245mm）

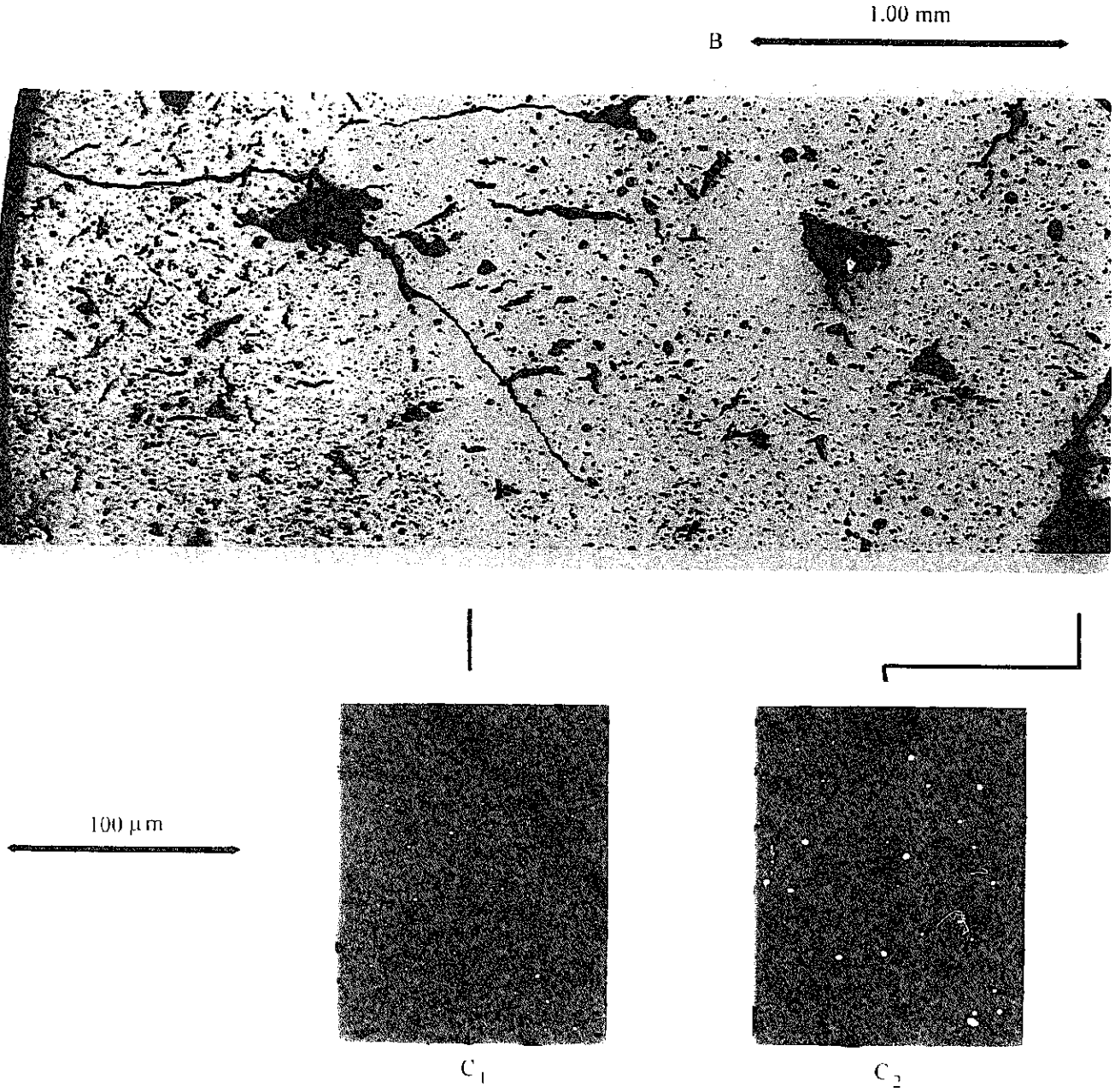


図5.8.4.14　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、周辺部）

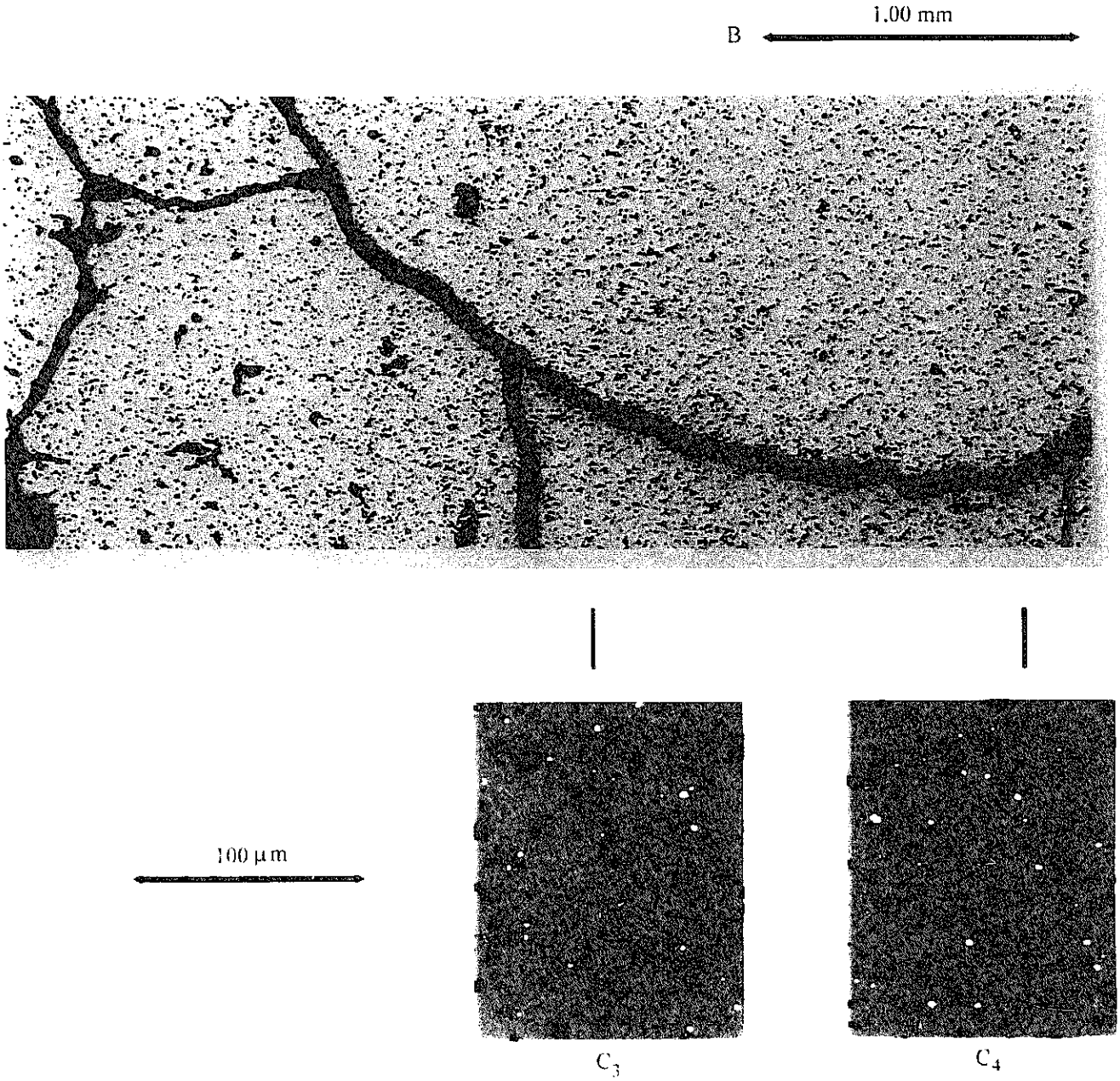


図5.8.4.15　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、中心部）

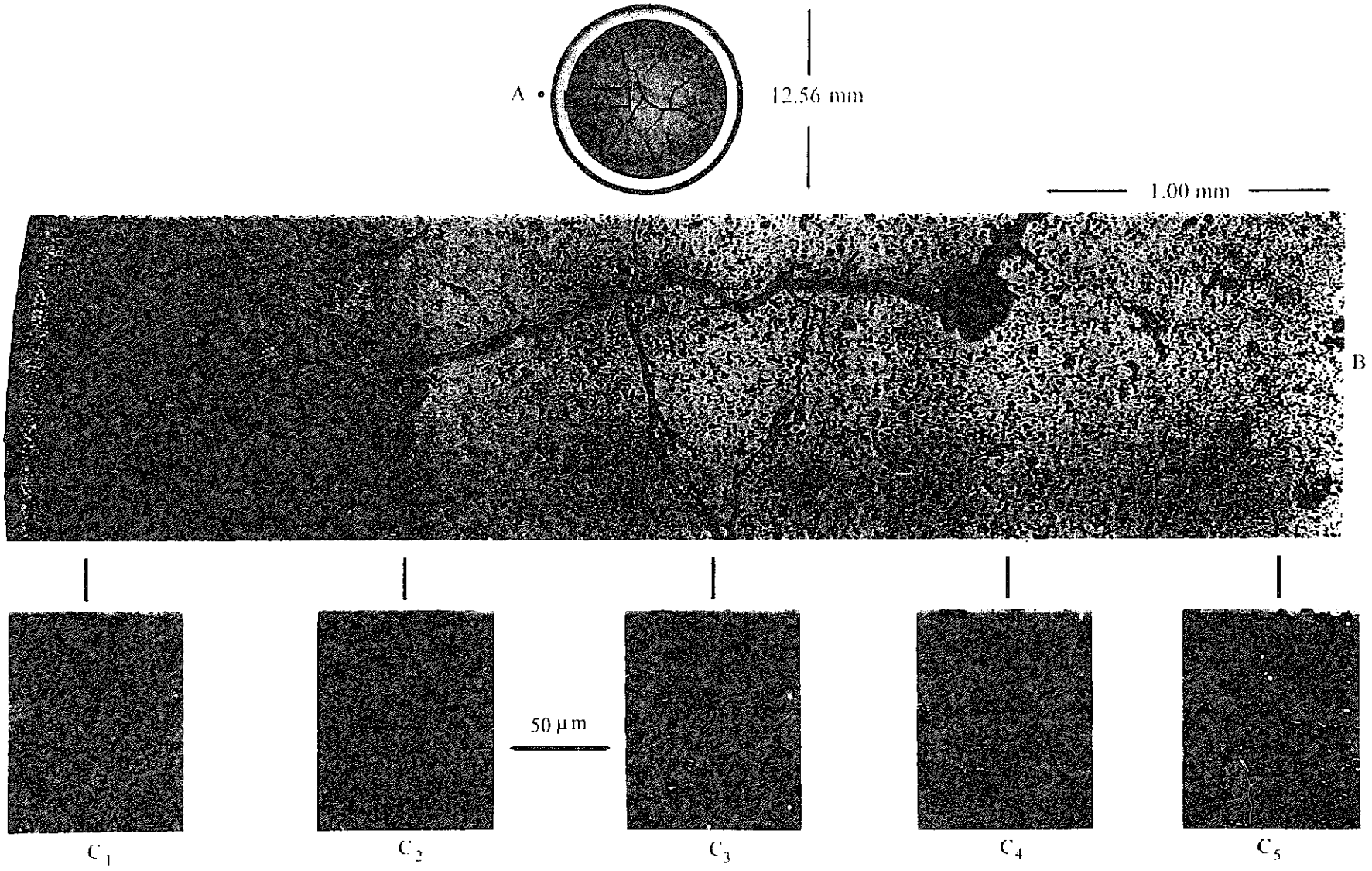


図5.8.4.16　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより1245mm）

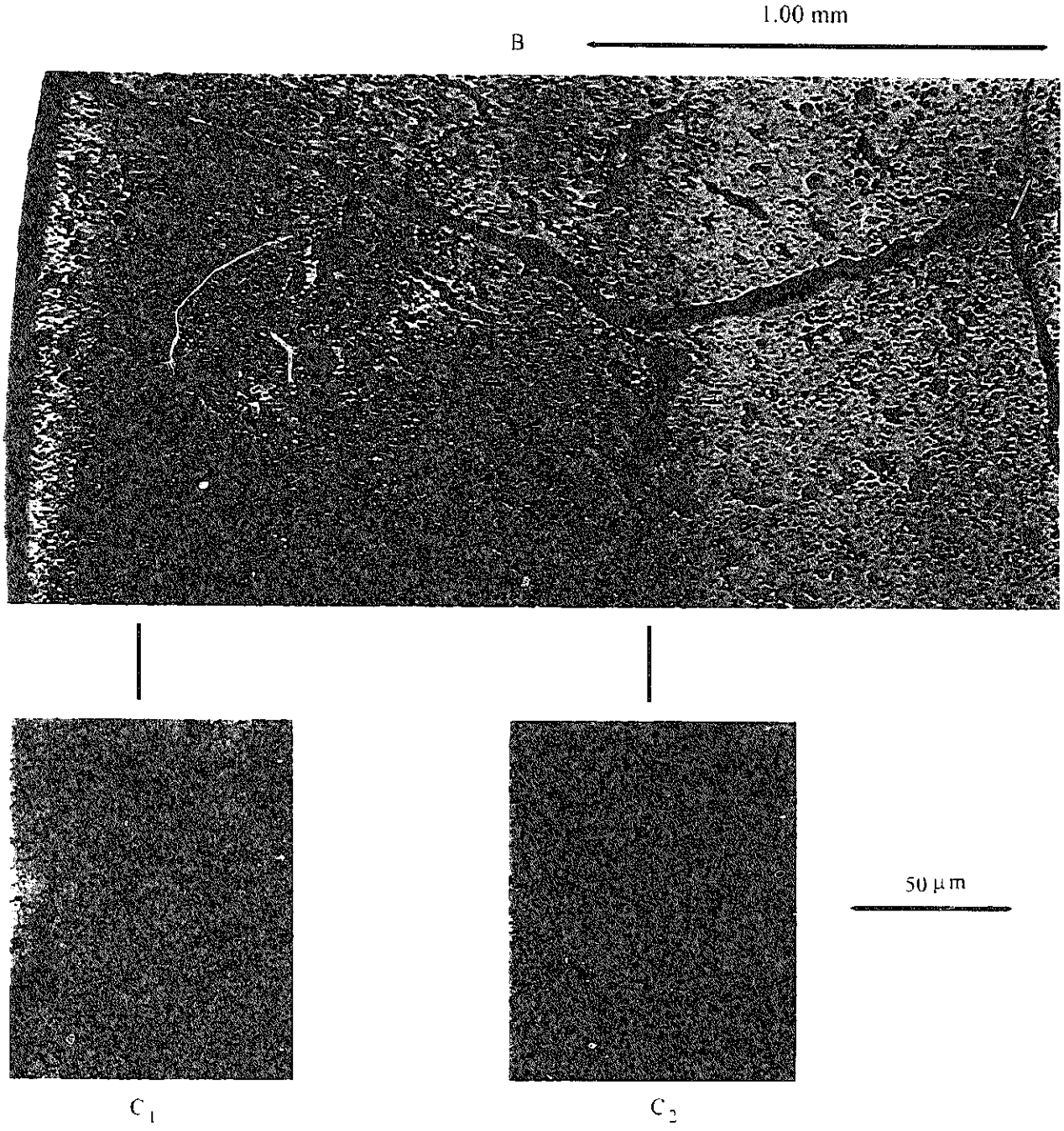


図5.8.4.17　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、周辺部）

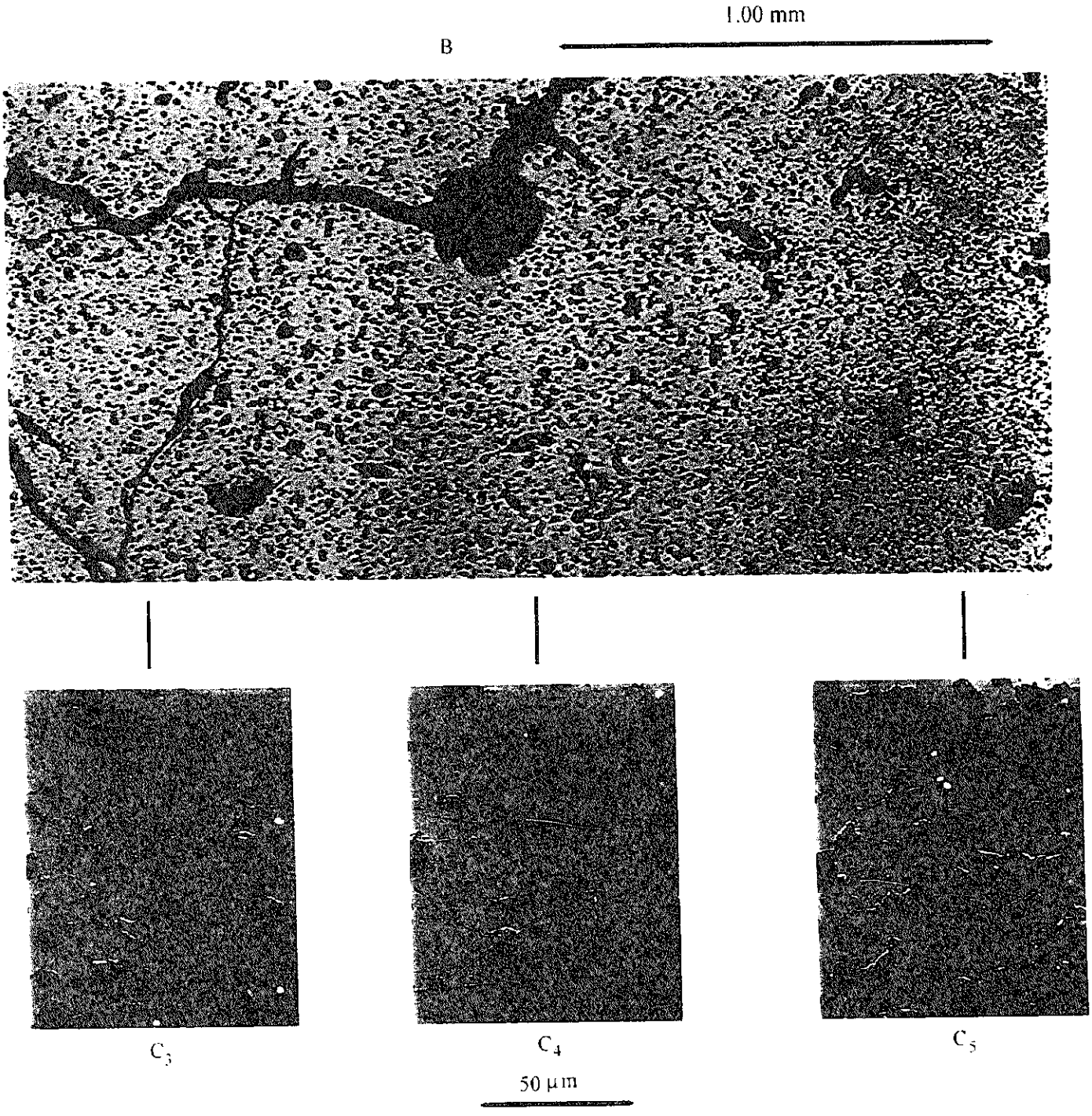


図5.8.4.18　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、中心部）

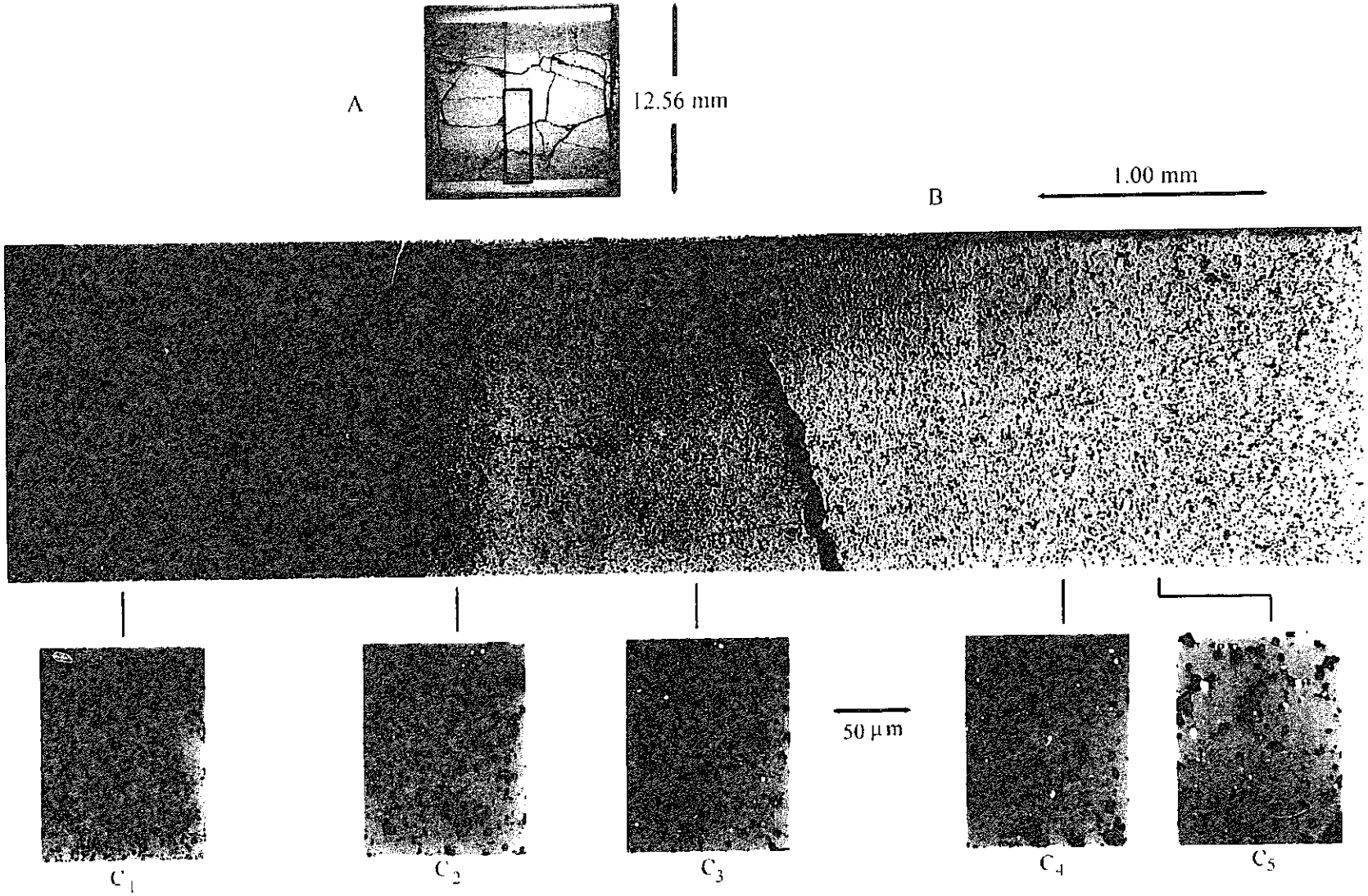


図5.8.4.19　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm）

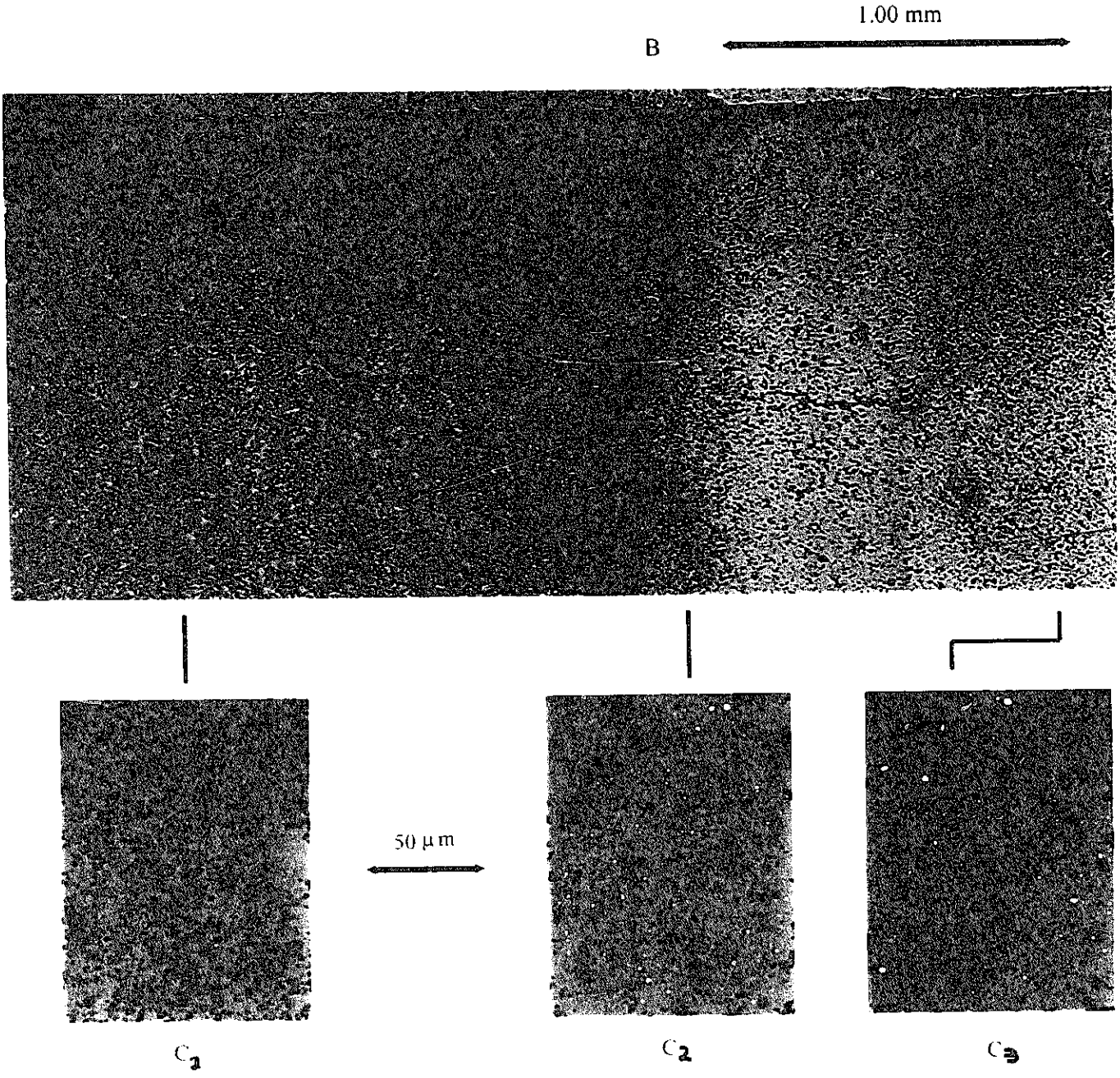


図5.8.4.20　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、周辺部）

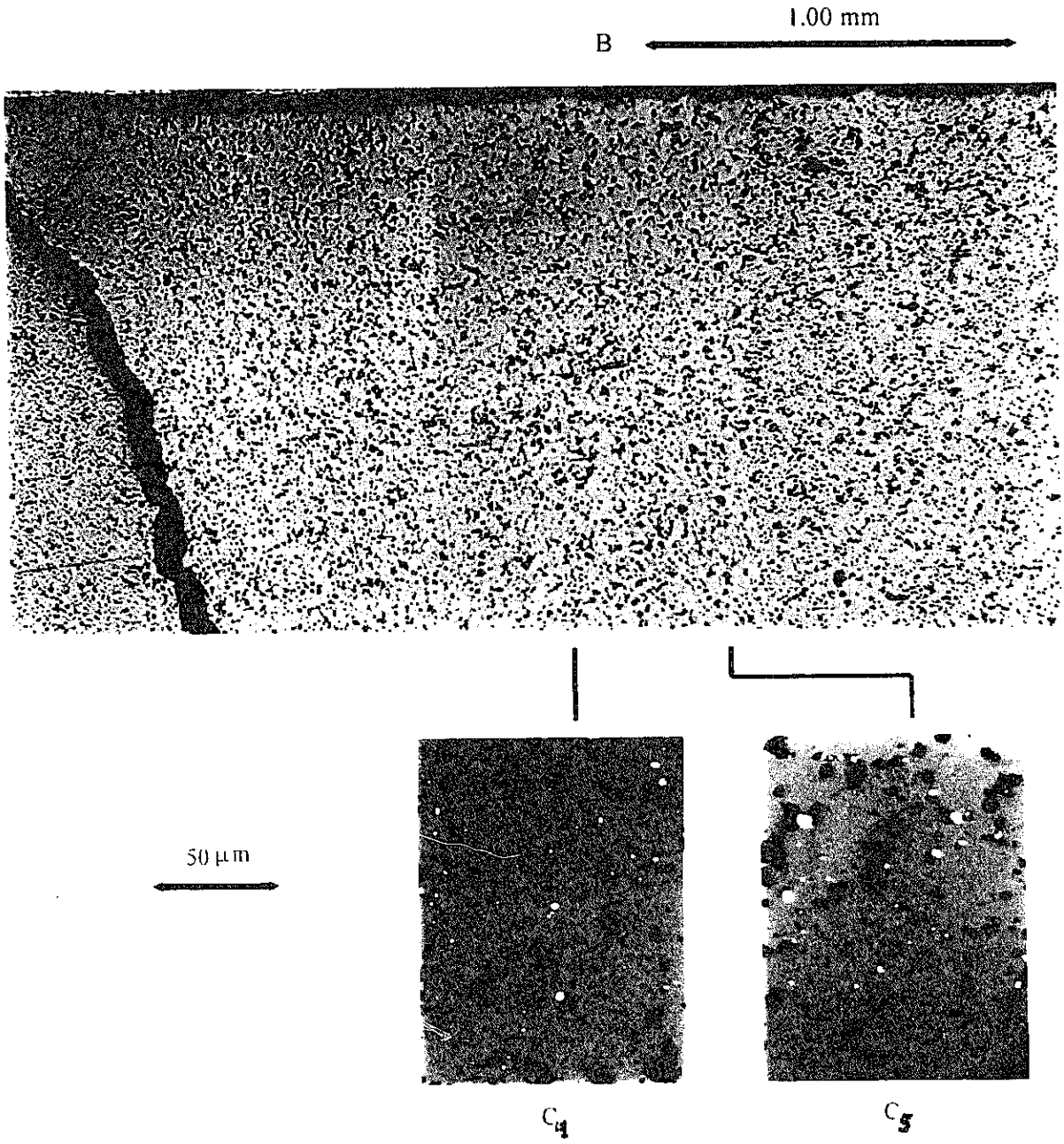


図5.8.4.21　IFA-565-3の研磨後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、中心部）

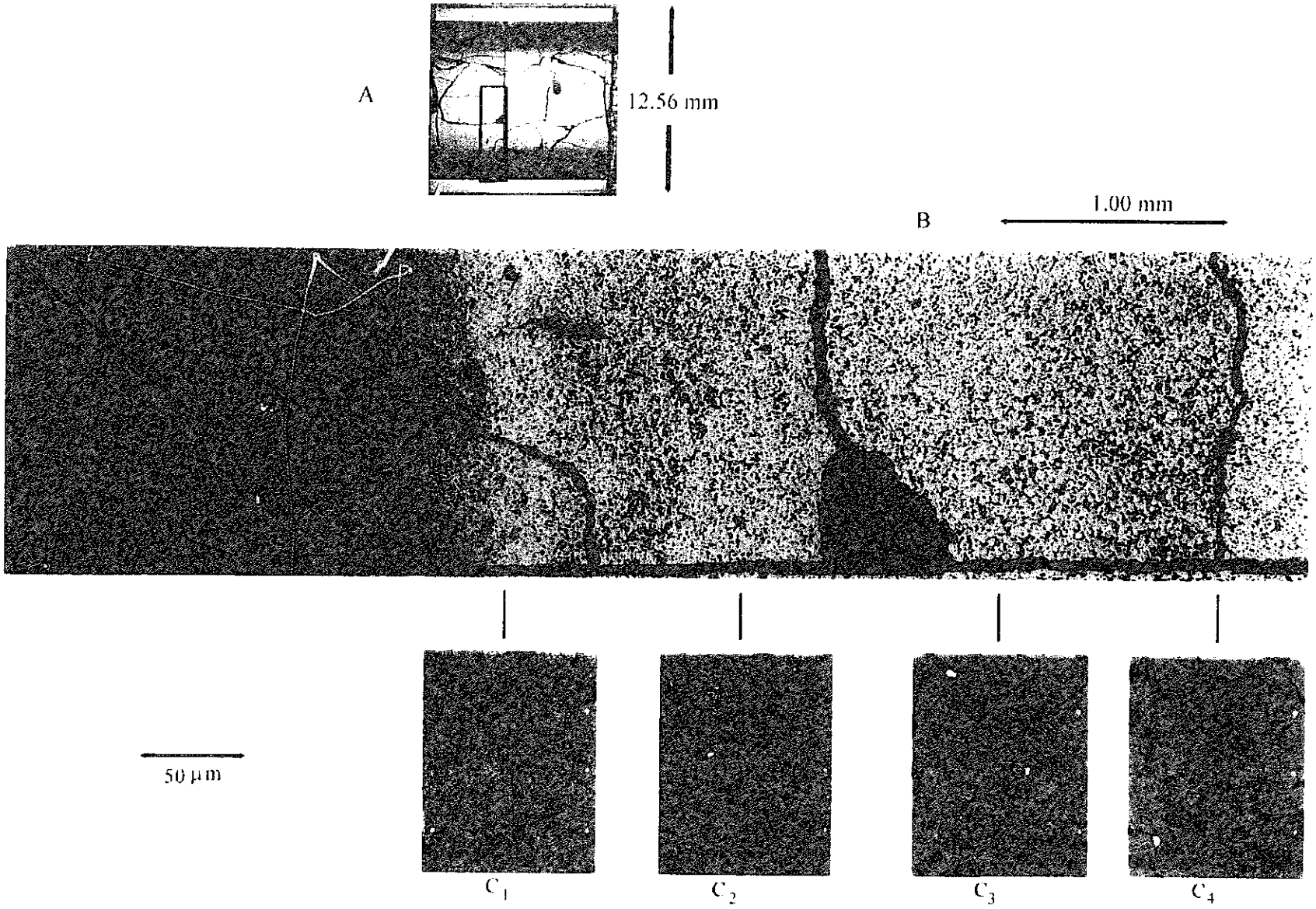


図5.8.4.22　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm）

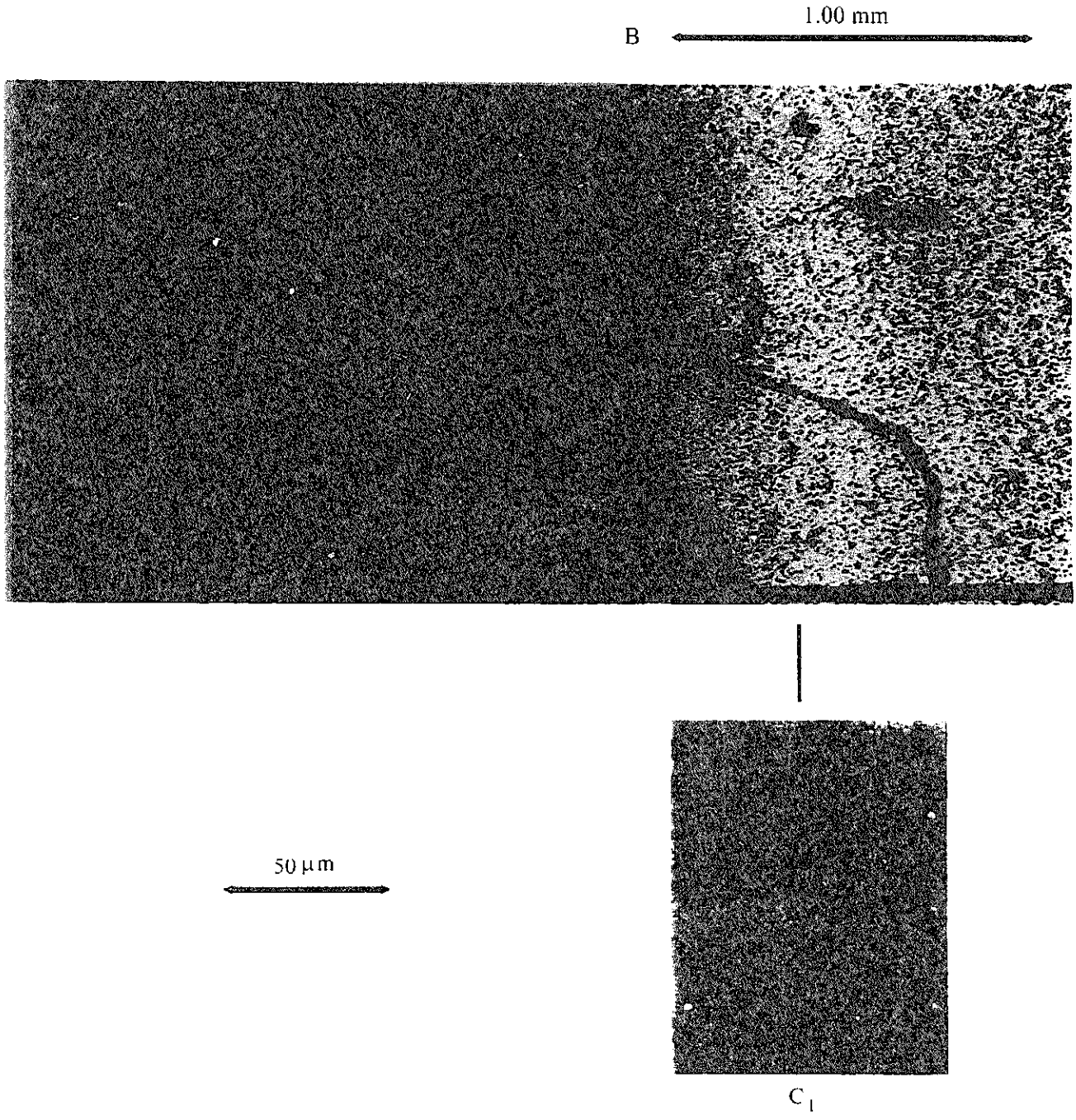


図5.8.4.23　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、周辺部）

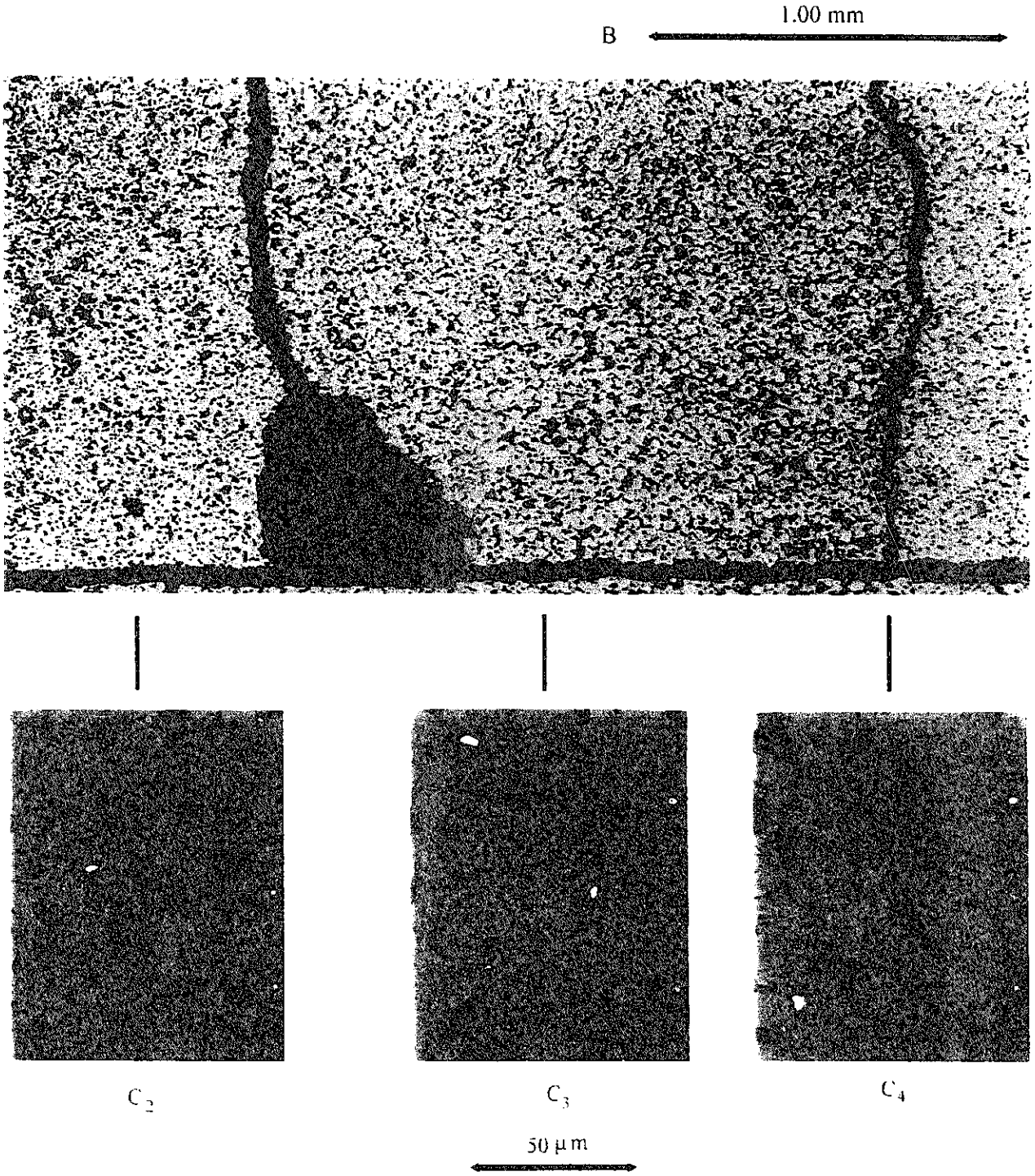


図5.8.4.24　IFA-565-3のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、中心部）

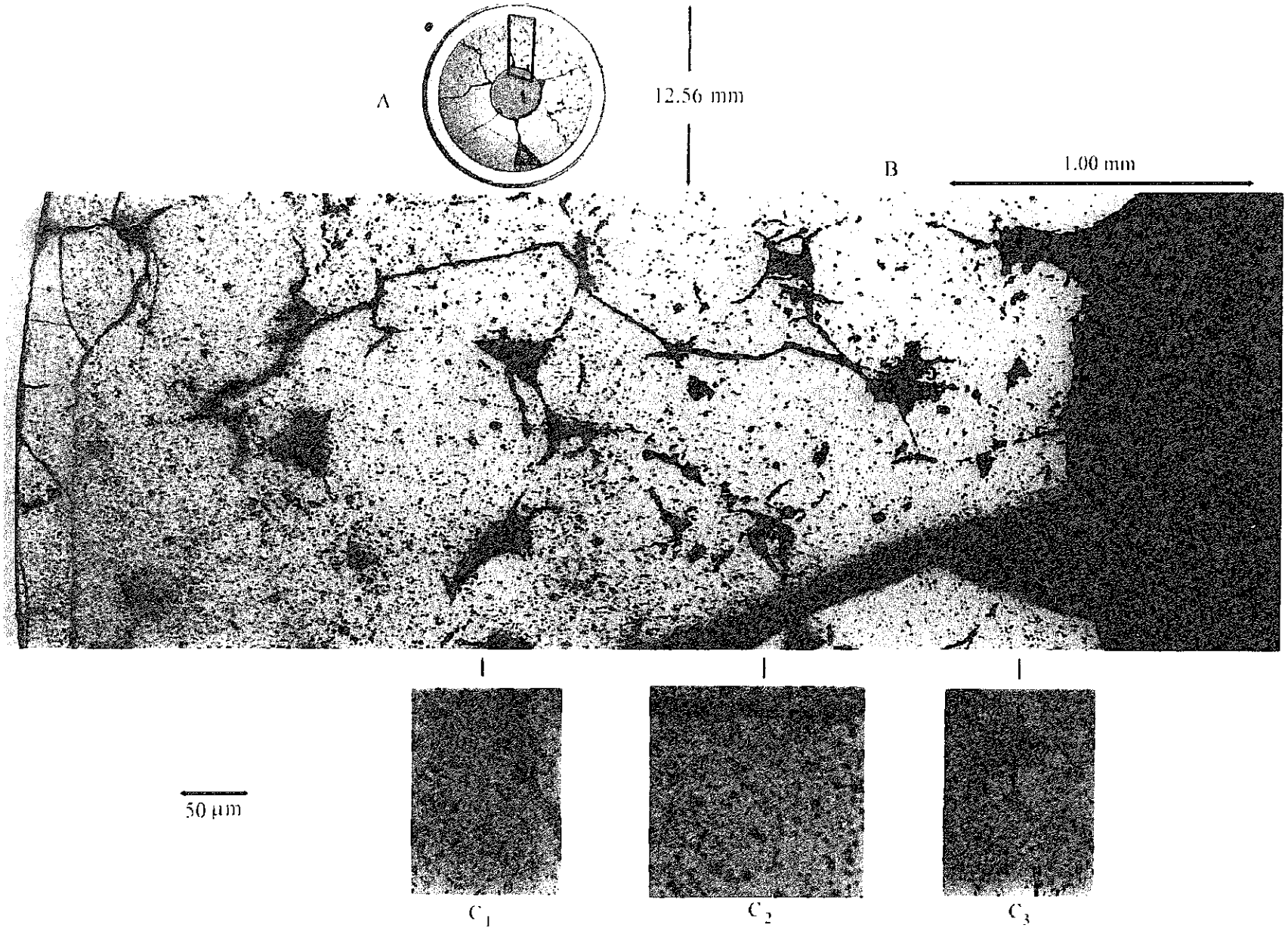


図5.8.4.25　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより246mm）

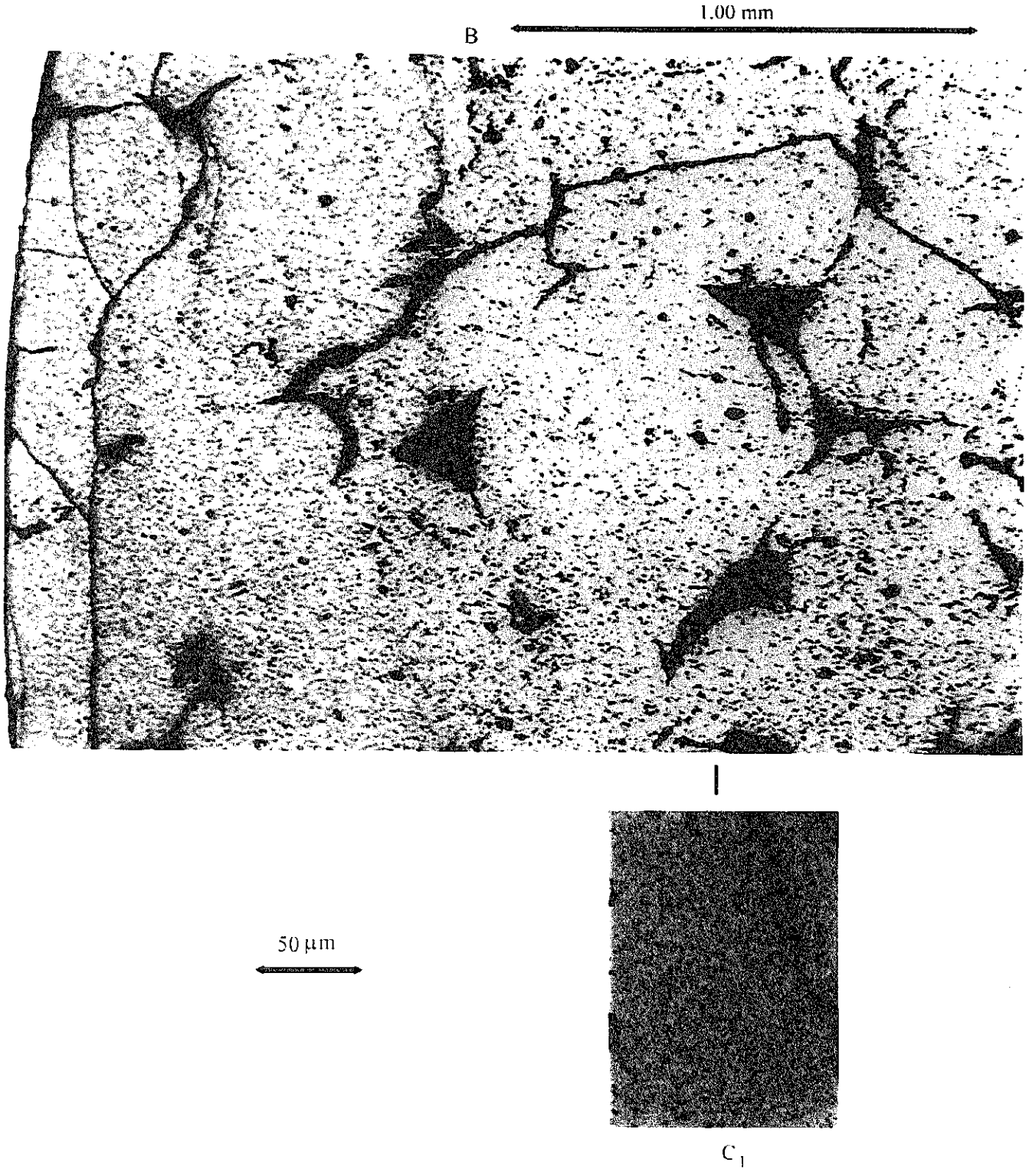


図5.8.4.26　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより246mm、周辺部）

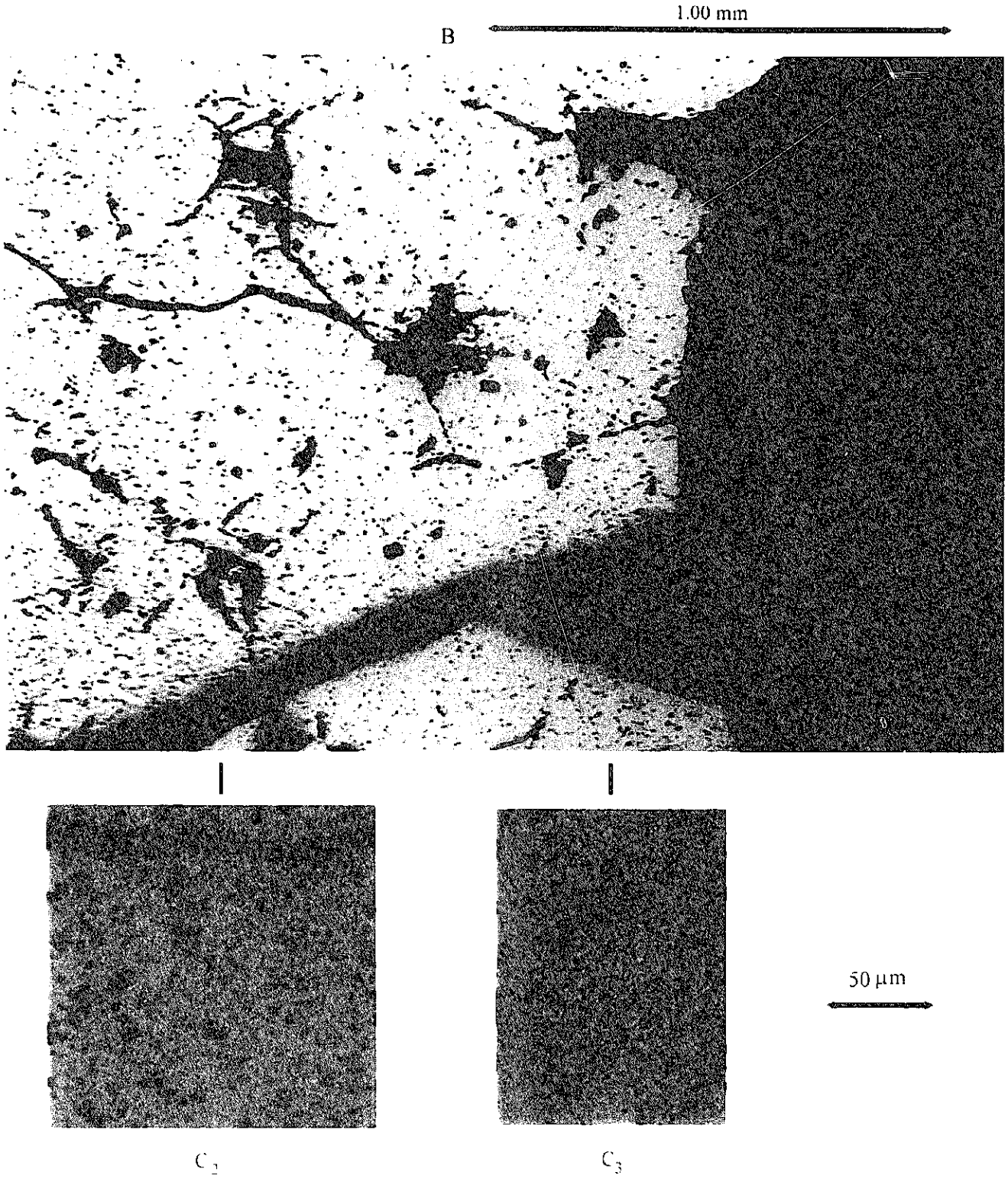


図5.8.4.27　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより246mm、中心部）

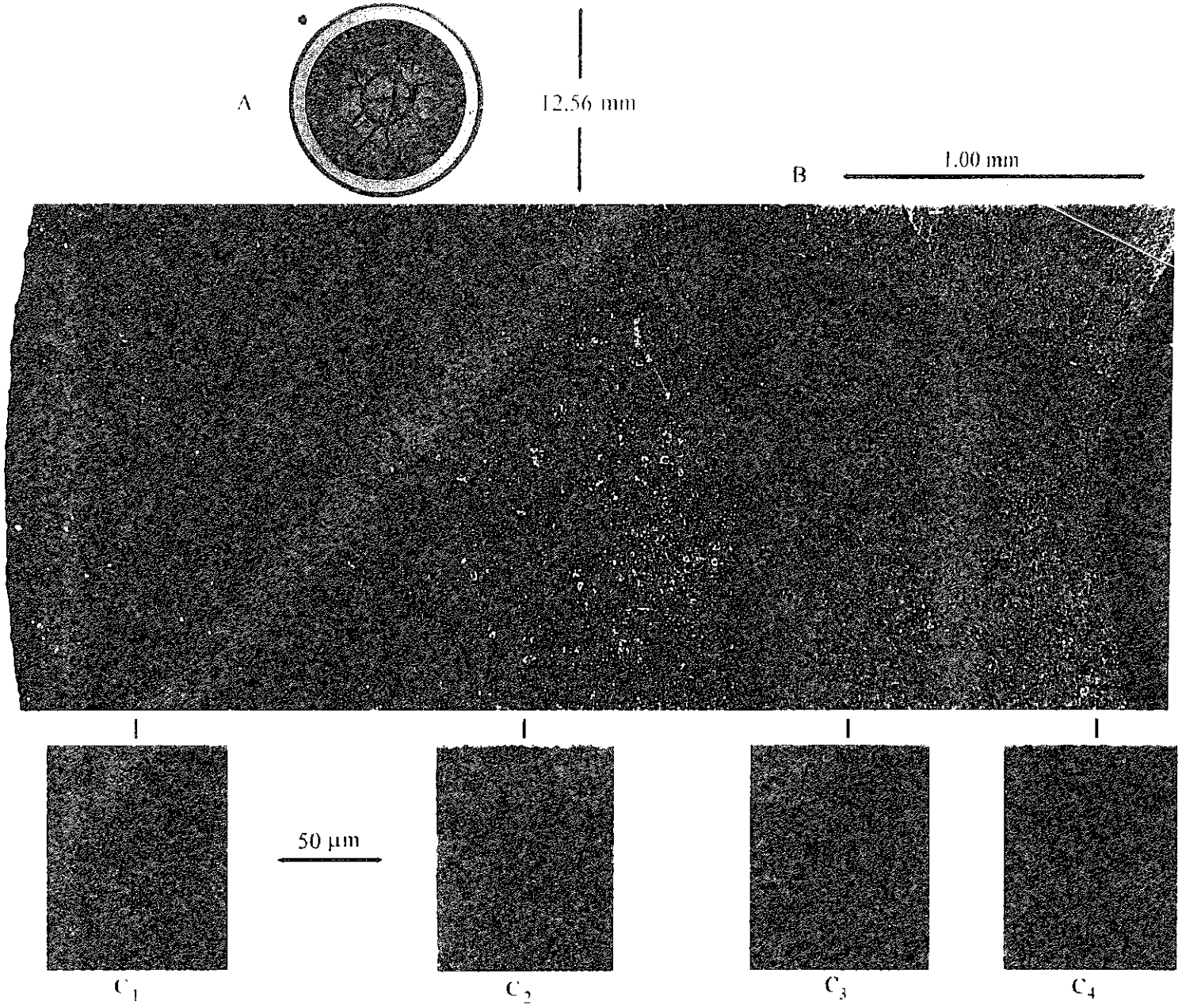


図5.8.4.28　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより246mm）

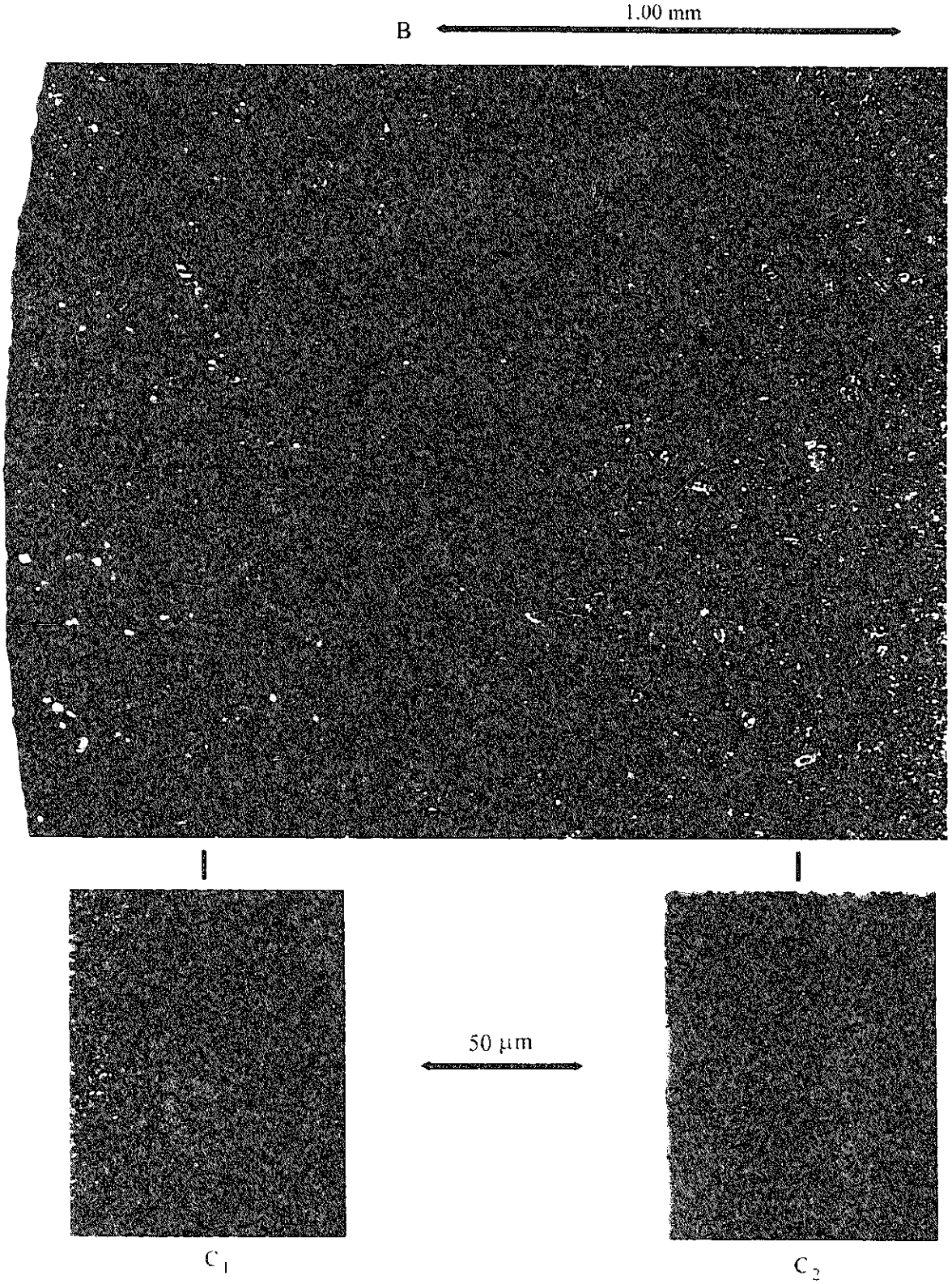


図5.8.4.29　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより246mm、周辺部）

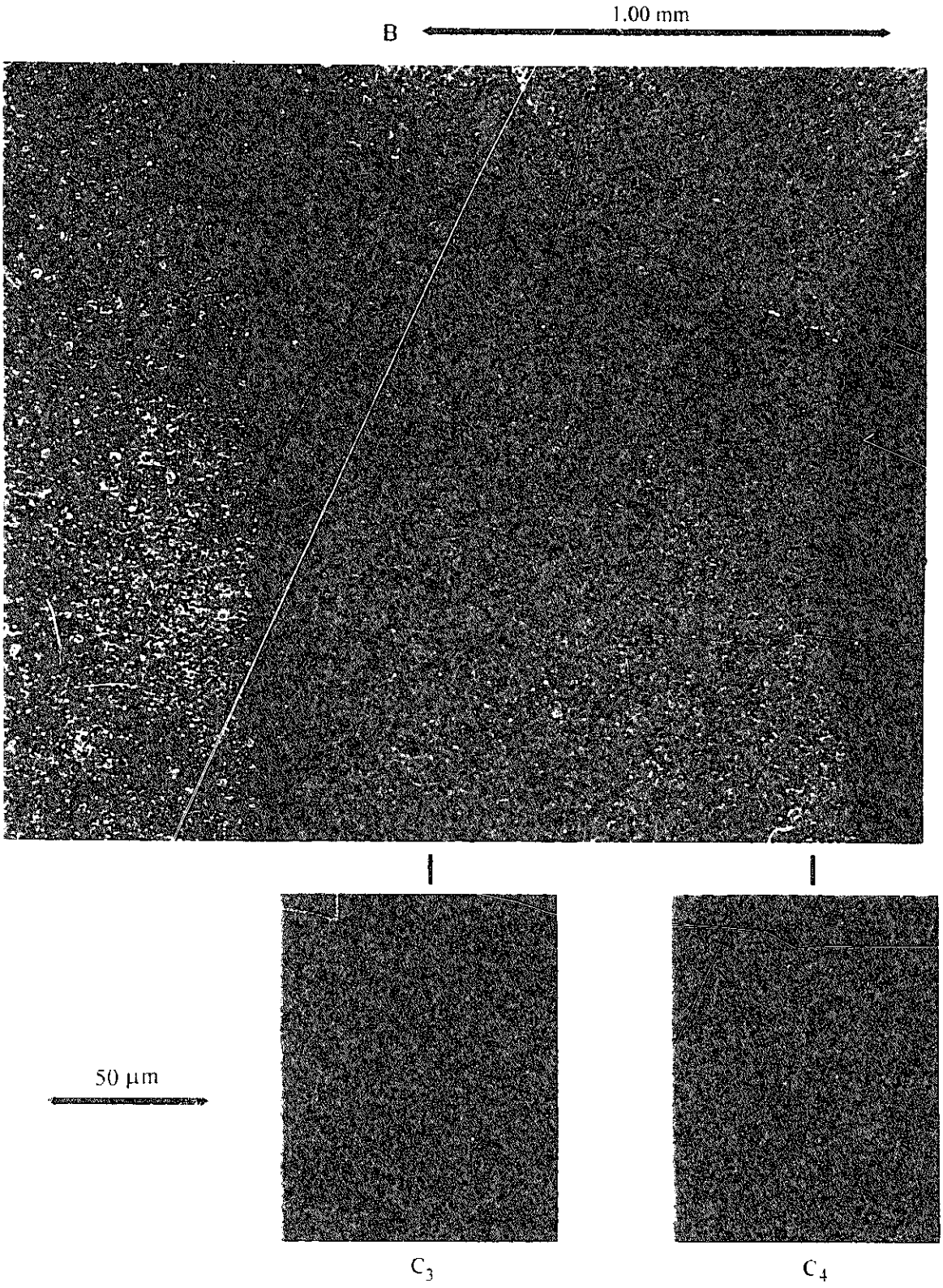


図5.8.4.30　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより246mm、中心部）

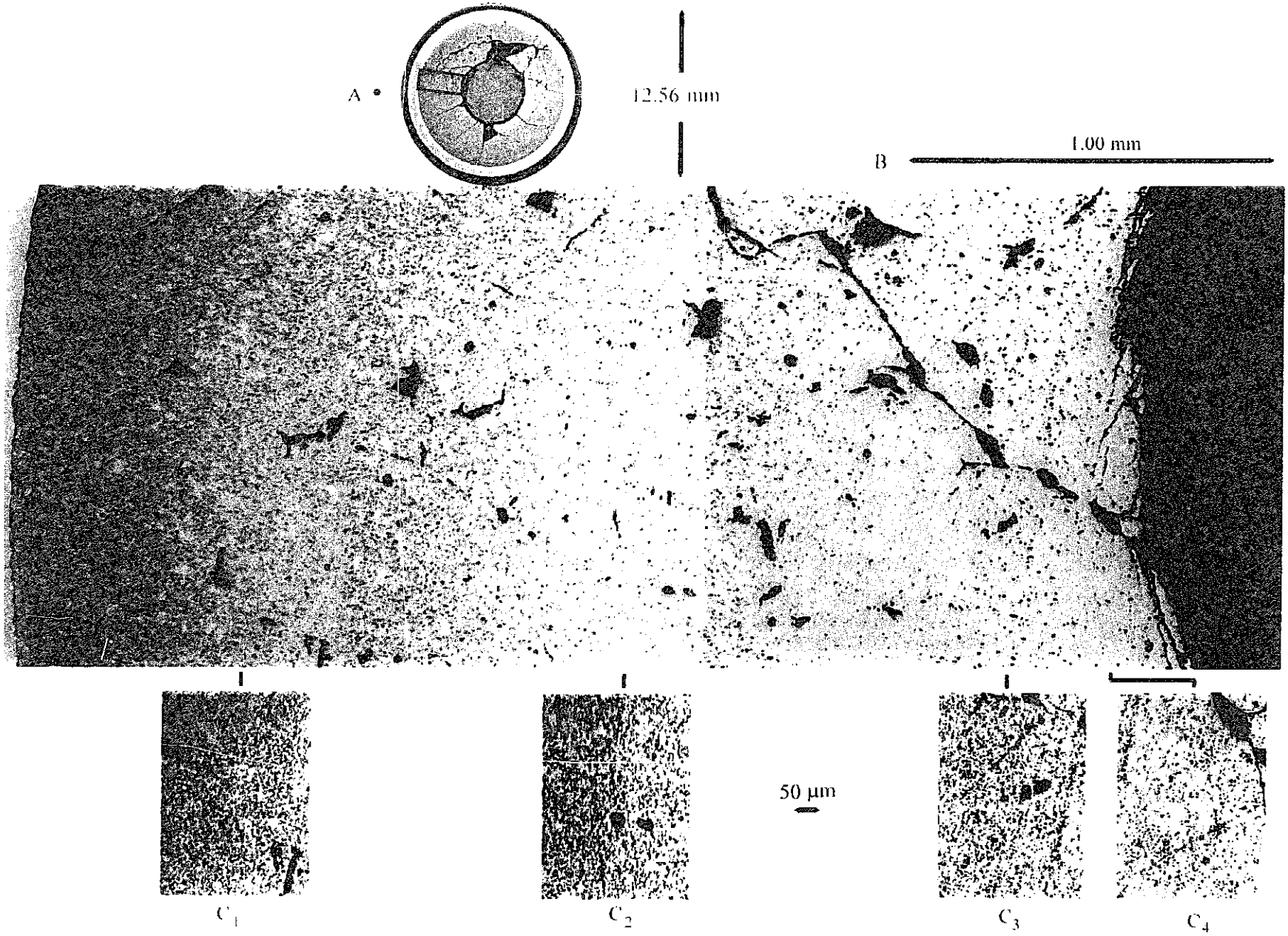


図5.8.4.31　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより742mm）

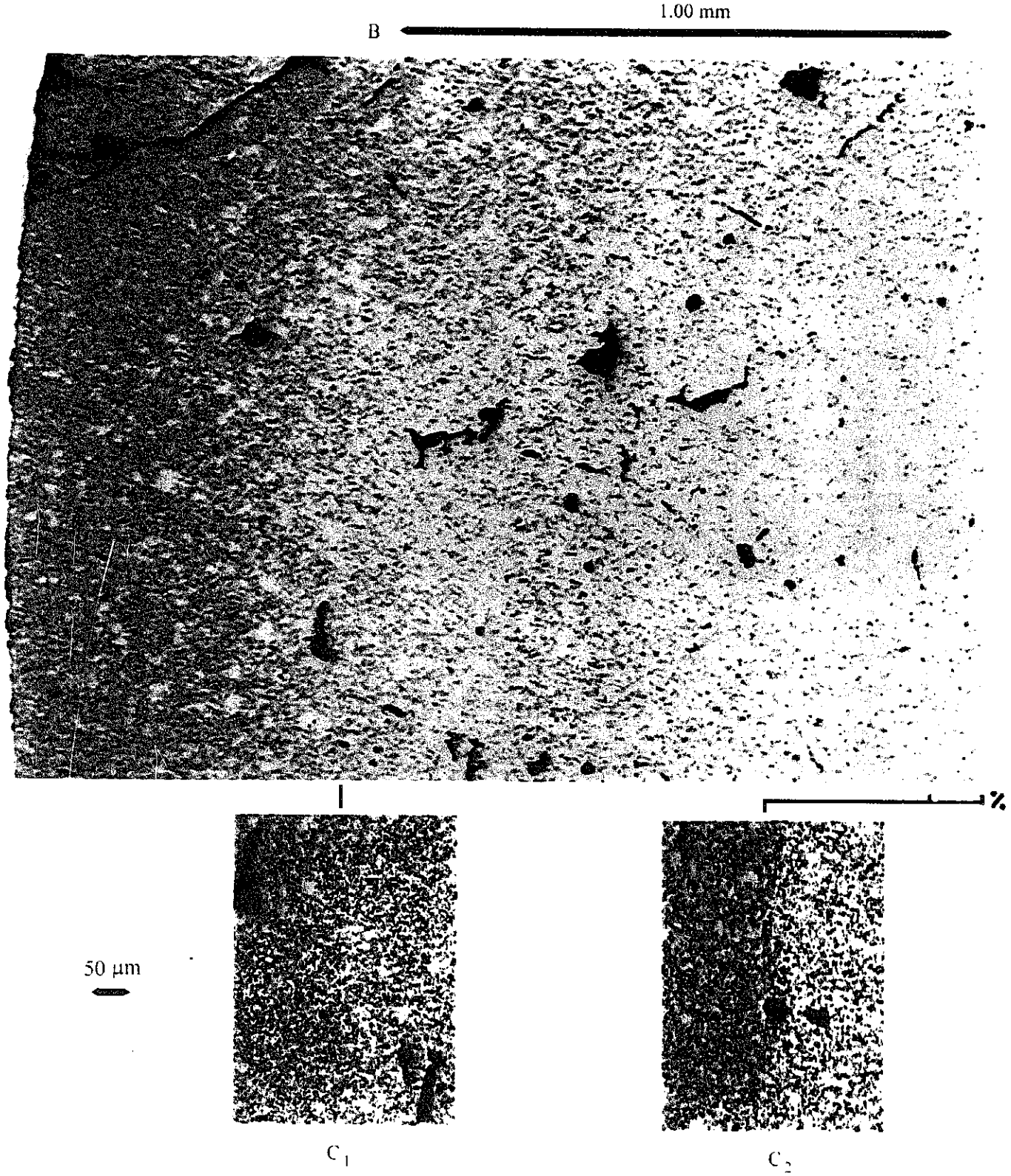


図5.8.4.32　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより742mm、周辺部）

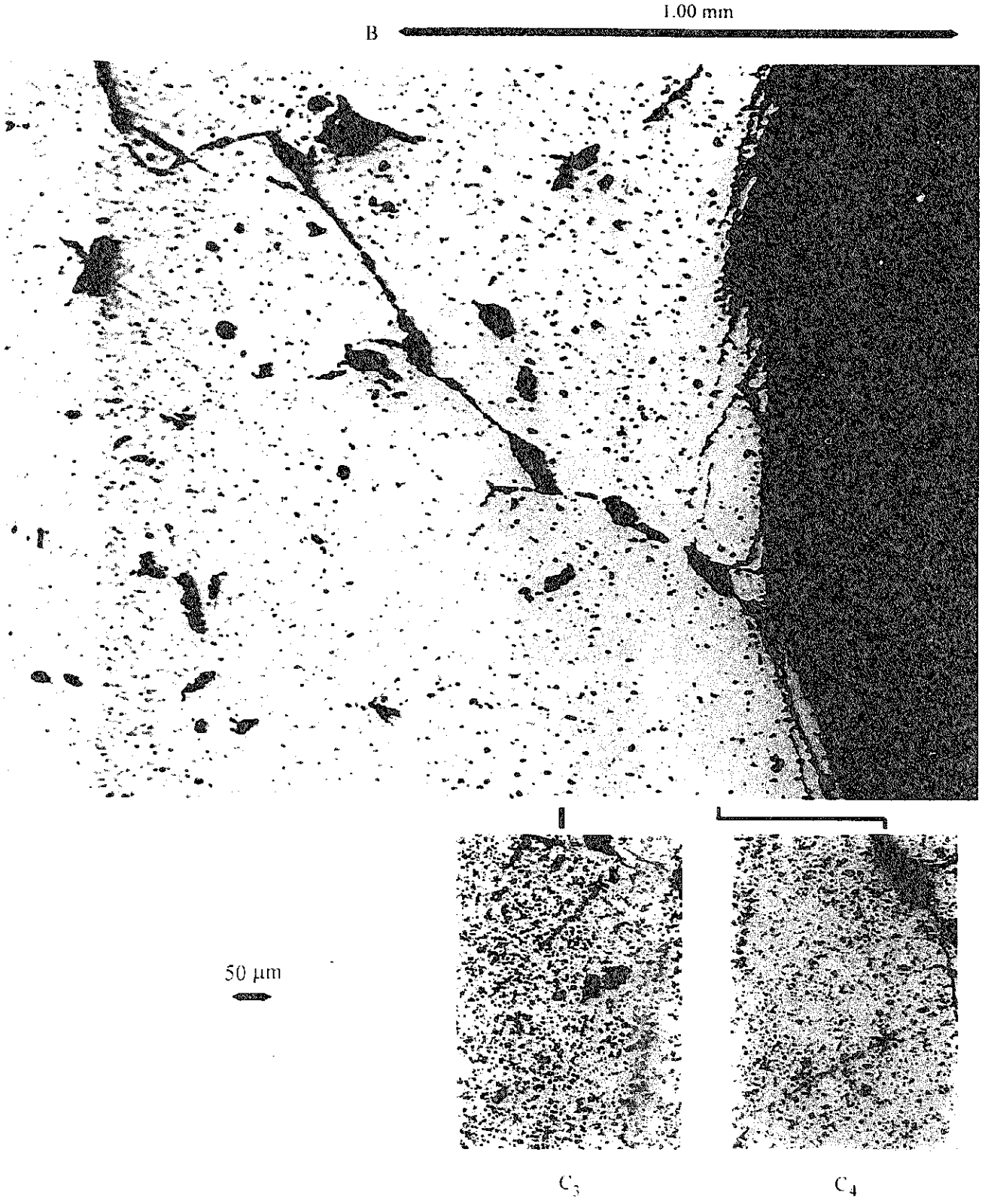


図5.8.4.33　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより742mm、中心部）

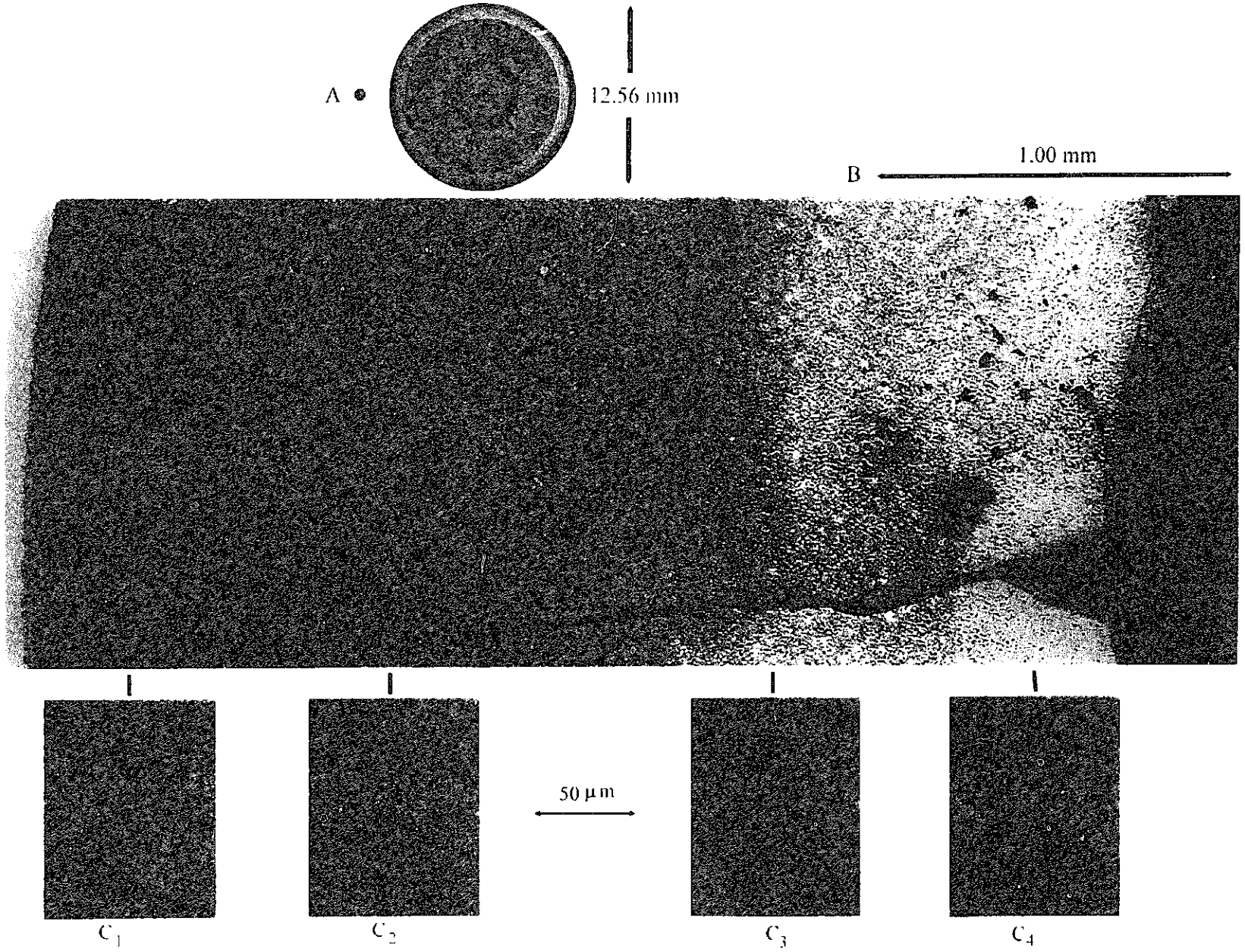


図5.8.4.34　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより742mm）

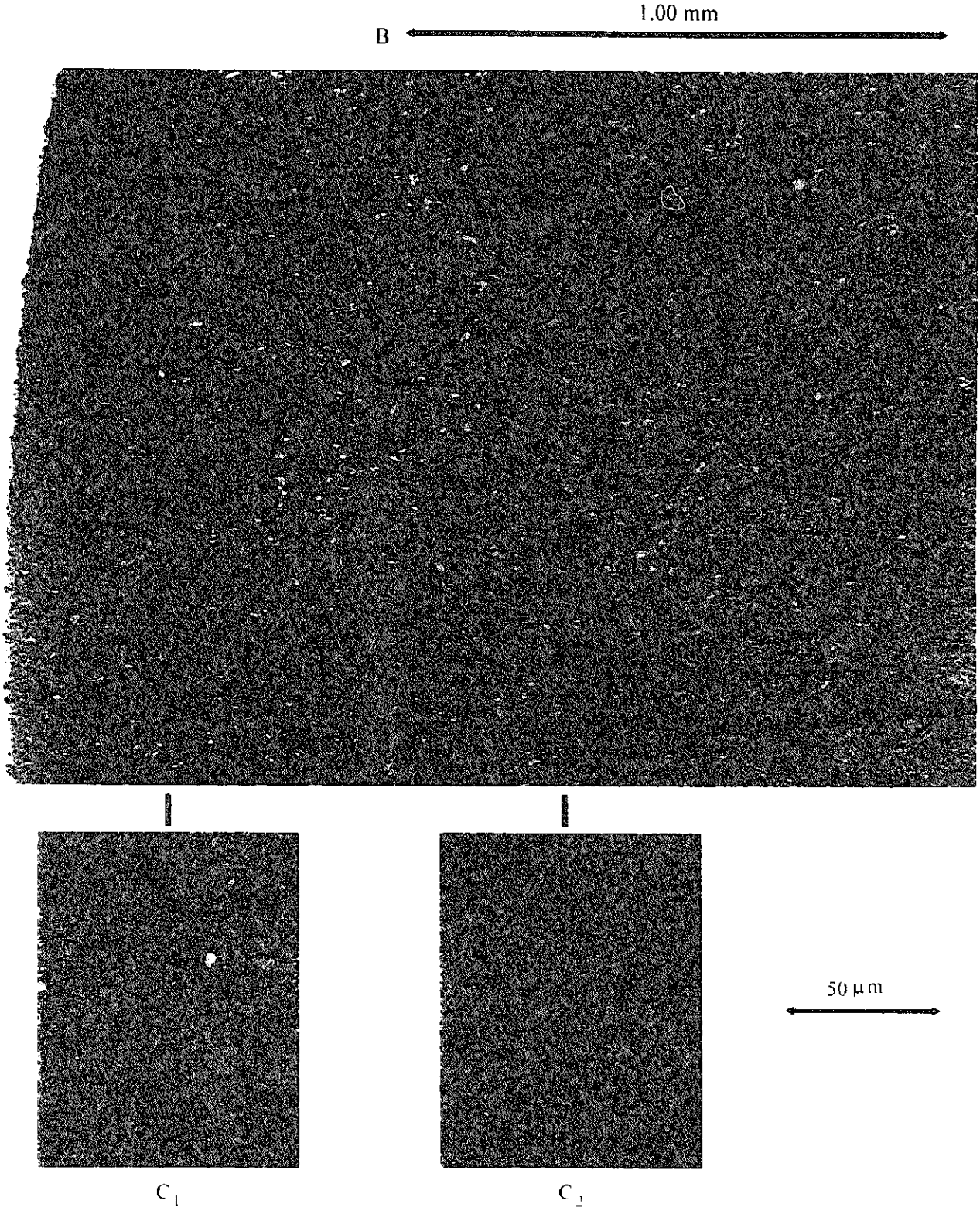


図5.8.4.35　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより742mm、周辺部）

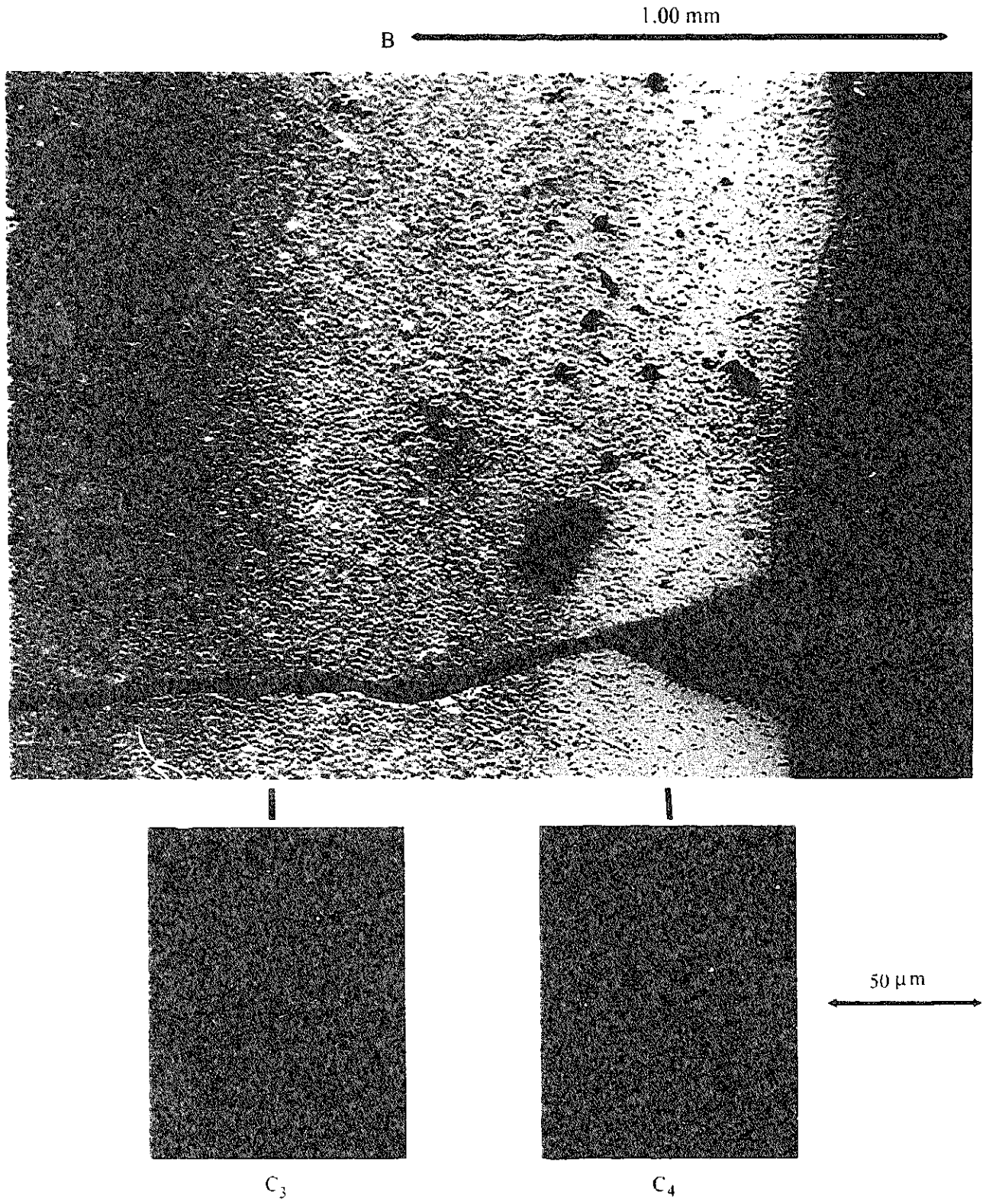


図5.8.4.36　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより742mm、中心部）

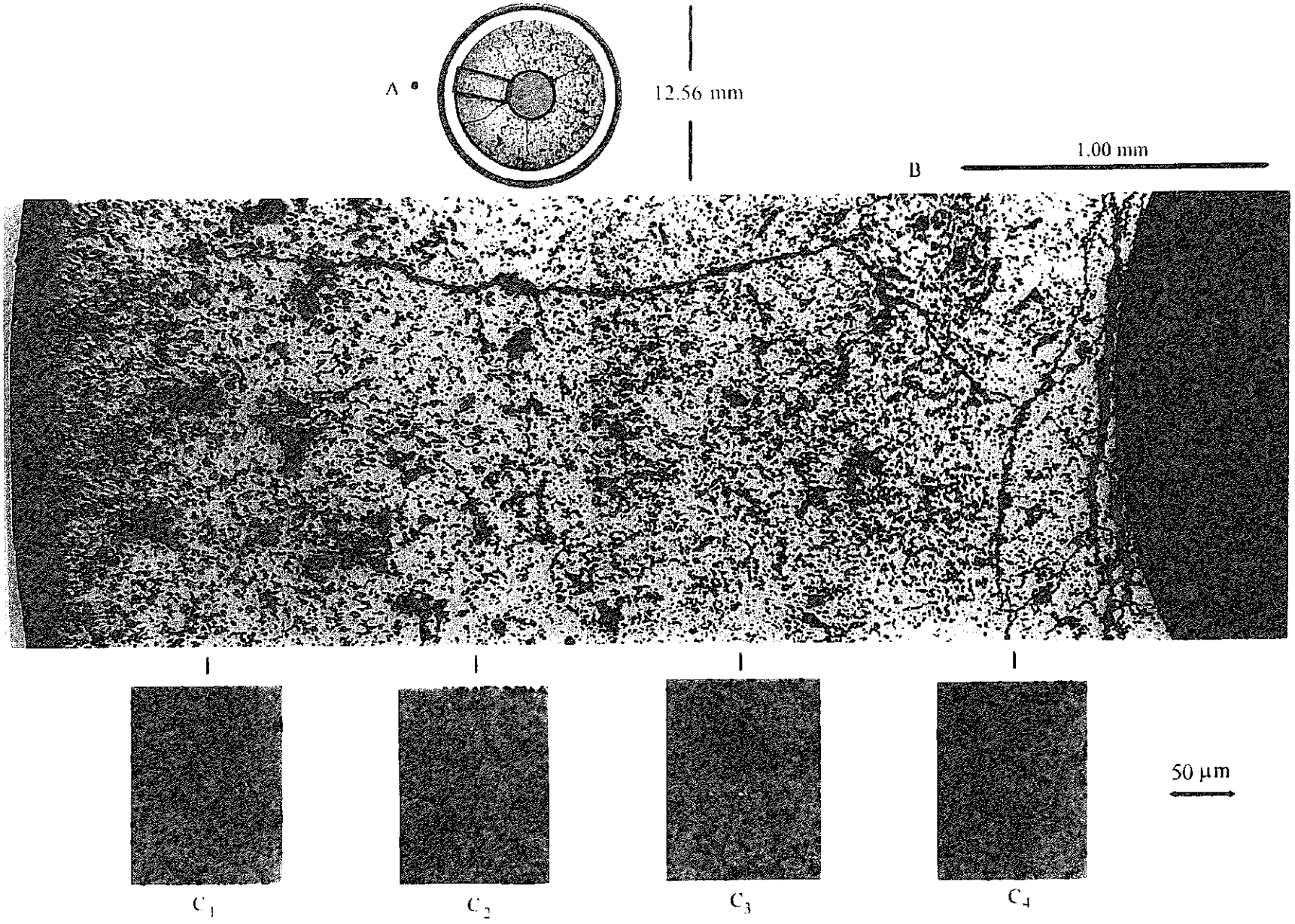


図5.8.4.37　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより1245mm）

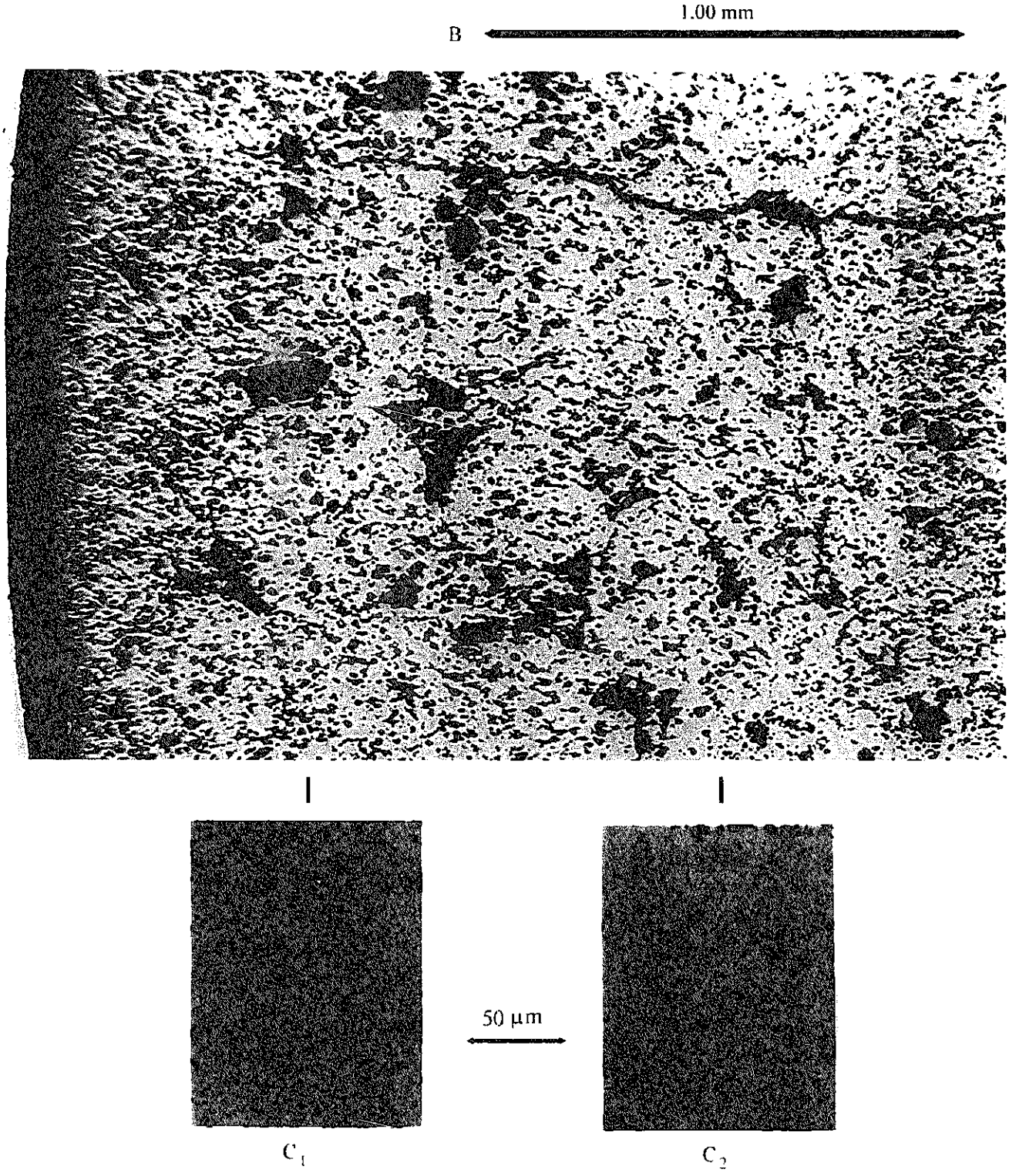


図5.8.4.38　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、周辺部）

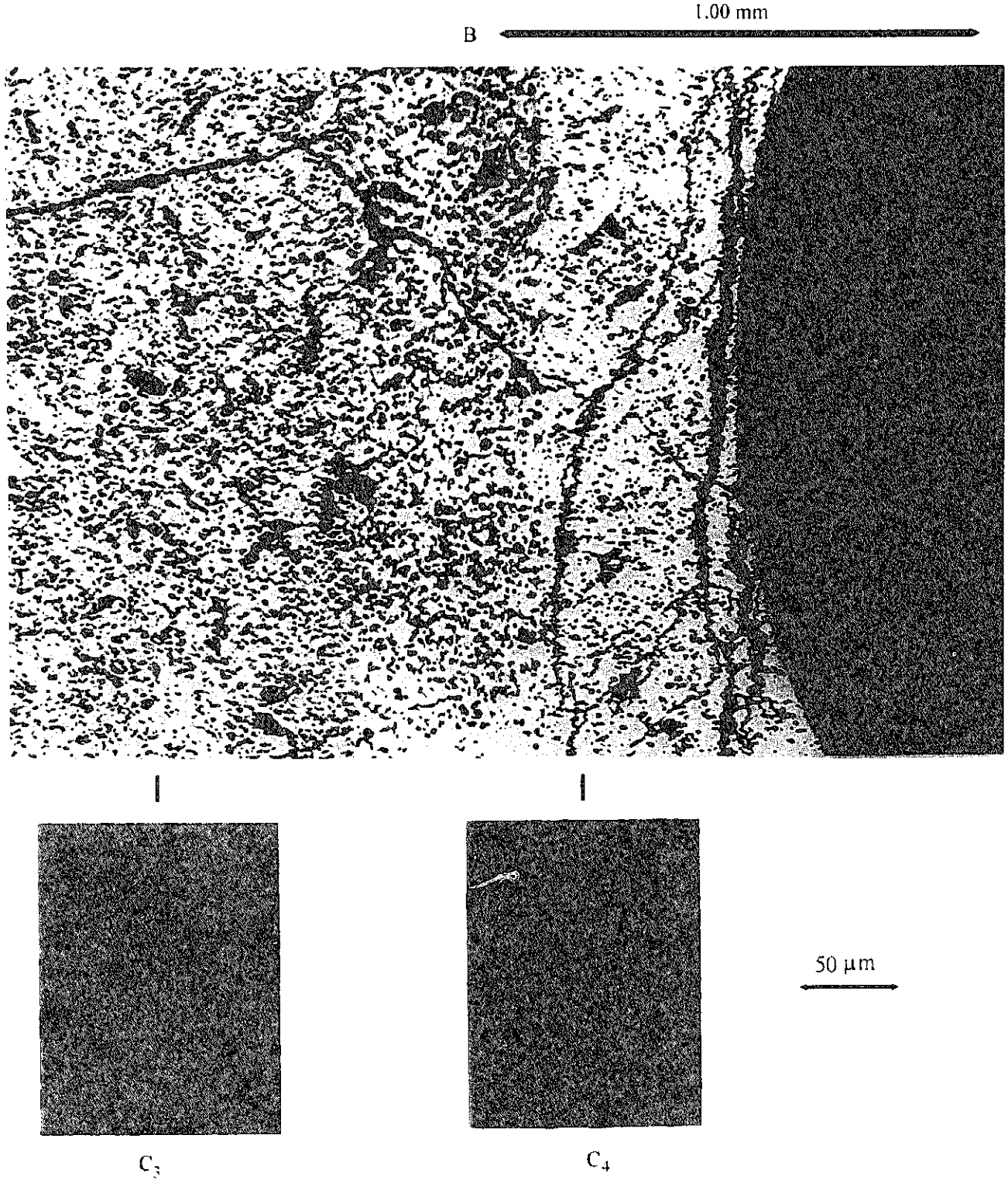


図5.8.4.39　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、中心部）

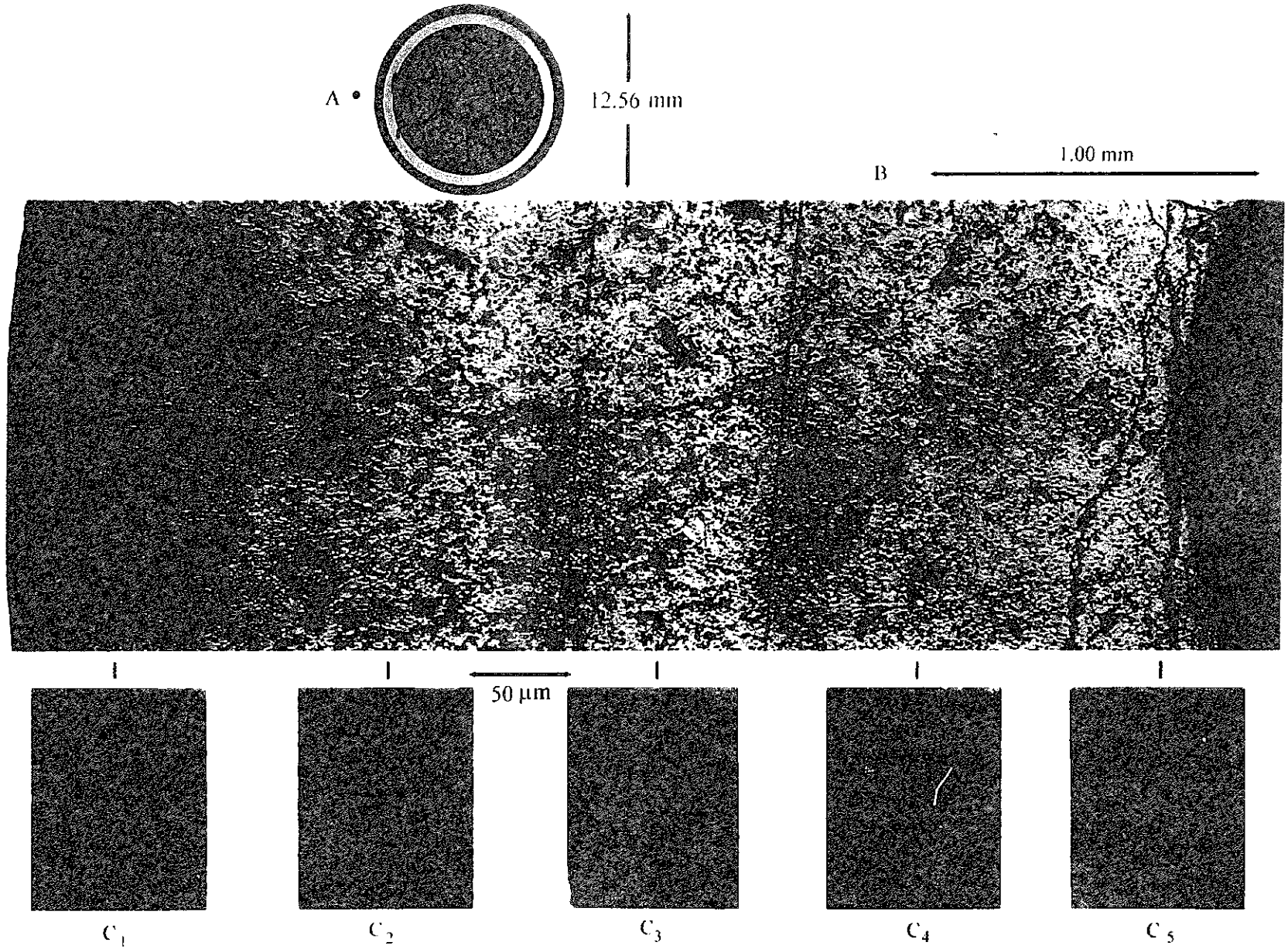


図5.8.4.40　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより1245mm）

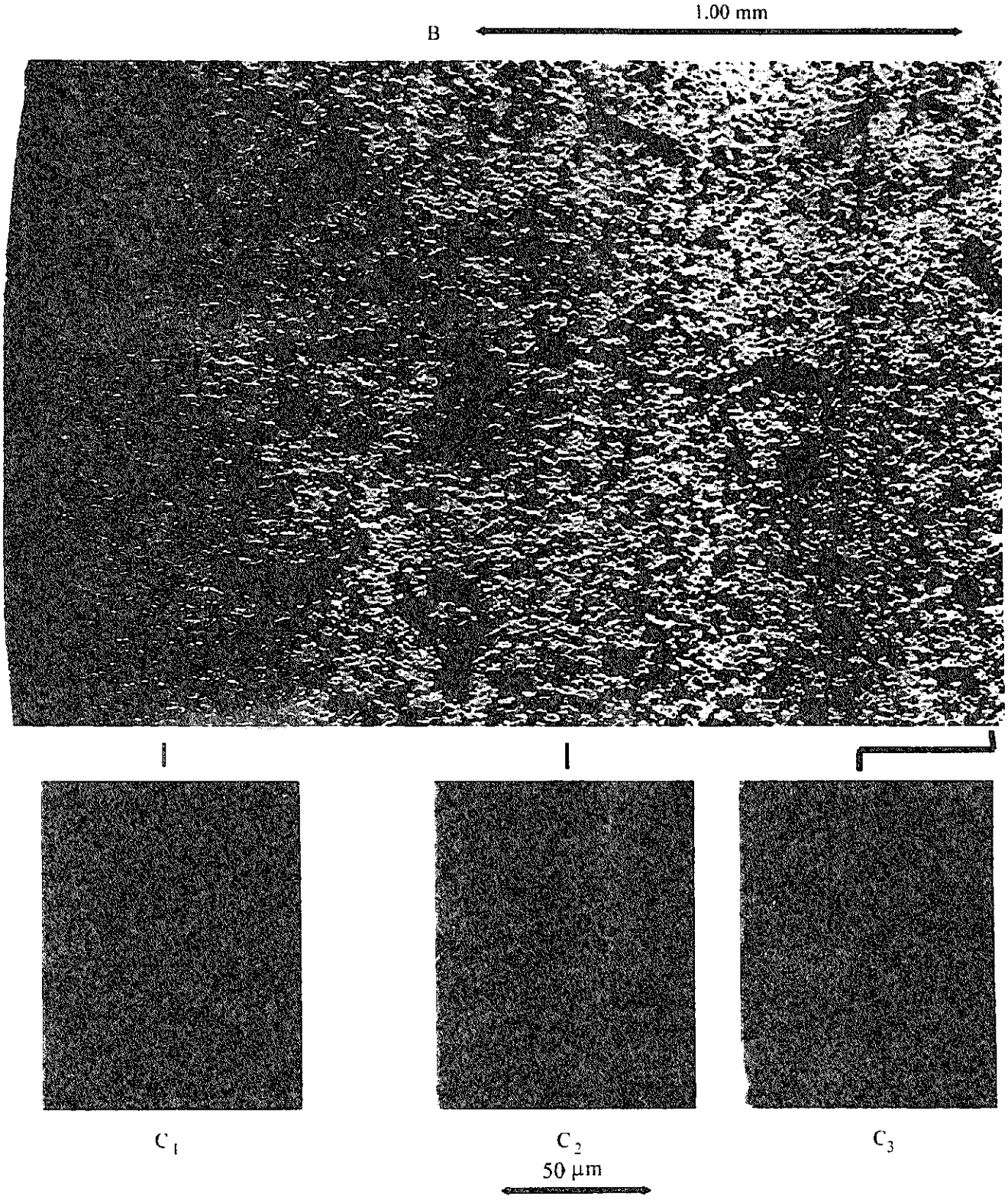


図5.8.4.41　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、周辺部）

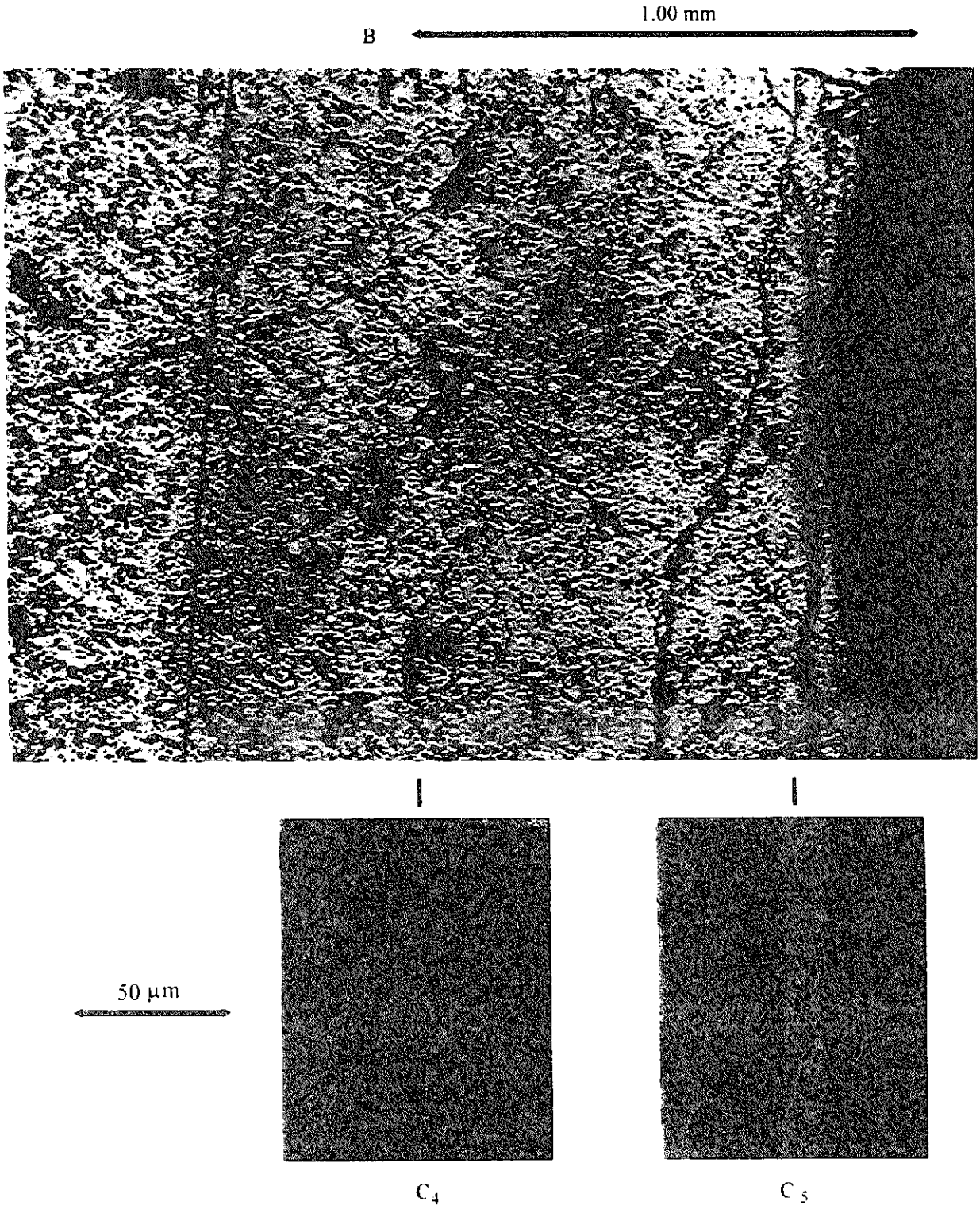


図5.8.4.42　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより1245mm、中心部）

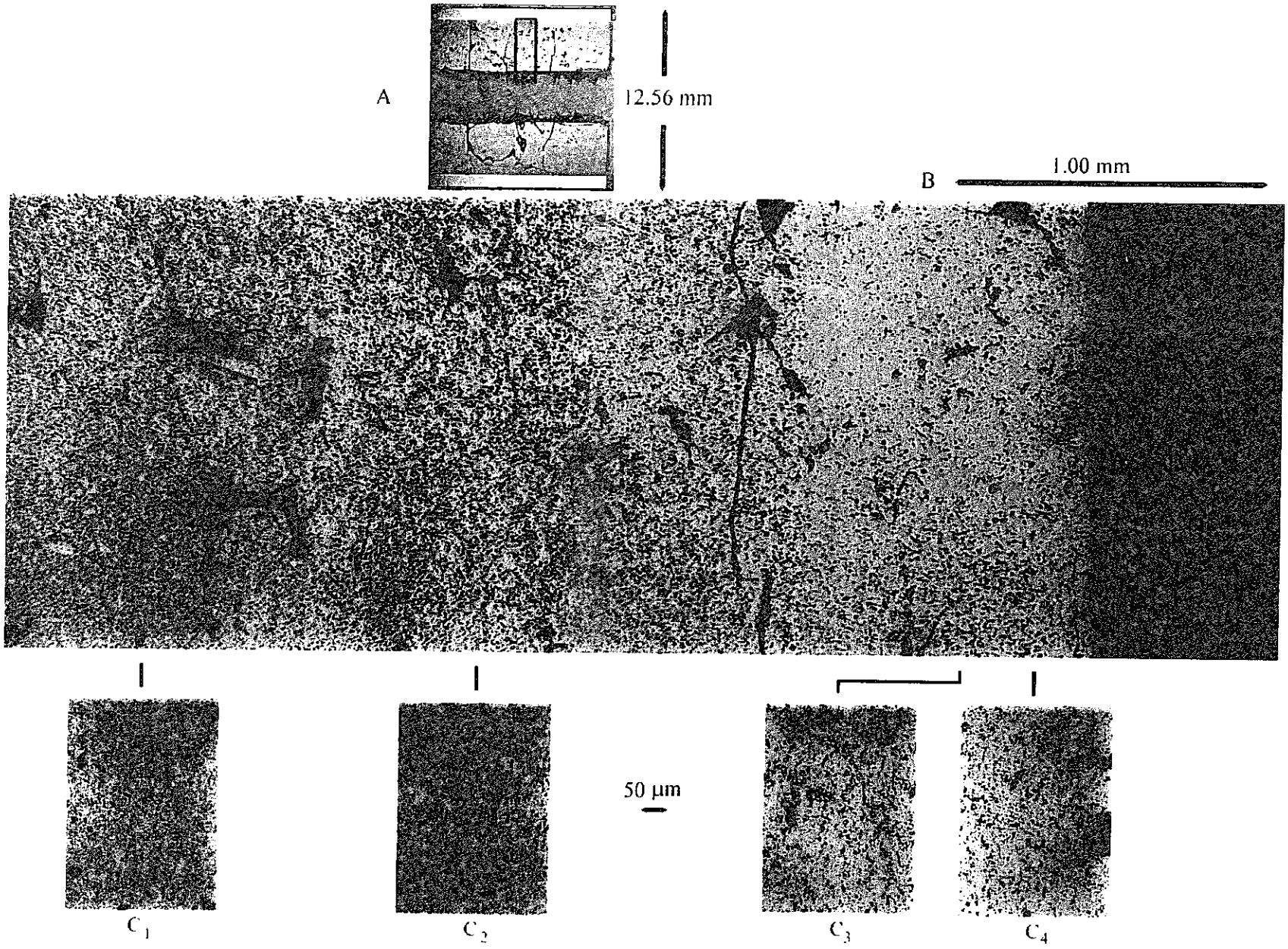


図5.8.4.43　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm）

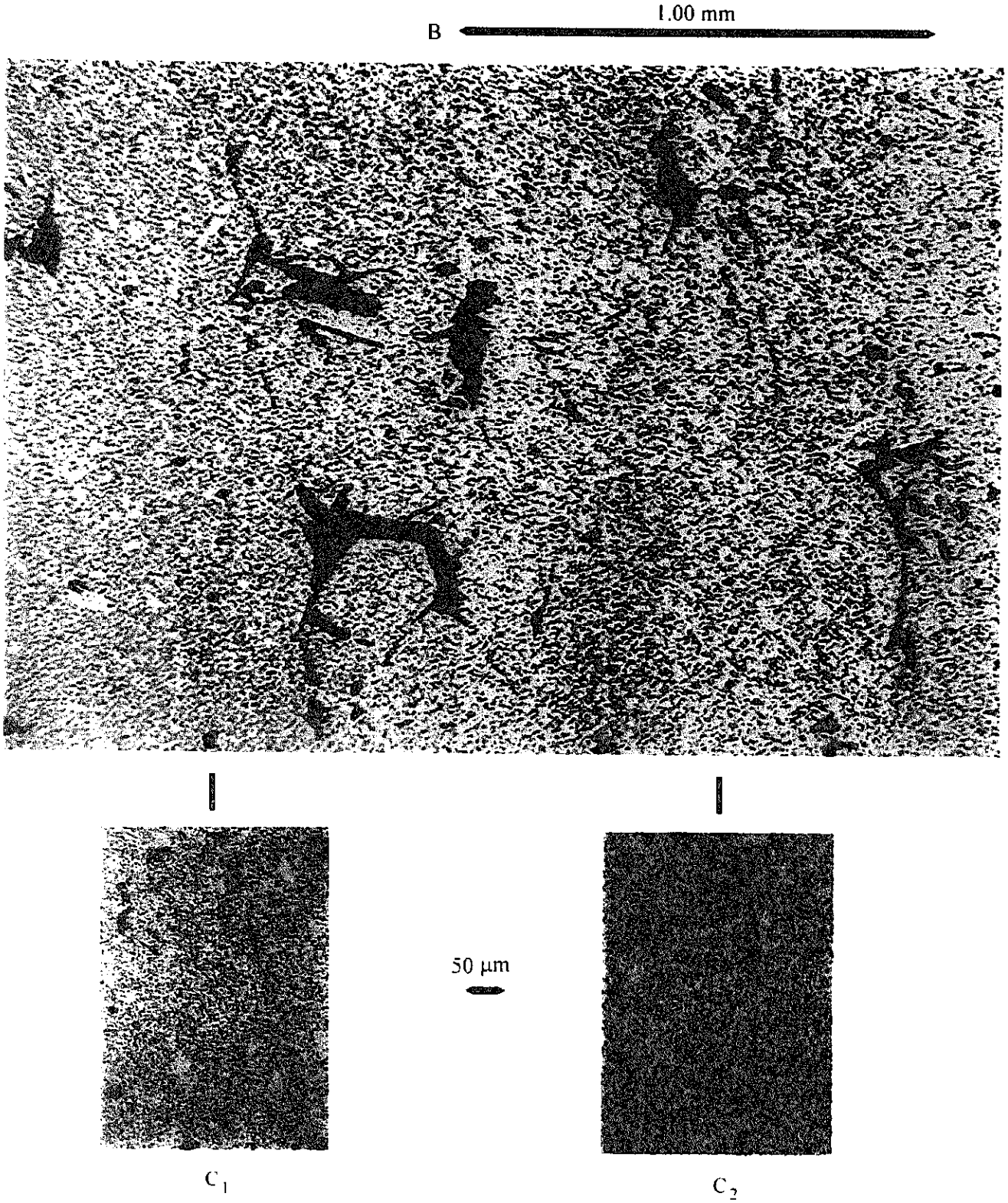


図5.8.4.44　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、周辺部）

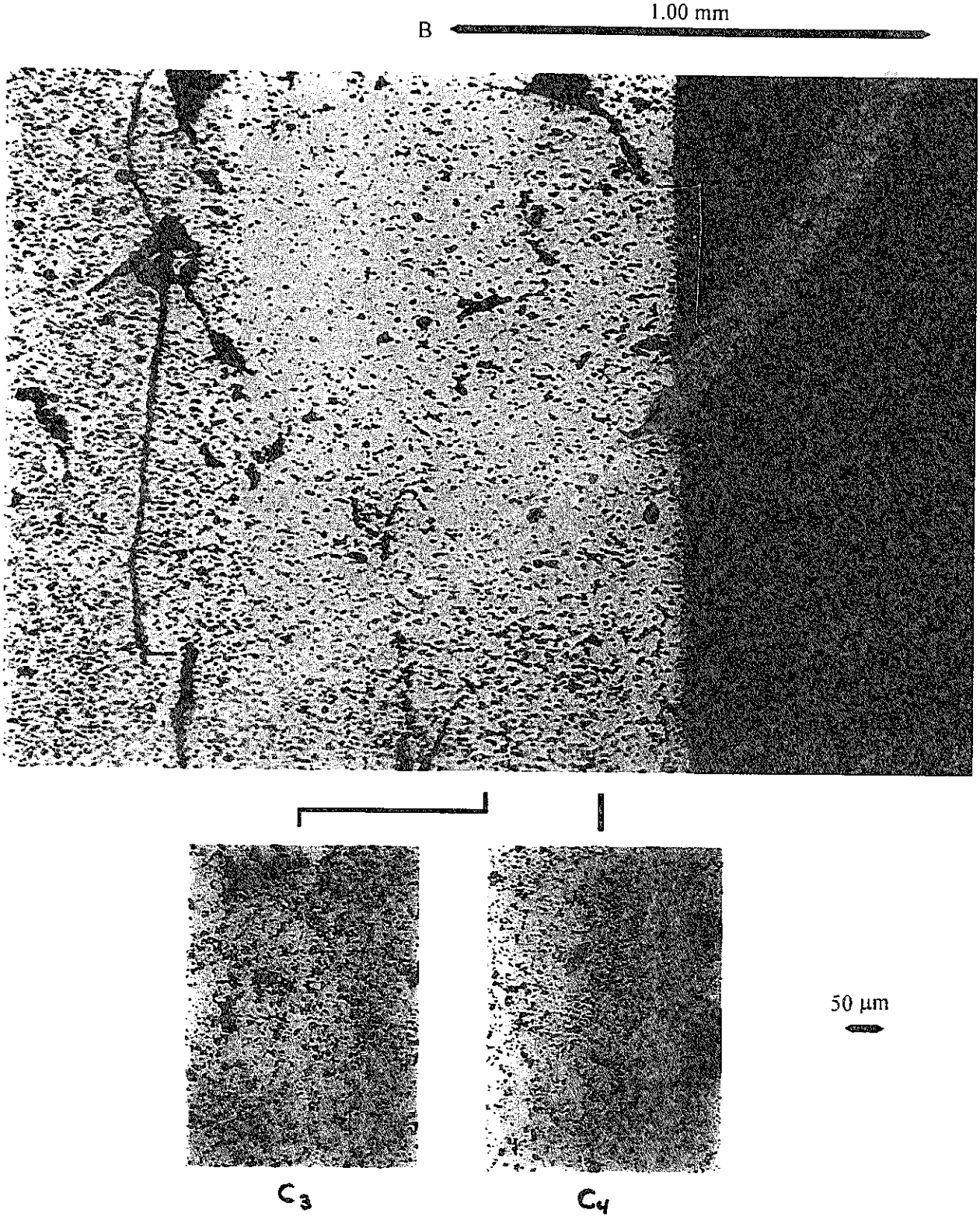


図5.8.4.45　IFA-565-6の研磨後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、中心部）

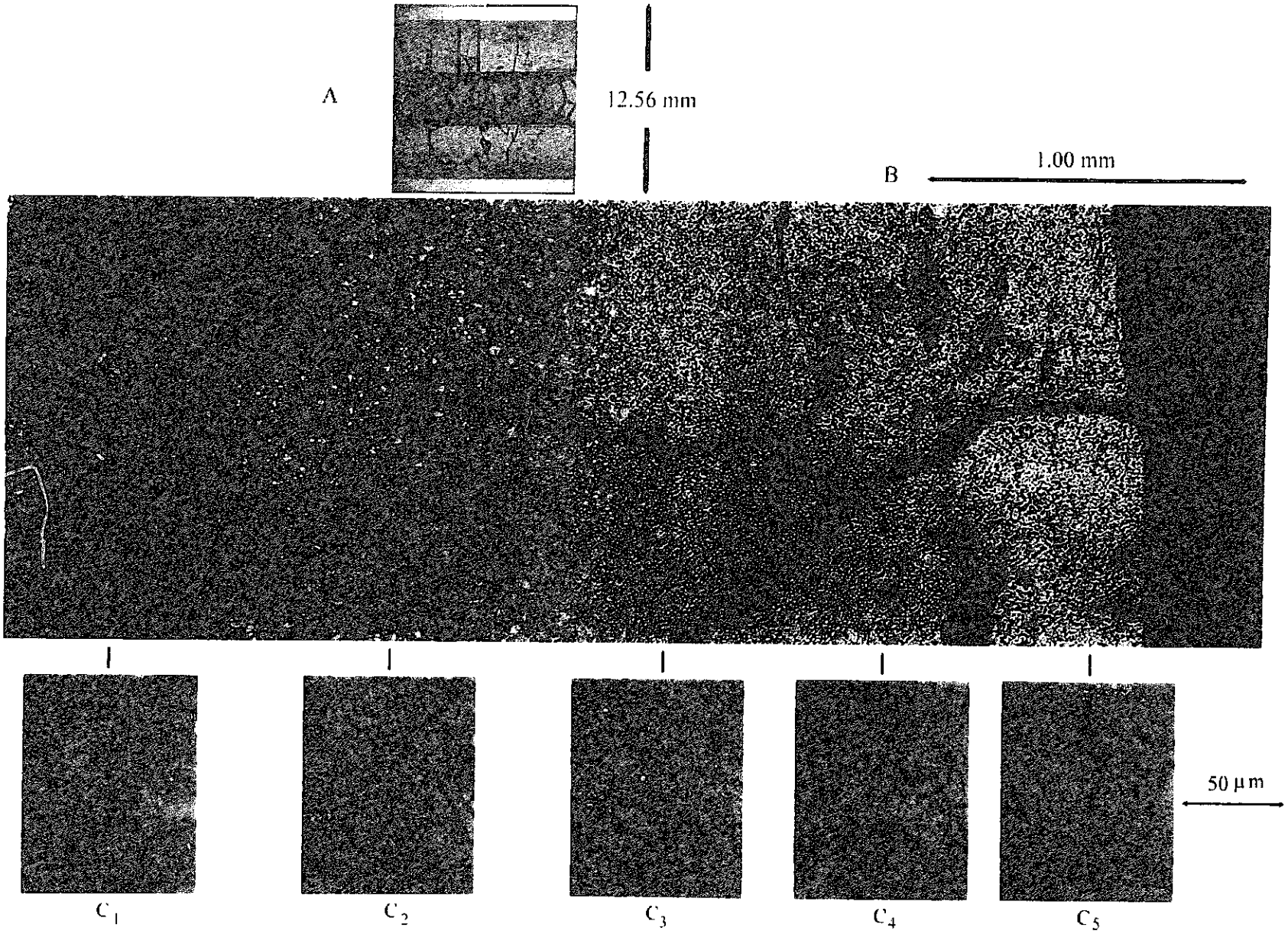


図5.8.4.46　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm）

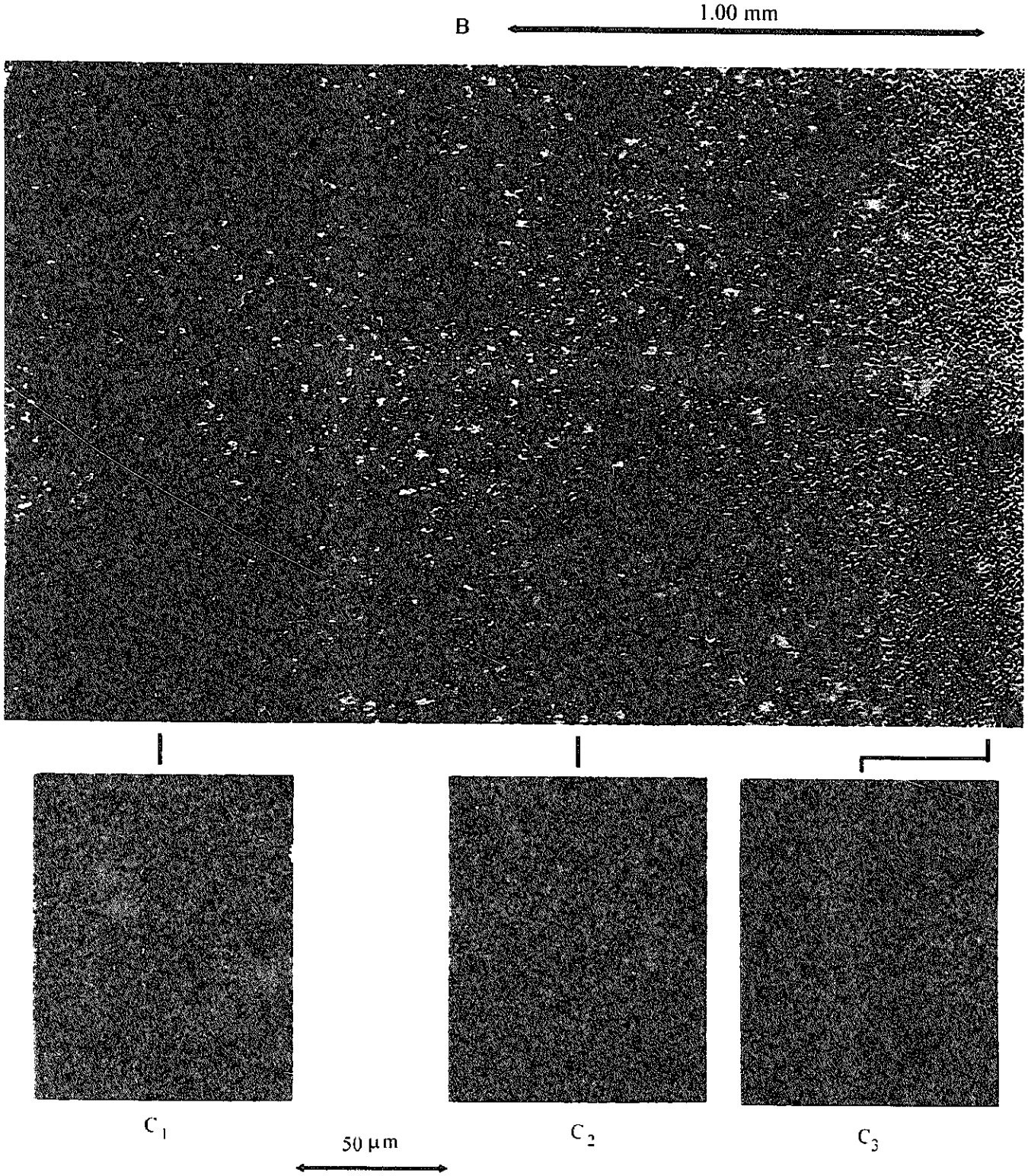


図5.8.4.47　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、周辺部）

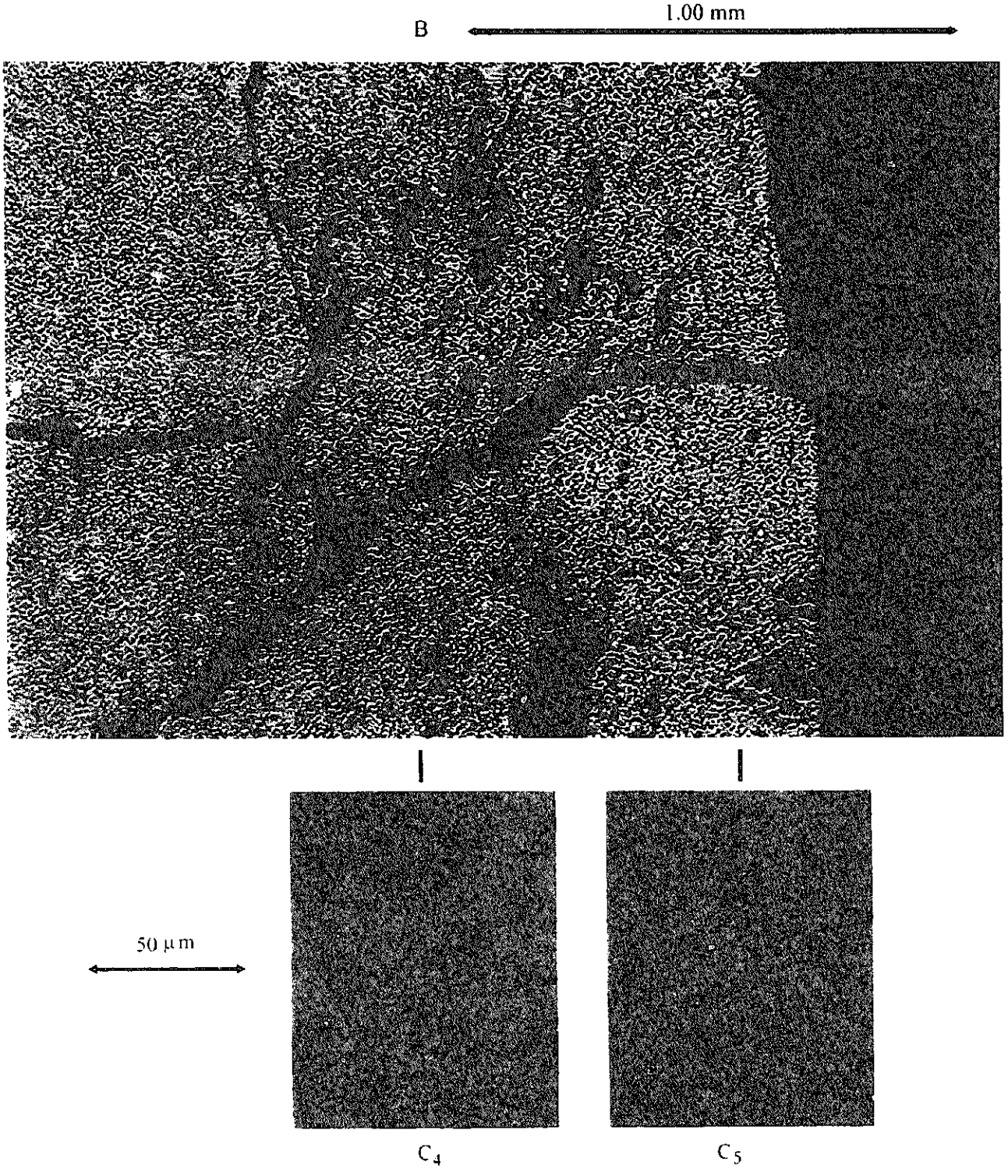


図5.8.4.48　IFA-565-6のｴｯﾁﾝｸﾞ後の金相写真（下部Vノッチより720-732mm、中心部）

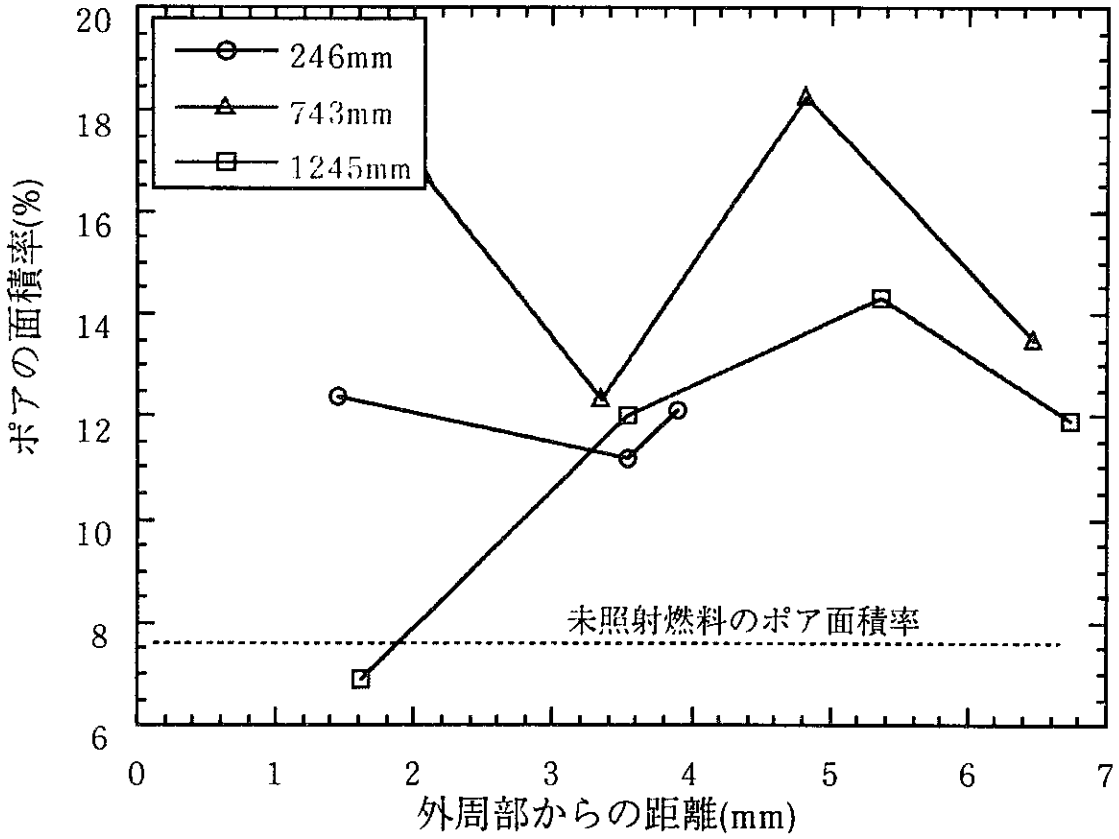


図5.8.4.49　IFA-565-3におけるペレット径方向のポアの面積率変化

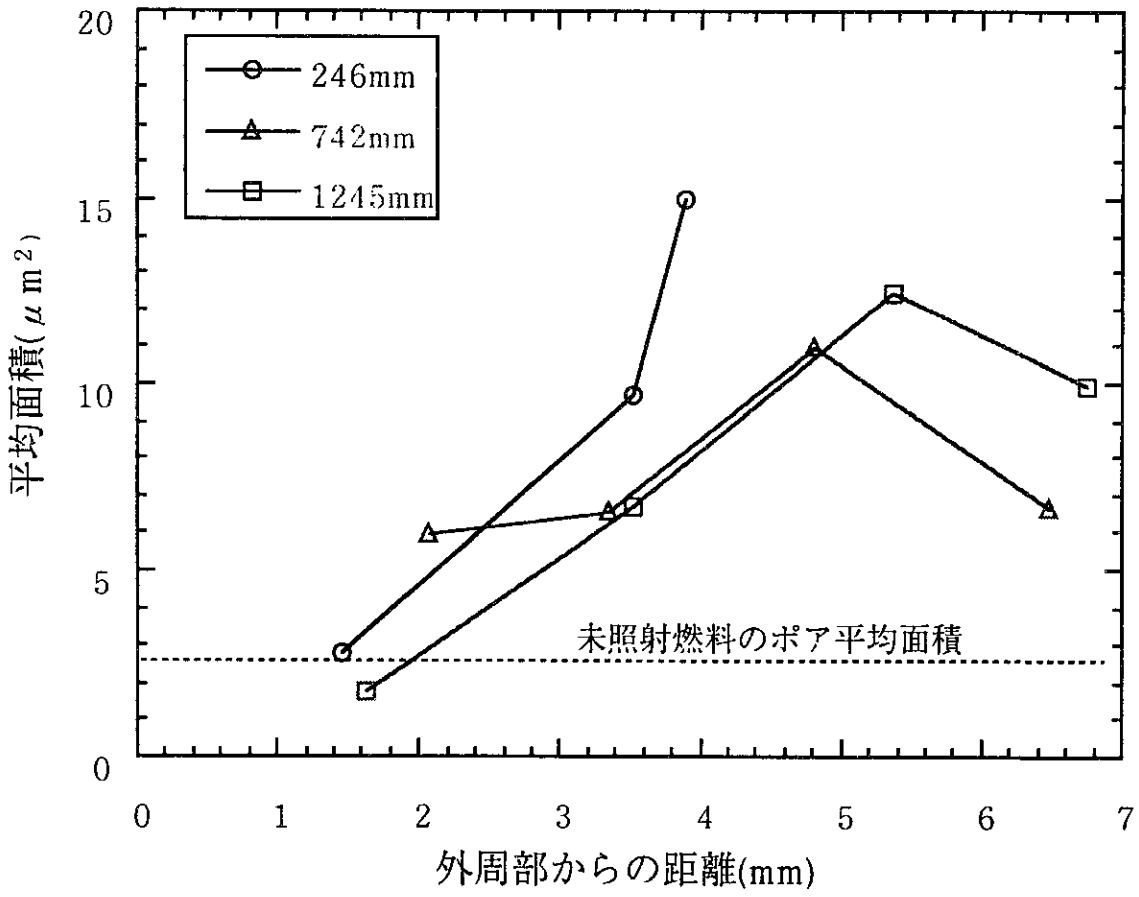


図5.8.4.50　IFA-565-3におけるペレット径方向のポアの平均面積変化

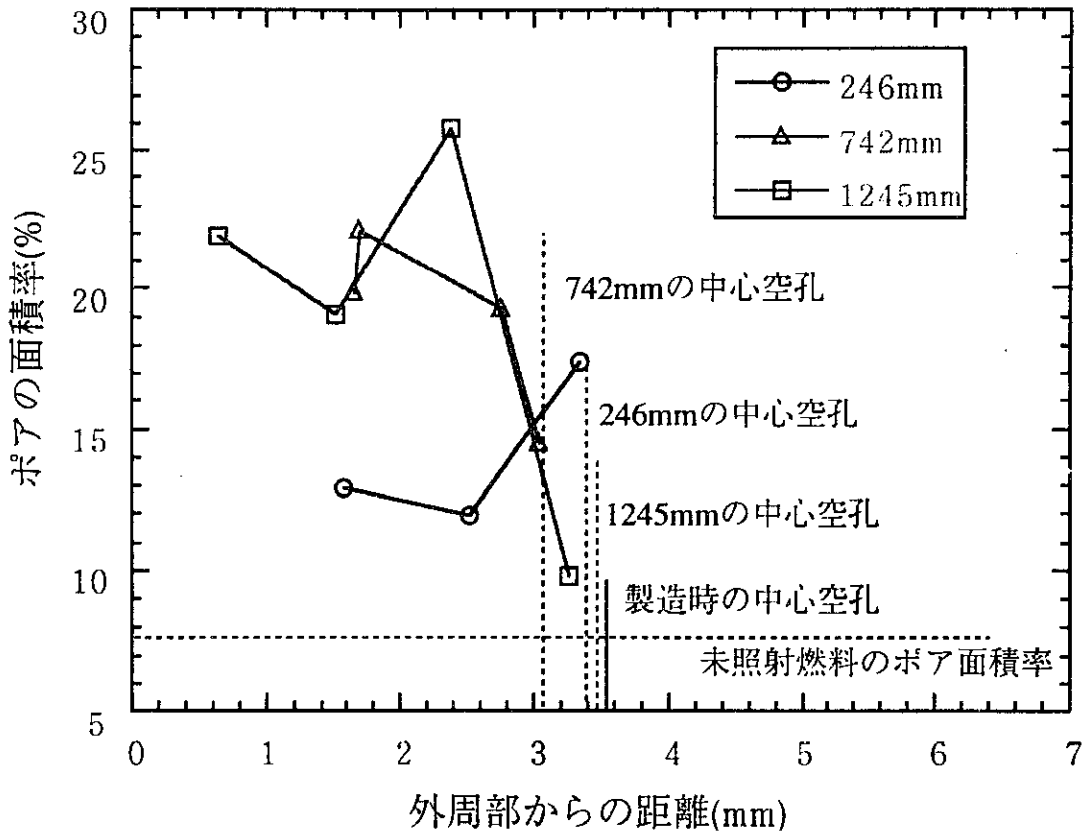


図5.8.4.51　IFA-565-6におけるペレット径方向のポアの面積率変化

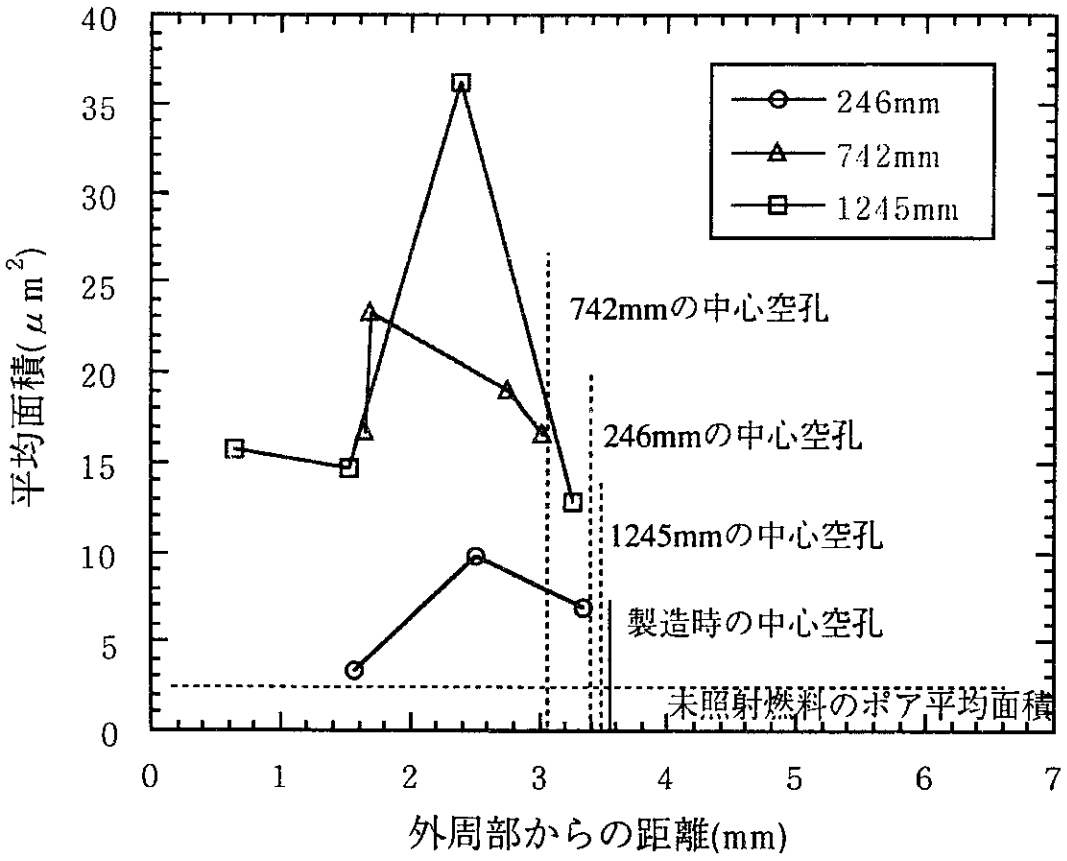


図5.8.4.52　IFA-565-6におけるペレット径方向のポアの平均面積

5.8.5 ノジュラー腐食

5.8.3.1節「被覆管の水側の酸化膜」においても、IFA-565-3, 6のノジュラー腐食について、軸方向位置246, 742, 1245mmの横断面、720-732mmの縦断面について述べた。これとは別に、軸方向位置1008mmの横断面でノジュラー腐食試験を実施した。IFA-565-3の結果を図5.8.5.1～2に、IFA-565-6の結果を図5.8.5.3に示す。

試験結果は、以下のようにまとめられる。

(1)FA-565-3, 6は、被覆管の水側酸化膜が連続かつ均一である。

(2)IFA-565-3, 6では、試験に供したサンプルでは被覆管上の均一な水側酸化膜には、断言できるようなノジュラー腐食はなかった。

(3)しかしながら、初期ノジュラー腐食が観察された。そういった初期ノジュラー腐食部は、ジルカロイ被覆管と連続で均一な酸化膜との境界において、特徴的に不規則性を示している。そういった部分では、酸化物とジルカロイ界面が、ジルカロイ側により深く入り込んでいる。これが、酸化膜厚さのノジュラー状で局所的な増加、従って、ジルカロイ被覆管の局所的な減肉となっている。この報告書では、こういった部分を初期ノジュラー腐食部と呼ぶ。これらの最小深さは、2.5～5μm、最大幅は、＞20μmである。

(4)IFA-565-3には、1008mm、45°に初期ノジュラー腐食が数カ所ある（図5.8.5.1B）。

(5)IFA-565-6には、1008mm、270°に初期ノジュラー腐食が数カ所ある（図5.8. 5.3D）。

(6)IFA-565-3の初期ノジュラー腐食は、1245mm、180°に観察される。図5.8.3.5C参照。

(7)IFA-565-6の初期ノジュラー腐食は、742mm及び1245mm、180°に観察される。それぞれ図5.8.3.11C及び図5.8.3.13C参照。

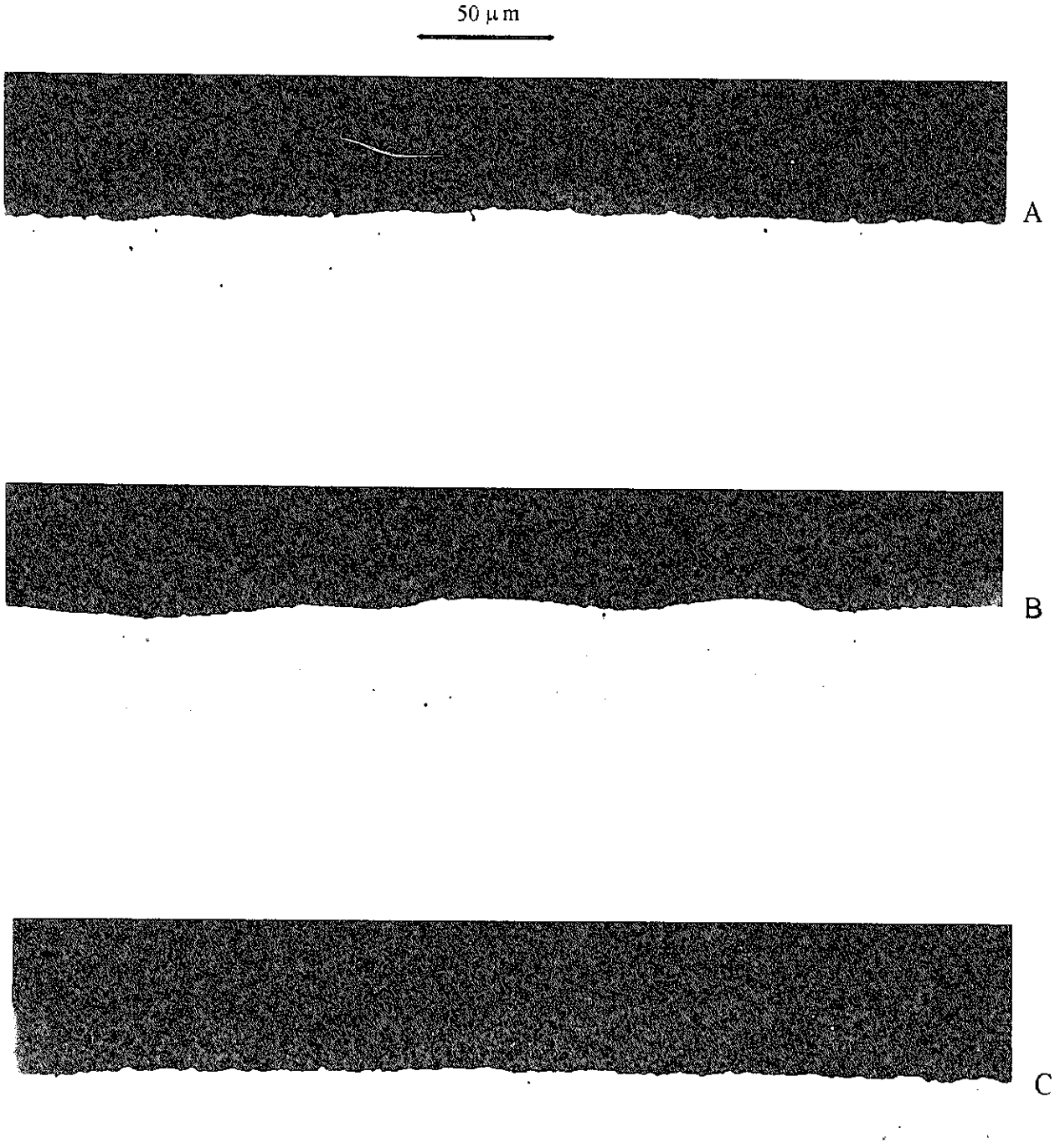


図5.8.5.1　IFA-565-3の水側被覆管の金相写真（均一腐食、研磨）
A:0°、B:45°、C:90

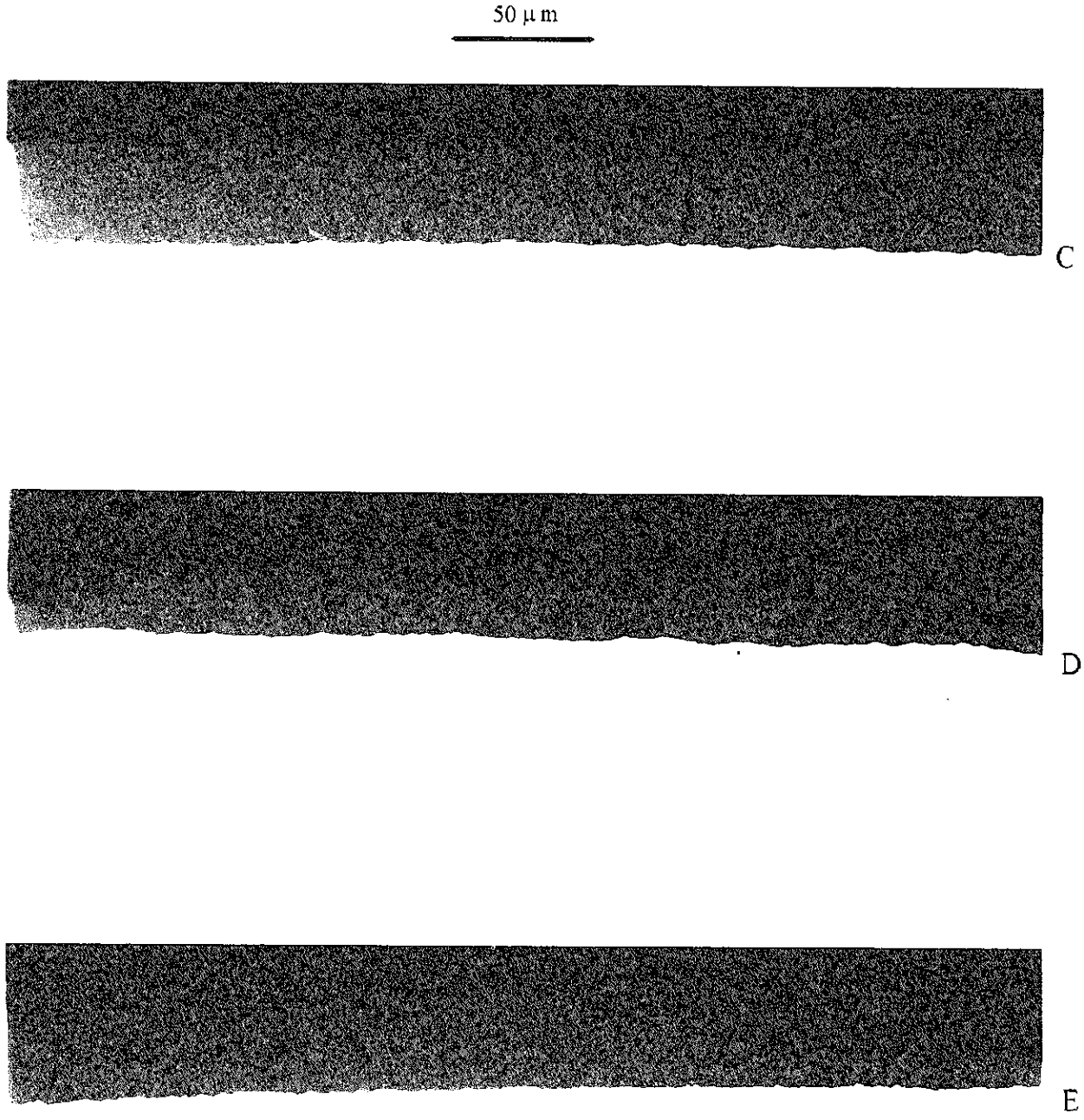


図5.8.5.2　IFA-565-3の水側被覆管の金相写真（均一腐食、研磨）
C:115°、D:180°、E:270°

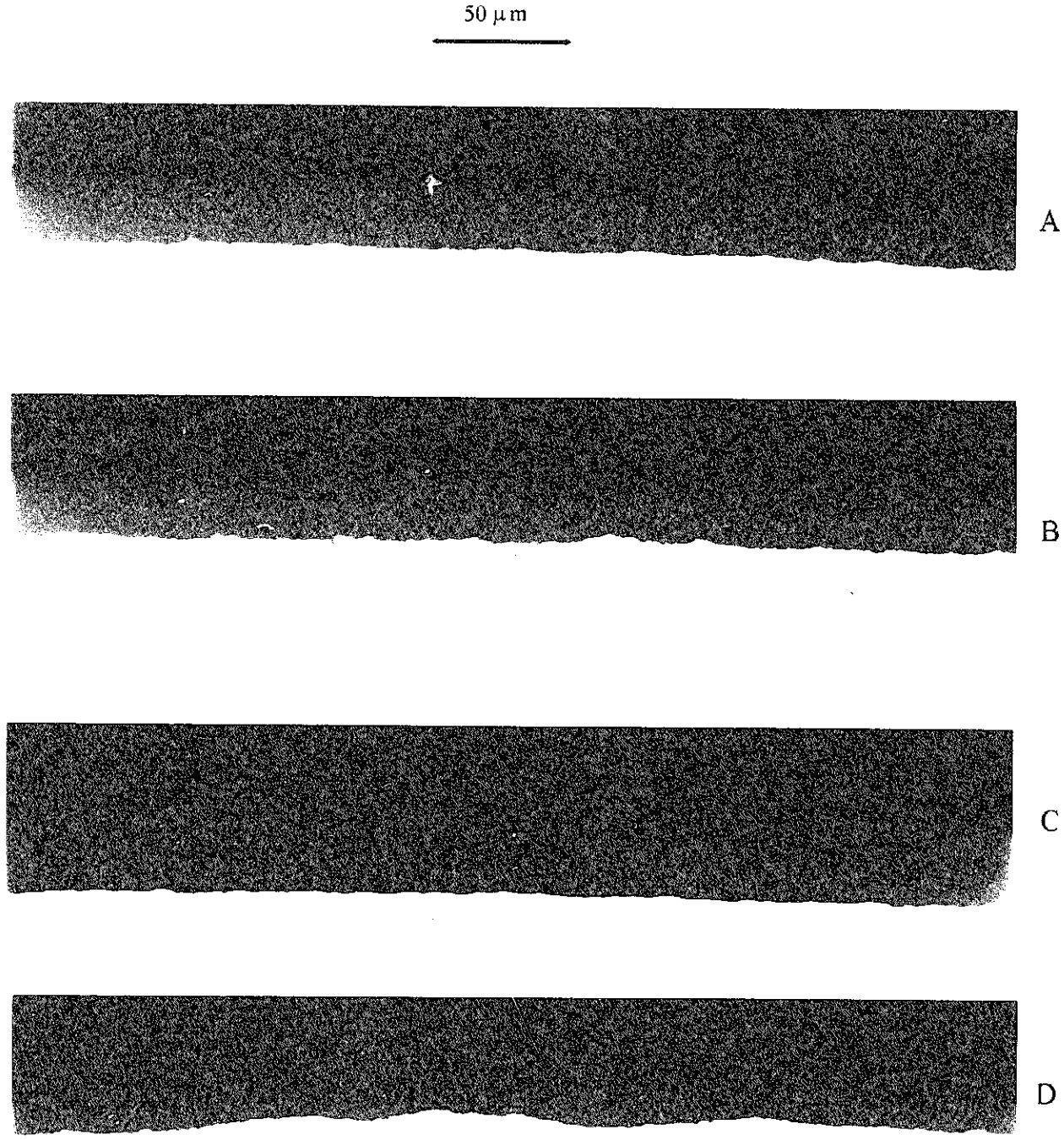


図5.8.5.3　IFA-565-6の水側被覆管の金相写真（均一腐食、研磨）
A:0°、B:90°、C:180°、D:270°

5.9 α及びβ/γ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試験結果を、図5.9.1～2に示す。オートラジオグラフ写真とともに、各々の横断面金相マクロ写真を示した。オートラジオグラフ写真は、下部V溝から742㎜位置のIFA565-3（図5.9.1）及びIFA-565-6（図5.9.2）の研磨された横断面金相試料のα及びβ/γ線強度を見ている。方向性及び倍率に関する図のイメージは、オートラジオグラフ写真中（中段及び下段）のα及びβ/γ線強度情報が、図中の金相写真(上段）の構造上の特徴を直接なぞらえられることから、この方法で編集される。0度方向は、黒点によって示した。

研磨された横断面金相試料中のα粒子線源の分布及び位置は、αオートラジオグラフ写真上の白点／白い領域で観察される。クラック及びボイドは黒い。IFA565-3（図5.9.1）及びIFA-565-6（図5.9.2）のα粒子線源強度の分布は、横断面上、同じように見られる。α粒子のわずかに高い集積が、燃料ペレット外周部（リム部）に観察されるが、これはペレット外周部において、Puの生成量が消滅量を上回りPu濃度が他の部分より濃くなったためである。

研磨された横断面金相試料のβ/γオートラジオグラフ写真は、研磨面のβ粒子及びγ線の相互作用の分布及び位置を写し出している。β/γ線源は、オートラジオグラフ写真上白点／白い領域で示されている。白い点は、β/γ線源が濃いことを示している。クラック及びポーラスな領域も白い。しかしながら、β/γ線源が、そこに必ずしも蓄積しているわけではない。この場合の高い線源強度は、クラック及びポーラス部が、平面と比較し、より大きな表面積を有するためである。

IFA-565-3（図5.9.1）のβ/γオートラジオグラフ写真の目立つ特徴は、被覆管の方に向かってペレット径方向の外側半分で、β/γ線源が濃いことである。この径方向の外側半分は、中心の内側半分より明るくなっている。

もし、IFA-565-6（図5.9.2）の横断面径方向外側半分でβ/γ線源の同様の明瞭な濃い部分があるとしても、それを言うことができない。この燃料は、燃料の径方向の半分まで大きな中空孔が存在している。また、図示したとおり金相写真の中空孔の大きさと、β/γ線源の中心部の黒い領域の大きさとが若干異なっているが、これは金相写真撮影後に試料が追加研磨され、その後にβ/γオートラジオグラフ写真が撮影されたためである。

両方のβ/γオートラジオグラフ写真共に良好である。しかし、別のグレー色の明瞭な

サブパターンが、全体的なβ/γ線源分布の中に局所的に変色して見られる。IFA-565-3(図5.9.1）のオートラジオグラフィの中にこのサブパターンが、燃料径方向の内側及び外側の両方に見られる。

このβ/γオートラジオグラフ写真のパターンと燃料のマイクロストラクチャーの間には、相互関係があるか。これを調べるため、研磨後のマイクロストラクチャー、エッチング後の燃料横断面金相、及び拡大写真を、IFA-565-3のものを図5.8.4.7及び図5.8.4.10に、またIFA-565-6のものを図5.8.4.31～32, 34に示した。そしてオートラジオグラフィとの比較を行った。

化学エッチングは、結晶粒、ボイド、金属FP、微細な気孔、及びそれらの状態のような、燃料の典型的なマイクロストラクチャーの特徴のコントラストを明らかにする。位置や大きさは光学顕微鏡によって撮られた顕微鏡写真で確認できる。典型的なマイクロストラクチャーの特徴とし、それらの位置に関して燃料の顕微鏡写真上で調査された。顕微鏡写真上のそれらの位置は、β/γオートラジオグラフ写真上に記録された、β/γ線源分布のメイン及びサブパターンの位置と比較された。

この試験により、エッチング剤のより強いアタックが、低いβ/γ線源の領域と一致する内側半分より、高いβ/γ線源の特徴を持つ燃料径方向の外側半分に見られた。

オートラジオグラフ写真は、燃料径方向の内側及び外側の部分共に良好である。しかし、別のグレー色の明瞭なサブパターンが、β/γ線源分布の中に変色して見られている。これらのパターンは、燃料のエッチングパターンに一致して見える。低倍率で撮られた軽光学顕微鏡写真（図5.8.4.10参照）に、明暗スポットから成る明瞭なパターンが、燃料径方向の外側半分に見られる。エッチングパターンの黒点は、より強いエッチング剤のアタックによるものである。低倍率のエッチングパターンの黒点は、β/γオートラジオグラフ写真のより高いβ/γ線源強度を表している明るい領域に一致しているように見える。

高倍率で燃料径方向の外側半分のマイクロストラクチャーを、（より高いβ/γ線源強度を持つ領域と一致する）定義することができる。それは、燃料径方向の内側より、より小さい結晶粒、よりわずかな大きいボイド、及びより小さい金属FPから成る。この領域内の結晶粒径と微小気孔の密度は、しかしながら一様でない。顕微鏡写真上のよりわずかな微小気孔がある大きな結晶粒は、高微小気孔密度の小さい結晶粒より明るい。

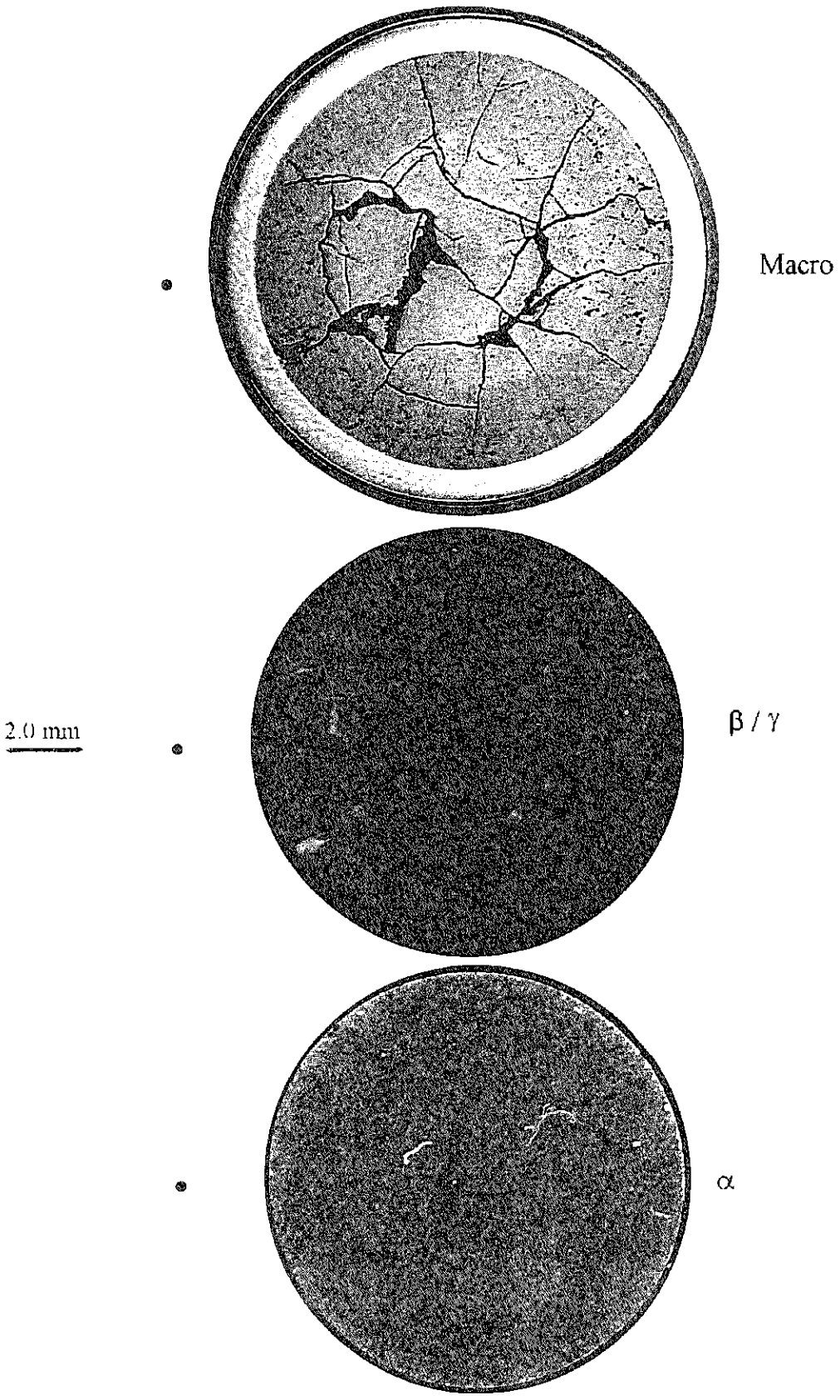


図5.9.1　IFA-565-3　742mm　マクロ写真、β/γ 及び α オートラジオグラフィ

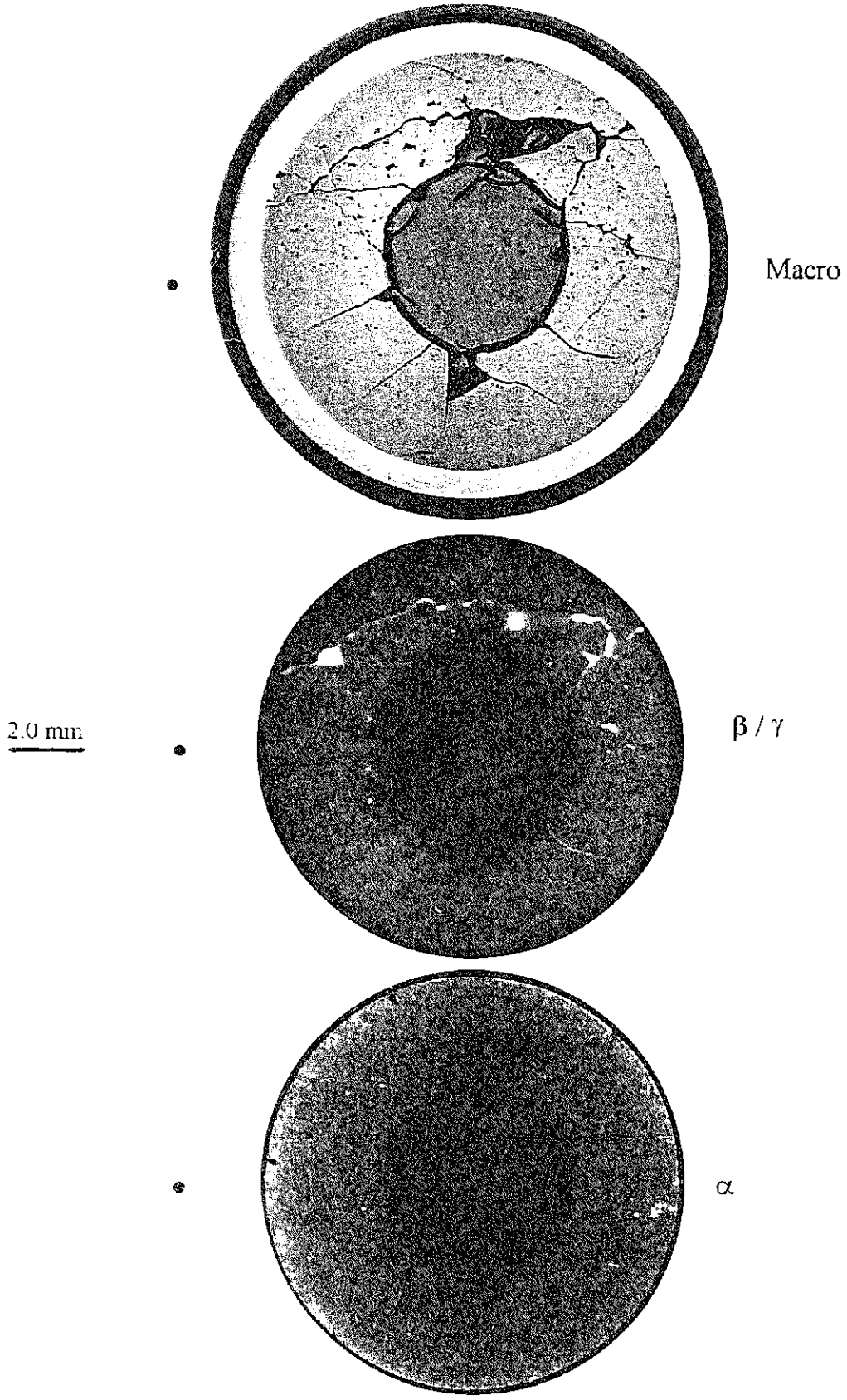


図5.9.2　IFA-565-6　742mm　マクロ写真、β/γ 及び α オートラジオグラフィ

5.10 断面γスキャニング

断面γスキャニングは、IFA-565-3, 6について行った。これらの試料は、5.8.4節「金相試験」に使用したものである。

γスキャニングは1995年7月に実施され、図5.10.1に示す4方向から行った。試料の0°方向は燃料棒の外側基準に合わせた。

測定方法

γスキャニングは、Ge検出器を用いて行った。γスペクトルは1024チャンネルの分析器に記録した。スペクトルは、各試料のリム領域と0°位置について測定した。測定時間は1000秒とし、コリメータスリットの開口部は0.1×1㎜とした。測定結果を図5.10.2～3に示す。

全スペクトルから、試料のγスキャニングを行う6つのエネルギウインドウが選定された。

ウインドウNo1： チャンネルNo200～900（グロスγ）
ウインドウNo2： チャンネルNo509～522（513keVのRu106のピークを含む。）
ウインドウNo3： チャンネルNo600～613（604keVのCs134のピークを含む。）
ウインドウNo4： チャンネルNo656～669（662keVのCs137のピークを含む。）
ウインドウNo5： チャンネルNo691～701（696keVのCe144のピークを含む。）
ウインドウNo6： チャンネルNo749～770（759keVのZr95及び766keVのNb95のピークを含む。）

γスペクトルは、チャンネルNoがγエネルギ（keV）に一致するようにエネルギ校正を行ったものである。ウインドウNo1は、200～900keVにおけるコンプトンバックグラウンドと光電ピークの全γスペクトルを含むが、ウインドウNo2～6は、コンプトンバックグラウンドを補正した光電ピークのみを含む。

比較的長時間の冷却を行ったことにより、Ce144（285日）、Zr/Nb95（65日）、Ru103（39.5日）といった同位体は全く検出されていない。

測定結果

γスキャニング中、コリメータは0.1×1㎜のスリットを介して試料と対峙している。測定中のコリメータと試料の距離は2～3㎜である。スキャンは0.2㎜刻み（コリメータの幅の2倍）で行った。各ステップの放射能測定は200秒とした。スキャンは図5.10.1に示す4方向から行った。

断面γスキャニング曲線を図5.10.4～15に示す。図のリストを表5.10.1に示す。各図は、4方向からのスキャニング結果を示したものである。

注）IFA-565-3（試料36）：Cs同位体の径方向分布をRu, Ce, Zr/Nbの結果と比較したもので、Csが低温の表面部に向かって移動したことを示している。

IFA-565-6（試料39）：測定は中空ペレットについて行われたものである。

考　察

(1)グロスγ強度は、H36の方がH39より大である。また、H36の方が径方向の勾配が急である。（図5.10.4、図5.10.10）

(2)Ru106の強度は、H36の分布は平坦であるが、H39はやや径方向の勾配がある。これは、中空孔の存在によるフラックスの落ち込みを示唆している。

（図5.10.5、図5.10.11）

(3)Cs134の強度は、H36の方が大である。H36の強度分布には0-180°方向を除いて非対称性が見られ、特に135-315°方向の強度には22%程度の差がある。これは、5.9節「α、β/γオートラジオグラフィ」の結果と一致しており、H36の温度が非均一であったことを示唆している。これに対し、H39の分布は対称である。

H36の径方向の勾配は大きく、特に外周部は平坦部のない急激な落ち込みを示している。これは、Cs134の相当量が既にペレット外に拡散していることを示唆しており、中心孔を持つH39に比べてH36の径方向温度分布が大きかったためと考えられるが、同時に、温度が低くても燃焼度が高くなると、FPが放出されやすくなることを示している。（図5.10.6、図5.10.12）

(1)で述べたように、H36のグロスγには大きな径方向分布が見られるが、これはCs134の分布を反映した結果と思われる。

また、H36の中心部には、若干の出っ張りが見られる。これは、5.9節「α、β/γオ

ートラジオグラフィ」の結果に一致するもので、クラックの影響と考えられる。

(4)Cs137の強度分布は、Cs134と同様の傾向が見られる。　(図5.10.7、図5.10.13)

(5)Ce144の強度分布は平坦ではあるが、Ru106やCsに比べてばらつきが大きく見える。これは、γ線強度が低く、カウント数が少なかったためと考えられる。

(図5.10.8、図5.10.14)

(6)Zr/Nb95の強度分布は、平坦であるが、Ru106やCsに比べてばらつきが大きい。H39の0-180°及び135-315°方向については、やや非対称性が見られる。

(図5.10.9、図5.10.15)

表5.10.1　断面γスキャニング測定結果のリスト

図　番	試料No/位置	同位体	スキャン実施日
図5.10.4	H36/ IFA-565-3 742mm	グロスγ	4/7-6/7 1995
図5.10.5		Ru-106	
図5.10.5		Cs-134	
図5.10.7		Cs-137	
図5.10.8		Ce-144	
図5.10.9		Zr/Nb-95	
図5.10.10	H39/ IFA-565-6 742mm	グロスγ	7/7-11/7 1995
図5.10.11		Ru-106	
図5.10.12		Cs-134	
図5.10.13		Cs-137	
図5.10.14		Ce-144	
図5.10.15		Zr/Nb-95	

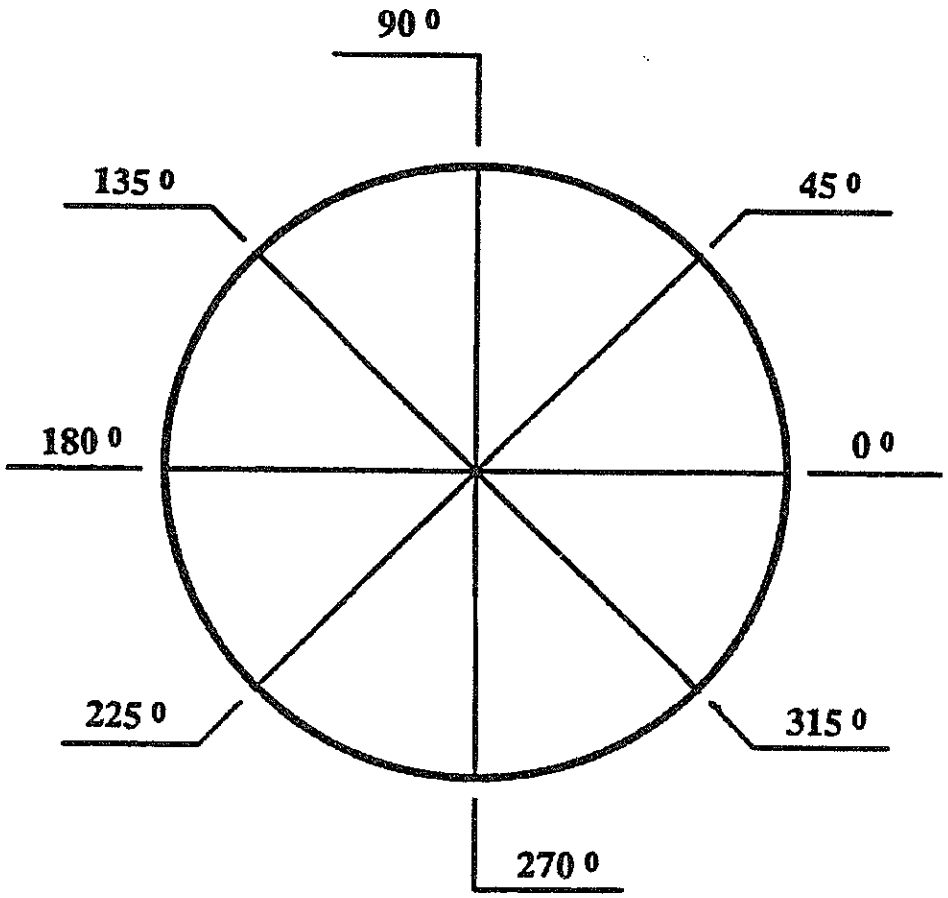


図5.10.1　横断面γスキャン方向（燃料ロッド上部から見て）

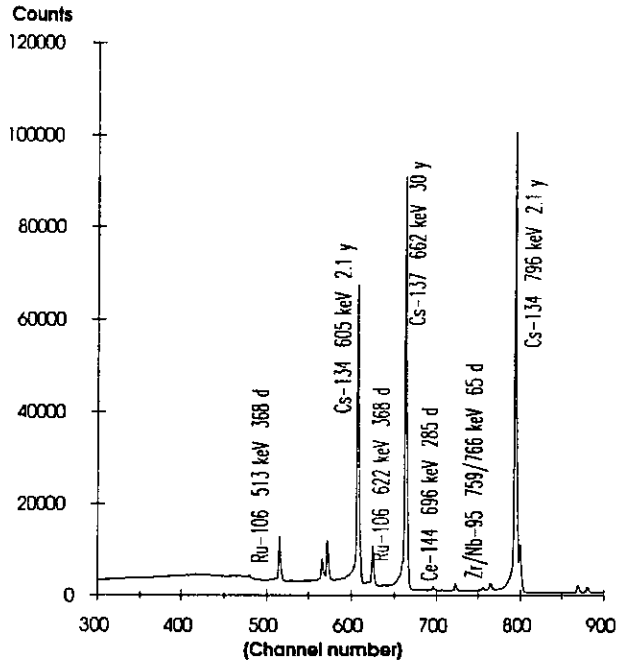


図5.10.2　IFA-565-3　H36試料のγスペクトル（742mm、周辺部、0°）

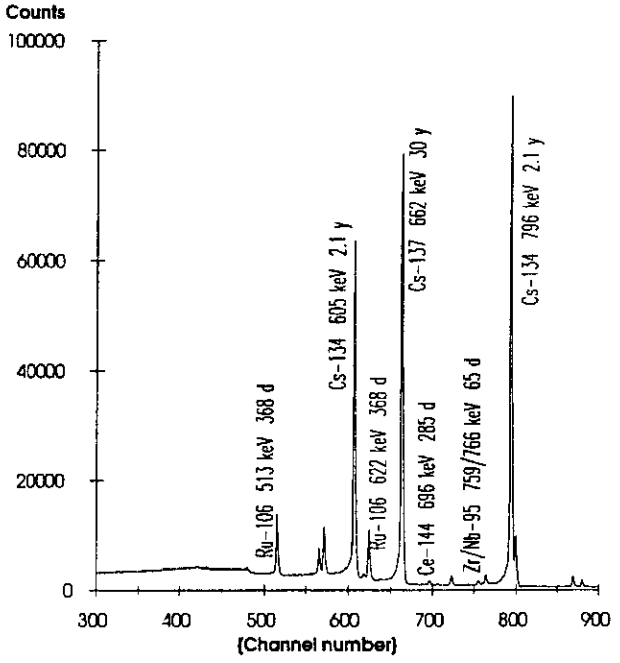


図5.10.3　IFA-565-6　H39試料のγスペクトル（742mm、周辺部、0°）

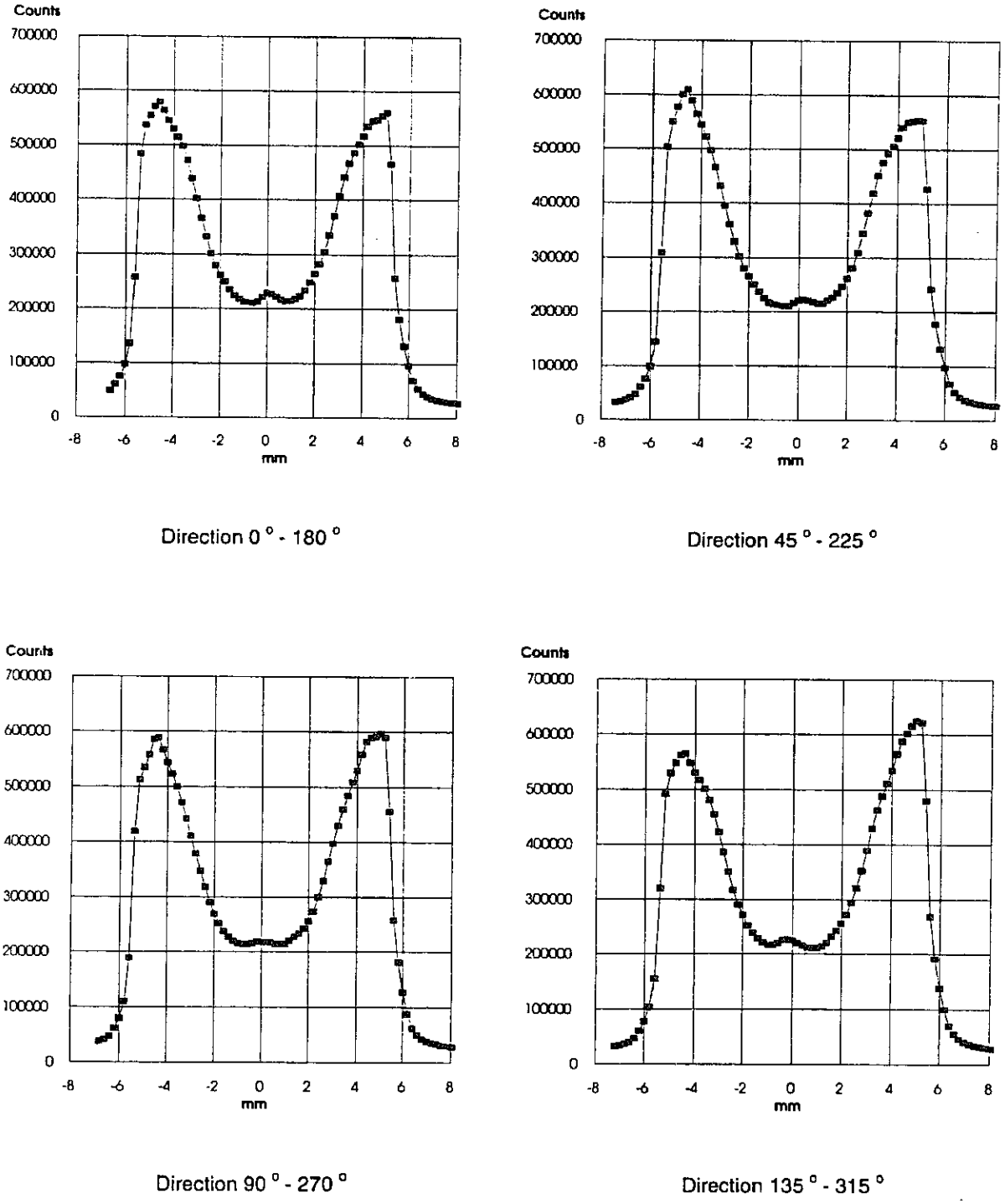
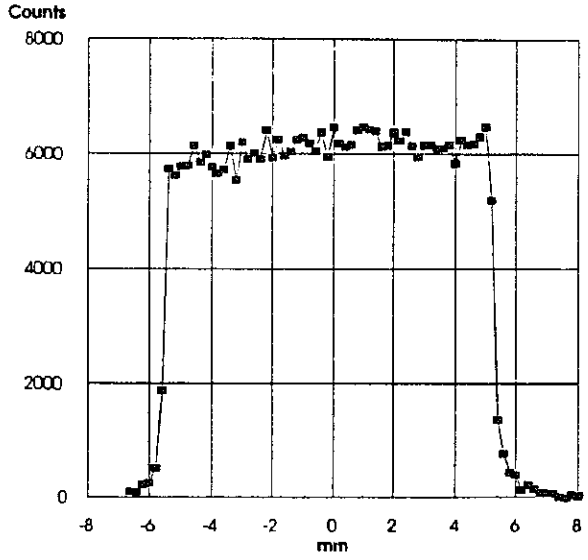
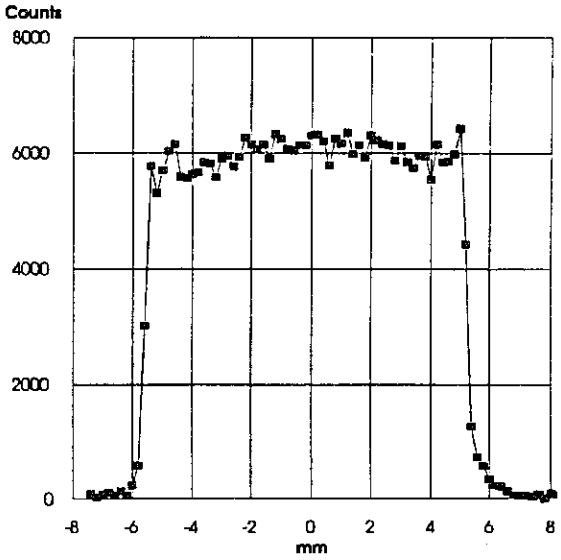


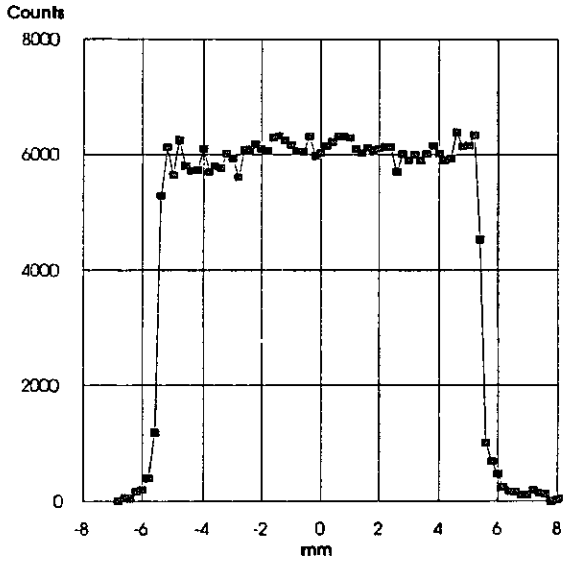
図5.10.4　IFA-565-3　H36試料の横断面γスキャン　グロスγ（742mm）



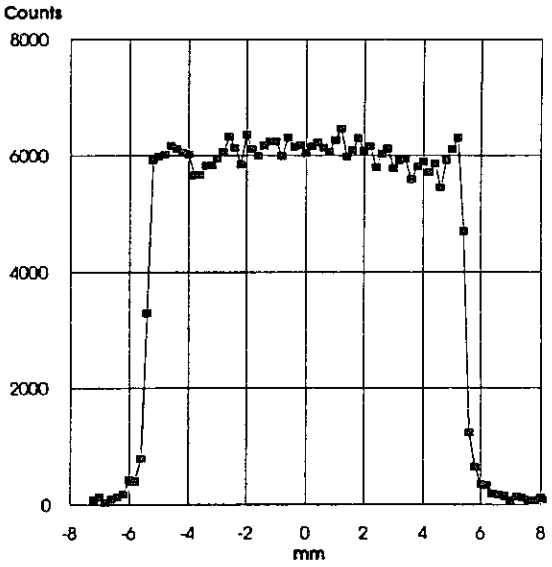
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

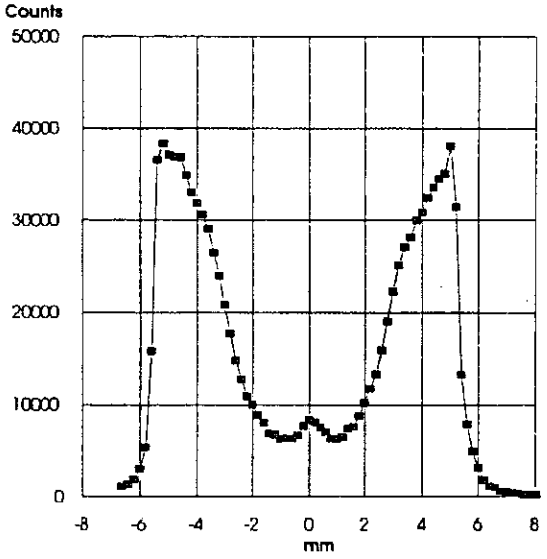


Direction 90 ° - 270 °

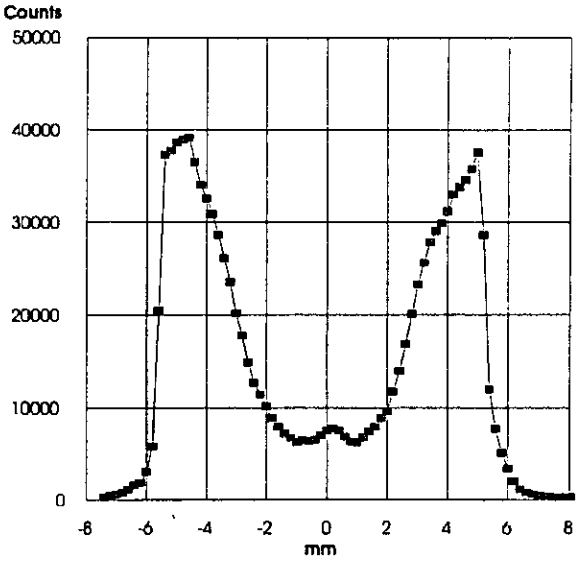


Direction 135 ° - 315 °

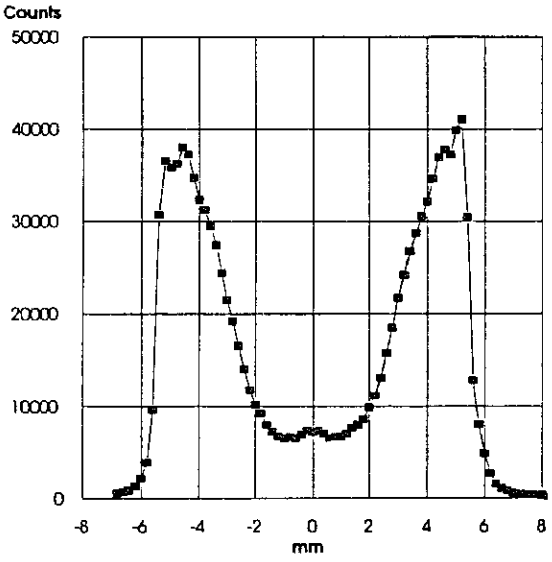
図5.10.5　IFA-565-3　H36試料の横断面γスキャン　Ru-106（742mm）



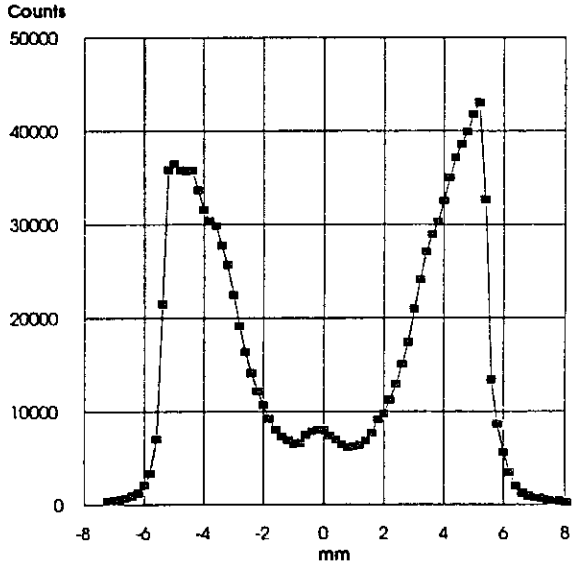
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

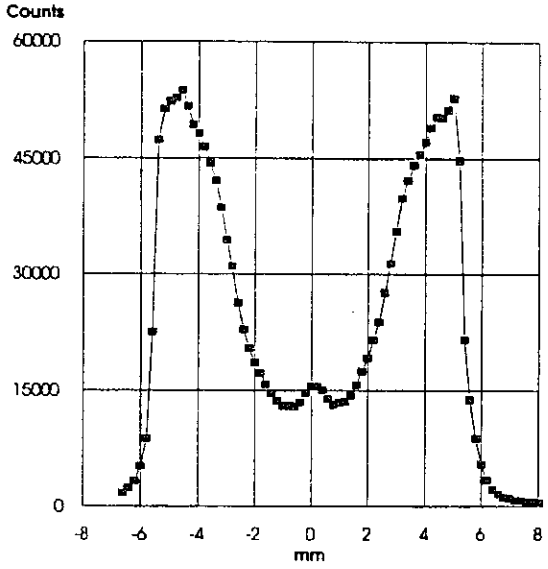


Direction 90 ° - 270 °

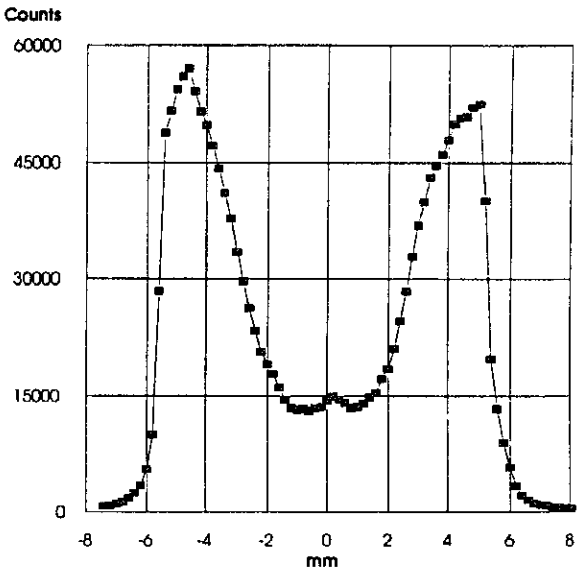


Direction 135 ° - 315 °

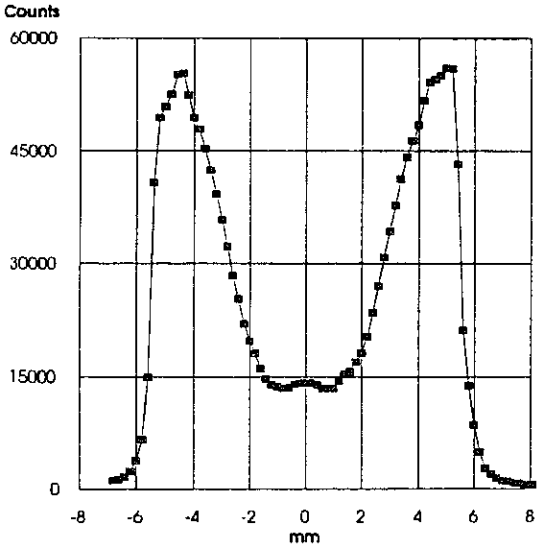
図5.10.6　IFA-565-3　H36試料の横断面γスキャン　Cs-134（742mm）



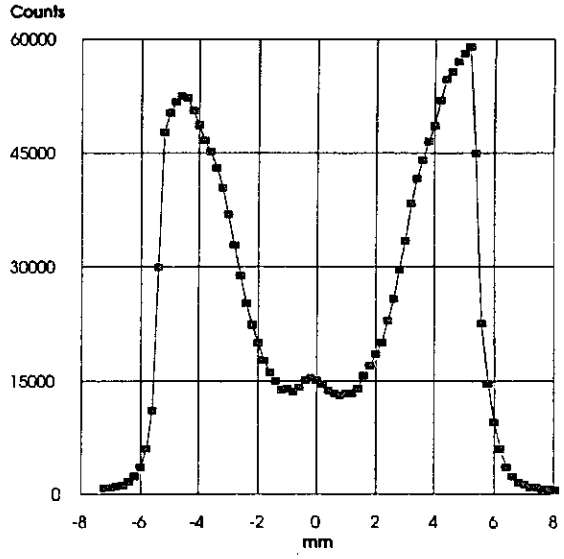
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

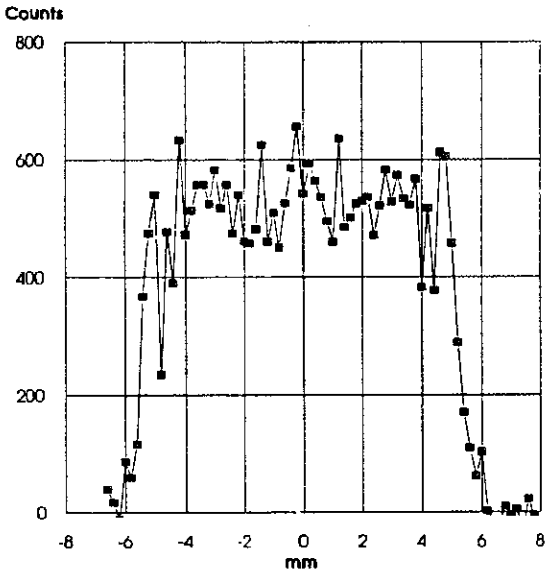


Direction 90 ° - 270 °

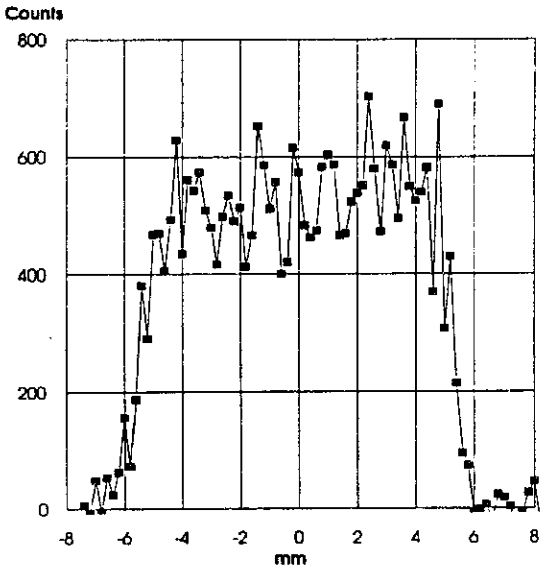


Direction 135 ° - 315 °

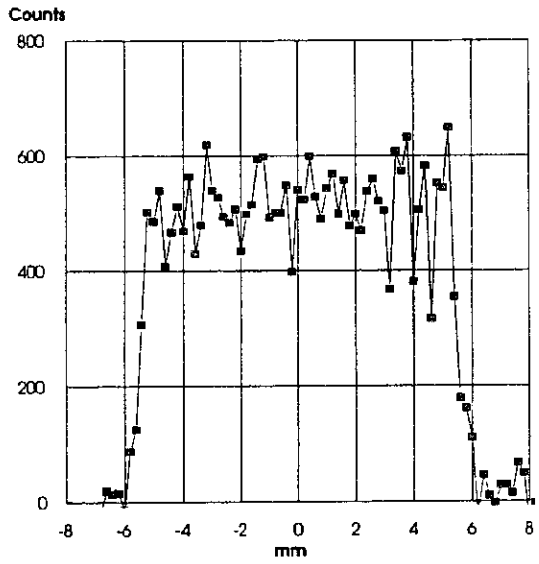
図5.10.7　IFA-565-3　H36試料の横断面γスキャン　Cs-137（742mm）



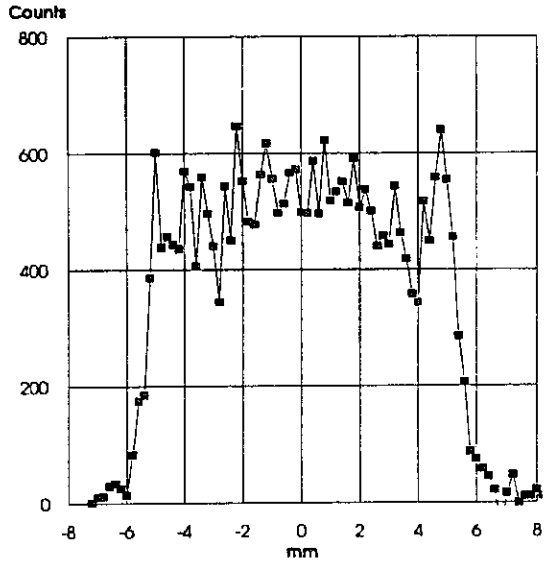
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

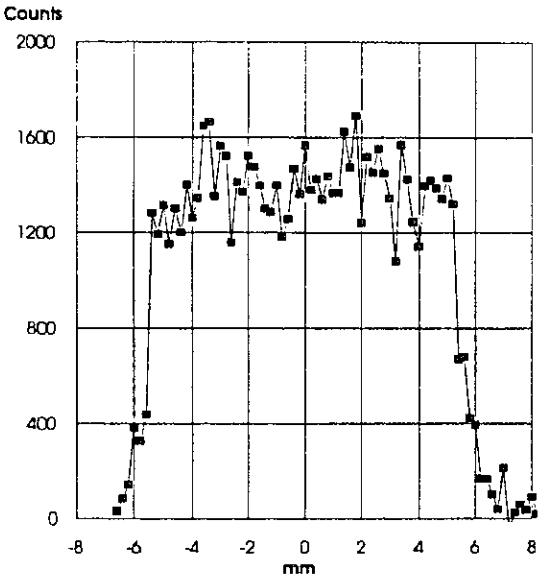


Direction 90 ° - 270 °

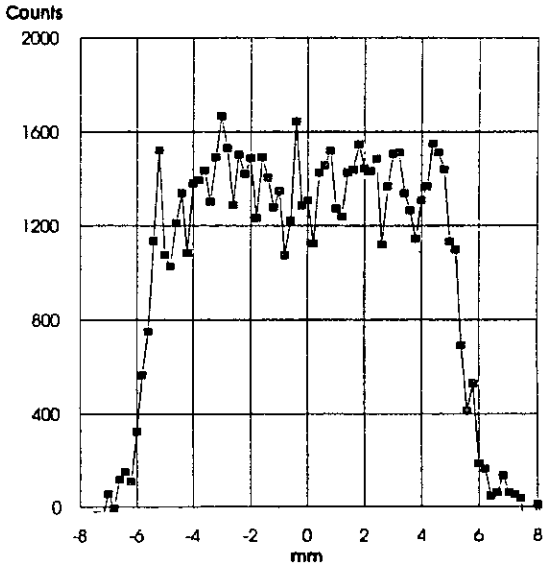


Direction 135 ° - 315 °

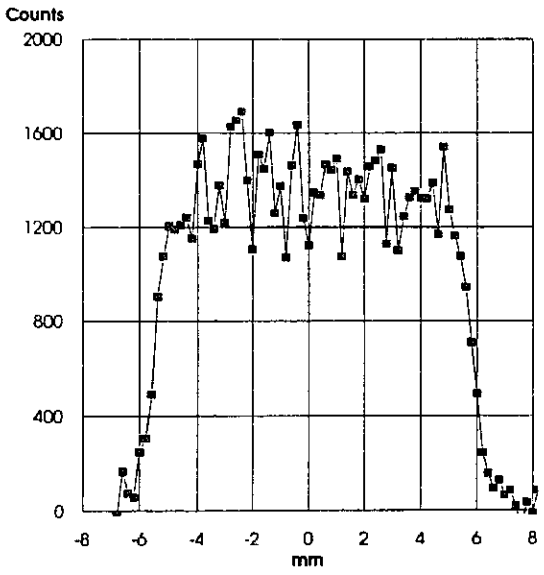
図5.10.8　IFA-565-3　H36試料の横断面γスキャン　Ce-144（742mm）



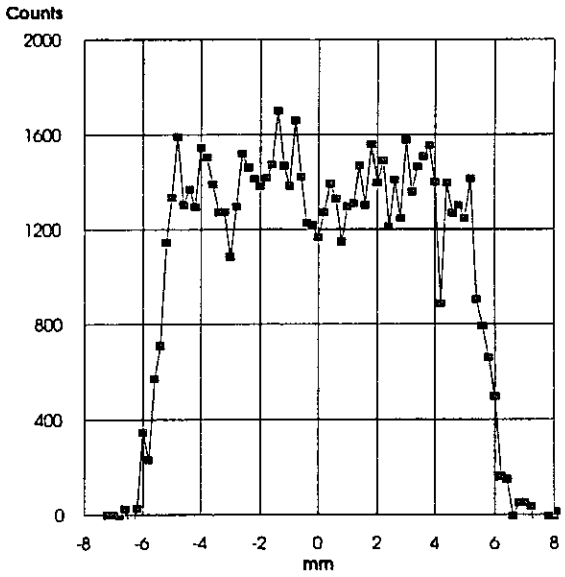
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

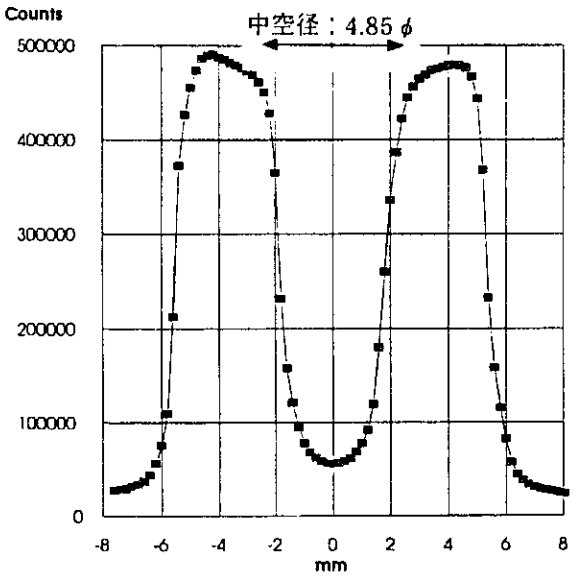


Direction 90 ° - 270 °

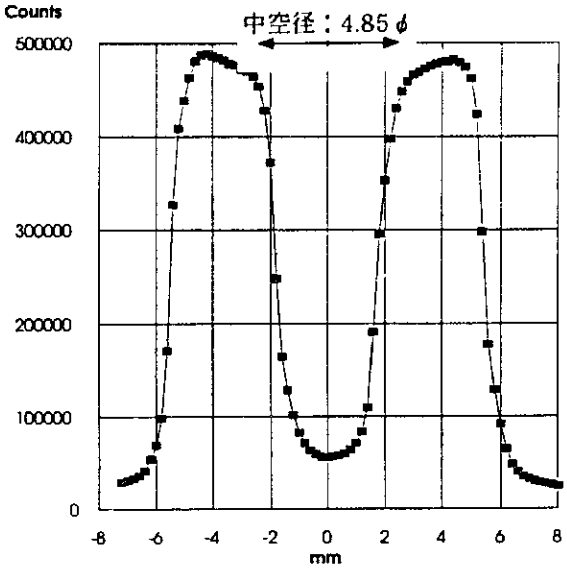


Direction 135 ° - 315 °

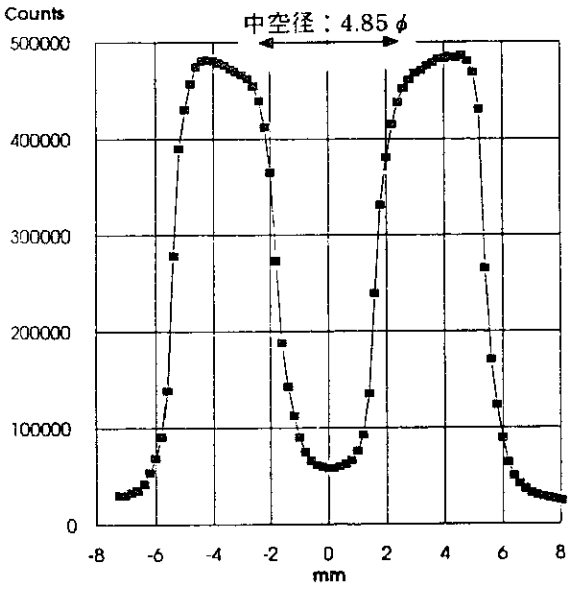
図5.10.9　IFA-565-3　H36試料の横断面γスキャン　Zr/Nb-95（742mm）



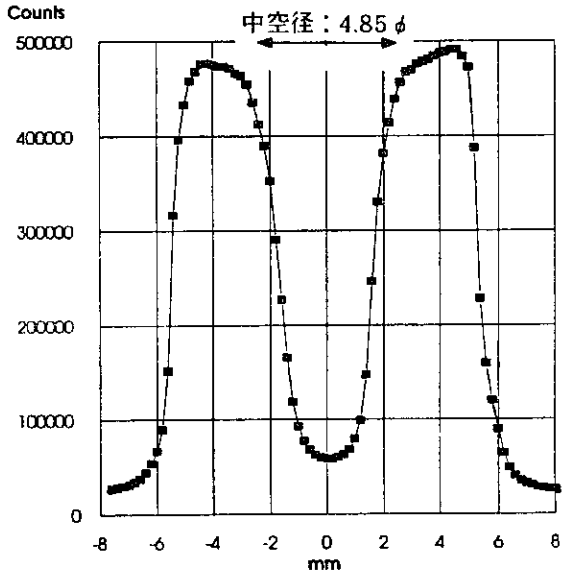
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

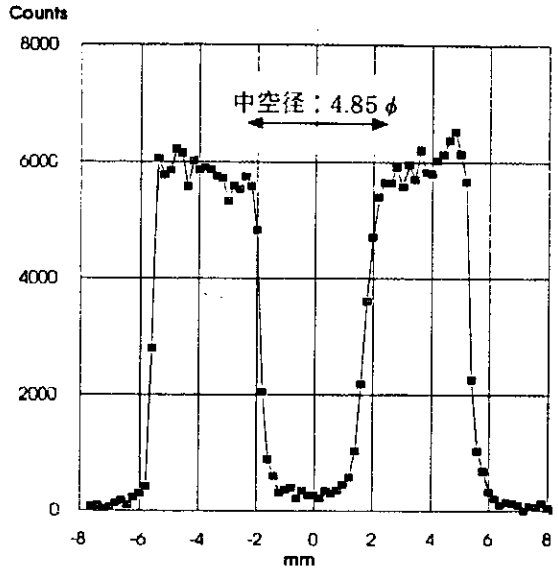


Direction 90 ° - 270 °

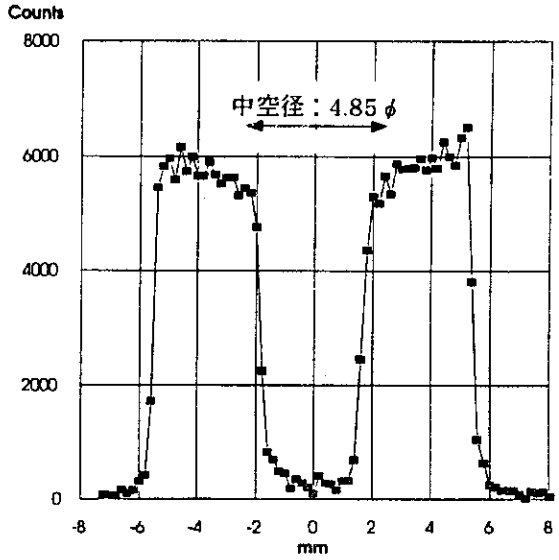


Direction 135 ° - 315 °

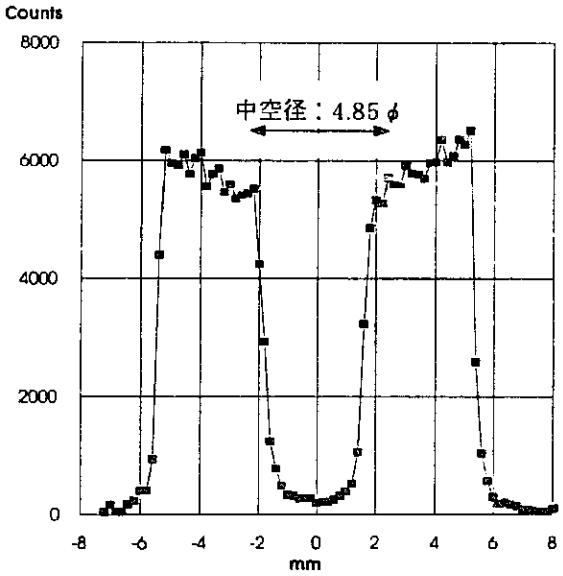
図5.10.10　IFA-565-6　H39試料の横断面γスキャン　グロスγ（742mm）



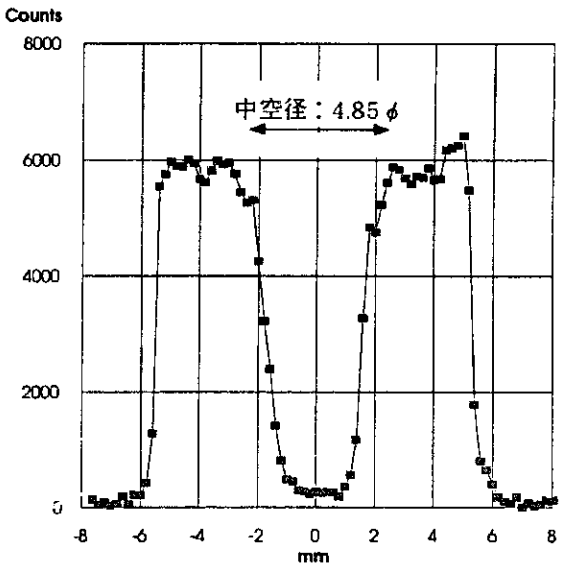
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

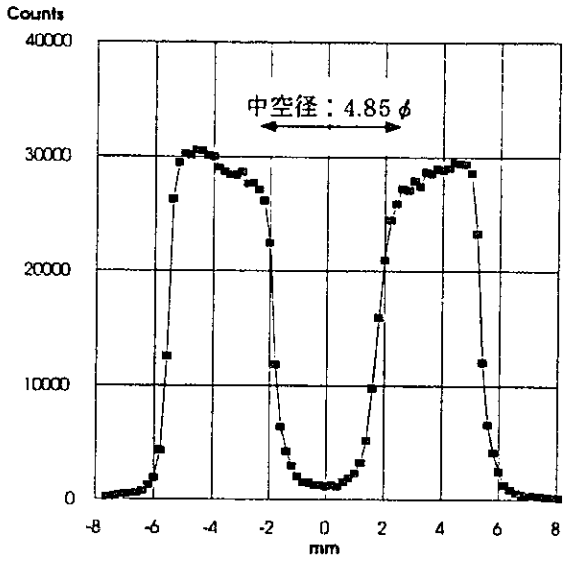


Direction 90 ° - 270 °

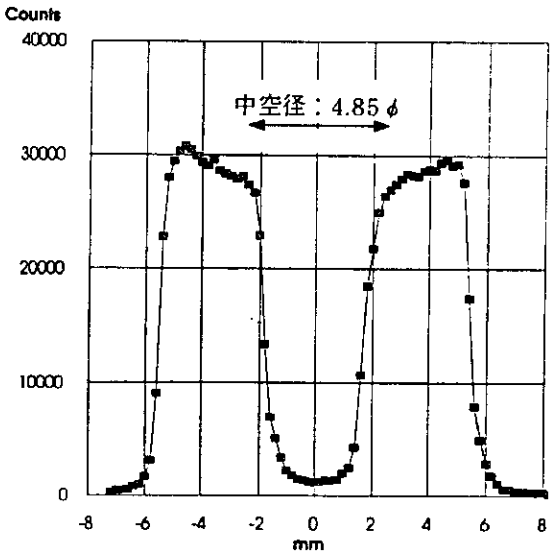


Direction 135 ° - 315 °

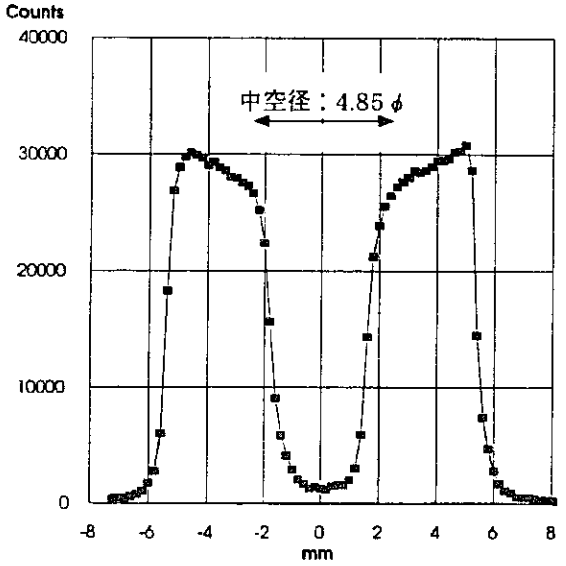
図5.10.11　IFA-565-6　H39試料の横断面γスキャン　Ru-106（742mm）



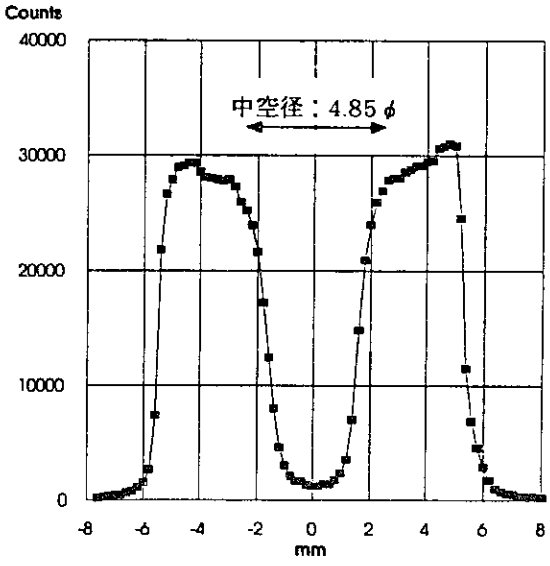
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

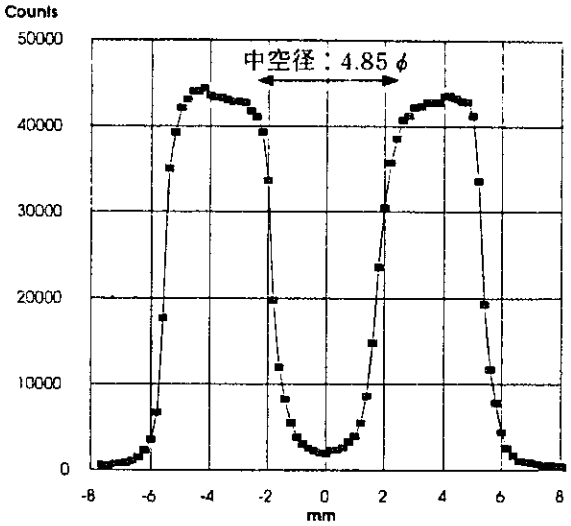


Direction 90 ° - 270 °

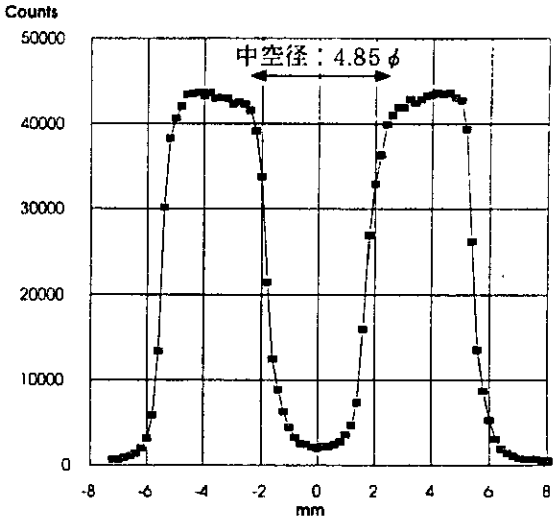


Direction 135 ° - 315 °

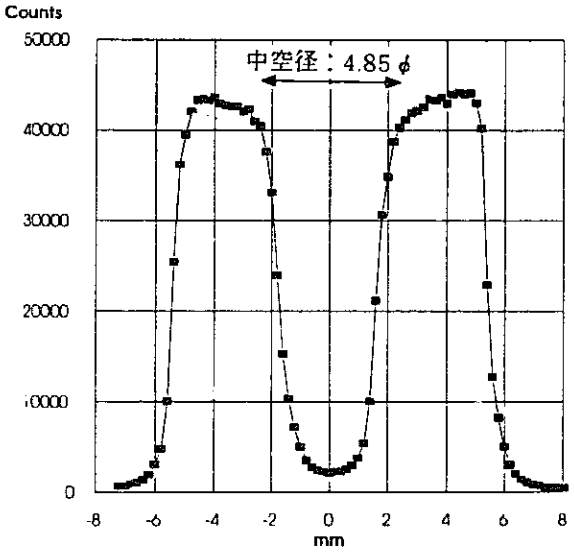
図5.10.12　IFA-565-6　H39試料の横断面γスキャン　Cs-134（742mm）



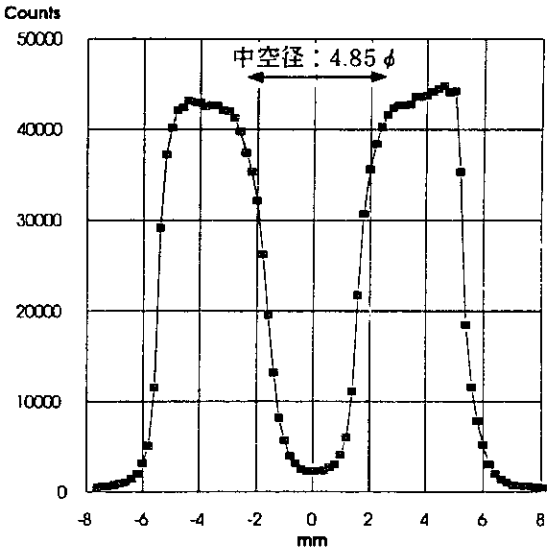
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

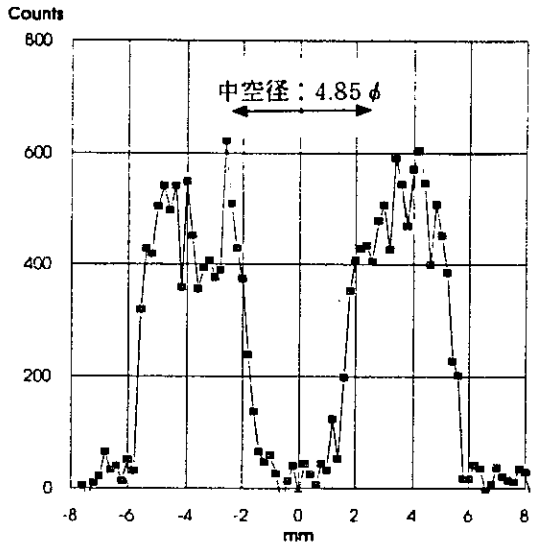


Direction 90 ° - 270 °

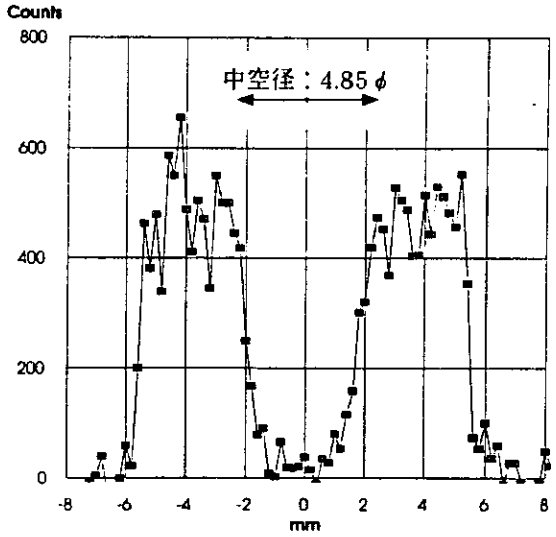


Direction 135 ° - 315 °

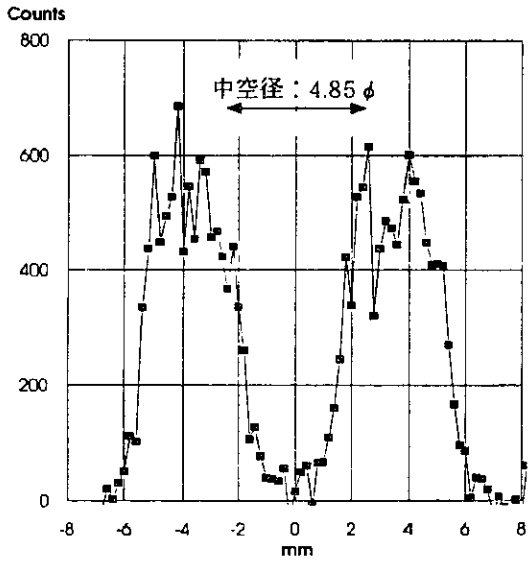
図5.10.13　IFA-565-6　H39試料の横断面γスキャン　Cs-137（742mm）



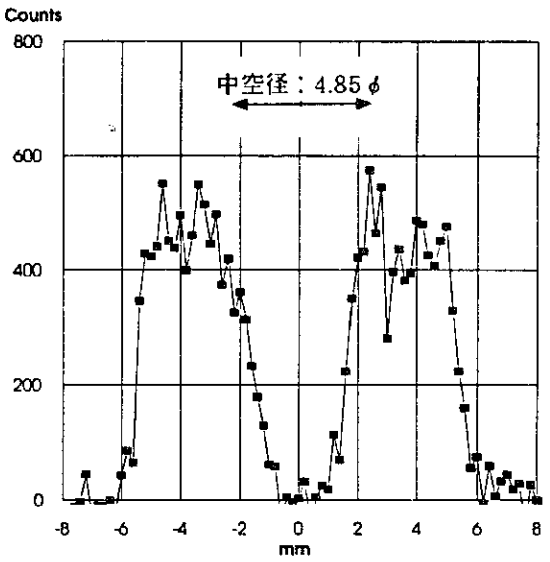
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° - 225 °

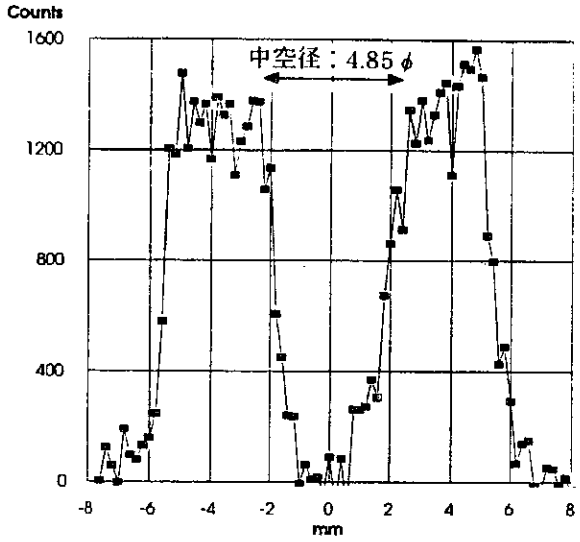


Direction 90 ° - 270 °

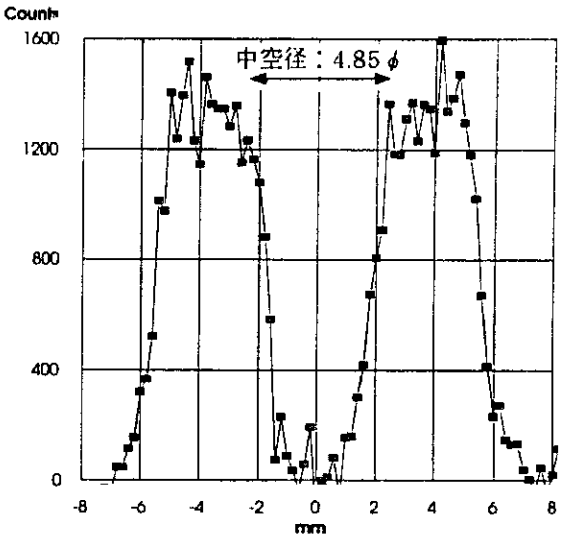


Direction 135 ° - 315 °

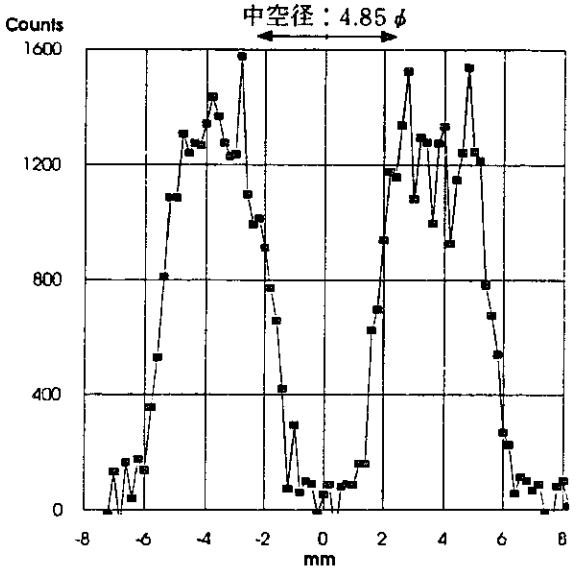
図5.10.14　IFA-565-6　H39試料の横断面γスキャン　Ce-144（742mm）



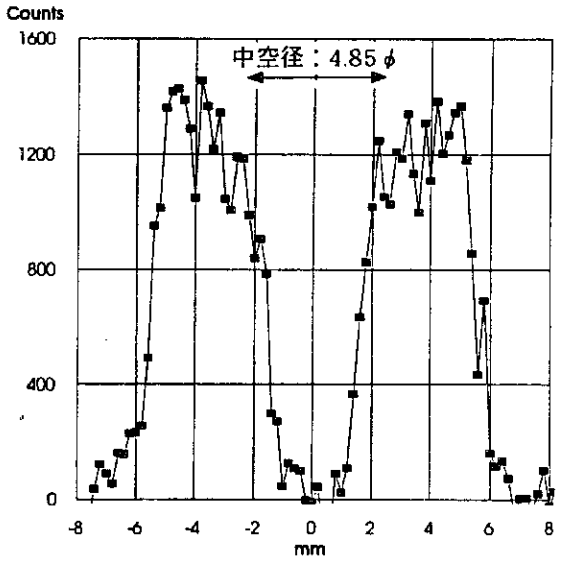
Direction 0 ° - 180 °



Direction 45 ° ε 225 °



Direction 90 ° - 270 °



Direction 135 ° - 315 °

図5.10.15　IFA-565-6　H39試料の横断面γスキャン　Zr/Nb-95（742mm）

5.11 残留FPガス

6サンプルについて残留FPガス分析を行ったが、1サンプルは失敗した。

測定方法

金相用の2サンプルからマイクロサンプリングした。サンプルのロッドNo.と軸及び半径方向位置について、表5.11.1及び図5.11.1に示す。軸方向位置は、下端Vノッチからの距離をmmで示した。半径方向位置は、rs/rで表記した。ここで、rs はサンプル半径位置で、r はペレットの半径を示す。サンプリングはサンプルの上面から採取した。

残留FPガス用のサンプルの準備手順は以下の通りである。

・超音波マイクロドリルで燃料サンプルを採取する。
・マイクロサンプルの重量を測定する。
・一定条件下で燃料マイクロサンプルを硝酸に溶解する。
・FPガスを専用容器にサンプリングする。
・質量分析にかける。

表5.11.1 IFA-565 残留FPガス分析サンプルのマイクロドリル位置

ロッドNo.	ﾏｲｸﾛｻﾝﾌﾟﾙ数	試料番号：軸方向位置 (mm)	ﾏｲｸﾛｻﾝﾌﾟﾙの 半径方向位置 (rs/r)
IFA-565-3	3 (2)	(36-1：742) 36-2：742 36-3：742	- 0.40 0.79
IFA-565-6	3	39-1：742 39-2：742 39-3：742	0.58 0.93 0.75
	全数： 5 (6)		

燃料直径 D=10.8mm、ドリル外径 OD=1.474mm、ドリル内径 ID=1.068mm

測定結果

表5.11.2にKr 同位体（Kr83, Kr84, Kr85, Kr86）及びXe 同位体（Xe131, Xe132, Xe134, Xe136）燃料マイクロサンプル中に残留したFPガスの質量分析結果を示す。Kr及びXeの合計量（μg）、合計体積（Nm^3）及び残留濃度（ppm）の計算結果をサンプル重量とともに示す。残念ながら、試料36-1からは結果が得られなかった。

Xe/Kr比から、質量分析データの信頼性について検討する。5.7節「パンクチャ試験及びFPガス分析」で述べたようにMOX燃料の場合、計算によればXe/Kr比は13～18となる。表5.11.2の分析結果からこの比は、25～29となる。サンプル間のデータのばらつきは小さいものの、Xe/Kr比は高く、分析値は倍程度の誤差を含んでいるものと考えられる。

図5.11.2に残留Kr、Xe組成の半径方向変化を示した。IFA-565-6は、中空燃料であることから、中心付近のサンプルは得られていない。各同位体の半径方向の特異な変化はなかった。両サンプルは、サンプリングの軸方向位置が等しく、燃焼度もほぼ同じであることから、同位体組成は、ほぼ同一であった。

図5.11.3に単位サンプル重量当たりに残留するFPガスの重量の半径方向変化を示した。IFA-565-3では中心から周方向に向かって残留濃度が高まる傾向が、また、IFA-565-6では半径方向に変化がなかった。

表5.11.2　IFA-565 マイクロサンプルからの残留FPガス

同位体		サンプルNo.				
		IFA-565-3		IFA-565-6		
		36-2	36-3	39-1	39-2	39-3
Kr	Kr 83 %	13.55	10.38	10.26	11.72	10.00
	Kr 84 %	32.97	36.78	36.16	34.60	36.79
	Kr 85%	5.68	4.39	4.56	4.60	4.37
	Kr 86 %	47.80	48.44	49.02	49.08	48.84
	全 Kr 量 (μ g)	1.97	2.38	2.21	4.69	3.12
	全Kr体積 (Ncm^3)	5.195×10^{-4}	6.276×10^{-4}	5.828×10^{-4}	12.368×10^{-4}	8.227×10^{-4}
	Kr残留濃度(ppm)	52	150	120	110	140
Xe	Xe 131 %	9.40	7.74	7.87	8.99	7.54
	Xe 132 %	20.54	22.15	21.91	20.71	22.47
	Xe 134 %	26.73	26.99	26.98	28.19	26.98
	Xe 136 %	43.33	43.12	43.24	42.10	43.00
	全 Xe 量 (μ g)	90.4	93.2	85.4	183.2	121.5
	全 Xe 体積(Ncm^3)	15.106×10^{-3}	15.573×10^{-3}	14.270×10^{-3}	30.613×10^{-3}	20.303×10^{-3}
	Xe残留濃度(ppm)	2400	5800	4800	4200	5300
サンプル重量 (mg)		38.1	16.2	17.7	43.7	23.0
Xe/Kr比		29.1	24.8	24.5	24.8	24.7

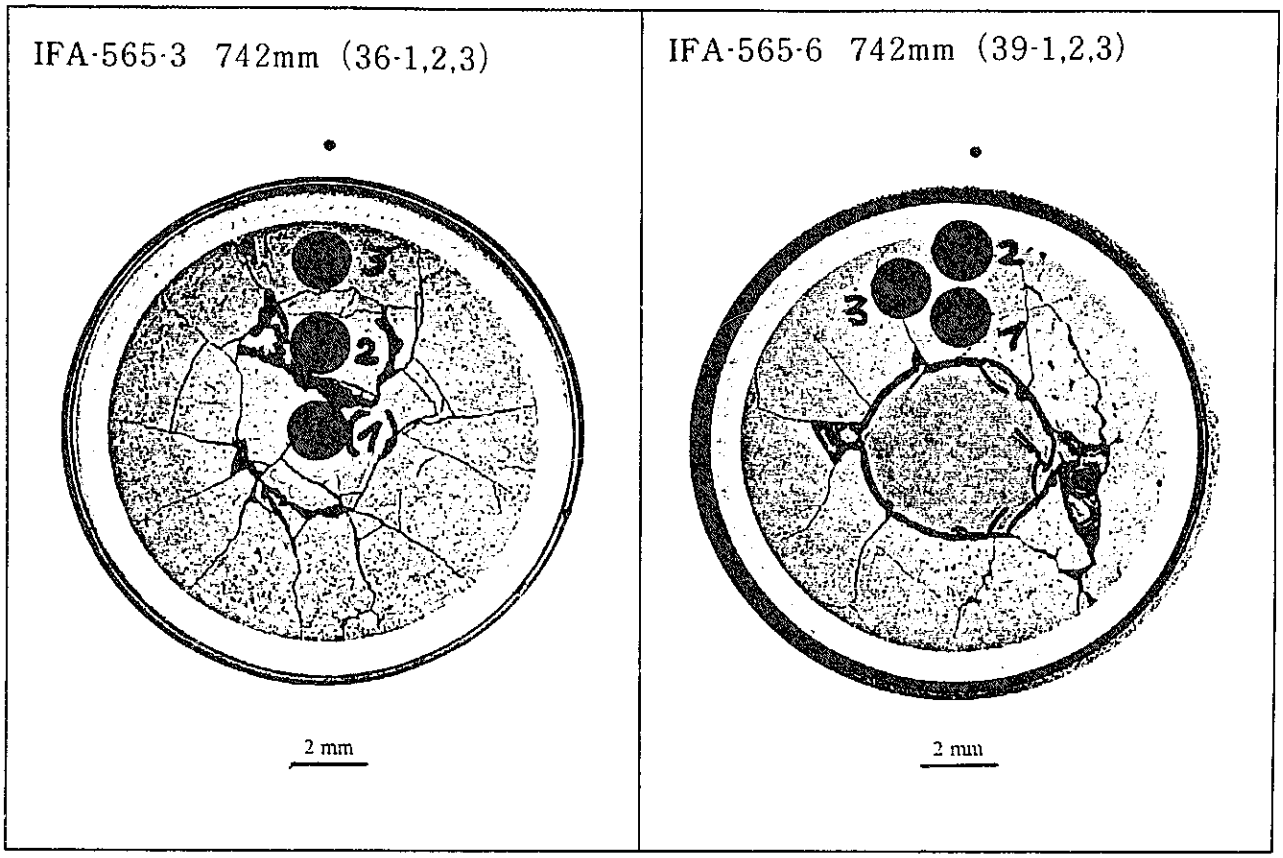


図5.11.1 残留ガス分析のためのマイクロサンプリングの位置
(横断面上に黒点で示す)

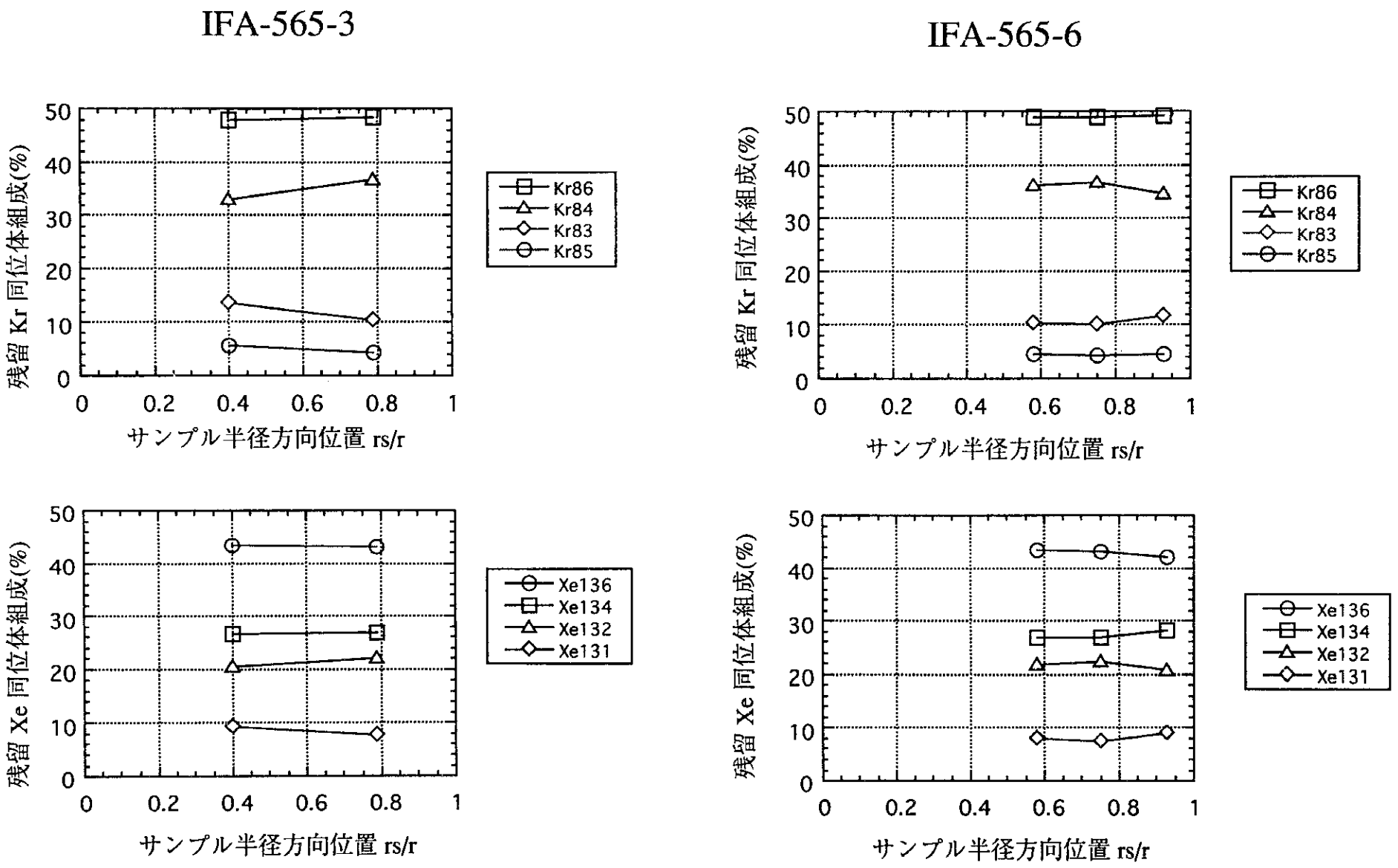


図5.11.2　残留FPガス組成の半径方向変化

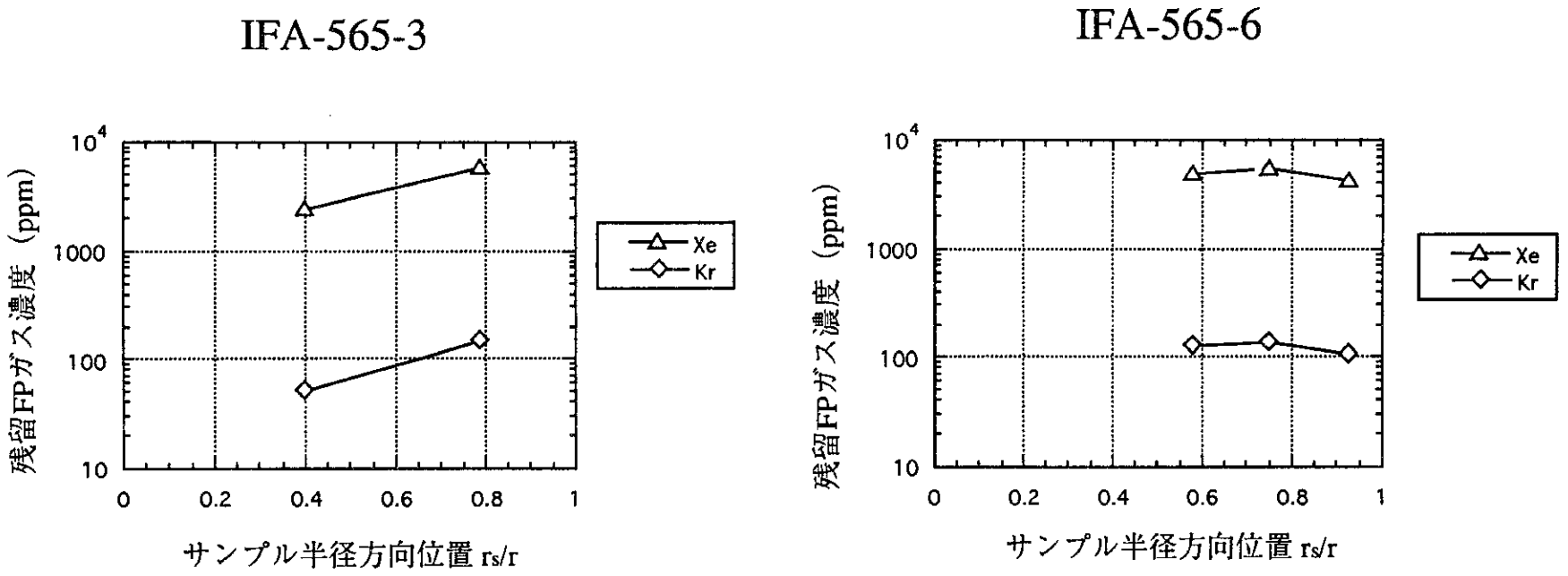


図5.11.3　残留FPガス濃度の半径方向変化

5.12 燃焼度分析

燃焼度分析用の試料は、IFA-565-3，6の、軸方向位置246㎜、742㎜、1245㎜について各々2試料づつ採取したが、№3の試料の742㎜の一つは採取に失敗した。

試料調製

試料の採取位置を表5.12.1及び図5.12.1～2に示す。軸方向位置は下部端栓のVノッチを基準とした。径方向位置は、r_s/r比で表した。ここで、r_sは試料の半径位置を、rはペレットの半径を表す。ミクロドリリングした試料は硝酸に完全溶解した。ミクロ組織は、質量分析器を用いてNd，Pu，Uの同位体についての分析を行った。さらに、^{241}Am，^{242}Cm，^{244}Cmについても分析を行った。分析結果を表5.12.3～14に示す。

考　察

(1) 計算値と分析値の比較

IFA-565-3の計算による燃焼度は、平均が49.0GWd/tMOX、ピーク値が59.6GWd/tMOXであった。これに対し、分析値の最大値は55.6GWd/tMOX（742㎜）であり、計算値が7%ほど高くなった。

次に、IFA-565-6の計算による燃焼度は、平均が50.0GWd/tMOX、ピーク値が61.1GWd/tMOXであった。これに対し、分析値の最大値は53.7GWd/tMOX（742㎜）となり、計算値が14%ほど高くなった。

(2) ロッドの軸方向及び径方向位置と燃焼度

ロッドの軸方向位置と燃焼度の相関を図5.12.3～4に示す。

燃焼度の軸方向分布は、軸方向位置742㎜をピークとする山型となった。これは、IFA-514-1，2，5についての結果（図5.12.15）と同様である。

径方向分布については規則性は見られなかったが、IFA-565-3の1245㎜（試料№37-1，37-2）及びIFA-565-6の742㎜（試料№39-1，39-2）は、径方向の燃焼度の差が大であった。図5.12.1～2では、これらのロッドのみ、試料の一部が被覆管領域にかかっており、そのことが測定結果に影響している可能性がある。

(3) 燃焼度とNd同位体組成

燃焼に伴うNdの同位体組成変化を図5.12.5～6に示す。これより、Ndについては、39GWd/tMOX付近より高燃焼度域では、燃焼に伴う組成変化及びロッド間の差は見られないことがわかる。これは、IFA-514-1, 2, 5の37～48GWd/tMOXにおける結果（図5.12.16）と一致する。

(4) 燃焼度とU同位体組成

燃焼に伴うUの同位体組成変化を図5.12.7～8に示す。

これより、39GWd/tMOX付近より高燃焼度域では、燃焼に伴いU235の存在度のみが緩やかに低下し、その他のU同位体はほとんど変化しないことがわかる。ロッド間の差も見られない。これは、IFA-514-1, 2, 5の結果（図5.12.17）とも一致する。

(5) 燃焼度とPu量及び同位体組成の変化

燃焼に伴うPuの量的変化を図5.12.9～10に、同位体組成変化をを図5.12.11～12に示す。

これより、トータルPu量の変化は緩慢であり、特に39GWd/tMOX付近より高燃焼度域ではごく緩やかに減少するだけであることがわかる。

しかし、組成の変化は大きく、Pu239は、39GWd/tMOX前後では照射前の80%近くから20%以下に低下しているが、その後はほぼ一定の値となっている。

Pu240の39GWd/tMOXに付近における存在度は、照射前に比べて相当増加しているが、その後は単調に減少している。

Pu241の39GWd/tMOXに付近における存在度は、照射前に比べて多少増加し、その後はほぼ一定となっている。

これに対し、Pu242は、39GWd/tMOX付近からも徐々に増加している。

以上の結果より、53GWd/tMOX以上の燃焼度域では、Pu240とPu242の存在比が大きくなっていることがわかる。

これらの傾向及び変化量は、IFA-565-3とIFA-565-6で同程度であった。

以上の結果は、IFA-514-1, 2, 5のデータ（図5.12.18）と一致することがわかる。また、IFA-514の結果から、Pu240の存在度はが37GWd/tMOX付近でほぼ一定になっていることがわかる。

(6) 燃焼度に伴うMA量の変化

燃焼に伴うMA量の変化を図5.12.13～14に示す。

IFA-565-3の42GWd/tMOXの分析結果は、不自然な落ち込みをしており、分析に際して何らかの問題があった可能性があるが、ロッド間のばらつきによることも考えられる。

Pu238、Am241、Cm242及びCm244は、程度の差はあるものの45GWd/tMOX付近までは上昇傾向にあるが、55GWd/tMOX以上ではこれより低下している。ただし、IFA-565-6については、53GWd/tMOX以上でのCm244の増加と、Am241の落ち込みが大きい点がIFA-565-3と異なっている。

しかしながら、全体的に生成量はIFA-514-1, 2, 5の結果（図5.12.19）と一致する。

ここで、これらの特異点が、一つのピンを構成しているスタック中に複数の製造ロットのペレットが含まれていることに起因している可能性がないかどうか検討した。

その結果、IFA-565-3の軸方向位置246㎜、742㎜、1245㎜に位置するペレットは同一製造ロットであった。

また、IFA-565-6については、246㎜と742㎜は同ロット（HB-201）であったが、1245㎜（燃焼度40.4及び41.3MWD/tMOX）は異なるロット（HB-202）であった。

すなわち、上述した特異点は、IFA-565-3と、IFA-565-6の55GWd/tMOX以上に見られており、製造ロットとは関係ないことがわかる。

HB-201とHB-202の差を表5.12.2に示す。

表5.12.1　燃焼度分析に用いた試料

ロッドNo	軸方向位置 (mm)	試料No	径方向位置 (r_s/r)	報告書
IFA-565-3	246	35-1/M-1	0.11	BUP343/BUP353
		35-2/M-2	0.61	BUP344/BUP353
	742	36-3/M-3	0.79	BUP345/BUP353
	1245	37-1/M-4	0.06	BUP346/BUP353
		37-2/M-5	0.93	BUP347/BUP353
	計：5試料			
IFA-565-6	246	38-1/M-6	0.74	BUP348/BUP353
		38-2/M-7	0.36	BUP349/BUP353
	742	39-1/M-8	0.58	BUP350/BUP353
		39-2/M-9	0.93	BUP351/BUP353
	1245	40-1/M-10	0.70	BUP352/BUP353
		40-2/M-11	0.43	BUP353/BUP353
	計：6試料			

被覆管；内径=10.80mm、ドリル；外径=1.474mm、内径；1.068mm

表5.12.2　IFA-565-6構成ペレットの製造ロットによる差

項目 ＼ ロット	HB-201	HB-202
Pu富化度（%）	4.76	4.68
O/M	1.98	1.99
蒸発性不純物（$\mu \ell$/g）	32	12
焼結密度（%TD）	94.6（σ=0.2）	94.8（σ=0.5）

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H35-1

Analyserapport nr. | BUP343 |

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT
==========

Sample: 1FA-565(microdrill) prøve mrk. M-1 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.448 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0373	U_233	0.00003	Pu_239	0.1385
Nd_148	0.6017	U_234	0.00008	Pu_240	0.5983
Nd_150	0.3611	U_235	0.00147	Pu_241	0.1177
		U_236	0.00096	Pu_242	0.1456
		U_238	0.9975		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.56	ug/mg oxide
U_234	0.00007	mg/mg oxide	Pu_240	11.11	ug/mg oxide
U_235	0.00119	mg/mg oxide	Pu_241	2.19	ug/mg oxide
U_236	0.00078	mg/mg oxide	Pu_242	2.73	ug/mg oxide
U_238	0.8172	mg/mg oxide	Pu_total	18.59	ug/mg oxide
U-total	0.8193	mg/mg oxide			

Nd_148	1.8466E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.117E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.073E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.659E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	5.01
BURNUP GWd / tonne met.	48.15

表5.12.3 燃焼度分析結果 (IFA-565-3 246mm H35-1 径方向位置r_s/r 0.11)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H35-2

Analyserapport nr. : BU9344

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-2 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.280 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0402	U_233	0.00003	Pu_239	0.1352
Nd_148	0.5983	U_234	0.00011	Pu_240	0.5849
Nd_150	0.3615	U_235	0.00133	Pu_241	0.1193
		U_236	0.00100	Pu_242	0.1606
		U_238	0.9975		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.65 ug/mg oxide
U_234	0.00009	mg/mg oxide	Pu_240	11.52 ug/mg oxide
U_235	0.00107	mg/mg oxide	Pu_241	2.36 ug/mg oxide
U_236	0.00081	mg/mg oxide	Pu_242	3.19 ug/mg oxide
U_238	0.8152	mg/mg oxide	Pu_total	19.73 ug/mg oxide
U-total	0.8172	mg/mg oxide		

Nd_148	1.8844E+15 atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.14E+17 fissions/mg oxide
Uran	2.068E+18 atoms/mg oxide
Plutonium	4.943E+16 atoms/mg oxide
Thorium	0 atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	5.11
BURNUP GWd / tonne met.	49.15

表5.12.4 燃焼度分析結果 (IFA-565-3 246mm H35-2 径方向位置rs/r 0.61)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H36-3

Analyserapport nr. | BUP345 |

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT
==========

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-3 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.091 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0693	U_233	0.00003	Pu_239	0.1839
Nd_148	0.5904	U_234	0.00010	Pu_240	0.3867
Nd_150	0.3403	U_235	0.00049	Pu_241	0.1300
		U_236	0.00106	Pu_242	0.2994
		U_238	0.9983		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.72 ug/mg oxide
U_234	0.00008	mg/mg oxide	Pu_240	5.74 ug/mg oxide
U_235	0.00039	mg/mg oxide	Pu_241	1.94 ug/mg oxide
U_236	0.00085	mg/mg oxide	Pu_242	4.48 ug/mg oxide
U_238	0.8081	mg/mg oxide	Pu_total	14.89 ug/mg oxide
U-total	0.8094	mg/mg oxide		

Nd_148	2.4137E+15 atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.463E+17 fissions/mg oxide
Uran	2.048E+18 atoms/mg oxide
Plutonium	3.727E+16 atoms/mg oxide
Thorium	0 atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	6.56
BURNUP GWd / tonne met.	63.06

表5.12.5 燃焼度分析結果 (IFA-565-3 742mm H36-3 径方向位置rs/r 0.79)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H 37-1

Analyserapport nr. : BUP346

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-4 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.340 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0338	U_233	0.00003	Pu_239	0.1679
Nd_148	0.6125	U_234	0.00010	Pu_240	0.5994
Nd_150	0.3537	U_235	0.00185	Pu_241	0.1177
		U_236	0.00094	Pu_242	0.1150
		U_238	0.9971		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	3.58 ug/mg oxide
U_234	0.00008	mg/mg oxide	Pu_240	12.85 ug/mg oxide
U_235	0.00150	mg/mg oxide	Pu_241	2.53 ug/mg oxide
U_236	0.00076	mg/mg oxide	Pu_242	2.49 ug/mg oxide
U_238	0.8172	mg/mg oxide	Pu_total	21.46 ug/mg oxide
U-total	0.8196	mg/mg oxide		

Nd_148	1.7132E+15 atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.036E+17 fissions/mg oxide
Uran	2.074E+18 atoms/mg oxide
Plutonium	5.379E+16 atoms/mg oxide
Thorium	0 atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	4.65
BURNUP GWd / tonne met.	44.67

表5.12.6 燃焼度分析結果 (IFA-565-3 1245mm H37-1 径方向位置rs/r 0.06)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Lateteknologi

H 37-2

Analyserapport nr. | BUP347 |

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT
==========

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-5 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.092 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0469	U_233	0.00003	Pu_239	0.1716
Nd_148	0.5842	U_234	0.00012	Pu_240	0.5154
Nd_150	0.3689	U_235	0.00138	Pu_241	0.1325
		U_236	0.00099	Pu_242	0.1803
		U_238	0.9975		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	3.18 ug/mg oxide
U_234	0.00010	mg/mg oxide	Pu_240	9.59 ug/mg oxide
U_235	0.00111	mg/mg oxide	Pu_241	2.48 ug/mg oxide
U_236	0.00080	mg/mg oxide	Pu_242	3.38 ug/mg oxide
U_238	0.8141	mg/mg oxide	Pu_total	18.63 ug/mg oxide
U-total	0.8161	mg/mg oxide		

Nd_148	1.9766E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.196E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.065E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.668E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	5.36
BURNUP GWd / tonne met.	51.56

表5.12.7 燃焼度分析結果 (IFA-565-3 1245mm H37-2 径方向位置rs/r 0.93)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H 38-1

Analyserapport nr. : BUP348

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT
==========

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-6 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.130 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0465	U_233	0.00003	Pu_239	0.1324
Nd_148	0.6035	U_234	0.00012	Pu_240	0.5652
Nd_150	0.3499	U_235	0.00116	Pu_241	0.1199
		U_236	0.00105	Pu_242	0.1824
		U_238	0.9976		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.37 ug/mg oxide
U_234	0.00009	mg/mg oxide	Pu_240	10.18 ug/mg oxide
U_235	0.00094	mg/mg oxide	Pu_241	2.17 ug/mg oxide
U_236	0.00085	mg/mg oxide	Pu_242	3.31 ug/mg oxide
U_238	0.8158	mg/mg oxide	Pu_total	18.03 ug/mg oxide
U-total	0.8177	mg/mg oxide		

Nd_148	1.9361E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.172E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.069E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.518E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	5.25
BURNUP GWd / tonne met.	50.51

表5.12.8 燃焼度分析結果 (IFA-565-6 246mm H38-1 径方向位置r_s/r 0.74)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H38-2

Analyserapport nr. : BUP349

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT
==========

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-7 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.096 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0507	U_233	0.00003	Pu_239	0.1309
Nd_148	0.5935	U_234	0.00009	Pu_240	0.5757
Nd_150	0.3558	U_235	0.00119	Pu_241	0.1180
		U_236	0.00104	Pu_242	0.1753
		U_238	0.9976		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.13 ug/mg oxide
U_234	0.00007	mg/mg oxide	Pu_240	9.39 ug/mg oxide
U_235	0.00096	mg/mg oxide	Pu_241	1.93 ug/mg oxide
U_236	0.00084	mg/mg oxide	Pu_242	2.89 ug/mg oxide
U_238	0.8178	mg/mg oxide	Pu_total	16.34 ug/mg oxide
U-total	0.8198	mg/mg oxide		

Nd_148	1.9205E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.162E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.074E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.095E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	5.21
BURNUP GWd / tonne met.	50.10

表5.12.9 燃焼度分析結果 (IFA-565-6 246mm H38-2 径方向位置r_s/r 0.36)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H39-1

Analyserapport nr. : BUP350

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-8 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.099 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0699	U_233	0.00003	Pu_239	0.1644
Nd_148	0.5869	U_234	0.00009	Pu_240	0.4359
Nd_150	0.3432	U_235	0.00058	Pu_241	0.1215
		U_236	0.00108	Pu_242	0.2782
		U_238	0.9982		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.44 ug/mg oxide
U_234	0.00008	mg/mg oxide	Pu_240	6.50 ug/mg oxide
U_235	0.00047	mg/mg oxide	Pu_241	1.82 ug/mg oxide
U_236	0.00087	mg/mg oxide	Pu_242	4.18 ug/mg oxide
U_238	0.8099	mg/mg oxide	Pu_total	14.94 ug/mg oxide
U-total	0.8114	mg/mg oxide		

Nd_148	2.3303E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.412E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.053E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	3.74E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	6.33
BURNUP GWd / tonne met.	60.87

表5.12.10 燃焼度分析結果 (IFA-565-6 742mm H39-1 径方向位置r_s/r 0.58)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H39-2

Analyserapport nr. | BUP351 |

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-9 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.192 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0499	U_233	0.00003	Pu_239	0.1609
Nd_148	0.6027	U_234	0.00010	Pu_240	0.5340
Nd_150	0.3474	U_235	0.00121	Pu_241	0.1209
		U_236	0.00103	Pu_242	0.1842
		U_238	0.9976		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003 mg/mg oxide	Pu_239	3.06	ug/mg oxide
U_234	0.00008 mg/mg oxide	Pu_240	10.21	ug/mg oxide
U_235	0.00097 mg/mg oxide	Pu_241	2.32	ug/mg oxide
U_236	0.00083 mg/mg oxide	Pu_242	3.55	ug/mg oxide
U_238	0.8128 mg/mg oxide	Pu_total	19.15	ug/mg oxide
U-total	0.8147 mg/mg oxide			

Nd_148	2.0164E+15 atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.221E+17 fissions/mg oxide
Uran	2.061E+18 atoms/mg oxide
Plutonium	4.798E+16 atoms/mg oxide
Thorium	0 atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	5.47
BURNUP GWd / tonne met.	52.61

表5.12.11 燃焼度分析結果 (IFA-565-6 742mm H39-2 径方向位置rs/r 0.93)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H 40-1

Analyserapport nr. : BUP352

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT
==========

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-10 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.189 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0405	U_233	0.00003	Pu_239	0.154
Nd_148	0.6086	U_234	0.00011	Pu_240	0.5824
Nd_150	0.3509	U_235	0.00151	Pu_241	0.1218
		U_236	0.00098	Pu_242	0.1412
		U_238	0.9974		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	3.05 ug/mg oxide
U_234	0.00009	mg/mg oxide	Pu_240	11.55 ug/mg oxide
U_235	0.00122	mg/mg oxide	Pu_241	2.43 ug/mg oxide
U_236	0.00079	mg/mg oxide	Pu_242	2.82 ug/mg oxide
U_238	0.8180	mg/mg oxide	Pu_total	19.86 ug/mg oxide
U-total	0.8201	mg/mg oxide		

Nd_148	1.758E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.064E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.075E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.977E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	4.77
BURNUP GWd / tonne met.	45.85

表5.12.12 燃焼度分析結果 (IFA-565-6 1245mm H40-1 径方向位置rs/r 0.70)

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
Avd. Reservoar og Leteteknologi

H40-2

Analyserapport nr. | BUP353 |

Date : 15-Mar-96
Sign.:

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-565(microdrill) prøve mrk. M-11 Feb-mar 1995

Calculated samplesize: 0.172 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0404	U_233	0.00003	Pu_239	0.1560
Nd_148	0.5962	U_234	0.00010	Pu_240	0.5659
Nd_150	0.3635	U_235	0.00147	Pu_241	0.1260
		U_236	0.00098	Pu_242	0.1521
		U_238	0.9974		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00003	mg/mg oxide	Pu_239	2.72 ug/mg oxide
U_234	0.00008	mg/mg oxide	Pu_240	9.91 ug/mg oxide
U_235	0.00119	mg/mg oxide	Pu_241	2.22 ug/mg oxide
U_236	0.00080	mg/mg oxide	Pu_242	2.69 ug/mg oxide
U_238	0.8194	mg/mg oxide	Pu_total	17.54 ug/mg oxide
U-total	0.8215	mg/mg oxide		

Nd_148	1.7958E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont
Fissions	1.087E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.079E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.396E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	4.87
BURNUP GWd / tonne met.	46.83

表5.12.13 燃焼度分析結果 (IFA-565-6 1245mm H40-2 径方向位置rs/r 0.43)

Ansalyserapport nr. BUP343/BUP353
Dato: 22.03.96
Sign.:

表5.12.14　αスペクトル分析によるアクチニド分析結果

IFA-565 Prøve mrk. Microdrill	BU(Nd) MWd/kg metal	$Am^{241/243}$ Massespektr.	$Pu^{238/239+240}$ Alfa-aktivit.	Pu^{238} µg/mg oksyd	Am^{241} µg/mg oksyd	Cm^{242} µg/mg oksyd pr. 06.03.96	Cm^{244} µg/mg oksyd
35-1	48.2	2.69	3.96	0.61	0.36	0.0030	0.033
35-2	49.2	2.34	4.22	0.67	0.49	0.0036	0.044
36-3	63.1	0.520	6.83	0.57	0.24	0.0024	0.021
37-1	44.7	3.22	3.61	0.65	0.52	0.0033	0.039
37-2	51.6	1.98	5.43	0.74	0.49	0.0035	0.067
38-1	50.5	1.98	4.39	0.62	0.38	0.0037	0.055
38-2	50.1	2.05	4.47	0.58	0.36	0.0033	0.048
39-1	60.9	0.557	6.21	0.58	0.13	0.0014	0.109
39-2	52.6	1.39	6.51	0.93	0.69	0.0058	0.062
40-1	45.9	2.48	4.14	0.66	0.53	0.0029	0.055
40-2	46.8	2.30	4.50	0.62	0.46	0.0031	0.052

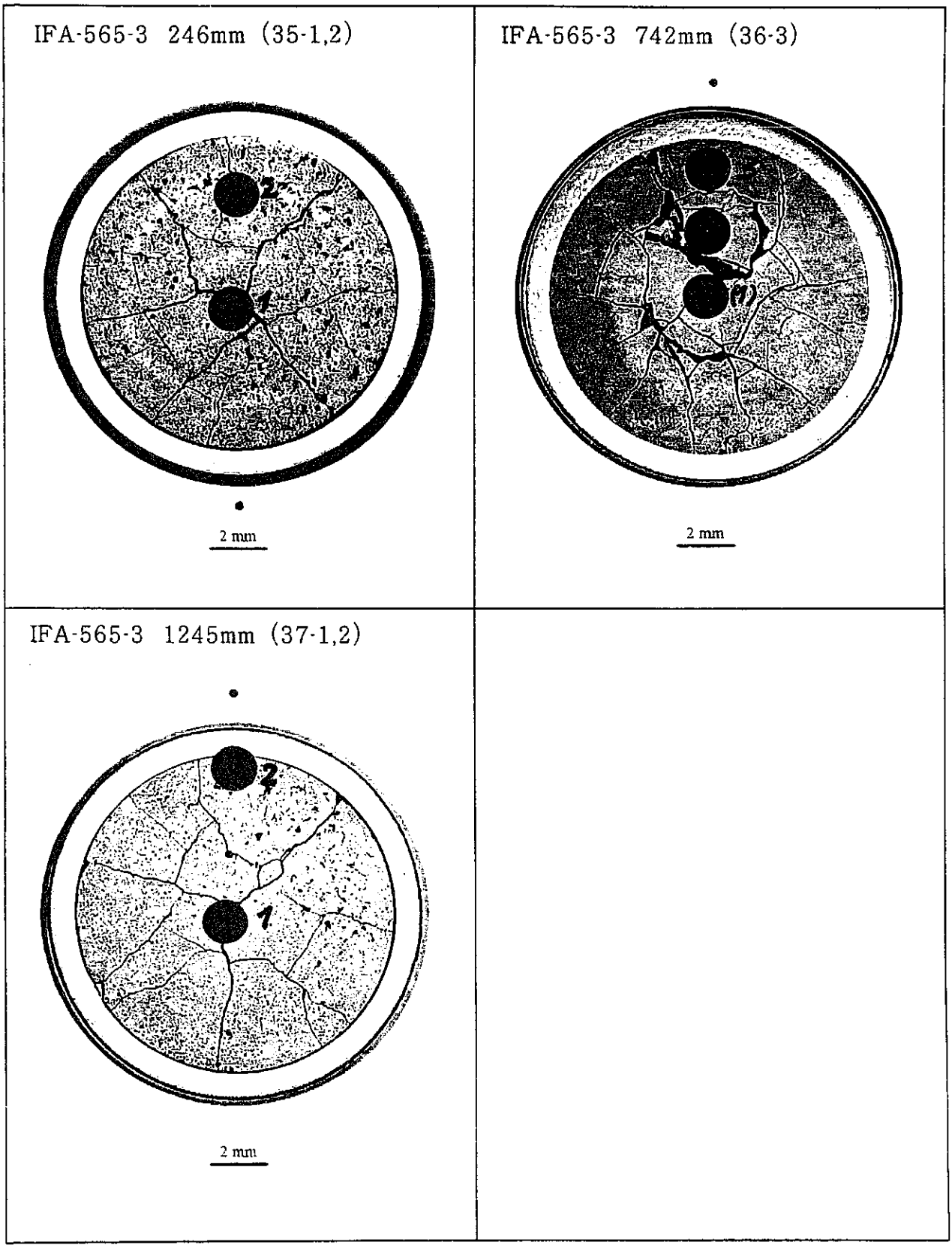


図5.12.1　燃焼度分析マイクロサンプルの半径方向位置（黒点）

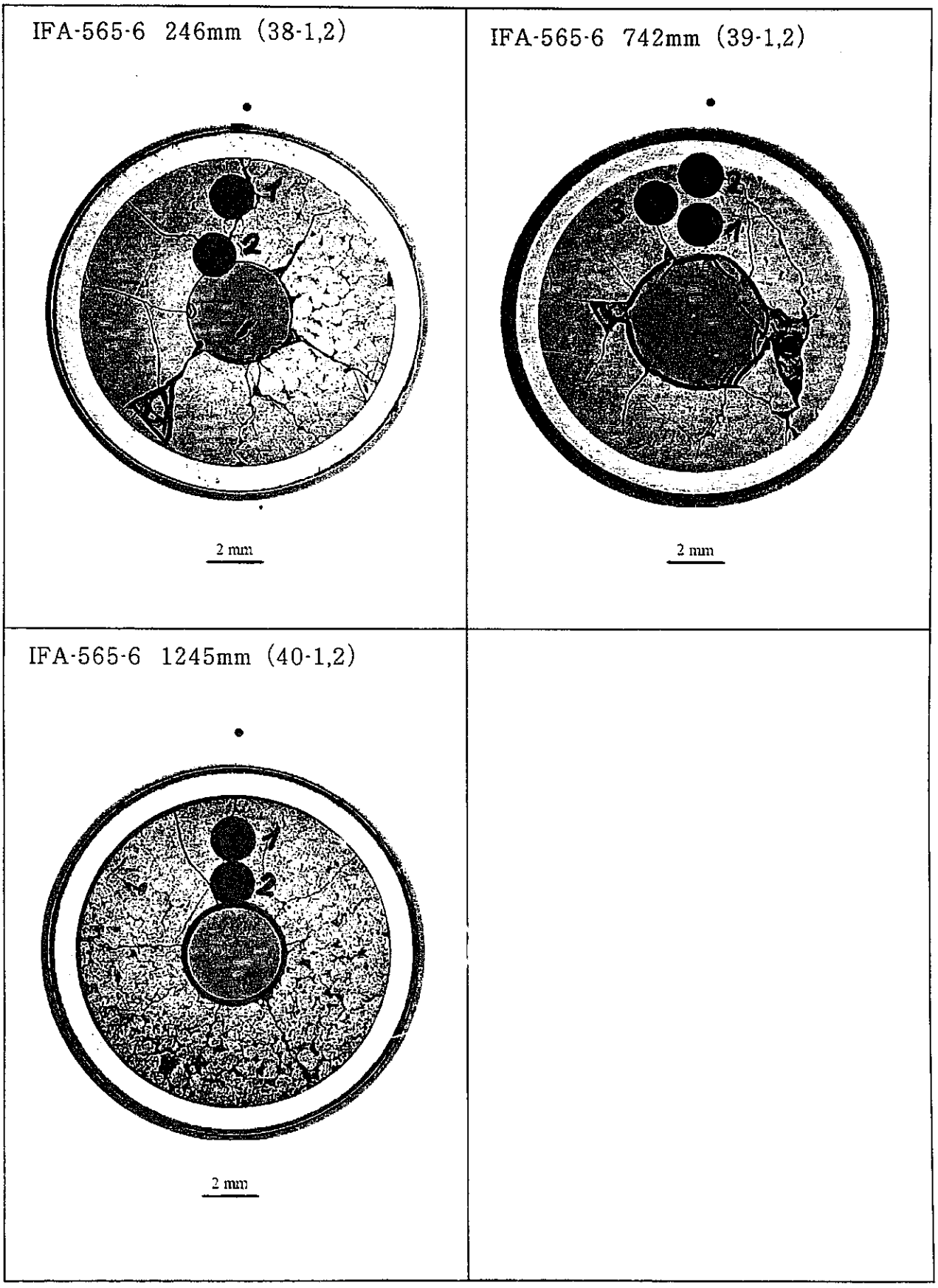
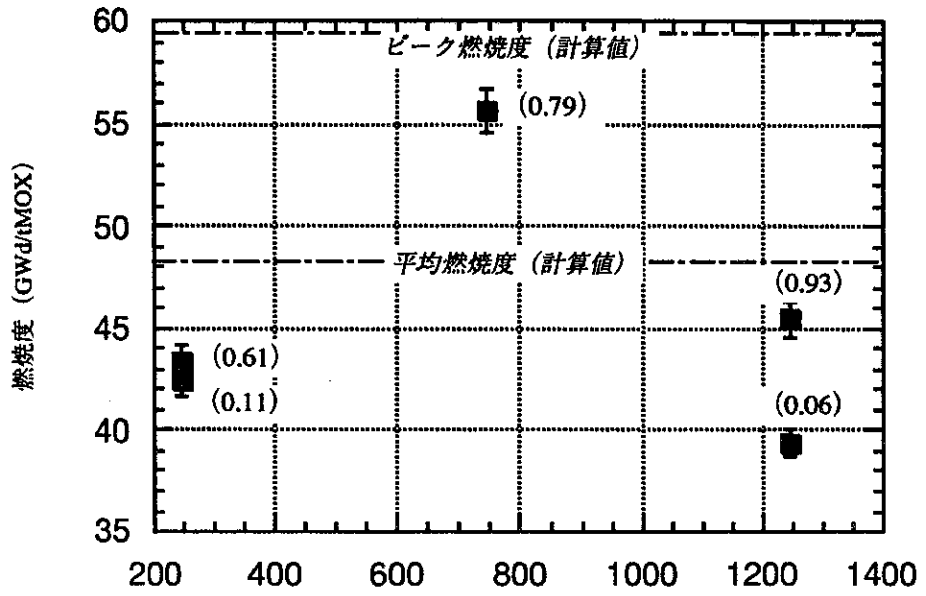
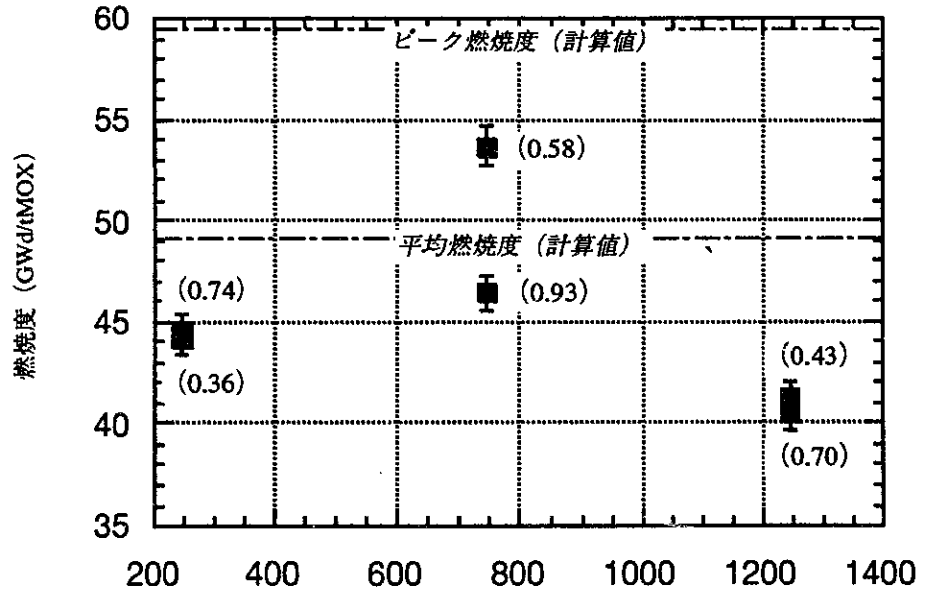


図5.12.2　燃焼度分析マイクロサンプルの半径方向位置（黒点）



※　カッコ内はr_s/r比を示す。

図5.12.3　軸方向位置と燃焼度の相関（IFA-565-3）



※　カッコ内はr_s/r比を示す。

図5.12.4　軸方向位置と燃焼度の相関（IFA-565-6）

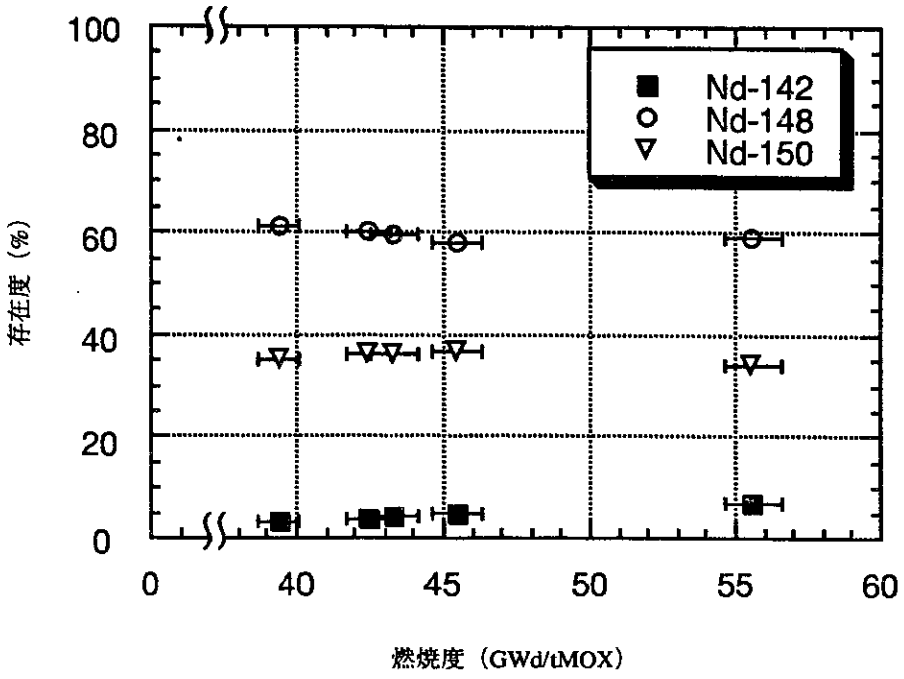


図5.12.5　燃焼に伴うNd同位体組成の変化（IFA-565-3）

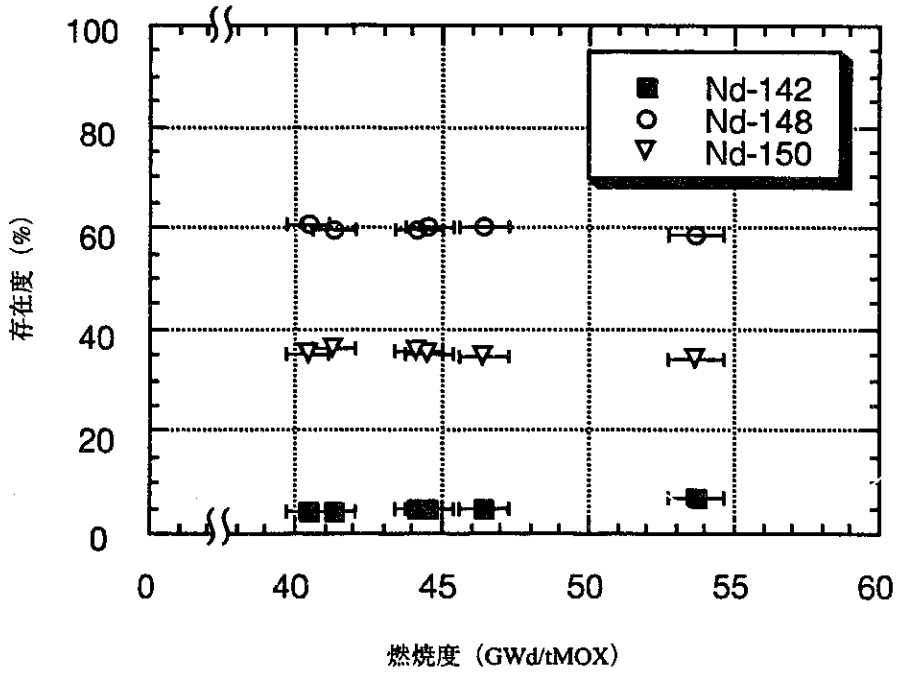


図5.12.6　燃焼に伴うNd同位体組成の変化（IFA-565-6）

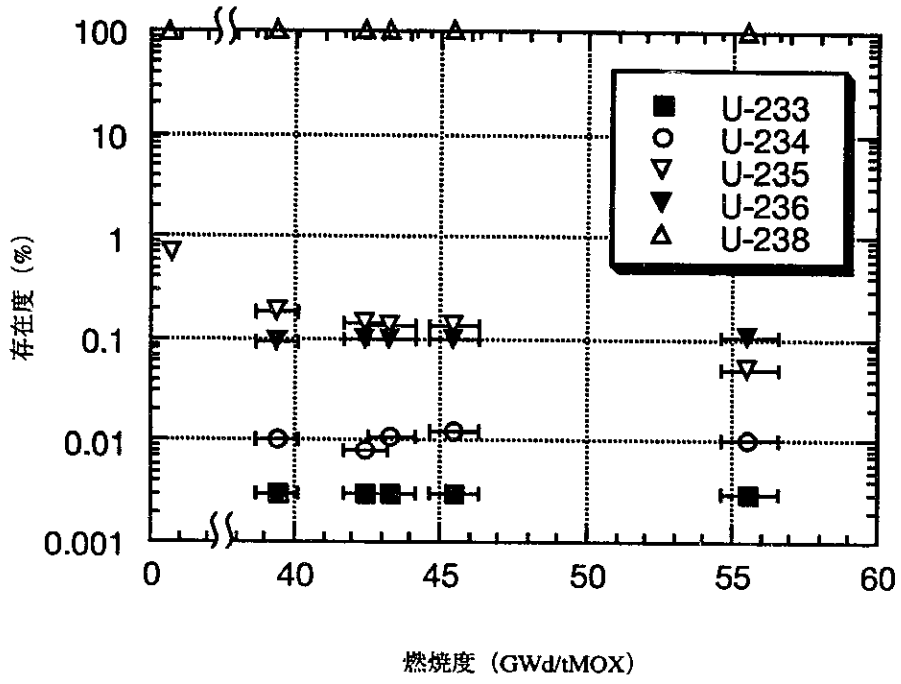


図5.12.7　燃焼に伴うU同位体組成の変化（IFA-565-3）

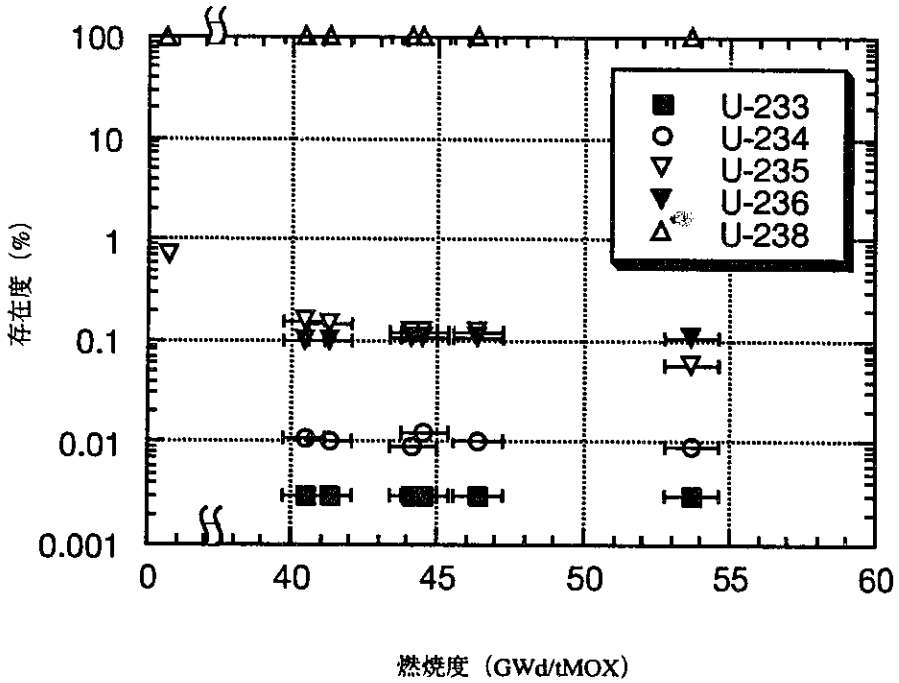


図5.12.8　燃焼に伴うU同位体組成の変化（IFA-565-6）

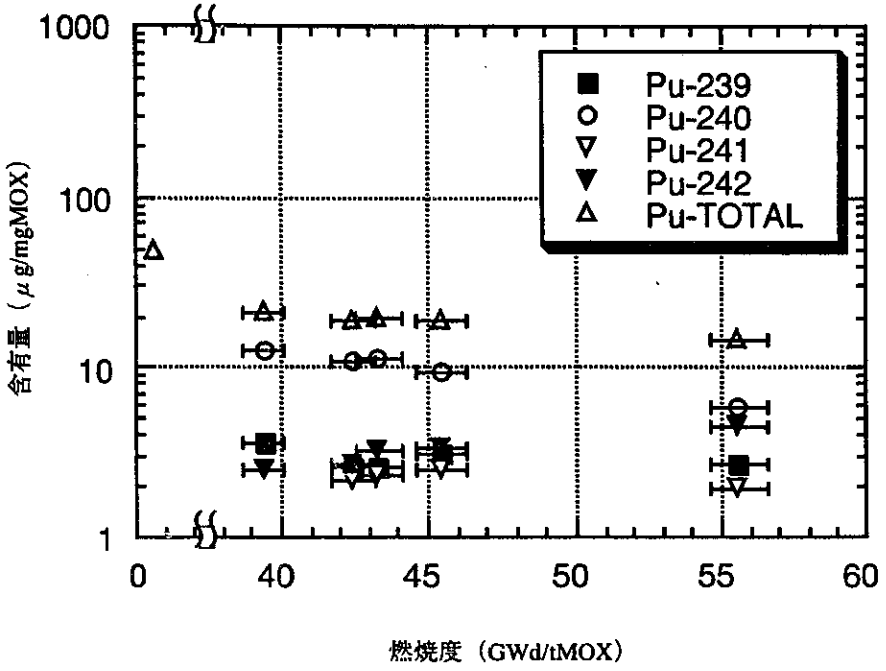


図5.12.9　燃焼に伴うPu量の変化（IFA-565-3）

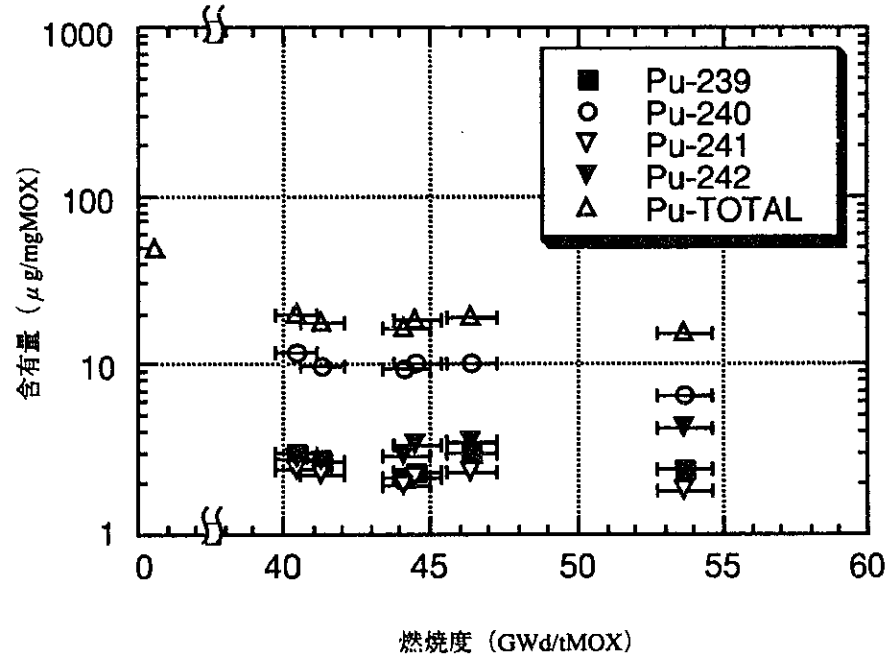


図5.12.10　燃焼に伴うPu量の変化（IFA-565-6）

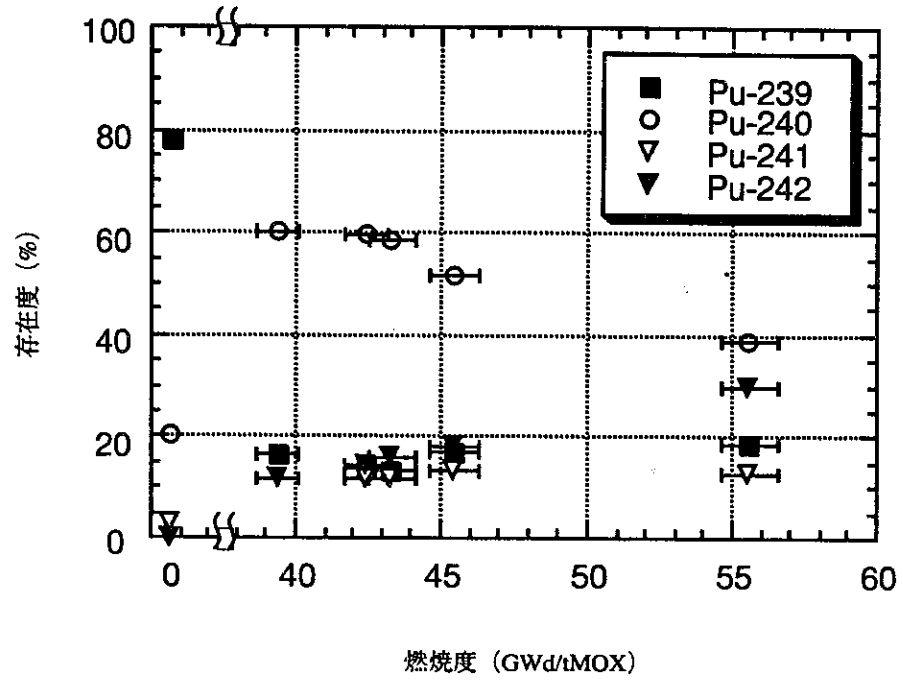


図5.12.11　燃焼に伴うPu同位体組成の変化（IFA-565-3）

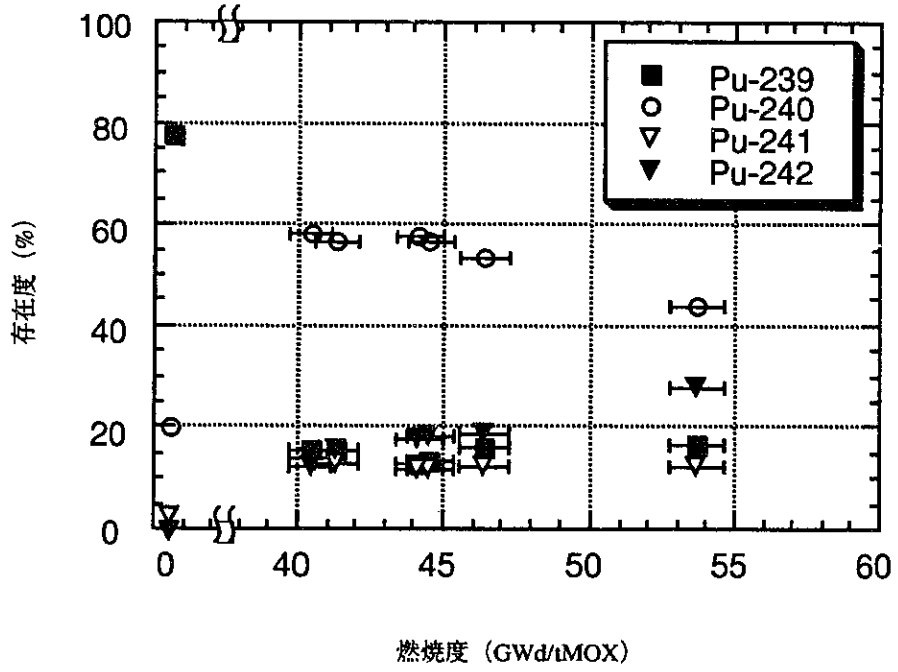


図5.12.12　燃焼に伴うPu同位体組成の変化（IFA-565-6）

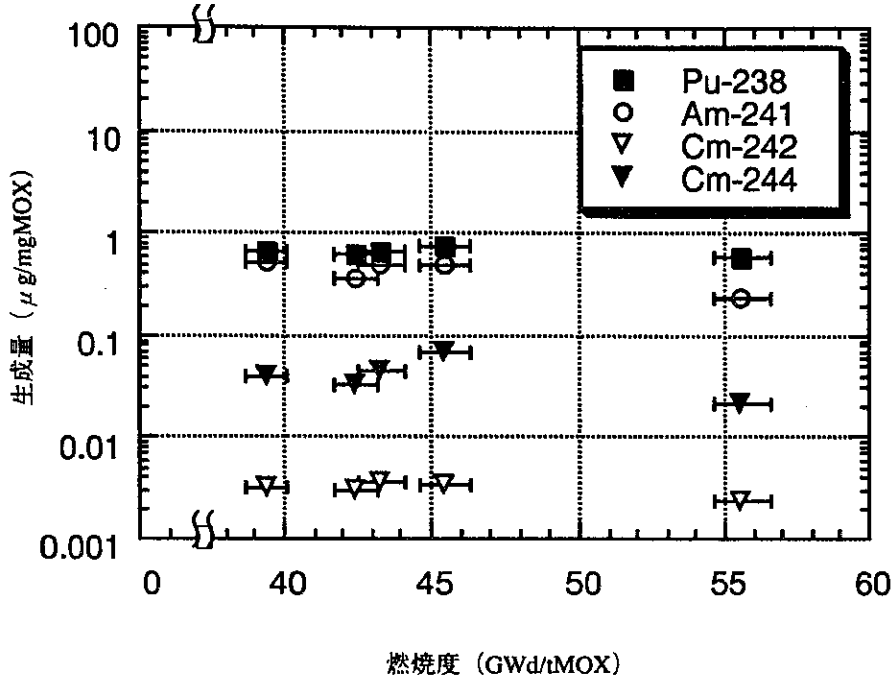


図5.12.13　燃焼に伴うMA量の変化（IFA-565-3）

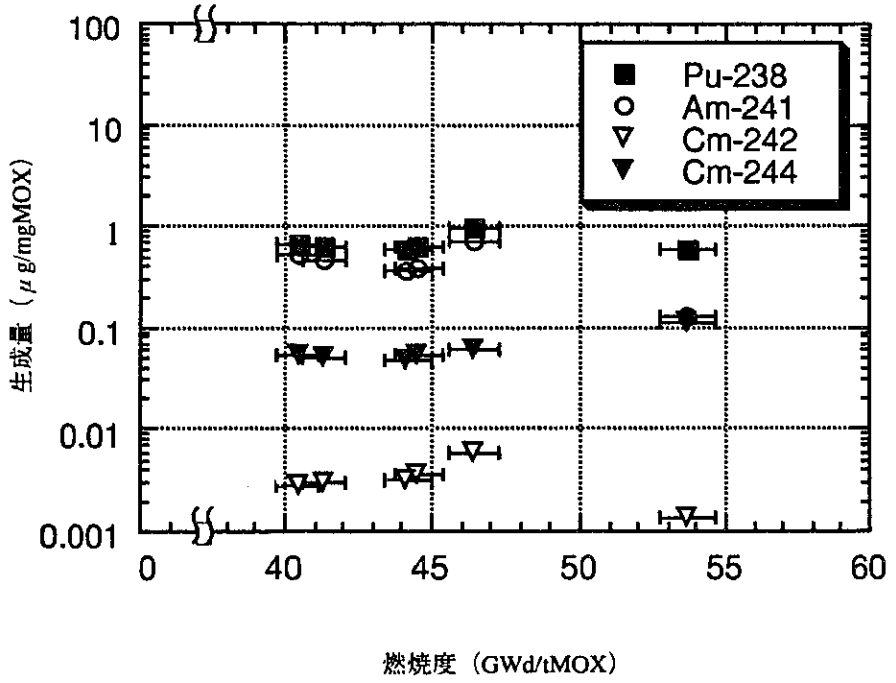


図5.12.14　燃焼に伴うMA量の変化（IFA-565-6）

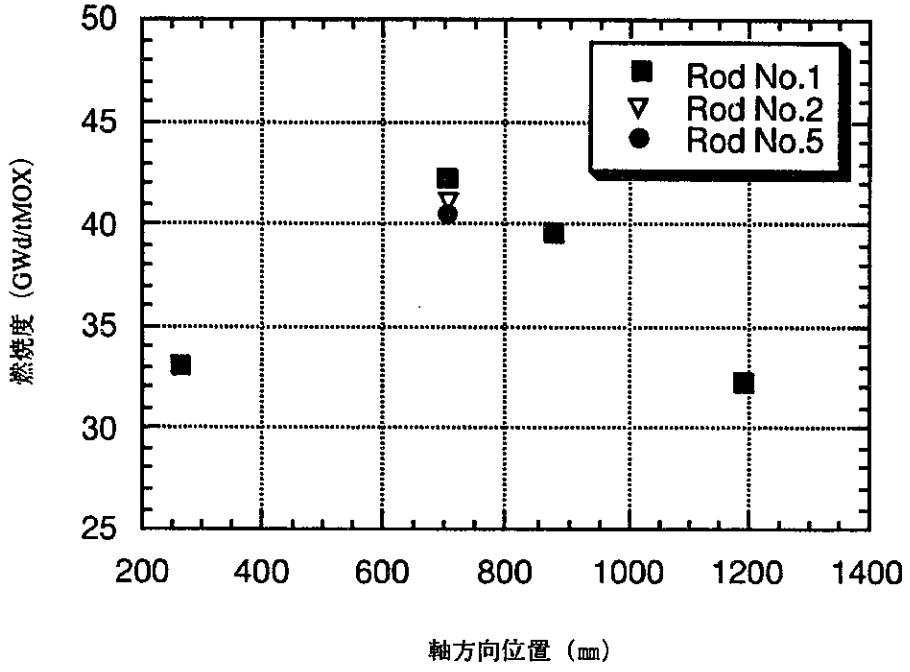


図5.12.15　IFA-514-1, 2, 5の軸方向位置と燃焼度の相関

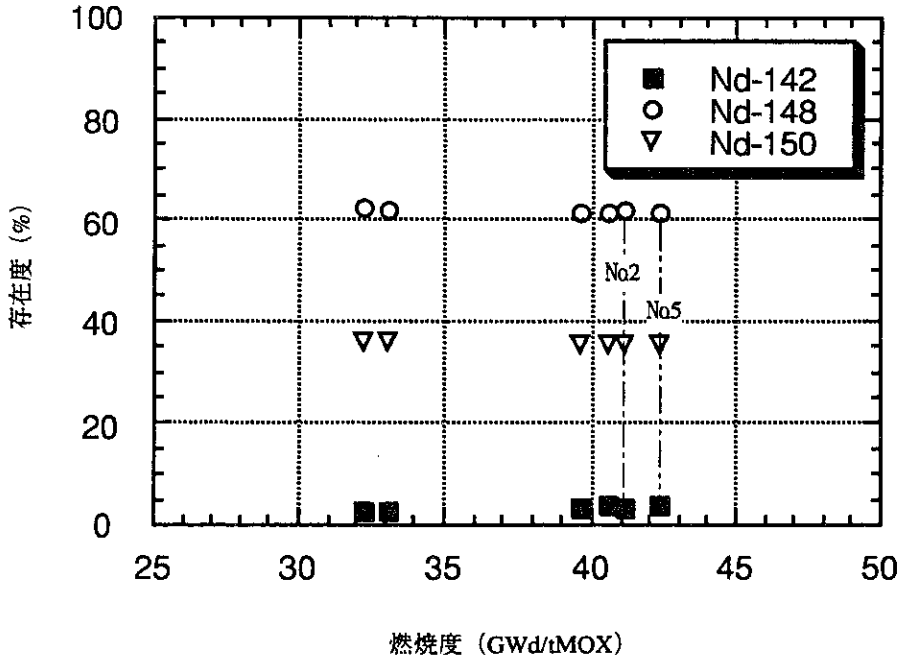


図5.12.16　IFA-514-1, 2, 5の燃焼に伴うNd同位体組成の変化

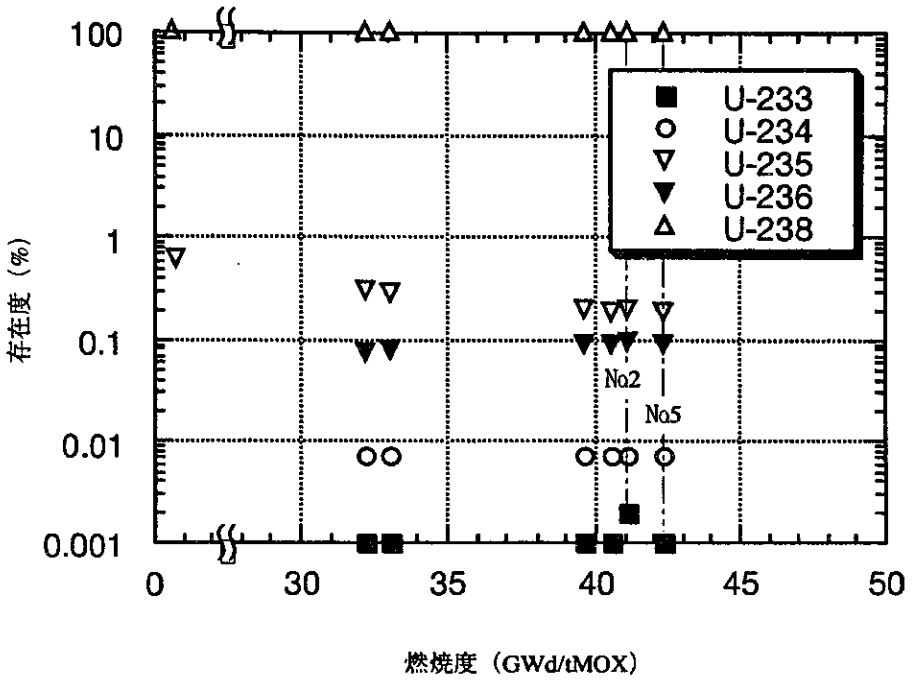


図5.12.17　IFA-514-1, 2, 5の燃焼に伴うU同位体組成の変化

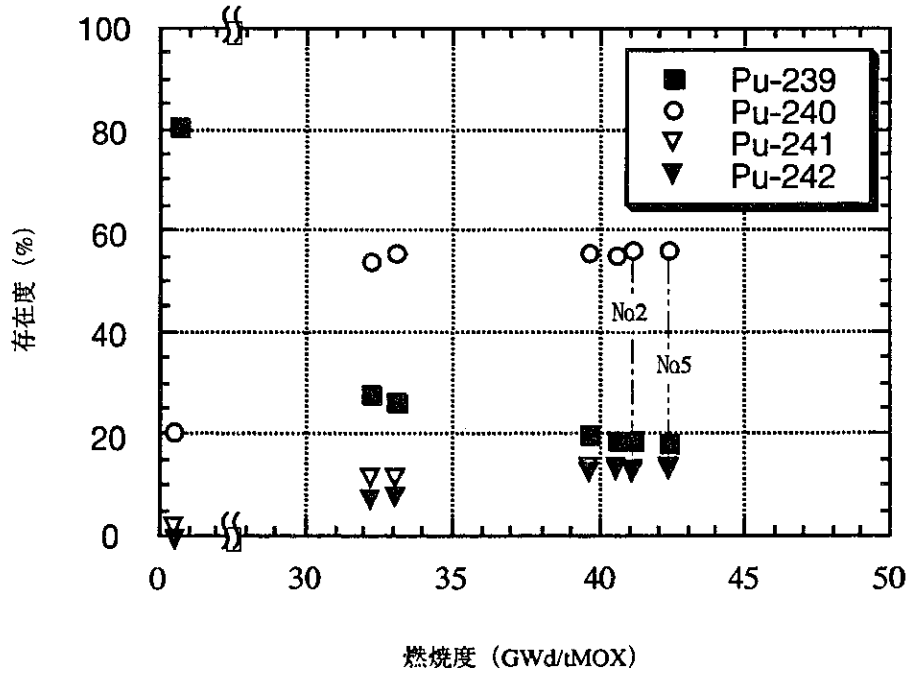


図5.12.18　IFA-514-1, 2, 5の燃焼に伴うPu同位体組成の変化

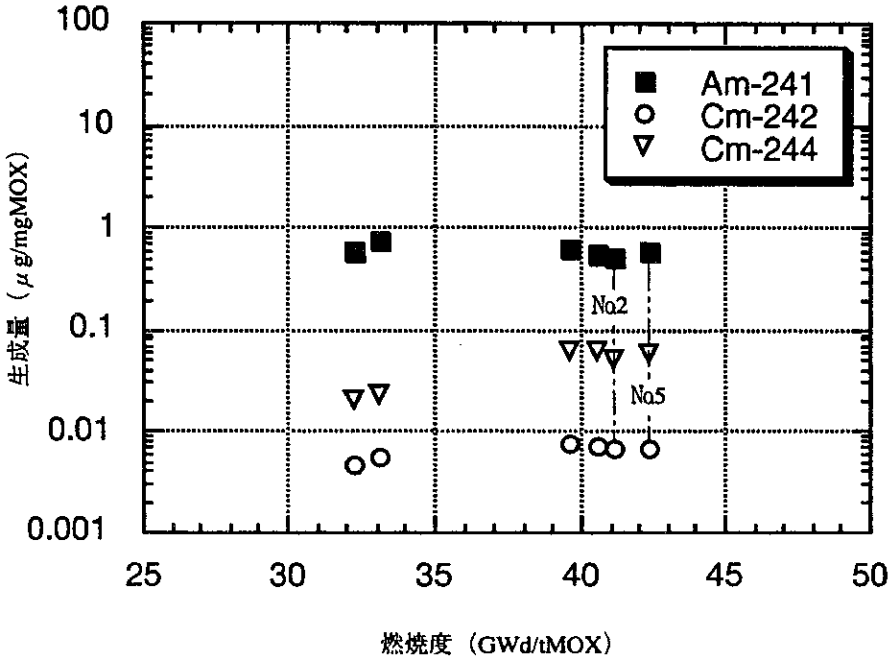


図5.12.19　IFA-514-1, 2, 5の燃焼に伴ううMA量の変化

5.13 被覆管内面観察

4つのサンプルを切り出して被覆管内面観察を行った。

試験方法

サンプルの切断位置を表5.13.1に示した。軸方向位置はロッドの下端プラグのVノッチから計測したものである。試料は所定の軸方向軸位置で低速ダイヤモンドカッターを用いて切断し、同様にして縦方向にスライスした。燃料ロッド片は軸方向から見て0/180度で分けてその後燃料を取り除いた。

その後、2分割した被覆管の燃料側をペリスコープにより外観観察と写真撮影を行った。

残った燃料を被覆管表面より取り除くため、2分割した被覆管を室温で20時間硝酸処理している。

2回目の外観観察を行い、2分割した被覆管（硝酸処理済み）の燃料側の写真撮影を行った。試験は、2分割した被覆管サンプルの両方について行った。

硝酸処理後のサンプルについてSEM観察を行った。

表5.13.1 被覆管内面の外観観察とSEM観察サンプル

ロッドNo.	軸方向位置(mm)
IFA-565-3	690-718
IFA-565-3	980-1000
IFA-565-6	690-718
IFA-565-6	980-1000

試験結果

サンプル分割後の燃料は簡単に取り除くことができた。燃料と被覆管の間には強い結合はみられなかった。図5.13.1を見ると、IFA-565-3ではどの観察位置においても付着物がなく、きれいに燃料が取り除かれている。また、図5.13.2を見るとIFA-565-6では690-718mmの領域に付着物らしき模様がある（硝酸処理の後、この模様は落ちているので被覆管の酸化等の模様ではない）。980-1000mmの領域においては写真からは付着物があるかどうかは判断がつきにくい。一方、IFA-514のサンプルではペレットの除去にドリルを用いており、比較的強いボンディングがあったと報告されている。

外観観察

外観観察の結果を図5.13.1～2に示した。左側が脱燃料したもので、右側が硝酸処理したものである。

脱燃料したサンプルについては燃料とペレット/ペレットの境界のみが見られた。硝酸処理後の被覆管内面にはペレット/ペレットの境界の傷跡が残っていた。クラックのような、その他特殊な様相は見られなかった。

IFA-565-3の表面観察（図5.13.1）では690-718mmでは比較的にはっきりとペレットの境界が見える。これは硝酸処理前、後ともである。これに対して980-1000mmではペレットの境界が分かりにくくなっている。ただし、どの観察位置においても付着物のようなものは見あたらない。

IFA-565-6（図5.13.2）では硝酸処理前は690-718mm、980-1000mmともに境界線が見えない。硝酸処理後は境界線が見えてきている。

また、表面観察はIFA-514でも行っており、これでは若干の酸化物が見られている（高出力部側ほど酸化物が多く観察される）。これに対しIFA-565のサンプルではIFA-565-3、6ともに690-718mmの領域では極端に黒く酸化している所は観察されていない。980-1000mmの領域では写真が全体的に黒っぽくなっているため酸化物の判断はつきにくくなっている。

被覆管内面のSEM観察

被覆管内表面を硝酸処理後、SEM観察した。観察部分をマクロ写真に矢印で示した。SEM観察の目的は、高倍率（100倍と1000倍）で被覆管内表面の典型的な構造を得ることである。IFA-565-3のSEM観察の結果を図5.13.3～4に、IFA-565-6については図5.13.5～6に示した。

IFA-565-3の690-718mm（図5.13.3）部分は、延性組織を示している。

IFA-565-3の980-1000mm（図5.13.4）部分は、IFA-565-3の690-718mmの組織とは異なっており、690mmではしっかり見えていた粒界がはっきりしなくなってきている。

IFA-565-6の690-718mm（図5.13.5）部分ではペレットの境界を観察しており、ペレットとの接触面において組織が押しつぶされているのが分かる。また、組織は延性組織を示している。

IFA-565-6の980-1000mm（図5.13.6）部分ではIFA-565-3の980mm同様、690mmではしっ

かり見えていた粒界がはっ　　ている。

SEM観察はIFA-565以外で比較になるものはない。

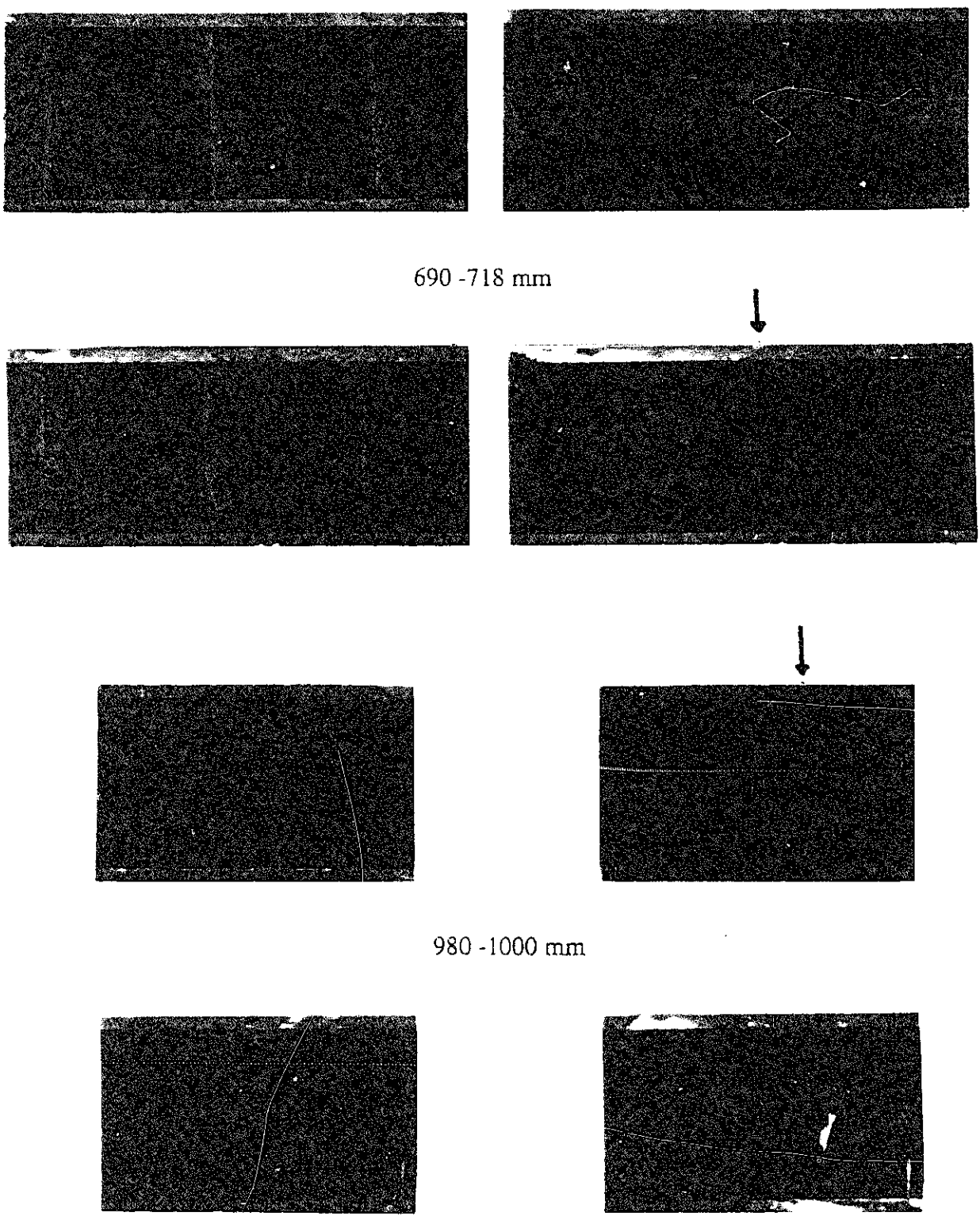
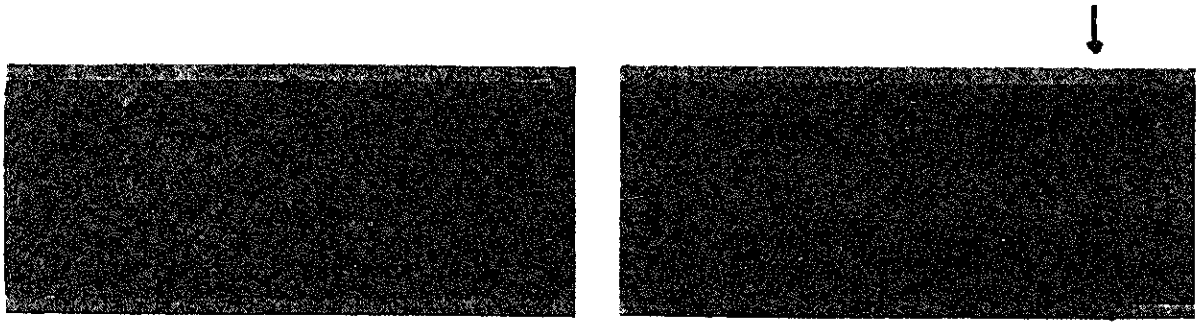
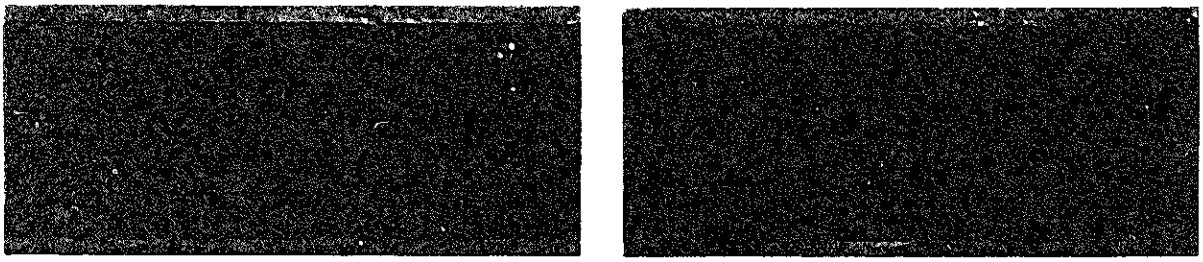
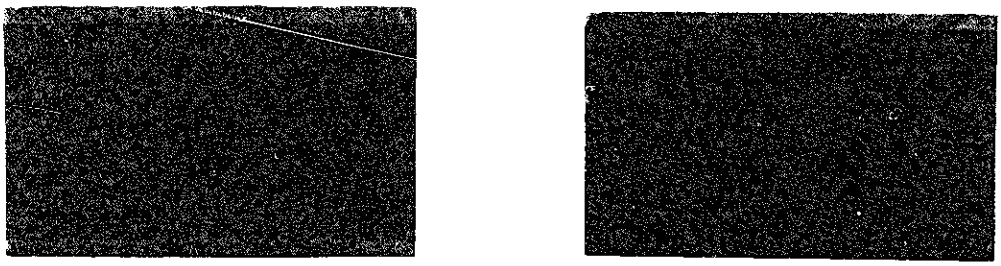


図5.13.1　IFA-565-3　被覆管内面の外観観察

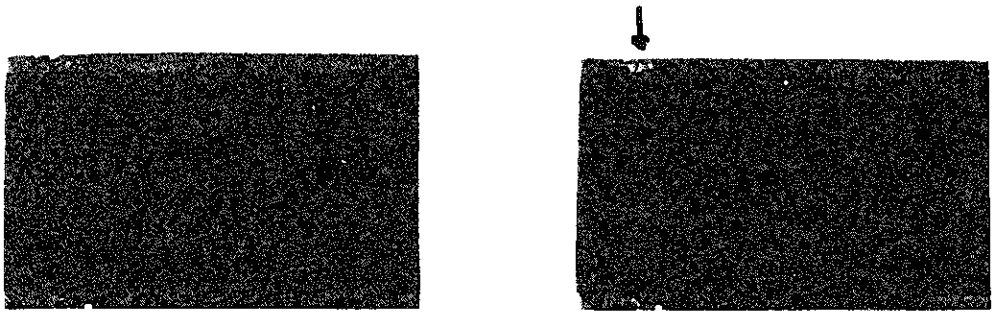


690 -718 mm





980 -1000 mm



Before and after acid treatment

図5.13.2　IFA-565-6　被覆管内面の外観観察

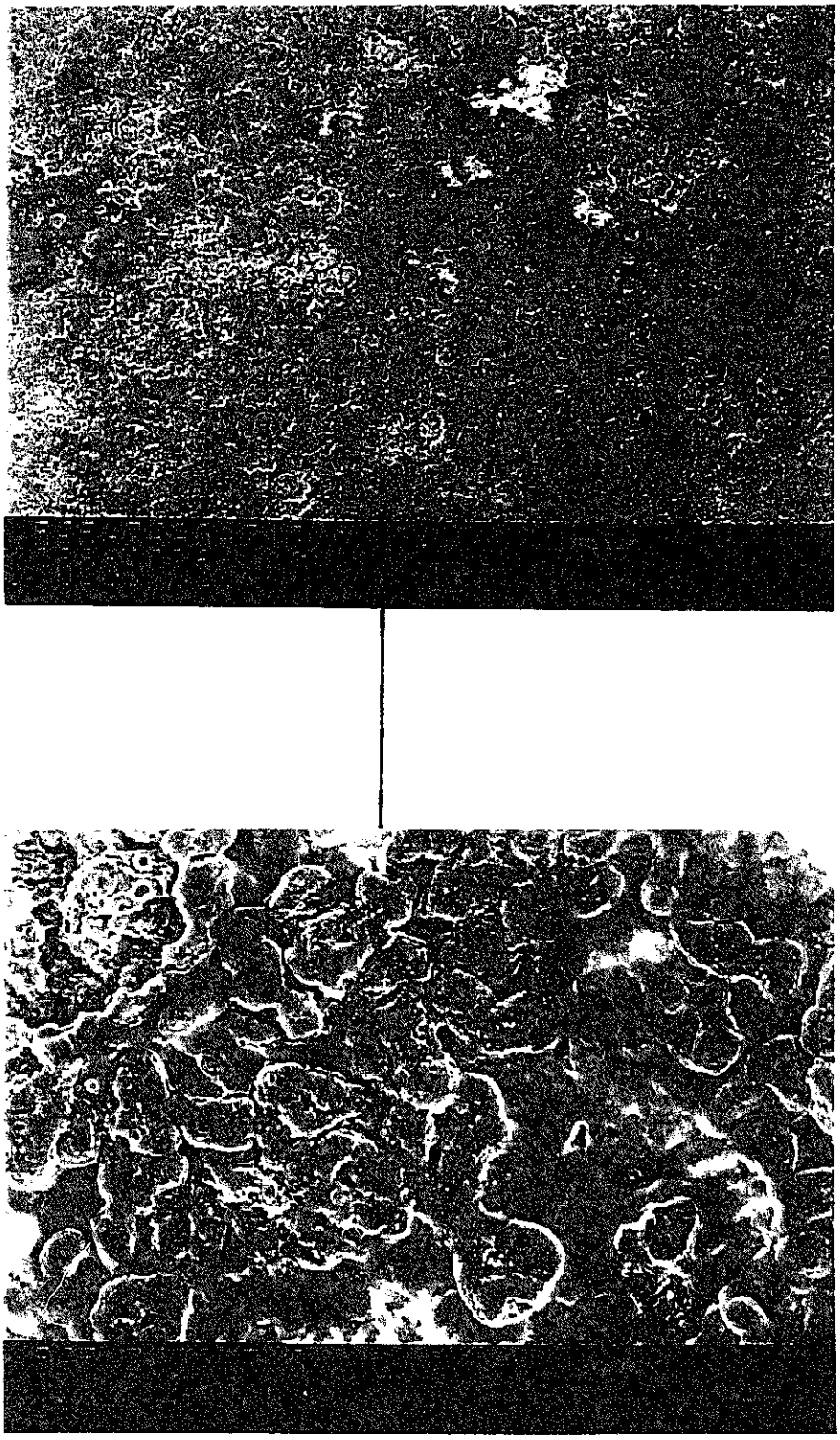


図5.13.3　IFA-565-3 690-718mm 被覆管内面のSEM観察（酸処理後）

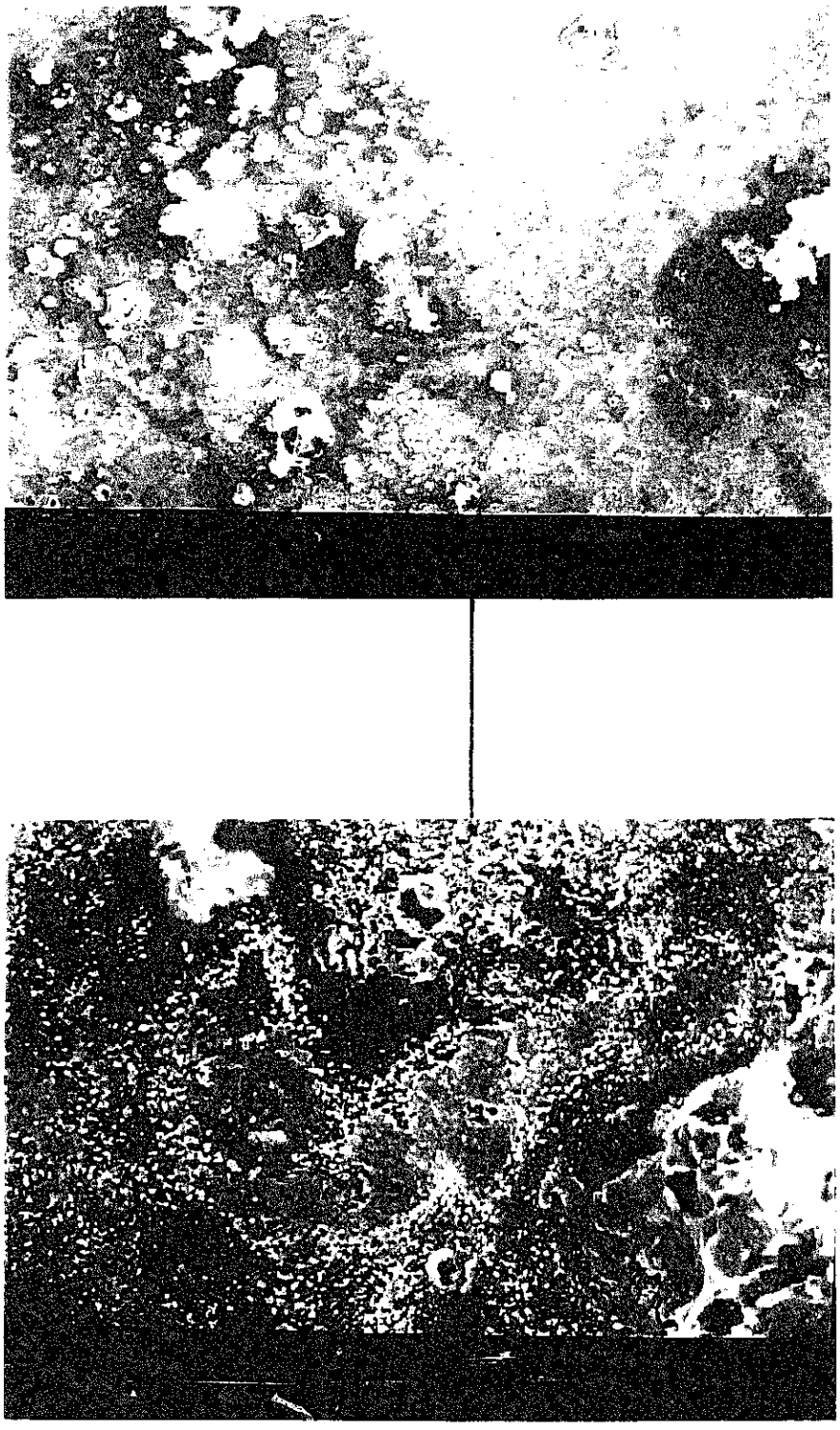


図5.13.4　IFA-565-3 980-1000mm 被覆管内面のSEM観察（酸処理後）

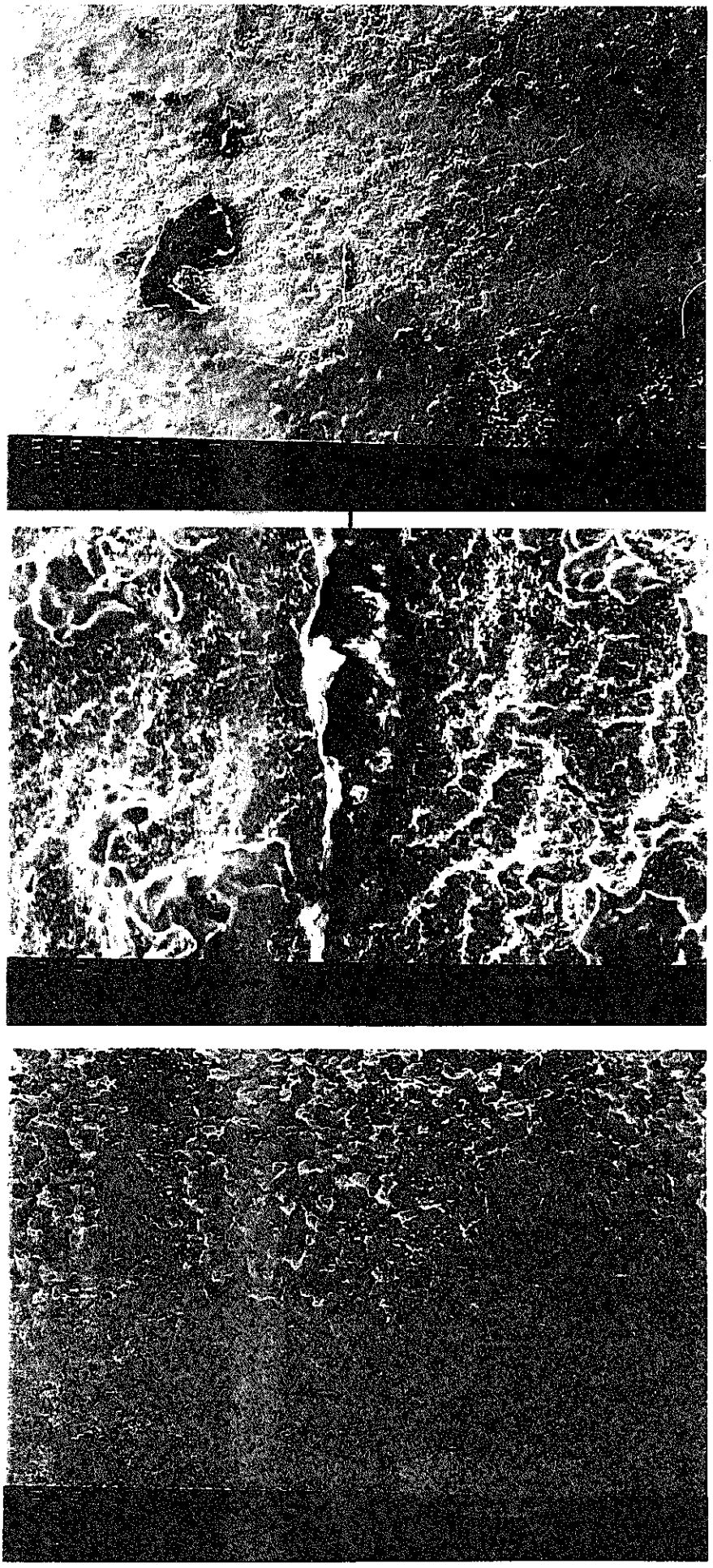


図5.13.5　IFA-565-6 690-718mm 被覆管内面のSEM観察（酸処理後）

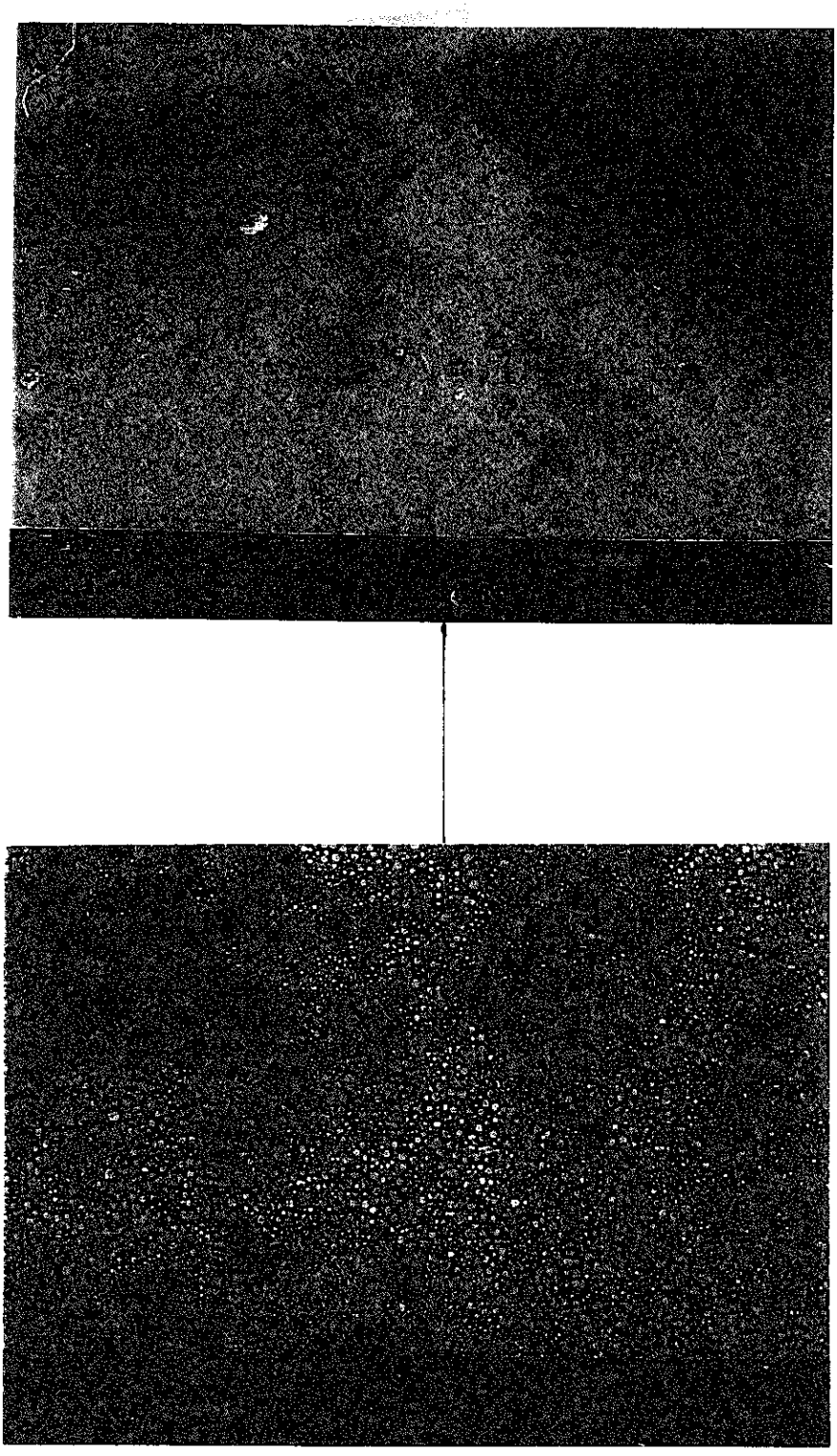


図5.13.6　IFA-565-6 980-1000mm 被覆管内面のSEM観察（酸処理後）

5.14 被覆管の水素分析

IFA-565-3, 6から8サンプルを水素分析した。

測定方法

IFA-565-3とIFA-565-6から2サンプルずつ計4サンプルを切り出した。サンプルはそれぞれのロッドの被覆管下部のVノッチから718～720mmと1008～1010mmの位置から切り出した。これらをさらに2の小さなサンプルにカットし、分析を行う。これらのサンプルの角度的な位置は任意とした。

分析はH-MAT2500装置によって行った。これは固体中の水素を正確にまた再現性良く決定するコンピュータ制御の分析装置である。測定には、原則的にキャリアーガスを用いて行った。キャリアーガスには、純度99.995%のアルゴンガスを用いた。水素含有量を決定するため試料をグラファイトのルツボに入れ、パルス炉でおよそ2100℃に加熱する。溶融した試料から放出された水素や一酸化炭素は、キャリアーガスによって運ばれる。キャリアーガスはダストトラップ及びオキシダント・モレキュラーシーブを通り、粗い粒子が除去され、水素と一酸化炭素の酸化生成物であるH_2OとCO_2が付着除去される。

H-MAT2500の熱伝導測定セルは水素検出器として用いられる。熱ブリッジ回路はリファレンスガスの熱伝導度に対するキャリアーガスの熱伝導度を測定する。試料からの水素の放出によるキャリアーガスの熱伝導度の変化はコンパレーターの熱伝導度の変化のシグナルとなって現れる。このシグナルの大きさは試料中の水素の量に比例する。

試験中にはスクリーン上で測定シグナルの変化をフォローすることができる。これは分析器が正常に動作していることをチェックするものである。試料中に含まれている水素は測定カーブの時間積分で与えられ、これはコンピュータで計算される。

測定結果

測定結果を表5.14.1に示す。

表5.14.1　IFA-565のリングサンプルの水素含有量

ロッドNo.	サンプルNo.	位置*(mm)	H_2含有量(ppm)	平均値(ppm)
IFA-565-3	1 2	718-720	128 168	148
IFA-565-3	3 4	1008-1010	130 134	132
IFA-565-6	5 6	718-720	108 168	138
IFA-565-6	7 8	1008-1010	119 131	125

＊：被覆管下部Vノッチからの位置

被覆管製造時の水素分析では上部で5ppm、中間部で7ppm、下部で9ppmとなっている。これに対し、照射後（IFA-565）は誤差を考慮するとIFA-565-3、6ともに位置によらずだいたい一定の量で水素含有量が上昇している。なお、IFA-514では水素分析は行われていない。

5.15 バースト試験

IFA-565-3, 6から2サンプルをバースト試験した。

試験方法

IFA-565-3, 6から各1サンプルをバースト試験に供した。カッティング位置は、それぞれ被覆管下端Vノッチから760-910mmの位置とし、試験温度は340℃とした。

サンプルをカッティングし、燃料を取り除いた後、水圧バースト試験機で試験した。測定手順は以下の通り。

- チューブ部を充填体積を減少させるため、緩く入る金属棒（10mm外径、120mm長）を挿入する。
- チューブの両端を、金属シールリングを支持できるように、中央に穴の開いたきついプラグで塞ぐ
- チューブ部に金属シールリングとナット（Ermeto）を取り付ける。
- サンプル上端にバルブを取り付ける。
- 仮組立したサンプルをバースト冶具に取付け、セル外側のポンプからの加圧ラインに接続する。
- サンプル上端のバルブから溢れるまで水／油エマルジョンを満たす。
- バルブを閉じ、手動ポンプで200barまで加圧し、圧力チャネルを正確な圧力計の指示値に対して校正する。
- 圧力を約160barまで減少させ、加圧炉をサンプルに被せ、昇温する。
- 昇温中、圧力は、水の熱膨張と蒸気圧により上昇する。体積を増やすためのスクリューポンプを用いて、圧力を160-200barに保つ。
- 所定の温度に達した後、一定の速度で加圧を始める。

試験中、圧力とスクリューポンプのピストン排水量のシグナルを、時間（2チャンネルレコーダ）と相互（XYレコーダ）の関数として両方を記録する。

得られたカーブから最大内圧破裂強さと破断応力を計算する。

変形特性が複雑であるため、圧力-ピストン移動量カーブから全伸び量及び0.2%耐力を計算することはできない。しかしながら、バーストの最大膨張部のサンプルをリング状に

切断して、周方向の全伸びを計算で求め、その後、倍率（6，7x）の写真上で伸びを測定する。

試験結果

試験結果を表5.15.1に示す。

応力を計算するのに、サンプル直径を11.68mmとした。

バースト試験カーブとバースト後のサンプル表面状態を図5.15.1～2に示す。

表5.15.1　IFA-565のバースト試験結果

ロッドNo.	位置 (mm)	試験温度 (℃)	σ max (MPa)	σ frac (MPa)	TCE (%)
IFA-565-3	760-910	340	651	-	3.8
IFA-565-6	760-910	340	683	667	13.5

σ max=最大内圧破裂強さ	σ ＝PDm/2t＝P×1.168／2×0.088
σ frac=破断応力	
TCE＝全周方向伸び	

結果の考察

被覆管製造時と途中取り出しのIFA-514での結果と比較する。被覆管製造時のバースト試験は常温で２回行っており、σ max（最大内圧破裂強さ）は791、800MPa、全周方向伸びは30.9、33.4%である。IFA-514のバースト試験結果を表5.15.2に示す。

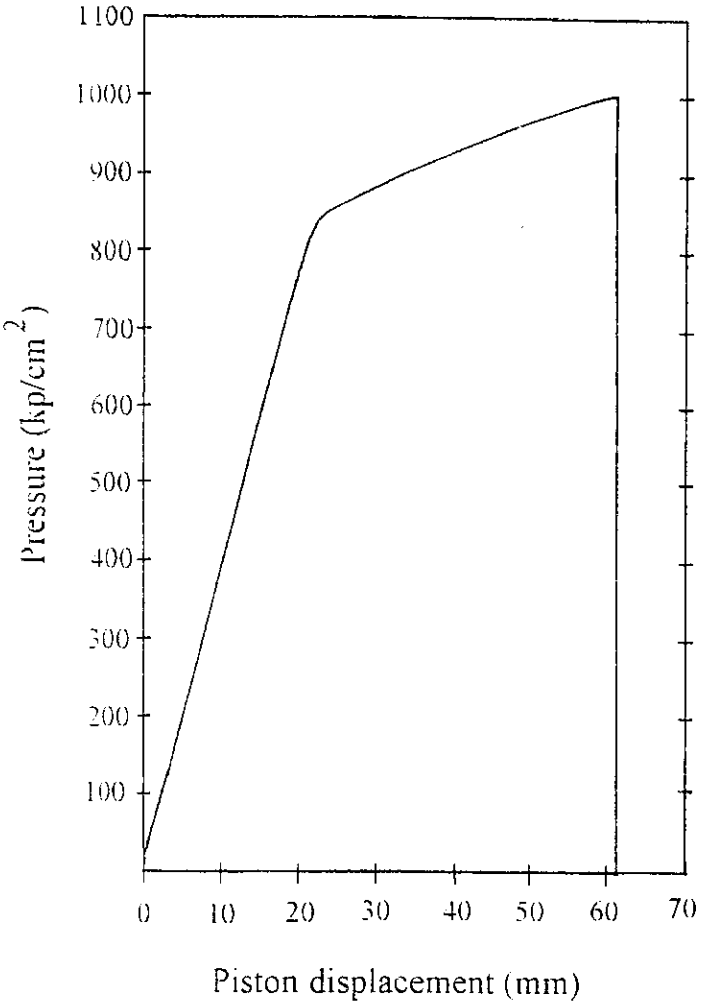
IFA-565-3，6で、バースト後のサンプル表面状態を比較すると、IFA-565-3の方は被覆管の形が変形しないまま破裂しているのに対し、IFA-565-6では一旦被覆管が膨れてから破裂している。またバースト試験カーブを見てもIFA-565-3は脆性、IFA-565-6は延性を示している。これは表5.15.1の全周方向伸びのデータからも分かる。

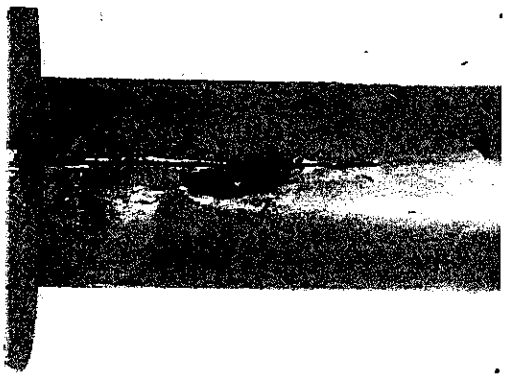
表5.15.2　IFA-514のバースト試験結果（IFA-514-2，5とも中実ペレット）

ロッドNo	ｻﾝﾌﾟﾙNo	位置 (mm)	試験温度 (℃)	σ max (MPa)	σ frac (MPa)	TCE (%)	備考
IFA-514-2	BT-2	480-665	350	667	657	2.01	高照射量位置
IFA-514-5	BT-4	285-470	350	567	563	12.36	中照射量位置
IFA-514-5	BT-7	1245-1430	350	298	298	-	低照射量位置

IFA-514ではBT-2、BT-4が一旦膨れて破裂している。BT-7は、小さなピンホールが開いており、破裂しなかったため、考察対象からは外した。BT-2、BT-4はそれぞれ480-665、285-470mmのところであり、高照射、中照射領域である。

またσ max（最大内圧破裂強さ）を比較すると、IFA-565についてはIFA-565-6の方が若干強いということが分かる。IFA-514については最大内圧破裂強さはBT-2→BT-4の順（照射量が高い順）である。





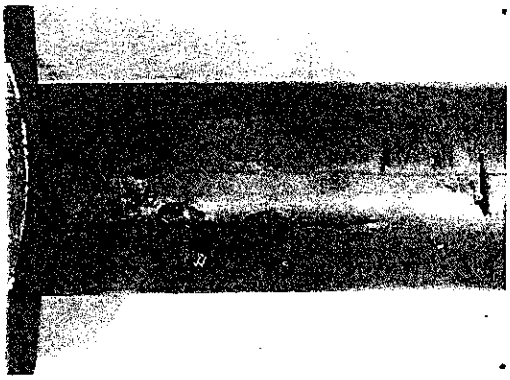




図5.15.1　IFA-565-3 バースト試験結果（760-910mm）

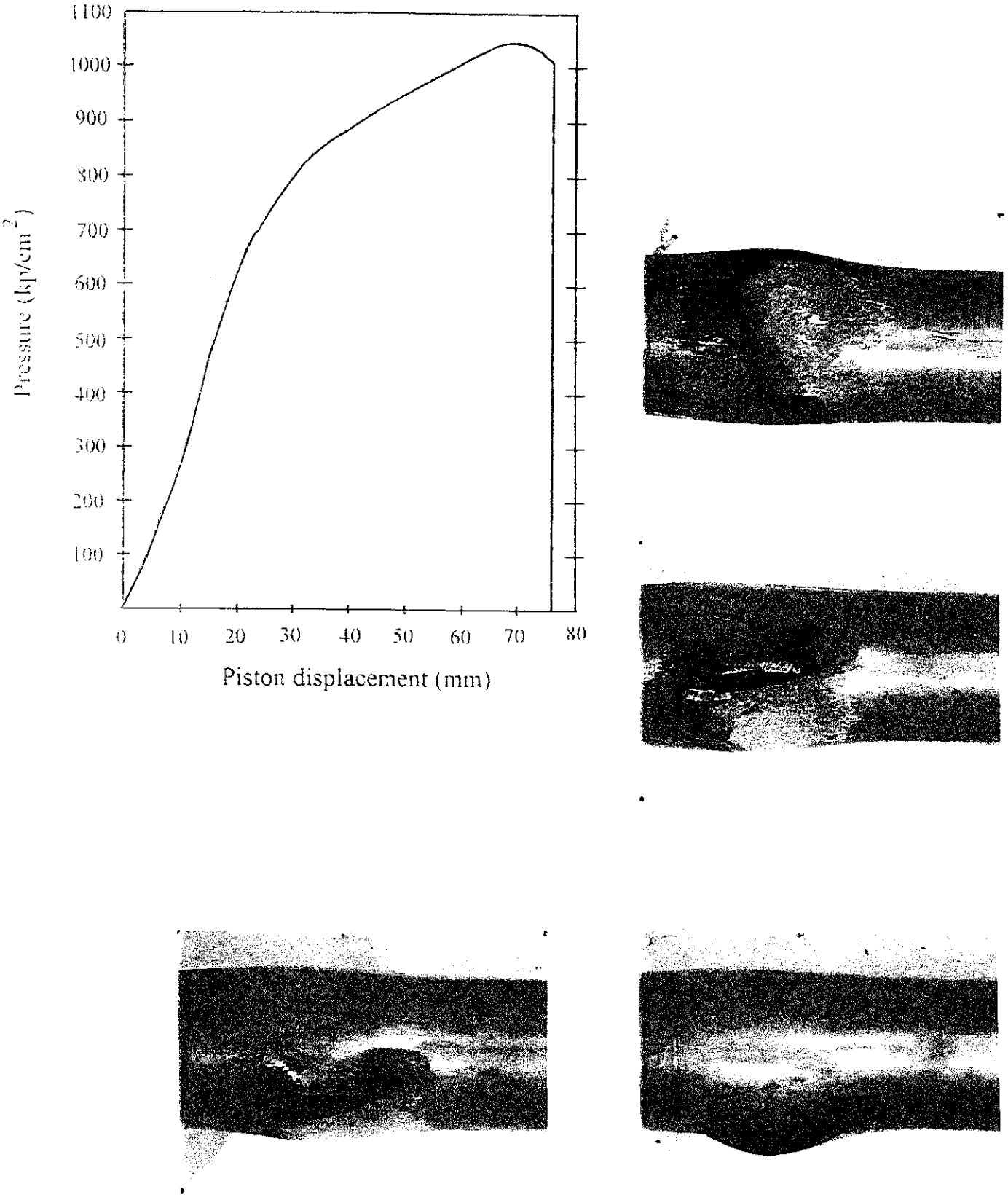


図5.15.2　IFA-565-6 バースト試験結果（760-910mm）

6. 結果の検討

6.1 燃料挙動解析コードによる解析

ハルデン炉において、燃料棒平均燃焼度約50.0GWd/t MOXの高燃焼度まで燃焼が進んだIFA-565燃料に関し、その照射挙動をMOX燃料照射挙動解析コード「FEMAXI-ATR」により解析した。この解析に際し、「FEMAXI-ATR」への入力データとして、燃料仕様には、製造時に採取した各燃料棒の製造時データ（平均値）を、また、照射データには、ハルデン炉において採取した線出力履歴を使用した。

図6.1.1～3に、MOX燃料照射挙動解析コード「FEMAXI-ATR」における解析に用いた燃料棒平均燃焼度履歴（実際に燃料棒が経験した線出力履歴を基に設定）を示す。また、表6.1.1にMOX燃料照射挙動解析コード「FEMAXI-ATR」における解析に用いた燃料仕様等の主な入力データを示す。

表6.1.1　FEMAXI-ATRへの主な燃料仕様入力値

	IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
ペレット外径（mm）	10.566	10.549	←
中空径（mm）	—	3.5	←
被覆管外径（mm）	12.526	12.534	12.531
被覆管内径（mm）	10.798	10.792	10.795
スタック長（mm）	1378.75	1377.95	1378.05
ﾍﾟﾚｯﾄ-被覆管ｷﾞｬｯﾌﾟ（μm）	116	122	123

以下に、MOX燃料照射挙動解析コード「FEMAXI-ATR」により、本照射試験燃料棒の照射挙動に関し解析した結果を述べる。なお、平均的な燃料棒の照射挙動を見る観点から、今回使用したMOX燃料照射挙動解析コード「FEMAXI-ATR」の解析モデルは、ベストフィットモデルである。図6.1.4～5に代表例として、燃料中心温度及び燃料棒内圧のC/E図を示したが、ベストフィットモデルは、解析値がこれまで入手された実測値の平均的な値となるようにモデル化されたものである。

6.1.1 燃料中心温度及び被覆管温度解析結果

図6.1.1.1～3に、最大の燃料中心温度を経験した位置における、各燃料棒毎の燃料中心温度の解析結果を示す。燃料中心温度は、IFA-565-3, 4で寿命中期に高い線出力を経験した時期（燃料棒平均燃焼度15,000MWd/t付近）で最も高くなっており、それぞれ約2,100℃及び約1,450℃、また、IFA-565-6は寿命初期に高い線出力を経験した時期（燃料棒平均燃焼度5,000MWd/t付近）で最も高くなっており、約1,480℃であるとの解析結果を得た。

図6.1.1.4～6に最大の被覆管内面温度を経験した位置における、各燃料棒毎の被覆管内面温度の解析結果を、また、図6.1.1.7～9にその位置における被覆管外面温度の解析結果を示す。被覆管外面温度に関しては、各燃料棒とも寿命を通じほぼ一定であり冷却材温度とほぼ同様の約260℃であるとの解析結果を得た。被覆管内面温度に関しても、各燃料棒間に有意差はなく約320℃であるとの解析結果を得た。

6.1.2 燃料棒内圧及びFPガス放出率解析結果

図6.1.2.1～3に、照射中における燃料棒内圧の解析結果を示す。図に示したとおり、燃料棒内圧は照射末期に最大となり、照射中でIFA-565-3が約155.0kg/cm²、IFA-565-4が約52.0kg/cm²、IFA-565-6が約63.0kg/cm²であるとの解析結果を得た。また、運転停止中の燃料棒内圧は、IFA-565-3が約53.0kg/cm²、IFA-565-4が約14.0kg/cm²、IFA-565-6が約16.0 kg/cm²であるとの解析結果を得た。

図6.1.2.4～6に、FPガス放出率の燃焼度依存性に関する解析結果を示す。FPガス放出率の最大値は、各燃料棒共に照射中期において生じているが、照射末期におけFPガス放出率は、IFA-565-3が約23.1%、IFA-565-4が約17.5%、IFA-565-6が約18.2%であるとの解析結果を得た。

6.1.3 被覆管応力及び外径変化率解析結果

図6.1.3.1～3に、照射中における被覆管応力の経時変化に関する解析結果を示す。被覆管応力は、各燃料棒共に照射末期で最大となっており、IFA-565-3が約2720kg/cm²、IFA-565-4が約998kg/cm²、IFA-565-6が約1120kg/cm²であるとの解析結果を得た。

図6.1.3.4～6に、照射中における被覆管外径変化率の経時変化に関する解析結果を示す。被覆管外径変化率は、被覆管応力と同様に各燃料棒共に照射末期で最大となっており、IFA-565-3が約0.46%、IFA-565-4が約0.26%、IFA-565-6が約0.28%であるとの解析結果を得た。また、照射末期における運転停止中の被覆管外径変化率は、IFA-565-3が約0.06%、IFA-565-4が約0%、IFA-565-6が約0.004%であるとの解析結果を得た。

6.1.4 ペレット-被覆管ギャップ解析結果

図6.1.4.1～3に、照射中におけるペレット-被覆管ギャップの変化に関する解析結果を示す。ペレット-被覆管ギャップが閉じた時期は、燃料棒毎に若干異なり、IFA-565-3が約1,000MWd/t、IFA-565-4が約10,000MWd/t、IFA-565-6が約5,000 MWd/t であるとの解析結果を得た。この時期と計装データから求められたPCMIを生じ始めた時期、IFA-565-3及びIFA-565-6でそれぞれ、3,000MWd/t及び5,500MWd/tを比較すると、解析結果より若干遅い時期に生じているが、未研磨中実ペレット燃料の後に未研磨中空ペレット燃料がPCMIを起こすと言う傾向は両者間で一致している。

また、図6.1.4.4～6照射末期における運転停止時のペレット-被覆管ギャップの平均は、IFA-565-3が約44μm、IFA-565-4が約46μm、IFA-565-6が約49μmであるとの解析結果を得た。

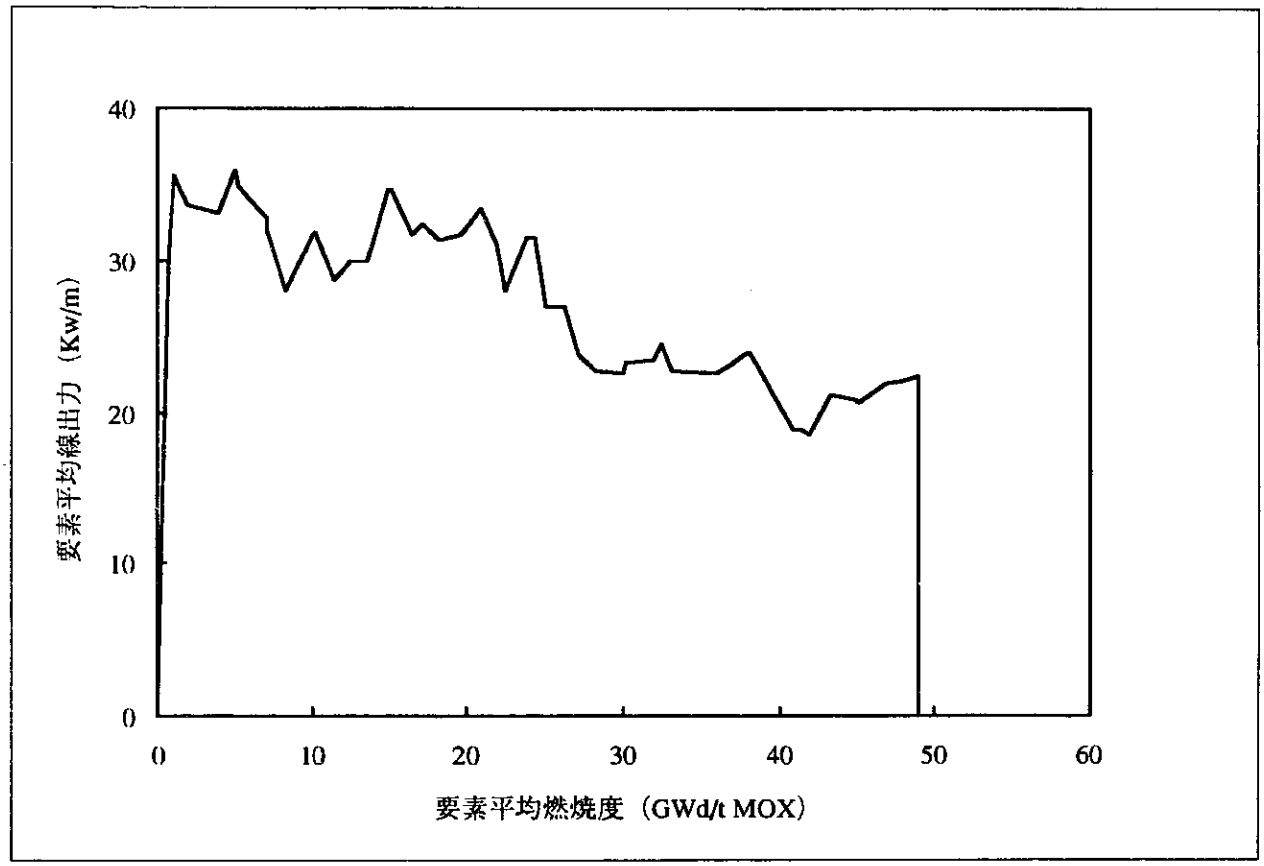


図6.1.1　解析に用いた燃料棒平均線出力履歴（IFA-565-3）

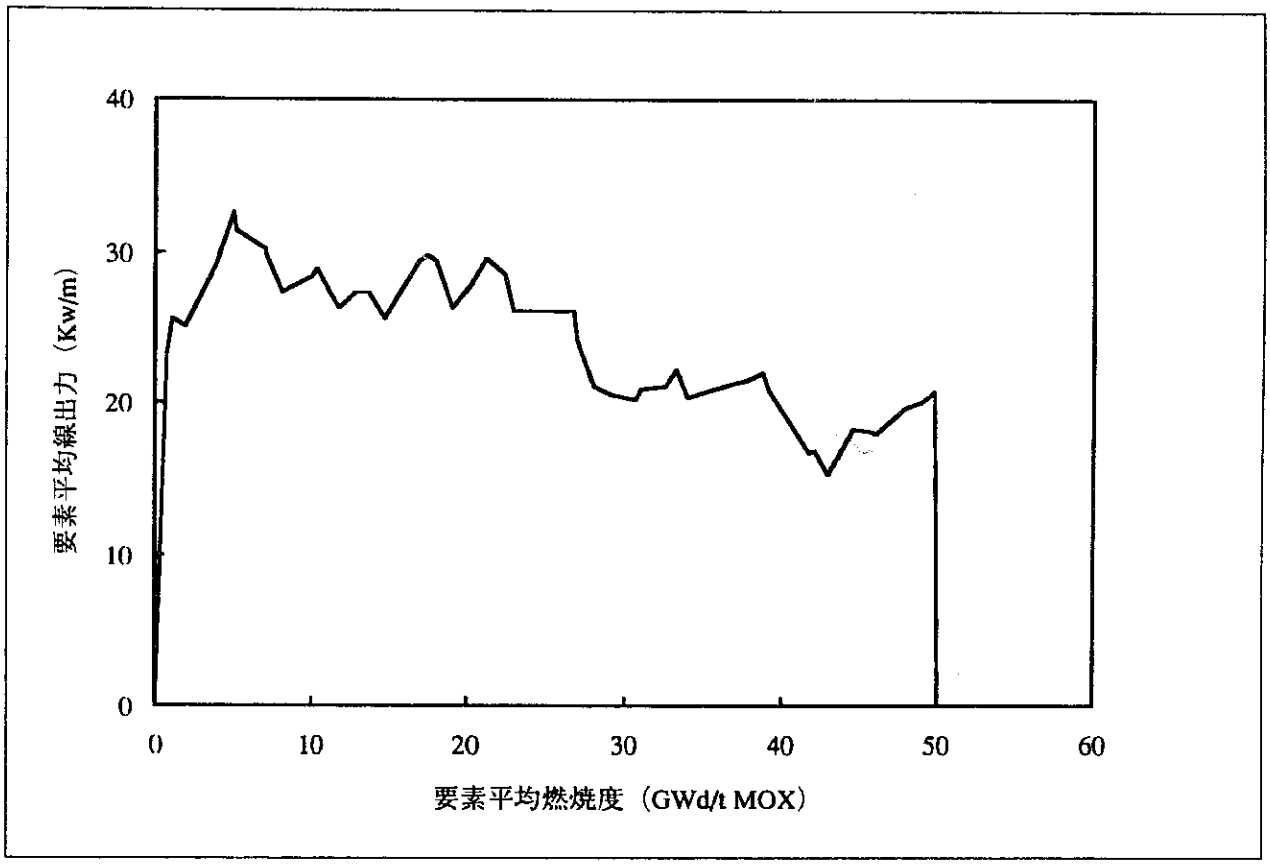


図6.1.2　解析に用いた燃料棒平均線出力履歴（IFA-565-4）

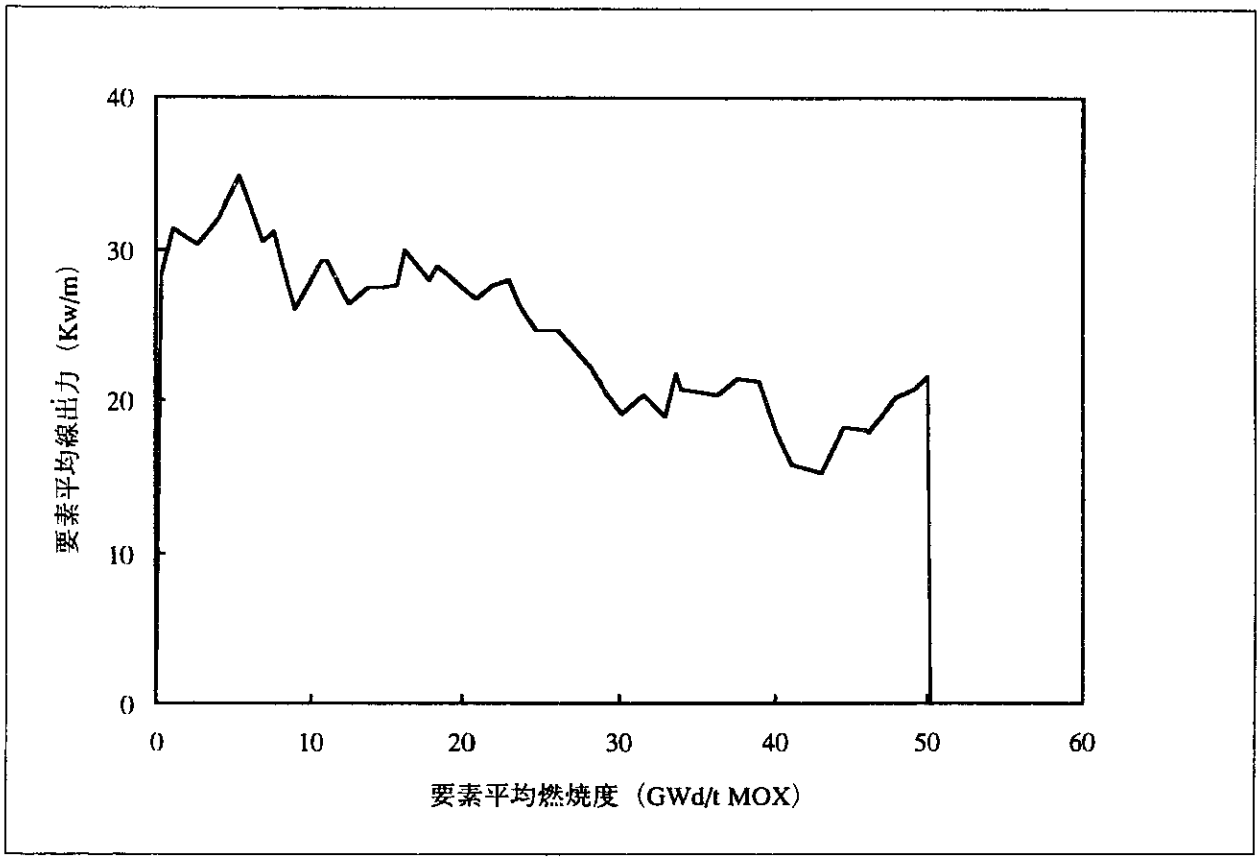


図6.1.3　解析に用いた燃料棒平均線出力履歴（IFA-565-6）

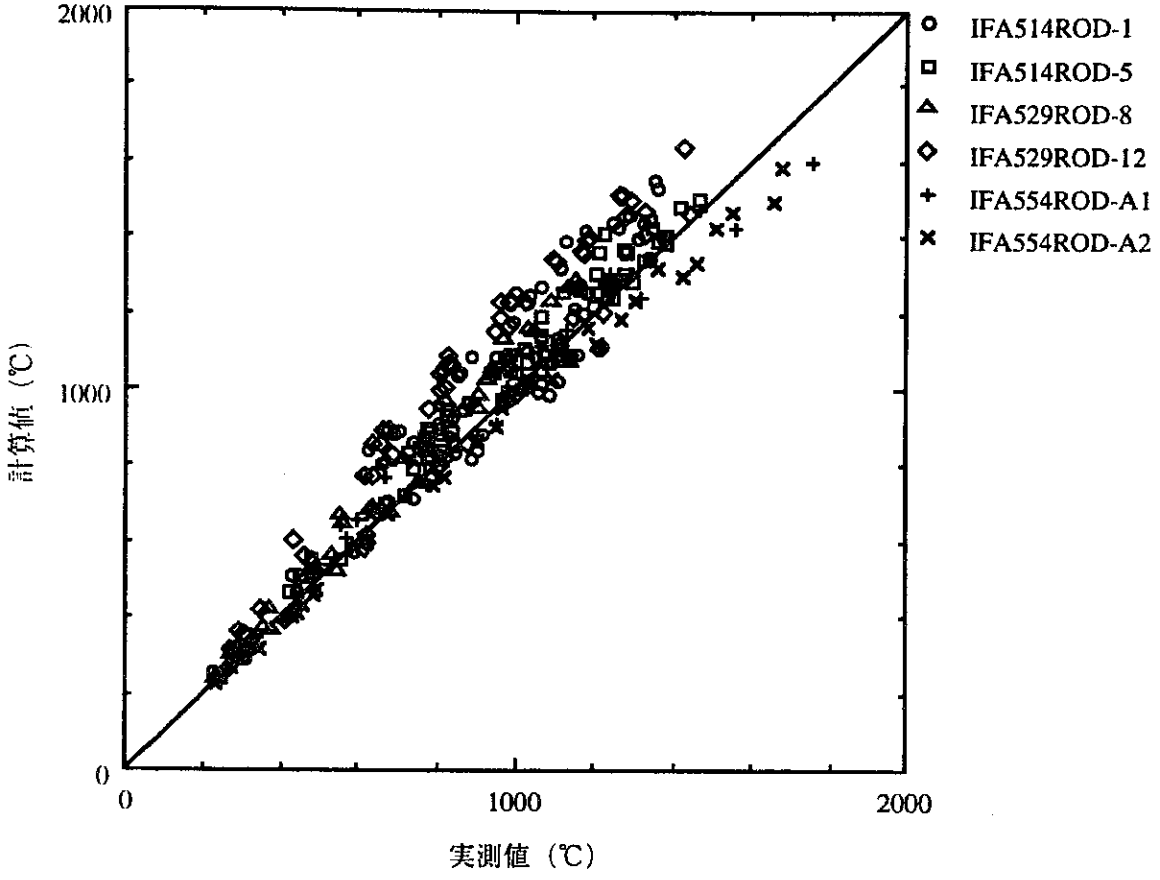


図6.1.4　燃料中心温度の実測値と計算値の比較

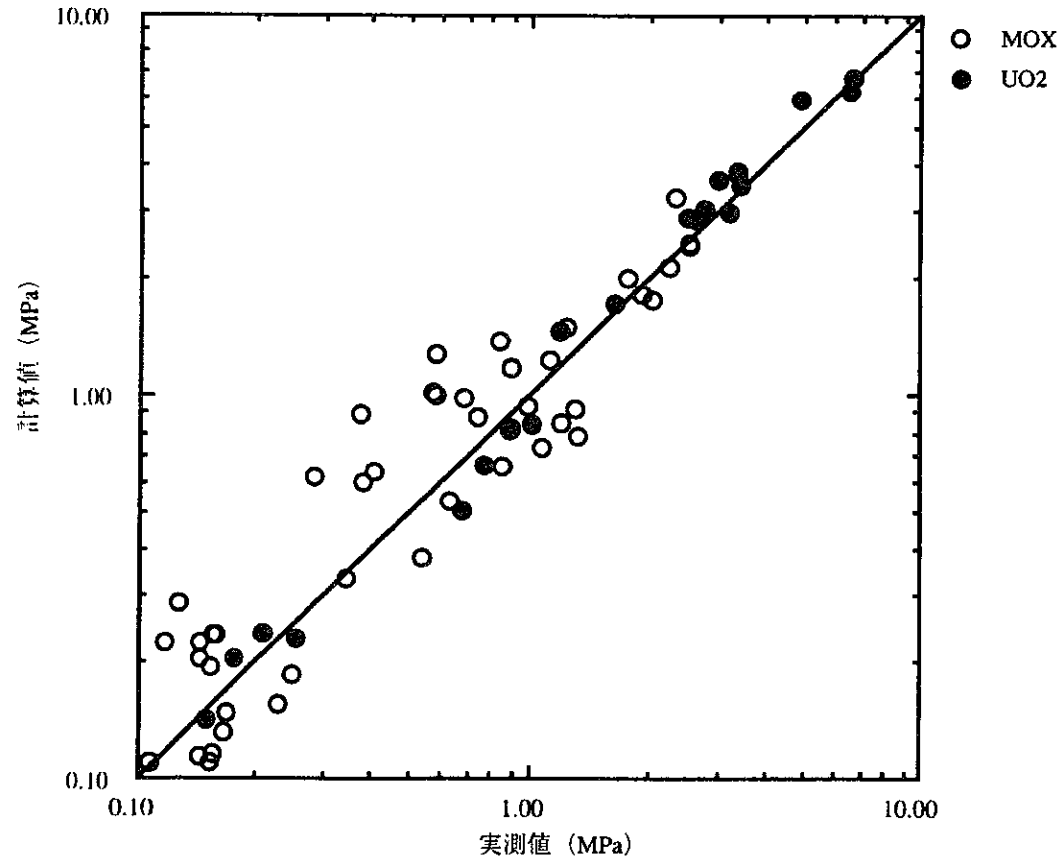


図6.1.5　燃料棒内圧の実測値と計算値の比較

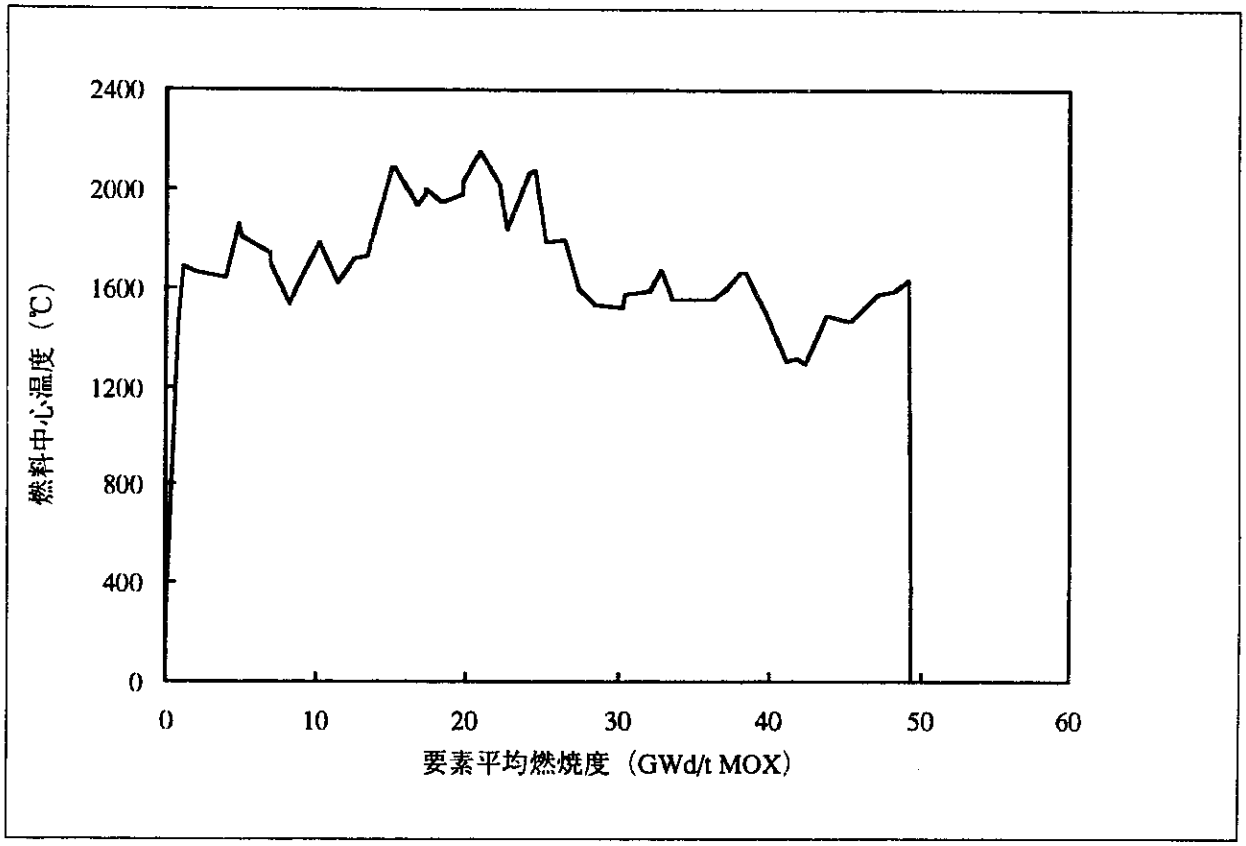


図6.1.1.1　IFA-565-3 燃料棒の燃料中心温度履歴（解析結果）

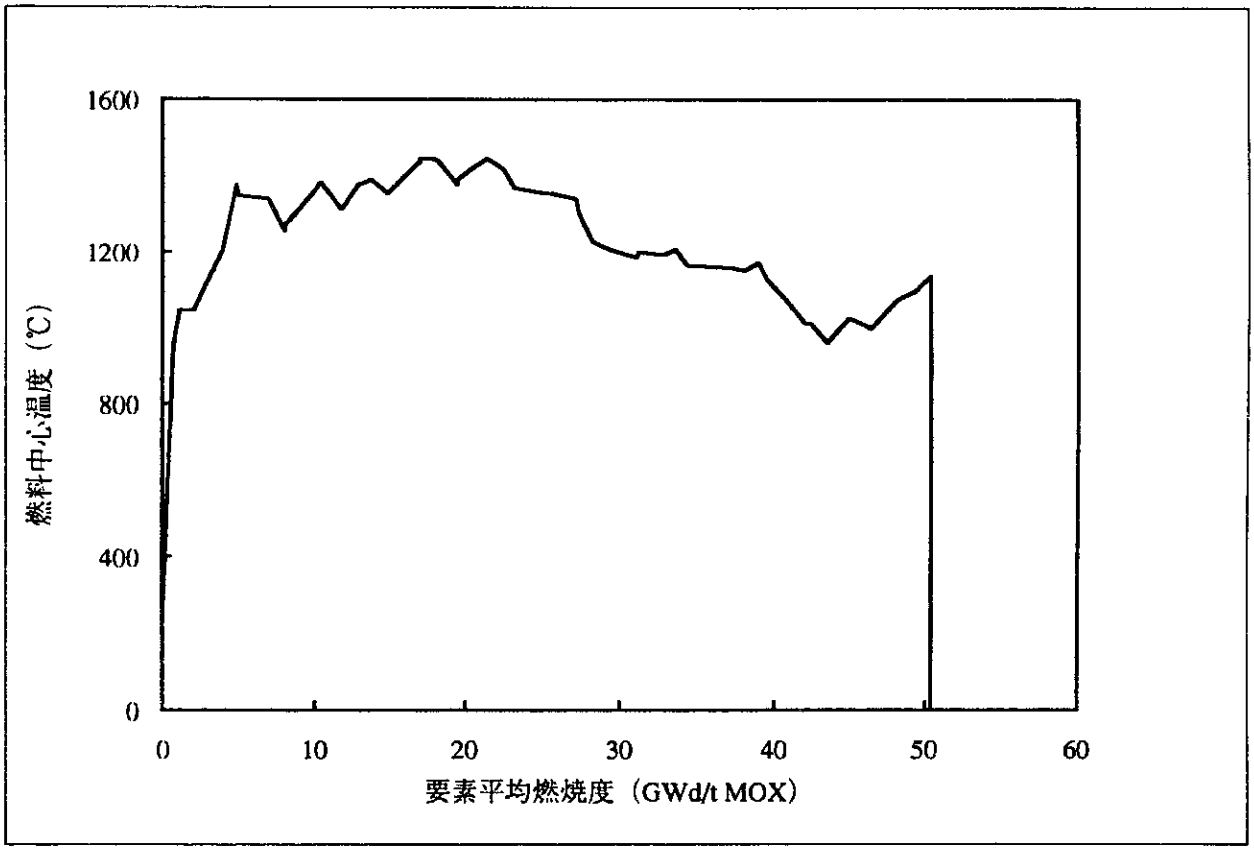


図6.1.1.2　IFA-565-4 燃料棒の燃料中心温度履歴（解析結果）

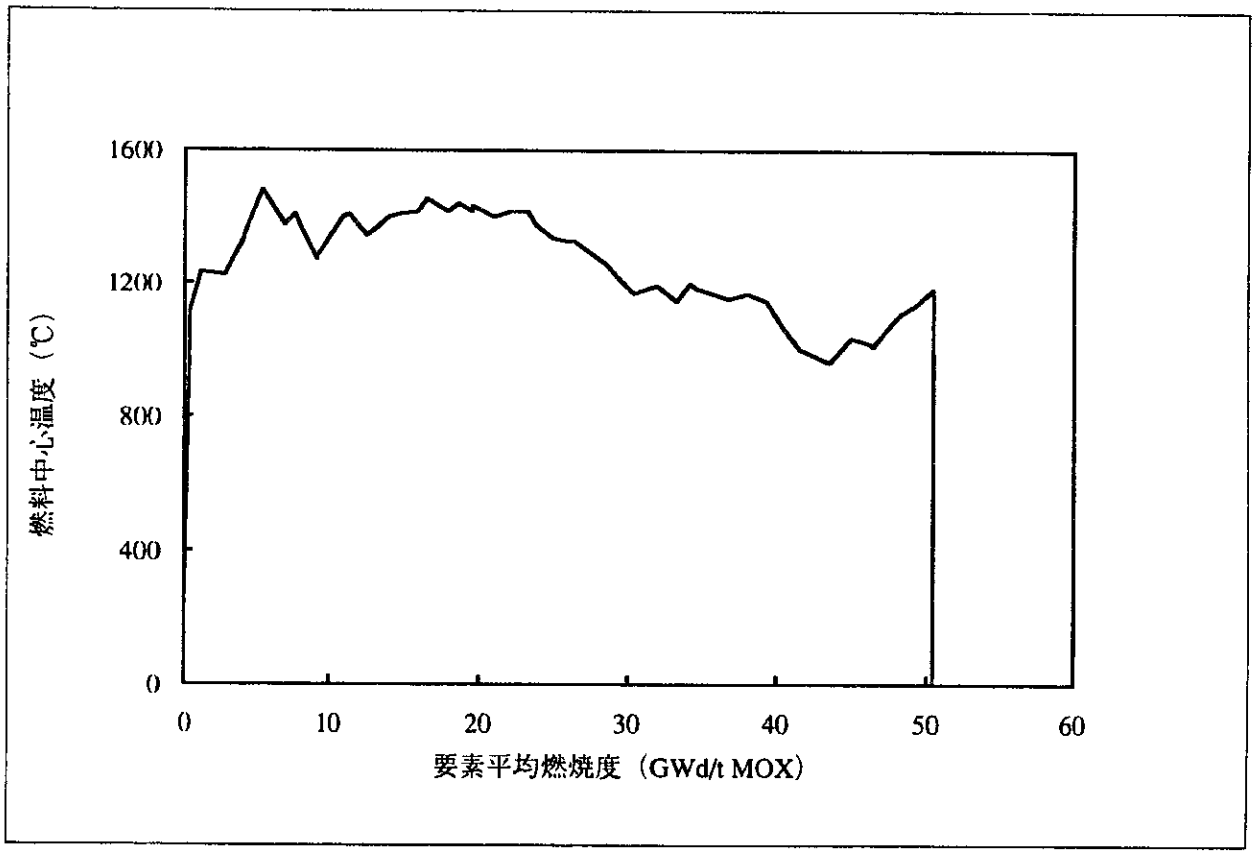


図6.1.1.3　IFA-565-5 燃料棒の燃料中心温度履歴（解析結果）

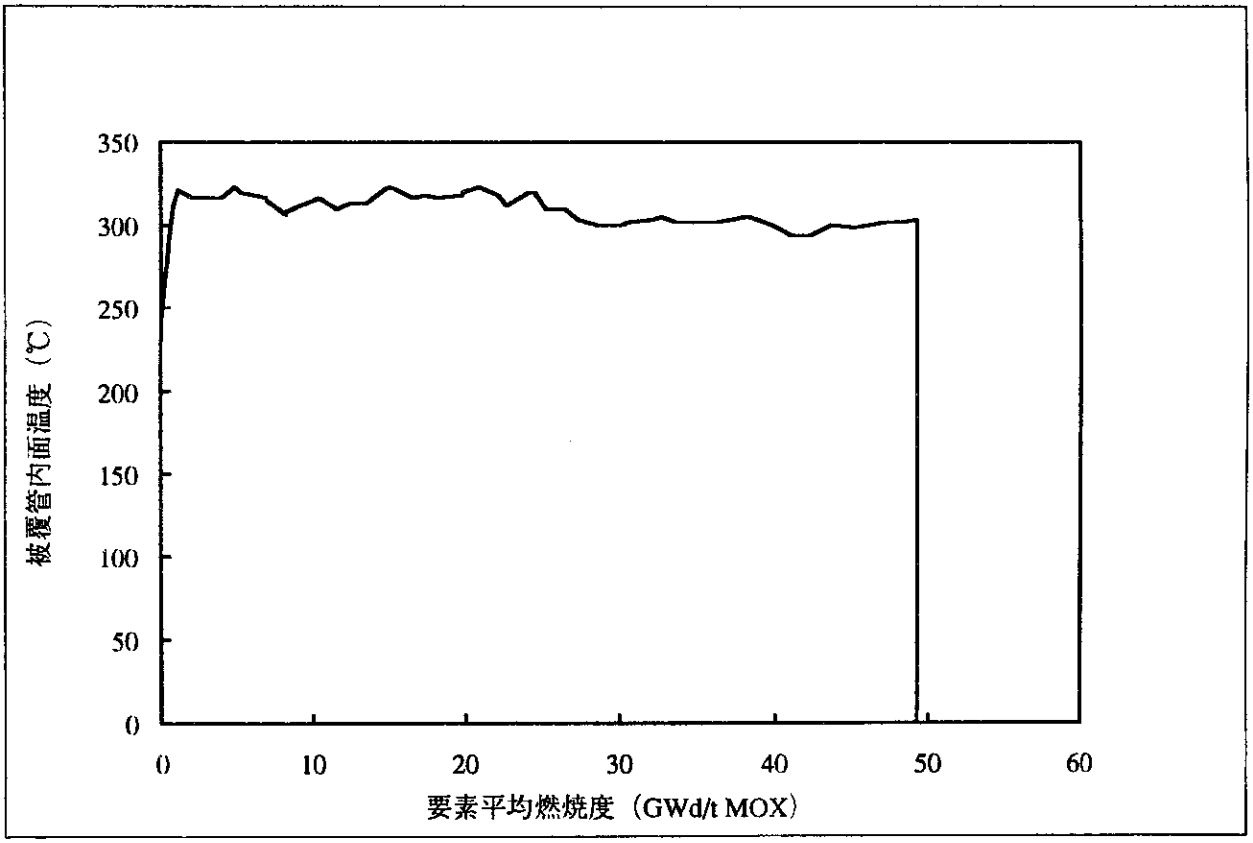


図6.1.1.4　IFA-565-3 燃料棒の被覆管内面温度履歴（解析結果）

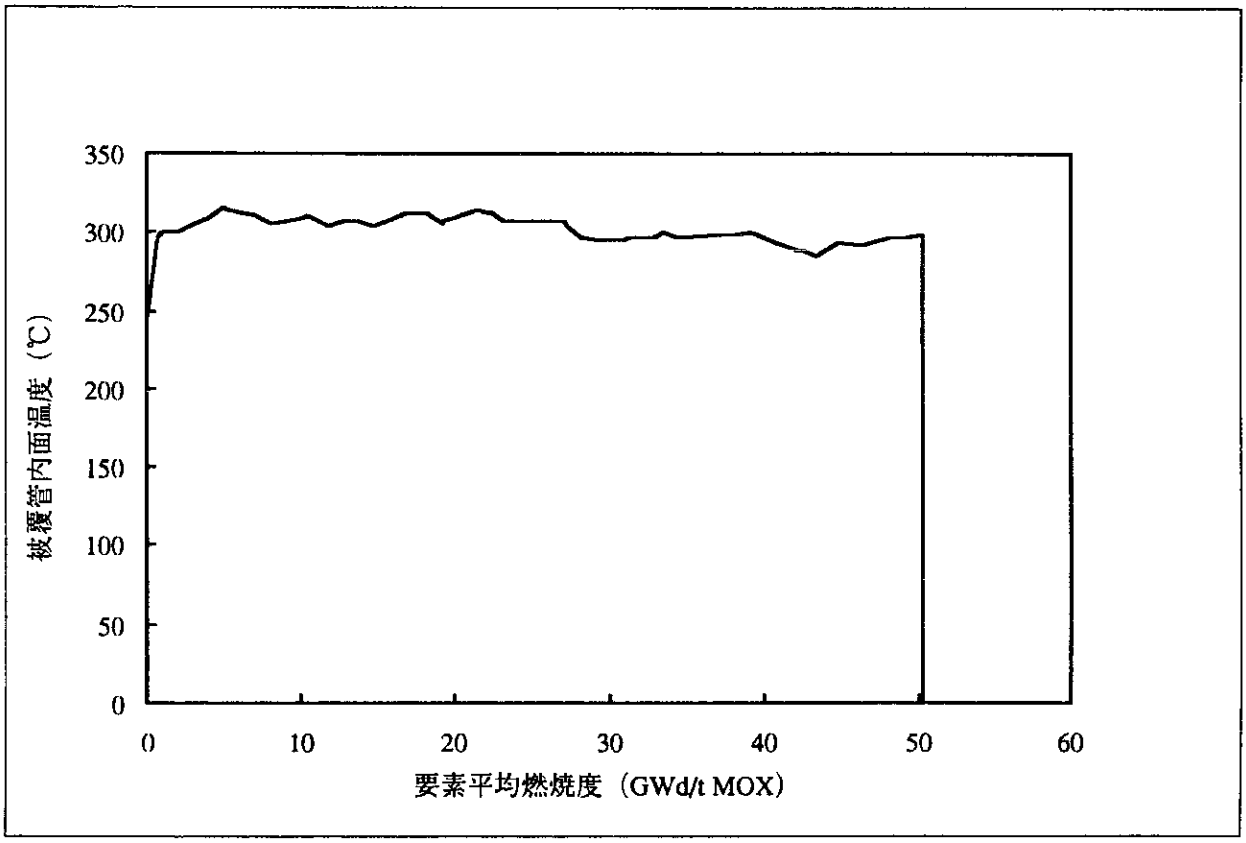


図6.1.1.5　IFA-565-4 燃料棒の被覆管内面温度履歴（解析結果）

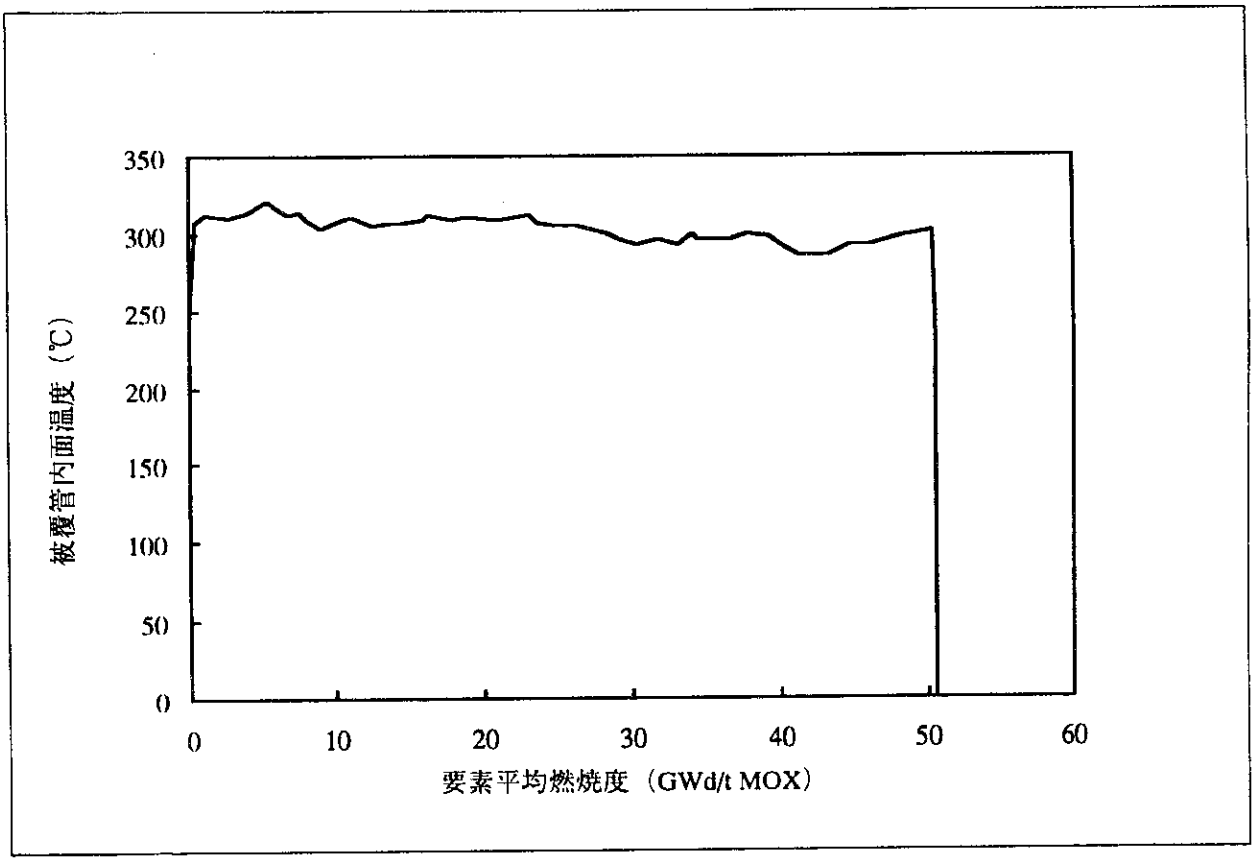


図6.1.1.6　IFA-565-6 燃料棒の被覆管内面温度履歴（解析結果）

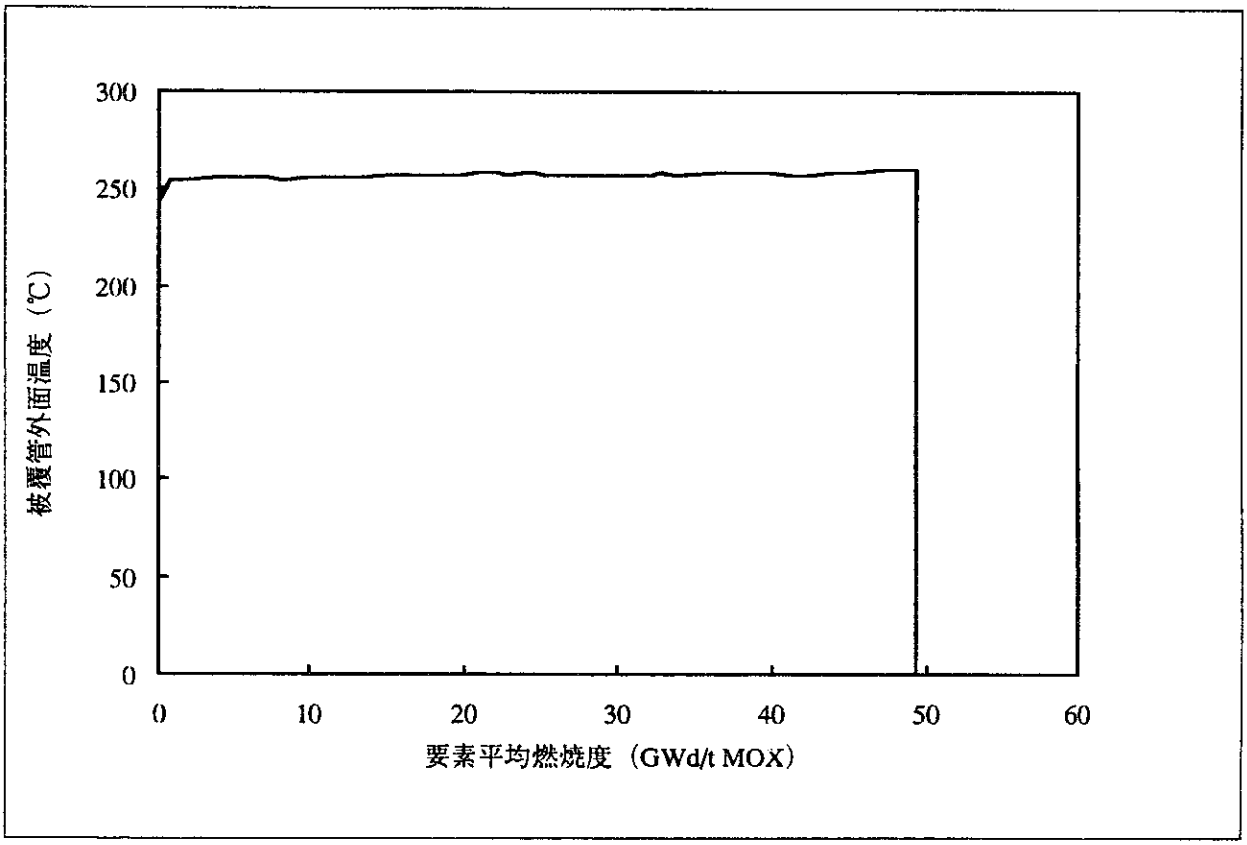


図6.1.1.7　IFA-565-3 燃料棒の被覆管外面温度履歴（解析結果）

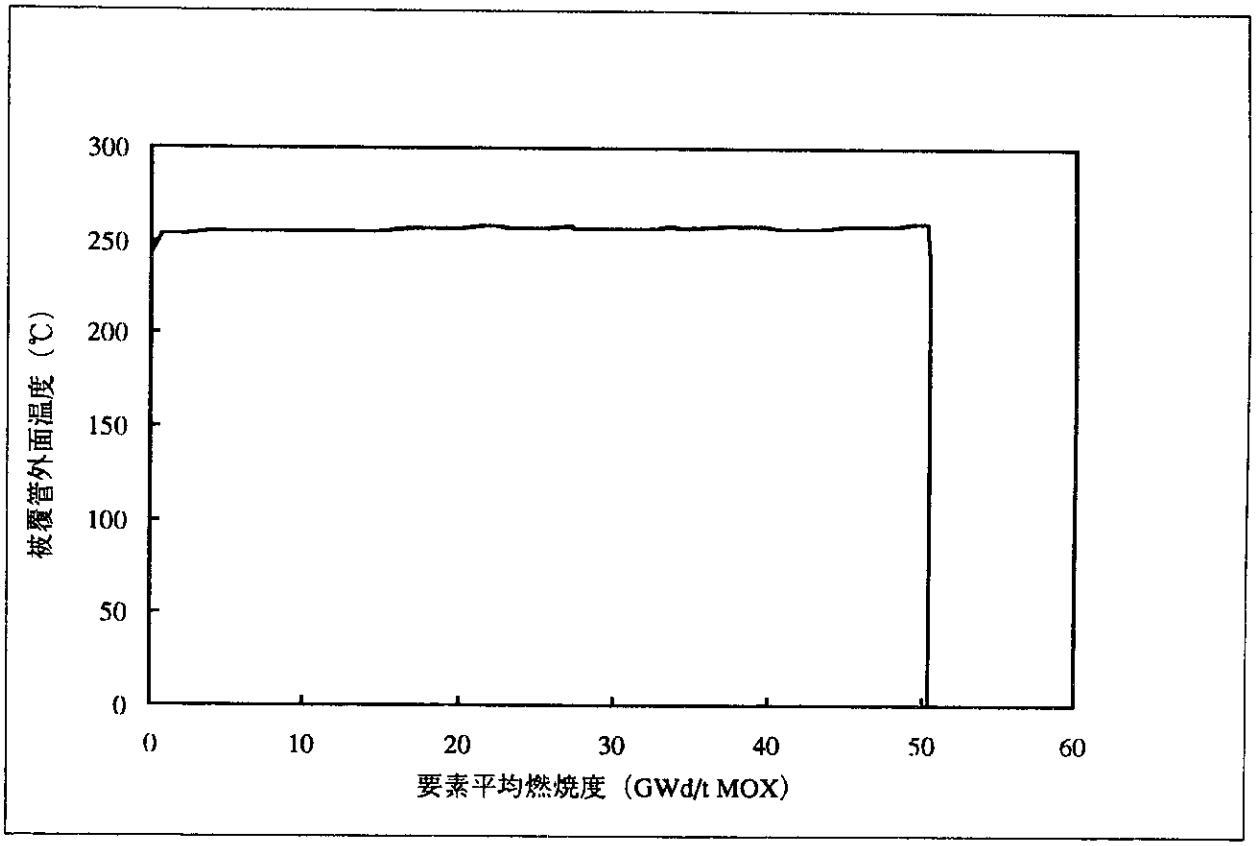


図6.1.1.8　IFA-565-4 燃料棒の被覆管外面温度履歴（解析結果）

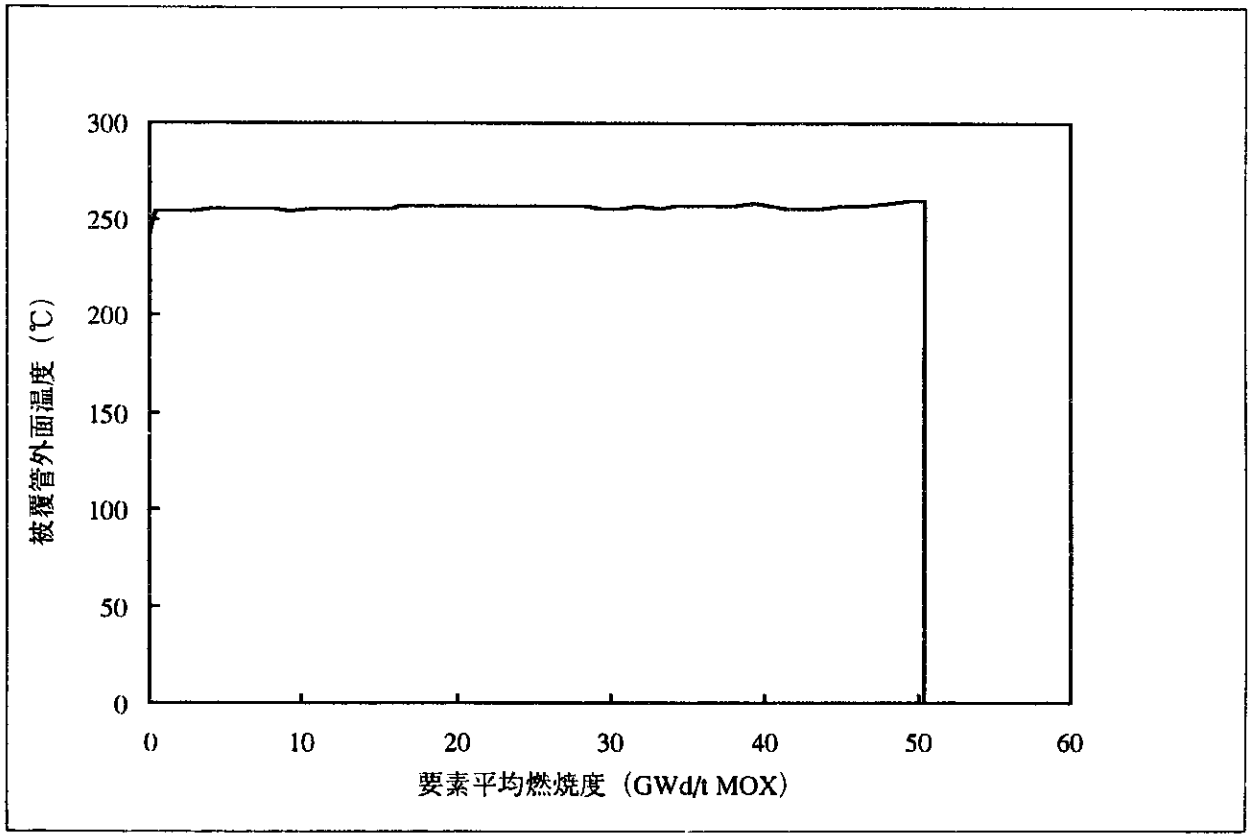


図6.1.1.9　IFA-565-6 燃料棒の被覆管外面温度履歴（解析結果）

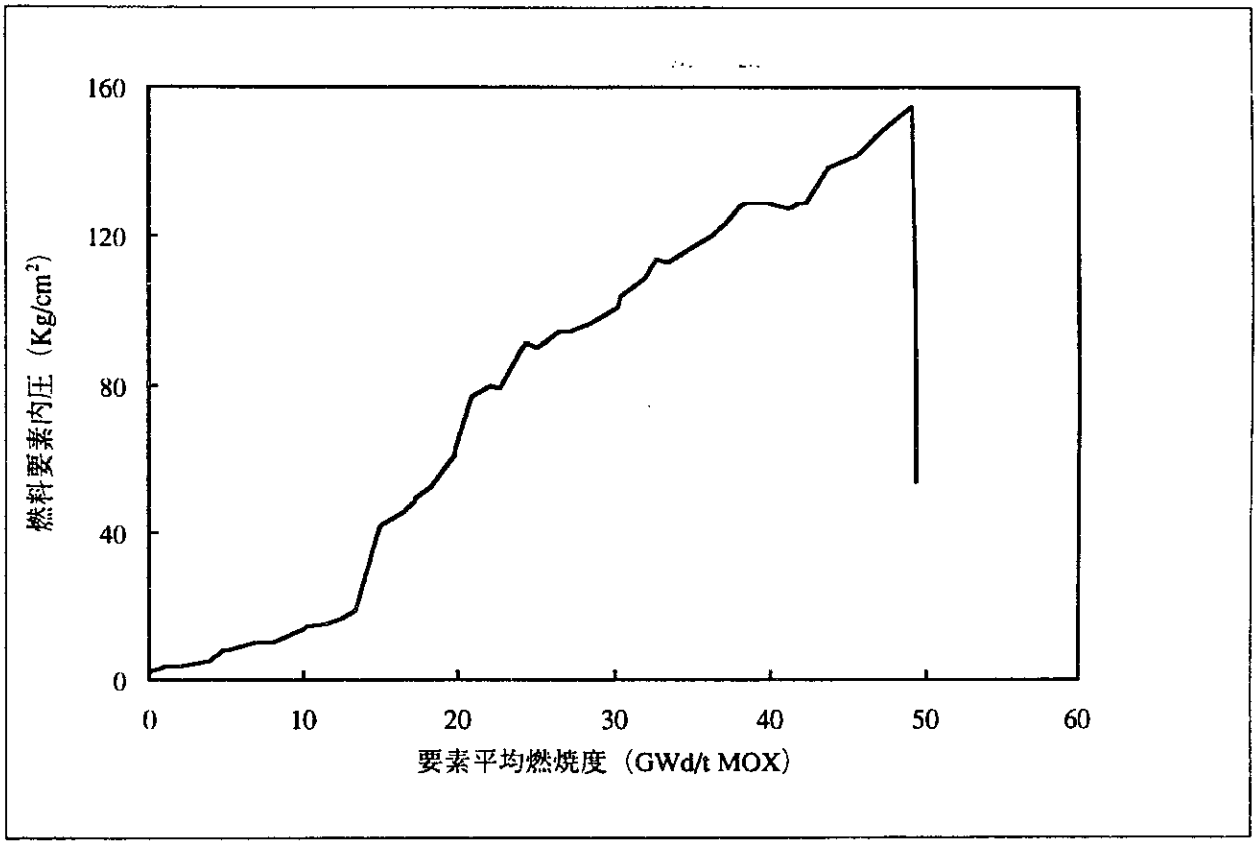


図6.1.2.1　IFA-565-3 燃料棒の内圧履歴（解析結果）

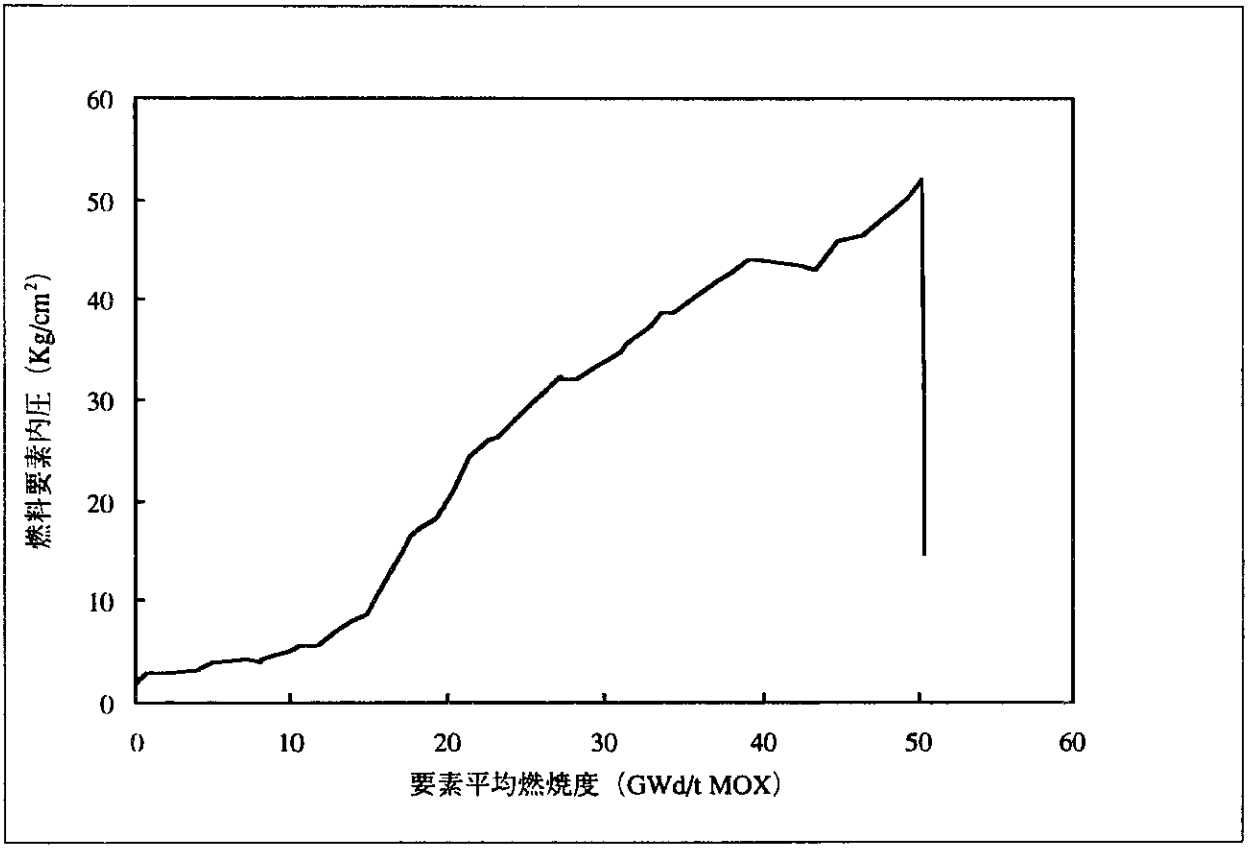


図6.1.2.2　IFA-565-4 燃料棒の内圧履歴（解析結果）

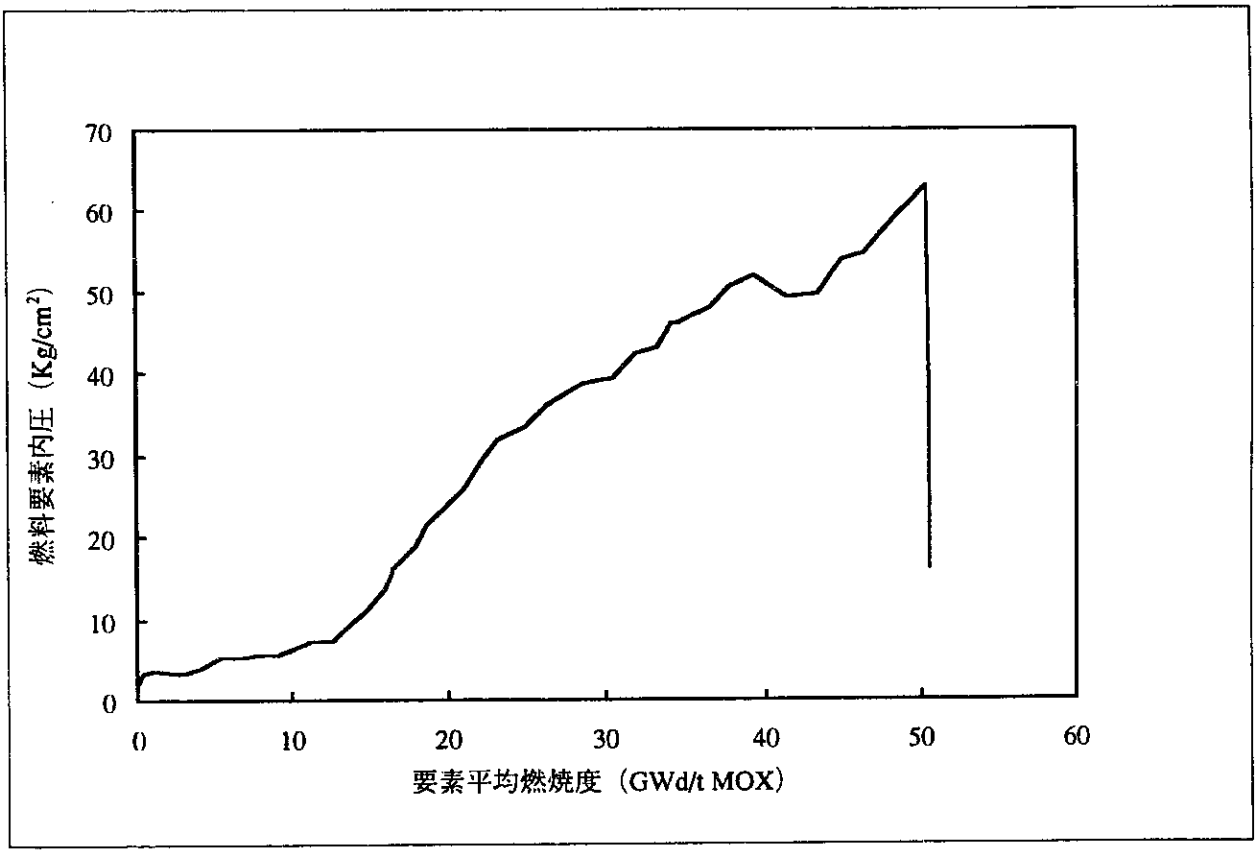


図6.1.2.3　IFA-565-6 燃料棒の内圧履歴（解析結果）

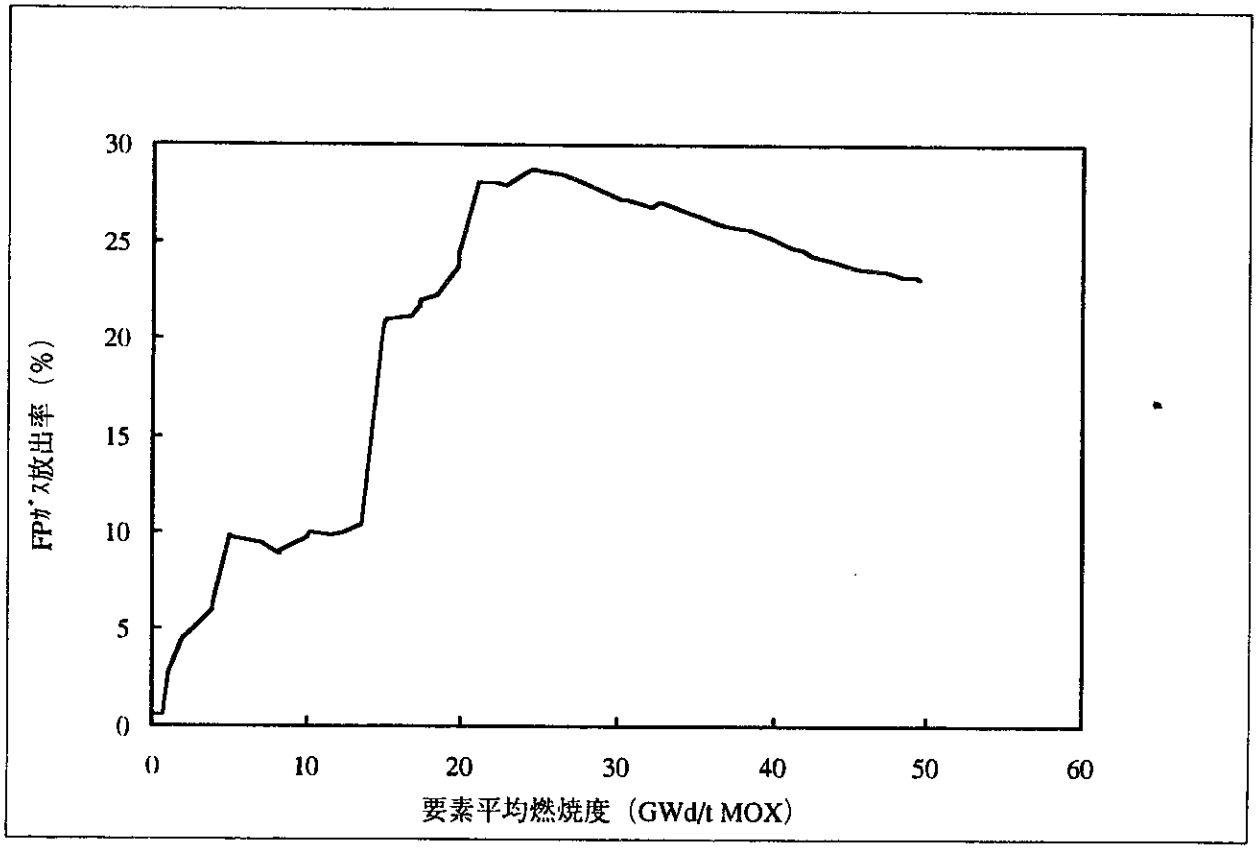


図6.1.2.4　IFA-565-3 燃料棒のFPガス放出率履歴（解析結果）

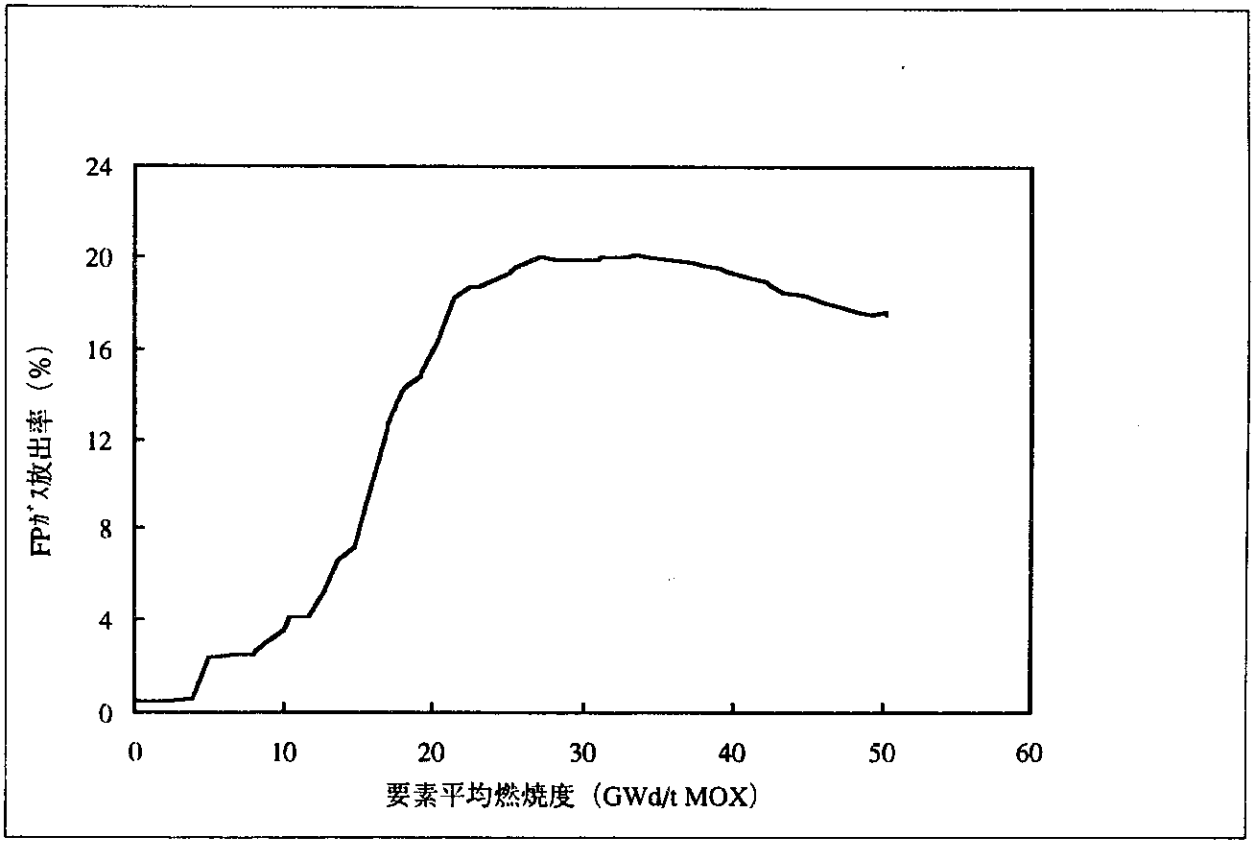


図6.1.2.5　IFA-565-4 燃料棒のFPガス放出率履歴（解析結果）

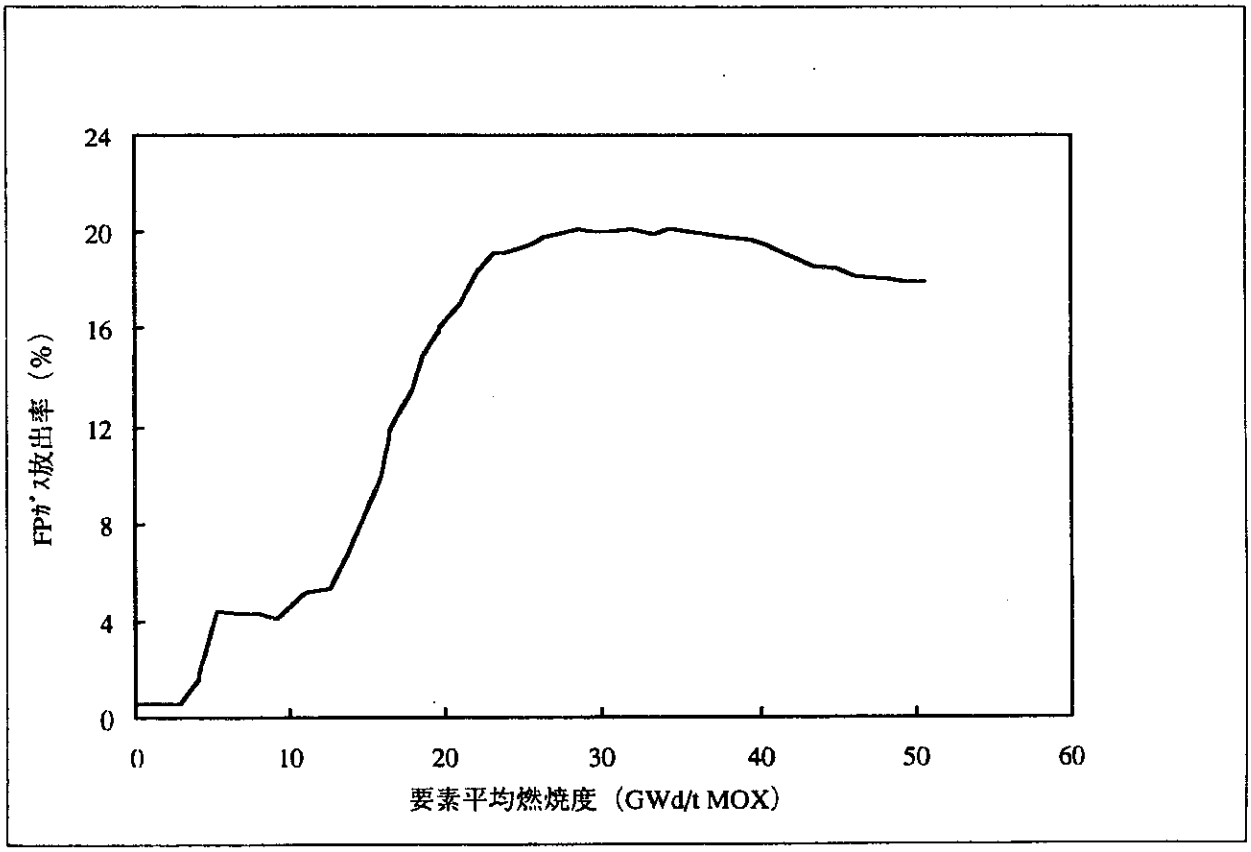


図6.1.2.6　IFA-565-6 燃料棒のFPガス放出率履歴（解析結果）

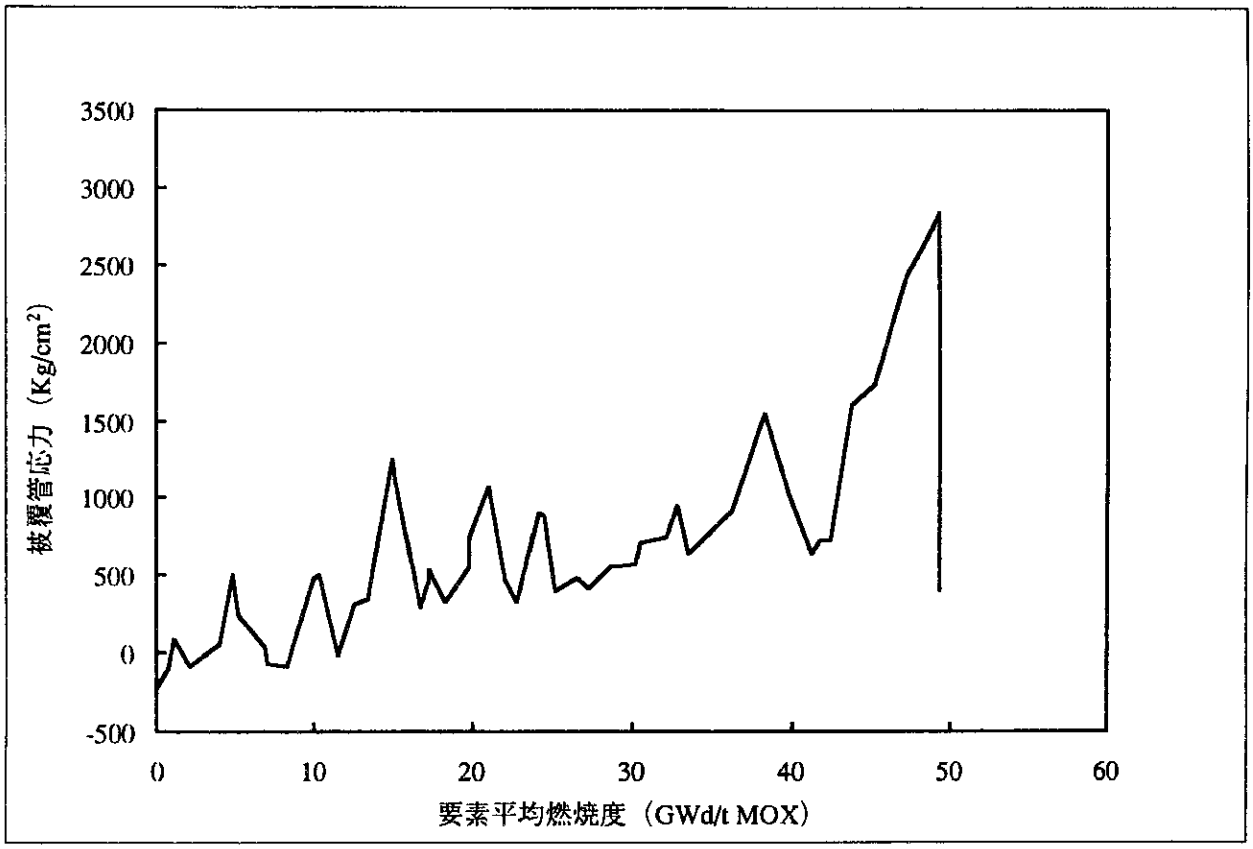


図6.1.3.1　IFA-565-3 燃料棒の被覆管応力履歴（解析結果）

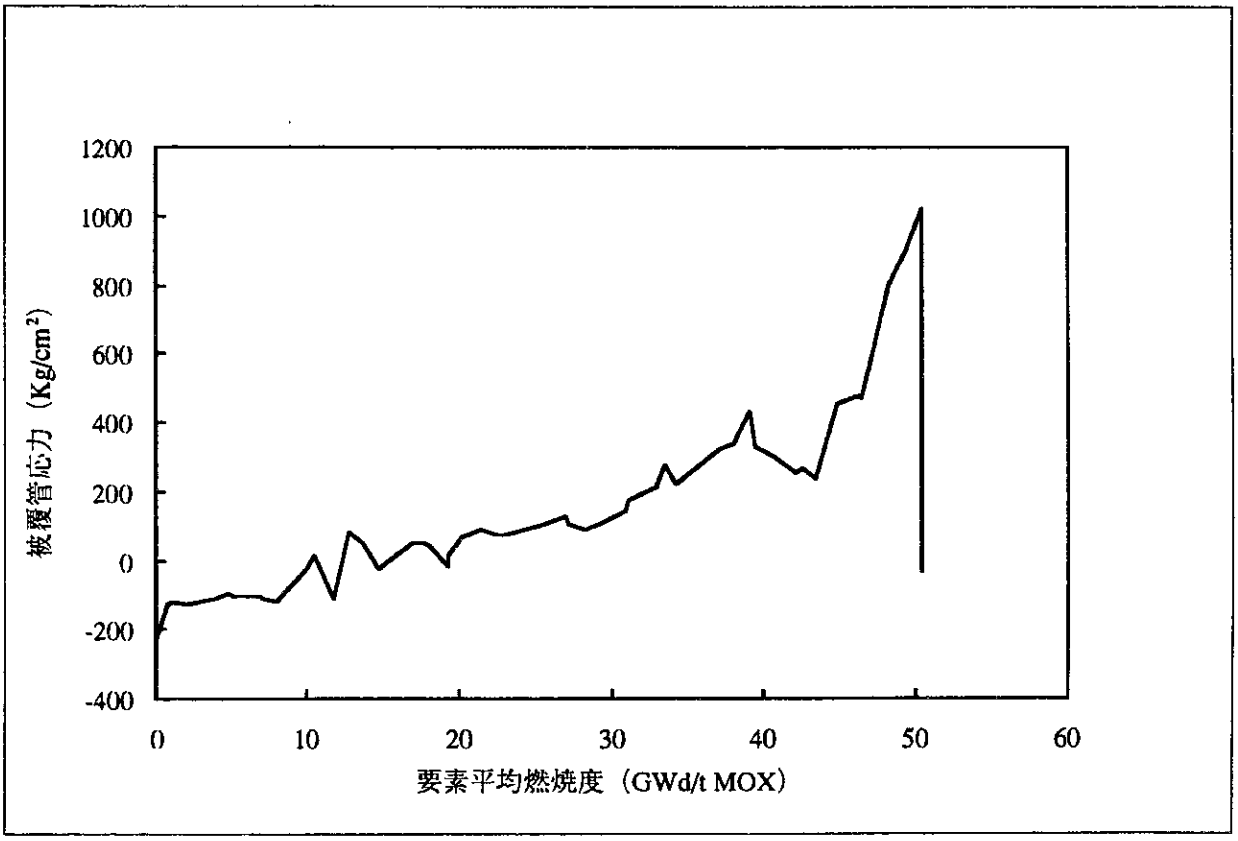


図6.1.3.2　IFA-565-4 燃料棒の被覆管応力履歴（解析結果）

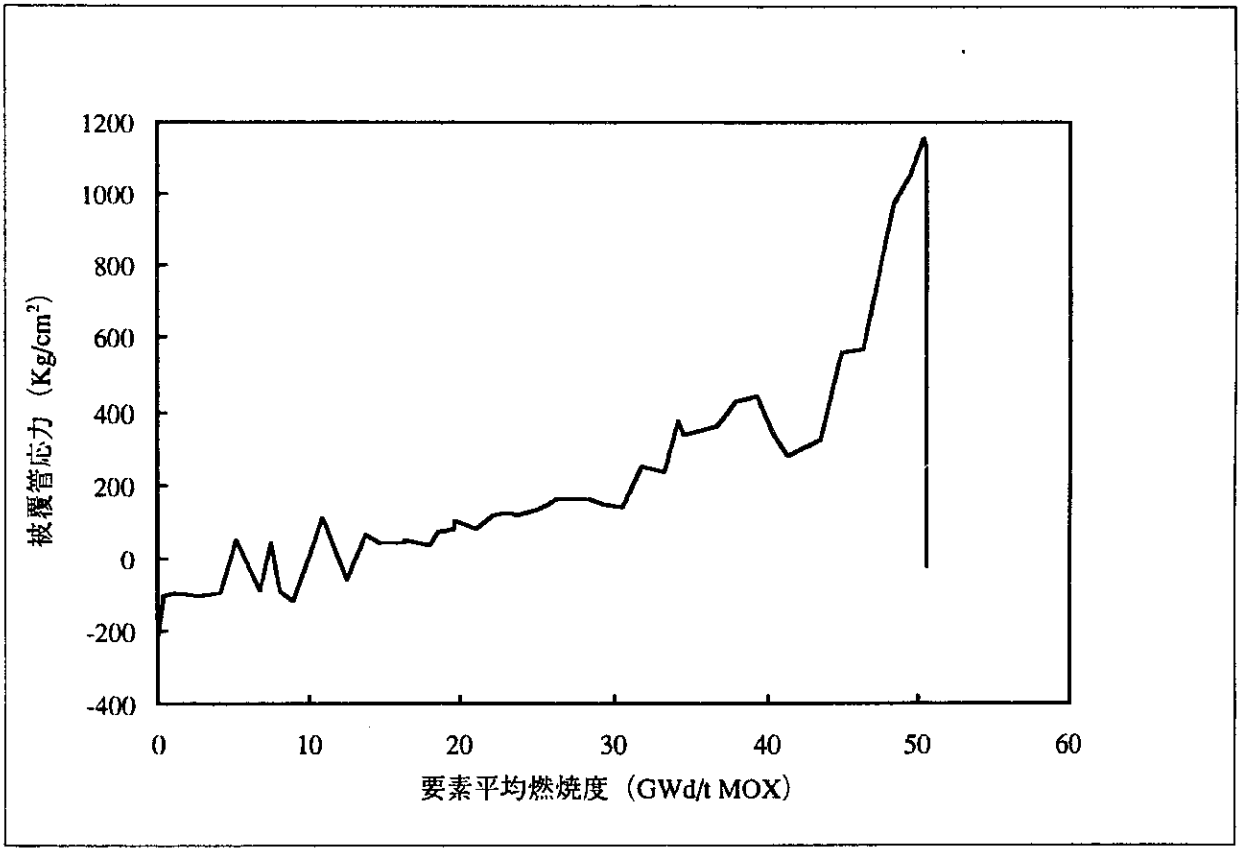


図6.1.3.3　IFA-565-6 燃料棒の被覆管応力履歴（解析結果）

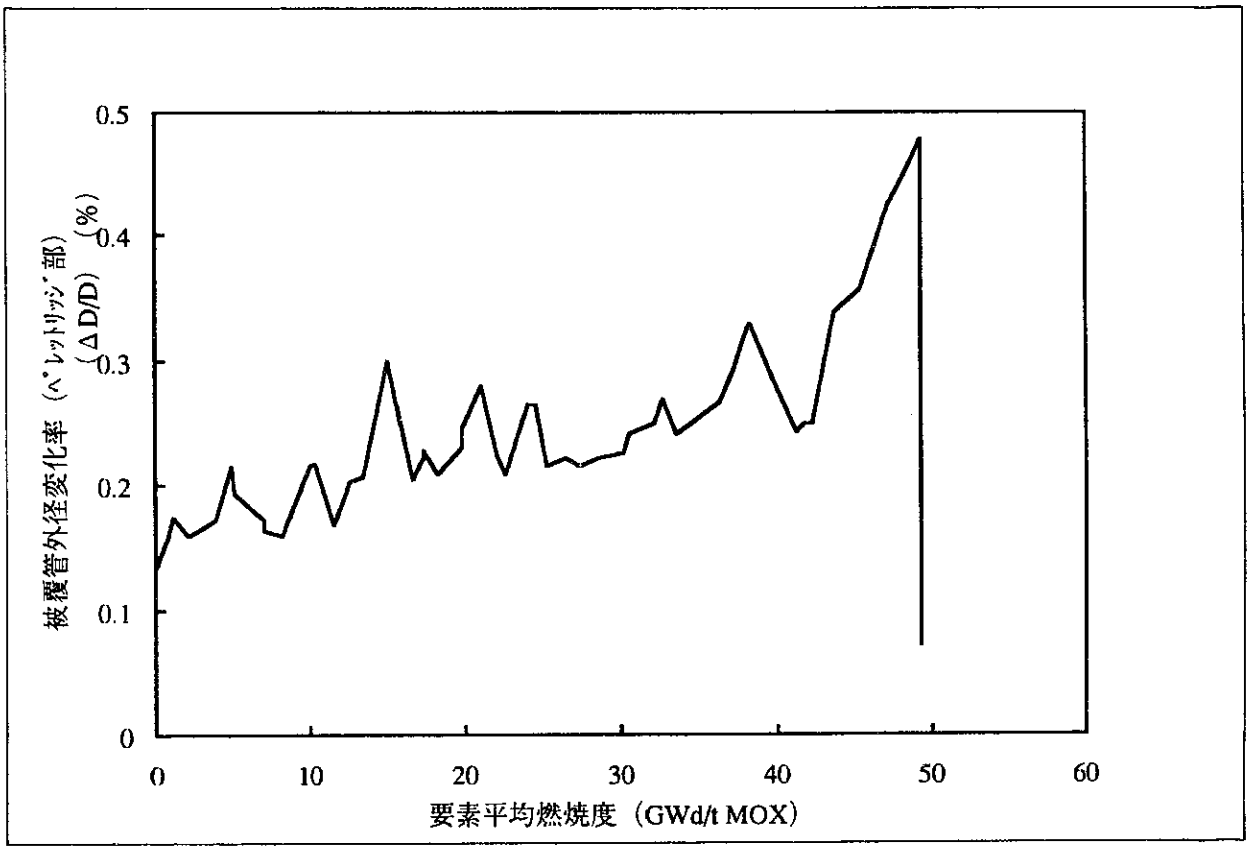


図6.1.3.4　IFA-565-3 燃料棒の被覆管外径変化率履歴（解析結果）

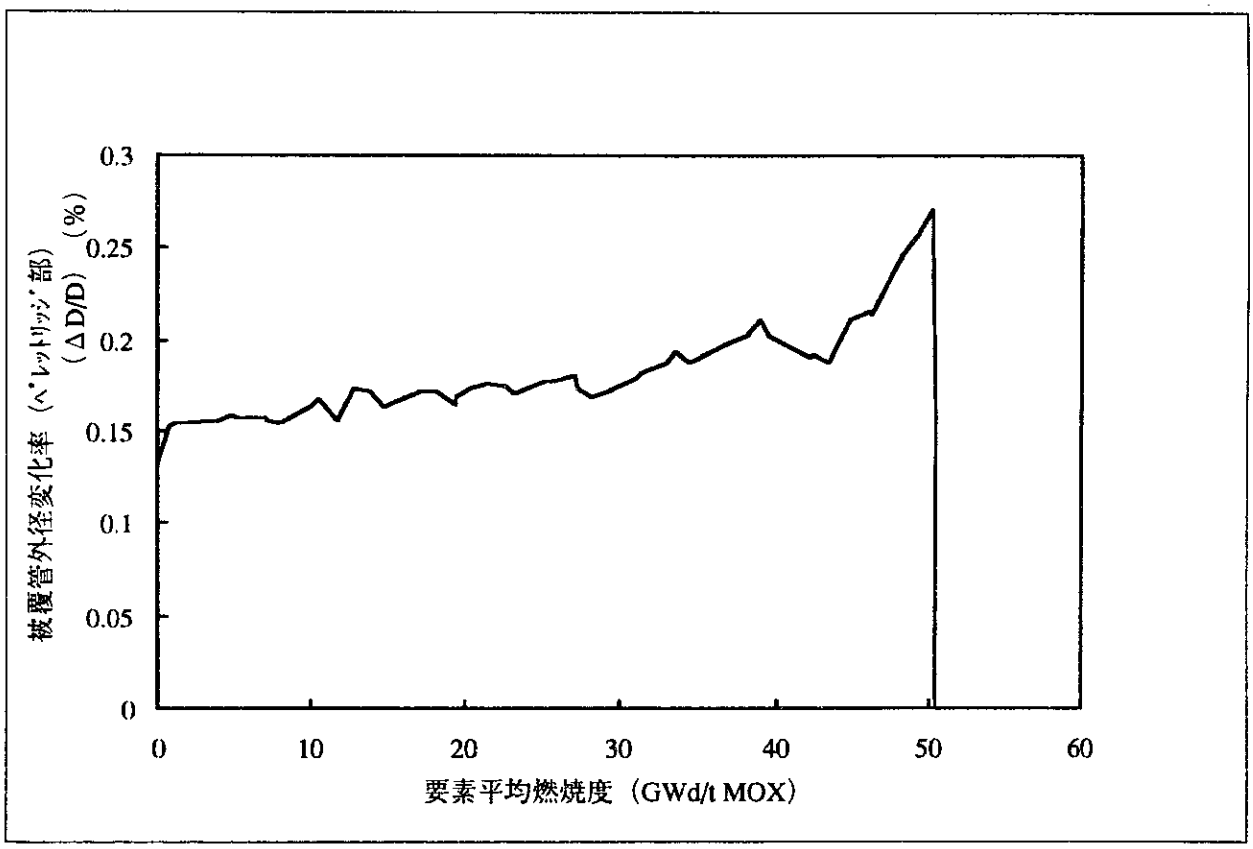


図6.1.3.5　IFA-565-4 燃料棒の被覆管外径変化率履歴（解析結果）

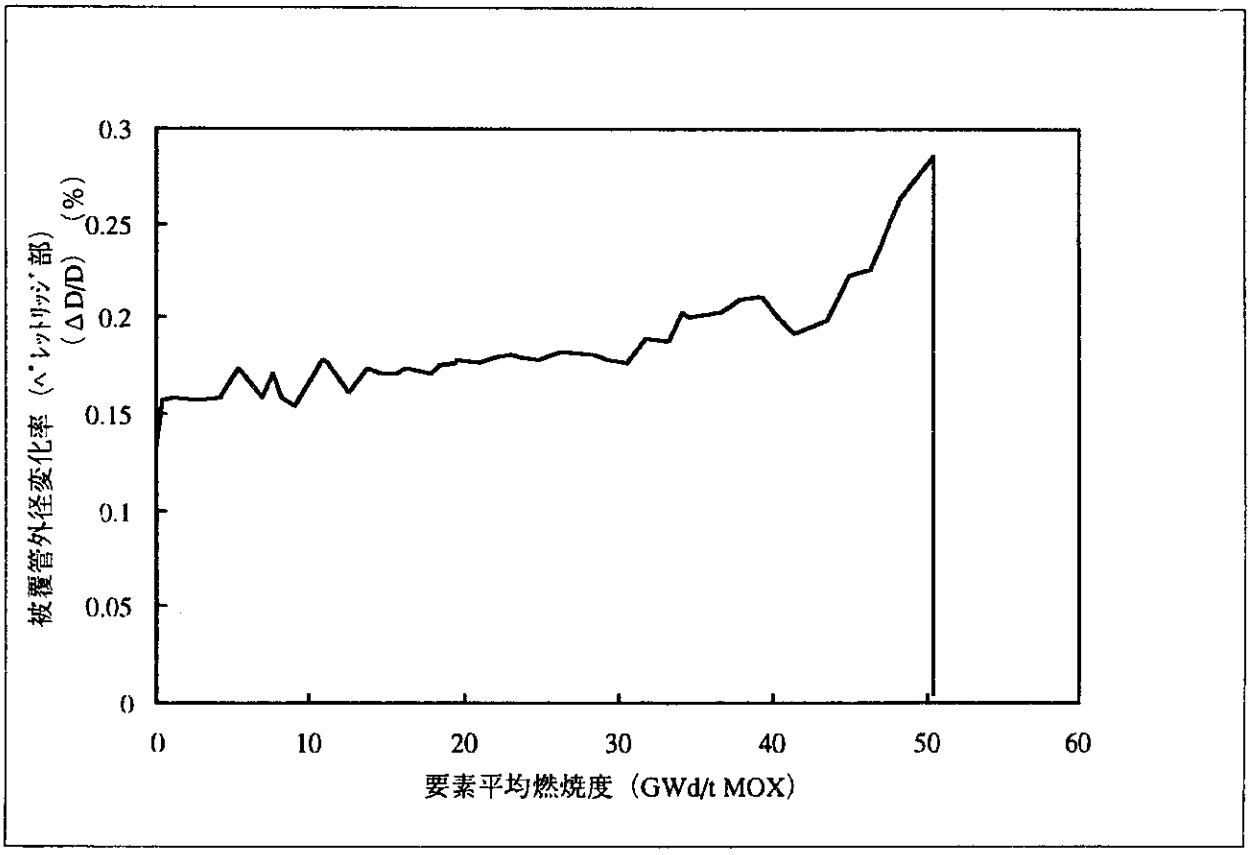


図6.1.3.6　IFA-565-6 燃料棒の被覆管外径変化率履歴（解析結果）

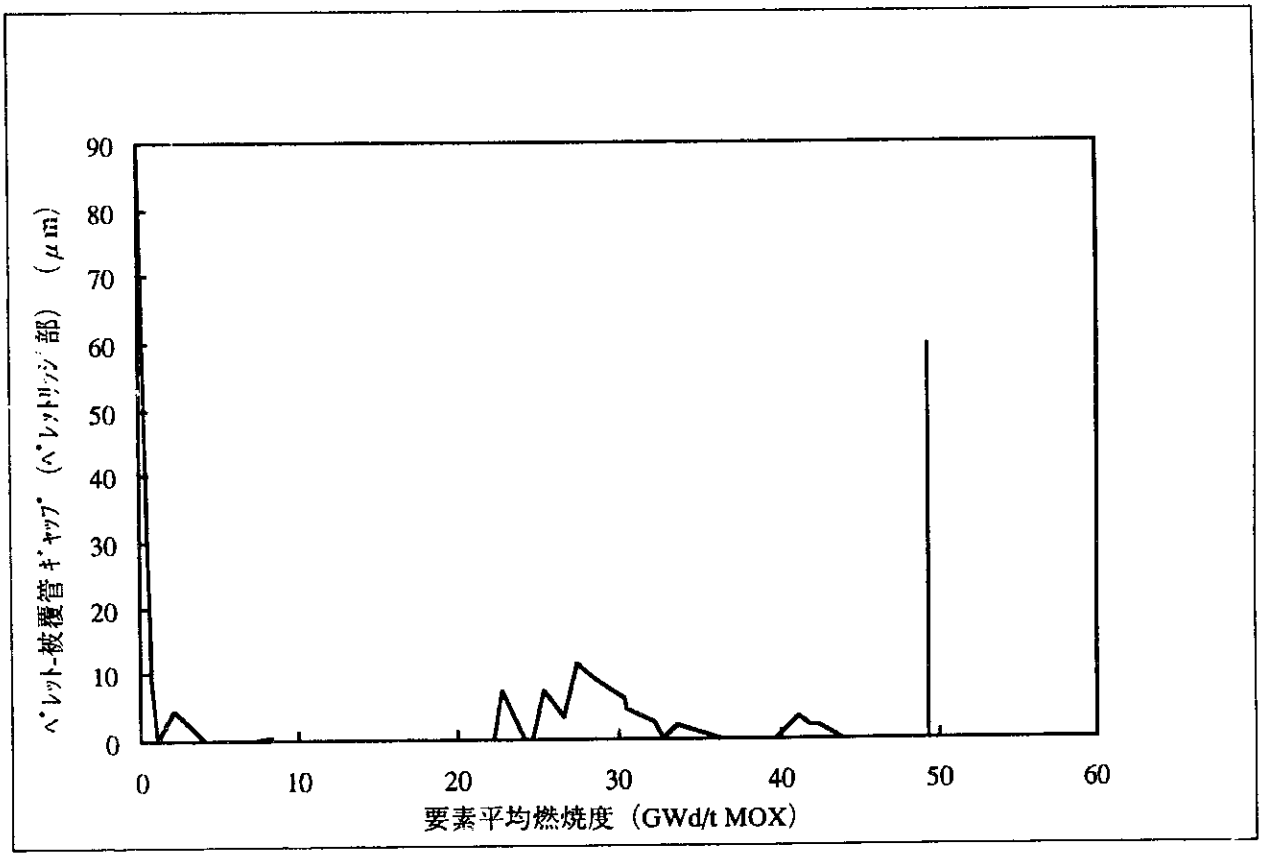


図6.1.4.1　IFA-565-3 燃料棒のペレット-被覆管ギャップ履歴（ﾍﾟﾚｯﾄﾘｯｼﾞ部解析結果）

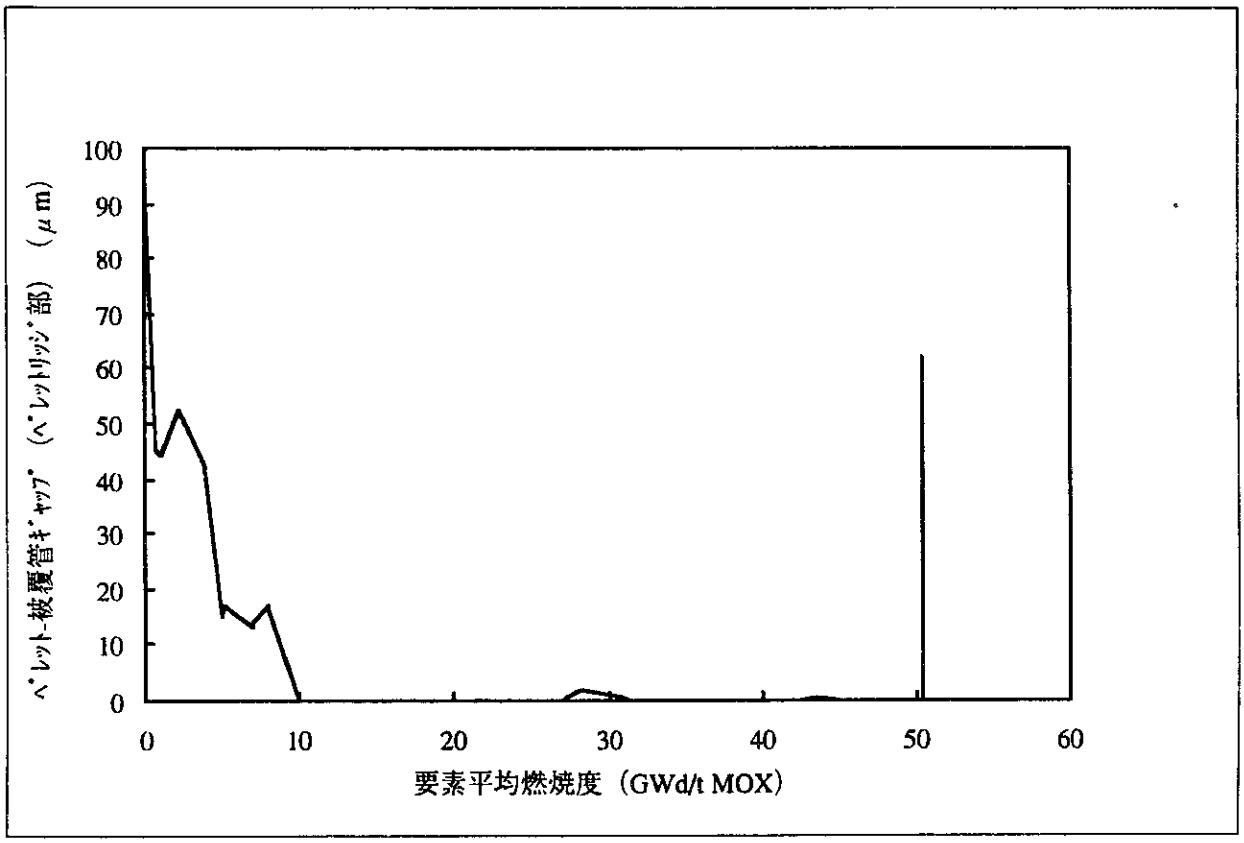


図6.1.4.2　IFA-565-4 燃料棒のペレット-被覆管ギャップ履歴（ペレットリッジ部解析結果）

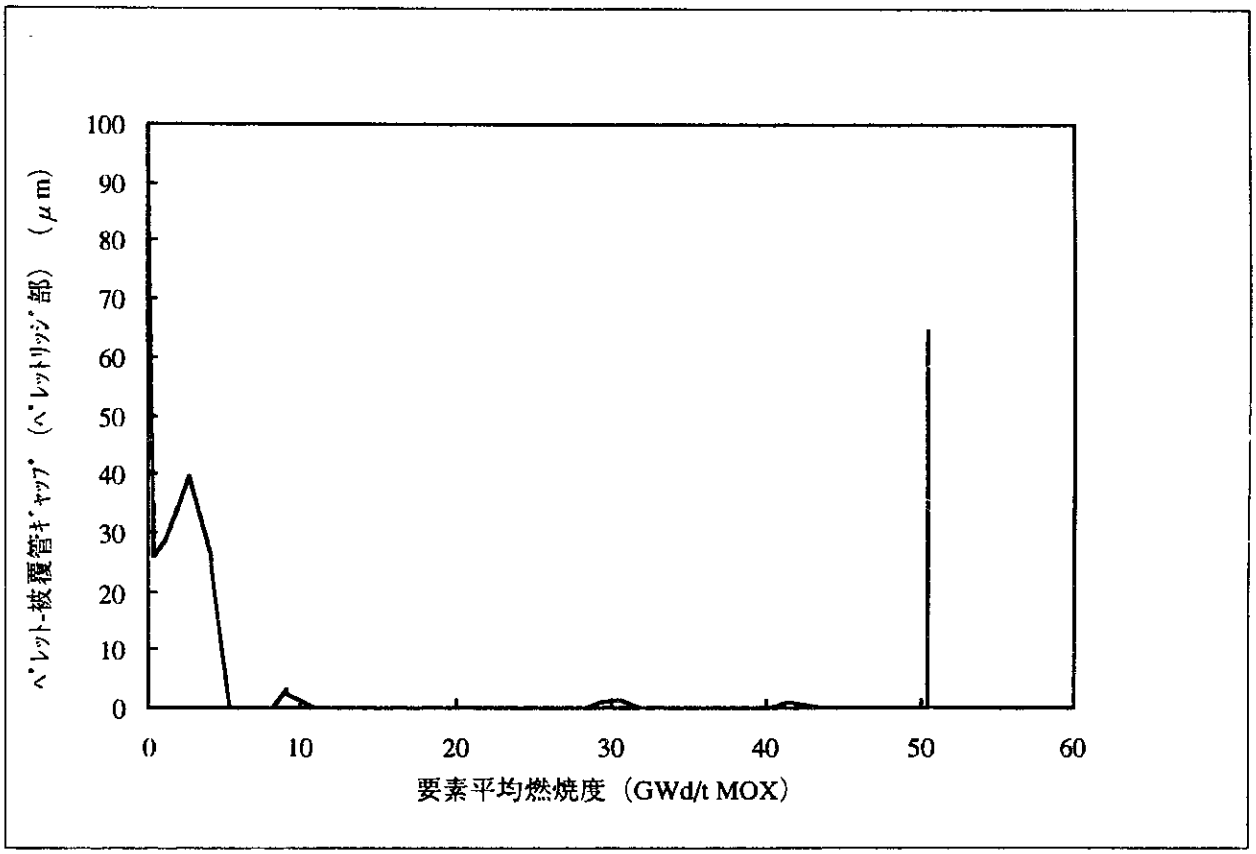


図6.1.4.3　IFA-565-6 燃料棒のペレット-被覆管ギャップ履歴（ペレットリッジ部解析結果）

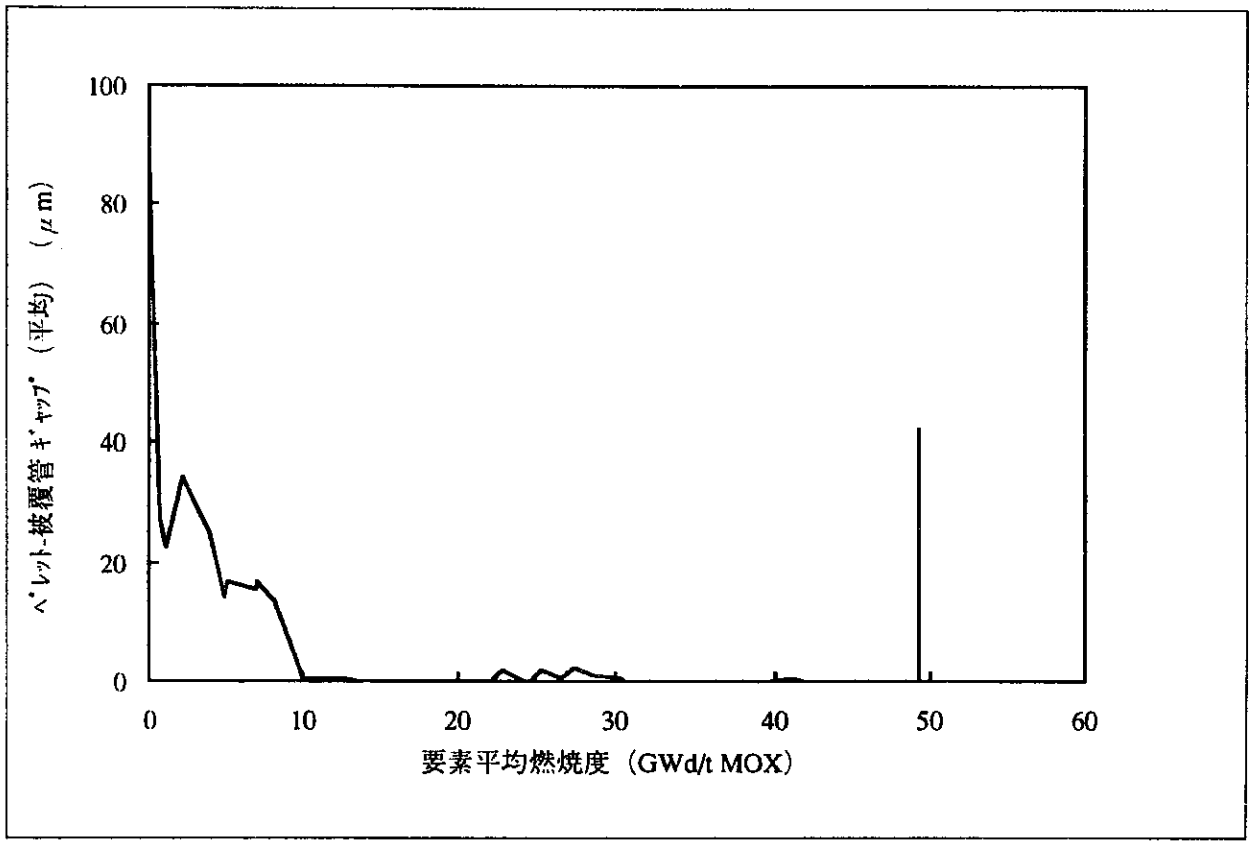


図6.1.4.4　IFA-565-3 燃料棒のペレット-被覆管ギャップ履歴（ペレット中央部解析結果）

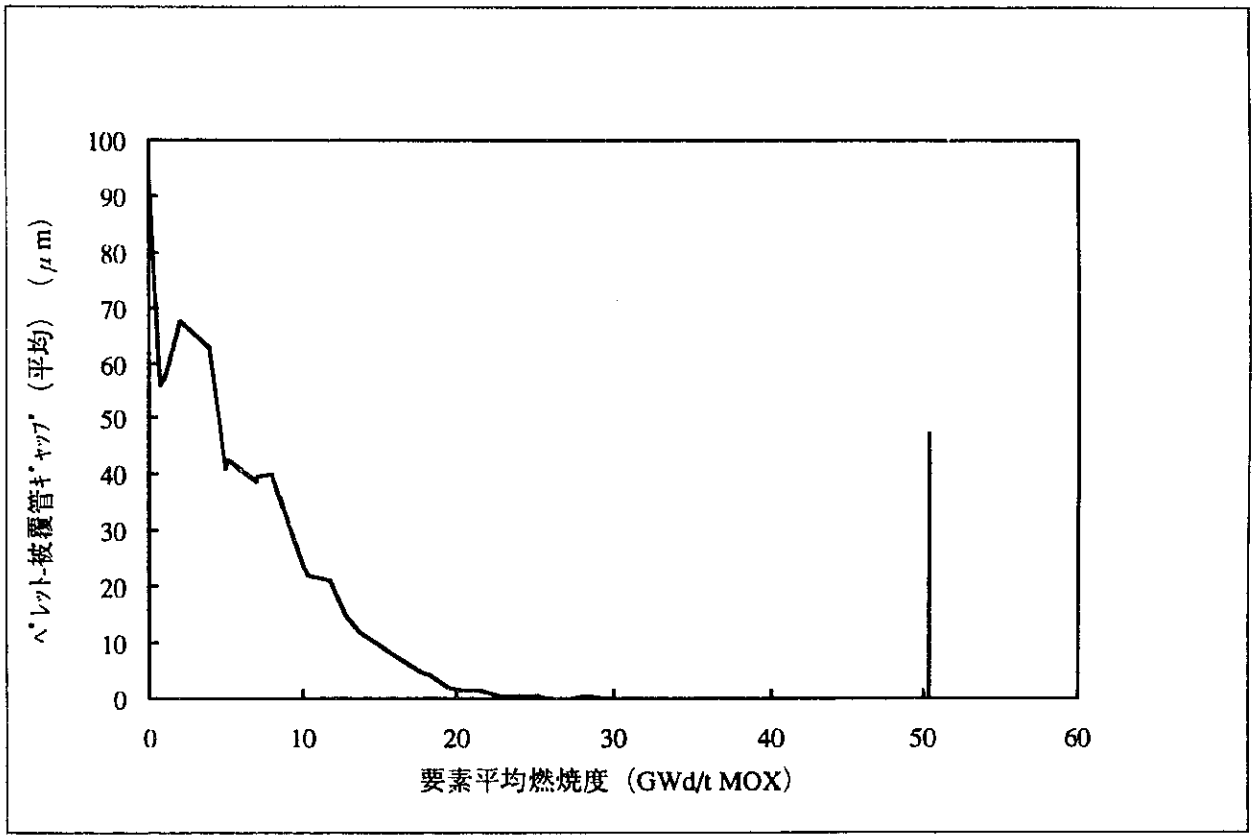


図6.1.4.5　IFA-565-4 燃料棒のペレット-被覆管ギャップ履歴（ペレット中央部解析結果）

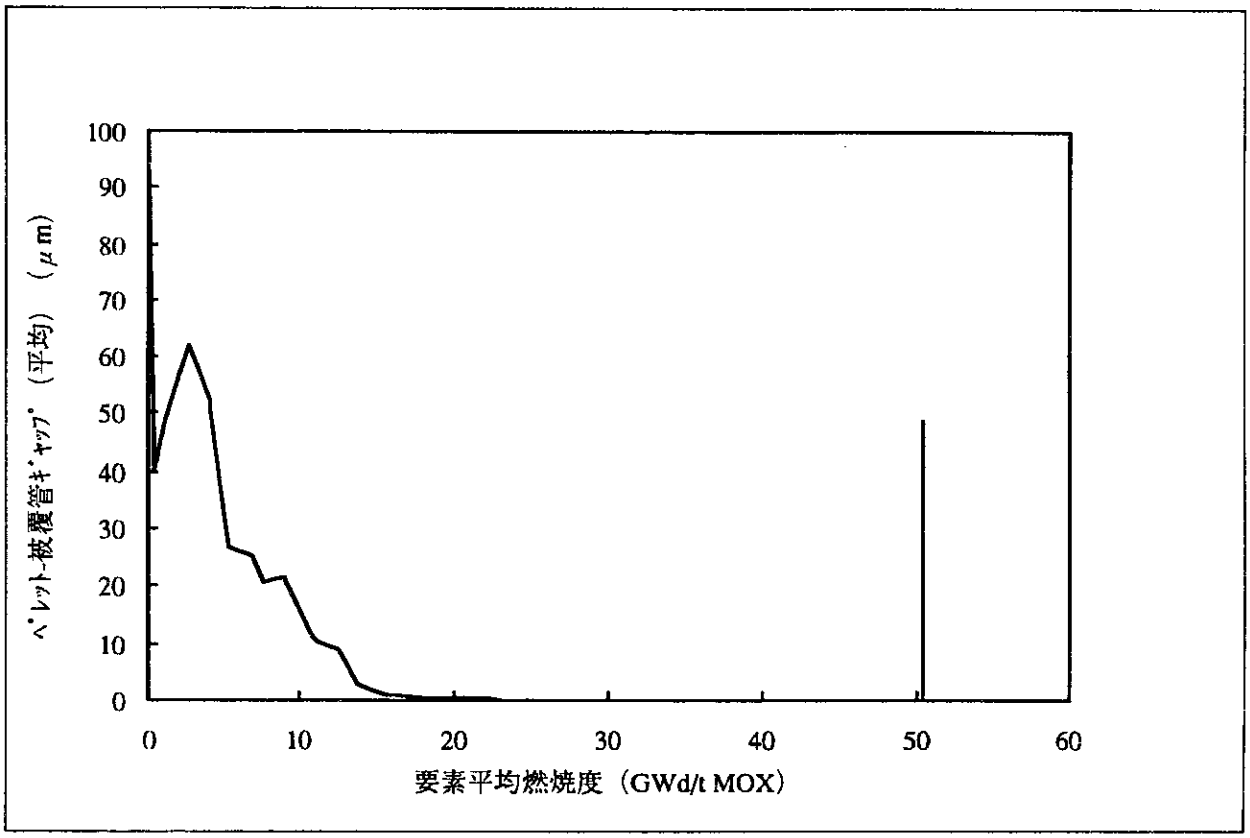


図6.1.4.6　IFA-565-6 燃料棒のペレット-被覆管ギャップ履歴（ペレット中央部解析結果）

6.2 線出力と燃焼度の評価

Ru-106のγ線強度分布と燃焼度分析の結果を用いて燃焼度の解析を行った。解析は以下の考えに基づいて行った。

(1) ピン軸方向の燃焼度分布はRu-106のγ線強度分布に一致すると考える。

(2) 燃焼度の絶対値は分析結果が正しいと考える。

この方針に従って、以下の手順で真の燃焼度の推定を行った。

① Ru-106のγ線強度分布及び燃焼度分析値について、表6.2.1に示す数値を1として規格化した。

② 規格化したγ線強度分布と燃焼度分析値をグラフにプロットし、前者の回帰式を得た。

③ ②の回帰式をグラフ上でy軸方向に移動し、最小二乗法により分析値へのフィッテイングを行うことで、燃焼度分布の回帰式を得た。

④ ③の回帰式から、各々のピン軸方向位置における規格化された燃焼度を求め、次にこれを燃焼度に換算した。

以上のプロセスによって得られた燃焼度の計算式を下記に示す。また、解析結果を表6.2.2に、燃焼度分布を図6.2.1、図6.2.2に示す。

IFA-565-3：$BU = (0.65365 + 0.0009624 \cdot y - 7.379 \times 10^{-7} \cdot y^2) \cdot 55.6$

IFA-565-6：$BU = (0.68870 + 0.0011082 \cdot y - 8.504 \times 10^{-7} \cdot y^2) \cdot 50.0$

y：ロッド軸方向位置 (単位；mm)

BU：燃焼度解析値 (単位；MWd/tMOX)

核計算予測値と比較すると、表6.2.3から、中性子検出器の測定値から予測した燃焼度は、上記の解析値に比べて、平均燃焼度でIFA-565-3が105%、IFA-565-6が110%、両者の平均が107%と高くなっている。核計算による予測誤差は通常±10%程度であることから、事前に行った計算予測値はほぼ妥当であると言えるが、以降のデータ解析に際しては本節の解析値を用いる。この評価に基づき見直した線出力と燃焼度を表6.2.4に示した。

表6.2.1　規格化の基準条件

ロッドNo	γ線強度分布		燃焼度分析値	
	軸方向位置 (mm)	強度 (counts)	軸方向位置 (mm)	燃焼度 (GWd/tMOX)
IFA-565-3	800	1450	742	55.6
IFA-565-6	700	1430	742	50.0

＊　上記軸方向位置の強度及び燃焼度をそれぞれ1に規格化した。

表6.2.2　燃焼度分析値の解析結果

ロッドNo	軸方向位置 (mm)	燃焼度（GWd/tMOX）		
		分析値	分析値の平均	解析値
IFA-565-3	246	42.46 43.34	42.9	47.0
	742	55.61	55.6	53.5
	1,245	39.39 45.47	42.4	39.4
IFA-565-6	246	44.54 44.18	44.4	45.5
	742	53.68 46.39	50.0	52.2
	1,245	40.43 41.30	40.9	37.5

表6.2.3　核計算予測値と解析値の比較

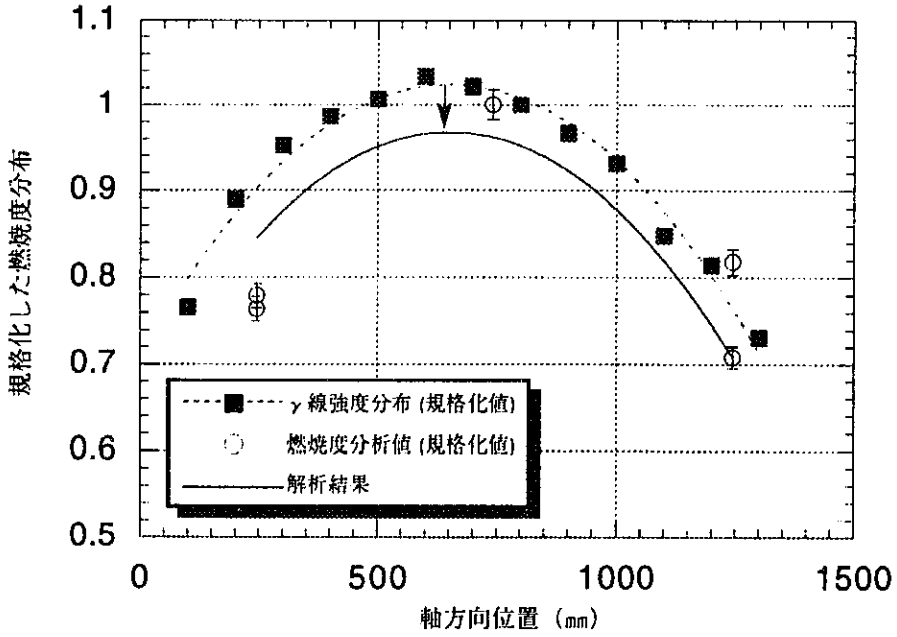
ロッドNo	核計算予測値（GWd/tMOX）		解析値（GWd/tMOX）		予測値/解析値 〔①/②×100〕（%）	
	平均値〔①〕	ピーク値	平均値〔②〕	ピーク値		
IFA-565-3	49.0	59.6	46.9	53.7	104.5	平均 107.3
IFA-565-6	50.0	61.1	45.4	52.5	110.1	

＊ 核計算予測値は中性子検出器の測定値を基にした燃焼度を示す。また、解析値とは本節の解析によって分析結果から求めた燃焼度のピーク値を示す。

表6.2.4　燃焼度分析値により見直した線出力及び燃焼度

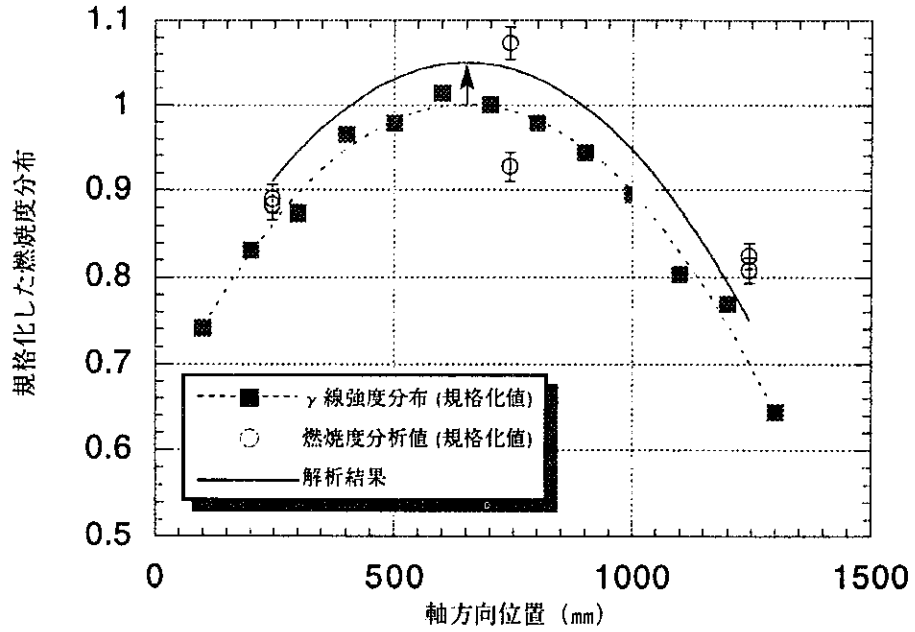
ロッドNo	平均燃焼度 IFA-514*		平均燃焼度 IFA-565**		経験最大線出力**
	GWd/tMOX	GWd/tM	GWd/tMOX	GWd/tM	kW/m
1	37.9	42.9			43.9
2	37.6	42.6			47.2
3	35.4	40.2	46.9	53.2	46.7
4	36.4	41.2	45.4	51.5	45.2
5	19.3	21.8			43.0
6	36.8	41.8	45.4	51.5	37.4

*：参考文献 [8] 表3-1 の要素平均燃焼度/1.07で算出した。
**：表4.1.1.1 の燃料棒燃焼度/1.07および最大線出力密度/1.07で算出した。



1) γ線強度分布は、軸方向位置742mmの強度を1に規格化した。
2) 分析値は、軸方向位置742mmの燃焼度（55.6GWd/tMOX）を1に規格化した。

図6.2.1　Ru-106のγ線強度分布と燃焼度分析値から求めた燃焼度分布（IFA-565-3）



1) γ線強度分布は、軸方向位置742mmの強度を1に規格化した。
2) 分析値は、軸方向位置742mmの燃焼度（50.0GWd/tMOX）を1に規格化した。

図6.2.2　Ru-106のγ線強度分布と燃焼度分析値から求めた燃焼度分布（IFA-565-6）

6.3 燃料棒の外観・形状変化

外観観察では、スペーサーと被覆管の接触部に黒点が観察された以外、ねじれ、酸化物、損傷等の特筆すべき現象はなかった。黒点部分は、プロフィロメトリーにおいても高さ約50μmのバルジとして確認されている。途中取り出し時のプロフィロメトリーの結果から、高さは約60μmで、燃焼度の増加にもかかわらずほとんど変化していない。これは、途中取り出し以降、被覆管（黒点部に係わらず）の水側酸化膜厚さがほとんど変化しないという結果と一致している。

水側の酸化の腐食形態は、一部初期的なノジュラー腐食が観察されるものの、均一腐食である。酸化膜厚さについては、図5.8.3.1.5～6に示したとおり、燃焼に伴い増加するが、寿命末期においては、飽和あるいは微増傾向にあり、その量は40～50μmである。ノジュラー腐食は、初期的なものが燃料ロッド上半分に観察され、形状は最小深さで2.5～5μm、最大幅で20μmを超えた。また、燃料側の酸化物は厚さ約10μmで途中取り出し時の値から変化していない。一部サンプルで局所的な内面付着物が観察されたが、これは途中取り出し時のIFA-514-1, 2, 5にも観察されている。

IFA-565-3, 4, 6の外径変化率を途中取り出し時と寿命末期で比較（表5.3.8）すると、燃料ロッド平均では増加する場合と減少する場合があるが、燃料ロッドの最大値は減少し、一方燃料ロッドの最小値は増加している。これは燃焼度の増加に伴い真円に近づいたことを意味しており、原因の一つとしてはMOX燃料のクリープ変形が考えられる。外径を均等に押し広げるのではなく、一部を押し広げることで外径変化が生じている場合、その部分の応力が大きいことからクリープ変形も大きく、全体としては真円に近づいたと考えられる。最小値の増加は、各燃料ロッドとも途中取り出し以降の平均線出力の増加（図4.1.1.1参照）により、PCMI量が増大したためと考えられる。

燃料ペレットのタイプで外径変化を比較すると、中空のIFA-565-4, 6が、中実のIFA-565-3に比べて平均、最大、最小のいずれの場合も小さい傾向にある。燃料ロッド平均の変化率で中空の場合、約0.1%外径変化を抑制している。この原因としては、中空化によるPCMIの緩和が考えられる。軸方向のPCMI挙動については、図4.2.3.5に示したとおり中実と中空で明確な差はなかった。これらから中空化によるPCMI緩和は、軸方向ではなく、外径方向に効果があることが分かった。

被覆管外径変化率について解析コード計算値と比較する。この際、コードは出力時であ

るのに対して、プロフィロメトリのデータは、炉外取り出し後、常温での塑性変形量を示していることを考慮する必要がある。各燃料ロッドのコード計算による外径変化率（ペレットリッジ部：図6.1.3.4～6）のトレンドは、燃料中心温度の変化に追随しつつ、全体としては増加した後、燃焼末期に急激に増加するというものである。この急激な増加量はIFA-565-3（中実），4（中空），6（中空）で、それぞれ約0.23、0.08、0.09%であり、燃料中心温度の上昇に対応したものであると考えられる。一方、この急激な増加時期が、ほぼ途中取り出し時期に一致することから、プロフィロメトリの測定値をそのまま用いて燃料ロッド平均の外径変化率を表5.3.8から求めた。IFA-565-3（中実），4（中空），6（中空）は、それぞれ0.05, 0.07, -0.05%となる。コード計算の方が高い値となっているが、これはコード計算では、ペレットリッジ部に注目しているのに対して、測定値は燃料ロッド全体を平均化したために生じたと考えられる。また、中空ペレットが中実ペレットよりも変化率が小さく、中空化によりPCMIが緩和する傾向は一致している。全照射期間を通じて、外径変化率の中空と中実での差は、プロフィロメトリ（表5.3.8参照）、コード計算（燃焼末期）とも中空の方が、外径変化が小さい結果となっており、ペレット中空化による被覆管外径変化の抑制効果が確認された。

燃料ロッドの伸びと高速中性子照射量の関係をBWR-UO_2燃料及びふげん-MOX燃料他のデータと合わせて図6.3.1に示す。IFA-565燃料ロッドの伸びは、他のUO_2、MOX燃料データに比較すると、高速中性子照射量が高い割に、伸びが小さいことが分かる。また、途中取り出したIFA-514のデータ（図中◆印）と比較すると、燃焼度の増加に伴い燃料ロッド伸び率も平均で約0.02%増加している。

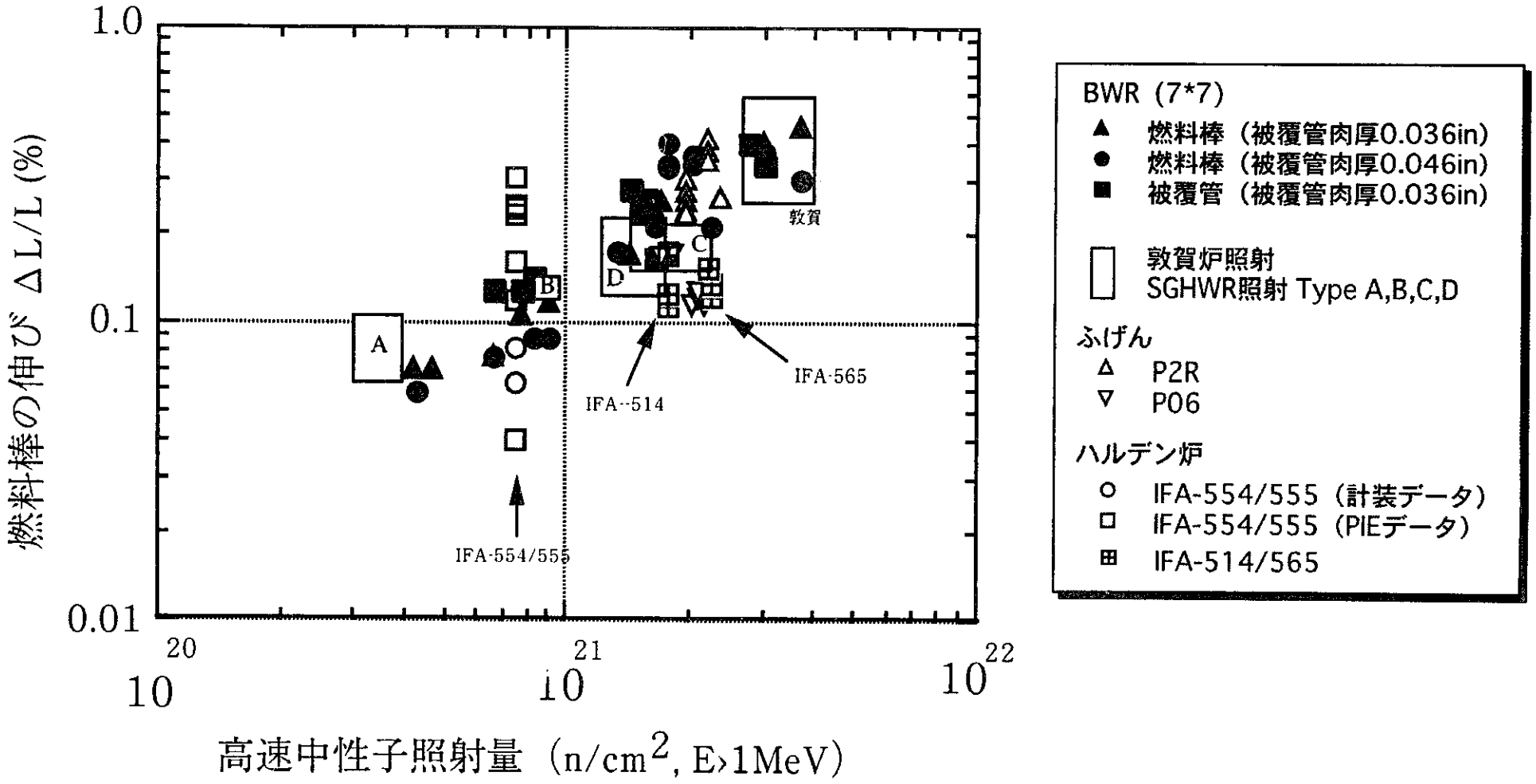


図6.3.1　燃料棒の微の高速中性子照射量依存性
(軽水炉燃料との比較)

6.4 燃料ペレットの微細組織変化と燃料温度評価

6.4.1 マクロ組織について（造粒界の影響）

IFA-565の燃料ペレットは、製造時からペレット全面にわたり造粒界が存在する。その造粒界の照射中の変化はIFA-565のペレットの興味深い組織変化の一つである。照射後のペレットにおいても造粒界が観察できる。IFA-565-6の中空ペレットの各断面の造粒界を観察すると、742mmの断面では、造粒界はほとんどないが、246mmでは半分程度、1245mmの位置では全面にわたって造粒界が存在する。この照射後の造粒界の量は中空径の大きさの傾向と良く一致する。5.8.4節「燃料ペレットの微細構造」で述べたように、ペレットの中空径は燃料の軸方向で変化しており、造粒界の最も残っている1245mmでは中空径が3.57mm、次に246mmの位置では3.65mm、造粒界がほぼ消失した742mmでは4.85mmと、造粒界が少ないほど中空径が大きくなっている。これは、照射中に造粒界が消失したことによって、中空径が大きくなったと説明できる。また、最も造粒界が消失している742mmの位置は線出力が最も高く、線出力、すなわち燃料温度が高いほど造粒界の消失と考えられる。結晶粒の観察では柱状晶はなく、ポアの移動の形跡も観察できないため、造粒界の中空径の移行は、焼きしまりによって起こっていると考えられる。

造粒界の消失は、中空径等への移動だけでなくスウェリングの点からも考えることができる。本燃料のような高燃焼度に達した燃料では、燃料ペレットは相当、スウェリングを起こしているはずである。図6.4.1.1～4にポアの径方向の分布を示したように、ペレット中心部ほど、ポアの割合、大きさが増大しており、気体スウェリングを起こしていることを示している。このようなFPガスによるスウェリングを、造粒界が吸収することによって造粒界が消失する。計装データや非破壊試験の結果からは燃料軸方向のスウェリングはほとんどなく、逆に収縮している傾向がある。このことは、造粒界がペレットのスウェリングを吸収してさらに、焼きしまりがおこっていること示唆している。

造粒界の焼きしまり及びスウェリングへ与える影響は、定量的には説明できないが、スウェリングを緩和することに対してはかなり効果があると思われる。

6.4.2 組織と燃料温度

前述の燃料挙動解析コードによる解析で、IFA-565-3，4は寿命中期に最大燃料中心温度が、それぞれ2100℃及び1450℃に達しており、IFA-565-6は寿命初期に1480℃に達しているとした。

IFA-565-3において、燃料軸方向で燃焼度の高い位置の燃料断面である742nmの組織を見ると燃料中心部では結晶粒内及び粒界にかなりのポアが観察できるが、結晶粒は30～40μmに成長した等軸粒である。解析コードで評価したように2100℃まで燃料中心温度が上昇していれば、柱状組織が観察されると予想されるが、金相観察では柱状組織は観察されない。しかし、結晶粒は、製造時の10倍程度に成長している。組織からは予想される燃料中心温度は等軸粒の存在する温度が～1800℃とされているので、実際には解析コードで得た結果より低いかもしれない。

中空燃料であるIFA-565-6の組織を見ると中空径付近で成長した等軸粒が観察できる。しかし、その大きさはIFA-565-3ほどではなく、10μm以下である。燃料中心温度は、解析コードで得られた値程度かもしれない。

6.4.3 リム組織

40GWd/tを超える高燃焼度燃料においてペレットリム部に微細粒組織が発生することが水炉燃料で報告されている。本燃料の燃焼度は60GWd/tを超えた高燃焼度に達しており、UO_2燃料で報告されているリム組織がMOX燃料でも観察できるかどうか興味深い。リム組織では、ペレットリム部でリム効果により燃焼度が増加し、微細粒組織の発生、低密度化及びFPガス放出が起こるとされている。また、微細粒の大きさは約0.3μmでポアの大きさは1μm以下であり、ペレット外周部から数十μmの領域で、燃焼度に依存して範囲が広がる。今回のPIEでは光学顕微鏡観察で観察しているが、そのような微細粒やマイクロポアを観察するには不十分な倍率であり、リム組織の発生の有無についてはわからなかった。

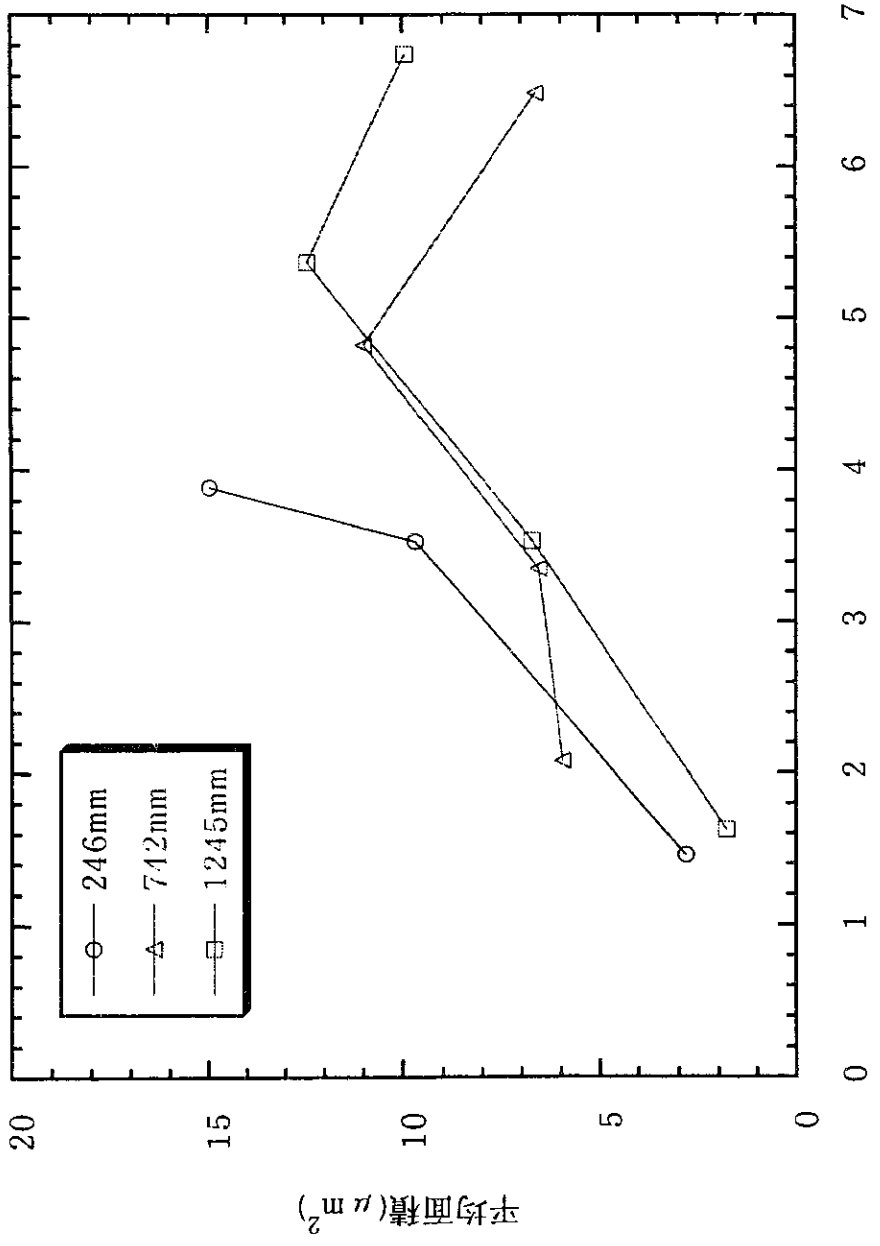


図6.4.1.1　IFA-565-3におけるペレット径方向のポア一個当たりの平均面積分布

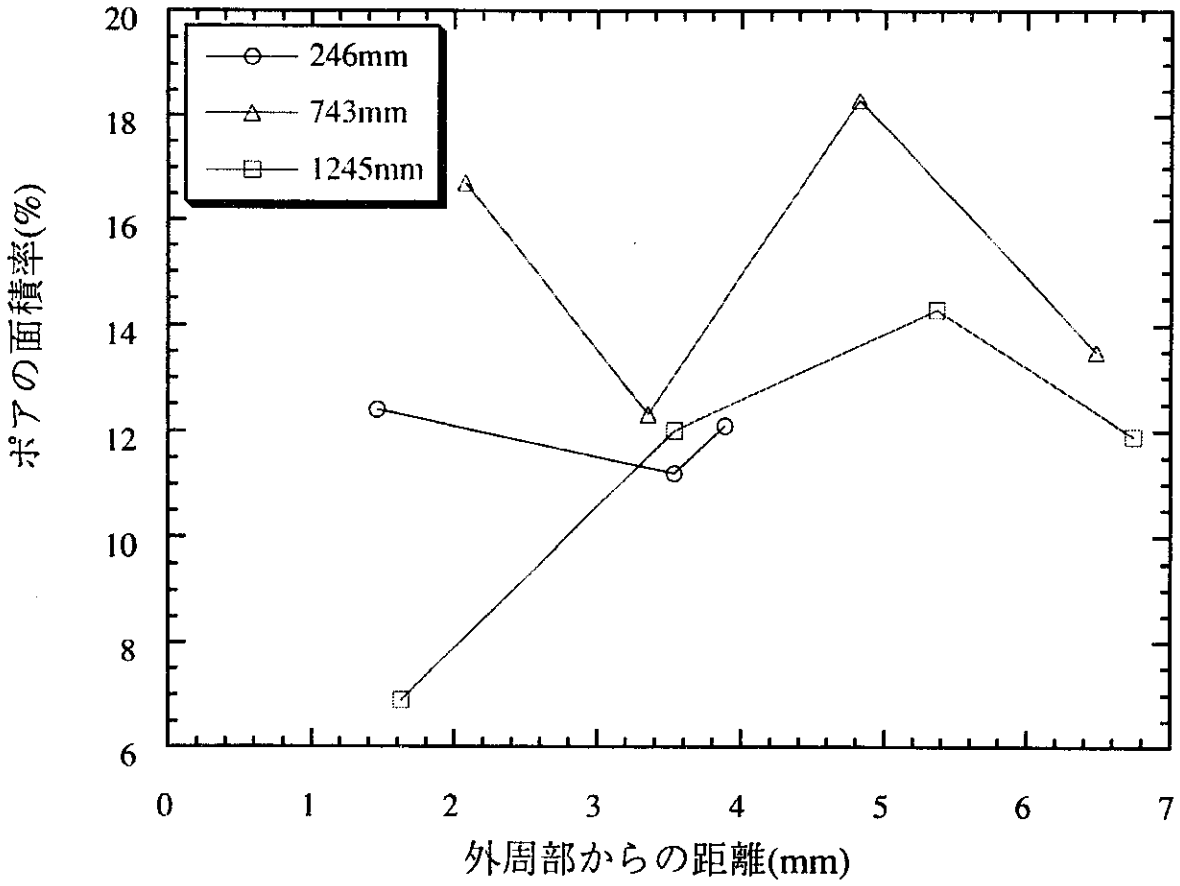


図6.4.1.2　IFA-565-3におけるペレット径方向のポアの面積率変化

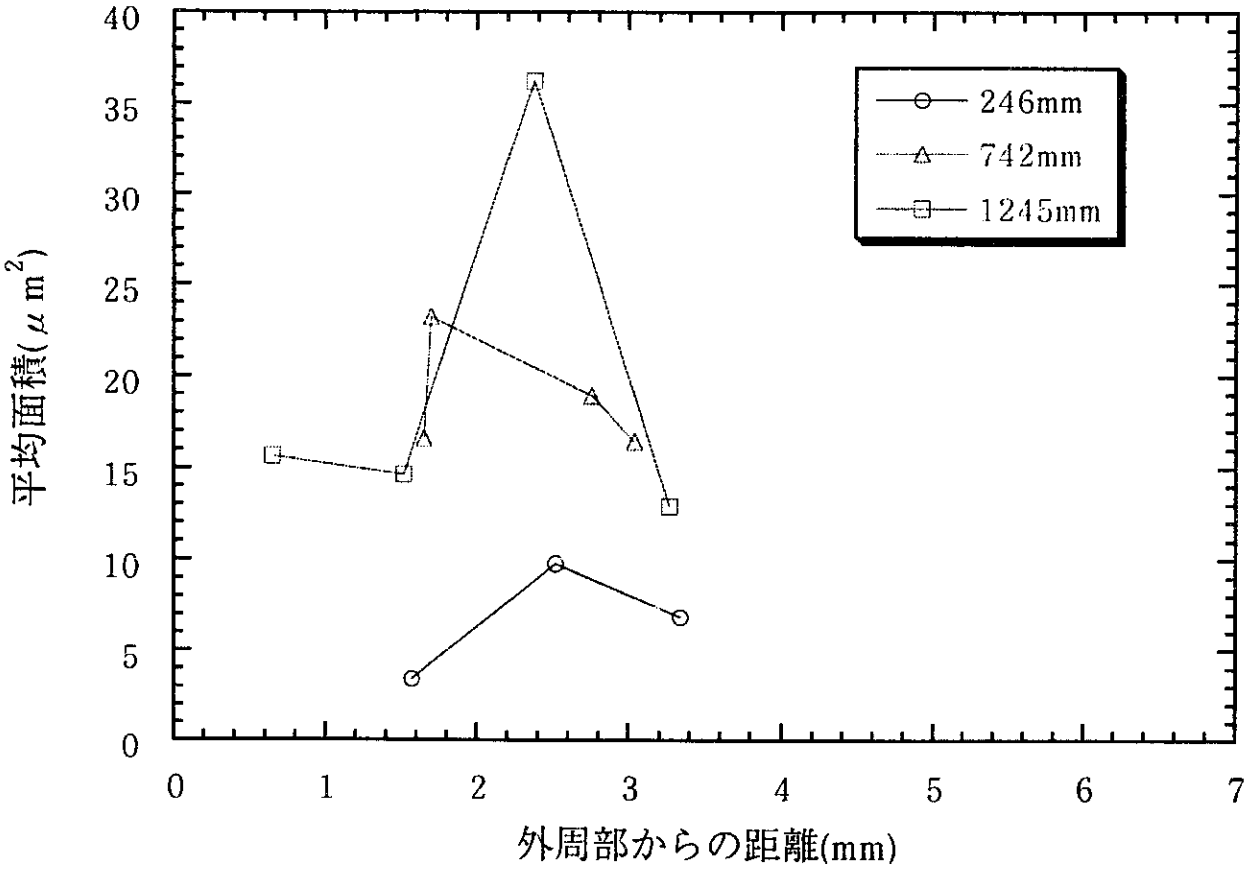


図6.4.1.3　IFA-565-6におけるペレット径方向のポア一個当たりの平均面積

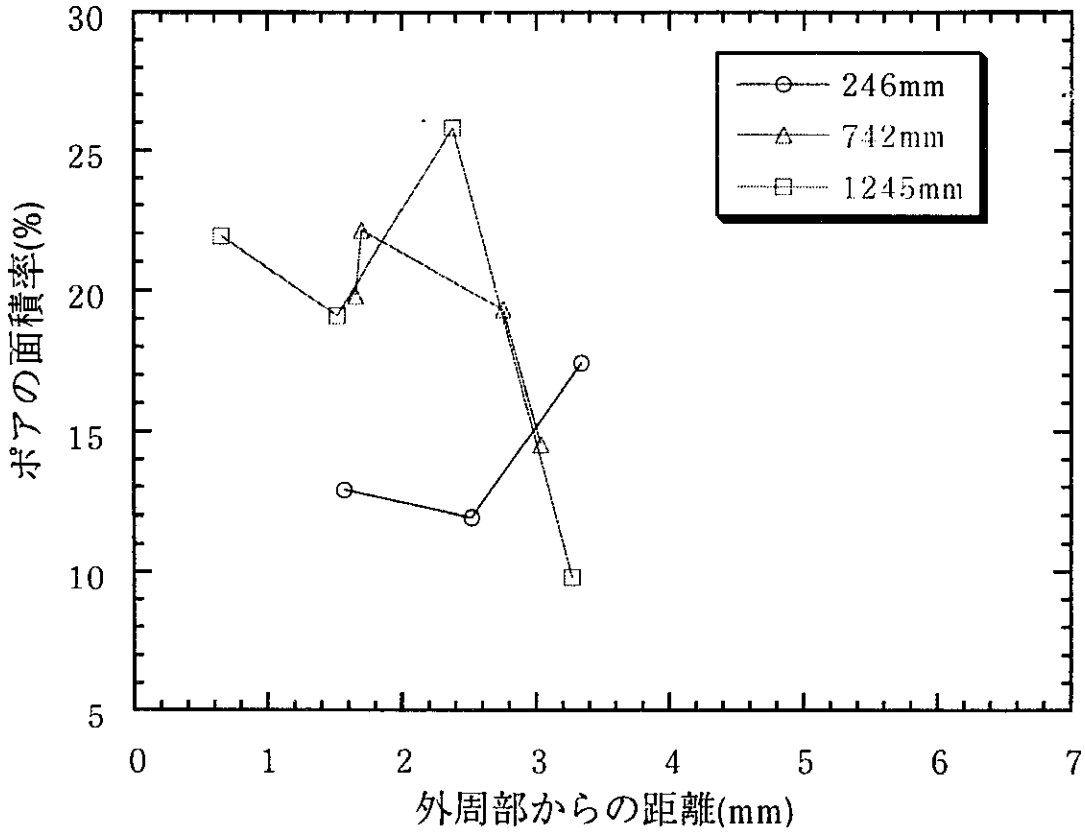


図6.4.1.4　IFA-565-6におけるペレット径方向のポアの面積率変化

6.5 FPガス放出挙動

表6.5.1にIFA-565-3, 4, 6のFPガス放出率を示した。それぞれのFPガス放出率は、16.0、12.7、4.8%でばらつきはあるものの、中空ペレットのIFA-565-4, 6は、中実ペレットのIFA-565-3に比べて低い放出率となっている。また、IFA-565-6が他の2本に比べて特に低い原因としては、中空ペレットであることに加えて、経験最大線出力が低いことが考えられる。なお、ペレットの製造ロットについては、両ロッドともHB-201,-202の2ロットから構成されている。それらの構成割合は、IFA-565-4で 50：50%、IFA-565-6で 60：40%で大差ないことから、FPガス放出率の差への影響は小さいと考えられる。本節で使用した燃焼度及び経験最大線出力は、6.2節で燃焼度分析値により見直した値（表6.2.4）を用いた。

図6.5.1にIFA-514-1とIFA-565-4のFPガス放出率の比較を示す。ここで、FPガス放出率は、照射中の燃料棒内圧測定の実測値から燃料棒内自由体積中に存在する全ガス量を求め、この値から燃料棒への初期封入ガス量、蒸発性不純物ガス量を差し引いてFPガス量を算出し、この値と理論的に求められるFPガス生成量の算出式から求めたFPガス生成量との割合を算出することにより求めた。

同図からFPガス放出率は燃焼度が約7GWd/tMあたりから顕著になっており、IFA-514-1のFPガス放出率は燃焼度約30GWd/tMで約15%まで増加している様子がわかる。これ以降、40.5GWd/tMまでの燃焼度では内圧計が機械的なリミットに達しているため、計装によるFPガス放出率は求められなかった。一方、ロッドNo.4のFPガス放出率は、IFA-514-4からIFA-565-4の全期間で内圧計装値が得られている。IFA-514の照射末期（約41GWd/tM）には約9%で飽和しているが、再装荷して継続照射を開始したIFA-565の初期では11%までわずかに増加している。その後、さらに増加してIFA-565-4としての燃焼末期(約52GWd/tM)には約15%に達して照射を終了している。これをパンクチャ試験したところ 12.7%と計装データの方が高めの値となった。これは、パンクチャ試験ではプレナムガス中のFPガスであるKrおよびXeにのみ注目しているのに対して、計装データにはこれらに加えてHeが含まれていることから高めの値になったものと考えられる。

また燃焼度30GWd/tMまでのIFA-514-1とIFA-514/565-4のFPガス放出率を計装データで比較すると、IFA-514-1の方が高くなっている。この原因としては、中空・中実ペレットによるペレット中心温度の違いが考えられる。IFA-565-4に用いた中空ペレットの中心温度

は、IFA-514-1の中実ペレットに比べて低いことがあげられる。中空と中実ペレットのペレット中心温度を燃料挙動挙動解析コードの結果により比較する。中実ペレットのIFA-514-1は解析結果がないため、IFA-565-3（図6.1.1.1）を代用すると、中空ペレットを用いたIFA-565-4（図6.1.1.2）の方が約400～600℃低い結果である。

同図には、BWR-UO_2燃料及びATR用のPNC製MOX燃料のこれまでに得られたFPガス放出率の燃焼度依存性を合わせて示した。これから、PNC製MOX燃料のFPガス放出率のデータは、UO_2燃料データが 40GWd/tUまでしかないものの、これらのばらつきの中に入っている。なお、最近のBWR高燃焼度燃料は、約37GWd/tUまでの範囲で、FPガス放出率10%未満であり、従来型のBWR燃料に比べてFPガス放出抑制効果が著しいことが特徴的である。

ここで、異なった燃料タイプのFPガス放出率を比較するためには、同一線出力密度で比較することが必要である。一般に、FPガス放出は燃焼度が10GWd/tM以上で起こり、10GWd/tM以上の燃焼度を経験した最大線出力密度がFPガス放出率に最も影響するといわれている。10GWd/tM以上の最大線出力密度の関数として、測定されたUO_2燃料及びPNC製MOX燃料のFPガス放出率を解析した。その結果を図6.5.2に示す。この図から、BWR-UO_2燃料では線出力が35kW/mまでで約20%のFPガス放出率となっているのに対して、IFA-565-3,3,6では最大48kW/mで16%のFPガス放出率であることから、より高い線出力でも同程度のFPガス放出率となっている。なお、ここでの線出力は定義通り燃焼度10GWd/tM以降に経験した最大線出力としたが、ハルデン炉の運転は、図4.1.1.1(1/3～3/3)に燃料棒平均線出力で示すように、局所的なピークを含んでいる。このようなピークが生じるのは、ハルデン炉が多くの試験を抱えながら運転を行っているためで、商業炉のピークを含まない滑らかな線出力履歴と比較すると、このピークをカウントするハルデン炉の方が線出力としては高めになる。ただし、IFA-514/565の最大線出力の設定は、44kW/m（13.4kW/ft）とBWRに比べて高めであった。

表6.5.2にIFA-565-3, 6の軸方向位置742mmでのFPガス残留率を示す。IFA-565-3からのサンプルH36-2の25.6%を除くと、約50~60%の値を示している。この位置は軸方向中央で燃焼度が高く、FPガス残留率が他の位置に比べて低いと考えられるものの、パンクチャ試験で得られたFPガス放出率にこのFPガス残留率を加えても100%に満たない結果となって

いる。この差の一因としては、FPガス残留率測定に当たってFPマイクロドリルで試料サンプリングしているが、この際、一部の残留ガスが試料外に放出されることも考えられる。

表6.5.1　FPガス放出率

ロッドNo.	IFA-565-3	IFA-565-4	IFA-565-6
Kr放出量　Ncm^3 Xe放出量　Ncm^3	15.07 270.50	9.38 183.04	3.46 68.81
ｽﾀｯｸFPガス放出量　Ncm^3	285.57	192.42	72.27
ｽﾀｯｸ重量　tMOX	$1,254.7*10^{-6}$	$1,107.6*10^{-6}$	$1,108.1*10^{-6}$
平均燃焼度　MWd/tMOX *	46,900	45,400	45,400
FPガス生成量　Ncm^3 **	1,780	1,520	1,520
FPガス放出率　%	16.0	12.7	4.8

*：燃焼度分析値による見直し値（表6.2.4）を用いた。

**：FPガス生成量=$1.35*10^{-3}$mol/MWd * 平均燃焼度MWt/tMOX * ｽﾀｯｸ重量tMOX * $22.4*10^3Ncm^3$

表6.5.2 FPガス残留率

サンプルNo.		No.36-2	No.36-3	No.39-1	No.39-2	No.39-3
ロッドNo.		IFA-565-3		IFA-565-6		
局所燃焼度 (GWd/tMOX) *		53.5		52.2		
Kr	生成量 (mol/kg) **	$4.28*10^{-3}$		$4.18*10^{-3}$		
	残留量 (mol/kg)	$0.61*10^{-3}$	$1.77*10^{-3}$	$1.41*10^{-3}$	$1.30*10^{-3}$	$1.65*10^{-3}$
	残留率 (%)	14.3	41.4	33.7	31.1	39.5
Xe	生成量 (mol/kg) ***	$6.79*10^{-2}$		$6.63*10^{-2}$		
	残留量 (mol/kg)	$1.79*10^{-2}$	$4.32*10^{-2}$	$3.58*10^{-2}$	$3.13*10^{-2}$	$3.95*10^{-2}$
	残留率 (%)	26.4	63.6	54.0	47.2	59.6
FPガス残留率 (%)		25.6	62.3	52.8	46.3	58.2

* ：軸方向位置742mmでの燃焼度解析値（表6.2.2）

** ：Kr (mol/kg) = $0.08*10^{-3}$ * 燃焼度GWd/tMOX

*** ：Xe (mol/kg) = $1.27*10^{-3}$ * 燃焼度GWd/tMOX

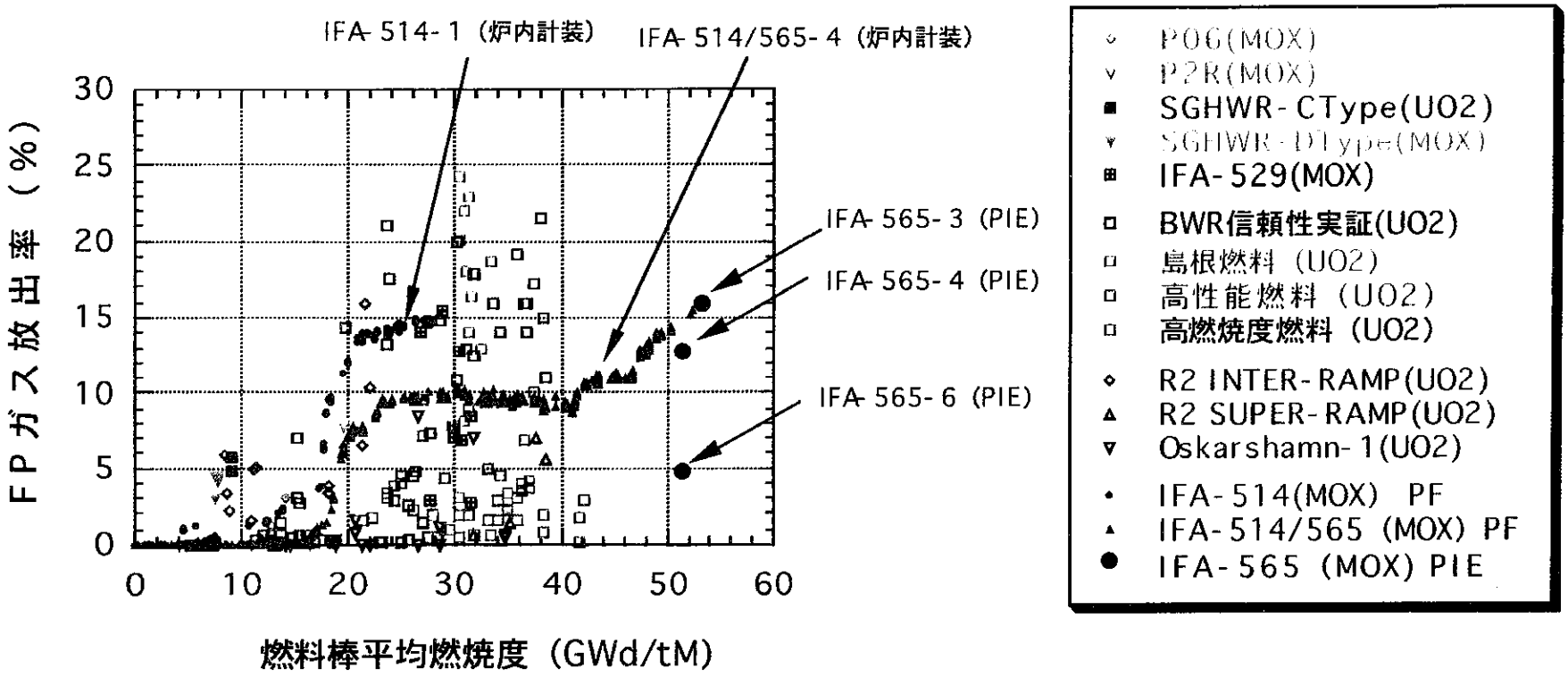


図6.5.1　UO2及びMOX燃料のFPガス放出率の燃焼度依存性

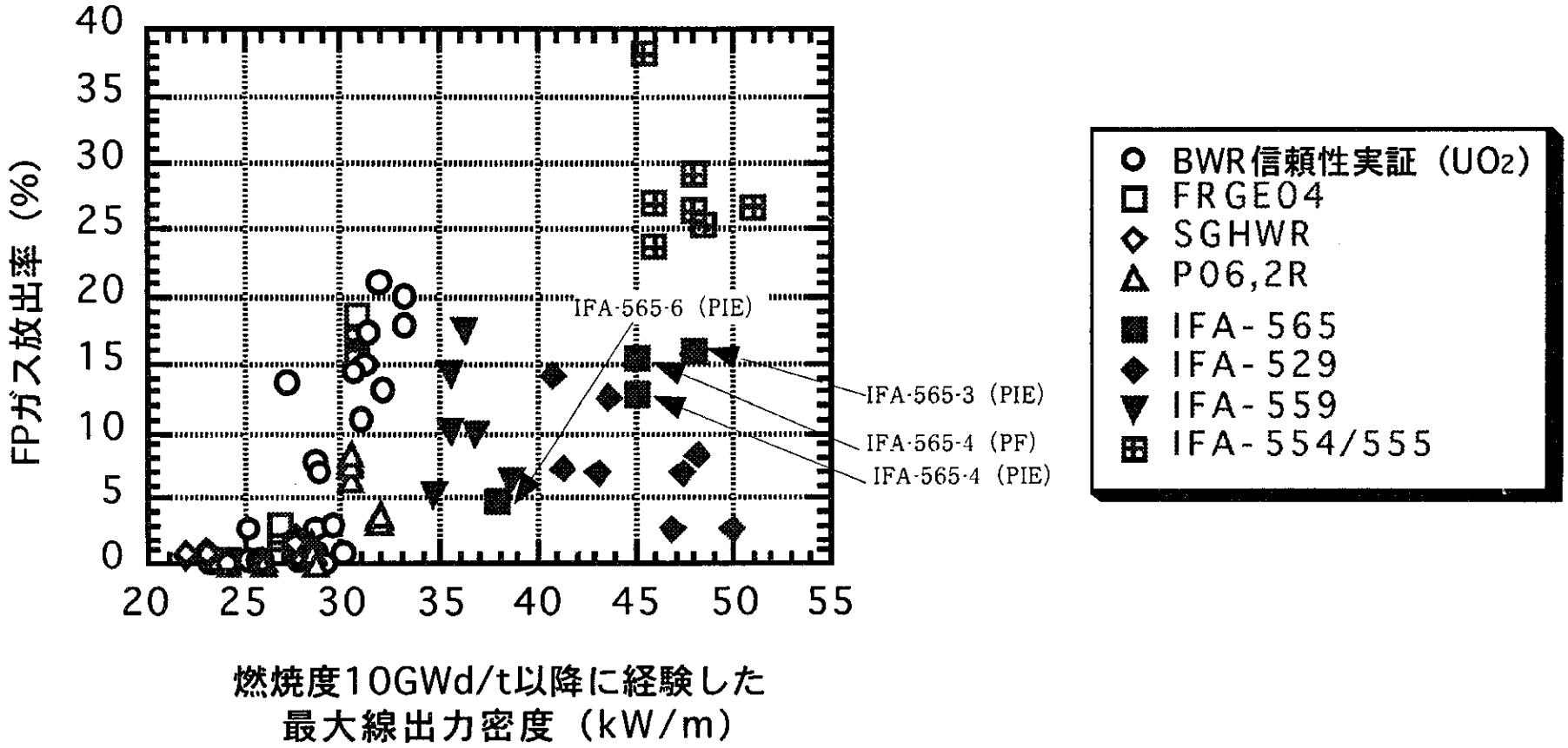


図6.5.2　FPガス放出率の線出力密度依存性

6.6 PCMI挙動

被覆管の燃料側の観察結果では、IFA-565-3、6ともに各燃料で燃焼度が高い700～800mmの一部で被覆管と燃料のボンディングが観察できる。それ以外は、ギャップがはっきり観察できる。高燃焼度に達しているにも係わらず、大きなPCMIが起こっていないことを示唆している。照射前の燃料外径は12.52mmであるがIFA-565-3，4，6の外径変化率は、0.6、0.5、0.4%の増加である。また、プロフィロメトリの測定で観察できる周期的な変動は、ペレット長とほぼ一致するため、ペレットエンド部のPCMIによる変形と考えられる。その変動幅は、IFA-565-3，4，6でそれぞれ、約0.013、0.009、0.015mmであり、0.14～0.24％と変形量は小さく燃料間の違いもない。この結果もPCMIがそれほど大きくなかったことを示唆している。

挙動解析コードによる評価では、ペレットリッジ部での外径変化率は、IFA-565-3，4，6で、照射中の最大外径変化率が約0.48%、0.25%、0.28%であり、照射終了後では約0.06%、0%、0.004%である。また、照射末期のペレット-被覆管ギャップは照射中には閉塞しているが、運転停止時には44～49μmのギャップが存在する。これらの評価結果もまた、PCMIが厳しくなかったことを示しているが、照射後試験の結果と比べると、被覆管の外径変化はプロフィロメトリの結果に比べると小さく、金相観察の結果ではIFA-565-3，6ともに一部ボンディングが観察されているのに対し、ギャップが残っていることを示しており、PCMIに対して少し小さく見積もっているかもしれない。

表6.6.1及び図6.6.1に各金相断面から求めたペレット断面積を求め初期面積との率を示す。中実ペレットは燃焼度に対してほとんど変化がなく、中空ペレットは燃焼度が高いところで断面積の変化率が小さくなっている。その燃焼度の高い中空ペレットの外径変化は他の断面とほぼ同じであるが、内径も大きくなっているために断面積の変化が小さくなっている。これは、このペレットのスウェリングがほとんど起こっていないことを示している。ペレットのスウェリングは燃焼度が増加するほど、気体及び固体スウェリングによりペレット体積が増加する。IFA-565の燃料は、微構造変化の項でも述べたように、製造時から造粒界が存在し、照射中にその造粒界が消失している。また、中空ペレットにおいては中空径の増大がおこり、これらとペレットのスウェリングは複雑に関係していると思われる。いずれにしても造粒界の消失と中空径の増加は、スウェリングを緩和する働きをしていると思われる。

表6.6.1　燃料ペレットの断面積変化率

燃料棒	IFA-565-3　中実ペレット			IFA-565-6　中空ペレット		
軸方向位置	at 246mm	at 742mm	at 1245mm	at 246mm (内径)	at 742mm (内径)	at 1245mm (内径)
燃焼度	47.0GWd/t	53.5GWd/t	39.4GWd/t	45.5GWd/t	52.2GWd/t	37.5GWd/t
製造時のペレット直径	10.55mm	10.55mm	10.55mm	10.55mm (3.49mm)	10.55mm (3.49mm)	10.55mm (3.49mm)
照射後のペレット直径	10.93mm	11.14mm	11.09mm	11.07mm (3.65mm)	11.11mm (4.85mm)	10.93mm (3.57mm)
断面積変化率	7.3%	11.5%	10.5%	10.2%	0.8%	7.7%

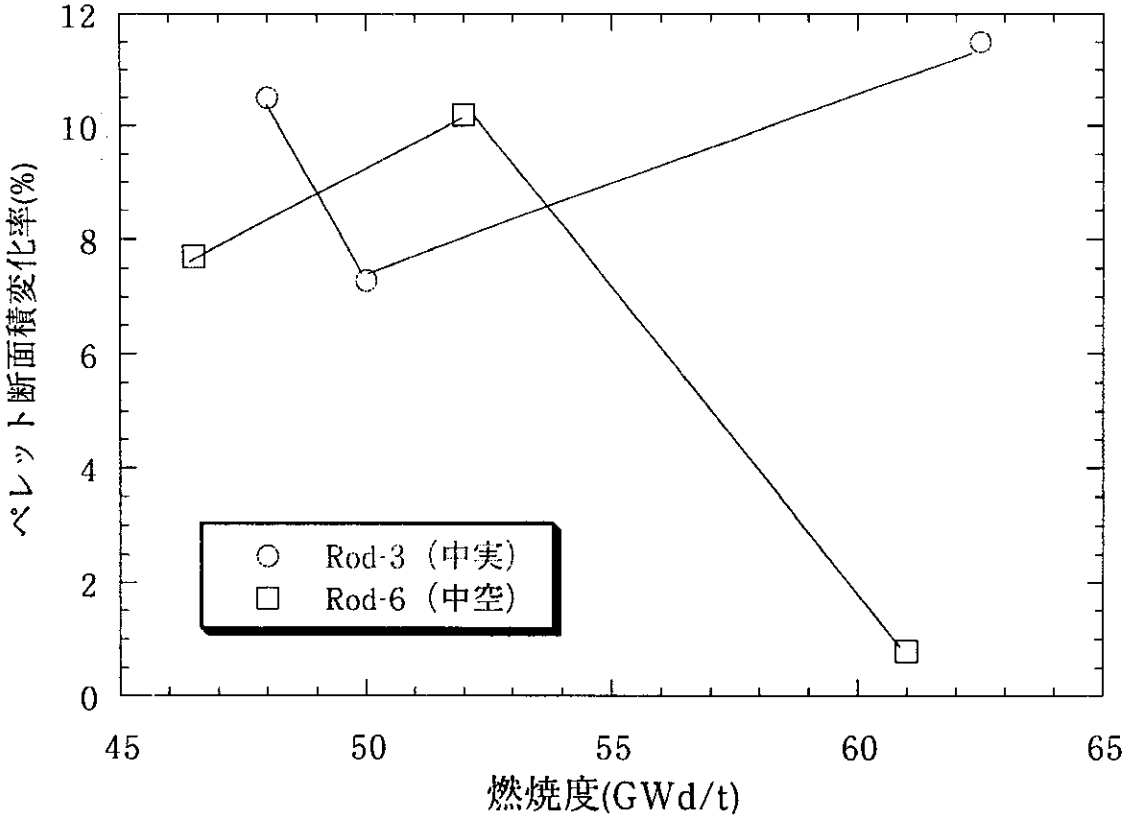


図6.6.1　ペレット断面積変化率と燃焼度

6.7 被覆管の健全性

6.7.1 被覆管内面観察

燃料と被覆管のボンディングについて、IFA-565において被覆管より燃料を取り除く作業は比較的簡単であり、燃料と被覆管の間に強いボンディングはない。これに対してIFA-514のサンプルではペレット除去にドリルを用いるほど強いボンディングがあったと報告されている。燃料-被覆管のボンディングと燃焼度との間には比例関係はないようである。燃焼度とボンディングの関係については他の要因も併せて考える必要がある。

表面観察については、IFA-565-3の表面観察（図5.13.1）では690-718mmでは比較的はっきりとペレットの境界が見える。これは硝酸処理前、後ともである。これに対して980-1000mmではペレットの境界が分かりにくくなっている。どちらの観察位置においても付着物らしきものは見あたらない。IFA-565-6（図5.13.2）では硝酸処理前は690-718mm、980-1000mmともに境界線が見えない。（燃料の残りが付着していると考えられる）硝酸処理後は境界線が見えてきている。

IFA-565-3、IFA-565-6ともに690-718mmと980-1000mmでの境界線の太さの比較をすると980-1000mmの方が境界線が太くなっている。これより燃料は上部のほうが照射中の変化が大きいと考えられる。また同じ観測位置でのIFA-565-3とIFA-565-6の境界線の太さの比較をすると、IFA-565-6のほうが境界線が太く照射中にペレットが大きく変化したと思われる。

6.7.2 被覆管の水素分析

図6.7.2.1に被覆管製造時、IFA-514、IFA-565の試験データを示す。

被覆管製造時の水素分析では平均 7ppmとなっている。これに対し、照射後（IFA-565）では誤差を考慮するとIFA-565-3、6ともに位置によらず均一に水素含有量が上昇している（120～150ppm）。今回の照射試験では水素含有量は中実、中空、また軸方向位置に関わらず一定の量で増加していることが分かる。また図6.7.2.1にBWR信頼性実証試験 [10] の結果と合わせて示した。燃焼度に比例して水素含有量が増加していることが分かる。

5.8.2節「被覆管 水素化物」の図5.2.1をみるとIFA-565の被覆管の水素化物の分布はIFA-

565-3、IFA-565-6ともに水側にかなり偏っている。IFA-514での水素化物の分布にもその傾向が若干見受けられるがその大部分は均一に分布している。またIFA-514、IFA-565ともに角度的に偏りがあるところが一部あった。今回の照射試験からは燃焼度の増加に伴い、水素化物が水側に多く発生する傾向が見られた。水素化物の移動の有無については分からなかった。（水素化物の発生、移動については燃焼度、その位置での温度勾配、温度勾配の続いた時間、等を考慮して解析を行わなければならない。）また、表6.7.2.1の水素化物面積比の平均値からIFA-565の下部（246mm）、中間（742mm）、上部（1245mm）での水素化物量を比較すると、IFA-565-3（中実）では上端、下端が多く中間は少ない。IFA-565-6（中空）については上端に近い方が多い傾向がある。水素化物の発生傾向が中実ペレットと中空ペレットで異なるかどうかはこれに関する試験データをさらに収集する必要がある。IFA-514に関しては上部（965mm）が比較的水素化物量が少なかった。

析出方位に関してはIFA-565-3（中実）では基本的に径方向、周方向の混合であり、燃料側の一部に径方向の支配的な箇所がある。IFA-565-6（中空）では周方向が支配的であった。IFA-514では全体的に燃料側は周方向、水側は径方向に水素化物が延びている傾向がある。析出方位に関しては燃焼度、ペレット形状により傾向に差があった。これらの議論はさらに試験データを収集し、その傾向を調べる必要がある。

表6.7.2.1　被覆管断面の水素化物面積比平均値

	IFA-565-3	IFA-565-6
246mm	16.17	13.93
742mm	8.72	18.43
1245mm	10.50	23.04

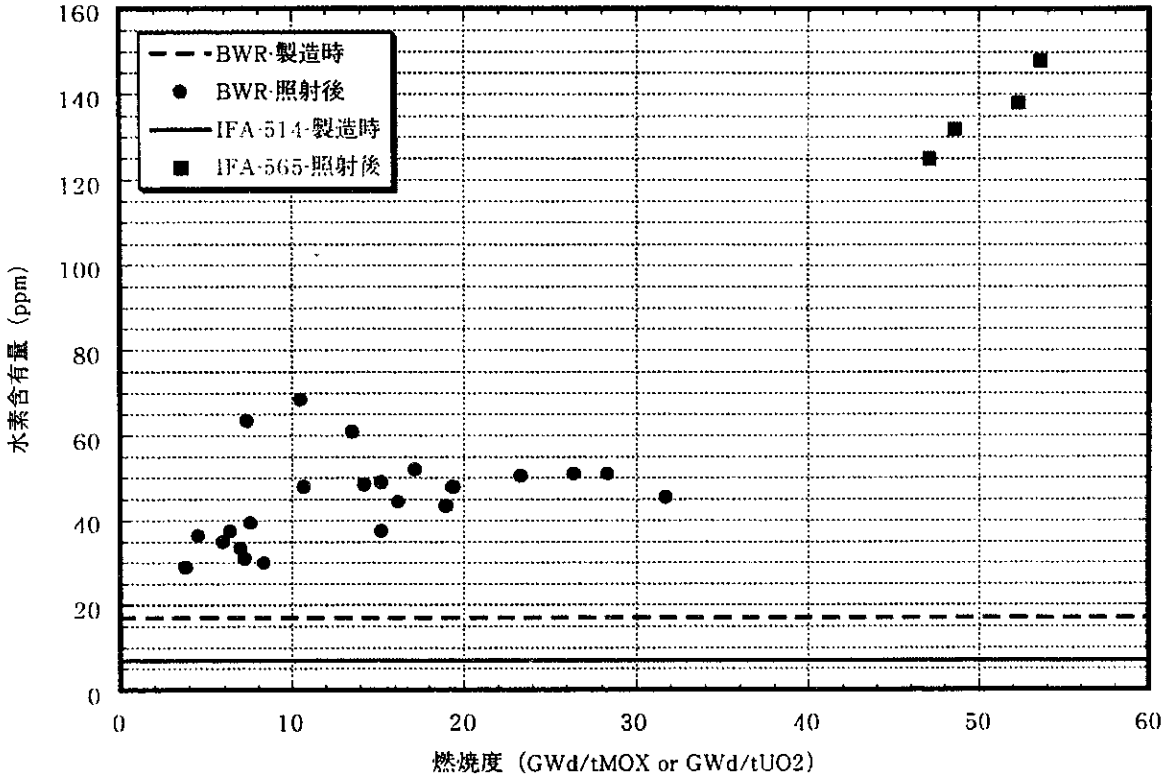


図6.7.2.1　水素含有量の比較

6.7.3　被覆管の酸化物

IFA-514、IFA-565ともに水側に厚い酸化膜の相が形成されている。また酸化物層は、IFA-514、IFA-565-3、IFA-565-6とも、またどの位置でも連続的かつ均一である。燃料側はIFA-514、IFA-565ともに一部燃料の付着が見受けられるが厚さは水側と比較すると薄い。酸化物層の厚さについては、軸方向位置では図5.8.3.17～20に示すようにIFA-514、IFA-565ともに全体的に下側ほど厚い傾向がある。

IFA-565-3では初期ノジュラー腐食が、1245mm、180°に観察される（図5.8.3.5C）。IFA-565-6では、742mmと1245mm、180°で観察される（図5.8.3.11Cと5.8.3.13C）。

表6.7.3.1にIFA-514、IFA-565の軸方向位置での酸化膜厚さの平均値を示す。また、図5.8.3.1.7に横軸に燃焼度、縦軸に酸化膜の厚さをとったグラフを示す。これらより今回の試験においては酸化膜の厚さはIFA-514、IFA-565で大差がなく、高燃焼度において酸化膜の増加があまり見られない。被覆管としては良い傾向にある。

表6.7.3.1　軸方向位置での酸化膜厚さ

IFA-514		IFA-565	
軸方向位置(mm)	酸化膜厚さ(μm)	軸方向位置(mm)	酸化膜厚さ(μm)
・IFA-514-1		・IFA-565-3	
275	48.5	246	45.5
720	36.3	742	32.8
965	105.3	1245	18.8
・IFA-514-2		・IFA-565-6	
715	31.3	246	30.5
		742	24.5
		1245	14.8
・IFA-514-5			
260	48		
715	34.3		

6.7.4　バースト試験

IFA-565についてはバースト後のサンプル表面状態でIFA-565-3、6を比較すると、IFA-565-3の方は被覆管の形が変形しないまま破裂しているのに対し、IFA-565-6では一旦被覆管が膨れてから破裂している。またバースト試験カーブを見てもIFA-565-3は脆性、IFA-565-6は延性を示している。

5.8.2節「被覆管　水素化物」を見てみるとIFA-565-3については水素化物の析出方位は半径方向と周方向の混合である。IFA-565-6に関しては析出方位は周方向のみである。この水素化物の析出方位によってバースト試験の被覆管の延性、脆性が決められていると考えられる。

IFA-514ではIFA-514-2（480-665mm：高照射領域）、IFA-514-5（285-470mm：中照射領域）はともに一旦膨れて破裂している。

σmax（最大内圧破裂強さ）を比較すると、IFA-565についてはIFA-565-6の方が若干強いということが分かる。IFA-514については最大内圧破裂強さはIFA-514-2, 5の順（照射量が高い順）である。

図6.7.4.1～2に燃焼度、平均高速中性子照射量と内圧破裂強さ、周方向伸びでの比較を

示す。内圧破裂強さに関しては高速中性子、燃焼度に対して、ともにばらつきはあるもののだいたい一定の値を示している。若干、高速中性子量に対して右上がり傾向であるともいえる。周方向伸びに関してはかなりばらつきがあるが、高速中性子量が大きいほど周方向伸びの大きいものが現れにくくなる傾向がある。これより内圧破裂強さ、周方向伸びともに高速中性子量による照射硬化が大きく影響していると考えられる。

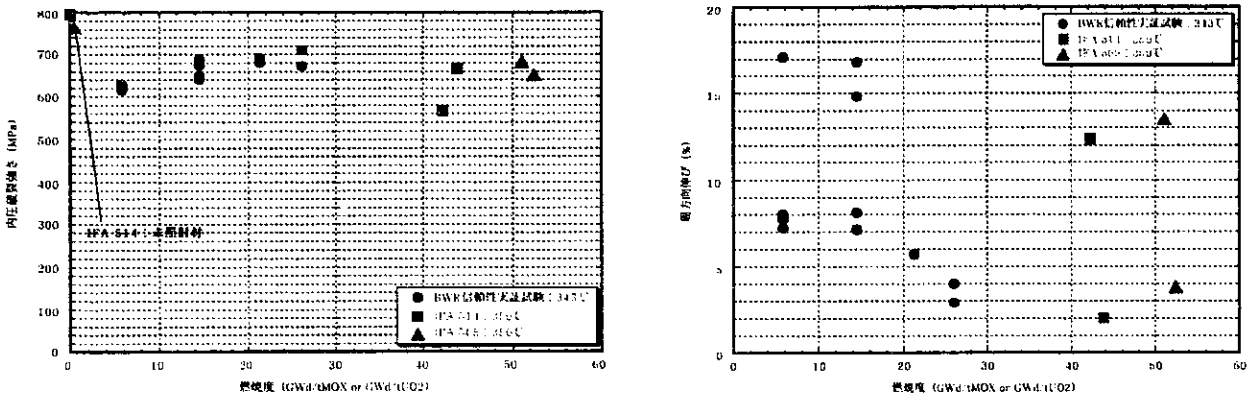


図6.7.4.1　燃焼度-内圧破裂強さと燃焼度-周方向伸び

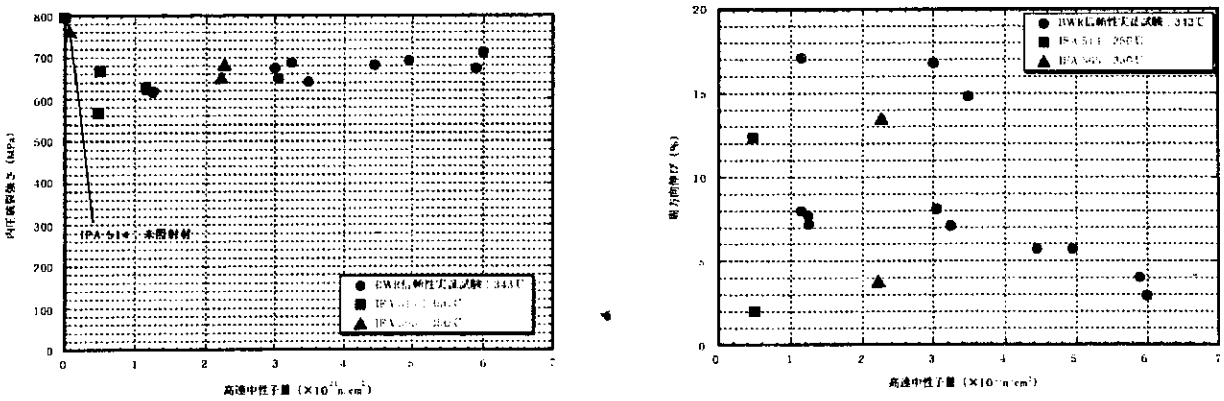


図6.7.4.2　高速中性子量-内圧破裂強さと高速中性子量-周方向伸び

6.7.5 被覆管の健全性のまとめ

今回の試験結果において強いボンディングがなかったこと、水素含有量がZry-2の使用範囲内に入っていること（400ppm以下）、高燃焼度化にともない酸化膜の厚さが飽和すること、バースト試験で照射後の周方向伸びが1%以上であることより、この被覆管は健全であったと考える。

表6.7.1　被覆管製造時、IFA-514、IFA-565の試験データ一覧

		製造時	IFA-514	IFA-565
内面観察			ボンディング有り(強)	ボンディング無し
水素化物	水素分析	TOP：5ppm MID：7ppm BOT：9ppm 規格値≦25ppm	― ― ―	・ロッド3 148ppm（718-720mm） 132ppm（1008-1010mm） ・ロッド6 138ppm（718-720mm） 125ppm（1008-1010mm）
	析出方位	―	・ロッド1 下部、上部では周方向に均一に分布。中間部は90度に偏り。 量的には上部が少ない。軸方向では中間部が下部より多い。 ・ロッド2 どの角度も水側が水素化物が多い。 ・ロッド5 均一に分布。水側が水素化物が多い。 ・析出方位は全体的に燃料側は周方向、水側は半径方向に延びている傾向。	・ロッド3 周方向では不均一に分布。軸方向では246と1245が多く、742では少ない。径方向では水側ほど水素化物が多い傾向。 析出方位は径方向、周方向の混合。 ・ロッド6 周方向では均一に分布。軸方向では上側ほど水素化物が多い。径方向では水側ほど水素化物が多い傾向。 析出方位は周方向が支配的。
酸化膜最大厚	平均値	―	・ロッド1：外面 [内面] 48.5μm [8μm]（275mm） 36.3μm [10μm]（720mm） 105.3μm [12μm]（965mm） ・ロッド2：外面 [内面] 31.3μm [12μm]（715mm） ・ロッド5：外面 [内面] 48μm [18.5μm]（260mm） 34.3μm [13.3μm]（715mm）	・ロッド3：外面 45.5μm（246mm） 32.75μm（742mm） 18.81μm（245mm） ・ロッド6：外面 30.5μm（246mm） 24.5μm（742mm） 14.8μm（1245mm）
バースト試験 （340℃）		σmax：796MPa (常温) TCE　：32.2% (常温) 規格値≧640MPa	ロッド2（480-665mm） σmax：：667MPa TCE　：2.01%（脆性） ロッド5（285-470mm） σmax：567MPa TCE　：12.36%（延性）	ロッド3（760-910mm） σmax：651MPa TCE　：3.8%（脆性） ロッド6（760-910mm） σmax：683MPa TCE　：13.5%（延性）

7. 結論

水炉用MOX燃料 (IFA-565) の照射データ及び照射後試験結果の整理と解析・評価から以下のことが結論される。

(1) ペレットピーク燃焼度で61GWd/tMOXの高燃焼度まで健全に燃焼することを確認した。

(2) FPガス放出挙動はBWRUO2及びATR用MOX燃料の挙動と類似しており、FPガス放出率に差は認められない。また、中空ペレットのFPガス放出率 (13.0%) は中実ペレット (17.3%) より低い。

(3) 金相観察結果及びペレット長の変形量からいずれの燃料棒にも大きなPCMIは生じておらず、ペレット形状（中実と中空）がPCMI挙動に与える影響に明確な差は認められない。しかし、中空ペレットの方が中実ペレットに比べて燃料棒外径変化率がやや小さく、外径変化の抑制に効果がある。

(4) 燃料棒の伸びはBWRUO2燃料棒及びATR用MOX燃料棒に比べてやや小さく、約0.15%である。

(5) 製造時に存在したペレットの造粒界が照射中に消失することにより、ペレットスウェリングの緩和に効果のあったことが推察される。

参考文献

[1] PNC N841 77-53 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR照射試験（Ⅰ）
IFA-514燃料集合体の設計

[2] PNC N843 78-01 Certificate and Record of HALDEN IFA-514 Test Fuel Rods in PNC Irradiation Program

[3] PNC N841 79-39 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR照射試験（Ⅱ）
IFA-514燃料集合体の製作

[4] PNC N841 83-69 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR照射試験（Ⅲ）
IFA-514燃料集合体の照射　中間報告

[5] PNC I845 85-03 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR（第一次、第二次）照射試験（Ⅳ）
IFA-514/529燃料集合体の照射データの中間報告　第２報

[6] PNC N8410 86-029 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR（第一次、第二次）照射試験（Ⅴ）
IFA-514/529燃料集合体の照射データの中間報告　第１報

[7] PNC N8410 86-040 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR（第一次、第二次）照射試験（Ⅵ）
ハルデン炉照射燃料のギャップ熱伝達評価

[8] PNC ZN8410 95-117 「軽水炉用」プルトニウム富化燃料のHBWR照射試験（Ⅵ）
IFA-514燃料集合体の照射データ最終報告及び照射後試験結果報告

[9] K.Ogata et al. ASTM STP-1023 (1989) 291-314

[10] 三島他、「沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験」
日本原子力学会誌, Vol.29, No.2 (1987)