

新型転換炉実証炉燃料の HBWRにおける負荷追従試験 (VI)

IFA-555ロッド1照射後試験結果 (その2)

1996年3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)

新型転換炉実証炉燃料のHBWRにおける負荷追従試験 (VI)

IFA-555ロッド1照射後試験結果 (その2)

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*
大代 操*、森平 正之*、森本 恭一*
菊池 圭一**

要 旨

OECDハルデンプロジェクトとしてATR実証炉燃料の負荷追従試験 (IFA-554/555) を実施している。IFA-555ロッド1の照射後試験項目のうち、前報ですでに金相試験、SEM試験、 α 及び β/γ オートラジオグラフィの結果について報告している。本報では、断面ガンマスキヤニング等ペレット分析に係る試験及び被覆管の強度試験について結果を報告するとともに、IFA-555ロッド1の照射後試験結果についてまとめる。

得られた結果は、以下の5点である。

- (1)日負荷追従照射試験は、照射中のリークなしに、計画通り第23サイクルまで照射された。
- (2)燃料棒伸び、FPガス放出率の観点から、日負荷追従照射による顕著な影響は認められなかった。
- (3)パンクチャ試験でFPガスが測定されなかったが、これは炉内照射中に、腐食の進んでいた被覆管に照射終了後、PIEまでの期間にリークが生じたものと考えられる。この原因として、IFA-554ロッド5同様、腐食感受性の高いZrライナー管を使用していることがあげられる。照射後試験では、燃料要素上部の被覆管表面の荒れと著しい酸化膜形成及び剥離、並びに水素化物の被覆管肉厚部への浸透が観察されている。
- (4)燃料要素上部ペレットの一部に破碎が認められ、その直下で中心空孔と柱状晶の形成が観察された。この原因の1つとして、照射中に経験した線出力が、試験計画値49.2kW/mを超え燃料要素中最高55.8kW/mに達したことがあげられる。
- (5)被覆管リング引張試験及び水素分析試験結果から、燃料要素上部のサンプルに、水素含有量が低いにもかかわらずリング引張強度が著しく低下する傾向が見られた。

* 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

** 技術開発推進部 炉心・燃料設計室

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法と結果	5
2.7 パンクチャ試験	5
2.8 残留FPガス	6
2.9 マイクロγスキャニング	16
2.10 燃焼度分析	40
2.11 被覆管内表面の外観観察及びSEM観察	46
2.12 リング引張試験	55
2.13 被覆管の水素分析	64
2.14 マイクロ硬さ測定	66
2.15 パースト試験	69
3. 結果の検討	72
3.1 線出力と燃焼度の評価	72
3.2 燃料ペレットの組織変化	74
3.3 FPガス放出挙動	86
3.4 被覆管の健全性	90
3.5 燃料スタック上部の破碎燃料の堆積について	94
4. 結論	106

1.はじめに

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

- (1) IFA-554/555燃料の設計 (PNC ZN841 85-29)
- (2) IFA-554/555燃料要素製造 (PNC I843 85-38)
- (3) IFA-554/555燃料集合体の照射データ中間報告 (PNC PN8450 92-010)
- (4) IFA-554/555照射試験中間報告書 (PNC ZN8410 95-210)
 - ① 照射データまとめ
 - ② 非破壊試験 (全7ロッド)
 - ③ 破壊試験 (IFA-554ロッド5のみ)
- (5) IFA-555ロッド1の照射後試験結果 (その1) (PNC ZN8410 95-211)
 - ① 破壊試験 (IFA-555ロッド1のみ)
 - (a) 燃料ペレット及び被覆管の金相試験
 - (b) 燃料ペレットのSEM観察
 - (c) 燃料棒の α 及び β/γ オートラジオグラフィ

今回は、前報(5)に引き続いてIFA-555ロッド1 (以下「IFA-555.1」という) に関する以下の項目について評価・解析し、照射後試験結果を取りまとめた。

- (6) IFA-555.1の照射後試験結果 (その2)
 - ① 破壊試験 (IFA-555.1のみ)
 - (a) マイクロスキャン等のペレット分析
 - (b) 被覆管の強度試験
 - (c) 照射後試験結果 (上記(5)と(6)) の考察

なお、今後は、残る5ロッド (IFA-554ロッド1,2,3,4,6) の破壊試験を実施し、解析することとしている。

IFA-555.1の非破壊試験結果 (上記(4)) において、燃料棒が、特に燃料上部において顕著な照射損傷を受けていると結論付けた。中性子ラジオグラフでは、この位置で、被覆管に大きな水素化物が生じていた。また、燃料棒のパンクチャ中にFPガスは採取されなかったことから、被覆管には欠陥があり、この欠陥を通してFPガスが放出したと考えられる。

IFA-555.1燃料棒は、ATR実証炉サイズの燃料棒である。負荷追従の照射試験のためのハルデン炉への燃料装荷は、1985年の10月である。照射リグを強制循環ループ内で、冷却水圧力が73.5気圧、冷却水温度が288℃のATR条件下で、照射した。

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

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

燃料棒下部のVノッチから232, 401及び509mmの位置で横断面試料を、462～478mmの位置で縦断面試料を採取した。また、試料の角度は、顕微鏡写真上の黒点を0°とし、角度は燃料を上部から見て、時計方向にカウントした。図1.1に燃料棒の切断位置を中性子ラジオグラフ写真のコピーの上に示す。

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

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

表2 略号について

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

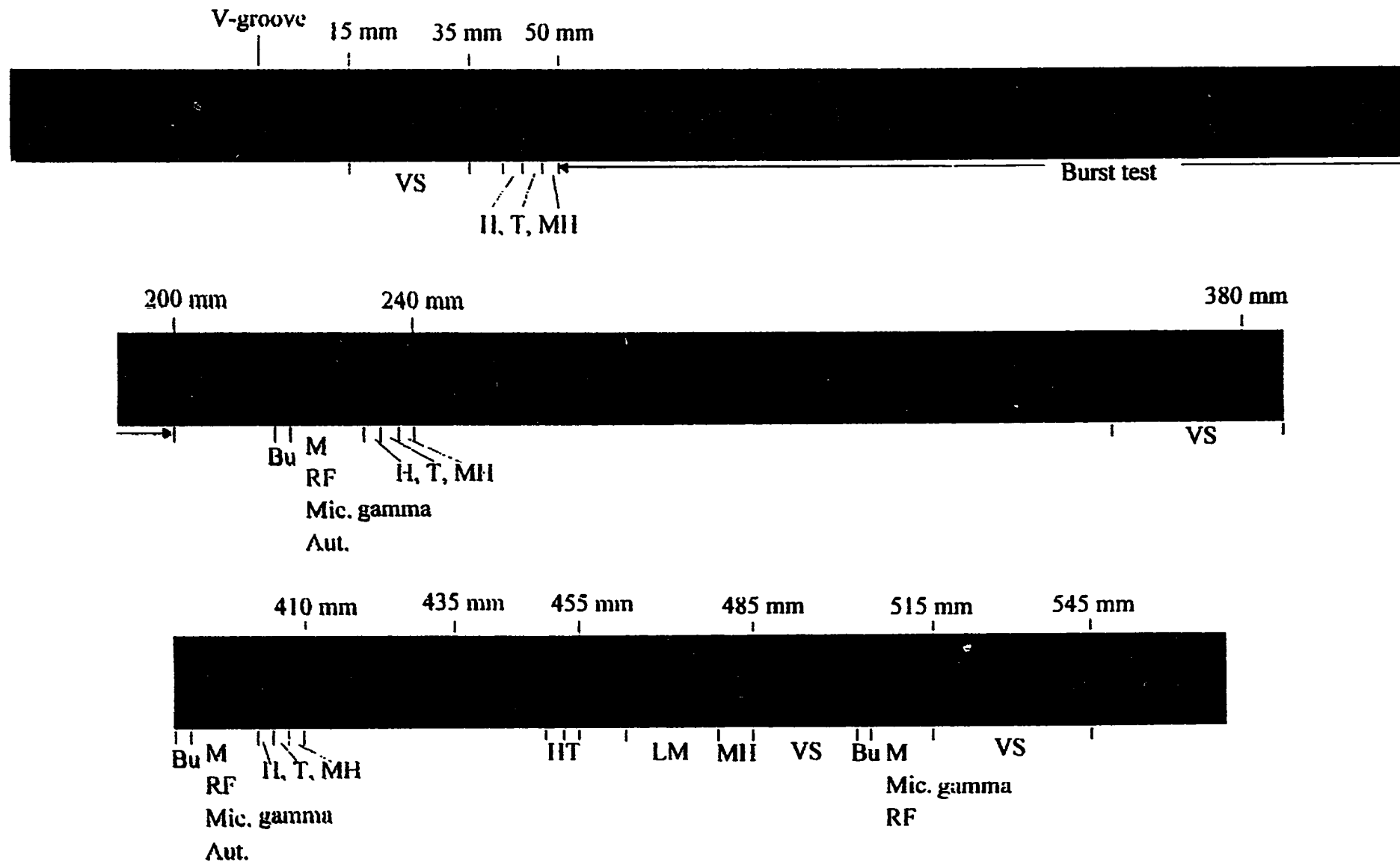


図1.1 燃料棒の中性子ラジオグラフィ上での切断位置

2. 試験方法と結果

2.1～2.6章については、前報¹⁾に報告済みであり、本報告書では、2.7章以降について述べる。

2.7 パンクチャ試験

IFA-555.1の非破壊試験結果に関する前報¹⁾において、燃料棒が、特に燃料上部において顕著な照射損害を受けていると推定され、中性子ラジオグラフではまた、この位置で被覆管に大きな水素化物が生じていることが確認された。

また、燃料棒のパンクチャ試験を実施しようとしたが、ロッドがリークしていたためにパンクチャ中にFPガスを採取できなかった。

したがって、もっともリークしていると考えられるのは、ロッド上部半分であろう。

2.8 残留FPガス

IFA-555.1からカットされた金相用試料に超音波で3つの穴を開け、全9個の微試料を残留FPガス分析用に使用した。それらは、金相用の3試料から準備した。

微試料のサンプリング位置を表2.8-1及び図2.8-1に示す。軸方向位置は、下部端栓のVノッチからmm単位で測定した。

試料を重量測定した後、あらかじめ凍結した濃硝酸液の入ったmlサイズの小さなガラス製のバイアルピン2個に移した。

冷却されている最中、そのバイアルピンを真空排気した。その後、試料を溶解するために温度を40℃まで上昇させた。

微試料を完全溶解した後、硝酸ガスを凍結するためにバイアルピンを約-80℃まで冷却した。それから、FPガスをあらかじめ真空排気した試料容器に移し、その試料容器を質量分析にかけた。質量分析の結果を表2.8-2に示す。試料H-29.3のKr同位体組成が他のものと異なっていることに注意する必要がある。これは、分析する前に少量の空気が試料容器に混入したことを示唆している。

図2.8-2～4に各試料における中心からの位置に対するKr及びXeの各同位体重量比を示す。この結果から、各試料ともKr、Xe同位体は、半径方向にほとんど変化がなかった。この際、図2.8-4の試料H-29.3 ($rs/s=0.76$) のKr同位体の値は、上記の理由から評価外とした。

次に、表2.8-3に試料1mg当たりのKr及びXeの割合を示し、図2.8-5には各試料における割合を中心からの位置に対して、また図2.8-6には軸方向に対してプロットした。図2.8-5から、Kr、Xeとも軸方向位置が高くなるにつれ、ペレット中心付近での割合低下（試料H-28）は、試料H-26ではフラットとなりさらに高くなると、逆にペレット周辺部で低下（試料H-29）している。図2.8-6からは、軸方向位置が高くなるに従いKr、Xeの割合が小さくなっていることがわかる。

表2.8-1 残存F P ガス分析の試料採取位置

試料 No	試料軸方向位置 (mm)	中心からの位置 (r s / r)
H-26.1	401	0.06
H-26.2	〃	0.49
H-26.3	〃	0.86
H-28.1	232	0.19
H-28.2	〃	0.44
H-28.3	〃	0.83
H-29.1	509	0.26
H-29.2	〃	0.51
H-29.3	〃	0.76

ドリル寸法：外径=1.474mm

内径=1.068mm

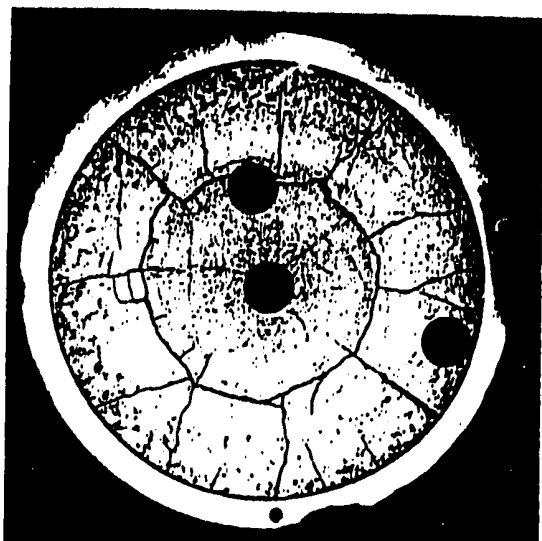
燃料被覆管：外径=12.71mm

表2.8-2 残存F P ガス分析

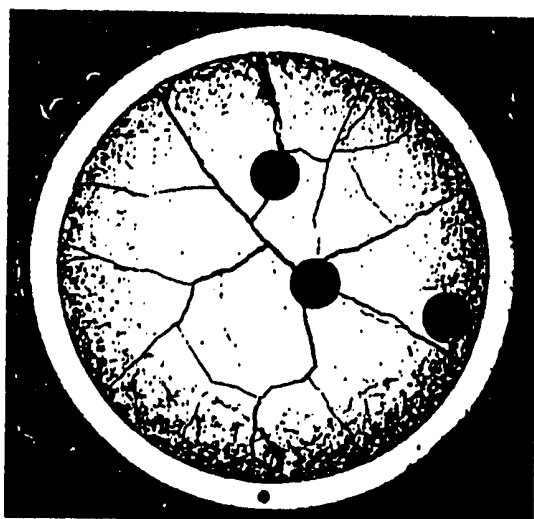
	試料 No.								
	H-26 1	H-26 2	H-26 3	H-28 1	H-28 2	H-28 3	H-29 1	H-29 2	H-29 3
Kr83 %	14.5	15.5	13.6	14.4	14.6	13.3	12.9	13.1	13.0
Kr84 %	35.2	29.3	33.1	38.2	31.1	32.9	37.5	30.6	51.2
Kr85 %	5.1	8.6	5.2	5.4	5.7	5.0	4.7	6.7	2.3
Kr86 %	45.1	46.6	48.0	41.9	48.6	48.8	44.9	49.6	33.5
Kr 総重量 (μg)	0.34	0.03	0.45	0.08	0.88	0.88	0.21	0.07	0.05
Kr 総体積 (10^{-3}Ncm^3)	0.090	0.008	0.119	0.021	0.233	0.233	0.055	0.019	0.013
Xe131 %	10.4	10.5	9.9	11.0	11.0	10.5	9.0	9.7	10.0
Xe132 %	18.1	18.4	19.9	18.5	18.8	20.0	20.7	18.1	22.2
Xe134 %	27.1	27.4	27.3	26.5	27.4	27.2	26.3	27.0	25.3
Xe136 %	44.3	43.6	42.9	43.9	42.8	42.8	44.0	45.2	42.4
Xe 総重量 (μg)	10.70	1.18	8.83	1.29	41.40	50.83	4.48	1.85	0.72
Xe 総体積 (10^{-3}Ncm^3)	1.788	0.197	1.476	0.216	6.918	8.494	0.749	0.309	0.120
試料重量(mg)	34.0	3.5	43.9	22.1	29.5	30.6	17.4	5.3	14.8

表2.8-3 試料1mg当たりのKr及びXeの割合

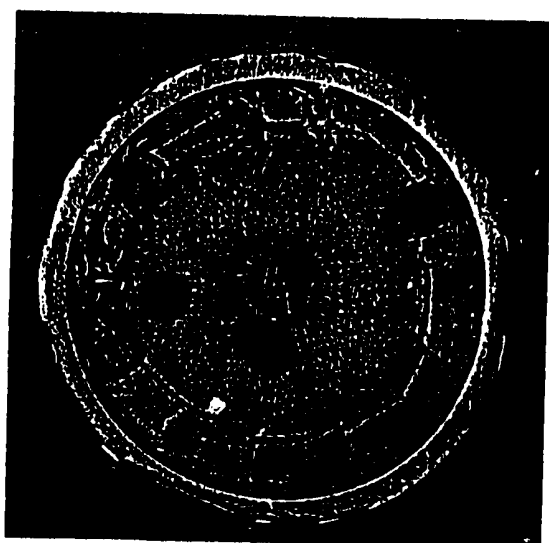
	試料 No								
	H-26 1	H-26 2	H-26 3	H-28 1	H-28 2	H-28 3	H-29 1	H-29 2	H-29 3
Kr重量 (μg)	0.34	0.03	0.45	0.08	0.88	0.88	0.21	0.07	0.05
Kr割合 (ppm)	10	9	10	4	30	29	12	13	3
Xe重量 (μg)	10.70	1.18	8.83	1.29	41.40	50.83	4.48	1.85	0.72
Xe割合 (ppm)	315	337	201	58	1403	1661	257	349	49
試料重量 (mg)	34.0	3.5	43.9	22.1	29.5	30.6	17.4	5.3	14.8



H - 26

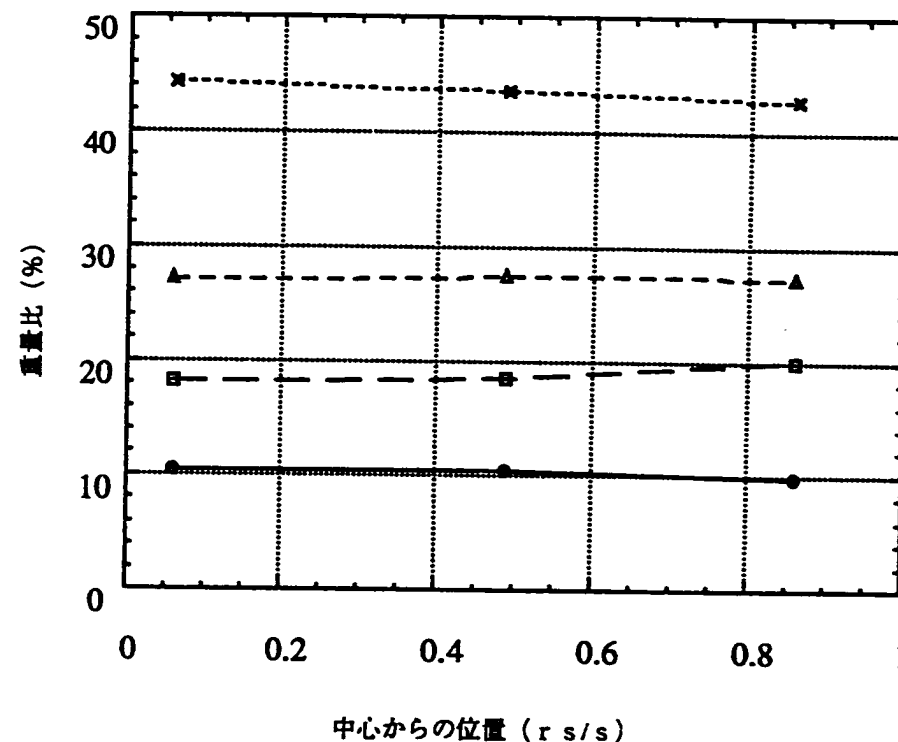
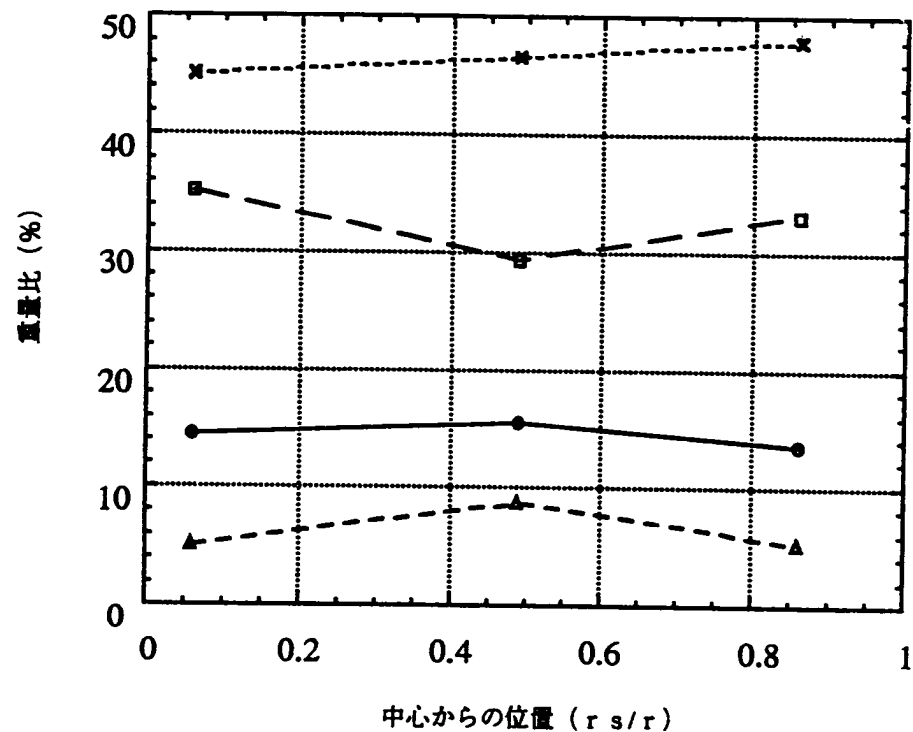
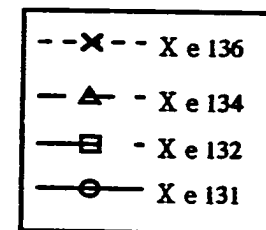
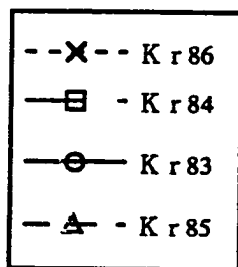


H - 28



H - 29

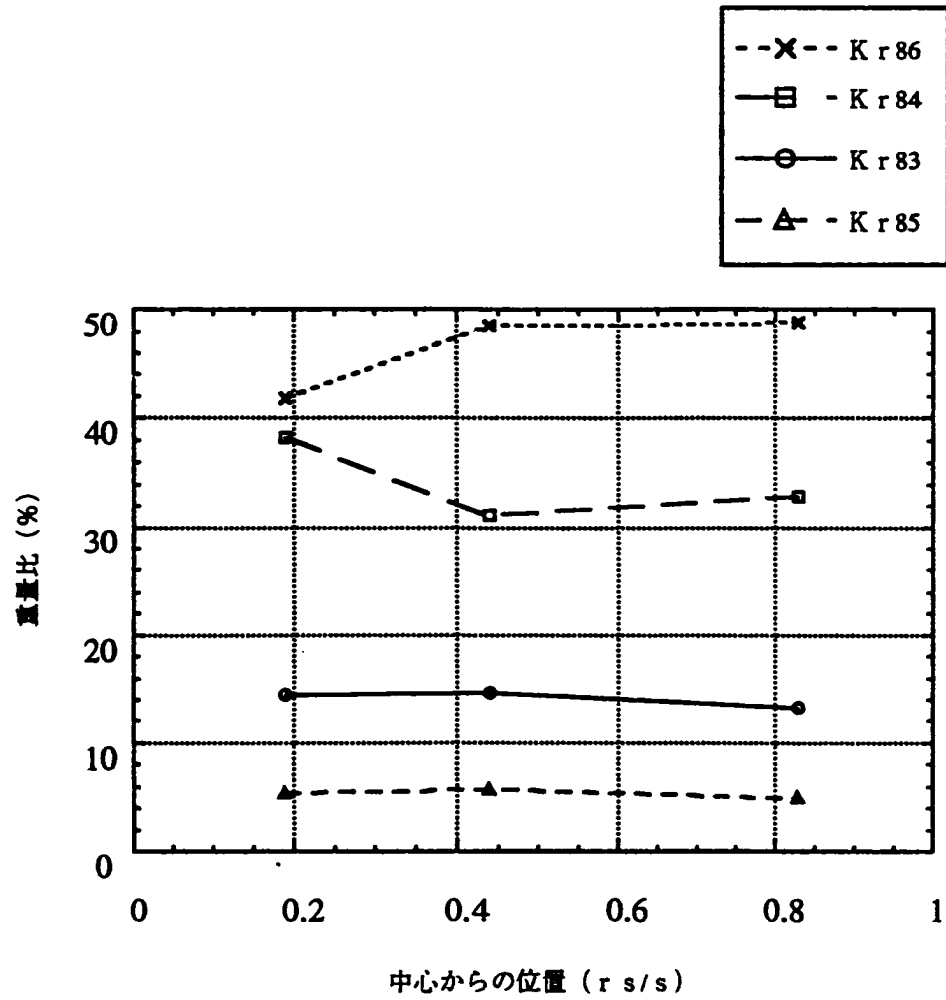
図2.8-1 IFA-555.1からドリルカットされた
微試料の位置



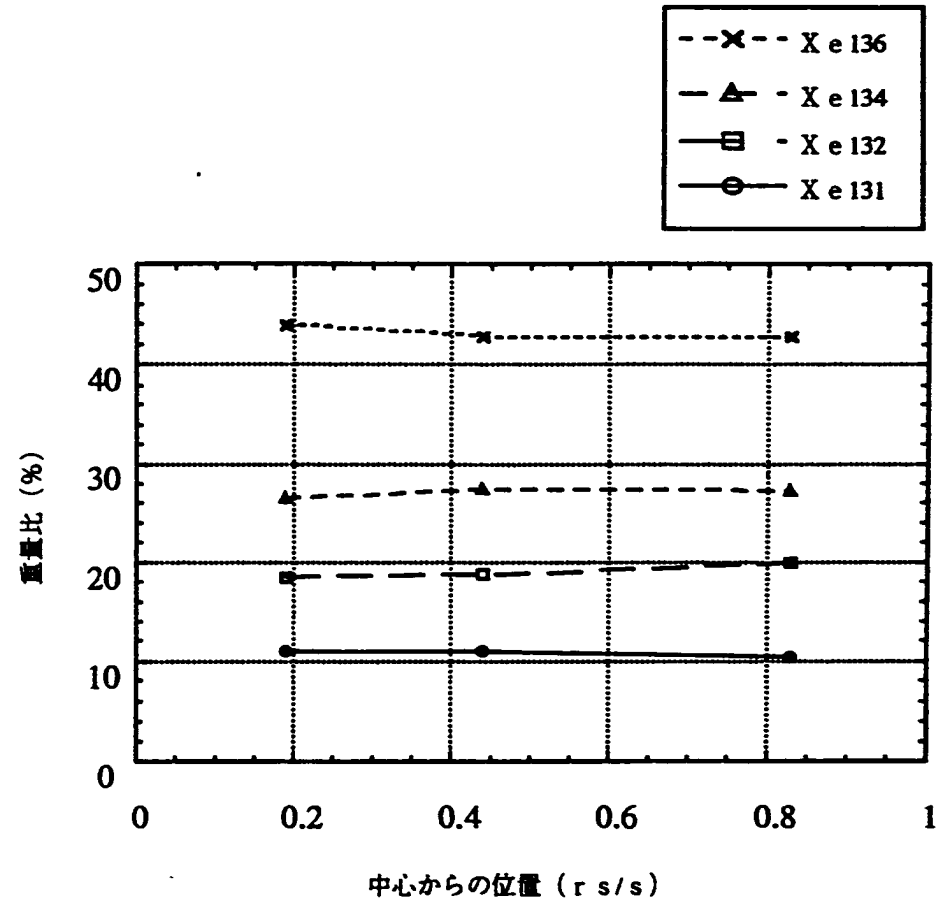
H26 (試料軸方向位置；401mm) の各K r 同位体の重量比

H26 (試料軸方向位置；401mm) の各X e 同位体の重量比

図2.8-2 H26におけるK r 及びX e の各同位体重量比

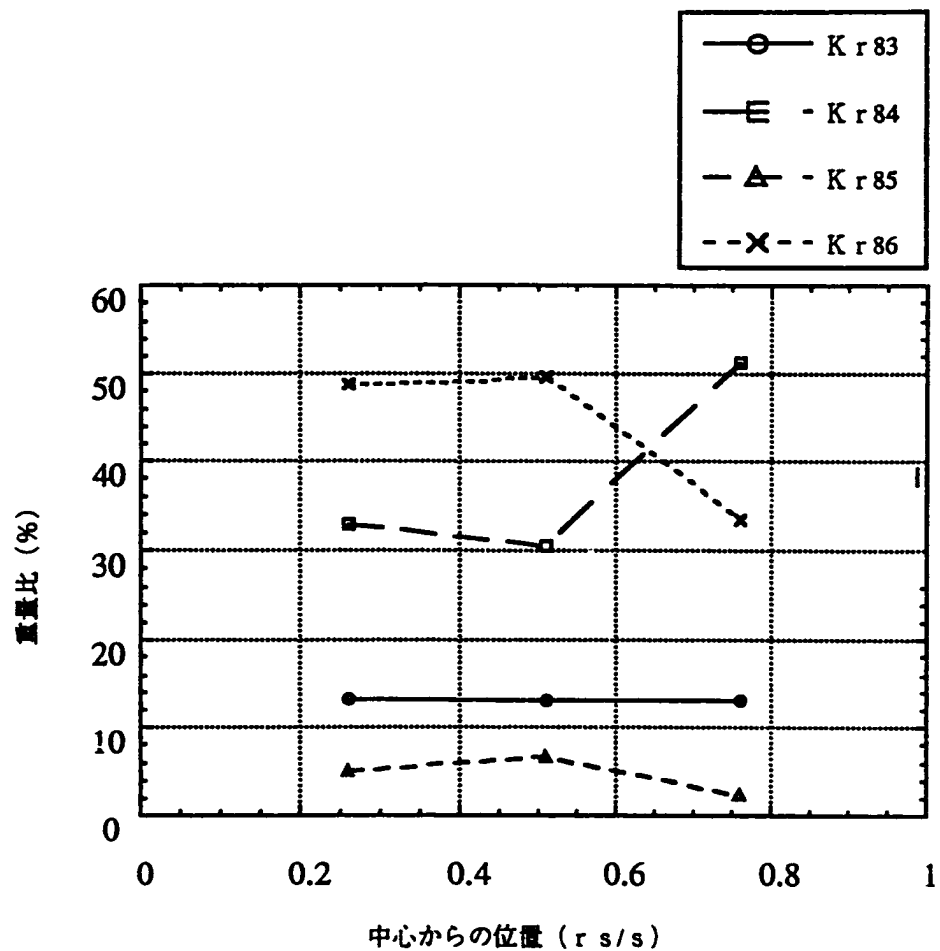


H28 (試料軸方向; 232mm) の各Kr同位体の重量比

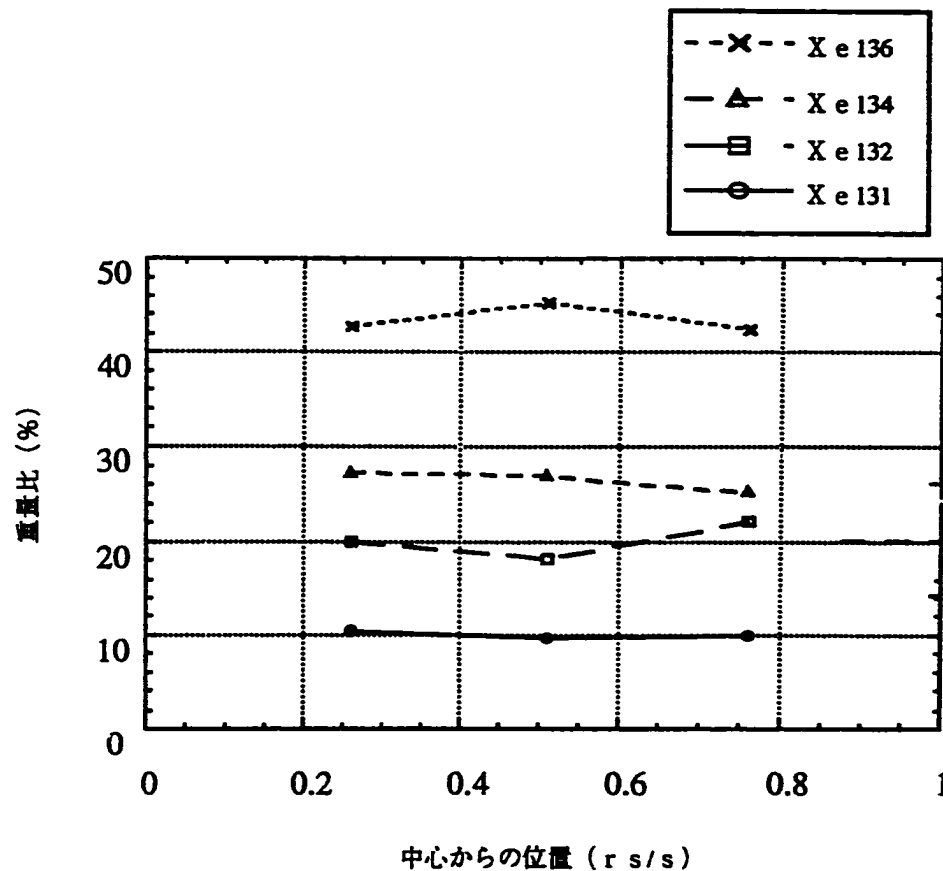


H28 (試料軸方向; 232mm) の各Xe同位体の重量比

図2.8-3 H28におけるKr及びXeの各同位体重量比

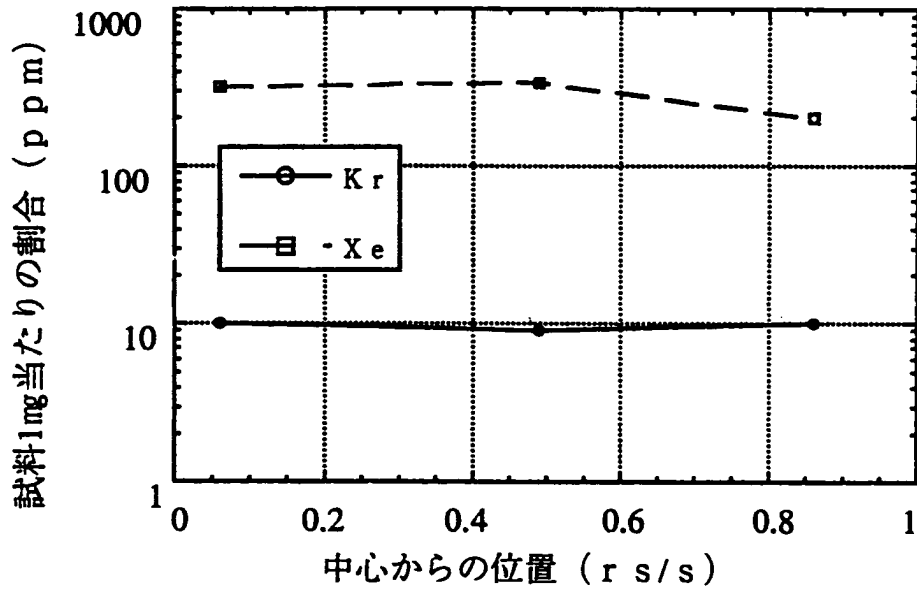


H29 (試料軸方向; 509mm) の各Kr同位体の重量比

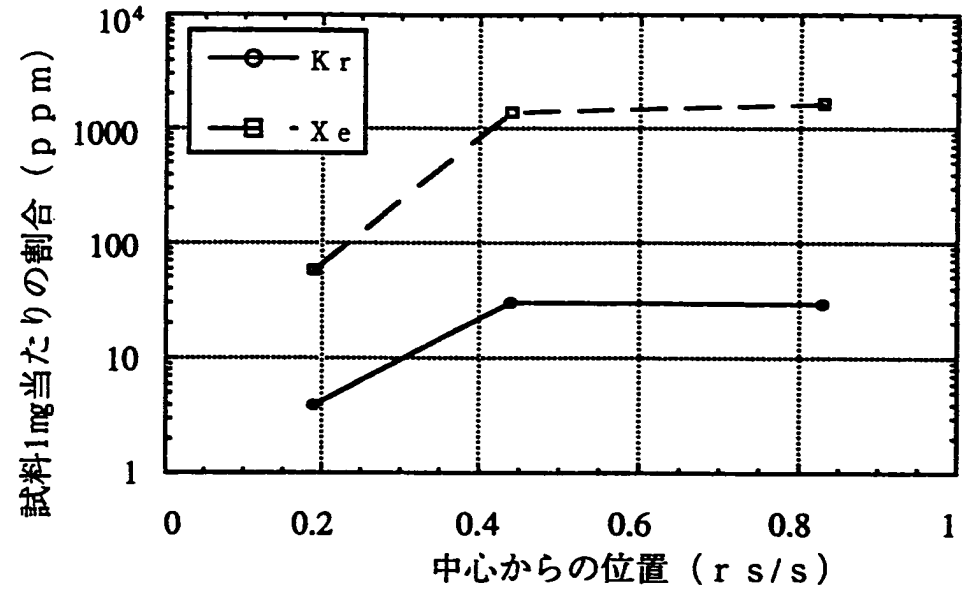


H29 (試料軸方向; 509mm) の各Xe同位体の重量比

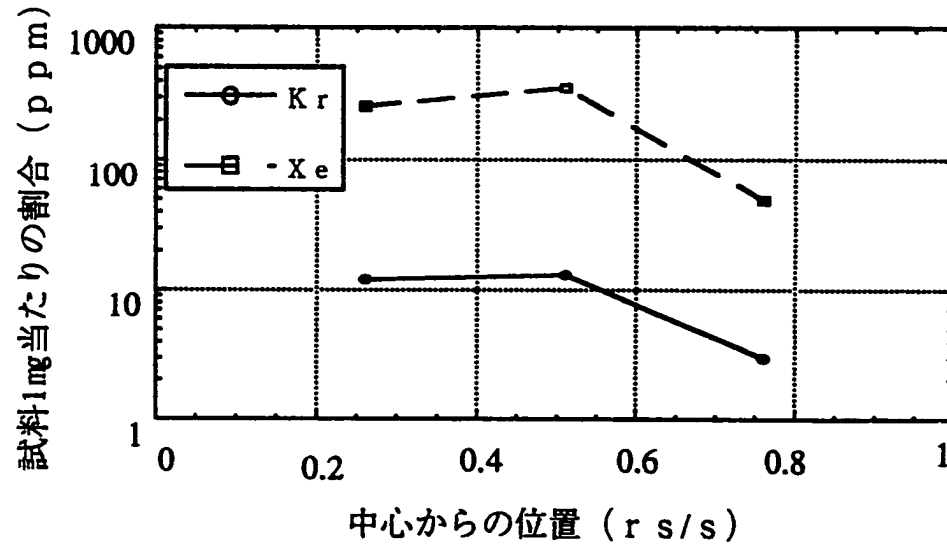
図2.8-4 H29におけるKr及びXeの各同位体重量比



H26 (試料軸方向位置; 401mm)

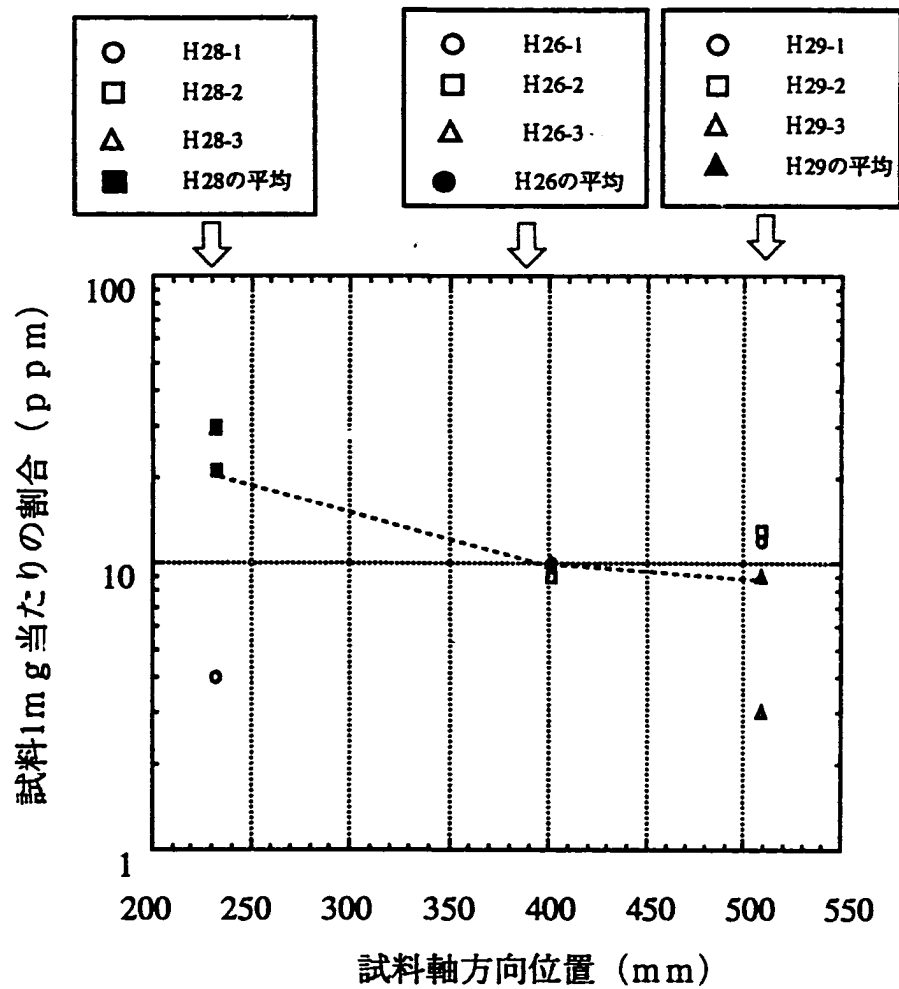


H28 (試料軸方向位置; 232mm)

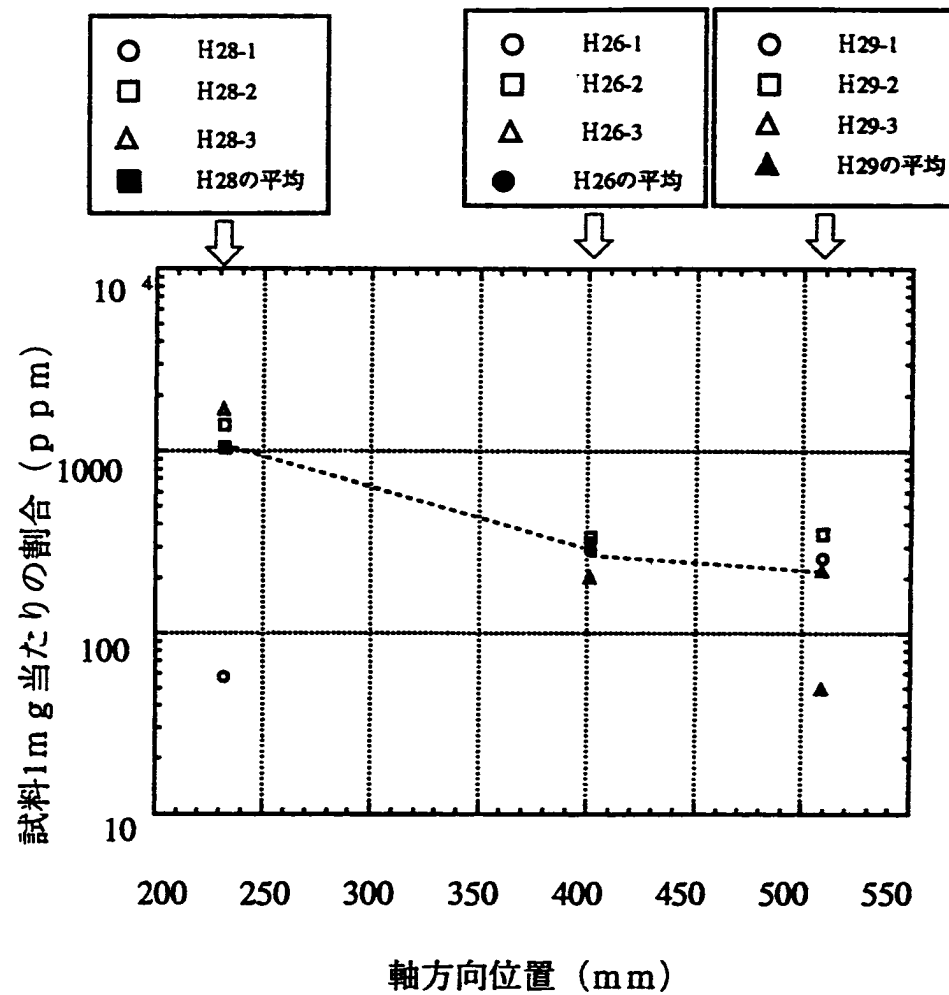


H29 (試料軸方向位置; 509mm)

図2.8-5 各試料におけるKr及びXeの割合



各試料の軸方向に対する Kr の割合



各試料の軸方向に対する Xe の割合

図2.8-6 軸方向に対する Kr 及び Xe の割合

2.9 マイクロ γ スキャン

IFA-555.1からの3試料の横断面についてマイクロ γ スキャンを測定した。試料は金相試験で用いた試料である。測定は1995年1月に行った。断面の4方向で測定を行った。測定した方向を図2.9.1に示す。試料上の0度の方向は燃料の外側に印した基点の位置である。

燃料ロッドの γ スキャンと中性子ラジオグラフィの測定結果は燃料の上端部でひどく割れ、それらのひとつは完全に粉々になっている。マイクロ γ スキャンを測定する試料の一つは燃料のその部分から採取した。

γ スキャン測定はGe検出器で行った。測定の前に定点 γ スペクトルを1024チャンネル分析器で測定した。測定は各ペレットの外周部で測定した。測定時間1000秒、コリメータスリットアパーチャー $0.1 \times 1\text{mm}$ である。図2.9.2~4にスペクトルの測定結果を示した。

全スペクトルから γ スキャン測定を行うために次の6つのエネルギーウィンドを設定した。

window 1: channel No.200-900 Gross Gamma

window 2: channel No.509-520 Ru-106 ピーク 513KeV

window 3: channel No.600-612 Cs-134 ピーク 604KeV

window 4: channel No.656-668 Cs-137 ピーク 662KeV

window 5: channel No.691-701 Ce-144 ピーク 696KeV

window 6: channel No.509-520 Zr,Nb-95 ピーク Zr: 759KeV Nb: 766KeV

γ スペクトルはChannel No.と γ エネルギー(KeV)がほぼ等しくなるようにエネルギー校正を行った。window1はコンプトンバックグラウンドのようなフォトピークもすべて含んでいる。しかし、window5、6はバックグラウンドのみの値である。これは長期間の冷却のためにCe-144とZr,Nb-95の同位体がほとんど崩壊してしまったためである。

γ スキャンにおけるコリメータはスリットアパーチャー $0.1 \times 1\text{mm}$ で測定した。コリメータと試料の間の距離は測定の間、数mmに保たれた。測定はステップ 0.2mm で行った。それぞれのステップでガンマ線を200sec測定した。測定は図2.9.2に示す異なった4つの方位で行った。

マイクロ γ スキャンの測定結果は図2.9.5~22に示した。図のリストを表2.9.1に示す。それぞれの図は4つの異なった測定方位の測定結果を示した。

Gross γ の径方向分布は、 γ スペクトルと γ スキャンの結果より、Cs-134と137の径方

向分布を反映している。図2.9.23にCs-134と-137の燃料中心部と外周部の γ 線の強度比を示した。強度比が大きいほど、外周部に移動していることを示している。Cs-137とCs-134の間には径方向分布に大きな違いがないが、Cs-134の方がペレットの外周部に比べ中心部で強度がより低い傾向にある。また、Cs-134,-137ともに線出力の高い燃料上部がペレット径方向への移動がより大きくなっている。また、試料H29 (509mm) は直径約2mmの中心空孔が存在するため、中心部でより強度が低下している。強度比で用いた値は、中心空孔部を除いたデータである。

表2.9.1 断面 γ スキャン測定の間番リスト

Fig. No.	Sample No./Pos.	Isotope	Date of scanning
7-5	H 28 232 mm *	Gross gamma	20/1 - 23/1 1995
7-6		Ru-106	
7-7		Cs-134	
7-8		Cs-137	
7-9		Ce-144	
7-10		Zr/Nb-95	
7-11	H 26 401 mm *	Gross gamma	24/1 - 25/1 1995
7-12		Ru-106	
7-13		Cs-134	
7-14		Cs-137	
7-15		Ce-144	
7-16		Zr/Nb-95	
7-17	H 29 509 mm *	Gross gamma	17/1 - 19/1 1995
7-18		Ru-106	
7-19		Cs-134	
7-20		Cs-137	
7-21		Ce-144	
7-22		Zr/Nb-95	

* above the lower end v-groove

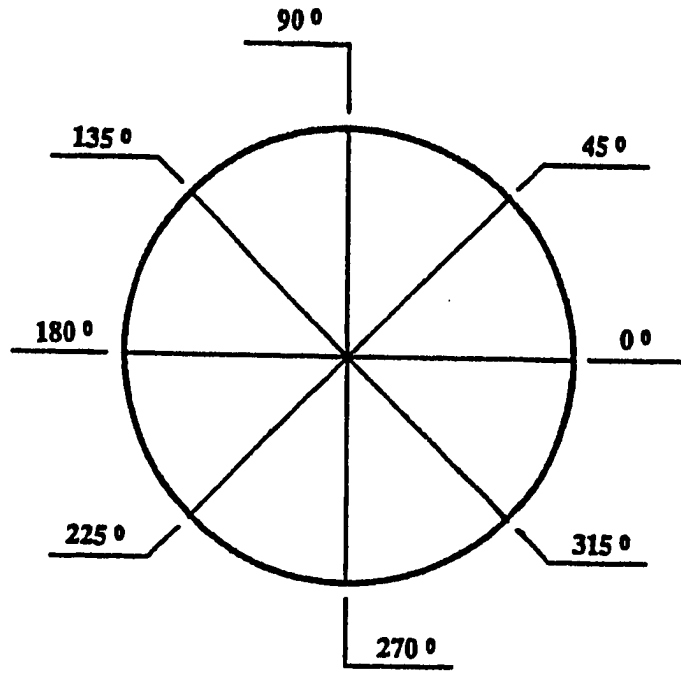


図2.9.1 上部から見た断面 γ スキャンの方向

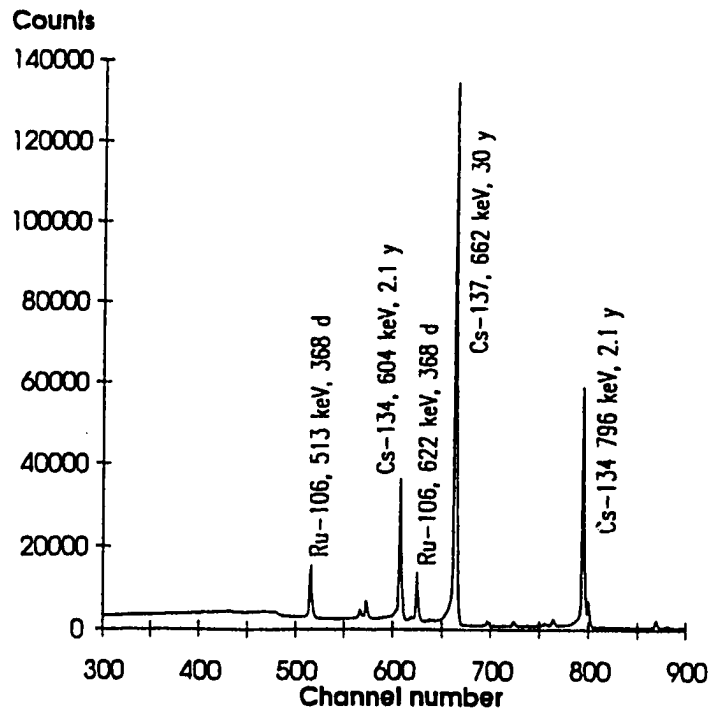


図2.9.2 サンプルH28の γ スペクトル、軸方向位置232mm、0°方向の最大値

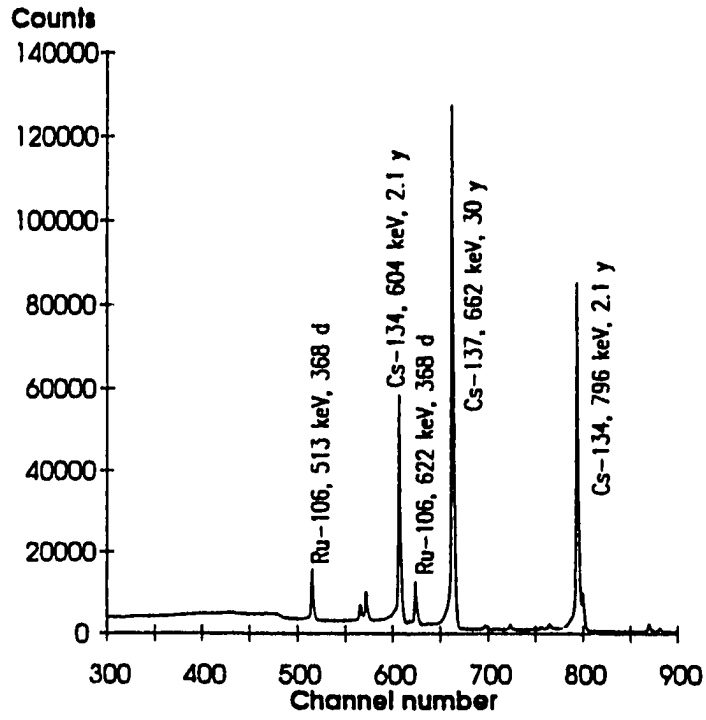


図2.9.3 サンプルH26の γ スペクトル、軸方向位置401mm、 0° 方向の最大値

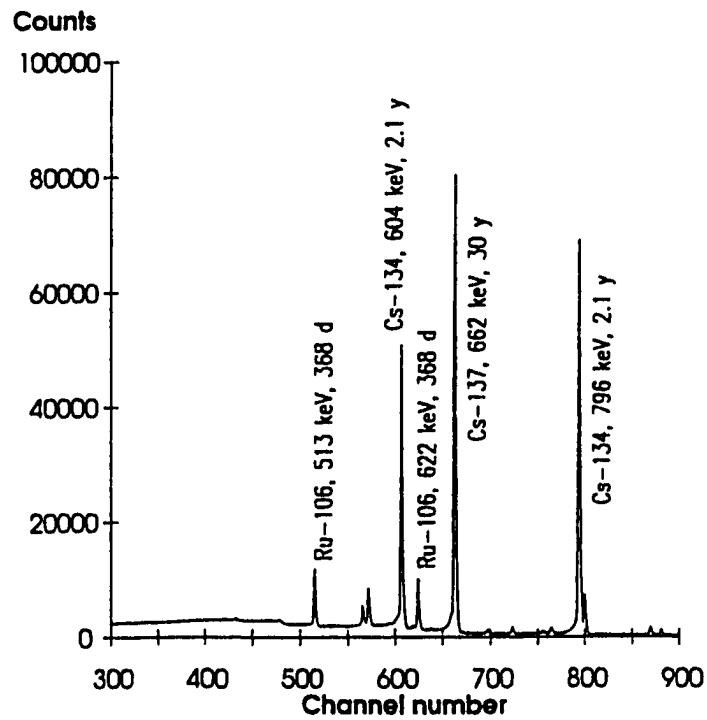
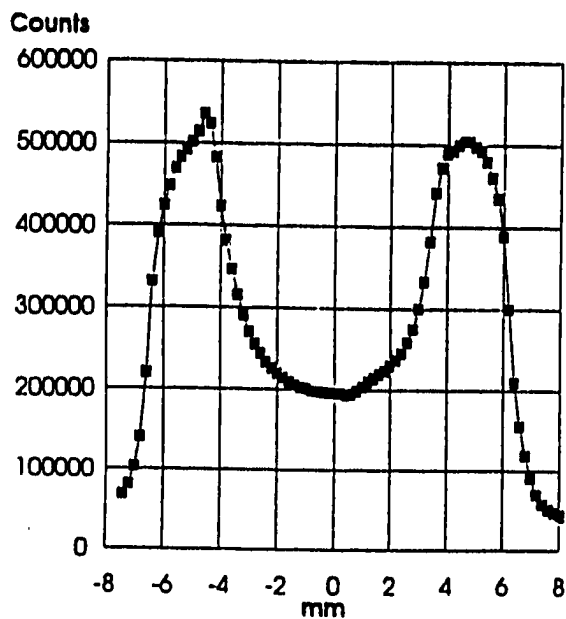
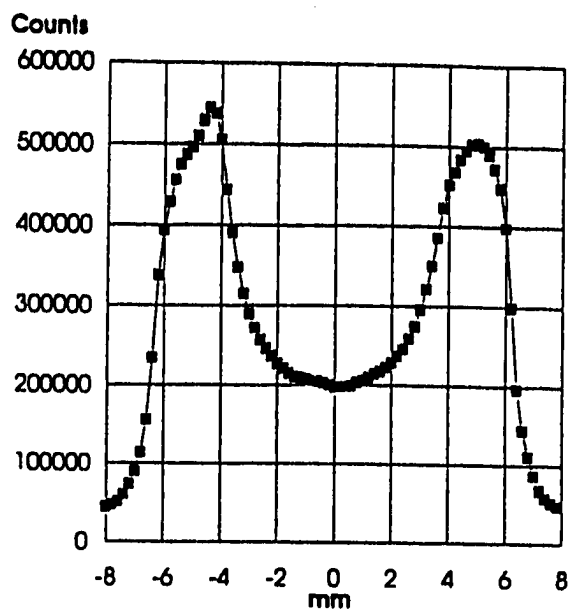


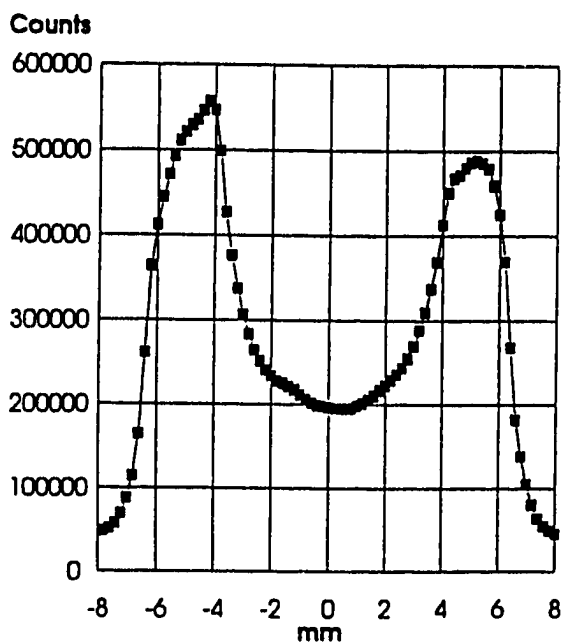
図2.9.4 サンプルH29の γ スペクトル、軸方向位置509mm、 315° 方向の最大値



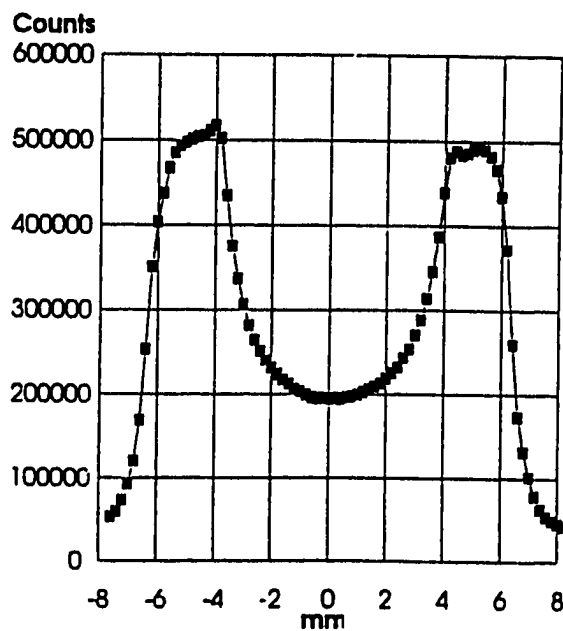
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

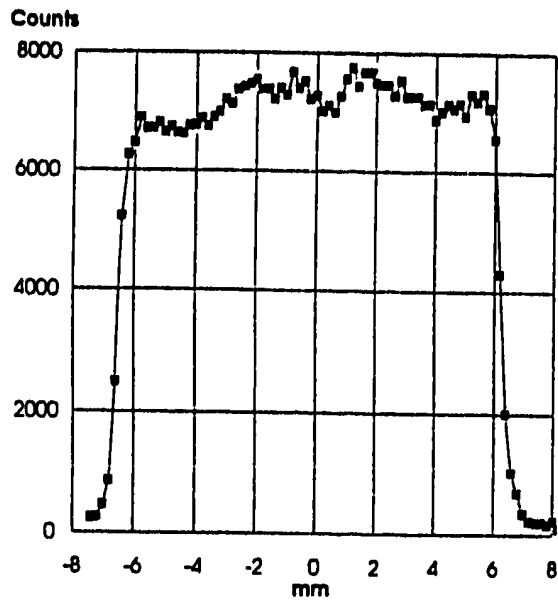


Direction 90° - 270°

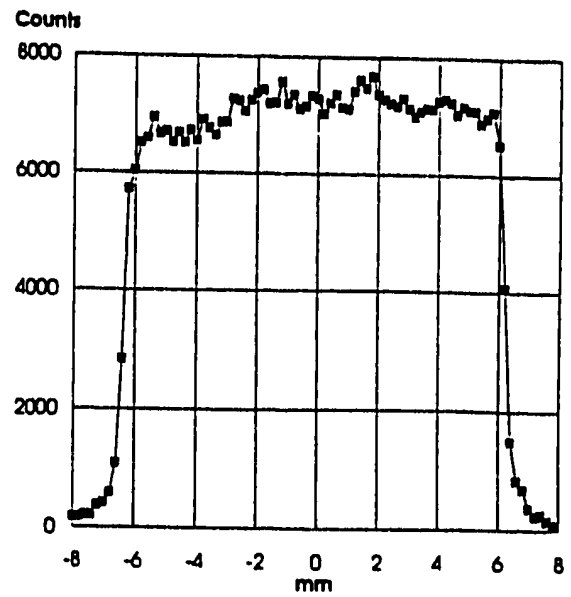


Direction 135° - 315°

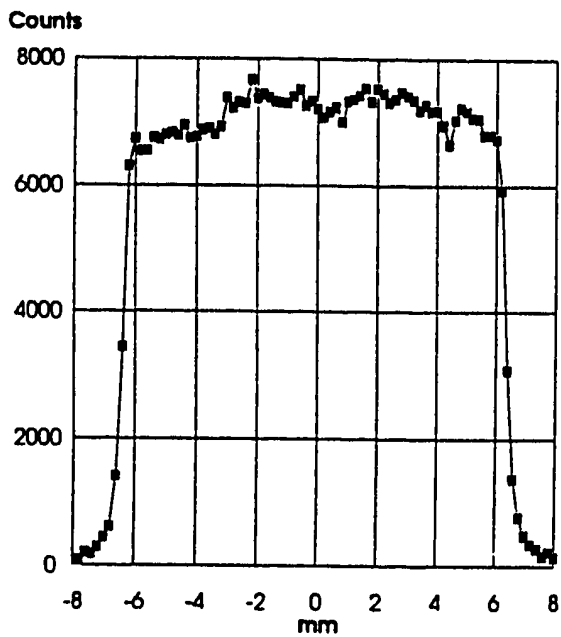
図2.9.5 サンプルH28の断面 γ スキャン、軸方向位置232mm、IFA-555.1、グロスガンマ



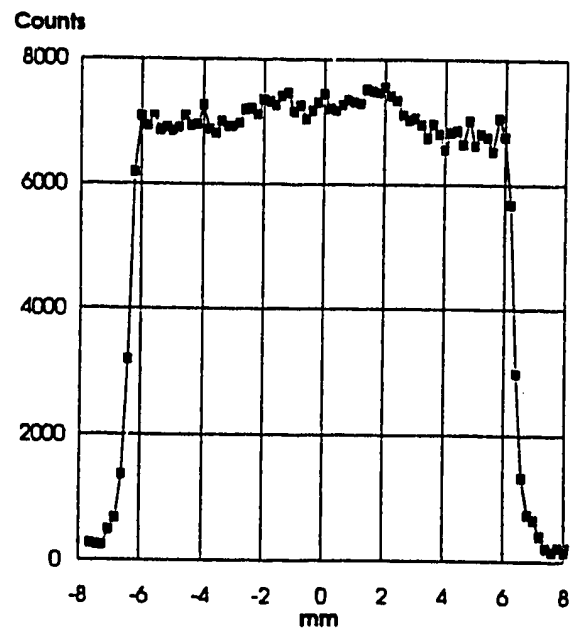
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

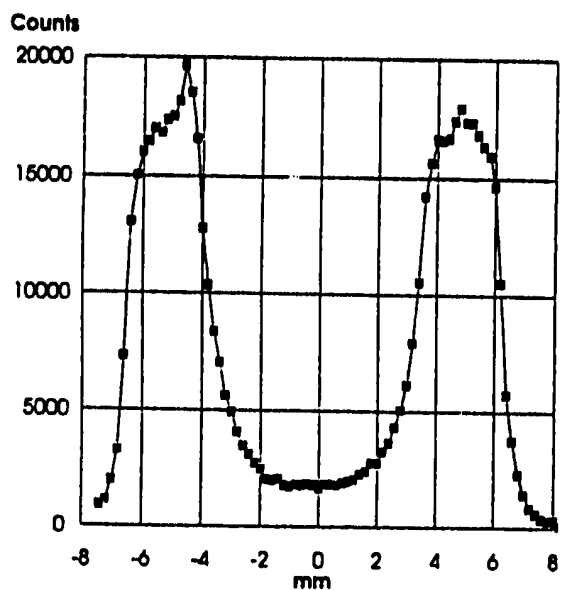


Direction 90° - 270°

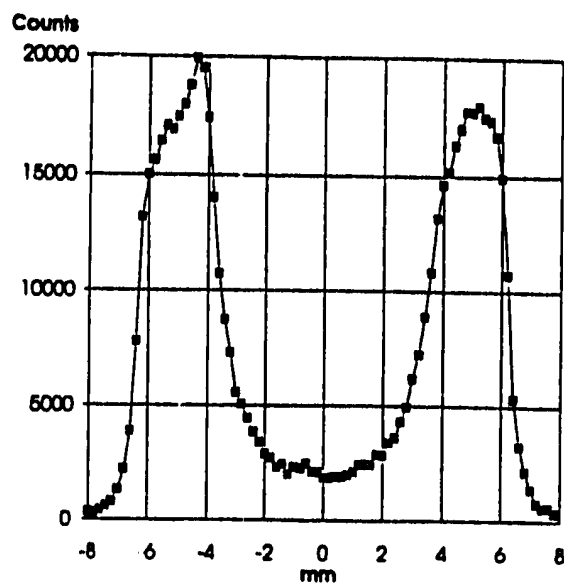


Direction 135° - 315°

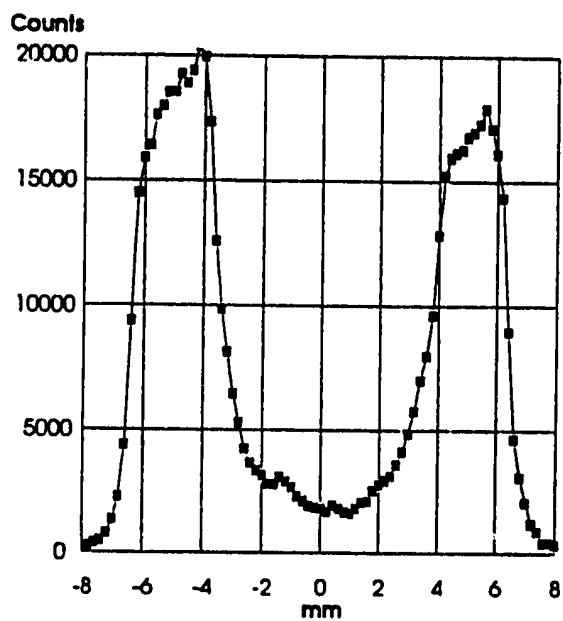
図2.9.6 サンプルH28の断面 γ スキャン、軸方向位置232mm、IFA-555.1、Ru 106



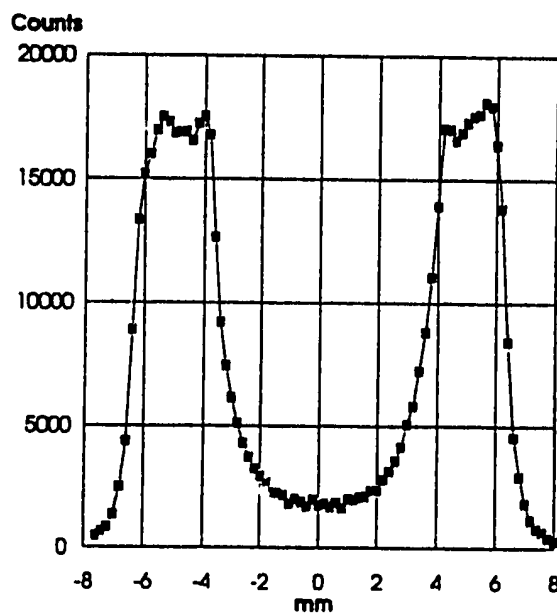
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

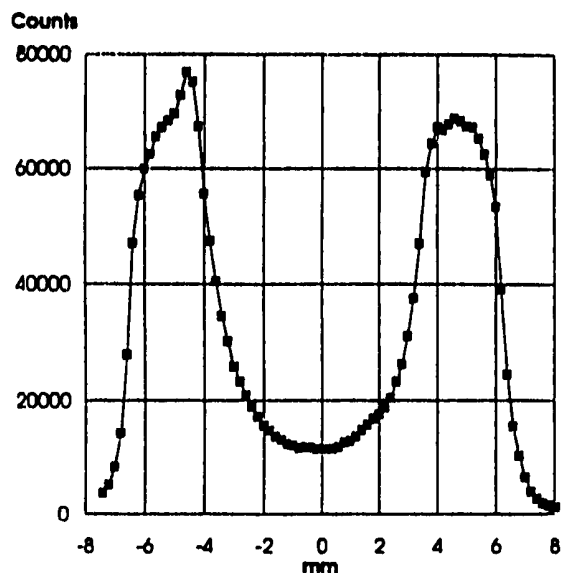


Direction 90° - 270°

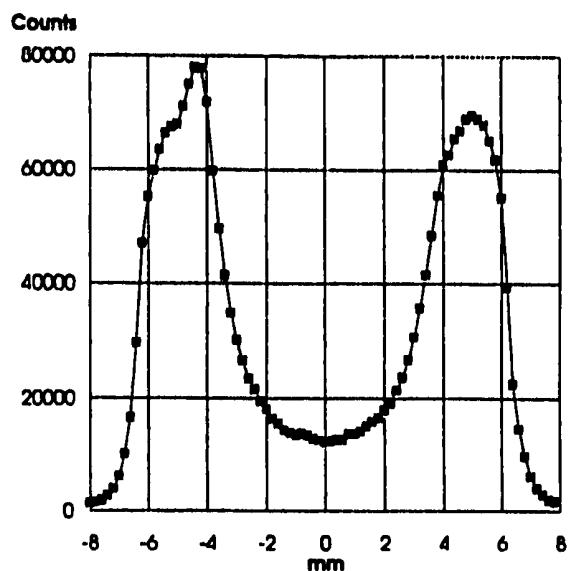


Direction 135° - 315°

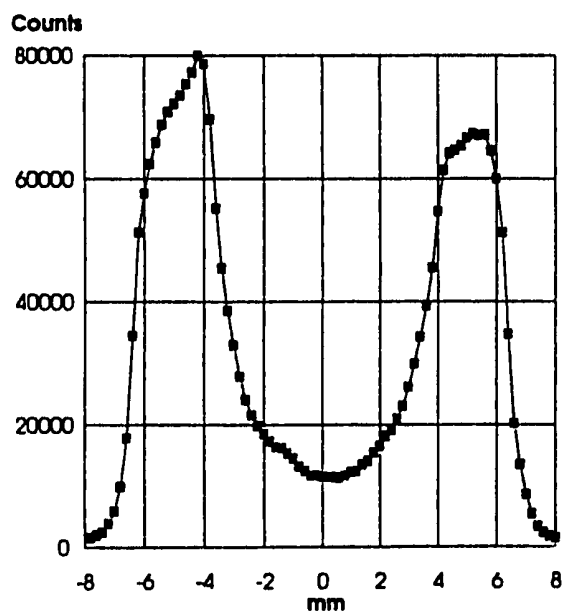
図2.9.7 サンプルH28の断面 γ スキャン、軸方向位置232mm、IFA-555.1、Cs 134



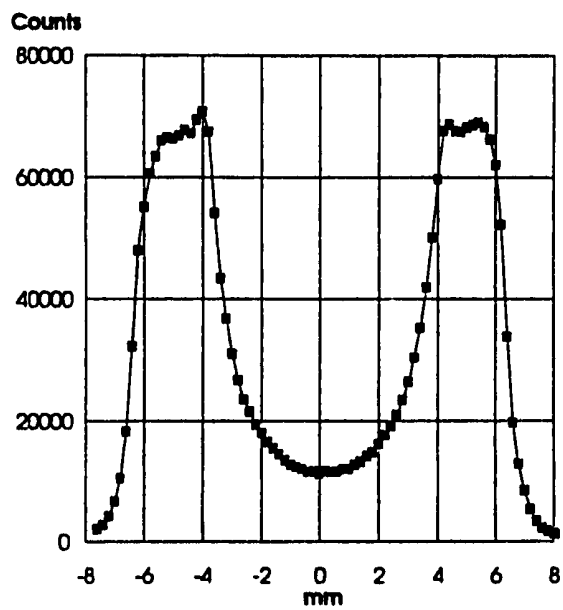
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

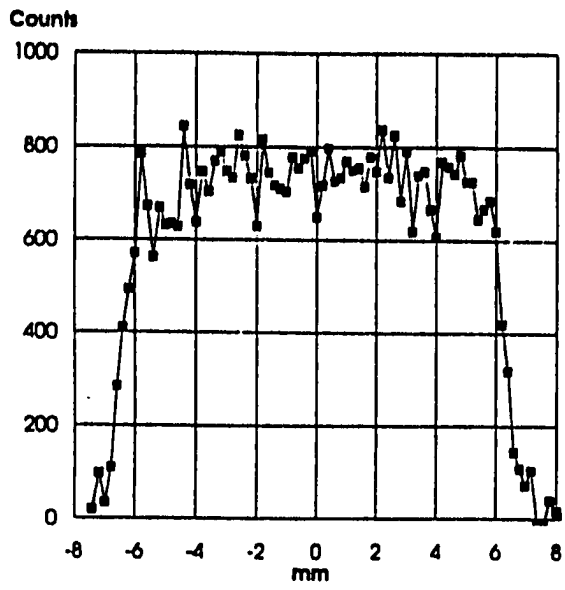


Direction 90° - 270°

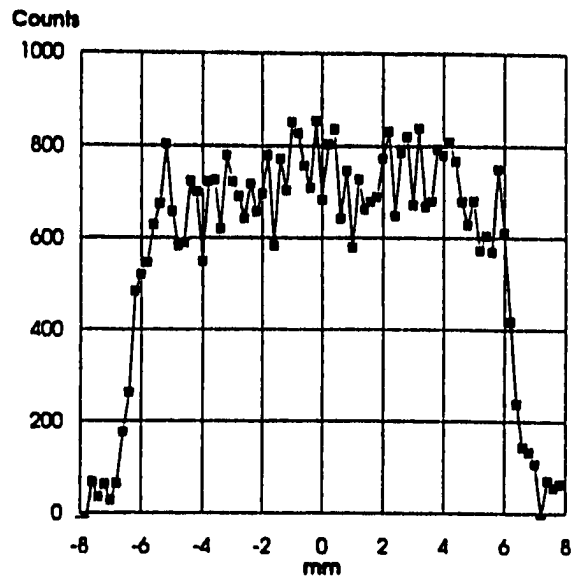


Direction 135° - 315°

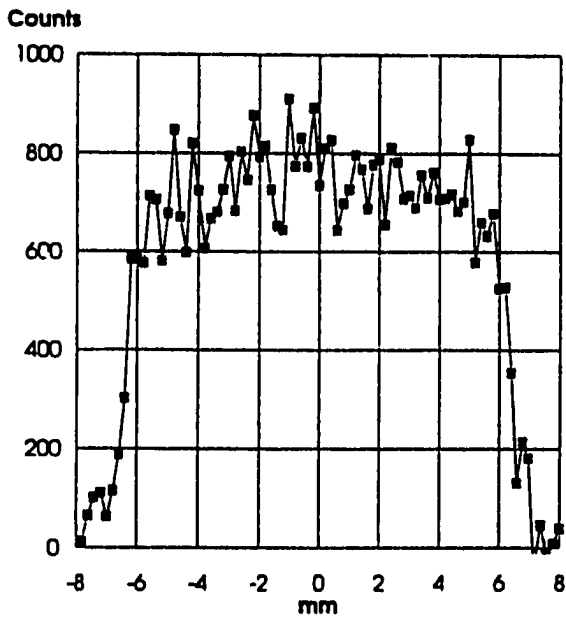
図2.9.8 サンプルH28の断面 γ スキャン、軸方向位置232mm、IFA-555.1、Cs 137



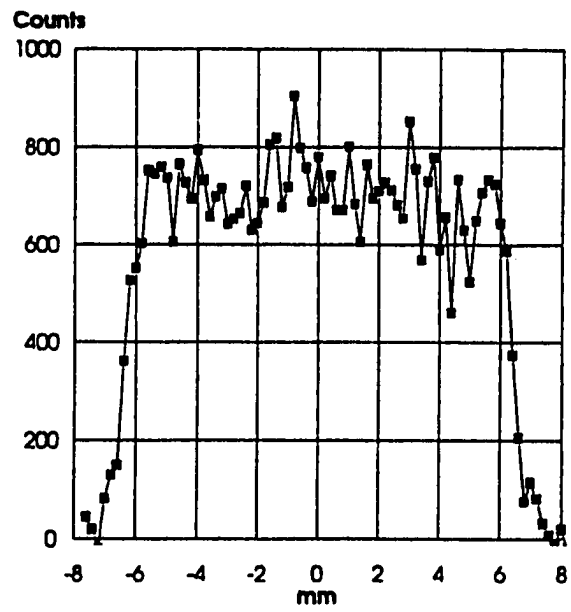
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

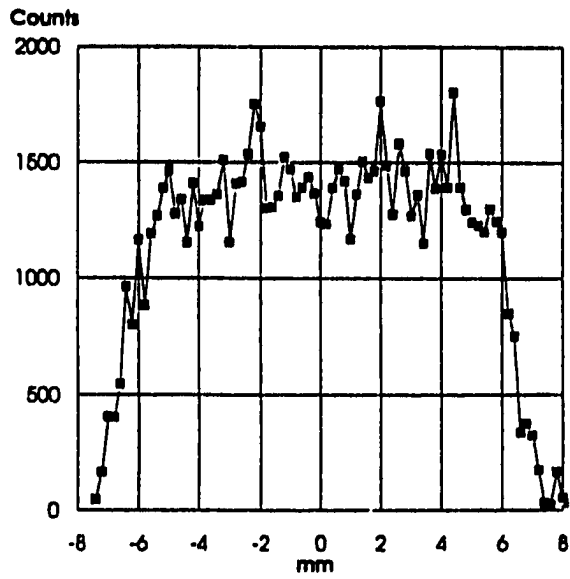


Direction 90° - 270°

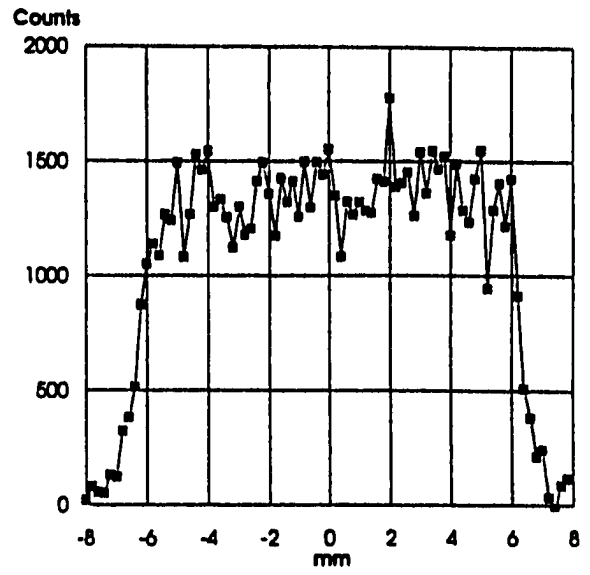


Direction 135° - 315°

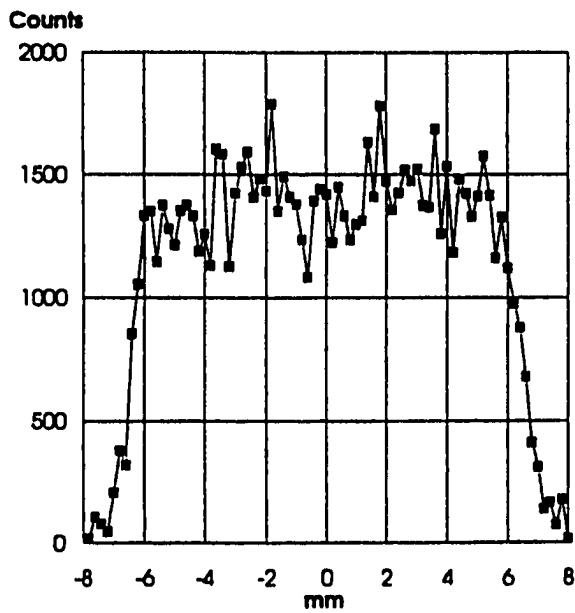
図2.9.9 サンプルH28の断面 γ スキャン、軸方向位置232mm、IFA-555.1、Ce 144



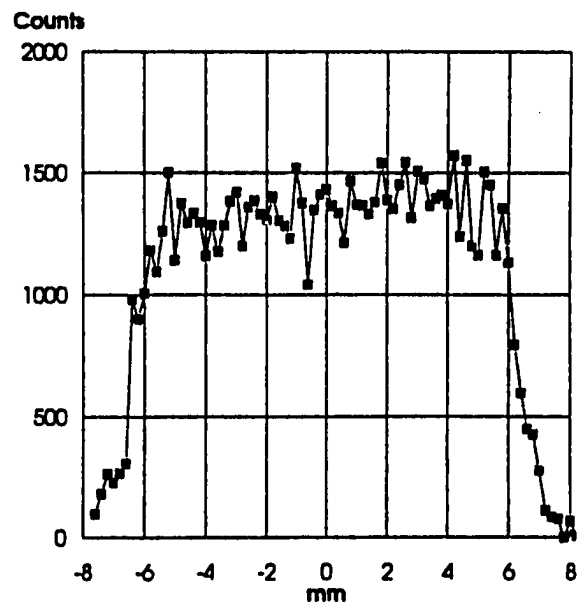
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

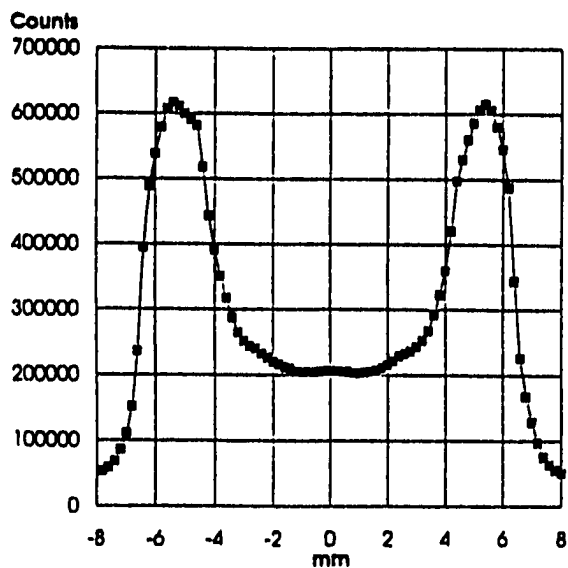


Direction 90° - 270°

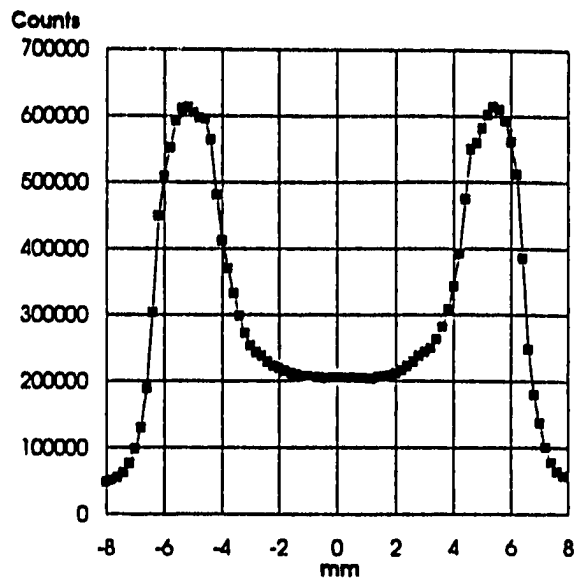


Direction 135° - 315°

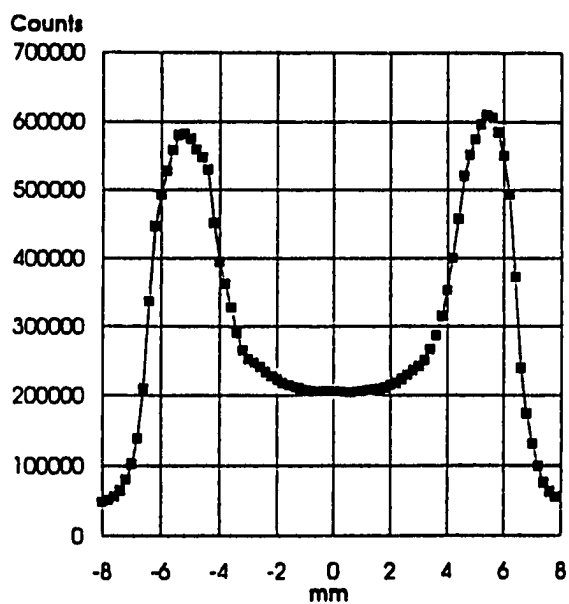
図2.9.10 サンプルH28の断面γスキャン、軸方向位置232mm、IFA-555.1、Zr/Nb 95



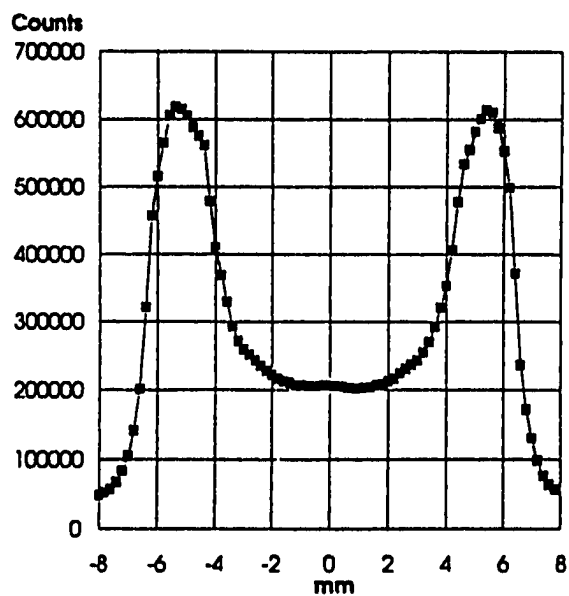
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

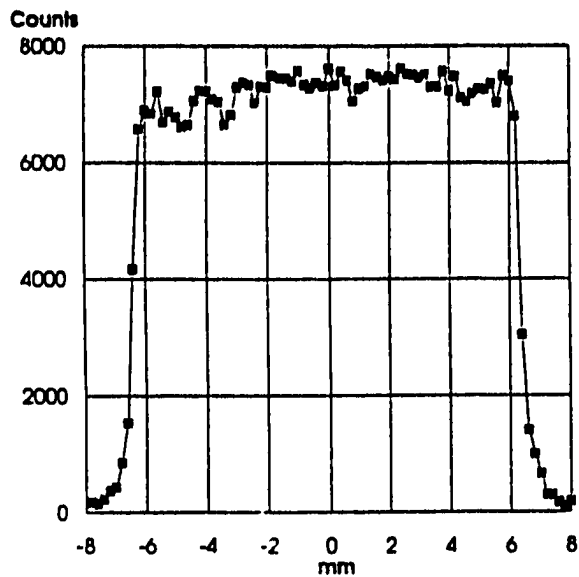


Direction 90° - 270°

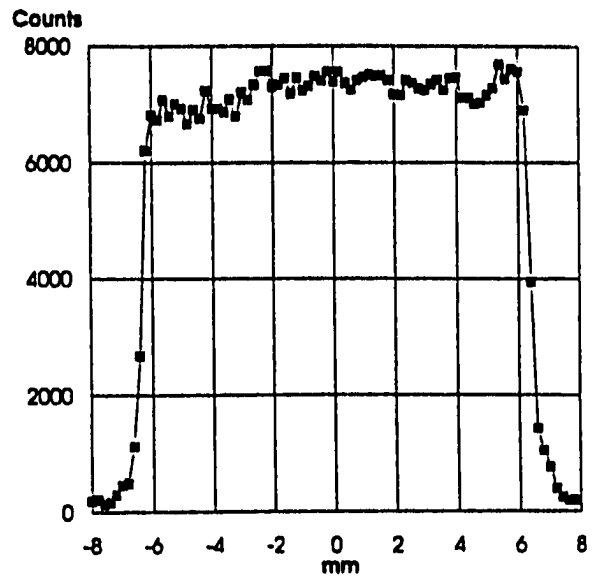


Direction 135° - 315°

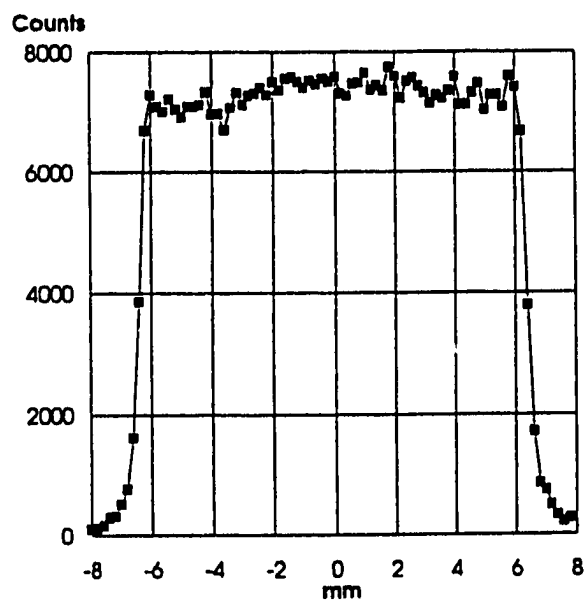
図2.9.11 サンプルH26の断面 γ スキャン、軸方向位置401mm、IFA-555.1、グロスガンマ



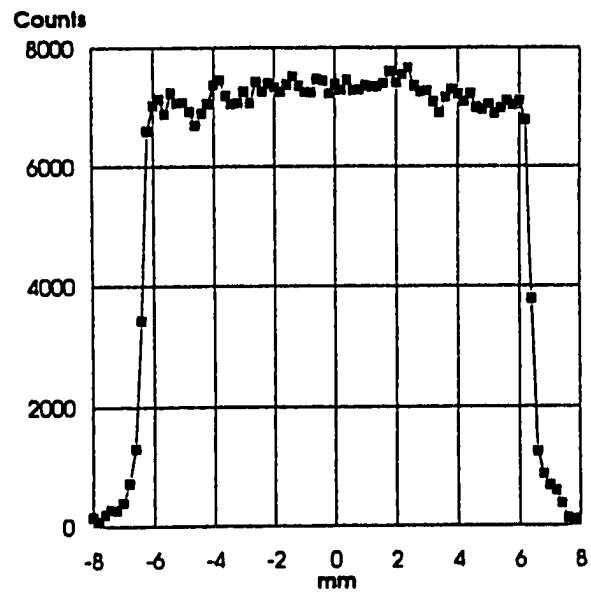
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

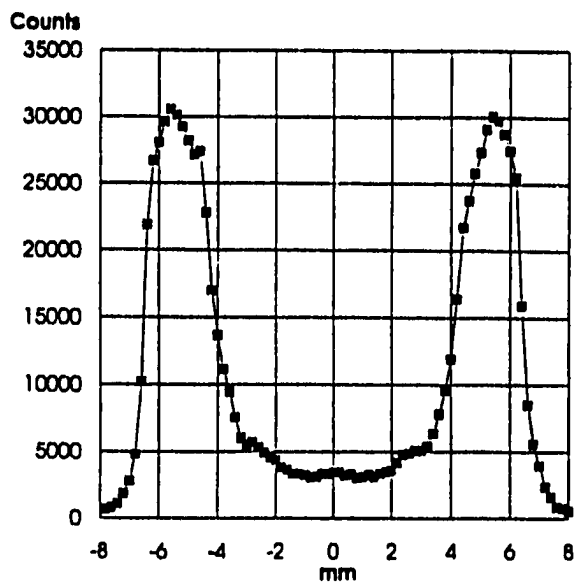


Direction 90° - 270°

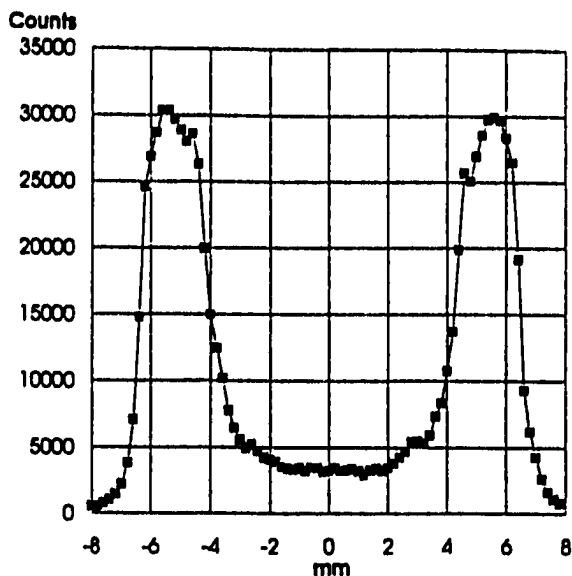


Direction 135° - 315°

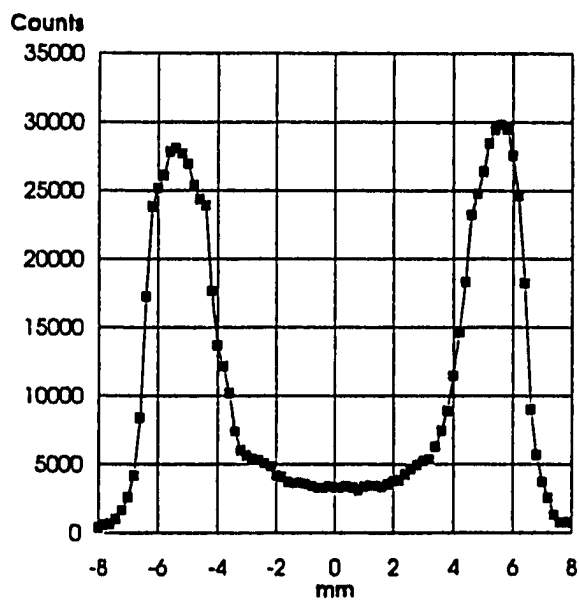
図2.9.12 サンプルH26の断面 γ スキャン、軸方向位置401mm、IFA-555.1、Ru 106



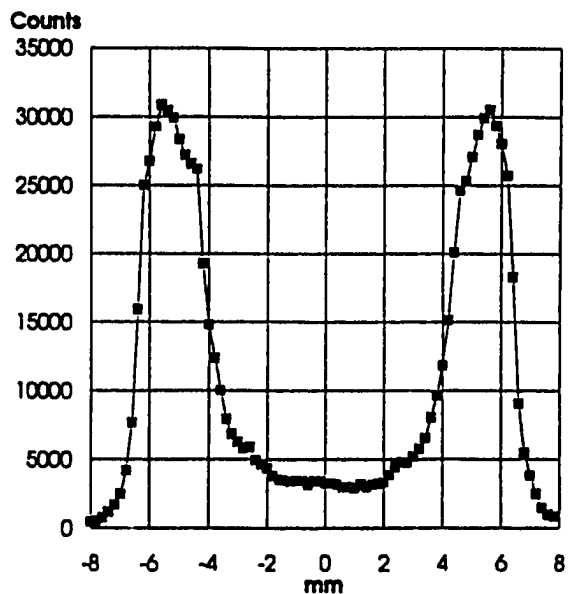
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

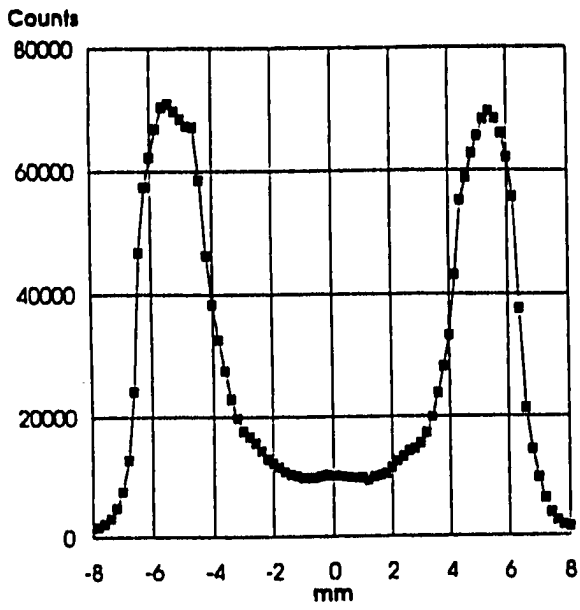


Direction 90° - 270°

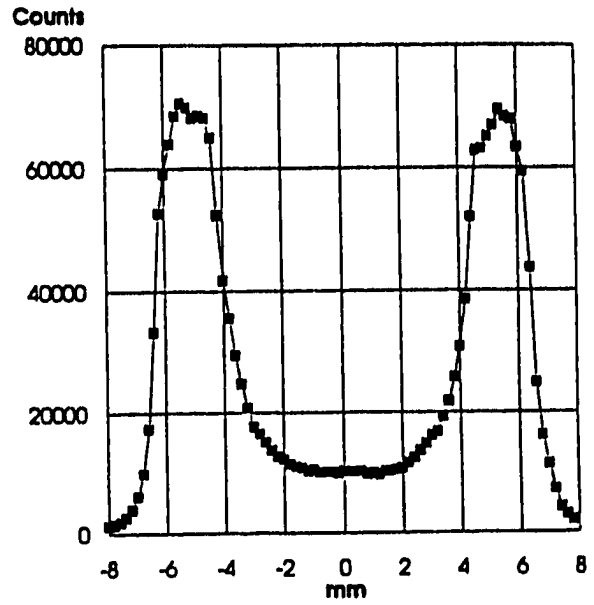


Direction 135° - 315°

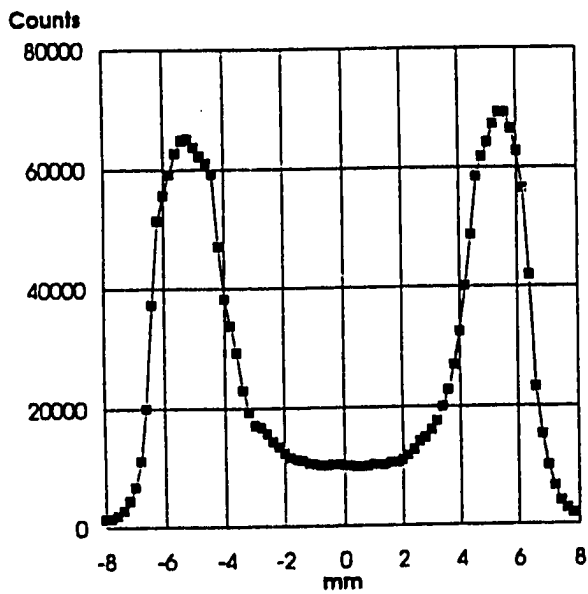
図2.9.13 サンプルH26の断面 γ スキャン、軸方向位置401mm、IFA-555.1、Cs 134



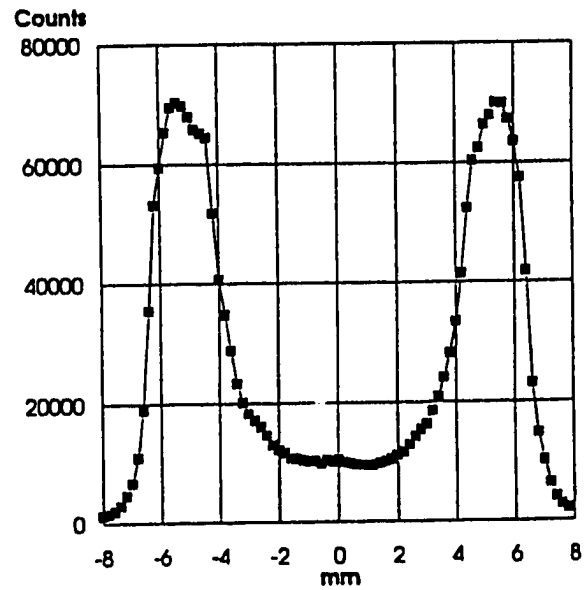
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

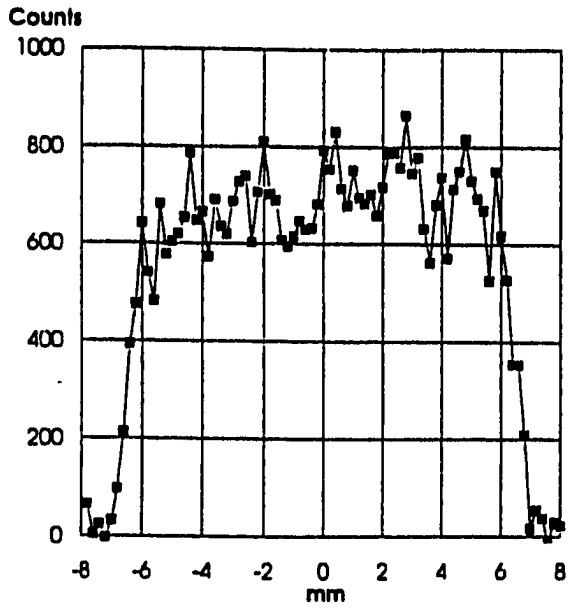


Direction 90° - 270°

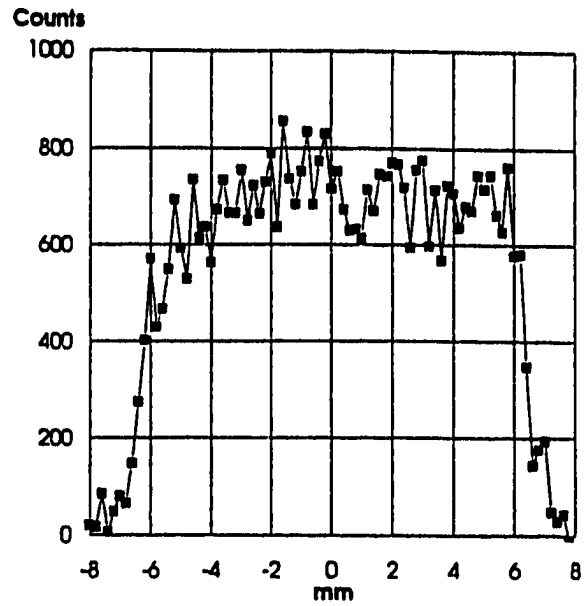


Direction 135° - 315°

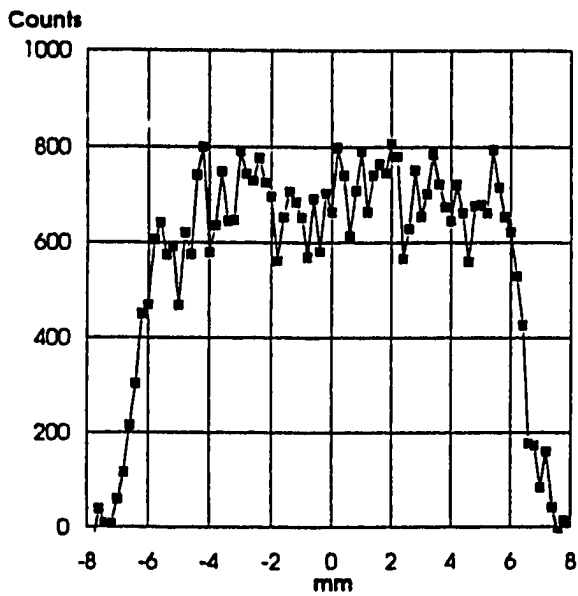
図2.9.14 サンプルH26の断面 γ スキャン、軸方向位置401mm、IFA-555.1、Cs 137



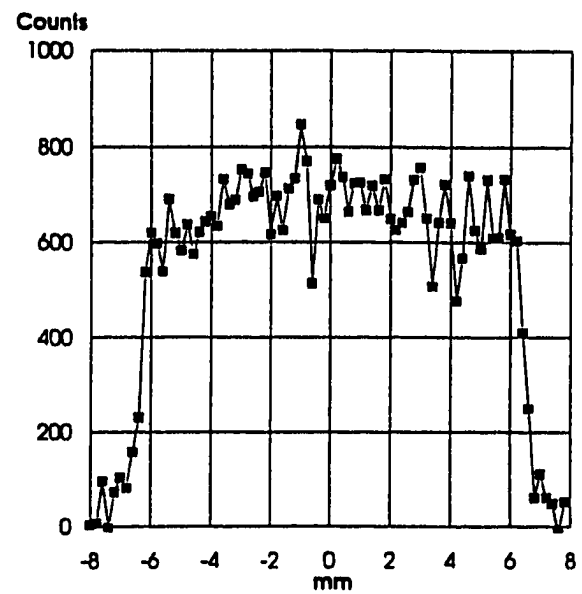
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

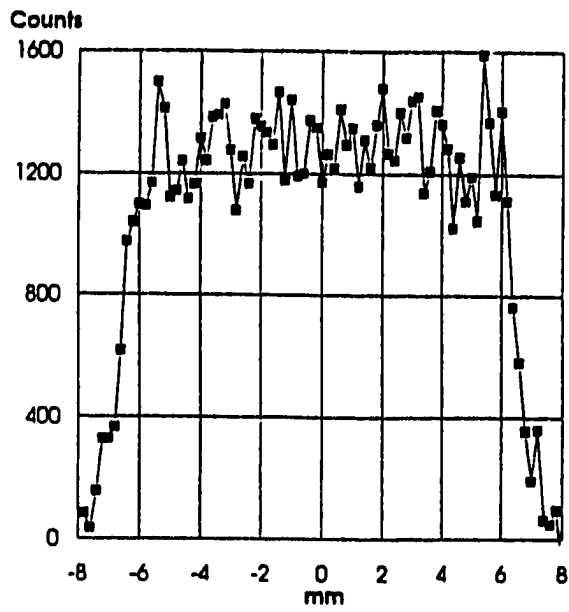


Direction 90° - 270°

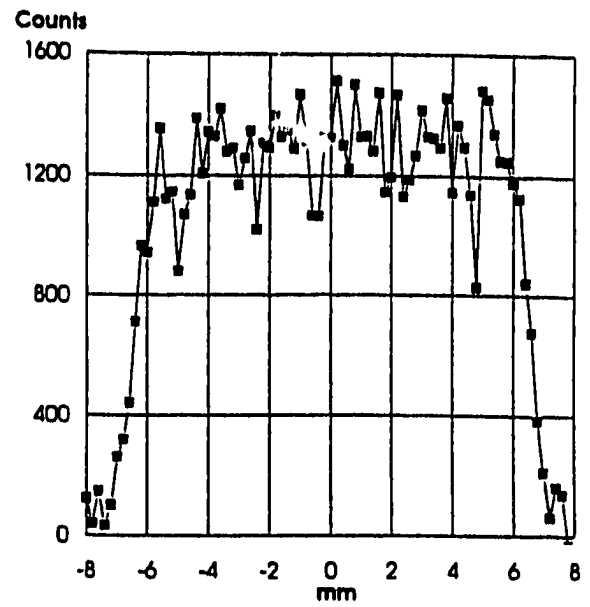


Direction 135° - 315°

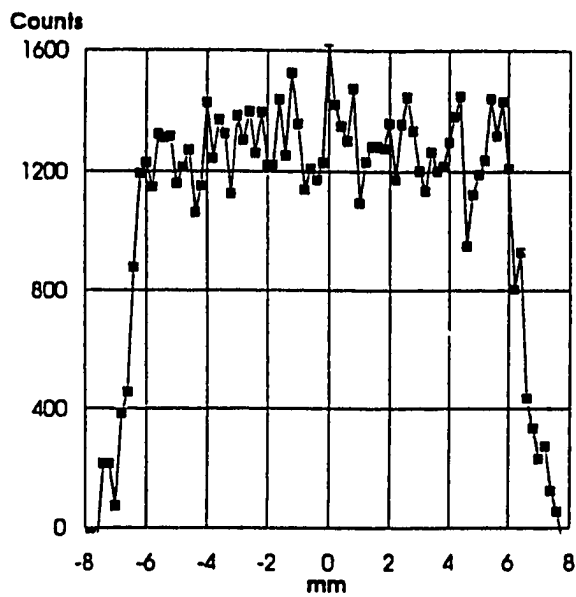
図2.9.15 サンプルH26の断面 γ スキャン、軸方向位置401mm、IFA-555.1、Ce 144



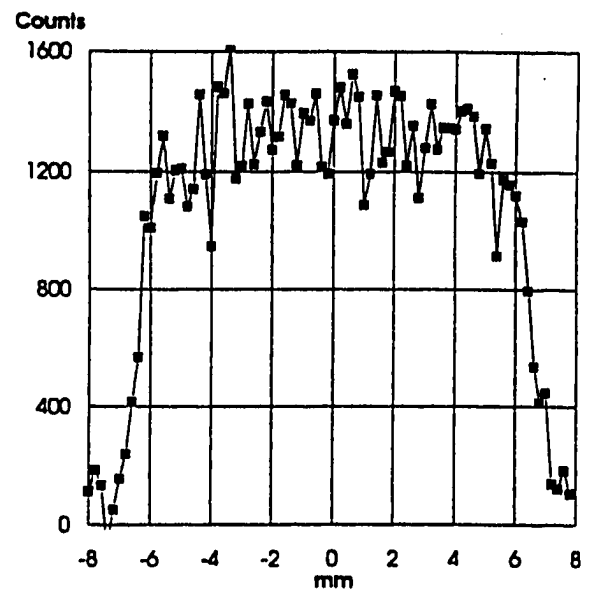
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

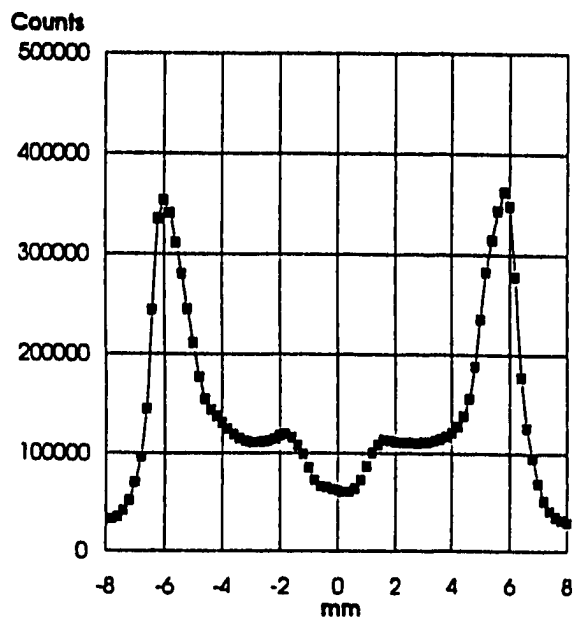


Direction 90° - 270°

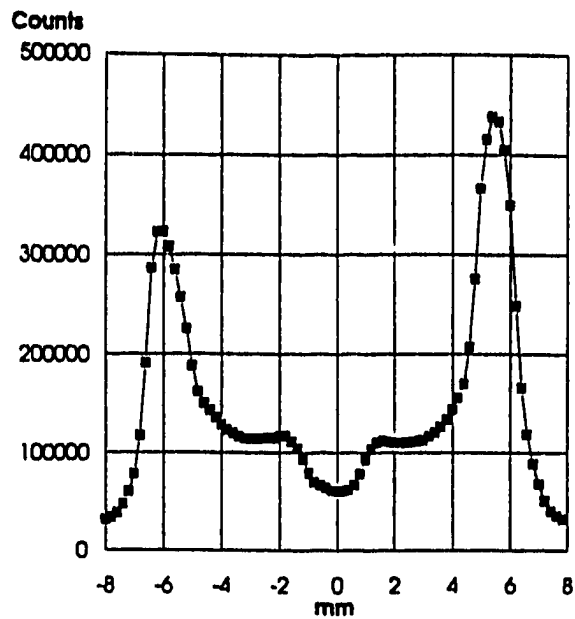


Direction 135° - 315°

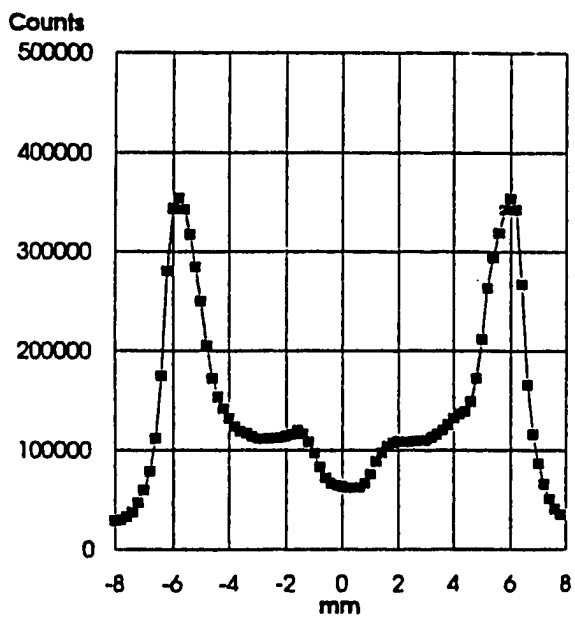
図2.9.16 サンプルH26の断面 γ スキャン、軸方向位置401mm、IFA-555.1、Zr/Nb 95



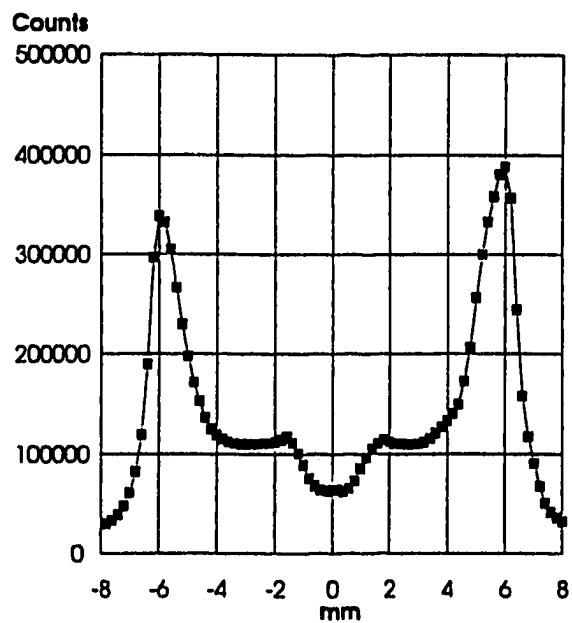
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

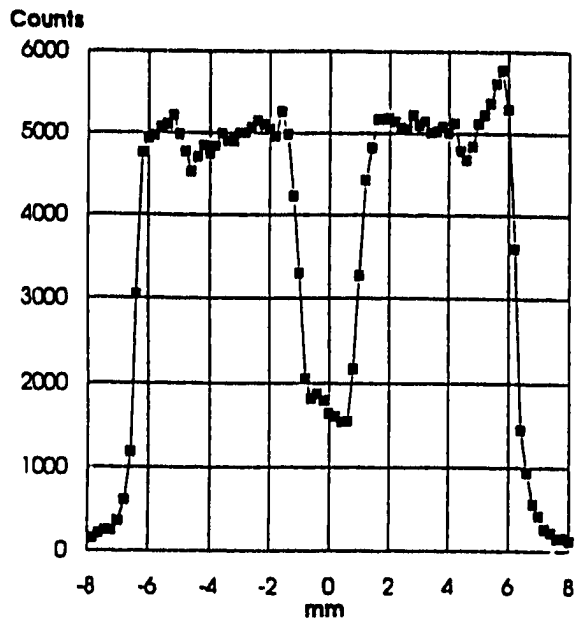


Direction 90° - 270°

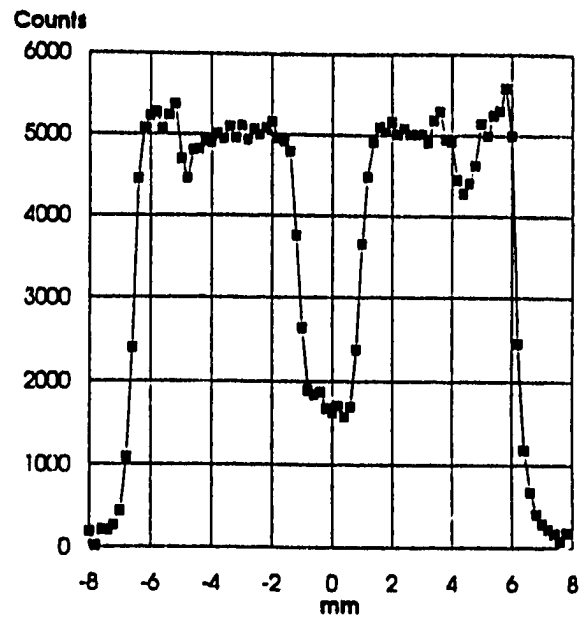


Direction 135° - 315°

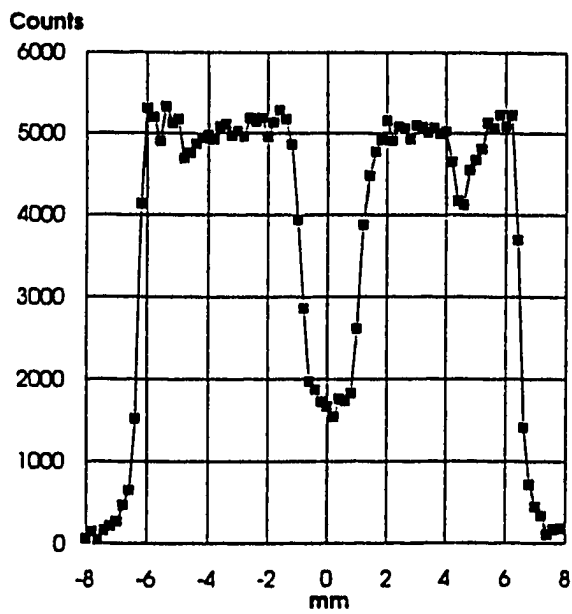
図2.9.17 サンプルH29の断面 γ スキャン、軸方向位置509mm、IFA-555.1、グロスガンマ



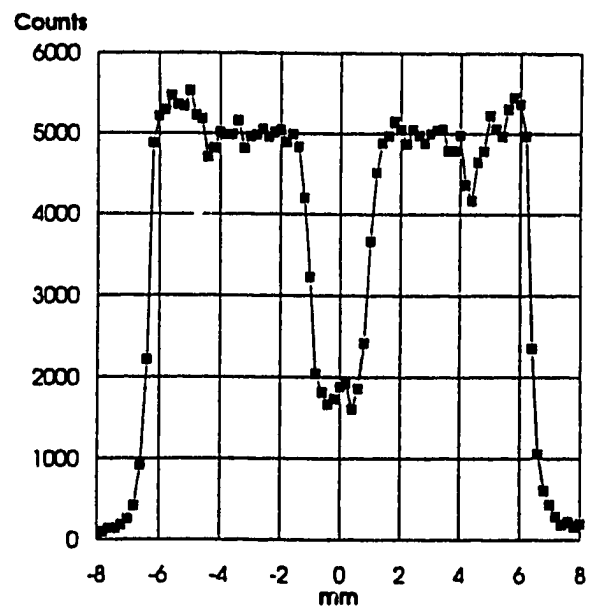
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

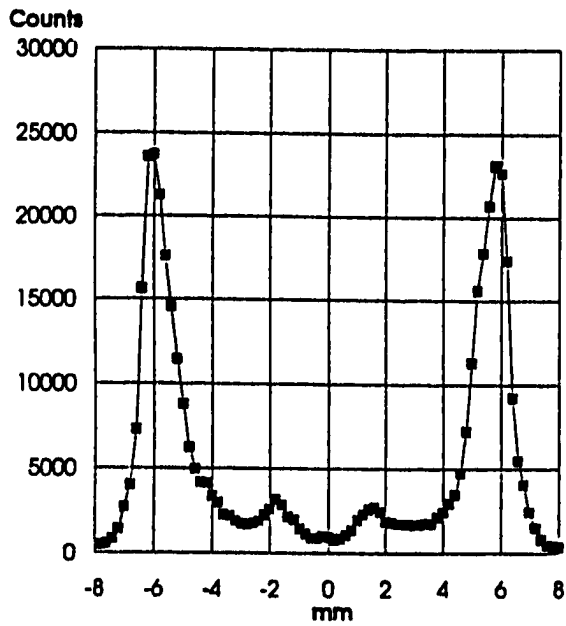


Direction 90° - 270°

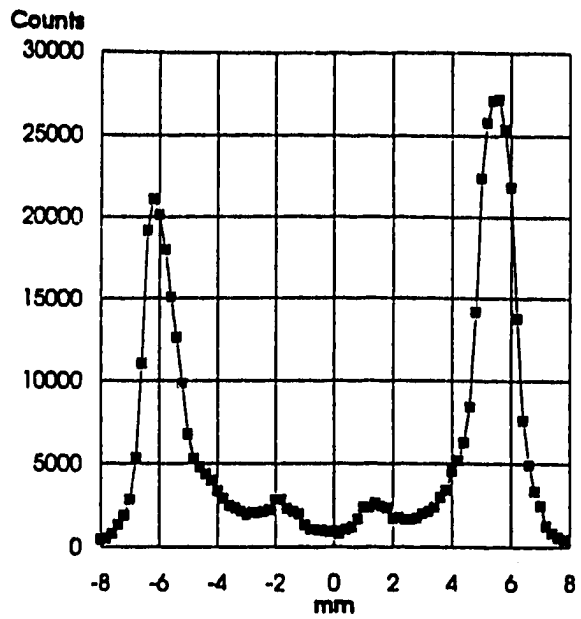


Direction 135° - 315°

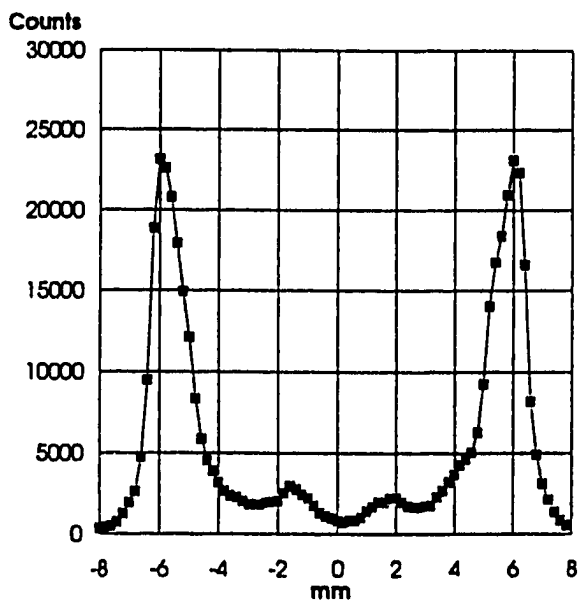
図2.9.18 サンプルH29の断面 γ スキャン、軸方向位置509mm、IFA-555.1、Ru 106



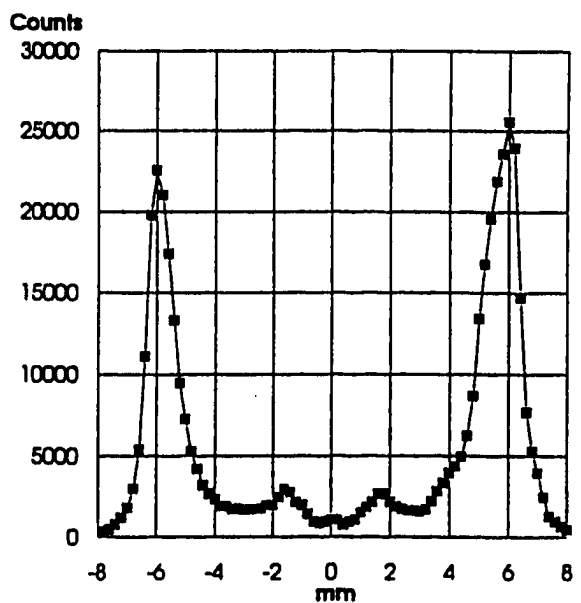
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

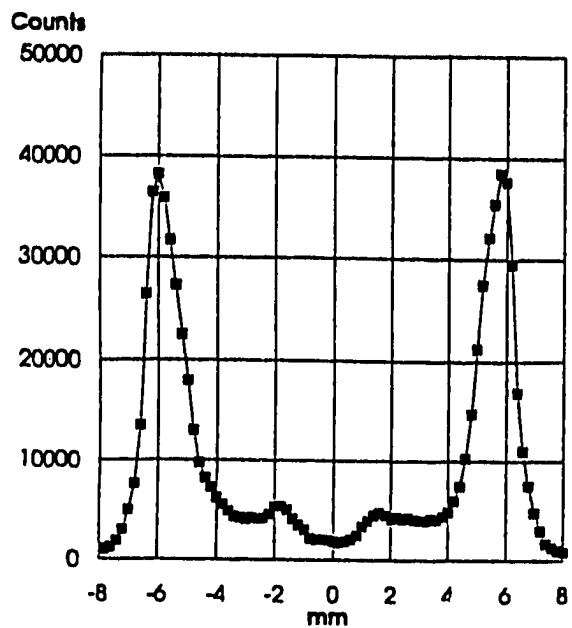


Direction 90° - 270°

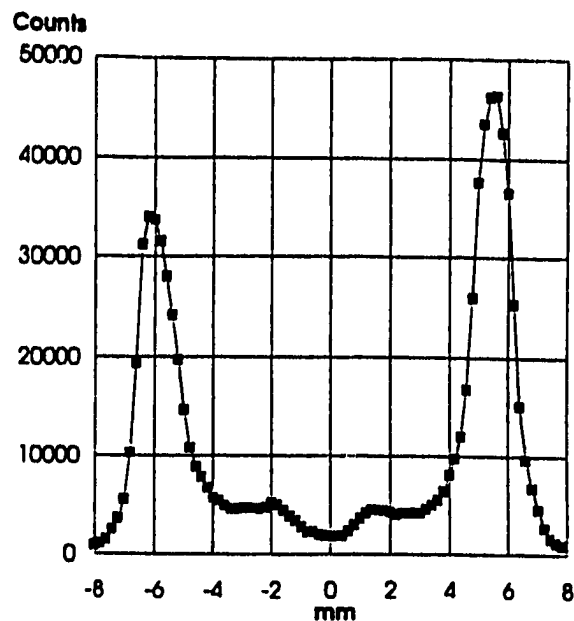


Direction 135° - 315°

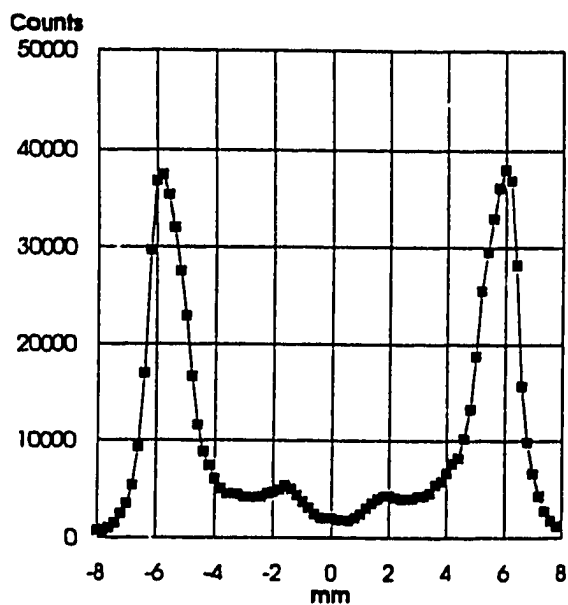
図2.9.19 サンプルH29の断面 γ スキャン、軸方向位置509mm、IFA-555.1、Cs 134



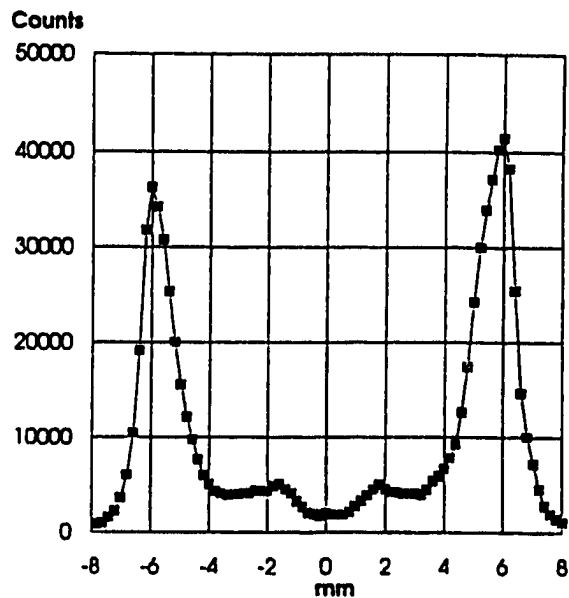
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

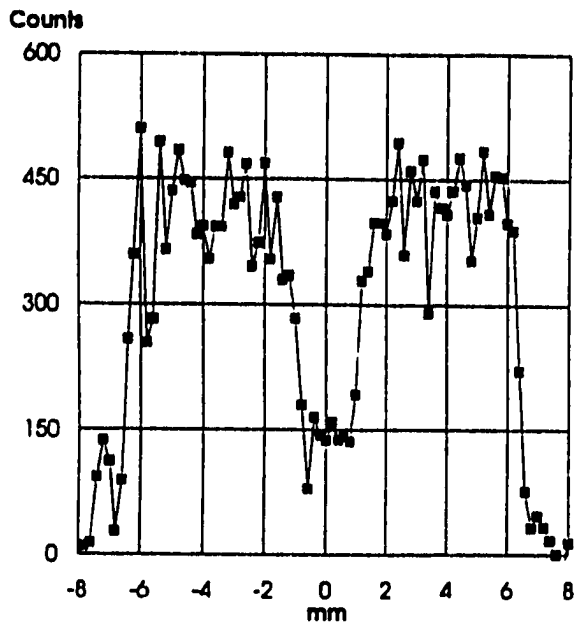


Direction 90° - 270°

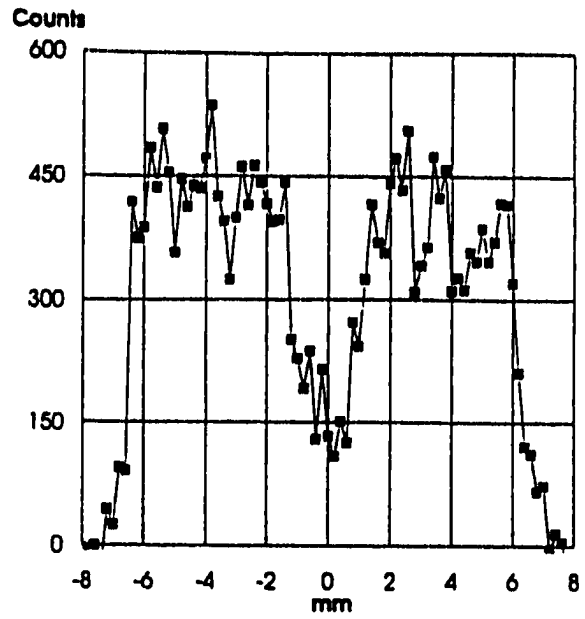


Direction 135° - 315°

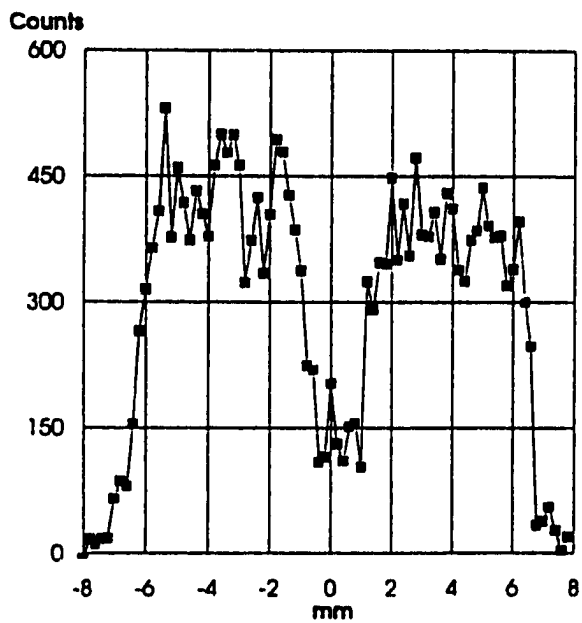
図2.9.20 サンプルH29の断面 γ スキャン、軸方向位置509mm、IFA-555.1、Cs 137



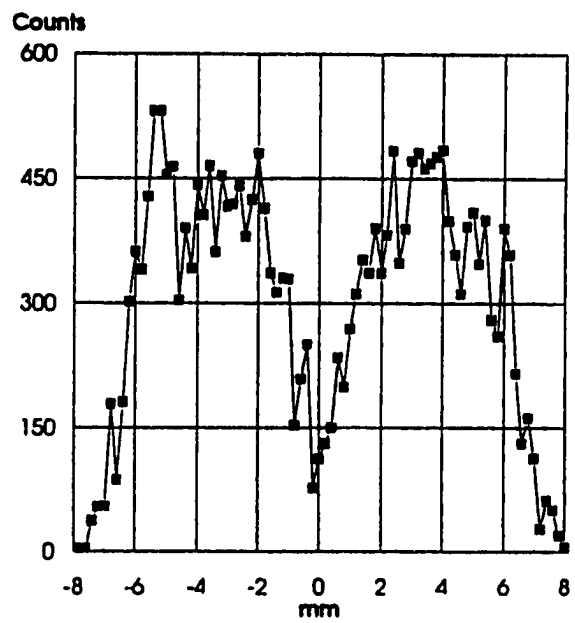
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°

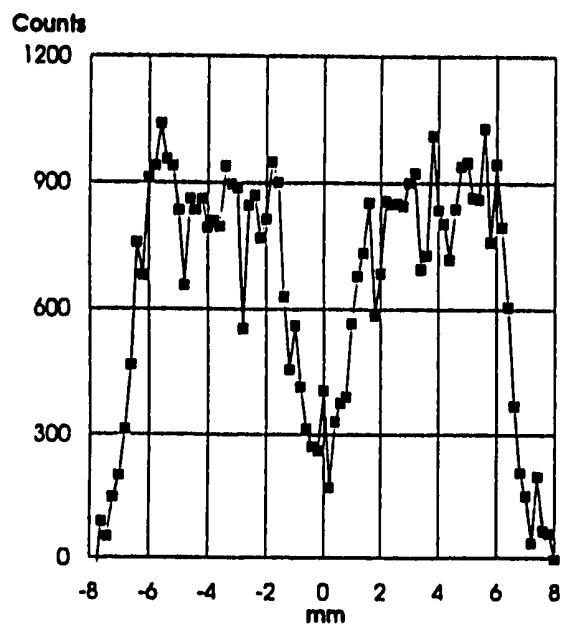


Direction 90° - 270°

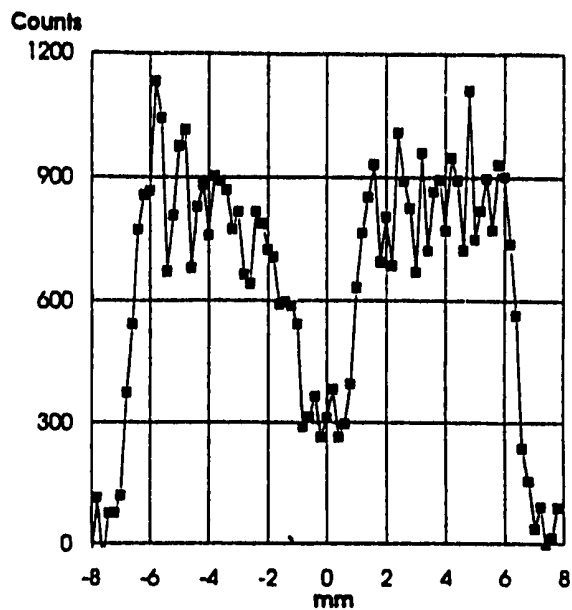


Direction 135° - 315°

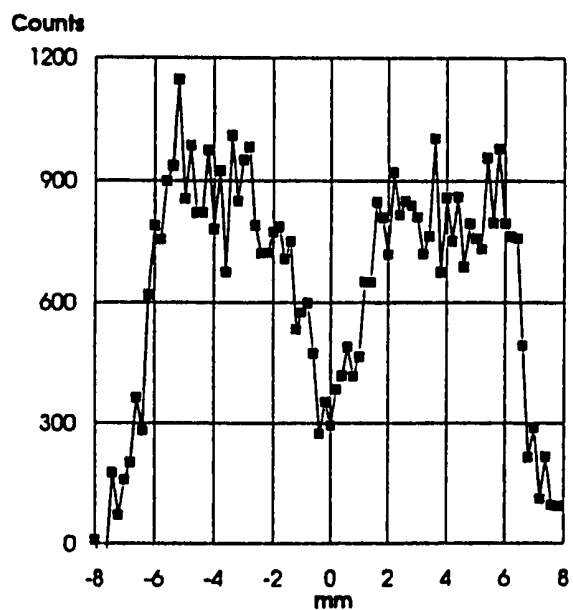
図2.9.21 サンプルH29の断面 γ スキャン、軸方向位置509mm、IFA-555.1、Ce 144



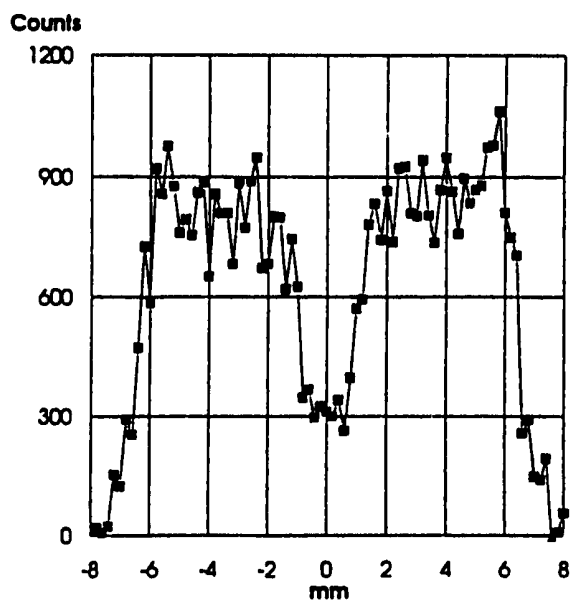
Direction 0° - 180°



Direction 45° - 225°



Direction 90° - 270°



Direction 135° - 315°

図2.9.22 サンプルH29の断面 γ スキャン、軸方向位置509mm、IFA-555.1、Zr/Nb 95

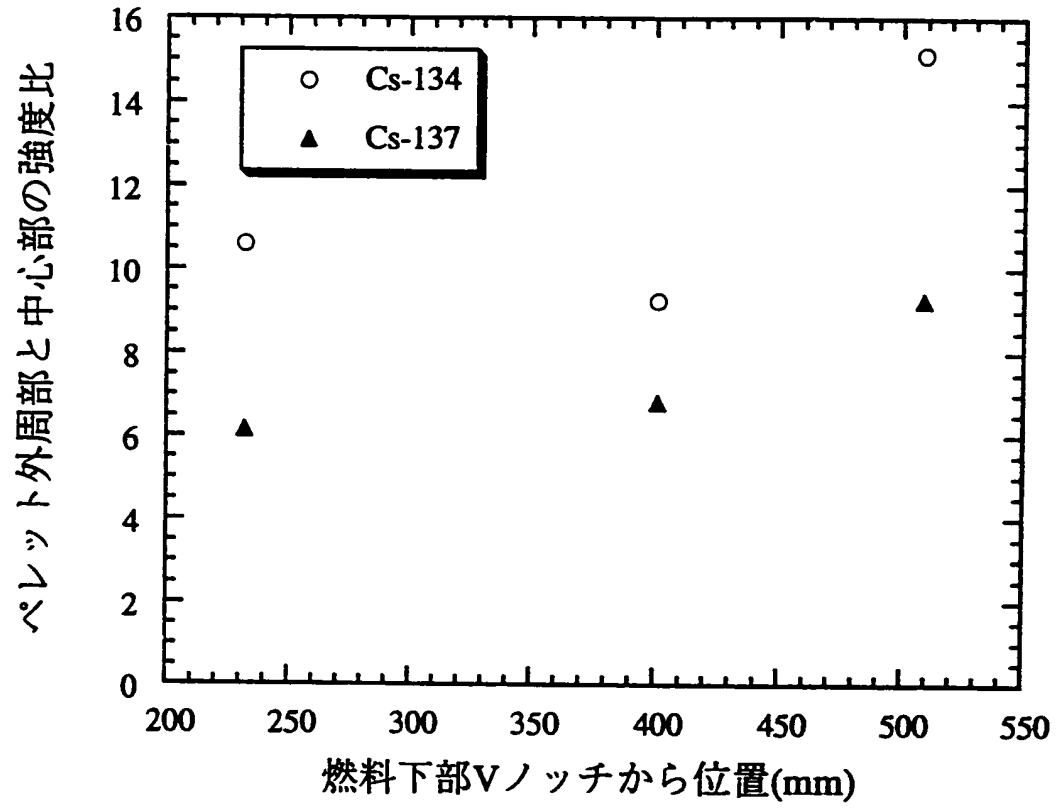


図2.9.23 Cs-134及びCs-137の径方向移動の燃料棒軸方向変化

2.10 燃焼度分析

IFA-555.1から3つの試験片を切り出して燃焼度分析を行った。

試験片は厚さ2mmの円盤状とし、断面平均燃焼度を求めるために酸溶解を行った。

試料の軸方向採取位置と各位置における燃焼度分析の結果を表2.10.1及び図2.10.1に示す。数値は下部端栓のV溝からの距離をmm単位で表したものである。また、燃焼に伴うプルトニウム及びウラン組成の変化を図2.10.2～3に示す。質量分析の結果を表2.10.2～4に示す。

表2.10.1 試験片採取位置と燃焼度分析の結果

試験片No	採取位置 (mm)	燃焼度 (GWd/HMt)
Bu H-29	501-503	47.37
Bu H-26	390-392	40.07
Bu H-28	220-222	34.63

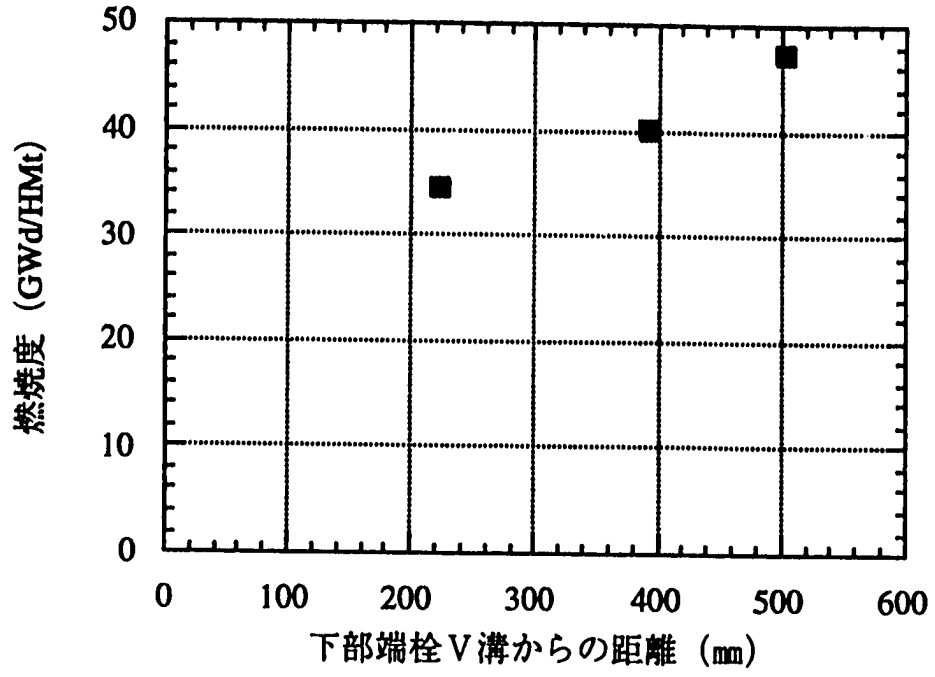


図2.10.1 燃料の軸方向位置と燃焼度の相関

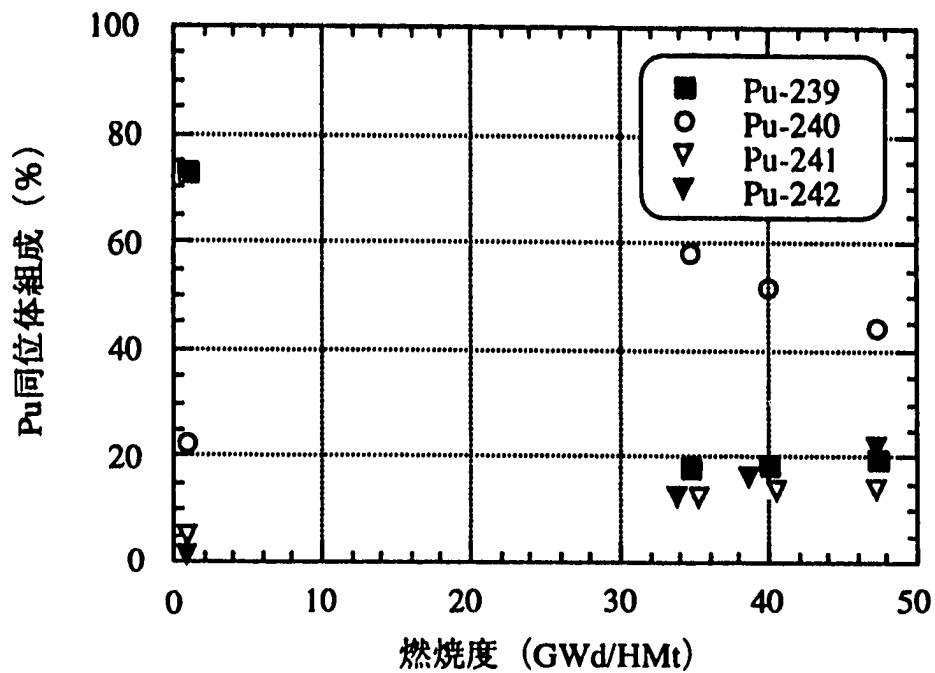


図2.10.2 燃焼に伴うプルトニウム同位体組成の変化

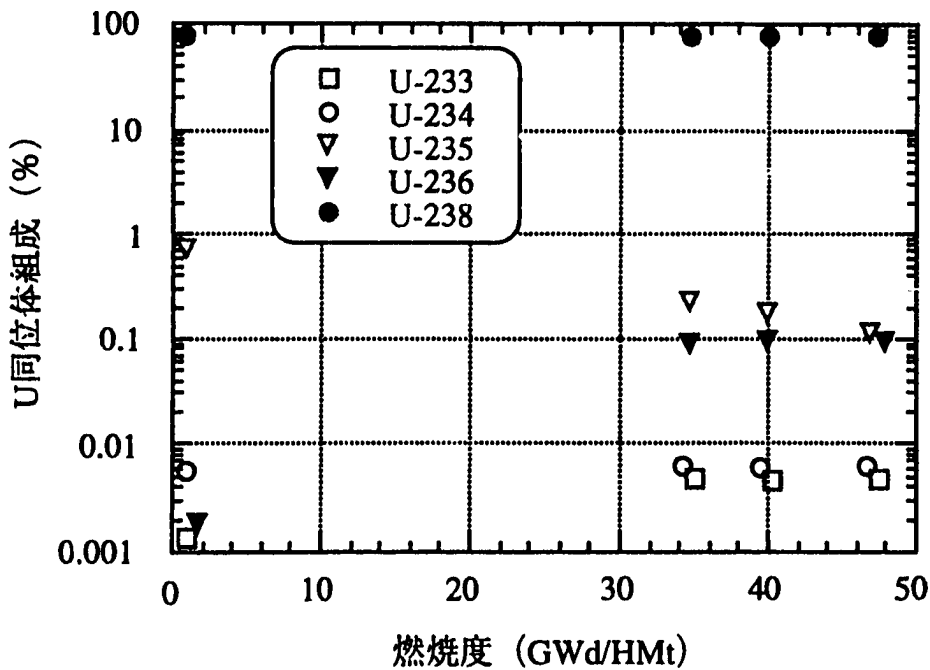


図2.10.3 燃焼に伴うウラン同位体組成の変化

INSTITUTT FOR ERNÆRINGSKEMIKALI
 Avd. Reservoar og Leteteknologi

Analyserapport nr.
 Date :
 Sign:

BUF332
 30-Oct-95

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-555-1 BU H-29 Mars - mai 1995
 Calculated samplesize: 1.21 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0441	U_233	0.00005	Pu_239	0.1984
Nd_148	0.6096	U_234	0.00006	Pu_240	0.4430
Nd_150	0.3463	U_235	0.00104	Pu_241	0.1404
		U_236	0.00093	Pu_242	0.2202
		U_238	0.9979		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00004	mg/mg oxide	Pu_239	3.04	ug/mg oxide
U_234	0.00005	mg/mg oxide	Pu_240	6.87	ug/mg oxide
U_235	0.00084	mg/mg oxide	Pu_241	2.19	ug/mg oxide
U_236	0.00076	mg/mg oxide	Pu_242	3.45	ug/mg oxide
U_238	0.8213	mg/mg oxide	Pu_total	15.54	ug/mg oxide
U-total	0.8230	mg/mg oxide			

Nd_148	1.8137E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont.
Fissions	1.0989E+17	fissions/mg oxide
Uran	2.0824E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	3.8929E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	4.93
BURNUP GWd / tonne met.	47.37

INSTITUTT FOR ENERGITEKNIKK
 Avl. Reservoar og Leteteknologi

Analyserapport nr.
 Date :
 Sign:

BUP330
30-Oct-95

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-555-1 BU H-26 Mars - mai 1995
 Calculated samplesize: 1.30 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0342	U_233	0.00005	Pu_239	0.1879
Nd_148	0.6159	U_234	0.00006	Pu_240	0.5182
Nd_150	0.3499	U_235	0.00169	Pu_241	0.1353
		U_236	0.00094	Pu_242	0.1586
		U_238	0.9973		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00004	mg/mg oxide	Pu_239	3.16	ug/mg oxide
U_234	0.00005	mg/mg oxide	Pu_240	8.74	ug/mg oxide
U_235	0.00138	mg/mg oxide	Pu_241	2.29	ug/mg oxide
U_236	0.00077	mg/mg oxide	Pu_242	2.70	ug/mg oxide
U_238	0.8281	mg/mg oxide	Pu_total	16.88	ug/mg oxide
U-total	0.8283	mg/mg oxide			

Nd_148	1.5359E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont.
Fissions	9.2962E+16	fissions/mg oxide
Uran	2.0958E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.2307E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	4.17
BURNUP GWd / tonne met.	40.07

表2.10.3

INSTITUTT FOR ENERGITTEKNIKK
 Avd. Reservoar og Leteteknologi

Analyserapport nr.
 Date :
 Sign:

BUP331
 30-Oct-95

BURNUP-MEASUREMENT

Sample: IFA-555-1 BU H-28 Mars - mai 1995
 Calculated samplesize: 1.28 mg/ml

Results:

Atomic fraction of the isotopes measured:

Nd_142	0.0278	U_233	0.00005	Pu_239	0.1792
Nd_148	0.6204	U_234	0.00006	Pu_240	0.5821
Nd_150	0.3517	U_235	0.00219	Pu_241	0.1183
		U_236	0.00087	Pu_242	0.1205
		U_238	0.9968		

Weight fraction of the isotopes:

U_233	0.00004	mg/mg oxide	Pu_239	3.23	ug/mg oxide
U_234	0.00005	mg/mg oxide	Pu_240	10.55	ug/mg oxide
U_235	0.00180	mg/mg oxide	Pu_241	2.15	ug/mg oxide
U_236	0.00072	mg/mg oxide	Pu_242	2.20	ug/mg oxide
U_238	0.8294	mg/mg oxide	Pu_total	18.13	ug/mg oxide
U-total	0.8320	mg/mg oxide			

Nd_148	1.3279E+15	atoms/mg oxide, corr. for nat. Nd-cont.
Fissions	8.0328E+16	fissions/mg oxide
Uran	2.1051E+18	atoms/mg oxide
Plutonium	4.5456E+16	atoms/mg oxide
Thorium	0	atoms/mg oxide

Total heavy elements atom percent fission:	3.60
BURNUP GWd / tonne met.	34.63

表2.10.4

2.11 被覆管内表面の外観観察及びSEM観察

IFA-555.1から4つの試験片を切り出して被覆管内面の観察を行った。

試料の採取位置は以下のとおり。

15-35 mm
359-390 mm
483-501 mm
513-543 mm

軸方向位置は下部端栓のV溝から測定したものである。

試料は、所定の軸方向位置において低速度ダイヤモンドカッターを用いて切断し、次に縦方向にスライスした。縦割り後のペレットと被覆管は容易に分離し、強い固着は見られなかった。

次に、ペリスコープによる観察と写真撮影を行うため、試料を切断用セルから観察用コンクリートセルに移した。

試験は、分離したペレットと被覆管の両方について行った。

2.11.1 被覆管内面の外観観察

試験結果を図2.11.1～2に示す。図は前処理条件の異なる2つの試料を示す。左側は2箇所から採取した脱ミート試料を示す。右側は同じ試料を硝酸処理したものである。

脱ミートした試料には燃料とペレット境界のみが見られた。

室温で20時間硝酸処理した被覆管の内面には、なおペレット境界の痕跡が残っていた。クラックなどその他の特異な様相は認められなかった。

図2.11.1より、燃料棒上部に行くにつれて内面の黒化度が大きくなっている。また、15-35mm部のペレット端面接触部は茶色を呈しているが、硝酸処理によって除去されている。図2.11.2より485-501mm部には硝酸処理後でも付着物が見られる。

2.11.2 被覆管内面のSEM観察

各軸方向位置の内表面についてSEM観察を行った。被覆管表面は酸処理を行ったものである。観察位置を図2.11.1、図2.11.2の図中に矢印で示す。SEM観察の目標は代表的な組織の高倍像（100倍及び1000倍）を得ることである。

SEM観察の結果を図2.11.3～7に示す。

軸方向位置15-35mm、359-390mm、483-501mm及び513-543mmについて被覆管内面の代表的な組織像を、図2.11.3、図2.11.5～7にそれぞれの低倍と高倍像で示す。図2.11.7に見られる引っ掻き傷は人為的なものであり、脱ミートの際についてのものである。

ペレット境界の影響について図2.11.4（高倍と低倍）に軸方向位置15-35mmにおける高倍及び低倍像を示す。

被覆管内面から突き出している部分の高倍及び低倍像を、軸方向位置15-35mm及び483-501mmについて図2.11.4、図2.11.6にそれぞれ示す。当該部は酸化物であると思われる。

15-35mm部のミクロ組織（図2.11.3）には加工時に由来すると考えられる縦縞が見られるが、359-390mm部（図2.11.5）及び483-501mm部（図2.11.6）では消失しており、組織変化が生じたことを示唆している。また、ペレット端面の接触部のミクロ組織（図2.11.4）には非接触部（図2.11.3）のような縦縞が見られず、接触によって組織が押し潰されたとも考えられる。

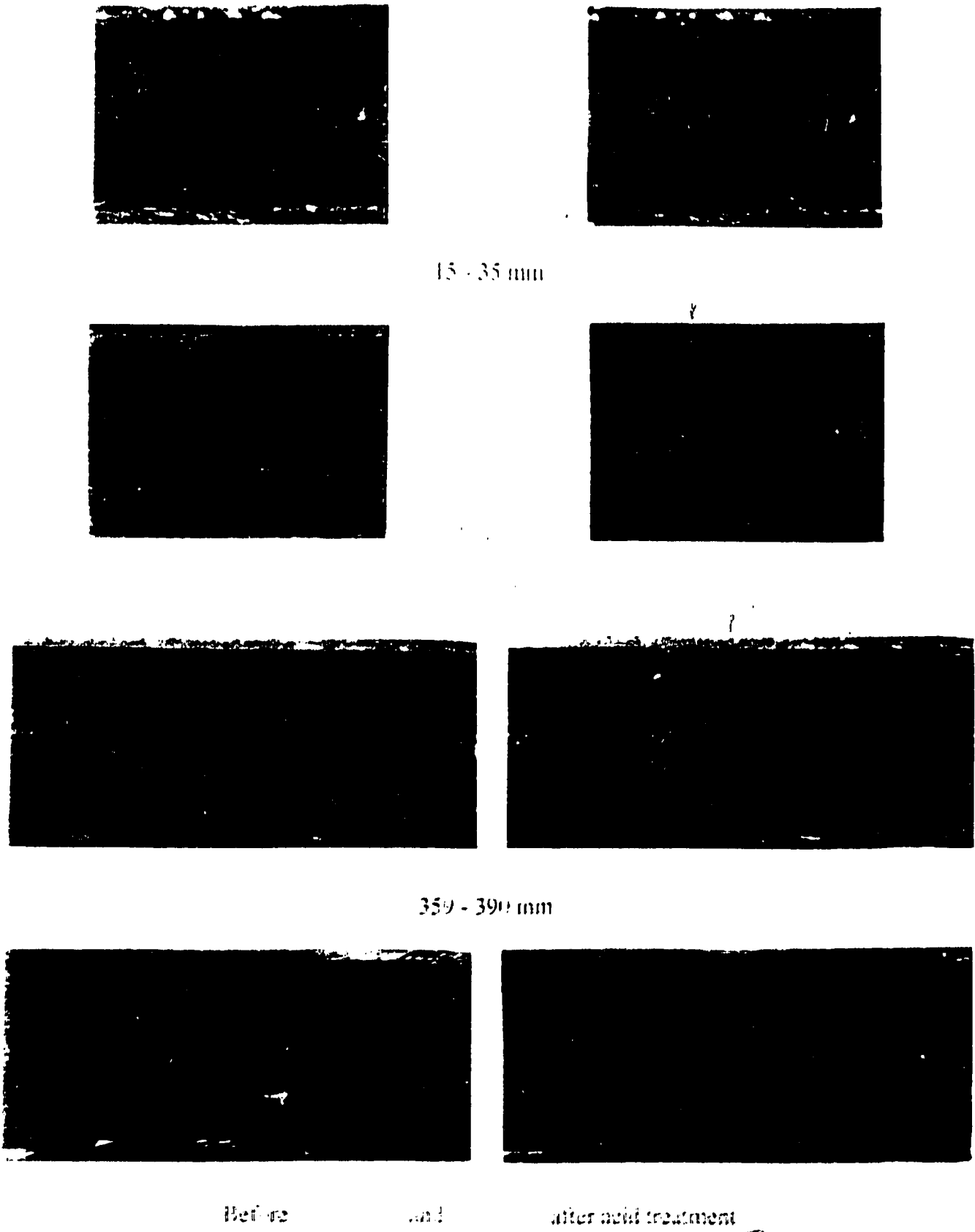
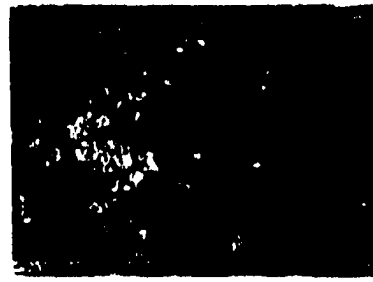
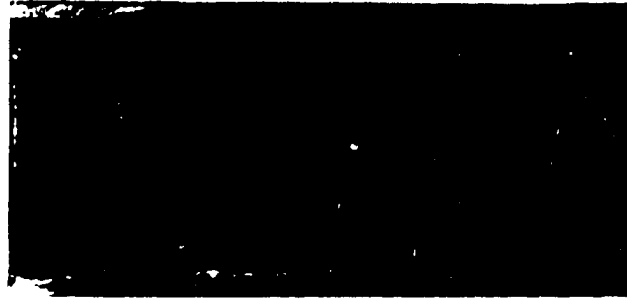
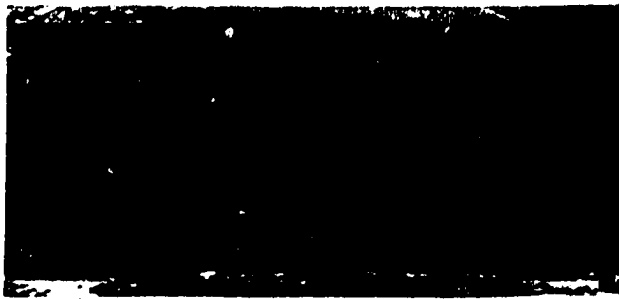


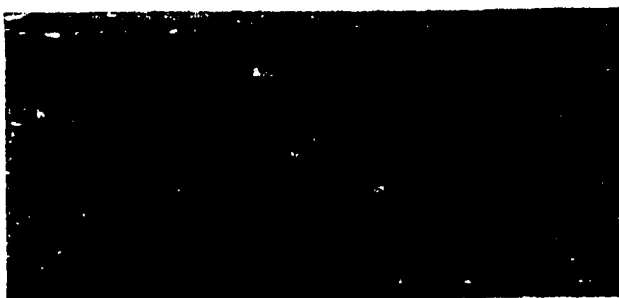
図2.11.1 IFA-555.1 被覆管サンプルの内表面の外観観察



483 - 501 mm



513 - 543 mm



Before

and

after acid treatment

図2.11.2 IFA-555.1 被覆管サンプルの内表面の外観観察

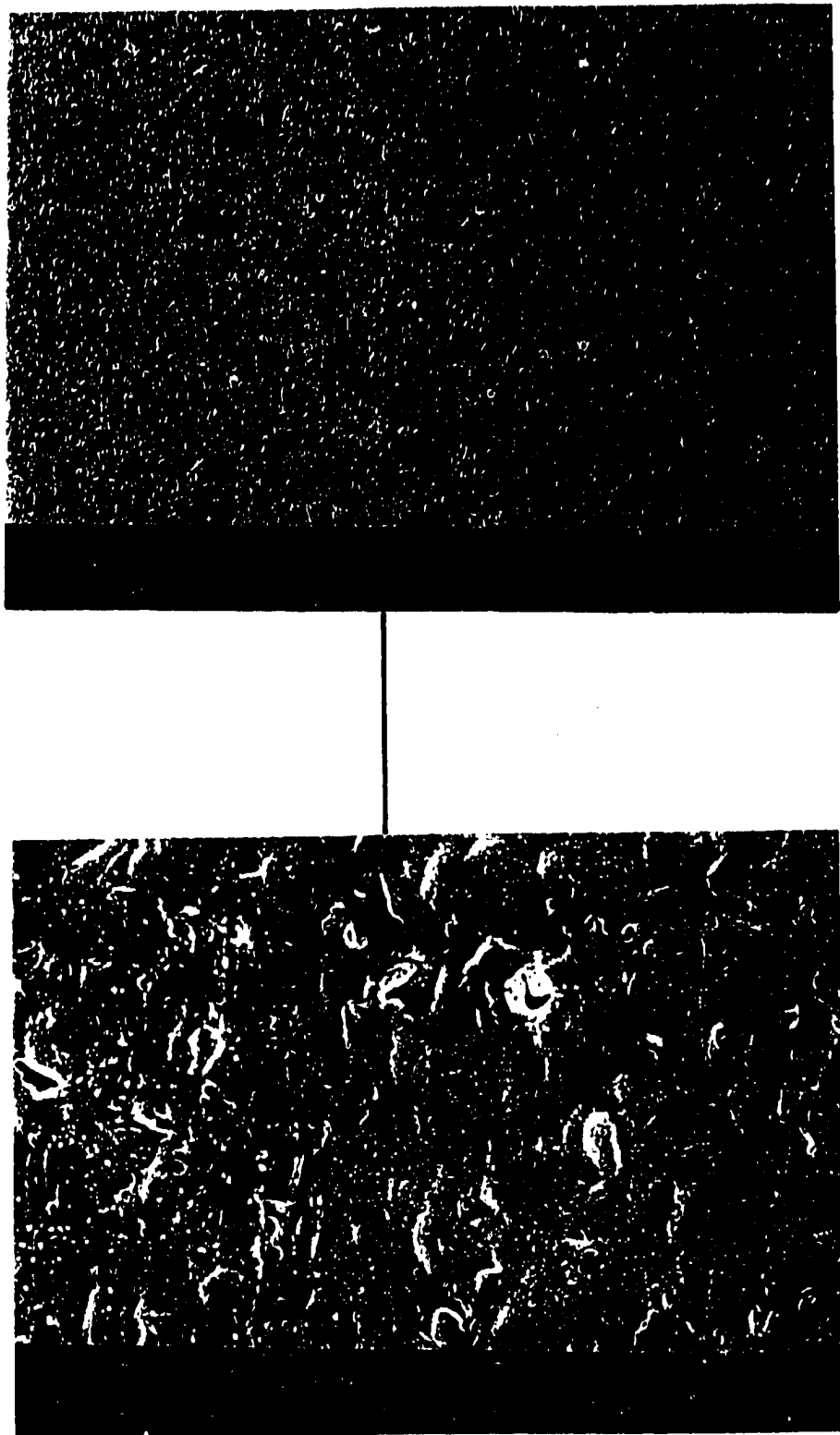


図2.11.3 IFA-555.1 サンプル (15-35mm) の酸処理した被覆管内表面のSEM写真

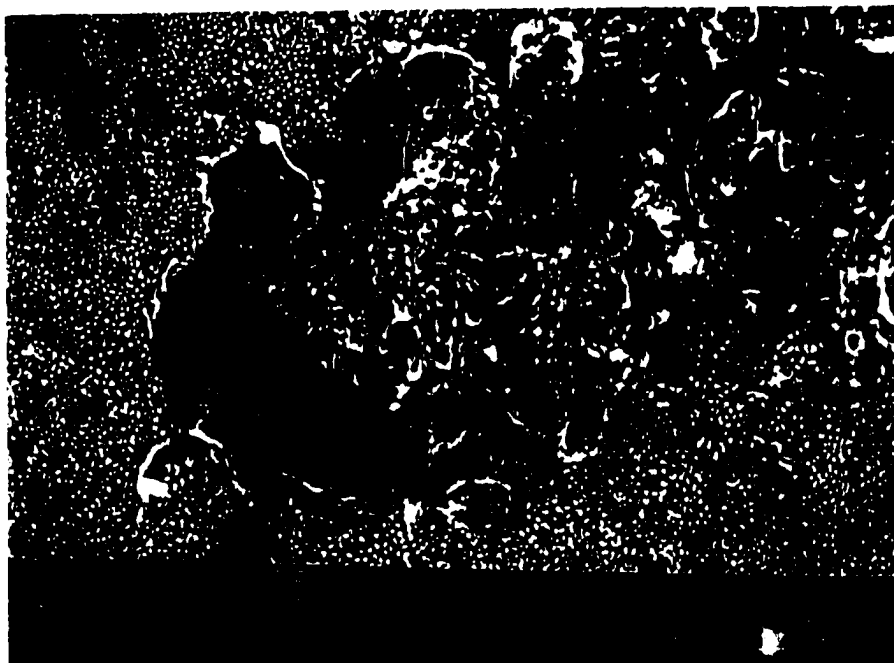
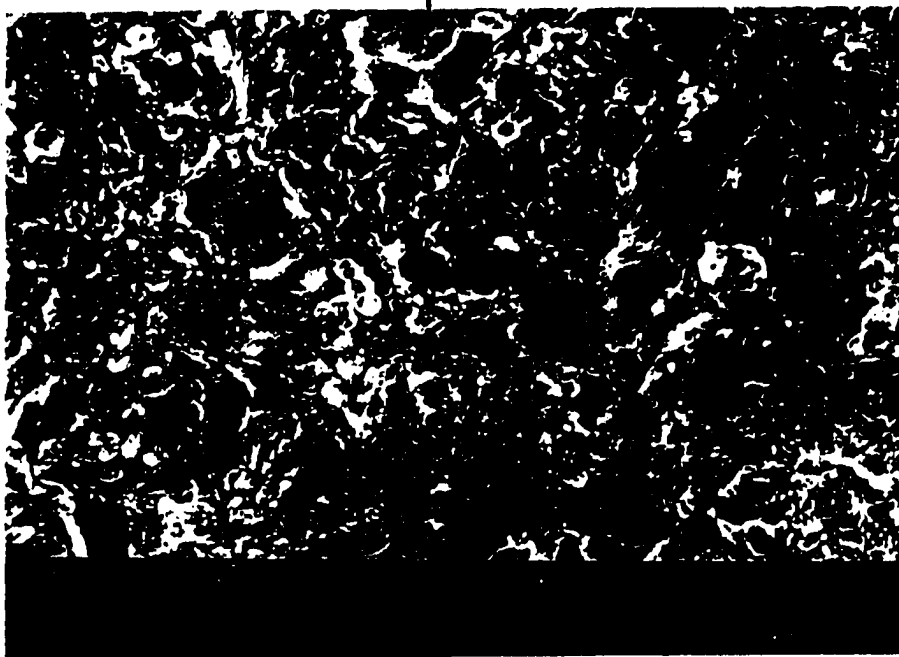
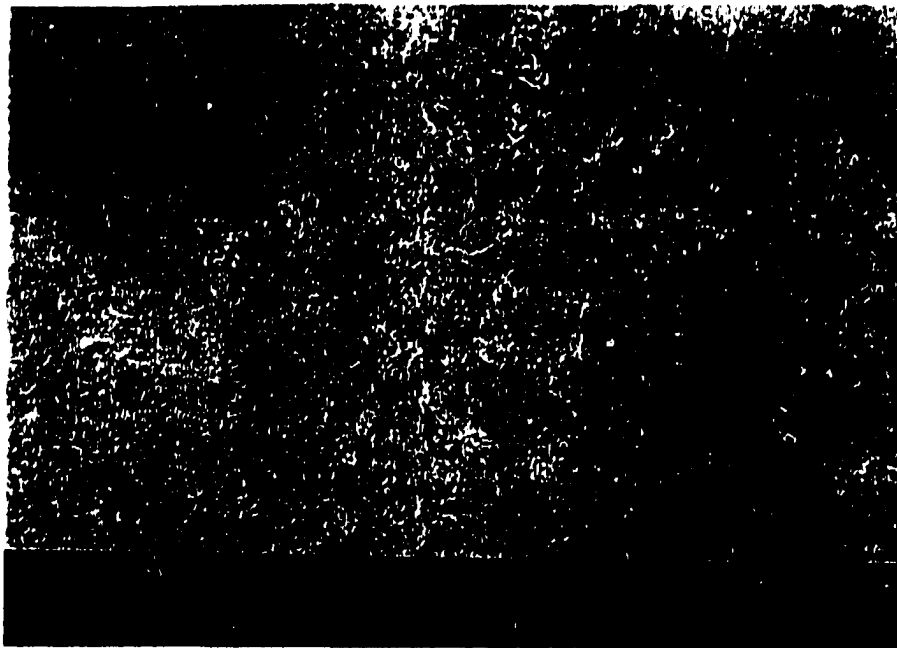


図2.11.4 IFA-555.1 サンプル (15-35mm) の酸処理した被覆管内表面のSEM写真

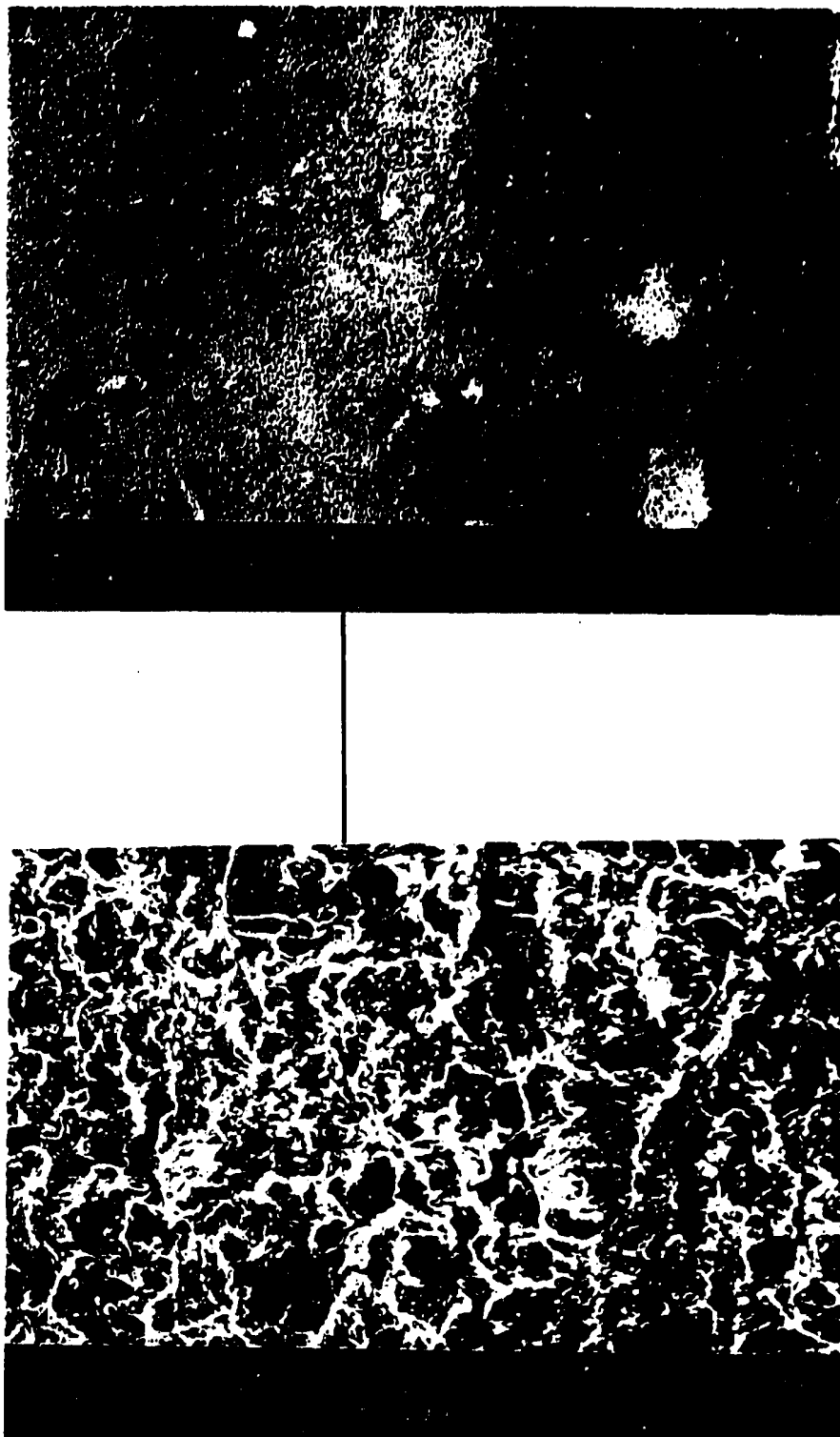


図2.11.5 IFA-555.1 サンプル (359-390mm) の酸処理した被覆管内表面のSEM写真

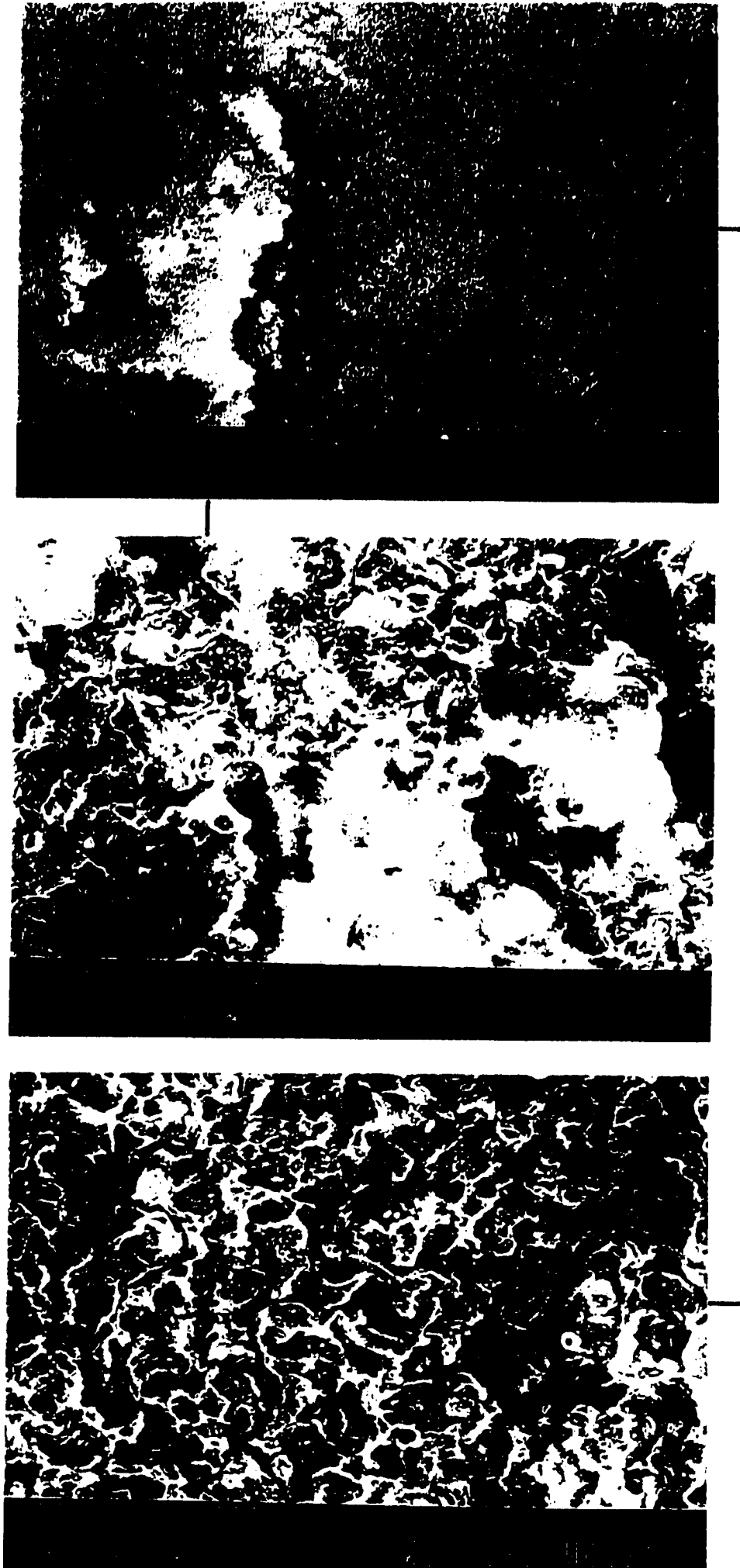


図2.11.6 IFA-555.1 サンプル (483-501mm) の酸処理した被覆管内表面のSEM写真

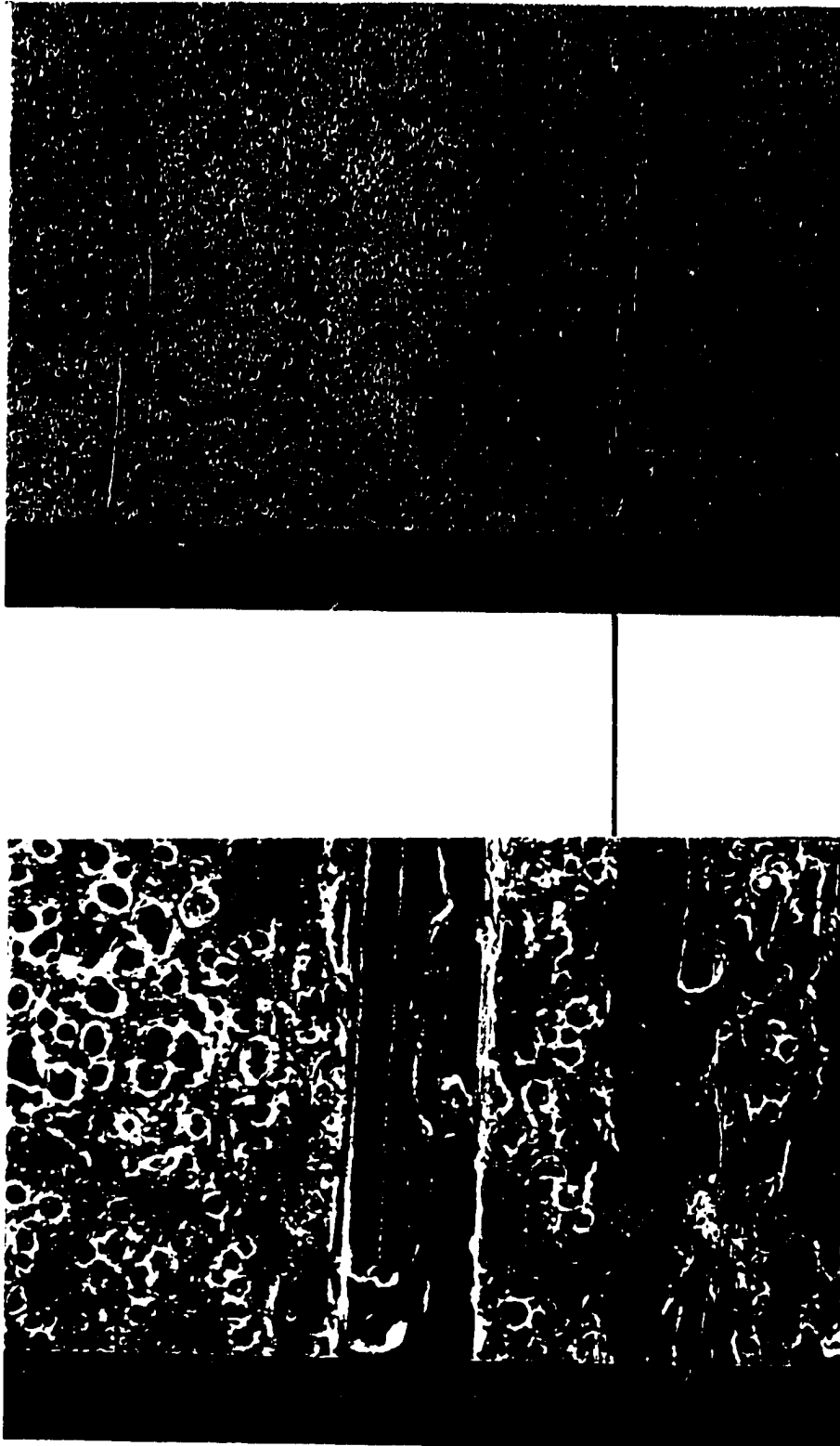


図2.11.7 IFA-555.1 サンプル (513-543mm) の酸処理した被覆管内表面のSEM写真

2.12 リング引張試験

リング引張試験をIFA-555.1から得られた4つのサンプルについて実施した。サンプルをV溝から、43-45、235-237、404-406、452-454mmのところでカットした。

サンプルはカットした後、燃料を取り除き、汚染を除くために硝酸で洗ってその後超音波洗浄したものである。

リングサンプル用に作られた特殊な半円形のツールを使ったInstron社製引張試験機で試験を行った。引張速度は2mm/minである。リングサンプルに対しての標点距離は物理的には決められていないが、平均円周の10%程度のノミナル値であればそれは一般的に適当であると考えられている。IFA-555.1のサンプルの場合、標点距離は4.268mm、ノミナルのひずみ速度は0.468/minである。

それぞれのリング幅をマイクロメータゲージで3点において測定し、その平均を断面積の計算に用いた（表2.12.1参照）。応力の計算に必要な肉厚を照射されたサンプルにおいて測定した。また肉厚の平均値を計算に用いた。これは肉厚の平均値からの差に相当する応力値の誤差を引き起こしてしまう。試験中の経過は一般的なチャートレコーダーによって記録している。これらのテストの主な結果を表2.12.1に示した。

引張試験温度は20℃である。表2.12.1に示した測定結果は、得られた引張曲線から概算したものである。

記録された引張曲線は数値化され、校正される。結果として得られた応力-ひずみカーブを図2.12.1～3に示した。データを補正した直線を、実際のカーブ上に重ねて記録した。応力-ひずみカーブの直線の部分に加えられている直線はカーブより概算されたものである。均質伸び（UEL）とトータルの伸び（TEL）を概算するために用いた補正ラインは引張曲線に重ねて示してある。

破断面については、引張試験を行った後にJSM-80 Scanning Electron Microscope（SEM）によって観察した。SEM写真を図2.12.4～7に示した。マイクロメータのスケールをそれぞれの写真に入れた。ポジション43-45mmと235-237mmでのサンプルの破断面は延性であり、ポジション404-406mmでのサンプルの破断面は脆性と延性の両方であった。またポジション452-454mmでは脆性であった。

表2.12.1 試験結果

サンプル 位置* (mm)	幅 (mm)	肉厚 (mm)	UTS (MPa)	UEL (%)	TEL (%)
43-45	2.14	0.89	803	2.6	16.8
235-237	1.98	0.9	818	3.3	22.2 (?)
404-406	1.96	0.92	407	0	0
452-454	2.31	0.82	362	0	0

* 下端Vノッチからの高さ

表2.12.1から燃料ピンの上側ほど最大の引張強さ（UTS）は小さくなっている。また図2.12.1～3の伸びのデータ（UEL）や図2.12.4～7のSEMの結果からは燃料ピンの上側ほど脆化していることが分かる。

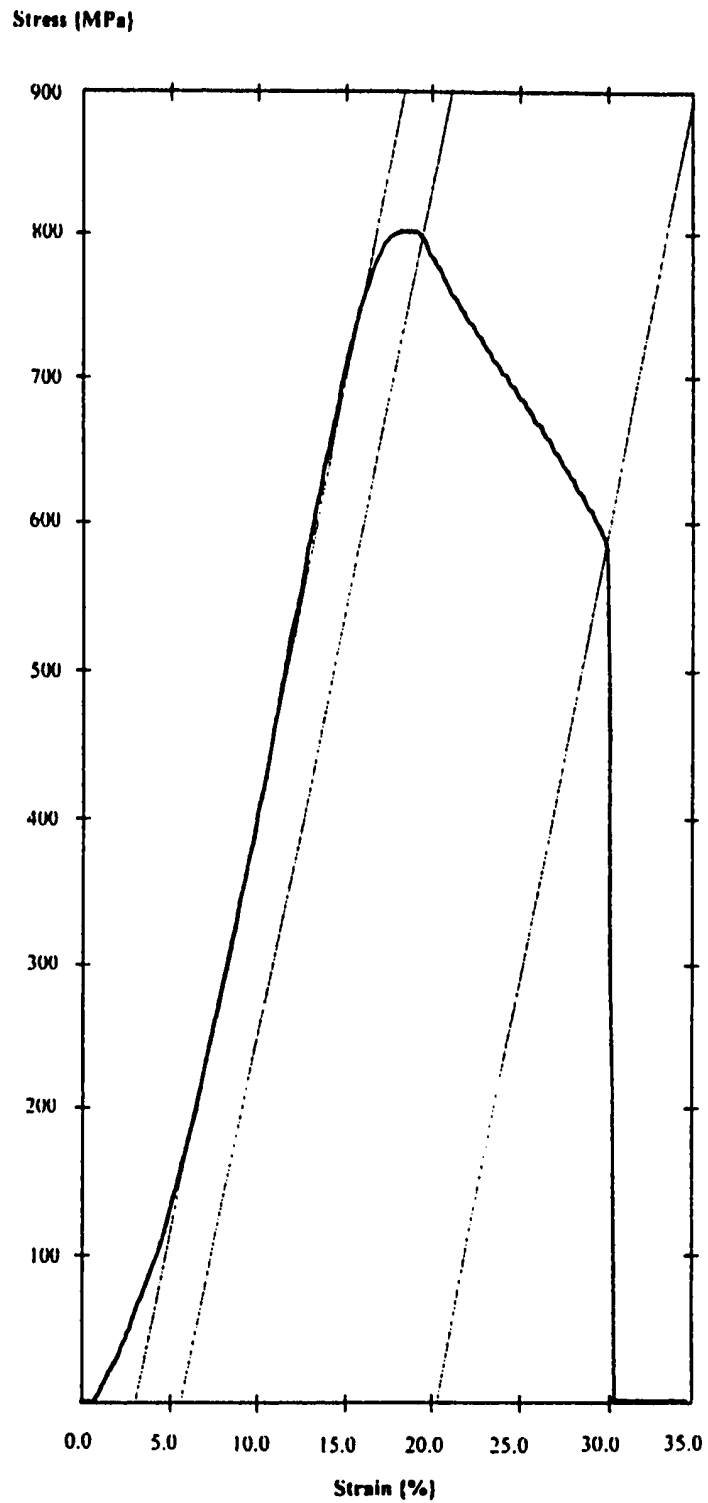


図2.12.1 リング引張サンプルの応力-歪カーブ
IFA-555、ロッドNo.1 43-45mm位置

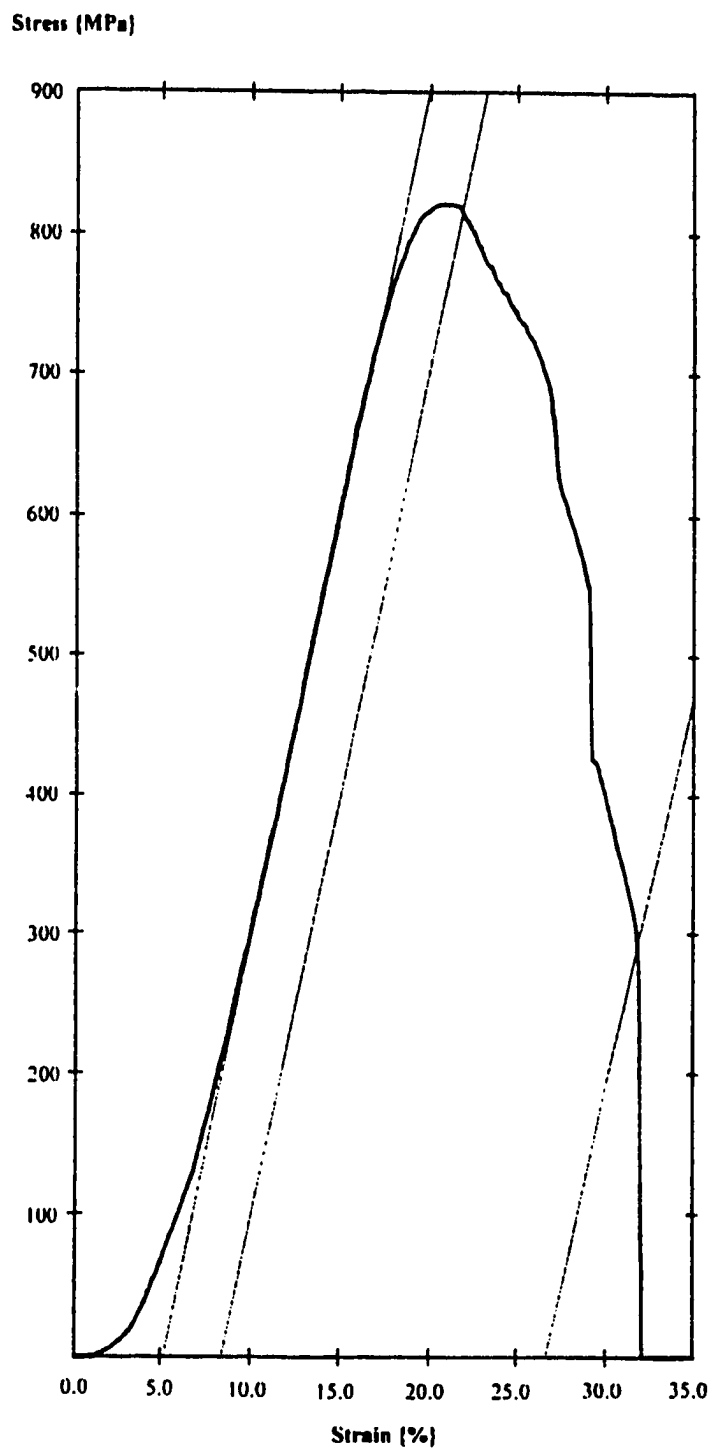


図2.12.2 リング引張サンプルの応力-歪カーブ
IFA-555、ロッドNo.1 235-237mm位置

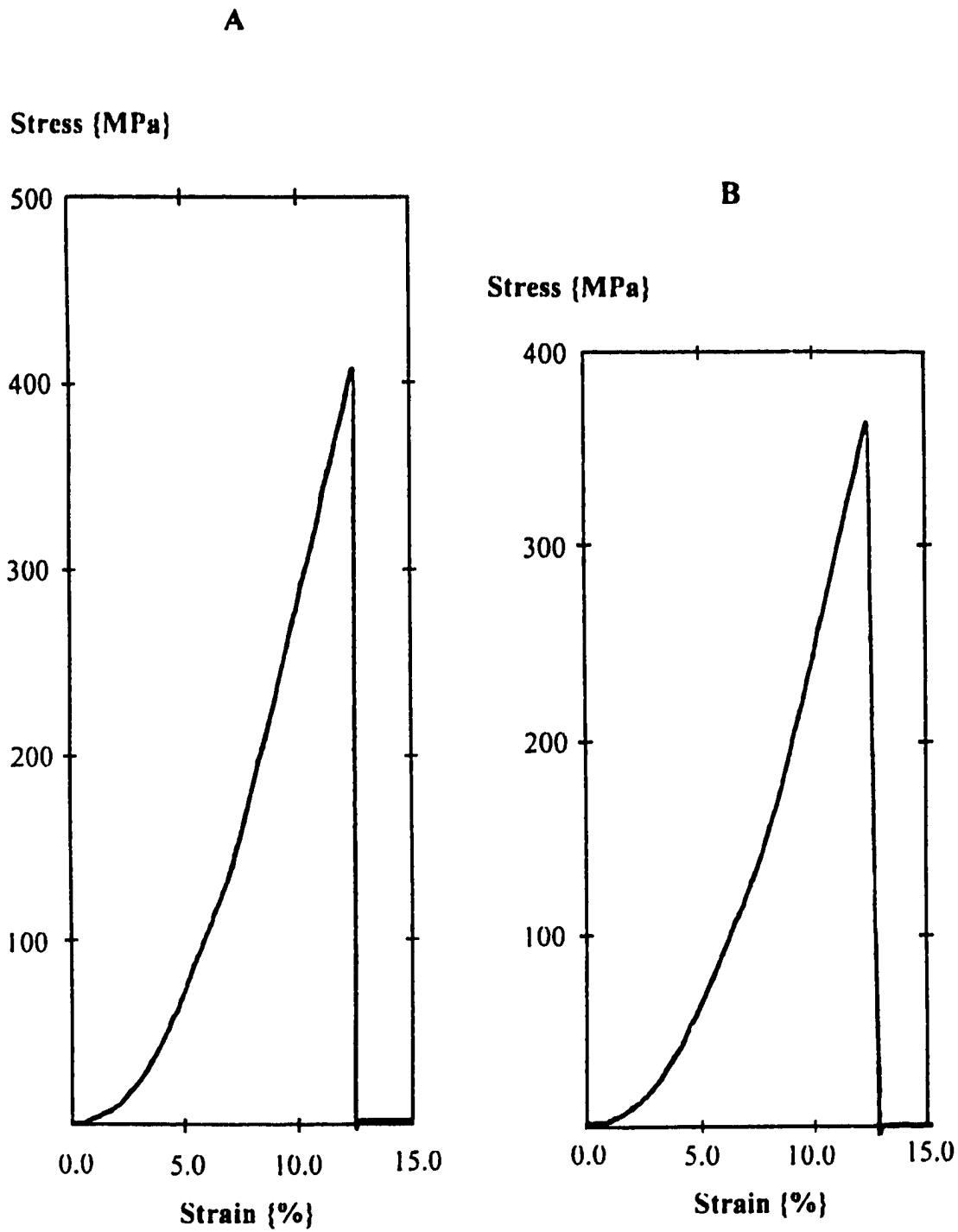
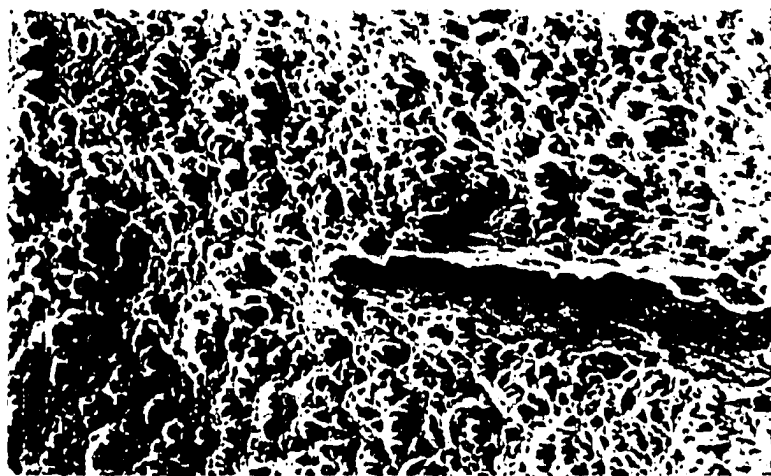


図2.12.3 リング引張サンプルA,Bの応力-歪カーブ
IFA-555、ロッドNo.1 404-406mm位置(A)、452-454mm位置(B)



100 μm

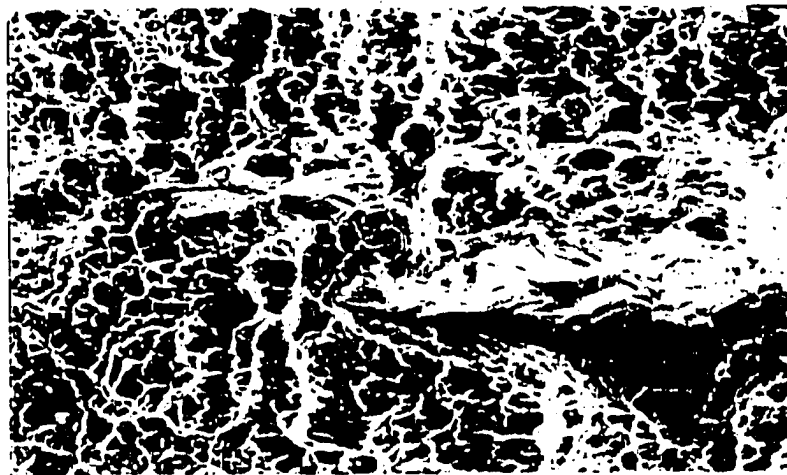


10 μm

図2.12.4 43-45mm位置の破断構造と破断面



100 μm



10 μm

図2.12.5 235-237mm位置の破断構造と破断面

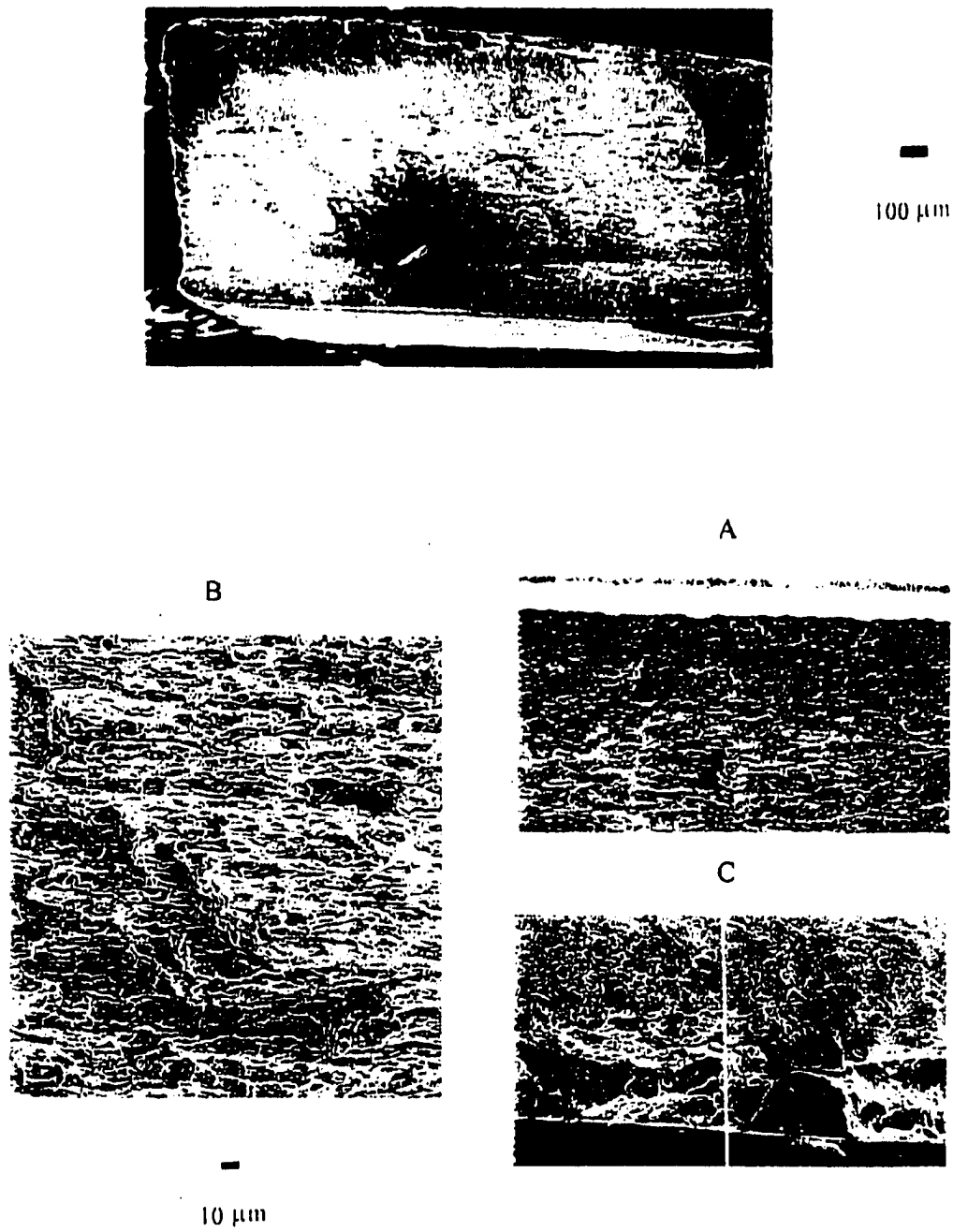


図2.12.6 404-406mm位置の破断構造と破断面
(A) 被覆管内側表面、(B) 被覆管中央部表面、(C) 被覆管外側表面

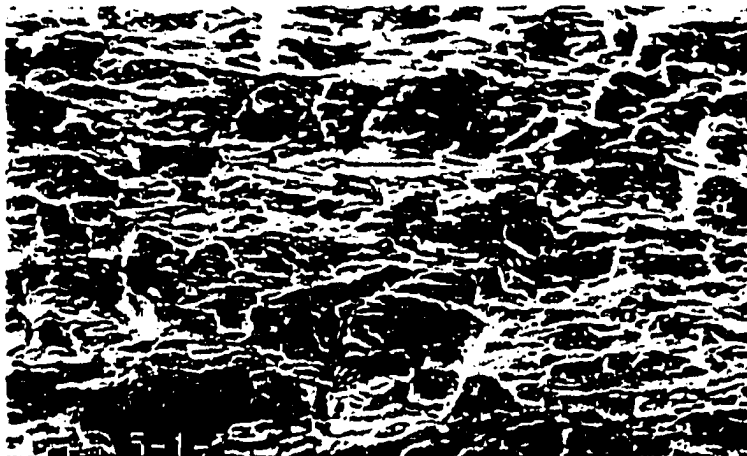
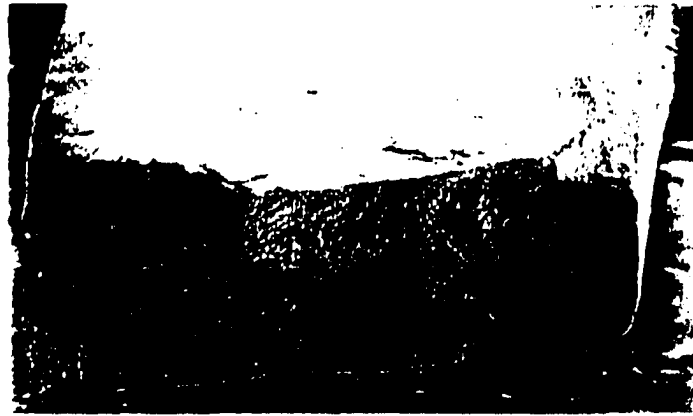


図2.12.7 452-454mm位置の破断構造と破断面

2.13 被覆管の水素分析

水素分析のための4つのリングサンプルをIFA-555.1の被覆管からカットした。サンプルは、V溝から40-43、232-235、401-404、449-452mmの位置からサンプリングした。その後それぞれのリングより2個づつの小さいサンプルが切り出され、これを分析した。これらのサンプルの角度的な位置は任意に取られる。

分析を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。測定は原則的にキャリアーガスを用いて行う。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℃に加熱した。この溶けた抽出物が水素や一酸化炭素を放出し、それらはキャリアーガスによって運ばれる。キャリアーガスは粗い粒子を除去するダストトラップ（オキシダント：酸化性物質とモレキュラーシーブ）を通り、水素と一酸化炭素の酸化生成物であるH₂OとCO₂として集められる。

H-MAT2500の熱伝導測定セルを水素検出器として用いた。thermal bridge circuitが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が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が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。

測定結果を表2.13.1にサンプル位置、重量とともに記載した。サンプル重量は8.7～68.4mg、水素含有量は32（下端）～1441ppm（上端）である。水素含有量はロッドの下端では比較的low、上端近くではかなり高い。これは図1.1の中性子ラジオグラフで見ることができる被覆管の水素化の観察結果と良く一致する。

表2.13.1 IFA-555.1のリングサンプルの水素含有率

サンプル	位置 (mm)	重量 (mg)	H ₂ -含有率 (ppm)	H ₂ 含有率平均値 (ppm)
1.0	40-43	61.3	62	47
2.0	40-43	23.1	32	
3.0	232-235	28.0	276	283
4.0	232-235	68.4	290	
5.0	401-404	12.4	304	269
6.0	401-404	22.6	233	
7.0	449-452	9.2	866	1154
8.0	449-452	8.7	1441	

* 下端Vノッチからの高さ

水素分析試験からは平均値で見ていく限りは上側ほど水素含有量が多くなっている傾向がある。ただし同じ高さのサンプルでもばらつきがあり水素含有量の多い上側ほど大きくなっている。リング引張試験と水素分析試験を総合的に見ると200mmと400mm付近では水素含有量はほぼ同じ値を示しているのに対し引張強さに関してはかなりの変化がみられる。

2.14 マイクロ硬さ測定

マイクロ硬さは、3mm厚さのリングサンプル4本について測定した。サンプルは、下端Vノッチからの距離で、45-48mm、237-240mm、406-409mm及び478-480mmである。サンプル位置を図1.1に示す。

燃料を取り除き、除染したリングサンプルをエポキシ樹脂にマウントし、水素化物が現れるようにエッチング研磨する。荷重は100gとした。硬さ測定は、全て被覆管の燃料側から開始した。水素化物の上あるいは近辺は測定しないようにした。各測定点での硬度は、刻みの対角線長 x 及び y から計算した平均値である。対角線 x は被覆管の半径方向に、対角線 y は周方向に平行になるようにした。平均硬さは、測定値の算術平均である。下端Vノッチからの距離と角度でロッド位置を特定している。各リングサンプルに対して、2方向ずつ硬さを求めた。Appendix 1 に全測定値を示す。

被覆管の燃料側は、Zrライナーでコートされている。このライナーの硬さを、2点で測定している。測定値は、 $\phi 172 \pm 8$ HV(100)である。軸方向の位置及び角度をパラメータにして、被覆管の平均硬さ (ϕ) を表2.14.1に示す。

燃料側に近く水素化物のないZry2被覆管の硬度は、全4サンプル、3方向で、322-340 HV(100)である。

表2.14.1 IFA-555.1 軸方向4カ所、3方向での被覆管の平均硬さ HV(100) 値

軸方向位置 (mm)	HV(100) 角度 0° ϕ	HV(100) 角度 90° ϕ	HV(100) 角度 180° ϕ
45-48		322	333
237-240	322	330	
406-409		340	326
478-480		338	330

Zry2被覆管の硬度は、軸方向位置、半径方向位置によらず、ほぼ一定である。未照射材での硬度は、ライナー部でHV(25)=104~118 (本試験と同一材料)²⁾、Zry-2部でHV(200)=194~210 (ふげん用材料)³⁾ となっており、それぞれ照射により硬化している。なお、ピッカース硬さは荷重に依存しない。

Appendix 1:

		Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
		555-1	45-48	90°	322
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV	
1	23,7	330	24,4	312	
2	23,7	330	24,4	312	
3	23,4	339	24,1	319	
4	23,6	333	24,1	319	
5	23,9	325	24,6	306	
6	23,8	327	24,4	312	

		Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
		555-1	45-48	180°	333
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV	
1	22,7	360	22,9	354	
2	21,5	401	23,2	345	
3	22,8	357	23,4	339	
4	23,1	348	23,4	339	
5	22,2	376	23,7	330	
6	22,2	376	22,8	357	

		Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
		555-1	237-240	0°	322
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV	
1	23,4	339	24,3	314	
2	24,0	322	24,7	304	
3	23,5	336	23,8	327	

		Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
		555-1	237-240	90°	330
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV	
1	23,6	333	24,0	322	
2	23,6	333	24,0	322	
3	23,1	348	24,2	317	
4	24,1	319	24,9	299	
5	23,3	342	23,9	325	
6	23,6	333	23,5	336	
7	22,9	354	23,5	336	
8	23,1	348	24,0	322	
9	23,6	333	23,8	327	

	Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
	555-1	406-409	90°	340
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV
1	23,6	333	24,7	304
2	23,6	333	24,7	304
3	22,6	363	23,9	325
4	23,2	345	24,3	314
5	22,6	363	23,4	339
6	22,1	380	21,8	390

	Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
	555-1	406-409	180°	326
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV
1	24,2	317	24,5	309
2	24,4	312	24,2	317
3	24,2	317	24,7	304
4	23,3	342	23,1	348
5	21,9	387	24,0	322

	Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
	555-1	478-480	90°	338
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV
1	22,8	357	23,9	325
2	22,8	357	23,7	330
3	23,3	342	24,3	314
4	22,5	366	24,0	322

	Rod	Position (mm)	Orientation	HV ₁₀₀ average
	555-1	478-480	0°	330
Indent No.	Diagonal X	HV	Diagonal Y	HV
1	23,6	333	24,7	304
2	23,4	339	23,9	325
3	22,3	373	23,9	325
4	23,0	351	25,2	292
5	23,4	339	24,9	299
6	22,5	366	24,2	317

2.15 バースト試験

バースト試験に供されたサンプルは1つで、軸方向カッティング位置を図1.1に示す。試験温度は340℃とした。

カッティング位置は、下端Vノッチから48-200mmである。

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（12mm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治具に取付け、セル外側のポンプからの加圧ラインに接続する。
- ・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、正確な圧力計の指示値で校正を行う。
- ・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ーンプンを用いて、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、圧力とスクリーンプンの移動量を、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破断応力を計算する。

変形特性が複雑であるため、圧力とピストン移動量から全伸び量及び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る。従って、倍率（6， 7x）の写真上で伸びを測定する。

試験結果を表2.15.1に示す。

応力を計算するのに、サンプル直径を13.585mm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2.15.1に示す。

表2.15.1 IFA-555.1のバースト試験結果

ロッドNo.	位置 (mm)	試験温度 (℃)	ρ_{max}	ρ_{frac}	TEC (%)
			MPa		
IFA-555.1	48-200	340	742	708	13.25

σ_{max} = 最大内圧破裂強さ

$$\sigma = PDm/2t = P \cdot 1.3585/2 \cdot 0.0875$$

σ_{frac} = 破断応力

TCE = 全周方向伸び

既にバースト試験を実施したIFA-554.5の値と比較すると、IFA-554.5の $\rho_{max} = \rho_{frac} = 734$ MPaに対してIFA-555.1は $\rho_{max} = 742$ とほとんど変わらない。また、全周方向の伸びについては、照射前のバースト試験での伸び結果は、常温で測定されており、30%である。これに対して、照射後のIFA-554.5で2.2%、IFA-555.1で13.25%と伸び値は小さくなっている。

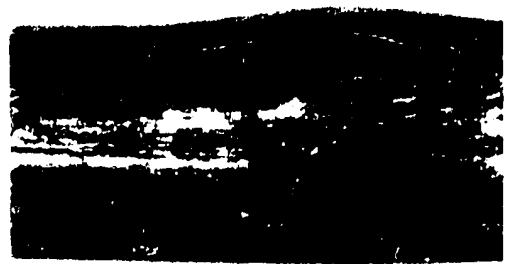
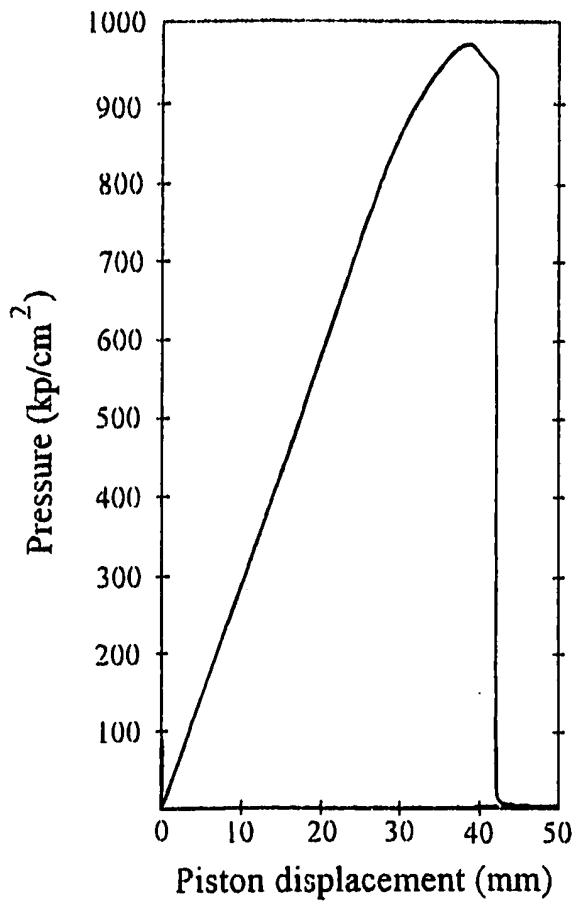


図2.15.1 IFA-555.1 サンプル (48-200mm) のバースト試験曲線とバースト状況

3. 結果の検討

3.1 線出力と燃焼度の評価

燃焼度分析の結果及びRu-106の γ スキャンの結果を、軸方向位置391mmを1として規格化したグラフを図3.1.1に示す。各々の直線の相関係数は、前者が0.98、後者が1.00である。

ここで、Ru-106の γ 強度分布が燃焼度分布と一致するとすれば、2本の直線は一致するはずであるが、今回の結果では燃焼度分析の結果から求めた直線の方が傾きが緩やかになった。しかし、燃焼度分布の測定箇所は3点であるが、 γ 強度分布の測定点はこれよりはるかに多く、データの信頼性は後者の方が高いと考えられる。また、燃焼度分析結果のうち軸方向位置391mmと502mmの2点は γ スキャンの結果から求めた直線上に乗っていることから、221mmにおける燃焼度分析値のみが高めに出ている可能性がある。

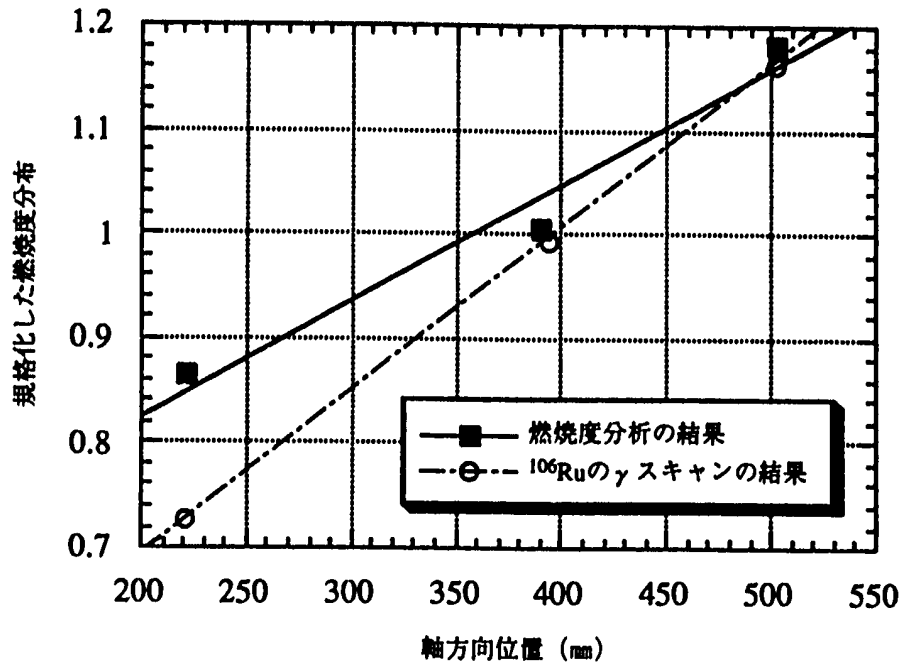
したがって、394mmと502mmの燃焼度を結ぶ3.1式の直線が燃焼度分布を最も正確に表していると考えられ、本照射試験の評価・解析に際しては、3.1式で求めた燃焼度を用いるのが適当であろう。

$$y = 14.356 + 0.065766 x \text{ ----- (3.1)}$$

x : 下部端栓Vノッチからの距離 (mm)

y : 燃焼度 (GWd/HMt)

次に、核計算によるIFA-555.1の燃焼度は燃料棒平均で37.20GWd/t、ペレットピークで42.20GWd/tとなった。他方、分析した3試料のうち最も高い燃焼度は502mmの47.37GWd/tとなり、燃焼度計算値はこの分析値に比べて約10.9%低くなっていることがわかる。このように燃焼度計算値が過小評価されている可能性については既刊のIFA-554/555の照射試験報告書⁴⁾でも指摘されており、留意すべき点である。



※ 燃焼度分析及びRu-106のγ線強度測定の結果を、軸方向位置391mmの値を1に規格化した。

図3.1.1 2つの方法によって求めた燃焼度分布

3.2 燃料ペレットの組織変化

図3.2.1に燃料断面のマクロ写真を示す。232mmの位置断面写真では、放射状にクラックが存在し、401mmの断面では径方向中間部の周方向に円周状のクラックが存在している。また、509mmの位置では、円周状のクラックに加え中心空孔が存在する。このような燃料軸方向のペレットマクロ組織の変化を中性子ラジオグラフィと対応づける。すると中心空孔は、燃料上部のペレット1～2個で存在し、円周状のクラックは、下部Vノッチから約300mmより上部のペレットで存在する。この円周状のクラックが存在するペレットは、その外側では径方向のクラックが存在するが、内側ではクラックの形跡がわかるもののクラックは存在しない。これは、燃料温度が高温になるため、クラックヒーリングが起こっているためである。線出力が高い燃料上部の方が、円周状クラックが大きくなる傾向と一致する。燃料の縦方向の組織変化として、462mmから478mmの縦断面写真を見ると、ペレットのディッシュは全くなく、チャンファは角度が鈍くなっている。また、円周状クラックの外側ではペレットエンドがわかるが、その内側ではペレットエンドは完全に接続し、その存在もわからなくなっている。縦断面写真は、向かって右側が燃料下部である。

このようなクラックの観察結果よりクラックの発生について考える。燃料の温度が上昇すると、径方向の温度分布に起因して、ペレットが熱膨張によりつづみ形に変形することがよく知られている⁹⁾。この時、ペレット内の応力は、円周方向に引っ張り応力が働く。これが駆動力となり、径方向のクラックが発生する。このクラックが燃料の下部で見られる放射状のクラックに相当する。燃料温度がクラックヒーリングが起こらない低い温度で燃焼された場合、この放射状クラックは燃焼期間中維持されることになる。しかしながら、クラックヒーリングが起こるような高い温度で燃料が燃焼された場合、クラックヒーリングにより、放射状のクラックがなくなり、さらに、熱膨張によりペレット内に発生していた径方向の引っ張り応力を緩和するように組織変化が起こる。そして、燃焼中にペレット内のクラックと内部応力がなくなる。このようなペレットは、炉のシャットダウン時に温度が低下すると、ペレット径方向に引っ張り応力が働き、周方向のクラックが発生する駆動力となる。このクラックが燃料上部で見られる円周状のクラックである。

次に、燃料径方向の組織変化について詳細に見てみる。図3.2.2に各横断面の写真を示す。径方向の組織変化は、燃料外周部から製造時の組織、高密度領域、等軸晶領域となっており、燃料中心ほど、結晶粒が粗大化している。中心空孔のある509mmの断面では、柱状晶の領域も確認でき、より中心側では、結晶粒界が確認できない領域が存在する。これらの他にポア及び連結状ポアの領域、白色相析出領域が観察されるが、それらはいずれも、燃料温度がより高い燃料上部ほど燃料の外側に位置している。表3.2.1及び図3.2.3に各断面の結晶粒径変化を示す。いずれも製造時の結晶粒径に比べ大きくなって

る。また、燃料中心ほど、そして、燃料上部ほど結晶粒が成長している。これは、燃料中心部の方が温度が高く、燃料上部の方が出力が高いため結晶粒がより成長している。

ペレットの照射中の組織変化について考えると、まず照射初期に焼きしまりが起こり、その後、ペレット内にFPが蓄積されるに従い、FPガス原子が気孔として現れる。FPガスの気孔の現れ方はその燃料の温度によって、粒内、粒界、連結状など変化する。本燃料ペレットの組織は温度の低い外周部では製造時の組織が残っているが、そのうち側には高密度領域があり、この領域は、焼きしまりに起因する組織と考えられる。さらにその内側にはFPガスによるポアが存在している。図3.2.4～5に401mmの断面の径方向中間部と中心部のSEM写真を示すが、中間部では結晶粒内及び粒界にポアが存在しているのが観察できる。中心部では粒界に気孔が並んで存在し、それらが連結しているのが観察できる。FPガス原子は生成時には結晶格子内に存在するが、拡散により移動し、粒内の欠陥や粒界に蓄積される。温度が高いペレットほど粒界でより大きいポアが観察できる。

燃料径方向の組織変化は、燃料温度に密接に関係があり、一般に等軸晶の領域は約1200℃以上、柱状晶の領域は1500～1700℃以上、中心空孔は約1800℃以上で起こるとされている⁹⁾。燃料の組織変化は燃料上部の方が線出力が高く、燃料中心温度が高いことと一致している。また、燃料上部の中心空孔の存在するペレットの中心空孔近傍の組織は、ポアが分散して残っており、熔融にまではいたっていないことを示唆している。

次に燃料温度を燃料の出力密度履歴から評価する。IFA-554.4（ロッド4）は、IFA-555.1と同じタイプの標準燃料で、温度計装の装荷された燃料である。前報告⁴⁾の温度評価によれば、IFA-554.4は照射初期の履歴中最大線出力密度約48kW/mで約1730℃に達している。本燃料の照射中の平均線出力密度履歴を図3.2.6に示すが、燃料初期の0.5GWd/t時の平均線出力密度は約47kW/mであり、この時の最大出力ピーキング係数は1.176であるため最大線出力密度は、55.3kW/mとなる。報告⁴⁾の温度評価と同様な評価を行うと、本燃料の照射初期の最大燃料中心温度は約2000℃と見積もられる。ただし、この評価は、IFA-554.4と本燃料のギャップコンダクタンスなど温度評価に必要な値が同じと仮定し、燃料表面温度は設計で求めた600℃として評価した。さらに、照射中の値も変化しないと仮定した場合、図3.2.3における各評価点での燃料温度を表3.2.2に示す。これらの温度は、照射中の焼きしまり、リロケーション、スウェリング、ガス放出、PCMIなどにより照射初期では高めに、照射末期では低めに見積もっていると思われる。図3.2.6と表3.2.2を見ると、約15GWd/tまで燃料上部の最大燃料温度は1800℃付近であったと思われる。この評価は、前述の燃料組織から見積もられる温度と一致する。本燃料の組織は、約15GWd/tまでに形成されたと考えられる。

本燃料の燃焼度は、燃料上部で約47GWd/tに達している。水炉燃料では、燃料外周表面でPu-239が蓄積されるため、燃焼度がペレット平均の2倍以上に上がることが報告されている。このような領域では組織が微細化し、リム相と呼ばれる微細組織領域が現れ

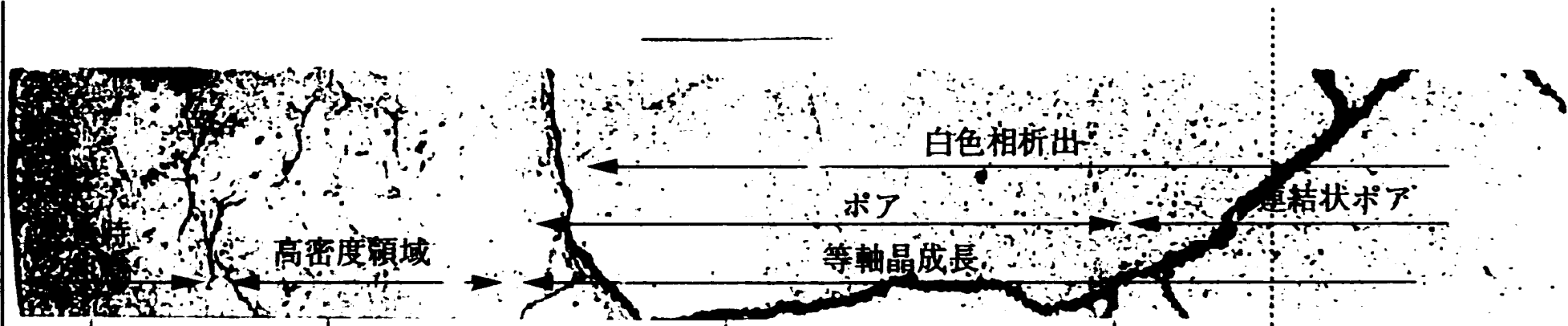
ることが報告されている⁹⁾。図3.2.7に断面の α オートラジオグラフィを示す。外周部で α 線量が高くなっており、Puの蓄積及び燃焼度の増加に起因していると思われる。図3.5.8～9に509mm外表面近傍のSEM写真を示すが、かなり小さい結晶粒径で他の領域では存在しない領域が観察できる。しかし、製造時ペレットの平均結晶粒径も $3.4\mu\text{m}$ と小さく、外表面近傍で組織の微細化が起こっているとは言えない。

表3.2.1 結晶粒径測定結果

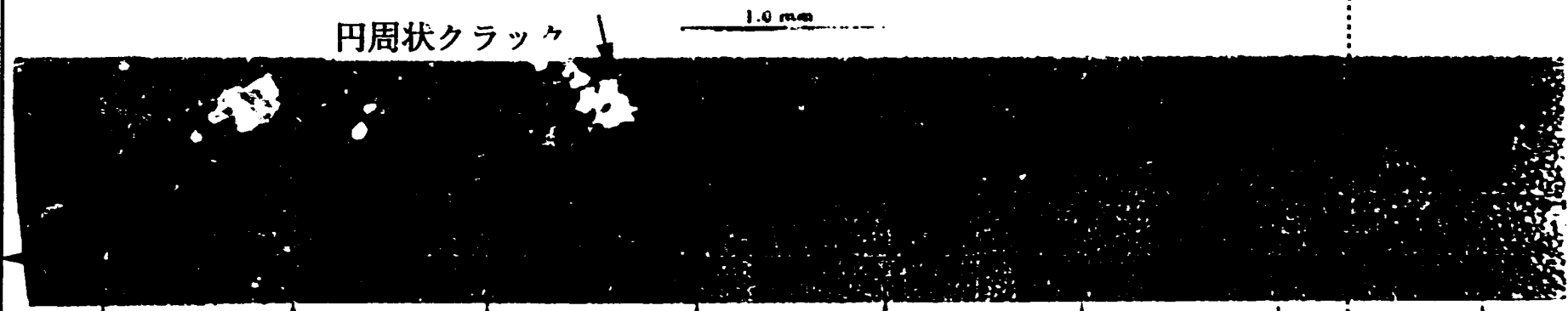
図番号 (PNC ZN8410 95-211 の図番号 に対応)	平均結晶粒径 (μm)
図2.4.6 C1	6.7
図2.4.6 C2/C3	14.6
図2.4.7 C3	13.4
図2.4.7 C4/C5	20.9
図2.4.7 C4	19.2
図2.4.7 C5	18.5
図2.4.13 C2	7.5
図2.4.14 C3	11.9
図2.4.14 C6	40.9
図2.4.14 C4	23.4
図2.4.14 C7	33.9
図2.4.20 C1/C2	9.2
図2.4.20 C2	dl:55, dw:48
図2.4.20 C1/C2	27.5
図2.4.20 C2	dl:100, dw:46
図2.4.27 C1	7.7
図2.4.27 C3	dl:50.5, dw:28.6
図2.4.28 C4	dl:62.9, dw:41.1

表3.2.2 照射履歴中の温度変化

評価位置	燃焼度 (GWd/t)	平均線出力 (kW/m)	ピーキング係数	最大線出力 (kW/m)	燃料棒平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	燃料棒最大温度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.5	47	1.176	55.3	1698	2001
2	3.7	46	1.204	55.4	1664	2006
3	15	42	1.218	51.2	1534	1845
4	21	37	1.127	41.7	1384	1525
5	33	24	1.148	27.6	1050	1134



(a) 232mm



(b) 401mm



(c) 509mm

図3.2.2 燃料径方向の組織変化

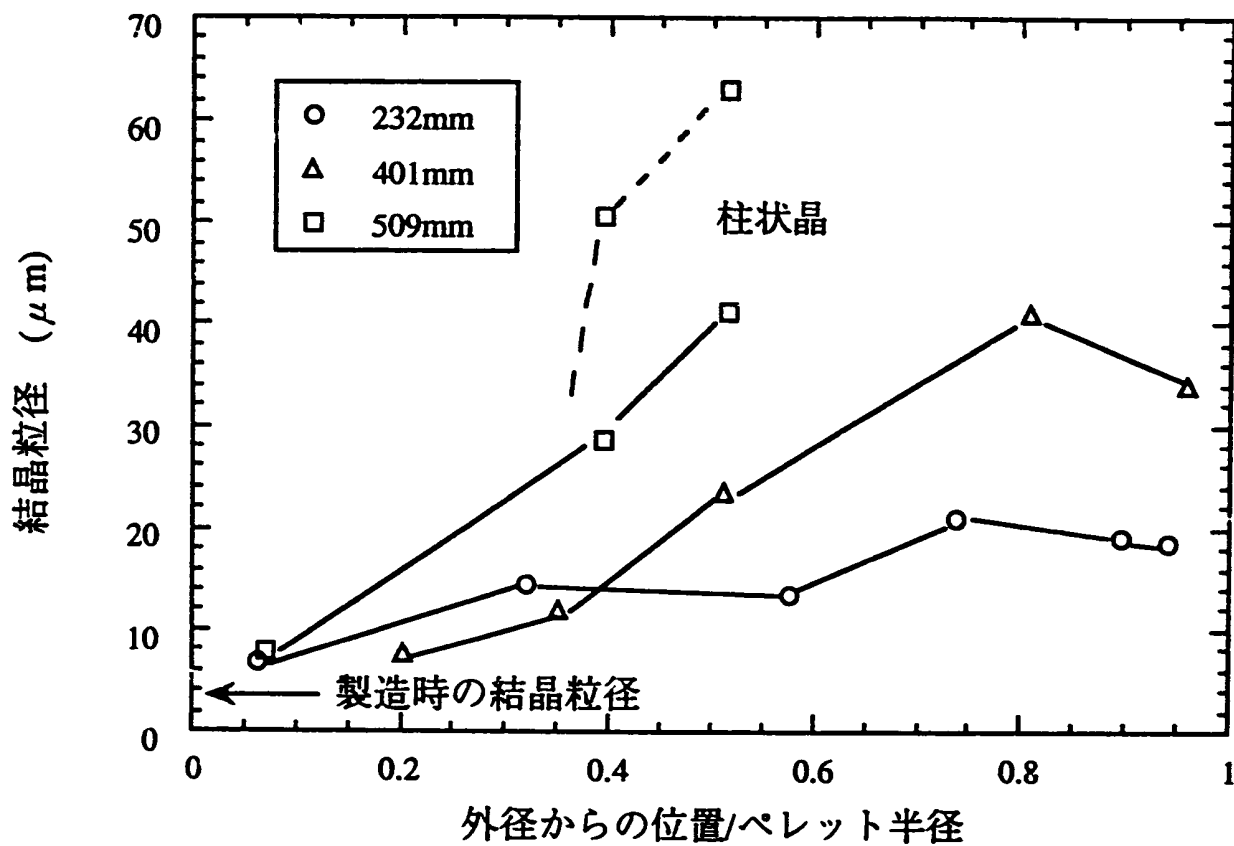


図3.2.3 ペレット径方向の結晶粒径変化

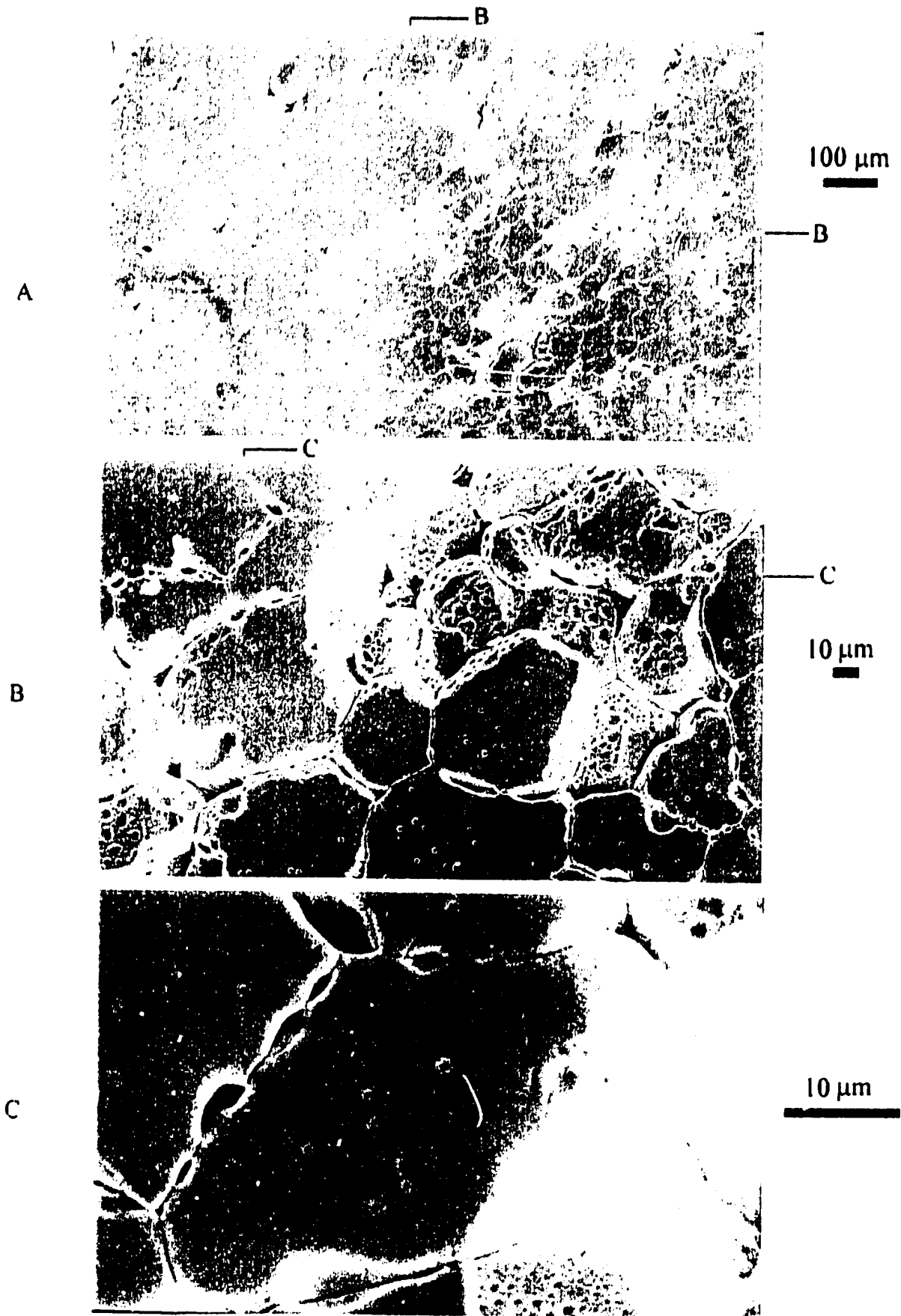


図3.2.4 燃料レプリカのSEM、エッチング、中心部、IFA 555-1、401mm位置

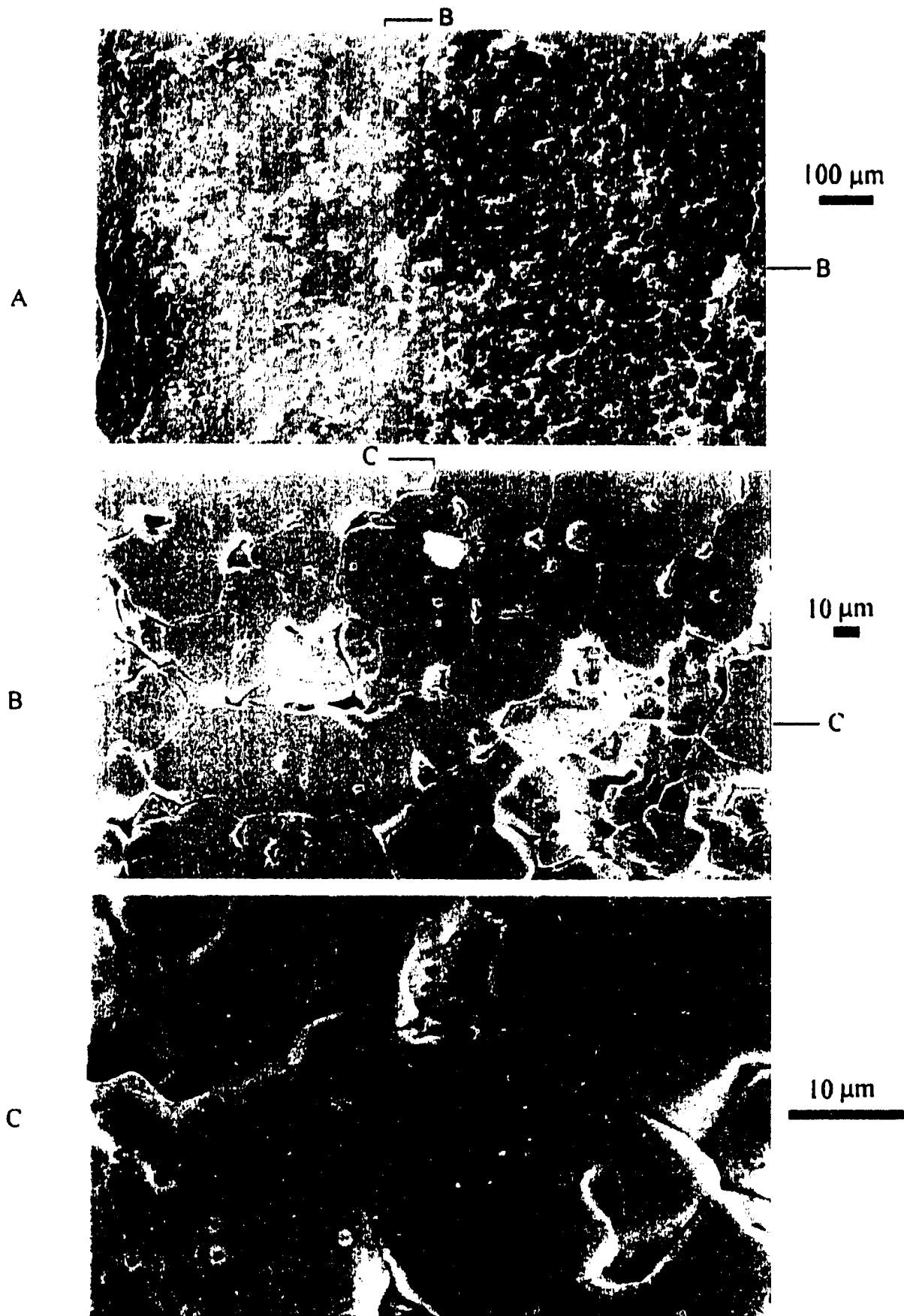


図3.2.5 燃料レプリカのSEM、エッチング、半径方向中間部、IFA 555-1、401mm位置

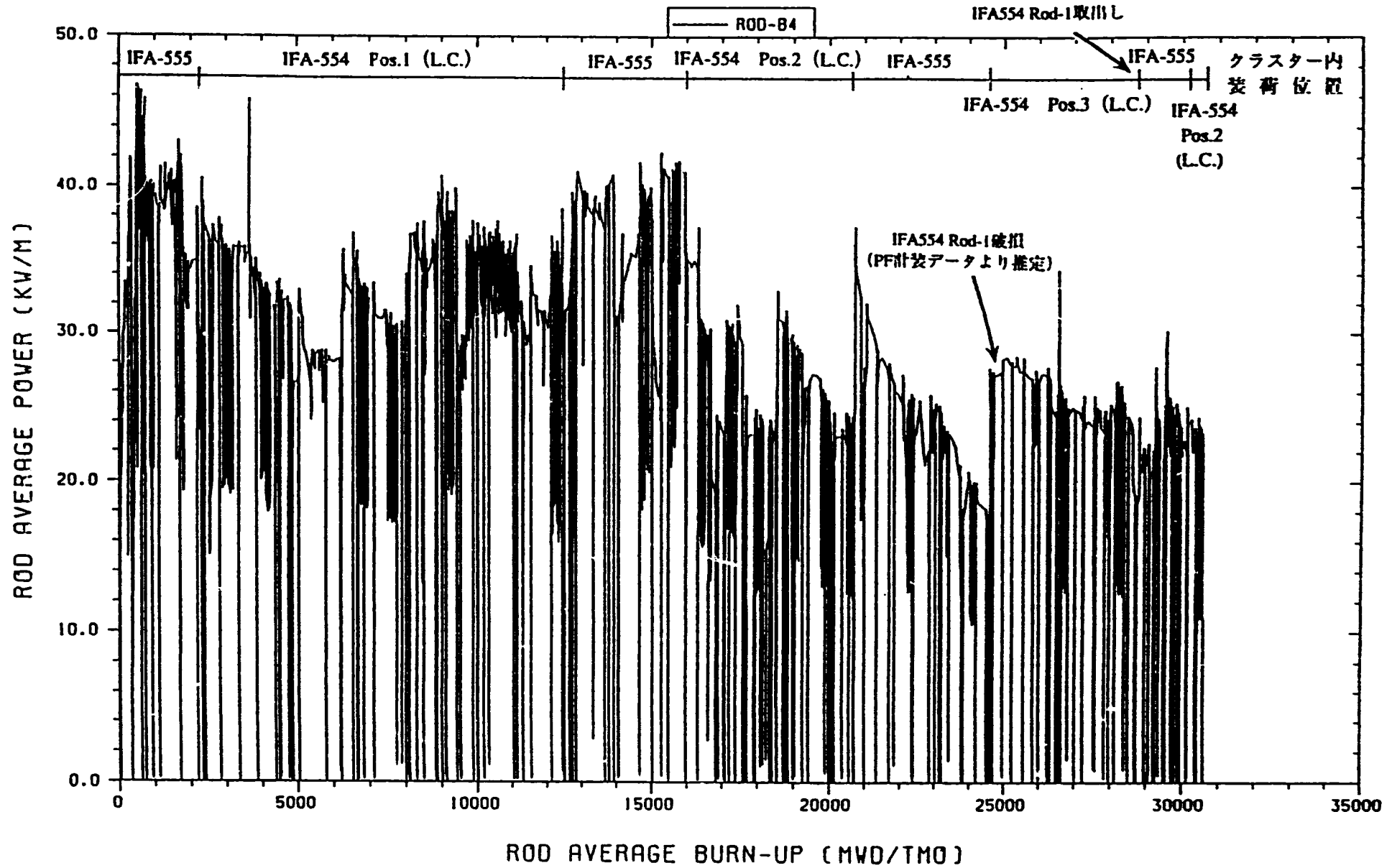
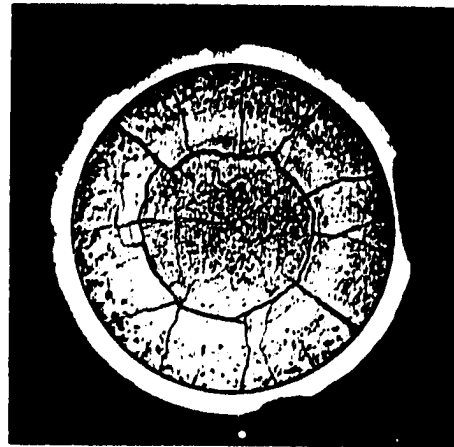
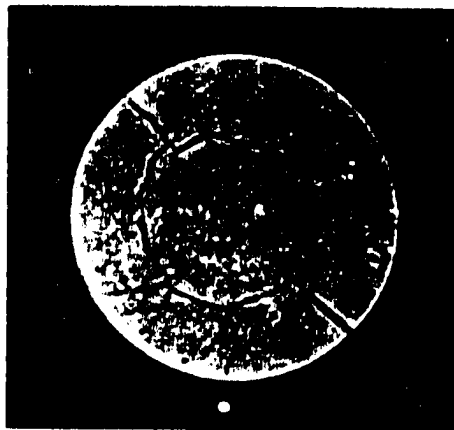


図3.2-6 (7/7) IFA-555 Rod-1燃料棒平均線出力密度履歴



Macro



α



β, γ

図3.2.7 マクロ写真、 α 及び β/γ オートラジオグラフィ、IFA 555-1、401mm位置

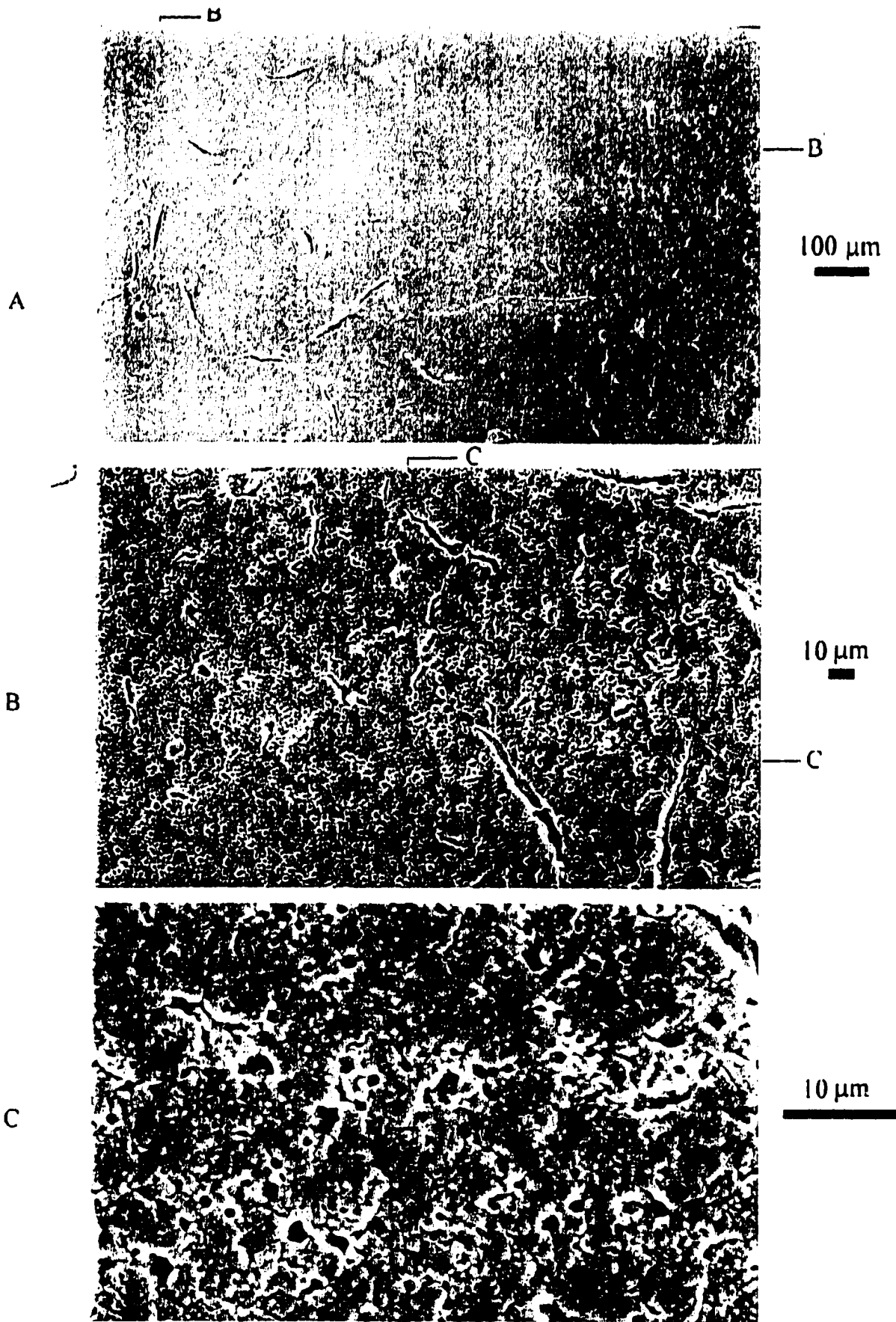


図3.2.8 燃料レプリカのSEM、エッチング、周辺部、IFA 555-1、509mm位置

3.3 FPガス放出挙動

表3.3-1にFPガス残留率（残留量／生成量）を示した。また、図3.3-1と3.3-2に各試料におけるFPガス残留率を、半径方向及び軸方向に対してそれぞれ示した。なお、残留量は次式から求めた。

$$\text{残留量 (mol/kg)} = (PV/RT) / M$$

$P=1\text{atm}$ V -残留ガスの体積 (ℓ) M -試料重量 (kg)
 $R=0.082$ (ℓ · atm/K · mol) $T=273.15\text{K}$

また、生成量は、次式から求めた。ここで、燃焼度は、3.1章の燃焼度近似式から算出した。

$$\text{Kr (mol/kg)} = 0.08 \times 10^{-3} \times \text{燃焼度 (Wd/kgMOX)}$$

$$\text{Xe (mol/kg)} = 1.27 \times 10^{-3} \times \text{燃焼度 (Wd/kgMOX)}$$

図3.3-1から、燃焼度が低い（軸方向位置の低い）試料H-28は、FPガス残留率が30%程度であるが、ペレット中心部で1.2%と極端に低下している。これより燃焼度の高い（軸方向位置の高い）試料H-26、-29は、FPガス残留率が5%程度以下と低く、またペレット周辺部で残留率がさらに低下している。図3.3-2は、軸方向位置が高く（燃焼度が高く）なるに従い、FPガス残留率が低下していることを示している。

今回の試験の結果は、FPガス残留率が低めであり、以下の観点から信頼性が低いと考えられる。

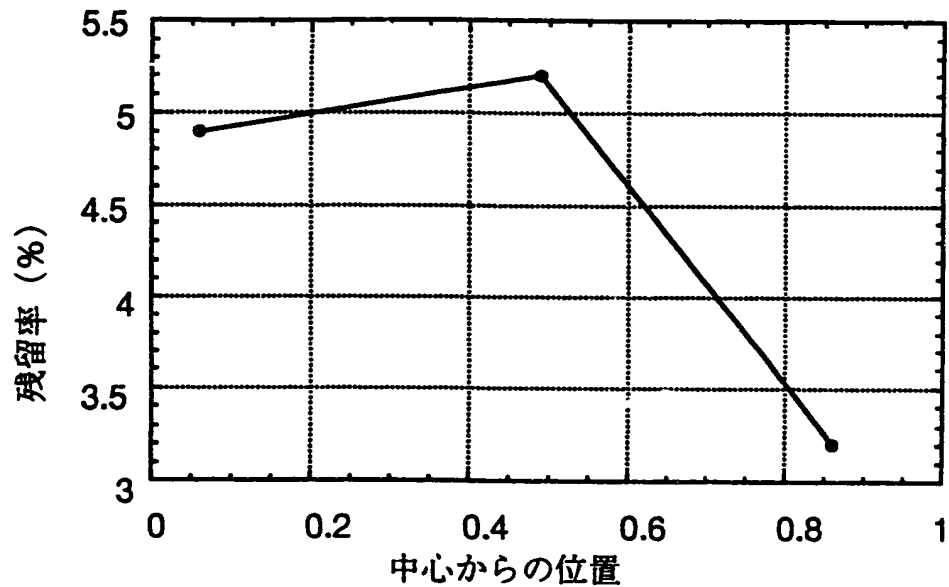
- ① 前々報⁴⁾のIFA-554.5のFPガス残留率 20~80%に比較して、燃焼度は高いものの、かなり低い値となっている。
- ② PF計装（EOLまで健全）から求めたFPガス放出率は約10%であり、約90%が残留していることになる。また、PF計装を付けた4本のロッド間ではFPガス放出率に大きな差がない。
- ③ 3.2章の燃料ペレットの組織変化の考察から、特にペレット周辺部では製造時の組織がそのまま残っていることから、FPガス残留率が数%まで減少することは考えられない。

なお、以下の点については、傾向が一致している。

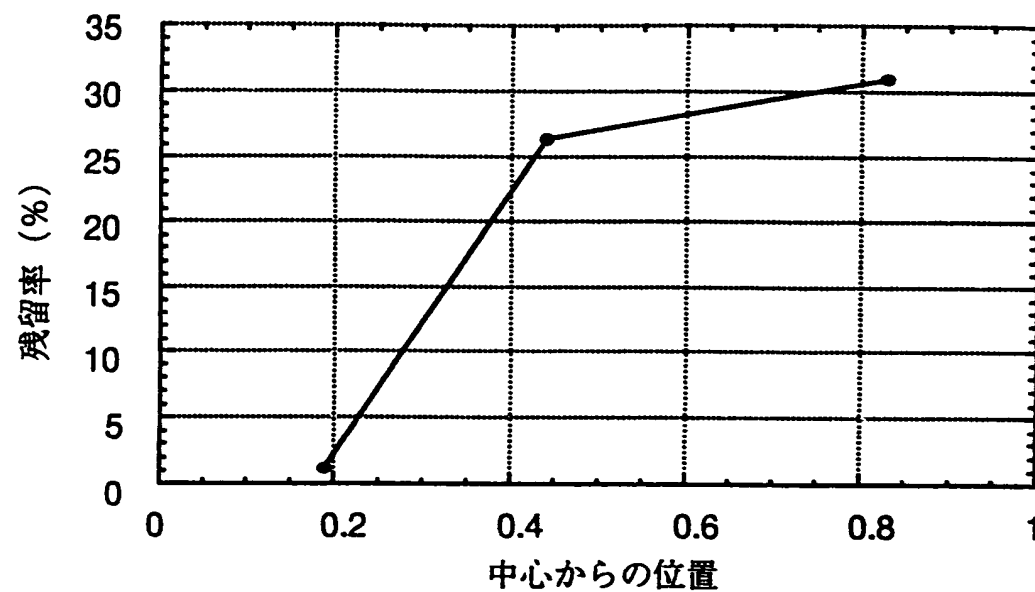
- ④ 2.9章のマイクロスキヤンの図2.9.7と図2.9.8（試料H-28の位置）は、それぞれCs-134とCs-137の分布を示している。これらの間にはペレット中央部でCs-134の方が低いという差がある。この差は、Xe-133の挙動を示すものであり、Xeが中央部から周辺部へ移動していることを示している。図3.3.1でペレット中心部が低い傾向を示しているが、この傾向は一致している。

表3.3-1 残留率

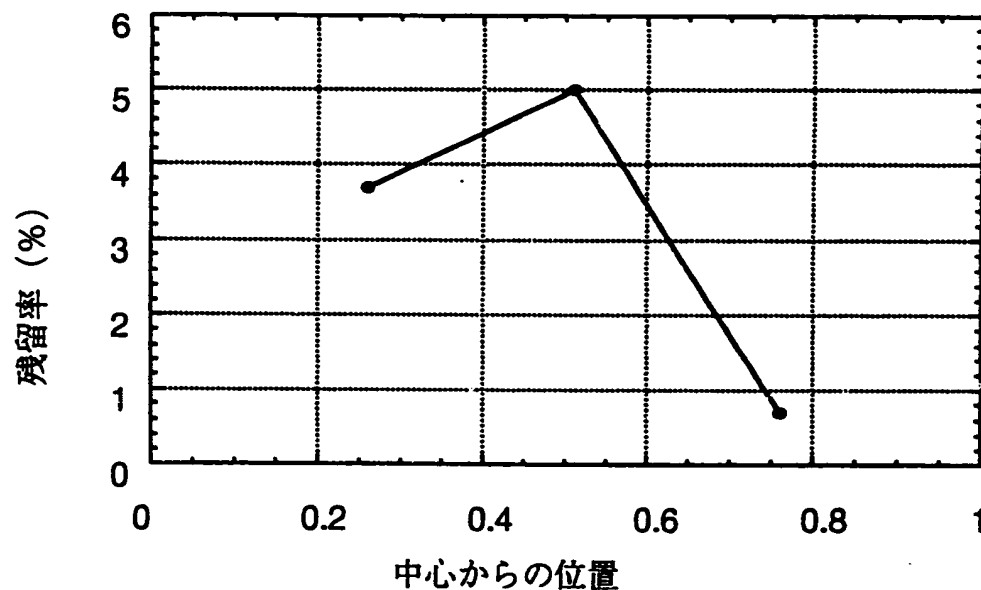
		試料 No								
		H-26 1	H-26 2	H-26 3	H-28 1	H-28 2	H-28 3	H-29 1	H-29 2	H-29 3
燃焼度 (Mwd/tMetal)		42,002			35,528			46,779		
K r	残留量 (mol/Kg)	1.18×10^{-4}	1.02×10^{-4}	1.21×10^{-4}	4.24×10^{-5}	3.53×10^{-4}	3.40×10^{-4}	1.41×10^{-4}	1.60×10^{-4}	3.92×10^{-5}
	生成量 (mol/Kg)	2.96×10^{-3}			2.44×10^{-3}			3.30×10^{-3}		
	残留率(%)	4.0	3.5	4.1	17.4	14.5	13.9	4.3	4.9	1.2
X e	残留量 (mol/Kg)	7.46×10^{-3}	7.45×10^{-3}	7.46×10^{-3}	7.48×10^{-3}	7.46×10^{-3}	7.46×10^{-3}	7.46×10^{-3}	7.46×10^{-3}	7.44×10^{-3}
	生成量 (mol/Kg)	4.70×10^{-2}			3.87×10^{-2}			5.24×10^{-2}		
	残留率(%)	5.0	5.3	3.2	1.1	26.6	32.0	3.7	5.0	0.7
ガス残留率(%)		4.9	5.2	3.2	1.2	26.4	31.0	3.7	5.0	0.7



H26 (試料軸方向位置; 401mm)



H28 (試料軸方向位置; 232mm)



H29 (試料軸方向位置; 509mm)

図3.3-1 各試料におけるF_pガスの残留率

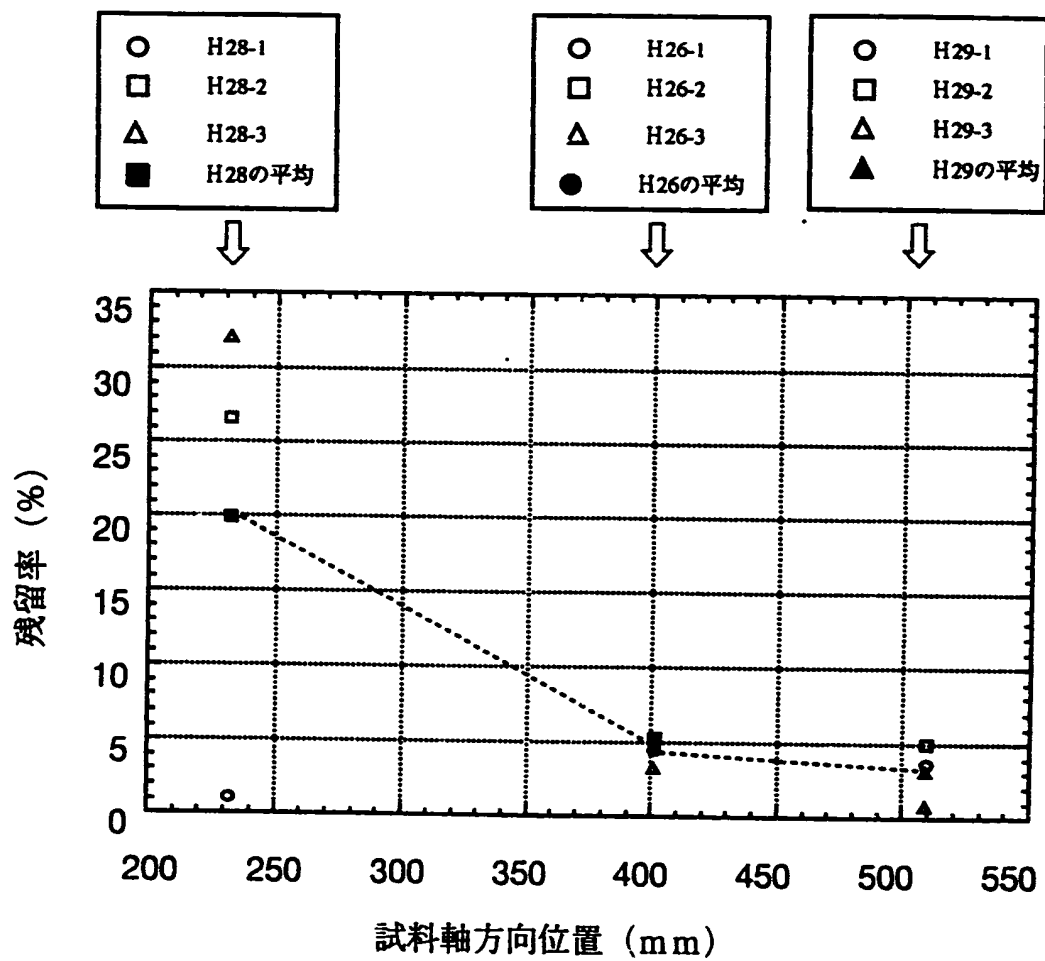


図3.3-2 軸方向とFPガス残留率の関係

3.4 被覆管の健全性

図3.4.1にリング引張試験と水素分析試験の結果をまとめた。燃料ピンの上側ほど被覆管内の水素含有量は増えて引張強さは小さくなるので、傾向としては水素脆化により引張強さは低下する。ただし400mm付近の水素含有量と引張強さに矛盾が生じており、200mmと400mm付近では水素含有量はほぼ同じ値を示しているのに対し引張強さに関してはこの2つのサンプルでかなりの変化がみられる（約2倍）。ここで404mm付近での水素脆化を示す試験結果としては、以下がある。

- ① リング引張試験の結果404～406mmでは引張強さが低下している。
- ② リング引張試験の404～406mmの破断面のSEM写真では大部分が脆性を示す組織をしている。
- ③ リング引張試験の応力-歪グラフ（図2.12.3）を見ると404～406mmは脆性破断をしている。
- ④ 前報¹⁾の「2.2章 被覆管の水素化物」の結果で232mm付近と401mm付近の横断面を比較すると401mm付近では水素化物の量が多い。

逆に水素脆化を示さない試験結果としては、以下がある。

- ① 水素分析試験では水素含有量が200～300ppmと比較的少ない。

上記の事柄について考察すると、まずリング引張試験の信頼性の問題が出てくる。第1にリング引張試験の404mmの破断面のSEM写真（図2.12.6）のC図を見ると被覆管の外側に延性組織とも脆性組織とも言えないような部分があり、この部分が試験を開始する前から生じているクラックだとするとこれが原因で引張強さは真値よりも低下する。第2に前報¹⁾の「2.2章 被覆管の水素化物」において水素化物のミクロ観察をしているが、ここで被覆管の厚さに関しては、腐食（水素化物もしくは酸化物）によって局部的に薄い所があり（特に401mm付近）、応力計算は肉厚の平均値を用いているので実際の肉厚と平均値の差に相当する応力値の誤差がでる。また水素分析試験の信頼性の問題としては第1に水素分析試験のサンプルはそれぞれの高さのリングより任意に2個ずつ切り出しているが401mm付近のサンプルが偶然水素濃度の低いサンプルという可能性がある。第2に水素化物のミクロ観察で401mm付近には被覆管の厚さが局部的に薄い所があり、この失った部分が水素脆化していたならば水素含有量は真値よりも小さな値として現れる。ということが挙げられる。

結論としては404～406mmのリング引張試験の破断面のSEM写真と401mm付近の被覆管の水素化物の観察結果より400mm付近は水素脆化して引張強さが低下しており、水素分析試験の結果は上記の信頼性の問題から測定に偏りがあったと考える。

図3.4.1のリング引張試験と水素分析試験の結果の中で未照射材の常温での単軸引張強さ⁴⁾と照射後のリング引張強さを比較しているが、この結果からはVノッチより0~200mmの間では照射硬化が観察され200mm以上ではVノッチからの距離とともにリング引張強さが弱くなっているということが分かる。一方、マイクロ硬さ試験ではリング引張試験のような変化は特には見られず、全領域でだいたい一定の照射硬化が観察された。BWRの信頼性実証試験⁵⁾ではマイクロ硬さとリング引張強さの間に1次の相関関係があったのに対し今回の試験ではそのような相関性はない。BWRの信頼性実証試験での相関が一般的に成り立つとすれば、今回の測定で両者の間に相関がない理由としては、マイクロ硬さ試験は水素化物を避けて測定しているに対しリング引張試験では被覆管の厚さを平均で計算しているため水素化物の影響をもろに受けてしまうということが考えられる。

バースト試験に関しては照射後サンプルは1つであり、試験温度は340℃となっている。この試験では最大内圧破裂強さは742MPaであり、伸び値は13.25%である。これに対し未照射被覆管でのバースト試験では最大内圧破裂強さは623MPa (at 343℃) であり、伸び値は約50% (at 343℃) である。この結果より照射後は明らかに照射硬化があることがわかる。また、前々報⁶⁾のバースト試験では特に伸び値が低く2.2%となっている。これは燃料破損により被覆管が特に水素化していることが原因と考えられる。

図1.1の中性子ラジオグラフィと前報⁷⁾の「2.2章 被覆管の水素化物」の結果を比較するとVノッチより上側ほど被覆管内の水素の量は徐々に増えていっている傾向にある。これは「2.13章 被覆管の水素分析」の結果の傾向とだいたい一致している。

本燃料要素は、照射期間中、FP計装が健全であることから破損に至っておらず健全であった。しかし、パンクチャ試験でFPガスが確認されなかったことから、照射終了後、PIEまでの期間に破損したと考えられる。

照射後の被覆管の腐食状況は、(1) 燃料要素上部において被覆管外表面の荒れが著しい。(2) 黒色でレンズ状のノジュラー腐食による酸化膜が形成している。(3) これらの一部は剥離しており、最大で70%の減肉が認められている。また、水素化物については、中性子ラジオグラフィの結果では、水素化物が被覆管を貫通した形跡が認められたが、金相試験結果からは、貫通まで至らないものの、周方向の水素化物が被覆管外表面から肉厚の最大で70~80%程度観察されている。また、この被覆管は、破損したIFA-554.5と同様に腐食感受性の高いZライナー管であった。これらから、被覆管は、照射期間中健全であったとはいえ、酸化による減肉、水素化物による脆化がかなり進んでいたと考えられ、照射試験終了後の破損につながったものと考えられる。

破損孔は、IFA-554.5では水素化物中に被覆管を貫通するクラック (2次破損孔と考

えられている)が確認されているが、本燃料要素では確認されていない。

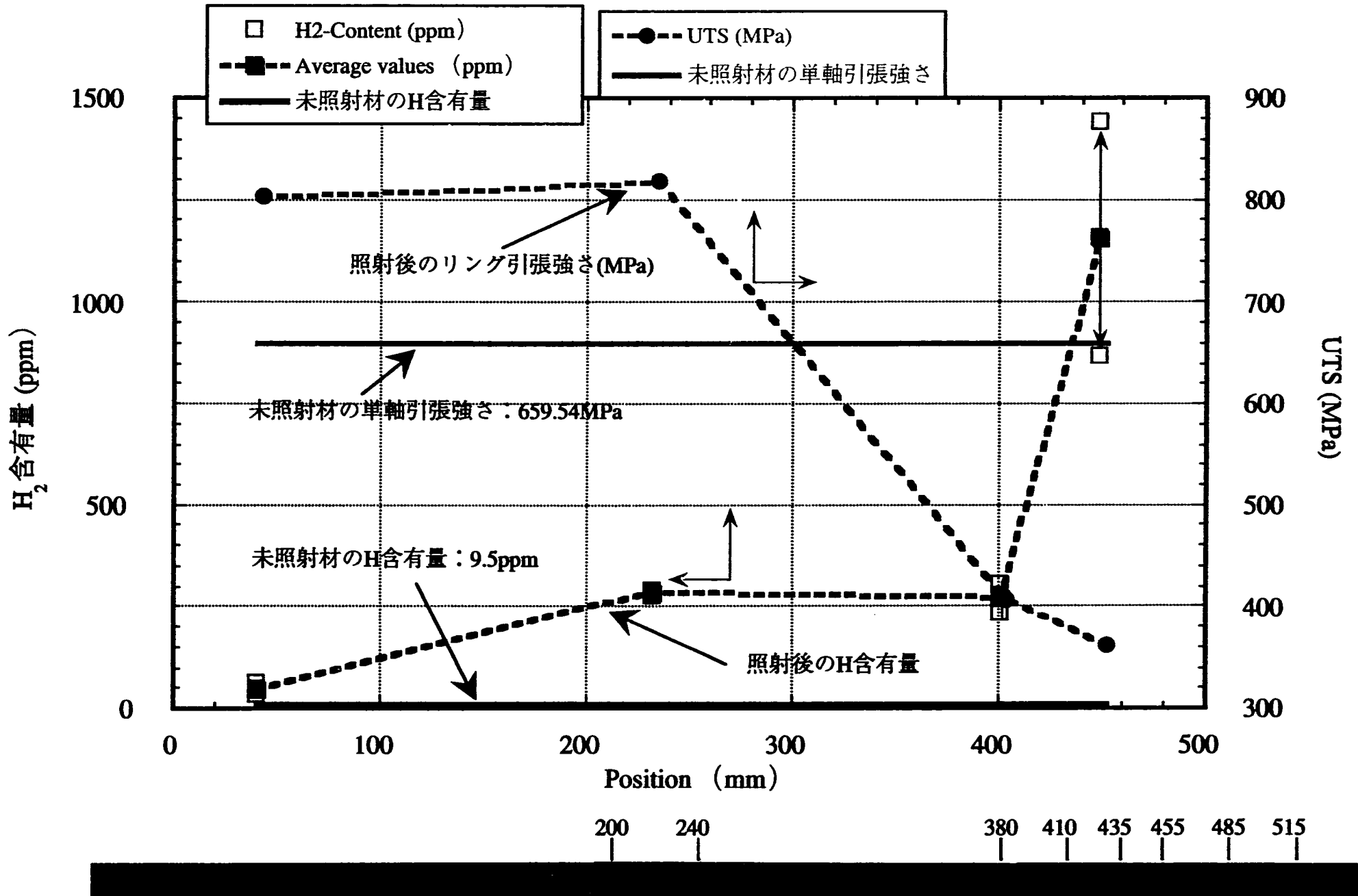


図3.4.1 被覆管のリング引張試験と水素分析試験

3.5 燃料スタック上部の破碎燃料の堆積について

EBR-IIにおける運転時過渡試験燃料の試験後の燃料棒上部の状態と今回のIFA555.1の燃料棒上部の状態が類似しているため、参考までにこのEBR-IIにおける試験結果⁹⁾について紹介する。

EBR-IIにおける運転時過渡試験は、高速炉用酸化物燃料の信頼性を確立することを目的に日米共同で実施しているものである。この中で、TOPI-1Dと呼ばれている試験結果の中に、今回のIFA555.1の燃料棒上部の状態が類似しているWT179と呼ばれる燃料棒がある。図3.5-1にこの燃料棒の燃料集合体内の装荷位置を、表3.5-1に主な燃料仕様を、図3.5-2に燃料の概略図を示す。燃料棒仕様としては、「もんじゅ」燃料棒の仕様である。また、照射条件を表3.5-2に示す。WT179の照射条件としては、過渡出力74.4kW/m、燃料中心温度3766℃と今回のIFA555.1より高い出力及び温度を経験している。次に、照射後試験結果として図3.5-3に被覆管外径プロファイル、図3.5-4～7に金相試験結果、図3.5-8に試料採取位置を示す。図3.5-4を見ると、上部プレナムに未溶融の燃料ペレット片と溶融燃料が認められ、燃料上端にペレット片が堆積しているIFA555.1の燃料棒上部の状態と類似しているように見える。WT179燃料の上部プレナムの未溶融の燃料ペレット片と溶融燃料の堆積は、線出力が高いため、中心空孔の形成とさらに一段階進んだ燃料中心部の溶融が生じ、これにより中心空孔内に蓄積したFPガスの圧力が増加し、上部プレナムへのFPガスの噴き上げが生じることによって、燃料の噴き上げが起こり堆積したものと考えられている。しかし、この溶融燃料の噴き上げによっても、図3.5-4に示したように、溶融燃料と被覆管の反応層等は認められず、被覆管へのダメージとしては小さく、燃料破損を起こしていない。また、図3.5-3に示すように上部プレナムの被覆管外径に著しい増加が見られるが、これは、中心空孔内から噴き上げたガスの圧力により生じたものと考えられている。また、燃料スタック上部の被覆管外径の増加も、図3.5-5～7に示すように、この部分で顕著なFCCIが生じており、これにより生じたものと考えられている。なお、参考までに図3.5-9に今回のIFA555.1と同程度の線出力(58.5kW/m)を経験したWT011燃料の被覆管外径プロファイルが採取されていたので示すが、ほとんど変化は認められていない。

以上のことから考えて、IFA555.1の線出力が55.8kW/mとWT179のそれより18.6kW/m低かったために、WT179ほど顕著な溶融燃料及び未溶融燃料ペレット片の噴き上げは見られていないが、上部プレナム部に見られる未溶融燃料ペレット片の堆積は、中心空孔形成→中心空孔内FPガス圧の増加→中心空孔内FPガス圧の増加によるペレット端部の崩壊(未溶融燃料ペレット片の発生)→中心空孔内から上部プレナムへのFPガスの噴き上げ→上部プレナム部の未溶融燃料ペレット片の堆積というWT179燃料と同様の過程を経て生じた可能性が考えられる。

Experiment

TOPI-1D

Pin Fabrication Condition

表3.5-1 Detailed Design Parameters for TOPI-1D Test pins.

Pin	Pin Type	* Fuel Batch Number	Pellet Density (% TD)	Pellet Dia. (mm)	Smear Gap (mm)	Dia. Density (% TD)	Fuel Content O/M	U-235 Enrich. (%)	Fuel Pellet Form	Fuel Pre-slugged
WT179	PNC.L.A.HT	FE025001	92.2	6.162	.086	89.7	1.97	19.9	65.4	Dished No
WT180	PNC.L.A.HT	FE025001	92.2	6.162	.086	89.7	1.97	19.9	65.4	Dished No

* D9, 316, PNC: denote the three types of cladding materials
 L, S : denote Large (7.0-mm) or Small (5.6-mm) diameter cladding
 C, M, A : denote Conservative, Moderate, or Aggressive pin design
 HT, LT : denote High or Low cladding temperature.

** Pu (metal) / (U, Pu)O₂-x

Pin	Top UO ₂ Insul. Ht. (mm)	Bot UO ₂ Insul. Ht. (mm)	Tag Gas ID	Plenum Volume (ml)	Plenum /Fuel Ratio	Clad Type	Clad OD (mm)	Clad Thick. (mm)	Clad Mat. No.	Wire Type	Wire Dia. (mm)	Wire Pitch (mm)
WT136	12.7	12.7	5X5209	8.2	1.2	316	5.842	0.381	93589	316	1.422	76.2
WT179	12.7	12.7	5X4604	11.8	1.1	Monju	6.985	0.368	56 MK	Monju	1.219	76.2
WT190	12.7	12.7	5X4604	11.8	1.1	Monju	6.985	0.368	56 MK	Monju	1.219	76.2

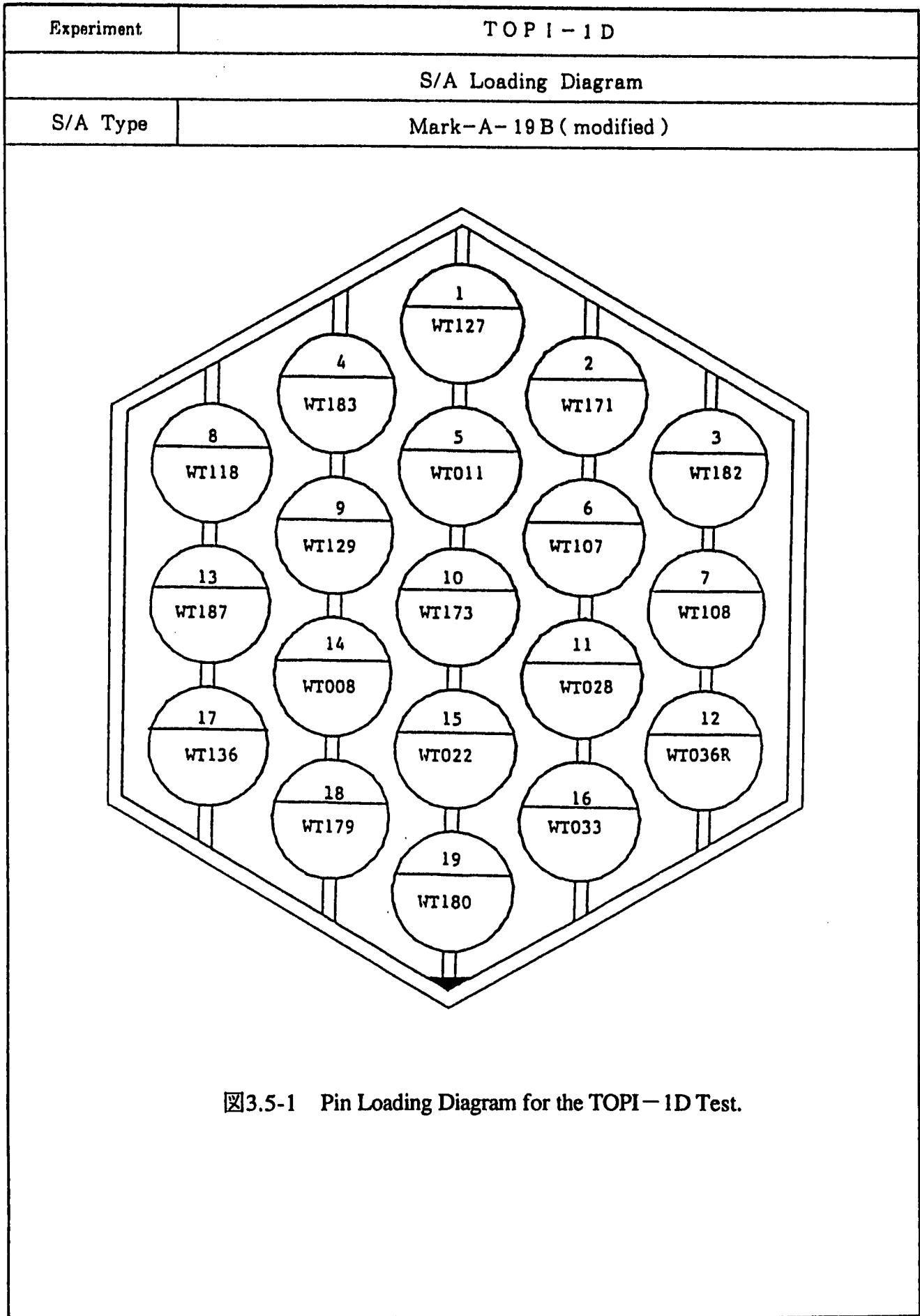
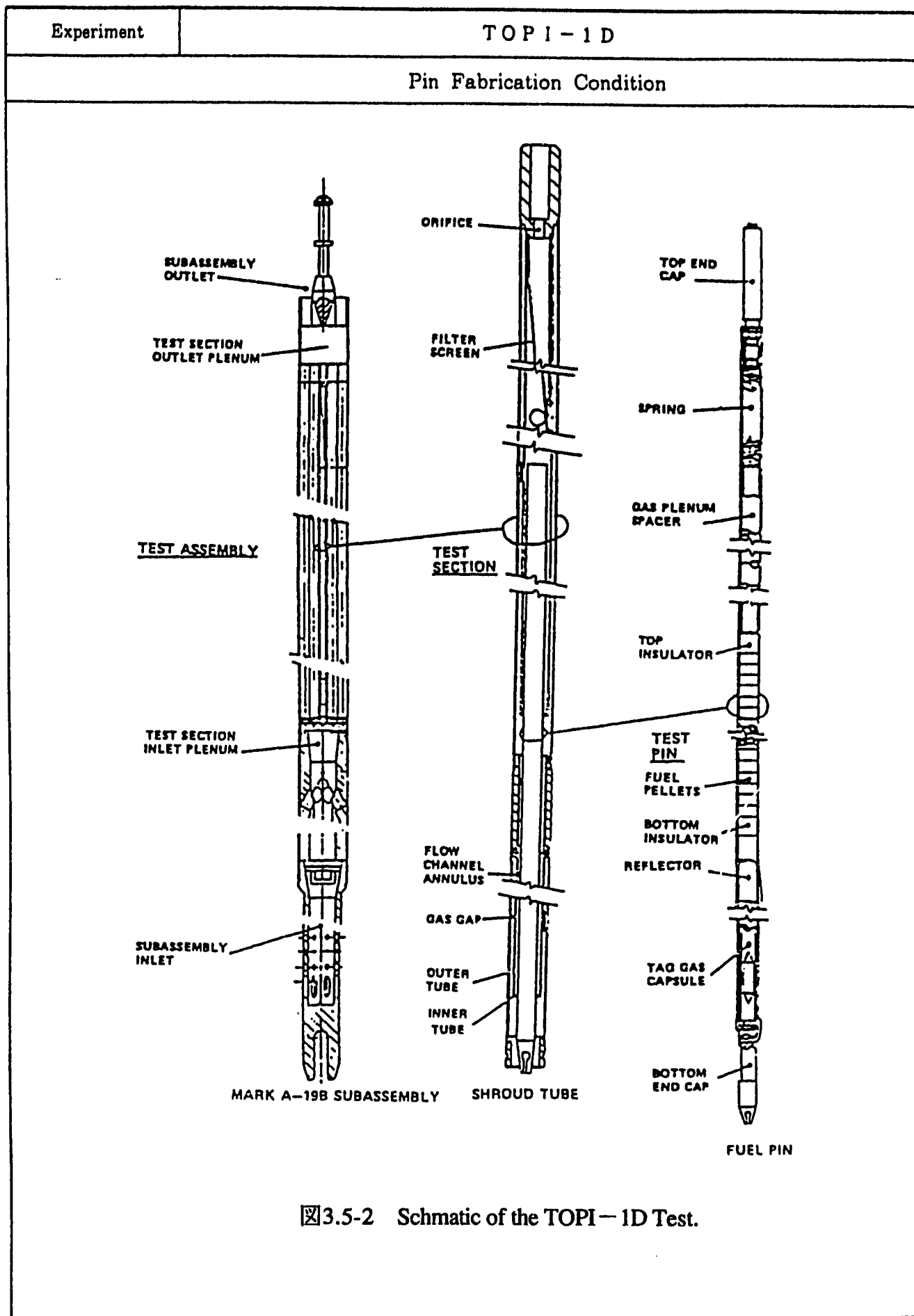


图3.5-1 Pin Loading Diagram for the TOPI-1D Test.



3.5-2 Schematic of the TOPI-1D Test.

Experiment TOPI-1D

TOP Irradiation History

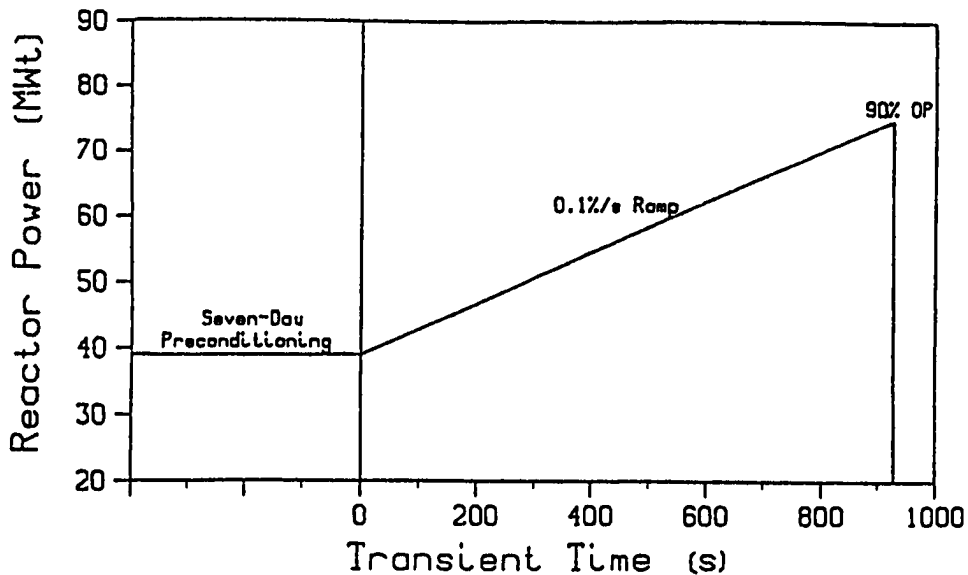
表3.5-2 (1/2) Steady-State and Transient Irradiation Parameters for Test Pins.

Pin	Pin Type*	Source S/A	Run 128	Irr. Run No.	Steady-State			Transient		
					Peak BU (n/o)	Peak Fluence (X10+22)	EOL LHR (kW/m)	Precon LHR (kW/m)	Trans. LHR (kW/m)	Peak* Overpower (%)
WT138	316.8.H.MT	TOP-4BB	No	131-139	8.9	6.5	32.5	31.8	60.0	86
WT179	PNC.L.A.MT	TOP-4BB	No	131-139	7.1	6.4	30.0	39.1	74.4	91
WT180	PNC.L.A.MT	TOP-4BB	No	131-139	6.9	6.3	37.6	30.4	75.0	99

表3.5-2 (2/2) Summary of Thermal Conditions of the TOPI-1D Test Pins.

(All temperatures in degree centigrade)

Pin	Steady-State	Preconditioning			Transient		
	Clad H.W. Temp.	Clad I.D. Temp.	Fuel Center Temp.	Peak Coolant Temp.	Clad I.D. Temp.	Fuel Center Temp.	Peak Coolant Temp.
WT179	660	622	2103	590	850	3766	794



Power History of the TOPI-1D Test.

Experiment	TOP 1 - 1 D
------------	-------------

Non-destructive PIE

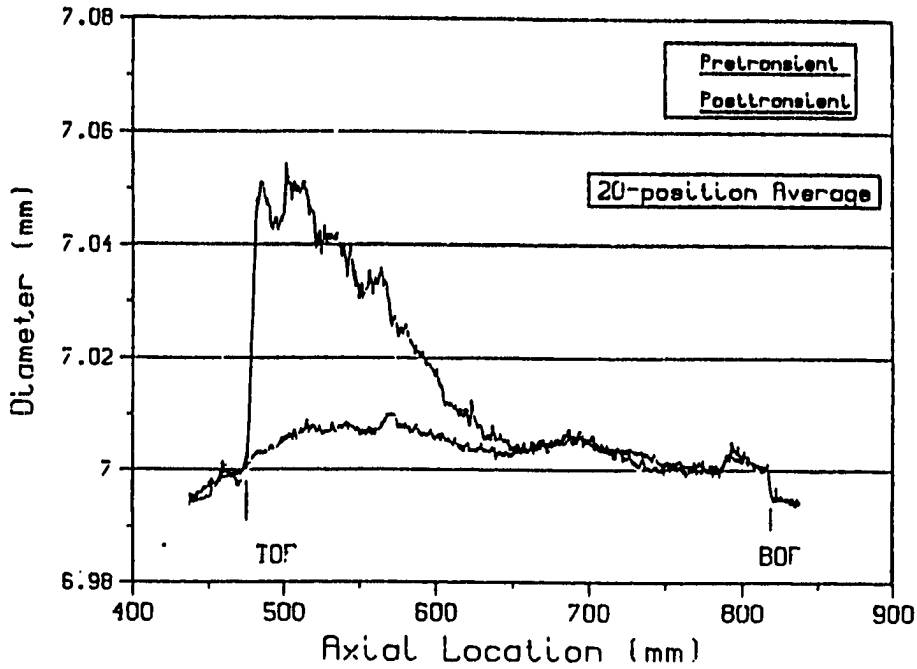
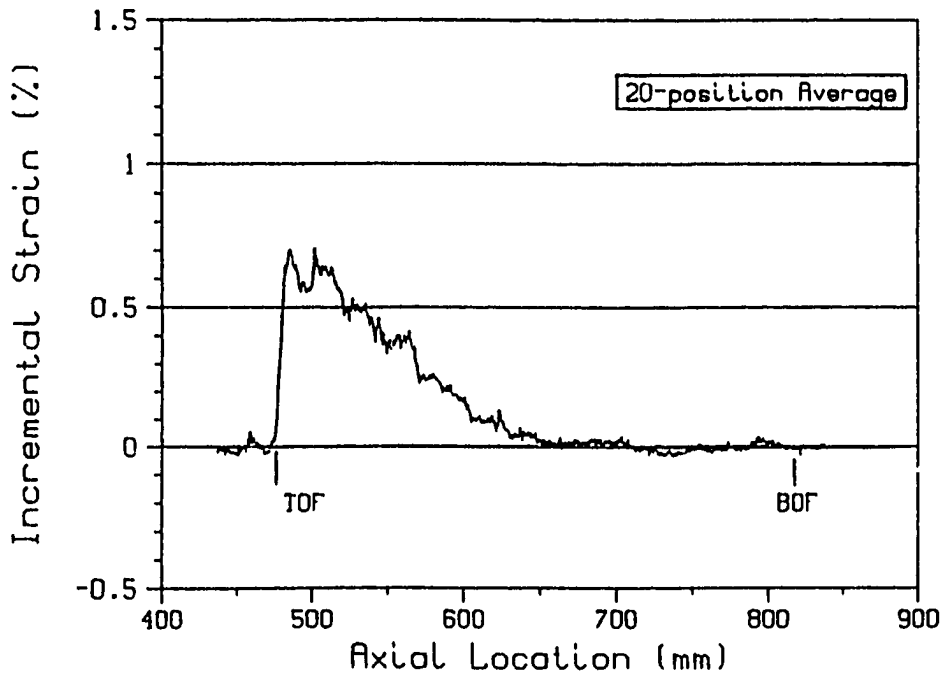



Fig. PI. D. 12 Pre- and Posttransient Cladding Diameter Profiles of Pin WT-179.



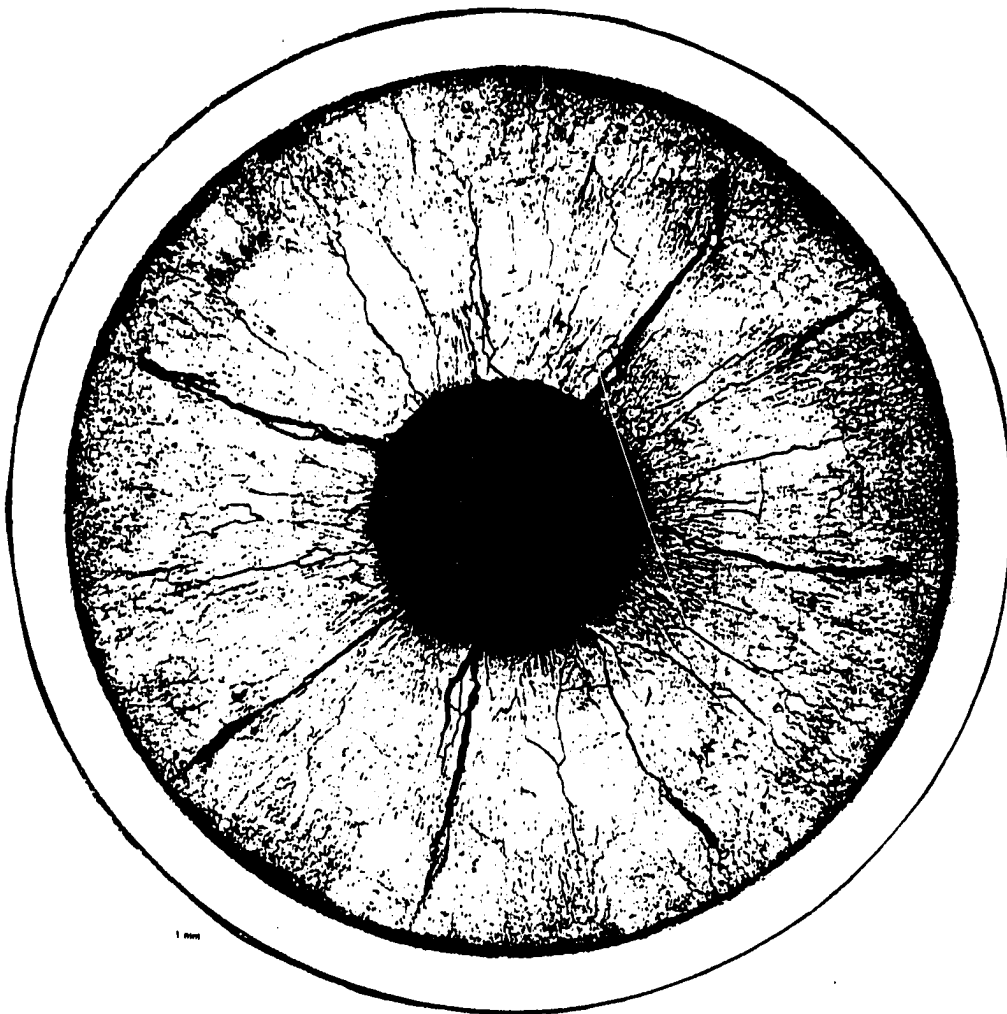
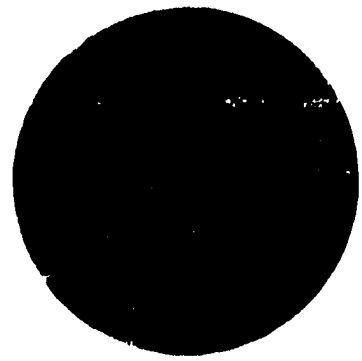
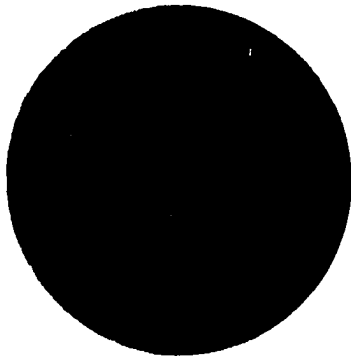
3.5-3 Incremental Strain Profile of Pin WT-179.

Experiment	TOPI-1D
Destructive PIE	
 <p data-bbox="954 383 1050 584">WT-179 SAMPLE LI C.V. ETCHED</p> <p data-bbox="1155 696 1193 1621">3.5-4 Longitudinal Section of WT 179 (X/L=1.02, As - Etched)</p> <p data-bbox="1011 1653 1050 1832">88103139-1</p>	

Experiment

TOP I - 1 D

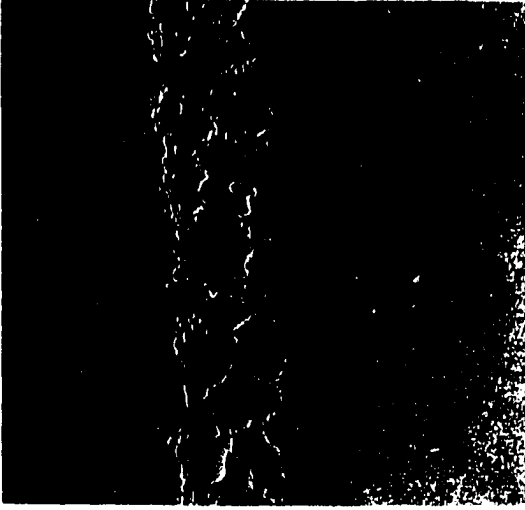

Destructive PIE

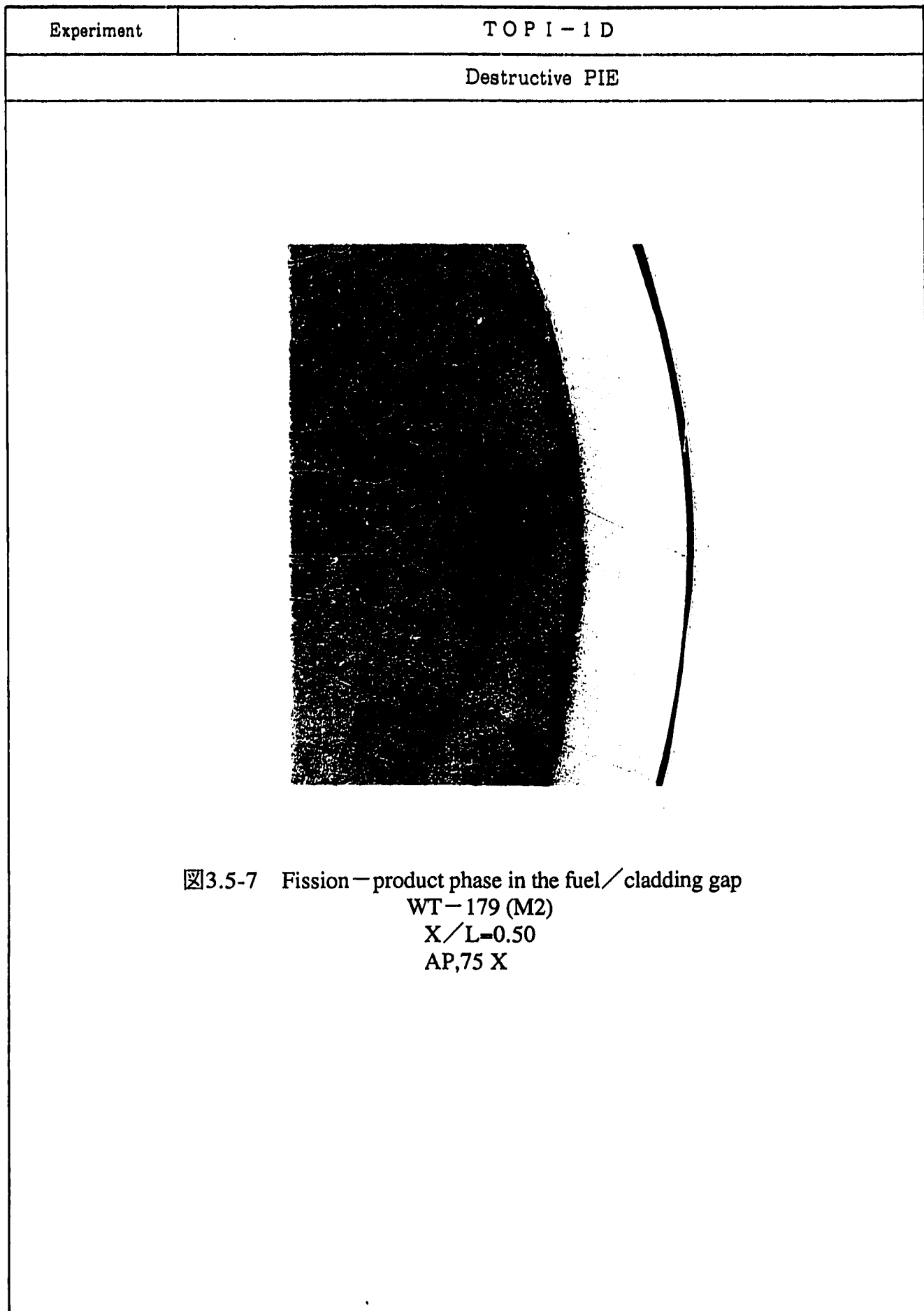


88102525-1

WT-179
SAMPLE M1
C.V. ETCHED

图3.5-5 Transverse Section of Pin WT 179 ($X/L=0.78$, As - Etched)
Autoradiographs: α , left; $\beta - \gamma$, right

Experiment	TOPI-1D
Destructive PIE	
<p>M1 X/L = 0.79</p>	
<p>M2 X/L = 0.50</p>	
<p>☒3.5-6 Intergranular cladding penetration. WT-179 750 X, Etched</p>	



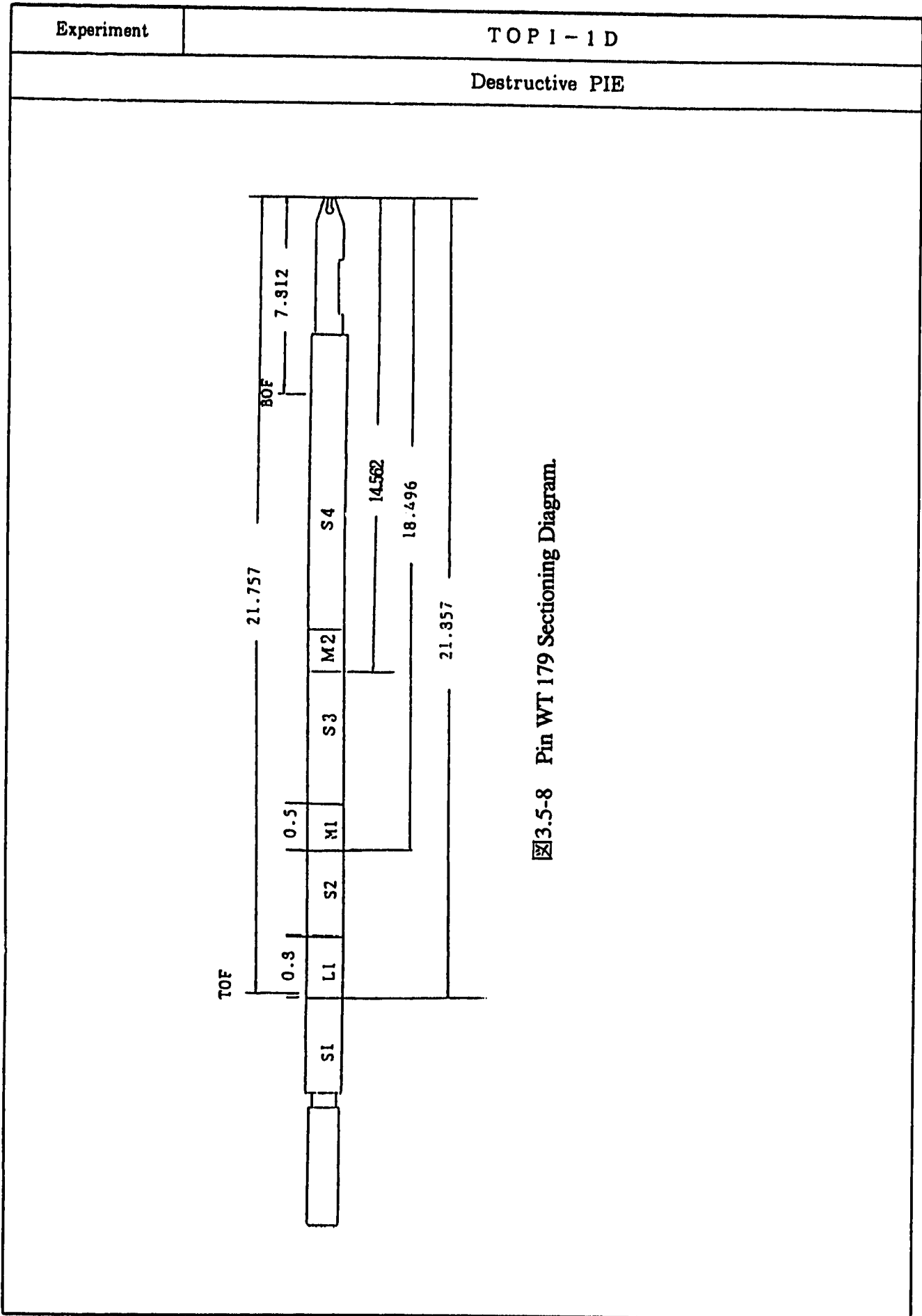


Fig 3.5-8 Pin WT 179 Sectioning Diagram.

Experiment	TOP1-1D
------------	---------

Non-destructive PIE

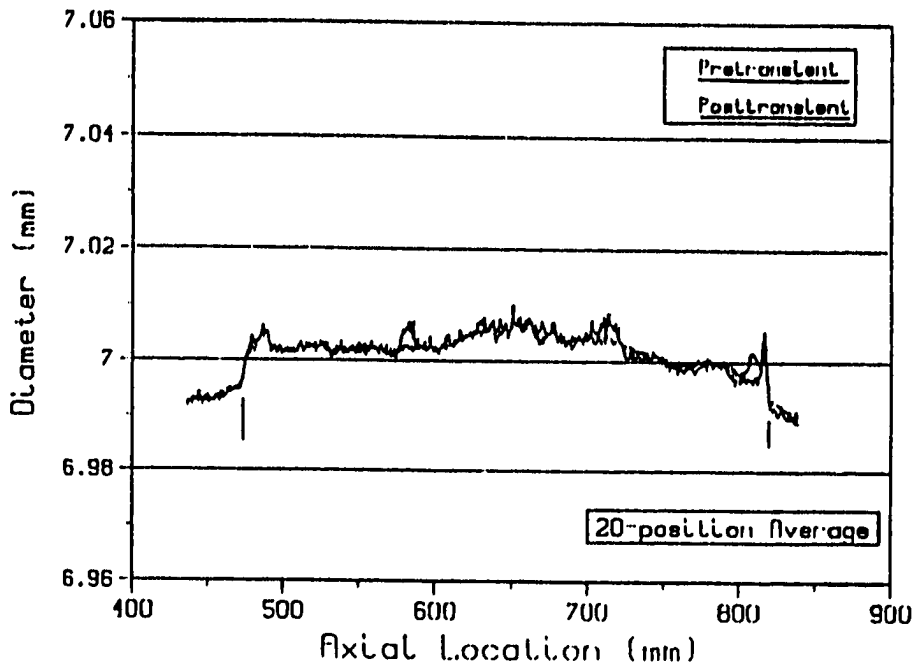
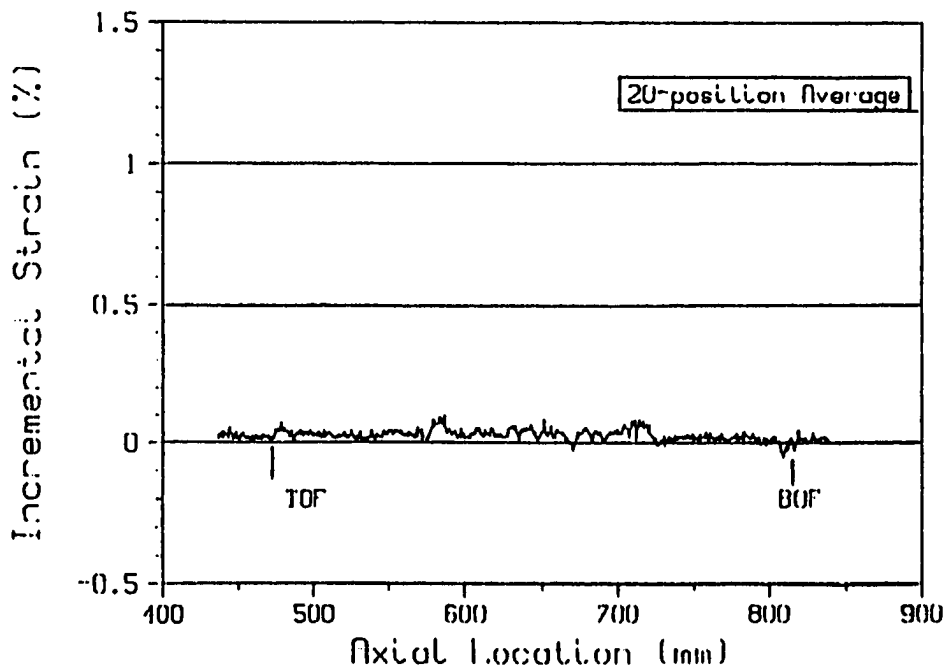


Fig. PI. D. 32 Pre-and Posttransient Cladding Diameter Profiles of Pin WT-011.



3.5-9 Incremental Strain Profile of Pin WT-011.

4.結論

IFA-555 ロッド1の照射挙動については、これまでの照射試験及び照射後試験結果の整理と解析・評価結果から以下のことが結論される。

- (1) ハルデンでの日負荷追従照射試験では、内圧測定計装 (PF) にリークを示す兆候が見られなかったこと及び炉水監視データから、照射中のリークは無く、計画通り第23サイクルまで照射されたと判断される。
- (2) また、照射データ解析においても、内圧計装データから求めたFPガス放出率の最大線出力密度依存性の評価結果から、負荷追従照射による顕著な影響は認められなかった。
- (3) しかし、照射試験後非破壊及び破壊試験において、以下の様な特異な事象が観察された。
 - ① 燃料要素上部において被覆管外表面の荒れと著しい酸化膜形成及び剥離が認められた。
 - ② 燃料要素上部ペレットの破碎、水素化物の被覆管肉厚部への浸透が認められた。
 - ③ パンクチャ試験では、パンクチャ中にFPガスは観察されなかった。
 - ④ 燃料要素上部ペレットの燃料中心部に、中心空孔と柱状晶の形成が観察された。
 - ⑤ 燃料要素上部の被覆管リング引張試験結果と水素分析試験結果から、一部の試料に、水素含有量が低いにも拘わらず、リング引っ張り強度が著しく減少する傾向が見られた。
- (4) 上記のうち、①～③の原因としては、破損したIFA-554 ロッド5の被覆管と同じ、腐食試験のスペックを超えたZrライナー付被覆管が使用されたことから、被覆管腐食による破損が、照射終了直後かPIE前に生じたことが考えられる。また、IFA-555 ロッド1の燃料要素上部の燃料中心部で、照射中に経験した高線出力のため約1800℃以上の高温にさらされ、被覆管の酸化が進行したことが推察される。
- (5) 上記④の原因の一つとして、照射中に経験した線出力が燃料要素中で最も高い55.8kw/mあったこと及び外径測定リグとの間で8回、装荷位置が替っていることから、相対的に高い線出力条件と装荷位置の変更による出力上昇と、それに伴う温度上昇の影響についてさらに検討を進める必要がある。なお、前に破損したIFA-554 ロッド1も、照射中に経験した線出力が52.8kw/mと2番目に高く、燃料要素上部のペレット中央部に高密度化した組織変化が観察された他、外径測定リグとの間で8回、装荷位置が替っており、燃料棒上部で被覆管表面に著しい酸化が認められる等の類似点が観察されている。

参考資料

- 1) PNC ZN8410 95-211 「新型転換炉実証炉燃料のHBWRにおける負荷追従試験 (V) IFA-555ロッド1照射後試験結果 (その1)」
- 2) PNC PN8440 91-027 「ジルコニウムライナ被ふく管各種試験結果報告」
- 3) 股開課メモ No420-63-103 「ジルカロイ製被覆管の硬さ測定」
- 4) PNC ZN8410 95-210 「新型転換炉実証炉燃料のHBWRにおける負荷追従試験 (IV) IFA-554/555照射後試験中間報告」
- 5) 原子力安全研究協会編 「軽水炉燃料のふるまい (改訂新版)」
- 6) PNC ZN9410 94-103 「炉内照射中燃料温度評価手法の検討」
- 7) M.E.Cunningham, M.D.Freshley and D.D.Lanning, J. of Nuclear Material, 188 (1992) 19
- 8) 特集 「沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験」 原子力学会誌 Vol.29 No.2 (1987)
- 9) PNC ZN9450 91-001 「EBR-IIにおける運転時過渡試験 (I) Phase-I TOPI試験データパッケージ