

SN841-75-02

配布限定

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

JRR-2照射試験(中心溶融実験共同研究)Ⅲ

照射後試験解析

Irradiation Testing of UO_2 Fuel Pins in JRR-2

Central Melting Test・Ⅲ

1 9 7 5 年 1 月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

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

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

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



JRR-2 照射試験 (中心溶融実験共同研究) Ⅲ

照射後試験解析

Irradiation Testing of UO_2 Fuel Pins in JRR-2 (Central Melting Test) Ⅲ

Post-Irradiation Examination Analysis

実施責任者	小 泉 益 通	(プルトニウム燃料部)
報 告 者	横 内 洋 二	(")
	山 口 俊 弘	(")
	古 屋 広 高	(")
	梶 谷 幹 男	(")
	宮 坂 靖 彦	(日本原子力研究所)

期 間 1973年4月1日～1974年5月1日

概 要 1971年4月1日～1974年5月1日までの約3年間に渡り、照射計画、照射燃料製造、照射、照射後試験、解析と行なってきたが、今回は第3報として、照射後試験結果と解析結果を報告する。

照射後試験は原研ホットラボで、昭和48年8月～10月の間行なった。カプセル外観、燃料ピン外観に異常はみられなかった。またγスキャニングからも、燃料ピンのスランピング現象はみられなかった。

燃料内組織変化は、IT-1カプセル(M-1ピン)に比較し、IT-2(M-3ピン)の方が線出力は低いにもかかわらず、大きいことが観察された。これは被覆管-燃料間のギャップ幅の違いにより、IT-2(M-3ピン)の方が高温になったために燃料内組織変化が大きくなったものと思われる。

燃料中心が溶融を起したか、起さなかったかは金相写真からは判断できなかった。しかし、計算結果や被覆管表面温度測定結果から推察すると、照射初期には、少領域の溶融があったと思われる。

ま え が き

現在まで商業用，実験用原子炉の燃料は，溶融する条件で運転することを許されていない。しかし，溶融時の燃料挙動を把握することは，原子炉の安全解析という観点から重要なものである。

今回の照射試験により溶融実験が国内炉（JRR-2）で，安全に照射できるということを得たことは大きな成果といえる。また今回の実験により広領域溶融の条件が把握でき，次回の溶融実験には，燃料溶融時の燃料挙動が把握できるのではないかと考える。

溶融実験の目的は，前にのべたようなこと以外に，現在動燃に於いて開発中の燃料ビン挙動解析コードのフィッティング用としても有用である。

I. 照射後試験

照射後試験は原研ホットラボで、昭和48年8月～10月までの2ヶ月間で非破壊検査、破壊検査を行なった。

検査項目は、1) 燃料ピン外観検査、2) X線透過検査、3) γ スキャンニング、4) 燃料ピン外径検査、5) フラックスモニターの測定、の5項目が非破壊検査であり、破壊検査は金相試験を主に行ない合計6項目の試験を行なった。以下に結果を報告する。

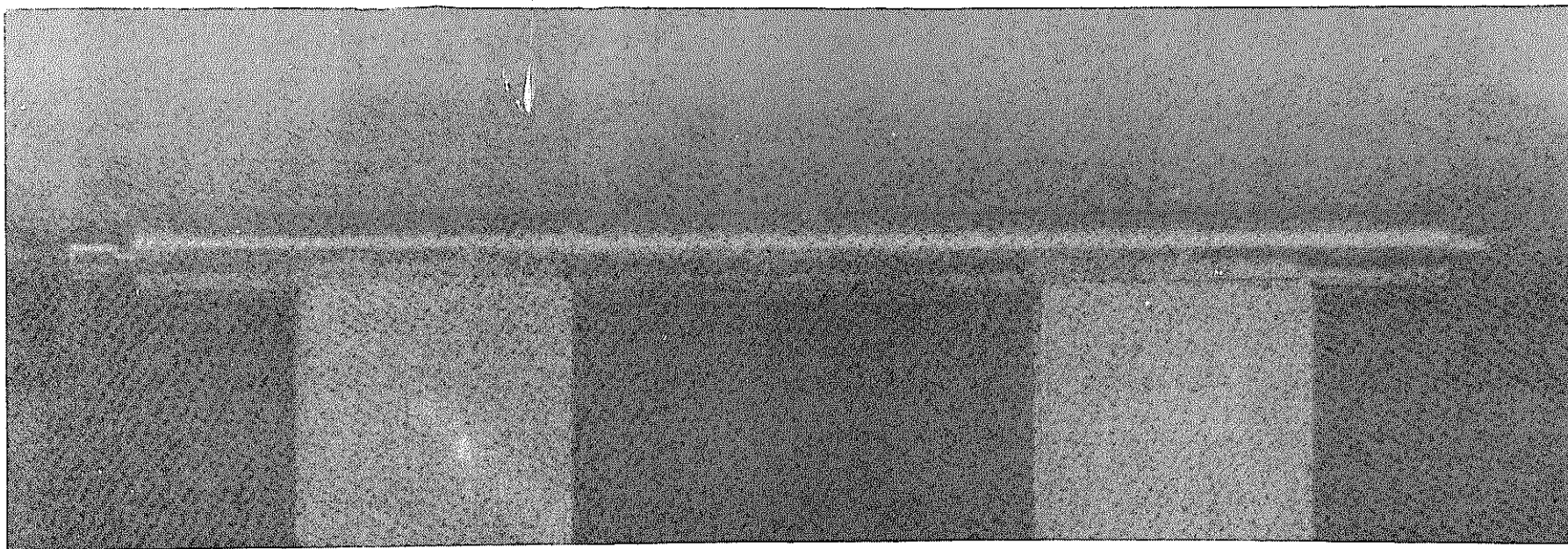
I-1 非破壊試験

I-1-1 燃料ピン外観検査

外観写真を写真-1, 2に示す。燃料ピンには異常はみられなかったが、M-1ピンとM-3ピンを比較すると、M-3ピンの燃料被覆管表面が黒色に変色している部分があるが、M-1ピンにはみられない。これは、M-3ピンの被覆管表面温度がM-1ピンよりも高かったためと思われる。

SN841-75-02

0°



180°

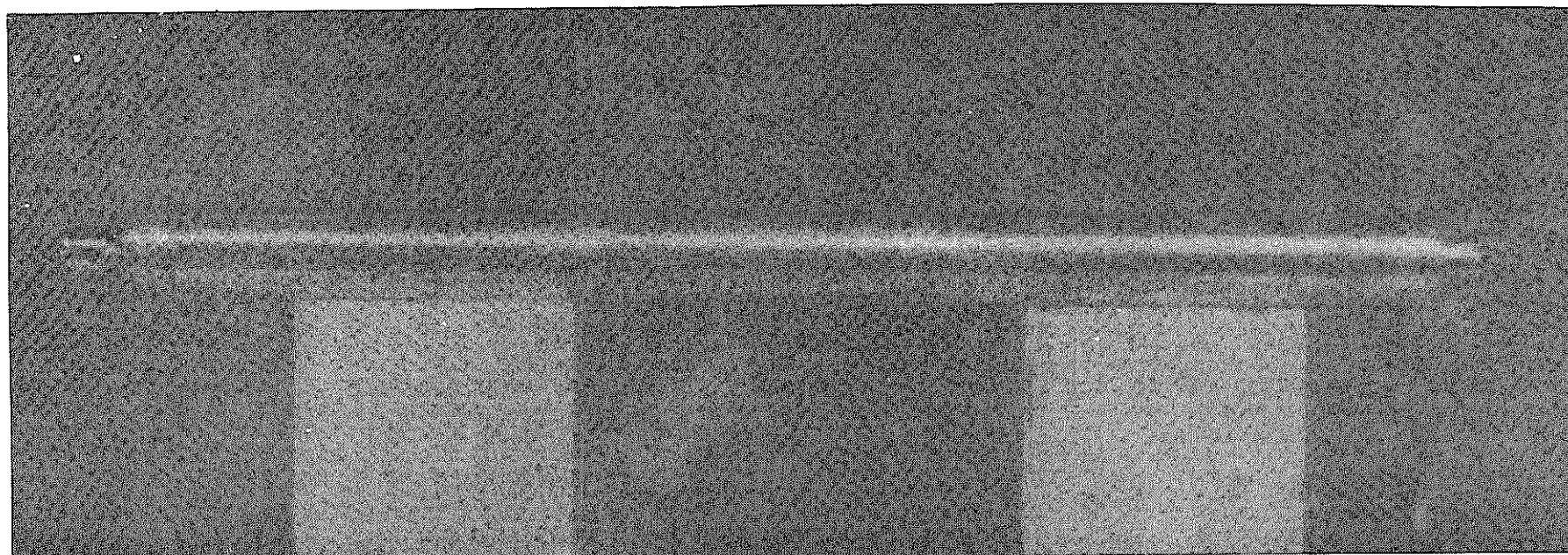
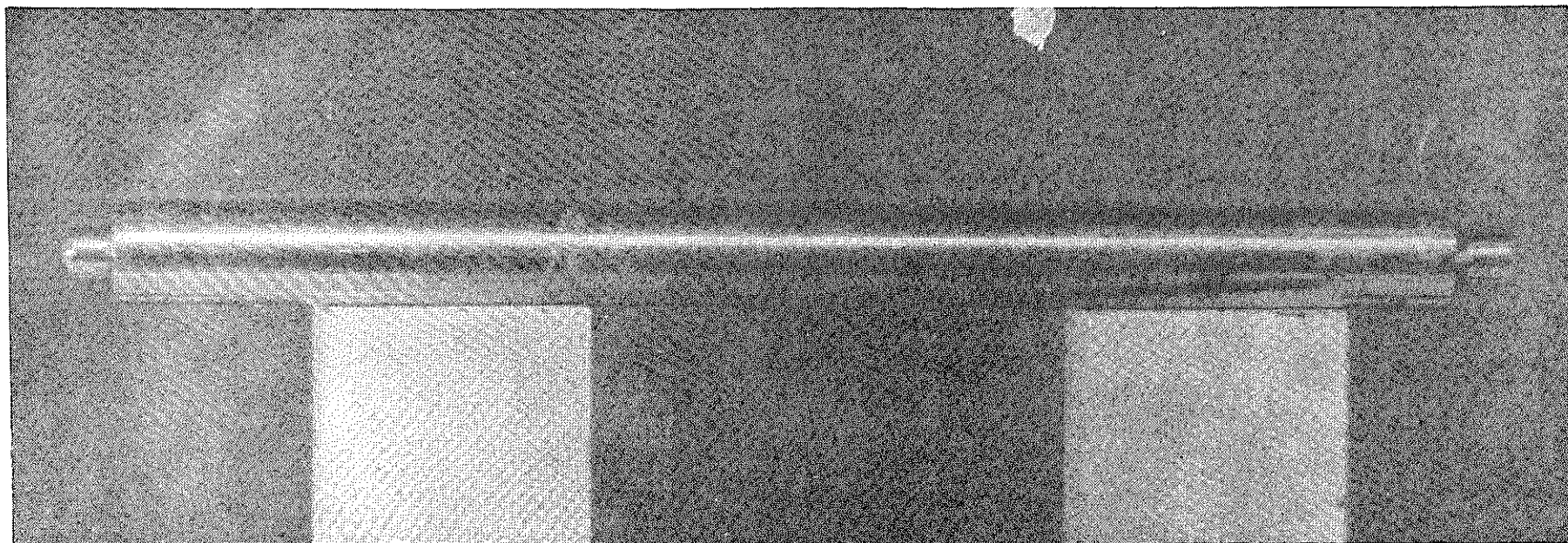
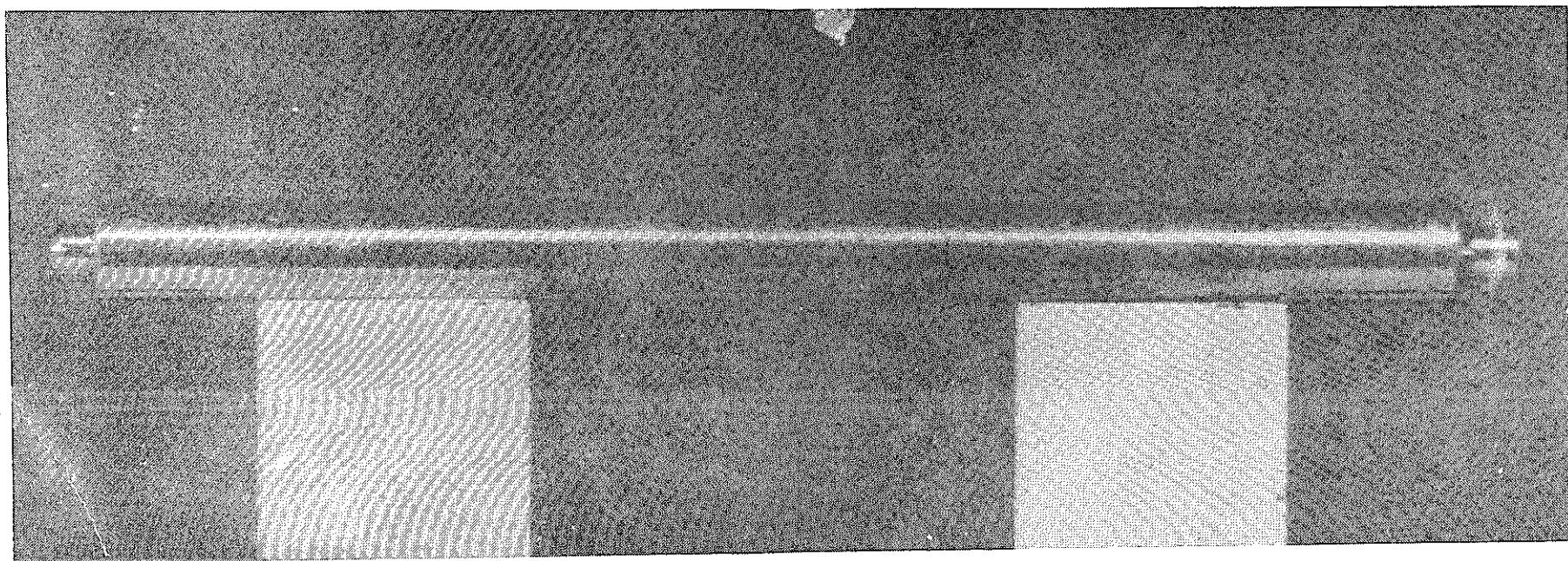


写真 - 1 IT-1 カンセル (M - 1 ピン) 外観写真



0°



180°

写真 - 2 IT-2 カプセル (M - 3 ピン) 外観写真

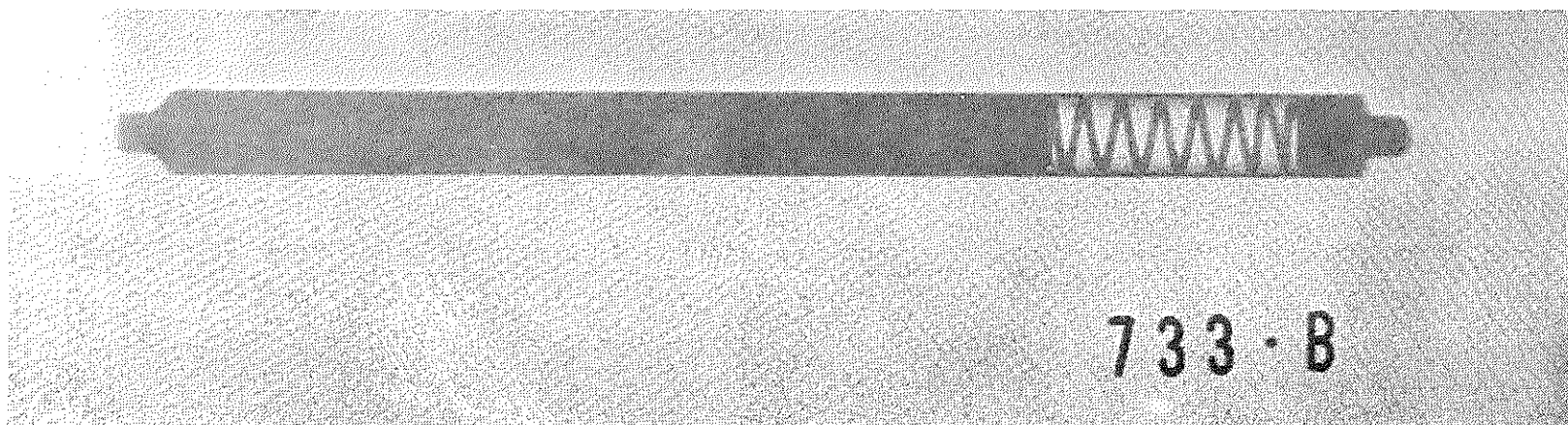
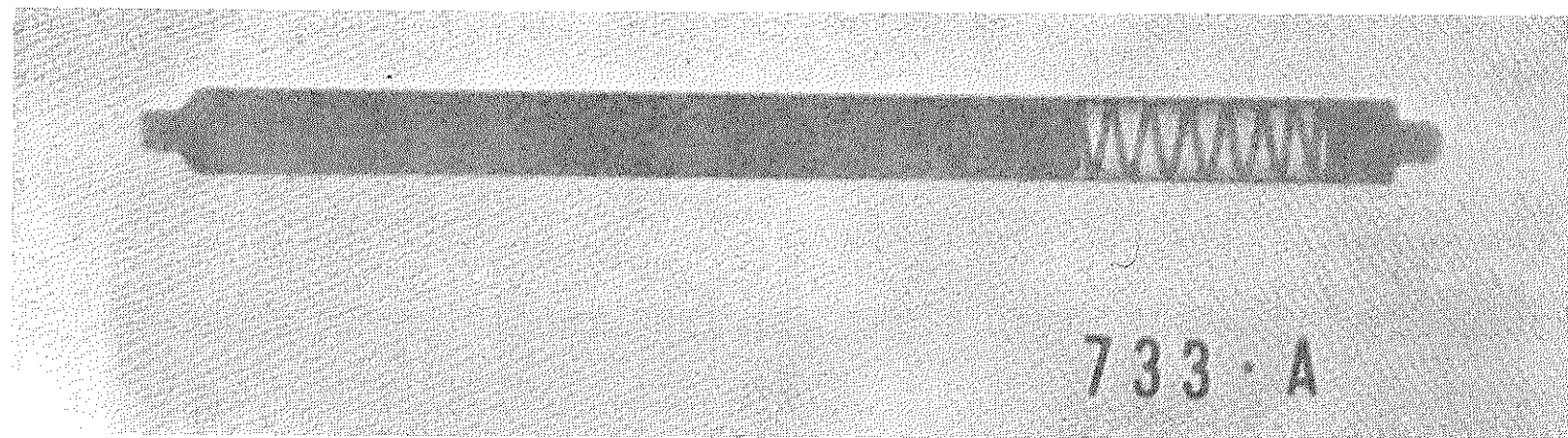
I-1-2 X線透過試験

X線透過写真を写真-3, 4に示す。

I-1-3 γ スキャンニング

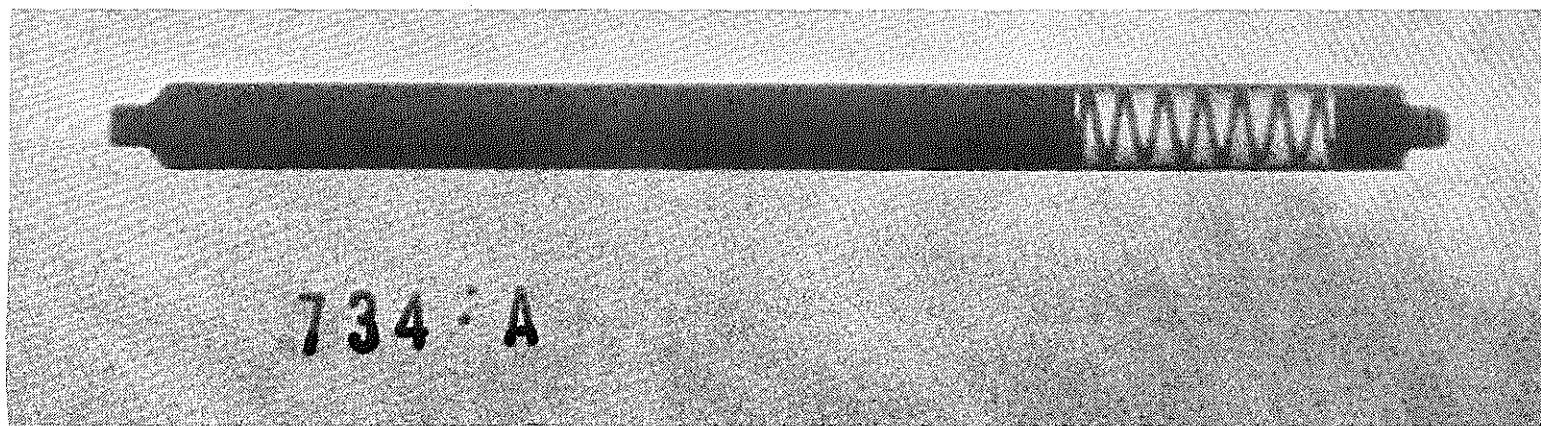
測定結果を図1-a, 図1-bに示す。この結果より検出した線は平坦であり、スランピング現象はみられなかったと云える。

M-1ピン、M-3ピンを比較すると全体のピークはM-3ピンの方が高いが、これは燃料ピンの冷却期間がM-3ピンの方が短いため、放射線量が高いためである。



150KAP, 150mA, 500mAs

写真-3 X線写真 IT-1 カプセル (M-1 ピン)



0°



90°

150KAP, 150mA, 500mAs

写真-4 X線写真 IT-2 カプセル (M-3 ピン)

10

9

1973-6-6

Sample No. HL-733

測定核種 Zr^{95} - Nb^{95}

8

$\left\{ \begin{array}{l} R : 5 \times 10^2 \text{ cps} \\ T.C : 2 \end{array} \right.$

7

6

5

3

2

1

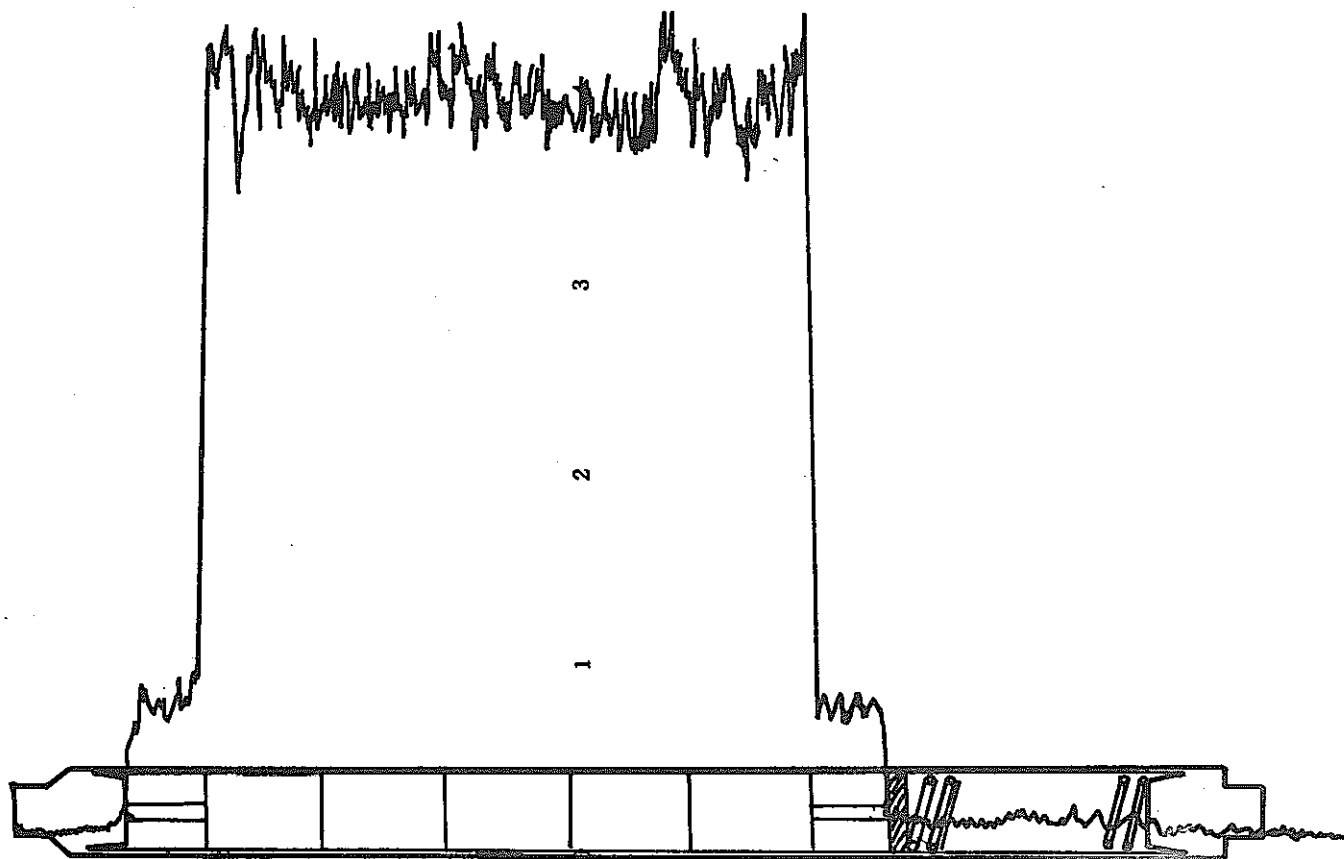


図 1-a M-1 ピン

1973-6-6

Sample No. HL-734

測定核種 $Zr^{95} - Nb^{95}$

{ R : 5×10^2 cps

{ T.C : 2

別添図参照

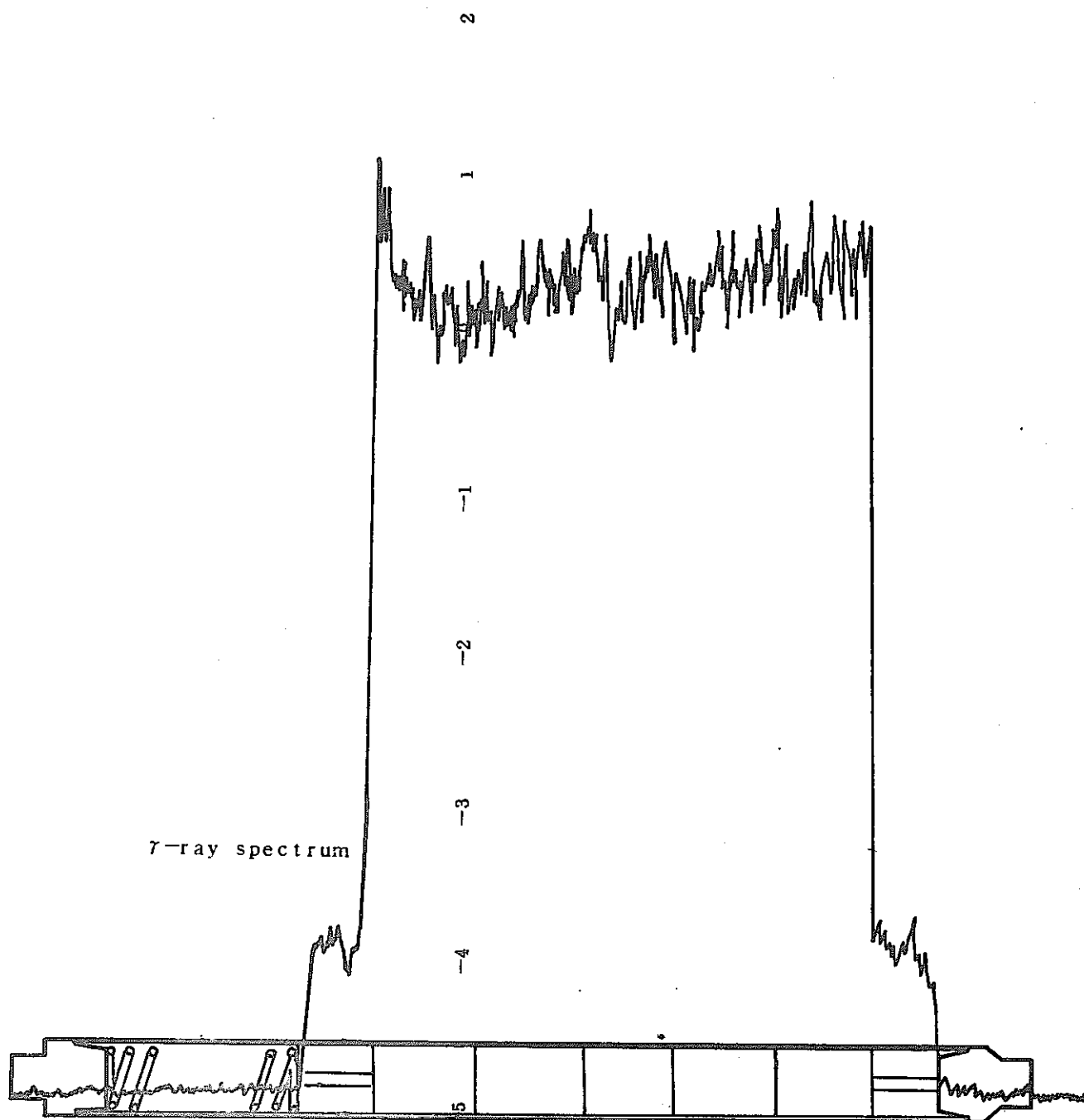


図 1 - b M - 3 ピン

I-1-4 燃料ピン外径検査

測定結果を表 1-a, 表 1-b に示す。この測定は、中心溶融が起こった場合燃料の急激な膨張により被覆管の膨張があるのではないかという推定に基づいて行った。測定結果は、マイクロメータの誤差内であった。

燃料ピン外径変化率をもとめるには、照射前の測定法と測定機器と同一のものを使用することが理想的である。

I-1-5 フラックスモニターワイヤーの測定結果

IT-1, IT-2 カプセル内に各々 3 本ずつ封入されている Al-Co ワイヤーを代表的な位置を 5 箇所とり測定した。その結果を表-2, 3 に示す。また Ci/gr の結果を図-2 ~ 3 に示す。

表 1 - a 寸法測定結果

H. L. № 733
 Capsel № IT-1
 Pin № M-1

測定位置	測定方向	測定 値 (%)				照射前値	変化率 (%)	備 考
		1	2	3	平均			
1	0°	1 1.3 9 ₀	1 1.3 9 ₀		1 1.3 9	1 1.4 0	-0.0 9	
	90	1 1.4 1 ₀	1 1.4 0 ₈		1 1.4 1	"	+0.0 9	
2	0	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7	"	-0.2 6	
	90	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7 ₅	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7	"	"	
3	0	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7 ₄		1 1.3 7	"	"	
4	0	1 1.3 6 ₉	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	"	"	
5	0	1 1.3 6 ₅	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₈	1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₄	1 1.3 6 ₁		1 1.3 6	"	-0.3 5	
6	0	1 1.3 6 ₄	1 1.3 6 ₅	1 1.3 6 ₃	1 1.3 6	"	"	
	90	1 1.3 6 ₃	1 1.3 6 ₄		1 1.3 6	"	"	
7	0	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	"	-0.2 6	
	90	1 1.3 7 ₁	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7	"	"	
8	0	1 1.3 7 ₀	1 1.3 6 ₈		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₁	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	"	"	
9	0	1 1.3 7 ₀	1 1.3 7 ₁		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7	"	"	
10	0	1 1.3 7 ₀	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₃		1 1.3 7	"	"	
11	0	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₅		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₇	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	"	"	
12	0	1 1.3 6 ₅	1 1.3 6 ₀	1 1.3 6 ₈	1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₆	1 1.3 6 ₈		1 1.3 7	"	"	
13	0	1 1.3 6 ₈	1 1.3 7 ₂		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₉	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	"	"	
14	0	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₁		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₁	1 1.3 7 ₃		1 1.3 7	"	"	
15	0	1 1.5 7 ₃	1 1.5 7 ₅	1 1.5 7 ₆	1 1.5 8	1 1.6 1	-0.2 6	
	90	1 1.5 6 ₈	1 1.5 7 ₀		1 1.5 7	"	-0.3 4	
16	0	1 1.3 8 ₀	1 1.3 7 ₈		1 1.3 8	1 1.4 0	-0.1 8	
	90	1 1.3 8 ₁	1 1.3 8 ₀		1 1.3 8	"	"	

測定位置

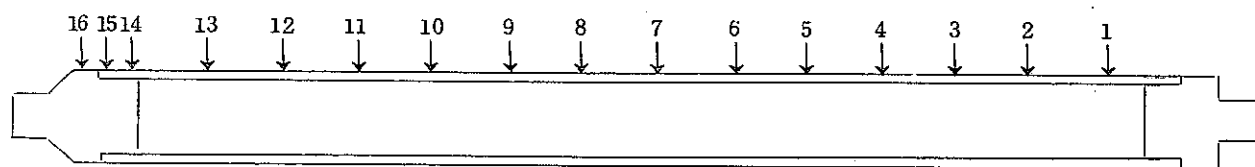


表 1 - b 寸法測定結果

H. L. № 734
 Capsel № IT-2
 Pin № M-2

測定位置	測定方向	測定値				照射前値	変化率 (%)	備考
		1	2	3	平均			
1	0°	1 1.3 7 ₂	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	1 1.4 0	-0.2 6	
	90	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₀		1 1.3 7		"	
2	0	1 1.3 7 ₀	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₇	1 1.3 7 ₇		1 1.3 8		-0.1 8	
3	0	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	"	-0.2 6	
	90	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7 ₁		1 1.3 7		"	
4	0	1 1.3 7 ₀	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7 ₂		1 1.3 7		"	
5	0	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₈	1 1.3 7 ₅		1 1.3 8		-0.1 8	
6	0	1 1.3 6 ₇	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	"	-0.2 6	
	90	1 1.3 8 ₂	1 1.3 7 ₈		1 1.3 8		-0.1 8	
7	0	1 1.3 7 ₀	1 1.3 6 ₈		1 1.3 7	"	-0.2 6	
	90	1 1.3 7 ₅	1 1.3 7 ₂	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7		"	
8	0	1 1.3 6 ₇	1 1.3 6 ₅		1 1.3 6	"	-0.3 5	
	90	1 1.3 6 ₉	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7		-0.2 6	
9	0	1 1.3 6 ₄	1 1.3 6 ₅		1 1.3 6	"		
	90	1 1.3 6 ₄	1 1.3 6 ₇	1 1.3 6 ₆	1 1.3 7		-0.2 6	
10	0	1 1.3 6 ₅	1 1.3 6 ₈		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₅		1 1.3 7		"	
11	0	1 1.3 6 ₆	1 1.3 6 ₉		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 6 ₇	1 1.3 6 ₆		1 1.3 7		"	
12	0	1 1.3 6 ₅	1 1.3 6 ₄	1 1.3 6 ₃	1 1.3 6	"	-0.3 5	
	90	1 1.3 6 ₄	1 1.3 6 ₄		1 1.3 6		"	
13	0	1 1.3 6 ₆	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	"	-0.2 6	
	90	1 1.3 6 ₉	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7		"	
14	0	1 1.3 6 ₈	1 1.3 6 ₅		1 1.3 7	"	"	
	90	1 1.3 7 ₈	1 1.3 7 ₃	1 1.3 7 ₆	1 1.3 8		-0.1 8	
15	0	1 1.4 7 ₈	1 1.4 7 ₈		1 1.4 8	1 1.6 1	-1.1 2	
	90	1 1.4 9 ₈	1 1.4 9 ₈		1 1.5 0		-0.9 5	
16	0	1 1.3 6 ₆	1 1.3 6 ₇		1 1.3 7	1 1.4 0	-0.2 6	
	90	1 1.3 8 ₃	1 1.3 8 ₂		1 1.3 8		-0.1 8	

測定位置

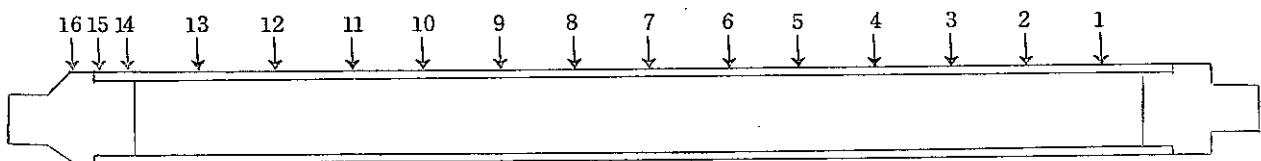


表 2. Co-60 Quantitative

1973-5-15

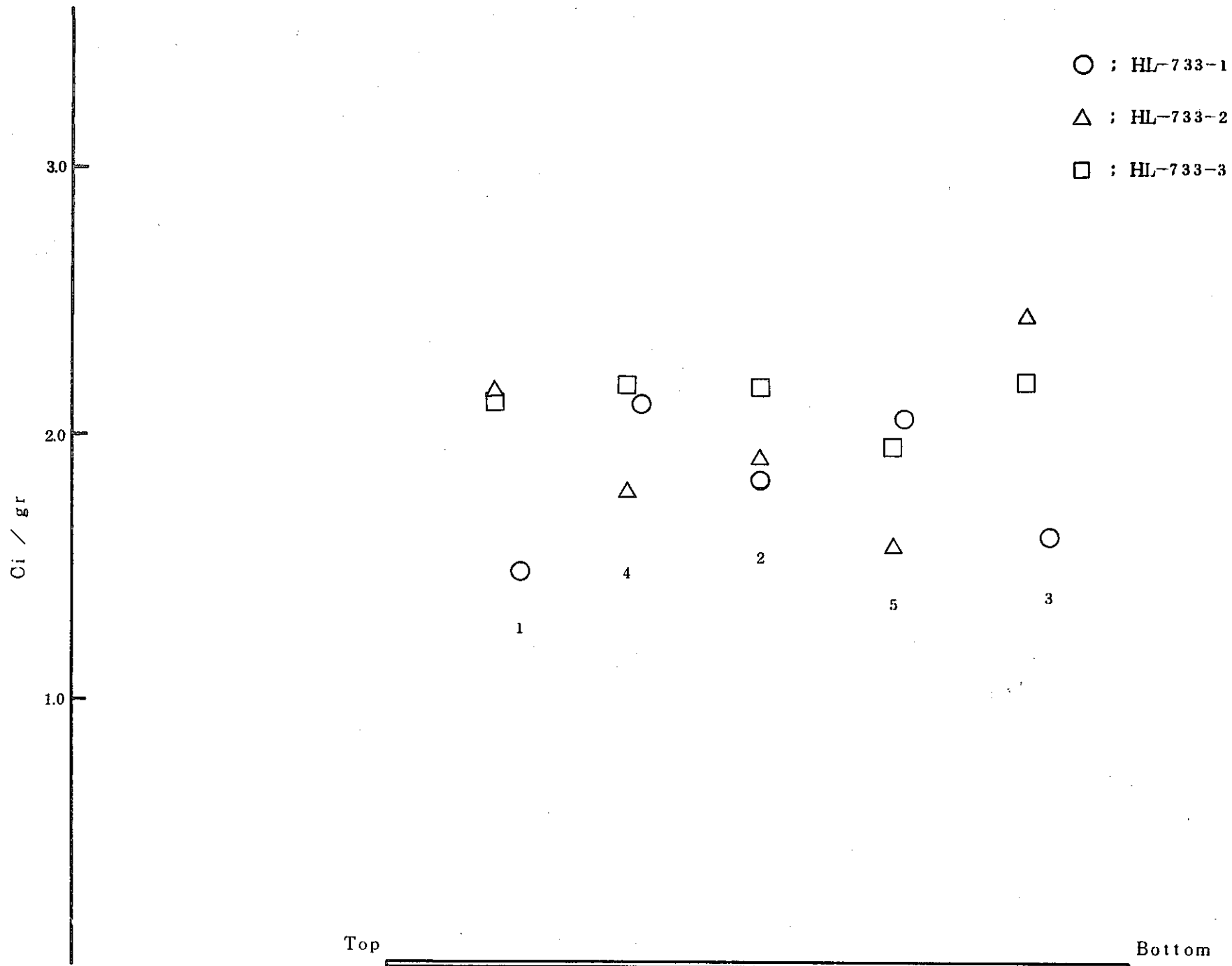
Sample №	48年	Activity (10^{-6} Ci)	Weight(Co) (10^{-6} gr)	Ci/gr
HL-733-1-1		8.1791	5.48	1.4925
1-2	5月9日	11.5820	6.34	1.8268
1-3		3.0009	1.85	1.6221
1-4	5月11日	16.5175	7.79	2.1203
1-5		10.8062	5.21	2.0741
HL-733-2-1		12.7185	5.87	2.1667
2-2	5月9日	11.2864	5.87	1.9227
2-3		6.1862	2.51	2.4646
2-4	5月11日	10.7501	6.01	1.7887
2-5		9.1285	5.74	1.5903
HL-733-3-1		16.3766	7.72	2.1213
3-2	5月10日	17.4327	7.99	2.1818
3-3		25.1266	11.35	2.2138
3-4	5月11日	18.1902	8.32	2.1863
3-5		8.9278	4.55	1.9622

表 3. Co-60 Quantitative

1973-5-15

Sample №	48年	Activity (10^{-6} Ci)	Weight(Co) (10^{-6} gr)	Ci/gr
HL-734-1-1		15.3225	7.06	2.1703
1-2	5月10日	13.2987	7.26	1.8318
1-3		17.3057	8.45	2.0480
1-4	5月12日	14.5347	7.66	1.8975
1-5		16.2271	7.13	2.2759
HL-734-2-1		20.2720	9.90	2.0477
2-2	5月10日	10.9772	5.74	1.9124
2-3		4.8617	2.11	2.3041
2-4	5月12日	19.4304	8.98	2.1637
2-5		13.1339	6.27	2.0947
HL-734-3-1		15.3010	6.47	2.3649
3-2	5月10日	3.9799	2.05	1.9414
3-3		12.2805	4.88	2.5165
3-4	5月12日	10.3511	5.21	1.9868
3-5		10.6972	5.08	2.1057

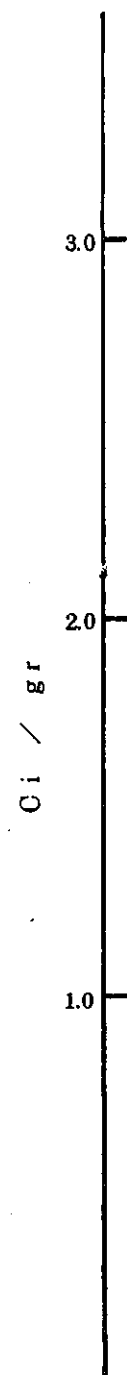
-15-



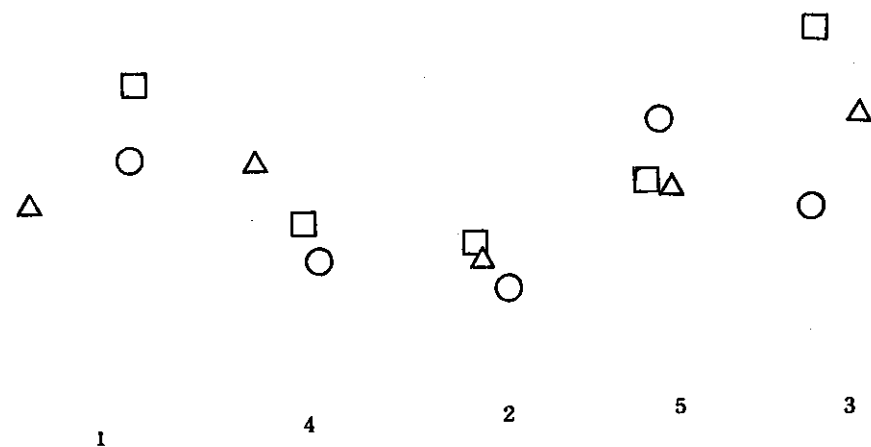
Top

Bottom

- ; HL-734-1
- △ ; HL-734-2
- ; HL-734-3



Top Bottom



I-2 破壊試験

I-2-1 金相試験

M-1, M-3 ピン共各々金相試料を3箇所づつとり試験した。金相試験位置を図-4に示す。それぞれの金相面についてマクロおよびミクロ写真を撮影したが、M-3ピンのA面については全面連続写真も作成した。各金相面の写真を写真-5から写真-10に示す。

I-2-2 Quantimet 720によるボイド分布測定

Quantimet 720は大洗工学センターA・G・Fに設置しており、燃料内のボイド分布やボイドの面積、直径、ボイドの数をサイズに別けて測定できる。

今回A・G・Fの協力により測定した。その結果を図-5~14に示す。図中に測定位置を3点取って測定したものは測定スリット幅を小さくし測定したものである。1点だけ測定したものは、大きなスリット幅で測定したものである。大きなクラックや特に大きな(100 μ 以上)のボイドは除いて測定した。またIT-1カプセルのM-1ピンに関しては、切断面Aはクラックが多いため測定出来なかった。

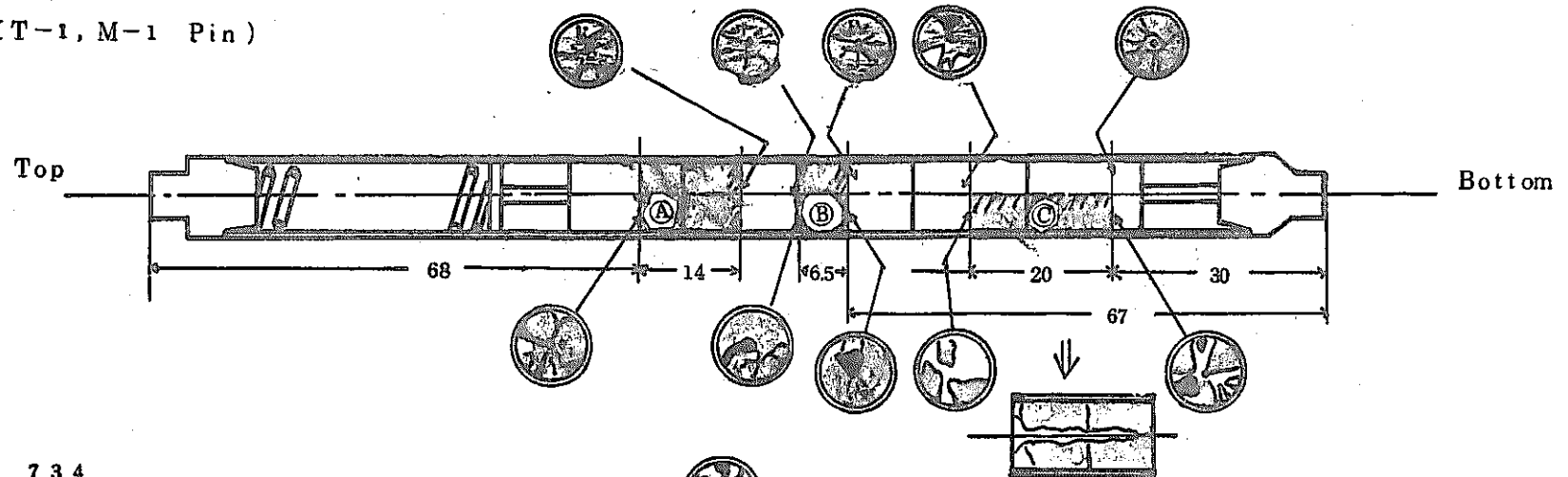
ボイド分布の曲線は、等軸晶内はボイドが低く等軸晶と柱状晶領域との境界はボイドが多いということが全般的にいえる。またこの装置は、開発されたばかりでまだ不確定要素が残っていることと、今回の金相写真が、エッチングしてあるため、エッチビットなどもボイドとして数えているため、定量的には分析できなかった。

したがって、ボイド分布を求めるには、エッチング前の、試料の研磨面で測定することが必要である。

切断寸法 & 切断面

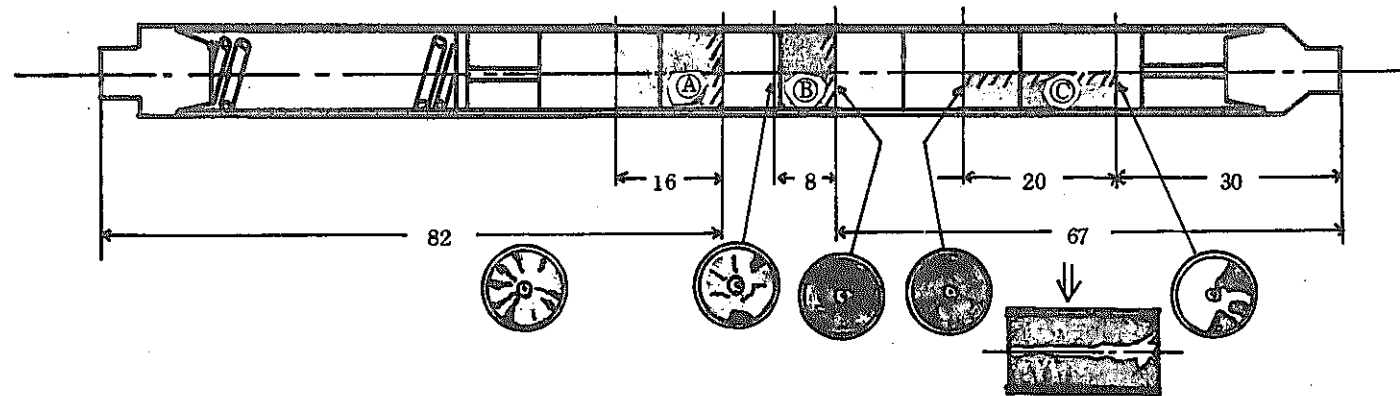
HL No 733

(IT-1, M-1 Pin)



HL No 734

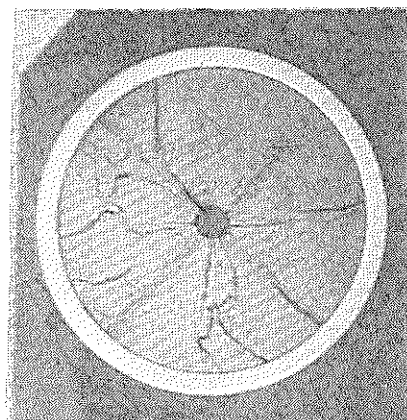
(IT-2, M-3 Pin)



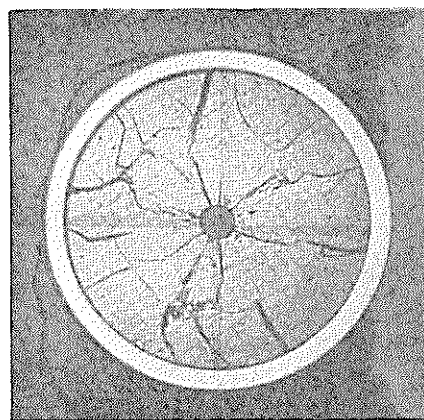
※切断点にスリットを入れ樹脂注入後（エポコート系）切断する。

切断面 { 真 黒 : くずれ
ほかし : ペレット を表わす
白 : 樹 脂

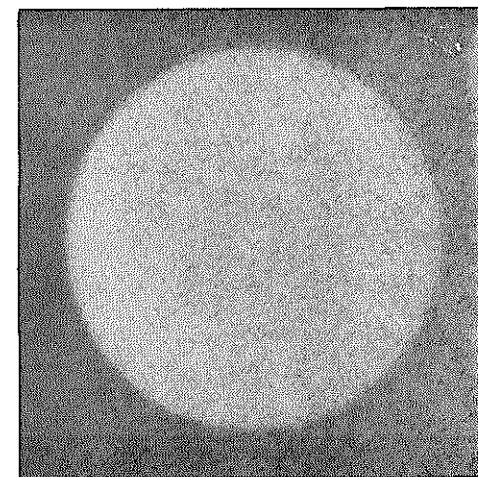
図 4. 金 相 試 験 位 置



マクロ (エッチ前)



マクロ (エッチ後)



β - γ オートラジオグラフィー



500 μ

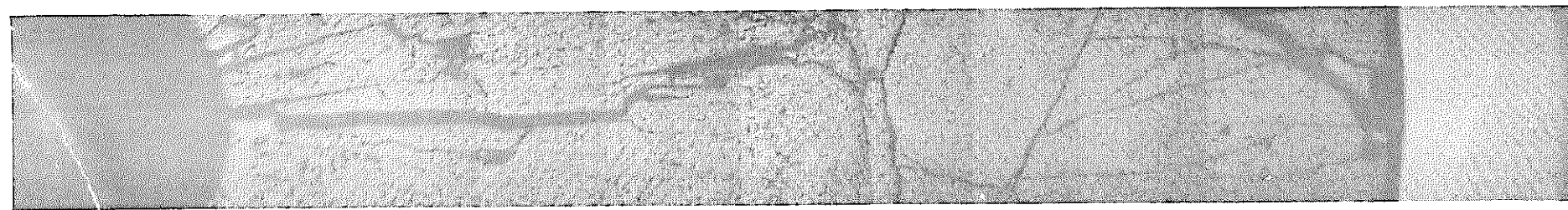
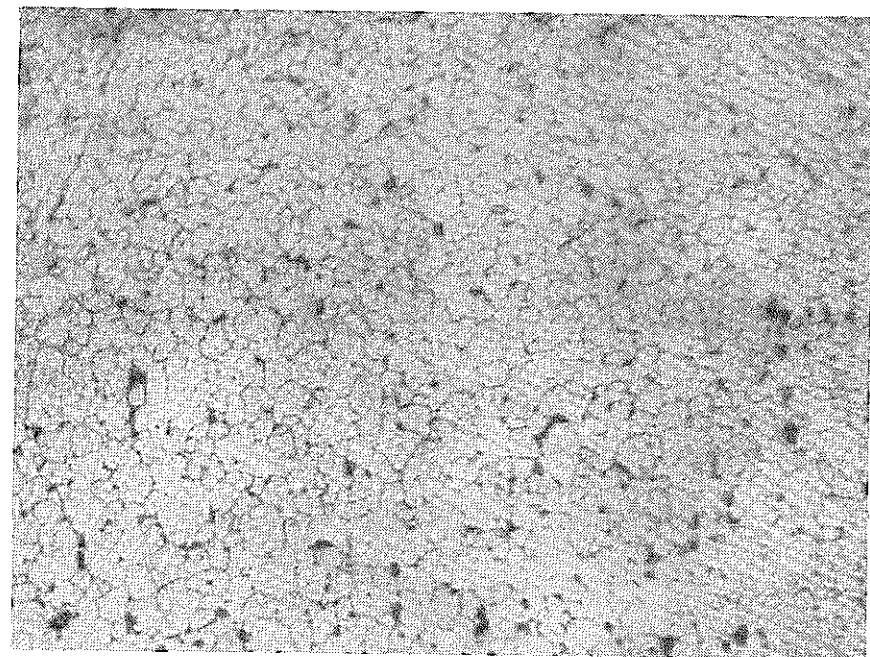
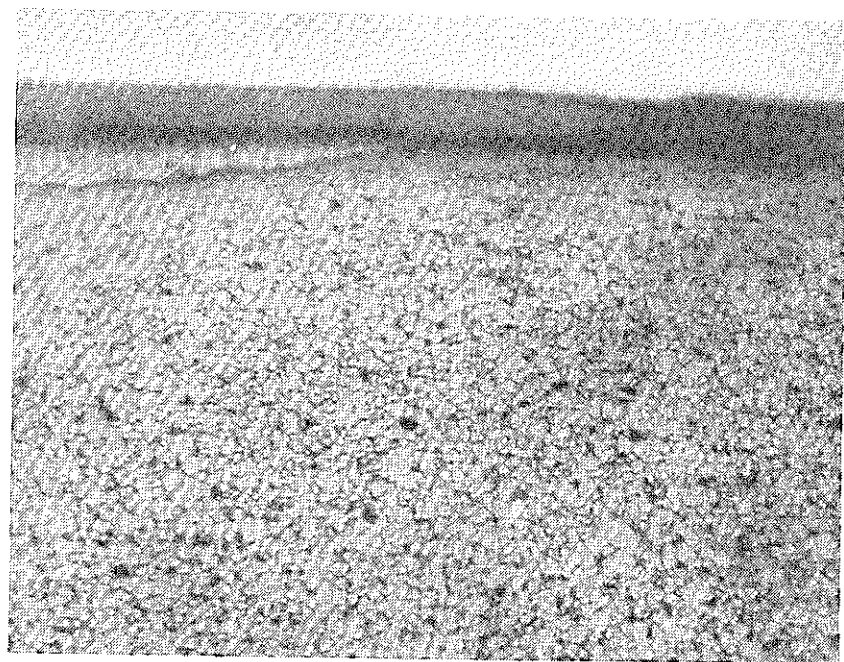


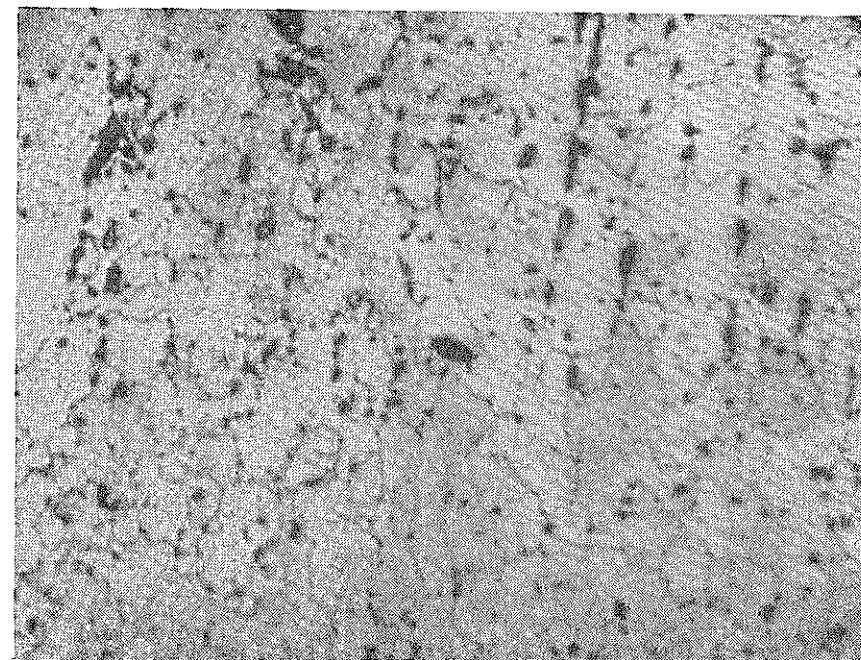
写真 - 5 IT-1 カプセル (M - 1 ピン) 切断位置 A



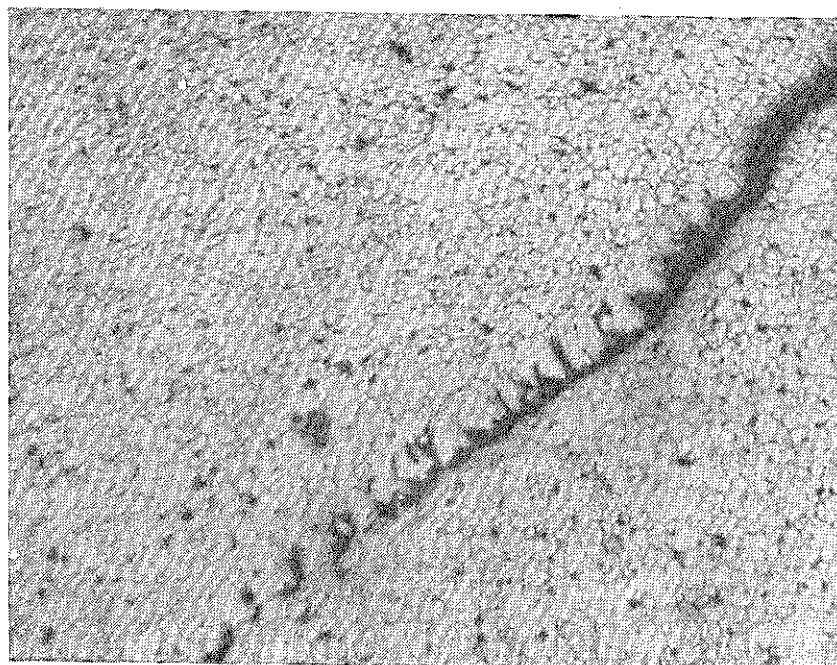
中間部



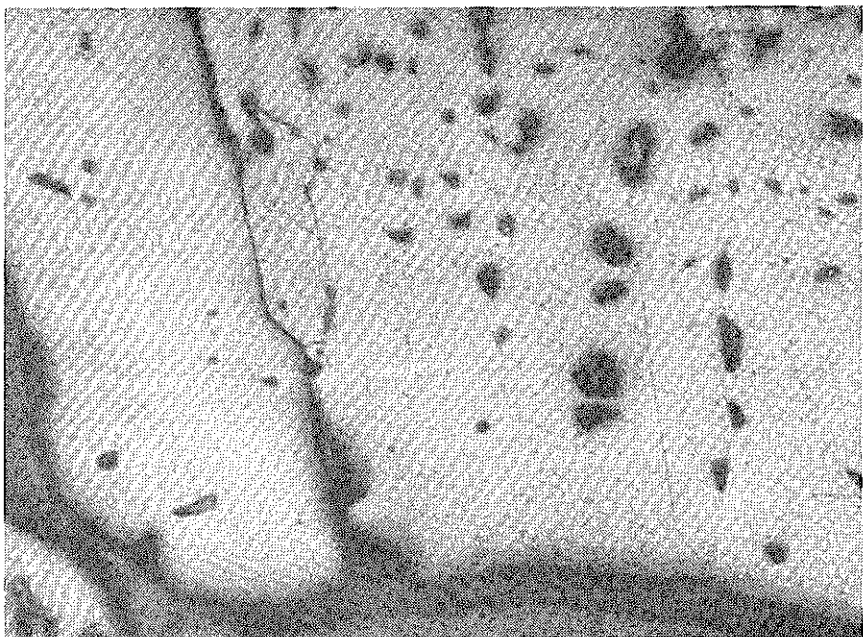
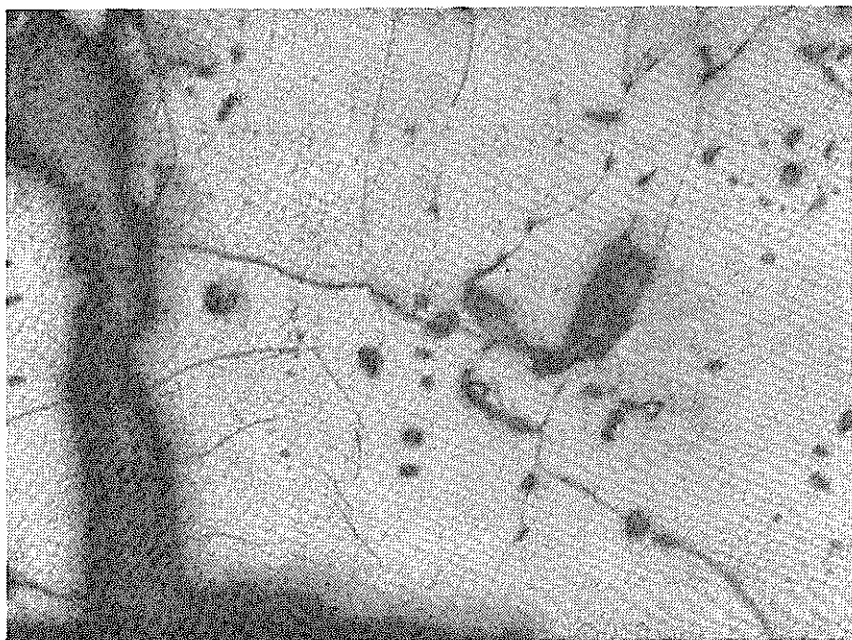
外周部



中間部

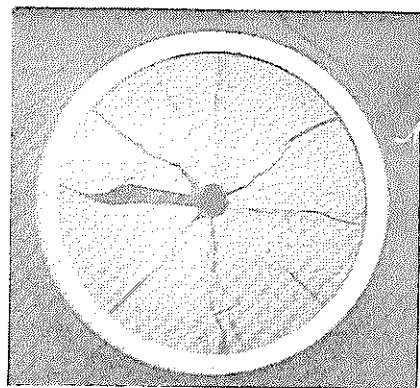


中間部

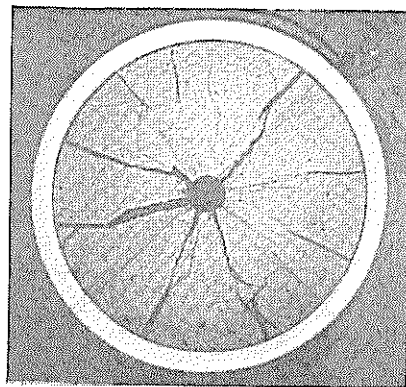


中 心 部

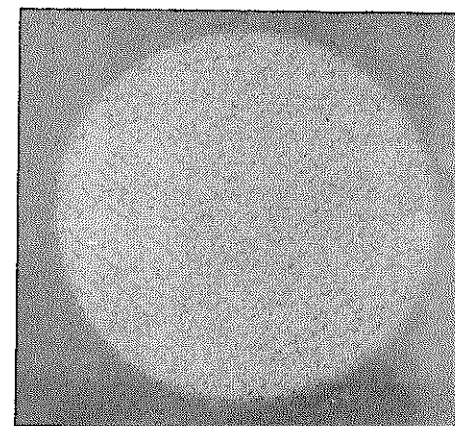
500 μ



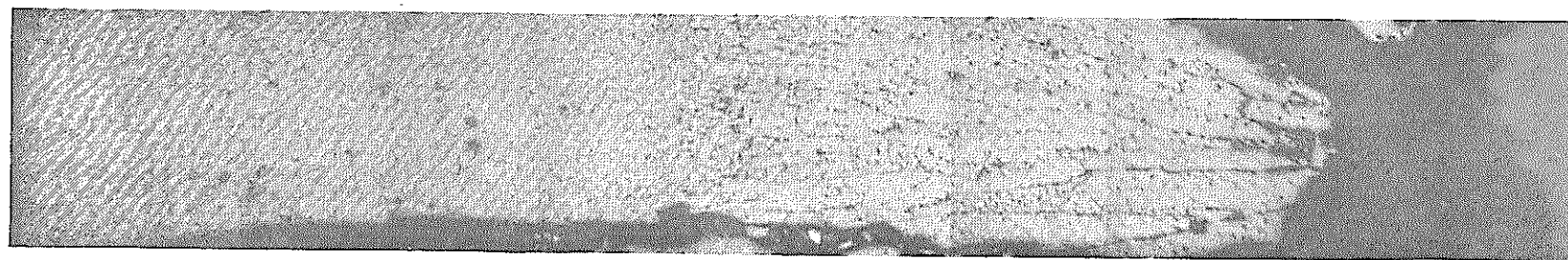
マクロ (エッチ前)



マクロ (エッチ後)



β - γ オートラジオグラフィー



500 μ

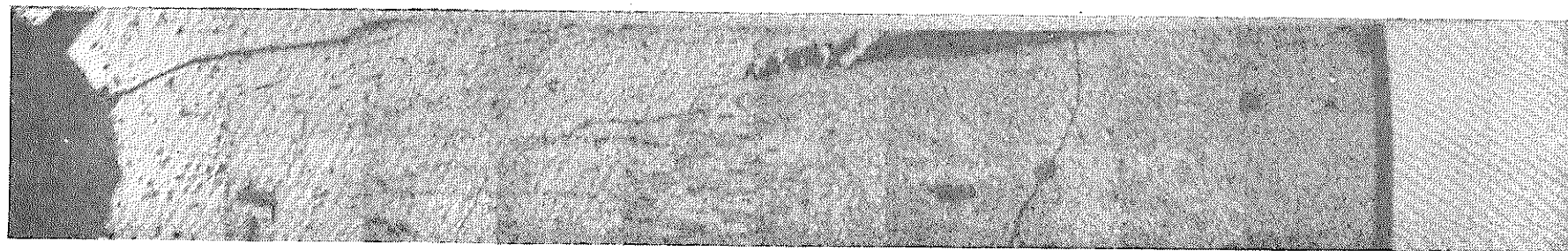
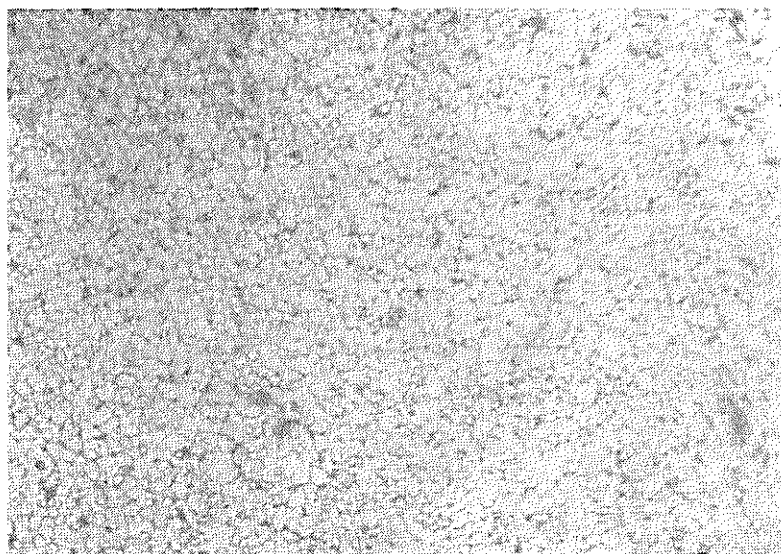
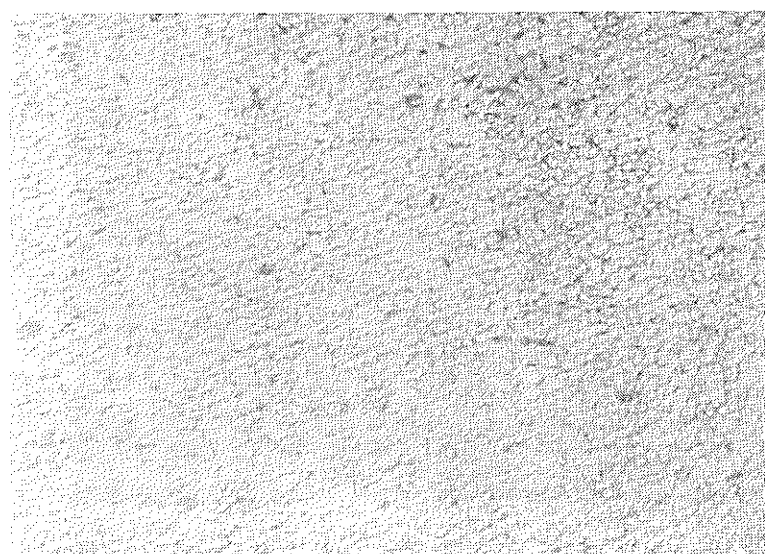
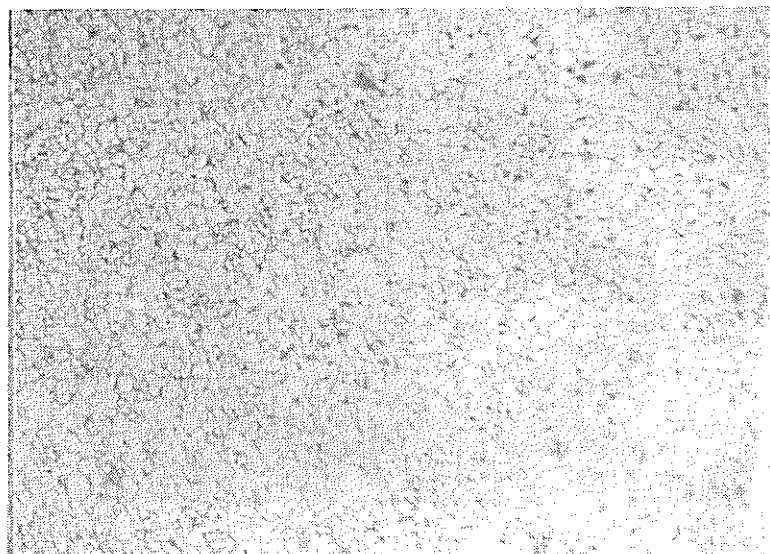


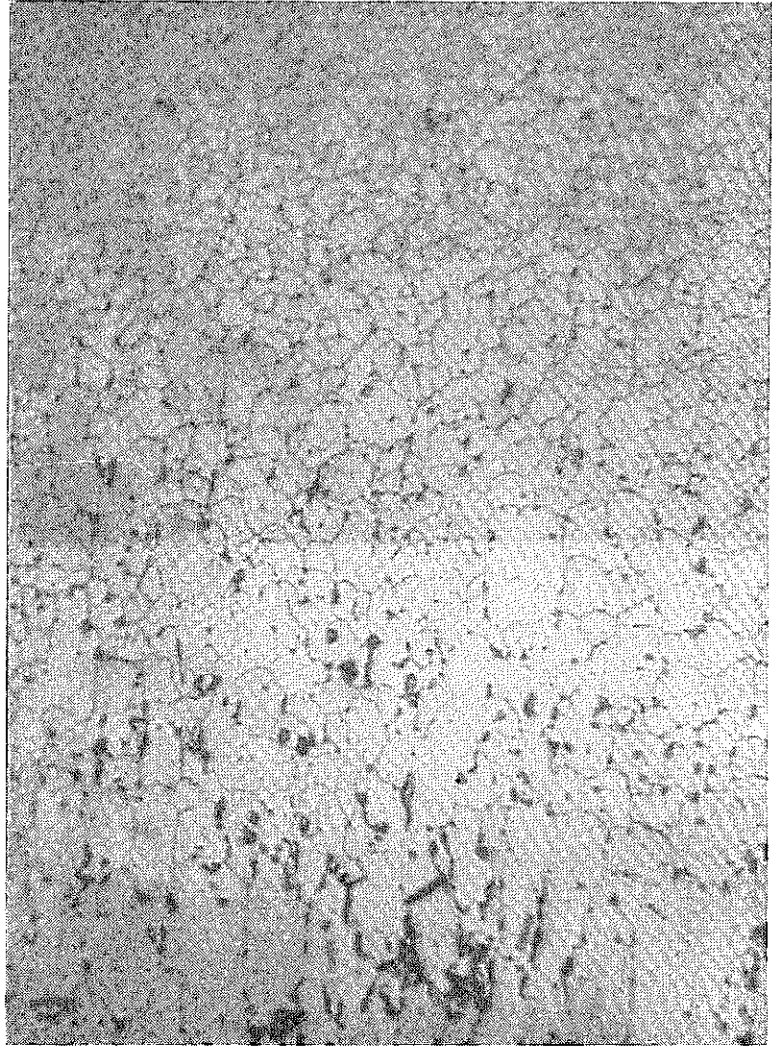
写真 - 6 IT-1 カプセル (M-1 ピン) 切断位置 B



外 周 部

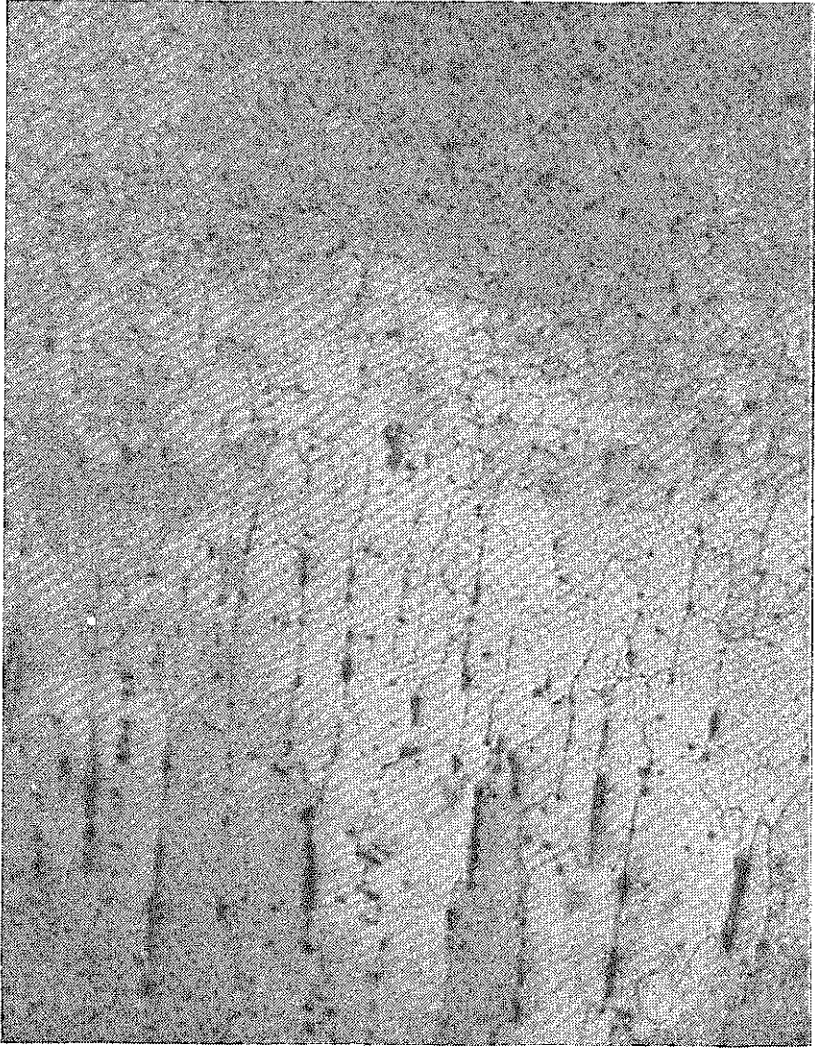


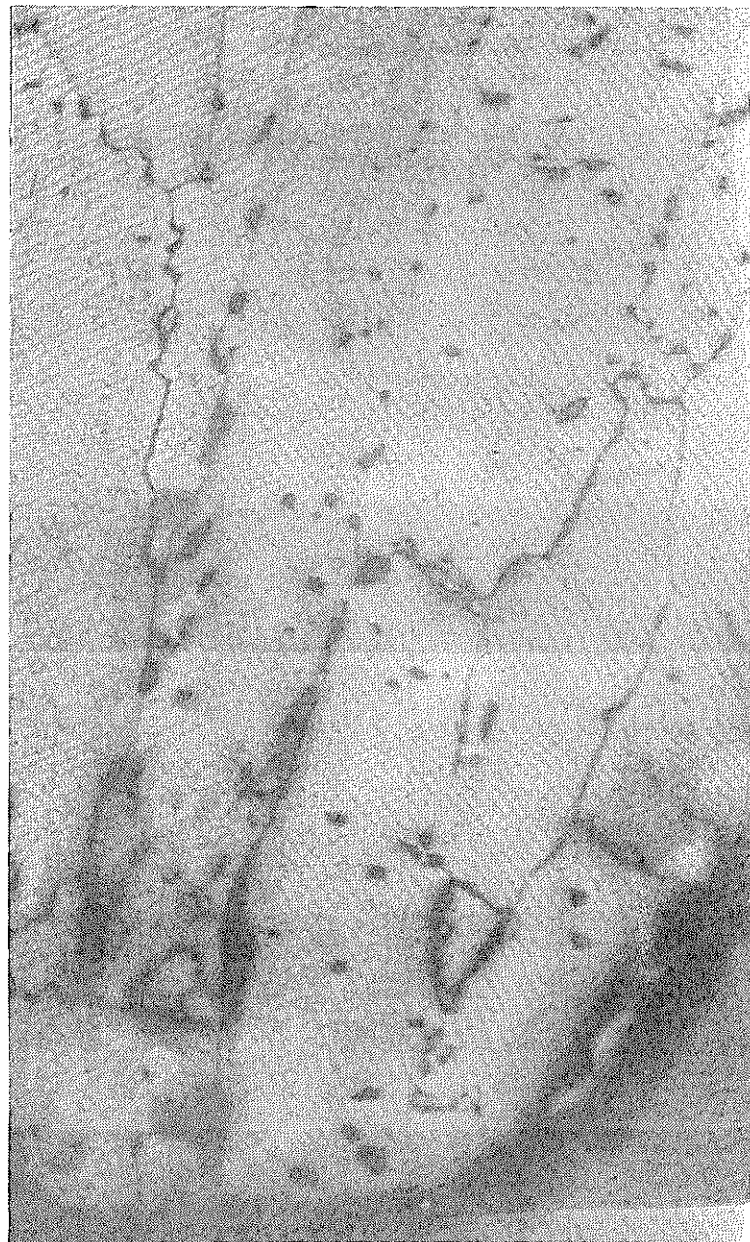
500 μ



500 μ

中 間 部

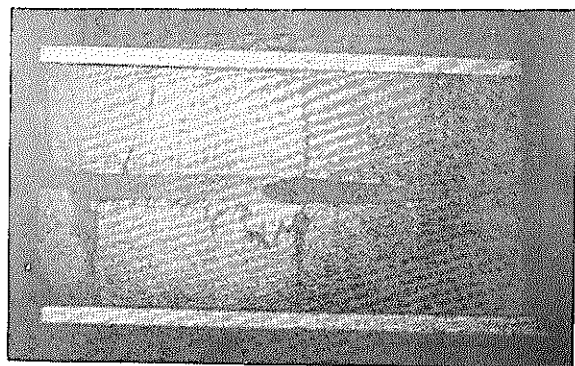




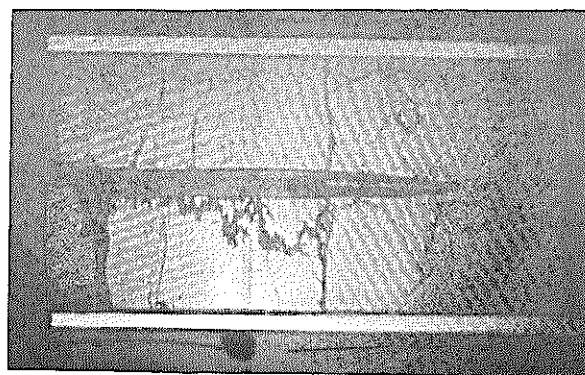
中心部

500μ

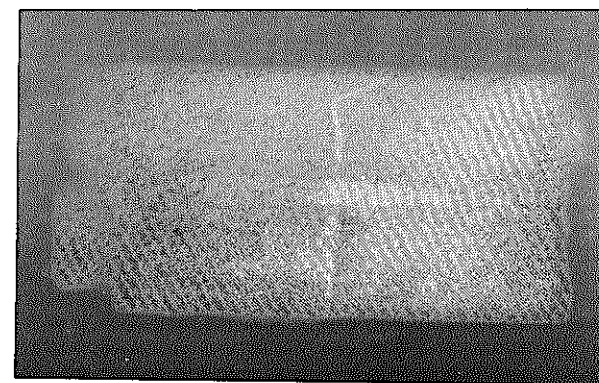




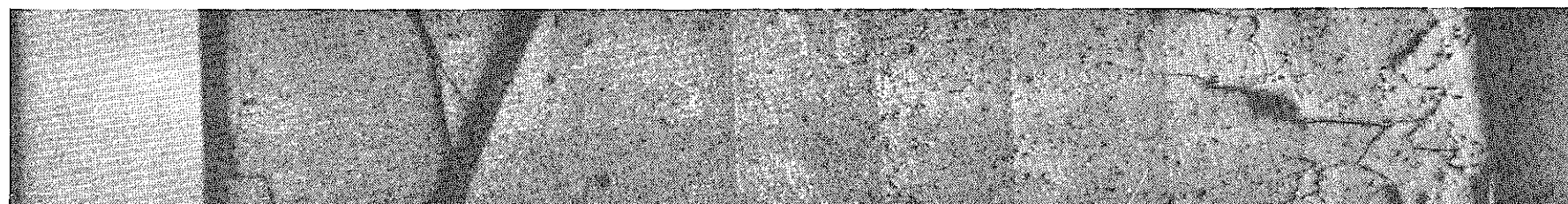
マクロ (エッチ前)



マクロ (エッチ後)



β - γ オートラジオグラフィー



500 μ

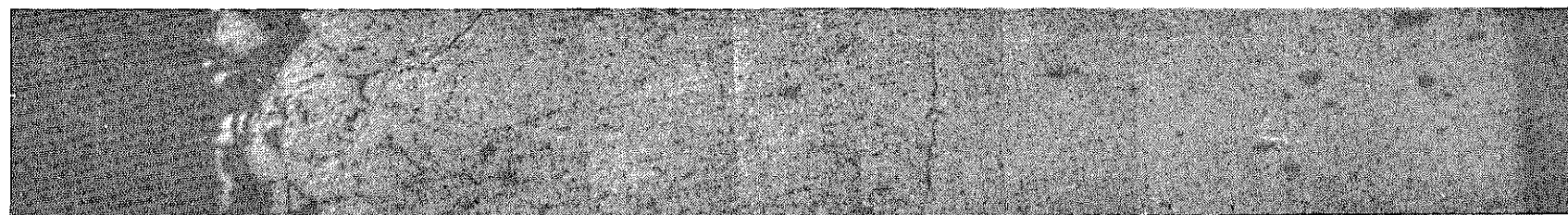
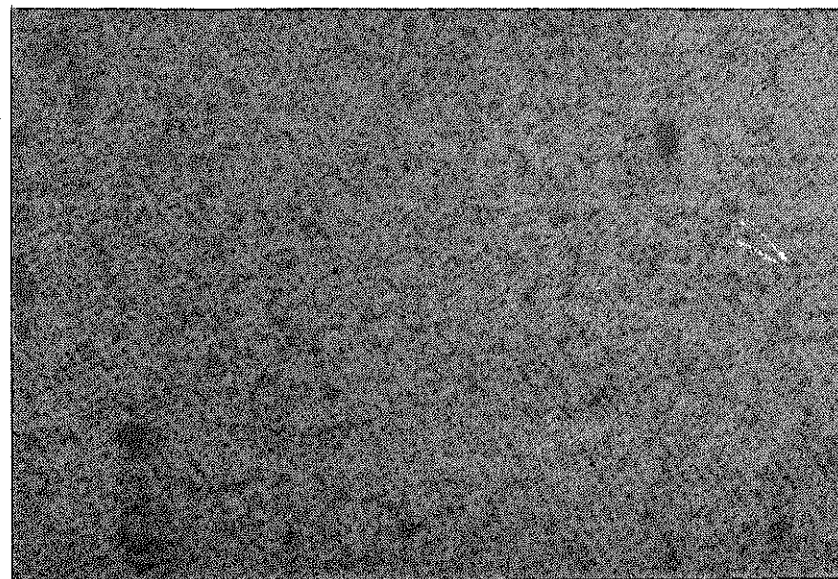
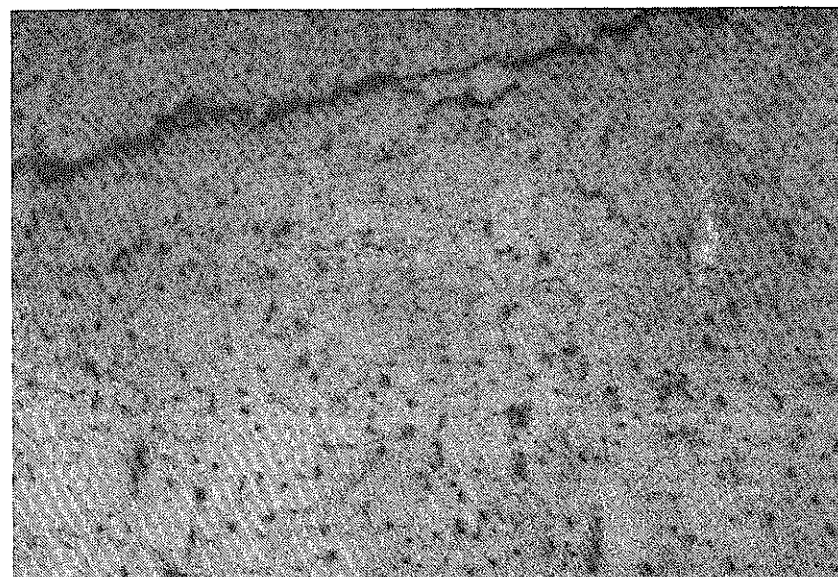


写真 - 7 IT-1 カプセル (M - 1 ピン) 切断位置 C

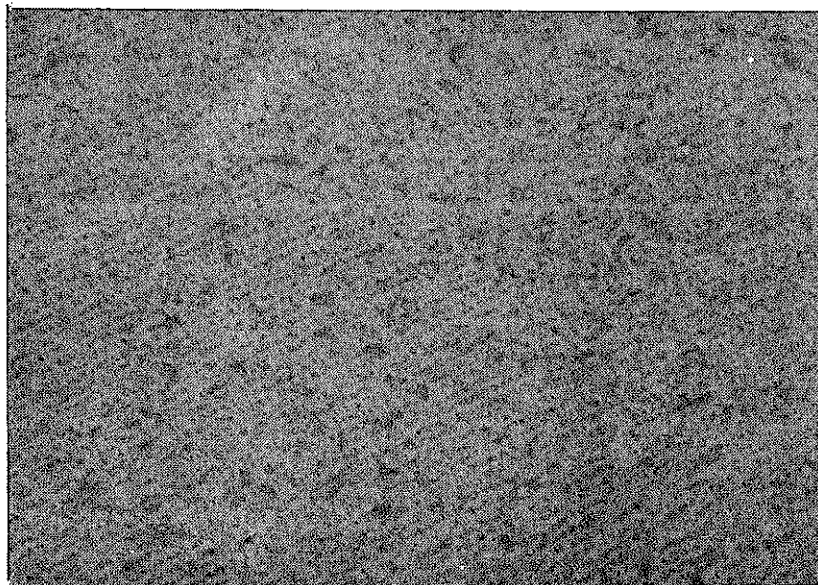


外 周 部

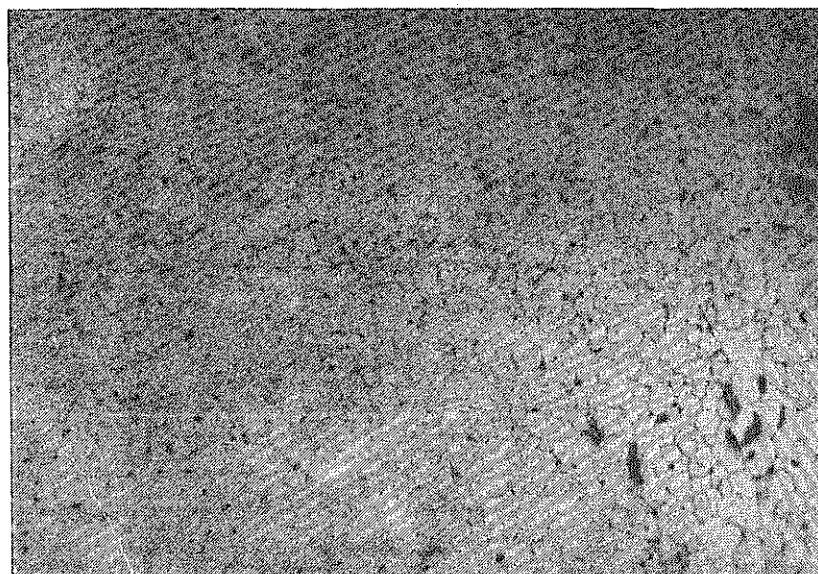


中 間 部

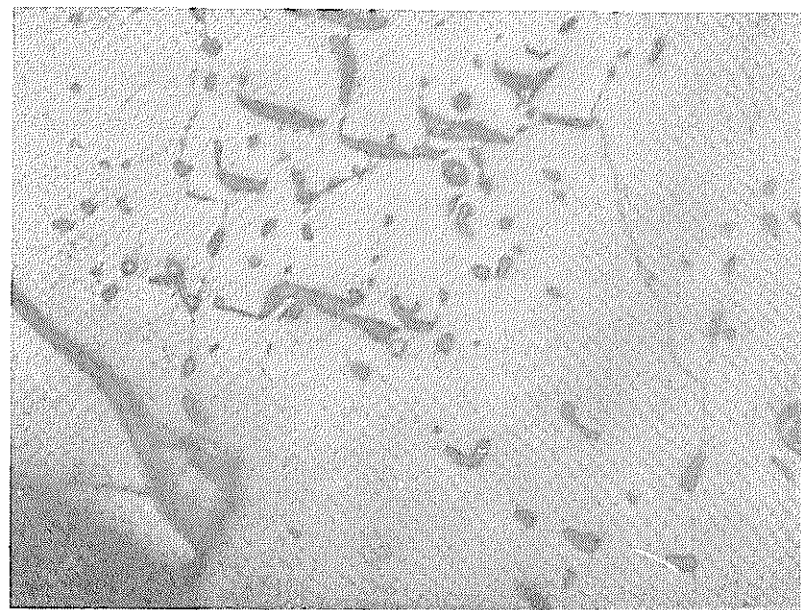
500 μ



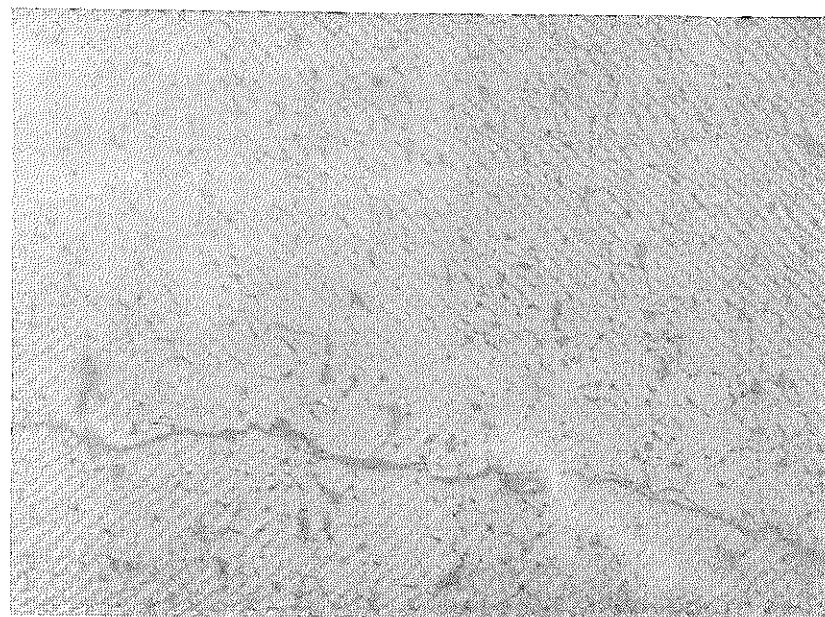
外 周 部



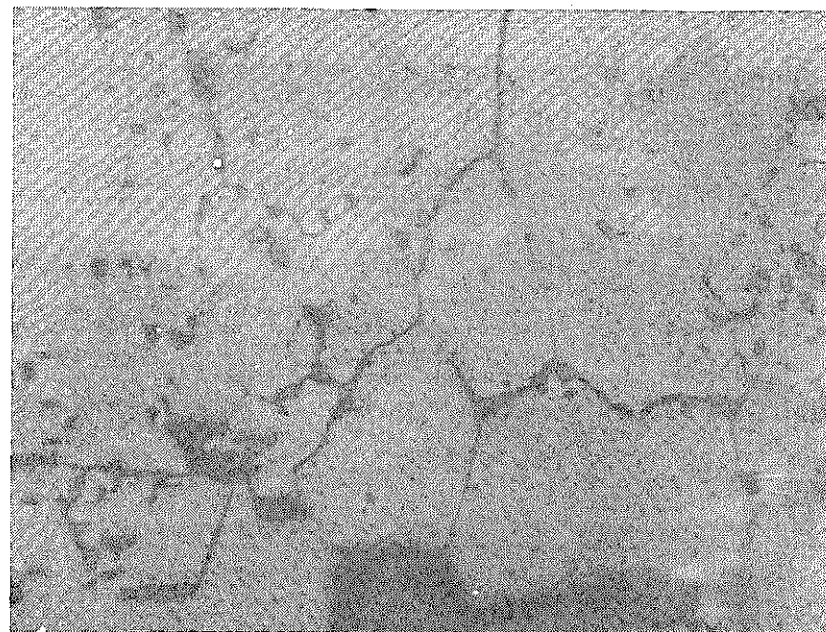
中 間 部



中心部

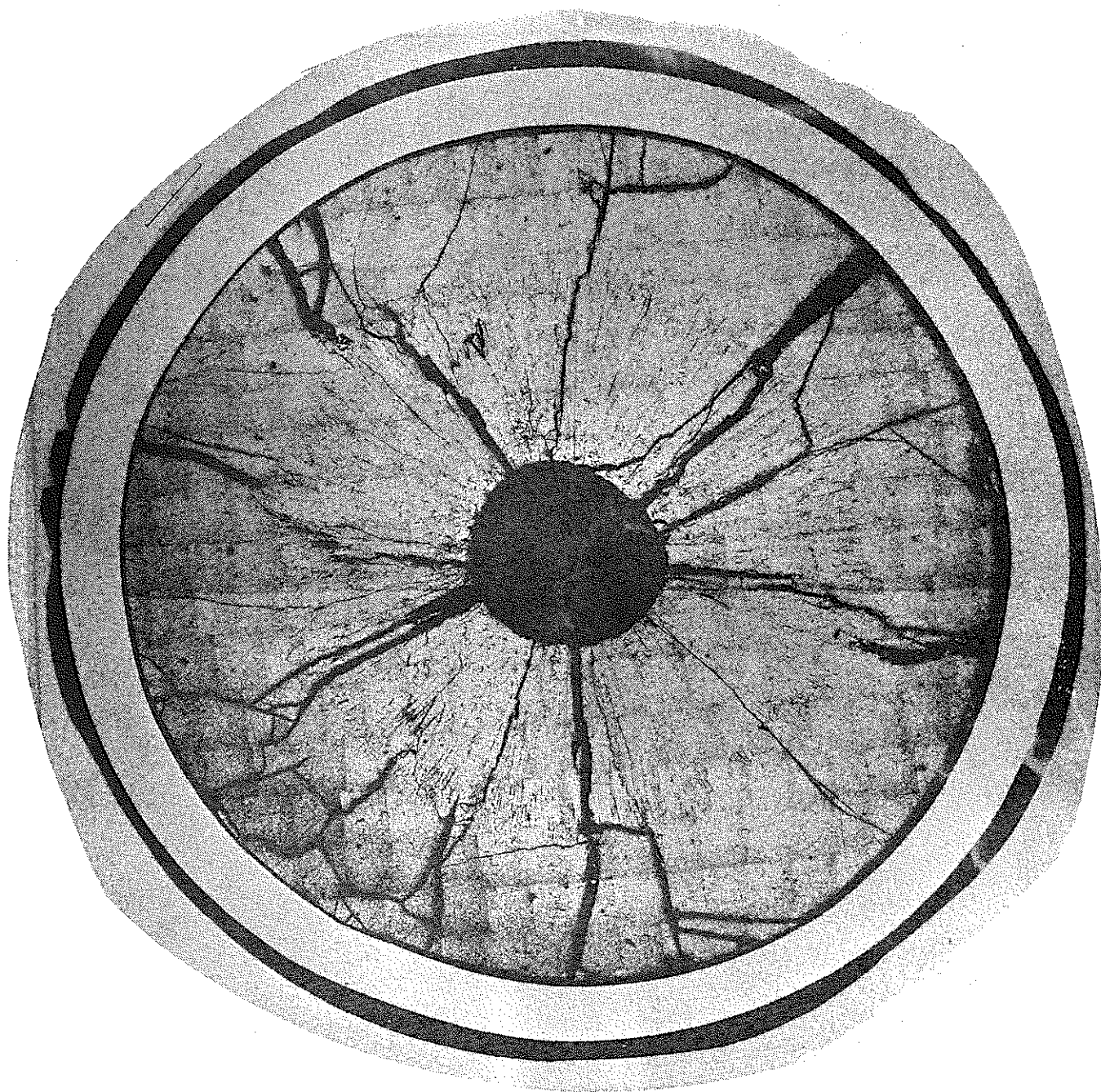


中間部



中心部

500 μ



照射炉：JRR-2

線出力：600 w/cm

直径：9.7 mmφ

照射孔：6C

燃焼度：942 MWD/T

被覆管：AISI 316

照射年月日：昭和47年11月6日

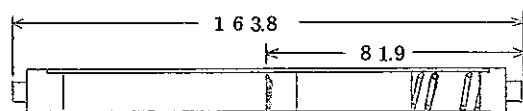
燃焼要素：UO₂

外径：11.4 mmφ

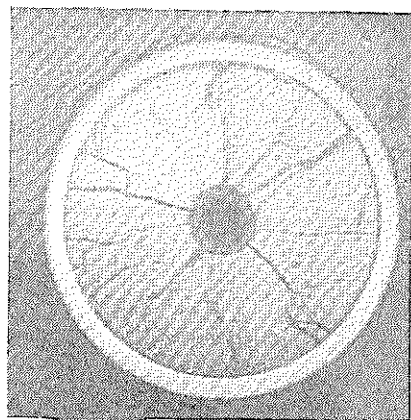
～11月18日

濃縮度：5.9 w/o

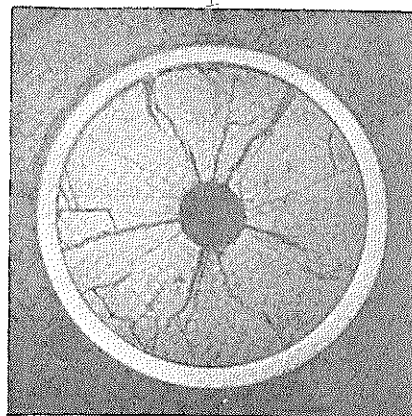
内径：10.0 mmφ



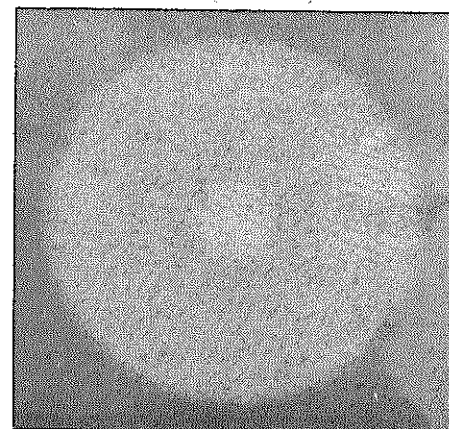
JRR-2 中心溶融実験（IT-2 カプセル）



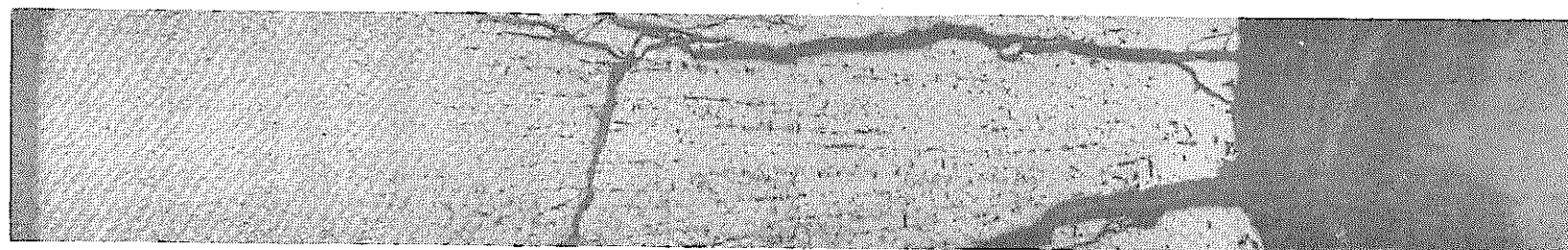
マクロ (エッチ前)



マクロ (エッチ後)



β - γ オートラジオグラフィー



500 μ

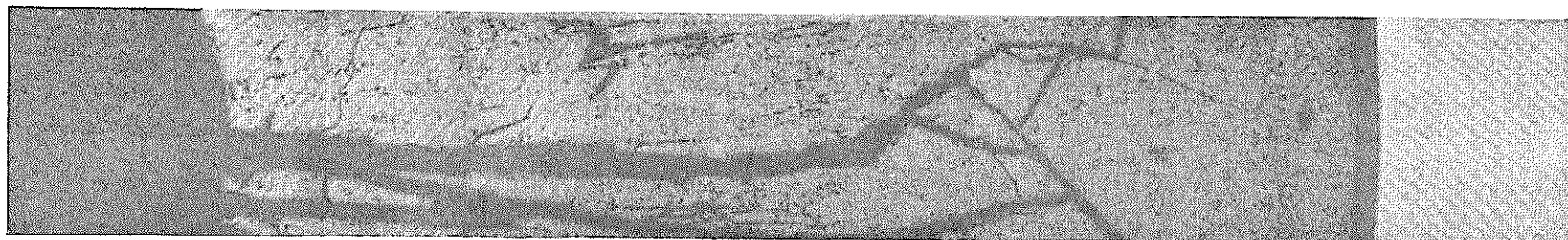
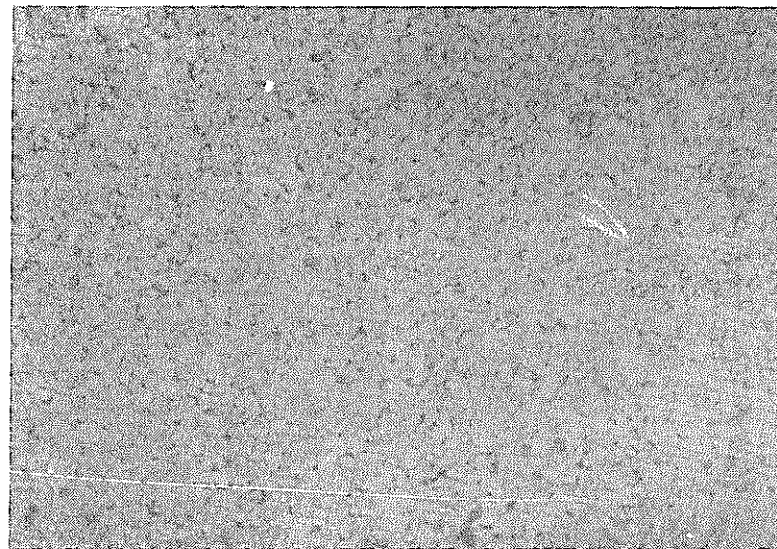
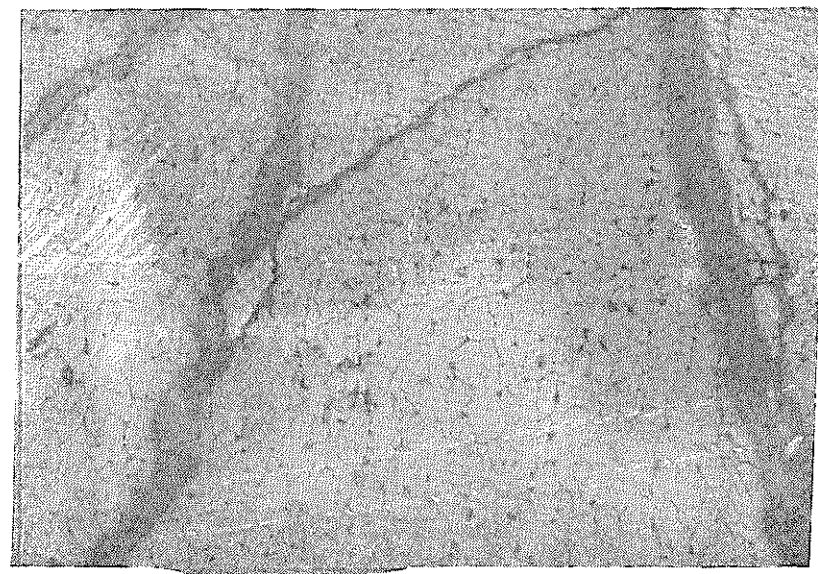


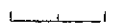
写真 - 8 IT-2 カプセル (M-3 ピン) 切断位置 A



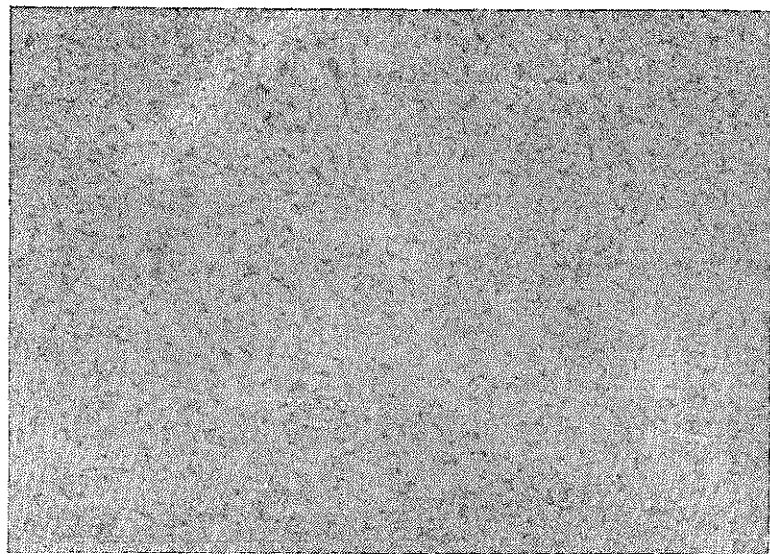
外 周 部



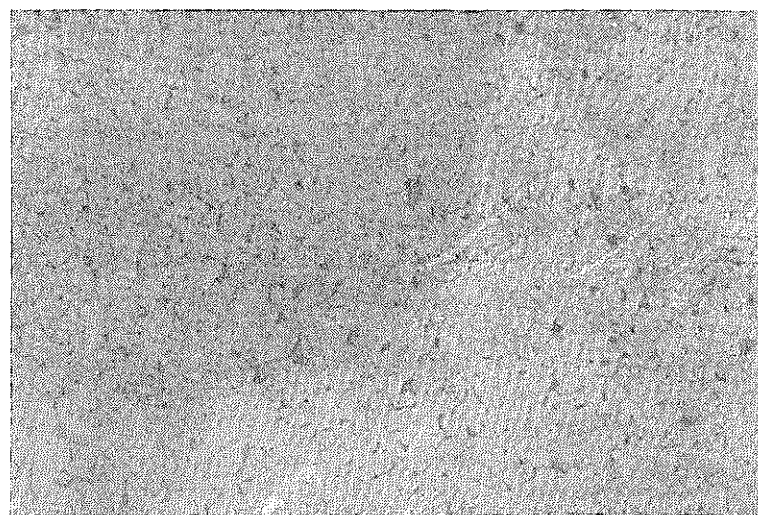
中 間 部



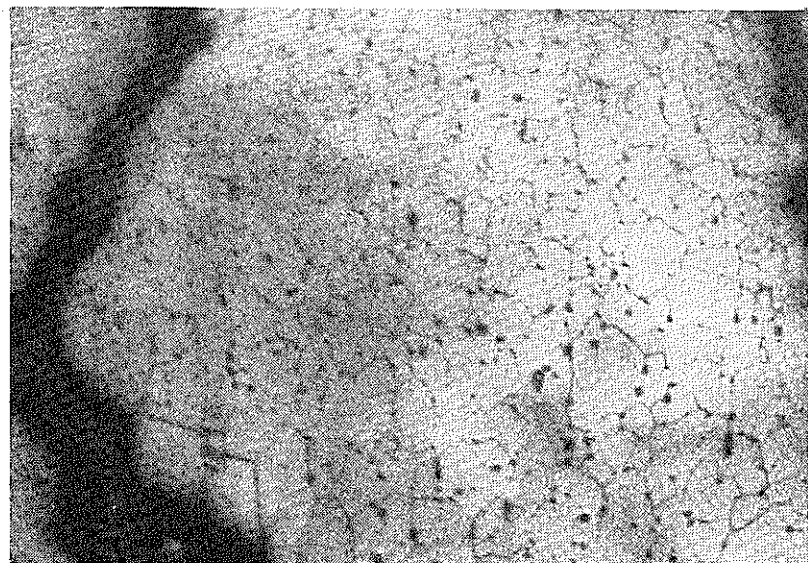
500 μ m



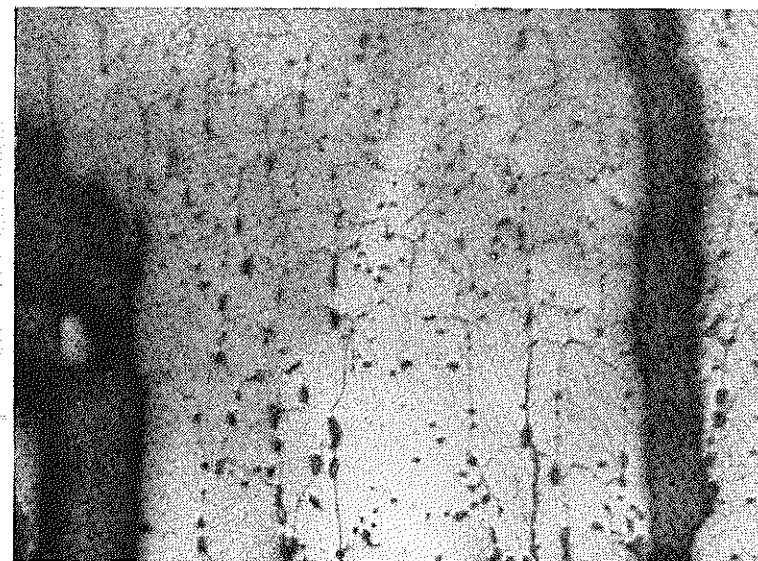
外 周 部



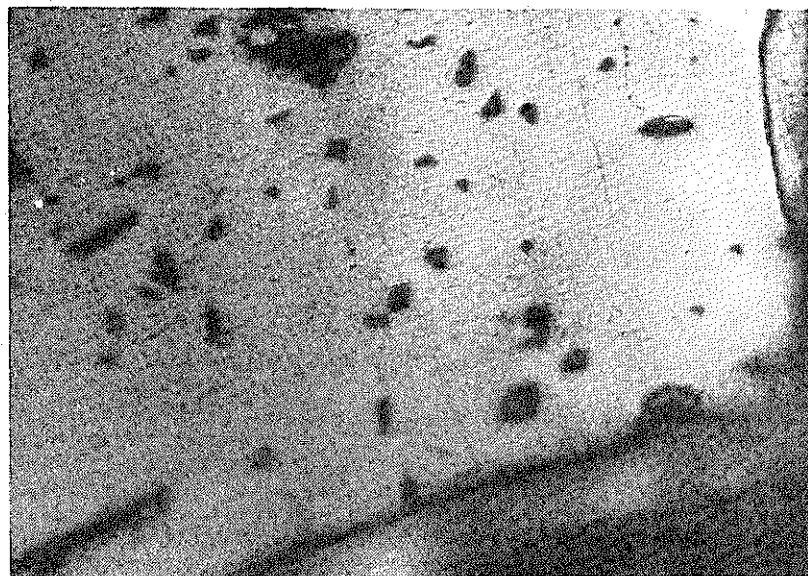
中 間 部



中間部

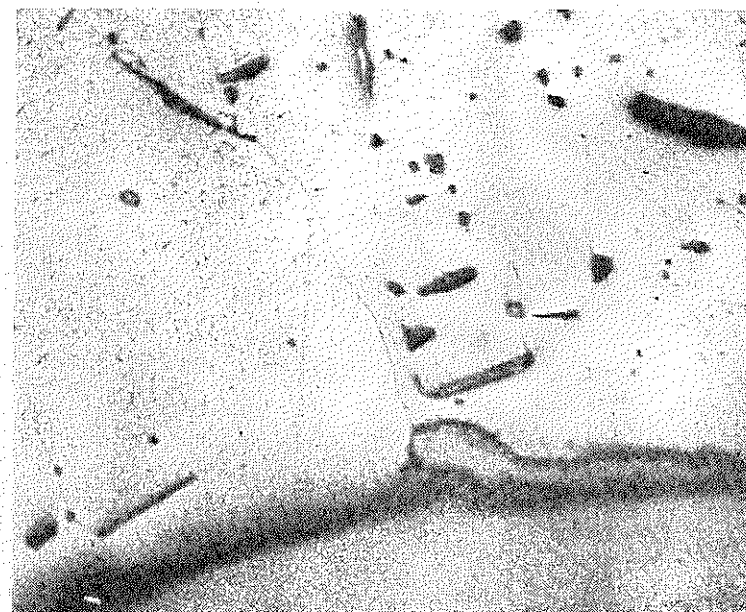


中間部

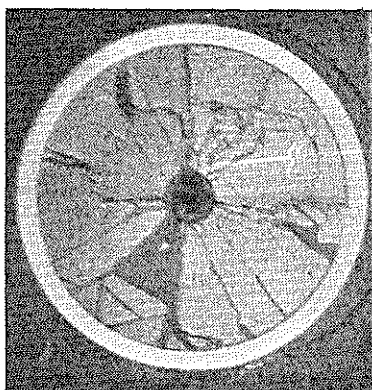


中心部

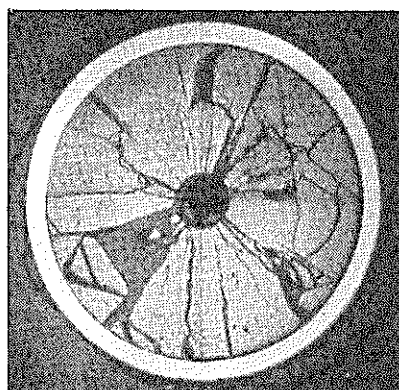
500 μ



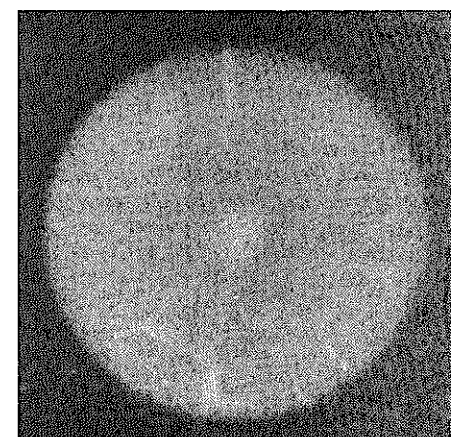
中心部



マクロ (エッチ前)



マクロ (エッチ後)



β - γ オートラジオグラフィー



500 μ

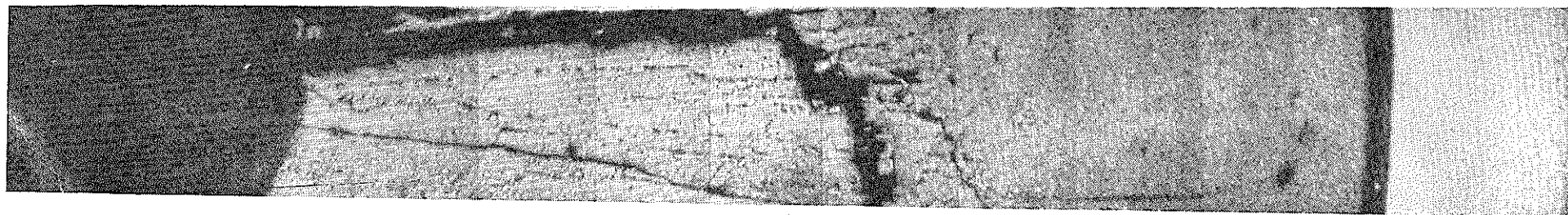
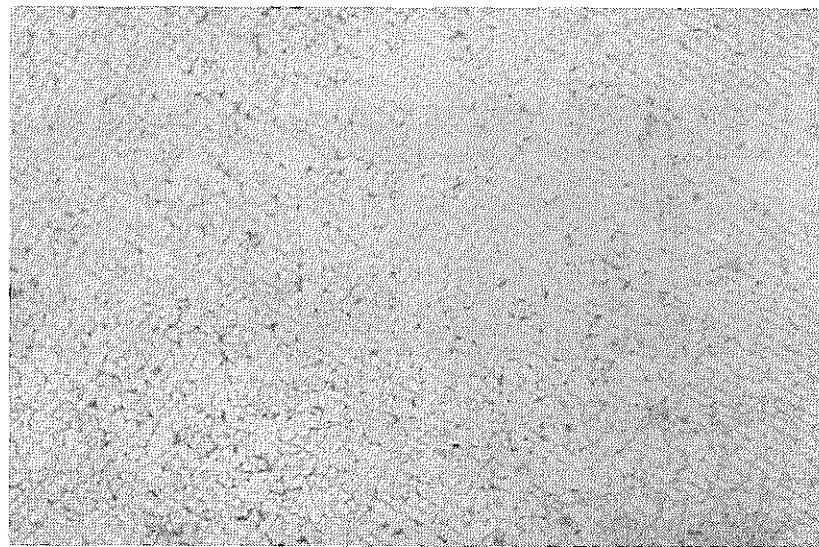


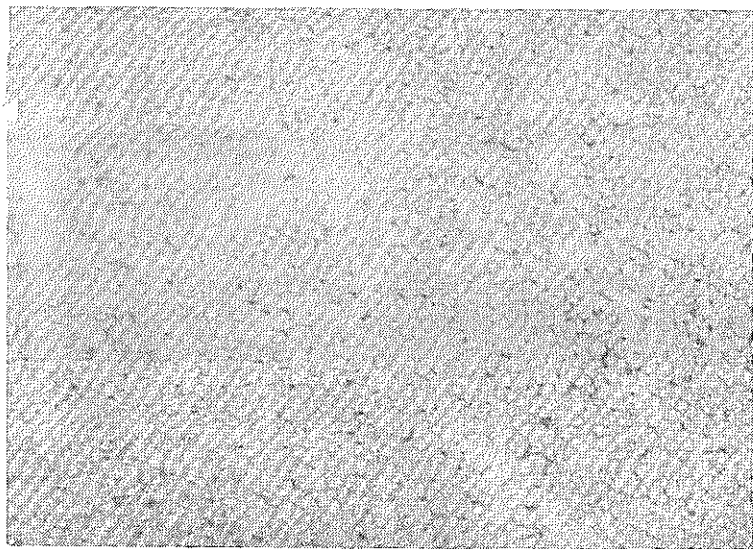
写真 - 9 IT-2 カプセル (M - 3 ピン) 切断位置 B



外 周 部



中 間 部

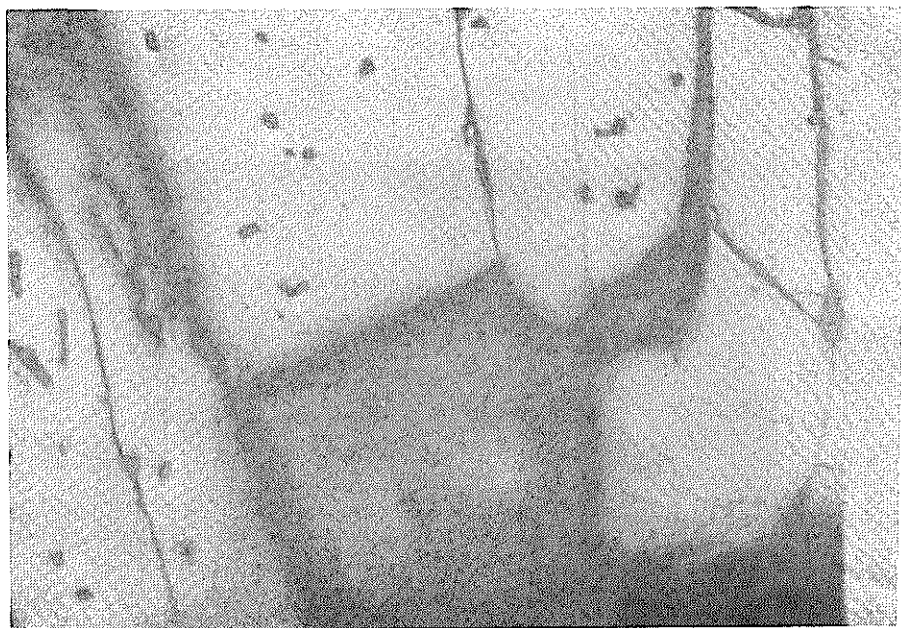


外 周 部

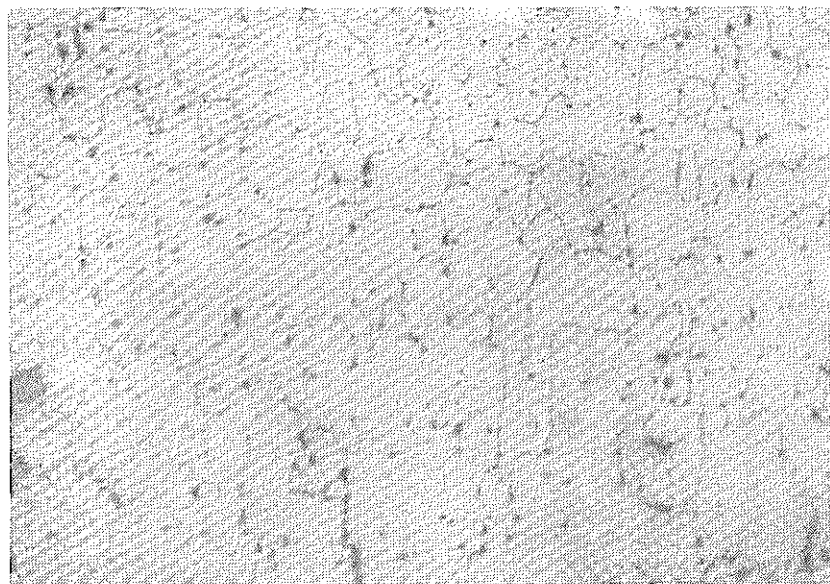


中 間 部

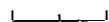
500 μ



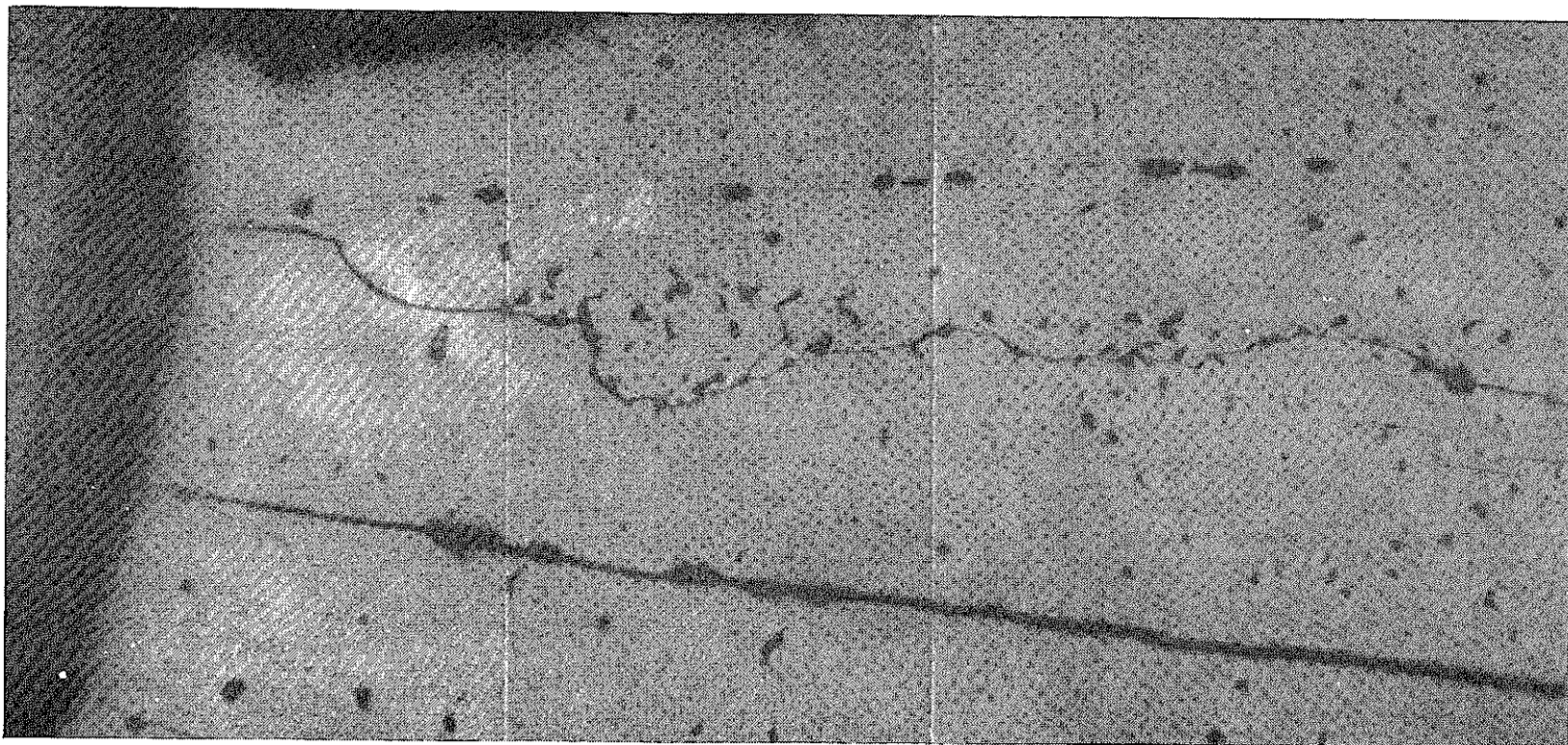
中 心 部



中 間 部



500 μ



中心部

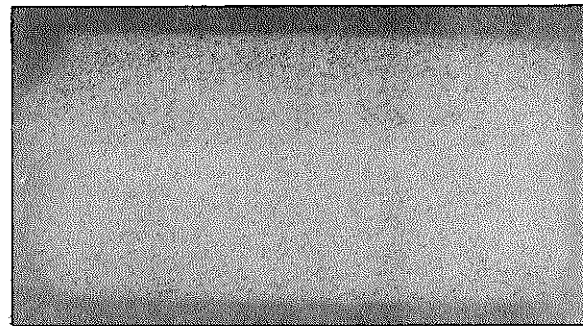
500 μ



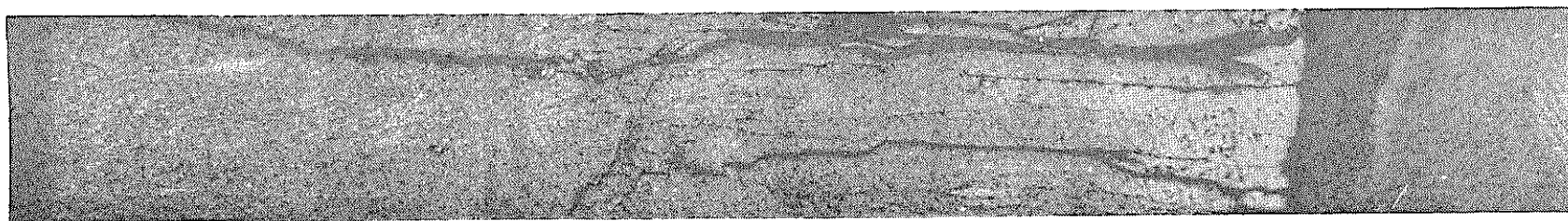
マクロ (エッチ前)



マクロ (エッチ後)



$\beta - \gamma$ オートラジオグラフィー



500 μ

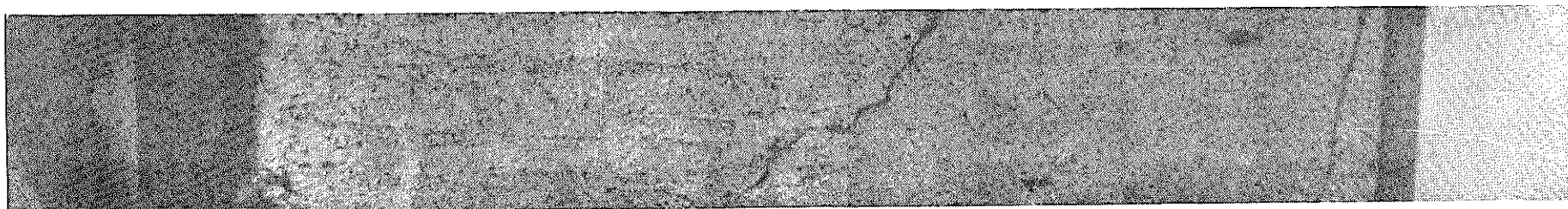
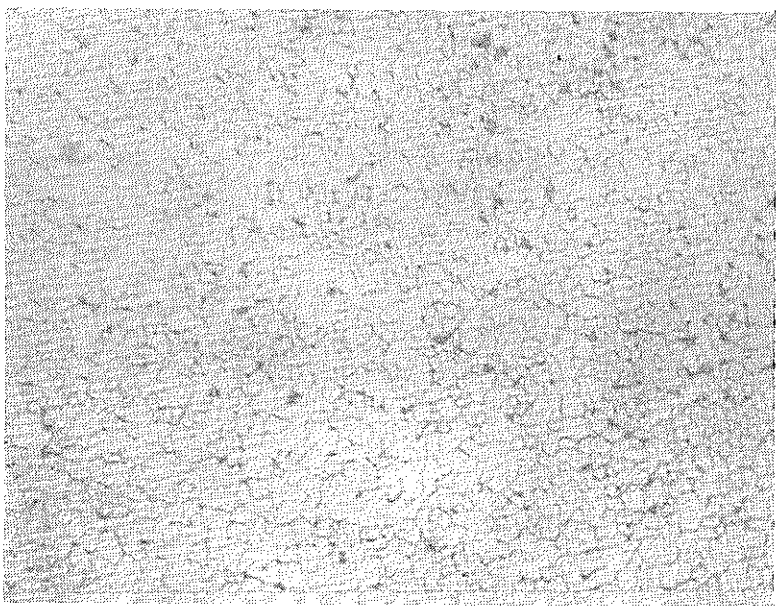
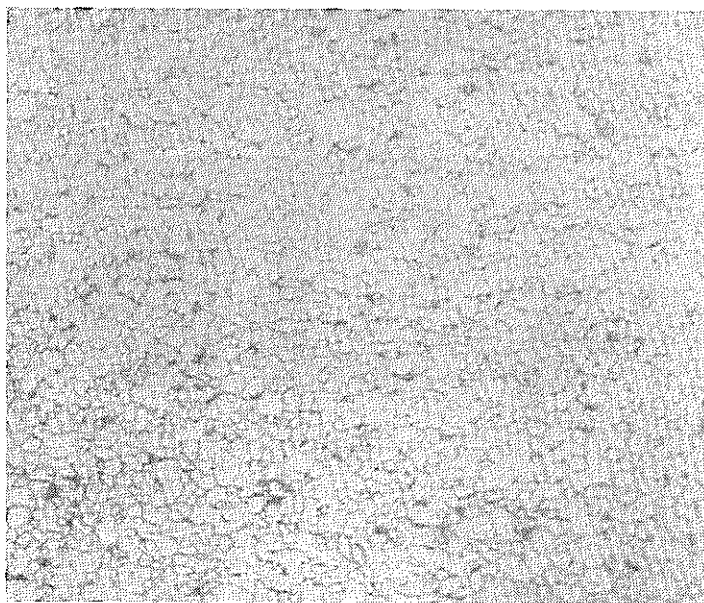
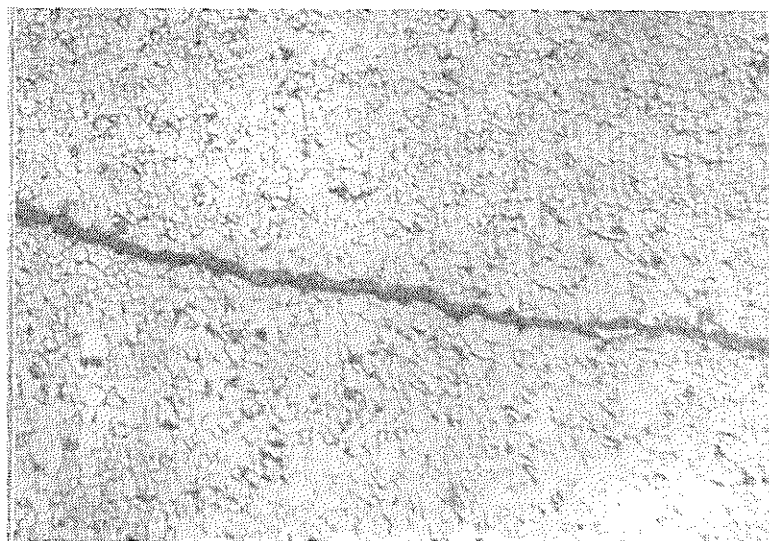


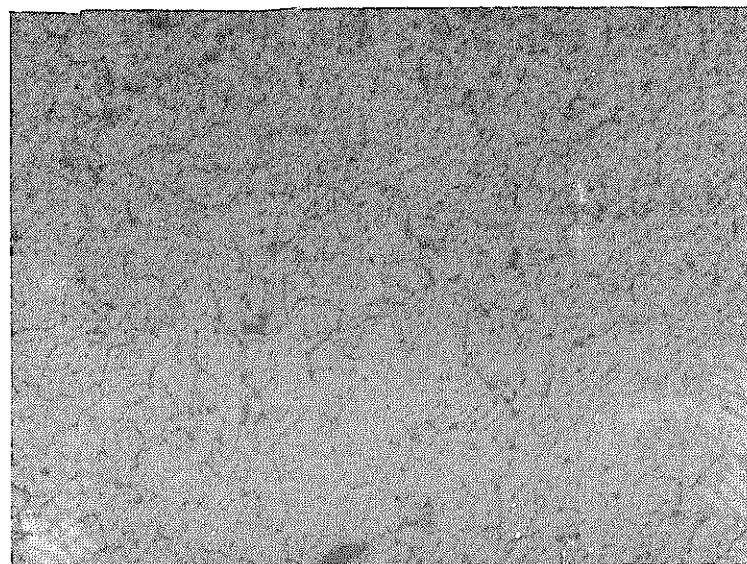
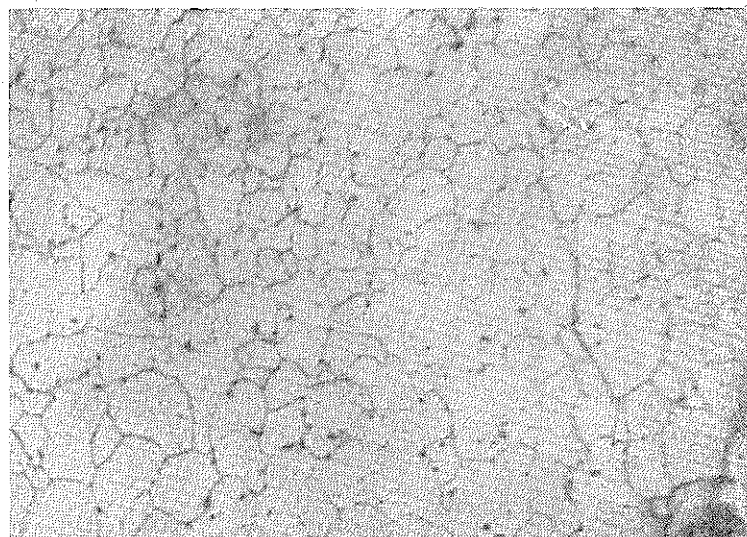
写真-10 IT-2 カプセル (M-3 ピン) 切断位置 C



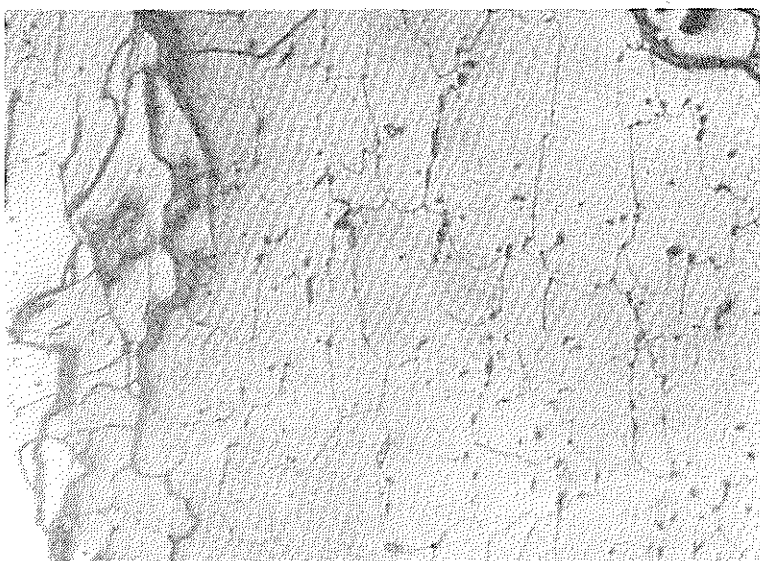
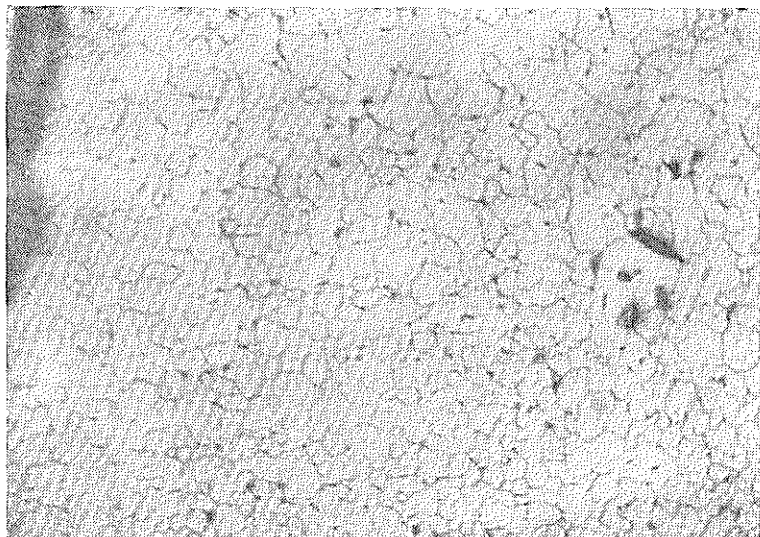
外 周 部



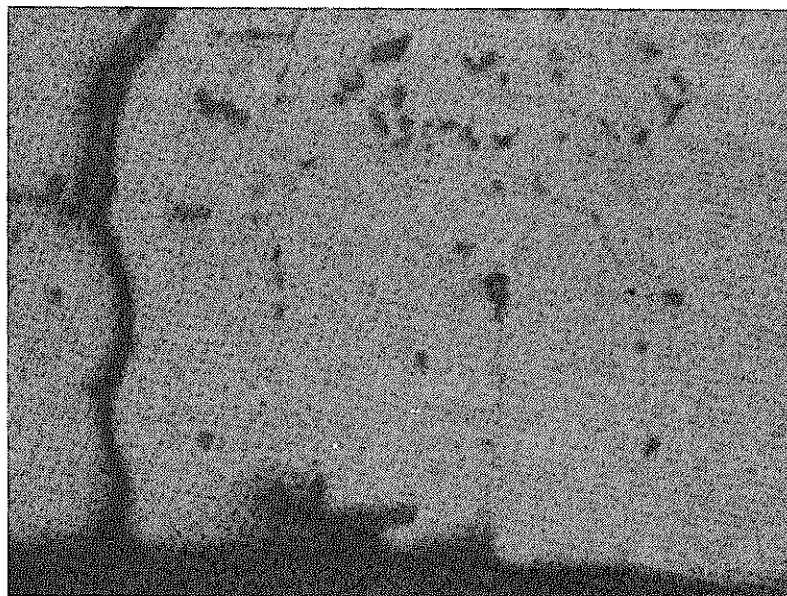
500 μ



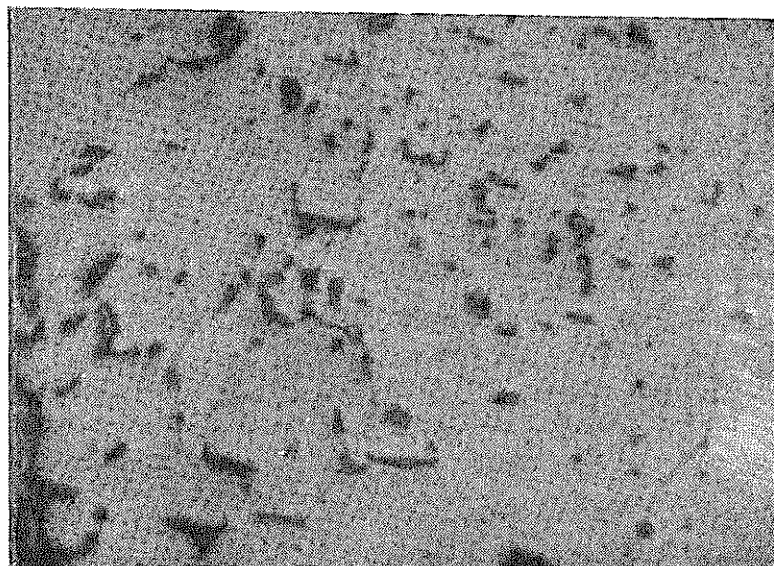
中間部



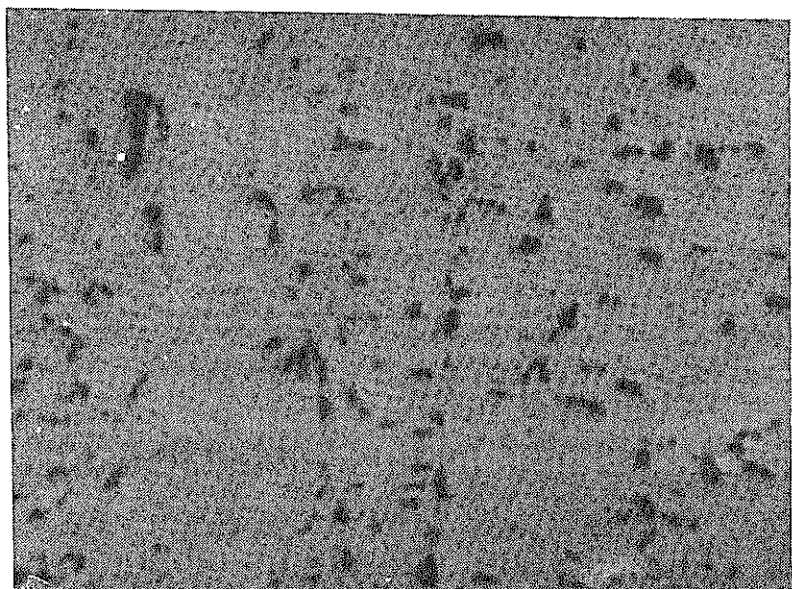
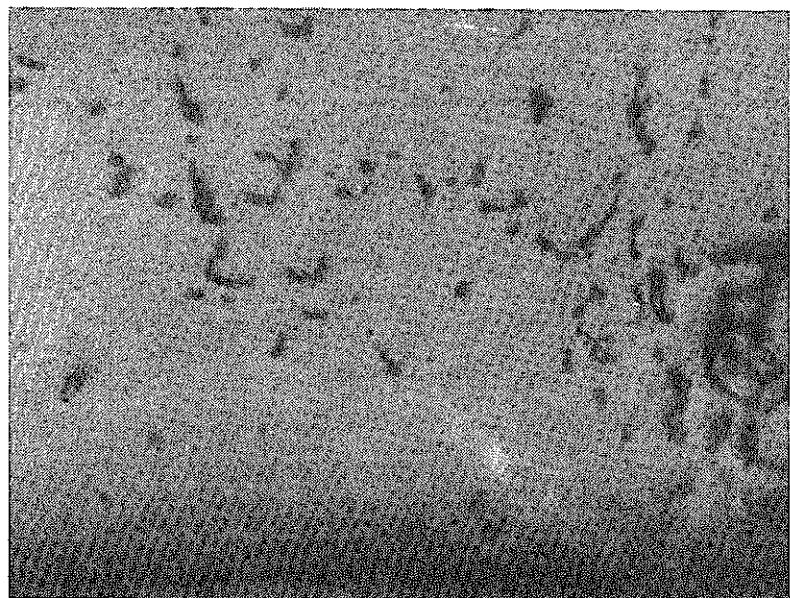
500 μ



中心部



500 μ



ボイド分布及び密度分布

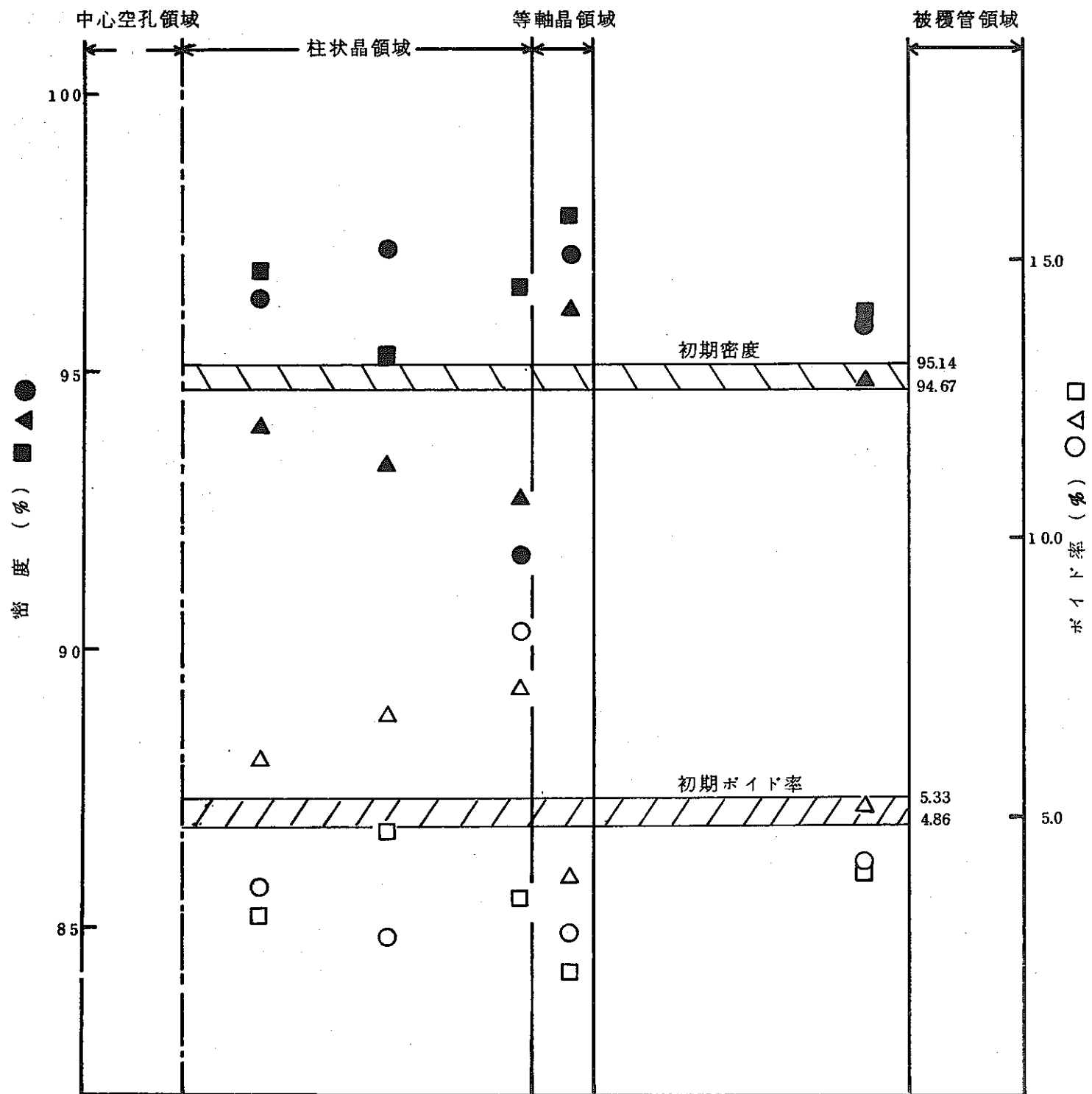


図-5 IT-1カプセル(M-1ピン)切断位置; B

ポイド分布及び密度分布

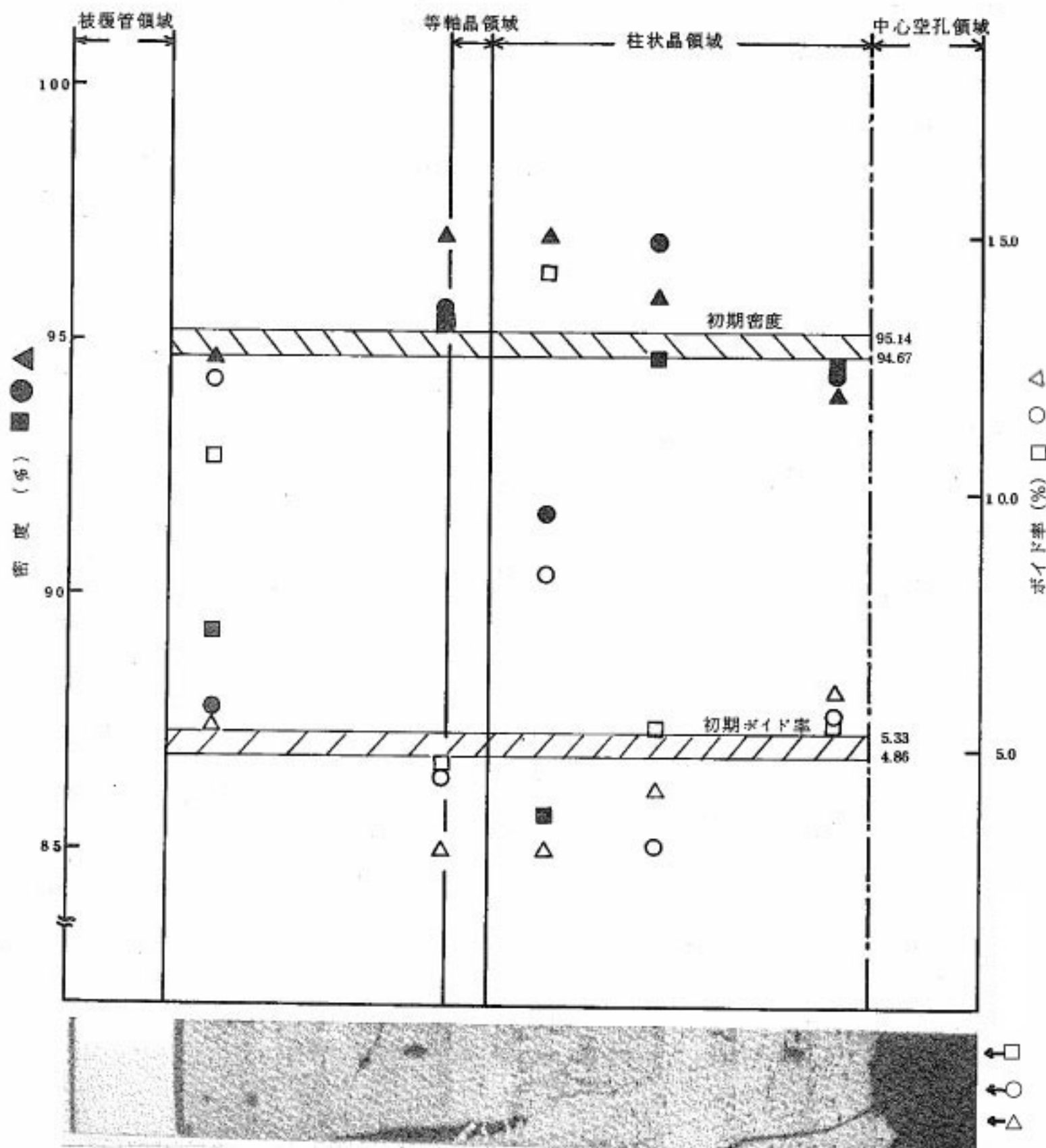


図-6 IT-1カプセル(M-1ピン)切断位置; B

ポイド分布及び密度分布

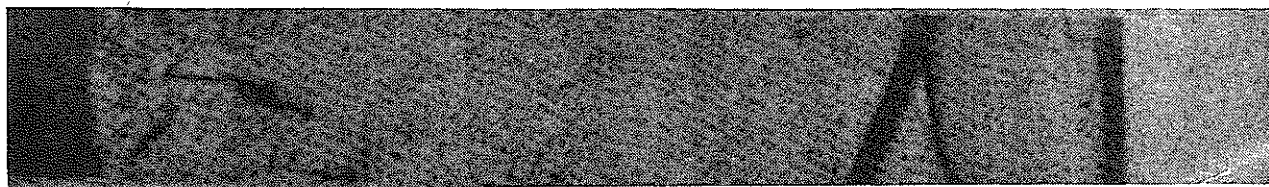
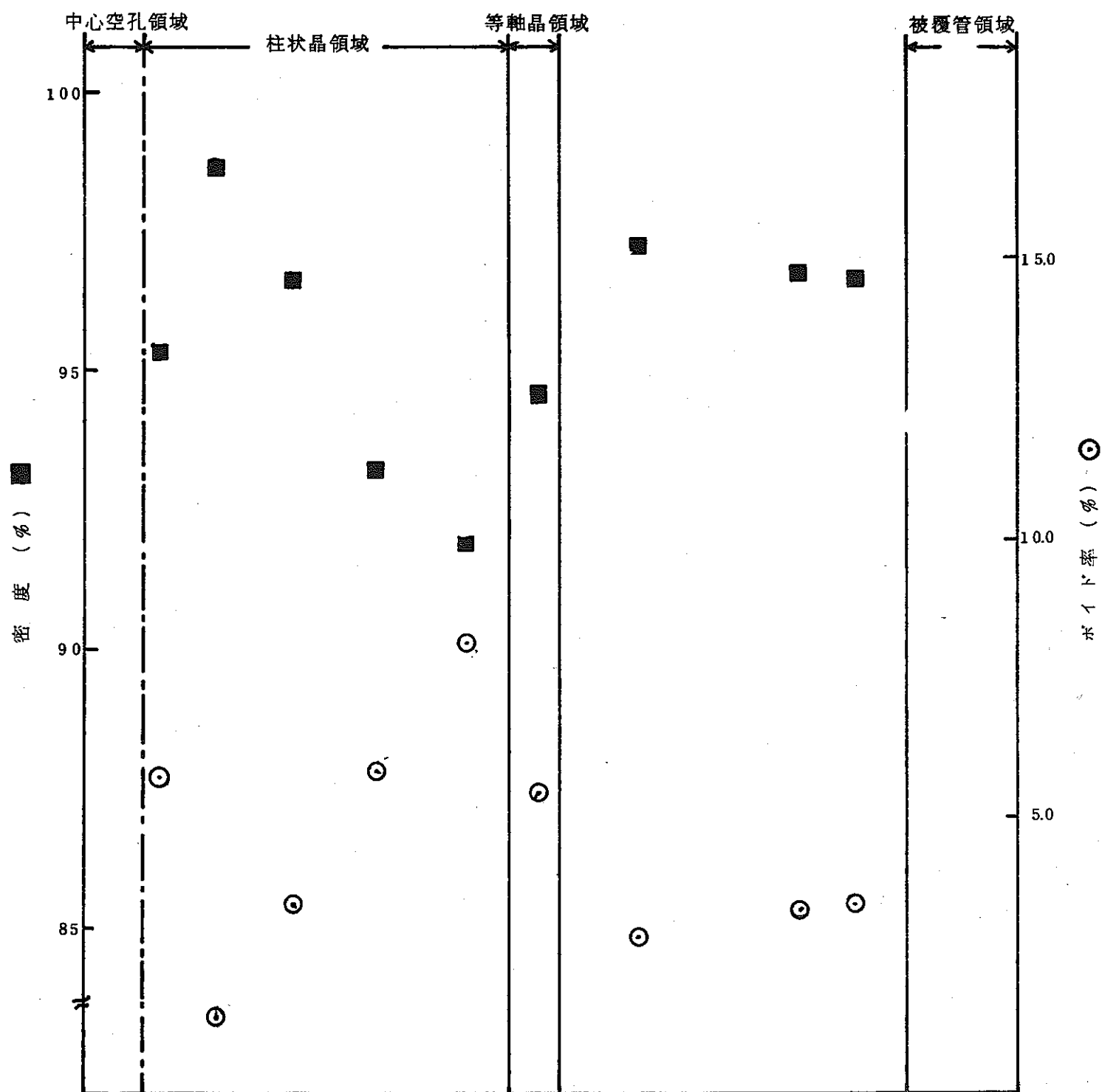


図-7 IT-1カプセル (M-1ピン) 切断位置; C

ポイド分布及び密度分布

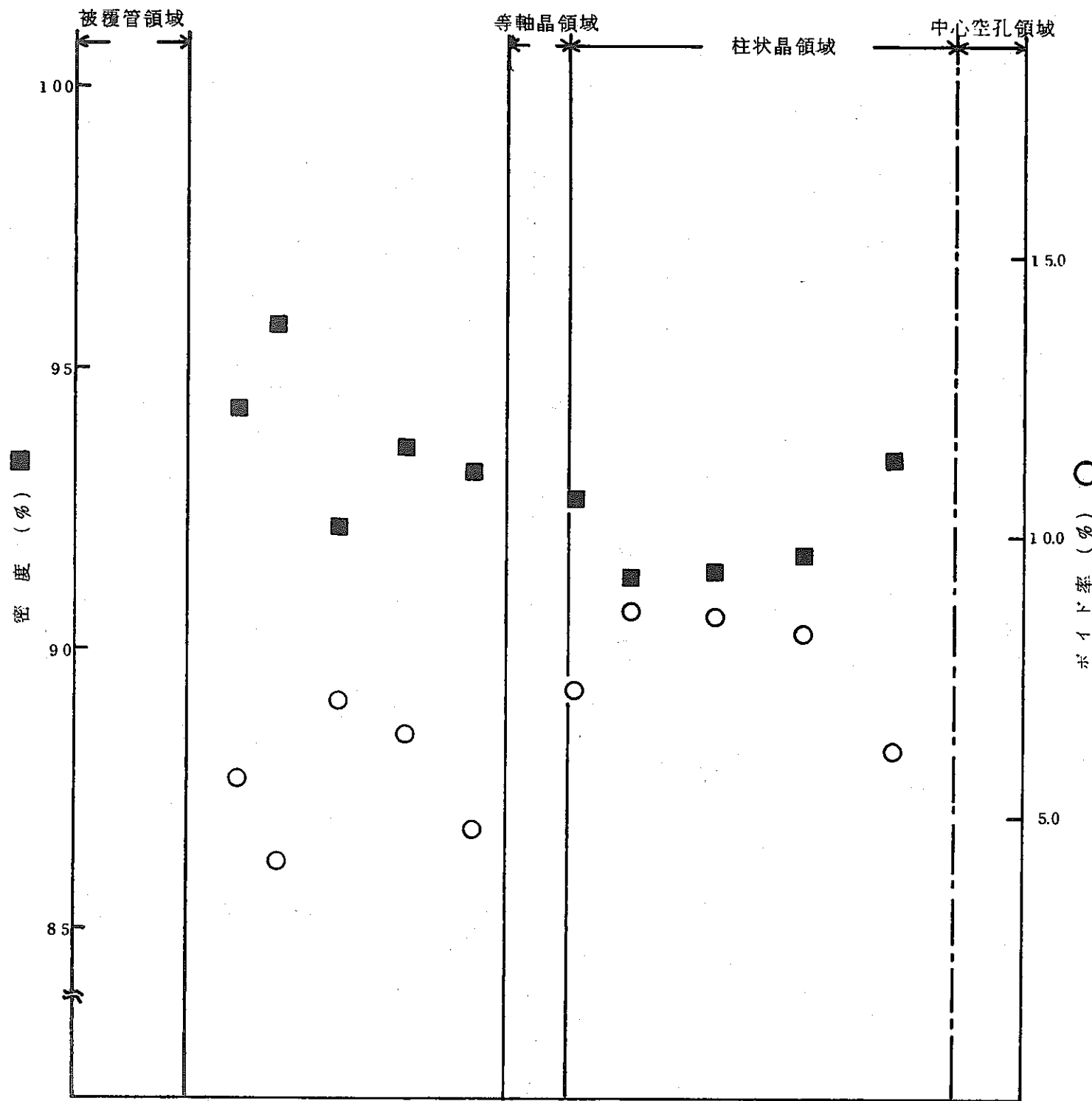


図-8 IT-1カプセル (M-1ピン) 切断位置 ; C

ポイド分布及び密度分布

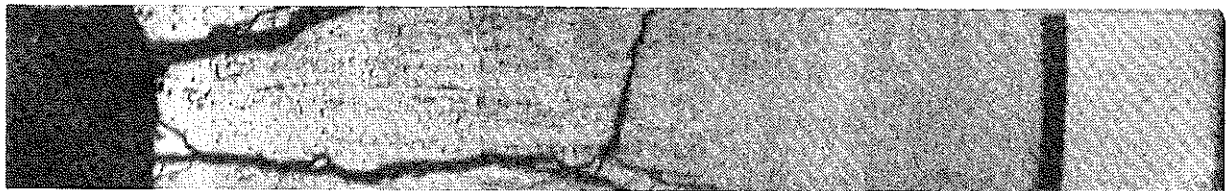
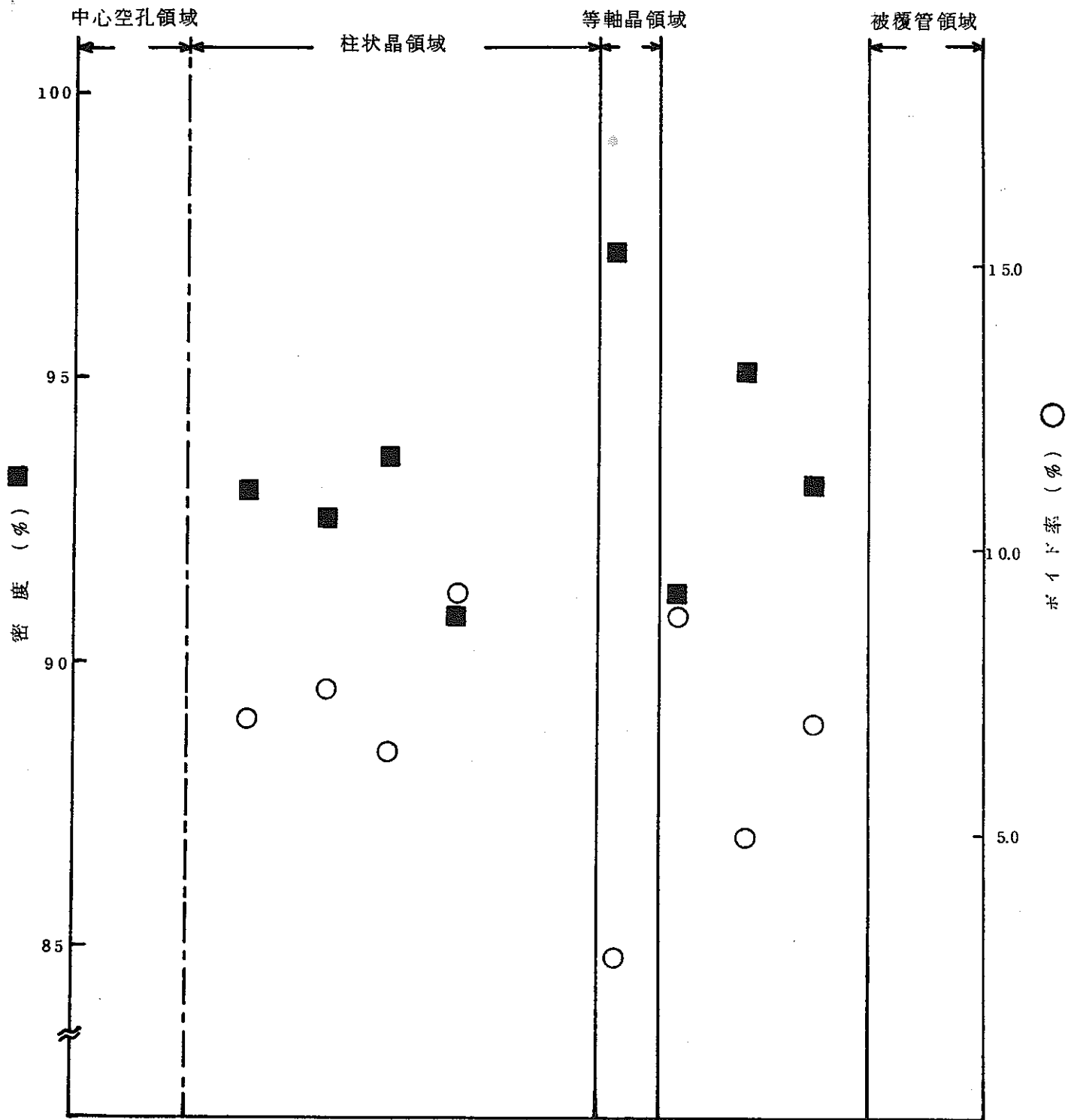


図-9 IT-2 カプセル (M-3 ピン) 切断位置 ; A

ポイド分布及び密度分布

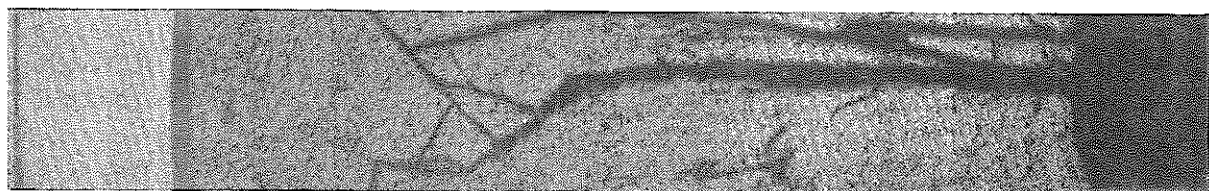
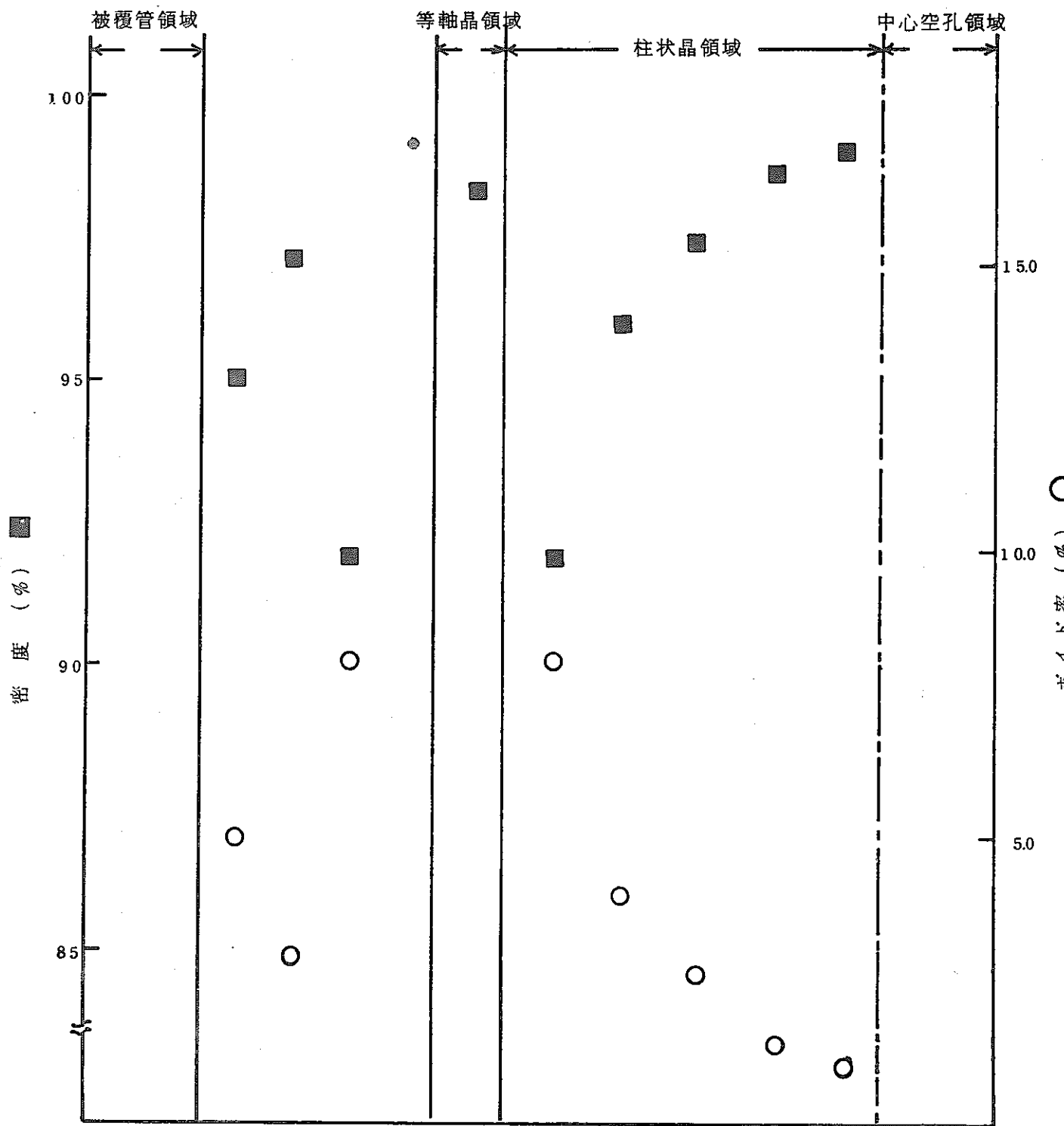


図-10 IT-2 カプセル (M-3 ピン) 切断位置 ; A

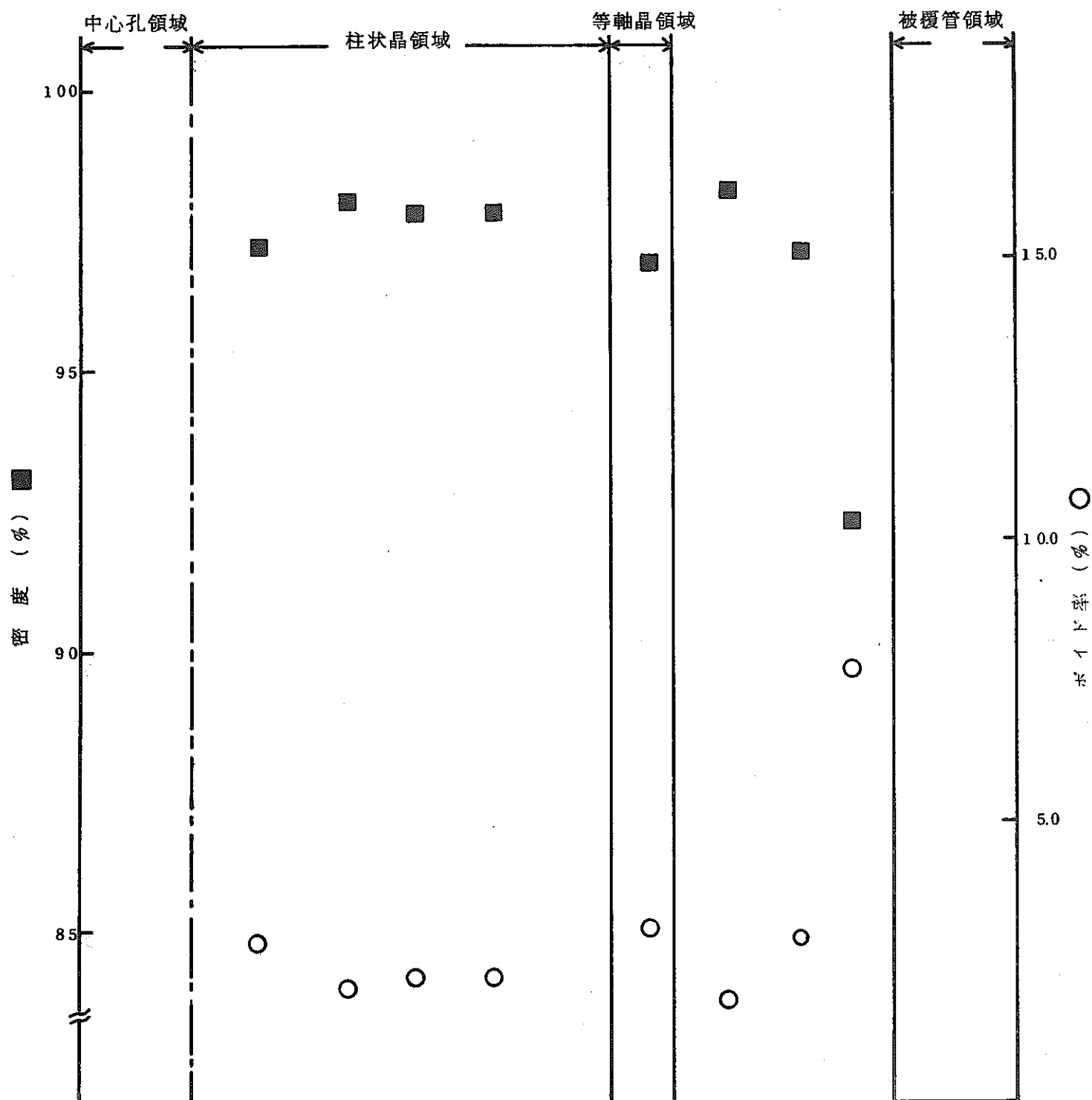


図-11 IT-2カプセル (M-3ピン) 切断位置: B

ポイド分布及び密度分布

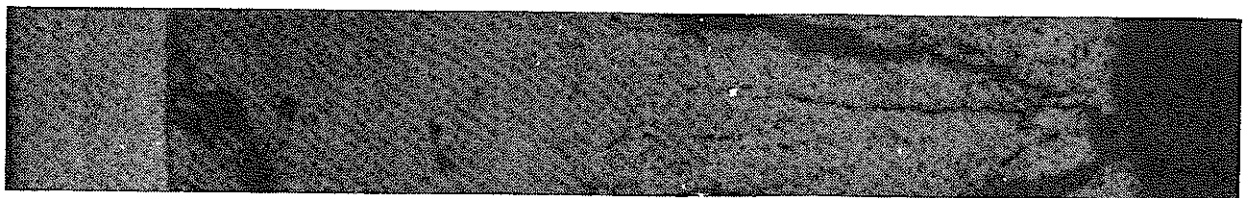
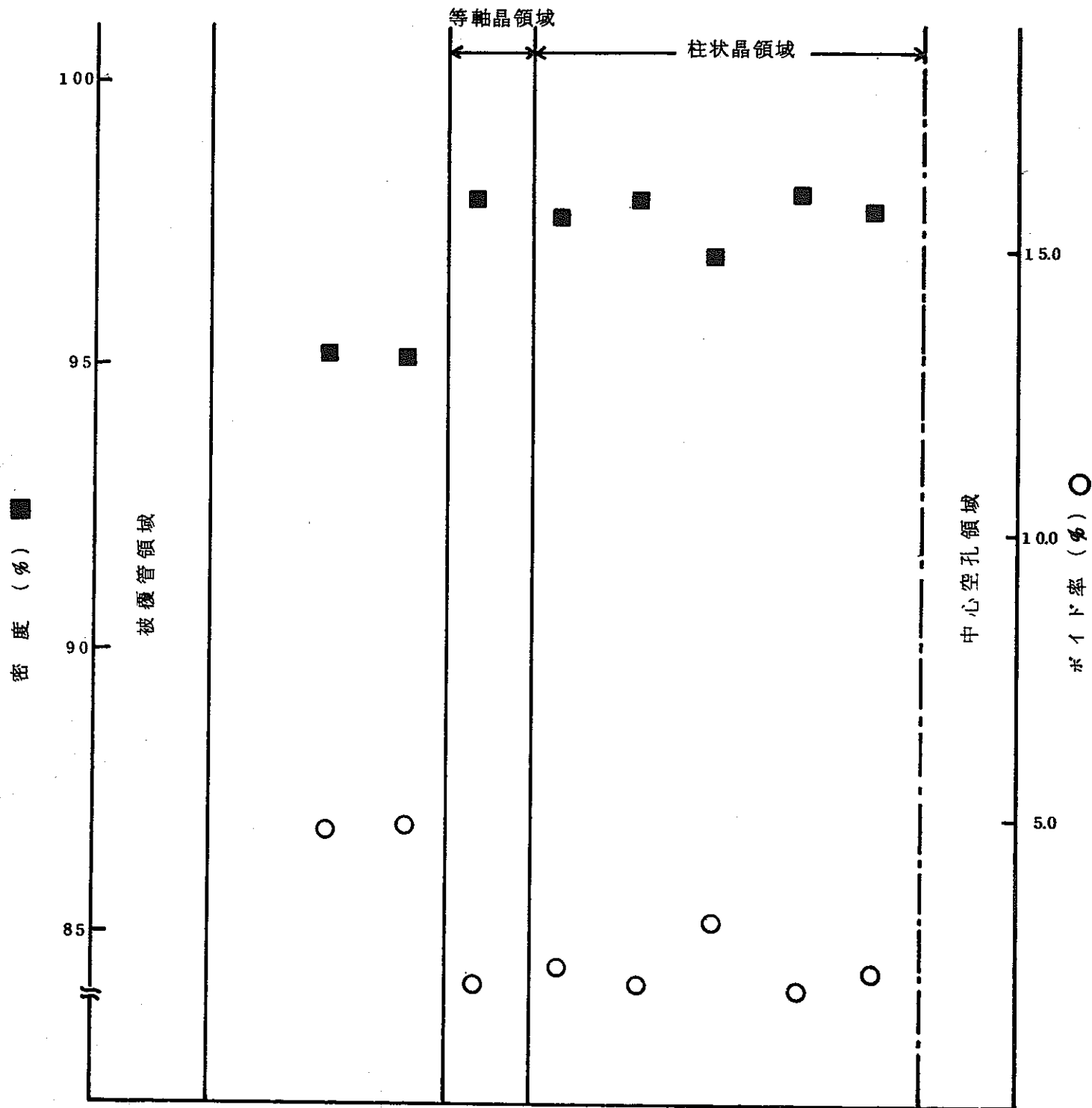


図-12 IT-2 カプセル (M-3 ピン) 切断位置 ; B

ポイド分布及び密度分布

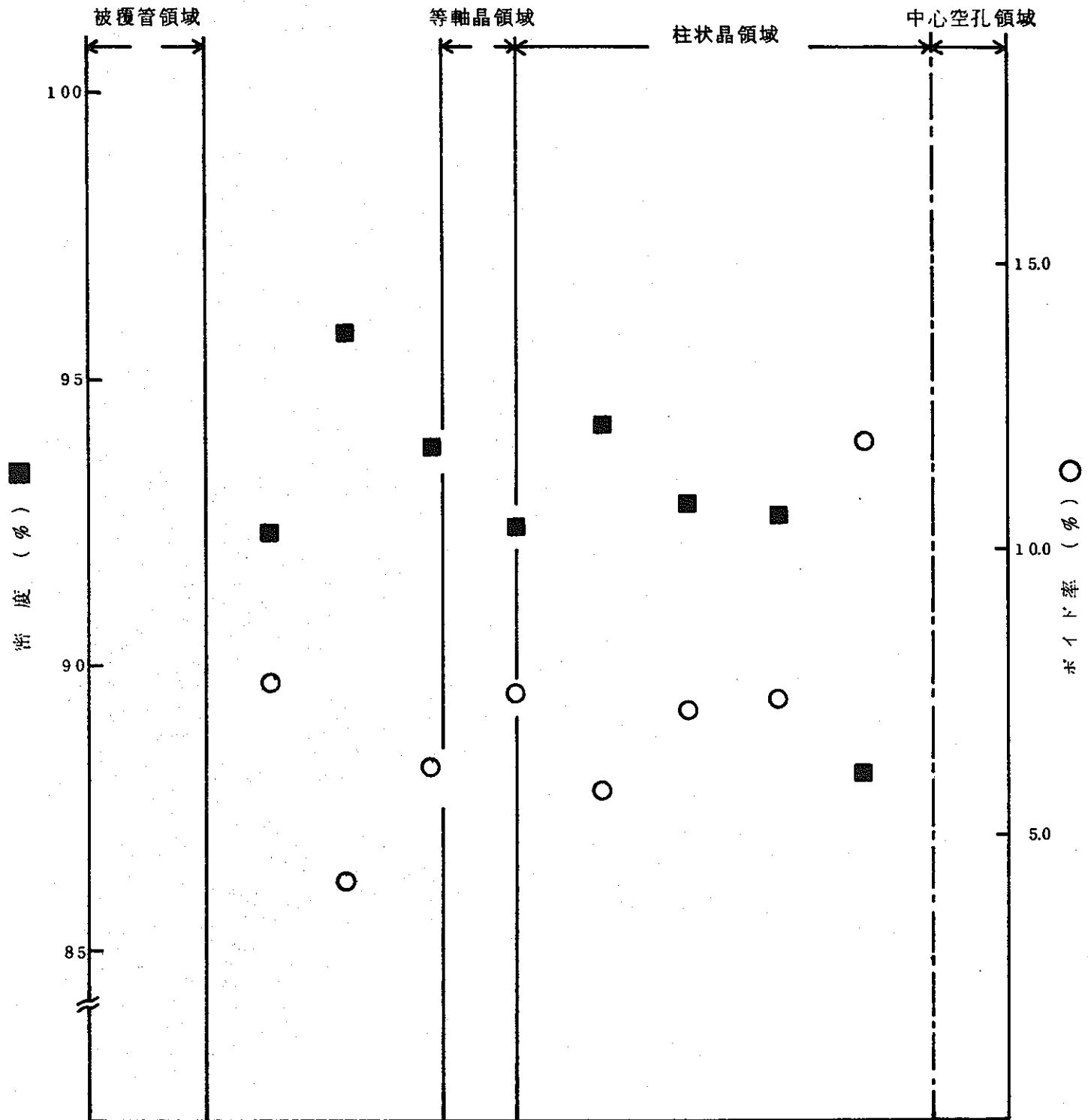


図-13 IT-2カプセル (M-3ピン) 切断位置; C

ポイド分布及び密度分布

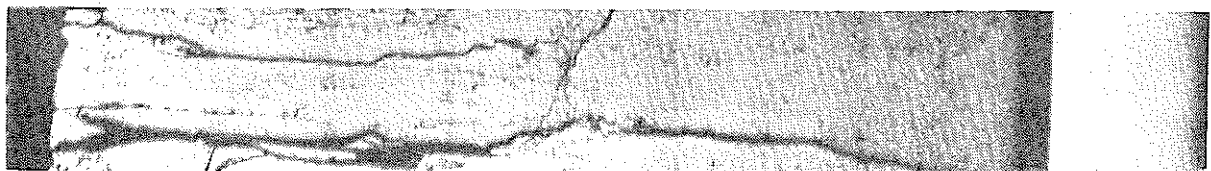
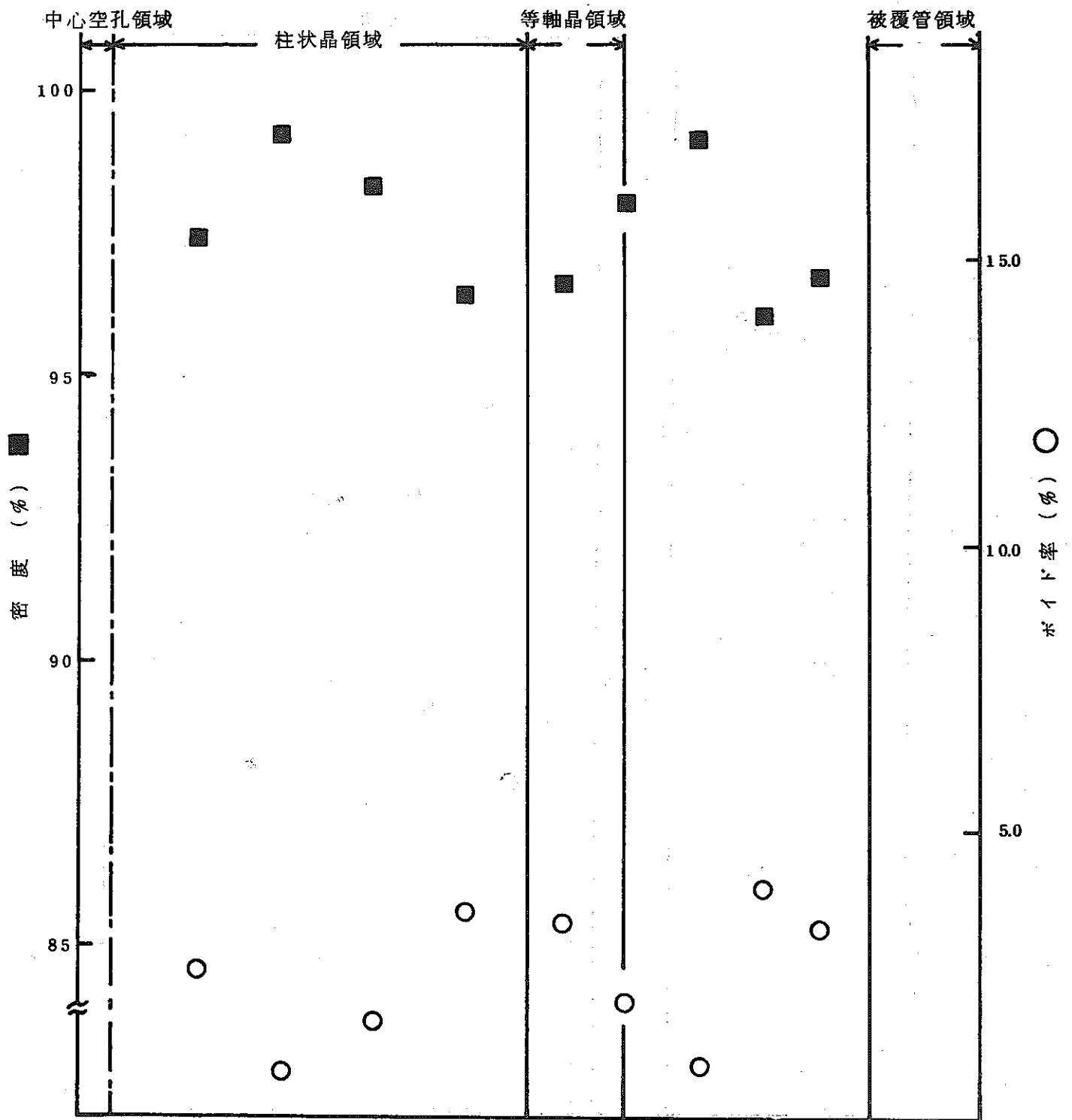


図-14 IT-2カプセル(M-3ピン)切断位置:C

Ⅱ 照射後解析

照射後解析の項目は、1) 線出力と燃焼度の評価、2) M-1, M-3 ビン内組織変化の相違、の2つに大別し報告する。

Ⅱ-1 線出力履歴の評価

Ⅱ-1-1 フラックスモニターワイヤーからの線出力評価

IT-1, IT-2 カプセルには、各々3本のフラックスモニターワイヤーが装着されていた。このワイヤーの分析結果よりフラックス ($f \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$) を算出した。その結果を、以下に示す。

ホットラボからのデータは、照射後試験の項に記したが、 ci/gr の単位で報告されている。ここでの重量は、 Co の重量である。

フラックスモニターワイヤーからのフラックスは、次のようにして求められる。

^{60}Co のアクティビティーは、

$$A = N f \sigma (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'}$$

ここで、

A ; 生成放射能 ($\text{d} \cdot \text{p} \cdot \text{s/cm}^3$)

f ; 中性子束 ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$)

λ ; 壊変定数 (sec^{-1})

t ; 照射時間 (sec)

N ; Co の原子数密度 (n/cm^3)

σ ; 放射化断面積 (cm^2)

t' ; 冷却時間 (sec)

$A (\text{d} \cdot \text{p} \cdot \text{s})$ をキューリー数で表わすと

$$C (\text{ci/cm}^3) = \frac{A (\text{d} \cdot \text{p} \cdot \text{s/cm}^3)}{3.7 \times 10^{10}}$$

測定値は表一 に示す如く ci/gr で求めているので、 $C (\text{ci/cm}^3)$ と ci/gr Co の間の関係を求める必要がある。

$$\text{ci/gr Co} = C \cdot \text{gr Co/cm}^3$$

すなわちモニターワイヤー単位体積中のキューリー数をその中に含まれる Co の総重量で除すれば良い。

Co 単位重量当りのキューリー数を C 、またモニターワイヤー単位体積に含まれる Co の重量を W_{Co} とすると、

$$C = C \cdot W_{Co}$$

$$\begin{aligned} \text{よって } A (d \cdot p \cdot s / cm^2) &= 3.7 \times 10^{10} \cdot C \\ &= 3.7 \times 10^{10} \cdot C \cdot W_{Co} \end{aligned}$$

したがって

$$f = \frac{3.7 \times 10^{10} \cdot C \cdot W_{Co}}{N \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot e^{-\lambda t'}}$$

$$N = 0.001461 \times 10^{23}$$

$$\sigma = 38 \text{ barns } (T \cdot N \cdot A \cdot C)$$

$$\lambda = 0.693 / 5.2 \text{ 年}$$

$$t = 123 \text{ 日 (IT-1)}, 122 \text{ 日 (IT-2)}$$

$$t' = 206 \text{ 日 (IT-1)}, 178 \text{ 日 (IT-2)}$$

C, W_{Co} の測定値は表-2, 3 に示す。

以上の値を使って計算した結果を表-4 に示す。

表 4. Flux Monitor Wire からの flux (n/cm²·sec) の計算

Sample No.	c_i / gr	$\frac{c_i}{\text{cm}^2} = \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2} \times \frac{c_i}{\text{gr}}$	$A = \frac{c_i}{\text{cm}^2} \times 3.7 \times 10^{10}$	$(1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} N \sigma$	$f = \frac{A}{(1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} N \sigma}$
HL-733-1-1	1.4925	2.1379×10^{-2}	7.9102×10^8	2.3219×10^{-5}	3.4067×10^{13}
2	1.8268	$2.6168 \times "$	$9.6821 \times "$	"	4.1699×10^{13}
3	1.6221	$2.3235 \times "$	$8.5599 \times "$	"	3.6865×10^{13}
4	2.1203	$3.0372 \times "$	$11.2376 \times "$	"	4.8398×10^{13}
5	2.0741	$2.971 \times "$	$10.9927 \times "$	"	4.7343×10^{13}
HL-733-2-1	2.1667	$3.1037 \times "$	$11.4836 \times "$	2.3219×10^{-5}	4.9457×10^{13}
2	1.9227	$2.7541 \times "$	$10.1901 \times "$	"	4.3886×10^{13}
3	2.4646	$2.5304 \times "$	$13.0624 \times "$	"	5.6257×10^{13}
4	1.7887	$2.5622 \times "$	$9.4801 \times "$	"	4.0829×10^{13}
5	1.5903	$2.2780 \times "$	$8.4286 \times "$	"	3.6300×10^{13}
HL-733-3-1	2.1213	$3.0386 \times "$	$11.2428 \times "$	2.3219×10^{-5}	4.8420×10^{13}
2	2.1818	$3.1253 \times "$	$11.5636 \times "$	"	4.9802×10^{13}
3	2.2138	$3.1711 \times "$	$11.7330 \times "$	"	5.0531×10^{13}
4	2.1863	$3.1317 \times "$	$11.5872 \times "$	"	4.9903×10^{13}
5	1.9622	$2.8107 \times "$	$10.3995 \times "$	"	4.4788×10^{13}
HL-734-1-1	2.1703	$3.1088 \times "$	$11.5025 \times "$	2.2891×10^{-5}	5.0249×10^{13}
2	1.8318	$2.6239 \times "$	$9.7084 \times "$	"	4.2411×10^{13}
3	2.0480	$2.9336 \times "$	$10.8543 \times "$	"	4.7417×10^{13}
4	1.8975	$2.7180 \times "$	$10.0566 \times "$	"	4.3932×10^{13}
5	2.2759	$3.2601 \times "$	$12.0623 \times "$	"	5.2694×10^{13}

Sample No.	c_i / gr	$c_i / \text{cm}^3 = \text{gr} / \text{cm}^3 \times c_i / \text{gr}$	$A = c_i / \text{cm}^3 \times 3.7 \times 10^{10}$	$(1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t} N \sigma$	$f = A / (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t} N \sigma$
HL-734-2-1	2.0477	2.9332×10^{-2}	10.8528×10^8	22891×10^{-5}	4.7410×10^{13}
2	1.9124	$2.7394 \times "$	$10.1357 \times "$	"	4.4278×10^{13}
3	2.3049	$3.3016 \times "$	$12.2159 \times "$	"	5.3365×10^{13}
4	2.1637	$3.0994 \times "$	$11.4677 \times "$	"	5.0096×10^{13}
5	2.0947	$3.0005 \times "$	$11.1018 \times "$	"	4.8498×10^{13}
HL-734-3-1	2.3649	$3.3876 \times "$	$12.5341 \times "$	22891×10^{-5}	5.4755×10^{13}
2	1.9414	$2.7809 \times "$	$10.2893 \times "$	"	4.4949×10^{13}
3	2.5165	$3.6047 \times "$	$13.3373 \times "$	"	5.8264×10^{13}
4	1.9868	$2.8460 \times "$	$10.5302 \times "$	"	4.6001×10^{13}
5	2.1057	$3.0163 \times "$	$11.1603 \times "$	"	4.8754×10^{13}

フラックス計算結果より線出力を求めると、線出力 q (w/cm) は、SN841-73-01 のレポートにより

$$\text{IT-1 カプセル}; q = 0.58938 \times 10^{-11} \times \Phi_u$$

$$\text{IT-2 カプセル}; q = 0.56987 \times 10^{-11} \times \Phi_u$$

の式により求めることができる。ここで、 Φ_u (unperturbed flux) は、 D_2O 、 H_2O 領域の外側でのフラックスを意味する。(SN841-73-01 参照のこと)

フラックスモニターワイヤーでのフラックス測定位置は、AL-SUS 共引き管のカプセル外筒内側である。したがって Φ_u の値は、フラックスモニターワイヤーからのフラックスを f_w とすると、

$$\text{IT-1 カプセル}; \Phi_u = f_w \times 1.52$$

$$\text{IT-2 カプセル}; \Phi_u = f_w \times 1.49$$

となる。1.52, 1.42 の値は、カプセル内フラックス分布 (SN841-73-01 参照) より、フラックスモニターワイヤー計装位置のフラックスと D_2O 、 H_2O の外側でのフラックスの比を取ったものである。

以上により、計算した結果を表-5 に示す。

表 5. 線出力計算結果

Sample No	$f (w/cm^2 \cdot sec)$ $\times 10^{13}$	Rod power (w/cm)
733-1-1	3.4067	305.2
2	4.1699	373.6
3	3.6865	330.3
4	4.8398	433.6
5	4.7343	424.1
733-2-1	4.9457	443.1
2	4.3886	393.2
3	5.6257	504.0
4	4.0829	365.8
5	3.6300	325.2
733-3-1	4.8420	433.8
2	4.9802	446.2
3	5.0531	452.7
4	4.9903	447.1
5	4.4788	401.2
734-1-1	5.0249	426.7
2	4.2411	360.1
3	4.7417	402.6
4	4.3922	372.9
5	5.2694	447.4
734-1-1	4.7410	402.6
2	4.4278	376.0
3	5.3365	453.1
4	5.0096	425.4
5	4.8498	411.8
734-1-1	5.4755	464.9
2	4.4949	381.7
3	5.8264	494.7
4	4.6001	390.6
5	4.8754	414.0

II-1-2 熱電対からの線出力評価との比較

熱電対からの線出力評価は、第2報に報告済みである。今回は、モニタリングワイヤーからの線出力評価との比較を行なった。平均線出力で表わすと、表-6のようになる。

表-6

照射カプセル	IT-1カプセル(M-1ピン)	IT-2カプセル(M-3ピン)
フラックスモニターワイヤー	405.3 w/cm	415.0 w/cm
熱電対	609.4 w/cm	595.2 w/cm

以上の結果のように、フラックスモニターワイヤーからの線出力と熱電対からの線出力計算結果に約200 w/cmの違いがある。また、フラックスモニターワイヤーの測定結果で図-2, 3の様に燃料中心部が低い値を示している。これは金相試験結果と比較し逆の結果となる。

前項の線出力の違いは、ホットラボでのサンプリングが数ミリグラム程度の量であったため、測定誤差が大きいと思われる。また後者の燃料中心部のフラックスが小さくなっているのは、原子炉運転時のコントロールロッドの操作によりこのようなパターンになることがわかった。

II-2 IT-1(M-1ピン), IT-2(M-3ピン)カプセル内組織変化

II-2-1 IT-1(M-1ピン)カプセル

(1) 切断位置A部

中心空孔、柱状晶が良く発達している。柱状晶内のレンズ状ボイドは少ない。中心空孔は偏心がなくペレット中央に円形に存在している。また等軸晶と柱状晶の境界に葉巻状ボイドが存在している。

照射初期に入ったと思われるクラックは、照射途中で再焼結し、レンズ状ボイドの移動が見られる。ペレット中心部は、高密度になっている。また円形のボイドやレンズ状ボイドも存在し、多少ヘアークラックも存在する。この位置でも高温を経験したことが予想される。

(2) 切断位置B部

中心空孔、柱状晶は切断位置A部よりも大きく発達している。柱状晶内のレンズ状ボイドはほとんど存在しない。中心空孔は偏心がなくペレット中央部に円形に存在している。

照射初期に入ったと思われる大きなクラックは、等軸晶領域で再焼結し、レンズ状ボイドになりかけている部分がみられる。

ペレット中心部は、高密度になっているが溶融した領域はみられない。柱状晶中のボイドは、レンズ状ボイドではなく、円形のボイドが多い。

(3) 切断位置 C 部

この切断位置は、スランピング現象を観察するために燃料ピンの最下部を縦割したものである。しかし、写真からもわかるようにスランピング現象は起きていなかった。

中心空孔、柱状晶がよく発達している。しかし中心空孔は、燃料ピン最下部に入っているペレットまでは発達していない。切断位置 A、B 部と比較しても特長的なことはない。

II-2-2 IT-2 (M-3 ピン) カプセル

(1) 切断位置 A 部

中心空孔、柱状晶が IT-1 カプセル燃料ピンよりも大きく発達している。この部は燃料ピン上部であるが、組織変化が一番大きい。この切断位置に関しては、全体の連続写真を撮影した。

この写真からもわかるように、柱状晶内のレンズ状ボイドは少なく、照射初期に入ったクラックは照射途中で再焼結し、その部よりレンズ状ボイドが走り柱状晶が発達している。

ペレット中心部に溶融した領域はみられない。また IT-1、IT-2 カプセル内で一番中心温度が高くなった部と思われる。

(2) 切断位置 B 部

中心空孔、柱状晶は良く発達している。燃料ピン切断時のかけ落ちが多く見られる。組織的には切断位置 A と比較し特長的なことはみられない。

(3) 切断位置 C 部

スランピング現象を観察するため燃料ピン下部を縦割りした。中心空孔、柱状晶が良く発達している。特に中心空孔は、燃料ピン最下部のペレットにも発達している。スランピング現象は起っていない。

照射初期に入ったクラックの再焼結現象はこの部分にもみられる。

II-3 IT-1 カプセル (M-1 ピン) と IT-2 カプセル (M-3 ピン) との組織変化の比較

燃料-被覆材間のギャップ幅を大きく設計し照射した IT-2 カプセル (M-3 ピン) の方が、組織変化は大きい。

両方のピン共に金相結果より溶融していなかったが、燃料中心部は、高密度化し高温を経

験したことがわかる。

IT-1, IT-2 カプセルと比較し中心空孔, 柱状晶の発達度合は異なるが, 組織上特に相異はみられない。

II-4 燃料内組織変化領域の寸法

IT-1, IT-2 カプセル内燃料ピンの組織変化領域を測定し, DIRADコードとの比較を表-7に示す。

表 7. 各領域の測定結果と計算値

燃 料 ピ ン	燃料密度 % T.D	中 心 空 孔 半 径			柱 状 晶 領 域 半 径			等 軸 晶 半 径			燃料外 半径(mm)
		実 測 (mm)	半径率	計算値 (半径率)	実 測 (mm)	半径率	計算値 (半径率)	実 測 (mm)	半径率	計算値 (半径率)	
M - 1 (IT-1カプセル)	95.0	0.570	0.116		3.165	0.646		3.330	0.680		4.90
		0.580	0.118	0.100	2.910	0.594	0.620	3.075	0.628	0.760	
		0.530	0.108		2.595	0.530		2.730	0.557		
M - 3 (IT-2カプセル)	95.0	1.125	0.232		3.505	0.723		3.740	0.771		4.85
		0.840	0.173	0.120	3.120	0.643	0.700	3.285	0.677	0.800	
		0.755	0.156		2.905	0.599		3.140	0.647		

Ⅲ．結　　言

本照射試験は、燃料中心溶融時の挙動を調べるために行なわれたが、照射後金相試験の結果燃料内の溶融領域は観察できなかった。しかし、金相面から照射初期に小領域の溶融はあったと思われる。照射が進むにつれて、中心空孔が大きく発達し、溶融領域は、この範囲内に入ってしまったのではないかと思われる。

上記の様に本照射試験では、燃料溶融温度近傍までの照射ができた。照射終了時まで溶融領域が存在しなかったのは、出力不足が原因である。出力に関するコメントは附録 1 を参照されたい。

今回の照射試験は、国内の原子炉では最初の試みであり、当初の設計も安全係数を大きく取り設計している。本実験により、Nakカプセル、燃料ピン内圧及び温度が設計時に予測した値よりも小さいことがわかった。これにより溶融実験の安全性は確立されたので、今後の実験の重要な資料になると考える。また国内の実験炉や商業炉は、燃料溶融を許可されない現状であったが、今回の実験により、実験炉での溶融実験が可能になったことは大きな成果であると考ええる。

附 録 1

今回の燃料中心溶融実験では、照射後金相結果より溶融領域は観察されなかった。しかし燃料中心温度は中心空孔の外側で、 $2600^{\circ}\text{C} \sim 2800^{\circ}\text{C}$ の範囲にあることは金相結果より推測できる。

この附録1では、次回の実験へのコメントを目的に燃料内広領域溶融条件を検討し、その結果を報告する。

中心溶融実験第2報で、DIRADコードを用い温度計算をしたがこの時用いたギャップコンダクタンスは、M-1ピンが $0.3499 \text{ w/cm}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$ であり、この時の最大中心温度は 3030°C となった。しかし照射後金相試験結果では燃料溶融は観察できなかった。したがって第2報での計算は、燃料中心温度を過大評価した。そこで今回実験した燃料ピンのギャップコンダクタンスをM-1ピンを $1400 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr}\cdot^{\circ}\text{F}$ 、M-3ピンを $1000 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr}\cdot^{\circ}\text{F}$ とし溶融条件を求めた。

溶融条件は線出力について検討した。燃料ピンモデルは、M-1ピンを用いた。

線出力を評価するために、今回の照射より得た線出力に1.1倍、1.2倍、1.3倍したもの3ケースをとりDIRADを用い燃料中心温度を求めた。この結果 $850 \sim 900 \text{ w/cm}$ の線出力で十分溶融することがわかった。

現在国内炉で 900 w/cm という高出力運転を出来るところがないが、昭和50年度にはJRR-2の改造が終り、この線出力で運転することが許可される予定である。