

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による低密度UO<sub>2</sub>ペレット照射試験Ⅲ

## 照射後試験解析

Irradiation Test of Low Density UO<sub>2</sub> Fuel in JRR-2

Post - Irradiation Examination Analysis

1975年10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による低密度 $UO_2$ ペレット照射試験 III

(照射後試験解析)

Irradiation Testing of Low Density  $UO_2$  Fuels in JRR-2

(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( )

期間 1974年4月~1975年6月

目的 製造工程で、高温焼結を省略したグリーンペレット(低密度60% T.D)の炉内挙動の安全性、1) Gas放出 2) 炉内焼結による燃料の収縮、以上について検討し、その有利性を定量的に把握し、グリーンペレットの使用可能性を照射実験により実証することを目的とした。

要旨 低密度燃料(約60% T.D· $UO_2$ )の照射挙動を調べるためにJRR-2(JAPAN RESEARCH REACTOR-2)を用いて6本の燃料ピン(全部同一仕様)のキャプセル照射試験を実施した。キャプセルは3体で、1体に2本の燃料ピンを上下に連結して封入した。

照射は1973年4月から1973年6月の間に行なった。燃料の照射初期挙動を時間を迫って調べるために1時間、5時間、290時間の3つの照射時間を選んだ。

出力は最大480watts/cm が得られ、照射は安全に終了した。

照射後試験は1974年4月より1975年1月にかけて金相組織の変化を中心に行った。この結果燃料ペレットの収縮が大きく燃料-被覆材間のギャップが増大し低出力にもかかわらず燃料ペレットの温度は、高密度ペレット比べ、全般的に高かった。

燃料ペレットはもろく崩れやすいため、ピン下部のペレットは崩れて被覆管と機械的相互作用をおこした形跡がみられた。

キャプセル下部に封入された燃料ピンでは中心空孔、柱状晶等の成長による大きな組織変化がみられた。

以上の結果を総合的に判断すると、60%前後の低密度ペレットを実際の原子炉に用いることは、燃料挙動の評価から不適當であると考えられる。

## 目 次

まえがき	1
I 照射試料および照射条件	2
II 照射後試験	5
II-1 非破壊試験	5
II-1-1 キャプセルおよび燃料ピン外観検査	5
II-1-2 燃料ピン寸法測定	5
II-1-3 X線透過写真	18
II-1-4 中性子透過写真	18
II-1-5 ガンマースキャンニング	21
II-2 フラックスモニターワイヤーの $C_{60}$ の定量	28
II-3 破壊試験	33
II-3-1 パンクチャーテスト	33
II-3-2 金相試験位置	33
II-3-3 金相試験	33
III 考 察	59
IV 結 論	71
参 考 文 献	72
附録1. 燃料ピン寸法測定	73
附録2. モニターワイヤー測定	77
附録3. 燃料ピンのガンマースキャンニング	81
附録4. パンクチャーテスト	83
附録5. 金 相 試 験	97
附録6. ギャップコンダクタンスの計算	103

## ま え が き

低密度燃料の実用性を調べる為に60% T.D.  $UO_2$  ペレット燃料の照射試験を原研の2号炉を用いて行つた。

燃料ピンの設計と製造記録および照射データとその解析についてはすでに報告した。[1], [2]

照射試験は昭和48年4月から昭和50年1月にわたり行われた。燃料ペレットおよび燃料ピンは、 $UO_2$  粉末と被覆管を支給し原子燃料工業で製造した。照射用キャプセルは原研工作場で加工し、組立を行つた。

照射はJRR-2で1時間、5時間およびIRO (Reactor Cycle) の3シリーズについて行つた。照射時間については、計画では1時間、5時間および10時間としていたが炉側の都合により、10時間照射が行えず、IRO (12日間) となつた。

照射後試験は1974年4月より1975年1月にかけて原研ホットラボで行つた。照射後試験は燃料の組織変化の観察を中心に行つた。ペレットが低密度である為崩れ安いので金相試験の実施には細心の注意が払われた。

## I 照射試料および照射条件

燃料ペレットは1000℃という比較的低温で焼結された60%T.D.のもので、ウランの濃縮度は6%である。被覆管はZircaloy-2ですべてPu-Thermalタイプの設計である。燃料に関する概略データを表I-1に示す。また燃料ピンは2本連結で1つの冷却フィン付キャプセルに封入されたが、このピンおよびキャプセルの概略図を図I-1に示す。

照射はJRR-2(Japan Research Reactor-2)のVT-1照射孔(炉心中央)で1時間、5時間および290時間の3ケースについて行った。照射条件の概略を表I-2に示す。

表I-1 燃料に関するデータ

CAPSULE	G - 4		G - 5		G - 6	
	GR-1	GR-2	GR-3	GR-4	GR-5	GR-6
FUEL PIN						
PELLET DIA. (mm)	10.66	10.66	10.66	10.65	10.67	10.65
DENSITY (%T.D)	60.88	60.91	61.27	61.51	60.99	61.06
ENRICH (wt%)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
TOTAL PIN LENGTH (mm)	170.0	171.0	170.0	171.0	170.0	171.0
DIA. GAP (mm)	0.170	0.170	0.170	0.180	0.160	0.180
CLAD MATERIAL	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2

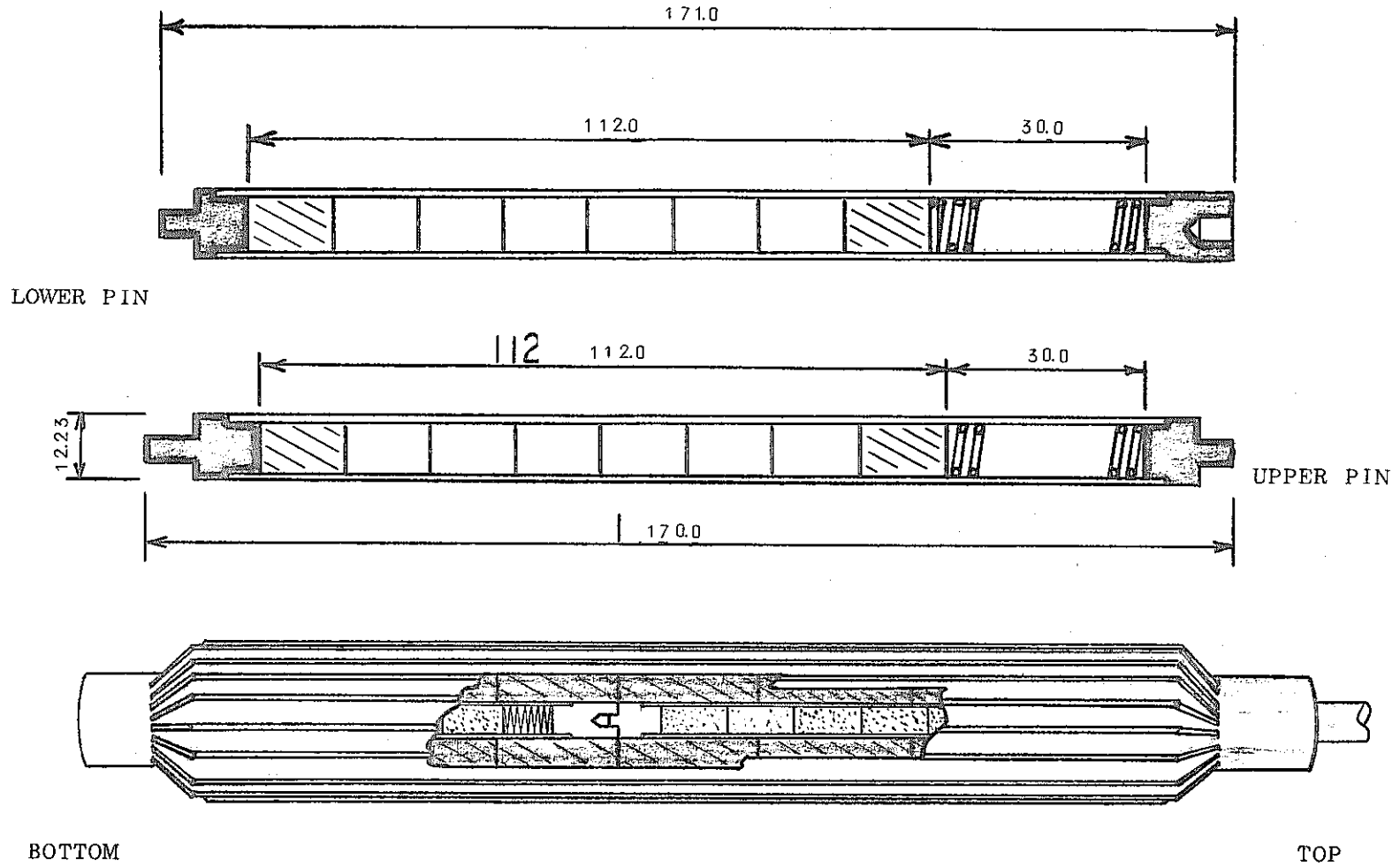


図 I-1 燃料ピンと冷却用フィン付キャプセル概略図

表I-2 照射条件概要

CAPSULE	G - 4		G - 5		G - 6	
FUEL PIN	GR-1	GR-2	GR-3	GR-4	GR-5	GR-6
REACTOR POWER	10MW	10	10	10	10	10
ROD POWER(peak)	228 w/cm	372	212	481	166	433
FLUX(n/cm <sup>2</sup> sec)	1.5×10 <sup>13</sup>	3.2	2.0	3.5	1.1	2.9
CLAD SURF. TEMP.	210	365	196	391	168	385
IRRA. TIME	1.25		5.0		291.5	



## II 照射後試験

照射後試験は昭和49年4月から50年1月にかけて金相試験を中心に原研ホットラボにおいて行った。

### II-1 非破壊試験

#### II-1-1 キャプセルおよび燃料ピン外観検査

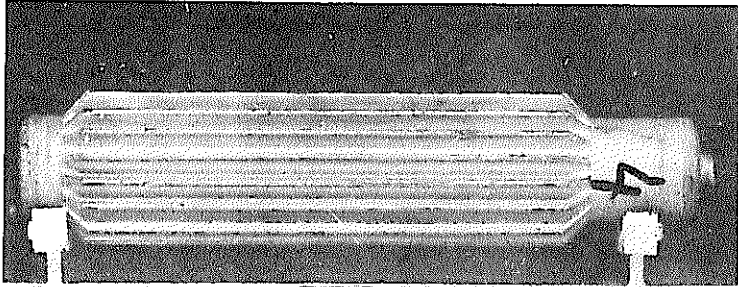
外観検査としてペリスコープによる目視検査と写真撮影を行った。キャプセルおよび燃料ピンとも特に注目すべき変化は見られず、燃料ピンは健全であった。キャプセルと燃料ピンの外観写真を写真II-1と写真II-2に示す。

#### II-1-2 燃料ピン寸法測定

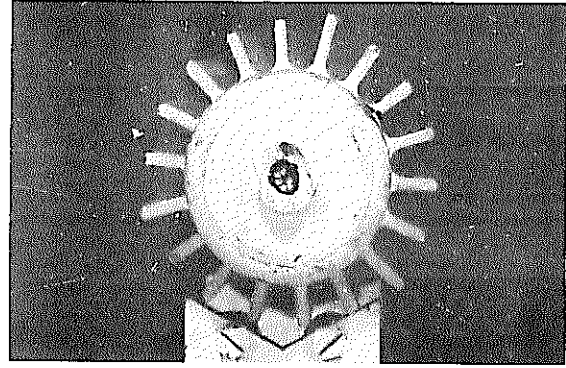
燃料ピンの表面の汚れをアルコールで洗浄し乾燥した後、外径はマイクロメータ、長さにはノギスを用いて測定した。測定は0°及び90°の2方向、3ヶ所について行った。測定位置を図II-1に、また測定結果を表II-1に示す。

照射前後の寸法変化を見る為に表II-1の値をグラフにして図II-2(1)から図II-2(6)に示す。これから照射後の燃料ピン直径が照射前より0.01~0.02mmほど小さくなっている。この直径減少は全ピンについてほぼ一率に出ていること、1時間照射ピンについてもみられることから、これら直径の減少は照射前後に測定したマイクロメーターが違うことによる不一致であると思われる(照射前直径測定:原燃、照射後直径測定:原研ホットラボ)。照射前後の直径測定には手作業と、マニプレータ作業の違いがあるので照射前の値が正しいと判断するのが妥当であろう。

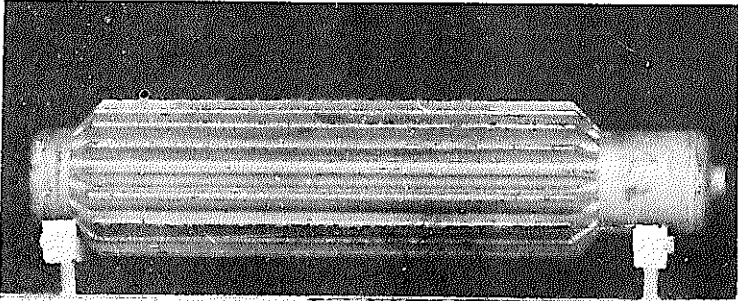
GR-4, GR-6ピンでは燃料ピン最下部でピンが大きくふくらんでいる。これは何らかの原因によりペレットと被害管が相互作用を起したものである。



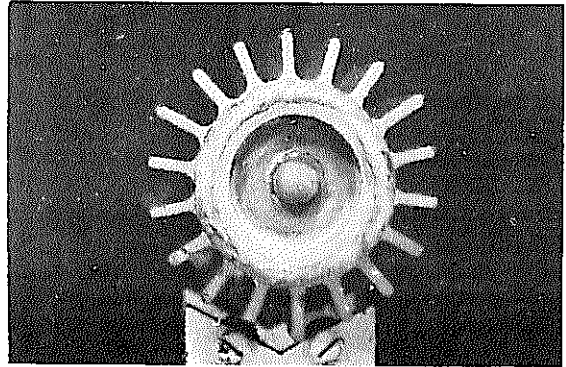
822 4



0°

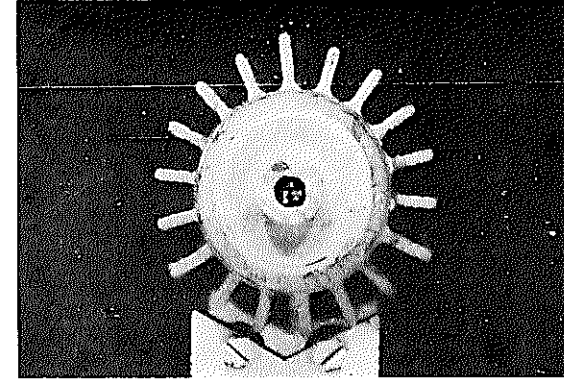
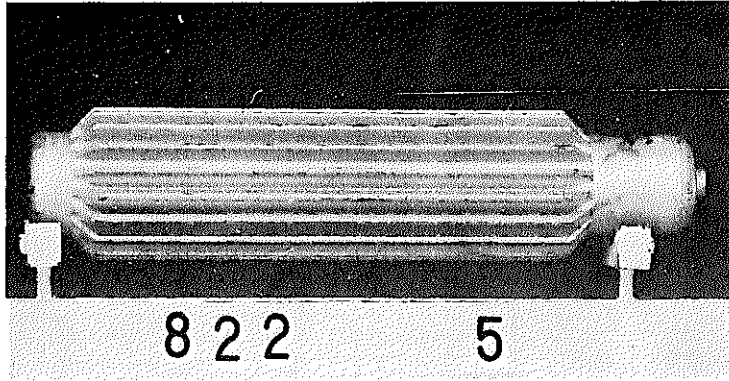


822 4

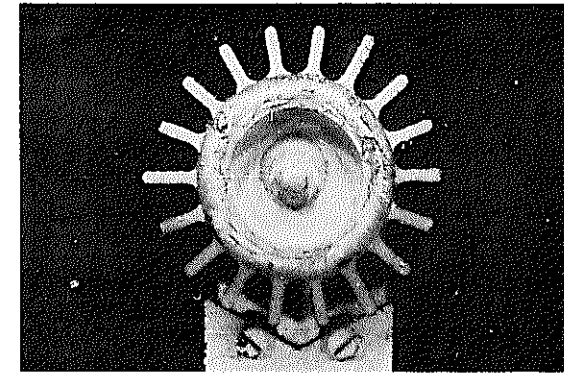
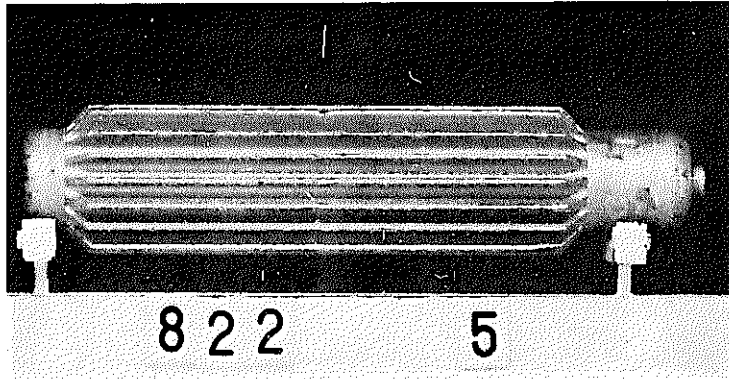


180°

写真Ⅱ-1(A) 外觀写真 Capsule № G-4

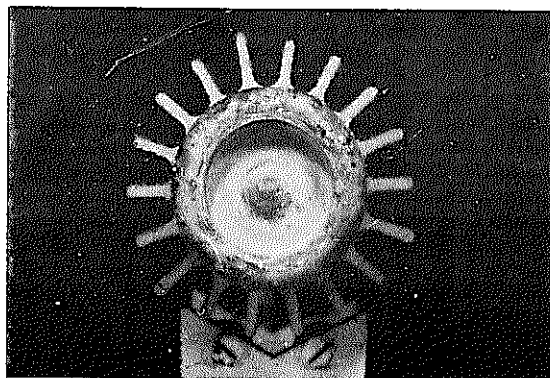
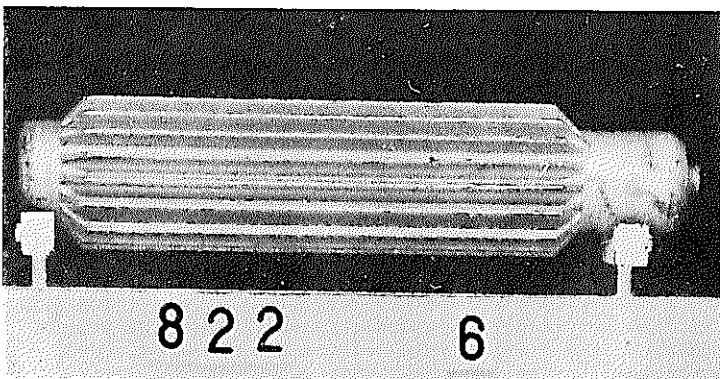
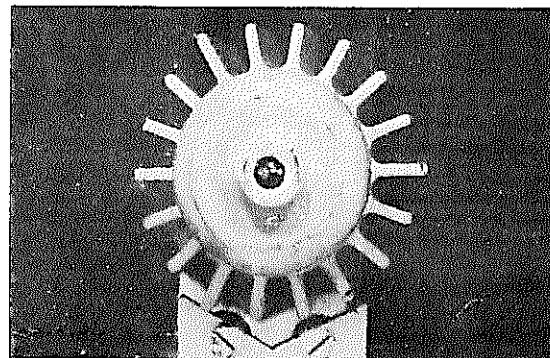
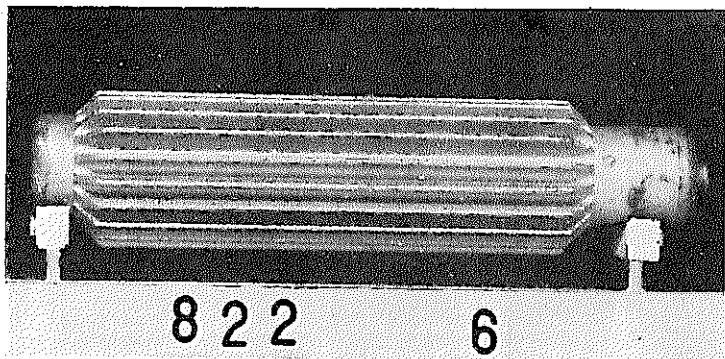


0°

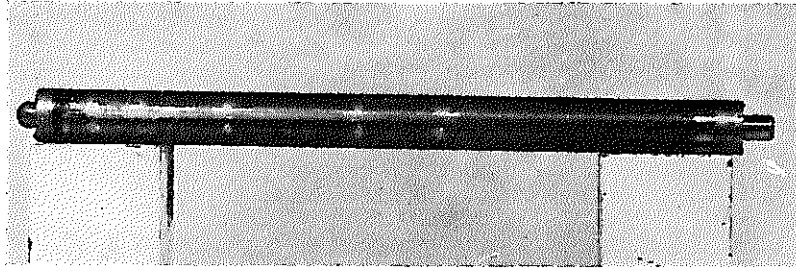


180°

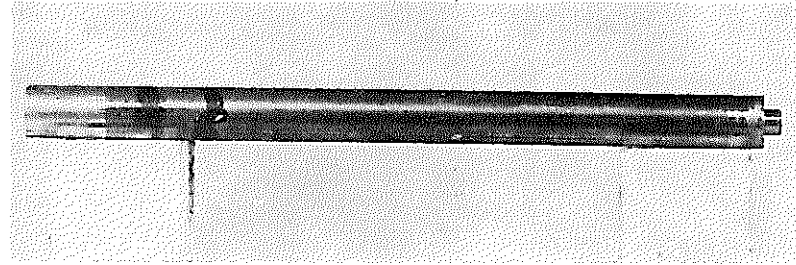
写真Ⅱ-1(B) 外觀写真 Capsule № G-5 (続き)



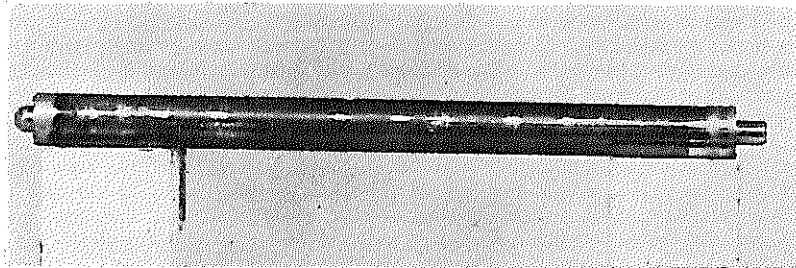
写真II-1(C) 外観写真 Capsule No G-6 (続き)



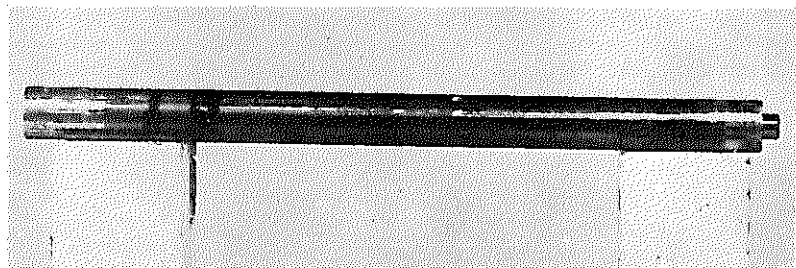
0°



0°



180°

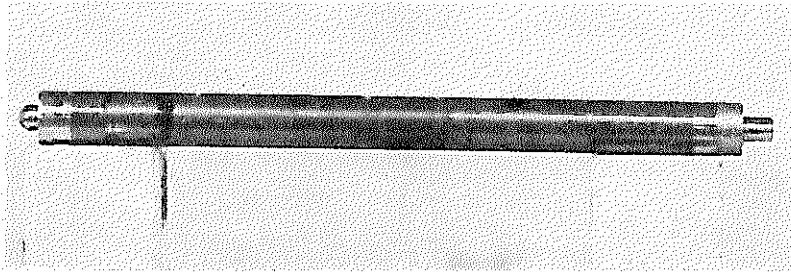


180°

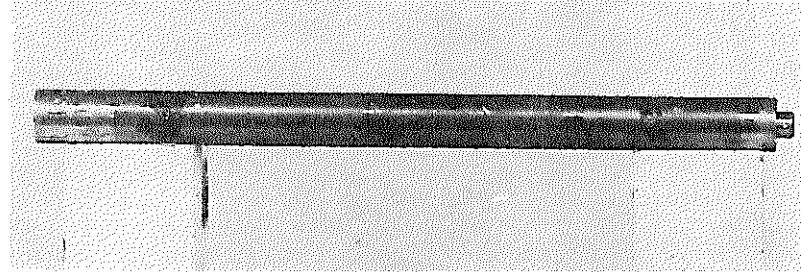
燃料ピン外観写真PIN NoGR-1

燃料ピン外観写真PIN NoGR-2

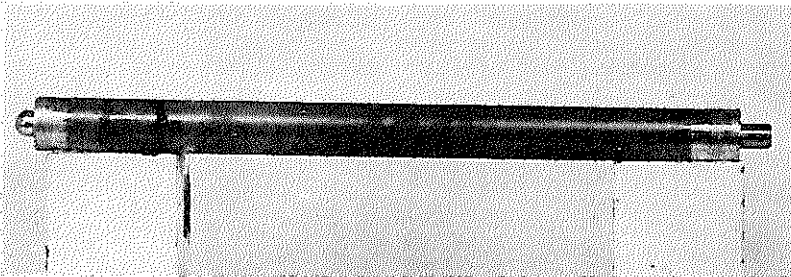
写真II-2(A) 燃料ピン外観写真



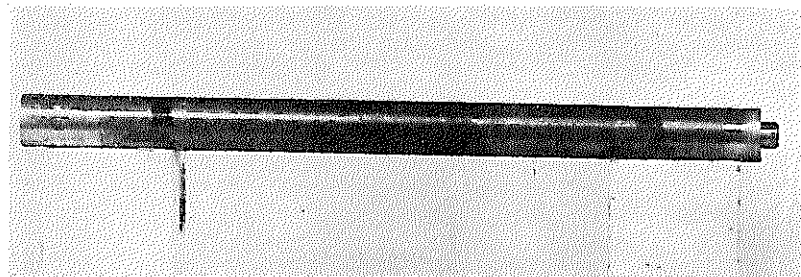
0°



0°



180°

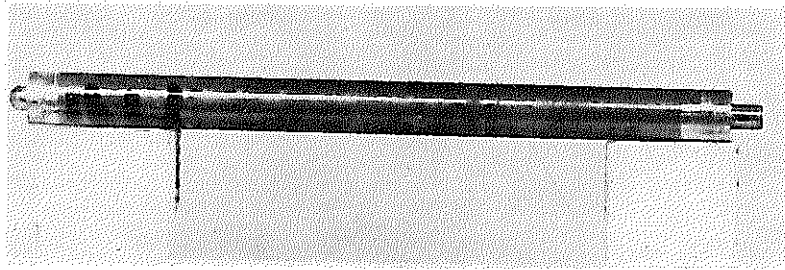


180°

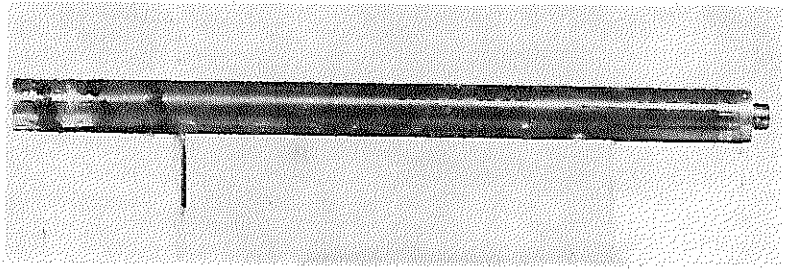
燃料ピン外観写真PIN No. GR-3

燃料ピン外観写真PIN No. GR-4

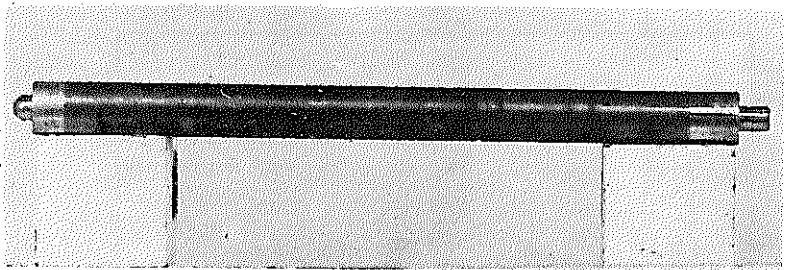
写真II-2(B) 燃料ピン外観写真 (続き)



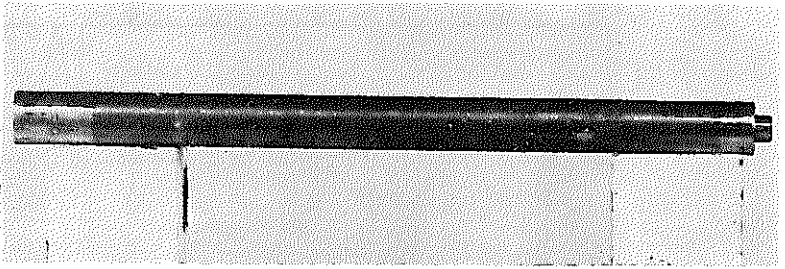
0°



0°



180°



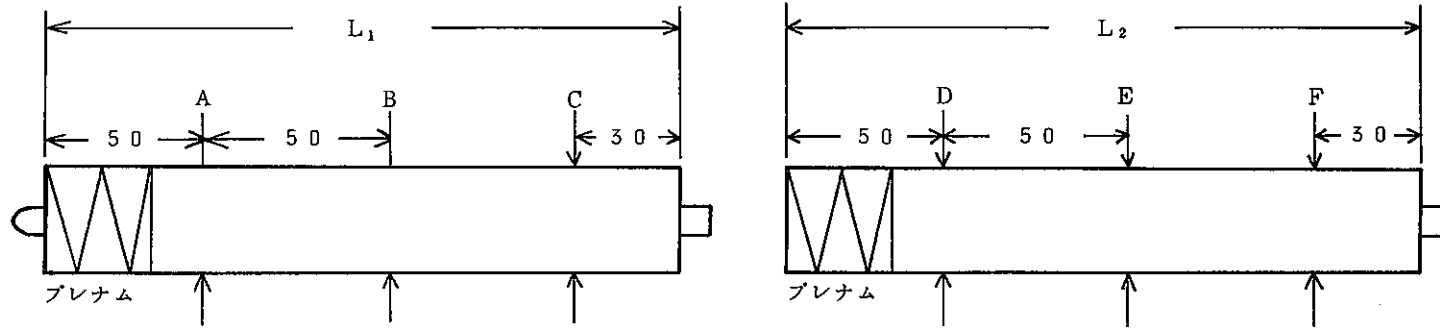
180°

燃料ピン外観写真PIN №GR-5

燃料ピン外観写真PIN №GR-6

111

A, B, C, D, E, F : 測定位置



上部ピン

GR-1

GR-3

GR-5

下部ピン

GR-2

GR-4

GR-6

図 II - 1 燃料ピン寸法測定位置



表Ⅱ-1 燃料ピン寸法測定結果

## ○ G-4 キャプセル

GR-1	0°			90°			L <sub>1</sub>
	A	B	C	A	B	C	
測定値	12.21	12.20	12.21	12.21	12.21	12.21	171.15
	12.21	12.20	12.21	12.20	12.21	12.21	171.15
	12.21	12.20	12.21	12.20	12.20	12.20	171.15
平均値	12.21	12.20	12.21	12.20	12.21	12.21	171.15
照射前値	12.23	12.22	12.23	12.23	12.23	12.23	171.2
GR-2	0°			90°			L <sub>2</sub>
	D	E	F	D	E	F	
測定値	12.20	12.19	12.21	12.20	12.21	12.20	171.20
	12.21	12.19	12.21	12.20	12.20	12.21	171.20
	12.20	12.18	12.21	12.20	12.20	12.20	171.20
平均値	12.20	12.19	12.21	12.20	12.20	12.20	171.20
照射前値	12.23	12.23	12.22	12.22	12.22	12.22	171.4
○ G-5 キャプセル							
GR-3	0°			90°			L <sub>1</sub>
	A	B	C	A	B	C	
測定値	12.22	12.22	12.21	12.22	12.23	12.22	171.20
	12.22	12.22	12.21	12.22	12.23	12.22	171.20
	12.22	12.22	12.22	12.22	12.22	12.22	171.20
平均値	12.22	12.22	12.21	12.22	12.23	12.22	171.20
照射前値	12.23	12.23	12.22	12.23	12.23	12.23	171.2
GR-4	0°			90°			L <sub>2</sub>
	D	E	F	D	E	F	
測定値	12.22	12.23	12.24	12.22	12.21	12.24	171.25
	12.22	12.23	12.24	12.22	12.21	12.23	171.25
	12.22	12.23	12.24	12.22	12.21	12.23	171.25
平均値	12.22	12.23	12.24	12.22	12.21	12.23	171.25
照射前値	12.23	12.23	12.23	12.23	12.23	12.23	171.4

## ○ G-6 キャプセル

GR-5	0°			90°			L <sub>1</sub>
	A	B	C	A	B	C	
測定値	12.21	12.21	12.20	12.20	12.20	12.21	171.15
	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	171.20
	12.20	12.20	12.21	12.21	12.20	12.21	171.20
平均値	12.21	12.21	12.21	12.21	12.20	12.21	171.20
照射前値	12.23	12.23	12.23	12.23	12.23	12.23	171.2
GR-6	0°			90°			L <sub>2</sub>
	D	E	F	D	E	F	
測定値	12.21	12.21	12.36	12.20	12.22	12.30	171.25
	12.21	12.20	12.36	12.21	12.22	12.32	171.25
	12.21	12.20	12.36	12.21	12.22	12.31	171.25
平均値	12.21	12.20	12.36	12.21	12.22	12.31	171.25
照射前値	12.24	12.23	12.23	12.23	12.22	12.23	171.4

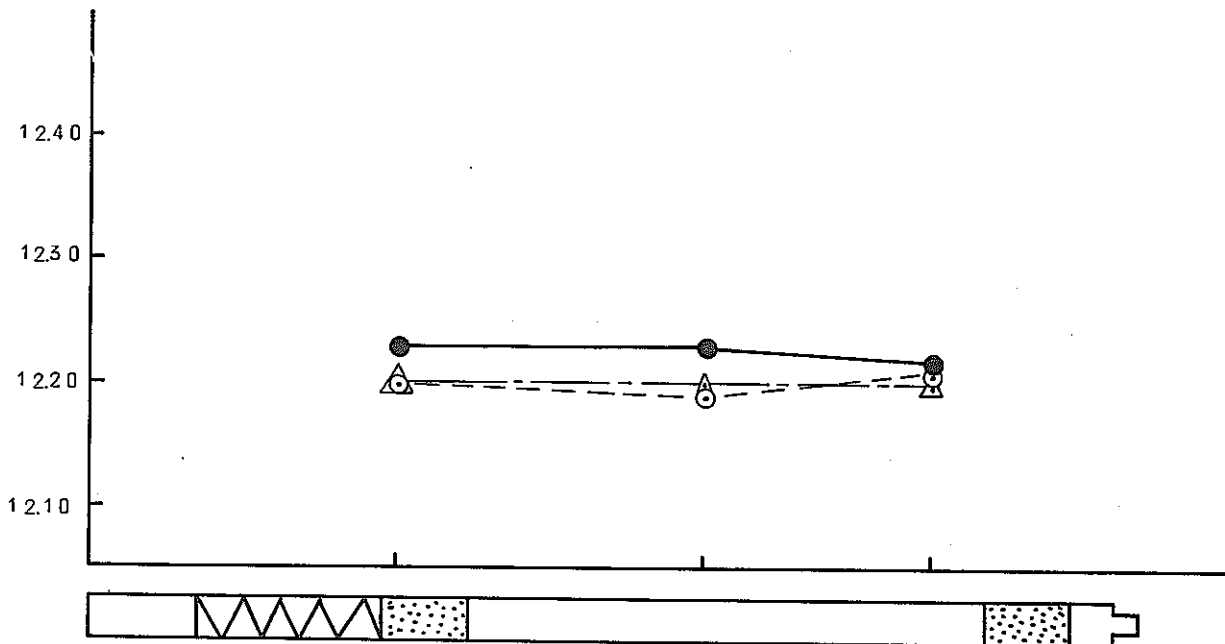


図 II - 2 (2) GR-2 燃料ピン外径測定結果

- 照射前値
- ⊙ 0° 測定値
- △ 90° 測定値

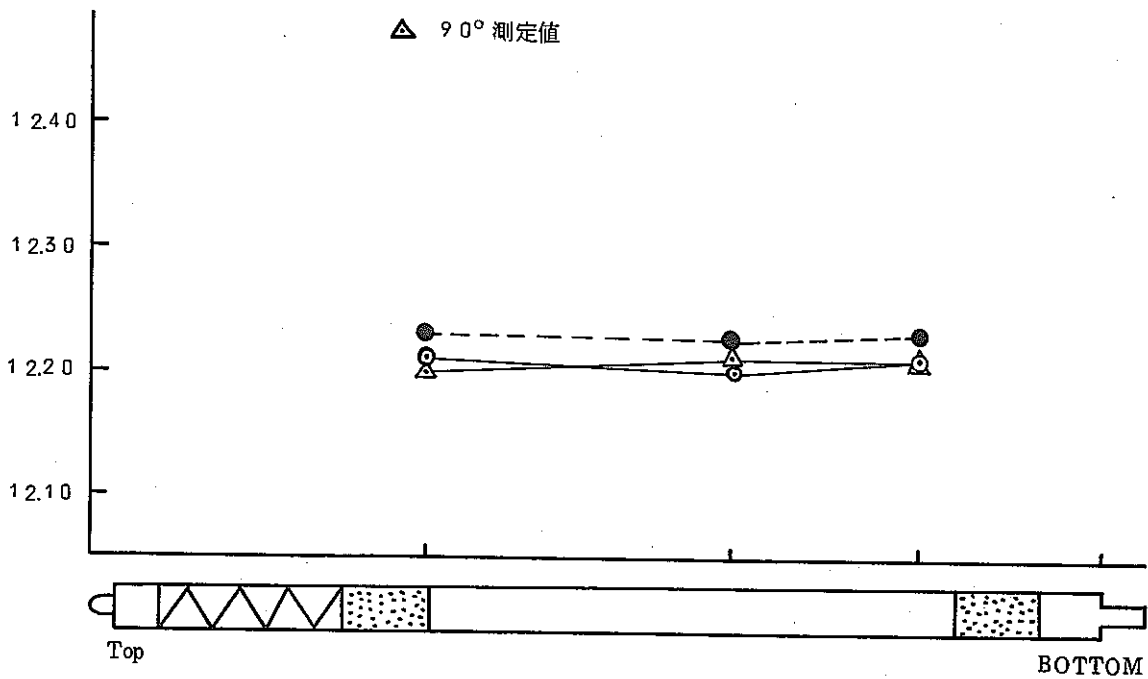


図 II - 2 (1) GR-1 燃料ピン外径測定結果

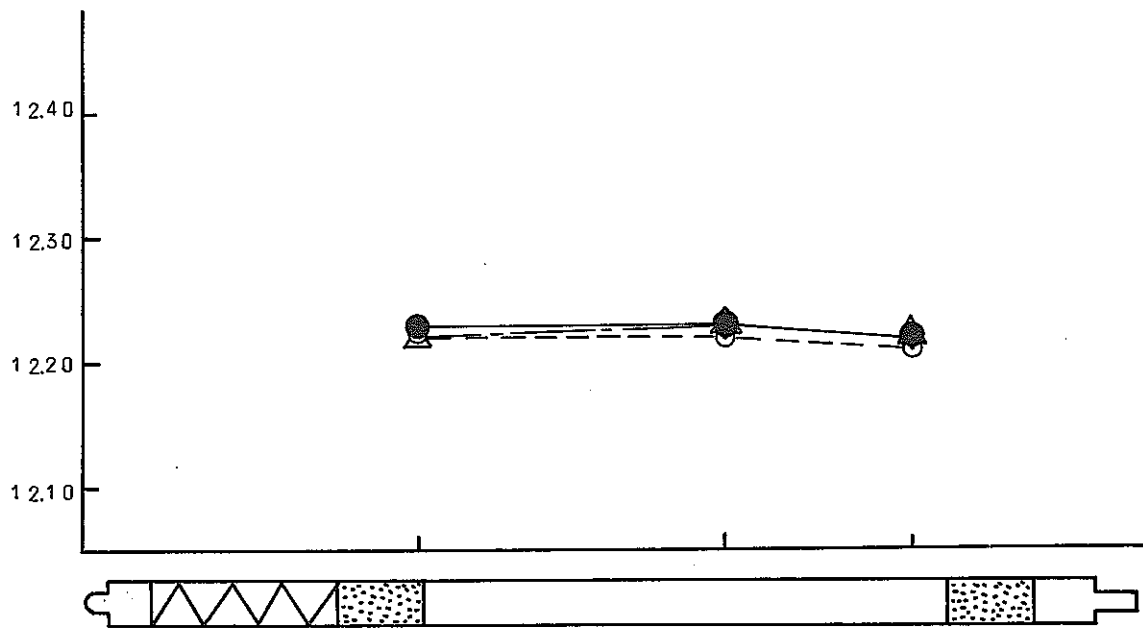


図 II - 2 (3) GR-3 燃料ピン外径測定結果

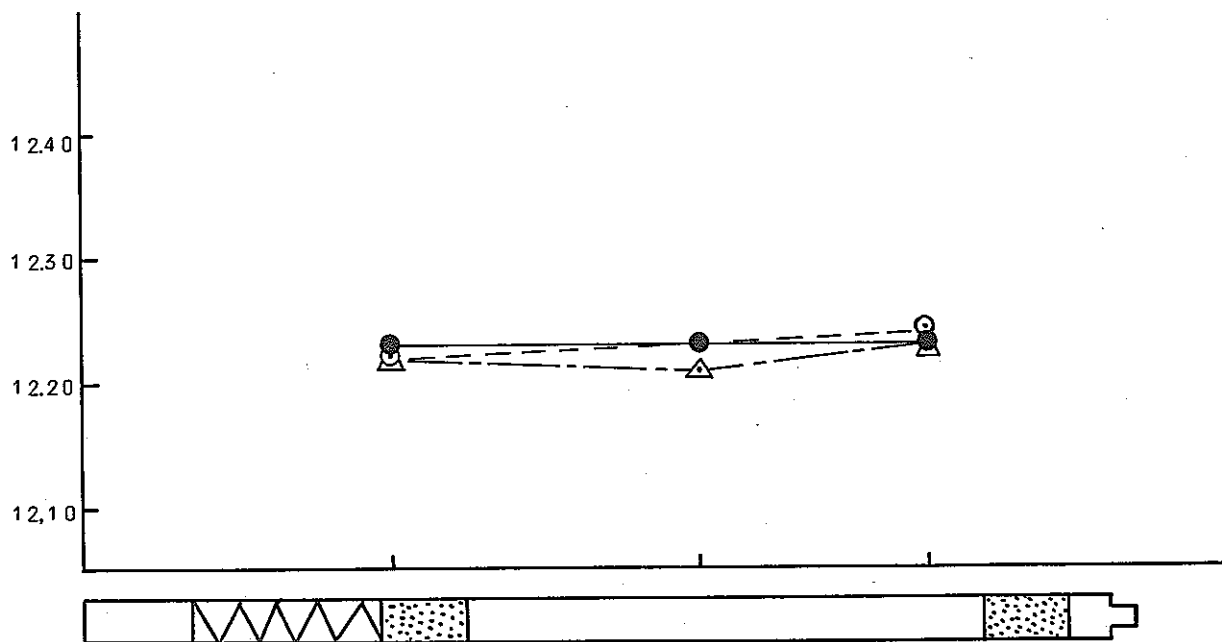


図 II - 2 (4) GR-4 燃料ピン外径測定結果

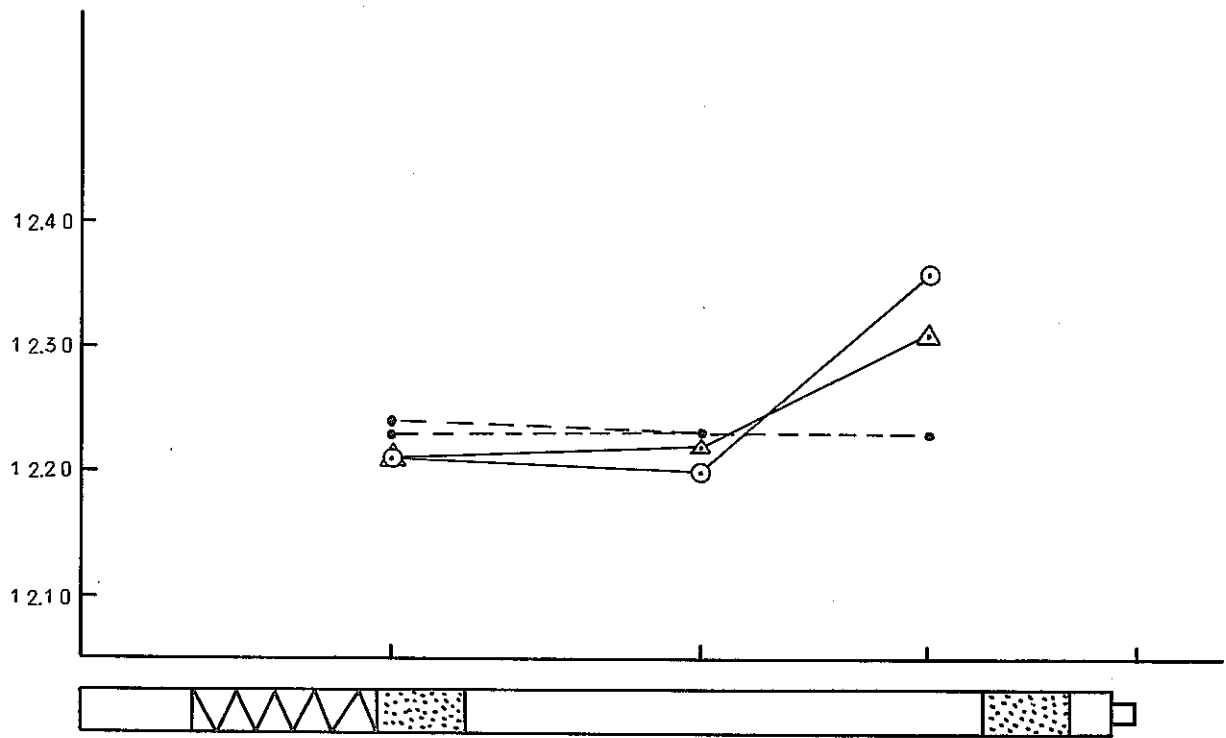


図 II - 2 (6) GR-6 燃料ピン外径測定結果

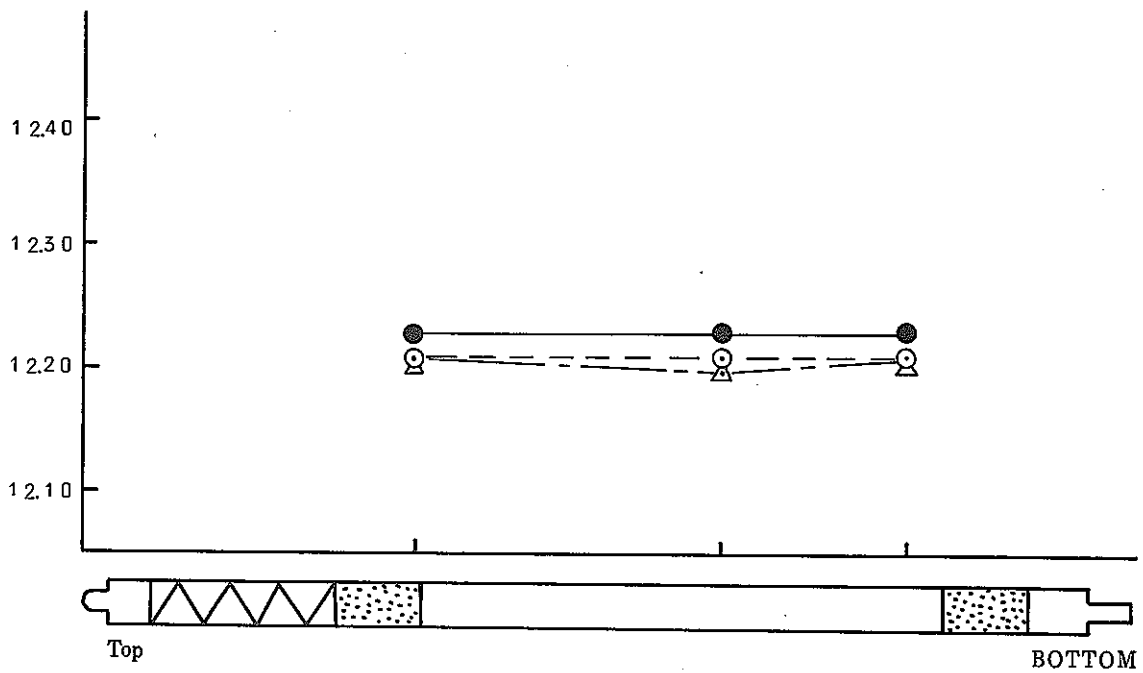


図 II - 2 (5) GR-5 燃料ピン外径測定結果

### II-1-3 X線透過写真

X線による透過撮影は、6本の燃料ピンについて行った。中性子透過写真は最初は撮る予定がなかったし、ペレット密度が低いのでX線透過写真でピン内部の状況がある程度わかるという見通しでX線透過撮影を行った。結果は写真II-3に示す。

この写真からペレット間のギャップとかペレットのカケあるいはプレナム部分の状況がある程度判別出来るが、まだ不十分なものである。

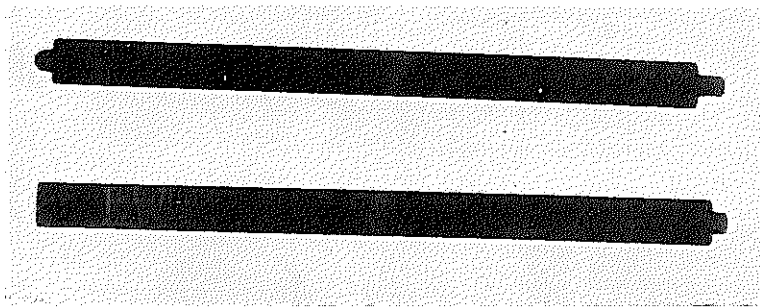
### II-1-4 中性子透過写真

原研ホットラボは現在JRR-3を利用した中性子透過撮影技術の開発を行っており、そのサンプル試料としてGR-1, GR-4およびGR-5の中性子透過写真の撮影を行った。撮影結果を写真II-4に示す。技術開発中なので燃料ピンと写真乾板が平行に置かれていなかったりしているが、ピン内部のペレットの状況が良くわかる。GR-1とGR-5の低出力ピンではペレット組織変化を起しておらず、崩れているという感じである。GR-4ピンは出力が大きかったので、中心空孔の生成がみられ、ペレットはそれほど崩れていない。

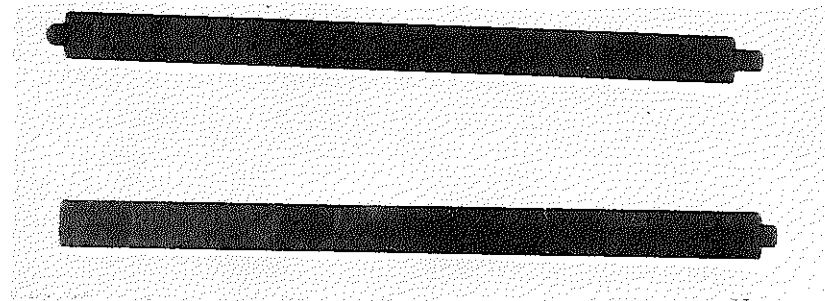
3ピン共にスタック長に縮みがみられる。



Capsule No. G-4

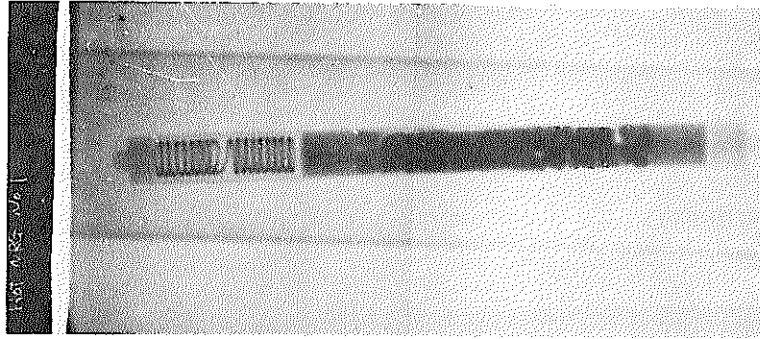


Capsule No. G-5

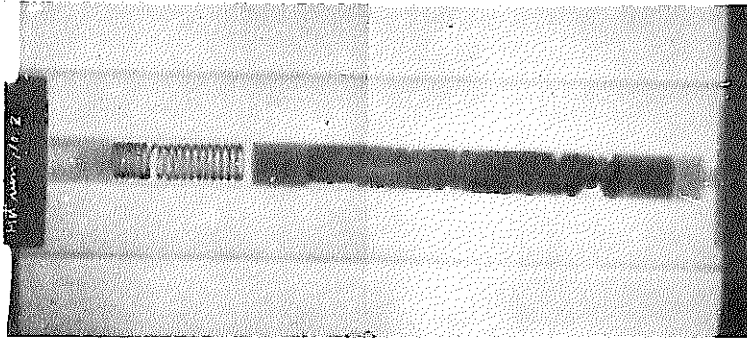


Capsule No. G-6

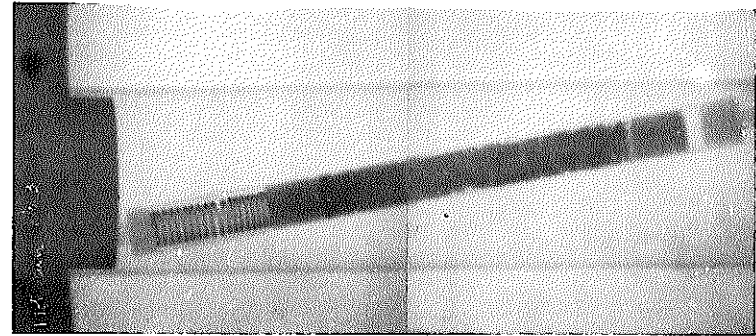
写真II-3 X線透過検査



PIN No. GR-1



PIN No. GR-4



PIN No. GR-5

写真II-4 ニュートロンラジオグラフィー



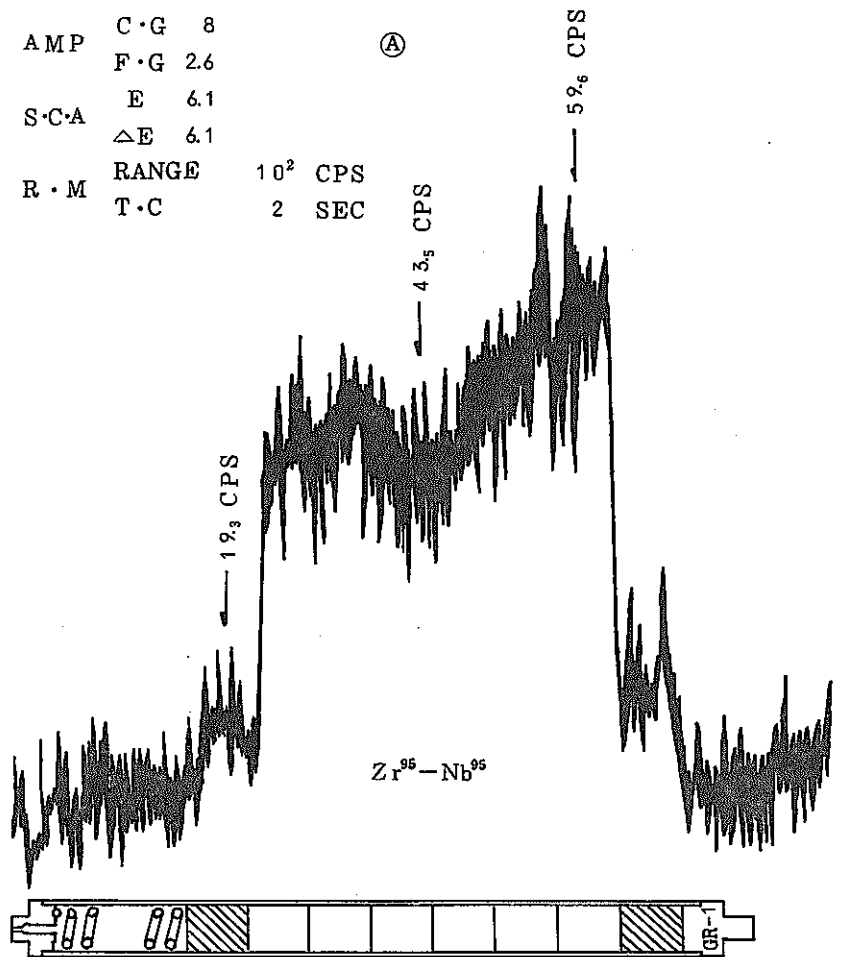
## II-1-5 ガンマースキャンニング

Ge(Li)半導体検出器と1,000チャンネルP.H.A.を使用したガンマ線エネルギー分析の結果 $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ のピークが最も大きく、しかも分布が比較的均一であるので、 $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ のガンマースキャンニングとグロスガンマースキャンニングを行った。これらの結果を図II-3(1)~II-3(6)に示す。

いずれのピンについても、ピン中央部にグロスガンマースキャンニングの凹部がみられる。

燃料ピンは中性子束の勾配の急な場所で照射されたので燃料ピン下部の方がアクティビティの凹みがあることから、軸方向のF.P.マイブレーションがあったものと考えられる。

GR-3  
 1974-3-1  
 AMP C·G 8  
 F·G 2.6  
 S·C·A E 6.1  
 ΔE 6.1  
 R·M RANGE 10<sup>2</sup> CPS  
 T·C 2 SEC



GR-1  
 1974-3-1  
 AMP C·G 4  
 F·G 20  
 R·M RANGE 5×10<sup>2</sup> CPS  
 T·C 2 SEC

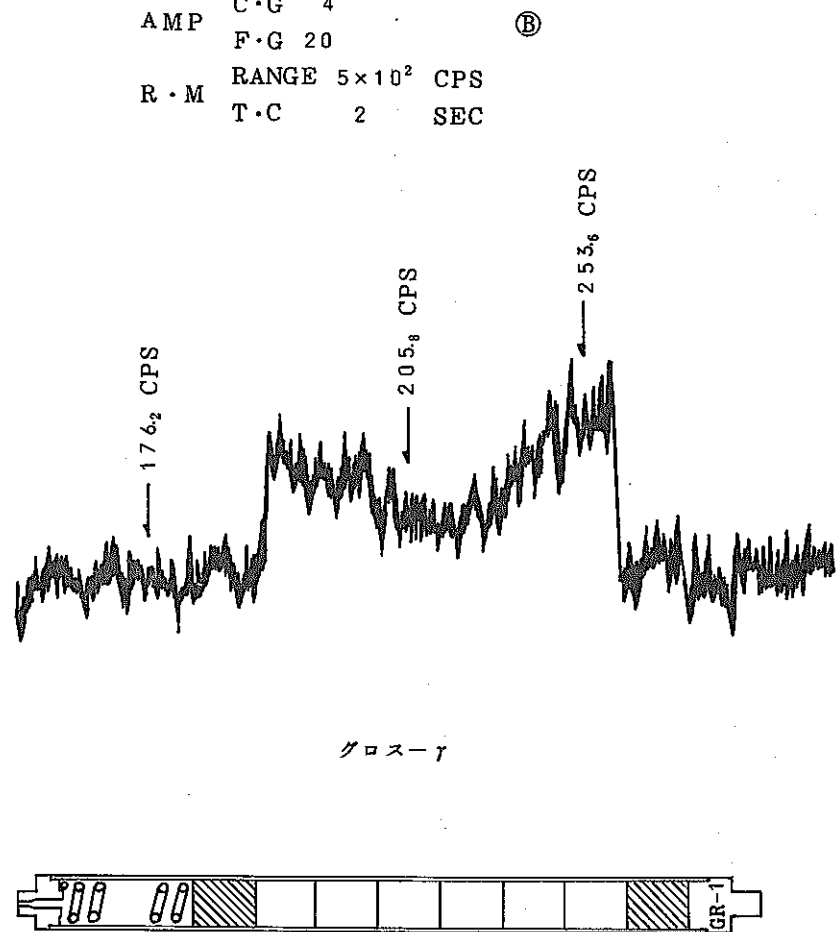


図 II-3(1) GR-1 ピンγスキャン結果

GR-2  
 1974-3-1  
 AMP C·G 8  
 F·G 2.6 (A)  
 S·C·A E 6.1  
 ΔE 1.7  
 R·M RANGE  $5 \times 10^2$  CPS  
 T·C 2 SEC

GR-2  
 1974-3-1  
 AMP C·G 4  
 F·G 20 (B)  
 R·M RANGE  $10^2$  CPS  
 T·C 2 SEC

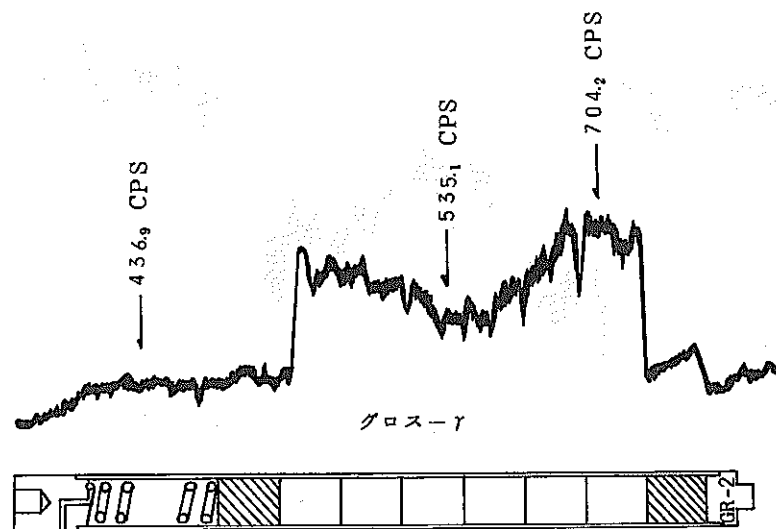
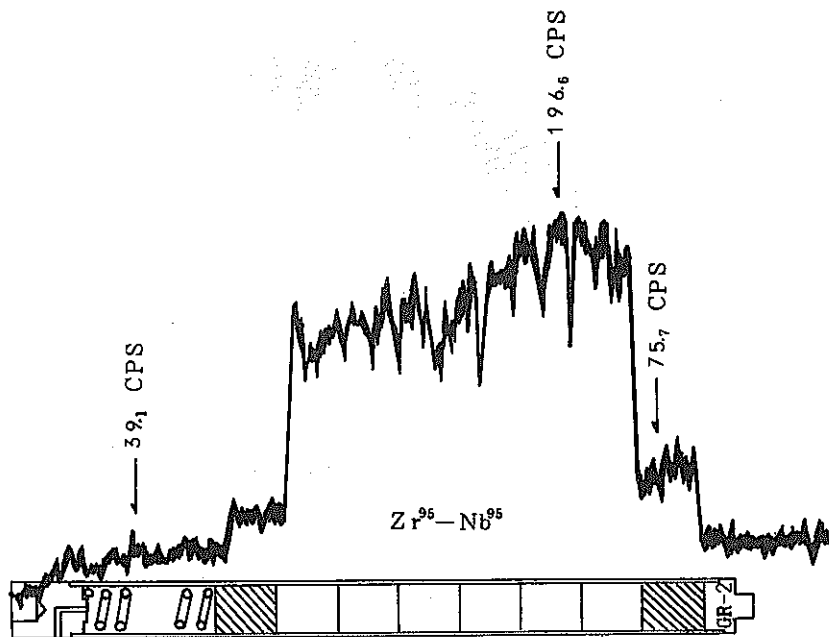
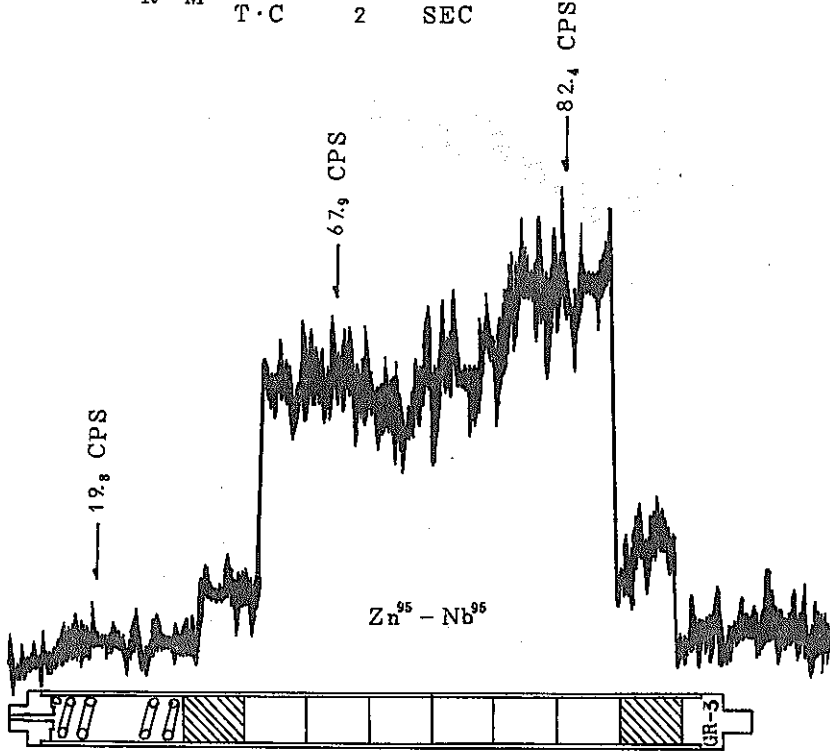


図 II-3 (2) GR-2 ピンチスキャン結果

GR-3  
 1974-2-28  
 AMC C·G 8  
 F·G 2.6 (A)  
 S·C·A 6.1  
 ΔE 1.7  
 R·M RANGE 2×10<sup>2</sup> CPS  
 T·C 2 SEC



GR-S  
 1974-2-28  
 AMP C·G 4  
 F·G 2.0 (B)  
 R·M RANGE 2×10<sup>2</sup> CPS  
 T·C 2 SEC

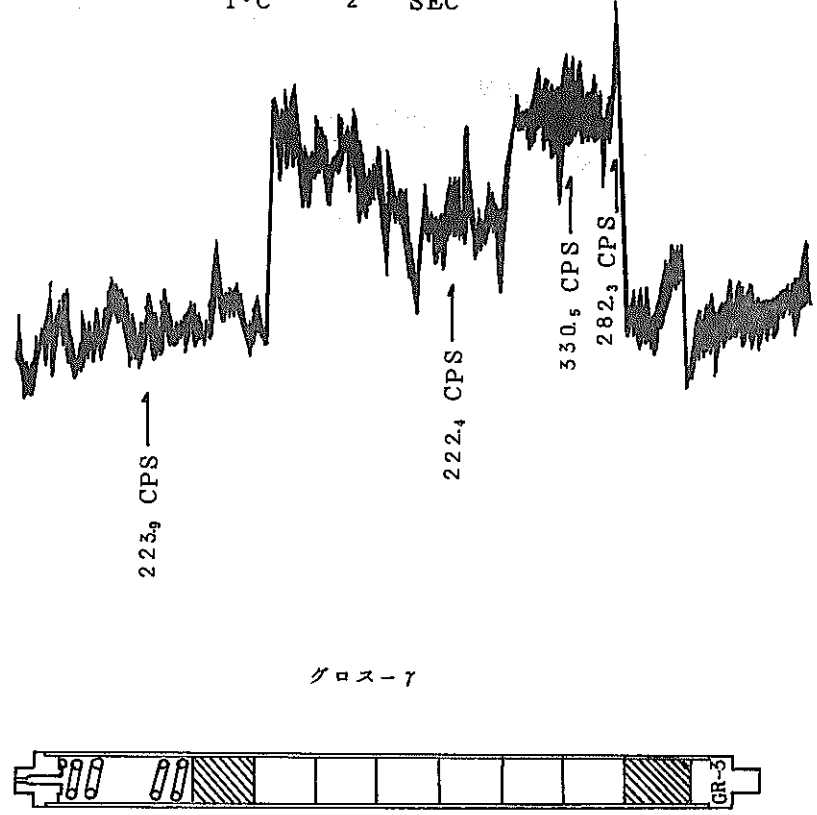
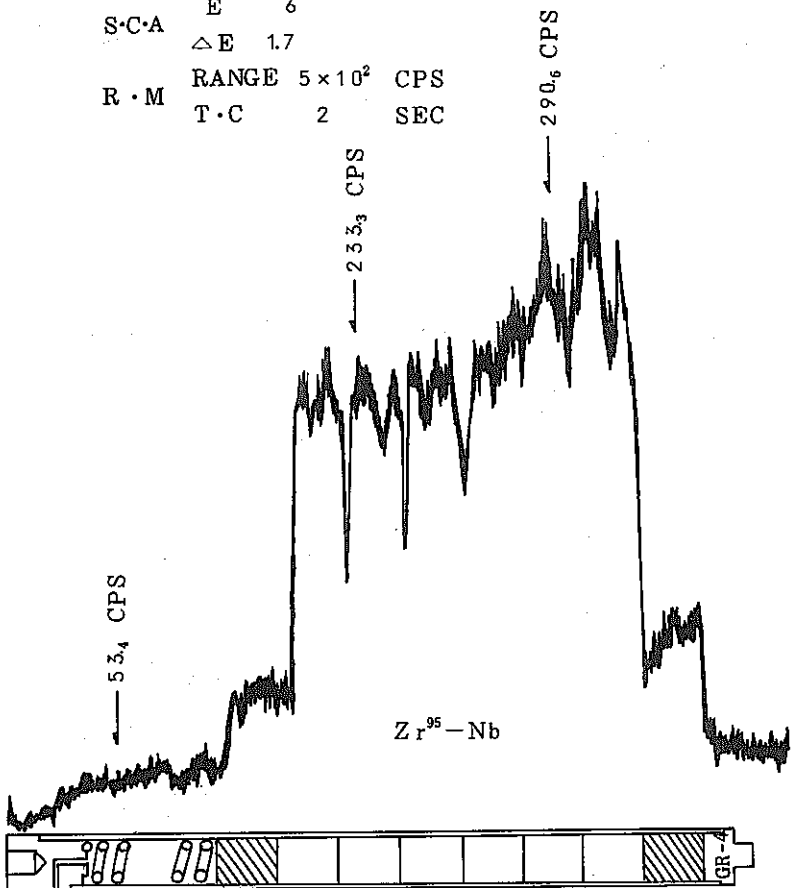


図 II - 3 (3) GR - 3 ピン γ スキャン 結果

GR-4  
 1974-2-28  
 AMP C·G 8  
 F·G 2.6  
 S·C·A E 6  
 ΔE 1.7  
 R·M RANGE  $5 \times 10^2$  CPS  
 T·C 2 SEC

Ⓐ



GR-4  
 1974-2-28  
 AMP C·G 4  
 F·G 2.0  
 R·M RANGE  $2 \times 10^3$  CPS  
 T·C 2 SEC

Ⓑ

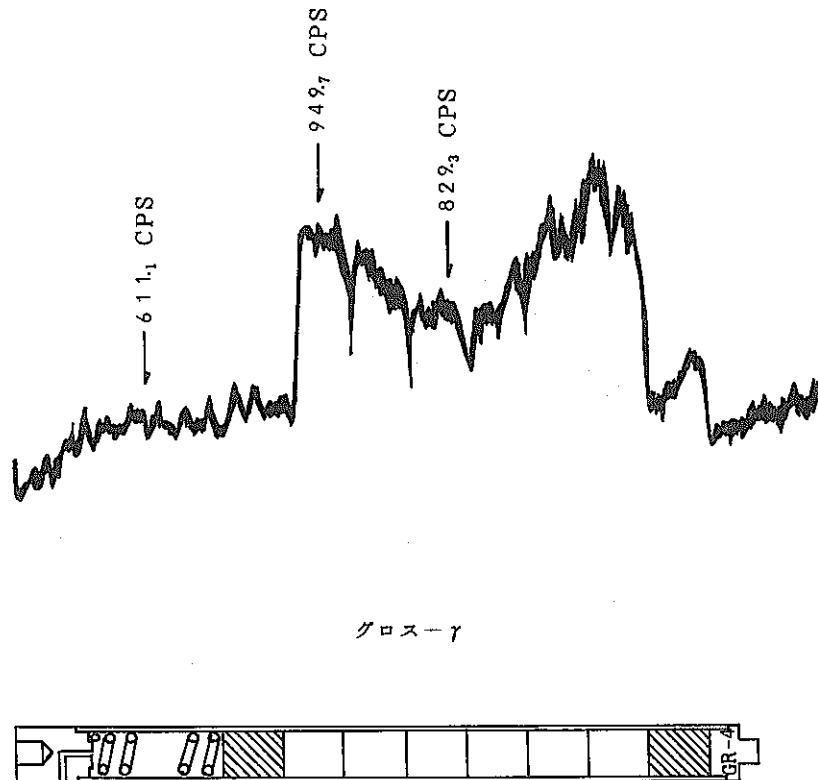
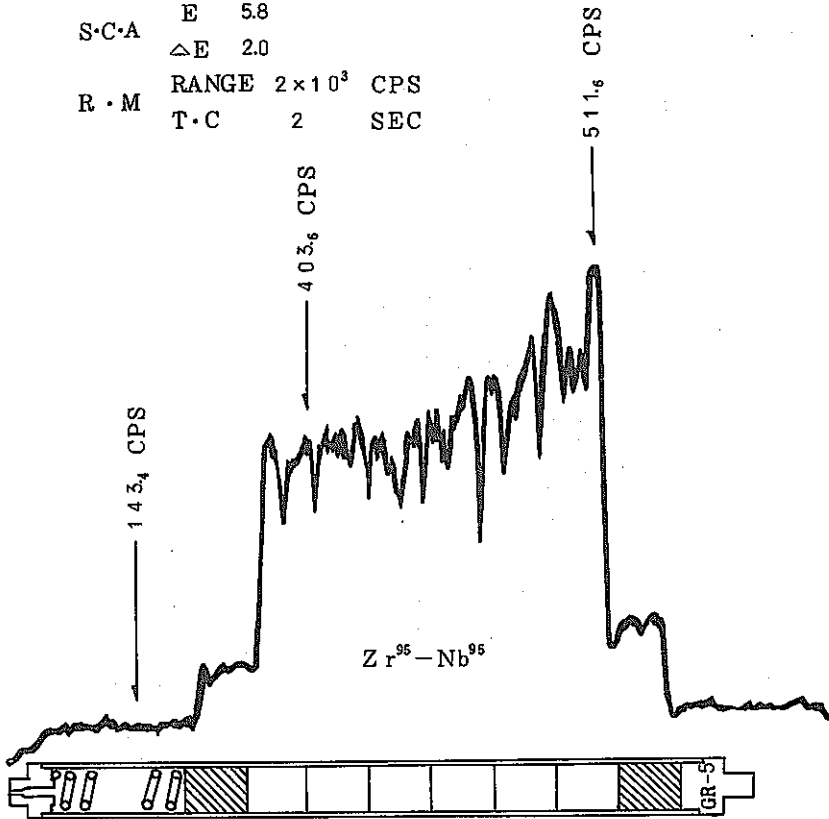


図 II-3(4) GR-4 ビンγ スキャン結果

GR-5  
 1974-3-2  
 AMP C·G 8  
 F·G 2.6  
 S·C·A E 5.8  
 ΔE 2.0  
 R·M RANGE  $2 \times 10^3$  CPS  
 T·C 2 SEC

(A)



GR-5  
 1974-3-1  
 AMP C·G 4  
 F·G 2.0  
 R·M RANGE  $5 \times 10^3$  CPS  
 T·C 2 SEC

(B)

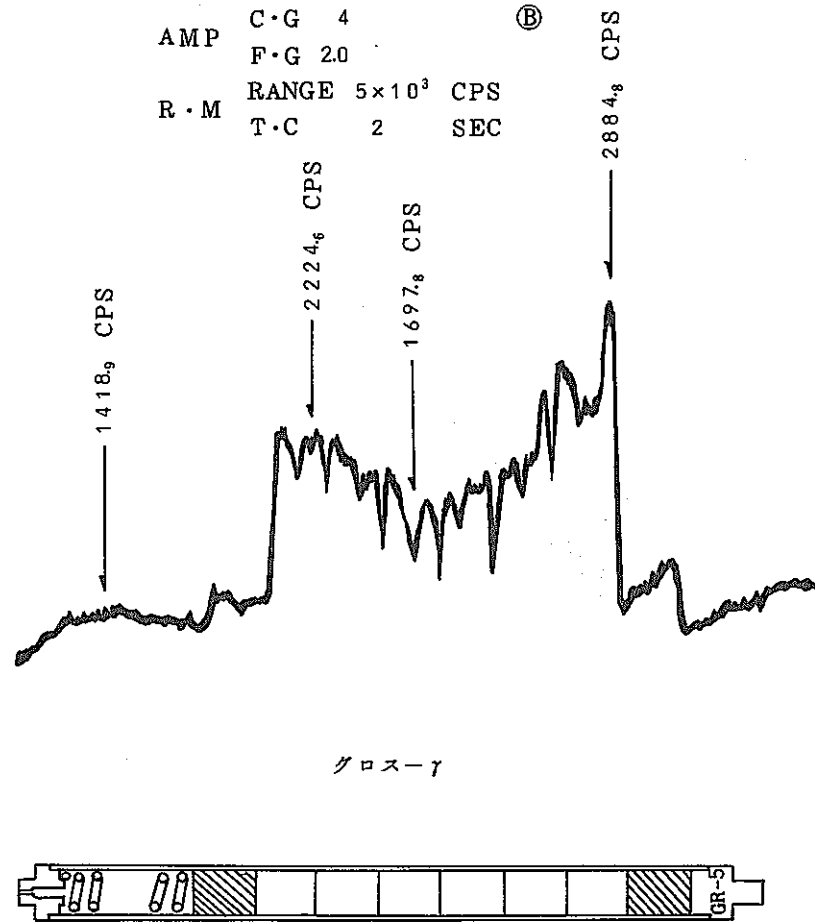
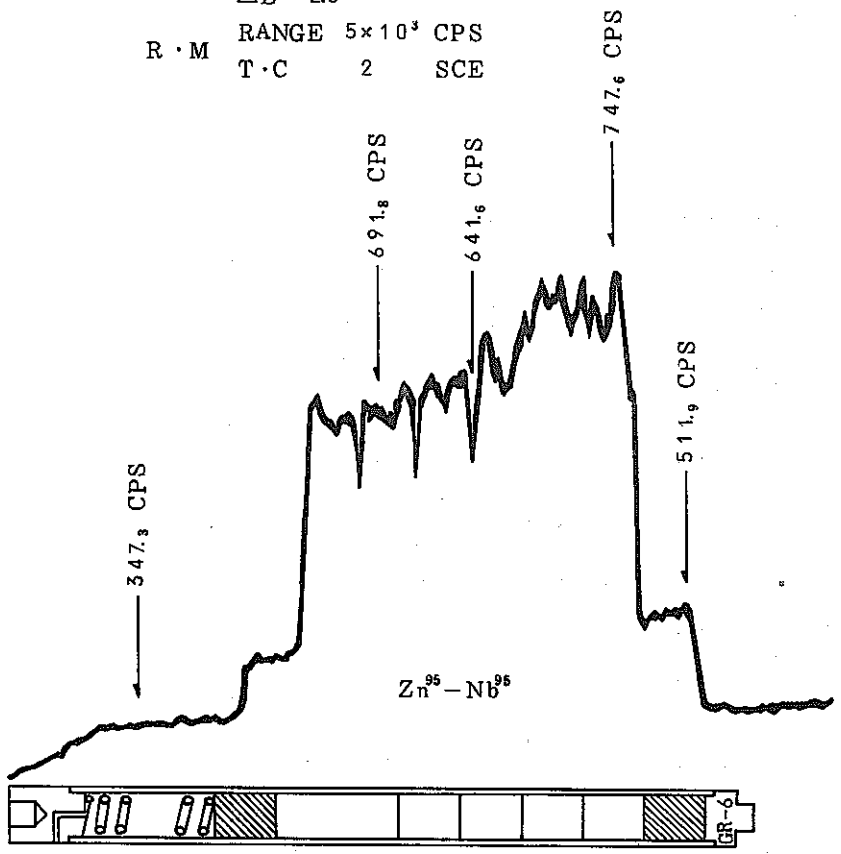


図 II-3(5) GR-5 ピンγスキャン結果

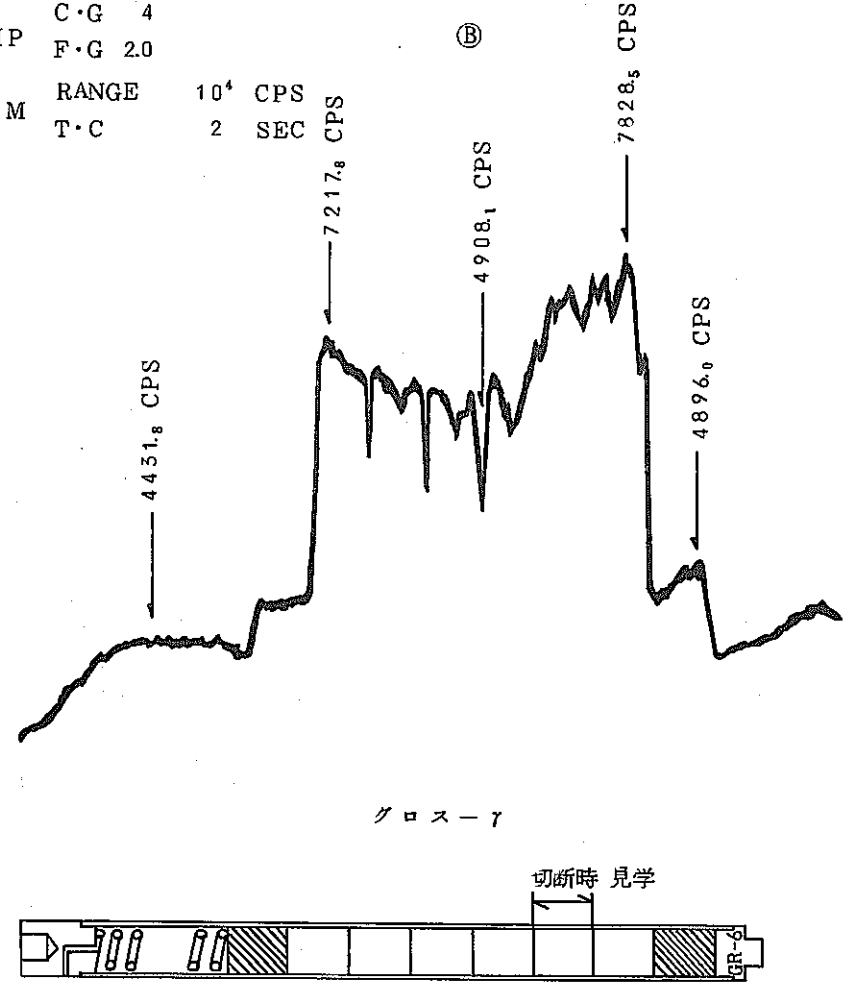
GR-6  
 1974-3-2  
 AMP C·G 8  
 F·G 2.6  
 S·C·A E 5.8  
 ΔE 2.0  
 R·M RANGE  $5 \times 10^3$  CPS  
 T·C 2 SCE

Ⓐ



GR-6  
 1974-3-2  
 AMP C·G 4  
 F·G 2.0  
 R·M RANGE  $10^4$  CPS  
 T·C 2 SEC

Ⓑ



図II-3(6) GR-6ピンγスキャン結果

II-2 フラックスモニターワイヤーの $Co^{60}$ の定量

## II-2-1 フラックスモニターワイヤー測定結果

フラックスモニターワイヤーはカプセル1体につき1本封入されている。モニターワイヤーは、燃料ピン2本にまたがる長さで、約290 mmである。

測定方法は、最初にモニターワイヤーの $\gamma$ スキヤニングを行い、切断位置を決め試料を採取した。採取したサンプルはその重量を測定し、IAEA標準線源との比較測定により試料の $^{60}Co$ の定量を行った。

## II-2-2 ガンマスキヤニング

試料の生成核種の確認、その他F・Pによる汚染のないことを確認した後に、 $\gamma$ 線強度分布測定のため $^{60}Co$ のPhoto Peakによる $\gamma$ スキヤニングを行った。

この結果を図II-4(1)~II-4(3)に示す。

II-2-3  $^{60}Co$  定量

$\gamma$ スキヤンの終了した試料は、ケーブル内で2~3 mmのサンプルを数点切断採取し、アセトンによる洗浄後重量測定し、NaI(Te)3"×3" 検出器、400 ch, P.H.Aを使用してIAEA標準線源との比較測定により $^{60}Co$ の定量を行った。

その結果を表II-2と図II-5に示す。

表II-2  $Co^{60}$ 定量結果

キャプセル	ワイヤー上部からの距離 (mm)	$Co^{60}$ 定量値 ( $\mu Ci/mg$ )
G-4	120	59.17
	213	101.33
	270.3	164.03
G-5	52	39.83
	143	77.83
	232	141.87
G-6	29	245.30
	120	525.50
	230	1,075.83



HL-822(G-4) S. 42 1. 10

PANGE  $1 \times 10^2$  cps

T.C 2

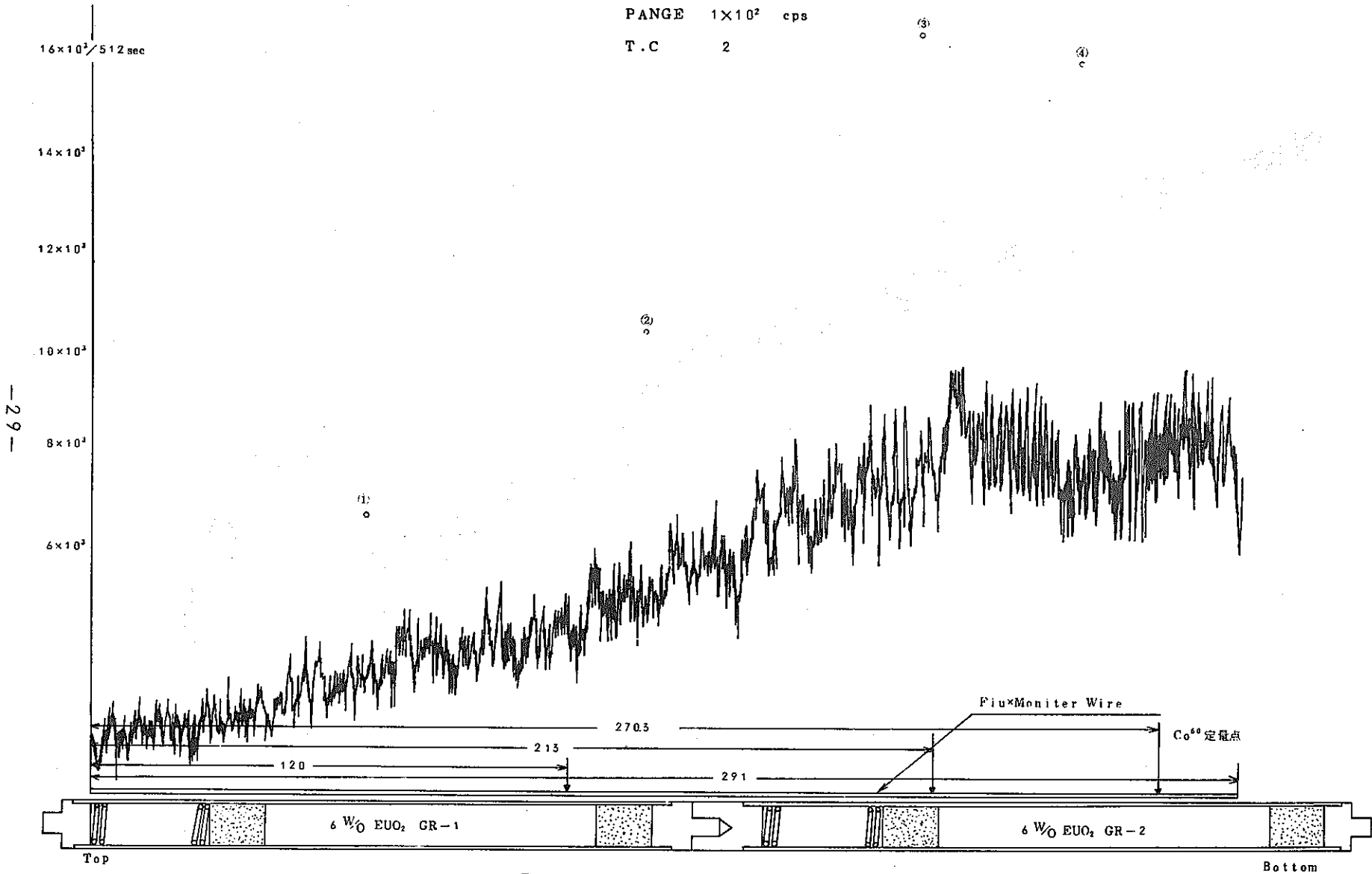


図 1. G-4 カプセルモニターワイヤーアスキャン結果

- 30 -

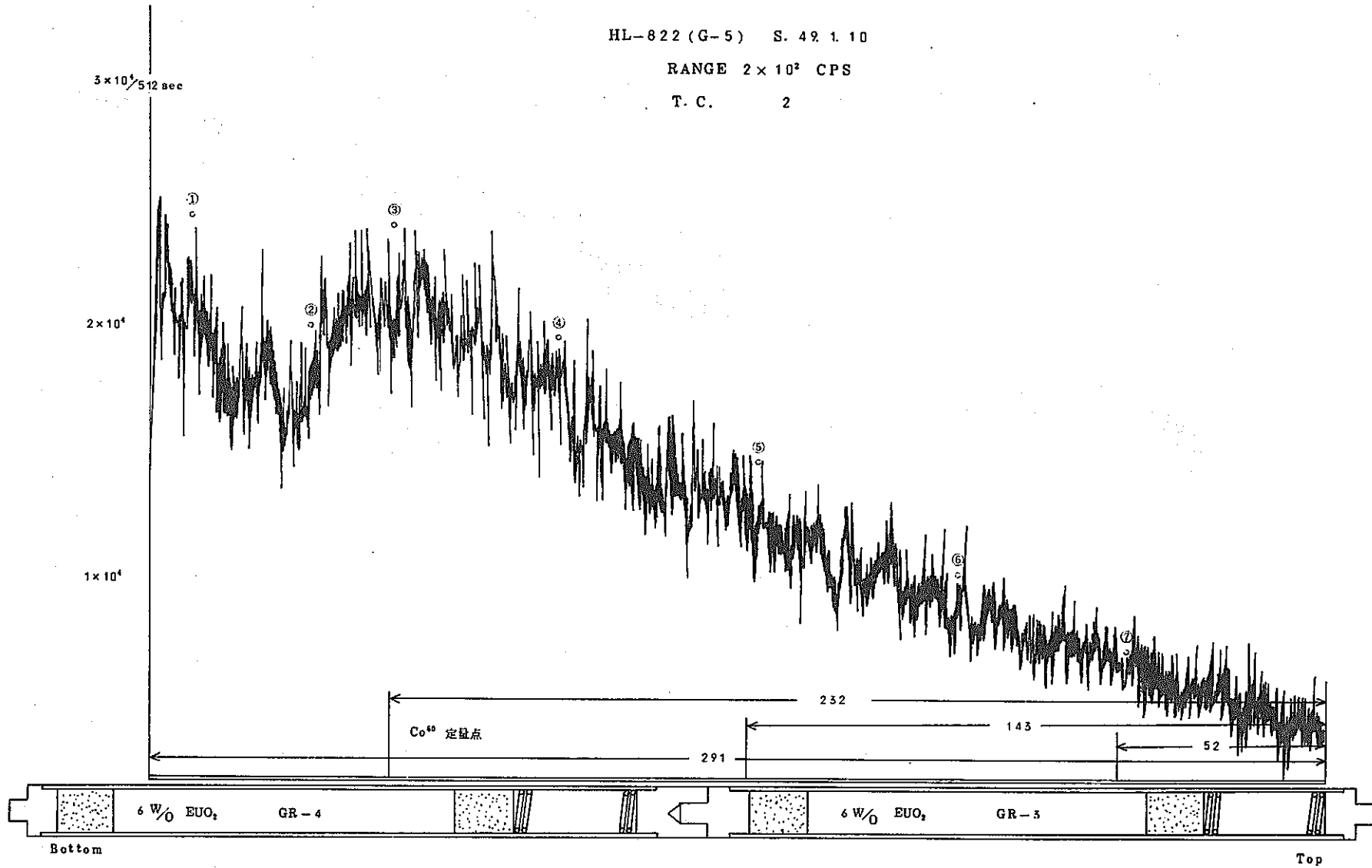


図 2 G-5 カプセルモニターワイヤーアスキャン結果

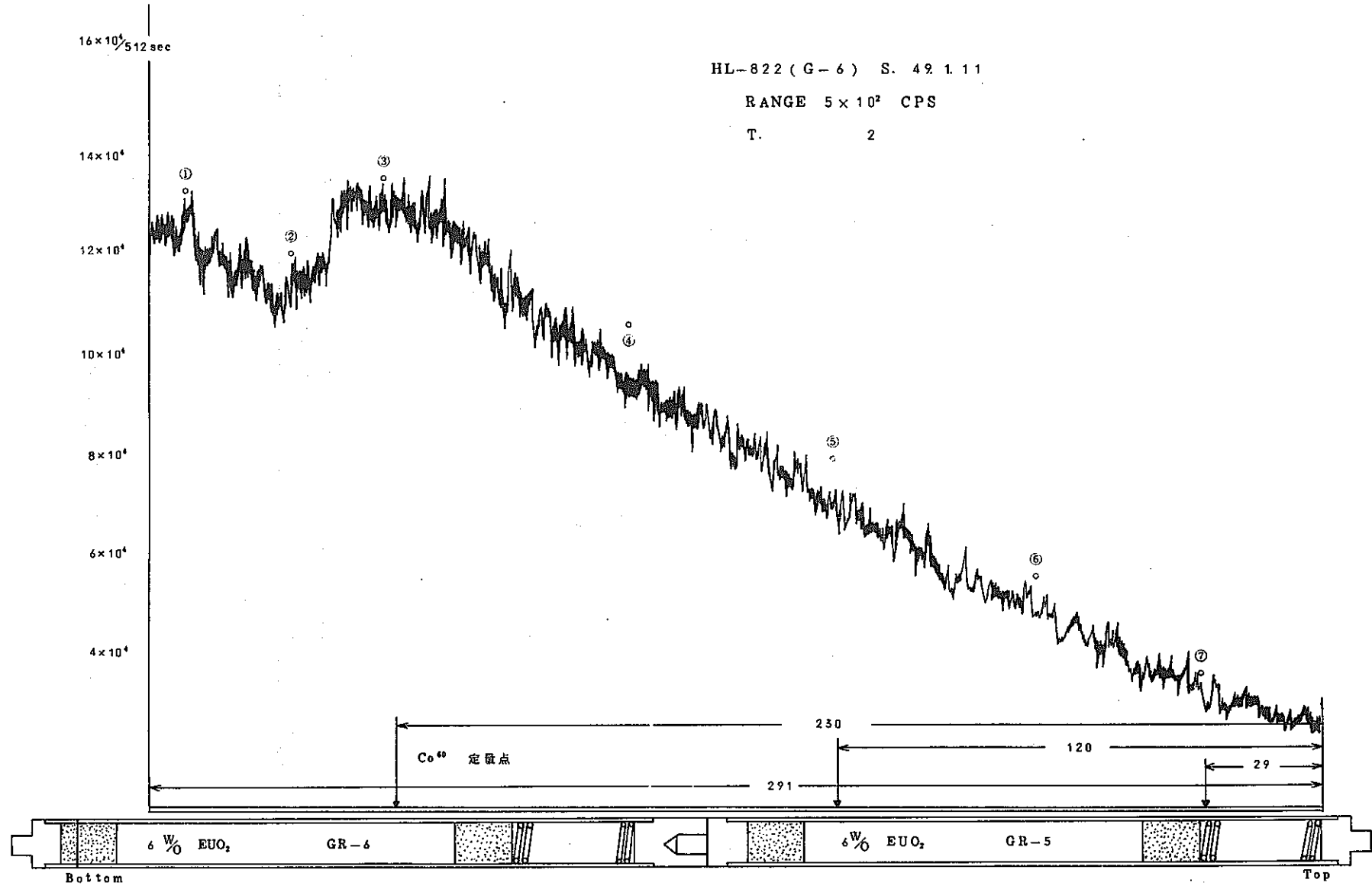


図-3 G-6カプセルモニターワイヤーアスキャン結果

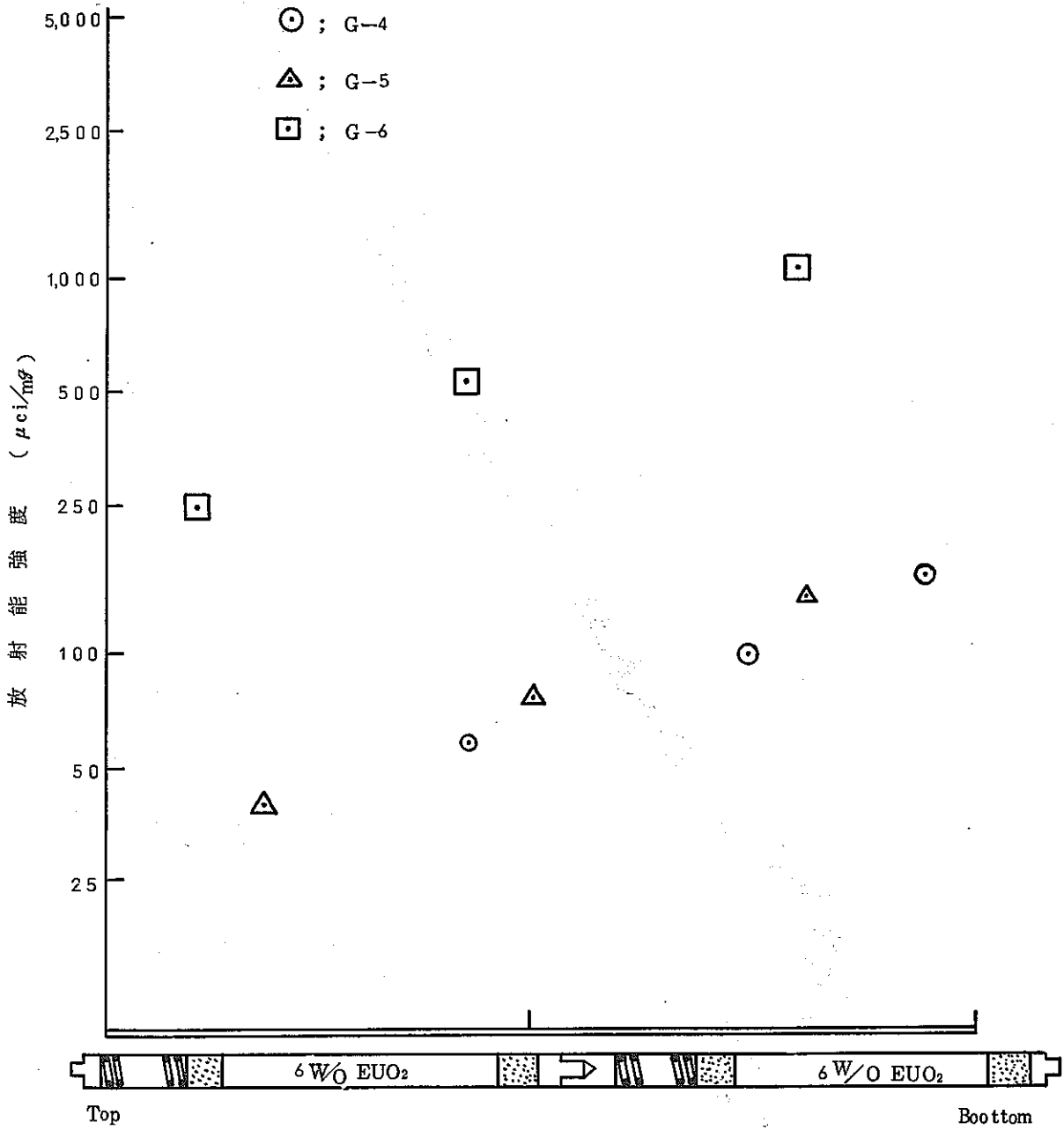


图 II-5 <sup>60</sup>Co 定量值

## II-3 破壊試験

### II-3-1 パンクチャーテスト

燃料ピン内の全ガス量と $^{85}\text{Kr}$ の定量を目的とし、全ピンについてパンクチャーテストを行った。

キャプセル搾孔装置で燃料ピンブレナム部に孔を明け、全ガス量をオイルマンノメーターにより測定した。またこのガスの一部を捕収し、 $^{85}\text{Kr}$ の定量をおこなった。測定結果を表II-3に示す。

燃料ピン中に封入されていたヘリウムガス量を計算し、総ガス量から差し引いてF.P.ガス量と吸着ガス量の和を求めた。これも合せ表II-3に示す。

### II-3-2 金相試験位置

各燃料ピンについて2ヶ所ずつの金相試験を行った。金相試験の位置関係を図II-6に示す。燃料ペレットの密度が低いので、ペレットが崩れることを恐れ慎重に作業を行った。金相試験技術については附録5を参照されたい。

### II-3-3 金相試験

この照射試験においては、金相組織変化に関する燃料挙動が研究の主題になっているので、金相試験は特に念入りに行った。

各金相面ごとに撮影した写真の種類を表II-4にまとめた。金相試験で得られた結果を照射前ペレットの金相写真の一例と共に写真II-5より写真II-23に示す。

金相面の全体連続写真はペレット組織変化の解析に極めて有効であった。試料面にかけて落ち、クラック等が多くある場合には、従来から行われて来た一つの直径の連続写真では不十分で精密な金相解析は行えない。

表II-3 パンクチャーテストの結果

燃料ピン名	全放出ガス量 CC at. N.T.P	全放出ガス量 Mole	ヘリウムガス量 CC at. N.T.P	$n_{He}$ * Mole	$n_{F.P.}^{**} + n_{abs}^{***}$ Mole	$^{85}Kr$ 全放射能 $\mu Ci$	$^{85}Kr$ Mole
GR-1	4.06	$1.8125 \times 10^{-4}$	3.4351	$1.5335 \times 10^{-4}$	$2.79 \times 10^{-5}$	2.04	$6.143 \times 10^{-11}$
GR-2	3.69	$1.6473 \times 10^{-4}$	3.0048	$1.3414 \times 10^{-4}$	$3.059 \times 10^{-5}$	11.21	$3.376 \times 10^{-10}$
GR-3	4.26	$1.9018 \times 10^{-4}$	3.4075	$1.5212 \times 10^{-4}$	$3.806 \times 10^{-5}$	12.32	$3.710 \times 10^{-10}$
GR-4	4.66	$2.0804 \times 10^{-4}$	3.0520	$1.3625 \times 10^{-4}$	$7.179 \times 10^{-5}$	99.34	$2.991 \times 10^{-9}$
GR-5	6.82	$3.0446 \times 10^{-4}$	3.0433	$1.3586 \times 10^{-4}$	$1.686 \times 10^{-4}$	208.84	$6.289 \times 10^{-9}$
GR-6	4.38	$1.9554 \times 10^{-4}$	3.0985	$1.3833 \times 10^{-4}$	$5.721 \times 10^{-5}$	3518.67	$1.060 \times 10^{-7}$

\*  $n_{He}$  : 燃料ピン製造時に封入されたHeのモル数

\*\*  $n_{F.P.}$  : 燃料ピン内に生成されたF.P.ガスモル数

\*\*\*  $n_{abs}$  : 燃料ペレットに吸着されていた吸着ガスモル数

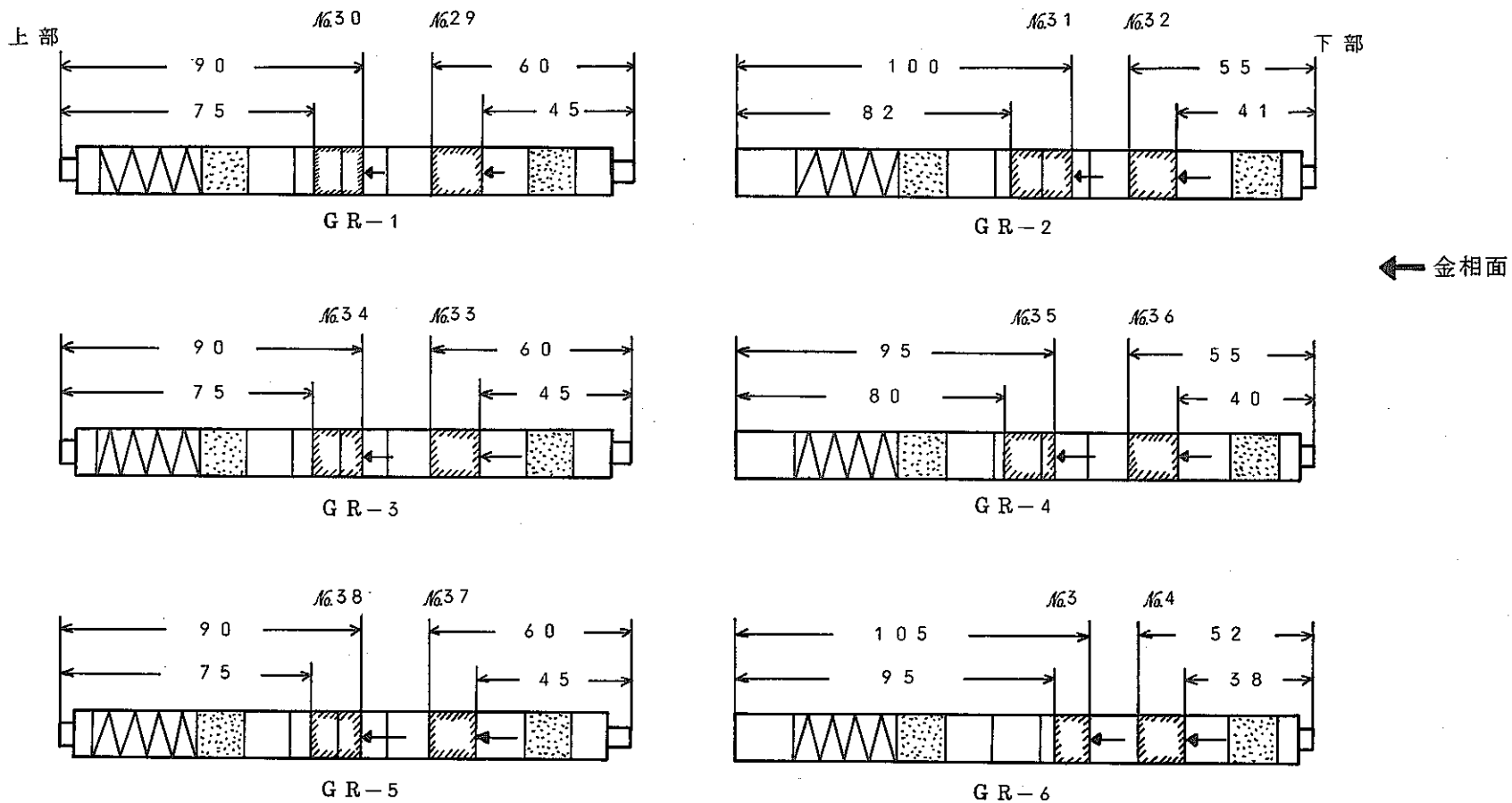


図 II - 6 各燃料ピンの金相試験位置

表II-4 金相試験で撮影した写真の種類

撮影項目	ピン板 埋込板 HL 倍率	GR-1		GR-2		GR-3		GR-4		GR-5		GR-6	
		29 *(下)	30 (上)	31 (上)	32 (下)	33 (下)	34 (上)	35 (上)	36 (下)	37 (下)	38 (上)	3 (中央部)	4
マクロ写真	×5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
全体連続写真	×50		○	○			○	○		○			1/4連続有り
Dia連続写真	×100	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
マイクロ写真 (エッチ前)	×200	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	
マイクロ写真 (エッチ後)	×200	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		

\* ( )内の上, 下は, プレナム部が(上)とし, END PLAGの方向を(下)とした。



1) GR-1ピン

## イ) 試料No 29

燃料ペレットは、焼結が進んでいる段階であり、外周部、中間部、中心部におけるグリーンサイズに大きな変化は観られず、約5 $\mu$ 程度のものである。

また、外周部、中間部、中心部での組織上の違いには、5 $\mu$ 程度のグリーンサイズの組織ではあるが、中心部に向うほど、ボイドの合体でできた比較的大きなボイドがみられる。

中心空孔、柱状晶、等軸晶は発達していないが、ペレット全体は収縮している。

## ロ) 試料No 30

29番の試料に比較し焼結は進んでいる。また、ボイドの少ない領域も大きくなり、グリーンサイズも全般的に大きなものが存在する。グリーンサイズは、 $\sim 15\mu$ 程度である。

ボイドの形状は細長く熱力学的に不安定状態の形であり、その大きさと数は、外周部は小さく多く、中心部に向って大きく少くなる。

2) GR-2ピン

## イ) 試料No 31

この燃料ピンは、組織変化が大きく、中心空孔、柱状晶、等軸晶が発達し、外周部は完全な焼結体であると思われる。外周部のグリーンサイズは、 $\sim 25\mu$ 程度であり、ボイドの形状は、GR-1ピンの場合と異なり円に近い、いわゆる普通の焼結 $UO_2$ ペレットの様な状態である。柱状晶内のボイドは、レンズ状ボイドが比較的少なく、葉巻状あるいは、かき状のボイドがよく観られる。またクラックのヒーリング現象も観られる。

燃料ペレット全体は、収縮が大きい。

## ロ) 試料No 32

31番の試料とほぼ同じであるが、レンズ状ボイドがやや多い。

写真中、中心空孔内の燃料は、かけ落ちたものである。

3) GR-3ピン

## イ) 試料No 33

燃料ペレットは外周部に於いても焼結状態である。グリーンサイズは、外周部と中間部にちがいがあり中間部と中心部には、大きな相異はない。しかし、グリーンサイズの大きさからすると、外周部、中間部、中心部としだいに大きくなっていることが観察される。

GR-1ピンに比較し、このピンの方がはるかに焼結は進んでいる。このため金相面もきれいである。

中心空孔、柱状晶などは発達していないが中心部にボイドが集まり出している現象が観察される。このピンの照射時間は5時間であったが、この時間がもう少し長ければ、中心空孔は発達すると思われる。

いいかえれば、この燃料ピンは、中心空孔のあき始めの現象を表わしていると言える。

ロ) 試料№34

試料№33と類似の組織をしている。中心空孔のあき始めの燃料挙動が33番の試料よりもはっきりしている。

4) GR-4ピン

イ) 試料№35

この燃料ピンは、組織変化が大きく燃料ペレット全体がほとんど柱状晶領域である。またペレットの外周は、写真からもわかるようにデンドライド状の複雑な形状をしている。

中心空孔は、大きく発達し、偏心している。柱状晶領域にボイドの少ないシングルクリスタル状のグリーン領域と、ボイドの多い柱状晶領域とが観られる。

ロ) 試料№36

この部の金相結果では、35番の試料の様な柱状晶の極端な発達を観られない。

この部は、先の35番の試料の位置よりも温度的に低かったものと推察される。

その他の組織については、35番の試料と同様に中心空孔、柱状晶、等軸晶領域が良く発達しており、柱状晶がペレット外周部までは達しておらず等軸晶領域となっている。

5) GR-5ピン

イ) 試料№37

38番のペレットとは逸い焼結は進んでおり、グリーンサイズも大きい。

中心空孔、柱状晶、等軸晶領域は観られない。

この燃料ピンは、ニュートロンラジオグラフィからもわかる様にペレットは原形を保っておらず全体的に崩れている。

ロ) 試料№38

この燃料ペレットは、焼結はしているが大きな組織変化は起していない。

ペレットは原形を保っておらず、ピン取出し時や切断時などの振動により、かけら状になっている。

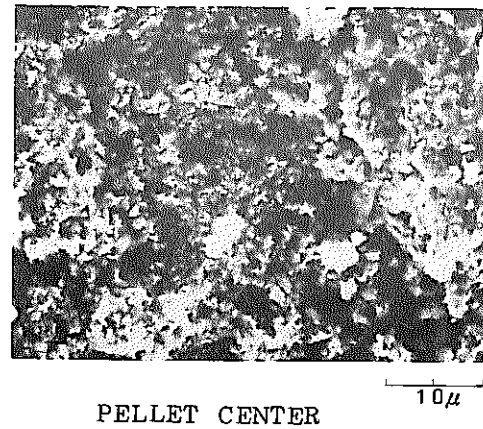
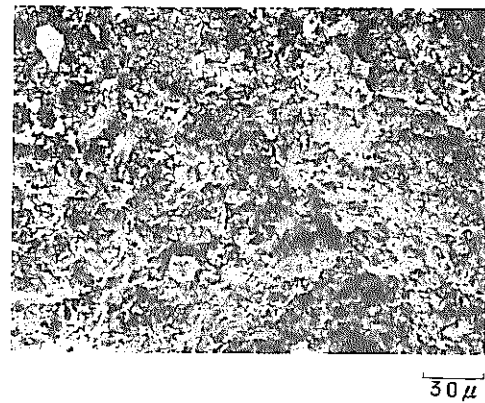
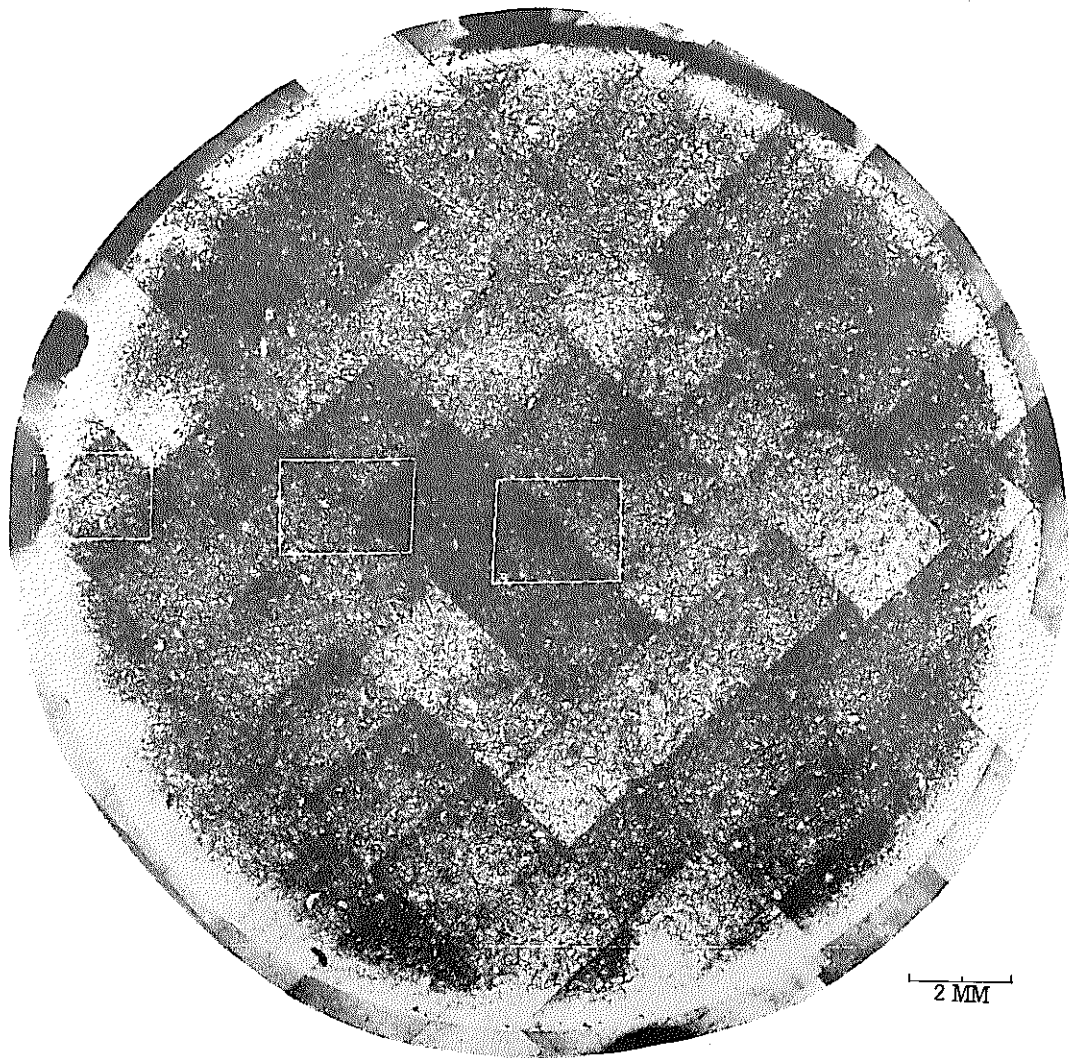
グリーンサイズは、GR-1ピンの試料№30番と同じ程度である。

6) GR-6ピン

この燃料ピンは、中央部についての金相試験だけしか行っていないが、大きな組織変化を起していることがわかる。

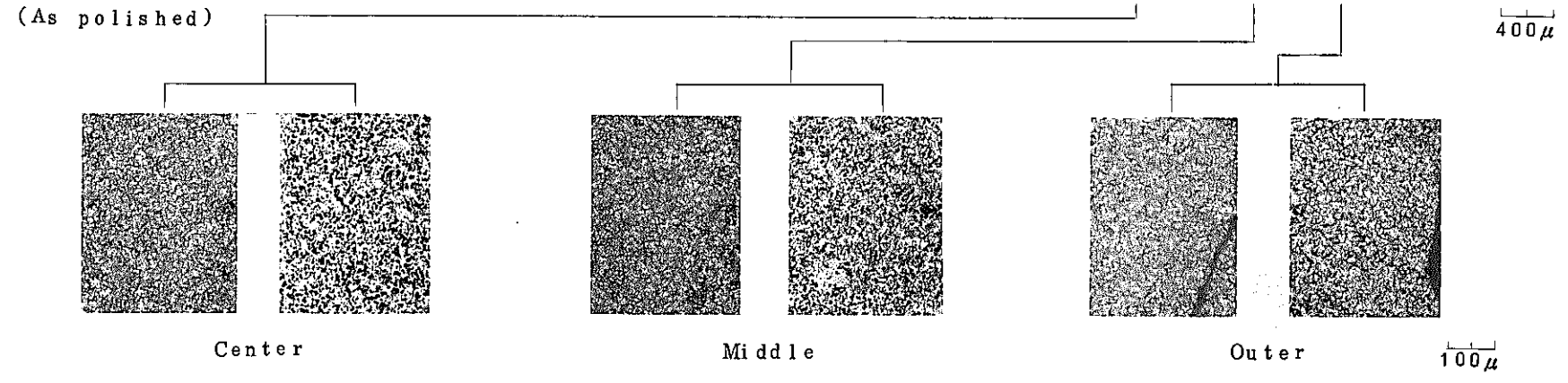
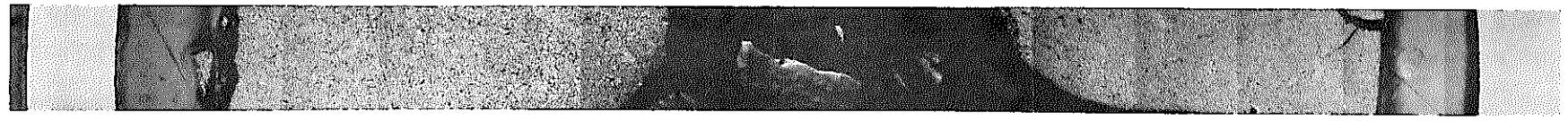
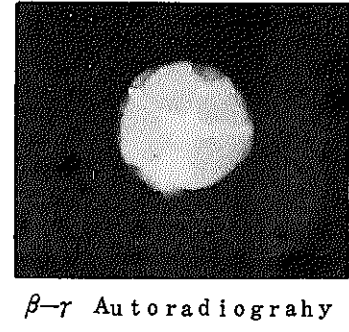
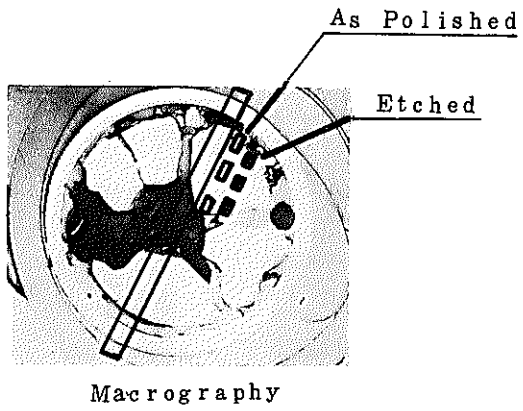
GR-4ピン同様デンドライド状の部分がペレット外周領域に観られる。

柱状晶は燃料ペレット全体に発達しており、中心空孔も6本の燃料ピンの中で一番大きく発達している。



- 40 -

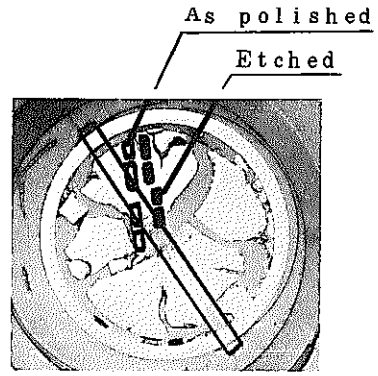
写真 II - 5 Before Irradiation Sample



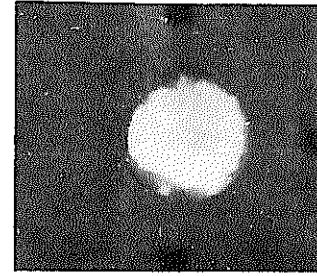
Micrograph

写真II-6 GR-1 PIN Specimen No. 29

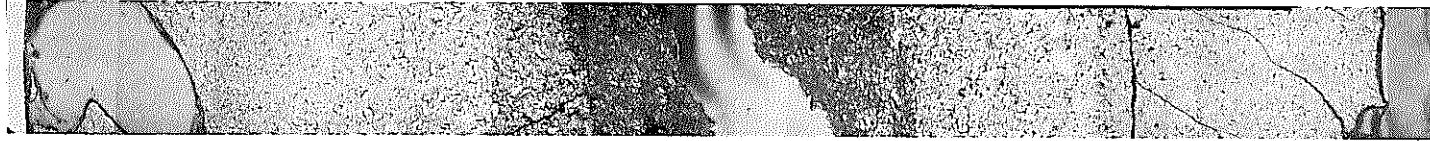
-41-



Macrography



$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography



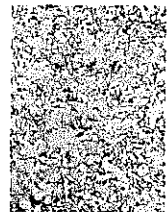
(As polished)

400  $\mu$



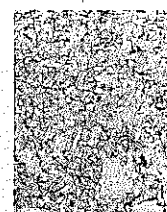
(Etched)

Outer



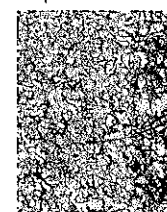
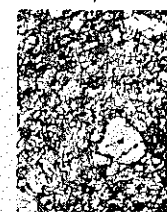
(Etched)

Middle



(Etched)

Center



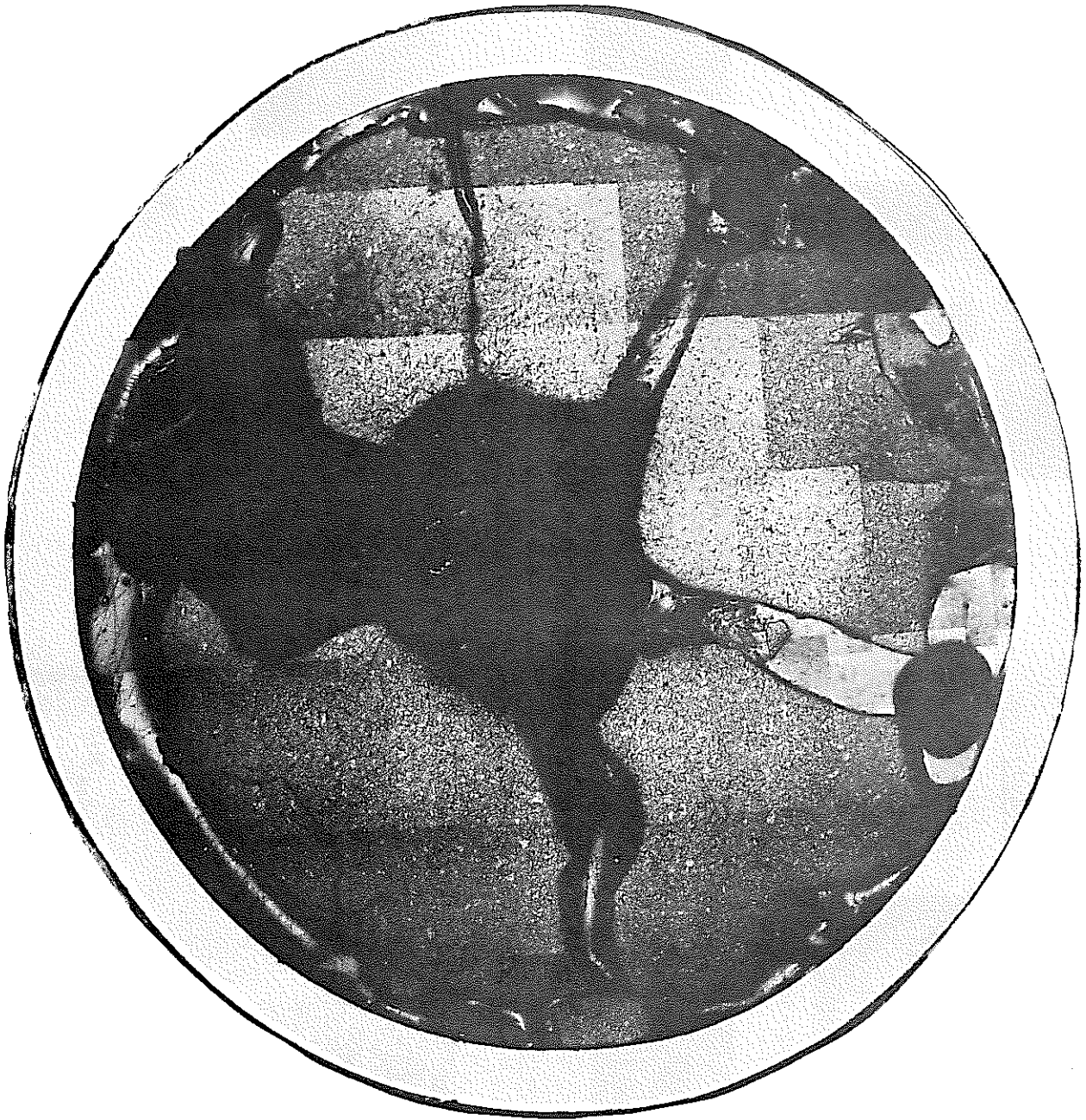
(Etched)

100  $\mu$

Center

Micrography

写真 II-7 GR-1 Specimen No. 30

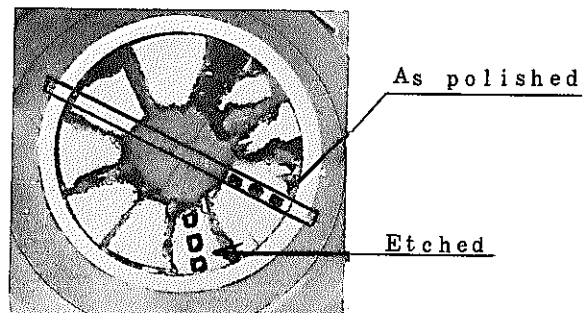


Transverse Section

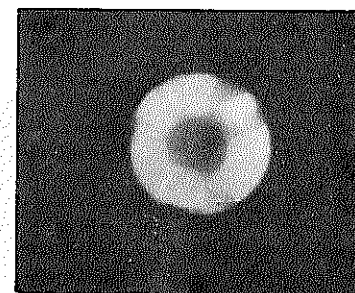
写真Ⅱ-8 Low Magnification Composite PIN No. GR-1

No. 29

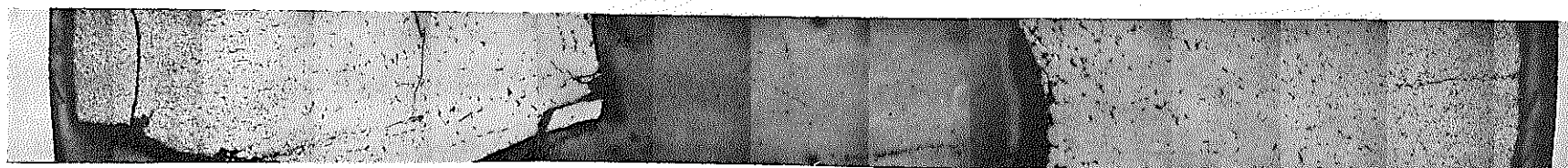




Macrography

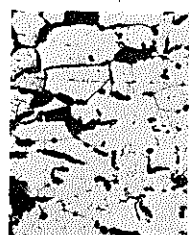


$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography

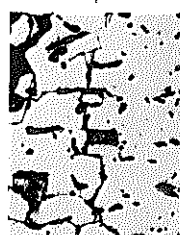


(As polished)

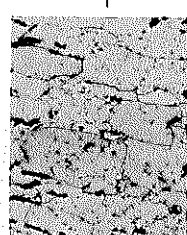
400  $\mu$



(Etched)

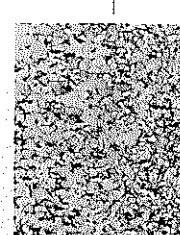
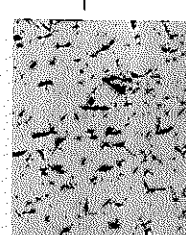


Center



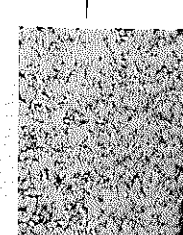
(Etched)

Middle



(Etched)

Outer

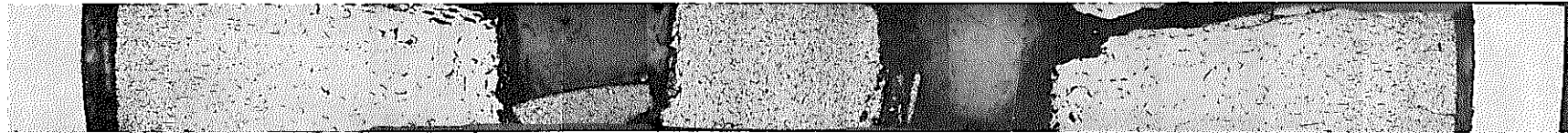
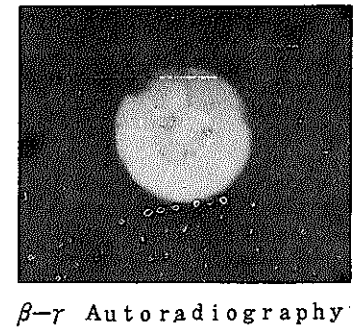
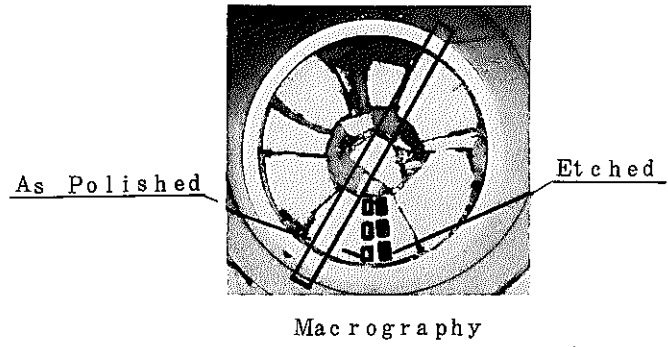


100  $\mu$

Micrography

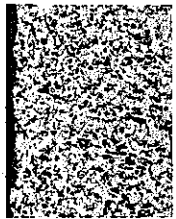
写真II-9 GR-2 PIN Specimen No 31





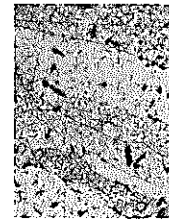
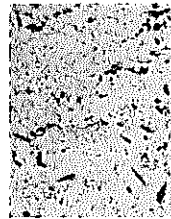
(As Polished)

400  $\mu$



(Etched)

Outer



(Etched)

Middle



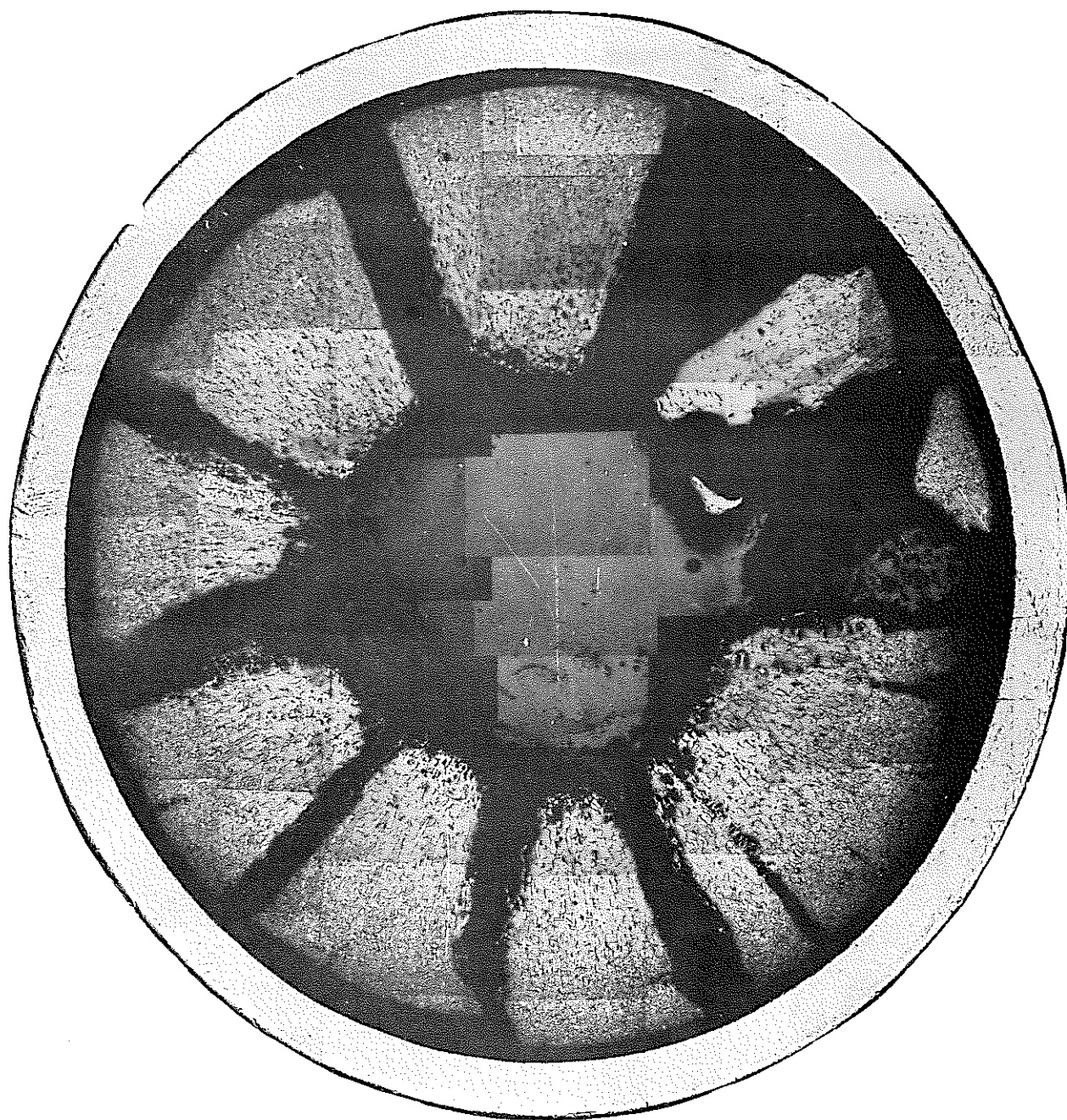
(Etched)

Center

100  $\mu$

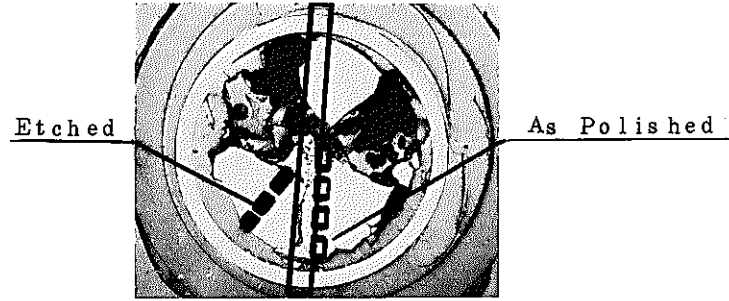
Micrography

写真II-10 GR-2 PIN Specimen No. 32

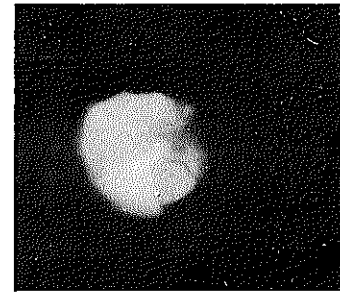


Transverse Section

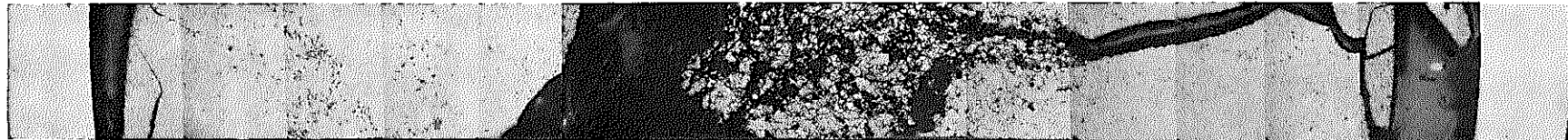
写真Ⅱ-11 Low Magnification Composite PIN №GR-2



Macrography



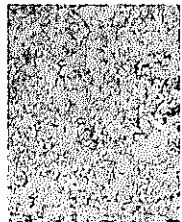
$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography



(As Polished)

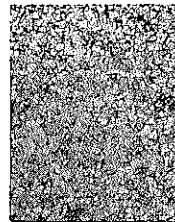
400 $\mu$

1-47-



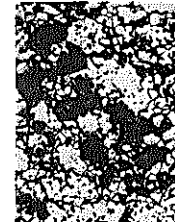
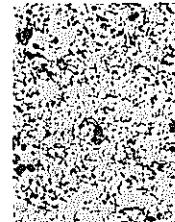
(Etched)

Outer

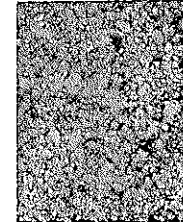


(Etched)

Middle



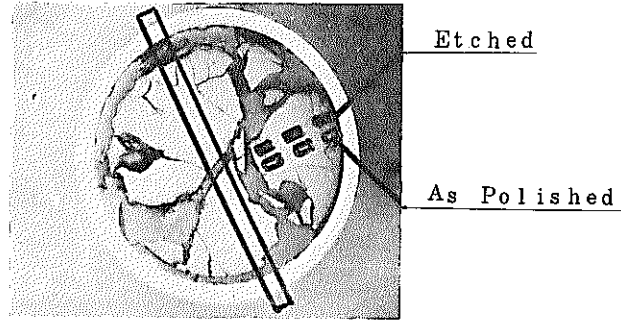
Center



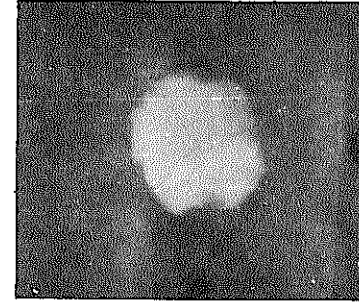
(Etched)

100 $\mu$

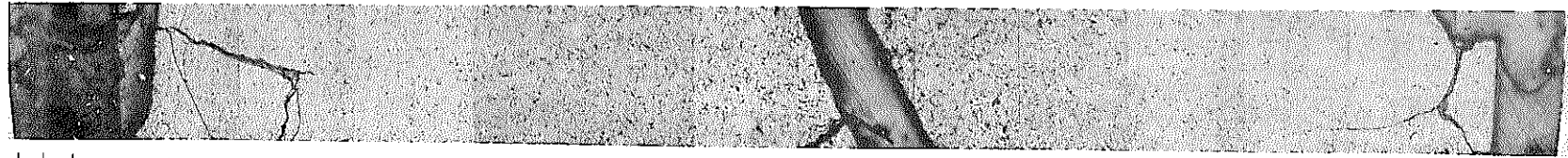
Micrography



Macrography

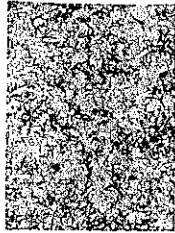


$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography



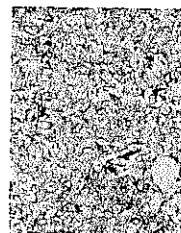
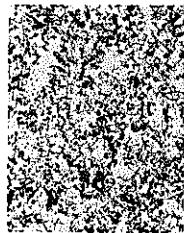
400 $\mu$

(As Polished)



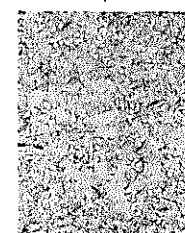
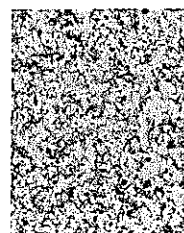
(Etched)

Center



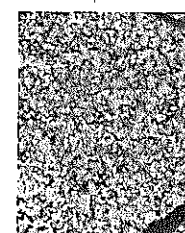
(Etched)

Middle



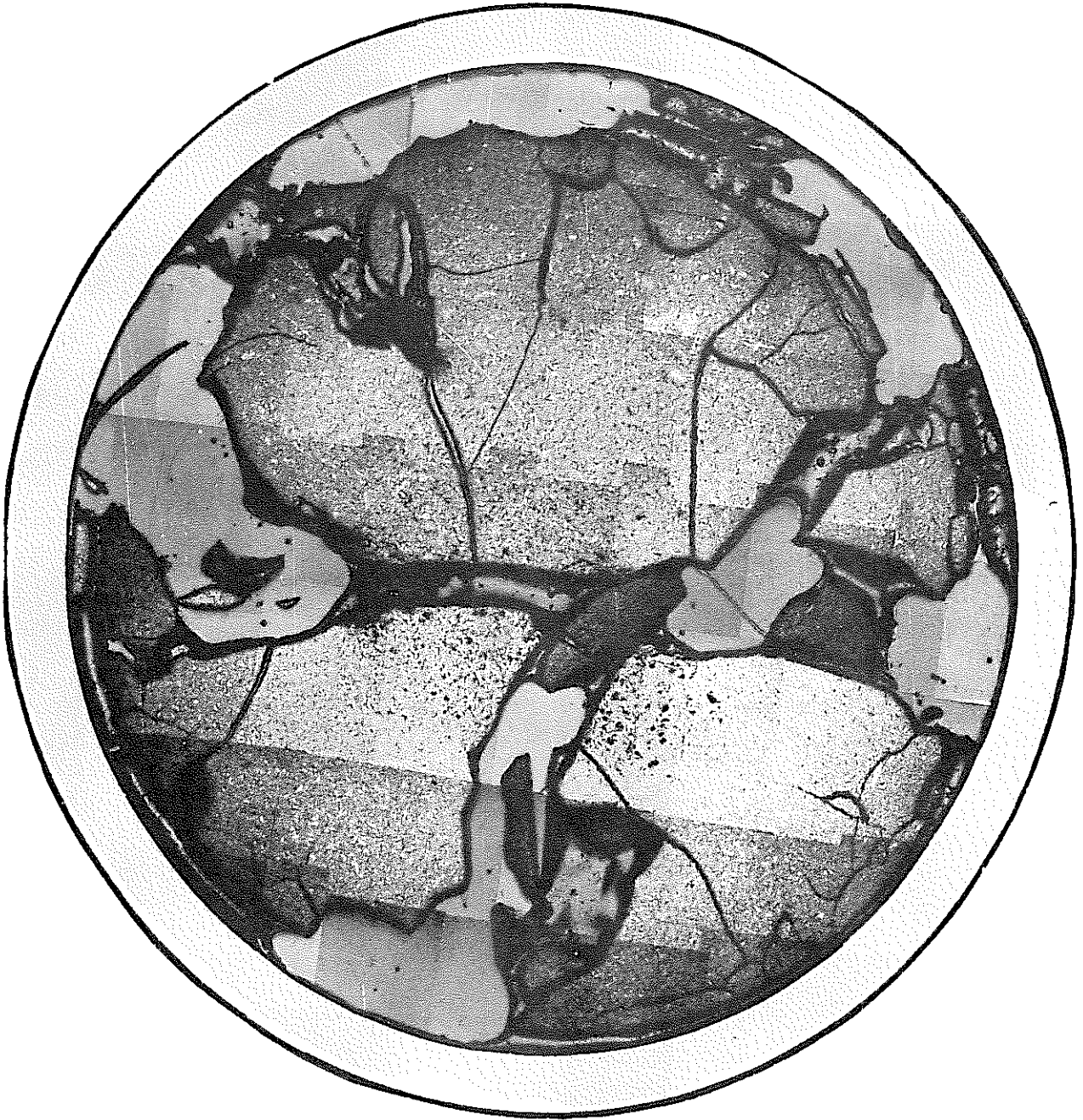
(Etched)

Outer



100 $\mu$

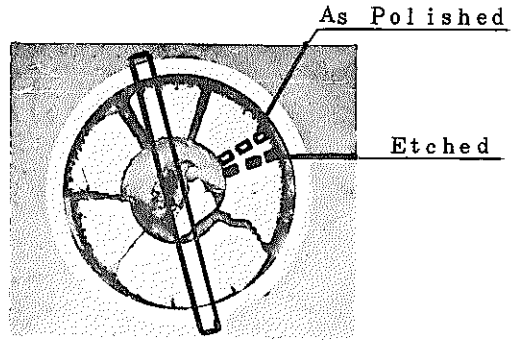
Micrography



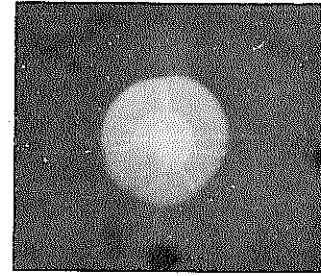
Transverse Section

写真Ⅱ-14 Low Magnification Composite PIN №GR-3 №34

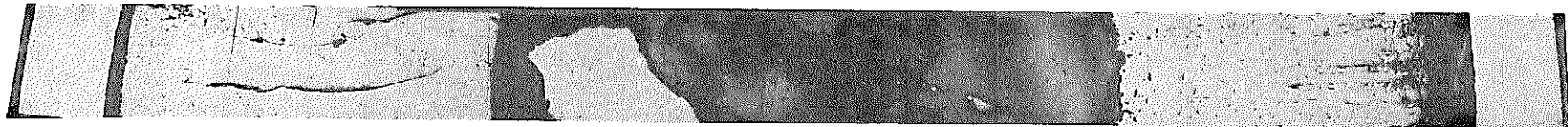




Macrography



$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography



(As Polished)

400 $\mu$



(Etched)

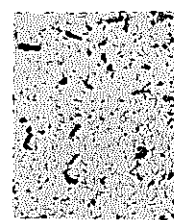


Center

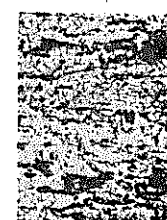


(Etched)

Middle

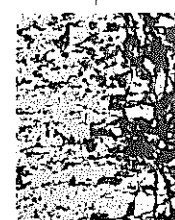


Micrography

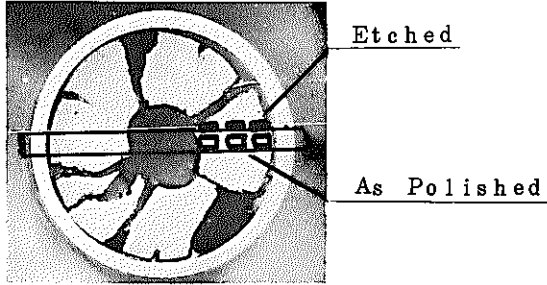


(Etched)

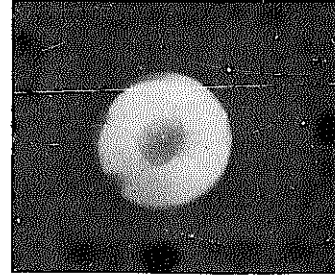
Outer



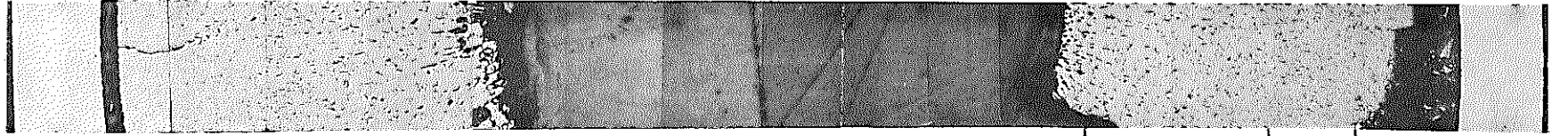
100 $\mu$



Macrography



$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography

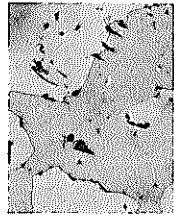


400 $\mu$

(As Polished)

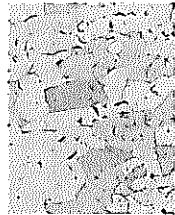


100 $\mu$



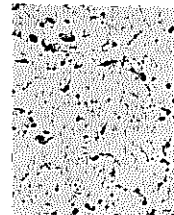
(Etched)

Center



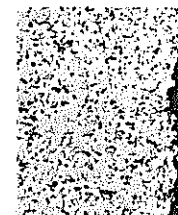
(Etched)

Middle



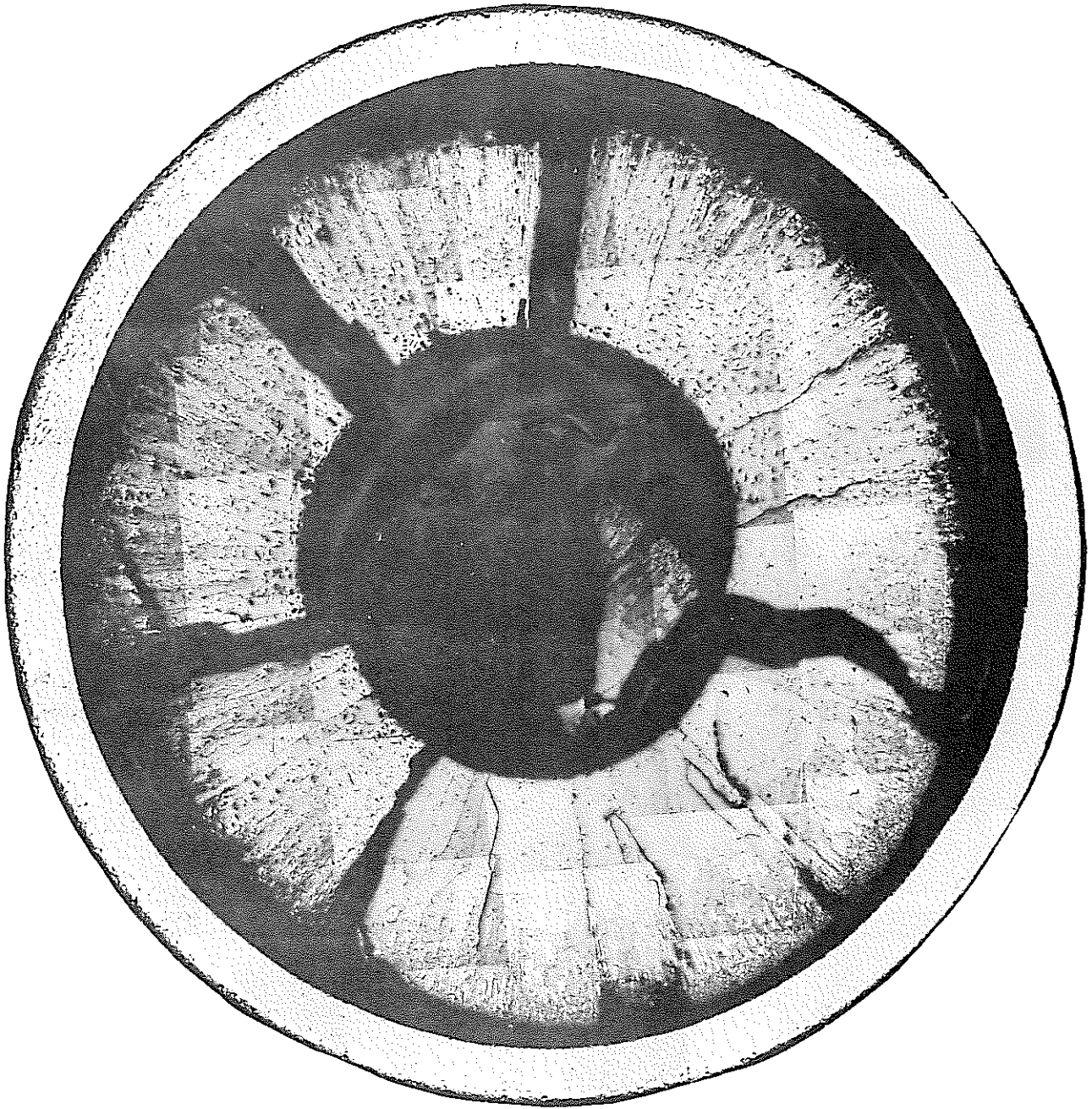
(Etched)

Outer



Micrography

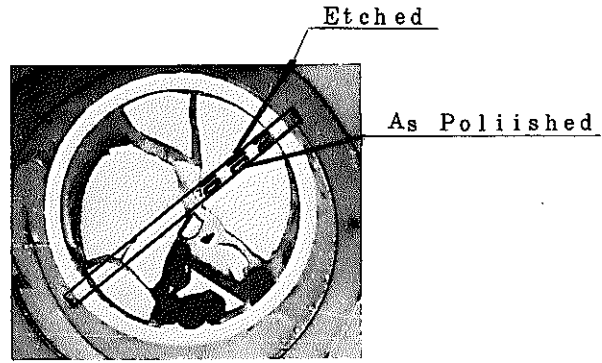
写真II-16 GR-4 PIN Specimen No. 36



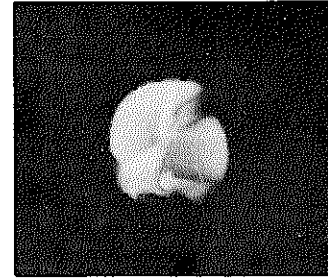
Transverse Section

写真Ⅱ-17 Low Magnification Composite PIN №GR-4 №35

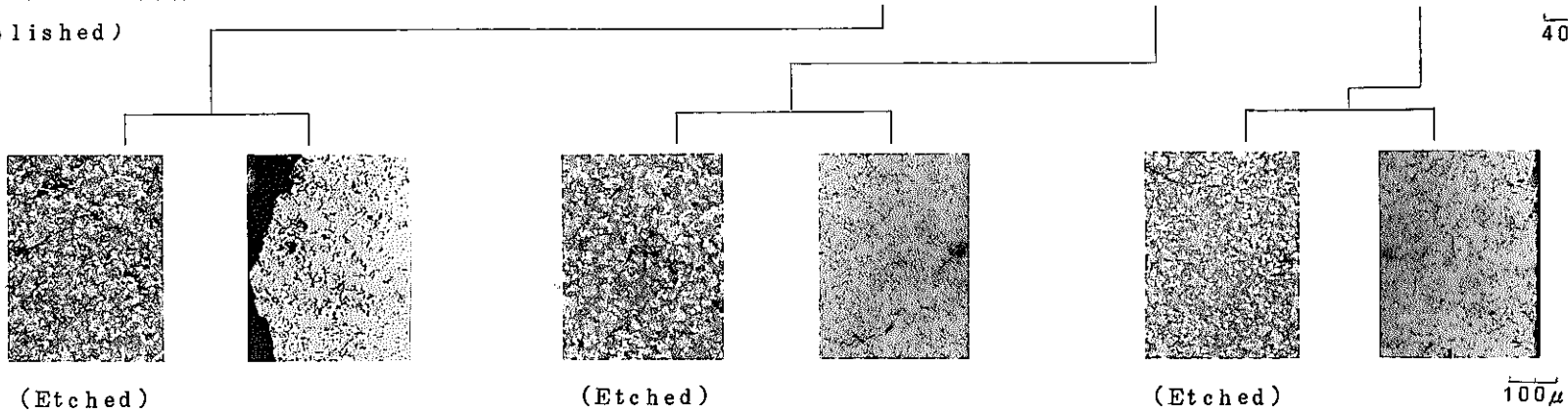
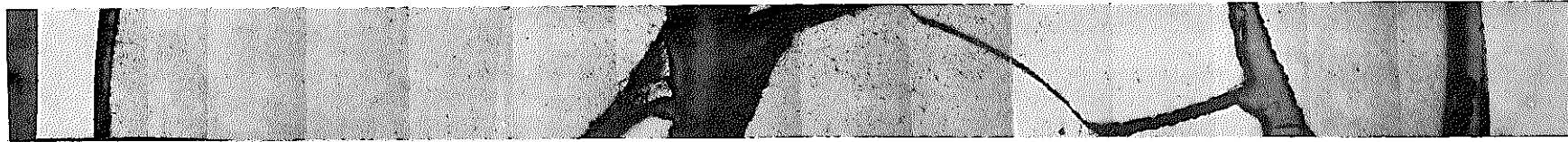




Macrography



β-γ Autoradiography

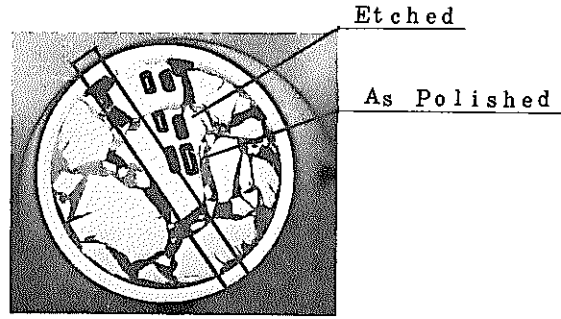


Center

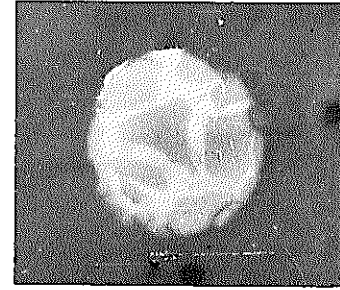
Middle  
Micrography

Outer

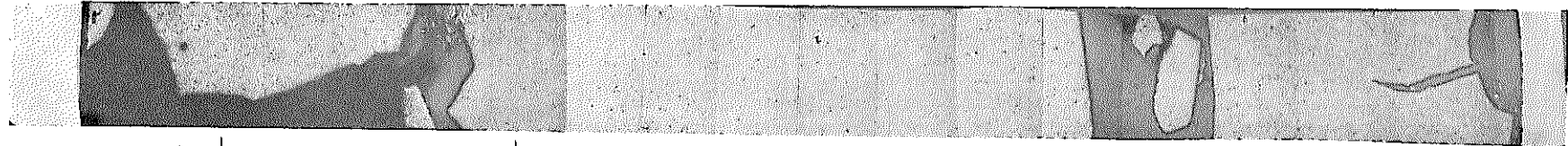
写真II-18 GR-5 PIN Specimen No. 37



Macrography

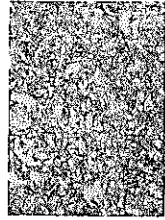


$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography



(As Polished)

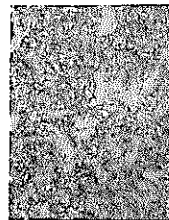
400  $\mu$



Outer



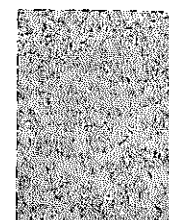
(Etched)



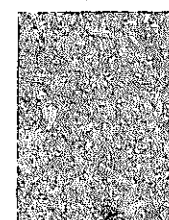
Middle



(Etched)



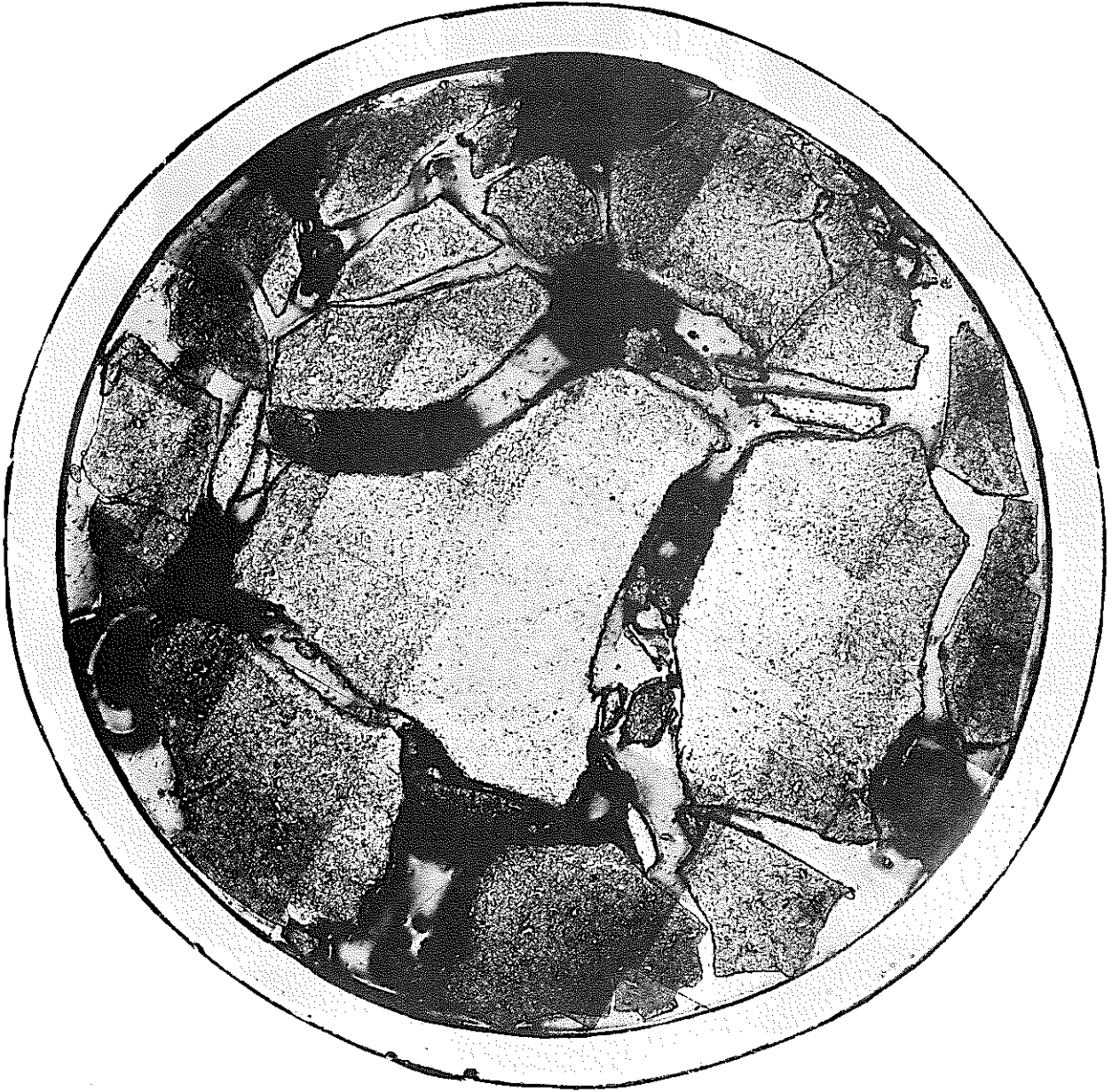
Center



(Etched)

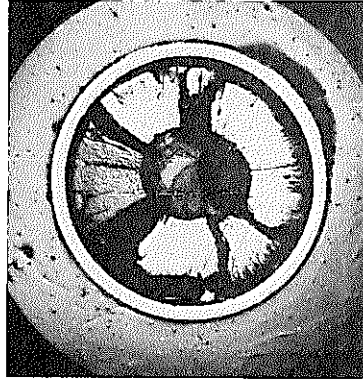
100  $\mu$

Micrography

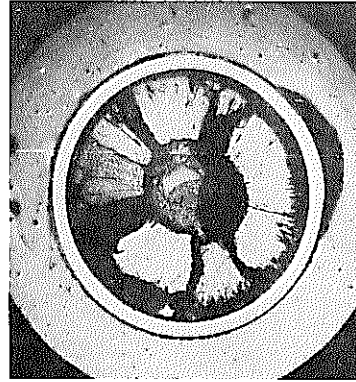


Transvers Section

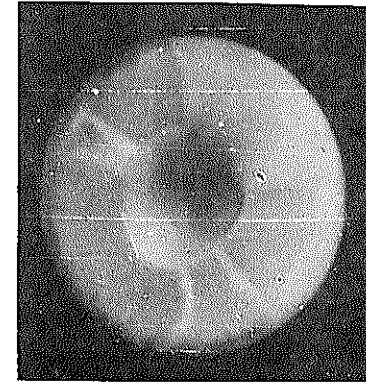
写真Ⅱ-20 Low Magnification Composite PIN №GR-5 №38



Macrography (As Polished)

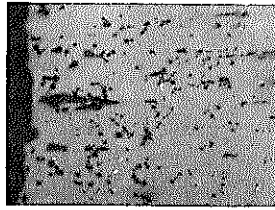


Macrography (As Polished)

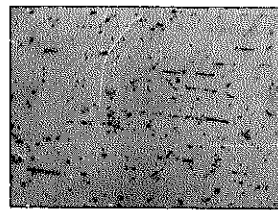


$\beta$ - $\gamma$  Autoradiography

(As Polished)

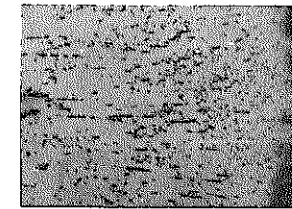


Center



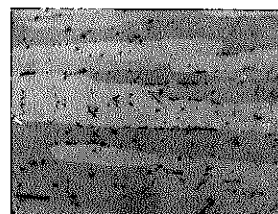
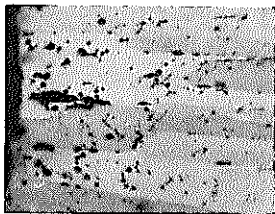
Middle

100 $\mu$

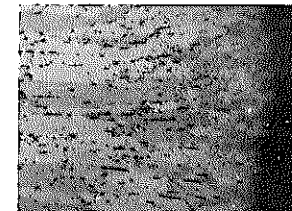


Outer

(Etched)



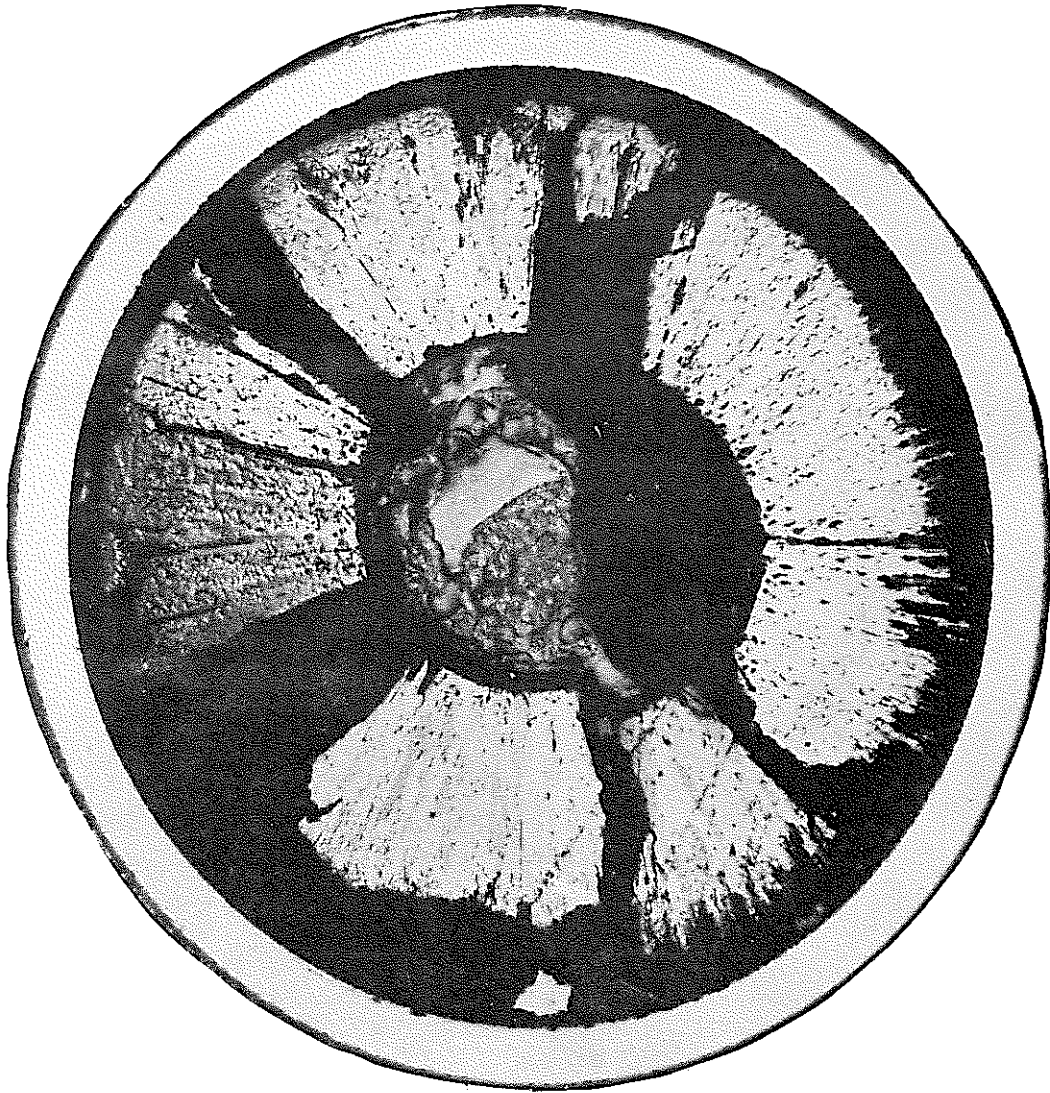
Micrography





Transverse Section

写真Ⅱ-22 Low Magnification Composite PIN NoGR-6 No3



Transverse Section

写真Ⅱ-23 Low Magnification Composite Pin №GR-6 №3

### III 考 察

#### III-1 非破壊試験の結果について

##### III-1-1 燃料ピン寸法変化

低密度燃料を実用化するにあたって、懸念されたことの一つは、軸方向に燃料ミートの移動がおこり燃料ピン破損の原因になりはしないか、ということであった。

以上事について、燃料ピンの寸法変化とガンマースキャンニングの結果から次のことが得られた。

燃料スタックの中心附近のミートが燃料ピン下部に落下し、この部の被覆管をペレット-被覆管の相互作用により押しひろげた形跡が観られる。GR-4とGR-6ピンの被覆管寸法変化に示されている。

GR-1, 3, 5のように組織変化を起していない燃料ピンでは、ミートの落下はあまりなく燃料ピン下部のピン直径が大きくなっているようなことはない。

ここで $\Delta D/D_0$ の変化のもっとも大きかったGR-6ピンについて記す。

GR-6ピンの寸法測定結果をみると、燃料ピン下部でピン直径が著しく増大している。 $\Delta D/D_0$ にして、1.06%にまで達し、この直径の増加はペレットと被覆管の機械的相互作用によってもたらされたと解釈させるを得ない。なぜならば、GR-6ピンの照射時間は約290時間であり、出力も390W/cmで比較的lowく、被覆管の内圧クリープ、スエリングはまったく考えられないからである。

燃料ペレットは焼しまり(焼結)により収縮しているにもかかわらず、何処ペレットと被覆管が機械的相互作用を起したかという疑問に対して、2通りの解釈の仕方が考えられる。

1つは、燃料ピン上部の方のペレットの破片が下部に落下してきて、下部ペレットのクラックにはさまり、ペレットを押し広げたというものである。

しかし、 $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ のガンマースキャンニングの結果及びGR-1, GR-4, GR-5の中性子透過写真の結果をみると、照射中大幅なかけ落ちがあったとは考えにくい。

クロスガンマースキャンニングのグラフでは、中心附近のミートが燃料ピン下部に落下したように思えるが、比較的移動の少ない $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ によるガンマースキャンニングでは、この傾向がほとんどみられない。したがってこれは、F, Pの軸方向への移動があったとみる方が妥当である。

もう1つの解釈は燃料ピン下部の方のペレットが上部ペレットの重力により押しつぶされ被覆管と接触するにいたったというものである。この考え方は、ガンマースキャンニングおよび中性子透過写真の結果により裏づけられる。つまりガンマースキャンニング結果におい



て上部ペレットは、ペレット-ペレット間の境界が明瞭であるが、下部の方ではこれが不明瞭である。これは、下部のペレットが原形をとどめず崩れたためと思われる。また、中性子透過写真特にGR-4ピンにおいても、下部ペレットが崩れている様子がうかがえる。したがってGR-6ピンの直径の増大は後者の機構で起つたものと判断される。

他の燃料ピンでは、何故GR-6ピンのような直径変化が起らなかったかという点については、他のピンでは出力が小さく、照射時間が短かったため、ピン直径が大巾に変化するに致らなかったと考えられる。

### III-1-2 ガンマスキューニング結果とモニターワイヤー測定結果

各ピンのガンマスキューニング結果とモニターワイヤーのガンマアクティビティースキューニング結果とを相互の位置関係を正しく記したのが図III-1と図III-2, 3である。モニターワイヤーのアクティビティ分布でピーク附近にアクティビティの凹部がある。この原因について、炉側と検討中であるが、これといった結論を得ていない。

GR-1, 3, 5ピンのアクティビティ分布がモニターワイヤーのガンマアクティビティ分布と軸方向の分布勾配が違っている。この原因はモニターワイヤーの $^{59}\text{Co}$ が熱中性子と熱外( $<100\text{eV}$ )中性子の両方と( $n, \gamma$ )反応を起し $^{60}\text{Co}$ を作った為に、軸方向の勾配が急になったものと思われる。

$^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ のガンマとグロスのガンマスキューニング結果の対比からF, P, の燃料軸方向の移動が激しく起つたことがうかがわれる。

燃料製造時の燃料ペレットスタック長さとのアクティビティの軸方向長さを対比するとスタック長さの収縮率が計算できる。これを表III-1に示す。

表III-1 ガンマスキューニング結果からの $\Delta L/L_0$  データ

	$L_0$	L	$\Delta L$	$\Delta L/L_0$	$\Delta L/L_0$ (%)
GR-1	84.2	83.0	-1.2	-0.01425	-1.425
2	83.6	81.5	-2.1	-0.02512	-2.512
3	83.6	82.5	-1.1	-0.01316	-1.316
4	83.6	81.5	-2.1	-0.02512	-2.512
5	83.5	81.0	-2.5	-0.02994	-2.994
6	83.8	80.0	-3.8	-0.04535	-4.535

先にも述べた通りこのスタックの縮みはペレットの焼しまりのみでおこつたものではなく下部ペレットの挫屈による縮みも含んでいる。また、ガンマスキューニングデータを取る時点でプレナム内のスプリングは、まったくきいていないのでペレット間にすき間が生じ、



照射中の実際のスタックより長くなっている可能性はある。

各燃料ピンのガンマ-アクティビティーの平均値を表Ⅲ-2に示す。

表Ⅲ-2 ガンマ-スキヤニングの定点測定

	$^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$	グロスガンマ
GR-1	52.6 CPS	229.7 CPS
2	163.6	619.7
3	75.0	322.4
4	262.0	889.5
5	457.6	2,291.3
6	719.7	6,368.3

この結果をみると各ピンのアクティビティーは照射時間と比例関係にない。(出力はGR-1, 3, 5は、ほぼ同一, GR-2, 4, 6もほぼ同一とみなして)。

GR-2のアクティビティーはGR-1のその約5倍, GR-5のアクティビティーはGR-3の約58倍であつてもよいはずである。しかるにGR-3はGR-1の1.43倍, GR-5はGR-3の6.10倍しかない。この事実から推測すると, GR-1, 2の照射時間は1時間ではなく, またGR-3, 4の照射時間も5時間ではなくもつと長かつたことになる。

前回の照射データ報告書〔2〕に述べてある通り, G-4, G-5キャプセルはそれぞれ1時間, 5時間の照射を終了した後に炉から取り出したわけではなく, 炉心から離れるように引き上げて炉上部に保持し, 1リアクターサイクル(約290時間)終了時に炉から取り出した。この間に出力は極めて低かつたにしろ多少は核分裂をおこしていた。

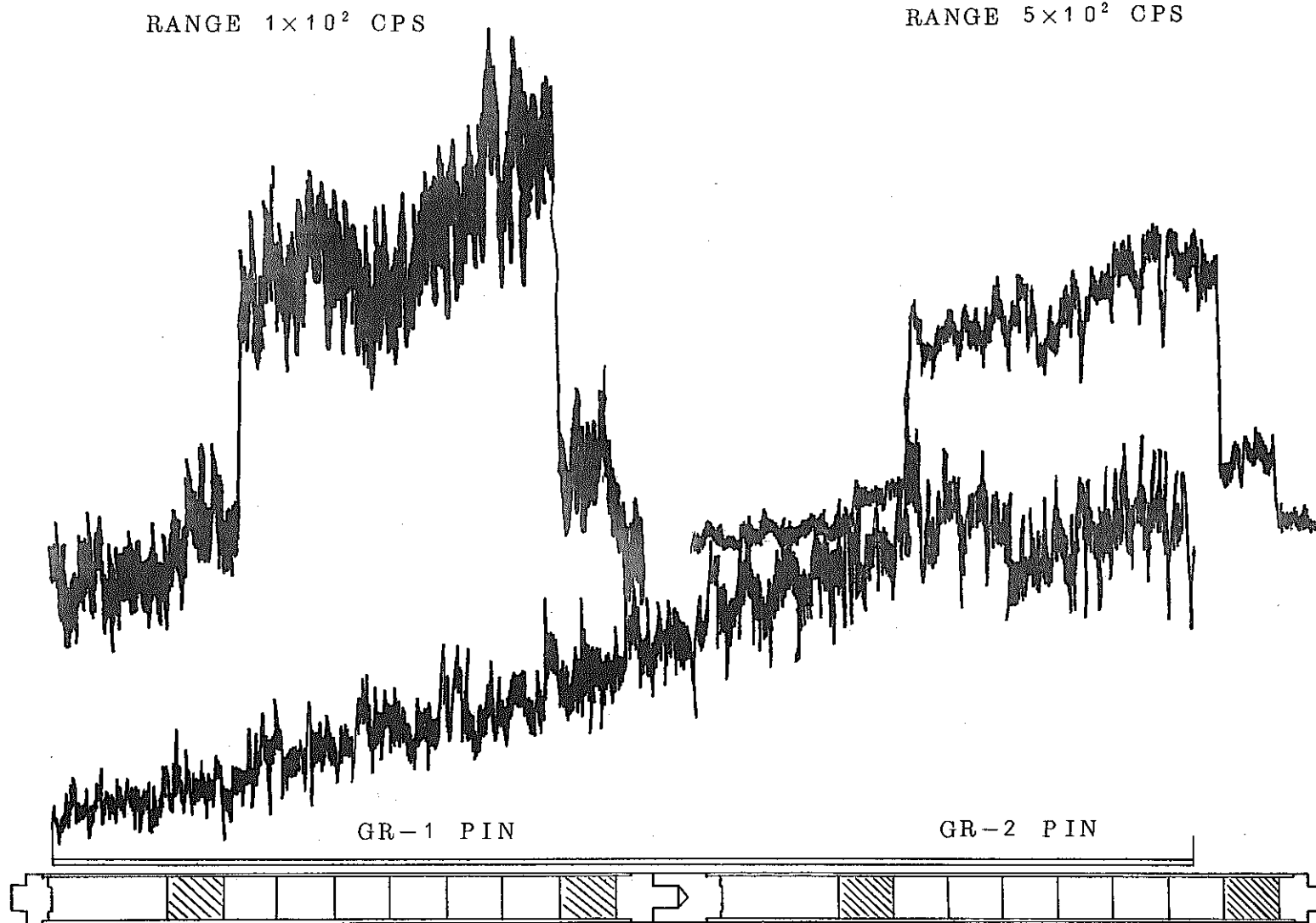


図 III-1 G-4 キャプセルモニターワイヤーと燃料ピンのガンマスキヤンニング測定結果の対比

照射中の実際のスタックより長くなっている可能性はある。

各燃料ピンのガンマーアクティビティーの平均値を表Ⅲ-2に示す。

表Ⅲ-2 ガンマースキャンニングの定点測定

	$^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$	グロスガンマ
GR-1	52.6 CPS	229.7 CPS
2	163.6	619.7
3	75.0	322.4
4	262.0	889.5
5	457.6	2,291.3
6	719.7	6,368.3

この結果をみると各ピンのアクティビティーは照射時間と比例関係にない。(出力はGR-1, 3, 5は、ほぼ同一, GR-2, 4, 6もほぼ同一とみなして)。

GR-2のアクティビティーはGR-1のその約5倍, GR-5のアクティビティーはGR-3の約58倍であつてもよいはずである。しかるにGR-3はGR-1の1.43倍, GR-5はGR-3の6.10倍しかない。この事実から推測すると, GR-1, 2の照射時間は1時間ではなく, またGR-3, 4の照射時間も5時間ではなくもつと長かつたことになる。

前回の照射データ報告書〔2〕に述べてある通り, G-4, G-5キャプセルはそれぞれ1時間, 5時間の照射を終了した後に炉から取り出したわけではなく, 炉心から離れるように引き上げて炉上部に保持し, 1リアクターサイクル(約290時間)終了時に炉から取り出した。この間に出力は極めて低かつたにしろ多少は核分裂をおこしていた。

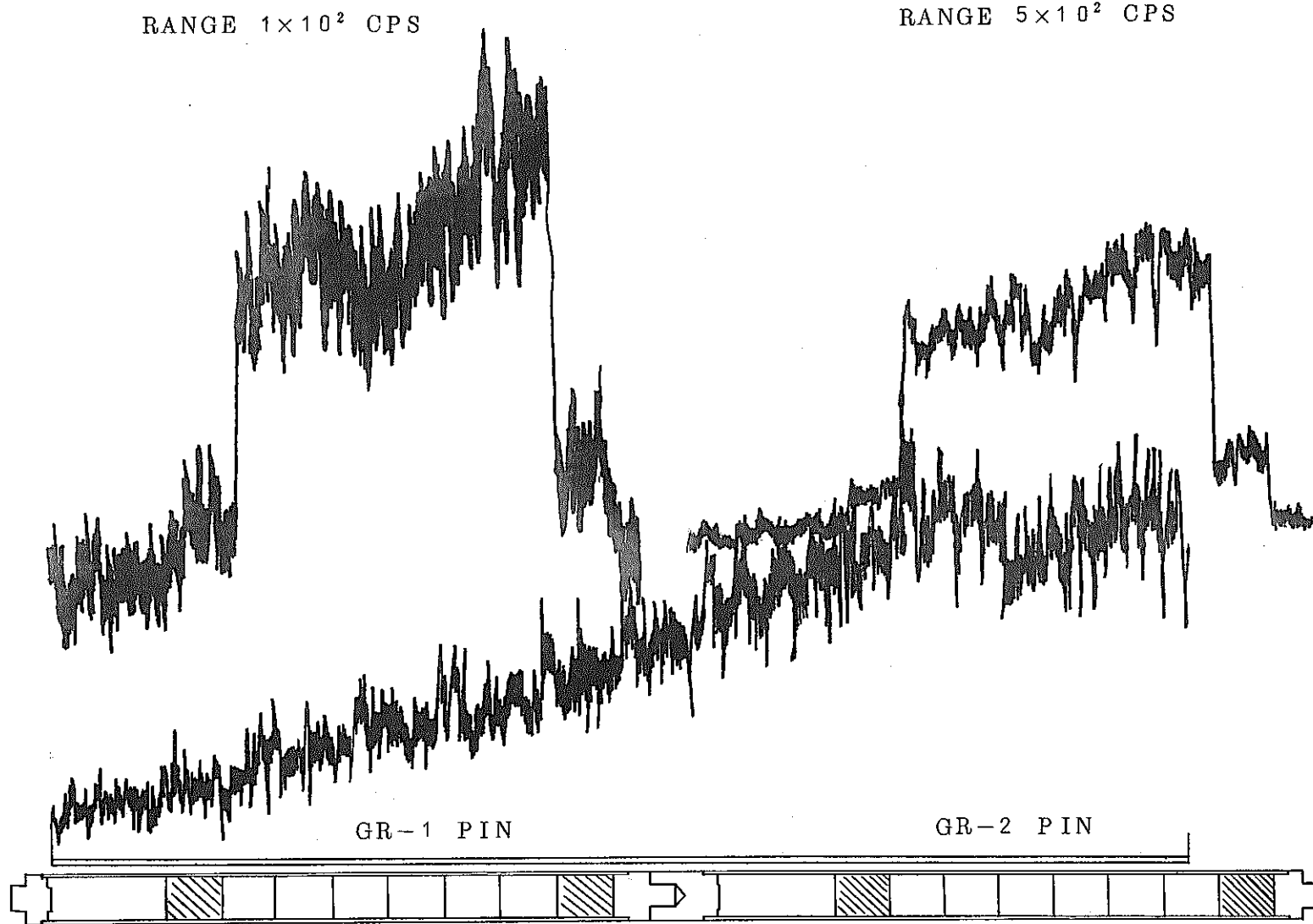


図 III-1 G-4 キャプセルモニターワイヤーと燃料ピンのガンマスキヤンニング測定結果の対比

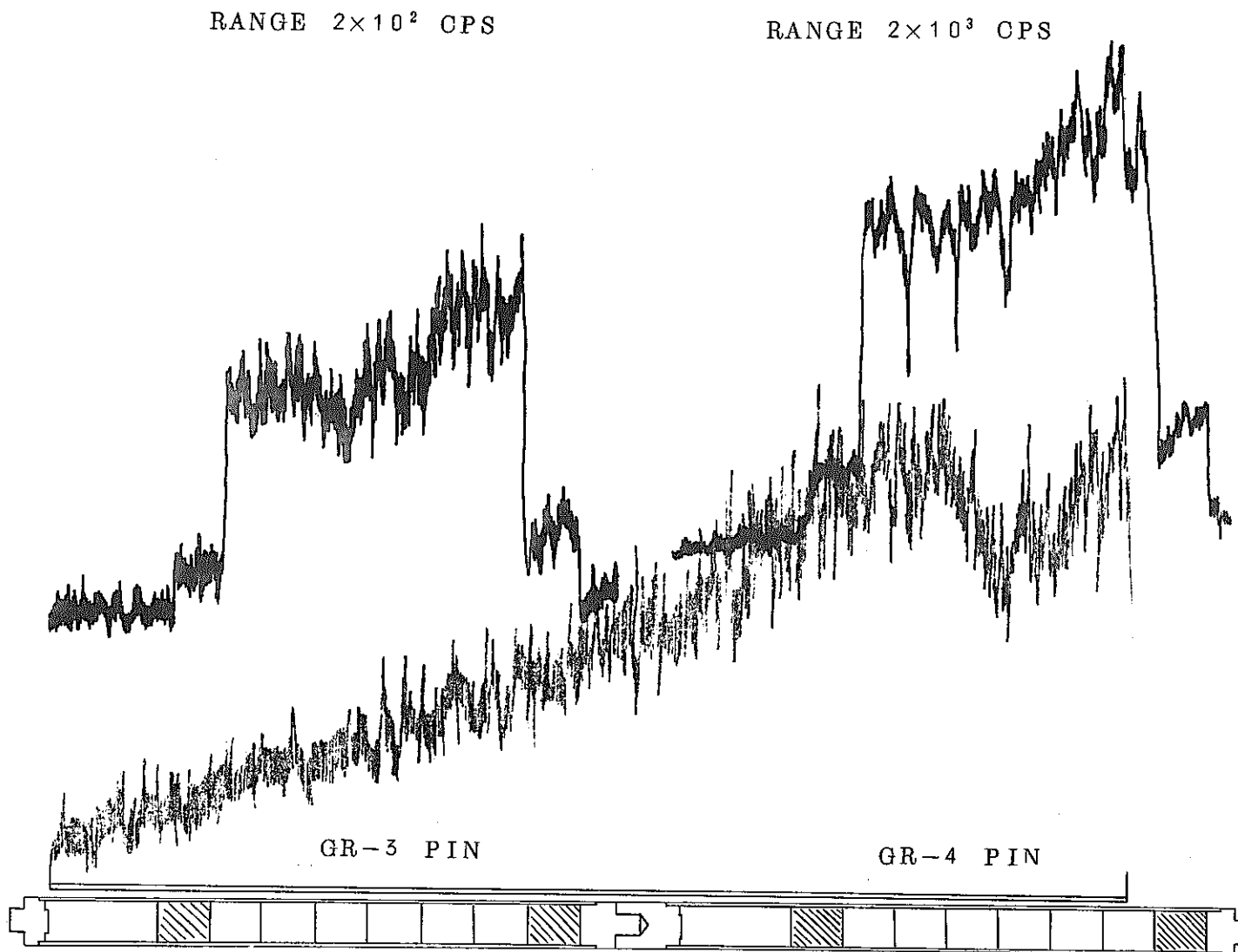


図 III-2 G-5 キャプセルモニターワイヤーと燃料ピンのガンマスキヤニング測定結果の対比

RANGE  $2 \times 10^3$  CPS

RANGE  $1 \times 10^4$  CPS

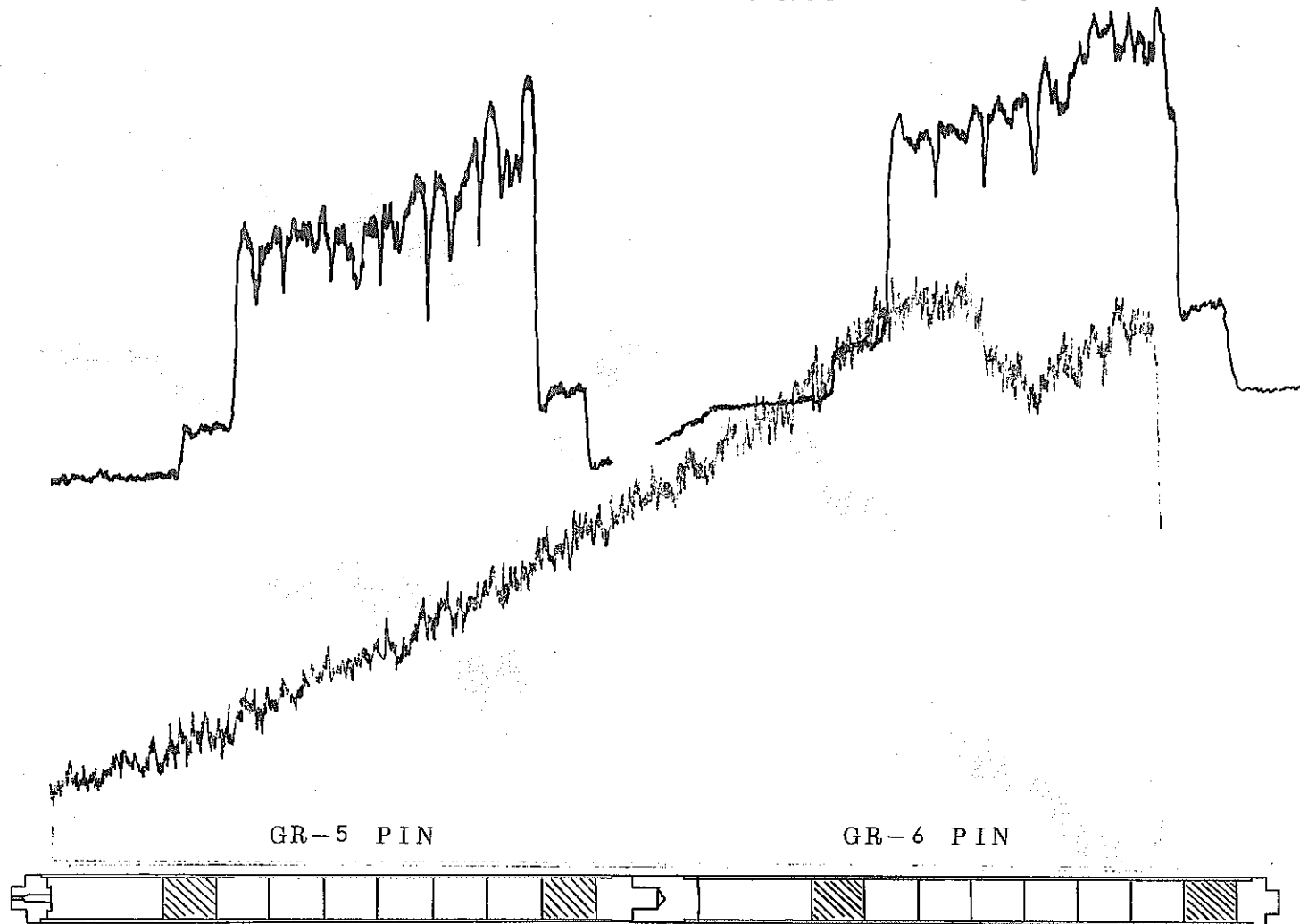


図 III-3 G-6 キャプセルモニターワイヤーと燃料ピンのガンマースキャンニング測定結果の対比

## III-2 破壊試験の結果について

照射後試験を待つまでもなく、この試験に用いたペレットは焼結が不十分なので割れ易いこととはわかっていた。したがって燃料ピンの取扱いには充分注意をはらった。しかし照射後試験工程でキャプセルからピンを取り出す時、あるいはピンを切断する時にピンにある程度のショック、振動が加わるのはやむを得ないことであつた。

中性子透過写真でみるとGR-1, GR-3, GR-5の低出力照射ピンではペレットは $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ の三方向にクラックが発生しペレットは多数の破片に分割されている。しかし金相面を観察するとクラックの破面が比較的滑らかであり、これらクラックの大部分は照射中に起つたものと考えられる。GR-2, 4, 6, ピンはペレットが組織変化を起して密度が高くなっているののでGR-1, 3, 5に比しクラックの入り方は少ない。

GR-1, 3, 5ピンの炉内焼結についての定量的な評価は、ペレットのクラックおよびかけ落ちにより行なえる状態ではない。しかし金相面に現われているペレットの湾曲部の曲率から判断して、焼結による焼しまりがおこっていることはわかる。

GR-2, 4, 6ピンについてはペレットの組織変化量が大きくまたかけ落ちも少なかったので、燃料焼しまりについて十分な解析を行なうことができた。

これらの燃料ペレットに入っている半径方向クラックは照射中には金相写真でみるほどひらいていたわけではない。金相写真のNo 31, 35と3について柱状晶の方向、燃料外周の曲率から判断し照射中の金相面を再現した。これを図III-4, 5, 6に示す。これらの図から燃料中心孔径、燃料ペレット外直径を読み取り、ペレットの収縮率を出した。これを表III-3に示す。

先に述べた燃料スタックの $\Delta L/L_0$ と $\Delta D/D_0$ を比較するとペレット半径方向の収縮の方がスタックの収縮よりかなり大きい、両者共に測定はあまり厳密なものではないので、定量的な議論はできない。

表III-3 燃料ペレットおよび被覆管寸法変化

	中心空孔直径 (mm $\phi$ )		燃料外直径 (mm $\phi$ )		燃料外直径変化 $\Delta D/D_0$ (%)	被覆管外直径 (mm $\phi$ )	
	照射前	照射後	照射前	照射後		照射前	照射後
GR-1	0	0	10.66	—	—	12.23	12.21
GR-2	0	3.93	10.66	9.52	-10.69	12.23	12.20
GR-3	0	0	10.66	—	—	12.23	12.22
GR-4	0	4.30	10.65	9.28	-12.78	12.23	12.22
GR-5	0	0	10.67	—	—	12.23	12.21
GR-6	0	4.56	10.65	9.86	-6.65	12.23	12.21

GR-2とGR-4ピンはほぼ同一の線出力を経験している。GR-2ピンでは燃料ペレットが焼きしまり、大きな燃料と被覆管のギャップが形成されている。また、ペレットの組織変化が進んでおり典型的な柱状晶、等軸晶および組織変化を起していない領域にわかれている。

GR-4ピンではこの組織変化が更に進み、ペレット断面のほとんどが柱状晶領域になっている。ペレットが被覆管内で偏心していた為にギャップの狭くなっていた側に等軸晶と組織変化を起していない領域が少し残っている。この部分が被覆管に接触していたかどうかはわからない。

ギャップ巾が一番大きかったと思われる側ではペレット外周部にボイドが多く見られる。また柱状晶の中に存在する細かいボイドの数も多く、反対側の柱状晶はボイドがなく巨大結晶を作っている。

ギャップ巾の違いで何故このような柱状晶の違いができたかについて理由は不明である。

GR-6ピンの金相組織はGR-4よりさらに進んで、組織変化を起していない領域は消滅してしまい、わずかな等軸晶領域は残されているにすぎない。しかし、金相面はGR-4のそれに似ており、ペレットは被覆管内で偏心して存在していた。ギャップ巾の最大の付近でペレット表面はデンドライト状に結晶成長を起している。柱状晶はGR-4のように場所によって微細ボイドの含有率が違つか結晶粒の大きさに差があるようなことはなく、全体的に均一である。

#### 金相位置での線出力について

各々の金相位置での線出力評価には、各燃料ピンの中央部に設けている熱電対の温度差より求めた値により、このピンの軸方向のフラックス分布より比例計算により求めた。表III-4に計算結果を示す。

表III-4 金相位置での線出力

		試料番号	燃料ピン中央部の平均線出力 (watts/cm)	金相面での平均線出力 (watts/cm)	金相面での最大線出力 (watts/cm)
G-4	GR-1	30	151	151	165
		29		209	228
	GR-2	31	297	297	313
		32		353	372
G-5	GR-3	34	149	149	165
		33		192	212
	GR-4	35	330	330	380
		36		417	481
G-6	GR-5	38	106	106	111
		37		159	166
	GR-6	3	339	339	392



### ギャップコンダクタンスの評価

ペレットの焼しまりて生じた大きなギャップのギャップコンダクタンスがどの程度のものであるかについて評価を行なった。

GR-4とGR-6ピンについては燃料外周まで柱状晶が発達していること、及び、まだ等軸晶が残っている部分が存在することから、燃料外周温度を1,800℃としてギャップコンダクタンスを計算した。

GR-2ピンについては金相組織変化の状態から燃料内温度分布を推定し(燃料組織変化を計算するDIRADコードを使用)ギャップコンダクタンスを計算した。計算結果を表Ⅲ-5に示す。

一般の燃料でのギャップコンダクタンスは0.5678~0.8517 watts/cm<sup>2</sup>℃であるのに対し0.07~0.1 watts/cm<sup>2</sup>℃という値は一桁小さく、注目に値する。

表Ⅲ-5 ギャップコンダクタンス推定結果

燃料ピン	ギャップコンダクタンス
GR-2	0.075 watts/cm <sup>2</sup> ℃
GR-4	0.079 watts/cm <sup>2</sup> ℃
GR-6	0.085 watts/cm <sup>2</sup> ℃

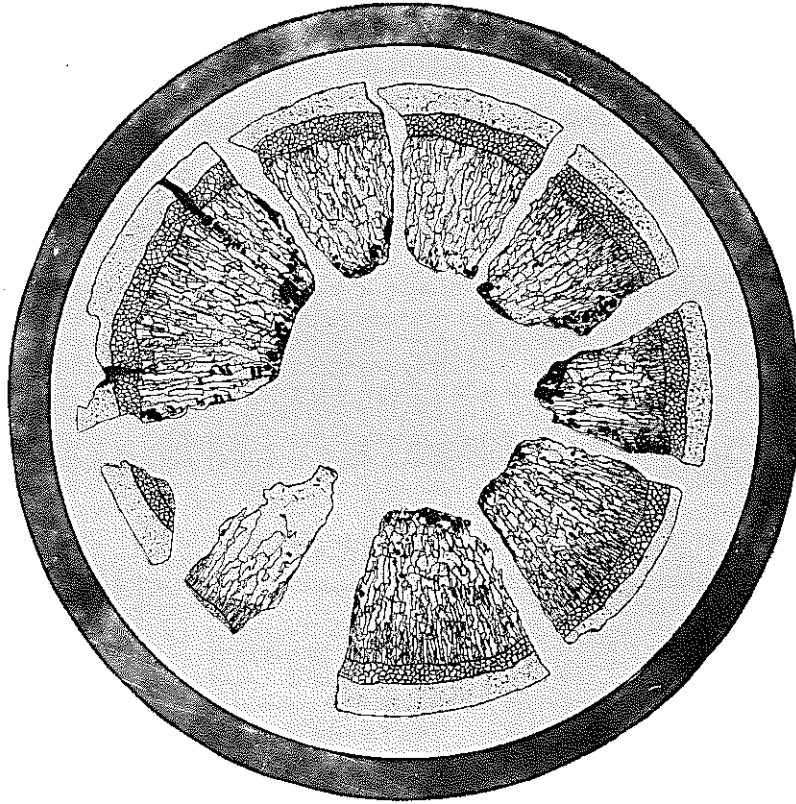


图 III-4 GR-2 Pin No 31

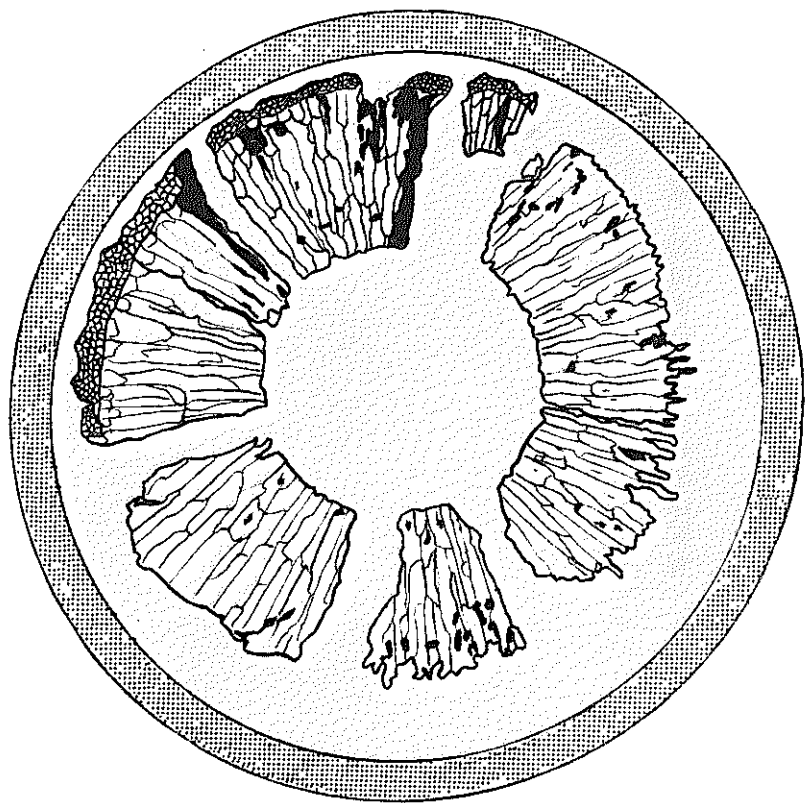


图 III-5 GR-6 Pin No 3

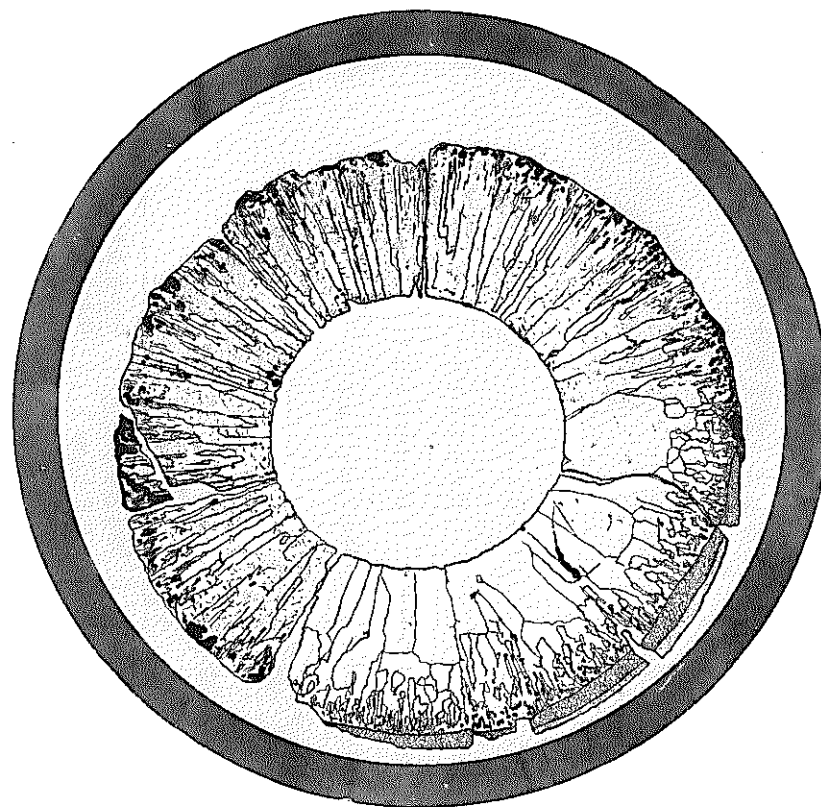


图 III-6 GR-4 Pin No 35

## 照射後の燃料ペレット密度について

燃料ペレットの径変化より，次式を用い焼きしまり効果だけを考えた場合のペレット最終密度を計算した。

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{RF}{RI} \right)^3 \quad (\% \text{ T. D.})$$

$\rho$  = Final Fuel Density (% T. D)

$\rho_0$  = Initial Fuel Density (% T. D)

RI = Initial Fuel Diameter (mm)

RF = Final Fuel Diameter (mm)

上の式で計算した結果を表Ⅲ-6に示す。

表Ⅲ-6 照射後燃料密度

燃料ピン名	照射前燃料密度 $\rho_0$ (% T. D)	照射前燃料直径 RI (mm)	照射後燃料直径 RF (mm)	$\frac{\text{照射後燃料直径}}{\text{照射前燃料直径}}$	照射後燃料密度 $\rho$ (% T. D)
GR-2	61.52	10.66	9.52	0.8931	86.4
GR-4	62.38	10.65	9.28	0.8722	94.3
GR-6	60.29	10.65	9.86	0.9241	76.0

GR-6が最つとも焼きしまりが大きく高密度になるはずであるが，測定誤差が大きい為に，このような結果になったものと思われる。

## Ⅳ 結 論

60% T.D 前後の極めて低密度燃料の照射挙動を実際に照射試験を行なうことによつて調べた。2本の燃料ピンを直列につなぎ1つのキャプセルに納め、このキャプセルを3体作り、それぞれ1, 5, 290時間の照射を行なった。

3キャプセル共に同一線出力で照射する予定であつたが照射技術の関係で線出力に多少の差異が出た。

キャプセル上段の燃料ピンは、 $100 \sim 230 \text{ watt/cm}$ という低出力であつたため燃料組織変化はほとんど起さなかつた。ただ燃料中心附近で結晶成長しているのが観察された程度にとどまつた。燃料ペレットには多数のクラックが発生しており、ペレットの焼きしまりの程度を金相試験から定量することは不可能であつた。しかし、ペレット外円周の曲率がみられるものについては焼きしまりが起つている事実が観測された。

キャプセル下段の燃料ピンは大きな組織変化を起して、1時間照射のものでも中心空孔、柱状晶、等軸晶が存在していた。下段燃料ピンにおける燃料ペレットの焼きしまりは $\Delta L/L_0$  (%)にして6.65~12.78%程度であつた。この結果燃料ペレットと被覆管の間に大きなギャップを生ずることとなつた。

軸方向の焼きしまりによるペレットスタック長さの変化は $\Delta L/L_0$  (%)で1.3~4.6%の間であり半径方向の焼きしまりに比し小さかつた。

以上の実験結果にみられるような、ペレット-被覆管ギャップの増大、ペレットの崩壊によるペレット-被覆管の機械的相互作用などは燃料挙動として好ましいものではない。今回の照射は短尺燃料ピンを使用しているが、実用炉に用いられるような長尺ピンを使用した場合、この傾向は一層顕著となりピン下部のペレットは上部ペレットの重みにより崩壊しペレットと被覆管が機械的相互作用を起し複覆管を破損せしめる公算が大である。したがつて、60%前後の低密度のペレットを実用炉に用いることは、適切でないと結論できる。

参 考 文 献

[1] 小泉益通, 他

JRR-2による低密度 $UO_2$ ペレットの照射試験I

燃料ピンの設計と製造記録

SN841-74-04

1974年3月9日

[2] 小泉益通, 他

JRR-2による低密度 $UO_2$ ペレットの照射試験II

照射中データとその解析

SN841-74-07

1974年4月

附録 1

(試験名) 燃料ピン寸法測定

(ホットラボ受付番号) 822

(件名) 低密度ペレット燃料照射後試験

依頼課室	動力炉核燃料開発事業団 課		
試験セル名	冶金 C ケーブ		
試験期間	49年 1月 7日～49年 1月 8日		
報告年月日	49年 1月18日		
試験担当者	石田, 田畑 (TEL 488)		
照 査		承 認	

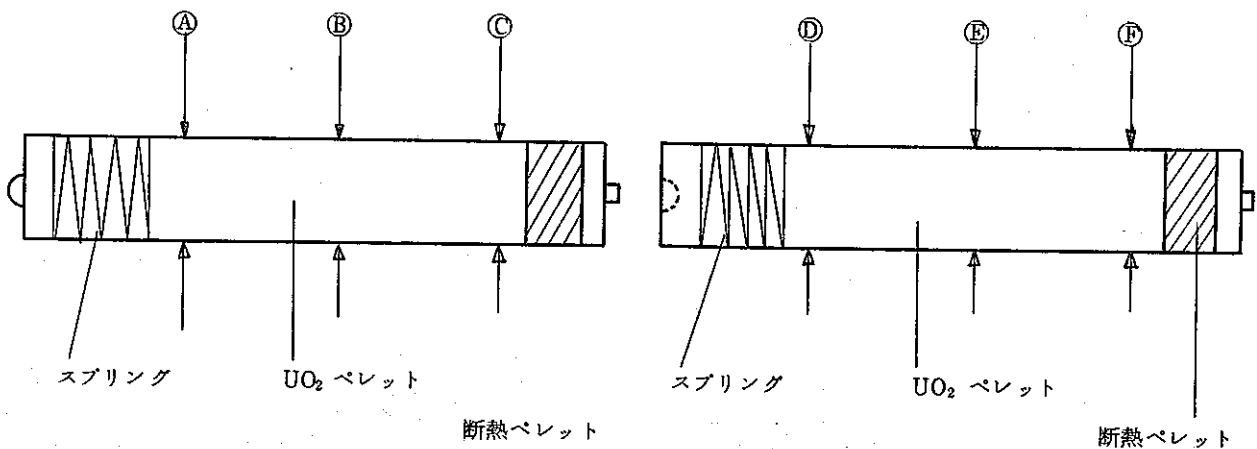
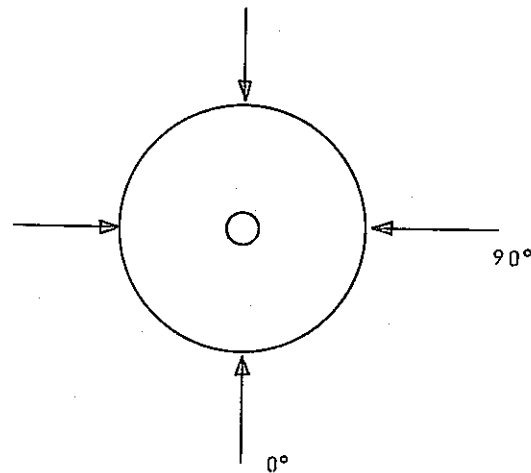
1. 測定方法

燃料ピンの表面の汚れがひどいのでアルコールで洗浄し乾燥した後、外径はマイクロメータ、長さはノギスを用いて測定した。

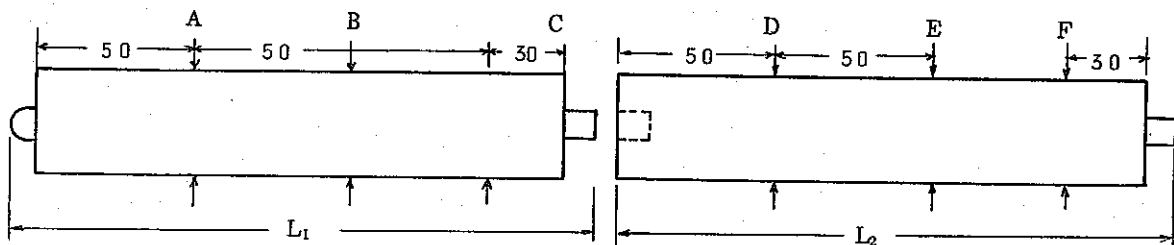
2. 測定位置

0°及び90°の2方向、3ヶ所について測定した。3ヶ所の位置④は燃料ピン内部のスプリング部をはずし⑤は④より50mm中央部へ⑥は断熱ペレットをはずして測定した。

④⑤⑥についても同様に測定した。



3. 測定結果





o G - 4

G R - 1	0°			90°			L <sub>1</sub>
	A	B	C	A	B	C	
测 定 值	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 7 1.1 5
	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 1	1 7 1.1 5
	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 0	1 7 1.1 5
平 均 值	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 1	1 7 1.1 5
照射前值	1 2.2 3	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 7 1.2
G R - 2	0°			90°			L <sub>2</sub>
	D	E	F	D	E	F	
测 定 值	1 2.2 0	1 2.1 9	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 0	1 7 1.2 0
	1 2.2 1	1 2.1 9	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 1	1 7 1.2 0
	1 2.2 0	1 2.1 8	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 0	1 7 1.2 0
平 均 值	1 2.2 0	1 2.1 9	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 0	1 7 1.2 0
照射前值	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 2	1 7 1.4

o G - 5

G R - 3	0°			90°			L <sub>1</sub>
	A	B	C	A	B	C	
测 定 值	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 2	1 7 1.2 0
	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 2	1 7 1.2 0
	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 2	1 7 1.2 5
平 均 值	1 2.2 2	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 2	1 7 1.2 0
照射前值	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 7 1.2
G R - 4	0°			90°			L <sub>2</sub>
	D	E	F	D	E	F	
测 定 值	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 4	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 4	1 7 1.2 5
	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 4	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 3	1 7 1.2 5
	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 4	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 3	1 7 1.2 5
平 均 值	1 2.2 2	1 2.2 3	1 2.2 4	1 2.2 2	1 2.2 1	1 2.2 3	1 7 1.2 5
照射前值	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 7 1.4

o G - 6

G R - 5	0°			90°			L <sub>1</sub>
	A	B	C	A	B	C	
测 定 值	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 1	1 7 1.1 5
	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 7 1.2 0
	1 2.2 0	1 2.2 0	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 7 1.2 0
平 均 值	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.2 1	1 7 1.2 0
照射前值	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 7 1.2
G R - 6	0°			90°			L <sub>2</sub>
	D	E	F	D	E	F	
测 定 值	1 2.2 1	1 2.2 1	1 2.3 6	1 2.2 0	1 2.2 2	1 2.3 0	1 7 1.2 5
	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.3 6	1 2.2 1	1 2.2 2	1 2.3 2	1 7 1.2 5
	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.3 6	1 2.2 1	1 2.2 2	1 2.3 1	1 7 1.2 5
平 均 值	1 2.2 1	1 2.2 0	1 2.3 6	1 2.2 1	1 2.2 2	1 2.3 1	1 7 1.2 5
照射前值	1 2.2 4	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 2.2 3	1 7 1.4

附録 2

(試験名) モ ニ タ ー ワ イ ヤ ー 測 定

(ホットラボ受付番号) HL 822

(件名) 低密度ペレット燃料照射後試験

依 頼 課 室	動燃事業団 部	課 室
試 験 セ ル 名	化 学 A ケ ー プ	
試 験 期 間	49年 1月10日～49年 2月10日	
報 告 年 月 日	49年 4月16日	
試 験 担 当 者	伊藤忠春, 斎藤光男, 喜多川勇 (TEL )	
照 査		承 認

## モニターワイヤー測定

## 概 要

試料の $\gamma$ 線強度分布測定のため $^{60}\text{Co}$  Photo Peakによる $\gamma$ -Scanningを行い任意の点を切断採取し、重量測定を行った後 IAEA 標準線源との比較測定により試料の $^{60}\text{Co}$ の定量を行った。

## 内 容

1. 試 料
2.  $\gamma$ -Scanning
3.  $^{60}\text{Co}$ の定量
4. 測 定 結 果
5. 備 考

## 1. 試 料

- 低密度ペレット燃料モニターワイヤー

モニターワイヤー名称	試料(燃料)名称
G-4	GR-1, GR-2
G-5	GR-3, GR-4
G-6	GR-5, GR-6

## 試料成分

Al-Coワイヤー      Co含有量 0.6% (Weight%)

試料のTopは燃料ピンのプレナム側としBottomは燃料の底部側とした。

2.  $\gamma$ -Scanning

試料の生成核種の確認、その他FPによる汚染のないことを確認した後、 $\gamma$ 線強度分布測定のため $^{60}\text{Co}$ のPhotoによる $\gamma$ -Scanningを行った。使用した機器は、NaI(Tl) 3"×3"検出器、S.C.A.スキャナー(20mm/min)、3×10mmのスリットコリメーター(遮蔽厚200mm)を使用して行い20mm/min速度で記録した。スキャン終了の定点放射能測定を数点行った。

3.  $^{60}\text{Co}$ の定量

Scanの終了した試料はケーブル内で2~3mm内で数点の切断採取を行い、アセトンによる洗浄後重量測定を行い、NaI(Tl) 3"×3"検出器400ch, P.H.A.を使用して、IAEA標準線源との比較測定により $^{60}\text{Co}$ の定量を行った。

## 4. 測定結果

- |                         |      |             |
|-------------------------|------|-------------|
| 1. $\gamma$ -Scanning   | 本文の中 | G4~G6       |
| 2. 定点放射能測定              | 本文の中 | G4~G6 (①~⑦) |
| 3. $^{60}\text{Co}$ の定量 |      |             |

試料NO	$^{60}\text{Co}$ 定量値 $\mu\text{ci}/\text{mg}$
G-4	① 52.17
	② 101.33
	③ 164.03
G-5	① 141.87
	② 77.83
	③ 39.83
G-6	① 1,075.83
	② 525.50
	③ 245.30

## 5. 備考

- $\gamma$ -Scanning試験で、試料の長さが、スキャナーの試料供給長さ以上であるため、逆側よりスキャンを行い記録紙を貼り合せ一枚のデータとした。

附録 3

燃料ピンのガンマスキヤニング

本試験は、燃料の大まかな状態を知ること。及び燃料ピンの切断位置を決定することを主目的とし行なった。以下に測定方法と結果を示す。

測定方法

測定には、1000チャンネルP.H.AとシングルチャンネルP.H.Aを用い、前者の検出器は、Ge(Li)であり、後者は、NaI(Tl)を用いている。測定原理を図-1に示す。

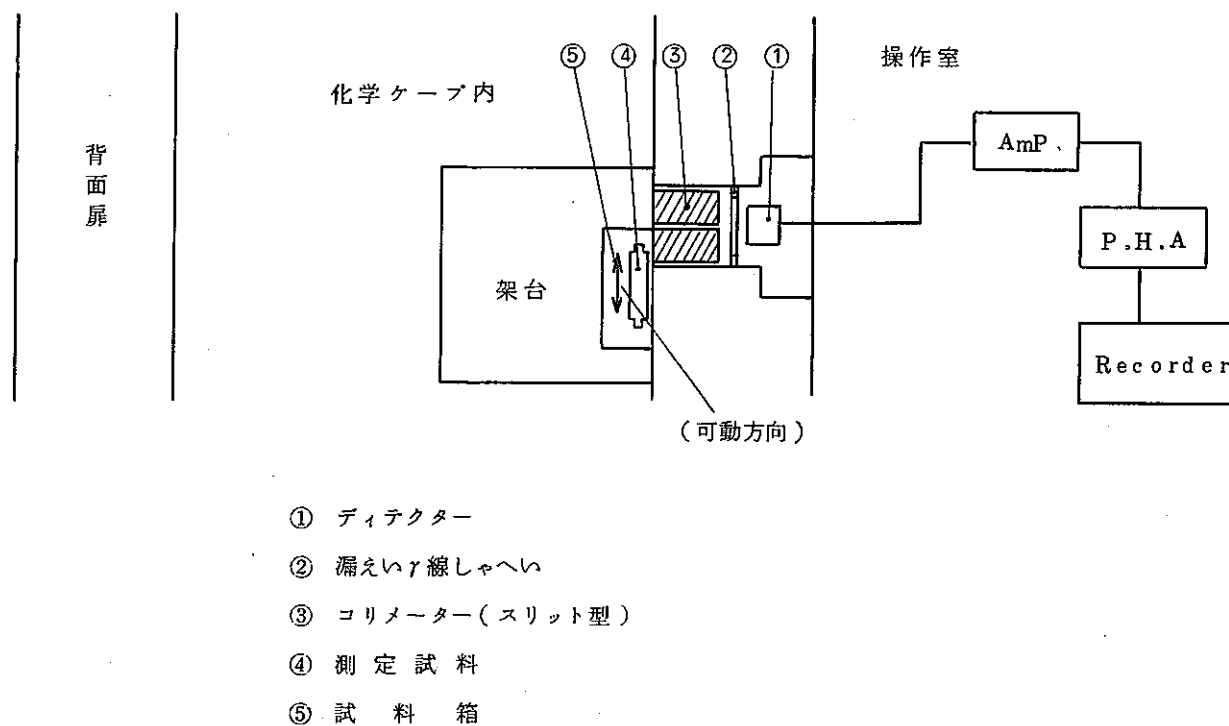


図-1 測定原理図

以上の方法で、存在量の大きい<sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nbについての測定とクロスγの強度分布測定を行った。この結果を図-6~11に示す。また1000チャンネルP.H.Aでのγスペクトラムの測定により、<sup>137</sup>Cs, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>144</sup>Pr, <sup>105</sup>Ru, <sup>106</sup>Rh等が観察された。

附録 4

(試験名)            パ ン ク チ ャ ー テ ス ト

(ホットラボ受付番号)    HL 822

(件名)            低密度ペレット燃料の照射後試験

依 頼 課 室	動燃事業団 部	課 室
試 験 セ ル 名	化 学 B ケ ー プ	
試 験 期 間	49年 3月20日～49年 4月13日	
報 告 年 月 日	49年 4月23日	
試 験 担 当 者	伊藤忠春, 斎藤光男, 喜多川勇 (TEL 527)	
照 査		承 認

## F P G A S 捕集

## 概 要

キャプセルより、FPガスを捕集する捕集装置は大別すると、キャプセル搾孔装置と放出ガス測定装置とによって構成されている。前者は真空系内に試料を挿入し、被覆管に孔を開け、後者は、その放出された全ガス量をオイルマンومترで測定し、その内の一定量を捕集容器内に捕集する系である。試料の搾孔位置はプレナム部である。

## 内 容

## 1. 試 料

## 低密度ペレット

## 動燃事業団Gシリーズ

G-4	2本
G-5	2本
G-6	2本

## 2. 試 験 内 容

## 2-1) 全放出ガス量の測定

2-2)  $^{85}\text{Kr}$ の定量

ガラス製捕集容器に分取した、 $^{85}\text{Kr}$ をNaI検出器東芝400ch, P.H.Aを使用して $^{22}\text{Na}$ のannihilation radiationの0.51MeVにより計数効率を求め、 $^{85}\text{Kr}$ の0.514MeVのPhot peakを計数し定量を行った。

## 3. 試 験 結 果

## 本 文

## 4. 線 量 率 測 定

G・Mサーベイメーターを使用して、ガスを分取した捕集容器の表面線量率を測定した。測定結果を下記に示す。






	$\beta, r.$	$r$
GR-1	10.7 mR/h	0.034 mR/h
" 2	6.0 "	0.070 "
" 3	0.5 "	0.044 "
" 4	0.3 "	0.090 "
" 5	0.9 "	0.160 "
" 6	22.2 "	3.80 "

附録1 パンクチャーテスト結果

GR-1ピン測定結果

- |              |        |    |   |   |      |    |   |     |
|--------------|--------|----|---|---|------|----|---|-----|
| 1. 試験日       | 昭和     | 49 | 年 | 3 | 月    | 19 | 日 | (火) |
| 2. ホットラボ受付番号 | HL-822 |    |   |   |      |    |   |     |
| 3. 試験料名      | GR-1   |    |   |   |      |    |   |     |
| 4. 試験依頼者     | 動燃     |    |   |   | 横内洋二 |    |   |     |
| 5. 実施担当者     | 技術3係   |    |   |   |      |    |   |     |

A 全放出ガス量

[条件]	到達真空度	搾孔装置	1.25 × 10 <sup>-5</sup>	mmHg
		測定装置	1.20 × 10 <sup>-5</sup>	mmHg
	リークレート	搾孔装置	6.9 × 10 <sup>-5</sup>	lusec
		測定装置		lusec
	測定装置温度	⑨	21.3	℃
	試料の体積	⑦	16.0	c.c
	キャプセルホルダー	№ 	④ 20.5	c.c
	キャップ	有 	⑤ 	c.c
	スペーサー		⑥ 	c.c
	オイルマンノメーターの差圧	①	29.6	mm
	オイルの比重	②	1.07	
	水銀の比重	③	13.5437	
	使用真空系の体積	⊗	1417.91	c.c

[計算]

$$\frac{\textcircled{1} 29.6 \times \textcircled{2} 1.07}{\textcircled{3} 13.5437} = \textcircled{8} 2.34 \text{ mmHg}$$

$$\textcircled{10} (\textcircled{\otimes} 1417.91 + \textcircled{4} 20.5 + \textcircled{5} 0 - \textcircled{6} 0 - \textcircled{7} 16.0) \times \textcircled{8} 2.34 = \frac{V_1 \times 760}{\textcircled{11} (27.3 + \textcircled{9} 21.3)} = \frac{V_1 \times 760}{27.3}$$

$$V_1 = \frac{\textcircled{10} 1422.41 \times \textcircled{8} 2.34 \times 27.3}{760 \times \textcircled{11} 29.43} = \textcircled{12} 4.06 \text{ c.c}$$

(at. N.T.P.)



B 放出ガスの分取

[条件]

ガス捕集容器の体積  $\textcircled{13}$  5.08 c.c

テブラーポンプの水銀高さ  $\textcircled{14}$  5.13 mm

[計算]

$$\textcircled{15} (760 - \textcircled{14} \text{ 5.13 }) \times \textcircled{13} \text{ 5.08 } = 760 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\textcircled{15} \text{ 247 } \times \textcircled{13} \text{ 15.08 }}{760} = \textcircled{16} \text{ 1.65 } \text{ c.c}$$

C  $^{85}\text{Kr}$  の定量

[条件]

測定日 昭和 49 年 4 月 6 日 (土)

測定装置 東芝 400 ch P.H.A

H.V. 1,100V GAIN. C.G. 1/1

F.G. 3.0

DISTANCE 28.0 cm

標準線源 Na-22

H.L. 2.60 y  $\gamma$ -ENERGY 0.51 MeV

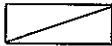
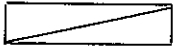
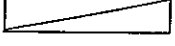
[計算]

試料名	L.T.	counts	c.p.s	対s.s.比 $\textcircled{17}$	$\textcircled{17} \times 100 / 0.41$	$\mu\text{Ci}$	$\textcircled{12} / \textcircled{16}$	全 $\mu\text{Ci}$
GR-1	172828	68827	0.398	0.00116	0.283	0.827	2.461	2.036

GR-2ピン測定結果

- 1. 試験日 昭和 49 年 3 月 20 日 (水)
- 2. ホットラボ受付番号 HL-822
- 3. 試料名 GR-2
- 4. 試験依頼者 動燃 横内洋二
- 5. 実施担当者 技術 3 係

A 全放出ガス量

[条件]	到達真空度	挿孔装置	1.60 × 10 <sup>-5</sup> mmHg
		測定装置	2.05 × 10 <sup>-5</sup> mmHg
	リークレート	挿孔装置	6.9 × 10 <sup>-5</sup> lusec
		測定装置	
	測定装置温度	⑨	22.0 °C
	試料の体積	⑦	16.6 c.c
	キャプセルホルダー	1/2 	④ 20.5 c.c
	キャップ	有 無	⑤  c.c
	スペーサー	⑥	 c.c
	オイルマンメーターの差圧	①	27.0 mm
	オイルの比重	②	1.07
	水銀の比重	③	13.5412
	使用真空系の体積	⊗	1417.86 c.c

[計算]

$$\frac{\textcircled{1} 27.0 \times \textcircled{2} 1.07}{\textcircled{3} 13.5412} = \textcircled{8} 2.13 \text{ mmHg}$$

$$\textcircled{10} (\textcircled{\otimes} 1417.86 + \textcircled{4} 20.5 + \textcircled{5} 0 - \textcircled{6} 0 - \textcircled{7} 16.6) \times \textcircled{8} 2.13 = \frac{V_1 \times 760}{\textcircled{11} (273 + \textcircled{9} 22.0)}$$

$$V_1 = \frac{\textcircled{10} 1421.76 \times \textcircled{8} 2.13 \times 273}{760 \times \textcircled{11} 295} = \textcircled{12} 3.69 \text{ c.c}$$

(at. N.T.P)

B 放出ガスの分取

[条件]

ガス捕集容器の体積  $\textcircled{13}$  4.96 c.c

テブラーポンプの水銀高さ  $\textcircled{14}$  502 mm

[計算]

$$\textcircled{15} (760 - \textcircled{14} 502) \times \textcircled{13} 4.96 = 760 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\textcircled{15} 258 \times \textcircled{13} 4.96}{760} = \textcircled{16} 1.68 \text{ c.c}$$

C  $^{85}\text{Kr}$  の定量

[条件]

測定日 昭和 49 年 4 月 5 日 (金)

測定装置 東芝 400ch P.H.A

H.V. 1,100V GAIN. C.G. 1/1

F.G. 3.0

DISTANCE 28.0 cm

標準線源 Na-22

H.L. 2.60y  $\gamma$ -ENERGY 0.51 MeV

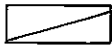
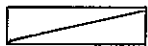
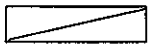
[計算]

試料名	L.T.	counts	c.p.s	対s.s.比 $\textcircled{17}$	$\textcircled{17} \times 100 / 0.41$	$\mu\text{Ci}$	$\textcircled{12} / \textcircled{16}$	全 $\mu\text{Ci}$
GR-2	60800	166195	2.73	0.00716	1.746	5.106	2.196	11.21

GR-3ピン測定結果

- 1. 試験日 昭和 49 年 3 月 22 日 (金)
- 2. ホットラボ受付番号 HL-822
- 3. 試験料名 GR-3
- 4. 試験依頼者 動燃 横内洋二
- 5. 実施担当者 技術3係

A 全放出ガス量

[条件]	到達真空度	挿孔装置	$1.20 \times 10^{-5}$ mmHg
		測定装置	$9.80 \times 10^{-5}$ mmHg
	リークレート	挿孔装置	} $6.9 \times 10^{-5}$ lusec
		測定装置	
	測定装置温度	⑨	$21.0$ °C
	試験料の体積	⑦	$16.0$ c.c
	キャプセルホルダー	$\frac{1}{16}$ 	④ $20.5$ c.c
	キャップ	有 <input checked="" type="radio"/> 無 <input type="radio"/>	⑤  c.c
	スペーサー	⑥	 c.c
	オイルマンノメーターの差圧	①	$31.0$ mm
	オイルの比重	②	$1.07$
	水銀の比重	③	$13.5437$
	使用真空系の体積	⊗	$1417.94$

[計算]

$$\frac{\textcircled{1} \ 31.0 \times \textcircled{2} \ 1.07}{\textcircled{3} \ 13.5437} = \textcircled{8} \ 2.45 \text{ mmHg}$$

$$\textcircled{10} \left( \textcircled{\otimes} \ 1417.94 + \textcircled{4} \ 20.5 + \textcircled{5} \ 0 - \textcircled{6} \ 0 - \textcircled{7} \ 16.0 \right) \times \textcircled{8} \ 2.45 = \frac{V_1 \times 760}{\textcircled{11} \ (273 + \textcircled{9} \ 21.0)}$$

$$V_1 = \frac{\textcircled{10} \ 1422.44 \times \textcircled{8} \ 2.45 \times 273}{760 \times \textcircled{11} \ 294.0} = \textcircled{12} \ 4.26 \text{ c.c}$$

(at. N.T.P)

B 放出ガスの分取

[条件]

ガス捕集容器の体積 ⑬ 4.92 c.c

テブラーポンプの水銀高さ ⑭ 508 mm

[計算]

$$⑮ (760 - ⑭ 508) \times ⑬ 4.92 = 760 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{⑮ 252 \times ⑬ 4.92}{760} = ⑯ 1.63 \text{ c.c}$$

C <sup>85</sup>Kr の定量

[条件]

測定日 昭和 49 年 4 月 9 日 (火)

測定装置 東芝 400 ch P.H.A.

H.V. 1,100V GAIN. C.G. 1/1

F.G. 3.0

DISTANCE 28.0 cm

標準線源 Na-22

H.L. 2.60y  $\gamma$ -ENERGY 0.51 MeV

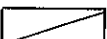
[計算]

試料名	L.T.	counts	c.p.s	対s.s.比⑰	⑰×100/0.41	μCi	⑱/⑲	全μCi
GR-3	66229	145153	2.19	0.00661	1.612	4.714	2.613	12.32

GR-4ピン測定結果

- |              |                                     |                                   |   |                                |   |                                 |   |     |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------------|---|---------------------------------|---|-----|
| 1. 試験日       | 昭和                                  | <input type="text" value="49"/>   | 年 | <input type="text" value="3"/> | 月 | <input type="text" value="25"/> | 日 | (月) |
| 2. ホットラボ受付番号 | <input type="text" value="HL-822"/> |                                   |   |                                |   |                                 |   |     |
| 3. 試験料名      | <input type="text" value="GR-4"/>   |                                   |   |                                |   |                                 |   |     |
| 4. 試験依頼者     | <input type="text" value="動燃"/>     | <input type="text" value="横内洋二"/> |   |                                |   |                                 |   |     |
| 5. 実施担当者     | <input type="text" value="技術3係"/>   |                                   |   |                                |   |                                 |   |     |

A 全放出ガス量

[条件]	到達真空度	挿孔装置	<input type="text" value="1.0 × 10&lt;sup&gt;-5&lt;/sup&gt;"/>	mmHg
		測定装置	<input type="text" value="7.3 × 10&lt;sup&gt;-6&lt;/sup&gt;"/>	mmHg
	リークレート	挿孔装置	<input type="text" value="6.9 × 10&lt;sup&gt;-5&lt;/sup&gt;"/>	lusec
		測定装置		
	測定装置温度	⑨	<input type="text" value="20.5"/>	℃
	試料の体積	⑦	<input type="text" value="16.6"/>	c.c
	キャプセルホルダー	有 	④ <input type="text" value="20.5"/>	c.c
	キャップ	有 <input checked="" type="radio"/>	⑤ <input type="text" value="0"/>	c.c
	スペーサー	⑥	<input type="text" value="0"/>	c.c
	オイルマンメーターの差圧	①	<input type="text" value="33.9"/>	mm
	オイルの比重	②	<input type="text" value="1.07"/>	
	水銀の比重	③	<input type="text" value="13.5461"/>	
		⊗	<input type="text" value="1418.01"/>	

[計算]

$$\frac{① \text{$$

$$⑩ \left( \text{⊗} \text{$$

$$V_1 = \frac{⑩ \text{$$

(at. N.T.P)

## B 放出ガスの分取

〔条件〕

ガス捕集容器の体積 (13) 4.82 c.c

テブラーポンプの水銀高さ (14) 532 mm

〔計算〕

$$(15) (760 - (14) 532) \times (13) 4.82 = 760 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{(15) 228 \times (13) 4.82}{760} = (16) 1.45 \text{ c.c}$$

C  $^{85}\text{Kr}$  の定量

〔条件〕

測定日 昭和 49 年 4 月 8 日 (月)

測定装置 東芝 400ch P.H.A

H.V. 1,100V GAIN. C.G. 1/1

F.G. 3.0

DISTANCE 28.0 cm

標準線源 Na-22

H.L. 2.60 y  $\gamma$ -ENERGY 0.51 MeV

〔計算〕

試料名	L.T.	counts	c.p.s	対s.s.比(17)	(17)×100/0.41	$\mu\text{Ci}$	(12)/(16)	全 $\mu\text{Ci}$
GR-4	22536	323618	1436	0.04334	10.571	30.91	3.214	99.34

GR-5ピン測定結果

- 1. 試験日 昭和 49 年 3 月 26 日 (火)
- 2. ホットラボ受付番号 HL-822
- 3. 試料名 GR-5
- 4. 試験依頼者 動燃 横内洋二
- 5. 実施担当者 技術3係

A 全放出ガス量

[条件]	到達真空度	搾孔装置	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 10px;"><math>1.2 \times 10^{-5}</math></span> mmHg
		測定装置	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 10px;"><math>1.05 \times 10^{-5}</math></span> mmHg
	リークレート	搾孔装置	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 10px;"><math>6.9 \times 10^{-5}</math></span> lusec
		測定装置	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 10px;">/</span> lusec
	測定装置温度	⑨	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">17.0</span> °C
	試料の体積	⑦	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">16.0</span> c.c
	キャプセルホルダー	有 <input type="checkbox"/>	④ <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">20.5</span> c.c
	キャップ	有 <input checked="" type="checkbox"/>	⑤ <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">0</span> c.c
	スペーサー	⑥	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">0</span> c.c
	オイルマンメーターの差圧	①	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">49.0</span> mm
	オイルの比重	②	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">1.07</span>
	水銀の比重	③	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">13.5535</span>
		⊗	<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">1418.33</span>

[計算]

$$\frac{\textcircled{1} \text{ 49.0} \times \textcircled{2} \text{ 1.07}}{\textcircled{3} \text{ 13.5535}} = \textcircled{8} \text{ 3.87 mmHg}$$

$$\textcircled{10} (\textcircled{\otimes} \text{ 1418.33} + \textcircled{4} \text{ 20.5} + \textcircled{5} \text{ 0} - \textcircled{6} \text{ 0} - \textcircled{7} \text{ 16.0}) \times \textcircled{8} \text{ 3.87} = \frac{V_1 \times 760}{\textcircled{11} (273 + \textcircled{9} \text{ 17.0})} = \frac{V_1 \times 760}{273}$$

$$V_1 = \frac{\textcircled{10} \text{ 1422.83} \times \textcircled{8} \text{ 3.87} \times 273}{760 \times \textcircled{11} \text{ 290}} = \textcircled{12} \text{ 6.82 c.c}$$

(at. N. T. P)



B 放出ガスの分取

〔条件〕

ガス捕集容器の体積 ⑬ 6.04 c.c  
 テブラーポンプの水銀高さ ⑭ 534 mm

〔計算〕

$$\textcircled{15} (760 - \textcircled{14} \text{ } 534) \times \textcircled{13} \text{ } 6.04 = 760 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\textcircled{15} \text{ } 226 \times \textcircled{13} \text{ } 6.04}{760} = \textcircled{16} \text{ } 1.80 \text{ c.c}$$

C <sup>85</sup>Kr の定量

〔条件〕

測定日 昭和 49 年 4 月 10 日 (水)

測定装置 東芝 400ch P.H.A

H.V. 1,100V GAIN. C.G. 1/1

F.G. 3.0

DISTANCE 28.0 cm

標準線源 Na-22

H.L. 2.60y γ-ENERGY 0.51 MeV

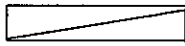
〔計算〕

試料名	L.T.	counts	c.p.s	対s.s.比 <sup>⑰</sup>	<sup>⑰</sup> ×100/0.41	μCi	<sup>⑱</sup> / <sup>⑰</sup>	全μCi
GR-5	58437	1583154	2709	0.07729	18851	55.12	3.789	208.84

GR-6ピン測定結果

- 1. 試験日 昭和 49 年 3 月 27 日 (水)
- 2. ホットラボ受付番号 HL-822
- 3. 試料名 GR-6
- 4. 試験依頼者 動燃 横内洋二
- 5. 実施担当者 技術3係

A 全放出ガス量

[条件]	到達真空度	挿孔装置	1.2 × 10 <sup>-5</sup>	mmHg
		測定装置	5.7 × 10 <sup>-6</sup>	mmHg
	リークリート	挿孔装置	6.9 × 10 <sup>-5</sup>	lusec
		測定装置		lusec
	測定装置温度	⑨	20.0	℃
	試料の体積	⑦	16.6	c.c
	キャプセルホルダー	№ <input type="text"/>	④ 20.5	c.c
	キャップ	有 <input checked="" type="radio"/> 無 <input type="radio"/>	⑤ 0	c.c
	スペーサー		⑥ 0	c.c
	オイルマンノメーターの差圧	①	3.18	mm
	オイルの比重	<input type="text"/> 20.0	② 1.07	℃
	水銀の比重		③ 1.35461	
		⊗	1417.94	

[計算]

$$\frac{\textcircled{1} \quad 3.18 \quad \times \quad \textcircled{2} \quad 1.07}{\textcircled{3} \quad 1.35461} = \textcircled{8} \quad 2.51 \quad \text{mmHg}$$

$$\textcircled{10} \left( \textcircled{\otimes} 1417.94 + \textcircled{4} 20.5 + \textcircled{5} 0 - \textcircled{6} 0 - \textcircled{7} 16.6 \right) \times \textcircled{8} 2.51 = \frac{V_1 \times 760}{\textcircled{11} (273 + \textcircled{9} 20.0)} = \frac{V_1 \times 760}{273}$$

$$V_1 = \frac{\textcircled{10} 1421.84 \times \textcircled{8} 2.51 \times 273}{760 \times \textcircled{11} 293} = \textcircled{12} 4.38 \quad \text{c.c}$$

( at . N . T . P )

B 放出ガスの分取

[条件]

ガス捕集容器の体積 ⑬ 6.02 c.c

テブラーポンプの水銀高さ ⑭ 524 mm

[計算]

$$\textcircled{15} (760 - \textcircled{14} 524) \times \textcircled{13} 6.02 = 760 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\textcircled{15} 236 \times \textcircled{13} 6.02}{760} = \textcircled{16} 1.87 \text{ c.c}$$

C <sup>85</sup>Kr の定量

[条件]

測定日 昭和 49 年 4 月 10 日 (水)

測定装置 東芝 400ch P.H.A

H.V. 1,100V GAIN. C.G. 1/1

F.G. 3.0

DISTANCE 70.0 cm

標準線源 Na-22

H.L. 2.60y r-ENERGY 0.51 MeV

[計算]

試料名	L.T.	counts	c.p.s	対s.s.比 <sup>⑰</sup>	<sup>⑰</sup> ×100/0.41	μCi	<sup>⑱</sup> / <sup>⑰</sup>	全 μCi
GR-6	2943	410326	139.42	2.10558	513.824	1502.42	2.342	3518.67

## 附録 5

金 相 試 験

本照射に用いた燃料ペレットは未焼結のものであるため樹脂注入が非常に難しいものであった。しかし、原研ホットラボの熱心な協力により本試験を終了した。

以下に燃料ピン切断方法及び切断位置を示し、金相方法と金相結果を示す。

## 本試験の経過

今回の試料はこれまでに経験がなく、再三に渡る検討を行った。

燃料ペレットは、高出力照射したものについて燃料中心部で焼結が進み、中間部、外周部では、焼結が進まず製造時の組織に近いと予想された。燃料ペレットとしては、製造時より崩れやすい状態と予想した。

したがって注入する樹脂は細部まで浸透するように従来使用しているものより、さらに流動性のよいものを使うことにし、樹脂、流動剤および硬化剤の配合をかえ、流動性および硬化の良否についてコールドテストを行った。その結果、以下のような配合のものが優れていたため、本作業に使用することにした。

	容量比
I ピコート樹脂 815	10
"      812	30
AGE (流動剤)	8
K-54 (硬化剤)	6

樹脂注入は、一度失敗すると再注入は不可能なことから1本のピン(GR-6)を先行試験用に選び行うこととした。

その結果、切断時には樹脂が注入されているようであったが、研磨すると樹脂注入が完全でなく、試料の脱落があった。

再度検討し、樹脂注入装置を修理し行った。その結果GR-6ピンよりも樹脂は浸透していたため、全ピンまとめて樹脂注入を行った。しかし、研磨工程で脱落するものが大部分であった。このため金相工程で、接着剤(アクリルダインNo.3)を注入し行った。

金相箇所は、1本につき2箇所とし、その内の1箇所を50倍の連続全体写真を撮影した。

主要金相試験項目は、1).  $\beta$ - $\gamma$ オートラジオグラフィー 2). マクログラフィー 3). ミクログラフィー、である。

## 燃料ピン切断

先にのべたように燃料ピン切断は、樹脂注入後に行うが、スリットは、金相サンプルの

附近に入れた。これは、金相サンプル部への樹脂の浸透を良くするためである。

切断には、歯厚 1mm のダイヤモンドカッターを用いた。切断位置を図 1～6 に示す。

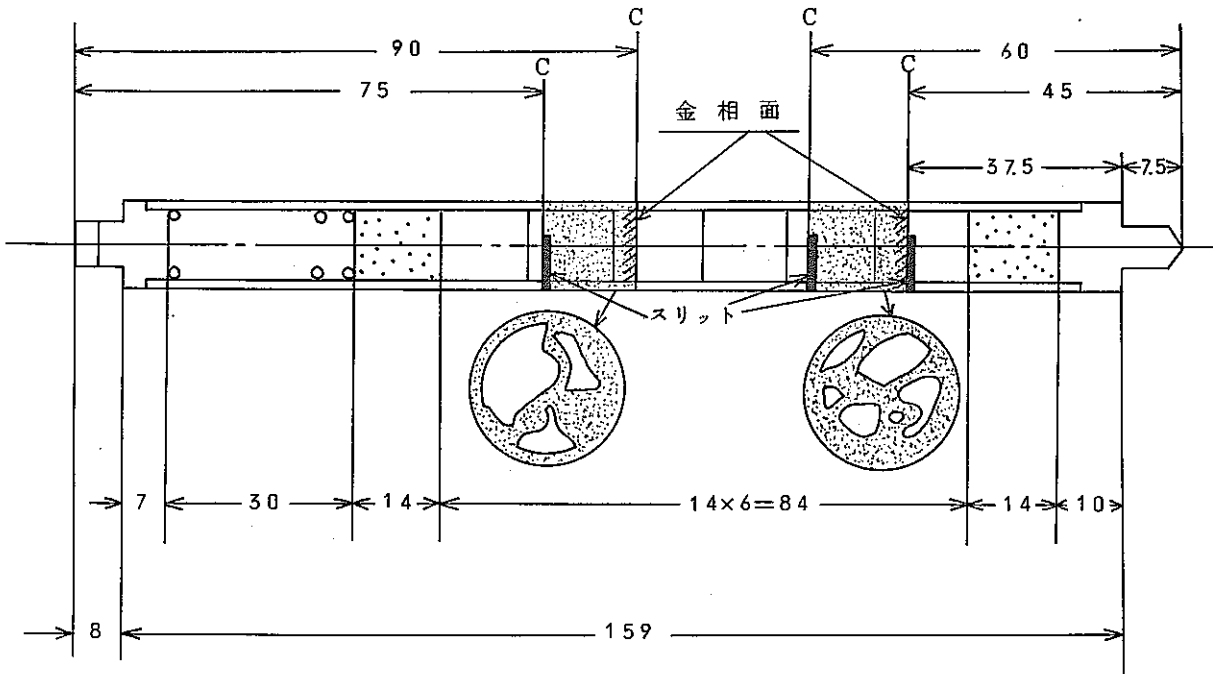


図1 GR-1 ピン切断位置

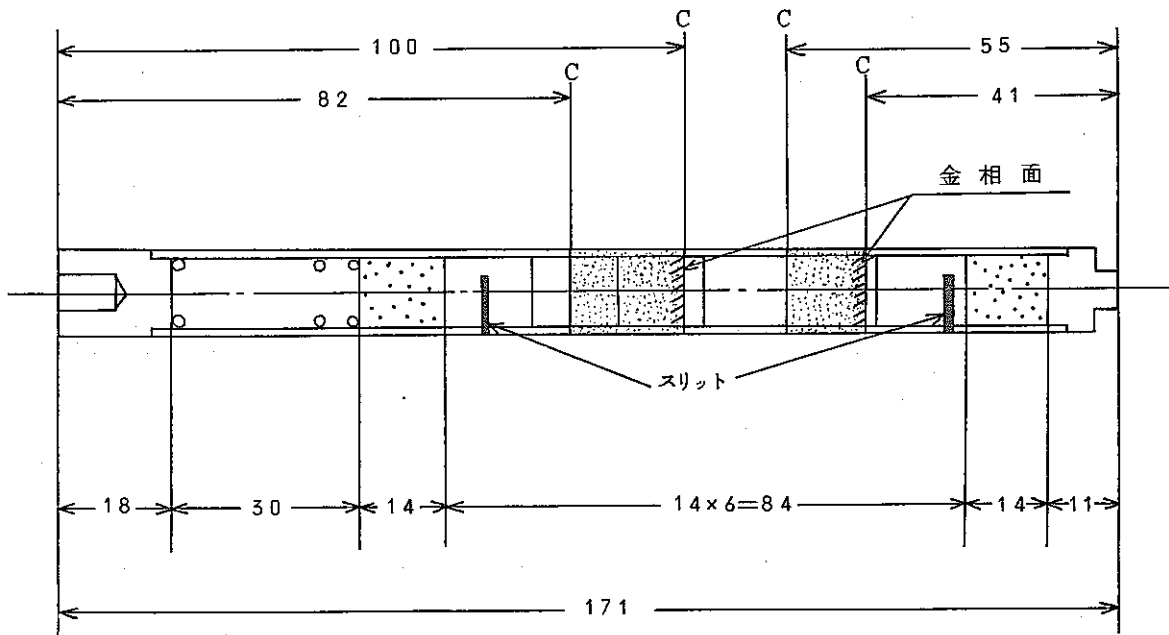


図2 GR-2 ピン切断位置

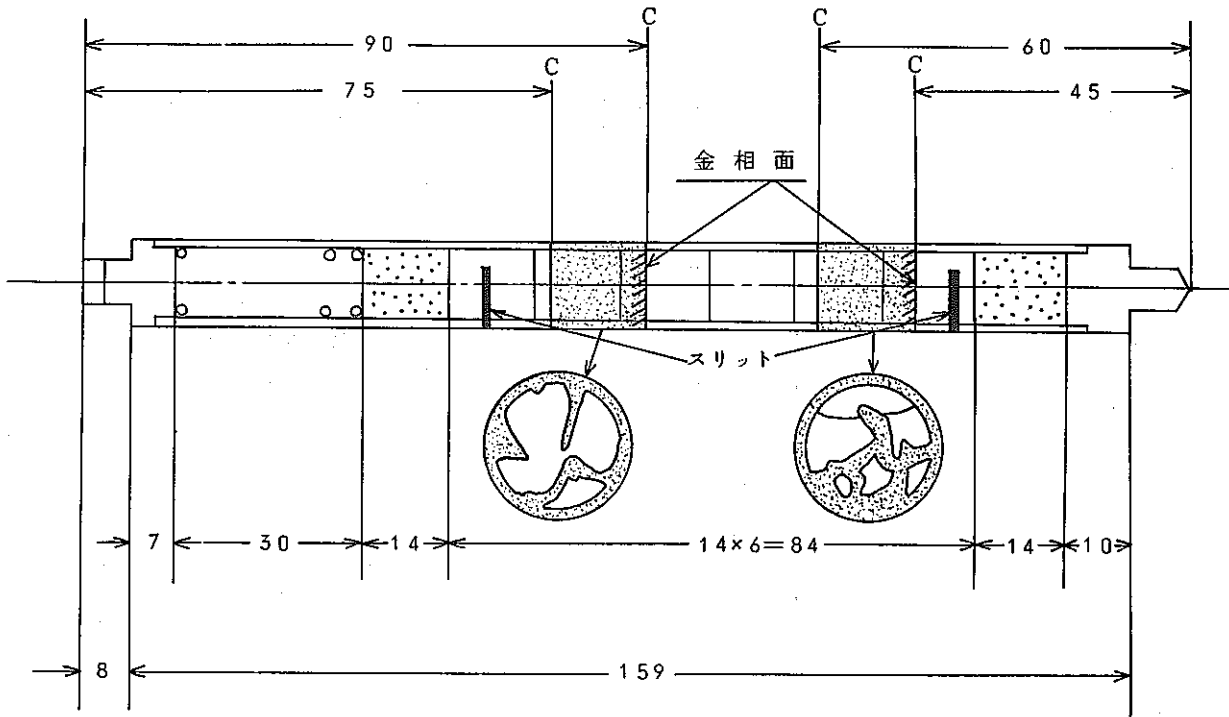


図3 GR-3ピン切断位置

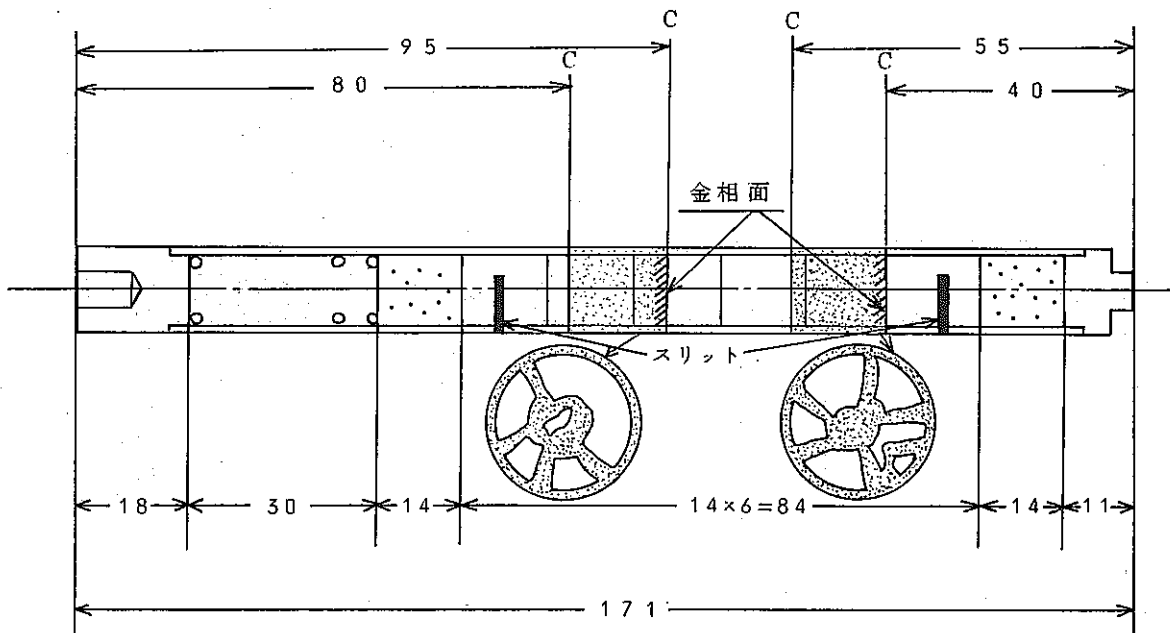


図4 GR-4ピン切断位置

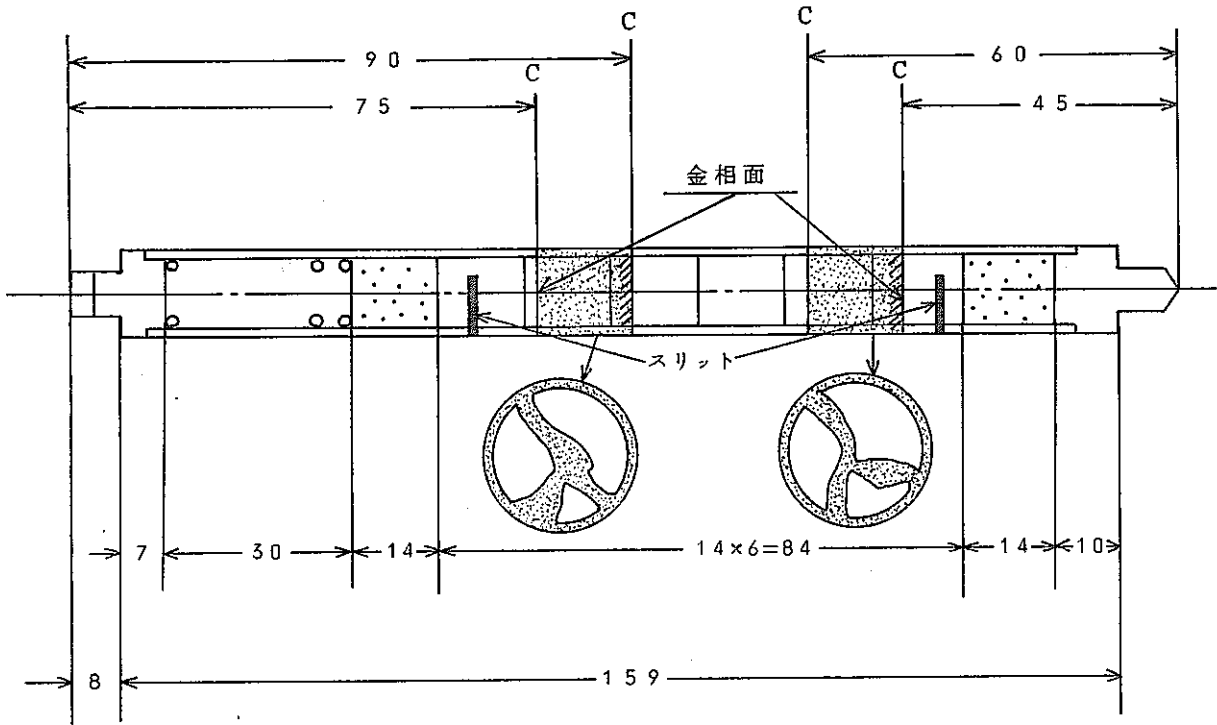


図5 GR-5ピン切断位置

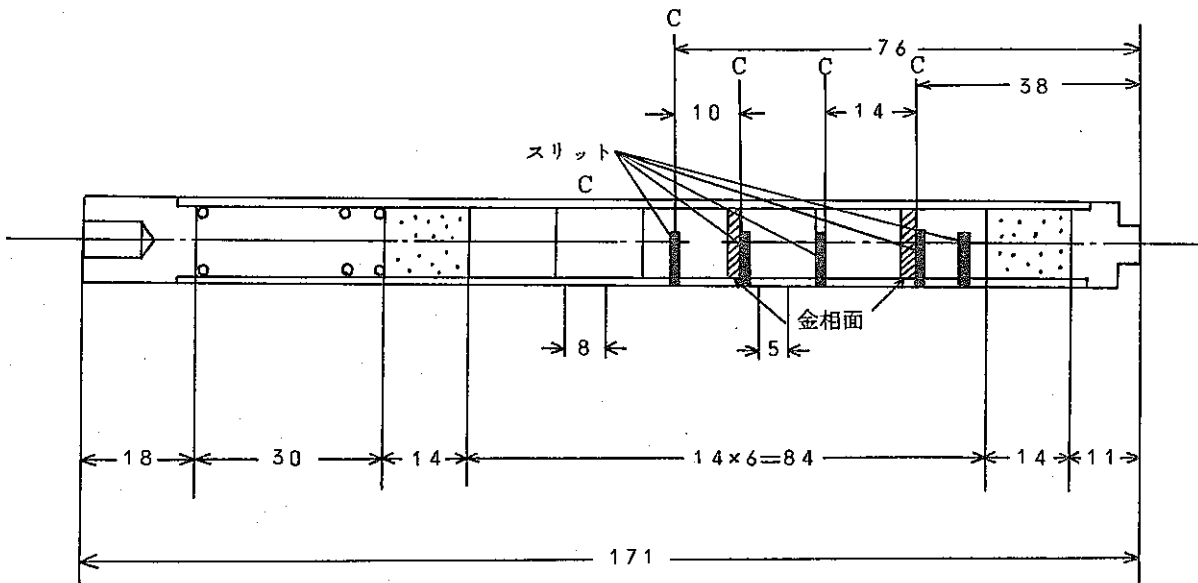


図6 GR-6ピン切断位置

金 相

金相は，樹脂埋込み，研磨，エッチング，検鏡および，写真撮影の順で行なった。以下に結果を示す。

a). 試料研磨

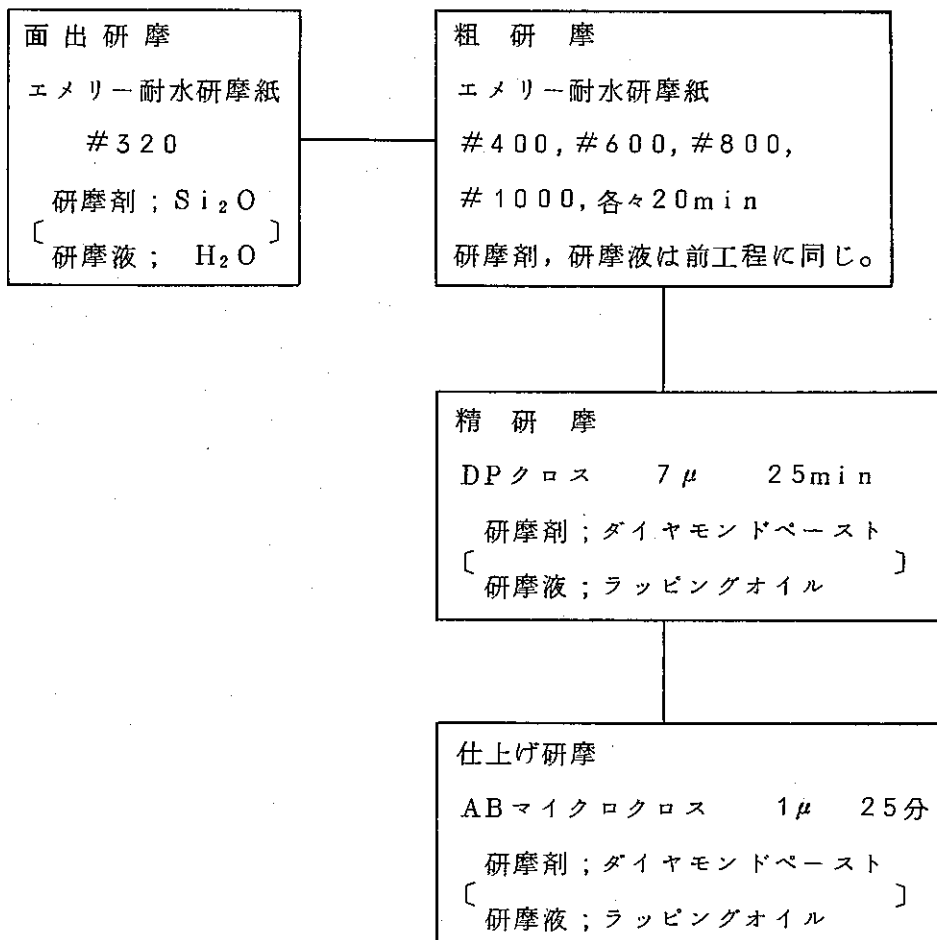
a)-1. 使用研磨機

試料ホルダー強制回転式試料複数個摩き研磨機 (東京・丸本工業K.K)

試料ホルダー回転数; 8 rpm  
 試料研磨板回転数; 240 rpm  
 重 錘 荷 重; 370 g/ヶ

a)-2 研磨工程

樹脂充填部は，先きのべたように切断面より数  $m/m$  程度と予想されたので，研削しすぎないように研磨には充分留意し下記の工程で行なった。また樹脂充填がうまくいかず研磨中にミートの一部がはくりしたような状態になった試料があったので，その試料には，接着剤（アクリルダイナミンNo.3）を注入し固化させた後研磨した。





b). 試料のエッチング法

使用液  $H_2SO_4$  1  
 $H_2O_3$  8 ] の混合液

所要時間 約 30 sec ~ 90 sec

試料は、エッチング液へどぶづけである。

c). 検鏡, 写真撮影

検鏡および写真撮影には、ライヘルト社製金属顕微鏡(オーストリア)を用いた。以下に結果を示す。

また、 $\beta$ - $\gamma$ オートラジオグラフィは、コダック社のハイレゾリューションプレートを使用し、0.007mm厚のアルミオイルでプレートを覆い、さらに汚染を防ぐために0.003mm厚のライファンでシールを行った。

表1 写真撮影判別表

撮影項目	ピンNo HL埋込No 倍率	GR-1		GR-2		GR-3		GR-4		GR-5		GR-6	
		29 (下)	30 (上)	31 (上)	32 (下)	33 (下)	34 (上)	35 (上)	36 (下)	37 (下)	38 (上)	3 (中央部)	
マクロ写真	× 5	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	
全体連続 写真	× 50	無	有	有	無	無	有	有	無	有	無	1/4 連続有り	
Dia連続 写真	×100	有	有	有	有	有	有	有	有	有	無	無	
マイクロ写真 (エッチ前)	×200	有	有	有	有	有	有	有	有	有	無	有	
マイクロ写真 (エッチ後)	×200	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	無	

\*( )内の上下は、プレナム部が(上)とし、END PLAGの方向を(下)とした。

表2 オートラジオグラフィ露出時間

HL埋込 No	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
露出時間 (分)	150	120	40	50	120	150	30	40	40	レ

(レ印は撮っていない。)

## 附録 6

## ギャップコンダクタンスの計算

表 1 計算条件と結果

	GR-4	GR-6
被覆管外径 (cm)	1.223	"
被覆管内径 (cm)	1.083	"
線出力 (W/cm)	366	392
被覆管表面温度 (°C)	390	380
被覆管内面温度 (°C)	430	420
燃料表面温度 (°C)	1,800	1,800
*ギャップコンダクタンス (W/cm <sup>2</sup> ·°C)	0.07944	0.08462

$$* hg = \frac{Q}{2\pi r_0 T} \quad (W/cm^2 \cdot ^\circ C)$$

## GR-2ピンについて

この燃料ピンは、燃料領域内の組織が3領域に別れており、このため、DIRADコードでギャップコンダクタンスを求めた。結果を以下に示す。

表 2 ギャップコンダクタンスと組織変化

ギャップコンダクタンス (W/cm <sup>2</sup> ·°C)	計算結果 (半径mm)		測定値 (半径mm)
0.070	等軸晶	5.329	4.463
	柱状晶	5.222	
	中心空孔	1.918	
0.075	等軸晶	5.116	4.463
	柱状晶	3.411	
	中心空孔	1.918	
0.080	等軸晶	5.009	4.463
	柱状晶	2.878	
	中心空孔	1.599	

表 3 GR-2ピン組織変化計算条件

ギャップコンダクタンス	0.070	0.075	0.080
線出力 (W/cm)	313	313	313
被覆管表面温度 (°C)	365	365	365
被覆管内面温度 (°C)	400	400	400
燃料表面温度 (°C)	1,735	1,650	1,570