

JAERI-M

5225

J R R — 4 使用済燃料の  
解体検査と燃焼度測定

1973年4月

足立 守・松野 見爾・内山 順三・佐藤 博  
高柳 弘・両角 実

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JRR-4 使用済燃料の解体検査と燃焼度測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

足立 守, 松野見爾, 内山順三

佐藤 博, 高柳 弘\*, 両角 実

(1973年2月12日受理)

1968年から1969年にかけて, JRR-4の破損燃料検出器(DN法)指示値が漸増した。炉内でflux tiltingおよびsipping法により調査をおこない, 炉心装荷燃料18本中の1本に異常のあることが認められた。その燃料の解体検査の結果, 燃料板15枚のうちの1枚に破損が確認された。本報告はこの時おこなった解体検査の結果と破損の状況をまとめたものである。破損原因はミート中に存在していた初期ボイドによるものである。

燃料要素の平均燃焼度を求めるため,  $\gamma$ スキャンニングをおこなった。 $^{137}\text{Cs}$ の化学分析値を用いて平均燃焼度の絶対値を求め, 3.92%を得た。この値と熱中性子束分布をもとに算出した計算値との差異について詳細に検討をおこなった。

\* 現在三菱原子力工業

Examination of the used JRR-4 Fuel and Burn-up Measurement  
by Gamma-ray Scanning

Mamoru ADACHI, Kenji MATSUNO, Junzo UCHIYAMA,  
Hiroshi SATO, Hiroshi TAKAYANAGI and Minoru MOROZUMI  
Div. of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

( Received February 12, 1973 )

In JRR-4, a swimming-pool type reactor of power 2.5MW, the ETR-type fuel element is made of 15 U-Al alloy plates with Al cladding.

The count by a fuel failure detector (FFD) had gradually increased from July 1968 to March 1969. Investigation was therefore made by flux-tilting and wet sipping methods, to find the failed fuel; and one leaky fuel element was detected.

This fuel element was disassembled in a hot laboratory, and the failed portion was disclosed. Metallurgical examination showed that the plate concerned had a large void in the fuel meat, with thinner cladding. Causes for this failure are described.

To evaluate the average burn-up of this fuel element, gamma-ray scanning was made on all the fuel plates. The absolute, average burn-up was found to be 3.92%, by radiochemical analysis of Cs-137.

The difference between this and the calculated value based on the thermal-neutron flux distribution is also described.

## 目 次

まえがき	
I 使用済燃料の解体検査	1
1 使用済燃料の詳細	1
2 燃料要素の外観および寸法検査	6
2.1 外観検査	6
2.2 寸法検査	6
3 燃料板の非破壊検査	10
3.1 表面検査	10
3.2 X線ラジオグラフィ検査	10
4 引張および硬度試験	14
4.1 引張試験	14
4.2 硬度試験	14
4.3 検 討	16
5 金相検査	20
5.1 検査方法	20
5.2 検査結果	20
6 破損原因の検討	28
II ガンマ・スキャンニングによる燃焼度測定	29
1 概 要	29
2 ガンマ・スキャンニング装置	29
3 選定核種	30
4 測定・結果	33
4.1 測定条件・測定位置	33
4.2 測定結果	33
5 測定値の補正と誤差	34
5.1 選定核種の減衰補正係数	34
5.2 測定結果の誤差	42
6 燃焼度の決定	43
6.1 試料の燃焼度	43
6.2 較正曲線	43
6.3 燃料要素および燃料板の燃焼度	43
7 検 討	50
7.1 低出力時の熱中性子束分布との比較	50
7.2 燃料板燃焼度分布の歪み	50
7.3 計算燃焼度と実測燃焼度	50
謝 辞	54
参 考 文 献	54

## ま え が き

JRR-4は、1966年1月に臨界となって以来、最高熱出力2.5 MWとなった現在まで順調に運転されている。ここで使用している燃料は、JRR-2同様90%濃縮ウランのETR型である。一方、破損燃料検出器は遅発中性子法が採用されており、運転開始当初は一定の計数値を示していたが、その後計数値は次第に上昇を続けていた。<sup>(1)</sup> 1969年3月に、指示値はアラーム設定値と同程度となったので、燃料破損の疑いありと判断し調査がおこなわれた。しかし、施設の構成上、破損燃料のロケーションはできないので、別報<sup>(2)</sup>のようにひとまず炉心内でflux tilting, sippingなどの検査をおこない破損を確認した。

本報はこれらの報告に続くもので、その後ホットラボでは外観、X線、金相、機械強度、γスキャンニングなどの検査をおこなっており、とくに破損部は樹脂に埋込んで詳細な検査をおこなっている。これらのデータ解析にあたっては、先にJRR-2でETR型燃料の破損を経験しているため、<sup>(3), (4)</sup>比較できるようになるべく同手法を用いている。

平均燃焼度の測定はJRR-4としては初めての経験なので、特に計算値との比較に重点をおいた。

なお打抜き試料の燃焼度の絶対測定は、燃焼率測定開発室に依頼しており、詳細は別途報告される予定なので、本報では省略する。

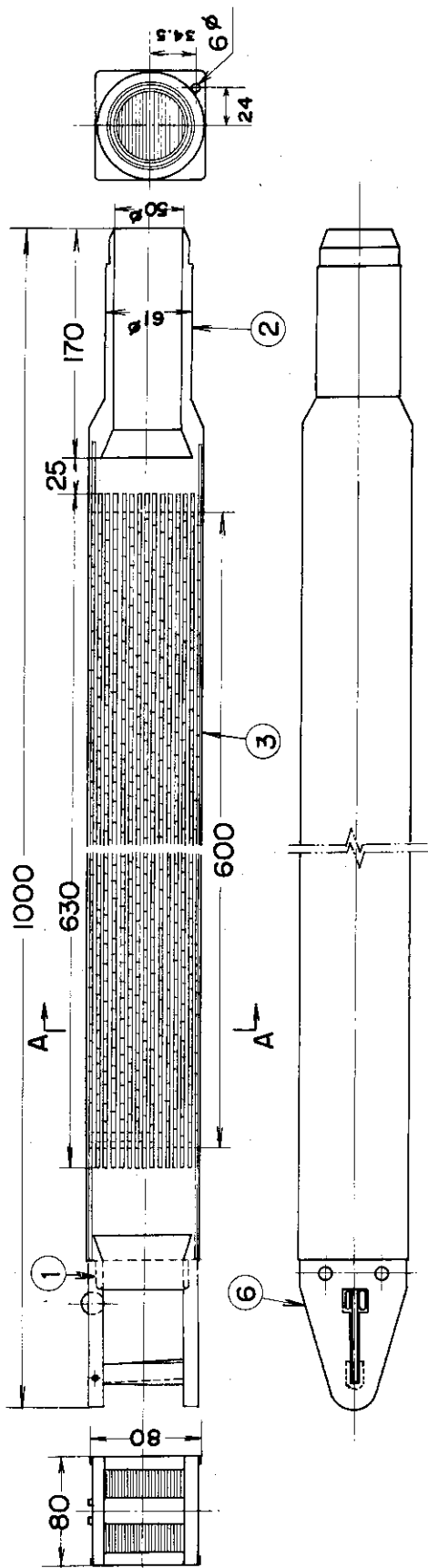
## I 使用済燃料の解体検査

## 1 使用済燃料の詳細

検査した燃料は、1964年末に米国B & W社で製作、H社よりまとめて納入された26本のうちの1本で、臨界実験時から炉心に装荷されていたものである。その詳細をTable I-1.1, Fig I-1.1に示す。また、JRR-4の炉心構成図と、破損した燃料が挿入されていた炉心位置および方向をFig I-1.2に示す。本報告中での燃料板とその方向性に関する呼称をFig I-1.3に示す。

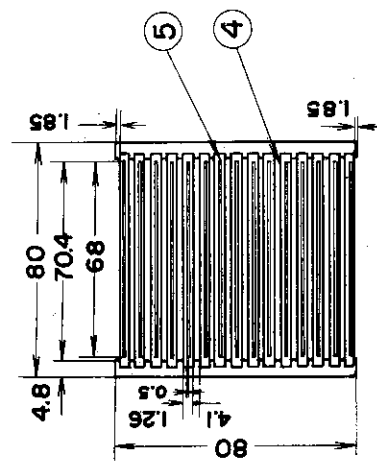
Table I-1.1 検査した燃料の詳細

型 式	ETR 型
燃 料 番 号	105
濃 縮 度	89.87%
U-235量	165.61g
燃 料 板	15枚
燃料挿入孔	E-6, F-5
挿 入 日	40. 1. 25
取 出 日	44. 6. 6
積算出力	150MWH
燃焼度(公称)	6.24%
冷却期間	376日(45.6.17現在)
表面処理	アローダイス
燃料板厚	1.26mm
ミート厚	0.50mm
被覆板厚	0.38mm
ウォーターギャップ	4.1mm



6	吊り手	1	A2PI SUS 27
5	燃料板	13	U-Al 合金 AlP3 相当
4	外燃料板	2	U-Al 合金 AlP3 相当
3	側板	2	A2P4 相当
2	プラグ	1	A2B1 相当
1	継ぎ手	1	A2B1 相当
項番	名称	買数	材質

仕様  
 濃縮度 89.866%  
 U<sup>235</sup>量(質量当り) 165.60gr  
 U含有量(質量パーセント) 19.41%



A-A 断面図

Fig. I-1.1 燃料要素



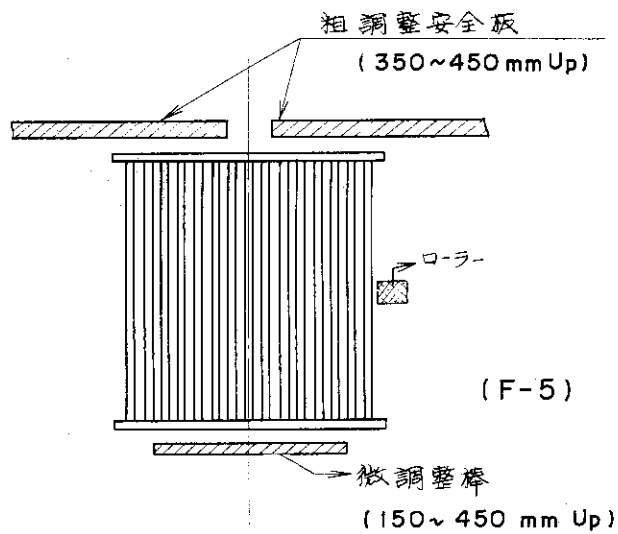
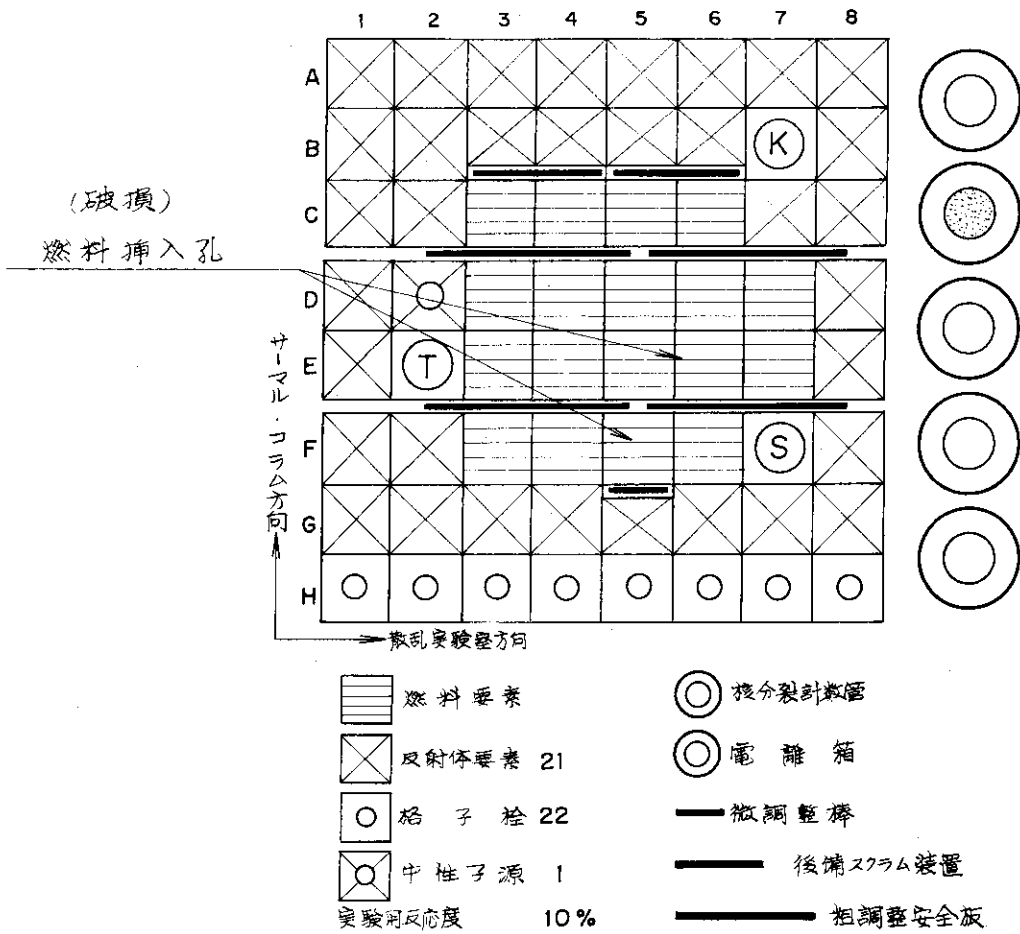
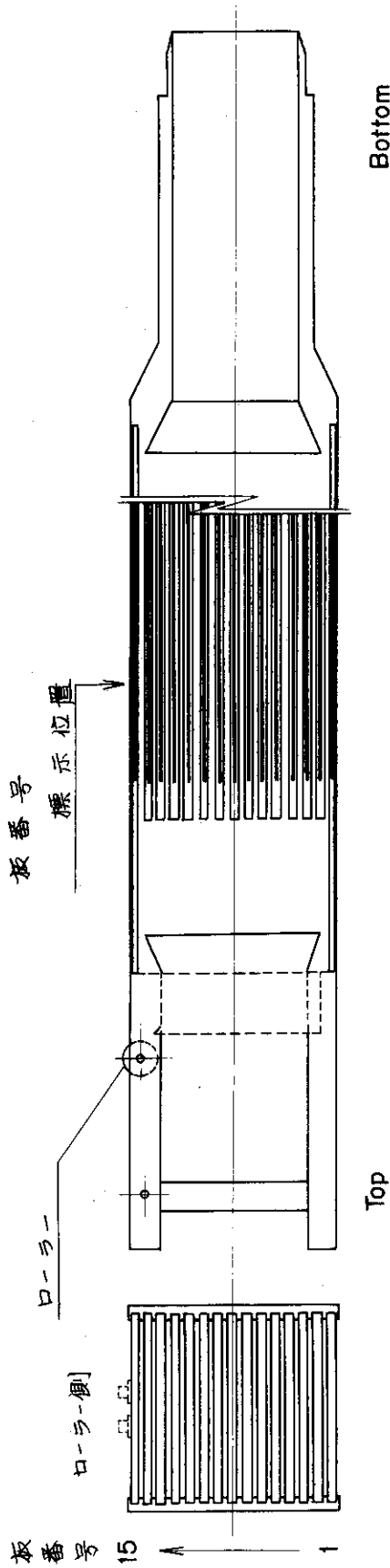


Fig. I-1.2 炉心孔位置とその詳細



注. 燃料板の番号

- (1) Top 側に付す
- (2) ローラー反対側から1~15番とする.
- (3) ローラー側に記す(A面, うらすなわち番号のない面をB面とする)

Fig. I-1.3 燃料板呼称明細

## 2 燃料要素の外観および寸法検査

### 2.1 外観検査

燃料要素の照射による外観上の変化（腐食，変色，庇など），破損の有無を肉眼で検査し，表面状態をスケッチした。また，写真撮影をおこなった。Fig I-2.1 に外観写真を示す。

外部燃料板1に黒く見える点，線状のものは，ベリスコープ（10倍）での詳細検査によれば，擦り庇，打ち庇である。このように燃料板および側板に，多くの擦り庇が見られるが，炉取り出し後の期間が約1年と長かったこと，庇の新旧が明確でないなどから，炉心挿入取出の際に生じたものか，その後の取り扱いで生じたものか判別できない。表面被膜のアロダインの剝離による変色は，燃料板と側板の全面に見られる。特に，燃料板においては，特異なパターンで剝離している。

その他明確な腐食，肌荒れなどは見られない。

### 2.2 寸法検査

照射による燃料要素全体の変形を見るため，ケーブル内にセットした定盤上で，治具に取り付けたノギス，ダイヤルゲージで，以下の5項目について測定した。測定位置関係を Fig I-2.2 に示す。

#### (1) 側板間平行度

側板の開きを見るものでB・D巾について4カ所測定した。測定結果を Fig I-2.3 に示す。この仕様は  $8.0.0 \begin{smallmatrix} +0.0 \\ -0.25 \end{smallmatrix} \text{ mm}$  である。実測値の最大ズレは  $-0.26 \text{ mm}$  であった。わずかに中開きの傾向がみられる。

#### (2) 側板間相対的ズレ

要素のネジレを見るもので，結果を Table I-2.1 に示す。この仕様は最大  $0.40 \text{ mm}$  である。実測値の最大ズレは  $0.01 \text{ mm}$  と少なかった。これは，要素にネジレが生じていないことを示すものである。

#### (3) 外部燃料板と側板間のギャップ

側板端から外部燃料板の引っ込みを見るもので，E値について16カ所測定した。結果を Table I-2.2 に示す。この仕様は  $1.85 \pm 0.2 \text{ mm}$  で，実測値の最大ズレは  $\begin{smallmatrix} +0.28 \\ -0.30 \end{smallmatrix} \text{ mm}$  であり，燃料板上側に出張りの傾向がある。

#### (4) 外部燃料板凹凸

外部燃料板の変形を見るもので，測定位置，測定結果および測定値平均からのズレを Fig I-2.4 に示す。

平均値からのズレは燃料板1で最大  $\begin{smallmatrix} +0.08 \\ -0.15 \end{smallmatrix} \text{ mm}$  で，燃料板15で最大  $\begin{smallmatrix} +0.16 \\ -0.06 \end{smallmatrix} \text{ mm}$  であった。燃料板表面の庇の状況を考えれば，この程度の値は炉内で変形が無かったことを示している。

#### (5) ノズル垂直度

要素の軸からの曲りを見るもので， $90^\circ$  離れた2方向について測定した。結果を Table I-2.3 に示す。測定値は  $0.00 \text{ mm}$  で曲がりはない。

以上のように，測定値を仕様および測定値平均と比較すると，これからわずかにズレるものがあるが，マニプレータ操作による測定の難しさ，ガラス越しに目盛りを読み取るための誤差定盤上の小さなゴミなどによる誤差を考慮すると， $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$  程度の変化は測定誤差とみな

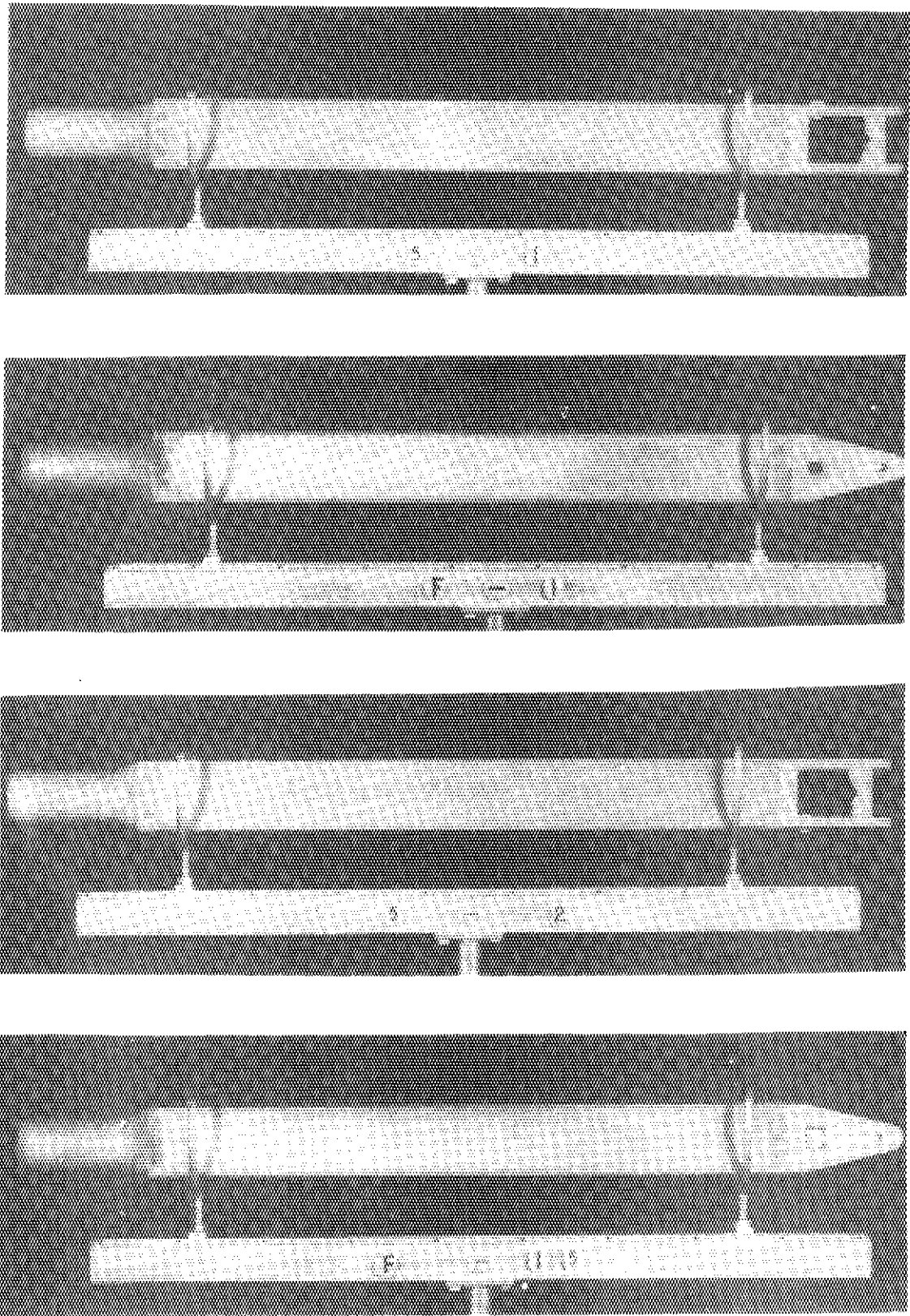


Fig. I-21 燃料要素外觀

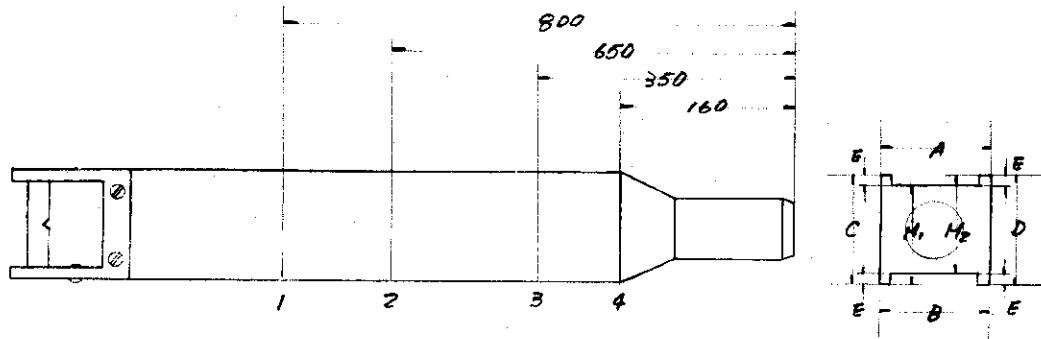


Fig. I-2.2 寸法検査位置関係

単位: mm

測定箇所	1	2	3	4
	79.89	79.91	79.90	79.74
	79.90	79.89	79.88	79.74

IT7:  $80.0 \pm 0.25$   
製作: MIN 79.81  
MAX 79.91

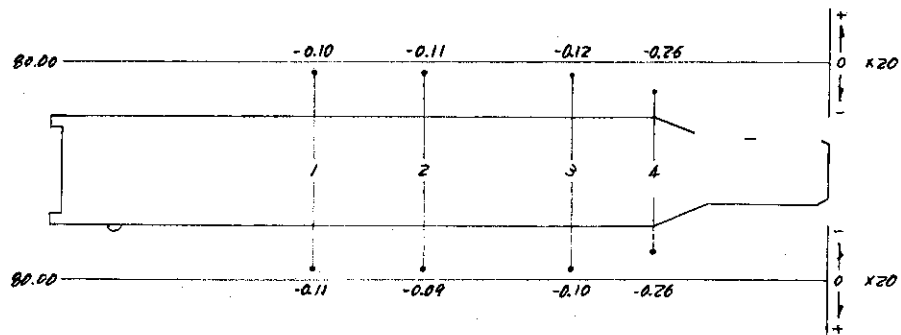


Fig. I-2.3 側板間平行度測定結果

単位: mm

測定箇所	1	2	3	4	5	6	7
燃料板 1	1.24	1.42	1.45	1.42	1.47	1.32	1.41
燃料板 15	1.45	1.44	1.63	1.47	1.41	1.43	1.45

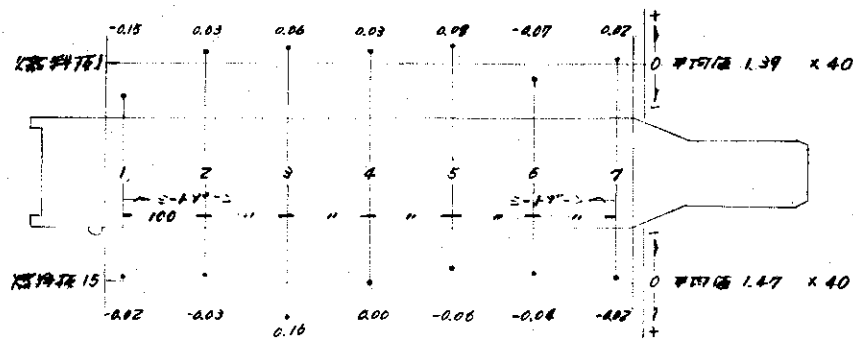


Fig. I-2.4 外部燃料板凹凸測定結果

すのが妥当と考えられ、ズレは誤差範囲内にあると思われる。

Table I-2.1 ずれ測定結果

単位 ; mm





測定カ所								
	A	B	A	B	A	B	A	B
測定値	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table I-2.2 ギャップ測定結果

単位 : mm

測定カ所	E=C-M <sub>1</sub>				E=D-M <sub>1</sub>			
	1	2	3	4	1	2	3	4
測定値	2.12	1.91	2.12	1.55	2.13	1.87	1.88	1.68

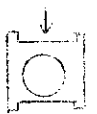
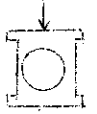
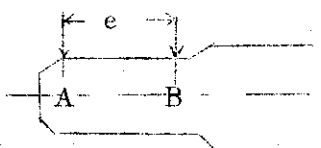
測定カ所	E=C-M <sub>2</sub>				E=D-M <sub>2</sub>			
	1	2	3	4	1	2	3	4
測定値	1.91	1.85	1.86	1.61	1.85	1.87	1.86	1.65

仕様 : 1.85 ± 0.2

製作 : MIN 1.73, MAX 1.98

Table I-2.3 ノズル部垂直度測定結果

単位 ; 任意

測定位置				
	A	B	A	B
		4.74	4.74	4.70
垂直度	0.00		0.00	

### 3 燃料板の非破壊検査

#### 3.1 表面検査

ペリスコープ（10倍）で燃料板表面の詳細な検査をおこないスケッチ，写真撮影した。代表的な表面写真をFig I-3.1に示す。

表面被膜のアロダインは，全板とも同様なパターンで剝離している。すなわち，剝離による変色帯は後述のFig II-9に示す燃焼度分布曲線と同様なパターンをしている。特に，下端部の燃焼度の変化の急勾配の部分では，ミート端に沿って明確な変色帯が見られ，15枚中10枚の燃料板は凹みを生じているように観察される。また，燃料板上部の乱流の激しい部分では，殆んど剝離しており，下部においては，外側に位置する燃料板ほど，ノズル中心方向に沿った流れの変色体が見られる。Fig I-3.2にミート端に沿った凹み，ノズル方向の流れを示す。

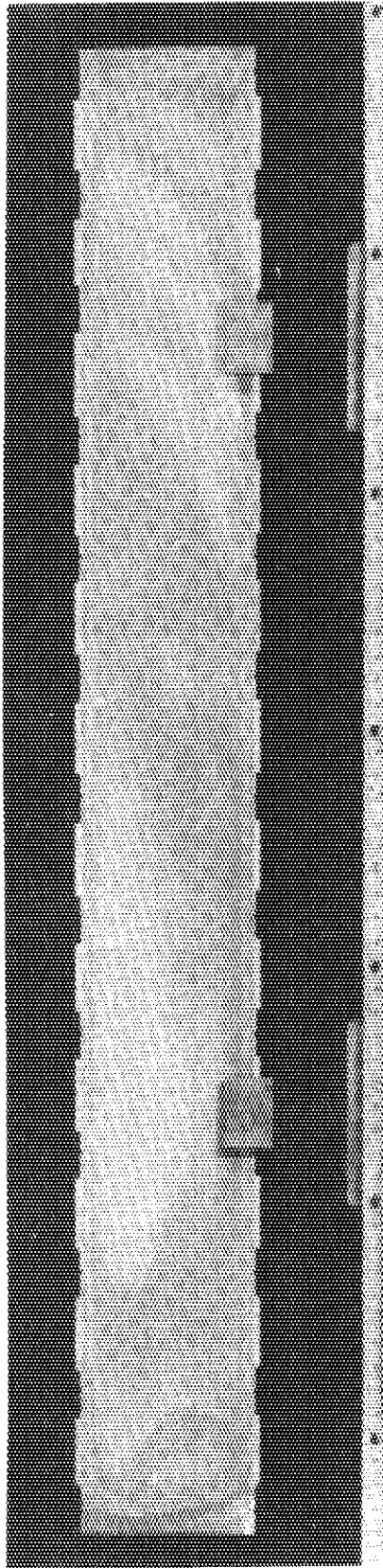
破損は，燃料板4の下部ミート端部に明確に観察された。これをFig I-3.3に示す。破損口には，U-AL合金が露出し水と反応してできた灰白色の反応生成物が見られ，一部にはウラニル水酸化物（ $UO_3 \cdot 2H_2O$ ）と思われる黄色の生成物が観察された。破損口の大きさは，最大巾1.5 mm，長さ3.5 mmで，裏面には2 mm φの変色部が見られ，破損が貫通している様子であった。破損は，JRR-2燃料（ $\#80$ ）の場合の最大巾0.7 mm，長さ8.6 mmにくらべると<sup>(5)</sup>かなりの大きさである。

#### 3.2 X線ラジオグラフィ検査

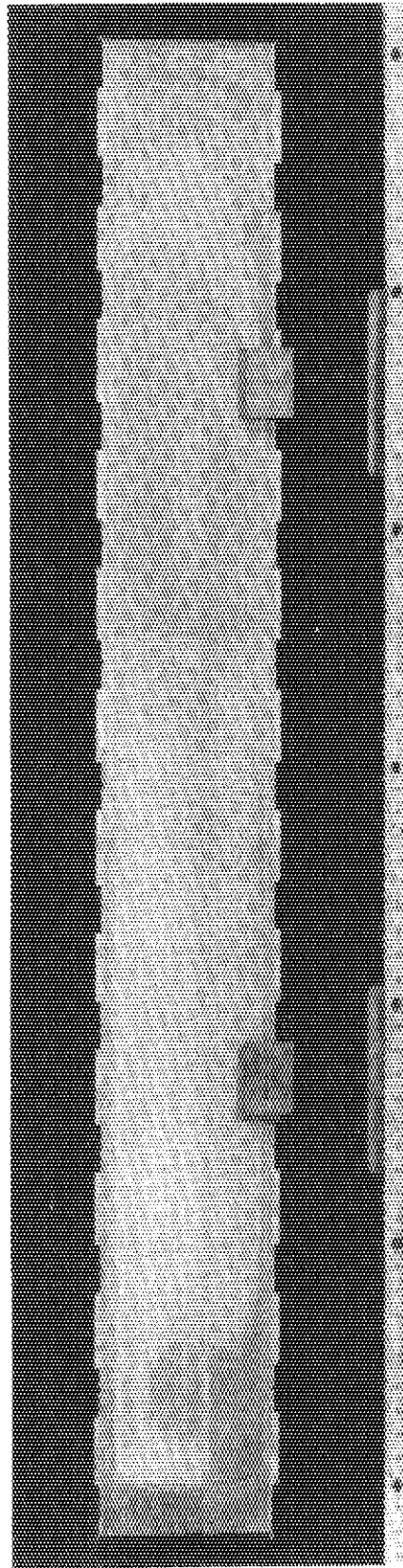
破損の詳細，その他燃料板の異常の有無を知るためX線検査をおこなった。これはフィルムの濃淡によりミートと被覆材とのボンデング，ミート厚の均一性および照射によって生ずる燃料表面に現われない変化の有無を検査するもので，照射前のX線検査結果と比較した。

全燃料板とも，照射成長によるミートの寸法変化は認められなかった。しかし，ミートと被覆材の間にボイドと見られる濃い極く細い筋が見られ，ボンデングの状態は良好とは言えなかった。ドッグボーン傾向については，破損燃料板を除き濃淡の差から見て小さいと思われる。しかし，ミートの被覆材（エンドプレート）への喰い込みは多く見られ，激しいものは，5 mm張り出しているものがある。

破損燃料板のX線写真をFig I-3.4 Aに示す。これは他の燃料板に比べ，エンドプレートへの喰い込みが少い。しかし，ドッグボーンを示す淡部がありこの部分の被覆材がかなり薄くなっていると思われる。この写真におけるボイドは，最大巾0.65 mm，長さ3.5～4.0 mmの大きさであった。一方照射前の燃料板と比較した結果，Fig I-3.4 Bに示すように，この部分にはすでに最大巾約0.6 mm，長さ約3.6 mmのボイドが存在していたことがわかる。照射後の燃料板はU-AL合金の溶出のためミート端が不明瞭となり，ボイドが成長していることがわかる。



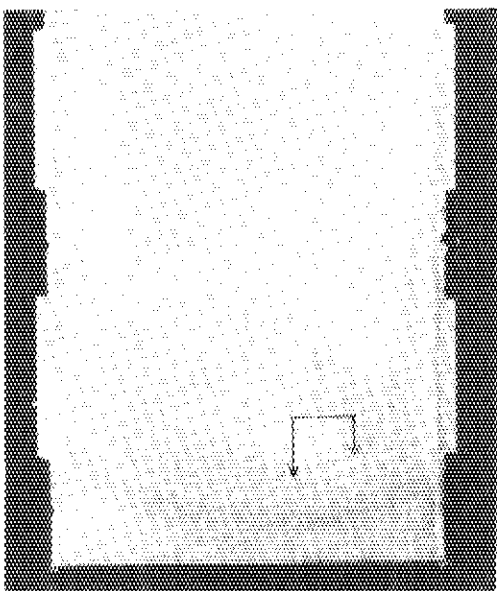
燃料板 4. B面 (破損燃料板)



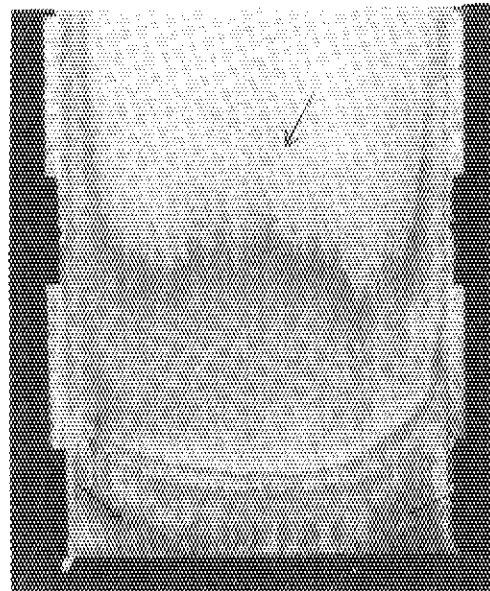
燃料板 1. B面 (健全燃料板)

Fig. I-3.1 燃料板表面全体

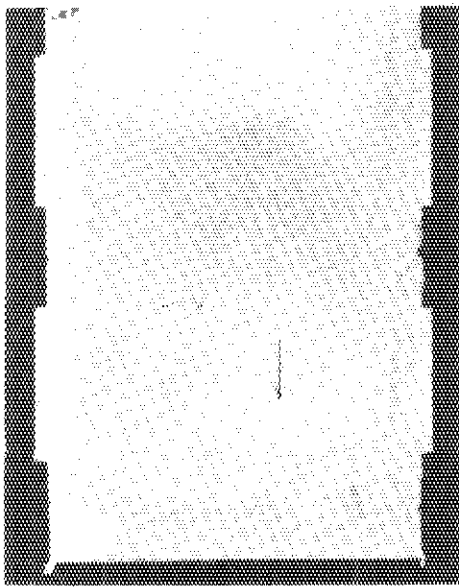




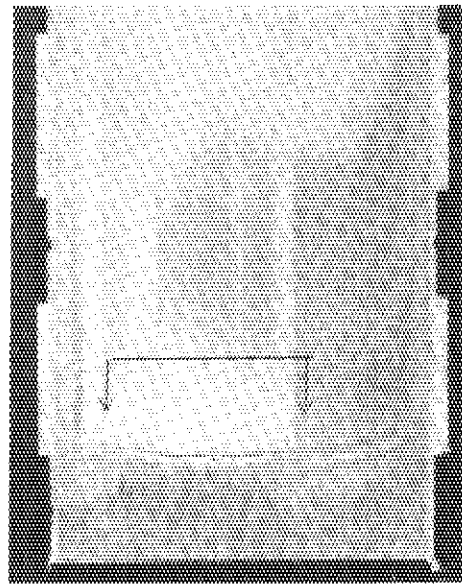
シート端に沿った凹み (燃料板 9, A面)



ノズル方向への流れ (燃料板 2, A面)



A面破損口

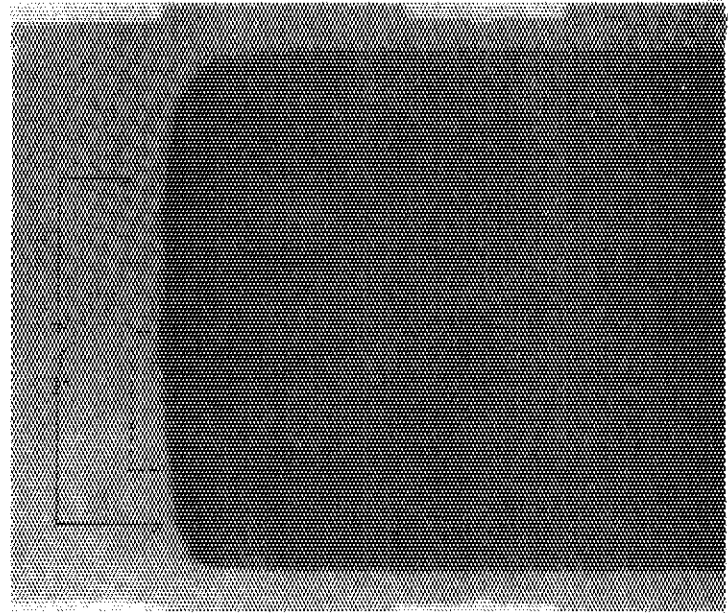
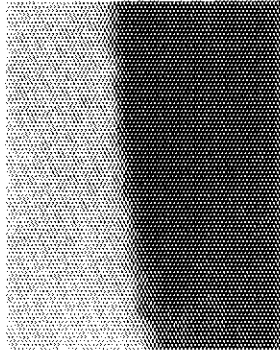


B面破損口

Fig. I-3.3 破損部詳細

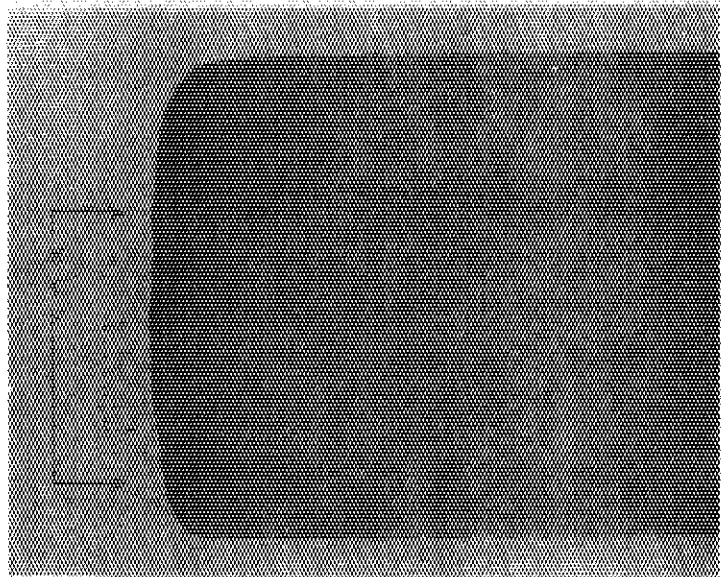
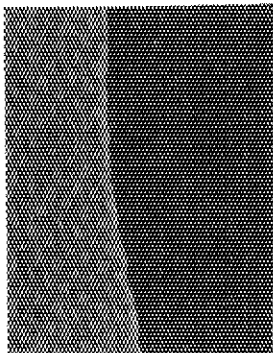
Fig. I-3.2 燃料板表面詳細

□部詳細



照射後(A)

□部詳細



照射前(B)

Fig. I-3.4 破損燃料板 X線写真

## 4 引張および硬度試験

## 4.1 引張試験

燃料板の照射による機械的性質の変化を調べるため、引張試験をおこなった。試験は、燃料要素のほぼ中央にあたる燃料板9と外側に位置する燃料板15についておこなった。試験片の打抜きは、ガンマスキヤニングの結果から、燃焼度分布が平坦で、できるだけ広範囲の平均燃焼度が得られる位置とした。試験片採取位置をFig I-4.1に示す。

- (1) 試料：6号試験片
- (2) 試験機：インストロン引張試験機
- (3) 試験条件：

引張早さ	0.5 mm/min
チャートスピード	30 mm/min
引張荷重	最大300Kg
周囲温度	25~27℃

- (4) 引張強さおよび伸び率の算出方法

$$\text{引張強さ } \sigma_B = \frac{P}{A} \quad (\text{Kg/mm}^2)$$

$$\text{伸び率 } \delta = \frac{L \times K}{L_0}$$

ただし、P：試験片の耐えた最大荷重 (Kg)

A：試験片の原断面積 (mm<sup>2</sup>)

L：チャート紙から算出した試験片の伸び (mm)

L<sub>0</sub>：JIS規格<sup>(6)</sup>による試験片の標点間距離 (mm) L<sub>0</sub> = 8 √A

K：チャート紙から求めた伸びと実際の伸びの較正定数<sup>(3)</sup> K = 1.45

## (5) 結果

引張強さと伸びの試験結果をTable I-4.1に示す。

伸びは燃焼度の増加 (2.8~6.7%) にもともない急激に低下 (0.2~1.9%) した。一方、引張強さはこの間 15~21 Kg/mm<sup>2</sup> であった。未照射のデータがないので正確にはいえないが、JRR-2の未照射燃料と比較すると、わずかに照射による引張強さの増加がみられる。燃焼度への依存性については、試験片の数がすくないことおよび燃焼があまり進んでいない燃料であるため、燃焼度の変化範囲を広くとれなかったことなどから明確にできなかった。

## 4.2 硬度試験

U-AL合金およびAL被覆部のビッカース硬度を測定し、照射による硬度変化を調べた。試験片には破損部金相試験の試料と、破損していない燃料板3枚から採取したものをを用いた。破損していない燃料板の選択位置は、破損した燃料板とほぼ対称位置にある燃料板10, 11と5とした。打抜きはFig I-4.2に示すように、1枚の燃料板から2個ずつおこなった。ここでAはミート端にあたり、燃焼度が急激に変化するところ、Bは平坦な燃焼度のところである。

- (1) 試料：破損部金相試験終了後の試料3個および破損していない燃料板から打抜いたもの6個を試験に供した。金相試験後の樹脂埋込試料はそのまま使用した。破損していない燃料板

試料名	$L_A$ (mm)	$L_B$ (mm)
4-9	125	371
4-15	148	391

Top側

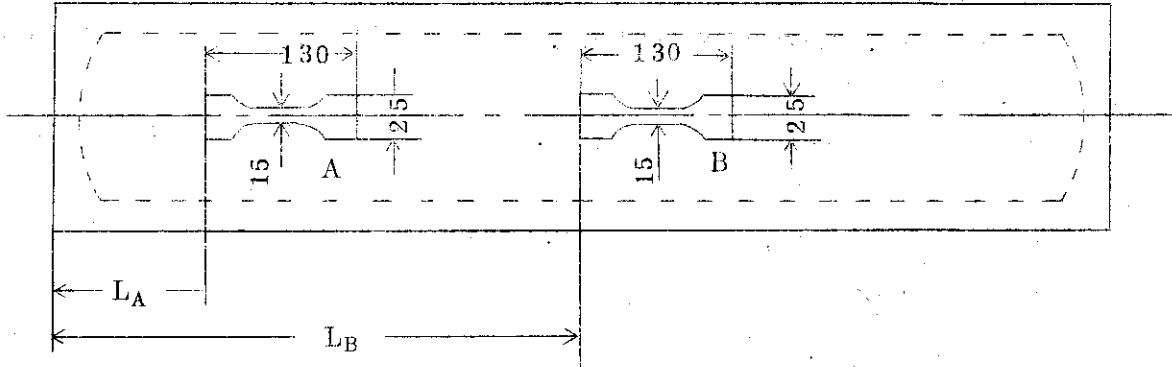


Fig I-4.1 引張試験片 (6号試験片) 採取位置

Table I-4.1 引張試験結果

試料番号	引張強さ (Kg/mm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	燃焼率 (%)	備考
4-9 A	19.15	1.87	2.77	
4-9 B	18.41	0.33	6.70	
4-15 A	20.74	0.46	(2.98) 4.10	切断位置不明
4-15 B	14.92	0.20	5.63	

室温 25~27°C

から打抜いた試料は、樹脂に埋込んだ後、金属顕微鏡（倍率100）でAL被覆とU-AL合金の境界が明確になるまで研磨した。（研磨は研磨紙および電解研磨を併用した。）

(2) 測定器：自動マイクロビッカース硬度計（TUKON製）

(3) 測定方法：試験荷重は0.2Kg，試験荷重に到達するまでの時間を約10秒，荷重継続時間を30秒とし，凹の対角線の長さは縦，横の読みの平均をとった。測定ヶ所はAL被覆部6ヶ所，U-AL合金部6ヶ所である。

(4) 硬度の決定法(7)ビッカース硬度は，対面角が136度のダイヤモンド四角錐圧子で，試験面にピラミッド形の凹をつけたときの荷重を永久凹の対角線の長さから求めた表面積で除した商をいう。すなわち，荷重をP(Kg)，凹の対角線の長さの平均をd(mm)とするとビッカース硬度 $H_v$  (Kg/mm<sup>2</sup>)は

$$H_v = 1.854 \frac{P}{d^2}$$

から求められる。

(5) 結 果

硬度試験結果をTable I-4.2に示す。こゝで試料番号末尾の記号Aの試料の燃焼度は正確に求めることが困難であるため，Bの試料と同様に算術平均をとり測定位置中央の値を用いた。この結果でも燃焼度に大きな変化がとれず，燃焼度への依存性について明確な結論を下すことはできない。

#### 4.3 検 討

U-AL合金燃料板の，照射による機械的性質の変化という観点から，引張および硬度試験結果をまとめて検討する。

JRR-4燃料については，未照射における引張および硬度試験のデータがなく，試験片も残されていないため，照射前後の変化を明らかにすることはできなかった。また，燃料の燃焼度が低く，試料の燃焼度変化範囲を広くとれなかったこと，タイムスケジュールの点から試料数に制限があったことなどにより，燃焼度への依存性について，検討するに十分なデータは得られなかった。しかし，Table I-4.3に示すように，燃料の組成，加工および燃焼条件がいずれもほぼ同じであることから，JRR-2燃料と比較することにより検討することは可能と思われる。

引張試験について，JRR-2燃料と比較した結果をFig I-4.3に示す。バラッキはあるが，JRR-2とくらべ燃料板の引張強度に大きな差はないことが分かる。しかし，伸びはFig I-4.4に示すように，JRR-2燃料とくらべて著るしく相異している。未照射時のデータがないので断定するには問題があるが，燃焼条件に大きな差がなく，引張強さにも差がないことから，伸びがこのように悪いのはJRR-4燃料に用いられているAL被覆材又はU-AL合金芯材が初めから延性の小さな材料であったか，あるいは後者が照射により急激に延性を失ったかのいずれかであると思われる。いずれにせよ断定するには今後のデータの積重ねが必要であるが，これから燃焼を進めるうえで一つの問題点であることを示している。

U-AL合金の硬度試験結果は，芯材へのSiの添加割合および試料の研磨後の放置時間により著るしい影響を受ける。このため直接JRR-2燃料と比較することはできない。燃焼の増加

試料名	$L_A$ (mm)	$L_B$ (mm)
4-5	20	300
4-10	25	300
4-11	55	300

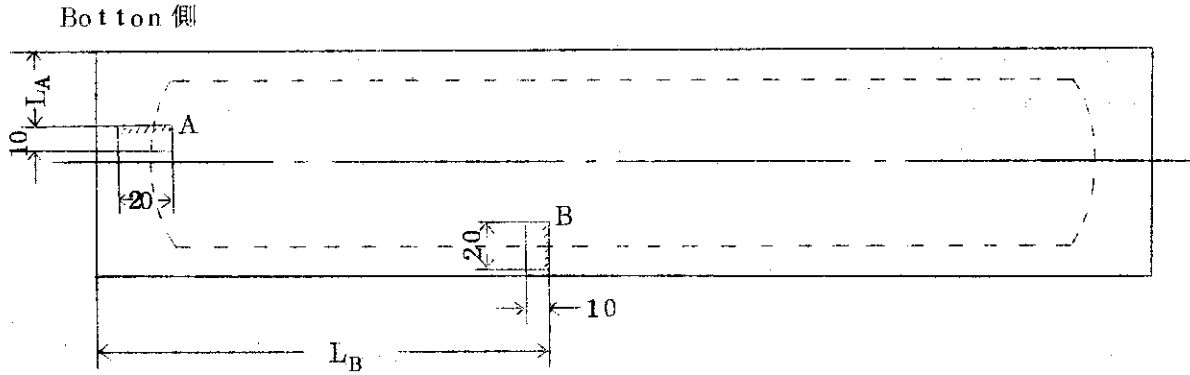


Fig I-4.2 硬度試験片採取位置

Table I-4.2 硬度測定結果

試料番号	燃焼度 (%)	U-Al 合金部	Al 被覆部	備考
		④,⑤,⑥の平均	①,②,③,⑦,⑧,⑨の平均	
4-5 A	4.36	65.5	26.7	
4-5 B	8.28	70.9	33.1	
4-10 A	3.97	68.3	28.8	
4-11 A	4.58	69.7	27.6	
4-11 B	4.21	62.5	28.8	
4-4-4	3.38	60.4	21.2	破損部金相試料
4-4-3	4.52	66.4	26.5	"
4-4-1	5.71	81.8	28.4	"

試験荷重: 0.2Kg

単位: ピッカース

	①	②	③	
Al	④	⑤	⑥	U-Al 合金
	⑦	⑧	⑨	

Table I-4.3 JRR-4 と JRR-2 の加工および燃焼条件の比較

	JRR-4	JRR-2
ウラン濃縮度および合金名	90%濃縮U-AL合金	90%濃縮U-AL合金
平均熱中性子束 ( $n/cm^2 \text{ sec}$ )	$2.5 \times 10^{13}$	$5.9 \times 10^{13}$
最大高速中性子束 ( " )	$1.1 \times 10^{14}$	$2.4 \times 10^{14}$
燃料中心最高温度 ( °C )	67	98.5
被覆材表面最高温度 ( °C )	101	95.7
芯材の混合割合 (W/O)	19.1~19.7	20.5~21.5
冷間加工度 ( % )	約19	15~20
平均燃焼度 ( % )	約 4	8~21

にともないわずかに硬化する傾向はみられるが、今後の変化は予想し得ない。

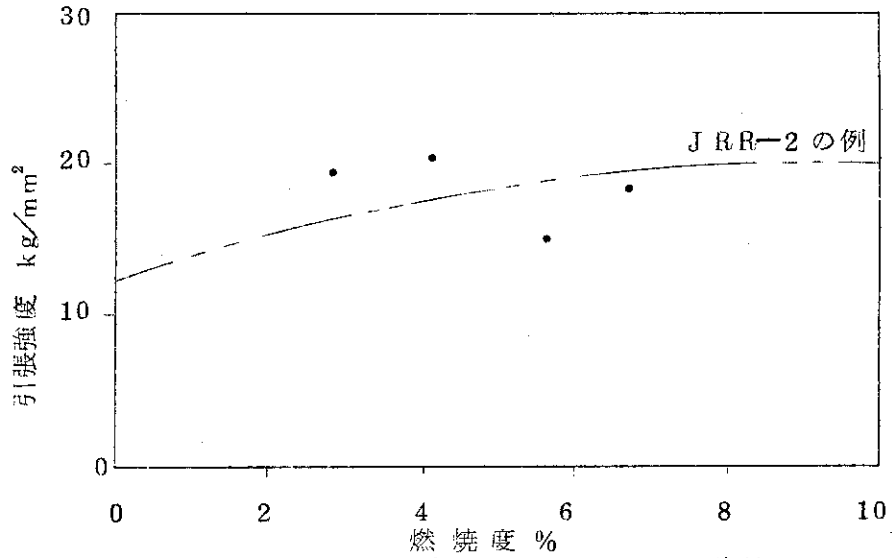


Fig I-4.3 引張強度のJRR-2との比較

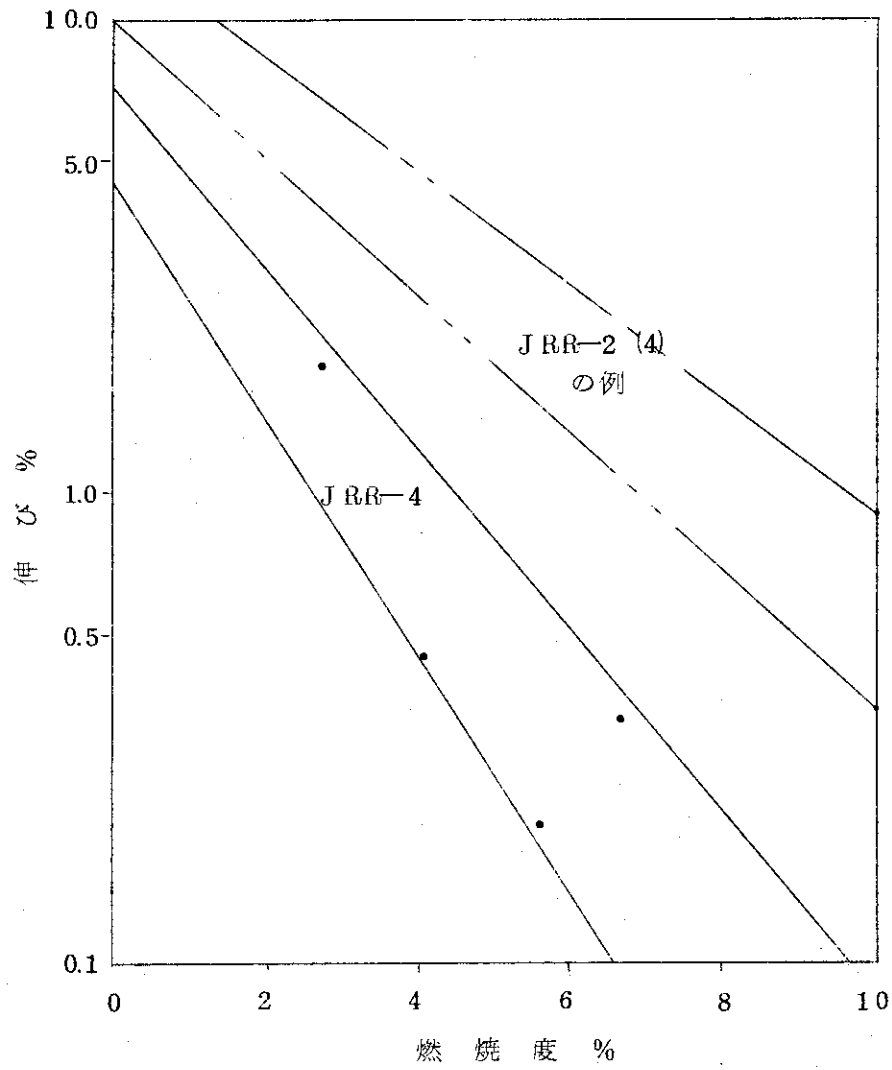


Fig I-4.4 伸びと燃焼度の関係



## 5 金相検査

照射による金属組成の損傷，ミートと被覆材とのボンディング，結晶粒子の異常等を調べ，さらに破損部の詳細を知るために金相検査をおこなった。

### 5.1 検査方法

金相検査に供した各試料の詳細位置をFig I-5.1A, Bに示す。試料は樹脂に埋込んで研磨した後，金属顕微鏡により写真撮影した。試料の切出しはプレスによったが，破損部は貫通していると思われる位置をさけて，破損部を変形させないように切断するためダイヤモンドカッタを用いた。

U-AL合金燃料は，化学的な腐食によって組織をだすより，電解研磨による方が容易なのでこの方法を用いた。しかし，破損部試料は小さく，板状であるため，樹脂への埋込みには特に苦勞した。

研磨と写真撮影に使用した機器および使用条件は次のとおりである。

電解研磨装置	DISA electropol mark 5
金属顕微鏡	RCM 金属顕微鏡 (ユニオン)
フィルム	ポラロイド (PSI&NEGA ASA55)
倍 率	6.4倍 (一部12.8倍)

### 5.2 検査結果

#### 5.2.1 金相検査結果

破損部以外の金相検査結果をFig I-5.2に示す。この結果から，U-AL合金粒子の圧延方向への伸びは良く，比較的大きな粒子は中央部に集まっており，特に大きな粒子は存在しない。この場合も，燃料購入時に燃料板の金相検査はおこなっていないため，今回の検査から照射前後の比較はできないが，特に問題となる損傷，結晶粒子の異常は見当らない。ミート端部の形状はJRR-2の場合と異なり，ドグボーンはほとんどなく，フィッシュテールが多い。ミートと被覆材のボンディングは良好で，X線写真でみられたボンディング不良らしきものはみあたらない。

寸法検査（燃料板厚，ミート厚，上・下被覆材板厚）の結果ではいずれも仕様の範囲内であった。検査の代表例をFig I-5.3に示す。

なお，この検査結果から，燃料板の表面検査でみられたミート下端部の変色部は凹とはなっていないことが確認された。

#### 5.2.2 破損部検査結果

破損部の検査は，破損の大きさをできるだけ正確に把握するため，一回の研磨量を約2 $\mu$ mとし，各回ごとに写真撮影，ダイヤルゲージによる研磨量測定をくり返した。検査ヶ所は全部で20ヶ所である。

##### (1) 破損状況

破損部の検査位置と，その結果をTable I-5.1とFig I-5.4A, Bに示す。

破損中心部でのふくれは大きく，最大もりあがりは約0.5 $\mu$ mである。中央部にはうら側に貫通する孔があいており，外觀検査でみられたミート端の被覆材変色部は奥深くポイドとなっている。JRR-2の破損と同様に，冷却水との接触面では，ミートは浸食され，その周辺

AL被覆材は肌荒れが著るしい。庇の大きさ（被覆材の開口部）は幅 0.7 mm（最大），長さ 3.2 mmである。

(2) ミート欠損容積

破損部より流出したミートの欠損容積は，連続した断面写真と研磨量から求めた。方法は，①全ポイド容積と，②初期ポイド容積を求め，その差をミートの欠損容積とするもので，算出過程を以下に示す。

① 全ポイド容積

各写真のポイドの断面積を測定して，隣接する面の平均値に各ステップの研磨厚をかけて積算する。すなわち，全ポイド容積  $V_1$  は

$$V_1 = \sum_{i=1}^{20} \left( \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) d_i + \alpha = 2.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$$

A : ポイドの断面積 ( $\text{cm}^2$ )

d : 研磨厚 (cm)

i : 写真番号

ここで  $\alpha$  は写真 No. 20 以降のポイド容積で，X線写真から  $3.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$  と推定された。

② 初期ポイド容積

照射前のX線写真からミート端部の位置を測定し，各断面写真の初期ミート端部位置を決めて初期ポイド容積  $V_2$  を求めた。算出方法は  $V_1$  の場合と同様である。

$$V_2 = 6.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

この結果，ミート欠損容積  $G$  は

$$G = V_1 - V_2 = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$$

となった。

この値は，U-AL合金比重 ( $3.25 \text{ g/cm}^3$ )，U-AL合金中のU重量比 ( $19.41 \text{ w/o}$ )，Uメタルの純度 ( $99.7\%$ )， $^{235}\text{U}$ の濃縮度 ( $89.9\%$ )を考慮して $^{235}\text{U}$ 量に換算すると  $7.9 \times 10^{-3} \text{ g}$ に相当する。

金相検査時の試料を用いて，破損部の燃料板厚，ミート厚，被覆材板厚の測定をおこない仕様と比較した。この結果を Fig I-5.5 に示す。燃料板厚は一定で，いずれも仕様を満足しているが，ミートと被覆材板厚は端部になるほど仕様から外れ，破損部では，ミート厚は  $0.84 \text{ mm}$  に達し，被覆材板厚は  $0.2 \text{ mm}$  以下まで減少している。燃料板厚が一定であることから，この現象は被覆材が溶出して薄くなったものではなく，初めから薄かったことが明らかである。

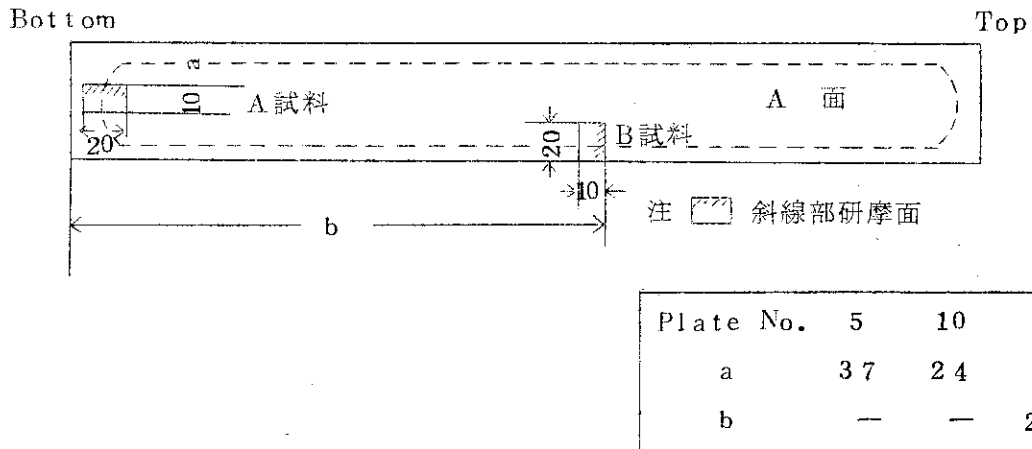


Fig I-5.1A 金相試料詳細位置

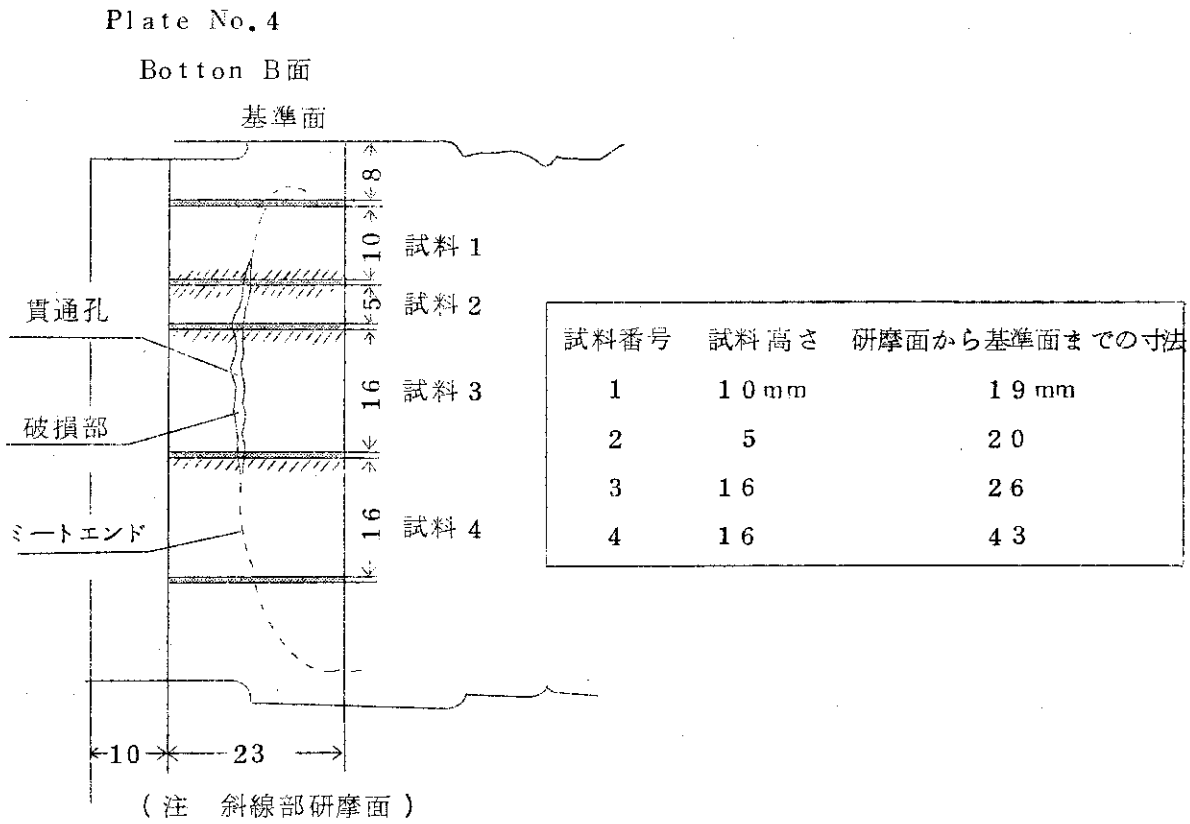
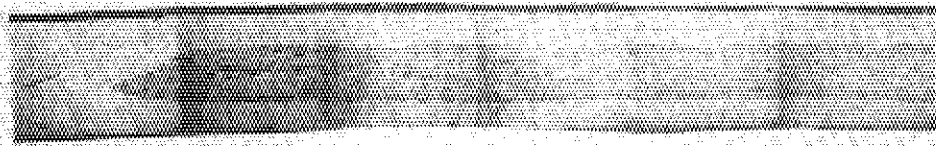
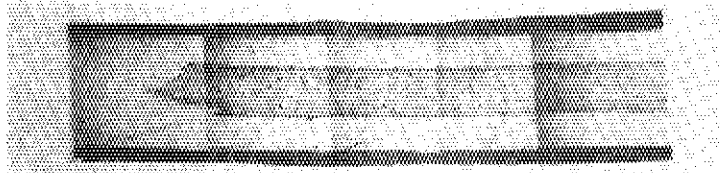


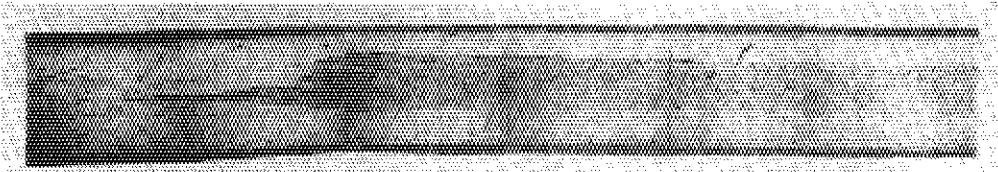
Fig I-5.1B 破損部試料詳細位置



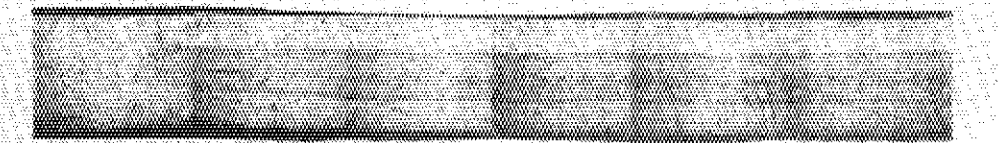
11 - A



11 - B



10 - A



5 - B

Fig. I-52 健全部金相写真

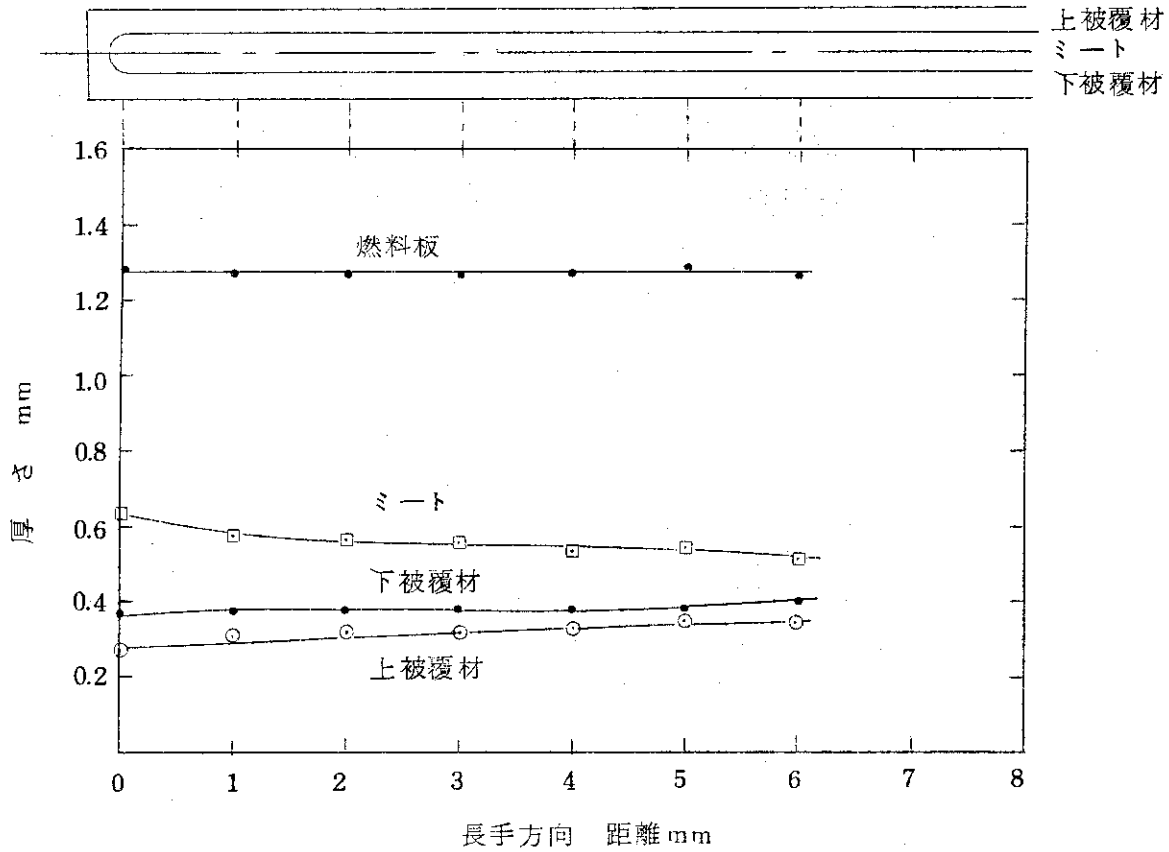


Fig I-5.3 端部における厚さ変化 (板 10-A より)

Table I-5.1 写真とその位置

試料	写真番号	研磨量 mm	基準面*からの距離 mm
1	20	8.6	10.4
	19	6.5	12.5
	18	4.8	14.2
	17	1.9	17.1
	16	0.0	19.0
2	15	0.0	20.0
	14	1.9	21.9
	13	4.2	24.2
3	12	0.0	26.0
	11	2.1	28.1
	10	4.3	30.3
	9	6.8	32.8
	8	8.5	34.5
	7	11.8	37.8
	6	14.0	40.0
5	15.3	41.3	
4	4	0.0	43.0
	3	1.7	44.7
	2	3.8	46.8
	1	6.9	49.9

\* Fig I-5.1 B 参照

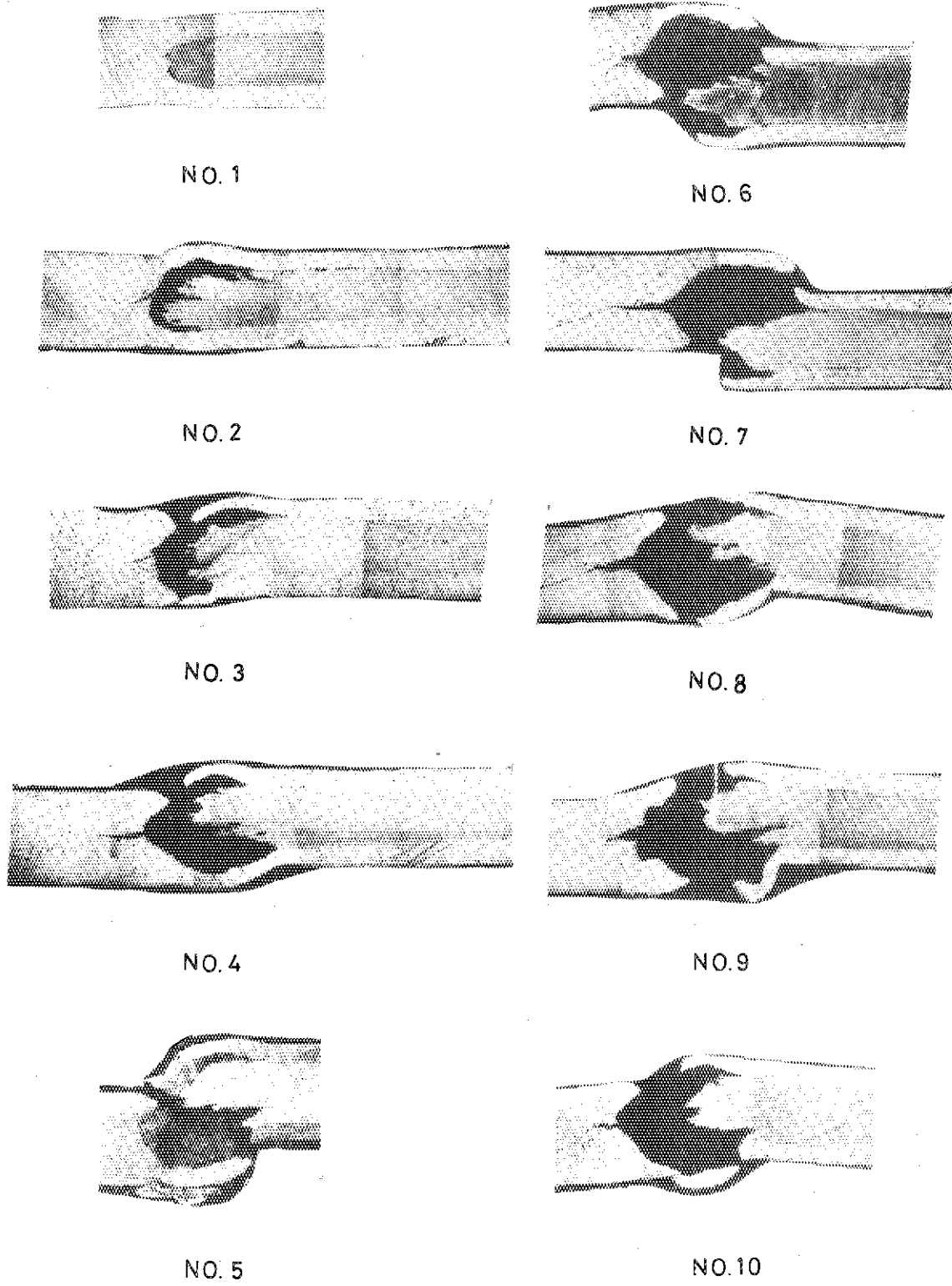
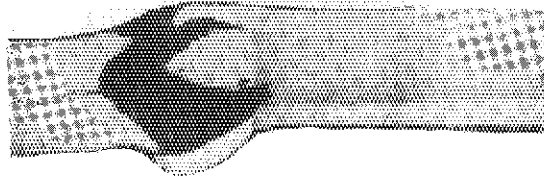
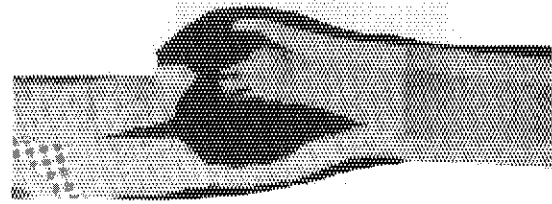


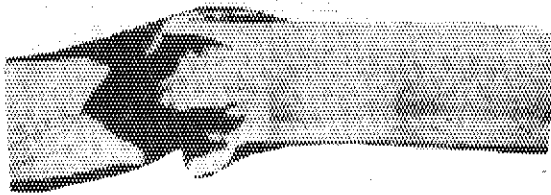
Fig. I-5.4A 破損部断面写真



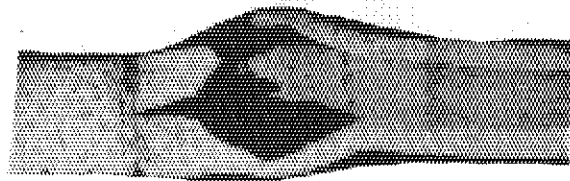
NO.11



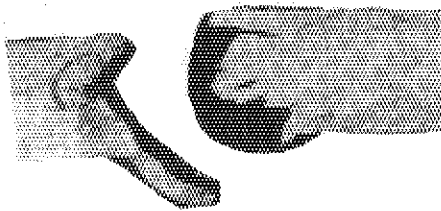
NO.16



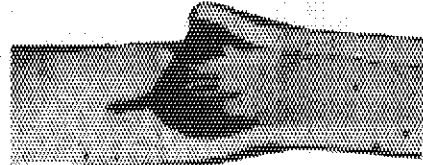
NO.12



NO.17



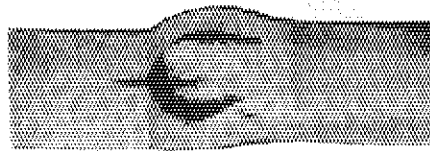
NO.13



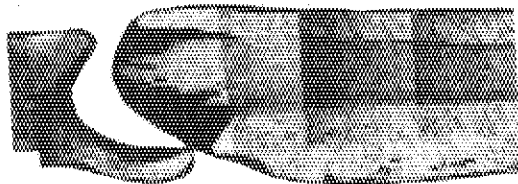
NO.18



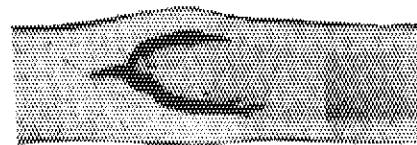
NO.14



NO.19



NO.15



NO.20

Fig. I-5.4B 破損部断面写真

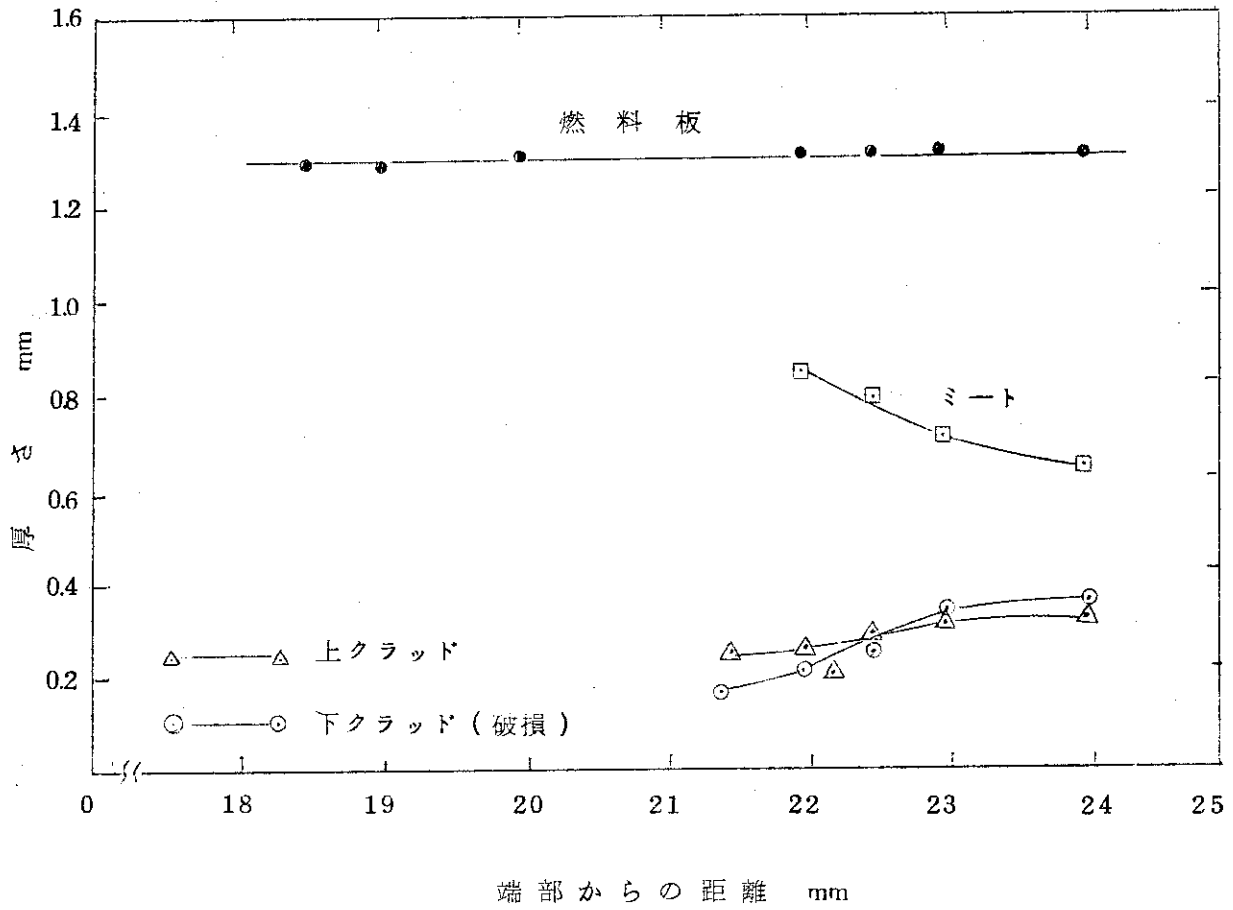


Fig I-5.5 端部における厚さ変化 (破損 photo 17 より)



## 6 破損原因の検討

今回の検査結果，次のことが明らかになった。

- ① 破損は1ヶ所で，端から4枚目のミート下端部に位置している。
- ② 同所のボイドは照射前に存在していた。
- ③ ミートの欠損容積は  $1.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$  で，JRR-2で起った破損<sup>(5)</sup>の約4倍である。
- ④ AL被覆材の厚さは破損位置が最小で0.18 mm程度であった。

この他，後述のガンマスキュニングの結果から，破損位置は熱中性子束のエンドピークにあり，燃焼度分布が急激に変化している所であることがわかった。

以上の結果から，破損は初期ボイドの存在とドグボーン現象，熱中性子束分布の急激な変化による極部的な温度上昇にAL被覆材の薄さが加わって発生したと推察される。ミート下端部の極部的な温度上昇は，破損していない他の燃料板における表面被膜のアローダインの剝離のパターンからも考えられる。

以上のように，今回の破損の直接原因は製作過程における検査に問題があったと推定され，今後同様なことが起る可能性は非常に少ないと考えられる。しかし，今後この種の原因による破損を起ささないためには，さらに厳しい検査と工程管理が必要である。

## II ガンマ・スキヤニングによる燃焼度測定

### 1 概 要

原子炉の設計，炉心管理などの面から炉に装荷した燃料の燃焼特性を知ることがきわめて重要である。このため原子炉内の熱中性子束分布の測定がおこなわれている。この測定には金，コバルト，ニッケルなどの箔またはモニターワイヤーを照射してその放射能を測定する放射化学法が一般におこなわれているが，燃料の真の燃焼特性は示さない。一方，使用済燃料は燃焼状況を示す多くのデータを蓄積しているので，化学分析および質量分析などから精度の高い燃焼特性を求めることができる。しかし使用済燃料の化学分析および質量分析には燃料の解体，試料採取および溶解などが伴なううえ，時間的，経済的に高価となり試料の数が制限される。この結果，燃料の部分的な燃焼特性しか得られず，全体的な状況を把握するのが困難である。

このような理由から定常的に多量の燃料の燃焼特性を求める方法としてガンマスキヤニング技術が研究開発されてきた。（例えば，ref. (8)~(18)を参照）ガンマスキヤニングの対称となる核分裂生成物（F・P）は一般に次の条件を満たしていることが望ましい。

- (1) 核分裂収率が大きく，中性子のエネルギーや核燃料物質に関係なく一定なこと。
- (2) ガンマ線のエネルギーが高く，他のF・P核種から分離できること。
- (3) ガンマ線の放出率が大きいこと。
- (4) 中性子吸収断面積が小さいこと。
- (5) 半減期が長いこと。
- (6) 拡散による移動がないこと。

燃料の種類，燃焼度，冷却期間および検出器などの違いにより対象となるF・P核種はいろいろであるが，多くの実験では $^{95}\text{Zr-Nb}$ ， $^{106}\text{Ru-Rh}$ ， $^{137}\text{Cs-Ba}$ ， $^{140}\text{Ba-La}$ ， $^{144}\text{Ce-Pr}$ などが一般に用いられており，これらのF・P核種の $\gamma$ 線強度分布を得ることによって燃料の相対的燃焼度分布を知ることができる。相対的燃焼度分布から絶対燃焼度を求めるには，化学分析，質量分析などの測定結果と対応させればよい。

### 2 ガンマ・スキヤニング装置

装置はJRR-2使用済燃料の解体検査<sup>(3)(4)</sup>で用いたものと同じで燃料板移動装置，コリメータ，検出器，検出器収納部および計測装置から構成されており，一部を除いてホットケブ内に置かれている。燃料板移動装置は駆動用シンクロモータ，チェーンおよび燃料板収納箱から成り左右に連続的に移動できる。移動速度は600，300，150，100，50，25mm/min，600，300mm/hrの8段変速で制御パネルによりケブの外から選択できる。また，ハンドル操作により移動装置全体を前後方向に22mm間隔で移動できる。これによって，固定した1枚の燃料板の3ヶ所についてスキヤニングをおこなうことができる。コリメータは鉛製で，上・下2段にわかれている。上段コリメータは3種類あり，厚さ70mmで直径1,2,3mmの孔があいたものが各1個ある。下段コリメータも3種類あり，厚さ200mmで直径4,6,8mmの孔があいている。検出器収納部は2"φ×2"のNaI(TL)検出器が入るようになっている。装置の概略図をFigII-1に示す。

### 3 選定核種

スキャンニングの対象とするF.P核種を決めるために代表的燃料板の $\gamma$ 線スペクトルを測定した。冷却時間、燃焼度の関係から1MeV以上の $\gamma$ 線については対象外とした。FigII-2に得られた $\gamma$ 線スペクトルを示す。NaI(TL)検出器の分解能が悪いため、 $^{137}\text{Cs}$ と $^{95}\text{Zr-Nb}$ の分離は完全でない。また、他の核種はこれらの光電ピークのコンプトンプラトにかくれて識別できない。

選定核種としては、半減期の長い $^{137}\text{Cs}$ の光電ピークに焦点をしぼるのが望ましい。しかし、こゝでは次の理由で $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{95}\text{Zr-Nb}$ の光電ピークを対象としてスキャンニングを実施した。(ウィンド幅0.45~0.83 MeV)

- (1)  $^{137}\text{Cs}$ の光電ピークだけでは計数率が低く、測定誤差を大きくする。
- (2) シングルチャンネルP.H.Aはウィンド幅を狭くするとベースライン電圧変動の影響を強く受け、測定を不安定にする。
- (3) バックグラウンドの評価が問題となるが、相対的分布の測定であり、冷却期間に比べて測定期間が短いので、減衰による補正はわずかである。

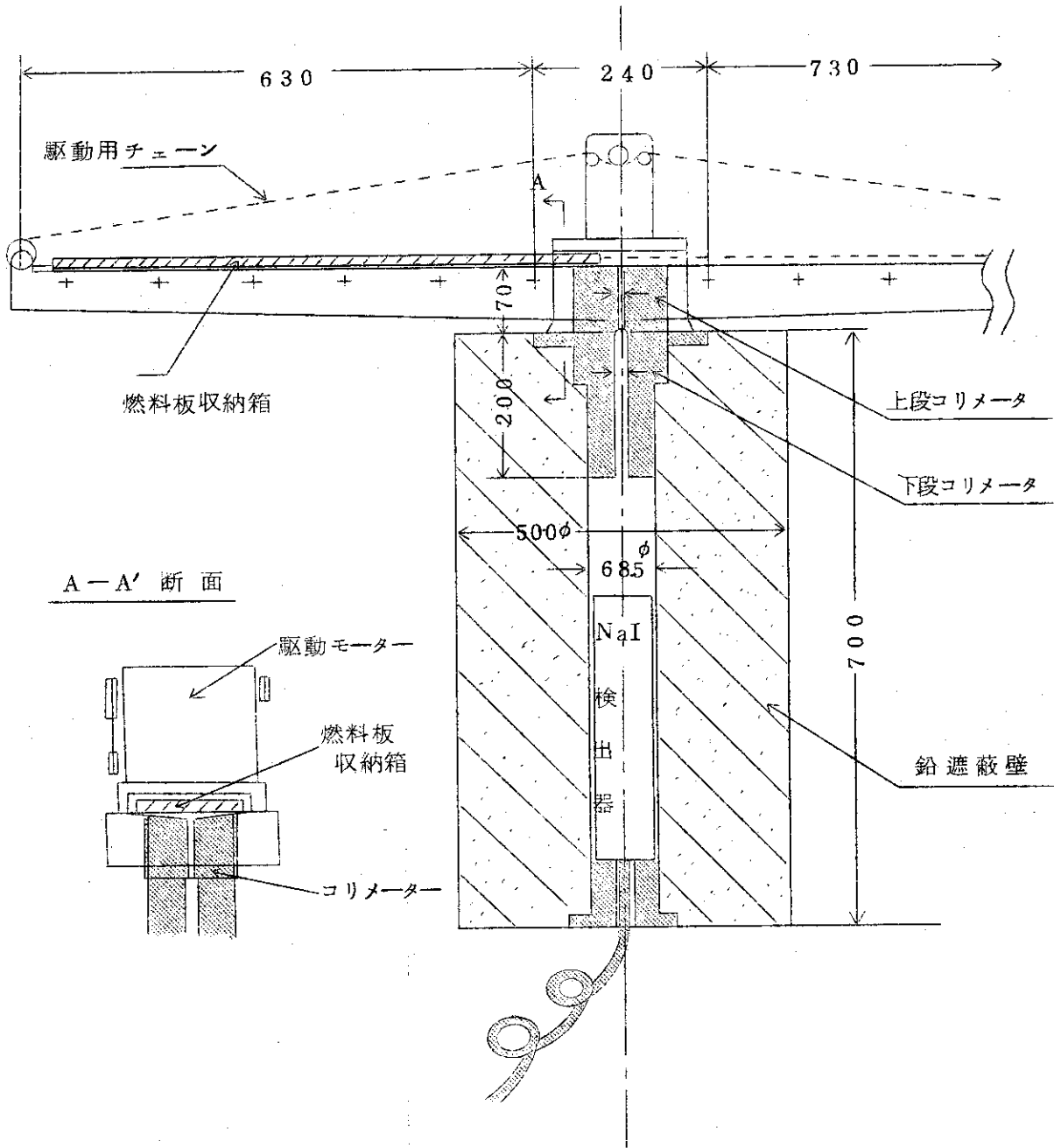


Fig II-1 ガンマスキャンナ

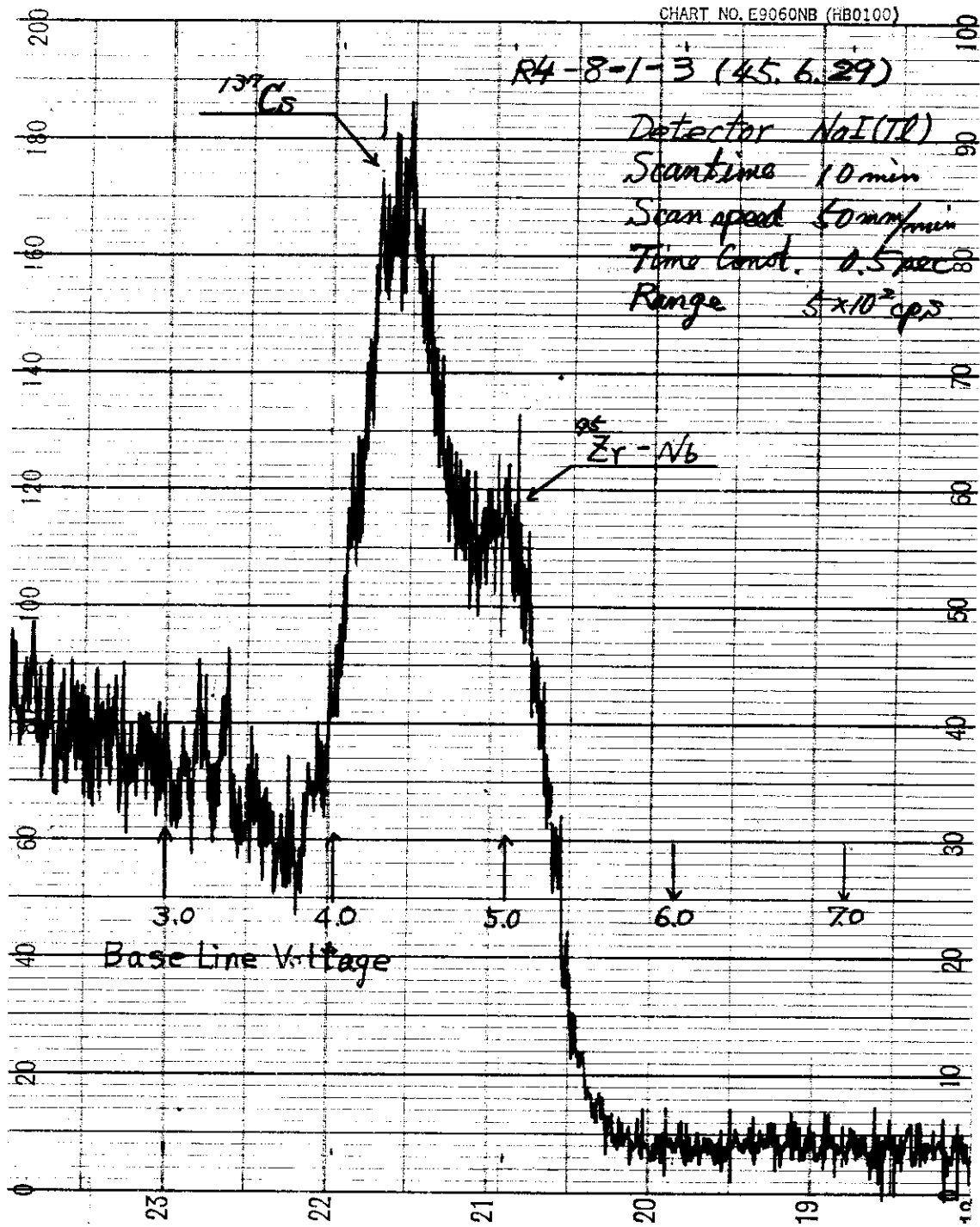


Fig. II-2 JRR-4 使用済燃料の $\gamma$ 線スペクトル

## 4 測定・結果

### 4.1 測定条件・測定位置

#### (1) 測定条件

選定核種の光電ピークの計数率が低いので、上段コリメータは直径3mm、下段コリメータは直径8mmの孔のあいたものを使用した。

燃料板の移動速度は計数率計の時定数RCに關係して決定される。計数率計の指針が99%安定を示すに要する時間TはRCの4.6倍である<sup>(11)</sup>。我々は計数率よりRCを0.5秒に設定したので、燃料板が直径3mmのコリメータ上を通過する時間がTより大きくなるように移動速度を50mm/minとした。測定条件下でのバックグラウンドはケーブ内に15枚の燃料板(スキヤンナに対し50mmの鉛で遮廠)を置いた状態で約180c.p.m(燃料平均計数率に対し0.5%以下)である。数え落しの割合は、使用した計数回路の分解時間が約 $2 \times 10^{-6}$ 秒であるから、燃料板の最大計数率(1500c.p.s)において0.3%で問題ない<sup>(19)</sup>。また計数率の読みの標準偏差は、燃料板の平均計数率に対して3.5%程度である。

#### (2) 測定位置

長手方向スキヤンニングは各燃料板(15枚)について3ヶ所おこなった。測定位置をFig II-3に示す。また、燃料板2,7は長手方向スキヤン後に切断し、巾方向スキヤンニングをおこなった。Fig II-4に切断および測定位置を示す。

### 4.2 測定結果

#### (1) 長手方向 $\gamma$ 線強度分布

長手方向スキヤンニングにより45本の $\gamma$ 線強度分布が得られる。1例として燃料板8-2(末尾の数はスキヤン位置2を表わす。以下同じ)で得られた $\gamma$ 線強度分布をFig II-5に示す。いづれの燃料板の分布も同じ形をしており上端側の計数率が低く下ふくれした形をしている。最大計数率(peak)の位置は燃料板中央より約10cm下方にずれており、最大計数率の値は平均計数率の1.48~1.64倍で燃焼が主に下半分で進んでいることを示している。また下端に急激な立上り(end peak)がみられ、その大きさは平均計数率に対して0.93~1.15倍である。上端側については多少上昇傾向であるが明確にend peakはあらわれていない。

JRR-2燃料板の $\gamma$ 線強度分布が中央に対して対称で平坦化しており、両端にend peak(平均計数率の1.2~1.5倍<sup>(4)</sup>)がみられた形と比較すると著しい違いである。

同一燃料板のスキヤン位置3の平均計数率に対するスキヤン位置1および2の平均計数率は各々1.35および1.20となる。要素No.105の挿入されていた炉心孔(Fig I-1.2参照)における熱中性子束の分布は制御板 $C_3$ 、 $C_4$ および $C_5$ の影響を受ける。粗調整板 $C_3$ 、 $C_4$ は運転時350mm~450mm引き抜き、微調整板 $C_5$ は150mm~450mm引き抜きである。長手方向 $\gamma$ 線強度分布が下ふくれした形になるのはこのため熱中性子束が歪むからである。熱中性子束は、長手方向分布のpeak位置から制御棒引き抜き距離のほぼ中間点で最高になっていることがわかる。これは低出力での炉心熱中性子束の測定結果と一致している<sup>(24)</sup>。またスキヤン位置1,2,3の平均計数率はこの順序で少なくなっている。位置關係で差が大きいのは、炉心で熱中性子束分布の変化が激しい場所に燃料要素が置かれていたことを示している。下端のend peakは炉心構造材によるリフレクタ効果によるものである。上端部にJRR-2のように明確

な end peak がみられないのは制御板の効果によるものであると思われる。

## (2) 巾方向 $\gamma$ 線強度分布

燃料板 2.7 から切断した各試料について 3ヶ所の中方向スキニングをおこない、30本の中方向  $\gamma$  線強度分布を得た。1例として燃料板 7 から切断した各試料のスキニング位置 2 における巾方向分布を Fig II-6 に示す。分布の傾向は燃料板の上側でほぼ左右対称な  $\square$  形をしているが下側にいくに従って対称性がくずれてくる。同時に  $\square$  形から  $\nabla$  形、さらに  $\nabla$  形へと移行している。また巾方向両端の end peak はいずれの試料にもあらわれていない。上端側が  $\square$  形となっているのは要素の両端に置れている制御板  $C_3, C_4, C_5$  による熱中性子束の沈みのためである。さらに下方になると  $\nabla$  形になり、両端の計数率にわずかな増加傾向がみられる。これは制御板の影響が弱くなり、燃料の自己吸収による熱中性子束の歪みによるものと考えられる。JRR-2 燃料板の巾方向分布が上・下位置に関係なく平坦化した  $\nabla$  形で<sup>(4)</sup> あったのにくらべて JRR-4 燃料板の巾方向分布が著るしく異なるのは、JRR-2 燃料板が炉の中心方向に直角に置れているのに対し、JRR-4 燃料板は Fig I-1.2 に示すように平行に置れていること、さらに燃料板と直角に制御板が置れているためである。

## (3) 燃料板の平均計数率分布

3本の長手方向分布から燃料板の平均計数率  $H_a$  を算出し、要素内の燃焼度分布を求めた。 $H_a$  は各分布曲線の面積をプランイメータで測定し、transverse average 法<sup>(20)</sup> を応用した方法で算出した。要素内の燃焼傾向を各燃料板の  $H_a$  の変化で表わすと Fig II-7 のようになる。15枚の燃料板の直角方向（幅方向に対して）の燃焼傾向は、各燃料板とも長手方向分布からみてほぼ同じであり、かつ平均計数率  $H_a$  に変化がないことから各燃料板ともほぼ同一といえる。

## (4) ホットスポット係数

JRR-4 ではホットスポット係数の要因を全核的係数と全工学的係数に分け、これらの積をもって設計ホットスポット係数を定義しており、その値は 2.73 である<sup>(21)</sup>。

燃料要素における最大計数率と平均計数率の比はピーキングファクタを示している。この値に、炉心平均に対する燃料挿入孔 E-6、（炉心孔は E-6 から F-5 に移動しているが、この燃焼比は 3:1 で前者が圧倒的に多い。）および F-5 の熱中性子束の比各々 1.16, 0.97 を考慮すれば、おおよそそのホットスポット係数を示すことになる。この測定から得られた要素のピーキングファクタは  $2.42 \pm 0.16$  となり、ホットスポット係数は約 2.71 で設計値とよい一致を示している。

次に、全核的係数のうちの軸方向炉内熱中性子束のピーキングファクタ（設計値 1.58）について比較する。各々の長手方向分布における最大計数率と平均計数率の比は各点のピーキングファクタを示す。この比を 45本の長手方向分布について求めた値の平均は、燃料ゾーンの平均的なピーキングファクタを示すものと考えられる。この結果軸方向ピーキングファクタは  $1.55 \pm 0.05$  となり設計値とよく一致した。

## 5 測定値の補正と誤差

### 5.1 選定核種の減衰補正係数

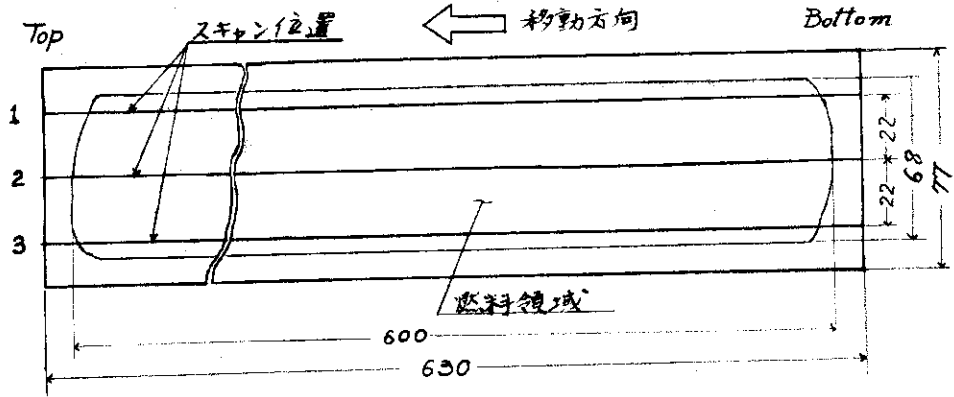


Fig. II-3 燃料板と長手方向スキャン位置

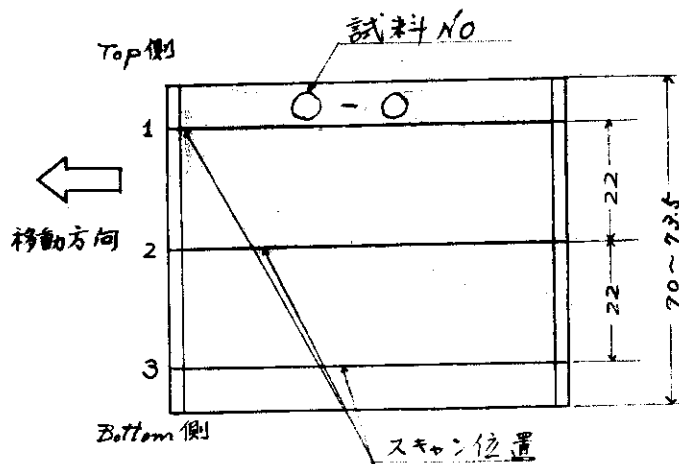
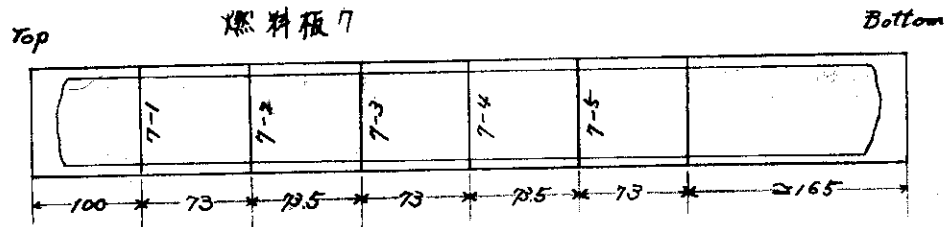
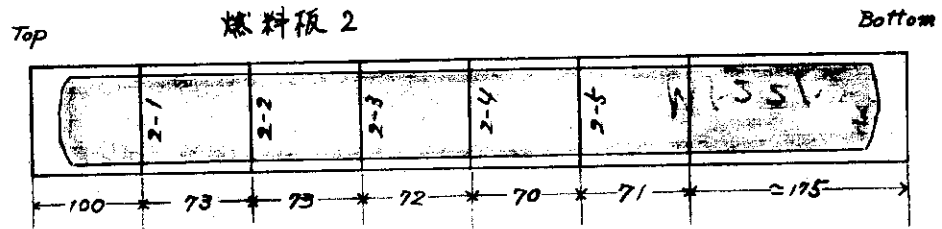


Fig. II-4 巾方向スキャン位置および試料切断位置



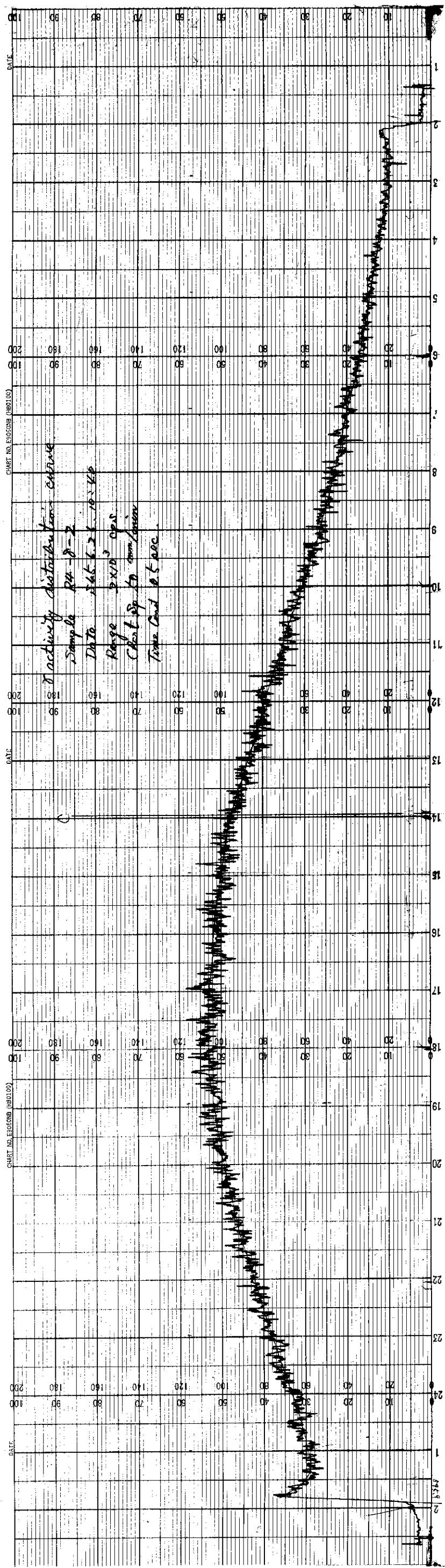


Fig. II-5 燃料板 8-2 長手方向ガンマ線強度分布

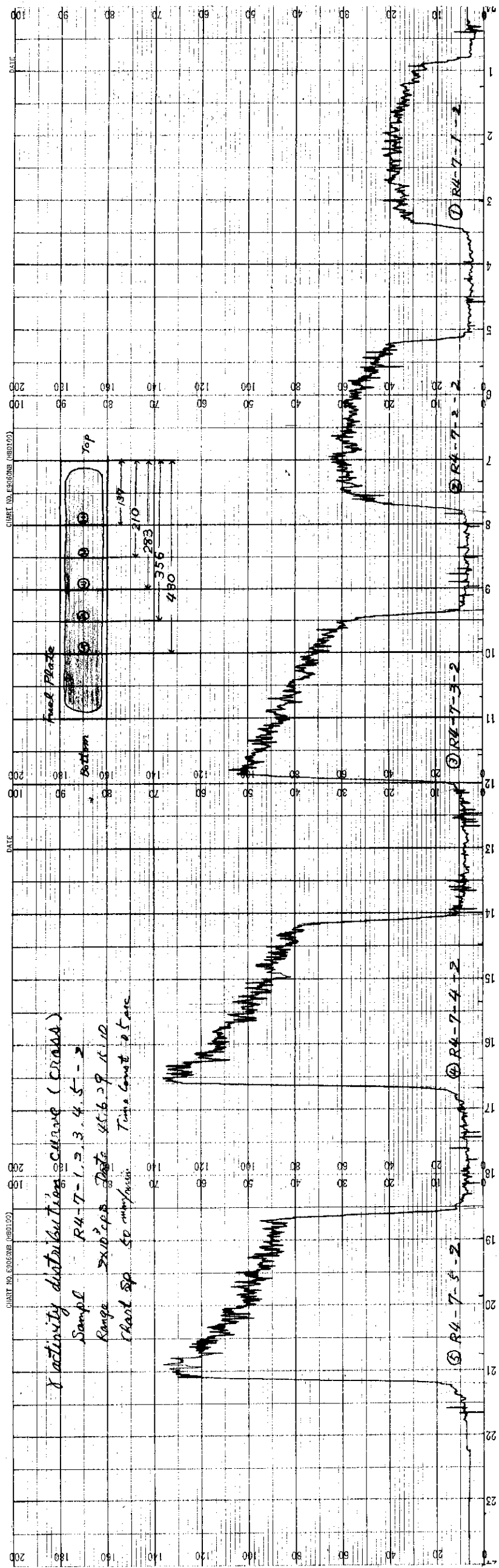


Fig. II-6 燃料板7の中方向ガンマ線強度分布

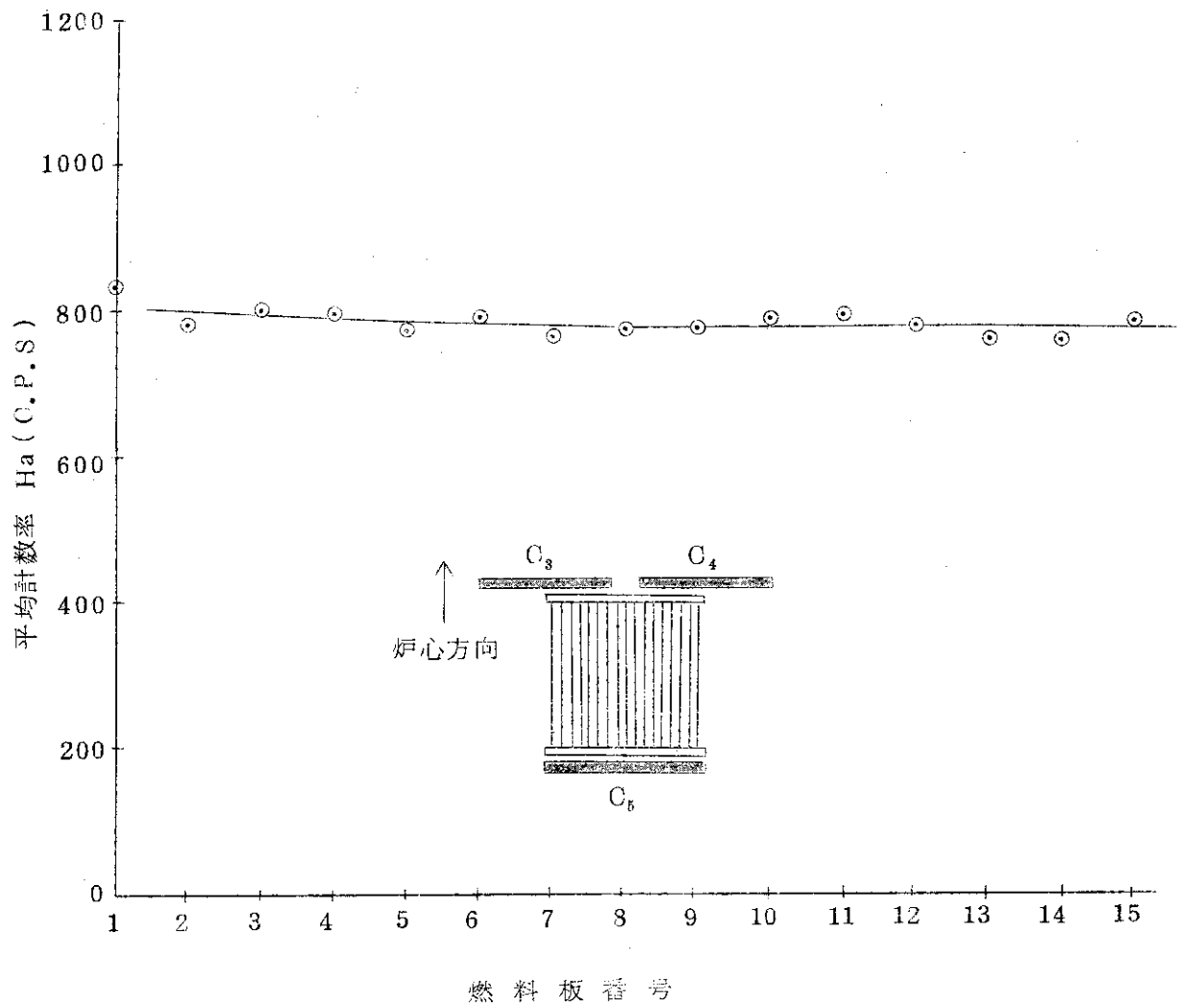


Fig II-7 燃料板の平均計数率 (Ha) の変化

ガンマスキャンニングは4日間にわたって実施されたので測定期間中の減衰がどの程度であるか検討し、この結果から減衰による補正係数を求めた。

スキャンニングの対象となった $\gamma$ 線はFig II-2に示すように $^{137}\text{Cs}$ および $^{95}\text{Zr-Nb}$ の光電ピークである。単一ピークであればその核種の半減期から補正係数が簡単に得られる。しかし今回は2つの核種の減衰を考えなければならぬ。そこで $\gamma$ 線スペクトルから両方のピークの大きさをストリッピング法で求め、 $^{95}\text{Zr-Nb}$ の面積の補正係数を算出した。その結果、この経過日数内では補正は最大3.1%となった。この値は $^{137}\text{Cs}$ の面積に対する $^{95}\text{Zr-Nb}$ の比0.74を考慮すると計測値に対しては1.3%となり問題にならないほど小さな値である。従って、この補正により生ずる誤差も非常に小さなものとなる。

## 5.2 測定結果の誤差

燃料要素の平均計数率を算出するまでの順序は大略次のとおりである。

- (1) 長手方向，巾方向 $\gamma$ 線強度分布の測定
- (2) 長手方向，巾方向分布の面積測定
- (3) 計数率の補正
- (4) 平均計数率の算定

燃料要素および燃料板の平均計数率の誤差は各項目の誤差から推定される。

(1) における計数誤差には i) 標準偏差，ii) 数え落し，iii) 計数率計指示の安定度，iv) 計測系の電圧変動などが考えられる。標準偏差は平均計数率に対して約 $\pm 3.5\%$ で、数え落し、安定度による誤差については計数率が低いこと、スリット通過時間を十分とったこと、電圧変動による誤差は短い期間で測定をおこない、さらに同一燃料板で計数率の測定をおこない問題のないことを確認していることなどから無視できると考えられる。

(2) の面積測定は長手方向分布についてはプランメータでおこない、巾方向分布については重量法でおこなった。プランメータによる誤差は $\pm 2\%$ 程度である。また、重量法の誤差は $\pm 2\sim 3\%$ である。

(3) の減衰補正值の誤差は、 $^{137}\text{Cs}$ と $^{95}\text{Zr-Nb}$ の面積比が例え10%変化しても補正係数への影響は0.1%以下となり無視することができる。

(4) の燃料板平均計数率を求める場合、各スキャン位置のミート長さが同じと仮定していること、巾方向分布から求めた比例定数にばらつきがあることなどによって誤差が生じる。ミート長さによる誤差は $\pm 1\%$ 、比例定数の誤差は $\pm 1.2\%$ である。

以上の点から、燃料要素および燃料板の平均計数率の相対誤差は $\pm 6.0\%$ と推定される。

## 6 燃焼度の決定

### 6.1 試料の燃焼度

燃料要素の平均燃焼度を決定するため、打抜き試料の $^{137}\text{Cs}$ の非破壊測定をおこなった。また、そのうちいくつかの試料については、全Uの定量とNdおよびU同位体比の測定をおこなった。測定用の試料は1, 2, 7, 8, 14の燃料板から採取した。X線ラジオグラフから求めた採取位置をTable II-1, II-2に示す。試料は直径5.3mm, 厚さ1.26mmである。試料の燃焼度は全核分裂数を初期U原子数で除して求めた。このうち全核分裂数は、 $^{137}\text{Cs}$ 量と照射歴、照射前後のUおよびNdの同位体比から算出した。

試料の $^{137}\text{Cs}$ 量、全U量および燃焼度をTable II-3に示す。 $^{137}\text{Cs}$ 量、全U量の測定精度は各々2%で、燃焼度の精度は5%である。Table II-4にU同位体比の測定結果を示す。同一試料における同位体比から算出した燃焼度と $^{137}\text{Cs}$ 量より求めた燃焼度を比較すると両者は比例関係にある。一般に前者のほうが測定精度は高いが、今回の場合、初期値が推定値であること、前者よりもさらに高い測定精度を有するNdの質量分析結果から求めた燃焼度が後者の値ときわめてよく一致したことから、 $\gamma$ スキャンニングの測定結果には $^{137}\text{Cs}$ 量から算出した燃焼度を対応させる。

なお、化学分析、質量分析および試料の絶対燃焼度計算は燃焼率測定開発室に依頼しておこなわれたものであり、この詳細は別途報告される予定であるので本報では省略する。

### 6.2 較正曲線

前節で求めた試料の絶対燃焼度から $\gamma$ スキャンニングの計数率の較正曲線を求めた。結果をFig II-8に示す。低い燃焼度のところでわずかにばらついているが、両者は直線関係にあり測定精度がよいことを示している。

### 6.3 燃料要素および燃料板の燃焼度

#### (1) 燃料板の燃焼度分布と平均燃焼度

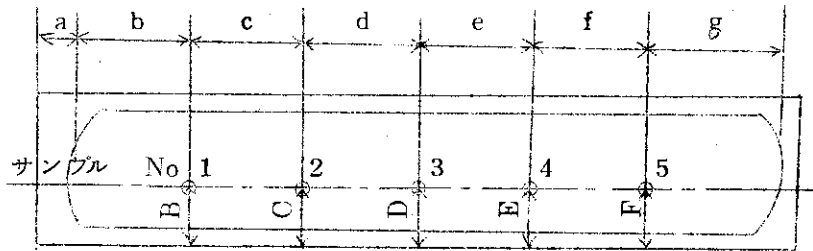
3本の長手方向分布と幅方向分布から、各燃料板の相対的燃焼度分布を求めた。1例として燃料板2の燃焼度分布をFig II-9に示す。燃焼度分布はミート部分上側20cmではほぼ左右対称になっており、残りの部分は下側から約20cmの位置を中心に上下対称になっている。燃焼範囲は上側で平均値の0.3~0.9倍、下側で1.0~1.9倍である。ミート下端のend peakが分布上にわずかに表われている。この結果をJRR-2燃料板の燃焼度分布(Fig II-10)と比較すると、JRR-4ではi)巾方向、長手方向に対し対称でない、ii)燃焼範囲が(0.3~0.9)と大きい(JRR-2は平均の約0.8~1.3倍)、iii)上端のエンドピークがあきらかでない、iv)長手方向の燃焼度の変化の割合は小さく、巾方向では大きい、などの相違がある。これらの相違は主に制御棒効果および燃料要素の配置に起因するものである。

燃料板の平均燃焼度は3本の長手方向分布より平均計数率を求め、前節の較正曲線から決定した。結果Table II-5に示す。

#### (2) 燃料要素の平均燃焼度

燃料要素の平均燃焼度は各燃料板の平均燃焼度より求めた。その結果、要素の平均燃焼度(以下実測値という)としては $3.92 \pm 0.32\%$ であった。この値をJRR-4の出力計から計算した燃焼度(以下計算値という)6.24%と比較すると、その比は1.59となる。JRR-4の出

Table II-1 化学分析用試料採取位置 (軸方向)



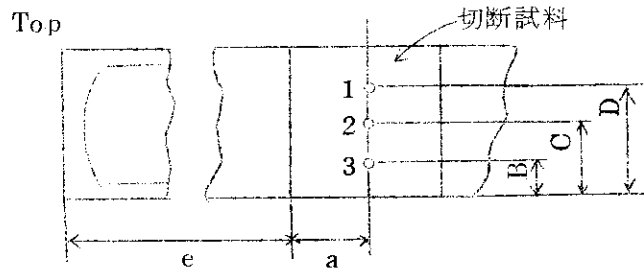
Top

単位：mm

	a	1		2		3		4		5		g
		b	B	c	C	d	D	e	E	f	F	
R4-1	123	943	406	981	415	990	377	999	387	1047	368	971
R4-8	142	1009	377	990	368	971	396	1018	406	1037	396	999
R4-14	151	999	377	999	368	1018	358	999	368	1009	377	990

( X線ラジオグラフィーより )

Table II-2 化学分析用試料採取位置 (巾方向)



Top

切断試料

単位：mm

plate No	切断試料 No	ℓ	a	B	C	D
R4-2	1	100	39.6	17.9	38.7	54.7
" -2	4	318	34.9	17.9	41.5	57.5
" -7	1	100	34.9	18.9	39.6	58.5
" -7	4	319	34.9	13.2	40.6	61.3

Table H-3 試料中の<sup>137</sup>Cs量, 全ウラン量および燃焼度(計算値)

Sample No	<sup>137</sup> Cs (mCi)	U ( $\times 10^{19}$ atoms)	Burn-up (%)
R4- 1-1	0.398		2.09
" - 1-2	0.729		3.60
" - 1-3	1.109		5.48
" - 1-4	1.235		6.32
" - 1-5	0.968		4.98
R4- 2-1-1	0.412		2.47
" - 2-1-2	0.420	1.576	2.30
" - 2-1-3	0.381		2.03
R4- 2-4-1	1.410	1.611	7.10
" - 2-4-2	1.179		6.31
" - 2-4-3	1.006	1.517	5.46
R4- 7-1-1	0.398		2.70
" - 7-1-2	0.422		2.30
" - 7-1-3	0.347		2.04
R4- 7-4-1	1.285	1.446	7.19
" - 7-4-2	1.145	1.588	5.77
" - 7-4-3	0.960	1.583	5.02
R4- 8-1	0.365	1.620	1.92
" - 8-2	0.678	1.636	3.48
" - 8-3	1.030	1.556	5.45
" - 8-4	1.185	1.558	6.24
" - 8-5	0.955	1.596	4.96
R4-14-1	0.355		2.17
" -14-2	0.626		3.56
" -14-3	0.993		5.22
" -14-4	1.097	1.574	5.71
" -14-5	0.894		4.68

<sup>137</sup>Cs Activity is assayed on July 1, 1970

\* 本測定は燃焼率測定開発室および分析センターにおいておこなわれたものである。

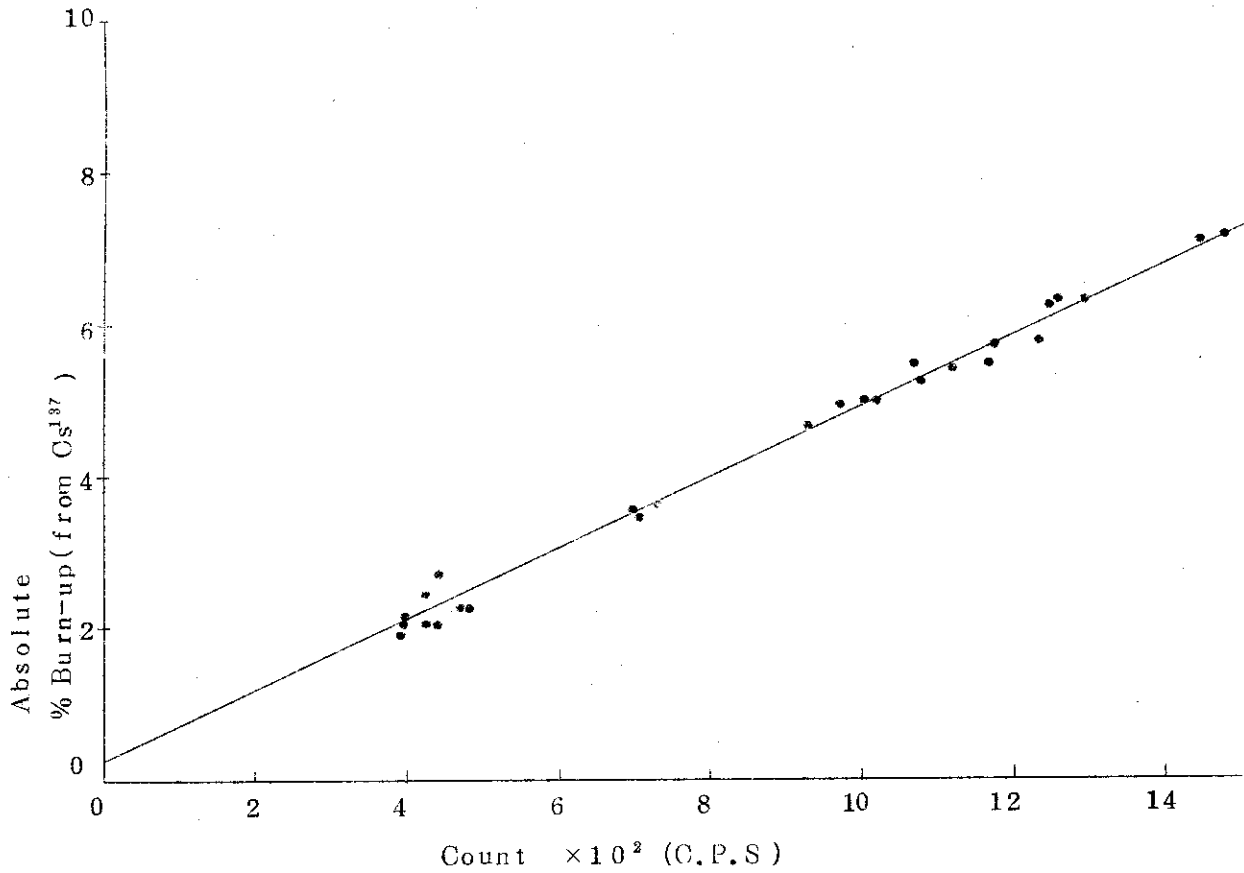


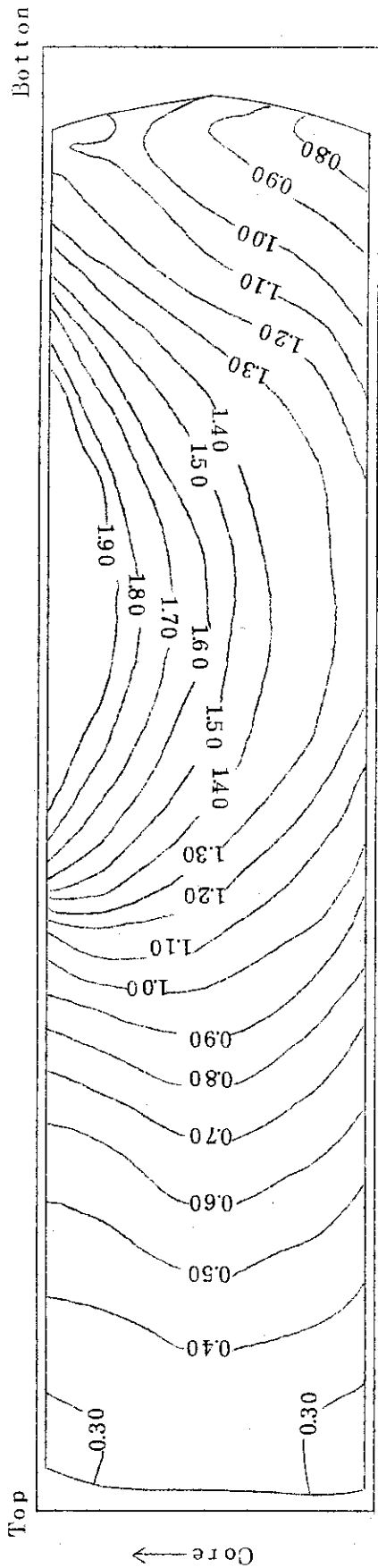
Fig 1-8 校正曲線

Table 1-4 試料中のウラン同位体比および計算燃焼度

Sample No.	Uranium Isotope (atom %)				Burn-up (%)
	234	235	236	238	
R4-8-1	0.9126	89.382	0.6603	9.0450	1.74
" -8-2	0.9247	88.925	0.9678	9.1826	3.13
" -8-3	0.9419	88.315	1.3801	9.3633	4.94
" -8-4	0.9368	88.091	1.5386	9.4336	5.61
" -8-5	0.9392	88.464	1.2882	9.3088	4.54

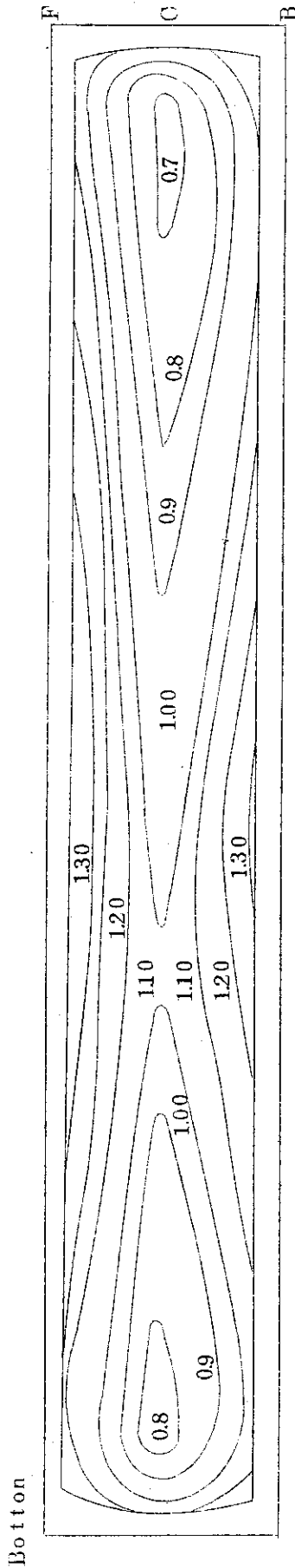
\* 本測定は燃焼率測定開発室においておこなわれたものである。





Average Burn-up = 3.89 (%)

Fig II-9 Burn-up Profile ( R4-2 )



average value 1.0  
( = 15.4 % 燃焼度 )

Fig II-10 2次燃料 ( No.7 ) の燃焼度分布

Table II-5 燃料板の平均燃焼度

燃料板 No	平均燃焼度(%)
R4- 1	4.14
2	3.89
3	4.00
4	3.98
5	3.92
6	3.95
7	3.83
8	3.88
9	3.89
10	3.94
11	3.98
12	3.89
13	3.82
14	3.80
15	3.94
要素	3.92 <sup>3</sup>

力計は熱出力によって較正されているが、炉心外への熱の逃げが考慮されていないにもかかわらず計算値がこのように大きな値となっているのは、燃焼度の定義、熱中性子束およびその変化、出力誤差などの影響によるものと考えられる。(7.3参照)

### (3) 長手方向の領域燃焼度

燃料要素の燃焼度計算では、要素の長手方向を13分割し、低出力時の熱中性子束分布をもとに各領域の燃焼度(計算値)を求めている。測定した長手方向分布も同様に13分割し、各領域の平均燃焼度(実測値)を求めた。平均燃焼度を求める方法は燃料板の平均燃焼度の場合と同じである。各領域の燃焼度の計算値と実測値の関係をFig II-11に示す。領域13が直線から大きく外れているのは燃料板のミート端部形状を一定とみなしているためである。この結果両者は比例関係にあるといえる。

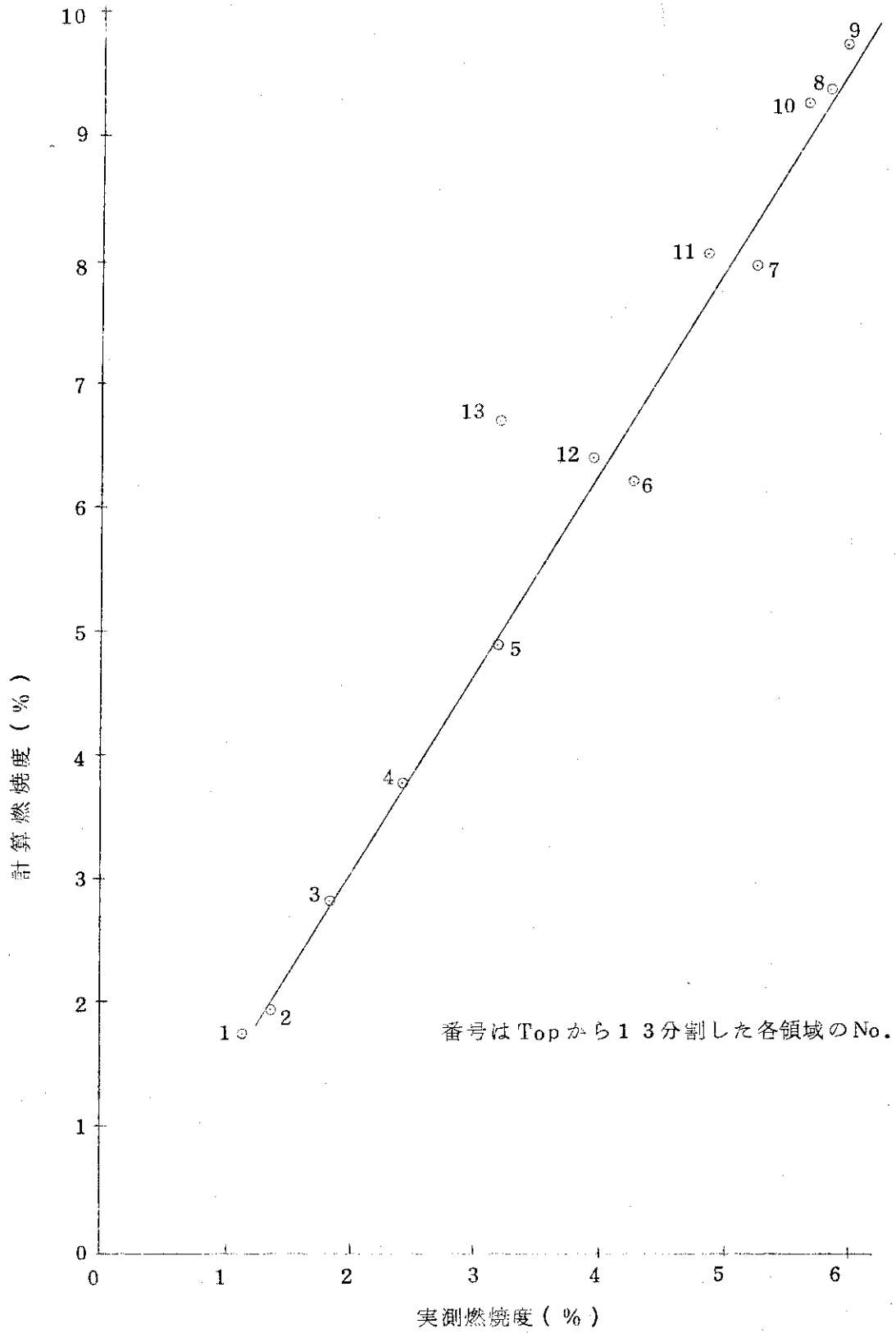


Fig II-11 計算値と実測値の関係

## 7 検 討

### 7.1 低出力時の熱中性子束分布との比較

計算燃焼度は低出力時に測定した炉心内熱中性子束分布(金,銅箔放射化法)をもとに算出されている。一方,実測燃焼度分布は低出力,高出力を通じての実際の熱中性子束分布を示す。両者を比較することによって熱中性子束分布の変化について検討する。Fig II-12 に平均燃焼度に対して基準化した分布を示す。図から明らかなように,実測値分布の方がわずかに上側にずれているが,ピーク的位置には変化がない。実測値の分布にミート端部の立上りが無いのは前節で述べたとおりミート端部の形状が一定でないためである。実測値がやや上側にずれている原因には, i) 制御板の変動, ii) 燃焼効果などが考えられる。

### 7.2 燃料板燃焼度分布の歪み

この燃料要素は初めは E-6 に, 後で F-5 に挿入されていた。要素の E-6 と F-5 における燃焼比率は 3:1 である。炉心孔 E-6 の熱中性子束分布は制御板  $C_4$  の引抜き位置に影響される。一方, F-5 の熱中性子束分布は制御板  $C_3, C_4, C_5$  の影響を受ける。原子炉運転時における  $C_3, C_4$  の引抜き位置は  $350 \sim 450 \text{ mm}$  で,  $C_5$  は  $150 \sim 450 \text{ mm}$  である。(Fig I-1.2 参照) Fig-9 に示した燃料板燃焼度分布は非常に著しく歪んでいるが, これについて検討する。

燃焼度分布のパターンは, 上 3 分の 1 と下 3 分の 2 に大きく 2 分できる。上 3 分の 1 は左右対称で中央部の燃焼が進んでいるが, これは炉心孔 E-6 において燃焼した時の  $^{95}\text{Zr-Nb}$  が減衰し, F-5 の燃焼の影響を大きく受けているためである。(F-5 では両端の制御板とも深く挿入されているため, 中央部で盛り上がった分布となる。) 一方, 下 3 分の 2 では著しく片寄った燃焼分布を示している。これは E-6, F-5 のいずれでも, 同一方向に熱中性子束分布が歪んでいるためで, 両者の相乗効果によるものである。(E-6 では  $C_4$  の影響を受け, F-5 では  $C_3, C_4$  よりも  $C_5$  の方が深く挿入されており影響が大きい。)(Fig I-1.2 参照)

熱中性子束分布の歪みを含めたホットスポット係数は II の 4.2 の(4)で述べたとおり約 2.71 である。この値をもとにすると, JRR-4 の燃料要素は平均燃焼度制限値 15% まで燃焼した場合, ピーク部では約 41% まで燃焼することになる。ちなみに MTR 型燃料を使用している JRR-2, NBSR, CP-5 の場合は各々 30~35%, 30~40%, 40~60% である。

### 7.3 計算燃焼度と実測燃焼度

燃料板および燃料要素の平均燃焼度を  $\gamma$  スキャンおよび  $^{137}\text{Cs}$  量から求めた絶対燃焼度より求めたが, その結果は計算燃焼度より約 37% 低い値を示した。この原因について検討する。

#### (1) 燃焼度の定義の違いによる差

燃焼度の定義には次の 2 通りがある。

##### i) $^{235}\text{U}$ の損耗

$$[\text{燃焼度}] = \frac{{}^{235}\text{U の損耗量}}{\text{初期}{}^{235}\text{量}}$$

但し,  $^{235}\text{U}$  の損耗には核分裂によるものの他, 中性子捕獲による  $^{236}\text{U}$  の生成分も含まれる。

##### ii) 全 U の損耗

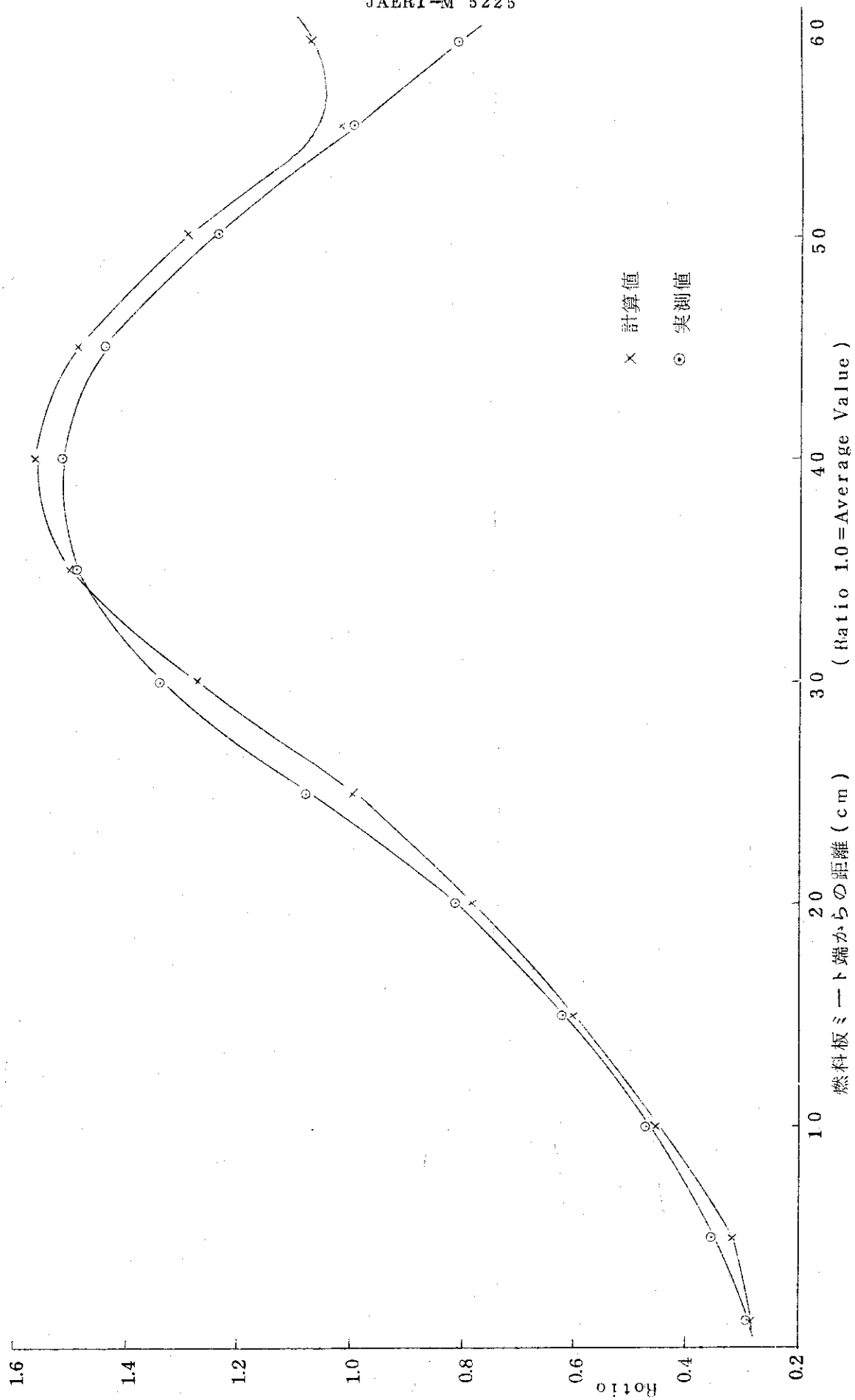


Fig II-12 基準化した計算および実測燃焼度分布

$$[\text{燃焼度}] = \frac{{}^{235}\text{U}, {}^{238}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu} \text{ の核分裂数}}{\text{初期全U原子数}}$$

計算燃焼度は i) の定義を用いて次のような方法で算出している。炉心熱中性子束の測定結果より各炉心孔の Flux weight を求め、さらに炉心孔を軸方向に 13 分割し、各領域の平均熱中性子束を決めている。 ${}^{235}\text{U}$  の消費量は  ${}^{235}\text{U}$  の熱中性子捕獲を考慮して出力 1MWD あたり 1.31g とし、出力計指示値と Flux weight から各燃料孔に挿入されている燃料要素あたりの  ${}^{235}\text{U}$  消費量が決められる。13 領域の消費量は各燃料孔の熱中性子束相対比より求められる。

一方、実測燃焼度のもとになっている試料の絶対燃焼度は、 ${}^{235}\text{U}, {}^{238}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu}$  の核分裂により生じた  ${}^{137}\text{Cs}$  量をもとに ii) の定義を用いて算出している。

ここで燃焼度の定義による違いがどの程度影響しているか推定してみる。打抜き試料の質量分析より、初期  ${}^{235}\text{U}$  量と初期  ${}^{238}\text{U}$  量の同位体比  $R = 5/8$  は 1.01125、 ${}^{235}\text{U}$  の核分裂断面積に対する捕獲断面積の比 (実効)  $\alpha$  は 0.207 と推定される。ここで  ${}^{137}\text{Cs}$  は  ${}^{235}\text{U}$  の核分裂だけによって生じ、燃料の組成は  ${}^{238}\text{U}$  と  ${}^{235}\text{U}$  だけと仮定すると、実測燃焼度は

$$[\text{実測燃焼度}] = \frac{{}^{235}\text{U} \text{ の核分裂数}}{\text{初期全U原子数}} = \frac{{}^{235}\text{U} \text{ の核分裂数}}{\text{初期}{}^{235}\text{U} \text{ 原子数} \times \left(1 + \frac{1}{R} \frac{5}{8}\right)}$$

で算出される。一方、計算燃焼度は

$$[\text{計算燃焼度}] = \frac{{}^{235}\text{U} \text{ の核分裂数} + {}^{238}\text{U} \text{ の生成原子数}}{\text{初期}{}^{235}\text{U} \text{ 原子数}} = \frac{{}^{235}\text{U} \text{ の核分裂数} \times (1 + \alpha)}{\text{初期}{}^{235}\text{U} \text{ 原子数}}$$

であり、 $[\text{計算燃焼度}]$  は  $[\text{実測燃焼度}]$  の  $(1 + \alpha) \left(1 + \frac{1}{R} \frac{5}{8}\right) = 1.33$  倍になる。従って定義の違いにより生ずる差は非常に大きいことがわかる。

## (2) 出力誤差

出力計は炉心冷却系の入口、出口の温度差から算出した熱出力を示すよう較正されている。従って温度測定および流量測定の精度が問題となる。このうち特に出力の誤差を評価するうえで炉心外への熱の逃げを無視することはできない。ここで 1 つの試みとして、定量した  ${}^{137}\text{Cs}$  量と計算燃焼度を求める際に使用した核定数、熱中性子束、出力、運転時間などを用いて、理論式により要素の燃焼度を算出し、計算値と比較して出力誤差を評価した。この結果、JRR-4 の出力は 15% 程度過大に評価していると推察される。

## (3) 熱中性子束分布の変化

7.1 で述べたように熱中性子束分布は初期にくらべてわずかに上側にずれていたと考えられる。各領域の計算燃焼度は上半分で過大評価、残りの領域で過小評価している。しかし測定誤差などを考えるとこの変化は計算燃焼度と実測燃焼度の分布差を表わすほど大きなものではないといえる。

## (4) 実測燃焼度の相対誤差

平均計数率の誤差、 $\gamma$  スキャンで求めた計数率の標準偏差、打抜き試料の絶対燃焼度の誤差から求めた燃料要素の相対誤差は  $\pm 8\%$  である。一般に非破壊法による相対誤差は  $\pm 10\%$  程度である。

燃料要素の平均燃焼度に関して、実測値と計算値の差を検討したが、決定的な原因はみあた

らない。しかし熱中性子束分布に大きな変化がなく、実測値の相対誤差が $\pm 8\%$ と比較的小さいことなどから、燃焼度の差は主にJRR-4の熱出力誤差および燃焼度の定義の違いによって生じたものであると考えられる。熱出力誤差（推定で15%過大）、定義の違いによる差（推定で計算値が33%過大）を考慮すると、計算燃焼度（6.24%）と実測燃焼度（3.92%）の差は十分考えられる値である。

## 謝 辞

本検査を実施するにあたり、燃焼度測定関係では夏目燃焼率測定開発室長、岡下宏、梅沢引一の諸氏および同室員の皆様ならびに小森卓二分析センター室長代理と同室員の皆様に厚く感謝の意を表します。また、研究炉管理部関係では、高田部長、伊勢前JRR-4管理課長、本間ホットラボ管理室長、石橋、伊藤同室長代理、浅見研究炉技術課長代理および鶴野晃、鈴木絃、岩本貞雄、園部清美、高橋彰、田村行人および担当の方々に深謝致します

## 参考文献

- (1) 大西信秋, 服部洋司良: "JRR-4の破損燃料検出器に関する実験解析", JAERI-memo 3675 (未) (1969)
- (2) 両角実他: "JRR-4における破損燃料の検出", JAERI-memo 4196 (公) (1970)
- (3) 高柳弘, 島敬二郎, 山原武: "JRR-2使用済燃料の解体検査 (I)", JAERI-memo 3028 (未) (1968)
- (4) 高柳弘, 足立守, 松野見爾他: "JRR-2使用済燃料の解体検査 (II)", JAERI-memo 3315 (未) (1968)
- (5) 高柳弘: "A Study of the Fuel Cladding Failures in JRR-2", JAERI-1175 (1969)
- (6) JIS B 7702
- (7) JIS Z 2244 (1961)
- (8) W, R, Diggle, W, H, Blackadder: Nucleonics, 23 71 (1965)
- (9) R, S, Forsyth, W, H, Blackadder: Proc, Symp. Karlsruhe, vol 1 6-10 (1970)
- (10) R, W, Durham: "Burnup of Cesium Fuel by Gamma-Ray Scanning", AECL-2688 (1967)
- (11) W, R, Diggle, W, H, Blackadder: "Gamma Scanning", TRG Report 603 (D) (1963)
- (12) T, D, Owen: Brit. J. Appl. Phys., 14 (1963)
- (13) A, J, Fudge, E, Foster, L, Murphy: Nuclear Material Management, 867-878 (1966)
- (14) A, J, Fudge, C, F, Griggs: the XLLL EACRP Meeting, GRPD/CFG/108 (1970)
- (15) N, C, Rasmussen: "the Nondestructive Analysis of Spent Reactor Fuel by Gamma-Ray Spectroscopy", WASH-1076, (1967)
- (16) M, J, Higastberger, H. Hick, et al: the 3rd Int. Conf. Peaceful Uses At. Energy, A/CONF 28/P/399, (1964)
- (17) J, Knoth, R, Marten, H. Schwenke: Atomkernenergie, 13, 67-71 (1968)
- (18) G, Casini: the XII EACRP Meeting, Ispra, 29/10/1969, (1969)
- (19) 佃正: "放射線計測の電子ロニクス", 岩波書店, 172 (1969)



## 謝 辞

本検査を実施するにあたり、燃焼度測定関係では夏目燃焼率測定開発室長、岡下宏、梅沢引一の諸氏および同室員の皆様ならびに小森卓二分析センター室長代理と同室員の皆様に厚く感謝の意を表します。また、研究炉管理部関係では、高田部長、伊勢前JRR-4管理課長、本間ホットラボ管理室長、石橋、伊藤同室長代理、浅見研究炉技術課長代理および鶴野晃、鈴木絃、岩本貞雄、園部清美、高橋彰、田村行人および担当の方々に深謝致します

## 参考文献

- (1) 大西信秋, 服部洋司良: "JRR-4の破損燃料検出器に関する実験解析", JAERI-memo 3675 (未) (1969)
- (2) 両角実他: "JRR-4における破損燃料の検出", JAERI-memo 4196 (公) (1970)
- (3) 高柳弘, 島敬二郎, 山原武: "JRR-2使用済燃料の解体検査 (I)", JAERI-memo 3028 (未) (1968)
- (4) 高柳弘, 足立守, 松野見爾他: "JRR-2使用済燃料の解体検査 (II)", JAERI-memo 3315 (未) (1968)
- (5) 高柳弘: "A Study of the Fuel Cladding Failures in JRR-2", JAERI-1175 (1969)
- (6) JIS B 7702
- (7) JIS Z 2244 (1961)
- (8) W, R, Diggle, W, H, Blackadder: Nucleonics, 23 71 (1965)
- (9) R, S, Forsyth, W, H, Blackadder: Proc, Symp. Karlsruhe, vol 1 6-10 (1970)
- (10) R, W, Durham: "Burnup of Cesamic Fuel by Gamma-Ray Scanning", AECL-2688 (1967)
- (11) W, R, Dcggle, W, H, Blackadder: "Gamma Scanning", TRG Report 603 (D) (1963)
- (12) T, D, Owen: Brit. J. Appe. Phys., 14 (1963)
- (13) A, J, Fudge, E, Foster, L, Murphy: Nuclear Material Management, 867-878 (1966)
- (14) A, J, Fudge, C, F, Griggs: the XLLL EACRP Meeting, GRPD/CFG/108 (1970)
- (15) N, C, Rasmussen: "the Nondestructive Analysis of Spent Reactor Fuel by Gamma-Ray Spectroscopy", WASH-1076, (1967)
- (16) M, J, Higastberger, H. Hick, etal: the 3rd Int, Couf. Peacefall Uses At. Energy, A/CONF 28/P/399, (1964)
- (17) J, Knoth, R, Marten, H. Schwenke: Atonrkernenergie, 13, 67-71 (1968)
- (18) G, Casini: the XII EACRP Meeting, Ispra, 29/10/1969, (1969)
- (19) 佃正: "放射線計測のエレクトロニクス", 岩波書店, 172 (1969)

- (20) R, J, Burian, J. E. Gates: "Post Irradiation Examination and Evaluation of "An ORME Fuel Assembly", BMI-1319, (1959)
- (21) 研究炉管理部: "研究用原子炉 (JRR-1, 2, 3, 4 及び JMTRC) の構造概要", JAERI-memo 2520 (1966)
- (22) 中井敏夫他: 日本原子力学会誌, 10, 205~213 (1968)
- (23) R, G, Hart, M. Lounsbury et, al: Nuclear Sci. and Eng. 18 (1964)
- (24) 苦米地頭他: "JRR-4 の特性測定(3)", JAERI-memo 2834 (1967)