

JAERI-M

9 4 3 4

JMTR 可燃性毒物燃料の開発

1981年4月

小山田六郎・中山富佐雄

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.

JMTR 可燃性毒物燃料の開発

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

小山田六郎・中山富佐雄

(1981年3月3日受理)

この論文は、JMTR (50 MWt) 用可燃性毒物燃料の開発のために行った燃料板及び天然ほう素入り側板の試作，ならびにこれらの照射試験及び照射後試験の結果について報告する。

燃料芯材のウラン含有率を現在の 22 wt% から 30 wt% に増加するために，燃料板の製作は粉末冶金法によった。また，ほう素入り側板の製作は燃料板とほぼ同様の工程によった。

照射試験及び照射後試験は満足すべき結果を得た。ただし，同じ条件下で照射された 4 枚の燃料板のうちの 1 枚に酸化膜の剥離が観察されたが，なぜ 1 枚の燃料板にのみかかる現象がみられたかの原因を明確にすることができなかった。

上記試験に加えて，燃料要素の及び全炉心での照射試験が予定されていた。しかし炉心変更に係る国の安全審査申込みの段階で，炉心変更と直接的関係のない仮想事故解析で問題が生じた。それ故，安全審査をパスするに要するマンパワーと費用の観点より，開発プログラムは中止となった。

A Development of Burnable Poison Fuel for the JMTR

Rokuro OYAMADA and Fusao NAKAYAMA

Division of JMTR Project, Oarai Research Establishment, JAERI

(Received March 3, 1981)

This paper describes the results of fabrication tests of fuel plate and side plate containing natural boron and their irradiation tests and post-irradiation examinations for the JMTR (50 MWt). In order to increase uranium loading density in fuel meat from present 22 wt% to 30 wt%, powder metallurgy techniques were used for fabricating the fuel plates. And fabrication procedure of the side plates with natural boron was nearly the same as that of fuel plates.

Irradiation tests and post-irradiation experiments on the fuel plates and the mini-side plates showed satisfiable results. However, oxide film spallation was observed on one of four plates irradiated under the same conditions. It is unable to clear the reason why such a phenomenon was observed on only one plate.

In the first program, fuel elements with burnable poison and full core irradiation tests were planned as well. However, in the application of safety approval for the core conversion with burnable poison fuel, by the competent authority in Japan, difficulties were felt with a problem of hypothetical accident analysis which were not directly related to the core conversion. The program was therefore stopped from the viewpoint of man power and cost needed for obtaining the safety approval.

Keywords : JMTR, Burnable Poison Fuel, Powder Metallurgy  
Technique, Irradiation Test, Post-Irradiation  
Examination, Oxide Film Spallation

## 目 次

1. まえがき	1
1.1 開発試験概要	1
1.2 計画を中止した理由	2
2. 燃料板の試作及び照射試験	5
2.1 燃料板の試作	5
2.1.1 製作概要	5
2.1.2 UAl <sub>x</sub> 合金の製造	5
2.1.3 粉末の製造	5
2.1.4 燃料芯材の製造及びU-235量の決定	6
2.1.5 燃料板の製作	6
2.2 燃料板の検査及び試験	6
2.3 キャプセルの組立及び検査	7
2.4 照射	7
2.4.1 照射履歴	7
2.4.2 燃焼度	7
2.4.3 燃料板発熱量及び照射温度	8
2.5 照射後試験	8
2.5.1 外観検査	8
2.5.2 寸法測定	9
2.5.3 リークロケーション・テスト	10
2.5.4 金相試験	10
2.6 まとめ	10
3. 側板の試作及び照射試験	39
3.1 側板の試作	39
3.2 側板照射用キャプセルの製作	39
3.3 照射	40
3.3.1 <sup>10</sup> Bの燃焼度	40
3.3.2 照射温度	41
3.4 照射後試験	41
3.4.1 スウェリング量の測定	41
3.4.2 引張試験	42
3.4.3 金相試験	43
3.5 まとめ	43
4. あとがき	61
謝辞	61
参考文献	62

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
1.1 General Description of Tests for Development .....	1
1.2 Reason to Stop Program .....	2
2. Fabrication and Irradiation Tests of Fuel Plates .....	5
2.1 Fabrication of Test Fuel Plates .....	5
2.1.1 General .....	5
2.1.2 Production of Uranium Intermetallic Compounds ....	5
2.1.3 Preparation of Powders .....	5
2.1.4 Preparation of Fuel Cores and Determination of U-235 Content .....	6
2.1.5 Fabrication of Fuel Plates .....	6
2.2 Inspection and Examination of Fuel Plates .....	6
2.3 Assembling of Capsules and their Inspection and Examination .....	7
2.4 Irradiation Tests .....	7
2.4.1 Irradiation History .....	7
2.4.2 Burn-up Rate .....	7
2.4.3 Heat flux and Irradiation Temperature of Fuel Plates .....	8
2.5 Post-Irradiation Examinations .....	8
2.5.1 Visual Inspection .....	8
2.5.2 Dimensional Inspection .....	9
2.5.3 Leak Location .....	10
2.5.4 Metallography .....	10
2.6 Conclusions .....	10
3. Fabrication of Test Side-plates and Irradiation Test ....	39
3.1 Fabrication of Side-plates .....	39
3.2 Fabrication of Capsule for Irradiation of Side-plates .....	39
3.3 Irradiation Test .....	40
3.3.1 Burn-up Rate of $^{10}\text{B}$ .....	40
3.3.2 Irradiation Temperature .....	41
3.4 Post-Irradiation Examinations .....	41
3.4.1 Measurement of Swelling .....	41
3.4.2 Tensile Test .....	42
3.4.3 Metallography .....	43
3.5 Conclusions .....	43
4. Afterword .....	61
Acknowledgement .....	61
References .....	62

# 1. ま え が き

## 1.1 開発試験概要

JMTR では可燃性毒物燃料 (以下 BPF と略称する) の使用を目指して準備をすすめてきた。BPF の使用は計画の途中で、1.2 に述べる理由により延期することになったが、BPF の開発の一環としてすすめてきた燃料板及びほう素添加側板 (以下単に側板と呼ぶ) の製作試験、試作燃料板及び側板の照射並びに照射後試験は終了した。本報告書はそれらの結果をまとめたものである。

当初の計画では現行の 50 MW より 75 MW への出力上昇も同時に行うことを考え、材料試験炉内部にワーキンググループが設けられ 1971 年 11 月より検討が開始された。

出力上昇の検討の結果は、冷却系統を改造することなく 75 MW への上昇が可能であると結論されたが、<sup>1)</sup> 当時は JMTR の本格利用が始まったばかりであり、時期尚早との理由で出力上昇は見送ることとなった。一方、BPF を JMTR で使用した場合、次のような利点があるのでその開発を進めることとした。

### (1) 運転効率の向上

運転途中で、約半数の燃料要素の交換のため 2 ~ 3 日間の炉停止期間を設けているが、BPF 使用によりこの炉停止が不要となる。

### (2) 中性子束分布変動の低減

炉運転中、燃料燃焼による反応度変化を補償するための制御棒位置変化が大きく、これに伴う中性子束分布変動が大きい。BPF 使用によりこの変動が低減する。

### (3) 燃料経費の節減

BPF 使用により、燃料交換回数を増やすことなしに燃料燃焼度が上げられ、燃料経費が節減する。

(1)、(3) は、燃料要素当たりの  $^{235}\text{U}$  を増量すれば達せられるが、そのままでは過剰反応度及び停止余裕などが制限値を満足しなくなるので可燃性毒物を添加する。

可燃性毒物としては天然ほう素を用い、また燃料要素当たりの  $^{235}\text{U}$  量を現行の 279 gr から 403 gr に増加する計画とした。BPF 炉心を現行炉心と比較して表 1.1 に示す。また BPF に関する実績工程を図 1.1 に示す。

燃料芯材中のウラン含有率は 30% と高く、燃料芯材を現行の溶解法で製造したのでは均一なウラン分布を得ることは難しい。それ故、粉末冶金法により製造することとした。

可燃性毒物の添加方式として、①側板の中にサンドウィッチ状に装填する、②燃料板の芯材中に混入する、の 2 通りが考えられる。①は OSIRIS (70MW)、PEGASE (35MW) などフランスの炉で採用され、②は HFIR (100MW)、ATR (250MW)、ETR (175MW) その他多くの炉で採用され、ともに十分な使用実績を有している。JMTR では次のような判断により、①を採用することとした。すなわち、

- 1) ②の方式では、燃焼によるFPガスにほう素燃焼によるHeガスが加算されるので、スウェリングが①の場合に比べ増大する方向となる。
- 2) 発熱分布の均一性の観点から添加したほう素の均一性に対する要求は②の方がより強い。  
 なお、①の方式では側板の強度が低下することが懸念されるが、現行の側板の強度は十分余裕があるので支障はない。

試験照射は小型燃料板、小型側板及び燃料要素について計画した。このうち前2者の照射及び照射後試験を終了した。

燃料要素の照射は設置変更許可手続きを経ないとできないが、燃料板及び側板はキャプセルの範疇であり、この手続きなしで照射できることが利点である。ただしキャプセルで照射する場合の問題点は、発熱量が100KW以下と制限されているので、燃料試料照射の際に熱的健全性を確認することができないことである。

燃料板及び側板はそれぞれ4枚及び2枚ずつ、原子燃料工業株式会社(NFI社と略称する)と三菱原子力工業株式会社(MAPI社と略称する)に発注した。燃料板の照射は両社製品の2枚ずつを、1枚毎にキャプセルホルダに組込んで実施した。その場合、燃料板を炉の冷却水で直接冷却する、いわゆるリーキー型キャプセルとした。側板の照射は、引張用、金相用、スウェリング測定用などの試験片を、両社の試作側板から切出したものを1体のキャプセル中に組込んで実施した。照射後試験はJMTR・HLで実施された。なおキャプセル番号は燃料板用が72F-17J, 18J, 19J および20Jであり、側板用が73M-50Jである。

## 1.2 計画を中止した理由

BPFの開発計画が中止に至った理由は次のようであった。

災害評価の再解析は最初当時の軽水動力炉で行われていた方法に準拠して行った。その結果仮想事故時の甲状腺被曝線量がめやす線量(300レム)の1.7倍程になる評価値が得られた。JMTRの給排気施設は軽水動力炉のそれと根本的に異なるものであり、軽水動力炉並にめやす線量との余裕(めやす線量の約1/10)をとるよう改造することは不可能に近い。甲状腺被曝線量の評価値が大巾に増えた主な原因は、JMTR設置時は未だとり上げられていなかった逆転層及び有機よう素を考慮したからである。

それ故、無機よう素の炉建屋内でのプレートアウトの割合として、PLUTO炉(英国)での実験データに基づいて軽水動力炉の値(50%)より大きい値(89%)を採用し、また排気施設に若干の改造を予定するなどの条件で災害評価を行い、所内の安全審査専門部会による審査を受けた。

専門部会では次の点が問題とされ委員の同意を得るに至らなかった。すなわち、無機よう素のプレートアウトする割合としてPLUTOの実験データを利用したが、JMTRの炉室地下空間での初期濃度( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )がPLUTO実験での初期濃度( $0.013 \sim 14.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )の範囲内にならない。またこれを用いて計算したプレートアウトの割合は89%にもなり疑問である。

この時点で材料試験炉部では次の理由により、BPFの利用を延期することを決定した。「(1)国の安全審査まで考えると、更に解析作業及び改造の検討並びに改造作業に人手を要し、また施設



改造にかなりの予算が必要とあることが予測される。(2)一方、OGL-1の建設その他急を要する仕事があり、BPF使用とこれらの仕事の両方を平行して推進することは困難である。」

但し施設の改造を含む検討作業は続行することとした。なお、その後昭和52年5月に原子力委員会より出された、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」によると、「上層逆転層については、とくに計算に入れないこととした。しかし、上層逆転層の出現が少いことをみるため、特定の期間気温差を観測し、気温逆転の高度別出現頻度、気温差の高度別出現頻度、気温逆転の継続時間等を把握することが望ましい。」とされており、当時と現在では状況が異なっている。

表 1.1 炉心諸元比較

項 目	単 位	現行炉心	BPF 炉心
炉心構成			
燃料要素	本	22	20
制 御 棒	本	5	7
燃料フォロワ	本	5	7
燃料装荷量			
U濃縮度	%	93	93
<sup>235</sup> U装荷量	Kg	6.6	8.9
燃料要素の <sup>235</sup> U量	g	279	403
燃料フォロワの <sup>235</sup> U量	g	195	245
天然ほう素装荷量			
燃料要素当り	g	—	3
燃料フォロワ当り	g	—	2
燃料芯材ウラン含有率			
	w/o	22	30
	gU/cm <sup>3</sup>	0.7	1.0
運転条件			
熱出力	MW	50	50
運転日数	日	12	25
燃料交換割合	%	30~50	50
燃料燃焼度(平均)	%	21	32

事項 \ 年度	1972	1973	1974	1975	1976
製 作	<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> ほう素入側板(4枚) <div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> 燃料板(8枚)				
照 射 及び PIE		<div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> 燃 料 板 (4枚)		<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> ほう素入側板 (キャプセル1体)	⇒ PIE
安 全 審 査 (要素及び全炉心)		<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> 所内	<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> 所内(災害評価)		

△

BPF使用延期の決定

図 1.1 BPF に関する工程の実績

## 2. 燃料板の試作及び照射試験

### 2.1 燃料板の試作

#### 2.1.1 製作概要

粉末冶金法による試作燃料板は、NFI及びMAPIにおいて4枚ずつ製作された。製作方法は、燃料芯材を粉末冶金法で作成した以外は従来の燃料板と同じである。寸法については、芯材厚み、及び被覆材の厚みを本番で使用しようとしている燃料板と同じとしたが長さ及び巾は、それぞれ $\frac{2}{3}$ 及び $\frac{1}{2}$ に縮小したものを製作した。縮小した理由は、局への手続上、燃料要素としてではなく、照射物として照射するため、反射体要素の照射孔(42φ)に挿入できるようにするためである。

燃料板の製作工程を図2.1に示す。

#### 2.1.2 UAl<sub>x</sub>合金の製造

UAl<sub>x</sub>合金には、図2.2に示すようにUAl<sub>4</sub>、UAl<sub>3</sub>、及びUAl<sub>2</sub>の3つの合金相がある。<sup>2)</sup> UAl<sub>4</sub>は最もU濃度が低く(68.8 w/o U)、低温(730°C)において包晶反応のために単相合金を作るのが難しい。しかしウランの欠乏した斜方晶のために、固体のFPがこの欠乏域に入り込み、スウェリングが起りにくいという特長がある。またUAl<sub>4</sub>は、化学的に安定なのでAlと反応することもない。UAl<sub>3</sub>はU濃度が高く(74.63 w/o U)、高温(1350°C)での包晶反応により、一般的な溶解技術で単相に近い合金を作ることができる。しかし照射下では高温でなくても、Alと反応してUAl<sub>4</sub>を形成する。UAl<sub>2</sub>は最もU濃度が高く(81.52 w/o U)、溶解法で簡単に単相を形成することができるが、化学的に活性なので、細い粉末にすると発火性になる。<sup>3)</sup>

以上に述べたU濃度、単相合金の作りやすさ、安定性及び照射挙動を考慮して、JMTRの試作燃料板では、UAl<sub>3</sub>合金を使用することにし、U濃度を68~72 w/oにした。この濃度になるようにウラン地金とアルミ地金とを混合して、高純度アルミナるつぼ中に入れて、高周波誘導真空溶解炉の中で約1400°Cまで加熱し、そのまま炉中で冷却しUAl<sub>3</sub>合金を作成した。UAl<sub>3</sub>以外の合金が存在しないことを確認するため、X線回折を行った。この結果はすべてUAl<sub>3</sub>であった。

またこの合金からサンプルをとり、化学分析してU含有率を測定した。この結果は表2.1の第5欄に示すとおり、NFI社製で約26 w/o、MAPI社製で約32 w/oである。

#### 2.1.3 粉末の製造

粉末を作るには、その粒径をどう選ぶか問題になる。最小粒径は、照射中に核分裂片の反跳ゾーンがオーバーラップしないように選ぶ必要がある。即ち核分裂により発生する熱の良好な伝達には照射により損傷していない母材が連続していることが必要であるからである。そのためには、粒径はある程度以上の大きさが必要であり、一般に飛程の2倍以上とすべきであるとされている。<sup>3)</sup> F.Pの飛程は13.7 μm程度であるから、<sup>3)</sup> 粒径の下限は約30 μmとなる。

一方、粒径が大きすぎると、圧延中にマトリックスとUAl<sub>3</sub>粒子が分離すること、及び粒子中

の温度が高くなり、核分裂性ガスの拡散及び凝集によりスウェリングが生じやすくなること等好ましくない現象が生ずる。

これらのことを考慮すると、 $UAl_3$  の粒径は  $60 \sim 90 \mu m$  がよいとされている。

しかし歩留りを考慮すると上、下限をもう少し広げる必要がある。それ故 JMTR の試作燃料板では、実績のある BR-2 燃料の仕様と同じ粒度とすることにした。即ち、 $40 \sim 150 \mu m$  粒度の粉末が全体の 75% 以上、 $40 \mu m$  以下の粒末が最大 25% となるように調整した。粉末の製造は、冷却後るつばから取り出した  $UAl_3$  合金をスタンプミル又はボールミルで粒砕し篩分け法によって行った。粒度測定の結果は次のとおりである。

NFI	$43 \sim 147 \mu m$	100 %
MAPI	$40 \sim 150 \mu m$	80 %
	< 40	20 %

#### 2.1.4 燃料芯材の製造及び U-235 量の決定

$UAl_3$  粒末と混合する Al 母材は、アトマイズ法により製作した粉末で  $40 \sim 150 \mu m$  の範囲に粒度調整した。 $UAl_3$  粒末と Al 粉末を乾式混合したものを秤量してプレス型に装填して約  $5 \text{ ton/cm}^2$  の圧力でプレスして圧粉体とし燃料芯材を作成した。(NFI の場合はこれを更に焼結した。)

芯材の U 含有量の決定は、合金法で作成した芯材は一般に比重法で行うが、粉末冶金で作成した場合は気孔を含有するため比重法は不的確である。このため芯材から 5 ケのサンプルを採取し化学分析により U 含有率が均一であることを確認し、次式から U-235 量を算出した。

$$U-235 \text{ 量} = U \text{ 含有率 (w/o)} \times \text{芯材重量} \times U-235 \text{ 濃縮度}$$

分析結果及び計算結果を表 2.1 に示す。

#### 2.1.5 燃料板の製作

芯材をフレームにはめ込み、上下に被覆板を重ね合わせるいわゆるピクチャーフレーム法で燃料板を作成した。フレーム及び被覆材の材質を表 2.1 に示す。

この板を  $450 \sim 550^\circ C$  の温度で熱間圧延して、芯材と被覆材を拡散結合させ、これを  $550^\circ C \pm 20^\circ C$  で 1 時間電気炉で加熱し、プリスターテストを行った。プリスターテストに合格した燃料板は、15~20% の冷間圧延を施し加工硬化及び芯材の曲りの調整を行い、最後にローラーレベラで反りを矯正した。この板を X 線透視具を用いて芯材位置を基準として燃料板の外寸法を決めて切断し、表面の汚れを落とし、純水洗浄し、完成燃料板を作成した。完成燃料板の寸法規格を図 2.3 に示す。

## 2.2 燃料板の検査及び試験

完成燃料板の検査及び試験の項目及び基準は、現在の JMTR 燃料と同じであり、項目は次のとおりである。

X 線フィルム検査、切断検査、組織検査、引張試験、外観検査、汚染検査、寸法検査

これらのうちで、引張試験の結果を表 2.2 に、組織検査結果を写真 2.1 及び 2.2 に示す。表 2.2 の試験結果と表 2.3 の現在使用している燃料板とを対比してみると、引張強さはほぼ同じであるが、伸びは若干低下している。また X 8001 は JMTR では、初めての使用材料であることから加工硬化を測定した。その結果を表 2.4 及び図 2.4 に示す。

### 2.3 キャプセルの組立及び検査

キャプセルの設計図を、図 2.5 に示す。また組立前の写真を写真 2.3 及び 2.4 に、組立後の写真を写真 2.5 及び 2.6 に示す。

このキャプセルの炉内での冷却能力を確認するために、JMTR の流水試験装置を用いて、流水試験を行った。この結果を表 2.5 に示す。

### 2.4 照 射

#### 2.4.1 照射履歴

試作燃料板を組み入れたキャプセルは、メーカ毎に 4 体ずつ作成され、2 体ずつ炉心に装荷された。作成されたキャプセル番号、燃料板番号及び照射されたキャプセル番号は表 2.1 に示すとおりである。これらのキャプセルは昭和 48 年の第 22 サイクルから、昭和 50 年の第 31 サイクルまで照射された。照射期間中の運転サイクル、積算出力を図 2.6 に示す。この図に示すように、この期間は原子炉のトラブルが発生し、実質サイクルは、1 サイクルの定格積出出力を 1118 MWD とすると約 4 サイクル相当である。照射した 4 体のキャプセルのうち、72F-19J と 72F-20J は、他の照射試料の都合により 27 サイクルからそれぞれ I-4→G-12, J-4→J-12 へ位置がえした。

#### 2.4.2 燃焼度

燃焼度は、以下のようにして求められる。

$$N_1 = N_0 e^{-\sigma_a \theta}$$

ここで  $N_0, N_1$  ; それぞれ初期及び燃焼後の U-235 の原子数

$\sigma_a$  ; U-235 のミクロ中性子吸収断面積 ( $= 453 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ )<sup>(4)</sup>

$\theta$  ; 中性子照射量  $= \int \phi_{th} dt$

$\phi_{th}$  ; 熱中性子束

$$B.U. (\%) = \left(1 - \frac{N_1}{N_0}\right) \times 100 = (1 - e^{-\sigma_a \theta}) \times 100$$

各燃料板の燃焼度を表 2.6 に示す。最大燃焼度は、FPM-2-3 (72F-19J) の 39.5% である。

燃焼度を fission/cm<sup>3</sup> の単位で評価すると他の照射実験と比較するのに都合がよい。この場合次式を用いて計算する。

$$\frac{\rho_{\text{core}}}{W_{\text{core}}} \cdot \frac{W_{\text{U-235}}}{A} \cdot N_a \cdot (1 - e^{-\sigma_a \theta}) \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

ここで  $\rho_{\text{core}}$  ; 燃料芯材の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$W_{\text{core}}$  ; " の重量 (g)

$A$  ; U-235 の原子量

$N_a$  ; アボガドロ数

$\sigma_f$  ; U-235 のマイクロ核分裂断面積  
(=  $386 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ )<sup>(4)</sup>

fission/cm<sup>3</sup> 単位の燃焼度の値を表 2.6 に示す。

### 2.4.3 燃料板発熱量及び照射温度

定格出力 (50MW) で運転中の、炉心冷却水入口温度は最高でも約 43°C であり、炉心差圧は約 3.2 kg/cm<sup>2</sup> である。従って表 2.5 より、冷却水流量は約 14 m<sup>3</sup>/hr となり、これより燃料板の冷却水流速は、約 11 m/sec と計算される。この流速と表 2.7 に示す燃料板発熱量から、照射温度 (燃料板表面最高) を熱計算により求めると 57°C ~ 60°C となる。

## 2.5 照射後試験

### 2.5.1 外観検査

#### (1) FPG-1-2 (72F-17J)

燃料板の外観写真を写真 2.7 に示す。同写真にみられるように燃料板表面は、JMTR 燃料の照射後に見られる程度の変色であり、異常な腐食はみられなかった。また照射による変形、亀裂及びプリスターの発生は認められなかった。

#### (2) FPG-2-1 (72F-18J)

写真 2.8 の外観写真にみられるように、燃料板中央部の両端部に他の部分より濃い変色が観測されたが、照射による変形、亀裂、プリスターその他の異常は認められなかった。

#### (3) FPG-2-3 (72F-19J)

燃料板全表面にわたり、写真 2.9 の外観写真にみられるようなはだ荒れ、変色が生じていた。表面は表、裏とも写真に見られるように、はっきりと二つの領域に分かれていた。燃料板全面にわたりすり傷状のごく浅い傷が生じており、写真の明るい部分は無光沢の灰色をしており、細かい斑点が多数観測された。しかし変形、亀裂、プリスター等の異常は認められなかった。写真 2.9 及び 2.10 にみられる変形は、キャプセル解体時に生じたものである。

#### (4) FPG-3-3 (72F-20J)

燃料板表面の腐食の様子は、写真 2.11 に示すように FPG-1-2, FPG-2-1 と同程度である。1ヶ所に打痕が発見されたが、これは古い打痕であることからキャプセル解体時に生じたものではなく、燃料板製作時またはキャプセル組立時に生じたものと思われる。傷の深さは約 0.25 mm と報告されているが、燃料板の傷は燃料芯材面上では 0.08 mm 以下が合格規準とされている

ことから、実際はそう深い傷ではないかも知れないし、もし観測どおりの深さであればキャプセル組立時に生じたものであろう。

いずれにせよこの傷が原因で燃料板に異常が生じた形跡は観測されなかった。燃料板にはこの傷以外に、照射による変形、亀裂、ブリストー等は観測されなかった。

## 2.5.2 寸法測定

燃料板の寸法測定の位置及び結果を表 2.8 に示す。また照射前の平均厚さと照射後の平均厚さ及びその差を表 2.9 に示す。この結果からみると FPG-2-3 (72F-19J) を除いて、約 20  $\mu\text{m}$  から 40  $\mu\text{m}$  程度の厚み増加がみられるが、FPG-2-3 (72F-19J) の厚さにはほとんど増加がみられない。本試料は 2.5.1(3) で述べたとおり、表面状況に異常がみられたものである。増加がみとめられない理由は、後述のとおり、酸化膜の剥離が生じたためと思われる。

燃料板の厚さ増加の原因としては、核分裂生成物 (FP) 蓄積によるスウェリング及び被覆材表面における酸化被膜の形成が考えられる。

FP 蓄積によるスウェリング量は次式で評価できる。<sup>5)</sup>

$$\Delta V/V [\%] = 6.3 \times 10^{-21} B - V_v$$

但し、 $B$  : 核分裂密度 (fission/ $\text{cm}^3$ )

$V_v$  : 初期ボイド率 (%)

$V_v$  は実測値が得られていないので、それを無視して求めると、 $B$  は約  $6 \times 10^{20}$  fission/ $\text{cm}^3$  (表 2.6) であるから、 $\Delta V/V = 3.8\%$  となる。スウェリングが厚さ方向にのみ生ずるとすると (この仮定は厚さの増加を過大評価しているが、幅及び長さ方向には、被覆材による拘束が大きいので伸び難く、それ程実際とずれてはいないと思われる。)、芯材の厚さは 0.5 mm なので厚さ増加量は約 20  $\mu\text{m}$  ( $0.5 \times 0.038 \div 0.020$  mm) となる。実際には、芯材に数%の初期ボイドを含むと云われており、上記の厚さ増加量は極端に見積った場合である。従って、スウェリングによる厚さ増加量は 0 から 20  $\mu\text{m}$  の範囲内にあると云える。

一方、酸化被膜の量の評価であるが、これには温度、時間、冷却水の pH と流速及び表面熱流束が関係する。川崎、野村らが A1100 について冷却水流速をパラメータとした重量変化を求めた結果を図 2.7 に示す。<sup>6)</sup> 同図からわかるように流速 3 m/sec ですでに重量減少する傾向にあり、その理由は酸化被膜の一部が冷却水に溶出するためと云われている。さらに、Englishらが行った A1100, A5154, A6061 及び X8001 についての実験でも、流速が増すにつれて腐食量に対する酸化被覆の量の比が小さくなるという結果を示した。<sup>7)</sup>

また Griess らは、酸化被膜の厚さが 2 mil (51  $\mu\text{m}$ ) を超えると剥離が起こると報告している。<sup>8)</sup> 試料 FPG-2-3 (72F-19J) の厚さ増加が他の試料に比べて少ないこと及び 2.5.1(3) で述べたごとく、表面状況に異常がみられたことなどより、被膜の剥離が生じたものと判断される。ただし、なぜ一つの試料にのみ剥離が生じ、他の 3 個の試料に生じなかったかは明らかではない。

なお、照射した燃料板の断面の金相観察によると、被覆厚さは約 0.32 mm 以上であり (製造時の厚さは公称 0.385 mm)、腐食量は問題にならない。

### 2.5.3 リークロケーション・テスト

被覆材の健全性を確認する試験としてリークロケーション・テスト（試料をオイルに浸らし、オイル上面の空気の真空度を上げると、被覆材に欠陥があり芯材まで達していれば、核分裂性ガスがオイルを通して吸出され、この時の気泡を目視する試験）を行った。各燃料板の試験を写真 2.12～2.15 に示す。いずれの燃料板も数ヶ所から気泡が観測された。特に 17F-19J の燃料板は、いたる所から気泡の発生があった。これは明らかに前項で述べた局部腐食発生部内の気泡である。他の燃料板の気泡は表面に附着しているゴミ等に含まれているガスと推測される。

### 2.5.4 金相試験

照射によって燃料芯材中でおこる欠陥としては、ブリストアの発生、芯材と被覆材の分離、クラックの発生等が考えられる。これらの欠陥を確認するために金相試験を行った。金相試験用の試料切断位置を図 2.8 に、金相写真を写真 2.16～2.27 に示す。写真 2.1 及び 2.2 に示した照射前の金相写真をみると、燃料粒子はゴツゴツした感じであり、ポイドやクラックの存在がみられる。アルミニウムは金相試験のために行う研磨やエッチングによりピットが生じやすいため、<sup>9)</sup>エッチングピットと照射によって生じたクラックやポイドを区別するのは難かしいが、写真 2.26 の金相写真は比較的良くとれており、この写真をみるかぎり、ポイドやクラックは存在しない。それ故、最初に存在したポイドやクラックは全て照射中に、燃料粒子のスウェリングによって消滅したと想定される。<sup>5)</sup>また F.P ガスの気泡の存在も認められない。これは外国の照射実験の結果とも一致している。F.P ガスの気泡が生じなかった理由は  $UAl_x$  内での F.P ガスの核散及び凝集は、この程度の照射温度では比較的小さく、また核分裂密度も小さいためと思われる。

また、照射後の燃料粒子には、flowlike pattern が表われており、明らかに幾つかの相の存在が認められる。この相変化は、(1)燃料粒子とアルミニウム母材との化学反応、(2)F.P の発生によっておこる燃料粒子の化学反応及び物理的組織の変化等が考えられる。<sup>5)</sup>炉外実験では、照射中に想定される温度で行っても、アルミナイド粒子とアルミニウム母材の間には似た様な反応は起こらないが W. Dienst 等<sup>10)</sup>は、照射した試料の相変化については、次のような知見をみている。即ち金相写真にみられる燃料粒子内の濃い部分は、初めの燃料粒子の合金相である  $UAl_3$  であり、燃料粒子のまわりの色のうすい部分は、 $UAl_3$ 、 $UAl_4$  及び  $UAl_5$  ( $U_{1-x}Al_4$ ) であったと報告している。また、燃焼度が進むと  $UAl_3$  の相は減少して行き、燃焼度 10～15% で  $UAl_3$  粒子の約 50 Vol. % が反応し、燃焼度 50% 後では、ほぼ完全に反応してしまうと報告されている。

さらに低温照射 (70℃) では、相ははっきりと区別できたが、より高温での照射では、相の境界ははっきりと区別できなかつたと報告されている。JMTR での照射温度は、あまり高くなかつたので、相の境界ははっきり区別できる。

## 2.6 まとめ

粉末冶金法を用いた燃料は、諸外国の高中性子束研究炉では一般的になっているが、日本のこの種の原子炉では未だ使用されておらず、合金法で製作された燃料を使用している。ウランの増量を計画する場合、粉末冶金法を用いることは不可決の問題である。



JMTRにおいても燃料の有効利用を計るため、ウラン含有量増加の計画をたて、粉末冶金法による燃料試作板を製作し、照射実験を行った。

燃料板は2社で合計8枚が製作され、このうち4枚が昭和48年7月から50年2月まで炉内に挿入された。最大ウラン濃度は約32 w/o ( $1.1 \text{ g U/cm}^3$ )であり、燃焼度は最大約40%に達した。

PIEは昭和53年1月からJMTRホットラボにおいて行った。この結果、一枚の燃料板に外観上も寸法検査上も明らかに酸化被膜が剥離した燃料板があったが、燃料板が破損するような大きな欠陥はどの板にも発生しなかった。しかしこの酸化被膜の剥離の原因を明らかにすることはできなかった。

金相試験の結果、ブリスタの発生、芯材と被覆板の剥離、クラックの発生等は認められなかった。

キャプセルに関しては、その解体に担当者が非常に苦勞し、結果的には燃料板の一部を切断せざるを得なかったり、損傷してしまう板もあった。これは設計、製作上の問題であり、設計者、製作者及びホットラボ担当者との十分な打合せの上、設計、製作を進めることが不可欠であることを痛感した。

表 2.1 試験燃料板ウラン諸元

メーカー	キャプセル番号	燃料板番号	焼結密度(g/cm <sup>3</sup> )	U含有率(w/o)	芯材重量(g)	U重量(g)	濃縮度(%)	U <sup>235</sup> 量(g)	被覆材
NFI	72F-17J1°	FPG-1-2	3.28	26.53	17.7911	4.72	93.17	4.40	A1200
	72F-17J2	FPG-1-3	3.26	26.53	17.5445	4.65	93.17	4.33	"
	72F-18J1°	FPG-2-1	3.27	26.53	17.9559	4.76	93.17	4.43	X8001
	72F-18J2	FPG-2-2	3.31	26.53	17.8837	4.74	93.17	4.42	"
MAPI	72F-19J1	FPM-2-1	—	31.52	14.8411	4.68	93.13	4.36	A1100
	72F-19J2°	FPM-2-3	—	31.52	14.9821	4.72	93.13	4.40	"
	72F-20J1°	FPM-3-3	—	31.52	14.9837	4.72	93.13	4.40	X8001
	72F-20J2	FPM-3-4	—	31.52	14.9329	4.71	93.13	4.39	"

\* : 規格は 4.31 ± 0.10 (g)

o : 照射したキャプセル

表 2.2 被覆板及び燃料板引張試験結果

試験片 NFI JIS Z 2201 13号-B  
MAPI JIS Z 2201 5号

燃料板番号	メーカー	被覆板材質	圧延率	引張強さ	耐力	伸び
被覆板のみ	NFI	X8001	0%	10.4 kg/cm <sup>2</sup>	—	44%
FPG-1-4	"	A1200	17.8	10.23	—	—
			17.8	10.12	—	10
FPG-2-4	"	X8001	19.6	11.26	—	2.2
			19.6	9.39	—	—
FPG-2-2	MAPI	X8001	19	8.50	8.2kg/mm <sup>2</sup>	5.0

表 2.3 JMTR 燃料要素の燃料板引張試験結果

材質; A1100 又は A1200

燃料発注回数	メーカー	引張強さ	耐力	伸び	圧延率
第34, 35次	NFI	11.32 kg/mm <sup>2</sup>	—	6.07%	19.3%
第 37 次	M API	10.43	9.3 kg/mm <sup>2</sup>	6.9	19.0
第 38 次	M API	11.48	10.48	11.3	19.0
第 39 次	NFI	10.53	—	4.5	19.2

表 2.4 加工度による機械的性質の変化

材質; X 8001

試験片厚さ (mm)	圧延率 (%)	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
1.23	39.41	15.6	14.4	6.5
1.43	29.56	14.1	13.0	9.9
1.64	19.21	12.5	11.3	16.5
1.75	13.79	12.0	10.4	22.1
1.85	8.87	11.4	9.2	25.5
1.94	4.43	11.0	7.9	28.5
2.03	0	11.1	6.8	30.0

注) 各数値は各厚み毎に 3 枚の試験片について試験した結果の平均値である

表 2.5 流水試験結果

入口圧力 kg/cm <sup>2</sup>	出口圧力 kg/cm <sup>2</sup>	差 圧 kg/cm <sup>2</sup>	流 量 m <sup>3</sup> /hr
3.95	1.10	2.85	12.8
4.38	1.05	3.33	14.3
4.97	0.95	4.02	15.9
4.32	1.05	3.27	14.2
3.95	1.10	2.85	13.1
3.50	1.22	2.28	11.3

表 2.6 燃料板照射データ

サイクルNo	諸 元	72F-17J	72F-18J	72F-19J	72F-20J
22	照射時間 (秒)	$0.879 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	I-4	J-4
	$\phi_{th}$ $\theta$	$1.03 \times 10^{14}$ $0.905 \times 10^{20}$	$1.14 \times 10^{14}$ $1.00 \times 10^{20}$	$1.16 \times 10^{14}$ $1.02 \times 10^{20}$	$1.08 \times 10^{14}$ $0.949 \times 10^{20}$
24	照射時間 (秒)	$1.60 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	I-4	J-4
	$\phi_{th}$ $\theta$	$0.974 \times 10^{14}$ $1.56 \times 10^{20}$	$1.03 \times 10^{14}$ $1.65 \times 10^{20}$	$1.04 \times 10^{14}$ $1.66 \times 10^{20}$	$0.932 \times 10^{14}$ $1.49 \times 10^{20}$
25	照射時間 (秒)	$1.55 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	I-4	J-4
	$\phi_{th}$ $\theta$	$1.03 \times 10^{14}$ $1.60 \times 10^{20}$	$1.20 \times 10^{14}$ $1.86 \times 10^{20}$	$1.39 \times 10^{14}$ $2.15 \times 10^{20}$	$1.31 \times 10^{14}$ $2.03 \times 10^{20}$
26	照射時間 (秒)	$0.572 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	I-4	J-4
	$\phi_{th}$ $\theta$	$0.946 \times 10^{14}$ $0.541 \times 10^{20}$	$1.14 \times 10^{14}$ $0.652 \times 10^{20}$	$1.30 \times 10^{14}$ $0.744 \times 10^{20}$	$1.25 \times 10^{14}$ $0.715 \times 10^{20}$
27	照射時間 (秒)	$0.637 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	G-12	J-12
	$\phi_{th}$ $\theta$	$0.946 \times 10^{14}$ $0.603 \times 10^{20}$	$1.01 \times 10^{14}$ $0.643 \times 10^{20}$	$1.67 \times 10^{14}$ $1.06 \times 10^{20}$	$1.18 \times 10^{14}$ $0.752 \times 10^{20}$
30	照射時間 (秒)	$0.839 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	G-12	J-12
	$\phi_{th}$ $\theta$	$0.954 \times 10^{14}$ $0.800 \times 10^{20}$	$1.00 \times 10^{14}$ $0.839 \times 10^{20}$	$1.70 \times 10^{14}$ $1.43 \times 10^{20}$	$1.15 \times 10^{14}$ $0.965 \times 10^{20}$
31	照射時間 (秒)	$1.87 \times 10^6$			
	照 射 孔	F-4	G-4	G-12	J-12
	$\phi_{th}$ $\theta$	$0.972 \times 10^{14}$ $1.82 \times 10^{20}$	$1.03 \times 10^{14}$ $1.93 \times 10^{20}$	$1.62 \times 10^{14}$ $3.03 \times 10^{20}$	$1.14 \times 10^{14}$ $2.13 \times 10^{20}$
合 計	合 計 $\theta$	$7.83 \times 10^{20}$	$8.57 \times 10^{20}$	$11.1 \times 10^{20}$	$9.03 \times 10^{20}$
燃焼度	%	30	32.2	39.5	33
	fission/cm <sup>3</sup>	$5.32 \times 10^{20}$	$6.96 \times 10^{20}$	*	*

\* 燃料芯材の密度および重量の値が得られていないので求められず。

表 2.7 燃料板発熱量

キャプセル No 運転サイクル	最大発熱量 (w/cm)			
	72F-17J	72F-18J	72F-19J	72F-20J
22	416	442	456	403
24	400	423	401	356
25	371	417	469	420
26	287	330	357	349
27	287	292	465	361
30	272	287	447	337
31	263	277	397	314

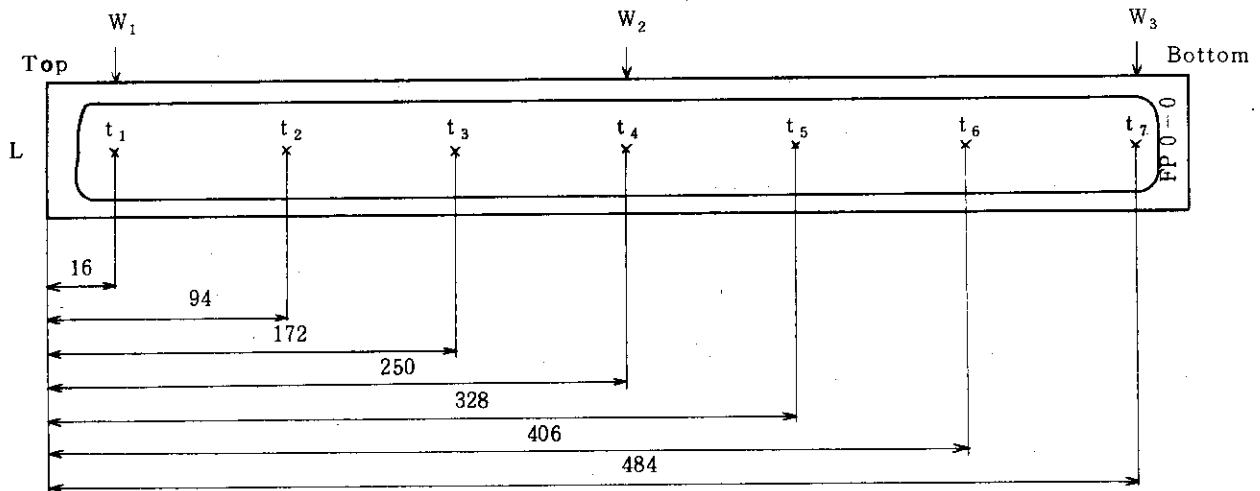
表 2.9 照射前と後の燃料板厚さ比較

単位: mm

キャプセル番号	燃料板番号	照射前燃料板厚		照射後燃料板厚			差 (照射後-照射前)
		最大	最小	最大	最小	平均	
72F-17J	FPG-1-2	1.29	1.28	1.32	1.30	1.309	0.022
72F-18J	FPG-2-1	1.27	1.26	1.28	1.28	1.280	0.017
72F-19J	FPM-2-3	1.27	1.24	1.26	1.25	1.257	0.007
72F-20J	FPM-3-3	1.27	1.24	1.29	1.28	1.287	0.037

表 2.8 燃料試料寸法測定結果 (照射前)

	測定位置	FPG-1-2 (72F-17J)	FPG-2-1 (72F-18J)	FPM-2-3 (72F-19J)	FPM-3-3 (72F-20J)	測定器具 (精度 mm)
幅	w <sub>1</sub>	32.58	32.62	25.63	32.25	ノギス 長さ 150mm ( $\frac{1}{20}$ )
	w <sub>2</sub>	32.57	32.58	25.97	32.23	
	w <sub>3</sub>	32.58	32.58	26.63	32.23	
厚さ	t <sub>1</sub>	1.30	1.28	1.25	1.29	マイクロメータ ( $\frac{1}{100}$ )
	t <sub>2</sub>	1.30	1.28	1.26	1.29	
	t <sub>3</sub>	1.31	1.28	1.26	1.29	
	t <sub>4</sub>	1.31	1.28	1.26	1.29	
	t <sub>5</sub>	1.31	1.28	1.26	1.29	
	t <sub>6</sub>	1.31	1.28	1.26	1.28	
	t <sub>7</sub>	1.32	1.28	1.25	1.28	
長さ	L	500.00	500.08	501.38	501.57	ノギス長さ600mm ( $\frac{1}{20}$ )



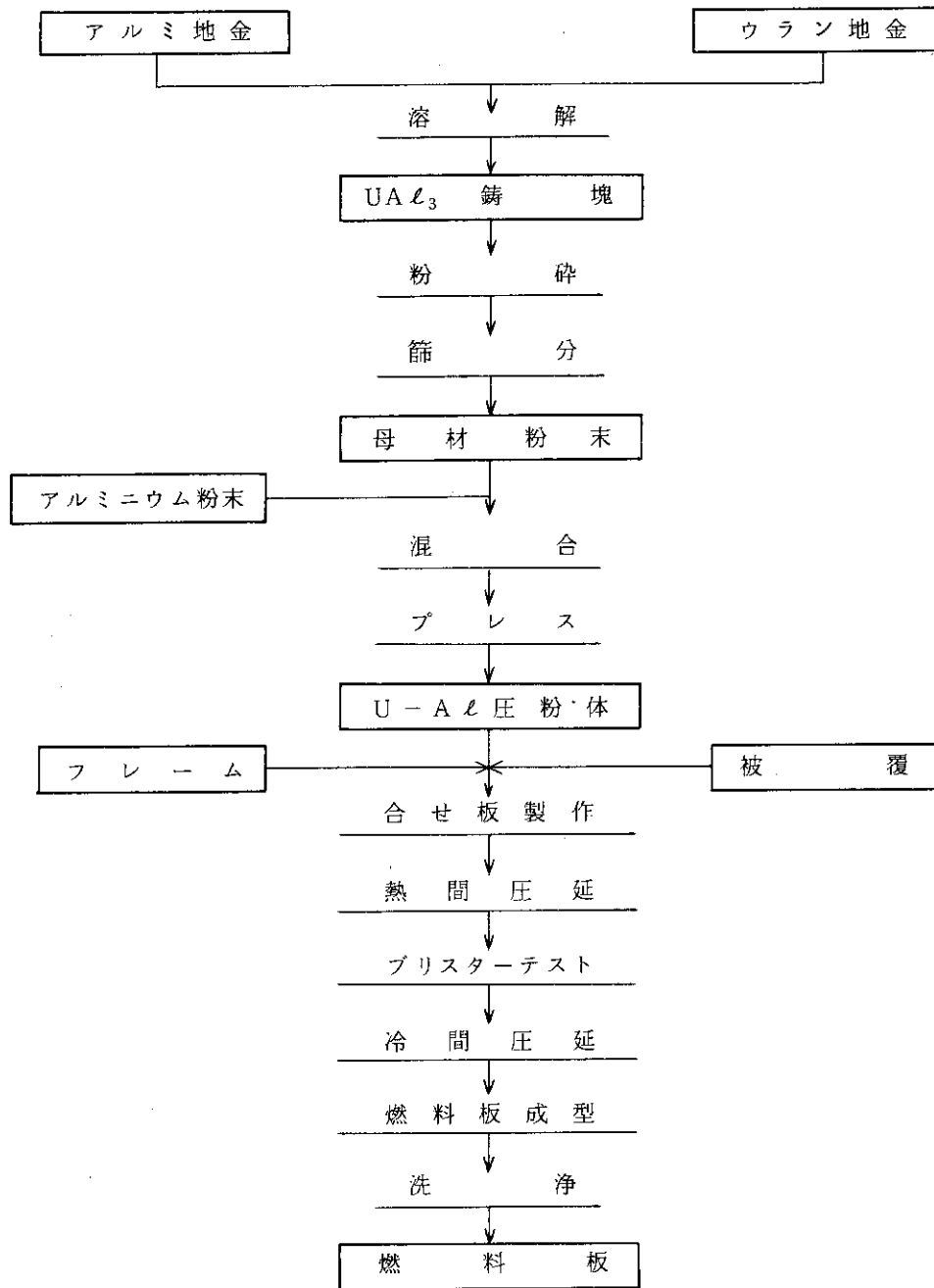


図 2.1 燃料板加工工程図

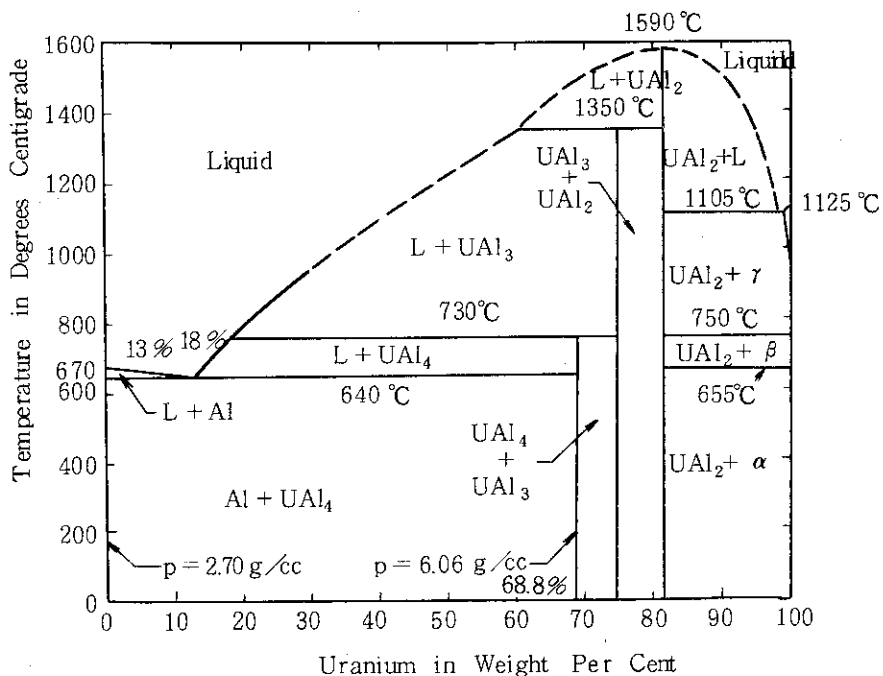
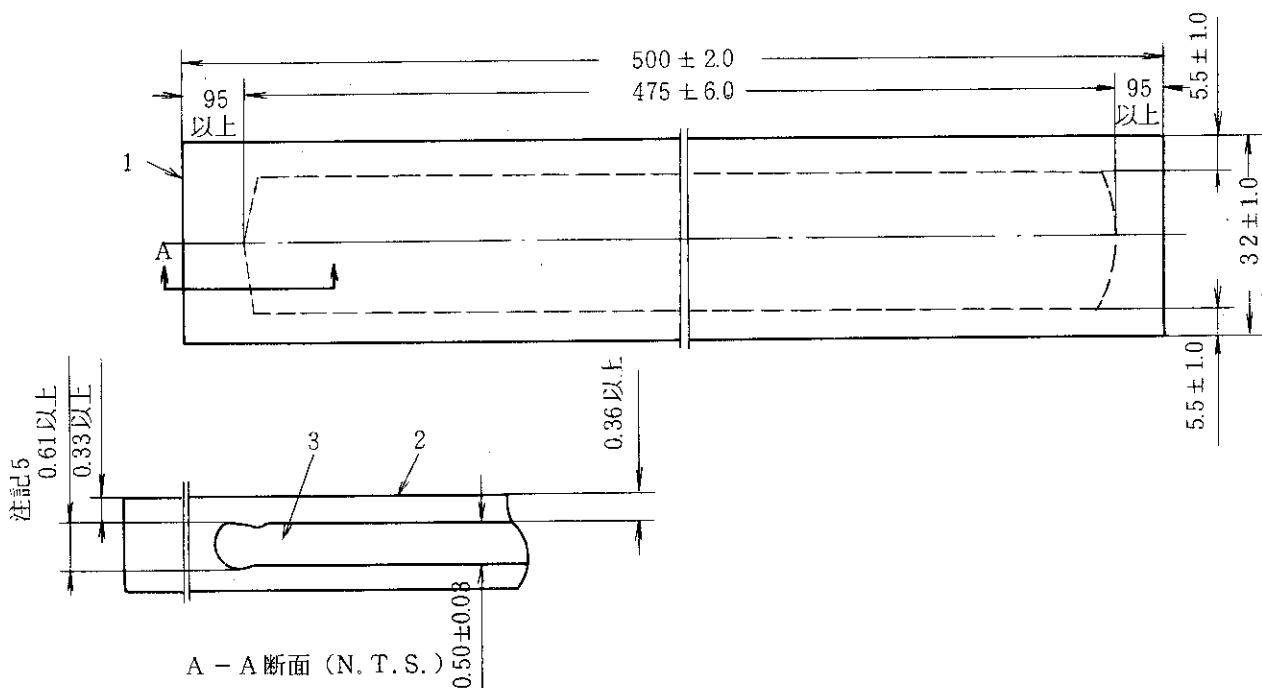


図 2.2 ウラン-アルミニウム状態図



- 注記 1. 使用材は仕様書本文を参照のこと。
2. 燃料板に 3mm カク深さ 0.3~0.2mm の識別番号を刻印または刻字すること。
3. 鋭い角, 縁, かえりはすべて面取りすること。
4. 機械加工面は 25-S 仕上げとする。
5. この規定はミート端部 35 mm の範囲内に限る。
6. 燃料板の表面傷の深さは 0.08mm 以下とすること。

名称	燃料板	3	芯材
		2	被覆材
		1	燃料板
	品番	部品名	

図 2.3 燃料板完成図



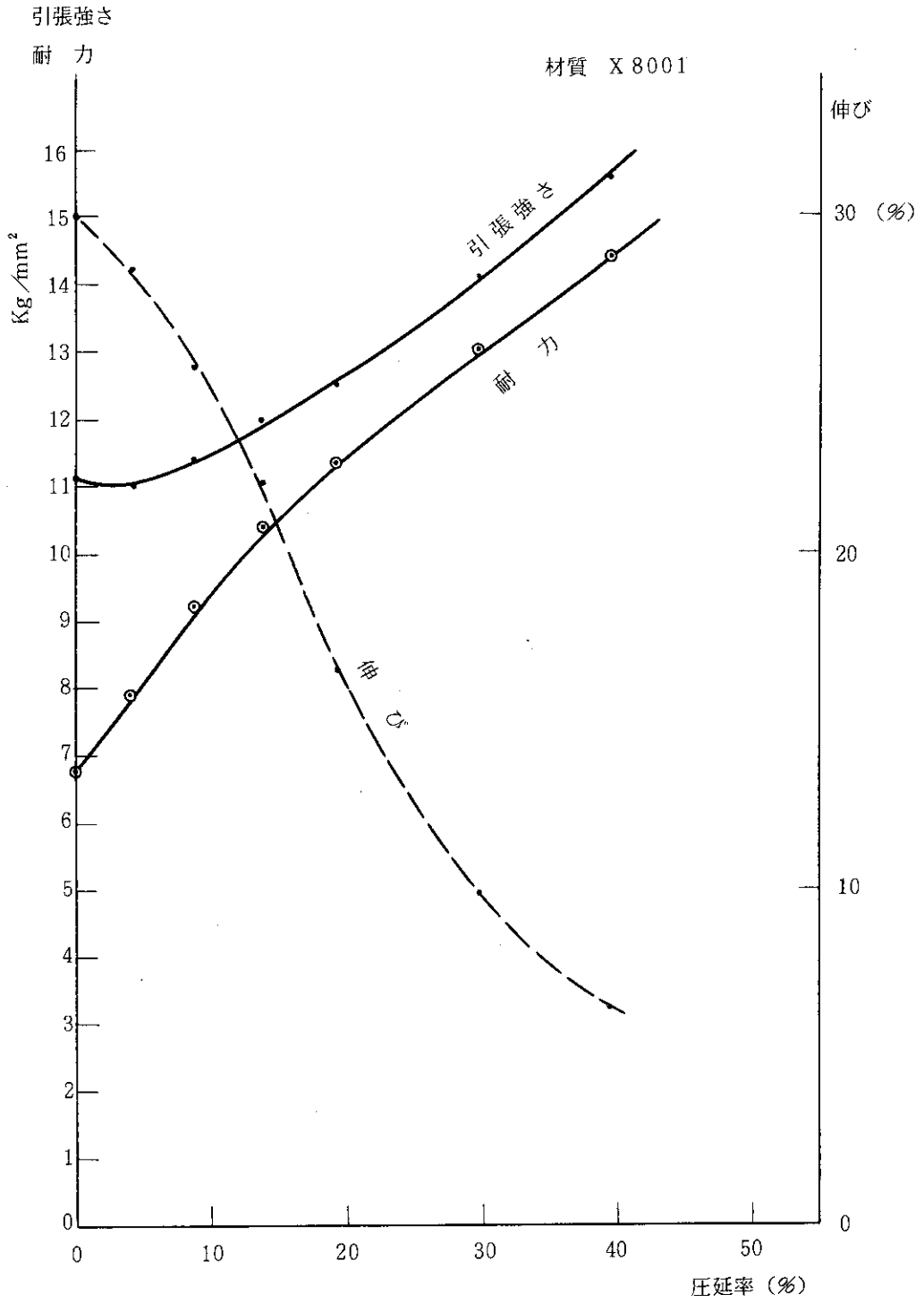
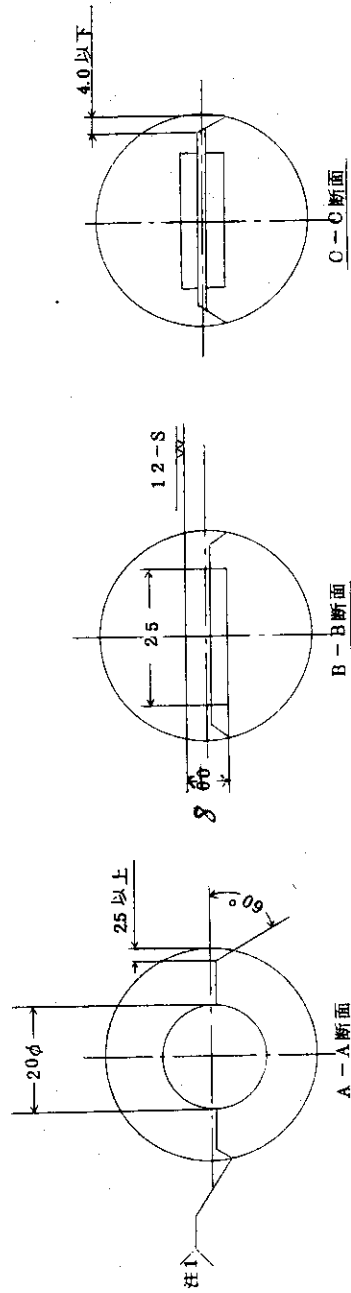
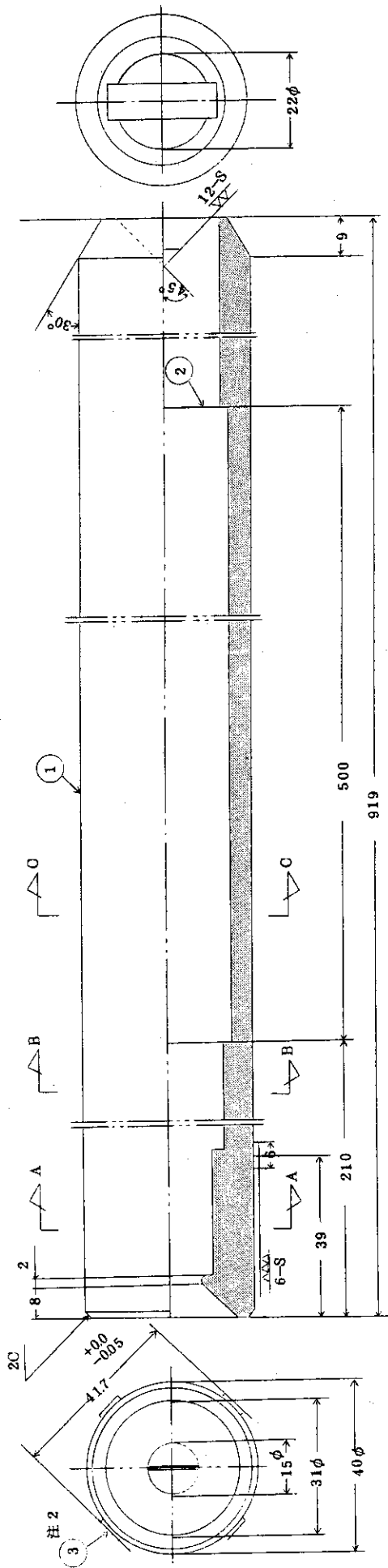


図 2.4 加工度による機械的性質の変化



注記

1. 上端より180mm, 下端より200mmは連続溶接すること。
2. 溶接後は研削又は切削をして仕上げる。
3. 材質はアルミ合金又はステンレスとすること。取付は溶接によってもよい。
4. 鋭い角, 縁, かえりはすべて面取りすること。
5. 指定外の機械加工面は25-S仕上げとすること。
6. 指定外の寸法精度はJIS中級とすること。

3	スペーサ			4	
2	試作板			1	
1	キャプセル	A6061-76	1		
品名		材質	価額	個数	備考
BPF試作板		面法	三角法	尺度	L/1
キャプセル		設計	大久保	承認	
		製図	大久保		
日本原子力研究所 図番R1D-0009-A					

図 2.5 キャプセル設計図

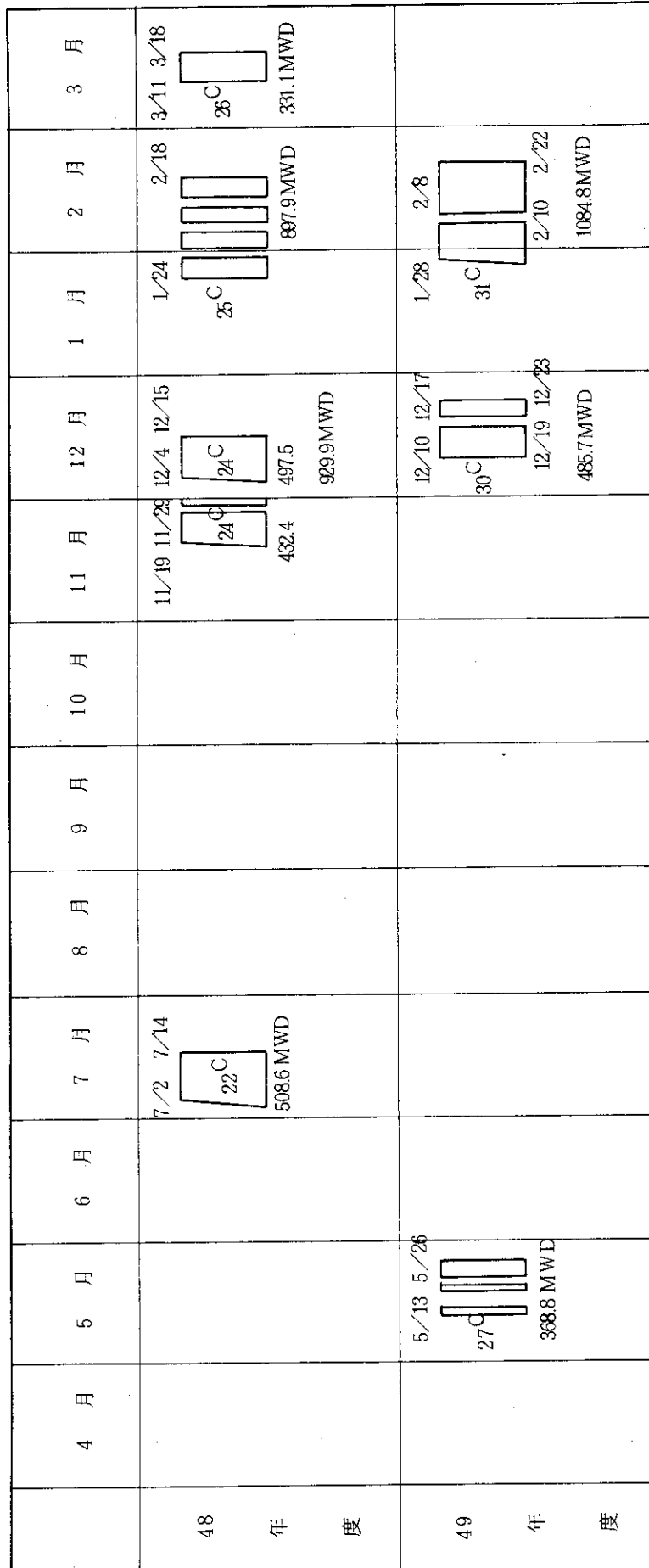


図 2.6 試作燃料板照射期間中の炉運転サイクル及び積算出力  
(総積算出力 4606.8 MWD)

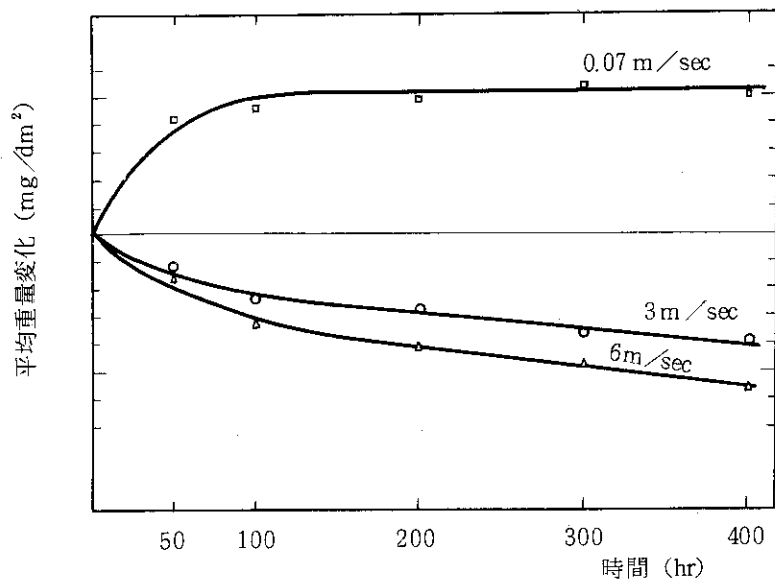


図 2.7 流水中での 1100 Al の 70 °C での重量変化 <sup>6)</sup>

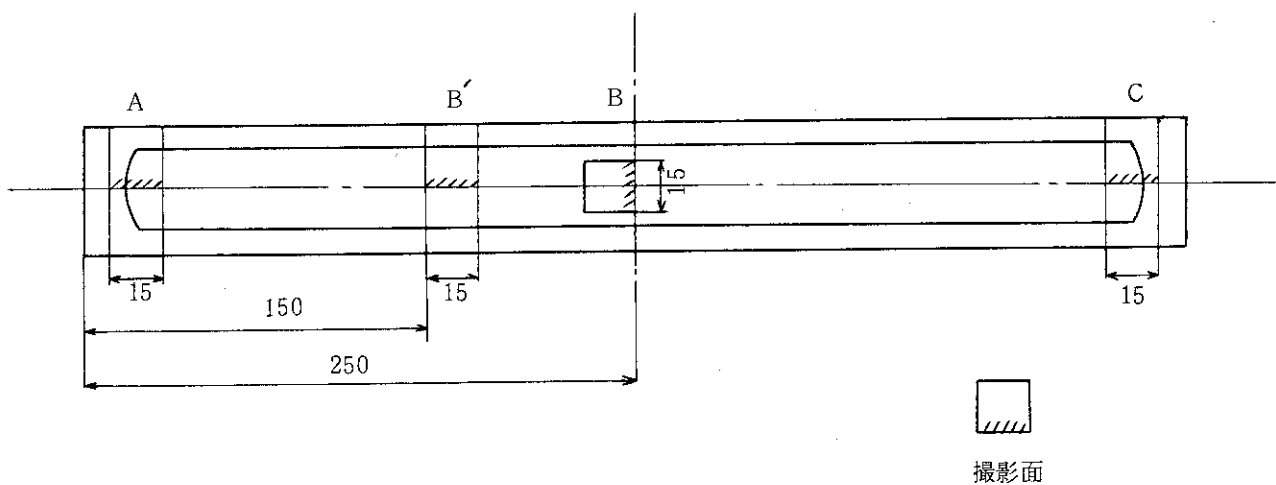


図 2.8 試料切断位置及び撮影面

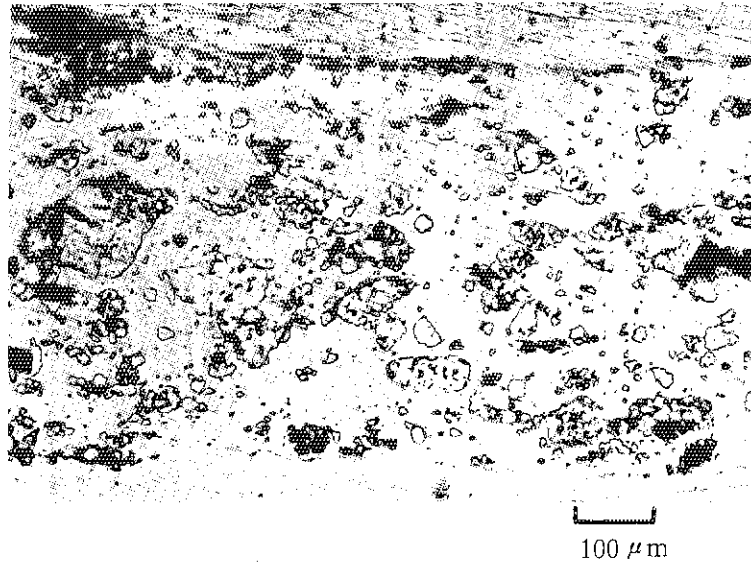


写真 2.1 顕微鏡組織写真 (NFI)  
(照射前)

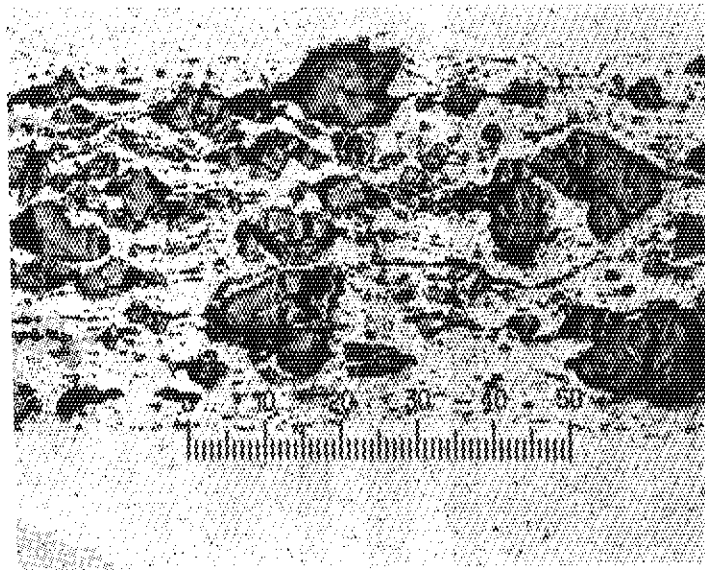


写真 2.2 顕微鏡組織写真 (MAPI)  
(照射前)

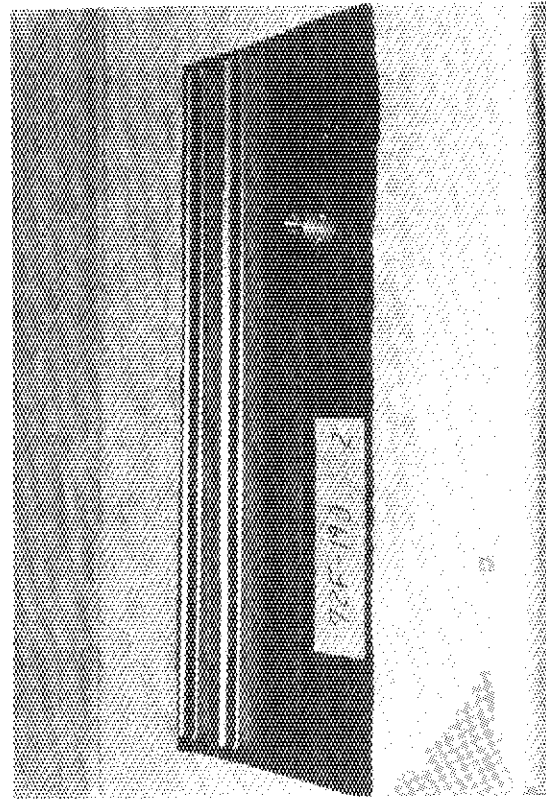
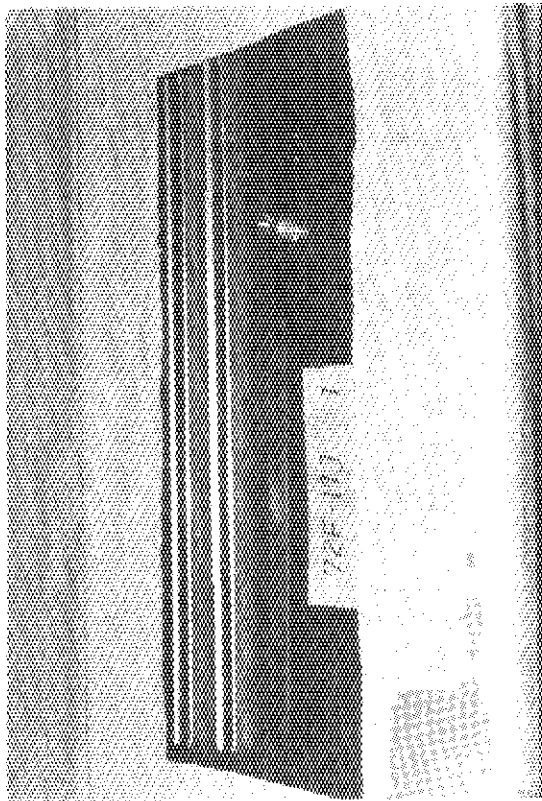


写真2.4 キャプセル組立前写真  
(MAPI)

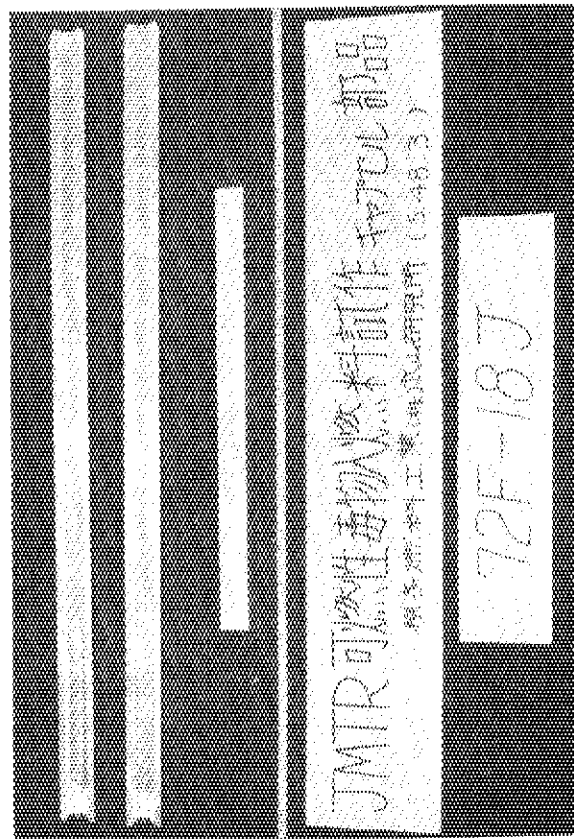
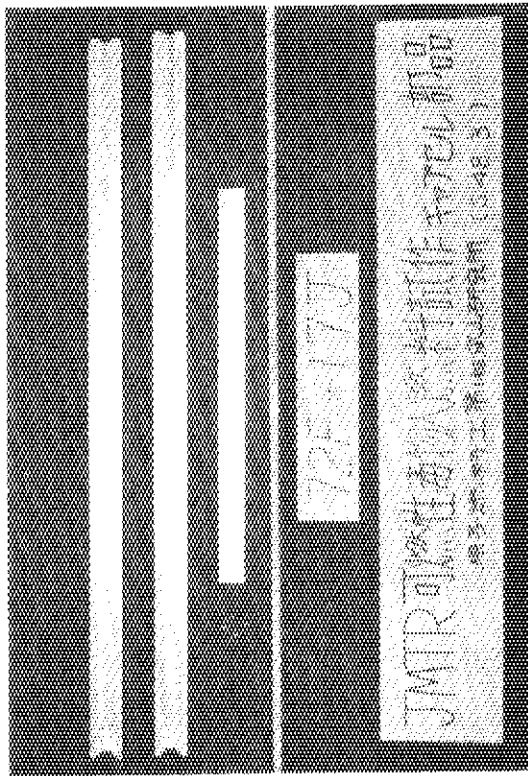


写真2.3 キャプセル組立前写真  
(NFI)



写真 2.5 キャプセル組後写真  
(NFI)

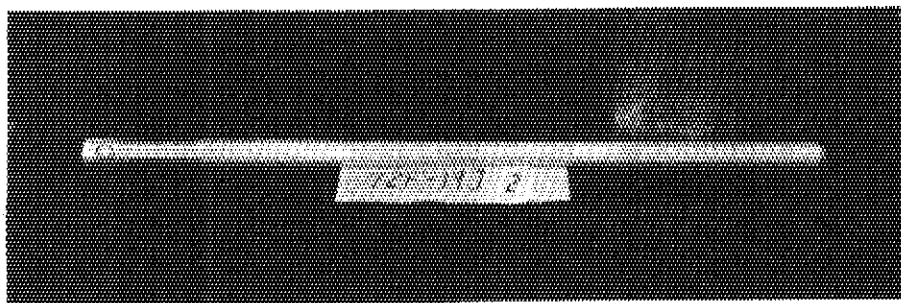
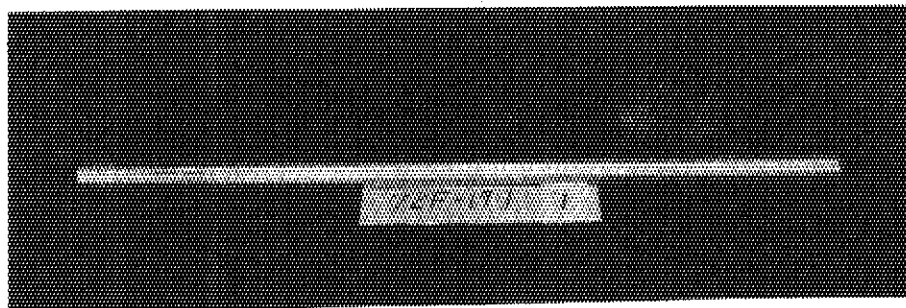


写真 2.6 キャプセル組立後写真  
(MAPI)

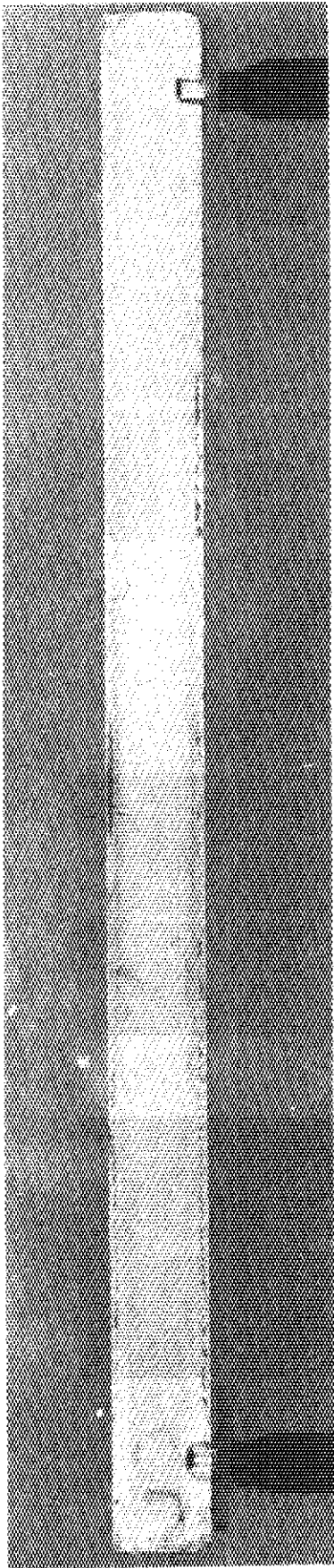
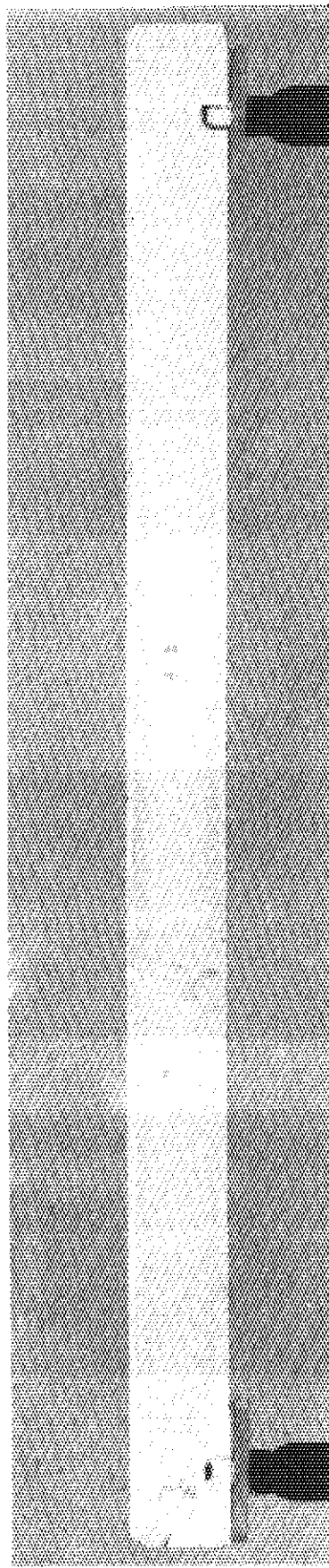


表 側



裏 側

写真 2.7 FPG-1-2 (72F-17J) 外観写真



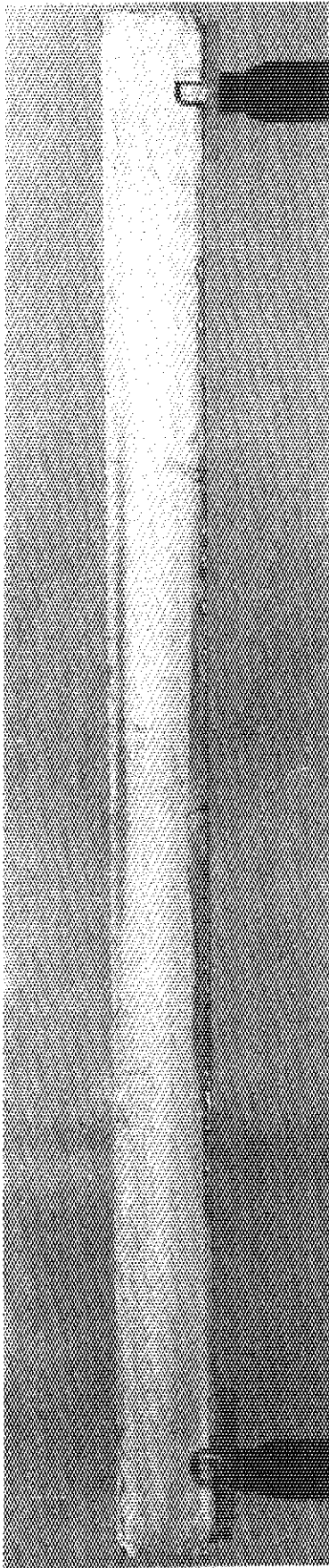
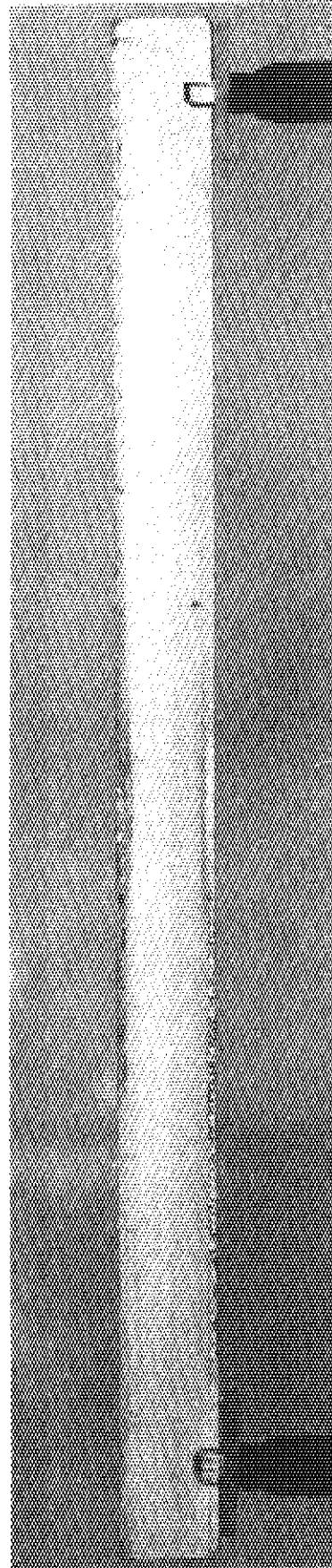


表 側



裏 側

写真 2.8 FPG-2-1 (72F-18J) 外觀写真

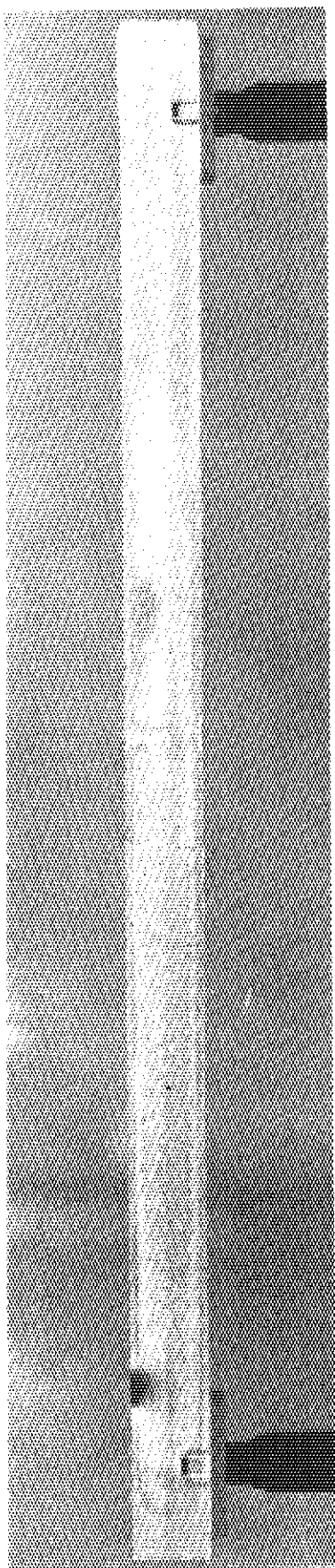
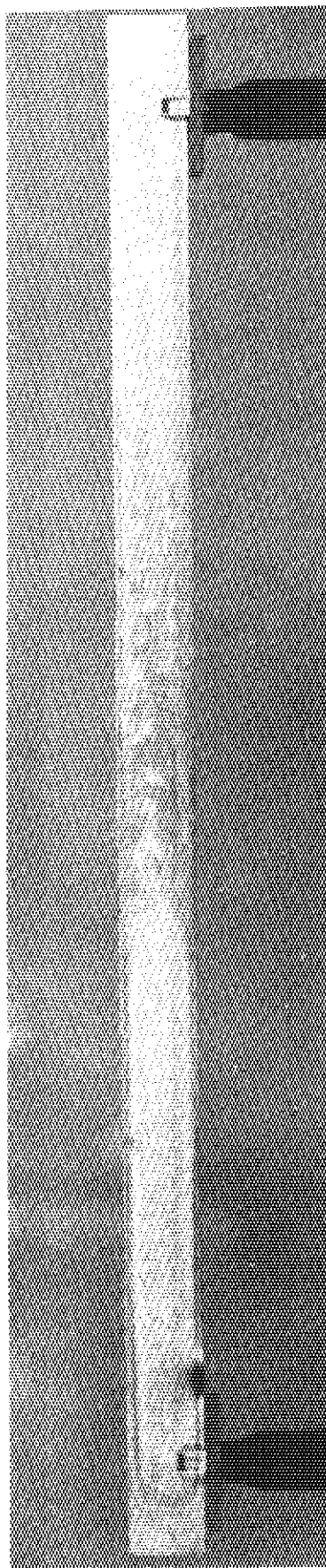


表 側



裏 側

写真 2.9 FPG-2-3 (72F-19J) 外觀写真

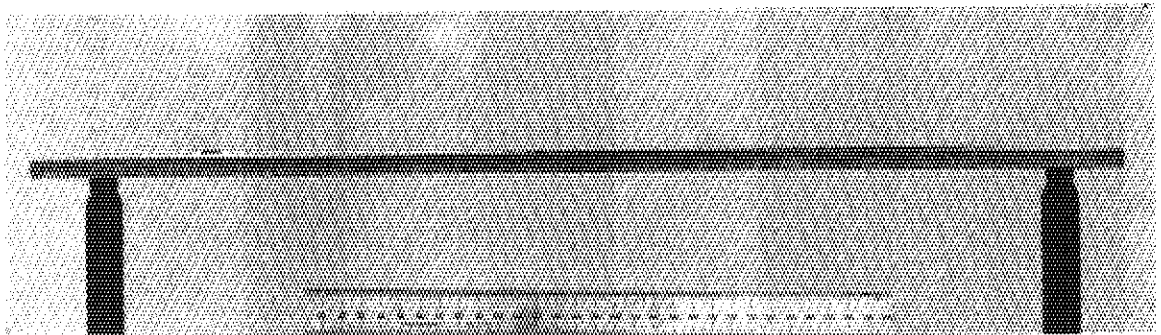
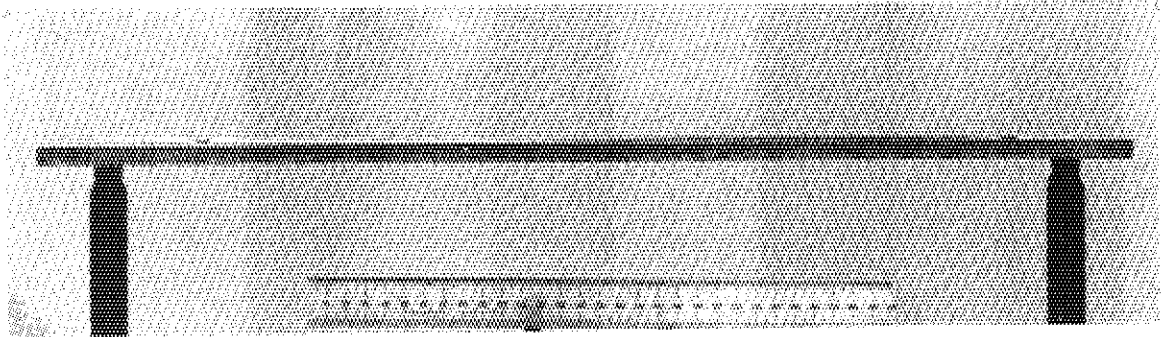


写真 2.10 FPG-2-3 (72F-19J) 側面写真

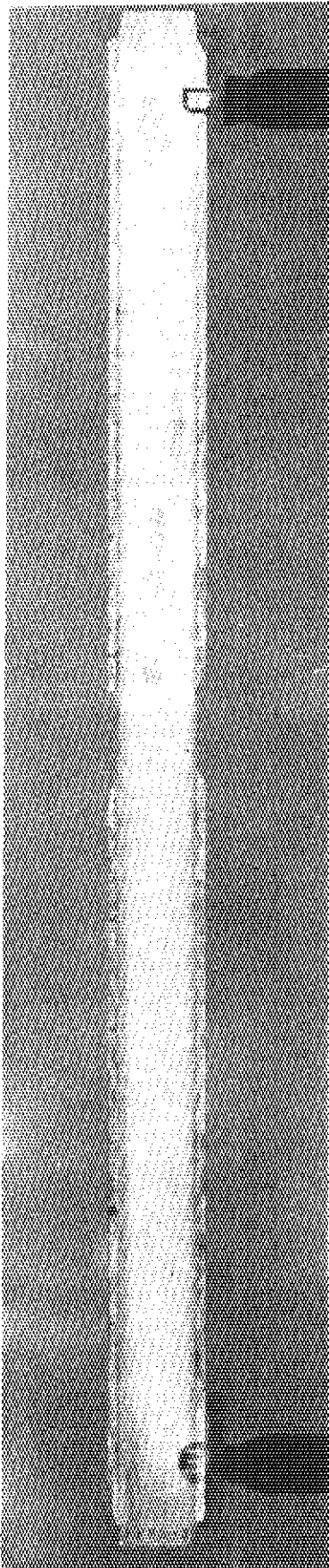
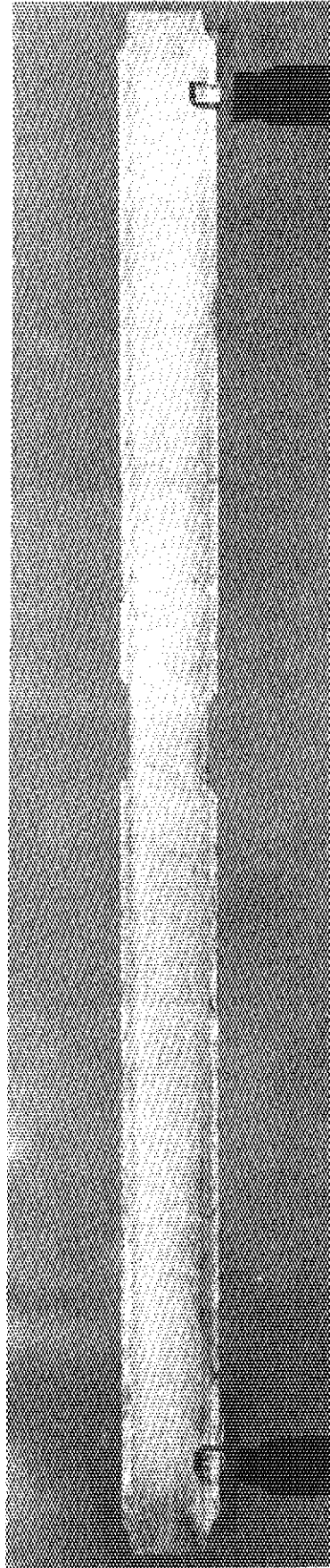
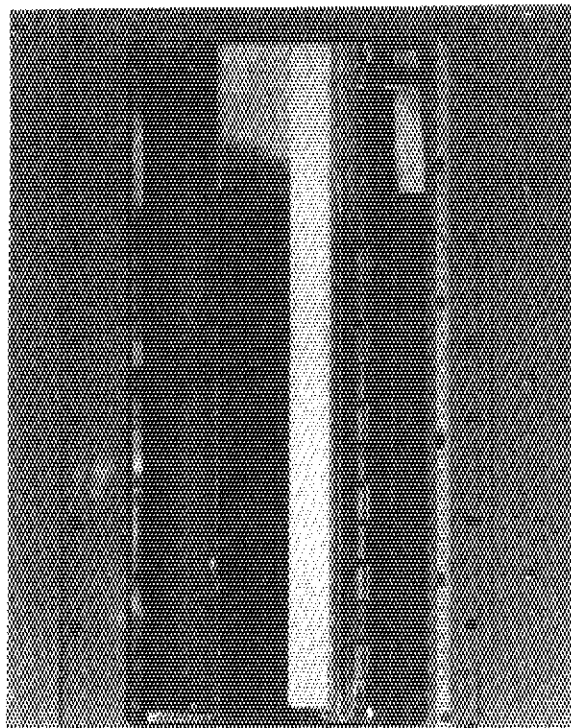


表 側

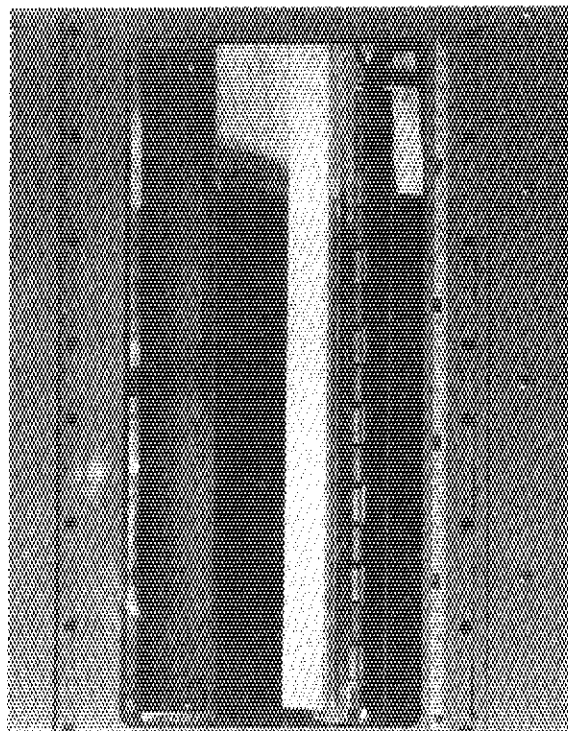


裏 側

写真 2.11 FPM-3-3 (72F-20J) 外觀写真

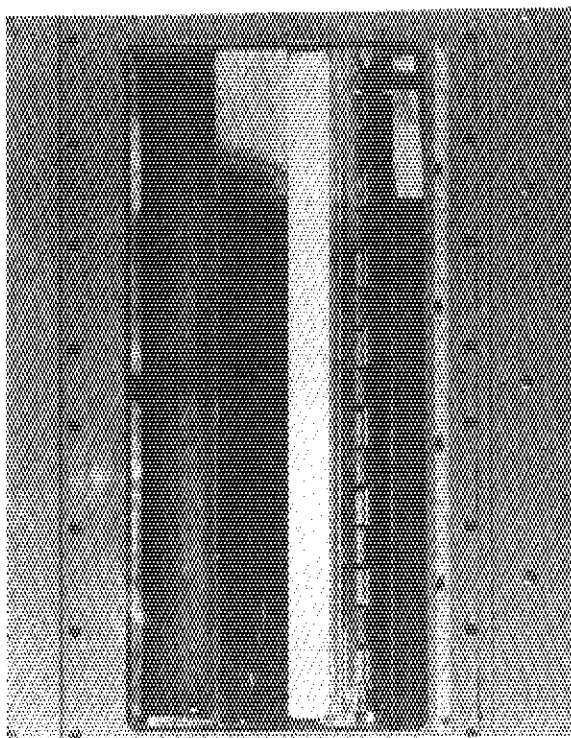


40 mmHg

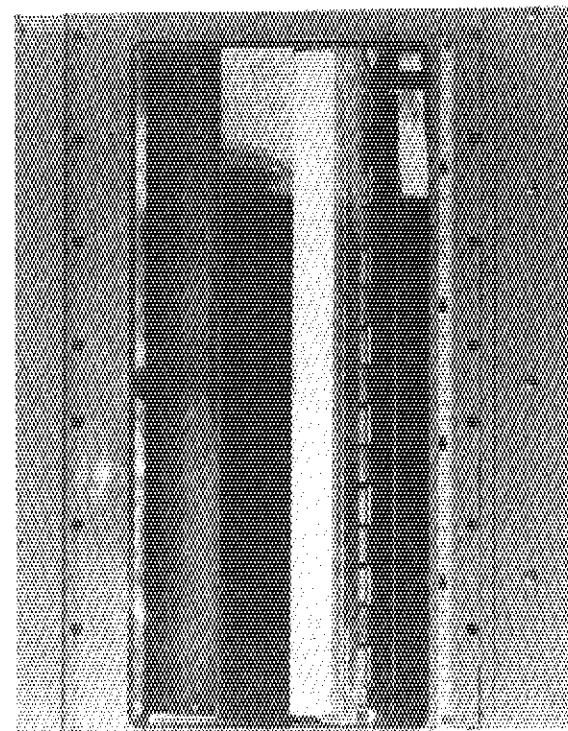


150 mmHg

写真 2.13 リーク・ロケーション・テスト  
FPG-2-1 (72F-18J)

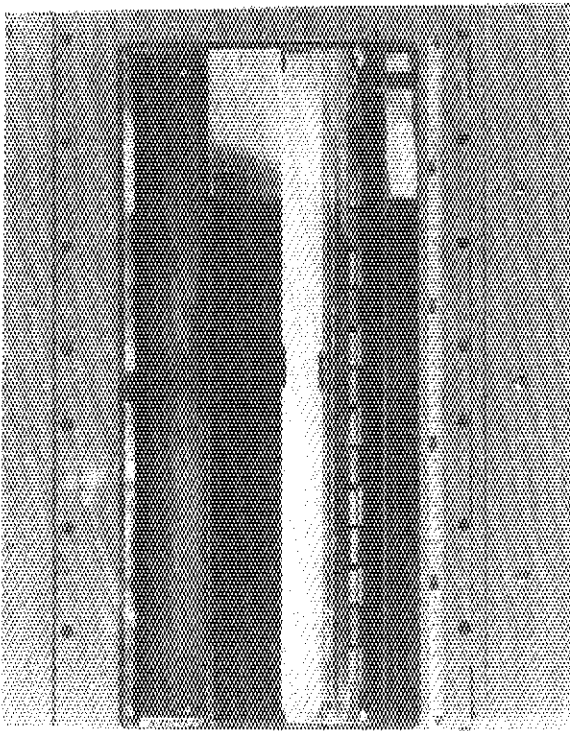


40 mmHg

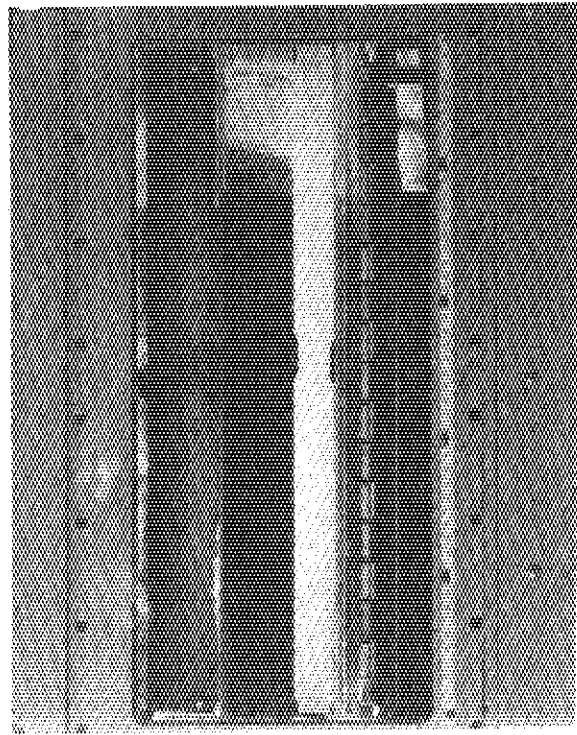


200 mmHg

写真 2.12 リーク・ロケーション・テスト  
FPG-1-2 (72F-17J)

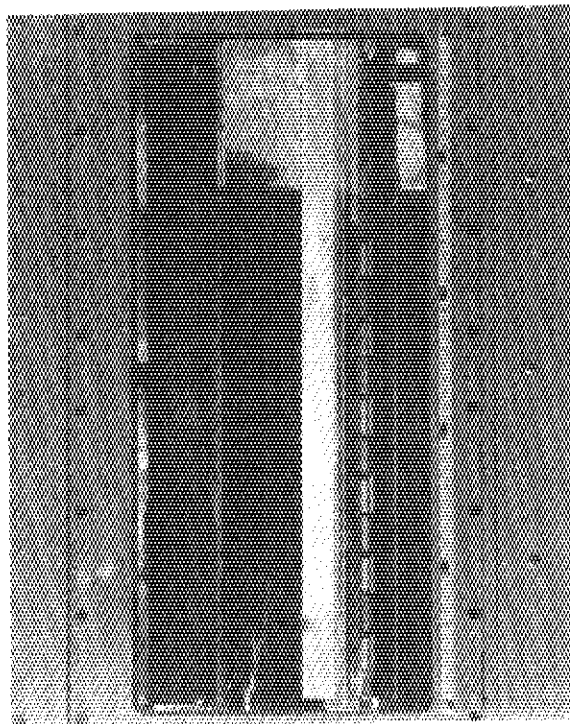


40 mmHg

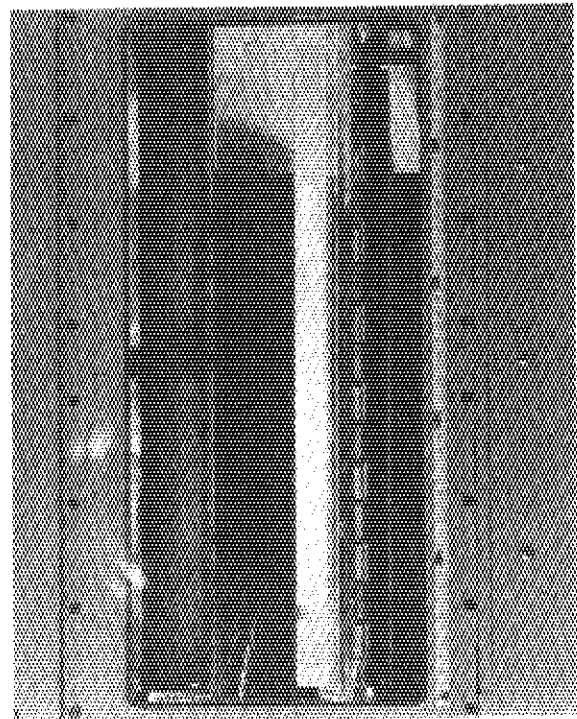


100 mmHg

写真 2.15 リーク・ロケーション・テスト  
FPM-3-3 (72F-20J)

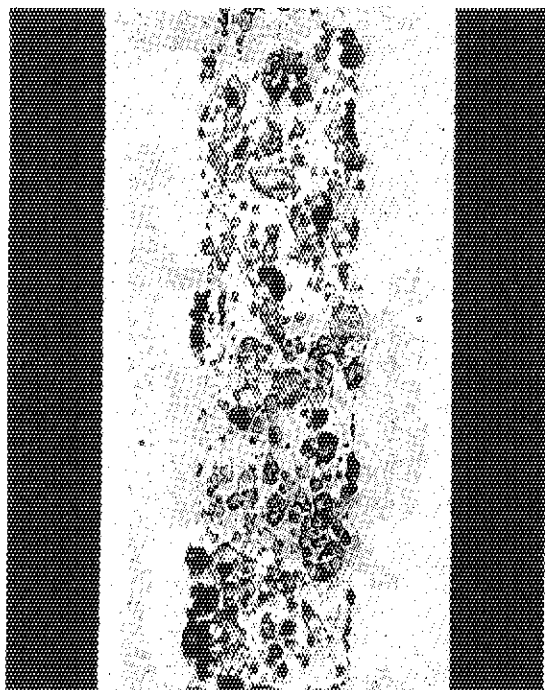


試験日 3月2日 40 mmHg



試験日 3月3日 40 mmHg

写真 2.14 リーク・ロケーション・テスト  
FPG-2-3 (72F-19J)

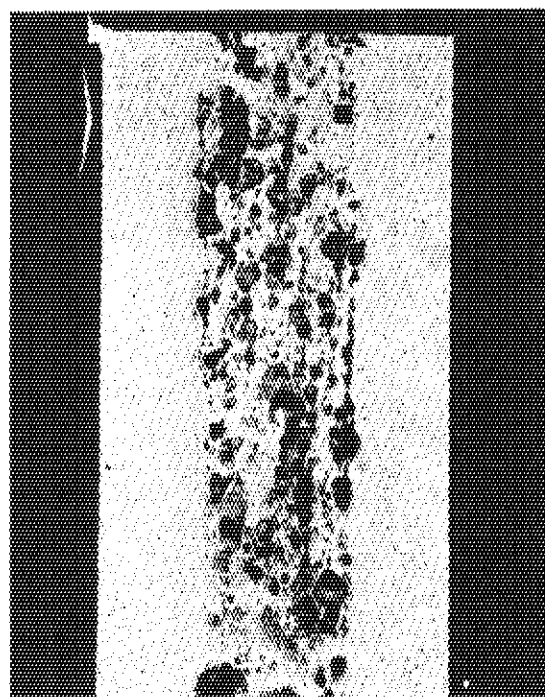


250  $\mu$ m



100  $\mu$ m

写真 2.17 FPG-1-2 (72F-17J) 金相写真  
(撮影面 B)



250  $\mu$ m



100  $\mu$ m

写真 2.16 FPG-1-2 (72F-17J) 金相写真  
(撮影面 A)

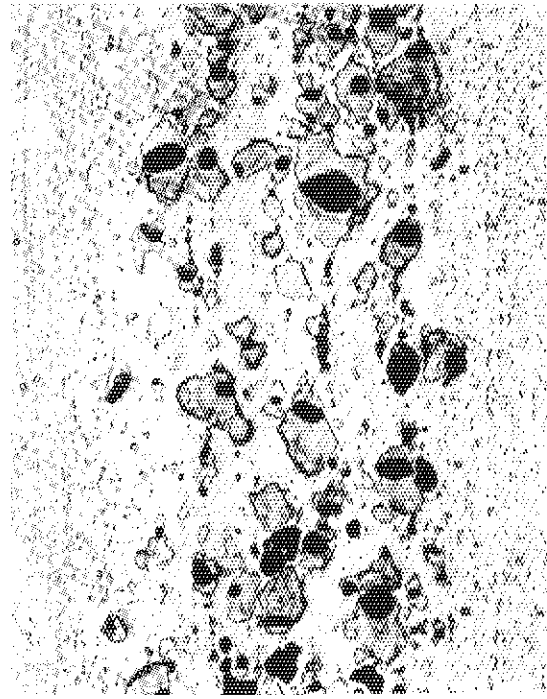
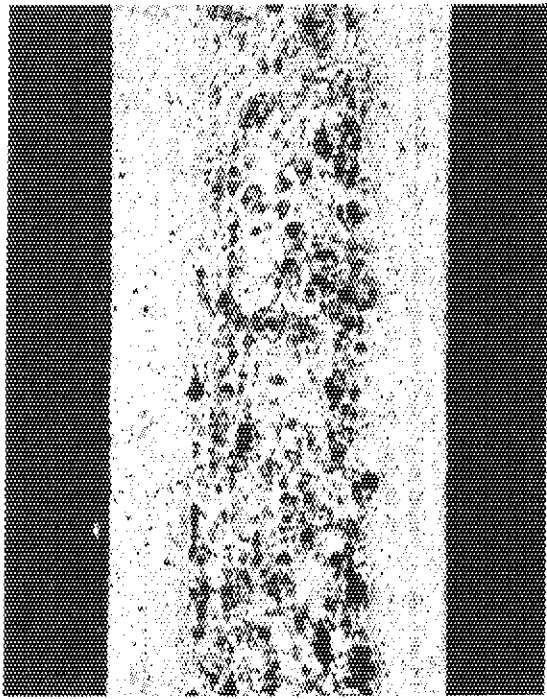


写真 2.19 FPG-2-1 (72F-18J) 金相写真  
(撮影面 A)

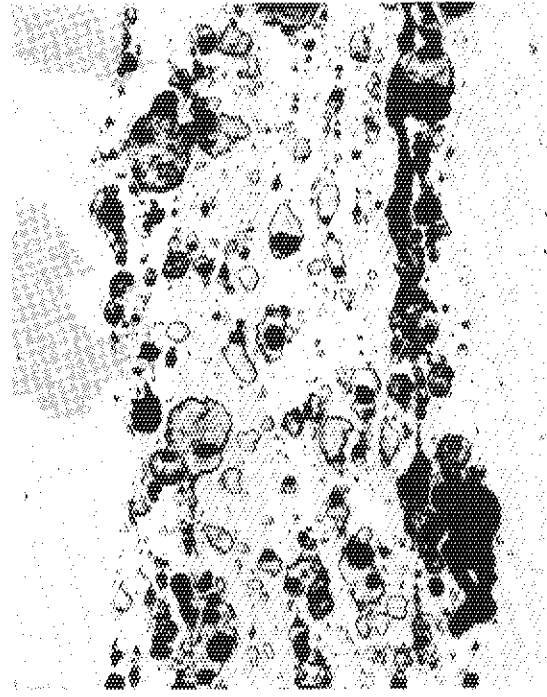
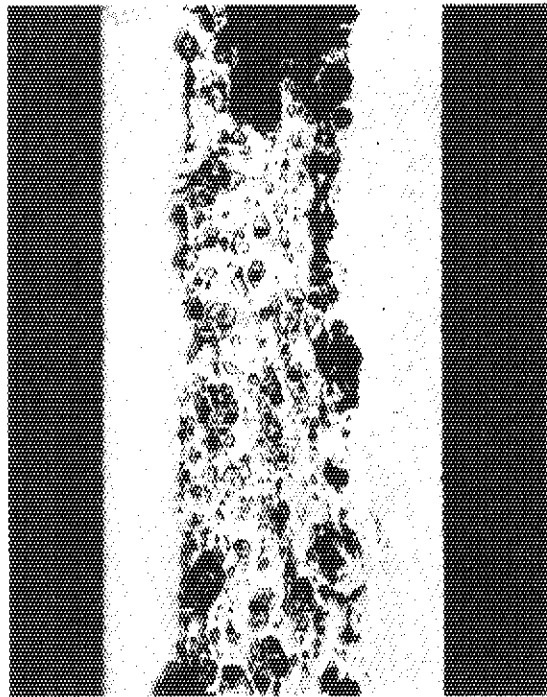
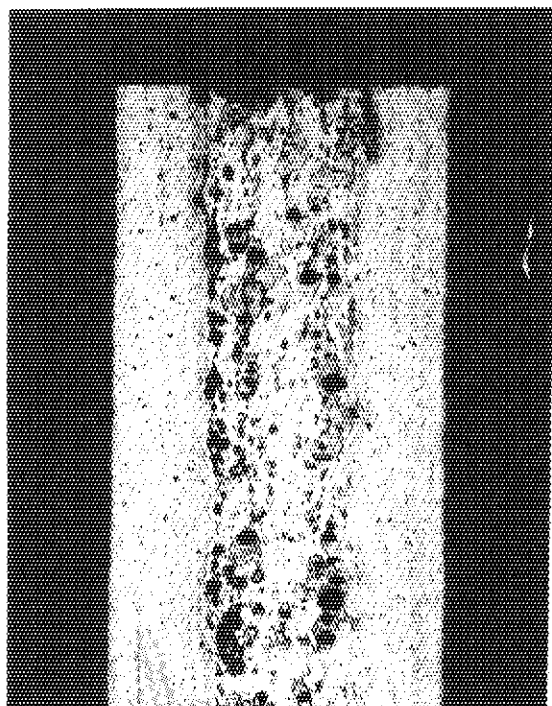


写真 2.18 FPG-1-2 (72F-17J) 金相写真  
(撮影面 C)



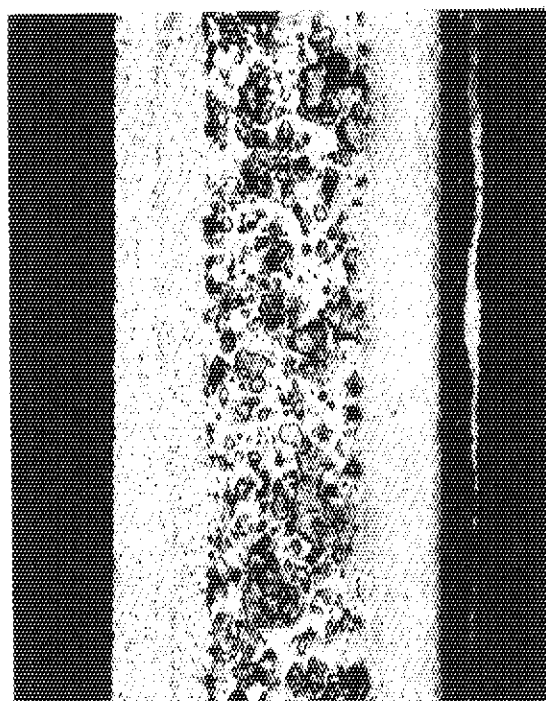


250 μm



100 μm

写真 2.21 FPG-2-1 (72F-18J) 金相写真  
(撮影面 C)



250 μm



100 μm

写真 2.20 FPG-2-1 (72F-18J) 金相写真  
(撮影面 B)

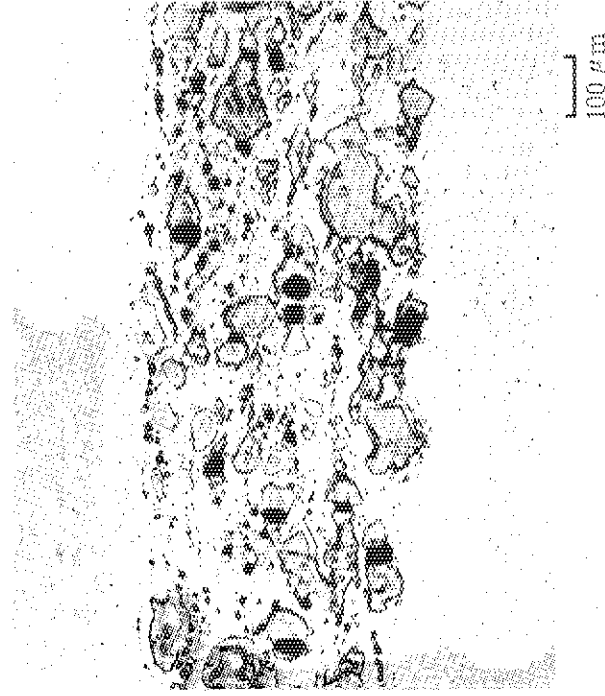
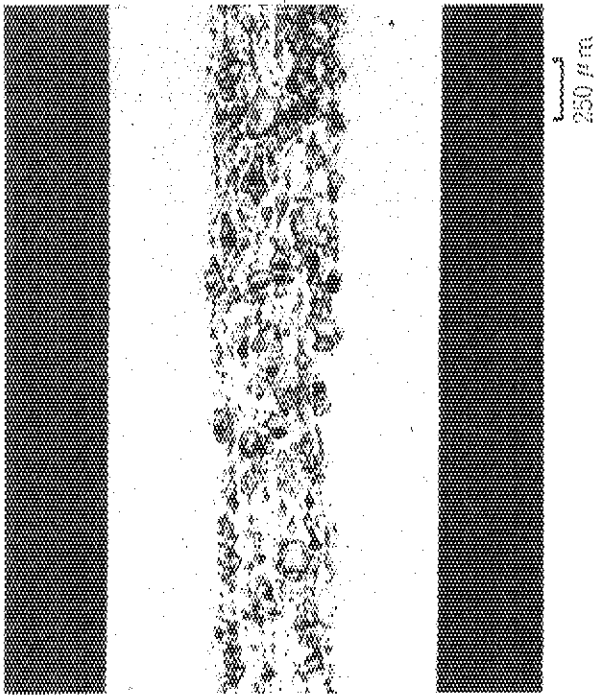


写真 2.23 FPM-3-3 (72F-19J) 金相写真  
(撮影面 B)

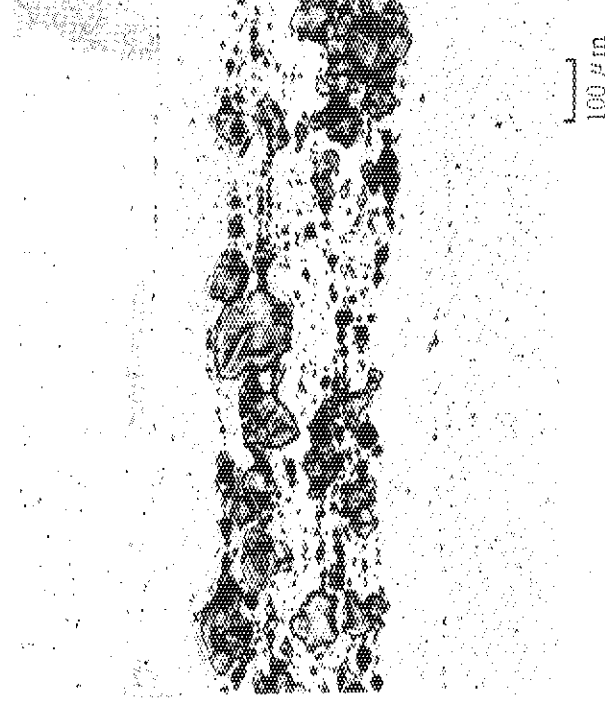
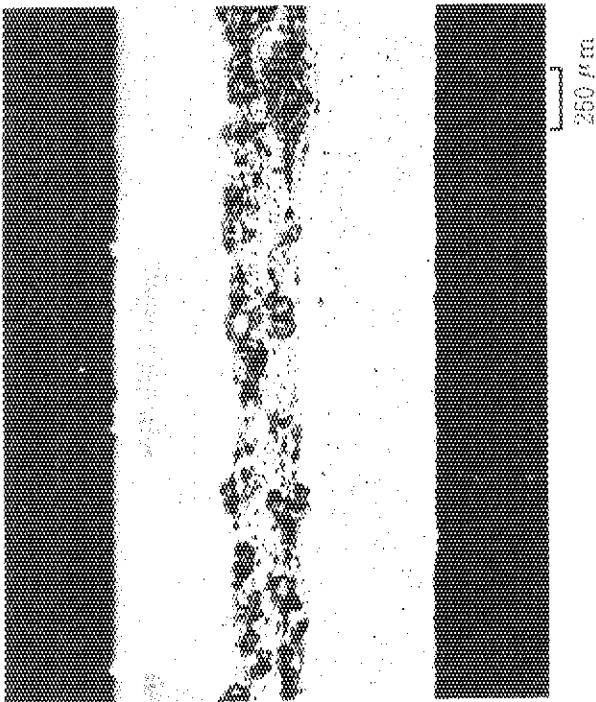
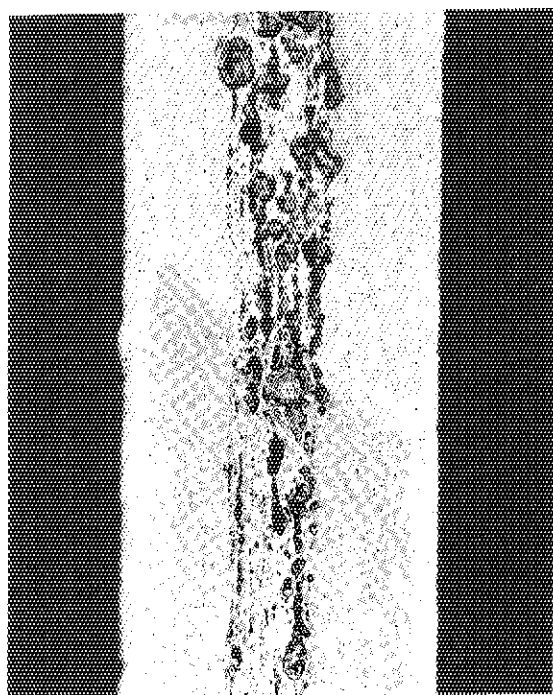
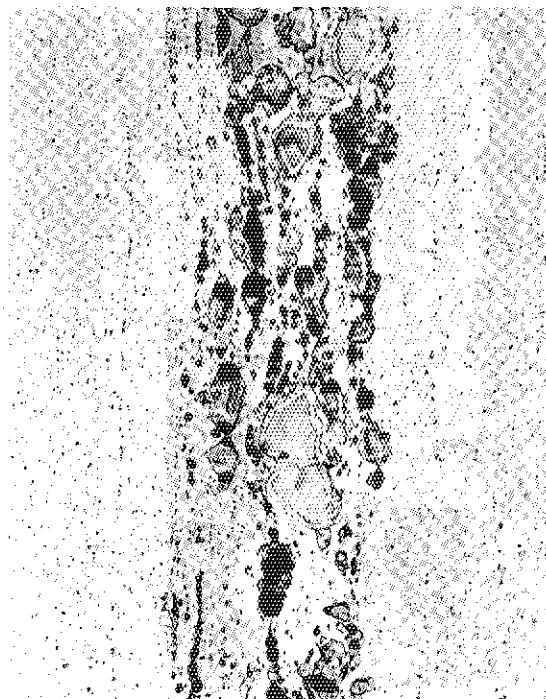


写真 2.22 FPM-2-3 (72F-19J) 金相写真  
(撮影面 A)

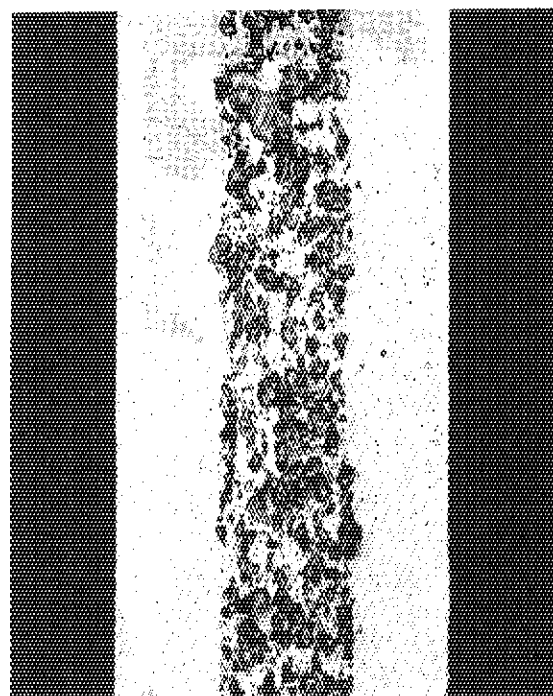


250 μm

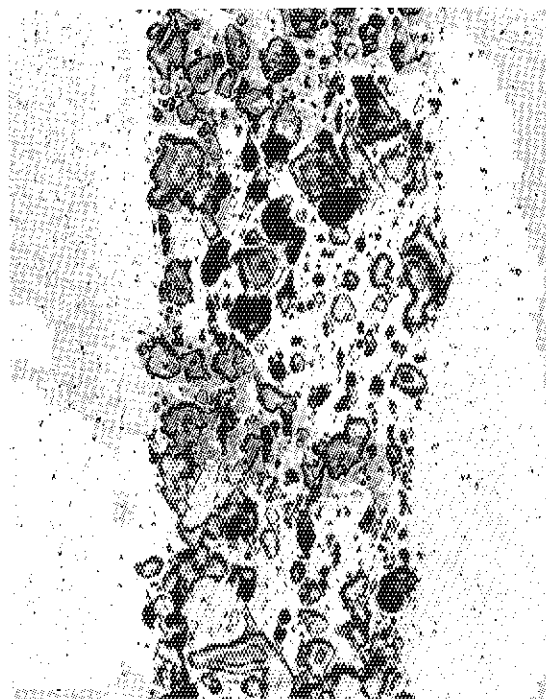


100 μm

写真 2.25 FPM-3-3 (72F-19J) 金相写真  
(撮影面C)



250 μm



100 μm

写真 2.24 FPM-3-3 (72F-19J) 金相写真  
(撮影面B)

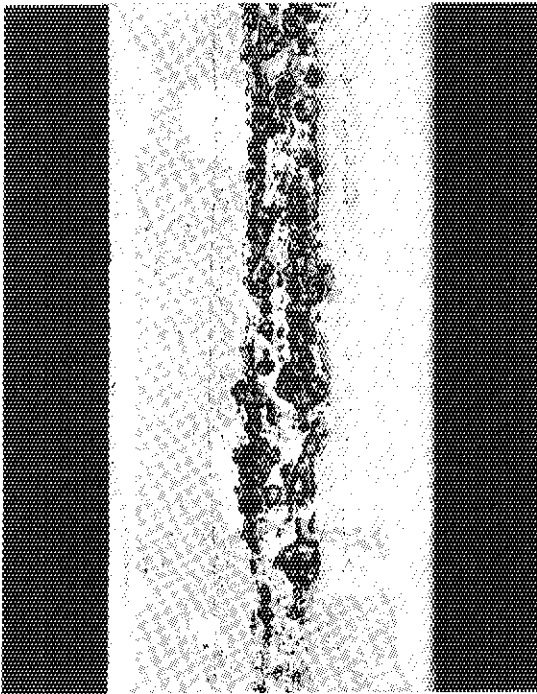


写真 2.27 FPM-3-3 (72 F-20 J) 金相写真  
(撮影面 C)

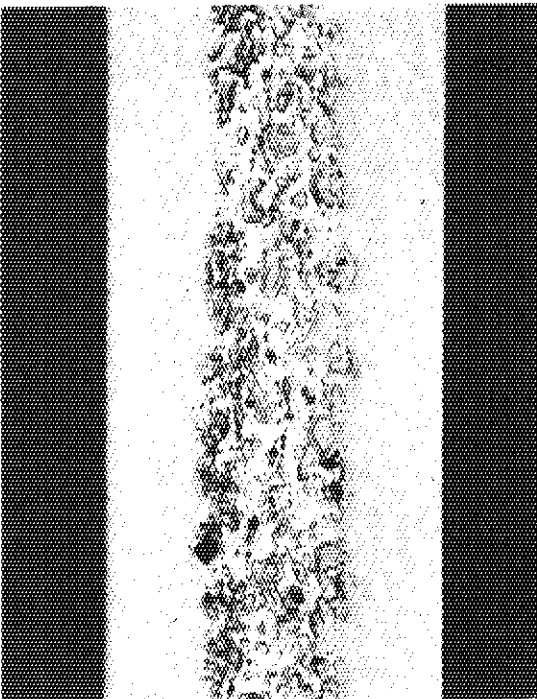


写真 2.26 FPM-3-3 (72 F-20 J) 金相写真  
(撮影面 B)

### 3. 側板の試作及び照射試験

#### 3.1 側板の試作

試作側板はNFIとMAPIに、それぞれ2枚ずつ発注した。発注図を図3.1に示す。<sup>11)</sup>

側板の仕様を表3.1に示す。試作した側板をそのままの形状でキャプセルホルダに組込んで照射する可能性があったので、幅及び長さ方向寸法は実際に使用する計画のものとは多少異なったものとなっている。しかし側板の製作技術を確認するという今回の目的からはこの寸法の差は支障ない。

製作手順は次に示すとおりで、燃料板の場合とほぼ同様である。すなわち、 $B_4C$ 又はほう素単体の粉末とアルミニウム粉末とを所定の濃度に配合してミキサを用いて十分混合する。混合粉末は油圧プレスを用いて約 $3t/cm^2$ の成形圧でプレスして圧粉体とする。プレス型より取出した圧粉体はやすりかけをして、ばり、返り等を除き、フレームにはめ込む。フレーム上下に被覆板を重ねて周辺を溶接し合せ板とする。フレーム及び被覆板はA6061を用いる。

合せ板を $450\sim 550^\circ C$ の温度で熱間圧延することにより芯材と被覆とを拡散結合させる。その後T-6処理を施す。最後にそりを矯正し、機械加工によって所定の寸法に仕上げる。

試験検査項目は、ほう素の純度分析、ほう素の含有量測定、ほう素不純物分析、組織検査、被覆状態の確認、添加状態の確認、プリスタ試験、引張り試験、外観検査、及び寸法検査、である。ここでは主要なデータについてのみ示す。すなわち、引張り試験の結果を表3.2に、ほう素分散の均一性の検査結果を表3.3に、切断面についての測定結果を表3.4に、及び納入した側板の寸法を検査した結果を表3.5に示す。

#### 3.2 側板照射用キャプセルの製作

燃料要素の実際の使用状態での、側板の温度は最高 $110^\circ C$ と推定される。すなわち、ホットチャンネルでの冷却水出口温度は $100^\circ C$ 程度であり、側板での温度上昇は $10^\circ C$ 程度である。それ故、試料の温度は $110^\circ C$ 以上となるようキャプセルは設計された。またあまり温度が高すぎることは、照射効果を過大に見積ることになるので問題となる。従って温度上限は $190^\circ C$ をこえないことを設計目標とした。

試料は、引張り試験用、金相試験用、寸法変化測定用、及び温度制御用として計11枚をキャプセルに装填した。試料は3.1で述べた、試作側板から切出した。切断面は芯材が露出した状態にあるので、スウェリング量への影響が懸念されたが、芯材の体積に比べて露出面の面積は僅かなので影響は無視できると判断した。

キャプセル設計に当って、次の方針をとった。

- 1) 試料にはキャプセルからの拘束力は加えない。
- 2) 縦方向発熱分布を考慮し、各試料の温度が同じになるよう試料と熱媒体間のギャップを変え

る。この際、発熱分布は炉心中央から 100 mm 下のところをピークとし、そこから ± 450 mm の位置でゼロになる余弦状とする。

- 3) 温度計算は円筒-平板を組合わせて行う。
- 4) 温度制御は、真空温度制御装置と温度制御用試料（2ケのうち片方は予備）の中に取り付けた熱電対を組合わせて行い、照射中は 150°C に温度制御する。
- 5) 他の一般の温度制御キャプセルのように内筒を設けることはせず、従って外筒と熱媒体及び熱媒体と試料間の He 濃度を同時に制御して温度制御を行う。内筒を設けない理由は温度が高くなり過ぎるのを防ぐためである。
- 6) 試料の面が炉心に向くよう、ツバ切欠きとの相関位置を決める。
- 7) 熱電対は、温度制御用試料に用いるものは 1.0 mmφ O. D. C/A とし他は 1.6 mmφ O. D. C/A とする。

各照射試験片の形状を図 3.2 に、キャプセルの代表的な断面略図を図 3.3 に、及びキャプセルの形状略図を図 3.4 に示す。

なお各試料を受入れる際に各部寸法を詳細に測定したが、その結果を表 3.6 に示す。

### 3.3 照射

#### 3.3.1 $^{10}\text{B}$ の燃焼度

照射は H-12 の位置で、第 32 サイクルから第 33 サイクルにかけて行われた。炉の積算出力は 1685 MWD（第 32 サイクルが 1084 MWD、第 33 サイクルが 601 MWD）であり、50 MW 出力で 34 日間の照射を行ったことになる。

$^{10}\text{B}$  の燃焼度を次に求める。

$$\text{燃焼度} = 1 - e^{-\bar{\sigma}\phi t}$$

$\bar{\sigma}$  :  $^{10}\text{B}$  の平均断面積

$$= \frac{\sigma_p}{\bar{v}} = \frac{3813 \times 10^{-24}}{1.32} = 2889 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$\sigma_p$  : 2200 m/s の中性子速度における断面積

$\bar{v}$  : ほう素芯材中の熱中性子平均速度\*

$\phi$  : ほう素芯材中の熱中性子束。その値を表 3.7 の第 3 欄および第 4 欄に示す。

(熱中性子束のセル平均値に対する芯材中の値の比は 0.8\* とし、また熱中性子束の縦方向分布は図 3.5 に示すものを使用した。)

$$t = \begin{cases} 1.87 \times 10^6 \text{ sec} , & \#32 \text{ Cy} \\ 1.04 \times 10^6 \text{ sec} , & \#33 \text{ Cy} \end{cases}$$

\* THERMOS コードにより計算

各試料の<sup>10</sup>Bの燃焼度の計算結果を表3.7の第5欄に示す。実際の燃料要素は50MW運転で50日間使用する計画(表1.1参照)であり燃焼度は平均で97%となる。一方今回の照射では平均で70%程度であり、計画した使用条件をカバーしてはいない。ただしスウェリング量はヘリウム生成量に比例するので、<sup>12)</sup>外挿により使用条件でのスウェリング量を求めることができる。

### 3.3.2 照射温度

各熱電対(取付個所については図3.4参照)の温度指示の範囲を表3.8に示す。熱電対#7を温度制御に用いたので、温度変化は5℃と比較的少いが、他は7℃から12℃までの変化がある。

3.2で述べたように、各試料の温度が同じになるよう、発熱率の縦方向分布を考慮して、試料と熱媒体の間のギャップを変えた。しかし温度は、各試料で多少異なったものとなることは避けられない。その理由は、(n, α)反応による発熱率は、照射が進むにつれて熱中性子束が高い中央付近ほど<sup>10</sup>Bの燃焼がより大きいことから、その縦方向分布は変動するからである。

熱媒体中に取付けた熱電対と試料に取付けた熱電対の温度指示の差は試料番号N<sub>1</sub>で30~34℃、M<sub>1</sub>で42~48℃である。従って熱媒体温度と試料間の温度差として、これらの中間値39℃を採用するものとする。また、熱媒体の温度も各変動値の中間値をとり、それに上述の39℃を足した値を試料の照射温度とする。そのようにして求めた照射温度を表3.7の第7欄に示す。いずれの試料の照射温度も、設計目標範囲(110~190℃)内に入っている。

## 3.4 照射後試験

### 3.4.1 スウェリング量の測定

NFI製及びMAPI製試験片について厚さ、幅及び長さ方向の、照射による寸法変化を測定した。それぞれの試験片について、厚さは照射前・後とも15箇所を、幅は照射前は3箇所、照射後は5箇所を測定し、それらの平均値から増加率を求めた。長さ方向については板と平行方向にノギスを当てて測定した。

測定結果を表3.9に示す。

同表に示す通り、照射による厚さの増加はNFI社製試料が0.037mm(ヘリウム生成量 $7.36 \times 10^{20}$ atms/cm<sup>3</sup>)、MAPI社製試料が0.033mm(ヘリウム生成量 $5.09 \times 10^{20}$ atms/cm<sup>3</sup>)であった。実際の使用条件ではヘリウム生成量は $9.3 \times 10^{20}$ atms/cm<sup>3</sup>程度になるが、スウェリング量はヘリウム生成量に比例すると云われている。<sup>12)</sup>それ故、外挿により厚さ増加を求めるとNFI社製試料で0.05mm、MAPI社製試料で0.06mmとなる。

一方、JMTR燃料の場合、許容される厚さ増加は、次に述べる理由により最大0.16mmである。従って両試料ともこの許容厚さ増加量を下まわっており、スウェリングは問題とならない。

JMTRの燃料要素の上部にはパッドが設けてあり、隣りの要素との接触はパッドが受持っている。従って、側板の変形量はパッドの高さを超えない範囲で許容できる。燃料要素のパッド部とそれ以外の外寸は図3.6の通りである。ほう素を含む領域はパッド部を避けた部分となっている。したがって口断面における他要素との間隔は

$$(77.04 - 0.10) - (76.2 + 0.10) = 0.64 \text{ mm}$$

変形の要因としてスウェリング以外に、燃料板の熱膨脹を考える必要がある。

後者として20°C（常温）から220°C（ホットスポット点における最高温度）までの温度上昇を考えると、熱膨脹による変形量は、

$$200 \times 2.47 \times 10^{-5} \times 66.6 \\ = 0.33 \text{ (mm)}$$

但し 200°C：温度上昇

$2.47 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ：熱膨脹率

66.6 mm：燃料板幅

従って、許容されるスウェリングによる厚さ増加は、

$$(0.64 - 0.33) \cdot \frac{1}{2} = 0.16 \text{ mm}$$

スウェリングは核反応によって生成されたヘリウムが媒質内で気泡を形成することによって引き起こる。アルミニウムは高速中性子との反応でヘリウムを発生するが、その量は $^{10}\text{B}$ の核反応によって発生する量に比べ僅少である。従って、スウェリングは芯材中でのみ起こり、被覆材中では起こらない。それ故、芯材のみの厚さ増加率を求めてみると表3.10に示すようである。同表から分かるように、単位体積毎のHe生成量当りのスウェリング率は、NFI社試料とMAPI社製試料で殆んど一致している。

なおスウェリング量を測定する場合の問題点は試験片の表面が腐食し、そのために厚さが変化することがあることである。本試験片は、変質を防止するためにヘリウム雰囲気中で照射した。ただし照射後撮影した表面写真は写真3.1に示すように多少変色していた。この原因は多分ヘリウム中に酸化性のガスが幾らか混入したためと思われる。しかし表面は滑らかであることから判断してスウェリング量への腐食による寸法の変化の影響は僅かであり、無視できると思われる。

### 3.4.2 引張試験

引張試験用試験片の形状は図3.2に示すように、JIS規格に沿ったものである。試験結果を照射前と照射後を対照させて表3.11に示す。同表に示すように、試験温度が両者で異なるので照射の影響を直接比較することは不可能である。

同表からわかるように、機械的強度の変化はNFI社製試料とMAPI社製試料で逆の傾向となっている。すなわち前者は引張強さが約10%増し（照射前の降伏応力の測定値は欠落）、後者は降伏応力と引張強さがともに約10%低下している。

芯材は側板に比べ薄いので、機械的性質は被覆材が受け持っていると考えてよい。被覆材はA6061-T6を用いており、同材の降伏応力の照射および温度依存性の測定例を図3.7(a), (b)に示す<sup>(13), (14)</sup>。降伏強度は、同図(a)では、試料温度が室温の場合に比べ100°Cの場合は約20%低く、かつこの低下割合は高速中性子照射量に関係ないが、同図(b)では逆に約10%上昇している。同図(b)では高速中性子照射量が少いので降伏強度に対する影響は現われていないと思われる。いずれにしても、同図(a)と(b)で降伏強度の、室温から100°C程度までの温度依存性は逆の傾向にある。

さて、今回の試料の高速中性子照射量は $5.1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ )と少いので、機械的



性質に対する照射の影響は現われていないと判断できる。従って表 3.11 の照射前と照射後の機械的性質の変化は温度の差に起因していると云える。前述のように、その変化の傾向が NFI 社製試料と MAPI 社製試料で逆になっていることは、前述の図 3.7 の(a), (b) の例からみてあり得ることと思われる。この傾向の違いは、多分、素材、加工工程および熱処理の相違に起因しているものと思われる。

### 3.4.3 金相試験

金相試験は JMTR 付設のホットラボで行われた。顕微鏡写真撮影のための試料準備工程を図 3.8 に示す。

各試料の照射前および照射後の顕微鏡写真を写真 3.2 (a), (b) および 3.3 (a), (b) に示す。また照射後の芯材および被覆材の密着状況を写真 3.4 (a), (b) に示す。これらの写真からわかるように、クラックの発生や芯材と被覆材の分離は認められない。

写真 3.2 (b) 及び 3.3 (b) をみればわかるようにほう素粒子の周囲にヘリウムガスのボイドの発生が見られる。

比較のために JRR-2 で実施した金相試験結果を写真 3.5 (a), (b) 及び 3.6 (a), (b) に示す。写真 3.5 (b) は  $^{10}\text{B}$  の燃焼度が 22.5% のときの金相であり、ヘリウムボイドはほとんど見られない。写真 3.6 (b) は燃焼度が 47.7% のときの金相であり、このときはほう素粒子の周囲にボイドが見られる。

なお、JMTR 試料ではほう素粒子がほぼ球形なのに対し、JRR-2 試料ではそれが針状となっている理由は、芯材の製造方法の相違による。すなわち JMTR 試料の芯材は 3.1 で述べたように粉末冶金法で製造したのに対し、JRR-2 試料のそれは B-Al 合金とアルミニウムを融解・<sup>16)</sup> 鑄造して製造したもので、ほう素を含む結晶は針状となる。<sup>16)</sup> このように、JMTR 試料の芯材を粉末冶金法で製造した理由は、その方法の方が均一なほう素分布が得られるからである。これに対し JRR-2 が融解・鑄造法によったのは、JRR-2 はほう素を JMTR のように側板にではなく、燃料板の芯材中に添加し、かつ燃料芯材は融解・鑄造法により製造することを計画したからである。<sup>16)</sup>

### 3.5 まとめ

ほう素を燃料要素の側板中に添加している例は多くはなくフランスの OSIRIS 炉 (70 MW) 及び PEGASE 炉 (35 MW) にみられる程度で、他の多くの炉は燃料板の芯材中に添加している。しかし JMTR では側板にほう素を添加する方式の方が利点が多いと判断し、その方式を採用する計画とした。

側板の試作を NFI 社及び MAPI 社に発注した。芯材の製造は両社とも粉末冶金法によったが、ほう素粉末として NFI 社は  $\text{B}_4\text{C}$  を、MAPI 社はほう素単体を用いた。両社製品はともに、有害なドックボーンは見られず、また芯材と被覆材の密着状況も良好であった。

両社の試作側板からそれぞれ各種試験用試料を切り取り、キャプセルに組込んで照射試験及び照射後試験を行った。照射中の試料の温度は 110 から 190°C の範囲に入ること为目标にキャプセ

ルを設計し、照射中は温度制御用試料の温度を約150°Cに保つよう温度制御した。その結果、照射中の各試料の温度は、低い試料で111°C、高い試料で148°Cとなり、目標とした範囲におさまった。

照射後試験としてスウェリング量測定、引張試験及び金相試験を行った。スウェリングによる厚さ増加は0.05～0.06mm（ヘリウム生成量 $9.3 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>）であり、許容量0.16 mmに比べ十分低いので問題ないことを確認できた。引張試験及び金相試験でも何ら異常は発見されず、ほう素添加側板の健全性を確認することができた。

前述のごとく、側板にほう素を添加している炉の例は少なく、さらにスウェリングに関するデータなどの重要なデータの入手は困難であった。それ故、とりあえず全体的な健全性を確認するために、必要最少限の照射及び照射後試験を開始したわけである。スウェリング量及び機械的性質の照射量及び温度依存性など、もっと広範なパラメータのデータをとれば、さらに有効なデータが提供できたはずであるが、今回はそこまでは至らなかった。

表 3.1 試作側板仕様

製作メーカー	NFI	MAPI
外形寸法 (mm)*	4.8×70.6×778	4.8×70.6×778
芯材寸法 (mm)	0.44×57×698	0.56×57×698
芯材組成	B <sub>4</sub> C-Al	B-Al
天然ほう素含有量	1.50	1.32
ほう素含有率 (w/o)	3.2	2.2
<sup>10</sup> B量** (g)	0.278	0.244
単位体積当り <sup>10</sup> B量 (g/cm <sup>3</sup> )	0.0159	0.0110

\* 公称値

\*\* 天然における <sup>10</sup>B の存在率 18.5%

表 3.2 側板引張り試験結果

メーカー	試験片番号	試験片寸法			引張り性質			
		幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	破断位置
NFI	G-1	—	—	122.35	—	16.71	20.4	A
	G-2	—	—	122.32	—	16.84	20.6	B
	(平均)	—	—	122.34	—	16.78	20.5	—
MAPI	M-1	24.89	4.92	122.46	22.1	25.4	16.2	A
	M-2	24.92	4.92	122.60	21.3	25.0	14.6	B
	(平均)	24.91	4.92	122.53	21.7	25.2	15.4	—

注 1) 降伏応力は 0.2%耐力とする。

2) 試験片は JIS Z 2201 5号。

表 3.3 ほう素分散の均一性検査結果

メーカー	採取数	均 一 性			
		平均濃度 (%)	最大濃度 (%)	最小濃度 (%)	平均値よりの偏差 (%)
NFI	5	0.27	0.28	0.26	± 4
MAPI	5	2.2	2.4	2.1	+ 14 - 5

注) 均一性検査の際のサンプルの採取は、NFI社は試作した側板の縦方向に適当に隔った位置より行い、MAPI社はほう素とアルミニウムの混合粉から行った。

表 3.4 側板切断検査記録

a) NFI 社製

単位：mm

	規 格 値	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5
ミート厚さ最大値	0.60 以下 端部 0.90 以下	0.42	0.45	0.50	0.45	0.40
(A) 被覆厚さ最小値	3.50 以上 端部 3.33 以上	3.94	3.82	3.92	3.85	3.95
(B) 被覆厚さ最小値	0.50 以上 端部 0.35 以上	0.55	0.50	0.50	0.50	0.55
ほう素添加 アルミニウム板厚さ	4.8 ± 0.2	4.9	4.8	4.9	4.8	4.9

端部ではミート端部より 35mm 以内の範囲を言う。

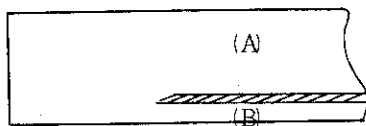
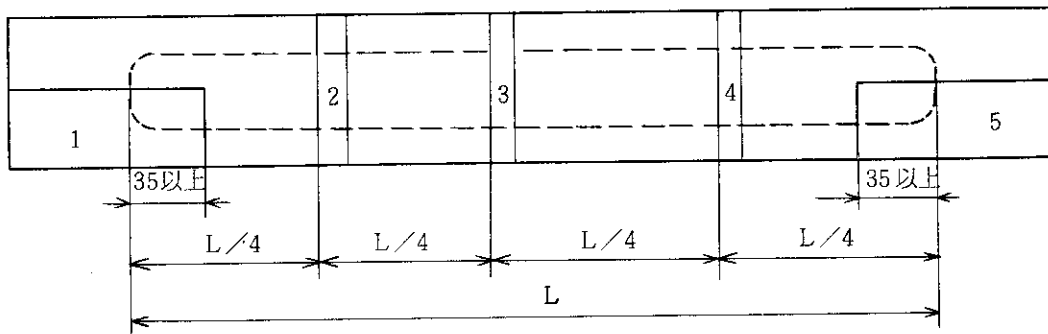
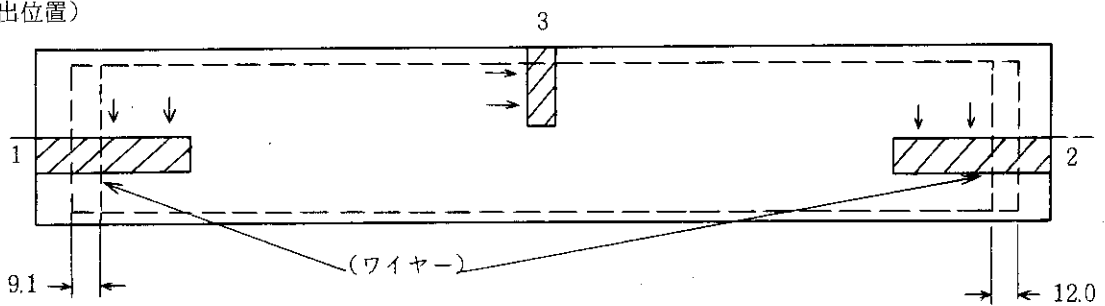


表 3.4 側板切断検査記録 (続き)

b) MAPI 社製

試料 No.	規格 (mm)	測定位置 (mm)	芯端より					
			5	10	15	20	25	30
端部 1	A	$\geq 0.5$	1.33	1.25	1.15	1.13	1.11	1.10
	B	(芯材厚)	0.27	0.35	0.39	0.41	0.40	0.42
	C	$\leq 2.27$	1.60	1.60	1.54	1.54	1.51	1.52
	D	(板厚)	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93
2	A	$\geq 0.5$	1.13	1.08	1.14	1.13	1.20	1.20
	B	(芯材厚)	0.28	0.44	0.55	0.62	0.60	0.65
	C	$\leq 2.27$	1.41	1.52	1.69	1.75	1.80	1.85
	D	(板厚)	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93
側部 3	A	$\geq 0.5$	1.11	1.06	1.08	1.09	1.08	
	B	(芯材厚)	0.61	0.65	0.61	0.67	0.68	
	C	$\leq 2.27$	1.72	1.71	1.69	1.76	1.76	
	D	(板厚)	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	

(切出位置)



(測定箇所)

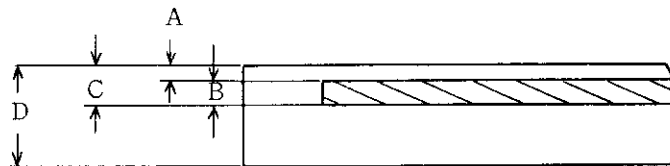


表 3.5 側板の寸法検査結果

a) NFI 社製

単位：mm

測定位置 規格 番号	778±1.0	48±0.2			2.5±0.2		70.6±0.2		
	L	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
1PG	778.1	4.9	4.9	4.9	2.4	2.4	70.6	70.7	70.7
2PG	778.1	4.9	4.9	4.9	2.3	2.3	70.6	70.6	70.6

b) MAPI 社製

単位：mm

検査項目	規格	検査結果			
		平均	最大	最小	範囲
板厚 (T)	4.8 ± 0.2	4.78	4.79	4.76	0.03
巾 (W)	70.6 ± 0.2	70.74	70.76	70.71	0.05
巾 (A)	2.5 ± 0.2	2.5	2.6	2.4	0.2
長さ (L)	778 ± 1.0	778.5	778.5	778.5	0

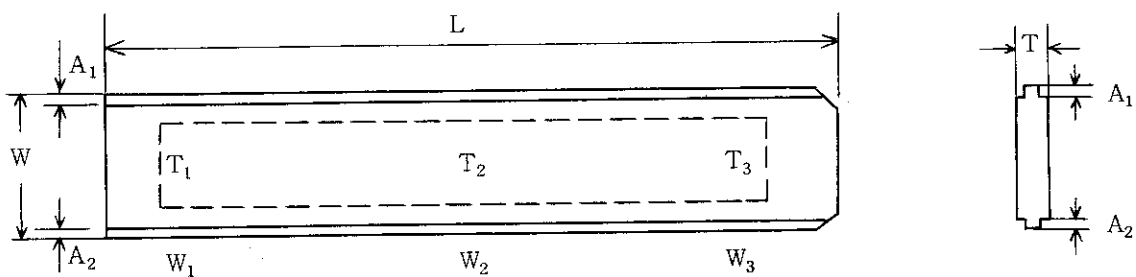
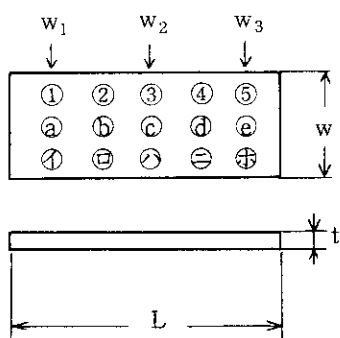


表 3.6 照射試験片寸法検査結果

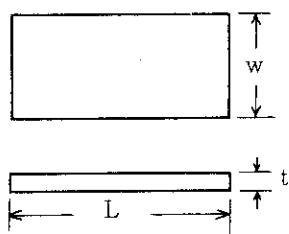
a) 寸法測定試験片



	N <sub>5</sub>			M <sub>2</sub>		
t	①	②	③	①	②	③
	④	⑤	⑥	④	⑤	⑥
	⑦	⑧	⑨	⑦	⑧	⑨
	⑩	⑪	⑫	⑩	⑪	⑫
	⑬	⑭	⑮	⑬	⑭	⑮
W	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
L	64.0			63.65		

t : マイクロメータ W : マイクロメータ L : ノギス

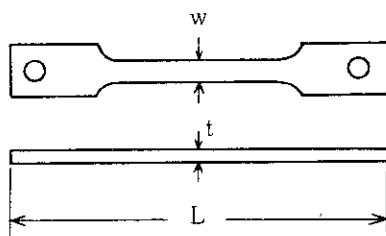
b) 温度制御用試料



	N <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>
L	40.01	39.95
W	25.01	25.01
t	4.95	4.85

L, W, t : ノギス

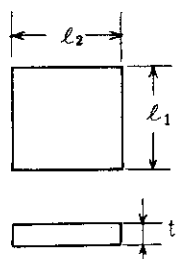
c) 引張試験片



	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>
L	80.0	80.0	80.0	80.0
W	3.915	3.76	4.03	4.035
t	2.92	2.93	3.02	3.035
G. L がない				

L : ノギス W, t : マイクロメータ

d) 金相試験片



	N <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
l <sub>1</sub>	10.0	10.0	10.0
l <sub>2</sub>	10.01	10.0	10.0
t	4.95	4.80	4.85

l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub>, t : ノギス

表 3.7 各試料の照射条件

試料 番号	照射目的	熱中性子束 ( $\times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ )		$^{10}\text{B}$ 燃焼率 (%)	He 生成量 ( $\times 10^{20} \text{atms/cm}^3$ )	照射温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
		#32 Cy	#33 Cy			
N <sub>1</sub>	温度制御	1.20	1.15	63	6.02	111
N <sub>2</sub>	引張試験	1.52	1.45	72	6.88	128
N <sub>3</sub>	引張試験	1.52	1.45	72	6.88	128
N <sub>4</sub>	金相試験	1.68	1.61	75	7.17	134
N <sub>5</sub>	寸法測定	1.77	1.70	77	7.36	133
M <sub>1</sub>	温度制御	1.87	1.77	79	5.22	148
M <sub>2</sub>	寸法測定	1.78	1.71	77	5.09	140
M <sub>3</sub>	金相試験	1.70	1.63	76	5.03	133
M <sub>4</sub>	金相試験	1.70	1.63	76	5.03	133
M <sub>5</sub>	引張試験	1.55	1.49	72	4.76	127
M <sub>6</sub>	引張試験	1.55	1.49	72	4.76	127

注 Ni (i = 1 ~ 5) NFI 社製試料  
 Mi (i = 1 ~ 6) MAPI 社製試料

表 3.8 熱電対温度指示値

熱電対番号	試料番号	温度指示( $^{\circ}\text{C}$ )	中間値( $^{\circ}\text{C}$ )
1	N <sub>1</sub>	107~114	111
2	N <sub>1</sub>	73~84	79
3	N <sub>2</sub> , N <sub>3</sub>	85~93	89
4	N <sub>4</sub>	90~100	95
5	N <sub>5</sub>	88~100	94
6	M <sub>2</sub>	95~107	101
7	M <sub>1</sub>	145~150	148
8	M <sub>1</sub>	97~108	103
9	M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	90~97	94
10	M <sub>5</sub> , M <sub>6</sub>	82~93	88



表 3.9 スウェリング量測定結果

項目	試験片	照射前寸法	照射後寸法	増加率 (%)
	メーカー	(mm)	増加量 (mm)	
厚さ	NFI	4.910	0.037	0.75
	MAPI	4.642	0.033	0.71
幅	NFI	25.007	0.093	0.37
	MAPI	24.997	0.083	0.33
長さ	NFI	64.00	0.20	0.31
	MAPI	63.65	0.20	0.31

表 3.10 芯材の厚さ方向スウェリング率

試験片 メーカー	照射中温度 (°C)	He 生成量 (atms/cm <sup>3</sup> )	照射前厚さ (mm)	厚さ増加量 (mm)	厚さ増加率 (%)	He 生成量当りの 増加率 (%/atms/cm <sup>3</sup> )
NFI	133	$7.36 \times 10^{20}$	0.44	0.037	8.4	$1.14 \times 10^{-20}$
MAPI	140	$5.09 \times 10^{20}$	0.56	0.033	5.9	$1.16 \times 10^{-20}$

表 3.11 照射による機械的性質の変化

試験片 メーカー	照射前				照射後			
	試験温度 (°C)	降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	試験温度 (°C)	降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
NFI	室温	—	16.8	20.5	100	16.5	18.7	12.4
MAPI	室温	21.7	25.2	15.4	100	19.9	21.9	5.2

注 i) データはそれぞれ 2 回測定した値の平均を示す。

ii) 高速中性子照射量 ( $E > 1 \text{ MeV}$ )  $5.1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

iii) クロスヘッドの速度  $0.2 \text{ mm/min}$



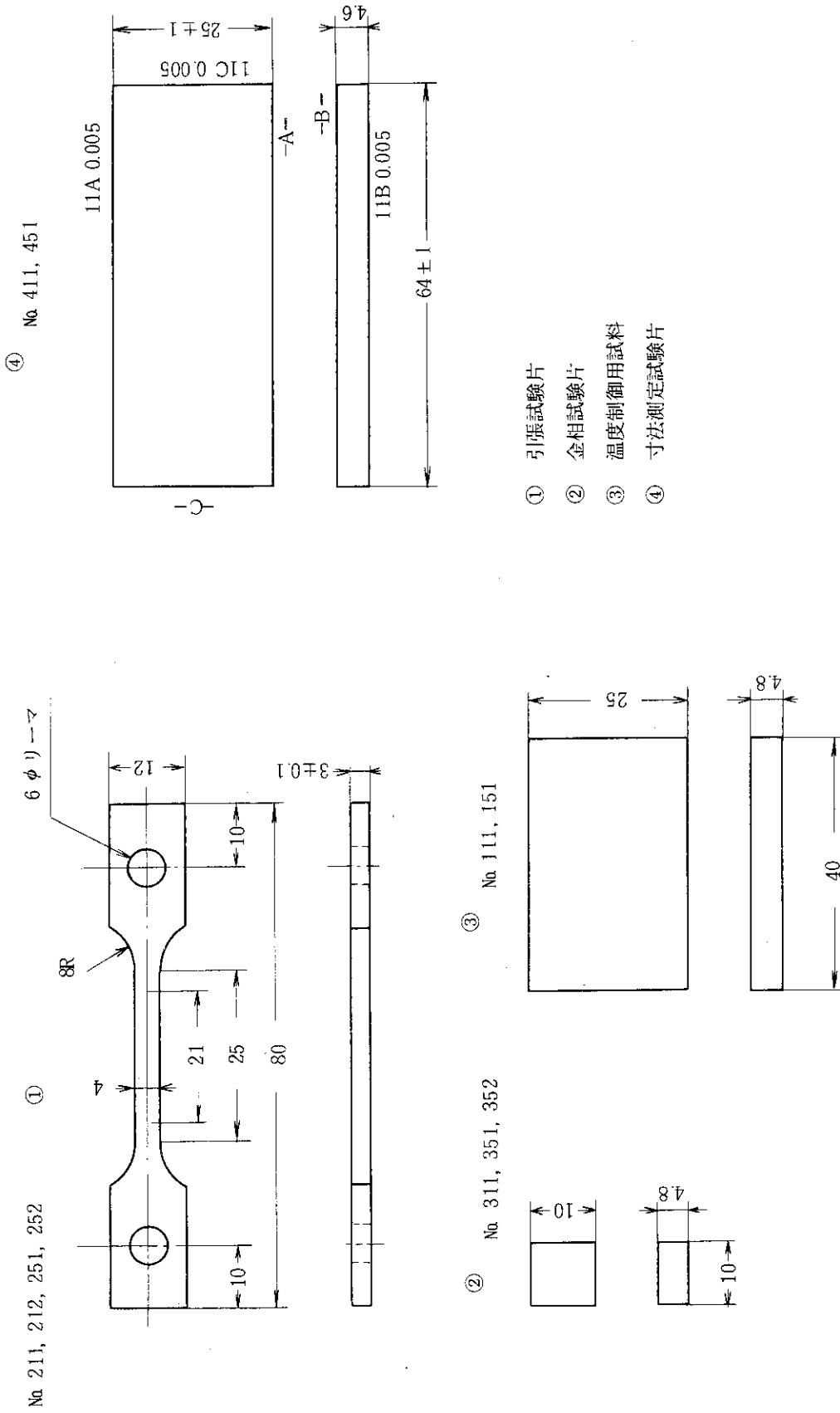
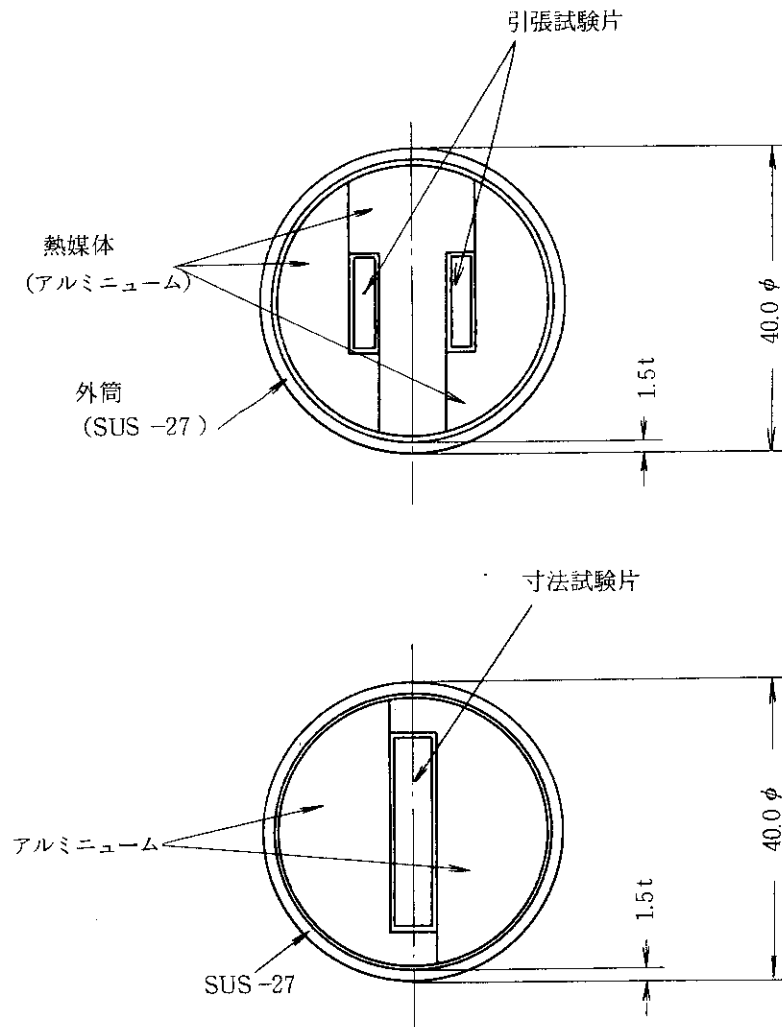


図 3.2 照射試験片形状



各ギャップは 0.1~0.2 mm 程度と想定している。

図 3.3 キャプセル断面略図

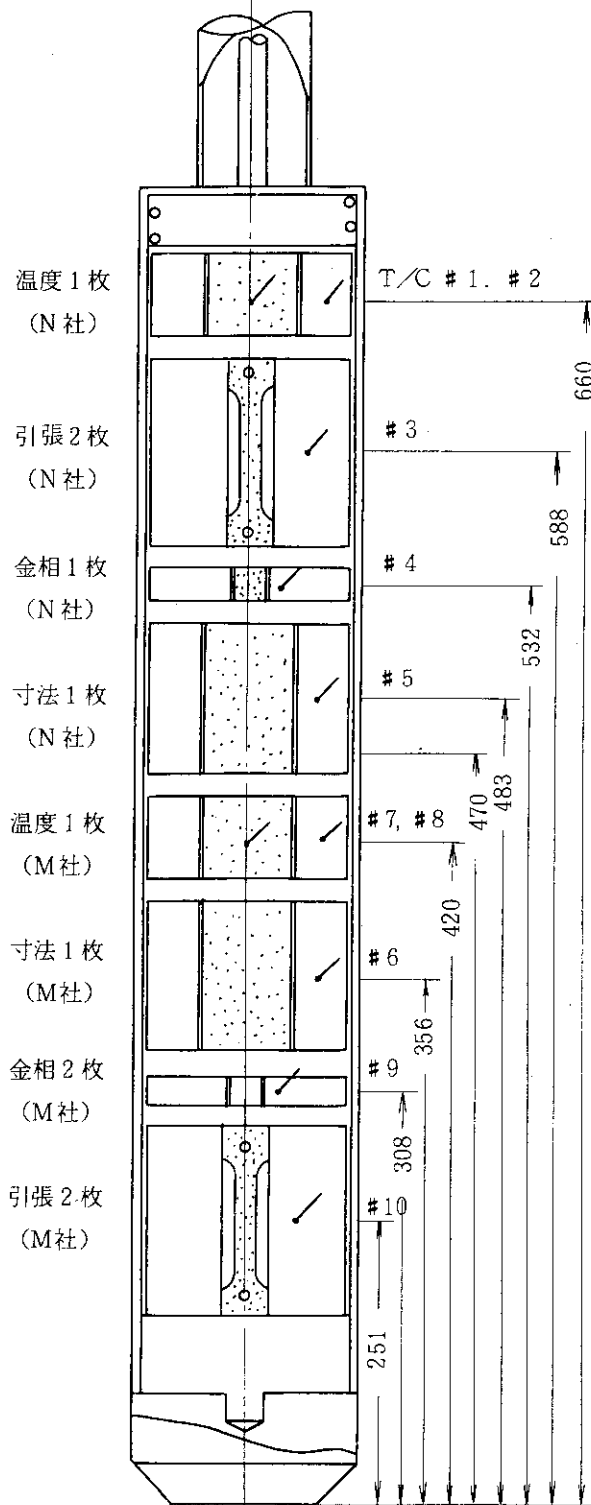


図 3.4 キャプセル形状

N社 : NFI社製

M社 : MAPI社製

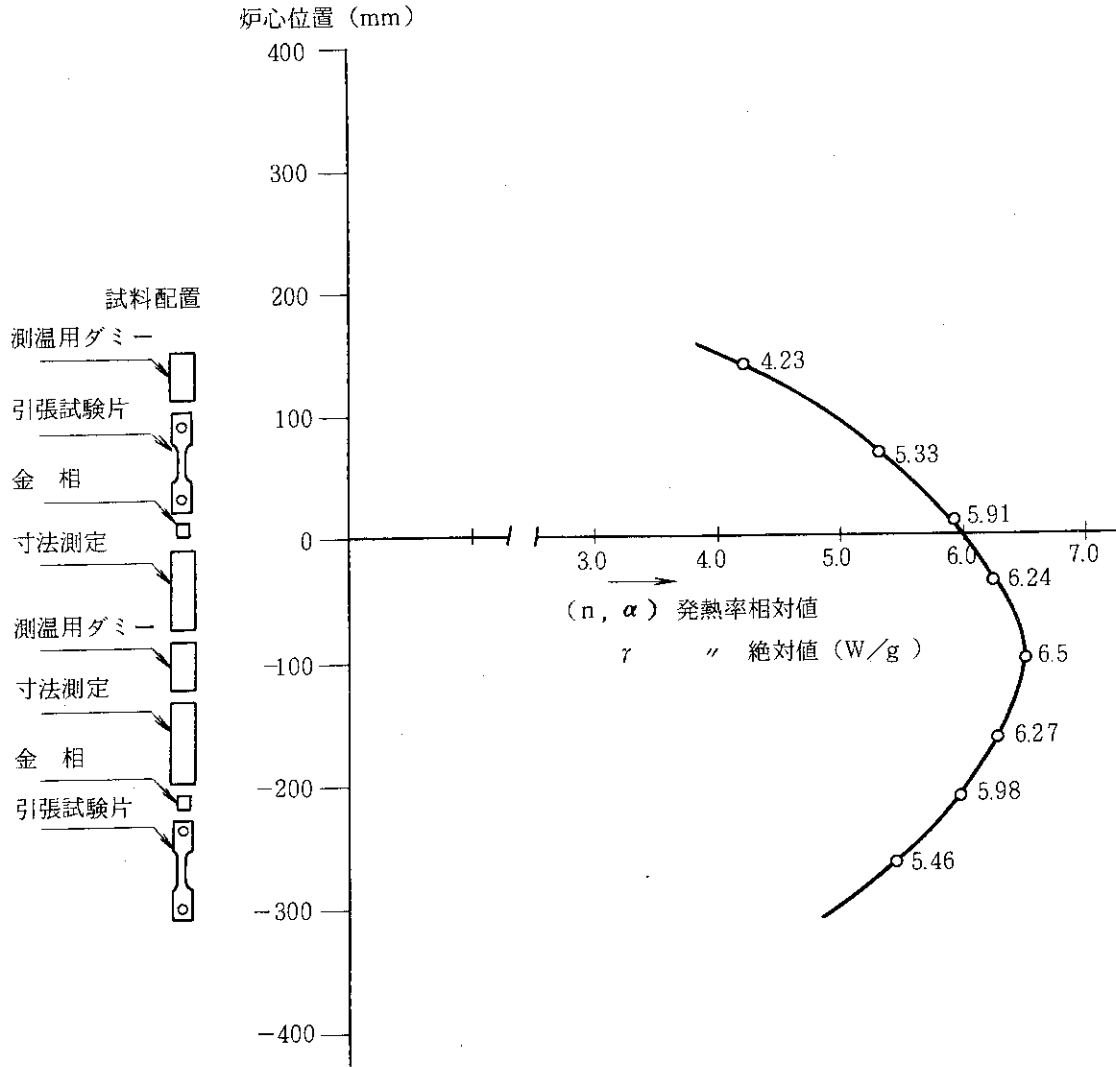


図 3.5 ( $n, \alpha$ ) 反応, ガンマ線による発熱率分布

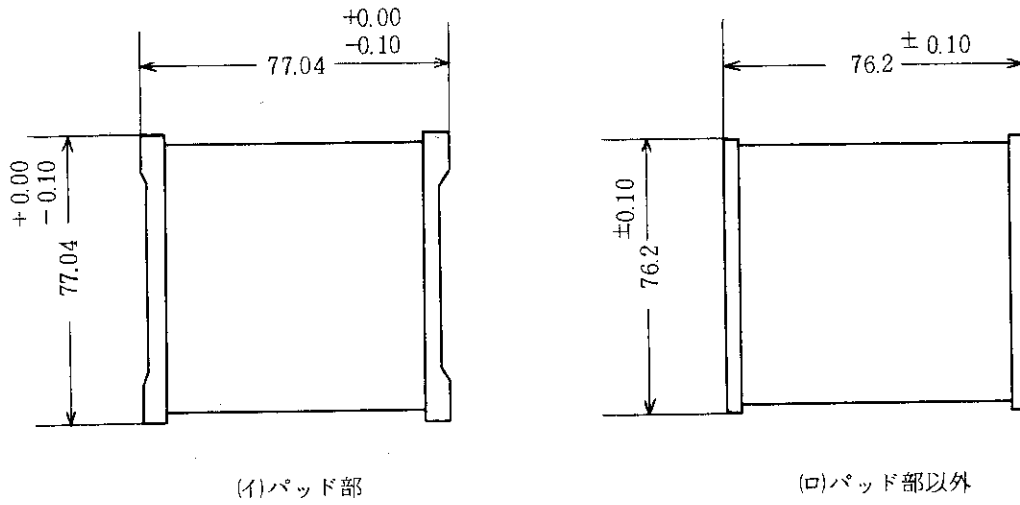


図 3.6 JMTR 燃料要素外寸

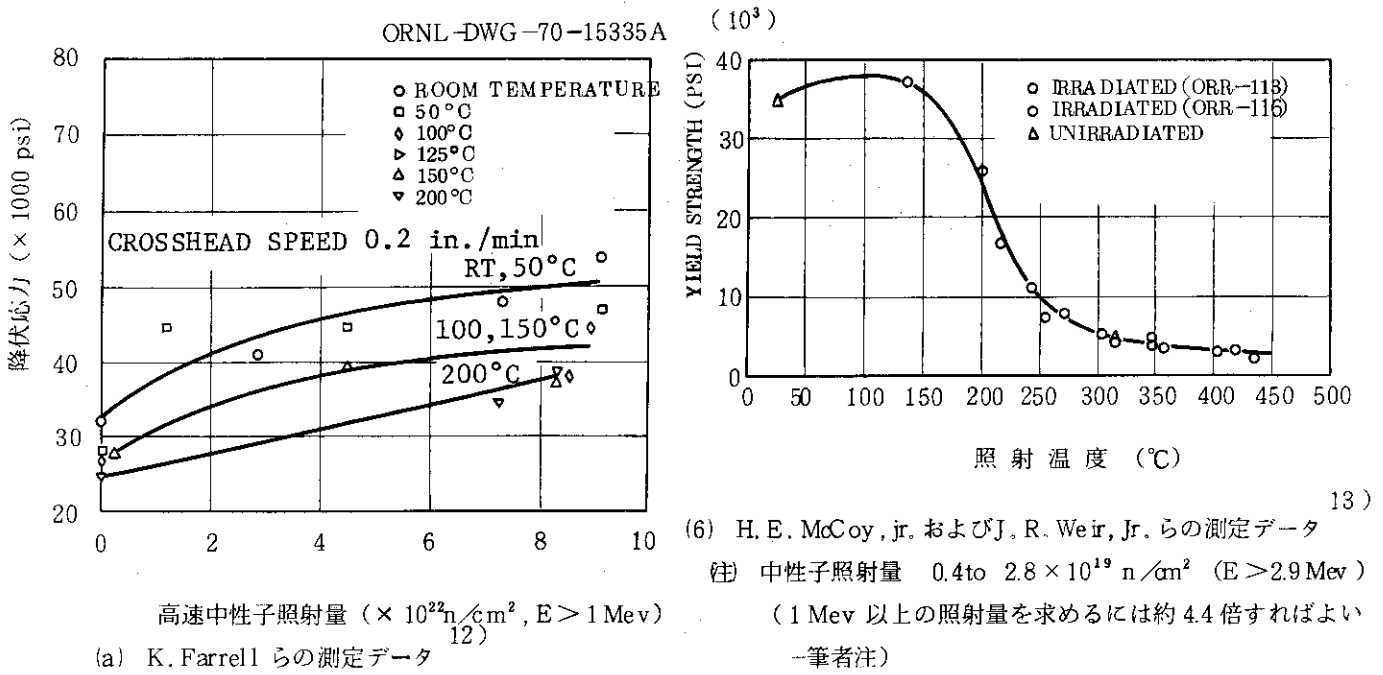


図 3.7 A6061-T6 材の降伏強度の変化

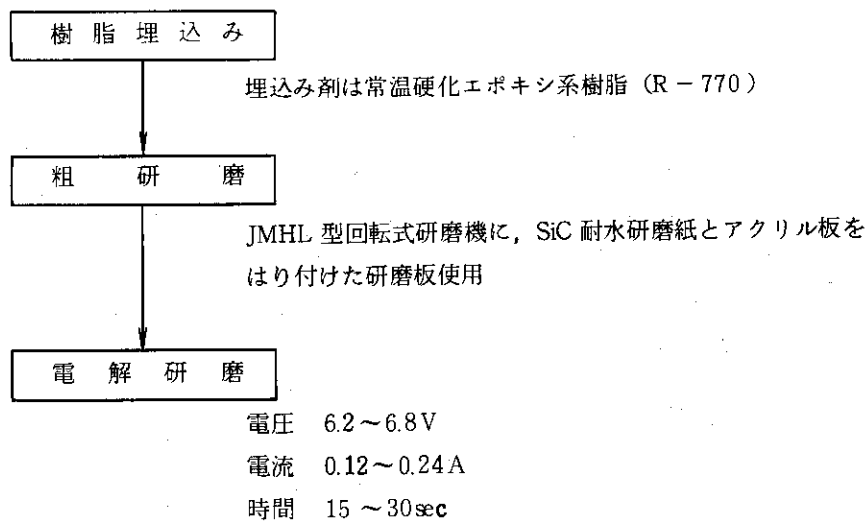
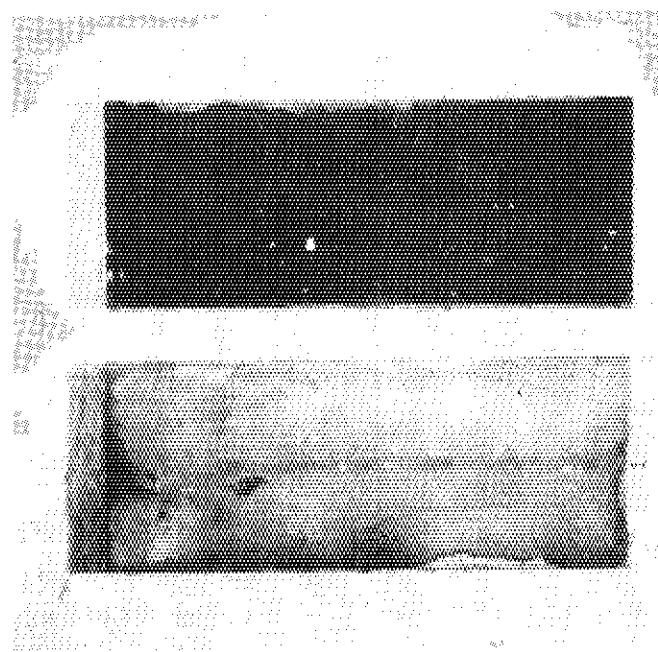


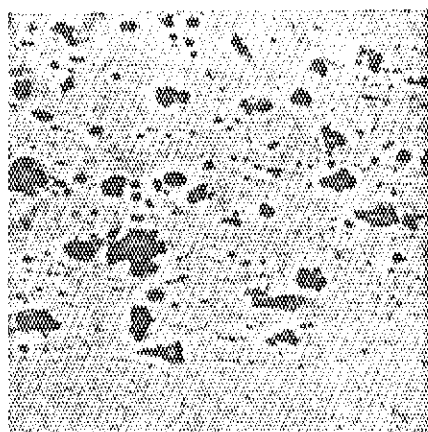
図 3.8 顕微鏡写真用試料の準備 (15)



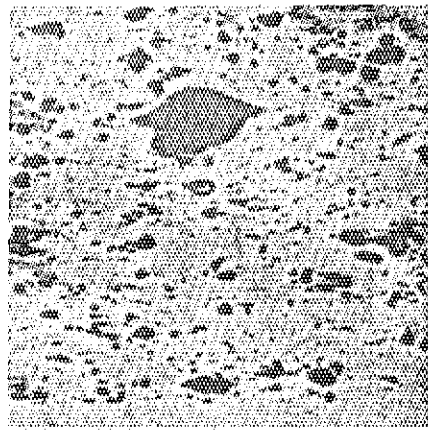
上：NFI社製試料  
下：MAPI社製試料

10 mm

写真 3.1 スウエリング量測定用試料照射後表面写真



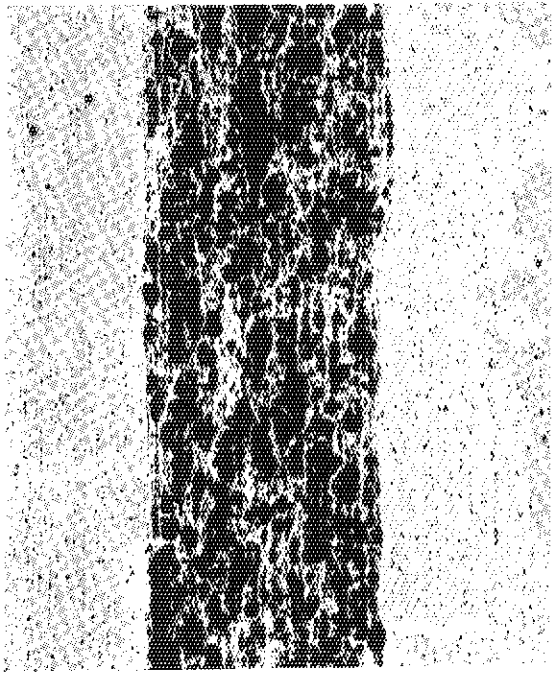
(a) NFI社製試料



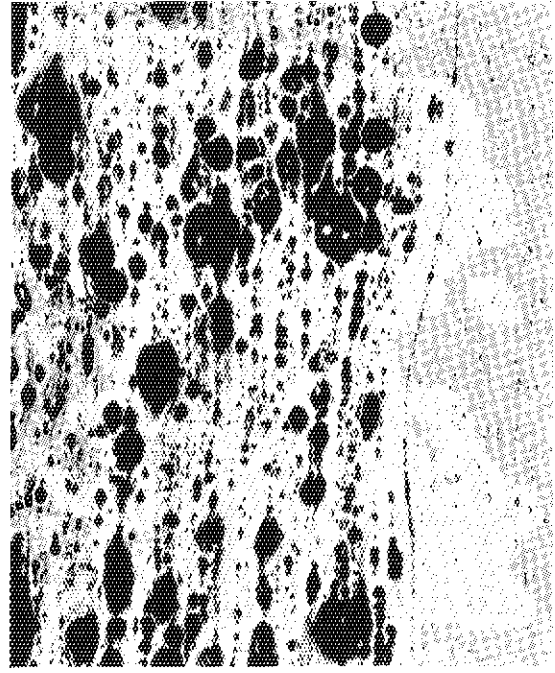
(b) MAPI社製試料

写真 3.2 ほう素添加板の金相（未照射）



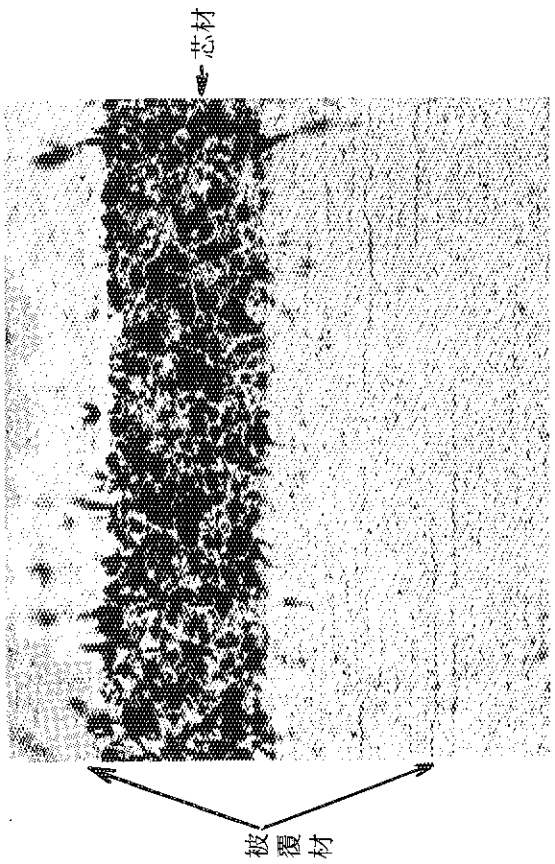


(a)

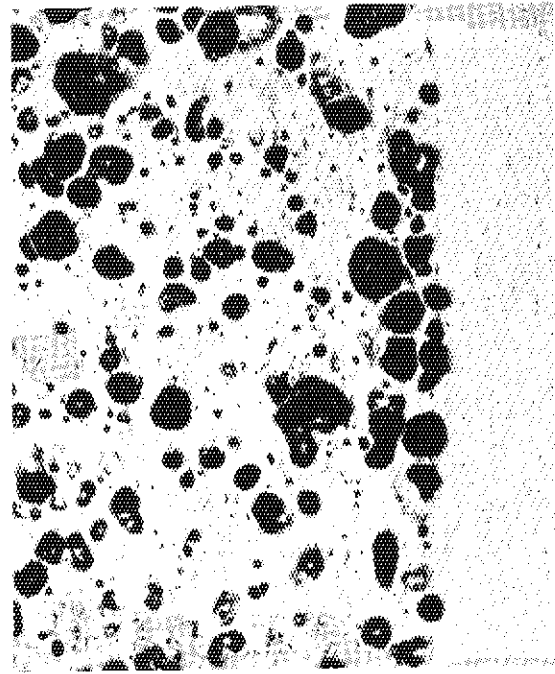


(b)

写真 3.4 MAPI 社製ほう素添加板の金相 (照射後)



(a)



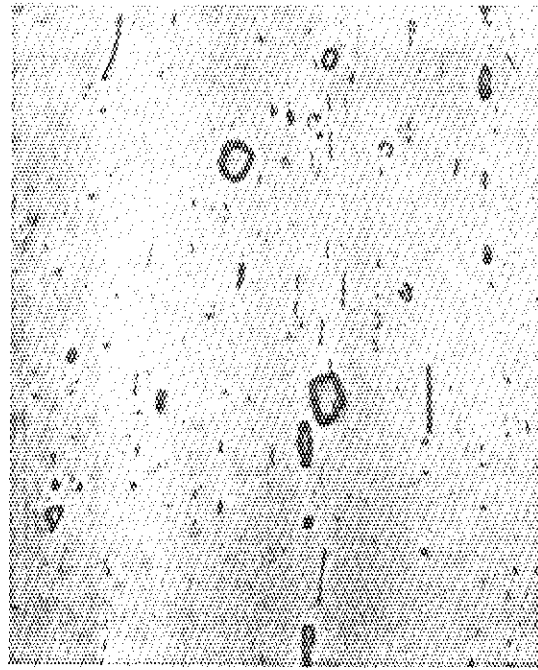
(b)

写真 3.3 NFI 社製ほう素添加板の金相 (照射後)



(a) 照射前

25 μm



(b) 照射後

25 μm

写真 3.6 JRR-2 でのほう素添加板の金相<sup>16)</sup>  
(ほう素含有率 0.33 w/o BU 47.7%)



(a) 照射前

25 μm



(b) 照射後

25 μm

写真 3.5 JRR-2 でのほう素添加板の金相<sup>16)</sup>  
(ほう素含有率 1.09 w/o, BU 22.5%)

#### 4. あとがき

燃料板及び側板の試作，照射並びに照射後試験の結果は2.6及び3.5「まとめ」で述べているように，何ら問題点は見つからず，健全性が確認できた。この後燃料要素の試作及び照射を行う予定であったが，BPFの使用計画が1.2で述べた理由により延期されたためにそれらは実施されなかった。

BPFを使用することは種々の利点をもたらすので，JMTRではその使用計画を完全に止めたというわけではなく，将来使用する可能性を有している。また現在開発がすすめられている濃縮度低減化燃料はやはり粉末冶金法により製作される。それ故，これまでの開発経験はそれらの際役立つはずである。

#### 謝 辞

BPFの燃料板及び側板の発注仕様の作成は大久保実氏（現JT-60第2開発室），試験片照射用キャプセルの設計は竹下功氏（現安全工学第1研究室）及び斉藤隆氏（照射第1課），燃料板の照射中の温度を推定するための熱計算は桜井文雄氏，また照射後試験は当部ホットラボ課の方方により行われたものであり，これらの方々に感謝致します。

さらにBPF計画は，八剣達雄部長（前大洗研究所長）の有益な指導のもとにすすめられたことを記し，感謝の意を表します。

#### 4. あとがき

燃料板及び側板の試作、照射並びに照射後試験の結果は2.6及び3.5「まとめ」で述べているように、何ら問題点は見つからず、健全性が確認できた。この後燃料要素の試作及び照射を行う予定であったが、BPFの使用計画が1.2で述べた理由により延期されたためにそれらは実施されなかった。

BPFを使用することは種々の利点をもたらすので、JMTRではその使用計画を完全に止めたというわけではなく、将来使用する可能性を有している。また現在開発がすすめられている濃縮度低減化燃料はやはり粉末冶金法により製作される。それ故、これまでの開発経験はそれらの際役立つはずである。

#### 謝 辞

BPFの燃料板及び側板の発注仕様の作成は大久保実氏（現JT-60第2開発室）、試験片照射用キャプセルの設計は竹下功氏（現安全工学第1研究室）及び斉藤隆氏（照射第1課）、燃料板の照射中の温度を推定するための熱計算は桜井文雄氏、また照射後試験は当部ホットラボ課の方方により行われたものであり、これらの方々に感謝致します。

さらにBPF計画は、八剣達雄部長（前大洗研究所長）の有益な指導のもとにすすめられたことを記し、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 第3期炉心ワーキンググループ (小山田六郎ほか); 私信 (JMTR 第3期炉心検討).
- 2) G.W. Gibson, "The Development of Powdered Uranium-Aluminide Compounds for use as Nuclear Reactor Fuels", U.S. Atomic Energy Commission Research and Development Report, IN-1133 (December 1967).
- 3) S. Nazare, G. Ondracek and F. Thümmber, "Investigations on  $UAl_x$ -Al Dispersion Fuel for High-Flux Reactors", Journal of Nucl. Mat., 56 (1975).
- 4) 小山田六郎, 「JMTR 燃料計量管理コード: JFM」, JAERI-memo4270 (公開) (1970年12月).
- 5) M.M. Martin, A.E. Richt, and W.R. Martin, "Irradiation Behavior of Aluminum-Base Fuel Dispersions", ORNL-4856 (May 1973).
- 6) M. Kawasaki, and S. Nomura et al. "Corrosion of Aluminum in Water", JAERI-1035 (March 1963).
- 7) J.L. English, L. Rice, and J.C. Griess, "The Corrosion of Aluminum Alloys in High-Velocity Water at 170 to 290 °C", ORNL-3063 (1961).
- 8) J.C. Griess, H.C. Savage, and J.L. English, "Effect of heat flux on the corrosion of Aluminum by water. Part IV. Tests relative to the Advanced test reactor and correlation with previous results", ORNL-3541.
- 9) 木崎実, 大内正博他; 私信 (JMTR 可燃性毒物入燃料 (金相試験)).
- 10) W. Dienst, S. Nazare, and F. Thümmler, "Irradiation Behaviour of  $UAl_x$ -Al Dispersion Fuel for Thermal High Flux Reactors", J. of Nucl. Mat., 64 (1977).
- 11) 大久保実, 除村能郎; 私信 (JMTR 可燃性毒物入燃料).
- 12) R.S. Barnes, "A Theory of Swelling and Gas Release for Reactor Materials", J. of Nucl. Mat., 11, 2, 135-148 (1964).
- 13) K. Farrel, R.T. King, and A. Jostsons, "Examination of the Irradiated 6061 Aluminum HFIR Target Holder", ORNL-TM-4139 (May 1973).
- 14) H.E. McCoy, Jr. and J.R. Weir, Jr., "Influence of Irradiation on the Tensile Properties of the Aluminum Alloy 6061", Nucl. Sci. & Eng., 25, 319-327 (1966).
- 15) 材料試験炉部ホットラボ課; 私信 (照射後試験報告書).
- 16) 島敬二郎, 小早川透, 西沢敏; 私信 (JRR-2 ほう素添加燃料の試作と使用試験).