

JAERI-M
8924

被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験 (1)
(JRR-2VT-1孔によるVP-1, VP-2,
VP-4キャプセル照射)

1980年7月

岩本 多実・飛田 勉・菊池 輝男・菊地 章

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.

被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験(1)
(JRR-2 VT-1孔によるVP-1, VP-2,
VP-4 キャプセル照射)

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部
岩本多実・飛田 勉・菊池輝男・菊地 章⁺

(1980年5月31日受理)

被覆粒子燃料コンパクトを、昭和46年～48年に、JRR-2のVT-1孔で3本のキャプセルにより照射した結果をまとめたものである。コンパクト試料は、UC₂核被覆粒子又はUO₂核被覆粒子を2種類の黒鉛粉末(針状黒鉛粉末、等方質黒鉛粉末)に分散させ、バインダー添加量を10、20パーセントと変えて試作した国産初のものである。照射は温度950-1500℃で240-290時間行ない、燃焼度は6400-7500MWD/Tであった。コンパクトの寸法収縮は、0.2-0.5パーセントでバインダー添加量の差は見られなかった。顕微鏡観察から被覆層の劣化が見られたが、被覆破損までには至らなかった。また、酸浸出試験でも照射前と比較して粒子の損傷は認められなかった。

+) 安全工学部

Irradiation Tests of Coated-particle Fuel Compacts (1)
(Irradiation Results by VP-1, VP-2 and VP-4 Capsules in JRR-2
VT-1 Facility.)

Kazumi IWAMOTO, Tsutomu TOBITA, Teruo KIKUCHI and Akira KIKUCHI⁺
Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment,
JAERI

(Received May 31, 1980)

Coated-particle fuel compacts, first fabricated in the country, were irradiated by three capsules in the VT-1 irradiation hole of JRR-2 in the duration from 1971 to 1973. The TRISO-coated particles with UC₂ or UO₂ kernels were dispersed by compaction in two kinds of graphite fluor, namely needle and isotropic graphites, by adding 10 and 20 % of organic binder. Dimensions are 10.5 mm in outer diam., 2.0 mm in inner diam. and 15.0 mm long. Irradiation temperatures were in the range from 950° to 1500°C, period from 240 to 290 hrs and burnups from 6400 to 7500 MWD/T.

The results of postirradiation examinations first conducted for the compacts in the country are as follows: Dimensional shrinkages were in the range from 0.2 to 0.5 % and no distinct difference was observed for the binder content. Some coating layers were seen to be deteriorated, but no coating failure was seen. Nitric acid leach confirmed no occurrence of coating failure.

Key Word; HTR, Irradiation Behavior, Coated Fuel Particle, Fuel Compact,
JRR-2 Reactor, Capsule, Irradiation Examination

⁺) Div. of Reactor Safety, Tokai, JAERI

目 次

| | |
|-------------------------------------|---|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 照射試験 | 1 |
| 2.1 VT-1孔用キャプセルVP-1, VP-2およびVP-4の構造 | 1 |
| 2.2 照射試料 | 1 |
| (1) VP-1キャプセル用試料 | 1 |
| (2) VP-2, VP-4キャプセル用試料 | 2 |
| 2.3 照射条件 | 3 |
| (1) VP-1キャプセル | 3 |
| (2) VP-2, VP-4キャプセル | 3 |
| 3. 照射後試験 | 3 |
| 3.1 試験方法 | 3 |
| 3.2 外観検査 | 4 |
| 3.3 寸法測定 | 4 |
| 3.4 金相試験 | 5 |
| 3.5 酸浸出試験 | 6 |
| 4. まとめ | 7 |

Contents

| | | |
|-----|---|---|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Experiment description | 1 |
| 2.1 | VP-1,VP-2 and VP-4 capsules description | 1 |
| 2.2 | Irradiation samples | 1 |
| (1) | Sample for VP-1 capsule..... | 1 |
| (2) | Sample for VP-2 and VP-4 capsules..... | 2 |
| 2.3 | Irradiation condition | 3 |
| (1) | VP-1 capsule | 3 |
| (2) | VP-2 and VP-4 capsule | 3 |
| 3 | Post irradiation examination | 3 |
| 3.1 | Method of PIE | 3 |
| 3.2 | Visual examination | 4 |
| 3.3 | Dimensional change | 4 |
| 3.4 | Metallography..... | 5 |
| 3.5 | Acid leaching test | 6 |
| 4 | Conclusion..... | 7 |

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉の研究が昭和44年に原研で採り上げられ、同年から同炉用の被覆粒子燃料の開発を目指した試験研究が開始された。それ以来国内メーカーが試作した燃料試料を原研に持込み、炉内外の評価試験を行い、その結果を試作に反映し、燃料製造技術の改良ならびに燃料仕様の修正を計るという方法で研究を進めて来ている。

原子炉による照射研究はJRR-2の利用からまず着手した。被覆粒子に対して2基のホール照射装置EFTL-2およびHWL-1によるキャプセル照射試験¹⁾を45年-47年に行い、ついでJRR-2のVT-1孔²⁾およびインコア照射孔によるキャプセル照射を46年-48年に行った。その後、JRR-2は改修工事に入ったので照射試験を中断していたが、51年からキャプセル照射を再開している。

本報告はJRR-2改修前の昭和46年から48年の間にJRR-2のVT-1照射孔で照射したキャプセル²⁾のうちVP-1, VP-2, VP-4と命名した3本の燃料コンパクト用キャプセルに入れた試料の照射結果について記述している。

2. 照射試験

2.1 VT-1孔用キャプセルVP-1, VP-2 およびVP-4の構造

VT-1孔用キャプセルの基本構造はすべて同一であり、タンタル内筒外径24mm, 内径22mm 内に試料を封じ込め、内筒の外側にアルミニウム熱媒体をおき、さらにフィン付きのアルミニウム外筒内径52mm, 外径60mm, フィン外径95.5mm で密封する構造である。

燃料コンパクトの照射はVP-1, VP-2, VP-4 と命名した3本のキャプセルで行った。これらのキャプセルの外観写真をFig. 1に示す。このキャプセルはFig. 2に示すようにタンタル内筒内に黒鉛ホルダーに収めた外径10.5mm, 内径2mm の燃料コンパクトが入っている。温度測定は熱電対によって行っており、コンパクト中心温度はTC1, 黒鉛ホルダー温度はTC2のそれぞれ外径1.6mm のタンタル被覆, BeO 絶縁, W-5Re/W-26Re により、またアルミニウム熱媒体の温度はTC3-TC8のCA熱電対(外径1.6mm, SUS 被覆, MgO 絶縁)によって測定している。

2.2 照射試料

(1) VP-1キャプセル用試料

VP-1キャプセルは、VT-1孔照射の最初のキャプセルであり、燃料コンパクトの高温照射キャプセルの開発を目指したものであった。当時、コンパクトは国産されていなかったため、筆者等による調製から着手した。製法をFig. 3(a)に示す。当時コンパクトの製法が明らか

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉の研究が昭和44年に原研で採り上げられ、同年から同炉用の被覆粒子燃料の開発を目指した試験研究が開始された。それ以来国内メーカーが試作した燃料試料を原研に持込み、炉内外の評価試験を行い、その結果を試作に反映し、燃料製造技術の改良ならびに燃料仕様の修正を計るという方法で研究を進めて来ている。

原子炉による照射研究はJRR-2の利用からまず着手した。被覆粒子に対して2基の水ループ照射装置EFTL-2およびHWL-1によるキャプセル照射試験¹⁾を45年-47年に行い、ついでJRR-2のVT-1孔²⁾およびインコア照射孔によるキャプセル照射を46年-48年に行った。その後、JRR-2は改修工事に入ったので照射試験を中断していたが、51年からキャプセル照射を再開している。

本報告はJRR-2改修前の昭和46年から48年の間にJRR-2のVT-1照射孔で照射したキャプセル²⁾のうちVP-1, VP-2, VP-4と命名した3本の燃料コンパクト用キャプセルに入れた試料の照射結果について記述している。

2. 照射試験

2.1 VT-1孔用キャプセルVP-1, VP-2 およびVP-4の構造

VT-1孔用キャプセルの基本構造はすべて同一であり、タンタル内筒外径24mm, 内径22mm 内に試料を封じ込め、内筒の外側にアルミニウム熱媒体をおき、さらにフィン付きのアルミニウム外筒内径52mm, 外径60mm, フィン外径95.5mm で密封する構造である。

燃料コンパクトの照射はVP-1, VP-2, VP-4 と命名した3本のキャプセルで行った。これらのキャプセルの外観写真をFig. 1に示す。このキャプセルはFig. 2に示すようにタンタル内筒内に黒鉛ホルダーに収めた外径10.5mm, 内径2mm の燃料コンパクトが入っている。温度測定は熱電対によって行っており、コンパクト中心温度はTC1, 黒鉛ホルダー温度はTC2のそれぞれ外径1.6mm のタンタル被覆, BeO 絶縁, W-5Re/W-26Re により、またアルミニウム熱媒体の温度はTC3-TC8のCA熱電対(外径1.6mm, SUS 被覆, MgO 絶縁)によって測定している。

2.2 照射試料

(1) VP-1キャプセル用試料

VP-1キャプセルは、VT-1孔照射の最初のキャプセルであり、燃料コンパクトの高温照射キャプセルの開発を目指したものであった。当時、コンパクトは国産されていなかったため、筆者等による調製から着手した。製法をFig. 3(a)に示す。当時コンパクトの製法が明らか

かにされていたのは UHTREX 炉の燃料³⁾であったので、それを参考にしている。マトリックス材としては石油コークス系（川崎製鉄製）黒鉛粉末および石炭ピッチ（川崎製鉄製）を原料とした。ピッチをトリクレンで溶解した後、黒鉛粉末と混練りし、空气中で 120-150°C で約 15 時間加熱して顆粒状にする。これをボールミルで粉碎し、篩分して 170 メッシュ以下にする。この粉末に被覆粒子（略号 70FC6 で示される UC₂ 核四重被覆粒子）を加え、よく混合する。つぎに金型に入れ、120-150°C で成形圧 100 kg/cm² で温間プレスした。使用した粒子の破壊強度は 50 粒子平均で約 1.28 kg と小さかったので成形圧は大きくしなかつた。成形したコンパクトを室温から 350°C まで真空中で加熱し、ついで 950°C までの熱処理をアルゴンガス中で 4 時間かけて行い、最終的に、真空中 1700°C で 1 時間保持して脱ガス処理を終えた。試料の概要を Table 1 に、断面を Fig. 4(a) に示す。またキャプセル内の試料配列を Fig. 5 に示す。

コンパクト成形に際しては焼成によるマトリックスの収縮を予め実験的に調べておき、粒子の添加量を定めた。粒子の分散度はマトリックス粉末と粒子との混合によって決まり、本実験では V 型ブレンダーを用いて混合を行った。コンパクト断面の粒子観察では比較的均一に分散している試料、極端に片寄った試料も見られて試料の均一性に問題があった。この点についてはマトリックス粉末と粒子との比重が異なるため、ダイスに混合粉体を入れる際、重い粒子と黒鉛粉末とが分離する傾向があることによる。この点は次に述べるオーバーコートプレス法を採用すればこの問題は解決できる。

(2) VP-2, VP-4 キャプセル用試料

VP-2, VP-4 キャプセル用の燃料コンパクトは燃料メーカーから購入したものである。マトリックス材は針状黒鉛粉末（Needle coke graphite : NCG）と Poco 等方性黒鉛粉末（Isotropic coke graphite : ICG）の 2 種類を用い、バインダーには当時 Dragon 計画からの情報に則り、フェノール樹脂を用い、オーバーコートプレス法を採用している。Fig. 3(b) にオーバーコートプレス法によるコンパクトの製造法を示す。この方法はまず被覆粒子をバインダーの混入した黒鉛粉のマトリックス材でおろっておき（オーバーコート）、これを金型へ入れて温間成形する。この成形法はプレス時に被覆粒子同士が直接接触することによる被覆破損が起らないほか、燃料の分散を均一にできる利点がある。試料コンパクトの概要を Table 1 に、また断面写真を Fig. 4(b) に示す。さらにキャプセル内の試料配列を Fig. 5 に示す。

このオーバーコート法による試料は計算によりオーバーコートの厚さが決められるので理論的には粒子の充填量、分散度は完全なものになるはずである。しかし、実際には Fig. 4(b) に示されるように粒子間が接近して付いているものや部分的にはマトリックスのみの箇所も見られた。オーバーコート球は回転ドラムで調製されるがその製造の過程ではオーバーコート球に核の無いものや複数の核をもったものそして核の偏心した不完全なものができる。本実験のコンパクトはオーバーコート球を篩分けにより整粒したのみのものを成形したため、不完全なオーバーコート球の混入はさけられず、計算値との差が生じたものと思われる。

2.3 照射条件

キャプセル照射条件の概略を Table 2 に示す。

(1) VP-1 キャプセル

VP-1 キャプセルは JRR-2 の VT-1 照射実験孔 (ϕ_{th} : 最大 2×10^{14} n/cm²·sec, ϕ_f : 最大 2×10^{13} n/cm²·sec) で昭和 46 年 6 月 21 日から同年 7 月 3 日までの R2-46-04 サイクルで合計 280 時間照射された。このコンパクトの照射は我が国において実施する初めての試験であるため、最初原子炉の出力を低出力 10 kW で運転し、キャプセルの照射位置を炉心内で上下に移動させて核反応度特性を測定した。ついで原子炉の定常運転 (10 MW) 後にキャプセルの照射位置を照射孔内で上下に移動させて試料温度の変化を調べた。結果は Fig. 6 に示すようにキャプセルを炉心に近ずけるにしたがって温度指示も上昇し、最高値は温度 950°C に相当した。そこでこの条件で照射を行った。このときのキャプセル半径方向の温度分布を Fig. 7 に示す。

(2) VP-2, VP-4 キャプセル

VP-2 キャプセルは昭和 47 年 6 月 19 日から同年 7 月 1 日 (R2-47-04) に、VP-4 キャプセルは昭和 48 年 2 月 5 日より同月の 19 日 (R2-47-11) にそれぞれ照射された。炉の定常運転時における試料の最高温度は VP-2 で 1390°C (照射目標値 : 1400°C)、VP-4 で 1495°C (照射目標値 : 1600°C) となり、ほぼ予定通りの照射温度を達成することができた。このときのキャプセル半径方向の温度分布は Fig. 7 に示す。また、試料の上下方向にも温度分布が生じ、キャプセル上端と下端の試料は中央部よりやや低めの温度となる。この軸方向の温度差をキャプセルのアルミ製熱媒体中に設けた熱電対の指示値から想定すると約 50°C 位となる。また照射の進行に伴い、照射温度は Fig. 8 および Fig. 9 に示すように若干変動し、最終的には約 100°C 位低下した。試料の燃焼度は前報 (VT-1 孔用被覆粒子燃料照射キャプセルの開発) に述べた通り VP-1 キャプセルで 0.74% FIMA、VP-2 キャプセルで 0.87% FIMA、VP-4 キャプセルで 0.81% FIMA と推定した。

3. 照射後試験

3.1 試験方法

照射後試験は Fig. 10 に示す手順で東海研、ホットラボで実施した。作業はキャプセルの解体、内筒切断、試料外観検査、寸法重量測定、顕微鏡による組織観察および酸浸出から成り立つ。

キャプセルの解体作業ではモニターワイヤーの取出しが行われた。内筒 (タンタル製) に対しては外観、曲り等の有無を観察した。その結果 Fig. 11 の写真に示すように VP-4 キャプセル内筒の一部に温度上昇による変色と思われる箇所がみられた。他の内筒については異常

2.3 照射条件

キャプセル照射条件の概略を Table 2 に示す。

(1) VP-1 キャプセル

VP-1 キャプセルは JRR-2 の VT-1 照射実験孔 (ϕ_{th} : 最大 2×10^{14} n/cm²·sec, ϕ_f : 最大 2×10^{13} n/cm²·sec) で昭和46年6月21日から同年7月3日までの R2-46-04 サイクルで合計280時間照射された。このコンパクトの照射は我が国において実施する初めての試験であるため、最初原子炉の出力を低出力10kWで運転し、キャプセルの照射位置を炉心内で上下に移動させて核反応度特性を測定した。ついで原子炉の定常運転(10MW)後にキャプセルの照射位置を照射孔内で上下に移動させて試料温度の変化を調べた。結果は Fig. 6 に示すようにキャプセルを炉心に近ずけるにしたがって温度指示も上昇し、最高値は温度950℃に相当した。そこでこの条件で照射を行った。このときのキャプセル半径方向の温度分布を Fig. 7 に示す。

(2) VP-2, VP-4 キャプセル

VP-2 キャプセルは昭和47年6月19日から同年7月1日(R2-47-04)に、VP-4 キャプセルは昭和48年2月5日より同月の19日(R2-47-11)にそれぞれ照射された。炉の定常運転時における試料の最高温度はVP-2で1390℃(照射目標値: 1400℃)、VP-4で1495℃(照射目標値: 1600℃)となり、ほぼ予定通りの照射温度を達成することができた。このときのキャプセル半径方向の温度分布は Fig. 7 に示す。また、試料の上下方向にも温度分布が生じ、キャプセル上端と下端の試料は中央部よりやや低めの温度となる。この軸方向の温度差をキャプセルのアルミ製熱媒体中に設けた熱電対の指示値から想定すると約50℃位となる。また照射の進行に伴い、照射温度は Fig. 8 および Fig. 9 に示すように若干変動し、最終的には約100℃位低下した。試料の燃焼度は前報(VT-1孔用被覆粒子燃料照射キャプセルの開発)に述べた通りVP-1キャプセルで0.74%FIMA、VP-2キャプセルで0.87%FIMA、VP-4キャプセルで0.81%FIMAと推定した。

3. 照射後試験

3.1 試験方法

照射後試験は Fig. 10 に示す手順で東海研、ホットラボで実施した。作業はキャプセルの解体、内筒切断、試料外観検査、寸法重量測定、顕微鏡による組織観察および酸浸出から成り立つ。

キャプセルの解体作業ではモニターワイヤーの取出しが行われた。内筒(タンタル製)に対しては外観、曲り等の有無を観察した。その結果 Fig. 11 の写真に示すようにVP-4キャプセル内筒の一部に温度上昇による変色と思われる箇所がみられた。他の内筒については異常

は認められなかった。

3.2 外観検査

試料コンパクトの外観検査では目視およびペリースコープにより全試料の表面について欠け、割れ、粒子の脱落その他照射による変化の有無を観察した。結果の一例を Fig. 12 に示す。外観上、注目されるような大きな変化は見られなかったが、コンパクトの端部には小さな欠けが観察されたものや、ケーブ内で試料の取扱い中にマトリックスの端部に欠けが生じたものもあり、全般的にもろくなっていることがわかった。バインダー添加量が 20 パーセントの試料はキズや欠けなどは少なく、健全であったが 10 パーセントの試料では Fig. 12 の(c) に示すように欠けや砕けが生じ、非常にもろくなっている。またマトリックスの砕けた部分に露出する粒子についてもペリースコープで観察を行ったが最外層の PyC 被覆が破れるような損傷は見られなかった。

VP-4 キャプセルで照射した粒子試料も各種類 20 粒ずつ取出し、コンパクトと同様な方法でその外観を観察したが被覆層の破損したものは見られなかった。しかし 71FC2 試料の表面はなめらかで致密な様相を呈しているが、70NC5 試料の表面は粗く、前者に比較して対照的な外観を示している。被覆粒子の外観写真を Fig. 13 に示す。

3.3 寸法測定

コンパクトの寸法測定はダイヤルゲージ (VP-1 試料) およびマイクロメーター (VP-2, VP-4 試料) を用い、直径をコンパクトのほぼ中央部で X, Y 2 方向 ($0^\circ, 90^\circ$ 回転) より各 3 回測定し、全長を 1 箇所 3 回測定した。測定具の精度は $1/100\text{mm}$ で、試料を測定する前に標準ブロックゲージを用い、補正が行われている。コンパクト中心の $2\text{mm}\phi$ の穴については照射後の寸法測定は行わなかった。照射前試料の寸法測定は直径方向に 2 箇所、軸方向に 3 箇所計 6 箇所で行い、全長をノギスで測定した。Table 3 に各キャプセルで照射した試料の寸法測定結果を示す。バインダーの照射効果を調べるため、その添加量を 10 パーセントと 20 パーセントとにした試料を照射したが 10 パーセントの試料 (71FP5B-4, 5) は Fig. 12 (c) の外観写真に見られるようにマトリックスの端部が割れてしまい、十分に測定、比較することができなかった。照射による寸法変化は表に示したように直径で 0.1 - 0.5 パーセント、長さで 0.1 - 0.3 パーセントの収縮を示し、直径方向がやや大きい。VP-1 キャプセルに封入した試料は原料、調製条件が全て同じ種類のコンパクトであるが、その収縮の割合もほぼ均一で 0.2 - 0.3 パーセント程度であった。一方 VP-2, VP-4 キャプセルではバインダー添加量、マトリックス黒鉛粉の異なった試料が照射されているが、寸法変化に系統的な特徴はみられていない。

照射による被覆粒子を含む燃料コンパクトの寸法は初め中性子照射量の増大と共に収縮し、ある照射量を越えると逆になり、膨脹することが多くの実験で知られている。M.R. Everett⁴⁻⁷⁾らのドラゴン炉による燃料コンパクトの照射実験では中性子照射量が $2 \sim 3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ で

約 1.8 % 収縮し、照射温度が高くなるとこの値はさらに大きくなることが報告されている。本実験では照射量も少なく、寸法収縮も小さかったので照射効果についての定量的な検討は出来ない。しかし、ICG 試料は NCG 試料より大きな収縮を示しており、この点はさらに照射量を増して検討を加える必要があるが、一方 ICG 試料は製造する時の成形性にやゝ難点がある事もあり、その後のコンパクト製造におけるマトリックス材としては採用しなかった。

3.4 金相試験

コンパクトの金相試験は東海研ホットラボの鉛セルに設置されているテラトーム型金属顕微鏡（オーストリア、ライヘルト社製）を用い、被覆粒子およびコンパクトマトリックスの変化を観察し、100, 200, 400, 倍の写真撮影を行った。観察した試料は各キャプセルのほぼ中央に位置するコンパクトで、照射温度が最高のもので、内筒下端で中性子照射量が最大のもので、および内筒上端のコンパクト、計 8 個（VP-1 : 2 個, VP-2 : 3 個, VP-4 : 3 個）と VP-4 キャプセルに封入した被覆粒子である。

顕微鏡試料はエポキシ系の樹脂に埋込み、硬化させた後、粗研磨、仕上げ研磨の順でその観察面が仕上げられた。粗研磨は SiC 耐水研磨紙で #400, #600, #800, #1000 の順に粒度を細かくし、仕上げ研磨はナイロクロスと AB マイクロクロスにダイヤモンド研磨剤を用い、最後に DP マイクロクロスで行った。顕微鏡観察面は試料の端部より厚さ 3 mm 以上の研削を行い、コンパクト端部の成形圧の影響をさけている。

Fig. 14-Fig. 16 にコンパクト照射前の顕微鏡観察結果を Fig. 17-Fig. 20 に照射後の顕微鏡観察結果を示す。

VP-1 キャプセル試料は Fig. 14 に示すように照射前においても被覆粒子の燃料核および各被覆層がやせ細り隙間が見られる。このコンパクトに使用した被覆粒子（70FC6）は燃料核が炭化物で、我が国における第一回目の試作品である。これらの被覆粒子はコンパクトの成形に対して顕微鏡観察で粒子に異常のないことを確かめている。しかし、コンパクト成形後の焼成、脱ガスには温度 1700°C、1 時間の熱処理が施される。従って、充填した被覆粒子も同様に熱処理を受け、この際に被覆粒子の高温耐熱性が十分でなかったために変化したものと思われる。照射後は Fig. 17 に示すように照射前に見られた燃料核および各被覆層間での隙間がさらに広がっている。このため、燃料核と第一被覆層の低密度 PyC 層が試料研磨の際に落ちてしまい、照射後の写真ではほとんど無くなっている。またこの試料の SiC 層断面にはほとんどポアが見られないが、高密度 PyC 層には数多くのポアが観察され、後述の VP-2, VP-4 試料と対照的である。コンパクトのマトリックスはこの照射により、割れなどは起らず特に問題は生じなかった。また被覆粒子とマトリックスとの結合についても照射前と比較して変化は認められなかった。

Fig. 15 は VP-2, VP-4 キャプセルに封入した試料（71FP）の照射前金相写真であり、Fig. 16 は同試料を温度 1380°C、270 時間炉外で照射温度条件を模擬して加熱試験した試料の写真である。これらの写真から燃料核、各被覆層、マトリックスは健全であることが確かめられる。また熱処理後においてもほとんど変化が示されず、十分な耐熱性を有す

ることがわかる。VP-2, 4 キャプセルで照射したコンパクトの断面をペリースコープで観察した結果、Fig. 18に示すようにコンパクトのマトリックスが外周部で緻密になっており、中心部には数多くのポアが含まれた不均一な断面組織が観察された。そしてこの現象はコンパクトの原料黒鉛粉末に、異方性の針状黒鉛 (needle coke graphite : NCG) や等方質黒鉛 (isotropic coke graphite : ICG) を用いた場合にみられた。しかし、これらの試料については試料入手のままと炉外で熱処理を施したのものについても同様に観察したが、Fig. 4(b)に示すようにこのような現象は観察されなかった。被覆粒子の金相観察では照射量が少ないので明確な効果は示されないが照射後の金相写真 Fig. 19, 20 に示すように、各被覆層にポアが観察され、特に第1層のPyCはほとんど欠損している。またSiC層中にもポアが見られ、一部の試料には被覆層の破損したのも観察された。E.H.Voice⁸⁾らの実験によると低密度のSiCは高温下では再結晶を起し、ポアが発生することが報告されており、この試料のSiC中のポアも密度が 3.1 g/cm^3 と低かったと認められる。またこのような挙動はJMTRで照射した70F-4Aキャプセル⁹⁾の試料(70FC6粒子と同条件で作られたもの)にも観察されている。しかしながらこれらの試料にはVP-1試料に見られたような被覆層境界面での反応や高密度PyC層内のポアは比較的少なくなっている。

黒鉛マトリックスはICG (Fig. 19(a)-(d), Fig. 20(e)(f)), NCG (Fig. 19(e)(f), Fig. 20(a)-(d)) いずれの場合でもマトリックスと被覆粒子との相互作用によるPyC層の損傷も起らず、照射前の様相と比較して変化はなかった。またバインダー添加量を10パーセントと20パーセントに変えた試料についても明視野で観察したが両者に差は見られなかった。なおコンパクトのマトリックス材としてICG黒鉛粉末はFig. 20(f)に示すようにマトリックス内のポアが多く、NCG試料Fig. 19(f)と比較して成形性が劣るようである。

VP-4キャプセルで照射した被覆粒子についてもその断面を顕微鏡で観察し、コンパクト試料と比較したが特に異った変化は見られなかった。

3.5 酸浸出試験

照射したコンパクト中の被覆破損粒子を検出するため電気化学的解砕-酸浸出法¹⁰⁾によりVP-4キャプセルで照射した試料5個のコンパクト(VP-2:3個, VP-4:2個)について酸浸出試験を実施した。Table 4に照射前後の酸浸出試験結果を示す。この表に示す照射前の値は燃料メーカーが試料納入の際測定した値で、コンパクトを直接硝酸溶液中に入れ、加熱して破損粒子のウランを溶かす方法で求めたものである。これに対し、照射後の方法はコンパクトを硝酸溶液中で電気化学的に解砕すると同時に酸浸出を行う方法で求めたものである。浸出液中のウラン量の定量には前者の場合化学分析により求めるが照射後は硝酸溶液中の⁹⁵Zr(725keV)の γ 線強度を測定して求めた。すなわち、試料コンパクトから解砕された粒子で、その被覆層があらかじめ健全であると確かめられた粒子10粒を選び、この⁹⁵Zrの γ 線強度を測定してコンパクト中の全粒子の γ 線強度を求め、この値と先に求めた浸出液に対する測定値とから酸浸出率(浸出溶液中の γ 線強度/全粒子の γ 線強度)を求めた。

酸浸出結果では試験した何れの試料にも被覆破損が起り、ウランの溶出があった形跡は示さ

れていない。しかし、前にも記したように金相観察では被覆層内にポアの発生が起り、これらのポアが各被覆層間を貫通しているものも観察されており、実際には多少の被覆破損の起った粒子も含まれるようである。また照射後では ^{95}Zr (757keV)– ^{95}Nb (765keV)の複合ピークより求めた値と ^{95}Zr (725keV)単独ピークより求めた値とを比較しているが両者に大きな差は示されていない。なおVP-4キャプセルで照射した被覆粒子については酸浸出試験を行わなかった。

4. ま と め

多目的高温ガス実験炉用燃料の開発を目指して、JRR-2を利用して行った燃料コンパクトに対する初期の3本のキャプセル照射試験の結果、以下の点が明らかになった。

1. キャプセル照射技術については、燃料コンパクトに対し3本のキャプセル(VP-1, VP-2, VP-4)で燃料最高温度を950℃, 1390℃, 1500℃と順次より高い温度を達成できその後の照射技術の確立に役立った。
2. 試作燃料コンパクトの照射挙動については、照射量が少ないので、真に照射に原因するものと断定できないが、以下の事柄が観察された。
 - 1) 外観：コンパクトの端面や角の部分に欠けたものや割れたものも見られ、バインダー量が10パーセントと少ない試料では特にその傾向が大きい。
 - 2) 寸法：僅かであるが収縮を示した。
 - 3) 断面：マトリックスはほぼ健全であったが、被覆粒子の被覆層にポアの生成が見られた。しかし、全被覆層を貫通するような被覆破損はあまり生じなかった。マトリックスは原料黒鉛粉の違いにより緻密度に差が生じる。
 - 4) 酸浸出：酸浸出率は照射前と大きな差はなく、照射した試料の酸浸出試験で破損粒子は検出されなかった。

これらの試験結果はその後のコンパクト製造技術の開発やキャプセル照射試験の推進に反映されている。

謝 辞

JRR-2による照射の実施にあたっては研究炉管理部とりわけJRR-2管理課および技術部工作課の関係各位の、また照射後試験実施にあたっては研究炉管理部ホットラボ管理室関係各位の御協力を頂いた。また下川純一燃料工学部長には本研究の推進に御激励を賜わった。深甚の謝意を表します。

れていない。しかし、前にも記したように金相観察では被覆層内にポアの発生が起り、これらのポアが各被覆層間を貫通しているものも観察されており、実際には多少の被覆破損の起った粒子も含まれるようである。また照射後では ^{95}Zr (757keV)- ^{95}Nb (765keV)の複合ピークより求めた値と ^{95}Zr (725keV)単独ピークより求めた値とを比較しているが両者に大きな差は示されていない。なおVP-4キャプセルで照射した被覆粒子については酸浸出試験を行わなかった。

4. ま と め

多目的高温ガス実験炉用燃料の開発を目指して、JRR-2を利用して行った燃料コンパクトに対する初期の3本のキャプセル照射試験の結果、以下の点が明らかになった。

1. キャプセル照射技術については、燃料コンパクトに対し3本のキャプセル(VP-1, VP-2, VP-4)で燃料最高温度を950℃, 1390℃, 1500℃と順次より高い温度を達成できその後の照射技術の確立に役立った。
2. 試作燃料コンパクトの照射挙動については、照射量が少ないので、真に照射に原因するものと断定できないが、以下の事柄が観察された。
 - 1) 外観：コンパクトの端面や角の部分に欠けたものや割れたものも見られ、バインダー量が10パーセントと少ない試料では特にその傾向が大きい。
 - 2) 寸法：僅かであるが収縮を示した。
 - 3) 断面：マトリックスはほぼ健全であったが、被覆粒子の被覆層にポアの生成が見られた。しかし、全被覆層を貫通するような被覆破損はあまり生じなかった。マトリックスは原料黒鉛粉の違いにより緻密度に差が生じる。
 - 4) 酸浸出：酸浸出率は照射前と大きな差はなく、照射した試料の酸浸出試験で破損粒子は検出されなかった。

これらの試験結果はその後のコンパクト製造技術の開発やキャプセル照射試験の推進に反映されている。

謝 辞

JRR-2による照射の実施にあたっては研究炉管理部とりわけJRR-2管理課および技術部工作課の関係各位の、また照射後試験実施にあたっては研究炉管理部ホットラボ管理室関係各位の御協力を頂いた。また下川純一燃料工学部長には本研究の推進に御激励を賜わった。深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩本 多実, 他, JRR-2 水ループ照射装置 (EFTL-2 及び HWL-1) による UC_2 核被覆粒子の照射試験 JAERI-M 5876 (1974)。
- 2) 菊池 輝男, 他, JRR-2, VT-1 孔用被覆粒子燃料照射キャプセルの開発, JAERI-M 6913 (1977)。
- 3) J.M.Taub and R.J.Bard, "Coated Particle Fuel Elements for UHTREX" LA3378.
- 4) M.R.Everett, R.Manzel, P.Barr and K.Mayr, Fuel Compacts, D.P.Report 686.
- 5) M.R.Everett, L.W.Graham, R.Manzel and R.Blakstone, Carbon 1971, Vol. 9 pp.417-437, DP657.
- 6) M.R.Everett, R.Blakstone, L.W.Graham and R.Manzel, 3rd Conf. on Industrial Carbons and Graphite 14th-17th April 1970.
- 7) M.R.Everett, L.W.Graham and F.Ridealgh, Graphite Structures for Nuclear Reactors 7,8,9 March 1972 Conference pp.321-345.
- 8) E.H.Voice and V.C.Scott, Special Ceramics 5 (1972) p.1.
- 9) 岩本 多実, 他, 被覆燃料粒子の照射挙動試験(1) (70F-4A キャプセルによる JM TR 照射) JAERI-M 6480。
- 10) 飛田 勉, 岩本 多実, JAERI-M 5265 (1973)。

Table 1 Outline of fuel compacts prepared for irradiation test in VP capsules

| Capsule | | | VP-1 | VP-2 , VP-4 | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|---|-------------------------|----------------------------|-------------|
| Fuel compact | | | 70 JPB | 71FP-4B | 71FP-5B | |
| Dimension (mm) | Outer diameter | | 10.0 | 10.5 | | |
| | Inner diameter | | 2.0 | 2.0 | | |
| | Length | | 9 — 11 | 15.0 | | |
| Particle loading (%) | | | 23 | 24 | | |
| Coated fuel particle | | | 70 FC6 | 71 FC4 | 71 FC5 | |
| Failed particle fraction | | | — | 6.2×10^{-4} | $1.2 - 5.4 \times 10^{-4}$ | |
| Matrix graphite | | | Coke flour | Isotropic coke graphite | Needle coke graphite | |
| Binder | Classification | | Coal-tar pitch | Phenolic resin | | |
| | Addition (%) | | 30 | 10 , 20 | | |
| Preparation conditions | Pressing (kg/cm ²) | | 100 | 150 — 300 | | |
| | Baking | Temp. (°C) | 950 | 800 | | |
| | | Atmosphere | R.T. — 350 : Ar gas 350 — 950 : Vacuum | Vacuum | | |
| | Degassing | Temp. (°C) | 1700 | 1700 | | |
| | | Atmosphere | Vacuum | Vacuum | | |
| Diameter (μm) | | | 660 | 789 — 810 | | |
| Density (g/cm ³) | | | 2.61 | 3.90 | | |
| Kernel | Fuel | | UC ₂ | UO ₂ | | |
| | ²³⁵ U enrichment (%) | | 20 | 19.95 | | |
| | Diameter (μm) | | 420 — 500 | 482 — 507 | | |
| | Density (% TD) | | 86.5 | 94.8 | | |
| Coating layers | No.1 | PyC | Thickness (μm) | 40 | 43 | 43 |
| | | | Density (g/cm ³) | 1.0 — 1.1 | 1.20 — 1.23 | 1.18 — 1.24 |
| | No.2 | PyC | Thickness (μm) | — | 33 | 34 |
| | | | Density (g/cm ³) | — | 1.72 — 1.75 | 1.72 — 1.80 |
| | | | Lc (A) | — | 30 | 28 |
| | No.3 | SiC | Thickness (μm) | 35 | 28 | 29 |
| | | | Density (g/cm ³) | 3.1 | 3.1 — 3.2 | 3.1 — 3.2 |
| | No.4 | PyC | Thickness (μm) | 55 | 45 | 45 |
| | | | Density (g/cm ³) | 1.7 — 1.8 | 1.72 — 1.75 | 1.72 — 1.80 |
| | | | Lc (A) | 50 | 30 | 28 |

Table 2 Summary of irradiation conditions on VP capsules

| Capsule | VP-1 | VP-2 | VP-4 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Irradiation time (hrs.) | 280 | 240 | 290 |
| Irradiation temperature (max.) (°C) (ave.) | 950 | 1390 1350 | 1500 1450 |
| * Burn-up (%FIMA) (MWD/Tu) | 0.74 6400 | 0.87 7500 | 0.81 7000 |

* Burn-up: Estimated by heat flux during irradiation

Table 4 Results of acid-leaching test on irradiated fuel compacts in VP-2 and VP-4 capsule

| Capsule | Fuel compact analyzed | * 1 | * 2 | |
|---------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Before irradiation | After irradiation ^{95}Zr | ^{95}Zr - ^{95}Nb |
| VP - 2 | 71FP4B-2 | $< 6.2 \times 10^{-4}$ | 3.96×10^{-4} | ———— |
| | 71FP5B-5 | $< 5.4 \times 10^{-4}$ | $< 1.0 \times 10^{-5}$ | ———— |
| | 71FP5B-7 | $< 1.2 \times 10^{-4}$ | 5.11×10^{-4} | 3.74×10^{-4} |
| VP - 4 | 71FP5B-2 | $< 1.2 \times 10^{-4}$ | $< 1.0 \times 10^{-5}$ | ———— |
| | 71FP4B-5 | $< 6.2 \times 10^{-4}$ | 1.79×10^{-6} | 2.2×10^{-6} |

* 1 : Fuel compact was leached with boiling nitric acid.

* 2 : Fuel compact was disintegrated electrochemically in nitric acid, and fraction leached of ^{95}Zr was obtained

Table 3 Dimensional change of fuel compacts irradiated in VP - 1, VP - 2 and VP - 4 capsule

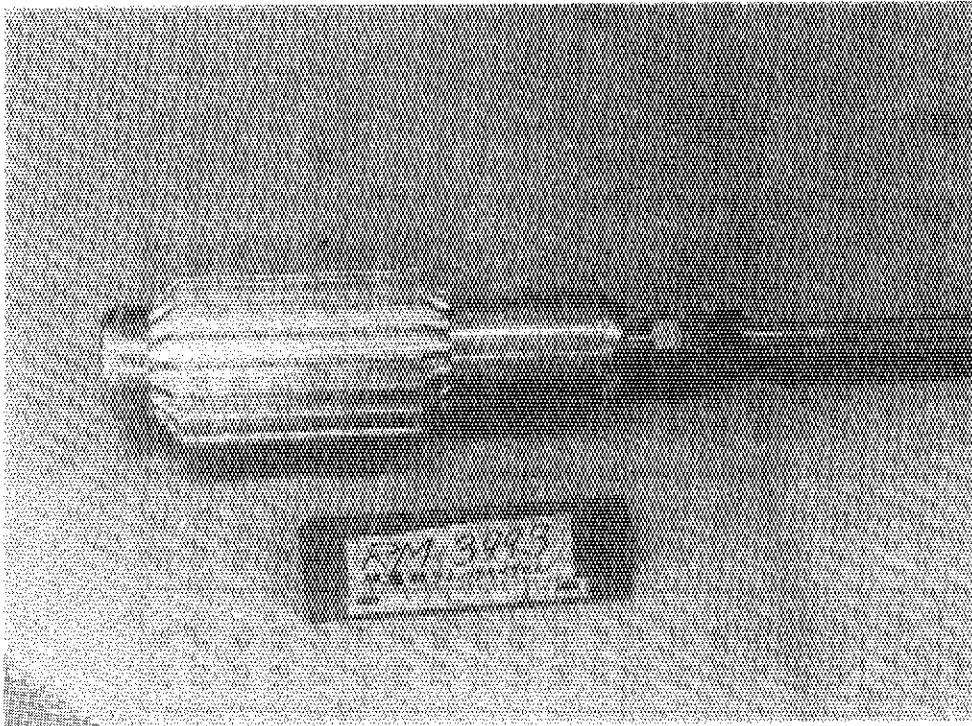
| Capsule | Sample | * 1 Matrix | * 2 Binder (w/o) | Fuel (v/o) | Irradiation condition | | Diameter (mm) | | * 3 ΔD/D ₀ (%) | Length (mm) | | * 4 ΔL/L ₀ (%) | |
|---------|----------|---------------|------------------------|---------------|--------------------------|----------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------|
| | | | | | Temp. (°C) | BU- (%FIMA) | Before irra.(D ₀) | After irra.(D) | | Before irra.(L ₀) | After irra.(L) | | |
| VP-1 | 70JB-1 | | | | | | | 10.16 | 10.12 | -0.39 | 10.8 | 10.79 | -0.09 |
| | " -2 | | | | 950 | | 10.12 | 10.10 | -0.20 | 11.2 | 11.19 | -0.09 | |
| | " -3 | Coke flour | 30 | 23 | | 0.74 | | 10.00 | 9.98 | -0.20 | 10.0 | 9.93 | -0.70 |
| | " -4 | | | | | | | 10.12 | 10.09 | -0.30 | 9.2 | 9.20 | 0.00 |
| | " -5 | | | | | | | 10.13 | 10.14 | 0.10 | 8.8 | 8.71 | -1.02 |
| | " -6 | | | | | | | 10.09 | 10.07 | -0.20 | 9.8 | 9.79 | -0.10 |
| VP-2 | 71FP4B-1 | ICG | 20 | | | | | 10.50 | 10.46 | -0.38 | 15.15 | 15.18 | 0.20 |
| | " -2 | " | " | | 1390 | | 10.51 | 10.46 | -0.48 | 15.20 | 15.19 | -0.07 | |
| | " -3 | " | " | | | | 10.50 | 10.45 | -0.48 | 15.15 | 15.11 | -0.26 | |
| | 71FP5B-4 | NCG | 10 | 24 | | 0.87 | | 10.46 | 10.40 | -0.57 | 15.10 | — | — |
| | " -5 | " | " | | | | 10.45 | 10.40 | -0.48 | 15.00 | — | — | |
| | " -6 | " | 20 | | 1350 | | 10.49 | 10.59 | 0.95 | 15.05 | 15.03 | -0.13 | |
| | " -7 | " | " | | | | 10.47 | 10.46 | -0.10 | 14.95 | 14.92 | -0.20 | |
| VP-4 | 71FP4B-4 | ICG | 20 | | | | | 10.53 | 10.51 | -0.19 | 15.25 | 15.23 | -0.13 |
| | " -5 | " | " | | 1500 | | 10.49 | 10.46 | -0.29 | 15.10 | 15.11 | -0.07 | |
| | 71FP5B-1 | NCG | 10 | 24 | | 0.81 | | 10.53 | 10.48 | -0.47 | 15.15 | 15.09 | -0.40 |
| | " -2 | " | 20 | | 1450 | | 10.47 | 10.46 | -0.10 | 15.00 | 14.96 | -0.27 | |
| | " -3 | " | " | | | | 10.49 | 10.47 | -0.19 | 15.10 | 15.09 | -0.07 | |

* 1 ICG : Isotropic coke graphite (POCO Graphite, Inc.)
 NCG : Needle coke graphite (Anglo Great Lakes Co. Ltd.)

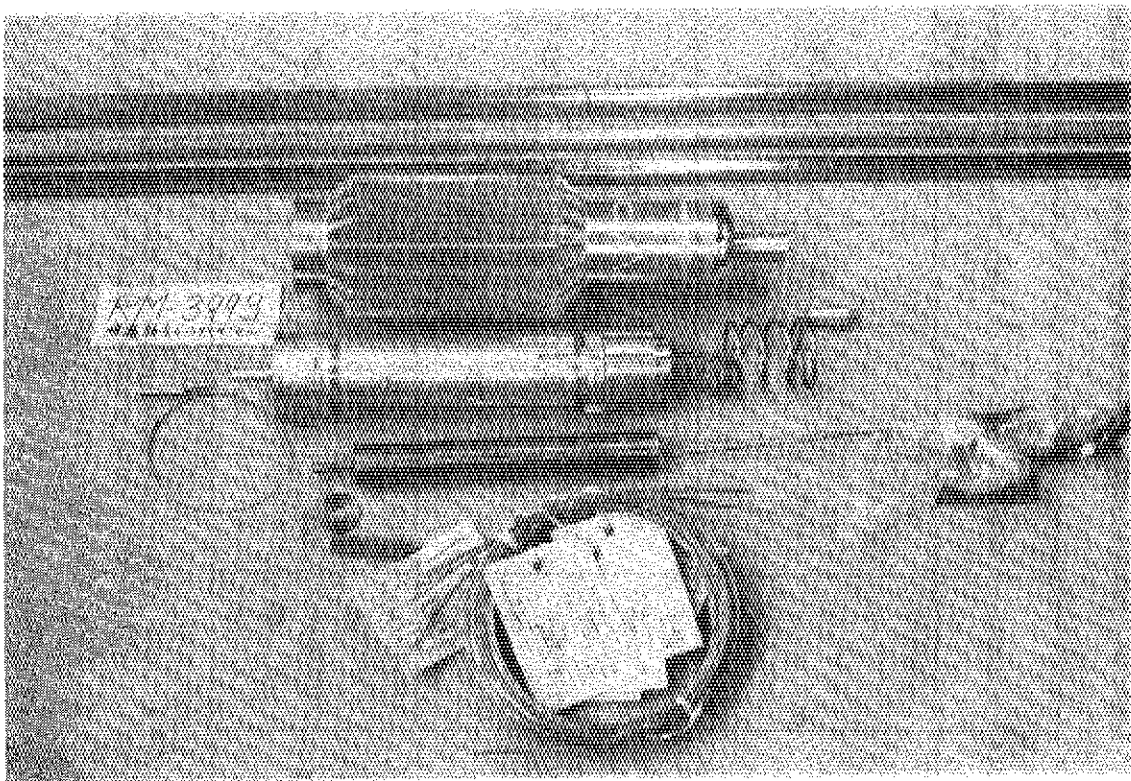
* 2 VP-1 : Coal tar pitch binder
 VP-2,4 : Phenolic resin binder

* 3 ΔD : D - D₀

* 4 ΔL : L - L₀



VP-1 Capsule



Parts for VP-1 Capsule

Fig. 1 Photographs of VP-1 capsule

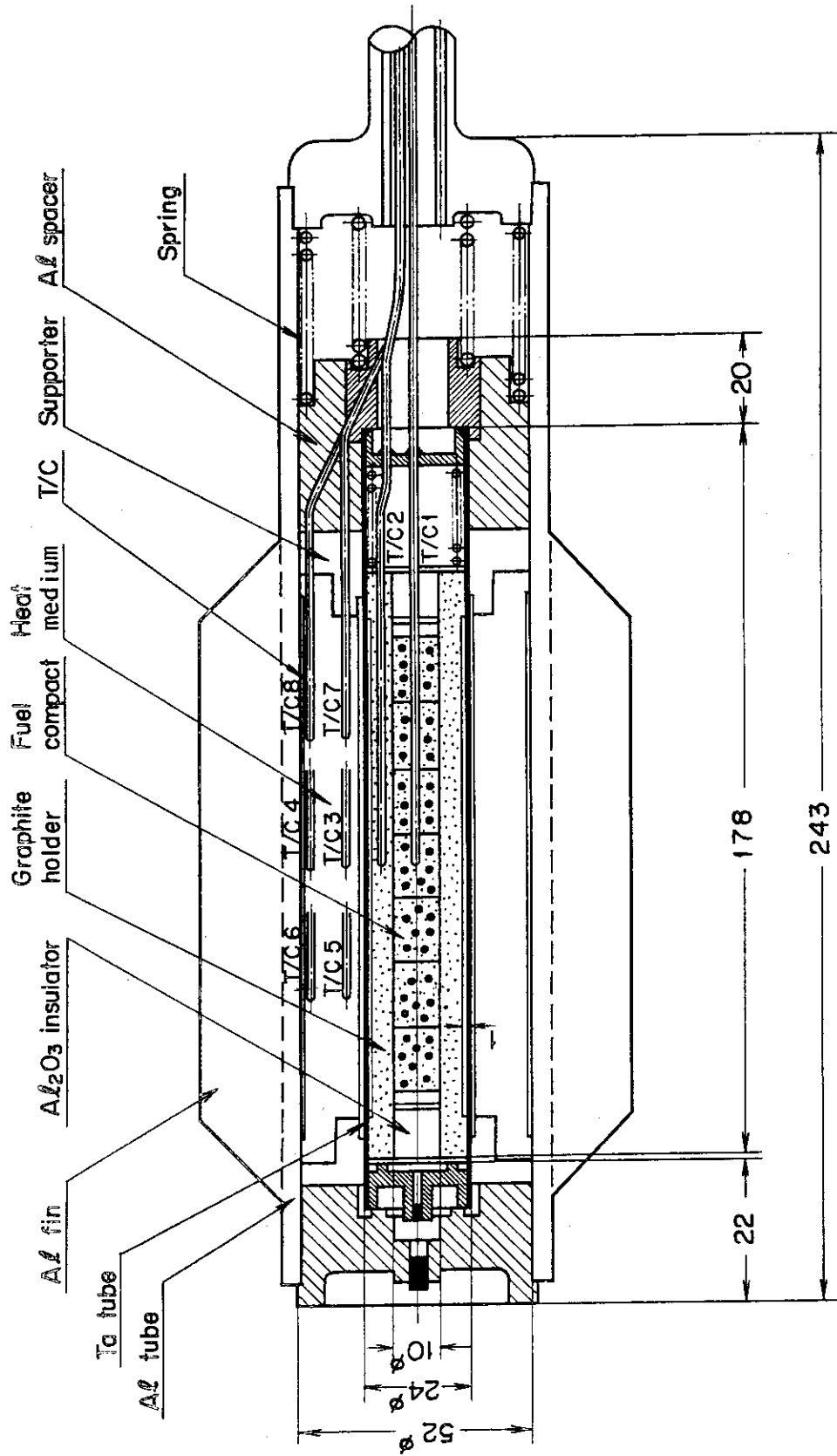
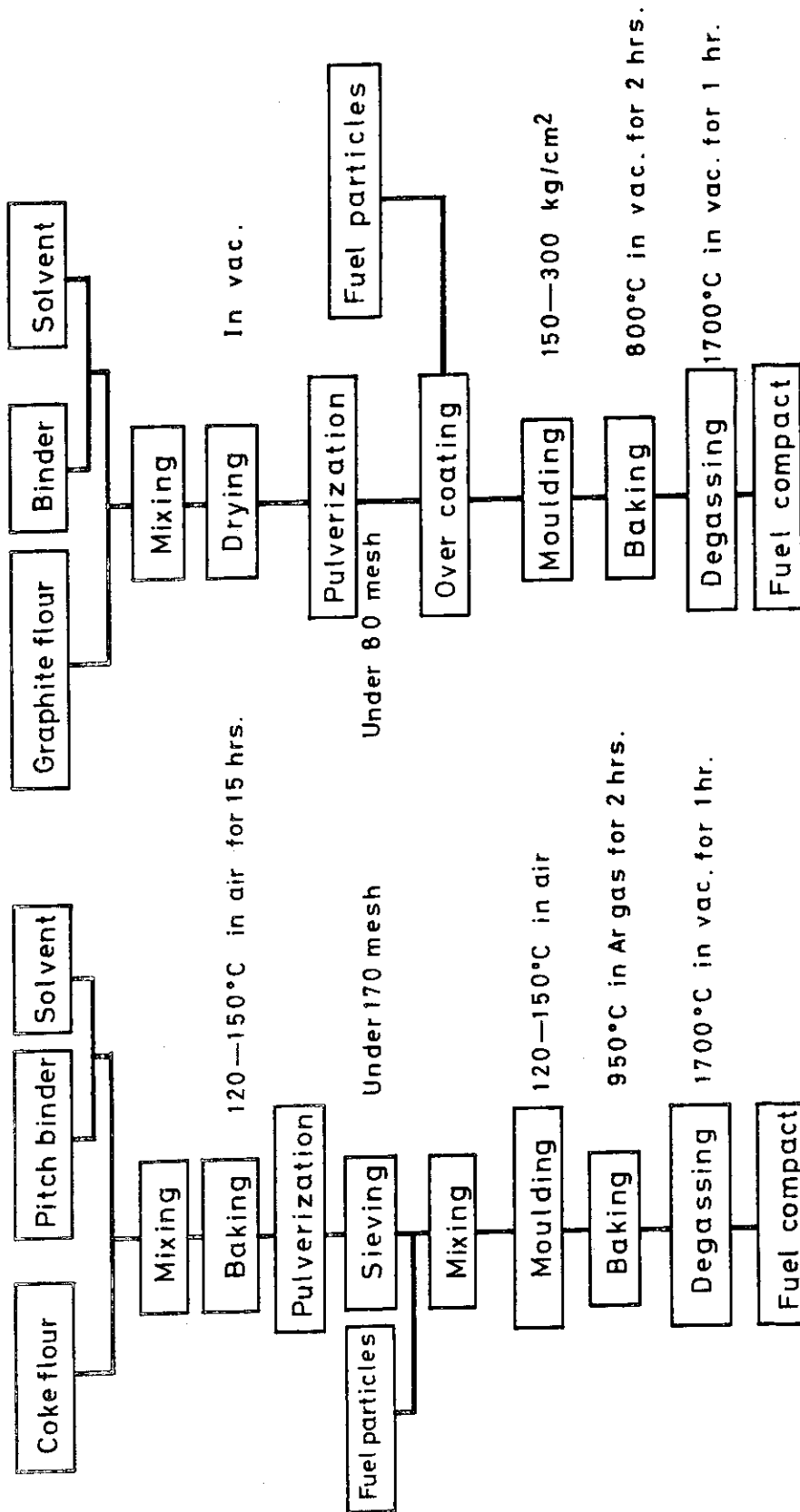


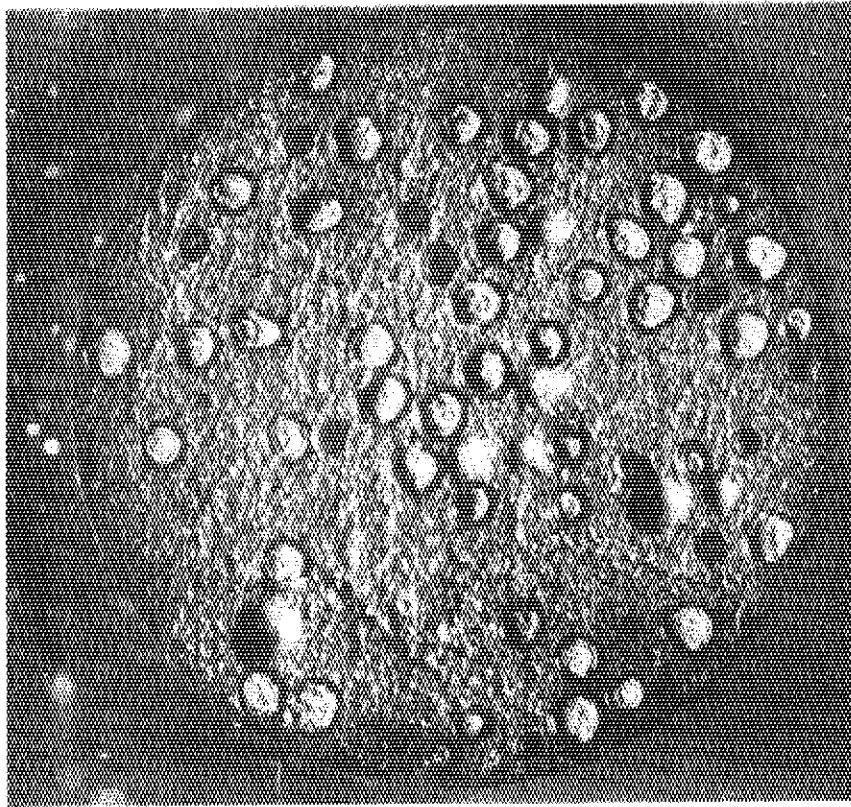
Fig.2 VP-1 capsule for fuel compact irradiation test in JRR-2



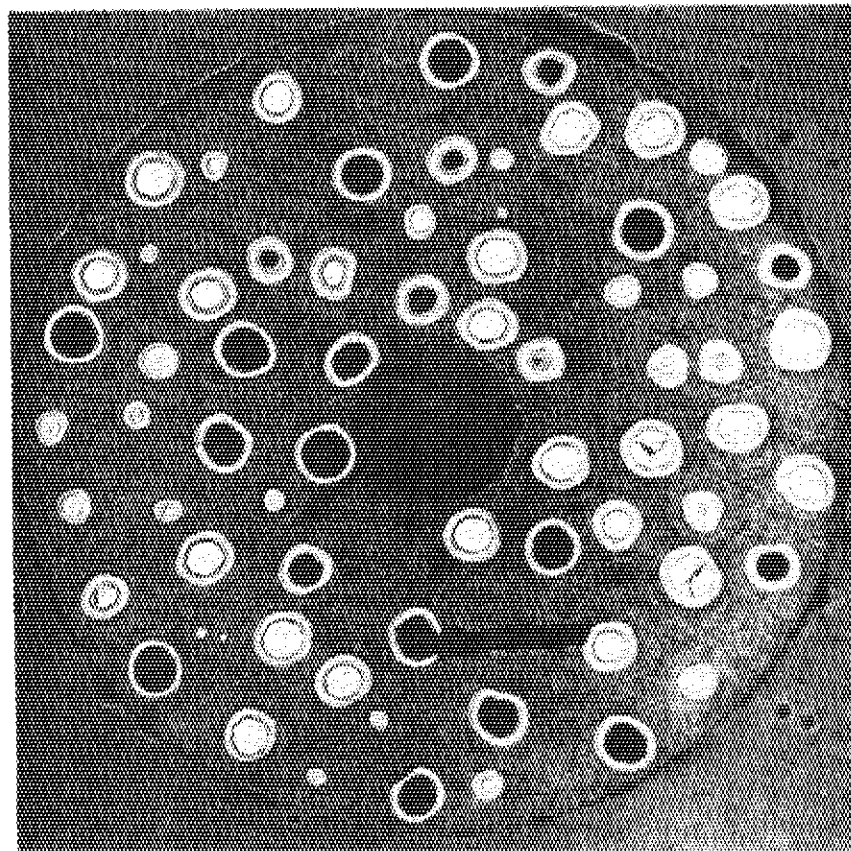
(a) Sample for VP-1 capsule

(b) Fuel compact by over-coat pressing for VP-2 and VP-4 capsules

Fig. 3 Flow diagrams of fuel compact preparation for VP capsule samples



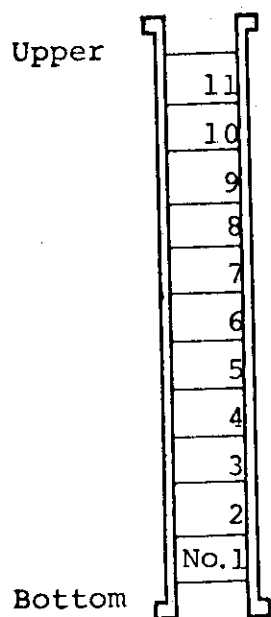
(a) Prepared by authors, to be irradiated in VP-1 capsule



(b) Prepared by a private company over-coat pressing, to be irradiated in VP-2 and VP-4 capsules

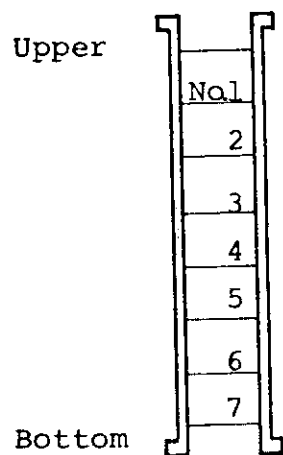
Fig. 4 Cross sections of fuel compacts prepared for VP capsules

(1) VP-1 capsule



| No. | Sample | Matrix | Binder (w/o) | Fuel loading (v/o) |
|-----|----------|------------|--------------|--------------------|
| 1 | Graphite | — | — | — |
| 2 | 70JPB-3 | Coke flour | 30 | 23 |
| 3 | " -9 | | | |
| 4 | " -10 | | | |
| 5 | " -11 | | | |
| 6 | " -12 | | | |
| 7 | " -13 | | | |
| 8 | " -15 | | | |
| 9 | " -16 | | | |
| 10 | " -17 | | | |
| 11 | " -18 | | | |

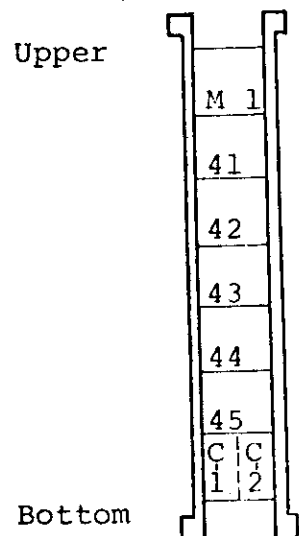
(2) VP-2 capsule



| No. | Sample | * Matrix | Binder (w/o) | Fuel loading (v/o) |
|-----|----------|----------|--------------|--------------------|
| 1 | 71FP4B-1 | ICG | 20 | 24 |
| 2 | " -2 | " | 20 | 24 |
| 3 | " -3 | " | 20 | 24 |
| 4 | 71FP5B-4 | NCG | 10 | 24 |
| 5 | " -5 | " | 10 | 24 |
| 6 | " -6 | " | 20 | 24 |
| 7 | " -7 | " | 20 | 24 |

* ICG: Isotropic coke graphite
NCG: Needle coke graphite

(3) VP-4 capsule



| Mark | Sample | Matrix | Binder (w/o) | Fuel loading (v/o) |
|------|---------------------------------------|--------|--------------|--------------------|
| M1 | Fluence monitor particle No.12, No.51 | | | |
| 41 | 71FP5B-1 | NCG | 10 | 24 |
| 42 | " -2 | " | 20 | 24 |
| 43 | " -3 | " | 20 | 24 |
| 44 | 71FP4B-4 | ICG | 20 | 24 |
| 45 | " -5 | " | 20 | 24 |
| C-1 | 71FC2 | — | — | — |
| C-2 | 70NC5 | — | — | — |

Fig. 5 Fuel compacts encased in the capsules VP-1, VP-2 and VP-4

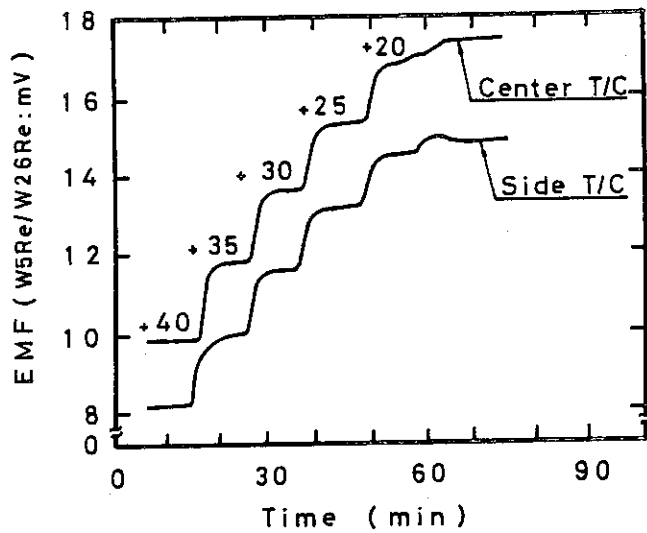


Fig. 6 Change of the temperature of VP-1 capsule with capsule position in VT-1 irradiation hole. Distance between a core center level and a capsule middle position is given by figure in cm.

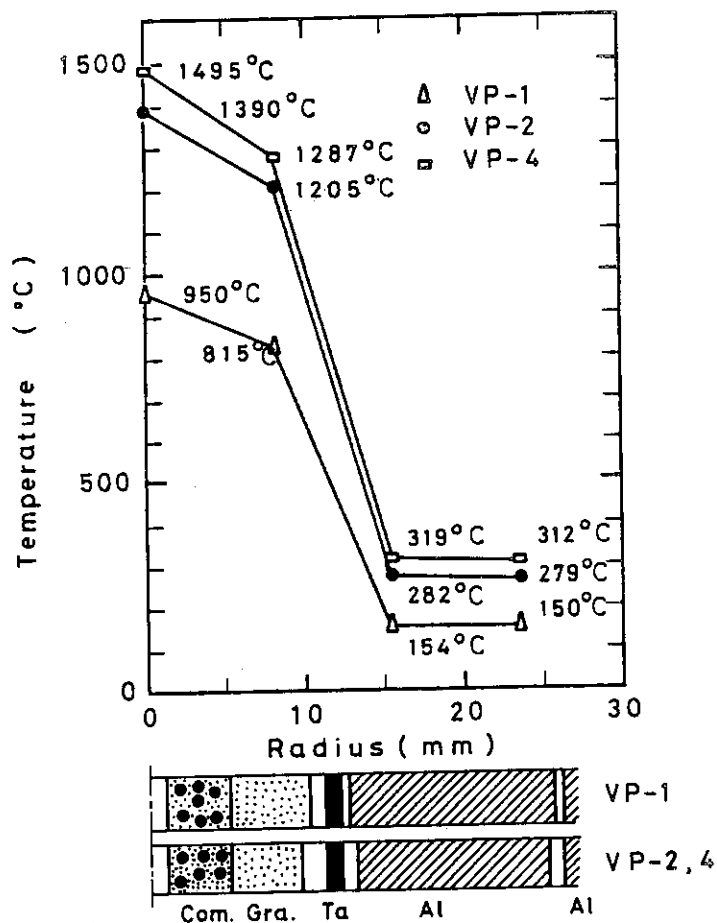


Fig. 7 Plots of temperatures measured by thermocouples during irradiations of VP capsules

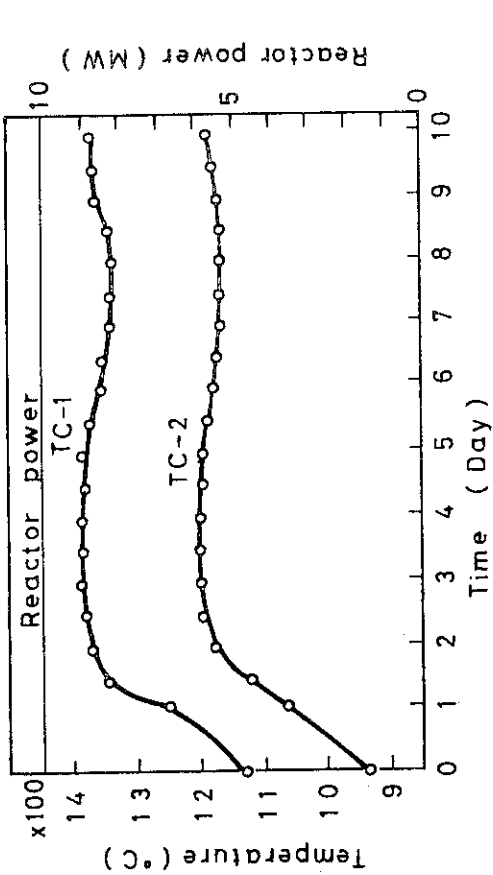


Fig. 8 Temperature change of VP-2 capsule during irradiation

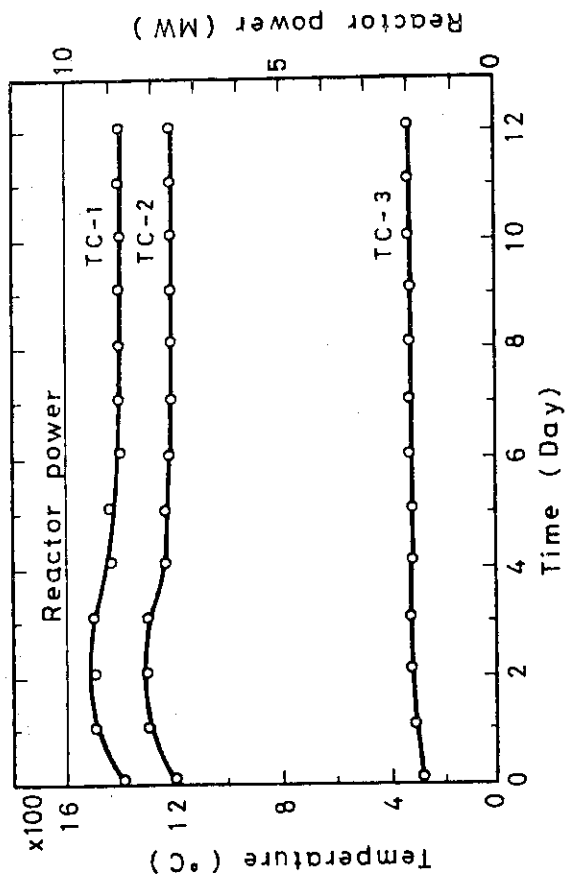


Fig. 9 Temperature change of VP-4 capsule during irradiation

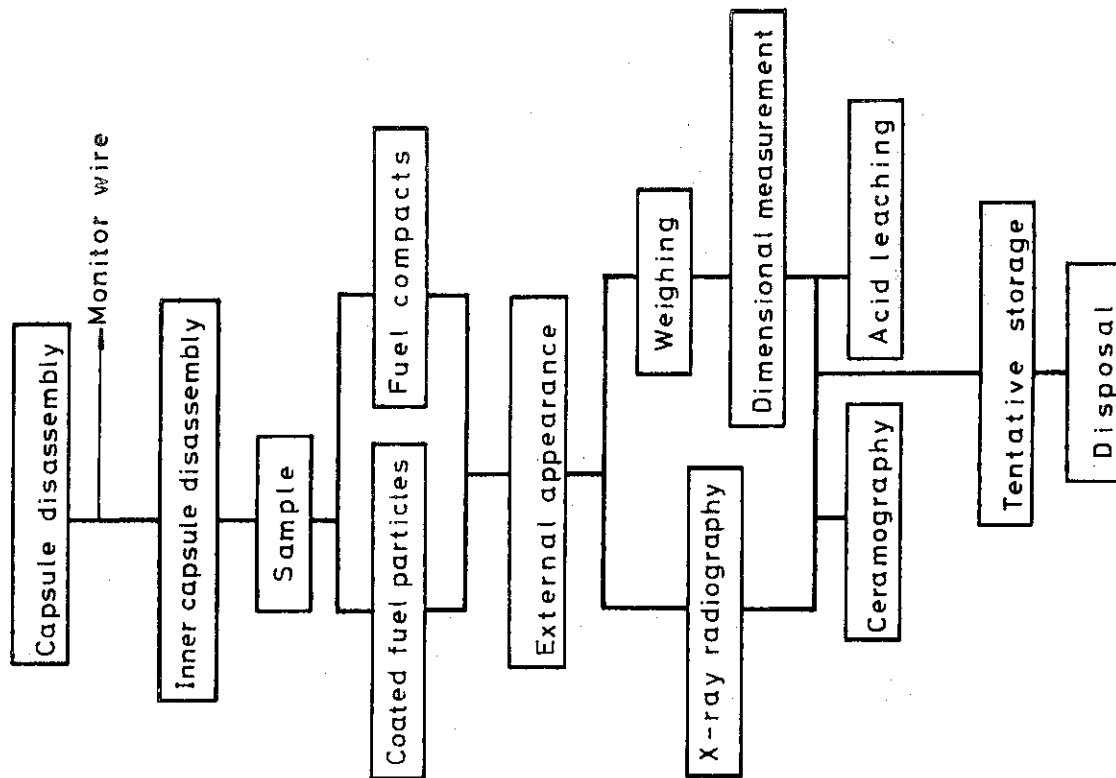
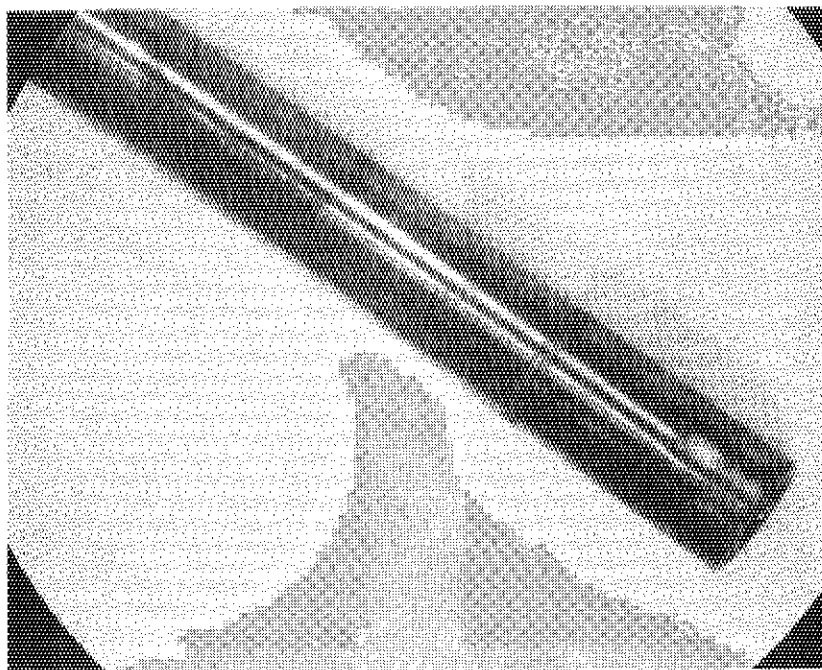
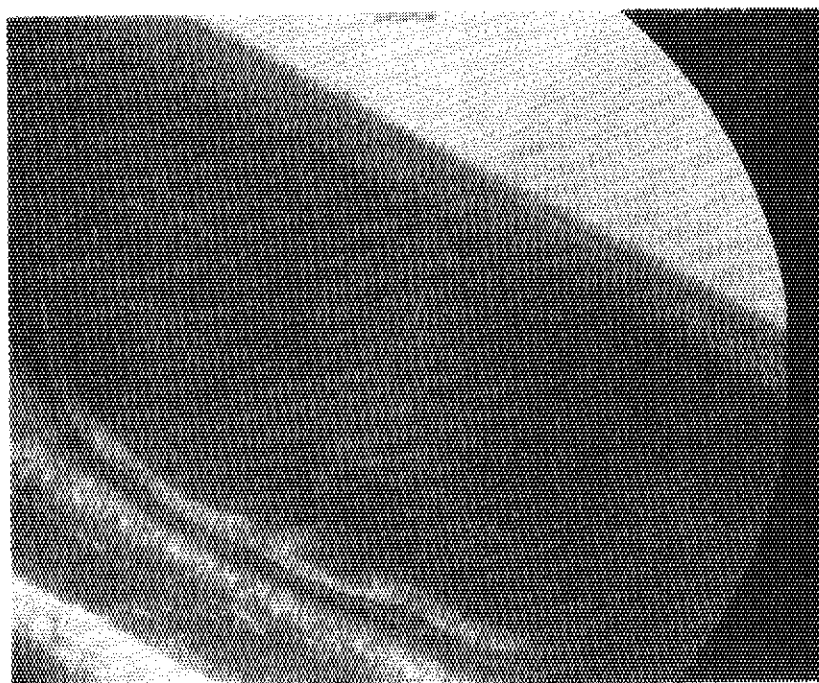


Fig. 10 PIE flow diagram for VP capsule

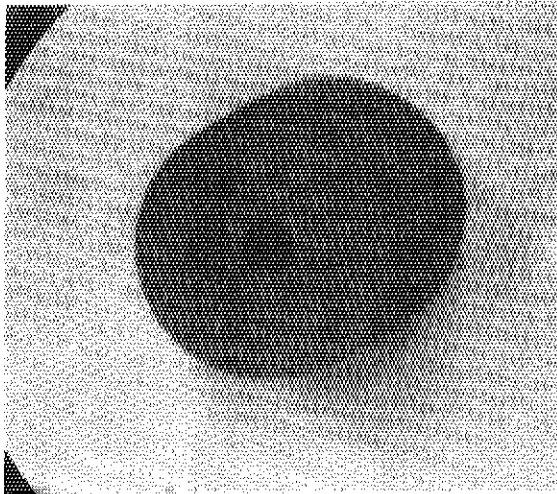


(1) External view of inner tantalum can

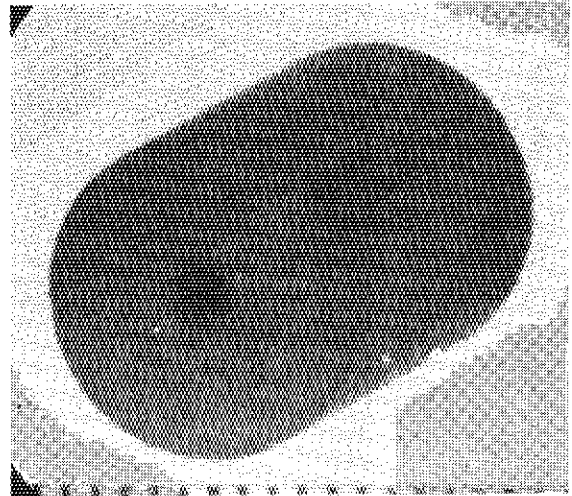


(2) Magnified view of the color-changed position of inner can

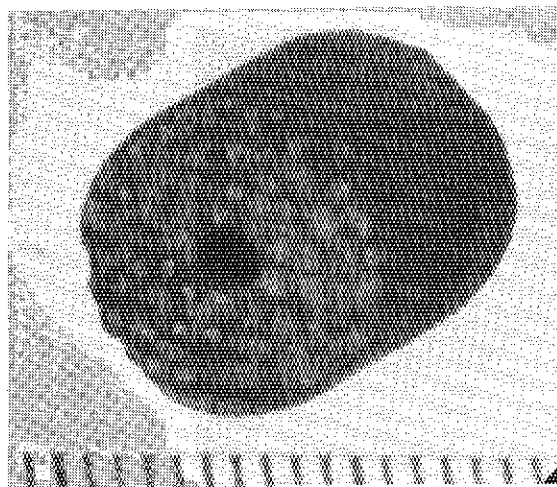
Fig. 11 External views of inner tantalum can used in VP-4 capsule



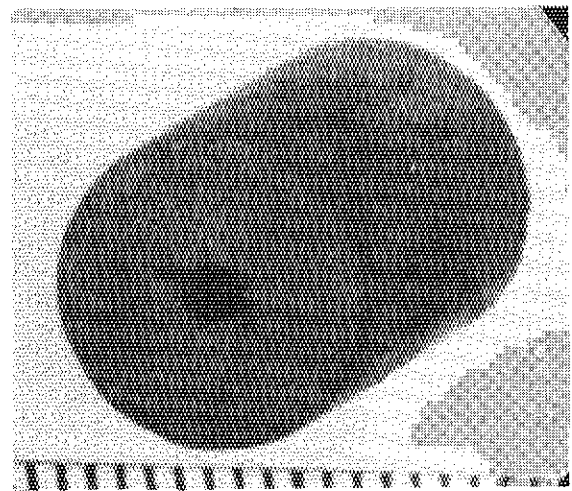
(a) Matrix : coke
Binder : 30^w/o
Irradiated in VP-1 capsule



(b) Matrix : Isotropic coke graphite
Binder : 20^w/o
Irradiated in VP-4 capsule



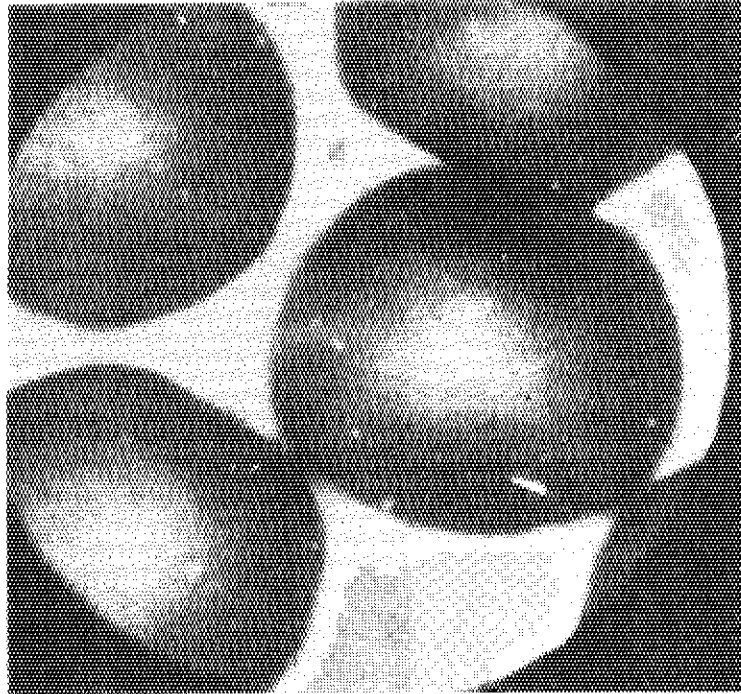
(c) Matrix : Needle coke graphite
Binder : 10^w/o



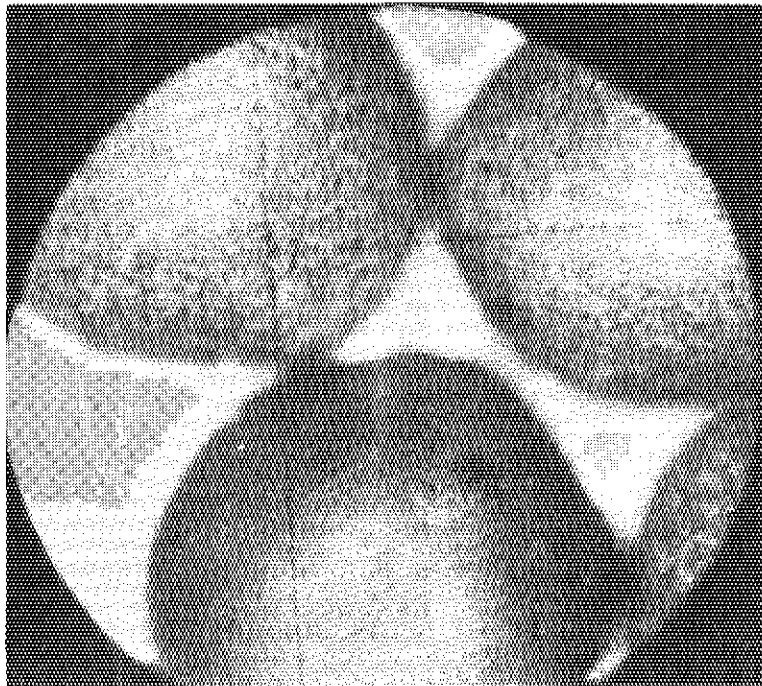
(d) Matrix : Needle coke graphite
Binder : 10^w/o

Irradiated in VP-2 capsule

Fig. 12 External views of fuel compacts irradiated in VP-capsules

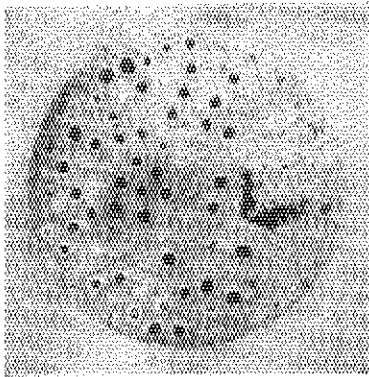


(a) Particles : 71FC2



(b) Particles : 70NC5

Fig. 13 External views of coated fuel particles irradiated at temperature 1500°C in VP-4 capsule



(a) Sectional view

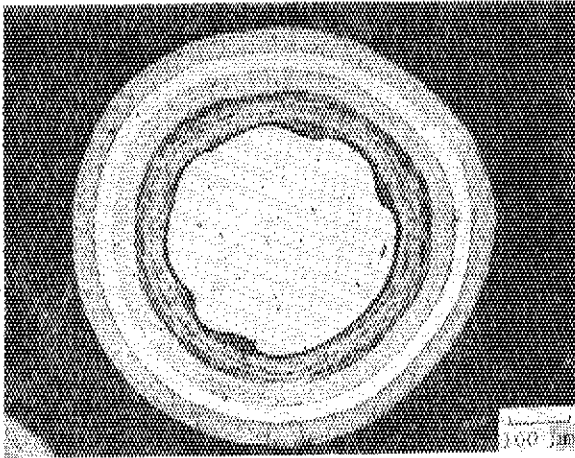


(b) Coated fuel particle in compact

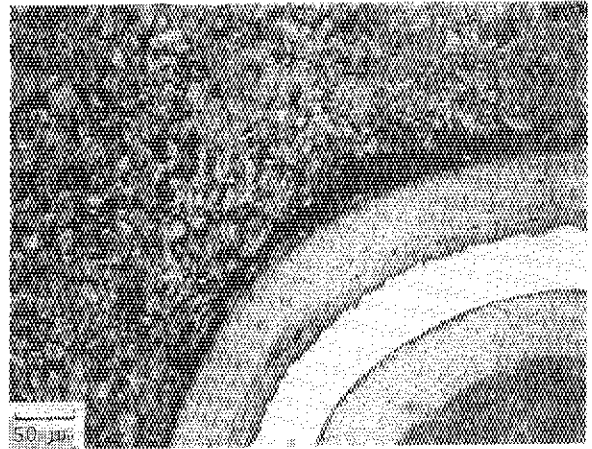


(c) Compact matrix

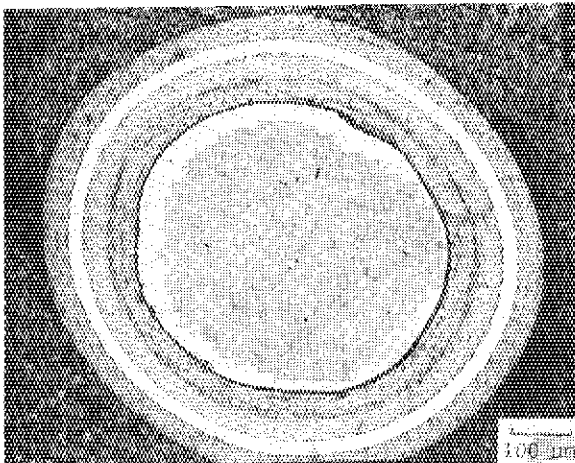
Fig. 14 Sectional views of fuel compacts before irradiation for VP-1 capsule



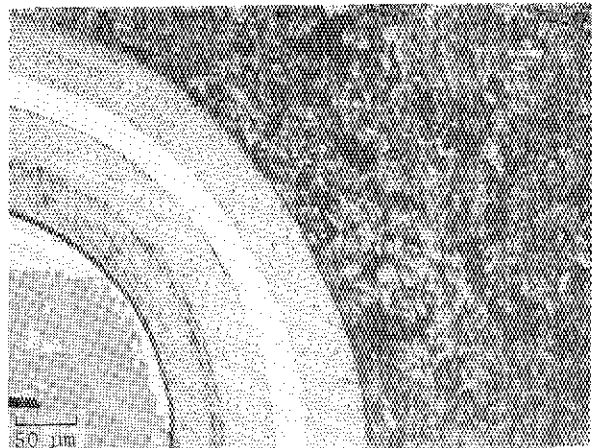
(a) Coated fuel particle
 Compact : 71 FP5 B
 Matrix : Isotropic coke graphite
 Binder : 20W/o



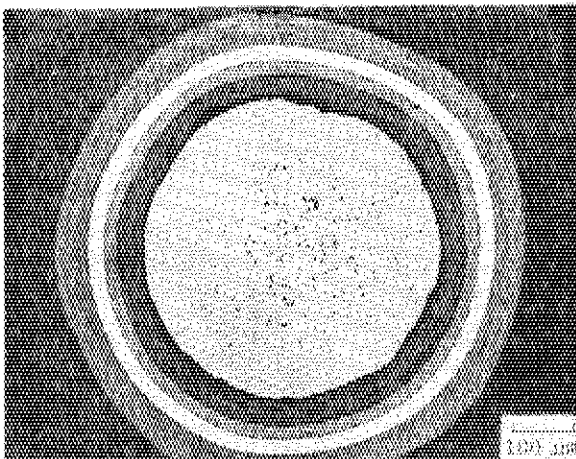
(b) Matrix



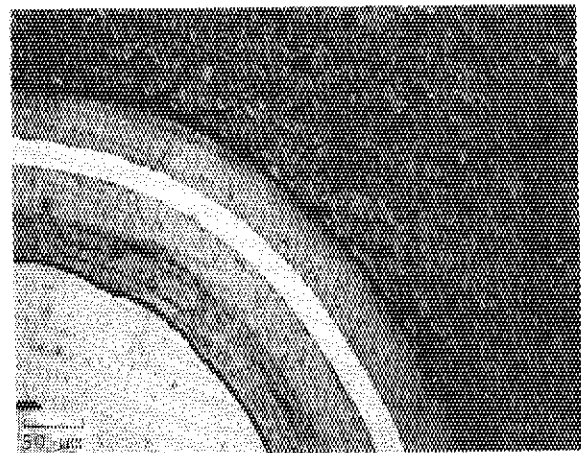
(c) Coated fuel particle
 Compact : 71 FP5 B
 Matrix : Needle coke graphite
 Binder : 10W/o



(d) Matrix

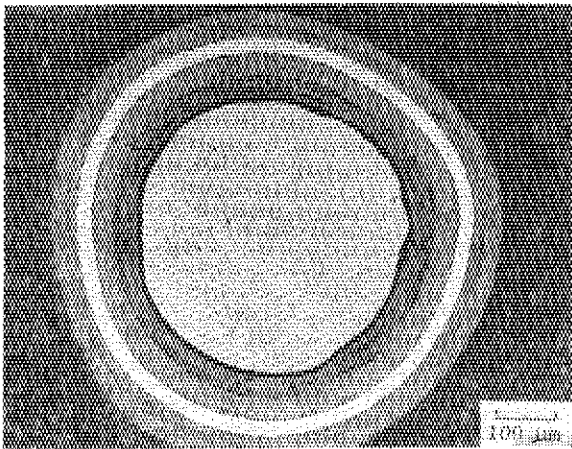


(e) Coated fuel particle
 Compact : 71 FP5 B
 Matrix : Needle coke graphite
 Binder : 20W/o

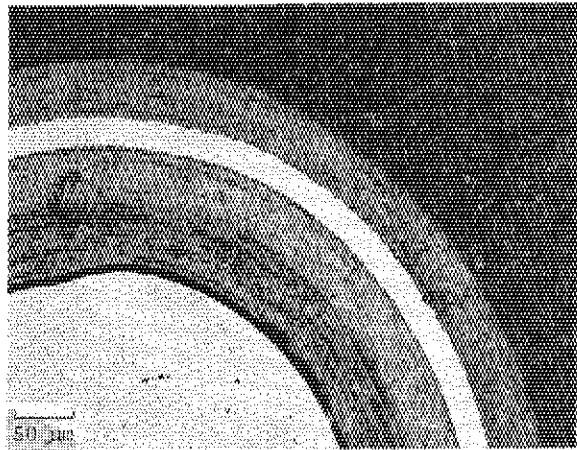


(f) Matrix

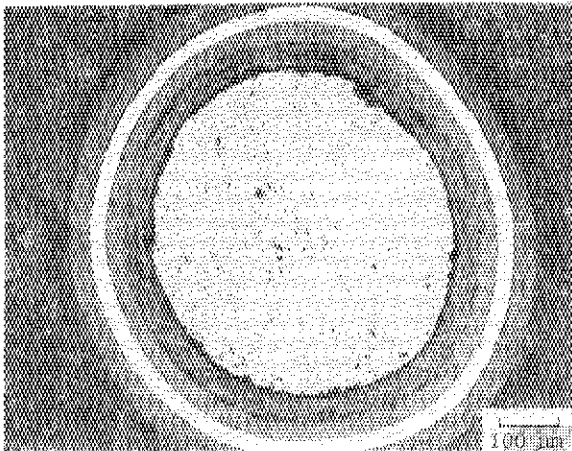
Fig. 15 Sectional views of fuel compacts before irradiation for VP-2 and VP-4 capsule



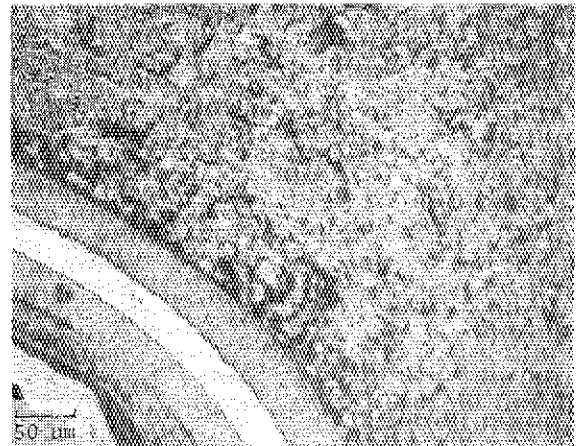
(a) Coated full particle
 Compact : 71 FP4 B
 Matrix : Isotropic coke graphite
 Binder : 20 W/o



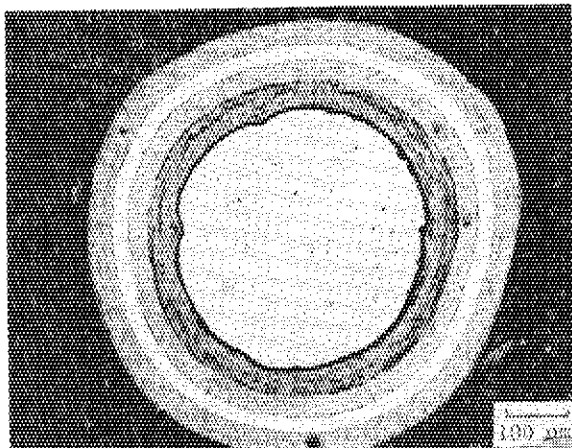
(b) Matrix



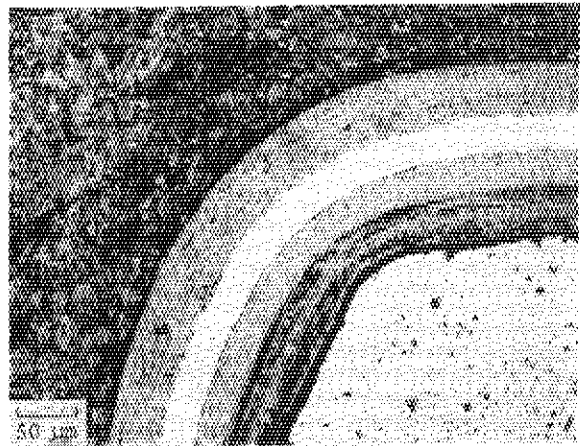
(c) Coated fuel particle
 Compact : 71 FP5 B
 Matrix : Needle coke graphite
 Binder : 10 W/o



(d) Matrix

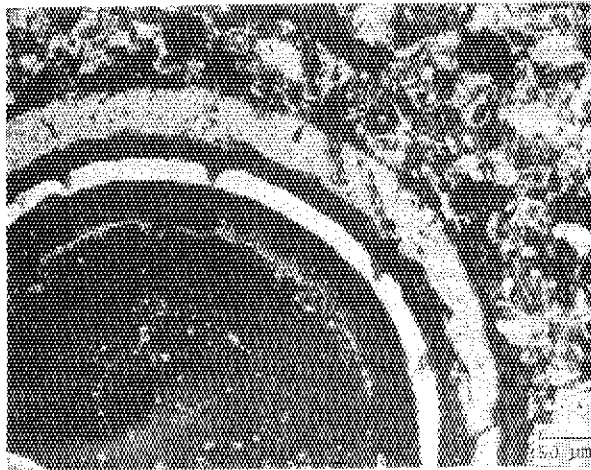


(e) Coated fuel particle
 Compact : 71 FP5 B
 Matrix : Needle coke graphite
 Binder : 20 W/o

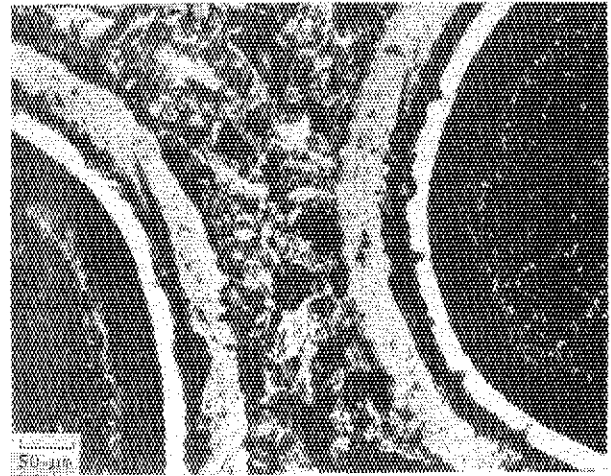


(f) Matrix

Fig. 16 Sectional views of fuel compacts after out-of-pile heating at temperature 1380°C for 270hrs

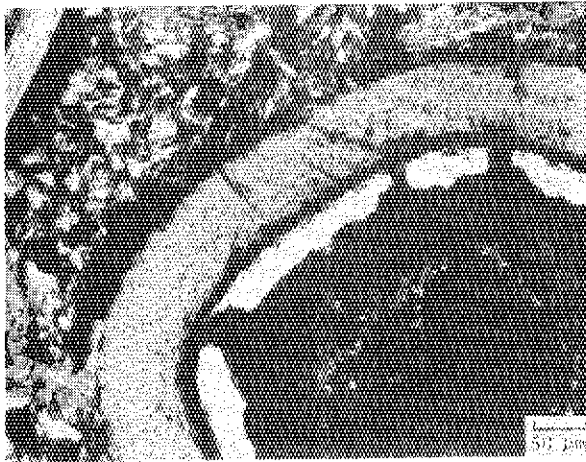


(a)

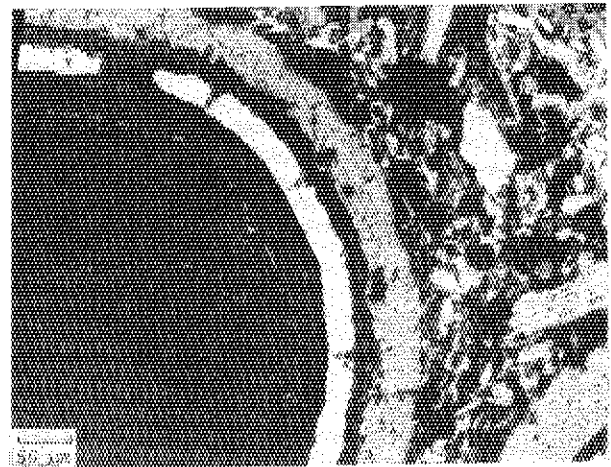


(b)

Irradiated in the middle of capsule



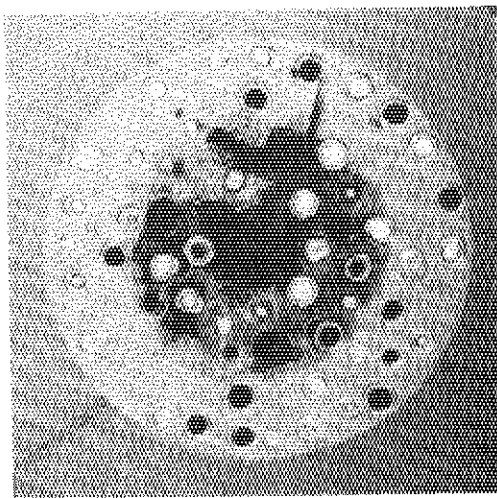
(c)



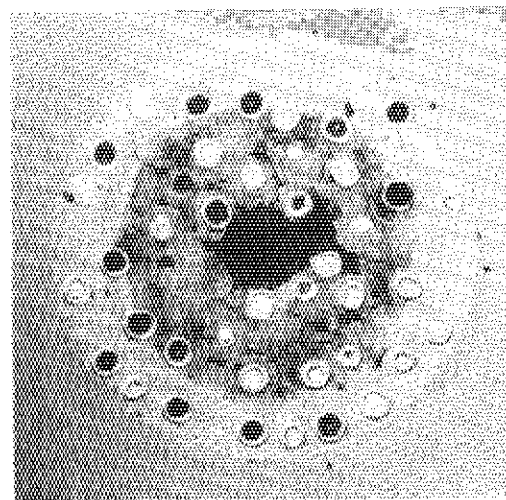
(d)

Irradiated in the bottom of capsule

Fig. 17 Sectional views of fuel compacts after irradiation at temperature in the range 900-950°C in VP-1 capsule

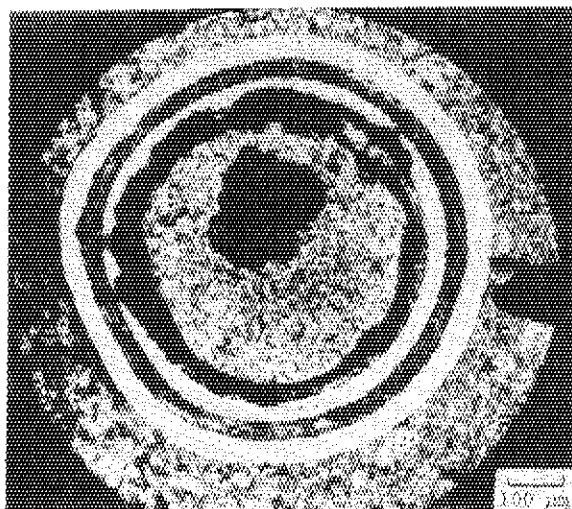


Compact : 71 FP5 B
Matrix : Needle coke graphite
Binder : 20 w/o
Capsule : VP-2

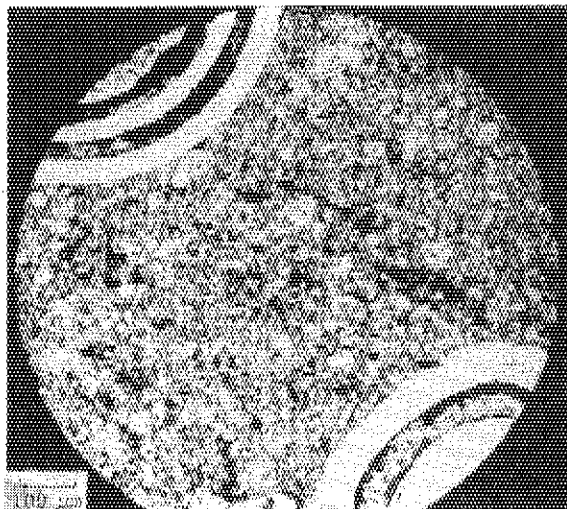


Compact : 71 FP4 B
Matrix : Isotropic coke graphite
Binder : 20 w/o
Capsule : VP-4

Fig. 18 Cross sections of fuel compacts after irradiation in VP-2 and VP-4 capsules

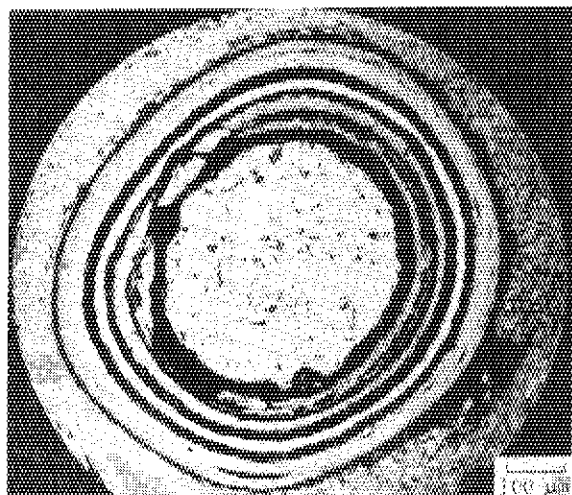


(a) Compact : 71FP4B
Matrix : Isotropic coke graphite
Binder : 20^w%

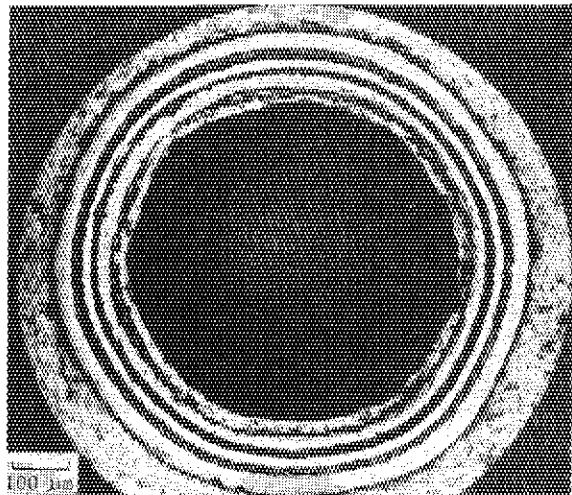


(b) Matrix

Irradiated in the top of capsule

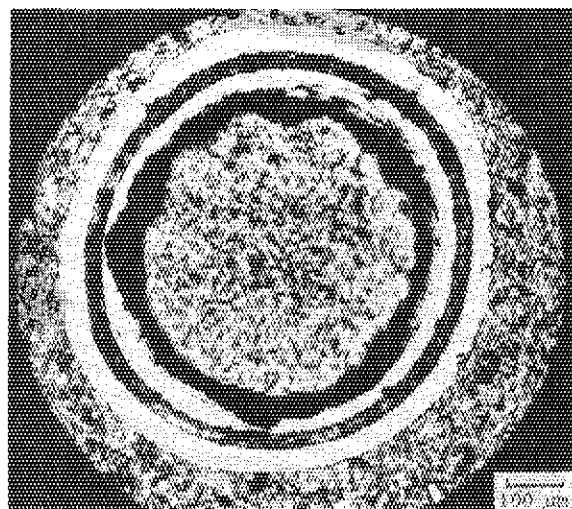


(c) Compact : 71FP5B
Matrix : Isotropic coke graphite
Binder : 10^w%

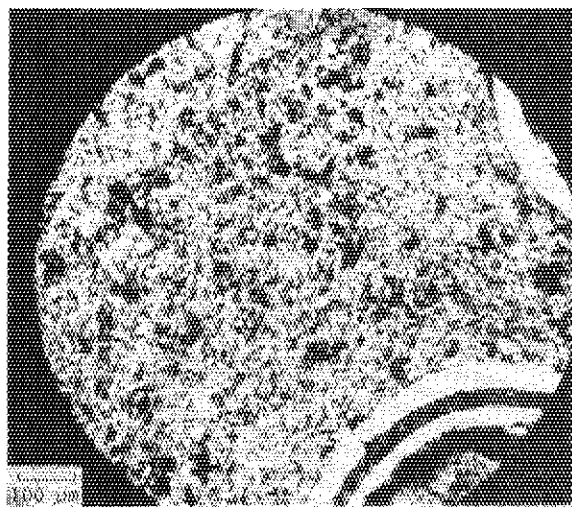


(d) Matrix

Irradiated in the middle of capsule



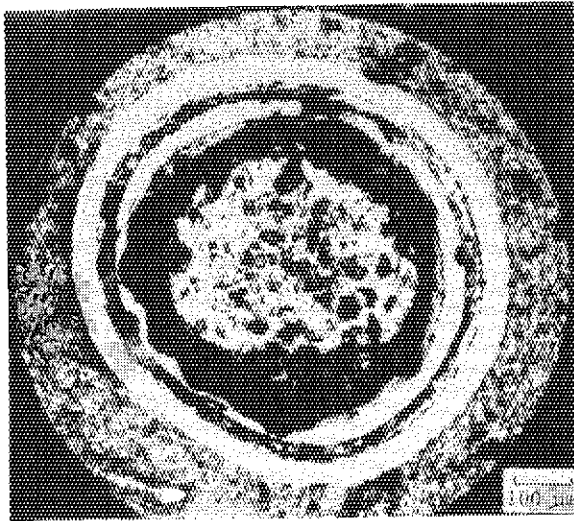
(e) Compact : 71FP5B
Matrix : Needle coke graphite
Binder : 20^w%



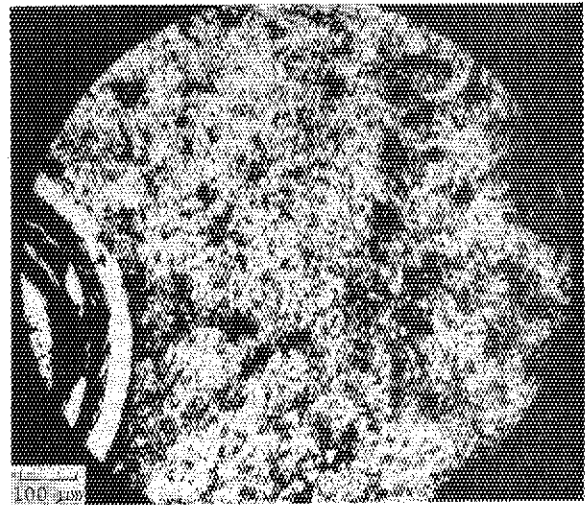
(f) Matrix

Irradiated in the bottom of capsule

Fig. 19 Sectional views of fuel compacts after irradiation at temperature in the range 1330-1380°C in VP-2 capsule

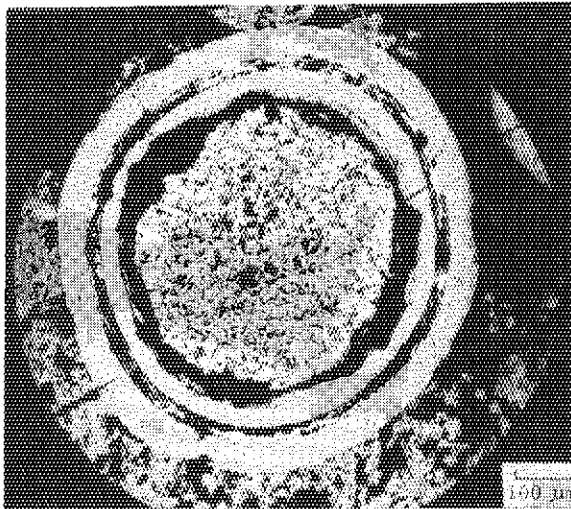


(a) Compact : 71FP5 B
Matrix : Needle coke graphite
Binder : 10^w%

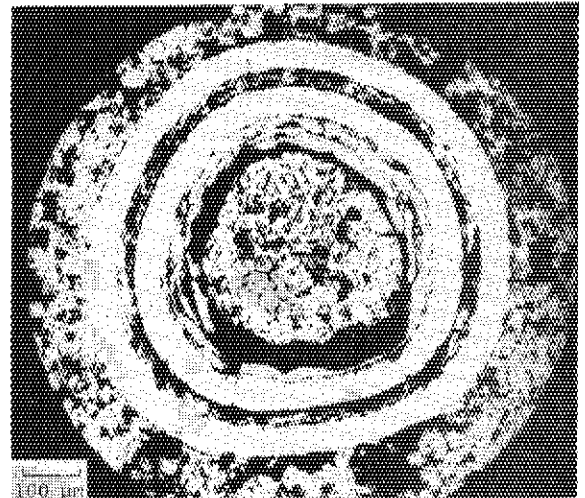


(b) Matrix

Irradiated in the top of capsule

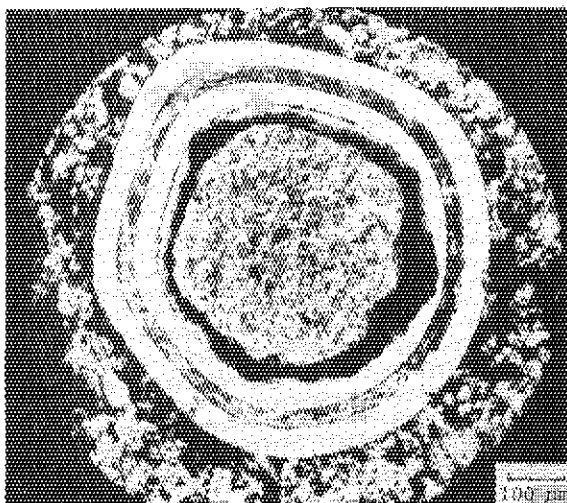


(c) Compact : 71FP5 B
Matrix : Needle coke graphite
Binder : 20^w%

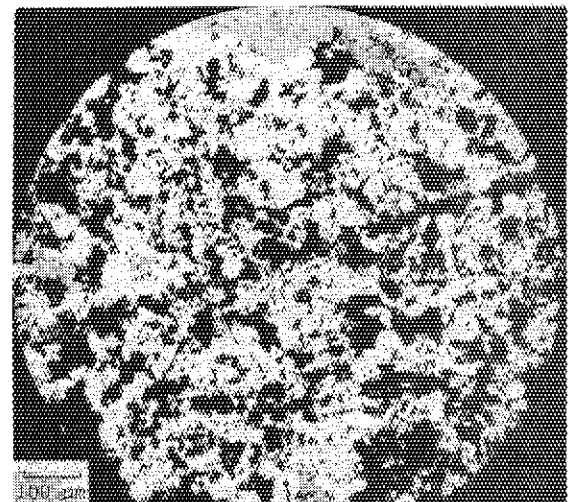


(d)

Irradiated in the middle of capsule



(e) Compact : 71FP5 B
Matrix : Isotropic coke graphite
Binder : 20^w%



(f) Matrix

Irradiated in the bottom of capsule

Fig. 20 Sectional views of fuel compacts after irradiation at temperature in the range 1450-1500°C in VP-4 capsule