

JAERI-M
83-092

JRR-2, VT-1孔による被覆粒子
燃料コンパクトの照射試験

1983年7月

菊池 輝男・井川 勝市・松島 秀夫・石本 清

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

JRR-2, VT-1 孔による被覆粒子燃料コンパクトの照射試験

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

菊池 輝男・井川 勝市・松島 秀夫⁺・石本 清⁺

(1983年5月30日受理)

多目的高温ガス炉のMK-III仕様に準じて製作した縮小寸法の燃料コンパクトを、V1F-16H およびV1F-24H キャプセルに封入し、JRR-2, VT-1 孔において、照射温度 600~1350℃ で、2 または 3 サイクル照射した。これらのキャプセルの高速中性子照射量は、3 サイクル照射で最大 6.4×10^{18} (n/cm²) (E > 1 MeV) であった。これらの照射により、被覆粒子の緩衝層には半径方向のクラックが、また第2層から緩衝層の剥離が観察された。また、この照射による燃料コンパクトの長さおよび直径の変化は、いずれも収縮で、その収縮率は、それぞれ 0.3 ~ 0.4 % および 0.1 % 以下であった。

⁺ 研究炉管理部

Irradiation experiments of coated particle fuel in JRR-2, VT-1 hole

Teruo KIKUCHI, Katsuichi IKAWA, Hideo MATSUSHIMA,⁺ Kiyoshi, ISHIMOTO⁺

Department of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 30, 1983)

Reduced size fuel compacts for HTGR which were sealed in VLF-16H and VLF-24H capsule, were irradiated in VT-1 irradiation hole of JRR-2 for 2 or 3 cycles at 600 to 1350 °C. The purpose of this experiments are to obtain the information on the irradiation behaviour of coated particle fuel. The maximum fast neutron fluence is about 6.4×10^{18} (n/cm²) (E>1 MeV). From these experiments, initial state of radial crack in buffer coating and initiation of circumferential crack between buffer layer and inner high density pyrocarbon layer were found and radiation induced shrinkage on length and diameter of fuel compacts are 0.3 to 0.4 % and less than 0.1 % respectively.

Keywords: HTGR, Fuel, Fuel Compact, Coated Particle, Irradiation,
Postirradiation Examination

⁺) Department of Research Reactor Operation, Tokai Research Establishment, JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの概要	1
3. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの照射条件	2
4. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの照射後試験	3
4.1 照射後試験の概要	3
4.2 キャプセルの外筒および内筒の外観	3
4.3 燃料コンパクト	3
4.3.1 外 観	3
4.3.2 寸 法	3
4.3.3 重 量	4
4.3.4 金 相	4
4.3.5 酸浸出試験	6
4.3.6 電解解砕粒子の外観および X 線検査	7
4.4 黒鉛スリーブ	9
4.4.1 外 観	9
4.4.2 寸 法	9
4.4.3 γ 線スペクトロメトリー	9
4.5 F/M測定	10
5. 考 察	11
6. ま と め	13
謝 辞	14
参考文献	14

Contents

1.	Introduction	1
2.	Outline of VLF-16H and VLF-24H capsule	1
3.	Irradiation condition	2
4.	Postirradiation examination	3
4.1	Outline of postirradiation examination	3
4.2	Visual examination of capsule	3
4.3	Fuel compact	3
4.3.1	Visual examination	3
4.3.2	Dimension	3
4.3.3	Weight	4
4.3.4	Ceramography	4
4.3.5	Leaching examination	6
4.3.6	Visual examination and X-ray radiograph of deconsolidated coated particles	7
4.4	Graphite sleeve	9
4.4.1	Visual examination	9
4.4.2	Dimension	9
4.4.3	Gamma spectrometry	9
4.5	Fluence monitor	10
5.	Discussion	11
6.	Conclusion	13
	Acknowledgment	14
	Reference	14

1. は じ め に

JRR-2, VT-1 孔における被覆粒子燃料の照射試験は、低中性子照射領域における被覆粒子燃料の照射挙動を調べると同時に、炉外において達成の困難であった、 $1200 \sim 1400^{\circ}\text{C}$ における燃料コンパクトの熱伝導率のデータの取得を目標に計画されたもので、すでに3本のキャプセル(V1F-11H, V1F-16H および V1F-24H)の照射を行なった。このうち、V1F-11H キャプセルの照射試験に対しては、照射下の熱特性試験並びに照射特性試験についてすでに報告した^{1), 8)}。本報告は、これらの報告につづいて、V1F-16H および V1F-24H キャプセルにおいて実施された照射試験のうち、被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動をまとめたものである。なお、これらのキャプセルの照射により取得した、燃料コンパクトの熱伝導率については、別に報告する予定である。

V1F-16H および V1F-24H キャプセルに封入した、被覆粒子燃料コンパクトは、MK-III 仕様の被覆粒子を、15, 22, 30 または 35 v/o 分散させたもので、JRR-2, VT-1 孔において、2 または 3 サイクル照射された。これらのキャプセルは、実験の性格上、照射温度を $600 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ まで変えて照射した。高速中性子照射量は、V1F-16H キャプセルで最大 $6 \times 10^{18} (\text{n/cm}^2) (E > 1 \text{ MeV})$ 、V1F-24H キャプセルで最大 $3.5 \times 10^{18} (\text{n/cm}^2) (E > 1 \text{ MeV})$ である。このように、これらのキャプセルの高速中性子照射量はきわめて少ないが、被覆粒子燃料の損傷は、高燃焼、高照射量において突然おこるものではなく、中性子照射量の低い領域からおこっており、これが蓄積されて破損になるために、被覆粒子燃料の照射挙動を解析する場合、このような中性子照射量の少ない領域における知見が必要となる。このような観点から、これらのキャプセルで照射した被覆粒子燃料の挙動を調べた。

2. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの概要

V1F-16H および V1F-24H キャプセルの構造を、それぞれ Fig.1 および Fig.2 に示す。V1F-16H キャプセルでは、被覆粒子充填率 15% および 20% の燃料コンパクトを、それぞれ 5 個ずつ直列に並べ、その両端に黒鉛製ダミーコンパクトを配置し、黒鉛スリーブ中に入れた。被覆粒子充填率 15% の燃料コンパクトの入った黒鉛スリーブは下段に、30% のそれは上段にして、ニオブ-ジルコニウム合金筒に入れ、溶接により封じた。ジルコニウム合金筒は、そのまわりにアルミニウムの熱媒体を配置し、フィン付アルミニウム外筒に入れ、溶接により封じた。燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブ中には、半径方向の温度勾配を測定するために、W-Re 熱電対がそれぞれ 2 対ずつ、上下段合わせて計 8 対装荷されている。アルミニウムの熱媒体中には長さ方向の温度分布を測定するため、CA 熱電対が 3 対装荷されている。V1F-24H キャプセルには、被覆粒子充填 22% 燃料コンパクトを下段に、被覆粒子充填率 35% の燃料コンパクトを上段に、それぞれ 5 個ずつを、V1F-16H キャプセル同様充填した。なお、V1F-

1. は じ め に

JRR-2, VT-1 孔における被覆粒子燃料の照射試験は、低中性子照射領域における被覆粒子燃料の照射挙動を調べると同時に、炉外において達成の困難であった、 $1200 \sim 1400^{\circ}\text{C}$ における燃料コンパクトの熱伝導率のデータの取得を目標に計画されたもので、すでに3本のキャプセル(V1F-11H, V1F-16H および V1F-24H)の照射を行なった。このうち、V1F-11Hキャプセルの照射試験に対しては、照射下の熱特性試験並びに照射特性試験についてすでに報告した^{1), 8)}。本報告は、これらの報告につづいて、V1F-16H および V1F-24Hキャプセルにおいて実施された照射試験のうち、被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動をまとめたものである。なお、これらのキャプセルの照射により取得した、燃料コンパクトの熱伝導率については、別に報告する予定である。

V1F-16H および V1F-24Hキャプセルに封入した、被覆粒子燃料コンパクトは、MK-III仕様の被覆粒子を、15, 22, 30 または 35 v/o 分散させたもので、JRR-2, VT-1 孔において、2 または 3 サイクル照射された。これらのキャプセルは、実験の性格上、照射温度を $600 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ まで変えて照射した。高速中性子照射量は、V1F-16Hキャプセルで最大 $6 \times 10^{18} (\text{n/cm}^2) (E > 1 \text{ MeV})$ 、V1F-24Hキャプセルで最大 $3.5 \times 10^{18} (\text{n/cm}^2) (E > 1 \text{ MeV})$ である。このように、これらのキャプセルの高速中性子照射量はきわめて少ないが、被覆粒子燃料の損傷は、高燃焼、高照射量において突然おこるものではなく、中性子照射量の低い領域からおこっており、これが蓄積されて破損になるために、被覆粒子燃料の照射挙動を解析する場合、このような中性子照射量の少ない領域における知見が必要となる。このような観点から、これらのキャプセルで照射した被覆粒子燃料の挙動を調べた。

2. V1F-16 および V1F-24Hキャプセルの概要

V1F-16H および V1F-24Hキャプセルの構造を、それぞれ Fig.1 および Fig.2 に示す。V1F-16Hキャプセルでは、被覆粒子充填率 15% および 20% の燃料コンパクトを、それぞれ 5 個ずつ直列に並べ、その両端に黒鉛製ダミーコンパクトを配置し、黒鉛スリーブ中に入れた。被覆粒子充填率 15% の燃料コンパクトの入った黒鉛スリーブは下段に、30% のそれは上段にして、ニオブ-ジルコニウム合金筒に入れ、溶接により封じた。ジルコニウム合金筒は、そのまわりにアルミニウムの熱媒体を配置し、フィン付アルミニウム外筒に入れ、溶接により封じた。燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブ中には、半径方向の温度勾配を測定するために、W-Re 熱電対がそれぞれ 2 対ずつ、上下段合わせて計 8 対装荷されている。アルミニウムの熱媒体中には長さ方向の温度分布を測定するため、CA 熱電対が 3 対装荷されている。V1F-24Hキャプセルには、被覆粒子充填 22% 燃料コンパクトを下段に、被覆粒子充填率 35% の燃料コンパクトを上段に、それぞれ 5 個ずつを、V1F-16Hキャプセル同様充填した。なお、V1F-

24H キャプセルと V1F-16H キャプセルのちがいは、燃料コンパクトのほかに、V1F-24H キャプセルには、SPD (Self-powered neutron detector, 自己出力中性子検出器) を、装荷したことである。

V1F-16H キャプセルに封入した燃料コンパクトの特性を Table 2 に、この燃料コンパクトに分散した被覆粒子の特性を Table 1 に、V1F-24H キャプセルに封入した燃料コンパクトの特性を Table 4 に、この燃料コンパクトに分散した被覆粒子の特性を、Table 3 に示す。照射前の燃料コンパクトの断面写真の一例として、V1F-24H キャプセルに封入した燃料コンパクト、79FPTC22 および 79FPTC35 の断面写真を、それぞれ Fig.3-a および Fig.3-b に示す。被覆粒子は、多目的高温ガス実験炉の MK-III 設計仕様に準じて製造されている。燃料コンパクトについても、寸法および被覆粒子の充填率以外は、MK-III 設計仕様に準じている。これらのキャプセル内での燃料コンパクトの配列を、Fig.4-a および Fig.4-b に示す。

黒鉛スリーブおよびダミーコンパクトは、微粒子等方質黒鉛 IG-11 により製作した。アルミニウムの熱媒体中には、中性子照射量を測定するために、Al-Co 合金線 (Co の含有率 0.024 %, 直径 0.5 mm, 長さ 30 cm) を装荷した。また、これらのキャプセルは、アルミニウム外筒とニオブ内筒の間の充填ガスの種類を変えて、照射温度の制御に利用した。なお、温度制御に使用したガスは、ヘリウムおよびネオンである。

3. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの照射条件

V1F-16H キャプセルは、JRR-2 の VT-1 孔において、R2-54-07 (1979.10. 22-11. 2), R2-54-08 (1979.11. 12-11. 23) および R2-54-09 (1979.12. 3-12.14) と 3 サイクル、V1F-24H キャプセルは、同炉、同照射孔において、R2-55-04 (1980.11. 10-11. 21) および R2-55-05 (1980.12. 1-12. 12) と 2 サイクル照射した。V1F-16H キャプセルの R2-54-07, R2-54-08 および R2-54-09 サイクルにおける、キャプセル各部の照射中の温度を、それぞれ Fig.5, Fig.6 および Fig.7 に、V1F-24H キャプセルの R2-55-04 および R2-55-05 サイクルにおけるそれらを、それぞれ Fig.8 および Fig.9 に示す。これらの図において、T/C1 および T/C2 は、下段に充填されている燃料コンパクトの、T/C3 および T/C4 は同じく黒鉛スリーブ中の、T/C5 および T/C6 は上段に充填されている燃料コンパクトの、T/C7 および T/C8 は同じく黒鉛スリーブ中の、T/C9 ~ T/C11 はアルミニウムの熱媒体中の照射温度である。これらの図にみられる通り、照射温度は照射時間に対していろいろと変えているが、これは燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスと温度との関係を、求めることを目的としているためである。V1F-16H および V1F-24H キャプセルの照射条件をまとめて、Table 5 および Table 6 に示す。これらの表に示した中性子束および中性子照射量は、JRR-2 の中性子の空間分布²⁾からの推定値である。さらに、この熱中性子束の空間分布から推定した燃焼率は、V1F-16H キャプセルで最大値 0.3 % FIMA, V1F-24H キャプセルで最大値 0.2 % FIMA である。

24H キャプセルと V1F-16H キャプセルのちがいは、燃料コンパクトのほかに、V1F-24H キャプセルには、SPD (Self-powered neutron detector, 自己出力中性子検出器) を、装荷したことである。

V1F-16H キャプセルに封入した燃料コンパクトの特性を Table 2 に、この燃料コンパクトに分散した被覆粒子の特性を Table 1 に、V1F-24H キャプセルに封入した燃料コンパクトの特性を Table 4 に、この燃料コンパクトに分散した被覆粒子の特性を、Table 3 に示す。照射前の燃料コンパクトの断面写真の一例として、V1F-24H キャプセルに封入した燃料コンパクト、79FPTC22 および 79FPTC35 の断面写真を、それぞれ Fig.3-a および Fig.3-b に示す。被覆粒子は、多目的高温ガス実験炉の MK-III 設計仕様に準じて製造されている。燃料コンパクトについても、寸法および被覆粒子の充填率以外は、MK-III 設計仕様に準じている。これらのキャプセル内での燃料コンパクトの配列を、Fig.4-a および Fig.4-b に示す。

黒鉛スリーブおよびダミーコンパクトは、微粒子等方質黒鉛 IG-11 により製作した。アルミニウムの熱媒体中には、中性子照射量を測定するために、Al-Co 合金線 (Co の含有率 0.024 %, 直径 0.5 mm, 長さ 30 cm) を装荷した。また、これらのキャプセルは、アルミニウム外筒とニオブ内筒の間の充填ガスの種類を変えて、照射温度の制御に利用した。なお、温度制御に使用したガスは、ヘリウムおよびネオンである。

3. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの照射条件

V1F-16H キャプセルは、JRR-2 の VT-1 孔において、R2-54-07 (1979.10. 22-11. 2), R2-54-08 (1979.11. 12-11. 23) および R2-54-09 (1979.12. 3-12.14) と 3 サイクル、V1F-24H キャプセルは、同炉、同照射孔において、R2-55-04 (1980.11. 10-11. 21) および R2-55-05 (1980.12. 1-12. 12) と 2 サイクル照射した。V1F-16H キャプセルの R2-54-07, R2-54-08 および R2-54-09 サイクルにおける、キャプセル各部の照射中の温度を、それぞれ Fig.5, Fig.6 および Fig.7 に、V1F-24H キャプセルの R2-55-04 および R2-55-05 サイクルにおけるそれらを、それぞれ Fig.8 および Fig.9 に示す。これらの図において、T/C1 および T/C2 は、下段に充填されている燃料コンパクトの、T/C3 および T/C4 は同じく黒鉛スリーブ中の、T/C5 および T/C6 は上段に充填されている燃料コンパクトの、T/C7 および T/C8 は同じく黒鉛スリーブ中の、T/C9 ~ T/C11 はアルミニウムの熱媒体中の照射温度である。これらの図にみられる通り、照射温度は照射時間に対していろいろと変えているが、これは燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスと温度との関係を、求めることを目的としているためである。V1F-16H および V1F-24H キャプセルの照射条件をまとめて、Table 5 および Table 6 に示す。これらの表に示した中性子束および中性子照射量は、JRR-2 の中性子の空間分布²⁾からの推定値である。さらに、この熱中性子束の空間分布から推定した燃焼率は、V1F-16H キャプセルで最大値 0.3 % FIMA, V1F-24H キャプセルで最大値 0.2 % FIMA である。

4. V1F-16 および V1F-24H キャプセルの照射後試験

4.1 照射後試験の概要

V1F-16H および V1F-24H キャプセルの照射後試験のフローシートを Fig.10 に示す。まず最初にキャプセルの外筒を切断し、フルエンスモニターと内筒を取出す。フルエンスモニターについては放射能を測定し、これから中性子照射量を求める。次に内筒を切断し、燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、ダミーコンパクトを取出す。黒鉛スリーブおよびダミーコンパクトは、外観検査を行なったあと黒鉛スリーブのみ長さ 10 mm 毎に切断しγ-スペクトロメトリーにより、長さ方向の FP 分布を求める。燃料コンパクトは、外観検査、寸法、重量測定を行なったあと、#2, #4, #7, #9 のコンパクト (Fig.3 および Fig.4 参照) については、電気化学的解砕および酸浸出により露出ウラン率を測定する。残りの #1, #3, #5, #6, #8 および #10 燃料コンパクトについては、金相試験を行なう。さらに、V1F-24H キャプセルの燃料コンパクトのみ、酸浸出試験のあとで、電解解砕粒子の外観検査および X 線マイクロラジオグラフの撮影を行なう。

4.2 キャプセルの外筒および内筒の外観

キャプセルの外筒および内筒については、目視による外観検査を行なった結果、内外筒表面の変色、内外筒の変形および損傷や腐食、溶接個所におけるクラックの生成などは全くみられなかった。なお、V1F-16H および V1F-24H キャプセルの内筒の外観写真を、Fig.11~Fig.13 に示す。

4.3 燃料コンパクト

4.3.1 外 観

V1F-16H キャプセルで照射した燃料コンパクトの外観写真を、Fig.14 および Fig.15 に、V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトのそれを、Fig.16 および Fig.17 に示す。これらの燃料コンパクトの表面状態は、照射前のそれと比較して、全く変化がみられなかった。

4.3.2 寸 法

V1F-16H および V1F-24H キャプセルに充填した燃料コンパクトの照射前の寸法を、それぞれ Table 7 および Table 8 に、照射後の寸法をそれぞれ Table 9 および Table 10 に、照射による燃料コンパクトの長さの変化率を Table 11 および Table 12 に、直径の変化率を Table 13 および Table 14 に示す。V1F-16H キャプセルで照射した被覆粒子充填率 15 % および 30 % の燃料コンパクトの照射による長さの変化は、いずれも収縮で、その収縮率の平均は 0.39 およ

び0.34%、直径の変化も収縮で、その収縮率の平均は0.08および0.05%で、被覆粒子充填率の大きい燃料コンパクトの方が、収縮率は若干大きい。V1F-24Hキャプセルで照射した被覆粒子充填率22%および35%の燃料コンパクトの照射による長さの変化は、前者が0.41%の収縮、後者は0.15%の膨張であった。直径については、前者が0.07%の収縮、後者が0.12%の収縮で、このキャプセルの場合直径の照射による寸法変化率は、粒子充填率の大きい方が大きかった。

4.3.3 重量

照射前後の燃料コンパクトの重量を、V1F-16HキャプセルについてTable15に、V1F-24HキャプセルについてTable16に示す。照射後において若干重量増加がみとめられるが、これは測定に際しての条件のちがいによるものと考えられる。

4.3.4 金相

V1F-24Hキャプセルで照射した燃料コンパクトについては、両キャプセルとも#1、#3、#5、#6、#8および#10について金相試験を行なった。中性子照射量は、燃料コンパクトの番号の小さい方が大きく、大きくなるに従って小さくなる。燃料コンパクトは、上端面から5mmの位置を切断し、0.5mm程度追込み研磨し、この面を観察した。なお、粗研磨に際しては、随時樹脂注入を行なって、被覆粒子の脱落や被覆層の破損を防止した。写真の倍率は、マクロ写真については5倍、ミクロ写真については、100倍または400倍である。観察は、燃料コンパクトの外側面近傍、中心付近および両者の中間の3箇所について行なった。

V1F-16Hキャプセルで照射した#1、#3、#5、#6、#8および#10の燃料コンパクトのマクロ写真を、それぞれFig.18、Fig.19、Fig.20、Fig.21、Fig.22およびFig.23に、V1F-24Hキャプセルで照射した#1、#3、#5、#6、#8および#10の燃料コンパクトのそれを、それぞれ、Fig.24、Fig.25、Fig.26、Fig.27、Fig.28およびFig.29に示す。V1F-16Hキャプセルで照射した#1、#3、#5、#6、#8および#10の燃料コンパクトについて、周辺近傍、中間部中心近傍にわけて、それぞれの領域における被覆粒子とその被覆層の写真を各2枚ずつ、燃料核およびマトリックス材を各1枚ずつ、ミクロ金相写真を撮影した。これらのなかから代表的なものを選んで、Fig.30～Fig.45に示す。V1F-24Hキャプセルで照射した#1、#3、#5、#6、#8および#10の燃料コンパクトについても同様に撮影し、その代表的なものを、Fig.46～Fig.54に示す。

これらの燃料コンパクトの金相写真から、被覆粒子におこる変化として、次のようなことが観察された。

1. 第1層における槍先型損傷の生成
2. 第2層から第1層の剥離
3. 第1層内における周方向クラックの生成
4. 第1層の一部脱落、
5. 第2層の半径方向クラックの生成
6. 第3層の半径方向クラックの生成

7. 第4層の半径方向クラックの生成
8. 全層クラックの生成
9. 燃料核と第1層の間の空隙の生成

V1F-16H キャプセルで照射した燃料コンパクトについて、項目1の緩衝層における槍先型損傷は、金相試験を行なった全てのコンパクトにみられ、(Fig.30, 31, 33, 34, 37, 38, 41, 43 および 44) 特に、周辺部、中間部、中心部に関係なくおこっており、また燃料コンパクトの充填位置に関係なくおこっている。(最も中性子照射量の少ない #10 の燃料コンパクト中の被覆粒子の第1層において、槍先型損傷の生成はげしくおこっている。Fig.43 項目2の第2層から第1層の剥離については、槍先型損傷の先端を起点におこっているものと(Fig.31, 33, 34, 38, 41, 42), これとは全く無関係におこっているもの(Fig.34-b)と二種存在する。これらの槍生型損傷は、金相写真から判定して、第1層が収縮した結果生じたものと推定される。また、第1層の内部において、周方向のクラックが生成している。(項目3, Fig.35-a, 37-b)これらは、第1層内の被覆の欠陥が起点になって、生じたものと推定される。項目4に掲げた緩衝層の一部脱落については、槍先型損傷が生成しているところに、研磨の応力が作用した結果、生じたものと推定される。(Fig.30-d, 34-d, e, 37-b, d, 41-a, c) 項目5の第2層の半径方向のクラック、項目6の第3層の半径方向のクラックおよび項目8の貫通クラックは、Fig.34-e, 36-a, 38-dにみられるが、これらは照射によるよりはむしろ、これ以外の原因で生じたものと推定される。項目7の第4層の半径方向のクラックについては、かなり多くの被覆粒子にみられる。(Fig.30, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 43, 44) SiC と層は、照射によりほとんど収縮しないのに対し、熱分解炭素は収縮するために、照射量が増加すると第4層の破損がおこる。なお、第4層の破損は、未照射の被覆粒子の金相写真においてもときどきみられることがある。これは、被覆工程の際の残留応力のバランスが、研磨によりくずれるために生ずる結果と推定される。従って、これら第4層のクラックが、照射によるものか否かを、金相写真から判定するためには、かなり熟練を要する。項目9については、すべての粒子について観察されている。

V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトについても、V1F-16H キャプセルと同様の項目について調べた。このキャプセルにおいては、項目1の第1層における槍先型損傷は全くみられなかったが、項目2の第2層から第1層の剥離については、その初期段階が、Fig.46-a, b, 47-a, 53-b, c にみられた。項目3の第1層内における周方向のクラックについては、Fig.47-a, b において、若干みとめられるが、このクラックは不良被覆において観察される。以上の観察から、V1F-24H キャプセルにおいて照射した燃料コンパクトの被覆粒子の損傷は、V1F-16H にくらべてかなり少ないことがわかる。これは、中性子照射量が少ないためか(V1F-24Hの照射時間は、V1F-16Hの約2/3)、それともこのキャプセルで照射した被覆粒子の被覆層の組織が、照射に対して安定であることによるのか、これらの照射後試験からだけでは判定できない。

このほか、被覆粒子の照射においては SiC 層の劣化および腐食、燃料核の移動や燃料コンパクトのマトリックスにおけるクラックの生成があるが、これらのキャプセルの照射においては、

中性子照射量もわずかで、照射温度もそれほど高くないこともあって、このような変化は全く観察されなかった。また、これらのキャプセルで照射した燃料コンパクトの外側面近傍、中間、中心における被覆粒子の被覆層や燃料核またはマトリックス材の照射挙動について、位置の差は全く認められなかった。また、これらのキャプセルは、長さ方向に対し中性子束および温度の勾配が存在するが、燃料コンパクトの充填位置のちがいによる照射挙動の差は、金相写真からみれば、全く認められなかった。

以上のほかに、本照射試験に用いた燃料試料においては、製造の際に生じたと思われる欠陥が、わずかであるが観察された。すなわち、燃料核内の大きな空隙 (Fig.31-a, 31-b)、真球度の悪い燃料核 (Fig.49, 51)、第1層における空隙および組織の不良 (Fig.37-b, 47-b, d, 48-b, 49-a, b, 50-b, 51-a, 52-d)、第2層内における空隙 (Fig.32-b)、第3層における空隙 (Fig.50-a, 52-a)、第4層の空隙 (Fig.36-d, 40-c) である。真球度の悪い燃料核の場合、第1層の蒸着に際して、組織が不良になりやすく、またその蒸着厚さが、極端に厚くなるために、照射に際してクラックを生成しやすい (Fig.47-b)。以上観察された欠陥は、貫通破損でないから、FP放出量の増加に直接結びついていないが、更に照射量を増加させた場合どのような影響を及ぼすか、さらに照射試験が必要である。

4.3.5 酸浸出試験

照射剤燃料コンパクトについては、電解解砕、酸浸出試験により露出ウラン率を測定した。露出ウラン率の測定に使用した燃料コンパクトは、両キャプセルとも#2、#4、#6 および#9の燃料コンパクトである。これらの燃料コンパクトを硝酸溶液中で電気化学的に解砕したあと、加熱して露出ウランを浸出させ、浸出液の放射能を測定し、露出ウラン率を求めた。露出ウラン率の測定法は、V1F-16HキャプセルとV1F-24Hキャプセルとでは、若干異なる。V1F-16Hキャプセルの場合、浸出液全量および解砕粒子10粒の線量率をそれぞれ測定し、解砕粒子10粒の線量率を燃料コンパクト1個の線量率に換算し、浸出液の線量率をこの値で除して求めた。このようにして求めたV1F-16Hキャプセルの燃料コンパクトの露出ウラン率の測定結果を、Table 17に示す。粒子充填率15%の燃料コンパクトにおいては、露出ウランは全く検出されなかったが、粒子充填率30%の燃料コンパクトにおいては、 10^{-5} のオーダーの露出ウランが検出された。これらの値は、照射前の値と比較して、全く変わっていない。このことから、このキャプセルで照射した燃料コンパクトにおいては、照射により破損率の増加は、おこっていないものと考えられる。

V1F-24Hキャプセルで照射した燃料コンパクトについては、酸浸出後、浸出液を200mlに調整し、これから1mlをポリエチレン棒瓶にとり、ゲルマニウム検出器によりこの溶液に含まれる ^{144}Ce 、 ^{106}Ru 、 ^{137}Cs および ^{95}Zr の放射能を測定した。解砕被覆粒子については、この一部(300粒)をゲルマニウム検出器により測定し、これに含まれる ^{144}Ce 、 ^{106}Ru 、 ^{137}Cs および ^{95}Zr の放射能を求め、それぞれを燃料コンパクト1個中の放射能に換算し、浸出液中の各核種の放射能を燃料コンパクト1個中の同じ核種の放射能で除して求めた。なお、解砕粒子の放射能測定に際しては、X線ラジオグラフにより、被覆粒子の数を確認した。測定結果をTable 18に示す。

Table 18 の A/B が、燃料コンパクトの露出ウラン率である。ここで、各核種毎に算出した露出ウラン率は、わずかつづ値が異なっている。すなわち、 ^{144}Ce から求めた露出ウラン率が最も大きく、つづいて ^{137}Cs 、 ^{106}Ru 、 ^{95}Zr の順になっており、この順序は 4 個の燃料コンパクトに共通である。一方、同バッチの未照射の燃料コンパクト 2 個づつを、塩素化法により露出ウラン率を測定した結果、被覆粒子充填率 22% の燃料コンパクトについては、 5.5×10^{-3} および 3.3×10^{-4} 、粒子充填率 35% の燃料コンパクトについては、 4.1×10^{-3} および 1×10^{-3} であった³⁾。未照射燃料コンパクトの露出ウラン率は、 ^{144}Ce 以外の核種から求めた値に近い。

浸出液および電解解砕粒子中に含まれる FP 核種の放射能の測定から、燃料コンパクトの露出ウラン率を求めた場合、どうしてこのように値がばらつくのか、この理由としては次のようなことが考えられる。

1. 照射中における FP 核種の被覆粒子外への放出、
2. コンプトン散乱によりバックグラウンドが上昇する結果、光電ピーク面積がみかけ上減少、
3. 他の核種の光電ピークの干渉

項目 1 については、 ^{144}Ce よりはるかに動きやすい ^{137}Cs から求めた露出ウラン率の方が、 ^{144}Ce のそれより小さいから、この場合項目 1 はあてはまらない。項目 2 に関して、放射能の強い試料においては、コンプトン散乱の寄与は大きく、特にエネルギーの小さい光電ピークにおいて大きいから、約 300 粒の照射済被覆粒子を、ゲルマニウム検出器により測定する場合、 ^{144}Ce の 134 keV の光電ピークに対するコンプトン散乱の影響は特に大きいものと考えられ、その放射能を実際より小さく評価していると考えられる。なお、浸出液においては、その放射能は弱いから、コンプトン散乱の影響は無視できる。このような理由で、Table 18 の露出ウラン率は、光電ピークのエネルギーの小さい場合に大きく、大きくなるに従って大きくなるものと考えられる。この場合と同じ方法により、76F-6A キャプセルで照射した燃料コンパクトの露出ウラン率を求めた結果も、Table 18 と同じ傾向を示していた¹³⁾。さらに、76F-6A キャプセルにおいては、ウラン量と熱中性子照射量から、 ^{144}Ce および ^{137}Cs の生成量を計算により求め、浸出液中におけるこれらの FP 量を計算値で除した値は、Table 18 の ^{95}Zr から求めた値にほぼ等しかった。従って、Table 18 の露出ウラン率のなかでは、 ^{95}Zr から求めた値が、実際の値に最も近いものと考えられる。また、 ^{106}Ru と ^{137}Cs とから求めた露出ウラン率で、後者の方が大きいのは、 ^{106}Ru — ^{106}Rh の 511.9 keV の光電ピークに対しては ^{22}Na の光電ピークが、 ^{137}Cs の 661.6 keV のそれに対しては、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ のそれが、それぞれ干渉しているためと考えられる。このほか、試料自身による光電ピークの自己吸収の影響が考えられるが、粒子数が 300 粒程度で、これは無視できると考えられる。

4.3.6 電解解砕粒子の外観および X 線検査

V1F-16H キャプセルで照射した燃料コンパクトの電解解砕粒子については、外観および X 線検査は行なわなかった。V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトについてのみ、これらの結果を示す。#2、#4、#7 および #9 の燃料コンパクトの電解解砕粒子から、約 300 粒を任意に選び出し、これについて外観検査と X 線検査を行なった。Fig. 54(a) および Fig. 56 の(b)は、それぞれ #2 および #4 燃料コンパクトの電解解砕粒子の外観および X 線写真であり、

Fig.55 の(a)および Fig.57 の(b)は、それぞれ #7 および #9 の燃料コンパクトの電解解砕粒子の外観および X 線写真である。これらの粒子の外観は、いずれも健全であるが、Fig.55(b)の左下に、被覆の破損した粒子が 1 個みられる。被覆層に貫通破損が生じている場合、燃料核は酸浸出の際完全にとけだしてしまうため、X 線写真においては容易に健全粒子との判別がつく。Fig. 56(a)においては、破損粒子は 0、Fig. 56 (b)には 1 個、Fig.57 (a)には 1 個、Fig.57(b)には 5 個みられる。Fig.56 および Fig.57 の(a)、(b)の X 線写真のそれぞれの視野における全粒子数は、306、310、304 および 302 である。それぞれの視野内における破損粒子数を、それぞれの視野内における全粒子数で除せば、 0 、 3.2×10^{-3} 、 3.3×10^{-3} および 0.017 となる。なお、X 線撮影のために採取した粒子は、解砕粒子の母集団から無作為に抽出したものである。

次に、Fig.56 および Fig.57 の X 線ラジオグラフを拡大し、被覆粒子の内部の状況を調べることを試みた。Fig.58 は、Fig.56(a)の一部を拡大したもので、写真(a)の中央に示す粒子においては、燃料核と緩衝層との境界が、2 重に観察される。これは、燃料核が緩衝層中に移動した結果生じたものかどうかは、この写真のみでは明らかでない。写真(b)の中央に示す粒子では、燃料核と緩衝層との境界の一部に不明瞭な部分がみられるが、これは、燃料核が緩衝層に移動したためと推定される。Fig.59(a)、(b)および Fig.60(a)、(b)は、Fig.56 の(b)の一部を拡大したものである。Fig.59(a)の左の粒子は破損粒子で、燃料核は完全に浸出されており、右の粒子においては、燃料核から被覆層にウランが移動しているのが観察される。Fig.60 の(a)においても燃料核から緩衝層へのウランの移動が観察される。Fig.60 の中央の粒子は、誤って混入した SiC 核粒子であると考えられる。Fig.61 の写真(a)、(b)は Fig.57 の写真(a)の、Fig.62 の写真(a)、(b) および Fig.63 の写真は Fig.57 の写真(b)の一部を拡大したものである。Fig.61 の写真(a) および Fig.62 の写真(a)の中央の粒子には、被覆層のクラックが、Fig.61 の写真(b)および Fig. 62 の写真(b)の中央の粒子および Fig.63 の中央右および左の粒子においては、燃料核から被覆層へのウランの移動が観察される。

以上の観察から、ウランの移動には 2 つのタイプがあることがわかる。一つは、緩衝層内に均一に分布している場合であり、他の一つは、緩衝層内に不均一に分布している場合である。さらに、燃料核と緩衝層の境界を明確に識別できる場合とできない場合がある。これらは、それぞれ緩衝層へのウランの移動のメカニズムが異なるために生じた結果であると考えられる。さらに、これらの X 線写真を注意深く観察すると、燃料核と緩衝層との間に空隙が存在しているのが確認できる。また、一部の粒子 (Fig.60(a)、Fig.61(b)、Fig.62(c)および Fig.63) については、第 4 層上に白いまだら模様が確認されるが、この部分にはウランが集合しているものと考えられる。これらの照射済燃料コンパクトの電解解砕粒子にみられた燃料核から被覆層へのウランの移動、被覆層の破損および第 4 層のウラン汚染等は、同バッチの未照射燃料コンパクトについてもみられたことから³⁾、照射に際して生じたものではなく、燃料コンパクトの製造の際に生じたものと考えられる。

4.4 黒鉛スリーブ

4.4.1 外 観

V1F-16H および V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブの外観写真を、それぞれ Fig.64 および Fig.65 に示す。これらの写真にみられる通り、変色、変形、破損、亀裂および腐食等、外観上の変化は、全くみられなかった。

4.4.2 寸 法

V1F-16H キャプセルおよび V1F-24H キャプセルの照射前および照射後の外径および内径を、それぞれ Table19 および Table20 に示す。直径および内径は、黒鉛スリーブの上端付近および下端付近を、それぞれ 90° 間隔で 2 回測定した。これらの測定結果から、V1F-16H キャプセルの上段および下段の黒鉛スリーブおよび V1F-24H キャプセルの下段の黒鉛スリーブの外径は、照射により寸法変化がみられなかったが、V1F-24H キャプセルの上段の黒鉛スリーブの外径は、照射により約 0.4 % の膨張がみられた。しかし、内径について照射前後の値を比較すると、外径のそれと必ずしも一致していないことから、これらの測定誤差にもとずくバラツキと考えられる。

4.4.3 γ 線スペクトロメトリー

V1F-16H および V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブを、長さ 10mm ずつ切断し、これを純ゲルマニウム検出器により、これに含まれる核分裂生成物および放射化物を測定した。測定結果を、Table21 および Table22 に示す。なお、黒鉛スリーブの切断片に対しては、上段および下段スリーブともに、上端から番号を付した。V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブからは、 ^{144}Ce 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs および ^{60}Co が、黒鉛スリーブの全長にわたって検出された。V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブ中の、これらの核種の分布の状況を、Fig.66 に示す。V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブ中の核分裂生成物および放射化物は、前のキャプセルで検出された核種に加えて、 ^{125}Sb および $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が検出された。V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブ中の、これらの核種の分布の状況を、Fig.67 に示す。

V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブにおいて、 ^{137}Cs および ^{60}Co の分布はなだらかであるが、 ^{144}Ce の分布は上下にばらついており、下段の黒鉛スリーブにおいては、#1 と #4 の燃料コンパクトと、上段の黒鉛スリーブにおいては #6 の燃料コンパクトと対応する位置において、 ^{144}Ce の濃度が大きい。また、3 核種の間には分布の共通性がみられない。V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブにおいては、これら 3 核種とも上下にばらついており、特に ^{144}Ce については #9 の燃料コンパクトと対応する位置において、極端に大きい。またこのキャプセルにおいても、V1F-16H キャプセル同様、3 核種の間の分布の共通性はみられない。また、V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブでは、上段と下段とでこれらの放射性物質の含有量に、それほど大きなちがいはみられないが、V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブにおいては、上段の方が大きい。V1F-24H キャプセルにおける燃料コンパクトの照射温度は、上段の方が低く、中性子照射量は上段の方が少ない。固体 FP の放出量は照射温度に依存するから、下段

の黒鉛スリーブの方が、FP 存在量が多いはずであるが、V1F-24Hの黒鉛スリーブには、このような対応がみられない。

V1F-24Hキャプセルでは、Fig.4に示す通り、下段には粒子充填率22%の燃料コンパクトを、上段には粒子充填率35%の燃料コンパクトを、それぞれ5個ずつ充填した。黒鉛スリーブ中の ^{137}Cs および ^{144}Ce の濃度は、燃料コンパクトの粒子充填率と対応している。これらの燃料コンパクトの露出ウラン率を、同バッチの未照射の燃料コンパクトについて測定した結果、粒子充填率22%と35%とで、差はほとんどみられなかった。また、照射後試験における#2、#4、#7および#9の燃料コンパクトの酸浸出試験の結果は、4.3.5に述べた通り、これら4個の燃料コンパクトの露出ウラン率には、ほとんど差がみられなかった。しかし、4.3.6のX線ラジオグラフの観察においては、#9の燃料コンパクトの粒子破損率が特に大きかった。このように、#9の燃料コンパクトの酸浸出試験から求めた露出ウラン率と、X線ラジオグラフから求めたそれとは、一致していない。電解解砕粒子は、全数X線撮影をしていないために、どちらが正しいか判定を下すことはできない。しかし、被覆粒子破損率と黒鉛スリーブ中の ^{144}Ce の量とを、対応させるのは最も適当と考えられる。

4.5 F/M測定

フルエンスモニターについては、V1F-24Hキャプセルに装荷したもののみ測定した。線径0.5mm、長さ30cmのAl-Co合金（Coの含有率0.024%）のF/Mは、アルミニウム管でカバーされ、アルミニウム熱媒体中に装荷されている。照射終了後、アルミニウム管のカバーを除去し、上端から80、167、229、279および296mmの位置で、約4mmずつ切断し、それぞれアセトンにより洗浄し、乾燥したあと、天秤により重量測定を行なった。つづいて、純ゲルマニウム検出器により、このそれぞれに含まれる ^{60}Co の計数率を測定し、Amarsham製 ^{60}Co 標準線源を用いて校正し、この各々のF/Mの切断片の比放射能を求めた。F/M中の計数率のプロファイルを、Fig.68に示す。F/Mは、常にコアセンターから上に位置していたため、このような分布を示している。各F/M測定片の比放射能を、Table 23に示す。F/M測定片の採取位置と番号との対応は、Fig.68に示されている。

コバルトのフルエンスモニターを原子炉中で中性子照射した場合、生成する放射性核種の量は次の式から求めることができる。

$$A = N\phi\hat{\sigma}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

A：単位時間当りの崩壊数（dps）

N：ターゲット核種（ ^{59}Co ）の原子数

ϕ ：中性子束（ $\text{n}/\text{cm}^2\text{sec}$ ）

$\hat{\sigma}$ ： ^{59}Co の実効反応断面積（ cm^2 ）

λ ：生成核種（ ^{60}Co ）の壊変定数（ sec^{-1} ）

t：照射時間（sec）

である。なお、 $\hat{\sigma}$ は次の式から求めた。

$$\hat{\sigma} = \sigma_{0.0253} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \sqrt{\frac{T_n}{293}} \quad (2)$$

ここで、

$$\sigma_{0.0253} = 37 \text{ (barn)}$$

T_n (中性子温度は 300°C (573K))

を用いた。これから、 $\hat{\sigma} = 45.3 \times 10^{-24} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ となる。

A および N に、それぞれ Table 23 の値を、 λ および t にそれぞれ ^{60}Co の壊変定数、 $3.61 \times 10^{-4} \text{ (d}^{-1}\text{)}$ および照射日数、22 (d) を代入して中性子束を求め、その結果を Table 24 に示す。一方、VT-1 孔内の中性子束の空間分布と照射時間とから、中性子束の平均値を求め、同表に示す。さらに、 F/M から求めた中性子束 A を、VT-1 孔内の中性子束の空間分布から求めた値 B で除し、これを同じく Table 24 に示す。 A/B は、デプレッション係数と呼ばれる数値で、通常のキャプセルの熱計算には、0.75 を使用する¹⁴⁾。キャプセルの下から上にかけて、デプレッション係数の減少がみられるが、なぜこのようになっているのか不明である。

5. 考 察

原研が開発中の多目的高温ガス炉用燃料の照射試験は、すでに JMTR や JRR-2 において実施されてきたが^{4)~7),9)}、これらの照射試験は、主として、多目的高温ガス実験炉の使用温度以上において、これらの燃料が受けると予想される中性子照射量および燃焼率を上まわる量を目的としてきた。これらの照射試験のなかで、第1次および第2次 OGL-1 ガスループの照射試験は、高速中性子照射量が比較的少なく、それでも 1.2×10^{20} および $2.3 \times 10^{20} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) であった⁹⁾。これに対して、V1F-16H および V1F-24H キャプセルの高速中性子照射量は最大で、それぞれ、 6.4×10^{18} および $3.4 \times 10^{18} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ ($E > 1 \text{ MeV}$) であった。これらのキャプセルの高速中性子照射量を、0.18 MeV 以上のそれに換算すると(換算係数は求められていないが、2.2 を使用する。)、それぞれ 1.4×10^{19} および $7.5 \times 10^{18} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ となり、第1次および第2次 OGL-1 の高速中性子照射量を、さらに下まわっている。

73F-12A キャプセル⁷⁾ における被覆粒子の照射試験においては(高速中性子照射量 $0.8 \sim 1.5 \times 10^{21} \text{ (E} > 0.18 \text{ MeV)}$ 、燃焼率 2~3%、照射温度 $800 \sim 1700^\circ\text{C}$)、第1層の収縮によるクラック巾の拡大、第2層から第1層の剥離、第3層から第2層の剥離、燃料核による第1層、第2層および第3層の侵食(アメーバ効果)および燃料核の炭化が観察されている⁷⁾。第1次 OGL-1 の照射試験においては、第1層におけるクラックの生成、第2層から第1層の剥離、第4層におけるクラックの生成が、第2次 OGL-1 の照射試験においては、第1層における槍先型損傷の生成、第2層から第1層の剥離、第3層および第4層におけるクラックの生成が観察されている。V1F-16H および V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトの被覆

$$\hat{\sigma} = \sigma_{0.0253} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \sqrt{\frac{T_n}{293}} \quad (2)$$

ここで、

$$\sigma_{0.0253} = 37 \text{ (barn)}$$

T_n (中性子温度は 300 °C (573 K))

を用いた。これから、 $\hat{\sigma} = 45.3 \times 10^{-24} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ となる。

A および N に、それぞれ Table 23 の値を、 λ および t にそれぞれ ^{60}Co の壊変定数、 $3.61 \times 10^{-4} \text{ (d}^{-1}\text{)}$ および照射日数、22 (d) を代入して中性子束を求め、その結果を Table 24 に示す。一方、VT-1 孔内の中性子束の空間分布と照射時間とから、中性子束の平均値を求め、同表に示す。さらに、 F/M から求めた中性子束 A を、VT-1 孔内の中性子束の空間分布から求めた値 B で除し、これを同じく Table 24 に示す。 A/B は、デプレッション係数と呼ばれる数値で、通常のキャプセルの熱計算には、0.75 を使用する¹⁴⁾。キャプセルの下から上にかけて、デプレッション係数の減少がみられるが、なぜこのようになっているのか不明である。

5. 考 察

原研が開発中の多目的高温ガス炉用燃料の照射試験は、すでに JMTR や JRR-2 において実施されてきたが^{4)~7),9)}、これらの照射試験は、主として、多目的高温ガス実験炉の使用温度以上において、これらの燃料が受けると予想される中性子照射量および燃焼率を上まわる量を目的としてきた。これらの照射試験のなかで、第 1 次および第 2 次 OGL-1 ガスループの照射試験は、高速中性子照射量が比較的少なく、それでも 1.2×10^{20} および $2.3 \times 10^{20} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) であった⁹⁾。これに対して、V1F-16H および V1F-24H キャプセルの高速中性子照射量は最大で、それぞれ、 6.4×10^{18} および $3.4 \times 10^{18} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ ($E > 1 \text{ MeV}$) であった。これらのキャプセルの高速中性子照射量を、0.18 MeV 以上のそれに換算すると(換算係数は求められていないが、2.2 を使用する。)、それぞれ 1.4×10^{19} および $7.5 \times 10^{18} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ となり、第 1 次および第 2 次 OGL-1 の高速中性子照射量を、さらに下まわっている。

73F-12A キャプセル⁷⁾ における被覆粒子の照射試験においては(高速中性子照射量 $0.8 \sim 1.5 \times 10^{21} \text{ (E} > 0.18 \text{ MeV)}$ 、燃焼率 2~3%、照射温度 800~1700 °C)、第 1 層の収縮によるクラック巾の拡大、第 2 層から第 1 層の剥離、第 3 層から第 2 層の剥離、燃料核による第 1 層、第 2 層および第 3 層の侵食(アメーバ効果)および燃料核の炭化が観察されている⁷⁾。第 1 次 OGL-1 の照射試験においては、第 1 層におけるクラックの生成、第 2 層から第 1 層の剥離、第 4 層におけるクラックの生成が、第 2 次 OGL-1 の照射試験においては、第 1 層における槍先型損傷の生成、第 2 層から第 1 層の剥離、第 3 層および第 4 層におけるクラックの生成が観察されている。V1F-16H および V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトの被覆

粒子の損傷の程度は、OGL-1 ガスループで照射した被覆粒子のそれとほぼ同じ程度であり、73F-12A キャプセルで観察された被覆粒子の損傷のごく初期のものである。また、既に報告したV1F-11H キャプセル⁸⁾ (JRR-2 において2 サイクル照射) において観察された被覆粒子の損傷は、V1F-16H キャプセルよりも軽微であった。以上の観察から、被覆粒子の第1層におけるクラックの生成および第2層から第1層の剥離は、約 1×10^{19} (n/cm²) ($E > 0.18$ MeV) の照射量を境にしておこるものと推定される。

燃料コンパクトの照射による寸法変化については、V1F-24H キャプセルで照射した粒子充填35%の燃料コンパクトの長さを除いて、全て収縮である。V1F-16H キャプセルで照射した燃料コンパクトの場合、粒子充填率の小さい方が、寸法変化率はごくわずかに大きい。被覆粒子のSiC層は、中性子照射により全く寸法変化を示さないから、被覆粒子の寸法変化はおこらずマトリックス材の寸法変化が、燃料コンパクトの寸法変化を支配する。V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトの長さは、粒子充填率22%の場合収縮、35%の場合膨張で、その直径は両者とも収縮であるが、粒子充填率35%の方が、収縮率は大きかった。粒子充填率35%の燃料コンパクトにみられたこのような照射挙動は、これまでの照射試験では全くみられなかった。黒鉛材の中性子照射により膨張するという報告もいくつかみられるが¹⁵⁾、他の燃料コンパクトの寸法変化が全て収縮であることから、この原因についてはよくわからない。

V1F-16H および V1F-24H キャプセルで照射した燃料コンパクトの長さ方向と直径方向の寸法変化率は、長さ方向の方が大きい。方向による寸法変化の異方性を、他のキャプセルで照射した燃料コンパクトについて調べてみると、OGL-1 ガスループで照射した第1次および第2次の燃料コンパクトでは、両方向ともほぼ同じ程度の収縮率を示していた⁹⁾。72F-8A および 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトでは、直径よりも長さの収縮率が大きかった¹¹⁾。76F-6A キャプセルで照射した燃料コンパクトでは、直径の方が収縮率は大きかった¹²⁾。これらの燃料コンパクトの照射試験においては、直径の収縮率の方が大きいという結果も、また長さの収縮率の方が大きいという結果も得られている。これらの照射試験に使用した燃料コンパクトは、オーバーコートプレス法によって製造しているから、黒鉛粉末の層面は被覆粒子のまわりに円周状に配列し比較的等方質であるが、成形に際して、一部の黒鉛粉末フィラーの層面は、成形圧と垂直方向に配列する傾向にあるため、若干異方性を示す¹⁰⁾。従って、照射による寸法変化率が、照射前の方向性に対応するなら、直径または長さのどちらか一方にかたよるものと考えられるが、このようになっていないのは、製造に際して黒鉛粉末フィラーの配列が、微妙に異なるためと考えられる。

V1F-16H および V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブ中においては、¹³⁷Cs は比較的なだらかな分布をとるが、¹⁴⁴Ce は上下にばらつきの多い分布をとる。ここで、黒鉛スリーブ中に検出された放射性物質のなかで、⁶⁰Co は黒鉛材中の不純物であり、¹³⁷Cs および ¹⁴⁴Ce は被覆粒子から放出されたものである。黒鉛スリーブ中において、¹⁴⁴Ce の放射能が他とくらべて特に多く検出されている個所は、V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブでは、#1、#4、#6 の燃料コンパクトに対応する位置に、V1F-24H キャプセルでは#9の燃料コンパクトと対応する位置である。ここで、Cs の融点は 28 °C、沸点は 690 °C であるのに対し、Ce の融点 793 °C、沸点は 1400 °C である。従って、これらの核種の燃料コンパクトから黒鉛スリ

ープ中への移動は、 ^{144}Ce の場合燃料コンパクトと黒鉛スリーブの固体と固体の接触点を通して移動すると考えられるのに対し、 ^{137}Cs の場合は固体と固体の接触点だけでなく、ガス相中の拡散によってもおこると考えられる。このような移動特性のために、 ^{137}Cs の分布はなだらかになる。 ^{144}Ce の分布が上下にばらついているのは、燃料コンパクト中の粒子破損率のちがひによるものと考えられる。しかし、V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブ中で、 ^{144}Ce の濃度の高い位置に対応する #4 の燃料コンパクトの酸浸出試験においては、他の燃料コンパクトよりも粒子破損率は大きいという結果は得なかった。また、V1F-24H キャプセルの #9 の燃料コンパクトの酸浸出試験においても、同様であった。しかし、X線ラジオグラフの結果では、明らかに破損粒子数は多かった。X線ラジオグラフの撮影に供した被覆粒子は、無作為にサンプリングしたもので、全数測定ではない。被覆層が完全であれば、 ^{144}Ce や ^{137}Cs の TRISO 粒子からの放出はわずかであるから、黒鉛スリーブ中に見出される ^{144}Ce は、燃料コンパクトの粒子破損率と対応して考えるのが、最も適当と思われる。

6. ま と め

JRR-2 の VT-1 孔において、照射温度 $600 \sim 1350^\circ\text{C}$ 、高速中性子照射量 $6.4 \times 10^{18} (\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 1 \text{ MeV}$) ($1 \times 10^{19} \text{ n}/\text{cm}^2$, $E > 0.18 \text{ MeV}$) で、燃料コンパクトを照射し、次のことがわかった。

1. 燃料コンパクトの被覆粒子の緩衝層に、半径方向のクラックの生成および第2層から第1層の剥離がみられた。これらの被覆層の損傷は、 $1 \times 10^{19} (\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で生成した。

2. これらのキャプセルで照射した燃料コンパクトの長さの変化は収縮で、その収縮率は $0.3 \sim 0.4\%$ 、直径変化も収縮で、その収縮率は 0.1% もしくはこれ以下で、寸法変化率は、長さの方が大きかった。

3. 燃料核から緩衝層へのウランの移動がみられた。これは未照射の燃料コンパクトの被覆粒子にもみられたことから、燃料コンパクトの焼成の際に生じたものと推定される。

4. 燃料コンパクトを電解解砕したあと酸浸出し、解砕粒子と浸出液を γ 線スペクトロメトリにより分析し、それぞれに含まれる ^{144}Ce 、 ^{106}Ru 、 ^{137}Cs および ^{95}Zr の計数率から、露出ウラン率を求めた結果、 ^{144}Ce から求めた値が最も大きく、 ^{95}Zr から求めた値が最も小さかった。これらの露出ウラン率は、他の照射試験結果との比較から、 ^{95}Zr から求めた値が、真の値に最も近いものと推定される。

5. V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブからは、 ^{144}Ce 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs および ^{60}Co が黒鉛スリーブの全長にわたって検出された。V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブからも、これと同じ核種が検出され、さらに、 ^{125}Sb および $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が、部分的に検出された。黒鉛スリーブ中の ^{137}Cs の分布は、なだらかであるのに対し、 ^{144}Ce の分布は上下のばらつきが大きかった。

ープ中への移動は、 ^{144}Ce の場合燃料コンパクトと黒鉛スリーブの固体と固体の接触点を通して移動すると考えられるのに対し、 ^{137}Cs の場合は固体と固体の接触点だけでなく、ガス相中の拡散によってもおこると考えられる。このような移動特性のために、 ^{137}Cs の分布はなだらかになる。 ^{144}Ce の分布が上下にばらついているのは、燃料コンパクト中の粒子破損率のちがひによるものと考えられる。しかし、V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブ中で、 ^{144}Ce の濃度の高い位置に対応する #4 の燃料コンパクトの酸浸出試験においては、他の燃料コンパクトよりも粒子破損率は大きいという結果は得なかった。また、V1F-24H キャプセルの #9 の燃料コンパクトの酸浸出試験においても、同様であった。しかし、X線ラジオグラフの結果では、明らかに破損粒子数は多かった。X線ラジオグラフの撮影に供した被覆粒子は、無作為にサンプリングしたもので、全数測定ではない。被覆層が完全であれば、 ^{144}Ce や ^{137}Cs の TRISO 粒子からの放出はわずかであるから、黒鉛スリーブ中に見出される ^{144}Ce は、燃料コンパクトの粒子破損率と対応して考えるのが、最も適当と思われる。

6. ま と め

JRR-2 の VT-1 孔において、照射温度 $600 \sim 1350^\circ\text{C}$ 、高速中性子照射量 $6.4 \times 10^{18} (\text{n/cm}^2) (E > 1 \text{ MeV})$ ($1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2, E > 0.18 \text{ MeV}$) で、燃料コンパクトを照射し、次のことがわかった。

1. 燃料コンパクトの被覆粒子の緩衝層に、半径方向のクラックの生成および第2層から第1層の剥離がみられた。これらの被覆層の損傷は、 $1 \times 10^{19} (\text{n/cm}^2) (E > 0.18 \text{ MeV})$ で生成した。

2. これらのキャプセルで照射した燃料コンパクトの長さの変化は収縮で、その収縮率は $0.3 \sim 0.4\%$ 、直径変化も収縮で、その収縮率は 0.1% もしくはこれ以下で、寸法変化率は、長さの方が大きかった。

3. 燃料核から緩衝層へのウランの移動がみられた。これは未照射の燃料コンパクトの被覆粒子にもみられたことから、燃料コンパクトの焼成の際に生じたものと推定される。

4. 燃料コンパクトを電解解砕したあと酸浸出し、解砕粒子と浸出液を γ 線スペクトロメトリにより分析し、それぞれに含まれる ^{144}Ce 、 ^{106}Ru 、 ^{137}Cs および ^{95}Zr の計数率から、露出ウラン率を求めた結果、 ^{144}Ce から求めた値が最も大きく、 ^{95}Zr から求めた値が最も小さかった。これらの露出ウラン率は、他の照射試験結果との比較から、 ^{95}Zr から求めた値が、真の値に最も近いものと推定される。

5. V1F-16H キャプセルの黒鉛スリーブからは、 ^{144}Ce 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs および ^{60}Co が黒鉛スリーブの全長にわたって検出された。V1F-24H キャプセルの黒鉛スリーブからも、これと同じ核種が検出され、さらに、 ^{125}Sb および $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が、部分的に検出された。黒鉛スリーブ中の ^{137}Cs の分布は、なだらかであるのに対し、 ^{144}Ce の分布は上下のばらつきが大きかった。

謝 辞

本キャプセルの製作にあたられた技術部工作課の関係各位，キャプセルの設計および照射の維持管理にあたられた研究炉利用課の各位，JRR-2の運転維持管理にあたられたJRR-2管理課の各位に，照射後試験の実施にあたられたホットラボ管理室の各位に謝意を表す。また，本研究の推進にあたって，御激励を賜った岩本多実燃料工学部長に，謝意を表す。

参 考 文 献

1. 菊池輝男，岩本多実，井川勝市，JAERI-M 82-134 (1982)
2. 本間俊二ら，JAERI-M 6943，Mar. (1977)
3. 飛田勉，井川勝市，原子力学会年会，Mar. (1983)
4. 岩本多実，福田幸朔，鹿志村悟，菊地章，JAERI-M 6480，(1976)
5. 岩本多実，福田幸朔，鹿志村悟，菊地章，JAERI-M 6717，(1976)
6. 福田幸朔，鹿志村悟，岩本多実，井川勝市，JAERI-M 8949，(1979)
7. 福田幸朔，鹿志村悟，小川徹，井川勝市，岩本多実，石本清，JAERI-M 9644，(1981)
8. 菊池輝男，井川勝市，JAERI-M 82-085，(1982)
9. 井川勝市，福田幸朔，菊池輝男，小林紀昭，林君夫，湊和生，岩本多実，伊丹宏治，伊藤尚徳，石本清，JAERI-M 83-012，(1983)
10. 菊池輝男，岩本多実，井川勝市，JAERI-M 9052，(1980)
11. 飛田勉，菊池輝男，岩本多実，菊地章，井川勝市，未発表データ，(1981)
12. 飛田勉，私信，(1981)
13. 菊池輝男，未発表データ，(1981)
14. 宮内武次郎，私信，(1981)
15. Pitner, A.L., Carbon, 9, pp 637-644 (1971)

謝 辞

本キャプセルの製作にあたられた技術部工作課の関係各位、キャプセルの設計および照射の維持管理にあたられた研究炉利用課の各位、JRR-2の運転維持管理にあたられたJRR-2管理課の各位に、照射後試験の実施にあたられたホットラボ管理室の各位に謝意を表する。また、本研究の推進にあたって、御激励を賜った岩本多実燃料工学部長に、謝意を表する。

参 考 文 献

1. 菊池輝男，岩本多実，井川勝市，JAERI-M 82-134 (1982)
2. 本間俊二ら，JAERI-M 6943，Mar. (1977)
3. 飛田勉，井川勝市，原子力学会年会，Mar. (1983)
4. 岩本多実，福田幸朔，鹿志村悟，菊地章，JAERI-M 6480，(1976)
5. 岩本多実，福田幸朔，鹿志村悟，菊地章，JAERI-M 6717，(1976)
6. 福田幸朔，鹿志村悟，岩本多実，井川勝市，JAERI-M 8949，(1979)
7. 福田幸朔，鹿志村悟，小川徹，井川勝市，岩本多実，石本清，JAERI-M 9644，(1981)
8. 菊池輝男，井川勝市，JAERI-M 82-085，(1982)
9. 井川勝市，福田幸朔，菊池輝男，小林紀昭，林君夫，湊和生，岩本多実，伊丹宏治，伊藤尚徳，石本清，JAERI-M 83-012，(1983)
10. 菊池輝男，岩本多実，井川勝市，JAERI-M 9052，(1980)
11. 飛田勉，菊池輝男，岩本多実，菊地章，井川勝市，未発表データ，(1981)
12. 飛田勉，私信，(1981)
13. 菊池輝男，未発表データ，(1981)
14. 宮内武次郎，私信，(1981)
15. Pitner, A.L., Carbon, 9, pp 637-644 (1971)

Table 1 Characteristics of coated particle for VIF-16H capsule

Batch No.			78FPT1
Kernel	Chemical form		UO ₂
	Uranium enrichment (%)		8.0
	Diameter (μm)		624
	Theoretical density (%TD)		96.6
	O/U ratio		2.01
Coating	Buffer layer	Material	PyC
		Source gas	C ₂ H ₂
		Thickness (μm)	60.8
		Density (g/cm ³)	1.13
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	H ₃ H ₆
		Thickness (μm)	31.6
		Density (g/cm ³)	1.83
		OPTAF	1.01
	SiC layer	Material	SiC
		Source gas	CH ₃ SiCl ₃
		Thickness (μm)	24.7
		Density (g/cm ³)	3.2
		Free Si (wt%)	—
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	44.5
		Density (g/cm ³)	1.81
		OPTAF	—
Coated particle	Diameter (μm)		920
	Crushing strength (Kg)		—
	Surface contamination		—

Table 2 Characteristics of fuel compacts for V1F-16H capsule

Batch No.	78FPTC15	78FPTC30
Outer diameter (mm)	18.0	18.0
Length (mm)	18.0	18.0
Dia. of thermocouple well (mm)	1.8	1.8
Weight (gr)	9.4	11.3
Geometrical density (gr/cm ³)	2.1	2.54
Actual amount of uranium (gr)	1.86	3.69
Enrichment (%)	8.0	8.0
Actual amount of U-235 (gr)	0.15	0.3
Coated particle packing fraction (%)	15	30
Matrix density (gr/cm ³)	1.7	1.7
Heat treatment temperature and time	1 hr at 1800 °C	
Coated particles dispersed	78FPT1	78FPT1
Binder	Phenol resin	
Graphite powder	Natural graphite and petroleum coke graphite	

Table 3 Characteristics of coated particle for V1F-24H capsule

Batch No.			79FPC1
Kernel	Chemical form		UO ₂
	Uranium enrichment (%)		8.0
	Diameter (μm)		623+23
	Theoretical density (%TD)		96.0+1.5
	O/U ratio		2.01
Coating	Buffer layer	Material	PyC
		Source gas	C ₂ H ₂
		Thickness (μm)	62.5+4.1
		Density (g/cm ³)	1.12
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	30.5 +2.6
		Density (g/cm ³)	1.86
		OPTAF	1.01
	SiC layer	Material	SiC
		Source gas	CH ₃ SiCl ₃
		Thickness (μm)	26.7+1.7
		Density (g/cm ³)	3.2
		Free Si (wt %)	0.02
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	45.8+3.6
		Density (g/cm ³)	1.86
		OPTAF	1.01
Coated particle	Diameter (μm)		895 + 3
	Crushing strength (Kg)		2.20
	Surface contamination		1x10 ⁻⁵

Table 4 Characteristics of fuel compacts for VLF-24H capsule

Batch No.	79FPTC22	79FPTC35
Outer diameter (mm)	18.0	18.0
Length (mm)	18.0	18.0
Dia. of thermocouple well (mm)	1.8	1.8
Weight (gr)	10.16	11.71
Geometrical density (gr/cm ³)	2.30	2.65
Actual amount of uranium (gr)	2.70	4.28
Enrichment (%)	8.0	8.0
Actual amount of U-235 (gr)	0.22	0.34
Coated particle packing fraction (%)	22	35
Matrix density (gr/cm ³)	1.70	1.71
Heat treatment temperature and time	1 hr at 1800 °C	
Coated particles dispersed	79FPC1	79FPC1
Binder	Phenol resin	
Graphite powder	Natural graphite and petroleum coke graphite	

Table 5 Irradiation conditions of V1F-16H capsule

Reactor	JRR - 2
Irradiation hole	VT - 1
Thermal neutron flux ($\text{ncm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)	$2.4\times 10^{13} \sim 6.6\times 10^{13}$
Fast neutron flux $> 1 \text{ MeV}$ ($\text{ncm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)	$1.9\times 10^{11} \sim 2.4\times 10^{12}$
Irradiation cycle	R2-54-07 (1979.10.22 - 11.2) R2-54-08 (1979.11.12 - 11.23) R2-54-09 (1979.12.3 - 12.4)
Irradiation time (hr)	792
Irradiation Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	600 $\sim$ 1350
Thermal neutron dose (ncm^{-2})	$6.4\times 10^{19} \sim 1.8\times 10^{20}$
Fast neutron dose (ncm^{-2}) $> 1 \text{ MeV}$	$5.2\times 10^{17} \sim 6.4\times 10^{18}$
Burn up (% FIMA) (max)	0.3

Table 6 Irradiation conditions of V1F-24H capsule

Reactor	JRR - 2
Irradiation hole	VT - 1
Thermal neutron flux (mean) ($\text{ncm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)	$2.0\times 10^{13} \sim 5.8\times 10^{13}$
Fast neutron flux (mean) $> 1 \text{ MeV}$ ($\text{ncm}^{-2}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$1.3\times 10^{11} \sim 1.8\times 10^{11}$
Irradiation cycle	R2-55-04 (1980.11.10 - 11.21) R2-55-05 (1980.12.1 - 12.12)
Irradiation time (hr)	528
Irradiation Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	600 $\sim$ 1300
Thermal neutron dose (ncm^{-2})	$3.8\times 10^{19} \sim 1.1\times 10^{20}$
Fast neutron dose (ncm^{-2}) $> 1 \text{ MeV}$	$2.5\times 10^{17} \sim 3.4\times 10^{18}$
Burn up (% FIMA) (max)	0.2

Table 7 Dimensions of fuel compacts (before irradiation)
for VIF-16H capsule

Compact No.			1	2	3	4	5
Length (mm)			18.03	18.02	18.02	18.01	18.02
Diameter (mm)	Top	0°	17.97	17.93	17.93	17.93	17.93
		90°	17.96	17.92	17.91	17.93	17.92
	Bottom	0°	17.93	17.91	17.90	17.91	17.92
		90°	17.92	17.90	17.91	17.91	17.91
	mean		17.95	17.92	17.91	17.92	17.92
Compact No.			6	7	8	9	10
Length (mm)			17.98	18.05	18.03	18.00	18.05
Diameter (mm)	Top	0°	17.99	17.97	18.01	17.98	17.99
		90°	17.97	17.97	17.98	17.97	17.97
	Bottom	0°	18.00	17.98	17.98	17.98	17.96
		19°	17.98	17.96	17.98	17.96	17.97
	mean		17.99	17.97	17.99	17.97	17.97

Table 8 Dimensions of fuel compacts (before irradiation)
for VIF-24H capsule

Compact No.			1	2	3	4	5
Length (mm)			18.02	17.96	18.04	18.04	18.00
Diameter (mm)	Top	0°	17.98	17.96	17.96	17.96	17.96
		90°	17.98	17.95	17.95	17.97	17.97
	Bottom	0°	17.97	17.95	17.96	17.95	17.97
		90°	17.96	17.94	17.95	17.95	17.97
	mean		17.98	17.95	17.95	17.96	17.97

Compact No.			6	7	8	9	10
Length (mm)			18.00	17.98	17.95	17.99	17.91
Diameter (mm)	Top	0°	17.97	17.96	17.98	17.97	17.98
		90°	17.98	17.97	18.00	17.99	17.99
	Bottom	0°	18.00	17.98	17.97	17.96	17.98
		90°	18.00	18.00	17.97	17.98	17.98
	mean		17.99	17.98	17.98	17.98	17.98

Table 9 Dimensions of fuel compacts (after irradiation)
for VIF-16H capsule

Cocompact.			1	2	3	4	5	
Length (mm)			17.98	17.94	17.95	17.94	17.94	
Diameter (mm)	Top	0°	17.91	17.89	17.90	17.92	17.90	
		90°	17.92	17.90	17.90	17.92	17.91	
	Bottom	0°	17.95	17.91	17.90	17.91	17.91	
		90°	17.96	17.92	17.92	17.90	17.93	
	mean		17.93	17.90	17.90	17.91	17.91	
Compact.			6	7	8	9	10	
Length (mm)			0°	17.92	17.97	17.97	17.96	17.98
Diameter (mm)	Top	0°	17.98	17.97	17.96	17.95	17.97	
		90°	17.99	17.97	17.97	17.97	17.96	
	Bottom	0°	17.97	17.95	17.98	17.96	17.97	
		90°	17.98	17.97	18.00	17.97	18.00	
	mean		17.97	17.96	17.98	17.96	17.97	

Table 10 Dimensions of fuel compacts (after irradiation)
for VIT-24H capsule

Compact No.			1	2	3	4	5
Length (mm)			17.90	17.97	17.95	17.90	17.97
Diameter (mm)	Top	0°	17.97	17.97	17.96	17.96	17.97
		90°	17.95	17.94	17.98	17.95	17.96
	Bottom	0°	17.96	17.95	17.95	17.99	17.98
		90°	17.96	17.96	17.95	17.99	17.99
	mean		17.96	17.96	17.96	17.97	17.98

Compact No.			6	7	8	9	10
Length (mm)			18.01	17.96	18.00	18.01	17.98
Diameter (mm)	Top	0°	17.99	17.96	17.94	17.95	17.96
		90°	17.99	17.95	17.95	17.94	17.94
	Bottom	0°	17.97	17.97	17.96	17.96	17.94
		90°	17.97	17.97	17.97	17.94	17.94
	mean		17.98	17.96	17.96	17.95	17.95

Table 11 Length change of fuel compacts for V1F-16H capsule

Compact No.	Length (mm)		$\Delta L = L_f - L_i$	$\frac{\Delta L}{L_i}$	Mean length change (%)
	Before irradi. L_i	After irradi. L_f			
1	18.03	17.98	-0.05	-0.0028	-0.39
2	18.02	17.94	-0.08	-0.0044	
3	18.02	17.95	-0.07	-0.0039	
4	18.01	17.94	-0.07	-0.0039	
5	18.02	17.94	-0.08	-0.0044	
6	17.98	17.92	-0.06	-0.0033	-0.34
7	18.05	17.97	-0.08	-0.0044	
8	18.03	17.97	-0.06	-0.0033	
9	18.00	17.96	-0.04	-0.0022	
10	18.05	17.98	-0.07	-0.0039	

Table 12 Length change of fuel compacts for V1F-24H capsule

Compact No.	Length (mm)		$\Delta L = L_f - L_i$	$\frac{\Delta L}{L_i}$	Mean length change (%)
	Before irradi. L_i	After irradi. L_f			
1	18.02	17.90	-0.12	-0.0067	-0.41
2	17.96	17.97	0.01	0.0006	
3	18.04	17.95	-0.09	-0.0050	
4	18.04	17.90	-0.14	-0.0078	
5	18.00	17.97	-0.03	-0.0018	
6	18.00	18.01	0.01	0.0006	+0.15
7	17.98	17.96	-0.02	-0.0011	
8	17.95	18.00	0.05	0.0028	
9	17.99	18.01	0.02	0.0011	
10	17.91	17.98	0.07	0.0039	

Table 13 Diameter change of fuel compacts for ViF-16H capsule

Compact No.	Diameter (mm)		$\Delta D = D_f - D_i$	$\frac{\Delta D}{D_i}$	Mean diameter change (%)
	Before irradi. D_i	After irradi. D_f			
1	17.95	17.93	-0.02	-0.0011	-0.08
2	17.92	17.90	-0.02	-0.0011	
3	17.91	17.90	-0.01	-0.0006	
4	17.92	17.91	-0.01	-0.0006	
5	17.92	17.91	-0.01	-0.0006	
6	17.98	17.97	-0.01	-0.0006	-0.05
7	17.97	17.96	-0.01	-0.0006	
8	17.99	17.98	-0.01	-0.0006	
9	17.97	17.96	-0.01	-0.0006	
10	17.97	17.97	0	0	

Table 14 Diameter change of fuel compacts for V1F-24H

Compact No.	Diameter (mm)		$\Delta D = D_f - D_i$	$\frac{\Delta D}{D_i}$	Mean diameter change (%)
	Before irradi. D_i	After irradi. D_f			
1	17.98	17.96	-0.02	-0.0011	-0.07
2	17.95	17.96	-0.01	-0.0006	
3	17.95	17.96	-0.01	-0.0006	
4	17.96	17.97	-0.01	-0.0006	
5	17.97	17.98	-0.01	-0.0006	
6	17.99	17.98	-0.01	-0.0006	-0.12
7	17.98	17.96	-0.02	-0.0011	
8	17.98	17.96	-0.02	-0.0011	
9	17.98	17.95	-0.03	-0.0017	
10	17.98	17.95	-0.03	-0.0017	

Table 15 Weight of fuel compacts for V1F-16H capsule

Compact No.	Weight (g)	
	Before irradi.	After irradi.
1	9.405	9.411
2	9.386	9.393
3	9.394	9.400
4	9.403	9.409
5	9.405	9.410
6	11.271	11.273
7	11.277	11.281
8	11.279	11.280
9	11.276	11.278
10	11.278	11.280

Table 16 Weight of fuel compacts for V1F-24H

Compact No.	Weight (g)	
	Before irradi.	After irradi.
1	11.718	11.721
2	11.716	11.720
3	11.711	11.715
4	11.705	11.712
5	11.696	11.704
6	10.158	10.166
7	10.156	10.103
8	10.161	10.160
9	10.160	10.170
10	10.159	10.165

Table 17 Exposed uranium fraction in fuel compacts irradiated
in VLF-16H capsule

Compact No.	A Total dose rate of leach solution (mR/h)	Dose rate of 10 C.P. (mR/h)	Numbers of C.P. per compact	B Dose rate of total C.P. in compact (R/h)	Failure fraction (A/B)	Failure fraction (unirradiated)
2	B.G ^a	1845	1713	316048	---	7×10^{-5}
4	B.G ^a	1545	1713	264658	---	
7	16	1224	3398	415915	3.85×10^{-5}	7×10^{-5}
9	14	895	3398	304121	4.60×10^{-5}	

a. Back ground level

Table 18 Exposed uranium fraction in fuel compacts
irradiated in V1F-24H capsule

Compact No.	Nuclide	Activity in leaching solution A (Ci)	Activity in fuel compact B (Ci)	Exposed uranium fraction $\frac{A}{B}$
2	Ce-144	2.27×10^{-3}	2.84×10^{-1}	7.99×10^{-3}
	Ru-106	8.35×10^{-5}	4.04×10^{-2}	2.07×10^{-3}
	Cs-137	6.04×10^{-5}	2.06×10^{-2}	2.93×10^{-3}
	Zr-95	3.39×10^{-3}	2.66	1.27×10^{-3}
4	Ce-144	4.06×10^{-3}	2.31×10^{-1}	0.07
	Ru-106	1.15×10^{-4}	3.42×10^{-2}	3.36×10^{-3}
	Cs-137	8.32×10^{-5}	1.75×10^{-2}	4.75×10^{-3}
	Zr-95	4.51×10^{-3}	2.26	1.99×10^{-3}
7	Ce-144	2.93×10^{-3}	2.09×10^{-1}	0.0140
	Ru-106	1.00×10^{-4}	3.27×10^{-2}	3.06×10^{-3}
	Cs-137	5.95×10^{-5}	1.71×10^{-2}	3.48×10^{-3}
	Zr-95	3.06×10^{-3}	2.23	1.37×10^{-3}
9	Ce-144	2.76×10^{-3}	1.86×10^{-1}	0.0148
	Ru-106	9.41×10^{-5}	2.62×10^{-2}	3.59×10^{-3}
	Cs-137	5.55×10^{-5}	1.36×10^{-2}	4.08×10^{-3}
	Zr-95	2.76×10^{-3}	1.77	1.56×10^{-3}

Table 19 Dimensions of graphite sleeves for V1F-16H capsule

Upper graphite sleeve

		Before irradi.		After irradi.	
		Top	Bottom	Top	Bottom
Outer diameter (mm)	0°	37.94	37.96	37.94	37.96
	90°	37.94	37.96	37.94	37.96
Inner diameter (mm)	0°	18.27	18.26	18.26	18.25
	90°	18.27	18.26	18.26	18.25
Weight (g)		162.8		163.1	

Lower graphite sleeve

		Before irradi.		After irradi.	
		Top	Bottom	Top	Bottom
Outer diameter (mm)	0°	38.05	38.01	38.05	38.01
	90°	38.05	38.01	38.05	38.01
Inner diameter (mm)	0°	18.11	18.10	18.08	18.09
	90°	18.11	18.10	18.08	18.09
Weight (g)		167.0		167.3	

Table 20 Dimensions of graphite sleeves for V1F-24H capsule

Upper graphite sleeve

		Before irradi.		After irradi.	
		Top	Bottom	Top	Bottom
Outer diameter (mm)	0°	38.02	38.03	38.04	38.04
	90°	38.02	38.03	38.04	38.04
Inner diameter (mm)	0°	18.25	18.25	18.25	18.23
	90°	18.25	18.25	18.25	18.23
Weight (g)		164.0		—	

Lower graphite sleeve

		Before irradi.		After irradi.	
		Top	Bottom	Top	Bottom
Outer diameter (mm)	0°	38.05	38.04	38.05	38.04
	90°	38.05	38.04	38.05	38.04
Inner diameter (mm)	0°	18.03	18.04	18.02	18.05
	90°	18.03	18.04	18.02	18.05
Weight (g)		167.8		—	

Table 21 Activity in graphite sleeve of V1F-16H capsule

Position		Activity (Ci/g-carbon)						
		^{144}Ce	^{125}Sb	^{22}Na	^{137}Cs	^{134}Cs	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	^{60}Co
Upper graphite sleeve	1	1.40(-8)	N.D.	7.65(-10)	2.85(-9)	1.15(-9)	N.D.	1.67(-7)
	2	1.35(-9)	N.D.	5.81(-10)	6.32(-9)	8.92(-10)	N.D.	8.20(-8)
	3	4.64(-8)	N.D.	2.11(-10)	1.25(-8)	1.12(-9)	N.D.	7.57(-8)
	4	3.98(-8)	N.D.	6.17(-10)	1.57(-8)	1.67(-9)	N.D.	1.11(-7)
	5	4.44(-8)	N.D.	3.58(-10)	2.07(-8)	1.16(-9)	N.D.	7.51(-8)
	6	3.34(-8)	N.D.	2.30(-10)	2.03(-8)	7.25(-10)	N.D.	8.45(-8)
	7	4.66(-8)	N.D.	5.86(-10)	2.55(-8)	1.83(-9)	N.D.	1.00(-7)
	8	4.37(-8)	N.D.	3.74(-10)	3.08(-8)	1.13(-9)	N.D.	8.41(-8)
	9	9.83(-8)	N.D.	7.34(-11)	3.84(-8)	2.40(-10)	N.D.	8.76(-8)
	10	7.33(-8)	N.D.	1.02(-9)	4.00(-8)	2.22(-9)	N.D.	1.97(-7)
Lower graphite sleeve	1	2.38(-8)	N.D.	1.18(-9)	1.25(-8)	1.76(-9)	N.D.	2.39(-8)
	2	4.92(-8)	N.D.	1.12(-9)	6.06(-9)	1.88(-9)	N.D.	2.04(-7)
	3	3.74(-8)	N.D.	1.21(-9)	4.83(-9)	1.55(-9)	N.D.	3.03(-7)
	4	7.57(-8)	N.D.	1.26(-9)	5.50(-9)	1.30(-9)	N.D.	2.86(-7)
	5	5.77(-8)	N.D.	1.22(-9)	4.83(-9)	5.41(-10)	N.D.	3.05(-7)
	6	5.10(-8)	N.D.	1.62(-9)	5.80(-9)	2.01(-9)	N.D.	3.13(-7)
	7	4.74(-8)	N.D.	1.17(-9)	4.10(-9)	1.90(-9)	N.D.	2.72(-7)
	8	4.33(-8)	N.D.	1.29(-9)	3.83(-9)	1.72(-9)	N.D.	2.61(-7)
	9	6.68(-8)	N.D.	1.31(-9)	3.22(-9)	1.36(-9)	N.D.	2.42(-7)
	10	1.19(-8)	N.D.	3.17(-10)	1.18(-9)	4.75(-10)	N.D.	6.93(-8)
N.D. : Not detected								

Table 22 Activity in graphite sleeve of V1F-24H capsule

Position		Activity (Ci/g-carbon)						
		^{144}Ce	^{125}Sb	^{22}Na	^{137}Cs	^{134}Cs	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	^{60}Co
Upper graphite sleeve	1	2.58(-9)	N.D.	3.15(-11)	3.77(-9)	1.56(-10)	N.D.	1.18(8)
	2	1.17(-8)	N.D.	1.04(-10)	5.09(-9)	3.48(-10)	N.D.	8.24(-9)
	3	2.37(-7)	N.D.	1.59(-10)	1.83(-8)	1.65(-10)	N.D.	1.64(-8)
	4	1.41(-6)	N.D.	2.47(-10)	5.32(-8)	4.71(-10)	N.D.	2.37(-8)
	5	1.35(-6)	2.39(-9)	5.23(-10)	6.18(-8)	1.19(-10)	N.D.	1.41(-8)
	6	2.90(-7)	N.D.	1.49(-10)	4.64(-8)	6.01(-10)	N.D.	1.26(-8)
	7	4.07(-7)	N.D.	7.97(-10)	6.19(-8)	1.36(-10)	N.D.	7.34(-8)
	8	2.33(-7)	N.D.	1.98(-10)	5.66(-8)	6.19(-10)	N.D.	1.83(-8)
	9	6.67(-8)	N.D.	1.70(-10)	3.91(-8)	8.63(-10)	2.08(-9)	1.95(-8)
	10	7.18(-8)	N.D.	2.00(-10)	4.12(-8)	1.26(-9)	5.34(-9)	4.01(-8)
Lower graphite sleeve	1	N.D.	N.D.	N.D.	1.38(-8)	5.83(-10)	N.D.	3.57(-8)
	2	1.27(-8)	N.D.	N.D.	1.49(-8)	6.09(-10)	N.D.	8.89(-9)
	3	5.65(-8)	N.D.	N.D.	1.19(-8)	1.87(-10)	N.D.	4.23(-9)
	4	5.29(-9)	N.D.	N.D.	1.08(-8)	3.53(-10)	N.D.	6.41(-9)
	5	N.D.	N.D.	N.D.	9.50(-9)	5.05(-10)	N.D.	5.92(-9)
	6	N.D.	N.D.	3.28(-10)	1.07(-8)	N.D.	N.D.	3.98(-8)
	7	4.79(-9)	N.D.	N.D.	1.42(-8)	4.23(-10)	N.D.	7.93(-9)
	8	1.39(-7)	2.00(-9)	N.D.	1.65(-8)	3.43(-10)	N.D.	8.84(-9)
	9	1.08(-8)	N.D.	N.D.	1.16(-8)	5.14(-10)	1.04(-9)	7.83(-9)
	10	1.07(-9)	N.D.	N.D.	6.47(-9)	5.38(-10)	4.08(-9)	8.77(-9)
N.D. : Not detected								

Table 23 Specific activities of fluence monitor

F/M specimen No.	Weight of F/M specimen(g)	Counts per 500 sec.	cps/g	Specific activity ($\mu\text{Ci/g}$) at 12.12.1980
St'd	—	67072	(134 ^b)	(11.80 ^a)
1	0.00239	2636	2205	193
6	0.00245	5116	4176	366
2	0.00228	8895	7802	683
3	0.00206	11836	11491	1007
4	0.00231	16796	14541	1274
5	0.00233	18190	15613	1368

a : Activity (μCi) of standard source, b : counts per sec.

Table 24 Thermal neutron flux in VT-1 irradiation hole

F/M specimen No.	A	B	$\frac{A}{B}$
	Neutron flux ^a ($\text{n/cm}^2\text{sec}$)	Neutron flux ^b ($\text{n/cm}^2\text{sec}$)	
1	8.64×10^{12}	1.7×10^{13}	0.51
6	1.52×10^{13}	—	—
2	2.85×10^{13}	4.4×10^{13}	0.65
3	4.19×10^{13}	—	—
4	5.30×10^{13}	—	—
5	5.70×10^{13}	7.5×10^{13}	0.76

a : determined from fluence monitor

b : determined from activation of gold foil



Fig. 1 V1F-16H capsule

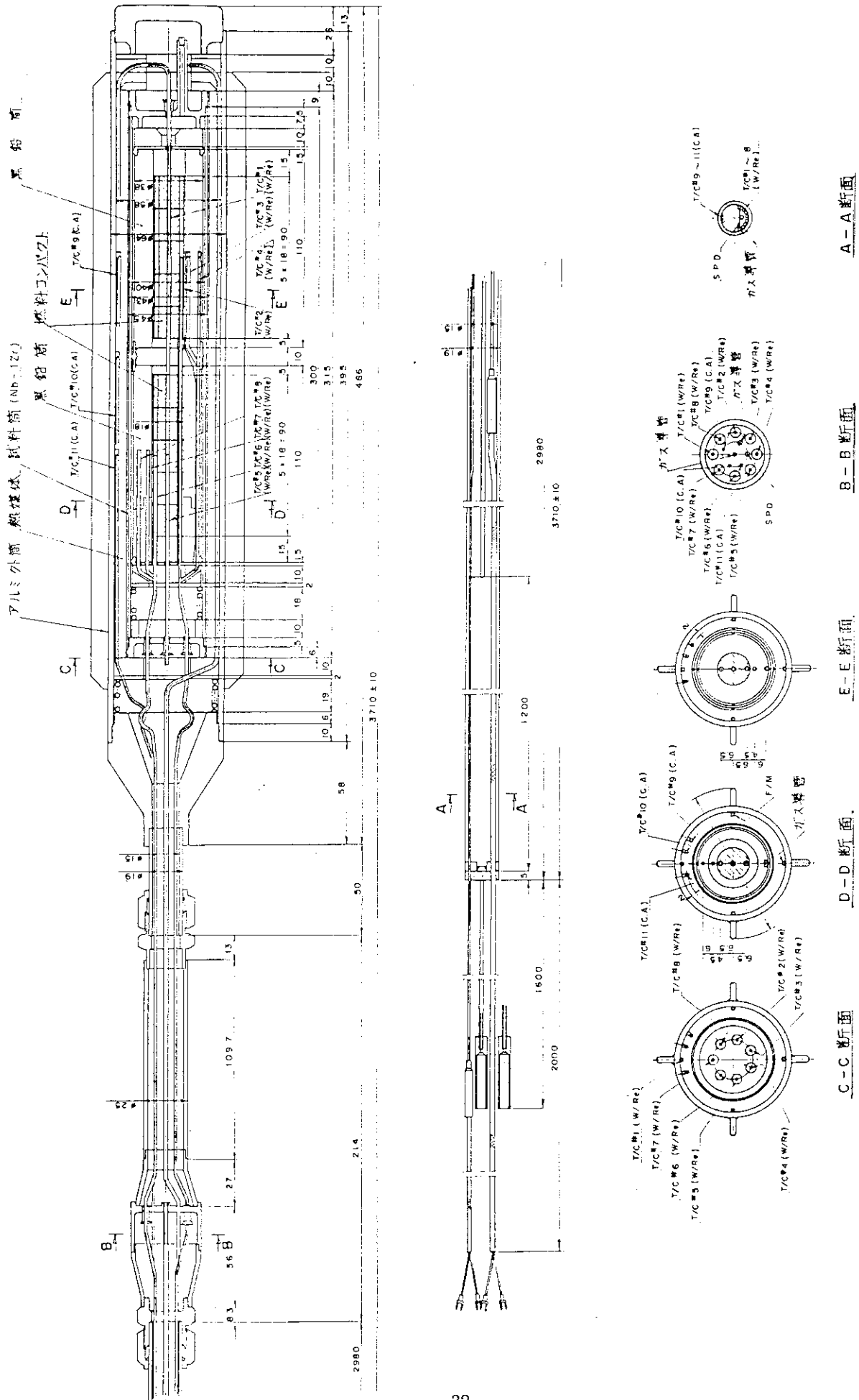
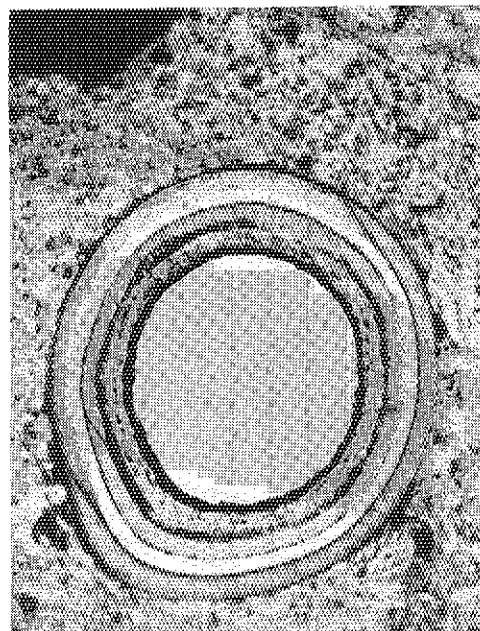
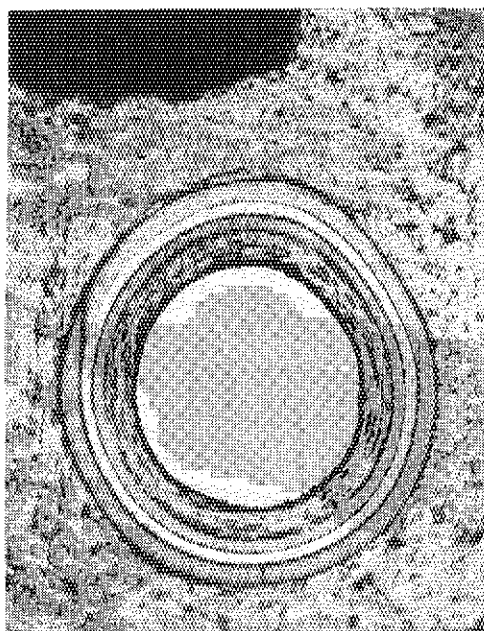
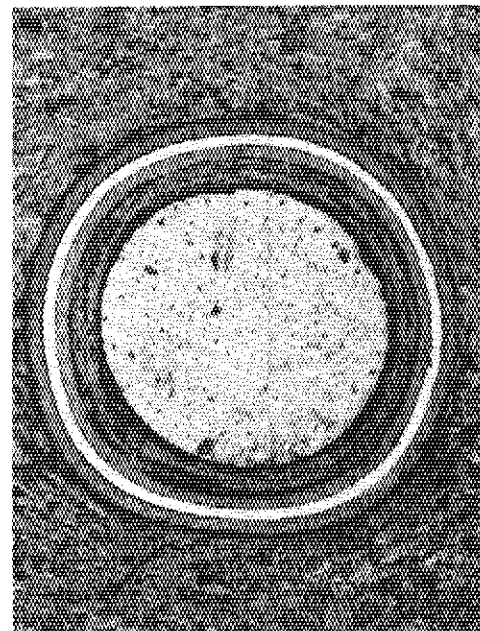
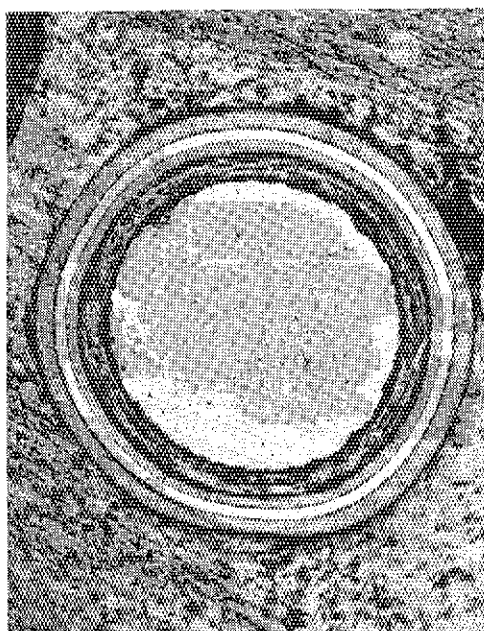


Fig. 2 V1F-24H capsule



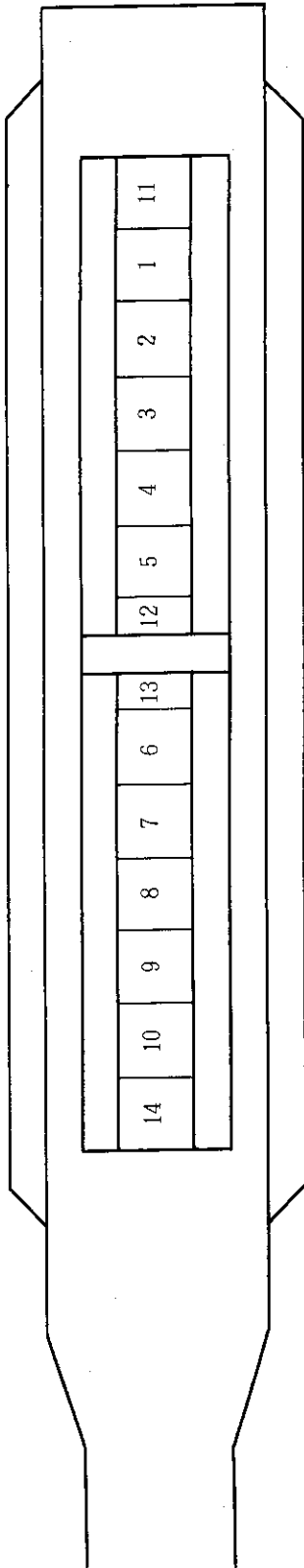
0.1 mm

Fig. 3-b Cross section of 79FPTC35 fuel compact (unirradiated)



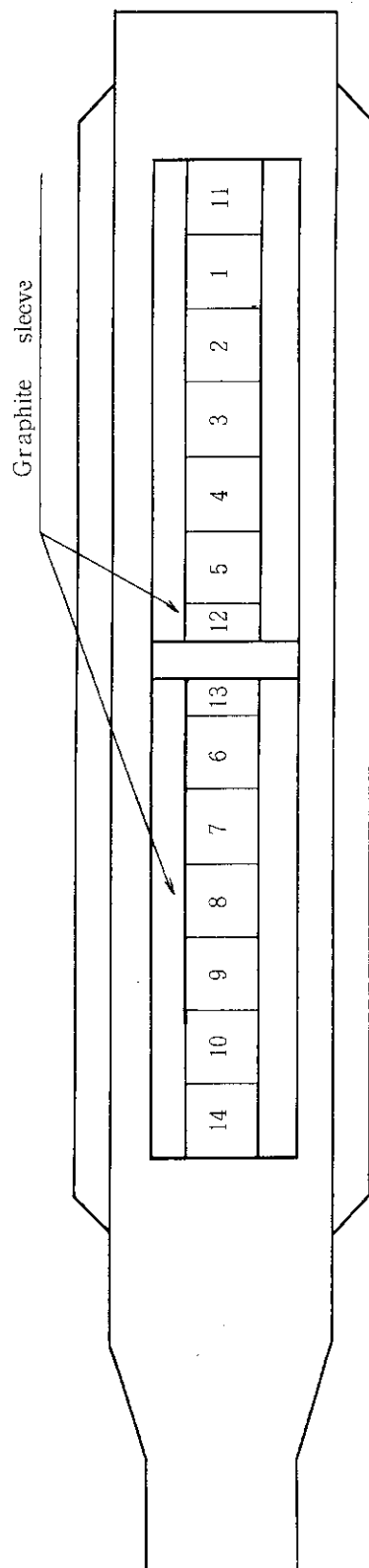
0.1 mm

Fig. 3-a Cross section of 79FPTC22 fuel compact (unirradiated)



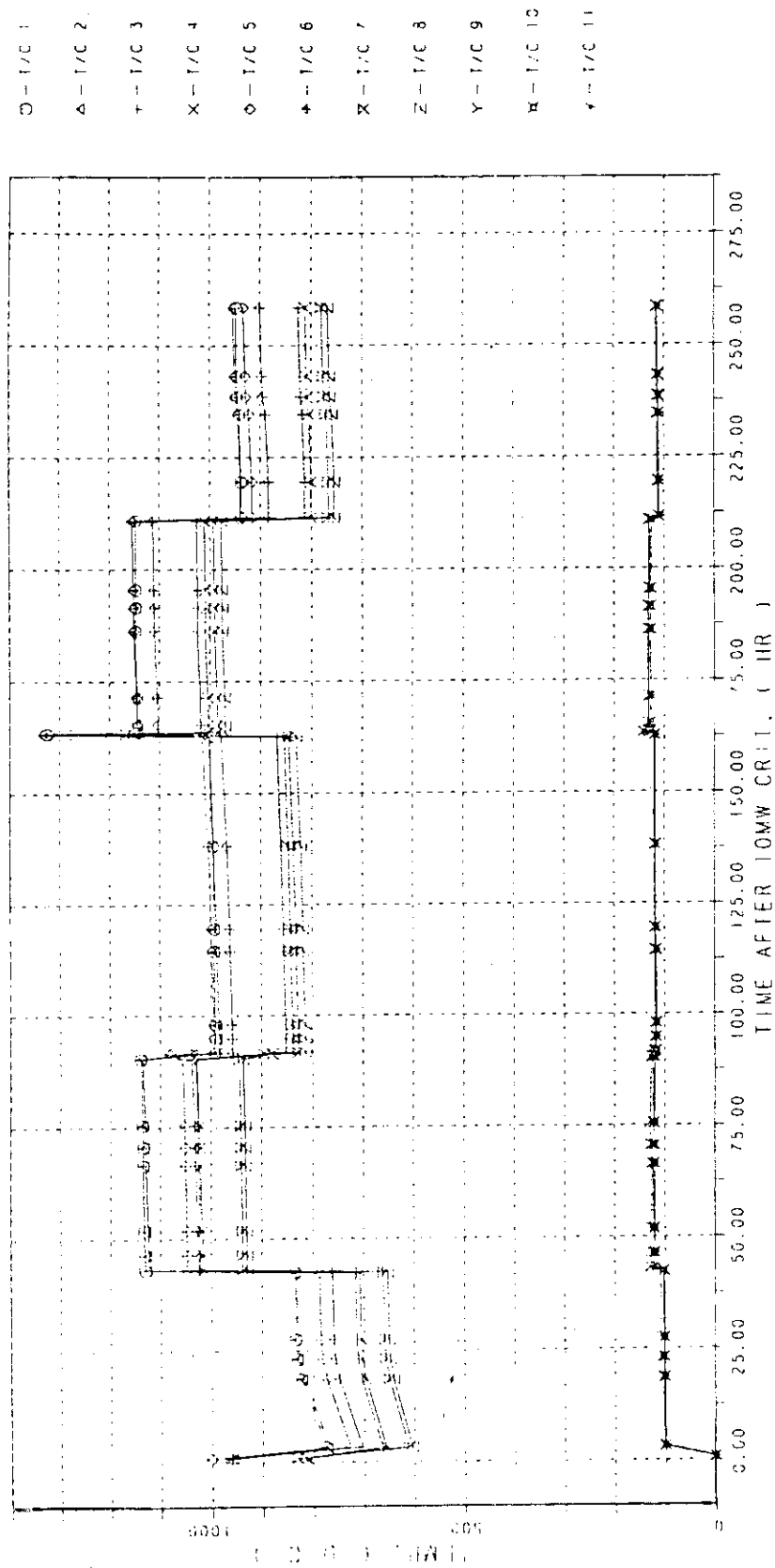
Compact No	Batch No	C P Packing fraction
1	78FPTC15-1	15%
2	" - 2	"
3	" - 3	"
4	" - 4	"
5	" - 5	"
6	78FPTC30-1	30%
7	" - 2	"
8	" - 3	"
9	" - 4	"
10	" - 5	"
11	Dummy compact	
12	"	
13	"	
14	"	

Fig 4-a Layout of fuel compacts in V1F-16H capsule



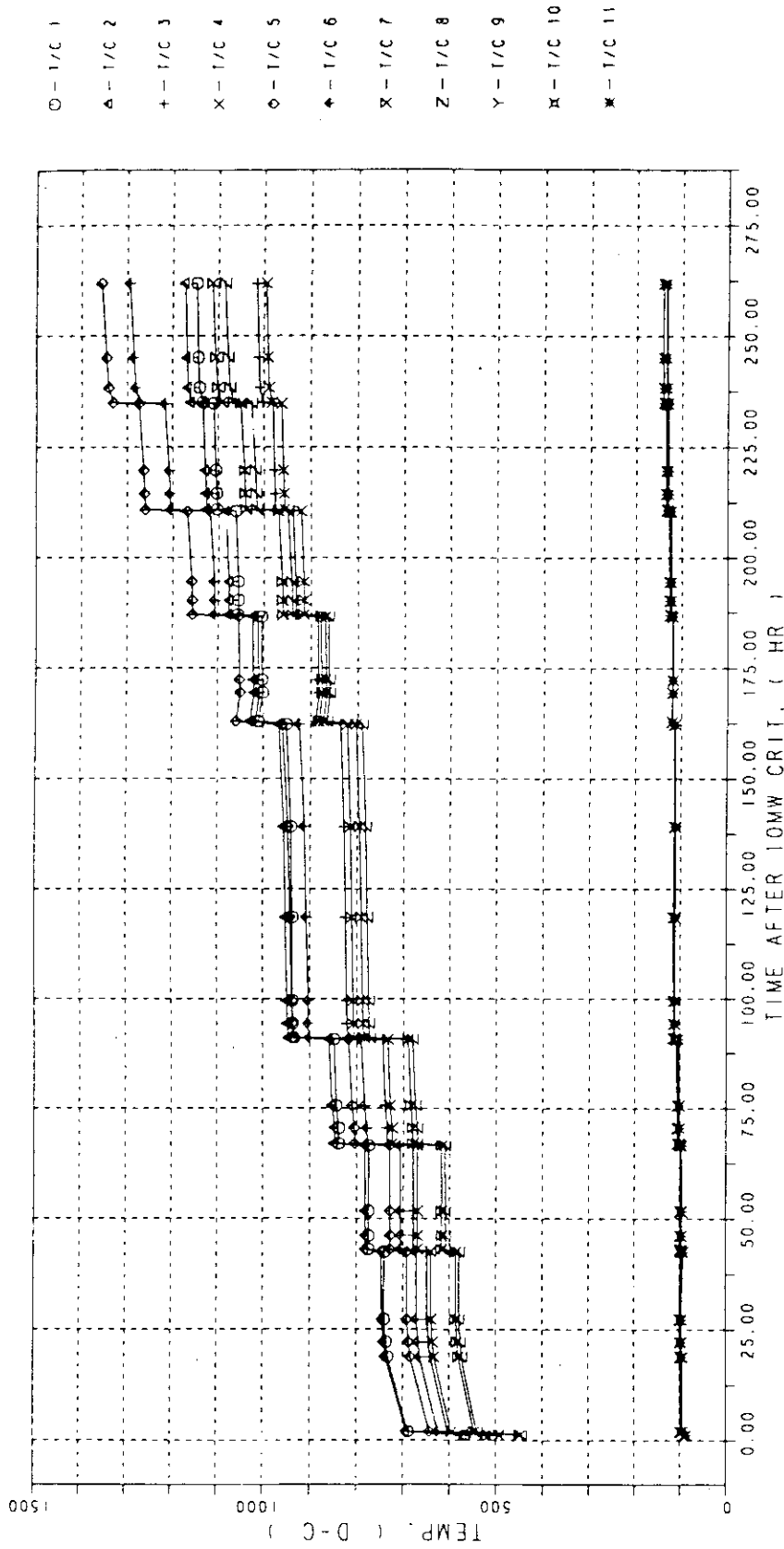
Compact No.	Batch No.	C.P. packing fraction
1	79FPTC22-1	22%
2	" - 2	"
3	" - 3	"
4	" - 4	"
5	" - 5	"
6	79FPTC35-1	35%
7	" - 2	"
8	" - 3	"
9	" - 4	"
10	" - 5	"
11	Dummy compact	
12	"	
13	"	
14	"	

Fig 4-b Layout of fuel compacts in V1F-24H capsule



CAPSULE ; V1F-16H
 REACTOR CYCLE ; R2-54-07
 10MW CRIT. ; 1979 10/22 15:00
 SHUT DOWN ; 1979 11/ 2 16:30

Fig. 5 Irradiation temperature of V1F-16H capsule (R2-54-07 cycle)



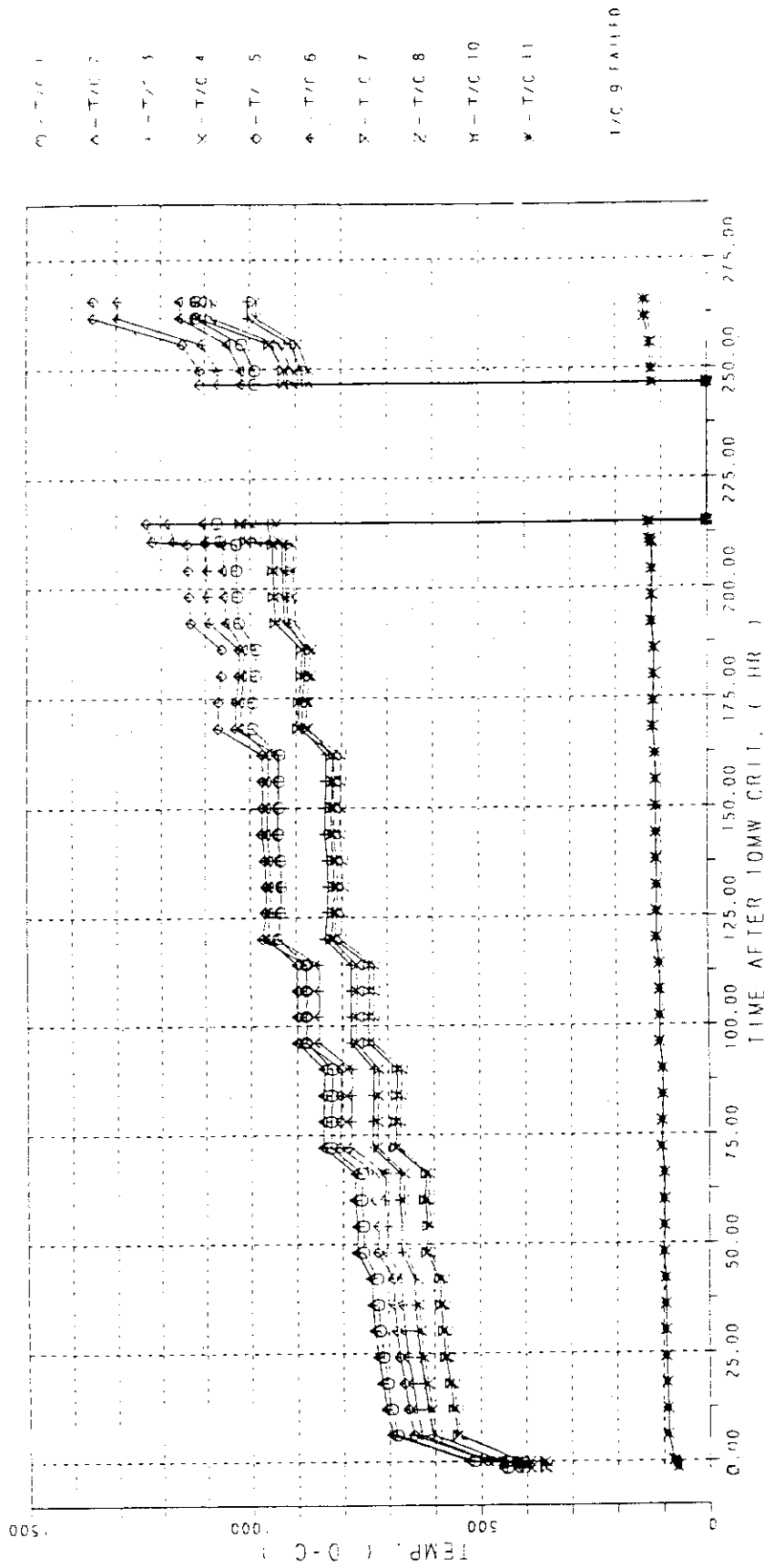
CAPSULE ; V1F-16H

REACTOR CYCLE ; R2-54-08

10MW CRIT. ; 1979 11/12 15:00

SHUT DOWN ; 1979 11/23 16:30

Fig. 6 Irradiation temperature of V1F-16H capsule (R2-54-08 cycle)



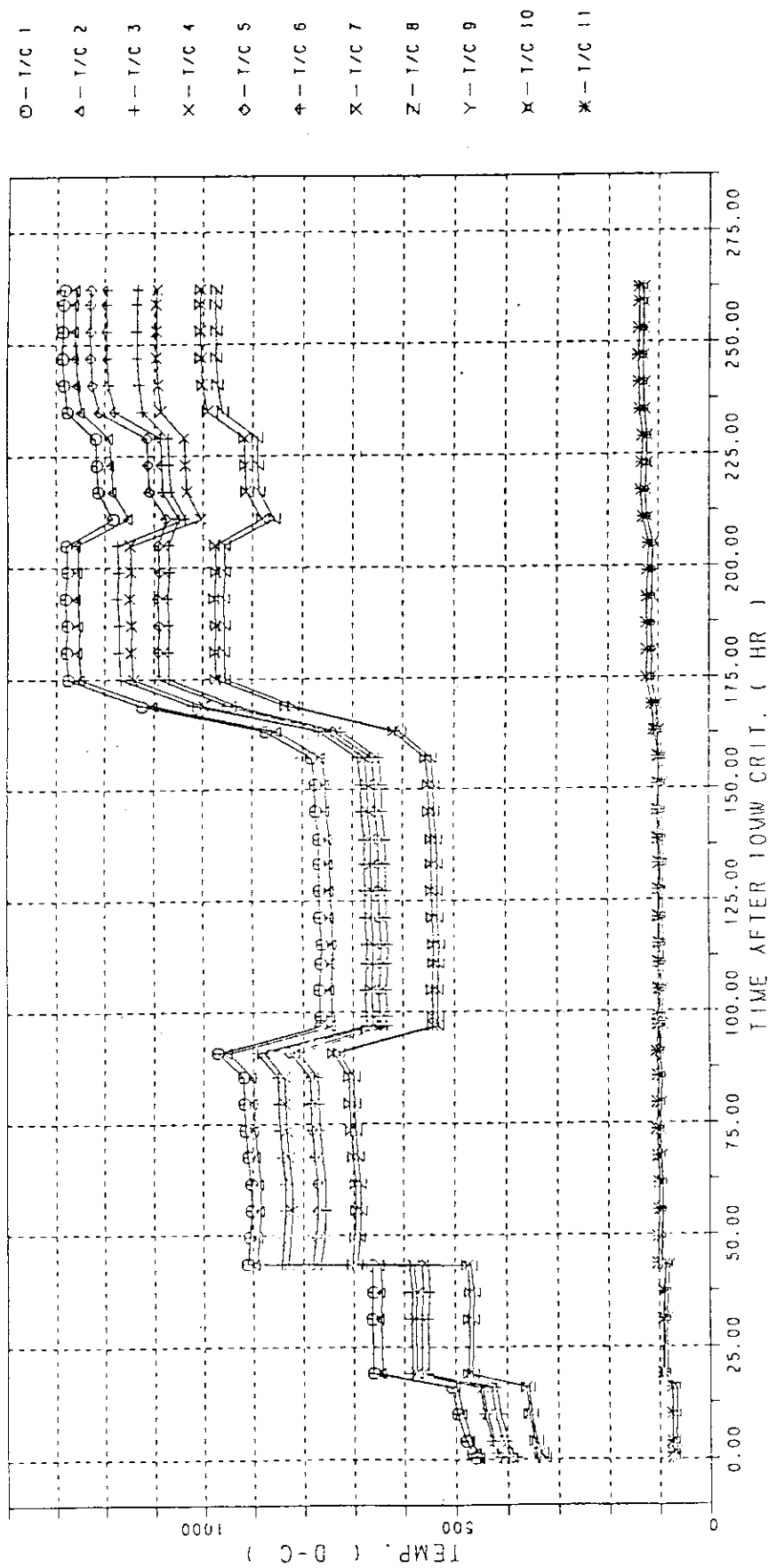
CAPSULE : VIF-16H

REACTOR CYCLE : R2-54-09

10MW CRIT. : 1979, 12/3 15:01

SHUT DOWN : 1979, 12/14 16:30

Fig. 7 Irradiation temperature of VIF-16H capsule (R2-54-09 cycle)



CAPSULE ; VIF-24H

REACTOR CYCLE ; R2-55-04

10MW CRIT. ; 1980 11/10 15:00

SHUT DOWN ; 1980 11/21 14:00

Fig. 8 Irradiation temperature of VIF-24H capsule (R2-55-04 cycle)

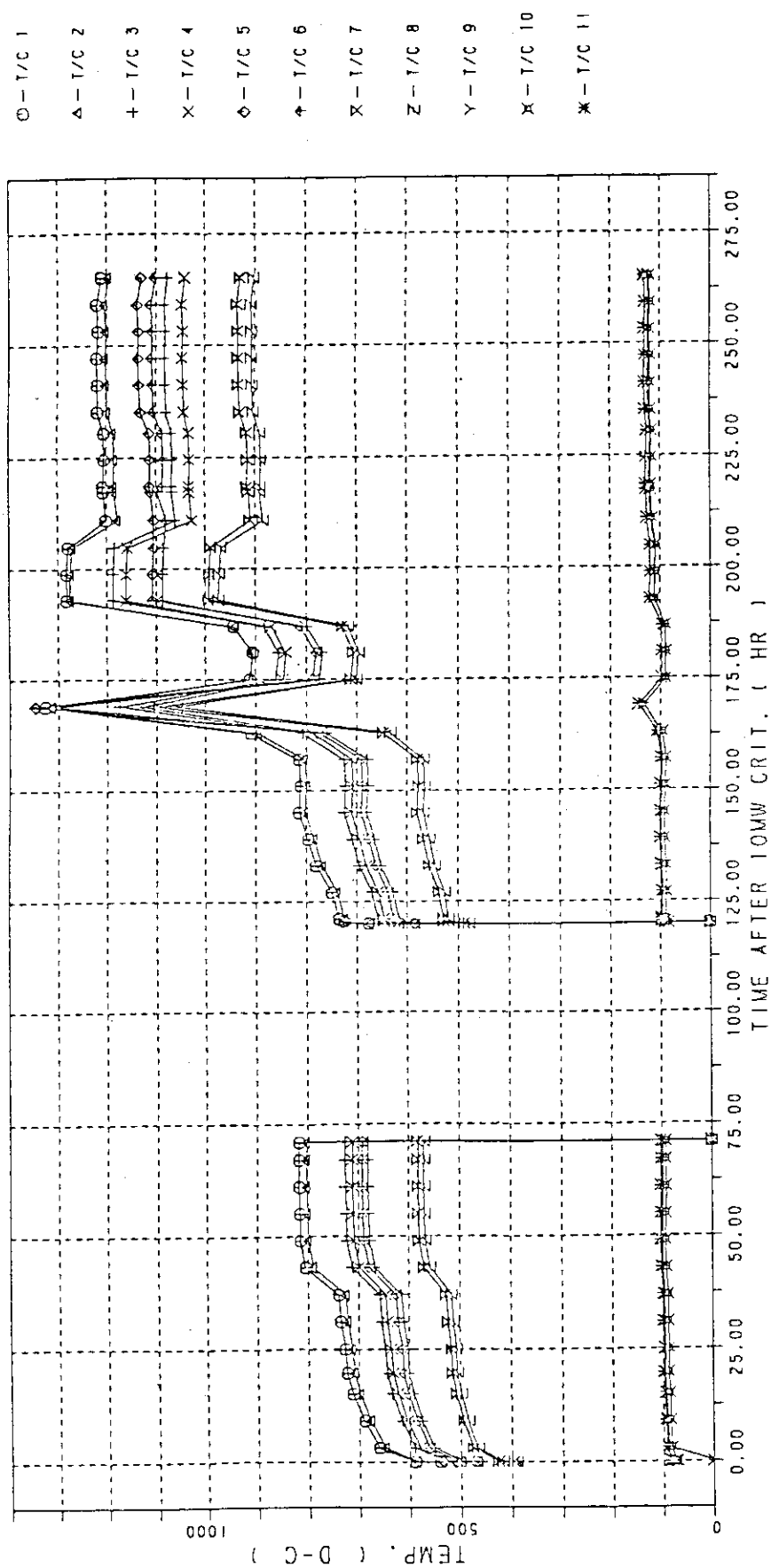


Fig. 9 Irradiation temperature of VIF-24H capsule (R2-55-05 cycle)

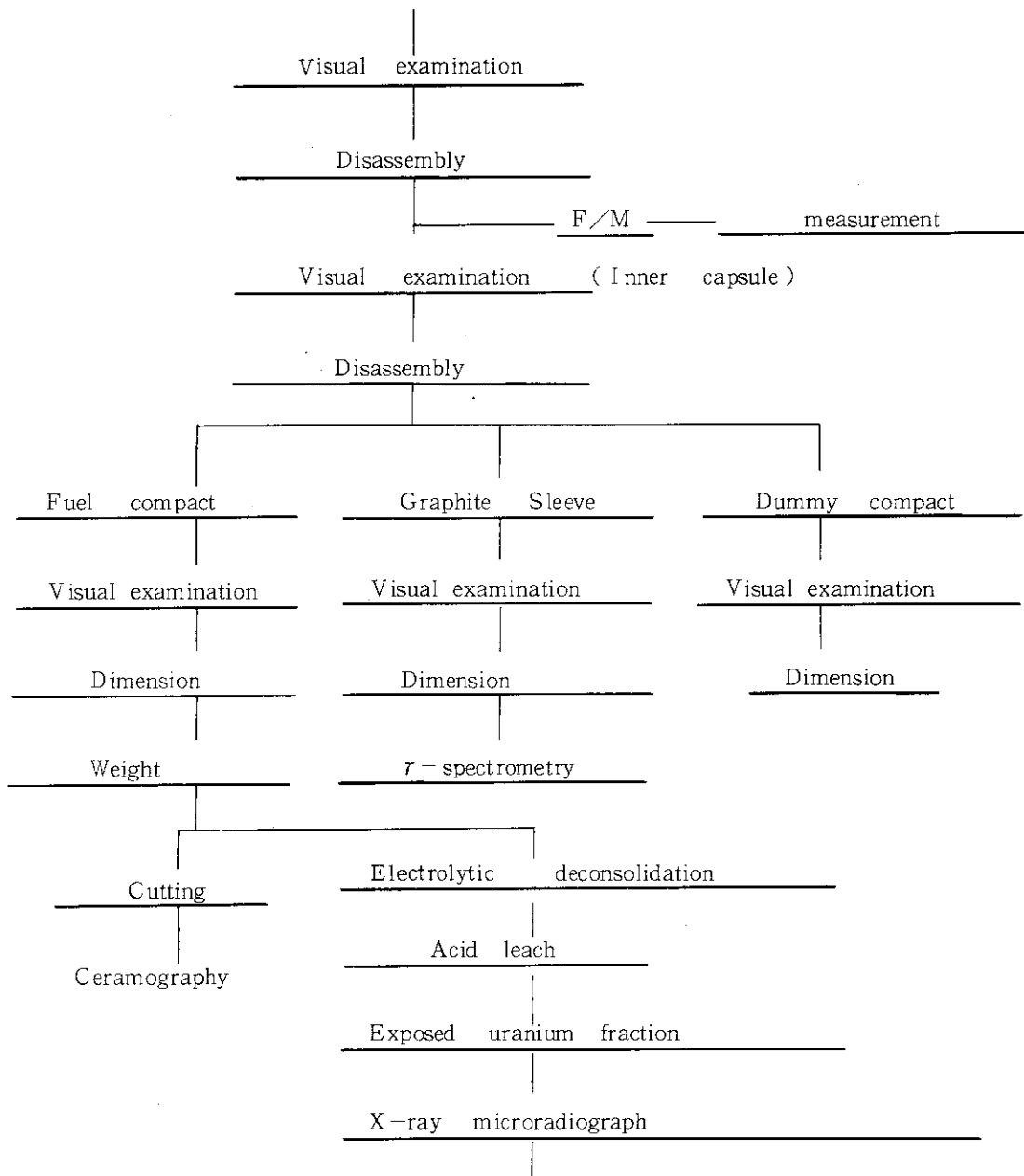
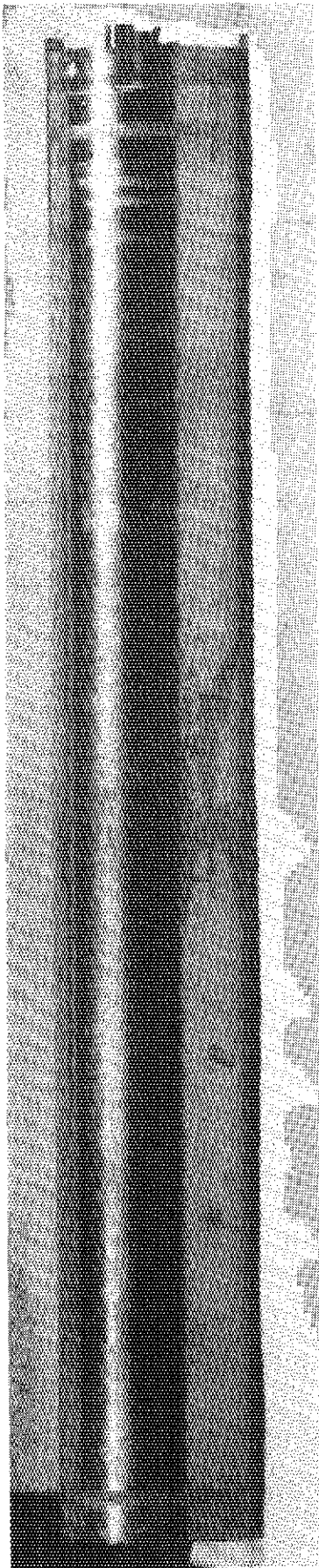
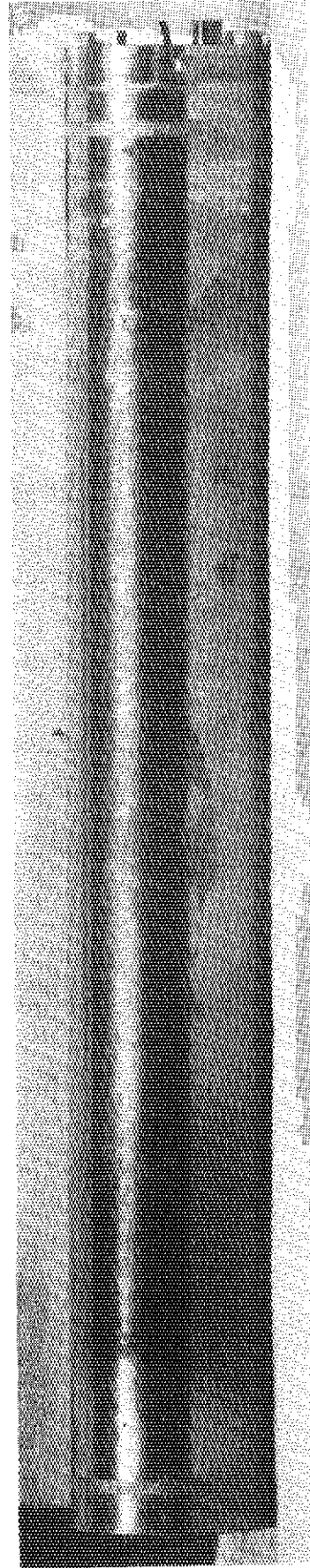


Fig. 10 PIE flow diagram of V1F-16H and V1F-24H capsule



One side



Opposite side

Fig. 11 Side views of inner capsule for VIF-16H capsule

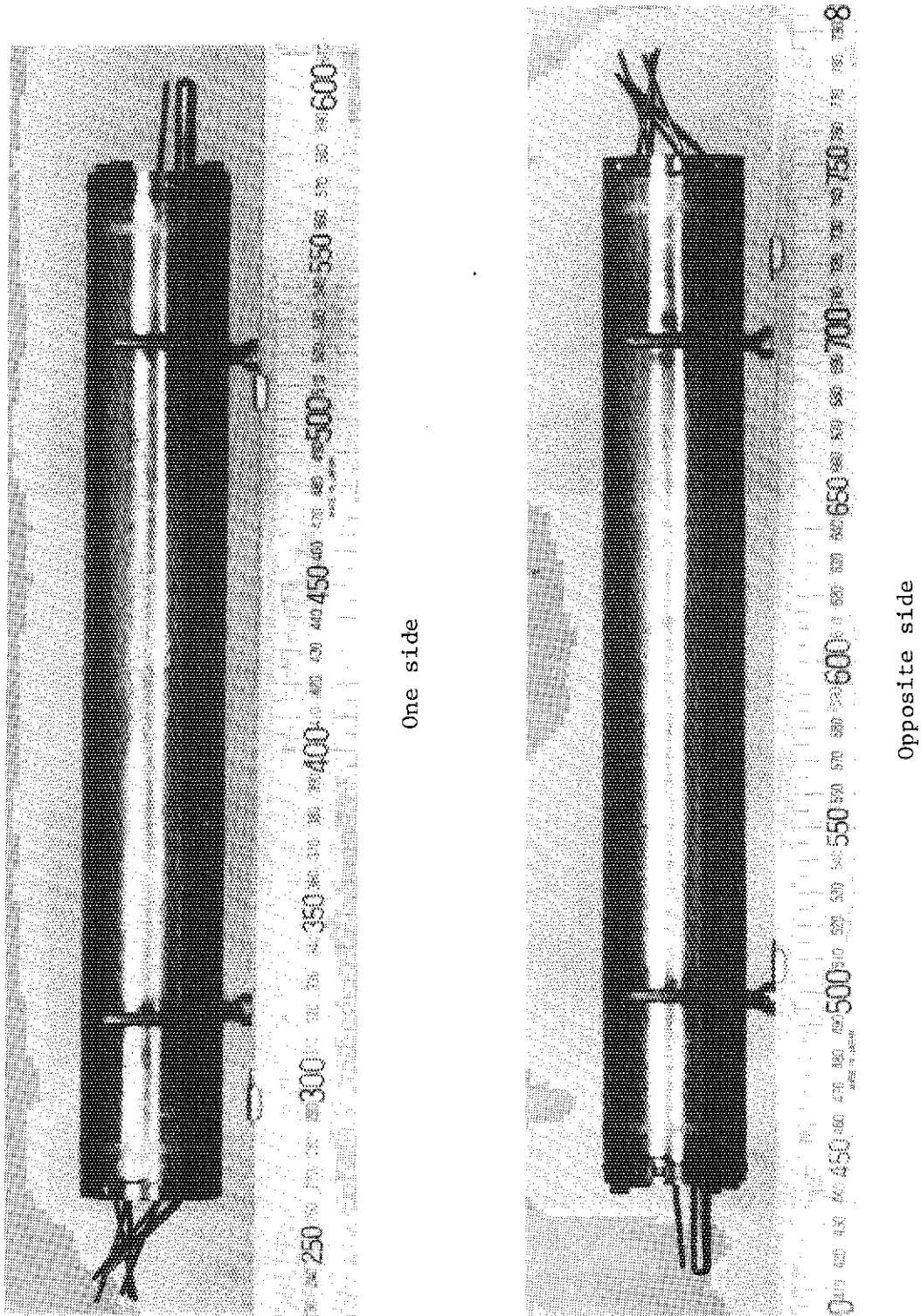


Fig. 12 Side views of inner capsule for VIF-24H capsule

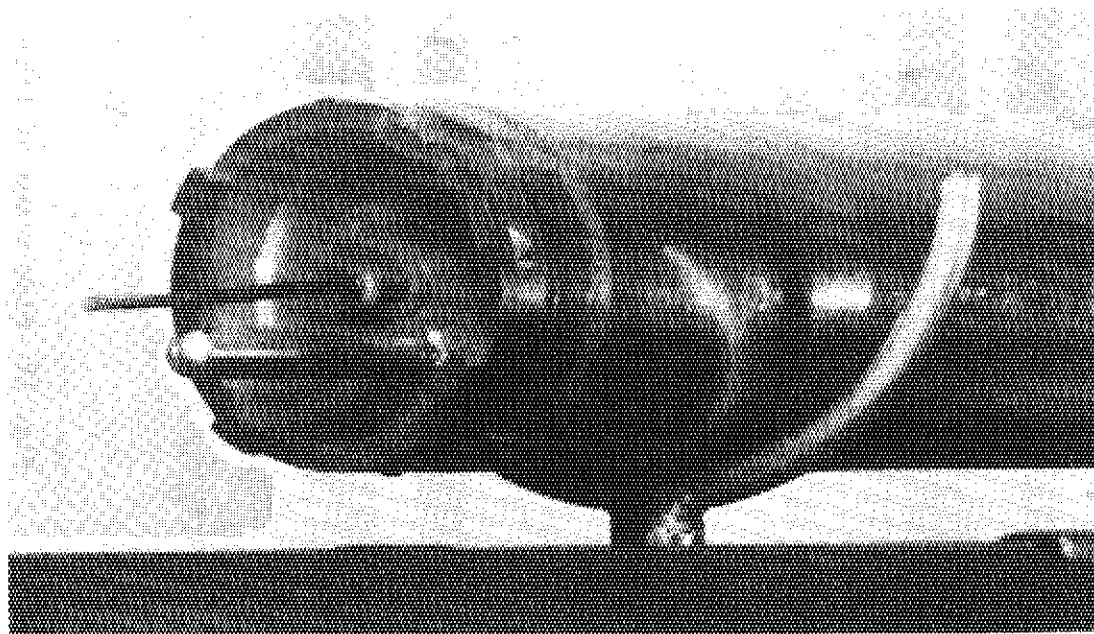
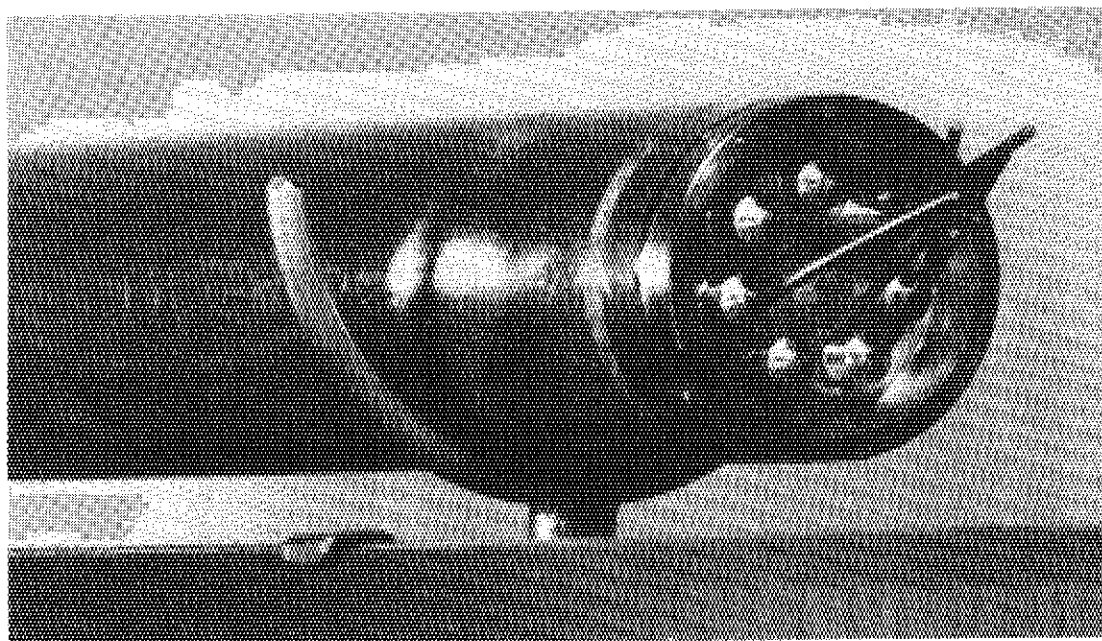


Fig. 13 Upper and lower end view of inner capsule for V1F-24H

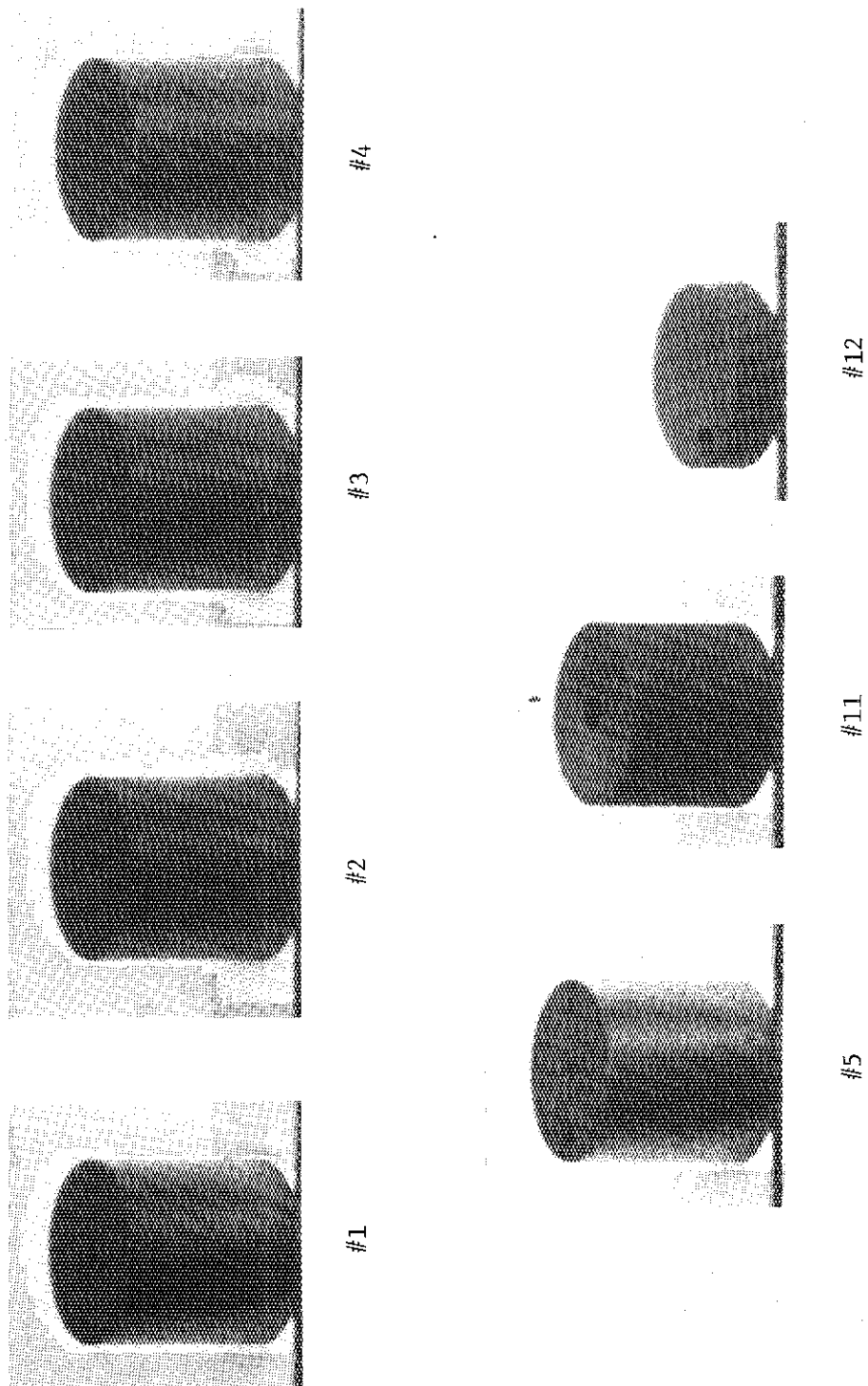


Fig. 14 Side view of fuel compacts and dummy compacts irradiated in V1F-16H capsule (Lower Side)

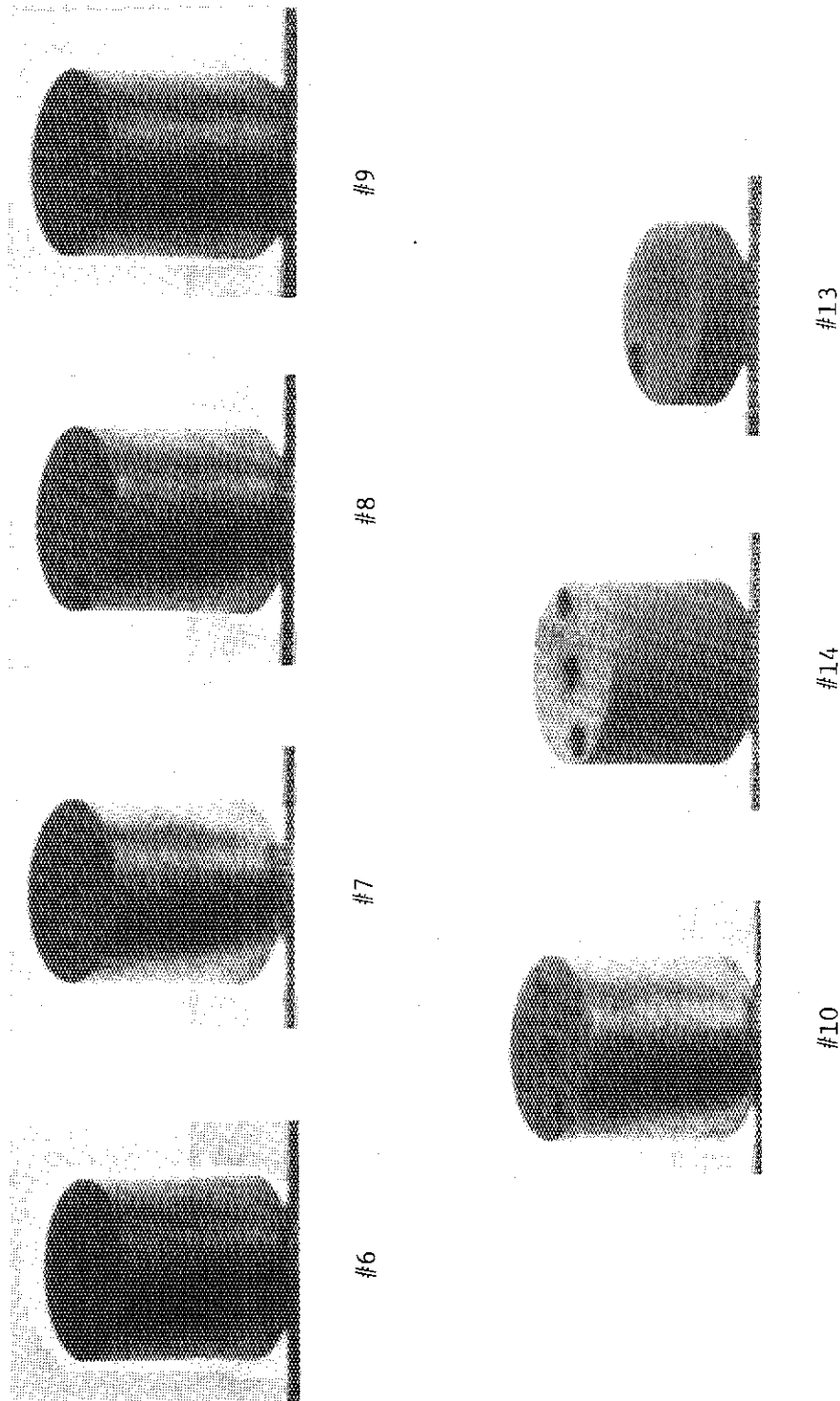
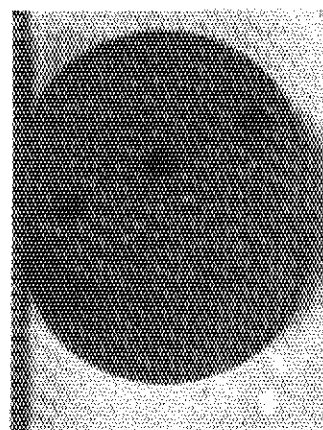
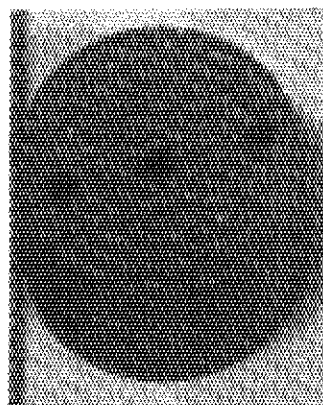


Fig. 15 Side view of fuel compacts and dummy compacts irradiated in VLF-16H capsule (Upper side)



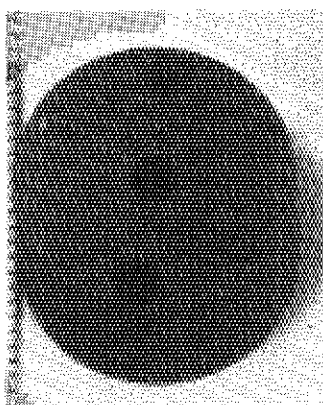
#3



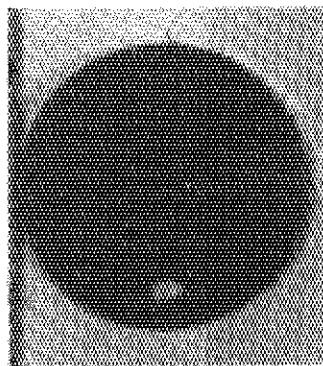
#2



#1



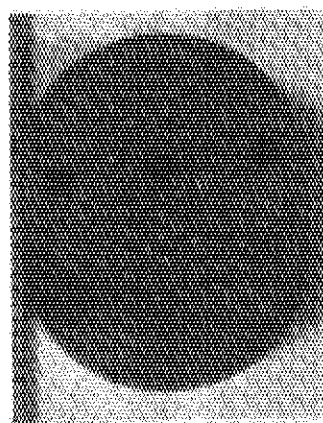
#11



#6



#5



#4

Fig. 16 End view of duel compacts and dummy compacts irradiated in VIF-24H capsule (Lower side)

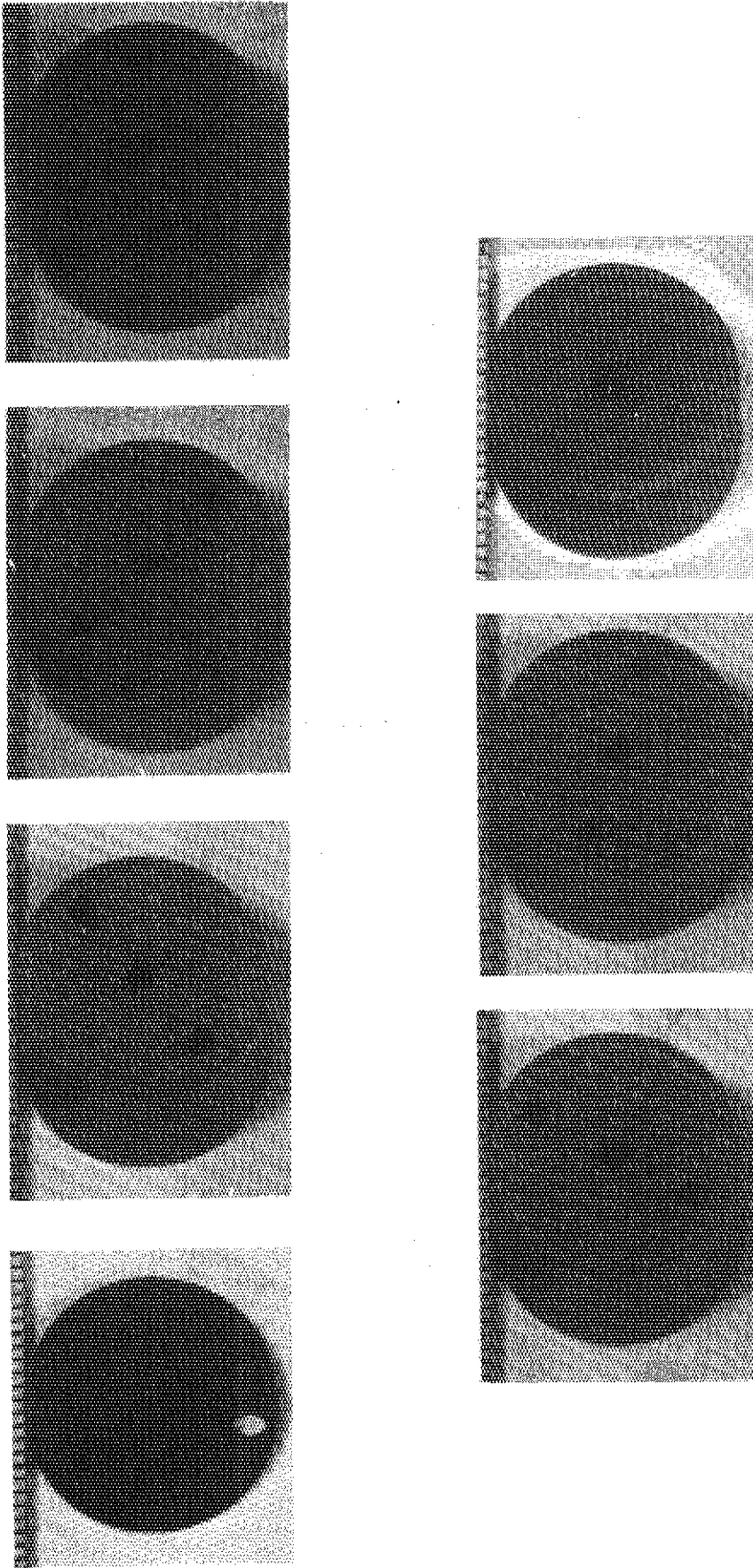


Fig. 17 End view of fuel compacts and dummy compacts irradiated
in VLF-24H capsule (Upper side)

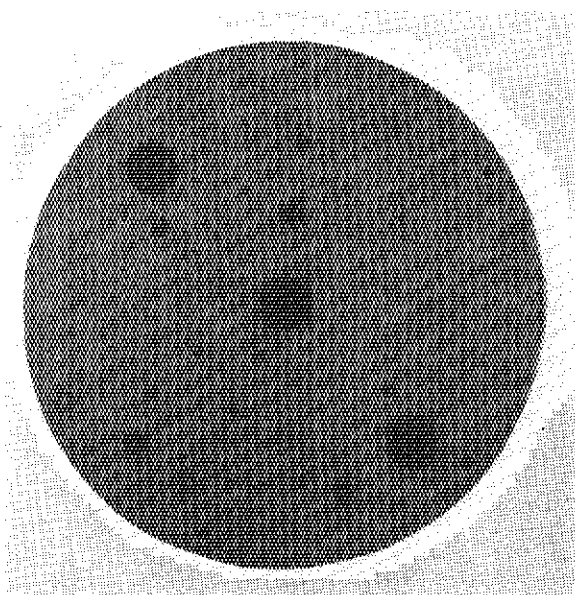


Fig. 18 Cross-section of #1 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule

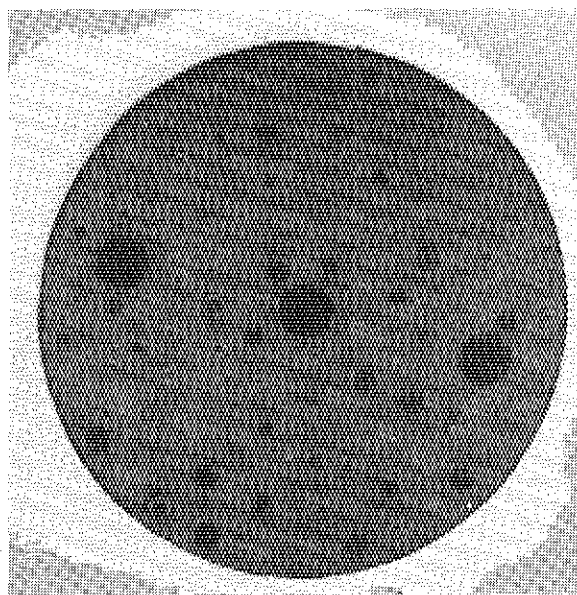


Fig. 19 Cross-section of #3 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule

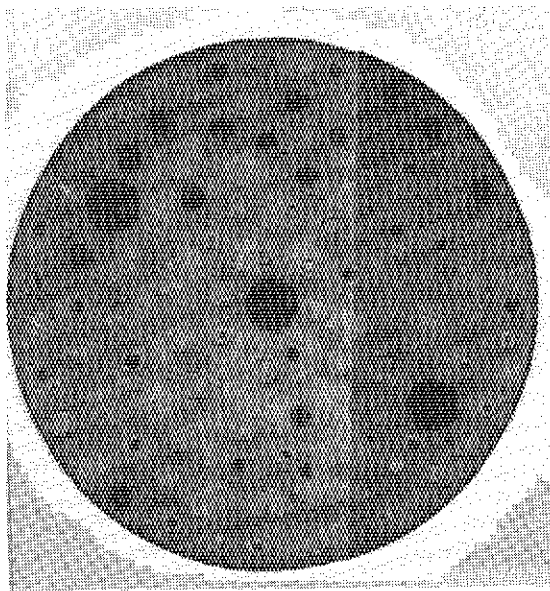


Fig. 20 Cross-section of #5 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule

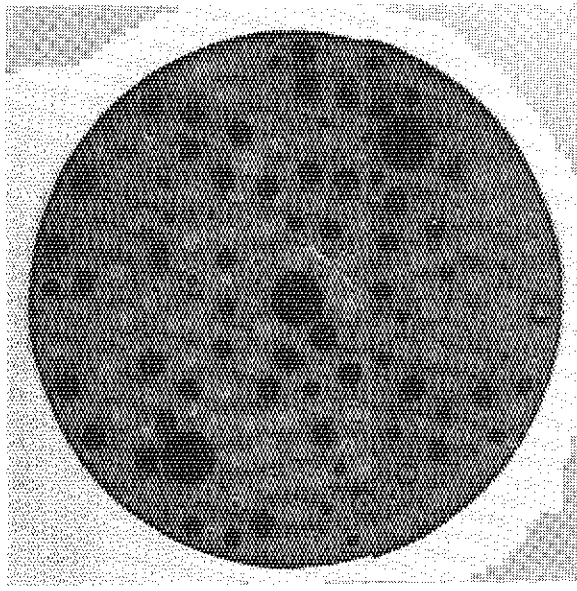


Fig. 21 Cross-section of #6 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule

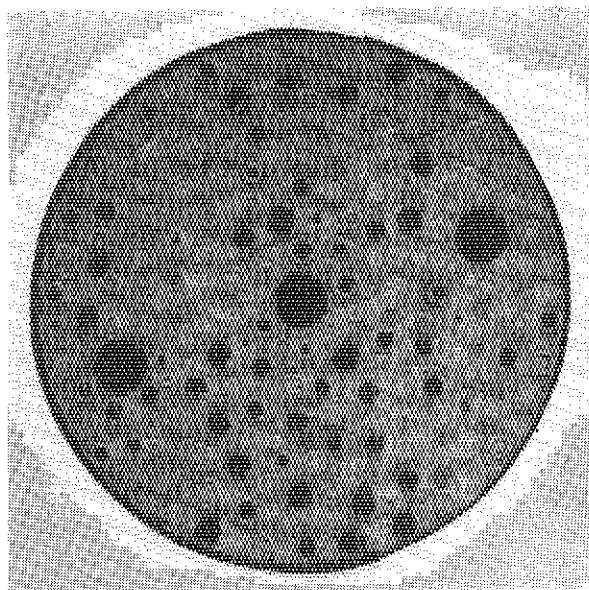


Fig. 22 Cross-section of #8 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule

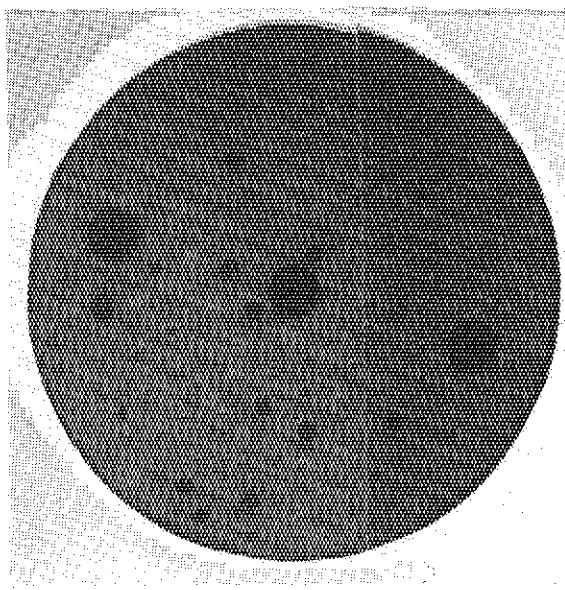


Fig. 23 Cross-section of #10 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule

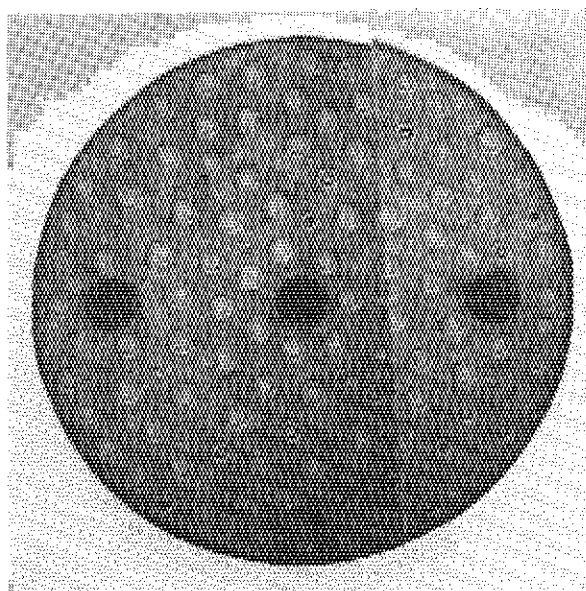


Fig. 24 Cross-section of #1 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

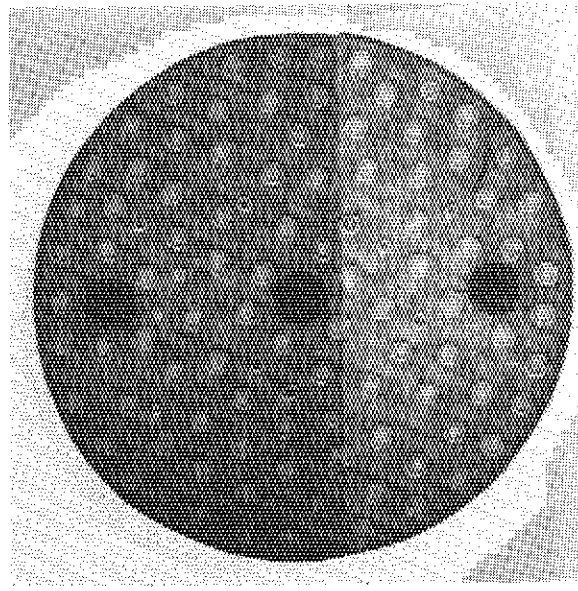


Fig. 25 Cross-section of #3 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

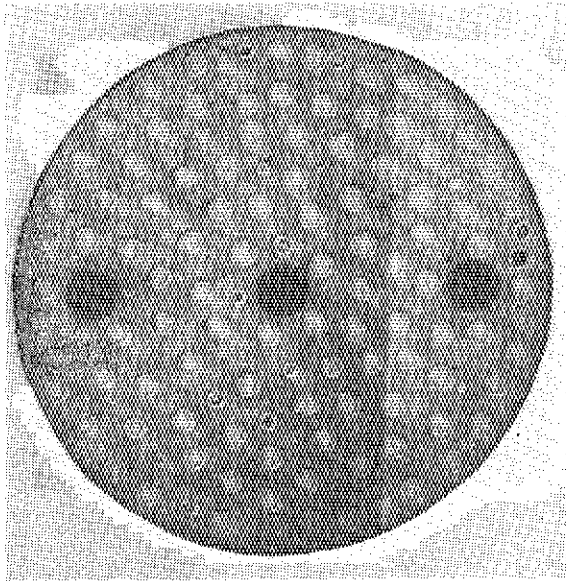


Fig. 26 Cross-section of #5 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

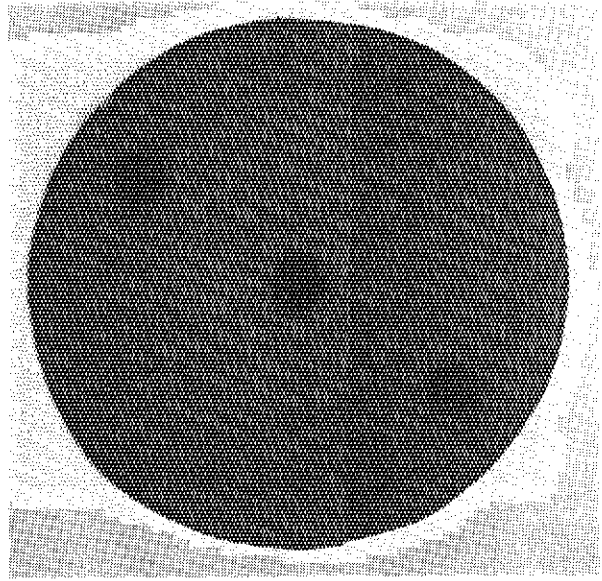


Fig. 27 Cross-section of #6 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

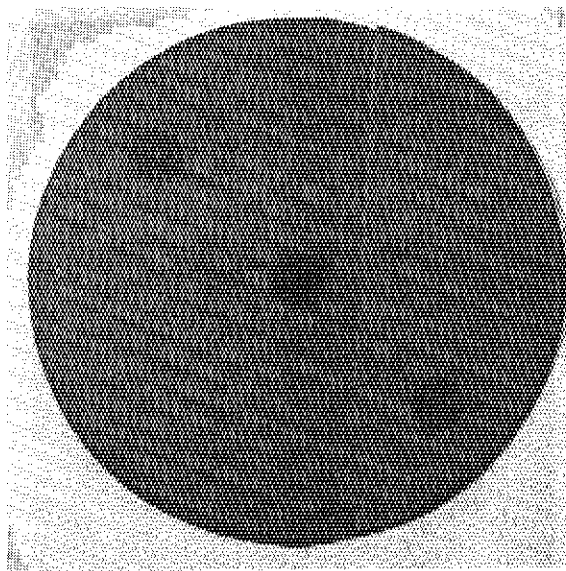


Fig. 28 Cross-section of #8 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

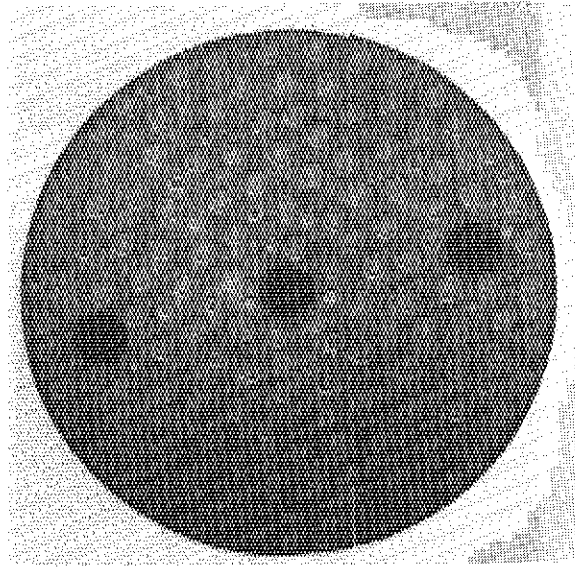
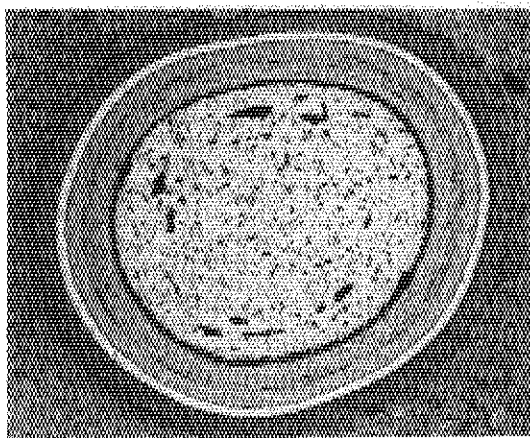
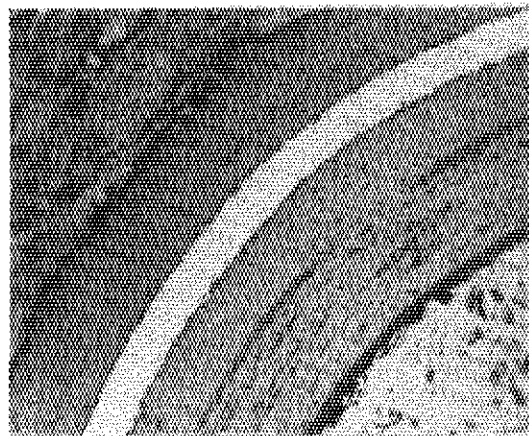


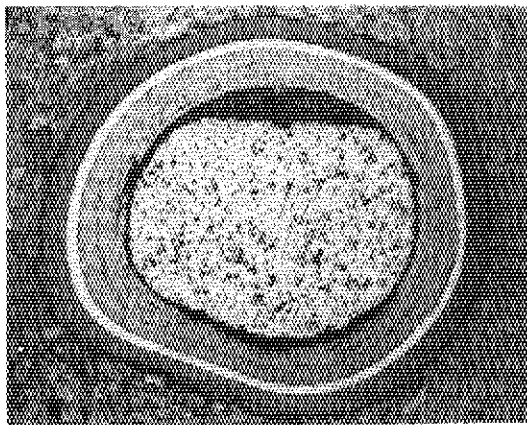
Fig. 29 Cross-section of #10 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule



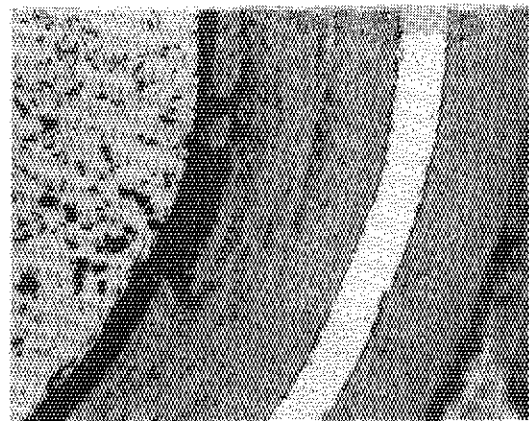
a



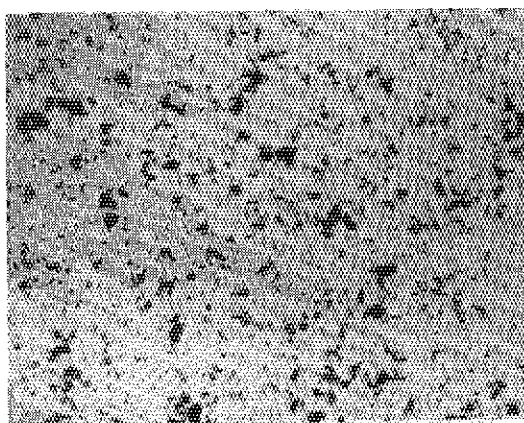
c



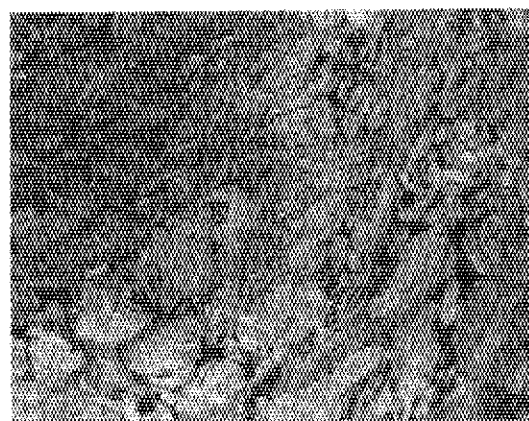
b



d



e



f

a, b : — 0.1 mm

d, d, e, f : — 0.025 mm

Fig. 30 Micrographs of coated particles and matrix material in #1 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (periphery region)

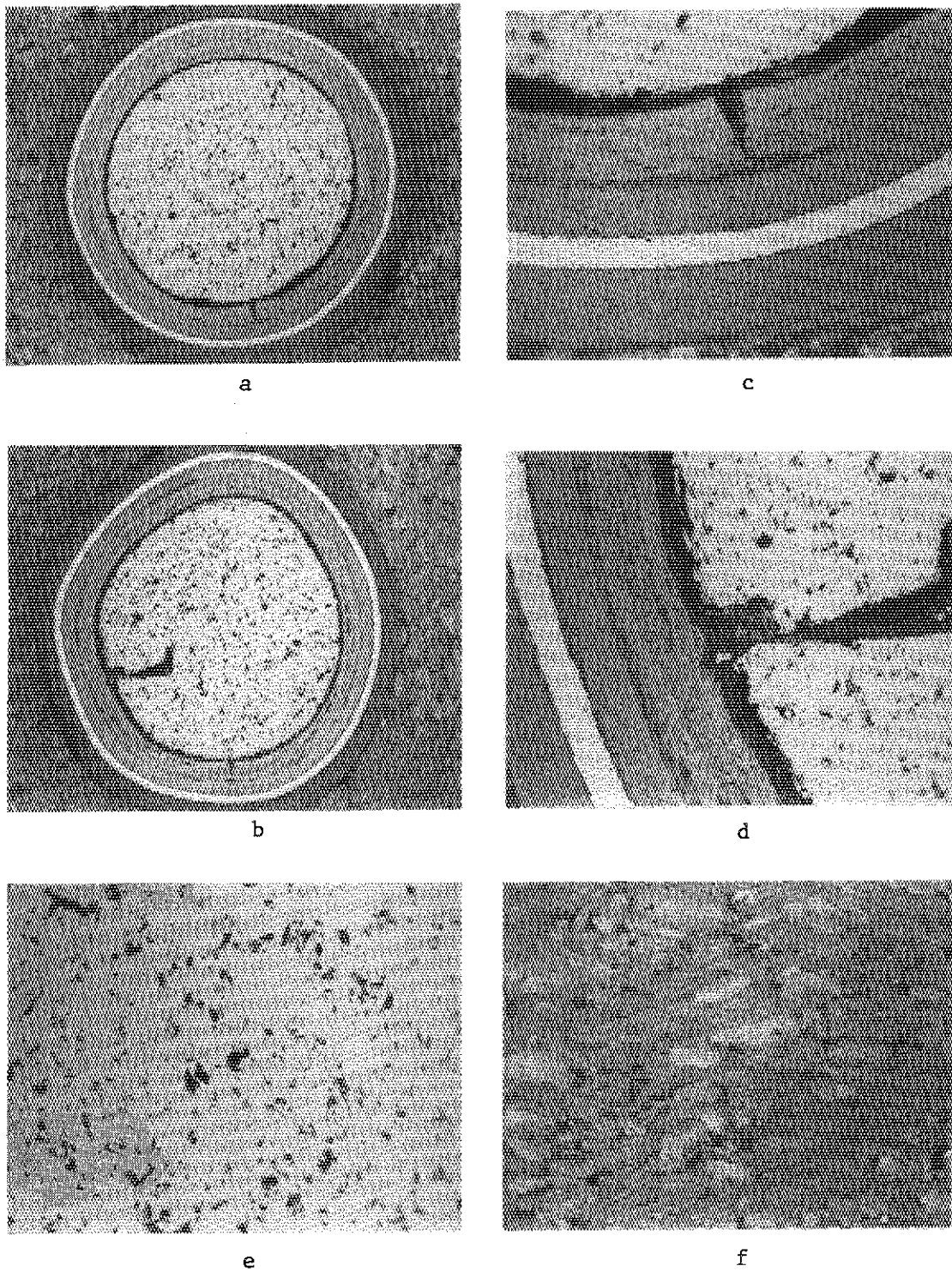
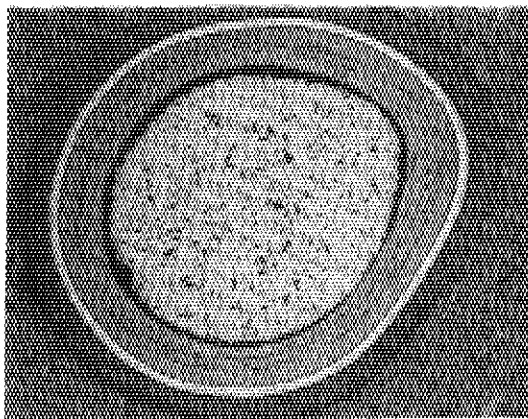
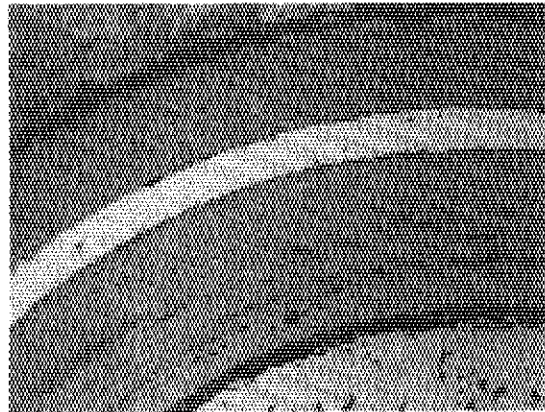


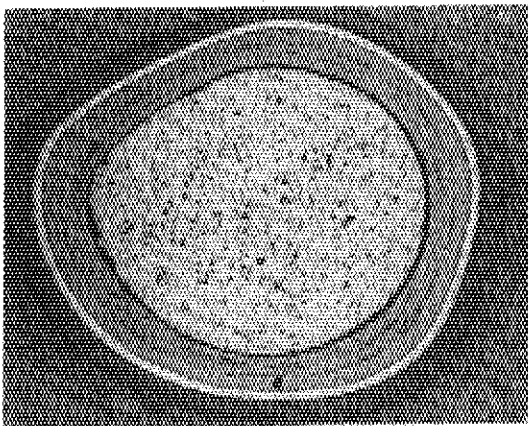
Fig. 31 Micrographs of coated particles and matrix material in #1 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (intermediate region)



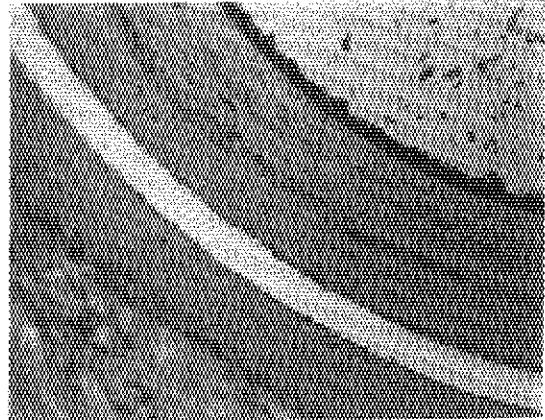
a



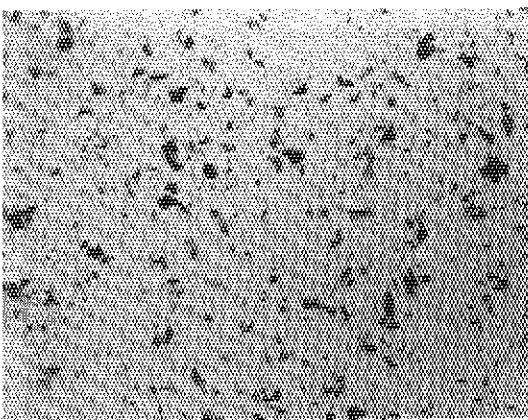
c



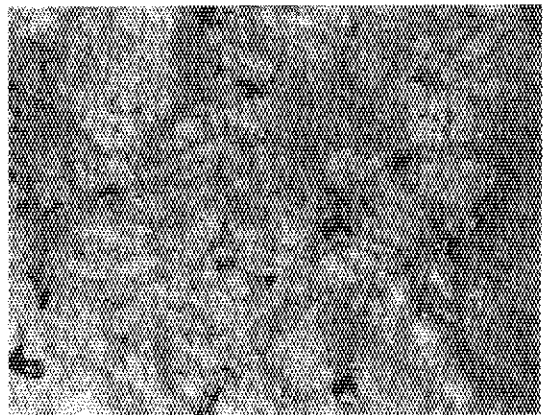
b



d

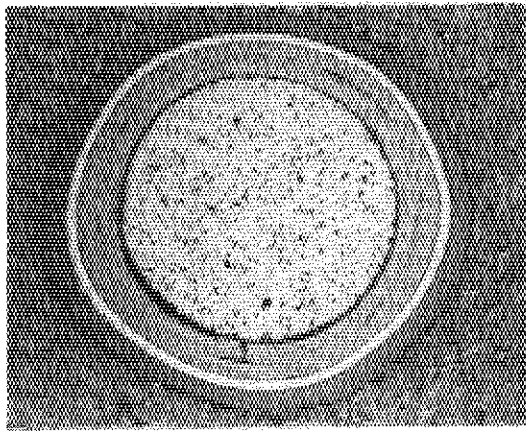


e

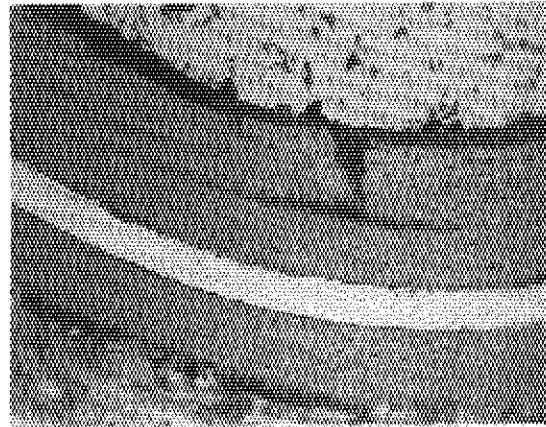


f

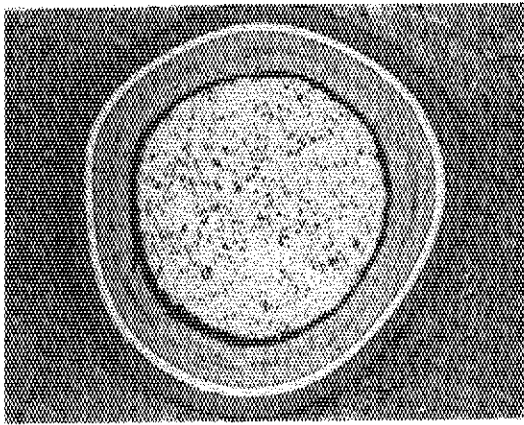
Fig. 32 Micrographs of coated particles and matrix material in #3 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (periphery region)



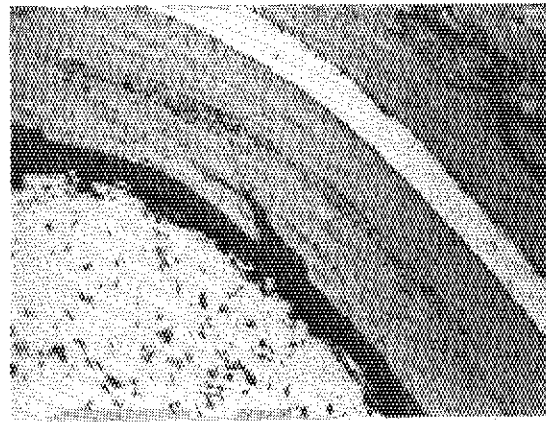
a



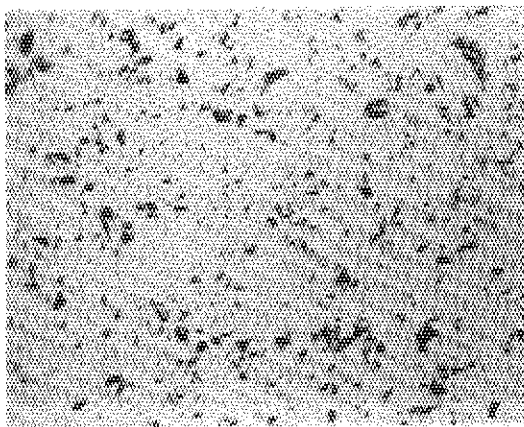
c



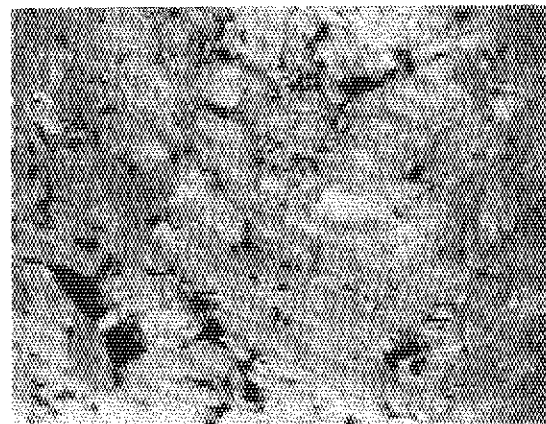
b



d



e



f

Fig. 33 Micrographs of coated particles and matrix material in #3 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (intermediate region)

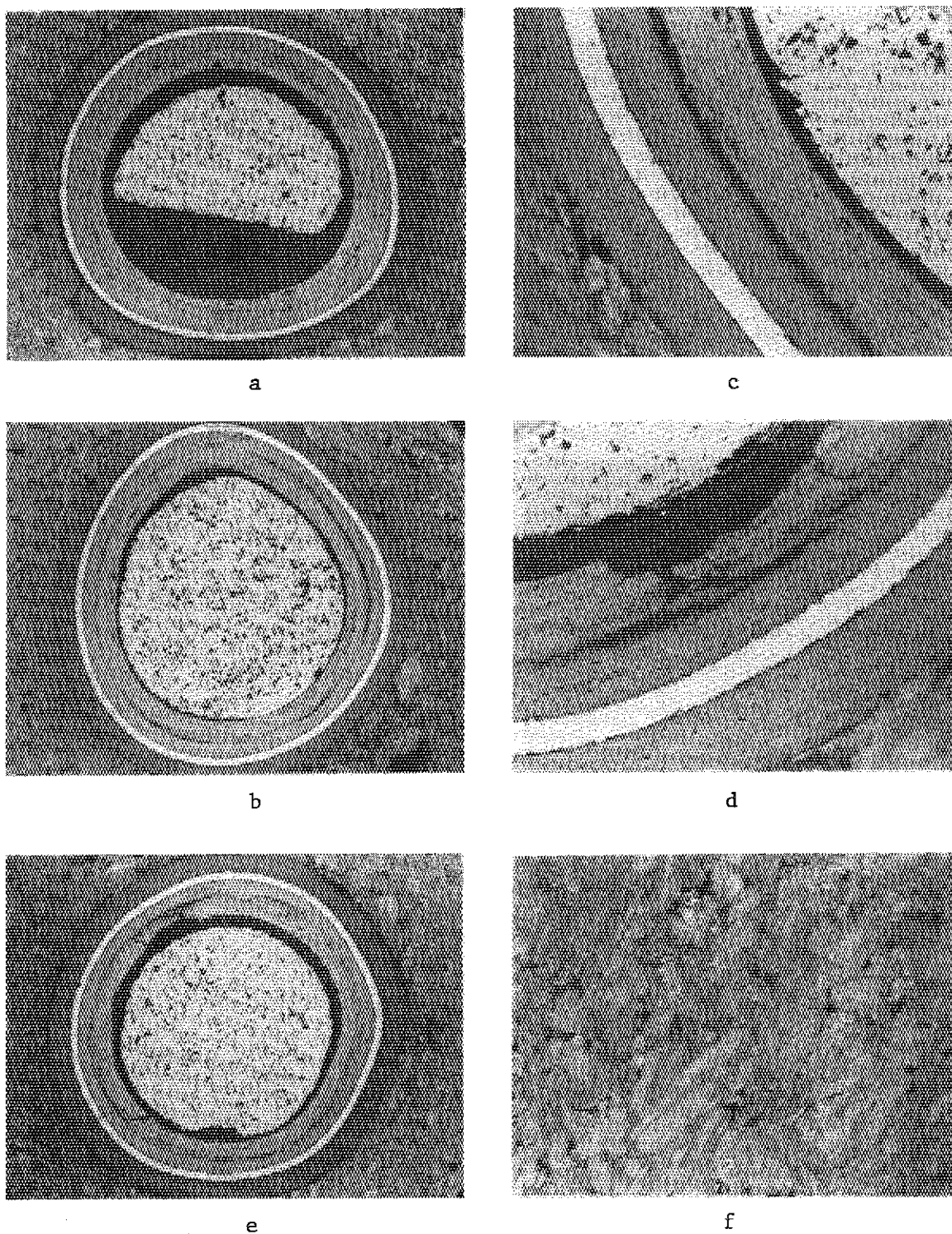
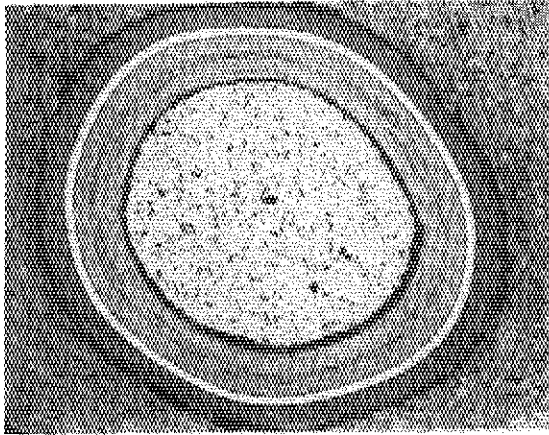
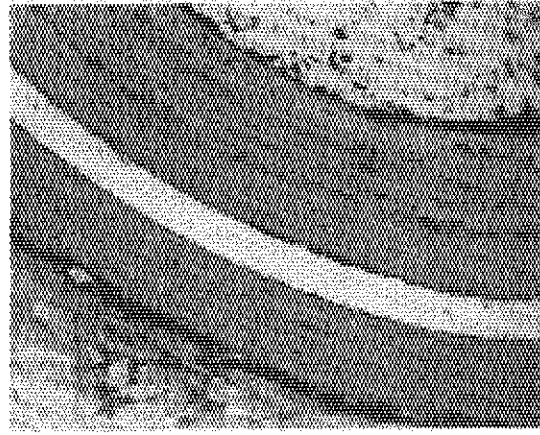


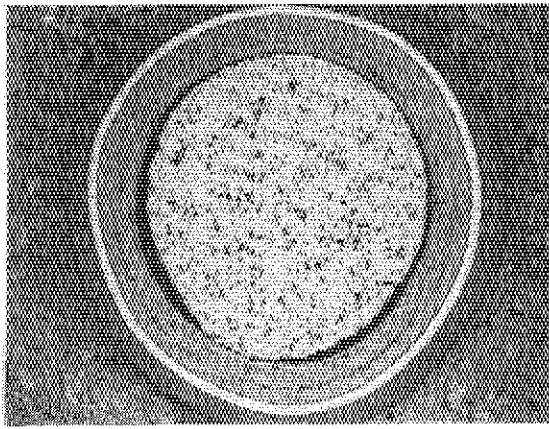
Fig. 34 Micrographs of coated particles and matrix material in #5 fuel compact irradiated in VLF-16H capsule (intermediate region)



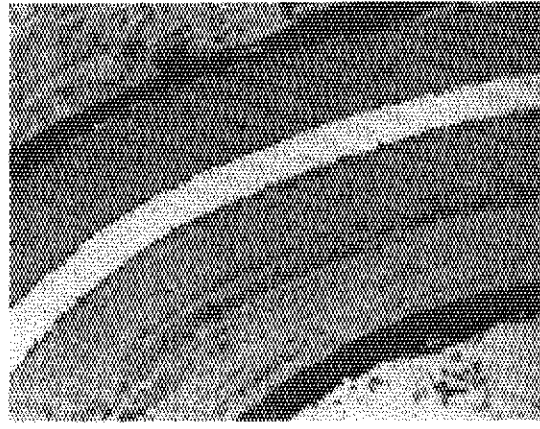
a



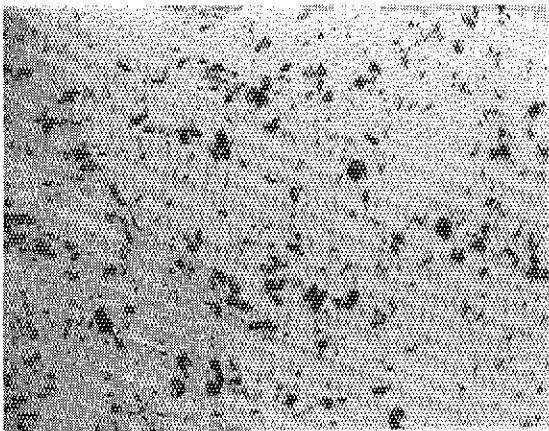
c



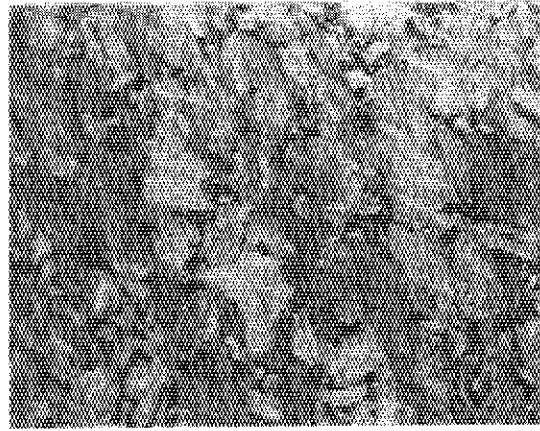
b



d



e



f

Fig. 35 Micrographs of coated particles and matrix material in #5 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (center region)

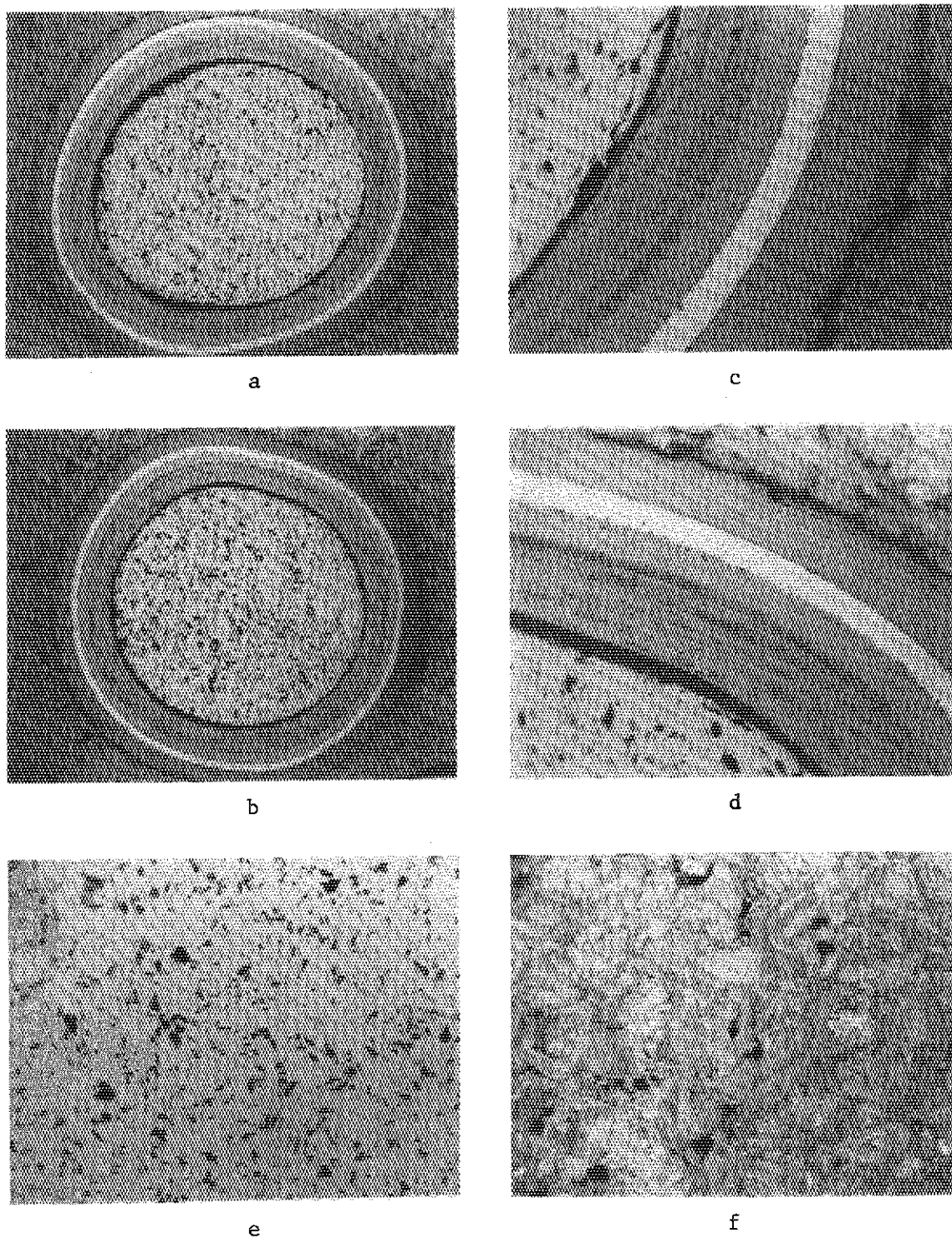
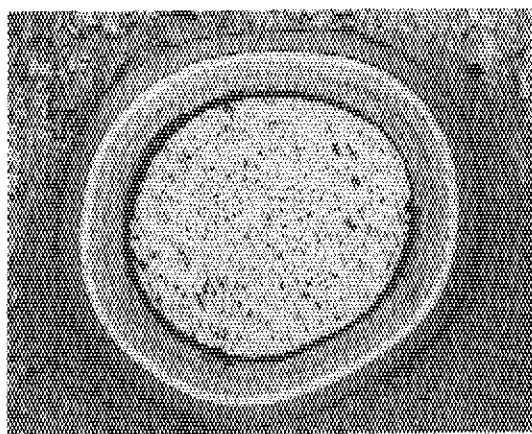
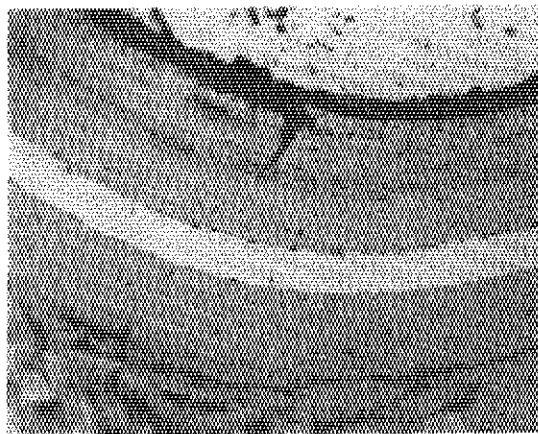


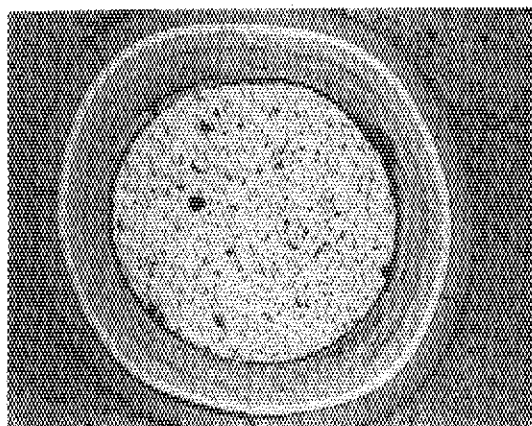
Fig. 36 Micrographs of coated particles and matrix material in #6 fuel compact irradiated in VLF-16H capsule (periphery region)



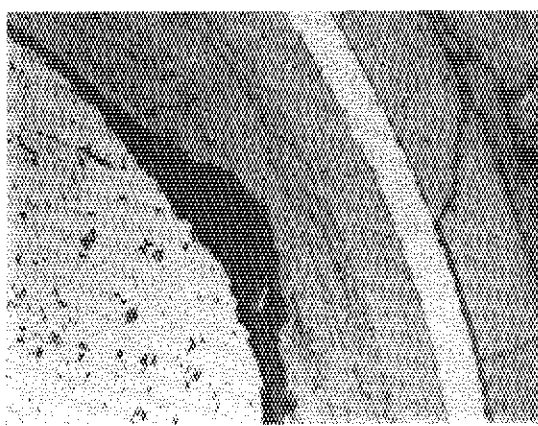
a



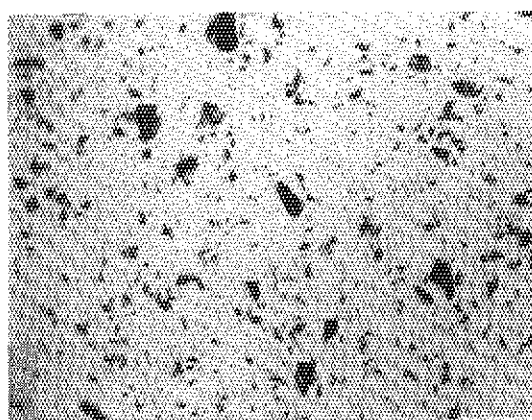
c



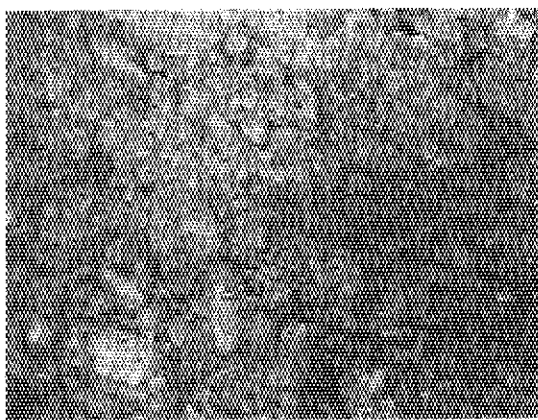
b



d



e



f

Fig. 37 Micrographs of coated particles and matrix material in #6 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (intermediate region)

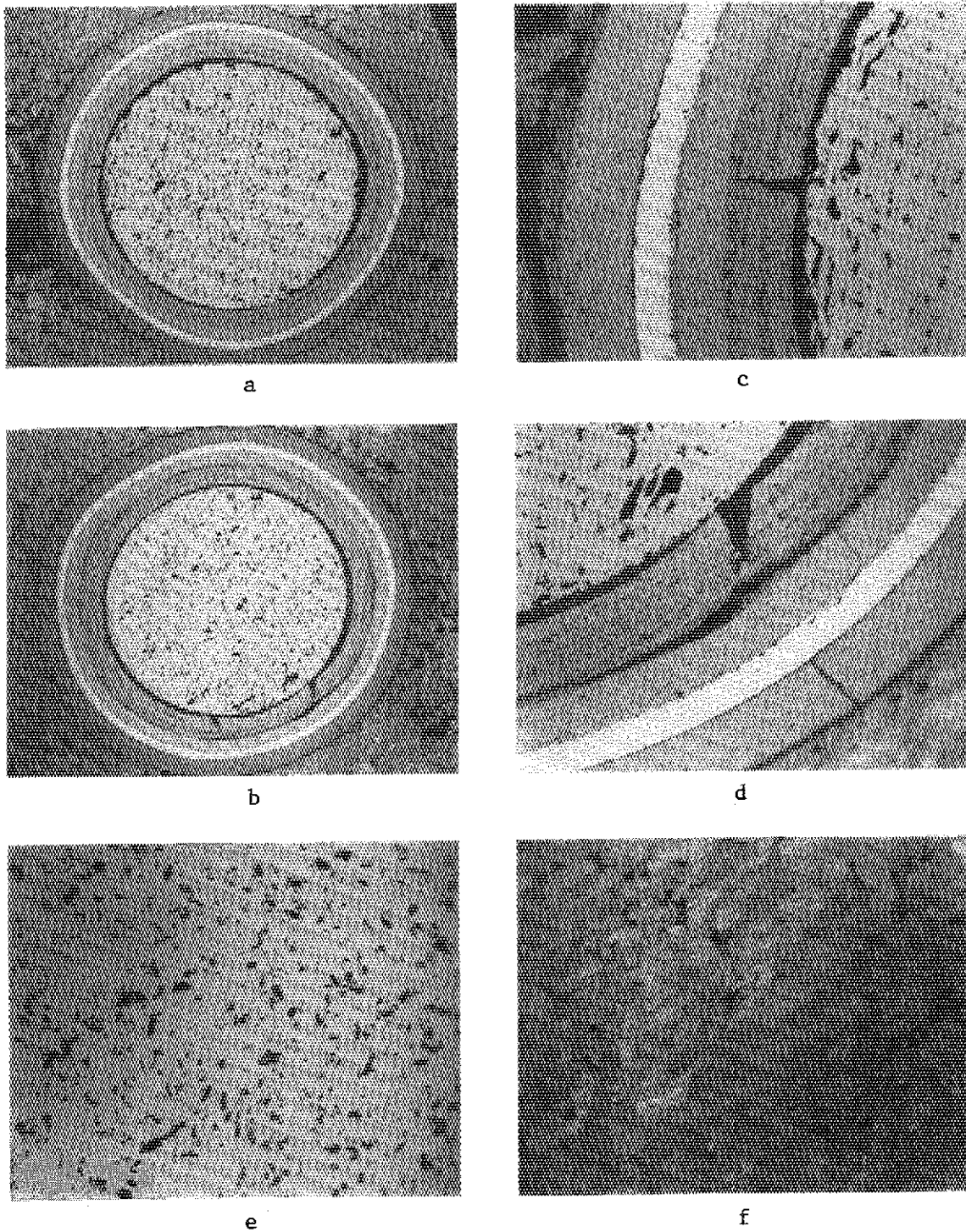
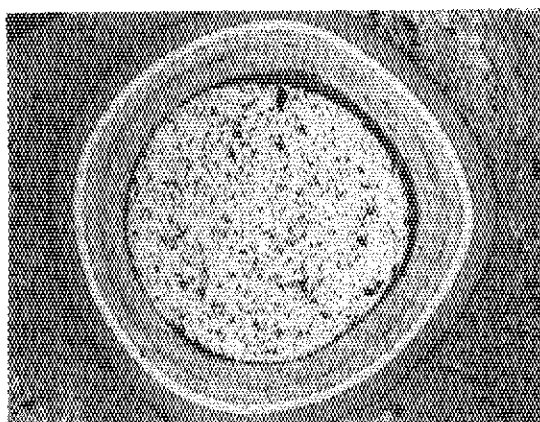
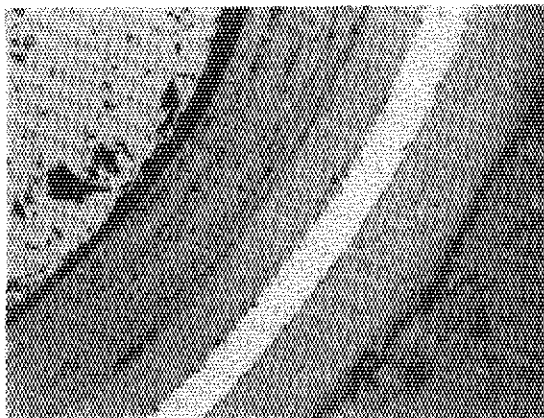


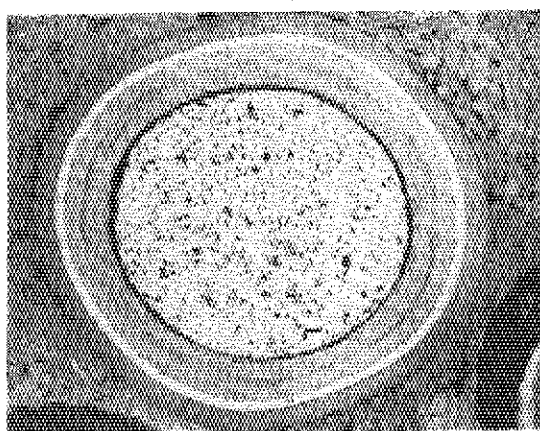
Fig. 38 Micrographs of coated particles and matrix material in #6 fuel compact irradiated in VLF-16H capsule (center region)



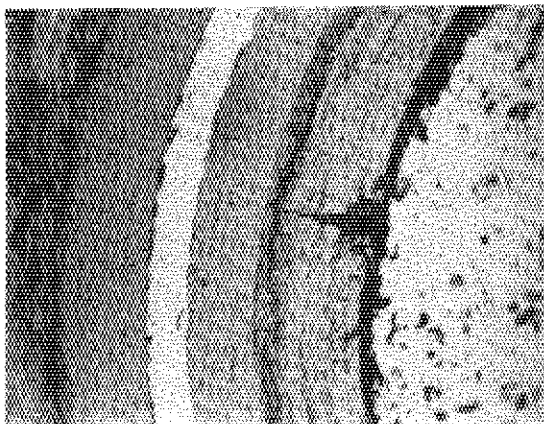
a



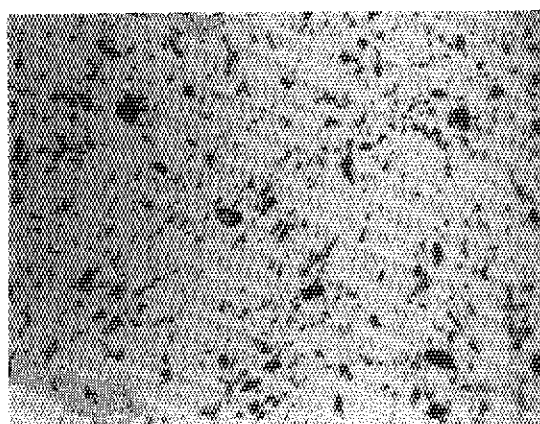
c



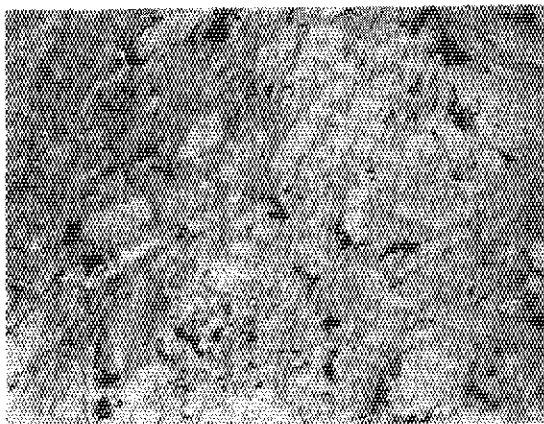
b



d



e



f

Fig. 39 Micrographs of coated particles and matrix material in #8 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (periphery region)

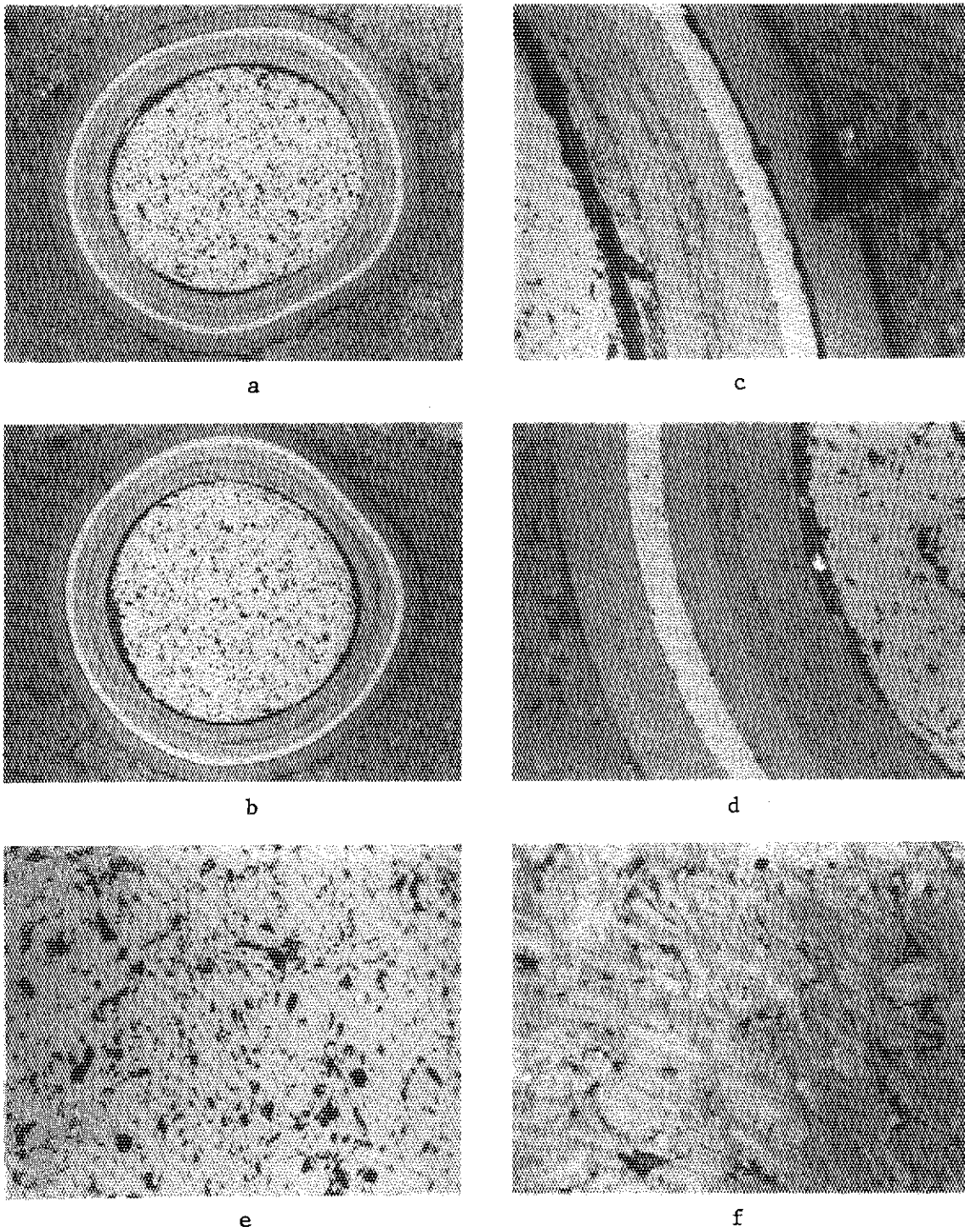
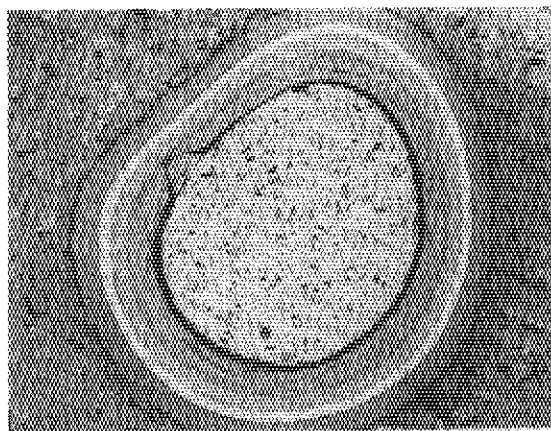
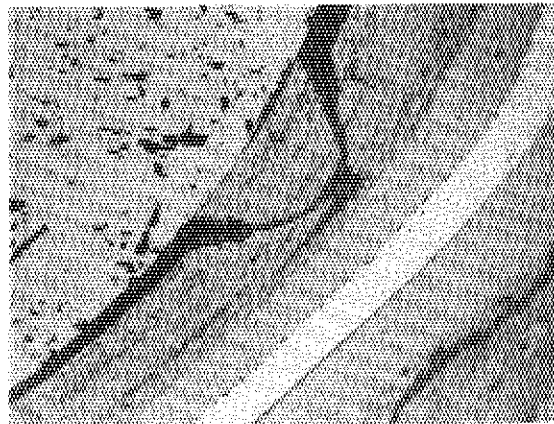


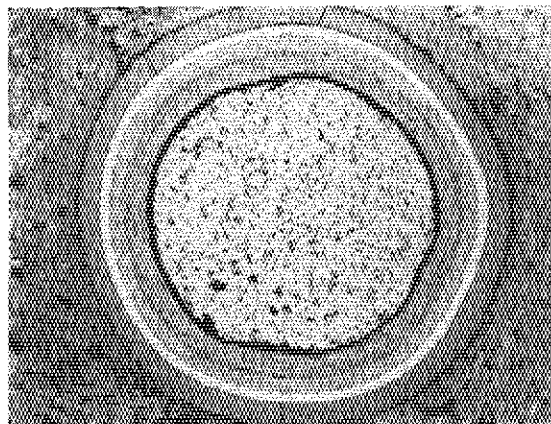
Fig. 40 Micrographs of coated particles and matrix material in #8 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (intermediate region)



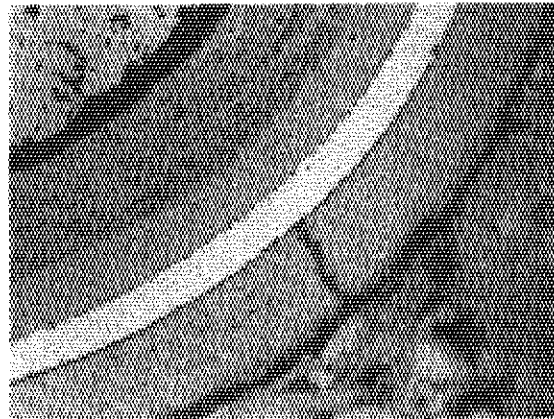
a



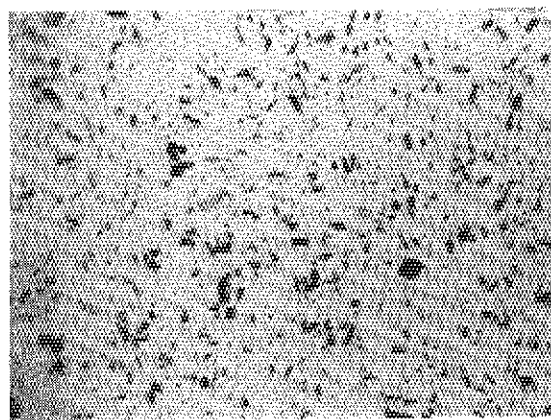
c



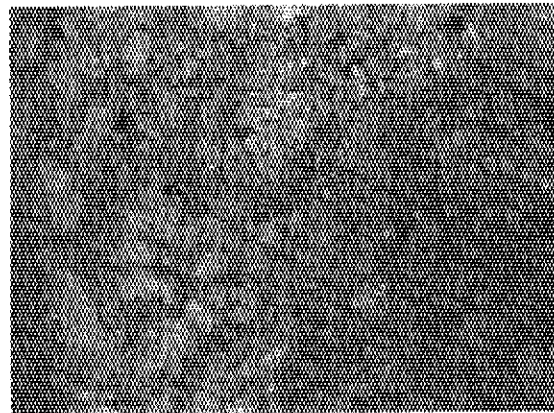
b



d



e



f

Fig. 41 Micrographs of coated particles and matrix material in #8 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (center region)

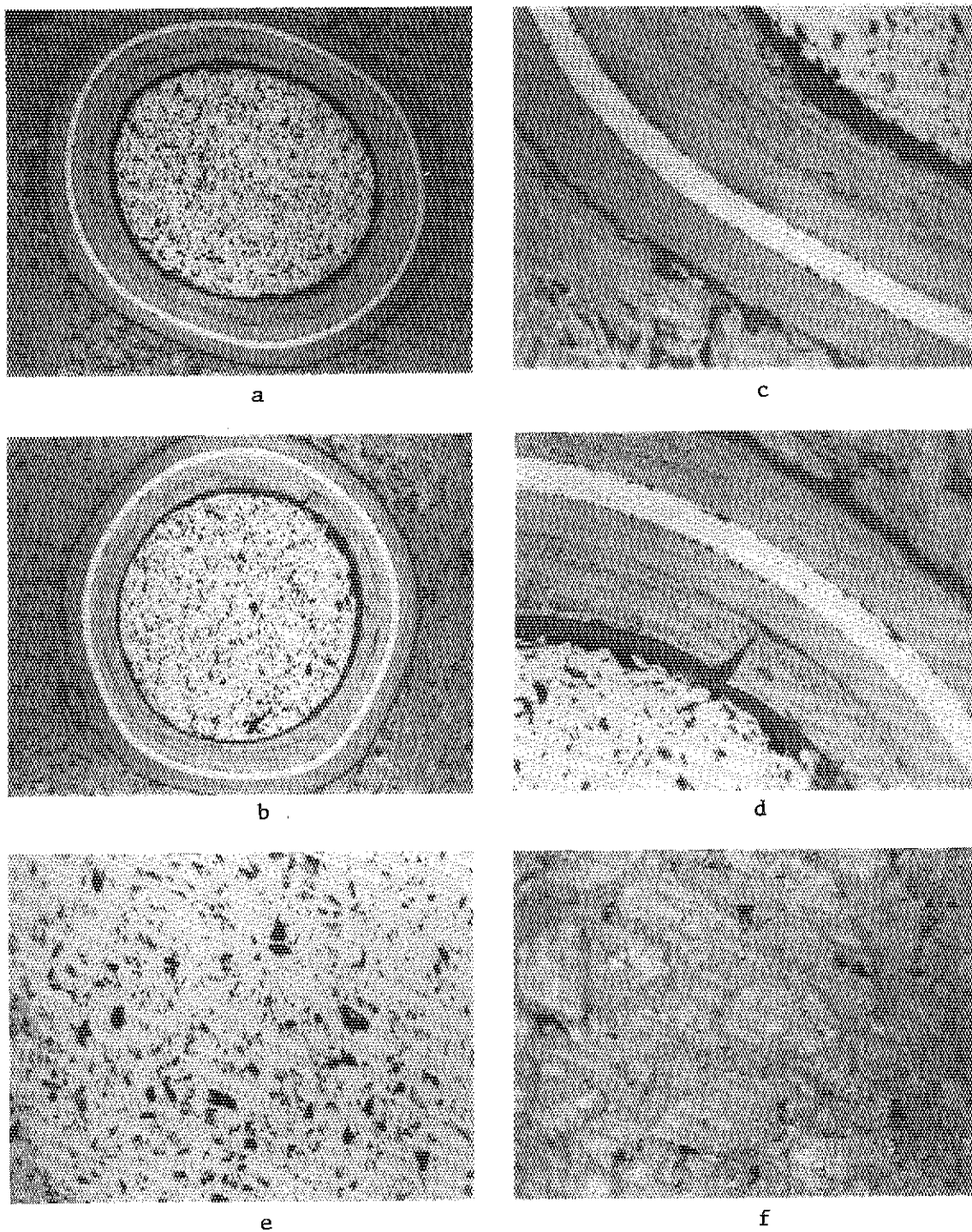


Fig. 42 Micrographs of coated particles and matrix material in #10 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (periphery region)

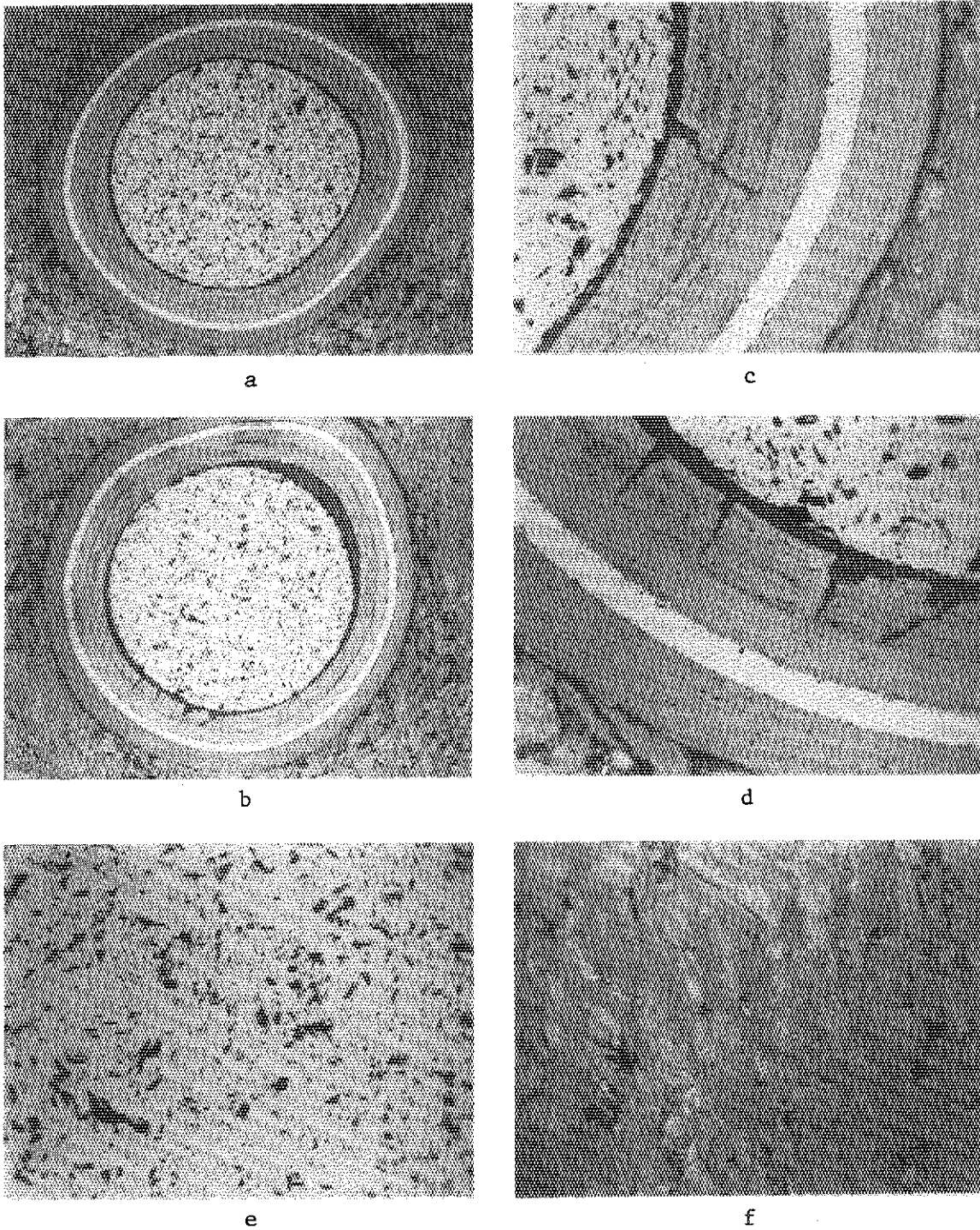


Fig. 43 Micrographs of coated particles and matrix material in #10 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (intermediate region)

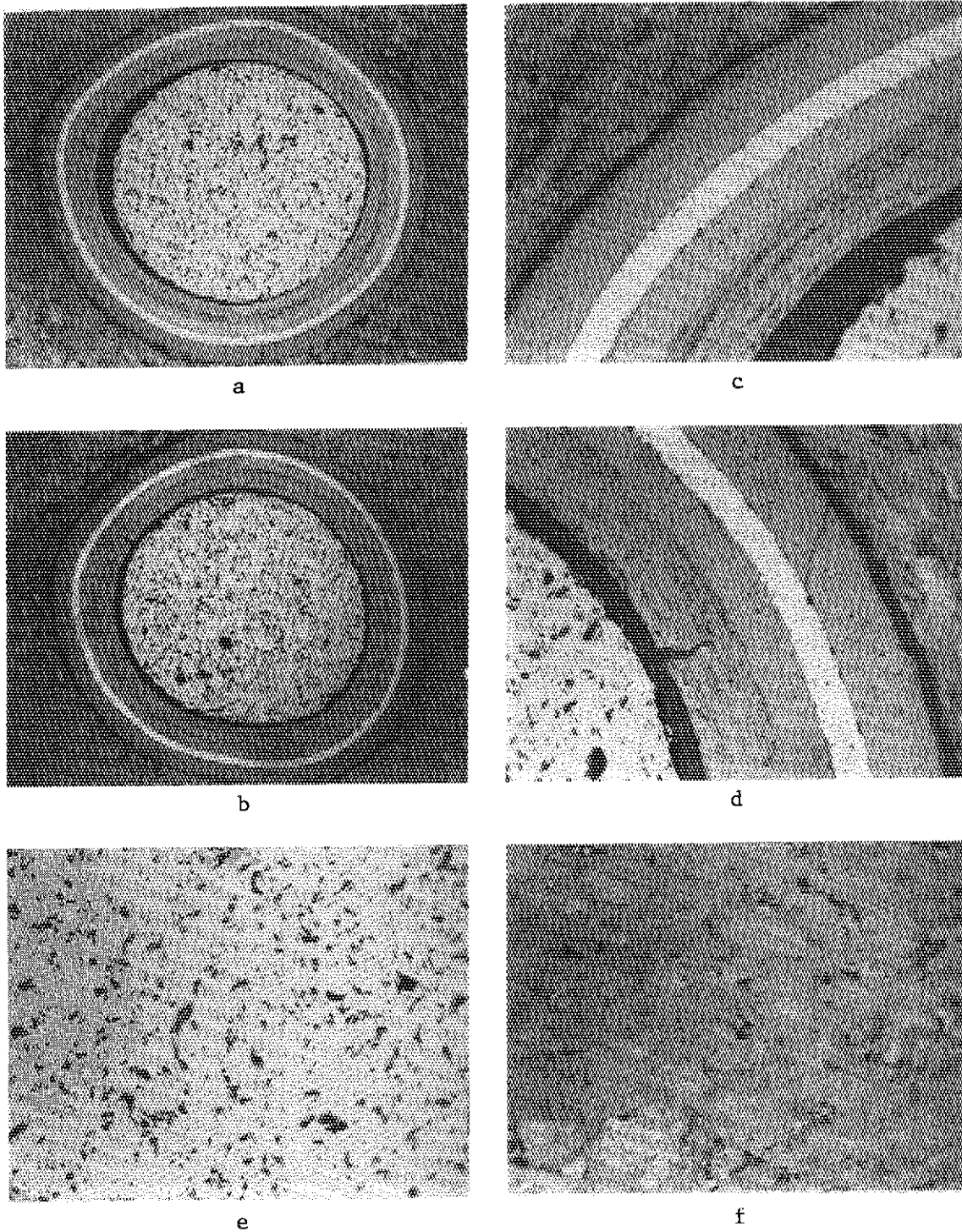


Fig. 44 Micrographs of coated particles and matrix material in #10 fuel compact irradiated in V1F-16H capsule (center region)

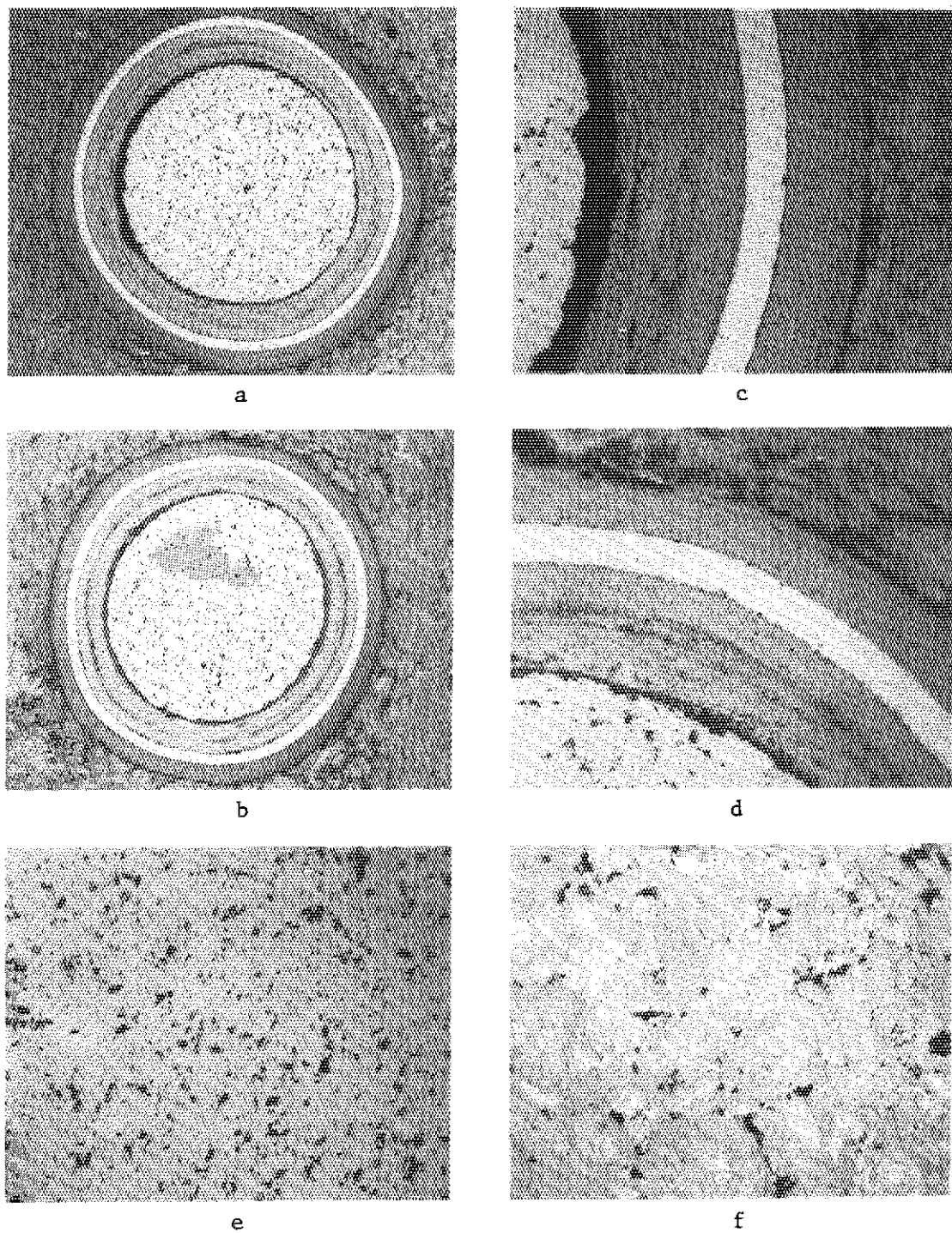


Fig. 45 Micrographs of coated particles and matrix material in #1 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule (periphery region)

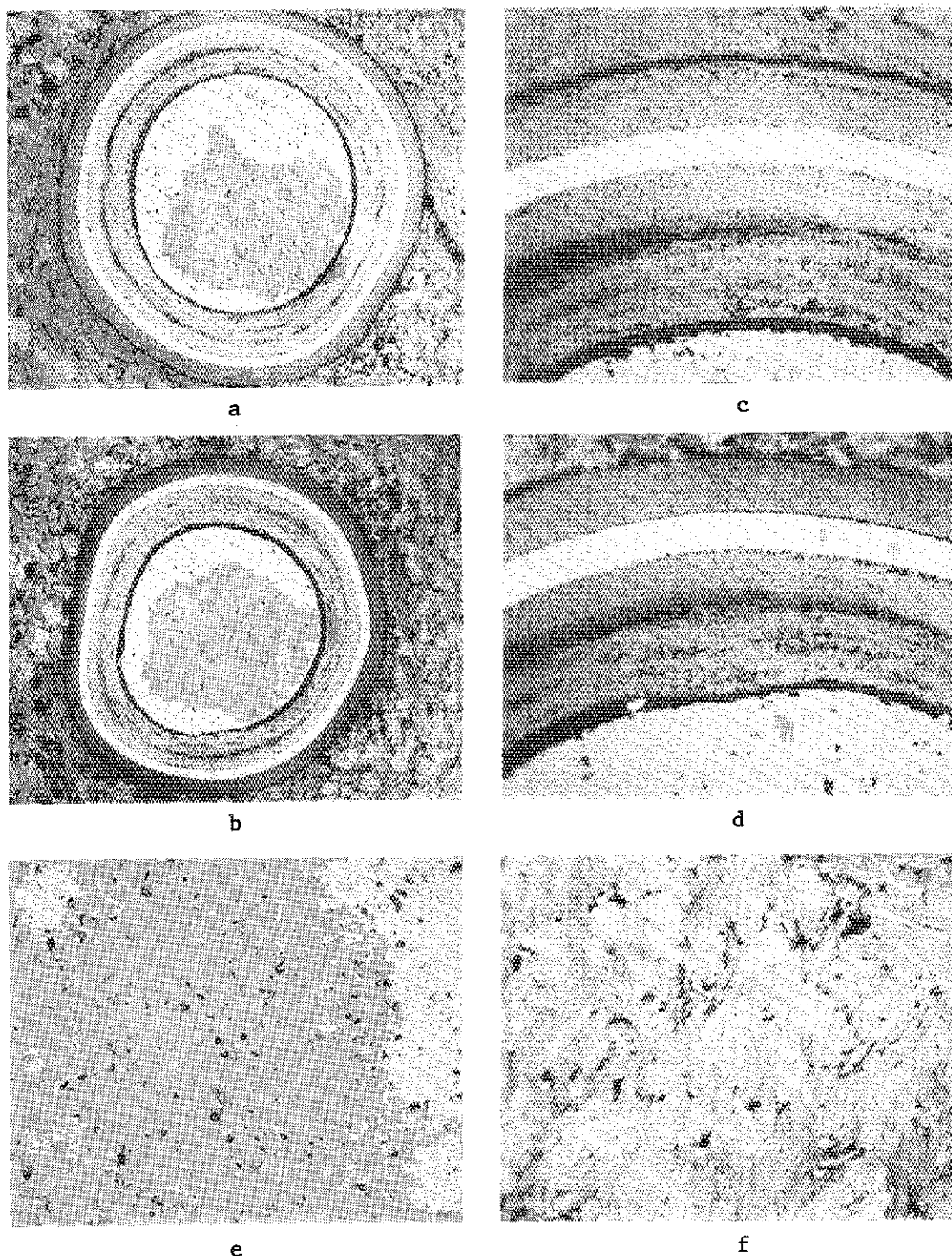


Fig. 46 Micrographs of coated particles and matrix material in #1 fuel compact irradiated in VLF-24H capsule (intermediate region)

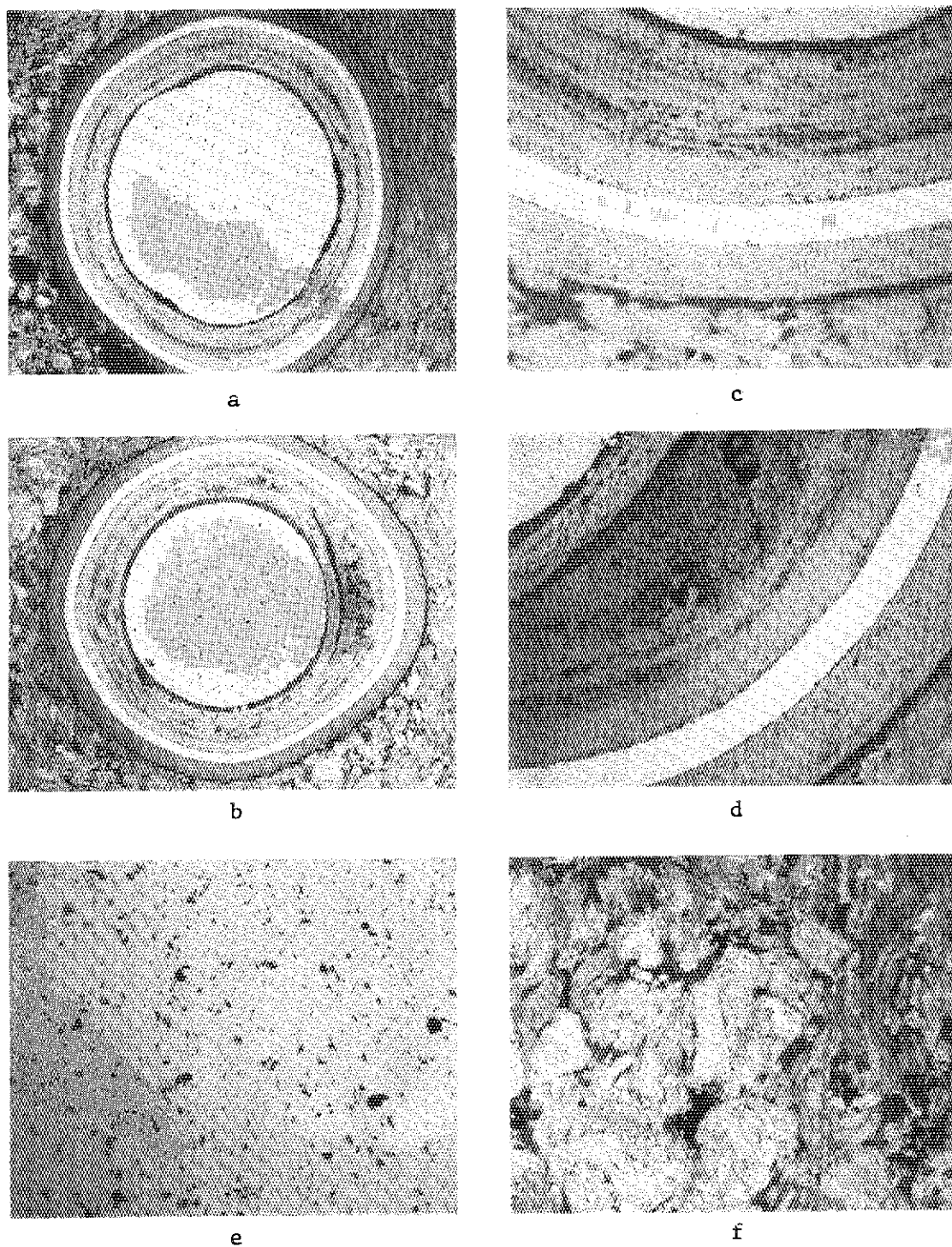


Fig. 47 Micrographs of coated particles and matrix material in #1 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule (center region)

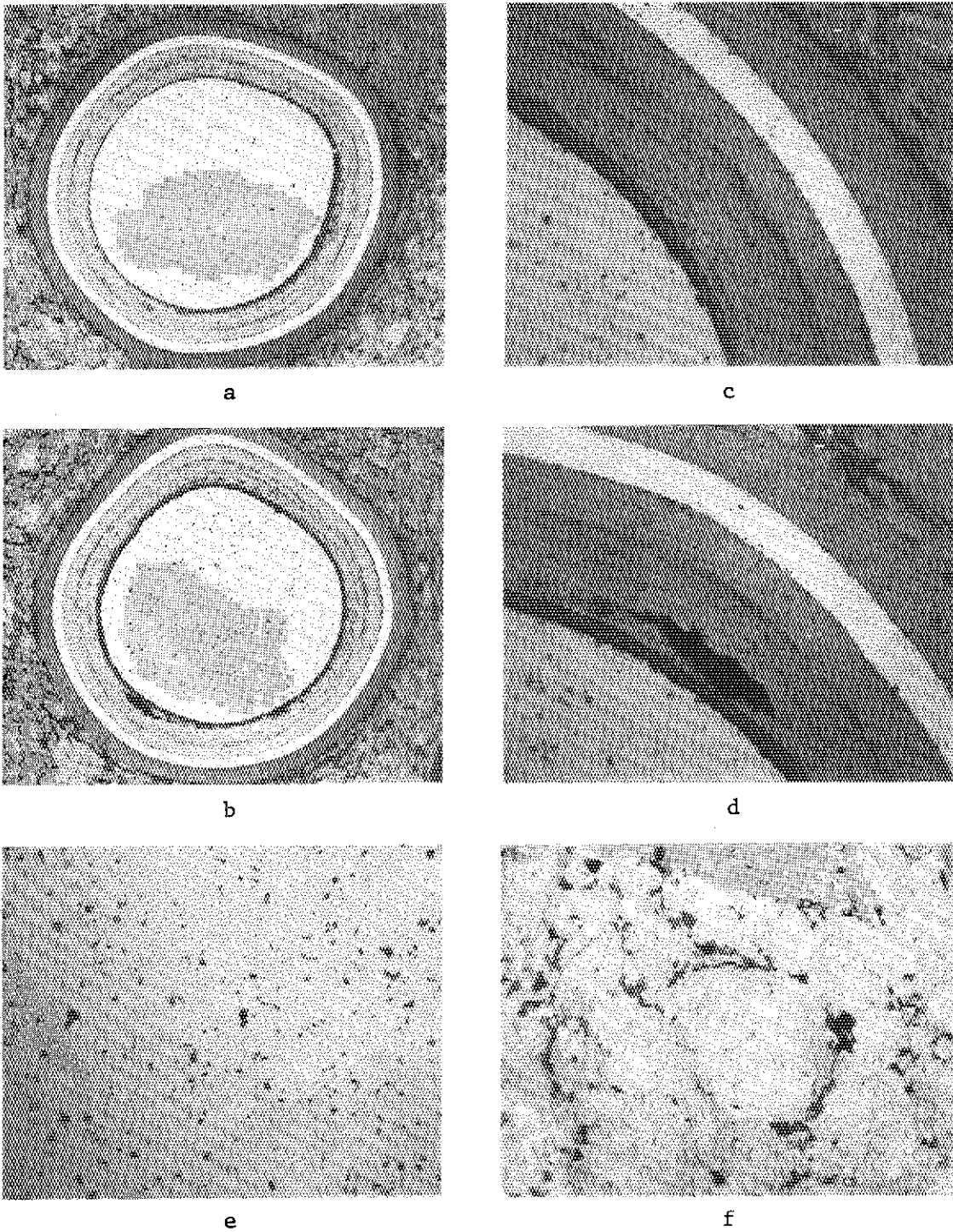


Fig. 48 Micrographs of coated paticles and matrix material in #3 fuel compact irradiated in VLF-24H capsule (intermediate region)

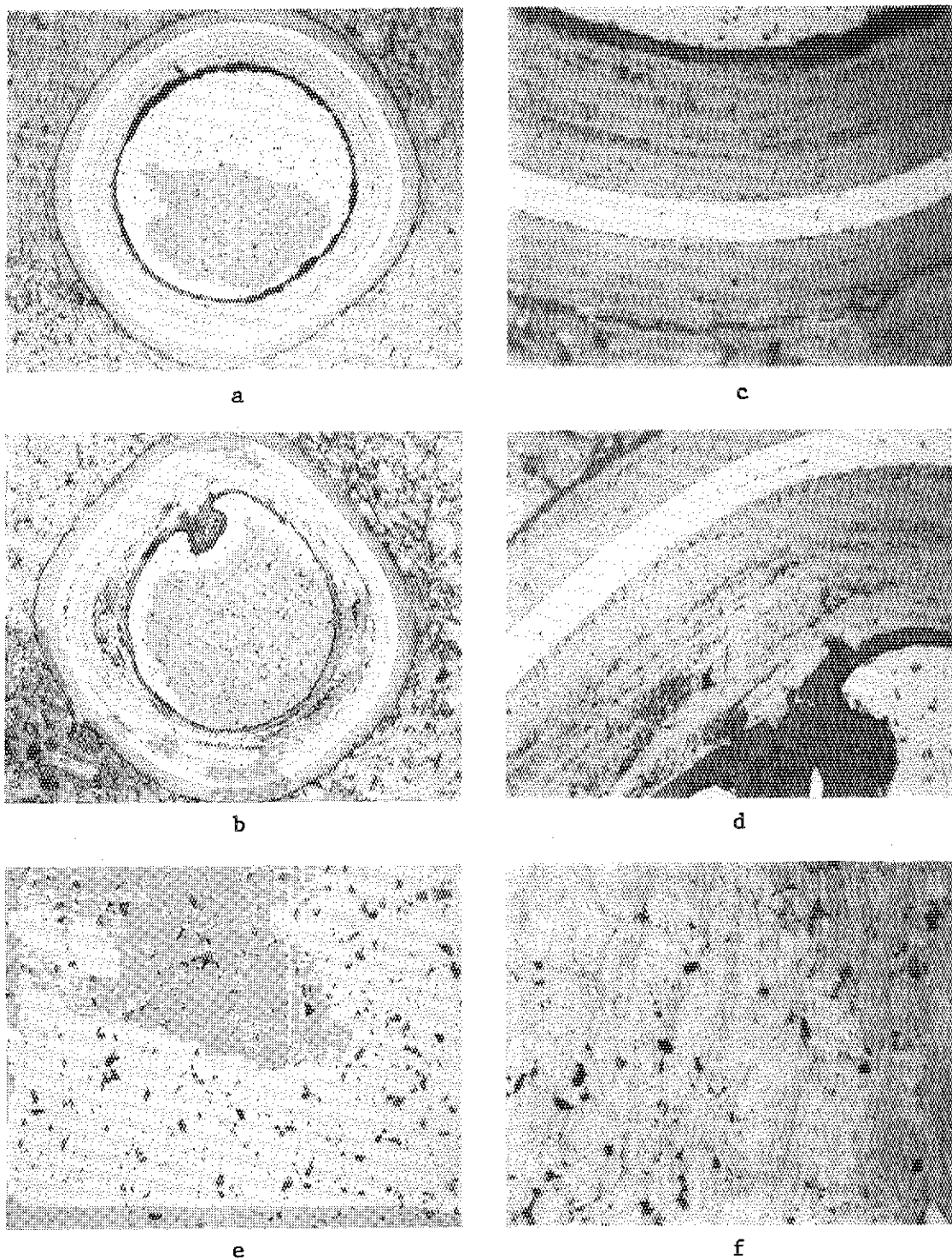


Fig. 49 Micrographs of coated particles and matrix material in #5 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule (intermediate region)

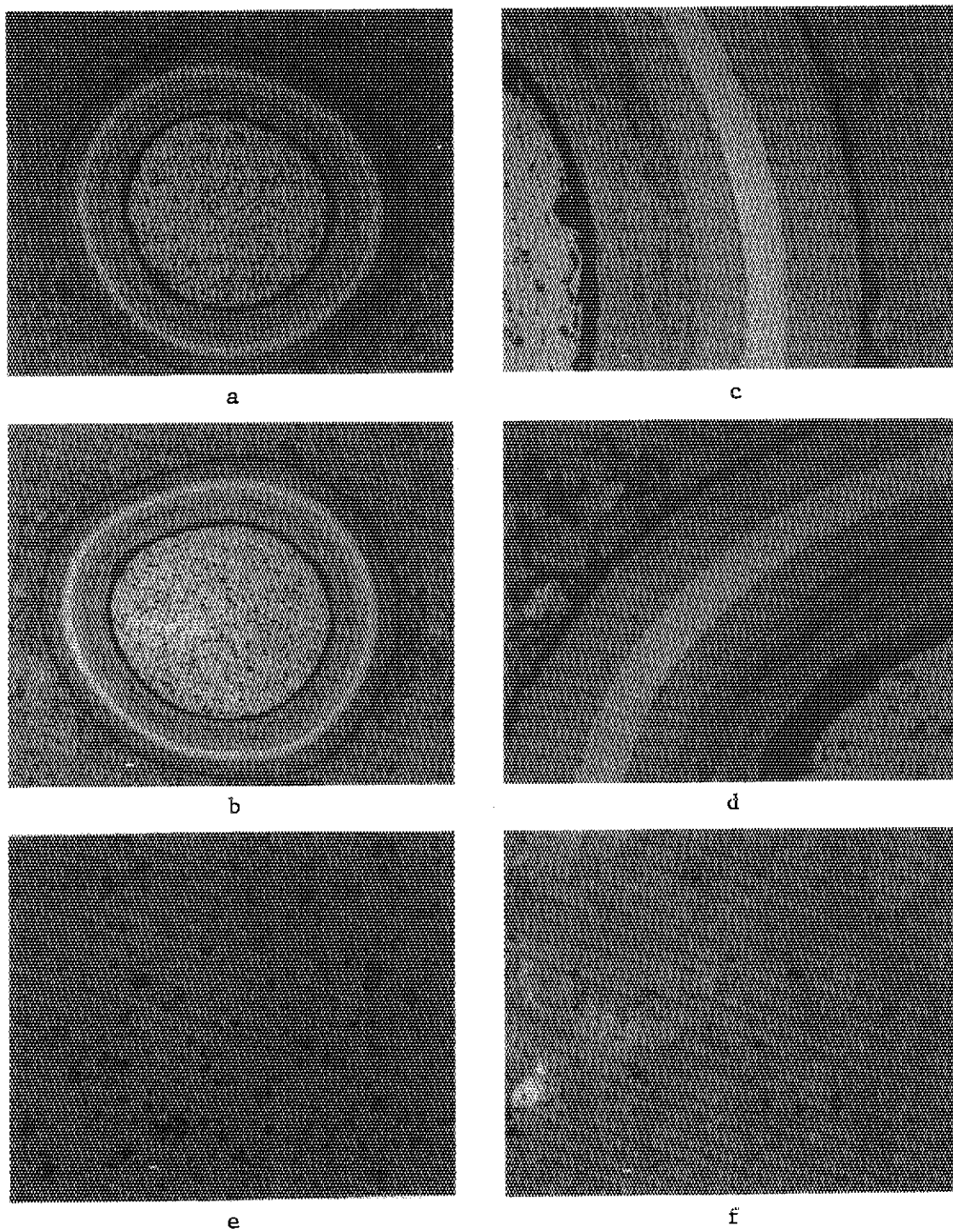


Fig. 50 Micrographs of coated particles and matrix material in #6 fuel compact irradiated in VLF-24H capsule (intermediate region)

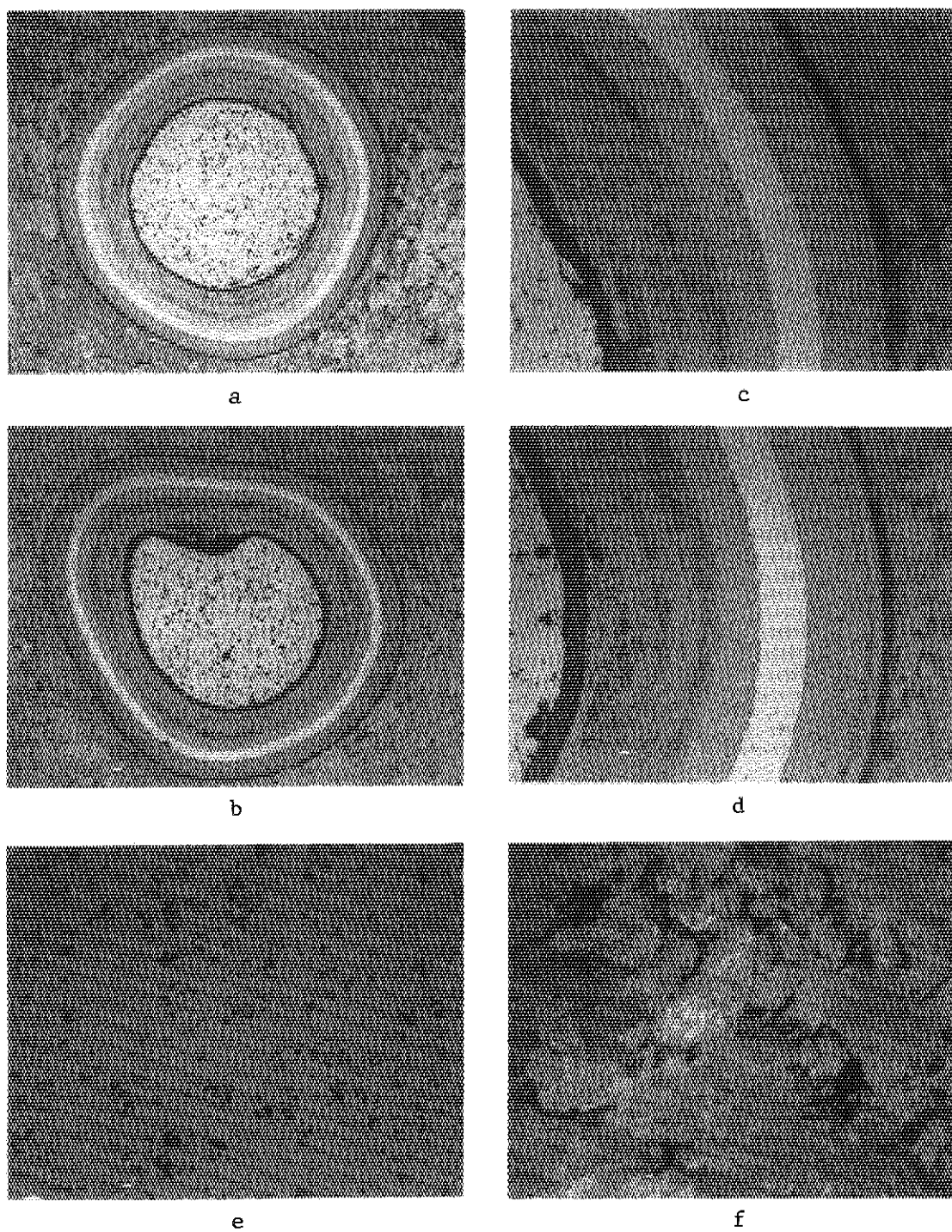


Fig. 51 Micrographs of coated particles and matrix material in #6 fuel compact irradiated in VLF-24H capsule (center region)

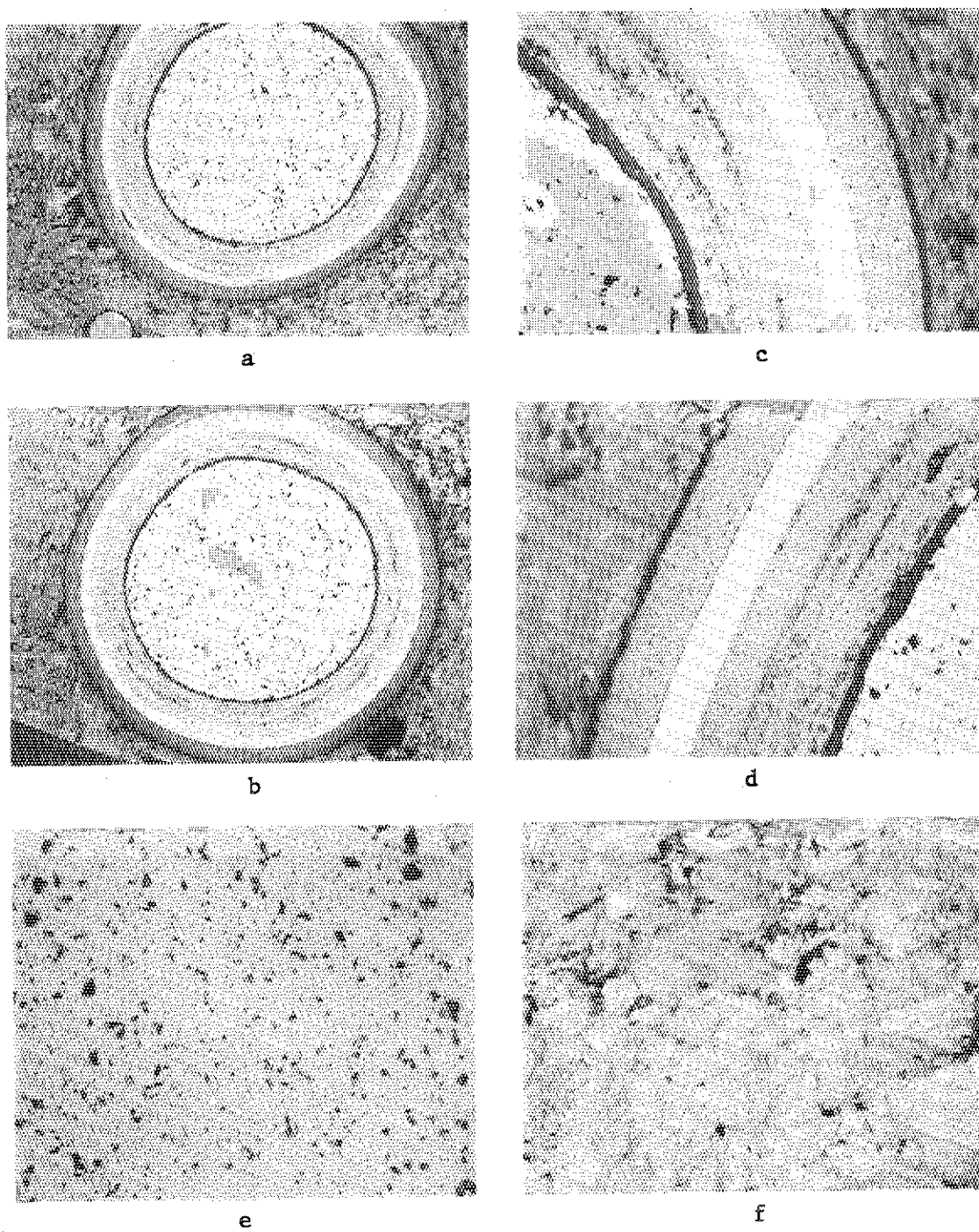


Fig. 52 Micrographs of coated particles and matrix material in #10 fuel compact irradiated in VLF-24H capsule (periphery region)

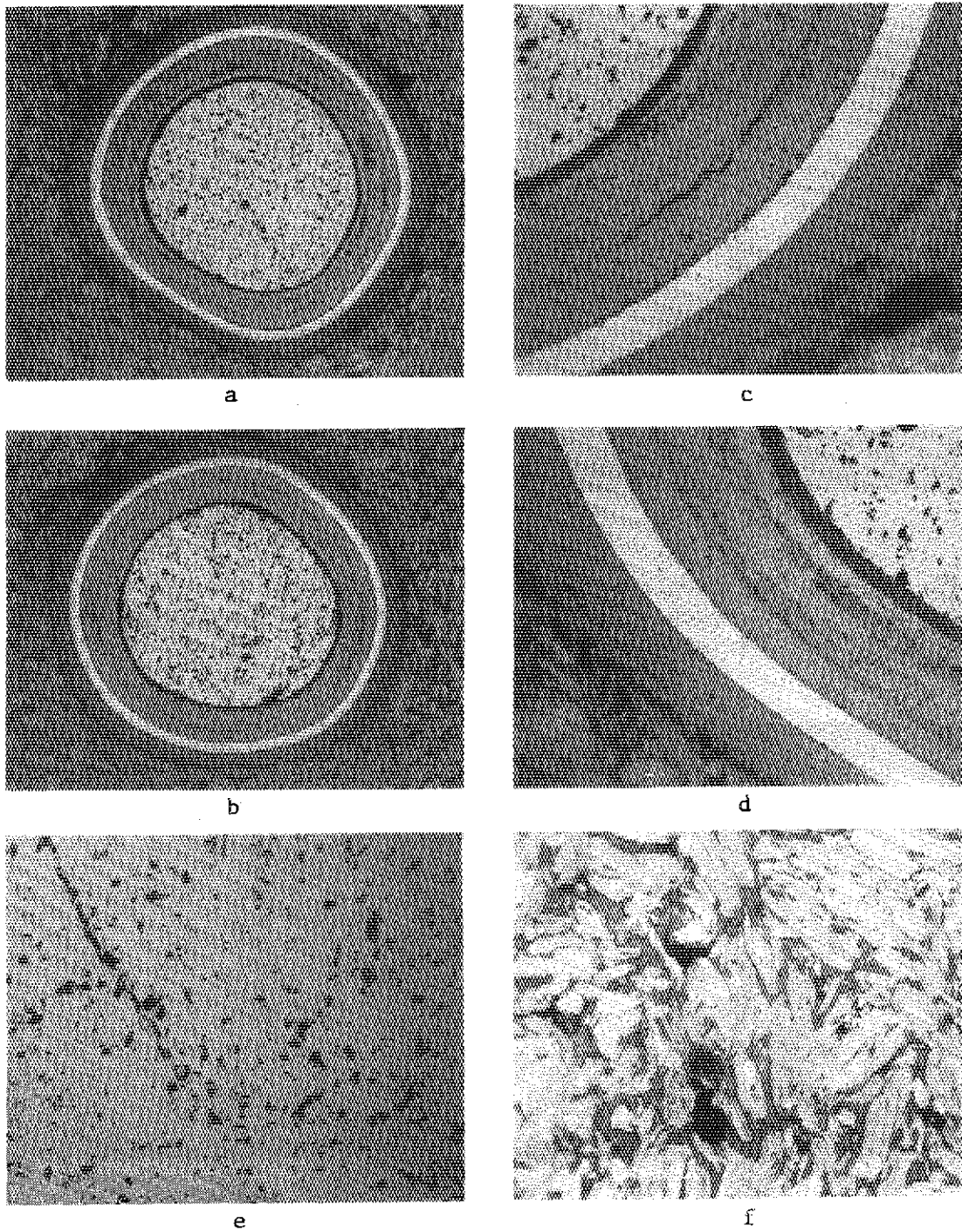


Fig. 53 Micrographs of coated particles and matrix material in #10 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule (center region)

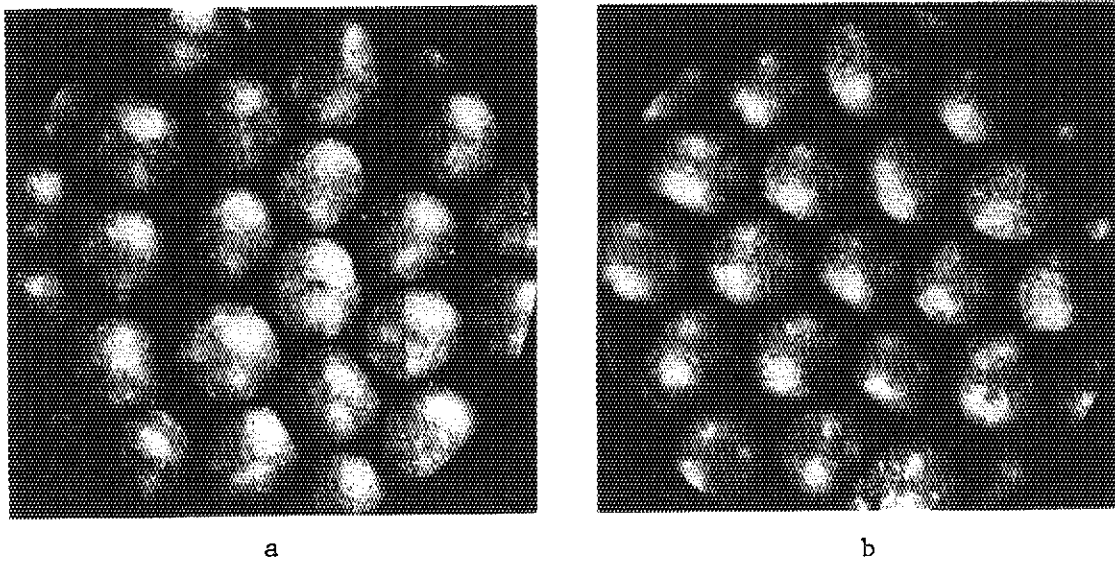


Fig. 54 Stereophotomicrographs of TRISO particles removed from #2 fuel compact (a) and #4 fuel compact (b) irradiated in V1F-24H capsule

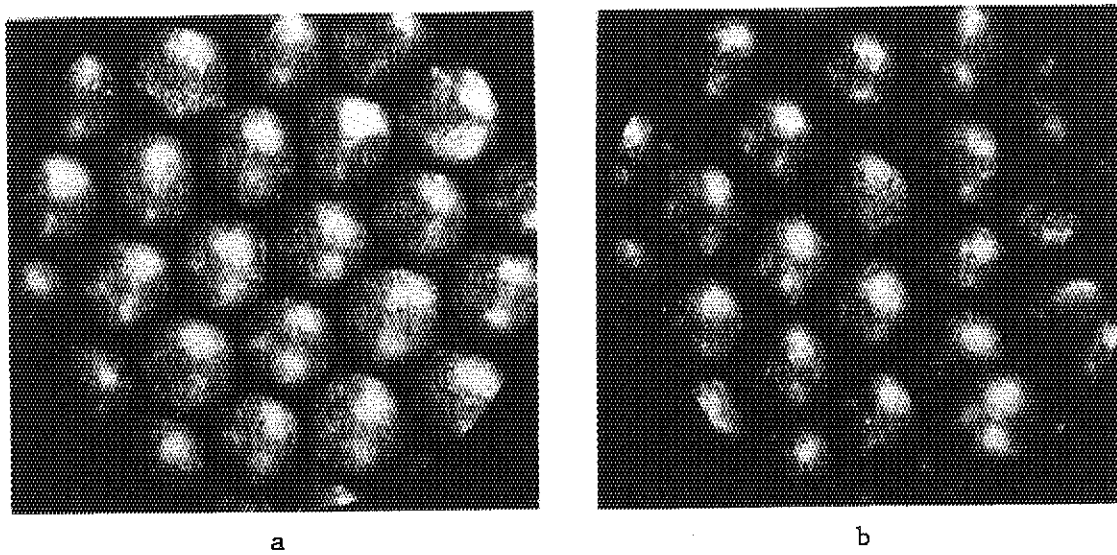


Fig. 55 Stereophotomicrographs of TRISO particles removed from #7 fuel compact (a) and #9 fuel compact (b) irradiated in V1F-24H capsule

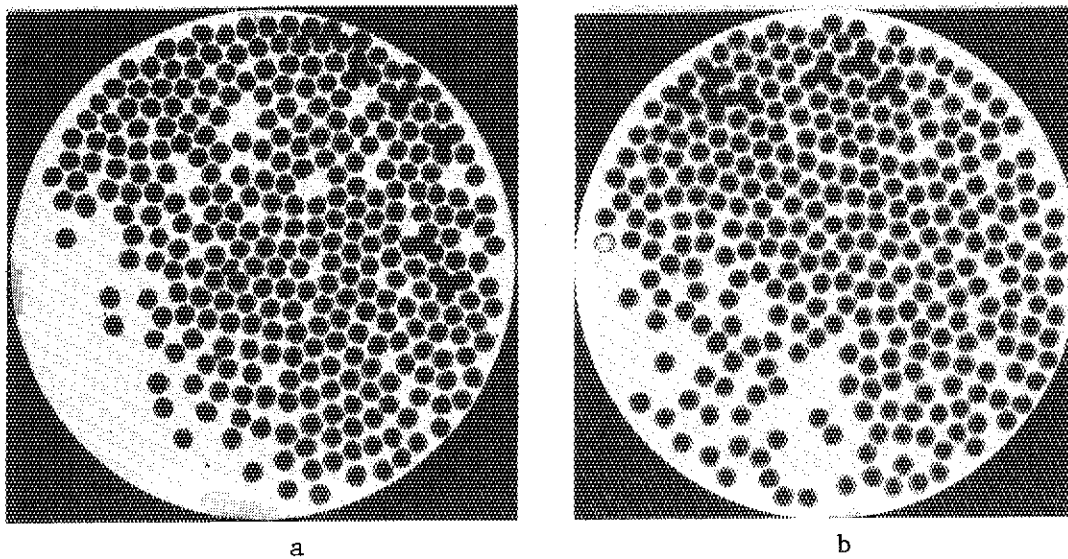


Fig. 56 X-ray radiographs of coated particles removed from #2 fuel compact (a) and #4 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

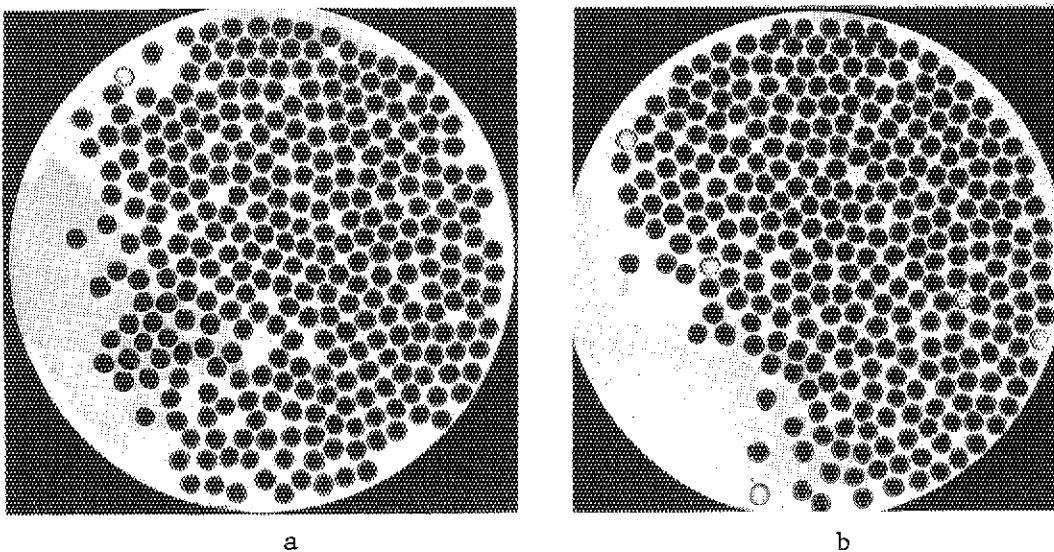


Fig. 57 X-ray radiographs of coated particles removed from #7 fuel compact (a) and #9 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

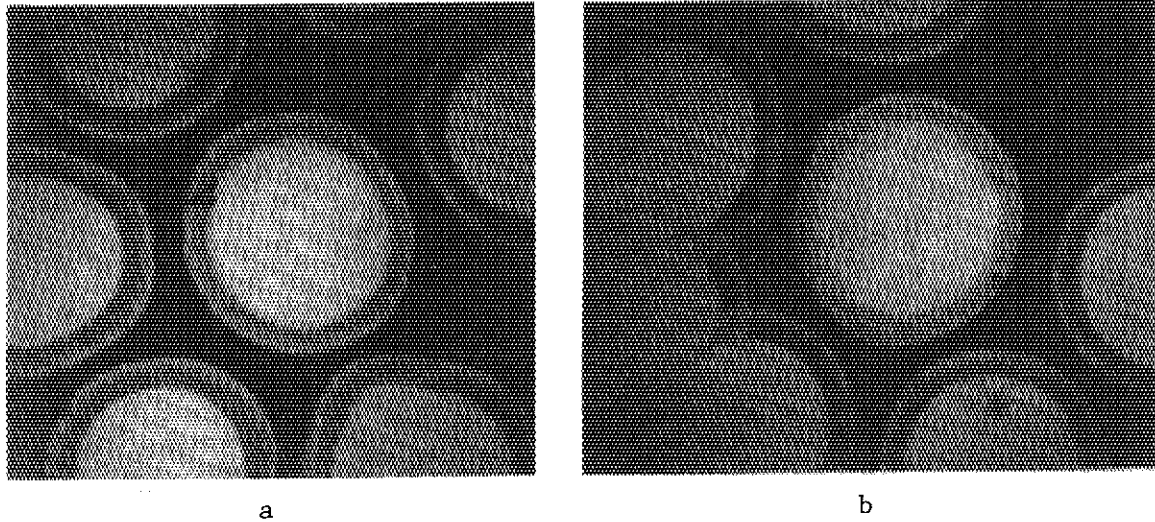


Fig. 58 X-ray microradiographs of coated particles removed from #2 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

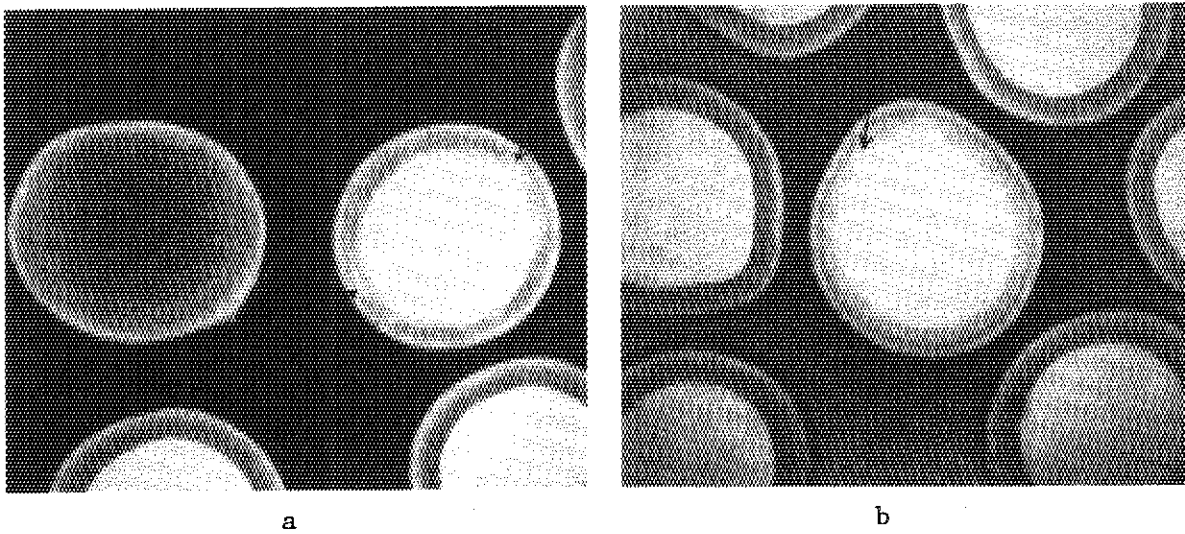


Fig. 59 X-ray microradiographs of coated particles removed from #4 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

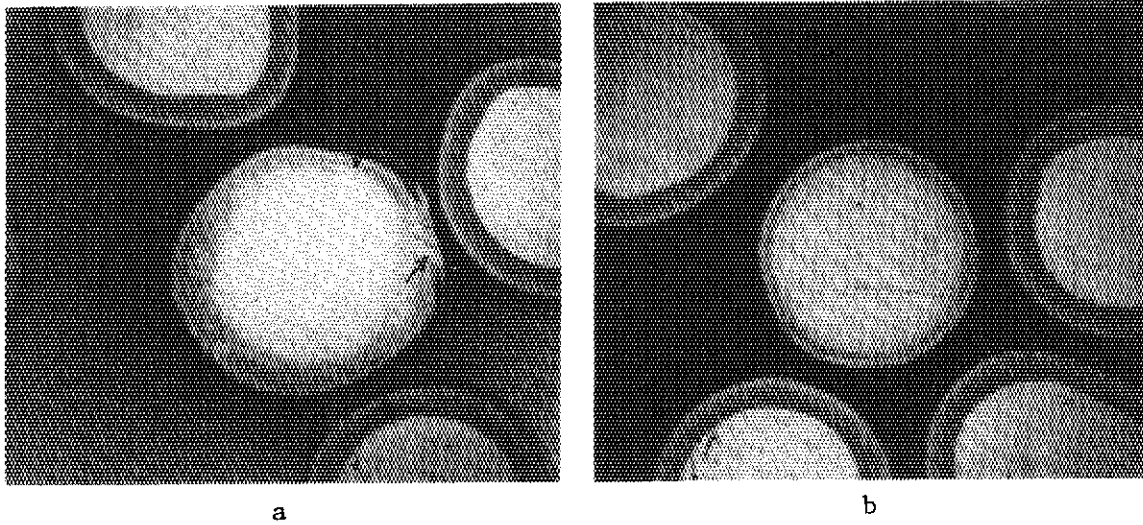


Fig. 60 X-ray microradiographs of coated particles removed from #7 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

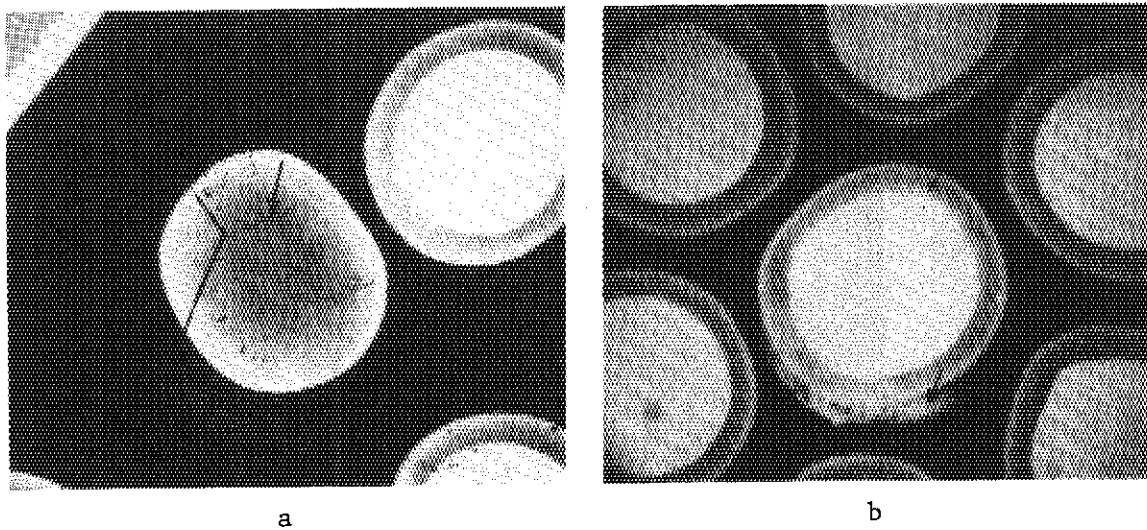


Fig. 61 X-ray microradiographs of coated particles removed from #7 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

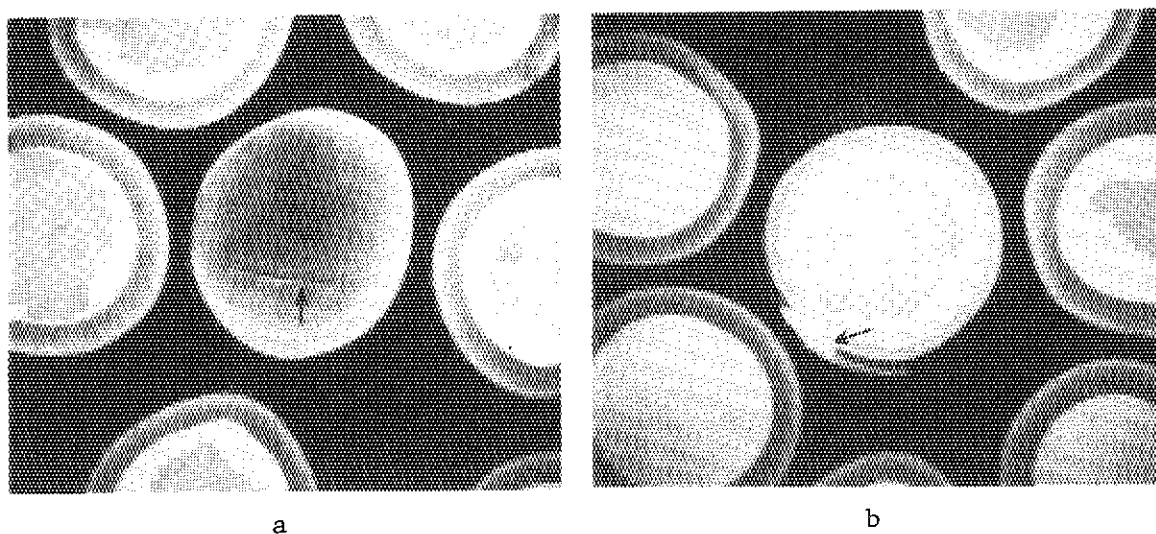


Fig. 62 X-ray microradiographs of coated particles removed from #9 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

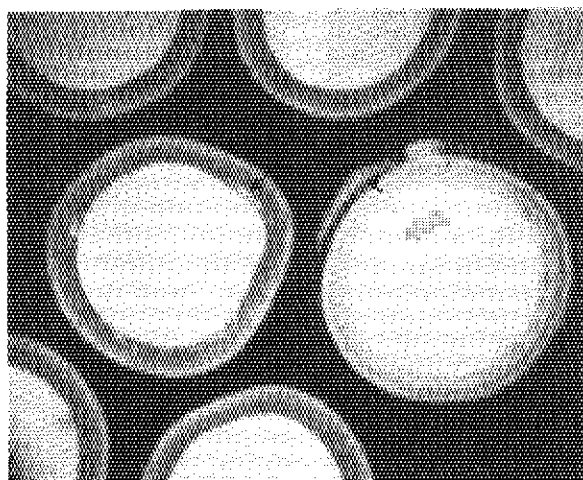
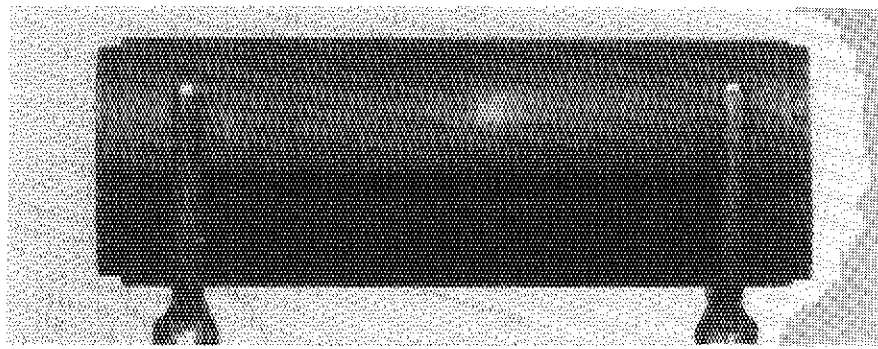
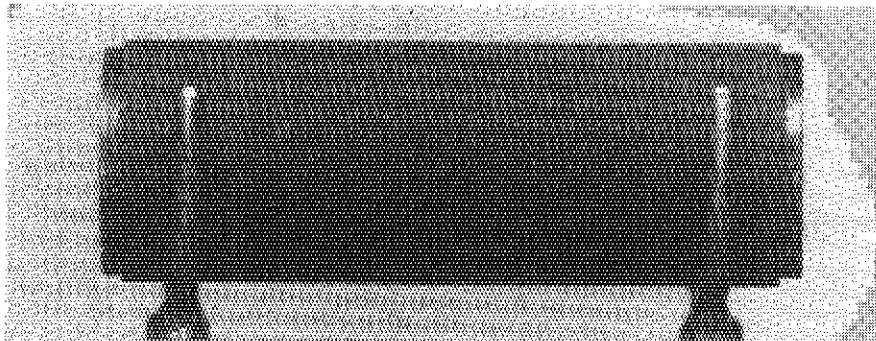


Fig. 63 X-ray microradiographs of coated particles removed from #9 fuel compact irradiated in V1F-24H capsule

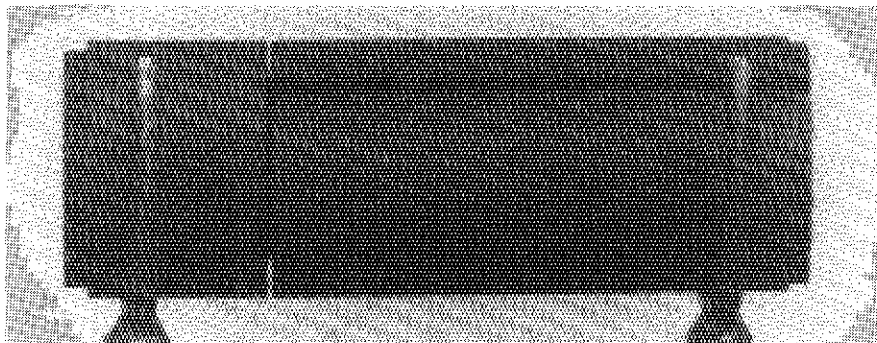


upper

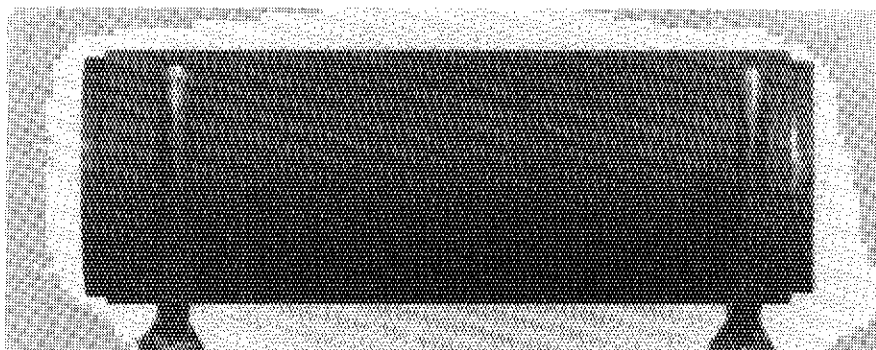


lower

Fig. 64 Side view of graphite sleeve for V1F-16H capsule



upper



lower

Fig. 65 Side view of graphite sleeve for V1F-24H capsule

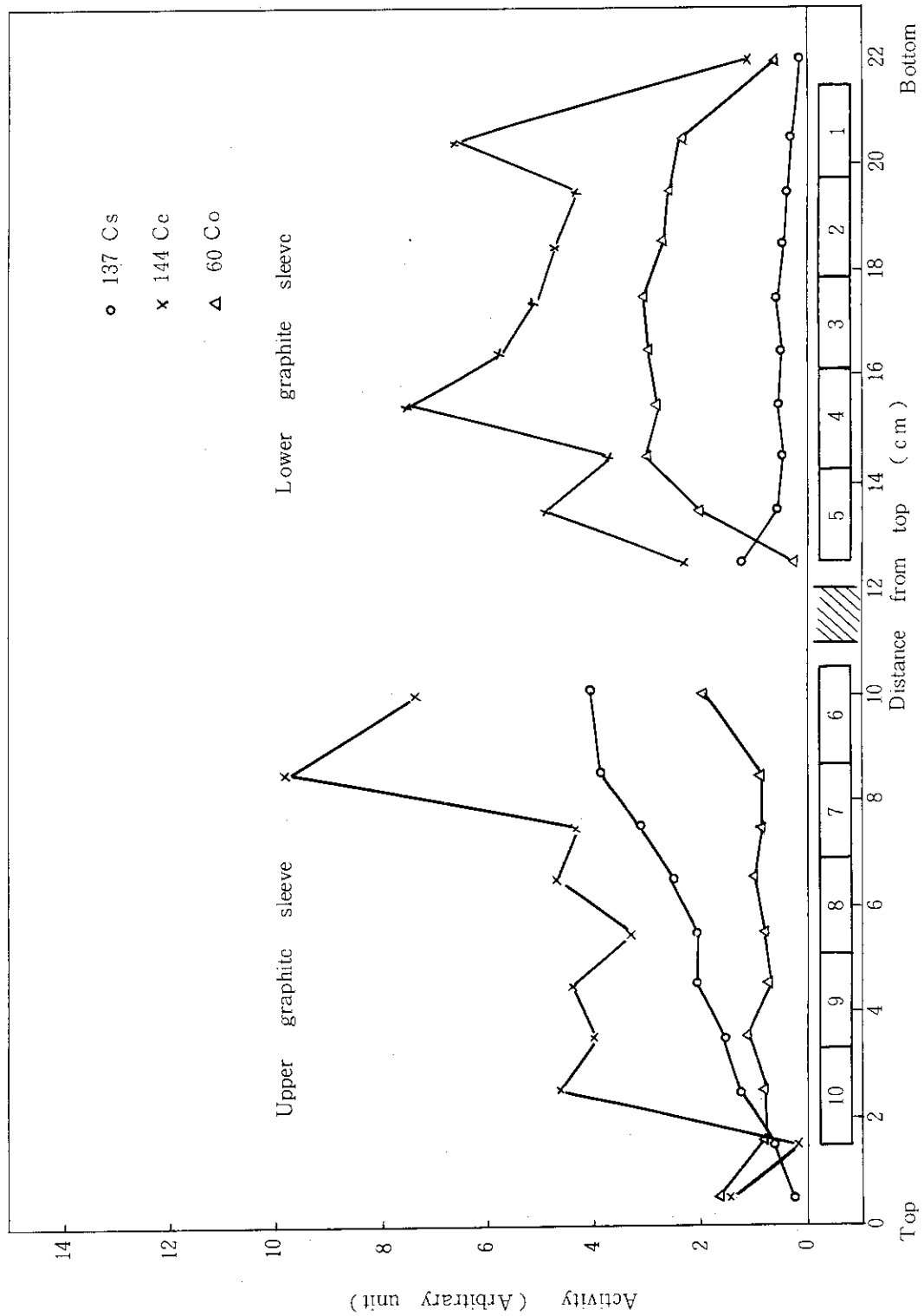


Fig. 66 Fission products distribution in graphite sleeve of V1F-16H capsule

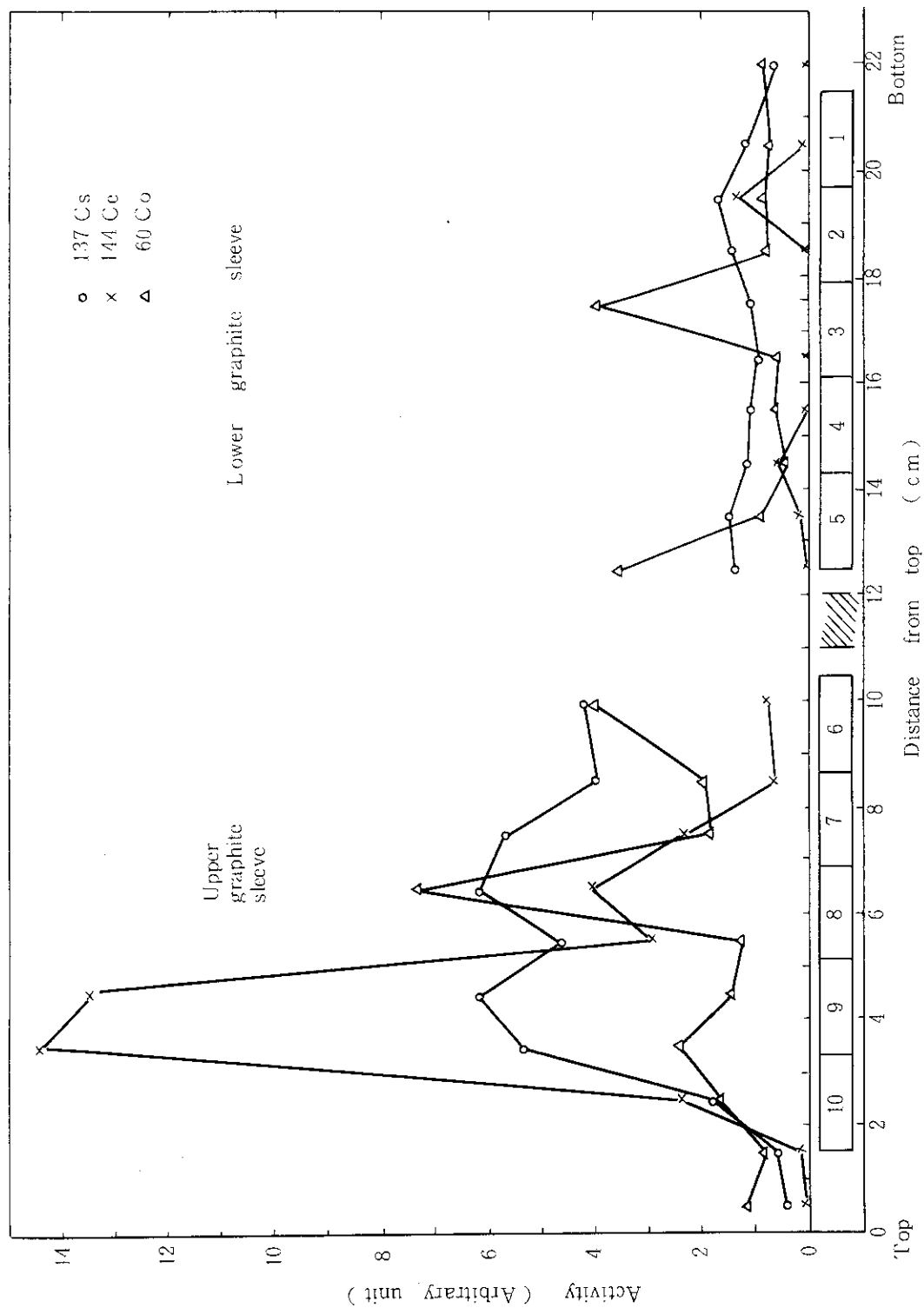


Fig. 67 Fission products distribution in graphite sleeve of V1F-24H capsule

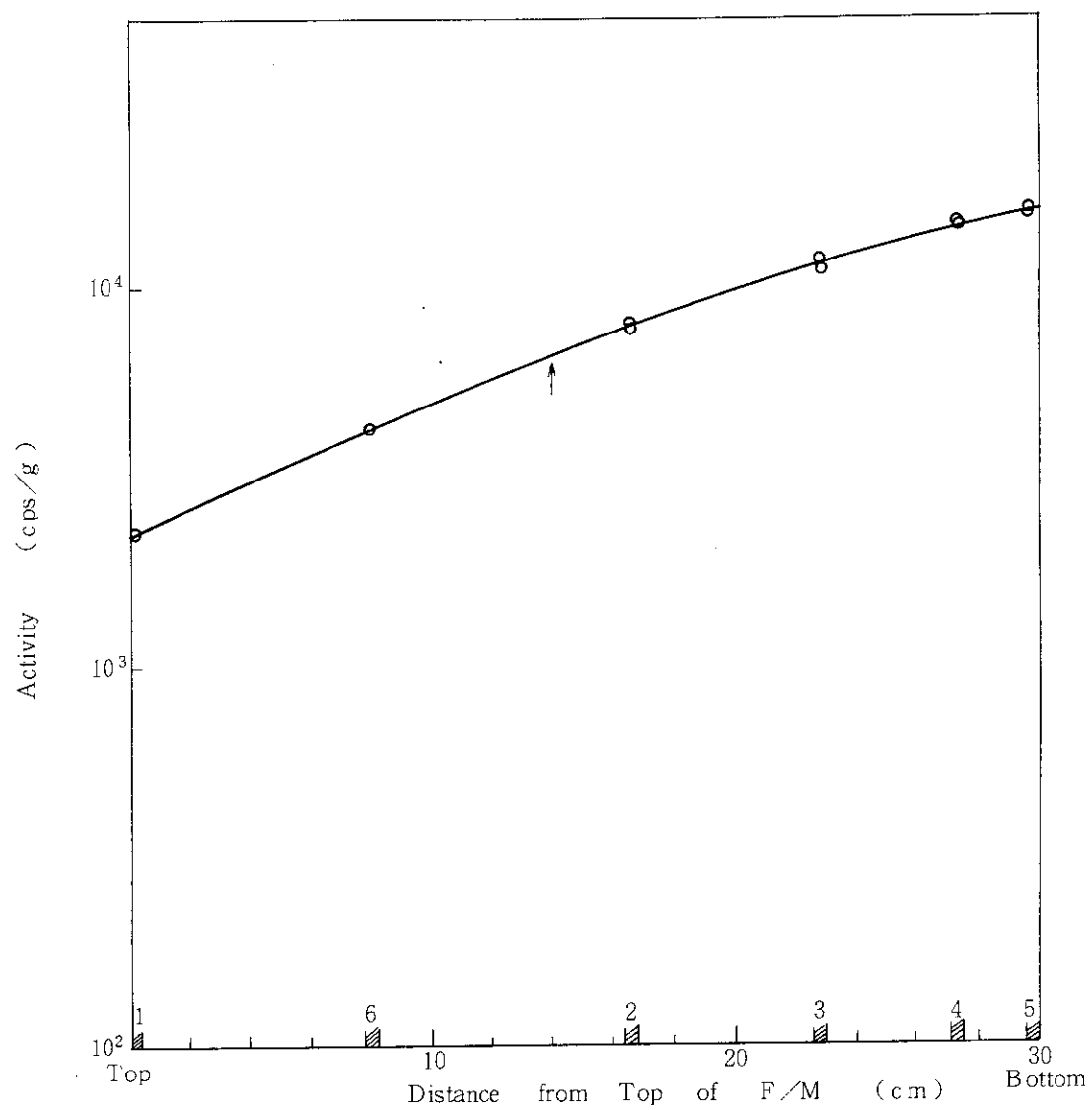


Fig. 68 Activity profile of fluence monitor for V1F-24H capsule