

被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験(II)
(JMTRによる71F-6A, 72F-8A, 72F-9Aキャプセルの照射)

1983年9月

飛田 勉・菊池 輝男・岩本 多実
井川 勝市・石本 清・松島 秀夫

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 いばらき印刷(株)

被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験(Ⅱ)
(JMTRによる 71F-6A, 72F-8A 及び 72F-9A キャプセルの照射)

日本原子力研究所 東海研究所 燃料工学部

飛田 勉・菊池輝男⁺・岩本多実・井川勝市

石本 清⁺・松島秀夫⁺

(1983 年 8 月 29 日受理)

予備設計仕様の高温ガス炉用被覆粒子燃料コンパクトの照射特性を調べるために、これらの燃料を 71F-6A, 72F-8A および 72F-9A キャプセルに封入し、JMTR の反射体領域および燃料領域において、それぞれ、2, 2 および 4 サイクル照射した。これらのキャプセルのなかで、高速中性子照射量および燃焼率の最大値は、72F-9A キャプセルの 2.4×10^{21} (n cm⁻²) ($E > 0.18$ MeV) および 3.9 % FIMA であった。燃料コンパクトの寸法は、高速中性子照射量の増加とともに収縮し、収縮率 2.6 % に達するものもみられた。被覆粒子の緩衝層および第 2 層の一部は、中性子照射により損傷を受けたほか、72F-9A の中段インナキャプセル中の被覆粒子には、アメーバ効果がみられた。

+) 研究炉管理部

Irradiation Performance of Coated Particle Fuel Compact (II)

(Irradiation Experiments in JMTR Capsule, 72F-6A, 72F-8A and 72F-9A)

Tsutomu TOBITA, Teruo KIKUCHI⁺, Kazumi IWAMOTO, Katsuichi IKAWA,
Kiyoshi ISHIMOTO⁺, and Hideo MATSUSHIMA⁺

Department of Fuels and Materials Research, Tokai Research Establishment,
JAERI

(Received August 29, 1983)

The 71F-6A, 72F-8A and 72F-9A experiments were designed as a comprehensive test of coated particle fuel compact tentatively manufactured for HTGR. The capsules were irradiated in the Material Testing Reactor (JMTR) at JAERI to peak fast neutron fluences up to 2.4×10^{21} ($n \text{ cm}^{-2}$) ($E > 0.18 \text{ MeV}$) and to peak burnups up to 3.9 % FIMA for coated particle fuel. The tentative results showed that the radiation induced dimensional changes of fuel compacts increase with increasing neutron fluence. The buffer and inner high density isotropic pyro-carbon layer are partially damaged and amoeba effect are observed in some of the coated particles in 72F-9A capsule.

Keywords : HTGR, Fuel, Coated Particle, Irradiation Performance,
Fast Neutron, Damaging Neutron Fluence

⁺ Department of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. 照射キャプセルの概要	1
2.1 71F-6A キャプセル	1
2.2 72F-8A および 72F-9A キャプセル	2
3. 照射試料の概要	3
3.1 71F-6A キャプセル用照射試料	3
3.2 72F-8A および 72F-9A キャプセル用照射試料	3
4. 照射条件	4
4.1 71F-6A キャプセルの照射条件	4
4.2 72F-8A および 72F-9A キャプセルの照射条件	4
5. 未照射燃料コンパクトの炉外加熱試験	5
6. 照射後試験	6
6.1 71F-6A キャプセルの照射後試験	7
6.1.1 燃料コンパクトの外観検査	7
6.1.2 燃料コンパクトの寸法検査	7
6.1.3 燃料コンパクトの重量検査	7
6.1.4 燃料コンパクトの金相	7
6.1.5 燃料コンパクトの酸浸出試験	7
6.2 72F-8A 及び 72F-9A キャプセルの照射後試験	8
6.2.1 インナキャプセルの外観検査	8
6.2.2 燃料コンパクトの外観検査	8
6.2.3 燃料コンパクトの寸法検査	8
6.2.4 燃料コンパクトの重量検査	9
6.2.5 燃料コンパクトの金相	9
6.2.6 燃料コンパクトの薄片X線ラジオグラフィー	11
6.2.7 燃料コンパクトの酸浸出試験	11
6.2.8 燃料コンパクトの強度試験	11
6.2.9 燃焼率測定	11
6.2.10 解砕粒子の破壊試験	12
7. 考 察	12
8. ま と め	14
謝 辞	15
参考文献	16

Contents

1.	Introduction	1
2.	Description of capsule	1
2.1	71F-6A capsule	1
2.2	72F-8A and 72F-9A capsule	2
3.	Description of fuel specimens	3
3.1	Fuel specimens for 71F-6A capsule	3
3.2	Fuel specimens for 72F-8A and 72F-9A capsule	3
4.	Description of irradiation	4
4.1	Irradiation condition of 71F-6A capsule	4
4.2	Irradiation condition of 72F-8A and 72F-9A capsule	4
5.	Annealing test of unirradiated fuel compacts	5
6.	Postirradiation examination	6
6.1	Postirradiation examination of 71F-6A capsule	7
6.1.1	Visual examination	7
6.1.2	Dimension	7
6.1.3	Weight	7
6.1.4	Metallographic examination	7
6.1.5	Electrolytic deconsolidation and acid leaching	7
6.2	Postirradiation examination of 72F-8A and 72F-9A capsule	8
6.2.1	Visual examination of inner capsules	8
6.2.2	Visual examination of fuel compacts	8
6.2.3	Dimension	8
6.2.4	Weight	9
6.2.5	Metallographic examination	9
6.2.6	X-ray radiography of sliced disk of fuel compacts	11
6.2.7	Electrolytic deconsolidation and acid leaching	11
6.2.8	Crushing test of fuel compacts	11
6.2.9	Burnup measurement	11
6.2.10	Crushing test of electrolytically deconsolidated particles ..	12
7.	Discussion	12
8.	Conclusion	14
	Acknowledgment	15
	Reference	16

1. は じ め に

1970年に、我が国において多目的高温ガス炉の研究開発のプロジェクトが開始されたのにもなって、被覆粒子燃料の製造試験、炉外および照射による燃料の評価試験が開始された。当初、照射による被覆粒子燃料の照射試験は、被覆燃料粒子の照射試験¹⁾⁻⁴⁾と平行して、燃料コンパクトの照射試験が、JRR-2およびJMTRにおいて開始された。その後、これらの被覆粒子燃料の照射試験は、スweepガスキャプセルおよびOGL-1ガスループによる照射⁵⁾へと発展していった。本報告は、JRR-2、VT-1孔での燃料コンパクトの照射試験^{6), 7)}につづいて、JMTRで実施した燃料コンパクトの密封キャプセル(71F-6A, 72F-8A, 72F-9A)での照射試験を、まとめたものである。

71F-6Aキャプセルは、JMTRで実施された最初の燃料コンパクト照射キャプセルで、その設計等に若干試行錯誤的な部分がある。これにつづく、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルは、燃料コンパクトの照射試験と同時に、燃料コンパクト用マトリックス材の評価試験を行なうために計画されたキャプセルで、その後のキャプセル設計の原型となったものである。71F-6Aキャプセルにおいては、外径24mm、内径8mm、長さ40mmの燃料コンパクトを4個、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルにおいては、外径10.5mm、内径2mm、長さ15mmの燃料コンパクトを、それぞれ18個と燃料コンパクト用マトリックス材を充填した。なお、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルで照射したマトリックス材の照射試験結果については、すでに報告した⁸⁾。燃料コンパクトに分散させた被覆粒子は、予備設計仕様に従って試作したものである。照射時間は、71F-6Aおよび72F-8Aキャプセルが2サイクル、72F-9Aキャプセルが4サイクルである。

2. 照射キャプセルの概要

2.1 71F-6Aキャプセル

71F-6Aキャプセルの構造をFig. 1に示す。このキャプセルには、外径24mm、内径8mm、長さ40mmの燃料コンパクトを充填し、照射した。このキャプセルは、304 SUSによる外筒、タントルによる試料筒からなる2重気密構造で、試料筒は、上段および下段に1個ずつ計2個取付けられている。外筒および試料筒中には、それぞれ高純度ヘリウムガスが充填されているが、外筒を試料筒との間のヘリウムガスは、ロータリーポンプにより吸引し、その充填圧を調整することにより、試料の照射温度の制御が行なわれる。試料筒は2個とも、基本的には同じ構造で、それをFig. 2に示す。

1. は じ め に

1970年に、我が国において多目的高温ガス炉の研究開発のプロジェクトが開始されたのにもなって、被覆粒子燃料の製造試験、炉外および照射による燃料の評価試験が開始された。当初、照射による被覆粒子燃料の照射試験は、被覆燃料粒子の照射試験¹⁾⁻⁴⁾と平行して、燃料コンパクトの照射試験が、JRR-2およびJMTRにおいて開始された。その後、これらの被覆粒子燃料の照射試験は、スイープガスキャプセルおよびOGL-1ガスループによる照射⁵⁾へと発展していった。本報告は、JRR-2、VT-1孔での燃料コンパクトの照射試験^{6), 7)}につづいて、JMTRで実施した燃料コンパクトの密封キャプセル(71F-6A, 72F-8A, 72F-9A)での照射試験を、まとめたものである。

71F-6Aキャプセルは、JMTRで実施された最初の燃料コンパクト照射キャプセルで、その設計等に若干試行錯誤的な部分がある。これにつづく、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルは、燃料コンパクトの照射試験と同時に、燃料コンパクト用マトリックス材の評価試験を行なうために計画されたキャプセルで、その後のキャプセル設計の原型となったものである。71F-6Aキャプセルにおいては、外径24mm、内径8mm、長さ40mmの燃料コンパクトを4個、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルにおいては、外径10.5mm、内径2mm、長さ15mmの燃料コンパクトを、それぞれ18個と燃料コンパクト用マトリックス材を充填した。なお、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルで照射したマトリックス材の照射試験結果については、すでに報告した⁸⁾。燃料コンパクトに分散させた被覆粒子は、予備設計仕様に従って試作したものである。照射時間は、71F-6Aおよび72F-8Aキャプセルが2サイクル、72F-9Aキャプセルが4サイクルである。

2. 照射キャプセルの概要

2.1 71F-6Aキャプセル

71F-6Aキャプセルの構造をFig. 1に示す。このキャプセルには、外径24mm、内径8mm、長さ40mmの燃料コンパクトを充填し、照射した。このキャプセルは、304 SUSによる外筒、タントルによる試料筒からなる2重気密構造で、試料筒は、上段および下段に1個ずつ計2個取付けられている。外筒および試料筒中には、それぞれ高純度ヘリウムガスが充填されているが、外筒を試料筒との間のヘリウムガスは、ロータリーポンプにより吸引し、その充填圧を調整することにより、試料の照射温度の制御が行なわれる。試料筒は2個とも、基本的には同じ構造で、それをFig. 2に示す。

燃料コンパクトは、タンタル筒に入れ、その両端に黒鉛円板およびアルミナ円板を配置し、タンタル筒に入れ、端栓をし、溶接により封じる。燃料コンパクトの中心の孔の中には、熱電対の保護のためにタンタル筒が挿入されており、この中にタングステナーレニウム熱電対が2対ずつ計4対装荷されている。このほか、試料筒の熱遮蔽板中には、CA熱電対が、試料筒ごとに1対ずつ、計2対、アルミ熱媒体中には、試料筒に対応して、CA熱電対が、計6対装荷されている。フルエンスモニタは、試料筒に対応してアルミニウム熱媒体中の上下2箇所、鉄モニタが装荷されている。このキャプセルの外観および部品の写真を、Fig. 3 に示す。

2.2 72F-8A および 72F-9A キャプセル

72F-8A キャプセルと 72F-9A キャプセルとは、全く同じ構造であるので、72F-8A キャプセルについてのみ、その構造を Fig. 4 に示す。これらのキャプセルでは、燃料コンパクト（直径 10.5 mm、長さ 15 mm）および燃料コンパクト用各種のマトリックス材（直径 3 mm、長さ 15 mm）を充填し、照射した。これらのキャプセルは、304 SUS による外筒および内筒、Nb-1 Zr 合金による試料筒からなる3重気密構造で、試料筒は上段、中段、下段に1個ずつ計3個取付けられている。外筒、内筒及び試料筒中には、それぞれ高純度ヘリウムガスが充填されているが、外筒と内筒との間のヘリウムガスは、ロータリーポンプにより吸引し、その充填圧を調整することにより、試料の照射温度の制御に利用される。

試料筒は、3個とも同じ構成で、それを Fig. 5 に示す。燃料コンパクトやマトリックス材などの照射試料は、黒鉛ホルダーに入れ、その両端に多孔質黒鉛による栓をし、モリブデンの筒でかこって Nb-1 Zr 合金の筒中に入れ、端栓をし溶接により封じる。黒鉛ホルダーには、燃料コンパクト用孔が中心に1個、そのまわりに電話のダイヤル状に、マトリックス用孔が7個あけられている。燃料コンパクト用孔には、直径 10.5 mm、長さ 15 mm の燃料コンパクトが6個、マトリックス用孔には、この孔1個に対し直径 3 mm、長さ 15 mm の試片が6個充填できる。

熱電対は、各黒鉛ホルダー中にタングステナーレニウム熱電対がそれぞれ1対ずつ計3対、内筒と外筒の間のアルミニウム熱媒体中にCA熱電対が、タングステナーレニウム熱電対と先端のレベルをそろえて1対ずつ計3対装荷されている。なお、キャプセルの中央には、中心に対して対称の位置に、CA熱電対がさらに1対装荷されている。フルエンスモニタは、外筒と内筒の間のアルミニウム熱媒体中の上、中、下3箇所に、コバルトおよび鉄モニタが装荷されている。このキャプセルの外観写真および部品の写真を Fig. 6 に示す。

3. 照射試料の概要

3.1 71 F-6 A用照射試料

71 F-6 A キャプセルで照射した燃料コンパクトの特性を、Table 1 に示す。このコンパクトに分散した被覆粒子の特性を、Table 2 に示す。これらの燃料コンパクトは、1971年に試作したもので、現在の標準的な燃料コンパクトの調整法であるオーバーコート温間プレス法を、はじめて採用した第1回目の試作品である。仕様は、多目的高温ガス実験炉の予備設計仕様に準じ、外径 24 mm、内径 8 mm、長さ 40 mm で、粒子充填率は 24 % である。マトリックス材の原料には、Anglo Great Lakes 社製、針状コークス黒鉛粉末 (NCG) および Poco Graphite 社製、等方質黒鉛粉末 (ICG) を用いた。バインダーには、フェノール樹脂を、10 % または 20 % 添加した。被覆粒子には、回転ドラムにより黒鉛粉とバインダーの混合物をコーティングし、金型により温間 100 ~ 150 °C において 150 ~ 300 kg/cm² でプレス成形し、不活性ガスの雰囲気中で、ゆっくりと 800 °C まで昇温し、バインダーの炭化を行なったあと、真空中、1700 °C で 1 時間 2 次焼成を行なった。未照射の 71 FP 4 A および 71 FP 5 A 燃料コンパクトの断面写真を、Fig. 7 に示す。71 F-6 A キャプセルで照射した燃料コンパクトの配置を、Fig. 8 に示す。

3.2 72 F-8 A および 72 F-9 A キャプセル用照射試料

72 F-8 A および 72 F-9 A キャプセルで照射した燃料コンパクトの特性を、それぞれ Table 3 および Table 5 に示す。これらの燃料コンパクト中に分散した被覆粒子の特性を、それぞれ、Table 4 および Table 6 に示す。なお、これらのキャプセルで照射した燃料コンパクト用マトリックス材については、別に報告⁸⁾したので省略する。これらのキャプセルで照射した燃料コンパクトの寸法は、外径 10.5 mm、内径 2 mm、長さ 15 mm で、寸法以外は予備設計仕様に準じて製作している。被覆粒子の仕様についても、予備設計仕様に準じている。燃料コンパクトのマトリックス用黒鉛粉としては、等方質黒鉛粉末、針状コークス黒鉛粉末、天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合粉末を用いた。バインダーには、フェノール樹脂を、14 % または 20 % 添加した。なお、燃料コンパクトの調整方法および調整条件は、71 FP 4 A および 71 FP 5 A コンパクトの場合と、全く同じである。この照射試験においては、このように種々の黒鉛粉末を用いて燃料コンパクトを調整したが、この理由は黒鉛粉のちがいによる燃料コンパクトの照射特性の差を調べ、高温ガス炉燃料コンパクトのマトリックス材として、最も適したものを選択することにある。これらの未照射の燃料コンパクトのなかから、72 FP 1 B 2、72 FP 1 B 4 および 72 FP 1 B 6 の断面写真を、Fig. 9 に示す。72 F-8 A および 72 F-9 A キャプセル内の燃料コンパクトの配置を、Fig. 10 および Fig. 11 に示す。

4. 照射条件

4.1 71F-6A キャプセルの照射条件

71F-6A キャプセルは、JMTR の第2層反射体領域におけるM-12 照射孔で、第17サイクル（1972. 10. 7 ~ 1972. 11. 2）と第18サイクル（1972. 11. 16 ~ 1972. 12. 14）の2サイクル照射した。この間の積算照射時間は、JMTR 運転出力、50 MWにおいて、1048 時間（43.7 日）である。これらの照射条件をまとめて、Table 7 に示す。71F-6A キャプセルの照射温度の経時変化として、#4 熱電対の指示値の経時変化を、Fig. 12 に示す。これは、下段のインナキャプセルの燃料コンパクトの中心に装荷されている熱電対で、原子炉の出力と対比して示してあり、最高1400℃を指示している。なおこの図で、照射サイクルの前半にみられる温度の低い領域は、キャプセルの真空温度制御装置を作動させる前の状態で、これを作動させることによりキャプセルの温度を、300 ~ 500℃昇温させることができることがわかる。なお、各熱電対毎に、真空温度制御装置の作動前後の温度の比較をTable 10 に示す。

このキャプセルに装荷した鉄モニターワイヤから評価したこのキャプセルの高速中性子照射量は、推定で最大 5.2×10^{19} (n cm⁻²) ($E > 1.0$ MeV) であった。⁹⁾ この評価方法は、まず最初にモニターワイヤの $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ の反応によって生ずる ^{54}Mn (半減期 303 d) の生成量から、中性子照射量を求める。なお、測定から求めた高速中性子照射量は、中性子エネルギー 1.0 MeV 以上のものであるから、これを 0.18 MeV 以上のものに換算するためには、ベリリウム反射体領域第2層における換算係数 2.16 を乗ずる。¹⁰⁾ これを、M-12 孔内の中性子照射量の分布図にプロットする。照射孔内の長手方向の分布は、各照射領域について、それぞれ代表的なカーブがあるので、このカーブをもとにして、中性子照射量の実測値が、このプロフィールに乗るように、最小二乗法を用いて決定する。このように求めた 71F-6A キャプセルの高速中性子照射量の分布を、Fig. 13 に示す。

4.2 72F-8A および 72F-9A キャプセルの照射条件

72F-8A および 72F-9A キャプセルは、JMTR の燃料領域におけるK-6 照射孔において、前者が第36サイクル（1976. 4. 5 ~ 4. 30）と第37サイクル（1976. 5. 24 ~ 6. 18）の2サイクル、後者が第32サイクル（1975. 3. 17 ~ 4. 11）、第33サイクル（1975. 5. 29 ~ 6. 17）、第34サイクル（1975. 12. 10 ~ 1976. 1. 22）、第35サイクル（1976. 2. 17 ~ 3. 13）の4サイクル照射された。これらのキャプセルの積算照射時間は、72F-8A が 977 時間（約 41 日）、72F-9A が 1859 時間（約 77 日）である。これらの照射時間を、まとめてTable 8 およびTable 9 に示す。72F-8A および 72F-9A キャプセルの照射温度の経時変化を、JMTRの熱出力とともにそれぞれFig. 14 およびFig. 15 に示す。これらの熱電対（#1、#2、#3）は、黒鉛ホルダー中に装荷されているもので、72F-8A キャプセルでは、キャプセルの照射開始直後に、#2 と #3 の熱電対

の断線がおこり、測定不能となった。72F-9A キャプセルの試料中に装荷した熱電対（#1, #2, #3）は、32 および 33 サイクルでは 3 本とも正常に作動していたが、34 サイクルで #1 の熱電対が作動不良になり、つづいて 35 サイクルで #2 の熱電対が作動不良になった。これらの照射結果をもとに、燃料コンパクトの中心温度を推定した結果を、Table 11 に示す。なお、この計算には、一次元熱計算コード GENGTC を用いた。この計算結果から、燃料コンパクトの照射温度は、72F-8A キャプセルでは、1100 ～ 1500 °C、72F-9A キャプセルでは 1000 ～ 1300 °C であると推定される。

72F-8A キャプセルの熱中性子照射量および高速中性子照射量を、それぞれ Fig. 16 および Fig. 17 に、72F-9A キャプセルの熱中性子照射量および高速中性子照射量を、それぞれ Fig. 18 および Fig. 19 に示す。なお、熱中性子照射量は、コバルトモニターにより $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ の核反応によって生ずる ^{60}Co （半減期 5.3 年）の生成量から、高速中性子量は、鉄モニターにより求めた。これらの照射量から、71F-6A キャプセルと同様に処理し、照射量のプロファイル求めた。^{11), 12)} なお、72F-8A および 72F-9A キャプセルは、同一照射孔で照射しているから、フルエンスモニタの実測は 72F-8A についてのみ行ない、72F-9A については、72F-8A の実測結果をもとに、これに対する照射時間の補正を行なって、中性子照射量のプロファイルを求めた。

5. 未照射燃料コンパクトの炉外加熱試験

未照射燃料コンパクトの加熱による寸法変化を調べるために、電気炉での加熱を行なった。この実験に使用した燃料コンパクトは、71F-6A キャプセルで照射した燃料コンパクトと同バッチの 71FP 4A および 71FP 5A と 72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトと同バッチのなかから、針状コークス黒鉛系マトリックスおよび等方質黒鉛系マトリックスの燃料コンパクトで、バインダー添加率 14 % と 20 % のもの、72FP 1B1, 72FP 1B2, 72FP 1B3 および 72FP 1B4 を選んだ。71FP 4A および 71FP 5A はアルゴンガス中、1400 °C で 1053 hr, 1600 °C で 250 hr または 740 hr 加熱した。72FP 1B1, 72FP 1B2, 72FP 1B3 および 72FP 1B4 は、アルゴン雰囲気において 1600 °C に加熱した。これらの試料については、途中で加熱を中止し、試料を取出して、寸法および重量を測定した。このあとこれらの試料は再び電気炉にもどし、加熱をくりかえした。

これらの加熱試験の結果、71FP 4A および 71FP 5A 燃料コンパクトの寸法変化は、直径において 0.4 ～ 0.7 %, 長さにおいて 0.3 ～ 0.5 % の収縮で、寸法変化では直径の方が大きかった。重量変化も減少であったが、寸法および重量から求めたかさ密度変化は、増加であった。熱処理温度 1600 °C において、加熱時間を 250 hr から 740 hr に延長しても、寸法および重量の変化は全くみられなかった。1400 °C の熱処理温度では、被覆粒子は健全であったが、1600 °C の熱処理温度では、一部の粒子の被覆層に、若干損傷がみられた。しかし、熱処理によるこれ以外の変化はみられな

の断線がおこり、測定不能となった。72F-9A キャプセルの試料中に装荷した熱電対（#1, #2, #3）は、32 および 33 サイクルでは 3 本とも正常に作動していたが、34 サイクルで #1 の熱電対が作動不良になり、つづいて 35 サイクルで #2 の熱電対が作動不良になった。これらの照射結果をもとに、燃料コンパクトの中心温度を推定した結果を、Table 11 に示す。なお、この計算には、一次元熱計算コード GENGTC を用いた。この計算結果から、燃料コンパクトの照射温度は、72F-8A キャプセルでは、1100 ～ 1500 °C、72F-9A キャプセルでは 1000 ～ 1300 °C であると推定される。

72F-8A キャプセルの熱中性子照射量および高速中性子照射量を、それぞれ Fig. 16 および Fig. 17 に、72F-9A キャプセルの熱中性子照射量および高速中性子照射量を、それぞれ Fig. 18 および Fig. 19 に示す。なお、熱中性子照射量は、コバルトモニターにより $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ の核反応によって生ずる ^{60}Co （半減期 5.3 年）の生成量から、高速中性子量は、鉄モニターにより求めた。^{11), 12)} なお、72F-8A および 72F-9A キャプセルは、同一照射孔で照射しているから、フルエンスモニタの実測は 72F-8A についてのみ行ない、72F-9A については、72F-8A の実測結果をもとに、これに対する照射時間の補正を行なって、中性子照射量のプロフィールを求めた。

5. 未照射燃料コンパクトの炉外加熱試験

未照射燃料コンパクトの加熱による寸法変化を調べるために、電気炉での加熱を行なった。この実験に使用した燃料コンパクトは、71F-6A キャプセルで照射した燃料コンパクトと同バッチの 71FP 4A および 71FP 5A と 72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトと同バッチのなかから、針状コークス黒鉛系マトリックスおよび等方質黒鉛系マトリックスの燃料コンパクトで、バインダー添加率 14 % と 20 % のもの、72FP 1B1, 72FP 1B2, 72FP 1B3 および 72FP 1B4 を選んだ。71FP 4A および 71FP 5A はアルゴンガス中、1400 °C で 1053 hr, 1600 °C で 250 hr または 740 hr 加熱した。72FP 1B1, 72FP 1B2, 72FP 1B3 および 72FP 1B4 は、アルゴン雰囲気において 1600 °C に加熱した。これらの試料については、途中で加熱を中止し、試料を取出して、寸法および重量を測定した。このあとこれらの試料は再び電気炉にもどし、加熱をくりかえした。

これらの加熱試験の結果、71FP 4A および 71FP 5A 燃料コンパクトの寸法変化は、直径において 0.4 ～ 0.7 %, 長さにおいて 0.3 ～ 0.5 % の収縮で、寸法変化では直径の方が大きかった。重量変化も減少であったが、寸法および重量から求めたかさ密度変化は、増加であった。熱処理温度 1600 °C において、加熱時間を 250 hr から 740 hr に延長しても、寸法および重量の変化は全くみられなかった。1400 °C の熱処理温度では、被覆粒子は健全であったが、1600 °C の熱処理温度では、一部の粒子の被覆層に、若干損傷がみられた。しかし、熱処理によるこれ以外の変化はみられな

かった、71 FP 4A および 71 FP 5A 燃料コンパクトの熱処理後の断面写真を、Fig. 20 に示す。

Fig. 21 に、72 FP 1B 1、72 FP 1B 2、72 FP 1B 3 および 72 FP 1B 4 燃料コンパクトの熱処理による直径の経時変化を示す。いずれのコンパクトも、加熱の開始と同時に収縮がはじまり、70 時間程度で収縮は停止し、それ以後の寸法変化はごくわずかである。1600℃、330 時間熱処理後のこれらの燃料コンパクトの直径の収縮率は、72 FP 1B 4 が 0.1%，72 FP 1B 3 が 0.1%，72 FP 1B 1 が 0.2%，72 FP 1B 2 が 0.2% で、寸法収縮率は、等方質黒鉛系マトリックスの方が大きい。また、このマトリックスの場合、バインダー添加率 20% の方が、寸法収縮率は若干大きい。燃料コンパクトのかさ密度は、72 FP 1B 1 以外ほとんど変わっていない。寸法収縮に対応して密度の増加が認められなかったことは、収縮と同時に重量減少がおこっていることを意味し、この重量減少は、バインダーの炭化の増進にともなう、揮発性成分の放出に起因すると考えられる。熱処理後の燃料コンパクトの金相写真の 1 例として、72 FP 1B 1 燃料コンパクトのそれぞれを Fig. 22 に示す。これらの燃料コンパクトの熱処理試験において、マトリックスの組織変化や被覆粒子の損傷は、まったく確認されなかった。

1600℃での長時間の熱処理により、寸法収縮がみられるということは、燃料コンパクトの脱ガス処理（真空中、1700℃、1 時間）において、バインダーの炭化および脱ガスが十分でないことを示している。72 FP 燃料コンパクトと比較し、71 FP 燃料コンパクトの寸法変化率は、かなり大きい。これは 71 FP 燃料コンパクトが、オーバーコートプレス法を採用した最初の試作品であることもあって、製造条件等のバラツキに起因していると考えられる。

6. 照射後試験

標準的な照射後試験の流れ図を、Fig. 23 に示す。キャプセルの外筒を切断したあと、フルエンスモニタおよびインナキャプセルを取出す。フルエンスモニタについては、JMTR に輸送し、計画課において放射能の生成量から、中性子照射量の測定が行なわれる。インナキャプセルについては、外観検査を行なったあと解体し、燃料コンパクト、黒鉛ホルダー、黒鉛炭素マトリックス試片を取出す。黒鉛ホルダーおよび黒鉛炭素マトリックス試片については、別に試験が行なわれる。燃料コンパクトについては、全数の外観、寸法、重量検査を行なったあと、金相、電解解砕-酸浸出試験、破壊試験を行なう。金相試験を実施した燃料コンパクトについては、さらに円板試料を製作し、X 線-マイクロラジオグラフの撮影を行なう。電解解砕粒子については、破壊強度と燃焼率の測定を行なう。

72 F-8 A および 72 F-9 A キャプセルの照射後試験は、Fig. 23 の流れ図に従っているが、71 F-6 A キャプセルの照射後試験については、このうち、燃料コンパクトの X 線ラジオグラフ、燃焼率測定、燃料コンパクトおよび解砕粒子の破壊荷重の測定を、行なわなかった。72 F-8 A および 72 F-9 A キャプセル中に充填した燃料コンパクトの照射後試験を、Table 12 に示す。

かった、71 FP 4A および 71 FP 5A 燃料コンパクトの熱処理後の断面写真を、Fig. 20 に示す。

Fig. 21 に、72FP 1B 1、72FP 1B 2、72FP 1B 3 および 72 FP 1B 4 燃料コンパクトの熱処理による直径の経時変化を示す。いずれのコンパクトも、加熱の開始と同時に収縮がはじまり、70 時間程度で収縮は停止し、それ以後の寸法変化はごくわずかである。1600℃、330 時間熱処理後のこれらの燃料コンパクトの直径の収縮率は、72 FP 1B 4 が 0.1%，72 FP 1B 3 が 0.1%，72FP 1B 1 が 0.2%，72 FP 1B 2 が 0.2% で、寸法収縮率は、等方質黒鉛系マトリックスの方が大きい。また、このマトリックスの場合、バインダー添加率 20% の方が、寸法収縮率は若干大きい。燃料コンパクトのかさ密度は、72FP 1B 1 以外ほとんど変わっていない。寸法収縮に対応して密度の増加が認められなかったことは、収縮と同時に重量減少がおこっていることを意味し、この重量減少は、バインダーの炭化の増進にともなう、揮発性成分の放出に起因すると考えられる。熱処理後の燃料コンパクトの金相写真の 1 例として、72 FP 1B 1 燃料コンパクトのそれぞれを Fig. 22 に示す。これらの燃料コンパクトの熱処理試験において、マトリックスの組織変化や被覆粒子の損傷は、まったく確認されなかった。

1600℃での長時間の熱処理により、寸法収縮がみられるということは、燃料コンパクトの脱ガス処理（真空中、1700℃、1 時間）において、バインダーの炭化および脱ガスが十分でないことを示している。72FP 燃料コンパクトと比較し、71FP 燃料コンパクトの寸法変化率は、かなり大きい。これは 71FP 燃料コンパクトが、オーバーコートプレス法を採用した最初の試作品であることもあって、製造条件等のバラツキに起因していると考えられる。

6. 照射後試験

標準的な照射後試験の流れ図を、Fig. 23 に示す。キャプセルの外筒を切断したあと、フルエンスモニタおよびインナキャプセルを取出す。フルエンスモニタについては、JMTR に輸送し、計画課において放射能の生成量から、中性子照射量の測定が行なわれる。インナキャプセルについては、外観検査を行なったあと解体し、燃料コンパクト、黒鉛ホルダー、黒鉛炭素マトリックス試片を取出す。黒鉛ホルダーおよび黒鉛炭素マトリックス試片については、別に試験が行なわれる。燃料コンパクトについては、全数の外観、寸法、重量検査を行なったあと、金相、電解解砕-酸浸出試験、破壊試験を行なう。金相試験を実施した燃料コンパクトについては、さらに円板試料を製作し、X線-マイクロラジオグラフの撮影を行なう。電解解砕粒子については、破壊強度と燃焼率の測定を行なう。

72F-8A および 72F-9A キャプセルの照射後試験は、Fig. 23 の流れ図に従っているが、71F-6A キャプセルの照射後試験については、このうち、燃料コンパクトの X 線ラジオグラフ、燃焼率測定、燃料コンパクトおよび解砕粒子の破壊荷重の測定を、行なわなかった。72F-8A および 72F-9A キャプセル中に充填した燃料コンパクトの照射後試験を、Table 12 に示す。

6.1 71F-6A キャプセルの照射後試験

6.1.1 燃料コンパクトの外観検査

71F-6A キャプセルで照射した 71FP 4A および 71FP 5A 燃料コンパクトの外観写真を、Fig. 24 に示す。燃料コンパクトの外観は、照射前のものと比較して、全く変化していなかった。

6.1.2 燃料コンパクトの寸法検査

燃料コンパクトの長さはノギス（測定精度 1/20 mm）により、測定した。測定は燃料コンパクトの上端および下端において、0° および 90° 方向に 2 回、計 4 回測定し、これらの平均をとった。これらの燃料コンパクトの照射による寸法変化を、Table 13 に示す。外径、内径および長さは、全て照射により収縮しているが、内径の収縮率が特に大きい。これは、測定誤差が原因と考えられる。直径方向および長さ方向の収縮率のちがいは、ほとんどみられず、寸法収縮率の方向依存性もほとんどみられない。

6.1.3 燃料コンパクトの重量検査

燃料コンパクトの重量は、メトラータ秤（測定感度 1/10000 (g)、測定範囲、0～200 (g)）により測定した。測定結果を Table 14 に示す。測定結果にばらつきがみられるが、これは試料の調整条件が異なるためと推定される。

6.1.4 燃料コンパクトの金相

4 個の燃料コンパクトは、各々中央で切断し、一方を金相試験に、他方を酸浸出試験に使用した。試料の調整には、丸本工業製の研磨機を使用し、面出し研磨、粗研磨、精研磨、仕上げ研磨の順で行ない、面出しおよび粗研磨には耐水研磨紙を、精研磨にはダイヤモンドディスクを、仕上げ研磨にはテックスメットクロスにダイヤモンドペーストを塗布して行なった。断面観察は、テラトーム型金属顕微鏡（オーストリア、ライヘルツ社製）により行なった。

71FP 4A および 71FP 5A 燃料コンパクトの断面写真を、Fig. 25 - Fig. 28 に示す。これらの断面写真から、SiC 層の劣化、緩衝層および第 2 層の侵食が、全ての試料に観察された。さらに、Fig. 26-(3)では、燃料核と第 1 層との反応によるウラン炭化物が、燃料核の周辺に形成されているのが観察される。Fig. 26-(4)および Fig. 27-(4)では、第 2 層にクラックの生成が観察される。Fig. 28 に示した燃料コンパクト、71FP 5A は、切断中に砕けたが、これはバインダーの添加量が 10% で、他の燃料コンパクトの 20% に比較して、強度が若干弱いと推定される。これらの金相写真からわかる通り、これらの被覆粒子の品質はよくないが、これは製造時点において、被覆粒子の製造条件が確立していなかったことによる。

6.1.5 燃料コンパクトの酸浸出試験

燃料コンパクトの切断片の残り半分については、切断面に露出しているウランを、50%硝酸により溶解除去したあと、電気化学的に解砕し、さらに 50%硝酸に浸出させ¹³⁾、浸出液の線量率と被覆粒子の線量率を測定し、前者を後者で除して、酸浸出率を求めた。このようにして求めた、71

F-6A キャプセルで照射した燃料コンパクトの酸浸出率を、Table 15 に示す。一方、照射前の燃料コンパクトの酸浸出率については、当時、電解解砕酸浸出法が確立していなかったため測定されていない。従って、照射により燃料コンパクト中の破損粒子が増加したか否かは不明である。

6.2 72F-8A および 72F-9A キャプセルの照射後試験

6.2.1 インナキャプセルの外観検査

72F-8A および 72F-9A キャプセルの内筒の外観写真を、Fig. 29 に示す。72F-8A キャプセルの内筒は、写真にみられる通り上、中、下段とも健全で、照射前と比較して全く変わっていないが、72F-9A キャプセルの中および下段の内筒は、熱媒体との間でゆ着し、切り離すことができなかった。また、72F-9A キャプセルの内筒の写真 (Fig. 29-(5), (6)) に見られる表面の傷は、キャプセルの解体作業の際に生じたものである。

6.2.2 燃料コンパクトの外観検査

72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの外観写真を Fig. 30 に、72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトの外観写真を Fig. 31 に示す。なお、検査は、照射した燃料コンパクトの全数に対して、被覆粒子の脱落、マトリックスの割れ、欠けなどを重点に調べた。72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの外観には、全く異常が認められず、また、72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトにおいても、取出しに際して衝撃を与えているにもかかわらず、Fig. 31-(4) を除いて異常はみられず、照射によって生じたと推定される損傷は、全くみられなかった。なお、Fig. 31-(4) にみられる燃料コンパクトの欠けは、解体の際に生じたものと推定される。

6.2.3 燃料コンパクトの寸法検査

燃料コンパクトの直径は、その上下端を、2 方向 (0° および 90°) に、計 4 回測定し、その平均を求めた。内径は、両端部を、一方向に、計 2 回測定し、その平均を求めた。長さは 1 回測定した。外径および長さの測定には、デジタル寸法測定器 (SONY DG-50, 測定精度 $2/1000$ mm) を、内径測定にはテーパーゲージ (測定精度 $1/10$ mm) を使用した。

72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの外径、内径および長さを、それぞれ Table 16, Table 17 および Table 18 に示す。72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトの外径、内径および長さを、それぞれ Table 19, Table 20 および Table 21 に示す。72F-8A および 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトの直径変化率および長さ変化率と、中性子照射量との関係を、それぞれ Table 22 および Table 23 に示す。これらの寸法変化率を、照射量に対してプロットしたのが、Fig. 32 である。この図中のマークと燃料コンパクトとの対応は、Table 22 および Table 23 に示されている。照射による直径変化率および長さ変化率は、Fig. 32 にみられる通り、ある巾をもって分布しているが、この巾からはずれているものもある。特に、72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトにおいて、これがみられる。72F-9A キャプセルで

照射した燃料コンパクトの場合、長さよりも直径の方が寸法変化率は大きい。72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトも、これと同じ傾向を示しているが、逆の場合もある。72F-8A キャプセルで照射した針状コークス黒鉛系、等方質黒鉛系および石油コークス黒鉛系マトリックスの燃料コンパクトの場合、収縮率曲線からの偏差量が大きい。天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系の場合、この曲線上にある。一方、針状コークス黒鉛系および等方質黒鉛系マトリックスでも、72F-9A キャプセルで照射した場合は、収縮率曲線上にある。72F-9A キャプセルの中段のインナキャプセル中に充填した燃料コンパクトでは、等方質黒鉛系マトリックスよりも、天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系の方が収縮率は若干小さかった。

6.2.4 燃料コンパクトの重量検査

燃料コンパクトの重量は、自動メトラ-天秤(B5C1000/11)により測定した。72F-8A および 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトの、照射前後の重量を、それぞれ Table 24 および Table 25 に示す。72F-8A キャプセルにおいては 0.05~0.2%、72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトにおいては 0.1~0.4% の重量減少がみられた。これらの重量減少は、燃料コンパクト中の揮発性成分が蒸発したために生じたものか、またはマトリックス材が酸化したために生じたものか、原因は不明である。

6.2.5 燃料コンパクトの金相

72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの断面写真を、Fig. 33~Fig. 40 に、72F-9A キャプセルで照射した、燃料コンパクトのそれを、Fig. 41~Fig. 46 に示す。このうち、Fig. 33 は、上段のインナキャプセルに充填された針状コークス黒鉛系マトリックスの、Fig. 34 は同じく石油コークス黒鉛系マトリックスの、Fig. 35 は、同じく等方質黒鉛系マトリックスの、Fig. 36 は、中段のインナキャプセルに充填された等方質黒鉛系マトリックスの、Fig. 37 は、同じく針状コークス黒鉛系マトリックスの、Fig. 38 は、同じく石油コークス黒鉛系マトリックスの、Fig. 39 は、下段のインナキャプセルに充填された天然黒鉛-石油コークス黒鉛系マトリックス(混合比 1:9)の、Fig. 40 は、同じく天然黒鉛-石油コークス黒鉛系マトリックス(混合比、1:1 および 4:1)の燃料コンパクトの断面写真である。Fig. 41 は、72F-9A キャプセルの上段のインナキャプセル中に充填された等方質黒鉛系マトリックスの、Fig. 42 は、同じく針状コークス黒鉛系マトリックスの、Fig. 43 は、中段のインナキャプセルに充填された等方質黒鉛系マトリックスの、Fig. 44 は、同じく天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系マトリックス(混合比 4:1)の、Fig. 45 は、下段のインナキャプセル中に充填された針状コークス黒鉛系および等方質黒鉛系マトリックスの、Fig. 46 は、同じく天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系マトリックス(混合比 4:1)の燃料コンパクトの断面写真である。これらの写真の掲載にあたっては、損傷の大きいものと比較的軽微なものの中から選んだ。

これらの燃料コンパクトの被覆粒子の被覆層において、全く損傷のみられないものもいくつか存在するが、何らかの損傷をうけているものが大部分である。

これらの燃料コンパクトの断面写真において、次のようなことが観察された。

1) 緩衝層における槍先型損傷

- 2) 第2層から緩衝層の剥離
- 3) SiC層から第2層の剥離
- 4) 第4層の半径方向クラック
- 5) 燃料核による緩衝層および第2層の浸食(特定方向)(アメーバ効果)
- 6) 緩衝層および第2層の瘦薄化(不特定方向)
- 7) 燃料核と緩衝層の間の空隙
- 8) 燃料核の粒界上へのポアの集合
- 9) 燃料核内のクラック
- 10) 燃料核内の大きな空隙
- 11) 第4層表面とマトリックス材との境界におけるクラック
- 12) 燃料コンパクトのマトリックス中のクラック

項目1～4は、中性子照射による熱分解炭素層が損傷し、収縮するためにおこる現象であり、このうち項目1～3は、特に72F-8Aキャプセルで照射した燃料コンパクトに多くみられ、槍先型損傷は、72F-9Aキャプセルで照射した燃料コンパクトには、あまりみられない。項目4の観察例は、両キャプセルともわずかである。項目5のアメーバ効果は、72F-9Aキャプセルで照射した燃料コンパクト、それも中段のインナキャプセルに充填した燃料コンパクトにみられた。アメーバ効果は、温度勾配に従って、特定方向に被覆層が浸食されるのに対し、6に掲げた項目は、全く任意の方向に緩衝層および第2層が瘦薄化している(Fig. 33-(4),(5), Fig. 36-(4), Fig. 37-(6), Fig. 38-(4), Fig. 41-(3),(6), Fig. 42-(5), Fig. 45-(2), (3), (4), (5), (6), Fig. 46-(2))。これらは燃料核との反応により生成したものか、研磨力がこれらの被覆層に作用した結果脱落したものか不明である。なお、72F-9Aキャプセルで照射した被覆粒子にみられたアメーバ効果においては、被覆層の浸食が、SiC層の内表面に達しているものも、わずかではあるが存在している。

項目7の燃料核と緩衝層の間の空隙については、被覆粒子製造時にすでに存在していたものか、照射により生成したものか、また、この両者であるのか明らかでない。項目8の燃料核の結晶粒界上へのポアの集合については、燃焼率の高い72F-9Aキャプセルで照射した被覆粒子(Fig. 43-(2), (6))にみられる。項目9の燃料核内のクラック(Fig. 36-(3))については、照射により生成したものかどうか不明である。項目10の燃料核内の大きな空隙については、燃料核の製造時において生成したものと推定される。項目11の第4層表面とマトリックス材との境界におけるクラックについては、ごく一部の粒子にみられるだけで、照射により生成したものかどうかたがわしい。項目12の燃料コンパクトのマトリックス中のクラックについては(Fig. 34-(1), Fig. 36-(1), Fig. 43-(1), Fig. 45-(1))、未照射の燃料コンパクトにおいても、観察されていることから、¹⁴⁾ 燃料コンパクトの製造時に生成したものと考えられる。なお、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルにおいては、71F-6Aキャプセルで照射した被覆粒子にみられたようなSiC層の劣化は、全くみられなかった。また、72F-8Aと72F-9Aと2本のキャプセルを比較した場合、中性子照射量の多い後者の方が、損傷の程度は大きい。

6.2.6 燃料コンパクトの薄片X線ラジオグラフィー

燃料コンパクト中の被覆粒子の状況を、非破壊的に調べるために、X線透過写真を撮影した。X線透過法は、金相写真と異なり、研磨力のような機械的応力を与えていない状態の被覆粒子を、観察できる長所がある。燃料コンパクトから、マイクロカッターにより厚さ2 mmのディスク試料を切出し、切断面を研磨したあと、試験に供した。この試験は、金相試験同様、72F-8A キャプセル9試料、72F-9A キャプセル7試料について行なった。Fig. 47に、72F-8A および72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトのX線ラジオグラフの一部を示す。

6.2.7 燃料コンパクトの酸浸出試験

酸浸出試験は、72F-8A キャプセルについて3個、72F-9A キャプセルについて7個の燃料コンパクトについて行なった。72F-8A キャプセルについては、中段のインナキャプセルから、72F-9A キャプセルについては、各段のインナキャプセルから2個または3個ずつ選んだ。測定方法は、71F-6A キャプセルの場合と同じである。これらの結果を、Table 26 および Table 27 に示す。72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの酸浸出率は、最も大きいもので 1×10^{-3} 、72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトのそれは、 $3.2 \sim 0.9 \times 10^{-3}$ の範囲にあり、後者の方が酸浸出率は若干大きい。また、72F-9A キャプセル内では、中段のインナキャプセルで照射した燃料コンパクトにおいて、酸浸出率は特に大きい。これらの燃料コンパクトは、1個当たり約1100粒の被覆粒子を含んでいるから、72F-9A キャプセルでは数粒の破損を含んでいることになる。

6.2.8 燃料コンパクトの強度試験

燃料コンパクトの強度試験は、圧縮破壊法により行なった。試験機は、ホットラボのコンクリートケーブ内に設置されているインストロン試験機(TT-CM-L型)を用いた。試験はコンパクトの長さ方向に加圧し、試験機のクロスヘッド速度を、0.2 mm/minとし、荷重歪曲線を記録し、これより破壊荷重とヤング率を求めた。強度試験に使用した燃料コンパクトは、72F-8A キャプセルについて6個、72F-9A キャプセルについて4個である。Table 28に、照射前後の燃料コンパクトの強度を示す。なお、この測定には、各種類ごとに、照射前および照射後の燃料コンパクトを、1個ずつ用いた。燃料コンパクトの強度は、72F-9A キャプセルに充填した73FP 2Bおよび73FP 3Bを除いて、照射により増加していた。また、マトリックスの種類と、燃料コンパクトの強度との間には、明確な関連はみられない。

6.2.9 燃焼率測定

燃料コンパクトの燃焼率は、キャプセルに装荷されているコバルトのフルエンスモニタの分析や照射中の燃料コンパクトの発熱量から、間接的に求める方法がとられている。しかし、72F-8A および72F-9A キャプセルにおいては、被覆粒子をとり出し、これを分析して燃焼率を直接求めることを試みた。試料は、72F-8A および72F-9A キャプセルの中段のインナキャプセルで照射した燃料コンパクトから、電解解砕粒子を各5粒選り出したものについて行なった。なお、測定は、燃焼率測定開発室に依頼した。測定に使用した燃料コンパクトは、72F-8A キ

ャプセルについて72FP 1B 2-8を, 72F-9A キャプセルについて73FP 2B-8を用いた。被覆粒子の燃料核は, 硝酸に溶解したあと, この溶液のウランおよび ^{137}Cs の分析を行ない, 次式により燃焼率(%FIMA)を算出した。

$$\text{燃焼率 (\%FIMA)} = \frac{{}^{137}\text{Cs}/Y}{U + {}^{137}\text{Cs}/Y} \times 100$$

^{137}Cs : ^{137}Cs 原子数

Y : ^{137}Cs の核分裂収率

U : U の原子数

なお, ^{137}Cs の原子数は, 72F-8A および72F-9A キャプセルの照射終了日に換算した値を用いた。これらの測定から, 72F-8A キャプセルの燃焼率の最大値は2.24%FIMA, 72F-9A キャプセルのそれは, 3.71%FIMAであった。

6.2.10 解砕粒子の破壊強度

被覆粒子の強度試験は, 上下方向から粒子に荷重を与え, 破壊させる方法により行なった。試料は, 72F-9A キャプセルの中段および下段のインナキャプセルで照射した燃料コンパクト73FP 3B-8, 73FP 1B-11 および73FP 3B-11 で, 電解解砕, 酸浸出試験を実施したもののなかから, 健全な粒子を30粒任意に選び出して用いた。照射後の破壊強度を, 照射前の値とともに, Fig. 48 に示す。これらのヒストグラムに対し, 破壊荷重の平均を求め, 同図に示した。被覆粒子の破壊強度は, 照射量の増加に対し減少することがわかる。しかし, この減少量が全て照射による劣化ではなく, この一部は燃料コンパクトの二次焼成に際して与えられた温度の効果もあることを注意する必要がある。

7. 考 察

被覆粒子 (TRISO 粒子) の高速中性子照射による直径の変化は, その被覆層の一部であるSiC層の照射による寸法変化がわずかであることから (照射温度1040℃, 中性子照射量 4.2×10^{21} (n cm⁻²) ($E > 0.18$ MeV) において0.05%の膨張¹⁵⁾), 中性子照射による燃料コンパクトの寸法変化は, 黒鉛炭素マトリックス材のそれに支配される。照射による燃料コンパクトの直径と長さでは, 結果に若干ばらつきはあるが, 直径の方が大きいという結果が得られた (Fig. 32)。型込めによる黒鉛材の照射による寸法変化の成形圧方向の依存性においても, 直径方向の方が大きく,¹⁶⁾ (押し出し成形の場合は, 長さ方向の方が大) 燃料コンパクトの場合と似ている。黒鉛粉末は, 通常鱗片状を呈し, その寸法はc軸方向よりもa軸方向の方が大きいから, 燃料コンパクトの成形に際し, 一部の黒鉛粉末の層面は, 成形圧と垂直方向に配列する。¹⁸⁾ 高配向性パイログラフアイトの中性子照射による寸法変化は, a軸方向に収縮で, c軸方向に膨張であり,²²⁾ マトリックス用黒鉛粉末においても, この傾向は保存されているものと推定される。

ャプセルについて72FP 1B 2-8を, 72F-9 A キャプセルについて73FP 2B-8を用いた。被覆粒子の燃料核は, 硝酸に溶解したあと, この溶液のウランおよび ^{137}Cs の分析を行ない, 次式により燃焼率(% FIMA) を算出した。

$$\text{燃焼率 (\% FIMA)} = \frac{{}^{137}\text{Cs}/Y}{U + {}^{137}\text{Cs}/Y} \times 100$$

${}^{137}\text{Cs}$: ${}^{137}\text{Cs}$ 原子数

Y : ${}^{137}\text{Cs}$ の核分裂収率

U : U の原子数

なお, ${}^{137}\text{Cs}$ の原子数は, 72F-8 A および72F-9 A キャプセルの照射終了日に換算した値を用いた。これらの測定から, 72F-8 A キャプセルの燃焼率の最大値は2.24% FIMA, 72F-9 A キャプセルのそれは, 3.71% FIMAであった。

6.2.10 解砕粒子の破壊強度

被覆粒子の強度試験は, 上下方向から粒子に荷重を与え, 破壊させる方法により行なった。試料は, 72F-9 A キャプセルの中段および下段のインナキャプセルで照射した燃料コンパクト73FP 3B-8, 73FP 1B-11 および73FP 3B-11 で, 電解解砕, 酸浸出試験を実施したもののなかから, 健全な粒子を30粒任意に選び出して用いた。照射後の破壊強度を, 照射前の値とともに, Fig. 48 に示す。これらのヒストグラムに対し, 破壊荷重の平均を求め, 同図に示した。被覆粒子の破壊強度は, 照射量の増加に対し減少することがわかる。しかし, この減少量が全て照射による劣化ではなく, この一部は燃料コンパクトの二次焼成に際して与えられた温度の効果もあることを注意する必要がある。

7. 考 察

被覆粒子 (TRISO 粒子) の高速中性子照射による直径の変化は, その被覆層の一部であるSiC層の照射による寸法変化がわずかであることから (照射温度1040℃, 中性子照射量 $4.2 \times 10^{21} (\text{n cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) において0.05%の膨張¹⁵⁾), 中性子照射による燃料コンパクトの寸法変化は, 黒鉛炭素マトリックス材のそれに支配される。照射による燃料コンパクトの直径と長さでは, 結果に若干ばらつきはあるが, 直径の方が大きいという結果が得られた (Fig. 32)。型込めによる黒鉛材の照射による寸法変化の成形圧方向の依存性においても, 直径方向の方が大きく,¹⁶⁾ (押し出し成形の場合は, 長さ方向の方が大) 燃料コンパクトの場合と似ている。黒鉛粉末は, 通常鱗片状を呈し, その寸法はc軸方向よりもa軸方向の方が大きいから, 燃料コンパクトの成形に際し, 一部の黒鉛粉末の層面は, 成形圧と垂直方向に配列する。¹⁸⁾ 高配向性パイログラフアイトの中性子照射による寸法変化は, a軸方向に収縮で, c軸方向に膨張であり,²²⁾ マトリックス用黒鉛粉末においても, この傾向は保存されているものと推定される。

バインダー炭素と多結晶黒鉛材とでは、中性子照射による収縮率は、前者の方が大きいから、¹⁷⁾ 黒鉛粉のc軸方向の膨張は、バインダー炭素の収縮により吸収され、長さ方向の寸法変化は、マクロ的には収縮となる。一方、直径方向では、黒鉛粉のa軸方向もバインダー炭素も収縮であるから、両者の収縮が加算され、長さ方向よりも直径方向の方が、収縮率は大きくなるものと推定される。しかし、成形圧方向に対する黒鉛粉末層面の優先的な配列は、被覆粒子を含まない方が助長されるから、¹⁸⁾ 中性子照射による収縮率は、燃料コンパクトよりも、マトリックス材単独の方が、大きくなるはずである。700～1100℃、 $2.3 \times 10^{21} \text{ (n} \cdot \text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) における、天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系マトリックス（混合比4:1）の⊥方向の収縮率は1.8%、//方向のそれは0.8%であった。⁸⁾ 本実験と同じ照射量における燃料コンパクトの⊥方向の収縮率は2.2%、//方向のそれは1.4%で、燃料コンパクトの方が大きく、予想と全く逆の結果であった。Brocklehurst らの結果²⁰⁾ も、本実験の場合と逆で、照射による燃料コンパクトの寸法収縮率は、粒子充填率の増加に対して減少していた。なお、この原因については、不明である。

バインダー添加率と照射による寸法収縮との関係については、72F-9A キャプセルにおいて、バインダー添加率14%の等方質黒鉛系マトリックスと、同じく20%の針状コークス黒鉛系マトリックスがあるが、黒鉛粉末の種類も同時に変わっているため、これらの効果を判定することは困難である。この種の実験は、同じ黒鉛粉末について条件をそろえて調べるのが通例である。寸法変化に対する照射温度の影響については、中性子照射量と照射温度が、同時に変わっているために、はっきりした傾向をつかむことができない。なお、72F-8A キャプセルにおいて、中性子照射量が少ないにもかかわらず、大きな寸法変化を示しているのは、未照射燃料コンパクトの加熱試験における寸法収縮と合わせて、燃料コンパクトの製造に際しての条件の違いによるものと推定される。

マトリックス用黒鉛粉末の種類と、照射による寸法収縮率との関係について、Brocklehurst らの結果¹⁹⁾ によれば、ギルソカーボン黒鉛系、針状コークス黒鉛系、天然黒鉛系およびピッチコークス黒鉛系マトリックスの、黒鉛粉末のちがいによる収縮率の差は、ごくわずかであった。本照射試験においては、この影響を調べるための試験は必ずしも系統的でないが、72F-9A キャプセルの結果からみれば、黒鉛粉末の種類がちがいによる収縮率の差を結論することは、困難である。燃料コンパクトの寸法収縮率は、Everett ら²¹⁾ によれば、外径44mm、長さ40mm、粒子充填率20%の燃料コンパクトを、 $2 \times 10^{21} \text{ (n cm}^{-2})$ (DNE) まで照射し、1.2～1.8%であった。Brocklehurst ら²⁰⁾ は、粒子充填率20%燃料コンパクトの、 $2 \times 10^{21} \text{ (n cm}^{-2})$ における収縮率は1.8%で、本照射試験結果より若干小さい。

72F-8A および 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクト中に分散した被覆粒子は、72F-6A および 72F-7A キャプセルにおいて、被覆粒子単独の照射を行なっている。³⁾ 72F-6A キャプセルは、JMTR のG-6（燃料領域孔）において、850～1350℃で、43日間、72F-7A キャプセルも、同様にG-6照射孔において、1300～1600℃で、3.5日間照射した。72F-6A キャプセルで照射した被覆粒子にみられる損傷は、緩衝層における槍先型損傷、緩衝層の第2層からの剥離、第2層の第3層からの剥離のような、初期的な照射損傷にとどまっていた。72F-7A キャプセルで照射した被覆粒子は、その中性子照射量はごくわずかであるにもかゝわ

らず、照射温度が高い領域に充填した被覆粒子においては、緩衝層にとどまっているものの72F-6Aキャプセルなみの照射損傷がみられた。緩衝層の槍先型損傷や緩衝層の第2層からの剥離については、さらに低い温度で、JRR-2、VT-1孔で照射したキャプセル、(高速中性子照射量 $1.0 \times 10^{20} (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$)) においても観察されている。¹⁹⁾ アメーバ効果については、72F-9Aの中段のインナキャプセルで照射した燃料コンパクトについてのみみられたが、72F-6Aおよび72F-7Aキャプセルで照射した被覆粒子では、全く認められなかった。72F-6Aキャプセルの照射温度は、72F-9Aキャプセルのそれと、ほとんどちがいはみられない。72F-9Aキャプセルと72F-6Aキャプセルとで最も大きなちがいは、照射時間である。前者は4サイクル照射、後者は2サイクル照射、すなわち、72F-9Aキャプセルでは、照射時間が長いために、アメーバ効果がみられたものと推定される。また、72F-6Aキャプセルの照射においてみられた、被覆粒子表面の隆起状突起物は、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルでの照射試料が、燃料コンパクトであることもあって、確認されなかった。72F-6Aおよび72F-7Aキャプセルで照射した被覆粒子と72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルで照射した燃料コンパクト中に分散した被覆粒子とでは、以上述べた以外の照射挙動のちがいはみられなかった。

8. ま と め

71F-6A、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルにおいて、それぞれ1971年(昭和46年)、1972年(昭和47年)および1973年(昭和48年)試作の被覆粒子燃料コンパクトの照射を行なった。71F-6Aキャプセルは、JMTRのM-12孔で照射し、照射温度最高1380℃、燃焼率最大1.8%FIMA、高速中性子照射量最大 $1.0 \times 10^{20} (\text{n cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$)を達成した。72F-8Aキャプセルは、K-6孔で2サイクル照射し、照射温度1510℃、燃焼率最大2.2%FIMA、高速中性子照射量最大 $1.3 \times 10^{21} (\text{n cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$)を達成した。72F-9Aキャプセルは、K-6孔で4サイクル照射し、照射温度最高1340℃、燃焼率最大3.9%FIMA、高速中性子照射量最大 $2.4 \times 10^{21} (\text{n cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$)を達成した。これらのキャプセルの照射により、次のことがわかった。

1. これらのキャプセルで照射した燃料コンパクトの外観は、照射前のものと比較し、全く変化がみられなかった。
2. 照射による燃料コンパクトの外径および長さは、全て収縮で、72F-6Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの外径および長さの収縮率は、0.2~0.3%、72F-8Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの外径および長さの収縮率は、0.4~2.0%、72F-9Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの外径および長さの収縮率は、0.8~2.6%で、中性子照射量の増加とともに増加していた。
3. 72F-8Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの中性子照射量は、72F-9Aキャプセルのその約半分であるにもかかわらず、その寸法収縮率は、72F-9Aのそれに近い値であった。

らず、照射温度が高い領域に充填した被覆粒子においては、緩衝層にとどまっているものの72F-6Aキャプセルなみの照射損傷がみられた。緩衝層の槍先型損傷や緩衝層の第2層からの剥離については、さらに低い温度で、JRR-2、VT-1孔で照射したキャプセル、(高速中性子照射量 $1.0 \times 10^{20} (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$)) においても観察されている。¹⁹⁾ アメーバ効果については、72F-9Aの中段のインナキャプセルで照射した燃料コンパクトについてのみみられたが、72F-6Aおよび72F-7Aキャプセルで照射した被覆粒子では、全く認められなかった。72F-6Aキャプセルの照射温度は、72F-9Aキャプセルのそれと、ほとんどちがいはみられない。72F-9Aキャプセルと72F-6Aキャプセルとで最も大きなちがいは、照射時間である。前者は4サイクル照射、後者は2サイクル照射、すなわち、72F-9Aキャプセルでは、照射時間が長いために、アメーバ効果がみられたものと推定される。また、72F-6Aキャプセルの照射においてみられた、被覆粒子表面の隆起状突起物は、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルでの照射試料が、燃料コンパクトであることもあって、確認されなかった。72F-6Aおよび72F-7Aキャプセルで照射した被覆粒子と72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルで照射した燃料コンパクト中に分散した被覆粒子とでは、以上述べた以外の照射挙動のちがいはみられなかった。

8. ま と め

71F-6A、72F-8Aおよび72F-9Aキャプセルにおいて、それぞれ1971年(昭和46年)、1972年(昭和47年)および1973年(昭和48年)試作の被覆粒子燃料コンパクトの照射を行なった。71F-6Aキャプセルは、JMTRのM-12孔で照射し、照射温度最高1380℃、燃焼率最大1.8%FIMA、高速中性子照射量最大 $1.0 \times 10^{20} (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) を達成した。72F-8Aキャプセルは、K-6孔で2サイクル照射し、照射温度1510℃、燃焼率最大2.2%FIMA、高速中性子照射量最大 $1.3 \times 10^{21} (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) を達成した。72F-9Aキャプセルは、K-6孔で4サイクル照射し、照射温度最高1340℃、燃焼率最大3.9%FIMA、高速中性子照射量最大 $2.4 \times 10^{21} (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) を達成した。これらのキャプセルの照射により、次のことがわかった。

1. これらのキャプセルで照射した燃料コンパクトの外観は、照射前のものと比較し、全く変化がみられなかった。
2. 照射による燃料コンパクトの外径および長さは、全て収縮で、72F-6Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの外径および長さの収縮率は、0.2~0.3%、72F-8Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの外径および長さの収縮率は、0.4~2.0%、72F-9Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの外径および長さの収縮率は、0.8~2.6%で、中性子照射量の増加とともに増加していた。
3. 72F-8Aキャプセルで照射した燃料コンパクトの中性子照射量は、72F-9Aキャプセルのその約半分であるにもかかわらず、その寸法収縮率は、72F-9Aのそれに近い値であった。

た。

4. 72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトと同バッチの針状コークス黒鉛系マトリックスおよび等方質黒鉛系マトリックス燃料コンパクトは、約 300 時間の炉外加熱試験により、それぞれ 0.1 または 0.2 % の寸法収縮がみられた。
5. 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトの直径の収縮率は、長さ収縮率よりも大きかった。
6. 72F-8A キャプセルで照射した被覆粒子には、緩衝層における槍先型損傷、緩衝層の第 2 層からの剥離、第 2 層の第 3 層からの剥離が、72F-9A キャプセルで照射した被覆粒子には、これらの損傷に加えて、アメーバ効果が、照射温度の高い中段のインナキャプセルで照射した被覆粒子において、観察された。
7. 72F-8A および 72F-9A キャプセルで照射した被覆粒子の照射挙動は、72F-6A および 72F-7A キャプセルで照射した同バッチの被覆粒子のそれと似ていた。
8. 71F-6A および 72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの酸浸出率は、 10^{-4} のオーダーもしくはこれ以下であるのに対し、72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトには、 10^{-3} のオーダーのものもみられた。
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は、5～10 % の破壊荷重の増加がみられた。
10. 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクト中に分散されていた被覆粒子の破壊荷重は、照射前の値に比較し 5～15 % 減少していた。

謝 辞

本報の照射試験を進めるに当って、御協力を賜った次の課室の諸兄に、謝意を表する。

1. キャプセルの設計、製作および照射
大洗研究所 材料試験炉部 照射 1 課, 照射 2 課, 照射 3 課, 計画課
東海研究所 技術部 工作課
2. 照射後試験
東海研究所 研究炉管理部 ホットラボ管理室
大洗研究所 材料試験炉部 ホットラボ課
3. 燃焼率測定
東海研究所 原子炉化学部 燃焼率測定開発室

た。

4. 72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトと同バッチの針状コークス黒鉛系マトリックスおよび等方質黒鉛系マトリックス燃料コンパクトは、約 300 時間の炉外加熱試験により、それぞれ 0.1 または 0.2 % の寸法収縮がみられた。
5. 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトの直径の収縮率は、長さ収縮率よりも大きかった。
6. 72F-8A キャプセルで照射した被覆粒子には、緩衝層における槍先型損傷、緩衝層の第 2 層からの剥離、第 2 層の第 3 層からの剥離が、72F-9A キャプセルで照射した被覆粒子には、これらの損傷に加えて、アメーバ効果が、照射温度の高い中段のインナキャプセルで照射した被覆粒子において、観察された。
7. 72F-8A および 72F-9A キャプセルで照射した被覆粒子の照射挙動は、72F-6A および 72F-7A キャプセルで照射した同バッチの被覆粒子のそれと似ていた。
8. 71F-6A および 72F-8A キャプセルで照射した燃料コンパクトの酸浸出率は、 10^{-4} のオーダーもしくはこれ以下であるのに対し、72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクトには、 10^{-3} のオーダーのものもみられた。
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は、5～10 % の破壊荷重の増加がみられた。
10. 72F-9A キャプセルで照射した燃料コンパクト中に分散されていた被覆粒子の破壊荷重は、照射前の値に比較し 5～15 % 減少していた。

謝 辞

本報の照射試験を進めるに当って、御協力を賜った次の課室の諸兄に、謝意を表する。

1. キャプセルの設計、製作および照射
大洗研究所 材料試験炉部 照射 1 課, 照射 2 課, 照射 3 課, 計画課
東海研究所 技術部 工作課
2. 照射後試験
東海研究所 研究炉管理部 ホットラボ管理室
大洗研究所 材料試験炉部 ホットラボ課
3. 燃焼率測定
東海研究所 原子炉化学部 燃焼率測定開発室

参考文献

1. 岩本多実, 福田幸朔, 鹿志村悟, 菊地章, JAERI-M 6480, (1976)
2. 岩本多実, 福田幸朔, 鹿志村悟, 菊地章, JAERI-M 6717, (1976)
3. 福田幸朔, 鹿志村悟, 岩本多実, 菊地章, JAERI-M 8949, (1980)
4. 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)
5. 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)
6. 菊池輝男, 菊地章, 飛田勉, 鹿志村悟, 宮坂靖彦, 岩本多実, JAERI-M 6913, (1977)
7. 岩本多実, 飛田勉, 菊池輝男, 菊地章, JAERI-M 8924, (1980)
8. 菊池輝男, 飛田勉, 井川勝市, 岩本多実, JAERI-M 82-206, (1982)
9. JMTR計画課 中性子照射量報告書 No.51-4 (F)
10. 日本原子力研究所, 大洗研究所材料試験炉部, JMTR照射ハンドブック, (1980)
11. JMTR計画課, 中性子照射量報告書, No.52-12.
12. JMTR計画課, 中性子照射量報告書, No.52-15.
13. 飛田勉, 岩本多実, JAERI-M 5265, (1973)
14. 岩本多実, 菊池輝男, 飛田勉, 小川清行, 菊地章, 真鍋勝美, 甲斐洋, 後藤雅和, 阪西健一, 未発表データ, (1976)
15. Price, R.J., J. Nucl. Mater., 33, pp17-22 (1969)
16. Engle, G.B., Carbon, 9, pp539-554 (1971)
17. Bullock, R.E., Carbon, 17, pp447-452 (1979)
18. 菊池輝男, 岩本多実, 井川勝市, JAERI-M 9052, (1980)
19. 菊池輝男, 井川勝市, 石本清, 松島秀夫, JAERI-M 83-092, (1983)
20. Brocklehurst, J.E., Edwards, J.A., Moore, D.A., Proceedings of the 4th London International Carbon and Graphite Conference, pp778-789 (1974)
21. Everett, M.R., Manzel, R., Barr, P., Mayr, K., D.P. Report 686 (1969)
22. Kelly, B.T., Carbon, 20, pp2-11, (1982)

Table 1 Characteristics of fuel compacts for 71F-6A capsule

Batch No.	71FP4A-3	71FP4A-4	71FP5A-1	71FP5A-4
Outer diameter (mm)	24.00	24.02	24.03	24.03
Inner diameter (mm)	8.02	8.02	7.99	8.02
Length (mm)	39.65	39.75	40.72	40.15
Weight (gr)	32.177	32.186	33.361	32.269
Geometrical density ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	2.02	2.02	2.03	2.00
Actual amount of U (gr)	9.148	9.149	9.781	8.890
Enrichment (%)	19.95			
Actual amount of U-235 (gr)	1.825	1.825	1.951	1.774
C.P. packing fraction (%)	24	24	24	24
Coated particles dispersed	71FC4		71FC5	
Binder	Phenol resin			
Binder content (%)	20		20	
Graphite powder	ICG ^{a)}		NCG ^{b)}	
²³⁵ U (g/cm)	0.460	0.459	0.479	0.442

a: Isotropic coke graphite

b: Needle coke graphite

Table 2 Characteristics of coated particle dispersed in 71FP4A and 71FP5A fuel compacts for 71F-6A capsule

Batch No.			71FC4	71FC5
Kernel	Chemical form		UO ₂	UO ₂
	Uranium enrichment (%)		19.95	19.95
	Diameter (μm)		482 - 507	482 - 507
	Theoretical density (%TD)		94.8	94.8
	O/U ratio		2.008	2.008
Coating	Buffer layer	Material	PyC	PyC
		Source gas	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂
		Thickness (μm)	43	43
		Density (g/cm ³)	1.2	1.2
	HDI PyC layer	Material	PyC	PyC
		Source gas	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈
		Thickness (μm)	33	34
		Density (g/cm ³)	1.7	1.8
		BAF	1.10	1.10
	SiC layer	Material	SiC	SiC
		Source gas	CH ₃ SiCl ₃	CH ₃ SiCl ₃
		Thickness (μm)	28	29
		Density (g/cm ³)	3.2	3.2
		Free Si (wt %)	< 0.1	< 0.1
	HDI PyC layer	Material	PyC	PyC
		Source gas	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈
		Thickness (μm)	45	45
		Density (g/cm ³)	1.7	1.8
		BAF	1.10	1.10
Coated particle	Diameter (μm)		789 - 810	790 - 810
	Crushing strength (Kg)		2.69	2.64
	Surface contamination		1.0×10 ⁻⁵	5.5×10 ⁻⁶

Table 3 Characteristics of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

Batch No.	72FP1B2	72FP1B4	72FP1B6	72FP1B7A	72FP1B7B	72FP1B7C
Outer diameter (mm)	10.47	10.52	10.45	10.52	10.52	10.50
Inner diameter (mm)	1.96	1.98	1.96	1.99	1.99	2.00
Length (mm)	14.98	14.99	14.80	14.97	14.85	14.81
Weight (gr)	2.8608	2.8085	2.8214	2.7853	2.7410	2.7540
Geometrical density ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)	2.30	2.24	2.30	2.22	2.21	2.23
Actual amount of U (gr)	0.7062	0.6933	0.6936	0.6806	0.6400	0.6934
Enrichment (%)	7.912	7.912	7.912	7.912	7.912	7.912
Actual amount of ^{235}U (gr)	0.0559	0.05484	0.0549	0.0538	0.0506	0.0548
C. P. packing fraction (%)	23.0	21.9	22.5	22.0	22.1	22.3
Coated particle dispersed	72FC1	72FC1	72FC1	72FC1	72FC1	72FC1
Binder	phenol resin	phenol resin	phenol resin	phenol resin	phenol resin	phenol resin
Binder content (%)	20	20	20	14	14	14
Graphite powder	ICG ^{a)}	NCG ^{b)}	PCG ^{c)}	P9N1 ^{d)}	P5N5 ^{e)}	P2N8 ^{f)}

a: Isotropic coke graphite, b: Needle coke graphite, c: Petroleum coke graphite,
d, e and f: Mixture of petroleum coke graphite and natural graphite in a ratio of 9:1,
5:5 and 2:8 respectively.

Table 4 Characteristics of coated particles dispersed in 72FP1B1, 72FP1B2, 72FP1B4, 72FP1B6, 72FP1B7A 72FP1B7B and 72FP1B7C fuel compacts for 72F-8A capsule

Batch No.			72FC1
Kernel	Chemical form		UO ₂
	Uranium enrichment (%)		7.91
	Diameter (μm)		510
	Theoretical density (%TD)		95.2
	O/U ratio		2.008
Coating	Buffer layer	Material	PyC
		Source gas	C ₂ H ₂
		Thickness (μm)	39
		Density (g/cm ³)	1.15
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	33
		Density (g/cm ³)	1.75 - 1.80
		BAF	1.06
	SiC layer	Material	SiC
		Source gas	CH ₃ SiCl ₃
		Thickness (μm)	26
		Density (g/cm ³)	3.2
		Free Si (wt %)	N.D. ^a
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	48
		Density (g/cm ³)	1.80 - 1.86
		BAF	1.06
Coated particle	Diameter (μm)		780
	Crushing strength (Kg)		2.44
	Surface contamination		< 3 × 10 ⁻³

a: Not detected

Table 5 Characteristics of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule

Batch No.	72FP1B1	73FP1B	73FP2B	73FP3B
Outer diameter (mm)	10.51	10.47	10.46	10.46
Inner diameter (mm)	1.98	1.98	1.96	1.97
Length (mm)	14.92	14.88	14.94	14.89
Weight (gr)	2.7617	2.8031	2.8292	2.8141
Geometrical density ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)	2.21	2.27	2.28	2.29
Actual amount of U (gr)	0.69	0.73	0.71	0.71
Enrichment (%)	7.91	8.13	8.13	8.13
Actual amount of ^{235}U (gr)	0.0549	0.0593	0.0577	0.0577
C.P. packing fraction (%)	22.1	22.7	22.2	22.3
Coated particles dispersed	72FC1	73FC1	73FC1	73FC1
Binder	phenol resin	phenol resin	phenol resin	phenol resin
Binder content (%)	14	20	20	20
Graphite powder	ICG	NCG	ICG	P ₂ N ₈

Table 6 Characteristics of coated particles dispersed in 73FP1B, 72FP2B and 73FP3B fuel compact for 72F-9A capsule

Batch No.			73FC1
Kernel	Chemical form		UO ₂
	Uranium enrichment (%)		8.13
	Diameter (μm)		506.3
	Theoretical density (%TD)		96.8
	O/U ratio		2.005
Coating	Buffer layer	Material	PyC
		Source gas	C ₂ H ₂
		Thickness (μm)	41.2
		Density (g/cm ³)	1.03
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	25.9
		Density (g/cm ³)	1.79
		BAF	1.04
	SiC layer	Material	SiC
		Source gas	CH ₃ SiCl ₃
		Thickness (μm)	29.2
		Density (g/cm ³)	3.2
		Free Si (wt %)	0.26
	HDI PyC layer	Material	PyC
		Source gas	C ₃ H ₆
		Thickness (μm)	47.2
		Density (g/cm ³)	1.79
		BAF	1.04
Coated particle	Diameter (μm)		752.1
	Crushing strength (Kg)		2.50
	Surface contamination		< 2 × 10 ⁻⁵

Table 7 Irradiation conditions of 71F-6A capsule

Reactor	JMTR
Irradiation hole	M-12
Thermal neutron flux (n/cm ² sec) (max)	4.9×10^{13}
Fast neutron flux ^a (n/cm ² sec) (max)	1.0×10^{14}
Irradiation cycle	¹⁷ (1972.10.9 - 1972.11.2) ¹⁸ (1972.11.16 - 1972.12.14)
Irradiation time (e.f.p.d.)	17 cycle 479.2 hr
	18 cycle 578.9 hr
	total 1058.1 hr
Irradiation temperature (°C)	1380

a: Neutron energy > 1.0 MeV

Table 8 Irradiation conditions of 72F-8A capsule

Reactor	JMTR
Irradiation hole	K-6
Thermal neutron flux (n·cm ⁻² ·sec ⁻¹) (max)	1.8×10^{14}
Fast neutron flux ^a (n·cm ⁻² ·sec ⁻¹) (max)	1.7×10^{14}
Irradiation cycle	³⁶ 1976.4.5 - 1976.4.30 ³⁷ 1976.5.24 - 1976.6.18
Irradiation time (e.f.p.h.)	36 cycle 450.4
	37 cycle 526.2
	total 976.6
Irradiation temp. (°C)	800 - 1500

a: Neutron energy > 1.0 MeV

Table 9 Irradiation conditions of 72F-9A capsule

Reactor	JMTR
Irradiation hole	K-6
Thermal neutron flux ($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$) (max)	1.8×10^{14}
Fast neutron flux ($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$) (max)	1.7×10^{14}
Irradiation cycle	32 cycle 1975.3.17 - 1975.4.11 33 cycle 1975.5.29 - 1975.6.17 34 cycle 1975.12.10 - 1976.1.22 35 cycle 1976.2.17 - 1976.3.13
Irradiation time (e.f.p.h.)	32 cycle 520.4 33 cycle 488.6 34 cycle 520.8 35 cycle 529.3 total 1859.1
Irradiation temp. ($^{\circ}\text{C}$)	700 - 1340

Table 10 Irradiation temperature of 71F-6A capsule

T/C No.	17 Cycle						18 Cycle Dec. 17*	T/C position
	Oct. 12*	Oct. 16	Oct. 17*	Oct. 23*	Oct. 31	Dec. 2*		
1	790	1045	770	770	1080	730	745	Center of fuel compact (upper)
2	770	1100	-	-	1090	-	730	Center of fuel compact (upper)
3	870	1145	860	840	1125	820	830	Center of fuel compact (lower)
4	955	1255	920	910	1180	860	880	Center of fuel compact (lower)
5	300	500	310	310	520	305	310	Radiation shield (upper)
6	420	600	415	415	580	385	390	Radiation shield (lower)

*: Capsule was filled with He gas.

Table 11-a Irradiation temperature of 72F-8A capsule

Reactor cycle	Inner capsule	Temperature at fuel compact (°C)
Front half of 36 cycle	Upper	1130
	Intermediate	1510
	Lower	1210
Back half of 36 cycle	Upper	990
	Intermediate	1325
	Lower	1070
Front half of 37 cycle	Upper	880
	Intermediate	1185
	Lower	955
Back half of 37 cycle	Upper	835
	Intermediate	1120
	Lower	910

Table 11-b Irradiation temperature of 72F-9A capsule

Reactor cycle	Inner capsule	Temperature at fuel compact (°C)
Front half of 32 cycle	Upper	1170
	Intermediate	1340
	Lower	1150
Back half of 32 cycle	Upper	1050
	Intermediate	1340
	Lower	1225
Front half of 33 cycle	Upper	780
	Intermediate	1215
	Lower	970
Back half of 33 cycle	Upper	720
	Intermediate	1200
	Lower	910
Front half of 34 cycle	Upper	720
	Intermediate	1180
	Lower	970
Back half of 34 cycle	Upper	720
	Intermediate	1180
	Lower	970
Front half of 35 cycle	Upper	720
	Intermediate	1170
	Lower	960
Back half of 35 cycle	Upper	720
	Intermediate	1170
	Lower	960

Table 12 Fuel compacts irradiated in 72F-8A and 72F-9A capsule and their postirradiation examination

Capsule	Inner tube	Compact	PIE test
72F-8A	Upper	72FP1B2-11	Crushing
		" 1B4- 7	Metallography
		" 1B6- 1	"
		" 1B2- 6	"
		" 1B4- 8	Crushing
		" 1B6- 3	"
	Inter-mediate	72FP1B2- 7	Metallography
		" 1B4-11	"
		" 1B6- 5	"
		" 1B2- 8	Acid leaching
		" 1B4-13	"
		" 1B6- 6	"
	Lower	72FP1B7A-3	Metallography
		" 1B7B-2	"
		" 1B7C-1	"
		" 1B7A-9	Crushing
		" 1B7B-3	"
		" 1B7C-3	"
72F-9A	Upper	72FP1B1- 4	Crushing
		" " - 5	Acid leaching
		" " - 6	Metallography
		73FP1B - 7	Crushing
		" " - 8	Acid leaching
		" " - 9	Metallography
	Inter-mediate	73FP2B - 7	Crushing
		" " - 8	Acid leaching
		" " - 9	Metallography
		73FP3B - 7	"
		" " - 8	Acid leaching
		" " - 9	Crushing
	Lower	73FP1B -10	Metallography
		" " -11	Acid leaching
		73FP2B -10	Metallography
		" " -11	Acid leaching
		73FP3B -10	Metallography
		" " -11	Acid leaching

Table 13 Radiation induced dimensional change of fuel compacts irradiated in F1F-6A capsule

Inner capsule	Compact No.	Outer diameter			
		D_i (mm) Before irradi.	D_f (mm) After irradi.	$\Delta D = D_f - D_i$ (mm)	$\frac{\Delta D}{D_i}$ (%)
Upper	71FP4A-3	24.00	23.95	-0.05	-0.21
	71FP5A-4	24.03	24.00	-0.03	-0.12
Lower	71FP4A-4	24.02	23.94	-0.08	-0.33
	71FP5A-1	24.03	23.99	-0.04	-0.17
Inner capsule	Compact No.	Inner diameter			
		d_i (mm) Before irradi.	d_f (mm) After irradi.	$\Delta d = d_f - d_i$ (mm)	$\frac{\Delta d}{d_i}$ (%)
Upper	71FP4A-3	8.02	7.79	-0.23	-2.87
	71FP5A-4	8.02	7.86	-0.16	-2.00
Lower	71FP4A-4	8.02	7.84	-0.18	-2.24
	71FP5A-1	7.99	7.85	-0.14	-1.75
Inner capsule	Compact No.	Length			
		L_i (mm) Before irradi.	L_f (mm) After irradi.	$\Delta L = L_f - L_i$ (mm)	$\frac{\Delta L}{L_i}$ (%)
Upper	71FP4A-3	39.65	39.55	-0.10	-0.25
	71FP5A-4	40.15	40.05	-0.10	-0.25
Lower	71FP4A-4	39.75	39.65	-0.10	-0.25
	71FP5A-1	39.72	39.65	-0.07	-0.18

Table 14 Weight of fuel compacts irradiated in 71F-6A capsule

Inner capsule	Compact No.	Weight (g)	
		Before irradi.	After irradi.
Upper	71FP4A-3	32.177	32.429
	71FP5A-4	32.269	32.403
Lower	71FP4A-4	32.186	32.194
	71FP5A-1	33.361	33.318

Table 15 Acid leaching fraction of fuel compacts irradiated in 71F-6A capsule

Compact No.	Leaching fraction
71FP4A-3	1.3×10^{-3}
71FP4A-4	6.6×10^{-4}
71FP5A-4	5.2×10^{-4}

Table 16 Radiation induced outer diameter change of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

	Compact No.	Outer diameter			
		D_i (mm) Before irradi.	D_f (mm) After irradi.	$\Delta D = D_f - D_i$ (mm)	$\frac{\Delta D}{D_i}$ (%)
Upper inner capsule	72FP1B2-11	10.47	10.430	-0.04	-0.38
	72FP1B4-7	10.51	10.381	-0.129	-1.23
	72FP1B6-1	10.45	10.318	-0.132	-1.26
	72FP1B2-6	10.47	10.325	-0.145	-1.38
	72FP1B4-8	10.52	10.423	-0.097	-0.92
	72FP1B6-3	10.45	10.309	-0.141	-1.35
Intermediate inner capsule	72FP1B2-7	10.47	10.275	-0.195	-1.86
	72FP1B4-11	10.52	10.352	-0.168	-1.59
	72FP1B6-5	10.45	10.344	-0.146	-1.40
	72FP1B2-8	10.47	10.363	-0.107	-1.02
	72FP1B4-13	10.52	10.330	-0.190	-1.81
	72FP1B6-6	10.46	10.256	-0.204	-1.95
Lower inner capsule	72FP1B7A-3	10.52	10.417	-0.103	-0.98
	72FP1B7B-2	10.51	10.466	-0.044	-0.42
	72FP1B7C-1	10.50	10.389	-0.111	-1.06
	72FP1B7A-9	10.52	10.429	-0.091	-0.87
	72FP1B7B-3	10.52	10.346	-0.174	-1.65
	72FP1B7C-3	10.50	10.426	-0.074	-0.71

Table 17 Radiation induced inner diameter change of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

Inner capsule	Compact No.	Inner diameter			
		d_i (mm) Before irradi.	d_f (mm) After irradi.	$\Delta d = d_f - d_i$ (mm)	$\frac{\Delta d}{d_i}$ (%)
Upper	72FP1B2-11	1.96	2.00	+0.04	+2.04
	72FP1B4-7	1.98	2.00	+0.02	+1.01
	72FP1B6-1	1.96	1.96	0	0
	72FP1B2-6	1.95	1.99	+0.04	+2.05
	72FP1B4-8	1.97	2.00	+0.03	+1.52
	72FP1B6-3	1.96	2.00	+0.04	+2.04
Intermediate	72FP1B2-7	1.97	1.99	+0.02	+1.02
	72FP1B4-11	1.98	2.00	+0.02	+1.01
	72FP1B6-5	1.96	1.98	+0.02	+1.02
	72FP1B2-8	1.97	1.98	+0.01	+0.51
	72FP1B4-13	1.97	2.00	+0.03	+1.52
	72FP1B6-6	1.96	1.98	+0.02	+1.02
Lower	72FP1B7A-3	1.99	2.00	+0.01	+0.50
	72FP1B7B-2	1.99	2.02	+0.03	+1.51
	72FP1B7C-1	2.00	2.02	+0.02	+1.00
	72FP1B7A-9	1.99	2.00	+0.01	+0.50
	72FP1B7B-3	1.99	2.00	+0.01	+0.50
	72FP1B7C-3	2.00	2.01	+0.01	+0.50

Table 18 Radiation induced length change of
fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

Inner capsule	Compact No.	Length			
		L_i (mm) Before irradi.	L_f (mm) After irradi.	$\Delta L = L_f - L_i$ (mm)	$\frac{\Delta L}{L_i}$ (%)
Upper	72FP1B2-11	14.98	14.724	-0.256	-2.57
	72FP1B4-7	14.99	14.856	-0.134	-3.43
	72FP1B6-1	14.83	14.704	-0.126	-3.42
	72FP1B2-6	14.98	14.686	-0.294	-4.90
	72FP1B4-8	14.99	14.780	-0.210	-3.34
	72FP1B6-3	14.83	14.714	-0.116	-3.67
Intermediate	72FP1B2-7	14.98	14.654	-0.326	-6.03
	72FP1B4-11	14.99	14.712	-0.278	-5.17
	72FP1B6-5	14.81	14.648	-0.162	-4.00
	72FP1B2-8	14.98	14.708	-0.276	-3.94
	72FP1B4-13	14.99	14.774	-0.216	-5.17
	72FP1B6-6	14.74	14.556	-0.184	-5.24
Lower	72FP1B7A-3	14.95	14.818	-0.132	-2.95
	72FP1B7B-2	14.84	14.780	-0.060	-1.37
	72FP1B7C-1	14.82	14.782	-0.038	-2.51
	72FP1B7A-9	14.98	14.886	-0.094	-2.39
	72FP1B7B-3	14.85	14.766	-0.084	-4.02
	72FP1B7C-3	14.80	14.750	-0.050	-1.86

Table 19 Radiation induced outer diameter change of fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

Inner capsule	Compact No.	Outer diameter			
		D_i (mm) Before irradi.	D_f (mm) After irradi.	$\Delta D = D_f - D_i$ (mm)	$\frac{\Delta D}{D_i}$ (%)
Upper	72FP1B1-4	10.51	10.364	-0.146	-1.39
	72FP1B1-5	10.50	10.343	-0.157	-1.50
	72FP1B1-6	10.51	10.355	-0.155	-1.48
	73FP1B-7	10.47	10.310	-0.160	-1.53
	73FP1B-8	10.47	10.271	-0.199	-1.90
	73FP1B-9	10.47	10.299	-0.171	-1.63
Intermediate	73FP2B-7	10.46	10.201	-0.259	-2.48
	73FP2B-8	10.46	10.174	-0.286	-2.73
	73FP2B-9	10.46	10.151	-0.309	-2.95
	73FP3B-7	10.46	10.227	-0.233	-2.23
	73FP3B-8	10.46	10.241	-0.219	-2.09
	73FP3B-9	10.47	10.230	-0.240	-2.29
Lower	73FP1B-10	10.47	10.279	-0.191	-1.82
	73FP1B-11	10.47	10.244	-0.226	-2.16
	73FP2B-10	10.46	10.255	-0.205	-1.96
	73FP2B-11	10.46	10.276	-0.184	-1.76
	73FP2B-10	10.47	10.330	-0.140	-1.34
	73FP3B-11	10.46	10.249	-0.211	-2.02

Table 20 Radiation induced inner diameter change of fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

Inner capsule	Compact No.	Inner diameter			
		d_i (mm) Before irradi.	d_f (mm) After irradi.	$\Delta d = d_f - d_i$ (mm)	$\frac{\Delta d}{d_i}$ (%)
Upper	72FP1B1-4	1.98	2.02	+0.04	+2.02
	72FP1B1-5	1.97	2.01	+0.04	+2.03
	72FP1B1-6	1.98	2.01	+0.03	+1.52
	72FP1B-7	1.99	2.01	+0.02	+1.01
	73FP1B-8	1.99	2.01	+0.02	+1.01
	73FP1B-9	1.98	1.98	0	0
Intermediate	73FP2B-7	1.96	1.96	0	0
	73FP2B-8	1.96	1.94	-0.02	-1.02
	73FP2B-9	1.96	1.99	+0.03	+1.53
	73FP3B-7	1.97	1.97	0	0
	73FP3B-8	1.98	1.98	0	0
	73FP3B-9	1.97	1.99	+0.02	+1.02
Lower	73FP1B-10	1.98	1.99	+0.01	+0.51
	73FP1B-11	1.98	1.98	0	0
	73FP2B-10	1.96	1.95	-0.01	-0.51
	73FP2B-11	1.96	1.98	+0.02	+1.02
	73FP2B-10	1.97	1.99	+0.02	+1.02
	73FP3B-11	1.97	2.00	+0.03	+1.52

Table 21 Radiation induced length change of
fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

Inner capsule	Compact No.	Length			
		L_i (mm) Before irradi.	L_f (mm) After irradi.	$\Delta L = L_f - L_i$ (mm)	$\frac{\Delta L}{L_i}$ (%)
Upper	72FP1B1-4	14.84	14.778	-0.062	-0.42
	72FP1B1-5	14.95	14.736	-0.214	-1.43
	72FP1B1-6	14.96	14.726	-0.234	-1.56
	73FP1B-7	14.85	14.702	-0.148	-1.00
	73FP1B-8	14.88	14.756	-0.124	-0.83
	73FP1B-9	14.90	14.758	-0.142	-0.95
Intermediate	73FP2B-7	14.95	14.700	-0.250	-1.67
	73FP2B-8	14.95	14.624	-0.326	-2.18
	73FP2B-9	14.93	14.616	-0.314	-2.10
	73FP3B-7	14.85	14.602	-0.248	-1.67
	73FP3B-8	14.84	14.652	-0.188	-1.27
	73FP3B-9	14.90	14.704	-0.196	-1.32
Lower	73FP1B-10	14.90	14.772	-0.128	-0.86
	73FP1B-11	14.86	14.738	-0.122	-0.82
	73FP2B-10	14.94	14.744	-0.196	-1.31
	73FP2B-11	14.93	14.756	-0.174	-1.17
	73FP2B-10	14.93	14.774	-0.156	-1.05
	73FP3B-11	14.95	14.792	-0.158	-1.06

Table 22 Fractional dimensional change of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

	Compact No.	Fast neutron fluence ^a (n·cm ⁻²)	$\frac{\Delta D}{D_i}$ (%)	$\frac{\Delta L}{L_i}$ (%)
Upper	72FP1B2-11	6.52 ^{×10²⁰}	○ -0.38	● -1.71
	72FP1B4-7	7.07	△ -1.23	▲ -0.89
	72FP1B6-1	7.57	□ -1.26	■ -0.85
	72FP1B2-6	8.08	○ -1.38	● -1.96
	72FP1B4-8	8.54	△ -0.92	▲ -1.40
	72FP1B6-3	8.99	□ -1.35	■ -0.78
Intermediate	72FP1B2-7	11.94	○ -1.86	● -2.18
	72FP1B4-11	12.04	△ -1.59	▲ -1.86
	72FP1B6-5	12.10	□ -1.40	■ -1.09
	72FP1B2-8	12.12	○ -1.02	● -1.82
	72FP1B4-13	12.04	△ -1.81	▲ -1.44
	72FP1B6-6	11.96	□ -1.95	■ -1.25
Lower	72FP1B7A-3	10.48	◇ -0.98	◆ -0.88
	72FP1B7B-2	10.20	◇ -0.42	◆ -0.40
	72FP1B7C-1	9.90	◇ -1.06	◆ -0.26
	72FP1B7A-9	9.59	◇ -0.87	◆ -0.63
	72FP1B7B-3	9.25	◇ -1.65	◆ -0.57
	72FP1B7C-3	8.89	◇ -0.71	◆ -0.34

a: Neutron energy > 0.18 MeV

Table 23 Fractional dimensional change of fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

	Compact No.	Fast neutron fluence ^a (n·cm ⁻²)	$\frac{\Delta D}{D_i}$ (%)		$\frac{\Delta L}{L_i}$ (%)	
Upper	72FP1B1-4	12.56 ^{×10²⁰}	▽	-1.39	▼	-0.42
	72FP1B1-5	13.53	▽	-1.50	▼	-1.43
	72FP1B1-6	14.42	▽	-1.48	▼	-1.56
	73FP1B-7	15.35	○	-1.53	●	-1.00
	73FP1B-8	16.22	○	-1.90	●	-0.83
	73FP1B-9	16.85	○	-1.63	●	-0.95
Intermediate	73FP2B-7	22.64	△	-2.48	▲	-1.67
	73FP2B-8	22.76	△	-2.73	▲	-2.18
	73FP2B-9	22.85	△	-2.95	▲	-2.10
	73FP3B-7	22.93	□	-2.23	■	-1.67
	73FP3B-8	22.89	□	-2.09	■	-1.27
	73FP3B-9	22.83	□	-2.29	■	-1.32
Lower	73FP1B-10	20.12	○	-1.82	●	-0.86
	73FP1B-11	19.55	○	-2.16	●	-0.82
	73FP2B-10	18.95	△	-1.96	▲	-1.31
	73FP2B-11	18.28	△	-1.76	▲	-1.17
	73FP3B-10	17.61	□	-1.34	■	-1.05
	73FP3B-11	16.85	□	-2.02	■	-1.06

a: Neutron energy > 0.18 MeV

Table 24 Weight of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

Inner capsule	Compact No.	Weight			
		W_i (g) Before irradi.	W_f (g) After irradi.	$\Delta W = W_f - W_i$ (g)	$\frac{\Delta W}{W_i}$ (%)
Upper	72FP1B2-11	2.8599	2.8581	-0.0018	-0.06
	72FP1B4-7	2.7599	2.7945	+0.0346	+1.25
	72FP1B6-1	2.8165	2.8051	-0.0336	-1.19
	72FP1B2-6	2.8605	2.8592	-0.0013	-0.05
	72FP1B4-8	2.8089	2.8060	-0.0029	-0.10
	72FP1B6-3	2.8237	2.8202	-0.0035	-0.12
Intermediate	72FP1B2-7	2.8625	2.8613	-0.0012	-0.04
	72FP1B4-11	2.8108	2.8073	-0.0035	-0.12
	72FP1B6-5	2.8206	2.8165	-0.0041	-0.15
	72FP1B2-8	2.8602	2.8581	-0.0021	-0.07
	72FP1B4-13	2.8186	2.8152	-0.0034	-0.12
	72FP1B6-6	2.8247	2.8192	-0.0055	-0.19
Lower	72FP1B7A-3	2.7843	2.7859	0.0016	0.06
	72FP1B7B-2	2.7403	2.7392	-0.0011	-0.04
	72FP1B7C-1	2.7500	2.7483	-0.0017	-0.06
	72FP1B7A-9	2.7863	2.7877	0.0014	0.05
	72FP1B7B-3	2.7416	2.7493	0.0077	0.28
	72FP1B7C-3	2.7580	2.7564	-0.0016	-0.06

Table 25 Weight of fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

Inner capsule	Compact No.	Weight			
		W_i (g) Before irradi.	W_f (g) After irradi.	$\Delta W = W_f - W_i$ (g)	$\frac{\Delta W}{W_i}$ (%)
Upper	72FP1B1-4	2.7611	2.7562	-0.0049	-0.18
	72FP1B1-5	2.7629	2.7573	-0.0056	-0.20
	72FP1B1-6	2.7610	2.7530	-0.008	-0.29
	73FP1B-7	2.8033	2.7915	-0.0118	-0.42
	73FP1B-8	2.8032	2.8001	-0.0031	-0.11
	73FP1B-9	2.8025	2.7994	-0.0031	-0.11
Intermediate	73FP2B-7	2.8277	2.8200	-0.0077	-0.27
	73FP2B-8	2.8311	2.8193	-0.0118	-0.42
	73FP2B-9	2.8295	2.8217	-0.0078	-0.27
	73FP3B-7	2.7924	2.7877	-0.0047	-0.17
	73FP3B-8	2.7930	2.7893	-0.0037	-0.13
	73FP3B-9	2.8258	2.8204	-0.0054	-0.19
Lower	73FP1B-10	2.8030	2.7995	-0.0035	-0.12
	73FP1B-11	2.8033	2.7997	-0.0036	-0.13
	73FP2B-10	2.8287	2.8230	-0.0057	-0.20
	73FP2B-11	2.8290	2.8232	-0.0058	-0.21
	73FP3B-10	2.8322	2.8306	-0.0016	-0.06
	73FP3B-11	2.8271	2.8359	0.0088	0.31

Table 26 Acid leaching fraction of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

Compact No.	Leaching fraction
72FP1B2-8	1×10^{-3}
72FP1B4-13	$< 10^{-4}$
73FP1B6-6	$< 10^{-4}$

Table 27 Acid leaching fraction of fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

Compact No.	Leaching fraction
72FP1B1-5 (Upper)	0.87×10^{-3}
73FP1B-8 (Upper)	0.84×10^{-3}
73FP2B-8 (Intermediate)	3.24×10^{-3}
73FP3B-8 (Intermediate)	2.21×10^{-3}
73FP1B-11 (Lower)	0.87×10^{-3}
73FP2B-11 (Lower)	0.90×10^{-3}
73FP3B-11 (Lower)	0.90×10^{-3}

Table 28 Crushing load of fuel compacts before and after irradiation

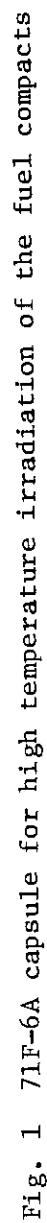
Capsule	Compact	Matrix	Binder content (w/o)	Particle loading (v/o)	Crushing load (kg/mm ²)		Fractional change (%)	Fast neutron fluence (n/cm ² ×10 ²¹)
					Before irradiation	After irradiation		
72F-8A	72FP1B2-11	ICG	20	22	10.90	12.34	+13.2	0.65
	72FP1B4-8	NCG	20	22	6.44(ave)	6.77	+ 5.1	0.85
	72FP1B6-3	PCG	20	22	7.38	8.09	+ 9.6	0.90
	72FP1B7A-9	P9N1	10-20	22	5.02	5.69	+13.3	0.96
	72FP1B7B-3	P5N5	10-20	22	3.83	4.19	+ 9.4	0.93
	72FP1B7C-3	P2N8	15	22	2.88	3.00	+ 4.2	0.89
72F-9A	72FP1B1-4	ICG	10	22	6.95	7.90	+13.7	1.26
	73FP1B-7	NCG	20	22	5.27	7.07	+34.2	1.54
	73FP2B-7	ICG	20	22	7.50	6.83	- 8.9	2.26
	73FP3B-9	P2N8	20	22	2.40	2.34	- 2.5	2.28

Table 29 Burn-up of coated particle fuel irradiated
in 72F-8A and 72F-9A capsule

Sample No.	Burn-up (% FIMA)	
	Coated particles in 72FP1B2-8 fuel compact ^{a)}	Coated particles in 73FP2B fuel compact ^{b)}
1	2.29	3.80
2	2.28	3.74
3	2.21	3.66
4	2.28	3.60
5	2.12	3.73

a) Irradiated in 72F-8A capsule

b) Irradiated in 72F-9A capsule



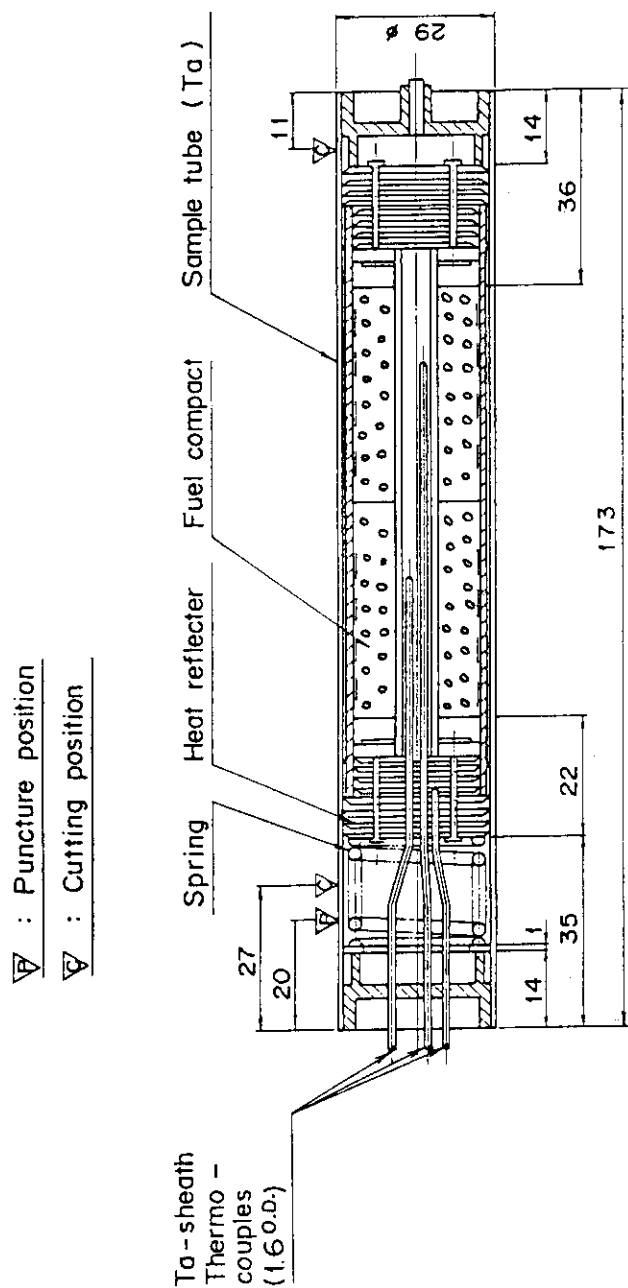


Fig. 2 Inner capsule of 71F-6A capsule

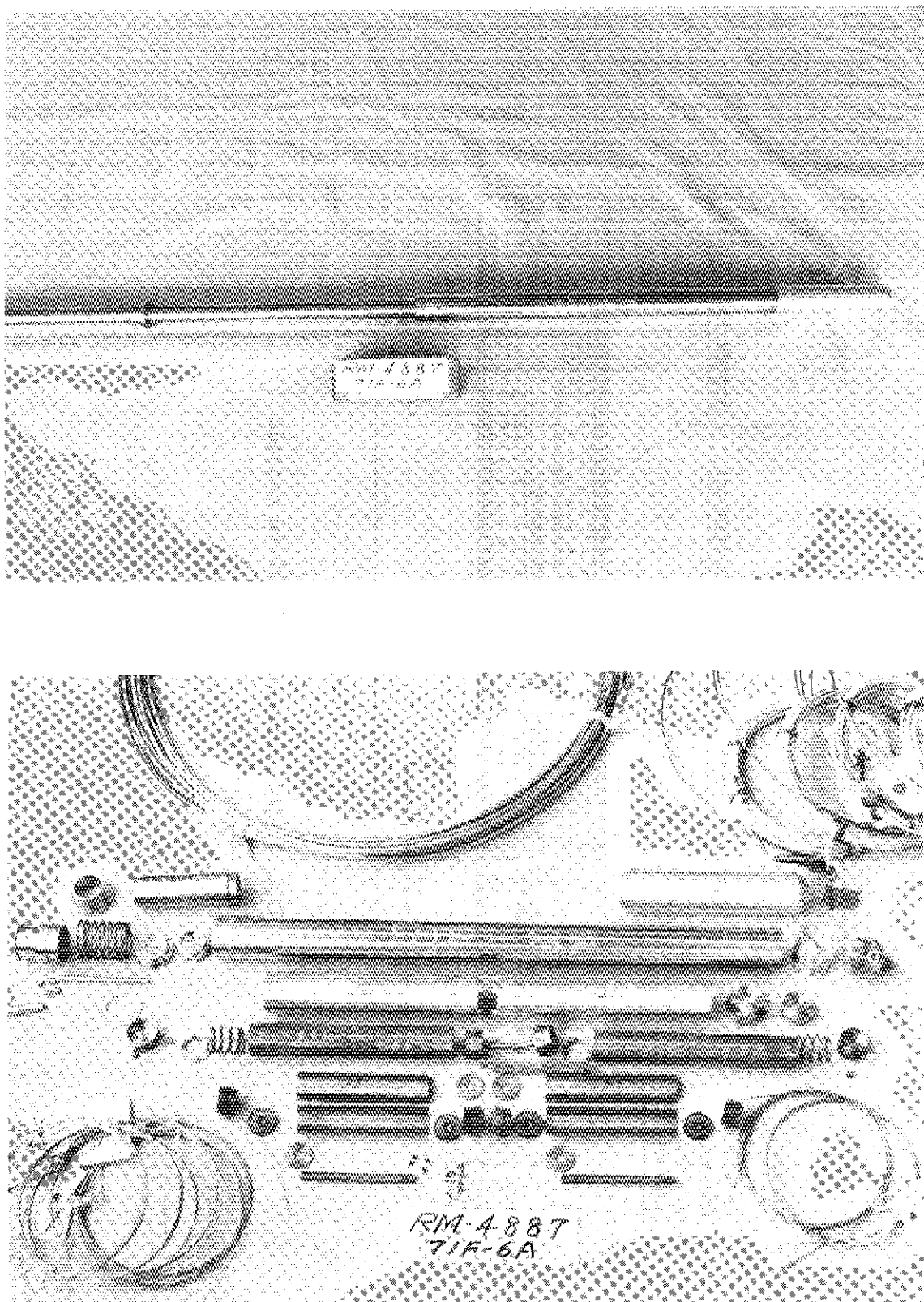


Fig. 3 Side view of 71F-6A capsule and its components

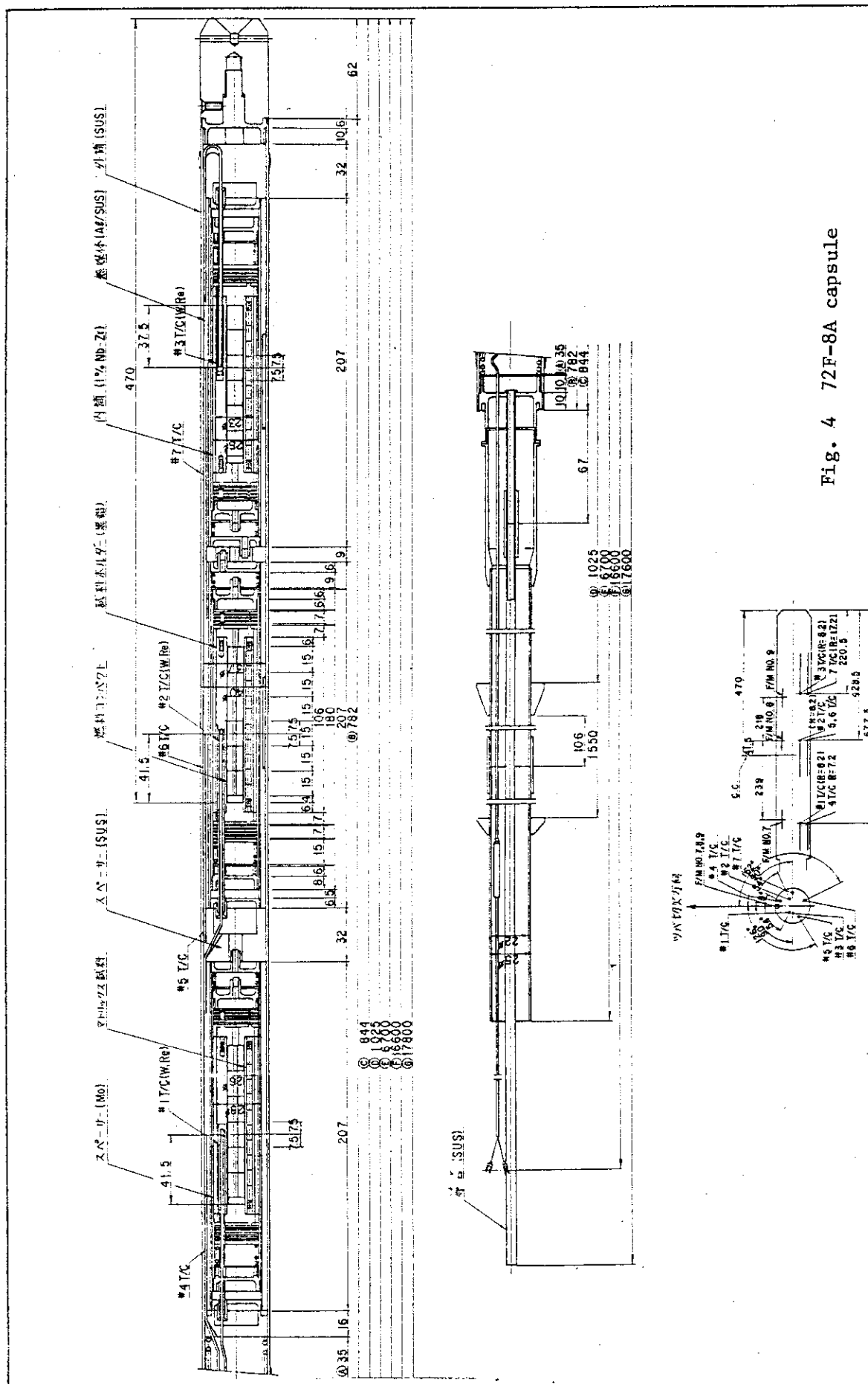


Fig. 4 72F-8A capsule

F/M 热量对比图

新刊72F-8Aキャブセル	三	角	／	()
朝 日 図 書	朝 日 図 書	朝 日 図 書	朝 日 図 書	朝 日 図 書
日本原子力研究所	日本原子力研究所	日本原子力研究所	日本原子力研究所	日本原子力研究所

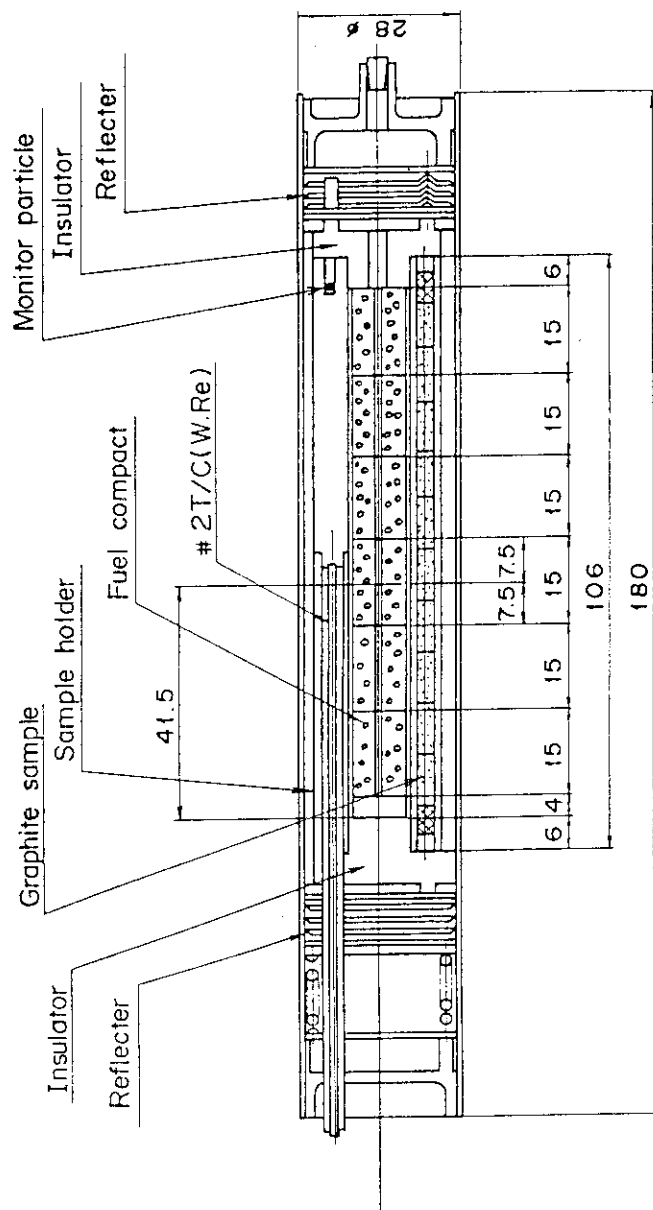


Fig. 5 Inner capsule of 72F-8A and 72F-9A capsule

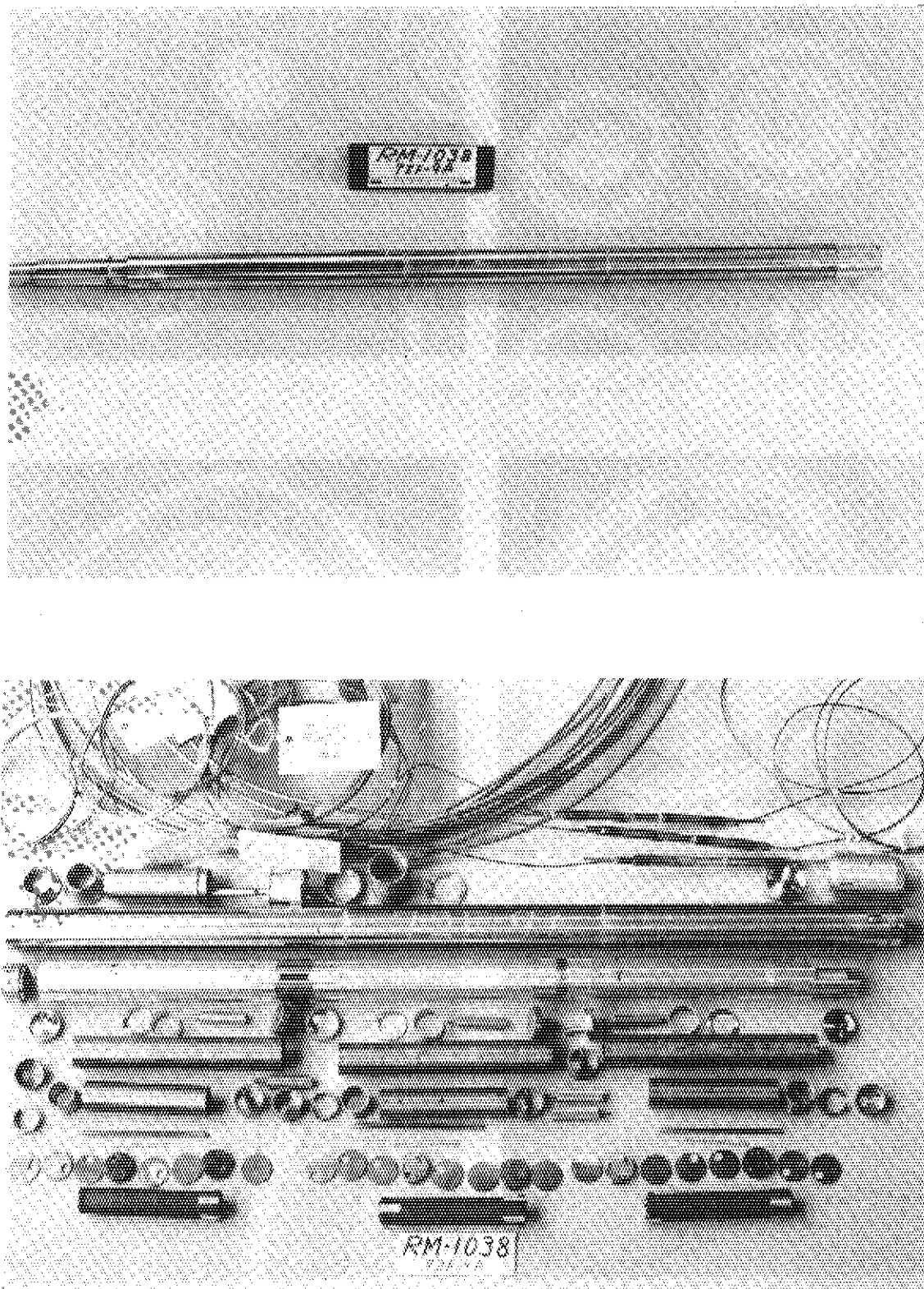


Fig. 6 Side view of 72F-9A capsule and its components

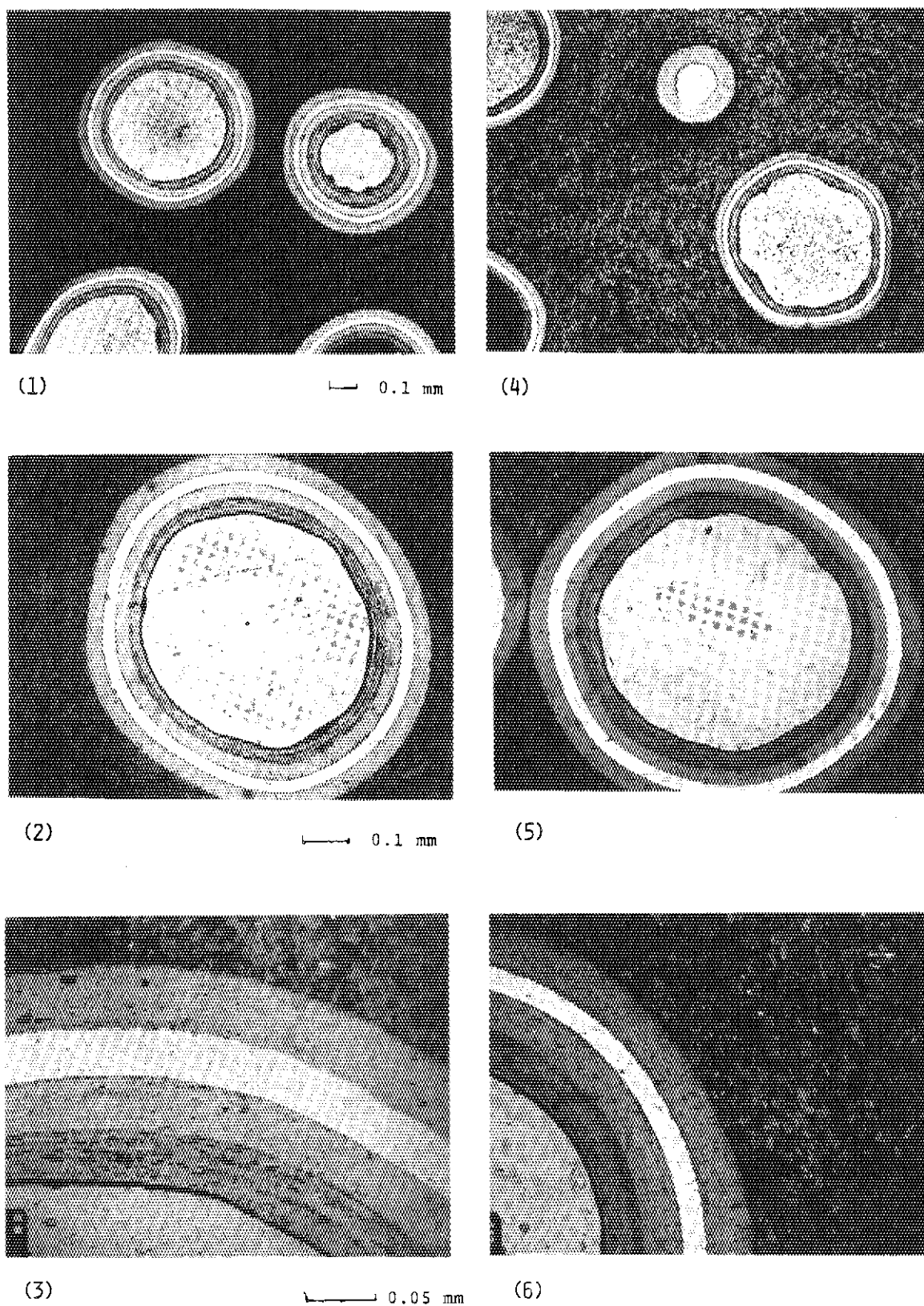


Fig. 7 Cross section of unirradiated fuel compacts for 71F-6A capsule
 (1),(2),(3) : 71FP4A fuel compact, (4),(5),(6): 71FP5A fuel capsule

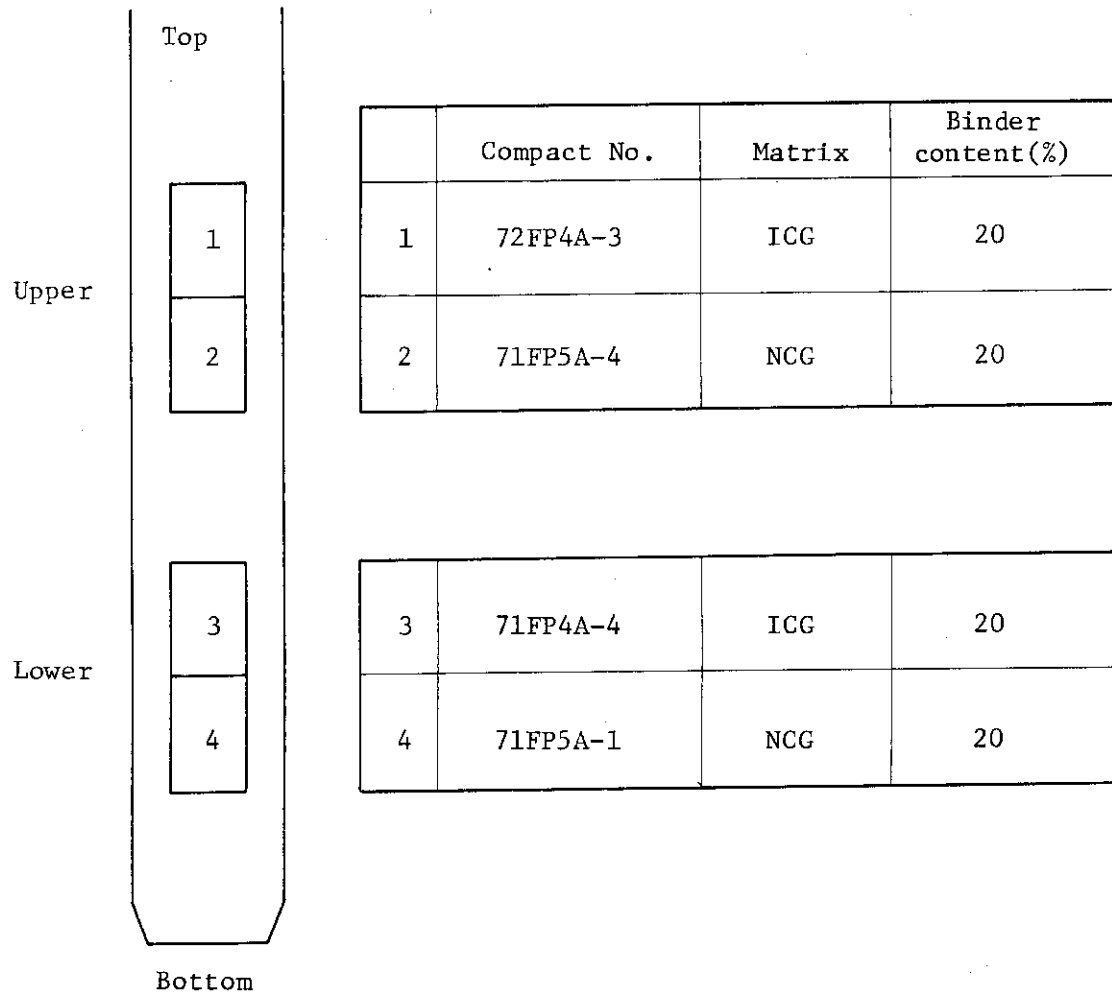
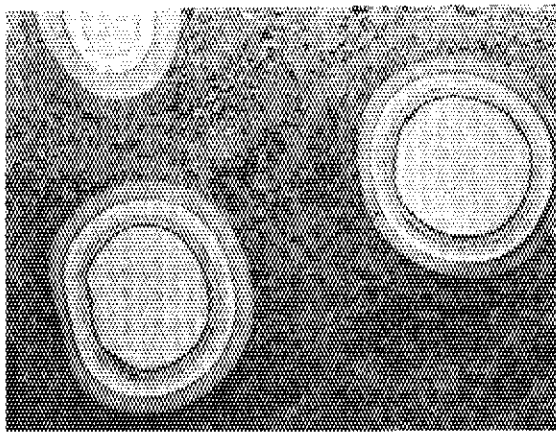
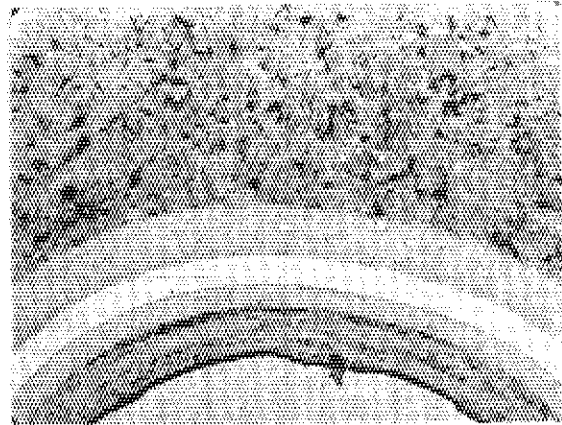


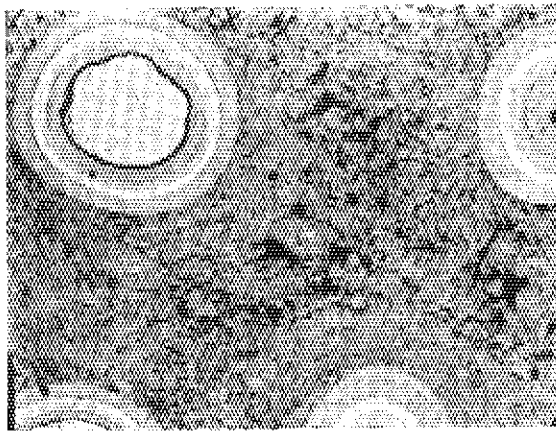
Fig. 8 Layout of fuel compacts in 71F-6A capsule



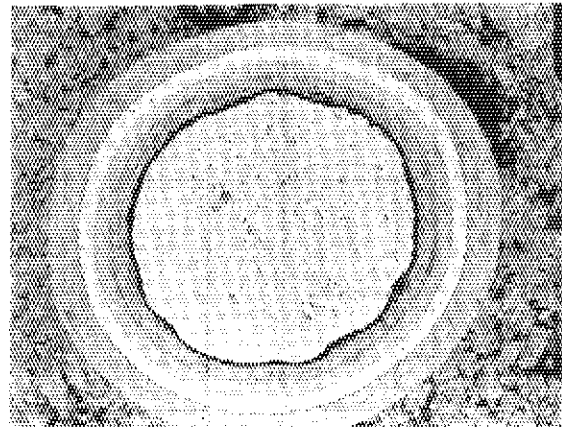
(1) MATRIX : ICG — 0.2 mm



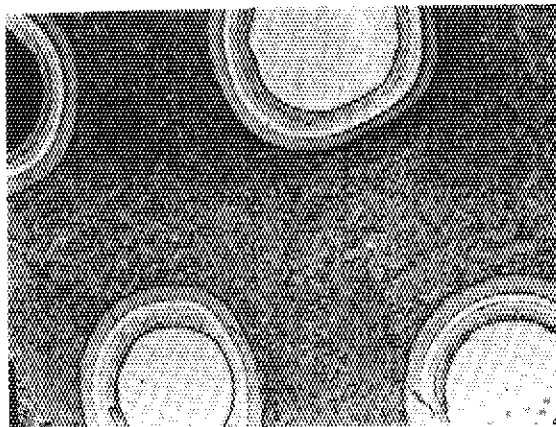
(2) MATRIX : ICG



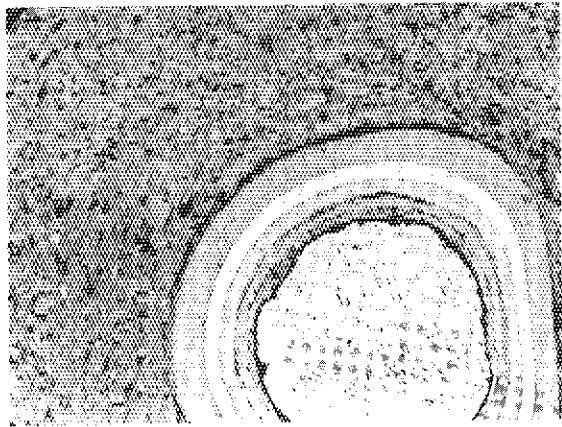
(3) MATRIX : PCG



(4) MATRIX : PCG — 0.1 mm



(5) MATRIX : NCG



(6) MATRIX : NCG

Fig. 9 Cross section of unirradiated fuel compacts for 72F-8A capsule
(1),(2) : 72FP1B2 fuel compact, (3),(4) : 72FP1B6 fuel compact,
(5),(6) : 72FP1B4 fuel compact

Upper	Top	1	1	72FP1B2-11	ICG	20
		2	2	72FP1B4-7	NCG	20
		3	3	72FP1B6-1	PCG	20
		4	4	72FP1B2-6	ICG	20
		5	5	72FP1B4-8	NCG	20
		6	6	72FP1B6-3	PCG	20
Inter- mediate		7	7	72FP1B2-7	ICG	20
		8	8	72FP1B4-11	NCG	20
		9	9	72FP1B6-5	PCG	20
		10	10	72FP1B2-8	ICG	20
		11	11	72FP1B4-13	NCG	20
		12	12	72FP1B6-6	PCG	20
Lower		13	13	72FP1B7A-3	P9N1	14
		14	14	72FP1B7B-2	P5N5	14
		15	15	72FP1B7C-1	P2N8	14
		16	16	72FP1B7A-9	P9N1	14
		17	17	72FP1B7B-3	P5N5	14
		18	18	72FP1B7C-3	P2N8	14
	Bottom					

Fig. 10 Layout of fuel compacts in 72F-8A capsule

Upper	Top	1	1	72FP1B1-4	ICG	14
		2	2	72FP1B1-5	ICG	14
		3	3	72FP1B1-6	ICG	14
		4	4	73FP1B-7	NCG	20
		5	5	73FP1B-8	NCG	20
		6	6	73FP13-9	NCG	20
Inter- mediate		7	7	73FP2B-7	ICG	20
		8	8	73FP2B-8	ICG	20
		9	9	73FP2B-9	ICG	20
		10	10	73FP3B-7	P2N8	20
		11	11	73FP3B-8	P2N8	20
		12	12	73FP3B-9	P2N8	20
Lower		13	13	73FP1B-10	NCG	20
		14	14	73FP1B-11	NCG	20
		15	15	73FP2B-10	ICG	20
		16	16	73FP2B-11	ICG	20
		17	17	73FP3B-10	P2N8	20
		18	18	73FP3B-11	P2N8	20
	Bottom					

Fig. 11 Layout of fuel compacts in 72F-9A capsule

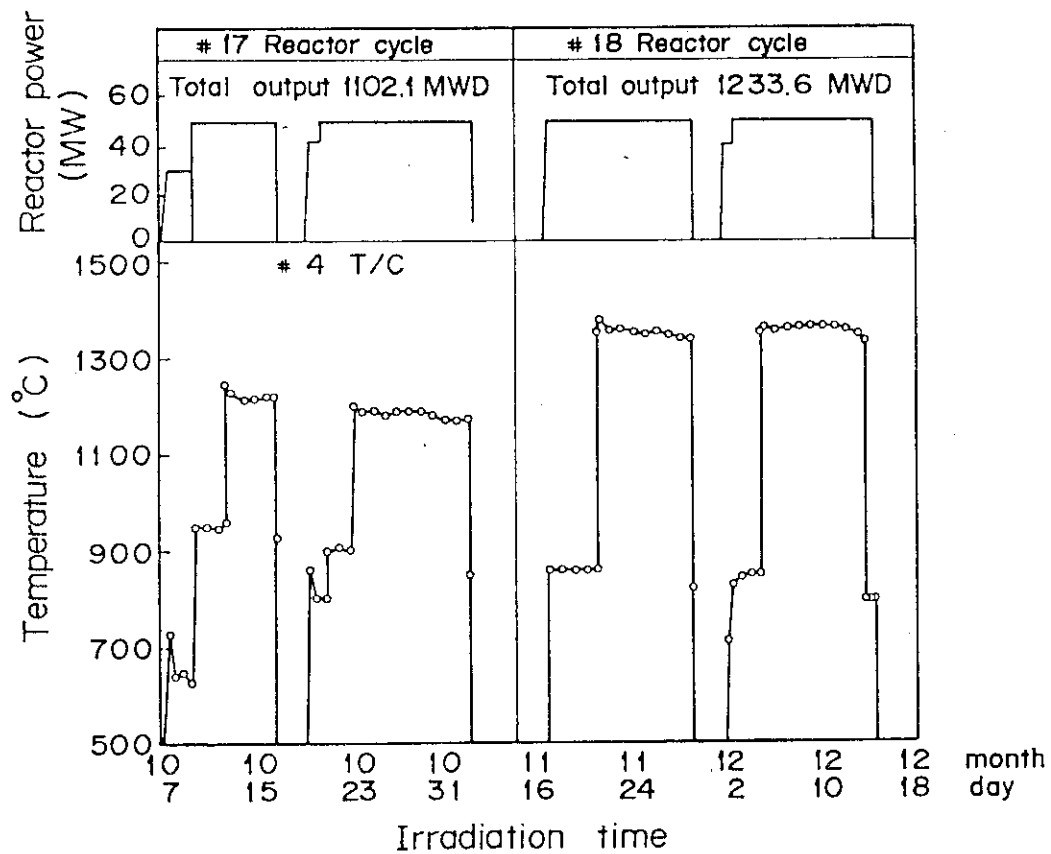


Fig. 12 Reactor power out-put and irradiation temperature of 71F-6A capsule

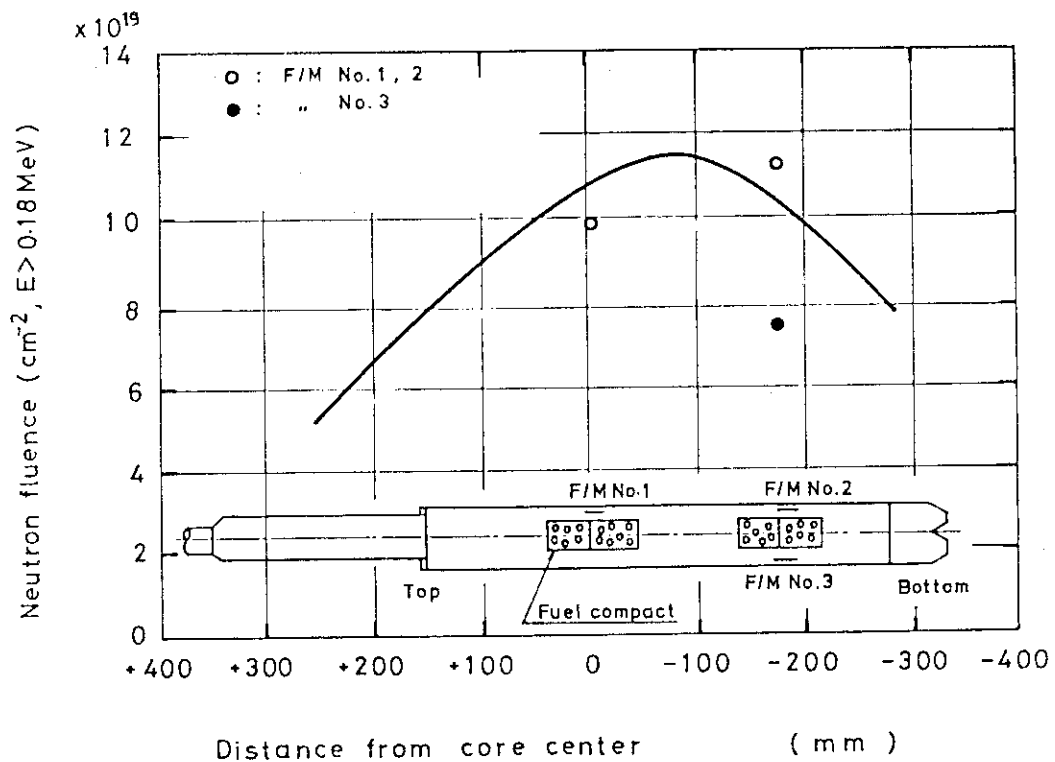


Fig. 13 Fast neutron fluence of 71F-6A capsule

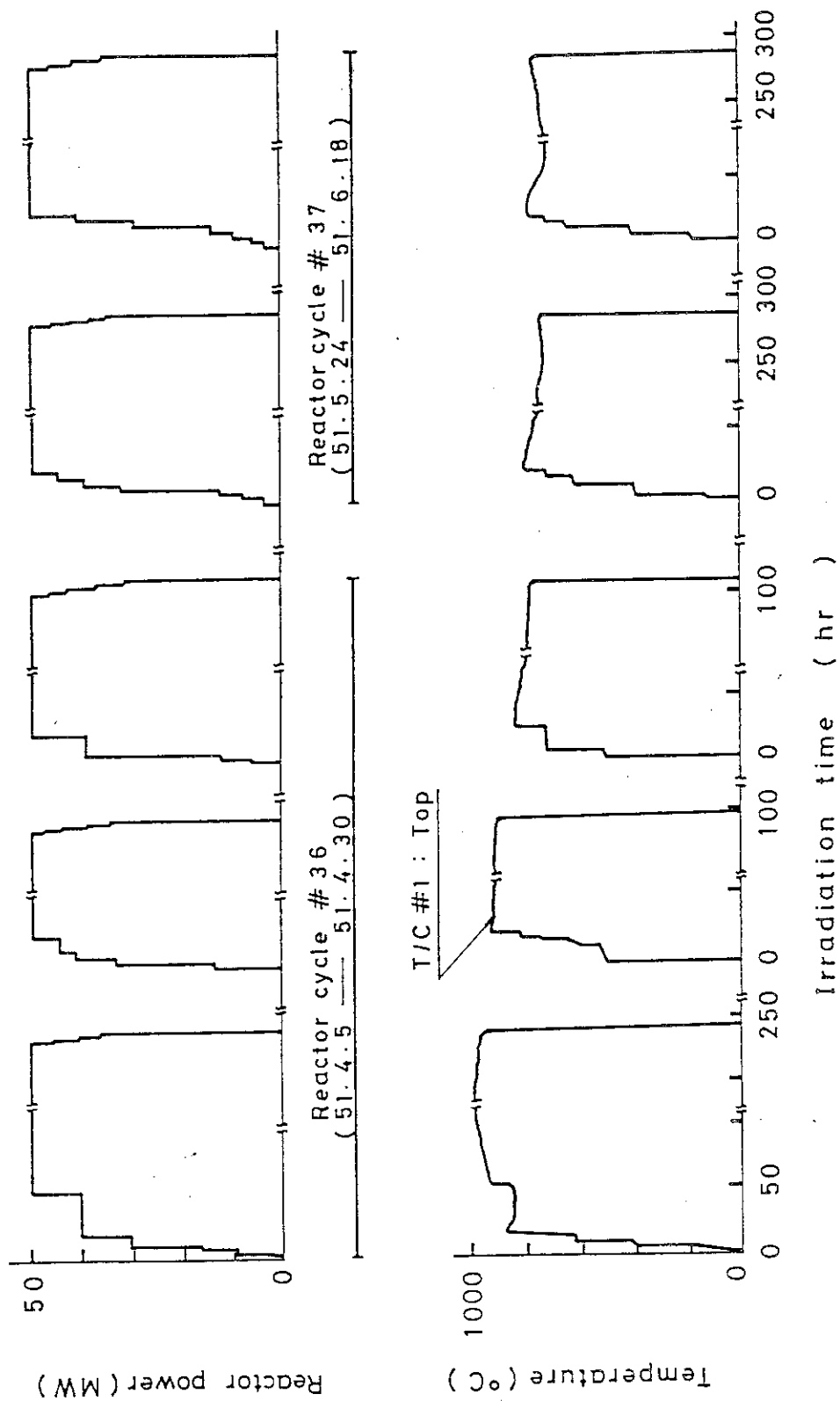


Fig. 14 JMTR power out-put and irradiation temperature of 72F-8A capsule

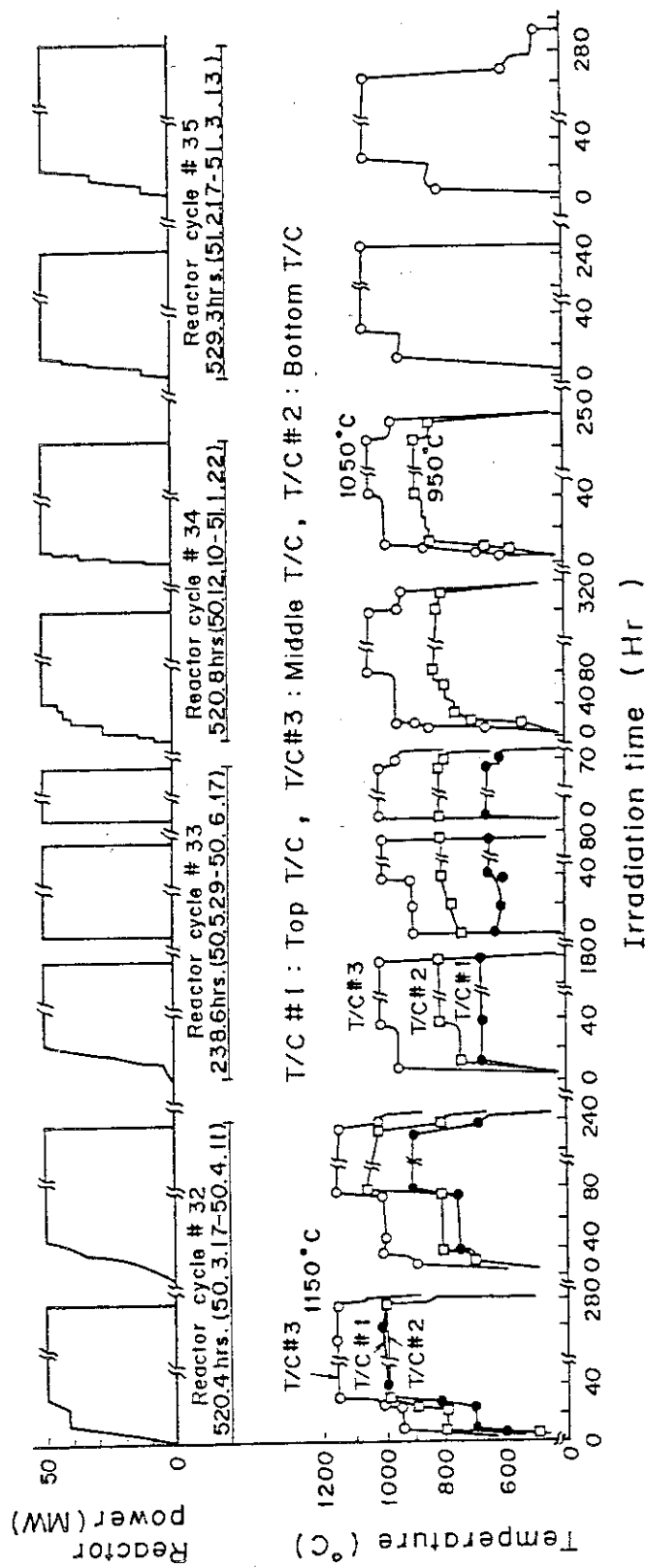


Fig. 15 JMTR power out-put and irradiation temperature of 72F-9A capsule

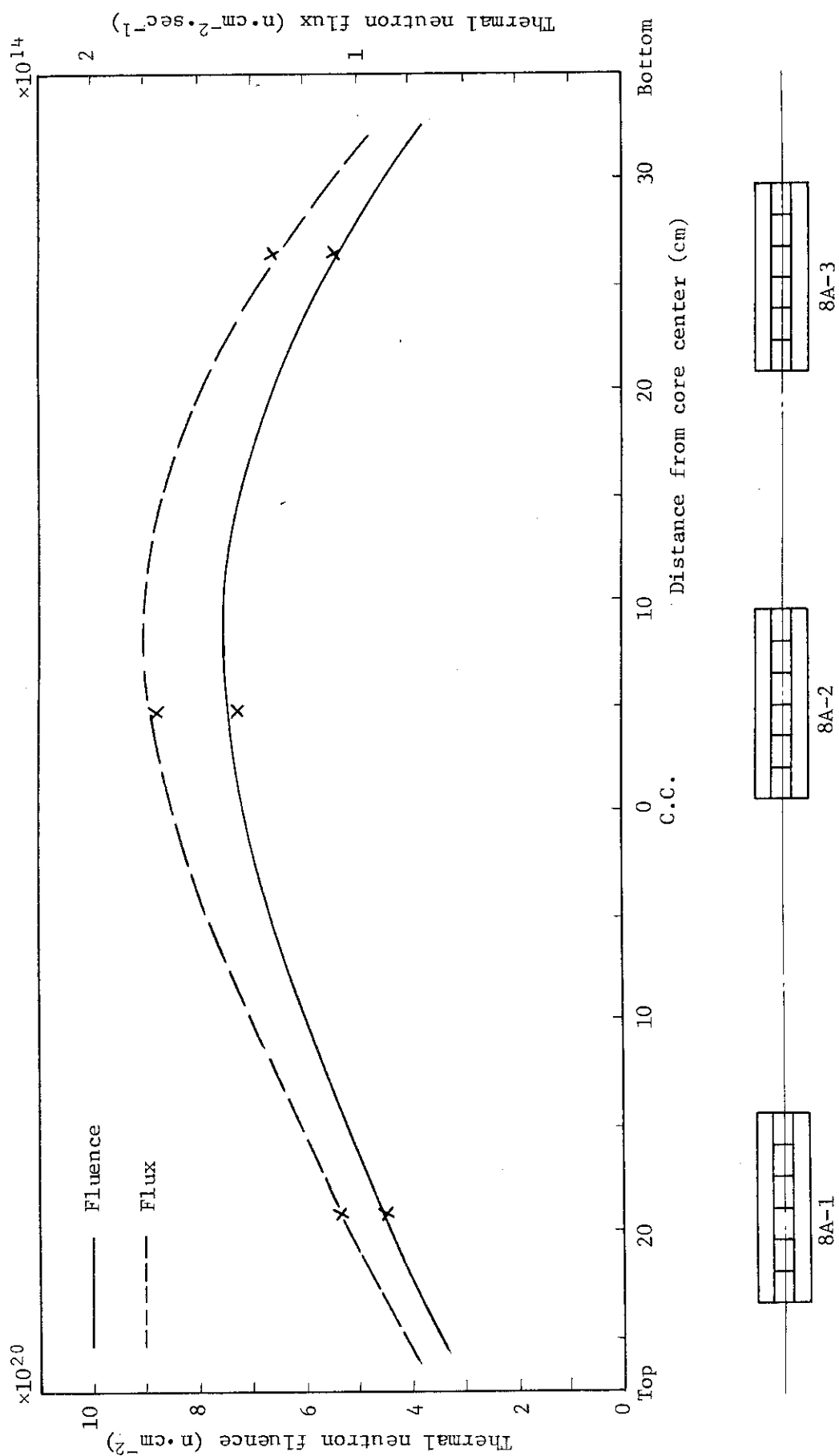
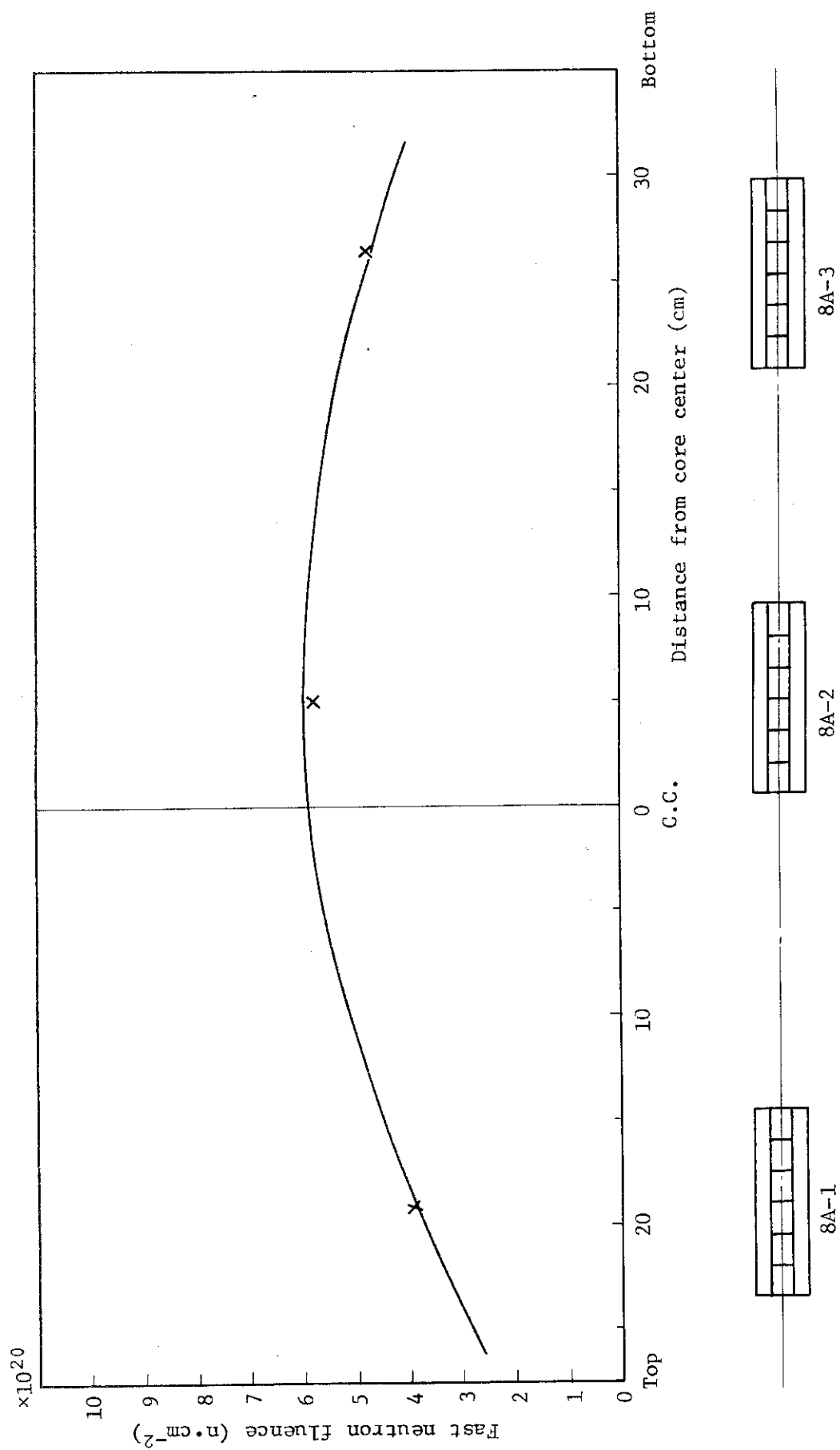


Fig. 16 Thermal neutron fluence of 72F-8A capsule

Fig. 17 Fast neutron fluence of 72F-8A capsule ($E > 1.0$ MeV)

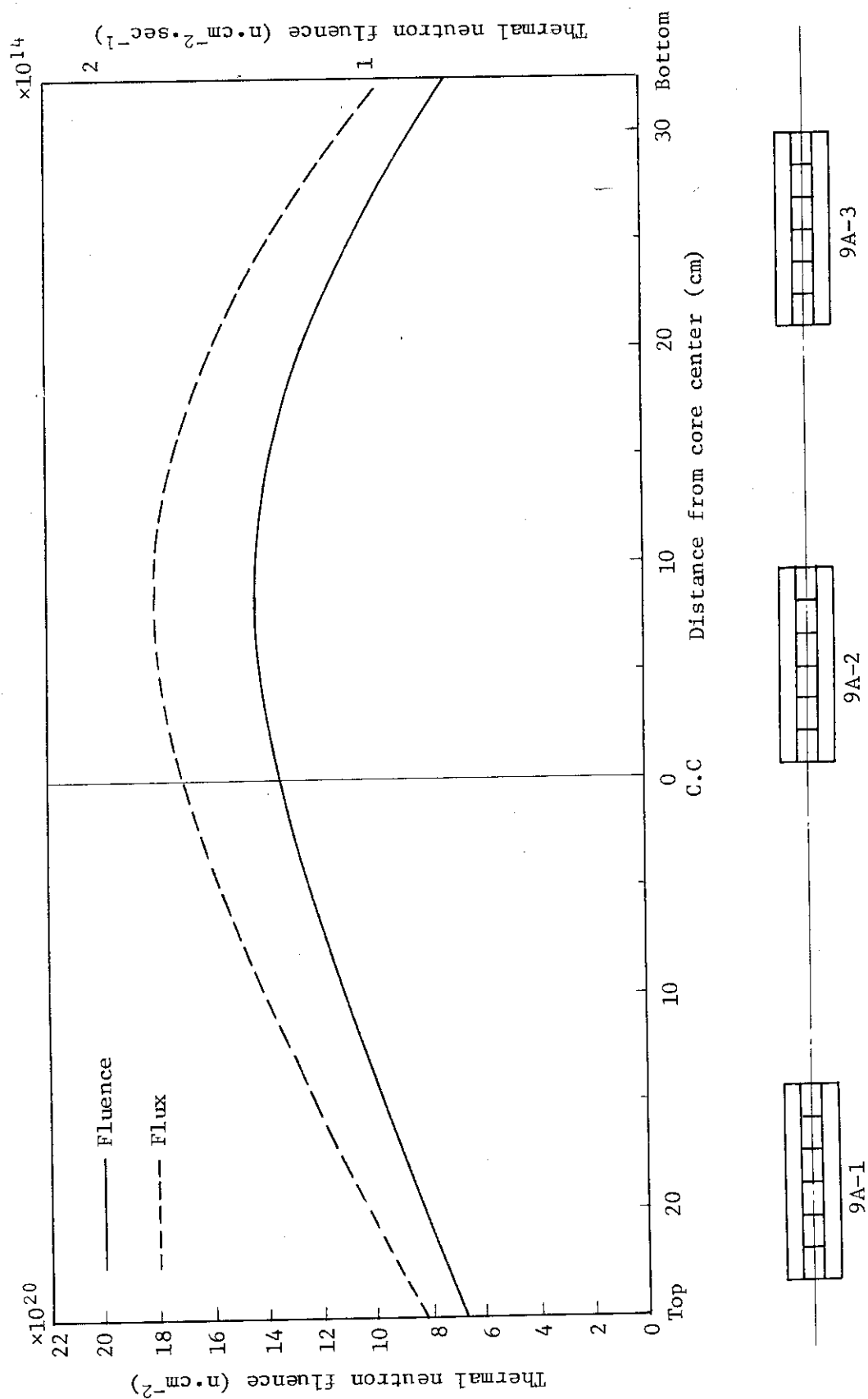


Fig. 18 Thermal neutron fluence of 72F-9A capsule

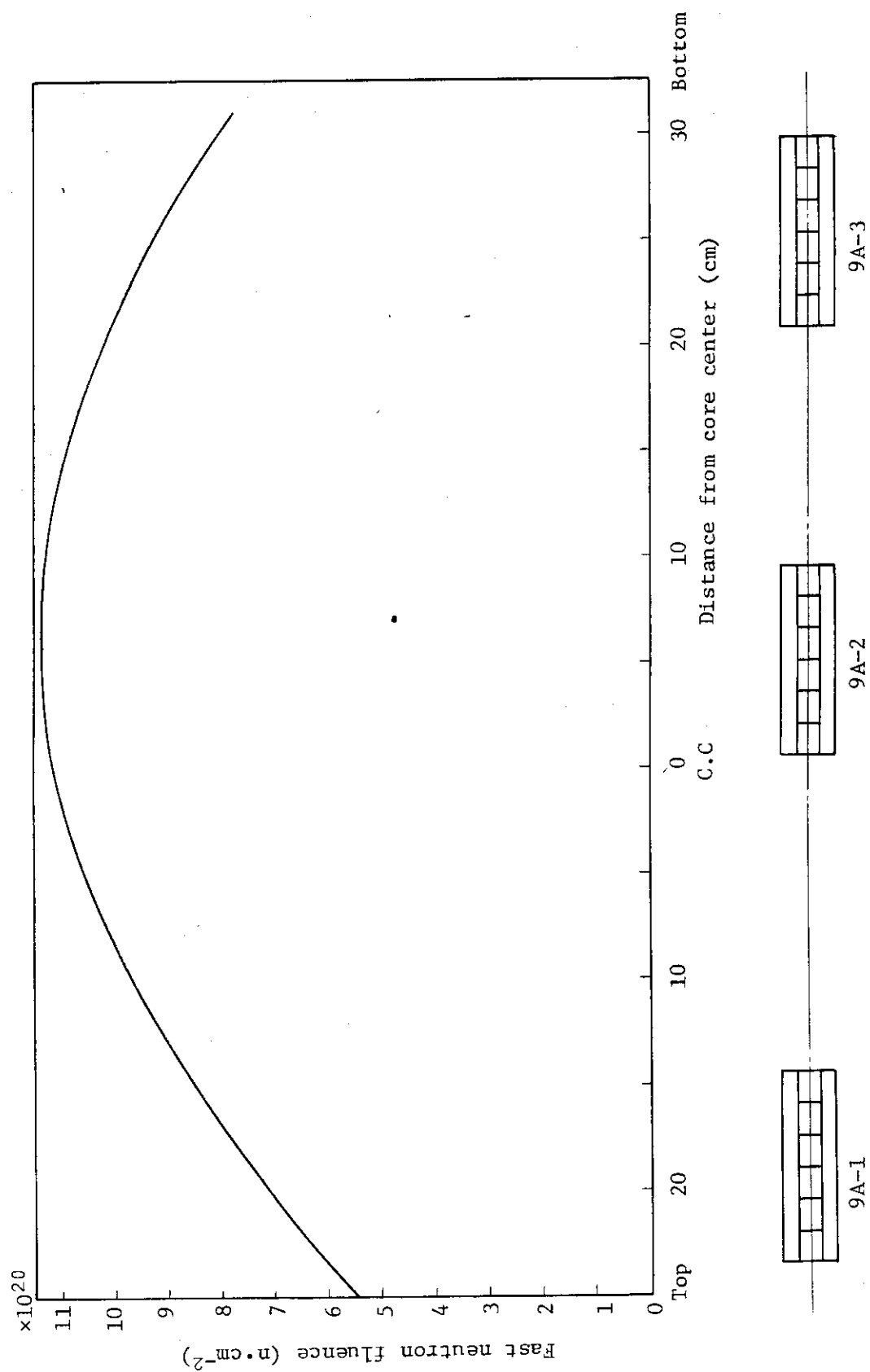
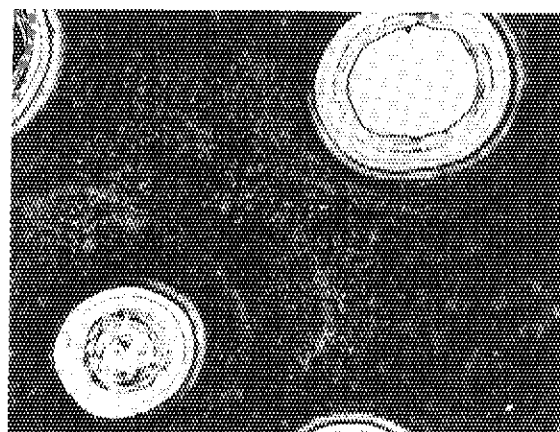
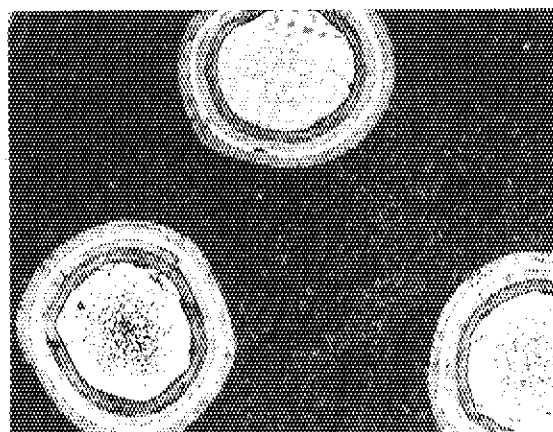


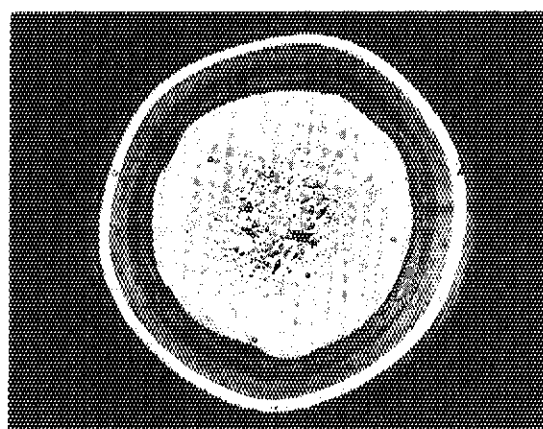
Fig. 19 Fast neutron fluence of 72F-9A capsule ($E > 1.0$ MeV)



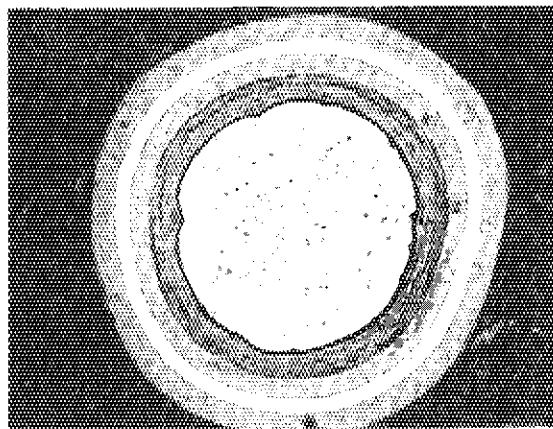
(1) MATRIX : ICG



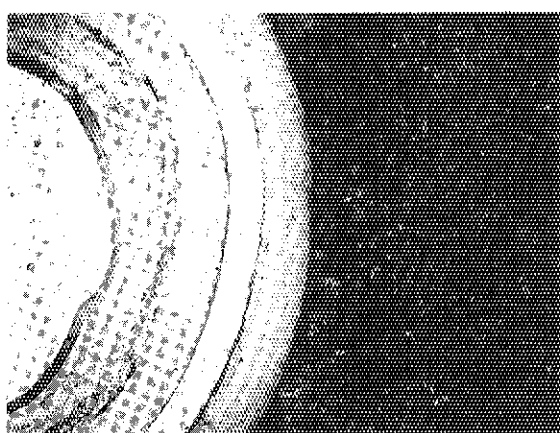
(4) MATRIX : ICG



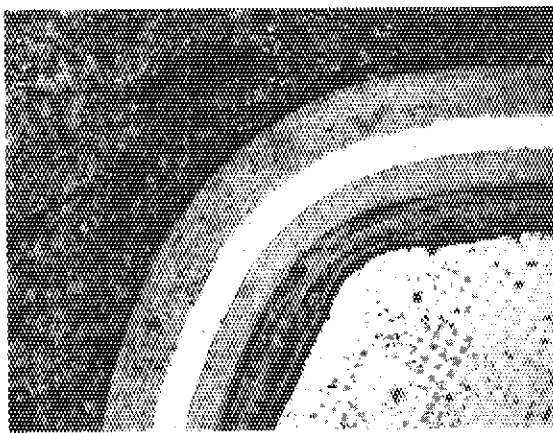
(2) MATRIX : ICG



(5) MATRIX : ICG



(3) MATRIX : ICG



(6) MATRIX : NCG

Fig. 20 Cross section of unirradiated fuel compact 71FP4A and 71FP5A after annealing

(1),(2),(3) : 71FP4A fuel compact, annealing temperature: 1600°C, annealing time : 250 hr

(4),(5) : 71FP4A fuel compact, (6) : 71FP5A fuel compact, annealing temperature: 1400 °C, annealing time : 1053 hr

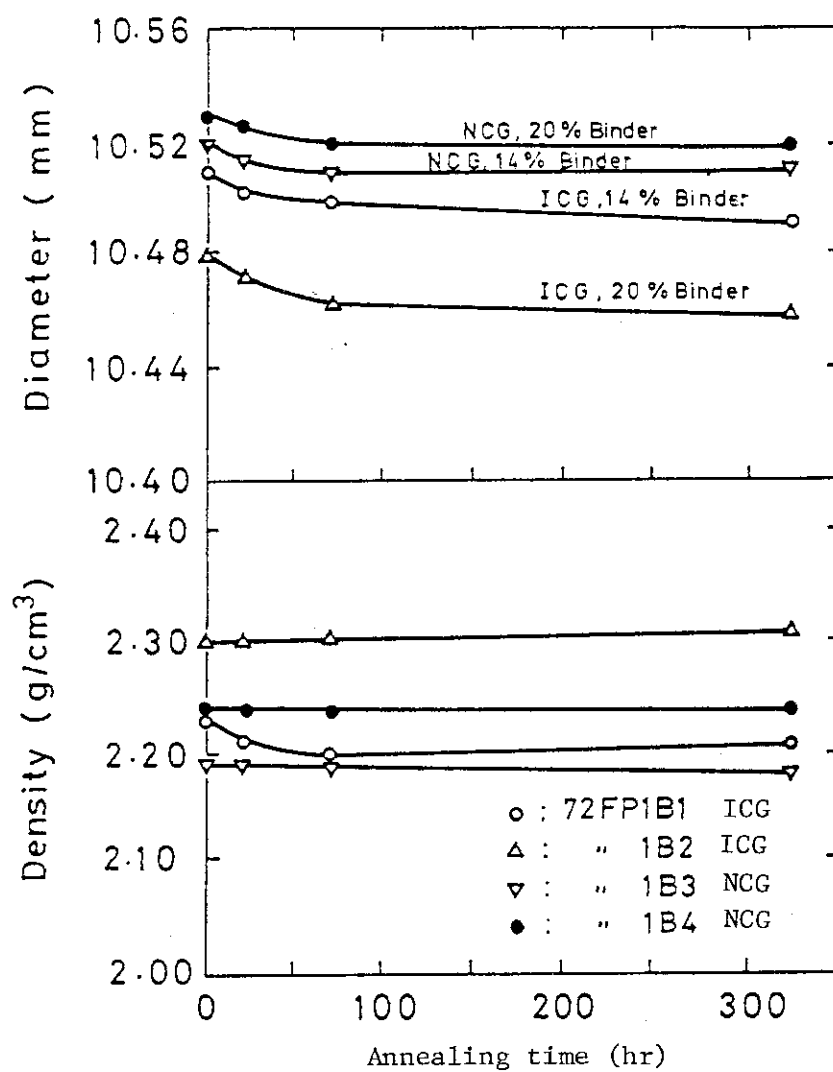


Fig. 21 Annealing-induced dimensional and density change of unirradiated fuel compacts
Annealing temperature : 1600 °C

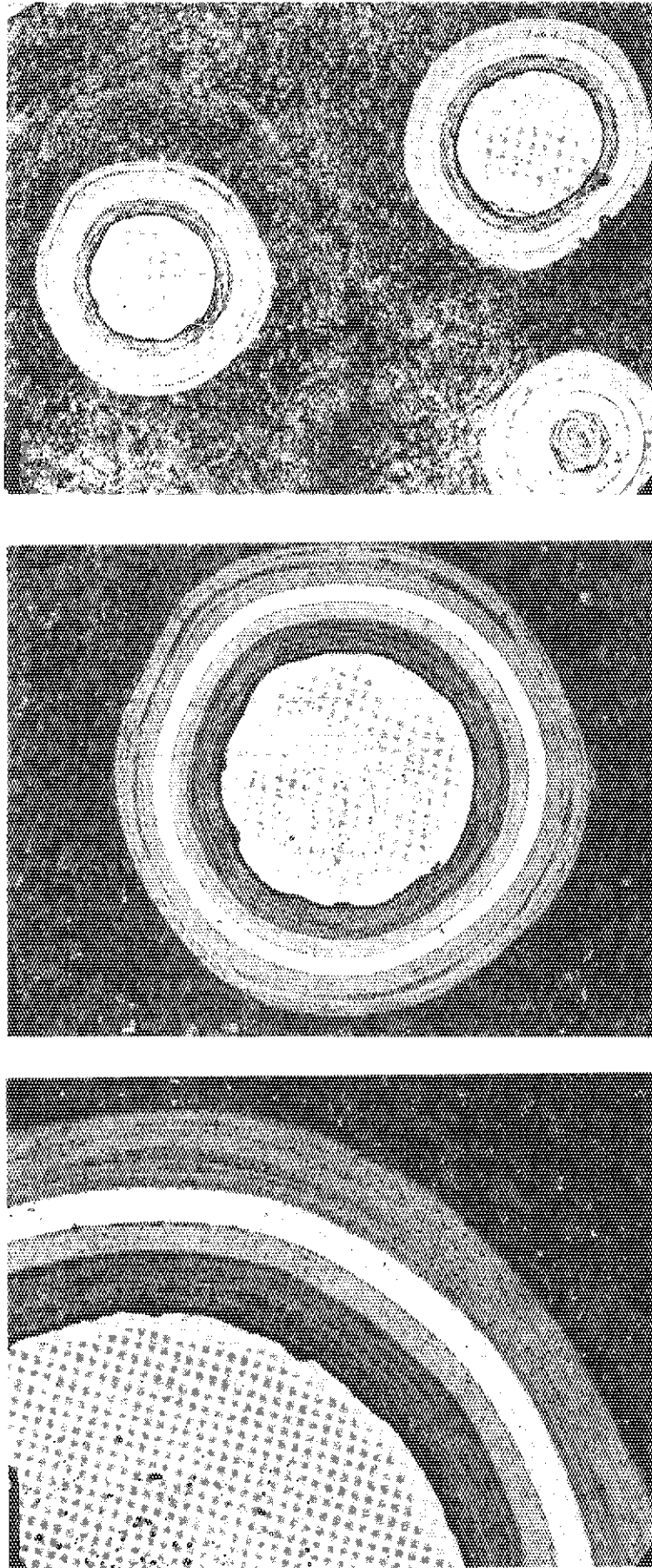


Fig. 22 Cross section of unirradiated fuel compact 72FP1B2 after annealing
annealing temperature : 1600 °C, annealing time : 325 hr

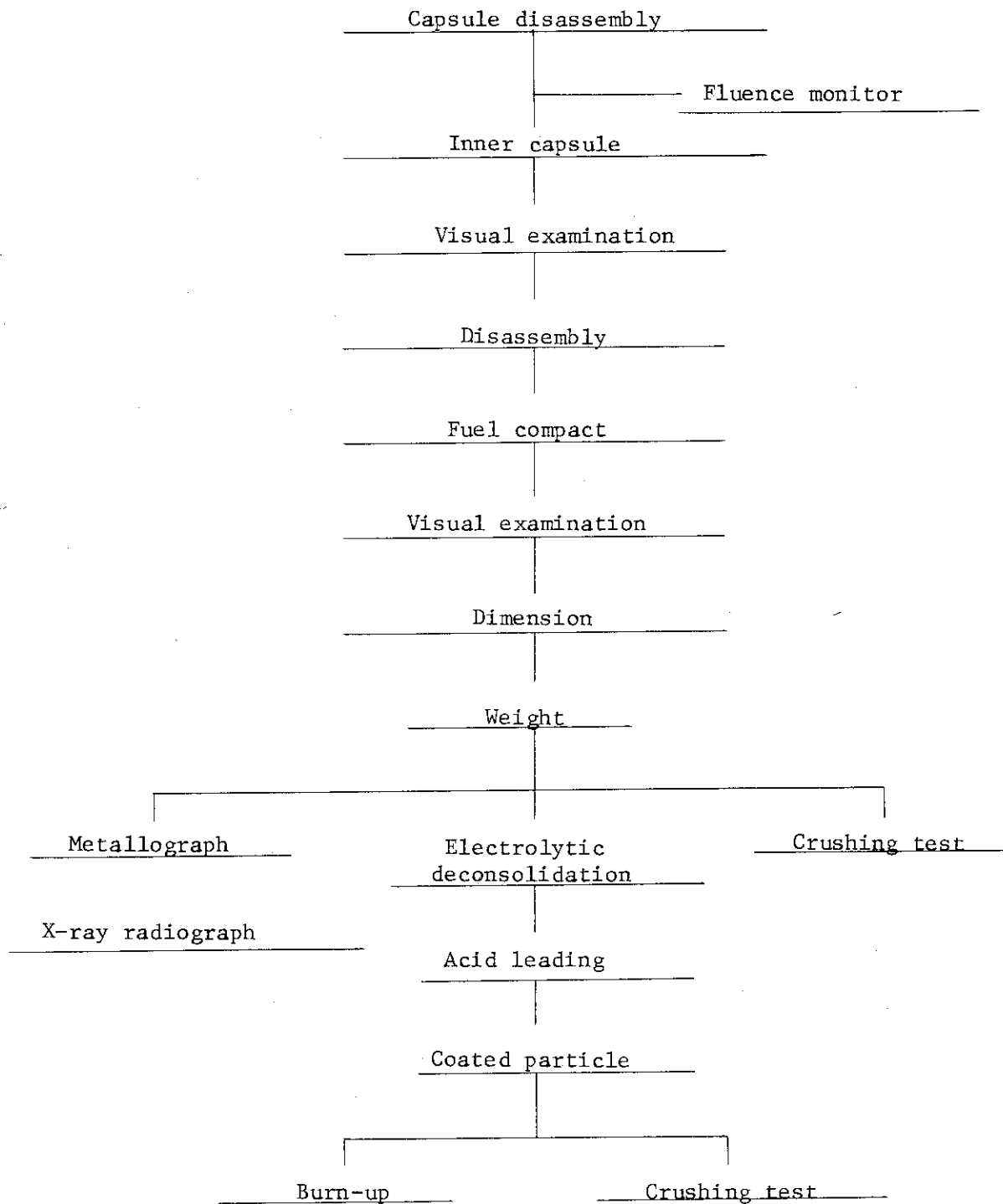


Fig. 23 Flow diagram of postirradiation examination

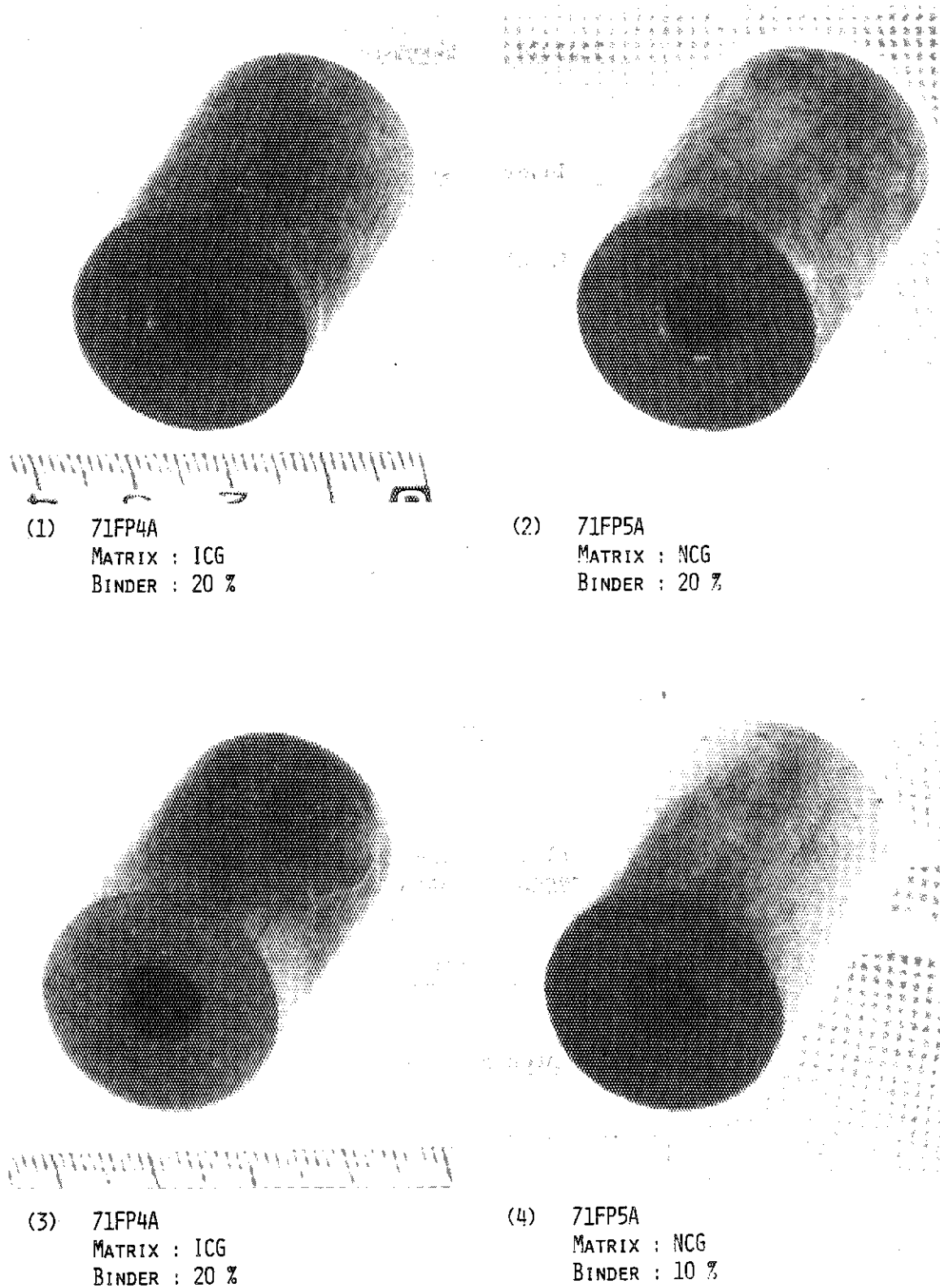
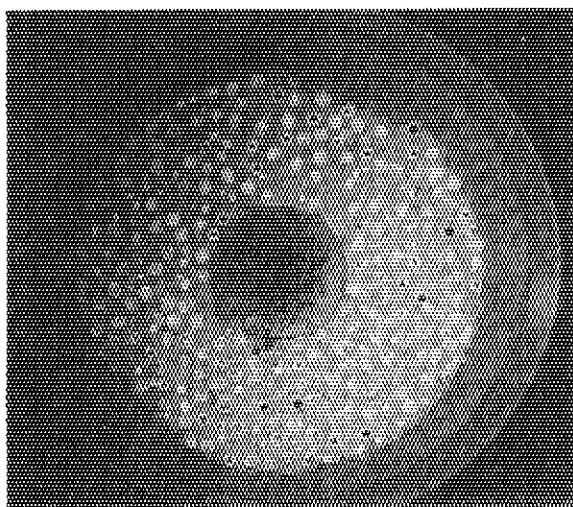
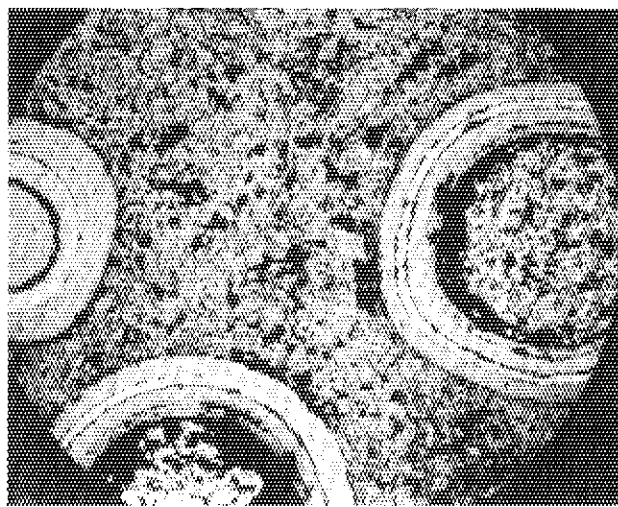


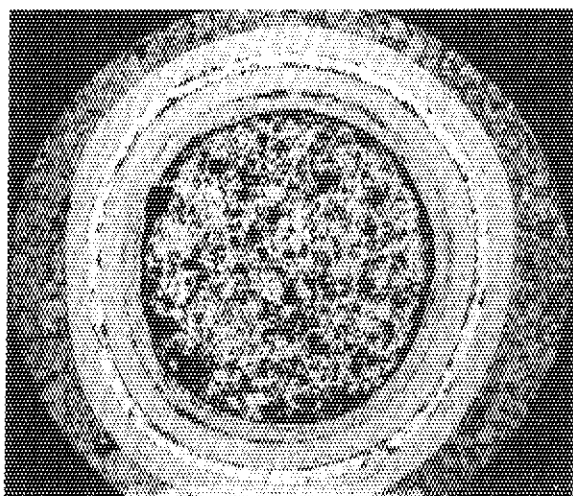
Fig. 24 External views of fuel compacts irradiated in 71F-6A capsule



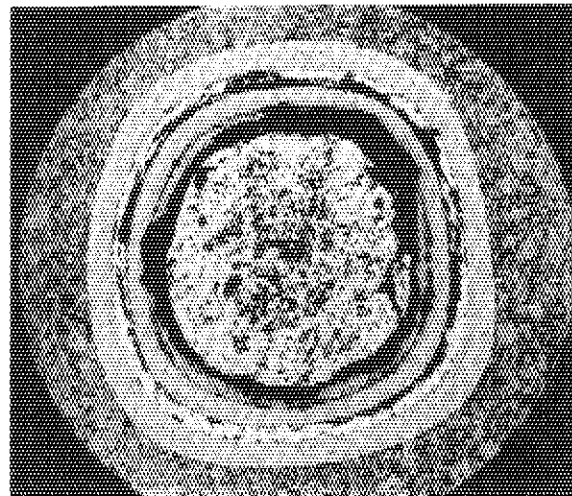
(1)



(2)

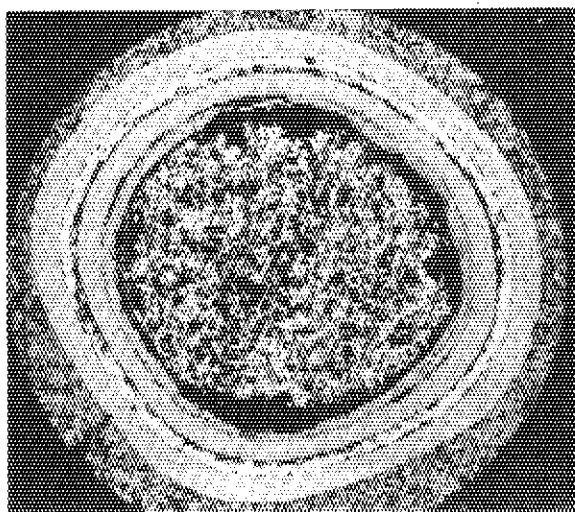


(3)

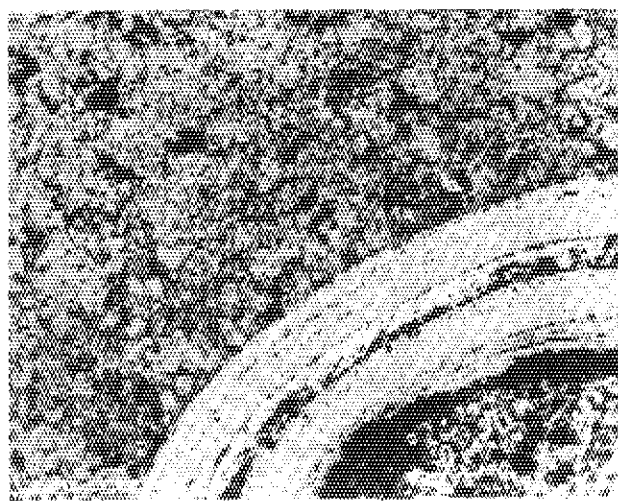


(4)

0.1 mm



(5)

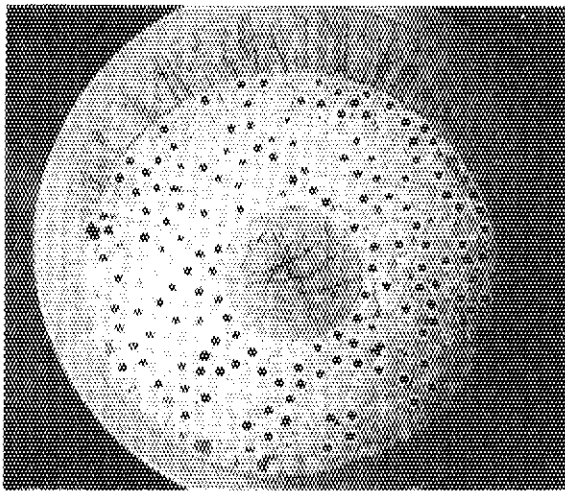


(6)

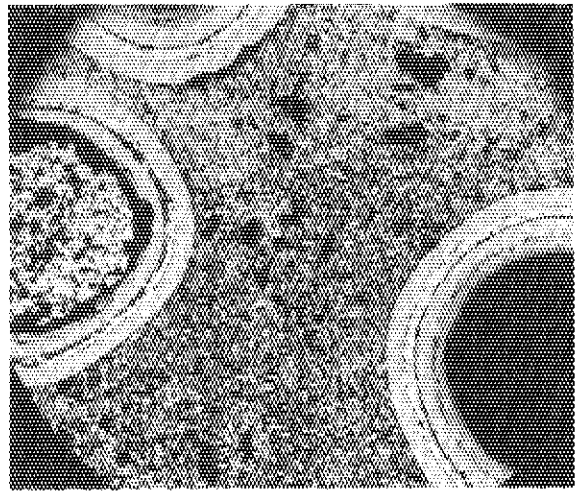
0.05 mm

COMPACT : 71FP 4A-3
MATRIX : ICG
BINDER : 20 %

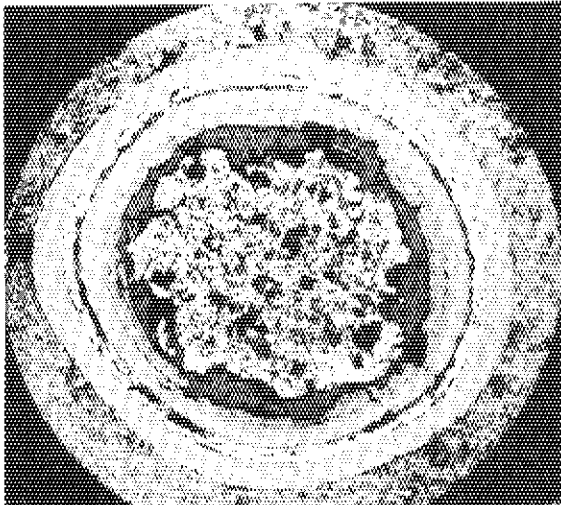
Fig. 25 Cross section of fuel compact irradiated in 71F-6A capsule



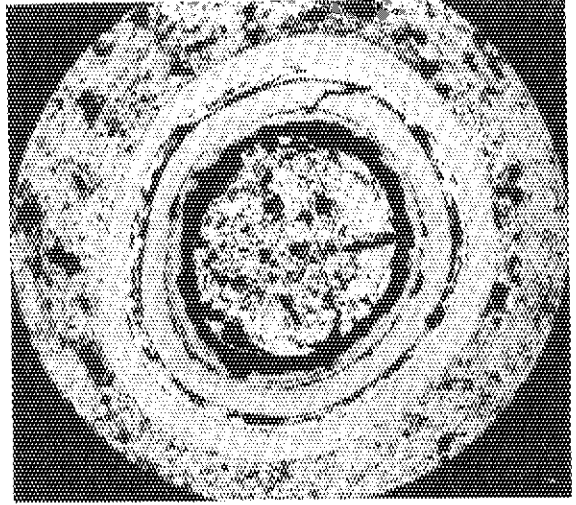
(1)



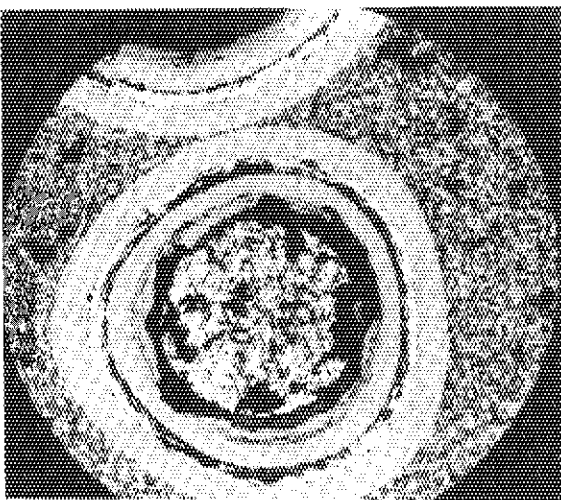
(2)



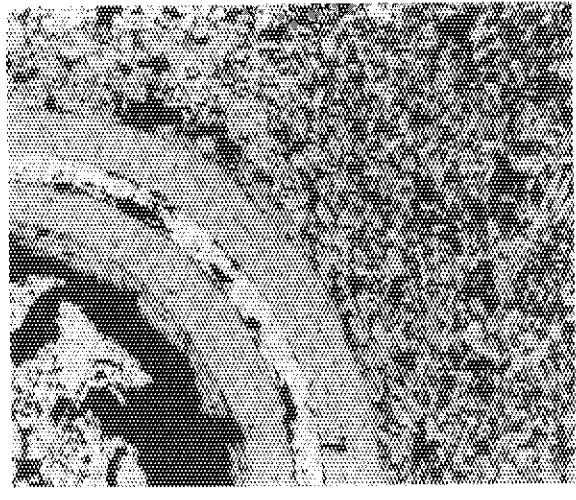
(3)



(4)



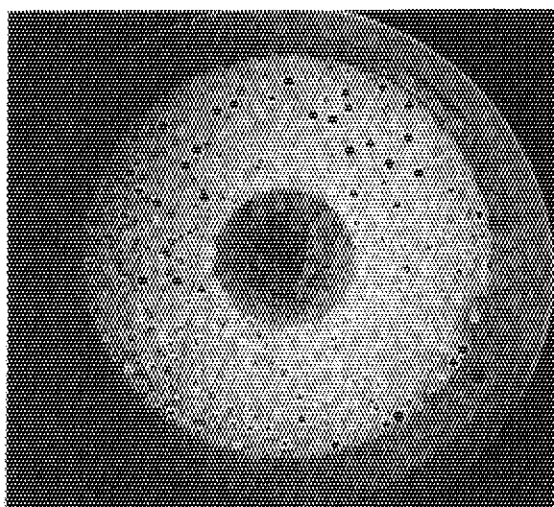
(5)



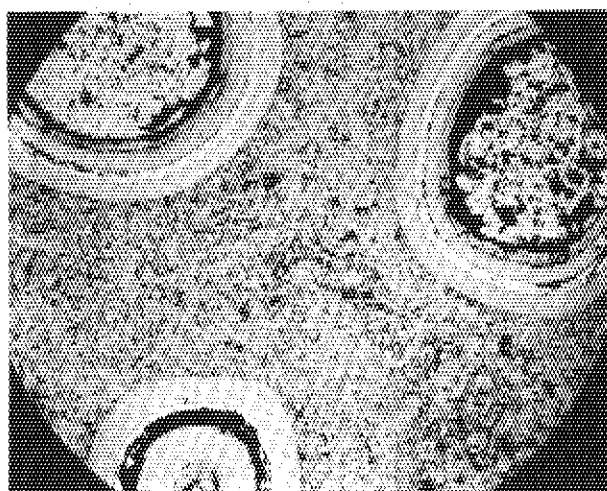
(6)

COMPACT : 71FP 5A-4
MATRIX : NCG
BINDER : 20 %

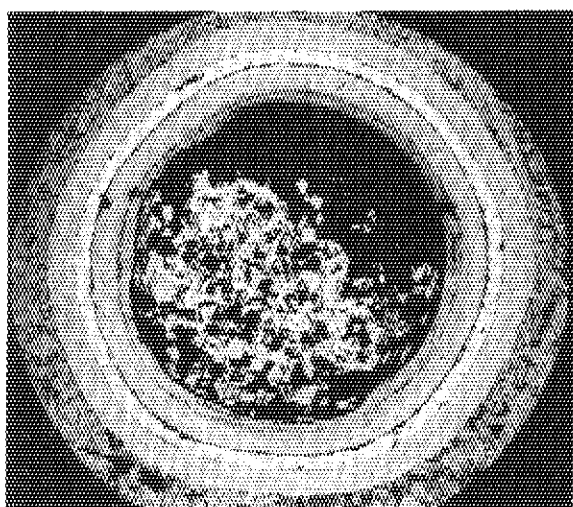
Fig. 26 Cross section of fuel compact irradiated in 71F-6A capsule



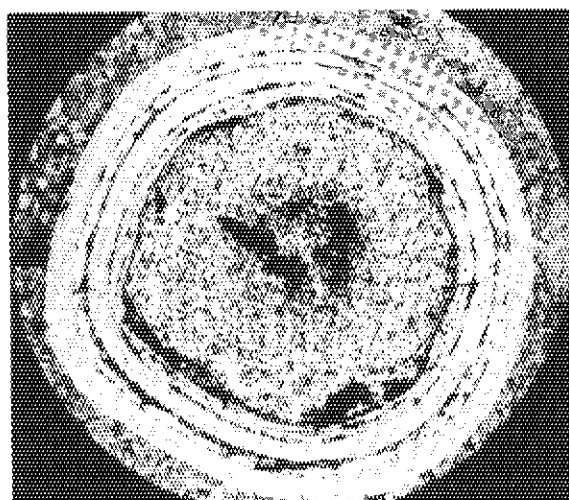
(1)



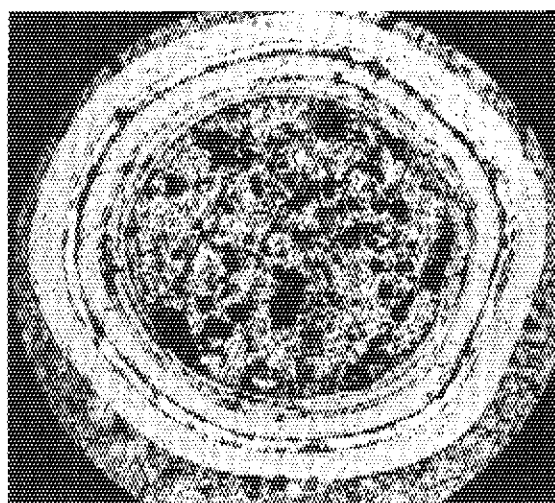
(2)



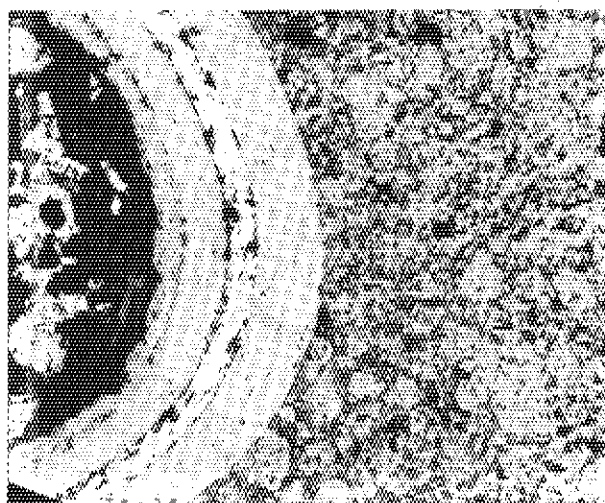
(3)



(4)



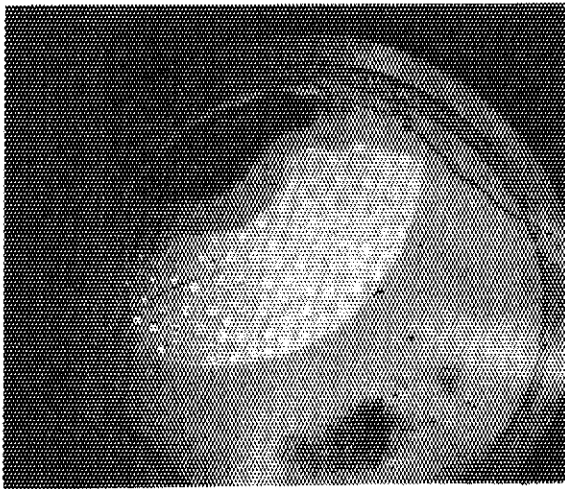
(5)



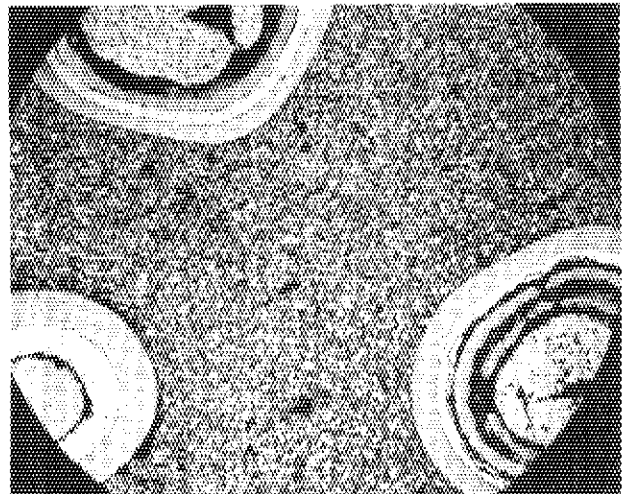
(6)

COMPACT : 71FP 4A-4
MATRIX : ICG
BINDER : 20 %

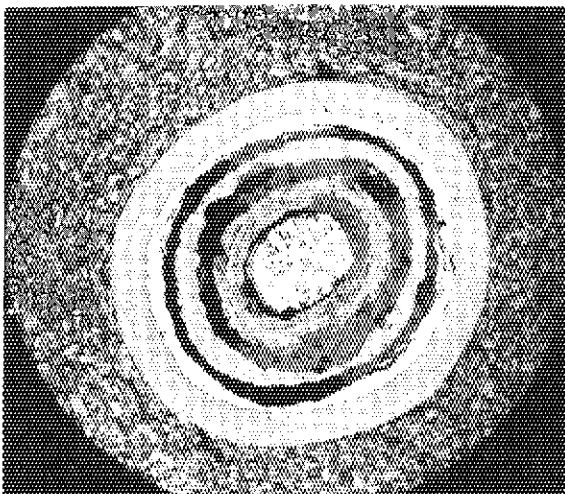
Fig. 27 Cross section of fuel compact irradiated in 71F-6A capsule



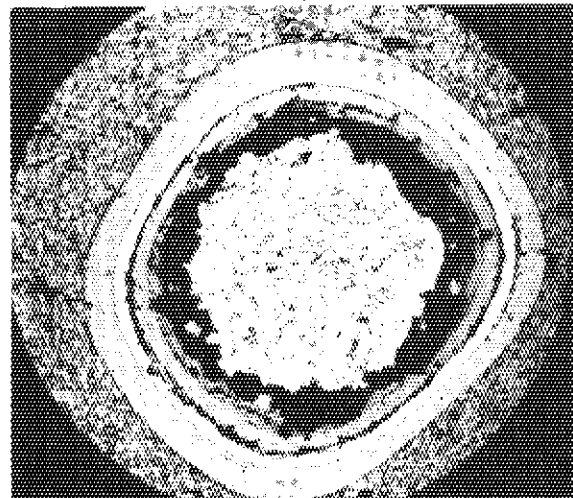
(1)



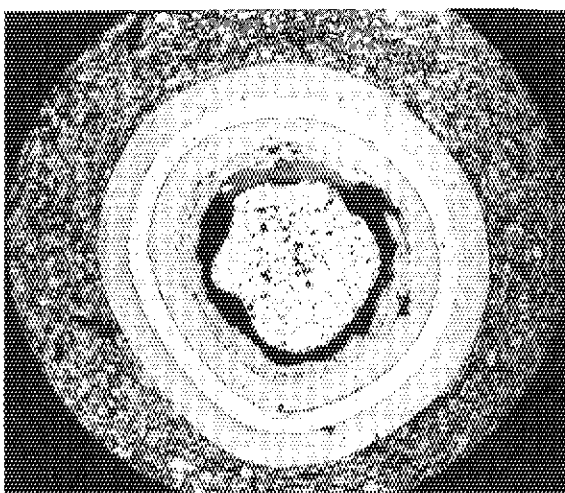
(2)



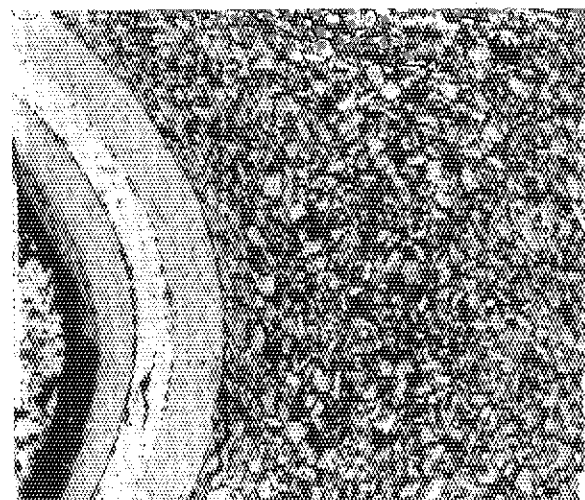
(3)



(4)



(5)



(6)

COMPACT : 71FP 5A-1
MATRIX : NCG
BINDER : 10 %

Fig. 28 Cross section of fuel compact irradiated in 71F-6A capsule

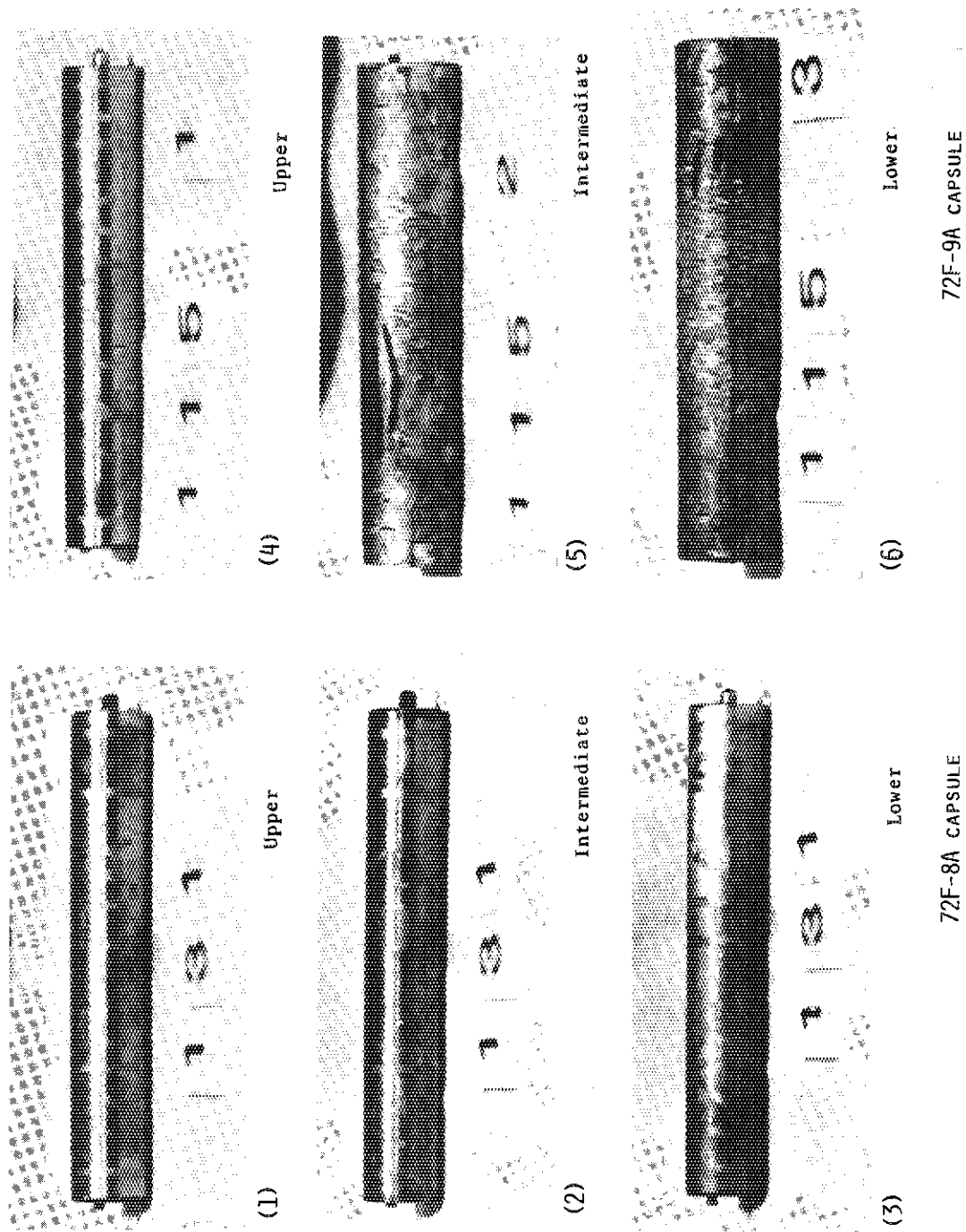


Fig. 29 Side view of inner capsule of 72F-8A and 72F-9A capsule after irradiation

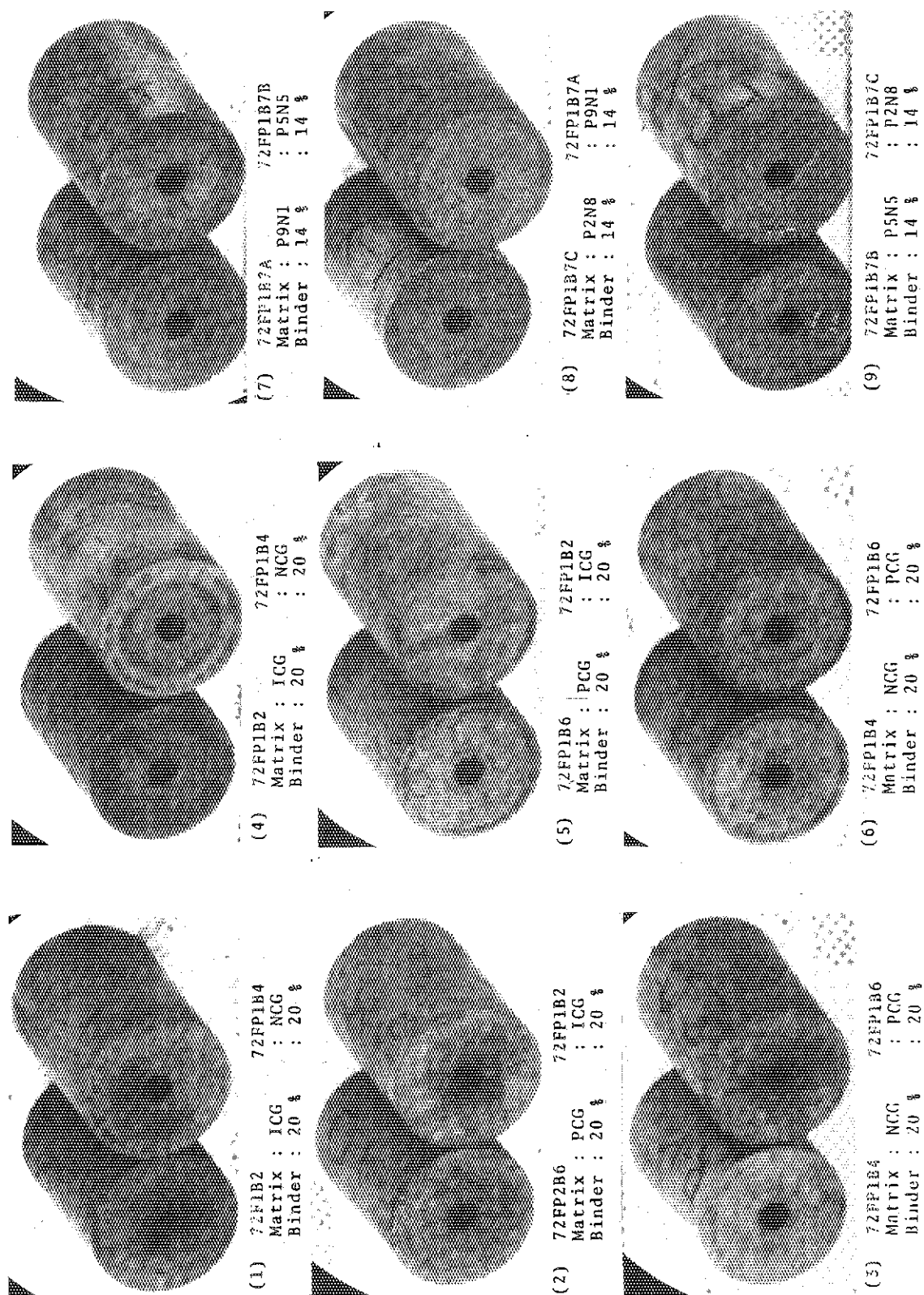


Fig. 30 External views of fuel compacts irradiated in 72F-8A capsule

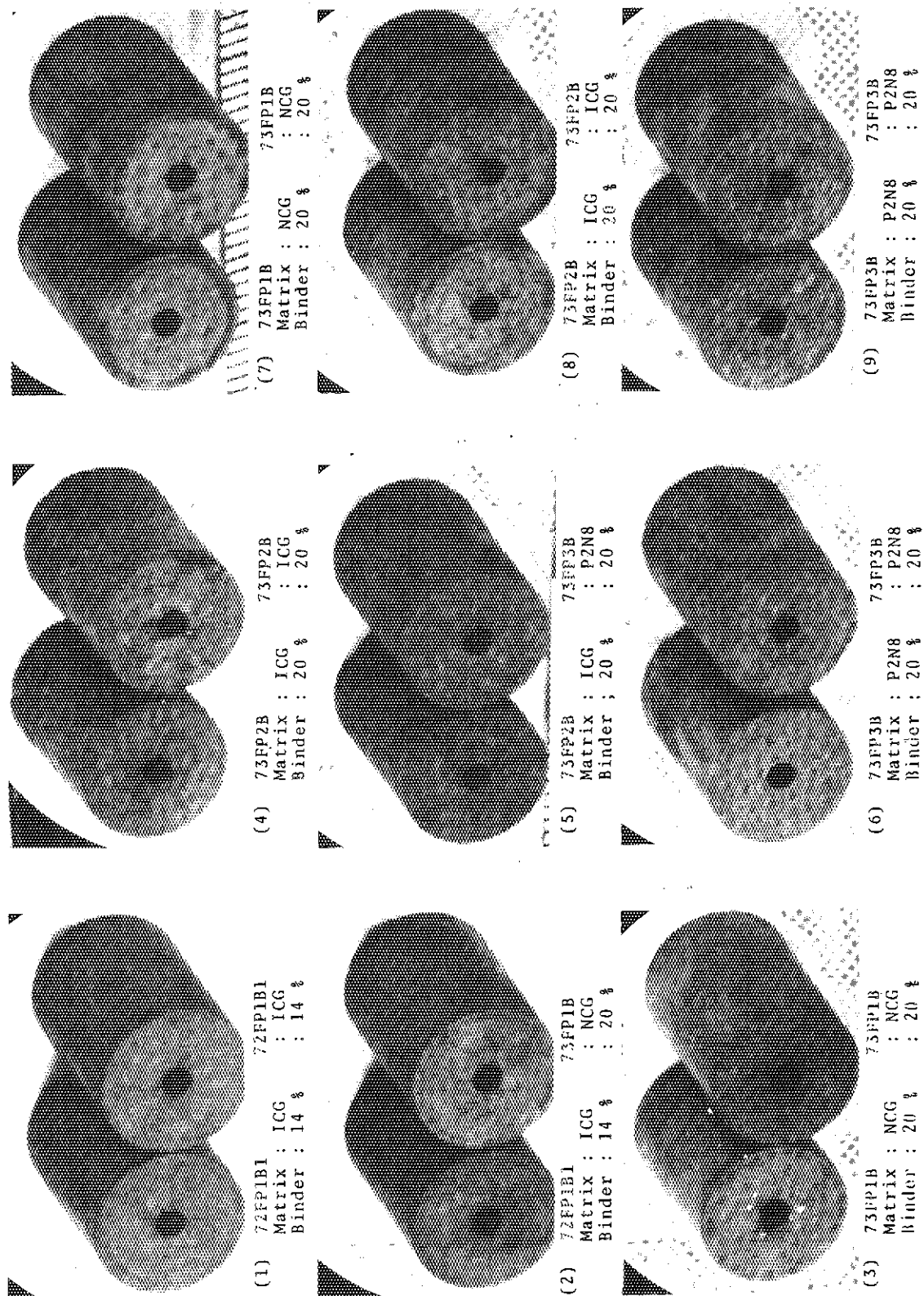


Fig. 31. External views of fuel compacts irradiated in 72F-9A capsule

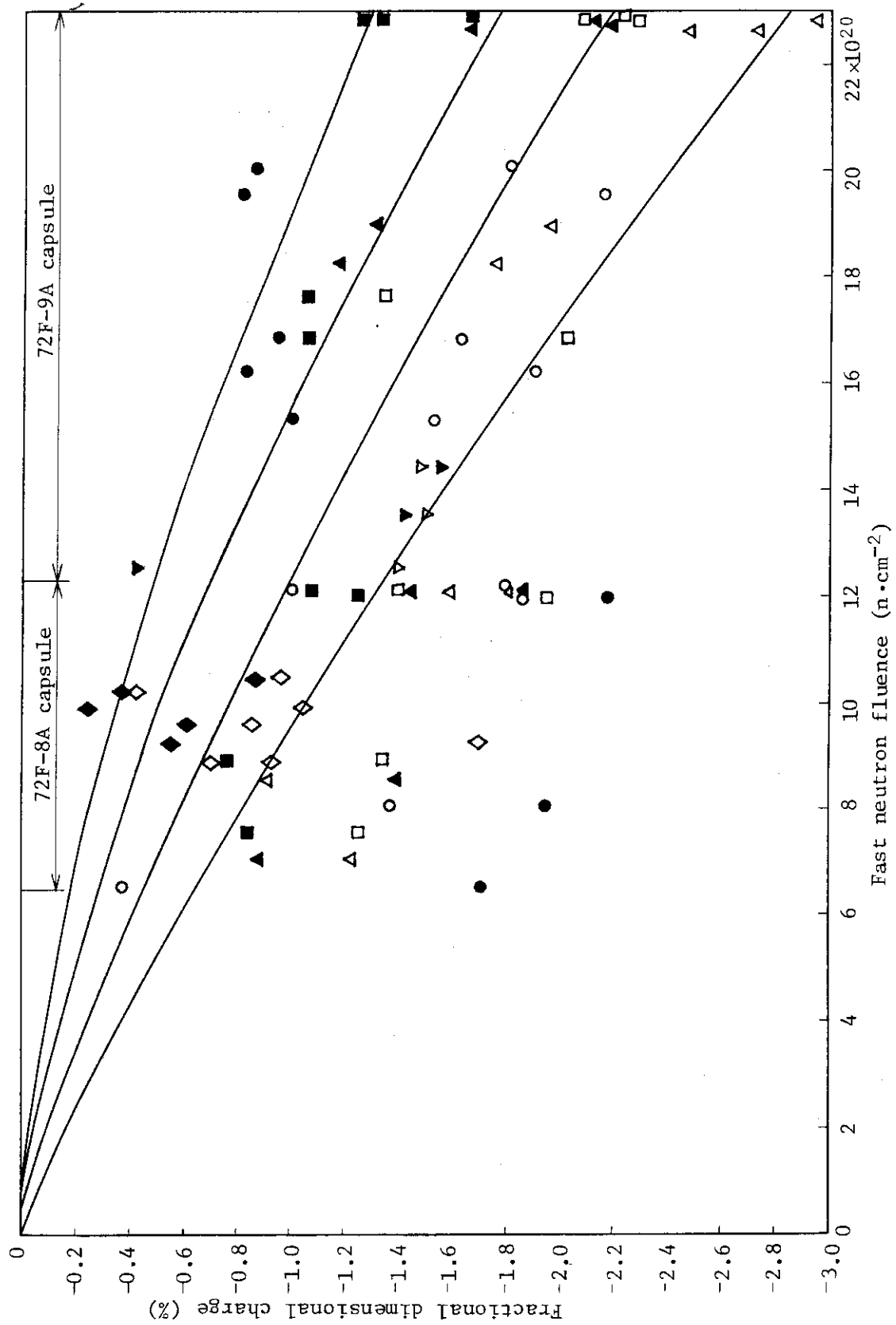
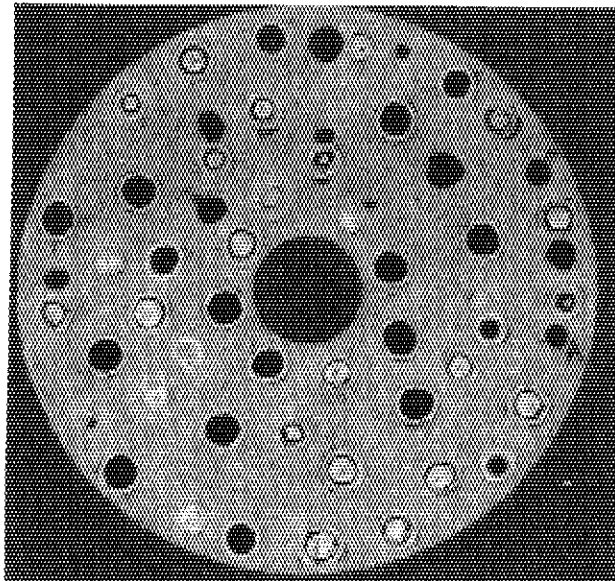
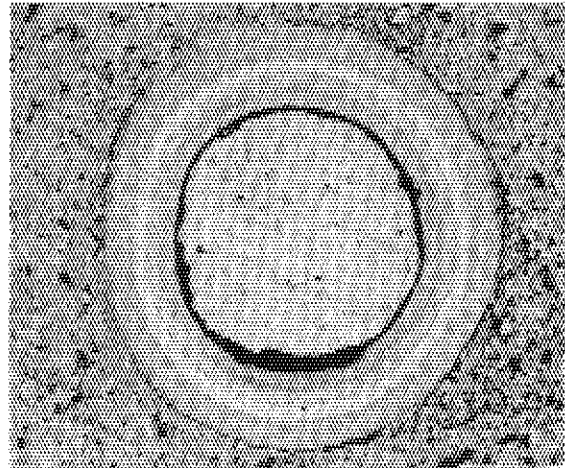


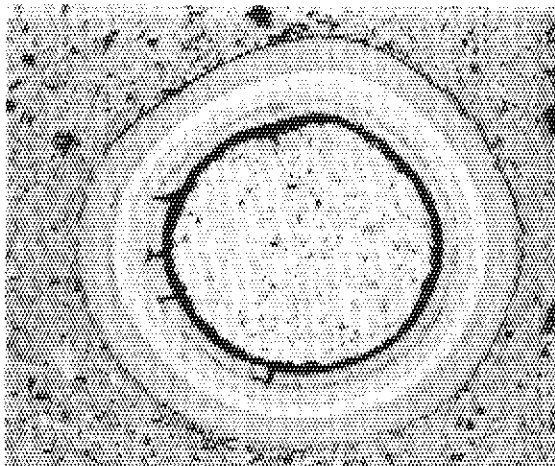
Fig. 32 Fractional dimensional change of fuel compacts irradiated in 72F-8A and 72F-9A capsule



(1) 72FP1B4
Matrix : NCG
Binder : 20 %

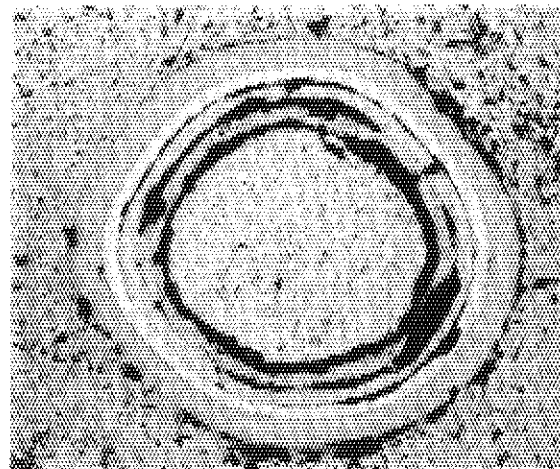


(2)

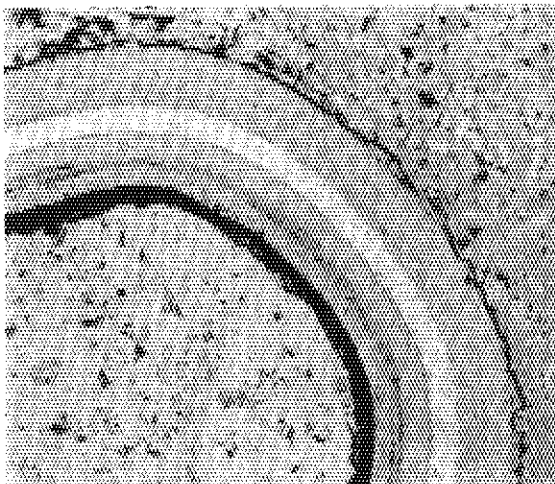


(3)

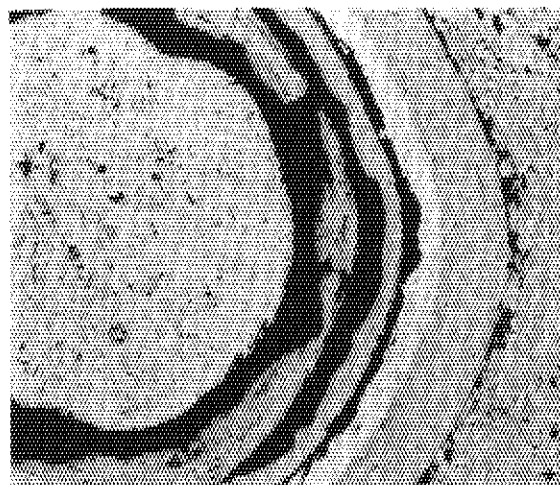
— 0.1 mm



(4)



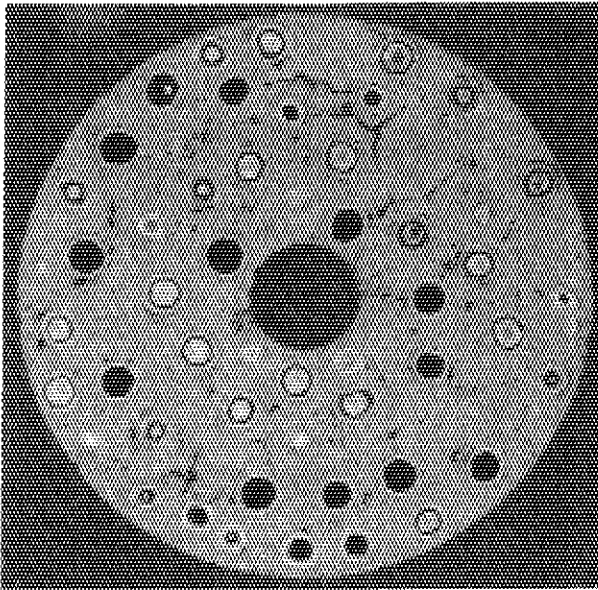
(5)



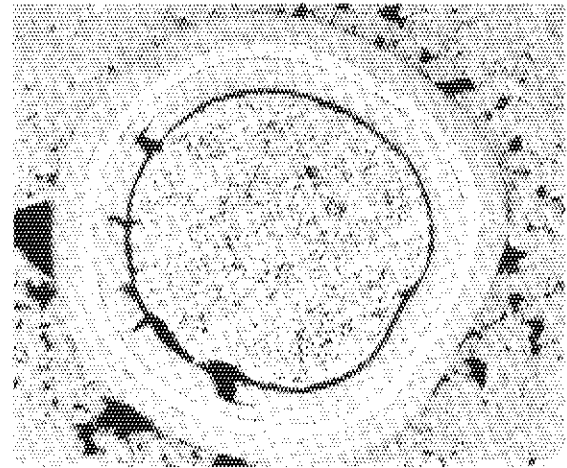
(6)

— 0.05 mm

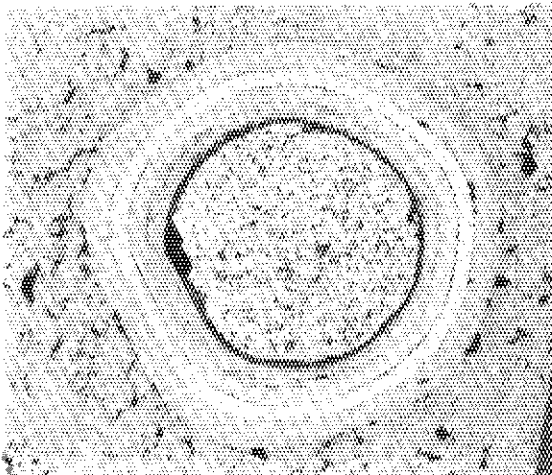
Fig. 33 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



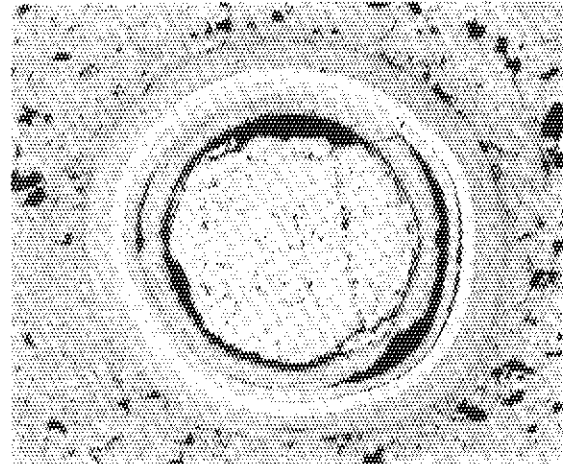
(1) 72FP1B6
Matrix : PCG
Binder : 20 %



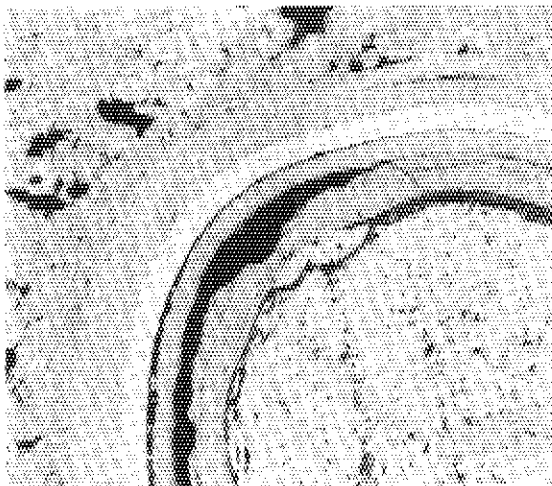
(2)



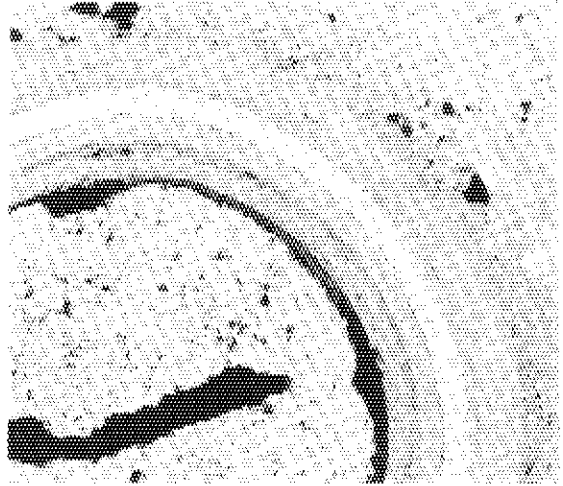
(3)



(4)

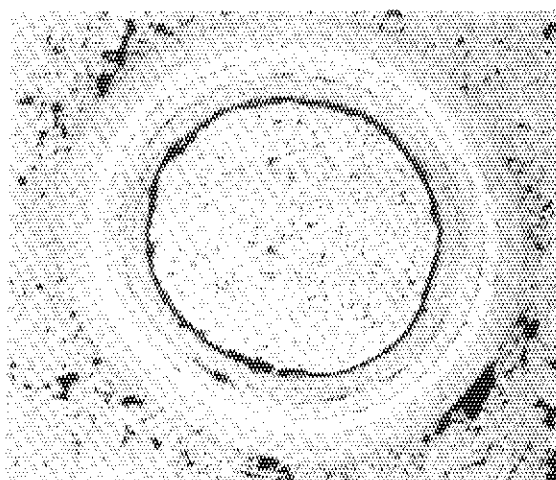


(5)

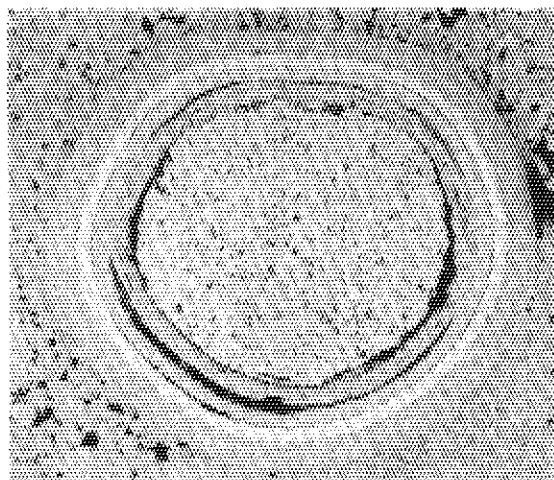


(6)

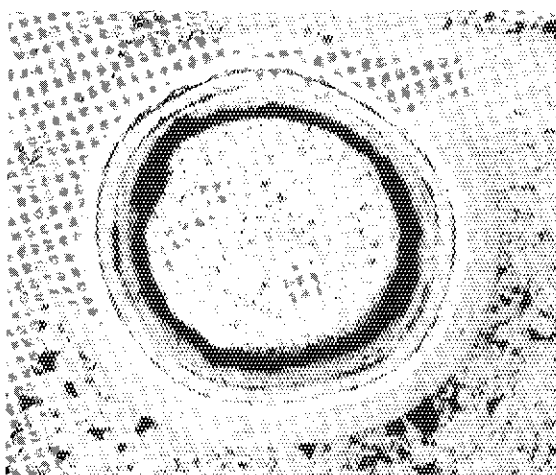
Fig. 34 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



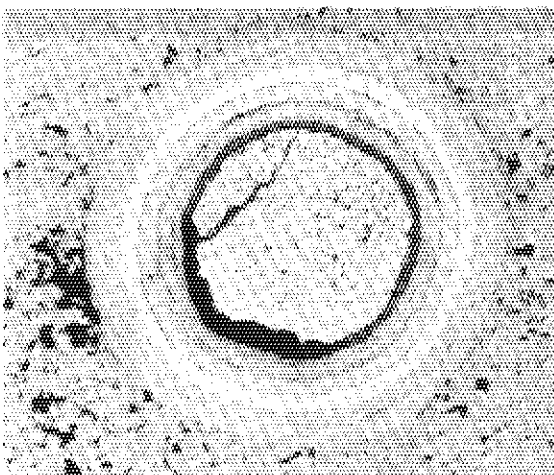
(1) 72FP1B2
Matrix : ICG
Binder : 20 %



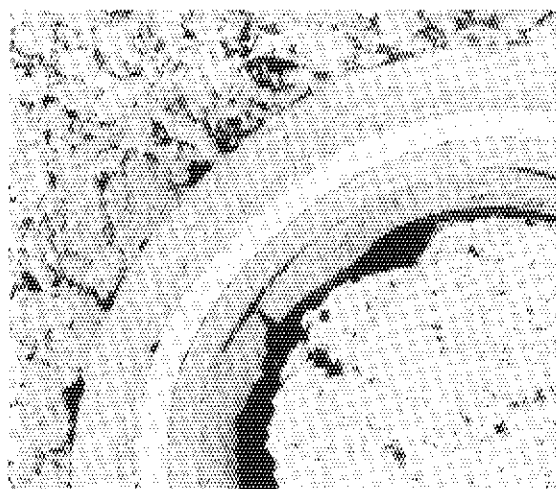
(2)



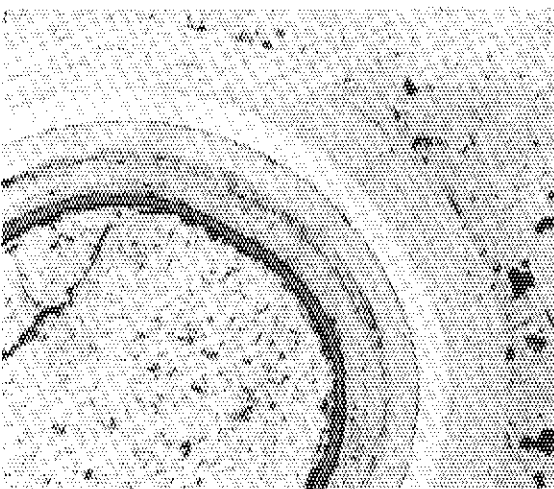
(3)



(4)

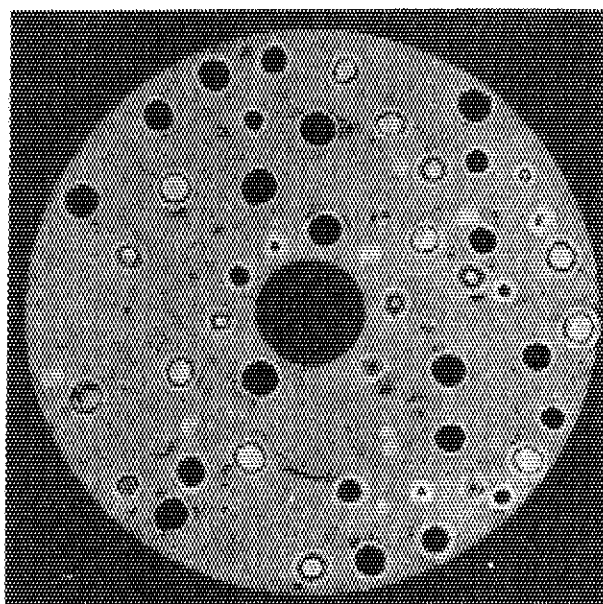


(5)

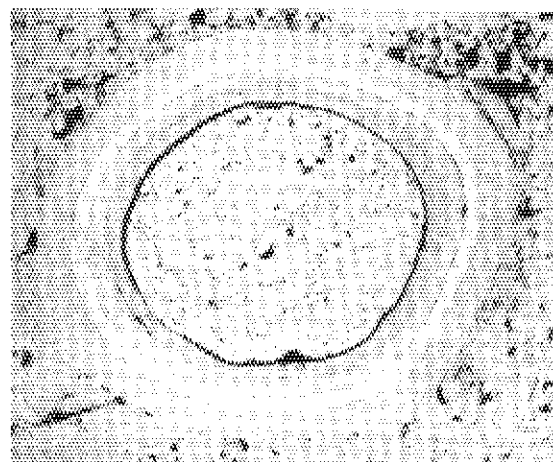


(6)

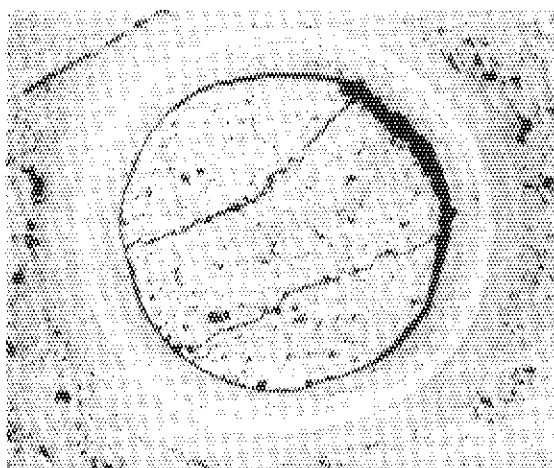
Fig. 35 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



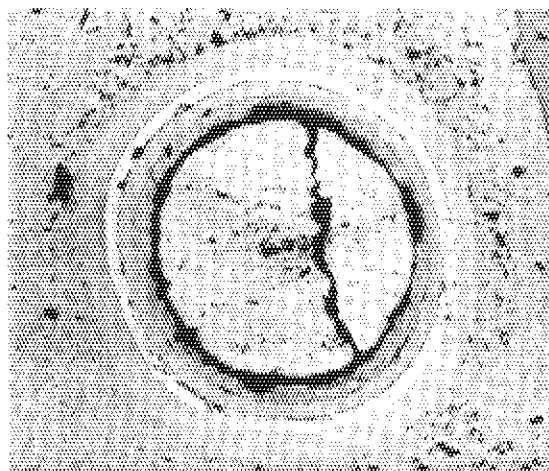
(1) 72FP1B2
Matrix : ICG
Binder : 20 %



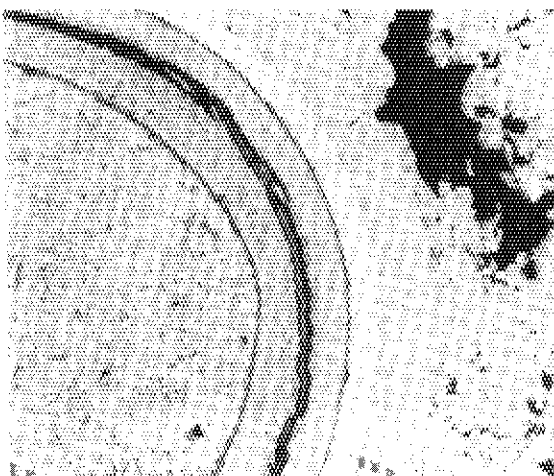
(2)



(3)



(4)

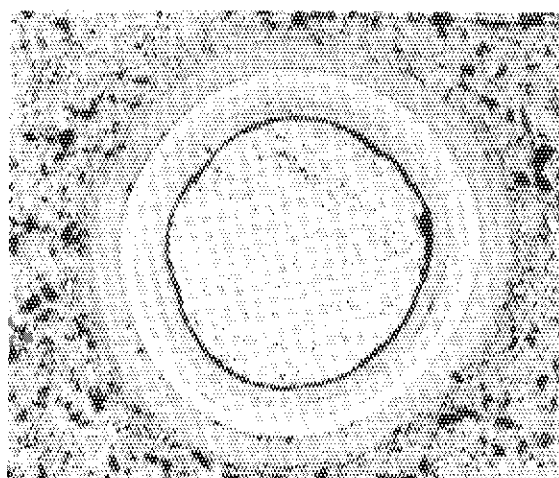


(5)

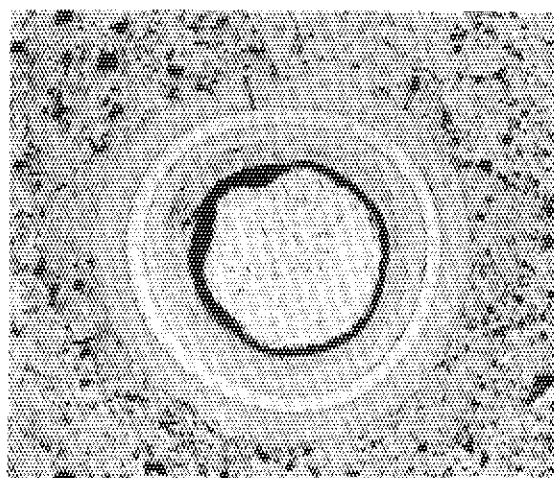


(6)

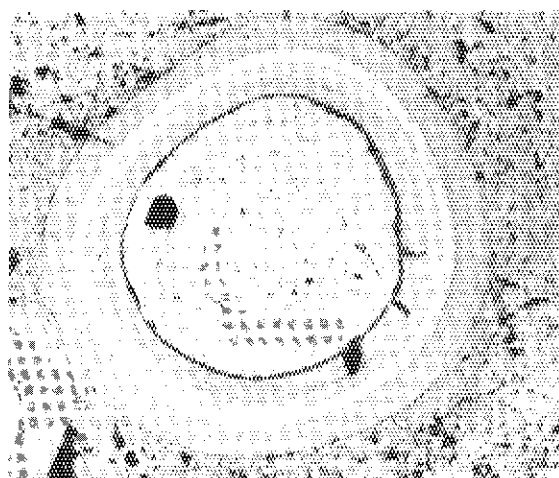
Fig. 36 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



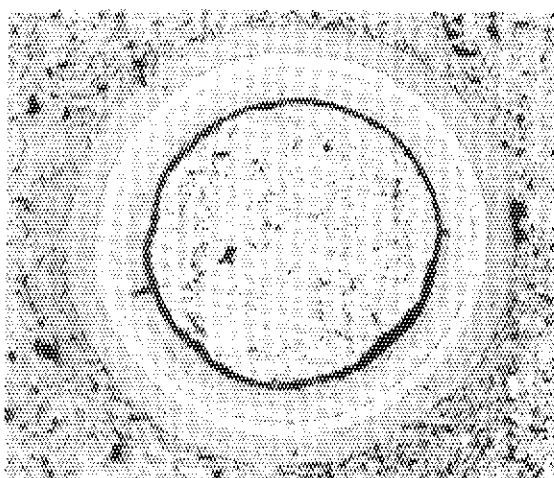
(1) 72FP1B4
Matrix : NCG
Binder : 20 %



(2)



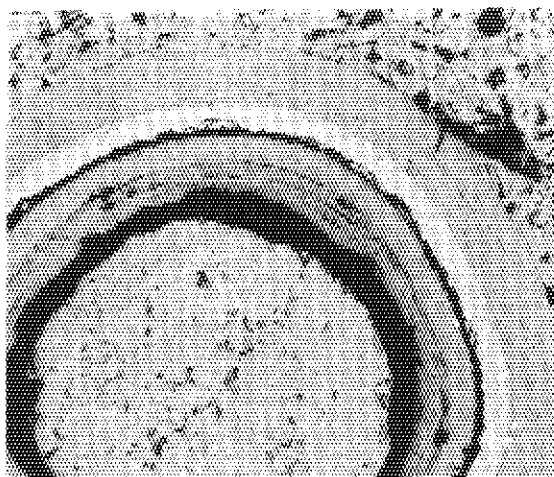
(3)



(4)

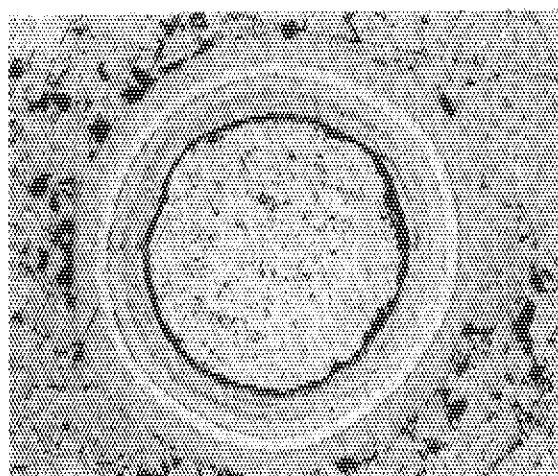


(5)

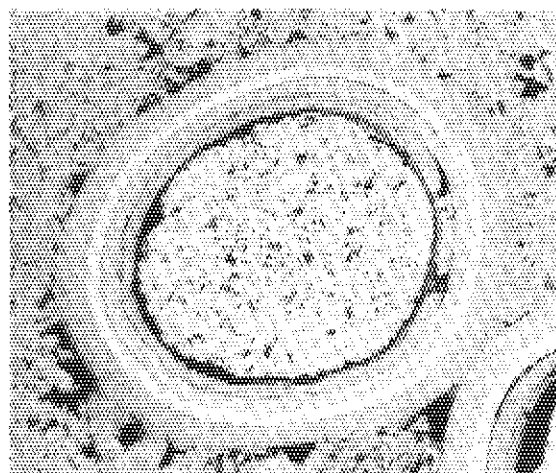


(6)

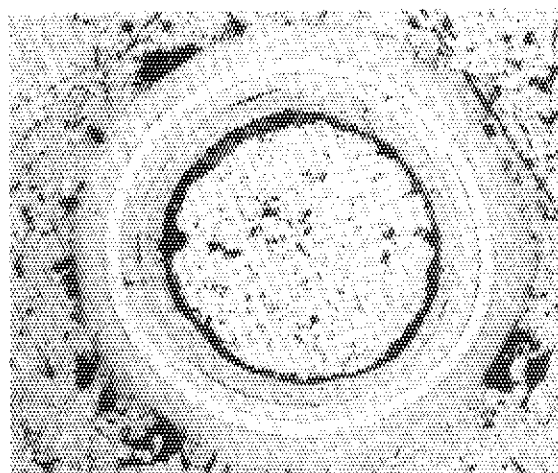
Fig. 37 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



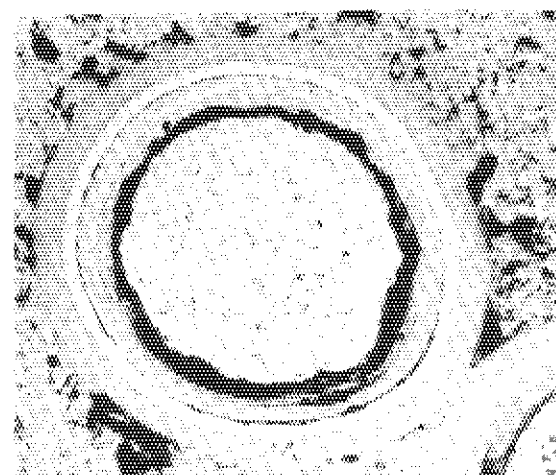
(1) 72FP1B6
Matrix : PCG
Binder : 20 %



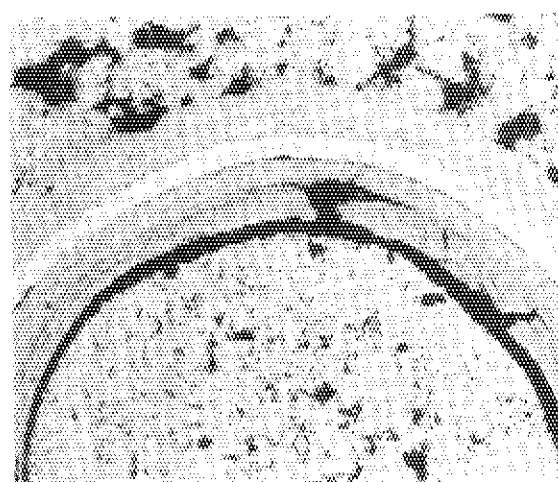
(2)



(3)



(4)

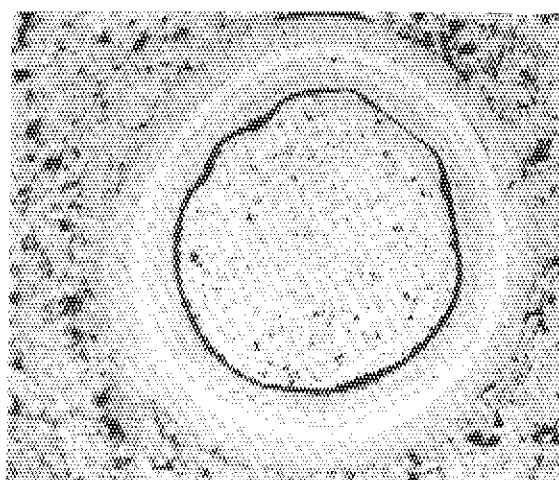


(5)

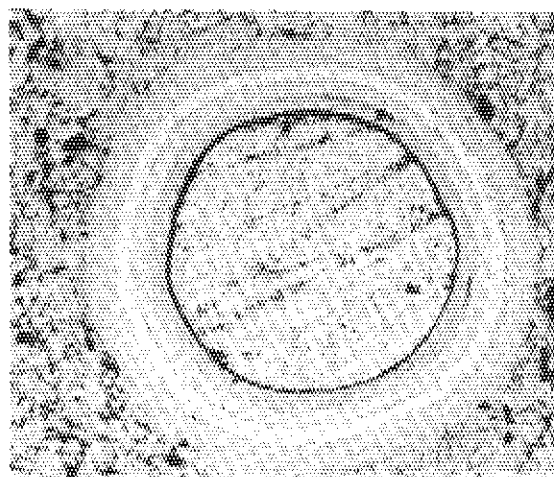


(6)

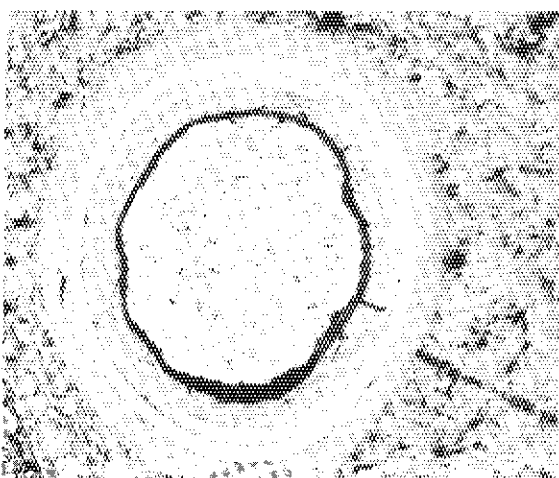
Fig. 38 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



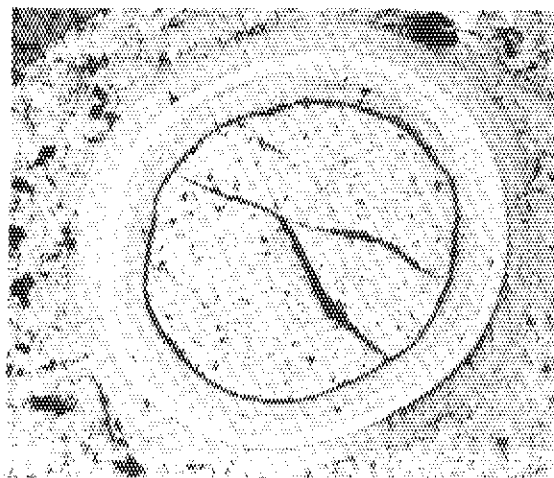
(1) 72FP1B7A
Matrix : P9N1
Binder : 14 %



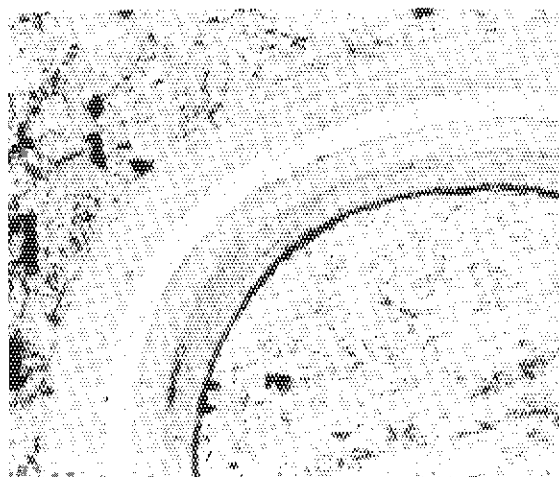
(2)



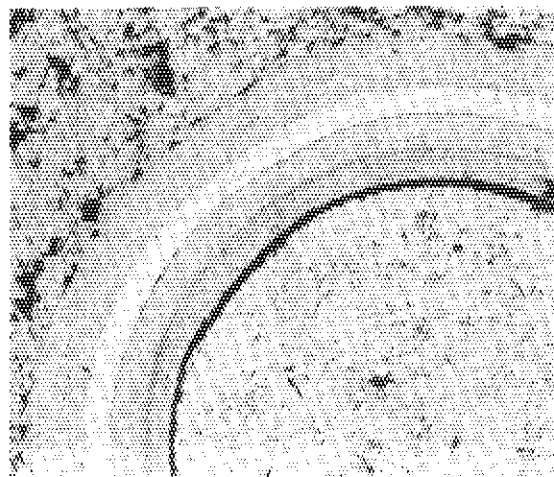
(3)



(4)



(5)



(6)

Fig. 39 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A cpasule

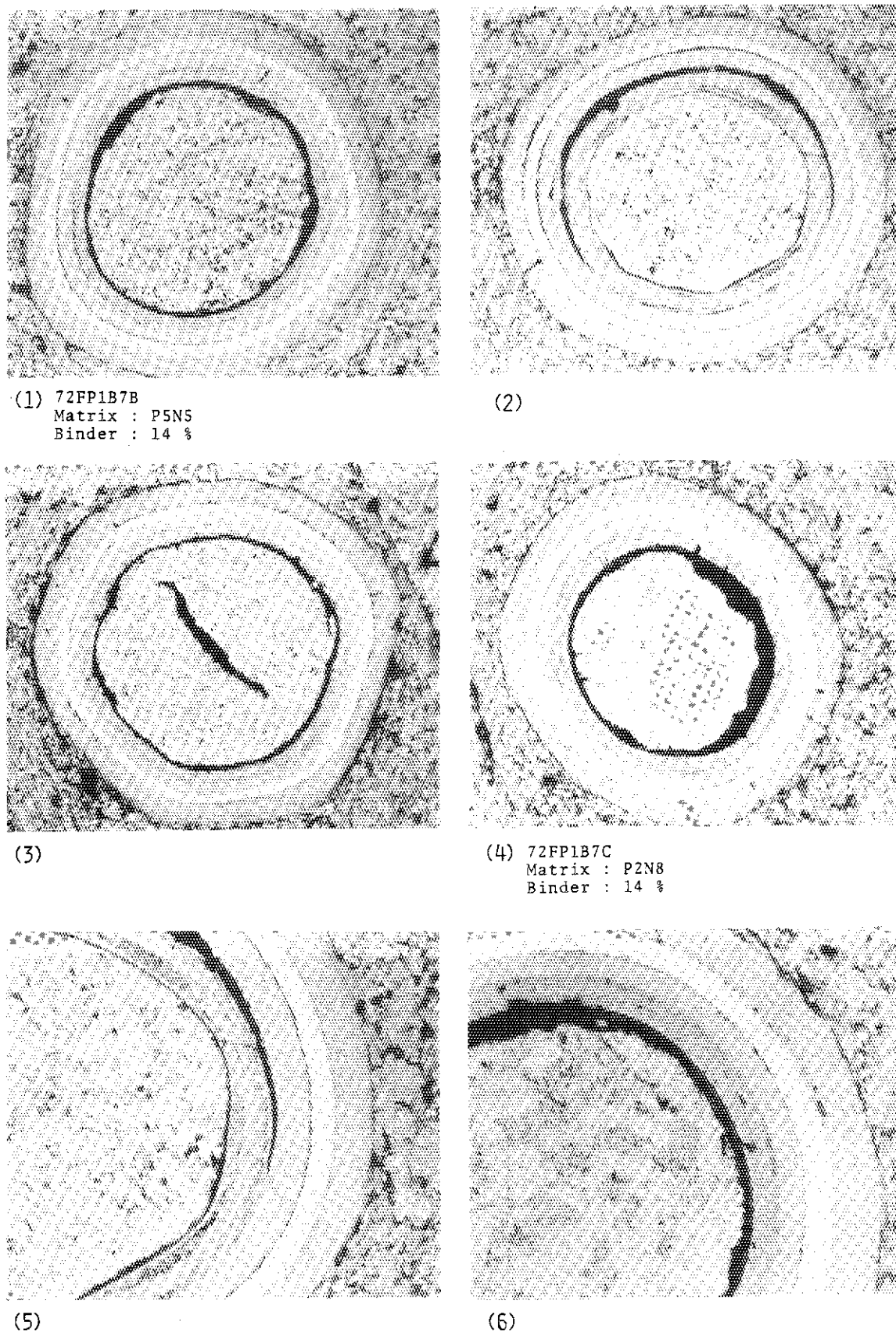
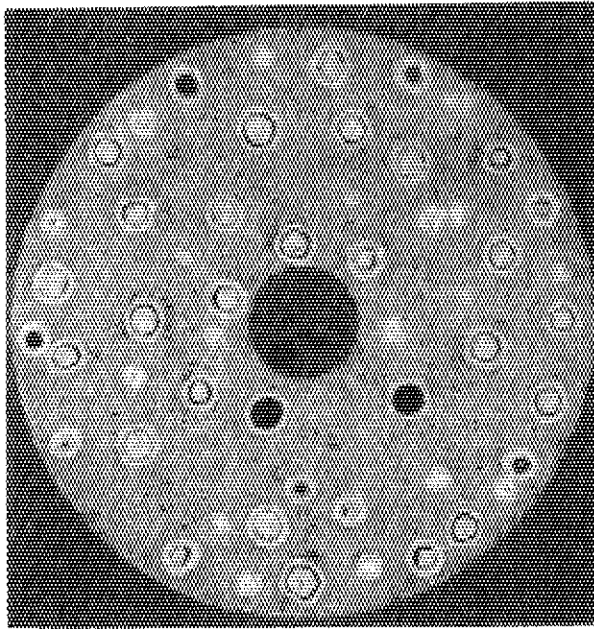
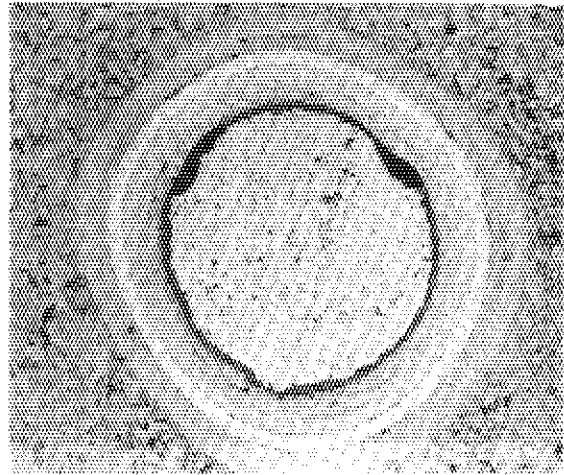


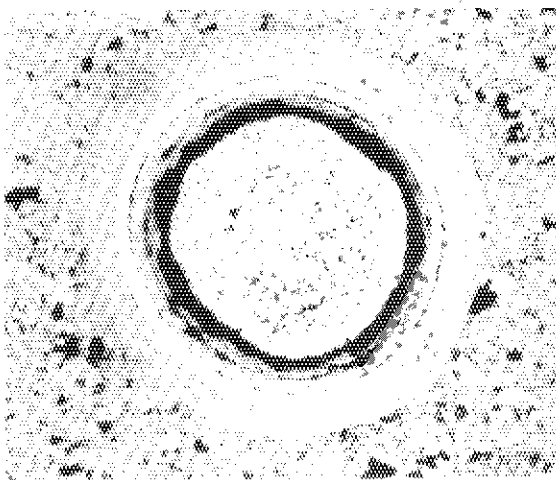
Fig. 40 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-8A capsule



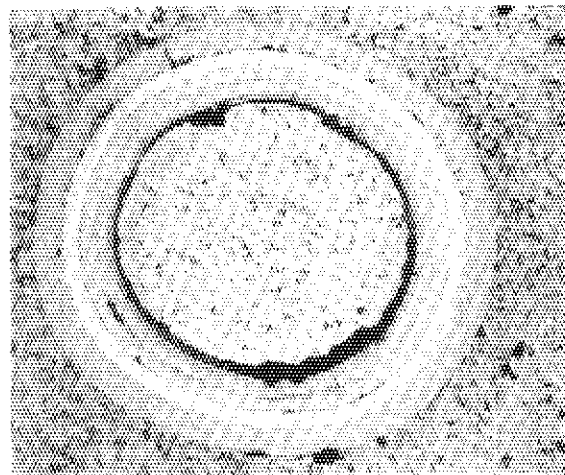
(1) 72FP1B1
Matrix : ICG
Binder : 14 %



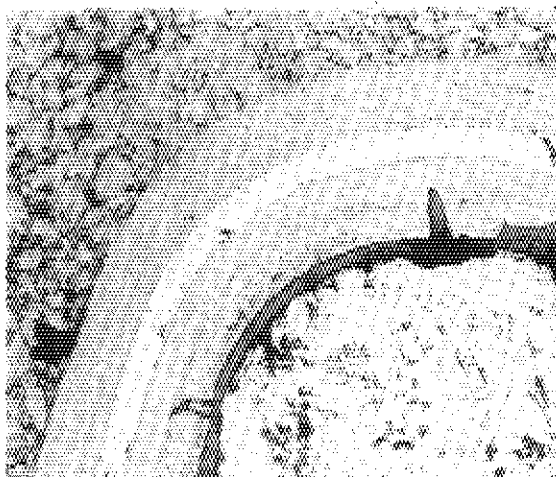
(2)



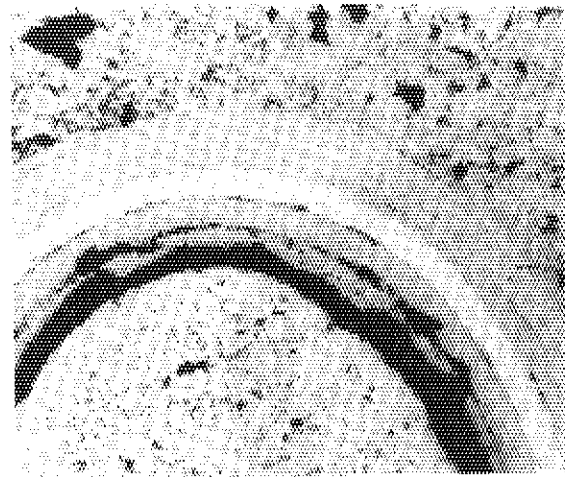
(3)



(4)

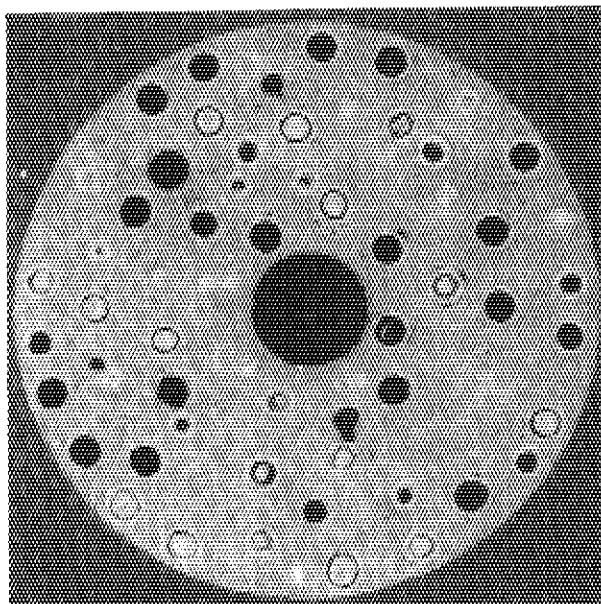


(5)

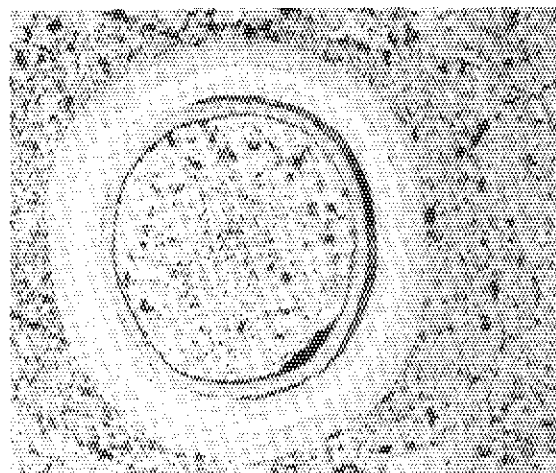


(6)

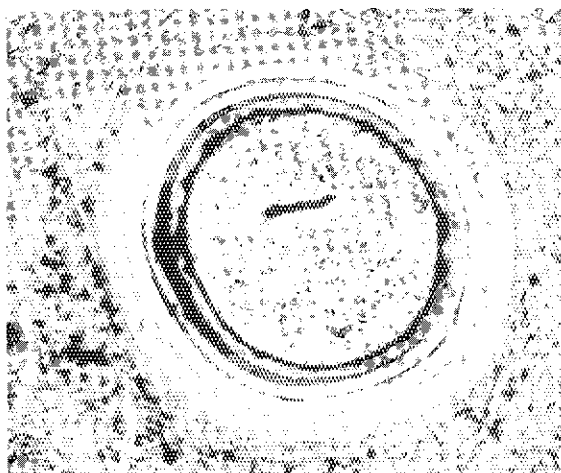
Fig. 41 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule



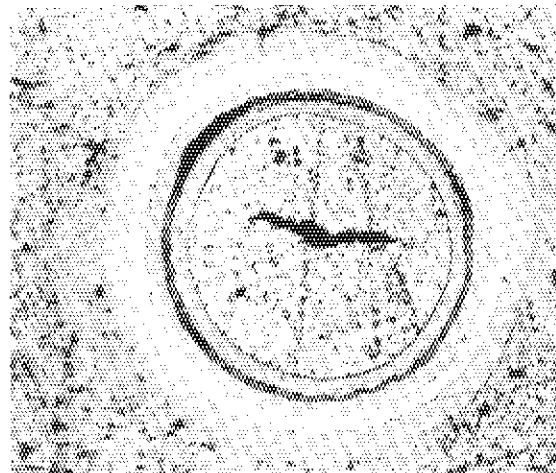
(1) 73FP1B
Matrix : NCG
Binder : 20 %



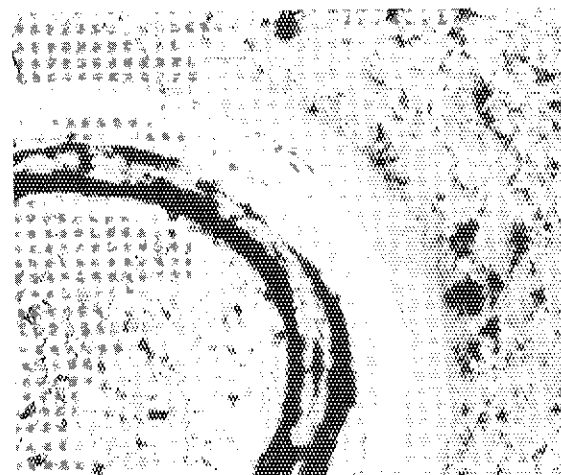
(2)



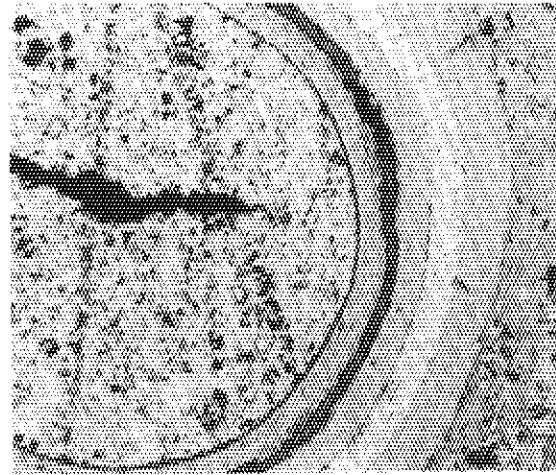
(3)



(4)

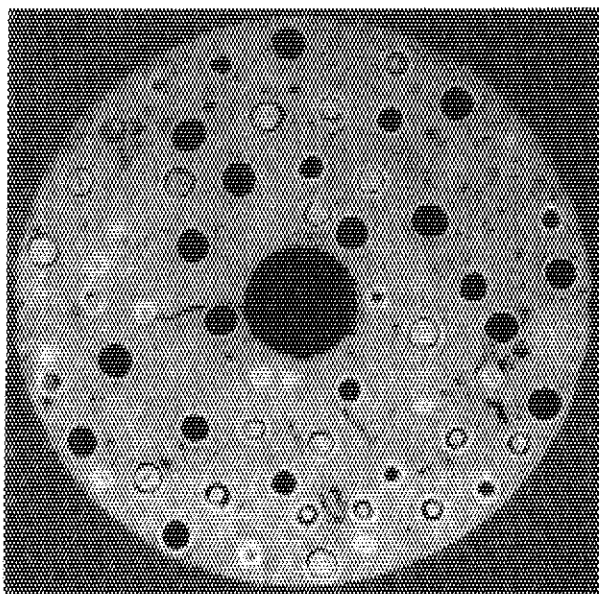


(5)

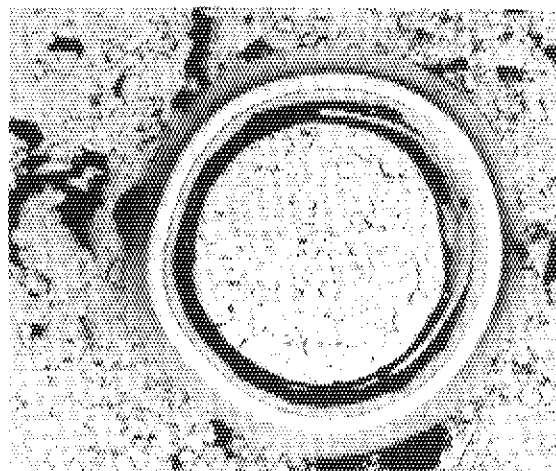


(6)

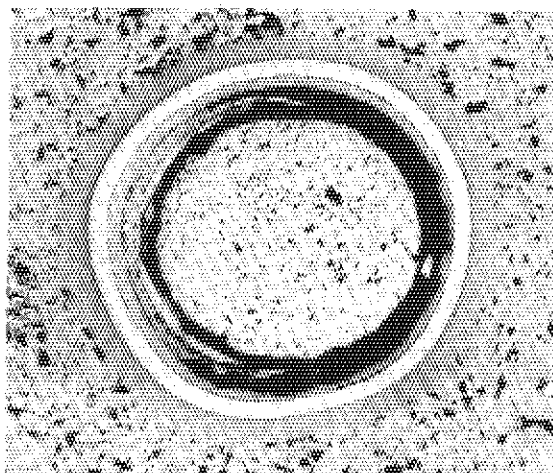
Fig. 42 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule



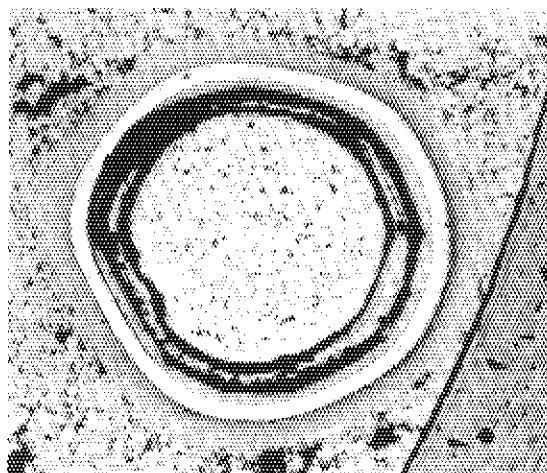
(1) 73FP2B
Matrix : ICG
Binder : 20 %



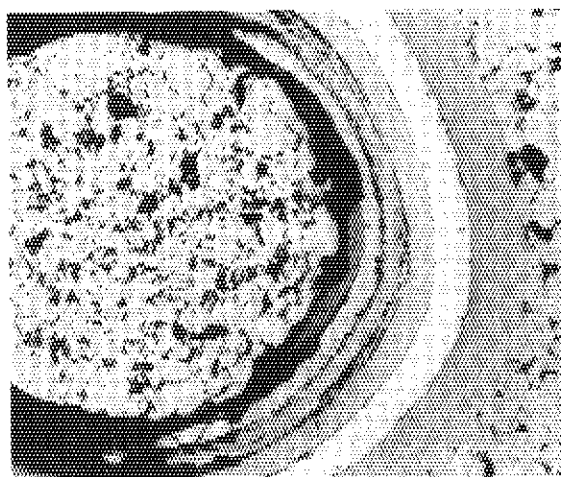
(2)



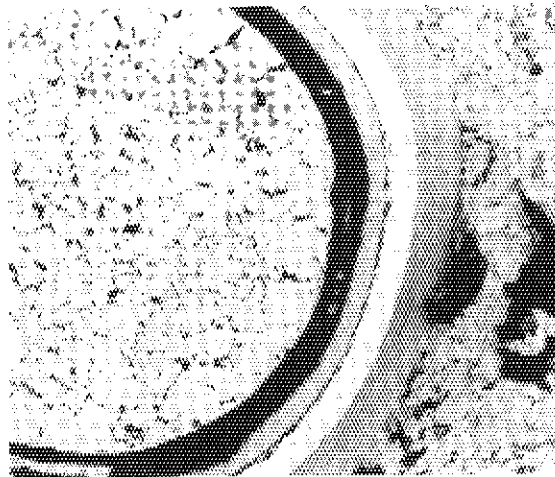
(3)



(4)

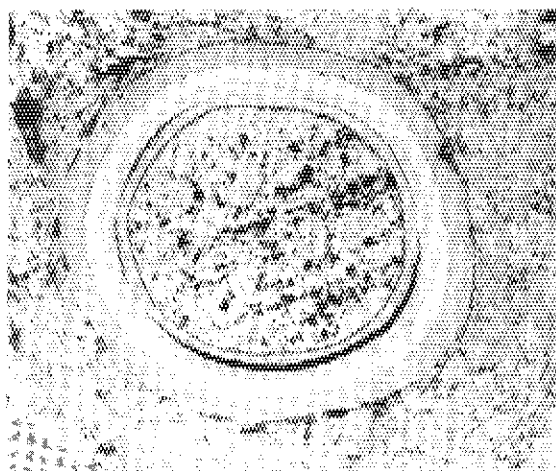


(5)

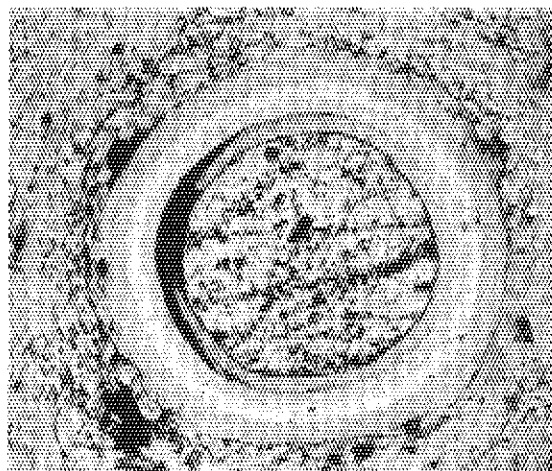


(6)

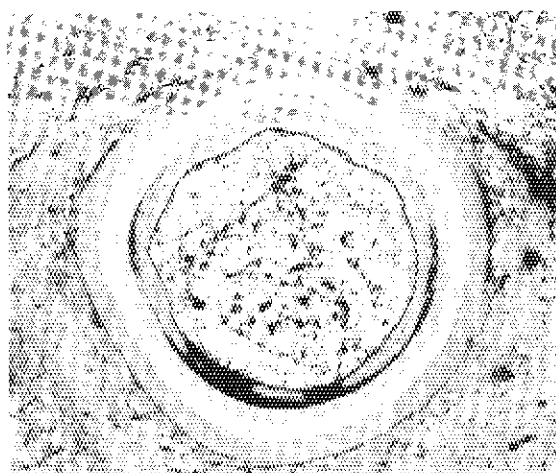
Fig. 43 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule



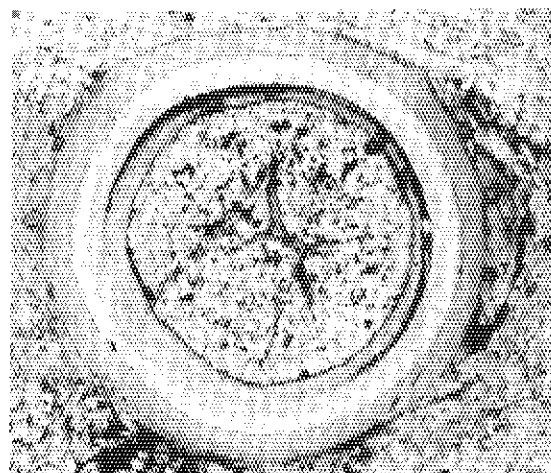
(1) 73FP3B
Matrix : P2N8
Binder : 20 %



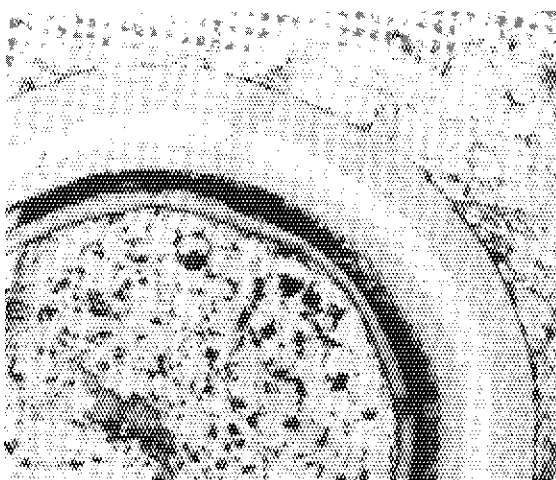
(2)



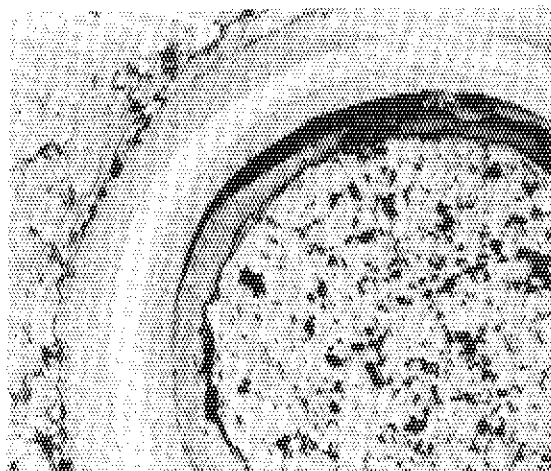
(3)



(4)

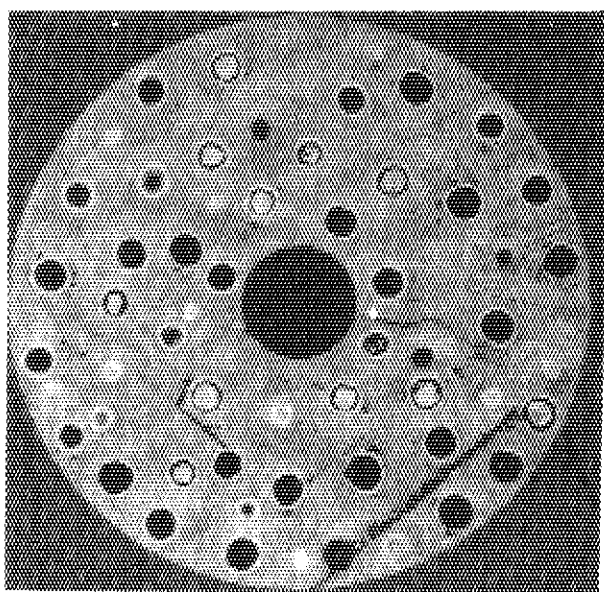


(5)

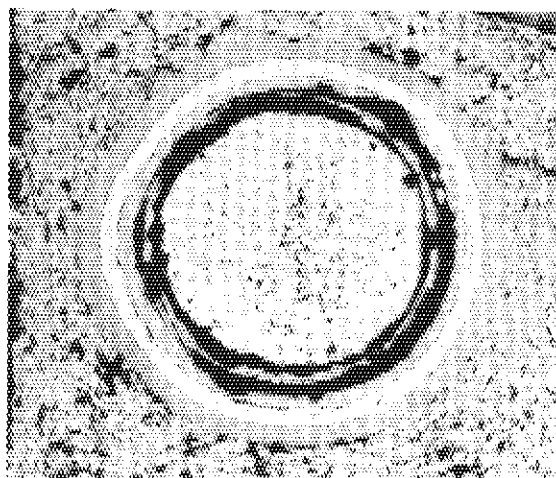


(6)

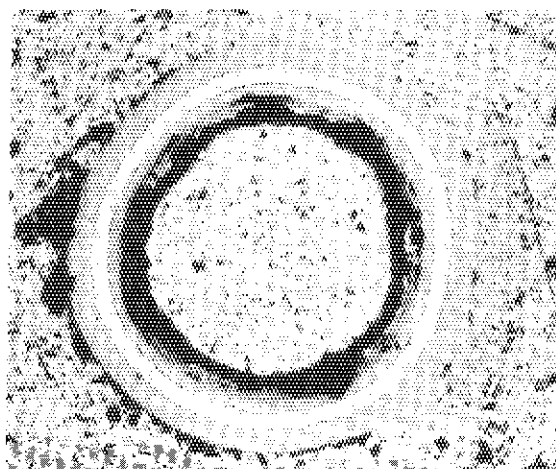
Fig. 44 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule



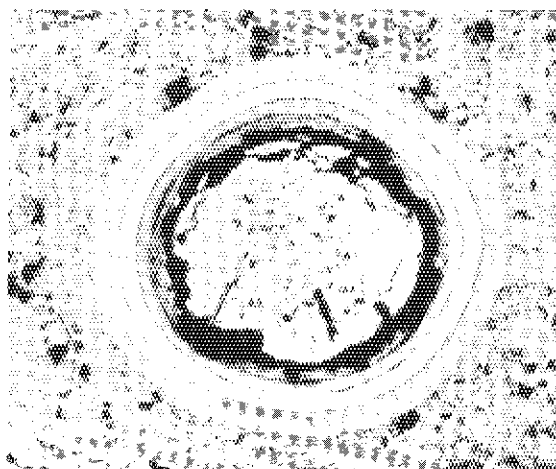
(1) 73FP1B
Matrix : NCG
Binder : 20 %



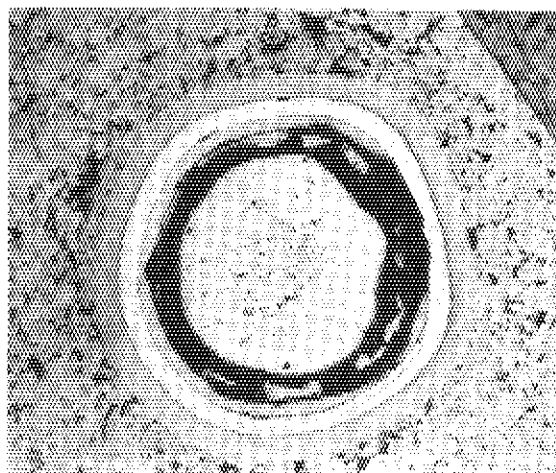
(2)



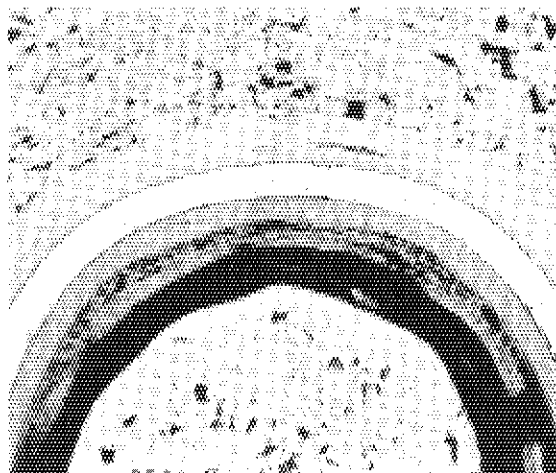
(3)



(4) 73FP2B
Matrix : ICG
Binder : 20 %

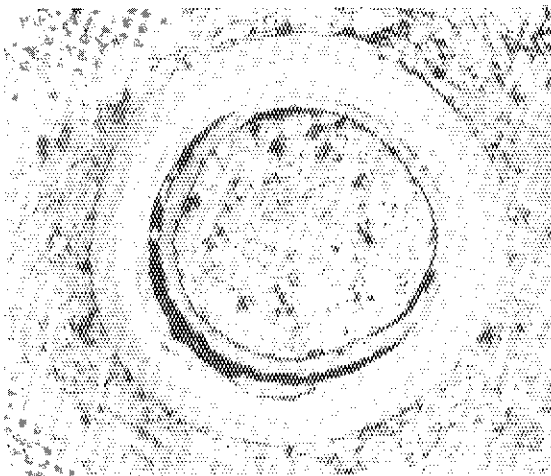


(5)

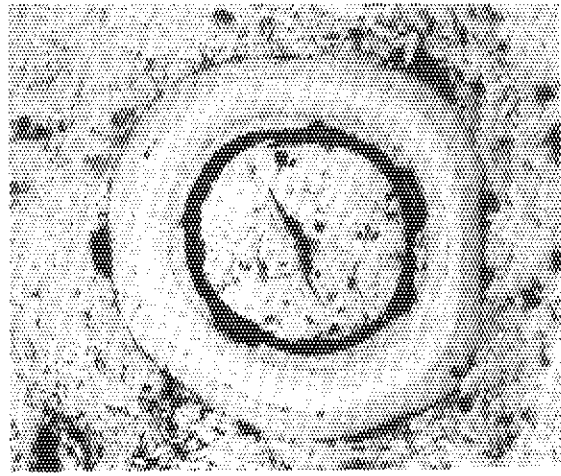


(6)

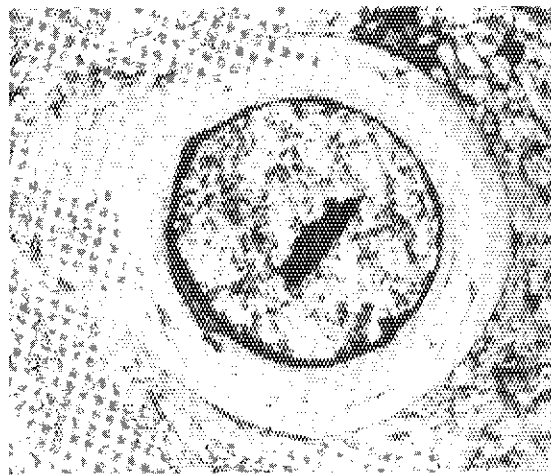
Fig. 45 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule



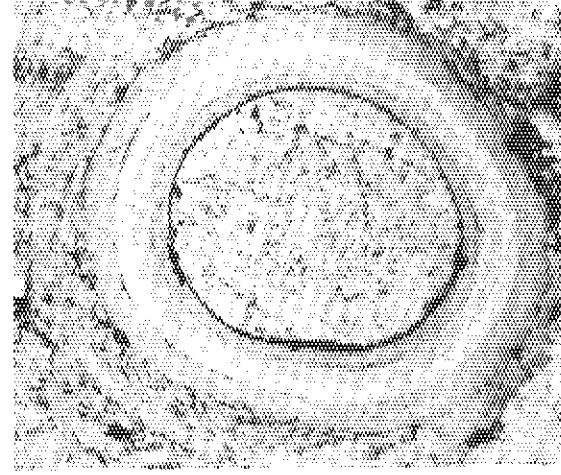
(1) 73FP3B
Matrix : P2N8
Binder : 20 %



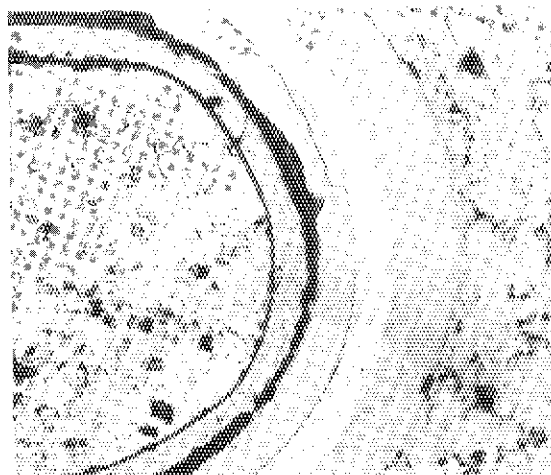
(2)



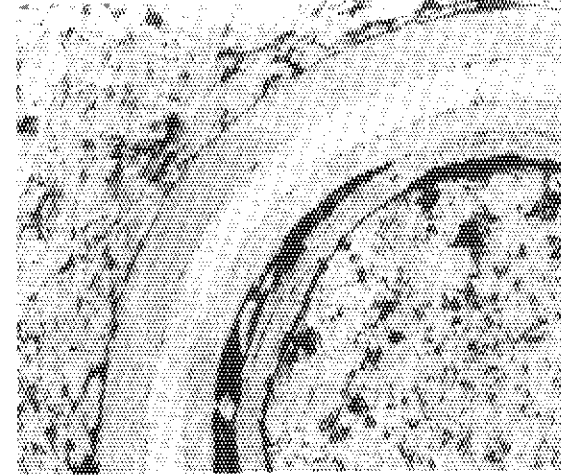
(3)



(4)



(5)



(6)

Fig. 46 Cross section of fuel compact irradiated in 72F-9A capsule

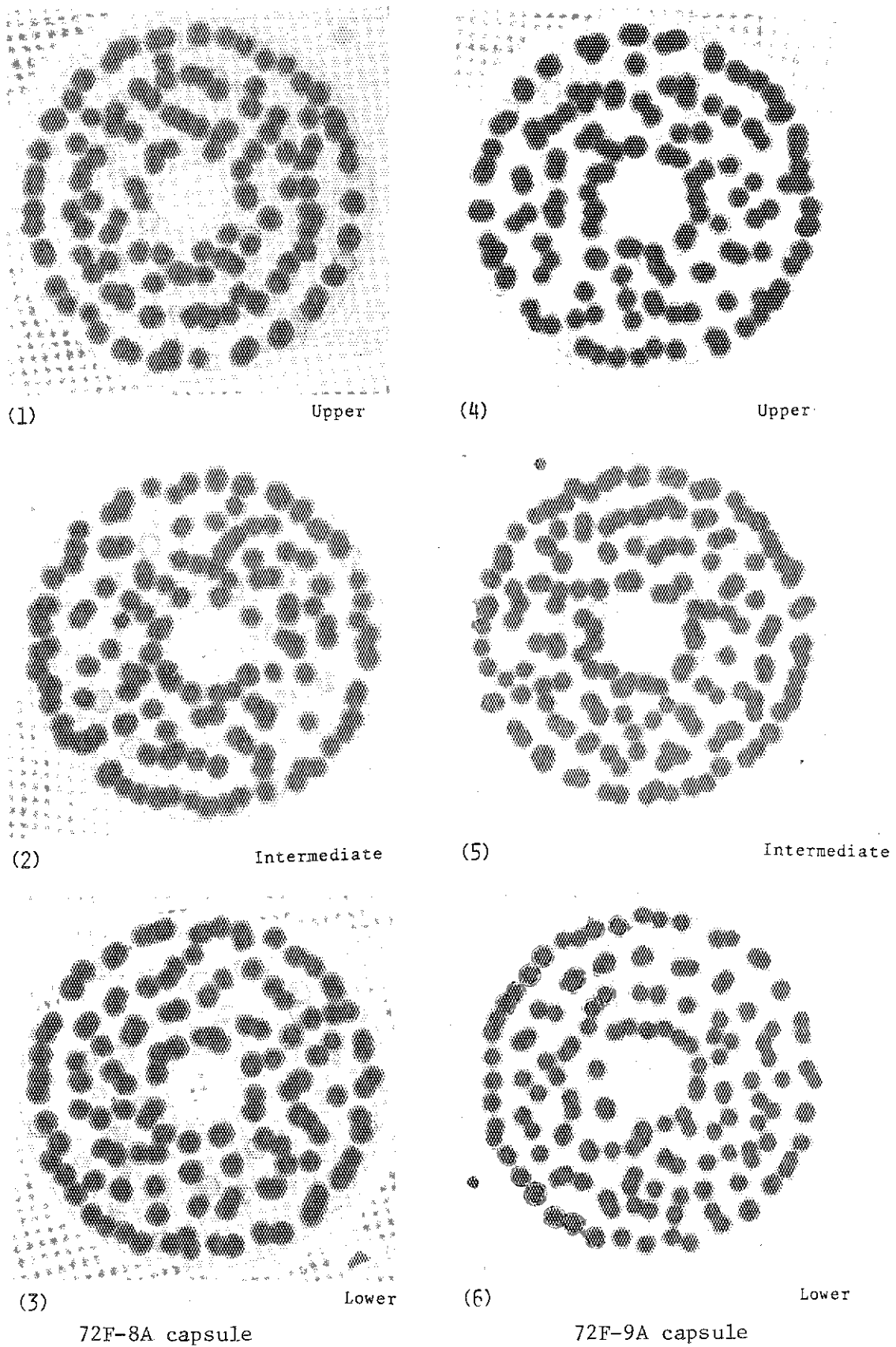


Fig. 47 X-ray radiographys of fuel compacts irradiated in 72F-8A and 72F-9A capsule

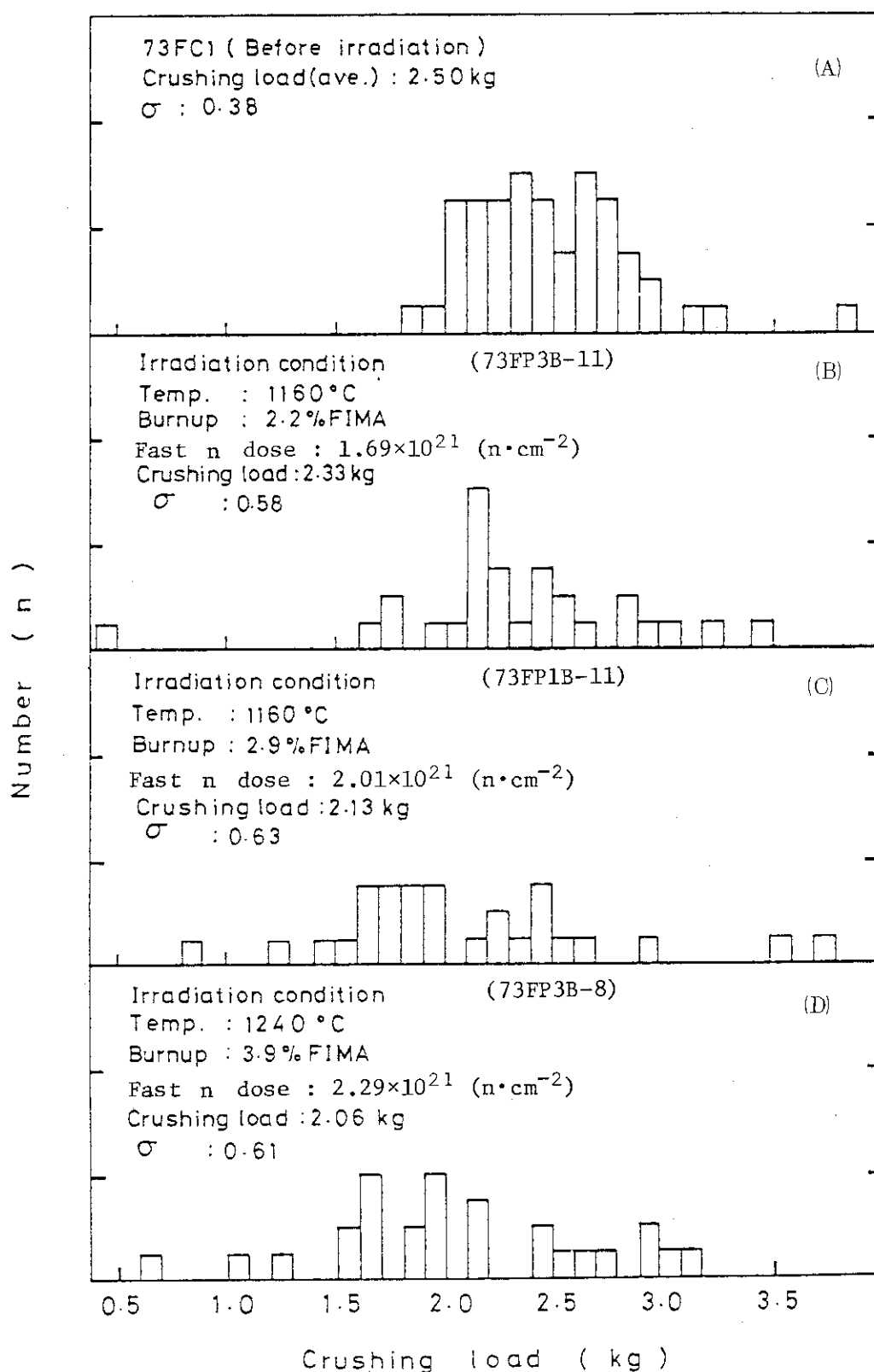


Fig. 48 Distributions of crushing strength of irradiated coated fuel particles