

JAERI - M
87-020

被覆粒子燃料のガススweepキャプセル
照射試験 (II)

(75F4A, 75F5A キャプセルによる照射)

1987年2月

小川 徹・福田 幸朔・鹿志村 悟・飛田 勉
湊 和生・山本 克宗・鈴木 紘・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、お申しこしてください。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 Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

被覆粒子燃料のガススィープキャプセル照射試験 (II)
(75F4A, 75F5A キャプセルによる照射)

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

小川 徹・福田 幸朔・鹿志村 悟・飛田 勉
湊 和生・山本 克宗⁺¹・鈴木 紘⁺²・松島 秀夫⁺²

(1987年1月28日受理)

ルーズな被覆燃料粒子および燃料コンパクトを、それぞれ、75F4A および75F5A の2本のガススィープキャプセルに装荷し、JMTRのBe第1層領域孔で4サイクル(約80日間)照射した。各キャプセルは相互に分離された3段の内筒を有していた。75F4A キャプセルの照射試料は多目的高温ガス実験炉の詳細設計仕様に従った、それぞれ初年度および2年度目の国産試作品であった。75F5A キャプセルには、他に、やや被覆燃料粒子寸法の異なる予備設計仕様試作品も装荷した。75F4A キャプセルでは、いずれの試料も始めの3サイクルの間、貫通破損率が0であり、最外層汚染ウランからのFPガスの放出挙動について貴重な知見が得られた。同キャプセル上段では、最高照射温度は1500℃、燃焼率は2.2%FIMAに達したが、FPガスのR/Bは約 1×10^{-5} (^{88}Kr)に過ぎず、照射後貫通破損率も 3×10^{-4} であった。75F5A キャプセル試料では最高照射温度約1600℃、燃焼率1.6%FIMAに対して、照射後貫通破損率は約 5×10^{-4} にすぎなかった。同キャプセル試料の照射後SiC層破損率は、照射前に比べて有意な増大を示さなかった。他に、熱分解炭素の照射効果、SiC層のパラジウム腐食、金属FP放出割合、燃料コンパクトの寸法変化等に関してデータが得られた。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+1 大洗研究所材料試験炉部

+2 研究炉管理部

Irradiation Experiments of Coated Particle Fuels
by Gas-swept Capsules (II)
(Irradiation by 75F4A and 75F5A Capsules)

Toru OGAWA, Kosaku FUKUDA, Satoru KASHIMURA,
Tsutomu TOBITA, Kazuo MINATO, Katsumune YAMAMOTO⁺¹,
Hiroshi SUZUKI⁺² and Hideo MATSUSHIMA⁺²

Department of Fuels and Materials Research,
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 28, 1987)

Coated fuel particles in loosely-packed condition and fuel compacts were irradiated in 75F4A and 75F5A capsules, respectively, in the 1st Be region of JMTR for four reactor periods (~80 days). Each capsule consisted of three inner-capsules which were separated from each other. The samples in the 75F4A capsule were obtained from the first and second fabrication campaigns meeting the VHTR fuel specification. The fuels according to a preliminary specification had different sizes and were also charged in the 75F5A capsule. All samples in the 75F4A showed no failure during the first three reactor periods, and gave valuable data concerning fission-gas release behavior due to uranium contamination in outer pyrolytic carbon layer. The coated fuel particles in its upper inner-capsule reached 2.2%-FIMA and experienced 1500°C, but R/B(⁸⁸Kr) was only about 1×10^{-5} ; the end-of-life fraction through-coating failure (ϕ_{EOL}) was 3×10^{-4} . The fuel compacts in the middle inner-capsule of 75F5A were irradiated to 1.6%FIMA at 1600°C maximum, but ϕ_{EOL} was merely 5×10^{-4} . Their end-of-life fraction defective SiC showed no statistically significant increase. Other data obtained were: Irradiation effects on pyrolytic carbon layers, Pd attack on SiC, fractional release of metal fission products and dimensional changes of fuel compacts.

Keywords: Gas-swept Capsule, Irradiation, JMTR, Fission Gases, Metal Fission Products, Coated Fuel Particles, Fuel Compacts, HTGR, PIE

+1 Department of JMTR Project, Oarai Research Establishment

+2 Department of Reactor Research Operation

目 次

1. 序 論	1
2. キャプセル構造	5
3. 照射試料	8
3.1 75F 4A キャプセル	8
3.2 75F 5A キャプセル	8
4. 照射条件	11
5. F P ガス放出率	13
6. ヨウ素放出率	13
7. 照射後試験	15
7.1 75F 4A キャプセル	15
7.1.1 被覆燃料粒子外観 (酸浸出前)	15
7.1.2 酸浸出率	15
7.1.3 酸浸出後の外観およびX線ラジオグラフ	15
7.1.4 断面組織	16
7.1.5 金属F P 放出割合	16
7.2 75F 5A キャプセル	17
7.2.1 燃料コンパクトの外観, 重量, 寸法	17
7.2.2 酸浸出率	17
7.2.3 酸浸出後の外観およびX線ラジオグラフ	17
7.2.4 断面組織	18
7.2.5 SiC 層破損率	18
7.2.6 金属F P 放出割合	19
8. 考 察	49
8.1 F P ガス放出率と粒子破損率	49
8.2 最外層汚染ウランからのF P ガス放出挙動	50
8.3 被覆層の照射健全性	51
9. 結 論	56
謝辞	57
参考文献	57
付録 照射履歴とF P ガス放出率の記録 (Table 5 - 1 ~ 5 - 6)	58

Contents

1. Introduction	1
2. Gas-swept capsule	5
3. Samples	8
3.1 75F4A capsule	8
3.2 75F5A capsule	8
4. Irradiation conditions	11
5. Fission-gas release	13
6. Iodine release	13
7. Post-irradiation examination	15
7.1 75F4A capsule	15
7.1.1 Visual inspection before acid leaching	15
7.1.2 Acid leaching	15
7.1.3 Visual inspection and X-ray radiography after acid leaching	15
7.1.4 Ceramography	16
7.1.5 Metal fission-product release	16
7.2 75F5A capsule	17
7.2.1 Appearance, weight and dimension of compacts	17
7.2.2 Acid leaching	17
7.2.3 Visual inspection and X-ray radiography after acid leaching	17
7.2.4 Ceramography	18
7.2.5 Fraction defective SiC	18
7.2.6 Metal fission-product release	19
8. Discussion	49
8.1 Fractional release of fission gases and fraction through-coating failure	49
8.2 Fission gas release behavior from uranium contamination of O-PyC	50
8.3 Irradiation integrity of coatings	51
9. Conclusion	56
Acknowledgements	57
References	57
Appendix Records of irradiation history and Fission gas release (Tables 5-1 ~ 5-6)	58

List of Tables

- Table 1.1 Irradiation devices in JMTR for HTGR fuel
- Table 1.2 Reports on irradiation tests of HTGR fuel in JMTR
- Table 1.3 List of gas-swept capsules irradiated in JMTR
- Table 3.1 Characters of coated fuel particles irradiated in 75F4A
- Table 3.2 Characters of HTGR fuel compacts irradiated in 75F5A
- Table 4.1 Summary of irradiation conditions of capsules 75F4A and 75F5A
- Table 5.1 R/B of 760PC-3 irradiated in 75F4A-1
- Table 5.2 R/B of 76FPC-1A irradiated in 75F4A-2
- Table 5.3 R/B of 75FPC-4A irradiated in 75F4A-3
- Table 5.4 R/B of 75FP4A irradiated in 75F5A-1
- Table 5.5 R/B of 75FP2A irradiated in 75F5A-2
- Table 5.6 R/B of 75FP3A irradiated in 75F5A-3
- Table 7.1 End-of-life fraction through-coating failure (ϕ_{EOL})
- Table 7.2 Weight and dimensional changes of fuel compacts irradiated in 75F5A capsule
- Table 7.3 Frequencies of minor anomalies introduced into the coating by irradiation
- Table 7.4 Fraction defective SiC by PIE burn-leaching test
- Table 7.5 Fractional release (F) of metal fission products
- Table 8.1 Diffusion coefficients assumed in the model by Fukuda et al¹¹⁾
- Table 8.2 Comparison of the end-of-life fraction through-coating failure (ϕ_{EOL}) by acid leaching test and those by model predictions from R/B of fission gas

List of Figures

- Fig. 1.1 Triso-coated UO₂ particle by VHTR specification.
- Fig. 2.1 Schematic arrangement of gas-swept capsule 75F4A.
- Fig. 2.2 Schematic arrangement of gas-swept capsule 75F5A.
- Fig. 4.1 Irradiation temperature of gas-swept capsule 75F4A.
- Fig. 4.2 Irradiation temperature of gas-swept capsule 75F5A.
- Fig. 6.1 Result of ¹³⁵Xe decay experiment after reactor shut-down at 46th JMTR cycle: 76OPC-3 particles in 75F4A-1.
- Fig. 7.1 Flowsheet of PIE of 75F4A capsule.
- Fig. 7.2 Flowsheet of PIE of 75F5A capsule.
- Fig. 7.3 Surface appearance of coated fuel particles irradiated in 75F4A: a-c, 76OPC-3 in 75F4A-1; d and e, 76FPC-1A in 75F4A-2; f-h, 75FPC-4A in 75F4A-3.
- Fig. 7-4 Surface appearance of coated fuel particles after acid-leaching test: 76FPC-1A particles in 75F4A-2.
- Fig. 7.5 X-ray microradiographs after acid-leaching test: a, 76OPC-3 in 75F4A-1; b, 76FPC-1A in 75F4A-2.
- Fig. 7.6 Ceramographs of coated fuel particles irradiated in 75F4A: a, 76OPC-3 in 75F4A-1; b, 76FPC-1A in 75F4A-2; c, 75FPC-4A in 75F4A-3.
- Fig. 7.7 Ceramographs showing irradiation induced changes: a-d, 76OPC-3 in 75F4A-1; e and f, 76FPC-1A in 75F4A-2; g, 75FPC-4A in 75F4A-3.
- Fig. 7.8 Results of EPMA analyses on 76OPC-3 particles irradiated in 75F4A-1: a, Optical image; b, Si image; c, Pd image; d, Te image; e, Ce image.
- Fig. 7.9 Surface appearance of fuel compacts irradiated in 75F5A: a, 75FP4A compacts in 75F5A-1; b, 75FP2A compacts in 75F5A-2; c, 75FP3A compacts in 75F5A-3.
- Fig. 7.10 Surface appearance of coated fuel particles after electrolytic deconsolidation of fuel compacts and acid-leaching test: a & b, 75FP4A-1 compact in 75F5A-1; c & d, 75FP4A-2 compact in 75F5A-1; e & f, 75FP2A-1 compact in 75F5A-2; g & h, 75FP2A-2 compact in 75F5A-2; i & j, 75FP3A-1 compact in 75F5A-3; k & l, 75FP3A-2 compact in 75F5A-3.
- Fig. 7.11 X-ray microradiographs after acid-leaching test: a & b, 75FP3A compact in 75F5A-3; c & d, 75FP2A compact in 75F5A-2; e & f, 75FP4A compact in 75F5A-1.

- Fig. 7.12 Ceramographs of coated fuel particles after electrolytic deconsolidation of fuel compacts and acid-leaching test: a, 75FP4A-1 compact in 75F5A-1; b, 75FP4A-2 compact in 75F5A-1; c, 75FP2A-1 compact in 75F5A-2; d, 75FP2A-2 compact in 75F5A-2; e, 75FP3A-1 compact in 75F5A-3; f, 75FP3A-2 compact in 75F5A-3.
- Fig. 7.13 Ceramographs showing irradiation induced changes: a, 75FP4A-1 in 75F5A-1; b & c, 75FP4A-2 in 75F5A-1; d, 75FP2A-1 in 75F5A-2; e & f, 75FP2A-2 in 75F5A-2; g & h, 75FP3A-2 in 75F5A-3.
- Fig. 7.14 Pd-L α line scan showing Pd penetration of $\approx 1 \mu\text{m}$ in SiC (75FP2A-1 irradiated in 75F5A-2).
- Fig. 7.15 Flowsheet of determination of fraction defective SiC.
- Fig. 8.1 Fission gas release after model analyses by Fukuda et al.
- Fig. 8.2 Ratio of R/B's from samples in 75F4A for the first three reactor periods: ^{135}Xe to ^{138}Xe .
- Fig. 8.3 Ratio of R/B's from samples in 75F4A for the first three reactor periods: ^{138}Xe to ^{88}Kr .
- Fig. 8.4 Ratio of R/B's from samples in 75F4A for the first three reactor periods: ^{135}Xe to ^{88}Kr .

1. 序 論

原研における高温ガス炉用被覆粒子燃料の照射試験は、主にJMTRおよびJRR-2の二つの試験炉において進められている。JMTRでの照射試験は、密封型計装キャプセル、ガススイープキャプセル、OGL-1ガスループの三種の装置によって行われている。Table 1.1にはこれら照射装置の特性を比較してある。全体の照射計画は各装置の特性を考慮して編成されている。Table 1.2には、これまでのJMTR照射試験についての報告をリストした。ガススイープキャプセル照射に関しては、本報告が74F9Jキャプセルについての報告⁸⁾に次いで第2報にあたる。

ガススイープキャプセルは、内筒中に収められた特定の燃料試料からの核分裂生成希ガス (FPガス) の放出率を、温度と時間の関数として詳細に追うことができるという、他の照射装置にはない特長を有する。52年度照射開始の74F9Jキャプセルに始まり、現在まで9本のガススイープキャプセルの照射が終了した (Table 1.3)。これらの照射試験から得られた結果の一部、特にFPガス放出挙動、金属FP挙動については既に別に報告してある¹¹⁻¹⁵⁾。

ここでは、これらのうち、第2、3本目にあたる75F4Aおよび75F5Aキャプセルによる照射試験について報告する。前者には燃料コンパクトに成型しないルーズな状態の被覆燃料粒子を、後者には燃料コンパクトを装荷した。これらのキャプセルにおいて初めて、多目的高温ガス実験炉予備設計仕様被覆燃料粒子の他に、詳細設計仕様被覆燃料粒子 (Fig. 1.1) についてのガススイープ照射試験が行われた^(*)。照射はJMTRのBe第1層領域で4サイクル (約80日) にわたって成功裏に行われ、照射後期には燃料温度最高1500℃以上を達成した。

Table 1.1 Irradiation devices in JMTR for HTGR fuel

	Sweep gas	(Fast fluence) ^a /(Burnup)	No. fuel compacts
Closed Capsule	None	$\leq 10^{25}/1\%FIMA$	≤ 16
Gas-swept Capsule	3 atm. He	$\leq 10^{25}/1\%FIMA$	≤ 6
OGL-1 Loop	30atm. He	$\sim 3 \times 10^{24}/1\%FIMA^b$	20~60 ^c

a. n/m^2 ($E > 29$ fJ)

b. 20% eU fuel

c. 20/Fuel Pin

* 1 実験炉計画は61年度に高温工学試験研究炉計画に移行した。現在の設計における粒子仕様は従来の詳細設計仕様にはほぼ等しい。

Table 1.2 Reports on irradiation tests of HTGR fuel in JMTR *

Ref. No.	Title	Report No.	Year
<u>Closed capsule</u>			
1.	被覆燃料粒子の照射挙動試験 (Ⅱ) (71F7A キャプセルによるJMTR照射)	JAERI-M 6717	1976
2.	被覆燃料粒子の照射挙動試験 (Ⅲ) (72F6Aおよび72F7A キャプセルによるJMTR照射)	JAERI-M 8949	1980
3.	被覆燃料粒子の照射挙動試験 (Ⅳ) (73F12AキャプセルによるJMTR照射)	JAERI-M 9644	1981
4.	被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験 (Ⅱ) (JMTRによる71F6A, 72F8A, 72F9A キャプセルの照射)	JAERI-M 83-153	1983
5.	被覆燃料粒子の照射挙動試験 (Ⅴ) (73F13AキャプセルによるJMTR照射)	JAERI-M 83-232	1984
6.	被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験 (Ⅲ) (JMTRによる76F6A キャプセルの照射)	JAERI-M 84-106	1984
7.	被覆燃料粒子の照射挙動試験 (Ⅵ) (74F1A キャプセルによるJMTR照射)	JAERI-M 84-199	1984
<u>Gas-swept capsule</u>			
8.	被覆粒子燃料のスweepガスキャプセル照射試験 (Ⅰ) (74F9Jキャプセルによる照射)	JAERI-M 84-054	1984
<u>OGL-1 Loop</u>			
9.	OGL-1 第1次, 第2次燃料体の照射試験	JAERI-M 83-012	1983
10.	OGL-1 第3次, 第4次および第5次燃料体の 照射試験	JAERI-M 86-092	1986

* Listing only those using UO₂-based coated particle fuel.

Table 1.3 List of gas-swept capsules irradiated in JMTR

Capsule	%eU	EFPD ^a	Burnup ^b	Fast fluence ^c	Temp.(°C) ^d
74F9J	8	50.5	1.7-2.4	0.5-0.7	1600
75F4A	4, 12	83.1	1.0-2.2	0.7-1.1	1500
75F5A	4	78.0	1.0-1.6	0.6-1.1	1600
76F4A	4	36.5	0.6-1.0	0.5-1.1	1200
76F5A	4	120.4	2.1-3.2	2.2-4.1	1370
78F3A	8	81.9	2.9-4.9	1.3-3.0	1500
80F4A	8	79.9	e	1.1-2.1	1300
81F10A	4	19.1	3	0.4-0.5	1050
83F1A	4	125.8	e	e	1490

- a. Effective full-power days.
b. Minimum and maximum of the average burnups for inner capsules.
c. 10^{25} n/m² (E>29fJ)
d. Maximum in temperature history.
e. To be measured.

Component	Size (μm)	Density (g/cm^3)
UO ₂	600 \pm 60	10.41 \pm 0.22
Buffer	60 \pm 15	1.10 \pm 0.10
PyC (Inner)	30 \pm 5	1.85 \pm 0.05
SiC	25 \pm 5	\geq 3.20
PyC (Outer)	45 \pm 5	1.85 \pm 0.05

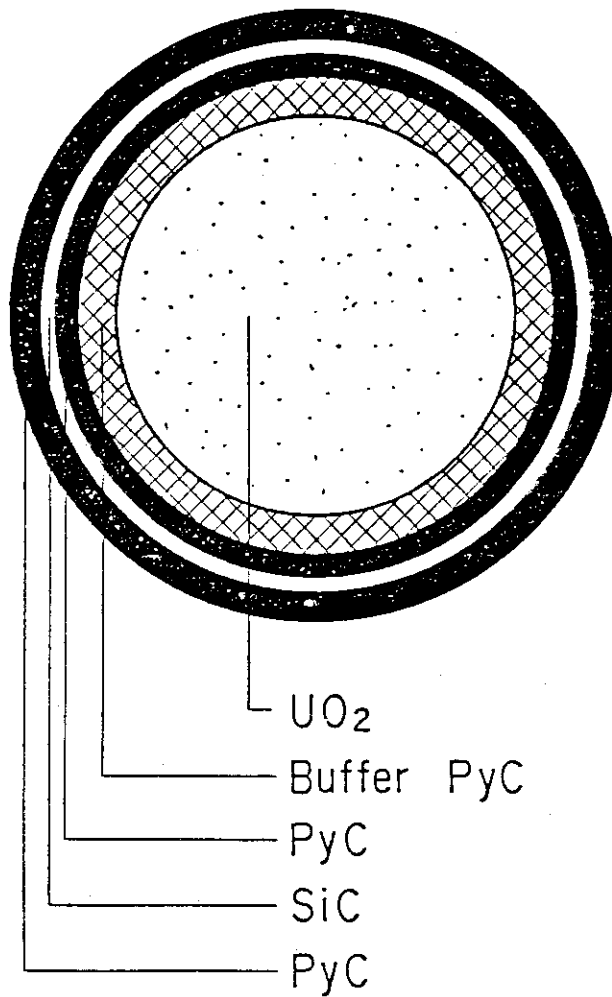


Fig. 1.1 Triso-coated UO₂ particle by VHTR specification.

2. キャプセル構造

75F4A, 75F5Aキャプセルの構造をFig. 2.1, 2に示す。各キャプセルは軸方向に3個の内筒を有していた。3個の内筒はHe スweepガス供給系を共有し、排気系を各独立としていた。Sweepガス圧力は0.3 MPa, ガス流量は100m³/min (標準状態)に設定されていた。

75F4AではSweepガスは黒鉛製試料容器の端栓部の多数のドリル孔から流入し、試料粒子充填部を通過して、容器底部から中央の排気管を通過して排出された。75F5Aキャプセルでは、端栓から流入したSweepガスはコンパクト外表面と容器内壁との間を通過して、底部から排気管に入った。試料温度は中心に配置したNb シースW 5%Re/W-26% Re 熱電対の読みで代表させた。W-Re 熱電対の中性子照射による起電力変化に関しては報告(13)で簡単に論じてある。照射温度はいわゆる真空温度制御法により、2重のNb-1%Zr内筒のギャップのHe ガス圧を介して制御された。ただし、真空温度制御系は各キャプセル1系統であったので、1つのキャプセル内の3段の内筒内の温度は同時に変化した。

Sweepガス排気管は放射性ヨウ素除去用の活性炭トラップを通ったのち、FPガス測定のための炉外装置に導かれた。その他、ガスSweepキャプセル照射装置の全体、ならびにFPガス測定用炉外装置については、報告(8)に詳しい。

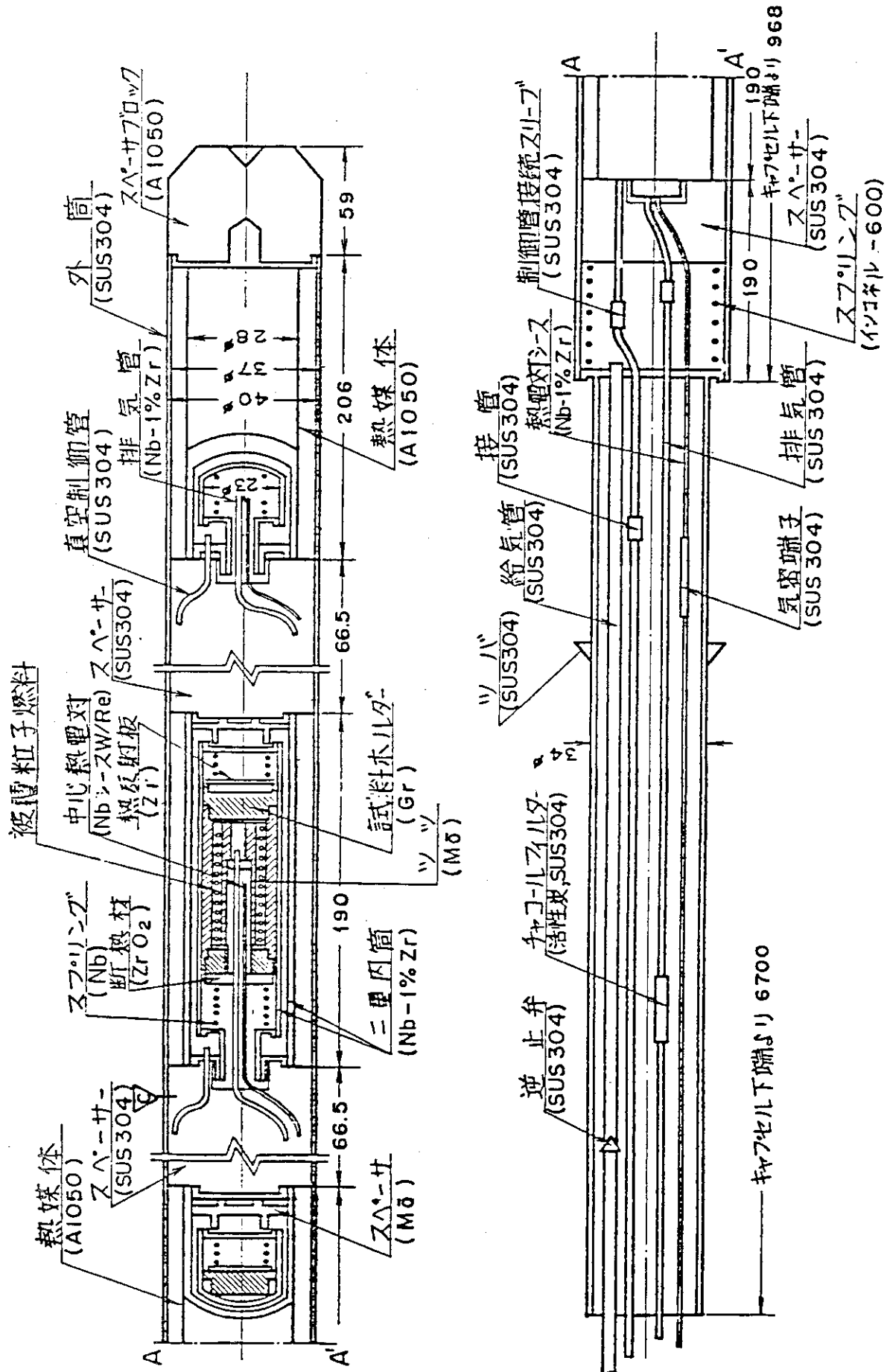


Fig. 2.1 Schematic arrangement of gas-swept capsule 75F4A.

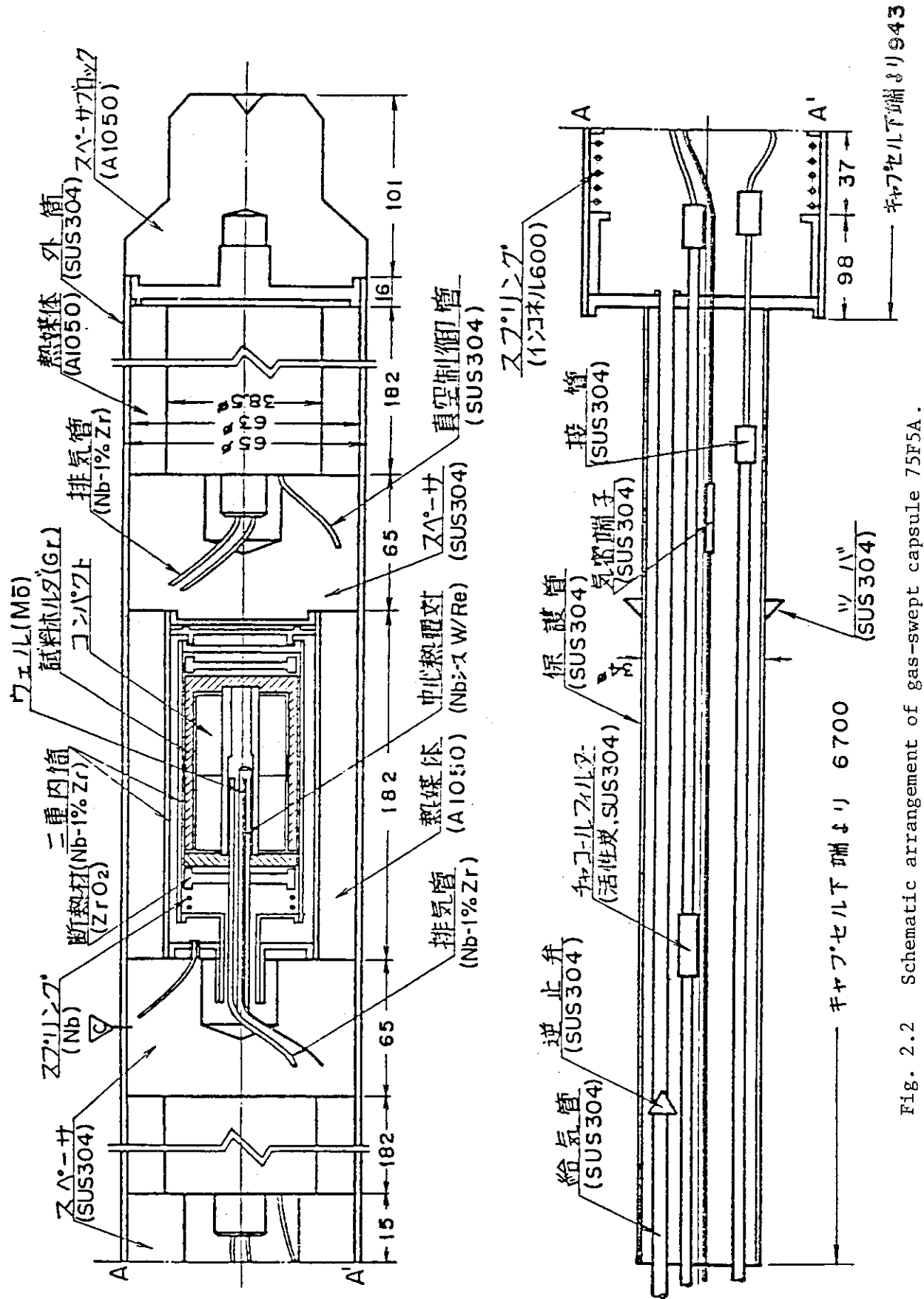


Fig. 2.2 Schematic arrangement of gas-swept capsule 75F5A.

3. 照射試料

3.1 75F4A キャプセル

75F4A キャプセル試料は、燃料コンパクトに成型する前のルーズな状態の被覆燃料粒子であった。各内筒にはそれぞれ異なった種類の被覆燃料粒子が装荷されていた。Table 3.1 には各粒子の製造諸元を、製造時貫通破損率および SiC 層破損率と併せて示してある。上段試料 (76 OPC3) は濃縮度 12%, 他は 4% であった。

下段試料 (75FPC-4A) は 50 年度に初めて試作された詳細設計仕様粒子、上段および中段試料 (76FPC-1A) は 2 年目の試作粒子であった。上段試料と同一バッチの被覆燃料粒子を分散させた燃料コンパクトは OGL-1 第 2 次燃料体に装荷され、約 1250°C で 0.5% FIMA まで照射された⁹⁾。中段試料と同一バッチの被覆燃料粒子を用いたコンパクトは、76F6A 密封キャプセルに装荷され、約 1250°C で 1.8% FIMA まで照射された^(*1) 6)。下段試料と同一バッチの被覆燃料粒子を用いたコンパクトは、以下に述べるように 75F5A キャプセルに装荷された。

3.2 75F5A キャプセル

75F5A キャプセルの照射試料は 50 年度試作の燃料コンパクトであった。製造諸元、製造時露出ウラン率^(*2)、SiC 層破損率を Table 3.2 に示す。上段試料コンパクト (75FP4A) は詳細設計仕様、中段試料コンパクト (75FP2A) は予備設計仕様準じて試作された。上段試料に用いた被覆燃料粒子は、上記 75F4A キャプセルに装荷されたものと同一製造バッチのものであった。下段試料コンパクト (75FP3A) は予備設計仕様の被覆燃料粒子を用いてあるが、粒子充填率は詳細設計仕様並の 30vol% に高めてあった。

*1 先の報告値 3.4% FIMA は過大評価であった。

*2 破損粒子中のウランと黒鉛マトリックスの汚染とを含む。

Table 3.1 Characters of coated fuel particles irradiated in 75F4A

Capsules Compact name	75F4A-1 760PC-3	75F4A-2 76FPC-1A	75F4A-3 75FPC-4A
Kernel			
O/U ^a	2.01	2.01	2.01
%eU	12.0	4.01	4.01
Dia. (μm) ^b	599(22)	602(19)	617(24)
Density ^c	95.5	96.5	96.8
Coating			
Thickness (μm) ^d			
Buffer	59.0	59.8	59.1
I-PyC	30.2	31.0	29.4
SiC	25.5	24.8	28.5
O-PyC	44.7	43.2	46.1
Density (Mg/m^3)			
Buffer	1.19	1.20	1.14
I-PyC	1.86	1.86	1.84
SiC	3.21	3.21	3.21
O-PyC	1.86	1.84	1.81
Particle			
$\phi_{\text{BOL}}^{\text{e}}$	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$
$\phi_{\text{BOL}}^{\text{f}}$	2×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}
U content (%)	61.8	62.6	63.0
Density (Mg/m^3)	4.54	4.49	4.66
Charge weight (g)	16.92	16.76	16.69

- a. Determined before coating, should be approximately stoichiometric after coating.
- b. Parenthesized value: standard deviation
- c. % Theoretical density
- d. Mean thickness
- e. Beginning-of-life fraction through-coating defects by acid leaching determined on particles from the same fabrication batch.
- f. Beginning-of-life fraction defective SiC by burn-leach techniques determined on particles from the same fabrication batch¹⁸⁾.

Table 3.2 Characters of HTGR fuel compacts irradiated in 75F5A

Capsules Compact name	75F5A-1		75F5A-2		75F5A-3	
	75FP4A-1	75FP4A-2	75FP2A-1	75FP2A-2	75FP3A-1	75FP3A-2
Kernel						
O/U ^a	2.01		2.01		2.01	
%eU	4.01		4.01		4.01	
Dia. (μm) ^b	617(21)		505(14)		507(17)	
Density ^c	96.8		97.0		96.6	
Coating						
Thickness (μm) ^d						
Buffer	59.1		43.5		40.1	
I-PyC	29.4		26.7		30.3	
SiC	28.5		26.8		29.0	
O-PyC	46.1		44.7		43.5	
Density (Mg/m^3)						
Buffer	1.14		1.05		1.12	
I-PyC	1.84		1.89		1.85	
SiC	3.21		3.20		3.21	
O-PyC	1.81		1.87		1.86	
Particle						
U content (%)	63.0		60.0		58.6	
Compact						
OD (mm) ^e	24.06	24.05	23.94	23.97	24.07	24.06
ID (mm)	8.00	7.99	8.00	8.00	7.99	7.99
L (mm)	39.92	39.97	40.32	40.20	39.95	39.95
Weight (g)	41.31	41.29	36.85	36.87	40.35	40.34
Vol% particle	29.9	29.9	21.9	22.0	29.8	29.9
U content (g)	14.11	14.11	9.51	9.51	12.49	12.49
$\phi_{\text{BOL}}^{\text{f}}$	9.5×10^{-5}		1.1×10^{-5}		4.4×10^{-5}	
$\phi_{\text{BOL}}^{\text{g}}$	1×10^{-3}		2×10^{-3}		1×10^{-3}	

- a. Determined before coating, should be approximately stoichiometric after coating.
- b. Parenthesized value: standard deviation
- c. % Theoretical density
- d. Mean thickness
- e. OD: outer diameter, ID: inner diameter, L: length
- f. Beginning-of-life fraction through-coating defects by acid leaching determined on a compact from the same fabrication lot.
- g. Beginning-of-life fraction defective SiC by burn-leach techniques determined on a compact from the same fabrication lot¹⁸⁾.

4. 照射条件

75F4A, 5A 両キャプセルの照射条件を Table 4.1 にまとめてある。両キャプセルとも JMTR 反射体 (Be) 第 1 層領域孔で 4 サイクルにわたって照射された。Fig. 4.1, 2 の温度履歴に示すように、75F4A 上段、75F5A 中段はともに、ほとんど全照射期間にわたって試料温度 1400°C 以上を維持することができた。ただし、75F5A キャプセルでは第 50 サイクル前半で中段の W/Re 中心熱電対が故障してしまい、以後は下段の熱電対指示値を用いて温度を制御した。したがって、第 50 サイクル以後の中段の照射温度は推定値である。

4%濃縮燃料について、燃焼率は内筒平均 1.6%FIMA に達した。高速中性子照射量は最大 $1.1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 29 \text{ fJ})$ であった。

中性子照射量はキャプセルに装荷したフルエンス・モニター・ワイヤの分析に基づいている。また、燃焼率は、東海ホットラボにおける照射後の健全粒子、数 10 粒の α スペクトロメトリーから求めた。これらの測定および評価方法については、報告 (19) に詳しい。しかし、その後、数種類の照射試料についてより厳密な燃焼率測定を行った結果 (*1)、ホットラボでの簡便法では ^{137}Cs 生成量が平均 20% 程度過小評価されていることが分かった。したがって、ここでは報告 (19) の方法で求めた燃焼率測定値に必要な補正を加えた値を採用した。

Table 4.1 Summary of irradiation conditions of capsules 75F4A and 75F5A

	75F4A			75F5A		
Date	1979 Jan. 13 - 1979 Dec. 07			1979 Nov. 12 - 1980 Jun. 07		
JMTR cycle	45 - 48			48 - 51		
Core position	M6 (1st reflector)			F11 (1st reflector)		
EFPD ^a	83.1 (1994.6h)			78.0 (1872.5h)		
Inner capsule	top	middle	bottom	top	middle	bottom
	75F4A-1	75F4A-2	75F4A-3	75F5A-1	75F5A-2	75F5A-3
Sample name	760PC-3	76FPC-1A	75FPC-4A	75FP4A-1,2	75FP2A-1,2	75FP3A-1,2
Thermal fluence ^b	0.8	1.2	0.7	0.7, 0.9	1.6	1.4, 1.2
Fast fluence ^c	0.7	1.1	0.8	0.6, 0.7	1.1	0.9, 0.8
Burnup (%FIMA) ^d	2.2	1.5	1.0	0.9, 1.1	1.6	1.3, 1.2
%Pu fission	4	16	11	11, 13	20	16, 14

a. Effective full-power days

b. $10^{25} \text{ n/m}^2 (E < 0.683 \text{ eV})$

c. $10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 0.18 \text{ MeV})$

d. Values in ref. (19) were slightly underestimated.

* 1 燃焼率測定開発室 (現、分析センター) による。

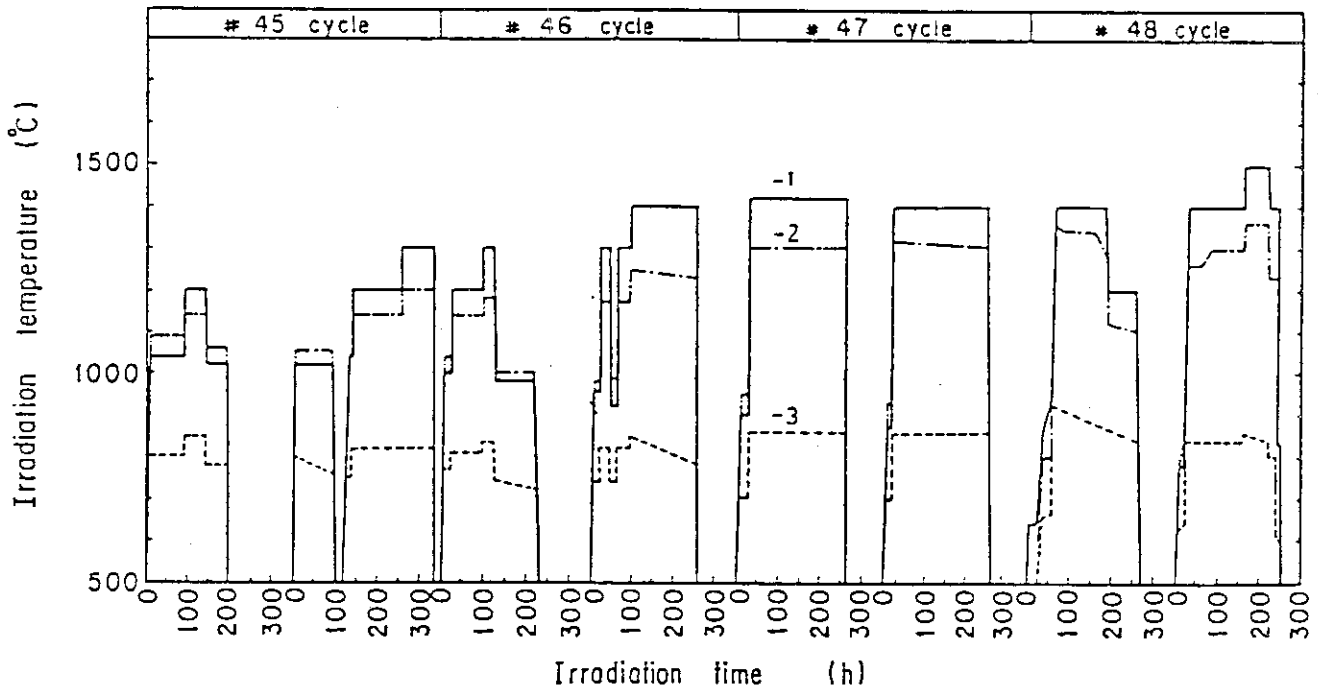


Fig. 4.1 Irradiation temperature of gas-swept capsule 75F4A.

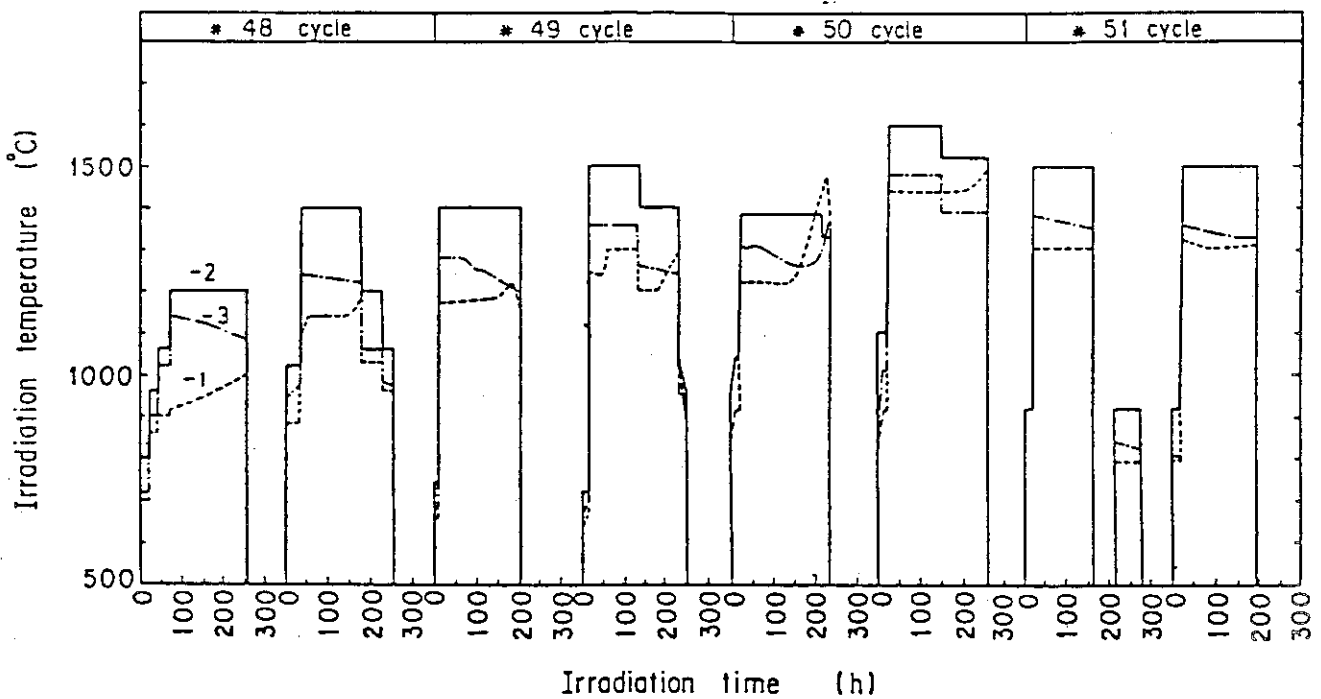


Fig. 4.2 Irradiation temperature of gas-swept capsule 75F5A.

5. FPガス放出率

短半減期FPガス放出率は、ガス原子の放出速度(R)の生成速度(B)に対する比、 R/B で表される。ガススweep照射試験では、Rをスweepガス中のFPガス濃度から求め、Bを燃料発熱量の計算から評価している。具体的には、報告(8)に詳しく述べてある。Table 5.1～5.6(巻末)に、75F4A、75F5Aの各試料からのFPガス放出率をまとめて示す。ただし、51サイクルの R/B 値は、他のキャプセル(76F4A)からのガスの混入が疑われたので、ここではデータとして採用しなかった。

6. ヨウ素放出率

ヨウ素は活性炭トラップをはじめ、途中のガス配管系内に沈着してしまうので、採取ガス中には含まれない。そこで、その放出率は以下のようにして評価している。

原子炉の停止後、燃料温度が室温近くまで低下してしまうと、燃料からのFPガスの放出はほとんど0になってしまうであろう。しかし、系内には、放射性ヨウ素の蓄積があり、これが壊変する際に、娘のXeを放出する。したがって、炉停止後も、 ^{133}I (半減期20.9h)、 ^{135}I (6.61h)の娘核種である ^{133}Xe 、 ^{135}Xe は、かなりの長時間にわたってスweepガス中に見出される。言い換えれば、炉停止後の ^{133}Xe 、 ^{135}Xe 濃度を、炉停止時点まで外挿することにより、ヨウ素沈着量を評価することができる。

75F4AキャプセルのJMTR第46サイクル終了後において、上段スweepガス中の ^{135}Xe 濃度の減衰を追った結果をFig. 6.1に示した。減衰が ^{135}I の半減期にほぼ従っていることがわかる。 ^{133}Xe については濃度が低すぎて測定できなかった。同図から、 ^{135}I の R/B は 7×10^{-9} と求められた。炉停止1.5時間前までは163時間にわたって上段試料(76OPC-3)の温度は約1400°Cに保たれていた。したがって、この ^{135}I の R/B はほぼ1400°Cにおけるものといえて良いであろう。同温度での ^{135}Xe の R/B は $\sim 3 \times 10^{-8}$ であったので、約20%が系内に沈着していた ^{135}I の寄与であったことになる。このように低いFPガスの R/B は、貫通破損率0の場合の被覆層汚染ウランからの放出に対応している。したがって、後述(第8章)するように、ここで得られた結果から、被覆層中の希ガス、ヨウ素の拡散係数を評価することができる。

5. FPガス放出率

短半減期FPガス放出率は、ガス原子の放出速度(R)の生成速度(B)に対する比、 R/B で表される。ガススweep照射試験では、Rをスweepガス中のFPガス濃度から求め、Bを燃料発熱量の計算から評価している。具体的には、報告(8)に詳しく述べてある。Table 5.1～5.6(巻末)に、75F4A、75F5Aの各試料からのFPガス放出率をまとめて示す。ただし、51サイクルの R/B 値は、他のキャプセル(76F4A)からのガスの混入が疑われたので、ここではデータとして採用しなかった。

6. ヨウ素放出率

ヨウ素は活性炭トラップをはじめ、途中のガス配管系内に沈着してしまうので、採取ガス中には含まれない。そこで、その放出率は以下のようにして評価している。

原子炉の停止後、燃料温度が室温近くまで低下してしまうと、燃料からのFPガスの放出はほとんど0になってしまうであろう。しかし、系内には、放射性ヨウ素の蓄積があり、これが壊変する際に、娘のXeを放出する。したがって、炉停止後も、 ^{133}I (半減期20.9h)、 ^{135}I (6.61h)の娘核種である ^{133}Xe 、 ^{135}Xe は、かなりの長時間にわたってスweepガス中に見出される。言い換えれば、炉停止後の ^{133}Xe 、 ^{135}Xe 濃度を、炉停止時点まで外挿することにより、ヨウ素沈着量を評価することができる。

75F4AキャプセルのJMTR第46サイクル終了後において、上段スweepガス中の ^{135}Xe 濃度の減衰を追った結果をFig. 6.1に示した。減衰が ^{135}I の半減期にほぼ従っていることがわかる。 ^{133}Xe については濃度が低すぎて測定できなかった。同図から、 ^{135}I の R/B は 7×10^{-9} と求められた。炉停止1.5時間前までは163時間にわたって上段試料(76OPC-3)の温度は約1400°Cに保たれていた。したがって、この ^{135}I の R/B はほぼ1400°Cにおけるものといえて良いであろう。同温度での ^{135}Xe の R/B は $\sim 3 \times 10^{-8}$ であったので、約20%が系内に沈着していた ^{135}I の寄与であったことになる。このように低いFPガスの R/B は、貫通破損率0の場合の被覆層汚染ウランからの放出に対応している。したがって、後述(第8章)するように、ここで得られた結果から、被覆層中の希ガス、ヨウ素の拡散係数を評価することができる。

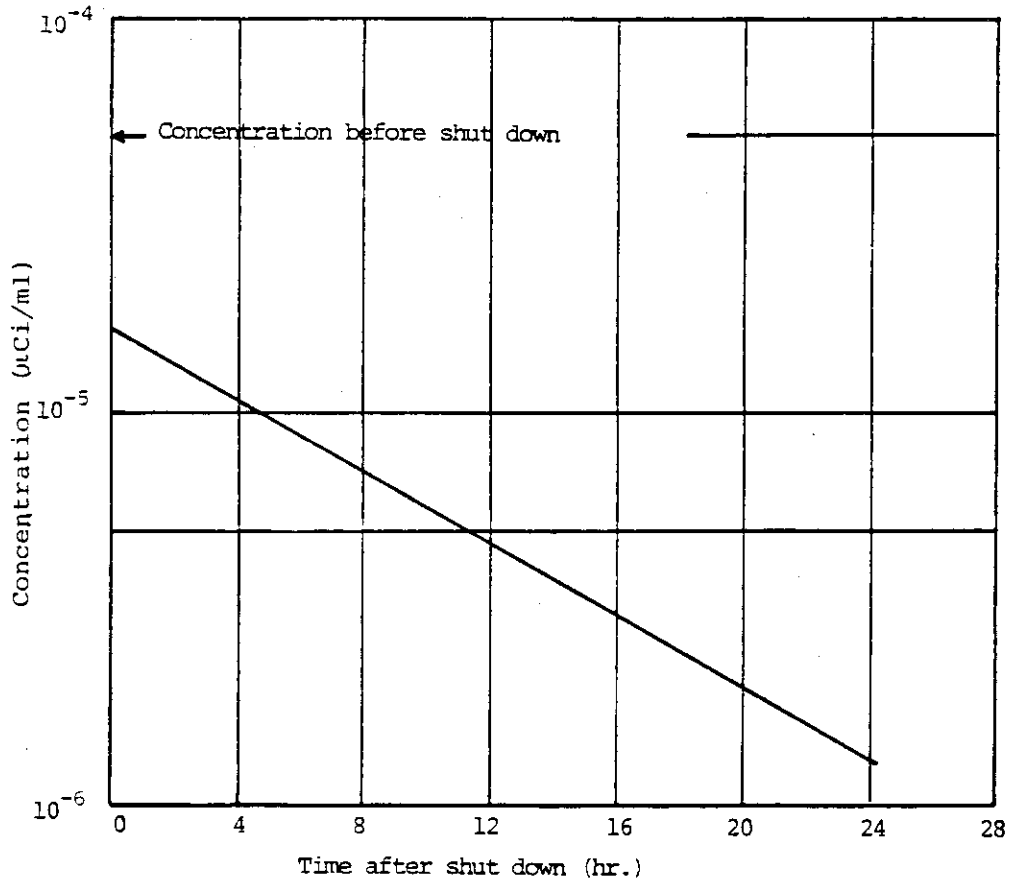


Fig. 6.1 Result of ^{135}Xe decay experiment after reactor shut-down at 46th JMTR cycle: 760PC-3 particles in 75F4A-1.

7. 照射後試験

75F4A キャプセルは昭和54年12月7日に、75F5A キャプセルは55年6月7日に照射を終了した。これらのキャプセルは55年10月に大洗ホットラボから東海ホットラボに移送され、照射後試験は56年2月に開始された。Fig. 7.1, 2に照射後試験の流れを示す。

7.1 75F4A キャプセル

7.1.1 被覆燃料粒子外観（酸浸出前）

実体顕微鏡による粒子外観検査は、酸浸出試験に先立って各600粒のサンプルについて行われた。検査終了後にサンプルは元の集団に戻し、酸浸出試験に供した。

結果をFig. 7.3に示す。上段試料(76 OPC3)については、ざくろ状の開口破損が1粒見出された。ただし、同破損粒子の燃料核はほとんど被覆の内側に残留しているようであった。また、破損は免れていたが、被覆表面になんらかの化学反応の痕と考えられる微小なクレータ状の凹みが見られた。

中段試料(76FPC-1A)については、裸の燃料核が1粒見出された。また、約2粒分に相当する被覆層の破片が見られた。

下段試料(75FPC-4A)については、約3粒分に相当する被覆層の破片が見出されたが、サンプル中には裸の燃料核は見つからなかった。

7.1.2 酸浸出率

各被覆燃料粒子試料の全量を100 mlの6モル硝酸溶液中で約8時間煮沸した。溶液から数mlを採取し、浸出されたFP量を γ スペクトロメトリーによって定量した。被覆燃料粒子の照射終了時貫通破損率(ϕ_{EOL})は、 144 (Ce-Pr)の浸出率で代表させた。他のFPはRuのように溶解挙動に問題があったり、Csのように相当量が被覆層中に移行してしまっていたりする 144 ため、貫通破損率を代表しないと考えられるからである。

結果はTable 7.1に照射前破損割合および照射条件と対比させて示してある。照射温度、燃焼率の最も高かった上段試料(76 OPC3)が 3×10^{-4} と、最も低い ϕ_{EOL} を示した。

7.1.3 酸浸出後の外観およびX線ラジオグラフ

酸浸出後に1200粒を採取し、再度外観を調べるとともに、X線ラジオグラフを撮影した。X線ラジオグラフでは燃料核が酸浸出されて失われている場合に破損と判断した。酸浸出前の外観検査ないしは酸浸出率の値に比べ、相対的に多数の破損粒子あるいは被覆層破片が観察された。これは、破損粒子の燃料核が溶解除去されて、比重が健全粒子よりも小さくなったために、酸浸出後のサンプルのなかに優先的に混入したためと考えられる。

破損粒子の外観をFig. 7.4に示す。被覆層に複雑な亀裂が入っていることが認められる。Fig.

7.5b には、このような粒子のX線ラジオグラフを示す。外観からは分からないが、燃料核が硝酸によってすっかり溶解除去されているのが認められる。

照射温度が最も高かった上段試料（760 OPC3）では1200粒中21粒に核移動（いわゆるアメーバ効果）が見られた。うち9粒についてはFig. 7.5a に示すような顕著な核移動が見られた。ただし、 UO_2 核とSiC層とが接触するまでは致っていないようであった。

7.1.4 断面組織

断面組織の検鏡粒子数は各試料について約20粒であった（Fig. 7.6）。

上段試料（760 OPC3）では1粒にアメーバ効果の発生が見られたが、燃料核は第2層熱分解炭素（PyC）までは達していなかった（Fig. 7.7a）。また、Fig. 7.7c に示すような第1層バッファ層と第2層PyCとの剥離、バッファ層の径方向の亀裂（スピアヘッド・アタック）がほとんどの粒子に見られた。Fig. 7.7b のようなSiC層と第2層PyCとの間の剥離も見られたが、SiC層内面には特に異常は認められなかった。しかし、さらに10粒を採取し、断面組織を調べた結果、2粒についてSiC層内面に異常を見出した。これら2粒をEPMAによって分析したところ、1粒について深さ9 μ mにも達するPd腐食が見出された（Fig. 7.8）¹⁶⁾。SiC層内面におけるPdの蓄積部位の頻度ならびに蓄積量は、アメーバ効果による核移動方向の反対側、すなわち低温側の方が、高温側より顕著であった。また、著しいPd腐食の生じている領域では、バッファ層内部にTeとCeの蓄積が認められた。健全粒子の UO_2 核から被覆層へのCeの移行量は、インベントリーの2%以下である¹⁴⁾ので、この現象はPd腐食の機構を考えるうえで興味深い。また、別の1粒については、SiC層の内面にCeとBaの蓄積が認められた。

中段試料（76FPC-1A）では、1粒について顕著なPd腐食が見出された（Fig. 7.7e, f）。この場合、Pd腐食部位の内側でバッファ層にスピアヘッド・アタックが起きている。ただし、この粒子に限らず、スピアヘッド・アタックおよび層間剥離は、殆どの粒子について認められた。

下段試料（75FPC-4A）では、被覆燃料粒子内部では特に異常は生じていなかった。上記2試料に見られたような、スピアヘッド・アタックも層間剥離もほとんど認められなかった。しかし、ほぼ半数の粒子について最外層PyCに亀裂が見られた（Fig. 7.7g）。外観検査およびX線ラジオグラフでは、酸浸出後に燃料核が残存している粒子の最外層には亀裂は認められていないので、これらの亀裂は検鏡に先立つ研磨過程で発生したものと考えられる。しかし、いずれにしても、最外層中の大きな引張り応力の残留を示すものと解される。

以上の被覆層の照射による変化の発生頻度をTable 7.3にまとめた。

なお、照射済み被覆燃料粒子の燃料核中には白色析出物が認められるが、これらは核分裂生成物のMo - Tc - Ru - Rh - Pdを主成分とする合金相である¹⁷⁾。これら析出物の存在は、最も燃焼率、照射温度の高かった上段試料で顕著であり（Fig. 7.7d）、下段試料ではほとんど認められなかった。

7.1.5 金属FP放出割合

キャプセル内部の黒鉛試料容器、スリーブ管内に放出された金属FP量を定量した結果をTable 7.5にまとめた。上段試料（76 OPC-3）は貫通破損率は 3×10^{-4} と低かったにもかかわらず

ず、インベントリーの約1%の ^{137}Cs 、約4%の $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が放出された。このことは、1%程度のSiC層が照射によって損傷したか、あるいは健全なSiC層を通して拡散放出が起きたことを意味している。しかし、1%ものSiC層破損につながるような現象は断面組織観察では見られていない。パラジウム腐食深さも最大9 μm に過ぎず、SiCを貫通してはいなかった。したがって、健全なSiC層を通して拡散放出が起きた可能性が大きい。他の試料では、 ^{137}Cs 放出割合は 2×10^{-4} 以下であった。

7.2 75F 5A キャプセル

7.2.1 燃料コンパクトの外観、重量、寸法

照射後の燃料コンパクトの外観をFig. 7.9に示す。上段試料(75FP 4A)には全く異常はなかった。また、下段試料(75FP 3A)の側面のきずは黒鉛試料容器からの取り出し時についたものと考えられる。しかし、最も照射条件の厳しかった中段試料(75FP 2A)では、側面に粒子の破損を示すような小さな穴、および染みが見られた(図中矢印)。

各コンパクトの照射前後での重量と寸法の変化をTable 7.2に示す。秤量は自動メトラータで行った。使用天秤の器差は50g 検定済み分銅を基準として+0.4mgであった。また、外径、長さは測定精度 $\pm 1/1000\text{mm}$ のマイクロメータ、内径は測定精度 $\pm 2/1000\text{mm}$ の内径測定器を用いて測定した。重量減少は特に照射条件には依存せず、一律に0.01%程度にすぎなかった。これに対して、寸法収縮は明らかな高速中性子照射量依存性を示した。

7.2.2 酸浸出率

各コンパクトは電気化学的に解砕されたのち、6モル硝酸溶液中で煮沸された。7.1.2と同じ方法で、照射終了時貫通破損率(ϕ_{EOL})を求めた結果を、Table 7-1に照射条件とともに示した。3種のコンパクトのいずれも $4 \sim 5 \times 10^{-4}$ とほぼ同程度の ϕ_{EOL} を示した。

7.2.3 酸浸出後の外観およびX線ラジオグラフ

酸浸出後に1200粒を採取し、外観観察、X線ラジオグラフィに供した(Fig. 7.10, 11)。各観察サンプル中には0~4/1200の破損粒子が見出された。しかし、7.1.3で述べたと同じ理由により、見掛け上、実際より多い破損粒子が観察サンプル中に混入したものと考えられる。また、X線ラジオグラフでは外観観察より多くの破損粒子が見出された。外観では微細な亀裂が見落されやすいこと、コンパクトから採取した粒子の表面には黒鉛マトリックス粉が付着して正確な観察を妨げることが、このことから推察される。

上段試料(75FP 4A)については、X線ラジオグラフで計3粒の破損が見いだされた(Fig. 7.11e)。うち1粒の外観では被覆層表面に噴火口のような穴があいていた(Fig. 7.10b)。また、バッファ層の亀裂に重金属が侵入している粒子が1粒見出された(Fig. 7.11f)。

中段試料(75FP 2A)では被覆層にFig. 7.10f, hのような亀裂の入った粒子が計6粒見出された。

下段試料(75FP 3A)では、外観ではFig. 7.10j, lに示した赤道面上の亀裂が2粒について見

られたが、X線ラジオグラフで、これらの亀裂は被覆層を貫通してはいないことが分かった(Fig. 7.11a)。このような最外層に局在した亀裂は、上段、中段試料では見られなかった。このことは、次の断面組織観察結果と比べると、興味深い。

7.2.4 断面組織

各コンパクトから採取した粒子20～30粒について断面組織を調べた(Fig. 7.12)。

上段試料(75FP4A-1, 2)については、計37粒中7粒についてバッファ層と第2層PyCとの間に剥離が見られた(Fig. 7.13a)。2つのコンパクトのうち、75FP4A-2については4粒の最外層PyCに径方向の亀裂が見られた。これらは、7.1.4で述べたように、研磨過程で発生した亀裂と考えられる。

中段試料(75FP2A-1, 2)については、バッファ層のスピアヘッド・アタック、バッファ層と第2層PyCとの剥離が、ほぼ全粒子について見られた(Fig. 7.13d, e)。また、1粒についてアメーバ効果の初期と見られる、燃料核表面での炭素の蓄積が観察された(Fig. 7.13f)。別に2粒について、EPMA分析を行った結果、SiC層内面にPdの蓄積が認められた(Fig. 7.14)しかし、PdのSiC層中の侵入深さは約1 μ mにすぎなかった。また、Pdの蓄積部位の第2層PyC中に、BaとSiが見出された。

下段試料(75FP3A-1, 2)では、バッファ層のスピアヘッド・アタック(Fig. 7.13h)は計58粒中8粒にとどまったが、最外層PyCの径方向の亀裂(Fig. 7.13g)が19粒について見出された。最外層PyCの亀裂は、より照射条件の緩い75FP3A-2コンパクトの方が多く、17粒に達した。

以上の被覆層の照射による変化の発生頻度をTable 7.3にまとめた。

また、照射条件によらず、すべての粒子でバッファ層の内側が厚さ約20 μ mの範囲で変質していることが、偏光下での観察によって明らかになった(Fig. 7.13c)。これはバッファ層の部分的な密度上昇あるいは気孔分布の変化と解釈できよう。燃料核から反跳放出されたFPのバッファ層中での飛程は約20 μ mと計算されるので²²⁾、反跳原子による損傷が関与しているものと考えられる。

なお、燃料核中の白色析出物はすべての試料について認められたが、最も照射温度と燃焼率の高かった中段試料において、最も顕著であった。

7.2.5 SiC層破損率

上段(75FP4A-1)および下段試料(75FP2A-1)について、SiC層破損率をバーン・リーチ(空气中燃焼後酸浸出)法によって調べた。東海ホットラボにおいて新たに開発された同法のフローシートをFig. 7.15に示す。破損粒子数は次の三通りの方法で求めた。

- (1) バーン・リーチ前後でのX線ラジオグラフ上の健全粒子数の差。
- (2) 酸浸出液の γ 線スペクトロメトリーによる溶出FP量の定量。
- (3) バーン・リーチ後の回収SiC層の破片の形状、数からの推定。

しかし、SiC層破片から推定する方法は、回収が完璧には行うことができず、不正確になることがわかった。したがって、Table 7.4には(1)、(2)の方法による結果を示した。

照射後のSiC層破損率 (ϕ'_{EOL}) としては、試料粒子数各約 4,500 粒に対する 95% 信頼限界を示してある。照射前の値 (ϕ'_{BOL}) は、コンパクト中の全粒子数 (75FP4A は約 12,000 粒, 75FP2A は約 15,000 粒) に対するものである。これらの値からは、SiC層破損率が照射によって、95% 信頼限界で有意な増大を示したとは言えない。先に報告 (13) で当時の暫定値に基づいて、75FP2A については有意な程度の SiC 層破損割合の増大があったとしたのを、ここで訂正する。

7.2.6 金属FP放出割合

キャプセル内部の黒鉛試料容器、スリーブ管内に放出された金属FP量を定量した結果を Table 7.5 にまとめた。照射温度の高かった中段試料 (75FP2A コンパクト) では、インベントリーの約 0.1% の ^{137}Cs , 約 8% の $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が放出された。照射後の SiC 層破損率 (Table 7.4) から考えて、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の放出は間違いなく健全な SiC 層を通しての拡散放出と考えられる。

Table 7.1 End-of-life fraction through-coating failure (ϕ_{EOL})

Capsule Sample	75F4A-1 760PC-3	75F4A-2 76FPC-1A	75F4A-3 75FPC-4A	75F5A-1 75FP4A	75F5A-2 75FP2A	75F5A-3 75FP3A
Burnup ^a	2.2	1.5	1.0	1.0	1.6	1.3
Fast fluence ^b	0.7	1.1	0.8	0.7	1.1	0.9
T _{max} (°C)	1500	1360	920	1450	1600	1490
ϕ_{BOL} ^c	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$	9.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}	4.4×10^{-5}
ϕ'_{BOL} ^d	2×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-3}	1×10^{-3}
ϕ_{EOL}	3×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	5×10^{-4}	5×10^{-4}	4×10^{-4}

a. %FIMA

b. 10^{25} n/m² (E>29fJ)

c. Beginning-of-life fraction through-coating failure

d. Beginning-of-life fraction defective SiC

Table 7.2 Weight and dimensional changes of fuel compacts irradiated in 75F5A capsule
(Value averaged over three measurements)

	75FP4A-1	75FP4A-2	75FP2A-1	75FP2A-2	75FP3A-1	75FP3A-2
Pre-irr. weight (g)	41.310	41.290	36.852	36.865	40.348	40.342
Post-irr. weight (g)	41.309	41.287	36.848	36.862	40.342	40.337
Pre-irr. OD (mm)	24.06	24.05	23.94	23.97	24.07	24.06
Post-irr. OD (mm)	23.96	23.92	23.79	23.90	23.93	23.94
-ΔOD (%)	0.457	0.582	0.668	0.709	0.582	0.499
Pre-irr. ID (mm)	8.00	7.99	8.00	8.00	7.99	7.99
Post-irr. ID (mm)	7.97	7.97	7.95	7.95	7.96	7.96
-ΔID (%)	0.50	0.38	0.63	0.63	0.50	0.38
Pre-irr. L (mm)	39.92	39.97	40.32	40.20	39.95	39.95
Post-irr. L (mm)	39.77	39.76	40.07	39.98	39.75	39.72
-ΔL (%)	0.376	0.525	0.645	0.547	0.501	0.601

Table 7.3 Frequencies of minor anomalies introduced into the coating by irradiation
(Occurrence/Number of particles inspected)

Capsule	Sample	Spearhead attack	Buffer/I-PyC separation	O-PyC crack by polishing	Pd attack
75F4A-1	76OPC-3	13/22	22/22	0/22	1/(22+10)
75F4A-2	76FPC-1A	13/21	15/21	0/21	1/21
75F4A-3	75FPC-4A	1/20	1/20	13/20	-
75F5A-1	75FP4A-1	0/20	2/20	0/20	-
	75FP4A-2	0/17	5/17	4/17	-
75F5A-2	75FP2A-1	29/29	28/29	0/29	1/(29+10)
	75FP2A-2	28/30	30/30	0/30	-
75F5A-3	75FP3A-1	5/28	18/28	2/28	-
	75FP3A-2	3/30	13/30	17/30	-

Table 7.4 Fraction defective SiC by PIE burn-leaching test.
In the table 5(-4), for instance, should read 5×10^{-4} .

Capsule	Sample	ϕ'_{BOL}^a	ϕ_{EOL}^b	$\phi's(G)^c$	$\phi's(X)^d$	ϕ'_{EOL}^e
75F5A-1	75FP4A-1	4.0(-4)-1.3(-3)	5(-4)	6(-4)	1.3(-3)	9.1(-4)-3.5(-3)
75F5A-2	75FP2A-2	1.4(-3)-2.8(-3)	5(-4)	3(-3)	3.5(-3)	2.4(-3)-6.0(-3)

- a. Beginning-of-life fraction defective SiC (95% confidence limit).
- b. End-of-life fraction through-coating defects.
- c. Fraction defective SiC by PIE burn-leaching test with γ -spectrometry.
- d. Fraction defective SiC by PIE burn-leaching test with X-ray microradiography.
- e. $\phi'_{BOL} = \phi_{EOL} + \phi's(X)$. 95% confidence limit.

Table 7.5 Fractional release (F) of metal fission products.
Parenthesized values are estimated as the upper limits.

Capsule	75F4A-1	75F4A-2	75F4A-3	75F5A-1	75F5A-2	75F5A-3
I: Inventory(Ci)^a						
Ru106	0.45	0.52	0.29	0.74	1.2	0.99
Ag110m	4×10^{-4}	3×10^{-4}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	1.3×10^{-3}	7.4×10^{-4}
Cs134	0.08	0.079	0.037	0.090	0.18	0.13
Cs137	0.59	0.37	0.27	0.65	0.75	0.76
Ce144	3.7	2.2	1.6	4.2	4.6	4.8
Eu154	3.7×10^{-3}	4.1×10^{-3}	1.9×10^{-3}	4.5×10^{-3}	8.8×10^{-3}	7.0×10^{-3}
R: Released(Ci)^a						
Ru106	(3×10^{-5})	3.9×10^{-5}	4.9×10^{-5}	3×10^{-6}	4.1×10^{-5}	6×10^{-6}
Ag110m	1.5×10^{-5}	(1×10^{-5})	(1×10^{-5})	1.4×10^{-6}	1.0×10^{-4}	3.3×10^{-6}
Cs134	1.3×10^{-3}	1.4×10^{-5}	7.0×10^{-6}	4.6×10^{-6}	2.1×10^{-4}	8.1×10^{-5}
Cs137	8.5×10^{-3}	6.2×10^{-5}	5.1×10^{-5}	2.9×10^{-5}	9.8×10^{-4}	4.1×10^{-4}
Ce144	5.5×10^{-5}	1.4×10^{-4}	1.7×10^{-4}	-b	1.5×10^{-4}	-b
Eu154	3.7×10^{-5}	(7×10^{-6})	(7×10^{-6})	-b	1.9×10^{-4}	-b
F=R/I						
Ru106	(7×10^{-5})	7.5×10^{-5}	1.7×10^{-4}	4×10^{-6}	3.4×10^{-5}	6×10^{-6}
Ag110m	0.04	(0.03)	(0.1)	7×10^{-3}	0.077	4.5×10^{-3}
Cs134	0.016	1.8×10^{-4}	1.9×10^{-4}	5.1×10^{-5}	1.2×10^{-3}	6.2×10^{-4}
Cs137	0.014	1.7×10^{-4}	1.9×10^{-4}	4.5×10^{-5}	1.3×10^{-3}	5.4×10^{-4}
Ce144	1.5×10^{-5}	6.4×10^{-5}	1.1×10^{-4}	-	3.3×10^{-5}	-
Eu154	0.010	(2×10^{-3})	(4×10^{-3})	-	0.022	-

- a. Activity normalized to 1981 June 1 for 75F4A; 1982 January 8 for 75F5A.
- b. Not included in the region of interest (ROI) in gamma spectrometry.

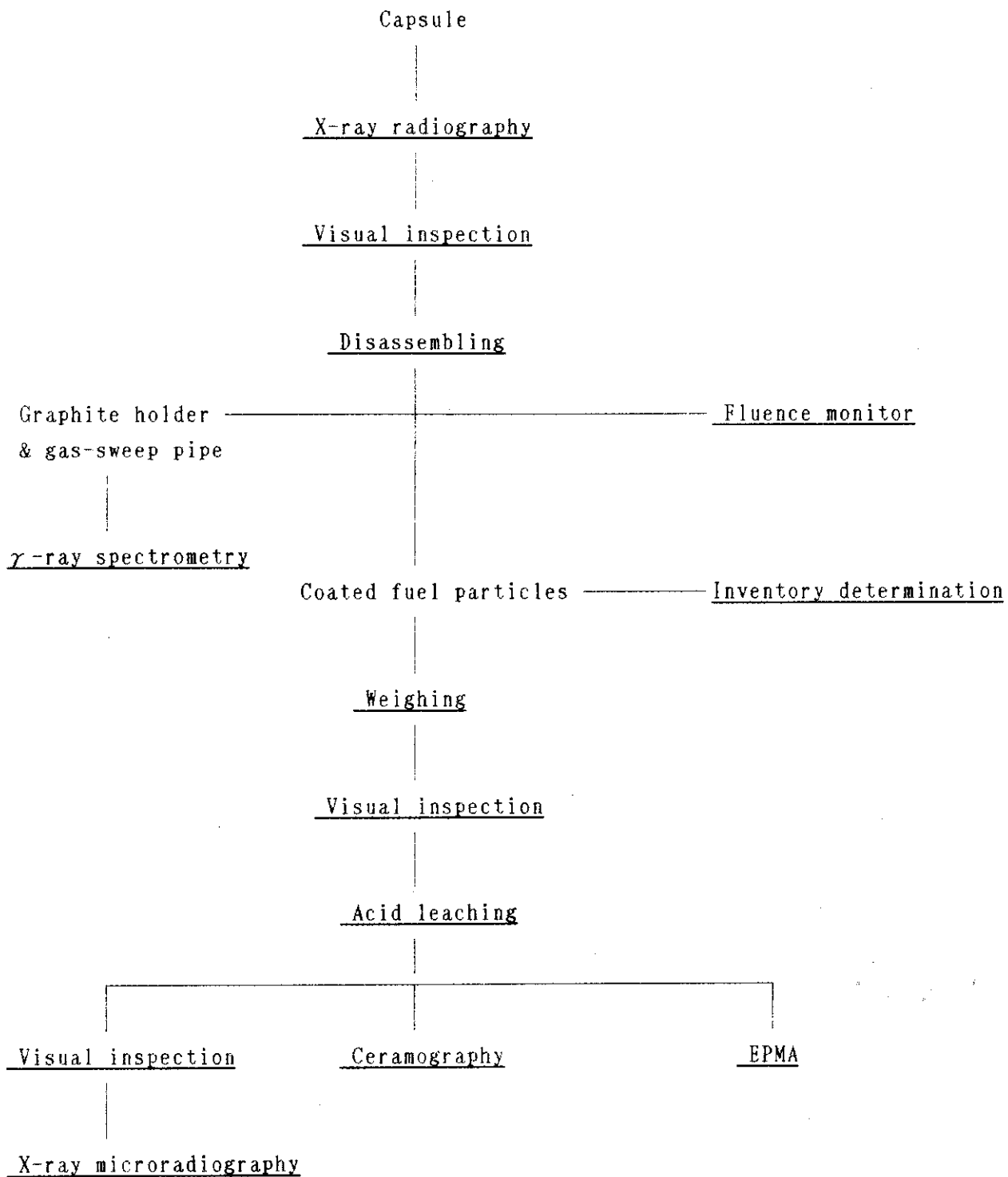


Fig. 7.1 Flowsheet of PIE of 75F4A capsule.

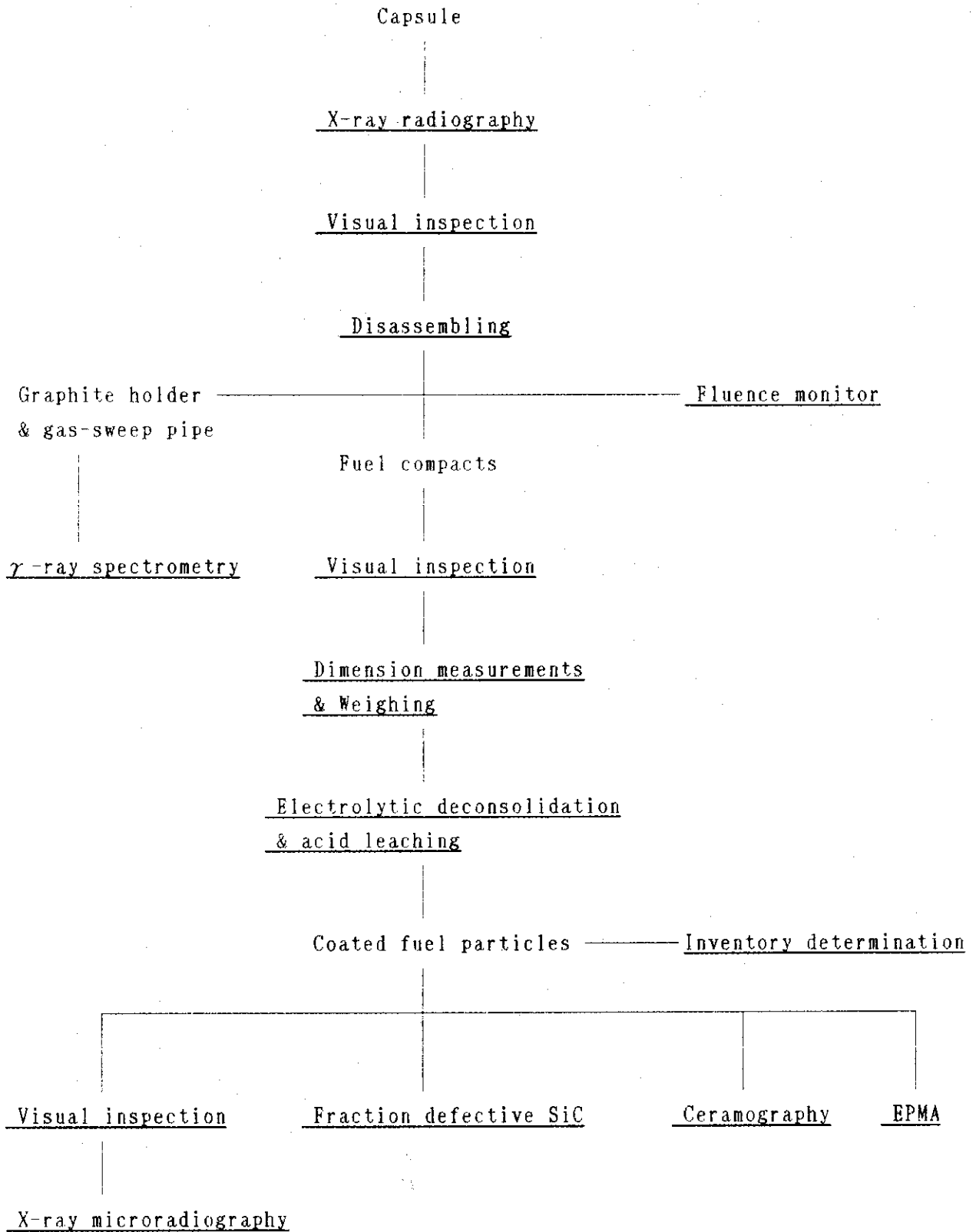
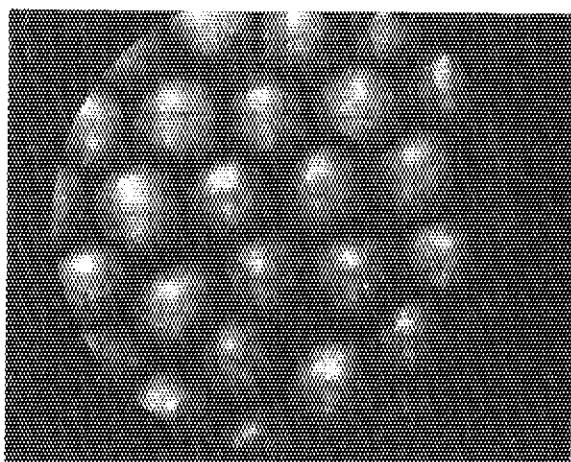
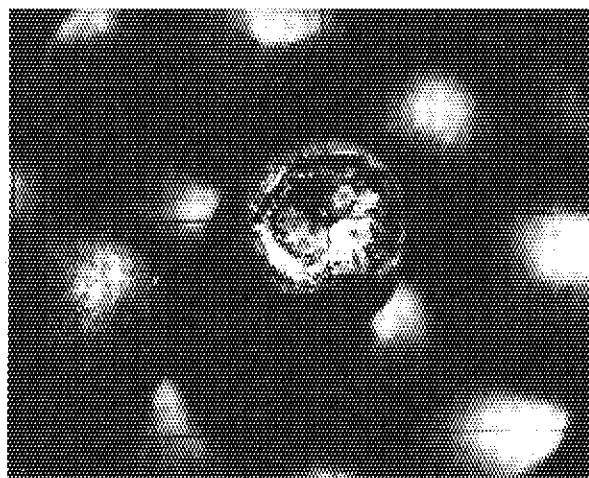


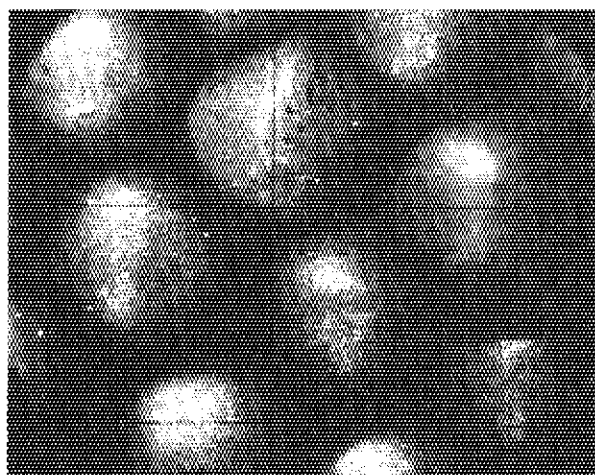
Fig. 7.2 Flowsheet of PIE of 75F5A capsule.



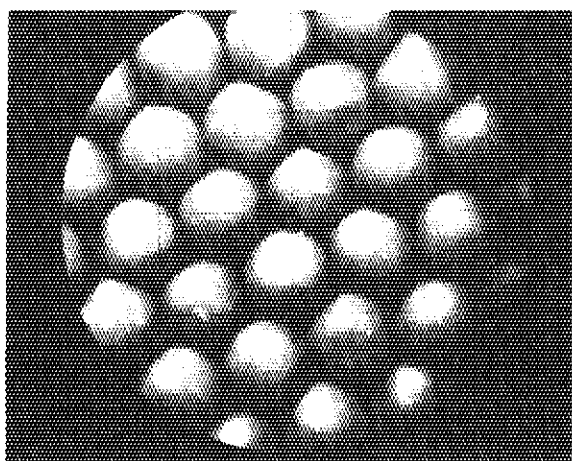
a



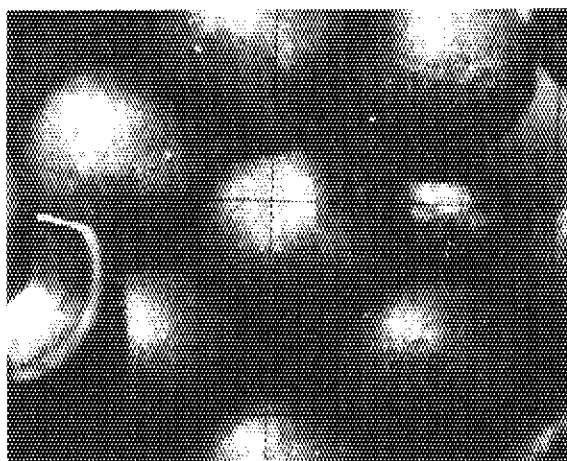
b



c

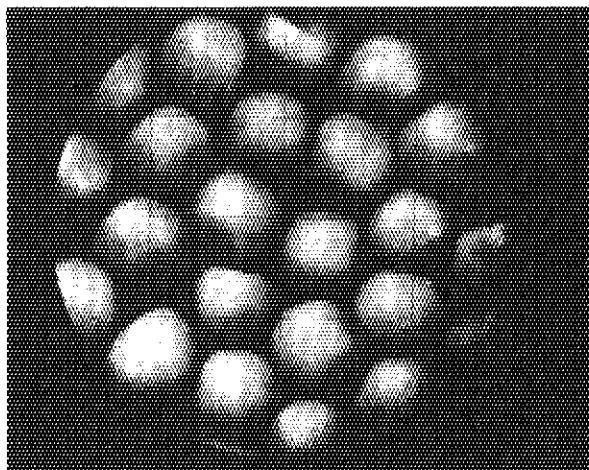


d

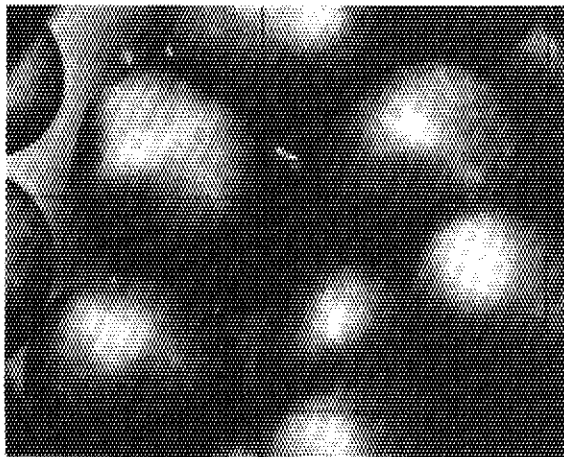


e

Fig. 7.3 Surface appearance of coated fuel particles irradiated in 75F4A: a-c, 760PC-3 in 75F4A-1; d and e, 76FPC-1A in 75F4A-2; f-h, 75FPC-4A in 75F4A-3.



f



g



h

Fig. 7.3 (continued)

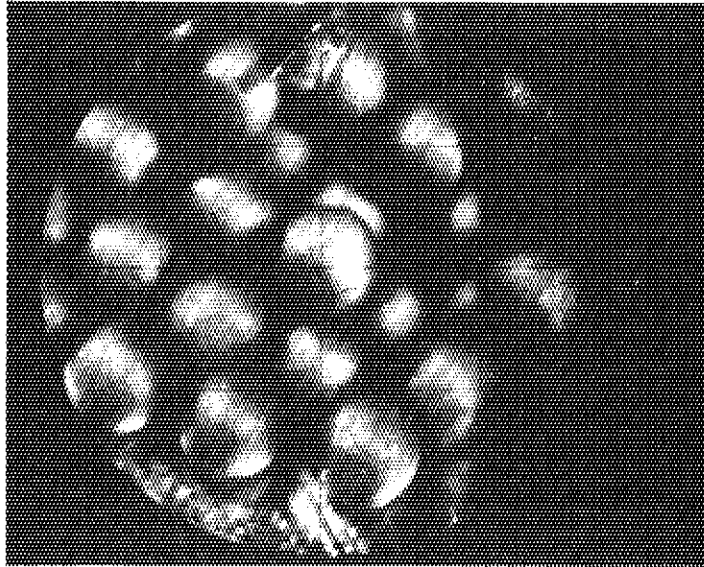
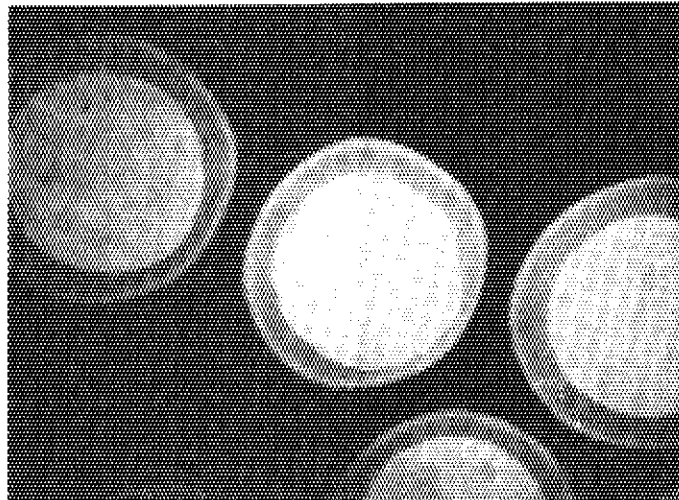
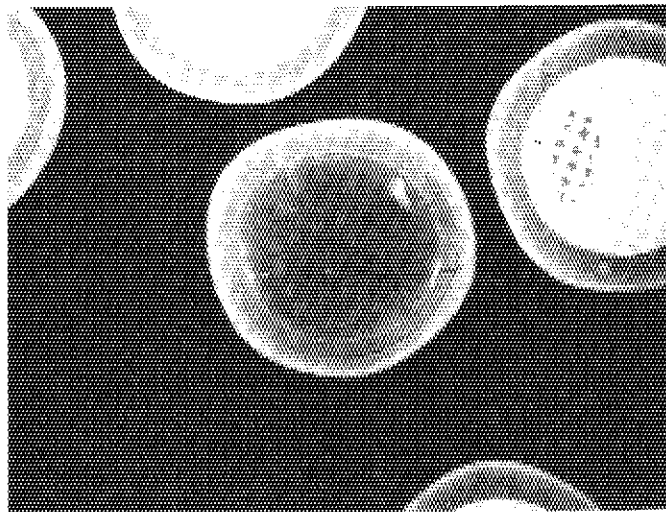


Fig. 7-4 Surface appearance of coated fuel particles after acid-leaching test: 76FPC-1A particles in 75F4A-2.

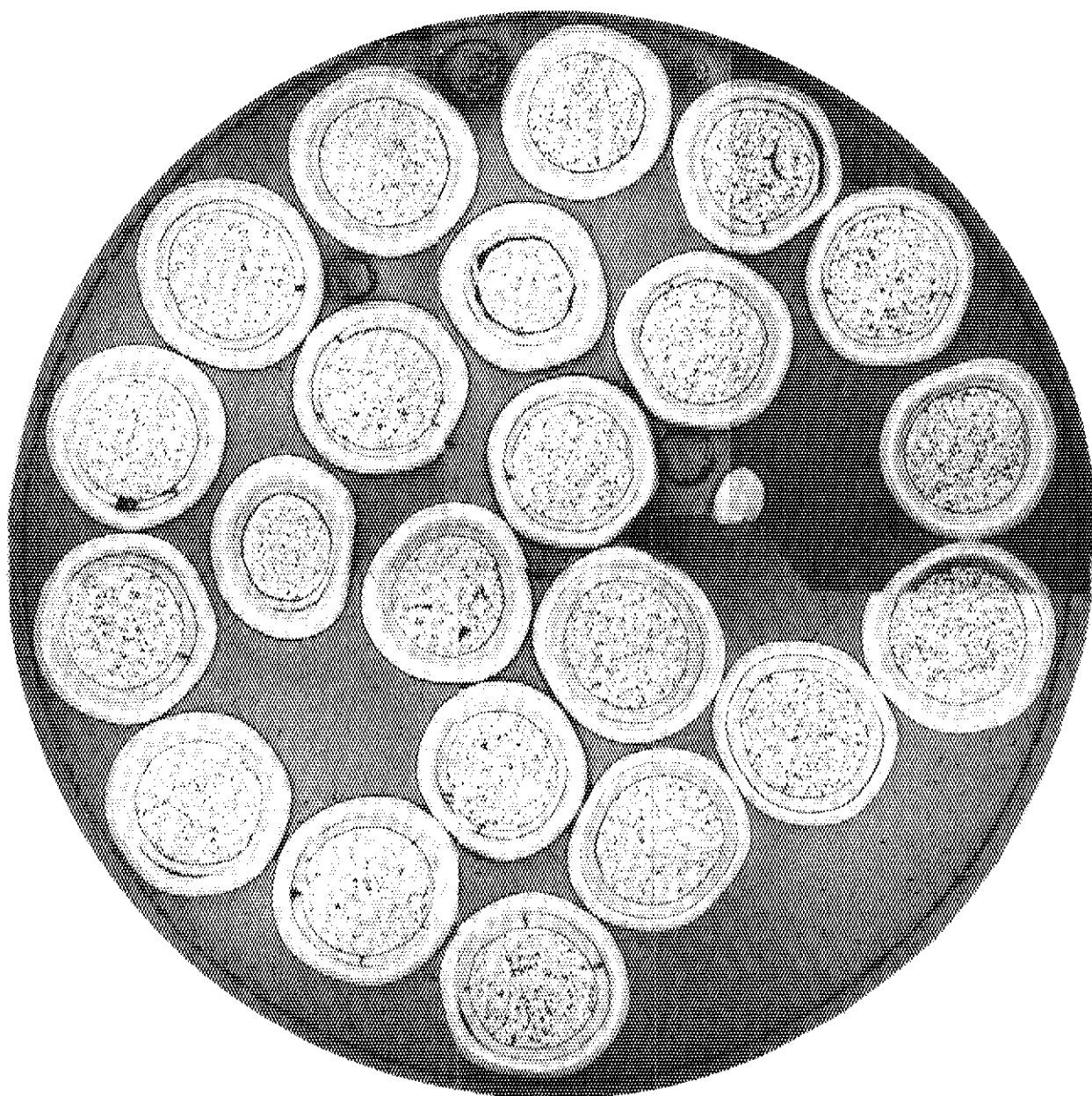


a



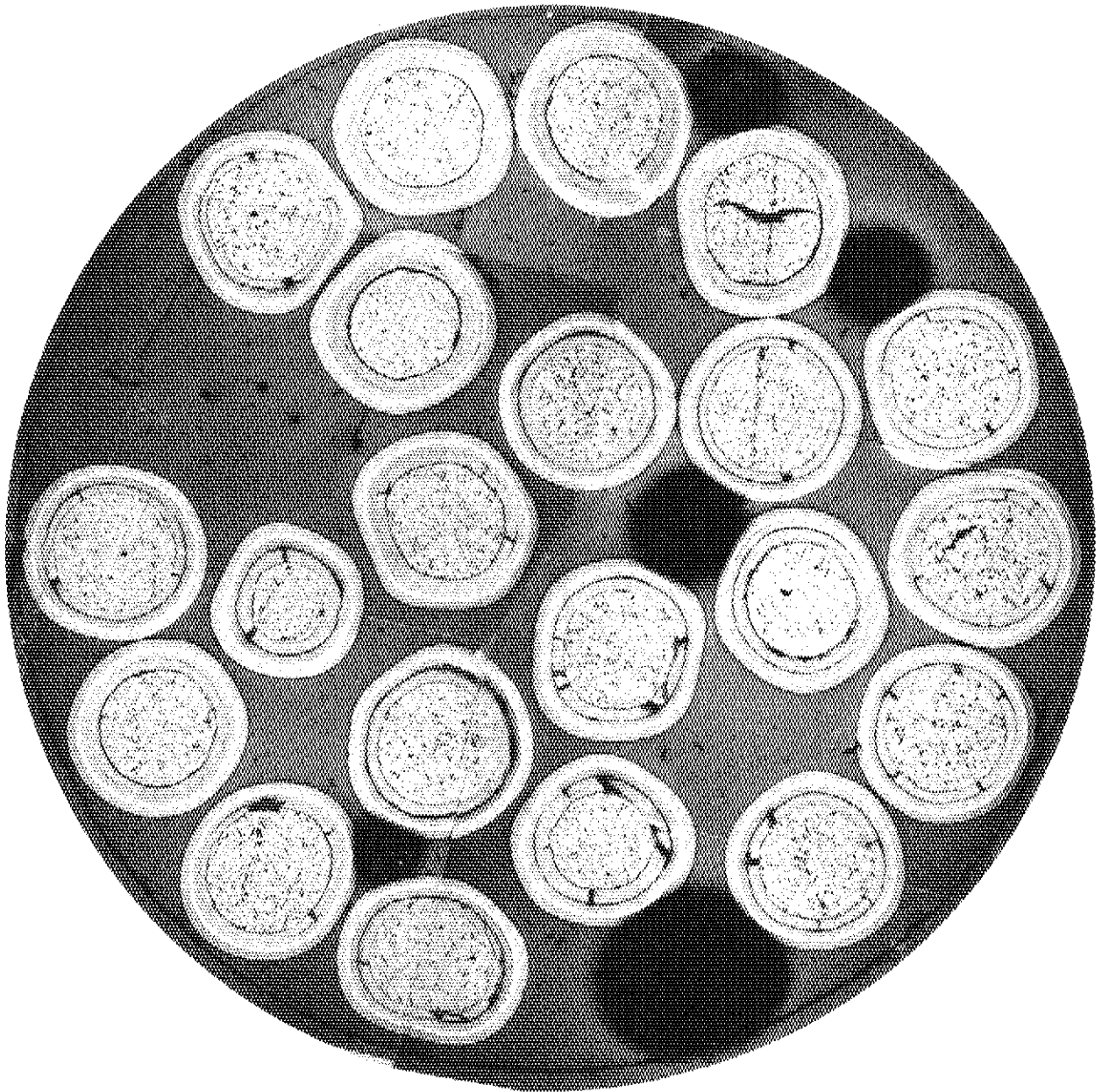
b

Fig. 7.5 X-ray microradiographs after acid-leaching test: a, 76OPC-3 in 75F4A-1; b, 76FPC-1A in 75F4A-2.



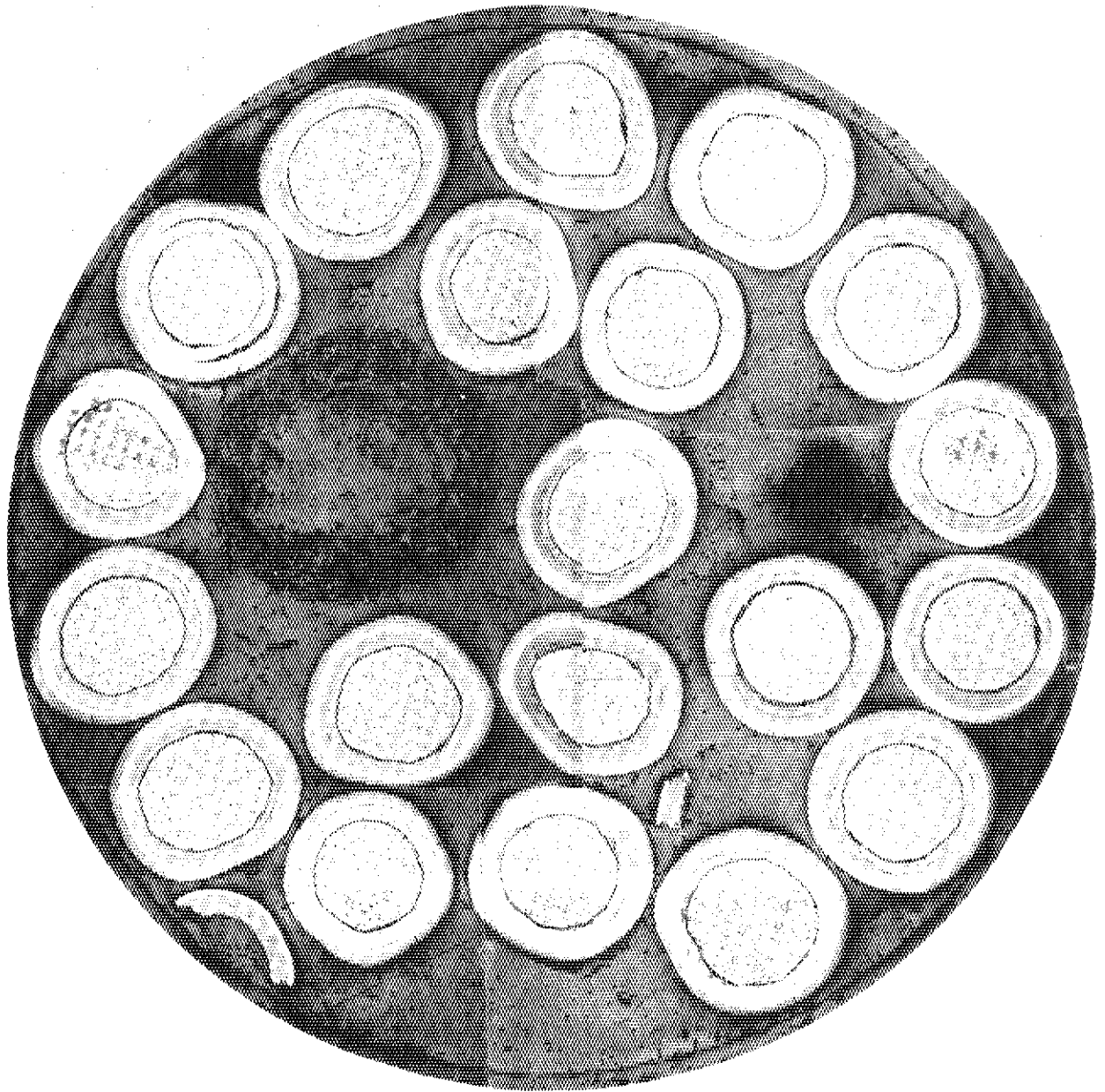
a

Fig. 7.6 Ceramographs of coated fuel particles irradiated in 75F4A:
a, 760PC-3 in 75F4A-1; b, 76FPC-1A in 75F4A-2; c, 75FPC-4A
in 75F4A-3.



b

Fig. 7.6 (continued)



c

Fig. 7.6 (continued)

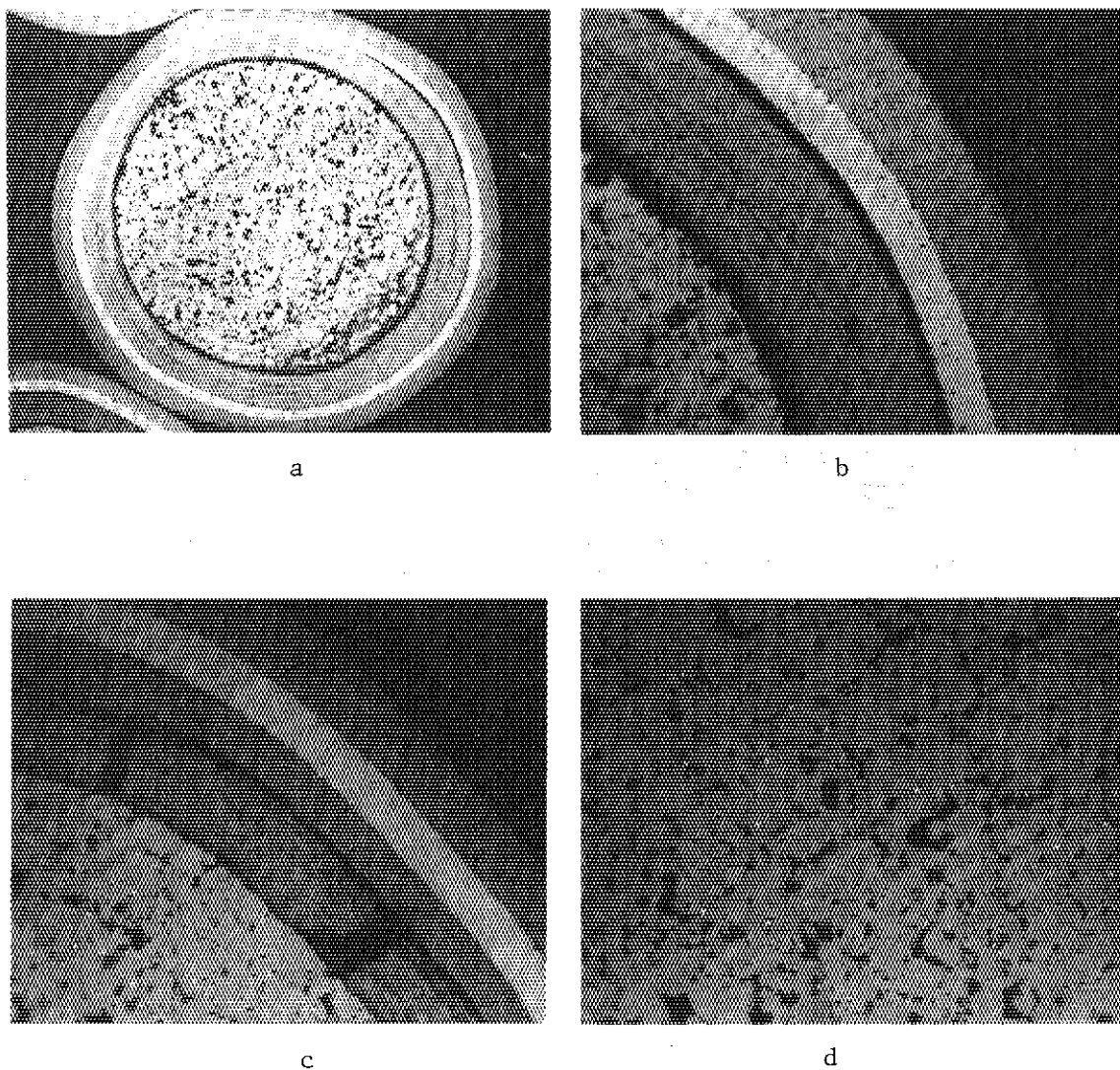
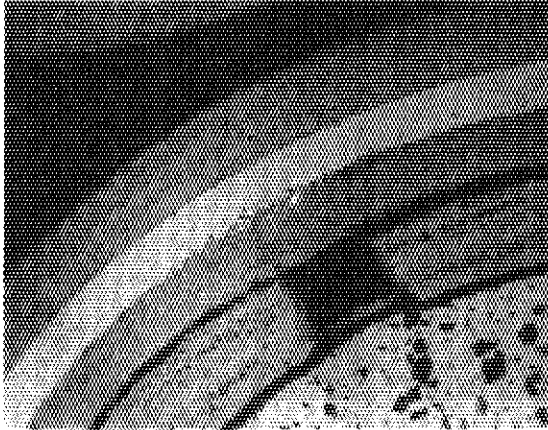
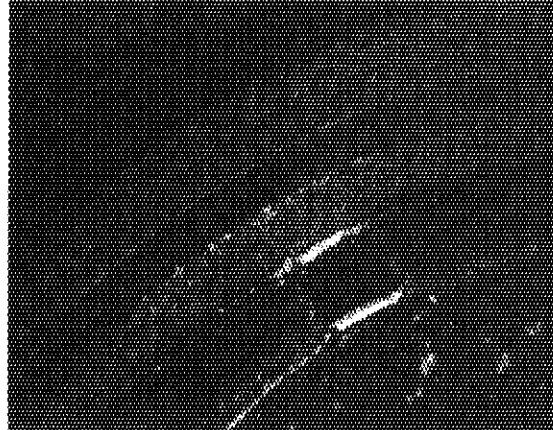


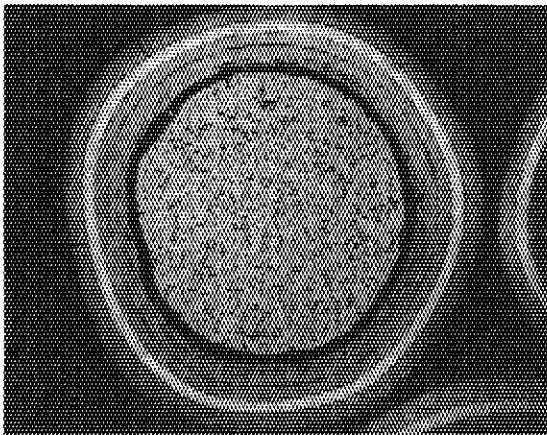
Fig. 7.7 Ceramographs showing irradiation induced changes: a-d, 76OPC-3 in 75F4A-1; e and f, 76FPC-1A in 75F4A-2; g, 75FPC-4A in 75F4A-3.



e



f



g

Fig. 7.7 (continued)

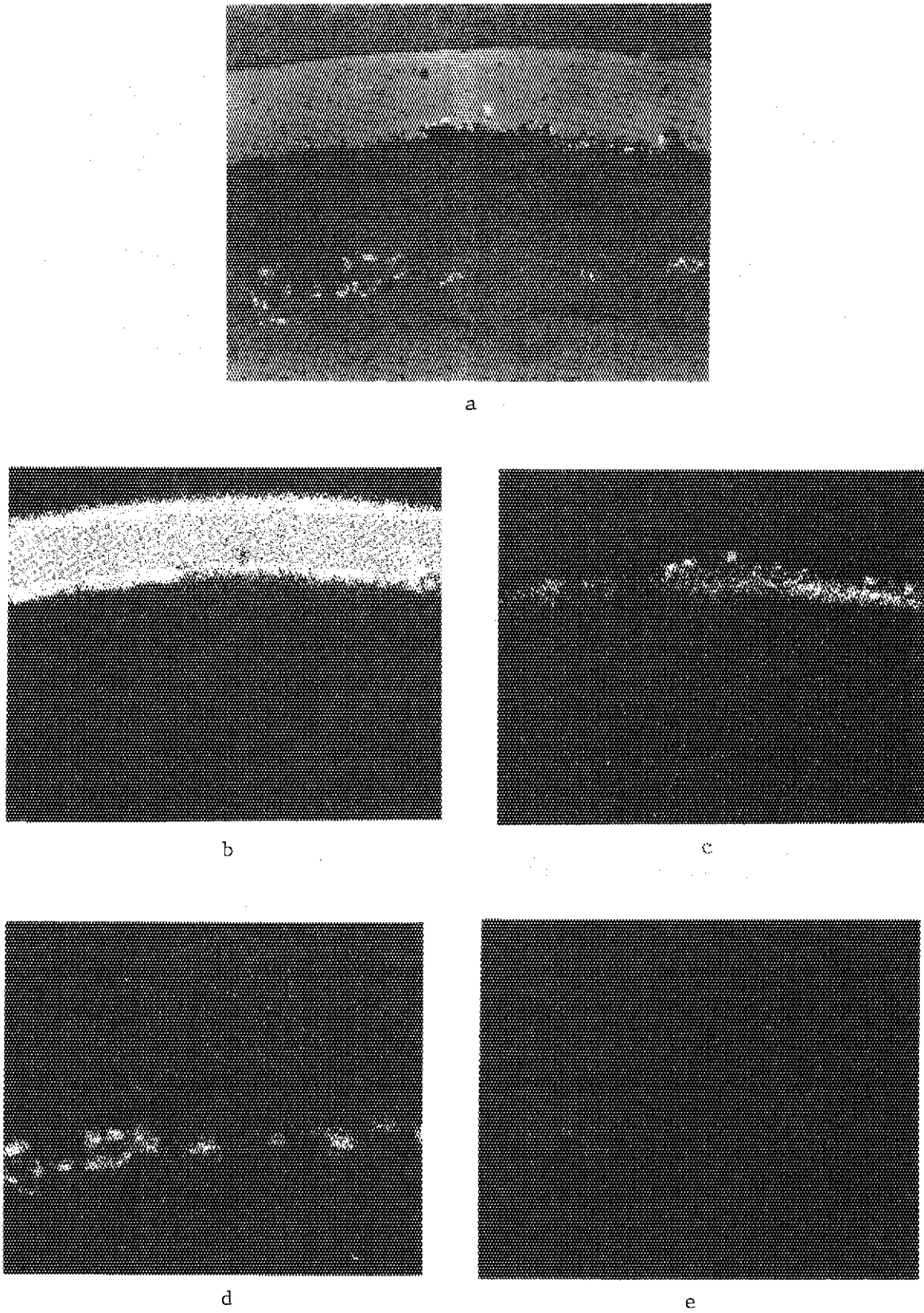


Fig. 7.8 Results of EPMA analyses on 760PC-3 particles irradiated in 75F4A-1: a, Optical image; b, Si image; c, Pd image; d, Te image; e, Ce image.

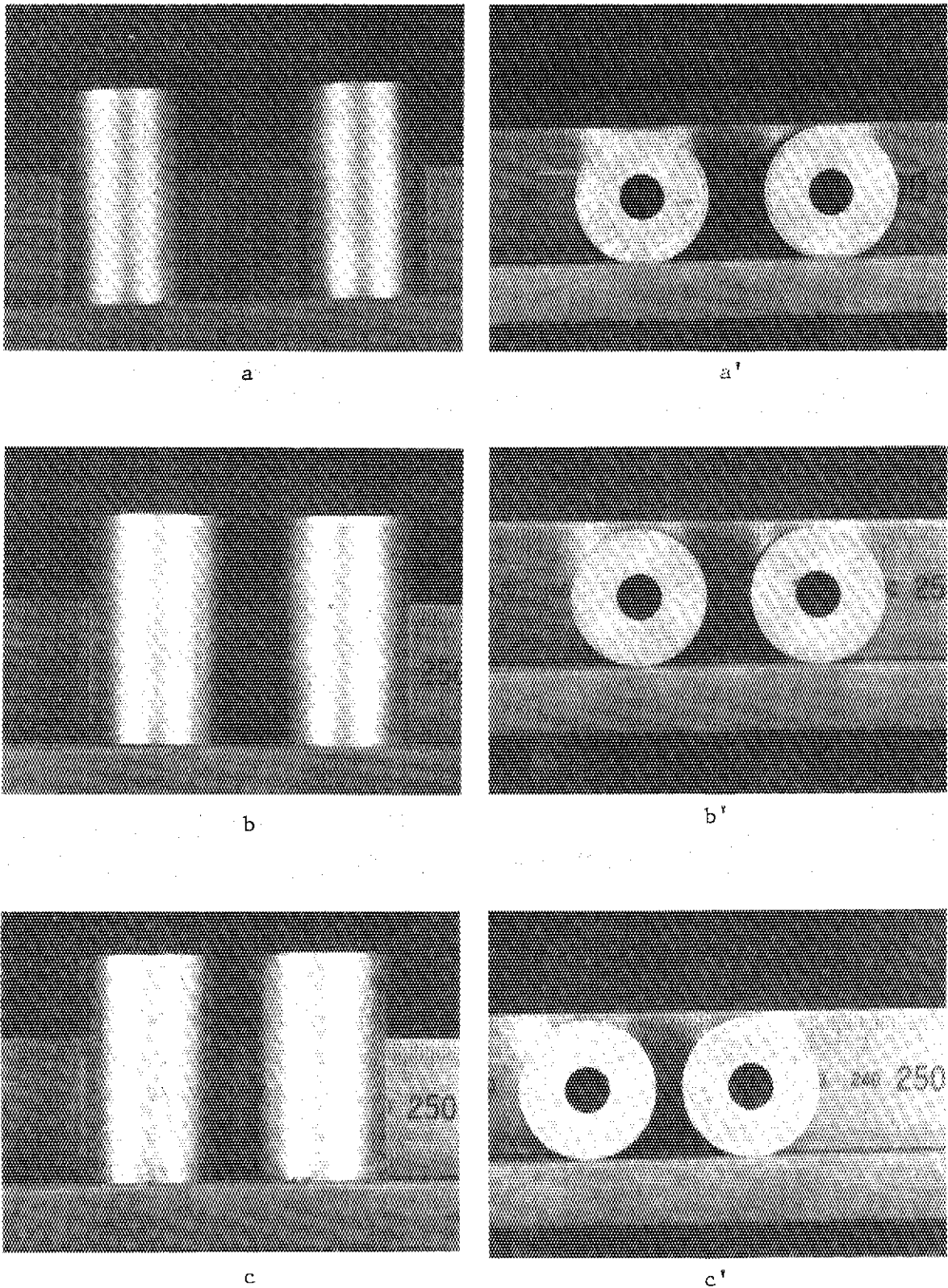


Fig. 7.9 Surface appearance of fuel compacts irradiated in 75F5A:
a, 75FP4A compacts in 75F5A-1; b, 75FP2A compacts in 75F5A-2;
c, 75FP3A compacts in 75F5A-3.

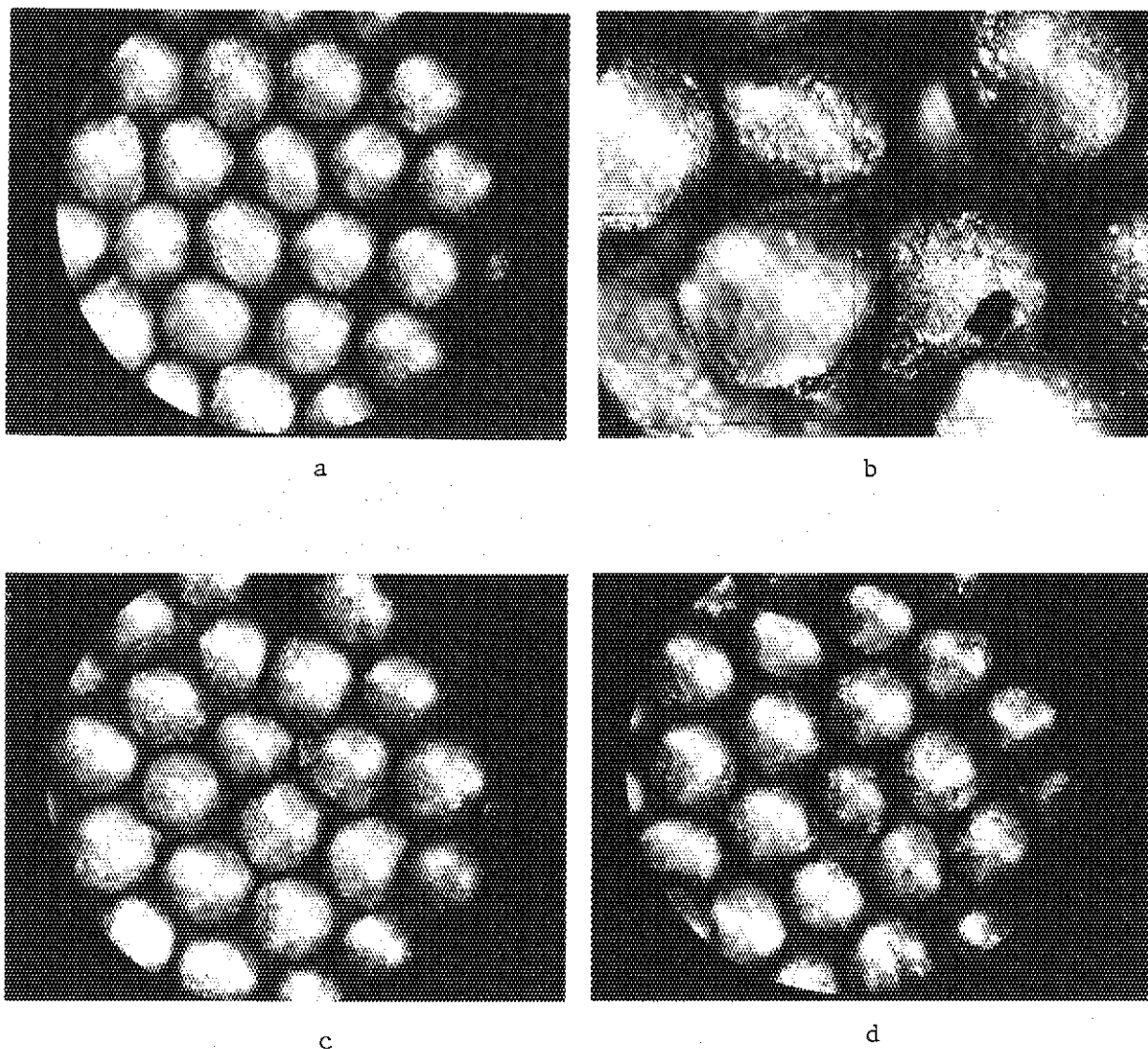
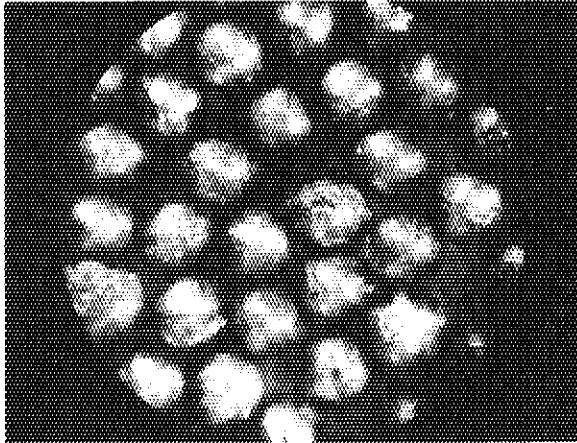
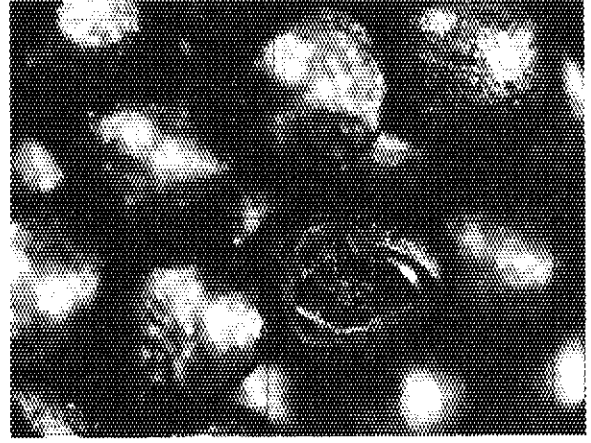


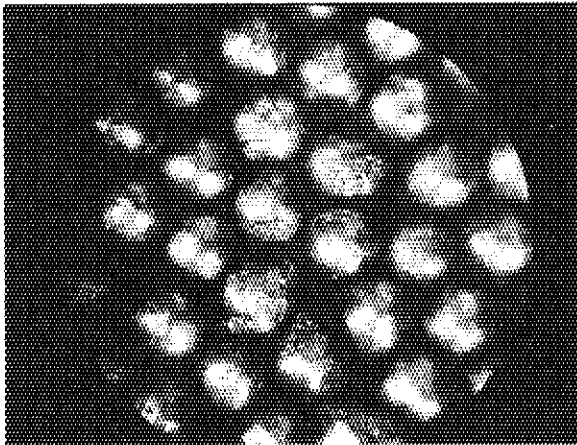
Fig. 7.10 Surface appearance of coated fuel particles after electrolytic deconsolidation of fuel compacts and acid-leaching test:
 a & b, 75FP4A-1 compact in 75F5A-1; c & d, 75FP4A-2 compact in 75F5A-1; e & f, 75FP2A-1 compact in 75F5A-2; g & h, 75FP2A-2 compact in 75F5A-2; i & j, 75FP3A-1 compact in 75F5A-3; k & l, 75FP3A-2 compact in 75F5A-3.



e



f

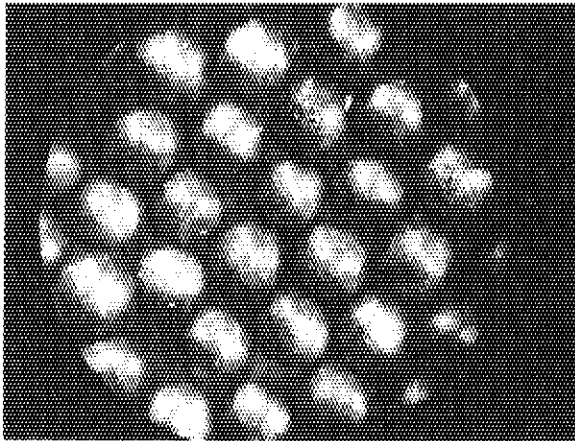


g

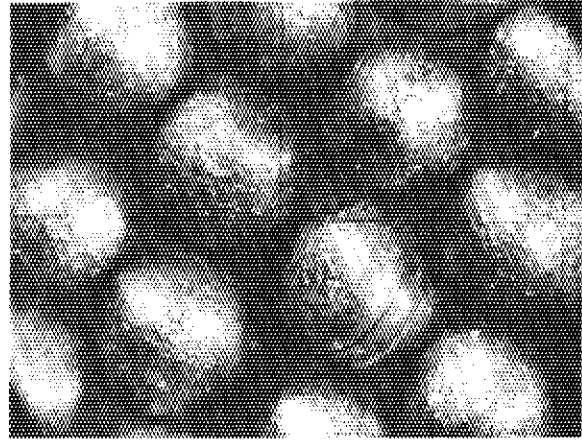


h

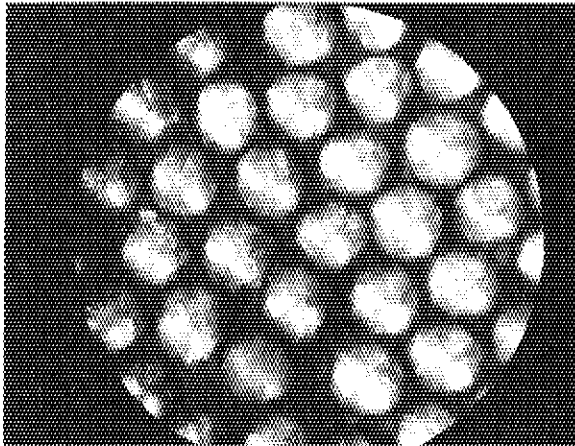
Fig. 7.10 (continued)



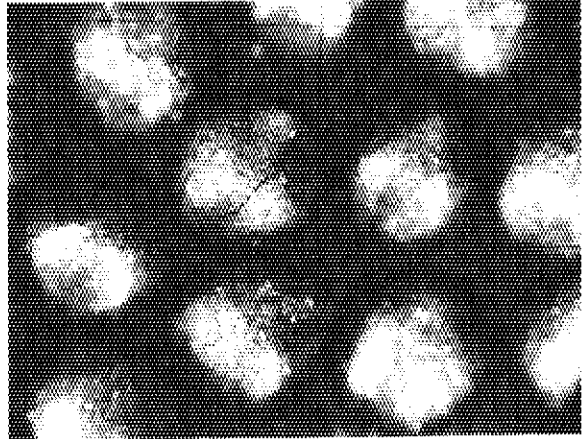
i



j



k



l

Fig. 7.10 (continued)

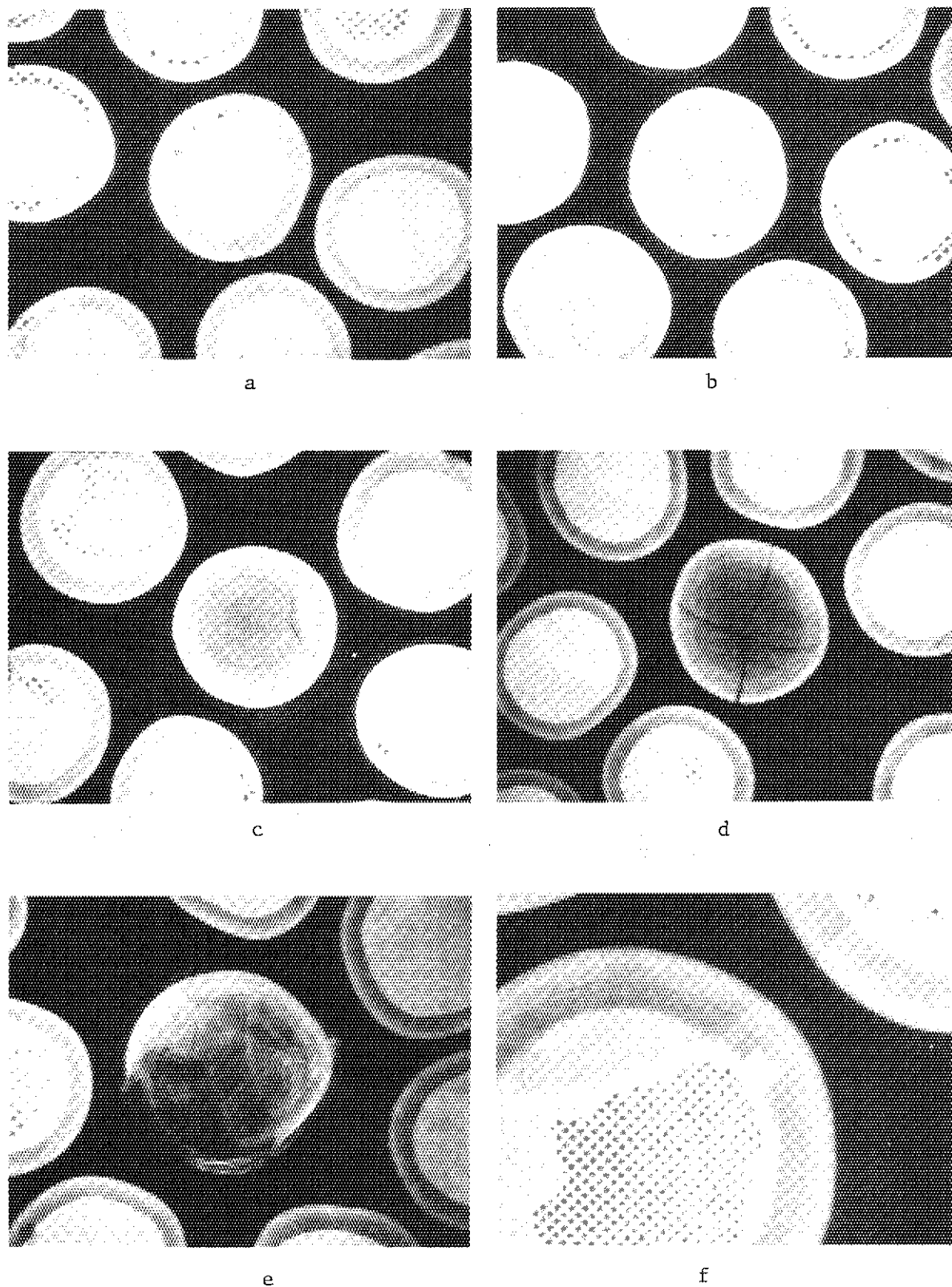
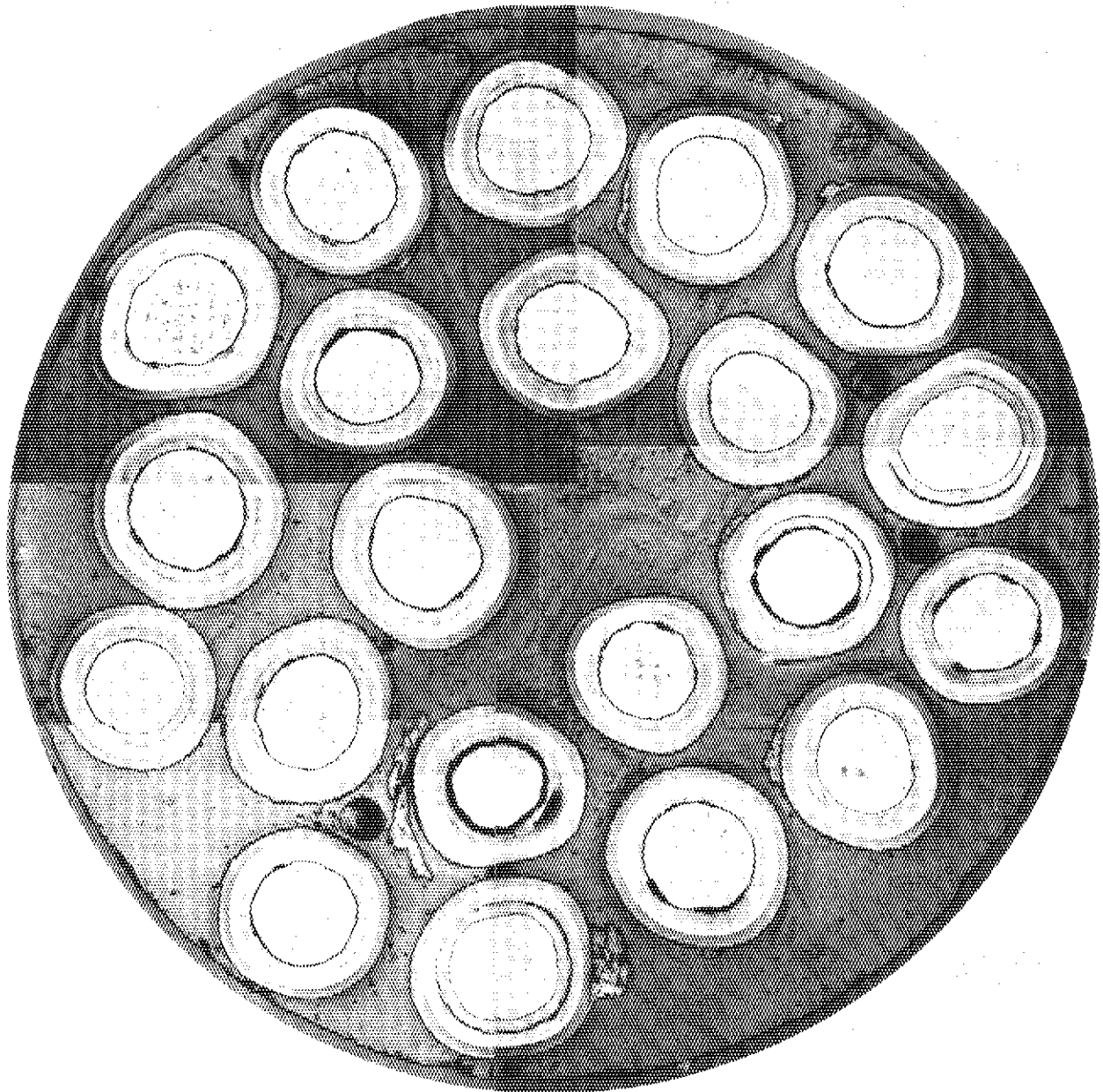
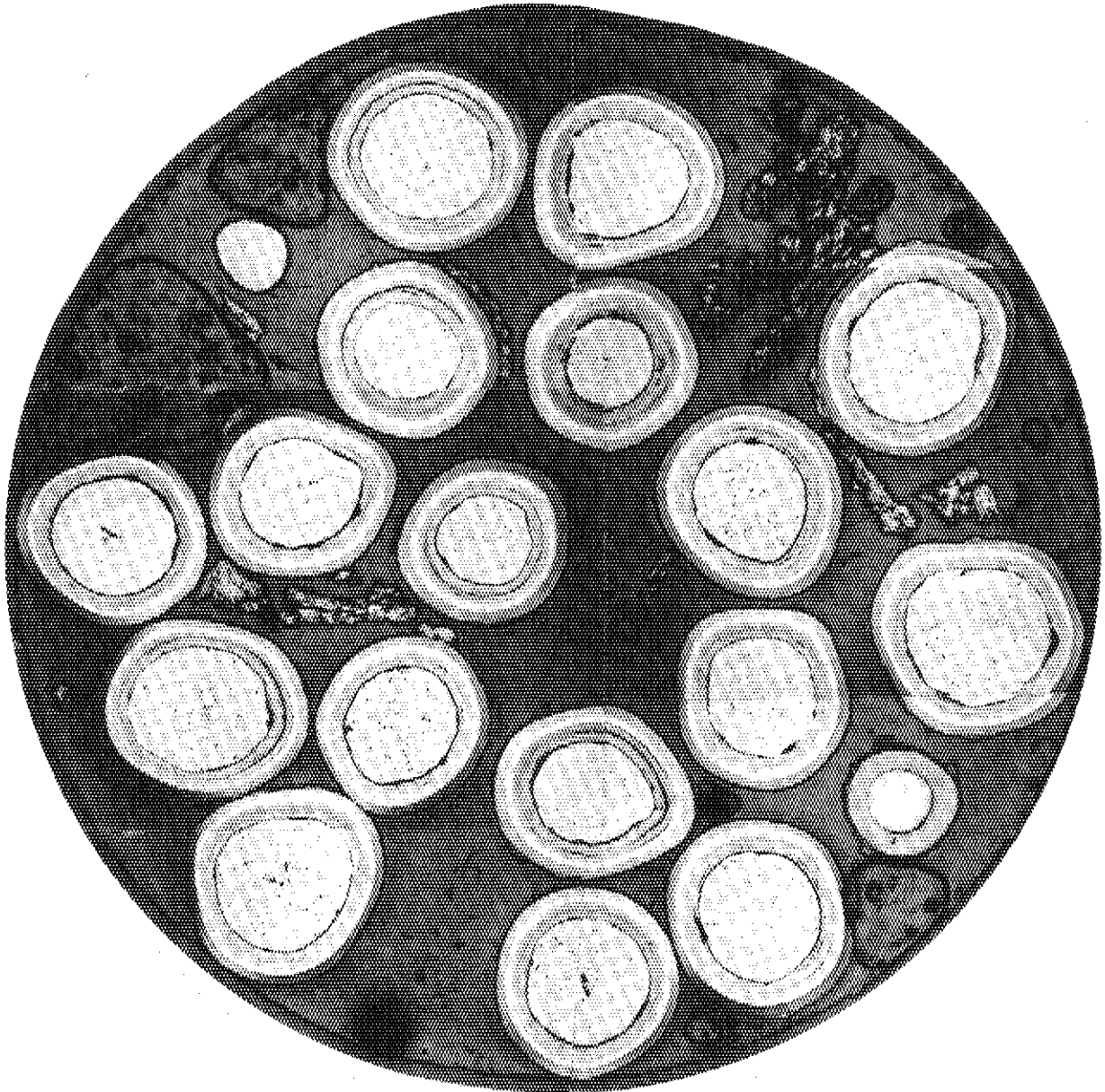


Fig. 7.11 X-ray microradiographs after acid-leaching test: a & b, 75FP3A compact in 75F5A-3; c & d, 75FP2A compact in 75F5A-2; e & f, 75FP4A compact in 75F5A-3.



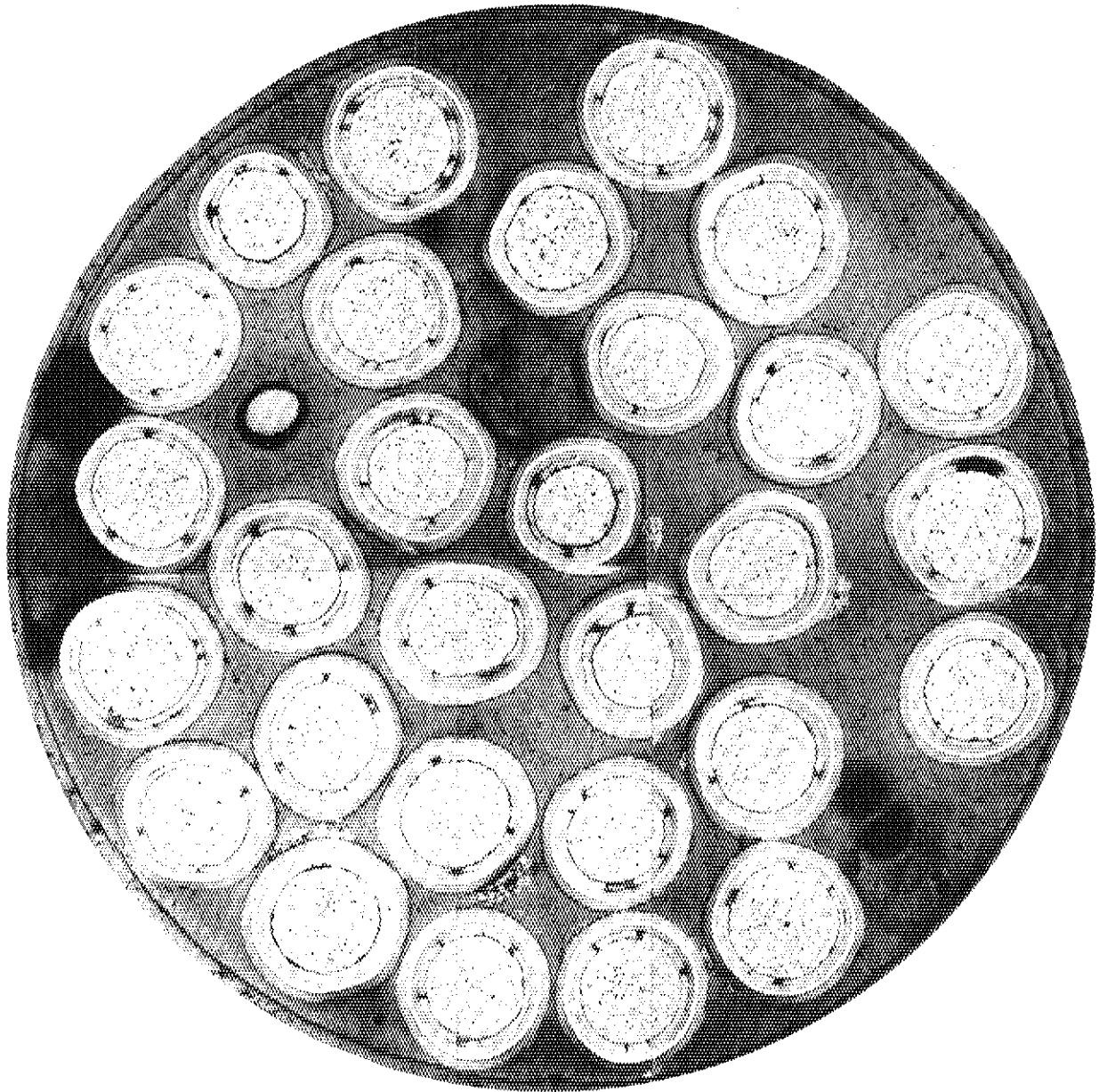
a

Fig. 7.12 Ceramographs of coated fuel particles after electrolytic deconsolidation of fuel compacts and acid-leaching test: a, 75FP4A-1 compact in 75F5A-1; b, 75FP4A-2 compact in 75F5A-1; c, 75FP2A-1 compact in 75F5A-2; d, 75FP2A-2 compact in 75F5A-2; e, 75FP3A-1 compact in 75F5A-3; f, 75FP3A-2 compact in 75F5A-3.



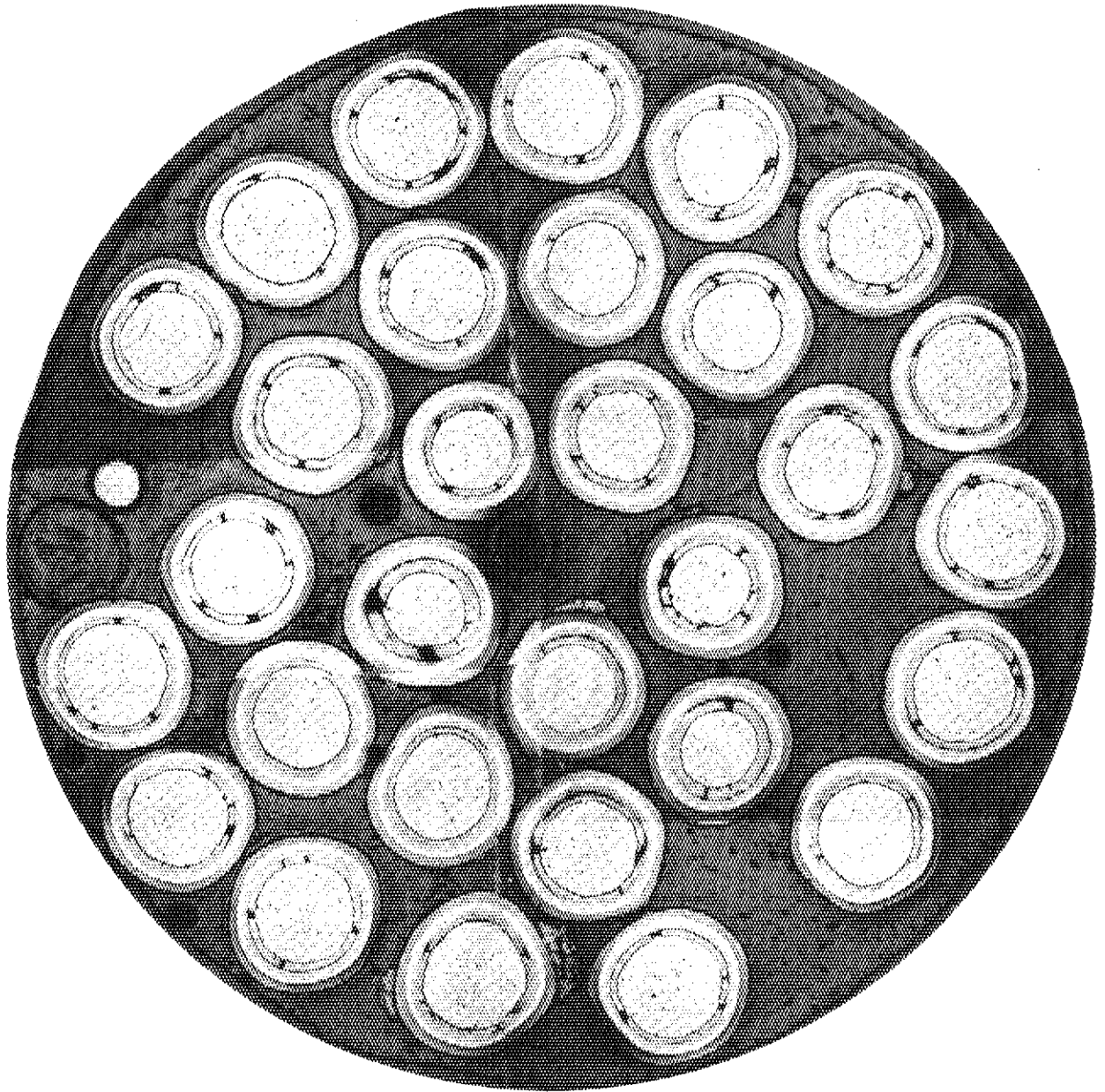
b

Fig. 7.12 (continued)



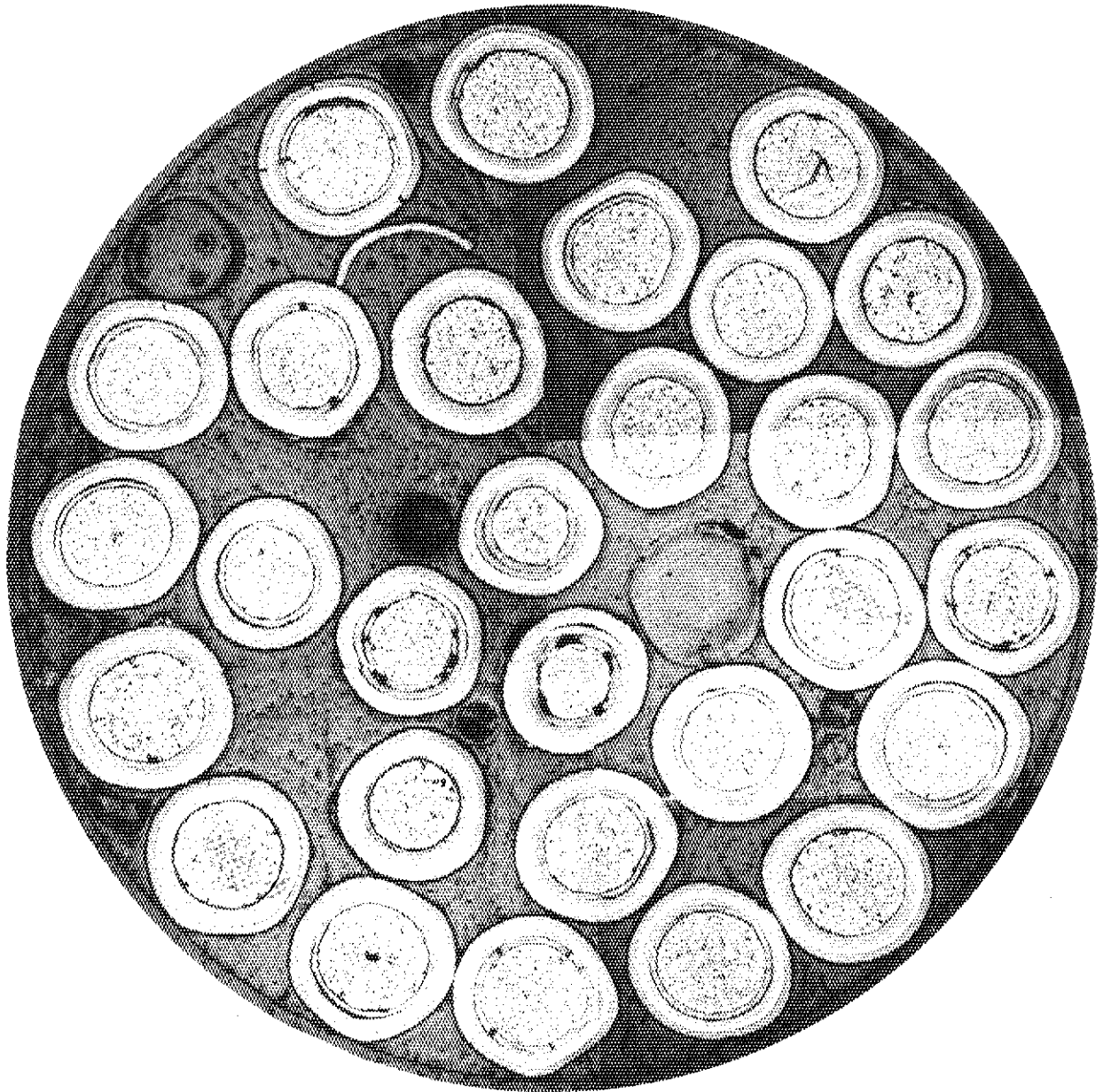
c

Fig. 7.12 (continued)



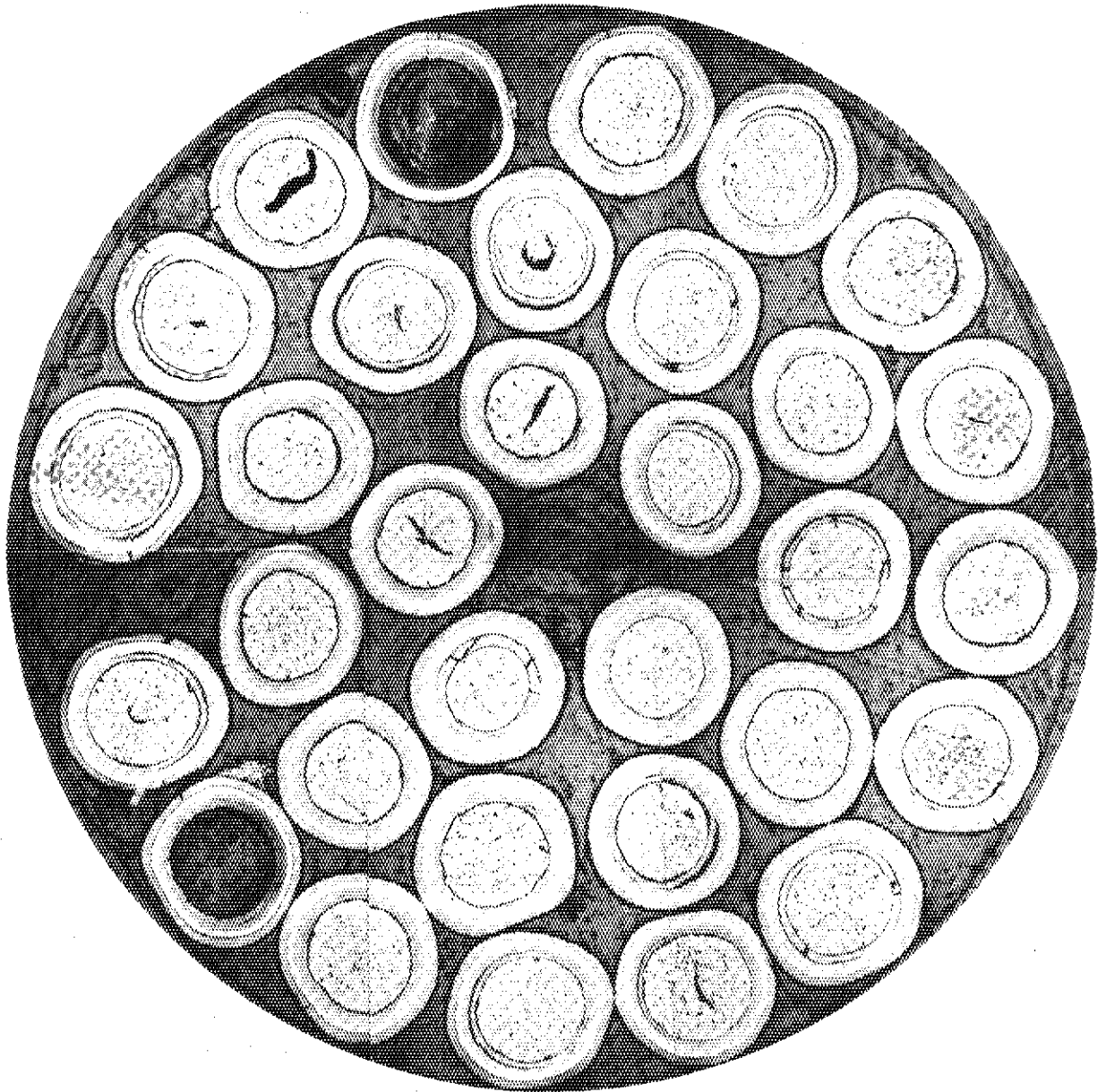
d

Fig. 7.12 (continued)



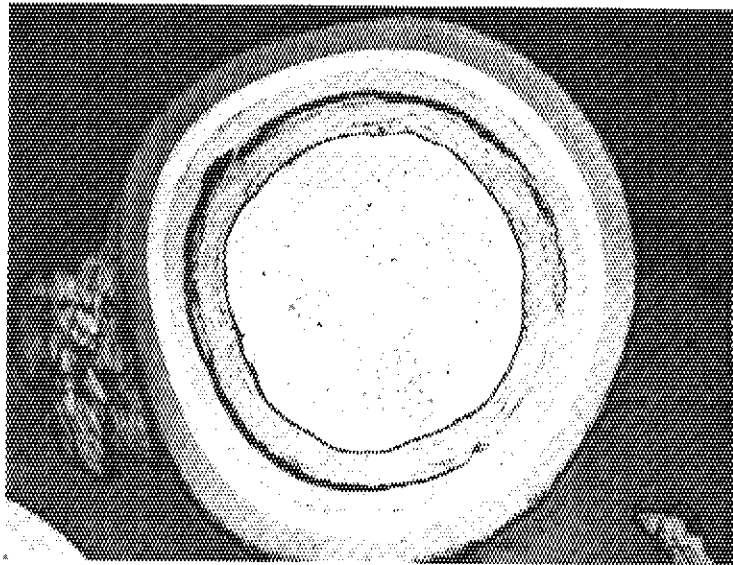
e

Fig. 7.12 (continued)

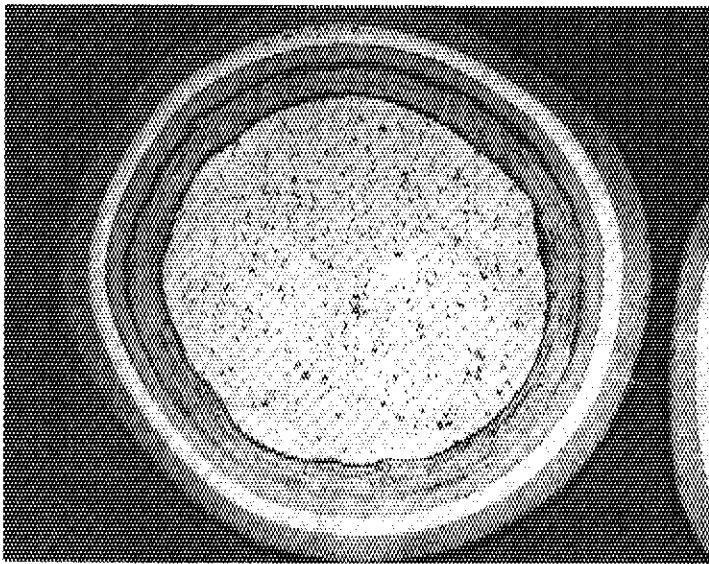


f

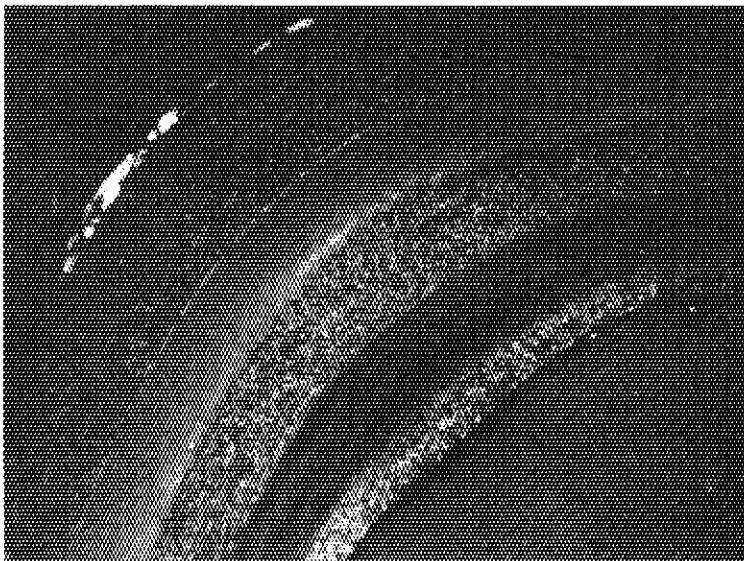
Fig. 7.12 (continued)



a

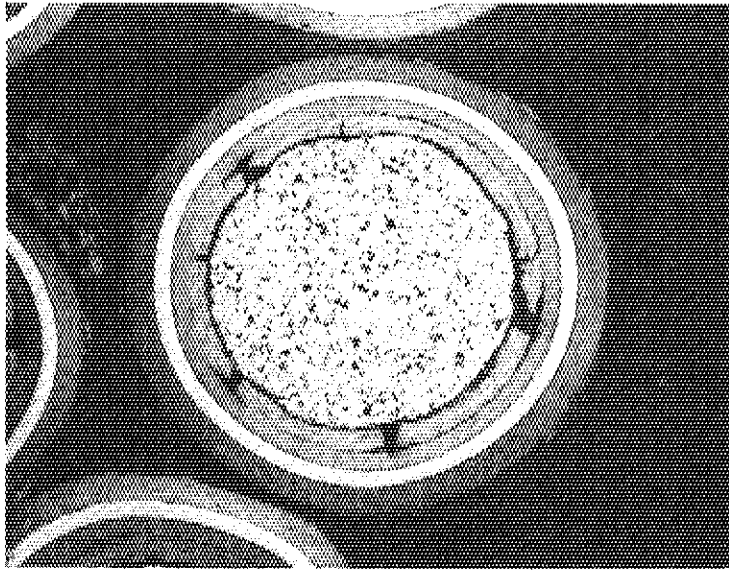


b

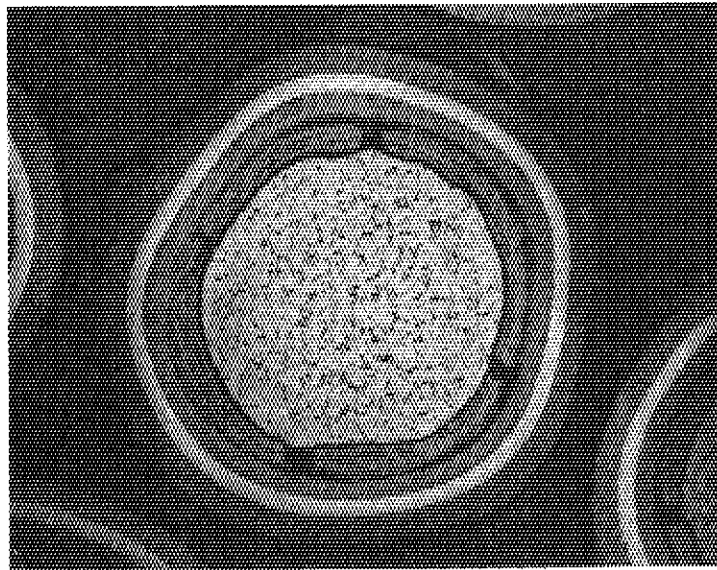


c

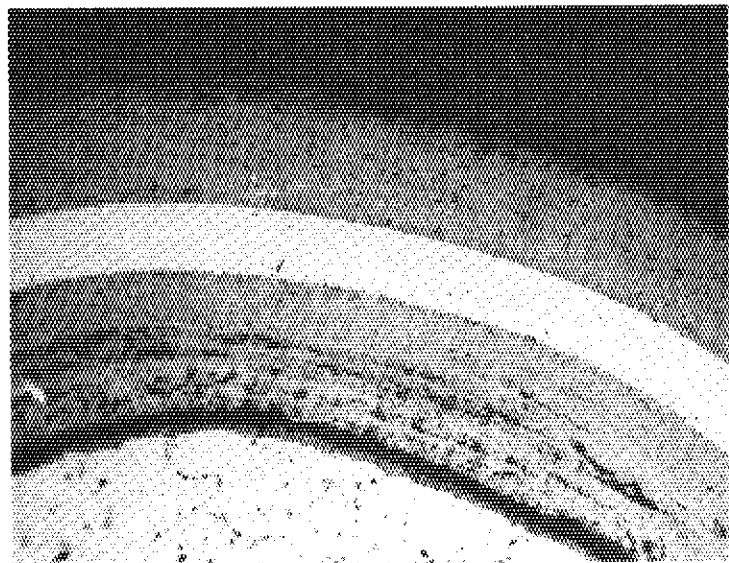
Fig. 7.13 Ceramographs showing irradiation induced changes: a, 75FP4A-1 in 75F5A-1; b & c, 75FP4A-2 in 75F5A-1; d, 75FP2A-1 in 75F5A-2; e & f, 75FP2A-2 in 75F5A-2; g & h, 75FP3A-2 in 75F5A-3.



d

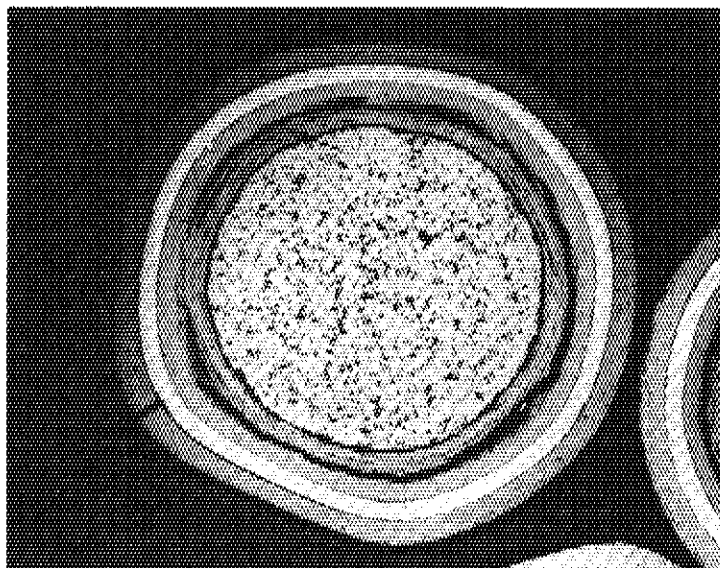


e

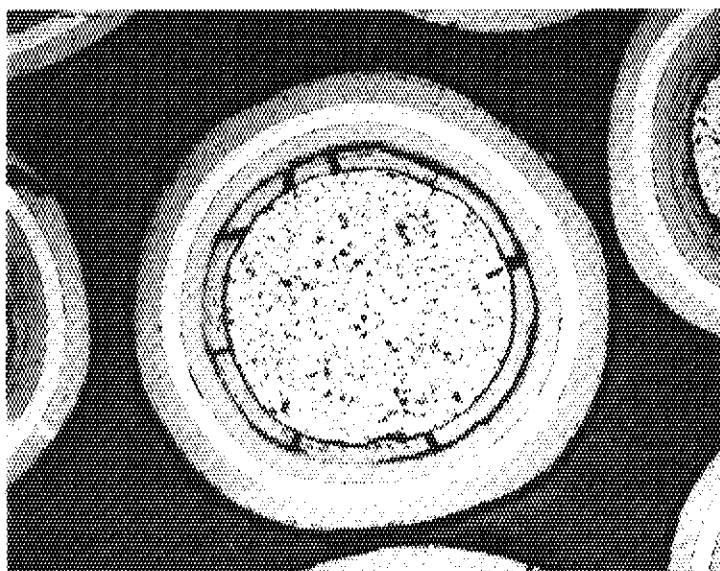


f

Fig. 7.13 (continued)



g



h

Fig. 7.13 (continued)

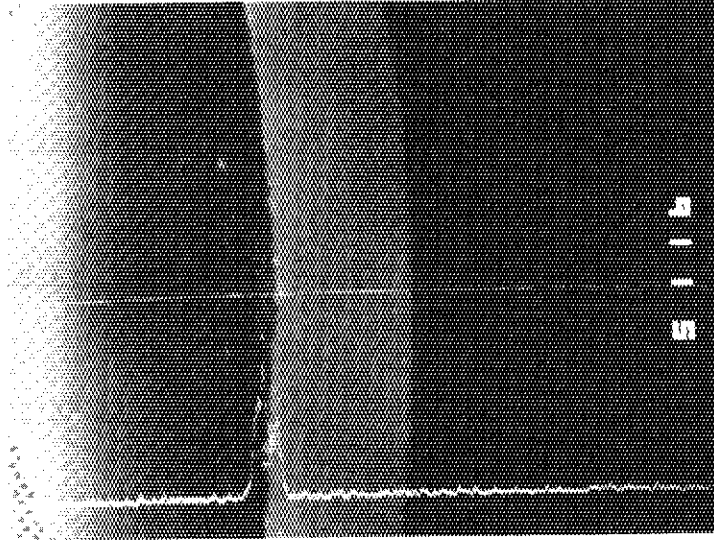


Fig. 7.14 Pd-L α line scan showing Pd penetration of $\sim 1 \mu\text{m}$ in SiC (75FP2A-1 irradiated in 75F5A-2).

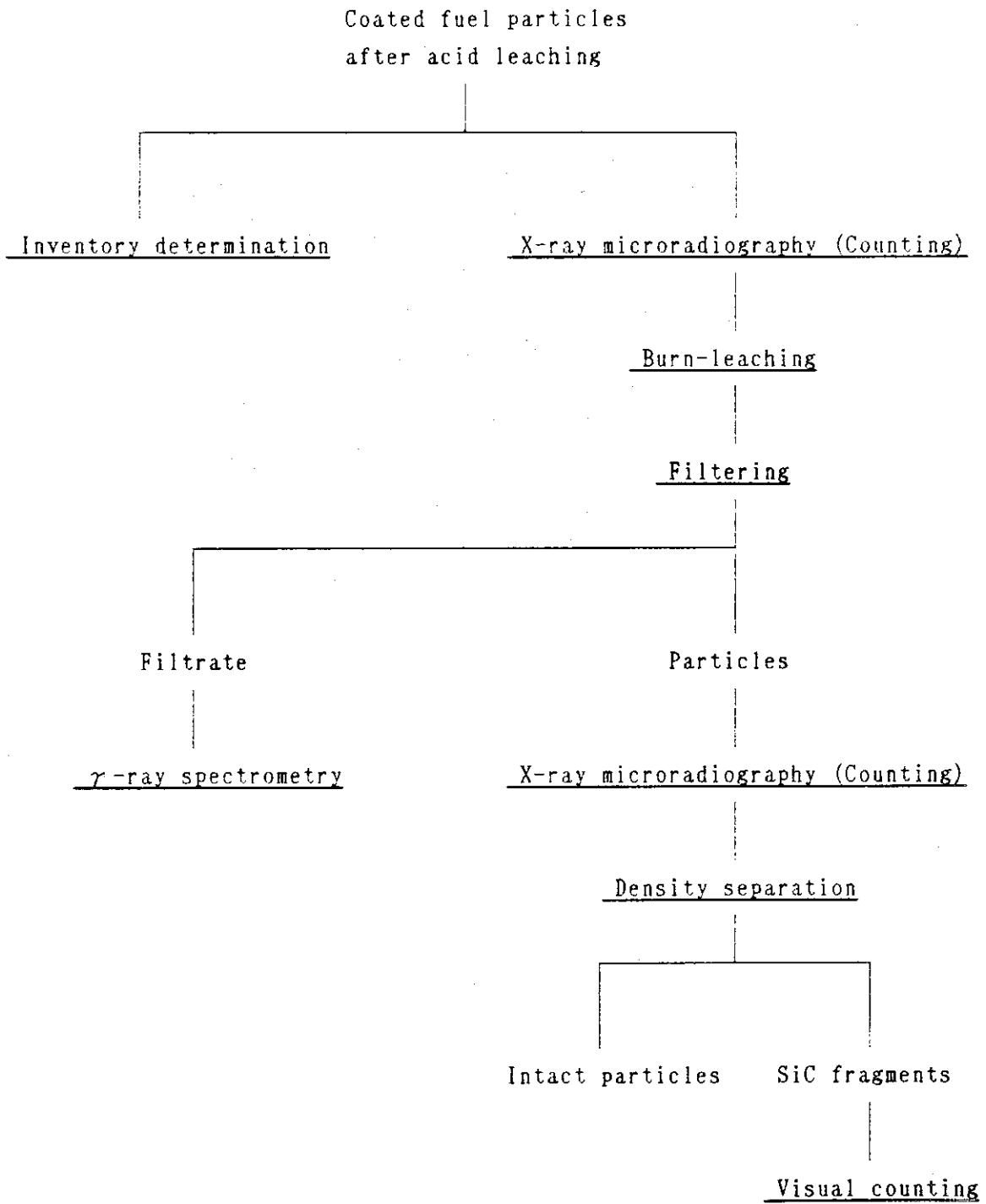


Fig. 7.15 Flowsheet of determination of fraction defective SiC.

8. 考 察

以下では、F P ガスの放出挙動と、被覆粒子燃料の照射健全性について考察を加えた。なお、金属F P 放出挙動については既に74F9J キャプセルの結果とあわせて詳細な解析を行った¹³⁾ので、ここでは再論しない。

8.1 F P ガス放出率と粒子破損率

被覆燃料粒子の貫通破損率 (ϕ) とF P ガス放出率 (R/B) との関係は、ルーズな被覆燃料粒子については福田ら¹¹⁾によって、燃料コンパクトについては小川ら¹⁵⁾によってまとめられている。

福田らはルーズな被覆燃料粒子の R/B を

$$R/B = (1 - \phi) (R/B)_i + \phi (R/B)_f \quad (1)$$

$(R/B)_i$: 健全粒子からの放出率

$(R/B)_f$: 破損粒子からの放出率

として捉えた。そして、

$$(R/B)_i = (R/B)_D + 0.03 (R/B)_R$$

$$(R/B)_f = (R/B)_D + (R/B)_R$$

$(R/B)_D$: 拡散放出項

$(R/B)_R$: 反跳放出項

と仮定した。ただし、健全粒子からの放出はすべて、最外層汚染ウランによるものである。解析に用いた拡散係数をTable 8.1 に示した。また、 $(R/B)_i$ と $(R/B)_f$ との計算結果をFig. 8.1 に示した。

一方、小川らは、燃料コンパクトの貫通破損率 (ϕ) と R/B とを、経験式によって関係づけた。

$$(R/B)_{88Kr} = \phi \{ 428 \exp(-16200/T) + 0.0136 \} \quad (2)$$

この経験式は、ある程度燃焼の進んだルーズな被覆燃料粒子についても、用いることができる。

Table 8.2 には、上記2種のモデルによって75F4A キャプセルの照射終了時の R/B から破損率を推定した結果を、照射試験による破損率と比較した。(1)式の解析モデルでは下段試料の破損率がやや過大評価されている。一方、(2)式の経験式モデルでは中段試料の破損率がやや過小評価されている。しかし、照射後試験による破損率の評価誤差と、それぞれのモデルの導出の根拠となったデータの精度とを考慮すれば、いずれのモデルも妥当な予測精度を持っていると言えよう。

第5章に述べたように、75F5A キャプセルについては最終照射サイクル(第51サイクル)の R/B 値をTable 5.4 ~ 5.6 のデータから除外したので、上のような照射後破損率との比較はできない。しかし、(2)式を用いて、第50サイクル終了近くまでは各段とも有意な程の破損率の

上昇はなかったと結論することができる。ここで重要な観察は、中段試料を第49サイクルで1400°Cから1500°Cに昇温後5日間保持したのち1400°Cに戻しても、R/Bが昇温の前後でほとんど変化していないことである (Table 5.5b)。また、第50サイクルで約1600°Cに昇温し5日間保持しても (Table 5.5c)、(2)式によるR/B値からの破損率評価値は昇温前1370°Cでの 8×10^{-5} のまま変化しない。

75F5Aキャプセルで、Table 7.1に示したように、照射後の破損率が約 5×10^{-4} まで上昇しているのは、R/Bデータのない第51サイクル中に破損の発生があったものと考えられる。しかし、75F4A、5Aキャプセルでの照射中の貫通破損の発生の機構を論ずることは、これら二本のキャプセルのデータだけをもってしては、ほとんど不可能である。これ以後のガススィープ・キャプセルのデータに基づいて、照射による貫通破損の発生は、照射前にすでにSiC層の割れている部分破損粒子の最外層熱分解炭素が破損したものとして、ほぼ説明できると我々は考えている。そして、現在、この観点に立った破損モデルを作成している。照射温度1000°C以下であった75F4A下段試料(75FPC-4A)の方が、最高照射温度が1500°Cに達し、燃焼率も2%を越えた上段試料(76OPC-3)より高い照射後貫通破損割合を示しているのは、前者の照射前SiC破損割合が 1×10^{-3} と比較的高かったことに関係していると考えられる。また、特に75F4A下段試料に関しては、後述(8.3)するように、最外層熱分解炭素中の照射収縮による引張り応力を照射クリープで緩和し切れなかったことも関与していよう。

8.2 最外層汚染ウランからのFPガス放出挙動

75F4Aキャプセルで照射したルーズな被覆燃料粒子試料については、FPガス放出率(R/B)の水準から考えて、最初の3サイクルの間は破損粒子を全く含まなかったと言える。したがって、最外層熱分解炭素中の汚染ウランによるFPガスの放出挙動について、700°Cから1400°Cの広い温度範囲で貴重な知見を得ることができた。

Fig. 8.2~8.4には、 ^{88}Kr 、 ^{135}Xe 、 ^{138}Xe の相互のR/Bの比の温度依存性を示した。ただし、 ^{138}Xe のR/Bについては、スィープガスのサンプリング位置での遅れ時間を10分として崩壊補正を行った。 ^{135}Xe については、半減期の比較的長い(6.6h)親の ^{135}I として放出移行する分があり、正確な崩壊補正が困難であるので、ここでは考察の対象とはしなかった。

これらの比から、最外層汚染ウランからのFPガスの放出挙動について、幾つかの推定を行うことができる。

第一に、放出の機構として、核分裂反跳と拡散とのいずれが支配的であるかを考える。核分裂反跳が支配的である場合には、FPガス核種間でのR/Bの比は、温度によらずほぼ一定(～1)であろう。しかし、実測結果は、 $^{138}\text{Xe}/^{88}\text{Kr}$ 、 $^{135}\text{Xe}/^{88}\text{Kr}$ 、 $^{135}\text{Xe}/^{138}\text{Xe}$ のいずれの比も、明らかな温度依存性を示しているうえ、低温においても比 $^{135}\text{Xe}/^{138}\text{Xe}$ は1から大きくずれている (Fig. 8.2)。すなわち、700~1400°Cにおいて、最外層汚染ウランからの放出は、拡散支配である可能性が大きい。

放出が拡散支配である場合には、親核種の移行が無視できる限りにおいて、同位体のR/Bは $\lambda^{-1/2}$ に比例する。すなわち、

$$R/B = (3/\sqrt{\lambda/D'}) (C/f_v) \quad (3)$$

D : 換元拡散係数 (/s)

λ : 崩壊定数 (/s)

C : 最外層ウラン汚染率

f_v : 最外層の1粒子中の体積分率 (詳細設計仕様では約 0.25)

中性子吸収を考慮した¹³⁵Xeの実効崩壊定数は約 2.5×10^{-4} であるので、親核種の移行が無視できるなら、R/Bの比、¹³⁵Xe/¹³⁸Xeは約1.8になるはずである。約1200℃より低温では実測の比はほぼこれに一致している。しかし、それより高温では実測比は温度とともに増大している。このことは、1200℃より高温で、¹³⁵Iの放出の寄与が温度とともに大きくなっていることを意味している。¹³⁸Iの半減期は6.5秒にすぎないので、その拡散放出は無視して良い。

親核種の移行を考慮したとき、娘核種の拡散放出によるR/Bは次式に従う

$$(R/B)_2 = (C/f_v) (3/\sqrt{\lambda_2/D'_2}) (X^3 - 1) (X^2 - 1) \quad (4)$$

$$X = (D'_1 \lambda_2 / D'_2 \lambda_1)^{1/2}$$

ここで、添字1および2は、それぞれ、親核種および娘核種に対応する。したがって、R/Bの比、¹³⁵Xe/¹³⁸Xeは、

$$(R/B)_{135\text{Xe}} / (R/B)_{138\text{Xe}} \approx 1.8 (X^3 - 1) / (X^2 - 1)$$

となる。1400℃での実測値の比(～3.4)から $X \approx 1.5$ 、したがって $D'_1/D'_{\text{Xe}} \approx 0.25$ が求まる。一方、(3)、(4)式から、

$$(R/B)_2 / (R/B)_1 = (X^3 - 1) / X (X^2 - 1) \quad (5)$$

である。第6章のヨウ素放出率の測定結果では、1400℃で $(R/B)_2 / (R/B)_1 \approx 5$ であったので、 $D'_1/D'_{\text{Xe}} \approx 0.1$ となる。すなわち、¹³⁵Xeの¹³⁸Xeに対するR/Bの比から評価した、ヨウ素とキセノンの熱分解炭素中の拡散係数の比は、ヨウ素放出率の測定結果と良く一致している。Fig. 8.2から、この拡散係数の比は低温ではさらに小さくなることが分かる。

最後に、熱分解炭素中のクリプトンとキセノンの拡散係数の比を考える。両者の拡散係数が等しければ、(3)式からR/Bの比、¹³⁸Xe/⁸⁸Krおよび¹³⁵Xe/⁸⁸Krは、それぞれ、約0.3および0.5となるはずである。1400℃付近の高温では、実測比はほぼこの値に近づいているが、低温では大きくずれている(Fig. 8.3, 4)。このことは、これらの温度領域で $D'_{\text{Kr}}/D'_{\text{Xe}} < 1$ であって、拡散の活性化エネルギーは $Q_{\text{Kr}} > Q_{\text{Xe}}$ であることを意味している。

以上を要約すれば、(1)最外層汚染ウランからのキセノン、クリプトン、ヨウ素の放出は拡散放出によること、しかし、(2)これらのFPガスは熱分解炭素中ではそれぞれ異なった拡散挙動を示すことが分かった。先に報告した74F9Jキャプセル⁸⁾および、この後の76F4Aキャプセル(Table 1.3参照)のデータの解析結果と併せて、熱分解炭素中の照射下拡散係数としてまとめる予定である。

8.3 被覆層の照射健全性

第7章Table 7.3には、照射後の断面観察で見出された、被覆層の照射による変化をまとめた。ここでは、それらについて簡単に議論する。

バッファー層については径方向の割れ(スピアヘッド・アタック)と同時に、第2層高密度熱分解炭素からの剥離が、相当数の粒子について観察された。バッファー層の機能としては、FPガスに対するプレナムの他、第2層高密度熱分解炭素の核分裂片損傷からの保護があげられる。スピアヘッド・アタックが一応バッファー層内でとどまっていることから、バッファー層はこの機能をほぼ満足していると言える。この意味では、第2層高密度熱分解炭素からのバッファー層の剥離が好ましくないとは必ずしも言えないのである。というのは、スピアヘッド・アタックの先端が第2層熱分解炭素内まで伝播することがこの層剥離によって防がれるからである。

スピアヘッド・アタックの発生頻度は照射温度が高いほど大きい。もう1つ、照射収縮の作用も考えられる。しかし、照射温度は高いが高速中性子照射量は小さい75F4A キャプセル上段の結果から考えて、照射温度の効果の方が大きいと考えられる。しかし、また、炉外加熱ではこの現象は見られていないことから、核分裂片による損傷が関与していることが考えられる。第7章で述べた通り、バッファー層の内側が核分裂反跳距離に相当する深さ約20 μm の範囲で変質、おそらく緻密化していることが分かったが、これがバッファー層の周方向に応力を与える1つの原因であろう。

最外層熱分解炭素中には、しばしば断面研磨によって径方向の割れが発生した。しかし、製造時の品質がほぼ等しい第2層熱分解炭素中についてはこのような割れは生じなかった。熱分解炭素は照射によって収縮するが、最外層熱分解炭素の場合、この収縮は第3層SiCによって拘束されるため、内部に引張り応力が発生する。この引張り応力は照射クリープによって緩和されるが、高速中性子照射量が小さい場合にはこの緩和が不十分になることが考えられる。これが、75F4A、5A両キャプセルの下段内筒中の試料で最も多く最外層の割れが観察された理由であろう。特に、75F4A下段試料では、照射温度が1000°C以下と低かったことから、照射クリープによる緩和は最も小さかったものと考えられる。

SiC層のパラジウム(Pd)腐食は、被覆燃料粒子の照射健全性に影響する最も重要な現象の一つである。しかし、Pd腐食はSiCの内面に点状に局在しているために、断面観察による検出がむずかしく、腐食速度データの蓄積は困難を極めている。ここで得られた結果では、公称の照射条件のより緩やかな75F4Aキャプセル試料の方に、75F5Aキャプセル試料で観察されたよりも著しいPd腐食が発生している。これに対しては、ルーズな粒子として観察した方が、被覆燃料粒子内部に大きな温度勾配が生じること、また、実際の照射温度は公称値より局所的には大きくなっていることが、説明として考えられる。すなわち、ルーズな粒子として照射した方がPdの燃料核からの放出、およびSiC層内面での局所的蓄積の程度が甚だしかったものと考えられる。将来、Pd腐食モデルの構成にあたっては、これら照射形態による厳密な意味での照射条件の違いも考慮に入れないと、統計的な分散の非常に大きなデータ・ベースを扱うことになってしまうであろう。

Table 8.1 Diffusion coefficients assumed in the model by Fukuda et al¹¹⁾

拡散媒体	拡散係数 (cm ² /sec)	備考
UO	$3.0 \times 10^{-2} \exp(-2.64 \times 10^5 / RT)$	本文参照
バッファー層	$1 \times 10^{-7} \exp(-4.2 \times 10^4 / RT)$	仮定値
内部PyC層	$2.9 \times 10^{-7} \exp(-2.55 \times 10^5 / RT)$	HTI-PyC中のXeの拡散係数
SiC層	$8.6 \times 10^{-6} \exp(-3.26 \times 10^5 / RT)$	SiC中のXe拡散係数
最外PyC層	$2.9 \times 10^{-4} \exp(-2.55 \times 10^5 / RT)$	本文参照

R : ガス定数 (8.314 J/K) , K : 絶対温度 (K)

Table 8.2 Comparison of the end-of-life fraction through-coating failure (ϕ_{EOL}) by acid leaching test and those by model predictions from R/B of fission gas.

Capsule	75F4A-1	75F4A-2	75F4A-3
ϕ_{EOL} by acid leaching	3×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
R/B(88Kr) Temp. (°C)	1.4×10^{-5} 1400	9.1×10^{-6} 1240	2.1×10^{-5} 800
ϕ_{EOL} by eq. (1)	2.9×10^{-4}	5.7×10^{-4}	2.9×10^{-3}
ϕ_{EOL} by eq. (2)	3.5×10^{-4}	3.9×10^{-4}	1.5×10^{-3}

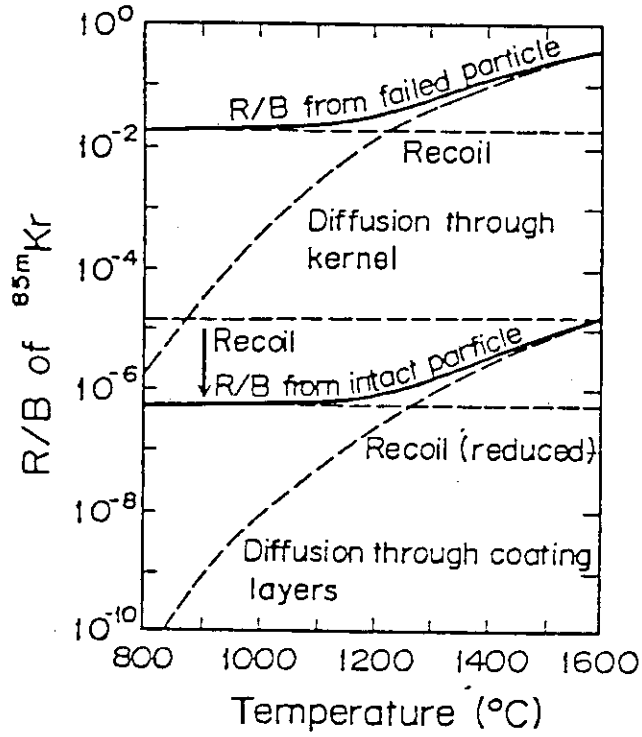


Fig. 8.1 Fission gas release after model analyses by Fukuda et al.

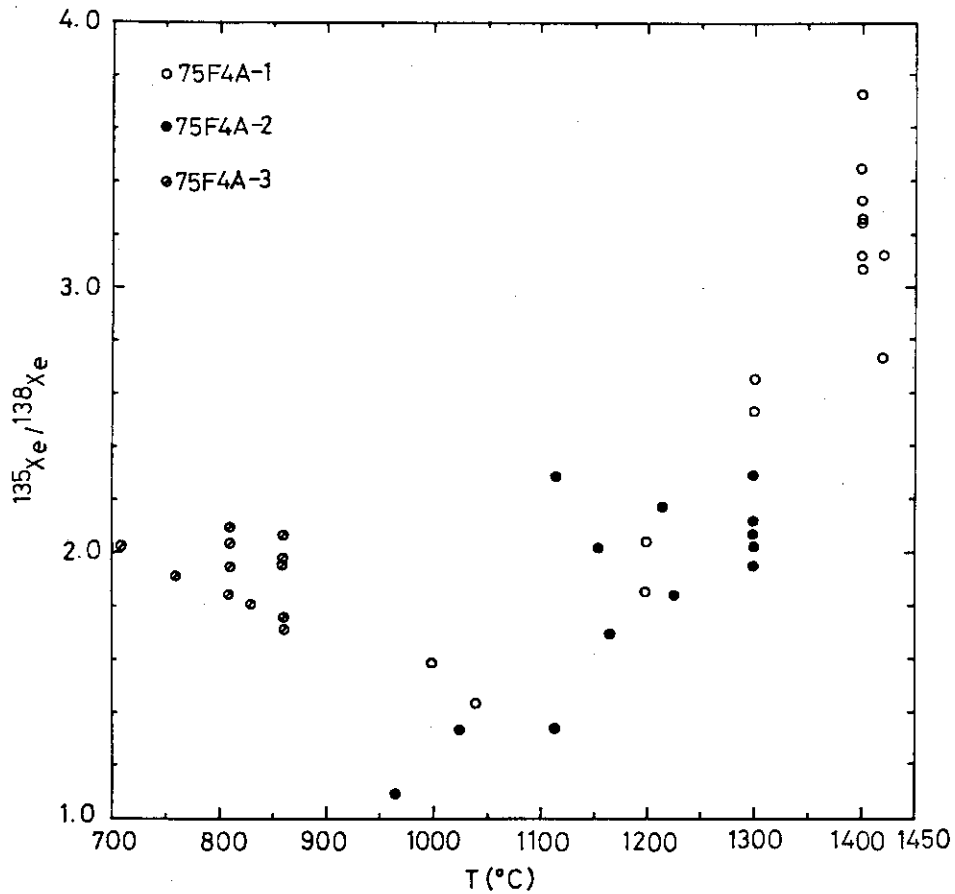


Fig. 8.2 Ratio of R/B's from samples in 75F4A for the first three reactor periods: ^{135}Xe to ^{138}Xe .

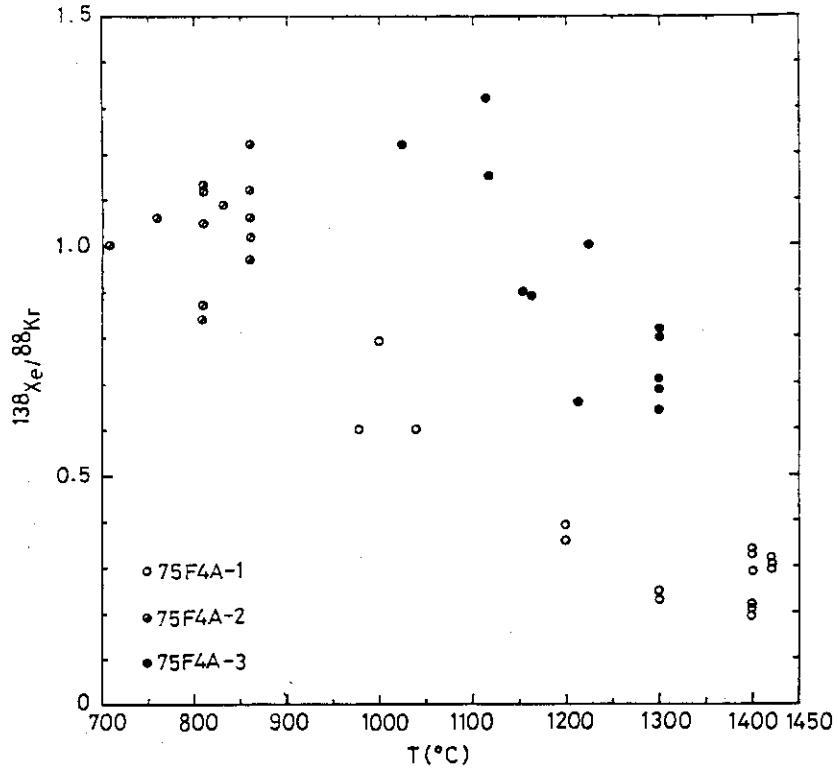


Fig. 8.3 Ratio of R/B's from samples in 75F4A for the first three reactor periods: ^{138}Xe to ^{88}Kr .

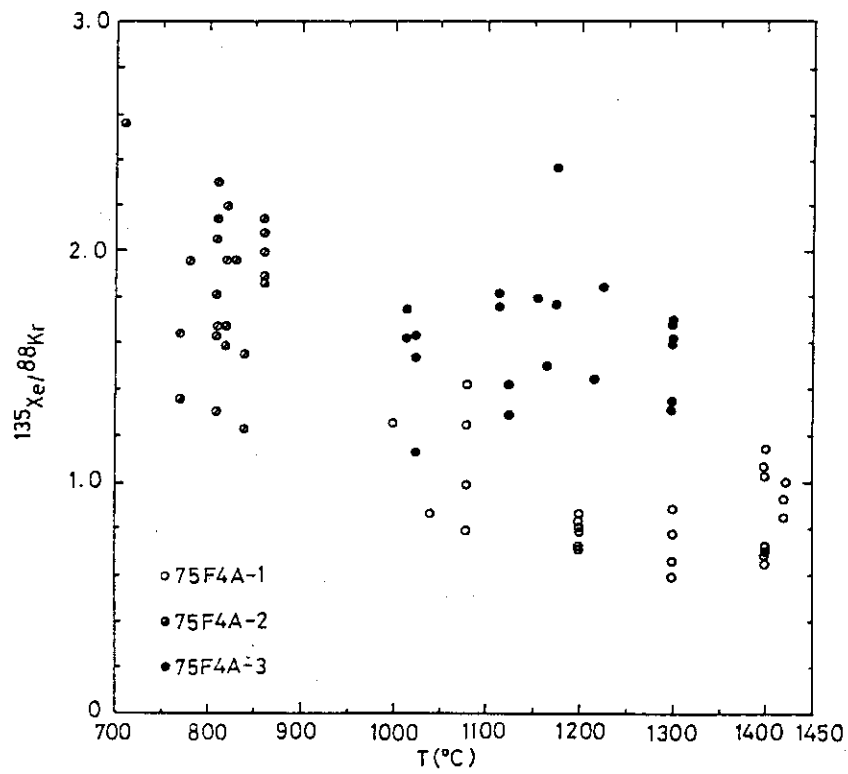


Fig. 8.4 Ratio of R/B's from samples in 75F4A for the first three reactor periods: ^{135}Xe to ^{88}Kr .

9. 結 論

75F4A および75F5A の2本のガススィープキャプセルは、JMTRのBe第1層領域孔で4サイクル(約80日間)にわたって照射された。両キャプセルとも3段の内筒を有し、前者にはコンパクトに成型しないルーズな状態の被覆燃料粒子を、後者には燃料コンパクトを装荷した。照射期間を通してほとんど何の故障もなく、照射末期でさえ温度調節巾は700℃に達し、最高1500℃(75F4A-1)、1600℃(75F5A-2)までの昇温を行うことができた。これらのキャプセルで得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 詳細設計仕様に従った試作燃料粒子のうち、51年度試作品の1つ(76OPC-3)は、75F4Aキャプセルでルーズな粒子として最高1500℃で2.2%FIMAまで照射されたが、照射後貫通破損率(ϕ_{EOL})は 3×10^{-4} に過ぎなかった。また、FPガスの放出率も1500℃で 1×10^{-5} (^{88}Kr)と十分低いものであった。ただし、詳細設計仕様初年度にあたる、50年度試作燃料粒子(75FPC-4A)は、照射温度は1000℃以下であったにもかかわらず、 ϕ_{EOL} は 1×10^{-3} であった。このような照射挙動の違いは、製造時の品質、特にSiC層破損率に関係していると考えられる。
- (2) 75F5Aキャプセルでは、予備設計および詳細設計仕様にしたがった50年度試作燃料粒子のコンパクトを最高1600℃で1.6%FIMAまで照射したが、貫通破損率は 5×10^{-4} に過ぎなかった。
- (3) 75F4Aキャプセル試料はいずれも始めの3サイクルの間、貫通破損率は0であった。その結果、最外層汚染ウランからのFPガス放出挙動について、700℃~1400℃で放出機構が拡散支配であること、また、キセノン、クリプトン、ヨウ素の熱分解炭素中の拡散挙動はそれぞれ異なることが分かった。
- (4) 照射温度の高かった75F4A上段試料(76OPC-3粒子)、中段試料(76FPC-1A粒子)および75F5A中段試料(75FP2Aコンパクト)ではSiC層のパラジウム(Pd)腐食が認められた。しかし、その程度は、公称の照射温度のより低かった75F4A試料の方で著しかった。ルーズな粒子として照射した場合には燃料粒子内の温度勾配が大きいことなどが、原因として考えられる。燃料コンパクトでは、最高照射温度1600℃の場合でさえPd侵入深さは1μmに過ぎなかった。また、照射後のSiC層破損率は照射前に比べて有意な増加を示さなかった。
- (5) 照射温度の高かった試料では、ほとんどの燃料粒子にバッファ層のスピアヘッド・アタックが観察された。一方、高速中性子照射量の小さかった試料については、断面組織観察のための研磨によって、最外層熱分解炭素に径方向の割れが入った。

以上の他、燃料コンパクトの寸法変化、金属FPの放出割合等についてデータが得られた。

謝 辞

ここで報告したキャプセルの照射は、以下の課室の協力のもとに行われた。関係各位の努力に感謝します。

(1) キャプセル設計、製作、照射

大洗研究所材料試験炉部照射一課、二課、三課、東海研究所技術部工作課

(2) 照射後試験

東海研究所ホットラボ管理室、大洗研究所ホットラボ課

75F4A, 5A キャプセル中段試料の燃焼率測定は燃焼率測定開発室（現在、分析センター）によって行われた。また、近藤達男燃料工学部長、岩本多実前燃料工学部長（環境安全研究部長）井川勝市トリウム燃料研究室長には御指導をいただいた。ここに感謝します。

参 考 文 献

- (1) 岩本多実, 他, JAERI - M 6717 (1976)
- (2) 福田幸朔, 他, JAERI - M 8949 (1980)
- (3) 福田幸朔, 他, JAERI - M 9644 (1981)
- (4) 飛田勉, 他, JAERI - M 83-153 (1983)
- (5) 福田幸朔, 他, JAERI - M 83-232 (1984)
- (6) 菊池輝夫, 他, JAERI - M 84-106 (1984)
- (7) 福田幸朔, 他, JAERI - M 84-199 (1984)
- (8) 福田幸朔, 他, JAERI - M 84-054 (1984)
- (9) 井川勝市, 他, JAERI - M 83-012 (1983)
- (10) 福田幸朔, 他, JAERI - M 86-092 (1986)
- (11) K. Fukuda et al., J. Nucl. Sci. Technol., 19, 889 (1982)
- (12) K. Fukuda et al., Proc. 3rd Japan-US Seminar on HTGR Safety Technology, NUREG/CP-0045 (1982) vol. 2, p. 563-573.
- (13) 小川徹, 他, JAERI - M 85-041 (1985)
- (14) T. Ogawa et al., J. Nucl. Mater., 135, 18 (1985)
- (15) 小川徹, 他, JAERI - M 86-146 (1986)
- (16) K. Minato et al., JAERI - M 84-002 (1984)
- (17) T. Ogawa et al., JAERI - M 83-200 (1983)
- (18) 小川徹, 井川勝市, JAERI - M 83-051 (1983)
- (19) 小川徹, 他, JAERI - M 83-152 (1983)
- (20) 松島秀夫, 他, "照射済被覆燃料粒子のSiC層破損率測定試験" 日本原子力学会58年度秋の分科会(札幌)。
- (21) C. A. Friskney and M. V. Speight, J. Nucl. Mater., 62, 89 (1976)
- (22) P. Zoller, Juel - 1324 (1976)

謝 辞

ここで報告したキャプセルの照射は、以下の課室の協力のもとに行われた。関係各位の努力に感謝します。

(1) キャプセル設計、製作、照射

大洗研究所材料試験炉部照射一課、二課、三課、東海研究所技術部工作課

(2) 照射後試験

東海研究所ホットラボ管理室、大洗研究所ホットラボ課

75F4A, 5A キャプセル中段試料の燃焼率測定は燃焼率測定開発室（現在、分析センター）によって行われた。また、近藤達男燃料工学部長、岩本多実前燃料工学部長（環境安全研究部長）井川勝市トリウム燃料研究室長には御指導をいただいた。ここに感謝します。

参 考 文 献

- (1) 岩本多実, 他, JAERI - M 6717 (1976)
- (2) 福田幸朔, 他, JAERI - M 8949 (1980)
- (3) 福田幸朔, 他, JAERI - M 9644 (1981)
- (4) 飛田勉, 他, JAERI - M 83-153 (1983)
- (5) 福田幸朔, 他, JAERI - M 83-232 (1984)
- (6) 菊池輝夫, 他, JAERI - M 84-106 (1984)
- (7) 福田幸朔, 他, JAERI - M 84-199 (1984)
- (8) 福田幸朔, 他, JAERI - M 84-054 (1984)
- (9) 井川勝市, 他, JAERI - M 83-012 (1983)
- (10) 福田幸朔, 他, JAERI - M 86-092 (1986)
- (11) K. Fukuda et al., J. Nucl. Sci. Technol., 19, 889 (1982)
- (12) K. Fukuda et al., Proc. 3rd Japan-US Seminar on HTGR Safety Technology, NUREG/CP-0045 (1982) vol. 2, p. 563-573.
- (13) 小川徹, 他, JAERI - M 85-041 (1985)
- (14) T. Ogawa et al., J. Nucl. Mater. 135, 18 (1985)
- (15) 小川徹, 他, JAERI - M 86-146 (1986)
- (16) K. Minato et al., JAERI - M 84-002 (1984)
- (17) T. Ogawa et al., JAERI - M 83-200 (1983)
- (18) 小川徹, 井川勝市, JAERI - M 83-051 (1983)
- (19) 小川徹, 他, JAERI - M 83-152 (1983)
- (20) 松島秀夫, 他, "照射済被覆燃料粒子のSiC層破損率測定試験" 日本原子力学会58年度秋の分科会(札幌)。
- (21) C. A. Friskney and M. V. Speight, J. Nucl. Mater. 62, 89 (1976)
- (22) P. Zoller, Juel - 1324 (1976)

付録 照射履歴とFPガス放出率の記録
(Table 5-1~5-6)

Table 5-1a R/B of 760PC-3 irradiated in 75F4A-1 at 45th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power ^b (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^e	138Xe ^e
01.13	21:05	1080	50	Full-power operation.						
01.16	9:47	1080	50	8.0(-9)	8.7(-9)	7.2(-9)	c	5.7(-9)	5.3(-9)	d
01.17	10:38	1080	50	1.0(-8)	9.9(-9)	5.6(-9)	c	7.0(-9)	7.3(-9)	d
	15:00			Temperature raised.						
01.18	9:45	1200	50	1.5(-8)	1.3(-8)	9.1(-9)	c	7.3(-9)	6.7(-9)	d
01.19	13:50	1200	50	1.9(-8)	1.6(-8)	1.3(-8)	c	9.2(-9)	7.4(-9)	d
	14:42			Temperature lowered.						
	12:50			Reactor shut-down.						
01.23	14:55	1080	50	Full-power operation.						
01.25	9:43	1080	50	8.8(-9)	9.2(-9)	5.0(-9)	c	7.1(-9)	7.4(-9)	d
01.27	9:55	1080	50	1.1(-8)	1.0(-8)	7.2(-9)	c	7.1(-9)	7.9(-9)	d
	15:02			Reactor shut-down.						
02.07	21:05	1080	50	Full-power operation.						
02.08	14:49			Temperature raised.						
02.09	18:06	1200	50	1.5(-8)	1.5(-8)	1.1(-8)	c	9.5(-9)	1.1(-8)	d
02.13	13:50	1200	50	1.7(-8)	1.7(-8)	1.2(-8)	3.4(-8)	1.0(-8)	9.5(-9)	d
	(15:00)			Temperature further raised.						
02.15	10:33	1300	50	2.7(-8)	2.5(-8)	1.6(-8)	4.8(-8)	1.4(-8)	1.2(-8)	d
02.16	10:25	1300	50	2.6(-8)	2.4(-8)	1.8(-8)	5.0(-8)	1.4(-8)	1.4(-8)	d
	16:20			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not included in the measurement.

e. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-1b R/B of 760PC-3 irradiated in 75F4A-1 at 46th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
03.29	21:00			Full-power operation.						
03.30	10:45	1040	50	9.9(-9)	1.2(-8)	1.0(-8)	c	8.6(-9)	1.0(-8)	3.7(-9)
	14:40			Temperature raised.						
03.31	9:43	1200	50	1.9(-8)	2.0(-8)	1.8(-8)	c	1.3(-8)	1.4(-8)	4.3(-9)
04.02	9:53	1200	50	2.0(-8)	2.0(-8)	1.9(-8)	c	1.4(-8)	1.5(-8)	4.2(-9)
	(11:00)			Temperature further raised.						
04.03	9:40	1300	50	3.2(-8)	3.0(-8)	2.9(-8)	c	1.9(-8)	1.9(-8)	4.4(-9)
	20:00			Temperature lowered.						
04.06	10:20	1000	50	8.7(-9)	1.1(-9)	7.8(-9)	c	9.8(-9)	1.5(-8)	3.8(-9)
04.07	11:21			Reactor shut-down.						
04.13	20:25			Full-power operation.						
04.14	14:55			Temperature raised to 1300°C.						
	21:45			Temperature lowered to 960°C. (A malfunction.)						
04.16	10:20			Temperature raised.						
04.17	10:03	1300	50	3.4(-8)	3.1(-8)	3.2(-8)	c	1.9(-8)	2.0(-8)	4.6(-9)
	(11:00)			Temperature further raised.						
04.19	14:06	1400	50	5.9(-8)	4.8(-8)	4.7(-8)	8.1(-8)	3.4(-8)	3.1(-8)	6.4(-9)
	15:48	1400	50	6.0(-8)	4.8(-8)	4.5(-8)	c	3.1(-8)	2.8(-8)	5.7(-9)
	16:49	1400	50	6.5(-8)	5.0(-8)	4.6(-8)	c	3.2(-8)	3.0(-8)	6.3(-9)
04.23	9:38	1400	50	6.3(-8)	5.1(-8)	5.4(-8)	c	3.5(-8)	3.1(-8)	6.6(-9)
04.24	9:30			Temperature lowered.						
	10:05	980	50	9.4(-9)	1.1(-8)	1.0(-8)	c	2.4(-8)	2.2(-8)	3.7(-9)
	10:30			Reactor shut-down.						
	10:46		0	Zero power.						
	11:05 ^e		0	1.2(-9)	5.8(-10)	c	c	6.3(-9)	3.9(-9)	c
	13:07 ^e		0	c	c	c	c	5.7(-9)	3.4(-9)	c
	14:34 ^e		0	c	c	c	c	2.6(-9)	4.8(-9)	c
	16:03 ^e		0	c	c	c	c	4.1(-9)	2.5(-9)	c
04.25	09:44 ^e		0	c	c	c	c	6.4(-10)	c	c
	13:23 ^e		0	c	c	c	c	3.1(-10)	c	c

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

e. Birth rate taken as that before shut-down for tabulation only.

Table 5-1c R/B of 760PC-3 irradiated in 75F4A-1 at 47th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
06.18	21:15			Full-power operation.						
06.19	14:00			Temperature raised.						
	16:10			Temperature reached 1420°C.						
06.22	13:57	1420	50	7.9(-8)	6.4(-8)	4.4(-8)	c	4.4(-8)	4.4(-8)	8.6(-9)
06.25	13:56	1420	50	8.2(-8)	6.9(-8)	4.8(-8)	c	4.1(-8)	5.6(-8)	9.2(-9)
06.28	13:48	1420	50	9.4(-8)	8.1(-8)	6.0(-8)	9.9(-8)	5.6(-8)	5.5(-8)	1.1(-8)
06.29	15:00			Reactor shut-down.						
07.03	2:11			Full-power operation.						
07.04	10:00			Temperature raised.						
	11:23			Temperature reached 1400°C.						
07.06	13:46	1400	50	8.9(-8)	8.1(-8)	5.3(-8)	4.5(-8)	5.5(-8)	4.9(-8)	1.1(-8)
07.09	13:38	1400	50	1.1(-7)	9.5(-8)	6.4(-8)	c	7.3(-8)	6.7(-8)	1.3(-8)
07.12	13:33	1400	50	1.5(-7)	1.1(-7)	8.5(-8)	1.6(-7)	9.1(-8)	8.7(-8)	1.5(-8)
07.13	1:00			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-1d R/B of 760PC-3 irradiated in 75F4A-1 at 48th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B							
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d	
11.12	14:13		30								
	19:10			Power drop to 0.5 MW.							
	20:32		30								
11.13	(10:00)		45								
11.14	10:01	900	45	1.1(-6)	7.6(-7)	6.0(-7)	6.7(-7)	9.8(-7)	6.4(-7)	9.2(-8)	
	10:12			Full-power operation.							
11.15	14:30			Temperature raised.							
	16:20			Temperature reached 1400°C.							
11.16	9:52	1380	50	1.0(-6)	7.6(-7)	5.3(-7)	1.8(-6)	1.2(-6)	8.6(-7)	7.9(-8)	
11.20	10:21	1380	50	6.1(-6)	3.7(-6)	3.0(-6)	5.8(-5)	8.5(-6)	5.9(-6)	6.2(-7)	
	15:00			Temperature lowered.							
	16:21			Temperature reached 1180°C.							
11.22	9:38	1180	50	4.3(-6)	2.8(-6)	2.1(-6)	1.1(-5)	4.4(-6)	2.6(-6)	3.7(-7)	
11.23	15:00			Reactor shut-down.							
11.26	20:30			Full-power operation.							
11.27	9:42	800	50	1.7(-6)	1.1(-6)	8.4(-7)	2.5(-6)	9.3(-7)	4.7(-7)	1.5(-7)	
	19:28			Temperature raised.							
11.30	9:50	1380	50	9.5(-6)	4.7(-6)	3.6(-6)	6.1(-5)	1.1(-5)	8.1(-6)	9.6(-7)	
12.03	9:40	1380	50	1.8(-5)	1.1(-5)	6.5(-6)	8.7(-5)	3.1(-5)	2.3(-5)	3.1(-6)	
	14:00			Temperature further raised.							
12.04	10:13	1500	50	1.9(-5)	1.5(-5)	9.8(-6)	7.5(-5)	3.0(-5)	2.4(-5)	4.5(-6)	
12.05	10:22	1500	50	1.9(-5)	1.8(-5)	1.2(-5)	1.0(-4)	1.8(-5)	1.6(-5)	5.5(-6)	
	11:10	1500	50	2.0(-5)	1.8(-5)	1.1(-5)	9.9(-5)	1.8(-5)	1.7(-5)	5.5(-6)	
	13:31	1500	50	2.6(-5)	1.8(-5)	1.1(-5)	1.0(-4)	1.9(-5)	1.5(-5)	5.5(-6)	
	14:00			Temperature lowered to 1400°C.							
12.06	9:36	1400	50	2.9(-5)	1.8(-5)	1.4(-5)	3.3(-4)	2.7(-5)	2.3(-5)	5.9(-6)	
	14:40			Temperature lowered to 860°C.							
12.07	10:30			Reactor shut-down.							

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-2a R/B of 76FPC-1A irradiated in 75F4A-2 at 45th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^e	138Xe ^e
01.13	21:05	1025	50	Full-power operation.						
01.16	10:20	1025	50	1.6(-8)	1.9(-8)	1.3(-8)	c	2.0(-8)	1.5(-8)	d
01.17	10:13	1025	50	1.9(-8)	2.3(-8)	1.5(-8)	c	1.7(-8)	1.6(-8)	d
	15:00			Temperature raised.						
01.18	10:04	1125	50	1.6(-8)	2.0(-8)	1.2(-8)	c	1.7(-8)	1.5(-8)	d
01.19	13:30	1125	50	2.4(-8)	2.3(-8)	1.4(-8)	c	1.8(-8)	1.7(-8)	d
	14:42			Temperature lowered.						
	12:50			Reactor shut-down.						
01.23	14:55	1015	50	Full-power operation.						
01.25	10:02	1015	50	1.9(-8)	2.1(-8)	1.3(-8)	c	2.1(-8)	2.0(-8)	d
01.27	9:36	1015	50	1.7(-8)	2.3(-8)	1.2(-8)	c	2.1(-8)	1.8(-8)	d
	15:02			Reactor shut-down.						
02.07	21:05	1015	50	Full-power operation.						
02.08	14:49			Temperature raised.						
02.09	16:10	1135	50	2.0(-8)	2.5(-8)	1.3(-8)	c	2.1(-8)	2.2(-8)	d
02.13	14:11	1135	50	1.8(-8)	2.6(-8)	1.3(-8)	c	2.3(-8)	2.1(-8)	d
	(15:00)			Temperature further raised.						
02.15	9:48	1175	50	2.6(-8)	3.0(-8)	1.5(-8)	c	3.1(-8)	2.1(-8)	d
02.16	9:40	1175	50	2.7(-8)	3.1(-8)	1.1(-8)	c	2.6(-8)	2.3(-8)	d
	16:20			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not included in the measurement.

e. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-2b R/B of 76FPC-1A irradiated in 75F4A-2 at 46th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
03.29	21:00			Full-power operation.						
03.30	11:18	1025	50	2.8(-8)	2.9(-8)	1.6(-8)	c	2.6(-8)	3.5(-8)	1.2(-8)
	14:40			Temperature raised.						
03.31	10:20	1115	50	2.9(-8)	3.4(-8)	2.1(-8)	c	3.7(-8)	4.2(-8)	1.7(-8)
04.02	10:24	1115	50	2.7(-8)	3.4(-8)	1.7(-8)	c	3.1(-8)	3.8(-8)	1.2(-8)
	(11:00)			Temperature further raised.						
04.03	10:15	1165	50	2.6(-8)	3.6(-8)	2.2(-8)	c	3.3(-8)	4.1(-8)	1.2(-8)
	20:00			Temperature lowered.						
04.06	11:07	965	50	2.2(-8)	2.7(-8)	1.3(-8)	c	3.2(-8)	4.4(-8)	1.8(-8)
04.07	11:21			Reactor shut-down.						
04.13	20:25			Full-power operation.						
04.14	14:55			Temperature raised to 1165°C.						
	21:45			Temperature lowered to 1000°C. (A malfunction.)						
04.16	10:20			Temperature raised.						
04.17	10:03	1155	50	3.2(-8)	3.3(-8)	2.0(-8)	c	3.6(-8)	3.6(-8)	1.1(-8)
	(11:00)			Temperature further raised.						
04.19	14:38	1225	50	4.2(-8)	4.6(-8)	2.6(-8)	c	4.8(-8)	5.5(-8)	1.6(-8)
04.23	10:09	1215	50	4.2(-8)	3.8(-8)	3.2(-8)	c	4.6(-8)	5.3(-8)	1.3(-8)
04.24	9:30			Temperature lowered.						
	10:30			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-2c R/B of 76FPC-1A irradiated in 75F4A-2 at 47th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
06.18	21:15			Full-power operation.						
06.19	14:00			Temperature raised.						
	16:10			Temperature reached 1300°C.						
06.22	14:30	1300	50	1.1(-7)	8.4(-8)	5.9(-8)	c	7.7(-8)	1.1(-7)	2.3(-8)
06.25	14:24	1300	50	8.2(-8)	7.6(-8)	4.4(-8)	c	7.4(-8)	9.1(-8)	2.2(-8)
06.28	14:13	1300	50	8.8(-8)	7.3(-8)	4.3(-8)	c	6.9(-8)	7.8(-8)	2.1(-8)
06.29	15:00			Reactor shut-down.						
07.03	2:11			Full-power operation.						
07.04	10:00			Temperature raised.						
	11:23			Temperature reached 1300°C.						
07.06	14:08	1300	50	8.8(-8)	8.9(-8)	5.3(-8)	c	8.6(-8)	9.8(-8)	2.3(-8)
07.09	14:01	1300	50	9.3(-8)	1.0(-7)	5.3(-8)	c	9.0(-8)	1.1(-7)	2.6(-8)
07.12	13:58	1300	50	1.1(-7)	7.9(-8)	5.4(-8)	c	7.3(-8)	1.0(-7)	2.3(-8)
07.13	1:00			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-2d R/B of 76FPC-1A irradiated in 75F4A-2 at 48th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B							
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d	
11.12	14:13		30								
	19:10			Power drop to 0.5 MW.							
	20:32		30								
11.13	(10:00)		45								
11.14	10:14	800	45	2.4(-6)	1.6(-6)	1.3(-6)	2.3(-6)	2.1(-6)	1.4(-6)	2.0(-7)	
	10:12			Full-power operation.							
11.15	14:30			Temperature raised.							
	16:20			Temperature reached 1360°C.							
11.16	10:20	1340	50	1.8(-6)	1.1(-6)	1.1(-6)	3.6(-6)	2.4(-6)	1.6(-6)	1.1(-7)	
11.20	10:40	1340	50	5.2(-6)	3.3(-6)	2.4(-6)	3.5(-5)	8.5(-6)	6.6(-6)	5.3(-7)	
	15:00			Temperature lowered.							
	16:21			Temperature reached 1120°C.							
11.22	10:02	1120	50	3.8(-6)	2.5(-6)	2.0(-6)	1.1(-5)	6.7(-6)	4.1(-6)	3.1(-7)	
11.23	15:00			Reactor shut-down.							
11.26	20:30			Full-power operation.							
11.27	9:59	830	50	2.5(-6)	1.4(-6)	1.2(-6)	4.6(-6)	1.6(-6)	9.2(-7)	2.2(-7)	
	19:28			Temperature raised.							
11.30	10:20	1300	50	7.0(-6)	4.6(-6)	3.4(-6)	4.1(-5)	1.2(-5)	8.3(-6)	8.5(-7)	
12.03	10:01	1300	50	1.4(-5)	7.8(-6)	5.4(-6)	8.3(-5)	2.3(-5)	1.7(-5)	2.2(-6)	
	14:00			Temperature further raised.							
12.04	10:34	1360	50	1.3(-5)	1.1(-5)	7.1(-6)	9.2(-5)	2.3(-5)	1.8(-5)	3.1(-6)	
12.05	9:55	1360	50	1.3(-5)	1.2(-5)	8.0(-6)	7.3(-5)	1.4(-5)	1.2(-5)	3.6(-6)	
	14:00			Temperature lowered to 1240°C.							
12.06	10:00	1240	50	1.7(-5)	1.4(-5)	9.1(-6)	1.8(-4)	1.8(-5)	1.6(-5)	3.8(-6)	
	14:40			Temperature lowered to 860°C.							
12.07	10:30			Reactor shut-down.							

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-3a R/B of 75FPC-4A irradiated in 75F4A-3 at 45th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^e	138Xe ^e
01.13	21:05	810	50	Full-power operation.						
01.16	10:43	810	50	2.7(-8)	4.1(-8)	2.1(-8)	c	3.5(-8)	2.8(-8)	d
01.17	11:02	810	50	4.0(-8)	4.5(-8)	2.3(-8)	c	3.0(-8)	2.9(-8)	d
	15:00			Temperature raised.						
01.18	10:27	840	50	4.0(-8)	3.5(-8)	2.0(-8)	c	3.1(-8)	2.7(-8)	d
01.19	14:14	840	50	3.4(-8)	3.9(-8)	2.6(-8)	c	3.2(-8)	3.0(-8)	d
	14:42			Temperature lowered.						
	12:50			Reactor shut-down.						
01.23	14:55	770	50	Full-power operation.						
01.25	10:25	770	50	3.8(-8)	3.8(-8)	2.8(-8)	c	3.8(-8)	3.6(-8)	d
01.27	10:20	770	50	3.5(-8)	3.8(-8)	2.2(-8)	c	3.6(-8)	3.2(-8)	d
	15:02			Reactor shut-down.						
02.07	21:05	770	50	Full-power operation.						
02.08	14:49			Temperature raised.						
02.09	17:30	820	50	3.9(-8)	4.2(-8)	2.3(-8)	c	4.5(-8)	3.9(-8)	d
02.13	14:33	820	50	3.5(-8)	3.9(-8)	2.4(-8)	c	4.0(-8)	3.8(-8)	d
	(15:00)			Temperature further raised.						
02.15	10:18	820	50	4.7(-8)	4.9(-8)	2.7(-8)	c	4.3(-8)	3.8(-8)	d
02.16	10:05	820	50	4.2(-8)	4.6(-8)	2.0(-8)	c	4.4(-8)	4.0(-8)	d
	16:20			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not included in the measurement.

e. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-3b R/B of 75FPC-4A irradiated in 75F4A-3 at 46th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B					135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe				
03.29	21:00			Full-power operation.							
03.30	11:42	760	50	4.1(-8)	5.1(-8)	2.7(-8)	c	5.3(-8)	5.4(-8)	1.7(-8)	
	14:40			Temperature raised.							
03.31	10:59	810	50	3.9(-8)	5.4(-8)	3.5(-8)	c	5.7(-8)	5.0(-8)	1.8(-8)	
04.02	10:56	810	50	2.5(-8)	3.7(-8)	1.9(-8)	c	3.9(-8)	4.2(-8)	1.3(-8)	
	(11:00)			Temperature further raised.							
04.03	10:40	830	50	4.1(-8)	4.7(-8)	2.4(-8)	c	4.7(-8)	5.3(-8)	1.6(-8)	
	20:00			Temperature lowered.							
04.06	11:46	710	50	3.3(-8)	4.0(-8)	1.8(-8)	c	4.6(-8)	5.0(-8)	1.4(-8)	
04.07	11:21			Reactor shut-down.							
04.13	20:25			Full-power operation.							
04.14	14:55			Temperature raised to 820°C.							
	21:45			Temperature lowered to 740°C. (A malfunction.)							
04.16	10:20			Temperature raised.							
04.17	10:51	810	50	3.0(-8)	4.6(-8)	2.3(-8)	c	5.3(-8)	5.0(-8)	1.6(-8)	
	(11:00)			Temperature further raised.							
04.19	15:10	810	50	4.2(-8)	5.4(-8)	2.8(-8)	c	6.0(-8)	6.2(-8)	1.8(-8)	
04.23	10:39	810	50	4.5(-8)	4.5(-8)	3.2(-8)	c	5.8(-8)	6.3(-8)	1.7(-8)	
04.24	9:30			Temperature lowered.							
	10:30			Reactor shut-down.							

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

e. Birth rate taken as that before shut-down for tabulation only.

Table 5-3c R/B of 75FPC-4A irradiated in 75F4A-3 at 47th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
06.18	21:15			Full-power operation.						
06.19	14:00			Temperature raised.						
	16:10			Temperature reached 860°C.						
06.22	14:57	860	50	4.4(-8)	7.5(-8)	3.6(-8)	c	7.7(-8)	9.1(-8)	2.7(-8)
06.25	14:50	860	50	5.5(-8)	6.6(-8)	3.8(-8)	c	7.2(-8)	8.7(-8)	2.6(-8)
06.28	14:50	860	50	5.0(-8)	6.0(-8)	3.7(-8)	c	6.9(-8)	8.2(-8)	2.4(-8)
06.29	15:00			Reactor shut-down.						
07.03	2:11			Full-power operation.						
07.04	10:00			Temperature raised.						
	11:23			Temperature reached 860°C.						
07.06	14:32	860	50	6.1(-8)	7.7(-8)	4.3(-8)	c	8.6(-8)	8.8(-8)	2.7(-8)
07.09	14:27	860	50	5.7(-8)	7.2(-8)	4.2(-8)	c	8.4(-8)	8.1(-8)	2.5(-8)
07.12	14:31	860	50	5.6(-8)	5.8(-8)	3.7(-8)	c	7.7(-8)	8.1(-8)	2.4(-8)
07.13	1:00			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-3d R/B of 75FPC-4A irradiated in 75F4A-3 at 48th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B								
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d		
11.12	14:13		30									
	19:10			Power drop to 0.5 MW.								
	20:32		30									
11.13	(10:00)		45									
11.14	10:31	650	45	5.3(-6)	3.5(-6)	3.0(-6)	3.6(-6)	3.8(-6)	2.4(-6)	3.9(-7)		
	10:12			Full-power operation.								
11.15	14:30			Temperature raised.								
	16:20			Temperature reached 940°C.								
11.16	10:37	920	50	2.8(-6)	2.0(-6)	1.5(-6)	6.6(-6)	3.8(-6)	2.6(-6)	2.3(-7)		
11.20	10:59	840	50	9.0(-6)	6.1(-6)	4.5(-6)	6.4(-5)	1.9(-5)	1.3(-5)	9.3(-7)		
	15:00			Temperature lowered.								
	16:21			Temperature reached 750°C.								
11.22	10:02	740	50	5.9(-6)	3.8(-6)	3.2(-6)	1.7(-5)	1.1(-5)	6.8(-6)	5.1(-7)		
11.23	15:00			Reactor shut-down.								
11.26	20:30			Full-power operation.								
11.27	10:23	630	50	3.5(-6)	2.1(-6)	1.7(-6)	5.0(-6)	2.2(-6)	1.4(-6)	2.7(-7)		
	19:28			Temperature raised.								
11.30	10:48	860	50	1.0(-5)	6.5(-6)	4.9(-6)	5.7(-5)	1.6(-5)	1.2(-5)	1.2(-6)		
12.03	10:20	860	50	2.4(-5)	1.2(-5)	9.1(-6)	2.2(-4)	3.8(-5)	2.8(-5)	3.6(-6)		
	14:00			Temperature further raised.								
12.04	10:48	920	50	1.9(-5)	1.6(-5)	1.0(-5)	9.2(-5)	3.3(-5)	2.6(-5)	4.7(-6)		
12.05	10:09	920	50	2.0(-5)	1.9(-5)	1.1(-5)	8.9(-5)	2.1(-5)	1.8(-5)	5.5(-6)		
	14:00			Temperature lowered to 800°C.								
12.06	10:28	800	50	4.3(-5)	2.8(-5)	2.1(-5)	5.8(-4)	3.4(-5)	2.6(-5)	6.7(-6)		
	14:40			Temperature lowered to 600°C.								
12.07	10:30			Reactor shut-down.								

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-4a R/B of 75FP-4A irradiated in 75F5A-1 at 48th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B							
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d	
11.12	14:13		30								
	19:10			Power drop to 0.5 MW.							
	20:32		30								
11.13	(10:00)		45								
11.14	13:50	890	45	2.9(-6)	2.1(-6)	1.7(-6)	5.2(-6)	8.7(-6)	4.4(-6)	2.7(-7)	
	10:12			Full-power operation.							
11.15	17:00			Temperature raised.							
	17:38			Temperature reached 930°C.							
11.16	13:37	930	50	3.1(-6)	2.1(-6)	1.5(-6)	8.9(-6)	4.0(-6)	2.0(-6)	2.4(-7)	
11.22	13:31	1000	50	4.4(-6)	2.3(-6)	2.1(-6)	2.0(-5)	1.1(-5)	5.1(-6)	2.8(-7)	
11.23	15:00			Reactor shut-down.							
11.26	20:30			Full-power operation.							
11.28	10:32	880	50	2.2(-6)	1.6(-6)	1.2(-6)	6.1(-6)	2.9(-6)	1.3(-7)	2.0(-7)	
	13:30			Temperature raised.							
	14:42			Temperature reached 1100°C.							
11.30	13:37	1140	50	6.3(-6)	3.2(-6)	2.6(-6)	2.0(-5)	9.4(-6)	4.4(-6)	3.5(-7)	
12.04	13:40	1170	50	6.2(-6)	3.6(-6)	2.7(-6)	2.1(-5)	9.0(-6)	4.6(-6)	6.1(-7)	
	20:00			Temperature lowered.							
	21:00			Temperature reached 1020°C.							
12.06	13:43	1030	50	1.2(-5)	5.9(-6)	5.4(-6)	4.1(-4)	8.1(-6)	4.2(-6)	9.4(-7)	
	14:40			Temperature further lowered to 950°C.							
12.07	10:30			Reactor shut-down.							

- a. Sampling time.
- b. W/Re thermocouple reading.
- c. Concentration too low.
- d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-4b R/B of 75FP-4A irradiated in 75F5A-1 at 49th JMTR cycle (1980).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
01.19	12:08	660	50	Full-power operation.						
	13:30			Temperature raised.						
	14:30			Temperature reached 1170°C.						
01.21	13:38	1160	50	4.9(-6)	3.0(-6)	2.2(-6)	1.2(-5)	8.3(-6)	3.8(-6)	3.1(-7)
01.23	13:31	1160	50	4.4(-6)	2.8(-6)	2.1(-6)	1.4(-5)	7.8(-6)	3.7(-6)	2.6(-7)
01.25	10:17	1180	50	3.6(-6)	2.5(-6)	1.8(-6)	1.5(-5)	7.0(-6)	3.2(-6)	2.3(-7)
01.27	15:03			Reactor shut-down.						
01.30	20:23	640	50	Full-power operation.						
01.31	10:30			Temperature raised.						
	11:10			Temperature reached 1270°C.						
02.01	14:14	1290	50	7.0(-6)	4.6(-6)	3.2(-6)	3.1(-5)	1.3(-5)	6.7(-6)	4.3(-7)
02.05	10:40	1290	50	5.5(-6)	4.2(-6)	3.0(-6)	1.8(-5)	1.0(-5)	5.7(-6)	4.6(-7)
	11:00			Temperature lowered to 1200°C.						
02.07	14:20	1220	50	3.2(-6)	2.1(-6)	1.6(-6)	1.3(-5)	4.9(-6)	2.5(-6)	2.2(-7)
02.08	10:34	1270	50	3.3(-6)	2.2(-6)	1.7(-6)	1.3(-5)	5.1(-6)	2.6(-6)	2.7(-7)
02.09	14:12			Temperature lowered to (600°)C.						
02.10	10:31			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-4c R/B of 75FP-4A irradiated in 75F5A-1 at 50th JMTR cycle (1980).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
03.14	14:47	920	50	Full-power operation.						
03.05	10:09			Temperature raised.						
03.07	11:10	1240	50	4.7(-6)	3.6(-6)	2.1(-6)	9.7(-6)	7.8(-6)	4.2(-6)	4.0(-7)
03.10	14:10	1250	50	4.0(-6)	3.0(-6)	2.2(-6)	8.7(-6)	5.7(-6)	3.1(-6)	3.4(-7)
				Temperature gradually increased for 4 days.						
03.13	9:58	1410	50	7.7(-6)	6.0(-6)	4.8(-6)	4.9(-5)	1.2(-5)	5.5(-6)	6.6(-7)
03.14	14:14			Reactor shut-down.						
03.18	17:22	900	50	Full-power operation.						
03.19	10:00			Temperature raised.						
03.21	13:35	1420	50	7.6(-6)	6.6(-6)	4.8(-6)	2.5(-5)	8.9(-6)	4.9(-6)	9.3(-7)
03.24	14:02	1450	50	8.5(-6)	6.6(-6)	4.4(-6)	2.9(-5)	7.9(-6)	4.3(-6)	9.9(-7)
03.26	13:37	1450	50	7.7(-6)	6.4(-6)	4.9(-6)	2.8(-5)	8.0(-6)	4.3(-6)	9.2(-7)
03.27	13:51	1450	50	8.2(-6)	6.9(-6)	4.9(-6)	2.3(-5)	8.9(-6)	4.6(-6)	8.9(-7)
03.29	10:30			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-5a R/B of 75FP-2A irradiated in 75F5A-2 at 48th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B							
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d	
11.12	14:13		30								
	19:10			Power drop to 0.5 MW.							
	20:32		30								
11.13	(10:00)		45								
11.14	14:06	1050	45	3.6(-6)	2.7(-6)	2.1(-6)	4.1(-6)	9.1(-6)	4.7(-6)	3.8(-7)	
	10:12			Full-power operation.							
11.15	17:00			Temperature raised.							
	17:38			Temperature reached 1200°C.							
11.16	14:08	1200	50	3.4(-6)	2.2(-6)	1.8(-6)	7.7(-6)	3.5(-6)	1.9(-6)	2.2(-7)	
11.22	13:44	1200	50	3.5(-6)	1.9(-6)	1.7(-6)	1.1(-5)	3.4(-6)	1.6(-6)	1.9(-7)	
11.23	15:00			Reactor shut-down.							
11.26	20:30			Full-power operation.							
11.28	10:46	1020	50	1.8(-6)	1.3(-6)	1.1(-6)	5.8(-6)	1.7(-6)	7.7(-7)	1.8(-7)	
	13:30			Temperature raised.							
	14:42			Temperature reached 1390°C.							
11.30	14:01	1390	50	4.9(-6)	2.4(-6)	2.2(-6)	1.7(-5)	5.9(-6)	3.0(-6)	2.4(-7)	
12.04	14:05	1380	50	6.2(-6)	3.5(-6)	2.8(-6)	2.5(-5)	8.4(-6)	5.4(-6)	6.2(-7)	
	20:00			Temperature lowered.							
	21:00			Temperature reached 1200°C.							
12.06	13:57	1200	50	8.6(-6)	4.9(-6)	4.4(-6)	2.2(-4)	6.4(-6)	3.4(-6)	7.9(-7)	
	14:40			Temperature further lowered to 1050°C.							
12.07	10:30			Reactor shut-down.							

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-5b R/B of 75FP-2A irradiated in 75F5A-2 at 49th JMTR cycle (1980).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B							
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d	
01.19	12:08	750	50	Full-power operation.							
	13:30			Temperature raised.							
	14:30			Temperature reached 1400°C.							
01.21	13:54	1400	50	5.2(-6)	3.2(-6)	2.5(-6)	1.2(-5)	7.3(-6)	3.7(-6)	3.1(-7)	
01.23	14:03	1400	50	5.3(-6)	3.0(-6)	2.3(-6)	1.7(-5)	7.5(-6)	4.0(-6)	3.2(-7)	
01.25	10:35	1400	50	5.5(-6)	3.5(-6)	2.7(-6)	2.4(-5)	8.7(-6)	4.3(-6)	3.5(-7)	
01.27	15:03			Reactor shut-down.							
01.30	20:23	730	50	Full-power operation.							
01.31	10:30			Temperature raised.							
	11:10			Temperature reached 1500°C.							
02.01	14:34	1500	50	8.1(-6)	5.2(-6)	4.1(-6)	3.1(-5)	1.6(-5)	8.7(-6)	6.2(-7)	
02.05	10:08	1500	50	7.2(-6)	5.2(-6)	4.3(-6)	4.3(-5)	1.5(-5)	8.5(-6)	7.1(-7)	
	11:00			Temperature lowered to 1400°C.							
02.07	14:45	1400	50	5.0(-6)	3.5(-6)	2.6(-6)	2.0(-5)	8.9(-6)	5.0(-6)	4.7(-7)	
02.08	11:00	1400	50	5.5(-6)	3.8(-6)	2.8(-6)	2.5(-5)	9.5(-6)	5.2(-6)	5.3(-7)	
02.09	14:12			Temperature lowered to 1040°C.							
02.10	10:31			Reactor shut-down.							

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-5c R/B of 75FP-2A irradiated in 75F5A-2 at 50th JMTR cycle (1980).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power ^b (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
03.14	14:47	1040	50	Full-power operation.						
03.05	10:09			Temperature raised.						
03.07	10:40	1380	50	7.3(-6)	4.4(-6)	3.1(-6)	1.3(-5)	1.0(-5)	5.3(-6)	6.0(-7)
03.10	14:32	1380	50	5.6(-6)	4.4(-6)	3.1(-6)	2.0(-5)	9.6(-6)	5.1(-6)	6.1(-7)
03.13	9:58	(1400)	50	1.1(-5)	8.6(-6)	6.8(-6)	9.2(-5)	2.2(-5)	1.1(-5)	1.2(-6)
03.14	14:14			Reactor shut-down.						
03.18	17:22		50	Full-power operation.						
03.19	10:00			Temperature raised.						
03.21	13:35	(1600)	50	1.3(-5)	1.1(-5)	7.6(-6)	5.8(-5)	2.4(-5)	1.4(-5)	1.8(-6)
03.24	14:21	(1600)	50	1.4(-5)	1.1(-5)	7.3(-6)	8.8(-5)	2.2(-5)	1.2(-5)	2.0(-6)
03.26	13:53	(1500)	50	1.4(-5)	1.2(-5)	8.3(-6)	9.0(-5)	2.2(-5)	1.3(-5)	2.1(-6)
03.27	14:11	(1500)	50	1.5(-5)	1.3(-5)	9.3(-6)	9.6(-5)	2.5(-5)	1.4(-5)	2.2(-6)
03.29	10:30			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-6a R/B of 75FP-3A irradiated in 75F5A-3 at 48th JMTR cycle (1979).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power (MW)	R/B								
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d		
11.12	14:13		30									
	19:10			Power drop to 0.5 MW.								
	20:32		30									
11.13	(10:00)		45									
11.14	14:21	1020	45	5.0(-6)	4.0(-6)	3.1(-6)	7.3(-6)	1.6(-5)	8.9(-6)	5.9(-7)		
	10:12			Full-power operation.								
11.15	17:00			Temperature raised.								
	17:38			Temperature reached 1140°C.								
11.16	14:37	1130	50	4.2(-6)	2.9(-6)	2.2(-6)	9.4(-6)	7.1(-6)	3.8(-6)	3.4(-7)		
11.22	14:14	1080	50	2.2(-6)	1.2(-6)	1.1(-6)	7.3(-6)	3.1(-6)	1.4(-6)	1.2(-7)		
11.23	15:00			Reactor shut-down.								
11.26	20:30			Full-power operation.								
11.28	11:00	990	50	1.5(-6)	1.0(-6)	8.7(-7)	4.1(-6)	1.4(-6)	6.7(-7)	1.3(-7)		
	13:30			Temperature raised.								
	14:42			Temperature reached 1240°C.								
11.30	14:30	1240	50	4.1(-6)	2.1(-6)	1.5(-6)	1.5(-5)	5.6(-6)	2.9(-6)	2.2(-7)		
12.04	14:05	1230	50	4.2(-6)	2.3(-6)	1.7(-6)	1.4(-5)	5.4(-6)	3.0(-6)	4.3(-7)		
	20:00			Temperature lowered.								
	21:00			Temperature reached 1070°C.								
12.06	14:15	1070	50	4.8(-6)	3.5(-6)	2.8(-6)	5.8(-5)	4.8(-6)	2.7(-6)	6.8(-7)		
	14:40			Temperature further lowered to 980°C.								
12.07	10:30			Reactor shut-down.								

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-6b R/B of 75FP-3A irradiated in 75F5A-3 at 49th JMTR cycle (1980).

Date	Time ^a	Temp. (°C)	Power ^b (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
01.19	12:08	700	50	Full-power operation.						
	13:30			Temperature raised.						
	14:30			Temperature reached 1280°C.						
01.21	14:10	1280	50	2.7(-6)	1.9(-6)	1.4(-6)	7.6(-6)	4.9(-6)	2.6(-6)	2.1(-7)
01.23	14:21	1240	50	2.4(-6)	1.8(-6)	1.4(-6)	8.2(-6)	4.1(-6)	2.4(-6)	2.0(-7)
01.25	10:53	1200	50	2.6(-6)	1.8(-6)	1.3(-6)	1.0(-5)	4.2(-6)	2.2(-6)	2.0(-7)
01.27	15:03			Reactor shut-down.						
01.30	20:23	680	50	Full-power operation.						
01.31	10:30			Temperature raised.						
	11:10			Temperature reached 1360°C.						
02.01	14:52	1350	50	4.2(-6)	2.9(-6)	2.2(-6)	1.9(-5)	8.6(-6)	4.8(-6)	3.6(-7)
02.05	10:25	1350	50	3.7(-6)	2.5(-6)	1.9(-6)	1.3(-5)	7.3(-6)	4.2(-6)	3.6(-7)
	11:00			Temperature lowered to 1260°C.						
02.07	15:08	1260	50	2.4(-6)	1.7(-6)	1.2(-6)	1.0(-5)	4.0(-6)	2.1(-6)	2.1(-7)
02.08	10:47	1240	50	2.5(-6)	1.7(-6)	1.3(-6)	9.2(-6)	3.9(-6)	2.2(-6)	2.3(-7)
02.09	14:12			Temperature lowered to 920°C.						
02.10	10:31			Reactor shut-down.						

a. Sampling time.

b. W/Re thermocouple reading.

c. Concentration too low.

d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.

Table 5-6c R/B of 75FP-3A irradiated in 75F5A-3 at 50th JMTR cycle (1980).

Date	Time ^a	Temp. ^b (°C)	Power (MW)	R/B						
				85mKr	87Kr	88Kr	133Xe	135Xe	135mXe ^d	138Xe ^d
03.14	14:47	1020	50	Full-power operation.						
03.05	10:09			Temperature raised.						
03.07	10:54	1320	50	3.2(-6)	2.4(-6)	1.7(-6)	7.6(-6)	5.6(-6)	3.3(-6)	3.4(-7)
03.10	14:54	1260	50	2.5(-6)	1.9(-6)	1.4(-6)	8.8(-6)	4.3(-6)	2.1(-6)	2.6(-7)
03.13	9:58	1290	50	4.8(-6)	3.6(-6)	2.5(-6)	2.8(-5)	7.9(-6)	3.7(-6)	4.3(-7)
03.14	14:14			Reactor shut-down.						
03.18	17:22		50	Full-power operation.						
03.19	10:00			Temperature raised.						
03.21	14:07	1490	50	6.3(-6)	5.1(-6)	3.7(-6)	3.8(-5)	1.0(-5)	6.4(-6)	1.0(-6)
03.24	14:48	1470	50	7.8(-6)	4.9(-6)	3.4(-6)	3.4(-5)	8.3(-6)	4.7(-6)	1.3(-6)
03.26	14:10	1390	50	5.1(-6)	4.3(-6)	2.9(-6)	2.5(-5)	6.6(-6)	3.6(-6)	7.4(-7)
03.27	14:21	1390	50	5.4(-6)	4.6(-6)	3.2(-6)	2.4(-5)	7.2(-6)	4.7(-6)	8.4(-7)
03.29	10:30			Reactor shut-down.						

- a. Sampling time.
b. W/Re thermocouple reading.
c. Concentration too low.
d. Not corrected for the delay time from fuel to sampling position.