

JAERI-Research

94-017



OGL-1第6次～第12次燃料体の照射試験

1994年10月

林 君夫・湊 和生・小林紀昭・菊地啓修
福田幸朔・菊池輝男・猿田 徹・北島敏雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、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、お申し越しください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

OG L - 1 第6次～第12次燃料体の照射試験

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

林 君夫・湊 和生・小林 紀昭・菊地 啓修
福田 幸朔・菊池 輝男⁺・猿田 徹⁺⁺・北島 敏雄⁺⁺

(1994年9月1日受理)

本報告書は、原研大洗研究所の材料試験炉（J M T R）に設置された、高温ガス炉燃料照射用の高温・高圧の炉内ヘリウムガスループOG L - 1において照射した、第6次～第12次燃料体の製造、照射および照射後試験の結果についてまとめたものである。第6次～第8次燃料体は、小型流動床によって製造した被覆燃料粒子を用いたものであり、燃料コンパクト最高温度1350°C程度における希ガス核分裂生成物の放出率(⁸⁸KrのR/B)は、 2×10^{-6} 以下の良好なレベルであった。また、照射後試験においても、特に異状は認められなかった。一方、第9次～第12次燃料体は、建設中の高温工学試験研究炉（H T T R）用の大型流動床によって製造した量産試作燃料を用いた。その第1作である第9次燃料体では、⁸⁸KrのR/Bは 1.5×10^{-5} と比較的高く、また照射後の燃料コンパクトの断面組織観察において、被覆層に種々の欠陥が認められた。その後、燃料製造経験の蓄積によって被覆燃料粒子の貫通破損率が低下し、これに対応して、第12次燃料体では⁸⁸KrのR/Bは 2×10^{-6} の良好なレベルまで低下した。以上の照射試験を通じて、種々の試験条件下におけるH T T R用燃料の照射挙動についての知見を蓄積するとともに、H T T Rの建設に向けた燃料量産製造技術の基盤の構築と量産試作燃料の照射健全性の実証を行うことができた。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

⁺ ホット試験室

⁺⁺ 大洗研究所材料試験炉部

Irradiation Experiments of the 6th-12th OGL-1
Fuel Assemblies

Kimio HAYASHI, Kazuo MINATO, Fumiaki KOBAYASHI
Hironobu KIKUCHI, Kousaku FUKUDA, Teruo KIKUCHI⁺
Tohru SARUTA⁺⁺ and Toshio KITAJIMA⁺⁺

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

(Received September 1, 1994)

The Oarai Gas Loop-1, OGL-1, is an in-pile helium gas loop, installed in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR), for irradiation of high-temperature gas-cooled reactor fuels at high pressure and temperature. The present report describes results of fabrication, irradiation and post-irradiation examinations (PIE) of the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies. The 6th-8th assemblies used coated fuel particles produced by a small-scale fluidized bed. On the other hand, the 9th-12th assemblies used trial manufacturing fuels, produced with a large-scale fluidized bed for mass production of the fuel for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) being constructed. For the 9th assembly loaded with the first mass-product fuel, the fission gas release, R/B of ^{88}Kr , was relatively high, 1.5×10^{-5} , and various defects were observed in the ceramography of the irradiated coating layers. Afterwards, a decrease was achieved in the through-coating failure fractions at the fabrication. Correspondingly, the R/B of ^{88}Kr for the 12th assembly was reduced to an excellent value of 2×10^{-6} . Thus, the production technology and the irradiation performance of the HTTR design fuels were successfully demonstrated.

Keywords : Irradiation, OGL-1, HTTR, Fabrication, Coated Fuel Particle, Fission Gas,
Post-irradiation Examination, Failure

+ Department of Hot Laboratories

++ Department of JMTR Project, Oarai Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. OGL-1 燃料体	8
2.1 はじめに	8
2.2 燃料体の概略	8
2.3 燃料コンパクトの製造	9
2.4 燃料体の製作	10
2.5 燃料試験体の製作	10
2.6 燃料体製作のまとめ	10
3. 照射	24
3.1 はじめに	24
3.2 各燃料体の照射条件の概要	24
3.3 OGL-1 ループを流れるヘリウム量	24
3.4 各燃料体の照射実績および希ガスF P放出挙動	25
3.5 希ガスF P放出挙動のまとめ	30
4. 燃料体および燃料棒の照射後試験	47
4.1 はじめに	47
4.2 照射後試験の概要	47
4.3 燃料体および黒鉛ブロック	48
4.3.1 燃料体の外観およびX線検査	48
4.3.2 黒鉛ブロックの外観および重量検査	48
4.3.3 黒鉛ブロックの内表面検査	48
4.3.4 黒鉛ブロックの寸法・曲がり測定	49
4.4 燃料棒および黒鉛スリーブ	50
4.4.1 燃料棒の外観および重量検査	50
4.4.2 燃料棒の γ -スキャニング	50
4.4.3 黒鉛スリーブおよび黒鉛部品の外観および重量検査	50
4.4.4 黒鉛スリーブの内表面検査	50
4.4.5 黒鉛スリーブの寸法・曲がり測定	51
4.5 まとめ	52
5. 燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の照射後試験	69
5.1 はじめに	69
5.2 燃料仕様および照射条件の概要	69

5.3 燃料コンパクトの照射後試験	70
5.3.1 外観および内面検査	70
5.3.2 寸法検査	72
5.3.3 重量検査	73
5.3.4 F P インベントリ測定	73
5.3.5 断面組織観察	73
5.3.6 E P M A 観察	77
5.3.7 薄切試料の X 線ラジオグラフィ	78
5.4 被覆燃料粒子の照射後試験	78
5.4.1 外観検査およびX線ラジオグラフィ	78
5.4.2 貫通破損率の測定	78
5.4.3 S i C 層破損率の測定	80
5.5 被覆燃料粒子の照射挙動の検討	81
5.5.1 断面組織上の異状の原因	81
5.5.2 その他の被覆層破損機構について	82
5.6 まとめ	82
6. 総 括	128
6.1 試験項目ごとの結果のまとめ	128
6.2 燃料体ごとの試験結果のまとめ	131
6.3 今後のOGL-1 照射試験計画	131
謝 辞	134
付録 1 燃料の照射前特性データ	135
付録 2 燃料体および燃料棒の照射後の外観	156
付録 3 各燃料体の燃料コンパクトの照射温度、燃焼度および高速中性子照射量	163
付録 4 未照射燃料コンパクトの外観	175
付録 5 燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の照射後試験の方法および試験データ	185
付録 6 各燃料体の製造、照射および照射後試験結果のまとめ	245

Contents

1. Introduction	1
2. OGL-1 Fuel Assemblies	8
2.1 Introduction	8
2.2 Outline of Fuel Assemblies	8
2.3 Production of Fuel Compacts	9
2.4 Fabrication of Fuel Assemblies	10
2.5 Fabrication of Fuel Test Assemblies	10
2.6 Summary of Fabrication of Fuel Assemblies	10
3. Irradiation	24
3.1 Introduction	24
3.2 Outline of Irradiation Conditions of Each Fuel Assembly	24
3.3 Amount of Helium Gas Flowing in OGL-1 Loop	24
3.4 Irradiation History and Fission Gas Release Behavior of Each Fuel Assembly	25
3.5 Summary of Fission Gas Release Behavior	30
4. Post-irradiation Examinations of Fuel Assemblies and Fuel Rods	47
4.1 Introduction	47
4.2 Outline of Post-irradiation Examinations	47
4.3 Fuel Assemblies and Graphite Blocks	48
4.3.1 Visual Inspection and X-ray Radiography of Fuel Assemblies	48
4.3.2 Visual Inspection and Weight Measurement of Graphite Blocks	48
4.3.3 Inner Surface Inspection of Graphite Blocks	48
4.3.4 Dimension and Bowing Measurement of Graphite Blocks	49
4.4 Fuel Rods and Graphite Sleeves	50
4.4.1 Visual Inspection and Weight Measurement of Fuel Rods	50
4.4.2 Gamma Scanning of Fuel Rods	50
4.4.3 Visual Inspection and Weight Measurement of Graphite Sleeves and Graphite Components	50
4.4.4 Inner Surface Inspection of Graphite Sleeves	50
4.4.5 Dimension and Bowing Measurement of Graphite Sleeves	51
4.5 Summary	52
5. Post-irradiation Examinations of Fuel Compacts and Coated Fuel Particles	69

5.1	Introduction	69
5.2	Outline of Fuel Specifications and Irradiation Conditions	69
5.3	Post-irradiation Examinations of Fuel Compacts	70
5.3.1	Visual Inspection of Outer and Inner Surfaces	70
5.3.2	Dimension Measurement	72
5.3.3	Weight Measurement	73
5.3.4	Measurement of Fission Product Inventories	73
5.3.5	Ceramographic Observation	73
5.3.6	Electron-probe Microanalysis (EPMA)	77
5.3.7	X-ray Radiography of Sliced Specimens	78
5.4	Post-irradiation Examinations of Coated Fuel Particles	78
5.4.1	Visual Inspection and X-ray Radiography	78
5.4.2	Measurement of Through-coating Failure Fractions	78
5.4.3	Measurement of SiC-layer Failure Fractions	80
5.5	Discussion on Irradiation Behavior of Coated Fuel Particles	81
5.5.1	Causes of Anomalies in Ceramography	81
5.5.2	On Other Coating Failure Mechanisms	82
5.6	Summary	82
6.	Summary	128
6.1	Summary of Results for Each Test Item	128
6.2	Summary of Test Results for Each Fuel Assembly	131
6.3	Further Plans of OGL-1 Irradiation Tests	131
Acknowledgements	.....	134
Appendix 1	Characteristics of Unirradiated Fuels	135
Appendix 2	Post-irradiation Views of Fuel Assemblies and Fuel Rods	156
Appendix 3	Irradiation Temperatures, Burnups and Fast Neutron Fluences of Fuel Compacts for Each Fuel Assembly	163
Appendix 4	External Views of Unirradiated Fuel Compacts	175
Appendix 5	Methods and Data of Post-irradiation Examinations of Fuel Compacts and Coated Fuel Particles	185
Appendix 6	Summary of Results of Production, Irradiation and Post-irradiation Examinations for Each Fuel Assembly	245

1. はじめに

本報告書は、原研大洗研究所の材料試験炉(JMTR)に設置された、高温ガス炉燃料照射用の高温・高圧の炉内ガスループOGL-1で照射した第6次～第12次燃料体の製造、照射および照射後試験の結果について、まとめたものである。

(1) OGL-1照射試験の特徴

OGL-1は、原研で現在建設中の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTTR)⁽¹⁾の炉心用初装荷燃料(A型燃料体、Fig.1.1参照)とほぼ同一仕様の燃料棒を、HTTR用燃料体模擬の黒鉛ブロックに挿入した燃料体(OGL-1燃料体)を、高温、高圧の冷却材ヘリウム流動条件下で照射できる炉内ガスループである^(2, 3)。

OGL-1による照射試験の特徴としては、以下の点があげられる⁽⁴⁻⁶⁾。

- ①高温・高圧のヘリウム流動条件下で照射できるため、HTTRの炉心を模擬した条件下で燃料の照射挙動を調べることができる。
- ②実寸大の燃料棒を用いる燃料体の照射を行うことができるため、燃料棒規模での照射健全性、および燃料棒と黒鉛ブロックとの相互作用を調べることができる。
- ③一度に多量の燃料コンパクトを照射することができ、また温度、燃焼度および照射量の点で広い範囲にわたるパラメトリックな照射ができる。
- ④HTTRに近い温度、圧力、冷却材流動条件下で、燃料棒および燃料体規模での希ガスおよび金属の核分裂生成物(FP)の挙動を調べることができる。

(2) OGL-1照射による成果の報告と本報告の範囲

第1次および第2次燃料体⁽⁵⁾、および第3次～第5次燃料体⁽⁶⁾の照射試験については、すでに総合的な報告を行った。そのほかに、一連のOGL-1照射試験によって、燃料の照射温度評価⁽⁷⁾、燃料棒および黒鉛ブロックの熱応力や曲り⁽⁸⁻¹⁰⁾、燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの照射寸法変化⁽¹¹⁾、燃料体中の金属核分裂生成物(FP)⁽¹²⁻¹⁸⁾および放射化生成物⁽²⁰⁾の分布と移行挙動、ならびにOGL-1照射一般⁽²¹⁻²⁴⁾に関する報告を行った。

第6次～第12次燃料体の照射試験のうち、燃料製造実績、被覆燃料粒子の貫通破損率、SiC層破損率等の一部については、文献(4)に掲載した。また、金属FP分布については、すでに一部報告を行った^(4, 17, 18)。本報告では、主に照射健全性の観点から、燃料体の製造、照射および照射後試験の結果についてまとめる。

(3) 各燃料体の照射試験の目的

第6次～第8次OGL-1燃料体は、小規模被覆装置によって製造した被覆燃料粒子を用いたものである。それぞれ、過渡的昇温時の燃料挙動(第6次)、輸入および国産黒鉛マトリックス粉を用いて製造した燃料コンパクトの照射健全性の比較(第7次)、ならびに燃料体中の金属FP挙動試験(第8次)を目的とした。

一方、第9次～第12次燃料体は、HTTR用燃料製造のための大型流動床を用いて製造

した量産試作燃料の照射健全性試験を目的としたものである。第12次燃料体は、それまでの燃料体で最長の9サイクル(照射日数195日)の照射を行うことにより、長期かつ高燃焼度照射に対する健全性を実証することを目的とした。到達燃焼率は、約3.9%FIMA(% Fissions per Initial Metal Atom)であり、HTTR燃料設計の最高燃焼率(3.6%FIMA)をうわまわるものであった。

OGL-1照射試験は、以上の目的に加えて、被覆燃料粒子、燃料コンパクトの製造技術、および燃料棒の製作技術^(4, 25)、ならびに燃料検査法⁽²⁶⁾の確立のために資するという目的も有している。また、燃料体および燃料棒規模での照射後試験技術の確立および試験経験の蓄積の点でも大きな役割を果たしてきた。

(4) 燃料仕様の概要

第6次～第12次燃料体に用いた被覆燃料粒子は、Fig.1.1に示したHTTR用初装荷燃料の被覆燃料粒子と同様に、UO₂燃料核に、低密度熱分解炭素層(バッファ層)、内側高密度熱分解炭素層(IPyC層)、炭化ケイ素(SiC)層、外側高密度熱分解炭素層(OPyC層)の順に被覆したものであり、いわゆるTRISO被覆粒子と呼ばれるものである。

第6次および第8次～第10次燃料体の仕様は、HTTRの前身である多目的高温ガス炉(VHTR)の第1次概念設計^(27, 28)の仕様(いわゆるMark-III仕様、Table 1.1参照)に基づくものである。すなわち、同仕様に基づいて、被覆燃料粒子を黒鉛マトリックス中に分散させた燃料コンパクトを黒鉛スリーブに装填し端栓を施した燃料棒を、同仕様の燃料体の黒鉛ブロックを模擬した円筒状の黒鉛ブロックに挿入したものである。第7次および第11次燃料体の燃料コンパクトは、第1次概念設計仕様に準ずるものであり、OGL-1燃料体の3本棒タイプ用(第2章の2.4節参照)の細径の燃料コンパクトおよび燃料棒を用いたものである。

多目的高温ガス炉の動力炉を開発するための実験炉としてのVHTRの建設計画は、昭和62年の原子力委員会の原子力開発利用長期計画に従って、試験研究炉としてのHTTRの建設計画へと変更された⁽²⁹⁾。これに伴って、燃料仕様も、Table 1.1およびFig.1.1に示すHTTR用初装荷燃料の仕様^(30, 31)へと変更された。ただし、被覆燃料粒子の仕様については、VHTR燃料の仕様が殆ど継承された。変更された主な点は、燃料コンパクト、燃料棒および燃料体の寸法であった。第12次燃料体は、HTTR用初装荷燃料の仕様に基づくものである。

以上述べたように、燃料体ごとに若干の仕様の相違はあるが、それらの仕様の相違は燃料の照射健全性に本質的な影響を与えるものではなく、現在のHTTR用初装荷燃料の仕様と基本的に同一のものであるとみなすことができる。したがって、各燃料体の照射試験結果は、いずれも照射健全性の評価のうえで有効である。

(5) 海外における炉内ループ照射試験

海外においては、炉内ループ照射試験は最近は殆ど行われていない。1960年代にはGA(General Atomics、当時はGeneral Dynamics社の一部門)が、GAILループを用いて、燃料照射挙動およびFP挙動を調べる照射試験を行い^(32, 33)、また英国のAEREがPLUTOループを用いて、FP挙動に関する試験を行った⁽³⁴⁾。1970年代には、米国がフランス、サ

クレー研究所のSSL-1ループで照射試験を行った⁽³⁵⁾。その後、米国、ドイツでは炉内ループ照射は殆ど行われていない。その代わり、原型炉Fort St. Vrainおよび実験炉AVRを用いた照射試験や、米国オークリッジ国立研究所のHFIR炉等を用いたキャプセル照射試験が行われてきた。

そのほか、フランスでは1970年代にグルノーブルのSILEO炉に設置されたCOMEDIEループを用いて照射試験が行われたが、1979年に軽水炉の導入を決定したことに伴って、高温ガス炉の開発計画は終了した⁽³⁶⁾。

以上のとおり、炉内ガスループを用いて長期にわたる系統的な照射試験を進めてきたのは日本だけであり、その成果は国際的にも貴重なものと言える。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所、“高温工学試験研究の現状”、1993年.
- (2) 松永朔郎、田中利幸、馬場治、高橋秀武、中村団夫、逆井実、小畠清和、亀ヶ谷勝彦、山田邦貴、臼井伸一、“高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験”、原子力誌 21 (1979) 249.
- (3) H. Itami, H. Nakata, I. Tanaka, K. Yamamoto, I. Aoyama and K. Ikawa, “High temperature irradiation facilities in JMTR for VHTR fuel development”, JAERI-M 83-104 (1983).
- (4) 福田幸朔、小川徹、鹿志村悟、林君夫、飛田勉、小林紀昭、湊和生、菊地啓修、村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”, JAERI-M 89-007 (1989).
- (5) 井川勝市、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、林君夫、湊和生、岩本多實、伊丹宏治、伊藤尚徳、石本清、“OGL-1第1次、第2次燃料体の照射試験”, JAERI-M 83-012 (1983).
- (6) 福田幸朔、小林紀昭、林君夫、湊和生、菊池輝男、足立守、伊丹宏治、岩本多實、井川勝市、“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).
- (7) 福田幸朔、小林紀昭、湊和生、井川勝市、岩本多實、“OGL-1燃料棒の温度評価”, JAERI-M 84-183 (1984).
- (8) 湊和生、荒井長利、福田幸朔、小林紀昭、菊池輝男、岩本多實、“OGL-1照射燃料試料用黒鉛ブロックの温度および熱応力解析”, JAERI-M 9036 (1980).
- (9) 湊和生、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、井川勝市、岩本多實、石本清、伊丹宏治、佐藤雅幸、“OGL-1照射済み燃料棒の曲がり解析”, JAERI-M 83-055 (1983).
- (10) 湊和生、福田幸朔、小林紀昭、井川勝市、“OGL-1照射燃料体黒鉛ブロックの熱応力解析”, JAERI-M 83-167 (1983).
- (11) 林君夫、湊和生、小林紀昭、飛田勉、菊池輝男、黒羽根史朗、足立守、福

- 田幸朔、“OGL-1照射燃料体の燃料コンパクトと黒鉛スリーブの照射寸法変化”、JAERI-M 88-107 (1988).
- (12) 林君夫、井川勝市、“第1次、第2次OGL-1燃料体黒鉛スリーブ中の核分裂生成物の拡散挙動に関する計算”, JAERI-M 82-109 (1982).
- (13) K. Hayashi, T. Kikuchi, F. Kobayashi, K. Minato, K. Fukuda and K. Ikawa, “Distribution of fission and activation products in the graphite sleeves of HTGR fuel rods: first and second OGL-1 fuels”, J. Nucl. Mater. 115 (1983) 233.
- (14) K. Hayashi, T. Kikuchi, F. Kobayashi, K. Minato, K. Fukuda, K. Ikawa and K. Iwamoto, “Distribution of fission products in irradiated graphite materials of HTGR fuel assemblies: third and fourth OGL-1 fuels”, J. Nucl. Mater. 136 (1985) 207.
- (15) K. Hayashi, T. Kikuchi, F. Kobayashi, K. Minato and K. Fukuda, “In-pile release behavior of metallic fission products in graphite materials of an HTGR fuel assembly”, J. Nucl. Mater. 149 (1987) 57.
- (16) K. Hayashi and K. Fukuda, “Diffusion coefficients of cesium in un-irradiated graphite and comparison with those obtained from in-pile experiments”, J. Nucl. Mater. 168 (1989) 328.
- (17) 林君夫、小林紀昭、渕和生、足立守、福田幸朔、“第9次および第10次OGL-1燃料体の黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”, JAERI-M 88-210 (1988).
- (18) K. Hayashi, K. Fukuda and S. Shiozawa, “Release behavior of metallic fission products from fuel for HTTR”, Proc. IAEA Specialists Meeting on behavior of gas cooled reactor fuel under accident conditions, IWGGCR/25, Oak Ridge, USA, 5-8 Nov. 1990, p.61.
- (19) 林君夫、福田幸朔、鶴田晴通、菊池輝男、“第11次および第12次OGL-1燃料体の黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”, JAERI-M 94-075 (1994).
- (20) K. Hayashi, T. Kikuchi, F. Kobayashi, K. Minato, K. Fukuda, K. Ikawa and K. Iwamoto, “Distribution of ^{60}Co and ^{54}Mn in graphite material of irradiated HTGR fuel assemblies”, JAERI-M 84-088 (1988).
- (21) K. Ikawa, K. Fukuda and K. Iwamoto, “Research on irradiation behavior of VHTR fuel”, IAEA IWGGCR Meeting, Moscow, USSR, 18-21 Oct. 1983.
- (22) 福田幸朔、小林紀昭、菊池輝男、渕和生、林君夫、井川勝市、岩本多實、石本清、松島秀夫、伊丹宏治、“多目的高温ガス実験炉参照燃料のインパイルガススリーブ(OGL-1)による照射試験”, 原子力誌 26 (1984) 57.
- (23) K. Fukuda and K. Iwamoto, “Resarch on in-pile release of fission products from coated particle fuels”, IAEA IWGGCR Meeting, Berkely, UK, 22-25 Oct. 1985.

- (24) K.Fukuda, K.Hayashi and I.Tanaka, "Irradiation experiments of HTTR fuel by an in-pile gas loop, OGL-1", Proc. 3rd Asian Symp.on Research Reactor, Hitachi, Japan, 11-14 Nov. 1991; JAERI-M 92-028 (1992) p.247.
- (25) 林 君夫、塙沢周策、沢 和弘、佐藤貞夫、丸山 創、小林紀昭、福田幸朔、“高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全性評価”、JAERI-M 89-161 (1989).
- (26) 小林紀昭、塙沢周策、林 君夫、沢 和弘、佐藤貞夫、福田幸朔、金子光信、佐藤努、“高温工学試験研究炉の燃料検査基準”、JAERI-M 92-097 (1992).
- (27) 青地哲男、下川純一、安野武彦、安川 茂、三竹 普、宮本喜晟、武藤 康、新藤隆一、田所啓弘、幾島毅、荒井長利、江崎正弘、平野光将、瀬谷東光、佐藤貞夫、鈴木勝男、鈴木邦彦、梶山武義、“多目的高温ガス実験炉第1次概念設計”, JAERI-M 6845 (1977).
- (28) 荒井長利、幾島毅、佐藤貞夫、鈴木勝男、谷 雄太郎、黒木修二、“多目的高温ガス実験炉Mark-III炉心の燃料特性”、JAERI-M 6945 (1977).
- (29) 日本原子力研究所、“高温工学試験研究の現状”、1987年.
- (30) 日本原子力研究所、“日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書 HTTR（高温工学試験研究炉）原子炉施設の設置”、平成元年2月（平成元年11月一部補正）（平成2年10月 一部補正）.
- (31) 日本原子力研究所、“日本原子力研究所大洗研究所の原子炉施設【HTTR（高温工学試験研究炉）】の変更に係る設計及び工事の方法の認可申請書 第3回申請(1/5)”, 平成4年2月.
- (32) R.F.Turner, R.G.baumgartel, H.I.Leon, E.O.Winkler and L.R.Zummwalt, “Irradiation test of the Gail III-B fuel element in the General Atomic In-pile Loop”, GA-5314 (1964).
- (33) E.O.Winkler, C.S.Luby, W.J.Scheffel and B.D.Snow, “Irradiation test and post irradiation examination of the GAIL IV fuel element in the General Atomic in-pile loop”, GA-7997 (1967).
- (34) E.Groos and H.J.Nordwall, “Post irradiation radiochemical analysis of the loop PLUTO IIIA”, AERE-R 4434 (1964).
- (35) D.D.Jensen, M.J.Haire and A.Ballagny, “Analysis of fission product behavior in the Saclay Spitfire Loop Test SLL-1”, GA-A 13839 (1978).
- (36) R.M.Gillet, “French programme for HTR fuel”, Proc. IAEA Specialists Meeting on behavior of gas cooled reactor fuel under accident conditions, IWGGCR/25, Oak Ridge, USA, 5-8 Nov. 1990, p.23.

Table 1.1 Comparison of fuel specifications in the first conceptual VHTR design, in the HTTR design and in the 12th OGL-1 fuel assembly.

	VHTR Design* ¹	HTTR Design* ²	12th OGL-1
Coated Fuel Particle (CFP)			
Fuel Kernel			
Material	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Diameter (μm)	600	600	600
Density (%TD)	95	97	95
Coating Layer			
Coating Type	TRISO	TRISO	TRISO
Material			
1st Layer	LD-PyC* ³	LD-PyC	LD-PyC
2nd Layer	HD-PyC* ³	HD-PyC	HD-PyC
3rd Layer	SiC	SiC	SiC
4th Layer	HD-PyC	HD-PyC	HD-PyC
Thickness (μm)			
1st Layer	60	60	60
2nd Layer	30	30	30
3rd Layer	25	25	25
4th Layer	45	45	45
Diameter (μm)	920	920	920
Fuel Compact			
Inner Diameter (mm)	18	10	10
Outer Diameter (mm)	36	26	26
Length (mm)	36	39	39
Packing Fraction of CFP (vol%)	30.5	30	30
Graphite Sleeve			
Inner Diameter (mm)	36.3	26.25	26.2
Outer Diameter (mm)	46	34	34
Length (mm)	555(482* ⁴)	577	790
Fuel Rod			
Fuel Compact			
Stack Length (mm)	529(455* ⁴)	546	720
Graphite Block			
Shape	Hexagonal	Hexagonal	Hollow Cylinder
Size			
Distance Across Flat(mm)	299	360	-
Height (mm)	570	580	-
Diameter of Fuel			
Insertion Hole (mm)	50	41	41
No. of Fuel Rods to be inserted	12	33(31)	1

*1 Ref.(27): T.Aochi et al. JAERI-M 6845 (1977) p.97.

*2 Refs.(30)(31).

*3 LD-PyC, low density pyrolytic carbon; HD-PyC, high density PyC.

*4 Dowel fuel rod; see ref.(27).

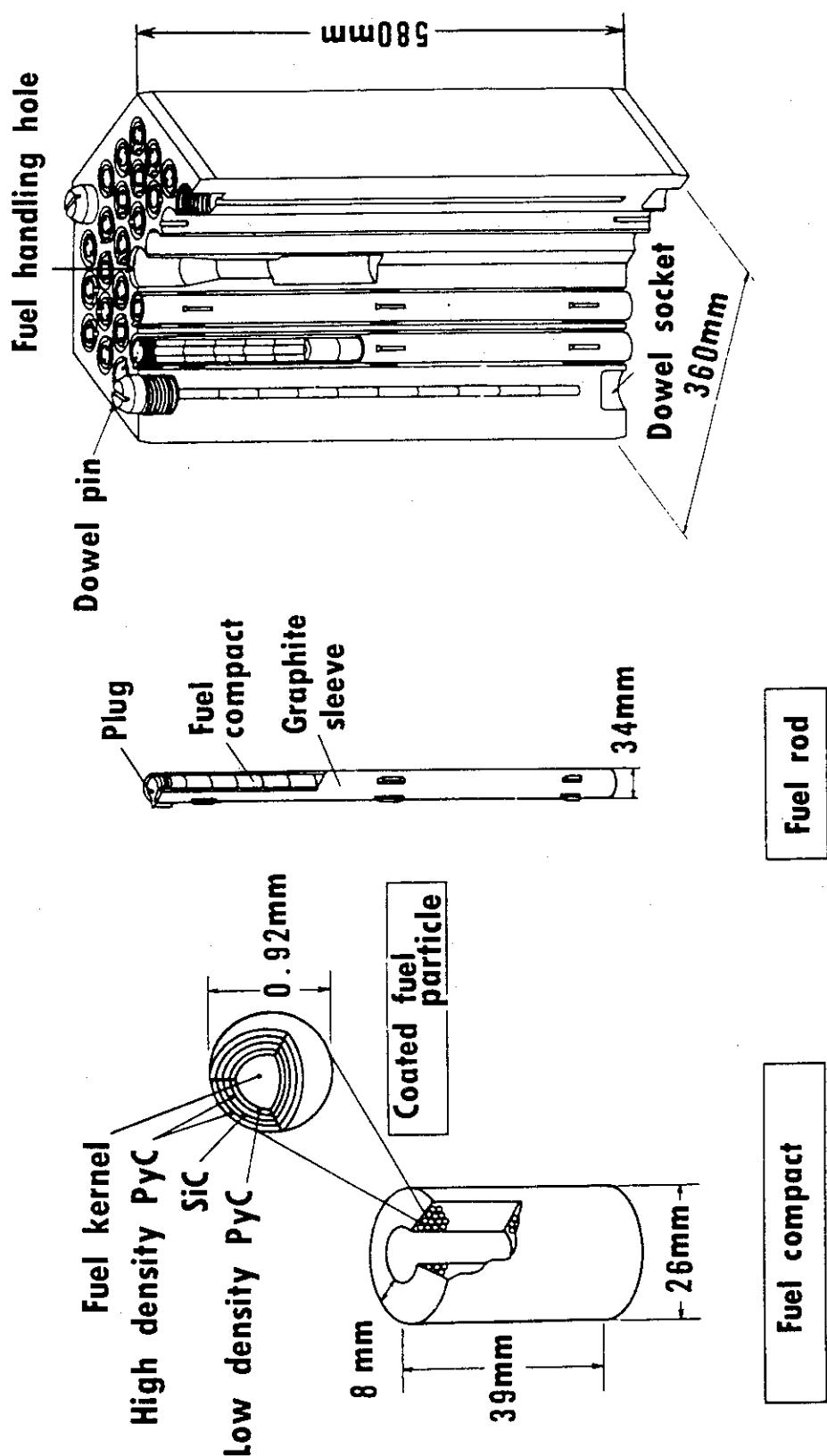


Fig. 1.1 Design structure of fuel of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR); A-type fuel assembly.

2. OGL-1 燃料体

2.1 はじめに

OGL-1による照射試験では、HTTRの燃料体を模擬したOGL-1燃料体を用いて、OGL-1燃料試験体を構成し、その燃料試験体をOGL-1ループの炉内管に装荷して照射を行う⁽¹⁾。OGL-1燃料体は、第1章で説明したように、燃料コンパクトを黒鉛スリーブに装填した燃料棒を、円筒状の黒鉛ブロックに挿入したものである。また、燃料試験体は、OGL-1燃料体のほかに、中性子遮蔽体、熱電対等部品を組み込んで、ハステロイX製の金具で固定したものである^(1, 2, 3)。

これまでに、第1次および第2次⁽²⁾、ならびに第3次～第5次⁽³⁾のOGL-1燃料体および燃料試験体の製作について、報告を行った。また、第1次～第11次のOGL-1燃料体について、燃料製造実績および製造時特性をまとめて報告した⁽⁴⁾。本報告では、第11次および第12次を中心として、第6次～第12次のOGL-1燃料体および燃料試験体の製作について述べる。

2.2 燃料体の概略

OGL-1燃料体は、VHTRの第1次概念設計⁽⁵⁾、およびHTTRの初装荷燃料設計⁽⁶⁻⁸⁾に基づいて製作してきた。そのうち、第6次～第12次燃料体の燃料設計の主要諸元をTable 2.1に示す。Table 2.1の備考欄には、被覆燃料粒子の熱分解炭素層やSiC層の被覆工程における1回の処理量、すなわち、1製造バッチあたりの量を示した。第6次～第8次燃料体では、1製造バッチが500g(UO₂燃料核にバッファ層を被覆する際のウラン量)の、比較的小型の流動床を用いた。

一方、第9次燃料体以降は、HTTR初装荷燃料の量産製造を考慮した、いわゆる量産試作燃料として、1製造バッチあたり約2kgのウランを取り扱うことができる大型流動床を使用した。ただし、第9次および第10次燃料体では、被覆燃料粒子の処理量は1kgU前後であった。

なお、HTTR初装荷燃料の²³⁵U濃縮度は最高約10wt%(平均で約6wt%)である^(7, 8)のに対して、OGL-1燃料体では、HTTR初装荷燃料の設計燃焼度(最高3.6%FIMA)に近い条件の照射をより短期間で行うため、HTTR初装荷燃料よりも²³⁵U濃縮度を高めて、約20wt%としている。

2.3 燃料コンパクトの製造

(1) 製造結果の概略

第6次～第12次燃料体の被覆燃料粒子および燃料コンパクトの製造のうち、第11次燃料体までの結果については、文献(4)にすでに報告した。

第12次燃料体の被覆燃料粒子の照射前の特性の詳細を付録1に示す(Table A1.3)。すべての検査項目について、製造仕様を満たしている。また、燃料コンパクトについても、寸法、ウラン量を含めて、第6次～第11次燃料体⁽⁴⁾と同様、品質の変動の少ない燃料が製造された(Table A1.6参照)。

(2) 貫通およびSiC層破損率の推移

次に、第6次～第12次燃料体について、燃料コンパクト単位での被覆燃料粒子の貫通破損率およびSiC層破損率の測定結果をまとめて、Table 2.2および2.3に示す。また、各燃料体について、貫通破損率およびSiC層破損率の平均値および95%信頼区間を比較したものをFig.2.1に示す。ここで、貫通破損率とは、すべての被覆層が破損している被覆燃料粒子を、SiC層破損率はSiC層が破損している被覆燃料粒子の割合を意味する。両者は、それぞれ被覆燃料粒子からの希ガス核分裂生成物(FP)および金属FPの放出に関係するものである。なお、これらの図表に示したデータは原研で測定したものである。

Fig.2.1からわかるように、第6次～第8次燃料体の平均貫通破損率は、 10^{-5} のオーダー以下の比較的低い値であるのに対して、第9次および第10次の値は、第8次までの値に比べて高くなっている。この原因是、第8次までは小型流動床で製造されており、積年の製造経験により品質が安定していたのに対して、第9次からは、新規に量産用の大型流動床を使用したことによるものと考えられる。事実、第11次、第12次と製造経験を積むに従って、貫通破損率の値が低下してきたことが示されている。

これに対して、SiC層破損率の値は、第5次燃料体以前を含めて[文献(4)のTable 7.3.2参照]、第7次燃料体までの結果に見られるように、小型流動床で製造した燃料でも、 10^{-3} のオーダー以上の比較的高い値であった。一方、第10次燃料体以降のSiC層破損率の値は 10^{-4} のオーダーとなっており、第9次燃料体までに比べて低下した傾向が見られる。

(3) 補足

Table 2.2および2.3に、貫通破損率およびSiC層破損率の測定値および平均値(単純平均破損率)に加えて、推定破損粒子数および推定破損率を示した。このとき、まず全試料粒子数に単純平均破損率を乗じて、破損粒子数に相当する値(破損粒子相当数、小数点以下の端数を含む)を求めた。次に、破損粒子数は整数であると考えて、破損粒子相当数の小数点以下を四捨五入して、整数化された破損粒子数(破損粒子数推定値)を求め、得られた破損粒子数推定値を全試料粒子数で除して、推定破損率を求めた。さらに、破損粒子数推定値と全試料粒子数を用いて、付録5Fの3.に示す方法によって、95%信頼区間を求めた。

2.4 燃料体の製作

OGL-1燃料体は、HTTRの燃料体を模擬した燃料の照射試験を実施するためのものであり、その構造はすでに報告した⁽²⁻⁴⁾。OGL-1燃料体は、燃料の照射目的や燃料設計使用等の条件に応じて設計される。第6次～第12次燃料体の黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロックの主な仕様を、HTTR燃料体の仕様と合わせてTable 2.4に示す。第12次燃料体は、黒鉛スリーブ、黒鉛ブロック、その他の黒鉛部品の寸法等に関して、HTTR初装荷燃料の仕様に沿って設計したものである。HTTR燃料体の黒鉛部品の加工精度を確認することも、第12次燃料体の照射目的に含まれている。

Table 2.4に示したように、OGL-1燃料体の燃料棒本数には、1本および3本のものがある。燃料棒が3本の例として、第11次燃料体の構造の概略をFig.2.2に、燃料棒が1本の例として、第12次燃料体の構造の概略をFig.2.3に示す。燃料体組み立て後の第11次燃料体の外観をFig.2.4に示す。

次に、第12次燃料体を例として、黒鉛スリーブの内径および外径の加工精度をFig.2.5に示す。また、同じく第12次燃料体について、燃料棒の黒鉛スリーブ内径と燃料コンパクトの外径の差、すなわち燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間の直径ギャップの測定値をFig.2.6に示す。すべての測定値は0.20～0.25mmの範囲に収まっており、製作目標値(0.20mm)にも近いことから、黒鉛スリーブは精度よく製作されていることがわかる。付録1のTable A1.11に、第12次燃料体の構成部品である黒鉛スリーブ、端栓、黒鉛ブロック、上部黒鉛ブロックおよび燃料棒について、製作仕様と合わせて製作結果を示す。製作結果は、いずれも仕様を満たしている。

以上述べたとおり、HTTR燃料の製作に必要な黒鉛部品については、特に重要な黒鉛スリーブの内面加工を含めて、十分な加工精度が達成されていることが確認された。

2.5 燃料試験体の製作

燃料試験体の例として、第11次燃料試験体の構造の概略をFig.2.7に、その外観をFig.2.8に示す。燃料試験体には、燃料棒およびOGL-1燃料体各部の温度を測定するための熱電対や、中性子照射量を測定するためのフルエンスモニタを組込む。さらに、上部への中性子漏洩を防ぐために、燃料体上部にホウ素化合物を収納した中性子遮蔽体が取り付けてある。第11次および第12次燃料試験体について、試験体各部の温度を測定するための熱電対の配置を、Fig.2.9に示す。

2.6 燃料体製作のまとめ

第6次～第12次燃料体の被覆燃料粒子は、第6次～第8次燃料体の小型流動床製品

と、HTTR燃料の製造を考慮した第9次～第12次燃料体の大型流動床製品に分けられる。被覆燃料粒子および燃料コンパクトの製造については、量産試作初期の被覆燃料粒子の貫通破損率およびSiC層破損率を除いて、燃料コンパクトの寸法、ウラン量等の特性について、安定した品質が得られた。

第12次燃料体の製作仕様は、黒鉛スリーブ、黒鉛ブロック、その他の黒鉛部品の寸法諸元等について、HTTR用初装荷燃料の設計仕様を可能な限り取り入れたものである。製作結果を検討し、HTTR燃料設計に基づく黒鉛材料の加工性について、十分な精度が達成されていることを確認した。

参考文献

- (1) 松永朔郎、田中利幸、馬場 治、高橋秀武、中村団夫、逆井 実、小畠清和、亀ヶ谷 勝彦、山田邦貴、臼井伸一、“高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験”、原子力誌 21 (1979) 249.
- (2) 井川勝市、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、林 君夫、湊 和生、岩本多實、伊丹宏治、伊藤尚徳、石本 清、“OGL-1第1次、第2次燃料体の照射試験”、JAERI-M 83-012 (1983).
- (3) 福田幸朔、小林紀昭、林 君夫、湊 和生、菊池輝男、足立 守、伊丹宏治、岩本 多實、井川勝市、“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).
- (4) 福田幸朔、小川 徹、鹿志村 悟、林 君夫、飛田 勉、小林紀昭、湊 和生、菊地 啓修、村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”、JAERI-M 89-007 (1989).
- (5) 青地哲男、下川純一、安野武彦、安川 茂、三竹 普、宮本喜晟、武藤 康、新藤 隆一、田所啓弘、幾島毅、荒井長利、江崎正弘、平野光将、瀬谷東光、佐藤貞夫、鈴木勝男、鈴木邦彦、梶山武義、“多目的高温ガス実験炉第1次概念設計”, JAERI-M 6845 (1977).
- (6) 斎藤伸三、他、“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”、原子力誌 32 (1990) 847.
- (7) 日本原子力研究所、“日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書 HTTR(高温工学試験研究炉) 原子炉施設の設置”、平成元年2月 (平成元年11月 一部補正)(平成2年10月 一部補正).
- (8) 林 君夫、塩沢周策、沢 和弘、佐藤貞夫、丸山 創、小林紀昭、福田幸朔、“高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全性評価”、JAERI-M 89-161 (1989).

Table 2.1 Design of the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assem- bly	Design			
	U con- tent(g)	No. of Fuel Rods	No. of Fuel Compacts	Remark
6th	360	1	20	Coater ^{*1} : 500g
7th ^{*2}	540	3	60	same as above
8th	363	1	20	same as above
9th	370	1	20	Coater ^{*1} : 2kg
10th	361	1	20	same as above
11th	541	3	54	same as above
12th	257	1	19	same as above

*1 Charge amount of uranium.

*2 Graphite powder of fuel compacts:

Domestic graphite powder was used for 2 rods.

German graphite powder was used for 1 rod.

Table 2.2 Through-coating failure fractions of coated fuel particles (CFPs) in unirradiated fuel compacts produced in the same batch as for those used in the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Number of CFPs		Failure Fraction			95% Confidence Limit	
	(/Compact)	(Failed /Total)*1	Results	Simple Mean	Inferred Mean	Lower	Upper
6th	18000	2/36000	5.2×10^{-6} 4.9×10^{-5}	5.1×10^{-6}	5.6×10^{-6}	1.7×10^{-6}	2.0×10^{-4}
7th	9000	2/63000	1.1×10^{-4} 1.1×10^{-7} 2.4×10^{-7} 1.2×10^{-7} 7.9×10^{-6} 1.1×10^{-7} 8.4×10^{-7}	2.7×10^{-6}	3.2×10^{-6}	9.8×10^{-6}	1.1×10^{-4}
8th	18000	1/90000	2.9×10^{-6} 6.7×10^{-8} 5.6×10^{-8} 5.6×10^{-8} 5.6×10^{-8} 2.7×10^{-7}	5.9×10^{-8}	1.1×10^{-6}	2.7×10^{-6}	6.2×10^{-5}
9th	19000	33/38000	9.2×10^{-4} 8.2×10^{-4}	8.7×10^{-4}	8.7×10^{-4}	6.2×10^{-4}	1.2×10^{-3}
10th	18000	9/36000	$2.7 \times 10^{-4*2}$ $2.4 \times 10^{-4*2}$	$2.6 \times 10^{-4*2}$	2.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}	4.7×10^{-4}
11th	10600	1/21200	1.1×10^{-4}	$7.0 \times 10^{-7*2}$	5.5×10^{-6}	4.7×10^{-6}	2.6×10^{-4}
12th	13500	3/27000	5.3×10^{-6} 1.5×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.1×10^{-4}	4.0×10^{-6}	3.2×10^{-4}

*1 Inferred integer number of failed CFPs divided by the total number of CFPs contained in tested fuel compacts. The ratio corresponds to the inferred mean failure fraction.

*2 Corrected from ref.(4) JAERI-M 89-007 (1989) p.276; Table 7.4.1.

Table 2.3 Defective SiC-layer fractions of coated fuel particles (CFPs) in unirradiated fuel compacts produced in the same batch as for those used in the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Number of CFPs		Defective Fraction			95% Confidence Limit	
	(/Compact)	(Failed /Total)*1	Results	Simple Mean	Inferred Mean	Lower	Upper
6th	18000	34/18000	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.4×10^{-3}	2.6×10^{-3}
7th	9000	79/18000	3.0×10^{-3} 5.8×10^{-3}	4.4×10^{-3}	4.4×10^{-3}	3.5×10^{-3}	5.5×10^{-3}
8th	18000	17/36000	4.6×10^{-4} 4.8×10^{-4}	4.7×10^{-4}	4.7×10^{-4}	3.0×10^{-4}	7.6×10^{-4}
9th	19000	74/19000	3.9×10^{-3}	3.9×10^{-3}	3.9×10^{-3}	3.1×10^{-3}	4.9×10^{-3}
10th	18000	27/36000	9.5×10^{-4} 5.4×10^{-4}	7.5×10^{-4}	7.5×10^{-4}	5.2×10^{-4}	1.1×10^{-3}
11th	10600	20/21200	1.1×10^{-3} 7.5×10^{-4}	9.3×10^{-4}	9.4×10^{-4}	6.1×10^{-4}	1.5×10^{-3}
12th	13500	12/27000	3.6×10^{-4} 5.4×10^{-4}	4.5×10^{-4}	4.4×10^{-4}	2.6×10^{-4}	7.8×10^{-4}

*1 Inferred integer number of defective CFPs divided by the total number of CFPs contained in tested fuel compacts. The ratio corresponds to the inferred mean defective fraction.

Table 2.4 Design of graphite parts for the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies and for HTTR.

Fuel Assem- bly	Graphite Sleeves			Graphite Blocks			
	Dimension (mm)			Hole for fuel rods		Dimension (mm)	
	Inner Dia.	Outer Dia.	Length	No. of Holes	Dia.(mm)	Length	Dia.
6th	36.2	46	790	1	50	785	80
7th	24.20	30	790	3	32.6	785	80
8th	36.20	46	790	1	50	785	80
9th	36.20	46	790	1	50	785	80
10th	36.20	46	790	1	50	785	80
11th	24.20	30	790	3	32.6	785	80
12th	26.20	34	790	1	41	785	80
HTTR*	26.25	34	577	31 or 33	41	580	----

* Design of HTTR.

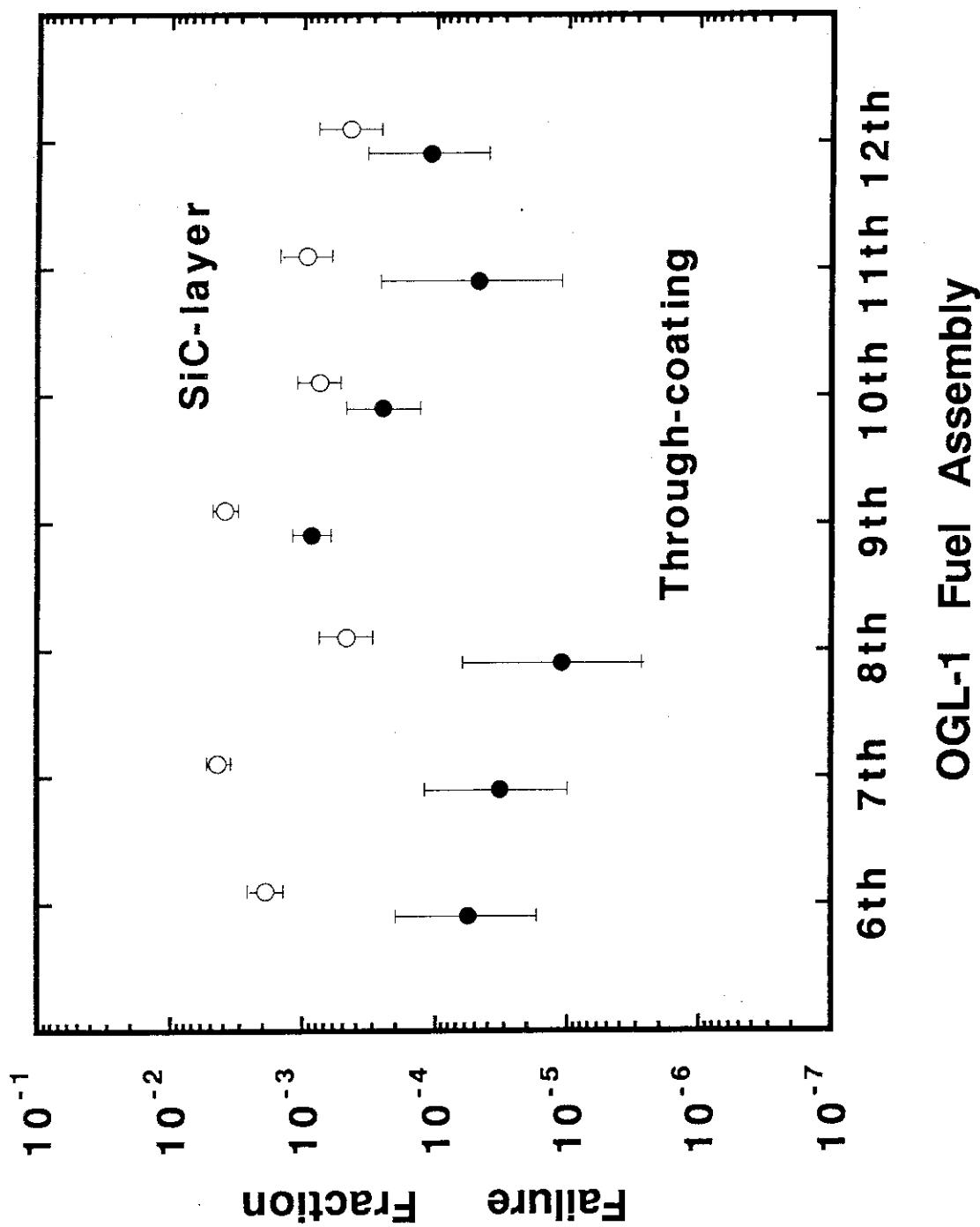


Fig. 2.1 Mean values and 95% confidence limits of through-coating failure fractions and defective SiC-layer fractions of coated fuel particles loaded in unirradiated fuel compacts produced in the same batch as for those used in the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

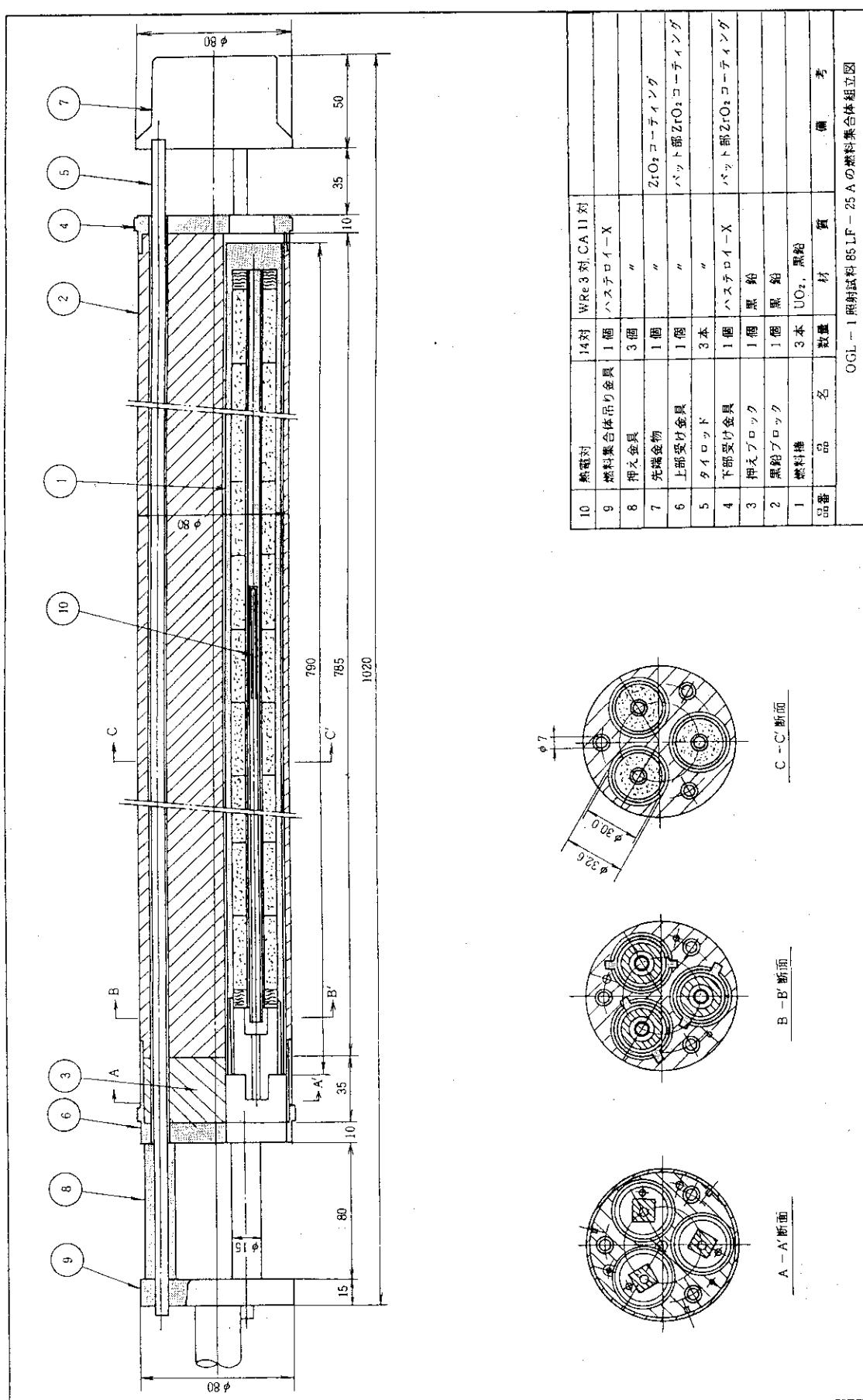


Fig. 2.2 Structure of the 11th OGL-1 fuel assembly.

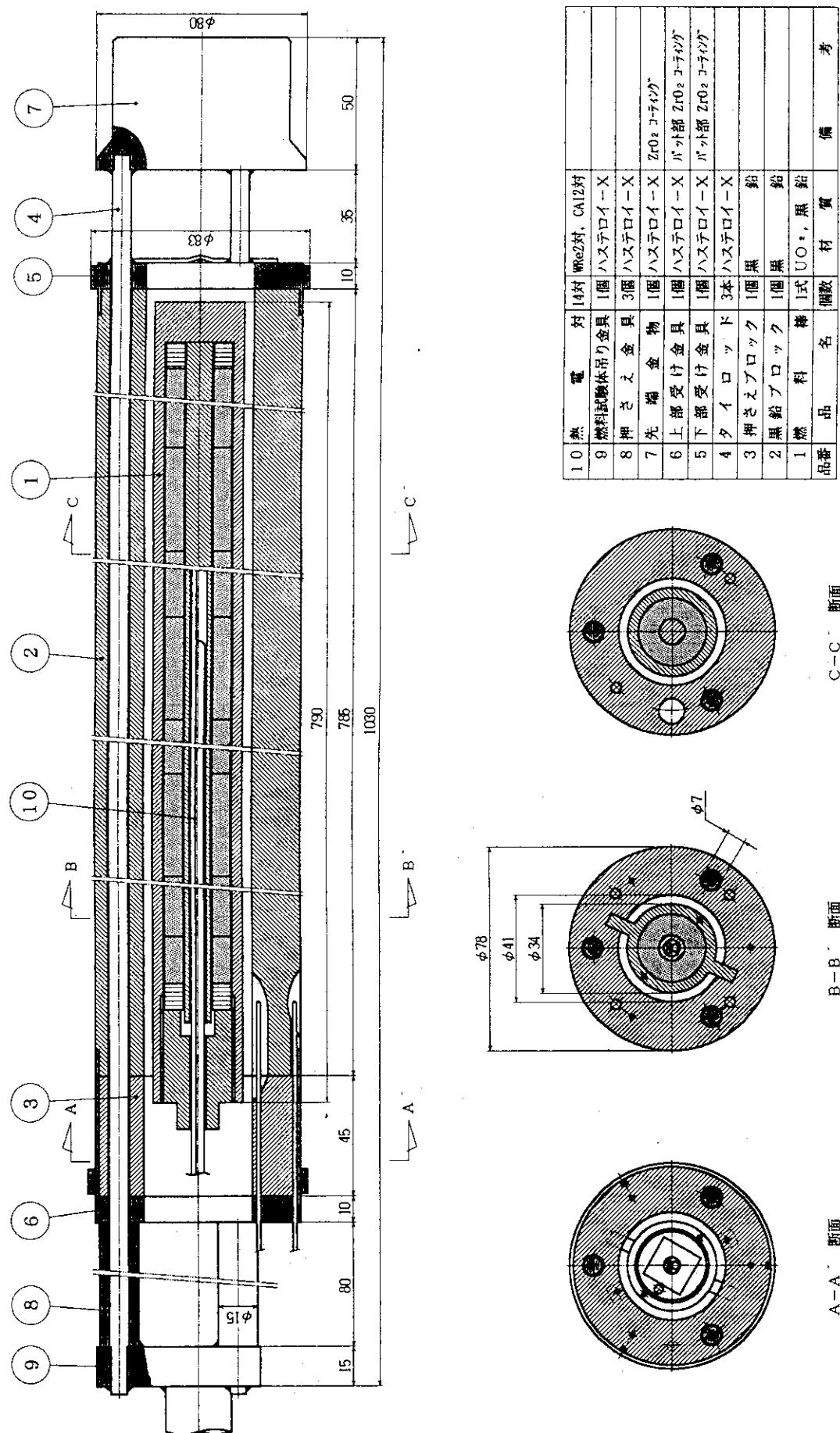


Fig. 2.3 Structure of the 12th OGL-1 fuel assembly.

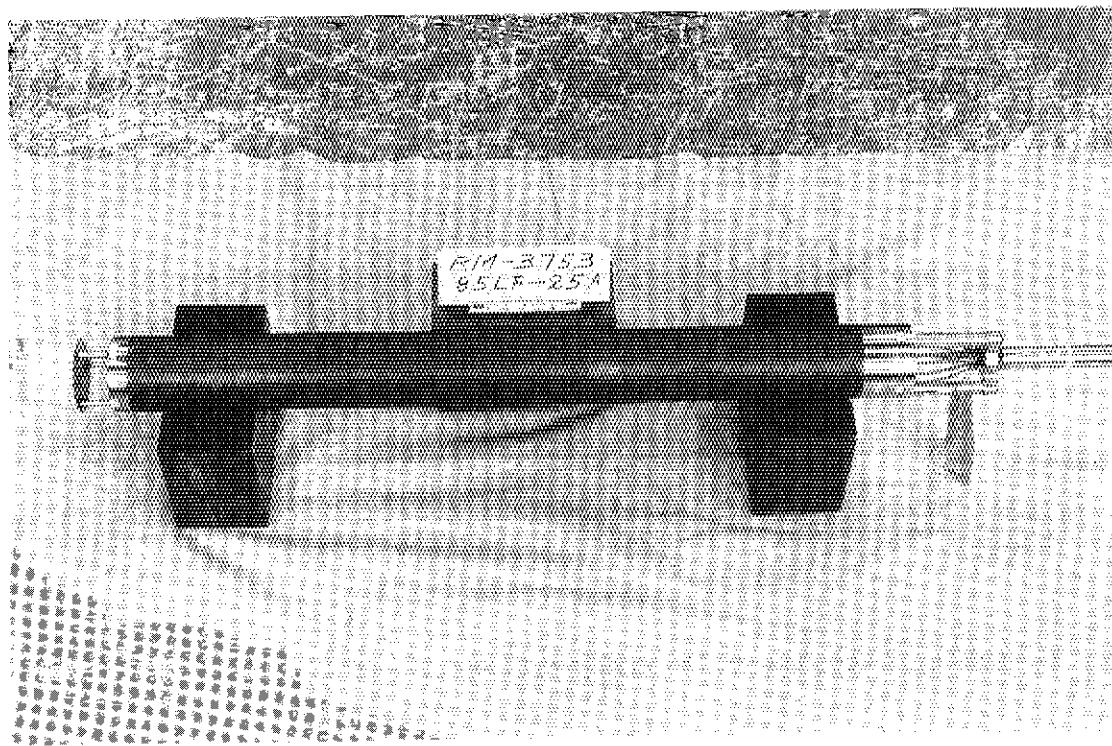


Fig. 2.4 External view of the 11th OGL-1 fuel assembly.

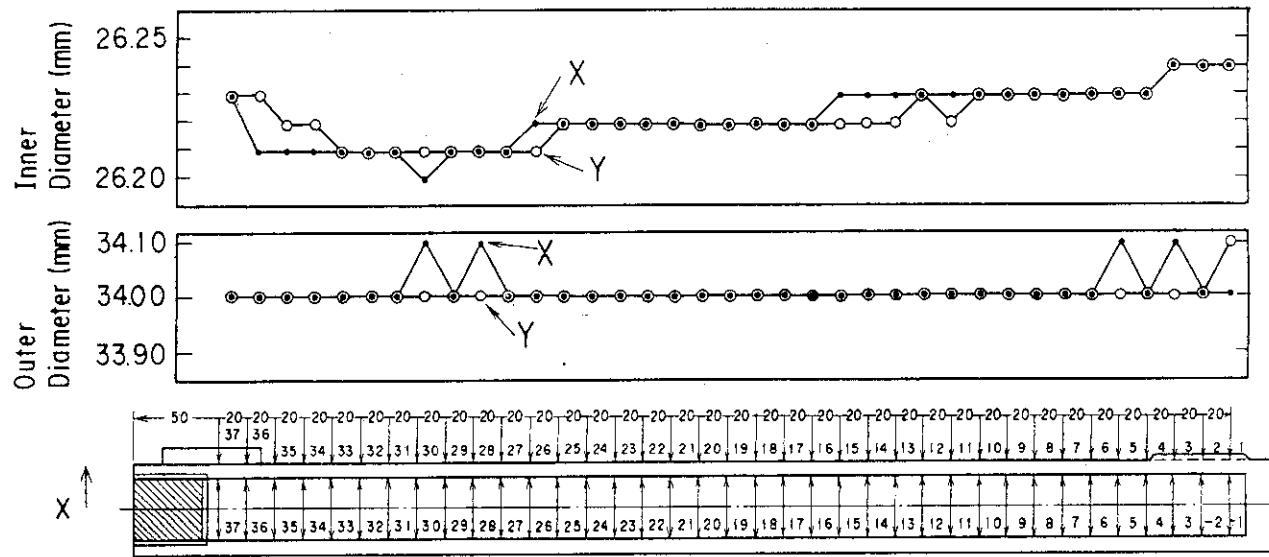


Fig. 2.5 Machining accuracy of the graphite sleeve of the 12th OGL-1 fuel assembly.

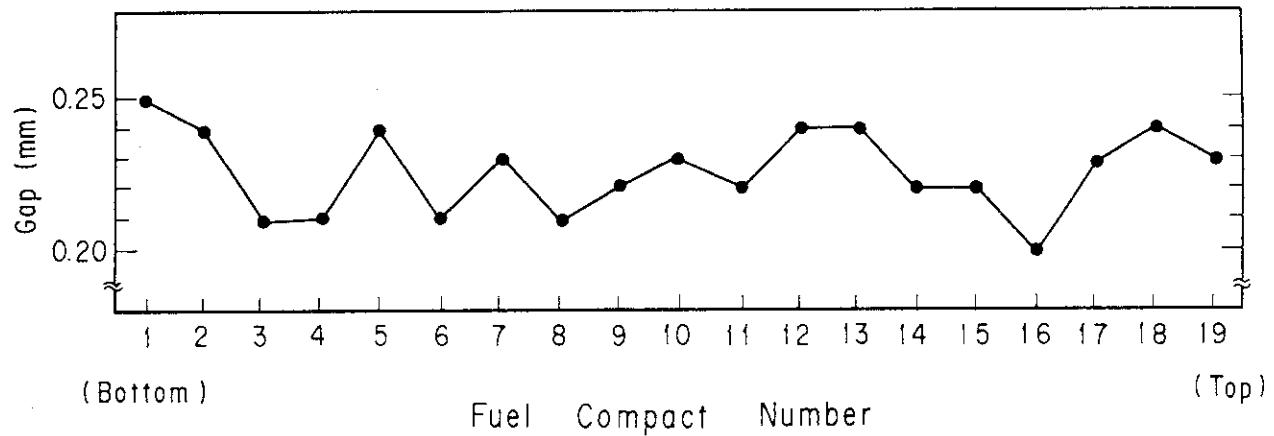


Fig. 2.6 Diametral gap between outer surfaces of fuel compacts and inner surface of graphite sleeve of the 12th OGL-1 fuel assembly.

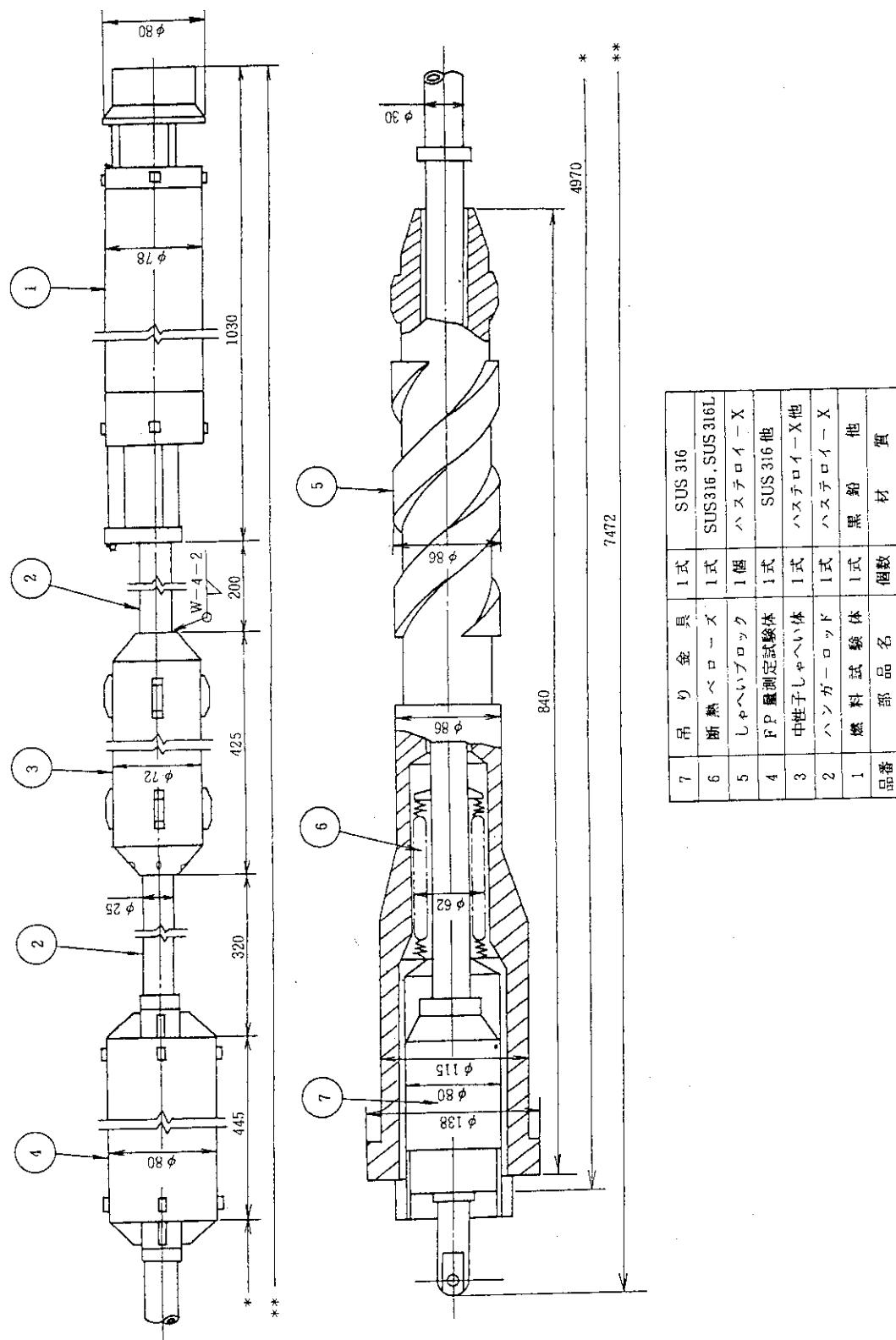


Fig. 2.7 Structure of the 12th OCL-1 fuel test assembly.

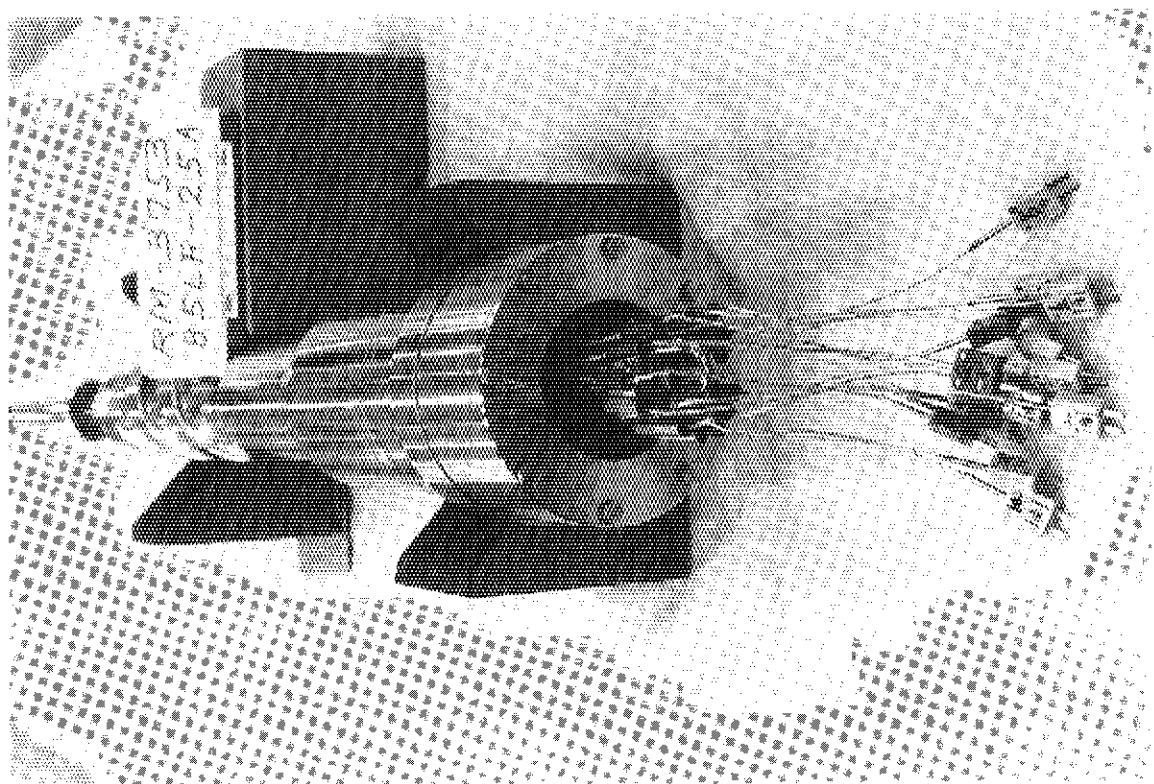
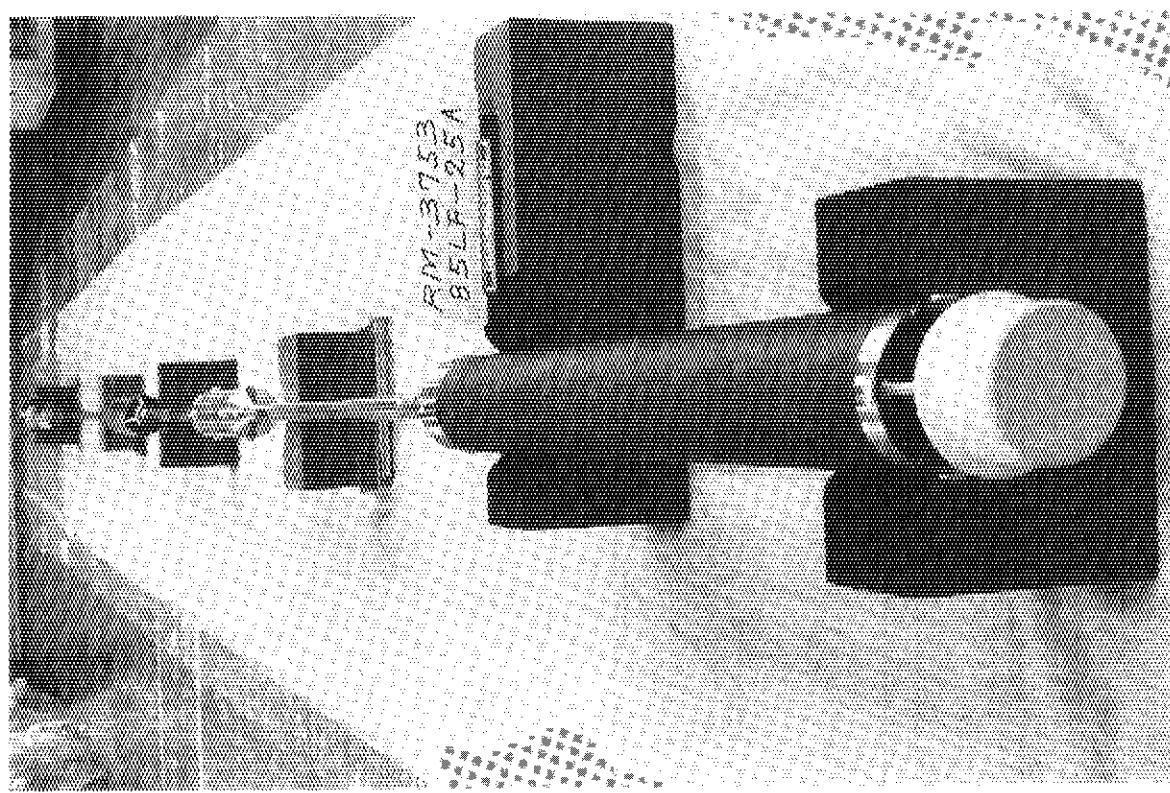
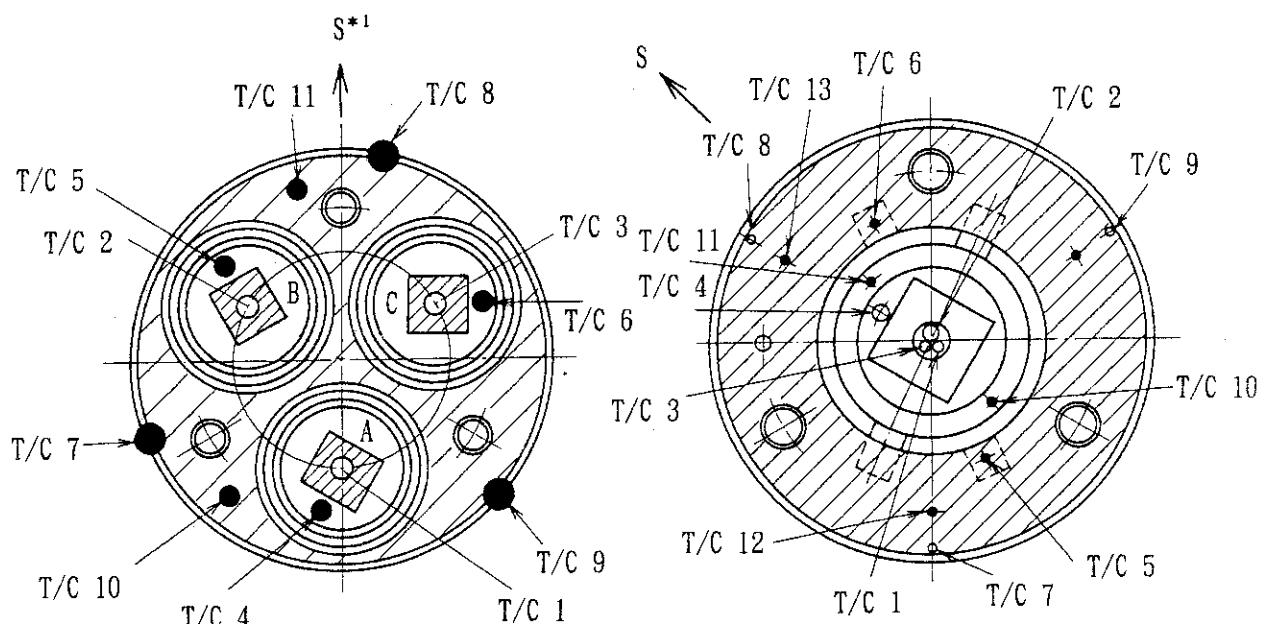


Fig. 2.8 External view of the 11th OGL-1 fuel test assembly.



11th OGL-1 Fuel Assembly				12th OGL-1 Fuel Assembly			
Name	Type	Dia. (mm)	Position	Name	Type	Dia. (mm)	Position
T/C 1	W/Re	3.2	Rod A* ²	T/C 1	W/Re	1.6	Compact 4
T/C 2	W/Re	3.2	Rod B* ²	T/C 2	W/Re	3.2	Compact 9
T/C 3	W/Re	3.2	Rod C* ²	T/C 3	K	1.6	Compact 15
T/C 4	K	3.2	Plug of Rod A	T/C 4	K	3.2	Plug of Rod
T/C 5	K	3.2	Plug of Rod B	T/C 5	K	1.6	Outlet Gas
T/C 6	K	3.2	Plug of Rod C	T/C 6	K	1.6	Outlet Gas
T/C 7	K	1.6	Bypass Gas	T/C 7	K	1.6	Bypass Gas
T/C 8	K	1.6	Bypass Gas	T/C 8	K	1.6	Bypass Gas
T/C 9	K	1.6	Bypass Gas	T/C 9	K	1.6	Bypass Gas
T/C10	K	1.6	Gr. Block	T/C10	K	1.6	Gr. Sleeve
T/C11	K	1.6	Gr. Block	T/C11	K	1.6	Gr. Sleeve
T/C12	K	1.6	Outlet Gas	T/C12	K	1.6	Gr. Block
T/C13	K	1.6	Neutron Shield	T/C13	K	1.6	Gr. Block
T/C14	K	1.6	Diffusion Tube	T/C14	K	1.6	Diffusion Tube

*1 South direction nearly toward the core center of the JMTR.

*2 Around the boundary between compacts 7 and 8.

Fig. 2.9 Arrangement of thermocouples in the 11th and 12th OGL-1 fuel assemblies.

3. 照射

3.1 はじめに

第6次～第12次燃料体の照射実績および希ガスFP放出挙動のうち、第10次燃料体の照射途中(4サイクル照射分)までは、すでに報告した⁽¹⁾。本報告では、第6次～第9次燃料体については要約して記載し、第10次～第12次燃料体について詳しく報告する。

なお、燃料からのヨウ素の放出挙動については、別に報告しているので、本報告ではふれないこととする。また、本報告では、燃焼度をMWd/tU単位で表示する場合もあるが、OGL-1照射孔では、8250 MWd/tUが1%FIMAに相当する。

3.2 各燃料体の照射条件の概要

Table 3.1に、第6次～第12次燃料体について、照射目的、照射期間、燃料コンパクト最高温度(燃料棒軸方向の最高温度位置における燃料コンパクト内面温度)、最高燃焼度等をまとめて示す。この表では、燃料コンパクト最高温度については、過渡的昇温を含めた最高照射温度と保持時間、および定常照射時の最高温度を示す。合わせて、HTTR初装荷燃料の使用条件⁽²⁻⁴⁾を示す。第12次燃料体では、最高燃焼率(実測燃料温度を用いた熱計算値)は3.9%FIMAに達しており、HTTR燃料設計の最高燃焼度(3.6%FIMA)⁽²⁻⁴⁾をうわまわる照射が行われた。

第6次～第12次燃料体について、各照射サイクルごとのOGL-1ループの1次系ヘリウム流量、燃料体の出力等の運転条件を、燃料体各部の温度とともに、Table 3.2に示す。これらのループ運転条件は、燃料コンパクト最高温度が希望の温度になるように設定した。燃料体で発生する熱を除去する1次系ヘリウム流量は、熱出力の大きさに応じて、最大の第7次燃料体の80g/sから、最小の第12次燃料体の約45g/sまで調整した。全ての照射サイクルについて、希望した照射温度一定の運転条件で照射が行われたことがわかる。本報告に記載する第6次～第12次燃料体だけでなく、第1次～第5次燃料体についても、同様のループ運転が行われた^(1, 5, 6)。

なお、照射中の1次系ヘリウム中の水分濃度および酸素濃度は、それぞれ約 2×10^{-2} および約2 vol ppmであった。

3.3 OGL-1ループを流れるヘリウム量

OGL-1照射の際に燃料から放出される希ガスFPの放出率(R/B: Release rate/Birth

rate)の求め方はすでに報告した[文献(5)のp.231参照]。このR/Bを計算する際に必要となるOGL-1ループ内を流れるヘリウム量を、第10次燃料体の照射の際に実験的に求めた。

照射時に燃料から放出される希ガスFPの量は、1次冷却材に含まれるFPの濃度を測定することによって求められる。この希ガスFP濃度は、燃料から放出されるFP量、FPの半減期、1次冷却材の精製系の流量、およびOGL-1ループ内を流れるヘリウムの量から求められる。これらの値のうち、希ガスFP濃度および精製系流量は測定が行えるが、OGL-1ループ内を流れるヘリウム量は、直接測定することが困難である。このため、第10次燃料体の最後の照射サイクルである第79サイクルにおいて、ループ内を流れるヘリウムの量を求める実験を行った。

実験方法としては、原子炉停止直後のOGL-1ループ内の1次系冷却ガスを一定時間ごとにサンプリングし、その希ガスFP濃度を測定することとした。この間、精製系は作動させておいた。測定対象核種は^{85m}Kr、⁸⁷Krおよび⁸⁸Krとした。原子炉停止時を基準にして、崩壊による減少を補正した各核種の濃度をFig.3.1に示す。この結果から、ループの精製系によって希ガスFPが除去される割合が求められる。この減少過程は、放射能の減衰と同様の式によって表わされる。その式の半減期に相当する係数を、ここでは「ループ精製系の半減期」とする。Fig.3.1に示したように、「ループ精製系の半減期」は、⁸⁸Kr(1.45時間)、^{85m}Kr(1.3時間)、⁸⁷Kr(1.15時間)と求められ、3核種についての平均は1.3時間と得られた。この値と、ループ精製系の流量から、OGL-1ループ内を流れるヘリウム量は、約6300gと求められた。ここで、OGL-1ループに充填したヘリウム量とせずに、ループ内を流れるヘリウム量としたのは、ループ配管内にヘリウムが流れにくい断熱層などの間隙が存在していることによる。OGL-1ループに充填したヘリウム量は6900gであり、この量と上記ヘリウム量6300gとの差が、希ガスFPの挙動に関与しない、流れの遅い間隙にあるヘリウム量に相当する。

3.4 各燃料体の照射実績および希ガスFP放出挙動

(1) 第6次燃料体

本燃料体は、燃料コンパクト最高温度1500°Cを目標として段階的に昇温し、各温度での希ガスFP放出率を測定し、高温照射下での燃料の健全性について調べるとともに、燃料からのFP放出挙動を調べることを目的として、照射を行った。

第6次燃料体の照射実績を、Table 3.3に示す。本燃料体は、1サイクルの照射であり、OGL-1燃料体では最も短期間の照射となった。最高燃焼率は0.4%FIMA、昇温時の燃料コンパクト最高温度は1480°Cであった。昇温は、燃料コンパクト最高温度が、1400、1450および1480°Cとなるように、段階的に行った。温度1400～1480°Cについて、照射時間に伴う希ガスFPの放出率(R/B)の変化をFig.3.2に示す。希ガスFPの放出挙動を調べる際の代表核種として扱うことができる⁸⁸Kr(半減期2.84時間)のR/Bは、1400°Cにおいて

では、 1.37×10^{-6} であった[文献(1)のTable 4.2.1およびFig.4.2.6参照]。1480°Cの高温照射においては、 ^{88}Kr のR/Bは昇温直後の 1.9×10^{-6} から徐々に低下し、ほぼ定常値の 1.4×10^{-6} となった。FP放出率と照射温度の関係についてみると、1200°Cから1480°Cまで昇温したとき、KrおよびXeのR/Bは3倍程度に増加した[文献(1)のFig.4.2.6参照]。この増加は、ガススイープキャップセル照射におけるR/Bの温度依存性のデータ[文献(1)の4.3節参照]から予測される値にほぼ一致することから、被覆燃料粒子の破損によるものではないと考えることができる。また、1480°Cで照射している間(サイクル前半、後半を合せて計280時間)に、R/Bの増加は認められなかったことから、被覆燃料粒子の有意な追加破損(貫通破損)は生じなかつたことがわかる。

(2) 第7次燃料体

本燃料体は、燃料コンパクトの製造の際に、黒鉛マトリックスの原料として用いる黒鉛粉末について、従来から使用してきた輸入品と、今回新たに用いた国産の黒鉛粉末(日本カーボン(株)製の高純度人造黒鉛粉末SAD-4および高純度天然黒鉛粉末ACP-E)の比較を行うことを目的として、照射試験を行った。

第7次燃料体の照射実績を、Table 3.3に示す。本燃料体の照射期間は3サイクルであり、通算照射時間は約1400時間である。表に示す第6次～第9次燃料体の4体のうちで、第7次燃料体の最高線出力が低い(約450W/cm)のは、本燃料体の燃料棒は3本あり、そのうちの1本の値を示しているためである。第7次燃料体全体としての最高線出力は、ほぼ3倍である。最高燃焼率は1.3%FIMA、燃料コンパクト最高温度は照射期間を通して1380°Cとほぼ一定であった。

照射中の ^{88}Kr のR/Bの変化を、Fig.3.2に示す。R/Bの値は、照射開始直後の 6.5×10^{-7} から次第に低下して、1サイクル(約500時間)照射した後にはほぼ定常値となり、 4×10^{-7} となった。また、照射中のR/Bの増加は認められなかったことから、燃料の有意な追加破損は生じなかつたことがわかる。

(3) 第8次燃料体

本燃料体は、燃料からの金属FP、特に ^{137}Cs の放出挙動を調べることを目的とした。このため、金属FPの放出源として、SiC層を有しない、2層の熱分解炭素のみを被覆した燃料粒子(BISO被覆粒子)を1.0%含む2個の燃料コンパクトを、燃料コンパクト20個から構成される燃料棒中のほぼ中央部に配置した。BISO被覆粒子は、TRISO被覆粒子と同様に、希ガスFPは放出しにくいので、燃料からの希ガスFP放出挙動は、他の燃料体と同様であると考えられる。

第8次燃料体の照射期間は3サイクル(約1300時間)であり、最高燃焼率は1.0%FIMA、燃料コンパクト最高温度は1390°Cであった(Table 3.3参照)。ただし、最初の照射サイクルでは、OGL-1ガスループの圧力逃し弁に相当するラプチャーディスクが破損したため約1230°Cで照射し、後の2サイクルは1360～1390°Cで照射を行った。

照射中の ^{88}Kr のR/Bの変化を、Fig.3.2に示す。R/Bの値は、1370°Cまで昇温した直後の 4×10^{-7} から次第に低下し、2サイクルめの途中(燃料コンパクト最高温度 1360

～1390°Cで約500時間経過後)には 2.6×10^{-7} で定常となった。燃料からの希ガスFPの放出挙動は、他の燃料体と同様であり、燃料の有意な追加破損は認められず、また、BISO被覆粒子を含む燃料コンパクトを装荷したことによる影響も特に認められなかった。

(4) 第9次燃料体

本燃料体は、HTTR燃料の製造を考慮した大型流動床を使用した最初の量産試作燃料の照射健全性を調べることを目的として、照射を行った。

本燃料体の照射では、照射サイクルが7と、第9次燃料体までの照射では最も長く、通算照射時間は約3500時間(145.5日)に達した。最高燃焼率は2.7%FIMA、燃料コンパクト最高温度は7サイクルを通して1330～1340°Cとほぼ一定の照射が行われた(Table 3.3 参照)。

^{88}Kr のR/Bの変化をFig.3.2に示す。R/Bは、照射開始直後の 2.8×10^{-5} から次第に低下して、1サイクル(約500時間)照射した後には、ほぼ定常値となり、 $1.2 \sim 1.5 \times 10^{-5}$ となつた。他の燃料体と比較してR/Bが高いのは、製造時の被覆燃料粒子の貫通破損率が高かったためである。全照射期間を通じてR/Bの増加は認められず、本燃料の燃焼率まで照射しても燃料の有意な追加破損は生じなかつたことが確認できた。

(5) 第10次燃料体

本燃料体は、第2作めの量産試作燃料の照射性能を調べることを目的とし、定常温度で照射を行った後、最終サイクルにおいて最高1500°Cまでの過渡的昇温を行つた。

本燃料体の照射実績を、Table 3.4に示す。燃焼率の最大値は2.8%FIMA(約23000 MWd/tU)に達しており、HTTRの平均燃焼率2.8%FIMAと同程度の照射が行われた。本燃料体の燃料コンパクト最高温度を測定する熱電対は、照射開始直後に断線して測定不能となつた。このため、燃料体構造、装荷ウラン量、冷却材流量等のループ運転条件をほぼ同じとした第9次燃料体の温度から、本燃料体の燃料コンパクト最高温度を推定した。計6サイクル照射のうち、はじめの5サイクルは、燃料コンパクト最高温度1330°Cの温度一定条件で照射が行われた。最後のサイクル(第79サイクル)では、原子炉運転の過渡状態を模擬して、1330°Cから1500°Cまで、約50°Cずつ段階的に昇温し、燃料から放出される希ガスFPのR/Bの変化を調べた。

燃料コンパクト最高温度が1330°C前後におけるKr同位体のR/Bの変化をFig.3.3に、Xe同位体のR/Bの変化をFig.3.4に示す。第77サイクルにおいては、測定核種のすべてについて、R/Bは第76サイクルまでの値から約40%程度下がり、第78サイクルで再び第76サイクルまでの値に戻っている。第77サイクルの燃料コンパクト温度、燃料棒出口ガス温度等の照射条件は、前後の第76サイクルおよび第78サイクルと同様である。したがつて、R/Bの値は同じであるはずであり、上記のR/B測定値の低下は真の挙動を反映したものではないと考えられる。実際には、第77サイクルのR/Bの値は、前後の第76サイクルおよび第78サイクルの値と同程度の値であると考えられる。なお、第77サイクル

のR/B測定値の低下の理由としては、FP濃度の測定条件の違いが考えられる。

^{88}Kr のR/Bの変化に注目すると(Fig.3.2およびFig.3.3)、照射開始直後の 4.9×10^{-6} から次第に低下し、1サイクル照射した後、約 3×10^{-6} で定常となった。Fig.3.5に、燃料コンパクト最高温度1330°Cにおける各核種のR/Bの半減期依存性を示す。その傾きは0.34であり、第9次燃料体までの値と同程度であった。

次に、過渡的昇温時の希ガスFPの放出挙動について述べる。燃料コンパクト最高温度を1330°Cから1500°Cまで昇温した第79サイクルにおけるKrおよびXeのR/Bの変化を、燃料コンパクト最高温度の変化と合わせてFig.3.6に示す。第79前半サイクルでは、段階的昇温に伴ってR/Bも段階的に増加し、昇温前(1330°C)に比べて、1500°Cまでの昇温後にはR/Bは約1.5倍に増加した。その後、第79後半サイクルで再び1330°Cとした時のR/Bの値は、昇温前の1330°Cの時の値に戻った。この結果から、温度上昇に伴うR/Bの増加は、被覆燃料粒子の追加破損によるものではないことがわかる。R/Bの増加は、燃料温度上昇に伴う希ガスFPの拡散係数の増加によるものであるとして説明できる。

以上をまとめると、本燃料体では、6サイクルの照射を通して燃料コンパクト最高温度1330°C程度の照射においては、いずれの核種についても、R/Bは 10^{-7} から 10^{-8} のオーダーであり、R/Bの増加は認められなかった。このような希ガスFPの放出挙動からみて、燃焼率2.8%FIMAまで、燃料の健全性は保たれたと言える。また、1500°C昇温時(2.6%FIMA)にも燃料の追加破損が認められなかったことから、HTTRの平均燃焼率と同程度まで照射された燃料については、HTTR燃料の照射末期(EOL)に、1500°Cまで昇温するような異常状態が生じても、健全性が保持できることが示された。

(6) 第11次燃料体

本燃料体の照射目的は、第9次燃料体から開始された第3作めの量産試作燃料を数多く照射試験することであり、このために燃料棒を3本棒タイプとし、燃料コンパクトを合計54個装荷した。さらに、別の目的として、本燃料体の照射前にOGL-1ループの炉内管の交換を行ったので、その性能を確認することも兼ねている。

本燃料体の照射実績を、Table 3.5に示す。照射は3サイクル、通算照射時間は約1500時間、最高燃焼率は1.6%FIMAである。3本の燃料棒は、燃料体内の位置によって、出力がそれぞれ異なる。各燃料棒の測定温度を用いて、それぞれの燃料棒の出力を求め、各燃料棒の出力比とした値を算出した。これらの値をTable 3.5に示す。

本燃料体の照射では、全期間を通じて燃料コンパクト最高温度は約1350°Cであった。照射に伴うKr同位体のR/Bの変化をFig.3.7に、Xe同位体のR/Bの変化をFig.3.8に示す。 ^{88}Kr のR/Bは、照射開始直後の 2.7×10^{-6} から徐々に減少し、約 1.0×10^{-6} で定常となった。定常となった後には、R/Bの増加は認められなかったことから、燃料の有意な追加破損は生じなかったことがわかった。

定常となったKrおよびXe同位体のR/Bをそれぞれの崩壊定数に対してプロットしたものを、Fig.3.9に示す。その傾きは0.56と得られ、他の燃料体で得られた0.3前後の値とは大きく異なっている。また、この値は、希ガスFPの燃料からの放出が拡散律速であ

としたBoothモデル⁽⁷⁾による値0.5に近い⁽⁸⁾。

本燃料体と他の燃料体で傾きが異なる点については、次のように考えられる。すなわち、R/Bと崩壊定数との両対数のプロットにおいて、直線を引いて、その傾きを求める際には、最も半減期の長い(崩壊定数 λ が最も小さい) ^{133}Xe の値が重要になる。本燃料体と他の燃料体の違いは、 ^{133}Xe のR/Bが定常に達しているか否かの違いによるものと考えられる。すなわち、Fig.3.8からわかるように、本燃料体の ^{133}Xe のR/Bについては、1サイクル内での変動が小さいのに対して、例えば第10次燃料体では、この変動が2~3倍に達している(Fig.3.4)。この原因としては、以下に述べるように、R/Bが定常に達していないためであると考えられる。

OGL-1(JMTR)で照射を連続して行う時間(1サイクルの半分で約11日)に対して、 ^{133}Xe の半減期は5.25日、その親核種の ^{133}I の半減期は20.9時間である。 ^{133}Xe のR/Bとして測定されるものには、 ^{133}Xe の形で燃料から放出されるものと、 ^{133}I として燃料から放出されてOGL-1の配管等にプレートアウト(沈着)し、崩壊によって ^{133}Xe となって測定されるものがありうる。そのため、測定時期が各半サイクルの照射開始に近い時には、R/Bが定常に達していないことが起り得る。本燃料体では、照射開始後、時間をおいて測定したデータが多くいたため、その平均値を用いた ^{133}Xe のR/B値は定常到達時の値となったものと思われる。一方、本燃料体以外のOGL-1燃料体については、第10次燃料体の場合と同じく、 ^{133}Xe のR/Bは定常に達していないものを多く含んでいたため、R/Bは1サイクル内で変動し、R/Bの平均値は定常値より低く評価された結果、希ガスFPのR/Bの崩壊定数依存性における傾きは、本来の0.5程度よりも小さく評価されて、0.3前後になったものと推定される。

(7) 第12次燃料体

本燃料体は、量産試作燃料の長期照射健全性を調べることを目的として、昭和63年から平成2年にかけて、計9サイクルの照射が行われた。本燃料体の照射時間は、約4700時間(195日)であり、第12次までのOGL-1燃料体では最長となった。照射実績を、Table 3.6に示す。燃料コンパクト最高温度は全期間を通して約1340°Cと一定であった。最高燃焼率は3.9%FIMA(実測温度を用いた熱計算による値)に達しており、HTTR燃料設計の最高燃焼度(3.6%FIMA)⁽²⁻⁴⁾をうわまわる照射が行われた。

照射時間に対するKrおよびXe同位体のR/Bの変化を、Fig.3.10に示す。照射開始直後の ^{88}Kr のR/Bは 6.0×10^{-6} であったが、その後、徐々に減少し、約 2.3×10^{-6} で定常となった。照射の進行に伴うR/Bの著しい増加は認められず、このことから燃料の著しい追加破損は生じなかったことがわかる。ただし、最後の第91サイクルでは、核種によるバラツキはあるものの、R/Bはわずかに増加しているように見える。これについては、第5章において、照射後の燃料コンパクトの断面組織観察およびEPMA観察、ならびに被覆燃料粒子の貫通破損率測定結果との関連で検討する。

Fig.3.11に、希ガスFPのR/Bの半減期依存性を示す。直線の傾きは0.3と得られた。第11次燃料体で検討したように、 ^{133}Xe の値が定常に達していないため、この核種のR/Bを

過小評価しているものと考えられる。定常では、 ^{133}Xe の値はより大きくなると考えられ、したがって直線の傾きは0.5に近い値になるものと推定される。

本燃料体の照射データを用いて、照射初期の希ガスFPのR/Bの減少過程における減少割合と、核種の半減期との関係を検討した。R/Bの減少割合を、各核種の崩壊定数 λ に対して表わしたのが、Fig.3.12である。この図において、R/Bの減少割合と崩壊定数 λ の間の相関係数は0.86であり、両者の間には明らかな相関が見られる。すなわち、半減期の長い(λの小さい)核種ほど、その減少割合が大きいことがわかる。この結果について、以下のように考えることができる。

OGL-1燃料体から冷却材中に放出される希ガスFPの大部分は、貫通破損した被覆燃料粒子から放出されるものと考えられる。貫通破損粒子からの放出において、希ガスFPが拡散するのに時間を要する箇所としては、燃料核(直径約600μmのUO₂)および黒鉛スリーブ(厚さ4mm)が考えられる。したがって、照射初期にR/Bが減少する理由としては、燃料核または黒鉛スリーブの照射による物性変化(特に前者)が考えられる。そのほか、破損粒子の燃料核からバッファ層や黒鉛マトリックス中に核分裂反応によって打ち込まれた後、拡散によって放出される希ガスFPが照射損傷による捕獲効果を受けることが考えられる。以上のような照射変化に起因する拡散速度の低下は、半減期の短い核種ほど効果が大きいはずであることから、照射の進行に伴って、希ガスFPの放出率は半減期の短い核種ほど低下することが期待される。しかし、Fig.3.12に示した本試験の結果は、これとは逆になっており、さらに検討が必要である。

3.5 希ガスFP放出挙動のまとめ

Fig.3.2に示したように、第6次～第12次のすべての燃料体について、照射初期における照射に伴う ^{88}Kr のR/Bの減少が認められ、1サイクル(約500時間)経過すると、ほぼ定常に到達することが確認された。

燃料コンパクト最高温度が1300～1400°Cの範囲における ^{88}Kr のR/Bと製造時の被覆燃料粒子の貫通破損率との関係を、Fig.3.13に示す。この図では、照射が1サイクル以上経過して、定常になった時のR/Bの値を用いた。ただし、第6次燃料体では、1400～1480°Cの値を用いた。この図から、照射中のR/Bと製造時の貫通破損率の間には、明らかな相関関係が存在することがわかる。Fig.3.13では、R/Bと貫通破損率の両対数表示において、両者の関係を示す傾きは1に近く、両者の間にはほぼ比例関係が認められる。

小型流動床で製造した被覆燃料粒子を用いた第6次～第8次燃料体では、燃料コンパクト最高温度1350°C程度での ^{88}Kr のR/B(定常値)は、 2×10^{-6} 以下の良好な値であった。一方、大型流動床によって製造したHTTR用量産試作燃料の第1作である第9次燃料体では、 ^{88}Kr のR/Bは 1.5×10^{-5} と比較的高かった。その後、被覆燃料粒子の貫通破損率の低下に対応して、第12次燃料体では、 ^{88}Kr のR/Bは 2×10^{-6} の良好なレベルまで低下した。

第6次～第11次燃料体については、通常条件下(燃料コンパクト最高温度が1350°C程度)での照射では、照射中の希ガスFP放出率の有意な増加は認められず、照射中の燃料の追加破損は認められなかった。第12次燃料体では、核種によっては、照射末期に希ガスFP放出率のわずかな増加が認められた。

第6次および第10次燃料体では、原子炉の過渡状態を模擬して、燃料コンパクト最高温度1500°C程度までの高温照射を行ったが、降温後の希ガスFP放出率は昇温前の値に戻り、高温照射に伴う燃料の追加破損は認められなかった。

参考文献

- (1) 福田幸朔、小川徹、鹿志村悟、林君夫、飛田勉、小林紀昭、湊和生、菊地啓修、村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”, JAERI-M 89-007 (1989).
- (2) 日本原子力研究所、“日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書 HTTR(高温工学試験研究炉)原子炉施設の設置”, 平成元年2月(平成元年11月一部補正)(平成2年10月一部補正).
- (3) 林君夫、塩沢周策、沢和弘、佐藤貞夫、丸山創、小林紀昭、福田幸朔, “高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全性評価”, JAERI-M 89-161 (1989).
- (4) 林君夫、沢和弘、塩沢周策、福田幸朔, “高温工学試験研究炉用燃料の健全性の評価と許容設計限界”, JAERI-M 89-162 (1989).
- (5) 井川勝市、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、林君夫、湊和生、岩本多實、伊丹宏治、伊藤尚徳、石本清、“OGL-1第1次、第2次燃料体の照射試験”, JAERI-M 83-012 (1983).
- (6) 福田幸朔、小林紀昭、林君夫、湊和生、菊池輝男、足立守、伊丹宏治、岩本多實、井川勝市、“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).
- (7) A.H.Booth et al., “Determination of the diffusion coefficient of fission xenon in UO₂ crystals and sintered compacts”, AECL No.692 (1958).
- (8) B.F.Myers, N.L.Baldwin, W.E.Bell and R.D.Burnette, “The behavior of fission product gases in HTGR fuel material”, GA-A 13723 (1977).

Table 3.1 Irradiation conditions of the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel assembly	6th	7th	8th	9th	10th	11th	12th	*1 HTTR
Irradiation Objective	Transient Irrad.	Domestic Gra. Matrix	Metal PP Behavior	Mass Prod. Fuel No.1	Mass prod. Fuel No.2	Mass Prod. Fuel No.3	Long-term Irrad.	
No. of Fuel Rods	1	3	1	1	1	3	1	---
No. of Compacts	20	60	20	20	20	54	19	14
Compact Size *2	MK-III	M1	MK-III	MK-III	MK-III	M2	H1,H2	H1
Irrad. Cycle No.	59	60-61,63	64-66	67-73	74-79	80-82	83-91	---
Total Cycle	1	3	3	7	6	3	9	---
Irrad. Time (EFPD) *3	21.9	58.0	53.8	145.5	130.2	62.3	195.0	660
Max. Irrad. Temp. (°C) × Time(h)	1480×280	1380	1390	1340	1500×95	1350	1340	1320
Steady Irrad. Temp. (°C)	----	1380	1360-1390	1330-1340	1330	1350	1340	---
Max. Burnup (%FIMA) *5	0.4	1.3	1.0	2.7	2.8	1.6	3.9	3.6
Max. Fast Neutron Fluence (m ⁻² , E>29fJ)	4.1×10^{23}	1.6×10^{24}	1.2×10^{24}	2.8×10^{24}	2.4×10^{24}	1.7×10^{24}	3.1×10^{24}	1.3×10^{25}

*1 Refs. JAERI-M 89-161 & 89-162 (1989).

*2 MK-III($36^{OD} \times 18^{ID} \times 36^L$), M1($24^{OD} \times 8^{ID} \times 36^L$), M2($24^{OD} \times 8^{ID} \times 40^L$), H1($26^{OD} \times 10^{ID} \times 39^L$), H2($26^{OD} \times 10^{ID} \times 18^L$).

*3 Effective full power days.

*4 Ref. JAERI-M 90-115 (1990) p.14.

*5 Calculated by the STEPDSP2 code.

Table 3.2 Summary of irradiation histories of the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

燃料体	照射サイクル	燃料コンパクト最高温度(°C)	燃料体出力 ^{*1} (kW)	1次系He流量(g/s)	黒鉛スリーブ温度(°C)		燃料体ガス温度(°C)		黒鉛プロック温度(°C) ^{*4}
					炉心側 ^{*2}	反対側 ^{*2}	入口	出口 ^{*3}	
6th	59	1480	44.7	50	1165	1165	675	972	842
7th	60	1377	77.7	80	---	---	672	967	880
	61	1377	72.3	80	---	---	707	989	898
	63	1380	72.8	80	---	---	722	995	906
8th	64	1377	45.0	55	1138	988	646	905	787
	65	1379	42.0	55	1126	976	626	891	778
	66	1391	41.9	68	1108	959	689	917	801
9th	67	1341	44.2	60	1123	1069	684	906	805
	68	1343	42.7	60	1106	1063	669	896	792
	69	1333	40.9	60	1097	1069	672	902	801
	70	1333	40.5	60	1089	1068	672	898	794
	71	1335	43.8	65	1053	1033	626	851	741
	72	1334	42.1	65	1048	1041	637	853	741
	73	1339	42.5	65	1053	1057	640	858	744
10th	74	1330 ^{*5}	48.8	65.0	1036	961	543	686	693
	75	1330 ^{*5}	45.0	64.7	1001	959	548	677	675
	76	1330 ^{*5}	48.2	65.3	1011	981	533	672	664
	77	1330 ^{*5}	47.9	65.3	1009	1004	545	681	673
	78	1330 ^{*5}	47.6	65.2	1004	1001	540	678	671
	79	1490 ^{*5}	47.7	50.6	1142	1149	631	801	793
	80	1344	75.3	75.0	---	---	644	814	829
11th	81	1354 ^{*5}	75.6	74.9	---	---	640	811	820
	82	1355 ^{*5}	76.1	75.0	---	---	660	814	821
	83	1332	32.3	45.4	1105	1088	636	777	770
12th	84	1335	31.9	44.9	1110	1096	636	779	772
	85	1339	31.1	44.8	1112	1097	640	767	769
	86	1338	30.6	44.2	1105	1101	645	772	778
	87	1331	30.7	44.4	1085	1095	635	761	763
	88	1340	31.9	45.3	1070	1081	585	718	721
	89	1341	33.2	45.5	1065	1081	585	716	717
	90	1339	33.5	44.8	1061	1080	574	708	705
	91	1339	34.2	44.7	1053	1076	562	695	698

*1 計算コードSTEPDSP2による値

*2 炉心側は、熱電対の位置が炉心の径方向中心に近い。反対側は、炉心から遠い位置。

*3 混合ガス温度の計算値。

*4 炉心側の熱電対の値。

*5 推定値。

Table 3.3 Irradiation histories of 6th-9th OGL-1 fuel assemblies.

試料	照射サイクル	積算照射時間(h)	燃料コンパクト最高温度(°C)	線出力最高値(W/cm)	積算燃焼度最高値(MWd/tU)
第6次	59	525	1,480	820	3,580
第7次	60	465	1,377	475 * ¹	3,670
	61	934	1,377	442 * ¹	7,114
	63	1,392	1,380	445 * ¹	10,500
第8次	64	276	1,377	825	1,871
	65	765	1,379	770	4,965
	66	1,291	1,391	768	8,285
第9次	67	527	1,341	810	3,467
	68	1,056	1,343	783	6,831
	69	1,530	1,333	750	9,718
	70	2,013	1,333	742	12,629
	71	2,536	1,335	803	16,040
	72	3,005	1,334	772	18,981
	73	3,492	1,339	779	22,062

*1 燃料棒3本の平均値

Table 3.4 Irradiation history of the 10th OGL-1 fuel assembly.

照射サイクル	照射開始日 および 照射終了日	照射時間(h) ()は積算値	燃料コンパクト最高 温度(℃)	線出力最高値 (W/cm)	燃焼度最高値 (MWd/tU) ()は積算値
74	昭和61年 5月21日 昭和61年 6月15日	529	1,330	896	3,950
75	昭和61年 7月 8日 昭和61年 8月 2日	528 (1,057)	1,330	825	3,630 (7,580)
76	昭和61年11月28日 昭和61年12月23日	528 (1,584)	1,330	883	3,885 (11,465)
77	昭和62年 1月28日 昭和62年 2月22日	530 (2,114)	1,330	878	3,978 (15,343)
78	昭和62年 3月17日 昭和62年 4月11日	527 (2,641)	1,330	872	3,851 (19,194)
79	昭和62年 6月 2日 昭和62年 6月27日	484 (3,125)	1,330- 1,500	875	3,865 (23,059)

Table 3.5 Irradiation history of the 11th OGL-1 fuel assembly.

照射サイクル	照射開始日 および 照射終了日	照射時間 (h), ()は 積算値	燃料コンパ クト最高 温度(℃)	線出力 最高値 (W/cm)	燃料棒No.2の 燃焼度(MWd/tU) ()は積算値	燃料棒の出力比 (燃料棒3本の平均 値で規格化)
80	昭和63年 2月 3日 昭和63年 2月28日	526	No.1 1,095 No.2 1,344 No.3 1,324	460	4,561	No.1 0.847 No.2 1.131 No.3 1.022
81	昭和63年 3月23日 昭和63年 4月17日	527 (1,053)	No.1 1,105 No.2 1,354 No.3 1,334	462	4,504 (9,065)	No.1 0.849 No.2 1.11 No.3 1.041
82	昭和63年 6月 1日 昭和63年 7月 2日	441 (1,494)	No.1 1,106 No.2 1,355 No.3 1,335	465	3,773 (12,838)	No.1 0.852 No.2 1.105 No.3 1.043

Table 3.6 Irradiation history of the 12th OGL-1 fuel assembly.

照射サイクル	照射開始日 および 照射終了日	照射時間(h) ()は積算値	燃料コンパクト最高 温度(°C)	線出力最高値 (W/cm)	燃焼度最高値 (MWd/tU) ()は積算値
83	昭和63年10月13日 昭和63年11月 8日	473	1,332	593	3,265
84	昭和63年11月29日 昭和63年12月24日	527 (1,000)	1,335	585	3,588 (6,853)
85	平成元年 2月 1日 平成元年 2月26日	524 (1,524)	1,339	570	3,476 (10,329)
86	平成元年 3月22日 平成元年 4月16日	532 (2,056)	1,338	561	3,474 (13,803)
87	平成元年 6月 6日 平成元年 7月 1日	504 (2,560)	1,331	562	3,279 (17,100)
88	平成元年11月24日 平成元年12月19日	530 (3,090)	1,340	584	3,602 (20,702)
89	平成 2年 1月25日 平成 2年 2月21日	533 (3,623)	1,341	608	3,772 (24,474)
90	平成 2年 3月17日 平成 2年 4月11日	532 (4,155)	1,339	614	3,802 (28,276)
91	平成 2年 5月 9日 平成 2年 6月 3日	525 (4,680)	1,339	627	3,831 (32,107)

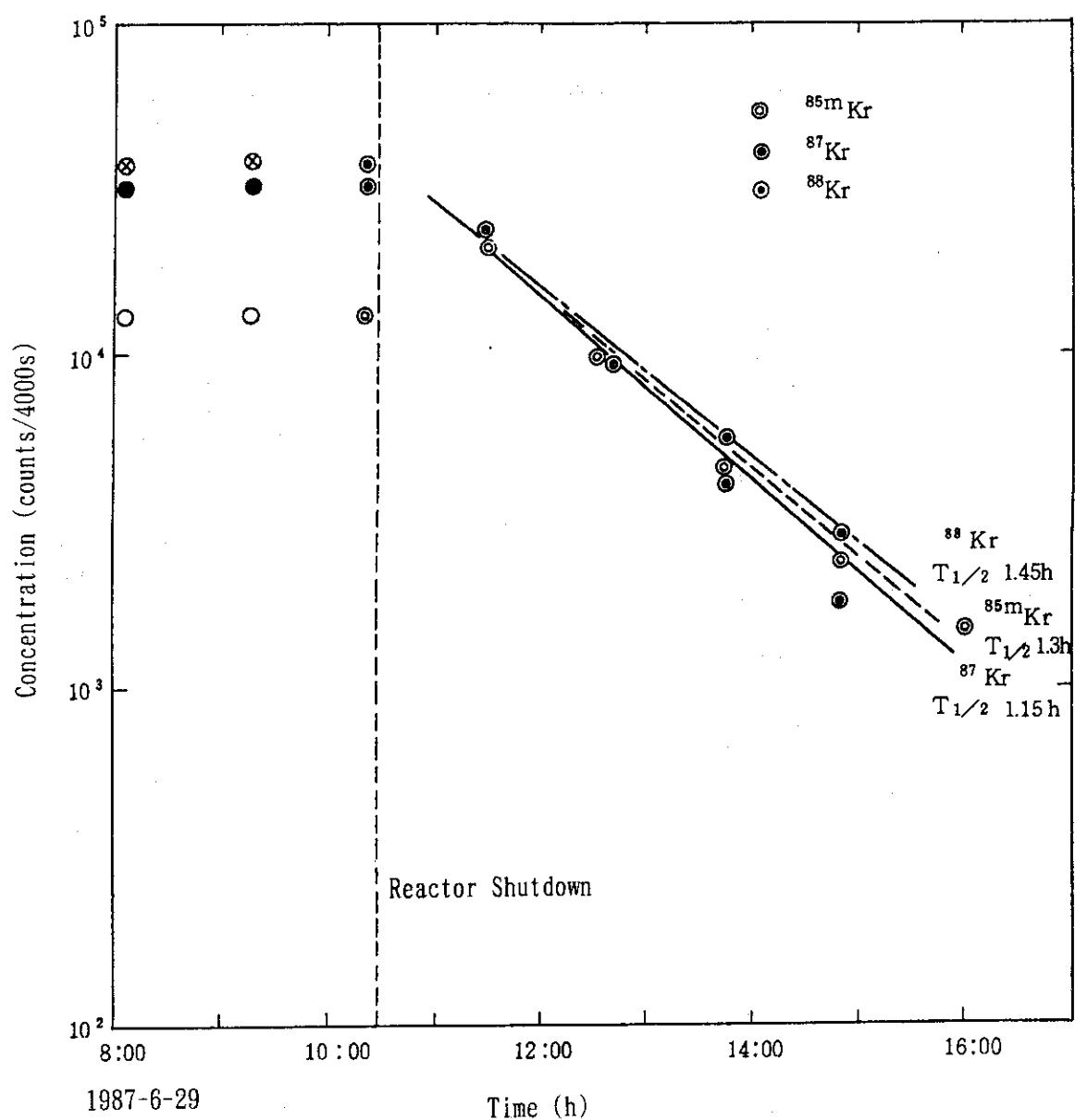
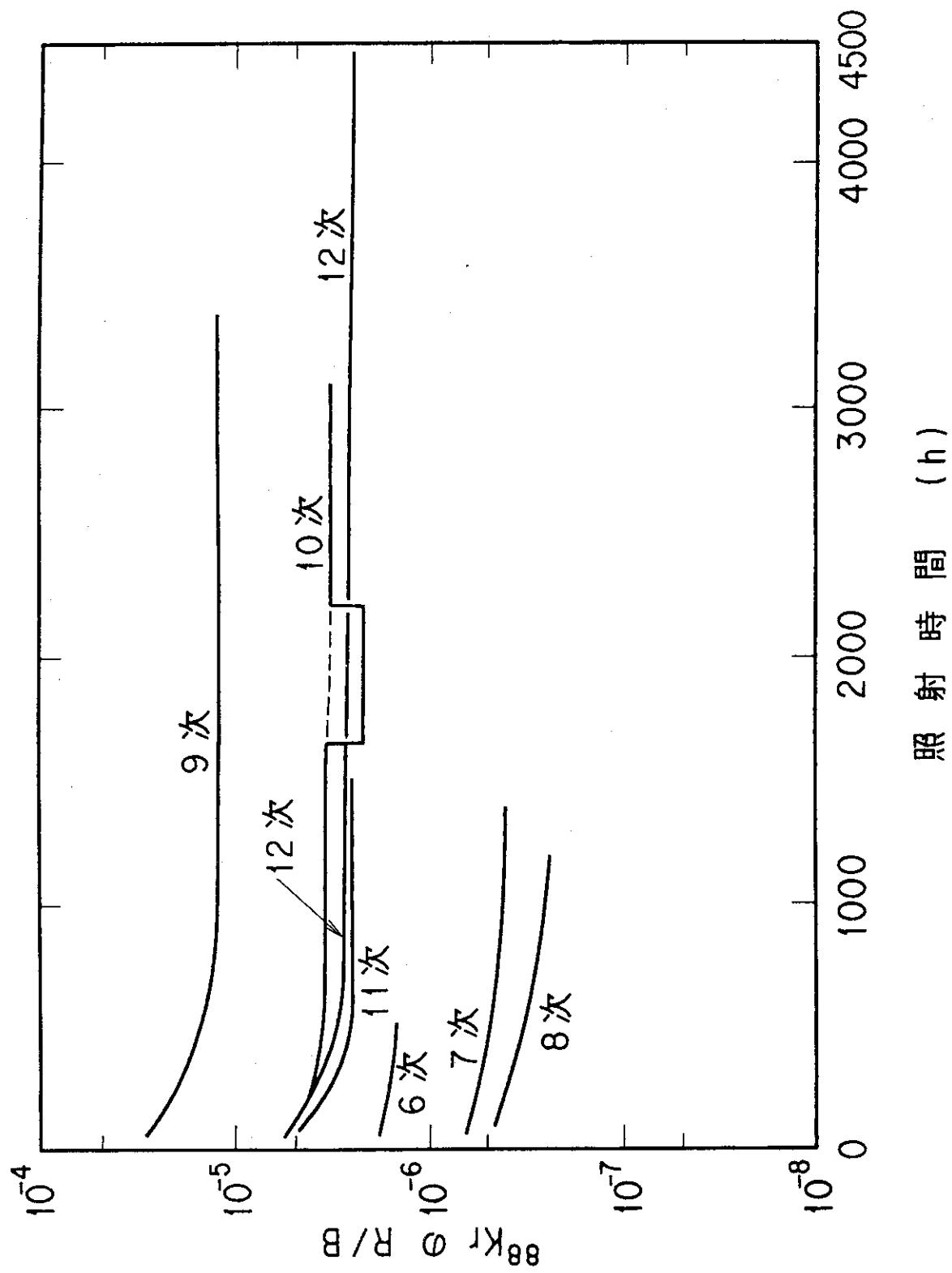


Fig. 3.1 Change of Kr isotope concentration in primary coolant after reactor shutdown.

Fig. 3.2 Variation of ^{88}Kr release (R/B) in the 6th-12th OGL-1 fuel irradiation.

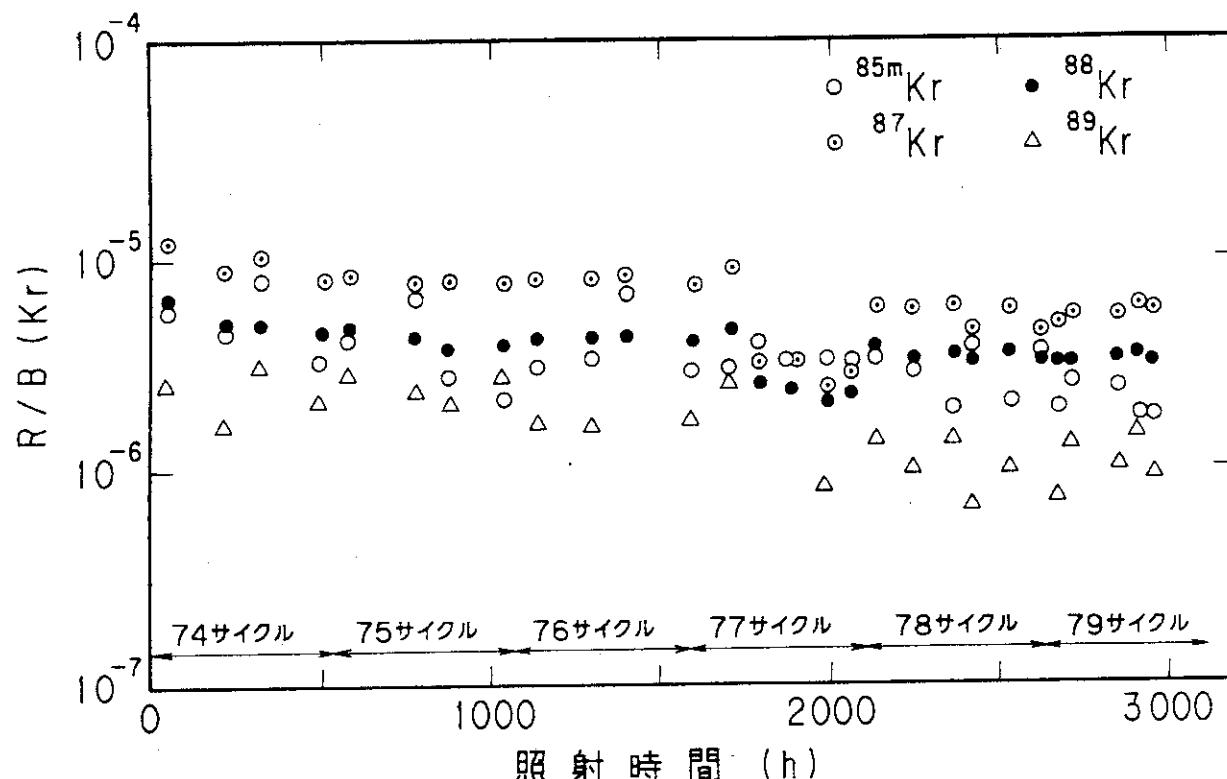


Fig. 3.3 Variation of Kr release (R/B) in the 10th OGL-1 fuel irradiation;
(maximum fuel compact temperature, 1330-1370°C).

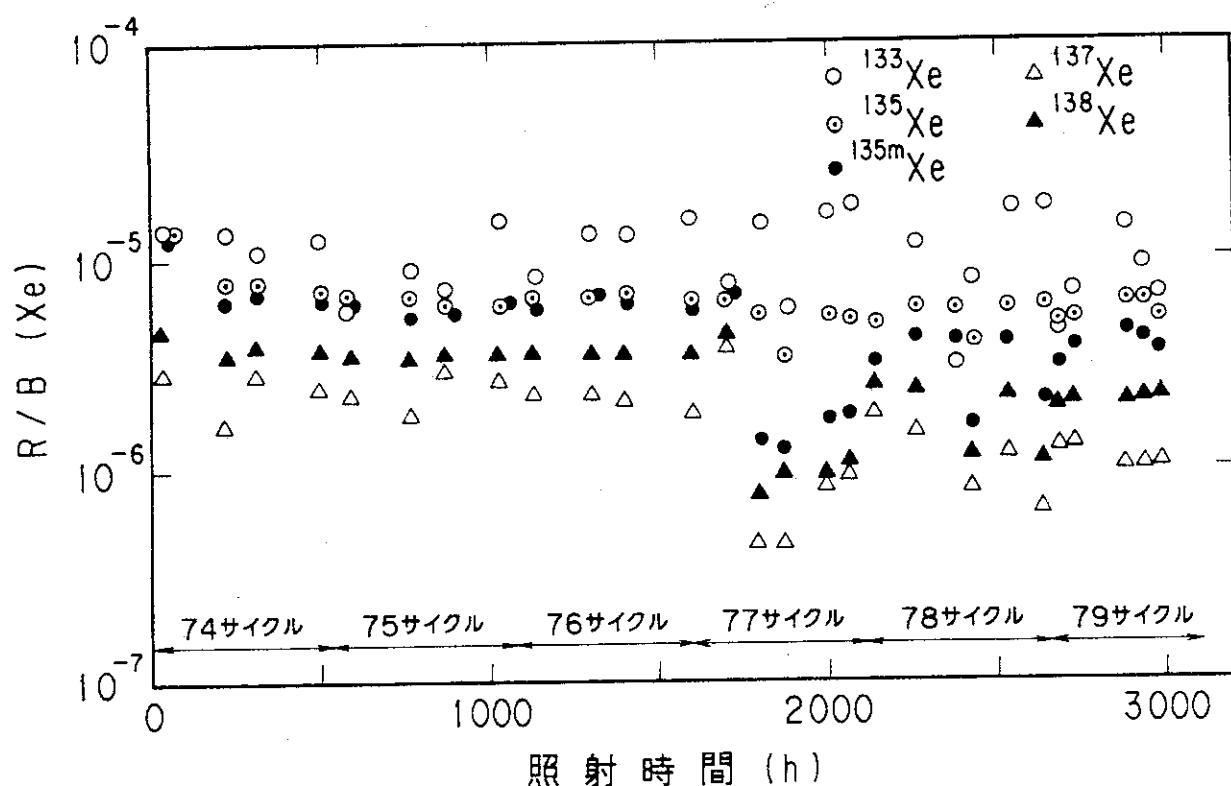


Fig. 3.4 Variation of Xe release (R/B) in the 10th OGL-1 fuel irradiation;
(maximum fuel compact temperature, 1330-1370°C).

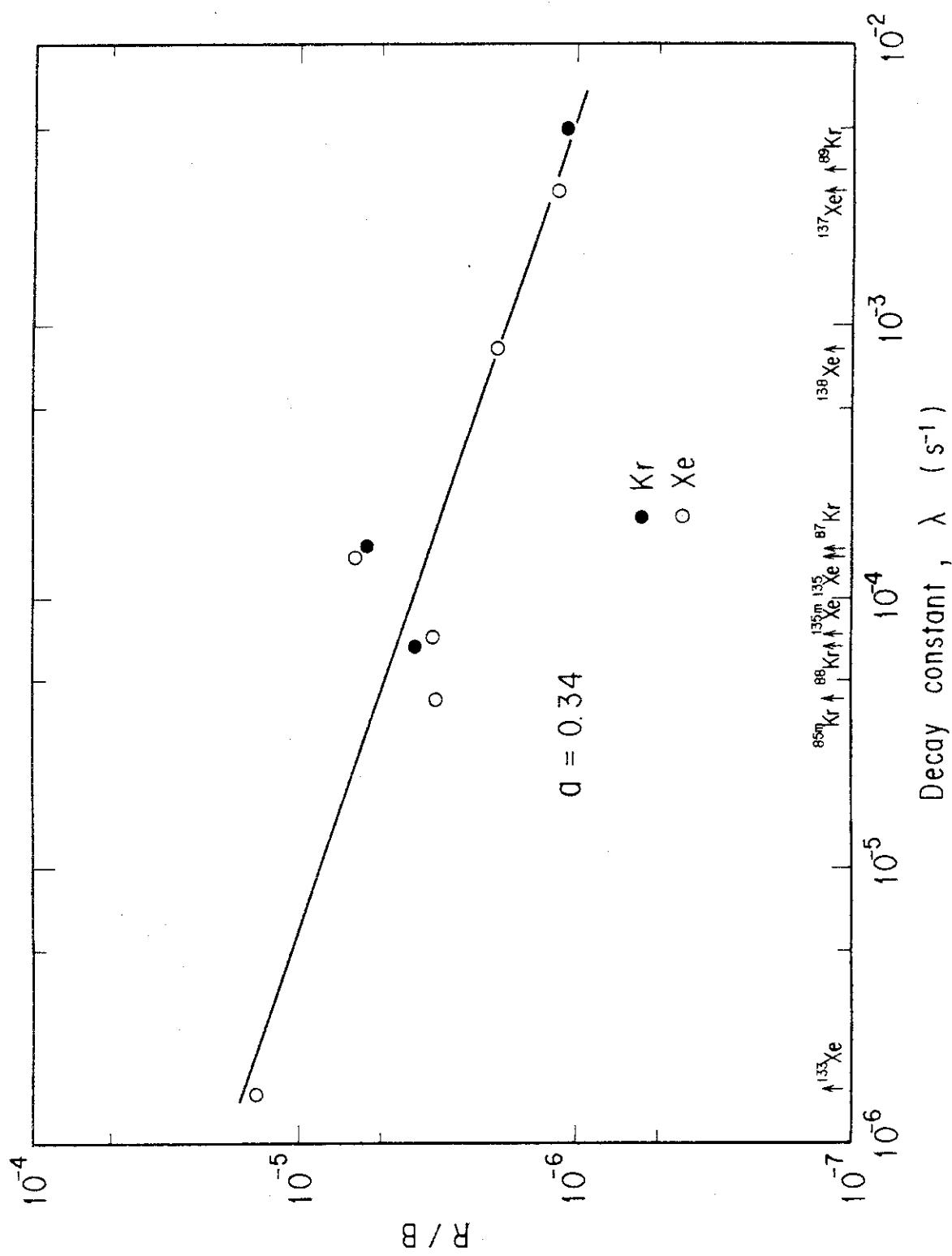


Fig. 3.5 Dependence of fission gas release (R/B) on the decay constant in the 10th OGL-1 fuel irradiation.

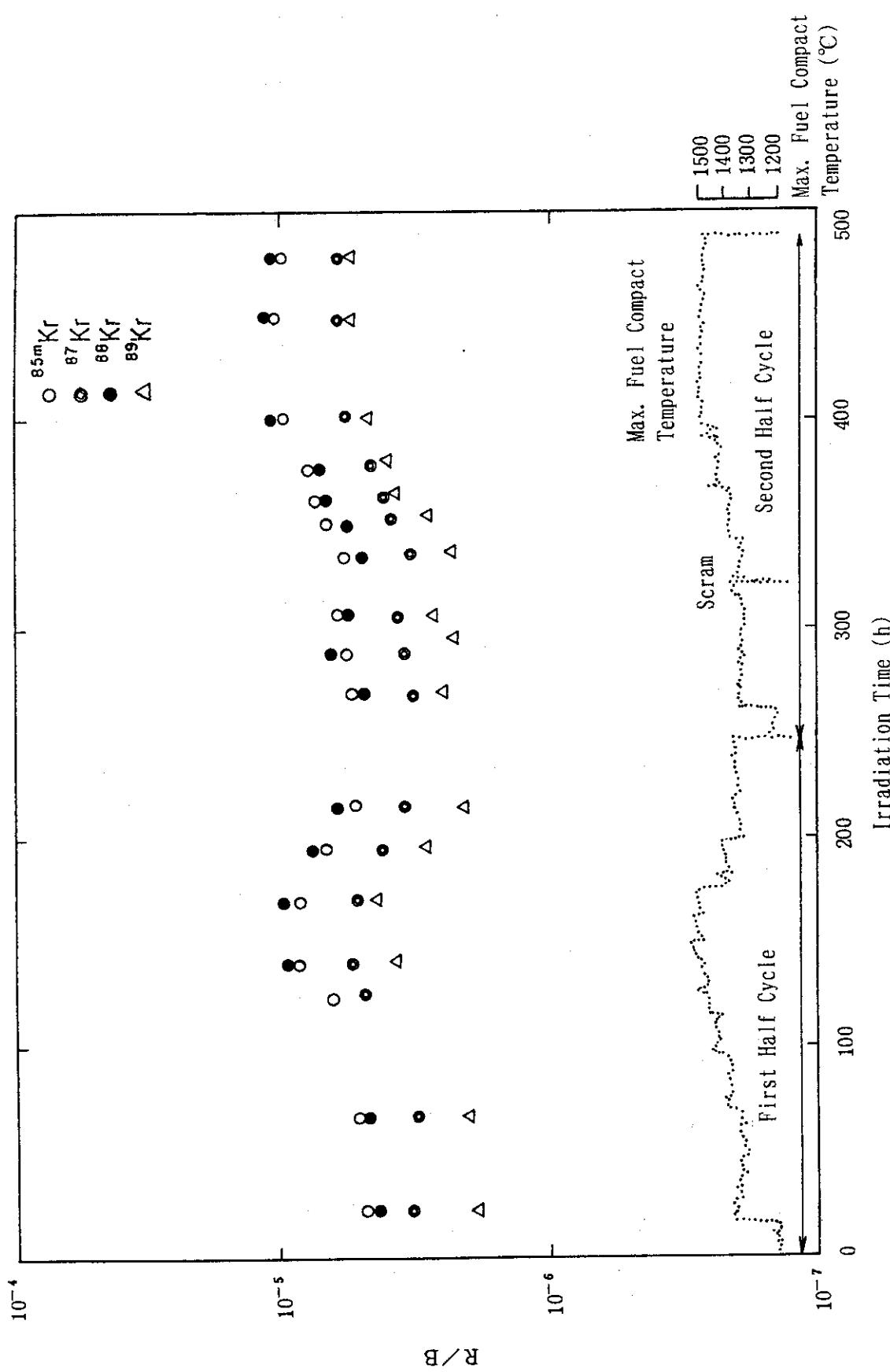


Fig. 3.6 Change of fission gas release following the transient in the maximum fuel compact temperature during the last irradiation cycle of the 10th OGL-1 fuel irradiation.

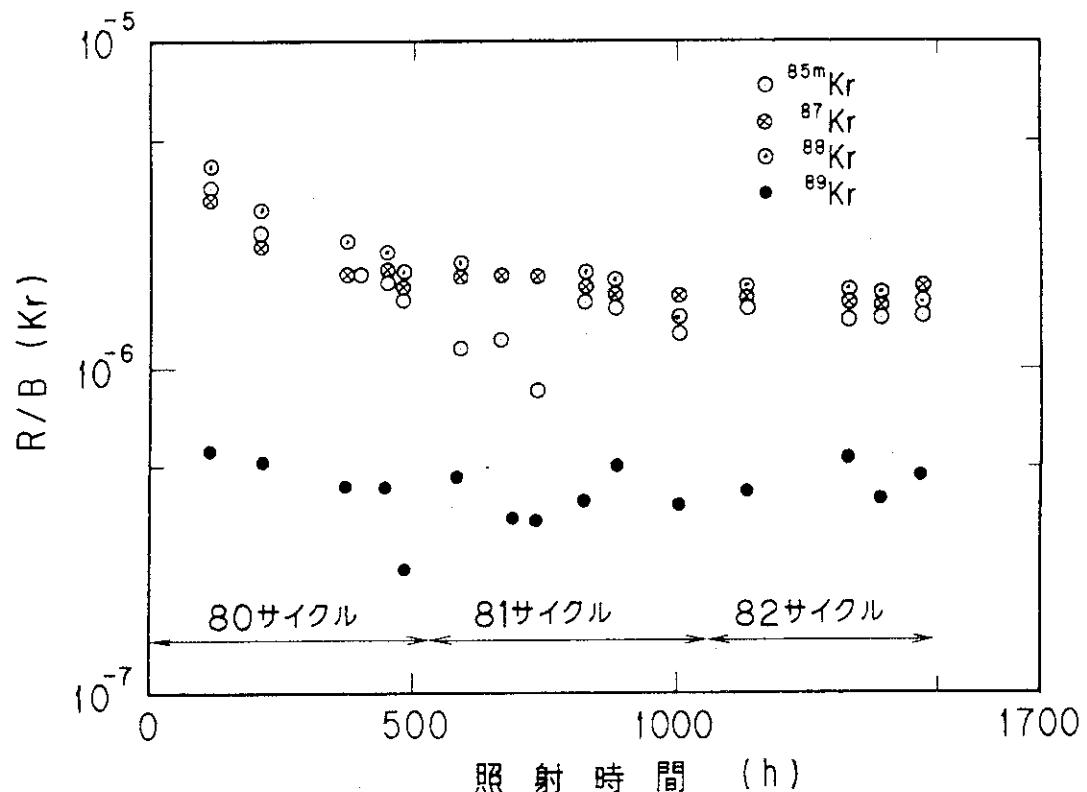


Fig. 3.7 Variation of Kr gas release (R/B) in the 11th OGL-1 fuel irradiation.

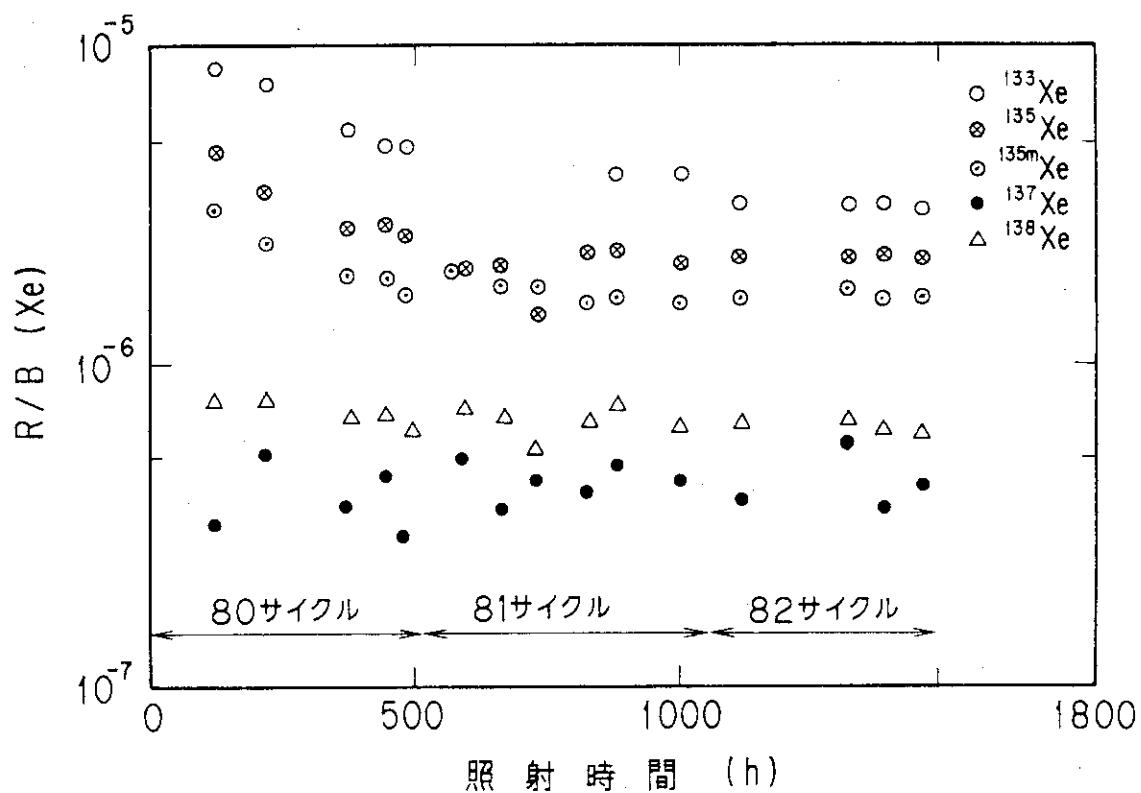


Fig. 3.8 Variation of Xe gas release (R/B) in the 11th OGL-1 fuel irradiation.

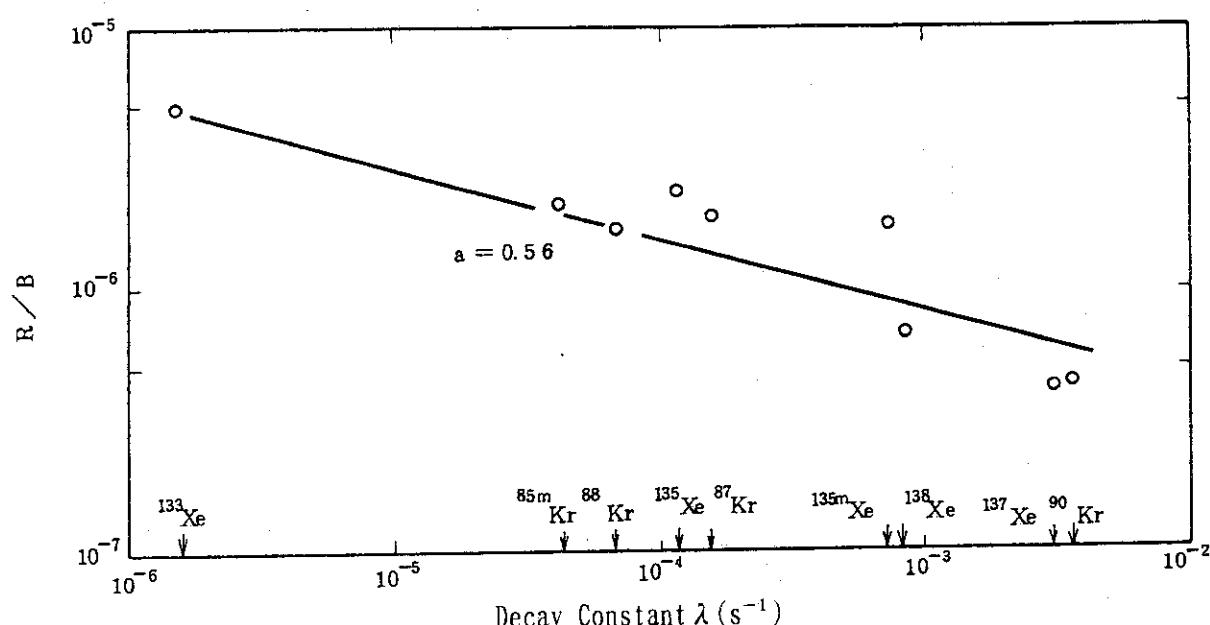


Fig. 3.9 Dependence of fission gas release (R/B) on the decay constant in the 11th OGL-1 fuel irradiation.

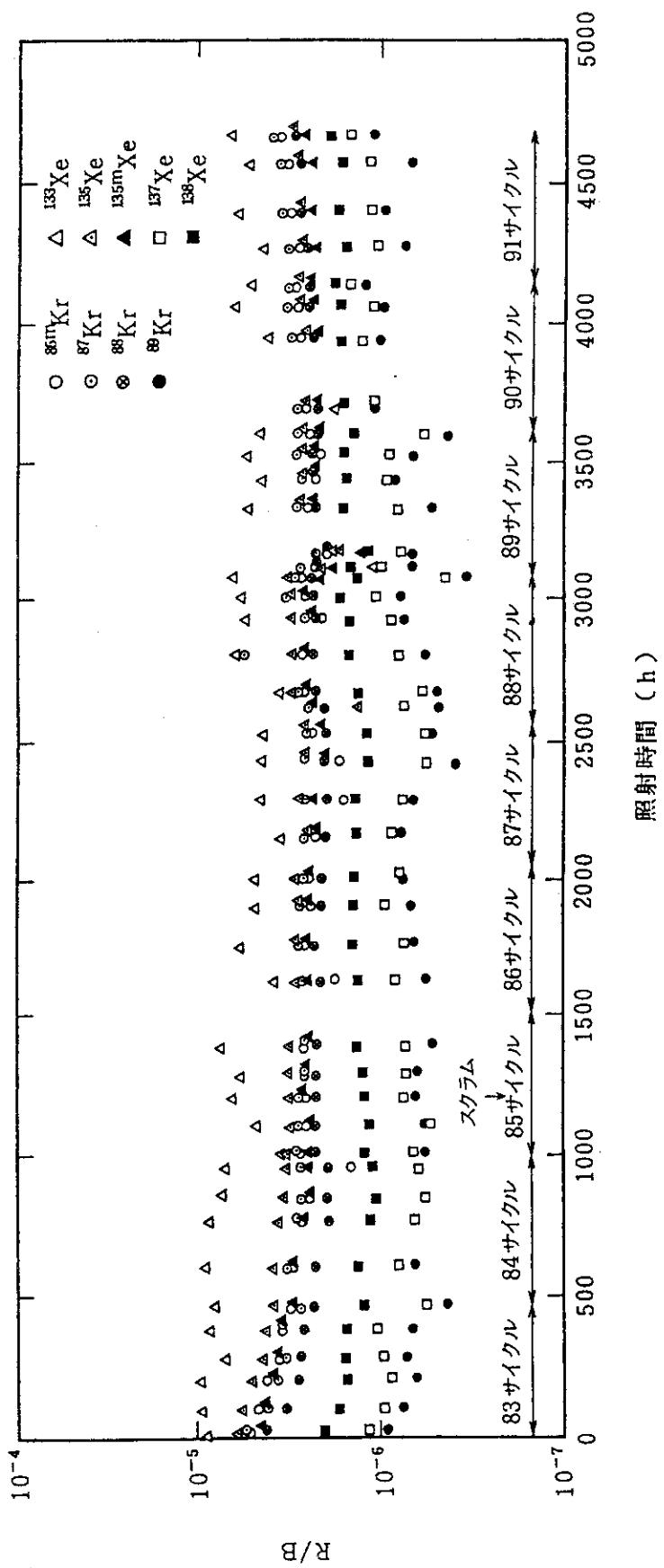


Fig. 3.10 Variation of fission gas release (R/B) in the 12th 0GL-1 fuel irradiation.

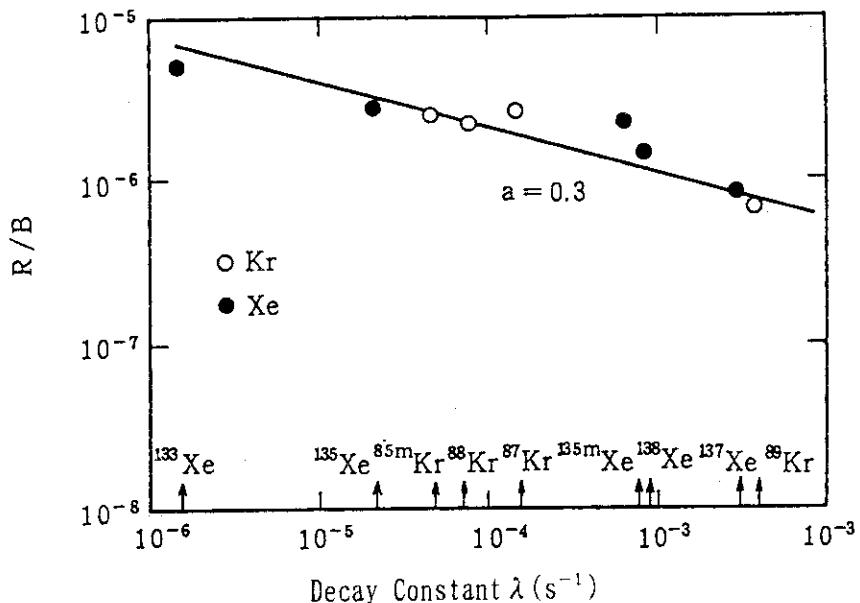


Fig. 3.11 Dependence of fission gas release (R/B) on the decay constant in the 12th OGL-1 fuel irradiation.

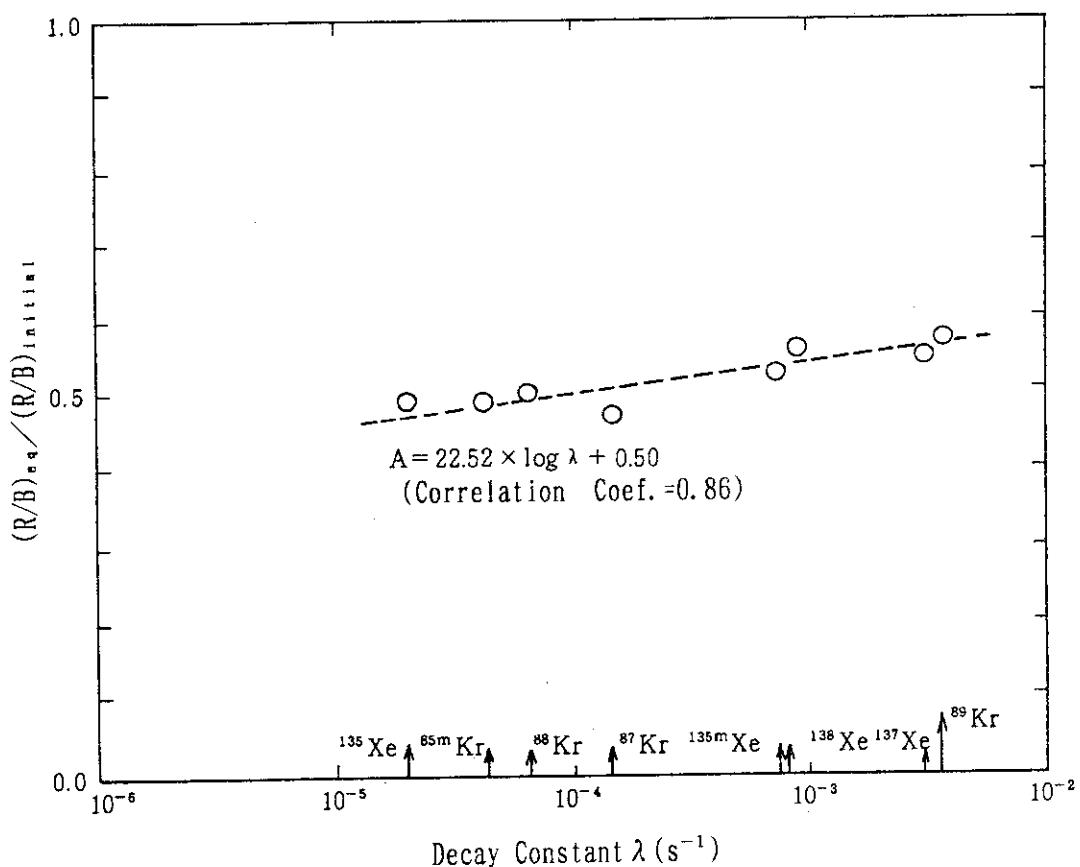


Fig. 3.12 Relationship between the decay constant and the ratio of equilibrium fission gas release (R/B) to the initial release in the 12th OGL-1 fuel irradiation.

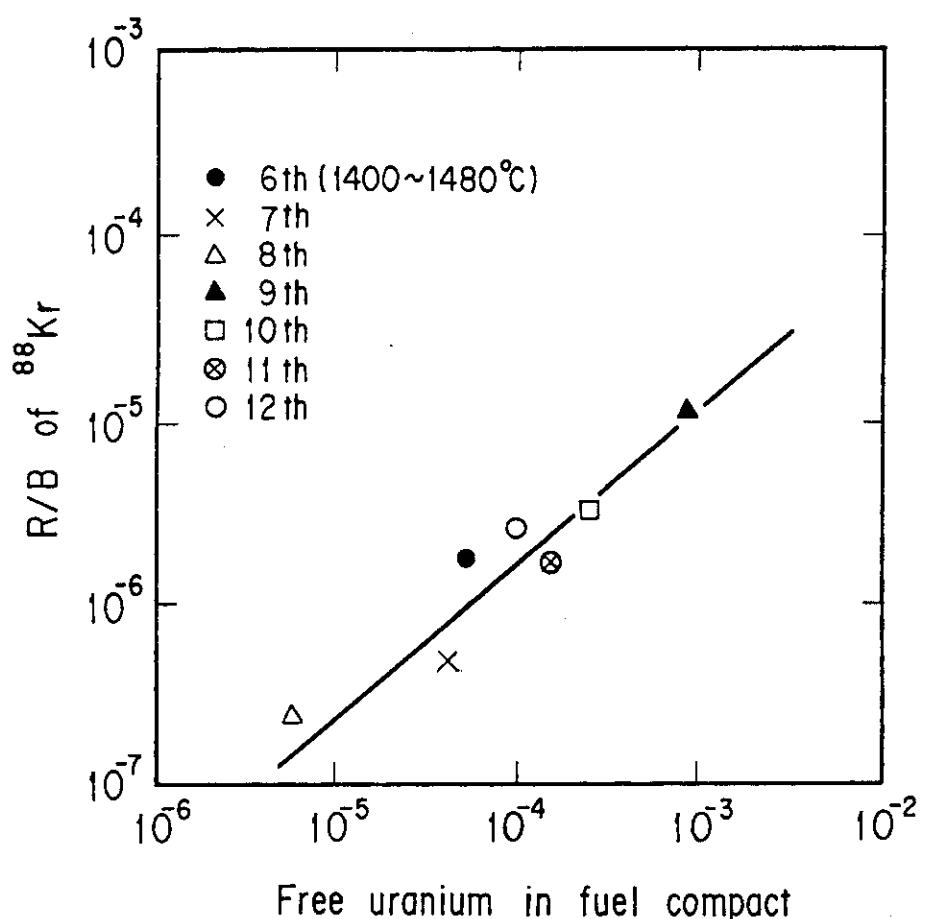


Fig. 3.13 Relationship between ^{88}Kr release (R/B) and free uranium fraction in the 6th-12th OGL-1 fuel irradiation at $1300\sim 1400^\circ\text{C}$.

4. 燃料体および燃料棒の照射後試験

4.1 はじめに

OGL-1 における照射試験の大きな特徴は、HTTRの燃料体型式であるいわゆるピンインブロック型の燃料体を、高圧ヘリウムガスを冷却材として循環させながら照射することである。したがって、燃料コンパクトのみならず、黒鉛スリーブ、黒鉛ブロック等を含んだ燃料体としての照射健全性を試験できるわけである。この章では、OGL-1 照射試験に特徴的な、燃料体および燃料棒についての照射後試験の結果を述べる。

なお、OGL-1 第1次および第2次燃料体ならびに第3次～第5次燃料体の照射後試験については、それぞれ既に報告済みである⁽¹⁾、⁽²⁾。また、第1次～第9次燃料体の黒鉛スリーブの照射寸法変化については、燃料コンパクトの照射寸法変化とともに、別に報告されている⁽³⁾。さらに、第4次～第7次燃料体の黒鉛ブロックから試験片を採取し、熱膨張率、電気比抵抗、ヤング率等の特性変化を調べたが、これらは、松尾ら⁽⁴⁾によって報告されている。

4.2 照射後試験の概要

OGL-1 燃料体の照射後試験の項目および手順を Fig. 4.1 に示す。試験の項目等については、第6次から第10次燃料体までほぼ同様であるが、第11次および第12次燃料体においては、今までの照射後試験結果を考慮し、Fig. 4.1 に示した試験項目のうち、後で述べるように、いくつかの項目を省略した。

燃料体については、外観検査およびX線検査を実施した。燃料体についての検査が終了した後、3本のハステロイ-X材のタイロッドの上部を切断し、燃料体を黒鉛ブロック、燃料棒、およびハステロイ-X材の金属部品に解体した。また、黒鉛ブロックに装荷されていたフルエンスモニタを取り出した。黒鉛ブロックについては、外観検査、重量検査、内表面検査、および寸法・曲がり測定を実施した。金属部品については、外観検査を実施した。燃料棒については、外観検査、重量検査、およびケースキャニングを行い、その後、端栓を止めている無頭ねじを緩め端栓を取り外し、燃料棒を燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、および黒鉛部品に解体した。黒鉛スリーブについては、外観検査、重量検査、内表面検査、および寸法・曲がり測定を実施し、黒鉛部品については、外観検査および重量検査を行った。

フルエンスモニタの測定から得られた、各燃料体の黒鉛ブロックの高速中性子照射量を Table 4.1 に示す。ここに示した値は、黒鉛ブロック外周部のJMTR炉心中心側の軸方向最大値であり、黒鉛ブロック、燃料コンパクトなどの照射量の算定の基礎

になるものである⁽⁵⁾。照射量が最も大きかった燃料体は第12次燃料体であり、約 $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ($E > 29 \text{ fJ}$) である。ここで注意しなければならないのは、OGL-1照射孔は JMTRの反射体領域に設置されているため、JMTR炉心中心側とその反対側とでは、高速中性子照射量におよそ2倍のひらきがあることである⁽⁶⁾。代表例として、Fig. 4.2 に、第12次燃料体の黒鉛ブロックに装荷されていたフルエンスモニタの測定値から得られた高速中性子照射量 ($E > 160 \text{ fJ}$) 分布を示す。ここで、 $E > 160 \text{ fJ}$ の高速中性子照射量を $E > 29 \text{ fJ}$ の高速中性子照射量に換算するには、2.48 倍する必要がある。黒鉛ブロックおよび黒鉛スリーブの曲がりは、このような高速中性子照射量の径方向分布の下で生じているのである。

以下に、各照射後試験の結果について述べる。なお、燃料コンパクトの照射後試験については、次章で扱う。

4.3 燃料体および黒鉛ブロック

4.3.1 燃料体の外観およびX線検査

第6次燃料体の照射後の燃料体の外観写真を、代表例として、Photo. 4.1 に示す。燃料体の外観検査では、煤により外表面が黒ずんでいるのが見られたが、どの燃料体においても欠け、クラック等の異状は認められなかった。燃料棒の保持に関する異状は認められなかった。第6次から第10次までの燃料体についてはX線検査を実施したが、この検査においても異状はとくに認められなかった。

なお、第7次から第12次燃料体までの照射後の燃料体の外観写真は、付録2にまとめて示す。

4.3.2 黒鉛ブロックの外観および重量検査

黒鉛ブロックの外観検査では、燃料体の外観検査では見ることのできなかった黒鉛ブロック端面付近の観察を行った。燃料体解体前には、黒鉛ブロック端面付近は、ハスティロイーX材の金属部品で覆われていた。外観検査では、どの燃料体においても欠け、クラック等の異状は認められなかった。第11次燃料体の黒鉛ブロックの重量検査は実施しなかったが、他の黒鉛ブロックでは、照射による重量の顕著な変化は認められなかった。

4.3.3 黒鉛ブロックの内表面検査

第6次から第10次燃料体までの黒鉛ブロックに対して、燃料棒挿入孔の内表面をボアスコープにより観察した。1つの燃料棒挿入孔に対して、全長にわたり周方向に3つの角度でそれぞれ観察し、観察視野に異状等が見られたときには全周にわたる観察を実施した。

第6次燃料体の黒鉛ブロックでは、機械加工による傷および寸法測定具による傷など

が見られたが、欠け、クラック等の異状は認められなかった。燃料棒を支持するための溝の部分においても異状は認められず、健全であった。

第7次燃料体の黒鉛ブロックの観察では、第6次燃料体の場合とほぼ同様の結果が得られたが、4ヵ所においてクラックのような長さ数mmの傷が見られた。Photo. 4.2 にその一例を示す。これらは、クラックと言うよりも、少し深いひっかき傷のようである。この他にはとくに異状は認められなかった。

第8次燃料体の黒鉛ブロックでは、煤により燃料棒挿入孔の内表面が黒ずんでいたため、大部分において通常の観察が不可能であった。観察ができた部分においては、機械加工による傷および寸法測定具による傷などが見られたが、欠け、クラック等の異状は認められなかった。

第9次および第10次燃料体の黒鉛ブロックでは、とくに異状は認められず、燃料棒支持溝においても異状は認められず、健全であった。

4.3.4 黒鉛ブロックの寸法・曲がり測定

OGL-1燃料体寸法測定装置⁽⁷⁾を用いて、黒鉛ブロックの寸法・曲がり測定を実施した。この装置による寸法・曲がり測定の原理および方法は、既に詳しく報告している⁽⁶⁾。照射前の黒鉛ブロックでは、定盤と厚さ計を用いた測定を実施しており、曲がり量は0.1mm以下であった。また、第8次燃料体の照射前の黒鉛ブロックについては、照射後に実施するのと同じ方法で、OGL-1燃料体寸法測定装置を用いた測定も実施した。

第6次から第10次および第12次燃料体の黒鉛ブロックの曲がり測定結果を、Fig. 4.3(a)～Fig. 4.8(a)にそれぞれ示す。これらの図では、黒鉛ブロックの上下端を原点に一致させたときの曲がりの様子を示しており、全長をほぼ等分した10点における中心線からの変位を順に結んだものである。曲がりの発生する機構は、4.2 節で述べたように、燃料体のJMTR炉心中心側とその反対側とでは高速中性子照射量に約2倍のひらきがあるため、黒鉛の照射寸法変化が均一ではないことに起因しているためと考えられる。

第6次から第10次燃料体の黒鉛ブロックでは、曲がり量はどれも0.1mm以下であった。曲がりの向きは、照射によって曲がりが生じると考えた場合の曲がりの向き（炉心中心と反対の向き）に必ずしも一致しなかった。照射前後に同一装置で測定した第8次燃料体の黒鉛ブロックの場合、照射前後ともに曲がりは炉心中心の向きであったが、曲がり量は小さくなり、照射の効果が現われていると考えられる。これらの黒鉛ブロックについては、曲がり量が小さく、照射と曲がりの関係について詳しい議論はできない。

第12次燃料体の黒鉛ブロックでは、曲がり量は0.15mmであり、曲がりの向きは照射によって生じると考えた場合の曲がりの向きに一致していた。第12次燃料体は、ここで試験対象にしたOGL-1燃料体のうちで最も長く照射されたものであり、高速中性子照射量の軸方向最大値は、約 $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ($E > 29 \text{ fJ}$) であった。

4.4 燃料棒および黒鉛スリーブ

4.4.1 燃料棒の外観および重量検査

第6次燃料体の照射後の燃料棒の外観写真を、代表例として、Photo. 4.3 に示す。燃料棒の外観は、黒鉛ブロックの外観と同様に、煤により黒ずんでいたが、どの燃料棒においても、欠け、クラック等の異状は認められなかった。

燃料棒の重量検査では、照射による顕著な変化は認められなかった。ただし、第11次燃料体の燃料棒に対しては、重量検査を実施しなかった。

なお、第7次から第12次燃料体までの照射後の燃料棒の外観写真は、付録2にまとめて示す。

4.4.2 燃料棒の γ -スキャニング

第6次から第10次燃料体までの燃料棒に対して、エネルギーが約0.05~2.3keVの γ 線強度の軸方向分布を測定した。代表例として、第10次燃料体の燃料棒の測定結果をFig. 4.9 に示す。この分布は、燃料棒の軸方向の発熱分布にほぼ等しいと考えられる。また、とくに異状は見られなかった。

4.4.3 黒鉛スリーブおよび黒鉛部品の外観および重量検査

黒鉛スリーブの外観検査では、燃料棒の外観検査では見ることのできなかった、黒鉛スリーブの上端部、ねじ部等を観察した。また、黒鉛部品としては、押えブロックおよび端栓の外観を検査した。これらの外観検査においては、欠け、クラック等の異状は認められなかった。

黒鉛スリーブおよび黒鉛部品の重量検査においては、照射による顕著な変化は認められず、異状はなかった。

なお、第11次燃料体の場合は、これらの外観・重量検査をすべて省略し、第12次燃料体の場合は、黒鉛部品の外観検査のみを実施した。

4.4.4 黒鉛スリーブの内表面検査

黒鉛ブロックの内表面検査の場合と同様に、黒鉛スリーブの内表面をボアスコープにより観察した。検査の対象は、第6次から第10次燃料体の黒鉛スリーブである。それぞれの黒鉛スリーブに対して、全長にわたり3方向から観察した。ただし、観察視野に異状等が見られたときには全周にわたる観察を実施した。

観察したすべての黒鉛スリーブにおいて、機械加工による傷および寸法測定具による傷などが見られたが、欠け、クラック等の異状は認められなかった。例として、第6次燃料体の黒鉛スリーブにおいて見られた傷などを Photo. 4.4 に示す。第7次および第8次燃料体の黒鉛スリーブにおいては、傷のほかに、Photo. 4.5 に示すように、しみのようなものが数ヶ所で見られた。これらは、燃料コンパクトの外表面近傍の破損粒子が原因となってできた可能性がある。詳細については、第5章を参照されたい。

4.4.5 黒鉛スリーブの寸法・曲がり測定

黒鉛ブロックに対する測定の場合と同様に、黒鉛スリーブの寸法・曲がり測定をOGL-1燃料体寸法測定装置を用いて行った。照射前の黒鉛スリーブについては、定盤と厚さ計を用いて測定しており、曲がり量は、0.1mm以下であった。また、第8次および第12次燃料体の照射前の黒鉛スリーブについては、照射後に実施するのと同じ方法で、OGL-1燃料体寸法測定装置を用いて測定を実施した。これは、照射による寸法および曲がりの変化を詳しく調べるためにある。

第6次から第10次燃料体および第12次燃料体の黒鉛スリーブの曲がり測定結果を、Fig. 4.3(b)～Fig. 4.8(b)にそれぞれ示す。これらの図では、黒鉛ブロックの場合と同様に、黒鉛スリーブの上下端を結んだ直線からの変位量として曲がりを表わしている。第6次燃料体の黒鉛スリーブでは、JMTR炉心中心と反対向きに、約0.4mmの曲がりが生じていた。この曲がりの向きは、照射によって曲がりが生じると考えた場合の向きに一致していた。第7次燃料体の黒鉛スリーブでは、スリーブAおよびCは、JMTR炉心中心と反対向きに0.2～0.3mm曲がっていた。スリーブBは約0.5mm曲がっていたが、曲がりの向きはJMTR炉心中心と反対向きというわけではなかった。照射前にも同様な測定を実施した第8次燃料体の黒鉛スリーブでは、照射前にはJMTR炉心中心の向きに約0.08mm曲がっていたが、照射後にはJMTR炉心中心と反対向きに約0.8mm曲がっていた。この場合は、照射による効果が明確である。第9次燃料体の黒鉛スリーブでは、JMTR炉心中心と反対向きに、約0.4mmの曲がりが生じていた。第10次燃料体の黒鉛スリーブでは、JMTR炉心中心と反対向きに、約0.1mm曲がっていた。第8次燃料体とともに、照射前にも同様な測定を実施した第12次燃料体の黒鉛スリーブでは、照射前にはJMTR炉心中心の向きに約0.03mm曲がっていたが、照射後にはJMTR炉心中心と反対向きに約0.8mm曲がっていた。

照射による黒鉛スリーブの内径の変化を、第8次および第12次燃料体の場合について、Fig. 4.10に示す。OGL-1照射孔では軸方向に高速中性子束分布があるため、照射寸法変化は一様ではなく、高速中性子束分布⁽⁶⁾に近い形をしている。高速中性子照射量が大きかった第12次燃料体の黒鉛スリーブは、第8次燃料体の場合よりも大きな照射収縮を示している。

また、内径変化で特徴的なことは、約370～450mmの間での変化が高速中性子束分布とは異なり、単調ではなく極大値をとる特異な変化を示していることである。これは、第12次燃料体の黒鉛スリーブの場合にとくに顕著である。照射前のこの付近の内径はほぼ一定値であり、加工による内径の著しい不均一は見られず、Fig. 4.10に示した変化は、照射に起因するものであると考えられる。既に示した外観写真からもわかるように、冷却材の流路を黒鉛スリーブの周囲に均一に確保する目的で、黒鉛スリーブ外面にはスペーサが付いている。第8次および第12次燃料体の黒鉛スリーブの場合、黒鉛スリーブ軸方向中央付近のスペーサは、黒鉛スリーブ上端から370～430mmの間に120°間隔で3方向に付いている。このスペーサの軸方向位置が、特異な寸法変化をした位置に合致する。この特異な寸法変化は、スペーサの存在が影響しているためと考えられる。

4.5 まとめ

OGL-1 照射試験に特徴的な燃料体および燃料棒の照射後試験を、第6次～第12次OGL-1 燃料体を対象にして実施した。

燃料体については、外観検査およびX線検査を実施した。黒鉛ブロックについては、外観検査、重量検査、内表面検査、および寸法・曲がり測定を実施した。金属部品については、外観検査を実施した。燃料棒については、外観検査、重量検査、およびマースキャニングを行った。黒鉛スリーブについては、外観検査、重量検査、内表面検査、および寸法・曲がり測定を実施し、黒鉛部品については、外観検査および重量検査を行った。

これらの試験から、以下のことが明らかになった。

- (1) 高速中性子照射量（軸方向最大値）約 $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ($E > 29 \text{ fJ}$) までの照射において、燃料棒および燃料体として、健全性を損なうような現象は認められなかった。
- (2) JMTR炉心中心側とその反対側とでは高速中性子束におよそ2倍のひらきがある条件下で照射され、黒鉛スリーブには照射により曲がりが生じたが、健全性は損なわれなかった。
- (3) 黒鉛スリーブは照射により寸法収縮を示したが、冷却材の流路を黒鉛スリーブの周囲に均一に確保する目的で黒鉛スリーブ外面に付けられているスペーサーが、黒鉛スリーブの寸法収縮挙動に影響を与えていた。

参考文献

- (1) 井川勝市、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、林君夫、湊和生、岩本多實、伊丹宏治、伊藤尚徳、石本清、“OGL-1 第1次、第2次燃料体の照射試験”、JAERI-M 83-012 (1983).
- (2) 福田幸朔、小林紀昭、林君夫、湊和生、菊池輝男、足立守、伊丹宏治、岩本多實、井川勝市、“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).
- (3) 林君夫、湊和生、小林紀昭、飛田勉、菊池輝男、黒羽根史朗、足立守、福田幸朔、“OGL-1 燃料体の燃料コンパクトと黒鉛スリーブの照射寸法変化”、JAERI-M 88-107 (1988).
- (4) 松尾秀人、湊和生、今井久、“OGL-1 高温照射黒鉛ブロックの特性変化”、JAERI-M 90-009 (1990).
- (5) 福田幸朔、小川徹、鹿志村悟、林君夫、飛田勉、小林紀昭、湊和生、菊地啓修、村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”、JAERI-M 89-007 (1989).

- (6) 渡 和生、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、井川勝市、岩本多實、石本 清、伊丹宏治、佐藤雅幸、“OGL-1 照射済燃料棒の曲がり解析”、JAERI-M 83-055 (1983).
- (7) Y. Ishida, F. Itonaga, H. Matsushima and K. Ishimoto, “PIE of HTGR fuels and materials dimension measuring of OGL-1 irradiated fuels”, Trans. Am. Nucl. Soc. 43 (1982) 733.

Table 4.1 Fast neutron fluence of graphite blocks

OGL-1燃料体	高速中性子照射量*
	(10^{24}m^{-2} , $E > 29 \text{fJ}$)
第6次	0. 50
第7次	1. 75
第8次	1. 46
第9次	3. 47
第10次	3. 40
第11次	1. 79
第12次	3. 97

* 黒鉛ブロック外周部JMTR炉心中心側の軸方向最大値

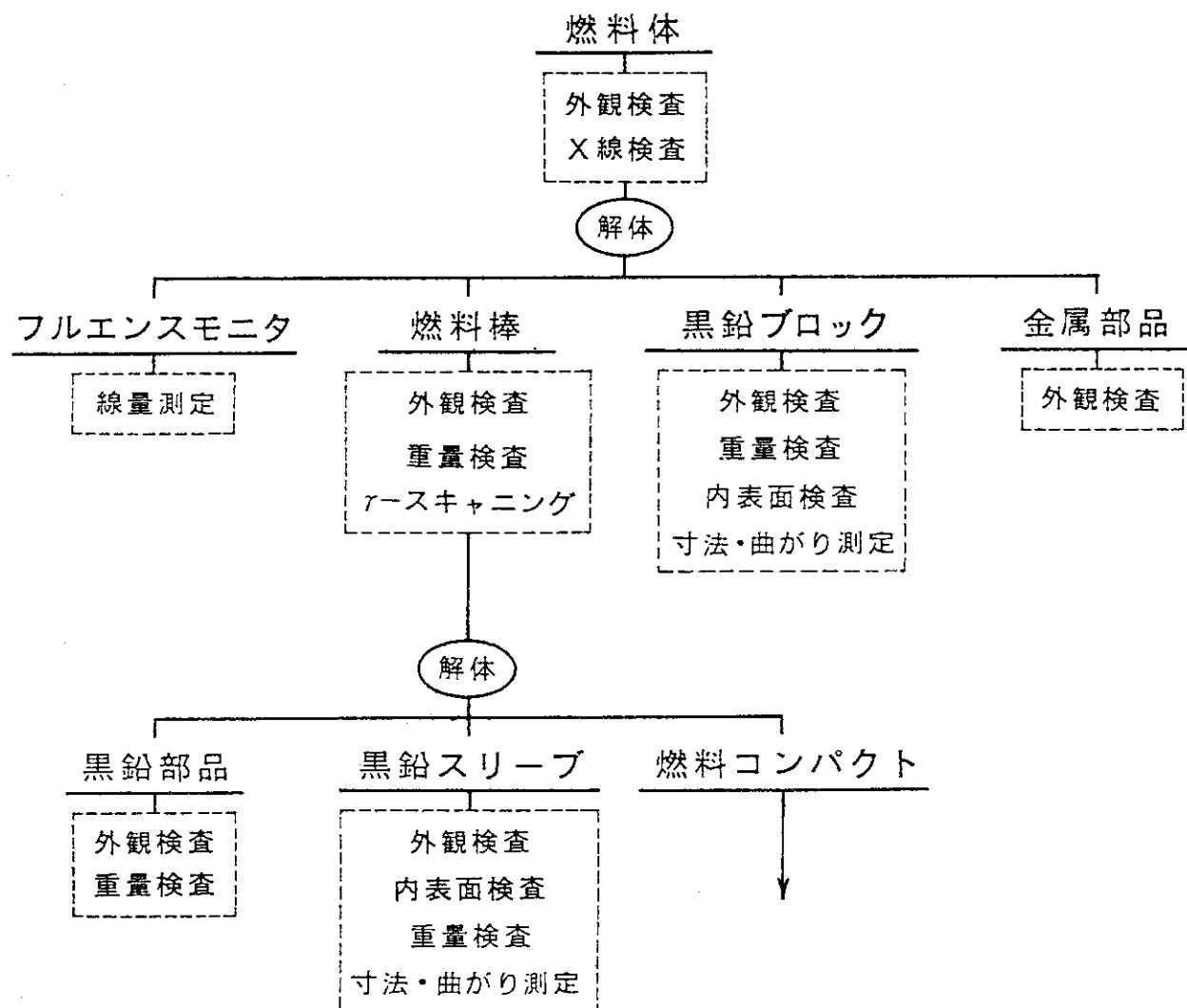


Fig. 4.1 Items of postirradiation examination of OGL-1 fuel assemblies.

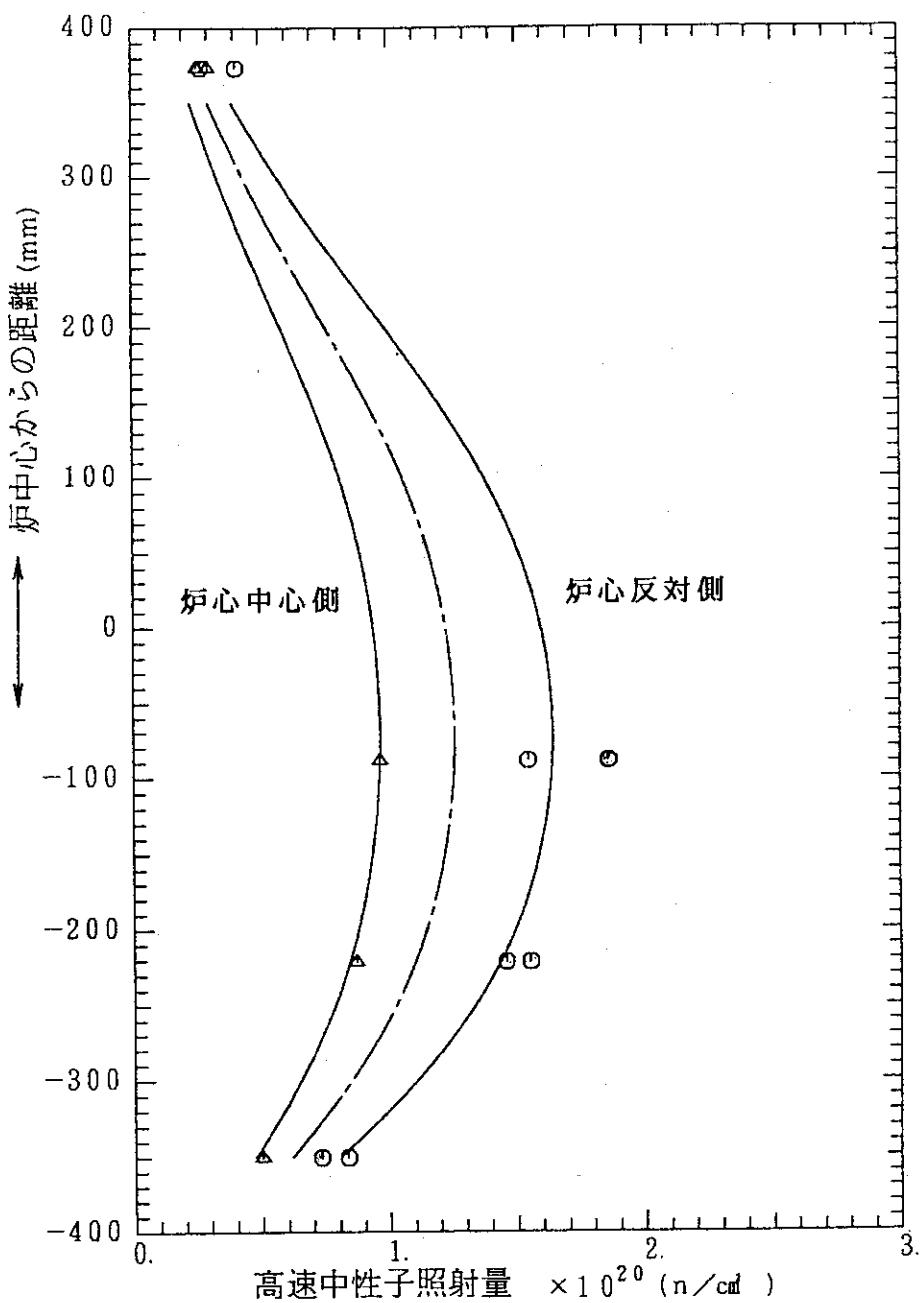


Fig. 4.2 Distribution of fast neutron fluence of graphite block irradiated in the 12th OGL-1 fuel assembly.

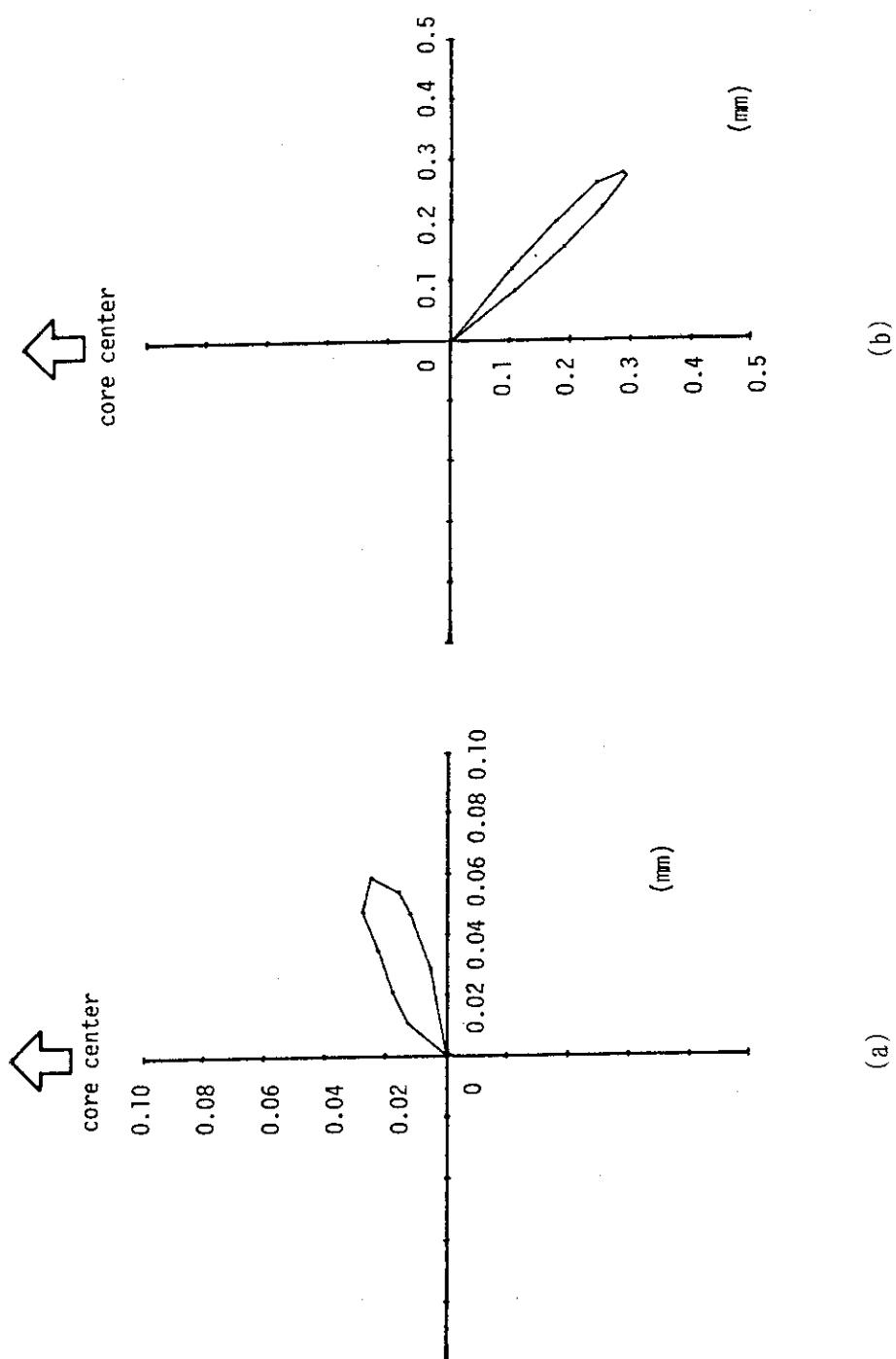


Fig. 4.3 Bowing of graphite block and sleeve irradiated in the 6th OGL-1 fuel assembly.
(a) Graphite block, (b) Graphite sleeve

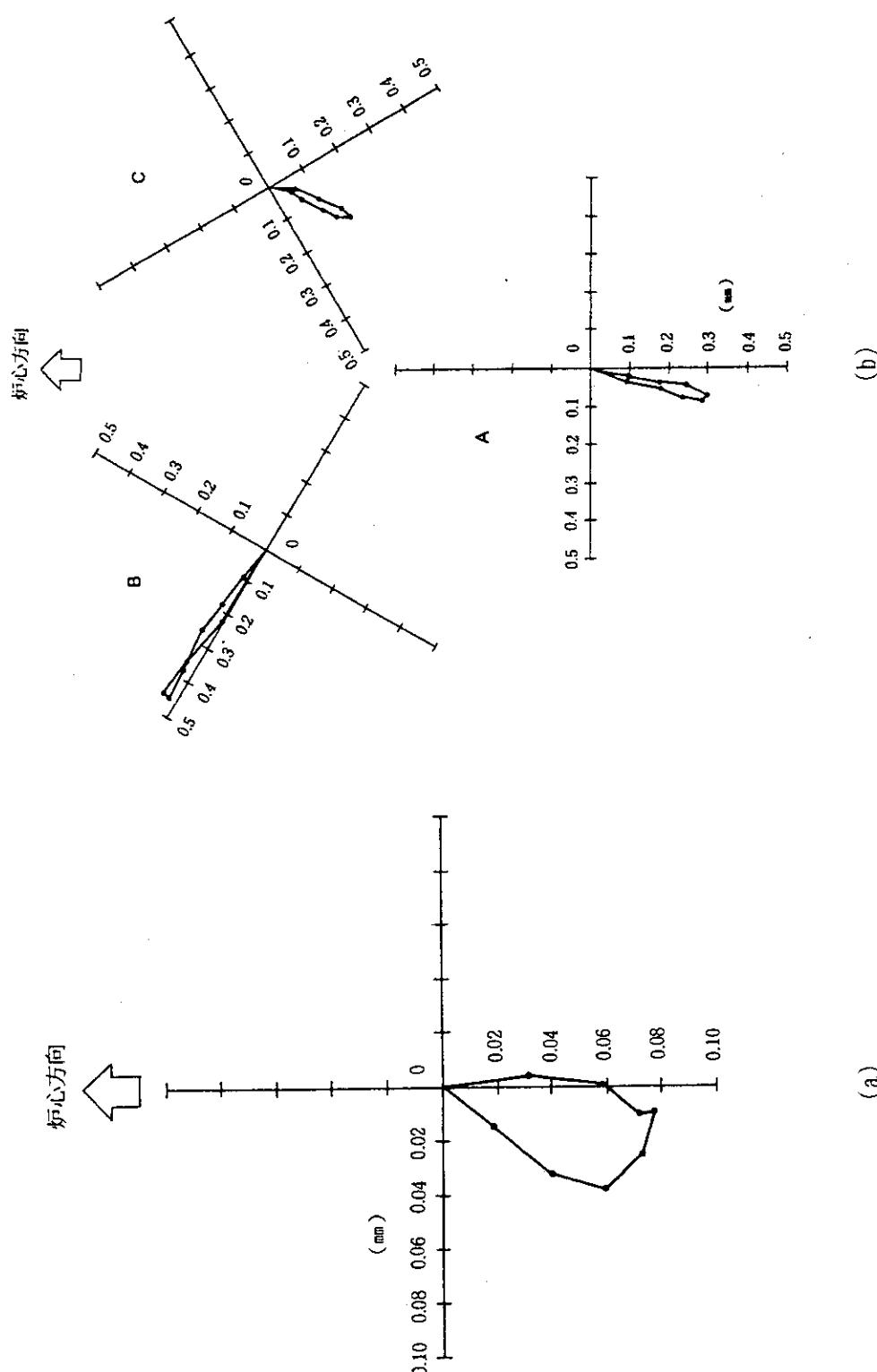


Fig. 4.4 Bowing of graphite block and sleeves irradiated in the 7th 0GL-1 fuel assembly.
 (a) Graphite block, (b) Graphite sleeves

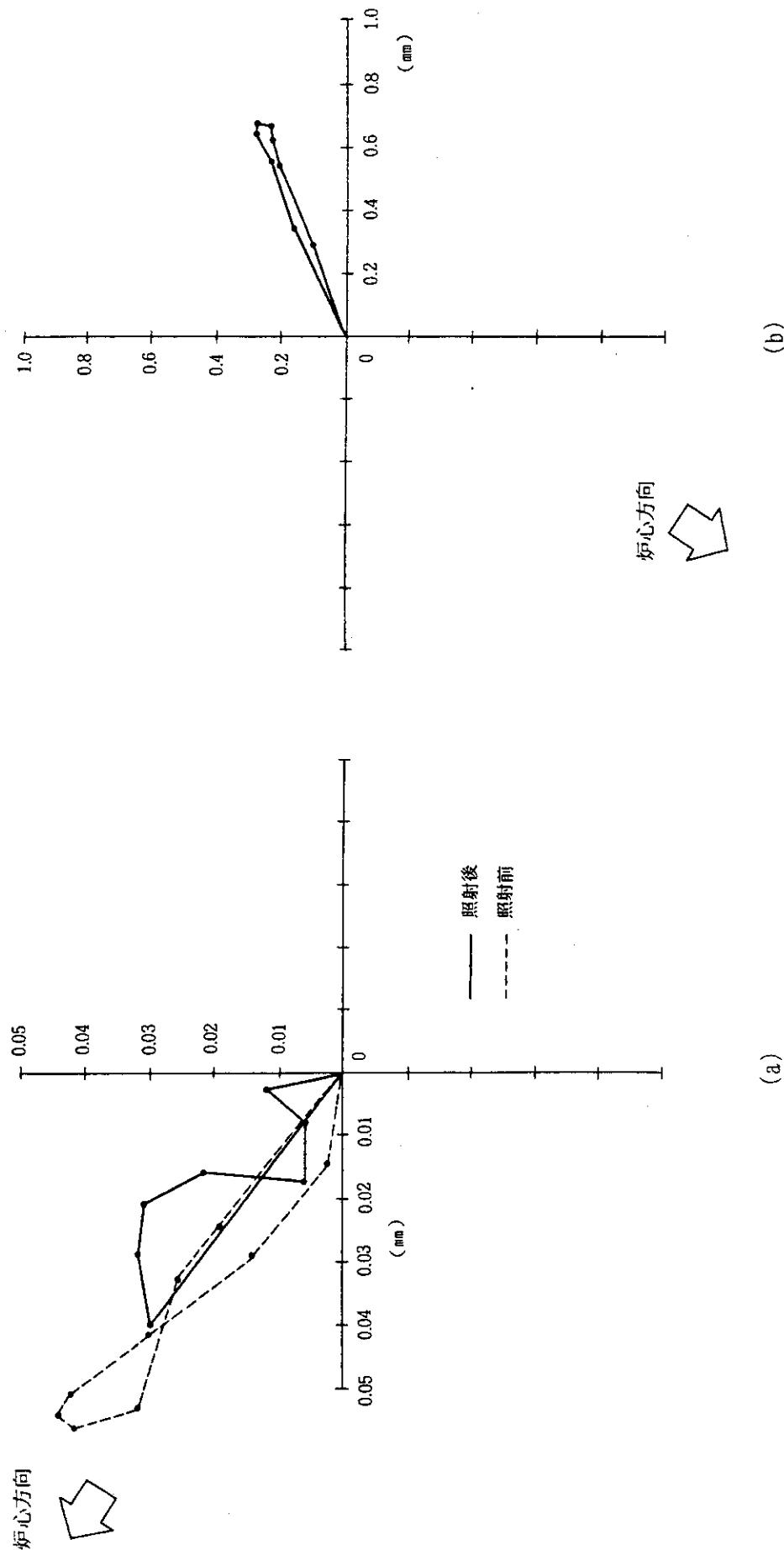


Fig. 4.5 Bowing of graphite block and sleeve irradiated in the 8th OGL-1 fuel assembly.

(a) Graphite block, (b) Graphite sleeve

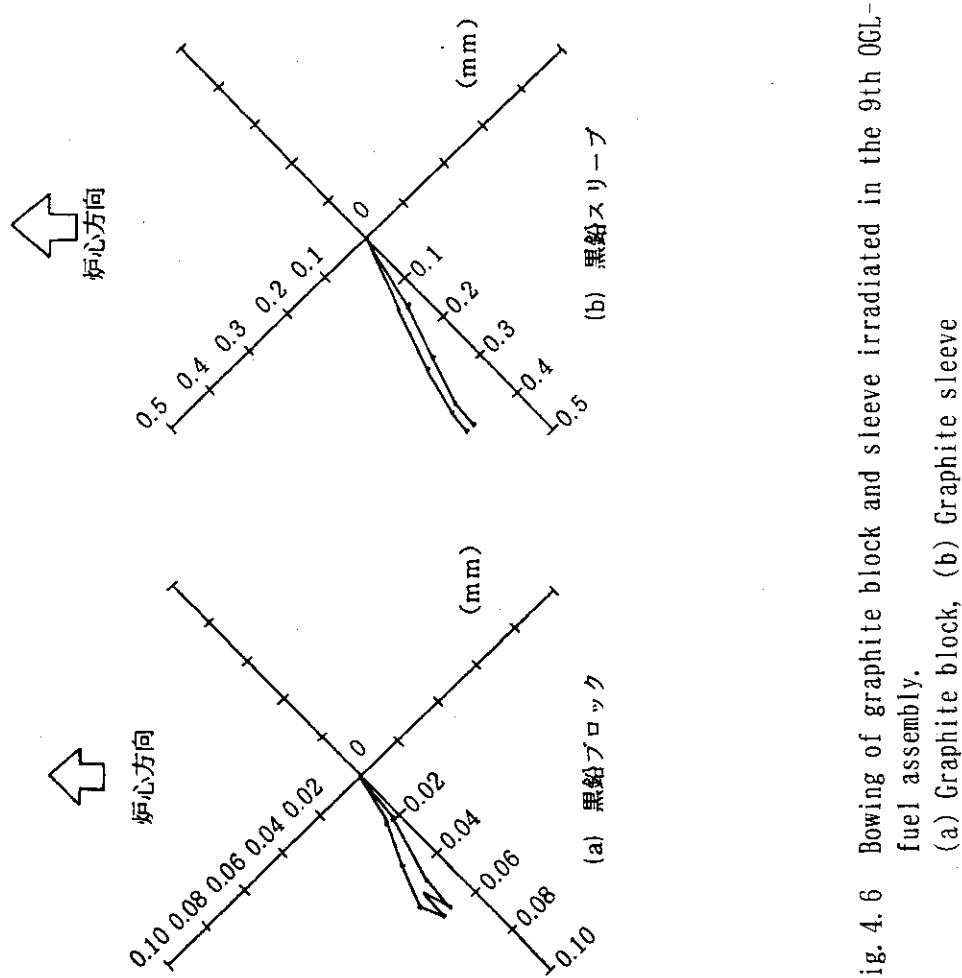


Fig. 4.6 Bowing of graphite block and sleeve irradiated in the 9th OGL-1 fuel assembly.
 (a) Graphite block, (b) Graphite sleeve

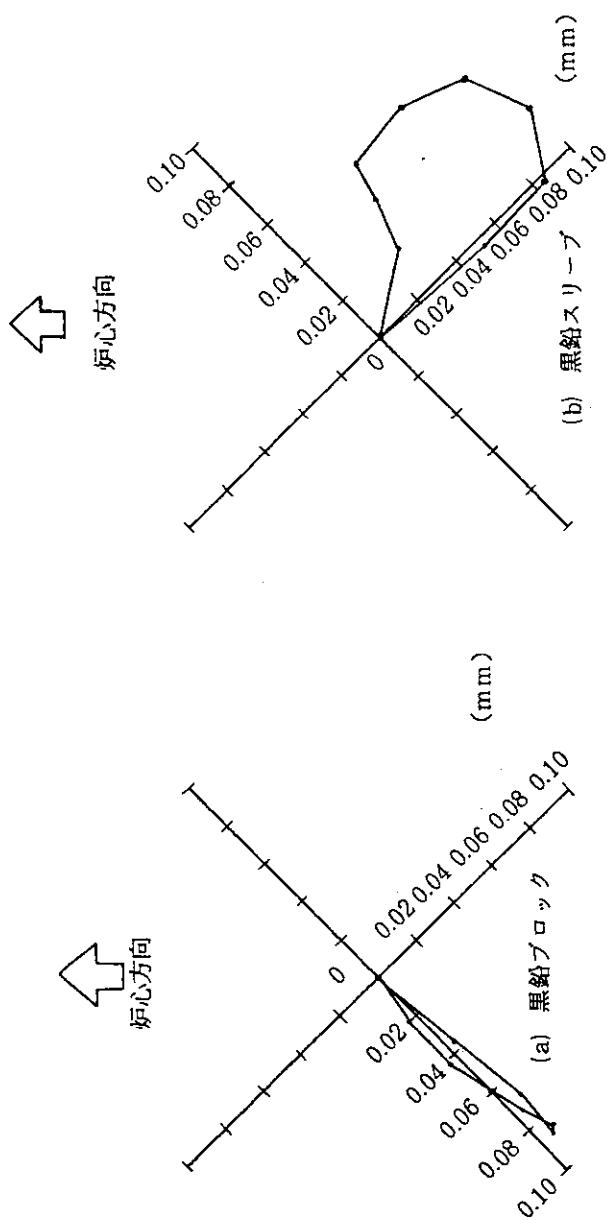


Fig. 4.7 Bowing of graphite block and sleeve irradiated in the 10th OGL-1 fuel assembly.

(a) Graphite block, (b) Graphite sleeve

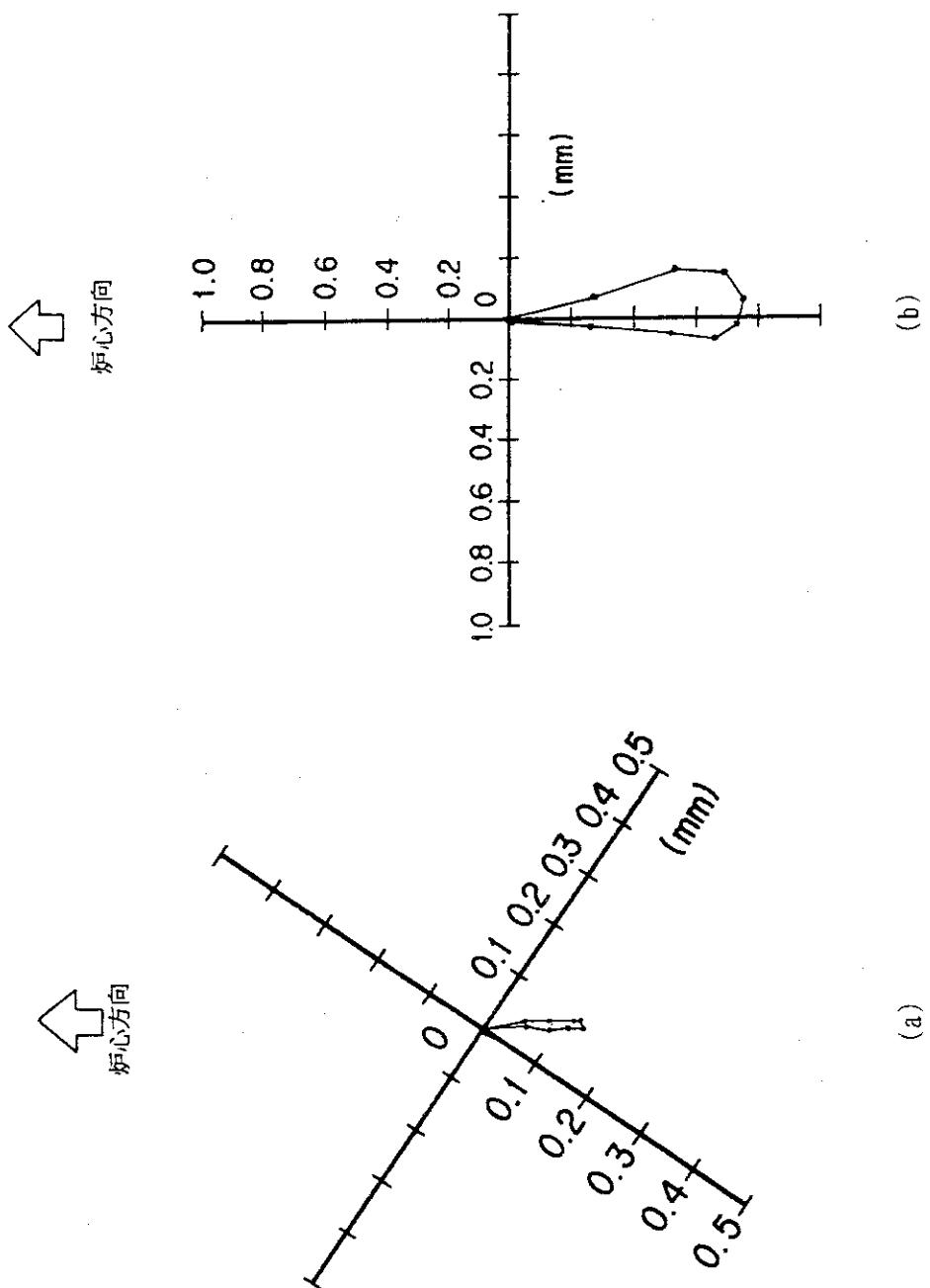
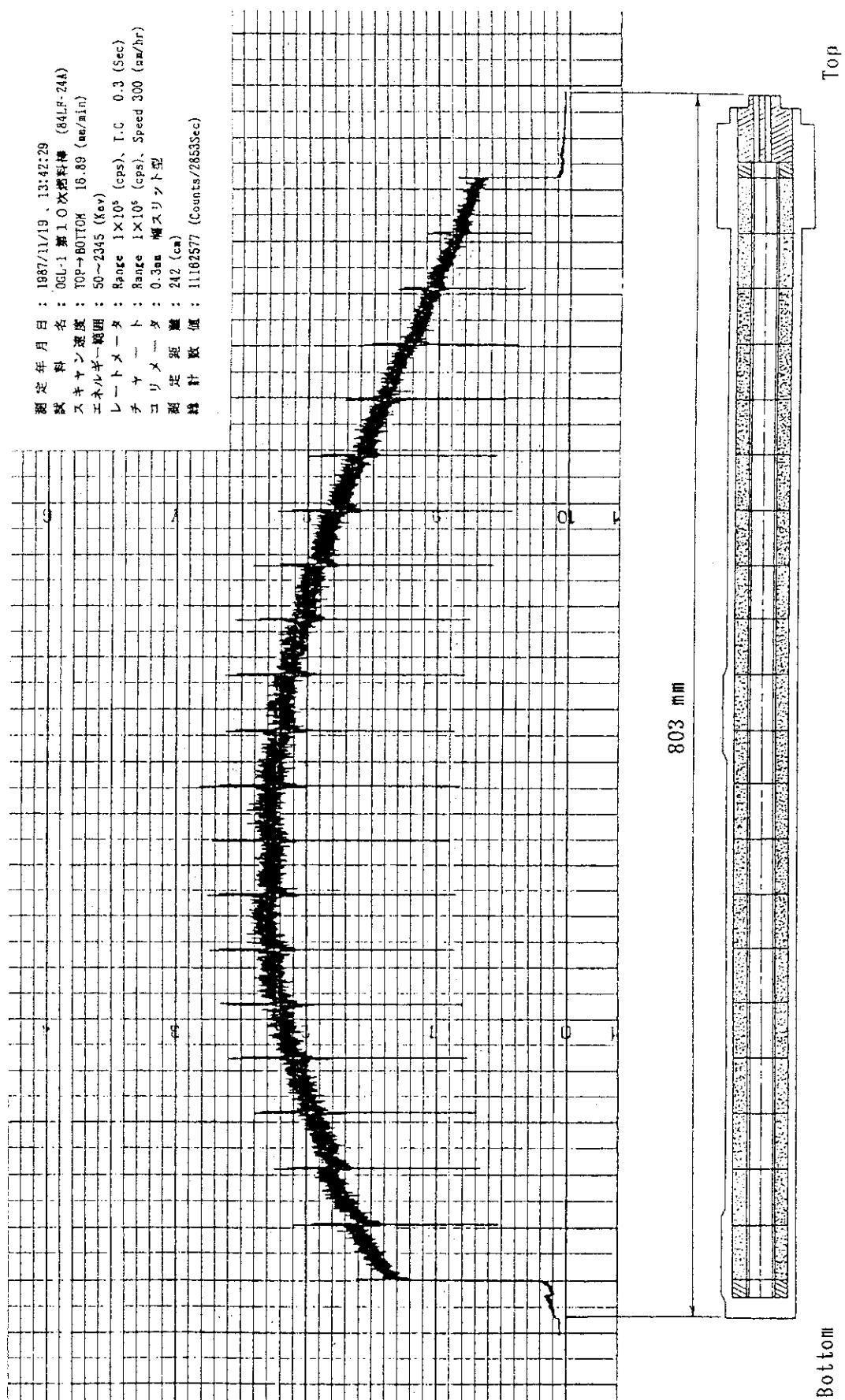


Fig. 4.8 Bowing of graphite block and sleeve irradiated in the 12th OGL-1 fuel assembly.

(a) Graphite block, (b) Graphite sleeve

Fig. 4. 9 γ -scanning of fuel rod irradiated in the 10th OCL-1 fuel assembly.

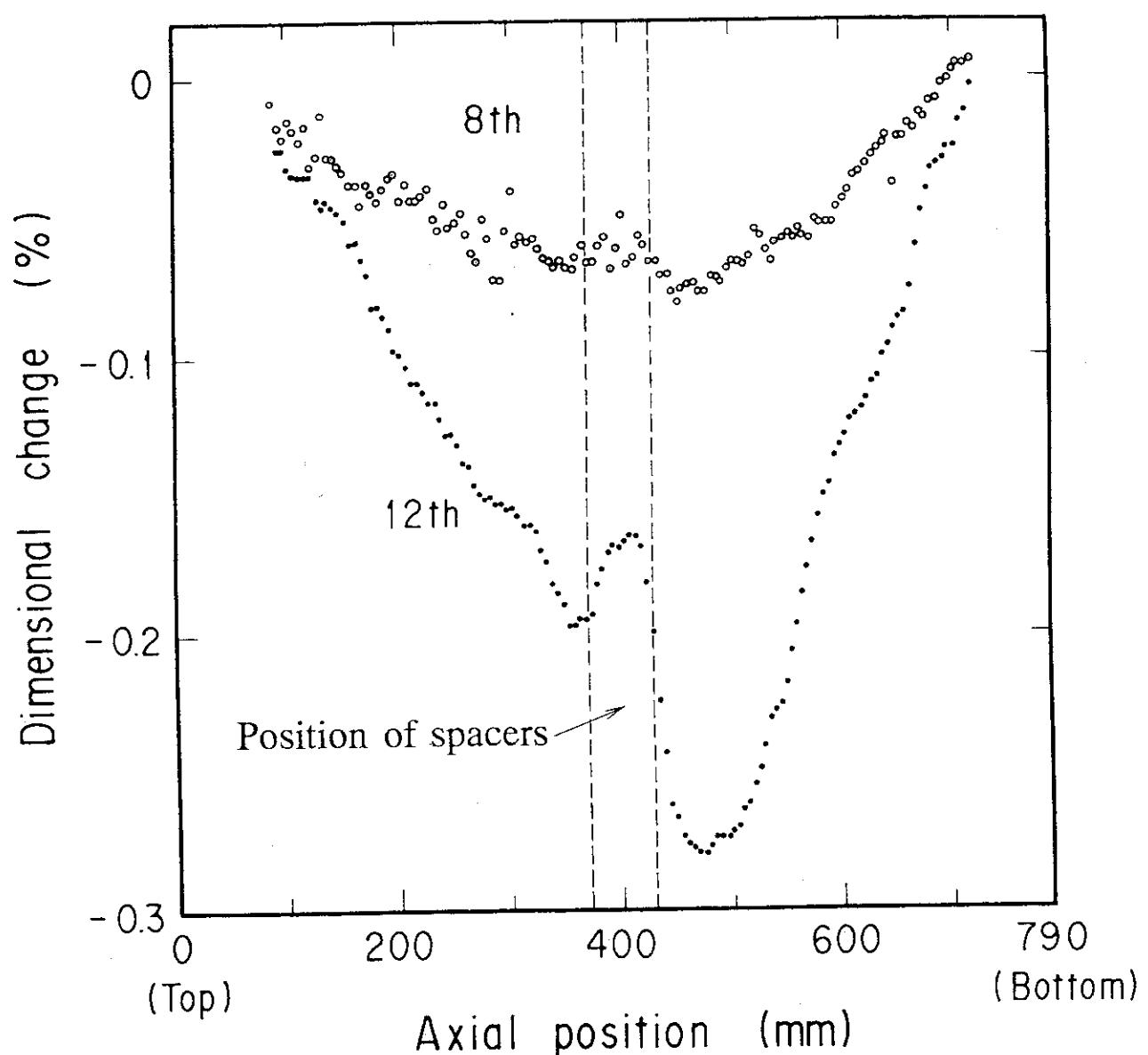


Fig. 4.10 Irradiation-induced inner diameter changes of graphite sleeves in the 8th and the 12th OGL-1 fuel assemblies.

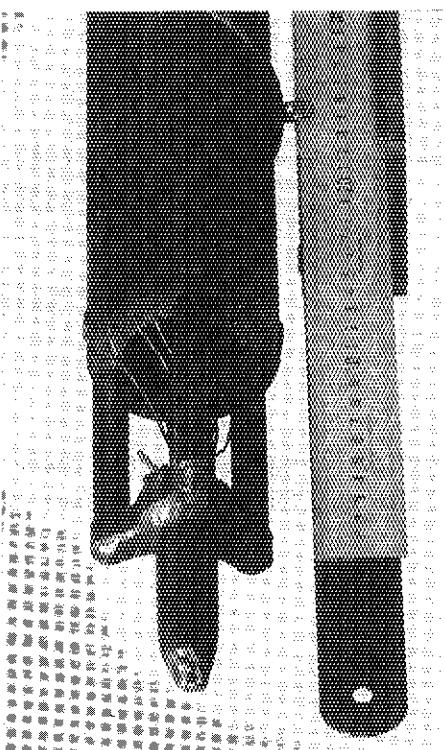
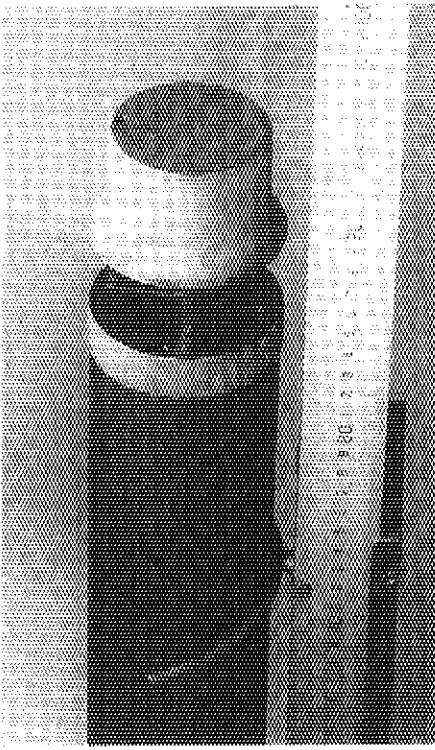
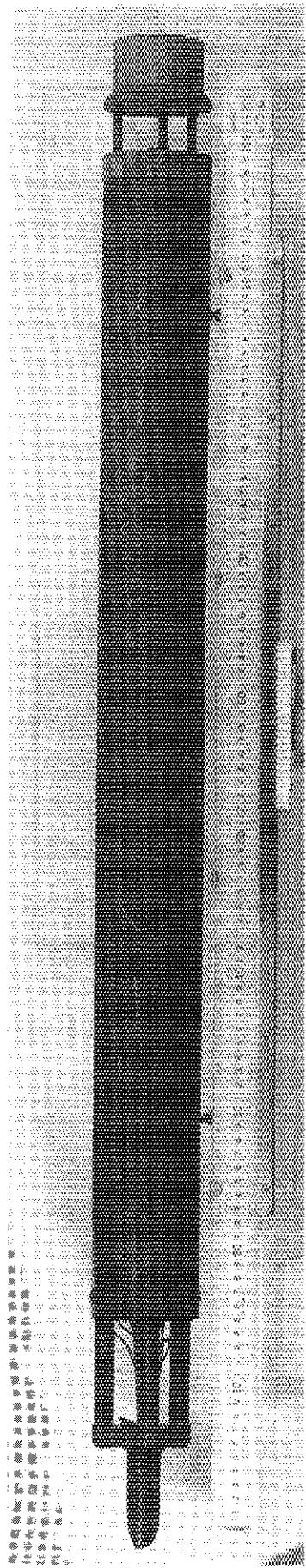


Photo. 4. 1 Appearance of the 6th OGL-1 fuel assembly after irradiation.

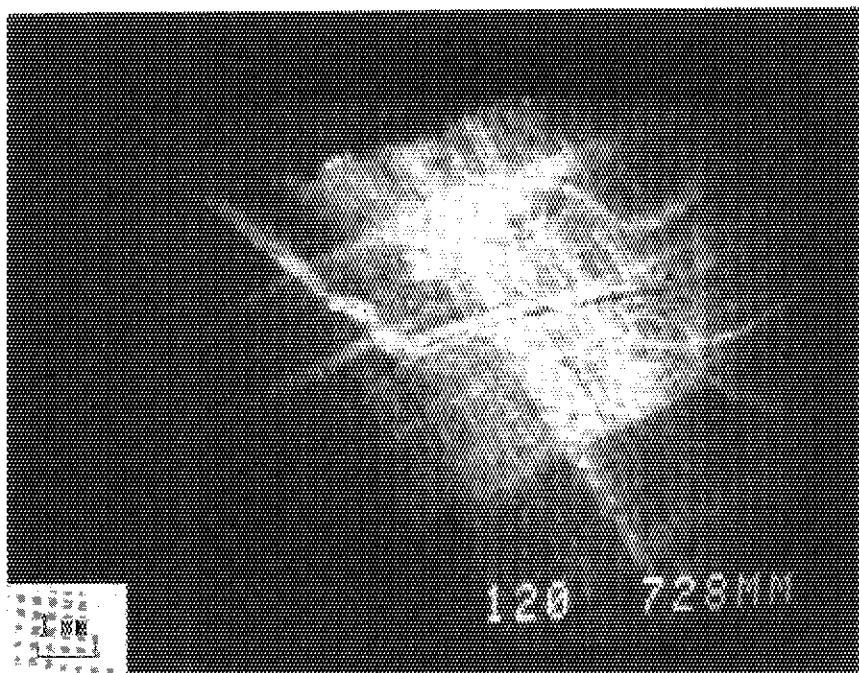


Photo. 4.2 Inner surface appearance of graphite block irradiated in the 7th OGL-1 fuel assembly.

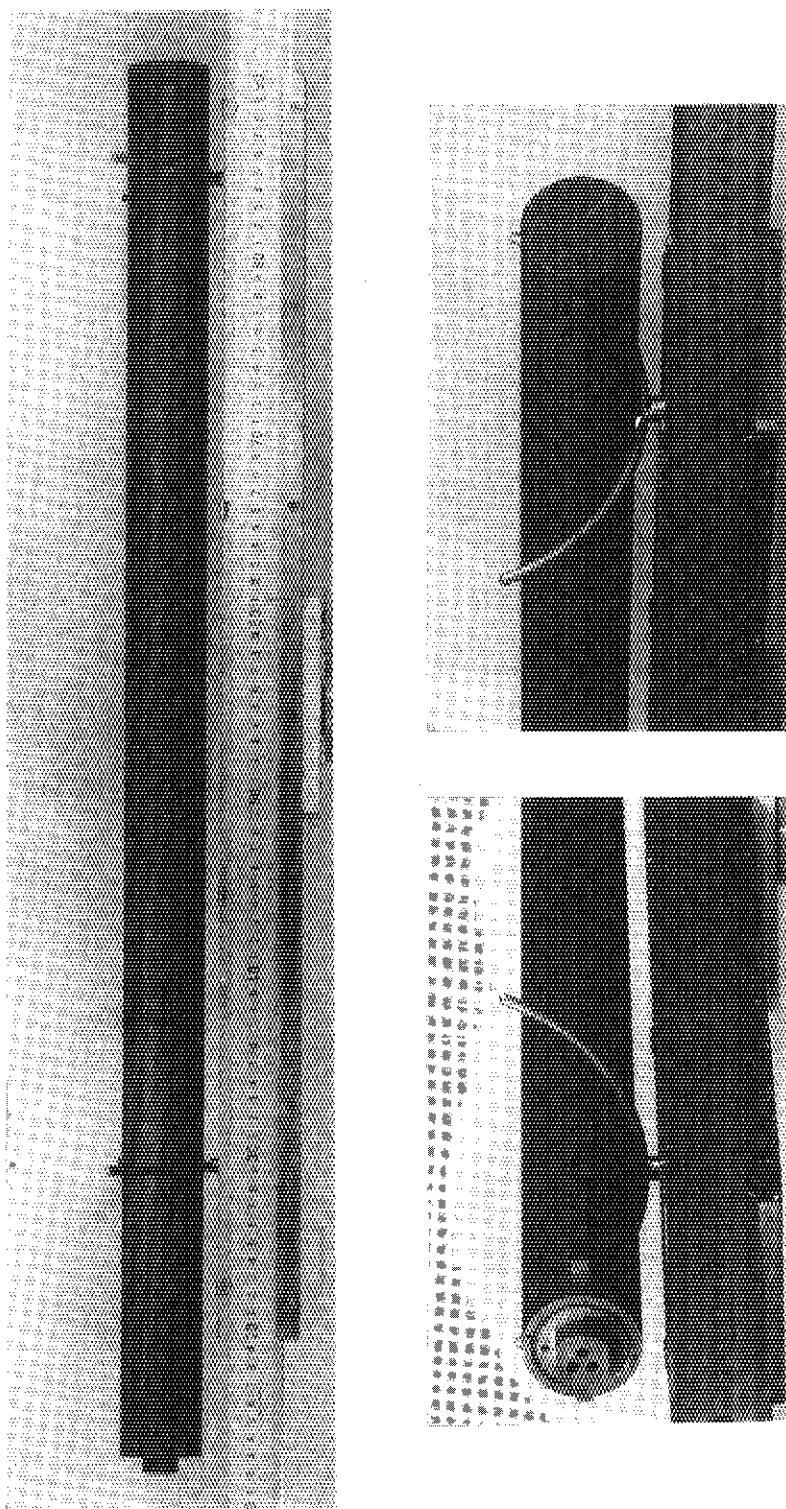


Photo. 4.3 Appearance of fuel rod irradiated in the 6th OGL-1 fuel assembly

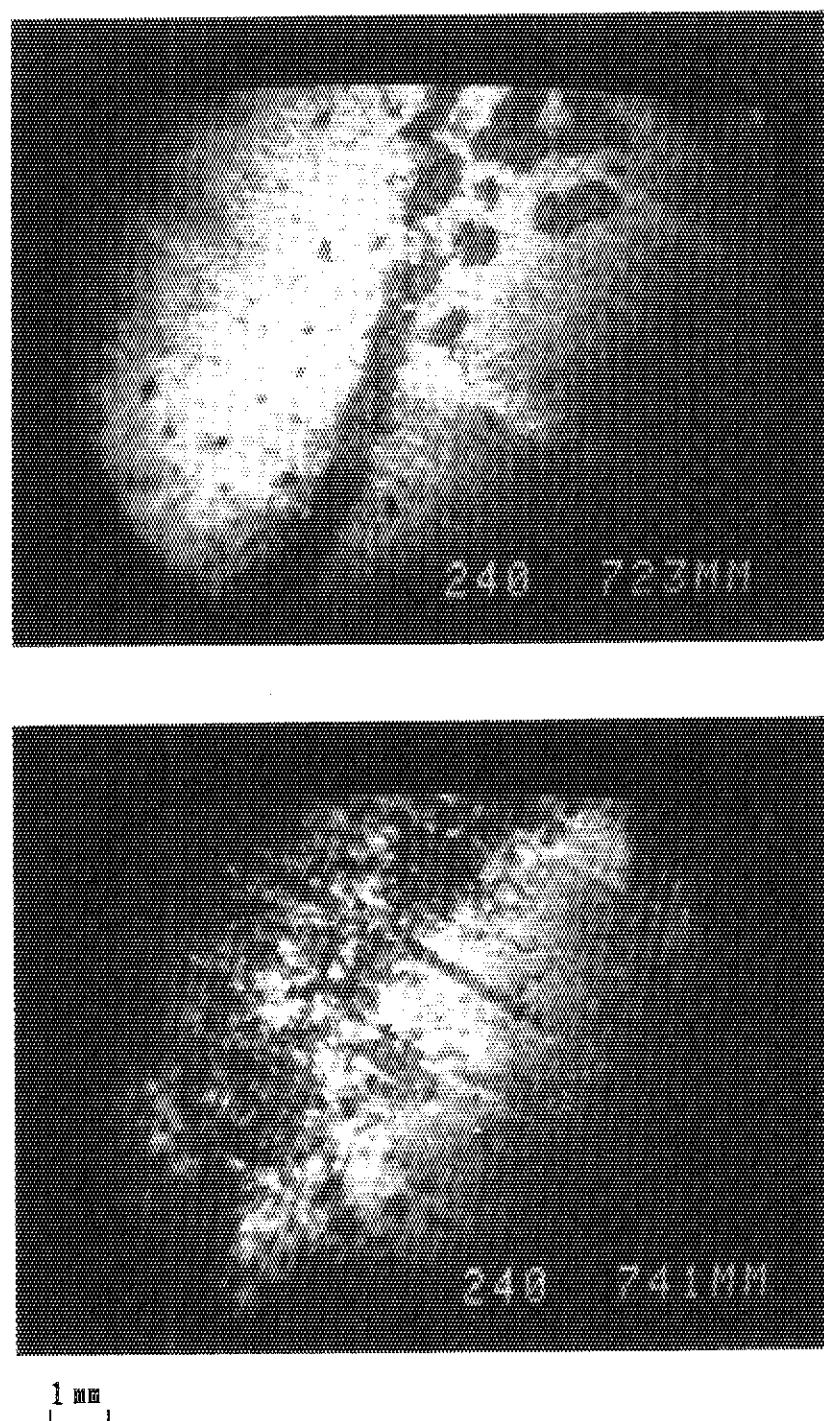


Photo. 4.4 Inner surface appearance of graphite sleeve irradiated in the 6th OGL-1 fuel assembly.

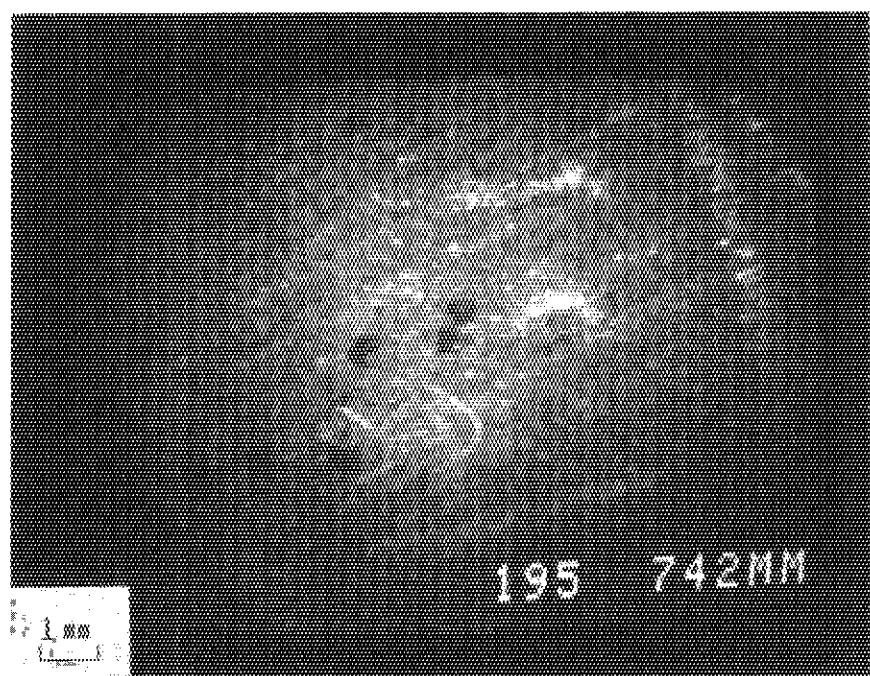


Photo. 4.5 Inner surface appearance of graphite sleeve irradiated in the 8th OGL-1 fuel assembly.

5. 燃料コンパクトおよび被覆 燃料粒子の照射後試験

5.1 はじめに

第1章に述べたように、OGL-1照射は、照射健全性試験の観点からは、①高温・高圧のヘリウムガス流動というHTTR炉心を模擬した条件下での照射を行うことができる、②燃料棒および燃料体規模での健全性を調べることができる、③一度に多量の燃料コンパクトが照射でき、また温度、燃焼度および高速中性子照射量の点で広い範囲にわたるパラメトリックな照射ができる、という特徴を有する⁽¹⁻⁴⁾。

本章では、燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の照射後試験について、燃料の健全性にとって極めて重要な項目である燃料コンパクトの外観および断面組織観察、被覆燃料粒子の貫通およびSiC層破損率測定の結果を中心に述べる。

照射後試験項目をFig.5.1に示す。燃料棒の解体によって得られた燃料コンパクトについては、所定の試験を行ったあと、電気化学的解砕によって被覆燃料粒子と黒鉛マトリックスに分離した。被覆燃料粒子については、さらに所定の試験を行った。なお、被覆燃料粒子のFPインベントリの測定は、被覆燃料粒子の貫通破損率およびSiC層破損率をFP浸出法によって求めるために行ったものであり、その結果の記述は省略する。

Table 5.1に、照射後試験項目と各燃料体ごとの試験実施燃料コンパクトとの対応を示す。

5.2 燃料仕様および照射条件の概要

燃料の仕様および特性、ならびに照射条件の詳細については、それぞれ第2章および第3章に記述した。また、照射条件の概要是、第3章のTable 3.1に示した。

(1) 燃料仕様の概要

第6次～第12次燃料体の被覆燃料粒子は、UO₂燃料核に、低密度熱分解炭素層(バッファ層)、内側高密度熱分解炭素層(IPyC層)、SiC層および外側高密度熱分解炭素層(OPyC層)を、この順に被覆したものである。その仕様は、HTTR用初装荷燃料(A型燃料体)⁽⁵⁻⁷⁾の被覆燃料粒子の設計仕様と基本的に同一である。

燃料コンパクトについては、第6次、第8次～第10次燃料体は、VHTRの第1次概念設計仕様(Mark-III仕様)⁽⁸⁻¹⁰⁾に従うものであり、第7次および第11次燃料体は同仕様に準ずるものである。一方、第12次燃料体は、HTTR初装荷燃料と基本的に同一仕様のものである。

(2) 照射条件の概要

第6次～第12次燃料体の燃料コンパクトについて、平均照射温度、燃焼度、高速中性子照射量の計算値を付録3に示す。平均照射温度および燃焼度の値は、いずれも実測温度を用いてSTEPDSP2コード⁽¹¹⁾によって計算した値である。高速中性子照射量はフルエンス・モニタの放射能実測値、ならびに燃料体径方向および軸方向分布の核計算結果から求めたものである。

5.3 燃料コンパクトの照射後試験

5.3.1 外観および内面検査

(1) 未照射燃料コンパクトの外観検査

以下に述べる照射済み燃料コンパクトの外観観察結果と比較するため、照射試料と同一バッチで製造した未照射燃料コンパクトの外観を光学顕微鏡で拡大観察した。その結果の詳細を付録4に示す。

(2) 照射済み燃料コンパクトの外観検査

(i) 概要

本検査は、第6次～第10次および第12次燃料体については全コンパクトについて、第11次燃料体については抜取りで試験を行った。全試験コンパクトの外観写真を、付録5Aに示す。

第7次、第10次および第12次燃料体では、異状は見られなかった。特に、第7次燃料体については、燃料棒1および燃料棒2は黒鉛マトリックス用黒鉛粉として国産品を、燃料棒3では輸入品を用いたが、いずれの燃料棒についても、燃料コンパクトの外観に異状は見られなかった。また、燃料棒1、2と燃料棒3の燃料コンパクトの間に差は認められず、本燃料体の照射条件下ではいずれも健全であった。なお、第10次および第12次燃料体については、未照射燃料コンパクトの外観検査においても、オーバーコートの隙間はわずかであった(付録4参照)。

以下、第6次、第8次、第9次および第11次燃料体の結果について記述する。

(ii) 第6次燃料体

光学顕微鏡による拡大観察は行わなかったので明瞭ではないが、コンパクト800P1-08では表面の変色が認められた(Photo.5.1)。しかし、破損した被覆燃料粒子は認められなかった。そのほかには、外観上、大きな異状は認められなかった。

なお、以下に示す写真には、Photo.5.1と同様に、燃料コンパクト番号(Compact 8, 800P1-08等)および写真番号(58治B83等)を記載する。

(iii) 第8次燃料体

全体的には、外観に殆ど異状は見られなかった。ただし、黒鉛スリープ中の金属FP分布を測定したところ、¹³⁷Cs、¹⁴⁴Ce等の顕著なピークが軸方向の2箇所に認められた⁽³⁾ので、これらの位置に対応するコンパクト820P1-05と820P1-15(燃料棒下端からのそ

れぞれ5番目および15番目)を光学顕微鏡で拡大観察することによって詳しく調べた。Photo.5.2の(a)は820P1-05の外観を示しており、1箇所に異状が見出された。(b)はこの部分を拡大したものであり、破損粒子が露出していることがわかる。

一方、コンパクト820P1-15では、オーバーコート間の間隙および欠けは観察されたが、露出した破損粒子は観察されなかった[同、(c)]。このことから、820P1-15については、表面ではなくコンパクト内部に破損粒子が存在していることが推定される。

なお、本燃料体については、全体としてはコンパクト外観は健全であったことから、たまたま表面で被覆層破損が生じた粒子が、黒鉛スリープ中の金属FP分布測定によって検出され、さらに外観観察において破損粒子であることが確認されたものと考えることができる。同様な破損粒子の露出は、第3次燃料体において多数観察された⁽²⁾。

(iv) 第9次燃料体

大きな割れ、欠けは見られなかつたが、表面の荒れ(オーバーコート粒子の盛り上がり)や黒鉛マトリックスの欠落が観察された[Photo.5.3Aの(a)]。また、黒鉛マトリックスが欠落して、被覆燃料粒子が露出している様子[同(b)]も観察された。しかし、外観からは表面に露出したこの被覆燃料粒子は破損していないものと思われる。黒鉛スリープの金属FP分布を見ても特に高濃度の部分は見られないことから⁽¹²⁾、表面に露出した破損粒子はなかったものと推定される。

一方、未照射燃料コンパクトの外観観察においても、黒鉛マトリックスが欠落し表面に露出した被覆燃料粒子が認められている(Photo.5.3B)。

(v) 第11次燃料体

大きな割れ、欠け等の異状は見られなかつたが、相当数の燃料コンパクトに黒鉛マトリックスの欠落等の異状が見られた。燃料コンパクト試料を、光学顕微鏡で拡大して調べたところ、表面の異状箇所では黒鉛マトリックスが欠落し、被覆燃料粒子が露出していることがわかつた[Photo.5.4Aの(a)-(c)]。ただし、黒鉛スリープ中の金属FP濃度分布のピーク位置において、破損粒子は認められなかつた⁽¹³⁾ことから、黒鉛マトリックスの欠落と被覆燃料粒子の破損とは直接対応はしていないと言える。なお、黒鉛マトリックスの欠落のほかに、Photo.5.4Aの(d)に示すように、オーバーコート境界にかなり大きな隙間が認められた。

一方、未照射燃料コンパクトの外観観察においても、照射後と同様な被覆燃料粒子の露出(Photo.5.4B)が見られた。また、オーバーコート境界の隙間は、他の燃料体に比べて大きいことが認められた(付録4の Photo.A4.6 参照)。

(vi) 外観上の異状の原因およびその影響についての検討

第9次および第11次燃料体では、オーバーコート境界の大きな隙間、被覆燃料粒子の露出等の異状が見られた。しかし、両燃料体では、未照射燃料コンパクトについても同様な異状が観察されており、照射によってこれらの異状が生じたり、異状の程度が著しく進行する兆候は認められなかつた。

一方、第9次および第11次燃料体よりも、照射期間、燃焼度および高速中性子照射量の点で厳しい照射条件におかれた第12次燃料体では、照射後の外観は健全であり、未照射

コンパクト外観に比べて劣化している様子は観察されなかった。さらに、未照射コンパクトで殆ど異状の見られなかった第10次燃料体についても、照射後の外観に異状は見られなかった。

製造時に生じたオーバーコート境界の隙間は、非常に大きい場合には被覆燃料粒子の照射健全性に影響を与える可能性がある。また、黒鉛マトリックスの欠けや被覆燃料粒子の露出についても、燃料コンパクトの照射健全性にとって好ましいことではないと考えられる。しかし、現在までのOGL-1照射試験結果において、黒鉛マトリックスの大きな損傷や、明らかにこれらの異状に起因すると思われる悪影響は観察されていない。また、照射による被覆燃料粒子の著しい追加破損は検出されていない(5.4.2項および5.4.3項参照)。以上のことから、上記程度の異状は、現在までのOGL-1照射試験条件のもとでは、燃料の照射健全性の点で大きな問題とはならないものと考えができる。

(vii)まとめ

第9次および第11次燃料体で照射後に見られた異状は、主に、照射ではなく製造に起因するものであると考えることができる。また、本試験の条件下では、未照射燃料コンパクトで観察された欠陥に起因すると思われる、照射健全性に対する顕著な悪影響は認められなかった。

(3) 内面検査

本検査は、第6次、第8次および第9次燃料体の各1個の燃料コンパクトについて行った。燃料コンパクトを軸方向に切断し、その内面を観察した。燃料コンパクト内面写真をPhoto.5.5に示す。

第6次燃料体[800P1-08、Photo.5.5の(a)]、および第8次燃料体[820P1-08、同(b)]では、黒鉛マトリックスの荒れは見られたものの、割れ、欠けは見られず、健全であった。

一方、第9次燃料体[830P1-08、同(c)]では、黒鉛マトリックスの荒れのほかに、欠けが一部に生じており、上述の外観検査結果と同様であった。

5.3.2 寸法検査

本検査は、第6次～第10次燃料体については、全燃料コンパクトについて実施した。第11次および第12次燃料体については抜取り検査を行った。第6次～第12次燃料体のコンパクト寸法の測定方法および測定データを、付録5Bに示す。

第1次～第9次燃料体の結果については、前報⁽¹⁴⁾にまとめた。コンパクト温度約900～1400°C、高速中性子照射量$4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$(E>29fJ)の範囲において、コンパクトの寸法変化は収縮側であり、寸法収縮率(バラツキの中央値)は高速中性子照射量に対してほぼ直線的に増加した⁽¹⁴⁾。

以上のような従来の結果と、第10次～第12次燃料体の結果を比較したものをFig.5.2に示す。図中にハッチで示した領域は、第1次～第9次燃料体のデータの範囲を示す。た

だし、高手中性子照射量の評価値に疑問のある第5次燃料体のデータは除いた。Fig.5.2から、第11次および第12次燃料体の結果は従来のデータと同様な傾向を示しており、従来のデータの範囲内および延長上に入っていることが分かる⁽¹⁵⁾。

5.3.3 重量検査

燃料コンパクトの黒鉛マトリックスは、OGL-1ループの冷却材中の不純物(H_2O 、 O_2 等)によって腐食される可能性がある。本検査は、照射前後の重量変化によって、腐食が生じているかどうかを調べることを主な目的としている。本試験は、第6次～第10次燃料体については全コンパクトについて行ったが、第11次および第12次燃料体については抜き取りで行った。

重量検査の方法および結果の詳細を付録5Bに示す。結果を要約すると、以下のようになる。照射後に重量減少となっている場合についてみると、異常値であると思われる第12次燃料体の場合を除いて、重量減少率は最大で0.01%(重量差最大値、4mg)であり、測定誤差を考慮すれば有意な重量減少とは考えられない。すなわち、冷却材中の不純物による燃料コンパクトの腐食は問題となる程度ではなかった。

5.3.4 FPインベントリ測定

本試験は、燃料コンパクトを非破壊のままで γ 線スペクトル分析を行うことによって、燃料コンパクト中のFPインベントリ(蓄積量)の相対値を求めるものである。第6次～第10次燃料体については全コンパクトについて試験を行ったが、第11次～第12次燃料体については抜き取りで試験を行った。

典型的な測定例として、第8次燃料体の測定結果をFig.5.3に示す。本燃料体では、燃料コンパクトを回転させながら γ 線測定を行った。燃料コンパクトを回転させないで測定を行った第6次および第7次燃料体(付録5C参照)に比べて、燃料棒軸方向に沿ってなめらかな分布が得られた。得られたFPインベントリ分布は、熱中性子束の燃料棒軸方向分布(JMTRの反射体領域での高さ方向の熱中性子束の分布⁽¹⁶⁾)とも良く一致している。本測定の結果は、5.2節および付録3に示した燃料コンパクトごとの燃焼度の評価に用いた。

OGL-1ループはJMTR炉心の反射体領域に設置されており、中性子束の炉心径方向の変化が大きいことが、核計算評価⁽¹⁶⁾やフルエンス・モニタの測定からわかっている。そして、OGL-1燃料体についても、燃料コンパクトの周方向、特に炉心側と反炉心側では燃焼度およびFPインベントリの値が相当異なる。上記の結果は、燃料コンパクトごとの平均の燃焼度を比較するためには、コンパクトを回転させながら放射能測定することが有効であることを示している。

5.3.5 断面組織観察

本試験は、第6次～第12次の全ての燃料体について行った。以下に、典型的な断面組織写真を示し、観察結果を各燃料体ごとに記述する。異状の生成原因については、

5.5節でも検討する。

(1) 第6次燃料体(Photo.5.6)

写真(a)に示すような健全な被覆燃料粒子の割合が大きく、全体的には健全であった。写真(b)では、燃料核表面に内部と異なった相(ウランの炭化物相と思われる)が生じているのが見られる。また、写真(c)は、同様な領域を偏光によって観察したものであるが、燃料核表面に異なった相がわずかに見られる。そのほかに、バッファ層の内面側でも変質が見られる。

写真(a)-(c)の燃料コンパクト800P1-07は、燃料棒軸方向について、最高温度位置で照射したものであり、本燃料体の高温照射時には、燃料コンパクト内面で約1480°Cまで燃料温度が上昇したものである。写真(b)(c)の異状は、高温照射時に燃料核のUO₂とバッファ層の炭素が反応して、燃料核の炭化とバッファ層中へのウランの移行が生じたものである可能性が考えられる。なお、被覆層蒸着時に燃料核の炭化が既に生じていた⁽¹⁷⁾可能性もある。また、バッファ層の内面の変質については、核分裂反跳によって熱分解炭素の高密度化が生じたものである可能性も考えられる。ただし、写真(b)(c)のような異状が観察された粒子の割合はわずかであり、かつ異状の程度も軽微であることから、照射健全性の点で特に問題とはならないものと考えられる。

そのほかに、写真(d)ではバッファ層とIPyC層の間の隙間が見られ、写真(e)(f)ではバッファ層にクラック(亀裂)が見られる。これらは主にバッファ層の照射寸法収縮によるものと考えられるが、クラックがバッファ層に留っている限り、被覆層全体の健全性の点からは特に問題とはならない。なお、写真(e)に見られるSiC層の欠けは、製造時の欠陥部分が照射後試験の研磨の際に欠けたものと思われる。

以上の種々の現象が認められたが、健全性のうえで特に問題となる異状は認められなかった。

(2) 第7次燃料体(Photo.5.7)

第6次燃料体と同様に、バッファ層とIPyC層の間の隙間[写真(a)(b)]、およびバッファ層のクラック[写真(e)(f)]が認められた。そのほか、OPyC層の径方向クラック[写真(c)(d)]、SiC被覆層内部の周方向欠陥[写真(a)(c)(d)]が見られる。これらについては、第8次燃料体で説明するが、特に問題となる異状ではない。そのほかに、IPyC層とSiC層の間の隙間[写真(e)(f)]が見られたが、その頻度は多くはなかった。これらのほかに異状は見られず、全体的には健全であった。

(3) 第8次燃料体(Photo.5.8)

特に問題となる異状は見られず、全体的には健全であった[写真(a)(b)参照]。ただし、以下に示すような異状が見られた。

①OPyC層の径方向クラック

写真(c)(d)参照。相当多数見られたが、これは従来の観察結果および考察から、照射中に生じたものではなく、照射後試験において、切断または研磨の際に生じたものであろうと推定される⁽²⁾。詳しくは、5.5.1項の(2)で検討する。径方向のクラ

ックが被覆層全体を貫通しているものも見られたが、燃料核や被覆層の損傷が全く見られないことから判断して、これも照射中に生じたものでなく、切断または研磨時に生じたものである可能性が高い。

②SiC被覆層内部の周方向欠陥

写真(e)(f)参照。これは未照射の被覆燃料粒子のSiC層中にも見られていたものと同様であり⁽¹⁷⁾、照射によって生じたものではないと考えることができる。

(4) 第9次燃料体(Photo.5.9)

燃料核中においては、製造時に生じた気孔の連結したものと思われる空洞[写真(i)(j)参照]や、金属FPの析出[写真(j)、白色の微小析出物]が見られた。これらは、特に異状ではない。

被覆層については、以下に示す種々の異状が認められた。

①OPyC層の径方向クラック

写真(a)(d)(e)(f)(g)(i)(k)参照。OPyC層のクラックは、第8次燃料体の場合と同様な様相を示していたが、これが観察される頻度は他の燃料体よりもかなり高かった。

②SiC層内部の周方向の欠陥

写真(a)(b)(f)(k)参照。上記(3)の②と同様なものである。

③IPyC層とSiC層の間の剥離

写真(c)(g)(h)(k)(l)に見られる。

④各層間(バッファ層、IPyC層、SiC層)の剥離

写真(k)(l)に示す。

⑤IPyC層の径方向クラックとSiC層の異状

写真(c)および(d)に示す。

⑥SiC層内面の異状

写真(f)に示す。

⑦破損粒子

写真(e)に示す。

③については、これまでのOGL-1燃料体では殆ど見られていなかったものである。IPyC層の照射寸法収縮のために生じたものと思われるが、剥離が生じたのは、むしろ被覆層の製造上の問題であると考えられる。というのは、通常はIPyC層とSiC層の境界では化学結合が生じるため密着性は良く、第9次燃料体以外では照射後に上のような剥離は殆ど見られなかったからである。

④については、③について今述べた原因に加えて、バッファ層の収縮により、バッファ層とIPyC層の剥離が生じたものであると考えられる。

⑤の写真(c)については、IPyC層のクラックの位置とSiC層内面の異状部の位置が対応している。これについては、IPyC層の径方向クラックがSiC層内に達したことも考えられるが、そのほかに、IPyC層のクラックを通過したCOガスによりSiC層が腐食された可能性

が考えられる。以前、密封キャプセル(80F-6A等)で照射した試料では、COガスによるSiC層の著しい腐食⁽¹⁸⁾が観察されたが、それに比べると本試料のSiC層の異状部分がわずかであり、SiC層の異状の状態も必ずしも似ていない。従って、SiC層の異状の原因について明確な判断は下せない。一方、写真(d)については、IPyC層のクラックと連続したクラックがSiC層中に生じているように見える。IPyC層のクラックが、照射中に生じたものであるとすれば、SiC層の内面部においてCOガスによる腐食が生じると考えられるが、写真(d)ではSiC層内のクラックは極く細いものであり、COガスによる腐食が生じていることは考えられない。このことから、写真(d)のIPyC層およびSiC層のクラックは、照射後試験において断面観察のために切断または研磨を行った際に生じたものと考えられる。なお、写真(c)(d)のように、IPyC層の径方向クラックが観察された被覆燃料粒子はわずかであった。

⑥については、SiC層内面に金属FPと思われる微小な白色の物質が見られる。明瞭ではないが、パラジウムによるSiC層の腐食が生じている可能性がある。

⑦については、被覆燃料粒子の貫通破損率の測定結果において、燃料コンパクトごとの大きな違いは認められなかった(Table 5.2b参照)ことを考慮すると、このコンパクトで偶然観察されたものと判断できる。

注意すべきことは、燃料コンパクトによって、照射温度および燃焼度が異なるにも拘らず、上の①～④の被覆層の異状が観察された頻度の差は認められなかったことである。このことは、これらの被覆層異状が、主に照射に起因するものではなく、製造に起因するものであることを示している。第9次燃料体は、被覆蒸着用流動床として、量産試作用の装置を用いた第1回目の試作燃料であり、このため被覆層蒸着等の製造条件が十分確立されていなかったことから、上記のような被覆層欠陥が観察されたものと考えられる。

(5) 第10次燃料体(Photo.5.10)

以下に示すような異状が見られたが、第9次燃料体の場合に比べると、異状の見られる割合は少なかった。写真(a)(b)においては、OPyC層に第9次燃料体の場合と同様な径方向クラックは見られるものの、これ以外には異状は見られず健全である。ごく一部の被覆燃料粒子には、SiC層中の周方向の欠陥[写真(c)、製造時の欠陥]や、IPyC層とSiC層の間の剥離[写真(d)]が見られた。しかし、それらの欠陥が見られる割合は、第9次燃料体の場合に比べて少なかった。

そのほか、燃料核中には、UO₂の結晶粒界上に気泡が配列したもの[写真(b)]や、気孔が同心円状に発達したもの[写真(e)(f)]が見られた。前者は照射後に通常見られるものであり、また後者は製造時に形成されたものである。両者とも、特に異状ではない。

(6) 第11次燃料体(Photo.5.11)

OPyC層の径方向クラック[写真(e)(f)(i)(j)(k)(l)]、製造時のSiC層の周方向欠陥[写真(a)(b)]、バッファ層のクラック[写真(e)(f)(g)]が見られる。前2者については、生成原因は上記の場合と同様であると考えられる。

バッファ層のクラックについては、照射寸法収縮によって生じたものと考えられるが、クラックがバッファ層内にとどまり、IPyC層に伝播していない限り、特に問題となるものではないと考えることができる。そのほかには特に異状は見られず、全体として極めて健全であった。

(7) 第12次燃料体(Photo.5.12)

燃料コンパクト 870P1-09[写真(a)-(f)]は、燃料棒軸方向について照射温度および燃焼度の点で、ほぼ最大位置で照射されたものである。また、燃料コンパクト 870P1-12 [写真(g)-(j)]は、上端側から燃料棒長さの約1/4の位置に荷物されたものである。

870P1-09では、バッファ層／IPyC層間の剥離[写真(a)(b)]、バッファ層のクラック[写真(e)(f)]が見られる。870P1-12では、バッファ層のクラック[写真(g)(i)]、バッファ層／IPyC層間の剥離[写真(h)(i)(j)]、IPyC層／SiC層間の剥離[写真(h)]、およびSiC層中の周方向の製造時欠陥[写真(j)]が見られる。以上については、著しい異状ではなく、第9次および第10次燃料に比べると、本燃料は極めて健全であった。

そのほか、燃料核中には、微小な析出物が白く見える[写真(b)(d)(f)(h)(j)]。これは高燃焼度照射に伴って生成した金属FPが析出したものであり、異状ではない。

燃料コンパクト 870P1-09は、第12次までのOGL-1燃料体で、最も高燃焼度の照射を行ったものである。この燃料コンパクトについて、断面組織上、極めて健全であることが認められたことは、特筆に値する。

なお、本燃料体については、燃料コンパクトの内面温度測定用の熱電対のシース材の溶融が照射後に観察された[文献(13)の付録1参照]。その熱電対シース溶融部分に位置していた燃料コンパクト[870P1-15、写真(k)(l)(o)(p)]では、SiC層の腐食が見られる。なお、この問題は、燃料自体の照射健全性の問題ではなく、高温の黒鉛材料中のシース付き熱電対の使用法に関する照射技術上の問題である。

5.3.6 EPMA観察

(1) 試料および観察方法

本試験に用いた試料は、上記の第12次燃料体の断面組織観察に用いた軸方向中央部試料(870P1-09)および熱電対シース溶融位置の燃料コンパクト(870P1-15)である。試料870P1-09については、燃料コンパクトの外周部および内周部から代表的な被覆燃料粒子を選び、SiC層内面の元素分析を行った。波長分析用の分光結晶としては、LiF(フッ化リチウム、分光範囲0.1055～0.3778nm)およびPET(ペンタ・エリストール、同0.2294～0.8214nm)を用いた。

(2) 観察結果および考察

燃料コンパクト 870P1-09のEPMA観察結果を、Photo.5.13およびPhoto.5.14に示す。前者はコンパクト外周部の被覆燃料粒子の低温側(外周部側)の被覆層であり、後者はコンパクト内周部の被覆燃料粒子の低温側(コンパクト肉厚側)の被覆層である。両者とも、SiC層の健全性に関連して問題となるPd^(18, 20)は検出されず、Pd腐食の兆候は認められ

なかった。熱電対シース溶融位置の燃料コンパクト870P1-15についての観察結果は、付録5Dに述べる。

5.3.7 薄切試料のX線ラジオグラフィ

本試験は、燃料コンパクトを厚さ2~3mmの薄片状の輪切り試料とし、X線ラジオグラフを撮ることによって、燃料コンパクト中の位置と被覆燃料粒子の欠陥および燃料核の移動挙動との相関を調べることを目的として行った。

本試験は、第6次~第10次燃料体について行った。試験結果の主なものをPhoto.5.15A~5.15Eに示す。いずれの試料にも、欠陥または破損粒子は認められなかった。また、燃料核移動の兆候は認められなかった。

5.4 被覆燃料粒子の照射後試験

5.4.1 外観検査およびX線ラジオグラフィ

第6次~第8次燃料体の燃料コンパクトの電気化学的解碎によって得られた被覆燃料粒子について、外観検査およびX線ラジオグラフィ検査を行った。一例として、第8次燃料体の被覆燃料粒子の外観をPhoto.5.16に、またX線ラジオグラフをPhoto.5.17に示す。第6次および第7次燃料体については、付録5Eに示す。

Photo.5.17に示す第8次燃料体の被覆燃料粒子のX線ラジオグラフィでは、SiC層が薄いもの[写真(a)の中央の粒子]、燃料核の表面が少し反応しているように見えるもの[写真(b)の中央の粒子の燃料核の斜め上の部分]、SiC層中の周方向の欠陥[写真(d)(f)の中央の粒子]、SiC層中の層状の欠け落ち[写真(e)の中央の粒子]が見られる。これらは、製造時に見られるSiC層中の層状の欠陥および燃料核表面の炭化⁽¹⁷⁾と同様なものであり、すでに製造時に生じていた欠陥がそのまま観察されたものと思われる。

これらの欠陥のほかには、外観検査およびX線ラジオグラフィ検査において、特に異状は見られなかった。特に、OPyC層に異状が見られなかったことに注意すべきである。詳しくは、5.5.1項の(2)で検討する。

5.4.2 貫通破損率の測定

燃料コンパクト中の被覆燃料粒子の貫通破損率は、電気化学的解碎・酸浸出法⁽²¹⁻²⁵⁾によって測定した。測定方法の詳細を付録5Fに示す。

各燃料体について、同一製造バッチ品である未照射および照射済み燃料コンパクトについての貫通破損率の測定結果をTable 5.2aおよび5.2bに示す。

また、未照射および照射済み燃料コンパクトの貫通破損率の95%信頼区間の比較を、Table 5.3a~5.3cに示す。表中には、ウランまたはFP浸出率から換算した破損粒子数と試験した燃料コンパクトに含まれる被覆燃料粒子の総数（概数）との比を示した。95%信頼区間を推定する方法は、付録5Fに示す。未照射、照射済み燃料とともに、仮想的に十

分(無限に)大きな母集団を考え、サンプリング(抜き取り後の破損率測定)の結果から、母集団の破損率の平均値(母平均)の95%信頼区間を統計的に推定した。未照射燃料の破損率の95%信頼区間の上限値よりも、照射済み燃料の破損率の95%信頼区間の下限値のほうが大きい時、すなわち照射前後の破損率の95%信頼区間が分離している時、95%信頼度において、照射前後で有意な増加が生じたと判断した。

Table 5.3(a,b,c)およびFig.5.4に、第6次～第12次燃料体について、製造時破損率と照射後破損率の各々の平均値およびその95%信頼区間(総合値、表中ではoverall)を示す。Table 5.2a、5.2bに示したように、燃料コンパクトごとの照射条件(温度、燃焼度、高速中性子照射量)に対して破損率が系統的に変化する傾向は認められないので、Table 5.3およびFig.5.4においては、燃料体ごとに燃料コンパクト試料全数にわたる平均値および95%信頼区間を用いた。なお、第12次燃料体については、熱電対シース溶融部分の燃料コンパクト[装荷位置16、下の(4)で説明する]を除く2個の燃料コンパクトの平均値を用いた。Fig.5.4からわかるように、第6次～第12次燃料体の照射後破損率は、いずれもHTTR設計における照射中の破損率の上限値(1×10^{-2})に比べて十分低い水準にある。

(1) 小型流動床製造燃料

第6次～第8次燃料体では、Table 5.2aに示したように、貫通破損率は、照射前、照射後ともに、 1×10^{-4} 程度以下の低い値であった。また、Table 5.3a、5.3bおよびFig.5.4に示したように、次の(2)に述べる第8次燃料体の結果を除いて、95%信頼度において照射前後で有意な破損率増加は認められなかった。

(2) 第8次燃料体

Table 5.3bにおいて、各燃料コンパクト単独の破損率をみると、装荷位置10の燃料コンパクトでは、照射前に比べて照射後で有意な破損率増加となっているが、これ以外のコンパクトでは有意な破損率増加となっていない。一方、各燃料コンパクトの破損率測定値を総合した結果をみると、95%信頼度において、照射前に比べて照射後で有意な破損率増加となっている。このような結果が得られた原因については、以下のことが考えられる。

照射後の破損率が照射前に比べて増加する機構として考えられることは、製造時にSiC層破損粒子であった粒子(コンパクト1個あたり数粒程度、Table 2.3参照)が貫通破損をおこすことである。ところが、第8次燃料体では、製造時の貫通破損率が 1.1×10^{-5} と非常に低く、その95%信頼区間の上限値も極めて低い値であった(6.2×10^{-6})。そのため、コンパクト1個あたり数粒程度のSiC層破損粒子が貫通破損を起こしても、破損率の95%信頼区間としては、製造時よりも著しく増加することになる。特に各燃料コンパクトを総合した破損率では、統計評価を行う母集団である燃料コンパクトの数が増え95%信頼区間が狭くなつたため、照射前の95%信頼区間から分離されてしまったことが考えられる。以上のことから、本燃料体の貫通破損率の増加は、例外的なものと考えられる。

(3)量産試作燃料

第9次燃料体では照射後破損率は 10^{-3} のレベルであったが、第12次燃料体では、溶融した熱電対シース位置に装荷した燃料コンパクトを除いて[次の(4)に述べる]、照射後破損率は 10^{-4} のレベルまで低下した(Table 5.2b参照)。この照射後破損率の低下は、製造時破損率が 8.7×10^{-4} から 1×10^{-4} まで低下したのに良く対応している。

第9次～第12次燃料体について、Table 5.3b、5.3cをみると、第9次燃料体(装荷位置20)および第12次燃料体(装荷位置16)の燃料コンパクトで、95%信頼度において照射による貫通破損率の有意な上昇は認められるが、これら以外には有意な上昇は認められない。第9次燃料体については、上記(2)の第8次燃料体の場合と同様に、製造時のSiC層破損粒子が照射中に貫通破損を起こしたことが考えられる。第12次燃料体については、下の(4)に述べる。

Fig.5.4においても、第9次～第12次燃料体について、照射前後の貫通破損率の平均値の95%信頼区間は重なっていることがわかる。このことから、95%信頼度において、照射による貫通破損率の平均値の有意な上昇は認められないと言える。また、第9次から第12次へと進むにつれて、製造時破損率と照射後破損率の平均値が対応して低下していることがわかる。

(4)第12次燃料体

熱電対シース溶融部分に位置していた燃料コンパクト(装荷位置16)では、そのほかの燃料コンパクトに比べて高い破損率が得られた(1.5×10^{-3} 、Table 5.2b参照)。また、Table 5.3cに示すように、95%信頼度において、照射による破損率の有意な上昇が認められた。これは、Ni等のシース金属元素によるSiC層腐食のためにSiC層破損が生じ(付録5DのEPMA観察の結果を参照)、さらにSiC層破損粒子の一部が貫通破損を起こしたことによるものと考えられる。

第3章の3.4節に述べたように、第12次燃料体の照射末期には、FPガス放出率のわずかな上昇が認められた。これは、熱電対シース部分での貫通破損率の増加に対応しているものと考えられる。

5.4.3 SiC層破損率の測定

SiC層破損率は、第6次～第10次燃料体について、燃焼・酸浸出法⁽²⁵⁻²⁹⁾によって測定した。測定方法の詳細を付録5Fに示す。

各燃料体について、未照射および照射済み燃料コンパクトのSiC層破損率の測定結果をTable 5.4に示す。同表には、貫通破損率の場合と同様に、未照射および照射済み燃料コンパクトのSiC層破損率の値およびその95%信頼区間の比較を示した。なお、燃焼・酸浸出法に用いた照射済み試料は、電気化学的解碎・酸浸出を行った後の被覆燃料粒子であるため、SiC層破損率を求める際には、燃焼後のFP浸出率に、Table 5.3aおよび5.3bに示した貫通破損率を加えた。

照射前後のSiC層破損率(推定平均値)は、いずれも 10^{-4} から 10^{-3} のレベルにある。

照射済み燃料コンパクトの破損率が3倍以上に増加している例(第8次燃料体、および第10次燃料体の装荷位置9の燃料コンパクト)が見られるが、いずれも95%信頼限界では有意な破損率増加とはなっていない。これら以外の試料では、照射前後の破損率は同程度の値であり、95%信頼区間は大きく重なっている。

以上より、測定した全ての試料について、95%信頼度において、照射による有意なSiC層破損率増加は認められなかった。

5.5 被覆燃料粒子の照射挙動の検討

以上の照射後試験を通して、被覆燃料粒子の照射挙動に関して特徴的な点について、以下に検討する。

5.5.1 断面組織上の異状の原因

(1) SiC層内部の層状の欠陥

これは、典型的には第8次燃料体で見られたものであるが、第7次～第12次のすべての燃料体で見られた。この欠陥は、既に未照射の被覆燃料粒子においても観察されており、その原因是、製造時におけるSiC層の蒸着条件が適当でなかったことによると推定されている⁽¹⁷⁾。

(2) OPyC層の径方向クラック

これは第8次燃料体で典型的に見られたものであり、他の被覆層は健全で、OPyC層だけに径方向にクラックが観察された。このようなクラックは、従来のOGL-1燃料体照射後の断面組織観察においても見られていたものであり^(1, 2)、照射中に生じたものではなく、照射中に被覆層内に蓄積された応力が、照射後試験における切断または研磨に伴って解放されて生じたクラックであると推定される。

電気化学的解碎を行ったままで、研磨を行っていない被覆燃料粒子の外観検査およびX線ラジオグラフィでは、OPyC層にクラックは見られなかった(5.4.1項参照)。このことから、粒子状態ではOPyC層は健全であり、断面組織観察を行うため切断および研磨を行った際に、OPyC層にクラックが生じたものと判断できる。すなわち、これらのクラックは切断または研磨に伴うものであり、照射によって生じた被覆層欠陥とは考える必要がないと言える。

OPyC層の径方向クラックが生じる機構として、定性的には以下のことが考えられる。OPyC層は、照射中は高速中性子照射により寸法収縮が生じようとし、その内側のSiC層を締めつける。OPyC層には引張り応力がかかっている状態である⁽³⁰⁾。この状態において、球状で対称性を有する被覆燃料粒子の形状のままであれば、高速中性子照射量や燃焼度がOGL-1照射条件程度においては、被覆層の機械的健全性は保たれ、被覆層破損は生じない。このことは、解碎粒子のOPyC層に破損が見られないことから言える。しかし、被覆燃料粒子の切断または研磨を行うと、被覆層に働く応力は非対称となって

応力状態が不安定になり、その結果としてOPyC層では過大な引張り応力が働き、そのため径方向のクラックが生じたものと考えられる。

(3)その他

第9次燃料体の断面組織観察において認められた異状については、5.3.5項でその生成原因について検討した。

5.5.2 その他の被覆層破損機構について

以上述べたもののほかに、一般に知られている通常運転条件下における被覆層破損原因に関して、本照射の結果を以下に要約して示す。

(1) 燃料核移動(アメーバ効果)

いずれの燃料体についても、全く認められなかった。

(2) SiC層のFP(特にPd)による腐食

第9次燃料体の燃料コンパクト830P1-07において、Pd腐食の可能性が認められた。しかし、これを含めて、第6次～第12次の全燃料体の断面組織観察において、明らかなPd腐食は認められなかった。また、第12次燃料体(試料870P1-09)では、EPMAによる観察を行ったが、SiC層内面へのPd蓄積は認められなかった。

OGL-1照射で殆どPd腐食が観察されないのは、以下の理由によると考えられる。すなわち、Pdの核分裂収率は²³⁸Puのほうが²³⁵Uの場合よりも1桁程度大きい。OGL-1燃料は²³⁵U濃縮度が約20%と高いため、²³⁵Uの核分裂が殆どを占め、²³⁸Puの核分裂割合はわずかである。このため、JMTR炉心領域で照射するキャップセル(密封キャップセルおよびスリープガスキャップセル、²³⁵U濃縮度は4～8%)の照射試料と比べると、同じ燃焼度でもPdの生成量が少なくなり、したがってSiC層の腐食に寄与するPdの量も少ないものと考えられる。

5.6まとめ

第6次～第12次OGL-1燃料体について、燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の照射後試験を行い、以下の試験結果を得た。なお、以下において特に記述していない項目については、第6次～第12次の全燃料体について試験を行った。

(1)外観、内面検査

第9次および第11次燃料体では、オーバーコート境界の著しい隙間、黒鉛マトリックスの欠け、および露出した被覆燃料粒子が観察された。しかし、これらは、未照射の燃料コンパクトでも観察されたことから、主に製造に起因するものであると推定された。そのほか、第8次燃料体では1個の破損粒子の露出が検出された。上記以外の燃料体では、特に異状は認められなかった。

(2)寸法検査

燃料コンパクトの照射寸法変化は、第1次～第12次燃料体を通して、同様な高速

中性子照射量依存性を示すことが確かめられた。

(3) 重量検査

異常値であると思われる第12次燃料体の場合を除いて、重量減少率は最大で0.01%（重量差最大値4mg）であった。測定誤差を考慮すれば、有意な重量減少とは考えられず、冷却材中の不純物による燃料コンパクトの腐食は問題となる程度ではなかった。

(4) 燃料コンパクト中のFPインベントリ測定

第8次燃料体以降は、燃料コンパクトを回転させながらFP放射能を測定した。この方法により、燃料コンパクトの炉心側と反炉心側の熱中性子束の差による燃焼度分布の影響が排除され、燃料棒軸方向になめらかなFPインベントリ分布が得られた。この分布は、OGL-1位置での炉心高さ方向の熱中性子束分布と良く一致した。

(5) 断面組織観察

第6～8次、第11～12次燃料体では、健全性の点で特に問題となるような被覆層欠陥は観察されなかった。一方、第9次および第10次燃料体では、IPyC層とSiC層の間の剥離等の種々の被覆層欠陥が観察された。これは、量産試作燃料の製造開始にあたって、被覆層蒸着条件が十分確立していなかったことによるものと思われる。

アメーバ効果の兆候は認められなかった。また、明らかなPd/SiC反応およびCO/SiC反応は認められなかった。

(6) EPMA観察

第12次燃料体の軸方向中央の高温・高燃焼度部の燃料コンパクトの断面について、EPMA観察を行ったが、Pdは検出されず、Pd腐食の兆候は認められなかった。

(7) 薄切燃料コンパクトのX線ラジオグラフィ

第6次～第10次燃料体の燃料コンパクトについて試験を行ったが、被覆層破損または欠陥は認められなかった。また、アメーバ効果は認められなかった。

(8) 被覆燃料粒子の外観検査およびX線ラジオグラフィ

第6次～第8次燃料体について検査を行った。第8次燃料体の一部に、製造時のものと思われる種々の欠陥がX線ラジオグラフィで観察されたが、照射に起因すると思われる欠陥は観察されなかった。

(9) 貫通破損率測定

電気化学的解碎・酸浸出法によって得た貫通破損率の値は、第6次～第8次燃料体では、製造時、照射後ともに 1×10^{-4} 程度以下の低い値であった。第9次燃料体では、照射後破損率は 10^{-3} の桁であり、比較的高いレベルであったが、第12次燃料体では 2.7×10^{-4} まで低下した。これは、製造時破損率が 8.7×10^{-4} から 1.0×10^{-4} まで低下したのに、ほぼ対応している。なお、例外的な第8次燃料体の場合を除いて、第6次～第12次のいずれの燃料体についても、各燃料コンパクトを総合した値については、95%信頼限界において、照射による有意な破損率増加は認められなかった。

(10) SiC層破損率測定

第6次～第10次燃料体について、燃焼・酸浸出法によって測定した。照射前後のSiC層破損率は、いずれも 10^{-4} から 10^{-3} のレベルであった。測定した全ての試料について

95%信頼限界において、照射による有意な破損率増加は認められなかった。

参考文献

- (1) 井川勝市、福田幸朔、菊池輝男、小林紀昭、林 君夫、湊 和生、岩本多實、伊丹宏治、伊藤尚徳、石本 清、“OGL-1第1次、第2次燃料体の照射試験”, JAERI-M 83-012 (1983).
- (2) 福田幸朔、小林紀昭、林 君夫、湊 和生、菊池輝男、足立 守、伊丹宏治、岩本多實、井川勝市、“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).
- (3) 福田幸朔、小川 徹、鹿志村悟、林 君夫、飛田 勉、小林紀昭、湊 和生、菊地 啓修、村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”, JAERI-M 89-007 (1989).
- (4) 松永朔郎、田中利幸、馬場 治、高橋秀武、中村団夫、逆井 実、小畠清和、亀ヶ谷勝彦、山田邦貴、臼井伸一、“高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験”, 原子力誌 21 (1979) 249.
- (5) 日本原子力研究所、“日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書 HTTR(高温工学試験研究炉)原子炉施設の設置”, 平成元年2月(平成元年11月一部補正)(平成2年10月一部補正).
- (6) 林 君夫、塩沢周策、沢 和弘、佐藤貞夫、丸山 創、小林紀昭、福田幸朔、“高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全性評価”, JAERI-M 89-161 (1989).
- (7) 林 君夫、沢 和弘、塩沢周策、福田幸朔、“高温工学試験研究炉用燃料の健全性の評価と許容設計限界”, JAERI-M 89-162 (1989).
- (8) 青地哲男、下川純一、安野武彦、安川 茂、三竹 普、宮本喜晟、武藤 康、新藤隆一、田所啓弘、幾島毅、荒井長利、江崎正弘、平野光将、瀬谷東光、佐藤貞夫、鈴木勝男、鈴木邦彦、梶山武義、“多目的高温ガス実験炉第1次概念設計”, JAERI-M 6845 (1977).
- (9) 青地哲男、下川純一、安川 茂、新藤隆一、幾島毅、荒井長利、江崎正弘、平野光将、佐藤貞夫、鈴木勝男、鈴木邦彦、渡部 隆、石黒興和、田村宣弘、西条泰博、谷 雄太郎、倉重哲雄、黒木修二、“多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計 Mark-III”, JAERI-M 6895 (1976).
- (10) 荒井長利、幾島毅、佐藤貞夫、鈴木勝男、谷 雄太郎、黒木修二、“多目的高温ガス実験炉Mark-III炉心の燃料特性”, JAERI-M 6945 (1977).
- (11) 小野寺一幸、馬場 治、本間健三、“OGL-1静特性計算プログラムSTEPDSP2”, 原研未公開資料 (1979).
- (12) 林 君夫、小林紀昭、湊 和生、足立 守、福田幸朔、“第9次および第10次OGL-1燃

- 料体の黒鉛スリープおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”、JAERI-M 88-210 (1988).
- (13) 林 君夫、福田幸朔、鶴田晴通、菊池輝男、“第11次および第12次OGL-1燃料体の黒鉛スリープおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”、JAERI-M 94-075 (1994).
 - (14) 林 君夫、湊 和生、小林紀昭、飛田 勉、菊池輝男、黒羽根史郎、足立 守、福田幸朔、“OGL-1燃料体の燃料コンパクトと黒鉛スリープの照射寸法変化”、JAERI-M 88-107 (1988).
 - (15) 菊地啓修、林 君夫、湊 和生、白鳥徹雄、福田幸朔、菊池輝男、鶴田晴通、“第11次および第12次燃料体の照射後試験”、日本原子力学会 1993年秋の大会 (1993年10月、神戸商船大) K16.
 - (16) 材料試験炉部、“JMTRハンドブック”、JAERI-M 94-023 (1994).
 - (17) 湊 和生、小林紀昭、菊地啓修、福田幸朔、“被覆燃料粒子の製造過程における破損機構”、JAERI-M 86-083 (1986).
 - (18) K. Minato, T. Ogawa, S. Kashimura, K. Fukuda, I. Takahashi, M. Shimizu and Y. Tayama, “Carbon monoxide-silicon carbide interaction in HTGR fuel particles”, J. Mater. Sci. 26 (1991) 2379.
 - (19) T.N. Tiegs, “Fission product Pd-SiC interaction in irradiated coated-particle fuels”, Nucl. Technol. 57 (1982) 389.
 - (20) K. Minato, T. Ogawa, S. Kashimura, K. Fukuda, M. Shimizu, Y. Tayama and I. Takahashi, “Fission product palladium-silicon carbide interaction in HTGR fuel particles”, J. Nucl. Mater. 172 (1990) 184.
 - (21) K. Fukuda, K. Minato, K. Ikawa, T. Itoh and H. Matsushima, “Detection of failed coated fuel particles in HTGR fules by acid leaching”, J. Nucl. Sci. Technol. 18 (1981) 887.
 - (22) 飛田 勉、岩本多実、“酸浸出法によるペレット中の被覆燃料粒子の破損率測定”、JAERI-M 5265 (1973).
 - (23) 小林紀昭、福田幸朔、“高温ガス炉用燃料コンパクトの電気解碎-硝酸浸出法による露出ウラン率検査法”、JAERI-M 87-023 (1987).
 - (24) 赤石 準、矢部 明、“固体蛍光法によるウランの定量法”、JAERI-memo 3622(公開) (1969).
 - (25) 小林紀昭、小倉浩一、小川 徹、福田幸朔、“高温ガス炉用量産試作燃料コンパクトの露出ウラン率およびSiC層破損率の検査”、JAERI-M 88-265 (1988).
 - (26) 松島秀夫、関野甫、菊池輝男、糸永文雄、伊藤忠春、石本清、福田幸朔、小林紀昭、“照射済被覆燃料粒子のSiC破損率測定試験”、日本原子力学会 昭和58年秋の分科会 (1983年9月、北大) G9.
 - (27) 菊池輝男、関野 甫、沼田正美、松島秀夫、石本 清、福田幸朔、“照射済被覆燃料粒子のSiC破損率測定試験(II)”、日本原子力学会 昭和61年年会 (1986年3月、京大) F33.

- (28) 菊池輝男、関野 甫、沼田正美、松島秀夫、足立 守、林 君夫、“照射済被覆燃料粒子のSiC層破損率の測定法の開発”、原研未公開所内報（1987）。
- (29) 林 君夫、菊池輝男、松島秀夫、関野 甫、沼田正美、小林紀昭、飛田 勉、鹿志村 悟、福田幸朔、“照射済み被覆燃料粒子のSiC層破損率”、原研未公開所内報（1992）。
- (30) 林 君夫、佐藤貞夫、豊田純二、塩沢周策、沢 和弘、鹿志村悟、菊池輝男、福田幸朔、“高温工学試験研究炉用被覆燃料粒子の被覆層の照射応力解析”、JAERI-M 91-111（1991）。

Table 5.1 Post-irradiation items and compact numbers tested for the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Appearance, Weight, Dimension	Fission Product Inventory	Inner Surface Inspection	Slice X-ray Radiography	Ceramo-graphy	Acid Leaching	Coated Particle Appearance, X-ray Radiography	Defective SiC-layer Fraction
6th	all	all	8* ¹	3,7,10,15	3,7,10, 12,15	1,5,9,14,20	1,5,9,14,20	9
7th	rod 1 rod 2 rod 3	all all all	- -	3,10,15 -	3,10,15 3,8,10,15 3,10,15	1,5,9,14,20 1,5,9,14,20 1,5,9,14,20	1,5,9 1,5,9 1,5,9	- 5,9 -
8th	all	all	8	3,7,11,15	3,7,11,15	1,5,9, 10,14,20	1,5,9, 10,14,20	5
9th	all	all	8	10	3,7,10,15	1,5,9,14,20	*2	9
10th	all	all	*2	10	3,7,10,15	1,5,9,14,20	*2	1,9
11th	rod 1 rod 2 rod 3	4,8,14 4,8,14 4,8,14	4,8,14 -	- -	7 7 7	8 8 8	- - -	- - -
12th	*3	8,13,16	-	-	9,12,15	8,13,16	-	-

*1 The compact number is addressed from the bottom side of the fuel rod.

*2 Canceled.

*3 Surface appearance inspection = all 19 compacts;
Weight and dimension measurement = compacts No. 1,3,5,7,8,10,12,14,16 and 18.

Table 5.2 a Through-coating failure fractions of coated fuel particles in irradiated and unirradiated fuel compacts of the 6th-8th OGJ-1 fuel assemblies

Fuel Assembly	Position of Fuel Compact	Irradiation Conditions			Failure Fraction	
		Temp. ^{a)} (°C)	Burnup ^{a)} (%)	Fast-neutron Fluence ^{a)} (10^{24} m^{-2} , E>29fJ)	Irrad. ^{b)}	Unirrad. ^{c)}
					(% FIMA)	(10^{24} m^{-2} , E>29fJ)
6th	1	980	0.3	0.2	1.5×10^{-4}	
	5	1345	0.4	0.4	3.7×10^{-5}	
	9	1488	0.4	0.4	1.1×10^{-4}	5.2×10^{-5}
	14	1428	0.3	0.3	$<3 \times 10^{-6}$	4.9×10^{-6}
	20	1093	0.1	0.1	1.8×10^{-4}	
	(Mean)				9.6×10^{-6}	5.1×10^{-6}
7th	1	984	0.5	0.5	1.1×10^{-4}	
	5	1106	0.7	1.0	1.1×10^{-4}	
	9	1215	0.8	1.2	1.8×10^{-4}	
	20	985	0.2	0.3	1.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}
	(Mean)				1.1×10^{-7}	1.1×10^{-7}
Rod 1	1	1063	0.8	0.7	1.2×10^{-7}	
	5	1224	1.2	1.4	7.5×10^{-8}	
	9	1376	1.3	1.6	1.5×10^{-7}	7.9×10^{-6}
	20	1068	0.4	0.4	6.9×10^{-6}	1.1×10^{-7}
	(Mean)				8.4×10^{-7}	
Rod 2	1	1060	0.7	0.7	1.7×10^{-7}	
	5	1215	1.0	1.4	8.0×10^{-6}	
	9	1358	1.1	1.6	1.2×10^{-7}	
	20	1064	0.3	0.4	1.2×10^{-6}	
	(Mean)				7.1×10^{-6}	2.7×10^{-6}
Rod 3	1	940	0.6	0.5	8.7×10^{-6}	
	5	1124	0.9	1.0	1.1×10^{-4}	2.9×10^{-5}
	9	1330	1.0	1.2	3.8×10^{-7}	6.7×10^{-8}
	10	1358	1.0	1.2	2.9×10^{-4}	5.6×10^{-8}
	14	1370	0.8	0.9	1.8×10^{-4}	5.6×10^{-8}
	20	1097	0.3	0.3	5.2×10^{-7}	2.7×10^{-7}
	(Mean)				1.1×10^{-4}	5.9×10^{-8}

a) Calculated by the STEPDSP2 code; see section 5.2 and Appendix 3.

b) Fraction of ^{144}Ce leached by nitric acid (7-normal HNO_3 aq.).

c) Fraction of exposed uranium leached by nitric acid (7-normal HNO_3 aq.).

Table 5.2 b Through-coating failure fractions of coated fuel particles in irradiated and unirradiated fuel compacts of the 9th-12th OG-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Position of Fuel Compact	Irradiation Conditions			Failure Fraction	
		Temp. a)	Burnup a)	Fast-neutron Fluence a)	Irrad. b)	Unirrad. c)
		(% FIMA)	(10^{24}m^{-2} , E>29fJ)			
9th	1	1104	1.6	1.2	0.96×10^{-3}	
	5	1313	2.5	2.5	1.35×10^{-3}	
	9	1381	2.7	2.8	1.49×10^{-3}	9.4×10^{-4}
	14	1255	2.1	2.2	1.15×10^{-3}	8.2×10^{-4}
	20	958	0.9	0.8	1.90×10^{-3}	
	(Mean)				1.37×10^{-3}	8.7×10^{-4}
10th	1	1057	1.7	1.0	1.1×10^{-4}	
	5	1270	2.6	2.1	3.9×10^{-4}	
	9	1331	2.8	2.4	6.6×10^{-4}	2.7×10^{-4}
	14	1180	2.1	1.8	7.7×10^{-4}	2.4×10^{-4}
	20	879	0.8	0.6	5.1×10^{-4}	
	(Mean)				4.9×10^{-4}	2.6×10^{-4}
11th	108 (Rod 1) d)	1.2	1.2	1.9×10^{-4}		
	208 (Rod 2) d)	1.5	1.6	2.3×10^{-4}	1.1×10^{-4}	
	308 (Rod 3) d)	1.4	1.7	2.6×10^{-4}	7.0×10^{-7}	
	(Mean)				2.3×10^{-4}	5.5×10^{-5}
12th	8 d)	3.9	3.1	7.1×10^{-5}	0.5×10^{-4}	
	13 d)	3.0	2.4	4.7×10^{-4}	1.5×10^{-4}	
	16 d)	2.0	1.5	$(1.5 \times 10^{-3})^e)$		
	(Mean)			2.7×10^{-4}	1.0×10^{-4}	

a) Calculated by the STEPDSP2 code; see section 5.2 and Appendix 3.

b) Fraction of ^{144}Ce leached by nitric acid (7-normal HNO_3 aq.).

c) Fraction of exposed uranium leached by nitric acid (7-normal HNO_3 aq.).

d) Not yet calculated.

e) Fuel compact loaded at the melted thermocouple position.

Table 5.3a Comparison of 95% confidence limits of the through-coating failure fractions of coated fuel particles (CFPs) for unirradiated and irradiated fuel compacts of the 6th-7th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Unirradiated Fuel Compact			Irradiated Fuel Compact			Separation of 95% Confidence Limit	
	No. of CFPs (Failed /Total)	Mean Failure Fraction	95% Limit (Lower /Upper)	Position of Fuel Compact	Measured Leaching Fraction	No. of CFPs (Failed /Total)		
6th	2/36000	5.6×10^{-6} $/2.0 \times 10^{-4}$	1.7×10^{-5}	1	1.5×10^{-4}	3/18000	1.7×10^{-4}	
				5	3.7×10^{-5}	1/18000	5.6×10^{-5}	
				9	1.1×10^{-4}	2/18000	1.1×10^{-4}	
			$< 3 \times 10^{-6}$	14	$0/18000$	0	3.4×10^{-5}	
				20	1.8×10^{-4}	3/18000	6.1×10^{-5}	
			Overall		9.6×10^{-6}	9/90000	1.0×10^{-4}	
							5.3×10^{-6}	
				(Rod 1)				
				1	1.1×10^{-4}	1/9000	1.1×10^{-4}	
				5	1.1×10^{-4}	1/9000	1.1×10^{-4}	
7th	2/63000	3.2×10^{-5} $/1.1 \times 10^{-4}$	9.8×10^{-6}	9	1.8×10^{-4}	2/9000	2.2×10^{-4}	
				9	1.5×10^{-7}	0/9000	$0/9000$	
				20	6.9×10^{-5}	1/9000	2.2×10^{-4}	
				(Rod 2)				
				1	1.2×10^{-7}	0/9000	$0/9000$	
				5	7.5×10^{-8}	0/9000	$0/9000$	
				9	1.5×10^{-7}	0/9000	$0/9000$	
				20	6.9×10^{-5}	1/9000	1.1×10^{-4}	
			Overall					
				(Rod 3)				
				1	1.7×10^{-7}	0/9000	$0/9000$	
				5	8.0×10^{-6}	1/9000	1.1×10^{-4}	
				9	1.2×10^{-4}	1/9000	1.1×10^{-4}	
				20	1.2×10^{-5}	0/9000	$0/9000$	

× : 95% confidence limits of through-coating failure fractions of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are not separative; no significant increase of the fraction due to irradiation.

○ : 95% confidence limits of through-coating failure fractions of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are separative;
a significant increase of the failure fraction due to irradiation.

Table 5.3 b Comparison of 95% confidence limits of the through-coating failure fractions of coated fuel particles (CFPs) for unirradiated and irradiated fuel compacts of the 8th-10th OG-L-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Unirradiated Fuel Compact			Irradiated Fuel Compact						Separation of 95% Confidence Limit	
	No. of CFPs Failed /Total	Mean Failure Fraction	95% Limit (Lower /Upper)	Position of Fuel Compact	Measured Leaching Fraction	No. of CFPs Failed /Total)	Inferred Failure Fraction	95% Confidence Limit			
								Lower	Upper		
8th	1/90000 1.1x10 ⁻⁶	2.7x10 ⁻⁶ /6.2x10 ⁻⁶	1	8.7x10 ⁻⁶	2/18000	1.1x10 ⁻⁴	3.4x10 ⁻⁶	4.0x10 ⁻⁴	X	X X X O X X	
			5	1.1x10 ⁻⁴	2/18000	1.1x10 ⁻⁴	3.4x10 ⁻⁶	4.0x10 ⁻⁴	X		
			9	3.8x10 ⁻⁷	0/18000	0	-	2.1x10 ⁻⁴			
			10	2.9x10 ⁻⁴	5/18000	2.8x10 ⁻⁴	1.2x10 ⁻⁴	6.5x10 ⁻⁴			
			14	1.8x10 ⁻⁴	3/18000	1.7x10 ⁻⁴	6.1x10 ⁻⁶	4.9x10 ⁻⁴			
			20	5.2x10 ⁻⁷	0/18000	0	-	2.1x10 ⁻⁴			
9th	33/38000 8.7x10 ⁻⁴	6.2x10 ⁻⁴ /1.22x10 ⁻³	Overall	1.1x10 ⁻⁴	12/108000	1.1x10 ⁻⁴	6.4x10 ⁻⁶	1.9x10 ⁻⁴	O	X X X X O X	
			1	0.96x10 ⁻³	18/19000	9.5x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻³			
			5	1.35x10 ⁻³	26/19000	1.4x10 ⁻³	9.4x10 ⁻⁴	2.0x10 ⁻³			
			9	1.49x10 ⁻³	28/19000	1.5x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³	2.1x10 ⁻³			
			14	1.15x10 ⁻³	22/19000	1.2x10 ⁻³	7.7x10 ⁻⁴	1.7x10 ⁻³			
			20	1.90x10 ⁻³	36/19000	1.9x10 ⁻³	1.4x10 ⁻³	2.6x10 ⁻³			
10th	9/36000 2.5x10 ⁻⁴	1.3x10 ⁻⁴ /4.75x10 ⁻⁴	Overall	1.37x10 ⁻³	130/95000	1.37x10 ⁻³	1.16x10 ⁻³	1.6x10 ⁻³	X	X X X X	
			1	1.1x10 ⁻⁴	2/18000	1.1x10 ⁻⁴	3.4x10 ⁻⁶	4.0x10 ⁻⁴	X		
			5	3.9x10 ⁻⁴	7/18000	3.9x10 ⁻⁴	1.9x10 ⁻⁴	8.0x10 ⁻⁴	X		
			9	6.6x10 ⁻⁴	12/18000	6.7x10 ⁻⁴	3.9x10 ⁻⁴	1.2x10 ⁻³	X		
	14	7.7x10 ⁻⁴	14/18000	7.8x10 ⁻⁴	4.67x10 ⁻⁴	4.67x10 ⁻⁴	1.3x10 ⁻³			X X X	
			20	5.1x10 ⁻⁴	9/18000	5.0x10 ⁻⁴	2.7x10 ⁻⁴	9.5x10 ⁻⁴			
			Overall	4.9x10 ⁻⁵	44/90000	4.9x10 ⁻⁴	3.7x10 ⁻⁴	6.6x10 ⁻⁴	X		

X : 95% confidence limits of through-coating failure fractions of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are not separative; no significant increase of the failure fraction due to irradiation.

O : 95% confidence limits of through-coating failure fractions of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are separative; a significant increase of the failure fraction due to irradiation.

Table 5.3c Comparison of 95% confidence limits of the through-coating failure fractions of coated fuel particles (CFPs) for unirradiated and irradiated fuel compacts of the 11th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Unirradiated Fuel Compact			Irradiated Fuel Compact				Separation of 95% Confidence limit		
	No. of CFPs (Failed /Total)	Mean Failure Fraction	95% Limit (Lower /Upper)	Position of Fuel Compact	Measured Leaching Fraction	No. of CFPs (Failed /Total)	Inferred Failure Fraction		95% Confidence Limit	
11th	1/21200	4.7x10 ⁻⁵	1.1x10 ⁻⁵ /2.6x10 ⁻⁴	Rod 1 Rod 2 Rod 3	0.8 0.8 0.8	1.9x10 ⁻⁴ 2.3x10 ⁻⁴ 2.6x10 ⁻⁴	2/10600 2/10600 3/10600	1.9x10 ⁻⁴ 1.9x10 ⁻⁴ 2.8x10 ⁻⁴	5.8x10 ⁻⁵ 6.8x10 ⁻⁴ 8.3x10 ⁻⁴	X X X
				Overall	2.3x10 ⁻⁴	7/31800	2.2x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻⁴	4.5x10 ⁻⁴	X
12th	3/27000	1.1x10 ⁻⁴	4.0x10 ⁻⁵ /3.2x10 ⁻⁴	0.8 1.3 (16)* ₁	7.1x10 ⁻⁵ 4.7x10 ⁻⁴ (1.5x10 ⁻³)	7/13500 6/13500 (20/13500)	7.4x10 ⁻⁶ 4.4x10 ⁻⁴ (9.6x10 ⁻³)	1.8x10 ⁻⁵ 2.1x10 ⁻⁴ (2.3x10 ⁻³)	4.1x10 ⁻⁴ 9.7x10 ⁻⁴ (O)	X X (O)
				Overall	2.7x10 ⁻⁴	7/27000	2.6x10 ⁻⁴	1.3x10 ⁻⁴	5.3x10 ⁻⁴	X

X : 95% confidence limits of through-coating failure fractions of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are not separative; no significant increase of the failure fraction due to irradiation.

O : 95% confidence limits of through-coating failure fractions of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are separative; a significant increase of the failure fraction due to irradiation.

*1 Fuel compact loaded at the melted thermocouple position.

Table 5. 4 Comparison of 95% confidence limits of the defective SiC-layer fractions of coated fuel particles (CFPs) for unirradiated and irradiated fuel compacts of the 6th-10th OG-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Unirradiated Fuel Compact* ¹			Irradiated Fuel Compact* ²			Separation of 95% Confidence Limit
	No. of CFPs (Defective /Total)* ³	Mean Defective Fraction	95% Limit (Lower /Upper)	Position of Fuel Compact	Measured Failure Fraction	No. of CFPs (Failed /Total)* ⁴	
6th	34/18000	1.9x10 ⁻³	1.4x10 ⁻³ /2.6x10 ⁻³	9	(1.9x10 ⁻³)	(2/1048)	2.0x10 ⁻³ (1.9x10 ⁻³) 6.2x10 ⁻⁴ (5.9x10 ⁻⁴) 7.3x10 ⁻³ (6.9x10 ⁻³) X
7th	79/18000	4.4x10 ⁻³	3.5x10 ⁻³ /5.5x10 ⁻³	5 of Rod 2 9 of Rod 2	(5.6x10 ⁻³) (3.4x10 ⁻³)	(5/889) (3/888)	5.6x10 ⁻³ (5.6x10 ⁻³) 2.5x10 ⁻³ (2.5x10 ⁻³) 1.3x10 ⁻² (1.3x10 ⁻²) X
8th	17/36000	4.7x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴ /7.6x10 ⁻⁴	5	(1.7x10 ⁻³)	(2/1208)	3.4x10 ⁻³ (3.4x10 ⁻³) 1.2x10 ⁻³ (1.2x10 ⁻³) 1.0x10 ⁻² (9.8x10 ⁻³) X
9th	74/19000	3.9x10 ⁻³	3.1x10 ⁻³ /4.9x10 ⁻³	9	(1.6x10 ⁻³)	(6/3432)	1.8x10 ⁻³ (1.7x10 ⁻³) 5.4x10 ⁻⁴ (5.1x10 ⁻⁴) 6.4x10 ⁻³ (6.0x10 ⁻³) X
10th	27/36000	7.5x10 ⁻⁴	5.2x10 ⁻⁴ /1.1x10 ⁻³	1 9	(5.0x10 ⁻⁶) (7.1x10 ⁻⁴)	(0/2320) (1/1966)	1.1x10 ⁻⁴ (0) 3.4x10 ⁻⁶ (-) 2.0x10 ⁻³ (1.6x10 ⁻³) X

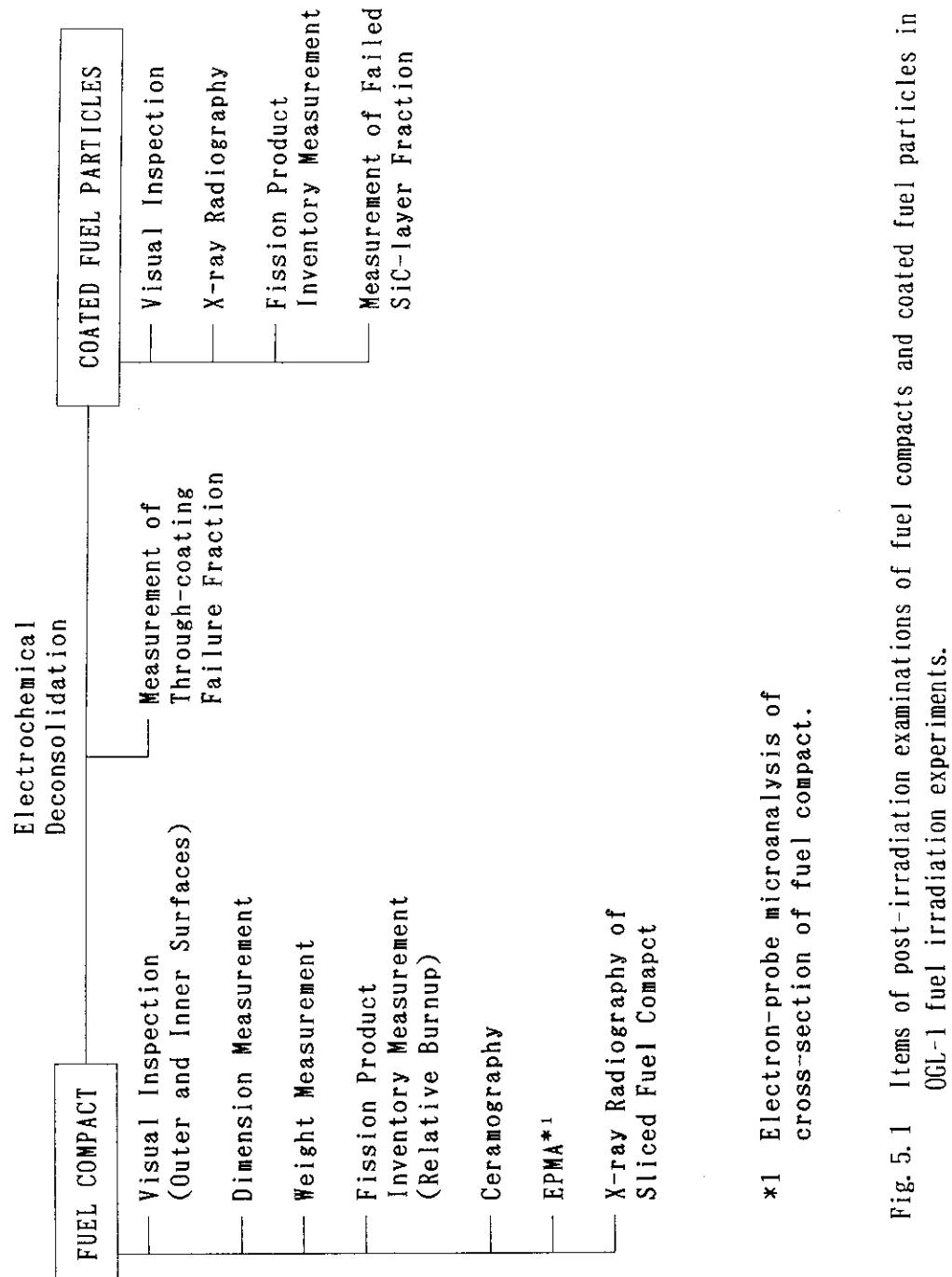
X 95% confidence limits of failure fractions of SiC-layer of CFPs for irradiated and unirradiated fuel compacts are not separative; no significant increase of the failure fraction due to irradiation.

*1 The through-coating failure fraction has been included.

*2 The through-coating failure fraction (see Tables 5.3a and 5.3b) has been included. The SiC-layer failure fraction excluding the through-coating failure fraction is indicated in parentheses.

*3 Inferred integer number of CFPs with defective SiC layer in uranium leaching before irradiation, divided by the total CFP specimen number.

*4 Inferred integer number of CFPs with defective SiC layer in fission product leaching after irradiation, divided by the total CFP specimen number.



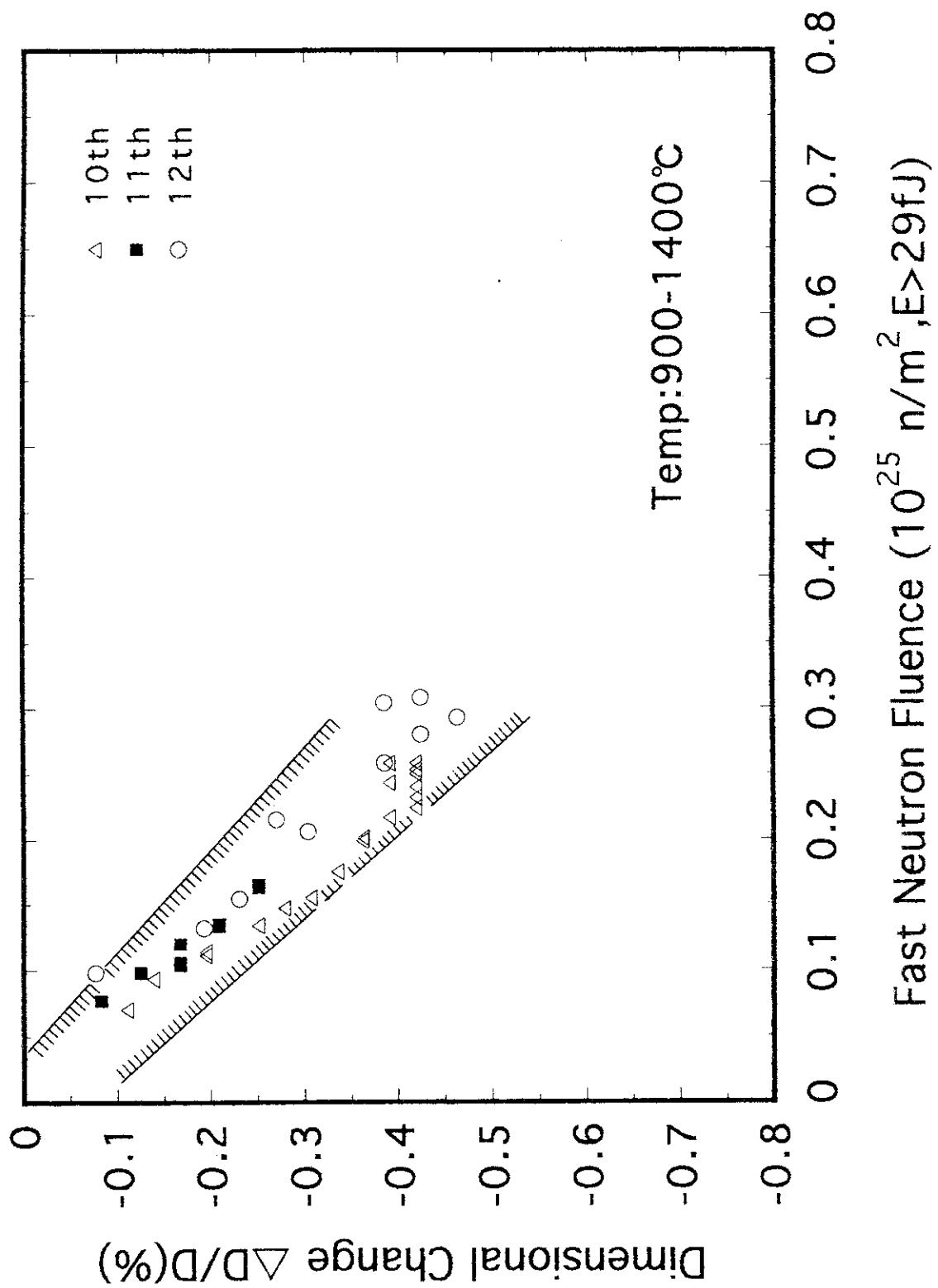


Fig. 5.2 Dimensional changes in fuel compact diameter for the 10th-12th OGL-1 fuel assemblies as a function of fast neutron fluence. The shaded area indicates the data range for the 1st-9th OGL-1 fuel assemblies.

HL-928 82LF-22A COMPACT COUNT RATE

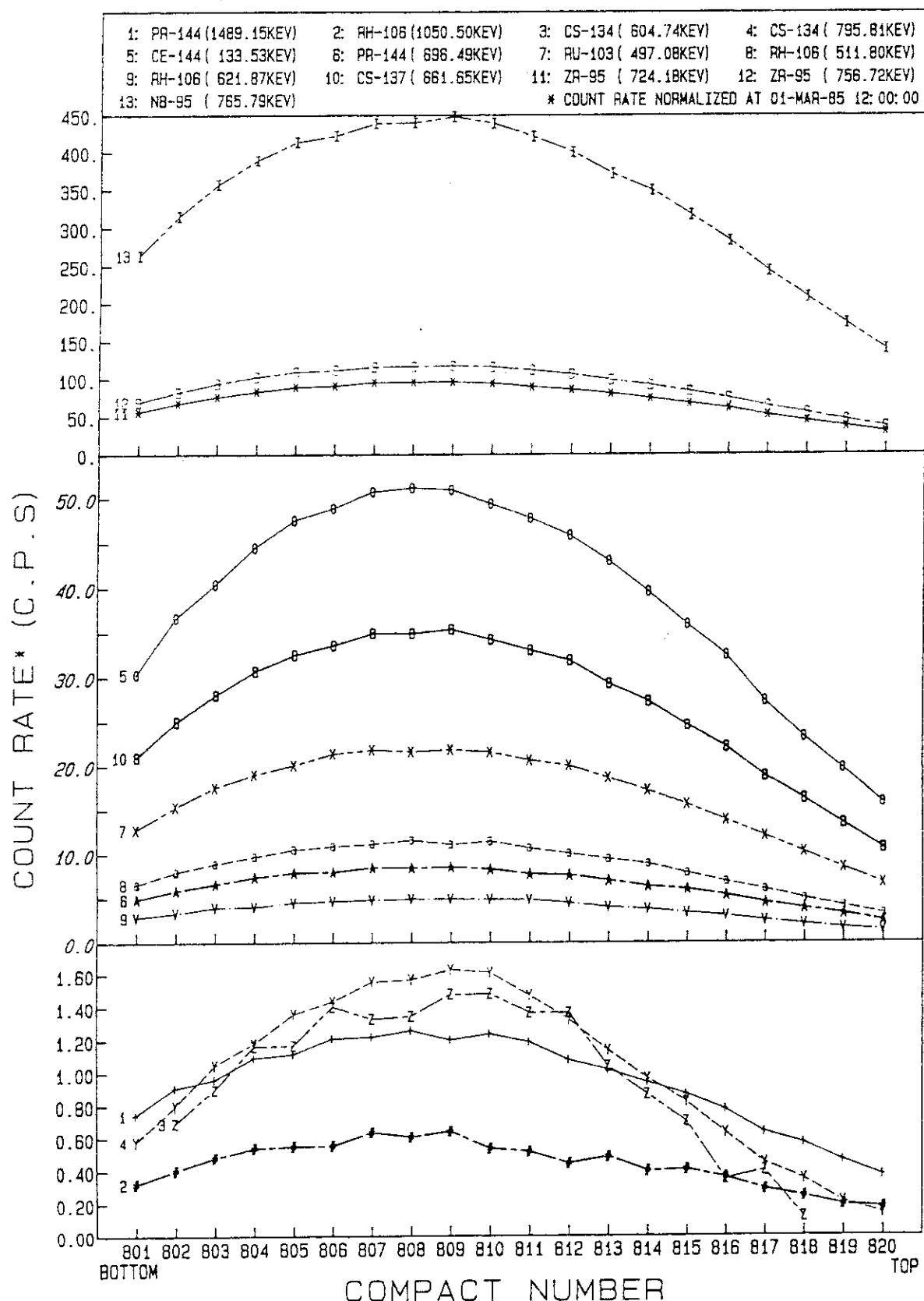


Fig. 5.3 Fission product inventory in fuel compacts of the 8th OGL-1 fuel assembly.
 The compacts were rotated during activity measurement.

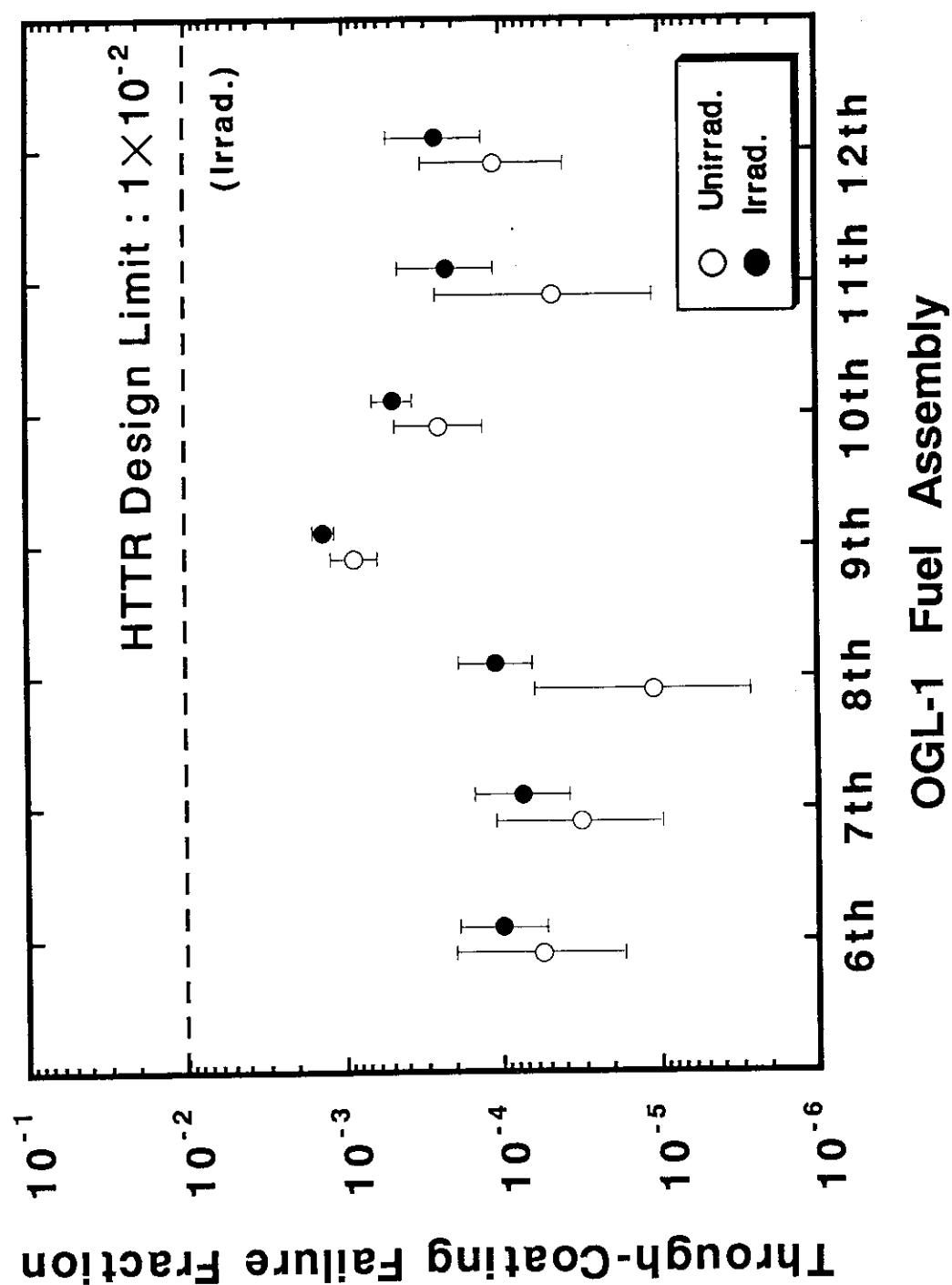
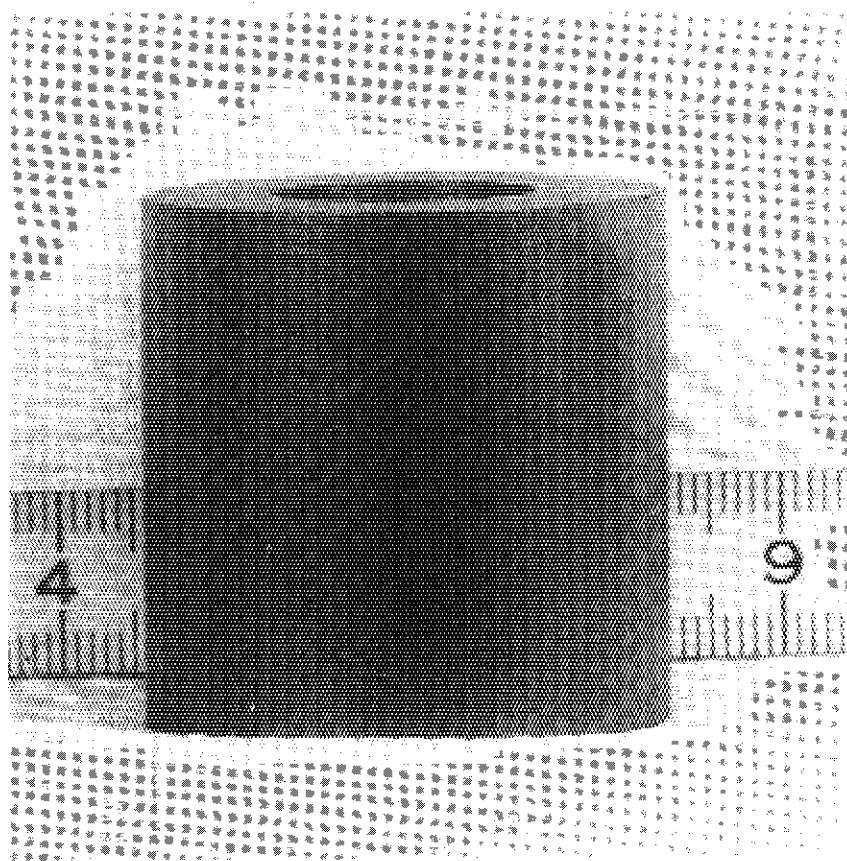
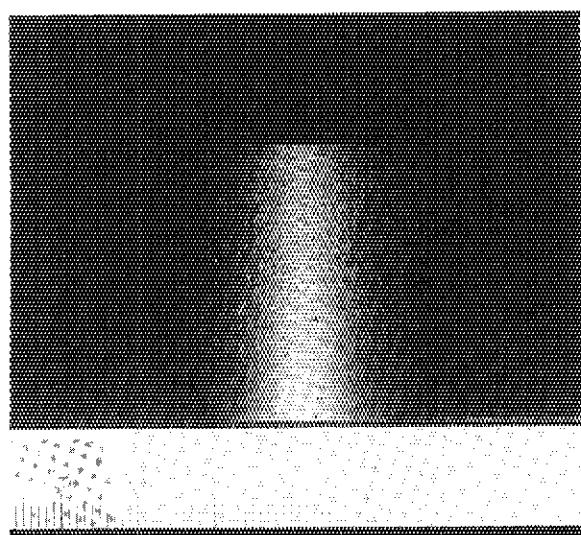


Fig. 5.4 Through-coating failure fractions of coated fuel particles loaded in the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies. The error ranges of the date indicate the upper and lower limits in 95% confidence.

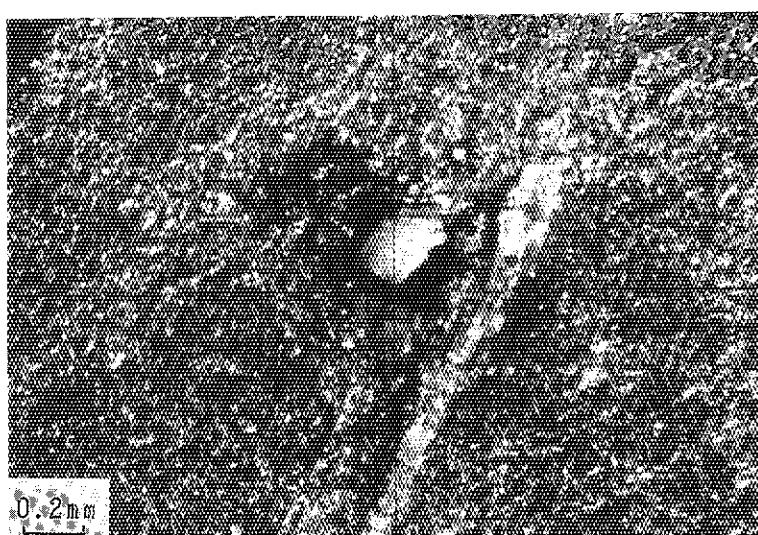


Compact 8 [80 OP1-08]
(58台 B83)

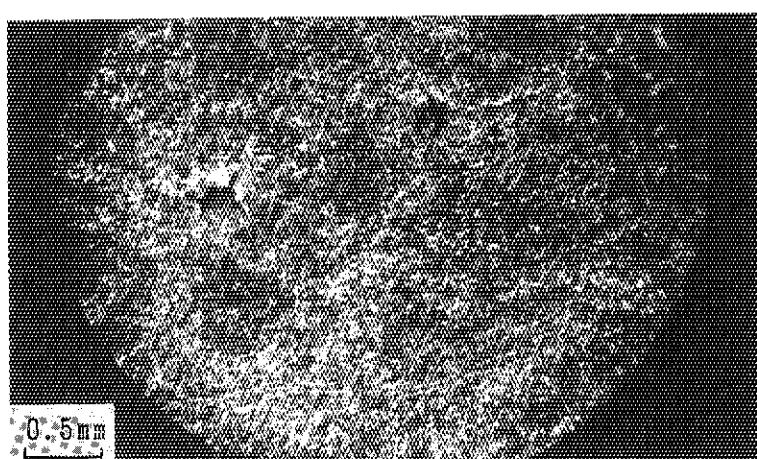
Photo. 5.1 Surface appearance of fuel compact 800P1-08 of the 6th OGL-1 fuel assembly.



(a) Compact 5
[82 OP1-05]
(60 Jr B-75)

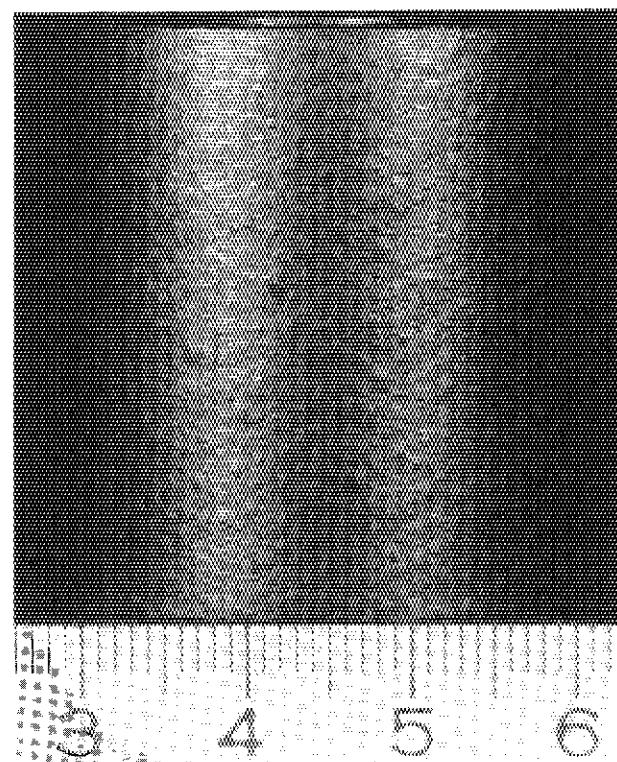


(b) Magnified view
of (a)
(60 Jr-34)

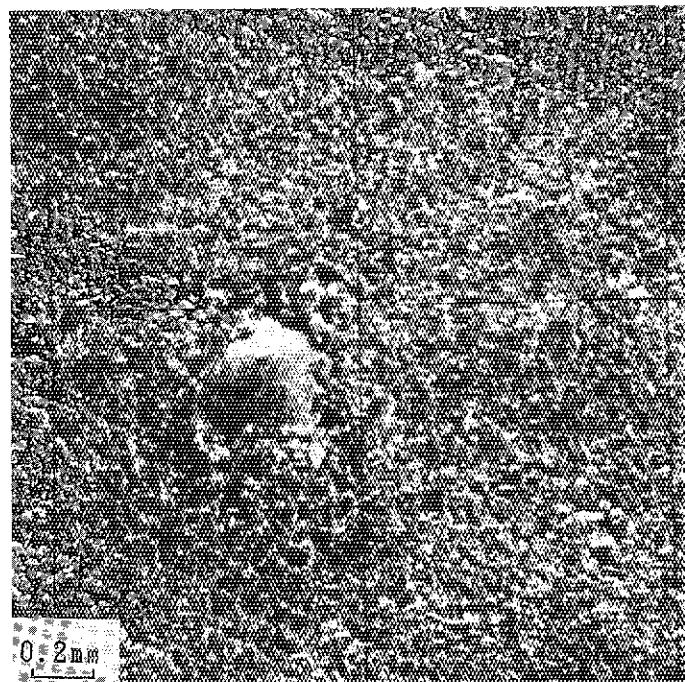


(c) Magnified view
of compact 15
[82 OP1-15]
(60 Jr-36)

Photo. 5.2 Surface appearance of fuel compacts 82OP1-05 and 82OP1-15 of the 8th OGL-1 fuel assembly.

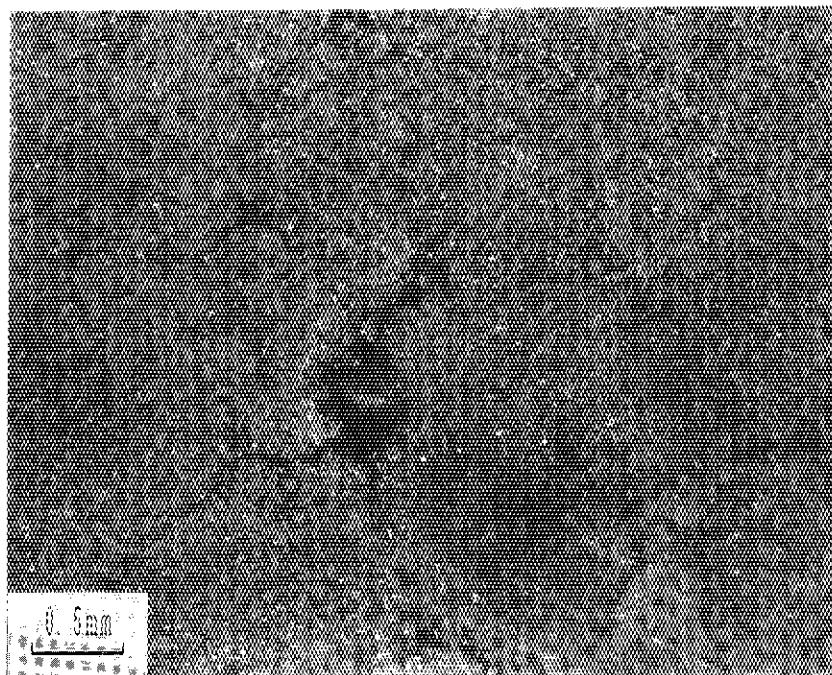


(a) Compact 16
[83 OP1-16]
(62 治 B145)

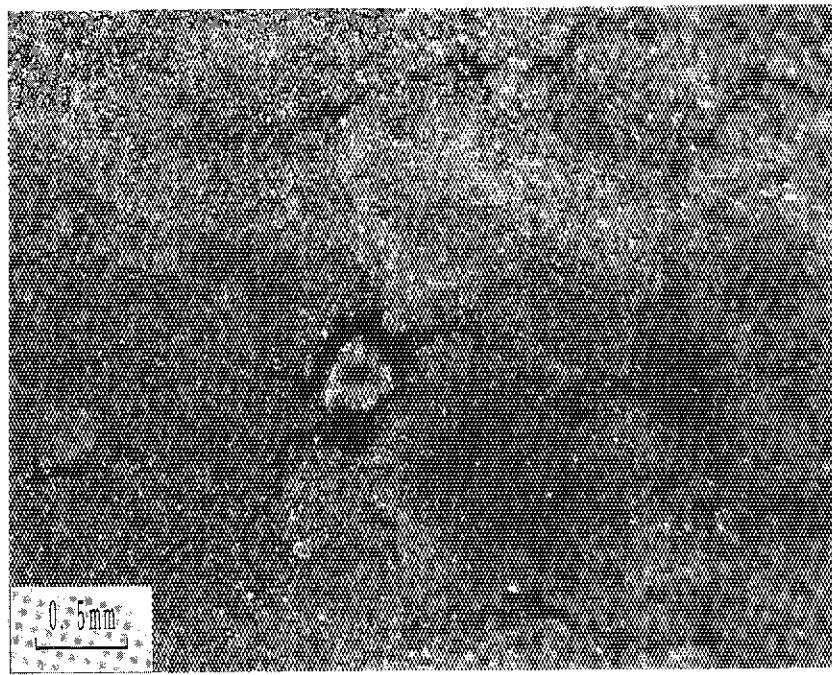


(b) Compact 12
[83 OP1-12]
(63 Jr-21)

Photo. 5. 3 A Surface appearance of fuel compacts 83OP1-16 and 83OP1-12 of the 9th OGL-1 fuel assembly.



(a)



(b)

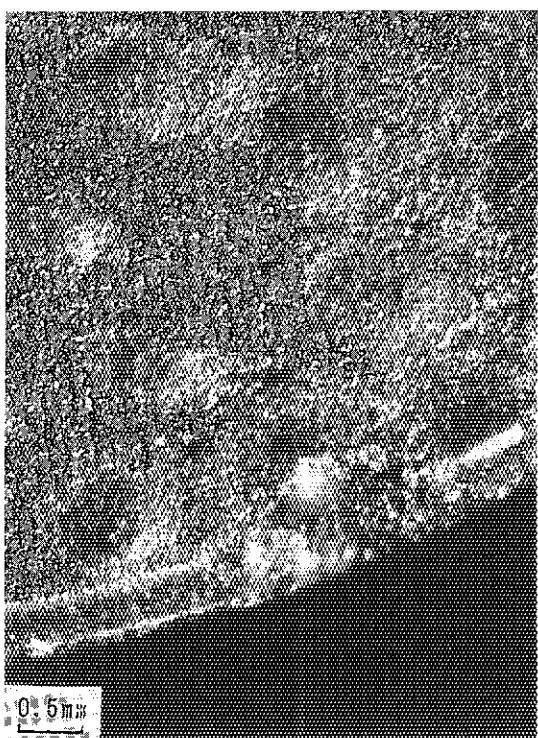
Photo. 5.3B Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as the compacts loaded in the 9th OGL-1 fuel assembly.



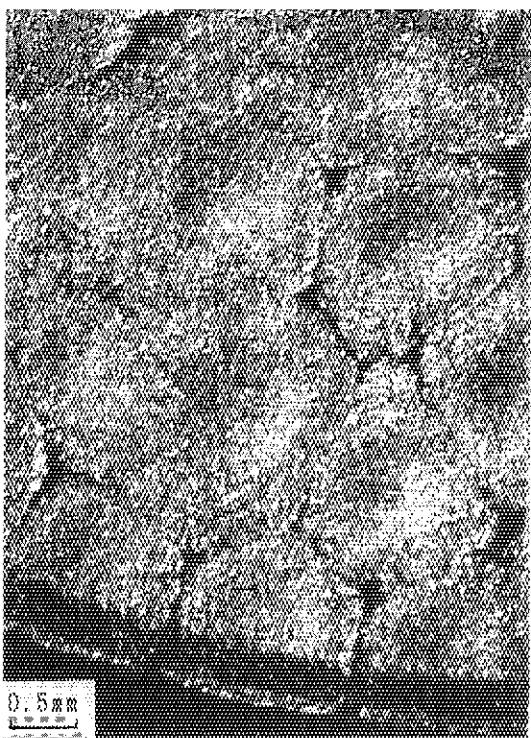
(a) Compact 3-12 [85 OP3-12]
(3 Jr-239)



(b) Compact 3-12 [85 OP3-12]
(3 Jr-241)

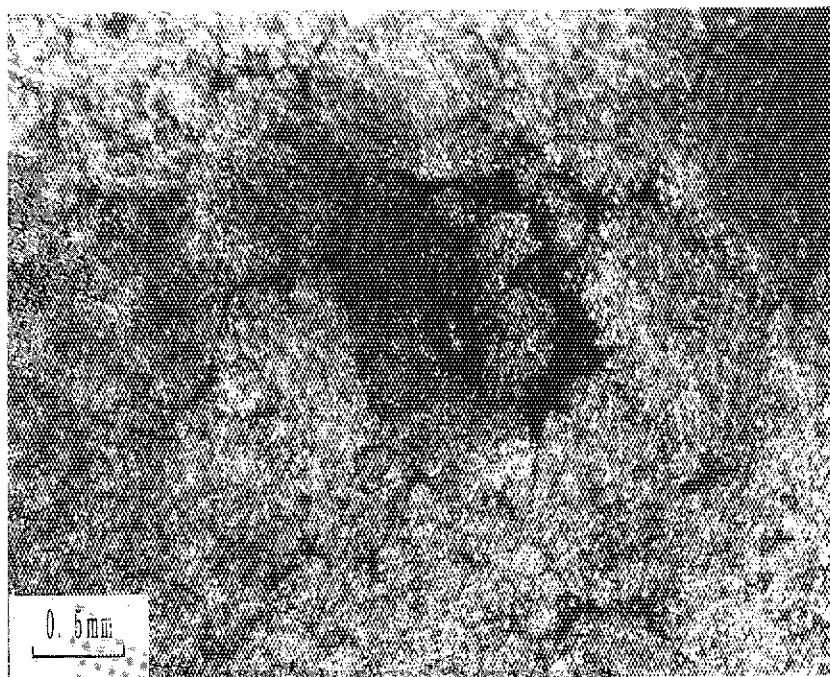


(c) Compact 2-6 [85 OP2-6]
(3 Jr-251)

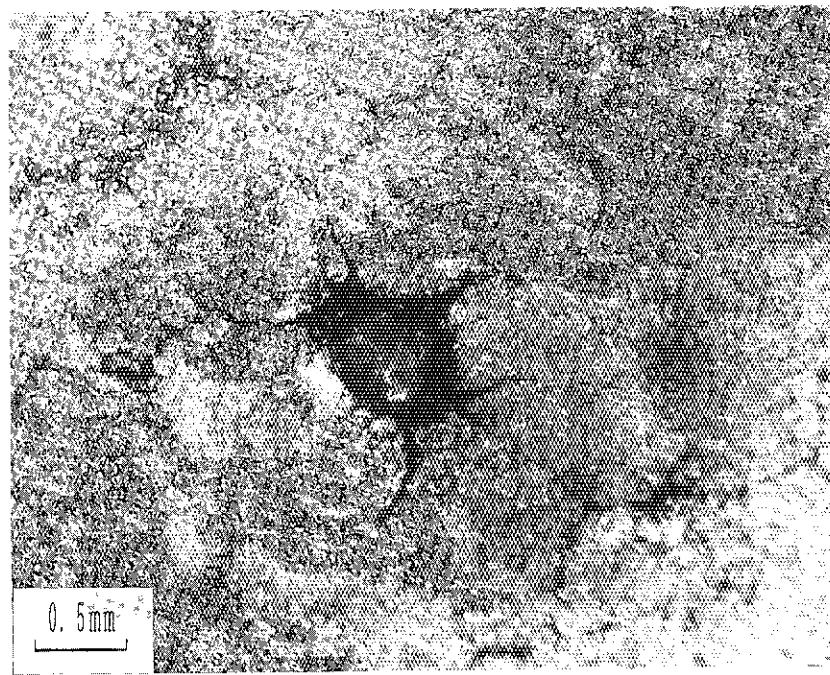


(d) Compact 1-13 [85 OP1-13]
(3 Jr-258)

Photo. 5.4 A Magnified surface appearance of fuel compacts of the 11th OGL-1 fuel assembly.

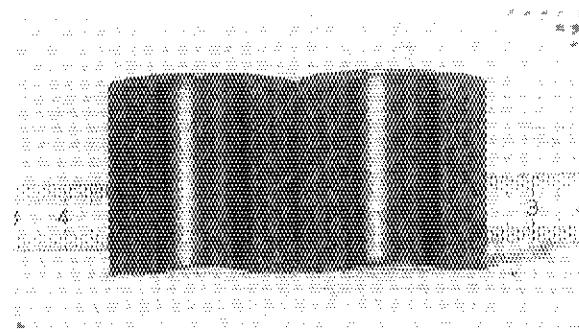


(a)

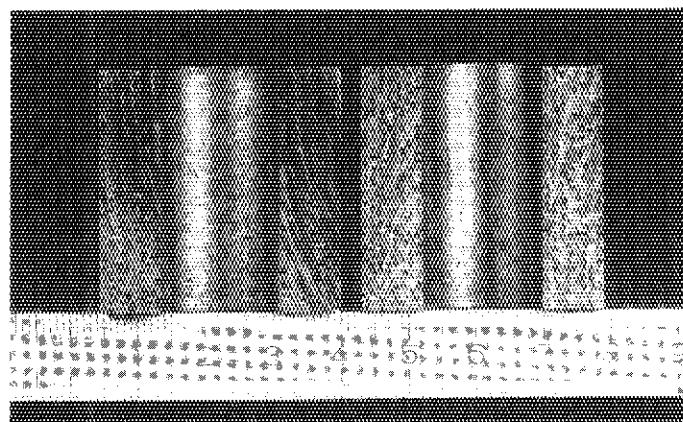


(b)

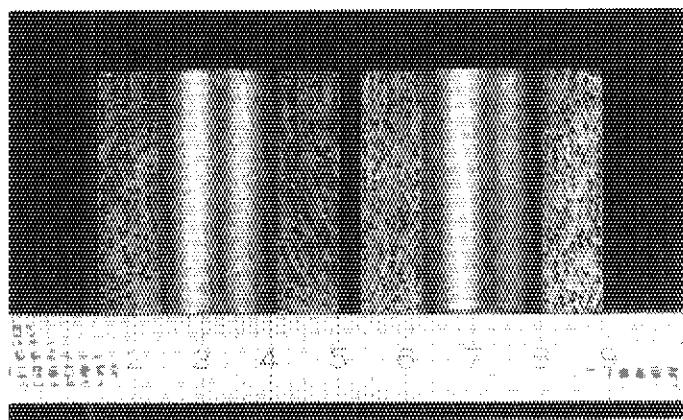
Photo. 5. 4 B Surface appearance of an unirradiated fuel compacts produced in the same batch as the compacts loaded in the 9th OGL-1 fuel assembly ; (a) compact No. 64 and (b) No. 63.



(a) 6th OGL, Compact 8 [80 OP1-08]
(58 治 B119)

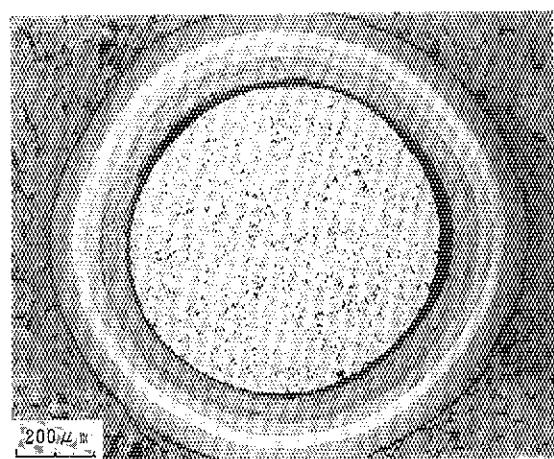


(b) 8th OGL, Compact 8 [82 OP1-08]
(62 治 B191)

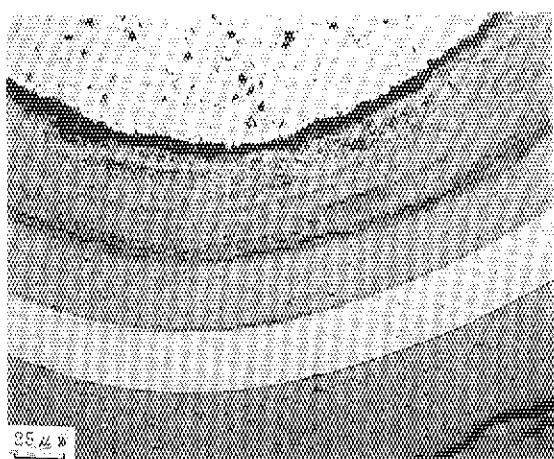


(c) 9th OGL, Compact 8 [83 OP1-08]
(62 治 B193)

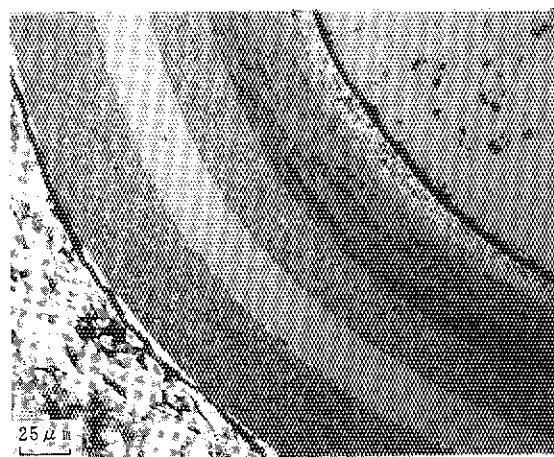
Photo. 5.5 Inner surface appearance of fuel compacts of the 6th, 8th and 9th OGL-1 fuel assemblies.



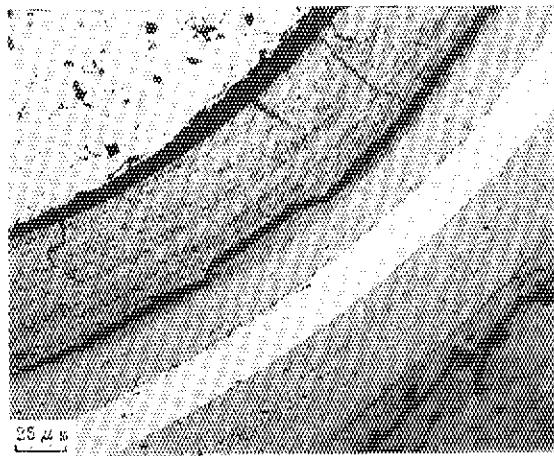
(a) Compact 7 [80 OP1-07]
(58 UM 0650)



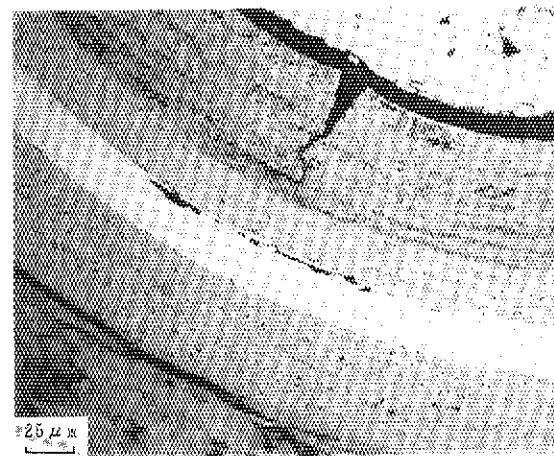
(b) Compact 7 [80 OP1-07]
(58 UM 0650)



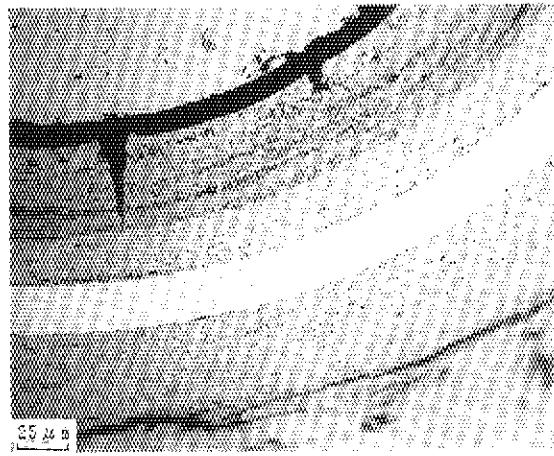
(c) Compact 7 [80 OP1-07]
(58 UM 0664)



(d) Compact 12 [80 OP1-12]
(58 UM 0712)

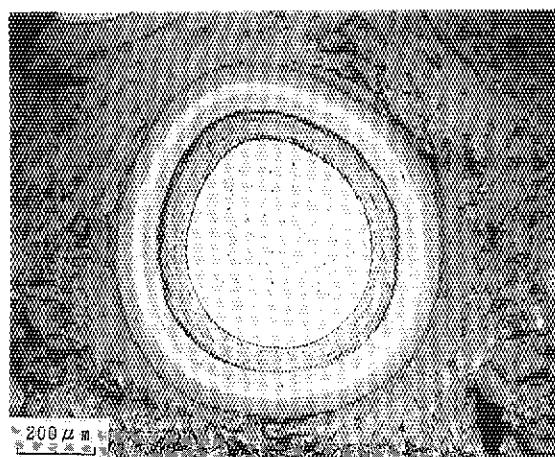


(e) Compact 15 [80 OP1-15]
(58 UM 0745)

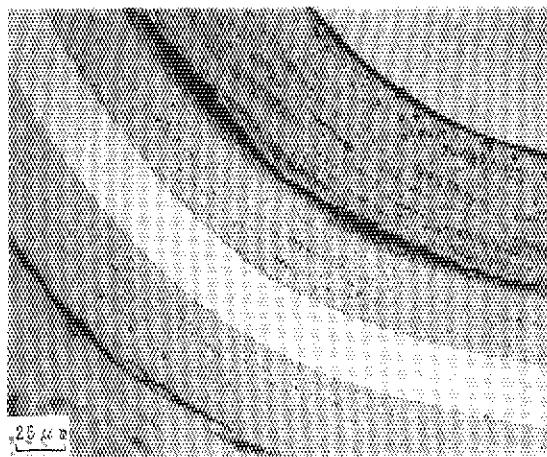


(f) Compact 15 [80 OP1-15]
(58 UM 0744)

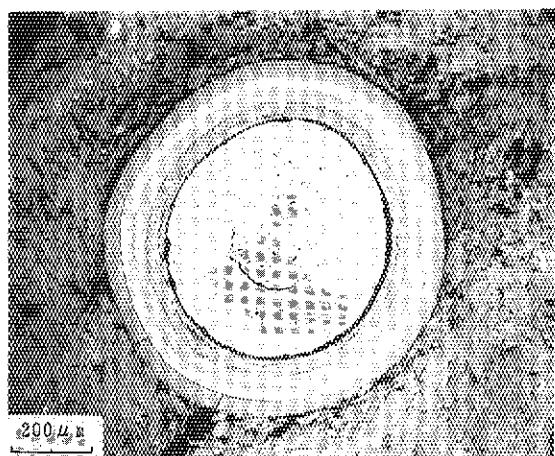
Photo. 5.6 Ceramographs of fuel compacts of the 6th OGL-1 fuel assembly.



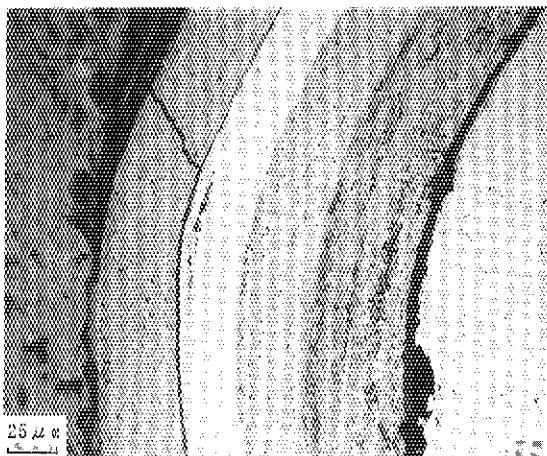
(a) Compact 2-10 [81 OP2-10]
(61 UM 0818)



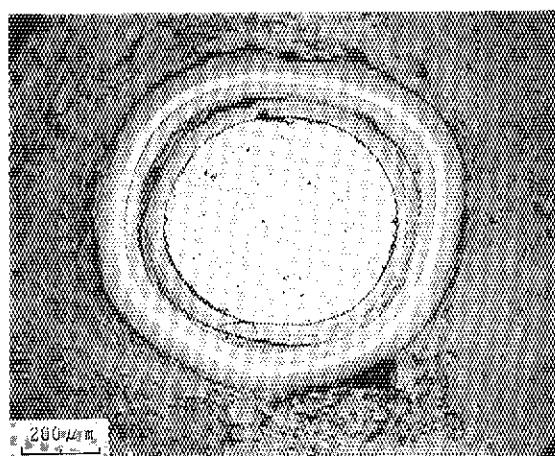
(b) Magnified view of (a)
(61 UM 0823)



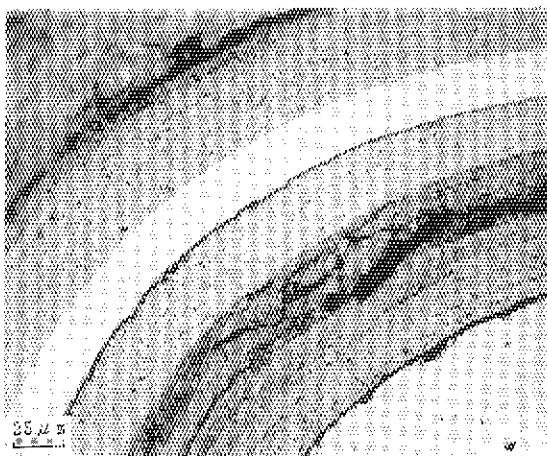
(c) Compact 2-10 [81 OP2-10]
(61 UM 0829)



(d) Magnified view of (c)
(61 UM 0832)

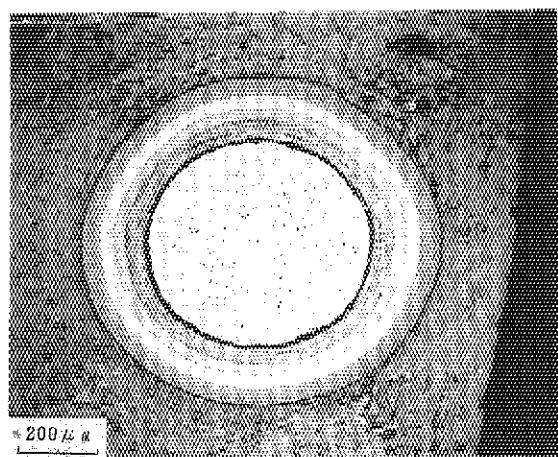


(e) Compact 1-3 [81 OP1-3]
(61 UM 0695)

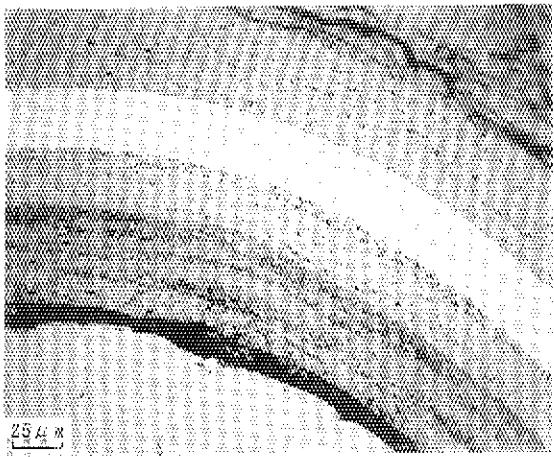


(f) Magnified view of (e)
(61 UM 0701)

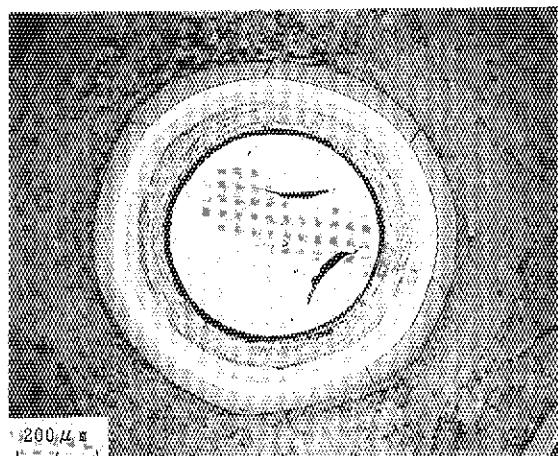
Photo. 5.7 Ceramographs of fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly.



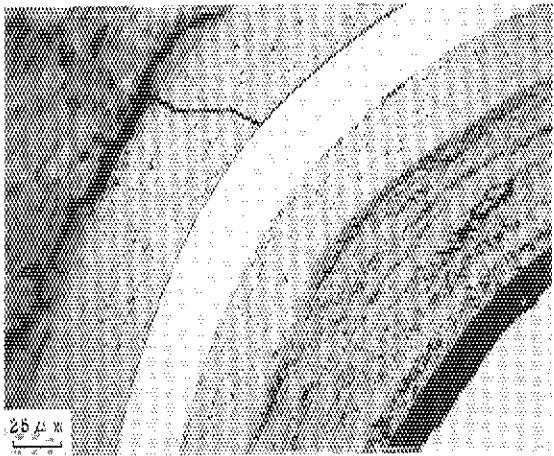
(a) Compact 7 [82 OP1-07]
(62 UM 0055)



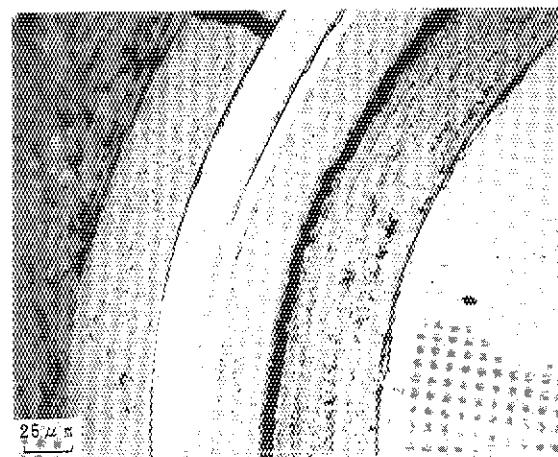
(b) Magnified view of (a)
(62 UM 0061)



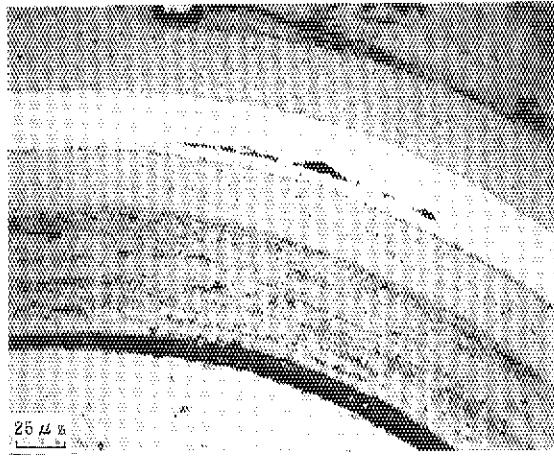
(c) Compact 7 [82 OP1-07]
(62 UM 0071)



(d) Magnified view of (c)
(62 UM 0080)

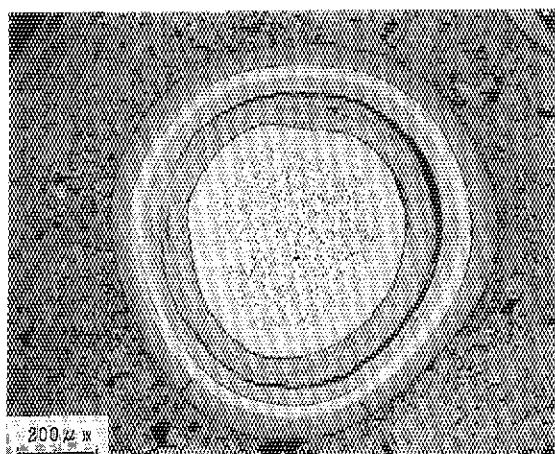


(e) Compact 7 [82 OP1-07]
(62 UM 0097)

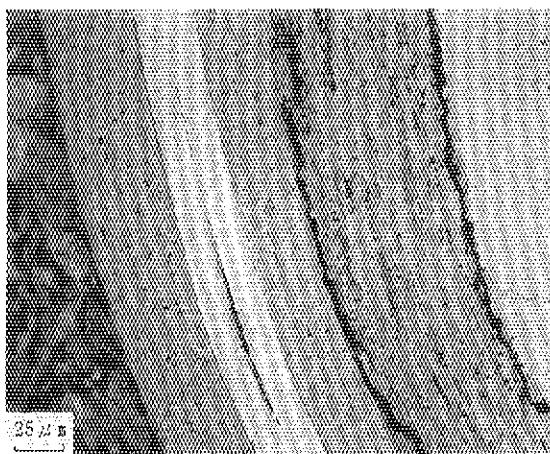


(f) Compact 7 [82 OP1-07]
(62 UM 0114)

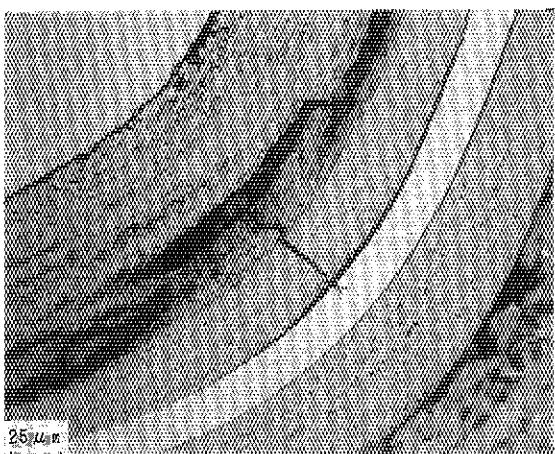
Photo. 5.8 Ceramographs of fuel compacts of the 8th OGL-1 fuel assembly.



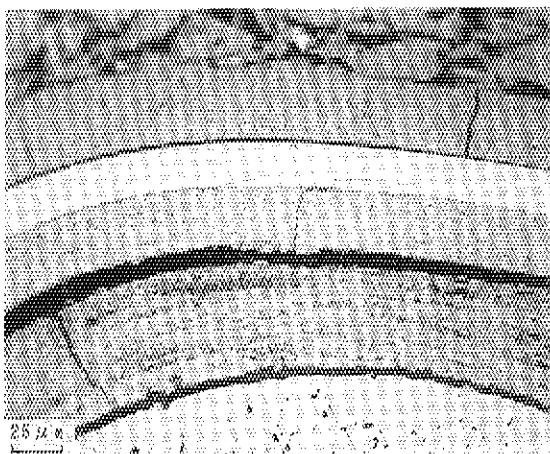
(a) Compact 3 [83 OP1-03]
(63 UM 1010)



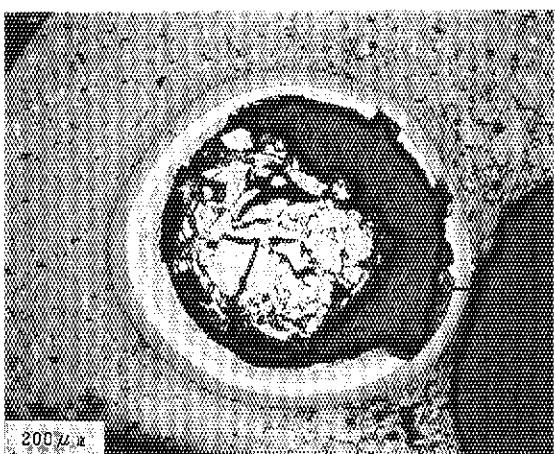
(b) Magnified view of (a)
(63 UM 1011)



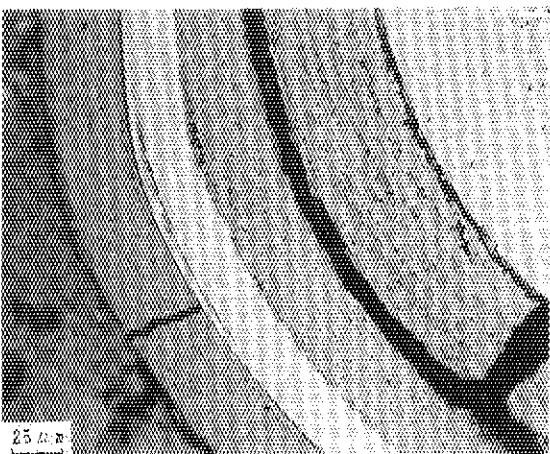
(c) Compact 3 [83 OP1-03]
(63 UM 1013)



(d) Compact 7 [83 OP1-07]
(63 UM 1080)

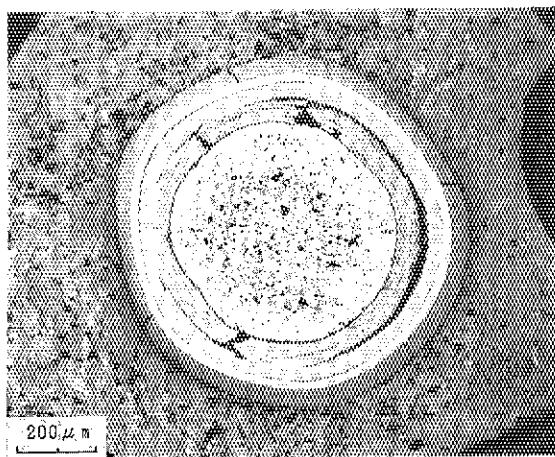


(e) Compact 7 [83 OP1-07]
(63 UM 1099)

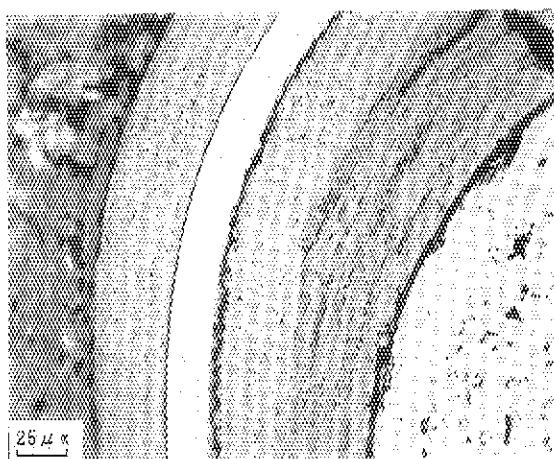


(f) Compact 7 [83 OP1-07]
(63 UM 1067)

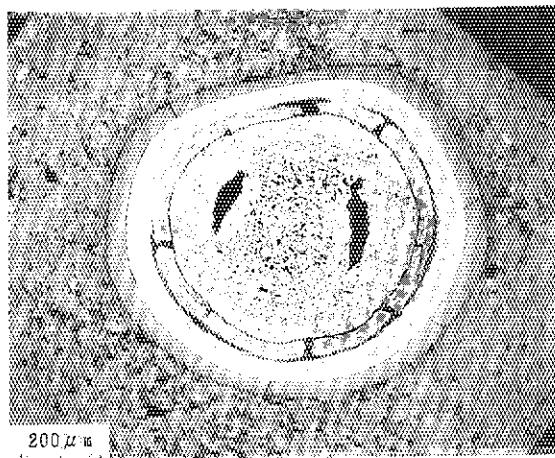
Photo. 5.9 Ceramographs of fuel compacts of the 9th OGL-1 fuel assembly.



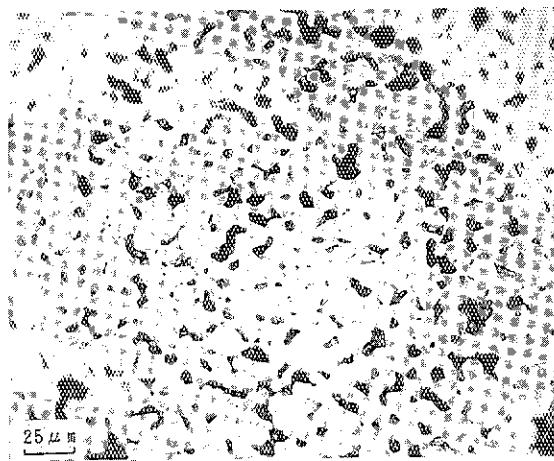
(g) Compact 10 [83 OP1-10]
(63 UM 1110)



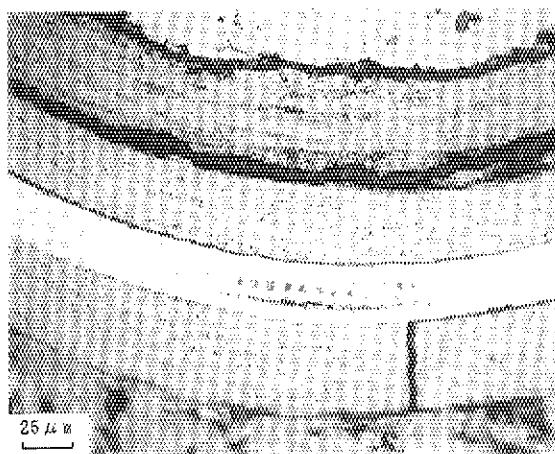
(h) Magnified view of (g)
(63 UM 1111)



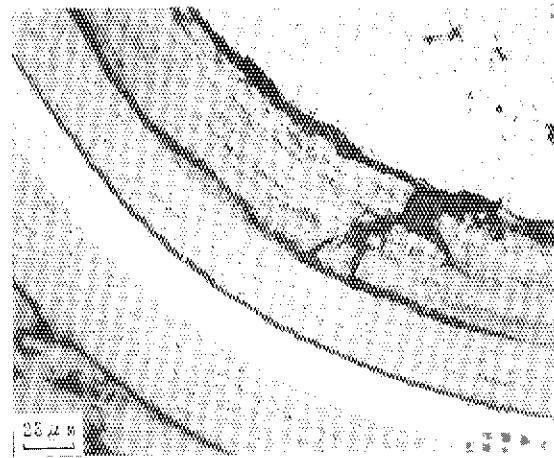
(i) Compact 10 [83 OP1-10]
(63 UM 1122)



(j) Magnified view of (i)
(63 UM 1123)

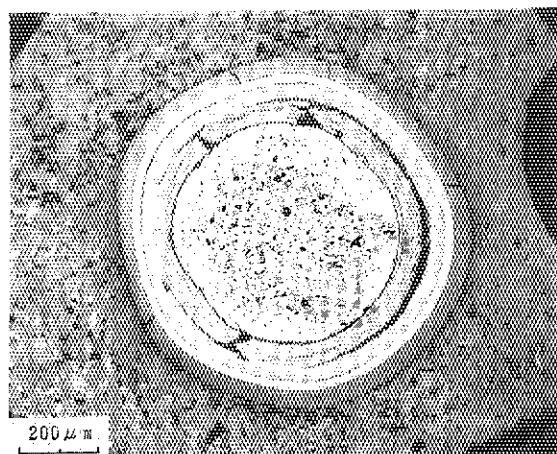


(k) Compact 10 [83 OP1-10]
(63 UM 1117)

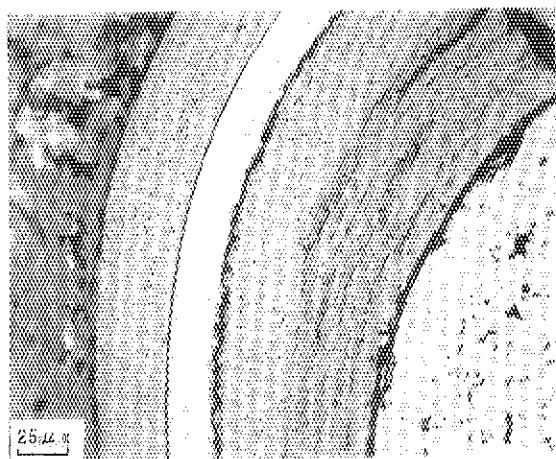


(l) Compact 1-15 [83 OP1-15]
(63 UM 1167)

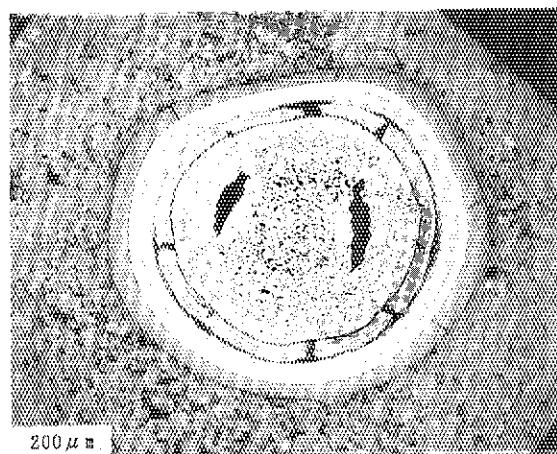
Photo. 5.9 Continued.



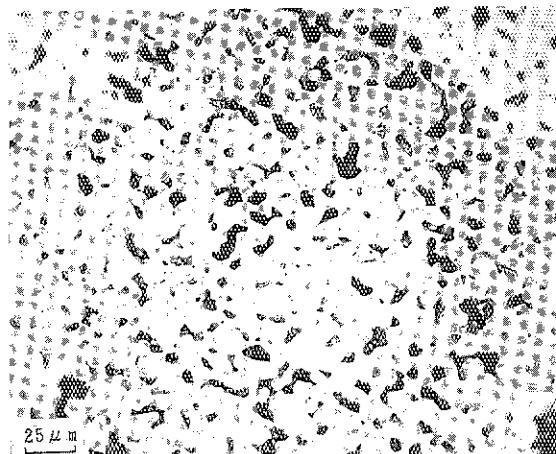
(g) Compact 10 [83 OP1-10]
(63 UM 1110)



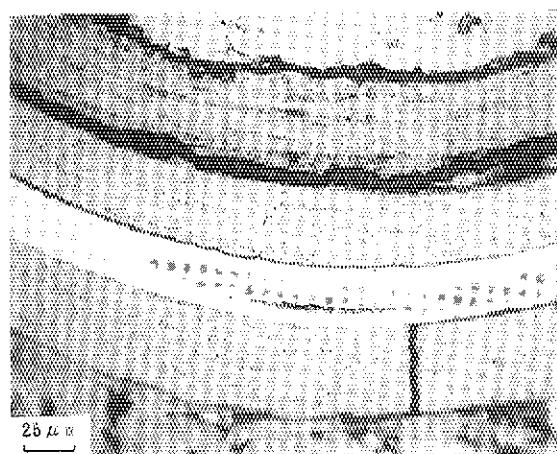
(h) Magnified view of (g)
(63 UM 1111)



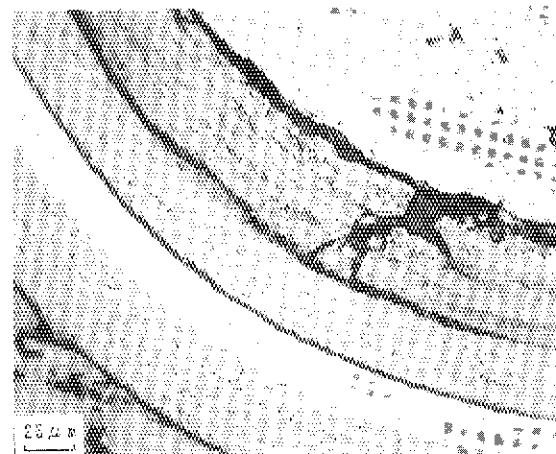
(i) Compact 10 [83 OP1-10]
(63 UM 1122)



(j) Magnified view of (i)
(63 UM 1123)

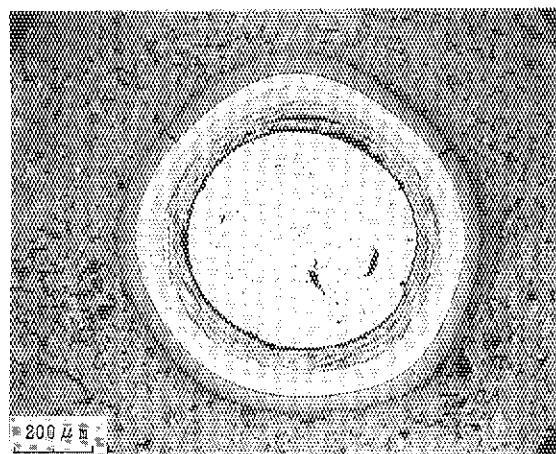


(k) Compact 10 [83 OP1-10]
(63 UM 1117)

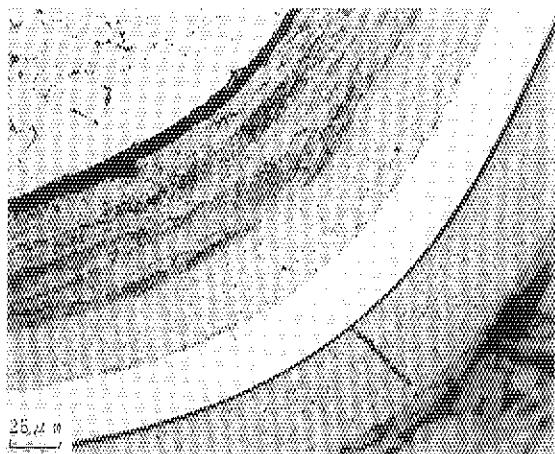


(l) Compact 1-15 [83 OP1-15]
(63 UM 1167)

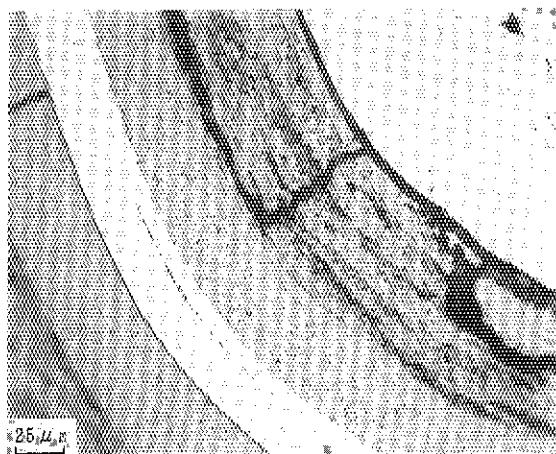
Photo. 5.9 Continued.



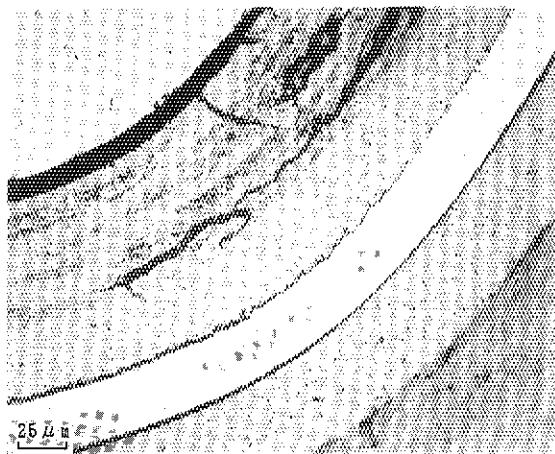
(a) Compact 10 [84 OP1-10]
(63 UM 1304)



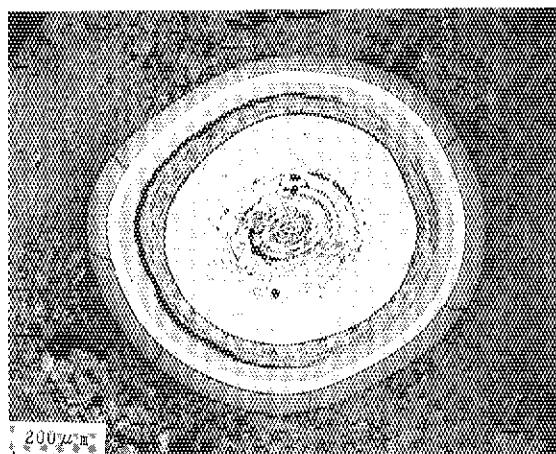
(b) Magnified view of (a)
(63 UM 1305)



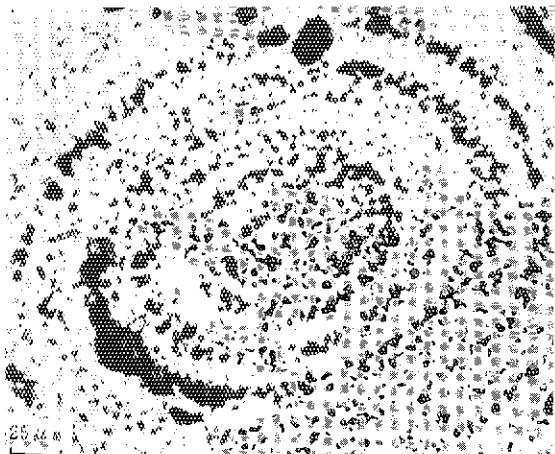
(c) Compact 15 [84 OP1-15]
(63 UM 1377)



(d) Magnified view of (c)
(63 UM 1383)

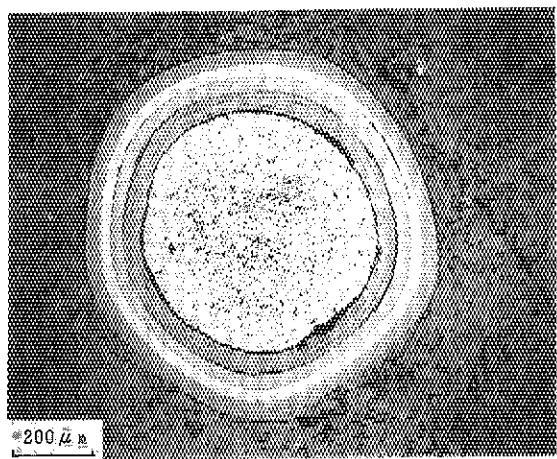


(e) Compact 15 [84 OP1-15]
(63 UM 1386)

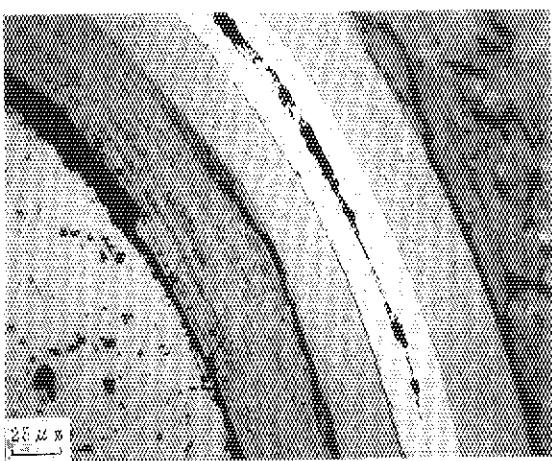


(f) Magnified view of (e)
(63 UM 1387)

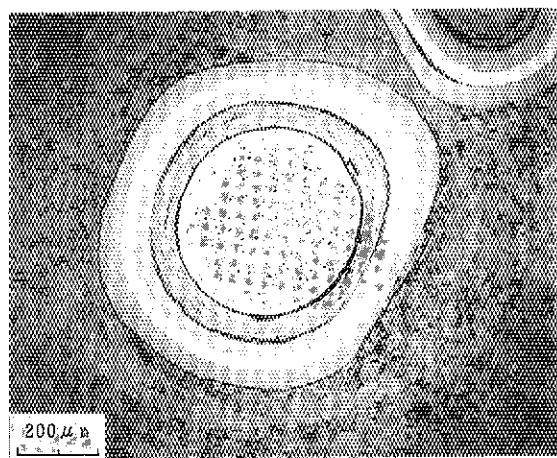
Photo. 5.10 Ceramographs of fuel compacts of the 10th OGL-1 fuel assembly.



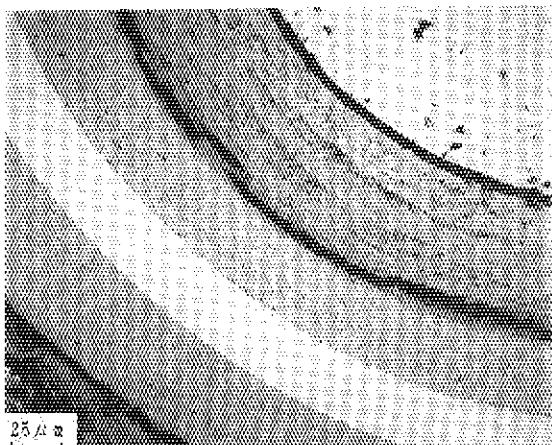
(a) Compact 1-7 [85 OP1-07], Outer surface
(5 UM 194)



(b) Magnified view of (a)
(5 UM 195)

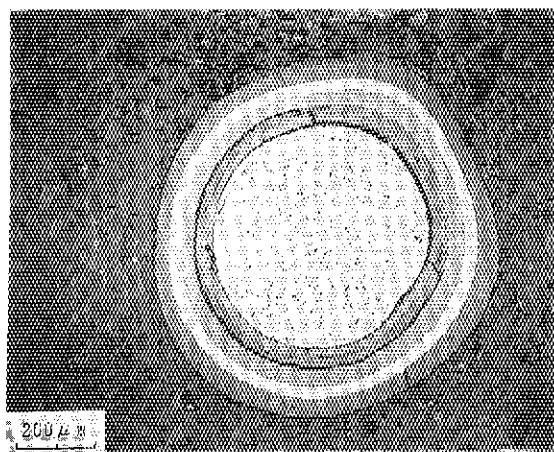


(c) Compact 1-7 [85 OP1-07], Inner surface
(5 UM 202)

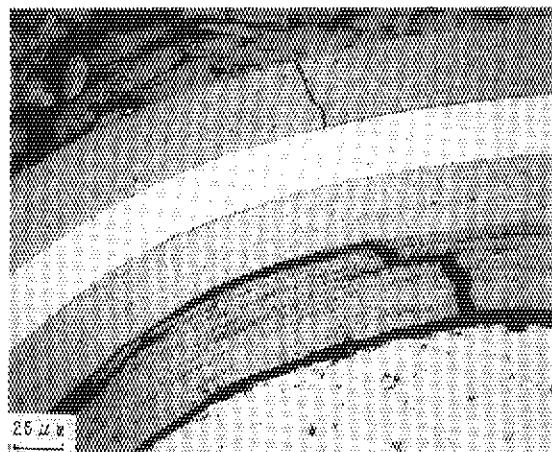


(d) Magnified view of (c)
(5 UM 203)

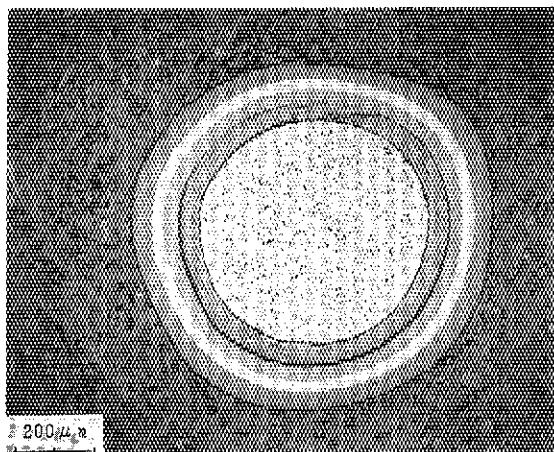
Photo. 5.11 Ceramographs of fuel compacts of the 11th OGL-1 fuel assembly
(rod 1).



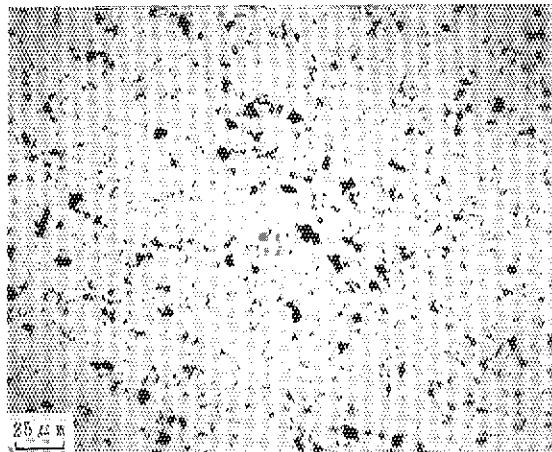
(e) Compact 2-7 [84 OP2-07], Outer surface
(5 UM 205)



(f) Magnified view of (e)
(5 UM 206)

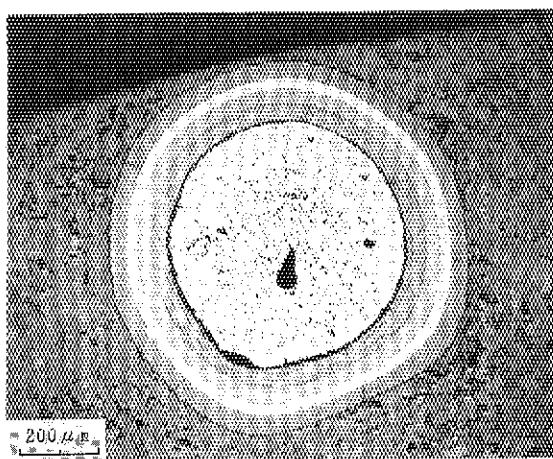


(g) Compact 2-7 [84 OP2-07], Inner surface
(5 UM 211)

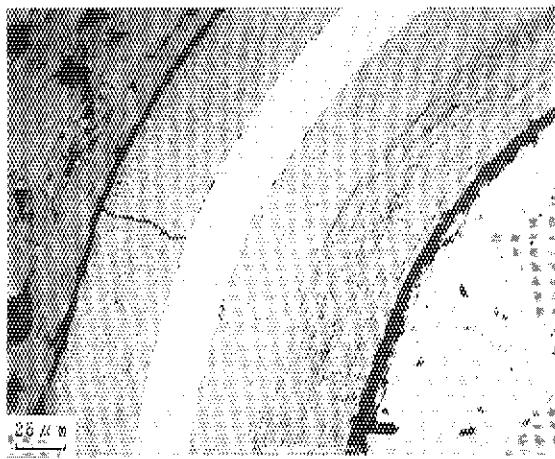


(h) Magnified view of (g)
(5 UM 212)

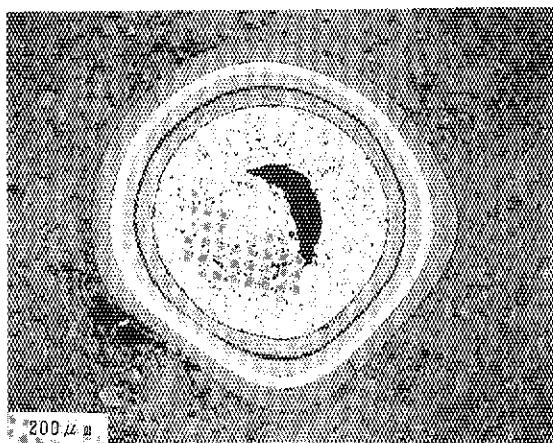
Photo. 5.11 Continued (rod 2).



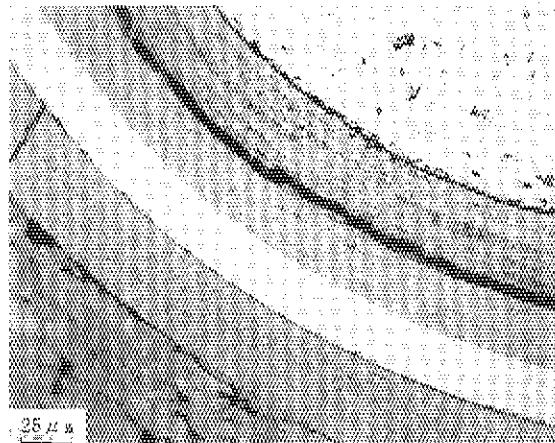
(i) Compact 3-7 [84 OP3-07], Outer surface
(5 UM 216)



(j) Magnified view of (i)
(5 UM 217)

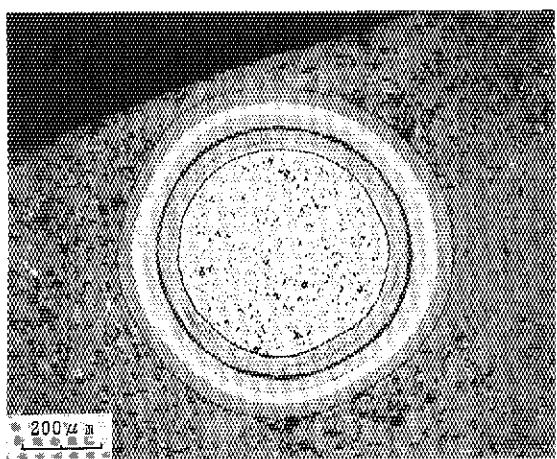


(k) Compact 3-7 [84 OP3-07], Inner surface
(5 UM 228)

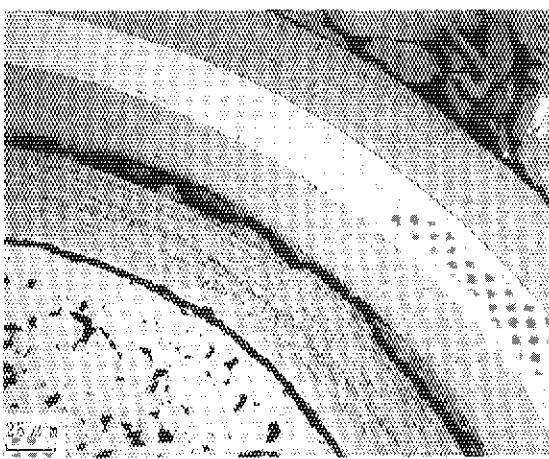


(l) Magnified view of (k)
(5 UM 229)

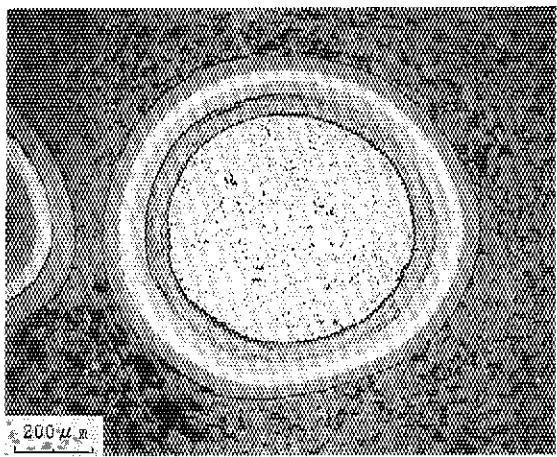
Photo. 5.11 Continued (rod 3).



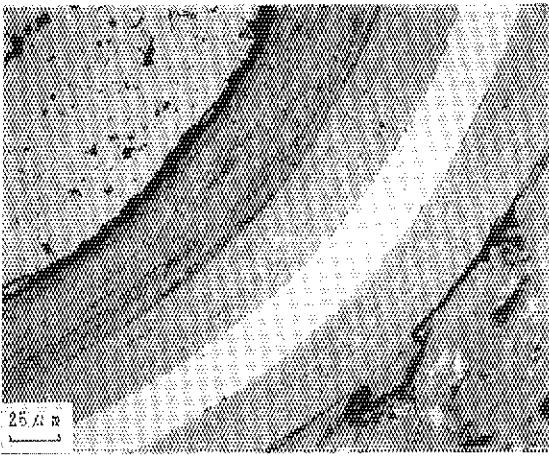
(a) Compact 9 [86 OP1-09], Outer surface
(5 UM 273)



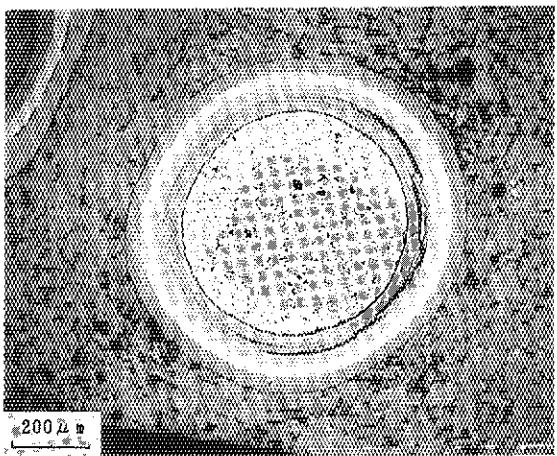
(b) Magnified view of (a)
(5 UM 274)



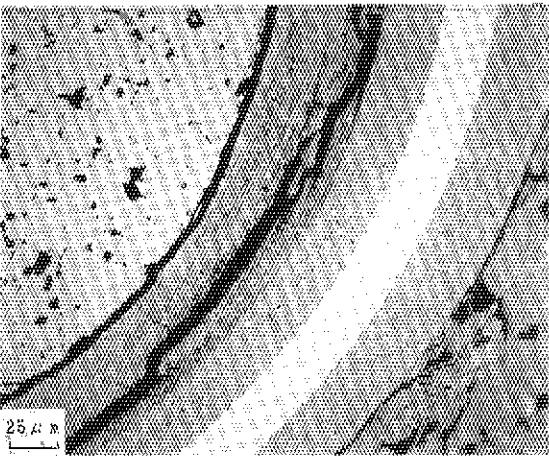
(c) Compact 9 [86 OP1-09], Middle
(5 UM 286)



(d) Magnified view of (c)
(5 UM 287)

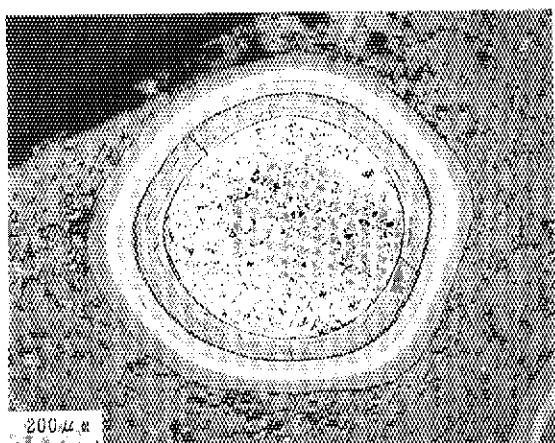


(e) Compact 9 [86 OP1-09], Inner surface
(5 UM 292)

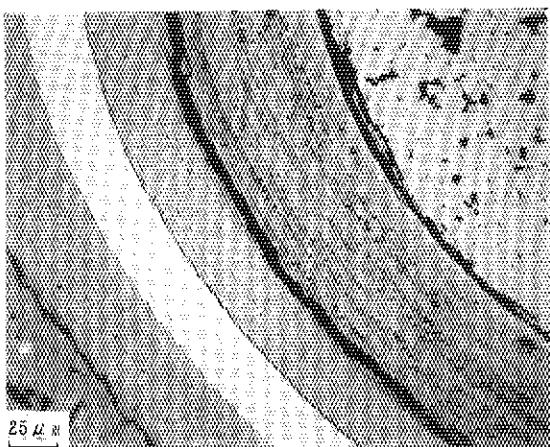


(f) Magnified view of (e)
(5 UM 294)

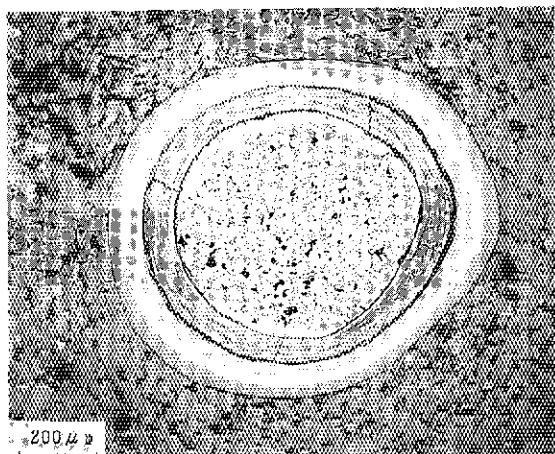
Photo. 5.12 Ceramographs of fuel compacts of the 12th OGL-1 fuel assembly.



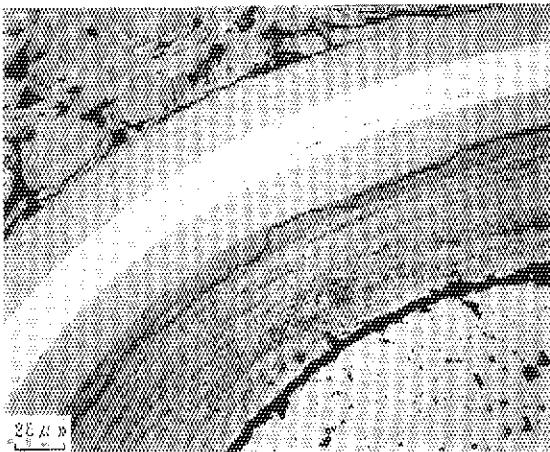
(g) Compact 12 [86 OP1-12], Outer surface
(5 UM 256)



(h) Magnified view of (g)
(5 UM 257)

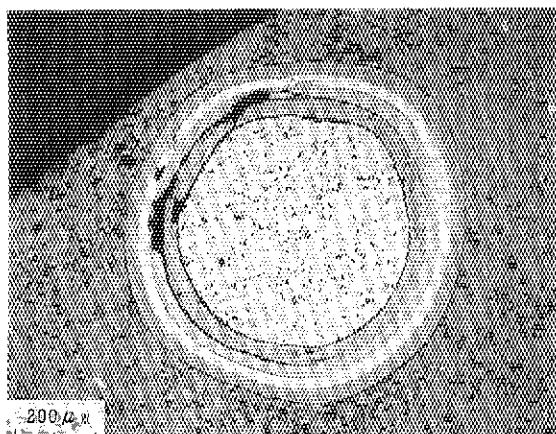


(i) Compact 12 [86 OP1-12], Middle
(5 UM 264)

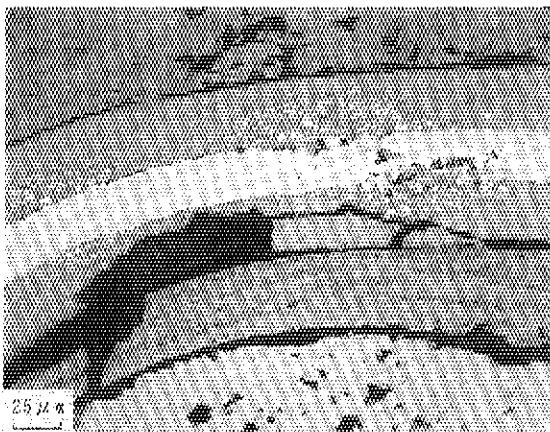


(j) Magnified view of (i)
(5 UM 265)

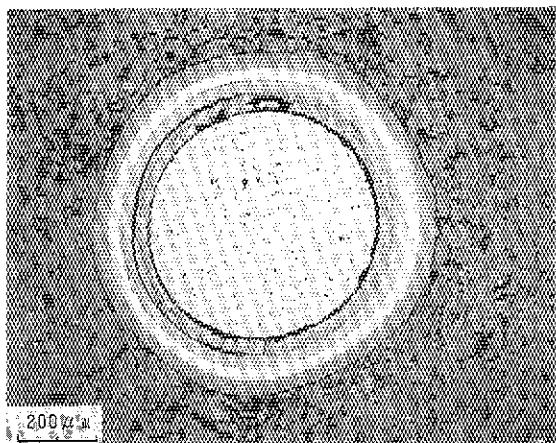
Photo. 5.12 Continued.



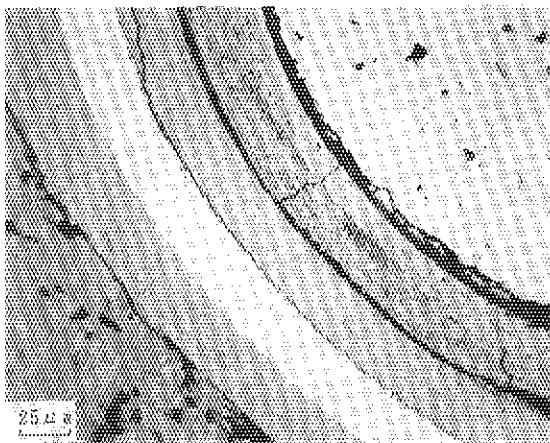
(k) Compact 15 [86 OP1-15], Outer surface
(5 UM 233)



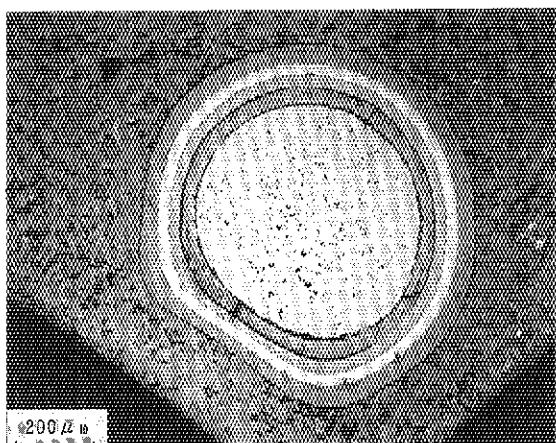
(l) Magnified view of (k)
(5 UM 234)



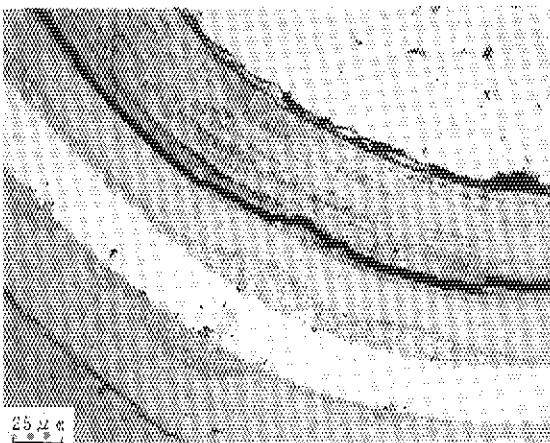
(m) Compact 15 [86 OP1-15], Middle
(5 UM 241)



(n) Magnified view of (m)
(5 UM 242)



(o) Compact 15 [86 OP1-15], Inner surface
(5 UM 252)



(p) Magnified view of (o)
(5 UM 253)

Photo. 5.12 Continued.

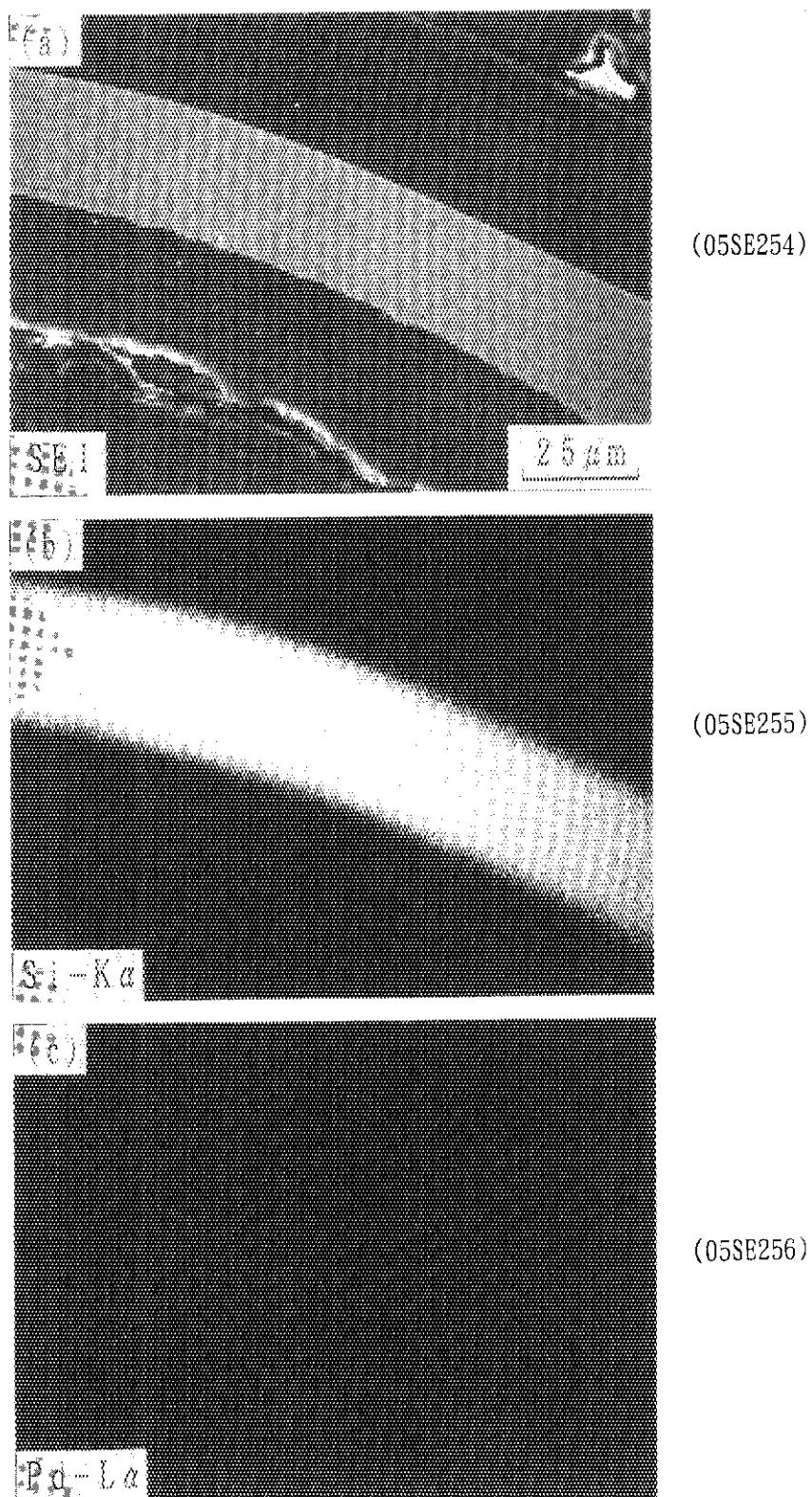


Photo. 5.13 Secondary electron image (SEI) and Si- $K\alpha$ and Pd- $L\alpha$ X-ray displays of the SiC layer at the outer-surface region of fuel compact 87 OP1-09, which was loaded near the axial center of the fuel rod of the 12th OGL-1 fuel assembly.

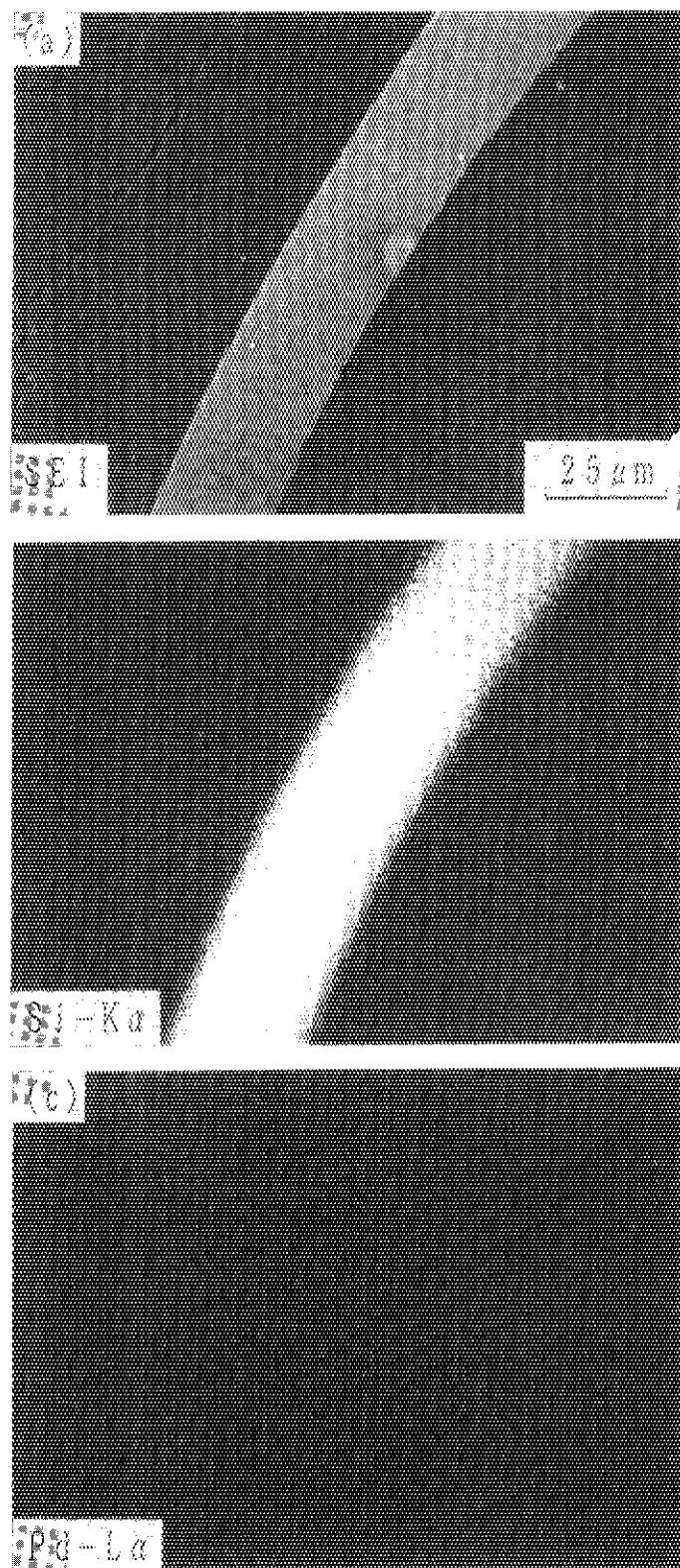
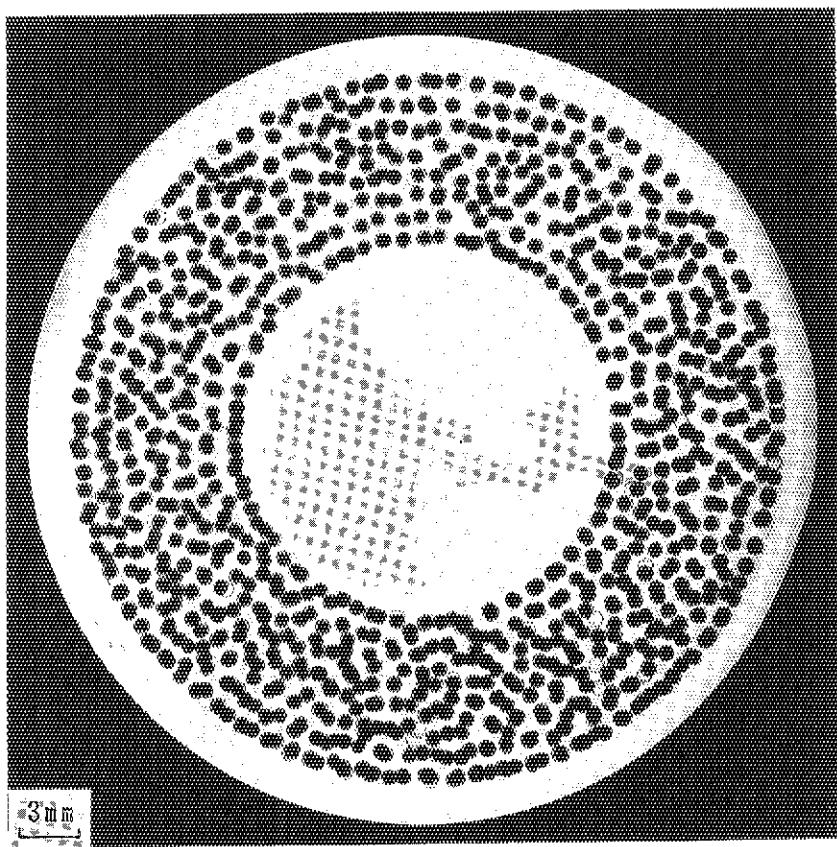
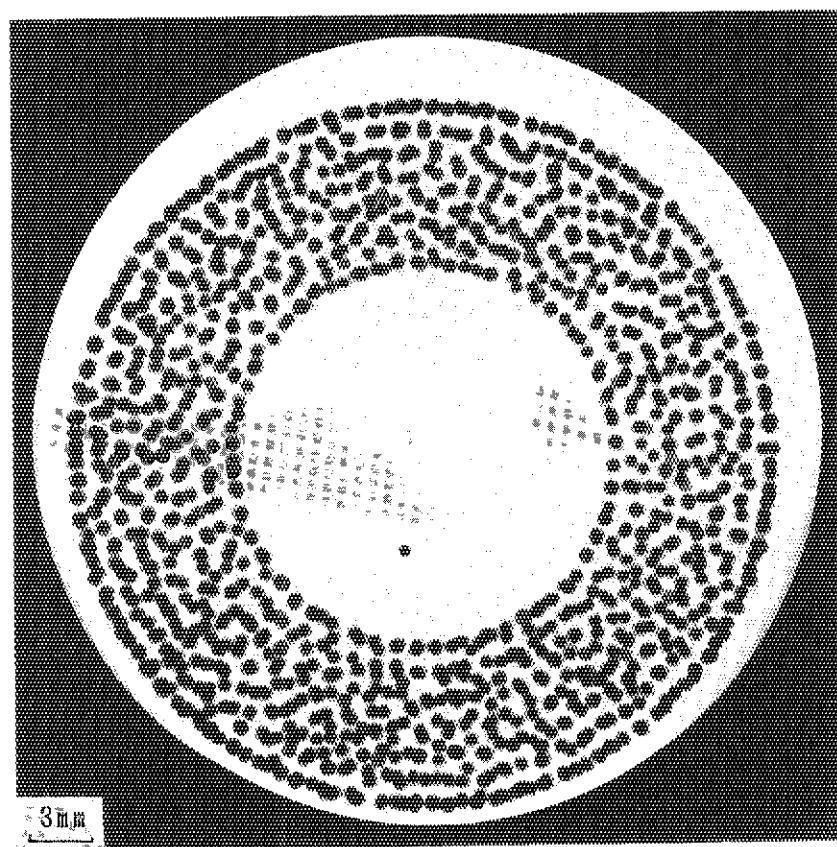


Photo. 5.14 Secondary electron image (SEI) and Si-K α and Pd-L α X-ray displays of the SiC layer at the inner-surface region of fuel compact 87 OP1-09, which was loaded near the axial center of the fuel rod of the 12th OGL-1 fuel assembly.

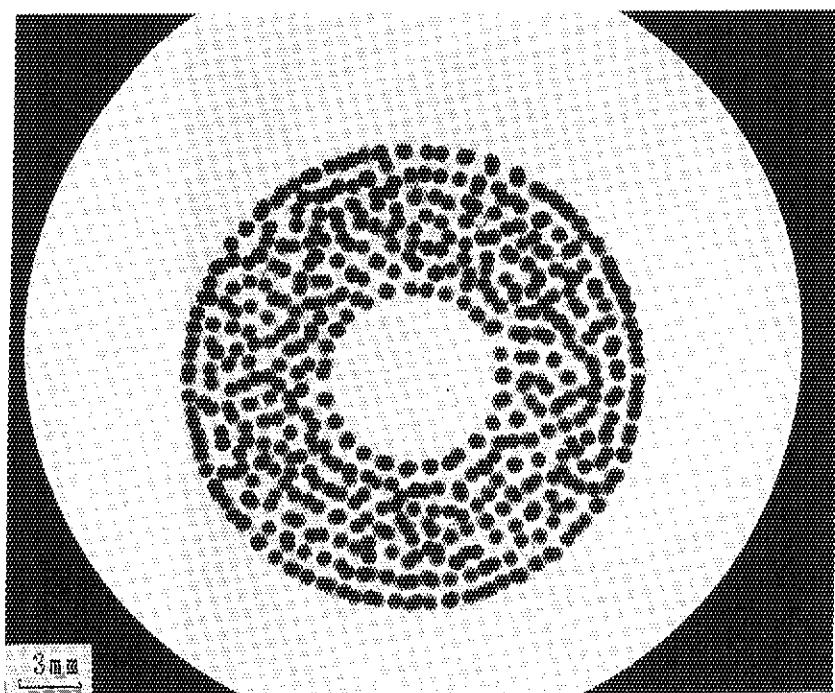


(a) Compact 7
[80 OP1-07]
(83 Jr-223)

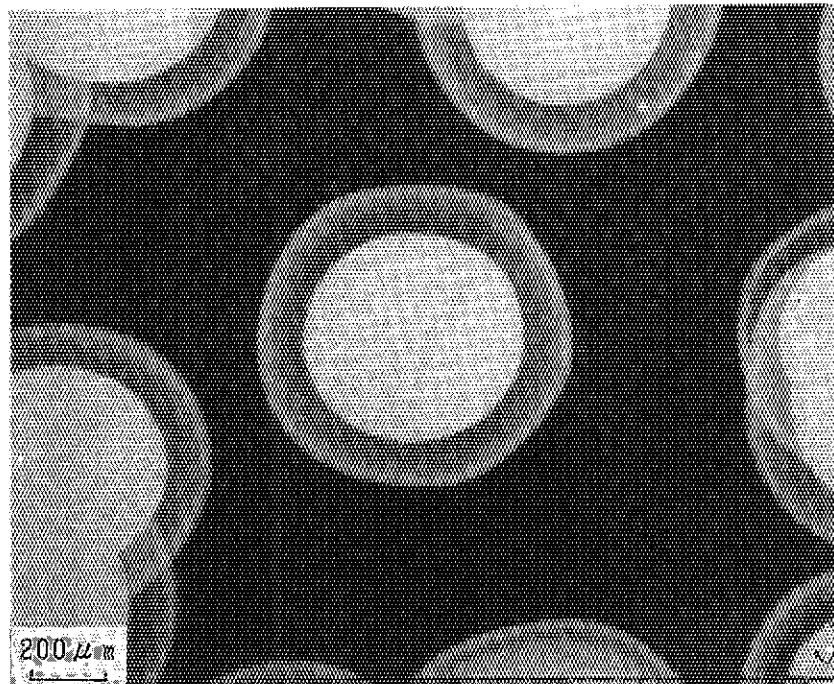


(b) Compact 10
[80 OP1-10]
(83 Jr-224)

Photo. 5.15A X-ray radiographs of slices of fuel compacts 7 and 10 of the 6th OGL-1 fuel assembly.

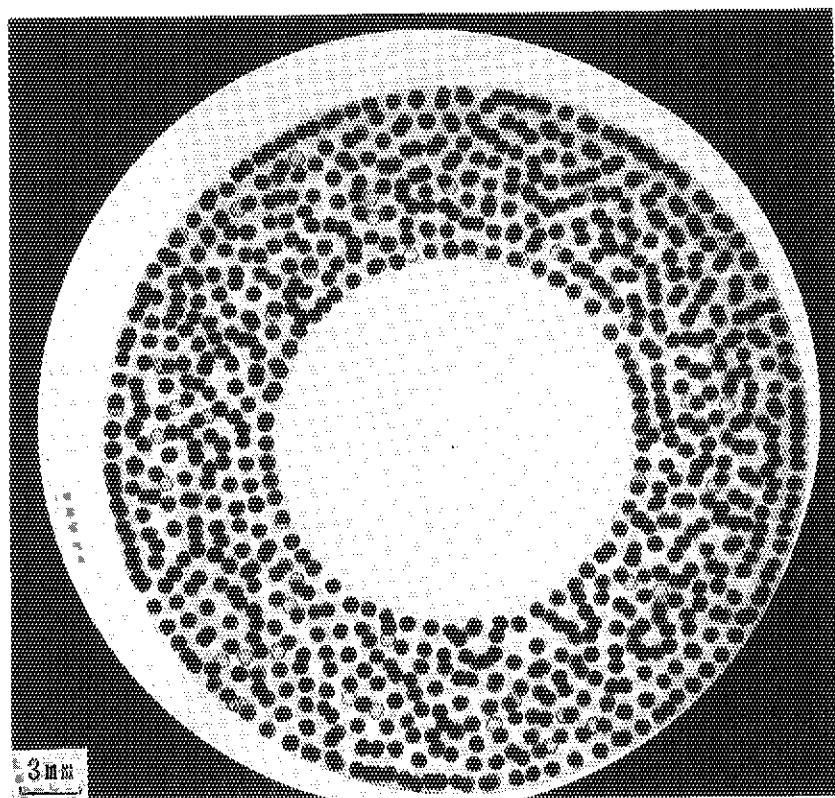


(a) Compact 2-10
[81 OP2-10]
(86 Jr-59)

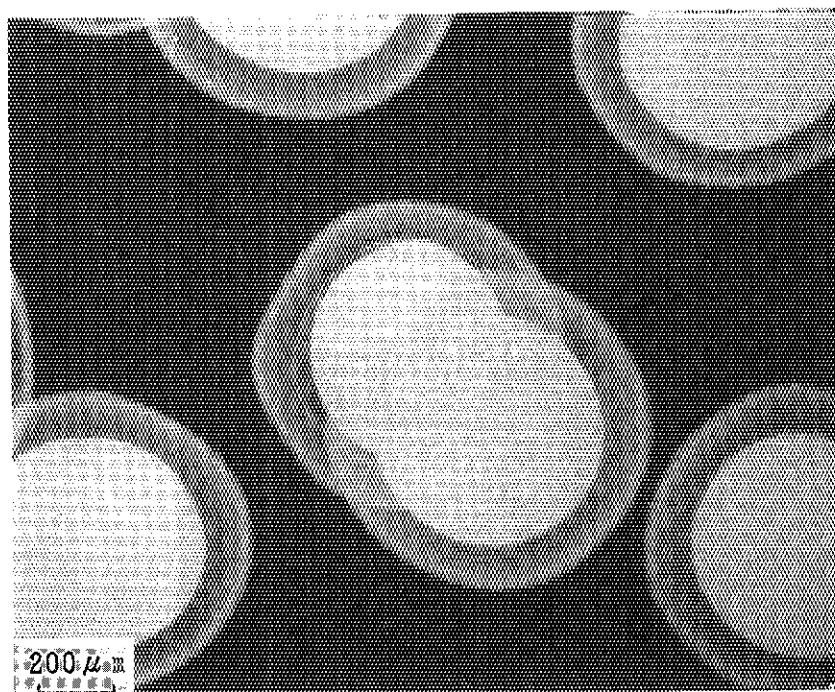


(b) Magnified view
of (a)
(61 Jr-62)

Photo. 5.15B X-ray radiographs of a slice of fuel compact 2-10 of the 7th OGL-1 fuel assembly.

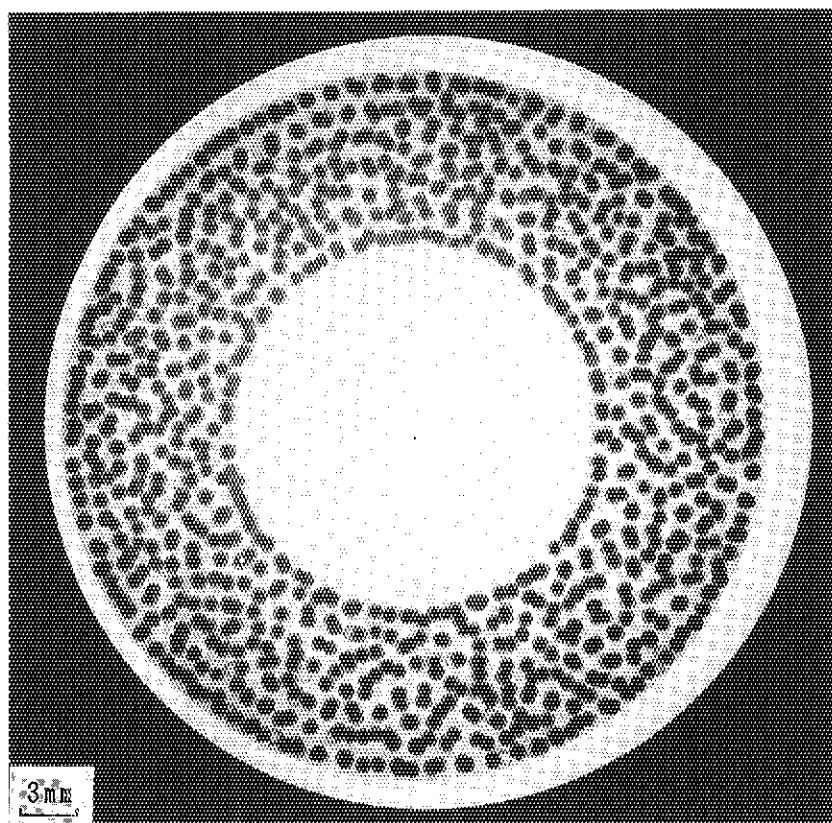


(a) Compact 7
[82 OP1-07]
(86 Jr-65)

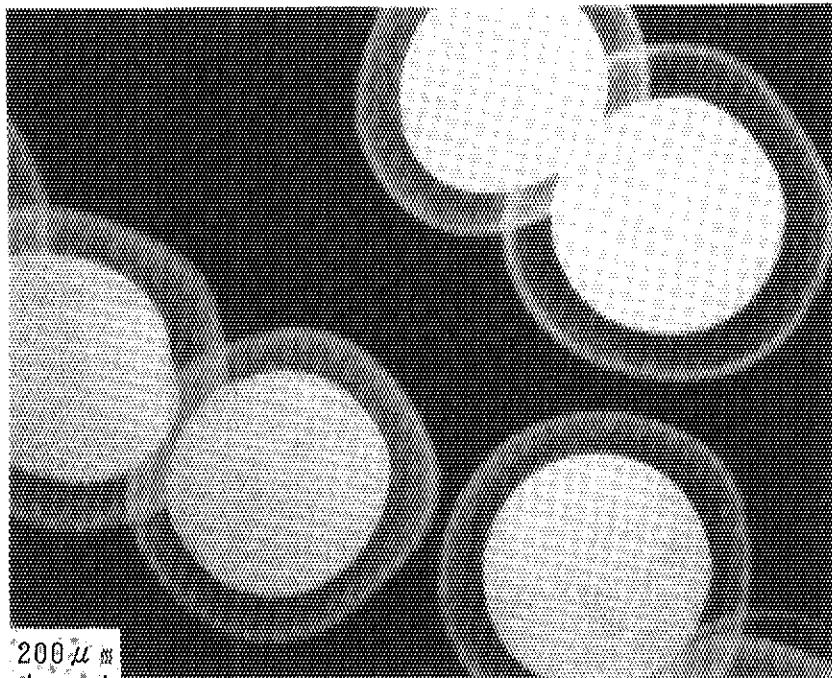


(b) Magnified view)
of (a)
(61 Jr-64)

Photo. 5.15C X-ray radiographs of a slice of fuel compact 7 of the 8th OGL-1 fuel assembly.

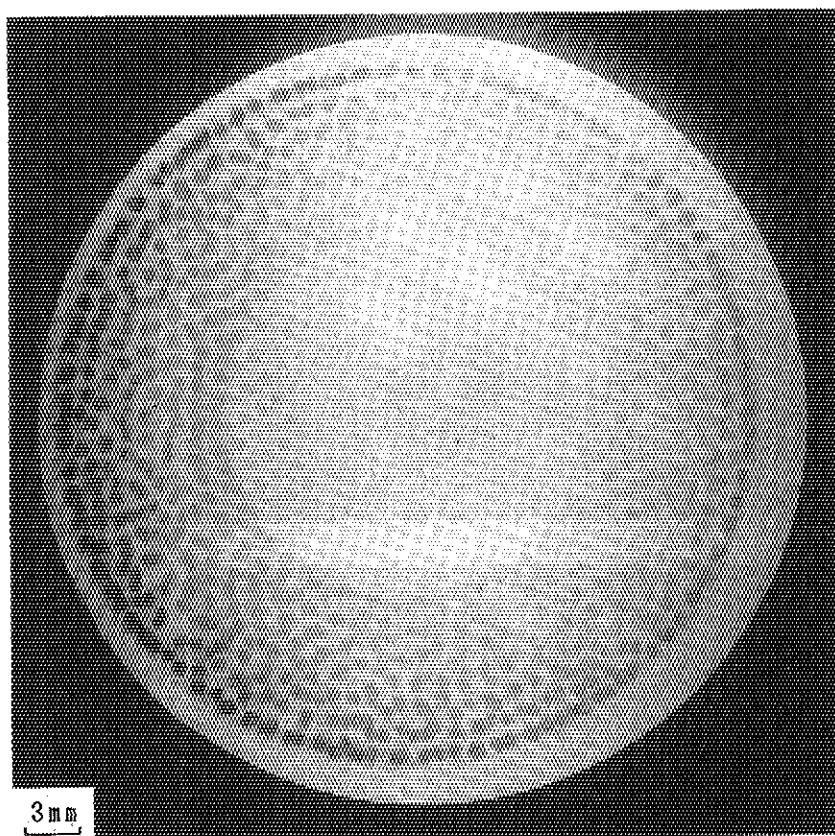


(a) Compact 10
[83 OP1-10]
(88 Jr-68)

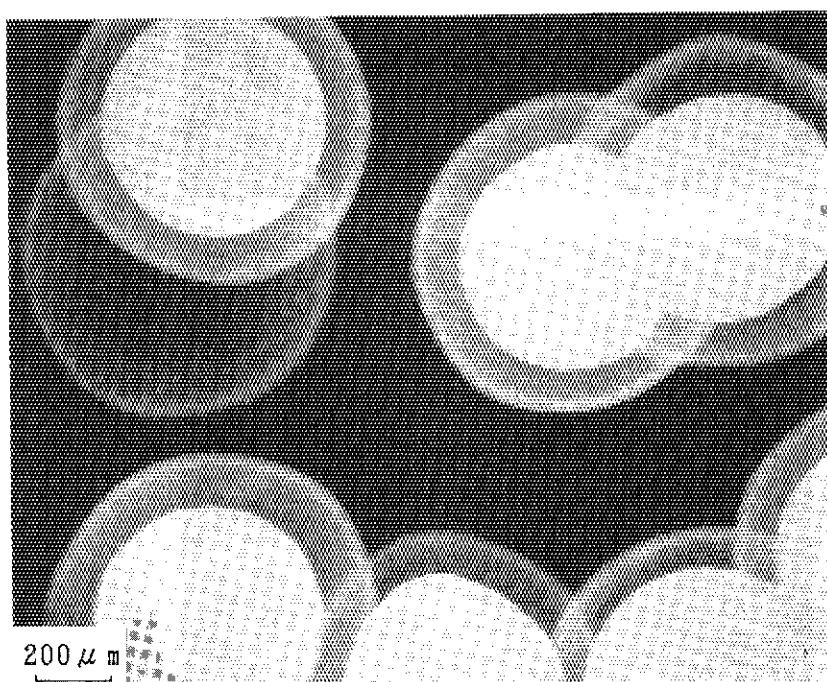


(b) Magnified view
of (a)
(2 Jr-23)

Photo. 5.15D X-ray radiographs of a slice of fuel compact 10 of the 9th OGL-1 fuel assembly.

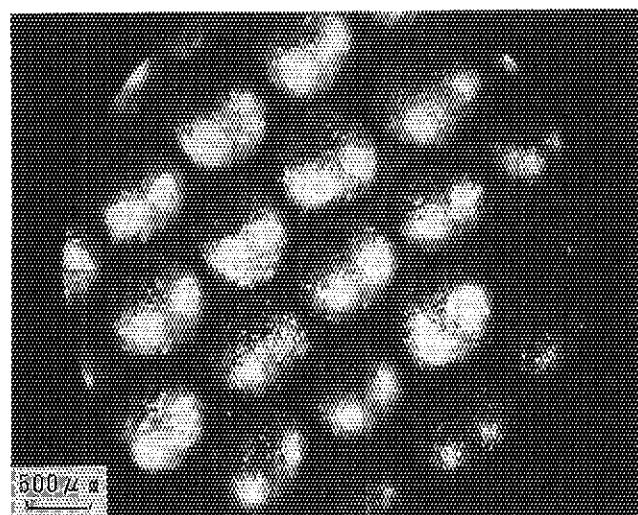


(a) Compact 10
[84 OP1-10]
(88 Jr-71)

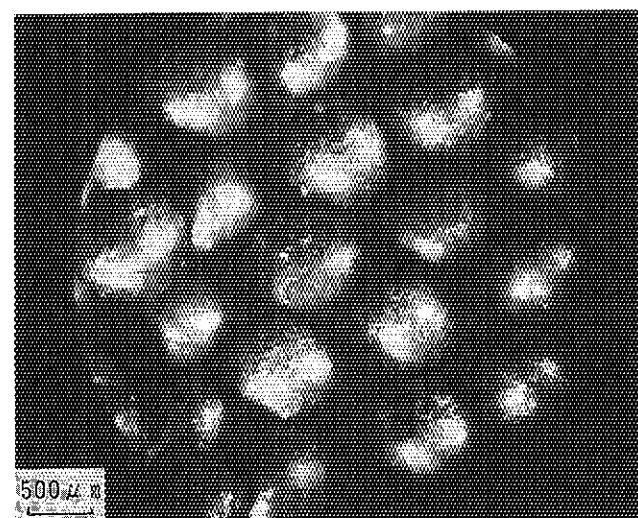


(b) Magnified view
of (a)
(2 Jr-26)

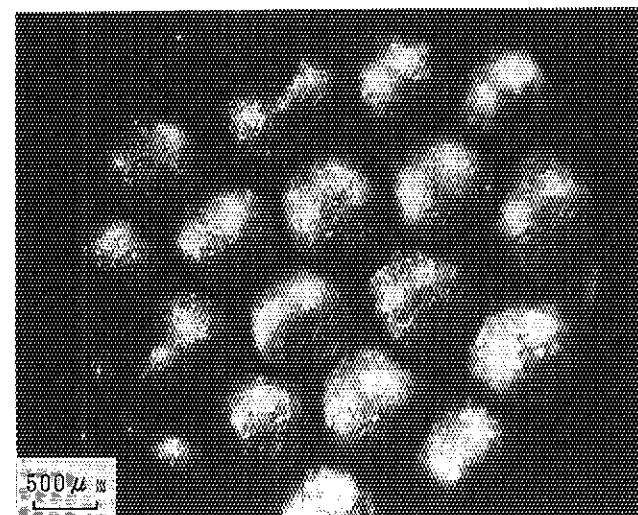
Photo. 5.15E X-ray radiographs of a slice of fuel compact 10 of the 10th OGL-1 fuel assembly.



(a) Compact 1
[82 OP1-01]
(61 Jr-70)

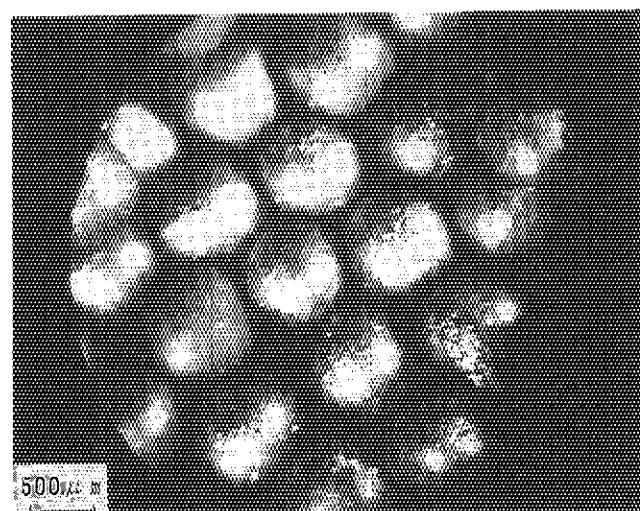


(b) Compact 5
[82 OP1-05]
(61 Jr-76)

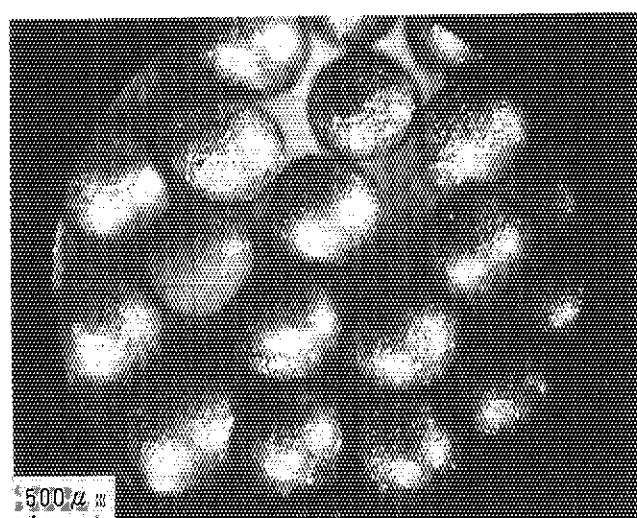


(c) Compact 9
[82 OP1-09]
(61 Jr-81)

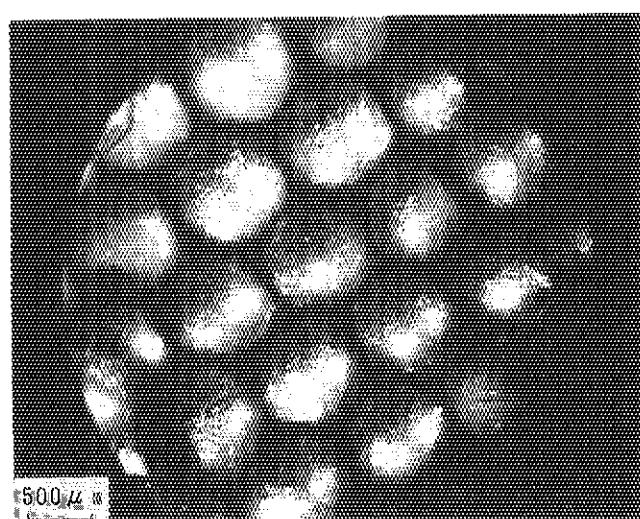
Photo. 5.16 Surface appearance of coated fuel particles sampled from deconsolidated fuel compacts of the 8th OGL-1 fuel assembly.



(d) Compact 10
[82 OP1-10]
(61 Jr-87)



(e) Compact 14
[82 OP1-14]
(61 Jr-93)



(f) Compact 20
[82 OP1-20]
(61 Jr-99)

Photo. 5.16 Continued.

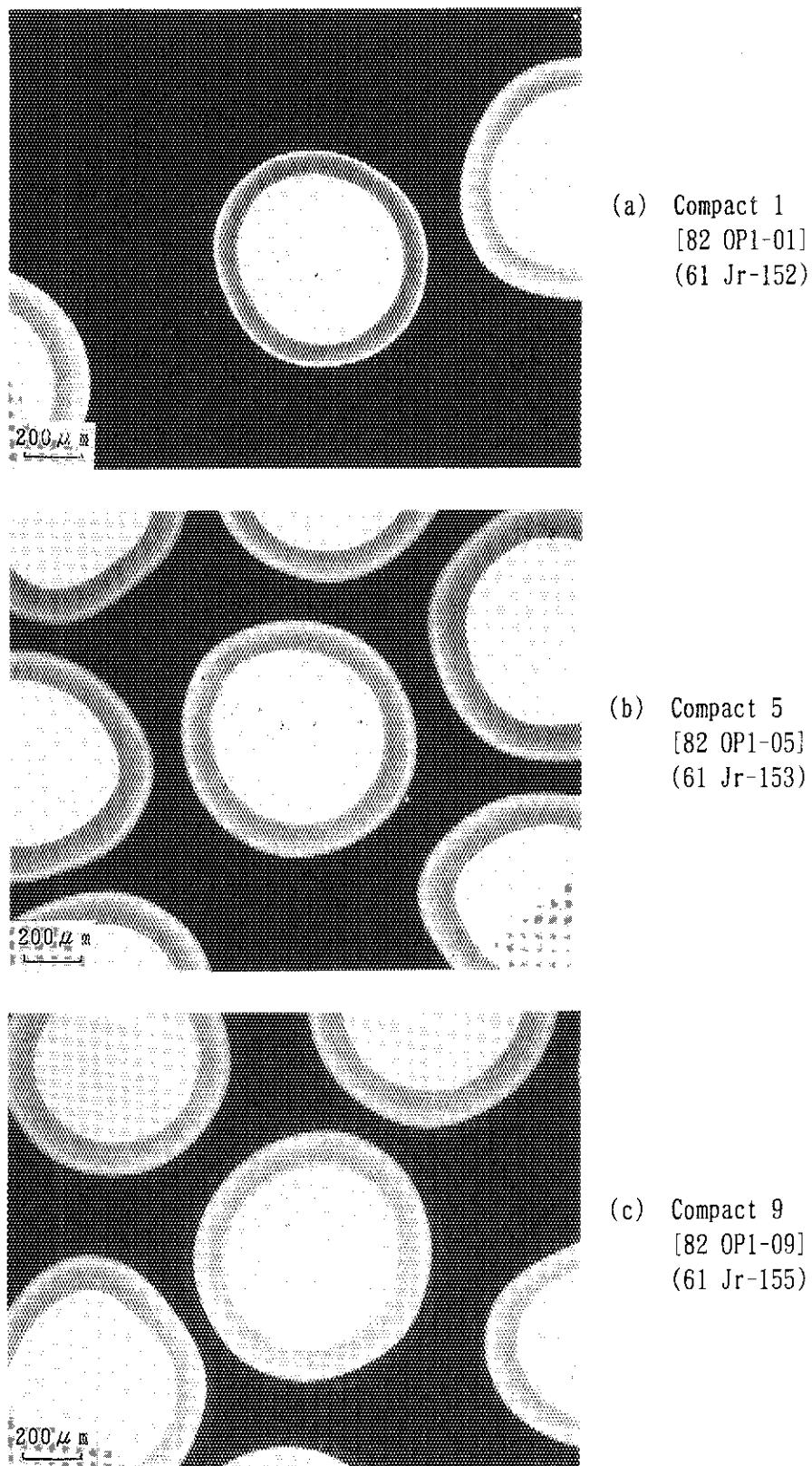
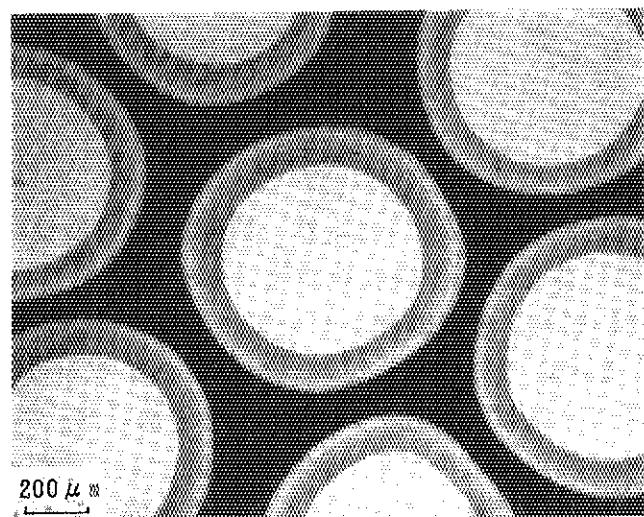
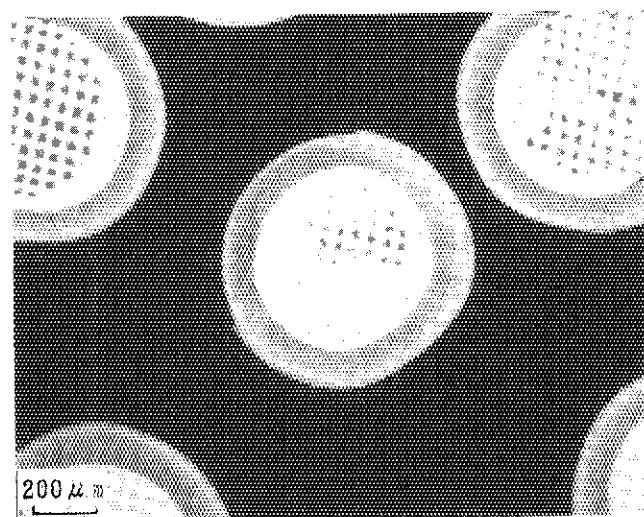


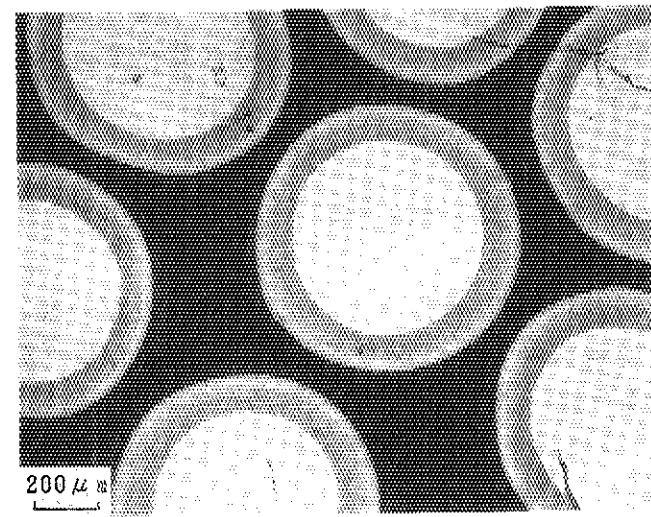
Photo. 5.17 X-ray radiographs of coated fuel particles sampled from deconsolidated fuel compacts of the 8th OGL-1 fuel assembly.



(d) Compact 10
[82 OP1-10]
(61 Jr-159)



(e) Compact 14
[82 OP1-14]
(61 Jr-164)



(f) Compact 20
[82 OP1-20]
(61 Jr-165)

Photo. 5.17 Continued.

6. 総括

JMTRに設置した炉内ガスループOGL-1により、第6次～第12次燃料体の照射を行った。第6次～第8次OGL-1燃料体は、小型流動床で製造した被覆燃料粒子を用いたものである。照射目的は、それぞれ、過渡的昇温時の燃料挙動試験(第6次)、輸入および国産黒鉛マトリックス粉を用いて製造した燃料コンパクトの照射健全性の比較(第7次)、および燃料体中の金属FP挙動試験(第8次)を行うことであった。一方、第9次～第12次燃料体は、HTTR用初装荷燃料の製造のための大型流動床によって製造した被覆燃料粒子を用いた量産試作燃料の照射健全性の試験を行うことを目的としたものであった。

6.1 試験項目ごとの結果のまとめ

(1) 燃料体の製作

第6次および第8次～第10次燃料体はVHTRの第1次概念設計仕様(Mark-III仕様)に基づく燃料体であり、第7次および第11次燃料体は同仕様に準じた燃料体である。一方、第12次燃料体はHTTR用初装荷燃料(A型燃料体)の仕様に基づく燃料体であった。

燃料体の製作においては、被覆燃料粒子、燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、燃料棒、黒鉛ブロック等の全ての構成要素において、製作仕様のほぼ全ての項目について、要求される水準を十分に満足するものであった。

ただし、量産試作燃料については、初期の第9次燃料体では第6次～第8次燃料体に比べて、被覆燃料粒子の貫通破損率の上昇が認められた。しかし、その後、製造経験が蓄積された結果、第12次燃料体では第9次燃料体に比べて、貫通破損率の一定程度の低減化が果たされた。

(2) 照射

照射中は、1次系のFPガス濃度を測定することにより、FPガスの放出率(R/B)を求め、以下の知見を得た。

(a) 燃料温度約1350°CにおけるFPガス放出率(^{88}Kr のR/B)は、第6次～第8次燃料体では 2×10^{-6} 以下の良好なレベルであった。量産試作燃料の第1作である第9次燃料体では、 ^{88}Kr のR/Bは 1.5×10^{-5} と比較的高かったが、第12次燃料体では、製造時の被覆燃料粒子の貫通破損率の低下に伴って、 2×10^{-6} まで低下させることができた。

(b) 約1500°Cまでの過渡的昇温を行った第6次および第10次燃料体では、昇温時にはFPガス放出率の上昇が認められたが、降温後には昇温前と同程度のFPガス放出率に戻った。

(c) 第6次～第12次燃料体の全てについて、照射の進行に伴うFPガス放出率の減少が認められ、1サイクル(約500時間)で定常状態に近づくことが確認された。KrおよびXe同位体について、定常状態到達後のR/Bは、 ^{133}Xe の放射能測定を定常状態到達後に測定した第11次燃料体では、崩壊定数λに対してほぼ-0.5乗の依存性を示した。他の燃料体についても、同様な測定を行えば、同様な依存性を示すことが推定された。得られたλ依存性は、FPガスの放出が拡散によって律速されていることを示唆している。

(d) 第6次および第10次燃料体を含めて、第6次～第11次燃料体では、定常照射条件(照射温度1350°C程度)において、照射に伴うFPガス放出率の有意な上昇は認められなかった。この結果は、第6次～第11次燃料体の燃料コンパクトの照射後試験において、未照射の燃料コンパクトに比べて、照射済みの燃料コンパクトについて、95%信頼度において、被覆燃料粒子の貫通破損率の有意な増加が認められなかつたことと良く対応している。

一方、第12次燃料体では、照射末期にFPガス放出率のわずかな上昇が認められた。照射後試験において、熱電対シースの溶融位置で照射された燃料コンパクトについて、有意な破損率上昇が認められた。このことが、FPガス放出率の上昇の原因であると推定される。

(e) 第12次までのOGL-1燃料体について、 ^{88}Kr を含めたFPガスのR/Bと製造時被覆燃料粒子貫通破損率の間には、ほぼ比例関係が成立した。

(3) 燃料体および燃料棒の照射後試験

以下の項目について照射後試験を実施した。

燃料体 : 外観検査、X線検査

黒鉛ブロック : 外観検査、重量検査、内表面検査、寸法・曲り検査

燃料棒 : 外観検査、重量検査、タースキャニング

黒鉛スリーブ : 外観検査、重量検査、内表面検査、寸法・曲り検査

黒鉛部品 : 外観検査、重量検査

上記試験により、以下の結果が得られた。

- (a) 高速中性子照射量(軸方向最大値)が約 $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ (E>29fJ)までの照射において、燃料棒および燃料体としての健全性を損うような現象は認められなかった。
- (b) 黒鉛スリーブは照射により寸法収縮を示したが、冷却材の流路を黒鉛スリーブの周囲に均一に確保する目的で黒鉛スリーブ外面に付けられているスペーサが黒鉛スリーブの寸法収縮挙動に影響を与えることがわかった。
- (c) 黒鉛スリーブは、JMTR炉心の中心側とその反対側とで高速中性子束についておよそ2倍のひらきがある条件で照射され、照射による曲がりが生じたが、健全性は損われなかった。

(4) 燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の照射後試験

燃料コンパクト、および燃料コンパクトの電気化学的解碎により分離・回収した被覆

燃料粒子について、以下の試験を実施した。

燃料コンパクト： 外観検査、内面検査、寸法検査、重量検査、FPインベントリ測定(相対値)、断面組織観察、EPMA観察、薄切試料のX線ラジオグラフィ

被覆燃料粒子： 外観検査、X線ラジオグラフィ、貫通破損率測定、SiC層破損率測定

以上の照射後試験を通じて、以下の主な結果が得られた。

(a) 外観検査

第9次および第11次燃料体では、オーバーコート境界の著しい隙間、黒鉛マトリックスの欠け、および露出した被覆燃料粒子が見られた。しかし、これらは未照射燃料コンパクトでも観察されたことから、主に製造に起因するものであると推定された。そのほか、第8次燃料体では1個の破損粒子の露出が検出された。上記以外の燃料体では、特に異状は見られなかった。

(b) 断面組織観察およびEPMA観察

第6次～第8次、および第11～12次燃料体では、健全性の点で特に問題となるような被覆層欠陥は見られなかった。一方、第9次および第10次燃料体では、種々の被覆層欠陥が見られた。これは主に被覆層の製造上の問題であると思われる。

いずれの燃料体についても、アメーバ効果の兆候、ならびに明らかなFP/SiC反応およびCO/SiC反応は認められなかった。

(c) 貫通破損率およびSiC層破損率の測定

貫通破損率の値は、第6次～第8次燃料体では、製造時、照射後ともに 1×10^{-4} 程度以下の低い値であった。第9次燃料体では、照射後の貫通破損率は平均で 1.3×10^{-3} という比較的高いレベルであったが、第12次燃料体では 2.7×10^{-4} まで低下した。これは、製造時の貫通破損率が 8.7×10^{-4} から 1.0×10^{-4} まで低下したのに、ほぼ対応している。

照射前後のSiC層破損率は、第6次～第10次燃料体について、いずれも 10^{-4} から 10^{-3} のレベルであった。

例外的な第8次燃料体の貫通破損率を除いて、第6次～第12次燃料体の貫通破損率およびSiC層破損率(各燃料コンパクトの平均値)について、95%信頼限界において照射による有意な破損率増加は認められなかった。

(d) その他

燃料コンパクトの重量検査では、冷却材中の不純物による有意な腐食は認められなかった。薄切燃料コンパクトのX線ラジオグラフィでは、被覆層破損または欠陥は認められず、またアメーバ効果は見られなかった。燃料コンパクトを解碎して得た被覆燃料粒子の外観検査およびX線ラジオグラフィにおいても、照射に起因すると思われる欠陥は観察されなかった。

6.2 燃料体ごとの試験結果のまとめ

各燃料体について、主な照射条件(最高温度、燃焼度)、ならびに燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の主な照射後試験結果(燃料コンパクトの外観、断面組織および被覆燃料粒子破損率)を、Table 6.1に示す。

付録6に、燃料体ごとに照射目的、照射条件、照射中のFPガス放出挙動および燃料コンパクトの照射後試験結果を中心に照射試験の結果をまとめる。付録6の内容を要約すると以下のようになる。

小規模製造燃料については、第6次～第8次燃料体の照射において、FPガス放出率、断面組織観察、被覆燃料粒子の貫通破損率(第8次燃料体の例外を除く)およびSiC層破損率について、照射に起因する健全性の低下は認められなかった。量産試作燃料については、初期の第9次および第10次燃料体では、照射前、照射後ともに、貫通およびSiC層破損率は高く、被覆層の種々の欠陥が認められた。その後、製造経験の蓄積に伴って、製造時貫通破損率が低減化し、第12次燃料体では、燃料照射温度および燃焼度(実測燃料温度を用いた熱計算結果)の点でHTTR条件をうわまわる条件において、照射健全性が確認された。

6.3 今後のOGL-1照射試験計画

本報告書の執筆時点で、第13次および第14次燃料体の照射が終了し、それらの照射後試験と第15次燃料体の照射が行われている。

第13次燃料体は、製造時SiC層破損率の大幅な低減化を果たしたHTTR用初装荷燃料(HTTR炉心用A型燃料と同一仕様の燃料)を装荷したもので、計11サイクルの長期照射を行ったものである。同燃料では、燃料核の真球度改善や燃料コンパクト製造工程における技術的試行(2重オーバーコート)も行った。第15次燃料体では、HTTR用炉心燃料に用いるのと同一の装置で製造した初装荷燃料の長期照射(8サイクル予定)を行っている。同燃料は、製造時SiC層破損率の低減化、燃料核の真球度改善、および2重オーバーコートの採用を引き継ぐものであった。以上の2体の照射試験を通じて、HTTR用量産試作の最終的な段階におけるHTTR初装荷燃料の照射健全性の実証を果たすことが期待されている。

一方、第14次燃料体は、燃焼度10%FIMAの照射に耐えることを目標として、燃料核直徑および被覆層厚さの仕様をHTTR用初装荷燃料の仕様から変更した改良燃料の照射を行ったものである。同燃料にも、製造時SiC層破損率の低減化、燃料核の真球度改善、および2重オーバーコートの採用は引き継がれた。同燃料体の照射サイクルは計4サイクルであり、第3サイクルで最高1500°Cまでの過渡的昇温を行った。同燃料体の照射後試験を通じて、改良燃料の照射挙動に関する基礎的な知見を得ることを予定している。

OGL-1による照射試験は第15次燃料体をもって終了し、その後OGL-1ループは撤去される予定となっている。

参考文献

- (1) 福田幸朔、小川徹、鹿志村悟、林 君夫、飛田勉、小林紀昭、湊 和生、菊地啓修、
村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”, JAERI-M 89-007 (1989).
- (2) 松永朔郎、田中利幸、馬場治、高橋秀武、中村団夫、逆井実、小畠清和、亀ヶ谷勝彦、山田邦貴、臼井伸一、“高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験”, 原子力誌 21 (1979) 249.
- (3) 林 君夫、福田幸朔、鶴田晴通、菊池輝男、“第11次および第12次OGL-1燃料体の黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”, JAERI-M 94-075 (1994).

Table 6.1 Summary of irradiation conditions, fission gas release (R/B) during irradiation, and main results of post-irradiation examinations of the 6th-12th OGL-1 fuel assemblies.

Fuel Assembly	Max. Temp. (°C)	Max. Burnup (%FIMA) [Transient]	R/B*1 of ^{88}Kr	Fuel Compact		Failure Fraction*2 Before After
				Ceramography		
6th	-	0.4	-	intact		5.1×10^{-6} 9.6×10^{-6}
	[1480×280h]		[1.4×10^{-6}]			
7th	1380*3	1.3	4×10^{-7}	intact		2.7×10^{-6} 7.1×10^{-6}
8th	1390*3	1.0	2.6×10^{-7}	intact		5.9×10^{-6} 1.1×10^{-4}
9th	1340*3	2.7	1.5×10^{-6}	defective		8.7×10^{-4} 1.3×10^{-3}
10th	1330	2.8	3×10^{-6}	less defective than for 9th		2.6×10^{-4} 4.9×10^{-4}
	[1500×95h]					
11th	1350*3	1.6	1.0×10^{-6}	intact		5.5×10^{-6} 2.3×10^{-4}
12th	1340*3	3.9	2.3×10^{-6}	intact*4		1.0×10^{-4} 2.7×10^{-4}

*1 Release rate divided by the birth rate of ^{88}Kr in steady state operation at temperatures around 1350°C, and that in transient operation in parenthesis.

*2 Mean values of uranium and fission product leaching fractions before and after irradiation, respectively.

*3 Irradiated under normal operating conditions.

*4 Intact except for a compact located at the thermocouple sheaths melted.

謝 謝

本報告書に述べた第6次～第12次OGL-1燃料体の照射試験を進めるにあたっては、以下の各部門の方々に協力を頂いた。

東海研究所技術部工作課	：燃料体の製作および組み立て
大洗研究所材料試験炉部	
照射第2課	：燃料体の設計および照射ループ運転
検査技術課	：燃料体の検査およびOGL-1ループ中のF Pガス放射能の測定
計画課	：燃料体の照射計画
ホットラボ課	：照射済み燃料体の解体および東海研究所への輸送
東海研究所ホット試験室ホットラボ課	：燃料体の照射後試験

特に、工作課の武山友憲氏、沢畠求氏、照射第2課の峯島博美氏(現在、JRR-3管理課)、検査技術課の横内猪一郎氏、比佐勇氏、大洗研究所ホットラボ課の岩井孝氏、大沢謙治氏、東海研究所ホットラボ課の鈴木紘氏(現在、HTTR計画室)、園部清美氏(現在、ホット試験技術課)、伊藤忠春氏、松島秀夫氏(現在、放射線照射協会)、飯田省三氏、高橋五志生氏、関野甫氏をはじめとする担当の方々には多大な協力を頂いた。

本研究を進めるにあたっては、岩本多實氏(現在、核物質管理センター)、井川勝市氏(現在、企画室)、小川徹氏(現在、融体・燃料プロセス研究室)をはじめとする燃料研究部燃料照射研究室の方々に、指導、助言および協力を頂いた。同研究室の白鳥徹雄氏には、第12次OGL-1燃料体の輸送に関して協力を頂いた。また、荒井長利氏(現在、高温構造工学研究室)、宮本喜晟氏(現在、高温工学部)をはじめとする旧多目的高温ガス炉設計室の方々、塩沢周策HTTR原子炉開発室長、沢和弘氏をはじめとする高温工学試験研究炉開発部の方々には、助言および協力を頂いた。燃料研究部の半田宗男部長、星三千男次長には激励を頂いた。

保健物理部線量計測課の熊沢蕃課長には、破損率の統計的処理に関して、F分布関数用サブルーチンの使用法およびF分布関数表について御教示いただいた。

本報告書の作成にあたっては、燃料照射研究室の旧業務協力員、井上正行氏および川辺勝氏の協力を頂いた。また、沢和弘氏には閲読のうえで助言を頂いた。

以上の方々に深く感謝いたします。

謝 言

本報告書に述べた第6次～第12次OGL-1燃料体の照射試験を進めるにあたっては、以下の各部門の方々に協力を頂いた。

東海研究所技術部工作課	：燃料体の製作および組み立て
大洗研究所材料試験炉部	
照射第2課	：燃料体の設計および照射ループ運転
検査技術課	：燃料体の検査およびOGL-1ループ中のFPガス放射能の測定
計画課	：燃料体の照射計画
ホットラボ課	：照射済み燃料体の解体および東海研究所への輸送
東海研究所ホット試験室ホットラボ課	：燃料体の照射後試験

特に、工作課の武山友憲氏、沢畠求氏、照射第2課の峯島博美氏(現在、JRR-3管理課)、検査技術課の横内猪一郎氏、比佐勇氏、大洗研究所ホットラボ課の岩井孝氏、大沢謙治氏、東海研究所ホットラボ課の鈴木紘氏(現在、HTTR計画室)、園部清美氏(現在、ホット試験技術課)、伊藤忠春氏、松島秀夫氏(現在、放射線照射協会)、飯田省三氏、高橋五志生氏、関野甫氏をはじめとする担当の方々には多大な協力を頂いた。

本研究を進めるにあたっては、岩本多實氏(現在、核物質管理センター)、井川勝市氏(現在、企画室)、小川徹氏(現在、融体・燃料プロセス研究室)をはじめとする燃料研究部燃料照射研究室の方々に、指導、助言および協力を頂いた。同研究室の白鳥徹雄氏には、第12次OGL-1燃料体の輸送に関して協力を頂いた。また、荒井長利氏(現在、高温構造工学研究室)、宮本喜晟氏(現在、高温工学部)をはじめとする旧多目的高温ガス炉設計室の方々、塩沢周策HTTR原子炉開発室長、沢和弘氏をはじめとする高温工学試験研究炉開発部の方々には、助言および協力を頂いた。燃料研究部の半田宗男部長、星三千男次長には激励を頂いた。

保健物理部線量計測課の熊沢蕃課長には、破損率の統計的処理に関して、F分布関数用サブルーチンの使用法およびF分布関数表について御教示いただいた。

本報告書の作成にあたっては、燃料照射研究室の旧業務協力員、井上正行氏および川辺勝氏の協力を頂いた。また、沢和弘氏には閲読のうえで助言を頂いた。

以上の方々に深く感謝いたします。

付録 1 燃料の照射前特性データ

1. はじめに

本付録では、第8次、第12次および第13次OGL-1燃料体について、燃料の照射前特性データを示す。第1次～第11次OGL-1燃料体の照射前特性データは前報告⁽¹⁾に記載したが、第8次燃料体の被覆燃料粒子については、前報告に記載しなかったので、ここに示した。また、第13次燃料体については、燃料棒の緩衝板の寸法、燃料コンパクトの一軸圧縮強度等、一部の燃料仕様が、第12次燃料体よりもHTTRの設計仕様に近いことから、比較のために示した。

本付録の特性データ表の記載内容は、以下に示すとおりである。

- Table A1.1 : 第8次燃料体の被覆燃料粒子(TRISO)の特性
- Table A1.2 : 第8次燃料体のBISO被覆粒子の特性
- Table A1.3 : 第12次燃料体の被覆燃料粒子の特性
- Table A1.4 : 第13次燃料体の被覆燃料粒子の特性
- Table A1.5 : 第12次燃料体の燃料コンパクトのフェノール
樹脂および黒鉛粉末の特性
- Table A1.6 : 第12次燃料体の燃料コンパクトの特性
- Table A1.7 : 第13次燃料体の燃料コンパクトの特性
- Table A1.8 : 第12次および第13次燃料体の黒鉛素材の特性
- Table A1.9 : 第12次燃料体の燃料棒の緩衝板の特性
- Table A1.10 : 第13次燃料体の燃料棒の緩衝板の特性
- Table A1.11 : 第12次および第13次燃料体の黒鉛部品および燃料棒の特性

以下では、照射前特性の詳細として、①燃料コンパクト中の汚染ウラン量および不純物量、②黒鉛素材および緩衝板の特性、ならびに③燃料コンパクトの一軸圧縮強度について、検討を行う。

2. 燃料コンパクト中の汚染ウラン量および不純物量

(1) 燃料コンパクト中の汚染ウラン量

燃料コンパクトの黒鉛マトリックスおよび被覆燃料粒子の外側高密度熱分解炭素層(OPyC層)に含まれるウラン量について考える。Table A1.7において、第13次燃料体の燃料コンパクトのSiC層破損率の値(燃料メーカー測定値)は、 10^{-8} のオーダーであるが、同じ製造バッチの燃料の原研における受け入れ検査の結果は 2×10^{-7} であった。この差は、ウラン定量法の違いによるものである。本報告では、より分析下限値の低い原研の検査結果を用いる。

燃料コンパクトのSiC層破損率の検査は、燃料コンパクトを空気中で加熱し、炭素からなる燃料コンパクトマトリックスおよびOPyC層を燃焼させて、SiC層が破損した

粒子(SiC層破損粒子)を検出するものである。燃料コンパクト中に、SiC層破損粒子が全く含まれていない場合のSiC層破損率測定値は、燃料コンパクトマトリックスおよびOPyC層中の全汚染ウラン率(汚染ウラン量を燃料コンパクト中の全ウラン量で除したもの)に相当する。

1個の燃料コンパクトに含まれる被覆燃料粒子の総数は約13000粒であるから、そのうち1粒子が破損した場合のSiC層破損率は、 $1/13000=8\times 10^{-5}$ である。第13次燃料体のSiC層破損率は 2×10^{-7} であることから、SiC層破損粒子は含まれていないことがわかる。したがって、この値は燃料コンパクトマトリックスおよびOPyC中の全汚染ウラン率に相当するものであると言える。

燃料コンパクトマトリックスおよびOPyC層中の全汚染ウラン率を、SiC層破損粒子が含まれている通常の燃料コンパクトについて実際に求めるには、特別の試験が必要である。上記により、全汚染ウラン率の妥当な評価を行うことができた。

(2) 燃料コンパクト中の不純物量

まず、燃料コンパクト中の被覆燃料粒子に含まれる不純物について検討する。Table A1.3において、第12次燃料体の燃料核について、不純物(I)として示す値は、被覆を施す前の燃料核単体を試料とし、化学分析法によって測定した値である。一方、不純物(II)として示す値は、同じ製造バッチの被覆燃料粒子を用いた燃料コンパクトから燃料核を採取し、放射化分析法によって、測定した値である。不純物(II)では、Ag、Eu等について、不純物(I)よりさらに微量まで測定できており、Ag、Eu等の分析対象元素以外についても、不純物(I)の値よりも低い値であることが推定される。得られた結果は、また、被覆燃料粒子の被覆工程および燃料コンパクトの成型工程において、特に燃料核の不純物量が多くなることはないことを示している。

Table A1.4に示す第13次燃料体の燃料核の不純物量(化学分析値)も、第12次燃料体の値と同様に低い値であった。

次に、燃料コンパクトに含まれる不純物のうち、被覆燃料粒子以外の物質に含まれる不純物について考える。Table A1.5に示す、第12次燃料体の燃料コンパクトの製造に用いた黒鉛粉末およびフェノール樹脂においても、ホウ素当量(EBC)は人造黒鉛粉末に比較して、天然黒鉛粉末のほうが高い。この理由としては、以下に述べるように分析法の違いによるものであると考えられる。

人造黒鉛粉末および天然黒鉛粉末の不純物分析は、輸入元であるドイツの黒鉛メーカーでも実施しており、その結果をミルシートとして入手している。メーカーのホウ素当量測定値を、同表中の()内に示す。人造黒鉛粉末のメーカーの分析結果と、本燃料体の検査結果(国内での測定値)を比べると、ホウ素当量に大きな影響を及ぼすDy、Gd、Eu、Smの分析値にあまり差がないのに対して、天然黒鉛粉末では上記4元素の分析値に大きな差が認められる。さらに、上記の原料を混合して製造した燃料コンパクトの黒鉛マトリックス中の上記4元素の分析値のうち、Gdについては人造黒鉛粉末と同様に

低い値が得られている。したがって、人造黒鉛粉末および天然黒鉛粉末に含まれる実際の不純物含有率は低く、両者のホウ素当量の差は分析法の違いによるものであると言える。

なお、Table A1.5に示した黒鉛粉末およびフェノール樹脂は、第7次燃料体の一部の燃料コンパクトを除いて、第12次燃料体までのすべての燃料に用いられてきたものであり、HTTR燃料に使用されることになっている。

3. 黒鉛素材および緩衝板の特性

黒鉛スリーブ、黒鉛ブロックおよび黒鉛内筒には、高純度化処理を行った微粒等方性黒鉛(IG-110)素材を用いている。一例として、Table A1.8に第12次燃料体の製作に用いた黒鉛素材の不純物量、物性値等の特性を発注仕様と合わせて示す。第6次～第11次燃料体に使用した黒鉛素材は、第12次燃料体の黒鉛素材と同じ製造工程および同じ高純度処理プロセスを経たもの(同じ銘柄)である。それらの物性値、不純物量等の検査結果は、第12次燃料体の場合と同程度であった。この黒鉛素材も、HTTR燃料に使用されることになっている。

燃料棒には、燃料コンパクトの輸送時における振動を緩和したり、高温時における熱膨張を吸収するために、黒鉛フェルトを加工した緩衝板を用いている。第12次および第13次燃料体に用いた緩衝板の特性の一例を、それぞれTable A1.9およびTable A1.10に示す。緩衝板は、これに含まれる不純物が、燃料からのFP放出挙動を調べる照射後試験の妨害をしないように、高純度化処理を行っている。この目的で測定した21元素の分析結果は、すべて製作仕様を満足している。

4. 燃料コンパクトの一軸圧縮強度

燃料コンパクトの破壊強度(破壊荷重)については、第12次燃料体までは、燃料コンパクトを横にした状態で荷重をかける、リング圧縮強度を測定してきた。第13次燃料体では、新たな検査項目として、燃料コンパクトの高さ方向に荷重をかける一軸圧縮強度(破壊荷重)を追加した。5個の試料についての一軸圧縮強度の測定値は、以下のとおりであった⁽³⁾。

コンパクト番号 (報告書頁)	20 7-13	29 7-14	28 7-15	36 7-16	46 7-17
一軸圧縮強度 (破壊荷重)(kgf)	910	996	992	992	836

これらの測定データから、平均値945kgf(9260N)、標準偏差(σ) 71kgf(696N)が得られる。この結果を従来のリング圧縮強度の結果とともにTable A1.8に示す。以上のことから、片側 2σ として、98%の燃料コンパクトは約800kgf(7840N)以上の強度(破壊荷重)を有していることがわかる。

参考文献

- (1) 福田幸朔、小林紀昭、林君夫、湊和生、菊池輝男、足立守、伊丹宏治、岩本多實、井川勝市、“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).
- (2) 福田幸朔、小川徹、鹿志村悟、林君夫、飛田勉、小林紀昭、湊和生、菊地啓修、村上裕彦、菊池輝男、井川勝市、岩本多實、“高温ガス炉用燃料に関する試験研究”, JAERI-M 89-007 (1989).
- (3) OGL-1照射試験用第13次燃料体試験検査成績書、原研未公開資料 (1989).

Table A1.1 Characteristics of coated fuel particles of the 8th OGL-1 fuel assembly.

Sample Name	820PC			
	Inspection Item	Specifi-cation	No. of Samples	Results
UO ₂ Kernel	Uranium enrichment (U-235 wt%)	19.5±0.44 -0.50	1	19.71
	Diameter(μm)	600±60	1828	595
	Dia. Std. Dev. (μm)	≤50.0	1828	28.7
	O/U Ratio	2.00±0.01 -0.00	2	2.01, 2.01
	Density(%TD)	96.0±2.0	2	95.8, 96.8
	Sphericity	≤1.2(≥95%)	100	100
	Impurities (ppm)	Ag <1 Al <500 B <1 C <300 Ca <200 Cd <1 Cl <25 Cr <30 Cu <10 F <25 Fe <500 Mg <100 Mo <25 N <100 Ni <70 Pb <5 Si <200 Sn <30	1	<0.5 <15 <0.2 16 <10 <0.7 <10 <22 <3 <1 <20 <2 <20 11 <20 <3 110 <3 <0.65
	Boron Equivalent (ppm)	≤3		
	Volatile Impurities (μl/g·UO ₂) ^{*1}	<80		<10

^{*1} 1 μl/g·UO₂=10⁻⁶m³/kg·UO₂

Table A1.1 Continued.

Sample Name		820PC			
		Inspection Item	Specifi-cation	No. of samples	Results
Coating Layer	1st	Thickness (μm) PSA* ¹	60±15	1000	64.5
		M* ²	----	40	62.8
	2nd	Density (Mg/m^3)	1.10±0.10	10	1.11
		Thickness (μm) PSA	30±5	1000	27.5
	3rd	M	----	40	32.4
		Density (Mg/m^3)	1.85±0.05	5	1.85
	4th	Thickness (μm) PSA	25±5	1000	24.5
		Density (Mg/m^3)	≥3.20	10	3.21
		(95% Confidence Limit)			
		Thickness (μm)	45±5	1000	43.0
Coated Particle	Diameter(μm)	1.85±0.05	2	1.86, 1.90	
		OPTAF	5	1.01	
	Density(Mg/m^3)	<1.03	5	3.24	
		Crystallite size (nm)	3.0±1.0	1	
	Sphericity	940±60	1286	914	
		≤60	1286	34.1	
	Dia. Std. Dev. (μm)	----	2	4.26, 4.26	
	Density(Mg/m^3)	≤1.2(≥95%)	100	100	
	Crushing Strength(kgf)* ³	≥2.0	50	2.5	
	Free U Fraction	≤5×10 ⁻⁵	5	<1×10 ⁻⁵	
	SiC Failure Fraction	≤5×10 ⁻³	5	1.1×10 ⁻⁴	

*1 Measured by particle size analyzer.

*2 Measured by microscope after polishing.

*3 1kgf=9.8N.

Table A1.2 Characteristics of BISO particles of the 8th OGL-1 fuel assembly.

Sample Name		820PCB* ¹			
		Inspection Item	Specifi-cation	No. of Samples	
	1st	Thickness (μm) Density (Mg/m^3)	60 ± 15 1.10 ± 0.10	1000 2	61.0 1.12, 1.14
	2nd	Thickness (μm) Density (Mg/m^3) OPTAF Crystallite size (nm)	100 ± 15 1.85 ± 0.05 < 1.03 3.0 ± 1.0	1000 10 5 1	103.5 1.85 1.00 3.12
Coated Particle		Diameter(μm) Dia. Std. Dev. (μm) Density(Mg/m^3) Crushing Strength(kgf) ^{*²} Std. Dev. (kgf) ^{*²} Free U Fraction	940 ± 60 ≤ 60 ----- ≥ 2.0 ≥ 0.7 $\leq 5 \times 10^{-5}$	1365 1365 2 50 50 5	924 37.6 3.94, 3.91 4.0 0.5 $< 2.1 \times 10^{-5}$

*1 UO_2 Kernels of 820PCB are the same as those of 820PC in table A1.1.

*2 1kgf=9.8N.

Table A1.3 Characteristics of coated fuel particles of the 12th OGL-1 fuel assembly.

Sample name	87OPC			
	Inspection Item	Specifi-cation	No. of Samples	Results
UO ₂ Kernel	Uranium Enrichment (U-235 wt%)	19.5±0.44 -0.50	1	19.13
	Diameter(μm)	600±60	1260	573
	Dia. Std. Dev. (μm)	≤60.0	1260	29.9
	O/U Ratio	2.00±0.01 -0.00	2	2.002, 2.003
	Density(Mg/m ³)	10.41±0.22	2	10.51, 10.51
	Sphericity	≤1.2(≥95%)	100	96
	Impurities (ppm) (I)	Ag <1 Al <500 B <1 C <300 Ca <200 Cd <1 Cl <25 Cr <30 Cu <10 Dy <0.2 Eu <0.2 F <25 Fe <500 Gd <0.2 Mg <100 Mo <25 N <100 Ni <70 Pb <10 Si <200 Sm <0.2 Sn <30 Pd --- Ru --- Cs ---	1	<0.6 <10 <0.4 <10 <14 <0.1 <10 <5 <4 <0.05 <0.05 <1 <20 <0.05 <4 <5 <12 <12 <6 <6 <0.05 <3 <0.1 <0.3 <0.002 <0.91 <44
	Boron Equivalent (ppm)	≤3		
	Volatile Impurities (μl/g·UO ₂)*	<80		
	Specially Analyzed Impurities (ppm) (II)	-----	1	Ag<0.007 Cl<0.7 Cs<0.001 Eu<0.0003 Pd<0.1 Ru<0.3

* 1 μl/g·UO₂ = 10⁻⁶m³/kg·UO₂.

Table A1.3 Continued.

Sample Name		87OPC			
		Inspection Item	Specifi-cation	No. of Samples	Results
Coating Layer	1st	Thickness (μm)	60 ± 15	200	58.2
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 12.0	200	8.8
		Density (Mg/m^3)	1.10 ± 0.10	2	1.12, 1.10
	2nd	Thickness (μm)	30 ± 5	200	32.7
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 5.0	200	3.6
		Density (Mg/m^3)	1.85 ± 0.05	10	1.84
		OPTAF	< 1.03	5	1.02
	Defective Layer		----	ca. 1000	0
Coating Layer	3rd	Thickness (μm)	25 ± 5	200	28.3
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 4.0	200	1.3
		Density (Mg/m^3)	≥ 3.20	10	3.22
		(95% Confidence Limit)			
		C/Si Ratio	$1.00 + 0.10$ $- 0.00$	2	1.008, 1.004
	4th	Free Si (wt%)	< 0.5	2	$< 0.06, < 0.06$
		Defective Layer	----	100	0
Coated Particle	1st - 4th	Thickness (μm)	45 ± 5	200	41.6
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 8.0	200	4.8
		Density (Mg/m^3)	1.85 ± 0.05	2	1.88, 1.86
		OPTAF	< 1.03	5	1.02
		Crystallite Size (nm)	----	1	3.36
		Defective Layer	----	100	0
Coated Particle	Impurities (ppm)		----	1	Ag < 0.002 Cl < 0.3 Cs < 0.0007 Eu < 0.0001 Pd < 0.02 Ru < 0.02
	Diameter (μm)		920 ± 60	1184	885
	Dia. Std. Dev. (μm)		≤ 60	1184	36.9
	Density (Mg/m^3)		----	2	4.39, 4.37
	Sphericity		$\leq 1.2 (\geq 95\%)$	100	98
	Crushing Strength (kgf) ^{*1}		≥ 2.0	50	2.79
	Free U Fraction		$\leq 5 \times 10^{-5}$	5	2.8×10^{-6}
	SiC Failure Fraction		$\leq 1.00 \times 10^{-3}$	5	2.2×10^{-5}
	UO ₂ Kernel O/U Ratio		----	2	2.003, 2.002

*1 1kg f = 9.8N.

Table A1.4 Characteristics of coated fuel particles of the 13th OGL-1 fuel assembly.

Sample Name	880PC			
	Inspection Item	Specifi-cation	No. of Samples	Results
UO ₂ Kernel	Uranium Enrichment (U-235 wt%)	19.5+0.44 -0.50	1	19.32
	Diameter(μm)	600±60	1096	595
	Dia. Std. Dev. (μm)	≤60.0	1096	20.4
	O/U ratio	2.00+0.01 -0.00	2	2.011, 2.011
	Density(Mg/m ³)	10.41±0.22	2	10.59, 10.55
	Sphericity	≤1.2(≥95%)	100	99
	Impurities (ppm)	Ag <1 Al <500 B <1 C <300 Ca <200 Cd <1 Cl <25 Cr <30 Cu <10 Dy <0.2 Eu <0.2 F <25 Fe <500 Gd <0.2 Mg <100 Mo <25 N <100 Ni <70 Pb <10 Si <200 Sm <0.2 Sn <30 Pd --- Ru --- Cs ---	1	<0.2 <10 <0.4 <10 72 <0.1 <10 <5 <4 <0.05 <0.05 <1 <20 <0.05 <4 <5 15 <12 <6 <6 <0.05 <3 <0.04 <0.08 <0.0005
	Boron Equivalent (ppm)	≤3		<0.92
	Volatile Impurities (μl/g·UO ₂) ^{*1}	<80		26

*1 1 μl/g·UO₂= 10⁻⁶m³/kg·UO₂.

Table A1.4 Continued.

Sample Name		880PC			
		Inspection Item	Specifi-cation	No. of Samples	Results
Coating Layer	1st	Thickness (μm)	60 ± 15	200	61.9
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 12.0	200	10.7
		Density (Mg/m^3)	1.10 ± 0.10	2	1.11, 1.13
	2nd	Thickness (μm)	30 ± 5	200	30.8
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 5.0	200	3.9
		Density (Mg/m^3)	1.85 ± 0.05	10	1.82
		OPTAF	< 1.03	5	1.00
	3rd	Defective Layer	----	100	0
		Thickness (μm)	25 ± 12 -0	200	32.5
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 4.0	200	1.8
	4th	Density (Mg/m^3) (95% Confidence Limit)	≥ 3.20	10	3.20
		Defective Layer	----	100	0
		Thickness (μm)	45 ± 5	200	41.6
		Thickness Std. Dev. (μm)	≤ 8.0	200	4.3
		Density (Mg/m^3)	1.85 ± 0.05	2	1.88, 1.85
Coated Particle	Coated Particle	OPTAF	< 1.03	5	1.00
		Crystallite Size (nm)	----	1	2.82
		Defective Layer	----	ca. 1000	0
		Diameter (μm)	940 ± 60	1121	923
		Dia. Std. Dev. (μm)	≤ 60	1121	37.1
		Density (Mg/m^3)	----	2	4.10, 4.13

*1 1kg f = 9.8N.

Table A1.5 Characteristics of phenol resin and graphite powders for the 12th OGL-1 fuel compacts.

Item	Phenol Resin (CS-217)		Natural Graphite (FP99.99)	Electrode Petroleum Graphite (KR-316)	
Impurities (ppm)					
Elements	Ag	<0.011	0.1 (0.1)	<0.011 (<0.5)	
	Al	3.0	9.0 (2.7)	0.15 (<0.1)	
	B	<0.2	0.05 (0.03)	0.08 (0.07)	
	Ca	<7.2	<9.2 (7)	1.7 (0.5)	
	Cs	<0.004	<0.006	<0.004	
	Cu	<0.85	6.5	<0.36	
	Dy	<0.015	<0.028	<0.004 (<0.01)	
	Eu	<0.00095	<0.098	<0.00003 (<0.01)	
	Fe	20	37 (19)	1.8 (1.4)	
	Gd	<0.20	<0.53	<0.01 (<0.01)	
	K	<1.4	<30	0.10	
	Mg	20	<38	6.4	
	Na	33	110	0.18	
	Ni	<15	<28 (2.5)	<2.9 (0.1)	
	Pd	<0.28	<0.67	<0.10	
	Ru	<0.014	0.15	<0.014	
	Si	330	30 (27)	3.5 (2.3)	
	Sm	<0.008	0.009	<0.002 (<0.01)	
	Ti	<1.3	<3.1(0.5) | Dy+Eu+Gd	<0.4 (0.1)	
	V	0.047	0.1 (0.1) | +Sm=0.02	<0.1 (0.1)	
	Cl	1.0	5.6	1.2	
EBC* ¹ <1.13		EBC <2.55	EBC <0.151		
Ash		1000	100	15	
Real Density (Mg/m ³)			2.260	2.155	
Tap Density (Mg/m ³)			-----	0.94	
Moisture(wt%)			0.04	<0.01	
Chemical Composition(wt%)		C 75.8, H 5.8, N 2.6, O 15.8	C 99.99	C >99.95	
Remarks					
		Melting point (°C) 143	Particle Size Dis- tribution (μm:wt%) >71 : 1.0 32-71 : 13.5 25-32 : 13.2 20-25 : 15.4 10-20 : 16.9 5-10 : 14.1 >5 : 8.2	Particle Size Dis- tribution (μm:wt%) >100 : 0 80-100 : 0.8 63-80 : 3.7 31-63 : 27.3 <31 : 68.2	

*1 EBC=Equivalent Boron Content.

Table A1.6 Characteristics of the 12th OGL-1 fuel compacts.

Inspection Item	Specification	No. of Sam-ples	Results				
			Mean	Max.	Min.	Std. Dev.	
Dimension (mm)	Outer Diameter	26.0±0.1	26	25.995	26.01	25.98	8.1E-3
	Inner Diameter	10.0±0.1	26	10.022	10.03	10.01	4.0E-3
	Length	39.0±0.5	26	38.997	39.05	38.94	2.9E-3
Weight (g/compact)	-----	26	43.239	43.267	43.197	1.9E-2	
U Content (g)* ¹	-----	26	13.861	13.991	13.499	1.4E-1	
Matrix Density (Mg/m ³)	1.70±0.05	26	1.686	1.69	1.68	5.0E-3	
Coated Particle Packing Fraction(vol%)	30±2	26	30.1	30.2	30.1	2.0E-2	
Residual Carbon (wt% /Total Carbon)* ²	-----	26	10.17	10.3	10.0	8.7E-2	
U Homogeneity Factor in Compact (%)	≤10	11	1.89	5.8	0.0	2.01	
U Content (g)* ³	13.49±0.67	5	13.63	13.78	13.52	1.3E-1	
Free U Fraction	≤1E-4* ⁴	5	3.0E-5	5.3E-5	9.3E-6	2.1E-5	
Defective SiC Layer Fraction	≤1.50E-3	5	5.5E-4	8.1E-4	3.6E-4	1.7E-4	
Young's Modulus (kgf/cm ²)* ⁵	-----	5	24932	26712	23352	1406	
Ring Strength (kg f)* ⁶	-----	5	177	189	167	9.26	

*1 γ -ray method.

*2 Residual carbon from resin devided by total carbon in compact matrix.

*3 Chemical analysis.

*4 $1E-4=1\times 10^{-4}$.*5 $1\text{kgf}/\text{cm}^2=9.8\times 10^4 \text{ Pa}$.*6 $1\text{kgf}=9.8\text{N}$.

Table A1.6 Continued.

Inspection Item	Specification	No. of Samples	Results
Matrix Impurities (ppm)	-----	1	Ag<0.007, Al 23, B<0.1, Cu<8, Ca<8, Cl<0.2, Cs<0.001, Dy<0.007, Eu<0.0007, Fe<0.7, Gd<0.02, K<0.3, Na<0.1, Mg<5, Ni<16, Pd<0.03, Ru<0.3, Si 110, Sm<0.02, Ti<8, V<8
Hydrogen ($\mu\text{l/g}$) ^{*1}	-----	2	21.22, 20.16
Volatile Impurities ($\mu\text{l/g}$)	-----	2	89, 360
UO ₂ Kernel ^{*2} Impurities (ppm)	-----	1	Ag<0.007, Cl<0.3, Cs<0.001, Eu<0.0003, Pd<0.1, Ru<0.3,
Coating Layer ^{*3} Impurities (ppm)	-----	1	Ag<0.002, Cl<0.3, Cs<0.0007, Eu<0.0001, Pd<0.02, Ru<0.02,

*1 $1\mu\text{l/g} = 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$.

*2 UO₂ kernels of coated fuel particles in fuel compact.

*3 Coating layers of coated fuel particles in fuel compact.

Table A1.7 Characteristics of the 13th OGL-1 fuel compacts.

Inspection Item		Specification	No. of Samples	Results			
				Mean	Max.	Min.	Std. Dev.
Dimension (mm)	Outer Diameter	26.0±0.1	26	25.979	26.00	25.96	8.9E-3
	Inner Diameter	10.0±0.1	26	10.002	10.01	9.99	5.4E-3
	Length	39.0±0.5	26	38.925	38.99	38.88	2.4E-3
Weight (g/compact)		-----	26	43.796	42.835	42.763	2.0E-2
U (g/compact)* ¹		13.49±0.67	26	13.532	13.77	13.22	1.5E-1
Matrix Density (Mg/m ³)		1.70±0.05	26	1.683	1.69	1.68	4.9E-3
Coated Particle Packing Fraction(vol%)		32±2	26	30.96	31.0	30.9	5.0E-2
Residual Carbon* ² (wt%/Total Carbon)		-----	26	10.27	10.5	10.1	9.6E-2
U Homogeneity Factor in Compact (%)		≤10	13	2.53	4.1	0.0	1.18
Free U Fraction		≤1E-4* ³	5	4.2E-6	5.8E-6	1.8E-6	1.5E-6
Defective SiC Layer Fraction		≤1.50E-3	5	3.9E-6	7.2E-6	2.5E-6	1.9E-6
Young's Modulus (kgf/cm ²)* ⁴		-----	5	17800	20363	15437	2065
Strength (kgf)* ⁵	Ring Axial	-----	5	192	219	168	19.6
Coated Particle O/U		-----	1	2.003			

*1 γ -ray method.

*2 Residual carbon from resin devided by total carbon in compact matrix.

*3 $1E-4=1\times 10^{-4}$.*4 $1\text{kgf}/\text{cm}^2=9.8\times 10^4 \text{ Pa}$.*5 $1\text{kgf}=9.8\text{N}$.

Table A1.7 Continued.

Inspection Item	Specification	No. of Samples	Results
Coated Particle O/U	-----	1	2.003
Matrix Impurities (ppm)	-----	1	Ag<0.001, Al<2.6, B<0.1, Cu<2, Ca 18, Cl<2.5, Cs<0.0003, Dy<0.004, Eu<0.00004, Fe 2.1, Gd<0.003, K<0.3, Na<1.0, Mg<1, Ni<3, Pd<0.04, Ru<0.03, Si 20, Sm<0.001, Ti<2, V<2
Hydrogen ($\mu\text{l/g}$) ^{*1}	-----	2	2.40, 2.71
Volatile Impurities ($\mu\text{l/g}$) ^{*1}	-----	2	140, 310

*1 1 $\mu\text{l/g} = 10^{-6}\text{ m}^3/\text{kg}$.

Table A1.8 Characteristics of graphite for the 12th and 13th OGL-1 fuel assemblies.

Inspection Item	No. of Samples	Specifi-cation	Results* ¹	
			12th	13th
Name of Graphite		IG-110	IG-110	IG-110
Bulk Density (Mg/m ³)	Surface 6 Center 6	— — —	M 1.77, S 6.1E-3 M 1.77, S 5.1E-3	M 1.78, S 4.5E-3 M 1.79, S 5.2E-3
True Density (Mg/m ³)	Surface 2 Center 2	— — —	2.18 2.17	2.16 2.16
Shore Hardness	Surface 6 Center 6	— — —	M 53, S 0.39 M 52, S 0.51	M 55, S 0.52 M 55, S 0.60
Bending Strength (kgf/cm ²)* ²	Surface 6 Center 6	— — —	M 401, S 12.5 M 386, S 17.8	M 380, S 10.4 M 378, S 21.4
Compressive Strength (kgf/cm ²)	Surface 6 Center 6	— — —	M 766, S 23.9 M 768, S 20.8	M 768, S 15.4 M 767, S 23.5
Tensile Strength (kgf/cm ²)	Surface 6 Center 6	≥200 ≥200	M 294, S 20.7 M 276, S 9.1	M 273, S 8.2 M 267, S 15.1
Young's Modulus (kgf/cm ²)* ²	Surface 6 Center 6	— — —	M 936, S 30.7 M 929, S 29.1	M 919, S 14.4 M 913, S 31.7
Coefficient of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C)* ³	Surface 6 Center 6	— — —	M 4.45, S 0.10 M 4.39, S 0.20	M 4.59, S 0.13 M 4.46, S 0.11
Thermal Conductivity (kcal/m·h·°C)	Surface 6 Center 6	— — —	M 106, S 9.91 M 104, S 5.82	M 91, S 1.86 M 88, S 2.10
Electric Resistivity (μΩ cm)	Surface 6 Center 6	— — —	M 1068, S 20.3 M 1066, S 37.6	M 1100, S 16.8 M 1113, S 41.1
Crystallite Size (nm)	2	— — —	La 95.3, Lc 5.09	La 106, Lc 42.5

*1 M : Mean Value, S : Standard Deviation.

*2 1kg f /cm²=9.8×10⁴ Pa.

*3 1kcal/m·h·°C=1.16W/m·K.

Table A1.8 Continued.

Inspection Item	No. of Samples	Specifi-cation	Results	
			12th	13th
Name of Graphite		IG-110	IG-110	IG-110
Impurities (ppm)	1	Ash \leq 100 B \leq 1	< 10 < 0.2	\leq 10 < 0.2
Impurities (ppm)	1	Ash \leq 100 B \leq 1 EBC \leq 3 ^{*1}	< 10 < 0.2 < 1.27	\leq 10 < 0.2 < 1.27
	1	-----	Al < 0.2, Ca < 0.2, Cu < 0.2, Dy < 0.2, Eu < 0.2, Fe < 0.2, Cd < 0.2, K < 0.2, Mg < 0.2, Na < 0.2, Ni < 0.2, Si < 0.2, Sm < 0.2, Ti < 0.2, V < 0.2, Ag < 0.2, Cs < 0.2, Pd < 0.2, Ru < 0.2, Cl < 2	Al < 0.2, Ca < 0.2, Cu < 0.2, Dy < 0.2, Eu < 0.2, Fe 0.4, Cd < 0.2, K < 0.2, Mg < 0.2, Na < 0.2, Ni < 0.2, Si < 0.2, Sm < 0.2, Ti < 0.2, V < 0.2, Ag < 0.2, Cs < 0.2, Pd < 0.2, Ru < 0.2, Cl < 2

*1 EBC=Equivalent Boron Content.

Table A1.9 Characteristics of carbon fiber spacer for the 12th OGL-1 fuel rod.

Material Name		CF-20A (Lot No. 87GF-1)		
Inspection Item		Specification	No. of Samples	Results
Outer Diameter (mm)	(26)		4	25.8, 25.9, 25.9, 26.0
Inner Diameter (mm)	(10)		4	10.0, 10.0, 10.0, 10.0
Thickness (mm)	(10)		4	11.1 10.5, 11.5, 11.0
Weight (g)	-----		4	0.661, 0.691, 0.646, 0.682
Shrinkage (mm) ^{*1}	-----		4	0.5, 0.5, 1.1, 0.9
Impurities (ppm)	Ash	\leq 100	1	40
	B	\leq 1	1	< 0.1
	Ag	\leq 0.5	1	< 0.2
Other Elements	-----		1	Al < 0.2, Ca < 0.2, Cs < 0.2, Cu 0.2, Dy < 0.2, Eu < 0.2, Fe < 0.2, Gd < 0.2, K < 0.2, Mg < 0.2, Na < 0.2, Ni 0.2, Pd < 0.2, Ru < 0.2, Si 16, Sm < 0.2, Ti < 0.2, V < 0.2, Cl 17

*1 The weight of fuel compact stack is loaded.

Table A1.10 Characteristics of carbon fiber spacer for 13th OGL-1 fuel rod.

Material Name		GF-20A			
Inspection Item		Specification	No. of Samples	Results	
				Type-I (5mm thick)	Type-II (3mm thick)
Outer Diameter (mm)		(26)	4	25.7, 25.8	25.6, 25.7
Inner Diameter (mm)		(10)	4	10.0, 10.0	10.2, 10.0
Thickness (mm)		(5), (3)	2, 2	5.9, 5.8	3.5, 3.2
Weight (g)		-----	4	0.34, 0.39	0.17, 0.17
Shrinkage (mm)* ¹		-----	4	0.4, 0.5	1.0, 0.3
Impurities (ppm)	EBC* ²	≤5	1	1.18	
	Ash	≤100	1	80	
	B	≤1	1	< 0.1	
	Ag	≤0.5	1	< 0.2	
	Other Elements	-----	1	Al 0.2, Ca 1.3, Cs<0.2, Cu<0.2, Dy<0.2, Eu<0.2, Fe 0.9, Gd<0.2, K<0.2, Mg 15, Na<0.2, Ni 3.9, Pd<0.2, Ru<0.2, Si 27, Sm<0.2, Ti<0.2, V 0.4, Cl<2	

*1 The weight of fuel rod is loaded.

*2 Equivalent Boron Content.

Table A1.11 Characteristics of graphite parts and fuel rods of the 12th and 13th OGL-1 fuel assemblies.

Parts Name	Inspection Item		Specification	12th	13th
Graphite Sleeve	Outer Dia- meter (mm)	Mean Max. Min.	34.0 ± 0.2		34.0 34.1 34.0
	Inner Dia- meter (mm)	Mean Max. Min.	$26.2^{+0.10}_{-0.05}$		26.22 26.24 26.21
	Length (mm)		790 ± 4 (12th) 778 ± 4 (13th)		789.9 777.5
	Weight (g)		-----		548.7 531
End Plug	Length (mm)		-----		45.0 45
	Weight (g)		-----		34.55 34.9
Graphite Block	Outer Dia- meter (mm)	Mean Max. Min.	78.0 ± 0.2		78.0 78.0 78.0
	Inner Dia- meter (mm)	Mean Max. Min.	41.0 ± 0.1		41.03 41.08 40.98
	Length (mm)		785.0 ± 0.3 (12th) 778.0 ± 0.3 (13th)		784.7 778.2
	Weight (g)		-----		4465.5 4464
	Outer Dia- meter (mm)	Mean Max. Min.	$75.0^{+0}_{-0.2}$		74.9 74.9 74.9
Upper Graphite Block	Inner Dia- meter (mm)	Mean Max. Min.	41.0 ± 0.1		41.03 41.03 41.03
	Length (mm)		45.0 ± 0.1		45.0
	Weight (g)		-----		228.9 232.0
	Stack Length (mm)		720 ± 4		720.2 719.0
Fuel Rod	U Con- tent (g)	^{235}U 48.56 ± 2.43 (12th) U 249.0 ± 7.47 (13th)		49.11	249.50
	Compact- Sleeve Gap(mm)	Mean Max. Min.	-----		0.23 0.25 0.20
			-----		0.20 0.23 0.17

**付録2 燃料体および燃料棒の
照射後の外観**

OGL-1第7次から第12次までの燃料体および燃料棒の照射後の外観写真を、
Photo. A2.1 から Photo. A2.6 に、それぞれ示す。

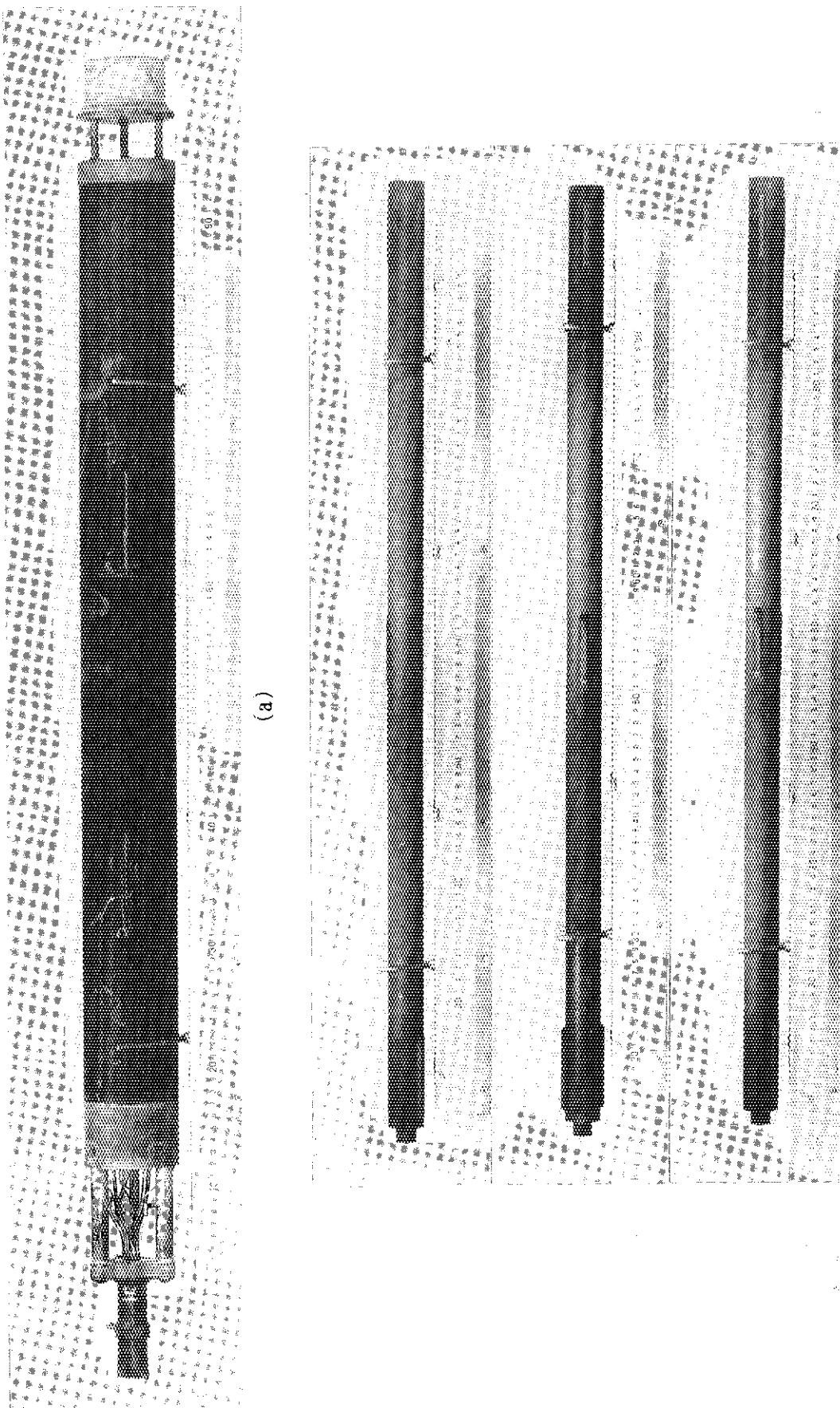


Photo.A2.1 Appearance of the 7th OGL-1 fuel assembly and fuel rods after irradiation.
(a) Fuel assembly, (b) Fuel rods

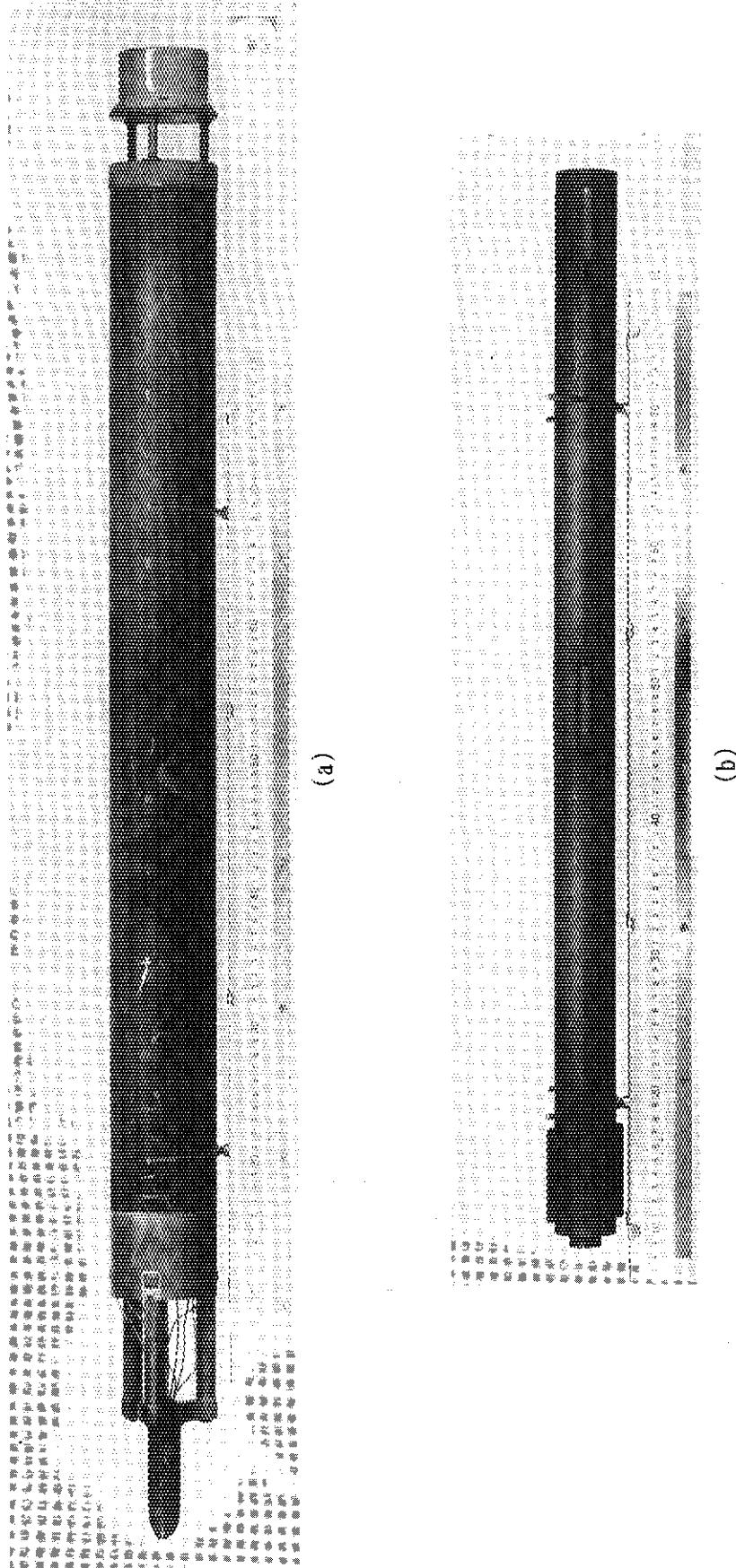
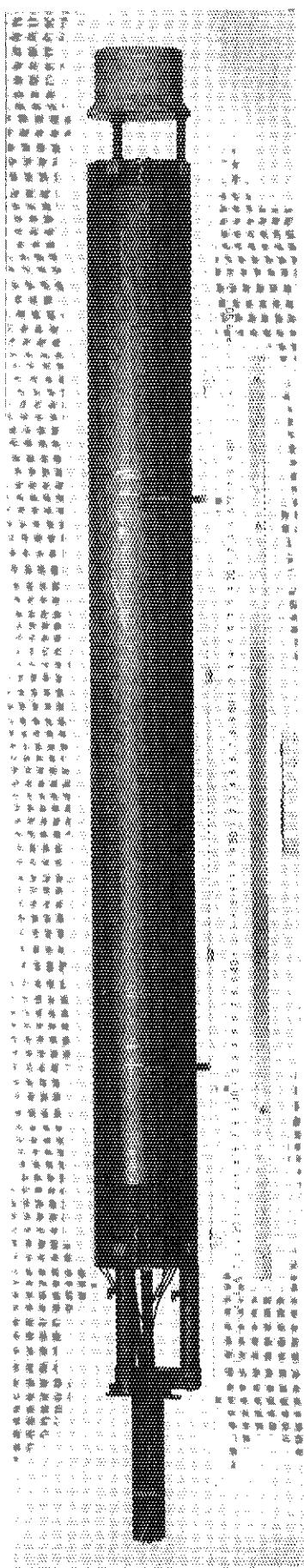
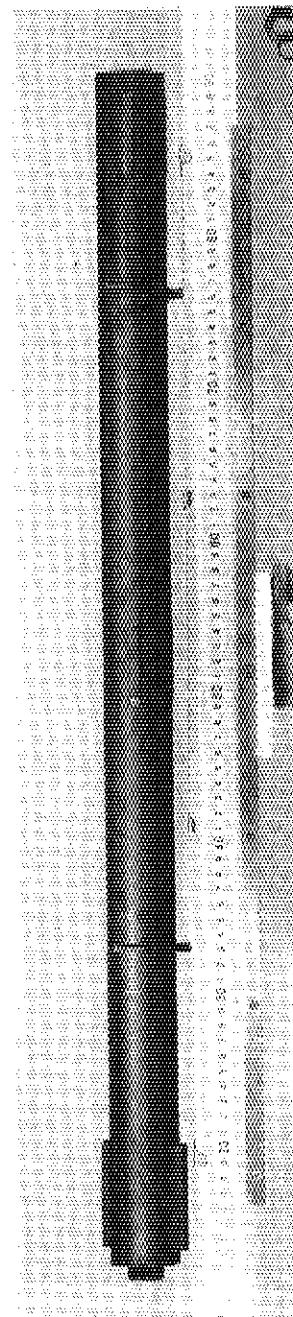


Photo. A2.2 Appearance of the 8th OGL-1 fuel assembly and fuel rod after irradiation.
(a) Fuel assembly, (b) Fuel rod

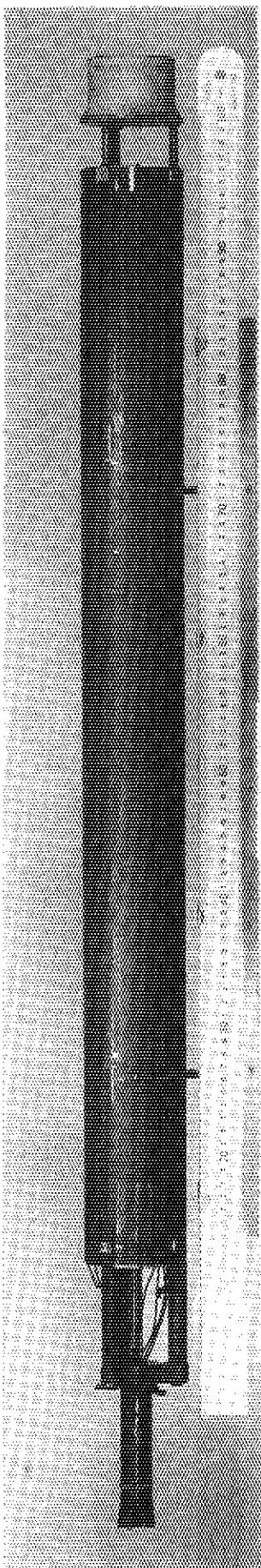


(a)

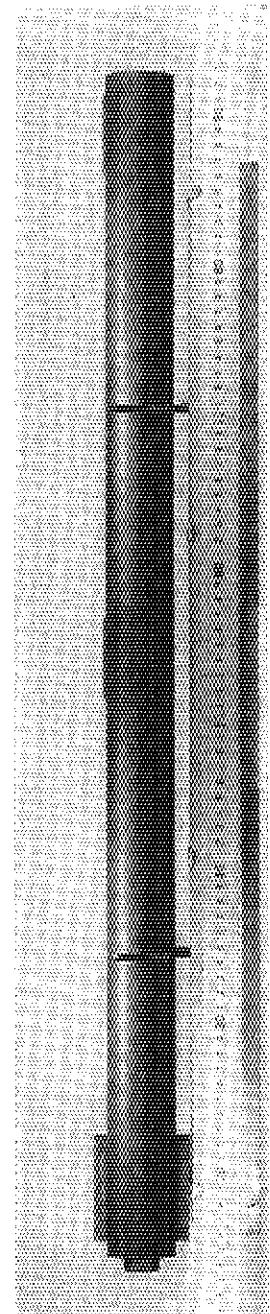


(b)

Photo. A2.3 Appearance of the 9th OGL-1 fuel assembly and fuel rod after irradiation.
(a) Fuel assembly, (b) Fuel rod

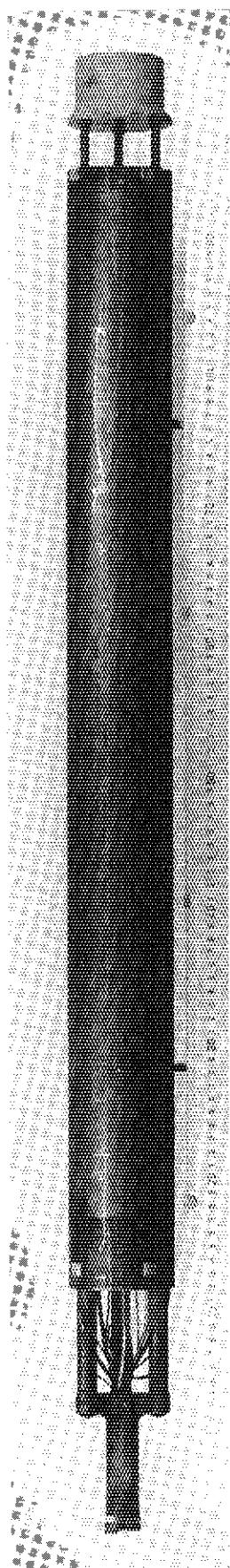


(a)

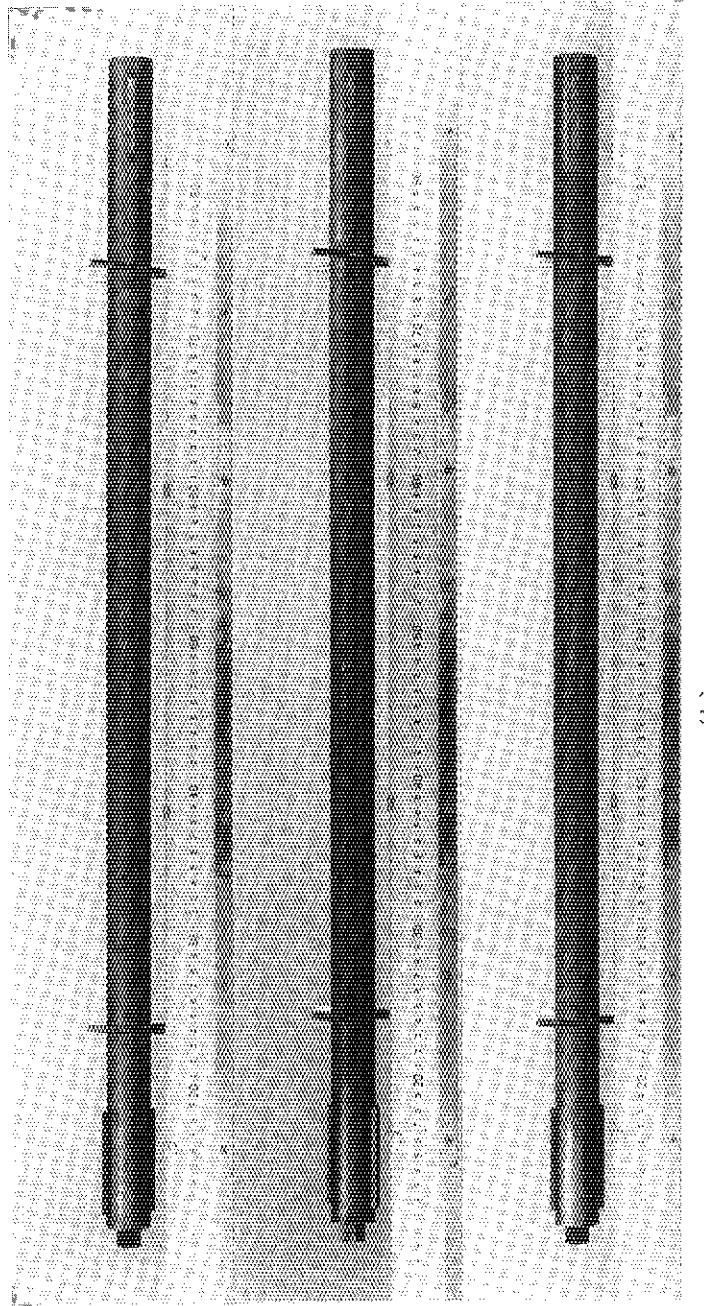


(b)

Photo A2.4 Appearance of the 10th OGL-1 fuel assembly and fuel rod after irradiation.
(a) Fuel assembly, (b) Fuel rod

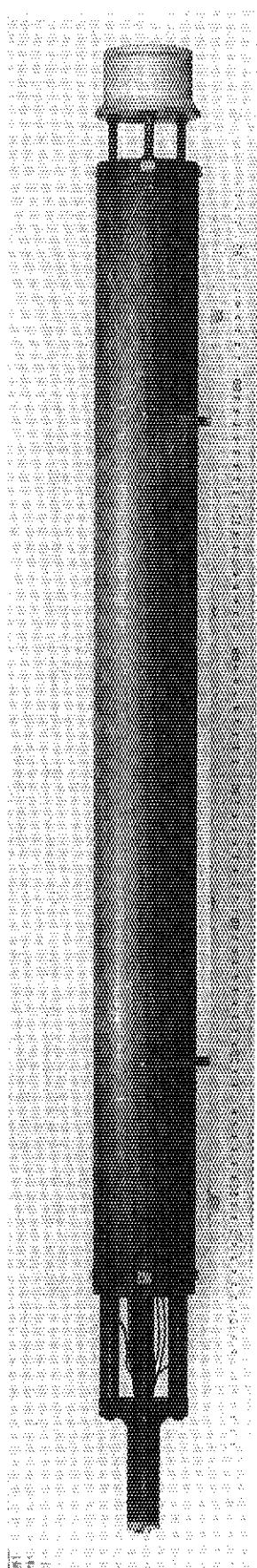


(a)

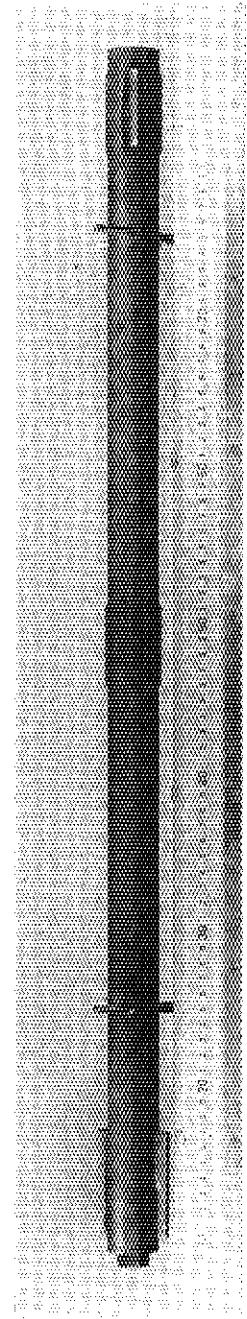


(b)

Photo A2.5 Appearance of the 11th OGH-1 fuel assembly and fuel rods after irradiation.
(a) Fuel assembly, (b) fuel rods



(a)



(b)

Photo A2.6 Appearance of the 12th OGL-1 fuel assembly and fuel rod after irradiation.
(a) Fuel assembly, (b) Fuel rods

付録3 各燃料体の燃料コンパクトの照射温度、燃焼度および高速中性子照射量

第6次～第12次燃料体の各燃料コンパクトの照射条件(照射温度、燃焼度、高速中性子照射量)をTable A3.1～A3.7に示す。算出方法は、本文5.2節の(2)に示した。

Table A3.1 Irradiation conditions of fuel compacts of the 6th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel Compact Name	Temp.* ¹ (°C)	Burnup* ² (% FIMA)	Fast Neutron Fluence (E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	FP inventory	Relative* ³
(bottom)						
1	800P1-20	980	0.26	0.18	0.60	
2	800P1-19	1107	0.31	0.24	0.71	
3	800P1-18	1202	0.35	0.28	0.81	
4	800P1-17	1281	0.38	0.32	0.87	
5	800P1-16	1345	0.40	0.36	0.93	
6	800P1-15	1389	0.42	0.38	0.96	
7	800P1-14	1442	0.43	0.40	1.00	
8	800P1-13	1470	0.43	0.41	1.00	
9	800P1-12	1488	0.43	0.41	1.00	
10	800P1-11	1494	0.43	0.40	0.98	
11	800P1-10	1489	0.41	0.39	0.95	
12	800P1-09	1473	0.39	0.37	0.91	
13	800P1-08	1457	0.36	0.35	0.84	
14	800P1-07	1428	0.34	0.32	0.78	
15	800P1-06	1383	0.31	0.28	0.71	
16	800P1-05	1335	0.28	0.25	0.64	
17	800P1-04	1278	0.23	0.21	0.54	
18	800P1-03	1234	0.20	0.18	0.46	
19	800P1-02	1164	0.17	0.15	0.39	
20	800P1-01	1093	0.13	0.11	0.31	
(top)						

*1 Time-averaged temperature of each fuel compact calculated by the STEPDSP2 code.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code; 19.755% enriched.

*3 Estimated from relative activity of ¹⁴⁴Ce and ¹³⁷Cs measured for rotating fuel compacts of the eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A3.2a Irradiation conditions of fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Fuel Compact Name	Temp.* ¹ (°C)	Burnup* ² (% FIMA)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24} m^{-2})	Relative* ³ FP inventory
(bottom)					
1	810P1-01 FPD20	984	0.47	0.50	0.60
2	810P1-02 FPD19	1001	0.55	0.66	0.71
3	810P1-03 FPD18	1019	0.63	0.79	0.81
4	810P1-04 FPD17	1063	0.68	0.91	0.87
5	810P1-05 FPD16	1106	0.73	1.01	0.93
6	810P1-06 FPD15	1142	0.75	1.08	0.96
7	810P1-07 FPD14	1173	0.78	1.13	1.00
8	810P1-08 FPD13	1198	0.78	1.16	1.00
9	810P1-09 FPD12	1215	0.78	1.16	1.00
10	810P1-10 FPD11	1227	0.76	1.14	0.98
11	810P1-11 FPD10	1231	0.74	1.09	0.95
12	810P1-12 FPD09	1229	0.71	1.04	0.91
13	810P1-13 FPD08	1219	0.65	0.97	0.84
14	810P1-14 FPD07	1204	0.61	0.89	0.78
15	810P1-15 FPD06	1181	0.55	0.79	0.71
16	810P1-16 FPD05	1153	0.50	0.70	0.64
17	810P1-17 FPD04	1118	0.42	0.60	0.54
18	810P1-18 FPD03	1079	0.36	0.51	0.46
19	810P1-19 FPD02	1034	0.30	0.42	0.39
20	810P1-20 FPD01 (top)	985	0.24	0.31	0.31

*1 Time-averaged temperature of fuel compact calculated by the STEPDSP2 code;
the data have been corrected from those in JAERI-M 88-107, p.65.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code (rods 1:2:3 = 0.74:1.21:1.05); 19.694% enriched.

*3 Estimated from relative activity of ^{144}Ce and ^{137}Cs measured for rotating fuel compacts of the eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A3.2b Irradiation conditions of fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position (bottom)	Fuel Name	Compact	Temp. * ¹ (°C)	Burnup * ² (% FIMA)	Fast Neutron Fluence (E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	Relative * ³ FP inventory
1	810P2-01	FPD40	1063	0.76	0.68	0.60
2	810P2-02	FPD39	1084	0.90	0.90	0.71
3	810P2-03	FPD38	1108	1.03	1.07	0.81
4	810P2-04	FPD37	1167	1.10	1.23	0.87
5	810P2-05	FPD36	1224	1.18	1.37	0.93
6	810P2-06	FPD35	1274	1.21	1.46	0.96
7	810P2-07	FPD34	1317	1.27	1.52	1.00
8	810P2-08	FPD33	1351	1.27	1.57	1.00
9	810P2-09	FPD32	1376	1.27	1.57	1.00
10	810P2-10	FPD31	1392	1.24	1.54	0.98
11	810P2-11	FPD30	1399	1.21	1.48	0.95
12	810P2-12	FPD29	1396	1.16	1.41	0.91
13	810P2-13	FPD28	1384	1.07	1.32	0.84
14	810P2-14	FPD27	1362	0.99	1.21	0.78
15	810P2-15	FPD26	1332	0.90	1.07	0.71
16	810P2-16	FPD25	1293	0.81	0.94	0.64
17	810P2-17	FPD24	1247	0.69	0.82	0.54
18	810P2-18	FPD23	1193	0.58	0.69	0.46
19	810P2-19	FPD22	1133	0.50	0.57	0.39
20	810P2-20	FPD21	1068	0.39	0.42	0.31
(top)						

*1 Time-averaged temperature of fuel compact calculated by the STEPDSP2 code;
the data have been corrected from those in JAERI-M 88-107, p.66.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code (rods 1:2:3 = 0.74:1.21:1.05); 19.694% enriched.

*3 Estimated from relative activity of ¹⁴⁴Ce and ¹³⁷Cs measured for rotating fuel compacts of the eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A3.2c Irradiation conditions of fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Position	Fuel Compact Name	Temp.* ¹ (°C)	Burnup* ² (% FIIMA)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Relative* ³ FP inventory
(bottom)					
1	810P3-01 FP120	1060	0.66	0.69	0.60
2	810P3-02 FP119	1081	0.78	0.91	0.71
3	810P3-03 FP118	1104	0.89	1.09	0.81
4	810P3-04 FP117	1161	0.96	1.25	0.87
5	810P3-05 FP116	1215	1.02	1.39	0.93
6	810P3-06 FP115	1263	1.06	1.49	0.96
7	810P3-07 FP114	1302	1.10	1.55	1.00
8	810P3-08 FP113	1333	1.10	1.60	1.00
9	810P3-09 FP112	1358	1.10	1.60	1.00
10	810P3-10 FP111	1371	1.08	1.57	0.98
11	810P3-11 FP110	1377	1.05	1.50	0.95
12	810P3-12 FP109	1374	1.00	1.44	0.91
13	810P3-13 FP108	1364	0.93	1.34	0.84
14	810P3-14 FP107	1343	0.86	1.23	0.78
15	810P3-15 FP106	1315	0.78	1.09	0.71
16	810P3-16 FP105	1279	0.71	0.96	0.64
17	810P3-17 FP104	1235	0.60	0.83	0.54
18	810P3-18 FP103	1184	0.51	0.70	0.46
19	810P3-19 FP102	1127	0.43	0.58	0.39
20	810P3-20 FP101	1064	0.34	0.43	0.31
(top)					

*1 Time-averaged temperature of fuel compact calculated by the STEPDSP2 code;
the data have been corrected from those in JAERI-M 88-107, p.67.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code (rods 1:2:3 = 0.74:1.21:1.05); 19.694% enriched.

*3 Estimated from relative activity of ^{144}Ce and ^{137}Cs measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A3.3 Irradiation conditions of fuel compacts loaded in the 8th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel Compact Name	Temp. * ₁ (°C)	Burnup * ₂ (% FIMA)	Fast Neutron Fluence (E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	Relative * ₃ FP inventory
(bottom)					
1	820P1-01 FP20	940	0.60	0.52	0.60
2	820P1-02 FP19	963	0.71	0.68	0.71
3	820P1-03 FP18	990	0.81	0.82	0.81
4	820P1-04 FP17	1052	0.87	0.94	0.87
5	820P1-05 FP16	1124	0.93	1.04	0.93
6	820P1-06 FP15	1188	0.96	1.12	0.96
7	820P1-07 FP14	1245	1.00	1.16	1.00
8	820P1-08 FP13	1292	1.00	1.20	1.00
9	820P1-09 FPM12	1330	1.00	1.20	1.00
10	820P1-10 FPM11	1358	0.98	1.18	0.98
11	820P1-11 FP10	1376	0.95	1.13	0.95
12	820P1-12 FP09	1384	0.91	1.08	0.91
13	820P1-13 FP08	1382	0.84	1.01	0.84
14	820P1-14 FP07	1370	0.78	0.92	0.78
15	820P1-15 FP06	1348	0.71	0.82	0.71
16	820P1-16 FP05	1316	0.64	0.72	0.64
17	820P1-17 FP04	1274	0.54	0.62	0.54
18	820P1-18 FP03	1223	0.46	0.53	0.46
19	820P1-19 FP02	1164	0.39	0.43	0.39
20	820P1-20 FP01	1097	0.31	0.32	0.31
(top)					

*1 Time-averaged temperature of fuel compact calculated by the STEPDSP2 code;
the data have been corrected from those in JAERI-M 88-107, p.68.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code; 19.709% enriched.

*3 Estimated from relative activity of ¹⁴⁴Ce and ¹³⁷Cs measured for rotating fuel compacts.

Table A3.4 Irradiation conditions of fuel compacts of the 9th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel Compact Name	Temp. *1 (°C)	Burnup *2 (% FIMA)	Fast Neutron Fluence (E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	Relative *3 FP inventory
(bottom)					
1	830P1-01 FP01	1104	1.56	1.22	0.584
2	830P1-02 FP02	1168	1.83	1.62	0.684
3	830P1-03 FP03	1225	2.09	1.93	0.783
4	830P1-04 FP04	1273	2.28	2.22	0.854
5	830P1-05 FP05	1313	2.45	2.47	0.917
6	830P1-06 FP06	1344	2.54	2.64	0.952
7	830P1-07 FP07	1366	2.60	2.75	0.975
8	830P1-08 FP08	1378	2.67	2.84	1.000
9	830P1-09 FP09	1381	2.68	2.84	0.997
10	830P1-10 FP10	1374	2.61	2.78	0.977
11	830P1-11 FP11	1358	2.55	2.67	0.954
12	830P1-12 FP12	1333	2.41	2.56	0.904
13	830P1-13 FP13	1298	2.27	2.39	0.852
14	830P1-14 FP14	1255	2.11	2.19	0.791
15	830P1-15 FP15	1202	1.92	1.93	0.719
16	830P1-16 FP16	1148	1.71	1.70	0.639
17	830P1-17 FP17	1072	1.49	1.48	0.557
18	830P1-18 FP18	1008	1.28	1.25	0.478
19	830P1-19 FP19	981	1.06	1.02	0.397
20	830P1-20 FP20	958	0.87	0.77	0.326
(top)					

*1 Time-averaged temperature of fuel compact calculated by the STEPDSP2 code.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code; 19.126% enriched.

*3 Relative activity of ¹⁴⁴Ce measured for rotating fuel compacts.

Table A3.5 Irradiation conditions of fuel compacts of the 10th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel Compact Name	Temp. *1 (°C)	Burnup *2 (% FIMA)	Fast Neutron Fluence (E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	Relative *3 FP inventory
(bottom)					
1	840P1-01 FP01	1057	1.74	1.02	0.621
2	840P1-02 FP02	1103	2.00	1.36	0.715
3	840P1-03 FP03	1181	2.24	1.62	0.801
4	840P1-04 FP04	1230	2.44	1.86	0.872
5	840P1-05 FP05	1270	2.59	2.07	0.926
6	840P1-06 FP06	1300	2.70	2.21	0.965
7	840P1-07 FP07	1321	2.76	2.31	0.984
8	840P1-08 FP08	1331	2.80	2.38	1.000
9	840P1-09 FP09	1331	2.75	2.38	0.983
10	840P1-10 FP10	1320	2.71	2.33	0.968
11	840P1-11 FP11	1300	2.60	2.24	0.928
12	840P1-12 FP12	1270	2.48	2.14	0.886
13	840P1-13 FP13	1230	2.32	2.00	0.829
14	840P1-14 FP14	1180	2.13	1.83	0.762
15	840P1-15 FP15	1121	1.92	1.62	0.686
16	840P1-16 FP16	1054	1.70	1.43	0.605
17	840P1-17 FP17	978	1.49	1.24	0.531
18	840P1-18 FP18	929	1.25	1.05	0.445
19	840P1-19 FP19	909	1.02	0.86	0.364
20	840P1-20 FP20	879	0.84	0.64	0.299
(top)					

*1 Time-averaged temperature of fuel compact, calculated by the STEPDSP2 code.

*2 Calculated by the STEPDSP2 code; 19.502% enriched.

*3 Relative activity of ¹⁴⁴Ce measured for rotating fuel compacts.

Table A3.6a Irradiation conditions of fuel compacts of the 11th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Fuel Compact Name	Burnup* ¹ (% FIMA)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24} m^{-2})	Relative* ² FP inventory
(bottom)				
1- 1	850P-01	0.75	0.53	0.63
1- 2	850P-02	0.87	0.71	0.73
1- 3	850P-03	0.97	0.85	0.82
1- 4	850P-04	1.06	0.98	0.89
1- 5	850P-05	1.13	1.08	0.95
1- 6	850P-06	1.16	1.15	0.98
1- 7	850P-07	1.19	1.19	1.00
1- 8	850P-08	1.17	1.20	0.99
1- 9	850P-09	1.15	1.18	0.97
1-10	850P-10	1.10	1.13	0.93
1-11	850P-11	1.04	1.07	0.88
1-12	850P-12	0.96	1.00	0.81
1-13	850P-13	0.87	0.88	0.73
1-14	850P-14	0.77	0.77	0.65
1-15	850P-15	0.66	0.66	0.56
1-16	850P-16	0.56	0.55	0.47
1-17	850P-17	0.43	0.44	0.36
1-18	850P-18	0.35	0.34	0.30
(top)				

*1 Calculated by the STEPDSP2 code ; 19.307% enriched; linear heat rate:
rods 1:2:3 = 0.850:1.115:1.035.

*2 Estimated from relative activity of ^{144}Ce measured for rotating fuel compacts
of the 8th OGL-1 fuel assembly.

Table A3.6b Irradiation conditions of fuel compacts of the 11th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position	Fuel Compact Name	Burnup* ¹ (%FIMA)	Fast Neutron Fluence* ² (E>29fJ 10 ²⁴ m ⁻²)	Relative* ² FP inventory
(bottom)				
2- 1	850P-19	0.98	0.72	0.63
2- 2	850P-20	1.14	0.96	0.73
2- 3	850P-21	1.28	1.16	0.82
2- 4	850P-22	1.38	1.34	0.89
2- 5	850P-23	1.48	1.47	0.95
2- 6	850P-24	1.52	1.56	0.98
2- 7	850P-25	1.56	1.61	1.00
2- 8	850P-26	1.54	1.63	0.99
2- 9	850P-27	1.51	1.60	0.97
2-10	850P-28	1.45	1.53	0.93
2-11	850P-29	1.37	1.45	0.88
2-12	850P-30	1.26	1.34	0.81
2-13	850P-31	1.14	1.19	0.73
2-14	850P-32	1.01	1.04	0.65
2-15	850P-33	0.87	0.90	0.56
2-16	850P-34	0.73	0.75	0.47
2-17	850P-35	0.56	0.60	0.36
2-18	850P-36	0.47	0.46	0.30
(top)				

*1 Calculated by the STEPDSP2 code ; 19.307% enriched; Linear heat rate:
rods 1:2:3 = 0.850:1.115:1.035.

*2 Estimated from relative activity of ^{144}Ce measured for rotating fuel compacts
of the 8th OGL-1 fuel assembly.

Table A3.6c Irradiation conditions of fuel compacts of the 11th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Position	Fuel Compact Name	Burnup* ¹ (%FIMA)	Fast Neutron Fluence (E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	Relative* ² FP inventory
(bottom)				
3- 1	850P-37	0.91	0.73	0.63
3- 2	850P-38	1.05	0.97	0.73
3- 3	850P-39	1.18	1.17	0.82
3- 4	850P-40	1.29	1.35	0.89
3- 5	850P-41	1.37	1.49	0.95
3- 6	850P-42	1.42	1.58	0.98
3- 7	850P-43	1.44	1.63	1.00
3- 8	850P-44	1.43	1.65	0.99
3- 9	850P-45	1.40	1.62	0.97
3-10	850P-46	1.34	1.55	0.93
3-11	850P-47	1.27	1.47	0.88
3-12	850P-48	1.17	1.35	0.81
3-13	850P-49	1.05	1.20	0.73
3-14	850P-50	0.94	1.06	0.65
3-15	850P-51	0.81	0.91	0.56
3-16	850P-52	0.68	0.76	0.47
3-17	850P-53	0.52	0.61	0.36
3-18	850P-54	0.43	0.46	0.30
(top)				

*1 Calculated by the STEPDSP2 code ; 19.307% enriched; linear heat rate:
rods 1:2:3 = 0.850:1.115:1.035.

*2 Estimated from relative activity of ¹⁴⁴Ce measured for rotating fuel compacts
of the 8th OGL-1 fuel assembly.

Table A3.7 Irradiation conditions of fuel compacts of the 12th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel Compact Name	Burnup* ¹ (%FIMA)	Fast Neutron Fluence(E>29fJ) (10 ²⁴ m ⁻²)	Relative* ² FP inventory
(bottom)				
1	870P1-01	(1)	2.45	1.32
2	870P1-02	(2)	2.84	1.78
3	870P1-03	(4)	3.19	2.15
4	870P1-04	(6)	3.46	2.46
5	870P1-05	(8)	3.66	2.80
6	870P1-06	(9)	3.81	2.91
7	870P1-07	(15)	3.89	3.04
8	870P1-08	(17)	3.89	3.08
9	870P1-09	(19)	3.81	3.03
10	870P1-10	(21)	3.66	2.93
11	870P1-11	(23)	3.50	2.77
12	870P1-12	(24)	3.23	2.58
13	870P1-13	(25)	2.96	2.37
14	870P1-14	(27)	2.65	2.06
15	870P1-15	(30)	2.34	1.81
16	870P1-16	(34)	1.98	1.54
17	870P1-17	(36)	1.60	1.26
18	870P1-18	(38)	1.32	0.98
19	870P2-01	(3)	1.09	0.80
(top)				

*1 Calculated by the STEPDSP2 code; 19.133% enriched.

*2 Estimated from relative activity of ¹⁴⁴Ce measured for rotating fuel compacts of the 8th OGL-1 fuel assembly.

付録4 未照射燃料コンパクトの外観

1. はじめに

第6次～第10次OGL-1燃料体について、照射後試験における燃料コンパクトの外観観察結果(本文5.3.1項参照)と比較するため、未照射燃料コンパクトの外観を光学顕微鏡によって観察した。観察は、照射用燃料コンパクトと同一製造バッチ品である炉外試験用コンパクトの上端面、下端面および側面について行った。

2. 各燃料体の燃料コンパクトの外観

(1) 第6次燃料体(Photo.A4.1)

黒鉛マトリックスのオーバーコート境界の隙間が見られる。詳しく見ると、隙間は下端面に比べて上端面のほうが大きいことが分かる。

(2) 第7次燃料体(Photo.A4.2)

上下端面については第6次燃料体と同様であるが、側面ではオーバーコート境界の隙間は殆ど見られない。

(3) 第8次燃料体(Photo.A4.3)

上下端面では、第6次および第7次燃料体に比べてオーバーコート境界の隙間は小さい。しかし、側面ではオーバーコートの境界において欠けが見られるが、被覆燃料粒子ではないように見える[写真(a)(b)]。

(4) 第9次燃料体(Photo.A4.4)

上下端面、側面ともに、オーバーコート境界の隙間は第6次～第8次燃料体に比べて小さい。しかし、側面では黒鉛マトリックスの欠けが見られ、被覆燃料粒子が露出している[写真(e)(f)]。

(5) 第10次燃料体(Photo.A4.5)

上下端面、側面ともに、オーバーコート境界の隙間は比較的小さく、第8次燃料体程度である。なお、側面の上端側には、やや大きな隙間が見られる。

(6) 第11次燃料体(Photo.A4.6)

上下端面、側面ともに、オーバーコート境界の隙間は比較的大きく、第6次燃料体程度である。この試料とは別の試料において、被覆燃料粒子の露出が観察された(本文5.3.1項参照)。

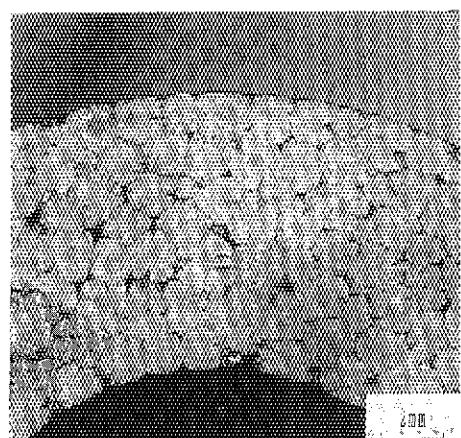
(7) 第12次燃料体(Photo.A4.7)

上下端面、側面ともに、オーバーコート境界の隙間は比較的小さかった。下端面で被覆燃料粒子がわずかに露出しているのが観察される[写真(d)]。

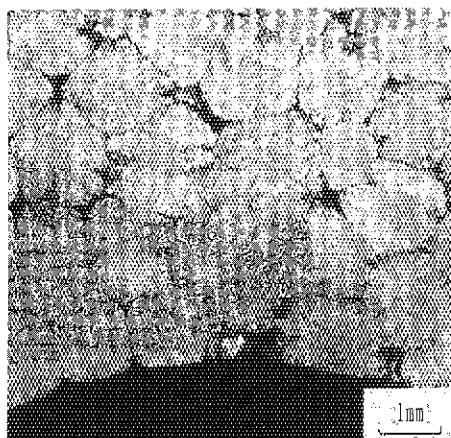
3. まとめ

オーバーコート境界の隙間は、燃料体ごとにかなりの違いが認められた。すなわち、第6次、第7次および第11次燃料体の比較的大きいグループと、第8次、第9次、第10次および第12次燃料体の比較的小さいグループに分かれた。それらのグループ内でも燃料体ごとに微妙な違いが見られた。第8次燃料体以降は安定したように見えたが、第11次燃料体ではオーバーコート境界の隙間は比較的大きく、被覆燃料粒子の露出が観察された。第12次燃料体でも、被覆燃料粒子の露出がわずかに観察された。

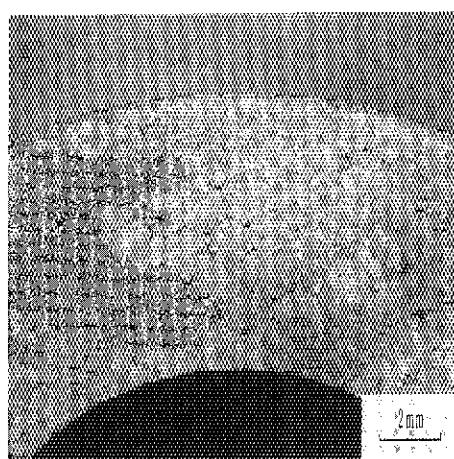
本文5章の5.3.1項に述べるように、これらの異状は、被覆燃料粒子の破損、燃料コンパクトの割れ等の照射健全性の低下に、必ずしも直接はつながらない。しかし、被覆燃料粒子の露出は照射健全性の確保の点からみて好ましいものではない。上記の測定結果は、燃料コンパクトの製造条件の改善のための検討が必要であることを示している。



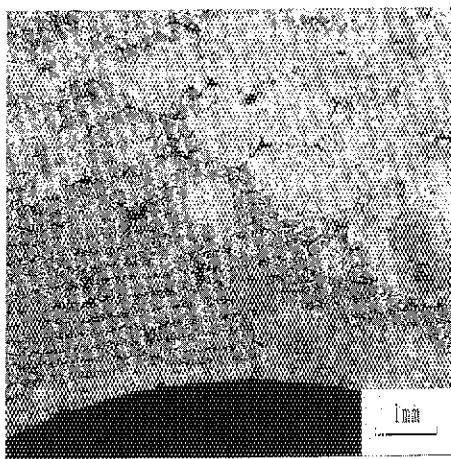
(a)



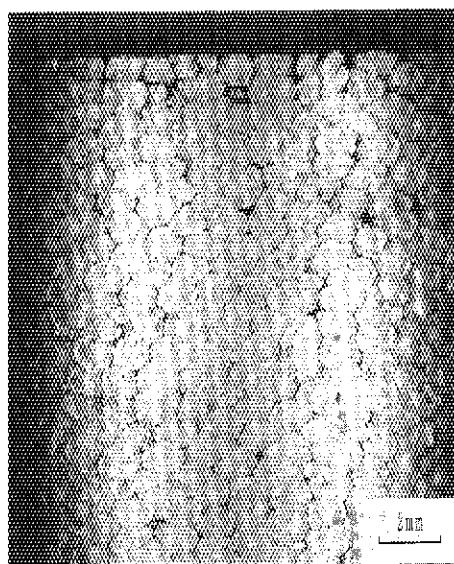
(b)



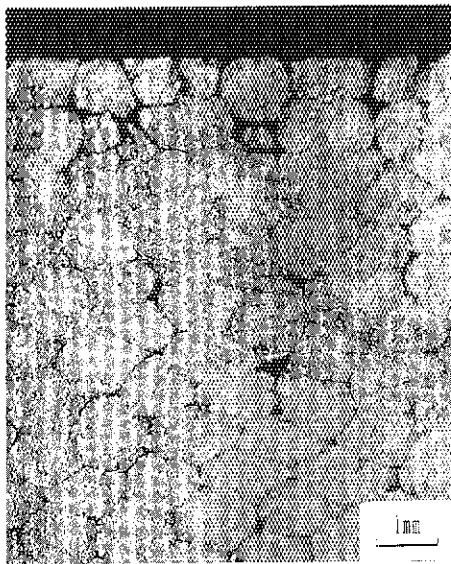
(c)



(d)



(e)



(f)

Photo.A4.1 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 6th OGL-1 fuel assembly;(a)(b)top, (c)(d)bottom and (e)(f) side views.

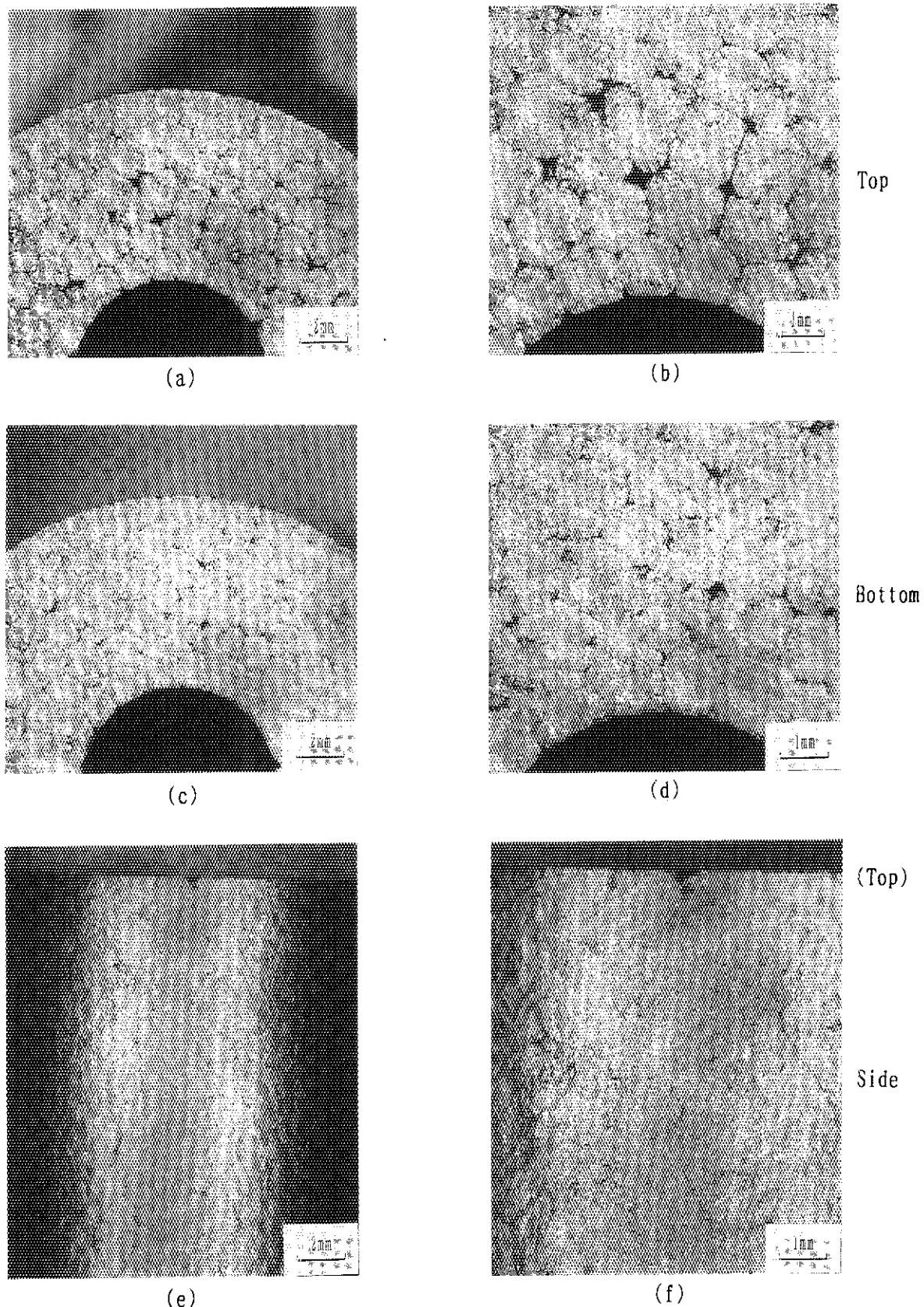


Photo. A4.2 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 7th OGL-1 fuel assembly;(a)(b)top, (c)(d)bottom and (e)(f) side views.

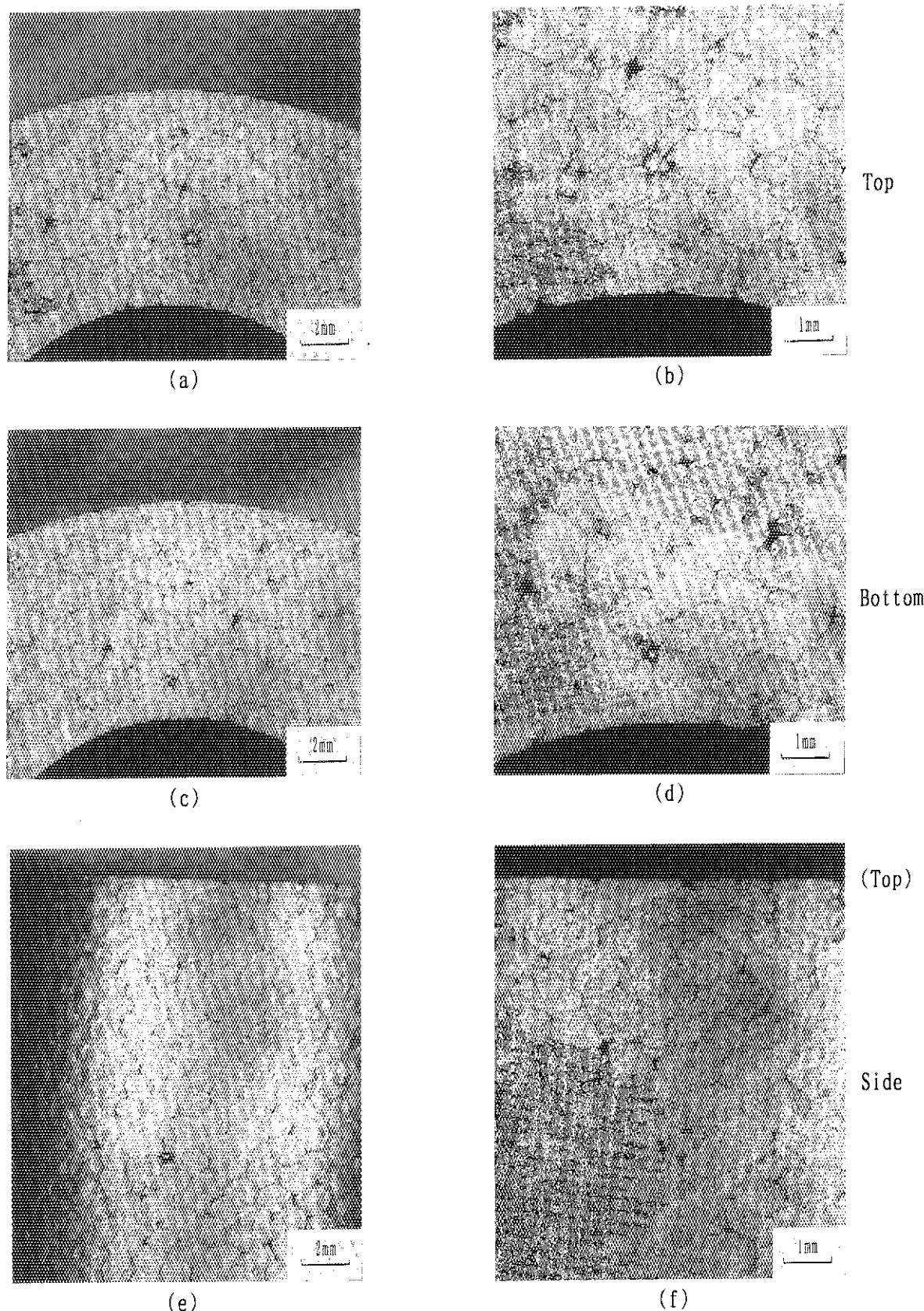


Photo. A4.3 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 8th OGL-1 fuel assembly; (a)(b) top, (c)(d) bottom and (e)(f) side views.

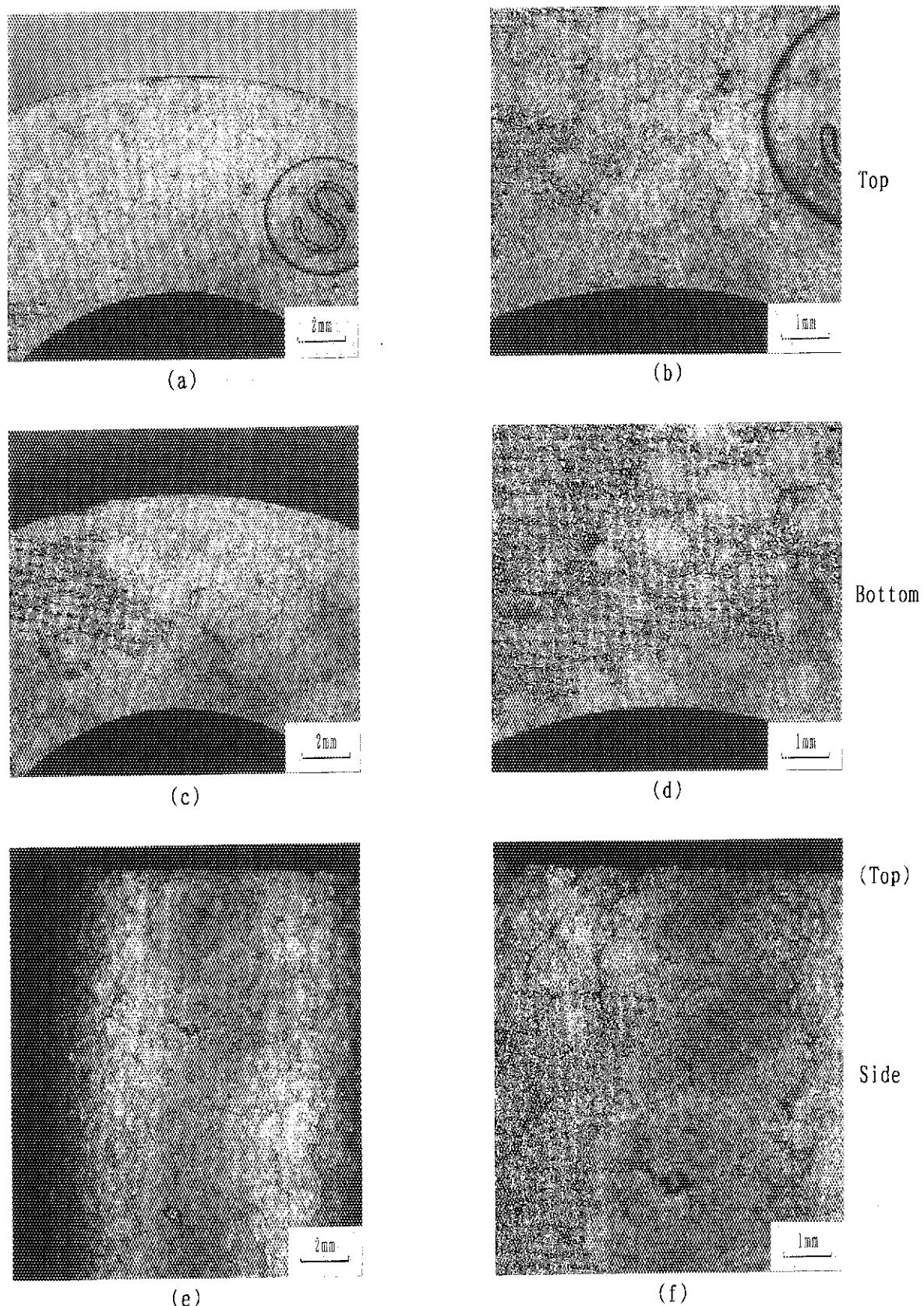


Photo. A4.4 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 9th OGL-1 fuel assembly;(a)(b)top, (c)(d)bottom and (e)(f) side views.

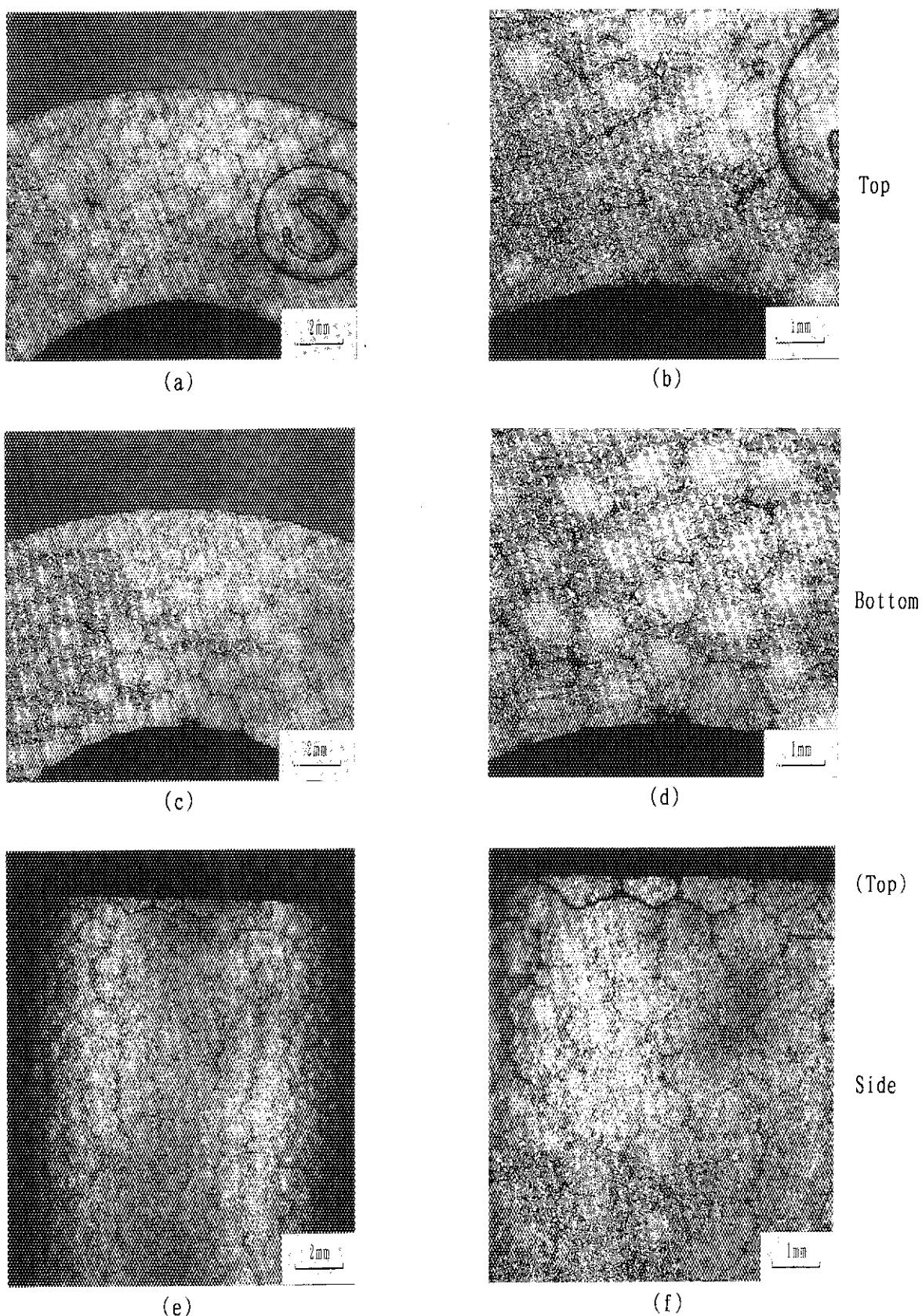


Photo. A4.5 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 10th OGL-1 fuel assembly;(a)(b)top,(c)(d)bottom and (e)(f) side views.

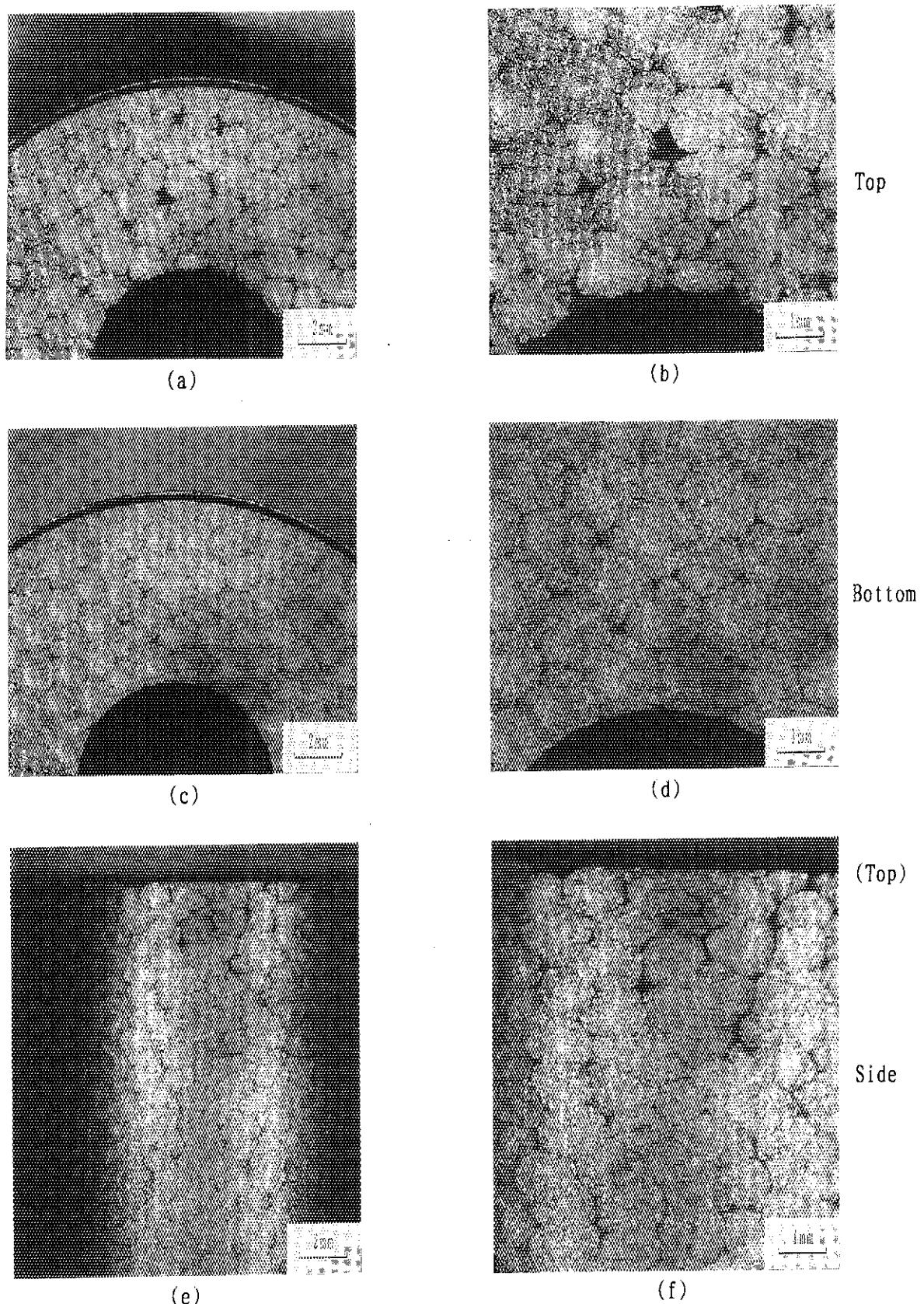
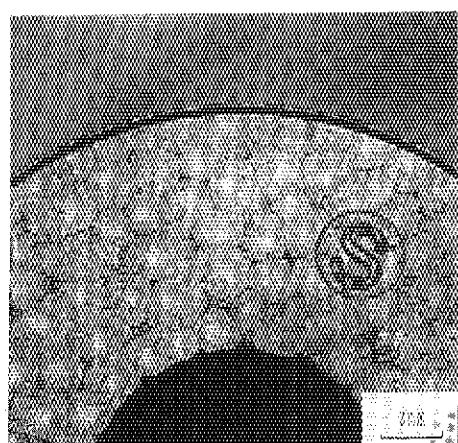
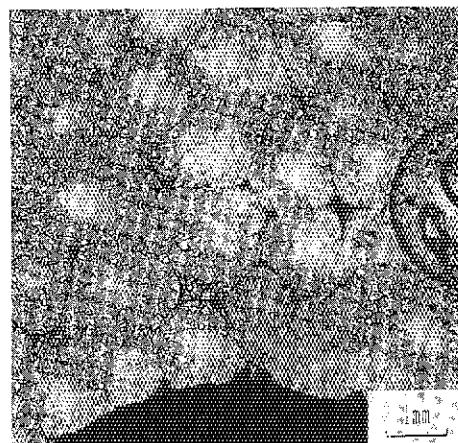


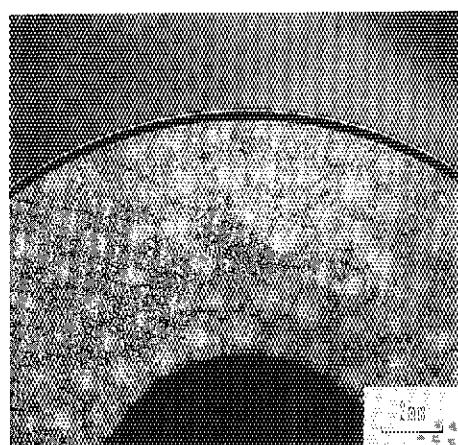
Photo. A4.6 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 11th OGL-1 fuel assembly;(a)(b)top, (c)(d)bottom and (e)(f) side views.



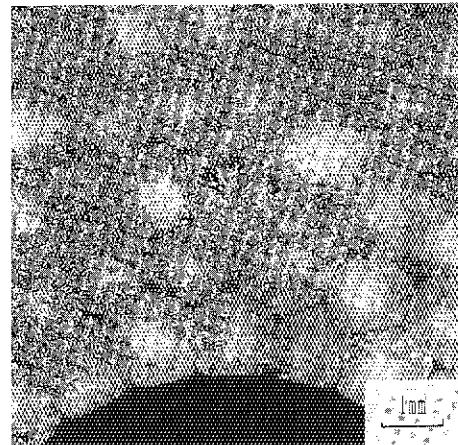
(a)



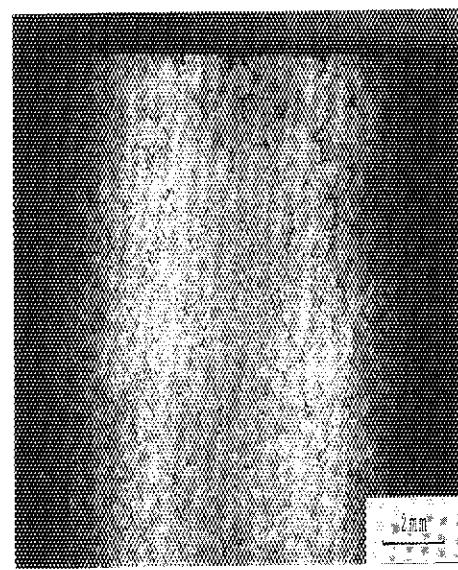
(b)



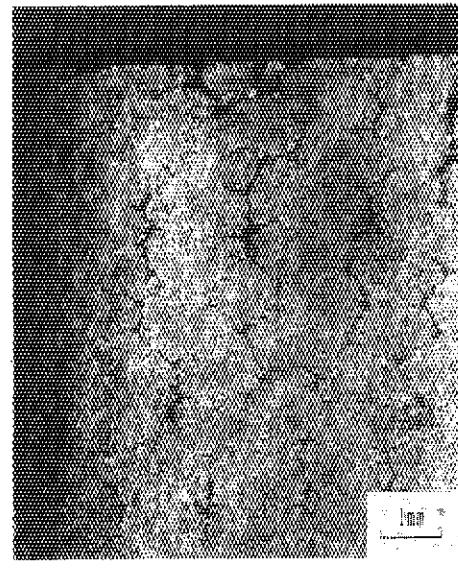
(c)



(d)



(e)



(f)

Top

Bottom

(Top)

Side

Photo. A4.7 Surface appearance of an unirradiated fuel compact produced in the same batch as for compacts loaded in the 11th OGL-1 fuel assembly;(a)(b)top, (c)(d)bottom and (e)(f) side views.

付録5 燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の 照射後試験の方法および試験データ

付録5 A 燃料コンパクトの外観

付録5 B 燃料コンパクトの寸法および重量検査

付録5 C 燃料コンパクト中のFPインベントリ測定

付録5 D 燃料コンパクト断面のEPMA観察

付録5 E 被覆燃料粒子の外観写真およびX線ラジオグラフ

付録5 F 貫通破損率およびSiC層破損率の測定方法、ならびに
測定結果の統計的処理方法

付録5A 燃料コンパクトの外観

第6次～第12次燃料体の燃料コンパクトの外観写真を以下のとおり示す。

- 第 6次燃料体： Photo.A5.A1
- 第 7次燃料体： Photo.A5.A2 ~ Photo.A5.A4
- 第 8次燃料体： Photo.A5.A5
- 第 9次燃料体： Photo.A5.A6
- 第10次燃料体： Photo.A5.A7 ~ Photo.A5.A8
- 第11次燃料体： Photo.A5.A9
- 第12次燃料体： Photo.A5.A10 ~ Photo.A5.A11

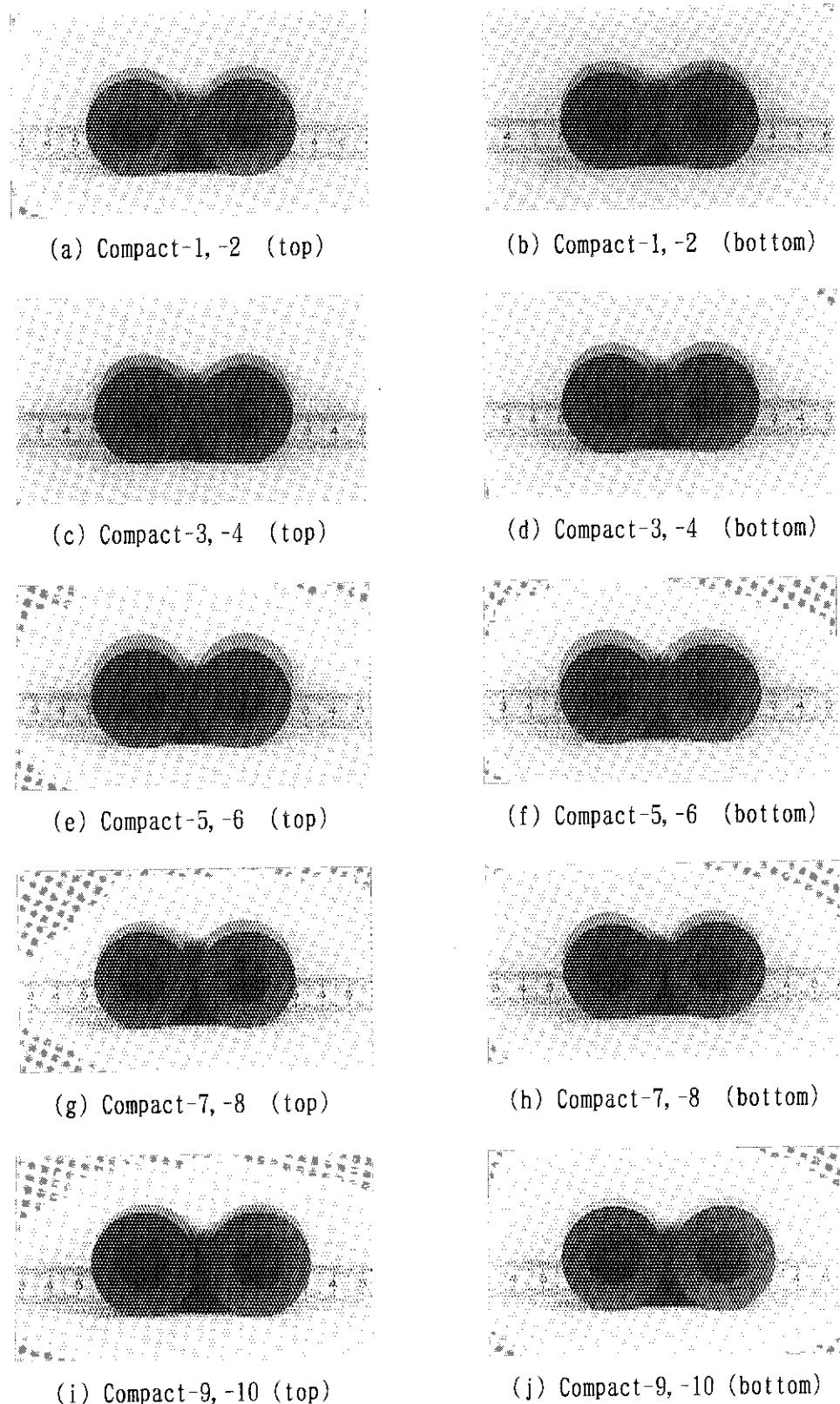
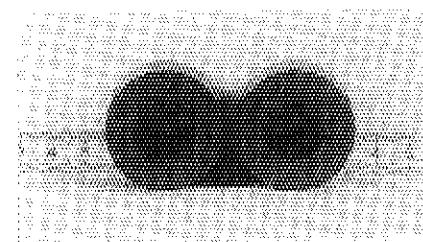
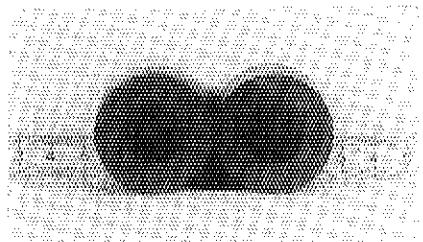


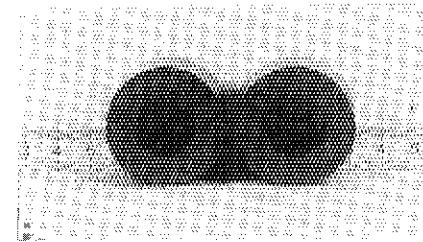
Photo. A5.A1 Surface appearance of fuel compacts of the 6th OGL-1 fuel assembly.



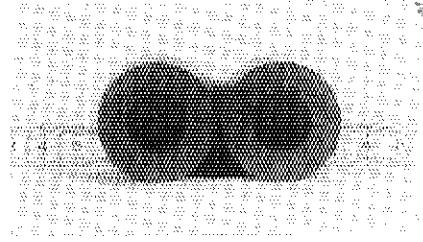
(k) Compact-11, -12 (top)



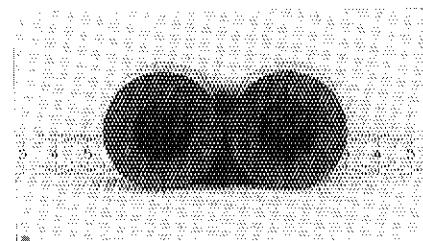
(l) Compact-11, -12 (bottom)



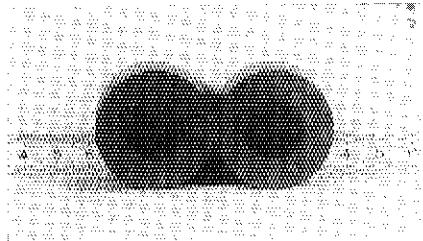
(m) Compact-13, -14 (top)



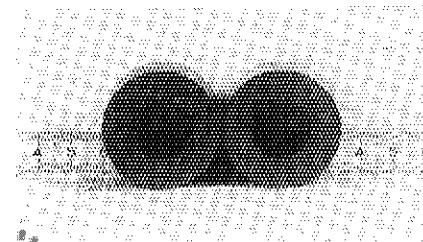
(n) Compact-13, -14 (bottom)



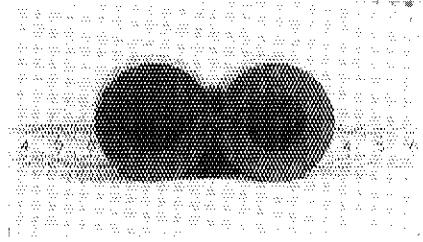
(o) Compact-15, -16 (top)



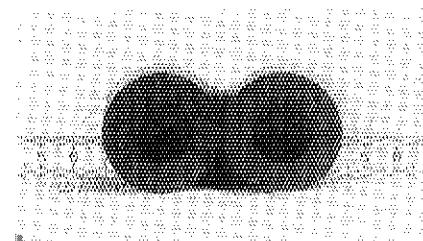
(p) Compact-15, -16 (bottom)



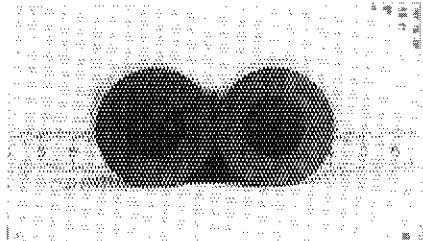
(q) Compact-17, -18 (top)



(r) Compact-17, -18 (bottom)

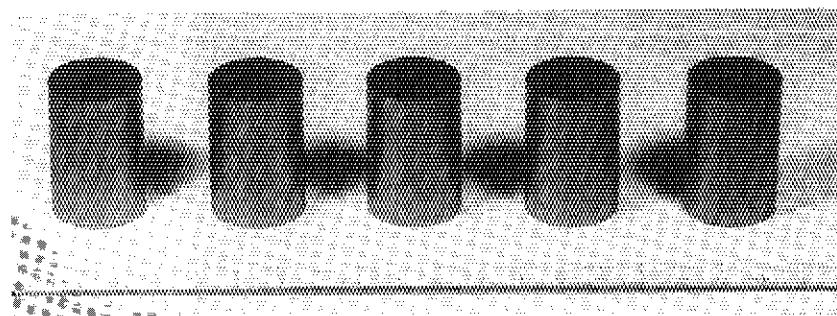


(s) Compact-19, -20 (top)

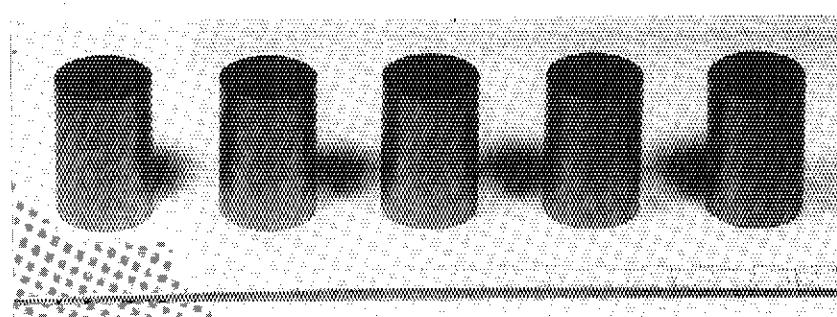


(t) Compact-19, -20 (bottom)

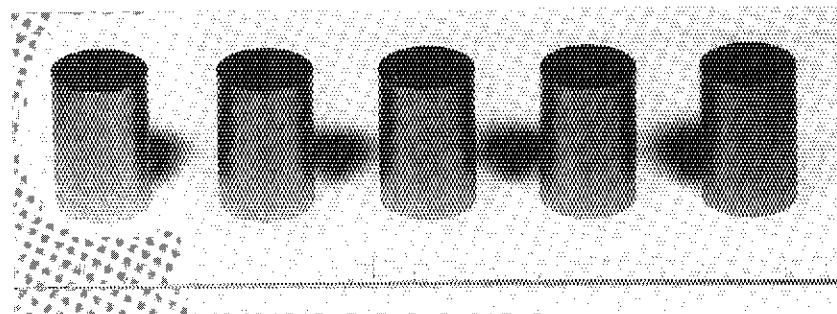
Photo. A5.A1 Continued.



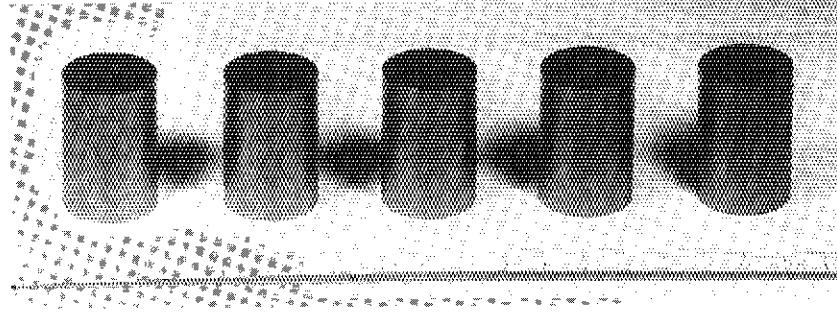
(a) Compacts 1 to 5
(59冶 B97)



(b) Compacts 6 to 10
(59冶 B98)

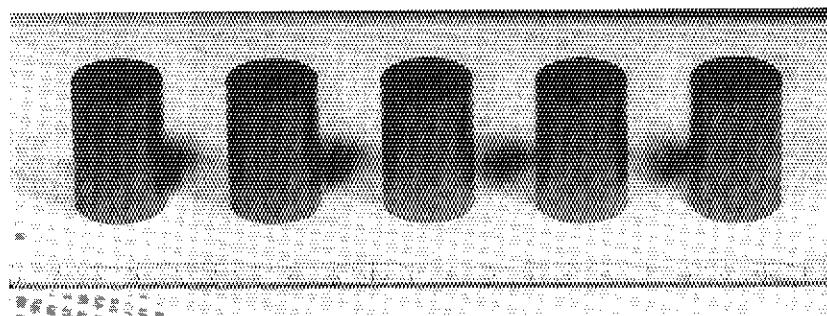


(c) Compacts 11 to 15
(59冶 B99)

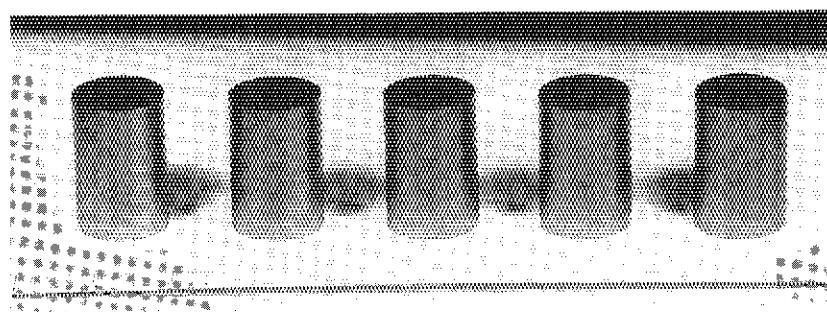


(d) Compacts 16 to 20
(59冶 B100)

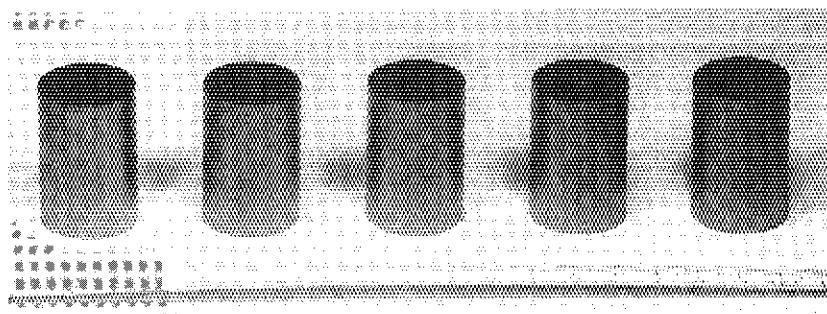
Photo. A5.A2 Surface appearance of fuel compacts of the 7th OGL-1
fuel assembly (rod 1).



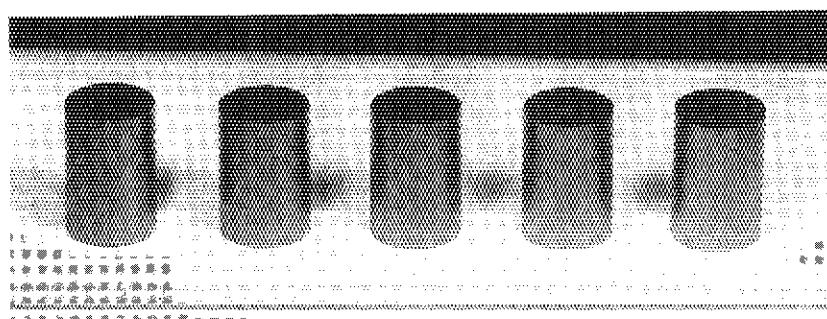
(a) Compacts 1 to 5
(59台 B101)



(b) Compacts 6 to 10
(59台 B102)

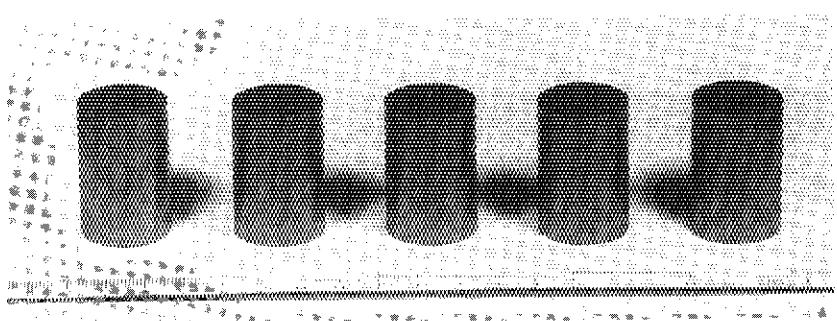


(c) Compacts 11 to 15
(59台 B103)

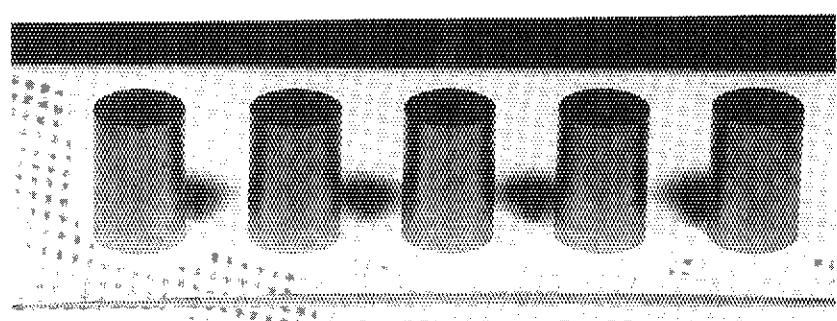


(d) Compacts 16 to 20
(59台 B104)

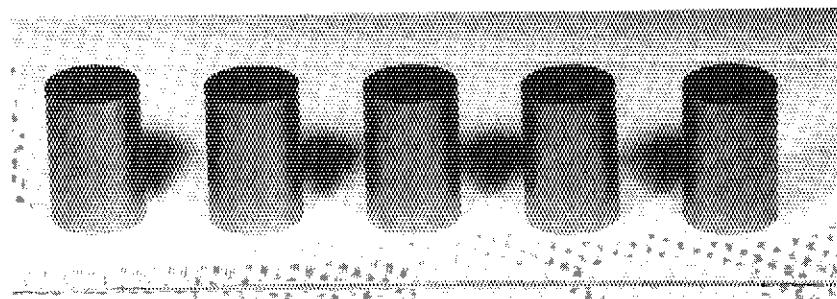
Photo. A5.A3 Surface appearance of fuel compacts of the 7th OGL-1
fuel assembly (rod 2).



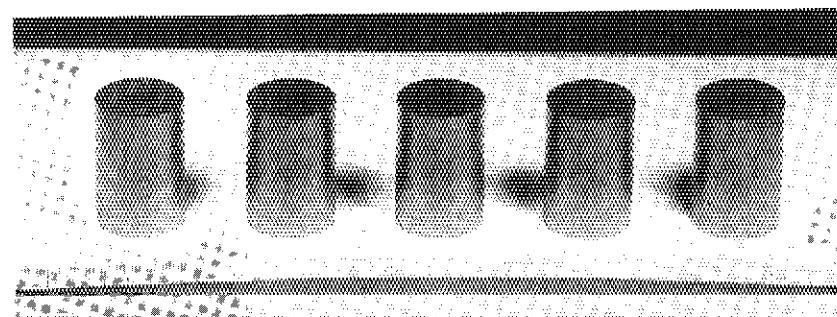
(a) Compacts 1 to 5
(59台 B105)



(b) Compacts 6 to 10
(59台 B106)



(c) Compacts 11 to 15
(59台 B107)



(d) Compacts 16 to 20
(59台 B108)

Photo. A5.A4 Surface appearance of fuel compacts of the 7th OGL-1
fuel assembly (rod 3).

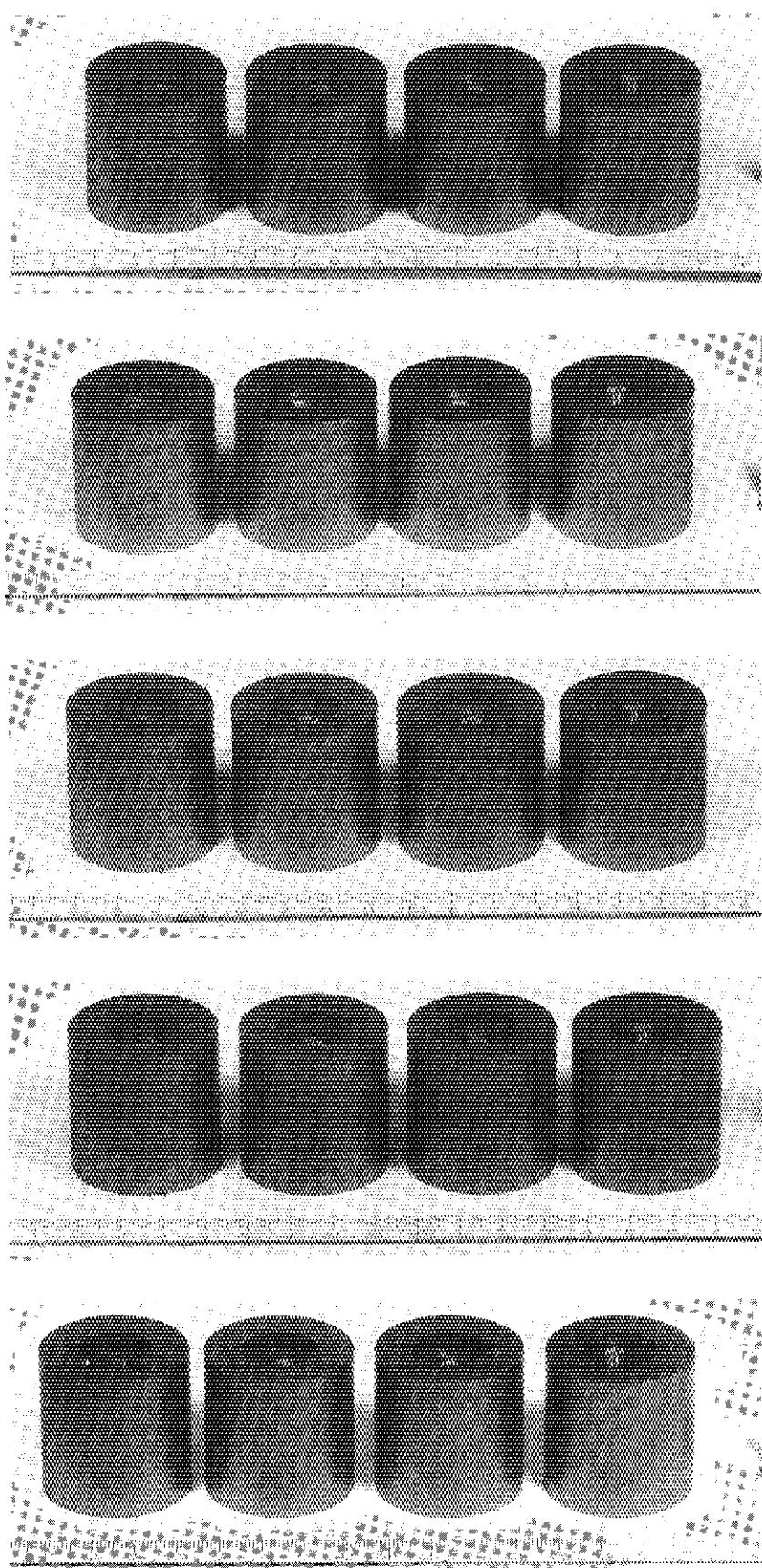


Photo. A5.5 Surface appearance of fuel compacts of the 8th OGL-1 fuel assembly.

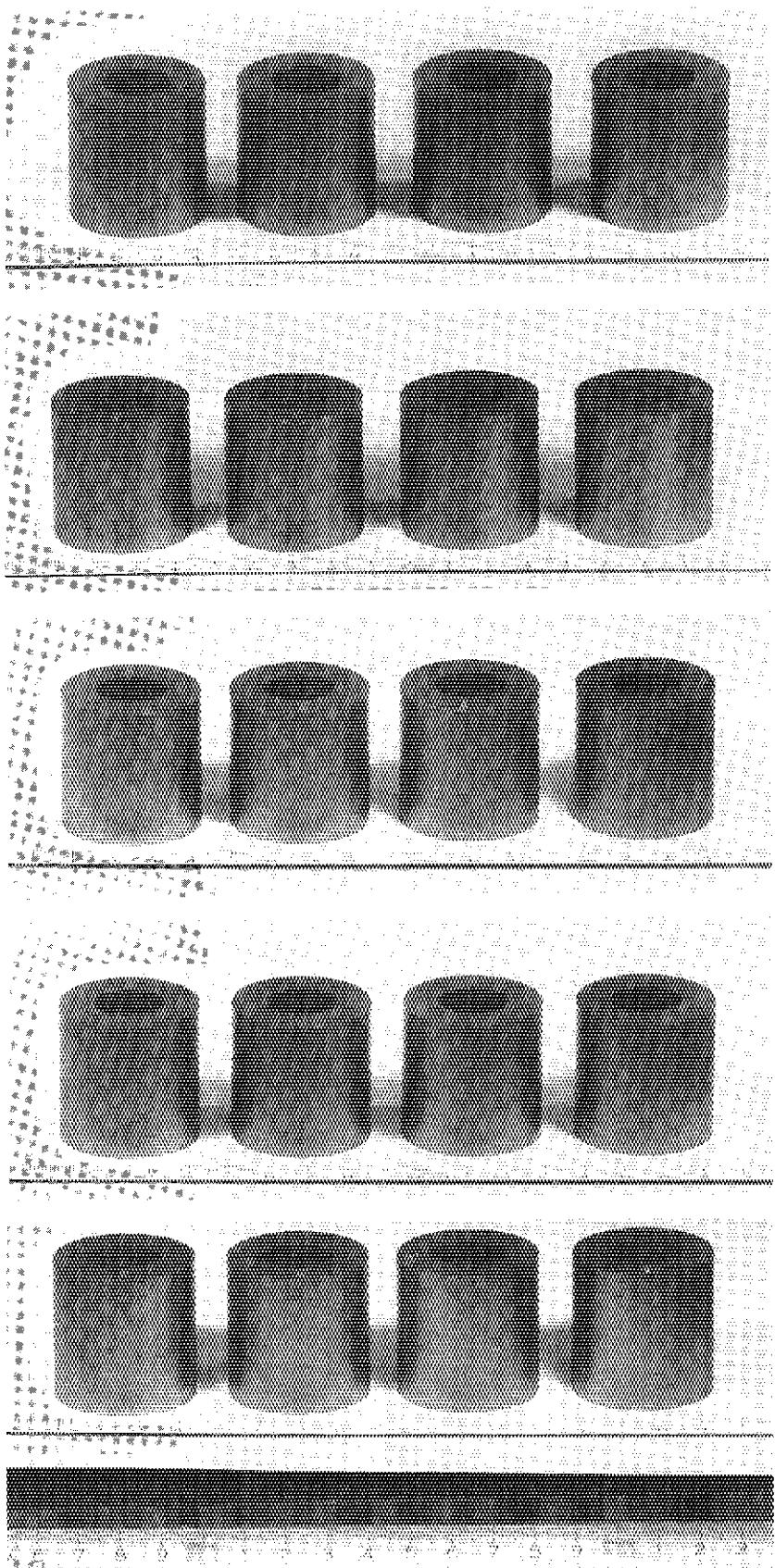
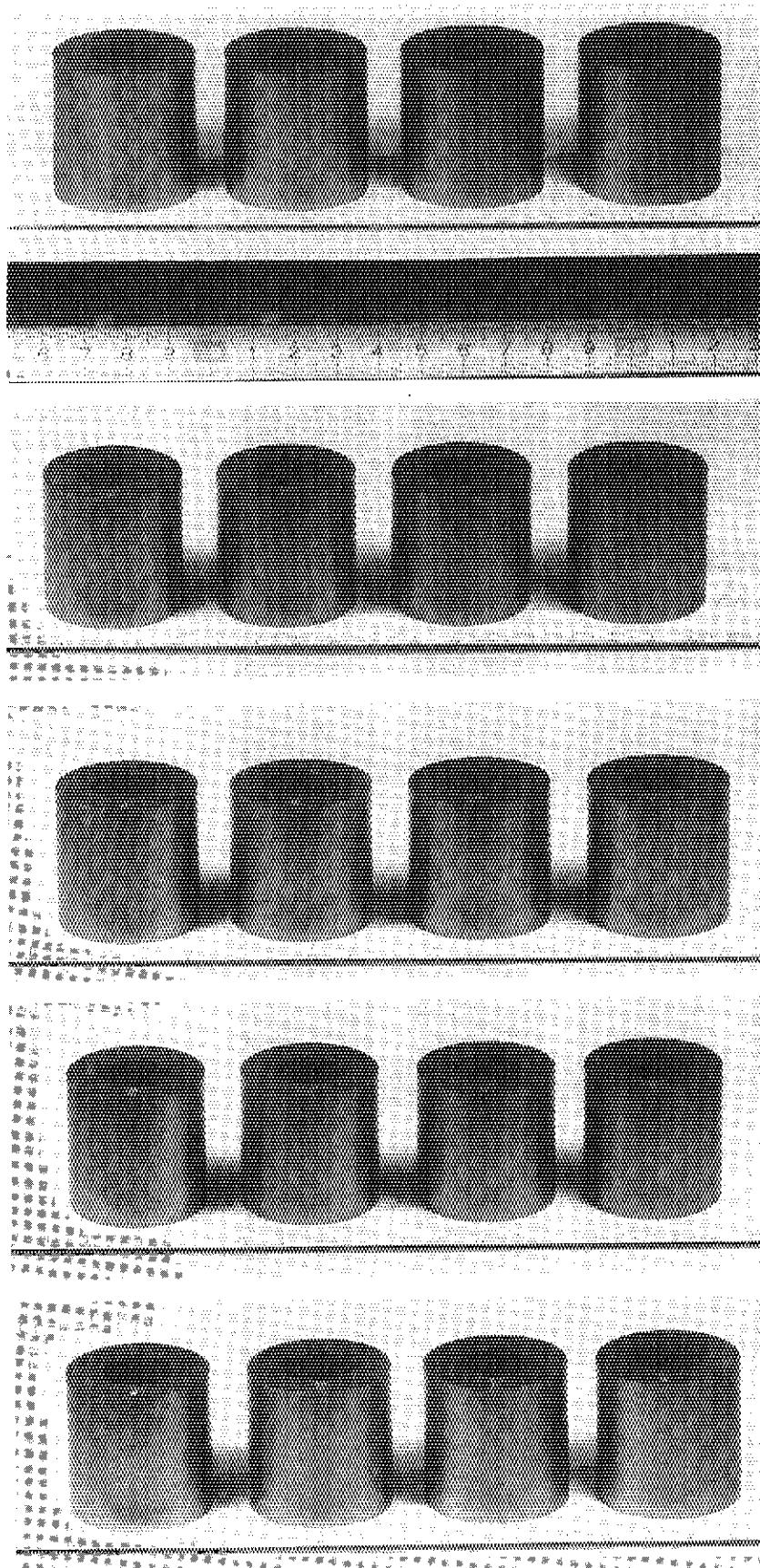


Photo. A5,A6 Surface appearance of fuel compacts of the 9th OGL-1 fuel assembly.



(a) Compacts 1 to 4
(62冶 B258)

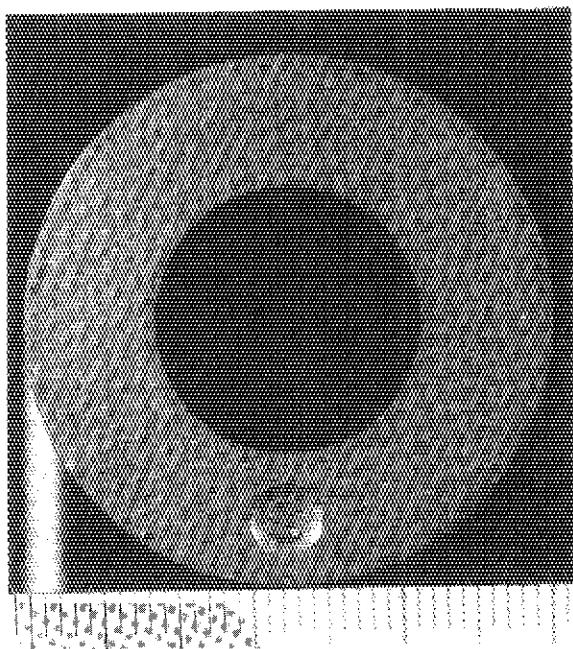
(b) Compacts 5 to 8
(62冶 B267)

(c) Compacts 9 to 12
(62冶 B277)

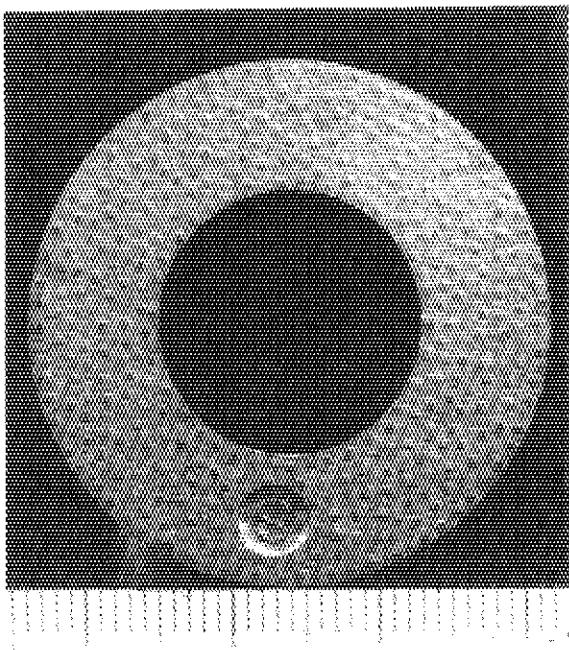
(d) Compacts 13 to 16
(62冶 B286)

(e) Compacts 17 to 20
(62冶 B295)

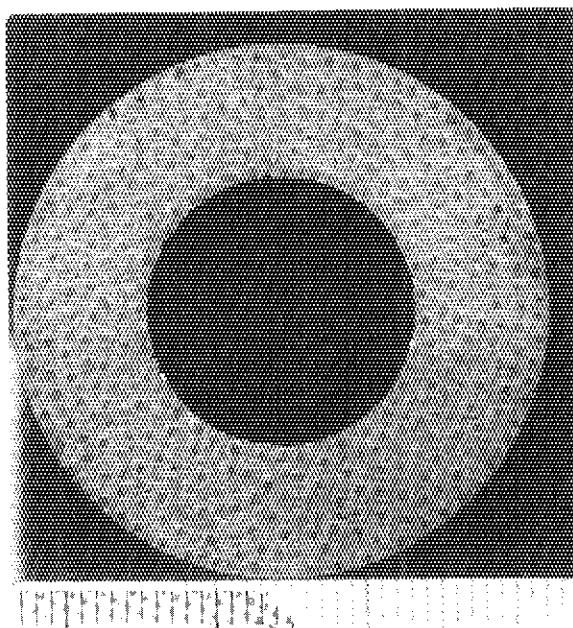
Photo. A5.A7 Surface appearance of fuel compacts of the 10th OGL-1
fuel assembly.



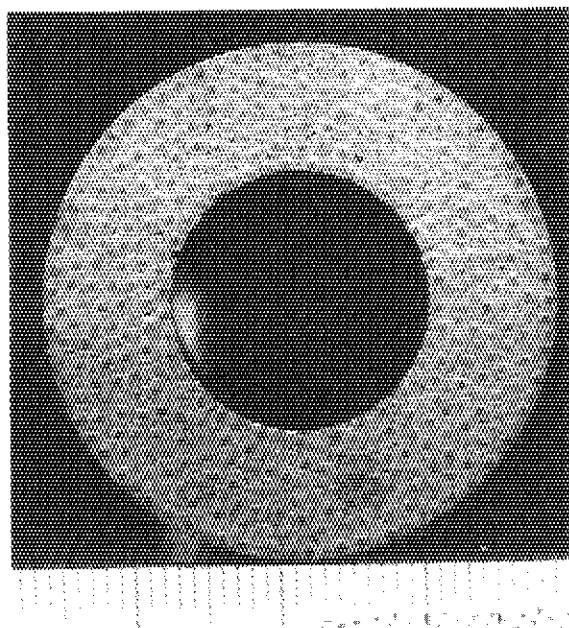
(a) Compact 5, top



(b) Compact 9, top

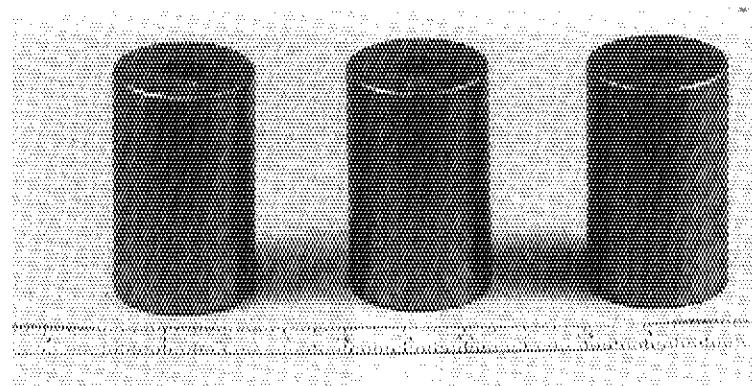


(c) Compact 5, bottom

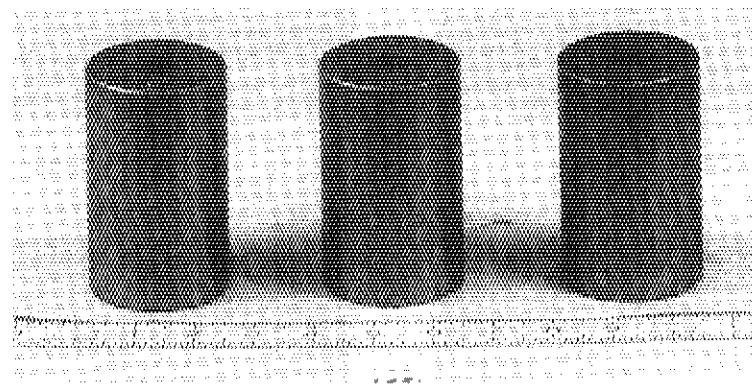


(d) Compact 9, bottom

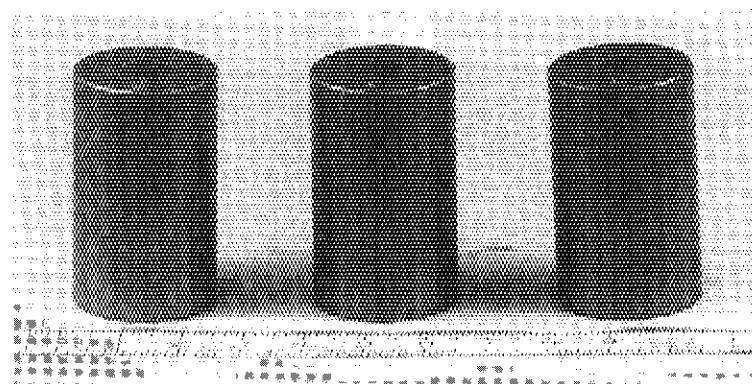
Photo.A5.A8 Surface appearance of fuel compacts 5 and 9 of the 10th OGL-1
fuel assembly ; top and bottom views.



(a) Compact 1-14 1-8 1-4
(3 治 C0062)

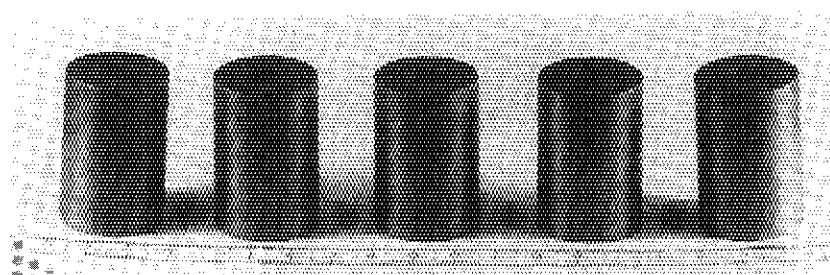


(b) Compact 2-14 2-8 2-4
(3 治 C0063)

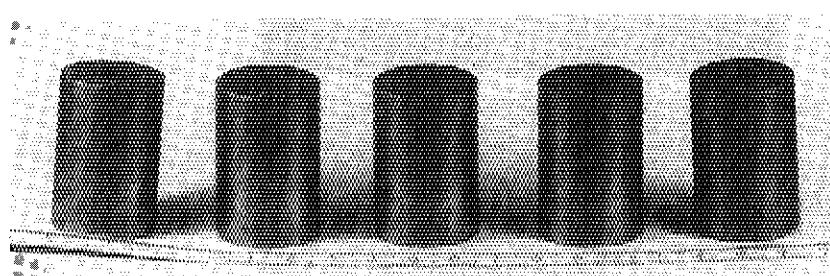


(c) Compact 3-14 3-8 3-4
(3 治 C0064)

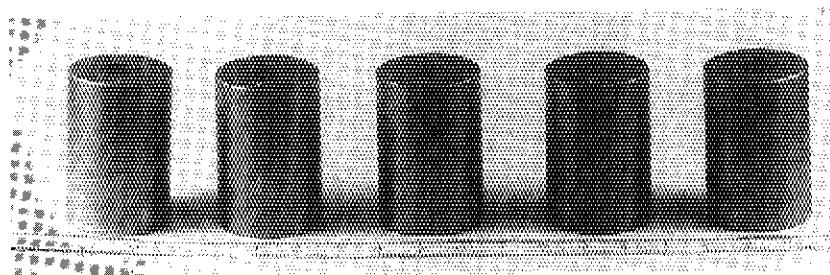
Photo. A5.A9 Surface appearance of fuel compacts of the 11th OGL-1
fuel assembly.



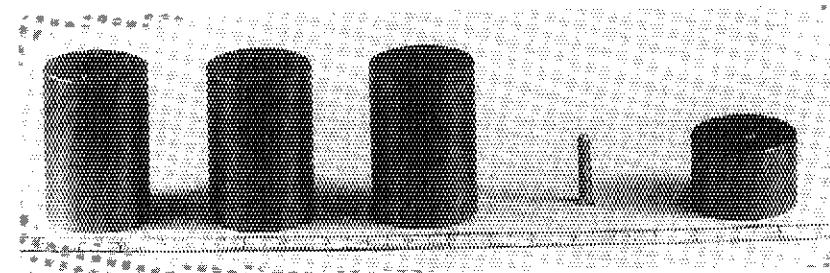
(a) Compacts 1 to 5
(3 治 0049)



(b) Compacts 6 to 10
(3 治 0050)

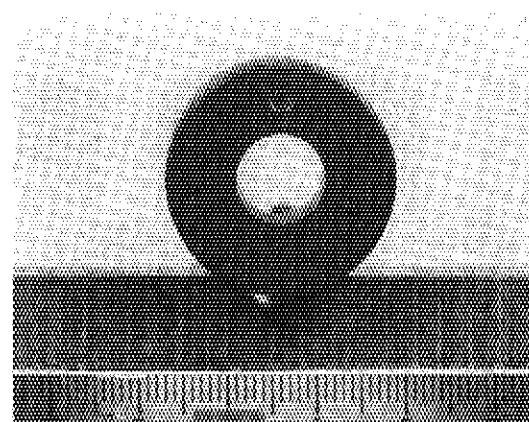


(c) Compacts 11 to 15
(3 治 0051)

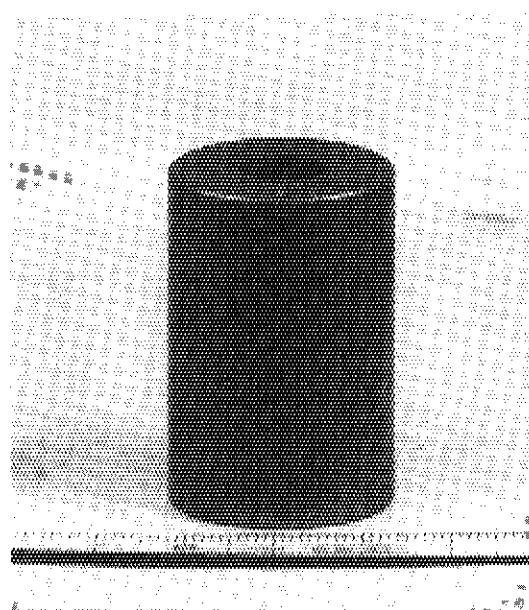


(d) Compacts 16 to 20
(3 治 0052)

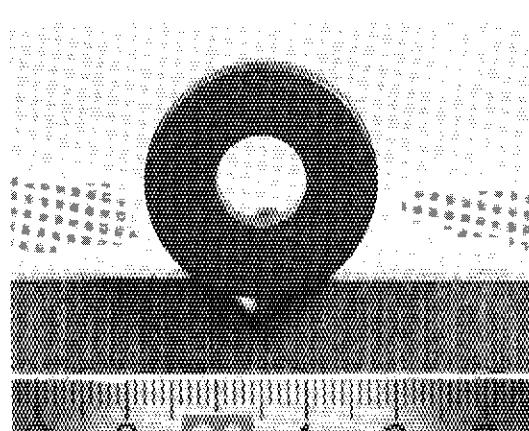
Photo. A5.A10 Surface appearance of fuel compacts of the 12th OGL-1 fuel assembly.



(a) Compact 8, top
(3 治 C0046)



(b) Compact 8, side
(3 治 C0047)



(c) Compact 8, bottom
(3 治 C0048)

Photo. A5.A11 Surface appearance of fuel compact 8 of the 12th OGL-1
fuel assembly ; top, side and bottom views.

付録5B 燃料コンパクトの寸法および重量検査

1. 寸法検査

(1) 測定方法

照射前に使用した測定器は、外径および長さについてはマイクロメータ、内径についてはイミクロメータである。照射後試験に使用した測定器は、外径および長さについては自動マイクロメータ、内径については内径測定器である。これらの器具の測定精度は $\pm 0.01\text{mm}$ である。

コンパクトの外径および内径は、コンパクト軸方向の上、中、下の3箇所を、周方向に 90° の角度で各々2方向、すなわち1個のコンパクトについて合計6箇所について測定した。コンパクトの長さは、周方向に 90° おきに4箇所について測定した。

(2) 測定データ

Table A5.B1～A5.B9に、第6次～第12次燃料体の燃料コンパクトの寸法測定データを示す。異常値と思われるものには、かっこを付した。なお、測定結果の評価については、本文5.3.2項に述べた。

(3) 付記

文献(1)の付録2 [Table A2.4(a)～A2.4(c)]、付録4 [Fig.A4.4(a)～A4.4(c)]、および文献(2)の付録2.1に示した第4次燃料体の燃料コンパクトの寸法測定データに誤りがあった。本付録のTable A5.B10～A5.B12およびFig.A5.B1～A5.B4に訂正したデータを示す。

2. 重量検査

(1) 測定方法

本検査は、第6次～第10次燃料体については全燃料コンパクトについて実施した。第11次および第12次燃料体については抜取り検査を行った。

照射前の重量測定は、原子燃料工業(株)社において、直視天秤(メトラー社製、PC-180)を用いて行われた。ゼロ点と基準分銅を用いた校正が行われ、その測定精度は、 $\pm 1\text{mg}$ 以内であった。

照射後は、第6次～第8次燃料については、自動天秤(メトラー社製、B5C 100/11)により、第9次～第12次燃料については分析用電子天秤(メトラー社製、SE160)によって行った。両者ともに公称精度は $\pm 1\text{mg}$ 以内である。

照射前後の測定における誤差について考えると、照射前後で測定装置が異なるため、照射前後で確度(中心値のずれ)がありうること、照射後はホットセル内での作業であるため安定・精密な測定が難しいこと、測定時における湿度差等により黒鉛マトリックスの水分吸着量が異なること等を考慮すると、重量変化量の測定誤差は $\pm 10\text{mg}$ 程度であると考えられる。

(2) 測定結果および考察

重量検査の結果を、Table A5.B1～A5.B9に示す。各燃料について重量変化率をまとめると、以下のようなになる。

第6次	.....	0% (重量差-3～+1mg)
第7次	.....	-0.01%～+0.01% (重量差-4～+3mg) ただし異常値(コンパクト3-18、-97mg)を除く
第8次	.....	0% (重量差-2～+2mg)
第9次	.....	0～+0.04% (重量差-2～+25mg)
第10次	.....	0～+0.02% (重量差+1～+10mg)
第11次	.....	+0.01～+0.07% (重量差+5～+25mg)
第12次	.....	-0.03～+0.09% (重量差-11～+40mg)

まず、重量減少になっているものを見る。第7次燃料体(燃料棒2の一部)で重量変化率が-0.01%(重量差-4mg)となっている。上記の誤差評価から、この重量差は測定誤差程度であり、有意な変化とは考えられない。これ以外には、第6次～第11次燃料体の全てのコンパクトについて、重量変化率が負(重量減少)になったものはない。なお、第12次燃料体では、-0.03%(-11mg)の重量変化が得られているが、この燃料では、コンパクトごとの重量変化率のバラツキが大きいので、異常値と思われる。以上のことから、異常値と思われる第12次燃料体の場合を除いて、燃料コンパクトの有意な腐食は生じなかつたと判断できる。

次に重量増加となっているものについて考える。第11次燃料体では、全てのコンパクトについて重量増加が観測されている。最大25mgに及ぶ重量差は、測定誤差を超えているものと考えられるが、その理由は明らかではない。第12次燃料体では、重量変化率のコンパクトによるバラツキが見られる。また、最大+0.09%(40mg)の変化は測定誤差を超えているものと考えられる。このような大きな重量変化の理由としては、文献(3)の付録1および本文5.3.5項(EPMA観察)で述べたように、燃料コンパクト温度測定用熱電対シーズ材が反応溶融し、燃料コンパクトに付着したことが考えられる。

参考文献

- (1) 林 君夫、湊 和生、小林紀昭、飛田 勉、菊池輝男、黒羽根史朗、福田幸朔、
“OGL-1燃料体の燃料コンパクトと黒鉛スリープの照射寸法変化”, JAERI-M
88-107 (1988).
- (2) 福田幸朔, 他, “高温ガス炉用燃料に関する試験研究”, JAERI-M 89-007 (1989).
- (3) 林 君夫、福田幸朔、鶴田晴通、菊池輝男、 “第11次および第12次OGL-1燃料体の黒
鉛スリープおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”, JAERI-M 94-075 (1994).

Table A5.B1 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 6th OGL-1 fuel assembly.

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight Change (mg) (%)	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)		(mg)	(%)
(Bottom)								
1	980	0.177	-0.037	-0.158	-0.070	1.89	-3	0.00
2	1107	0.235	-0.032	-0.185	-0.062	1.94	-3	0.00
3	1202	0.280	-0.070	-0.158	-0.090	1.29	0	0.00
4	1281	0.321	-0.074	-0.158	-0.111	1.50	0	0.00
5	1345	0.358	-0.094	-0.130	-0.222	2.29	-1	0.00
6	1389	0.383	-0.088	-0.241	-0.104	1.18	-2	0.00
7	1442	0.400	-0.083	-0.204	-0.111	1.34	-2	0.00
8	1470	0.412	-0.102	-0.176	-0.104	1.02	-3	0.00
9	1488	0.412	-0.083	-0.222	-0.187	2.25	0	0.00
10	1494	0.404	-0.060	-0.204	-0.201	3.35	0	0.00
11	1489	0.387	-0.088	-0.204	-0.132	1.50	0	0.00
12	1473	0.371	-0.107	-0.167	-0.125	1.17	+1	0.00
13	1457	0.346	-0.116	-0.241	-0.160	1.38	-1	0.00
14	1428	0.317	-0.056	-0.139	-0.035	0.63	0	0.00
15	1383	0.280	-0.079	-0.194	-0.111	1.41	-1	0.00
16	1335	0.247	-0.074	-0.185	-0.097	1.31	0	0.00
17	1278	0.214	-0.056	-0.176	-0.063	1.13	0	0.00
18	1234	0.181	-0.051	-0.185	-0.181	3.55	-1	0.00
19	1164	0.148	-0.028	-0.121	-0.076	2.71	+1	0.00
20	1093	0.111	-0.046	-0.176	-0.014	0.30	0	0.00
(Top)								
Average								

*1 Time-averaged temperature.

*2 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*3 Outer diameter (O.D.; D=36mm) and inner diameter (I.D.; d=18mm).

*4 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B2 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight Change (mg) (%)	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)		(mg)	(%)
(Bottom)								
1-1	984	0.50	-0.125	-0.250	-0.195	1.56	+2	+0.01
1-2	1001	0.66	-0.167	-0.250	-0.195	1.17	+2	+0.01
1-3	1019	0.79	-0.167	-0.0	-0.278	1.66	+1	0.00
1-4	1063	0.91	-0.167	-0.0	-0.222	1.33	0	0.00
1-5	1106	1.01	-0.125	-0.0	-0.334	(2.67)	+1	0.00
1-6	1142	1.08	-0.167	-0.0	-0.250	1.50	0	0.00
1-7	1173	1.13	-0.208	-0.0	-0.278	1.34	+1	0.00
1-8	1198	1.16	-0.167	-0.0	-0.195	1.17	+1	0.00
1-9	1215	1.16	-0.167	-0.125	-0.278	1.66	+1	0.00
1-10	1227	1.14	-0.208	-0.125	-0.250	1.20	+1	0.00
1-11	1231	1.09	-0.208	-0.125	-0.250	1.20	+2	+0.01
1-12	1229	1.04	-0.167	-0.125	-0.278	1.66	+1	0.00
1-13	1219	0.97	-0.125	-0.250	-0.278	(2.22)	0	0.00
1-14	1204	0.89	-0.167	-0.0	-0.278	1.66	+1	0.00
1-15	1181	0.79	-0.125	-0.125	-0.222	1.78	+1	0.00
1-16	1153	0.70	-0.125	-0.125	-0.195	1.56	0	0.00
1-17	1118	0.60	-0.125	-0.125	-0.167	1.34	0	0.00
1-18	1079	0.51	-0.125	-0.125	-0.195	1.56	0	0.00
1-19	1034	0.42	-0.083	-0.249	-0.111	1.34	+2	+0.01
1-20	985	0.31	-0.124	-0.125	-0.083	(0.67)	+1	0.00
(Top)								
							Average	
							1.45	

*1 Time-averaged temperature.

*2 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*3 Outer diameter (O.D.; D=24mm) and inner diameter (I.D.; d=8mm).

*4 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B3 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight Change (mg) (%)	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)			
(Bottom)								
2-1	1063	0.68	-0.125	-0.125	-0.195	1.56	+2	+0.01
2-2	1084	0.90	-0.125	-0.125	-0.195	1.56	0	0.00
2-3	1108	1.07	-0.167	-0.250	-0.278	1.66	0	0.00
2-4	1167	1.23	-0.208	-0.250	-0.250	1.20	+2	+0.01
2-5	1224	1.37	-0.250	-0.250	-0.278	1.11	0	0.00
2-6	1274	1.46	-0.250	-0.250	-0.278	1.11	+1	0.00
2-7	1317	1.52	-0.292	-0.375	-0.361	1.24	-1	0.00
2-8	1351	1.57	-0.292	-0.250	-0.306	1.05	0	0.00
2-9	1376	1.57	-0.250	-0.250	-0.333	1.33	-1	0.00
2-10	1392	1.54	-0.250	-0.375	-0.333	1.33	-1	0.00
2-11	1399	1.48	-0.250	-0.374	-0.334	1.34	+1	0.00
2-12	1396	1.41	-0.250	-0.375	-0.361	1.44	+1	0.00
2-13	1384	1.32	-0.250	-0.250	-0.361	1.44	0	0.00
2-14	1362	1.21	-0.250	-0.250	-0.361	1.44	+1	0.00
2-15	1332	1.07	-0.208	-0.250	-0.195	0.94	+1	0.00
2-16	1293	0.94	-0.167	-0.375	-0.222	1.33	-3	-0.01
2-17	1247	0.82	-0.125	-0.375	-0.222	1.78	-3	-0.01
2-18	1193	0.69	-0.166	-0.125	-0.195	1.17	-3	-0.01
2-19	1133	1.57	-0.125	-0.0	-0.139	1.11	-3	-0.01
2-20	1068	0.42	-0.083	-0.125	-0.111	1.34	-4	-0.01
(Top)								
							Average	
							1.32	

*1 Time-averaged temperature.

*2 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*3 Outer diameter (O.D.;D=24mm) and inner diameter (I.D.;d=8mm).

*4 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B4 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight Change (mg) (%)	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)			
(Bottom)								
3-1	1060	0.69	-0.083	-0.250	-0.139	(1.67)	+1	0.00
3-2	1081	0.91	-0.166	-0.250	-0.167	1.01	+1	0.00
3-3	1104	1.09	-0.208	-0.374	-0.167	0.80	+1	0.00
3-4	1161	1.25	-0.250	-0.250	-0.223	0.89	+2	+0.01
3-5	1215	1.39	-0.250	-0.125	-0.222	0.89	+2	+0.01
3-6	1263	1.49	-0.250	-0.374	-0.305	1.22	+2	+0.01
3-7	1302	1.55	-0.291	-0.250	-0.305	1.05	+2	0.00
3-8	1333	1.60	-0.250	-0.250	-0.361	1.44	+2	+0.01
3-9	1358	1.60	-0.291	-0.250	-0.333	1.14	+1	0.00
3-10	1371	1.57	-0.291	-0.374	-0.277	0.95	+3	+0.01
3-11	1377	1.50	-0.250	-0.374	-0.194	0.78	+1	0.00
3-12	1374	1.44	-0.250	-0.374	-0.250	1.00	+1	0.00
3-13	1364	1.34	-0.250	-0.374	-0.333	1.33	+2	+0.01
3-14	1343	1.23	-0.250	-0.374	-0.195	0.78	0	0.00
3-15	1315	1.09	-0.250	-0.250	-0.139	(0.56)	+1	0.00
3-16	1279	0.96	-0.166	-0.250	-0.222	1.34	+1	0.00
3-17	1235	0.83	-0.125	-0.374	-0.250	(2.00)	+2	+0.01
3-18	1184	0.70	-0.125	-0.250	-0.111	0.89	(-97)	(-0.29)
3-19	1127	0.58	-0.083	-0.374	-0.083	1.00	+1	0.00
3-20	1064	0.43	-0.083	-0.250	-0.028	(0.34)	+2	+0.01
(Top)								

Table A5.B5 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 8th OGL-1 fuel assembly.

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)		Change (mg)	(%)
(Bottom)								
1	940	0.52	-0.084	-0.222	-0.222	2.64	+2	0.00
2	963	0.68	-0.139	-0.222	-0.222	1.60	+2	0.00
3	990	0.82	-0.111	-0.277	-0.277	2.50	+2	0.00
4	1052	0.94	-0.111	-0.333	-0.333	3.00	+2	0.00
5	1124	1.04	-0.195	-0.278	-0.278	1.43	+1	0.00
6	1188	1.12	-0.223	-0.388	-0.388	1.74	0	0.00
7	1245	1.16	-0.167	-0.278	-0.278	1.66	+2	0.00
8	1292	1.20	-0.167	-0.278	-0.278	1.66	+1	0.00
9	1330	1.20	-0.195	-0.277	-0.277	1.42	-1	0.00
10	1358	1.18	-0.195	-0.277	-0.277	1.42	-1	0.00
11	1376	1.13	-0.167	-0.389	-0.389	2.33	+2	0.00
12	1384	1.08	-0.195	-0.333	-0.333	1.71	0	0.00
13	1382	1.01	-0.167	-0.333	-0.333	1.99	-2	0.00
14	1370	0.92	-0.167	-0.278	-0.278	1.66	0	0.00
15	1348	0.82	-0.139	-0.277	-0.277	1.99	0	0.00
16	1316	0.72	-0.111	-0.222	-0.222	2.00	+2	0.00
17	1274	0.62	-0.111	-0.222	-0.222	2.00	0	0.00
18	1223	0.53	-0.056	-0.277	-0.277	4.95	+1	0.00
19	1164	0.43	-0.085	-0.167	-0.167	1.96	0	0.00
20	1097	0.32	-0.083	-0.055	-0.055	0.66	0	0.00
(Top)								
Average								

*1 Time-averaged temperature.

*2 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*3 Outer diameter (O.D.;D=36mm) and inner diameter (I.D.;d=18mm).

*4 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B6 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 9th OGL-1 fuel assembly.

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight Change (mg) (%)	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)			
(Bottom)								
1	1104	1.22	-0.139	-0.33	-0.250	(1.80)	+25	+0.04
2	1168	1.62	-0.250	-0.44	-0.306	1.22	+13	+0.02
3	1225	1.93	-0.333	-0.44	-0.362	1.09	+6	+0.01
4	1273	2.22	-0.389	-0.50	-0.473	1.22	+5	+0.01
5	1313	2.47	-0.416	-0.61	-0.473	1.14	+9	+0.01
6	1344	2.64	-0.444	-0.61	-0.473	1.07	+5	+0.01
7	1366	2.75	-0.500	-0.61	-0.473	0.95	+4	+0.01
8	1378	2.84	-0.444	-0.61	-0.500	1.13	+2	0.00
9	1381	2.84	-0.472	-0.61	-0.556	1.18	0	0.00
10	1374	2.78	-0.444	-0.61	-0.500	1.13	+4	+0.01
11	1358	2.67	-0.444	-0.55	-0.445	1.00	+4	+0.01
12	1333	2.56	-0.416	-0.55	-0.445	1.07	-2	0.00
13	1298	2.39	-0.444	-0.61	-0.445	1.00	0	0.00
14	1255	2.19	-0.361	-0.55	-0.444	1.23	+4	+0.01
15	1202	1.93	-0.361	-0.55	-0.417	1.16	+2	0.00
16	1148	1.70	-0.305	-0.39	-0.417	1.37	+4	+0.01
17	1072	1.48	-0.305	-0.39	-0.333	1.09	+7	+0.01
18	1008	1.25	-0.250	-0.39	-0.278	1.11	+6	+0.01
19	981	1.02	-0.194	-0.33	-0.306	(1.58)	+10	+0.02
20	958	0.77	-0.111	-0.28	-0.278	(2.50)	+12	+0.02
(Top)								

Table A5.B7 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 10th OGL-1 fuel assembly.

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence* ² (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ⁴	Weight Change (mg) (%)	
			O.D.* ³ ($\Delta D/D$)	I.D.* ³ ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)		(mg)	(%)
(Bottom)								
1	1057	1.11	-0.195	-0.17	-0.419	2.15	+10	+0.02
2	1103	1.47	-0.279	-0.17	-0.419	1.50	+8	+0.01
3	1181	1.75	-0.335	-0.22	-0.447	1.33	+5	+0.01
4	1230	2.01	-0.363	-0.17	-0.531	1.46	+3	0.00
5	1270	2.24	-0.419	-0.33	-0.531	1.27	+3	0.00
6	1300	2.40	-0.419	-0.39	-0.615	1.47	+2	0.00
7	1321	2.50	-0.419	-0.39	-0.531	1.27	+2	0.00
8	1331	2.58	-0.419	-0.28	-0.588	1.40	+2	0.00
9	1331	2.58	-0.391	-0.33	-0.559	1.43	+1	0.00
10	1320	2.53	-0.419	-0.33	-0.532	1.27	+2	0.00
11	1300	2.43	-0.391	-0.28	-0.587	1.50	+1	0.00
12	1270	2.32	-0.419	-0.33	-0.614	1.47	+1	0.00
13	1230	2.17	-0.391	-0.28	-0.586	1.50	+1	0.00
14	1180	1.99	-0.362	-0.28	-0.587	1.62	+3	0.00
15	1121	1.75	-0.335	-0.28	-0.475	1.42	+2	0.00
16	1054	1.55	-0.307	-0.22	-0.475	1.55	+2	0.00
17	978	1.34	-0.251	-0.22	-0.447	1.78	+4	+0.01
18	929	1.14	-0.195	-0.22	-0.363	1.86	+4	+0.01
19	909	0.93	-0.139	-0.11	-0.279	2.01	+3	0.00
20	879	0.70	-0.111	-0.11	-0.307	2.77	+3	0.00
(Top)								
							Average 1.60	

*1 Time-averaged temperature.

*2 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*3 Outer diameter (O.D.;D=36mm) and inner diameter (I.D.;d=18mm).

*4 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B8 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 11th OGL-1 fuel assembly (rods 1-3).

Compact Number	Fast Neutron Fluence* ¹ (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ³	Weight Change (mg)	Weight (%)
		O.D.* ² ($\Delta D/D$)	I.D.* ² ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)			
(Bottom)							
1-4	0.98	-0.125	-0.037	-0.150	1.20	+25	+0.07
1-8	1.20	-0.167	-0.037	-0.150	0.89	+17	+0.04
1-14	0.77	-0.083	-0.037	-0.125	1.51	+20	+0.05
(Top)							
(Bottom)							
2-4	1.34	-0.209	-0.037	-0.200	0.96	+9	+0.02
2-8	1.63	-0.251	-0.037	-0.226	0.90	+8	+0.02
2-14	1.04	-0.167	-0.037	-0.176	1.05	+7	+0.02
(Top)							
(Bottom)							
3-4	1.35	-0.209	-0.038	-0.201	0.96	+10	+0.03
3-8	1.65	-0.251	-0.037	-0.276	1.10	+7	+0.02
3-14	1.06	-0.167	-0.063	-0.151	0.90	+5	+0.01
(Top)							

Average
1.05

*1 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*2 Outer diameter (O.D.; D=24mm) and inner diameter (I.D.; d=8mm).

*3 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B9 Irradiation-induced dimensional changes and weight changes of fuel compacts loaded in the 12th OGL-1 fuel assembly.

Compact Number	Fast Neutron Fluence* ¹ (10^{24}m^{-2})	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ³	Weight	
		O.D.* ² ($\Delta D/D$)	I.D.* ² ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)		Change (mg)	(%)
(Bottom)							
1	1.32	-0.193	-0.50	-0.231	1.20	+12	+0.03
3	2.15	-0.270	-0.50	-0.490	1.81	+2	+0.00
5	2.80	-0.425	-0.70	-0.516	1.21	+40	+0.09
7	3.04	-0.386	-0.70	-0.593	1.54	-11	-0.03
8	3.08	-0.425	-0.70	-0.309	0.73	-3	-0.01
10	2.93	-0.464	-0.70	-0.567	1.22	+4	+0.01
12	2.58	-0.386	-0.60	-0.463	1.20	+4	+0.01
14	2.06	-0.304	-0.50	-0.360	1.18	+7	+0.02
16	1.54	-0.231	-0.60	-0.257	1.11	+23	+0.05
18	0.98	-0.077	-0.40	-0.231	3.00	+8	+0.02
(Top)							
Average							
1.42							

*1 Energy > 29fJ = 0.18MeV.

*2 Outer diameter (O.D.; D=26mm) and inner diameter (I.D.; d=10mm).

*3 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B10 Irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts loaded in the 4th OGL-1 fuel assembly (rod 1); corrected.

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence (10^{24}m^{-2} , $E > 29\text{fJ}$)	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ³
			O.D.* ² ($\Delta D/D$)	I.D.* ² ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)	
(Bottom)						
1-1	887	0.73	-0.117	-0.350	-0.089	0.76
1-2	928	0.96	-0.167	-0.400	-0.097	0.58
1-3	966	1.15	-0.187	-0.524	-0.139	0.74
1-4	999	1.31	-0.192	-0.375	-0.170	0.89
1-5	1027	1.47	-0.200	-0.462	-0.209	1.05
1-6	1051	1.57	-0.242	-0.188	-0.245	1.01
1-7	1068	1.64	-0.229	-0.313	-0.195	0.85
1-8	1081	1.49	-0.221	-0.350	-0.228	1.03
1-9	1087	1.49	-0.238	-0.338	-0.223	0.94
1-10	1088	1.44	-0.250	-0.338	-0.209	0.84
1-11	1083	1.59	-0.288	-0.250	-0.186	0.65
1-12	1072	1.52	-0.267	-0.338	-0.231	0.87
1-13	1055	1.42	-0.238	-0.424	-0.264	1.11
1-14	1033	1.30	-0.171	-0.338	-0.147	0.86
1-15	1005	1.15	-0.196	-0.300	-0.139	0.71
1-16	973	1.01	-0.167	-0.275	-0.122	0.73
1-17	935	0.88	-0.175	-0.312	-0.122	0.70
1-18	903	0.74	-0.146	-0.399	-0.114	0.78
1-19	887	0.61	-0.125	-0.337	-0.092	0.74
1-20	873	1.46	-0.133	-0.250	-0.056	0.42
(Top)						
						Average 0.81

*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

*2 Outer diameter (O.D.; $D=24\text{mm}$) and inner diameter (I.D.; $d=8\text{mm}$).*3 $(\Delta L/L) / (\Delta D/D)$.

Table A5.B11 Irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts loaded in the 4th OGL-1 fuel assembly (rod 2); corrected.

Compact Number	Temp.* ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence (10^{24}m^{-2} , $E > 29\text{fJ}$)	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor* ³
			O.D.* ² ($\Delta D/D$)	I.D.* ² ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)	
(Bottom)						
2-1	1056	0.98	-0.209	-0.499	-0.139	0.67
2-2	1127	1.31	-0.267	-0.375	-0.209	0.78
2-3	1193	1.56	-0.271	-0.587	-0.231	0.85
2-4	1251	1.79	-0.271	-0.412	-0.264	0.97
2-5	1302	1.99	-0.313	-0.586	-0.289	0.92
2-6	1343	2.13	-0.325	-0.313	-0.370	1.14
2-7	1375	2.22	-0.346	-0.463	-0.312	0.90
2-8	1396	2.29	-0.336	-0.425	-0.325	0.97
2-9	1407	2.29	-0.342	-0.350	-0.306	0.89
2-10	1407	2.24	-0.313	-0.463	-0.362	1.16
2-11	1396	2.15	-0.342	-0.400	-0.306	0.89
2-12	1375	2.06	-0.271	-0.338	-0.251	0.93
2-13	1343	1.92	-0.280	-0.350	-0.264	0.94
2-14	1302	1.76	-0.246	-0.275	-0.209	0.85
2-15	1252	1.56	-0.221	-0.400	-0.244	1.10
2-16	1193	1.37	-0.212	-0.387	-0.167	0.79
2-17	1127	1.19	-0.196	-0.312	-0.180	0.92
2-18	1071	1.01	-0.241	-0.350	-0.103	0.43
2-19	1045	0.82	-0.175	-0.337	-0.083	0.47
2-20	1022	0.82	-0.150	-0.287	-0.069	0.46
(Top)						
						Average 0.85

*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

*2 Outer diameter (O.D.; $D=24\text{mm}$) and inner diameter (I.D.; $d=8\text{mm}$).*3 ($\Delta L/L$) / ($\Delta D/D$).

Table A5.B12 Irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts loaded in the 4th OGL-1 fuel assembly (rod 3); corrected.

Compact Number	Temp. * ¹ (°C)	Fast Neutron Fluence (10^{24}m^{-2} , $E > 29 \text{fJ}$)	Dimensional Change (%)			Anisotropy Factor * ³
			O.D. * ² ($\Delta D/D$)	I.D. * ² ($\Delta d/d$)	Length ($\Delta L/L$)	
(Bottom)						
3-1	991	1.00	-0.175	-0.400	-0.181	1.03
3-2	1049	1.32	-0.250	-0.250	-0.236	0.94
3-3	1101	1.58	-0.259	-0.250	-0.206	0.80
3-4	1146	1.81	-0.292	-0.412	-0.287	0.98
3-5	1185	2.02	-0.371	-0.338	-0.223	0.60
3-6	1216	2.16	-0.355	-0.437	-0.328	0.92
3-7	1240	2.25	-0.262	-0.400	-0.283	1.08
3-8	1256	2.32	-0.350	-0.438	-0.339	0.97
3-9	1265	2.32	-0.267	-0.375	-0.306	1.15
3-10	1265	2.27	-0.292	-0.475	-0.245	0.84
3-11	1258	2.18	-0.217	-0.413	-0.306	1.41
3-12	1243	2.09	-0.279	-0.413	-0.293	1.05
3-13	1220	1.95	-0.279	-0.474	-0.248	0.89
3-14	1189	1.79	-0.242	-0.350	-0.222	0.92
3-15	1151	1.58	-0.279	-0.412	-0.203	0.73
3-16	1106	1.39	-0.187	-0.250	-0.158	0.84
3-17	1054	1.21	-0.208	-0.375	-0.153	0.74
3-18	1009	1.02	-0.225	-0.350	-0.120	0.53
3-19	987	0.84	-0.146	-0.213 (-0.042)		(0.29)
3-20	968	0.63	-0.179	-0.225	-0.095	0.53
(Top)						
						Average 0.89

*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

*2 Outer diameter (O.D.; $D=24\text{mm}$) and inner diameter (I.D.; $d=8\text{mm}$).*3 $(\Delta L/L) / (\Delta D/D)$.

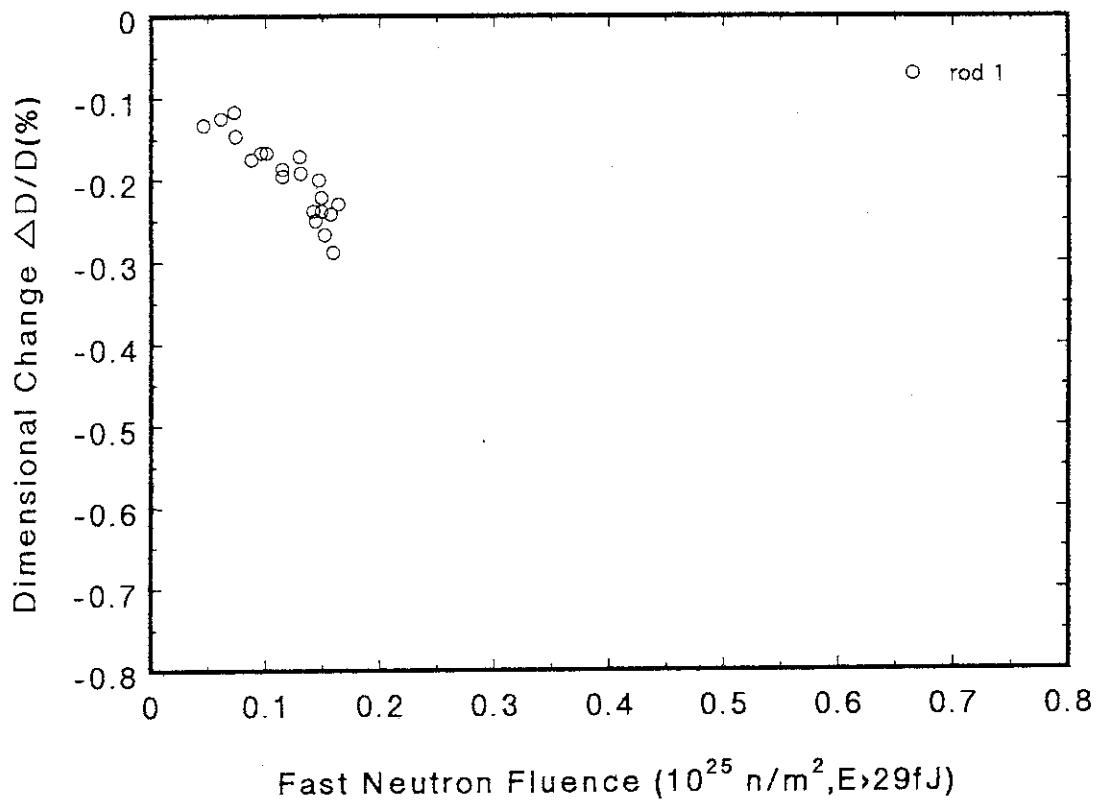


Fig.A5.B1 Neutron irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of the 4th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

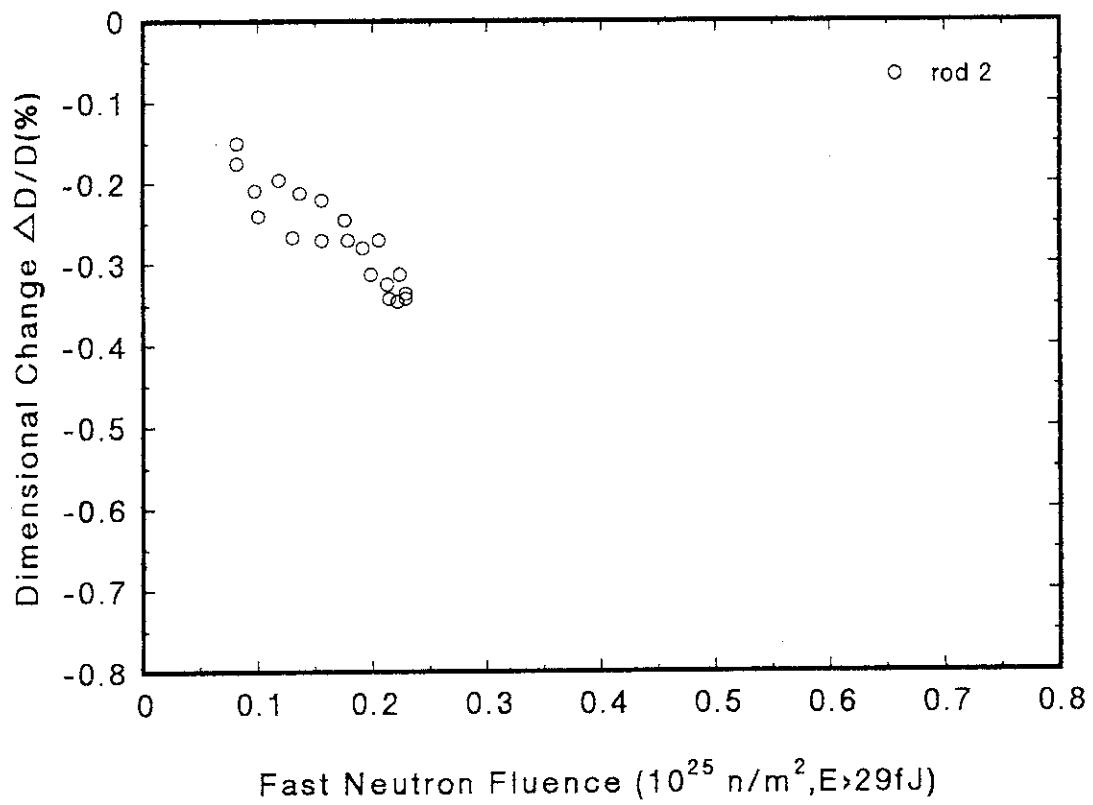


Fig.A5.B2 Neutron irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of the 4th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

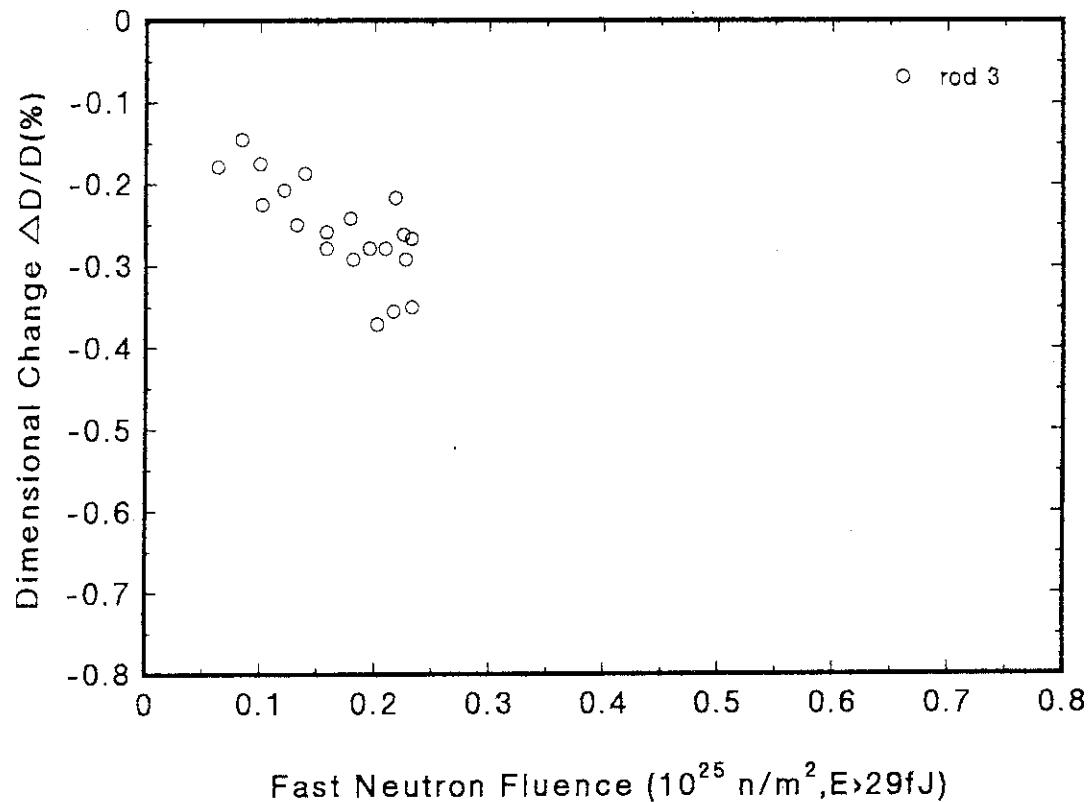


Fig. A5.B3 Neutron irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of the 4th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

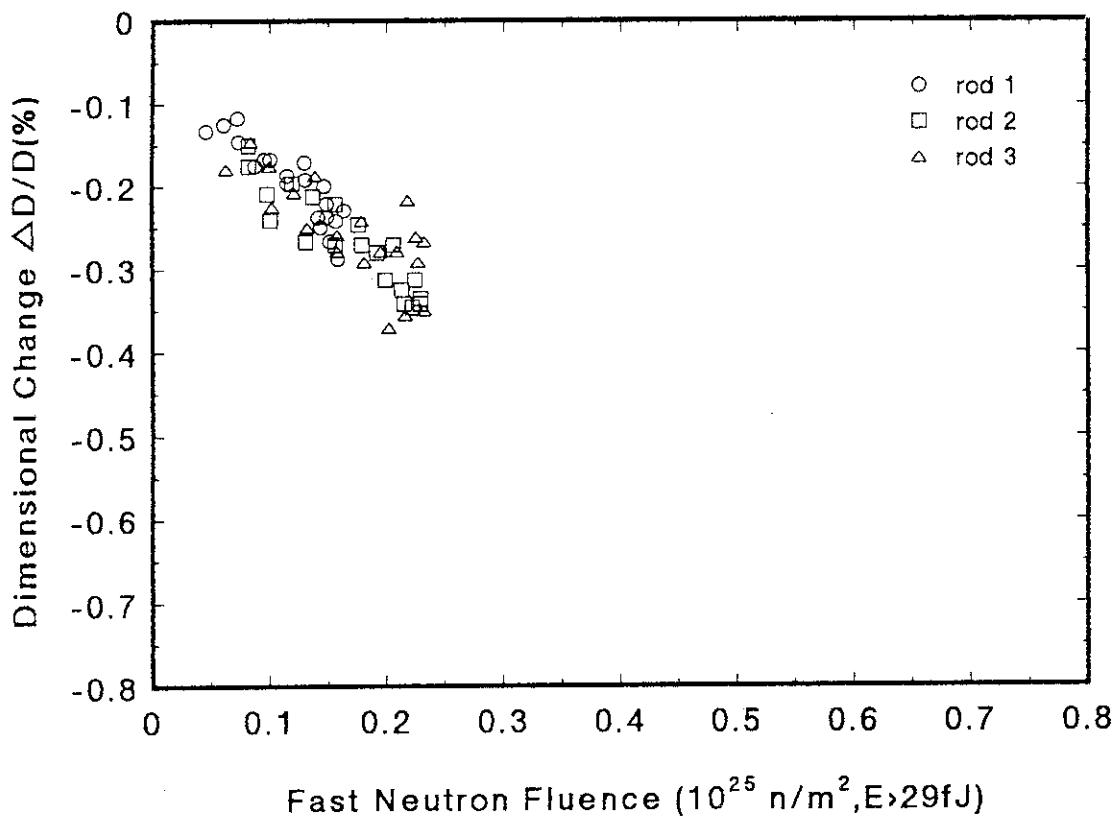


Fig. A5.B4 Neutron irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of the 4th OGL-1 fuel assembly (rods 1-3).

付録5 C 燃料コンパクト中のFPインベントリ測定

本試験は、燃料コンパクトを非破壊のままでガンマ線スペクトル分析することによって、燃料コンパクト中のFPインベントリの相対値を求めるものである。

典型的な測定結果の例として、第8次燃料体の結果は本文に述べた。それ以外の燃料体の測定結果について、以下に示す。

1. 第6次および第7次燃料体

燃料コンパクトごとのFPインベントリの相対値を軸方向にプロットしたものを、Fig.A5.C1～Fig.A5.C4に示す。燃料棒軸方向のFPインベントリ分布は、不規則な形をしている。これは、測定中に燃料コンパクトを回転させなかつたため、照射中と測定時の周方向位置が必ずしも一致しなかつたためである。すなわち、照射中には周方向にFPインベントリ分布が生じているが、これが偶然的に表われて不規則な形状の軸方向分布となつたものである。

2. 第9次および第10次燃料体

燃料コンパクトを回転させながら、FPインベントリ測定を行つた。測定結果をFig.A5.C5 およびFig.A5.C6に示す。第8次燃料体の分布とほぼ一致している。

FP量の相対分布は、 ^{134}Cs を除く核種については互いに良く一致している。それらの分布は、熱中性子束の燃料棒軸方向分布ともほぼ一致している。前報告⁽¹⁾に述べたように、 ^{134}Cs は、

①核分裂とその後の崩壊による ^{133}Cs の生成

② ^{133}Cs の中性子捕獲

という2段階の中性子吸収反応を経ることによって生じるため、その生成量は中性子照射量の2乗に比例することになる。 ^{134}Cs 量の相対分布と、 ^{137}Cs 量の2乗の相対分布とは良く一致する。

3. 第11次および第12次燃料体

これらの燃料体では、それぞれ燃料棒あたり3個の燃料コンパクトについてしか測定を行わなかつたため、燃料棒全長にわたるFPインベントリ分布が得られなかつた。そこで、第8次燃料体の測定結果との比較検討を行つた。

両燃料体は、燃料コンパクトの長さが第10次までとは異なつてゐるため、燃料棒軸方向位置がほぼ対応するように燃料コンパクト番号を選択して、FP量の相対比を求めた。その結果、Table A5.C1およびTable A5.C2に示すように、第11次、第12次燃料体とともに、第8次燃料体のFP量の相対比に近い結果が得られた。従つて、両燃料体については、全燃料コンパクトのFPインベントリおよび燃焼度の相対分布(付録3参照)として、第8次

燃料体の分布を用いることとした。

参考文献

- (1) 福田幸朔、小林紀昭、林君夫、湊和生、菊池輝男、足立守、伊丹宏治、岩本多實、井川勝市、“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).

Table A5.C1 Comparison of fission product (^{144}Ce - ^{144}Pr) inventory in fuel compacts of the 11th and 8th OGL-1 fuel assemblies.

	11th Fuel				8 th Fuel	
	Compact Position	rod 1	rod 2	rod 3	Compact Position	(Inventory)
Count Rate (cps)	No. 4	2.422	3.783	3.470	(No. 4+No. 5)/2	46.11
	No. 8	2.692	4.183	3.955	No. 9	51.01
	No.14	1.784	2.677	2.590	(No. 15+No. 16)/2	34.20
Relative Value of Count Rate	No. 4	0.900	0.904	0.877	(No. 4+No. 5)/2	0.904
	No. 8	1.000	1.000	1.000	No. 9	1.000
	No.14	0.663	0.640	0.655	(No. 15+No. 16)/2	0.670

Table A5.C2 Comparison of fission product (^{144}Ce - ^{144}Pr) inventory in fuel compacts of the 12th and 8th OGL-1 fuel assemblies.

	12th Fuel		8 th Fuel	
	Compact Position	Inventory	Compact Position	Inventory
Count Rate (cps)	No. 8	27.344	No. 9	51.01
	No.13	21.219	No.14	39.61
	No.16	14.395	No.17	27.32
Relative Value of Count Rate	No. 8	1.000	No. 9	1.000
	No.13	0.776	No.14	0.777
	No.16	0.526	No.17	0.536

HL-730 BOLF-20A COMPACT COUNT RATE

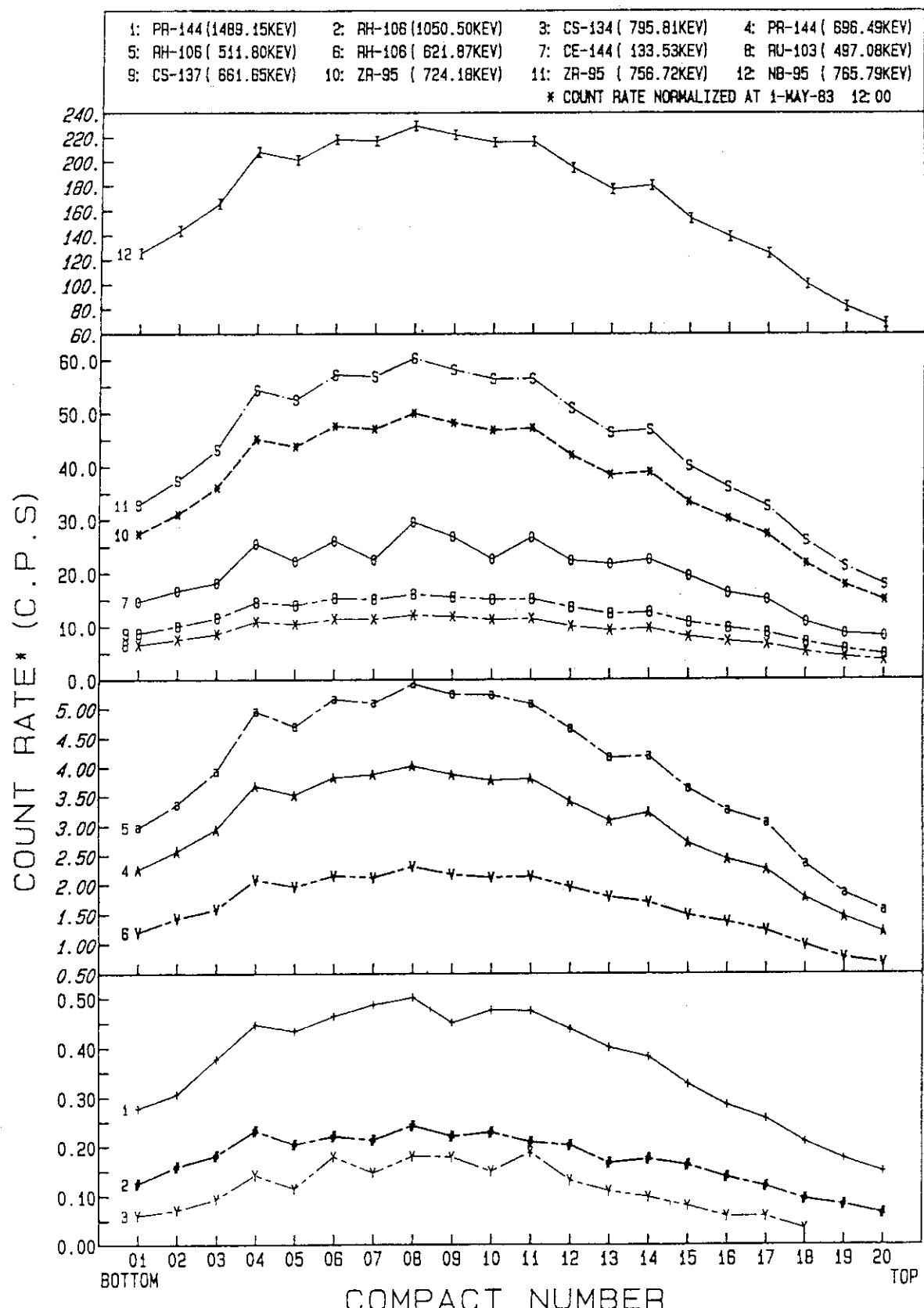


Fig.A5.C1 Fission product inventory in fuel compacts of the 6th OGL-1 fuel assembly.
 The compacts were not rotated during activity measurement.

HL-904 81LF-21A COMPACT COUNT RATE

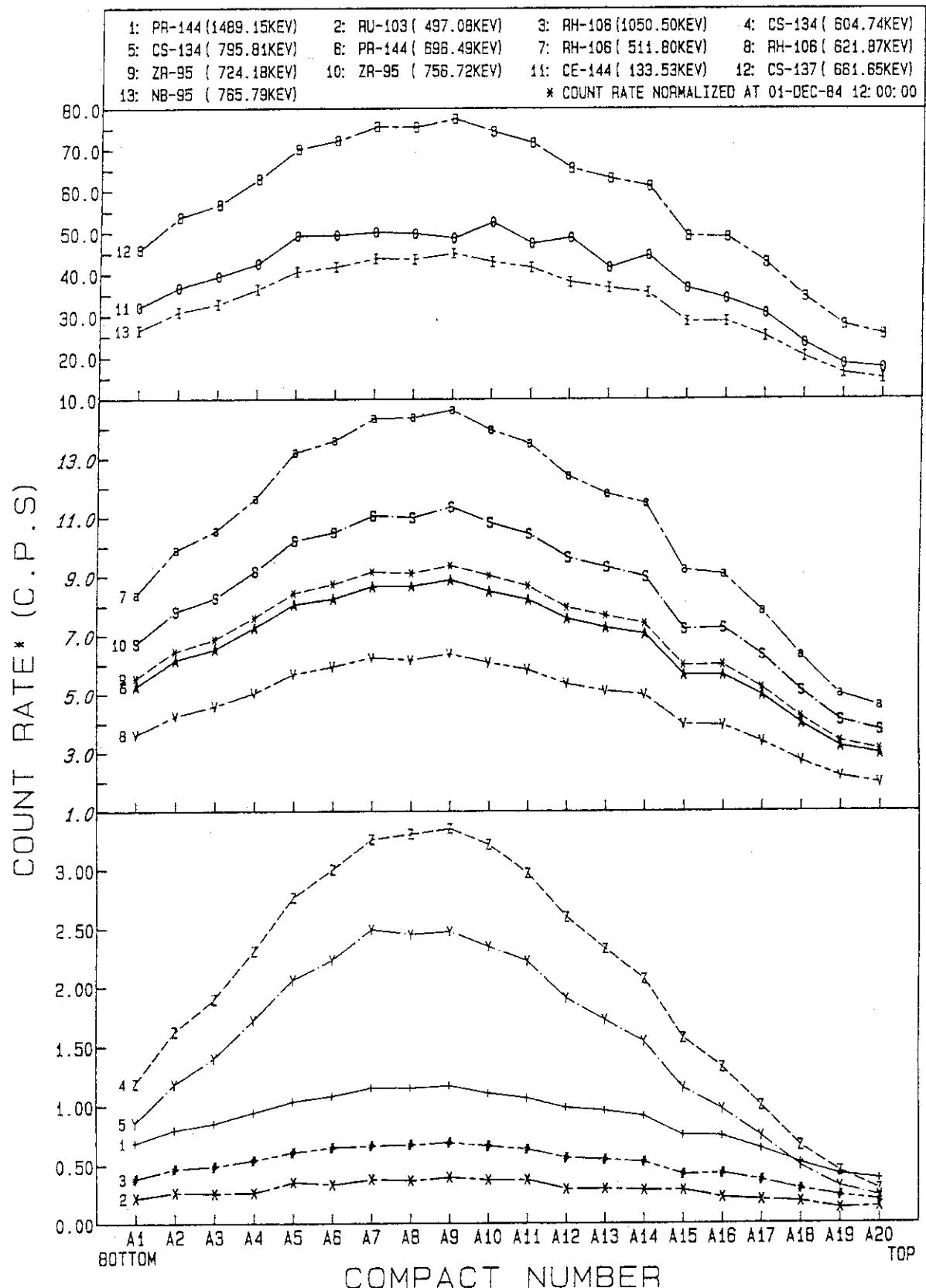


Fig. A5.C2 Fission product inventory in fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1). The compacts were not rotated during activity measurement.

HL-904 81LF-21A COMPACT COUNT RATE

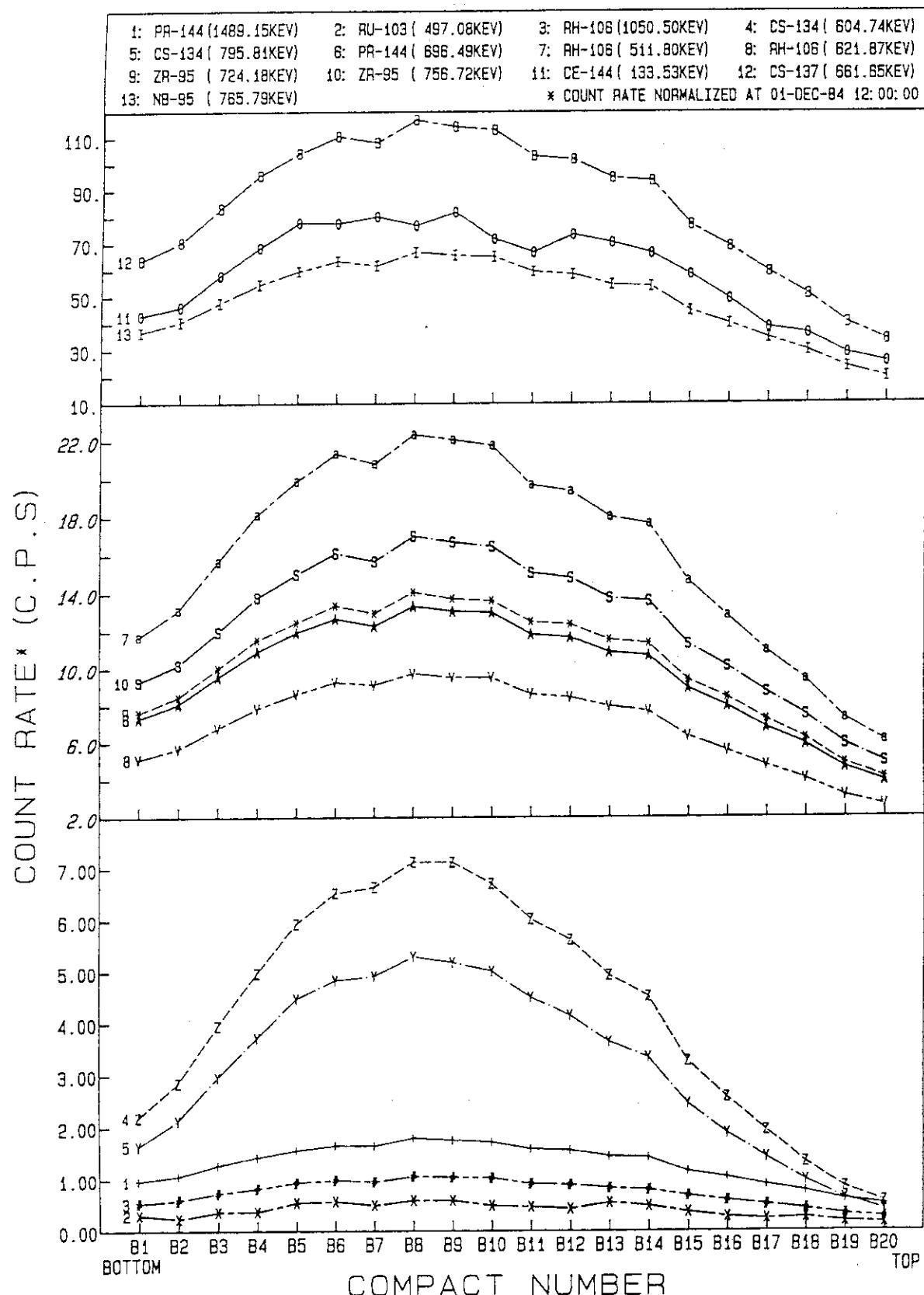


Fig.A5.C3 Fission product inventory in fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 2). The compacts were not rotated during activity measurement.

HL-904 81LF-21A COMPACT COUNT RATE

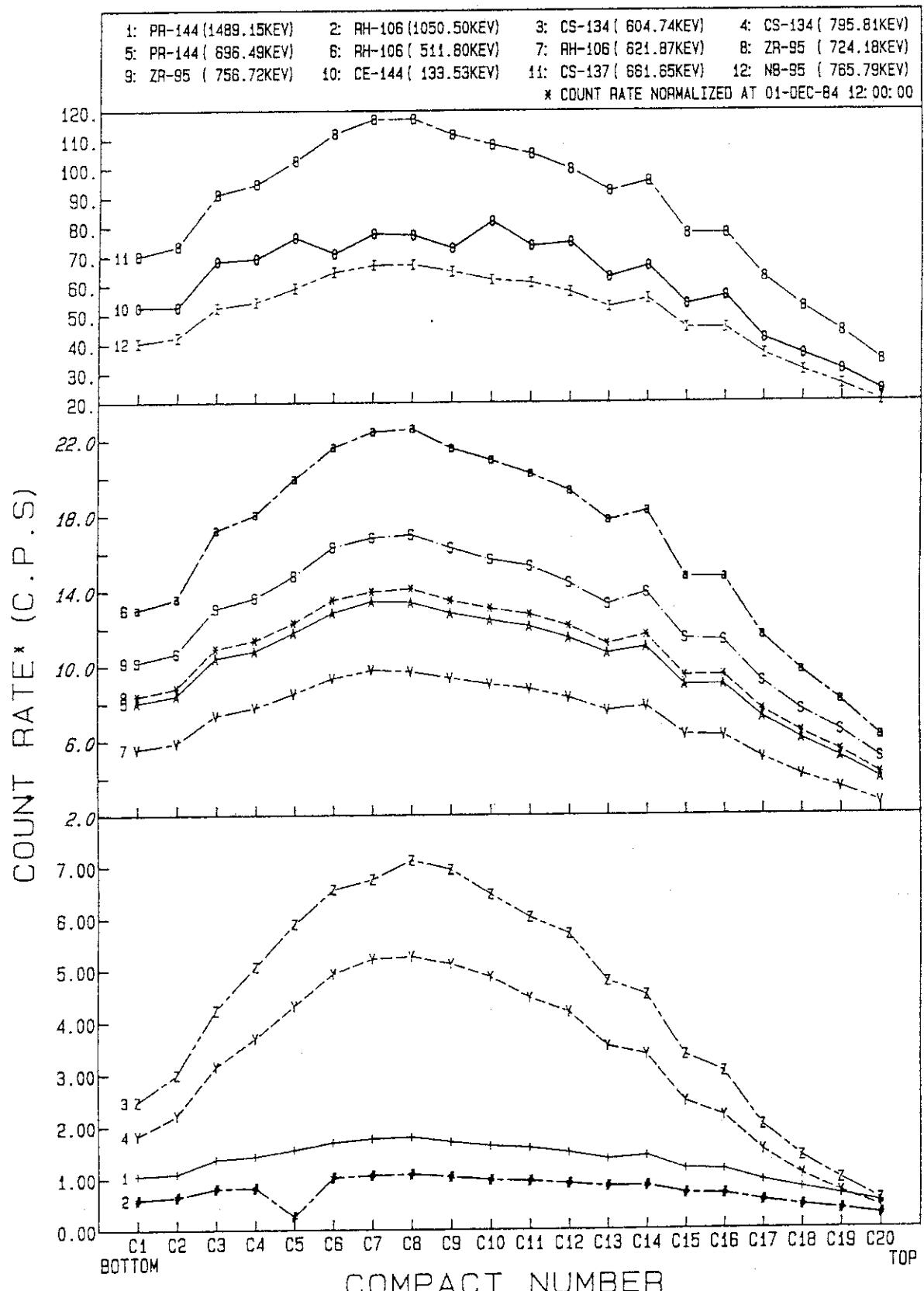


Fig.A5.C4 Fission product inventory in fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 3). The compacts were not rotated during activity measurement.

OGL-1 9th Fuel Compact

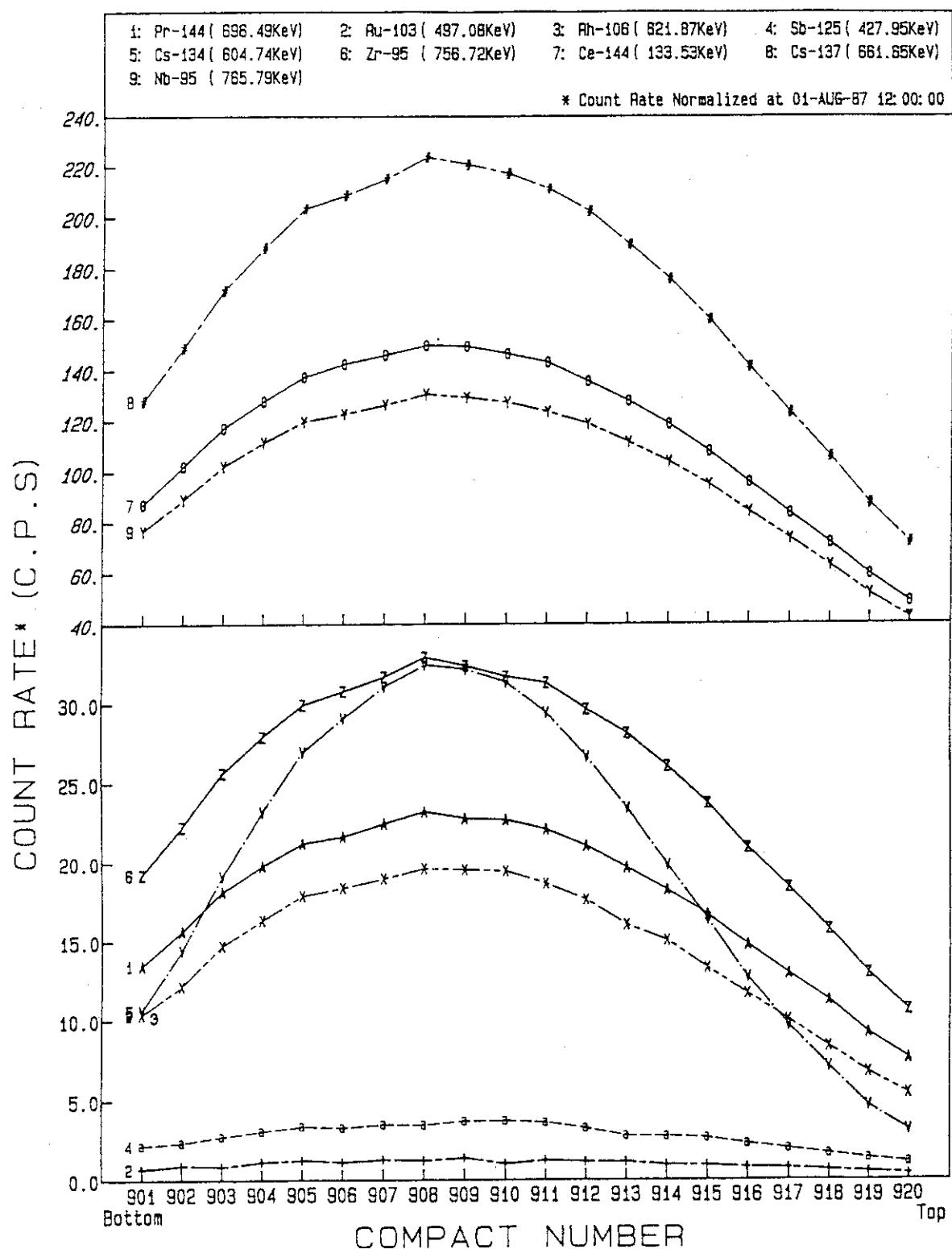


Fig. A5.C5 Fission product inventory in fuel compacts of the 9th OGL-1 fuel assembly.
 The compacts were rotated during activity measurement.

OGL-1 10th Fuel Compact

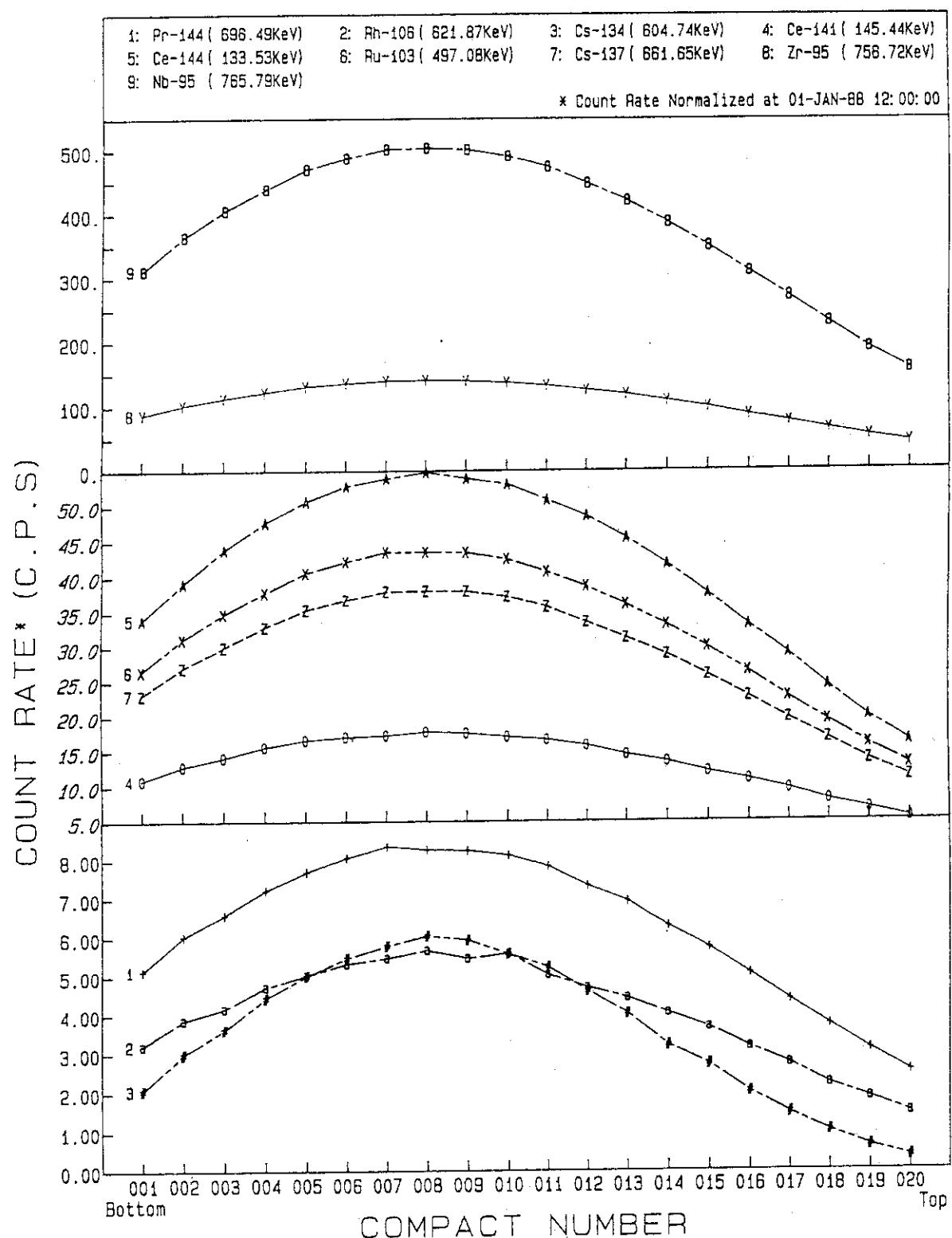


Fig.A5.C6 Fission product inventory in fuel compacts of the 10th OGL-1 fuel assembly.
The compacts were rotated during activity measurement.

付録5 D 燃料コンパクト断面のEPMA観察

1. はじめに

本付録では、本文5.3.6項に述べたEPMA観察を行った第12次燃料体の燃料コンパクトのうち、熱電対シース溶融位置に装荷された燃料コンパクト870P1-15についての観察結果について述べる。観察においては、燃料コンパクトの外周部および内周部から代表的な被覆燃料粒子を選び、SiC層の損傷部分について元素分析を行った。

2. 観察結果および考察

EPMA観察結果を、Photo.A5.D1およびPhoto.A5.D2に示す。両者ともに、SiC層の腐食が明瞭に観察された。腐食領域についての元素分析の結果では、SiのほかにNiが明瞭に検出された。腐食領域内では、測定箇所によってはFeおよびCrも検出された。

熱電対シース材であるインコネル-600には、Ni、FeおよびCrがそれぞれ76.0、8.0、および15.5wt%含まれている。このことから、検出されたNi、Fe、Crは、熱電対シース材の溶融(文献(1)の付録1参照)により、燃料コンパクト内面側から黒鉛マトリックス中を移行し、さらに被覆燃料粒子のOPyC層を透過して、SiC層を外面側から腐食させたものと考えることができる。Photo.A5.D1およびPhoto.A5.D2からわかるように、NiはSiC層内部(肉厚部)およびSiC層内面側でも検出されている。すなわち、両図とともに、NiはSiC層を透過していることから、観察した被覆燃料粒子はSiC層破損に至っているものと推定される。また、Photo.A5.D1のように、燃料コンパクトの外周部においても、NiとSiC層との腐食反応が顕著に見られることから、Niは黒鉛マトリックス中を容易に移行することができたものと考えることができる。

SiC層のNi、Fe等の金属元素による腐食は、Minatoらによって観察されており、黒鉛マトリックス中において炭化物(Ni_3C 、 Fe_3C)として存在するよりも、SiCとの反応によりケイ化物($NiSi$ 、 $FeSi$)を生成するほうが安定であることが、熱力学的評価によって示されている⁽²⁾。

参考文献

- (1) 林 君夫、福田幸朔、鶴田晴通、菊池輝男、“第11次および第12次OGL-1燃料体の黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロック中の核分裂生成物分布”, JAERI-M 94-075 (1994).
- (2) K. Minato, T. Ogawa, S. Kashimura, K. Fukuda, M. Shimizu, Y. Tayama and I. Takahashi, “Metallic impurities-silicon carbide interaction in HTGR fuel particles”, J. Nucl. Mater. 175 (1990) 14.

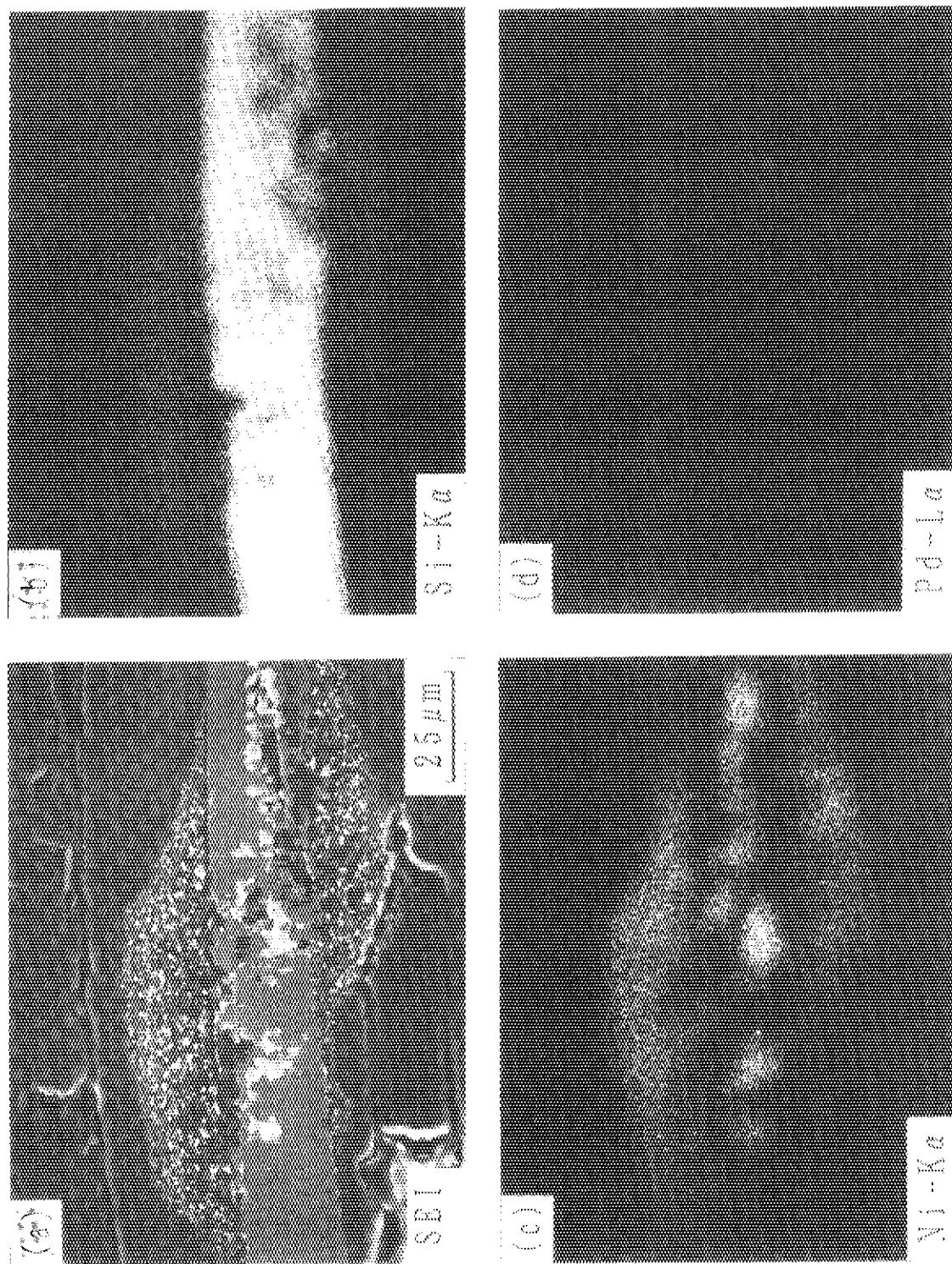


Photo. A5.D1 Secondary electron image (SEI) and Si-K α , Ni-K α and Pd-L α X-ray displays of coating layers at the outer-surface region of compact 15 [87 OP1-15], which was loaded at the melted thermocouple sheath position of the fuel rod of the 12th 0GL-1 fuel assembly.

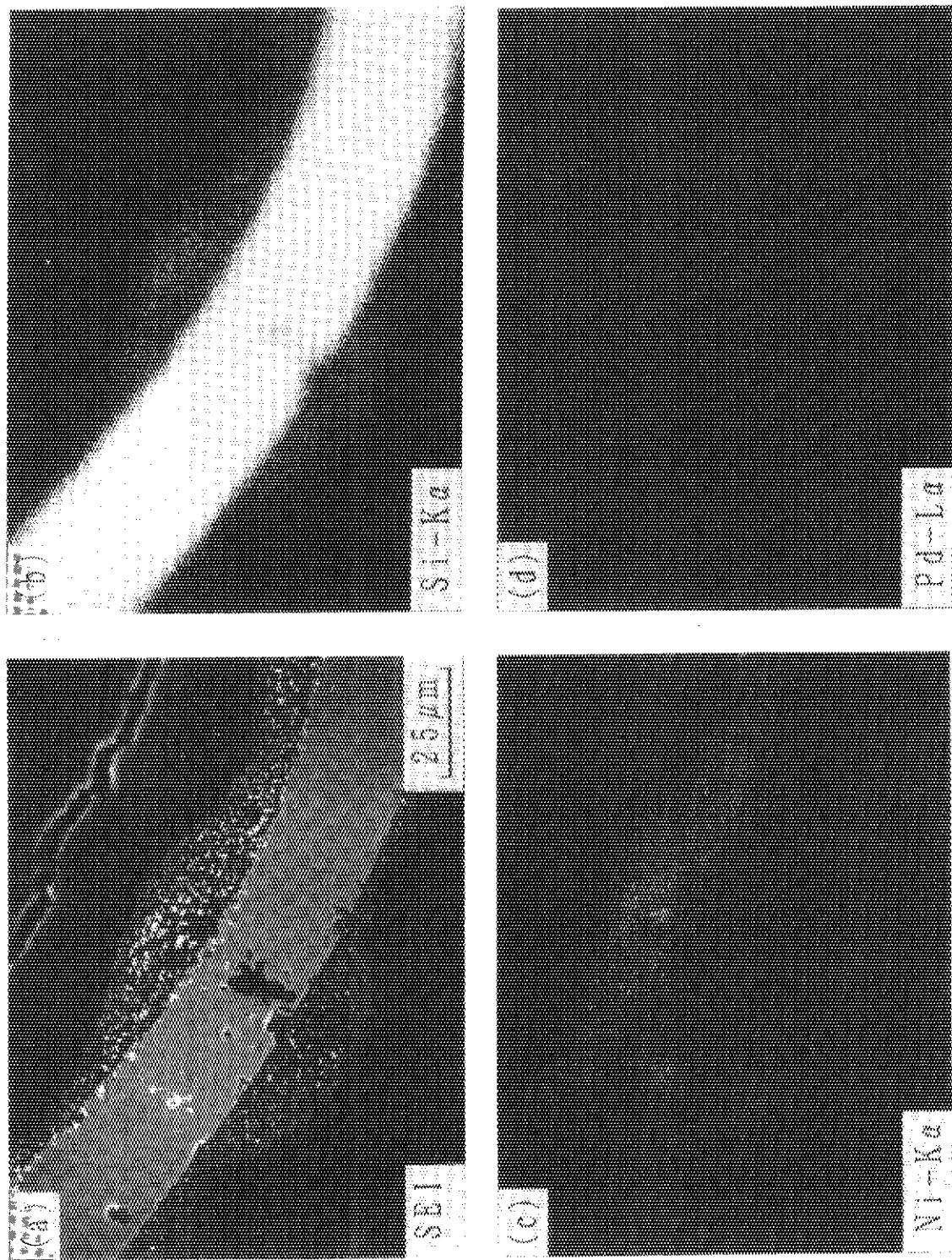
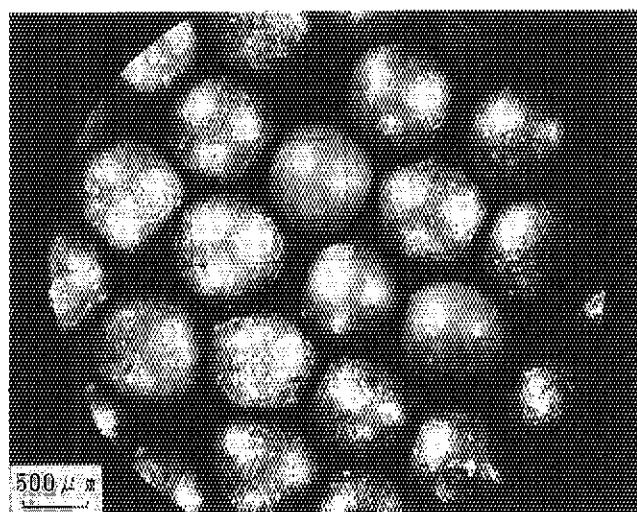


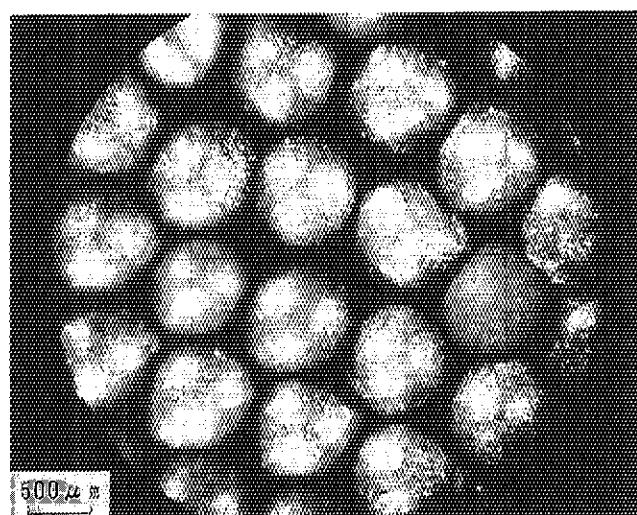
Photo A5.D2 Secondary electron image (SEI) and Si-K α , Ni-K α and Pd-L α X-ray displays of coating layers at the inner-surface region of compact 15 [87 OP1-15], which was loaded at the melted thermocouple sheath position of the fuel rod of the 12th OGL-1 fuel assembly.

付録5 E 被覆燃料粒子の外観写真およびX線ラジオグラフ

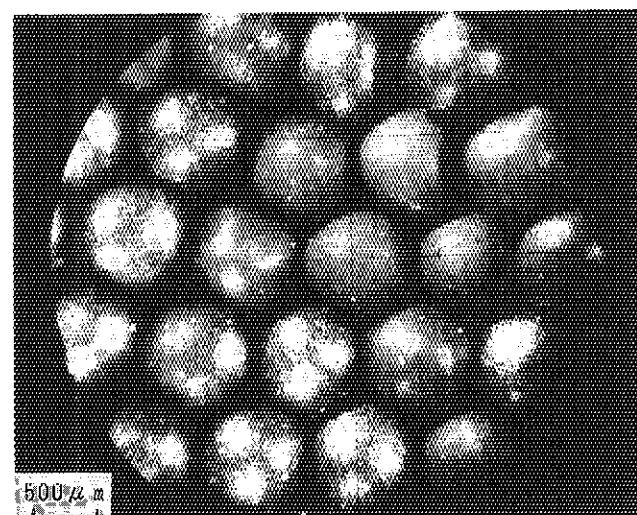
第6次燃料体の被覆燃料粒子の外観写真をPhoto.A5.E1に、X線ラジオグラフを Photo. A5.E2に示す。また、第7次燃料体の被覆燃料粒子の外観写真をPhoto.A5.E3に、X線ラジオグラフをPhoto.A5.E4に示す。



(a) Compact 1
[80 OP1-01]
(59 Jr-85)

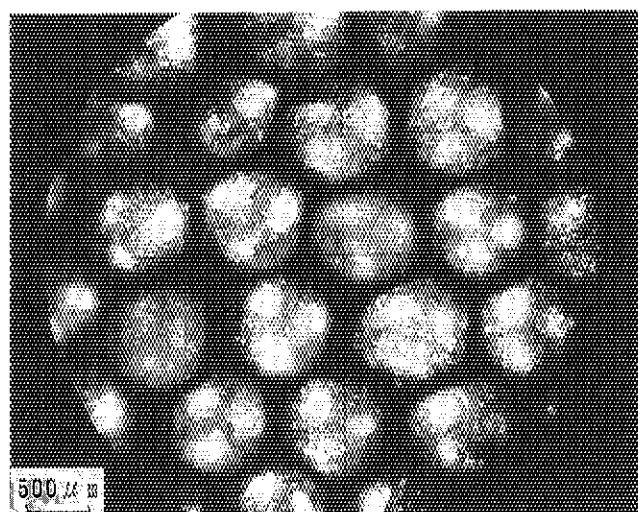


(b) Compact 5
[80 OP1-05]
(59 Jr-90)

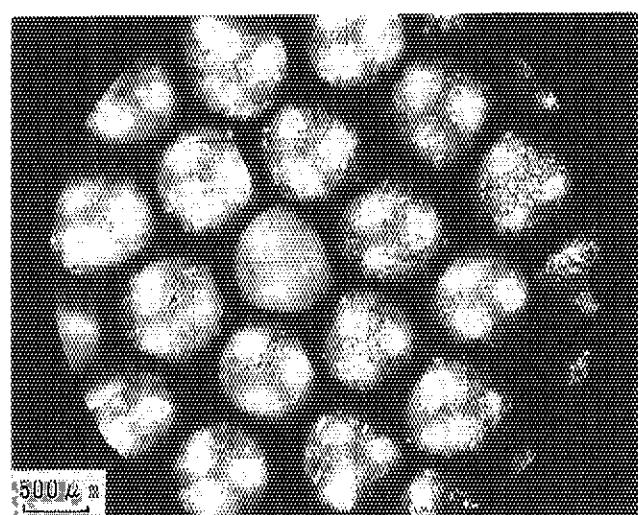


(c) Compact 9
[80 OP1-09]
(59 Jr-95)

Photo. A5.E1 Surface appearance of coated fuel particles sampled from deconsolidated fuel compacts of the 6th OGL-1 fuel assembly.

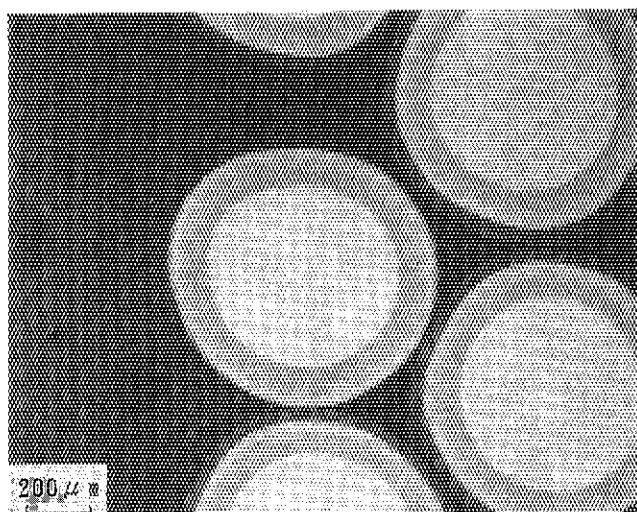


(d) Compact 14
[80 OP1-14]
(59 Jr-100)

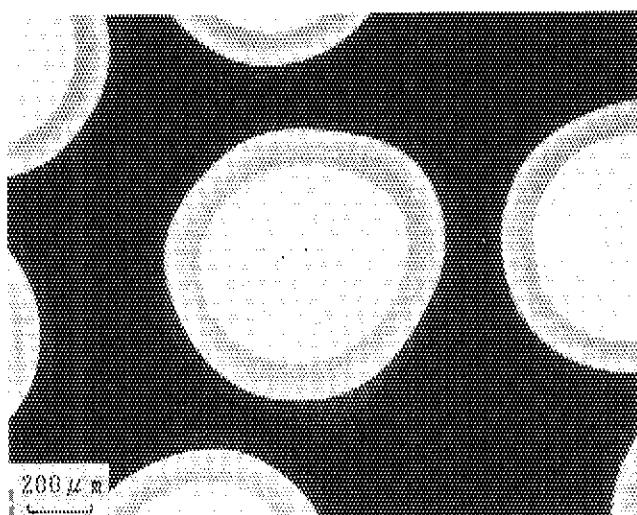


(e) Compact 20
[80 OP1-20]
(59 Jr-105)

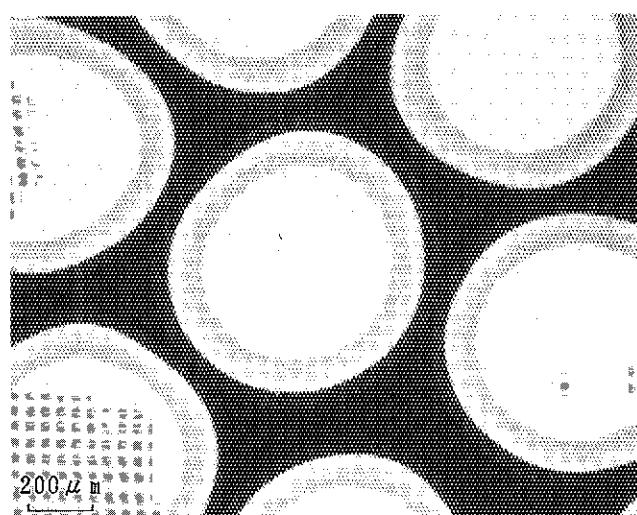
Photo. A5.E1 Continued.



(a) Compact 1
[80 OP1-01]
(59 Jr-613)

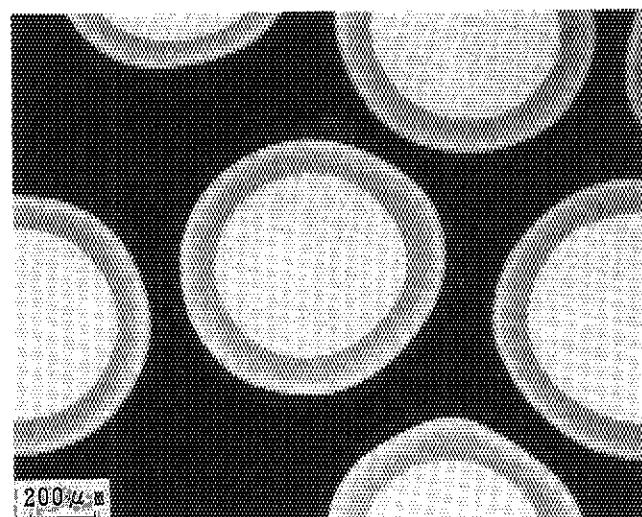


(b) Compact 5
[80 OP1-05]
(59 Jr-617)

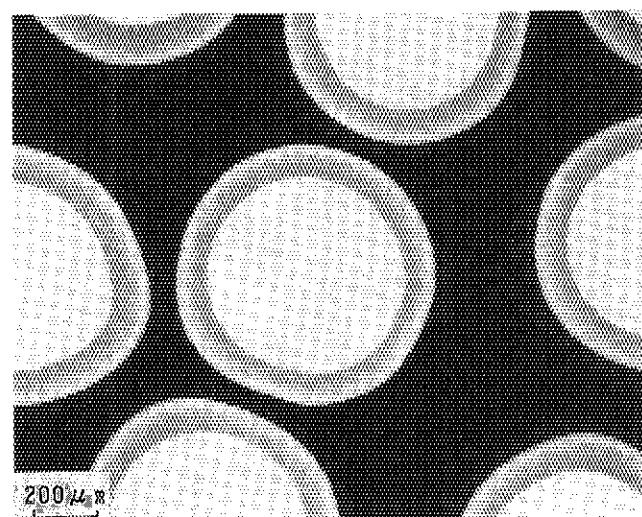


(c) Compact 9
[80 OP1-09]
(59 Jr-622)

Photo. A5.E2 X-ray radiographs of coated fuel particles sampled from deconsolidated fuel compacts of the 6th OGL-1 fuel assembly.

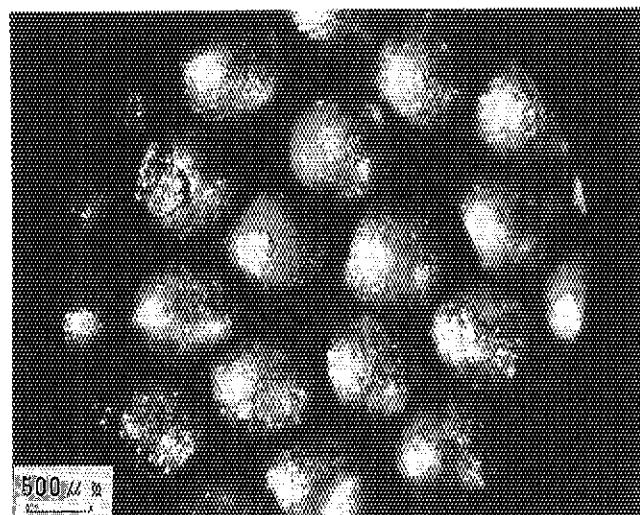


(d) Compact 14
[80 OP1-14]
(59 Jr-626)

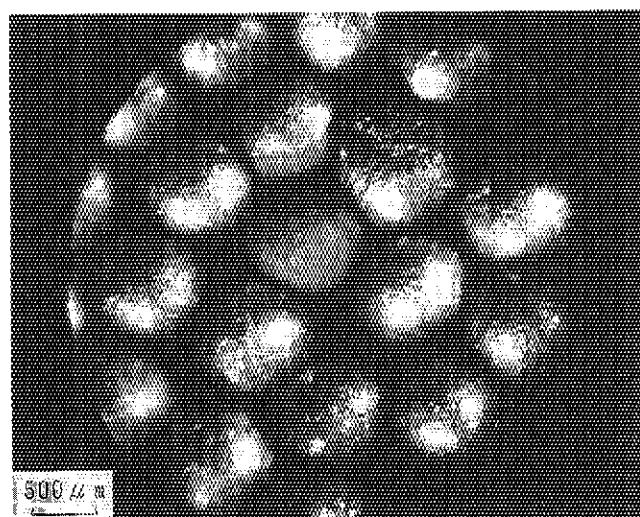


(e) Compact 20
[80 OP1-20]
(59 Jr-631)

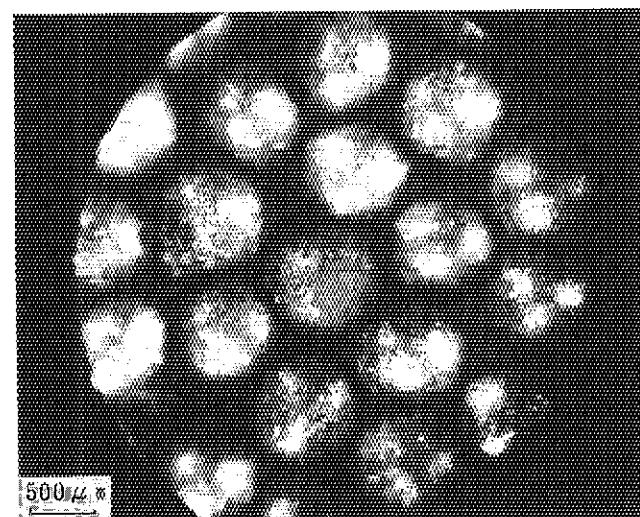
Photo. A5.E2 Continued.



(a) Compact 1
[81 OP1-01]
(60 Jr-243)

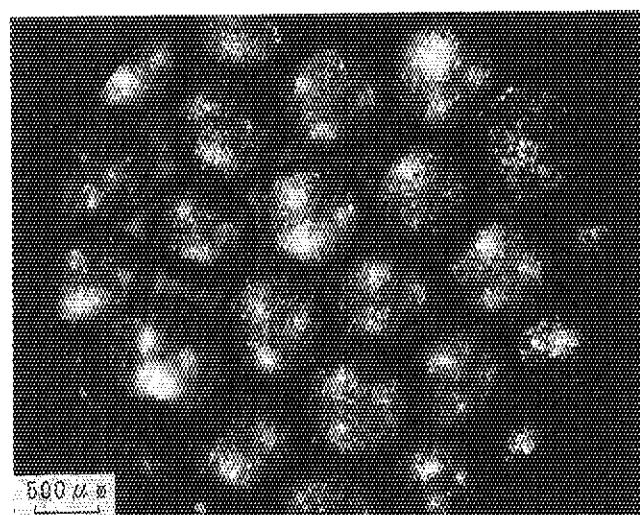


(b) Compact 5
[81 OP1-05]
(60 Jr-249)

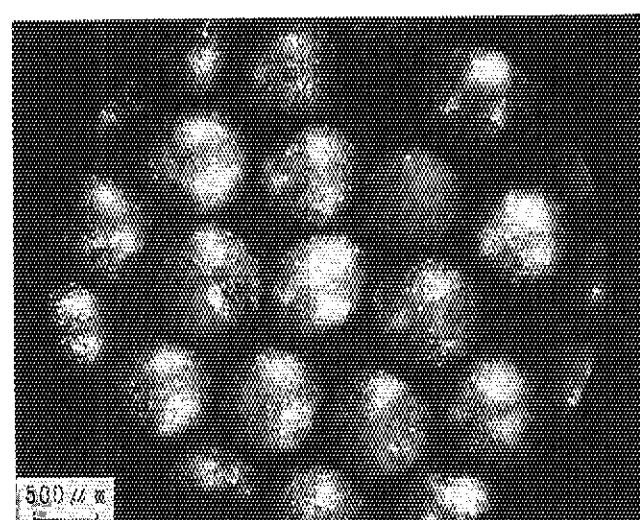


(c) Compact 9
[81 OP1-09]
(60 Jr-255)

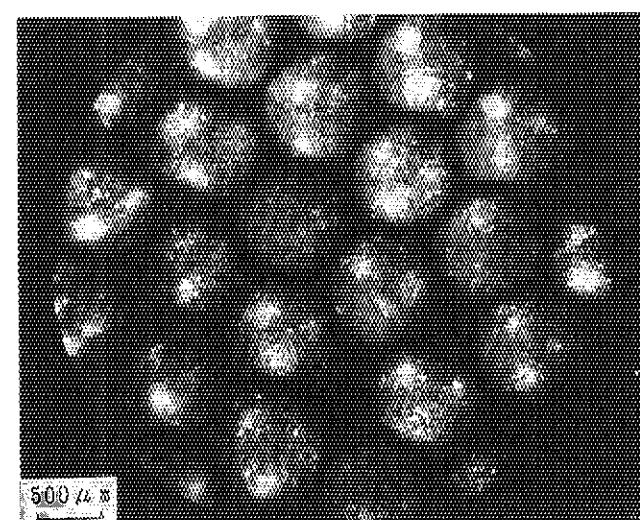
Photo. A5.E3 Surface appearance of coated fuel particles sampled from deconsolidated fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1).



(d) Compact 2-1
[81 OP2-01]
(60 Jr-162)

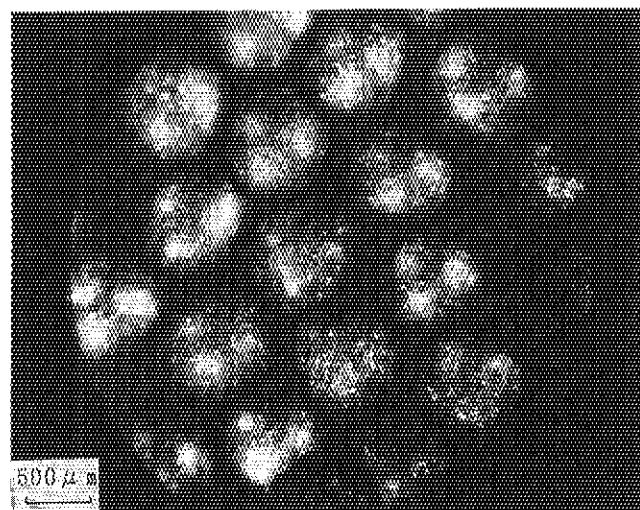


(e) Compact 2-5
[81 OP2-05]
(60 Jr-167)

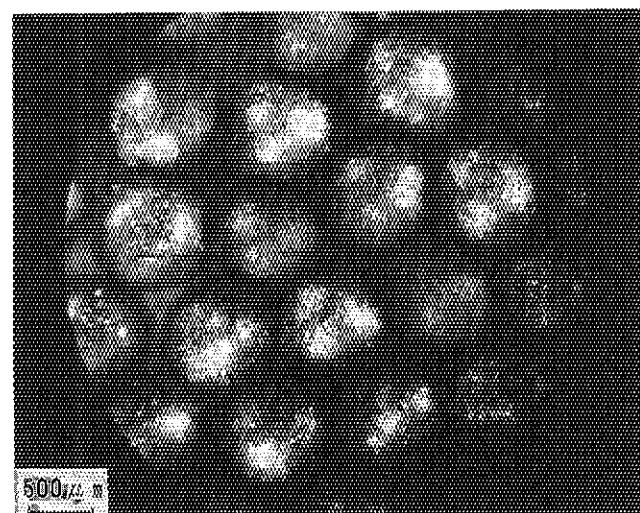


(f) Compact 2-9
[81 OP2-09]
(60 Jr-172)

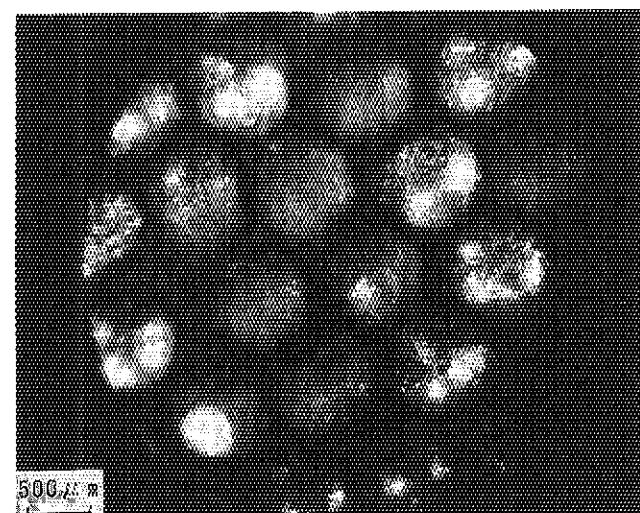
Photo. A5.E3 Continued (rod 2).



(g) Compact 3-1
[81 OP3-01]
(60 Jr-264)

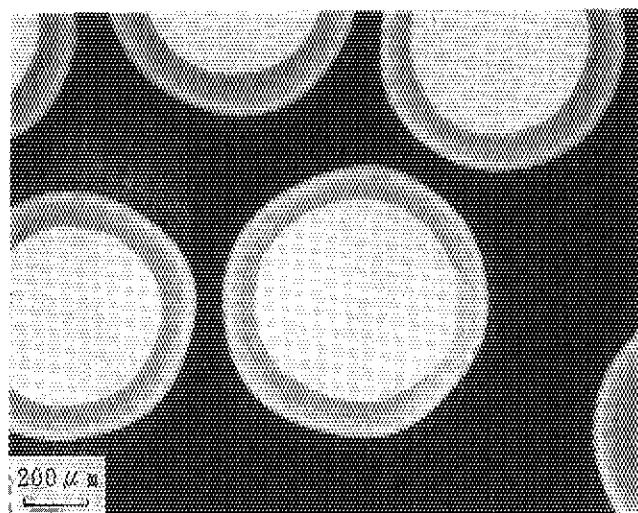


(h) Compact 3-5
[81 OP3-05]
(60 Jr-270)

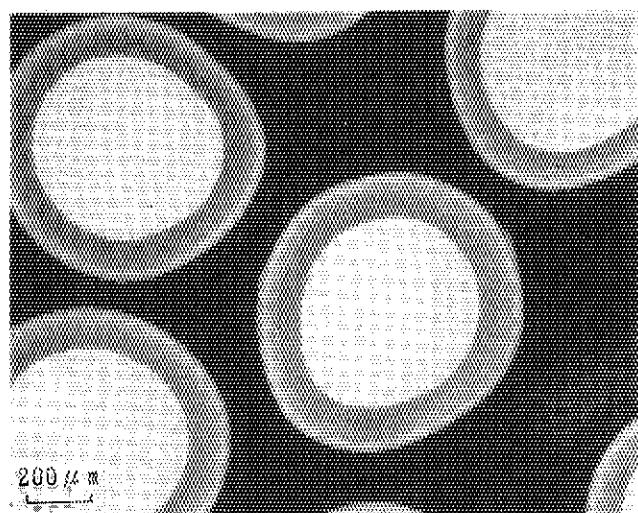


(i) Compact 3-9
[81 OP3-09]
(60 Jr-276)

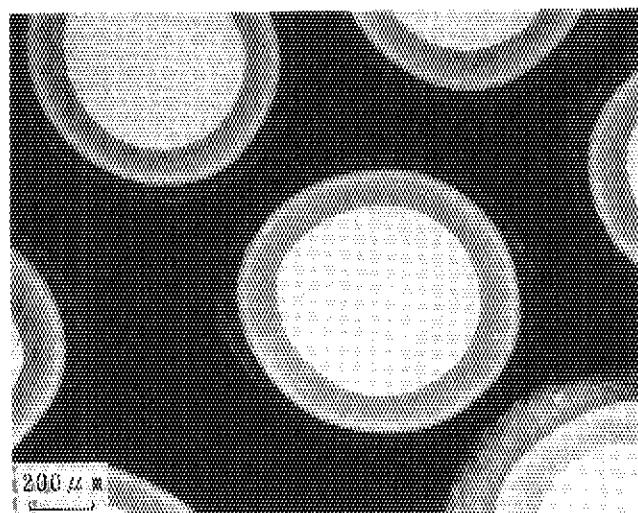
Photo. A5.E3 Continued (rod 3).



(a) Compact 1-1
[81 OP1-01]
(61 Jr-14)

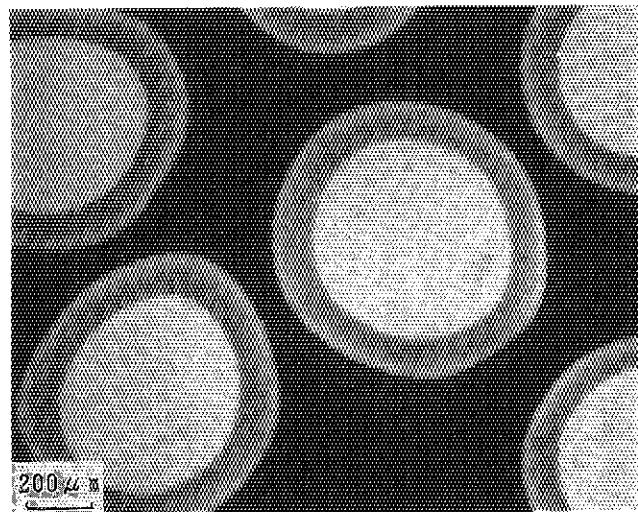


(b) Compact 1-5
[81 OP1-05]
(61 Jr-15)

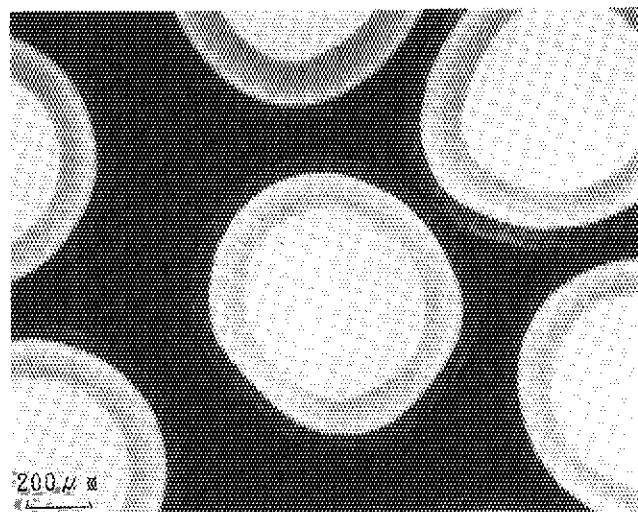


(c) Compact 1-9
[81 OP1-09]
(61 Jr-18)

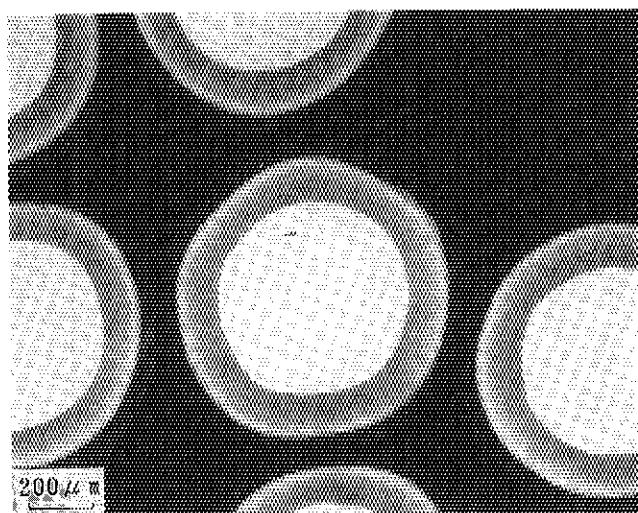
Photo. A5.E4 X-ray radiographs of coated fuel particles sampled from deconsolidated fuel compacts of the 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1).



(d) Compact 2-1
[81 OP2-01]
(61 Jr-20)

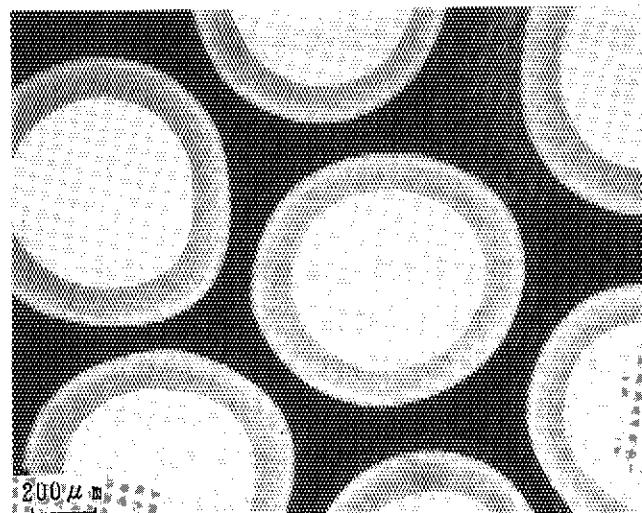


(e) Compact 2-5
[81 OP2-05]
(61 Jr-22)

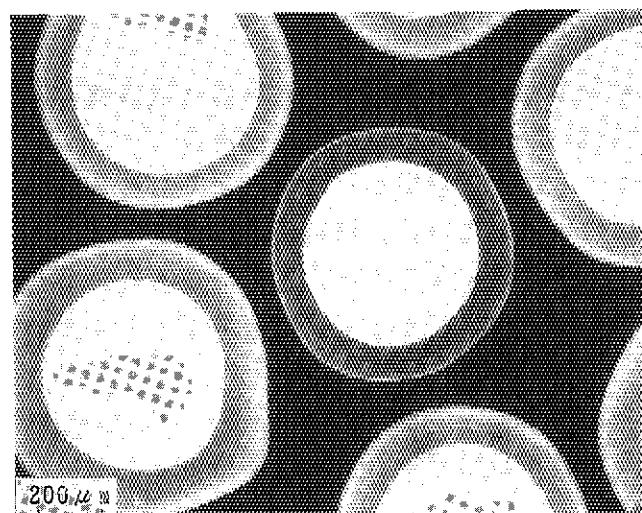


(f) Compact 2-9
[81 OP2-09]
(61 Jr-24)

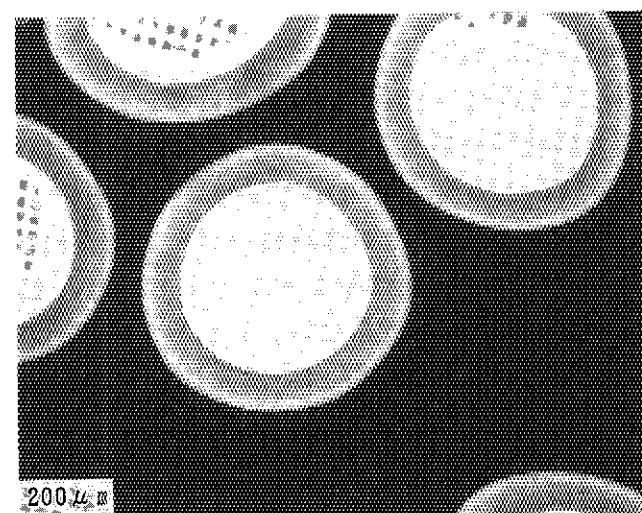
Photo. A5.E4 Continued (rod 2).



(g) Compact 3-1
[81 OP3-01]
(61 Jr-27)



(h) Compact 3-5
[81 OP3-05]
(61 Jr-29)



(i) Compact 3-9
[81 OP3-09]
(61 Jr-31)

Photo. A5.E4 Continued (rod 3).

付録5 F 貫通破損率およびSiC層破損率の測定方法、ならびに測定結果の統計的処理方法

1. 貫通破損率の測定方法

燃料コンパクト中の被覆燃料粒子の貫通破損率は、未照射、照射済み試料とともに電気化学的解碎－硝酸浸出法⁽¹⁻³⁾によって測定した。

未照射試料については、電気化学的に解碎した後、7規定の硝酸水溶液中に浸漬し、20時間煮沸して、浸出したウランをウラン蛍光法⁽⁴⁾によって定量した。

照射済み試料についても、同様な方法で浸出率を求めた。ただし、ウランのかわりに、核分裂生成物(FP)の浸出率をガンマ線スペクトル分析することによって求めた。浸出核種としては、¹⁴⁴Pr(¹⁴⁴Ceと放射平衡にある)を選んだ。これは、以下の理由によるものである。

①¹⁴⁴Ceは、照射済みTRISO被覆粒子の燃料核と被覆層への分配挙動⁽⁵⁾、および熱分解炭素被覆粒子(BISO)からの放出挙動^(6, 7)から考えて、貫通破損していない被覆粒子からは殆ど放出されないと考えられる。

②貫通破損粒子においても燃料核、被覆層および黒鉛マトリックス中に良く保持され、燃料コンパクトの外に移行することは考えられないため、燃料コンパクトの電気化学的解碎－硝酸浸出によって、破損粒子中のほぼ全量が回収されると考えられる。

なお、¹³⁷Csについては照射中に貫通破損粒子から相当放出され、さらに燃料コンパクト外へと移行するため、浸出核種としては不適当であることがわかっている⁽⁸⁾。

2. SiC層破損率の測定方法

(1) 照射前SiC層破損率の測定方法

燃料コンパクト中の被覆燃料粒子のSiC層破損率は、燃焼－硝酸浸出法⁽³⁾によって測定した。これは、被覆燃料粒子を空气中で加熱することによってOPyC層を燃焼除去し、その被覆燃料粒子を加温した硝酸水溶液中に浸漬することによって、SiC層が破損している被覆燃料粒子(SiC層破損粒子)中の燃料核のウランを浸出する方法である。

被覆燃料粒子を空气中で加熱しOPyC層を燃焼除去しても、健全なSiC層を持つ被覆燃料粒子(健全SiC層粒子)は破損には至らない。しかし、SiC層が破損しクラックが生じている粒子では、空気中の酸素が被覆粒子内に侵入し、バッファ層およびIPyC層が酸化されるとともに、UO₂燃料核が酸化されて、U₃O₈に変わる。この時、結晶構造が変化し、それに伴って燃料核は体積膨張を起こすため、SiC層のクラックが小さい場合でもクラックは拡大し、バッファ層およびIPyC層の燃焼除去と燃料核の酸化が進行すると考えられている。この状態で被覆粒子を硝酸水溶液中で加熱すれば、SiC層破損粒子中のウランは硝酸水溶液中に浸出される。浸出したウランを蛍光分析法等で定量することに

よって、ウランの浸出率、すなわち浸出量と試料の全ウラン量の比を求める。このようにして得られたウラン浸出率をSiC層破損率とする。

(2) 照射後SiC層破損率の測定方法⁽⁸⁻¹²⁾

照射済みの被覆燃料粒子についても、原理的には未照射の場合と同じ燃焼-酸浸出法によってSiC層破損率を求めた。

試料としては、照射済み燃料コンパクトの電気解碎および酸浸出を約7規定の硝酸水溶液中で行った後の被覆粒子を用いた。そして、850°C、6時間の空気酸化を施した。空気酸化に用いた石英製燃焼管をFig.A5.F1に示す。空気酸化の後の被覆粒子試料は、7規定の硝酸水溶液中で6時間煮沸加熱することによって、SiC層破損粒子中の燃料核のFPを硝酸水溶液中に浸出した。この硝酸浸出液を分取し、ガンマ線スペクトル分析法でFPを定量することによって、全粒子中のFP放射能との比を求めた。このFP浸出率をもって、FP浸出法によるSiC層破損率とした。

また、燃焼・酸浸出の前後に被覆粒子のX線ラジオグラフを撮ることによってSiC層破損粒子数を求め、全粒子数で除す方法(粒子計数法)によっても、SiC層破損率を求めた。

3. 測定結果の統計的処理方法

サンプリングによって得た被覆燃料粒子の破損率の実測値から、母集団の破損率を推定する方法は、小川ら⁽¹³⁾によって示された。ここでは、小川らの方法をもとに、照射済み燃料コンパクト、およびそれと同一製造バッチの未照射燃料コンパクトの破損率測定の結果から、照射前後で有意な破損率上昇が生じているか否かを統計的に推定する方法について検討する。

(1) 破損率の区間推定⁽¹³⁾

母集団の破損率pが未知の場合を考え、一度のサンプリングにおいて、全粒子数Nのうちr個の破損粒子を検出したとする。このとき、サンプルの破損率p_sは、

$$p_s = r/N \quad (1)$$

で与えられる。

次に、得られた破損粒子数rから母集団の破損率pを区間推定する方法を考える。一般的の場合、すなわち全試料粒子数Nまたは破損粒子数x(変数)が十分大きくない場合を含む一般的な場合には、

$$n_1 = 2(r+1) \quad (2)$$

$$n_2 = 2(N-r+1) \quad (3)$$

$$F = n_2 p / n_1 (1-p) \quad (4)$$

と置くと、Fは自由度n₁、n₂のF分布に従う。F分布の2.5%の点をF=F₁とすると、これに対応するpの値p₁(上限値)は、(4)式より

$$p_1 = n_1 F_1 / (n_1 F_1 + N_2) \quad (5)$$

となり、そしてp>p₁となる確率は2.5%となる。同様に、下限値については

$$n_1' = 2(N-r+1) = n_2 \quad (6)$$

$$n_2' = 2(r+1) = n_1 \quad (7)$$

$$F' = n_2'(1-p)/n_1'p \quad (8)$$

とし、F分布の2.5%の点を $F'=F_2$ とする。対応するpの値 p_2 (下限値)を

$$\begin{aligned} p_2 &= n_2'/(n_1'F_2+n_2') \\ &= n_1/(n_2F_2+n_1) \end{aligned} \quad (9)$$

とすれば、 $p < p_2$ となる確率は2.5%となる。母集団の破損率の95%信頼度における信頼区間は $p_2 < p < p_1$ となる。

(2) 計算例

具体的計算例をあげると、本文Table 5.4aの第6次燃料体の未照射燃料コンパクトについては、貫通破損率(露出ウラン率)は $p_0=5.1 \times 10^{-5}$ であるから、サンプルの粒子総数 $N=36000$ に対して、破損粒子相当数は $p_0 \times N=1.8$ 粒となる。破損粒子数rは整数であることから、破損粒子相当数の小数点以下を四捨五入して、 $r=2$ とした。

このとき、(2)～(5)式および(8)(9)式より

$$n_1 = 2 \times (2+1) = 6$$

$$n_2 = 2 \times (36000-2+1) = 71998$$

$$F_1 = 2.41$$

$$F_2 = 4.85$$

$$P_1 = 2.0 \times 10^{-4}$$

$$P_2 = 1.7 \times 10^{-5}$$

である。ゆえに、95%信頼度において、真の破損率pは

$$1.7 \times 10^{-5} < p < 2.0 \times 10^{-4}$$

となる。

F分布の2.5%の点を求めるには、原研の大型計算機で使用可能な原研版・科学用サブルーチン・ライブラリJSSL⁽¹⁴⁾を用いた。F分布のパーセント点を求めるサブルーチンFPNT(N1, N2, Q, EPS, F)を用いて、自由度(0または自然数)をN1, N2とし、上側確率Q(両側で95%信頼区間を求める場合には、Q=0.025)、要求精度(例えば1.0D-14)を入力することによって、F分布の2.5%点Fが求められる。ただし、入力値(N1, N2)によっては発散して、F分布のパーセント点が求められないことがある。この場合には、F分布表⁽¹⁵⁾を用いた。

(3) 上記の方法の適用とその妥当性

本文5.4.2項および5.4.3項では、未照射および照射済みの燃料コンパクトの被覆燃料粒子の貫通破損率またはSiC層破損率の測定値から、照射前後の95%信頼区間を求め、両区間の重なりを調べることによって、有意な破損率上昇が生じたか否かを推定した。この方法の妥当性を、SiC層破損率と貫通破損率の場合に分けて検討する。

(i) SiC層破損率

照射前においては、サンプリングした燃料コンパクトの破損率を用いて、母集団の破

損率を95%信頼度において区間推定する。OGL-1燃料の製造の場合、全部で30個以上の燃料コンパクトが製造される。そのうち、サンプリングする燃料コンパクト個数は5個程度である。燃料コンパクト1個あたりの被覆燃料粒子数は燃料コンパクトの寸法等によるが、 10^4 粒程度である。燃料製造は、同様に確からしい条件で行われると考えることができるために、照射前においては、30個以上の燃料コンパクト分の粒子(総数は 3×10^5 粒以上)の母集団を考えることができる。破損率の値が 10^{-4} 程度であれば、母集団、サンプルともに粒子数は十分であり、母集団は無限大の大きさ(無限大の粒子数)を有するものと仮定することができる。

その母集団から抜き取った燃料コンパクトについて照射を行い、照射後においては、燃料コンパクトの電気化学的解碎によって得た全粒子のうちから、サンプリングによって破損率を求める。照射後は、燃料コンパクトごとに照射条件(温度、燃焼度等)が異なると考えるべきであり、照射後の母集団(対象燃料コンパクト中の全粒子の集団)の破損率を95%信頼度において区間推定する。

この時、母集団である各燃料コンパクトの粒子数は 10^4 程度であるため、 10^{-4} 程度の破損率に対しては、母集団の粒子数は必ずしも多くはない。しかし、母集団として、仮想的に、製造した全ての燃料(製造時の母集団全体)を照射し、そのうちからサンプリングによって得た解碎粒子の破損率を求めて、仮想的な母集団の破損率の区間推定を行うものと考えることができる。照射前後の破損率の増加を問題にする場合、必ずしも、有限母集団で比較する必要はなく、上述のような無限大の大きさを持つ母集団を考えるほうが、統計的取り扱いは容易である。

以上の仮定のもとに、照射前後の破損率の95%信頼区間を求め、照射後破損率の95%信頼区間が照射前破損率の95%信頼区間より高い側にあり、かつ分離している時、95%信頼度において、破損率の有意な上昇が生じたと考えることは妥当である。

(ii) 貫通破損率

貫通破損率の場合にも、製造時の破損率測定のためのサンプリング等は、SiC層破損率の場合と同様であり、無限大の大きさを持つ仮想的な母集団を考えて、区間推定も同様に行うことができる。

照射後については、燃料コンパクトの電気化学的解碎によって得た被覆燃料粒子の全数を用いて、破損率測定を行う。すなわち、サンプリングによって母集団の破損率を区間推定するという方法は、みかけ上は採用していない。しかし、この場合にも、仮想的に無限大の大きさを持つ製造時の被覆燃料粒子の母集団が照射されたと考えれば、SiC層破損率の場合と同様に、照射後も無限大母集団への区間推定を行って、照射による破損率の有意な増加が生じたか否かを判定することができる。

(iii) 別の考え方

上記(ii)とは別に、貫通破損率については、照射後は全数測定となるので、統計的評価を行う必要はないと考える立場もありうる。この立場では、仮に、製造時のサンプルの破損率測定値から未照射母集団だけでなく、照射後破損率を測定する当該燃料コンパ

クトの照射前破損率が区間推定できれば、当該燃料コンパクトについて、照射前の区間推定値と照射後の測定値(決定値)を比較することによって、照射による破損率の有意な増加が生じたか否かを判定することができるうことになる。

しかしながら、未照射燃料のサンプリングから得た母集団の破損率とその区間推定値を用いて、母集団から(照射用に)改めて抜取った試料(有限集団となる)の、照射前破損率の区間推定をさらに行なうことは、必ずしも容易ではないと考えられる。ちなみに、改めて抜取った試料の破損率の95%信頼区間は、試料の粒子数が十分大きい場合には、母集団の95%信頼区間で近似できると考えられるが、破損率が低く、試料の粒子数が十分大きくない場合(例えば 10^4 程度の粒子数に対して、破損率が $<10^{-4}$ の場合)には、近似は難しくなると考えられる。その理由の1つとしては、破損粒子数の離散性の影響が大きくなることが考えられる。

(4) まとめ

以上の考察により、上記(1)(2)、および(3)の(i)(ii)に示した方法によって、貫通およびSiC層破損率の照射による增加の有意性に関して、妥当な評価が行えることが示された。

参考文献

- (1) 飛田 勉、岩本多実、“酸浸出法によるペレット中の被覆燃料粒子の破損率測定”、JAERI-M 5265 (1973).
- (2) 小林紀昭、福田幸朔、“高温ガス炉用燃料コンパクトの電気解砕－硝酸浸出法による露出ウラン率検査法”、JAERI-M 87-023 (1987).
- (3) 小林紀昭、小倉浩一、小川徹、福田幸朔、“高温ガス炉用量産試作燃料コンパクトの露出ウラン率およびSiC層破損率の検査”、JAERI-M 88-265 (1988).
- (4) 赤石 準、矢部 明、“固体蛍光法によるウランの定量法”、JAERI-memo 3622 (公開) (1969).
- (5) T.Ogawa, K.Fukuda, H.Sekino, M.Numata and K.Ikawa, “Release of metal fission products from UO₂ kernel of coated fuel particle”, J. Nucl. Mater. 135 (1985) 18.
- (6) K. Hayashi and K. Fukuda, “Release behavior of metallic fission products from pyrocarbon-coated uranium-dioxide particles at extremely high temperatures”, J. Nucl. Sci. Technol. 27 (1990) 320.
- (7) K. Hayashi and K. Fukuda, “Diffusion coefficients of fission products in the UO₂ kernel and pyrocarbon layer of BISO-coated fuel particles at extremely high temperatures”, J. Nucl. Mater. 174 (1990) 35.
- (8) K. Fukuda, K. Minato, K. Ikawa, T. Itoh and H. Matsushima, “Detection of failed coated fuel particles in HTGR fuels by acid leaching”, J. Nucl.

Sci. Technol. (Tokyo) 18 (1981) 887.

- (9) 松島秀夫、関野甫、菊池輝男、糸永文雄、伊藤忠春、石本 清、福田幸朔、小林紀昭、“照射済被覆燃料粒子のSiC破損率測定試験”、日本原子力学会昭和58年秋の分科会、1983年9月、北大、G9.
- (10) 菊池輝男、関野 甫、沼田正美、松島秀夫、石本 清、福田幸朔，“照射済被覆燃料粒子のSiC破損率測定試験(II)”、日本原子力学会昭和61年年会、1986年、3月、京大、F38.
- (11) 菊池輝男、関野 甫、沼田正美、松島秀夫、足立 守、林 君夫、“照射済被覆燃料粒子のSiC層破損率の測定法の開発”，原研未公開所内報（1987）。
- (12) 林 君夫、菊池輝男、松島秀夫、関野 甫、沼田正美、小林紀昭、飛田 勉、鹿志村悟、福田幸朔、“照射済み被覆燃料粒子のSiC層破損率”，原研未公開所内報（1992）。
- (13) 小川徹、井川勝市、“被覆燃料粒子のSiC層破損率の統計的検討”，JAERI-M 83-051 (1983).
- (14) 藤村統一郎、筒井恒夫編、“JSSL(原研版・科学用サブルーチン・ライブラリ)マニュアル(第4版)”, JAERI-M 92-121 (1992) p.151.
- (15) Z.Yamauchi ed., Statistical Tables and Formulas with Computer Applications, Japanese Standards Assoc., 1972, Tokyo, Japan, B2.1.

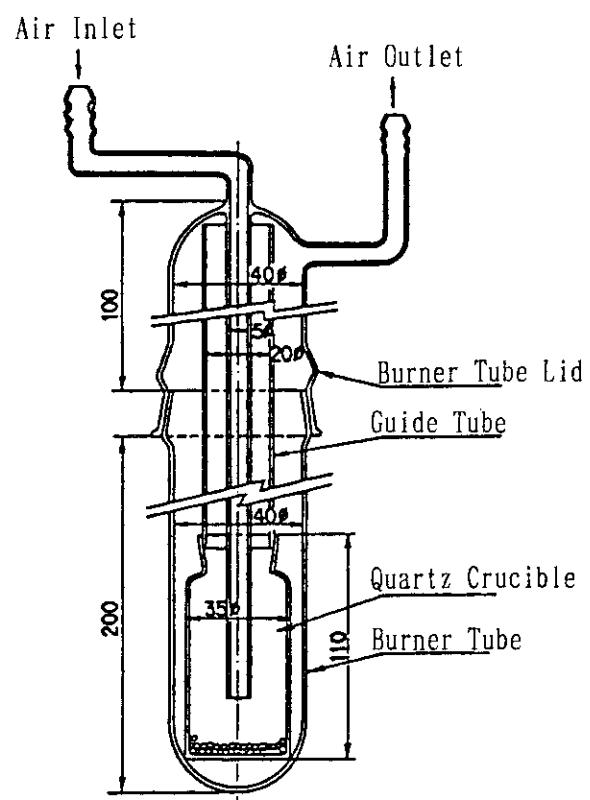


Fig. A5.F1 Quartz burner tube for measurement of failed SiC-layer fraction of irradiated coated fuel particles.

付録 6 各燃料体の製造、照射および
照射後試験結果のまとめ

1. はじめに

第6次～第12次OGL-1燃料体について、燃料体ごとに、照射目的、照射条件、照射中のFPガス放出挙動および燃料コンパクトの照射後試験結果を中心に、照射試験の結果をまとめる。なお、被覆燃料粒子の破損率については、OGL-1燃料の製造および照射の実績を考慮して 10^{-3} 以上を高いレベル、 10^{-4} の桁を通常レベル、 10^{-5} の桁以下を低いレベルと分類する。

2. 第6次燃料体

本燃料体は、燃料コンパクトを目標最高温度1500°C程度まで過渡的に昇温し、高温下での燃料の健全性および燃料からのFPガス放出挙動を調べることを目的としていた。照射期間は、JMTRサイクルで1サイクル、最高燃焼度は約0.4%FIMA、昇温時の燃料最高温度は1480°Cであった。

燃料からのFPガス放出率は、Kr、Xeとともに燃料コンパクト温度が1200°Cから1480°Cに上昇した時、放出率は3～4倍に増加した。 ^{88}Kr のR/Bは、1400°Cでは 1.37×10^{-6} であった。1480°Cの高温照射時においては、高温保持開始直後の 1.9×10^{-6} から徐々に低下し、ほぼ定常値の 1.4×10^{-6} まで低下した。このように高温保持期間(280時間)におけるFPガス放出率の有意な上昇は認められなかったことから、高温照射中に有意な追加破損が生じなかつたことが示された。

照射後試験においては、燃料コンパクト外観、断面組織観察とともに、特に異状は見られなかつた。被覆燃料粒子の貫通破損率についても、製造時 5.1×10^{-5} (露出ウラン率)、照射後 9.6×10^{-5} (FP浸出率)といずれも低いレベルであり、95%信頼限界では有意な上昇は認められなかつた。

本試験の結果、本照射条件のもとで燃料の健全性は十分保たれることが示された。

3. 第7次燃料体

本燃料体は、燃料コンパクトの製造に用いる原料黒鉛粉に関して、従来からの輸入品と新規の国産品の両方を用いて照射健全性の比較を行うことを目的として、照射を行つた。照射期間計3サイクル、最高燃焼度約1.3%FIMA、燃料最高温度約1380°Cの定常運転を行つた。

FPガス放出挙動については、これまでのOGL-1燃料と同様に、照射時間に伴つて放出率が低下する現象が見られた。 ^{88}Kr のR/Bは、定常状態到達後は約 4×10^{-7} であった。

照射後試験においては、燃料コンパクト外観、断面組織とともに特に異状は見られなかつた。破損率は、製造時 2.7×10^{-5} 、照射後 7.1×10^{-5} であり、ともに低いレベルであり、

95%信頼限界では有意な上昇は認められなかった。また、燃料コンパクトの照射寸法変化においても、高速中性子照射量に対する寸法変化の傾向は他の燃料体の場合と変わらなかった。

以上の結果により、本燃料体程度の短期照射においては、国産黒鉛粉を用いても従来から用いている輸入品と同等な照射性能が得られることが示された。

4. 第8次燃料体

本燃料体は、燃料からの金属FP、特に¹³⁷Csの放出挙動を調べることを目的として、SiC層を有しないBISO被覆粒子を含む燃料コンパクト2個と、通常の燃料コンパクト18個からなる燃料棒を用いた。照射期間は計3サイクル、最高燃焼度約1.0%FIMA、燃料最高温度約1390°Cのほぼ定常運転条件により照射された。⁸⁸KrのR/Bは、定常状態では約 2.7×10^{-7} であった。

照射後試験においては、燃料コンパクト外観では特に異状は見られなかった。断面組織観察では、製造時の欠陥(SiC層内部の層状欠陥)および照射後の研磨に伴うクラックが見られた。しかし、これらは健全性に特に悪影響を及ぼすものではないと考えられ、全体的に見て特に異状は見られなかった。被覆燃料粒子の貫通破損率については、例外的な1個の燃料コンパクト(装荷位置No.10)を除いて、95%信頼限界では有意な上昇は認められなかった。以上のことから、健全性は十分保たれたことが示された。

5. 第9次燃料体

本燃料体は、HTTR用燃料の製造にむけて量産規模で試作した燃料の健全性を調べるための第1回めの試作燃料であった。照射期間は計7サイクル、最高燃焼度約2.7%FIMA、燃料最高温度約1330~1340°Cのほぼ定常運転条件により照射された。

⁸⁸KrのR/Bは照射開始時には、定常状態到達後は約 1.5×10^{-5} であり、従来の燃料体に比べて1桁程度高いレベルであった。

照射後試験においては、外観検査において燃料コンパクト表面の荒れが見られたが、破損粒子は認められなかった。断面組織観察においては、種々の被覆層欠陥が認められた。被覆燃料粒子の貫通破損率については、製造時 8.7×10^{-4} 、照射後 1.3×10^{-3} であり、いずれも比較的高いレベルであった。ただし、95%信頼限界において照射による有意な上昇は認められなかった。

照射結果からみて、製造時における品質が劣っていたことが照射結果にそのまま現われたものと考えることができる。

6. 第10次燃料体

本燃料体は、第2回めの量産試作燃料である。計6サイクルの照射のうち、はじめの5サイクルでは、燃料最高温度約1330°Cの定常温度照射がおこなわれた。最後のサイクルでは、燃料最高温度を1330から約1500°Cまで、約50°Cずつ昇温し、FPガス放出挙動を調べた。最高燃焼度は2.8%FIMAであった。

^{88}Kr のR/Bは定常状態では約 3×10^{-6} であり、定常照射期間中の放出率の増加は認められなかった。FPガス放出率は、約1500°Cまでの過渡的昇温時には増加したが、1330°Cに低下させた時には昇温前の値に戻った。この結果から、高温照射中にも有意な追加破損は生じなかったと言える。

照射後試験においては、燃料コンパクト外観検査では特に異状は見られなかった。断面組織観察においては、被覆層欠陥が認められたものの、第9次燃料体に比べると、その頻度は少なく、健全性は向上していた。被覆燃料粒子の貫通破損率については、製造時 2.6×10^{-4} 、照射後 4.9×10^{-4} であり、第9次燃料体に比べると低下していた。

本燃料では、第9次燃料体に比べて、製造時における被覆燃料粒子の貫通破損率を低下させ、また被覆層の欠陥割合を減少させた。このことが照射後破損率の低下および照射後の被覆層の欠陥割合の減少をもたらしたものとみることができる。

7. 第11次燃料体

本燃料体は、第3回めの量産試作燃料の健全性を確認すると共に、OGL-1第2世代の炉内管の使用開始にあたっての性能を確認することを目的として照射された。照射期間は計3サイクル、最高燃焼度約1.6%FIMA、燃料最高温度約1350°Cのほぼ定常運転条件により照射された。

^{88}Kr のR/Bは定常状態では約 1.0×10^{-6} であり、照射中の放出率の増加は認められなかった。すなわち、照射期間中の有意な追加破損は認められなかった。

照射後試験においては、第9次および第10次燃料体に比べて製造時の被覆燃料粒子の貫通破損率が低下したことに対応して、照射後破損率も低下した。断面組織観察では、特に異状は見られなかった。

8. 第12次燃料体

本燃料体は、第4回めの量産試作燃料である。照射は、計9サイクル(実効照射日数195日)と、これまでのOGL-1燃料体では最長であった。燃焼度も、3.9%FIMAとHTTR初装荷燃料の最高燃焼度(3.6%FIMA)を超えるものであった。

(1) 照射健全性

^{88}Kr のR/Bは、定常状態では約 2.3×10^{-6} と低い値であり、照射期間を通して有意な上昇は見られなかった。

照射後試験においては、燃料コンパクトの外観検査および断面組織観察において、特に異状は見られず、健全であった。また、被覆燃料粒子の貫通破損率については、製造時 1.0×10^{-4} 、照射後 2.7×10^{-4} (シース材溶融部を除く2個のコンパクトの平均値)といずれも比較的低い値であり、95%信頼限界において照射による有意な上昇は認められなかった。

以上のことから、本燃料の照射健全性は十分保たれたといえる。

(2) 热電対シース溶融の影響

燃料コンパクト中心温度を測定するための熱電対について、K型(C/A)熱電対を1200°Cをこえる温度条件下で使用したため、シース材が溶融し⁽¹⁾、被覆燃料粒子のSiC層と反応した様子が断面組織観察(本文5.3.5項)およびEPMA観察(付録5D)によって認められた。また、被覆燃料粒子の貫通破損率検査においても、熱電対シース溶融位置では、そのほかのコンパクトに比べて高い破損率が得られた(本文5.4.2項)。これらの事実は、溶融シースとの反応によって、被覆燃料粒子のSiC層破損が生じ、さらに貫通破損が至ったことを示している。

ちなみに、FPガス放出率の時間変化を詳しく見ると、明瞭ではないが、照射の後半において、わずかにFPガス放出率が上昇しているように見える(本文3.4節の(7)およびFig.3.10参照)。これは、上記過程による貫通破損が徐々に進行したことを示唆している。ただし、熱電対シース溶融位置では、燃料温度および中性子束が低かったため、全体のFPガス放出率の増加には顕著に現われなかつたことが考えられる。

なお、この問題は、燃料の照射健全性の問題ではなく、照射技術上の問題である。

9. まとめ

(1) 小規模製造燃料

第7次および第8次燃料体では、照射中のFPガス放出率(⁸⁸KrのR/B)は、定常値では 1×10^{-6} 以下であった。また、第6次燃料体も1400°Cにおける値は約 1.4×10^{-6} 、1480°Cの高温照射中の定常値は 2×10^{-6} 以下であり、いずれも良好な値であった。また、照射後試験においても照射健全性の点で大きな問題となる点は見られなかつた。これらの結果は、第6次～第8次燃料体の被覆燃料粒子が、従来から使用してきた小規模製造装置で製造されたもので、品質の点で安定していたことが大きな要因であると考えられる。

なお、第7次燃料体では、燃料コンパクトの黒鉛マトリックス用黒鉛粉として国产品と輸入品を用いたものの比較照射を行ったが、両者ともに健全であり、有意な差は認められなかつた。

(2) 量産試作燃料

一方、量産試作燃料の第1作および第2作である第9次および第10次燃料体では、照射後の被覆燃料粒子の貫通破損率が高く、また種々の被覆層欠陥が見られた。ただ

し、照射中にFPガス放出率の有意な上昇は見られず、また、95%信頼度において、照射前後の貫通およびSiC層破損率の有意な上昇は認められなかった。これらの結果は、製造時の品質は確かに劣っていたが、照射によって更に著しい劣化が進むということはなかったことを示している。

第11次および第12次燃料体では、FPガス放出率は第9次、第10次燃料体よりも低下し、また照射後の被覆燃料粒子の貫通破損率も低下した。これは、製造条件の改善に伴って製造時の被覆燃料粒子の貫通破損率が低下したことを直接的に反映したものと言える。ちなみに、照射中のFPガス放出率の有意な上昇は認められず、また、照射による貫通破損率の有意な上昇も認められなかった。