

JAERI-M

83-012

OGL-1第1次, 第2次燃料体の照射試験

1983年3月

井川 勝市・福田 幸朔・菊池 輝男
小林 紀昭・林 君夫・湊 和生
岩本 多実・伊丹 宏治・伊藤 尚徳
石本 清

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、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、お申しこしください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

OGL-1第1次、第2次燃料体の照射試験

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部
井川勝市・福田幸朔・菊池輝男・小林紀昭
林君夫・湊和生・岩本多実・伊丹宏治⁺
伊藤尚徳⁺・石本清⁺⁺

(1983年1月24日受理)

JMT-Rに設置されたガスループOGL-1はフルサイズの燃料棒を実験炉と類似の条件下で照射できる唯一の設備である。OGL-1では毎年1体の燃料体を照射している。本報は第1次および第2次燃料体の照射試験についてまとめたものである。これら2体の燃料体はいずれも黒鉛ブロック中に3本の燃料棒を挿入した構造をもつ。照射期間は第1次が2原子炉サイクル、第2次が4原子炉サイクル、最高燃焼度は第1次が4500 MWD/T、第2次が8700 MWD/T、燃料コンパクト最高温度は推定で第1次が1380°C、第2次が1370°Cであった。照射後試験の結果、スリーブに若干の曲がりが認められた。燃料コンパクトにはクラック、欠けなどではなく、また照射による粒子の破損は検出されなかった。

+ 大洗研究所材料試験炉部

++ 研究炉管理部

Irradiation Experiment of the First and the Second OGL-1
Fuel Assemblies

Katsuichi IKAWA, Kousaku FUKUDA, Teruo KIKUCHI, Fumiaki KOBAYASHI
Kimio HAYASHI, Kazuo MINATO, Kazumi IWAMOTO, Hiroharu ITAMI⁺
Hisanori ITOH⁺ and Kiyoshi ISHIMOTO⁺⁺

Division of Nuclear Fuel Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 24, 1983)

The gas loop, OGL-1, installed in JMTR is the only facility for irradiation of full-size fuel rods under a simulated condition of the experimental reactor. One fuel assembly is irradiated every year in OGL-1. This report describes the irradiation experiment of the first and the second fuel assemblies. Each fuel assembly has three fuel rods inserted in a graphite block. Irradiation periods are two reactor cycles for the first and four reactor cycles for the second, maximum burnups are 4500 MWD/T for the first and 8700 MWD/T for the second and estimated maximum compact temperatures are 1380°C for the first and 1370°C for the second fuel assemblies. Post irradiation examination revealed a bowing of the sleeves to a small extent. It was also revealed that the fuel compacts have neither cracks nor defect and that the particles were not broken during irradiation.

Keywords: Coated Fuel Particles, Fuel Compacts, Fuel Rods, Irradiation,
JMTR, Gas Loop, Fission Products, Postirradiation Examination

+ Division of JMTR Project, Oarai Research Establishment, JAERI

++ Division of Research Reactor Operation, Tokai Research Establishment,
JAERI

目 次

要約（和英）	1
まえがき	8
1. OGL-1 燃料体	9
1. 1 燃料体の構成	9
1. 2 燃料体各部品および検査項目	10
1. 3 UO ₂ 核被覆粒子	10
1. 4 燃料コンパクト	11
1. 5 黒鉛部品	12
1. 6 燃料棒および燃料体	13
参考文献	14
2. 照 射	34
2. 1 照射装置 (OGL-1)	34
2. 2 照射履歴	34
2. 3 照射中のFPガス放出	35
参考文献	38
3. 燃料体と燃料棒の照射後試験	47
3. 1 燃料体の照射後試験	47
3. 1. 1 燃料体の外観検査	47
3. 1. 2 燃料体のX線検査	48
3. 1. 3 燃料体の寸法検査	48
3. 1. 4 燃料体の切断解体	48
3. 2 黒鉛ブロック	48
3. 2. 1 黒鉛ブロックの外観検査	48
3. 2. 2 黒鉛ブロックの寸法検査	49
3. 2. 3 黒鉛ブロックの重量検査	49
3. 2. 4 黒鉛ブロックの曲り検査	49
3. 2. 5 燃料孔内表面検査	50
3. 3 燃料棒	51
3. 3. 1 燃料棒の外観検査	51
3. 3. 2 燃料棒のX線検査	51
3. 3. 3 燃料棒の重量検査	51
3. 3. 4 燃料棒のアスキヤン	51
3. 3. 5 燃料棒の解体	52
3. 4 金属部品	52

3.4.1 金属部品の外観検査	52
3.4.2 金属部品の重量検査	52
3.5 黒鉛スリーブ	53
3.5.1 黒鉛スリーブの外観検査	53
3.5.2 黒鉛スリーブの寸法検査	53
3.5.3 黒鉛スリーブの重量検査	53
3.5.4 黒鉛スリーブの曲がり検査	53
3.5.5 黒鉛スリーブの内表面検査	54
3.6 燃料棒用黒鉛部品	55
3.6.1 燃料棒用黒鉛部品の外観検査	55
3.6.2 燃料棒用黒鉛部品の重量検査	55
3.6.3 緩衝材の弾性検査	55
3.7 考察	55
3.7.1 黒鉛材の照射による寸法変化	55
3.7.2 照射による煤の生成	56
3.8まとめ	58
参考文献	59
4. 燃料コンパクト及び被覆燃料粒子の照射後試験	136
4.1 はじめに	136
4.2 燃料コンパクトの特徴とその照射概要	136
4.3 照射後試験	137
4.3.1 外観検査（内面観察）	137
4.3.2 寸法検査	137
4.3.3 重量検査	139
4.3.4 金相検査	139
4.3.5 燃料コンパクトX線ラジオグラフィ	142
4.3.6 電解酸浸出試験	143
4.3.7 被覆燃料粒子外観検査及びX線ラジオグラフィ検査	144
4.3.8 コンパクト内でのFPインベントリー測定	144
4.4 考察	145
4.5 まとめ	148
参考文献	149
謝辞	150
付録	217

Contents

Summary (Japanese and English)	1
Introduction	8
1. OGL-1 fuel assembly	9
1.1 Structure of fuel assembly	9
1.2 Components and inspection items of fuel assembly	10
1.3 Coated UO ₂ particles	10
1.4 Fuel compacts	11
1.5 Graphite components	12
1.6 Fuel rods and fuel assembly	13
References	14
2. Irradiation	34
2.1 Irradiation facility (OGL-1)	34
2.2 Irradiation history	34
2.3 Fission gas release during irradiation	35
References	38
3. Postirradiation examination of fuel assembly and fuel rod ..	47
3.1 Postirradiation examination of fuel assembly	47
3.1.1 External observation of fuel assembly	47
3.1.2 X-ray examination of fuel assembly	48
3.1.3 Dimensional measurement of fuel assembly	48
3.2 Graphite block	48
3.2.1 External observation of graphite block	48
3.2.2 Dimensional measurement of graphite block	49
3.2.3 Weight measurement of graphite block	49
3.2.4 Bowing of graphite block	49
3.2.5 Surface examination of fuel hole	50
3.3 Fuel rods	51
3.3.1 External observation of fuel rods	51
3.3.2 X-ray examination of fuel rods	51
3.3.3 Weight measurement of fuel rods	51
3.3.4 Gamma-scanning of fuel rods	51
3.3.5 Disassembling of fuel rods	52
3.4 Metal components	52
3.4.1 External observation of metal components	52

3.4.2 Weight measurement of metal components	52
3.5 Graphite sleeves	53
3.5.1 External observation of graphite sleeves	53
3.5.2 Dimensional measurement of graphite sleeves	53
3.5.3 Weight measurement of graphite sleeves	53
3.5.4 Bowing of graphite sleeves	53
3.5.5 Internal surface examination of graphite sleeves	53
3.6 Graphite components for fuel rods	55
3.6.1 External observation of graphite components for fuel rods	55
3.6.2 Weight measurement of graphite components for fuel rods	55
3.6.3 Elastic property measurement of buffer graphite	55
3.7 Discussion	55
3.7.1 Irradiation-induced dimensional change of graphite	55
3.7.2 Soot formation by irradiation	56
3.8 Summary	58
References	59
4. Postirradiation examination of fuel compacts and coated particles	136
4.1 Introduction	136
4.2 Outline of fuel compacts and irradiation conditions	136
4.3 Postirradiation examination	137
4.3.1 External and internal surface observation	137
4.3.2 Dimensional measurement	137
4.3.3 Weight measurement	139
4.3.4 Ceramography	139
4.3.5 X-ray radiography of fuel compacts	142
4.3.6 Electrolytic deconsolidation and acid leaching	143
4.3.7 External observation and X-ray radiography of coated particles	144
4.3.8 Measurement of fission product inventory in fuel compacts	144
4.4 Discussion	145
4.5 Summary	148
References	149
Acknowledgements	150
Appendix	217

要 約（和英）

本報は一連の OGL-1 照射の第 1 報で、最初の 2 回の照射（第 1 次燃料体および第 2 次燃料体の照射）について述べる。

1) OGL-1 燃料体

OGL-1 燃料体は 1 年に 1 体製作されており、その構造は製造年度により若干異なるが、本報で述べる第 1 次燃料体と第 2 次燃料体の構造は類似している。直径 80 mm、長さ 850 mm の黒鉛棒に燃料棒挿入孔 3 本をあけて黒鉛ブロック（実験炉の燃料体構成と対応させるための呼称）とする。材質は、第 1 次燃料体用が等方性黒鉛 SE 2-24、第 2 次用が微粒等方性黒鉛 IG-11 である。燃料棒は、第 1 次用、第 2 次用ともに、外径 30 mm、長さ 800 mm IG-11 製スリーブに燃料コンパクトを挿入し、両端に緩衝用黒鉛フェルトを介して黒鉛製端栓を施したものである。燃料棒 1 本当りのコンパクト数は、第 1 次が 18 個、第 2 次が 20 個である。燃料コンパクトの寸法は、第 1 次用が外径 24 mm、内径 8 mm、長さ 40 mm であり、第 2 次用は外径、内径が同じで、長さが 36 mm になった。粒子充填率は第 1 次が 22 v/o、第 2 次が 30 v/o である。充填粒子は第 1 次では予備設計仕様、第 2 次では Mk-III 仕様である。燃料核のウラン濃縮度はいずれも 12 % である。

2) 照 射

照射は、上記燃料体にハンガーロッド、中性子遮蔽体、シールドプラグ等を取り付けて組上げられる全長約 7 m の燃料試験体を OGL-1 ループの照射内筒に装荷して行う。ループのヘリウム圧は 30 kg/cm²、流量は第 1 次が 34、第 2 次が 54 g/sec であった。照射期間は第 1 次が 2 サイクル、第 2 次が 4 サイクルであった。ただし第 2 次の第 2 サイクルでは照射時間が通常サイクルの約半分であった。燃料コンパクトの最高温度は熱電対のトラブルのため精度よく測定できなかった。燃料棒端栓温度からの計算コード STEP による推定では、第 1 次が 1380°C、第 2 次が 1370°C であった。最高燃焼度も計算による推定で、第 1 次は 4500 MWD/T、第 2 次は 8700 MWD/T であった。

照射中に燃料から放出された気体 FP 量は、ループのガス精製系入口で採取したヘリウムのガンマスペクトロメトリーにより求めた。Kr-85 m の R/B は第 1 次で $5-8 \times 10^{-7}$ 、第 2 次で $3-7 \times 10^{-7}$ であった。いずれの場合も照射の進行に伴う R/B の増加は認められなかった。すなわち照射に起因する破損は起こらなかったと判断できる。

3) ブロックとスリーブの照射後試験

燃料体の外観、X 線、寸法検査後、ブロック、燃料棒、金属部品に区分けした。ブロックの照射後試験は、外観、寸法、重量、曲がり、内面観察であり、燃料棒については、外観、重量、X 線、ガンマスキャンである。燃料棒は検査後さらにスリーブ、コンパクト、黒鉛部品に区分けした。スリーブの照射後試験は、外観、寸法、重量、曲がり、内面観察である。

ブロックとスリーブの照射後試験結果の要点を列挙すると、

- (1) 第 2 次のブロックは、照射により長さ方向に約 0.1 % の収縮を示したが、直徑変化および

重量変化は検出されなかった。第1次のブロックにはわずかながら直径増加が検出された。ブロックの曲がりは第1次で最大 0.05 mm, 第2次で最大 0.03 mm であった。

(2) ブロックの燃料棒挿入孔内面には傷, 亀裂, 部分変色, 斑点等が観察されたが, いずれも破損に結びつく可能性がない程度の軽微なものであった。

(3) 燃料棒からのコンパクト取出しはきわめて容易であった。

(4) スリーブについては, 外観, 重量ともに, 照射による変化は検出されなかった。内面観察においては, 亀裂等破損に結びつく可能性のある欠陥は全く検出されなかった。

(5) スリーブの直径変化は全く検出されなかった。曲がりは第1次, 第2次とも各燃料棒について若干検出されたが, 方向, 程度ともにまちまちであった。曲がりの最大は第1次で 0.9 mm, 第2次で 0.8 mm であった。

4) コンパクトと粒子の照射後試験

コンパクトの照射後試験は, 外観, 寸法, 重量, 酸浸出, 金相, 強度, X線, FP測定であり, 粒子については, 外観, X線, 強度, 金相である。

コンパクトと粒子の照射後試験結果の要点を列挙すると,

(1) コンパクトは外面, 内面ともに異常は認められなかった。また重量変化も認められなかった。

(2) コンパクトの直径収縮は高速中性子照射量にはほぼ比例し, 高速フルエンス ($> 0.18 \text{ MeV}$) $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2$ 当り約 0.1 % であった。

(3) 粒子内では, バッファー層収縮に伴う ILTI-PyC からのはく離がみられた。

(4) アメーバ効果の発生は認められなかった。

(5) ウランの酸浸出率は 5×10^{-5} 以下であった。

(6) 金相検査では粒子の OLTI-PyC に放射状のクラックがみられた。これは照射による内部応力が蓄積され, 研磨中に発生したものと考えられる。

Summary

This is the first report on a series of OGL-1 irradiation, describing the results of the first two irradiations (the irradiations of the first and the second fuel assemblies).

1) OGL-1 fuel assemblies

One fuel assembly has been fabricated every year. Some alteration in the configuration has been made each year, but there was no significant difference between the configurations of the first and the second fuel assemblies. Three holes for fuel rod accomodation were drilled in a graphite rod of 80mm dia. and 850mm long to make a graphite block (which correspond to the graphite block of the fuel element for the experimental reactor). Materials of the block are isotropic graphite SE2-24 and fine grained isotropic graphite IG-11 for the first and the second fuel assemblies, respectively. Fuel rods for both the first and the second fuel assemblies consist of sleeves made of IG-11 graphite measuring 30mm outer dia. and 800mm long, fuel compacts encased in the sleeves, graphite felt for buffer placed at both ends of the compact stacks and end plugs made of graphite.

The numbers of the compacts per fuel rod are 18 and 20 for the first and the second fuel assemblies, respectively. The dimensions of the compacts are 24mm outer dia., 8mm inner dia. and 40mm long and the same diameters and 36mm long for the first and the second, respectively. Particle loading fractions are 22vol% and 30vol% for the first and the second, respectively. In the first fuel assembly, particles of the preliminary design specification were used, whereas in the second, particles of the Mk-III design. Uranium enrichment were 12% in both cases.

2) Irradiation

A hanger rod, a neutron shield, a gamma shield plug etc. were attached to the above mentioned fuel assembly to complete a fuel test assembly, which was inserted in OGL-1 in-pile section for irradiation. Helium pressure in the loop was $30\text{kg}/\text{cm}^2$. The flow rates measured 34 and 54g/sec in the first and the second irradiations respectively. Irradiations were continued for 2 and 4 reactor cycles in the first and the second, respectively, although operation time of the second cycle in the second irradiation was about a half of the normal case. The maximum temperatures of the fuel compacts were not measured accurately due to thermocouple troubles. Calculation by STEP code based on the measured temperature of fuel rod end plug showed to be 1380°C and 1370°C in the first and the second irradiations, respectively. The maximum burnups were also estimated by calculation to be 4500 and 8700MWD/T, respectively.

Amount of gaseous fission products released from fuel during irradiation was measured by means of gamma spectrometry of helium sampled at the inlet of the gas purification system of the loop. R/B of Kr-85m were $5-8 \times 10^{-7}$ and $3-7 \times 10^{-7}$ in the first and the second irradiations, respectively. R/B increase with irradiation time was not observed in either case, which means that irradiation-induced particle failure did not occur.

3) Postirradiation examination of blocks and sleeves

After external observation, X-ray radiography and dimensional measurement, the fuel assemblies were disassembled into blocks, fuel rods and metal parts. Postirradiation examinations of the blocks are external observation, dimension, weight and bowing measurement and inner surface observation and that of the fuel rods are external observation, weight measurement, X-ray radiography and gamma scanning. The fuel rods were then disassembled into sleeves, compacts and graphite parts. Postirradiation examinations of the sleeves are external observation, dimension, weight and bowing measurement and inner surface observation. Some important results of blocks and sleeves are as follows:

- (1) Irradiation-induced axial shrinkage of the blocks of the second fuel amounted to about 0.1%, whereas neither diameter change nor weight change were detected. A slight diameter increase was detected in the block of the first fuel. Maximum bowings of the blocks were 0.05mm and 0.03mm in the first and the second fuels, respectively.

- (2) On the inner surface of the fuel holes of the blocks, flaws, cracks, local discoloration, spots etc. were observed but neither of them are so severe as to cause failure.
- (3) Compacts came out of the sleeves without any difficulty.
- (4) Irradiation-induced change was not detected in the external appearance and in the weight of the sleeves. Any defect such as flaws possibly causing failure was not detected on the inner surface of the sleeves.
- (5) No diameter change was detected in the sleeves. Moderate bowing was detected in fuel rods of both the first and the second fuel assemblies. The maximum bowings were 0.9mm and 0.8mm in the first and the second fuels, respectively.

4) Postirradiation examination of compacts and particles

Postirradiation examinations of compacts are external observation, dimension and weight measurement, acid leaching, metallography, crushing test, X-ray radiography and fission product analysis and those of particles are external observation, X-ray radiography, crushing test and metallography. Some important results of compacts and particles are as follows:

- (1) Any defect was not observed on either outer or on inner surface of the compacts. Weight change was not detected either.
- (2) Diameter shrinkage of compacts was roughly proportional to fast fluence and was about 0.1% per $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2 (> 0.18 \text{MeV})$.
- (3) Gap appeared between buffer and ILTI-PyC layers in particles due to shrinkage of the buffer layer.
- (4) Amoeba effect was not observed.
- (5) Acid leaching of uranium was less than 5×10^{-5}

(6) Metallography of particles showed radial cracks in OLTI-PyC. This was probably caused by accumulation of irradiation-induced internal stress and was generated during polishing.

まえがき

OGL-1はJMT-Rに設置されたガスループで、フルサイズの燃料棒が、実験炉と類似の環境の中で、燃料体の状態（黒鉛ブロックに挿入した状態）で照射できる唯一の設備である。OGL-1は、いわばひとつの小さな原子炉であるから、OGL-1照射で得られる情報は、スリーブ／ブロックのFPの分配、燃料棒の曲がりなど、キャップセル照射ではカバーできない領域に広がっている。しかし、これら全領域から得られる情報をひとつにまとめると、その情報量があまりにぼう大になりすぎる。そのため、これらをいくつかに分割して報告することとし、本報は、燃料体製造から照射後試験にいたるメインの流れを扱った。

OGL-1燃料体は1年1体製作されており、本報は第1次燃料体（初年度製品）および第2次燃料体（第2年度製品）の照射試験の報告である。OGL-1照射の目的は各年度で異なるが、第1次燃料体の照射目的は、当然のことながら、ループの性能試験であった。これに続く第2次燃料体には、第1次燃料とは異なり、新設計のMr-Ⅲ仕様の粒子が使用された。この新粒子の予備的な照射試験を行うことが、第2年度の照射目的であった。このような事情から、第1次と第2次の照射量は必ずしも満足であるとはいえないが、寿命中期の燃料挙動を知る上で貴重な成果をもたらした。また、これらの照射試験本来の成果に加えて、燃料棒製造の実証とそれに必要な燃料検査法の確立、ループ運転技術などを含むいわゆる照射技術および燃料棒寸法測定、内面観察などで代表される燃料棒特有の照射後試験技術の確立などの付随的な成果も貴重である。このように、第1次と第2次の照射は多くが未経験の中で進められたために、各種の波及的成果を生み出した。

1. OGL-1燃料体

1.1 燃料体の構成

多目的高温ガス実験炉の燃料体は、燃料コンパクトを内蔵した燃料棒を黒鉛ブロックに挿入した燃料棒を黒鉛ブロックに挿入したピン・イン・ブロック構造⁽¹⁾である。燃料コンパクトはTR ISO型被覆燃料粒子⁽²⁾を黒鉛のマトリックスに分散・結合して成形したものである。これを黒鉛のさや（スリーブと呼ぶ）に挿入して燃料棒とする。

OGL-1燃料体は、OGL-1ガスループ⁽³⁾の炉内管に装荷するため、黒鉛ブロックの寸法が実験炉の燃料体より小さい。したがって、それに挿入できる燃料棒の本数も少ない。しかし、燃料棒の寸法はフルサイズである。また、OGL-1燃料体には、炉内管に装荷するための金具が取付けられている。OGL-1燃料体は1年1体製作されており、年度により構造に差があるが、本報が対象とする第1次燃料体（初年度製品）と第2次燃料体（第2年度製品）の構造は類似である。

Fig. 1.1に第1次OGL-1燃料体の概念図を示す。燃料コンパクトは燃料棒内に収めてあり、燃料棒は黒鉛ブロック内に固定してある。固定方法は燃料棒中央部に固定用リブを設け、そのリブを上、下黒鉛ブロックではさむ方式である。黒鉛ブロックは3分割であるので各ブロックの連結はハステロイX金具によるネジ止め構造とした。さらにハステロイX製のタイロッドを黒鉛ブロック内に貫通させ、さらにハステロイX製の上、下金具により溶接、固定を行って燃料体とした。Fig. 1.2に黒鉛およびハステロイX部品、燃料体、燃料体に中性子遮蔽体やシールドプラグ等を取り付けて照射設備に装荷できるようにした燃料試験体の外観を示す。燃料体外観で示したように黒鉛ブロック下部に取り付けた凹凸部は、燃料体外周部を流れる冷却用ヘリウムの流量を抑え、燃料体内部を流れ、燃料棒を冷却するヘリウムの流量を増すために設けてある。燃料体の照射温度を測定するために、燃料コンパクト中空部、燃料体の入口および出口等にタンクステンレニウム熱電対やクロメルーアルメル熱電対を取り付けてある。中性子照射量を測定するためにフルエンスモニターを6個配した。組立後の燃料体は長さ約1m、直径80mmであり、さらにハンガーロッド、中性子遮蔽体、シールドプラグ等を取り付けて全長7m余りの燃料試験体として組立てた後、照射試験に供する。

第2次OGL-1燃料体は、基本的に第1次OGL-1燃料体と同じ構造とした。Fig. 1.3に概念図を示す。燃料棒の配置や数、黒鉛ブロックが3分割であることおよび燃料棒の黒鉛ブロック内の固定法については、第1次と同じである。黒鉛ブロック同士の接続はインロウ方式により行い、さらにハステロイX製リングを用いて黒鉛ブロック内部と外部のヘリウム流の短絡を止めてある。黒鉛ブロックの上部にはハステロイX製の上部受け金具を用い、照射中に黒鉛ブロック上部に加わる力を面で受けるようにした。照射中の温度および中性子照射量を測定するための熱電対やフルエンスモニターの配置は第1次と同じとした。Fig. 1.4に第2次燃料体の外観とX線透過写真を示す。燃料体外周部の溝は燃料体入口のヘリウム温度を測定するための熱電対用で

ある。燃料体下部の先端金物、リングおよび上部受け金具が白色なのは、照射設備内に入れたときに接触しているハステロイX 製仕切管と癒着するのを防ぐためにハステロイX 加工表面にジルコニア溶射を行っていることによる。

1.2 燃料体各部品および検査項目

燃料体を製作するのに必要な構造部品および部品製作の流れとその検査項目をFig. 1.5に示す。燃料体は燃料棒、黒鉛ブロック、ハステロイX 金具および熱電対から構成されている。燃料棒に入れてある燃料コンパクトの製作の流れは図のように UO_2 燃料核から始まる。 UO_2 燃料核は所定の検査を行い、合格した後、第1層被覆を行う。第1層は流動床内でアセチレンを 1300°C で熱分解した低密度 PyC である。続いて第2層を被覆する。第2層はプロピレンを原料として流動床内で 1300°C で熱分解して得られる高密度 PyC 層である。第3層はメチルトリクロルシランを原料として流動床内で 1600°C で熱分解し、生成する炭化ケイ素を被覆したもので、ほぼ理論密度に近いものである。第4層は第2層と同じ条件で被覆した高密度 PyC であり、第4層被覆を終了して被覆粒子として完成する。一方、粒度を調整した黒鉛粉末とバインダーを混ぜ、先に製造した被覆粒子を包むようにし、オーバーコート粒子とする。オーバーコート粒子を所定量を取り、温間プレス、コンパクトに成形する。さらに炭化、脱ガスを行って燃料コンパクトとする。黒鉛ブロック、黒鉛スリープおよび端栓を加工するための黒鉛素材は微粒子等方性黒鉛を使用した。黒鉛素材の検査項目で外観、内部欠陥および不純物について合格した後、黒鉛ブロック、黒鉛スリープ、端栓に加工する。黒鉛スリープに燃料コンパクトを挿入し、黒鉛繊維を加工した緩衝材を入れて端栓を施し、燃料棒とする。燃料棒は黒鉛ブロック中に入れ、ハステロイX を加工した金具で上下から締付けて溶接して燃料体として組立てる。さらに燃料体各部の温度測定用の熱電対を組込み、ハンガーロッド、中性子遮蔽体、シールドプラグを取付けて燃料試験体とする。

1.3 UO_2 核被覆粒子

第1次OG L-1 燃料に使用した燃料コンパクト用 UO_2 核被覆粒子（以下 75 OPC と略す）は、多目的高温ガス実験炉の予備設計仕様に基づいて製造した。第2次燃料以降は第1次概念設計仕様となるので、予備設計仕様燃料としてOG L-1 ループ照射を行うのは第1次燃料のみとなる。APP 1.1 に 75 OPC の製造仕様および製品の検査結果を示す。OPC に付した数字はバッチ番号である。各被覆バッチは燃料コンパクト製造バッチに対応しており、照射後試験で調べた燃料コンパクトの健全性については被覆粒子まで遡って調べることができる。被覆粒子のウラン濃縮度は、予備設計の 4, 6, 8 w/o より高い 12 w/o とし、燃焼度を高めると同時に燃料体の核出力を大きくして燃料部の温度を高くした。汚染ウラン率は被覆粒子を硝酸で浸出し、溶出したウラン量と被覆粒子中の全ウラン量の比で表わす。3 バッチの値とも分析下限より小さく、1 個の被覆粒子も破損していない（1 粒子破損で 2.5×10^{-4} となる）。SiC 層破損率は被覆粒子の第4層 PyC を酸化、除去した後、硝酸浸出した値である。いずれのバッチも SiC 層破損率の方が高く、第3層 SiC が 1 ~ 2 粒子破損していることがわかる。Fig. 1.6 に被覆粒子およ

び UO_2 核粒子の直径分布を, Fig. 1.7 に被覆粒子の破壊強度の分布を示す。

第2次 OGL-1 燃料に用いた被覆粒子（以下 76 OPC と略す）は多目的高温ガス実験炉の第1次概念設計に基づいた仕様で製作した。予備設計仕様の 75 OPC と異なるのは UO_2 核直径および第1層の厚さが大きくなっている点である。APP 1.2 に 76 OPC の製造仕様および検査結果を示す。 UO_2 核粒子の品質は 75 OPC と比較して真球度がやや悪くなった他は同程度に良好であった。真球度低下は UO_2 核粒子の直径が大きくなつたため、製造がより難しくなったことによる。被覆層は仕様を満足する品質であり、また、製造バッチ間の変動も少なく、再現よく被覆が行われた。第3層密度は 75 OPC よりも高く、より良い SiC 層が被覆された。Fig. 1.8 に 76 OPC の UO_2 核粒子および被覆粒子の外径分布を示す。 UO_2 核粒子の分布と被覆粒子の分布と被覆粒子の分布の形は良く似ている。また、標準偏差を平均値で除した値、すなわち変動係数はいずれも UO_2 核の方が大きい。このことは被覆層の厚みの変動が小さく、そのため UO_2 核直径がそのまま被覆粒子直径の変動に反映していることによる。Fig. 1.9 に被覆粒子の破壊強度の分布を示す。破壊強度は 75 OPC とほぼ同じであり、被覆粒子寸法の違いによる効果は認められなかった。また、75 OPC と比較して破壊強度が小さいが、燃料コンパクトに成形した後の破損粒子は認められなかった。

1.4 燃料コンパクト

第1次 OGL-1 燃料体の燃料コンパクトの製造は Fig. 1.5 のフローシートに示したように、黒鉛粉末とバインダーを混合し、被覆粒子にオーバーコートを施した後、温間プレスを行って成形した。用いた黒鉛粉末は天然黒鉛を 8割、人造黒鉛を 2割としたもので、通常 P 2 N 8 と称している。バインダーはフェノール樹脂を用い、黒鉛粉末に対して 20 w/o 加えた。APP 1.3 に黒鉛粉末の粒度および物性値を示す。天然黒鉛は西独 Ringsdorff 社製、人造黒鉛は西独 Kropfmühl 社製である。いずれの黒鉛粉末も高純度化されている。バインダーとしてはノボラック系フェノール樹脂で灰分は 300 ppm、融点 70 °C のものを用いた。APP 1.4 に第1次燃料に用いた燃料コンパクト（以下 75 OP と略す）の製造仕様および結果を示す。被覆粒子のバッチ番号は燃料コンパクトのバッチ番号と対応しており、燃料コンパクトの製造結果や照射後試験の評価を被覆粒子まで遡って行うことができる。燃料コンパクト製造数は各バッチあたり 20 個で、そのうちコンパクト番号 1 から 18 まで燃料棒に挿入した。燃料コンパクト製造結果のうち、仕上り寸法は外径が 23.96～24.04 mm、内径が 8.00～8.02 mm、長さが 39.93～40.38 mm の範囲にあり、とくに外径、内径の寸法精度が良い。ウラン量は 75 OP 3 が 75 OP 1, 75 OP 2 よりやや低い。これは被覆粒子充填率が 3 ロットとも、ほぼ同じであるが、被覆粒子中の含有ウラン量の違いによる。マトリックス密度は、燃料コンパクトの被覆粒子を除いた黒鉛粉末およびバインダーの炭化した部分の密度である。75 OP 1 および 75 OP 2 のマトリックス密度が 1.67～1.69 g/cm³ で 75 OP 3 は 1.65～1.66 g/cm³ とやや低くなつた。不均質度 (H・F) は燃料コンパクト中のウランの分散の程度を表す係数である。汚染ウラン率の項の粒子破損率とは貫通破損率と汚染ウラン率の和であるが、1 個のコンパクト中に 1 個の破損粒子があれば、汚染ウラン率は表の値を超えるので、検査した燃料コンパクトには 1 個の破損粒子もなかつたことがわか

る。すなわち、表の値は燃料コンパクト製造時または燃料コンパクト取扱い中に汚染したウラン量を表わしている。汚染ウラン率の項の SiC 破損率は同項の粒子破損率に比較して 2 衡高い値を示している。SiC 破損率が高くても第 4 層が健全であれば気体 FP の保持能は良い。75OP の粒子破損率は低く抑えられているので FP ガスの放出は低くなっている。また、他の試験結果の値も良好で、充分、仕様を満足する燃料コンパクトが製造された。

第 2 次 OGL-1 燃料コンパクト（以下 76 OP と略す）製造に用いた黒鉛粉末およびバインダーは 75 OP と同じものである。APP. 1.5 に 76 OP の製造仕様および検査結果を示す。コンパクトの仕様は内、外径を除いて第 1 次概念設計仕様に基づいている。75 OP と異なる点は(i) コンパクト長さが 40 mm から 36 mm に短くなったこと、(ii) 被覆粒子充填率が 22% から 30% に大きくなった点である。76 OP の製造バッチ数は 5 で、75 OP と同じく被覆粒子製造バッチと対応している。76 OP の寸法仕上りおよび被覆粒子充填率の結果は良好である。マトリックス密度は 75 OP より高くなっている。これは燃料コンパクト長さが短くなったため、コンパクト成形プレスの段階でコンパクト中央部まで充分プレスされたためと考えられる。不均質度は低く、コンパクト中のウランは均一に分散していることがわかる。粒子破損率は各バッチについて 1 個ずつ計 5 個の測定を行った。結果は全てウラン分析下限以下の 2×10^{-5} と得られた。コンパクト 1 個中の被覆粒子数は約 12000 個であり、1 個の被覆粒子が破損すると割合は 8.3×10^{-5} となる。したがって、検査を行った 5 個のコンパクトは全て破損粒子を含んでいなかったことになる。SiC 破損率も粒子破損率と同じく、各製造バッチ毎に 1 個ずつ計 5 個の検査を行った。最も大きいのは 76 OP 2 の 6.4×10^{-4} であるので SiC 破損粒子は 8 粒子となる。76 OP 1 は SiC 層が破損している粒子は 1 個もないことがわかる。Fig. 1.10 に 76 OP の断面および外観写真を示す。

1.5 黒鉛部品

第 1 次 OGL-1 燃料体を製造するために用いた黒鉛部品は Fig. 1.5 に示したように黒鉛ブロック、燃料棒を構成する黒鉛スリーブ、緩衝材、端栓がある。黒鉛加工用素材は黒鉛ブロック用に等方性黒鉛 SE 2-24 を使用し、黒鉛スリーブ、端栓には微粒等方性黒鉛 IG-11 を用いた。燃料棒中の燃料コンパクトを固定するために上下端に挿入する緩衝材として黒鉛繊維を使用した。黒鉛素材の特徴を APP. 1.6 に示す。SE 2-24 は高制度化処理してあるので灰分、ホウ素の含有量が低い。IG-11 は未精製のため、灰分、ホウ素がやや多い。黒鉛繊維の特徴を APP. 1.7 に示す。不純物はやや多いが、ホウ素は検出限界以下である。黒鉛スリーブ、端栓および黒鉛ブロックの製造仕様および加工結果を APP. 1.8 に示す。黒鉛スリーブは精度良く加工された。黒鉛スリーブ外径について長さ方向の分布を Fig. 1.11 に示す。内径は黒鉛スリーブの端部しか測定できなかつたので表には、その測定値を示す。端栓は、黒鉛スリーブ上下に施してあるので、1 本当り 2 個必要となる。重量の項で u で示したのが黒鉛スリーブ上側の端栓、d で示したのが下側の端栓重量である。黒鉛ブロックは上、中、下の 3 段重ねで構成されており、上段を No. 1、中段を No. 2、下段を No. 3 と番号を付した。外径の長さ方向の分布を Fig. 1.12 に示す。黒鉛ブロックには燃料棒を収める 3 本の孔があり、それぞれ、No. 1, No. 2, No. 3 孔とした。いずれの孔

も精度良く加工されている。

第2次OGL-1燃料体の黒鉛部品は第1次OGL-1燃料と同じである。構成はFig. 1.5に示す。黒鉛加工用素材は微粒等方性黒鉛IG-11を用いた。APP. 1.9に黒鉛素材の特徴を示す。第1次と比較して試験項目は多く、とくに不純物は2元素から14元素に増えている。黒鉛は高純度化処理を行っているので灰分、不純物量が少ない。また、機械的性質のうち、引張り強さは第2次燃料体の方が、やや低い値であるがデータの変動内であると思われる。他の機械的性質は1次とほぼ同じであり、高純度化処理の影響を受けていないことがわかった。第1次は黒鉛纖維をそのまま緩衝材として使用したが、第2次では黒鉛纖維を円筒状にした。緩衝材の不純物をAPP. 1.10に示す。高純度化処理を行っているので不純物濃度が低い。黒鉛スリーブおよび黒鉛ブロックの製作仕様および仕上り寸法をAPP. 1.11に示す。製作仕様は全般的に厳しくなっているが、とくに黒鉛スリーブ内径は公差が小さくなっている。これは燃料コンパクトと黒鉛スリーブ内面とのギャップを小さくすることにより熱の伝導を良くし、燃料コンパクトの温度を下げるためである。Fig. 1.13に黒鉛スリーブの外径を、Fig. 1.14に黒鉛ブロックの外径を示す。第1次の結果(Fig. 1.11, Fig. 1.12)と比較して加工精度が向上しているのがわかる。

1.6 燃料棒および燃料体

燃料棒は黒鉛スリーブに燃料コンパクトを挿入し、緩衝材で固定を行い、端栓を上、下端部に施して製作する。燃料棒を上、中、下3段接合の黒鉛ブロックに収めて燃料体とする。燃料試験体は、燃料体に温度測定用の熱電対および中性子測定用のフルエンスモニターを組込み、上下部をハステロイX金具で固定した後、中性子遮蔽体、シールドプラグ等を取り付けて完成する。ループへの装荷はこの状態で行う。本節では燃料棒、燃料体および熱電対について報告する。

第1次OGL-1燃料の燃料棒は「1.6 黒鉛部品」で記した黒鉛スリーブに燃料コンパクトを18個挿入し上下部に燃料コンパクトを固定するために緩衝材を装荷した後、端栓を施して組立てる。燃料棒の特徴をAPP. 1.12に示す。この表で真直度とは燃料棒の曲がりの程度を表すものであり、長さ2000 mmで1 mmの曲がりまで合格である。燃料棒長さは800 mmであるので曲がりは0.4 mmまで認められる。Fig. 1.15 aに燃料棒3本のX線写真と燃料体の外観を示す。Fig. 1.15 bは燃料中のコンパクトの配置である。図中のコンパクト番号はAPP. 1.4の番号に対応している。

熱電対は燃料試験体各部の温度を測定するためにW/5%Re-W/26%Re熱電対を各燃料棒に1対ずつ、計3対配した。冷却ヘリウムガス温度用には燃料体下部に冷却ガス入口温度測定用に2対、燃料棒出口ガス温度測定用にNo.1およびNo.2の燃料棒端栓部、燃料体外側冷却ガス温度測定用に2対、燃料棒を冷却したガスと燃料体外側を冷却したガスが混合する箇所に1対配した。ガス温度測定用いずれもクロメルーアルメル熱電対を用いた。

燃料体に熱電対を組込み、ハステロイX金具で固定したあと、中性子遮蔽体およびシールドプラグを接続して全長7 m余りの燃料試験体にする。Fig. 1.16に完成した燃料試験体を示す。

第2次OGL-1燃料の燃料棒は「1.6 黒鉛部品」で記した黒鉛スリーブに燃料コンパクトを20個挿入し、第1次OGL-1燃料と同様に、上下部に緩衝材を装荷した後、端栓を施して組

立てる。燃料棒の特徴を APP. 1.13 に示す。U 量が第 1 次と比較して多くなっているのは燃料コンパクトの設計を第 1 次概念設計に変更したためである。U 量の増加により、燃料棒重さも増加している。真直度は全て 1/2000 以下と示してあるが、実際は第 1 次と同程度の値である。

Fig. 1.17 a に燃料棒中の燃料コンパクトの配置を、Fig. 1.17 b に燃料棒、燃料体の外観および X 線写真を示す。黒鉛ブロック 3 体はハステロイ X 製リングで接続してある。ハステロイ X 金具の表面が白いのは照射筒との癒着を防ぐためにジルカロイ被覆を施しているためである。

燃料体に熱電対を組込み、ハステロイ X 金具で固定した後、中性子遮蔽体およびシールドプラグを接続して燃料試験体として完成した。熱電対の配置は第 1 次と同じである。Fig. 1.18 に燃料試験体の外観を示す。

(小林記)

参考文献

- (1) 青地哲男, 他: 日本原子力学会誌 19 (1977) 806
- (2) 安野武彦, 他: 日本原子力学会誌 24 (1982) 429
- (3) 松永朔郎, 他: 日本原子力学会誌 21 (1979) 245

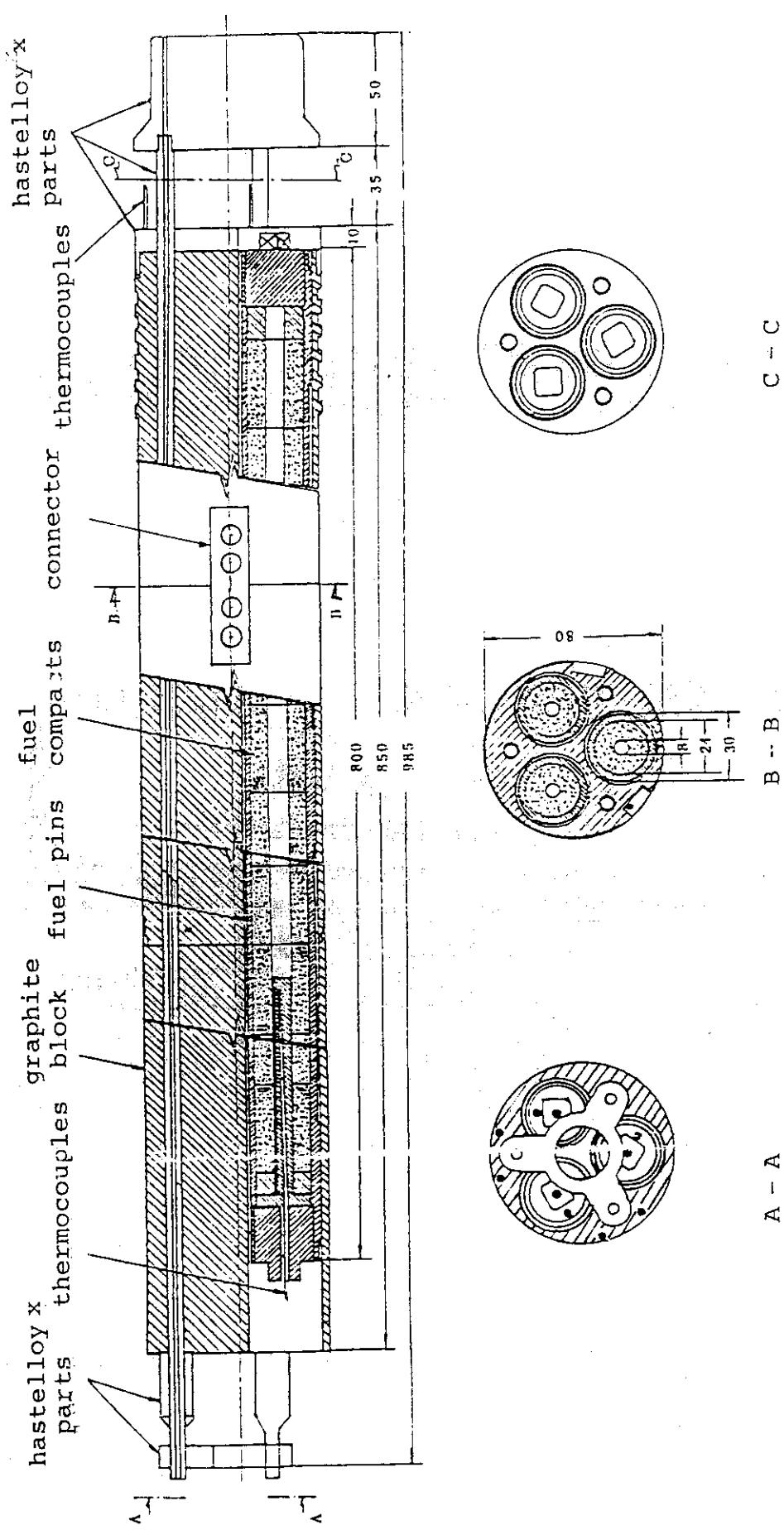


FIG.1.1 FUEL ASSEMBLY FOR THE 1ST OGL-I FUEL.

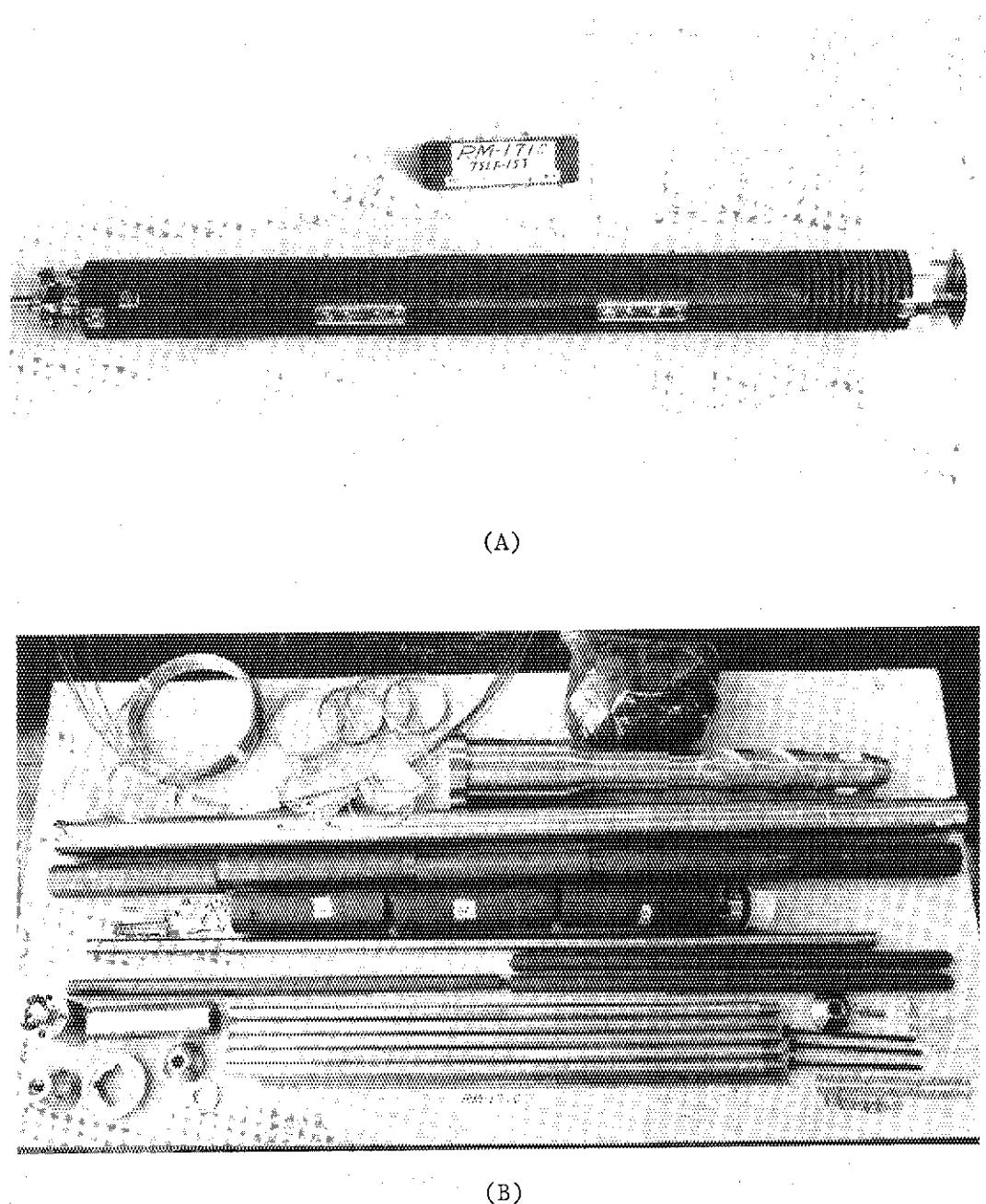


Fig. 1.2 External view of the 1st OGL-1 fuel, (A) fuel assembly, (B) component parts.

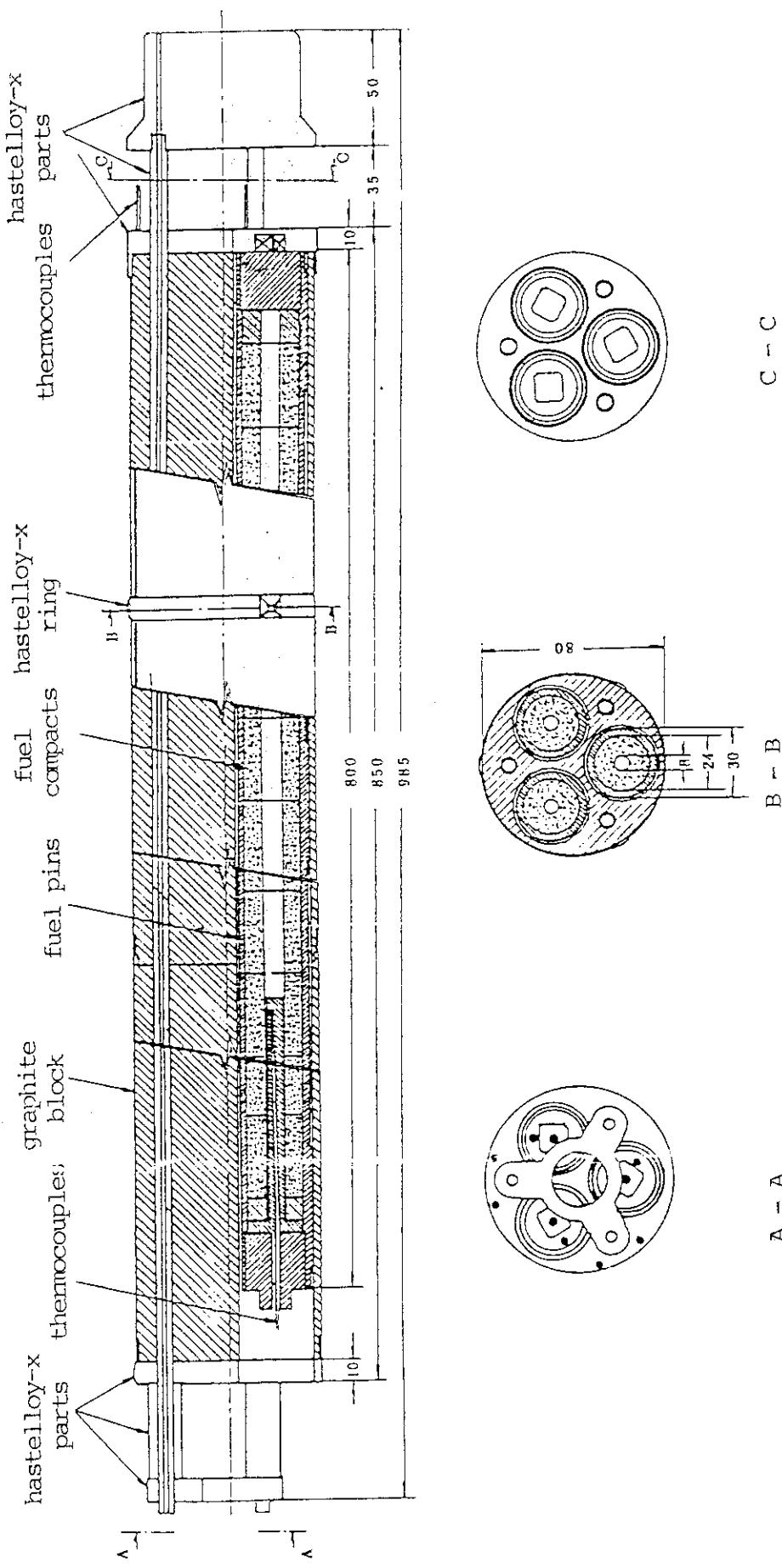


FIG.1.3 FUEL ASSEMBLY FOR THE 2ND OGL-I FUEL,

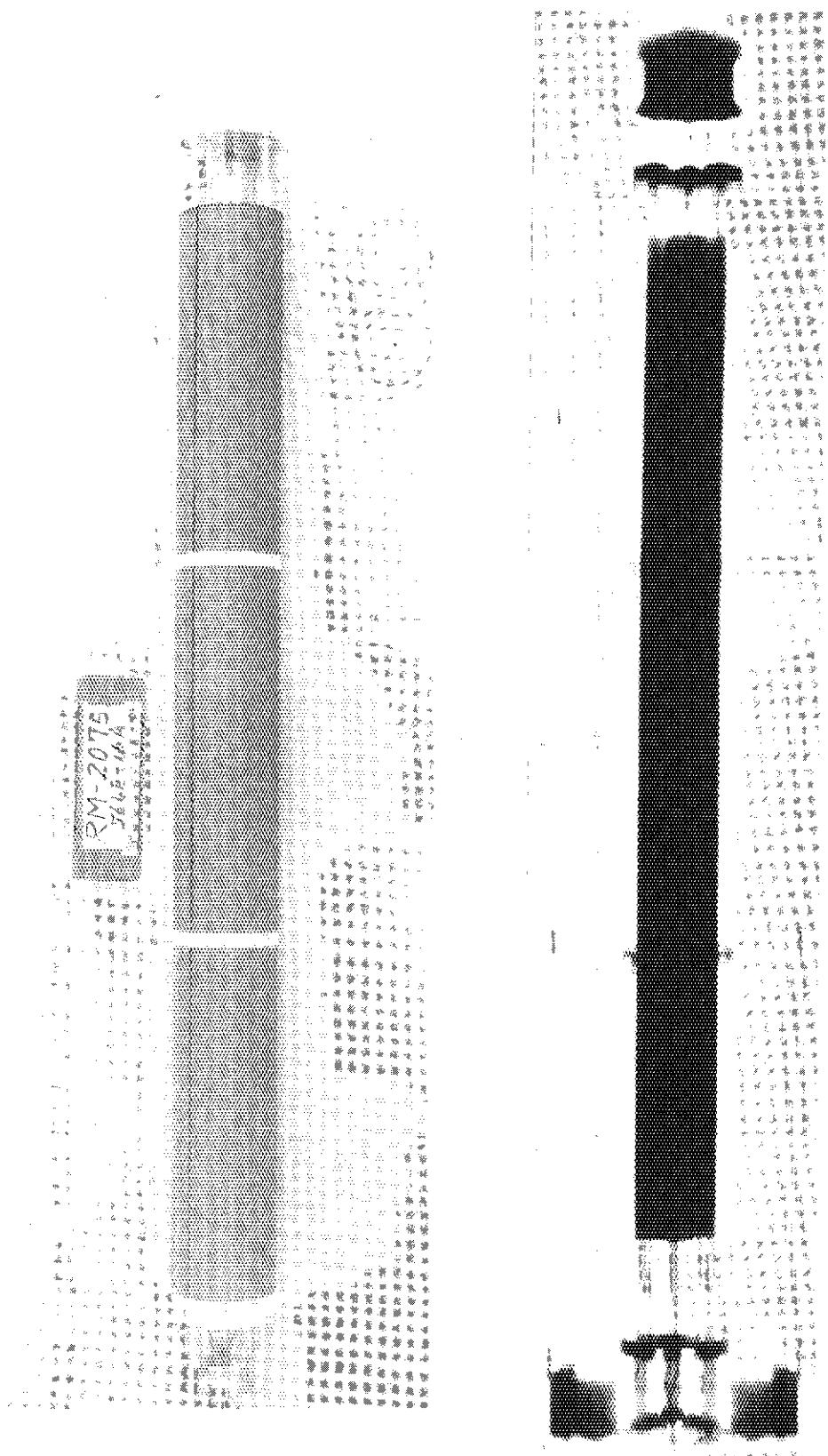


Fig. 1.4 External view and X-ray radiograph of the 2nd OCL-1 fuel assembly.

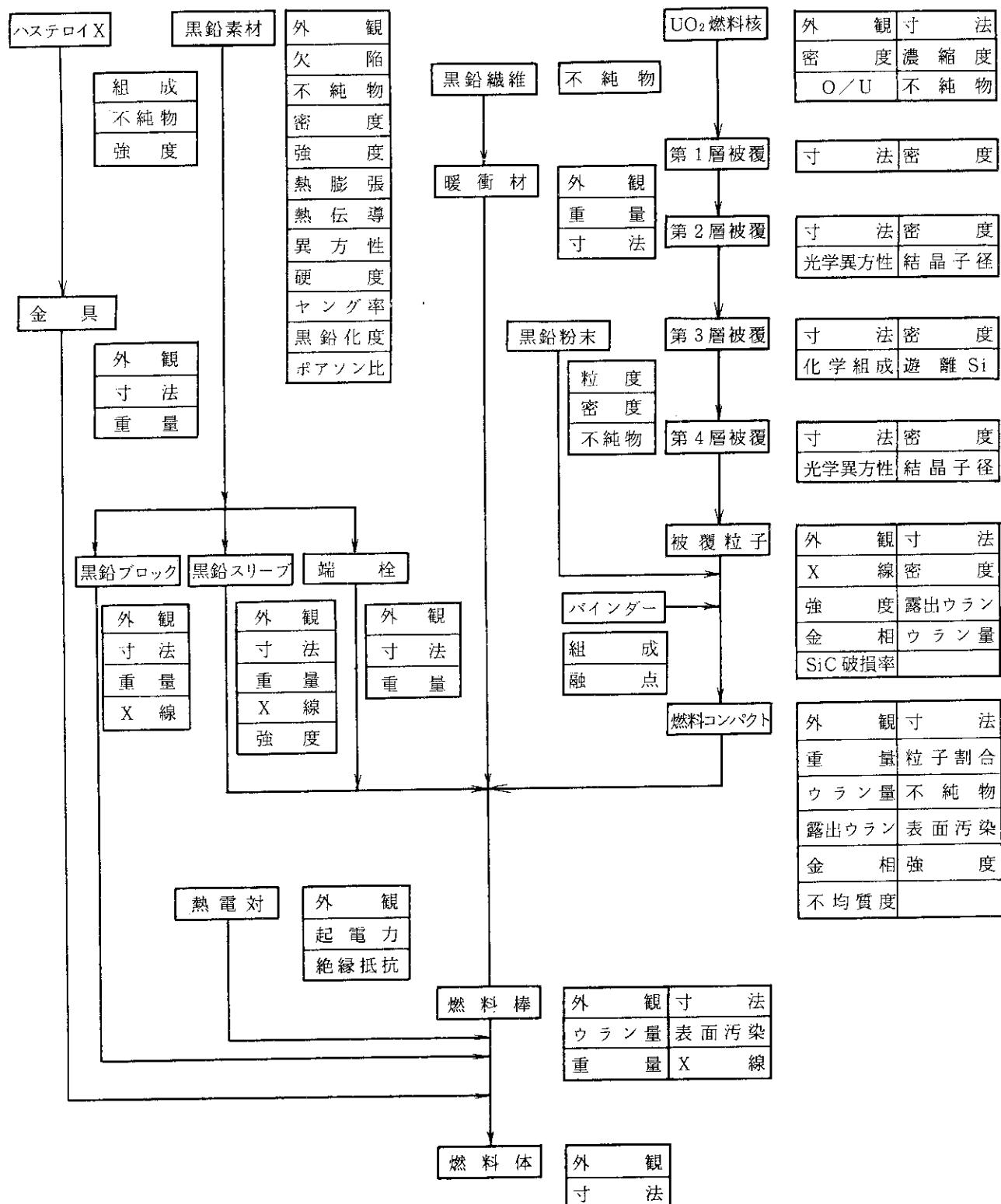


Fig. 1.5 Manufacturing process and inspection of the OGL-1 fuel assembly

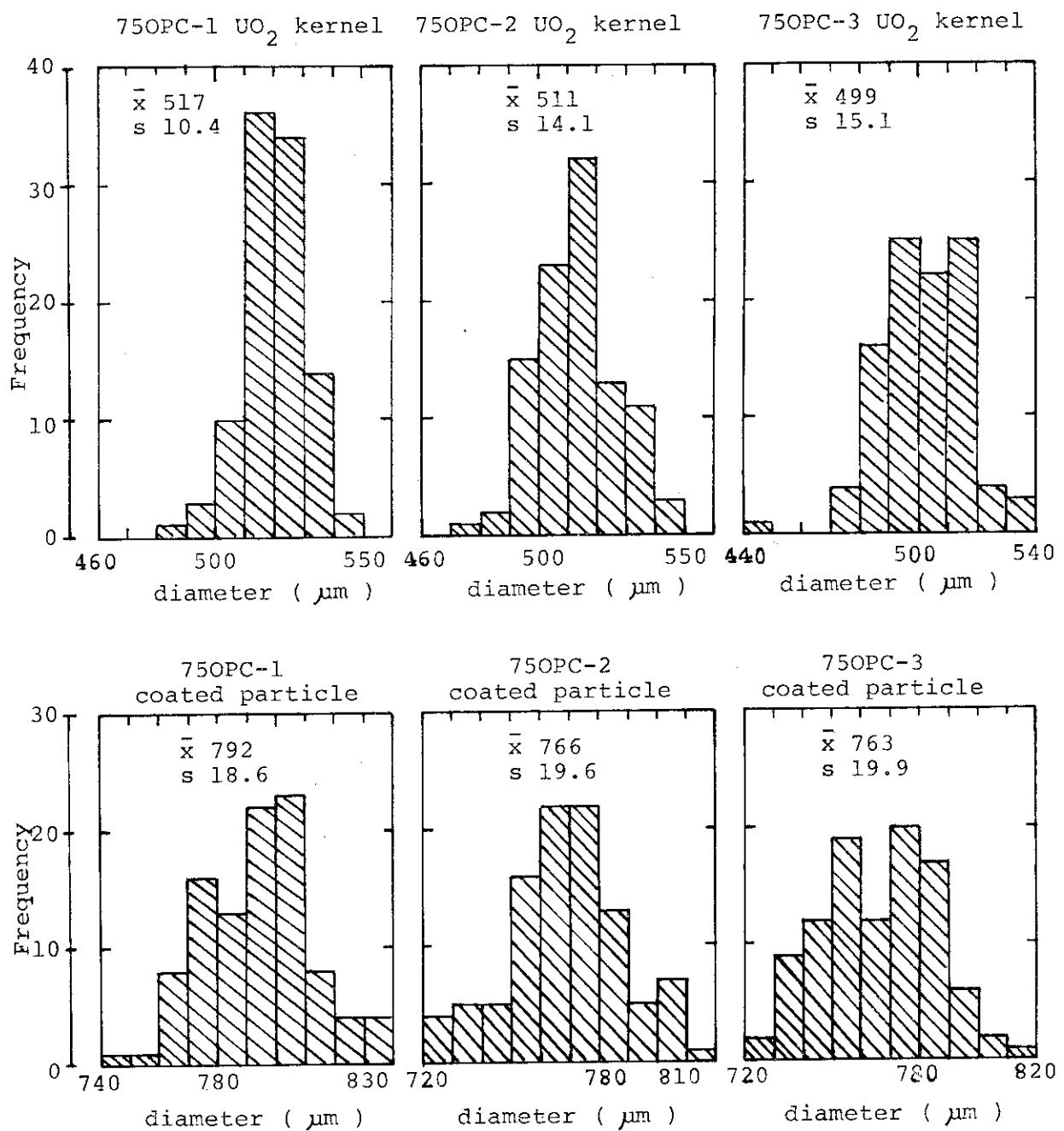


Fig.1.6 Frequency distribution of UO_2 kernel and coated particle diameter.

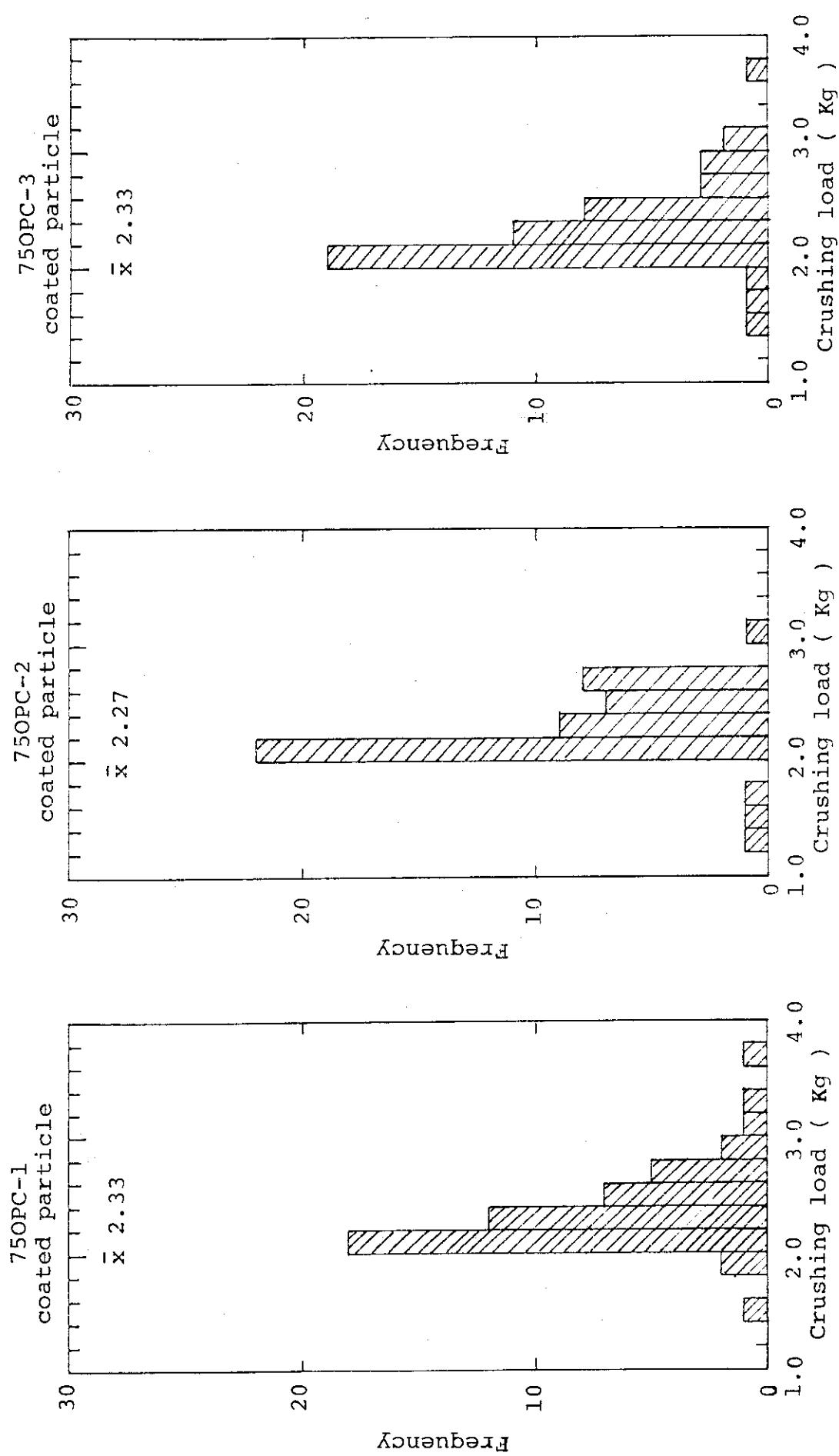


Fig.1.7 Frequency distribution of crushing strength of coated particles for the 1st OGL-1 fuel.

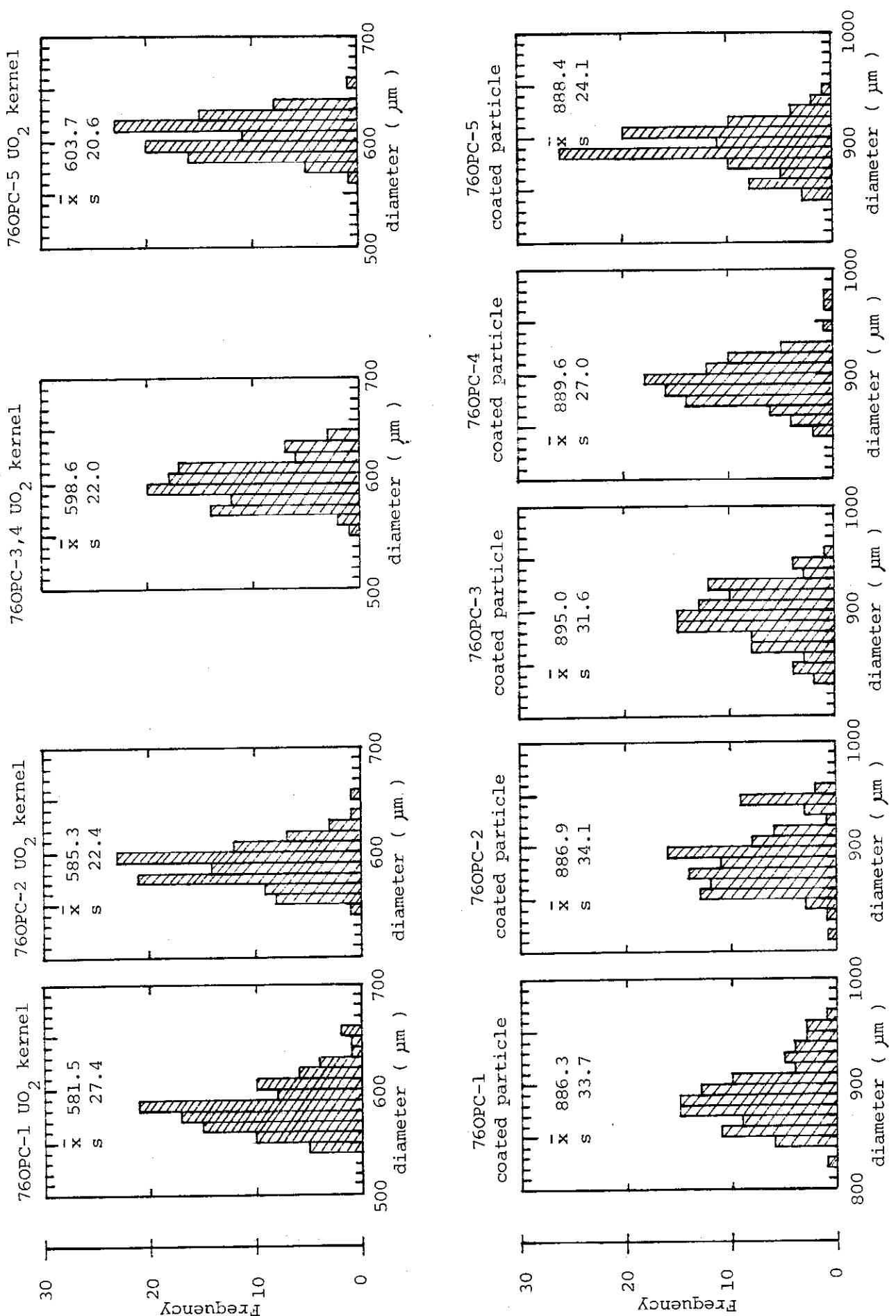


Fig.1.8 Frequency distribution of UO_2 kernel and coated particle diameter for the 2nd OGL-1 fuel.

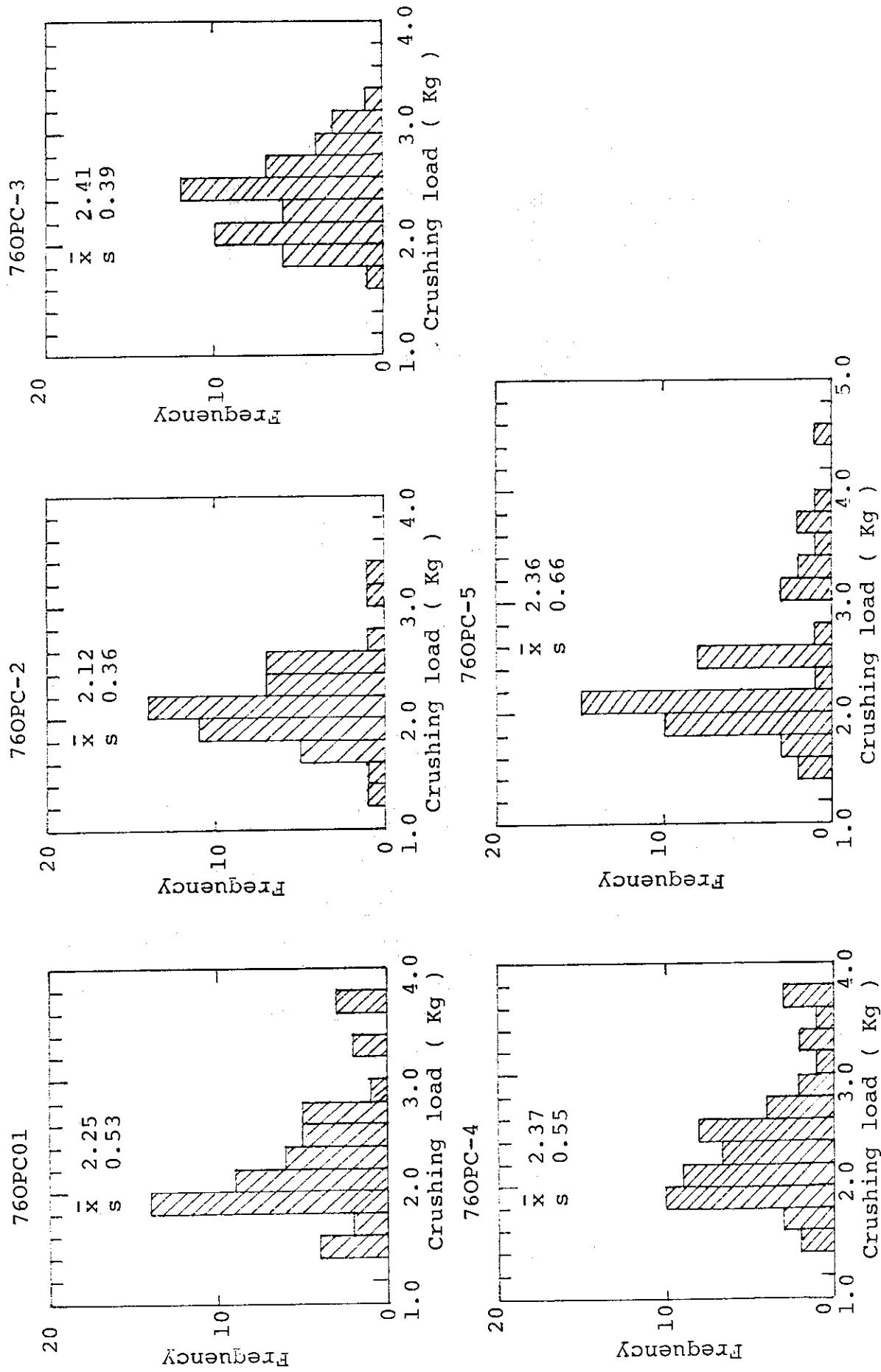
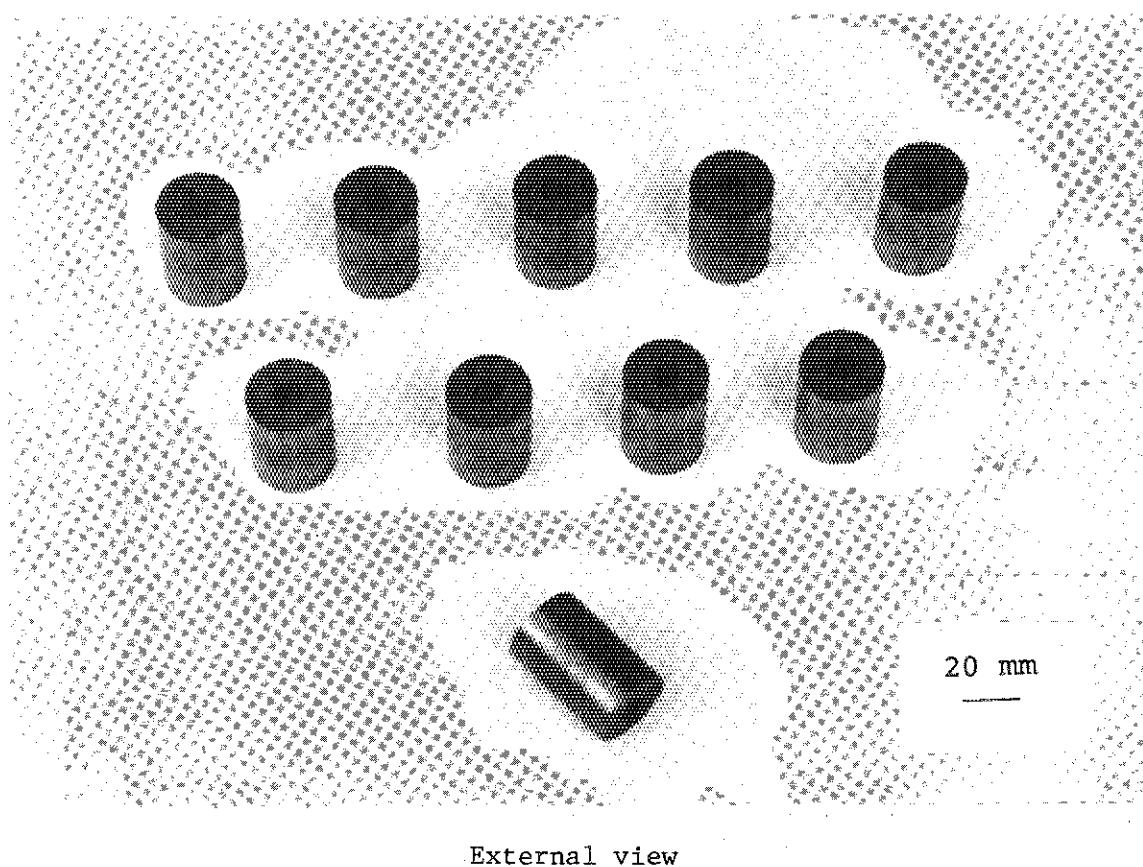
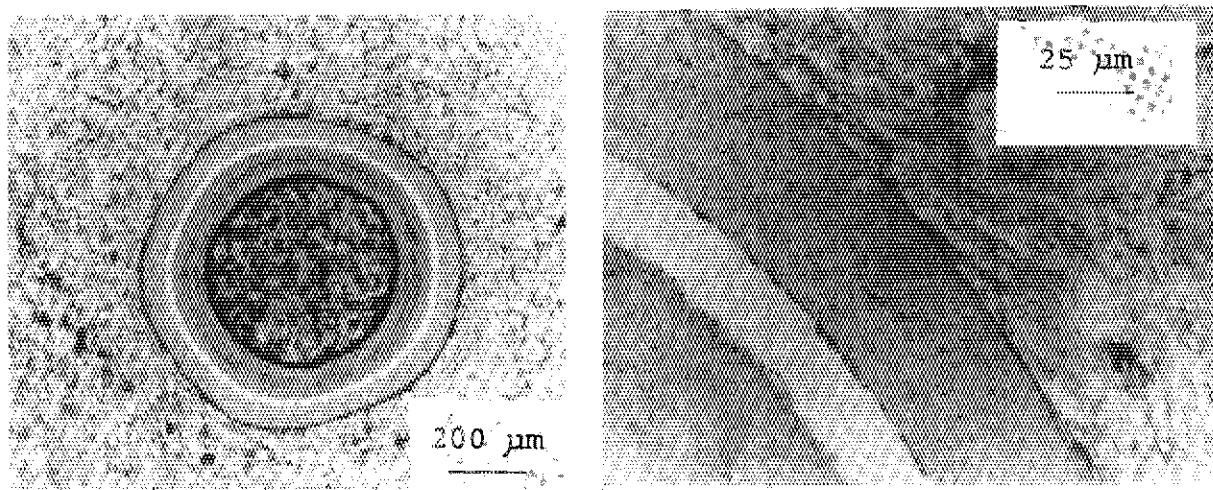


Fig.1.9 Frequency distribution of crushing strength of coated particles for the 2nd OGL-1 fuel.



External view



Cross section

Fig. 1.10 External view and cross section of the 2nd OGL-1 fuel compacts.

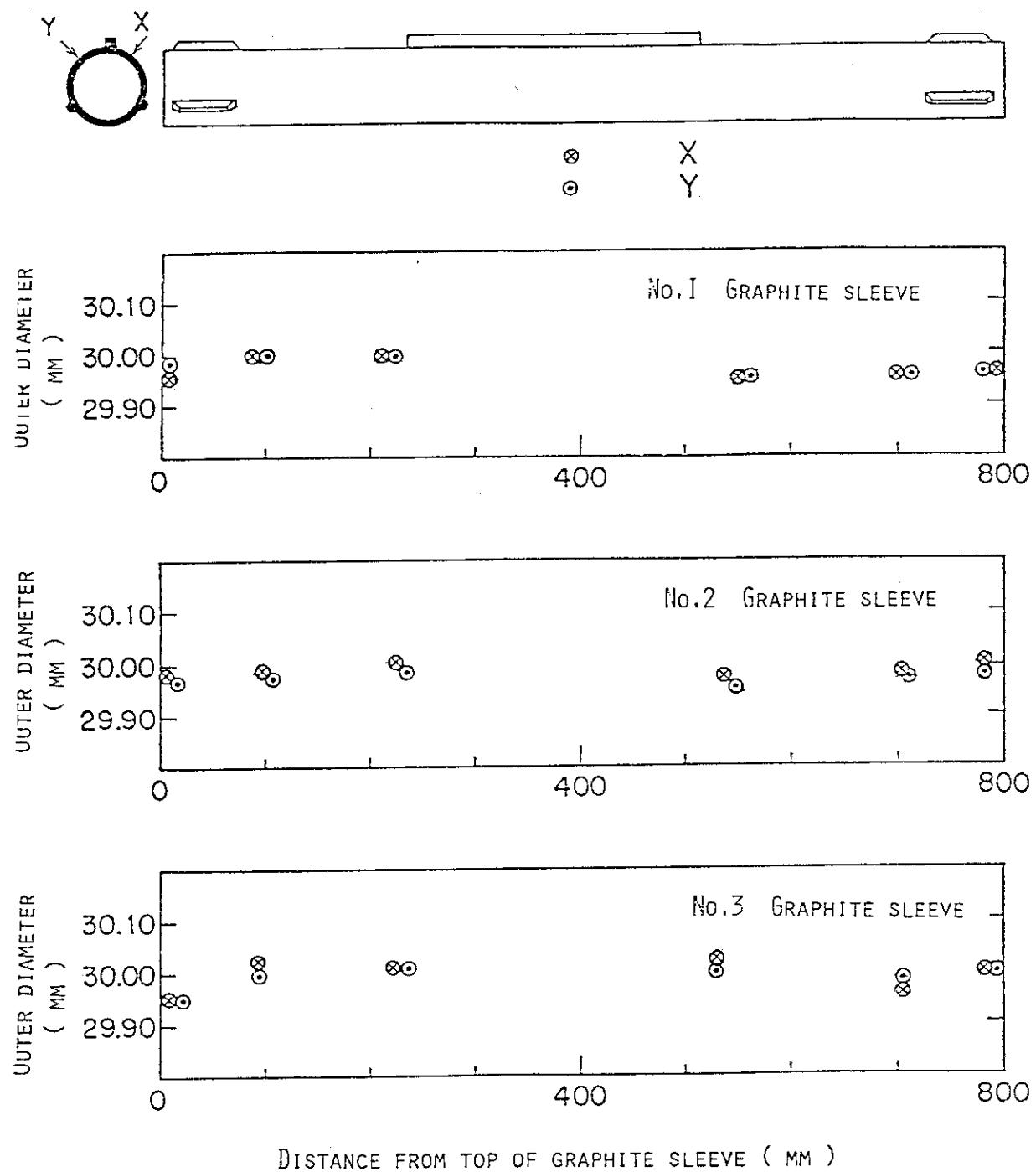


Fig.1.11 Outer diameter distribution of graphite sleeve for the 1st OGL-1 fuel assembly

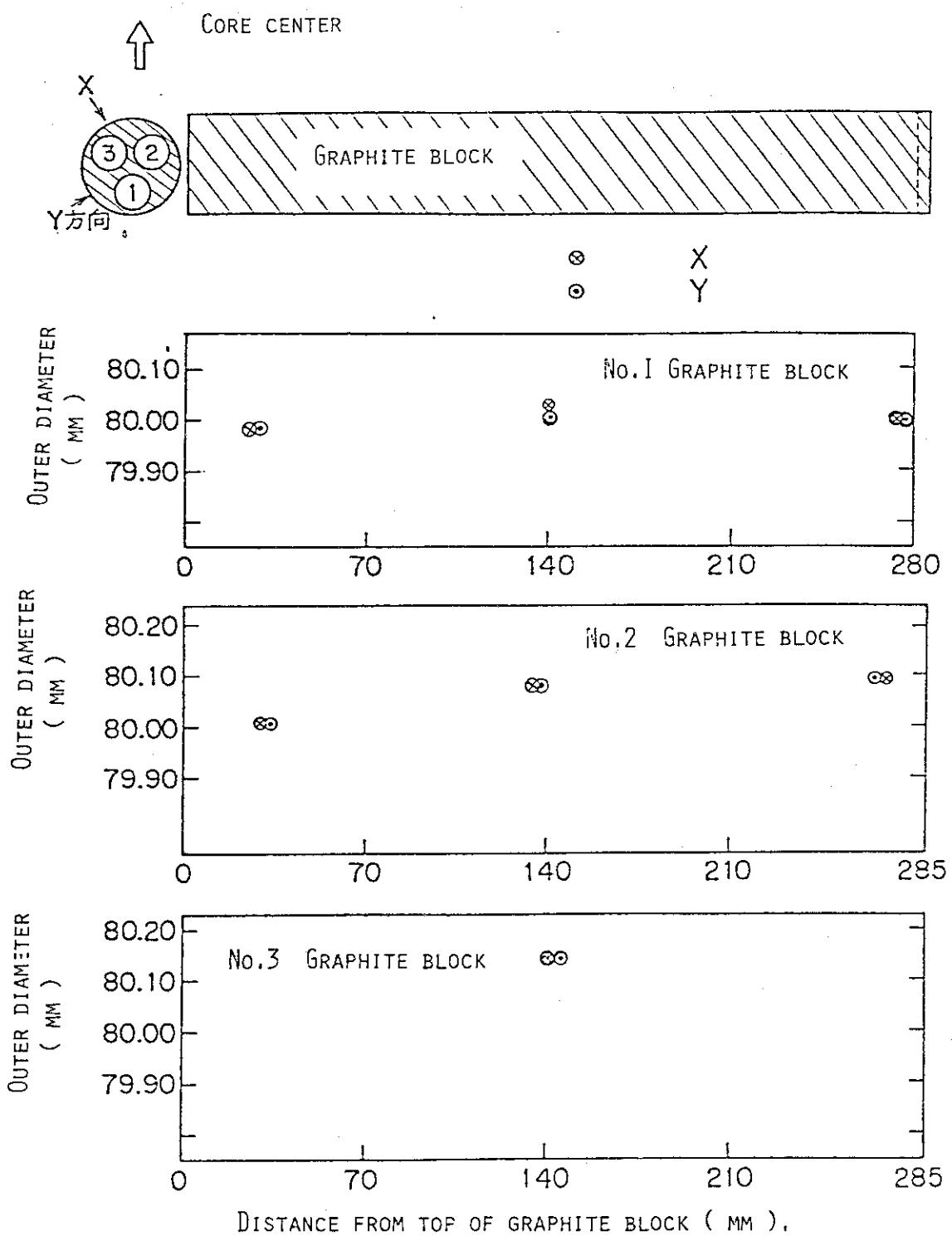


Fig.1.12 Outer diameter distribution of graphite blocks for the 1st OGL-1 fuel assembly

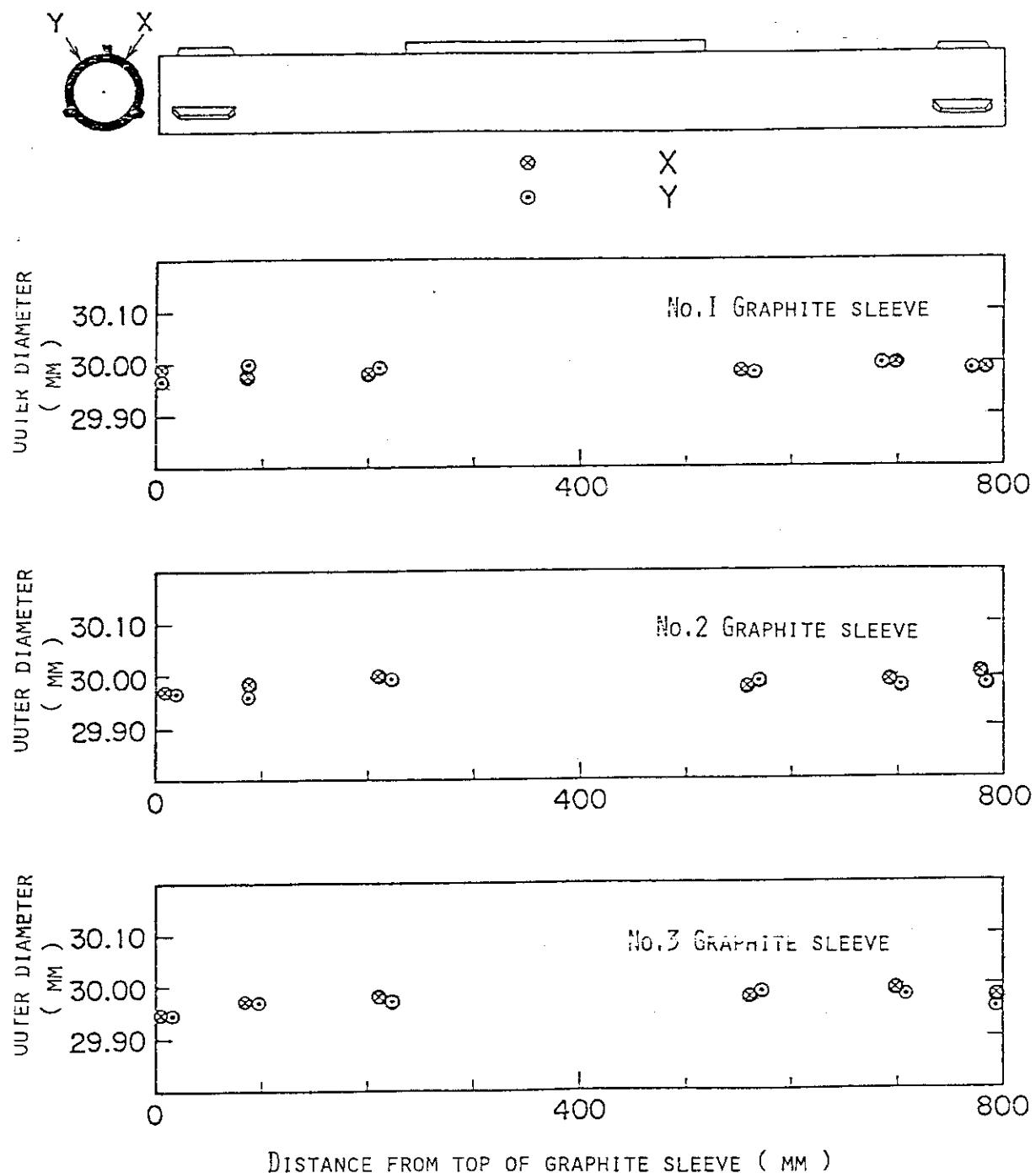


Fig.1.13 Outer diameter distribution of graphite sleeves for the 2nd OGL-1 fuel assembly

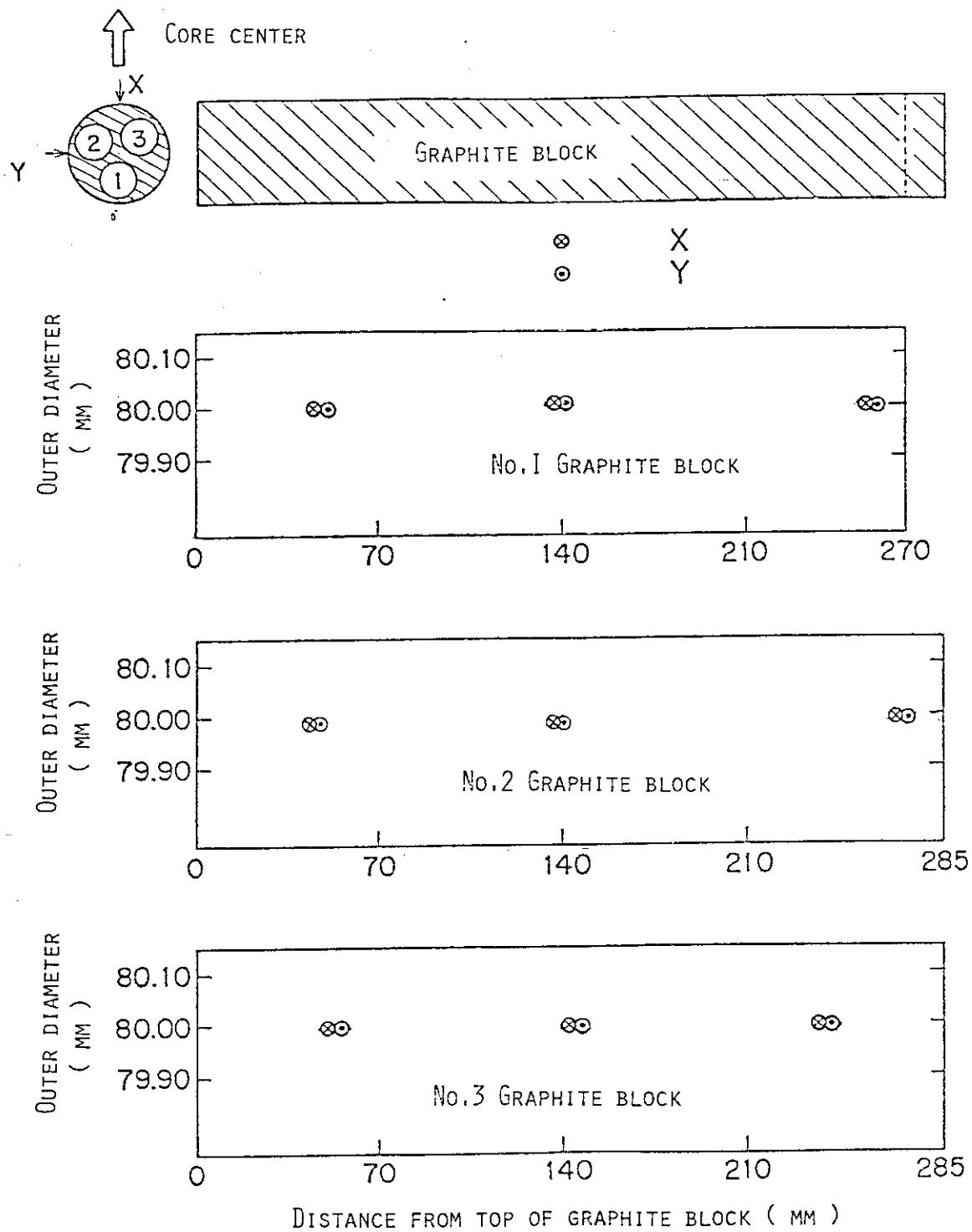
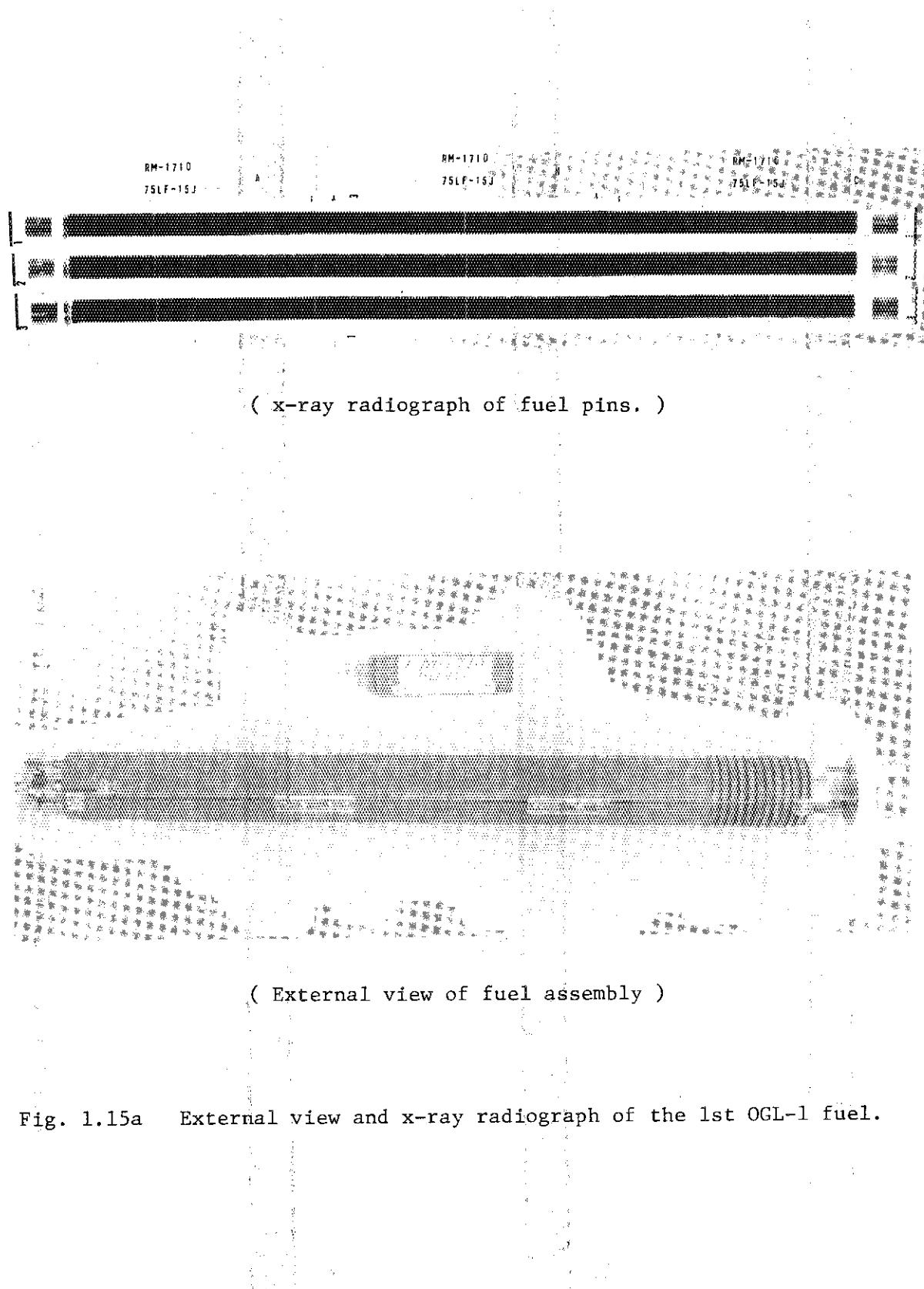


Fig.1.14 Outer diameter distribution of graphite blocks for the 2nd OGL-1 fuel assembly



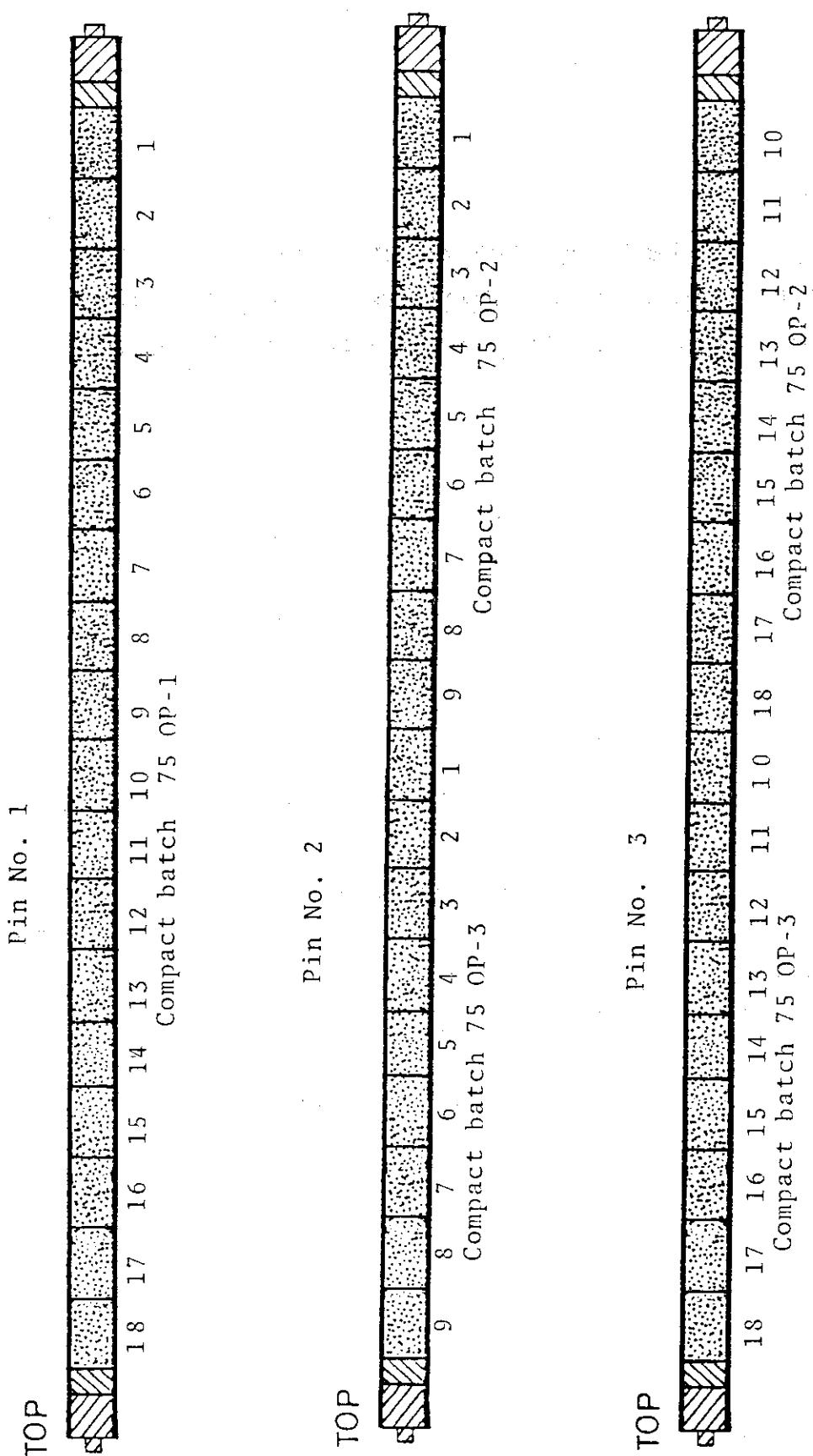


Fig.1.15b Layout of fuel compacts in the 1st OGL-1 fuel pins.

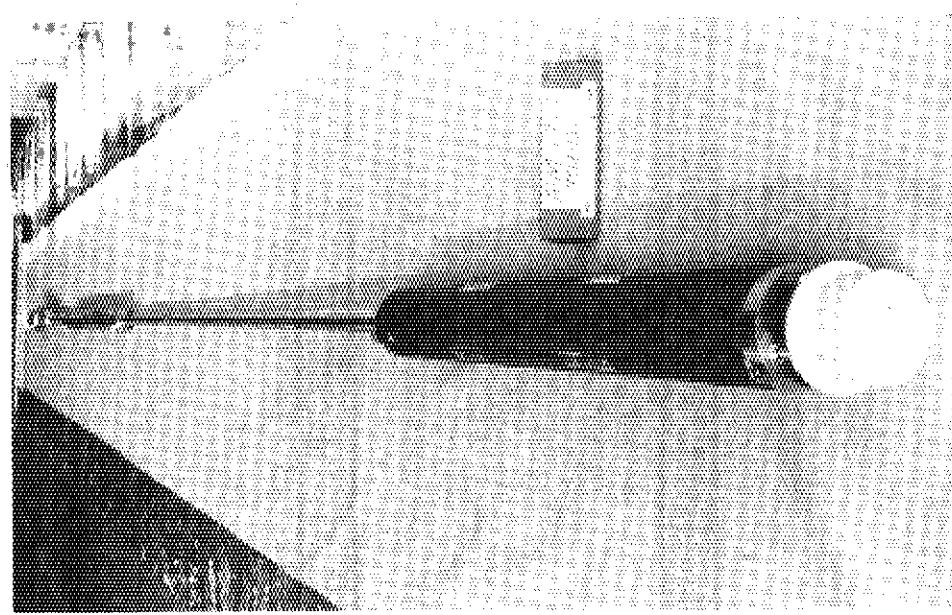


Fig. 1.16 External view of the 1st OGL-1 fuel specimen.

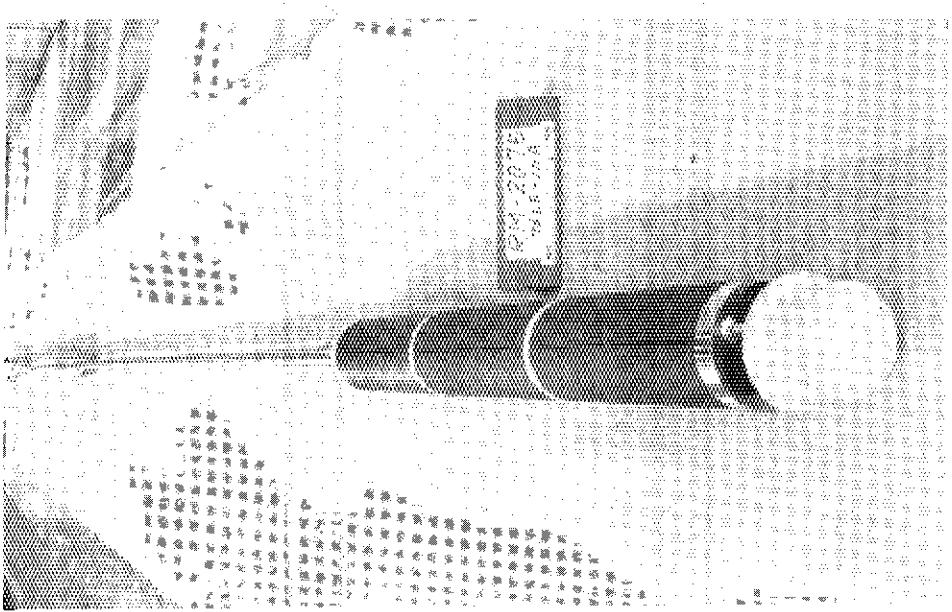


Fig. 1.18 External view of the 2nd OGL-1 fuel specimen.

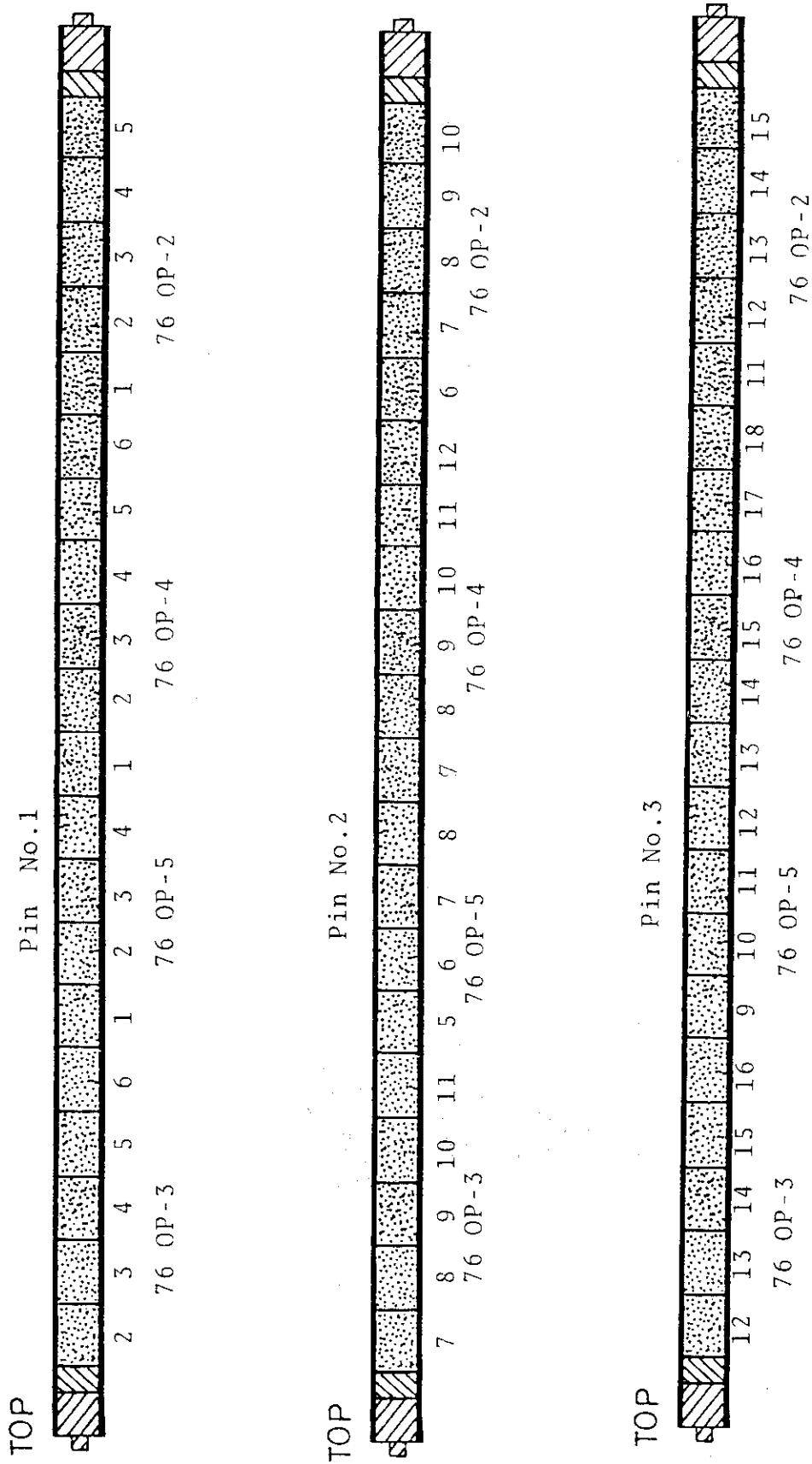


Fig.1.17a Layout of fuel compacts in the 2nd OGL-1 fuel pins.

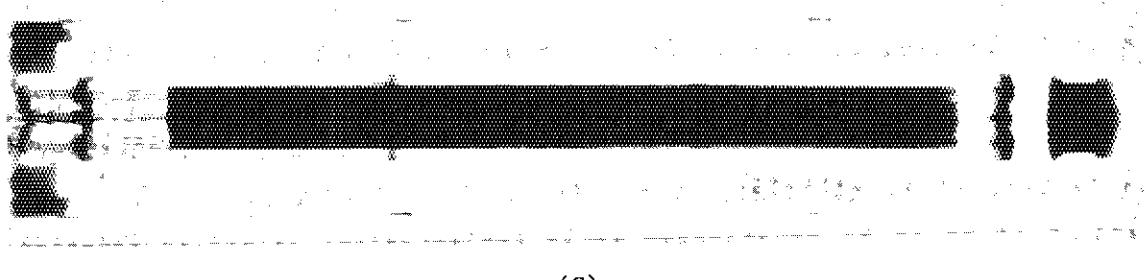
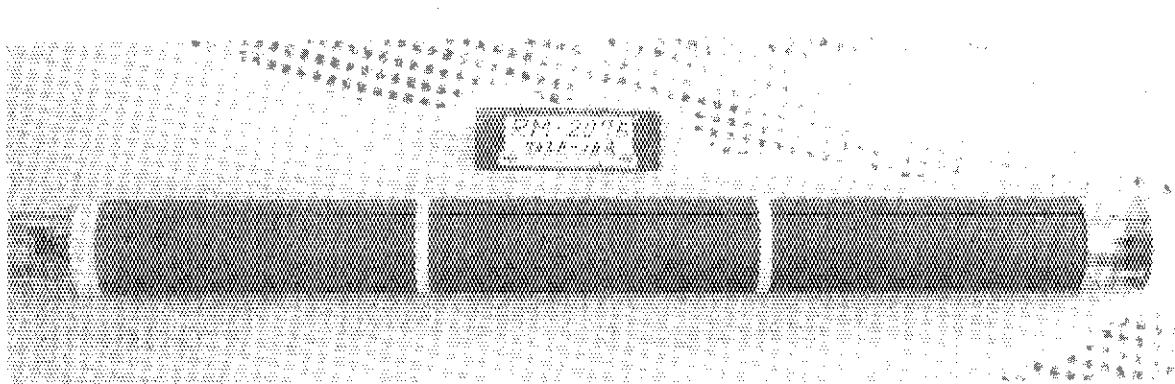
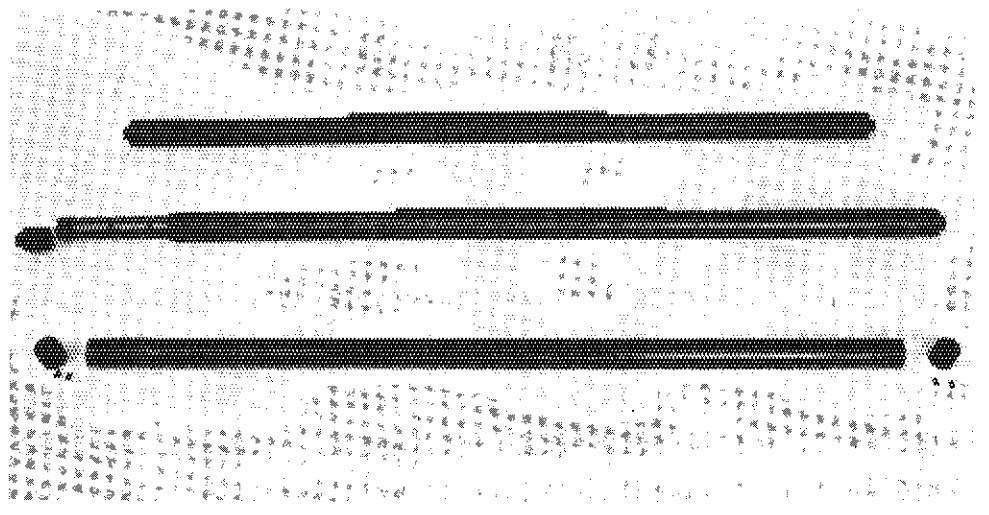


Fig. 1.17b The 2nd OGL-1 fuel, (A) external view of fuel pins, (B) external view of fuel assembly, (C) x-ray radiograph of fuel assembly.

2. 照 射

2.1 照射装置 (OGL-1)

照射装置 (OGL-1) についてはすでに詳報⁽¹⁾があるので、以下に要点のみを述べる。OGL-1はJMT-Rの反射体領域に設置しており、照射内筒はハステロイX製で内径84mm、長さ7m余りの管である。Fig. 2.1にOGL-1ループの流れを示す。系内は約30kg/cm²のヘリウムが循環しており、ガス中の不純物を除去するガス精製系、ガス冷却系、熱交換器系、照射中の燃料温度を調節するための加熱器およびOGL-1燃料試験体を装荷して照射試験を行う炉内管から構成されている。系内を流れるヘリウムガスは最大100g/secまで可能で、流量を変えることにより、OGL-1燃料の照射温度を変えることが出来る。照射試験中に燃料から放出された気体FP量は、ガス精製系入口で採取したヘリウムのガンマスペクトロメトリーにより求める。

2.2 照射履歴

第1次OGL-1燃料体の照射履歴をTable 2.1に示す。最高線出力は燃料棒外側を冷却するヘリウムガス温度から計算で求めた。計算は計算コードSTEP⁽²⁾を行った。表の値は燃料棒3本の最高値の平均値を示す。燃料棒3本の出力比をFig. 2.2に示す。この値は照射後試験のγスキャンの結果から求めたものである。燃料棒間の出力比は大きく異なっており、No.1はNo.2よりも50%も低い値である。これはNo.2の方がNo.1より炉心に近いためである。No.2とNo.3の違いは照射中、近くにある他のキャップセル等の影響を受けたことによると考えられる。燃料コンパクト最高温度は、温度測定用タンクステンレニウム熱電対が断線したり、絶縁不良を起す等のトラブルのため精度良く測定できなかった。このため、STEPで計算した値を示した。燃焼度は燃料棒3本の最高値の平均値で、線出力から計算した。燃料体長さ方向の平均燃焼度は3500MWD/Tである。Fig. 2.3に照射中の冷却ヘリウム流量および精製系ヘリウム流量の変化を示す。39サイクルに冷却ヘリウム流量が変動しているのはOGL-1ループの性能試験を行ったためである。40サイクルになると、ほぼ30g/secで安定した照射が行われた。Fig. 2.4に照射中の燃料体各部の温度を示す。燃料コンパクト温度は計算値である。燃料棒出口ガス温度は、No.1およびNo.2ピンの上部端栓の温度である。混合ガス温度は燃料棒を冷却したガスと、黒鉛ブロック外側を冷却したガスが混合すると思われる場所(黒鉛ブロック上端より35mm上)のガス温度である。燃料棒入口温度(試料入口温度)は黒鉛ブロック下端から熱電対を10mm下方に突出しており、仕切管から燃料体へ流れ込み、燃料体を冷却するため上方に流れるガス温度を測定した。39サイクル前半は冷却ヘリウムガス流量が多く、燃料棒入口温度も低いので、コンパクト温度および燃料棒出口ガス温度も低い。後半サイクルになると、試料入口を730°Cと高め、冷却ヘリウム流量も30g/secと少なくしたため、出口混合ガス温度、燃料コンパクト温度も大巾に上

昇した。40サイクルになると、前半、後半ともに、ほぼ一定条件で照射が行われていることがわかる。また、照射中のヘリウム雰囲気は、精製系が良く働き、不純物ガスは合計で10 VPm以下と高純度に保たれていた。

第2次OGL-1燃料体の照射履歴をTable 2.1に示す。最高線出力および燃料コンパクト最高温度は第1次OGL-1燃料の場合と同じく、計算コードSTEPを用いて求めた。線出力が第1次より増加しているのは燃料コンパクト中のウラン量が増加しているためである。燃料棒3本の出力比をFig. 2.2に示す。この出力比は照射後試験の結果から求めたもので、No. 2ピンが最も高い出力である。No. 2ピンの到達最高燃焼度はTableの値に1.13を乗じた値で8200MWD/T(1%FIMA)となる。燃料体を冷却するヘリウムガス流量および精製系流量の変化をFig. 2.5に示す。42サイクルは45g/secで44、45サイクルは55g/secと少し流量を増加させた。精製系流量は43サイクルが0.4~0.5g/secであり、他の3サイクルは0.7~1g/secで運転した。燃料体各部の温度の変化をFig. 2.6に示す。44サイクル前半を除いて、ほぼ一定条件で照射が行われた。燃料コンパクト最高温度は最も温度の高いNo. 2ピンで約1400°C、燃料棒出口ガス温度は約1000°Cであった。

2.3 照射中のFPガス放出

照射中のFPガス放出は、照射中にループのガス精製系入口で採取したヘリウムのガンマスペクトロメトリーにより測定する。ここで取得する値は、ループ内ヘリウム中のFP濃度であるが、これを通常の尺度R/B(Rは燃料からの放出速度、Bは燃料での生成速度)に換算するために、APP. 2.1に示す計算を行った。

Fig. 2.7に第1次燃料のR/Bを示す。R/Bの議論においては、特定の核種1つを選ぶのが便利であるが、その目的には、中性子吸収も親核種の挙動も問題にならないという理由で、XeよりKrを選ぶ。Fig. 2.7に示すように、Krは85m, 87, 88の3核種が測定され、その選択には、半減期、収率の点からの検討が必要であろう。しかし、希ガス放出に関するGAのほう大なデータ⁽³⁾との比較が容易である、などの理由でOGL-1照射ではKr-85mを標準として利用している。Fig. 2.7のKr-85mのR/Bは、平衡時点で、 $3 \sim 5 \times 10^{-7}$ であると読める。

一連のOGL-1照射試験の目的の第1は、粒子被覆が実験炉の使用条件に耐えることを実証することであるが、そのためには、R/Bの絶対値よりもむしろ照射時間に伴うR/Bの増加が問題である。なぜなら、照射初期のR/Bは製造の問題だからである。Fig. 2.7では、Kr, Xeとともに照射の初期に若干の上昇がみられるが、これは照射の初期ループの運転温度を上昇させた(Fig. 2.4参照)ためであって、照射に起因する破損の発生の証拠ではないと考える。

この種の議論においては破損検出の精度が問題になるが、OGL-1燃料棒の温度分布は拡散支配と反跳支配の両方の温度領域(1400~1000°C)にまたがっているため、スイープキャプセルのR/Bのような正確な議論⁽⁴⁾は困難である。そこで非常に粗い検討を試みる。粗い議論であれ正確な議論であれ、最大の問題は、現行の露出ウラン測定法では破損と汚染の正確な区別が困難なことである。また、最外炭素層の汚染は炭化ケイ素層破損率に含まれてしまって表に出ない。このような事情から、破損率測定自体の精度もまた問題になる。したがって、以下は大きな誤差

を2つ含む議論である。

先ず、汚染と破損の区別が必要である。それは、汚染10%放出、破損1%放出という西独の勇敢な線引き⁽⁵⁾からも想像できるように、汚染と破損ではR/Bに桁ちがいの差が出る可能性があるからである。第1次燃料の汚染率はデータがないので、第2次燃料のデータを借用する。第2次燃料体に使用した燃料コンパクトの汚染量($\mu\text{g}/\text{個}$)は、表面汚染5、電気解碎液13、マトリックス粉末10であった。粒子1個のウラン量は1mgであるから、ここには破損粒子からのウラン量は含まれていないと判断する。すなわち汚染率が 2×10^{-6} である。第2次のKr-85mのR/Bは $6-7 \times 10^{-7}$ (Fig. 2.9参照)であったから、外部汚染によるR/Bは大体 $0.3 \times$ 汚染率である。問題はこの関係の第1次への適用であるが、第1次のR/Bは上述のように $3 \sim 5 \times 10^{-7}$ であったから、汚染率は $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ と推定される。一方第1次の露出ウラン率(汚染率+破損率)は $0.5 \sim 1 \times 10^{-5}$ であったから、汚染のみという仮定からの推定より1桁近く高い。すなわち、第1次のR/Bには破損粒子からの寄与が可能性として考えられる。

破損粒子からのR/Bの評価には、汚染からの寄与が無視できるほど十分多数の破損粒子を含むコンパクトのR/Bを利用する望ましい。それにはDIDO照射のデータ⁽⁶⁾が便利である。これによると、第1次の平衡温度1400°C付近のR/BはKr-85mで $0.02 \times$ 破損率、1300°C付近で $0.01 \times$ 破損率である。1200°C以下は拡散の寄与が無視できると考えられる⁽⁷⁾から、R/Bは $0.01 \times$ 破損率より小さいであろう。したがって、粗い議論では、燃料棒全長にわたる平均としては、 $0.01 \times$ 破損率が適用できると考える。したがって、第1次の露出ウラン率が全部破損率であると仮定すると、R/Bは $0.5 \sim 1 \times 10^{-7}$ になり、Fig. 2.7のR/Bのたかだか $1/5$ 程度である。すなわち第1次のR/Bは汚染からの放出と破損からの放出の和である。ただし、以上の議論の根拠となった第2次の汚染データには最外炭素層の汚染が含まれていないので、この結論は、外部汚染からの放出と最外炭素層の汚染からの放出の和であると置き換えられる可能性がある。ちなみに、79FPC1(79年度製未成形粒子)の最外層汚染⁽⁸⁾は 1×10^{-4} であった。焼成時のマトリックスへの移行を無視しても、照射中に10%が反跳でマトリックスに移行すれば、第1次のR/Bを越える。

以上の議論から判断して、OGL-1照射のFPガス測定による破損検出精度は決して満足ではない。したがって、照射後試験が不可欠である。ただ1つの救いは、マトリックス汚染も最外層汚染とともに照射による増加が無視できることである。すなわち、照射時間とともにR/Bが増加する場合は破損発生に起因すると考えてよい。ここで再び検出精度を問題にする。単純に、汚染からのR/Bが $0.3 \times$ 汚染率、破損からのR/Bが $0.01 \times$ 破損率とすれば、破損が汚染の30倍あれば検出できる。第1次のマトリックス汚染が第2次と同程度であったと仮定すれば、 2×10^{-6} である。したがって、照射によって 6×10^{-5} の破損が起これば検出できる。第1次(Fig. 2.7)も第2次(Fig. 2.9)もともにR/Bの照射中の増加は認められなかった。言い換えれば、いずれの場合も、照射に起因する破損は 6×10^{-5} 以下であった。これは製造破損の許容値以下である。したがって、粗い議論においては、第1次、第2次ともに、照射に起因する破損は発生しなかったという表現が許される。

Fig. 2.7とFig. 2.9を比較すると1つの相違点が認められる。それは、Fig. 2.9では、照射の初期にわずかではあるがR/Bが減少していることである。この現象は核種による差がない。

第2次の照射温度 (Fig. 2.6 参照) は一定であったから、この原因は不明である。第3次⁽⁹⁾ではさらに顕著な減少が認められた。ループ照射ではなく、実際の原子炉においては、R/B が照射日数とともに減少する現象が普通に観察される。しかしその説明に定説はない。たとえば AVR⁽¹⁰⁾では黒鉛格子中の欠陥の増加 (トラップの増加) と微細開気孔閉鎖の相刺効果であると説明するのに対して、Peach Bottom⁽⁸⁾では燃料核の焼結が進むためであると説明する。第2次のR/B は、上述のように、破損粒子の寄与がないから、本報では AVR の立場をとるのが妥当である。これらとは逆に、照射に伴う R/B 上昇の報告^(11,12)もある。Peach Bottom の当事者である G A でさえ、照射に伴う拡散定数の増加を認めた例⁽⁸⁾がある。しかし、破損の増加がなければ R/B が増加しないと考えるのが G A の立場であり、かつ、FP ガス測定に基づく破損検出の一般的根拠である。

最後に、第1次の R/B は汚染と破損の和である可能性があるのに対して、第2次の R/B は汚染のみによるとする前述の推論に対して、違った角度からの考察を試みる。第1次と第2次の R/B の崩壊定数依存性を Fig. 2.8 と 2.10 に示す。いずれも Xe-135 の崩壊定数は燃料位置の熱中性子束を $3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ として吸収補正を行ったが、I-135 吸脱着の Xe-135m, Xe-135 へ影響は検討していない。Fig. 2.8 と Fig. 2.10 ともにデータのはらつきが大きいが、これはループの死容積が大きいことによると考える。しかし、そのようなばらつきの幅を越えて、Fig. 2.8 と Fig. 2.10 の間には差が認められる。前者の勾配が後者の勾配より大きいという差である。放出が拡散支配である場合は公配は 1/2 である⁽¹³⁾。反跳支配の場合は当然勾配はゼロである。マトリックス中の拡散は燃料核中の拡散より速いから、汚染からの放出は反跳支配に近く、破損からの放出は拡散支配に近いと考えると、Fig. 2.8 と Fig. 2.10 の勾配の差は、第1次の R/B は汚染と破損の和であるのに対して、第2次の R/B は汚染のみによるとする前述の推論を定性的に支持することになる。

(小林記)

参考文献

- (1) 松永朔郎, 他: 日本原子力学会誌 21 (1979) 245
- (2) J MTR 設計及び工事の方法の認可申請書 (OGL-1 照射試料 79LF-19A の製作)
55年7月
- (3) たとえば GA-A 13723 (1977)
- (4) 小川徹, 他: 未公開資料 (1982)
- (5) : REAKTOR TAGUNG (1978) 631
- (6) 燃料照射研状況報告 No.24
- (7) 福田幸朔, 他: 日米セミナー 1982 (米国 BNL)
- (8) 菊池輝男: 未発表データ
- (9) 原研パンフレット; 多目的高温ガス炉研究開発の現状 1980 p 24
- (10) Nieder, Effect of Environment on Material Properties in Nuclear Systems (1971) p183.
- (11) EUR5841-EN (1977) p60.
- (12) BNES Conf. Paper 18 (1973).
- (13) D.R Olander: TID-26711-P1 (1976).

Table 2.1 Irradiation history of the 1st and 2nd OGL-1 fuel.

項目 サイクル	照射開始日	照射時間 〔 〕は積算値 (時間)	最高線出力 (Watt/cm)	最高燃焼度 〔 〕は積算値 (MWd/T)*	燃料コントラクト 最高温度 (℃) *	燃料棒出口 Heガス最高 温度 (℃)
第1次	3 9	52. 3. 8	426	311	2297	1329
	4 0	52. 5. 13	509 [935]	256	2260 [4557]	1284
第2次	4 2	52. 12. 13	474	306	1771	1307
	4 3	53. 2. 25	230 [704]	367	1031 [2802]	1324
	4 4	53. 6. 12	509 [1213]	357	2219 [5021]	1319
	4 5	54. 1. 13	506 [1719]	356	2200 [7221]	1317
						1010

* 3本ピニンの最高燃焼度の平均値

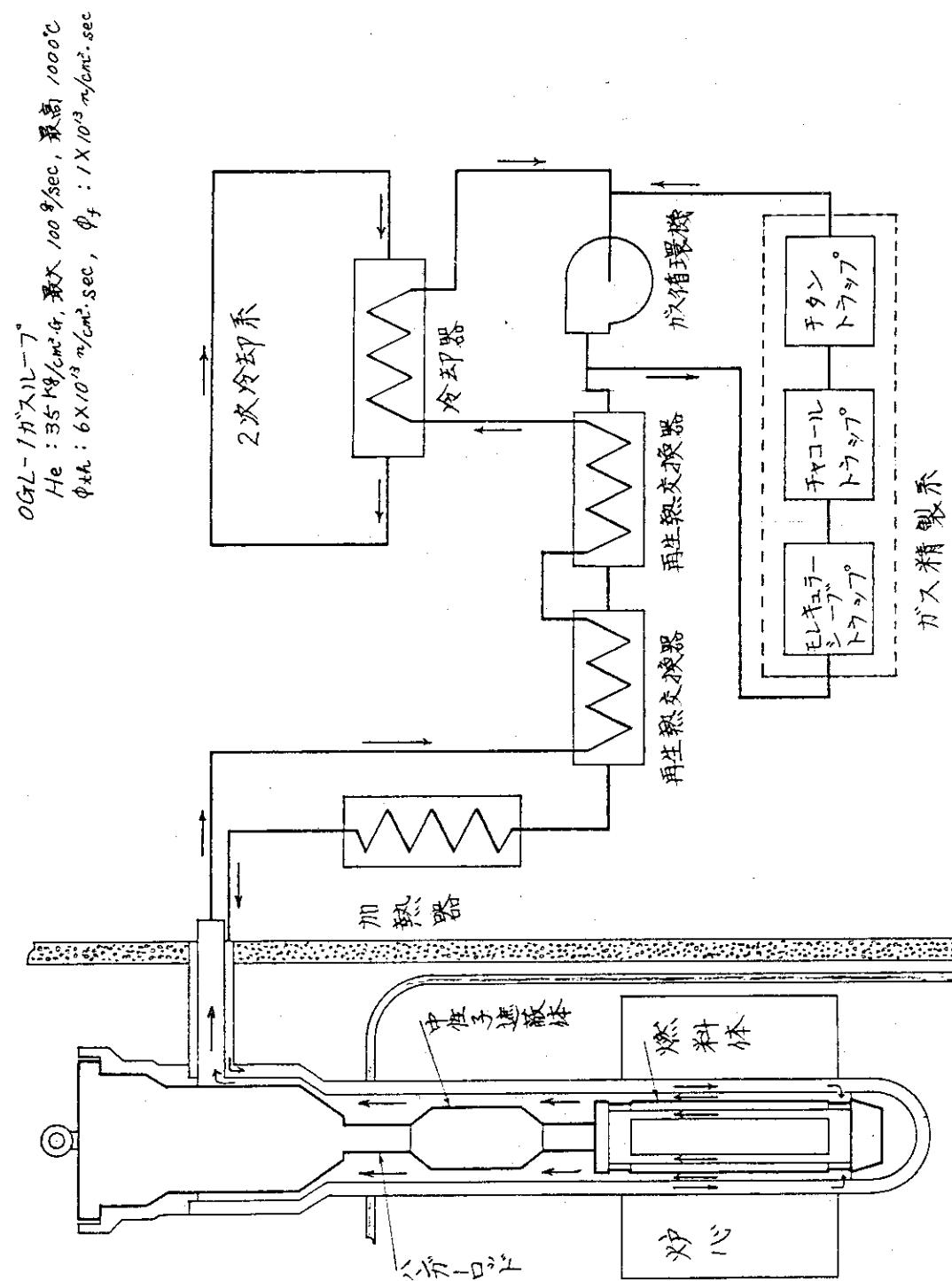


Fig. 2.1 Outline of the OGI-1 gas loop system.

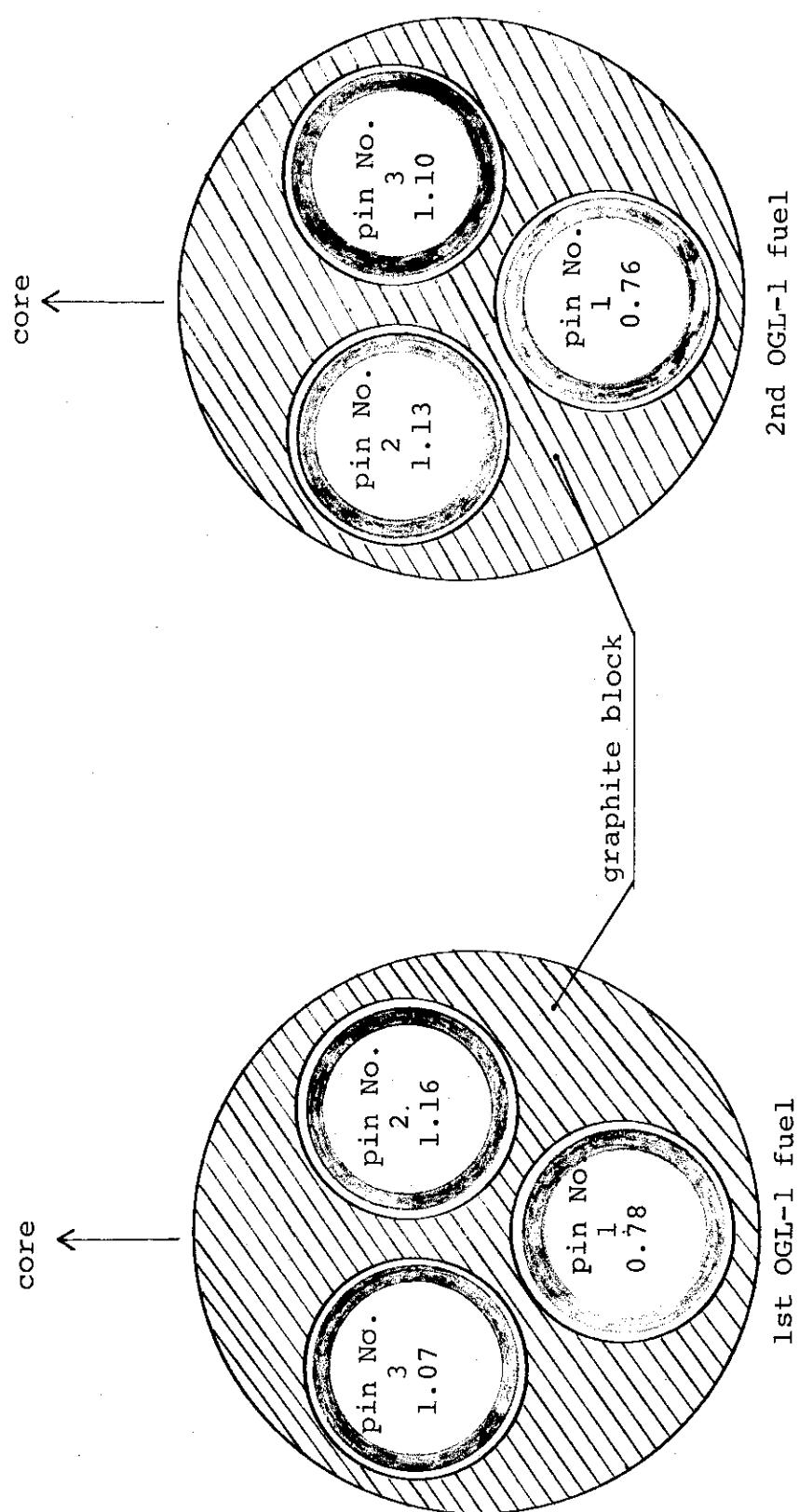


Fig.2.2 Peaking factor of the 1st and 2nd OGL-1 fuel.

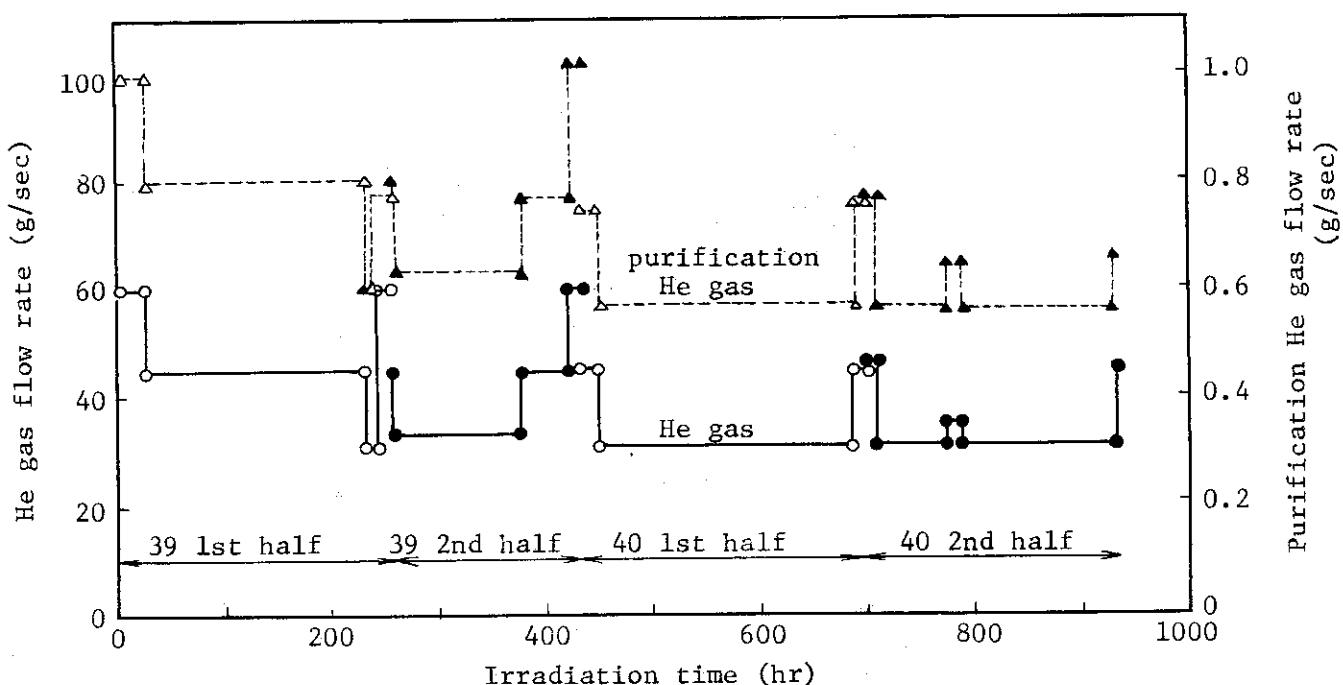


Fig. 2.3 Helium flow rate during irradiation of the 1st OGL-1 fuel

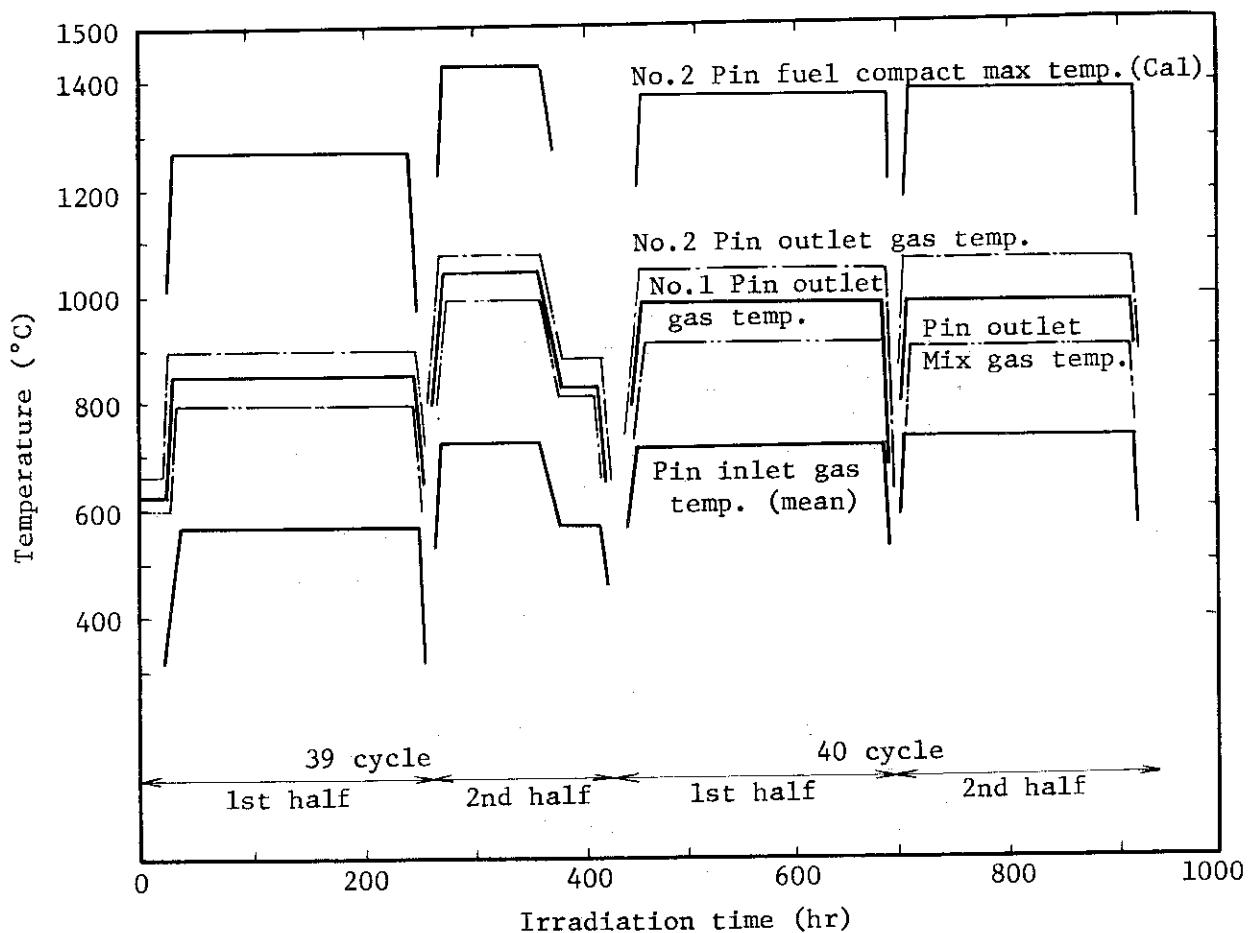


Fig. 2.4 Temperature history during irradiation of the 1st OGL-1 fuel

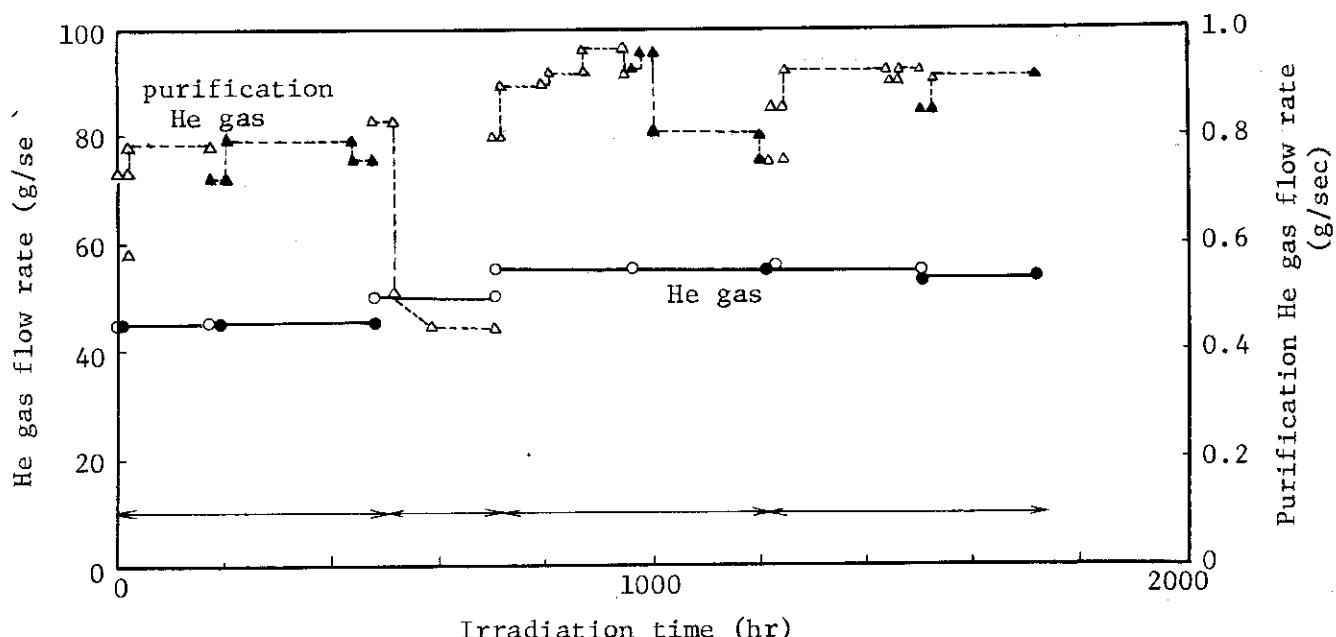


Fig. 2.5 Helium flow rate during irradiation of the 2nd OGL-1 fuel

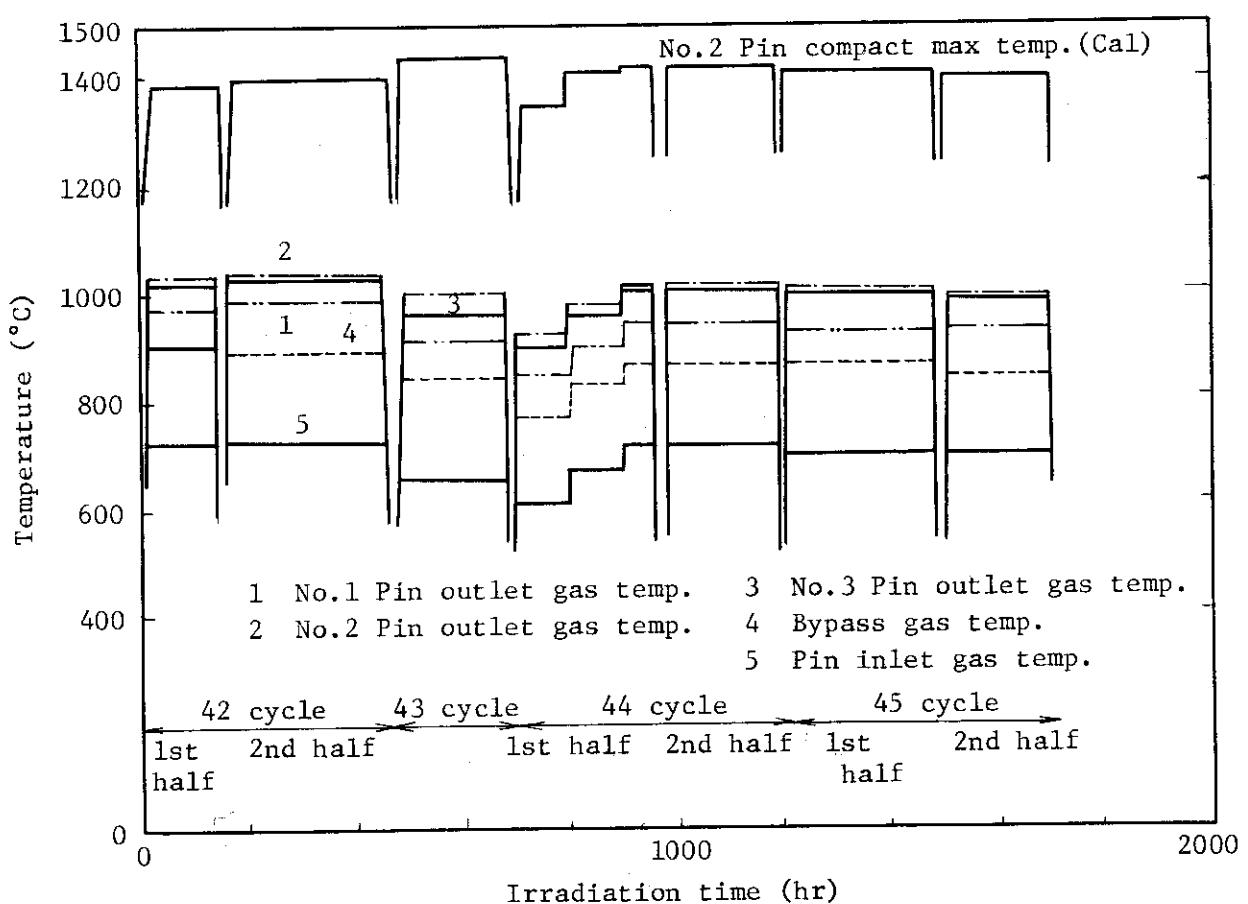


Fig. 2.6 Temperature history during irradiation of the 2nd OGL-1 fuel

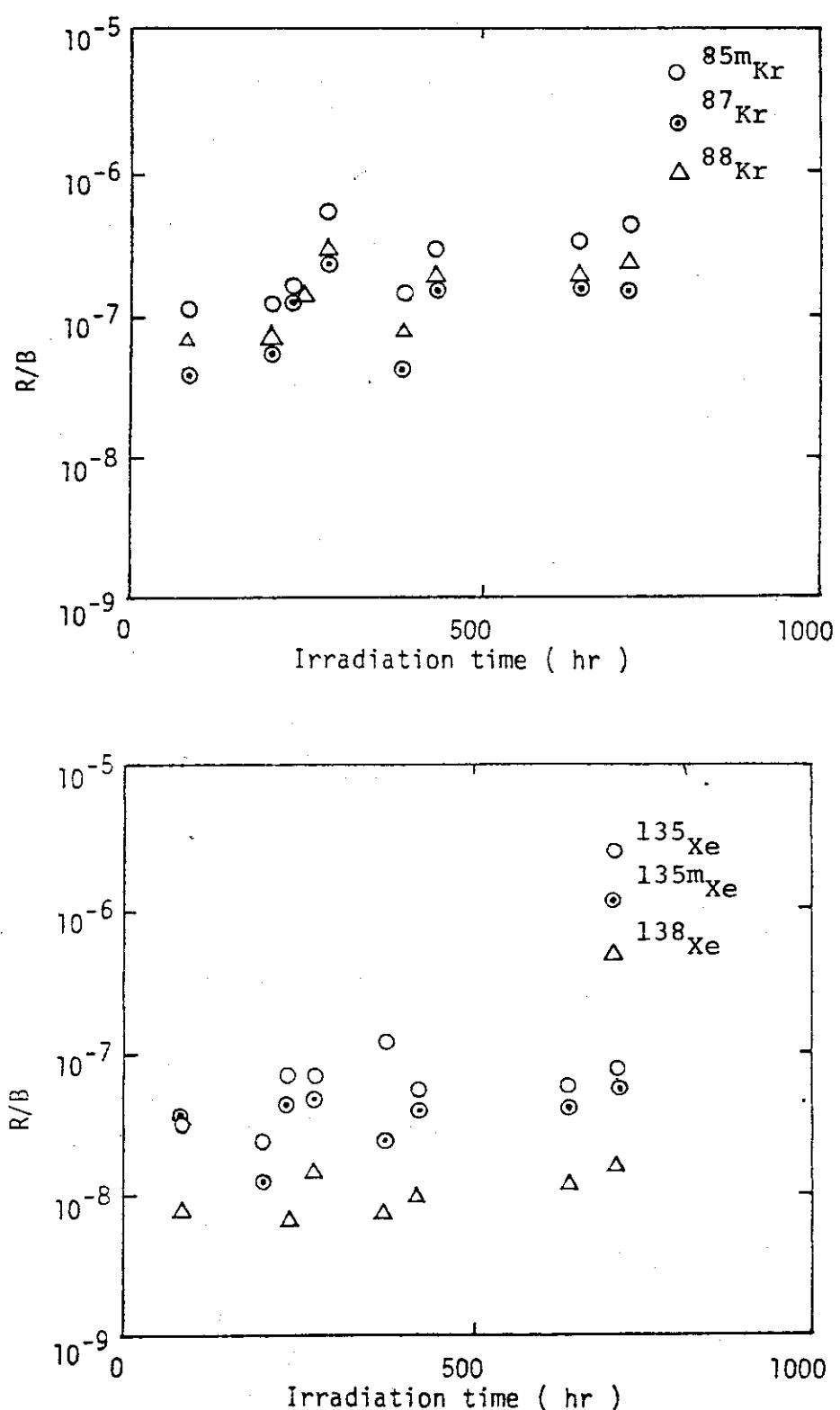


Fig.2.7 R/B change of the 1st OGL-1 fuel.

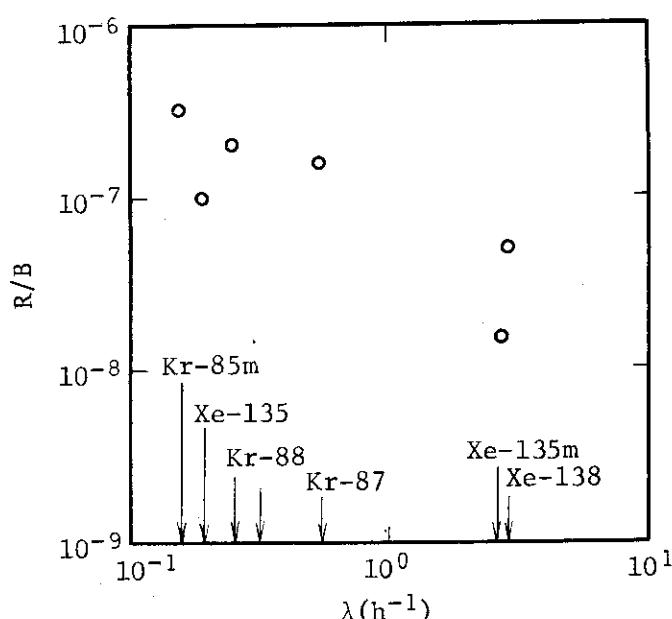


Fig. 2.8 Decay constant dependence of R/B of the 1st OGL-1 fuel

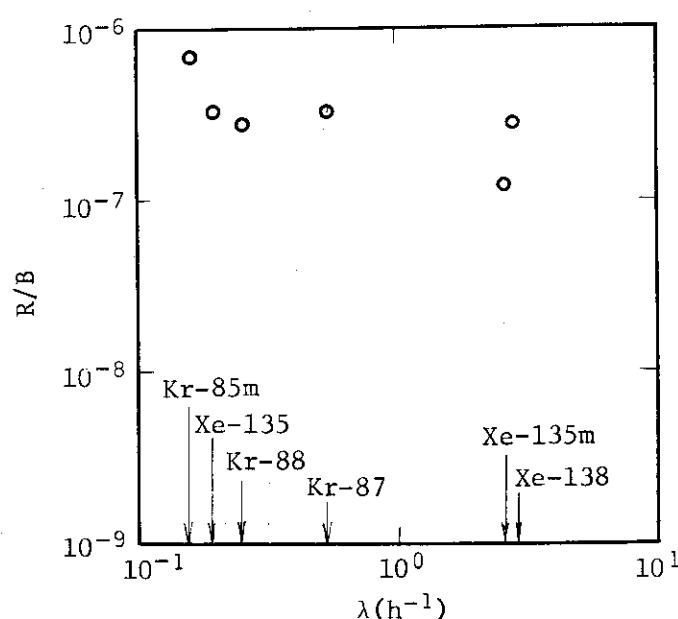


Fig. 2.10 Decay constant dependence of R/B of the 2nd OGL-1 fuel

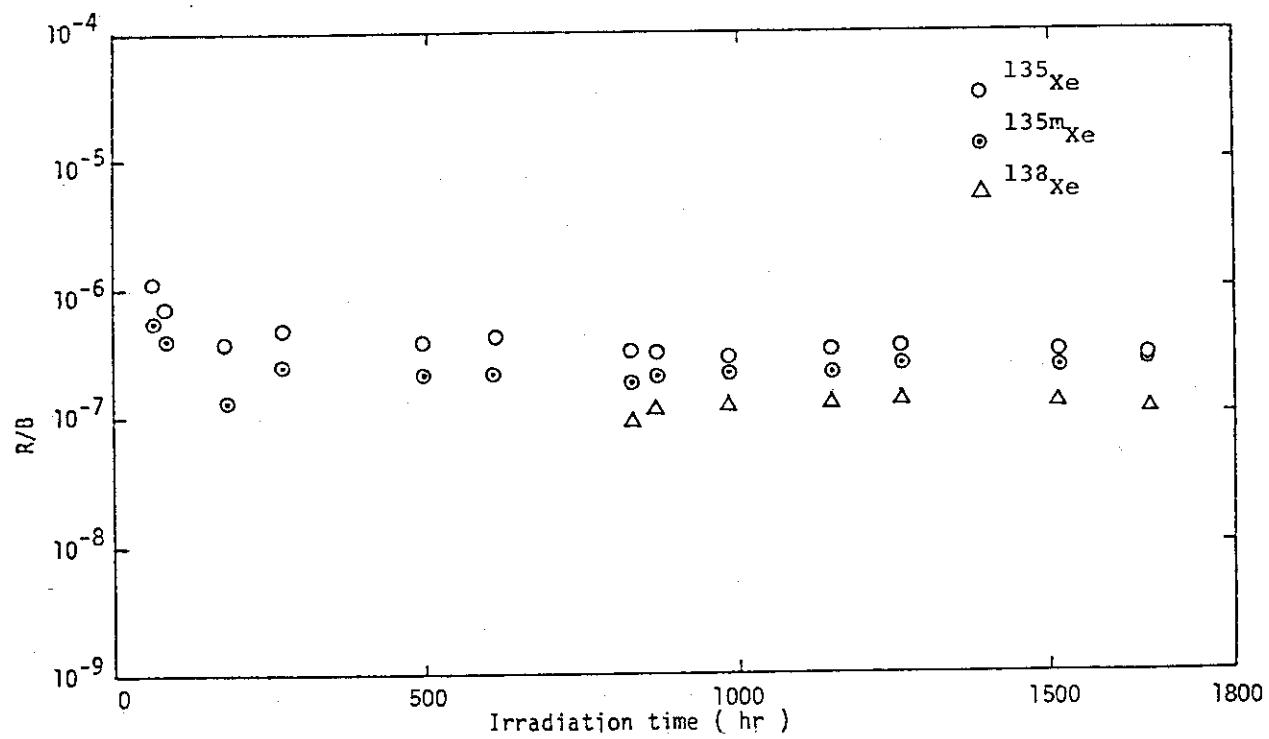
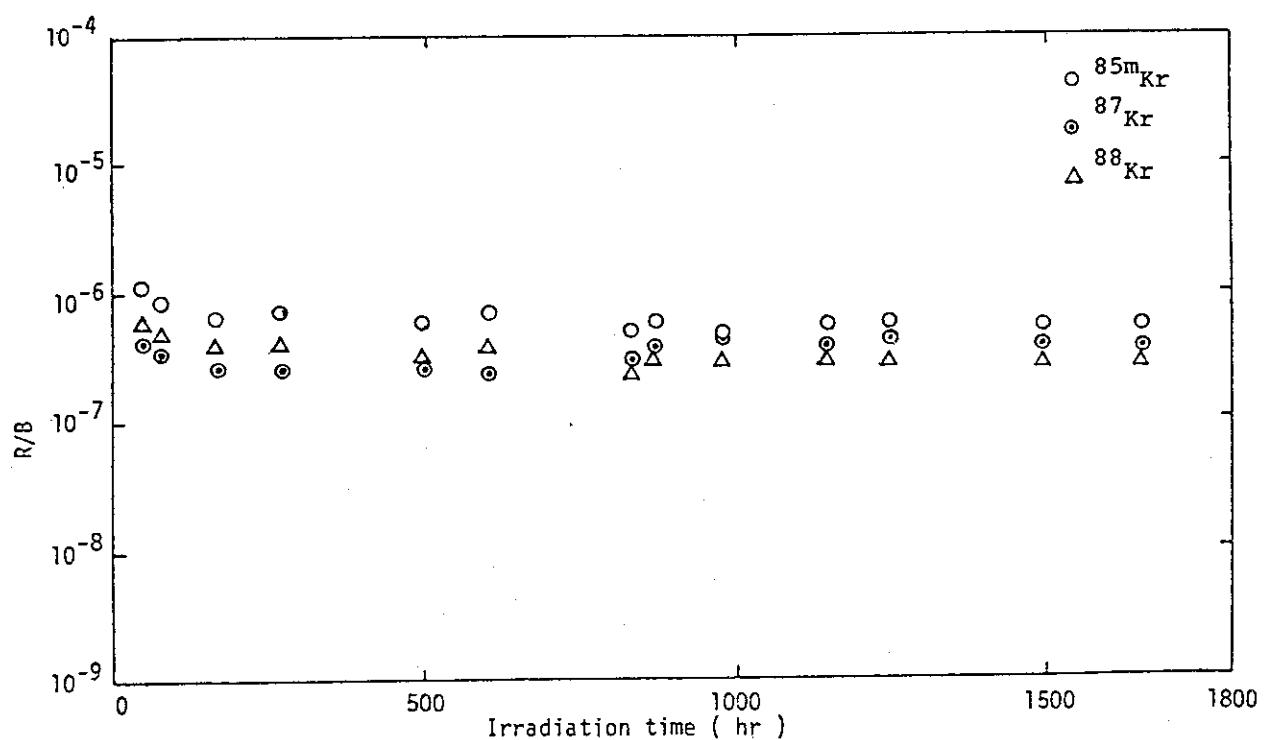


Fig.2.9 R/B change of the 2nd OGL-1 fuel

3. 燃料体と燃料棒の照射後試験

3.1 燃料体の照射後試験

照射の終了した第1次および第2次OGL-1燃料体は、Fig. 3.1に示すフローシートに従って、照射後試験を実施した。燃料体については、X線検査、外観検査、寸法検査を実施したあと、切斷解体し、黒鉛ブロック、燃料棒、金属部品に区分けした。黒鉛ブロックについては、外観検査、寸法検査、重量検査、曲がり検査、内表面検査を実施したあと、フルエンスモニタを取出した。金属部品については、外観検査および重量検査を実施した。燃料棒については、外観検査、重量検査、 γ スキャン、X線検査を実施したあと解体し、燃料コンパクト、黒鉛スリーブおよび端栓等の黒鉛部品に区別けした。黒鉛スリーブについては、寸法検査、重量検査、曲がり検査、内表面検査を、黒鉛部品については、外観検査、重量検査を実施した。黒鉛スリーブおよび黒鉛部品については、FP分布の測定を、黒鉛ブロックおよび黒鉛スリーブについては応力解析を行なったが、これらの結果は別に報告する。

3.1.1 燃料体の外観検査

第1次OGL-1燃料体全体を3方向から撮影した写真をFig. 3.2に、同じく斜方向から撮影した下端部の3方向の写真をFig. 3.3に、上端正面方向からの写真をFig. 3.4に示す。また、第2次OGL-1の燃料体の全体の外観写真をFig. 3.5に、上端部および下端部の斜方向からの写真をFig. 3.6に示す。第1次燃料体の黒鉛ブロックの上端部には破損がみられるが、第2次燃料体にはこのような破損はみられず全く健全である。第1次OGL-1の黒鉛ブロックにおいては、この破損のほかに、上部黒鉛ブロックと中央黒鉛ブロックの嵌合部に2個所、巾4mm、長さ15mmと巾5mm、長さ15mmの黒鉛材の欠落が観察される。

このほかの外観上の変化として、燃料体表面への煤の付着がある。第1次OGL-1の上、中、下段各黒鉛ブロック表面への煤の付着量は、中段ブロックおよび下段ブロックに多く、ブロックの全長にわたっては付着しているのに対し、上段ブロックでは下端部付近に多い、第2次OGL-1の上、中、下段黒鉛ブロックにおいては、3ブロックともほど同程度の煤の付着がみられる。ハステロイX材への煤の付着に関しては、第1次、第2次ともに燃料体の下端部に取付けられているジルコニアコーティングをほどこしたハステロイX材に多く、上端部のそれには少ない。第2次OGL-1の上部受金具にも、煤の付着量が多い。以上の観察から、煤の付着量はハステロイXの金属地肌の部分に少なく、ジルコニアコーティングをほどこした部分に多いことがわかる。ジルコニアコーティングの表面は、ハステロイX材の金属表面にくらべてかなり粗面で、このため煤が付着しやすいものと考えられる。

第1次および第2次OGL-1燃料体の外観からは、以上に述べた損傷および変形のほかには、異常は全くみとめられなかった。

第1次の黒鉛ブロックの破損の原因は不明であるが、同一基本構造（3分割構造）の第2次の

黒鉛ブロックは照射時間が2倍であるにもかかわらず健全であった。これは、材料の差（第1次はSE 2-24、第2次はIG-11）が少なくともひとつの原因であったと考えられることを示唆するものである。

3.1.2 燃料体のX線検査

第1次および第2次燃料体のX線写真を、それぞれFig. 3.7およびFig. 3.8に示す。これらの写真は、両燃料体を、それぞれ3方向から撮影したものである。燃料体内部の燃料コンパクト、ハステロイX材、熱電対の配置状況を知ることができる。これらの写真から、燃料コンパクトや熱電対の配置は、照射後も照射前同様正常に保たれていることがわかる。しかし、第1次OGL-1燃料体においては、熱電対が溝から飛出しており、また、タイロッドの上部に曲りが確認される。

3.1.3 燃料体の寸法検査

燃料体の寸法検査は、その全長のみ測定した。第1次OGL-1燃料体については、黒鉛ブロックが破損しているため、測定しなかった。第2次OGL-1燃料体については、照射後に測定した値は、照射前に測定した値と比較して、全く変化がみとめられなかった。

3.1.4 燃料体の切断および解体

第1次および第2次燃料体は、吊金具から30 mmの位置を切断した。第2次燃料体の場合は、この位置で切断したあとタイロッドを抜けば、黒鉛ブロックと燃料棒とに解体できるが、第1次燃料体の場合は、さらに黒鉛ブロックを接続している金具を、切断しなければならない。切断後、燃料体は、黒鉛ブロック、燃料棒、金属部品、フランクスモニタに分けた。

3.2 黒鉛ブロック

3.2.1 黒鉛ブロックの外観検査

第1次および第2次OGL-1黒鉛ブロックの側面については、すでに燃料体の外観検査のところすでに示したので割愛し、両端面の写真のみFig. 3.9およびFig. 3.10に示す。各ブロックがお互いに接触している面や燃料孔の内側面に煤の付着が観察される。接触面において、煤は、燃料孔や燃料棒固定溝やタイロッド孔のまわりに、これらの溝や孔の輪郭にそって付着している。第1次OGL-1では、中段黒鉛ブロックの下端面に煤の付着が多く、ついで部分的ではあるが、下段ブロックの上端面および中段ブロックの上端面に多い。第2次OGL-1黒鉛ブロックにおいても、第1次黒鉛ブロック同様、上端面および下端面に煤の付着が観察されるが、付着量は1次黒鉛ブロックのそれに比較し、それほど多くない。また、タイロッド孔のまわりに煤が付着していることから、タイロッド孔中をHeガスが流れていたことがわかる。また、1次の黒鉛ブロックの端面において煤の付着量が多いが、これは黒鉛材の銘柄のちがい（第1次の黒鉛ブロックはSE 2-24、第2次の黒鉛ブロックはIG-11）によるものか、またはその他の条件のちがいによるものか明らかでない。

このほか、黒鉛ブロックの損傷、変形、腐食など、照射による外観上の変化は、みられなかった。

3.2.2 黒鉛ブロックの寸法検査

黒鉛ブロックの寸法に関しては、直径、燃料孔径、長さ、真直度を測定した（測定方法は附録A 3 参照）

第1次の黒鉛ブロックの直径および燃料孔の直径の測定値をTable 3.1に、長さおよび真直度の測定値をTable 3.2に示す。また、第2次黒鉛ブロックの直径および燃料孔の直径の測定値をTable 3.3に、長さおよび真直度の測定値をTable 3.4に示す。これらの値と照射前の値との比較は、黒鉛ブロックの曲り検査の章で行なう。黒鉛ブロックの長さに関して、外径基準の値と内径基準の値では、一般に内径基準の方が小さく出る傾向にあり、また、測定値のバラツキも大きく、内径基準の長さは信頼性に問題がある。セル外において、黒鉛ブロックの長さをノギスにより測定し、外径基準の測定値との比較を試みた結果、両者よい一致を示した。そこで、寸法測定装置による長さの測定値には外径基準の値を採用し、この値と照射前の寸法とから寸法変化率を算出し、その結果をTable 3.5に示す。上、中、下段各ブロックとも、0.1%程度の収縮がみられる。

3.2.3 黒鉛ブロックの重量検査

黒鉛ブロックの照射後の重量は、少数点以下1桁の精度で測定した。第1次OGL-1燃料体の黒鉛ブロックは、破損しているために省略し、第2次OGL-1燃料体の黒鉛ブロックのみその測定結果を、Table 3.6に示す。照射前の黒鉛ブロックは、少数点以下を測定していない。両者の比較から、上段の黒鉛ブロックのみ重量増加が認められるが、この程度の差は測定の際の誤差の範囲内で、先の外観検査の結果も、黒鉛ブロックの重量変化を生ずるほどの酸化や煤の付着がおこっていないことを示していた。従って、第2次OGL-1の黒鉛ブロックは、照射により重量変化がみられなかったと判定できる。

3.2.4 黒鉛ブロックの曲り検査

測定方法は附録A 3 参照

第1次および第2次の黒鉛ブロックの外径を、それぞれFig. 3.11およびFig. 3.12に示す。なお同図には、照射前の値も示してある。第2次の黒鉛ブロックでは、ほど全長にわたって直径を測定したが、第1次の上段および下段の黒鉛ブロックでは、破損および外表面の凹凸のために、この部分の測定はできなかった。第2次の黒鉛ブロックの直径は、各黒鉛ブロックとも上端から下端に至るまで、ほど同じ値であり、照射前の値と比較して全く変化がみられないが、第1次の黒鉛ブロックでは照射前と後とでは若干差があり、特に中段の黒鉛ブロックの両端部の直径は、照射前のそれよりも大きくなっている。

第1次OGL-1の上、中、下段黒鉛ブロックの曲りの測定結果をTable 3.7に、第2次OGL-1の黒鉛ブロックのそれをTable 3.8に示す。また、第1次黒鉛ブロックの燃料孔の曲りの測定結果をTable 3.9～Table 3.11に、第2次の黒鉛ブロックのそれをTable 3.12～Table 3.14

に示す。Fig. 3.13～Fig. 3.15は、第1次OGL-1の黒鉛ブロックに関してこれらの曲りの測定データを、X-Y平面上にプロットした結果であり、Fig. 3.16～Fig. 3.18は、黒鉛ブロックの曲りのみプロットした結果である。これらの図には、黒鉛ブロックの曲りを左側に、燃料孔の曲りを右側に、それぞれの測定方向を黒鉛ブロックと対応させて示した。これらの図の折線上の数字は、長さ方向における測定位置である。

第1次の上段の黒鉛ブロックについては、上端部付近が破損しているために、その測定結果からその全長に対する曲りの傾向を把握できなかったが、中段および下段の黒鉛ブロックについては、ブロック自身の曲りおよび燃料孔の曲りの状況を、はっきりと確認できた。中段の黒鉛ブロックにおけるブロック自身の曲りと燃料孔の曲りとは、それぞれ曲りの方向がランダムであることから、機械加工の際に生じたものと推定され、加工後に2次的に生じたものではないと考えられる。これに対して、下段の黒鉛ブロックにおいてはブロック自身の曲りと、3個の燃料孔の曲りの方向が全て一致しているのに加えて、曲りのプロファイルが全てサインカーブ状であることから、加工後に生じたものと推定される。このようなサインカーブ状の曲りは特異であり、中性子照射の影響を考えるよりも、OGL-1ループへの装荷に際して、タイロッドの締め付けによる圧縮加重が黒鉛ブロックに均一に作用しなかったためと考えるのが妥当であろう。

第2次の黒鉛ブロックにおいては、ブロック自身の曲りおよび燃料孔の曲りは、いずれもわずかで、これらの測定値も機械加工の精度の範囲内で、全く曲りが生じていないということができる。そのため、第2次の黒鉛ブロックについては、ブロック自身の曲りのみを示し、燃料孔の曲りについては、X-Y平面へのプロットを省略した。

3.2.5 燃料孔内表面検査

黒鉛ブロックの燃料孔内表面は、ボアスコープにより観察した。観察は原則として、Fig.3.19に示すように120°間隔で、3方向について実施したが、部分的には、これ以外の角度においても調べている。これらの観察は、全内表面について実施することが望ましいが、スキヤン速度に制限があるために、3方向に限定し、ボアスコープの視野の周辺部に異常がみられた場合のみ、上記以外の角度において調べた。

第1次および第2次OGL-1燃料体の黒鉛ブロックの燃料孔内表面の観察写真を、Fig.3.20～Fig. 3.24に示す。第1次の黒鉛ブロックの製造には、ギルソコクス系粗粒子等方質黒鉛SE 2-24を、第2次の黒鉛ブロックの製造には、石油コーカス系微粒子等方質黒鉛IG-11を使用した。フィラー粒子の最大粒径は、前者が1.7 mmであるのに対し、後者は0.01 mm以下で、粒子の大きさのちがいが両者の観察写真にもはっきりあらわれている。前者の写真には大きなボアがたくさんみられるのに対し、後者ではこれに相当する大きさのボアは全くみられない。

燃料孔内表面にも黒鉛ブロックにも黒鉛ブロックの外表面同様、煤の付着が観察される。Fig. 3.20の写真cは、黒鉛スリーブのリブの接触位置の表面写真で、リブの輪郭にそって煤の付着が観察される。同図の写真bおよびfの斜半分が黒くなっているのも、煤の付着によるためで、リブと接触していない部分に煤が付着した結果である。同図の写真dは、黒鉛ブロック上端の写真であり、写真では上端部が破損した結果生じたクラックである。Fig. 3.21の写真は、上端部の破面である。

Fig. 3.21 の写真 c および Fig. 3.22 の写真 a は、中段の黒鉛ブロックの No.1 の燃料孔内で観察されたクラックで、上端から 137 および 147 mm の位置において、長さ方向にはしつっている。これが照射に起因するものであるかどうかは不明である。Fig. 3.21 の c の中央に見える黒い部分は巣であると考える。Fig. 3.22 の写真 c, d および e は、黒鉛ブロックのリブ溝の表面で、リブ溝を直角に横切る筋がみられるが、クラックであるかどうか、この写真からでは判定が困難である。Fig. 3.23 は、下段ブロックの燃料孔の内表面で、特に異常は認められない。

Fig. 3.24 は、第 2 次 OGL-1 の黒鉛ブロックの燃料孔内表面の写真で、a, b, c, d および e は、黒鉛スリーブのリブとの接触位置に、その輪郭にそってできた煤の付着による紋様であり、斜に白く走っているのは、寸法測定装置の測定子の接触あとである。

以上の内面観察から、第 2 次の黒鉛ブロックには、全く異常がみられなかったが、第 1 次の黒鉛ブロックにはクラックが観察された。第 1 次の黒鉛ブロックのクラックについては、素材中に存在していたものか、照射によるものが明らかでない。

3.3 燃料棒

3.3.1 燃料棒の外観検査

Fig. 3.25 ~ Fig. 3.27 は、第 1 次の OGL-1 の各燃料棒を、3 方向から撮影した側面の写真であり、Fig. 3.28 は両端面の写真である。Fig. 3.29 ~ Fig. 3.31 は、第 2 次 OGL-1 の各燃料棒の側面の写真であり、Fig. 3.32 は両端面の写真である。これらの写真から、端栓およびパッドにわずかに欠けがみられること、煤が若干付着していること以外、燃料棒には全く異常がみられないことがわかる。

3.3.2 燃料棒の X 線検査

第 1 次および第 2 次 OGL-1 燃料棒の X 線写真を、それぞれ Fig. 3.33 および Fig. 3.34 に示す。これらの検査においては、黒鉛スリーブも同様に撮影したが、燃料コンパクトのみが鮮明に出ている。黒鉛スリーブ内の燃料コンパクトの状態、燃料コンパクト中の粒子の分散状況がよくわかる。これらの X 線写真から識別できるかぎりにおいて、異常はみとめられない。

3.3.3 燃料棒の重量検査

第 1 次および第 2 次 OGL-1 の燃料棒の重量測定結果を、それぞれ、Table 3.15 および Table 3.16 に示す。第 1 次の燃料棒については、照射前の重量測定を行なわなかった。第 2 次の燃料棒の照射前の重量と照射後のそれとでは、測定精度が異なるために、両者を比較する場合、これを考慮に入れなければならない。No.3 のみわずかに差がみられるが、他の 2 本の燃料棒には重量変化がみられないことおよび外観検査においても、異物の付着がみとめられないことから、測定に際しての誤差であると考えられる。

3.3.4 燃料棒の γ スキャン

燃料棒は、1 本毎に γ スキャンを実施した。エネルギー範囲、0 ~ 1 MeV のグロス γ 強度を、

燃料棒の1端から他端まで連続的にスキャンした。検出器は、P.G.T. 製純ゲルマニウム検出器を、スペクトロスコピーアンプは ORTEC 527 を、波高分析器は CANBERA を使用した。コリメータは鉛ブロックに巾 0.3, 高さ 40, 奥行 300 (mm) のスリットを切込んだものを使用した。試料から検出器までの距離は、1100 mm である。第1次および第2次の燃料棒（いずれも No.1 の燃料棒）の γ 線強度分布を、それぞれ Fig. 3.35 および Fig. 3.36 に示す。 γ 線スキャンの条件は、レートメータレンジ 2×10^3 cps, 時定数 2 sec, スキャンスピード 20 mm/min, チャートスピード 20 mm/min である。

Fig. 3.35 および Fig. 3.36 にみられる通り、燃料棒の γ 線強度分布は、第1次、第2次ともよく似ており、また、ここに示した以外の燃料棒の γ 線強度のプロフィルも、No.1 のそれと相似である。第1次および第2次 OGL-1 の照射済燃料棒のなかで、 γ 線強度の最も大きい燃料棒を基準にとり、これに対するこれ以外の燃料棒の γ 線強度の比を求めた結果を、それぞれ Table 3.17 および Table 3.18 に示す。これらの Table の右端の欄に、燃料棒の比出力を示す。3本の燃料棒の比出力の比は、長さ方向の全ての位置において等しいことがわかる。また、燃料棒の長さ方向の出力比は、下端ではピーク値の約 60 %, 上端では約 30 % であることがわかる。

3.3.5 燃料棒の解体

以上の照射後試験が終了した燃料棒は、端栓を固定している止めネジをゆるめて、端栓をはずし、燃料コンパクト、緩衝材を取出した。なお、燃料棒の解体は、きわめてスムーズに行われた。

3.4 金属部品

3.4.1 金属部品の外観検査

第1次 OGL-1 の金属部品のうち、先端金具、タイロッド、下部受金具の外観写真を Fig. 3.37 に、ハンガーロッドとタイロッドの連結部の外観写真を Fig. 3.38 に示す。第2次 OGL-1 の金属部品のうち、先端金具、タイロッド、下部受金具の外観写真を Fig. 3.39 に、上部受金具のそれを Fig. 3.40 に、ハンガーロッドとタイロッドの連結部のそれを Fig. 3.41 に、熱電対保持リングのそれを Fig. 3.42 に示す。これらの写真から、第1次、第2次ともに先端金具および下部受金具に、煤の付着が観察される以外、変形、破損、酸化など外観上の変化は全くみられない。

3.4.2 金属部品の重量検査

金属部品については、溶接により固定されたものやカッターにより切断されたものについては、これらの作業に際して重量変化が生じるため、重量測定を行なわなかった。従って、このような金属部品を除くと、第2次 OGL-1 燃料体の熱電対保持リングと上部受金具のみが測定の対象となる。測定結果を、Table 3.19 に示す。これらの金属部品の重量は、測定精度の範囲内において、全く変化がみられない。

3.5 黒鉛スリーブ

3.5.1 黒鉛スリーブの外観検査

第1次および第2次OGL-1の側面の外観写真については、燃料棒の外観検査の章で示したので、ここでは黒鉛スリーブの端面写真のみを、それぞれFig. 3.43およびFig. 3.44に示す。これらの写真から、黒鉛スリーブの取扱いに際して生じたと推定される欠け以外の損傷は全くみられず、黒鉛スリーブは健全であることがわかる。

3.5.2 黒鉛スリーブの寸法検査

第1次OGL-1および第2次OGL-1の黒鉛スリーブの寸法測定結果を、それぞれTable 3.20およびTable 3.21に示す（測定方法は附録A3参照）。これらのスリーブ外径の測定値を、測定位置に対してプロットした結果を、Fig. 3.45およびFig. 3.46に示す。なお同図には、照射前の値も示してある。照射後の直径と照射前のそれを比較すると、上端部を除いて、第1次、第2次ともに両者よく一致しており、照射による変化はほとんど認められないが、上端においては、照射後の値が照射前の値を上まわっている。しかし、セルの外において、この部分の直径をノギスにより再測定した結果、照射前に測定した値と全く同じであった。このことから、寸法測定装置による上端部の値が大きくでてくるのは、この測定装置の特性にもとづく誤差と考えられる。

真直度は、後述する曲りに対応する値で、曲りの大きい黒鉛スリーブでは、これに対応して真直度もわるくなっている。第1次および第2次OGL-1の黒鉛スリーブの照射前および照射後の長さの比較を、Table 3.22に示す。第1次の黒鉛スリーブにおいては、わずかではあるが長さが増加しており、第2次では逆に収縮している。すなわち、第1次と第2次では全く逆の結果が得られた。高速中性子照射量は、第1次は第2次の約半分である。

3.5.3 黒鉛スリーブの重量検査

第1次OGL-1の黒鉛スリーブの照射前および照射後の重量および第2次OGL-1の黒鉛スリーブのそれらを、Table 3.23に示す。第1次のNo.1のスリーブを除いて、照射前後の重量差は全くみられない。なお、第1次のNo.1の黒鉛スリーブの重量減少は、取扱いの上のミスによる欠けが原因と推定される。

3.5.4 黒鉛スリーブの曲がり検査

第1次および第2次OGL-1の黒鉛スリーブの内側面基準の曲りのX成分およびY成分と曲り量を、それぞれTable 3.24およびTable 3.26に、外側面基準のそれらを、それぞれTable 3.25およびTable 3.27に示す（測定方法は附録A3参照）。これらの黒鉛スリーブの曲りを、X-Y平面上にプロットした結果を、Fig. 3.47～Fig. 3.50に示す。内側面基準と外側面基準を比較すると、折線の形が若干異なってはいるが、（スリーブの加工精度が原因と考えられる）、各黒鉛スリーブともほど同じ方向にはほど同じ程度曲っていることがわかる。また、第1次OGL-1では、No.1の黒鉛スリーブの曲りが最も大きく、No.2およびNo.3は、No.1の半分程度である。

さらに、No.1とNo.3の曲りは、2次元的な曲りに近く、No.2は3次元的な曲りである。第2次OGL-1では、3本とも曲りの方向および曲りの大きさが異なり、No.3の黒鉛スリーブの曲りが極端に大きく、逆にNo.2の黒鉛スリーブでは、全く曲りが生じていない。

Fig. 3.5.1は、黒鉛スリーブの曲り方向、炉心の方向および各燃料棒の比出力との対比を示したものである。黒鉛スリーブの曲りは、燃料棒の出力や高速中性子照射量に依存するはずであり、炉心に近い領域において曲りが大きく、炉心から離れるに従って小さくなるはずである。しかし、このような依存性が全くみられない。

Fig. 3.52～Fig. 3.54は第1次OGL-1黒鉛スリーブの曲り量を、黒鉛スリーブの上端からの距離に対してプロットした結果である。第1次OGL-1においては、これらのカーブから上段および下段黒鉛ブロックに対応する領域では黒鉛スリーブは全く曲っておらず、中段ブロックに対応する領域において曲っていることがわかる。このことは、黒鉛ブロックが嵌合部において、Fig. 3.55に示すように屈曲したことを示している。この場合、黒鉛ブロックにこのような変形をおこさせる原因であるが、軸方向の圧縮加重を考えるのが最も適当と思われる。第2次OGL-1の黒鉛スリーブでは、Fig. 3.56～Fig. 3.58に示すように、No.3の黒鉛スリーブの曲りが最も大きく、No.1の黒鉛スリーブがこれにつづき、No.2の黒鉛スリーブでは全く曲りを生じていない。また、曲りの方向がそれぞれ異なっている。

黒鉛スリーブの曲りについては、別途に詳細な解析が行われているので、これらの挙動はそこで考察する予定である。

3.5.5 黒鉛スリーブの内表面検査

黒鉛スリーブの内表面の検査は、前述の内面検査装置により、120°間隔で3方向について黒鉛スリーブの全長に対して実施した。観察方向と黒鉛スリーブの位置関係は、Fig. 3.59に示すとおり、第1次、第2次ともに全く同じ方向である。観察位置は、原則としてFig. 3.59に示す方向であるが、一部これらの位置をはずれて観察したものもある。なお、黒鉛スリーブの銘柄は、第1次、第2次ともにIG-11である。Fig. 3.60およびFig. 3.61の写真aは、第1次OGL-1のNo.1の黒鉛スリーブの内側面であり、Fig. 3.60およびFig. 3.61の写真b～eは、同じくNo.2の黒鉛スリーブのそれである。これらの写真のうち、Fig. 3.60の写真a, c, d, Fig. 3.61のaにみられる局部変色は、コンパクトと黒鉛スリーブの機械的相互作用で生じたと推定され、Fig. 3.60の写真b, fおよびFig. 3.61の写真bの黒い斑点は、煤またはコンパクトマトリックスの微細な破片と推定され、Fig. 3.60の写真eおよびFig. 3.60のc, dの毛状の物体はカーボンウールの破片と推定され、Fig. 3.60のeおよびFig. 3.61のeにみられる物体は、カーボンウールのかたまりと推定される。なお、クラック等、破損に結びつく可能性のある欠陥は全く検出されなかった。

Fig. 3.62は、第2次OGL-1のNo.1の黒鉛スリーブの内側面の写真であり、Fig. 3.63は同じくNo.2の黒鉛スリーブのそれである。Fig. 3.62の写真aおよびcは、機械加工に際して生じた切削工具による傷と推定される。第2次の黒鉛スリーブは、第1次と全く同じ銘柄であるにもかかわらず、第1次に比較し粗い表面を呈しているが、クラック等、破損に結びつく可能性のある欠陥は第2次のスリーブにおいても検出されなかった。

3.6 燃料棒用黒鉛部品

3.6.1 燃料棒用黒鉛部品の外観検査

第1次OGL-1の燃料棒の端栓の外観写真を、Fig. 3.64に、第2次OGL-1の燃料棒のそれを、Fig. 3.65に示す。Fig. 3.66は、第1次の燃料棒の中心に挿入されている熱電対保持棒の外観であり、Fig. 3.67は第2次の燃料棒のそれである。これらの外観検査から、端栓および熱電対保持棒には、異常はみとめられなかった。

3.6.2 燃料棒用黒鉛部品の重量検査

第1次および第2次OGL-1の燃料棒の照射前および照射後の端栓の重量を、Table 3.28に、第2次OGL-1の燃料棒の端栓止めネジおよび熱電対保持棒の照射前および照射後の重量を、Table 3.29に示す。これらの結果から、照射による重量減少はないといえる。一部の試料で、若干重量減少が認められるのは、欠け等によると推定される。

3.6.3 緩衝材の弾性検査

燃料棒の両端に充填されているカーボンフェルト製緩衝材の弾性試験を行なった。試験に供した緩衝材は、未照射のものと、第2次OGL-1の各燃料棒の上端部に充填されていたものである。試験方法は、緩衝材に荷重をかけ、順次これを追加し、カーボンフェルトの圧縮厚さを、カセットメーターで測定するという方法を用いた。測定結果を、Fig. 3.68に示す。荷重に対し圧縮厚さは、直線的に変化する。緩衝材の断面積は 4 cm^2 であるから未照射の緩衝材の荷重に対する圧縮率は、 $0.45(\text{mm/Kg/cm}^2)$ であるが、照射したその荷重に対する圧縮率は、 $0.27(\text{mm/Kg/cm}^2)$ である。このちがいは、圧縮加重をかけたまゝ照射したことによる効果であると推定される。

3.7 考 察

3.7.1 黒鉛材の照射による寸法変化

黒鉛ブロックおよび黒鉛スリープの照射による寸法変化は、すでに述べた通り、第2次OGL-1の黒鉛ブロックは収縮で、その収縮率は各段ともほど等しく、 $\sim 1 \times 10^{-3}$ であった。一方、第1次の黒鉛スリープは膨脹で、その膨脹率は、 $\sim 1 \times 10^{-3}$ であったのに対し、第2次の黒鉛スリープは収縮で、その収縮率は $\sim 5 \times 10^{-4}$ であった。第2次の黒鉛ブロックおよび黒鉛スリープは、ともに収縮であるが、黒鉛ブロックの方が収縮率は大きい。照射温度は、第1次と第2次では若干異なり、第1次の場合 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ (燃料棒の中心のピーク温度)であるが、約18時間 $1350\text{ }^\circ\text{C}$ で照射されている。第2次の場合、燃料棒中心の照射温度は $1360\text{ }^\circ\text{C}$ で、黒鉛スリープの温度は $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 、黒鉛ブロックの温度は $950\text{ }^\circ\text{C}$ (いずれもピーク温度)と推定される。照射サイクルは、第1次が2サイクル、第2次が4サイクルで、高速中性子照射量は、前者が $1.7 \times 10^{20}(\text{cm}^{-2})(E > 0.18\text{ MeV})$ 、 $(2.7 \times 10^{20}(\text{cm}^{-2})\text{EDN})$ 、後者が $3.1 \times 10^{20}(\text{cm}^{-2})(E > 0.18\text{ MeV})$ 、 $(5 \times 10^{20}(\text{cm}^{-2})\text{EDN})$ と見積られている。

このような高速中性子照射量のきわめて小さい領域における照射による黒鉛の寸法変化は、ほとんど報告されていない。IG-11 黒鉛の中性子照射による寸法変化に関しては、野村ら¹⁾のデータがある。この中性子照射量は $1.7 \sim 2.5 \times 10^{21} (\text{cm}^{-2})$ (END) で、本報告の中性子照射量とくらべてきわめて大きく、直接比較の対象にならないが、彼らのデータを中性子照射量 $5.0 \times 10^{20} (\text{cm}^{-2})$ END に外挿すると、収縮量は 3×10^{-4} 程度になり、本報告書の第2次黒鉛スリーブの寸法変化のデータとよい一致を示す。野村らの IG-11 黒鉛の照射による寸法変化のデータと本照射試験のデータとの比較を、Fig. 3.69 に示す。照射温度は、野村らの実験にくらべて、100 °C 程度低いと推定される。第2次の黒鉛ブロックの中性子照射量は、黒鉛スリーブのそれとはほぼ同じであるにもかかわらず、収縮量は若干大きい。従って、第2次 OGL-1 の黒鉛ブロックの収縮については、中性子照射の影響に加えて、ハンガーロッドの締付けによる荷重の影響もあると考えられる。

第2次 OGL-1 の黒鉛ブロックおよび黒鉛スリーブの寸法は収縮しているのに対し、第1次 OGL-1 の黒鉛スリーブの寸法は、膨脹している。これまでに種々の多結晶黒鉛材について中性子照射による寸法変化が調べられているが、¹⁰⁾⁻¹²⁾ 中性子照射量の低い領域において膨脹する例として、微粒子等方質黒鉛 AXF-8Q1 および AXZ-5Q1¹³⁾、準等方質黒鉛 H 451 および H 429¹⁴⁾ が報告されているにすぎない。また、佐々木ら¹⁰⁾ および菊池ら^{13), 14)} の等方質なギルソコーカス黒鉛 IM 2 および異方質なニードルコーカス黒鉛 H 327 の照射結果では、 $1 \times 10^{21} (\text{cm}^{-2})$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) の中性子照射でわずかではあるが膨脹していた。(照射温度 900 ~ 1000 °C) このように低い中性子照射量の領域におけるギルソコーカス黒鉛およびニードルコーカス黒鉛の膨脹例は全く報告されていないことから、佐々木らおよび菊池らの照射結果は特異である。なお、佐々木らおよび菊池らの照射に使用した黒鉛材は、同一素材から切出したものである。このように中性子照射により、黒鉛材が膨脹するという報告はきわめて少ない。

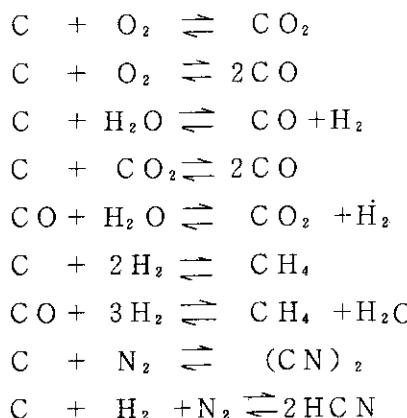
非常に結晶性のよい黒鉛では、中性子照射に対して a 軸方向には収縮し、c 軸方向には膨脹する。²⁾ 多結晶黒鉛では、程度の差はあるが、中性子照射に対して一旦収縮したあと膨脹に転ずる。また、多結晶黒鉛の中性子照射による寸法変化は、中性子照射量及び照射温度に依存するだけでなくフィラー粒子の特性及びその配向性、黒鉛の製造条件、気孔率や密度等の黒鉛の物性にも依存する。第1次の黒鉛スリーブと第2次のそれとは製造ロットは異なるが、同じ銘柄であり、同じ製造プロセスによって作られている。第1次の黒鉛スリーブと第2次のそれとのちがいは、第2次のそれが純化処理をほどこしてあるのに対し、第1次のそれは未精製であるため、灰分その他の不純物が多いことである。Kelly ら¹⁵⁾ は、0.5% ボロンを含む結晶性のよいパイログライトを照射した結果、その寸法変化はボロンを含まないパイログラファイトよりも大きかった。これは、ボロン原子が格子間原子を集合させるためであると述べている。第1次の黒鉛スリーブにおいても、これに含まれる不純物が核となって格子間原子のクラスターを形成するものと考えられ、この結果不純物を含まない黒鉛よりもわずかではあるが膨脹したものと推定される。

3.7.2 煤の生成

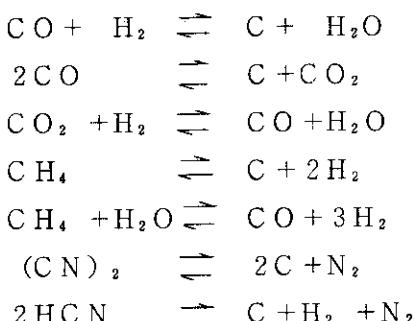
外観検査や内側面の観察から、煤は、黒鉛ブロックの接続部や黒鉛スリーブのパッドと黒鉛ブロック内側面の接触部のようなヘリウムガスの流れにみだれの生ずるところ、および ZrO_2 の表

面処理をほどこしたような、粗面上に多く付着していた。このようなことは、流体中に含まれる微粉が、配管上に付着するのと同じ現象である。

煤の生成機構であるが、ループ内での高温部と低温部における、CO と CO₂ の平衡分圧のちがいによる C の生成と考えられる。Everett ら¹⁶⁾によれば、高温ガス炉の炉心内で、黒鉛の温度が 1100 °C、ガスの温度が 800 °C の条件では、次の反応が予想される。



これに対して、熱交換器（350 ~ 750 °C）や金属表面上では、



の反応がおこる。高温部においては C の酸化が、低温部においては C の還元がおこり、この C が集合して構成部品の表面に沈着するという機構である。ここで、H₂O, O₂, N₂, CO, CO₂, H₂, CH₄ などは、リークにより外部から入ってくるほか、黒鉛や金属等の構成部品の表面から脱着したものである。

運転中の OGL-1 の 1 次冷却ガス中の不純物の濃度の測定結果の 1 例を、Fig. 3.70 に示す。不純物として、N₂, O₂, CO₂, H₂, CH₄, CO₂, H₂O が検出されている。OGL-1 の昇温スケジュールを、この図の下に示してある。なお、T-05 とは、炉内管入口の温度である。これらの測定結果から、OGL-1 の昇温特に不純物濃度が増加し、ある時間経過したあと減少に転じ、さらには検出限界以下までさがっていることがわかる。第 1 次の昇温時においては、検出された不純物の種類が多いのに対し、第 2 次以後の昇温時においては不純物の種類は少くなり、第 3 次にいたっては、脱ガスの量もきわめて少なくなる。また、この測定においては、H₂ が多量に検出されている。これは、H₂ 単体の脱着のためというよりはむしろ、脱着した H₂O が高温の炭素により還元されて、H₂ と CO₂ が生成したためと推定される。なお、CO は低温部において CO₂ に酸化され、同時に C が生成し、集合して、一部は低温部の金属表面に沈着し、一部は He の流れに乗って高温部の燃料体表面上に付着したものと考えられる。

不純物の濃度の測定から、脱ガスは主として 1 次（図中の①）および 2 次（図中の②）の昇温

時においておこり、特に1次の昇温では、吸着ガスの主要な成分が脱着し、2次の昇温では、 H_2O と N_2 のみ脱着がおこる。脱ガスはすでに2次までの昇温で終了し、脱着せずに残っていたわずかな吸着成分の脱着が、3次（図中の③）の昇温でおこることをFig. 3.80は示している。また、この図からOGL-1の運転中には、不純物は外部から全く供給されていないことがわかる。このことから、このOGL-1の照謝試験において、Cの生成は昇温時においてのみおこった現象であると推定することができる。

3.8 まとめ

OGL-1第1次及び第2次燃料体の黒鉛ブロック、黒鉛スリーブ等黒鉛構成材及び若干の金属部品の照射後試験を行った。検査項目は外観、寸法、重量及びX線検査が主体であるが、燃料棒についてはガンマスキャンも含まれている。これらに加えて、黒鉛スリーブについては、FP分布の測定及び曲がりの解析が進行中であるが、本報とは別の報告書としてまとめられる。したがって、ここでは、これら2項目を除く照射後試験について、結果の要点を記す。

- (1) 燃料体のX線観察によると、燃料コンパクト、熱電対等の位置は正常であった。
- (2) 第2次の黒鉛ブロックは、照射により約0.1%の長さ方向の収縮を示したが、直径変化及び重量変化は検出されなかった。第1次の黒鉛ブロックにはわずかながら直径増加が検出された。黒鉛ブロックの曲がりは、第1次で最大0.05 mm、第2次で最大0.03 mmであった。
- (3) 第1次の黒鉛ブロックの一端が破損した。この原因は明らかではないが、同一基本構造(3分割構造)の第2次の黒鉛ブロックが健全であったことは、材料の差(第1次はSE 2-24、第2次はIG-11)を原因のひとつに数える妥当性を示唆するものである。
- (4) 黒鉛ブロックには部分的にかなり煤の付着が観察された。この煤は主として照射中3回の昇温時に付着したものであると推論された。
- (5) 黒鉛ブロックの燃料棒挿入孔内面には、第1次、第2次とも、傷、亀裂、部分変色、斑点等が観察されたが、いずれも破損に結びつく可能性がない程度の軽微なものであった。
- (6) 燃料棒3本のガンマスキャンで得られたガンマ線強度の比は、当然のことながら、第1次、第2次とも、3本の出力比に一致していた。
- (7) 燃料棒からのコンパクト取出しはきわめて容易であった。
- (8) 先端金具、タイロッド、ハンガーロッド等金属部品には、煤の付着が観察された以外、変形、破損、酸化など、外観上の変化は全くみられなかった。また重量変化も検出されなかった。
- (9) 黒鉛スリーブについては、外観、重量とともに、照射による変化は検出されなかった。内面観察においては、コンパクトとスリーブの機械的相互作用で生じたと推定される局部的変色が観察されたが、クラック等破損に結びつく可能性のある欠陥は全く検出されなかった。
- (10) 黒鉛スリーブの寸法測定の結果によると、直径の照射による変化は全く検出されていないが、長さについては、ごくわずかではあるが、第1次のスリーブでは増加、第2次では減少が認められた。第1次の長さ増加は不純物に起因する(第2次は精製材)というのが考えられるひとつの説明である。
- (11) 黒鉛スリーブの曲がりは、方向、程度ともにまちまちで、照射量に対する依存性も明確で

ない。第1次、第2次各3本の曲がりの測定値(mm)は次のとおりである。

	No. 1	No. 2	No. 3
第1次	0.9	0.3	0.6
第2次	0.4	0	0.8

(12) 緩衝材の弾性を調べた結果、照射により弾性が落ちたことがわかった。

(菊池記)

参考文献

1. Nomura, S., Shimokawa, J., Sasaki, Y., Oku, T., Imai, H., Matsuo, H., Eto, M., Fukuda, Y., Fujisaki, K., JAERI-M 8068 (1979).
2. Reynolds, W.N., "Physical properties of Graphite", Elsevier Publishing Co., (1968).
3. Cox, J.H. Jr., Helm, J.W., Carbon, 7, PP319-327 (1969).
4. Engle, G.B., Carbon, 9, PP539-554 (1971).
5. Pitner, A.L., Carbon, 9, PP637-644 (1971).
6. Everett, M.R., Leushake, D.F., Pelle, W., BNES Couf. 1974, The high Temperature reactor and process application, Nov (1974).
7. Engle, G.B., Gulf-GA-A12080, (1972).
8. Everett, M.R., Graham, L.W., Price, M. S., 4th London International Carbon and Graphite Conf., (1974).
9. Harrison, J.W., Brocklehurst, J.E., Gilchrist, K. E., ibid.
10. Engle, G. B., Price, R. J., Johnson, W. R., Beavan, L. A., ibid.
11. Moore, R. W., Progress in Nuclear Energy-Nuclear Energy Maturity, Proc. European Nuc. Conf., Paris (1975).
12. Haag, H., Hammer, W., O'Connor, M. F., 5th London International Conf. on Carbon and Graphite (1978).
13. 佐々木泰一, 奥達雄, 今井久, 野村真三, 松尾秀人, 衛藤基邦, 斎藤保, 野沢武, 福田保昌, 藤崎勝夫, 藤井貴美夫, 井上孝, 未発表データ (1976)
14. 菊池輝男, 飛田勉, 井川勝市, 岩本多実, JAERI -M 82-206 (1982)
15. Kelly, B.T., Brocklehurst, J.E., Carbon, 9, 783 (1971).
16. Everett, M.R., Kinsey., D.V., Roemberg, E., Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 3, Dekker (1967).

Table 3.1 Diameter of graphite block and fuel hole for 1st OGL-1

Direction	Block diameter			Fuel hole diameter								
	D ₁	D ₂	D ₃	1			2			3		
				d ₁	d ₂	d ₃	d ₁	d ₂	d ₃	d ₁	d ₂	d ₃
Upper	0°	80.004	79.995	32.847	32.693		32.664	32.744		32.622	32.684	
	9 0°	80.102	80.066	32.644	32.712		32.690	32.701		32.706	32.654	
Middle	0°	80.024	80.086	80.108	32.667	32.659	32.753	32.676	32.673	32.675	32.665	32.659
	9 0°	80.126	80.107	80.203	32.722	32.676	32.703	32.698	32.634	32.655	32.719	32.659
Lower	0°	80.161	80.150	82.132	82.678	32.676	32.668	32.663	32.678	32.653	32.672	32.085
	9 0°	80.201	80.155	82.149	32.692	32.682	32.702	32.658	32.670	32.693	32.691	32.669

Table 3.2 Length and straightness of graphite block for 1st OGL-1

Direction	Length				Straightness			
	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
Upper	0°				0.02		-0.18	0.10
	9 0°				0.04	-0.15	0.28	0.08
Middle	0°	279.8	276.7	274.5	279.1	0.02	0.11	-0.12
	9 0°	279.9	279.3	278.7	279.2	0.05	0.10	-0.07
Lower	0°	279.4	282.7	284.3	283.6	0.01	0.20	-0.40
	9 0°	279.6	284.6	284.3	284.0	0.04	0.10	-0.20

Table 3.3 Diameter of graphite block and fuel hole for 2nd OGL-1

Direction	Block diameter			Fuel hole diameter								
	D ₁	D ₂	D ₃	d ₁	d ₂	d ₃	d ₁	d ₂	d ₃	d ₁	d ₂	d ₃
Upper 0°	77.897	80.005	80.000	32.699	32.712	32.712	32.697	32.701	32.701	32.733	32.718	32.738
	77.914	79.999	80.001	32.704	32.702	32.706	32.696	32.700	32.697	32.721	32.734	32.741
Middle 0°	77.916	80.004	79.993	32.708	32.695	32.684	32.707	32.690	32.698	32.701	32.682	32.688
	77.859	79.997	80.000	32.680	32.685	32.688	32.702	32.698	32.695	32.680	32.687	32.688
Lower 0°	77.936	80.001	79.975	32.698	32.687	32.678	32.683	32.686	32.686	32.694	32.682	32.688
	77.819	79.994	79.978	32.689	32.695	32.690	32.689	32.689	32.689	32.687	32.692	32.689

Table 3.4 Length and straightness of graphite block for 2nd OGL-1

Direction	Length				Straightness			
	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	S ₀	S ₁	S ₂	
Upper 0°	269.7	264.6	264.5	264.5	±0.01	-0.02	0.01	-0.02
	269.8	264.6	264.6	264.6	-0.01	-0.01	0.02	0.02
Middle 0°	284.5	279.2	279.4	279.3	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01
	279.4	279.4	279.4	279.4	0.01	0.05	0.01	0.01
Lower 0°	284.8	284.5	284.6	284.6	-0.02	-0.02	±0.01	0.01
	284.8	284.5	284.6	284.5	0.03	0.01	0.01	0.02

Table 3.5 Length change of graphite block of 2nd OGL-1 fuel assembly

	Length (mm)		Difference $\ell_f - \ell_i$	$\frac{\ell_f - \ell_i}{\ell_i}$
	before irradiation ℓ_i	after irradiation ℓ_f		
Upper	270.0	269.7	-0.3	-1.1×10^{-3}
Middle	284.8	284.5	-0.3	-1.1×10^{-3}
Lower	285.3	284.8	-0.5	-1.8×10^{-3}

Table 3.6 Weight of graphite block for 2nd OGL-1

	weight (g)	
	Pre irradiation	Post irradiation
Upper	1161	1161.9
Middle	1119	1118.5
Lower	1087	1087.0

Table 3.7 Bowing of graphite block for 1st OGL-1

(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Upper block	0°(X)	0	0.007	0.003	0	0.007	0.013	0.010	0.017	0.013	0
	90°(Y)	-0.295	0.017	-0.062	0	0.002	0.003	-0.005	-0.003	-0.042	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	(0.30)	(0.02)	(0.06)	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0
Middle block	0°(X)	0	0.001	0.002	0.003	0.004	-0.004	0.007	0.008	0.009	0
	90°(Y)	0	-0.033	-0.007	0	0.007	0.013	0.030	0.037	0.043	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.03	0.01	0	0.01	0.01	0.03	0.04	0.04	0
Lower block	0°(X)	0	0.013	0.017	0.020	0.013	0.017	0.010	0.003	0.007	0
	90°(Y)	0	-0.004	0.031	0.037	0.042	0.037	0.043	0.049	0.024	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0

Table 3.8 Bowing of graphite block for 2nd OGL-1

(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Upper block	0°(X)	0	0.007	0.003	0	-0.003	0.003	0	-0.003	-0.007	0
	90°(Y)	0	-0.010	-0.010	0	0	-0.010	0	0	0	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0	0.01	0
Middle block	0°(X)	0	0.004	-0.011	-0.007	-0.002	-0.008	-0.003	0.001	0.006	0
	90°(Y)	0	0.036	0.031	0.027	0.022	0.028	0.013	0.009	0.004	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0
Lower block	0°(X)	0	-0.006	-0.001	-0.007	-0.002	0.002	-0.003	-0.019	-0.014	0
	90°(Y)	0	0.024	0.029	0.033	0.028	0.032	0.017	0.011	0.016	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0

Table 3.9 Profile of fuel holes in upper graphite block for 1st OGL-1
(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. 1	0°(X)										
	90°(Y)	0	-0.065	-0.100	-0.150	-0.128	-0.039	-0.078	-0.081	-0.054	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$										
No. 2	0°(X)	0	-0.006	-0.033	-0.058	-0.072	0.022	-0.128	-0.175	-0.086	0
	90°(Y)	0	0.040	0.108	0.187	0.276	0.163	0.072	0.097	0.088	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.04	0.11	0.20	0.28	0.16	0.15	0.20	0.12	0
No. 3	0°(X)	0	0.012	0.025	0.039	0.066	0.079	0.096	0.016	0.025	0
	90°(Y)	0	-0.027	-0.019	-0.008	0.012	0.033	0.079	0.077	0.038	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.03	0.03	0.04	0.07	0.09	0.12	0.08	0.04	0

Table 3.10 Profile of fuel holes in middle graphite block for 1st OGL-1
(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. 1	0°(X)	0	0.063	0.104	0.087	0.093	0.109	0.090	0.032	-0.084	0
	90°(Y)	0	0.082	0.100	0.048	-0.012	-0.012	0.048	0.103	0.095	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.10	0.14	0.10	0.09	0.11	0.10	0.11	0.13	0
No. 2	0°(X)	0	0.075	0.109	0.064	-0.002	-0.043	-0.037	0.001	-0.001	0
	90°(Y)	0	-0.061	-0.065	-0.047	-0.039	-0.044	-0.052	-0.034	-0.009	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.10	0.13	0.08	0.04	0.06	0.06	0.03	0.01	0
No. 3	0°(X)	0	-0.107	-0.122	-0.028	0.068	0.104	0.067	0.034	-0.001	0
	90°(Y)	0	0.022	0.022	0.023	0.045	0.080	0.090	0.046	-0.023	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.11	0.11	0.04	0.08	0.13	0.11	0.06	0.02	0

Table 3.11 Profile of fuel holes in lower graphite block for 1st OGL-1
(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.1	0°(X)	0	0.141	0.198	0.179	0.059	-0.071	-0.161	-0.140	-0.071	0
	90°(Y)	0	0.051	0.091	0.095	0.075	0.041	0.012	0.006	-0.012	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.15	0.22	0.20	0.10	0.08	0.16	0.14	0.07	0
No.2	0°(X)	0	-0.028	-0.043	-0.031	-0.012	-0.004	0.017	0.023	0.017	0
	90°(Y)	0	-0.125	-0.199	-0.198	-0.105	0.002	0.096	0.120	0.086	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.13	0.20	0.20	0.11	0	0.10	0.12	0.09	0
No.3	0°(X)	0	-0.111	-0.189	-0.190	-0.076	0.031	0.096	0.142	0.113	0
	90°(Y)	0	0.073	0.104	0.088	0.031	-0.021	-0.063	-0.062	-0.045	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.13	0.22	0.21	0.08	0.04	0.12	0.16	0.12	0

Table 3.12 Profiles of fuel hole in upper graphite block for 2nd OGL-1
(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.1	0°(X)	0	0.001	0.002	-0.008	0.002	0.003	-0.001	-0.014	-0.021	0
	90°(Y)	0	-0.008	-0.006	-0.008	-0.008	-0.005	-0.004	-0.002	-0.001	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0
No.2	0°(X)	0	0.006	0.001	-0.004	0.003	0.007	0.003	0.006	0.011	0
	90°(Y)	0	0.008	0.016	0.015	0.012	0.010	0.018	0.008	0.003	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0
No.3	0°(X)	0	-0.004	-0.015	-0.013	-0.013	-0.022	-0.022	-0.019	-0.012	0
	90°(Y)	0	0.011	0.011	0.016	0.015	0.012	0.011	-0.002	-0.004	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0

Table 3.13 Profiles of fuel hole in middle graphite block for 2nd OGL-1
(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.1	0°(X)	0	-0.019	-0.018	-0.016	-0.013	-0.003	-0.003	0	0.001	0
	90°(Y)	0	0.005	0.014	0.020	0.027	0.034	0.045	0.053	0.043	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0
No.2	0°(X)	0	-0.009	-0.016	-0.020	-0.023	-0.018	-0.020	-0.013	-0.007	0
	90°(Y)	0	0	0.011	0.008	0.008	-0.003	0.005	0.006	0.004	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0
No.3	0°(X)	0	-0.013	-0.005	0	-0.003	0.006	0.004	0	-0.011	0
	90°(Y)	0	0.005	0.014	0.013	0.002	0.002	0.004	0.004	0.003	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0

Table 3.14 Profile of fuel holes in lower graphite block for 2nd OGL-1
(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.1	0°(X)	0	-0.011	-0.012	-0.015	-0.016	-0.018	-0.012	-0.013	0.005	0
	90°(Y)	0	0.007	0.007	0.007	0.008	-0.003	-0.003	-0.001	0.003	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0
No.2	0°(X)	0	-0.003	-0.004	-0.007	0.002	-0.001	0.007	0.004	0.004	0
	90°(Y)	0	0	0.008	0.007	-0.004	-0.005	0.004	0.004	0.002	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0	0
No.3	0°(X)	0	-0.005	0	-0.004	-0.001	-0.002	0	0.007	0.002	0
	90°(Y)	0	0.005	0.018	0.017	0.019	0.008	0.019	0.009	0.011	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0

Table 3.15 Weight of fuel pin for 1st OGL-1

Pin No.	weight (g)	
	before irradiation	after irradiation
1	_____	1084.5
2	_____	1088.3
3	_____	1090.7

Table 3.16 Weight of fual pin for 2nd OGL-1

Pin No.	weight (g)	
	before irradiation	after irradiation
1	1168	1168.6
2	1167	1166.6
3	1169	1166.1

Table 3.17 γ -activity ratio of fuel pin for 1st OGL-1

Pin No.	Distance from the bottom (cm)							Specific power ratio
	10	20	30	40	50	60	70	
1	0.67	0.63	0.68	0.67	0.71	0.72	0.62	0.67
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	0.94	0.91	0.94	0.93	0.94	0.95	0.95	0.92

Table 3.18 γ -activity ratio of fuel pin for 2nd OGL-1

Pin No.	Distance from the bottom (cm)							Specific power ratio
	10	20	30	40	50	60	70	
1	0.67	0.68	0.68	0.66	0.63	0.67	0.67	0.67
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	0.98	0.97	0.97	0.98	0.98	1.0	1.06	0.97

Table 3.19 Weight of metal componeuts for 2nd OGL-1

Components	Weight (g)	
	before irradiation	after irradiation
No.1 T/C Support ring	23.1	23.1
No.2 T/C Support ring	23.4	23.4
Upper end cover	193.6	193.6

Table 3.20 Diameter, length and straightness of graphite sleeves for 1st OGL-1

		Direction	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Length L	Straightness (mm)
1	Outer dia.	337°	30.058	29.999	29.998	30.045	30.068	30.050	29.956	29.958	29.981	30.033	(796.7)	-0.54
	Outer dia.	9 0°	30.039	29.991	29.993	29.981	30.057	30.031	29.954	29.984	29.983	29.986	799.6	-0.65
	Inner dia.	0°	24.241	24.208	24.205	24.196	24.189	24.195	24.181	24.173	24.191	24.192	741.9	0.77
	Inner dia.	9 0°	24.226	24.213	24.203	24.199	24.197	24.189	24.189	24.193	24.191	24.201	741.9	0.65
	Outer dia.	337°	30.079	29.986	30.000	30.011	30.019	30.022	29.940	29.963	29.980	30.003	799.8	0.45
	Outer dia.	9 0°	30.106	29.984	30.000	29.977	29.997	29.965	29.939	29.955	29.968	29.990	799.9	-0.41
2	Inner dia.	0°	24.302	24.271	24.258	24.234	24.226	24.225	24.225	24.230	24.241	24.254	736.0	-0.30
	Inner dia.	9 0°	24.286	24.276	24.254	24.231	24.230	24.221	24.223	24.227	24.236	24.260	736.9	0.21
	Outer dia.	337°	30.056	30.036	30.033	30.041	30.055	30.075	30.026	30.010	29.976	30.013	799.6	-0.53
	Outer dia.	9 0°	30.029	30.035	30.026	30.036	30.048	30.061	30.008	30.003	29.970	30.017	799.5	0.36
	Inner dia.	0°	24.250	24.223	24.208	24.200	24.197	24.182	24.194	24.193	24.206	24.218	735.8	0.47
	Inner dia.	9 0°	24.237	24.225	24.209	24.197	24.199	24.203	24.191	24.195	24.204	24.222	736.6	-0.36

Table 3.21 Diameter, length and straightness of graphite sleeves for 2nd OGL-1

		Direc-tion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Length L	Straight-ness	(mm)
1	Outer dia.	337°	30.056	30.014	30.006	29.965	29.994	30.012	29.966	30.012	30.010	29.985	800.3	-0.23	
	Outer dia.	90°	30.042	30.015	30.007	29.978	29.992	29.990	29.976	30.011	30.009	29.999	800.3	-0.18	
2	Inner dia.	0°	24.277	24.273	24.275	24.262	24.256	24.250	24.244	24.251	24.259	24.258	741.1	0.38	
	Outer dia.	90°	24.271	24.260	24.257	24.267	24.256	24.259	24.258	24.257	24.267	24.264	741.1	0.10	
3	Inner dia.	0°	24.270	24.250	24.252	24.240	24.249	24.241	24.243	24.248	24.260	24.261	742.6	-0.12	
	Outer dia.	337°	29.999	29.991	29.998	29.967	29.977	29.980	29.987	30.009	30.005	29.992	800.1	-0.08	
	Inner dia.	90°	30.043	29.992	30.006	29.968	29.969	29.972	29.987	30.002	29.999	30.009	800.1	0.09	
	Outer dia.	337°	29.996	30.011	30.005	29.963	29.963	29.956	29.977	29.987	30.007	29.997	799.8	0.11	
	Inner dia.	37°	30.017	30.012	29.995	29.948	29.929	29.933	29.965	29.989	30.010	29.989	799.8	0.90	
	Outer dia.	0°	24.259	24.269	24.251	24.240	24.234	24.238	24.240	24.249	24.260	24.259	741.1	0.27	
	Inner dia.	90°	24.269	24.254	24.239	24.244	24.245	24.231	24.233	24.242	24.251	24.265	740.8	0.78	

Table 3.22 Dimensional change of graphite sleeve

	Sleeve No.	Length (mm) χ_i	Length (mm) χ_f	$\Delta\chi = \chi_f - \chi_i$	$\frac{\Delta\chi}{\chi_i}$
1st OGL-1	1	799.0	799.6	0.6	7.5×10^{-4}
	2	799.3	799.9	0.6	7.5×10^{-4}
	3	799.2	799.5	0.3	3.8×10^{-4}
2nd OGL-1	1	800.3	800.3	0	0
	2	800.5	800.1	-0.4	-5.0×10^{-4}
	3	800.1	799.8	-0.3	-3.8×10^{-4}

Table 3.23 Weight of graphite sleeve

	Sleeve No.	Weight (g)	
		Pre irradiation	Post irradiation
1st OGL-1	1	358.9	358.3
	2	354.2	354.3
	3	358.5	358.6
2nd OGL-1	1	358	358.0
	2	358	358.1
	3	358	358.0

Table 3.24 Bowing of graphite sleeve for 1st OGL-1¹⁾

(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.1	0°(X)	0	0.208	0.449	0.626	0.745	0.768	0.644	0.444	0.216	0
	90°(Y)	0	0.180	0.378	0.565	0.654	0.570	0.456	0.318	0.147	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.28	0.59	0.84	0.99	0.96	0.79	0.55	0.26	0
No.2	0°(X)	0	-0.030	0.015	-0.004	-0.108	-0.238	-0.292	-0.257	-0.166	0
	90°(Y)	0	0.108	0.190	0.212	0.191	0.177	0.147	0.099	0.051	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.11	0.19	0.21	0.22	0.30	0.33	0.28	0.17	0
No.3	0°(X)	0	0.074	0.256	0.387	0.471	0.398	0.319	0.203	0.092	0
	90°(Y)	0	-0.127	-0.250	-0.325	-0.349	-0.360	-0.350	-0.282	-0.153	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.15	0.36	0.51	0.59	0.54	0.47	0.35	0.18	0

1) These values are based on inner diameter.

Table 3.25 Bowing of graphite sleeve for 1st OGL-1¹⁾

(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No.1	0°(X)	0	-0.267	-0.557	-0.754	-0.865	-0.836	-0.705	-0.480	-0.222	0
	90°(Y)	0	-0.174	-0.377	-0.540	-0.653	-0.617	-0.570	-0.403	-0.186	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.32	0.67	0.93	1.08	1.04	0.91	0.63	0.29	0
No.2	0°(X)	0	0.032	0.089	0.180	0.270	0.325	0.321	0.251	0.135	0
	90°(Y)	0	-0.114	-0.249	-0.353	-0.408	-0.392	-0.337	-0.231	-0.106	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.12	0.26	0.40	0.49	0.51	0.46	0.34	0.17	0
No.3	0°(X)	0	-0.126	-0.269	-0.377	-0.421	-0.400	-0.325	-0.240	-0.113	0
	90°(Y)	0	0.124	0.259	0.323	0.358	0.342	0.327	0.231	0.106	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.18	0.37	0.50	0.55	0.53	0.46	0.33	0.15	0

1) These values are based on outer diameter.

Table 3.26 Bowing of graphite sleeve for 2nd OGL-1¹⁾

(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. 1	0°(X)	0	0.065	0.212	0.323	0.367	0.324	0.243	0.170	0.065	0
	90°(Y)	0	0.037	0.053	0.101	0.090	0.094	0.078	0.029	0.003	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.07	0.22	0.34	0.38	0.34	0.25	0.17	0.07	0
No. 2	0°(X)	0	-0.018	0.029	0.060	0.039	-0.051	-0.124	-0.064	-0.056	0
	90°(Y)	0	-0.029	-0.042	-0.039	-0.047	-0.077	-0.078	-0.096	-0.055	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.03	0.05	0.07	0.06	0.09	0.15	0.11	0.08	0
No. 3	0°(X)	0	0.049	0.164	0.251	0.269	0.176	0.108	0.070	0.024	0
	90°(Y)	0	0.276	0.534	0.723	0.771	0.776	0.666	0.471	0.222	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.28	0.56	0.77	0.82	0.80	0.67	0.48	0.22	0

1) These values are based on inner diameter.

Table 3.27 Bowing of graphite sleeve for 2nd OGL-1¹⁾

(mm)

	Direction	Axial position									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. 1	0°(X)	0	-0.081	-0.192	-0.284	-0.324	-0.307	-0.230	-0.164	-0.073	0
	90°(Y)	0	-0.046	-0.111	-0.157	-0.182	-0.178	-0.133	-0.089	-0.034	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.09	0.22	0.32	0.37	0.35	0.27	0.19	0.08	0
No. 2	0°(X)	0	-0.036	-0.072	-0.083	-0.069	-0.016	0.015	0.016	0.003	0
	90°(Y)	0	0.007	0.013	0	-0.003	0.033	0.070	0.087	0.04	0
	$\sqrt{X^2+Y^2}$	0	0.04	0.07	0.08	0.07	0.04	0.07	0.09	0.04	0
No. 3	337°	0	0.052	0.084	0.097	0.089	0.111	0.083	0.046	0.008	0
	37°	0	-0.242	-0.544	-0.777	-0.899	-0.861	-0.703	-0.486	-0.238	0
	Bowing	0	0.31	0.68	0.96	1.09	1.06	0.86	0.59	0.28	0

1) These values are based on outer diameter.

Table 3.28 Weight of End Screw

	Pin No.	Weight	
		Pre irradiation	Post irradiation
1st OGL-1	1	Top	24.0
		Bottom	24.2
	2	Top	23.9
		Bottom	24.3
	3	Top	23.8
		Bottom	24.3
2nd OGL-1	1	Top	22.7
		Bottom	23.4
	2	Top	22.7
		Bottom	23.6
	3	Top	22.7
		Bottom	23.5

Table 3.29 Weight of rock-nut and T/C support rod for
2nd OGL-1

Components	No.	Weight (g)	
		Pre irradiation	Post irradiation
Rock-nut	1	0.7	0.70
	2	0.7	0.69
	3	0.8	0.70
T/C Support rod	1	17.1	17.19
	2	17.1	17.15
	3	17.2	17.35

<u>FUEL ASSEMBLY</u>			
<u>GRAPHITE BLOCK</u>	<u>FUEL PIN</u>	<u>METAL COMPONENT</u>	<u>FLUENCE MONITOR</u>
Visual examination	Visual examination	Visual examination	
Dimension	X-ray	Weight	
Weight	Weight		
Bowing	Gamma-scanning		
Inner surface	Disassembly		

<u>FUEL COMPACT</u>	<u>GRAPHITE SLEEVE</u>	<u>GRAPHITE COMPONENT</u>
	Visual examination	Visual examination
	Dimension	Weight
	Weight	Elasticity of carbon felt
	Bowing	
	Inner surface	

Fig. 3.1 PIE program for OGL-1 fuel assembly

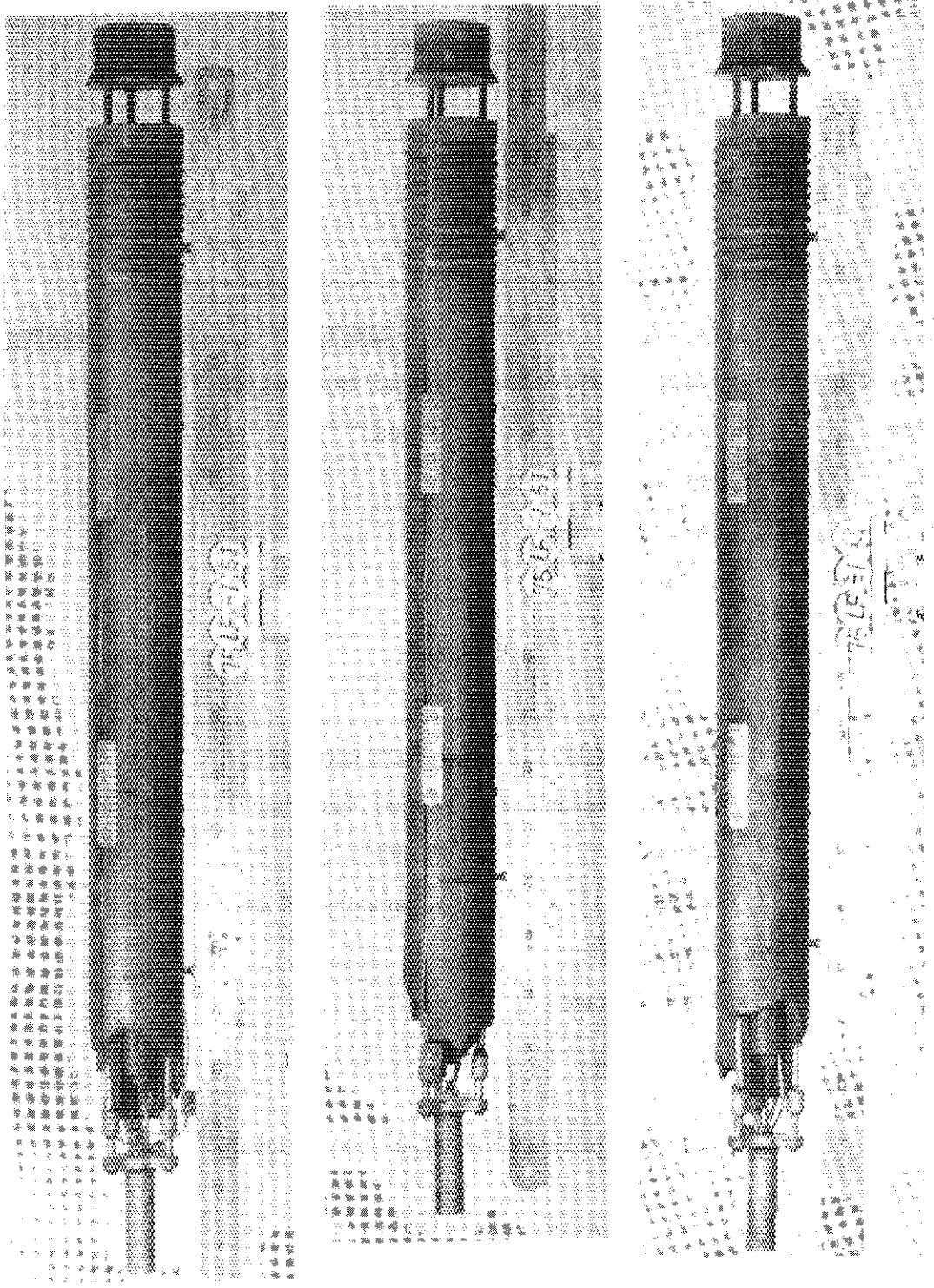


Fig. 3.2 Three side views of 1st OGL-1 fuel assembly.

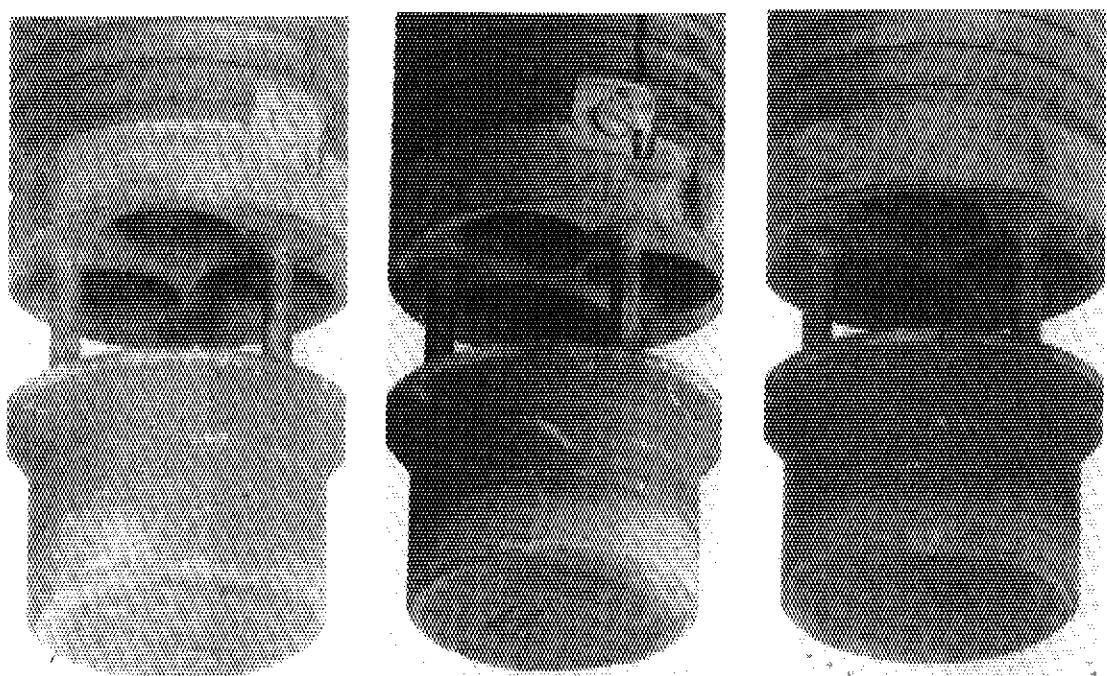


Fig. 3.3 Bottom end views of 1st OGL-1 fuel assembly.

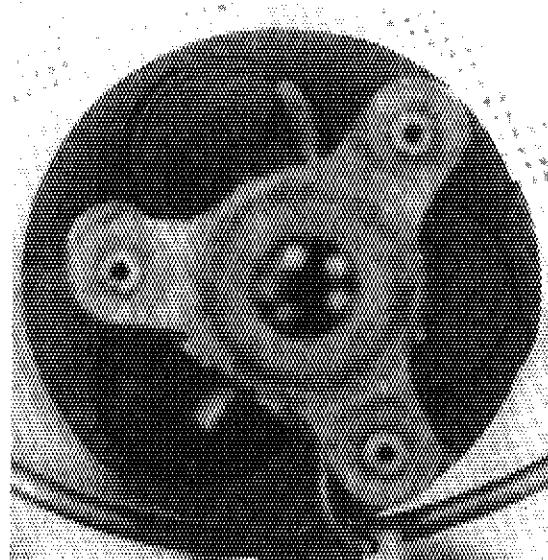


Fig. 3.4 Top end view of 1st OGL-1 fuel assembly.

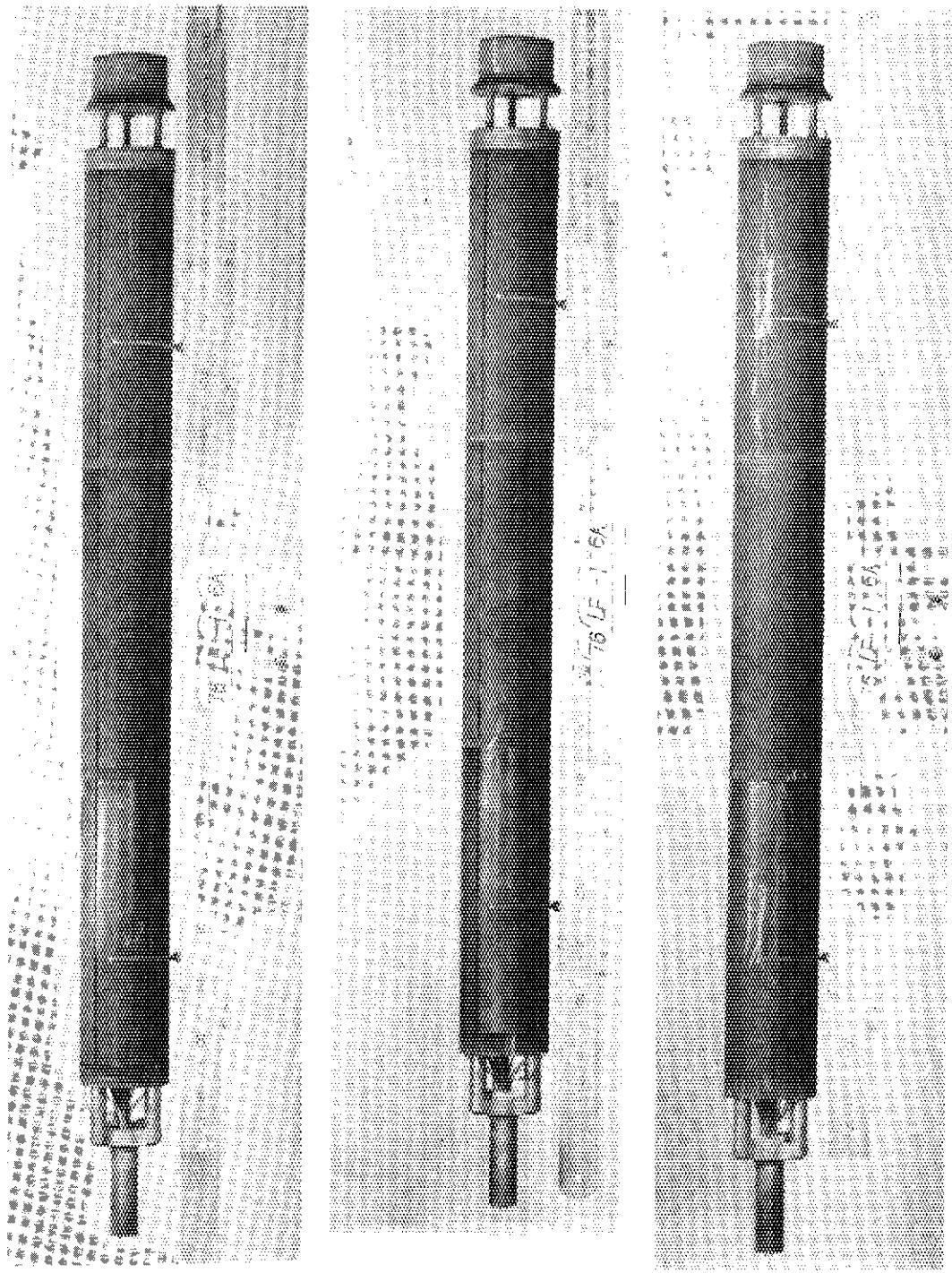


Fig. 3.5 Three side views of 2nd OGL-1 fuel assembly.

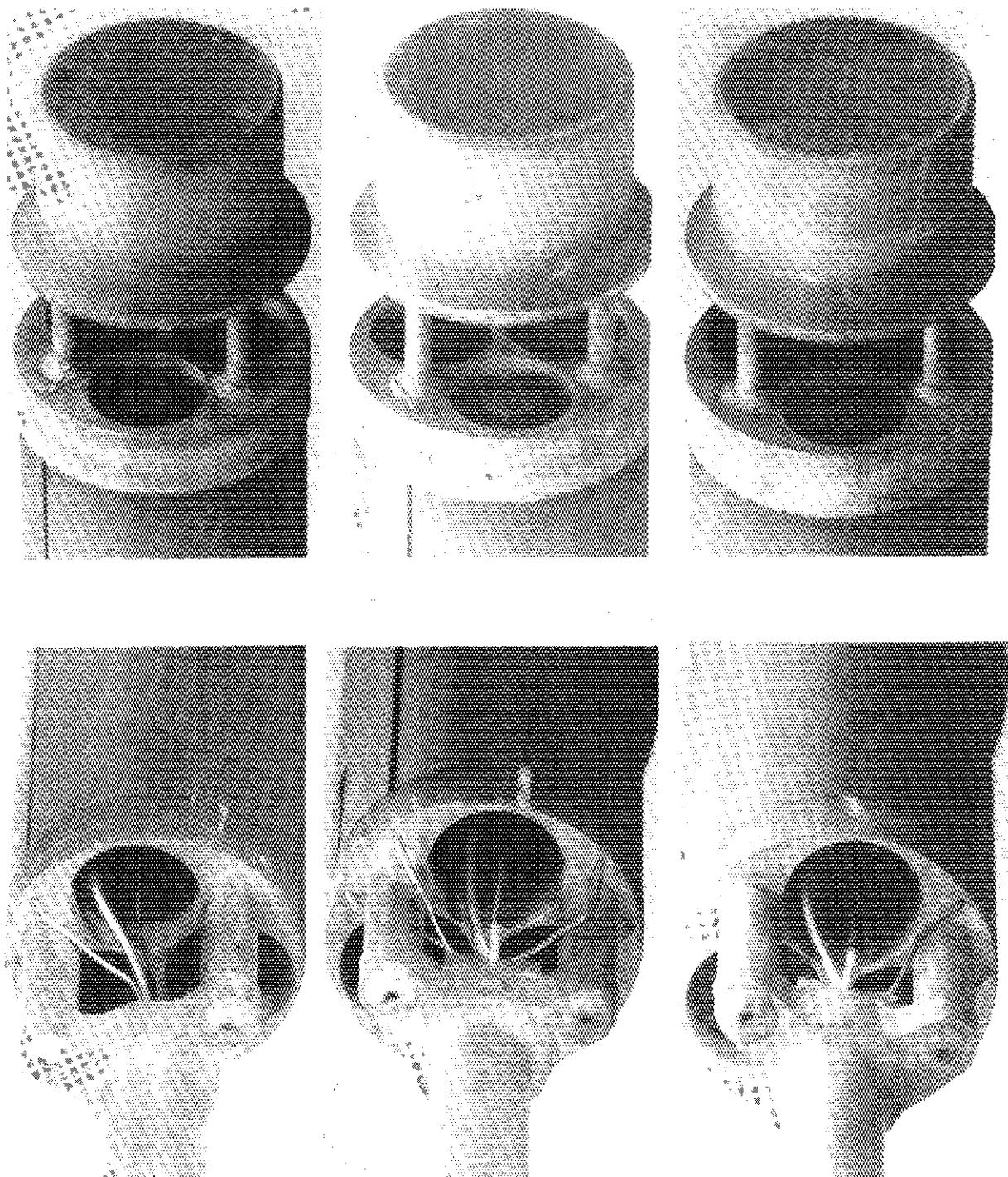


Fig. 3.6 Top and end views of 2nd OGL-1 fuel assembly.

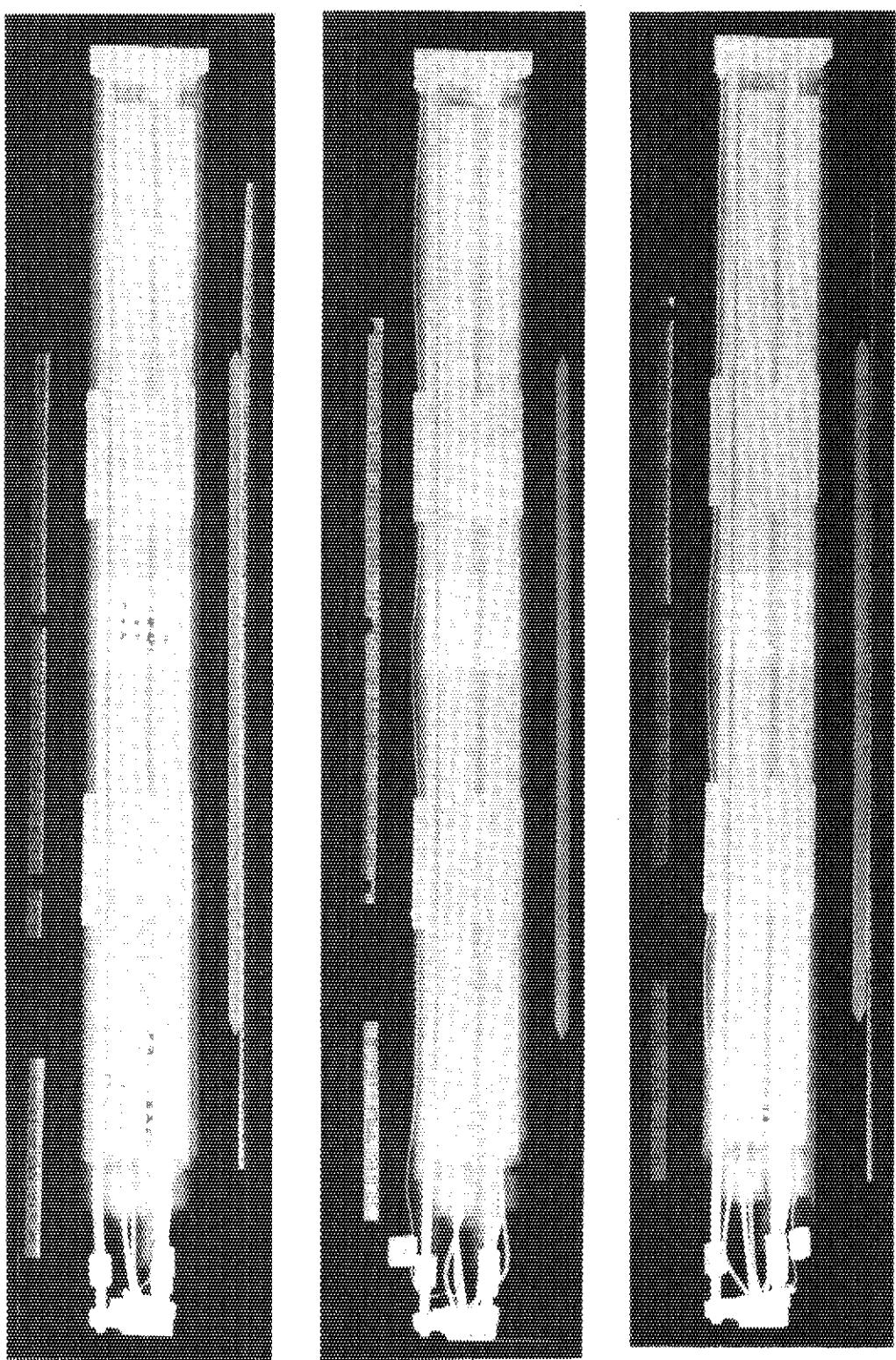


Fig. 3.7 X-ray photographs of 1st OGL-1 fuel assembly from three directions.

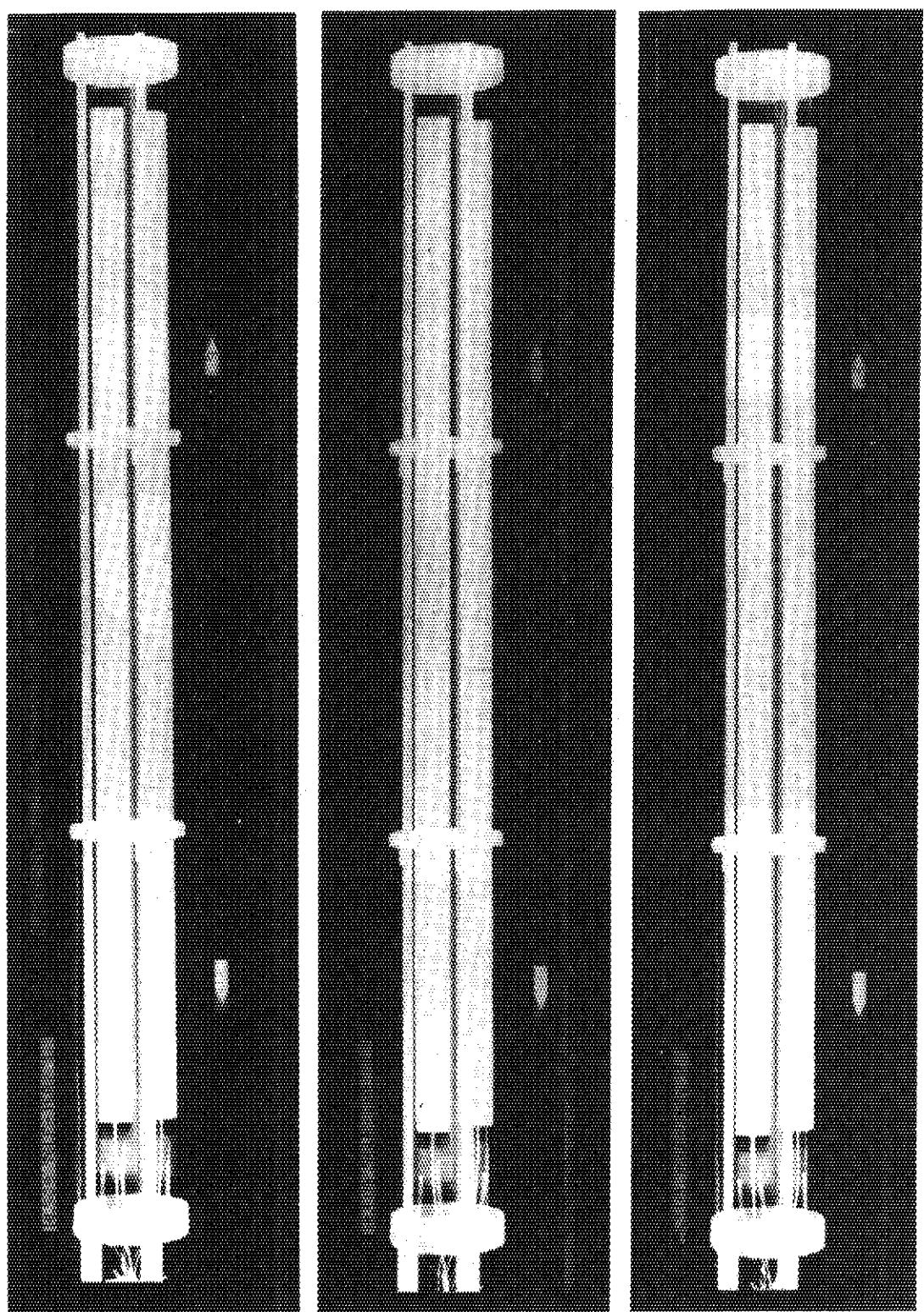


Fig. 3.8 X-ray photographs of 2nd OGL-1 fuel assembly from three directions.

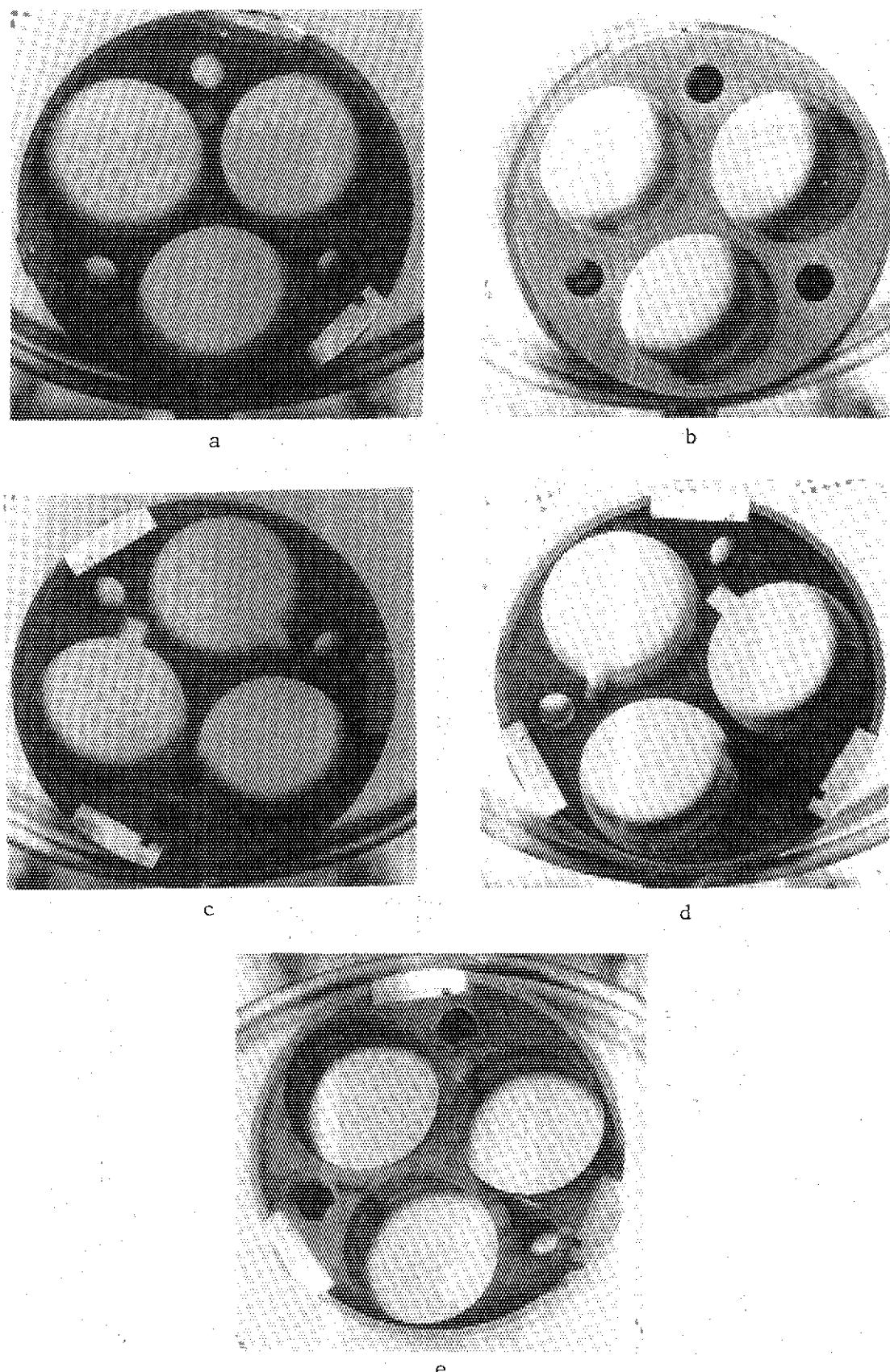


Fig. 3.9 Top (left) and bottom (right) end face of graphite blocks for 1st OGL-1 fuel assembly. a and b: lower, C and d: middle, e: upper graphite block.

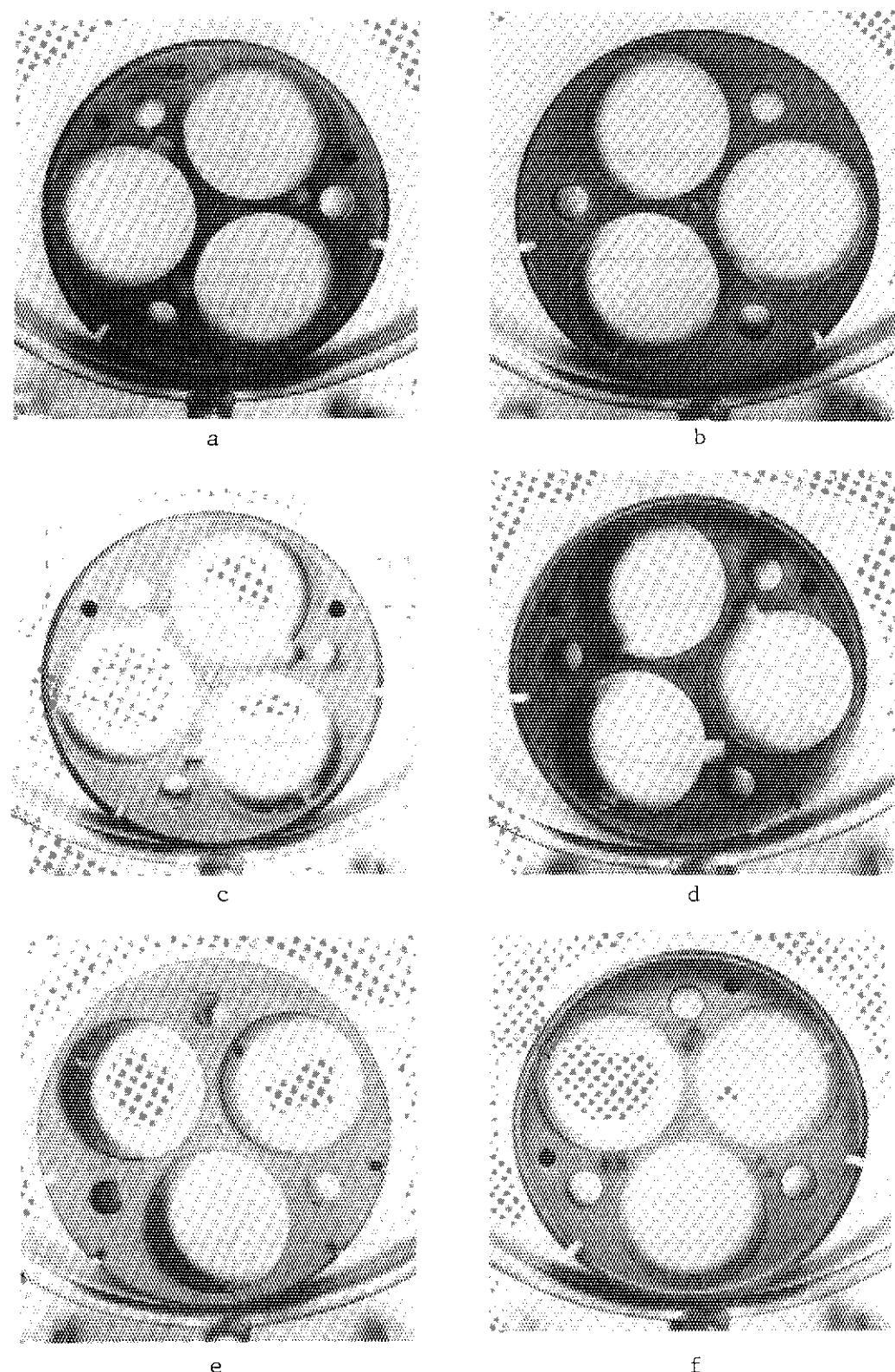


Fig. 3.10 Top 9 (left) and bottom (right) end face of graphite blocks for 2nd OGL-1 fuel assembly. a and b: lower, c and d: middle, e and f: upper graphite block.

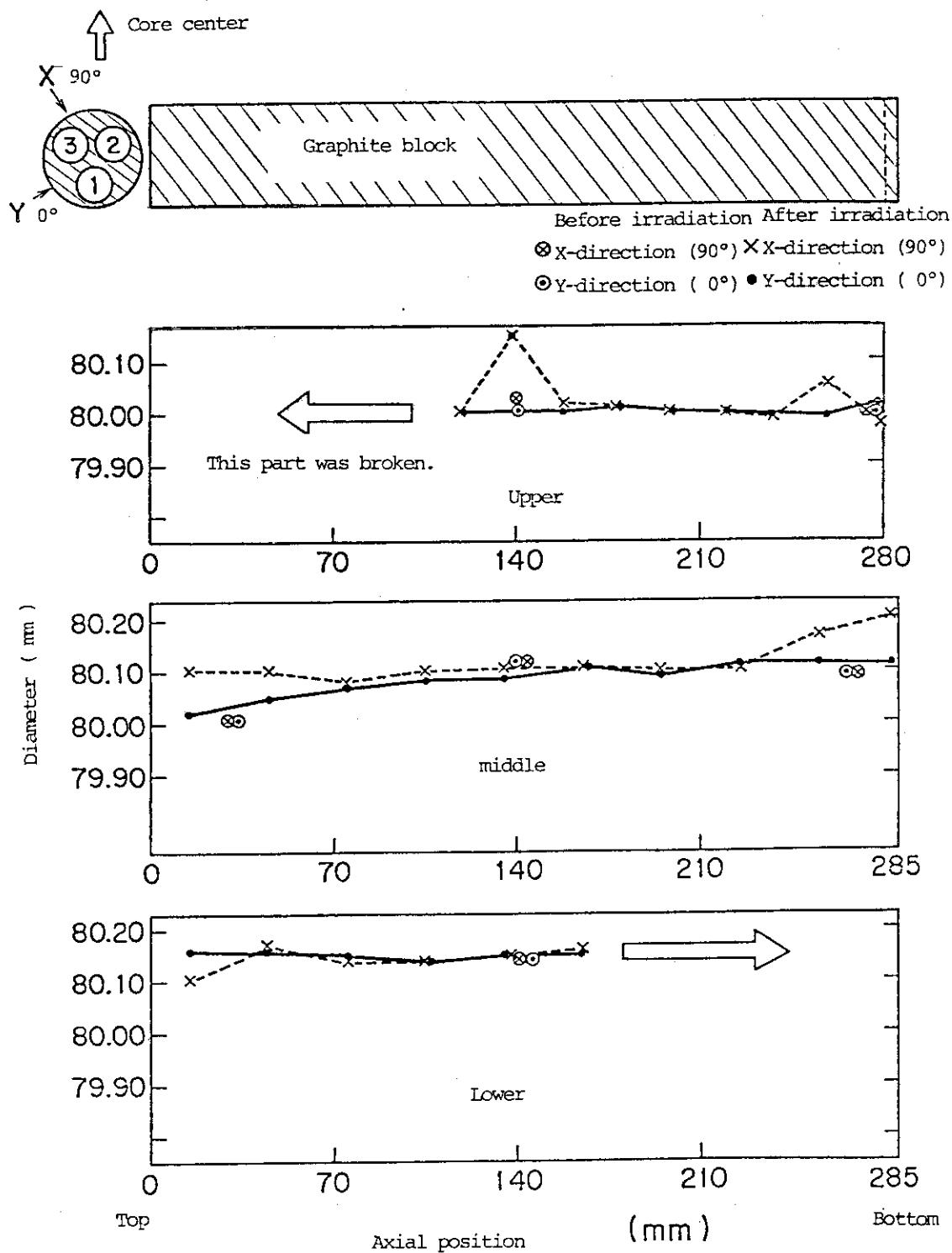


Fig.3.11 Diameter of graphite blocks for 1st OGL-1

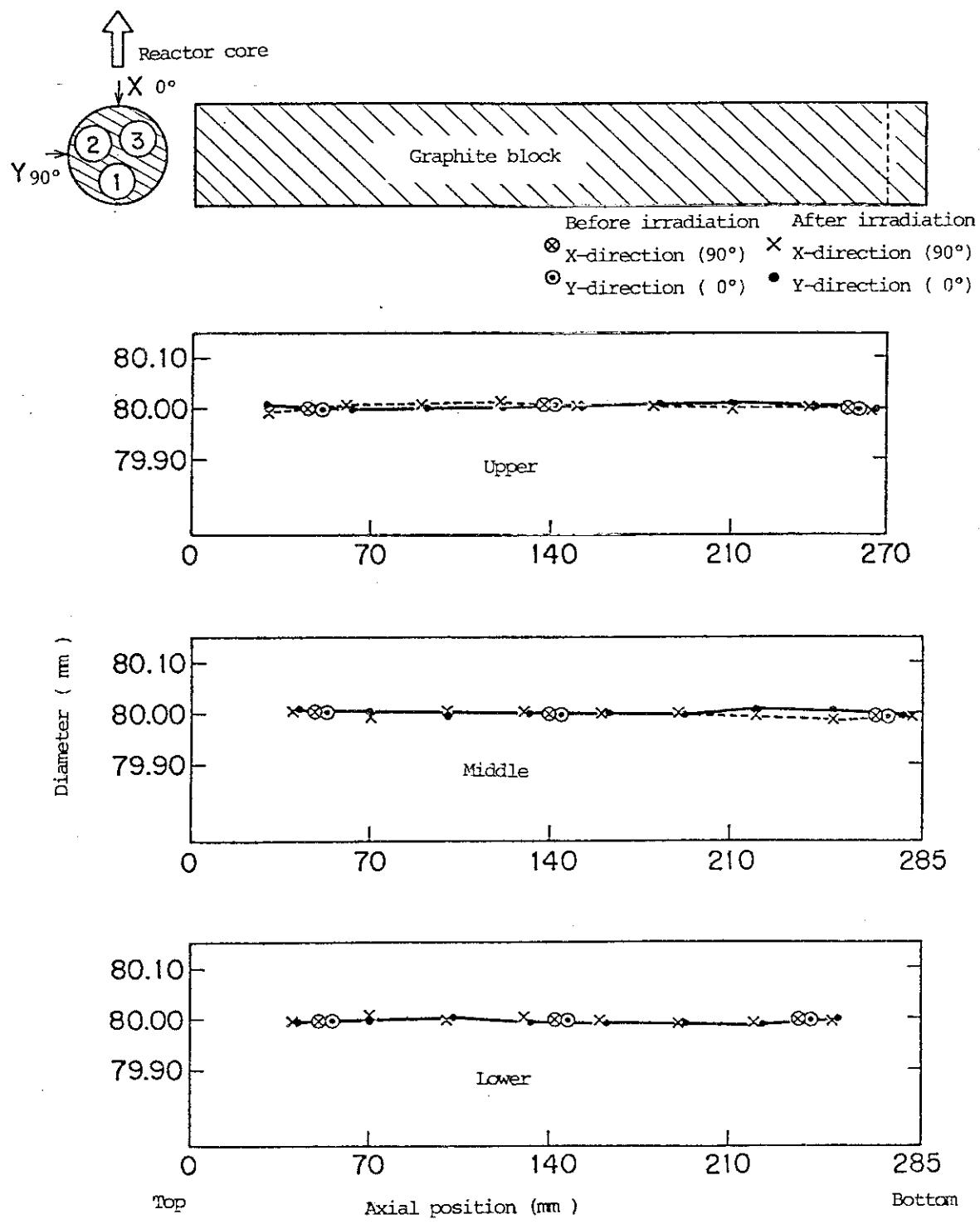


Fig. 3.12 Diameter of graphite block for 2nd OGL-1

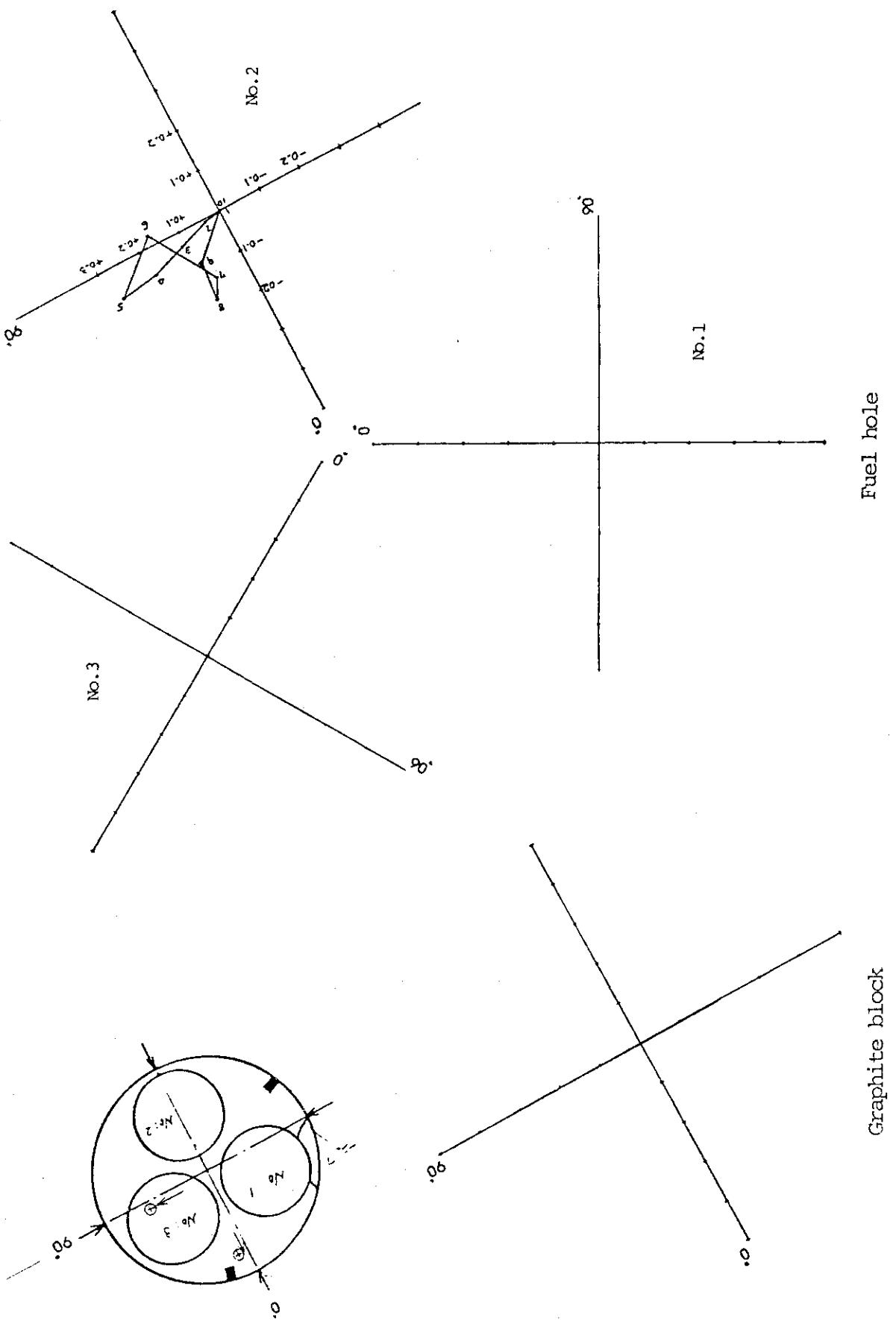


Fig. 3.13 Bowing of upper graphite block and fuel holes for 1st OGL-1

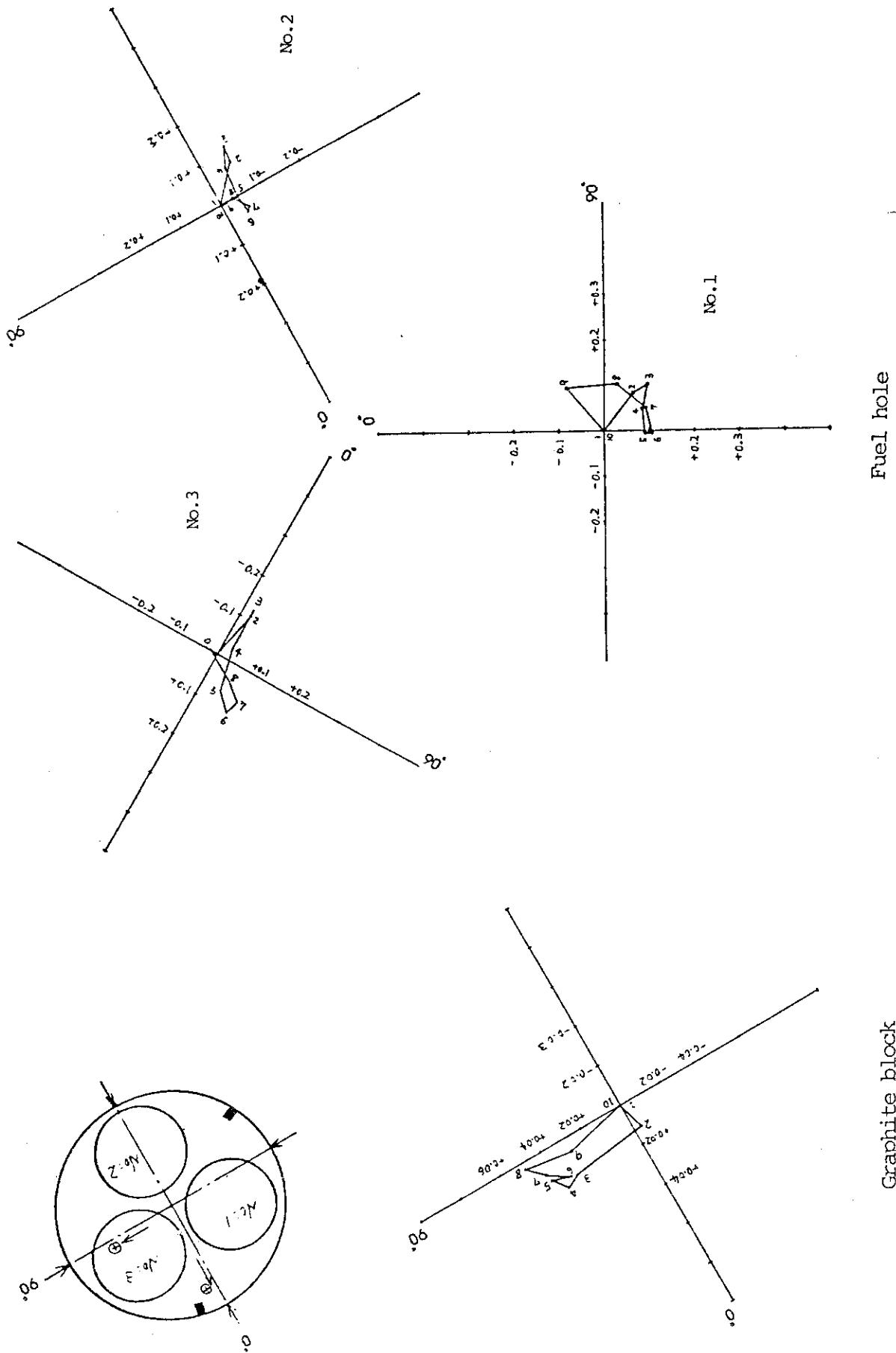


Fig. 3.14 Bowing of middle graphite block and fuel holes for 1st OGL-1

Fig. 3.14

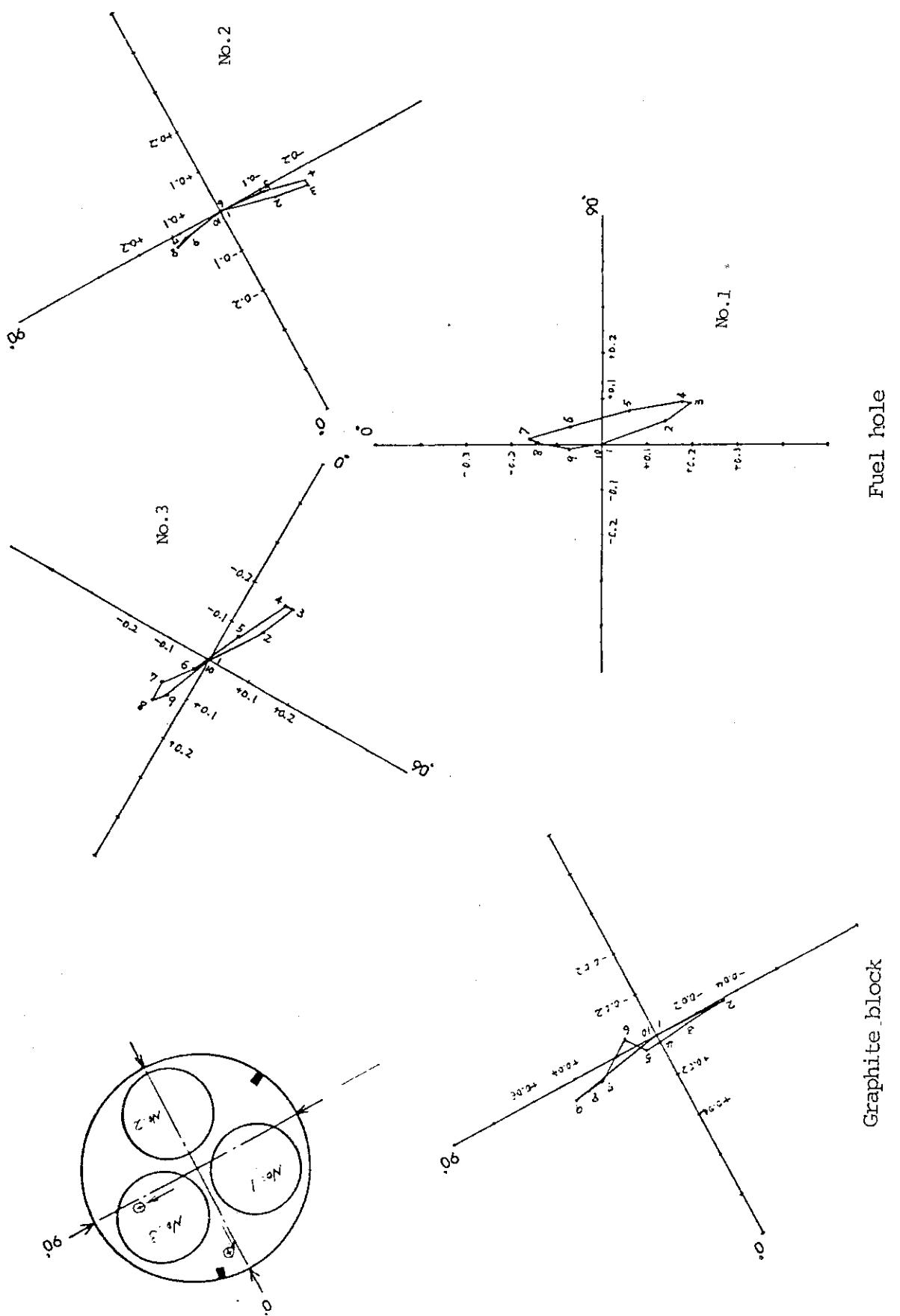


Fig. 3.15 Bowing of lower graphite block and fuel holes for 1st OGL-1

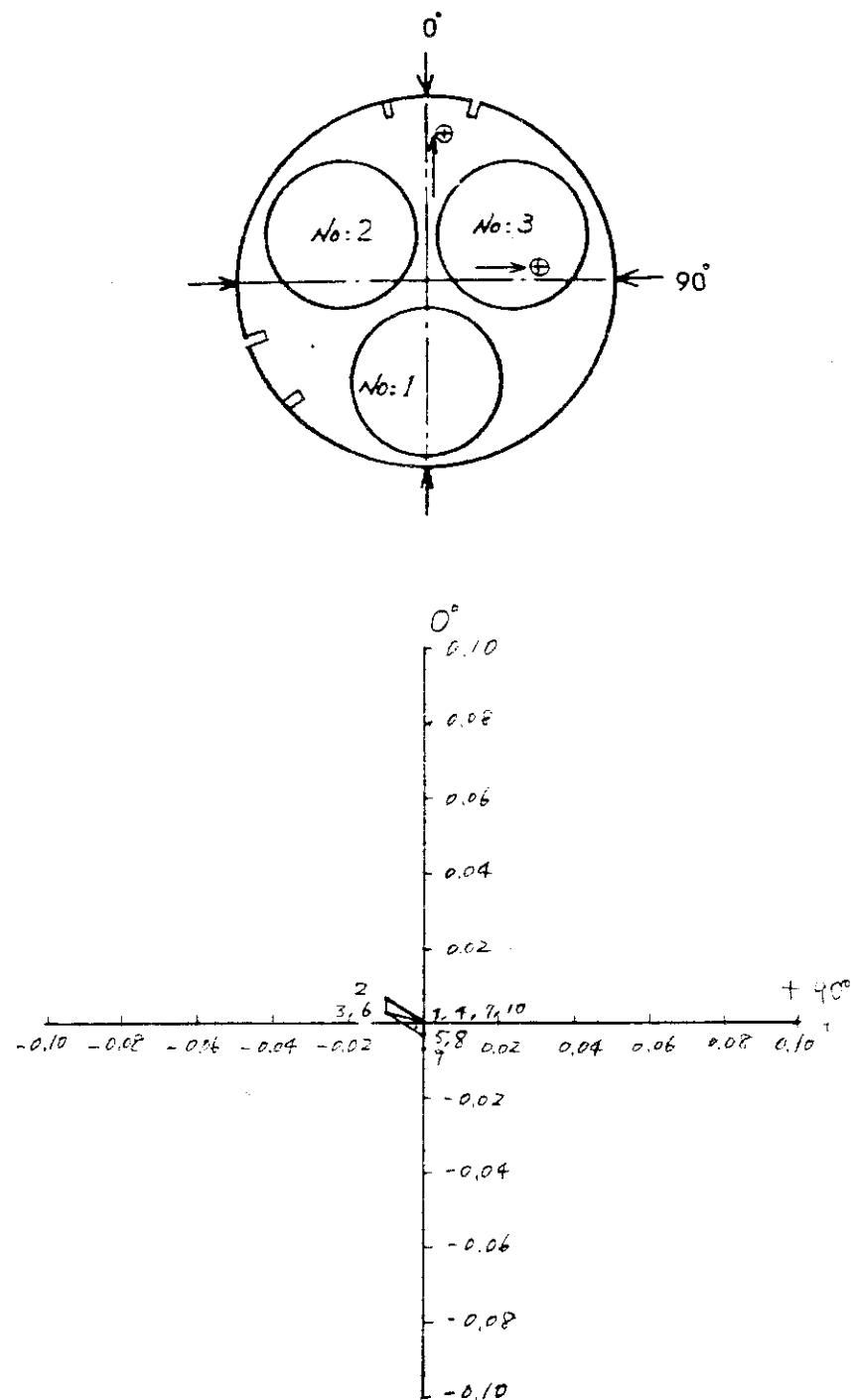


Fig. 3.16 Bowing of upper graphite block for 2nd OGL-1

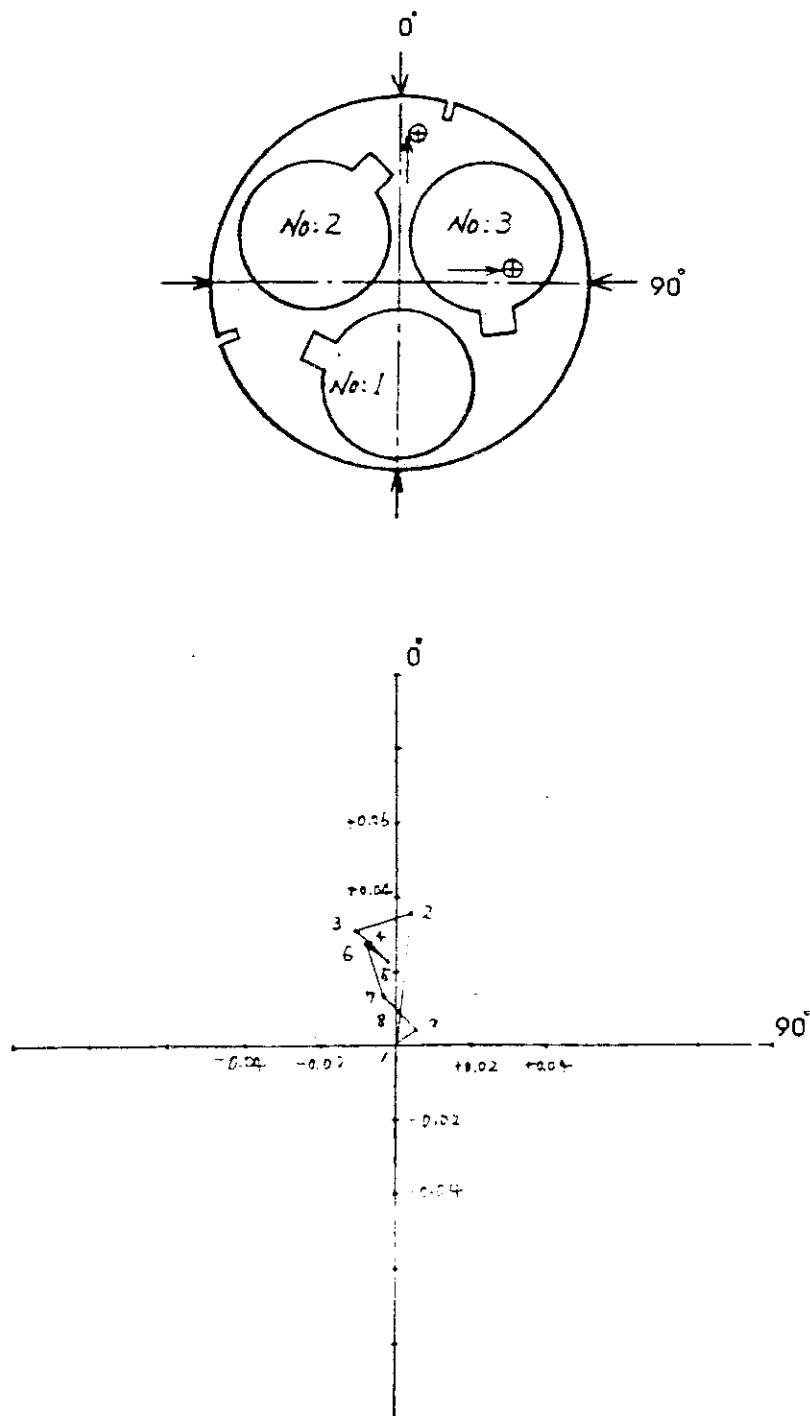


Fig. 3.17 Bowing of middle graphite block for 2nd OGL-1

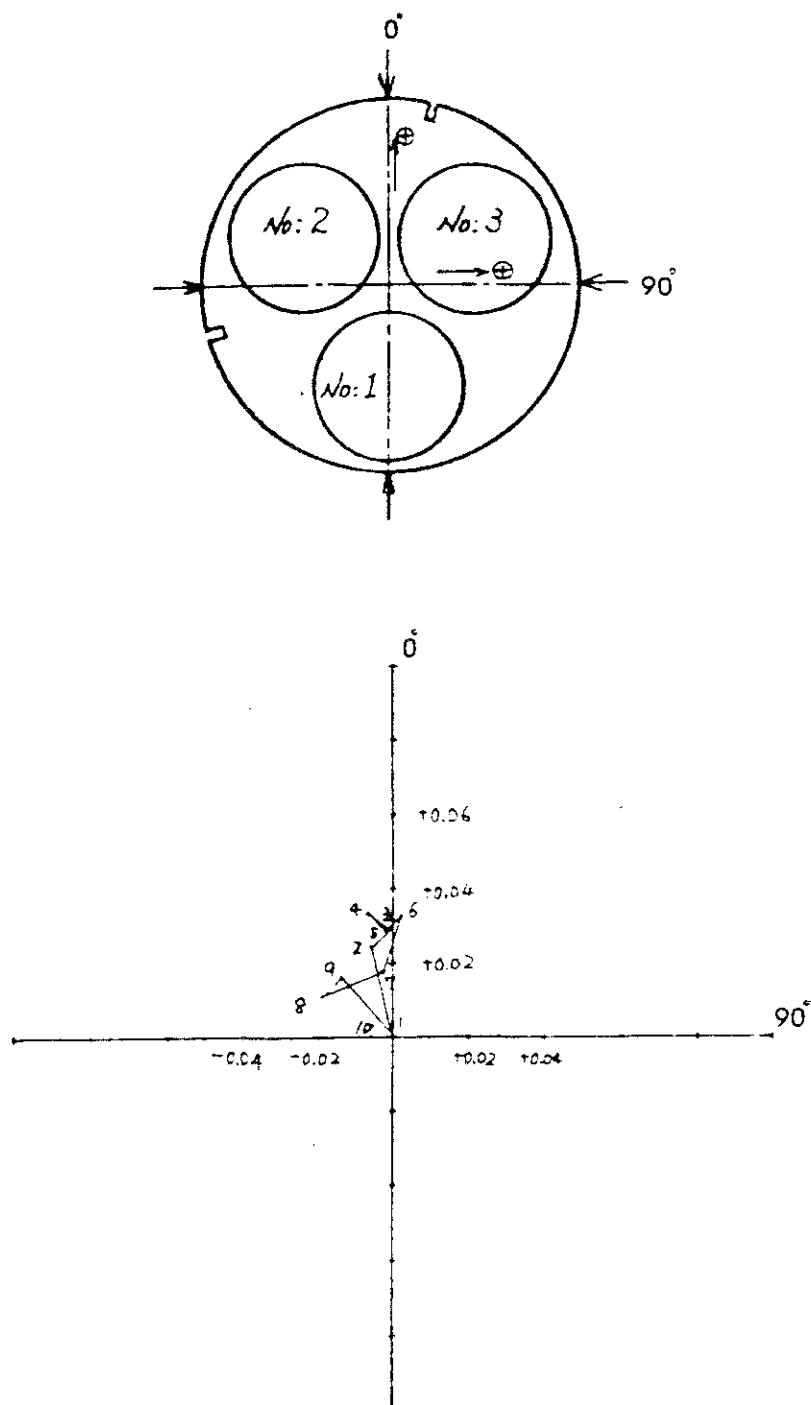


Fig. 3.18 Bowing of lower graphite block for 2nd OGL-1

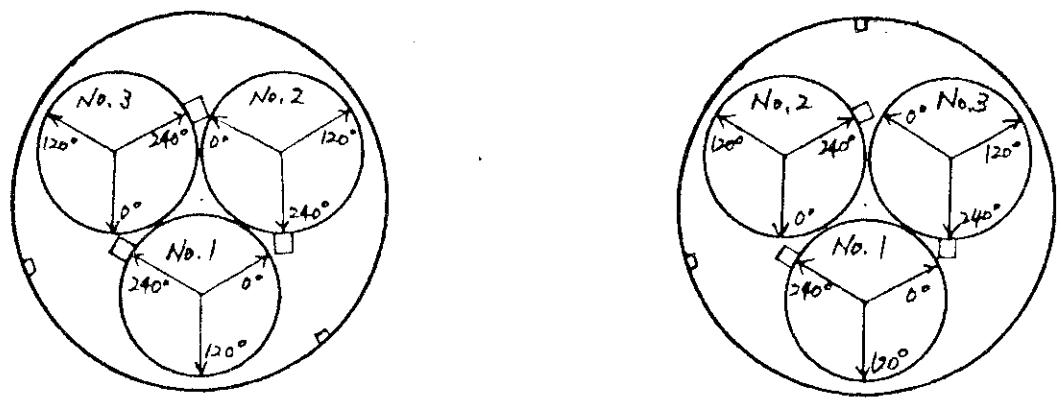


Fig. 3.19 Viewing direction of inner surface of fuel holes

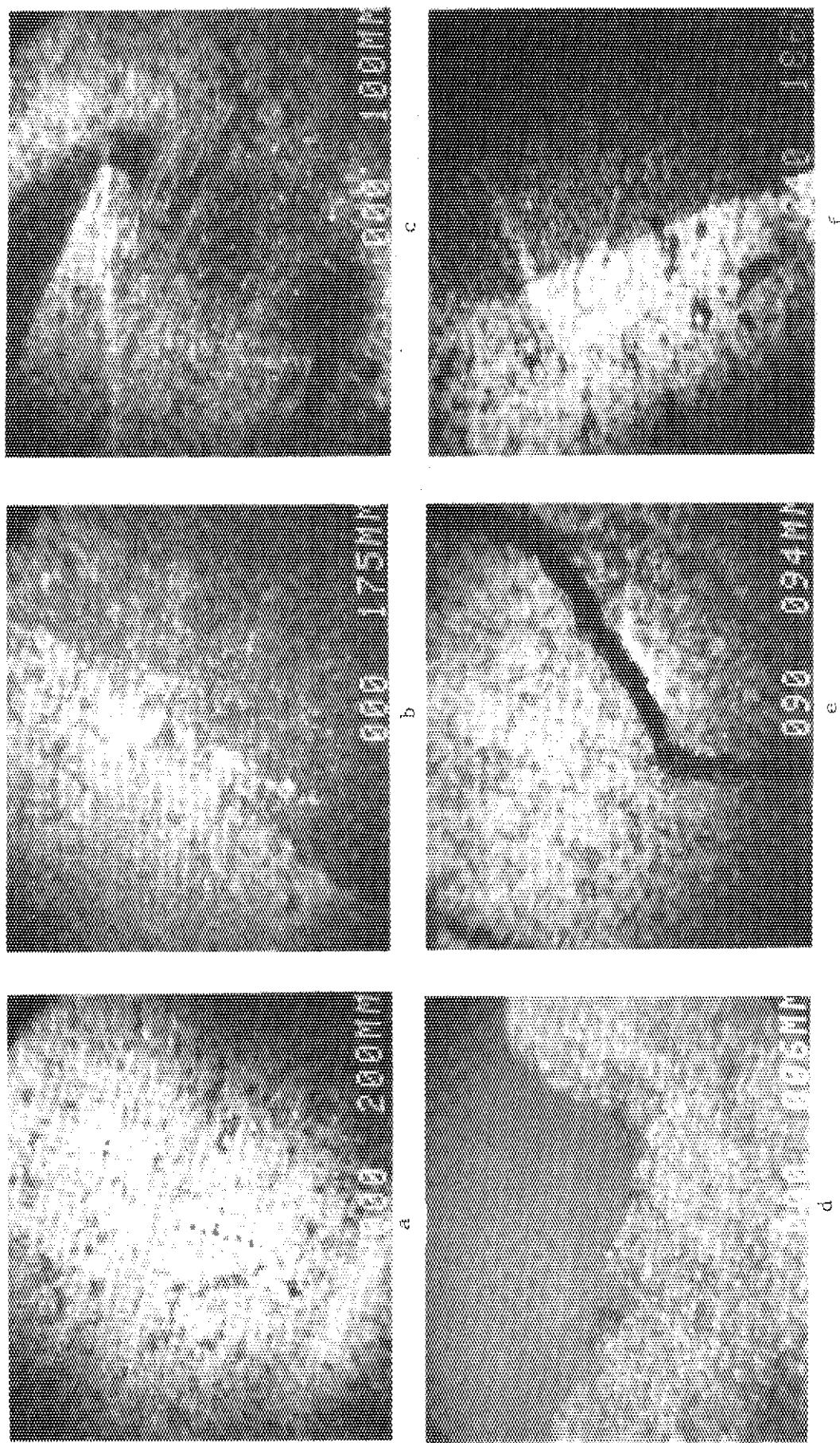


Fig. 3.20 Inner surface of fuel hole in upper graphite block for 1st OGL-1.

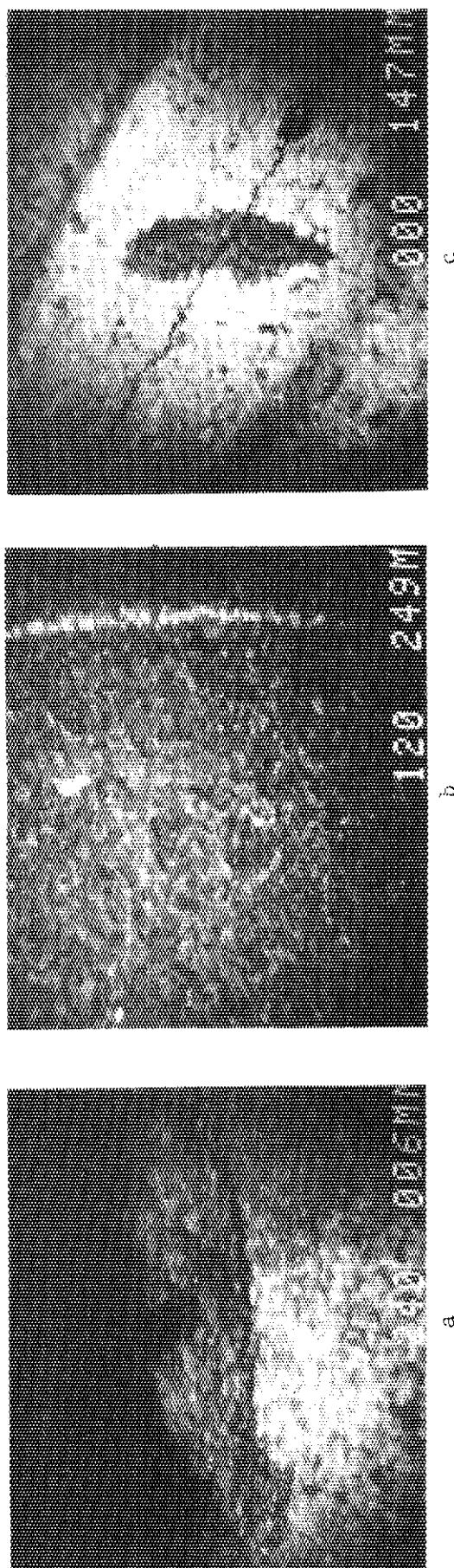


Fig. 3.21 Inner surface of fuel hole in graphite blocks for 1st OGL-1.
a and b; upper, c; middle graphite block.

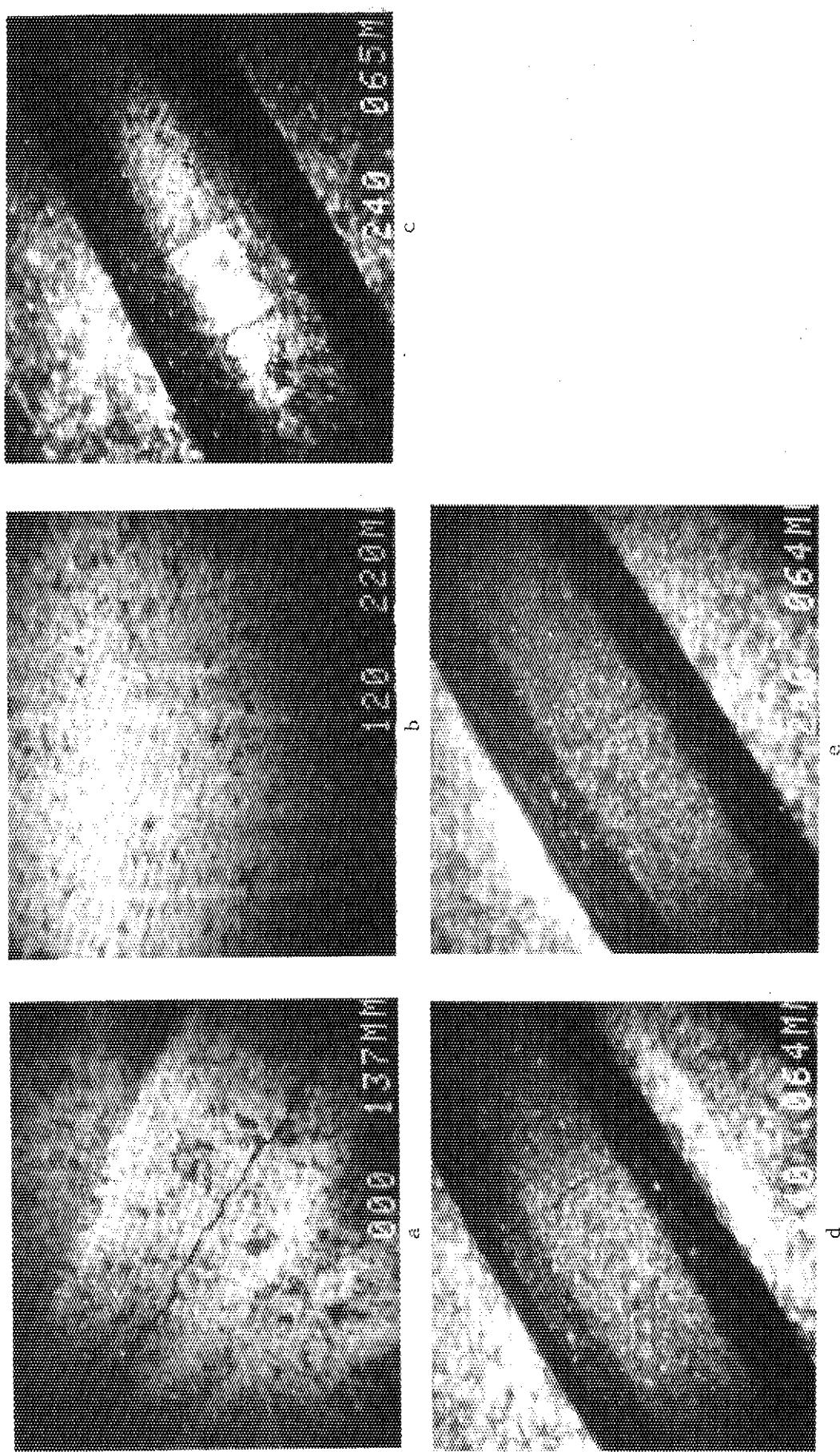


Fig. 3.22 Inner surface of fuel hole in middle graphite block for 1st OGL-1.
a, b and c; No.1 hole. d; No.2 hole. e; No.3 hole.

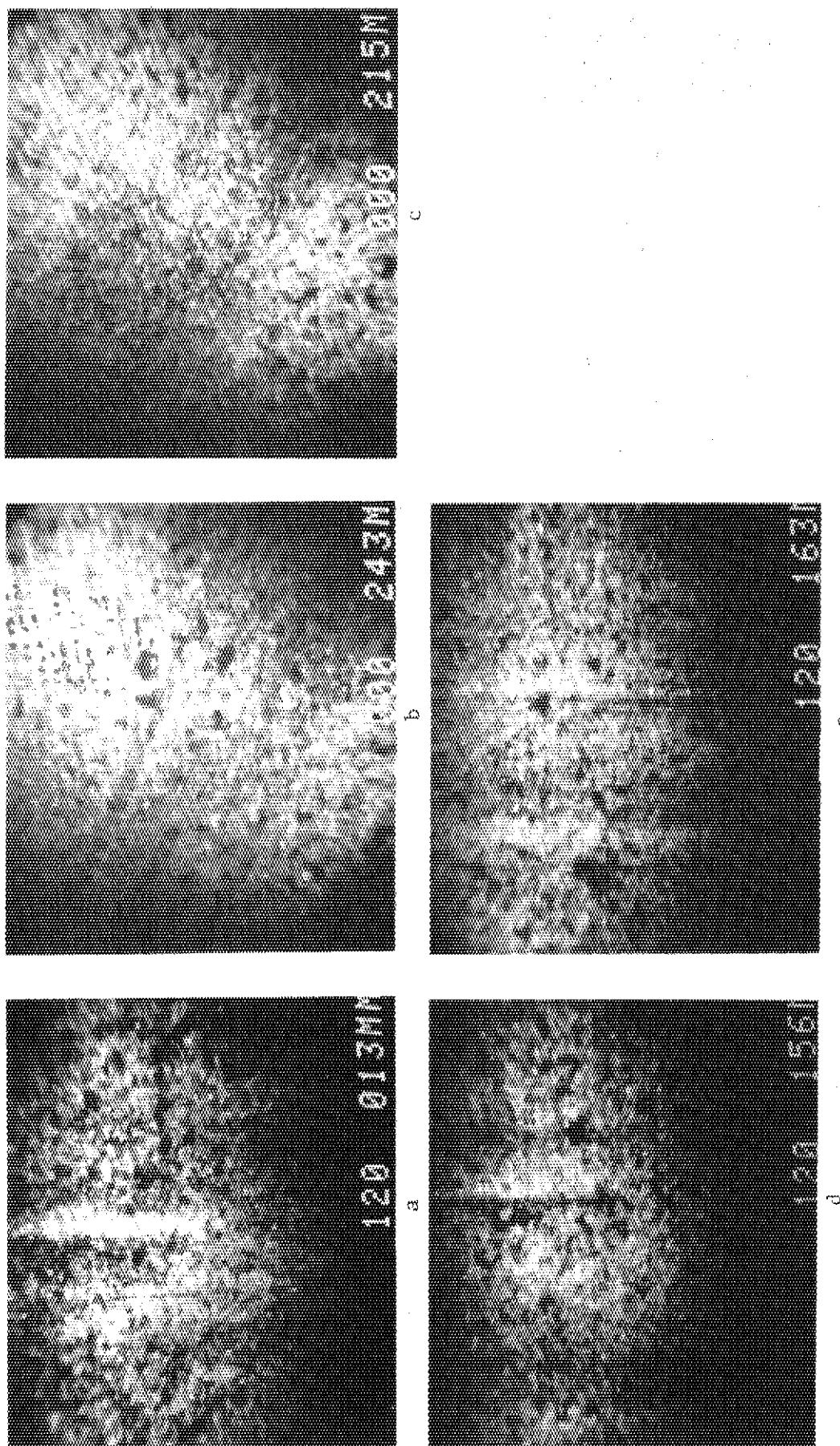


Fig. 3.23 Inner surface of fuel hole in lower graphite block for 1st OGL-1.
a; No.1 hole. b, c, d and e; No.2 hole.

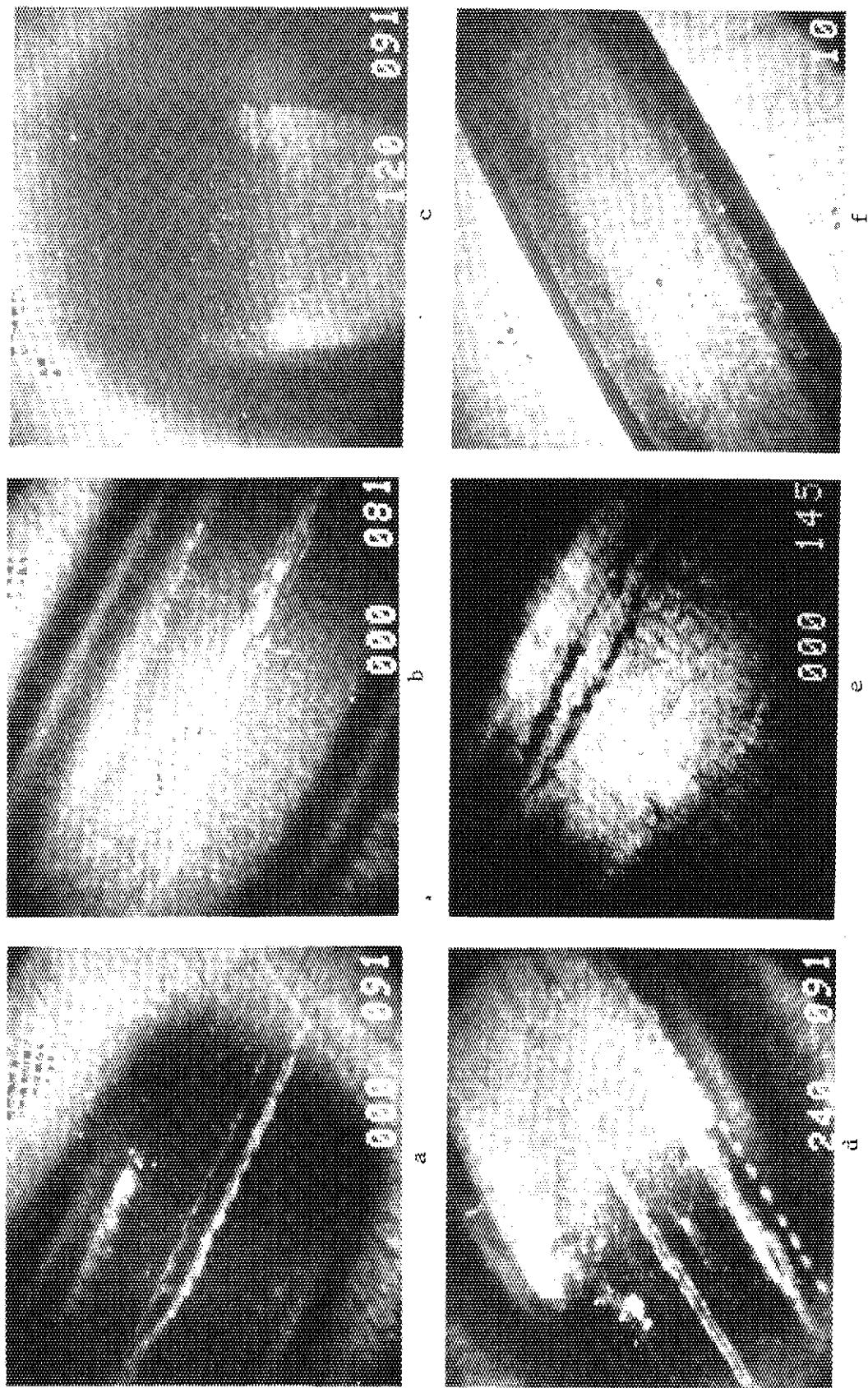


Fig. 3.24 Inner surface of fuel hole in graphite block for 2nd OGL-1
a, b, c and d; upper, No.1 hole. e and f; middle, No.1 hole.



Fig. 3.25 Three side views of No.1 fuel pin for 1st OGL-1.

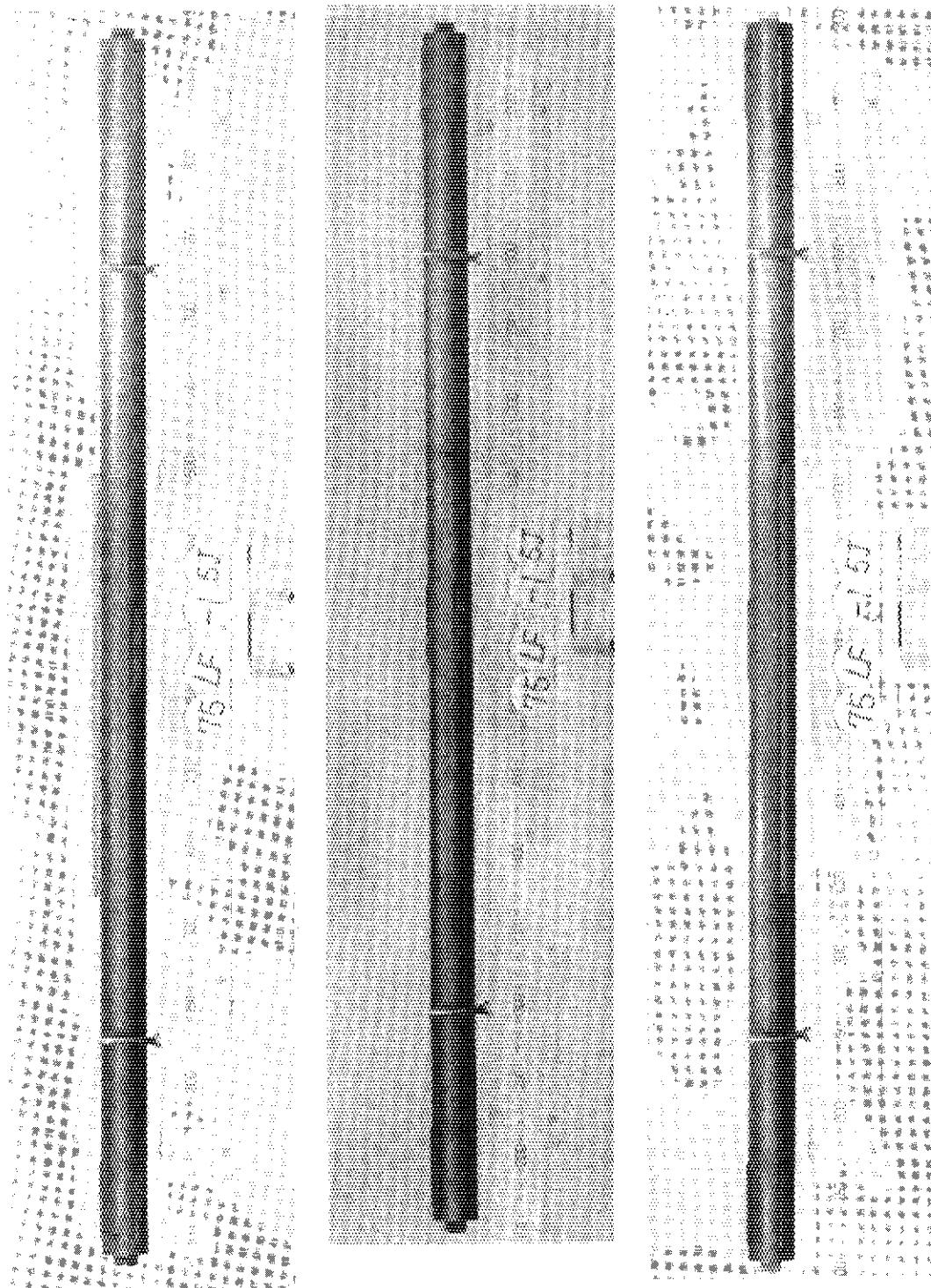


Fig. 3.26 Three side views of No.2 fuel pin for 1st OGL-1.



Fig. 3.27 Three side views of No.3 fuel pin for 1st OGL-1.

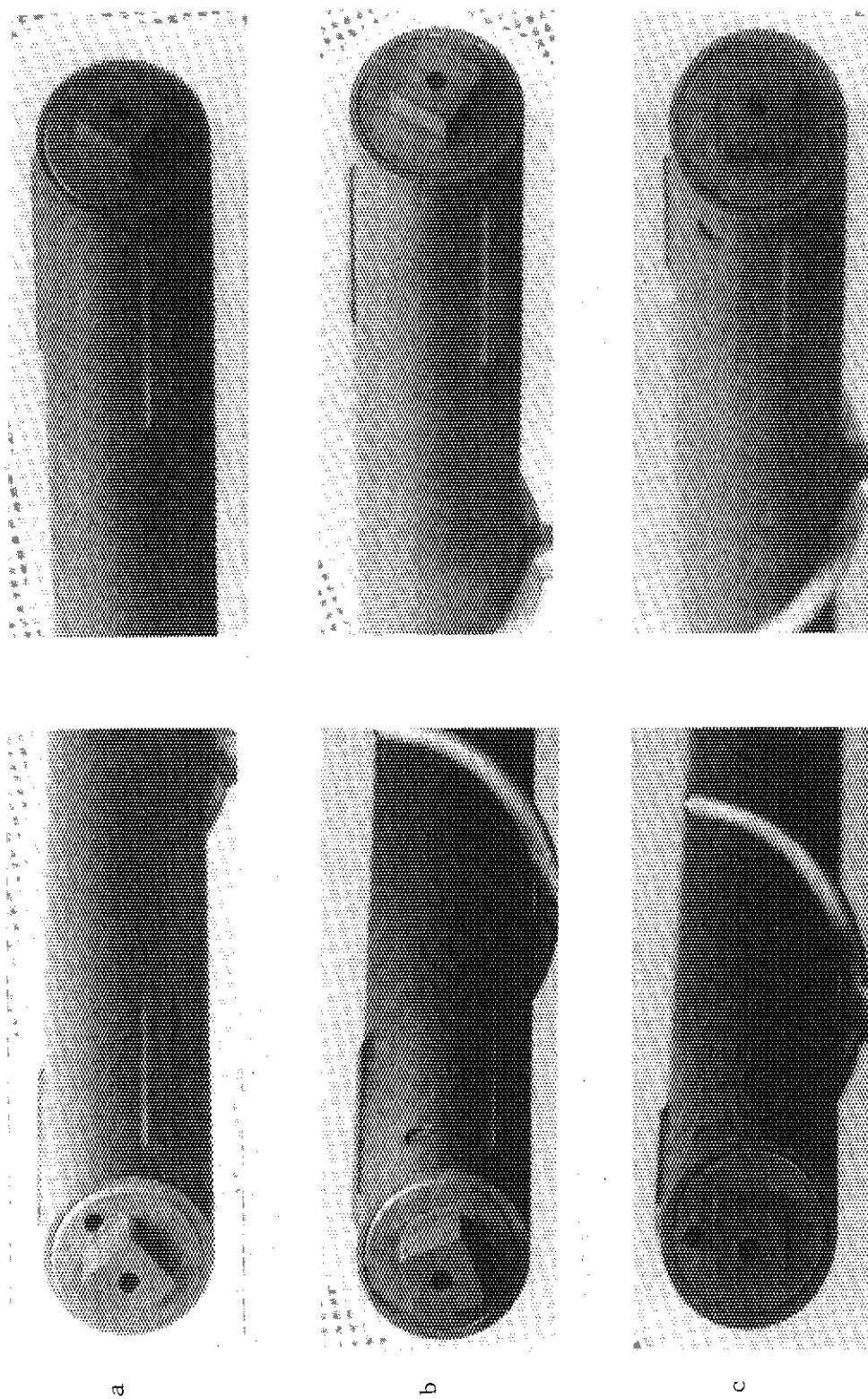


Fig. 3.28 Top (left) and bottom (right) end views of fuel pins for 1st OGL-1
a; No.1 pin, b; No.2 pin, c; No.3 pin.

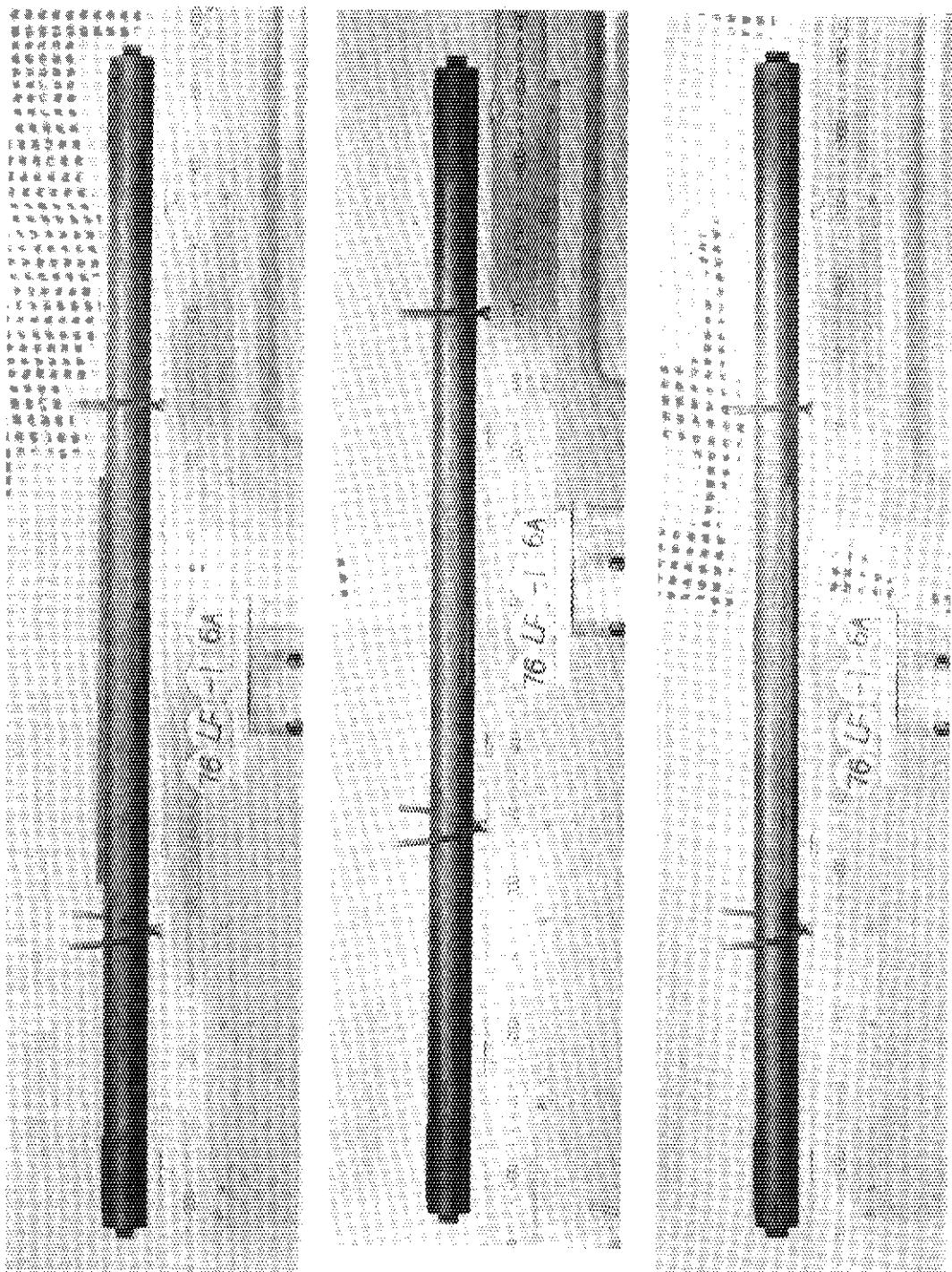


Fig. 3.29 Three side views of No.1 fuel pin for 1st OGL-1.

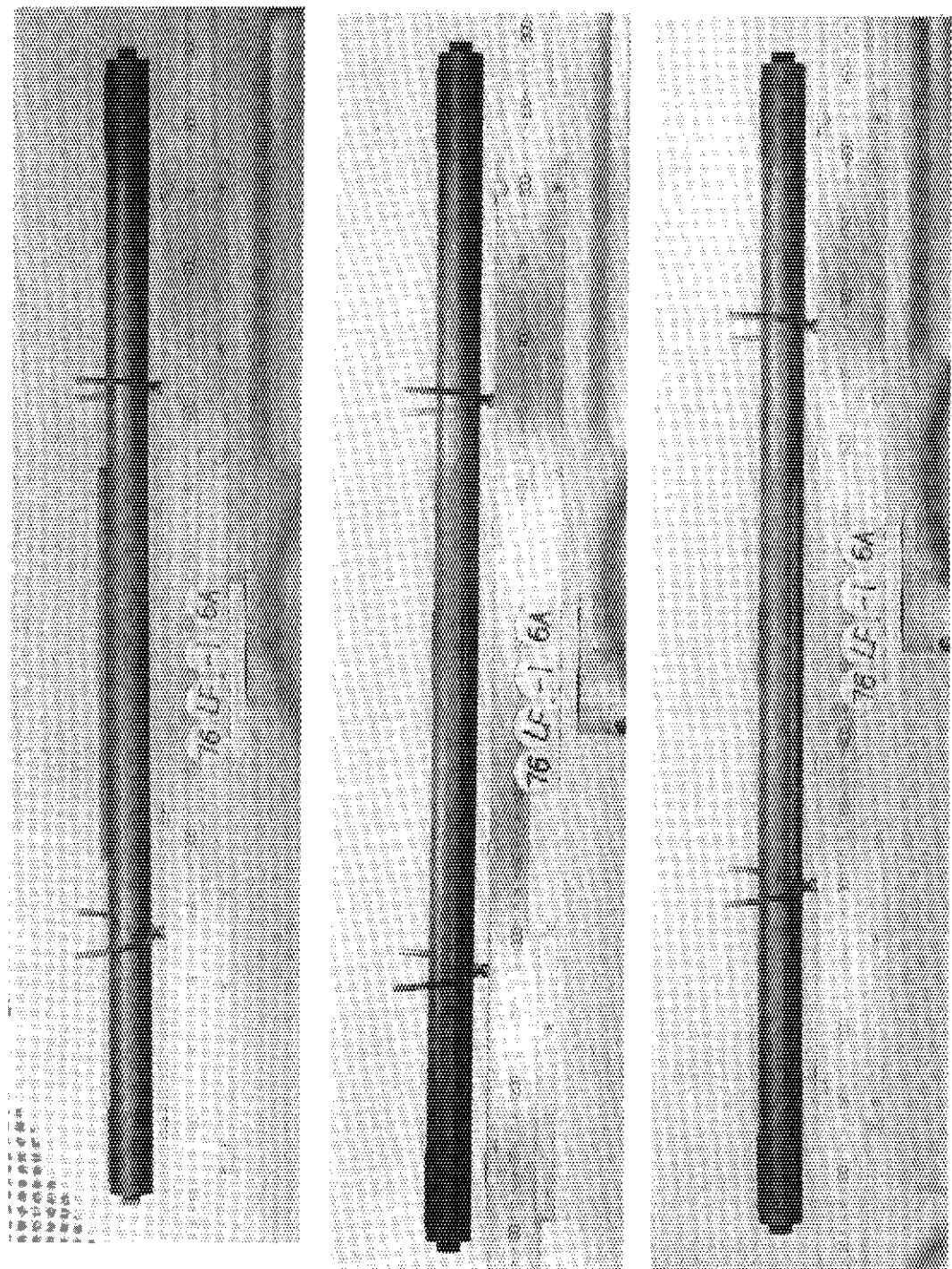


Fig. 3.30 Three side views of No. 2 fuel pin for 1st OGL-1.

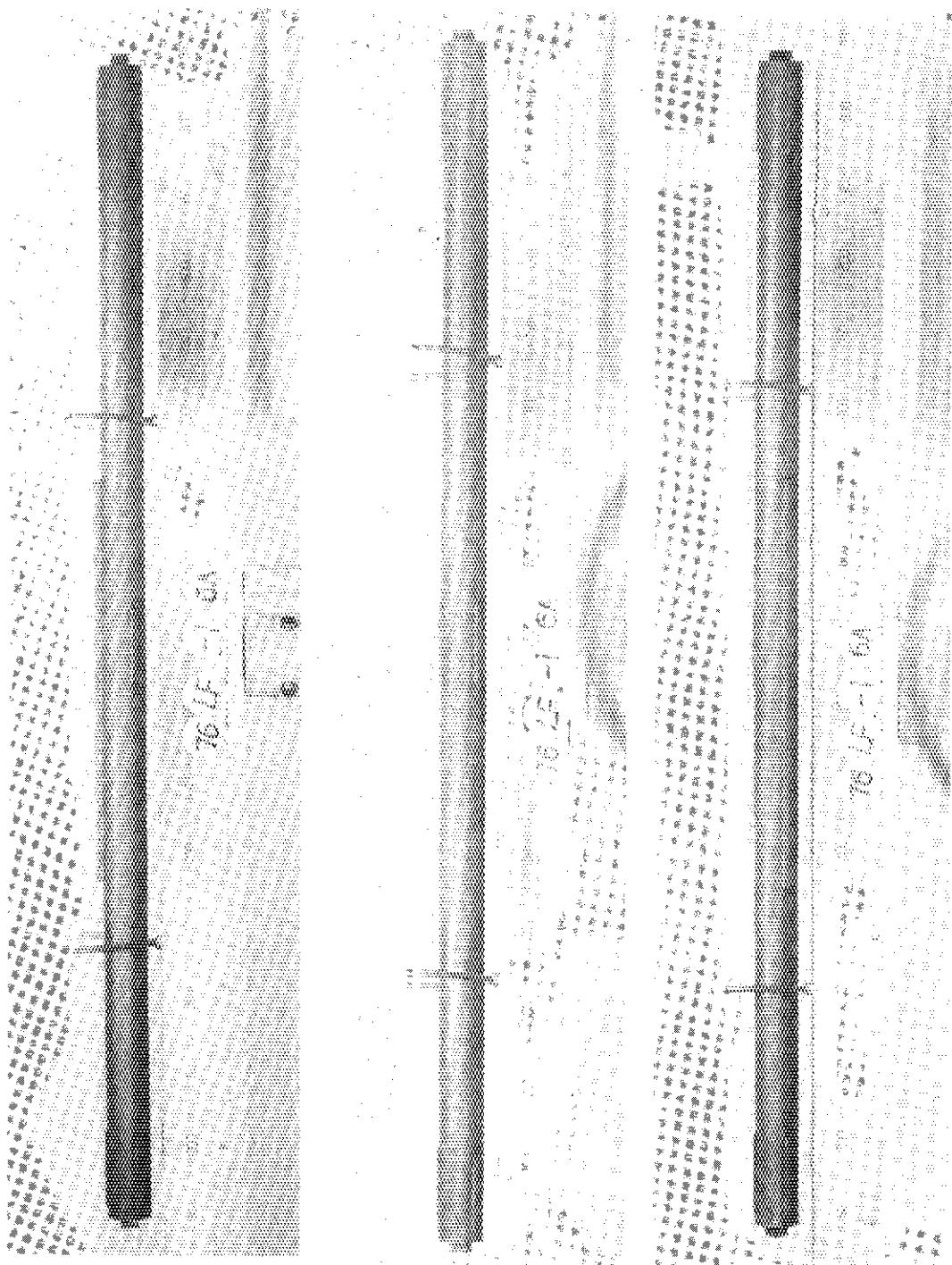


Fig. 3.31 Three side views of No.3 fuel pin for 1st OGL-1.

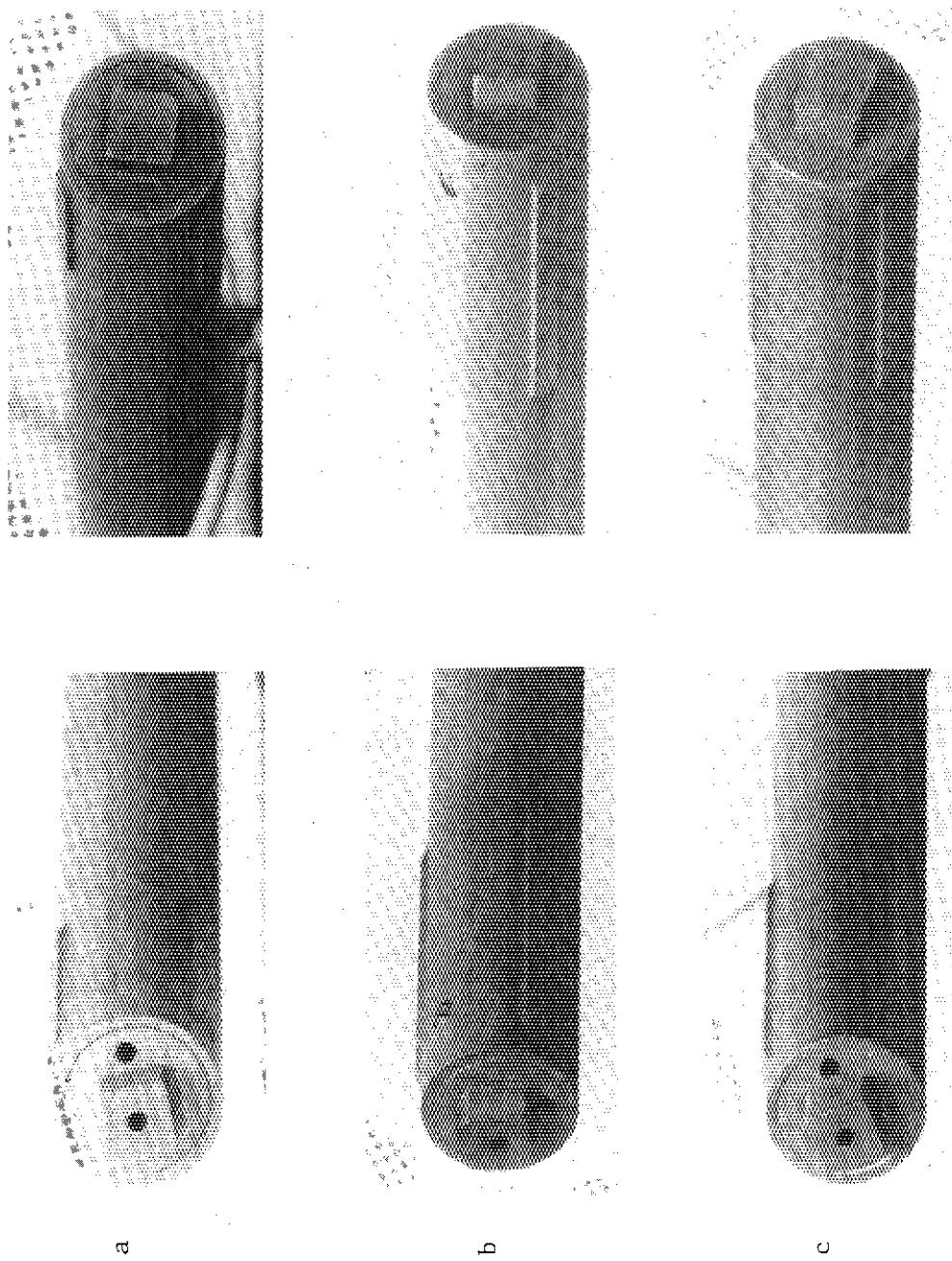


Fig. 3.32 Top (left) and bottom (right) end views of fuel pins for 2nd OGL-1
a; No.1 fuel pin, b; No.2 fuel pin, c; No.3 fuel pin.

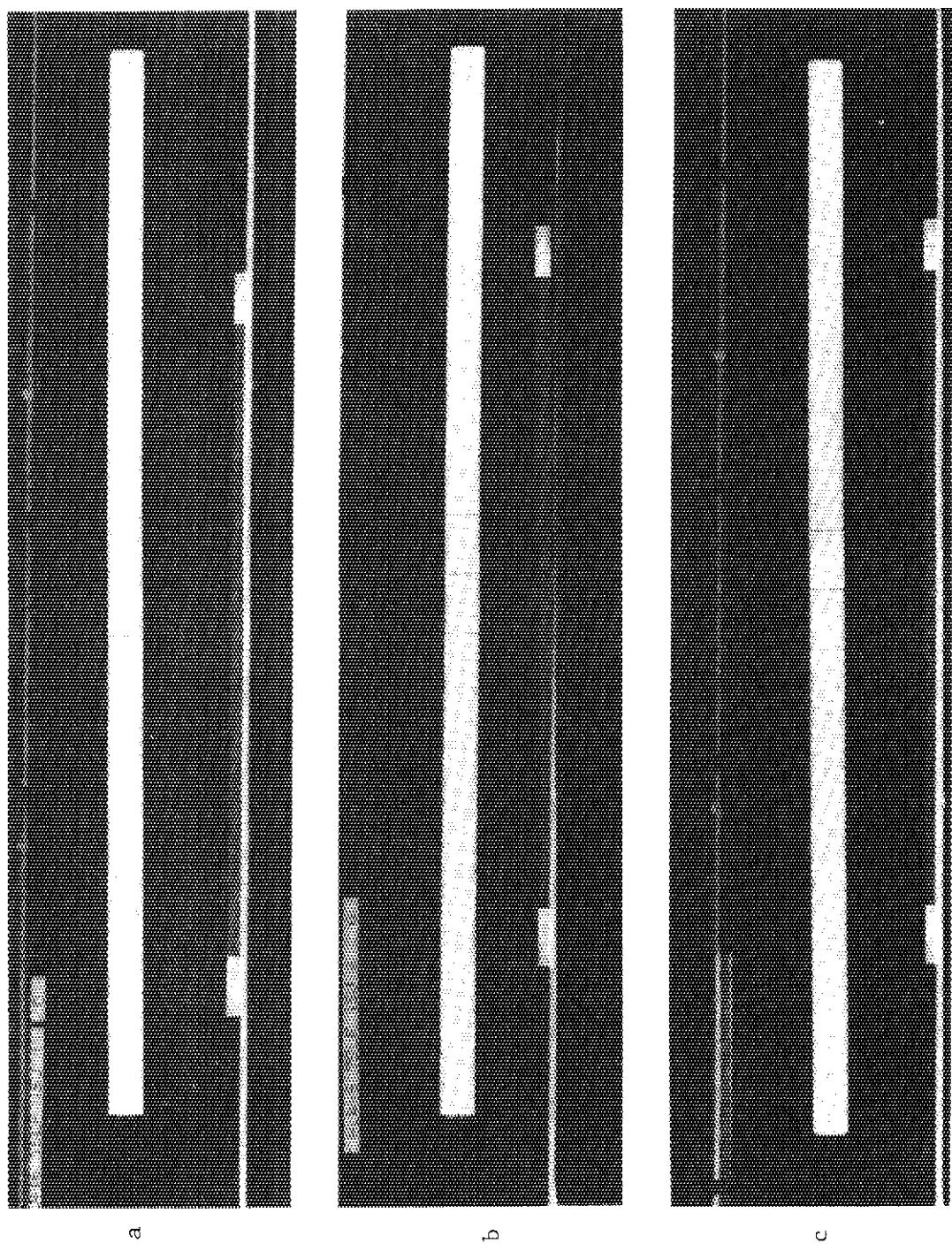


Fig. 3.33 X-ray photographs of fuel pins for 1st OGL-1.
a; No.1 fuel pin, b; No.2 fuel pin, c; No.3 fuel pin.

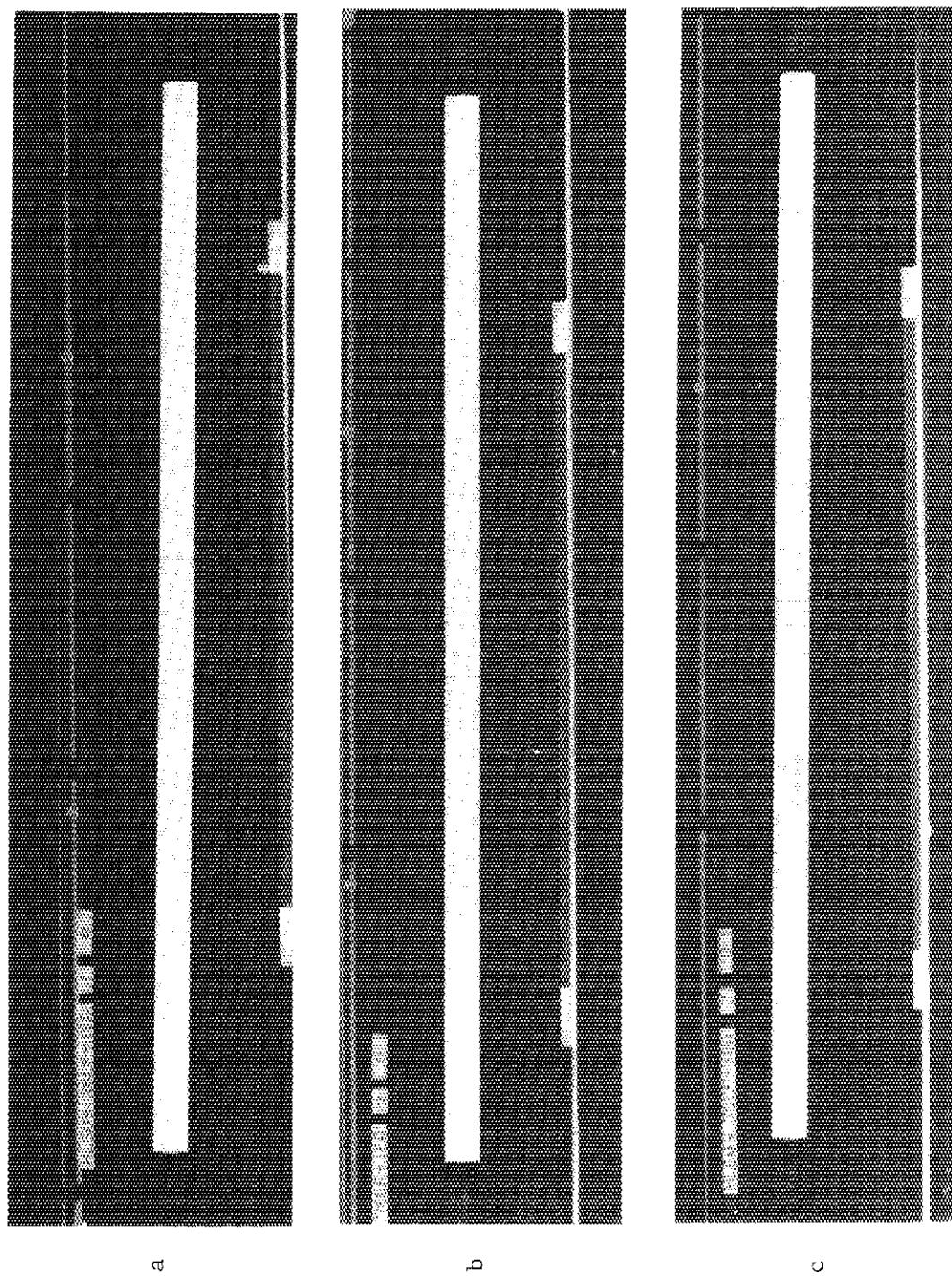


Fig. 3.34 X-ray photographs of fuel pins for 2nd OGL-1.
a; No.1 fuel pin, b; No.2 fuel pin, c; No.3 fuel pin.

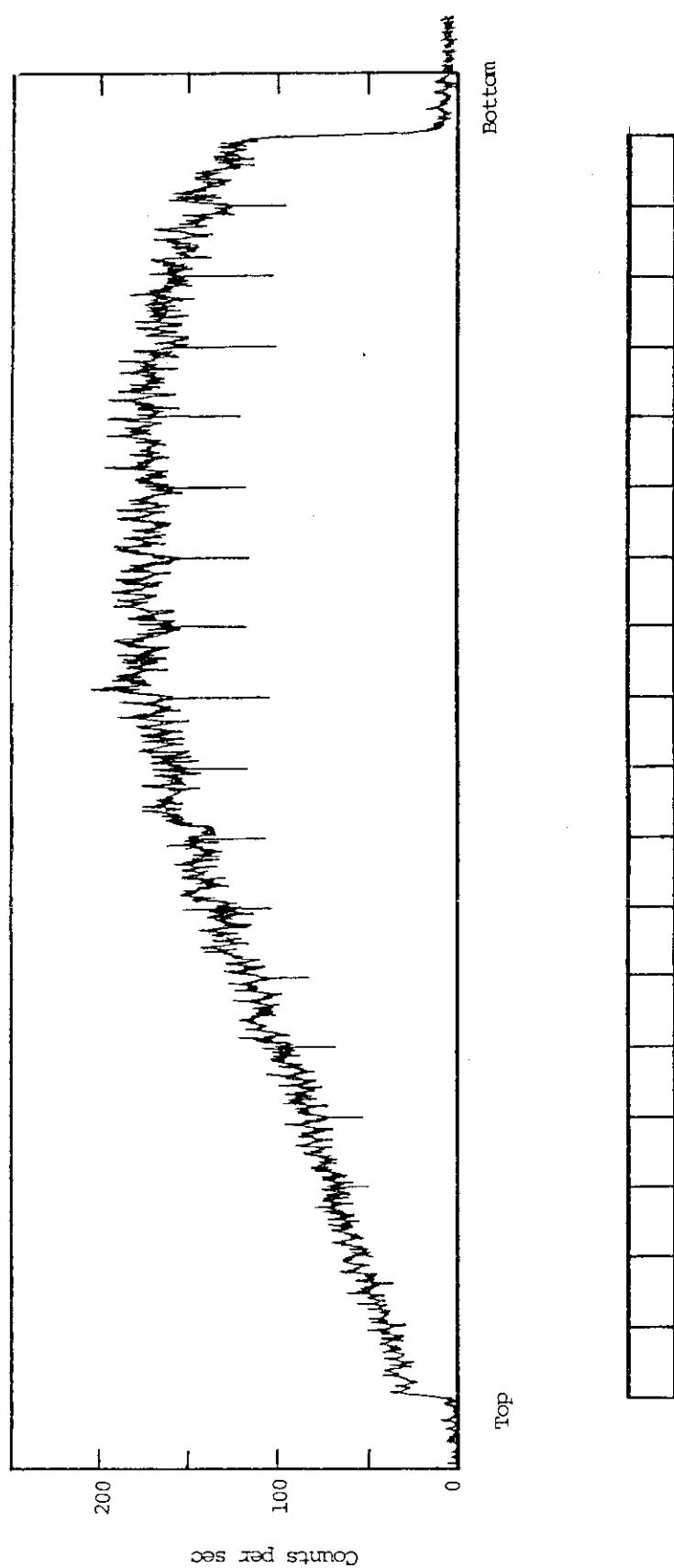


Fig. 3.35 Gamma-scanning of No.1 fuel pin for 1st OGL-1

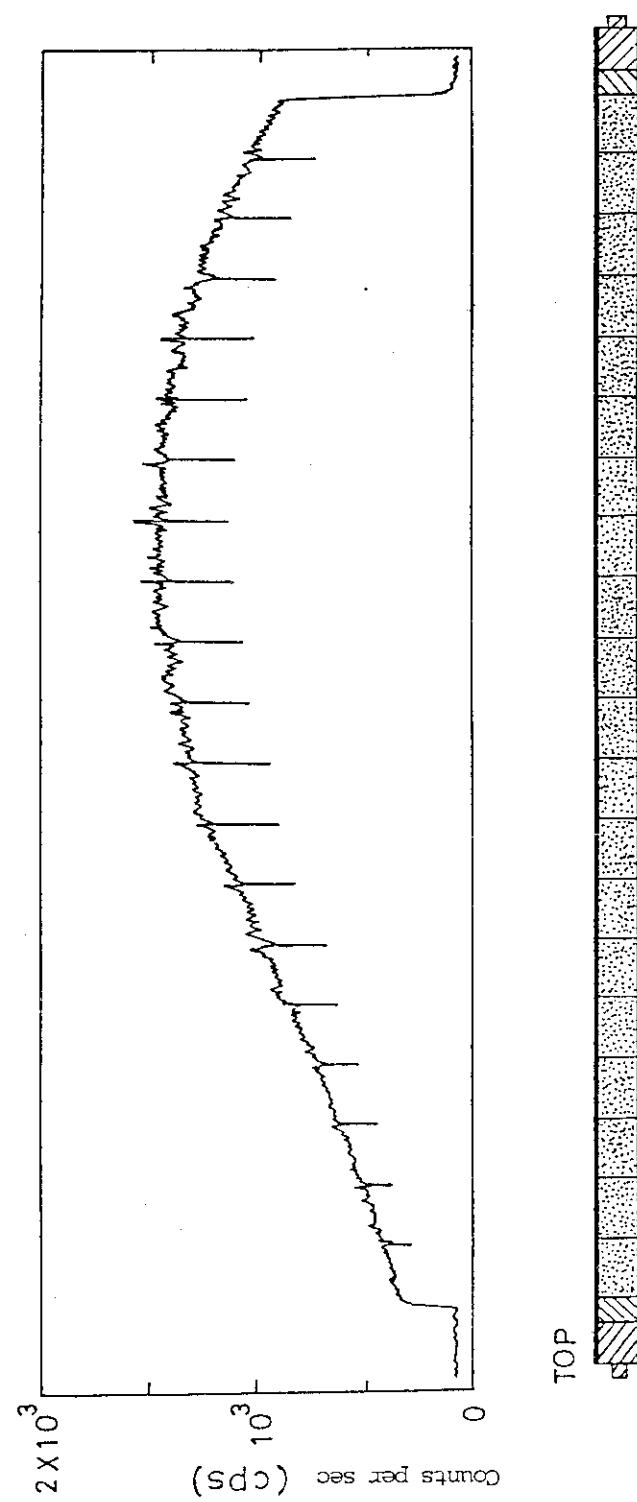


Fig. 3.36 Gamma-scanning of No.1 fuel pin for 2nd OCL-1

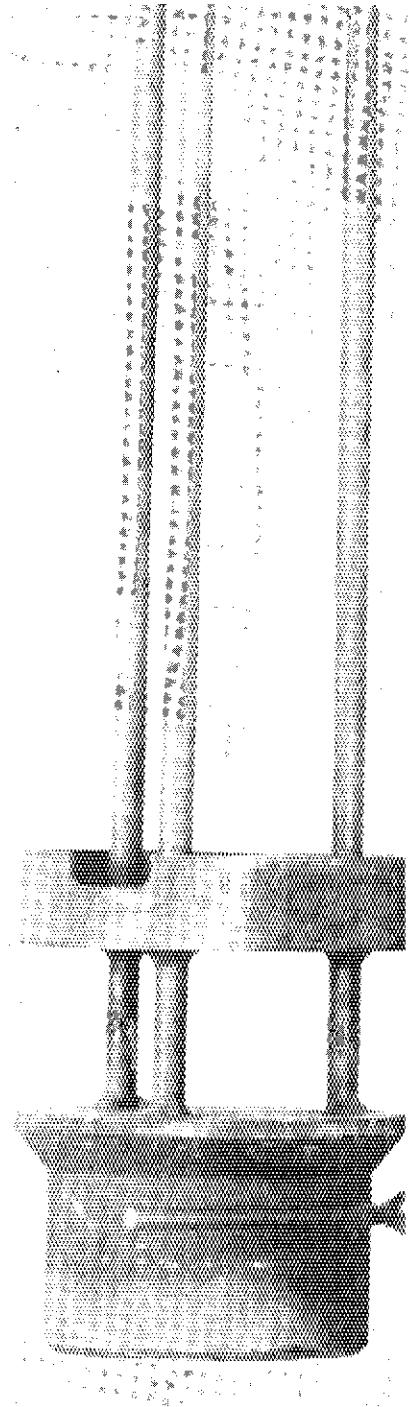
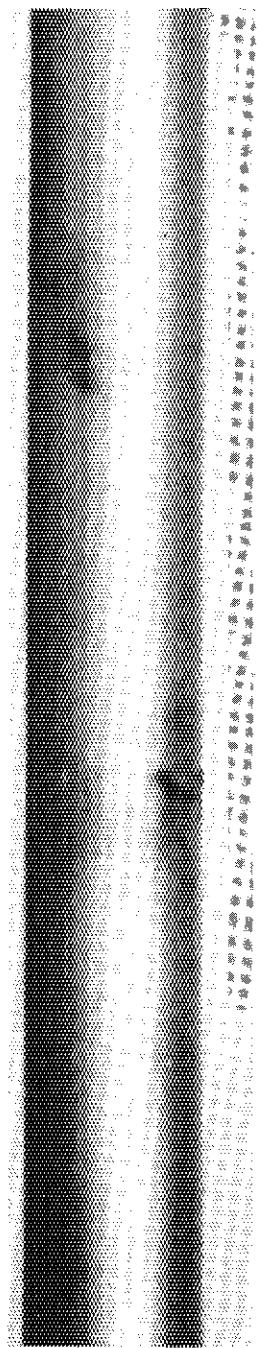
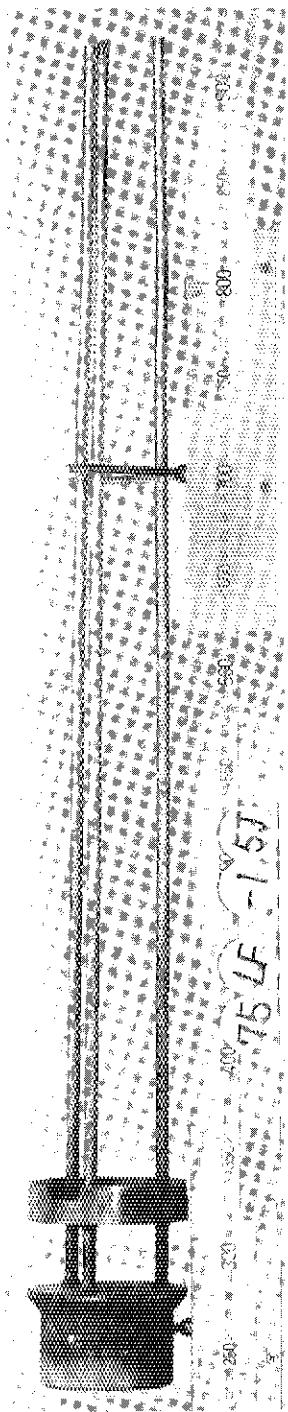


Fig. 3.37 Metal parts of 1st OGL-1 assembly.

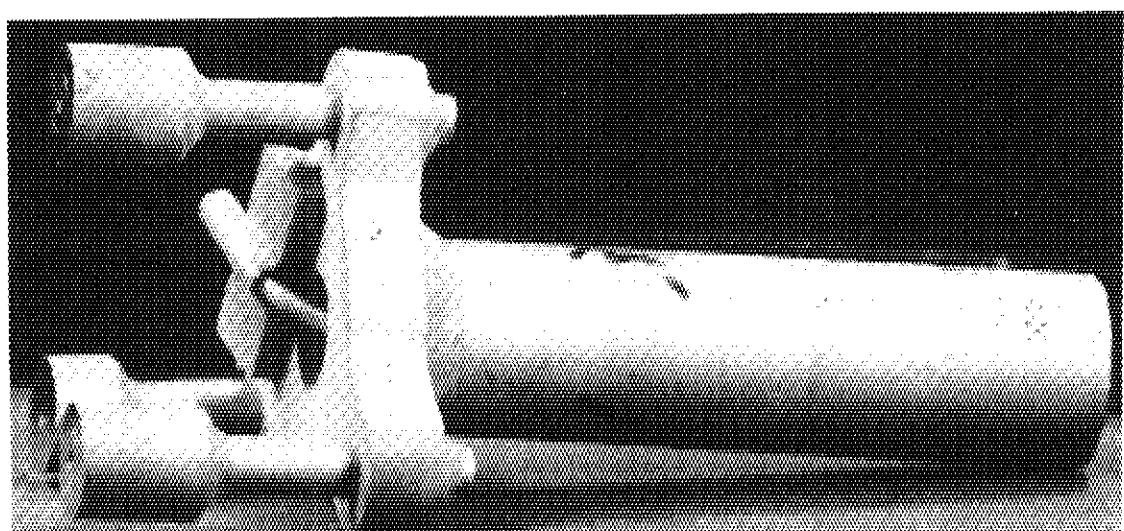


Fig. 3.38 Joint between hanger-rod and tie-rod of 1st OGL-1 fuel assembly.

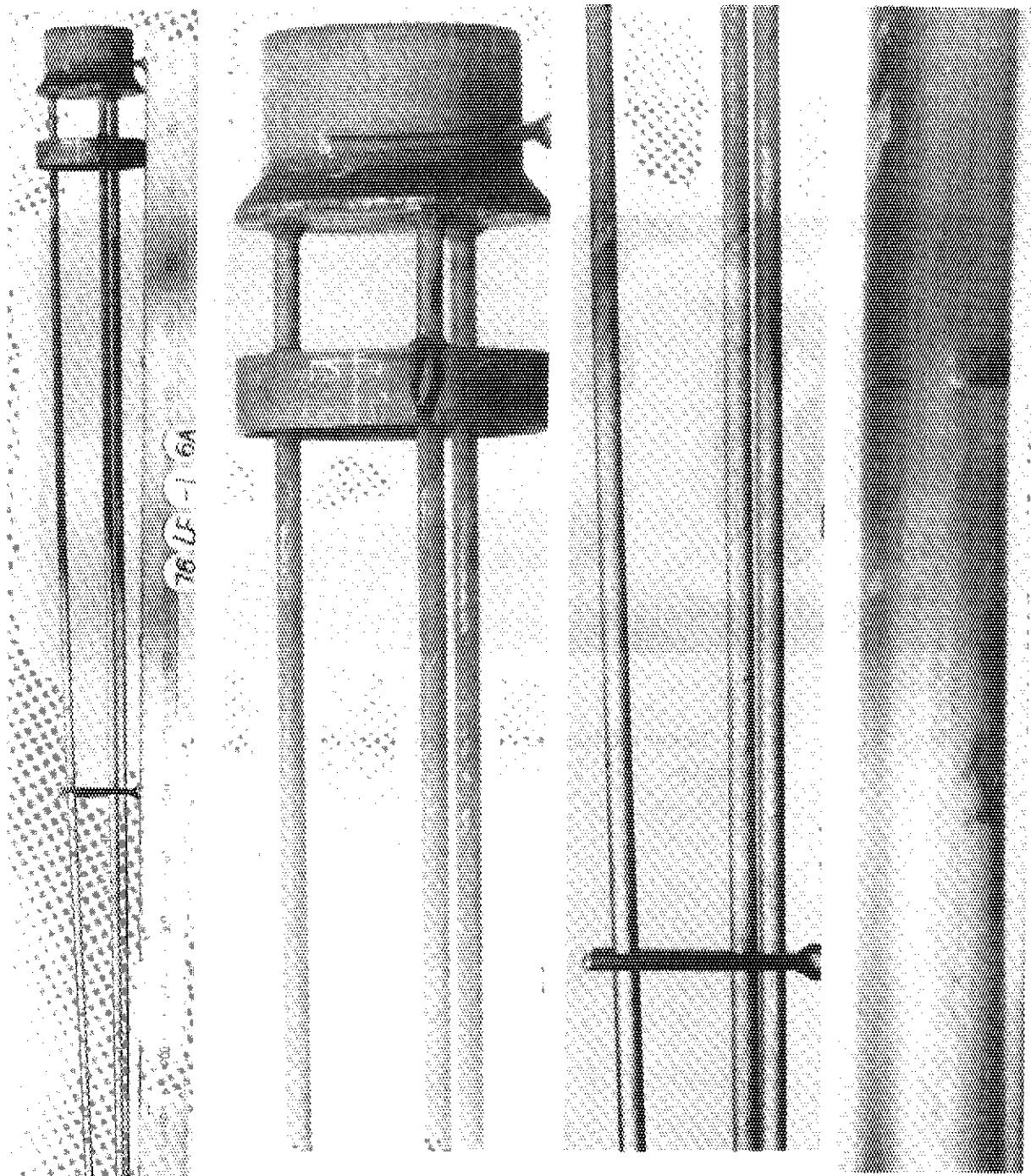


Fig. 3.39 Metal parts of 2nd OGL-1 fuel assembly.

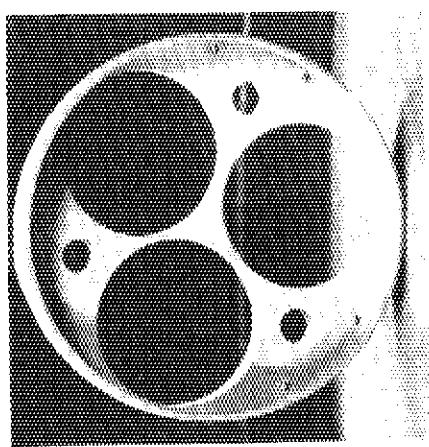


Fig. 3.40 Upper end cover for 2nd OGL-1 fuel assembly. left; front side,
right; back side.

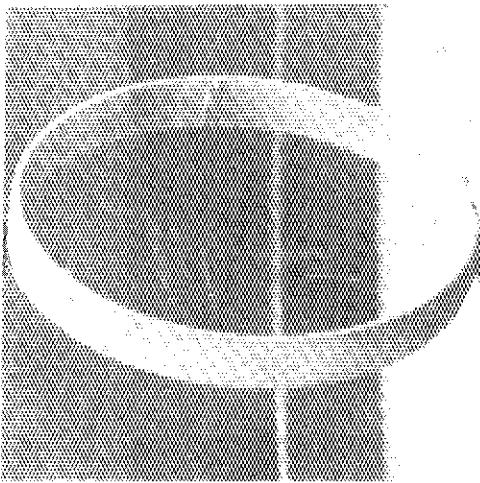
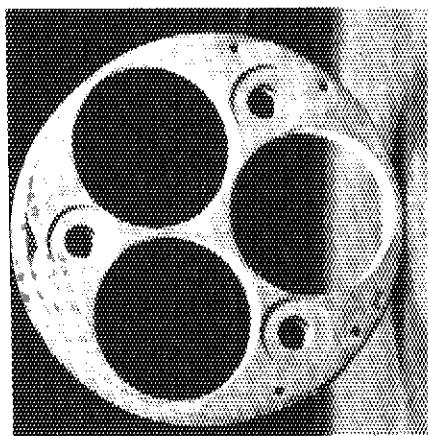


Fig. 3.42 T/C support ring for 2nd OGL-1 fuel assembly.

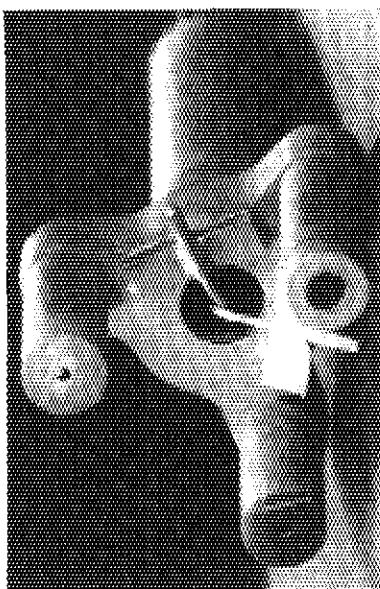


Fig. 3.41 Joint between hanger-rod and tie-rod
2nd OGL-1 fuel assembly.

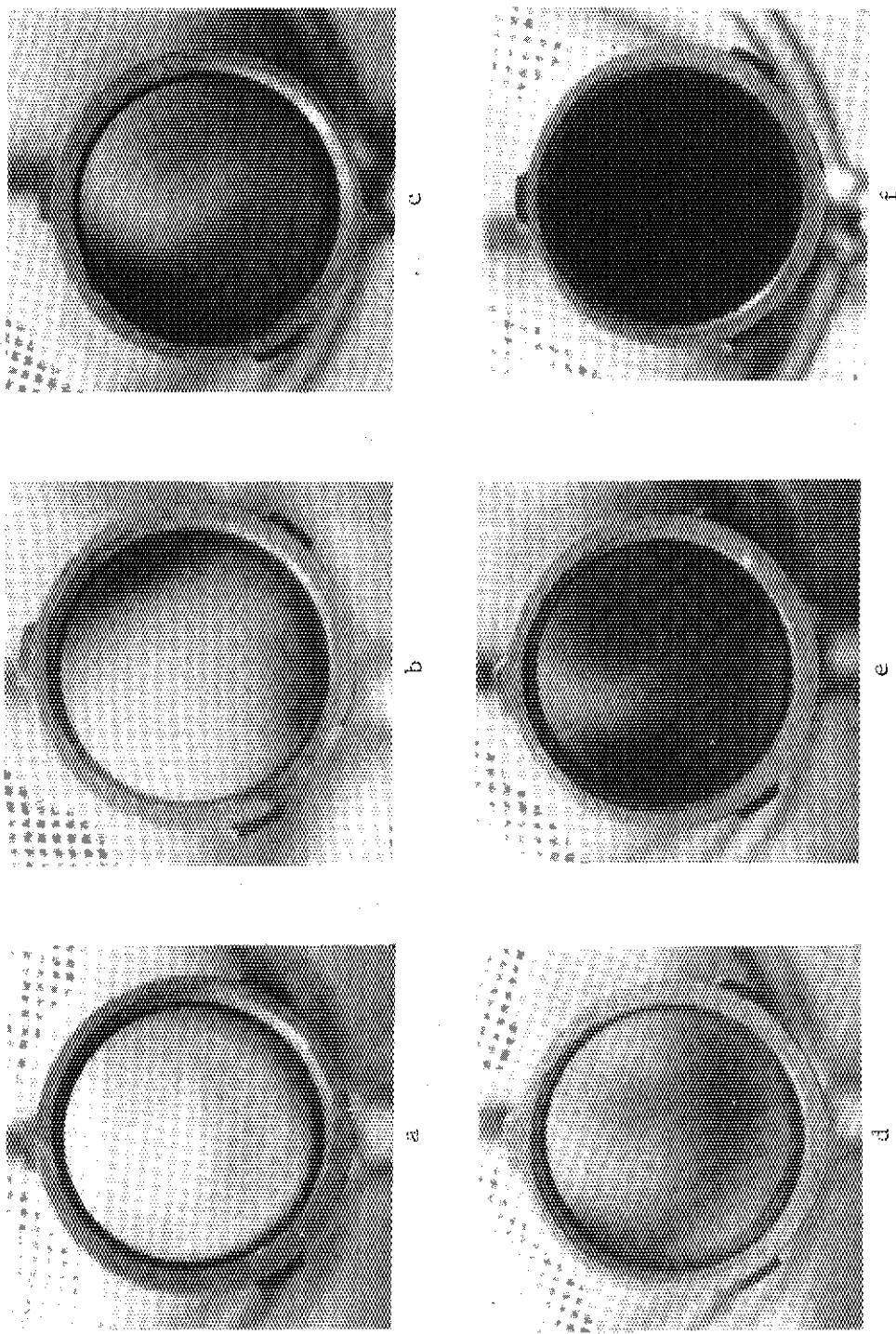


Fig. 3.43 End face of graphite sleeve for 1st OGL-L.
a, c and e; top face of No.1, No.2 and No.3 graphite sleeve, respectively.
b, d and f; bottom face of No.1, No.2 and No.3 graphite sleeve, respectively.

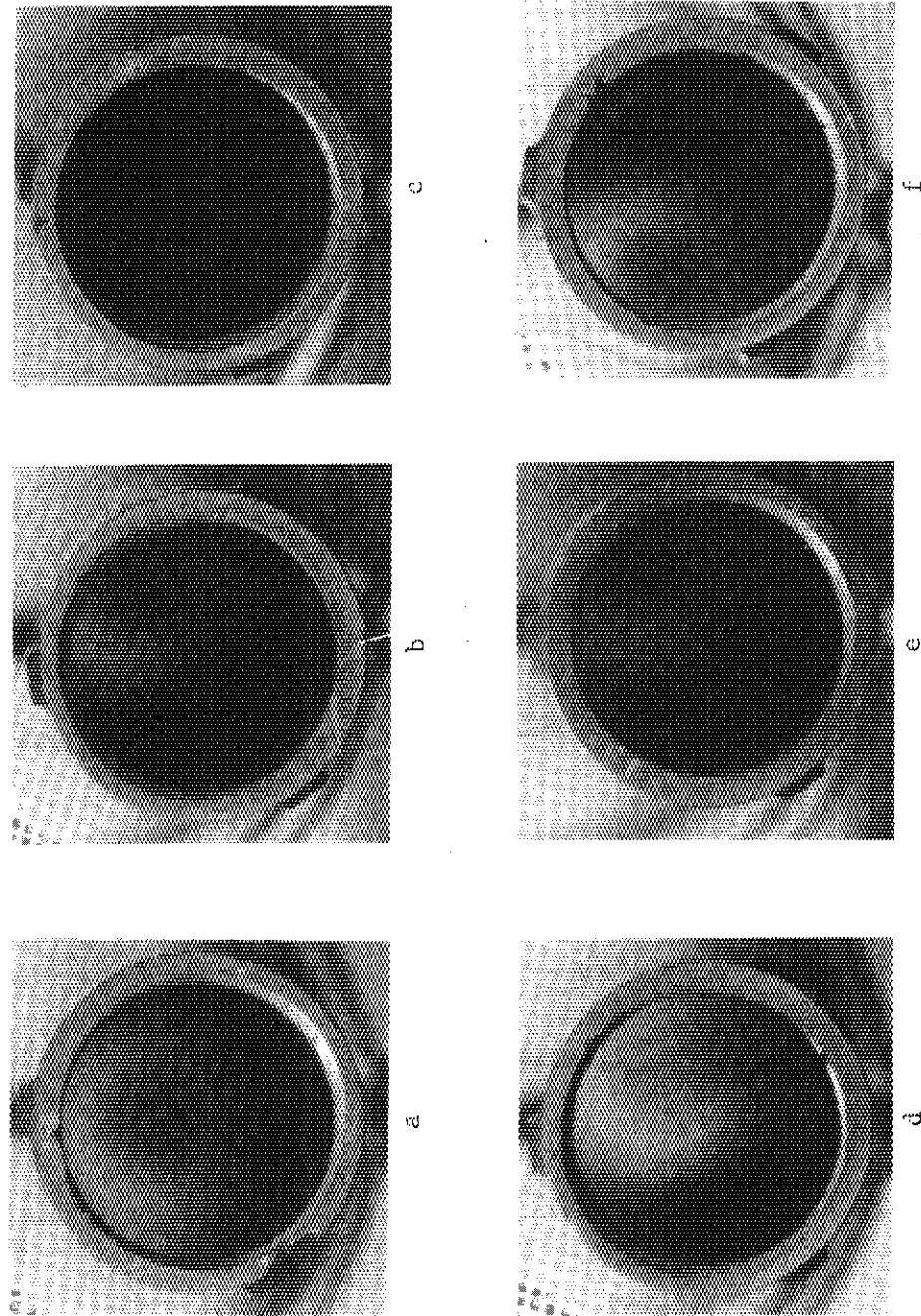


Fig. 3.44 End face of graphite sleeve for 2nd OGL-1.
a, c and e; top face of No.1, No.2 and No.3 graphite sleeve, respectively.
b, d and f; bottom face of No.1, No.2 and No.3 graphite sleeve, respectively.

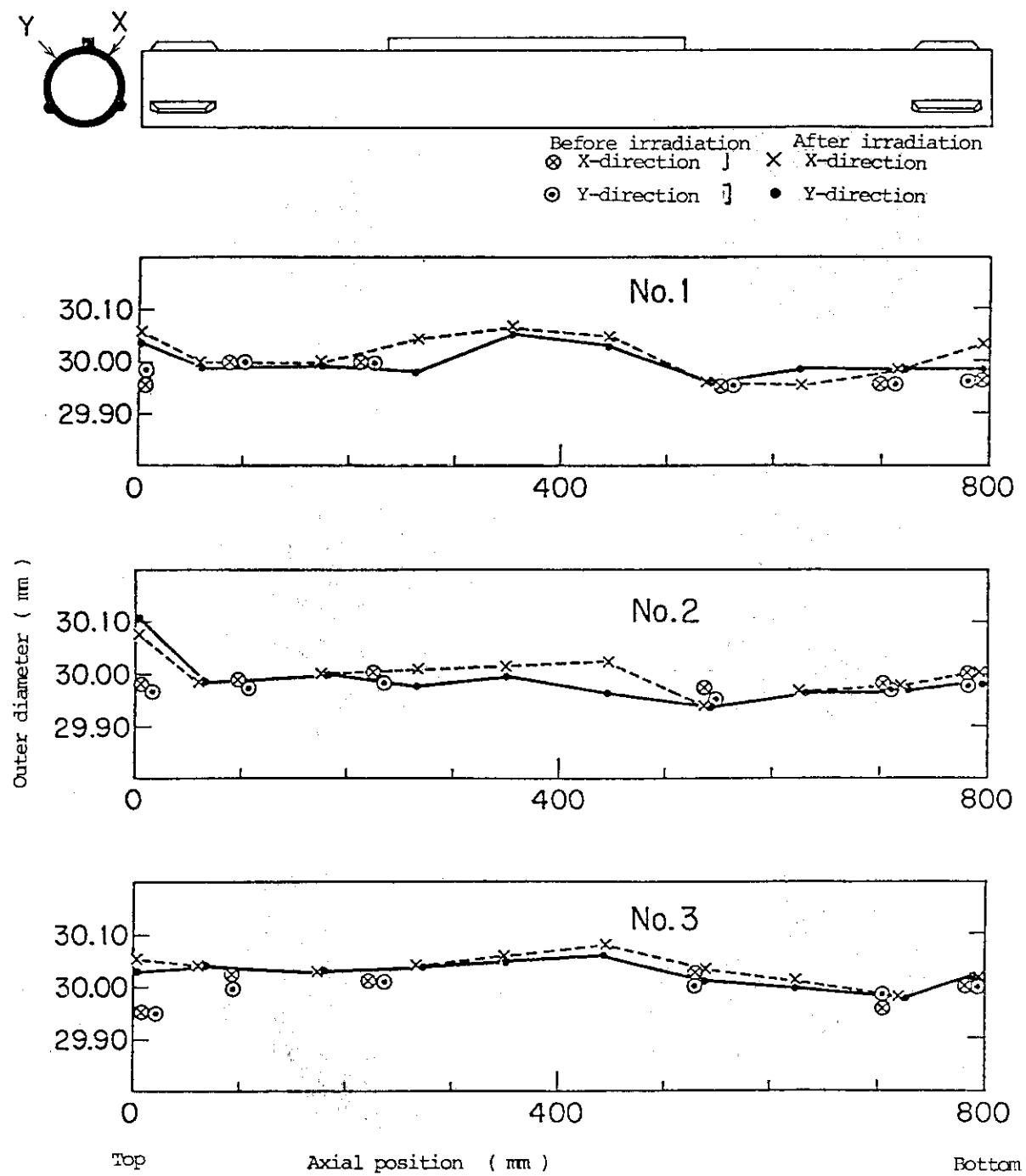


Fig.3.45 Outer diameter of graphite sleeves for 1st OGL-1.

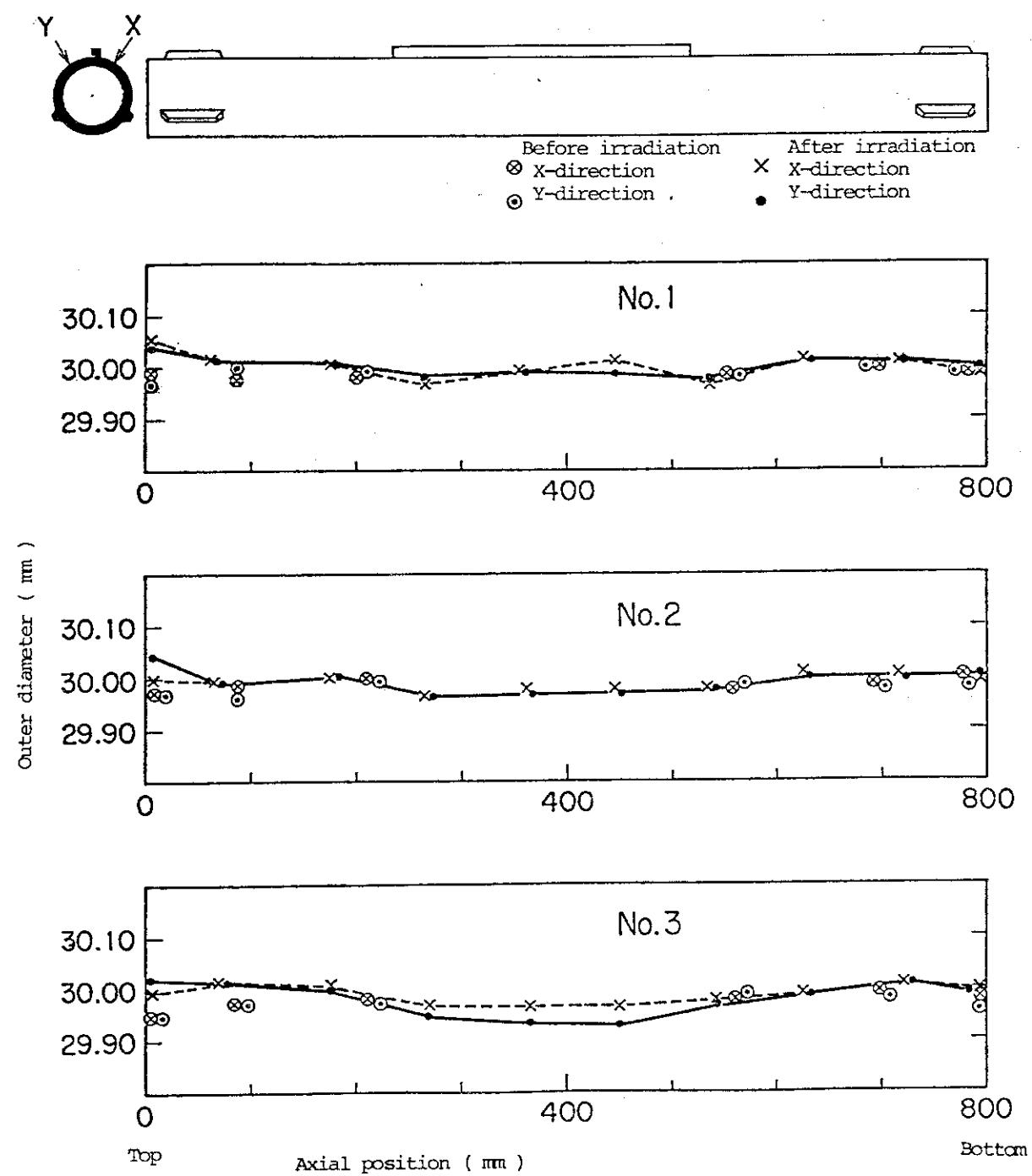


Fig.3.46 Outer diameter of graphite sleeves for 2nd OGL-1.

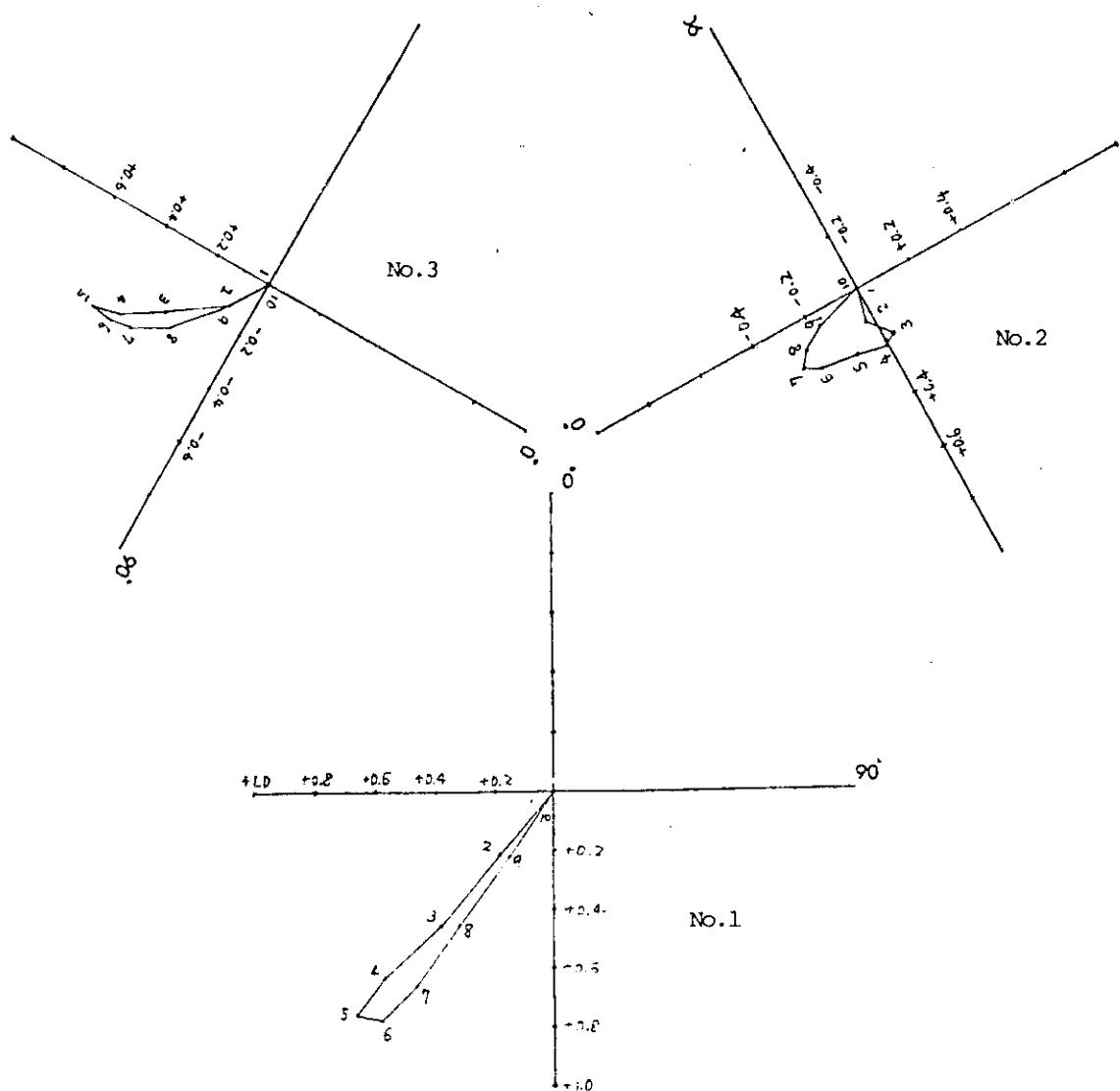


Fig.3.47 Bowing of graphite sleeve for 1st OGL-1. (inner diameter base)

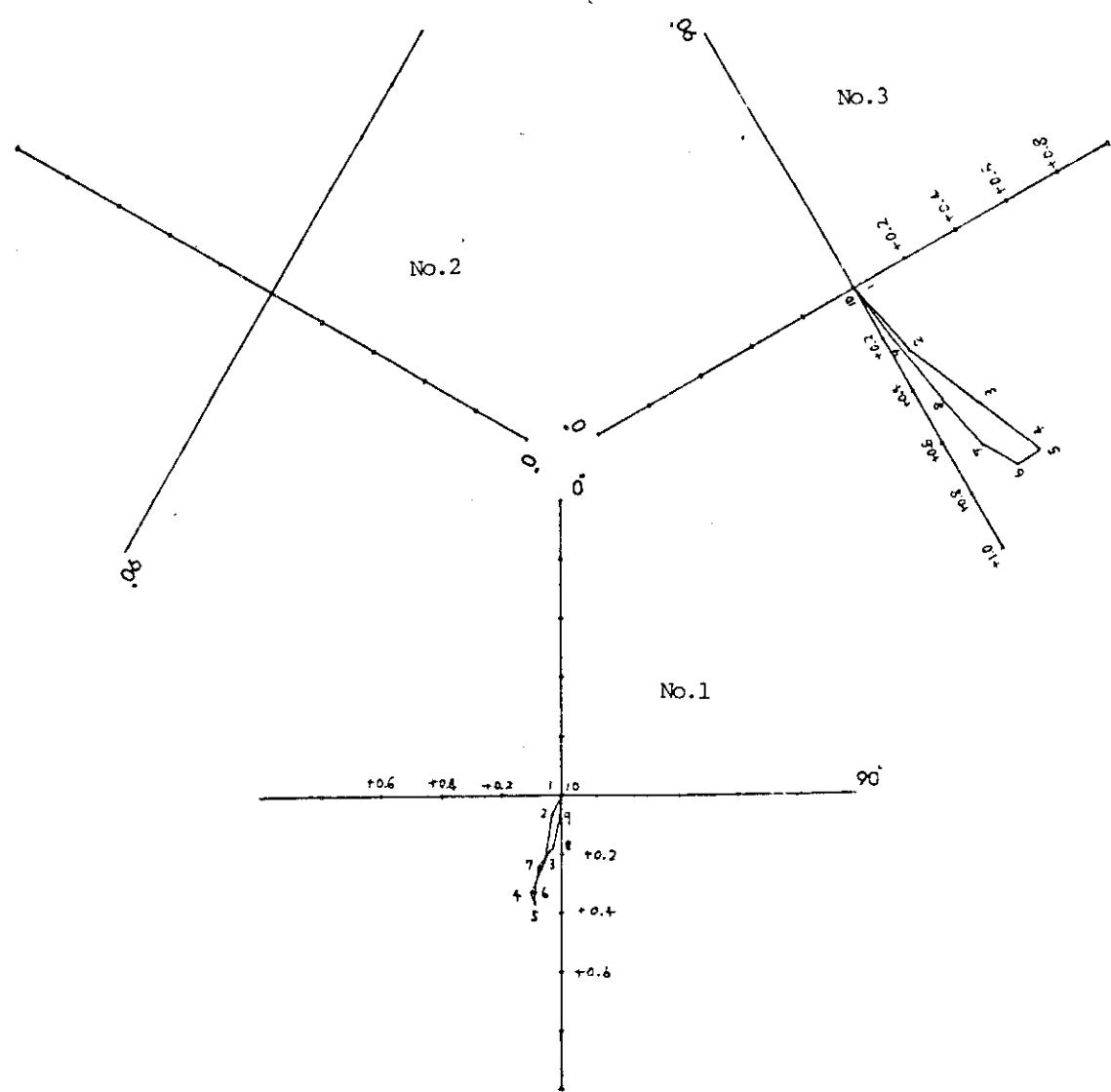


Fig.3.48 Bowing of graphite sleeve for 2nd OGL-1. (inner diameter base)

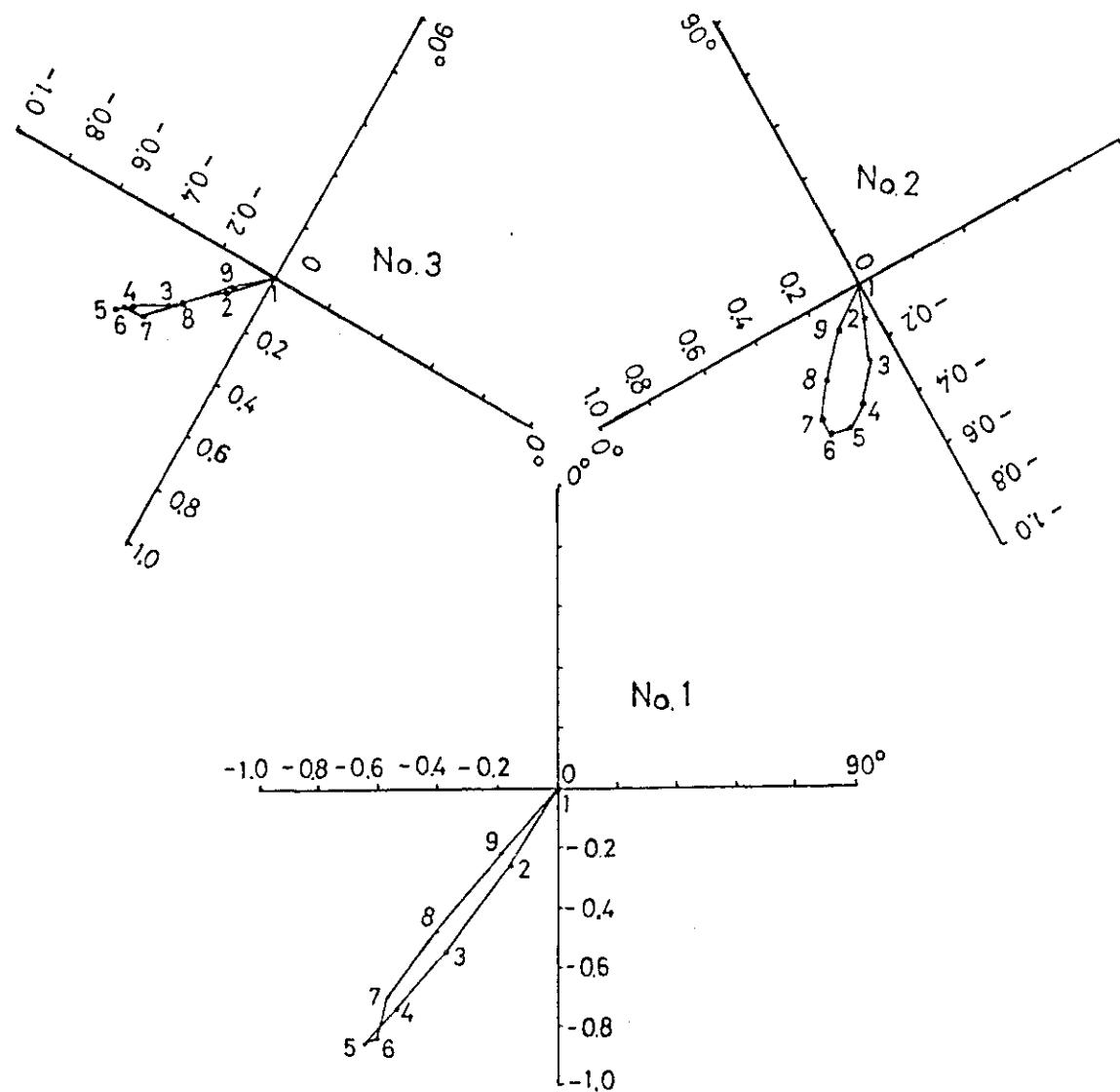


Fig.3.49 Bowing of graphite sleeves for 1st OG-1. (outer diameter base)

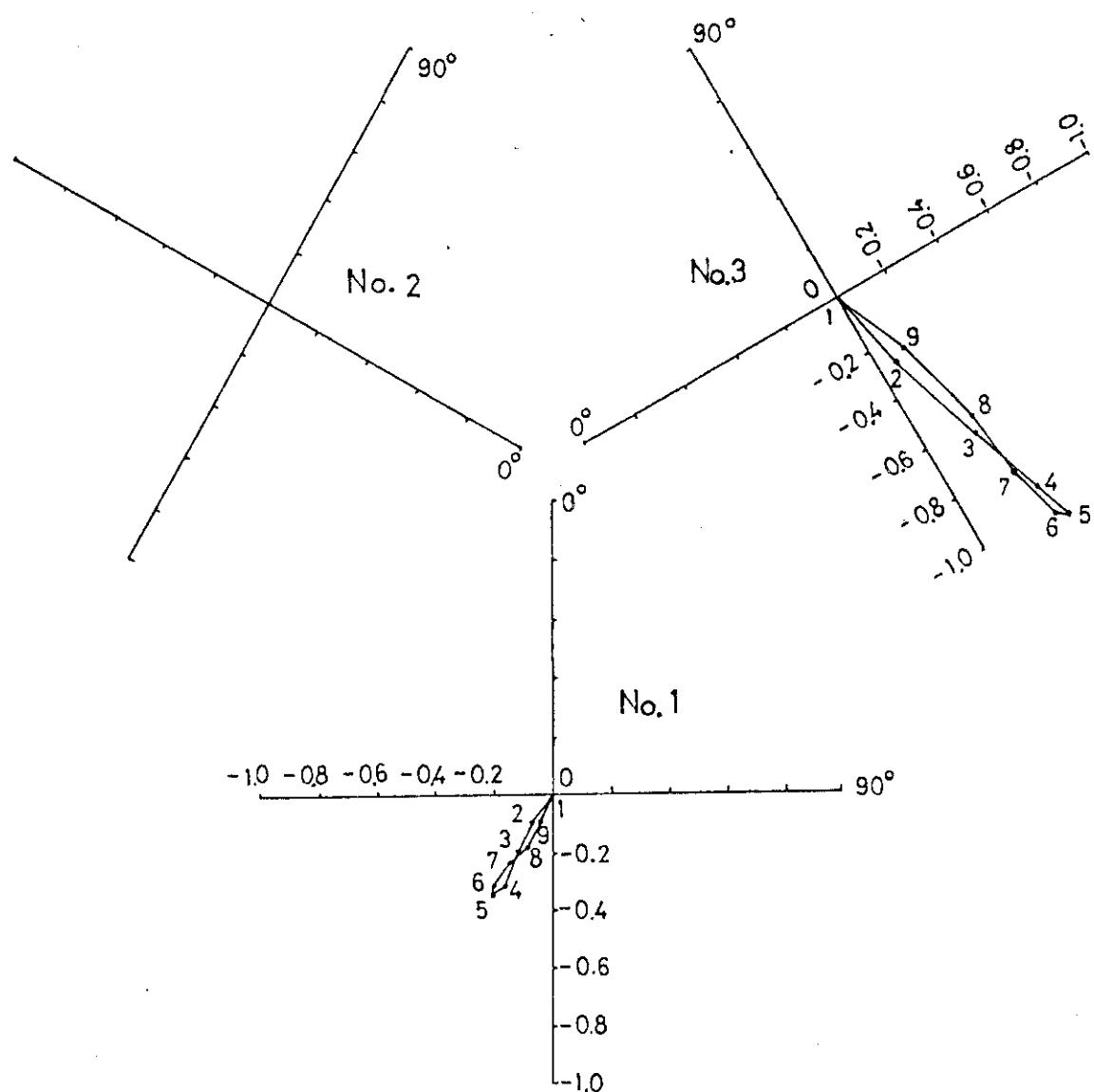
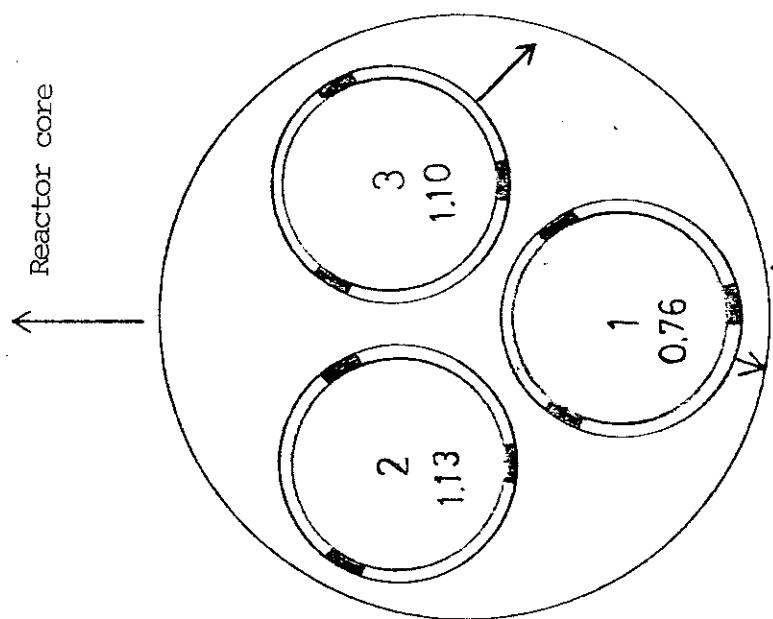
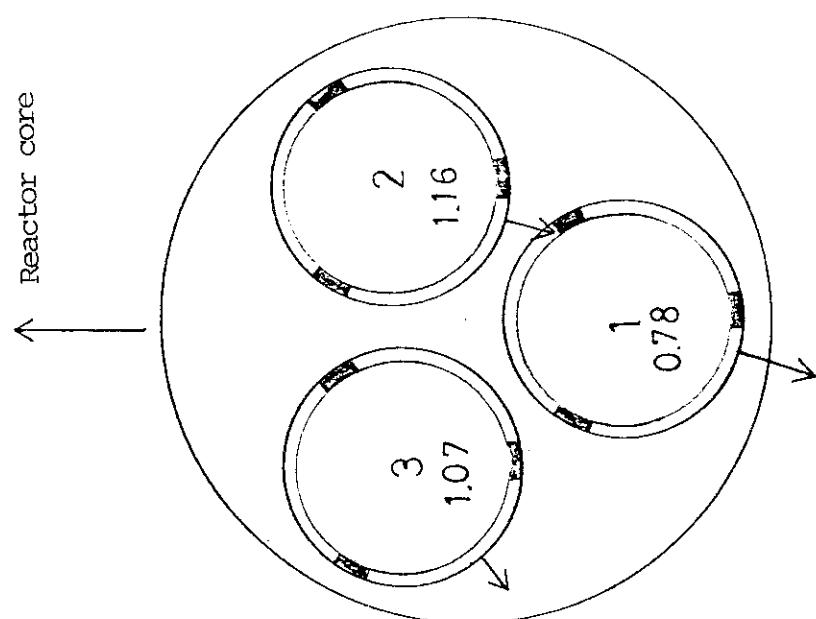


Fig.3.50 Bowing of graphite sleeves for 2nd OGL-1. (outer diameter base)



2nd OGL-1 fuel assembly



1st OGL-1 fuel assembly

Fig.3.51 Bowing direction and specific power of fuel pins.

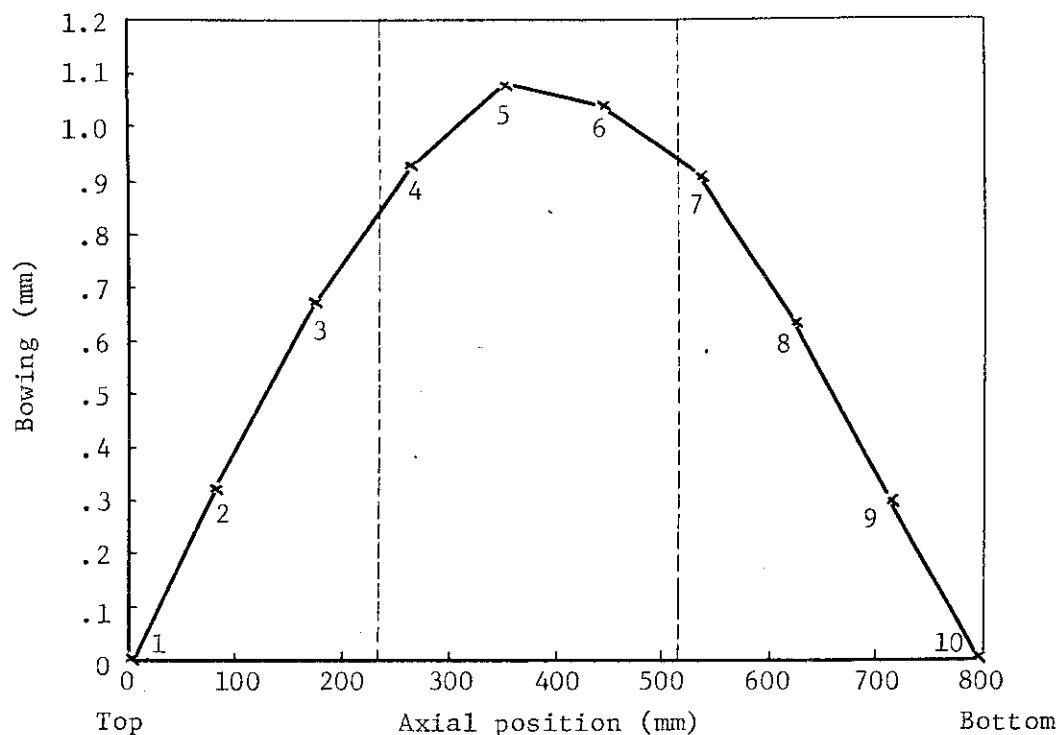


Fig. 3.52 Bowing of No.1 graphite sleeve for 1st OGL-1
(outer diameter base)

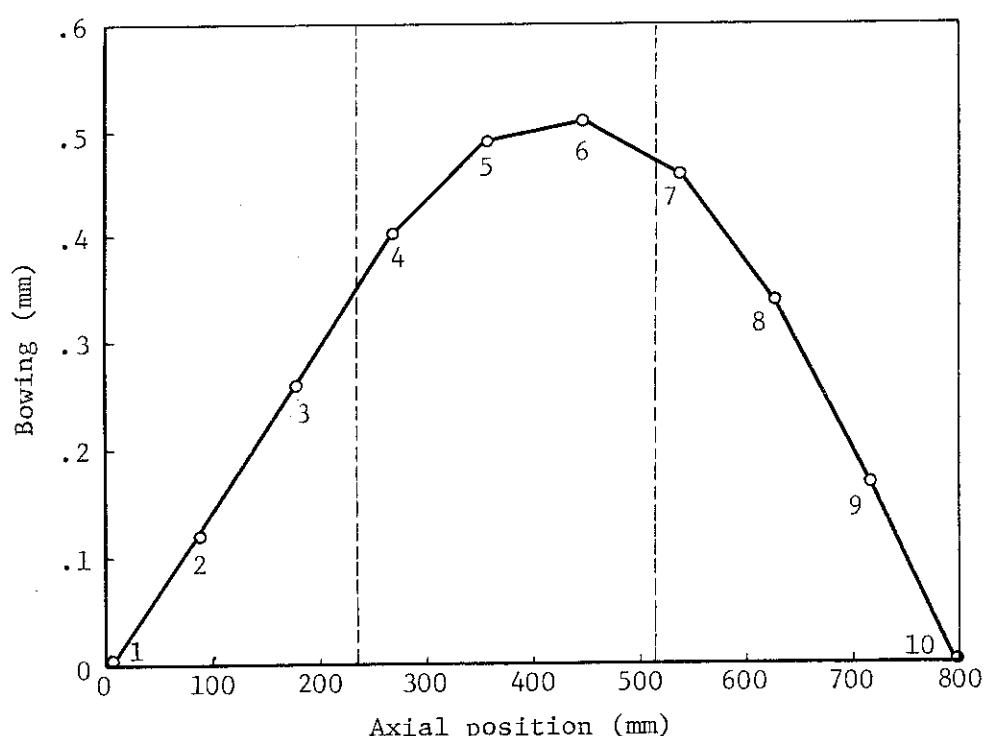


Fig. 3.53 Bowing of No.2 graphite sleeve for 1st OGL-1
(outer diameter base)

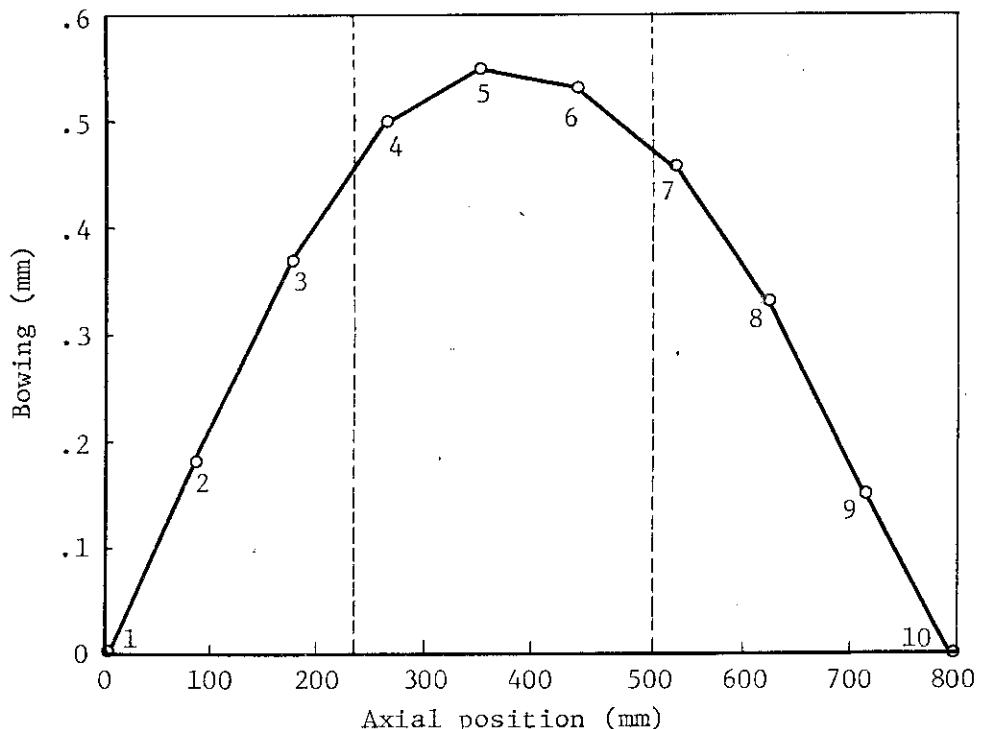


Fig. 3.54 Bowing of No. 3 graphite sleeve for 1st OGL-1
(outer diameter base)

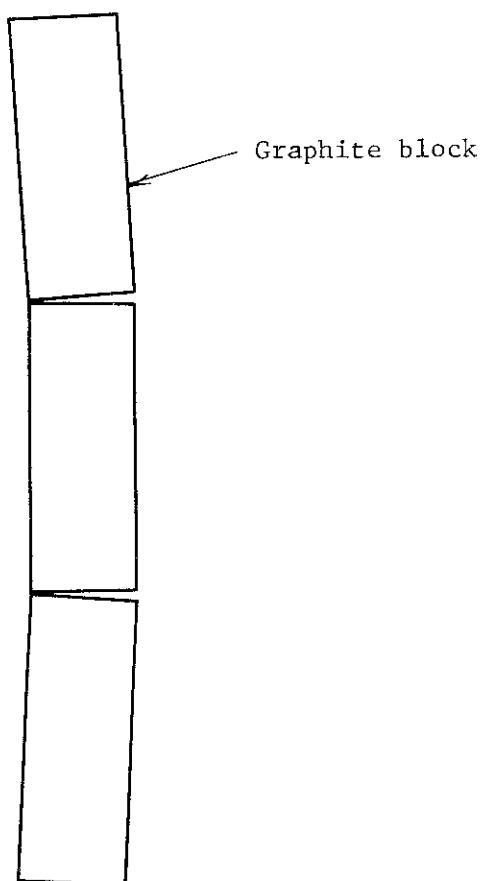


Fig. 3.55 Schematic representation of the bowing
of 1st OGL-1 fuel assembly

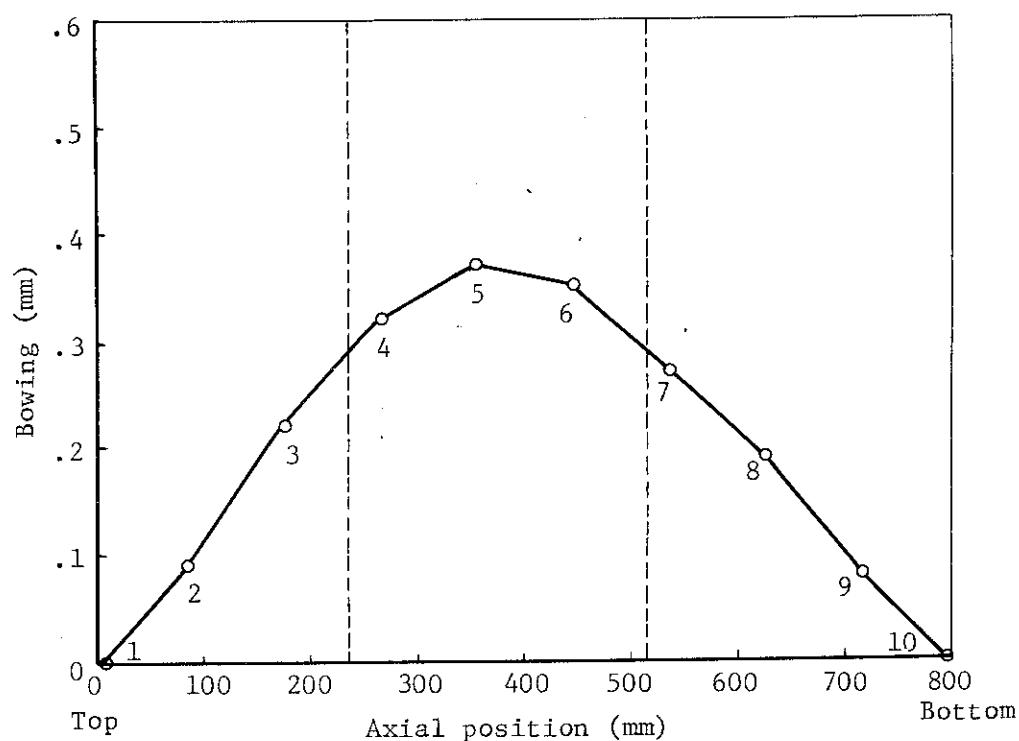


Fig. 3.56 Bowing of No.1 graphite sleeve for 2nd OGL-1
(outer diameter base)

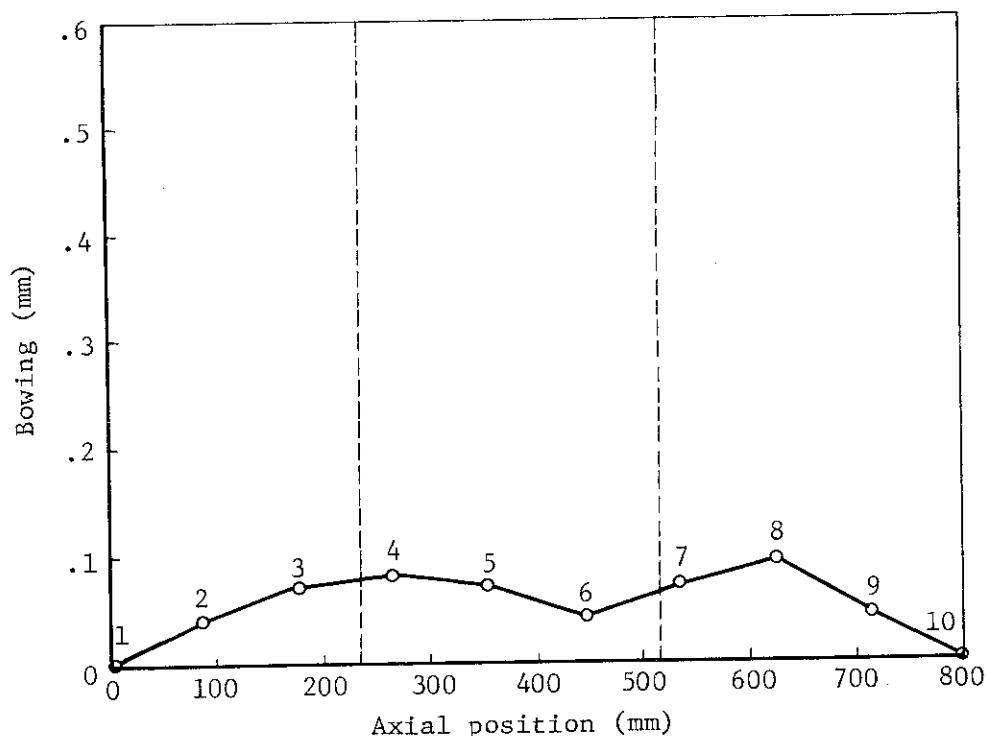


Fig. 3.57 Bowing of No.2 graphite sleeve for 2nd OGL-1
(outer diameter base)

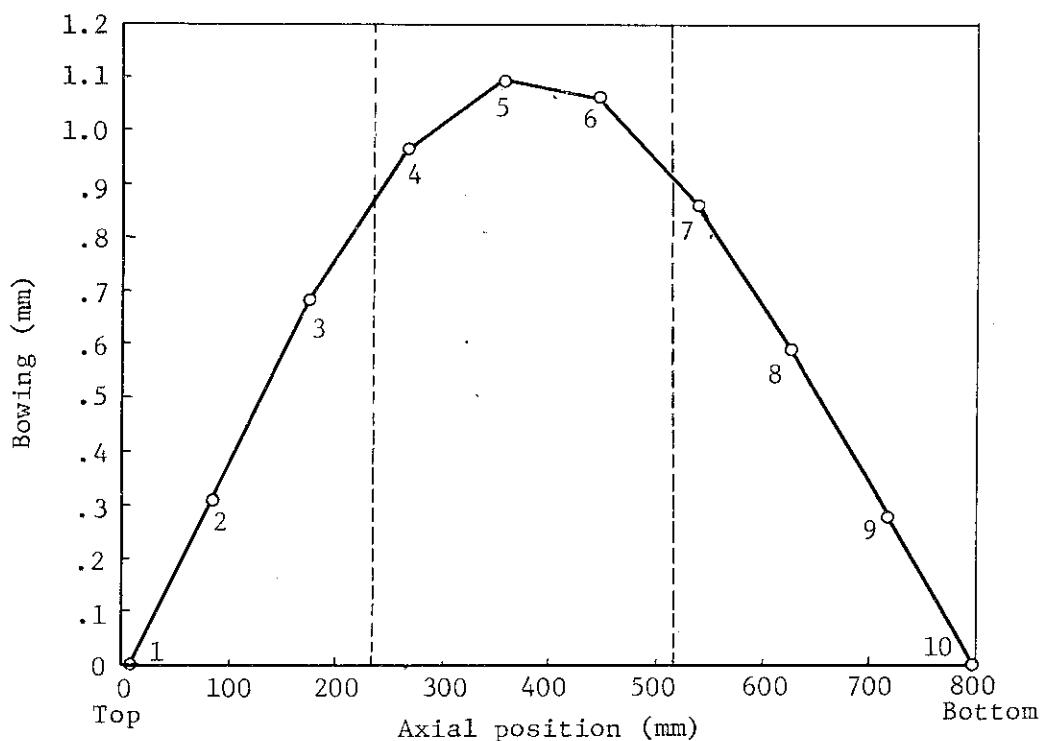
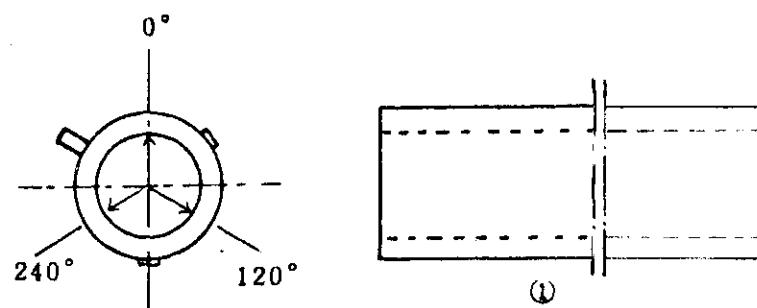
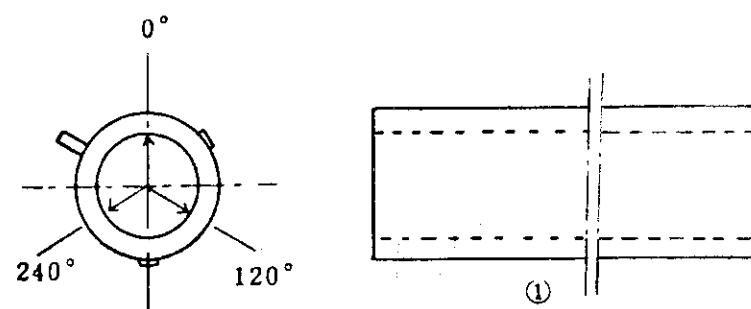


Fig. 3.58 Bowing of No.3 graphite sleeve for 2nd OGL-1
(outer diameter base)



1st OGL-1



2nd OGL-1

Fig. 3.59 Viewing direction of inner surface of graphite sleeve

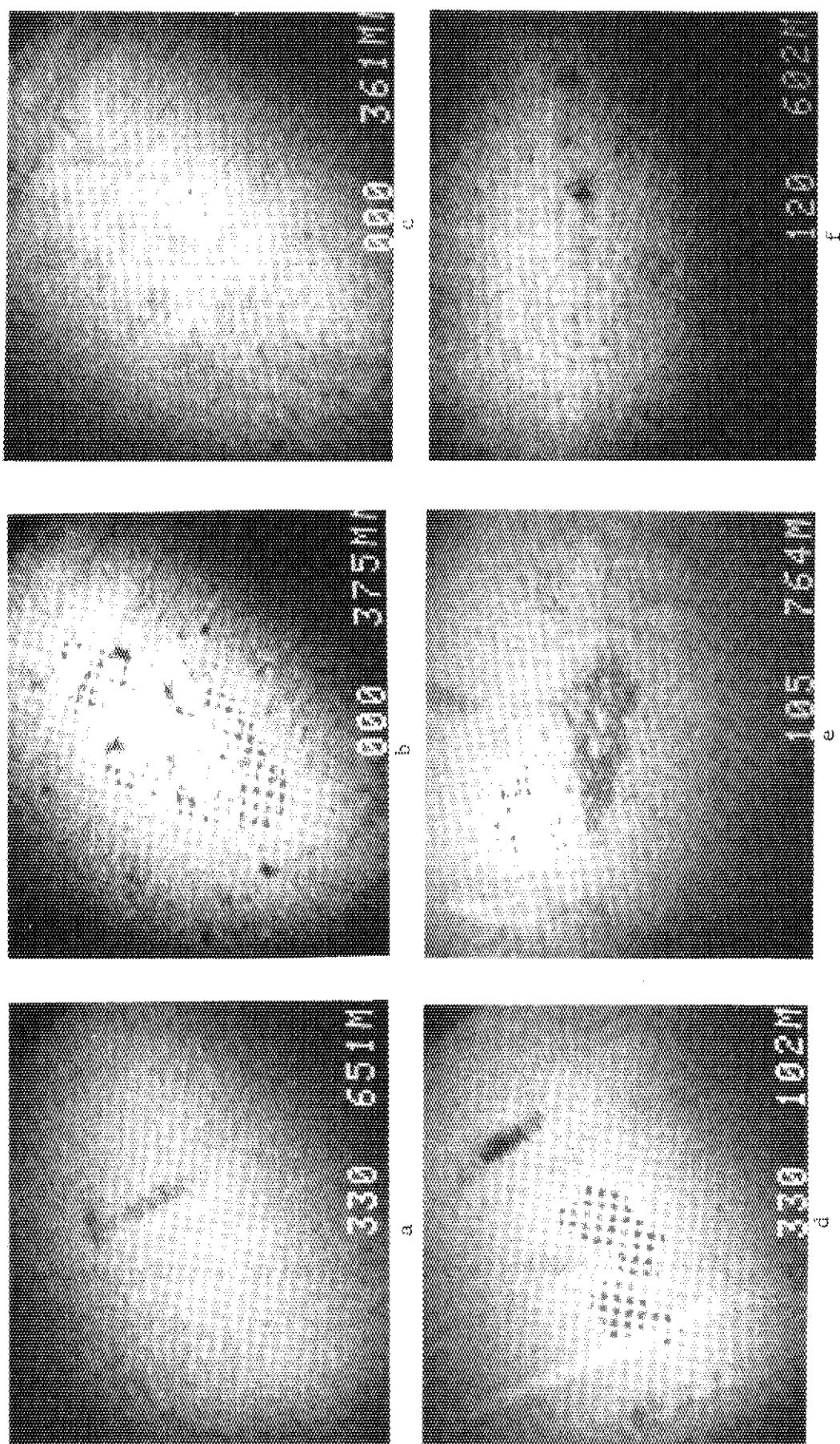


Fig. 3.60 Inner surface of graphite sleeve for 1st OGL-1.
a to f; No.1 graphite sleeve.

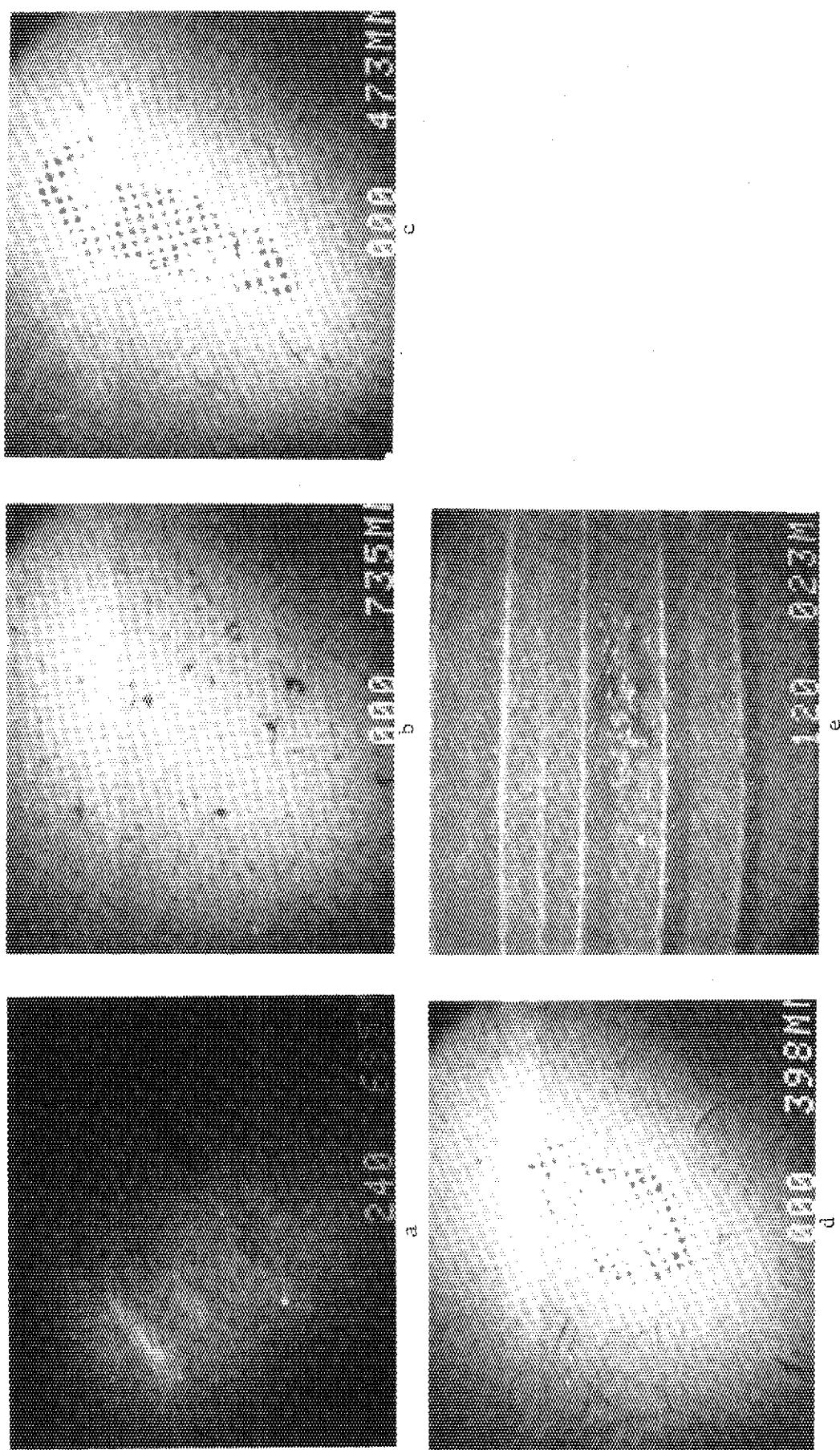


Fig. 3.61 Inner surface of graphite sleeve for 1st OGL-1.
a; No.1 graphite sleeve, b to e No.2 graphite sleeve.

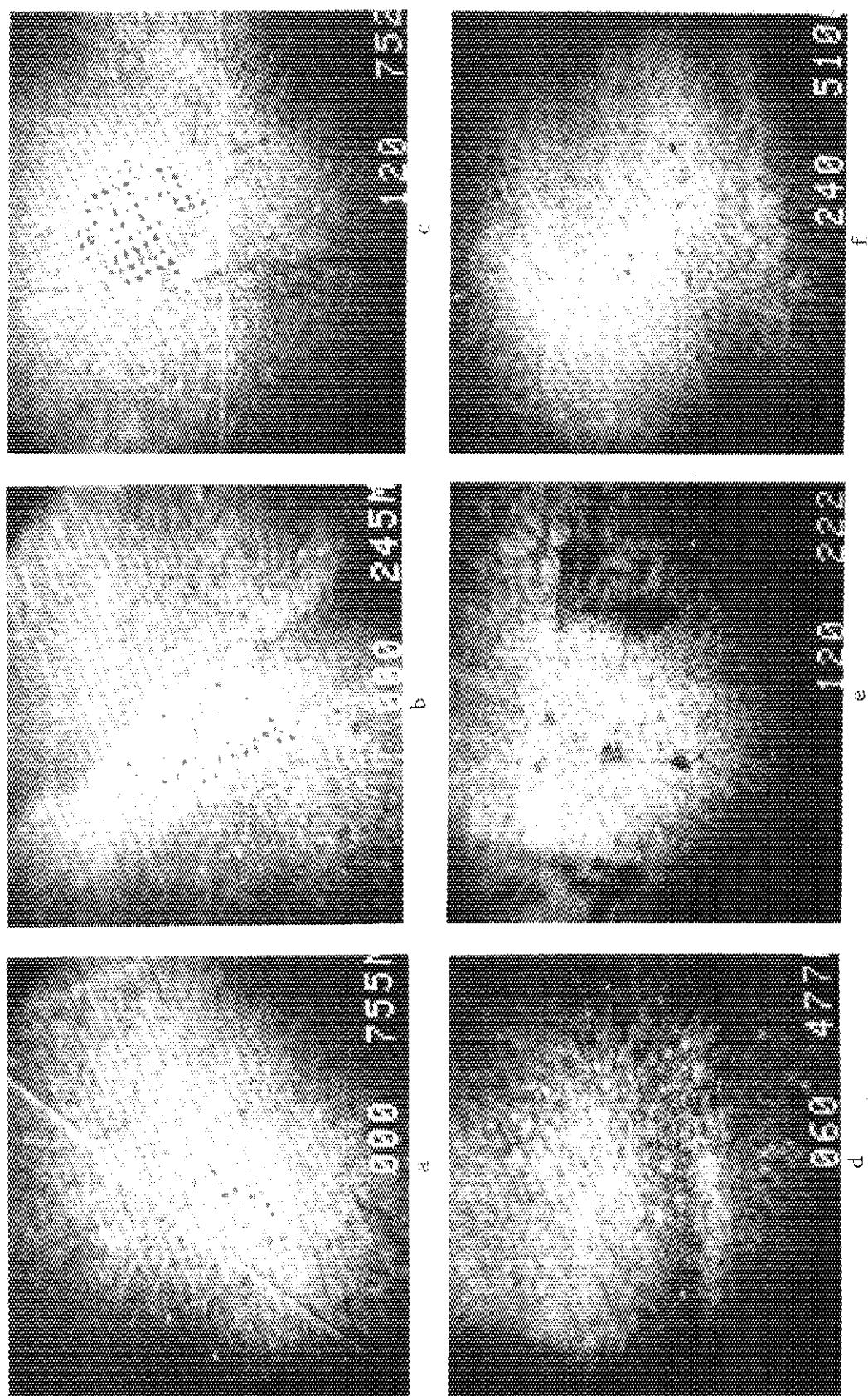


Fig. 3.62 Inner surface of graphite sleeve for 2nd OGL-1.
a to f; No.1 graphite sleeve.

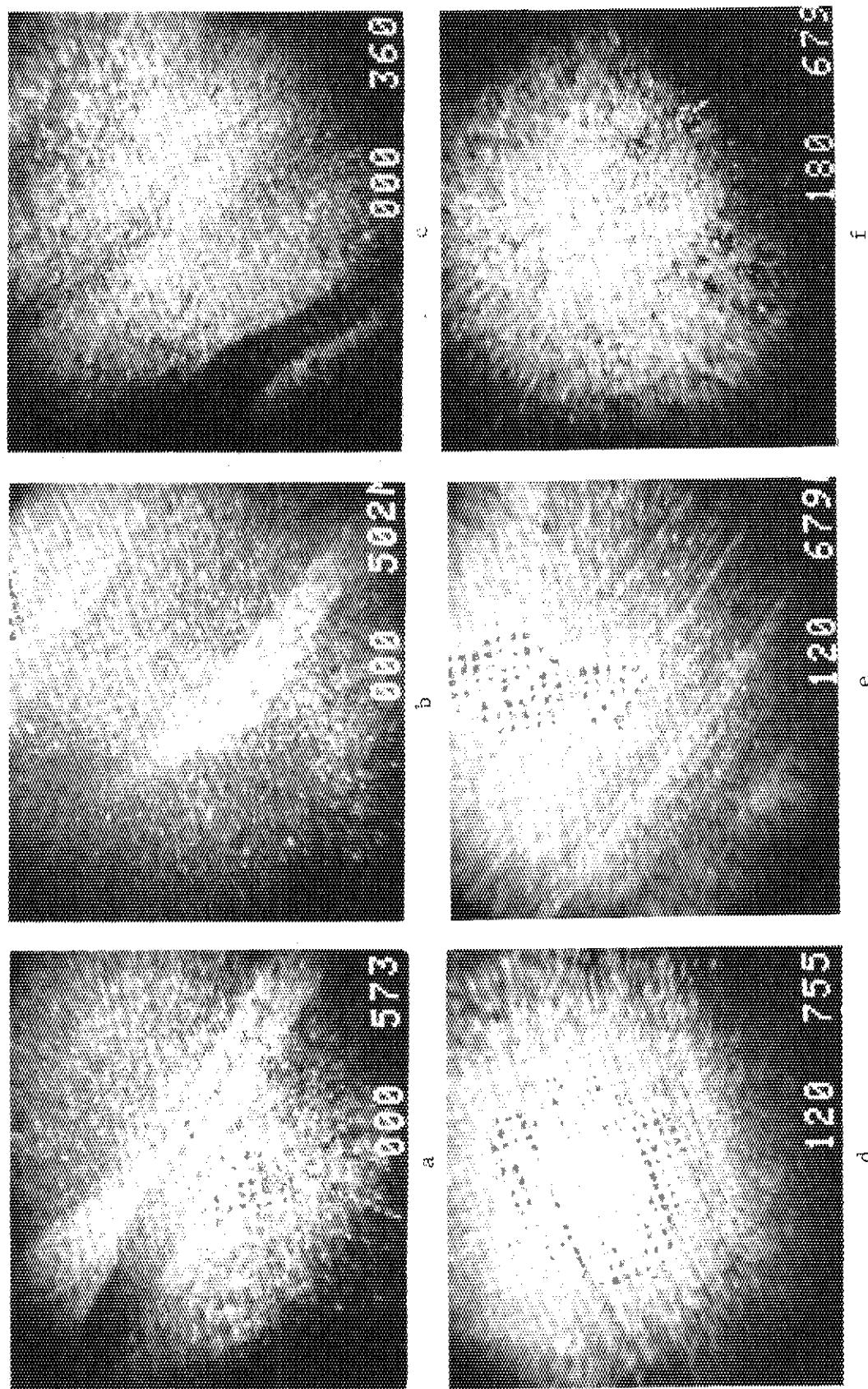
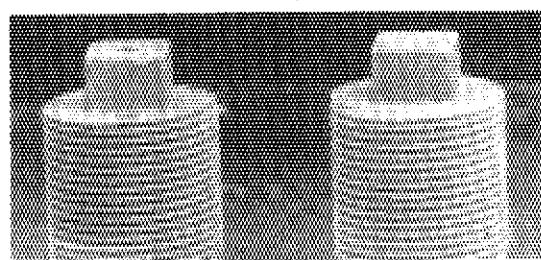


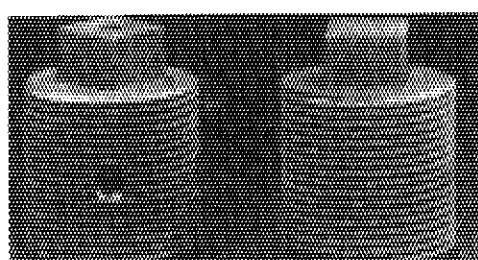
Fig. 3.63 Inner surface of graphite sleeve for 2nd OGL-1.
a to f; No.2 graphite sleeve.



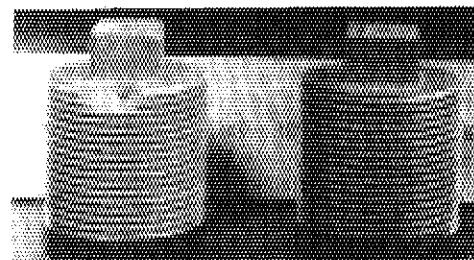
a



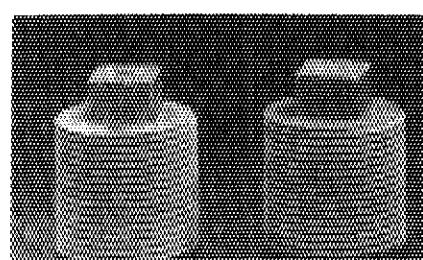
a



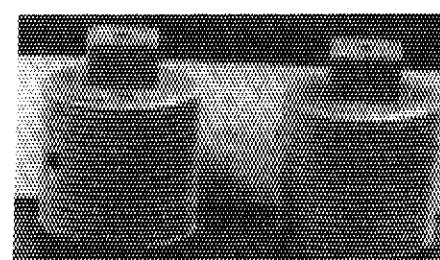
b



b



c



c

Fig. 3.64 End screw plug for
1st OGL-1 fuel pin.
a; No.1, b; No.2, c; No.3.

Fig. 3.65 End screw plug for
2nd OGL-1 fuel pin.
a; No.1, b; No.2, c; No.3.

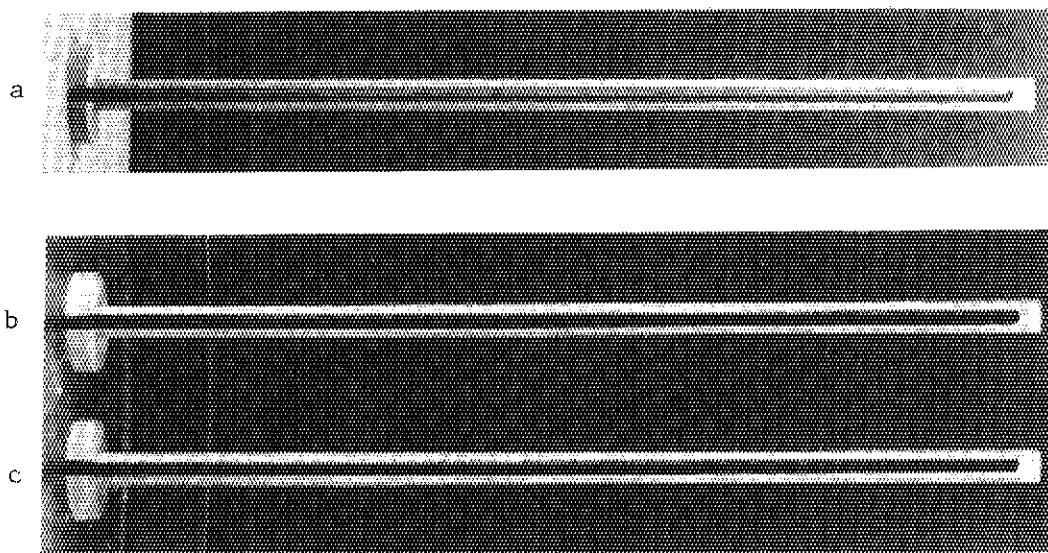


Fig. 3.66 Thermocouple support rods for 1st OGL-1.
a; No.1, b; No.2 c; No.3.

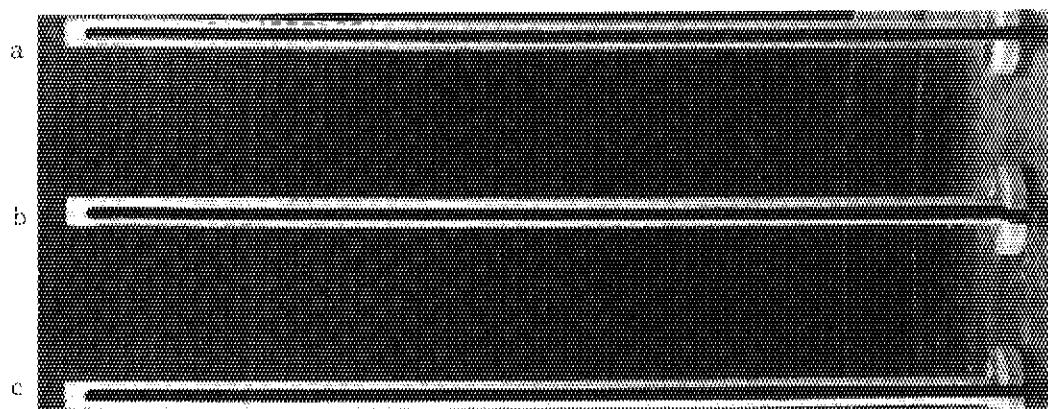


Fig. 3.67 Thermocouple support rods for 2nd OGL-1.
a; No.1, b; No.2, c; No.3.

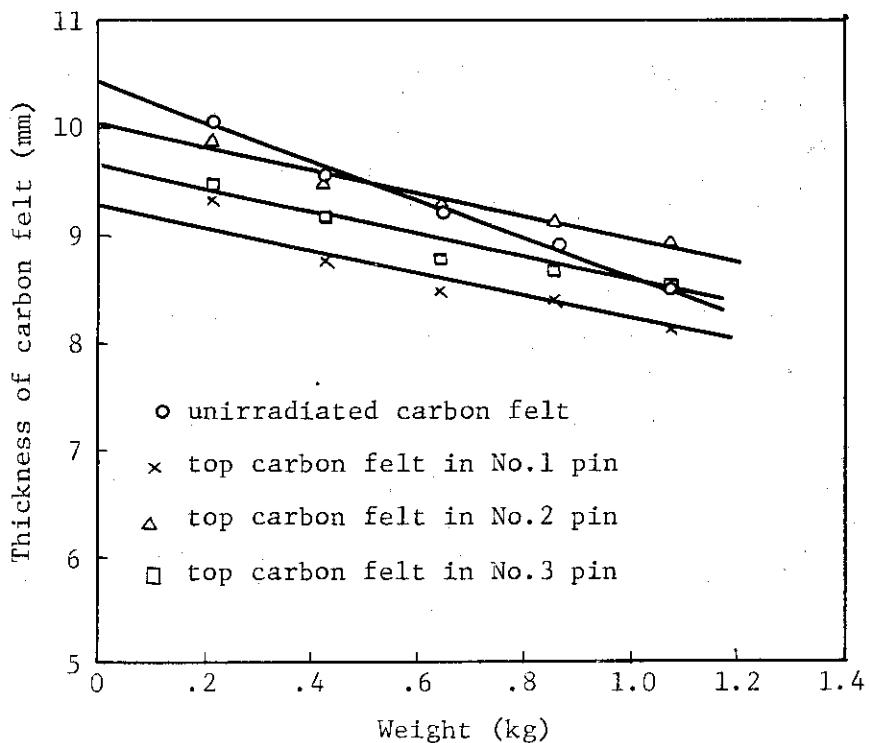


Fig. 3.68 Elasticity of carbon felt

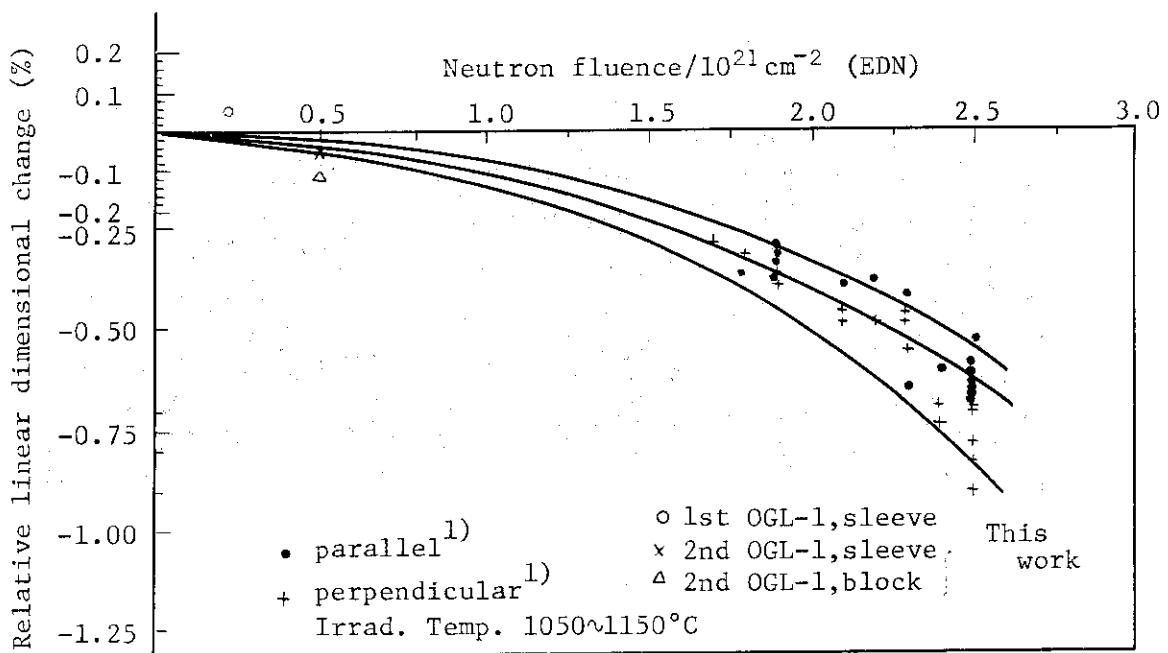


Fig. 3.69 Dimensional change of IG-11 graphite

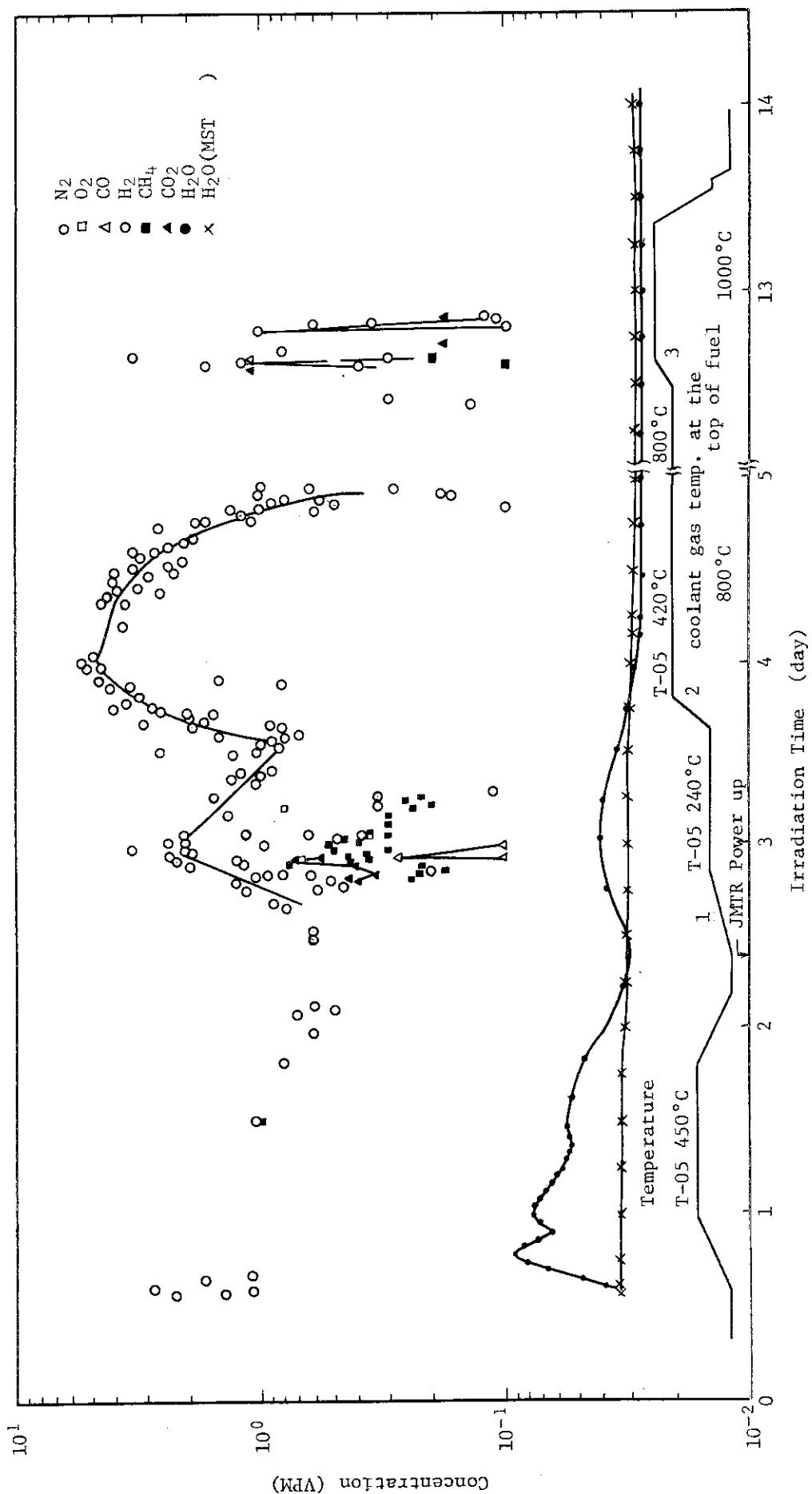


Fig. 3.70 Impurity concentration in OGL-1 primary cooling gas (39th cycle)

4. 燃料コンパクト及び被覆燃料粒子の照射後試験

4.1 はじめに

燃料コンパクトの照射試験は密封キャップセルやスイープガスキャップセルによっても行なうことが出来るが、OGL-1燃料のように燃料棒として多量のコンパクトを一度に、また多目的実験炉の炉内雰囲気に近い状態で照射出来るという観点からOGL-1照射はキャップセル照射とは異った特徴を有している。本章では第1次、第2次OGL-1燃料体から取出した燃料コンパクトの照射後試験について記したものであり、パラメトリックな試験から得られる種々の知見によって燃料コンパクトの照射健全性を評価した。照射量は第1次、第2次OGL-1燃料体とも燃料コンパクト温度は多目的実験炉設計の最高温度を満たしていたが、燃焼度、高速中性子照射量はまだ不十分であった。このような照射ではあったが、両燃料体から取出したコンパクトとも良好な照射健全性を示し、インパイルガスループ照射としての第1段階は成功したと言える。

4.2 燃料コンパクトの特徴とその照射概要

すでに第1章で記したように第1次及び第2次OGL-1燃料コンパクトは若干異っている。その概要をFig. 4.1に示すが、第1次OGL-1燃料コンパクトは24mm外径、8mm内径、40mm長さであるのに対し、第2次OGL-1燃料コンパクトは24mm外径、8mm内径、36mm長さと前者に比べると多少短くなっている。黒鉛マトリックスは石油系人造黒鉛粉(Ringsdorff社製)20%と天然黒鉛粉(Kropfmühl社製)80%にフェノール樹脂20%を加えて成形、加工したものである。被覆粒子充填率は第1次OGL-1燃料コンパクトが22v/oであるのに対し、第2次OGL-1コンパクトは30v/oである。前者には予備設計被覆粒子を装荷しているのに対し、後者にはMk-III設計粒子を装荷している。第2次OGL-1燃料コンパクトについては、コンパクト外径及び内径を除けば、Mk-III設計仕様に準じたものである。

第1次及び第2次OGL-1燃料試料として照射した燃料コンパクトの名称、照射温度、線出力、燃焼度及び近似的高速中性子照射量をApp. 4.1及び4.2にまとめている。これらの表に示す燃料コンパクトの番号(N=1, 2, 3, ...)は燃料棒下端からの値である。

各燃料コンパクトの照射温度はOGL-1温度評価コードであるSTEP-II⁽¹⁾を用いて求めたものであるが、この表に示す値は全照射期間を通じての時間的重みを掛けたもので、以下の式で示される。

$$\text{TEMP} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i \cdot T_i}{t_i}$$

t_i = 照射温度が一定に保たれた時間

T_i = その時の温度

n = 照射温度の変動数

これらの表に示す温度はコンパクト内表面での温度を示しているが、コンパクト外表面温度は燃料棒中央付近で約100°C、下端部で約30°C低くなっている。

各燃料コンパクトの線出力及び燃焼度もSTEP-IIから求めたものであるが、第1次OGL-1燃料コンパクトの最大燃焼度は約0.6%FIMAに対し、第2次OGL-1燃料コンパクトの最大燃焼度は約1%FIMAと約2倍の燃焼度を示している。

各燃料コンパクトの高速中性子照射量は次のようにして求めた。第2章で示したように、黒鉛ブロックに装荷したFe-フルューエンスモニター(2次OGL-1)から各燃料ピン中央付近の燃料コンパクトに対する高速中性子照射量を求め、これをもとに第3章で示した γ -スキャンニングの分布を高速中性子にも適応出来るものと仮定して、各コンパクトの高速中性子照射量を求めた。これらの表に示すように第1次OGL-1燃料コンパクトの最大高速中性子照射量($E > 0.18$ MeV)は 2.0×10^{20} n/cm²、第2次OGL-1燃料コンパクトのそれは 3.1×10^{20} n/cm²である。

第1次及び第2次OGL-1燃料コンパクトの照射条件としては燃料温度を除いて燃焼度及び高速中性子照射量とも多目的実験炉の最大照射条件を満すには到っていないが、実験炉内で中レベル程度の照射を受ける燃料の健全性評価には重要なデータである。

4.3 照射後試験

燃料棒から取出した燃料コンパクトの照射後試験の項目をFig. 4.2に図示する。外観検査、重量測定及び寸法測定については全燃料コンパクトについて実施したが、その他の項目については特定のコンパクトについて実施した。特に被覆粒子の照射後試験は電解・酸浸出試験を行った燃料コンパクト中の粒子にのみ実施可能である。

4.3.1 外観検査(内面観察)

上述した様に燃料コンパクトの外観検査は全燃料コンパクトに対して実施した。第1次OGL-1燃料コンパクトの照射後外観をFig. 4.3(1)からFig. 4.3(3)に、また第2次OGL-1燃料コンパクトの照射後外観をFig. 4.4(1)からFig. 4.4(3)に示す。これらの写真に見られるように、全ての燃料コンパクトの外表面には割れ(crack)、欠け(chip)、欠落(debonding)さらに変色などの異常は見られず、良好な状態であった。これらの表面状態は照射前のものとほとんど変らず、照射の影響はまったく表われなかった。また第1次及び第2次OGL-1燃料コンパクト3個づつについて、それらを軸方向に2分割し、内表面の観察を行った。それらの結果をFig. 4.5に示すが、これらの全てのコンパクトの内表面には異常はみられず、健全性を示した。

4.3.2 寸法検査

燃料コンパクトの寸法検査も全コンパクトについて行った。測定器については外径及び長さ測定に対してはオートマイクロメータ、内径測定に対しては内径測定器を使用した。これらの測定器の精度は±1/100 mmである。コンパクトの長さ測定は90°おきに4ヶ所について行い、内径及び外径については、コンパクト軸方向に上、中、下3ヶ所を90°の角度で2方向の測定、つまり1個のコンパクトについてそれぞれ6ヶ所の測定を行った。App. 4.3(1)~(3)には第1次

OGL-1 燃料コンパクトの測定結果を、App. 4.4(1)~(3) には第2次OGL-1の結果を示す。

また燃料コンパクトの照射による寸法変化率を燃料棒中のコンパクト配置としてプロットした結果を、第1次OGL-1に対してはFig. 4.6(1)からFig. 4.6(3)まで、また第2次OGL-1に対してはFig. 4.7(1)からFig. 4.7(3)までに示す。これらの図にはそれぞれのコンパクトの照射温度及び燃焼度も示している。これらの結果で明らかなことは

(1) コンパクト寸法は燃料棒内で照射温度よりも中性子照射量（ここでは燃焼度）に依存して収縮する、

(2) 中性子照射量の大きい燃料棒ほどコンパクトの寸法収縮は大きい、
などである。また高速中性子照射量に対する燃料コンパクトの寸法変化依存性を、第1次OGL-1 燃料コンパクトの場合、Fig. 4.8 に、第2次OGL-1 燃料コンパクトの場合、Fig. 4.10 に示す。
Fig. 4.9(1)~Fig. 4.9(3)には第1次OGL-1 燃料コンパクトの寸法変化を照射温度範囲ごとにプロットした結果を、Fig. 4.11(1)~Fig. 4.11(3)には第2次OGL-1 のそれを示す。Fig. 4.8 及び Fig. 4.10 にみられるように、コンパクトの寸法収縮は $2 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18$ MeV) 程度の照射量でも明確な照射量依存性を示していることがわかる。第1次OGL-1 燃料コンパクトの場合、0.3%以内の収縮率であるのに対し、第2次OGL-1 の場合、0.4%を越えているものもある。また寸法収縮の温度依存性については第1次及び第2次OGL-1 燃料コンパクトとも明確な差は認められず、この程度の中性子照射量では照射温度の影響はほとんど現れなかった。

また寸法変化の異方性（径方向に対する長さ方向の寸法変化率の割合）については、第1次、第2次OGL-1 燃料コンパクトに対して明確には現れなかったが、長さ方向の寸法変化の方が若干大きいようにも思われる。

コンパクトの外径寸法変化が特に重要な意味を持つのは燃料棒内での黒鉛スリーブ内径とコンパクト外径とのギャップが変化するため、この間の熱伝達係数が変化し、一定の線出力のもとでも燃料コンパクト温度が変動するというためである。特にスリーブ内径収縮量よりコンパクト外径収縮量が大きいとギャップが増加し、燃料コンパクト温度が上昇する。BOL*とEOL*の燃料棒上、下端付近のギャップは以下のとおりである。

Table 4.1 Change of compact-sleeve gap

燃料試料	燃料棒 No.	上端付近			下端付近		
		BOL ^(mm)	EOL ^(mm)	ギャップ [*] 増加率*	BOL ^(mm)	EOL ^(mm)	ギャップ [*] 増加率*
第1次OGL-1	No. 1	0.228	0.228	0	0.218	0.219	0.5
	No. 2	0.262	0.267	1.9	0.260	0.274	5.1
	No. 3	0.217	0.220	1.4	0.230	0.240	4.3
第2次OGL-1	No. 1	0.293	0.315	7.5	0.328	0.353	7.6
	No. 2	0.258	0.271	5.0	0.305	0.342	12.1
	No. 3	0.260	0.289	11.2	0.322	0.361	12.1

$$* = \frac{EOL - BOL}{BOL} \times 100 (\%)$$

* BOL = beginning of life , EOL = end of life

第1次 OGL-1 の燃料棒では 0 ~ 5 % 程度のギャップの増加がみられたが、第2次 OGL-1 燃料棒では 5 ~ 12 % 程度の増加が見られ、1 次にくらべて増加率は 2 倍以上になっている。EOL の1次及び2次OGL-1 燃料棒全体のギャップの分布をFig. 4.12に示すが、1次OGL-1 燃料棒中のギャップは軸方向に対して比較的均一な分布を示しているのに対し、2次OGL-1 では3本の燃料棒とも同じような不均一分布が見られる。これは恐らく黒鉛スリーブ加工時の分布の影響であり、照射によって生じたものではないと思われる。1次OGL-1 燃料棒ではEOL ギャップは 0.25 ± 0.05 mm 間にあるのに対し、2次OGL-1 ではほぼ 0.3 ± 0.05 mm あり、2次OGL-1 の方が若干ギャップが大きくなっている。

4.3.3 重量検査

燃料コンパクトの重量検査は全燃料コンパクトに対して実施した。その結果は App. 4.3(1) ~ App. 4.3(3) (第1次 OGL-1 燃料コンパクト) 及び App. 4.4(1) ~ App. 4.4(3) (第2次 OGL-1 燃料コンパクト) にまとめている。また燃料棒中での照射前後の重量変化率をFig. 4.6(1) ~ Fig. 4.6(3) (第1次 OGL-1) 及び Fig. 4.7(1) ~ Fig. 4.7(3) に示している。この図からも明らかなように1次及び2次 OGL-1 燃料コンパクトの重量変化率はほぼ $\pm 0.1\%$ 以内であり照射による変化はないと言える。

4.3.4 金相検査

燃料コンパクトの金相検査を各 OGL-1 燃料試料の燃料ピンから 3 個づつ取り出し、これについて行った。これらのコンパクトを次に示す。

	第1次 OGL-1 燃料コンパクト	第2次 OGL-1 燃料コンパクト
No. 1 燃料棒	1 - 103 (750 P1-3)	2 - 103 (760 P2-3)
	1 - 119 (750 P1-9)	2 - 110 (760 P4-2)
	1 - 113 (750 P1-13)	2 - 115 (760 P5-1)
No. 2 燃料棒	1 - 203 (750 P2-3)	2 - 203 (760 P2-8)
	1 - 209 (750 P2-9)	2 - 210 (760 P4-8)
	1 - 213 (750 P3-4)	2 - 215 (760 P5-5)
No. 3 燃料棒	1 - 303 (750 P2-11)	2 - 303 (760 P2-13)
	1 - 309 (750 P2-18)	2 - 310 (760 P4-14)
	1 - 313 (750 P3-13)	2 - 315 (760 P5-9)

これらの燃料コンパクトの研磨には新しい技術⁽²⁾が使われた。つまり、燃料コンパクトを切断した後、切断面に樹脂注入を行い、燃料核や不安定な部分を固定したが、このような樹脂注入は切断面を研磨する過程でも随時行われた。研磨は SiC 耐水研磨紙 (#600, #800), ダイヤモンドディスク (8μ , 6μ) を使って行われ、最終的には 1μ ダイヤモンドペーストでクロス研磨仕上げが行われた。金相観察では 100 倍と 400 倍の写真撮影を行った。

Fig. 4.13(1) ~ Fig. 4.13(9) には第1次 OGL-1 燃料コンパクト中の被覆粒子金相観察結果を示す。

Fig. 4.13(1)には750P1-3コンパクトの金相を示すが、このコンパクトは照射温度983°C、燃焼度0.4%FIMA、高速中性子照射量 $1.2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (E>0.18 MeV)で照射されたものである。この中で写真6には被覆層の一部が腐食されたような状態が見られる。被覆層(特にSiC)の腐食で問題になる核種はPdであるが、これはSiC-Pd反応によるものであると思われない。その理由として、上述したように照射温度が低いことがあげられる。SiC-Pd反応は燃料核がどんな化合物でも生ずるが⁽⁴⁾、温度が高くなれば(T>~1300°C)この反応は進まないであろう。たとえば最高1550°Cで照射した被覆粒子にはPd腐食が顕著に見られたが、1200°Cの場合にはほとんどこれが認められなかった。⁽³⁾また希土類FPによる反応とも多少様子が異なっているようである。この異状の原因を断定出来るデータは何もないが、研磨時にSiC破片がまき込まれて発生したとも考えられる。また写真4に見られるようにOLTI-PyC^{*}に放射状にクラックが発生しているのが認められる。このクラックが照射中に発生したものでないことは後述する被覆粒子の外観検査からも明らかである。これは照射によって収縮したOLTI-PyCに内部応力(引張り応力)が発生し、研磨時にOLTI-PyCにクラックが発生するものと考えられる。このようなクラックの発生はルーズに照射した被覆粒子にも見られた。⁽⁵⁾

Fig. 4.13(2)には750P1-9コンパクトの金相を示す。このコンパクトは1118°C、0.40%FIMA $1.4 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (E>0.18 MeV)^{**}で照射されたものである。写真5に見られるようにバッファー層がILTI-PyCから剥離している現象が見られる。これはバッファーの高密度化(densification)^{(4),(6)}による収縮が原因しているものと言われるが、後述するように燃料核とバッファー層とが密着し、バッファー層の収縮とともに核の焼きしまりによる収縮のため剥離現象が発生しているとも考えられる。さら写真6にはマトリックスとOLTI-PyCが密着し、その付近にクラックが発生している様子が見られるが、これも前述したように研磨によるクラック発生と思われる。マトリックス-被覆層相互作用によって被覆層破損が発生することはすでに多くの報告の中にみられる。特に米国燃料の場合、マトリックスのバインダーとしてピッチを使ったコンパクトよりレジンバインダーを使ったコンパクトに、より顕著なマトリックス-被覆層相互作用が発生する⁽⁷⁾と言われる。この点においてはフェノール樹脂を使用した当OGL-1燃料コンパクトもレジンバインダー系に該当するため注意を要するが、第1次、第2次OGL-1コンパクトは最大でわずか0.5%以内の収縮(Fig. 4.8及び4.10)しか生じていないため、ここではこの現象は問題ないものと思われる。

Fig. 4.13(3)には750P1-13コンパクトの金相を示す。このコンパクトは1080°C、0.26%FIMA、 $1.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (E>0.18 MeV)の照射量を受けたものである。写真3や写真6に示すように、ILTI-PyC及びバッファー層にクラックが生じている粒子が見られる。このクラック発生の1つの機構として考えられるのは、バッファー層の収縮にともなってクラックが発生しさらにクラックを境にしてバッファー全体が収縮するためILTI-PyCの引張り応力が倍加し、ILTI-PyCにクラックが発生するというものである。しかし照射中に発生したと思われるバッファー層内の亀裂は後述するように(Fig. 4.14(8)写真4)、燃料核表面からV字形の広がりを示

* OLTI-PyC = Outer Low-Temperature Isotropic PyC

** 以後照射温度、燃焼度、高速中性子、照射量の順に示す。

しており、写真 6 に見られるような亀裂とは様子が異っている。これも内部応力のため研磨時に発生したものと思われる。

Fig. 4.13(4)には 750 P2-3 コンパクトの金相を示すが、これは 1147°C , 0.55% FIMA, $1.6 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射したものである。OLTI-PyC のクラックやバッファー層の剥離といった現象が見られるが、特に注目することは写真 6 に見られるように SiC 層の中央部にクラックが発生していることである。これは恐らく製造時あるいは照射によるものと思われる。

Fig. 4.13(5)には 750 P2-9 コンパクトの金相を示す。このコンパクトは第 1 次 OGL-1 コンパクトの中では照射条件が最も大きなものの一つで、 1356°C , 0.59% FIMA, $1.9 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。写真 4 及び 5 には OLTI-PyC にギャップが見られるが、照射量が非常に低いことからこれは OLTI-PyC の収縮によるものとは思われない。恐らく研磨時の欠落と思われる。またこの粒子の OLTI-PyC と SiC の間にはギャップがみられるが、これも OLTI-PyC とマトリックスの反応によるものかどうかは疑問である。なぜなら第 1 次 OGL-1 の場合、MICROS 2N コードによる計算では OLTI-PyC には約 1000 kg/cm^2 の引張り応力が内在しており、OLTI-PyC は収縮状態にあるからである。また写真 6 にはバッファー層が ILTI-PyC から剥離している状態が見られるが、これは燃料核と密着しており、燃料核の焼きしまりによる収縮もこの剥離に作用しているのではないかと思われる。

Fig. 4.13(6)には 75OP3-04 コンパクトの金相を示す。このコンパクトは 1286°C , 0.41% FIMA, $1.4 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものであるが、OLTI-PyC 中の放射状クラック、バッファー層の剥離以外に SiC 層に半径方向にクラックが発生しているのが見られる（写真 6）。

Fig. 4.13(7)には 75OP2-11 コンパクトの金相を示す。これは 1039°C , 0.47%, $1.4 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ で照射されたものであり、OLTI-PyC におけるクラックやバッファーの部分的剥離がみられる。

Fig. 4.13(8)には 75OP2-18 コンパクトの金相を示す。これは 1270°C , 0.55% FIMA, $1.9 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。写真 3 に見られるように極端に燃料核が小さい粒子が認められる。もしこれが製造時におけるものであれば被覆層は燃料核の上に被覆しているはずである。

Fig. 4.13(9)には 75OP3-13 コンパクトの金相を示すが、これは 1215°C , 0.38% FIMA, 0.15×10^{20} で照射されたものである。クラックやバッファー層の剥離は他に比べて少ないようである。

Fig. 4.14(1)~(9)には第 2 次 OGL-1 コンパクトの金相を示す。第 2 次 OGL-1 コンパクトの被覆粒子は第 1 次のそれらに比べて OLTI-PyC 中のクラックやバッファー層の剥離がかなり少ない。

Fig. 4.14(1)は 76OP2-3 コンパクトの金相を示す。これは 1019°C , 0.59% FIMA, $1.8 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。写真 6 にはバッファー層及び ILTI-PyC にクラックが発生しているのが見られる。

Fig. 4.14(2)は 76OP4-2 コンパクトの金相を示す。これは 1160°C , 0.65% FIMA, $2.2 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。写真 6 にはバッファー層及び ILTI-PyC にクラックが発生しているのが見られる。

n/cm^2 ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されているが、バッファー層の剥離以外には顕著な変化は見られない。

Fig. 4.14(3)は 76OP5-1 コンパクトの金相であり、これは 1091°C , $0.38\% \text{ FIMA}$, $1.6 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。写真 5 には被覆層全体にクラックが発生している様子が見られるが、もしこれが照射中に入ったものであれば、ここからバッファー層の収縮が生じ、たとえば写真 6 に示すようにバッファー層のクラックは広がっているはずである。

Fig. 4.14(4)は 76OP2-8 コンパクトの金相を示す。これは 1200°C , $0.86\% \text{ FIMA}$, $2.4 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) の照射を受けたものである。このコンパクトにも写真 6 に示すように、SiC 層及び OLTI-PyC にクラックが発生している。

Fig. 4.14(5)は 76OP4-8 コンパクトの金相を示すが、これは 1426°C , $0.94\% \text{ FIMA}$, $3.0 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。このコンパクトは第 2 次 OGL-1 コンパクトの中で最高の照射温度を示したものである。写真 4 にみられるように、OLTI-PyC や SiC 層のクラック以外にバッファー層内にクラックが発生している様子が見られる。これは明らかに照射によるバッファー層の収縮のために生じたものである。

Fig. 4.14(6)には 76OP5-5 コンパクトの金相を示す。これは 1304°C , $0.55\% \text{ FIMA}$, $2.1 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものであるが、バッファー層の収縮にともなう照射変化（写真 4 ~ 6）がみられた。

Fig. 4.14(7)は 76OP2-13 コンパクトの金相を示すが、これは 1161°C , $0.84\% \text{ FIMA}$, $2.5 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものである。このコンパクトには際立った変化は見られず、バッファー層も健全である。

Fig. 4.14(8)は 76OP4-14 コンパクトの金相であり、 1354°C , $0.92\% \text{ FIMA}$, $3.0 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) の照射量を受けたものである。バッファー層収縮にともなう剥離（写真 2）やクラック（写真 3）の発生が見られるほか、燃料核内に異常な気孔（写真 2, 4）が見られる。これらは恐らく燃料核製造時ゲル化の過程において入ったものと思われる。

Fig. 4.14(9)は 76OP5-9 コンパクトの金相を示す。これは 1254°C , $0.54\% \text{ FIMA}$, $2.1 \times 10^{20} n/cm^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射されたものであるが、バッファー層の剥離が若干認められる以外は照射変化は見られなかった。

4.3.5 燃料コンパクト X 線ラジオグラフィ

燃料コンパクトの X 線ラジオグラフィ検査はコンパクト内での被覆粒子の照射変化が燃料コンパクトのどの方向に向って発生しているかを調べる上で重要である。しかし、コンパクト全体を X 線ラジオグラフィにかけても被覆粒子の区別が出来ないため、あまり意味がない。ここでは燃料コンパクトを $2 \sim 3 \text{ mm}$ に薄切にして、これを X 線ラジオグラフに撮った。X 線ラジオグラフを撮ったコンパクトは以下のとおりである。

第 1 次 OGL-1 コンパクト	75OP2-3, 75OP2-9, 75OP3-4
第 2 次 OGL-1 コンパクト	76OP2-8, 76OP4-8, 76OP5-5

これらの薄切試料は金相試料として切出した残りのコンパクトから加工したものである。第1次、第2次OGL-1薄切りコンパクトもNo.2燃料棒から切出したもので、この観察結果を第1次OGL-1コンパクトの場合Fig. 4.15(1)~(3)までに、第2次OGL-1コンパクトの場合Fig. 4.16(1)~(3)までに示す。これらの観察結果には内表面及び外表面付近の被覆粒子の代表的な写真を示す。これらのX線ラジオグラフの中に燃料核が抜けている被覆粒子が数個見られる。

Fig. 4.15(1)~(3)に示す第1次OGL-1コンパクトの被覆粒子にはアメーバ効果や粒子内の異状はまったく見られず、またSiC層にクラックが発生している様子も認められなかった。しかし、Fig. 4.15(1)の内表面付近の粒子や、Fig. 4.15(2)の外表面付近の粒子内には金相で見られたようなバッファー層の剥離の現象が認められた。この剥離方向や、剥離した粒子のコンパクト内での位置は特に定まってはいないようである。

Fig. 4.16(1)~Fig. 4.16(3)に示す第2次OGL-1燃料コンパクトの被覆粒子にも粒子内に異状は認められなかった。これらのX線ラジオグラフにはOLTI-PyC層がマトリックスの中に識別できるが、これらにクラックが発生している様子は認められなかった。これらの状況から第1次、第2次ともコンパクトの中では被覆粒子は健全であったと考えられる。

4.3.6 電解酸浸出試験

電気解碎を行った燃料コンパクトは以下のとおりである。

第1次OGL-1	No.1 燃料棒	75 OP1-10 (1-110)
	No.2 燃料棒	75 OP2-1 (1-201), 75 OP3-1 (1-210), 75 OP3-9 (1-218)
	No.3 燃料棒	75 OP3-10 (1-310)
第2次OGL-1	No.1 燃料棒	76 OP4-3 (2-109)
	No.2 燃料棒	76 OP2-10 (2-201), 76 OP4-9 (2-209), 76 OP3-7 (2-220)
	No.3 燃料棒	76 OP4-15 (2-309)

この中で第1次、第2次OGL-1ともNo.2棒中の燃料コンパクトについては酸浸出後のウラン浸出率の測定をも行った。

電解酸浸出については以下のプロセスで行った。⁽⁹⁾燃料コンパクトをアセトンで洗滌、乾燥した後、7 mol硝酸液中で約70時間かけて電気解碎した。この際の電圧6V、電流3Aである。電気解碎後、約130°Cで9時間酸浸出を行った。

電解浸出液1mLを石英管内で乾燥させ、石英アンプルとして減圧封入した後、標準ウランを封入したアンプルと共にJRR-2で20分間照射した。照射後、試料アンプルと標準ウランアンプルのBa-140放射能(0.329 MeV)を比較し、これより浸出液中のウラン量を求めた。この結果をもとに、コンパクト中の全ウラン量からウラン浸出率を得た。この結果をTable 4.2に示す。この表には燃料コンパクト中の粒子総数の逆数も示している。この物理的意味は、燃料コンパクト中に1粒子の破損があり、このウランが100%浸出された場合のウラン浸出率を示している。

Table 4.5に示すウラン浸出率はいずれも 1×10^{-4} 以下であり、どのコンパクトも健全であったことを示している。しかし、 $1/(粒子総数)$ の値と浸出率を比較してみると75OP3-1, 75OP3-9及び76OP4-3コンパクトには1粒子の破損の可能性はある。一方、75OP2-1, 76OP4-9,

76OP3-7 コンパクトには粒子破損は生じていないものと考えられる。特に 76OP3-7 コンパクトのウラン浸出率は 2.2×10^{-6} であるが、これと同一バッチのコンパクトの照射前ウラン浸出率は 2×10^{-6} であり、これらはほとんど同じである。もし金相で見られたような全被覆層クラックが照射中に発生したものであれば、ウラン浸出率は 1×10^{-4} をはるかに越えているものと思われるが、酸浸出試験からも照射によるクラック発生は否定できる。

4.3.7 被覆燃料粒子外観検査及びX線ラジオグラフィ検査

被覆燃料粒子外観及びX線ラジオグラフィ検査は前節に記した電解酸浸出後の被覆粒子について行った。この両検査における第1次 OGL-1 の結果を Fig. 4.17(1)~(5) に、第2次 OGL-1 の結果を Fig. 4.18(1)~(5) に示す。

Fig. 4.17(1)~(5) に示す第1次 OGL-1 コンパクトから取出した被覆粒子の外観では、粒子表面にマトリックスがガラス状カーボンのように付着している様子（白色付着物）が見られるが、この厚さは非常に薄く、たとえば Fig. 4.17(1) の X 線ラジオグラフに見られるように OLTI-PyC の厚みと比較すると数ミクロン程度であると考えられる。従って、もし OLTI-PyC にクラックが発生していると、外観検査でも識別できるはずである。しかし Fig. 4.17(1)~(5) に示す外観にはクラックはまったく認められなかった。一方、これらの X 線ラジオグラフでは OLTI-PyC 中のクラックは認められなかつたが、ILT-I-PyC からバッファー層が剥離している粒子が Fig. 4.17(3) (写真 2.3) 及び Fig. 4.17(5) (写真 2) に特に顕著に認められた。また Fig. 4.17(5) (写真 3) は (ILT-I-PyC + バッファー層) が著しく薄くなっている様子を示すが、これはいずれかの層が被覆されていないものと思われる。

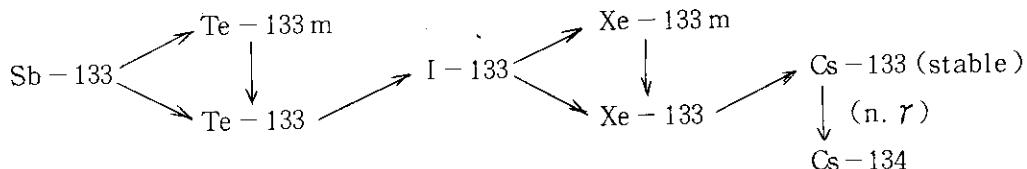
Fig. 4.18(1)~(5) に示す第2次 OGL-1 コンパクトから取り出した被覆粒子の表面にもマトリックスが付着している様子が見られるが、いずれの粒子にも被覆層の破損はなかった。X 線ラジオグラフでは ILTI-PyC からバッファー層が剥離している様子が多くの粒子に見られたが、アーベル効果や、粒子内での燃料核と被覆層との反応などはまったく認められなかつた。

外観や X 線ラジオグラフィ検査においては解碎して取出した被覆粒子は健全性を保っていたと言える。

4.3.8 コンパクト内での FP インベントリー測定

コンパクト内での FP インベントリーの測定を 1 本の燃料棒につき 5 ~ 6 ケ所行った。第1次 OGL-1 の測定結果を Fig. 4.19 に、第2次 OGL-1 の結果を Fig. 4-20 に示す。第1次 OGL-1 の場合、照射終了から測定までの時間が約 3 年と非常に長かったため、Zr-95 の放射能は測定限界以下であった。FP 放射能の中では、短半減期の Pr-144 ($T_{1/2} = 17.3 \text{ min}$) や Rh-106 ($T_{1/2} = 30 \text{ sec}$) が測定されているが、これらは Ce-144 ($T_{1/2} = 284 \text{ days}$) や Ru-106 ($T_{1/2} = 367 \text{ days}$) と放射平衡になっているためであり、実質上、これらの長半減期 FP の放射能とみてよい。Fig. 4.19 では Cs-137 の放射能が他の FP に比べて著しく高い。また燃料棒の中央部に位置するコンパクトの放射能が高く、Cs-137, Pr-144, Rh-106 などは燃料棒軸方向に対し同じような分布を示しているが、Cs-134 はこれらと若干異った分布を示しているようである。

Fig. 4.20に示す第2次OGL-1燃料コンパクトのFPインベントリーでも、第1次OGL-1と同じように燃料棒中央部でFP濃度が高くなっている。Cs-134を除いてはいずれも同じ分布をしている。Cs-134は



といったdecay-chainを示すが、Cs-134の生成には核分裂と(*n, γ*)反応の二重の中性子反応が関与しており、他のFP生成とは異っている。Fig. 4.21には第2次OGL-1のFP分布を示しているが、〔2〕に示すCs-137放射能は〔1〕に示す熱中性子照射量とほとんど同じ分布をしている。核分裂から直接生成するFPはこのように熱中性子分布と同じ形状を示す。従って、核分裂から直接生成する二種類のFP放射能の比はどの燃料ピンにおいても、またどのようなコンパクトでも一定の値を示すはずである。たとえばCs-137/Zr-95の比を〔3〕に示すが、これらの測定値はほぼ一定値を示している。しかしCs-134/Cs-137の場合は、上述したようにCs-134生成が二重の中性子反応によって起っているため、Cs-137/Zr-95と同じ分布にはならない。〔4〕に示すようにCs-134/Cs-137は中性子分布と似た形状を示している。

4.4 考 察

第1次及び第2次OGL-1燃料コンパクトの照射条件を多目的高温ガス実験炉燃料の最高燃焼条件と対比した図をFig. 4.22に示す。第1次、第2次OGL-1燃料の線出力や照射温度はほぼ多目的炉条件を満たしているが、燃焼度、高速中性子照射量、照射時間はまだ十分であるとは言えない。今後のOGL-1照射では照射条件を高めた試験が予定されている。

第1次、第2次OGL-1燃料コンパクトの照射条件はこのように低いものであるが、これらの照射結果は多目的炉燃料の低燃焼領域の燃料照射挙動を知る上で重要である。ここでは燃料コンパクトの照射健全性について被覆燃料粒子と燃料コンパクトに別けて考察を行う。

(i) 被覆燃料粒子

4.2にも記した様に第1次OGL-1燃料コンパクトの被覆燃料粒子は外径780 μmの予備設計粒子であるのに対し、第2次OGL-1のそれは外径920 μmのMk-III設計粒子である。両者の被覆粒子は寸法を除いては本質的な違いはないが、製造年は前者が50年度製作に対し、後者は51年度製作である。すでにX線や金相試験結果で記したように、これらの被覆粒子に共通した照射変化はバッファー層の収縮である。バッファー層収縮による剥離はピーチボトム燃料粒子内でも発生していることが^(4, 6, 10)2~3報告されている。^(4, 6, 10)特に高速中性子照射量が $6 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (E > 0.18 MeV)と第2次OGL-1と同程度の照射量であるFTE-3燃料エレメント⁽⁶⁾にもバッファー層収縮による剥離が発生していることは興味深い。この剥離は被覆粒子の劣化に対して直接的な悪影響はないものと思われるが、ILTI-PyCに対する保護の観点からするとこれは好ましいものではない。Fig. 4.13(4)の写真6に見られるように、この剥離はバッファー層内で生じている。

るものと, Fig. 4.13(8)の写真 6 に見られるように ILTI-PyC とバッファー層の境界で生じているものがある。前者の場合, バッファー層収縮に対抗し得る自らの強度が不足しているために生じているものと考えられ, また後者は ILTI-PyC とバッファー層の密着性に問題がある。特に前者の場合, バッファー層内でもより低密度になった領域で剥離が発生しているようである。

この剥離を防ぐ一つの方法として次のようなことが考えられる。Pechin 等による被覆実験報告⁽¹⁾によると ILTI-PyC の蒸着温度が低いほど, バッファー層密度が増加するが, これは ILTI-PyC を蒸着する際, 蒸着ガスがバッファー層の気孔内で熱分解を起すためである。プロピレン蒸着ガスの場合, 1450~1550°C以上になるとほとんどこの効果はなくなるようである。⁽¹¹⁾もし, ILTI-PyC の蒸着を従来の温度 (推定~1400°C) より低くすると, バッファー層の密度は若干増加するが, 気孔での蒸着のため, バッファー層の不均一性も改善されるであろうし, また ILTI-PyC とバッファー層の密着性も良くなり, 剥離の現象も少くなるものと思われる。

ILTI-PyC や SiC には特に問題はなく, 健全であった。多くの粒子の OLTI-PyC (その一部分の粒子には被覆層全体) にはクラック発生が見られたが, これらのクラックは照射によって発生したものではなく, 研磨時に起ったものであることは被覆粒子外観検査や X 線ラジオグラフィで認められている。このような研磨クラックはピーチボトム燃料においても発生しているようである。^(6, 10) クラック発生の原因はすでに記したように, LT1-PyC の照射収縮による応力の発生である。PyC の密度変化からみた寸法収縮⁽¹²⁾⁽¹³⁾は照射の初期 ($\phi_f < 1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2 \text{ EDN}$)において急激に発生するため, 第 1 次, 第 2 次 OGL-1 試験程度の照射量でも無視出来ない量の収縮が生じているはずである。特に BOL の PyC 密度が低いほど収縮量が大きくなるため, 研磨クラックの発生が起りやすい。例えば第 1 次 OGL-1 燃料コンパクトの場合, No. 1 燃料棒中のコンパクト使用粒子の OLTI-PyC 密度は 1.83 g/cm³ であるのに対し, No. 2 及び No. 3 燃料棒中のコンパクト使用粒子の OLTI-PyC 密度は 1.76, 1.77 g/cm³ と多少低くなっている。金相観察による研磨クラック発生率 (クラック発生粒子数/観察全粒子数) は No. 1 燃料棒中の粒子が最大 36% であるのに対し, No. 2 のそれは最大 91% である。もちろん照射量の違いも考慮しなければならないが, No. 2 棒中の粒子の研磨クラックの発生率がこのように高いのは OLTI-PyC の低密度にも原因があると思われる。高照射による TRISO 粒子の健全性試験では, 最外層 PyC 密度が 1.85~1.95 g/cm³ である TRISO 粒子は照射下で最も安定しているという報告がなされているが, 1.85 g/cm³ 以上の OLTI-PyC 密度を有する第 2 次 OGL-1 粒子には研磨クラックの発生が第 1 次 OGL-1 の場合に比べて非常に少い結果が得られており, 照射量が小さくても OLTI-PyC 密度は高くなればならないと言える。

また研磨クラック発生に対する照射温度の効果も無視出来ない。Fig. 4.23 及び 4.24 にはそれぞれ 75OP2-9 コンパクト (第 1 次 OGL-1) 及び 76OP4-08 コンパクト (第 2 次 OGL-1) 中の温度分布及びコンパクト内表面, 中間及び外表面付近にある被覆粒子の代表的な断面を示す。第 1 次 OGL-1 コンパクトの場合, 内表面 1356°C, 外表面 1310°C で約 46°C の温度差があるが, 研磨クラックはコンパクトの場所によらず, OLTI-PyC だけに見られる。一方, Fig. 4.24 に示す第 2 次 OGL-1 コンパクトでは, 内表面 1425°C, 外表面 1355°C で約 70°C の温度差があるが, 内表面にある被覆粒子の研磨クラックは顕著で, 被覆層を貫通したクラックさえも見られる。クラック発生は外表面へ行くほど少い。これらは研磨クラックの発生が照射温度に依存している

ことを示したものであり、また照射温度が高いほど被覆層内の応力が大きくなることを示している。特に照射温度が1400°Cを越えると研磨クラック発生は非常に顕著になる。第2次OGL-1コンパクトでは照射中での粒子破損はほとんどなかったと思われるが、今後照射量が増大するとOLTI-PyCの収縮にともなう粒子破損が起る可能性はある。

照射中の被覆粒子破損がほとんど起らなかったことについてはFPガス放出率(R/B)やTable 4.1に示す酸浸出率の測定データからも明らかである。Table 4.1に示す酸浸出の結果は他の高温ガス炉用実用燃料のデータと比較しても非常に良いことがわかる。たとえばピーチボトム炉FTE-3燃料エレメント($\phi_f = 5 \times 10^{20} \sim 6 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$, $E > 0.18 \text{ MeV}$)の照射後酸浸出率は $6 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ であり、⁽⁶⁾第1次、第2次OGL-1の値より約10倍以上大きな値を示している。またフォートセントブレイン炉の1-0743燃料エレメント($\phi_f = \sim 1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$, $E > 0.18 \text{ MeV}$)の照射後金相試験結果⁽¹⁴⁾では $2 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$ の被覆層貫通破損が生じており、多分これを酸浸出すればかなり高い浸出率を示すはずである。

(ii) 燃料コンパクト

燃料コンパクトの照射下における重要な挙動として、コンパクト寸法変化が小さいこと、ガス不純物に対する耐食性、割れや欠けなどに対する健全性などが要求される。第1次、第2次OGL-1では腐食による重量減少はまったく問題にならず、また割れや欠けといった照射欠損はみられなかった。

コンパクトの寸法変化は燃料棒内での燃料温度の評価に直接係わる重要な問題である。この寸法変化はコンパクトの製法、使用黒鉛粉、バインダーなどに依存する。Fig. 4.25には諸外国の高温ガス炉の実用燃料の寸法変化と第1次、第2次OGL-1コンパクトの寸法変化を比較したものを示す。ドラゴン燃料は針状黒鉛粉を高温硬化性レジンバインダーで成形したマトリックス⁽¹⁵⁾で、製法はOGL-1燃料コンパクトと同様にオーバコート法⁽¹⁶⁾である。AVR燃料はOGL-1燃料コンパクトと使用黒鉛粉、バインダーは似ているが、製法において前者が等方加圧による成形であるのに対し、OGL-1の場合、両押成形である。またFSV(フォートセントブレイン)やピーチボトムなどアメリカの高温ガス炉用燃料は高温軟化性ピッチバインダーと天然黒鉛粉をスラッグ状に、ダイスに充填した被覆燃料粒子間に注入する方法(hot slag injection法)を採っている。⁽⁶⁾OGL-1燃料コンパクトは使用原料などをみるとAVR燃料とほとんど同じであり、Fig. 4.25に示すように寸法収縮率においてもOGL-1燃料はAVR燃料と良く似た挙動を示している。一方、ドラゴン燃料の寸法変化挙動と比較すると、OGL-1燃料コンパクトの原料黒鉛粉は人造黒鉛(石油コークス)20%, 天然黒鉛80%であるのに対し、ドラゴン燃料は上述したように入人造黒鉛(針状黒鉛)を使用しているだけであり、製法(Overcoating法)は同じである。Fig. 4.25に見られるようにOGL-1燃料コンパクトの寸法収縮に比べるとドラゴン燃料コンパクトの収縮の方がかなり大きい。ピーチボトムとフォートセントブレイン炉燃料コンパクトの寸法変化には極端な違いが見られるが、OGL-1燃料コンパクトの寸法変化はフォートセントブレイン炉の燃料コンパクト寸法変化挙動に近いようである。このように諸外国の高温ガス炉燃料の寸法変化挙動に比べても、OGL-1燃料寸法変化はあまり大きくないと言えよう。また、この図には多目的実験炉の熱設計に使用する燃料コンパクトの寸法収縮値⁽¹⁸⁾を示すが、OGL-1燃料コンパクトで得られた寸法収縮率と比べて大きめの値を使っていると言えるが、むしろこれは安全側

の値である。

Table 4.1 に示したように、燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップは第1次 OGL-1 で最大～5%，第2次 OGL-1 で12%の増加であった。これらの測定値は燃料ピン端部の中性子フラックス量が非常に低い所での値であるが、恐らく燃料ピンの中央部ではギャップ変化率はもっと大きいものと考えなければならない。しかしピーチボトム燃料の場合、 $\sim 2.0 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ⁽¹⁰⁾ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射された FTE-4 燃料エレメントの燃料ピンギャップ⁽¹⁰⁾ は最大で27%の増加を示したが、 $\sim 2.6 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$) で照射された FTE-6 燃料エレメントの燃料ピンギャップ⁽¹⁹⁾ はむしろ減少の傾向を示しており、最大で29%も減少している。このことは照射量が大きくても、ギャップは必ずしも増加しないことを示したものであり、一定の銘柄の黒鉛スリーブに対し、定まった製法、原料で作った燃料コンパクトの照射によるギャップ変化を調べなければならない。OGL-1 燃料ピンの場合、ギャップ変化はピーチボトム燃料と比べても著しく大きく変化しているとは思われず、むしろピーチボトム燃料より小さいのではないかと推察される。第3次及び第4次 OGL-1 ではギャップ変化をさらに詳しく調べる予定である。

4.5 まとめ

第1次、第2次 OGL-1 燃料コンパクトの照射後試験を実施したが、燃料コンパクトについて以下の事が結論づけられる。

- (i) 第1次、第2次 OGL-1 燃料コンパクトの外観、内面ともに異状は認められなかった。
- (ii) これらの燃料コンパクトは照射量に依存して収縮を示したが、その収縮率は AVR 燃料と同程度のものであった。
- (iii) 第1次、第2次燃料ピン中の燃料コンパクトとスリーブの間のギャップは最大 5% (第1次)、12% (第2次) の増加を示した。
- (iv) 燃料コンパクトの重量は $\pm 0.1\%$ 以内で変化はなかった。
- (v) 金相検査では被覆粒子の OLTI-PyC に放射状のクラックが見られた。特にこのクラックは第1次 OGL-1 燃料コンパクト粒子に顕著にあらわれたが、これは照射による内部応力が蓄積され、研磨中に発生したものと考えられる。
- (vi) 被覆粒子内ではバッファー層収縮にともなう ILTI-PyC からの剥離がみられた。
- (vii) アメーバ効果発生は認められなかった。
- (viii) 電解酸浸出によるウラン浸出率は 5×10^{-5} 以下であり、コンパクト内で 1 粒子の破損の可能性はあるが、非常に良好な照射健全性を示したと言える。
- (ix) コンパクト内の FP インベントリーでは、測定した 5 核種の中で、Cs-134 を除く他の FP は中性子照射量に依存した生成を示したが、Cs-134 は Cs-133 からの生成のため、異った生成挙動を示した。

(福田記)

参考文献

- (1) 小野寺一幸, 馬場一治, 本間建三, "OGL-1 静特性計算プログラム STEPDSP 2"
(未公開資料)
- (2) 園部清美, 高橋五志生, 他, 私信。
- (3) 湊和生, 小川徹, XMA 測定 (1983)。
- (4) F.J. Homan, E.L. Long, Jr., et al., ORNL-5115 (1976).
- (5) 福田幸朔, 鹿志村悟, 岩本多実, 井川勝市, "被覆燃料粒子の照射挙動試験(Ⅲ) (72F-6A 及び 72F-7A キャプセルによる JMTR 照射)", JAERI-M 8949 (1980).
- (6) C.F. Wallroth, N.L. Baldwin, et al., GA-A 13004 (1974).
- (7) R. Bullock., Nucl. Technol., 52, 246 (1980).
- (8) T.N. Tiegs and E.L. Long, Jr., ORNL-5422 (1978) p25.
- (9) 伊藤忠春, 私信
- (10) C.F. Wallroth, J.F. Holzgraf, et al., GA-A 13452 (1977).
- (11) W.H. Pechin, W.J. Lackey, et al., ORNL-5165 (1977).
- (12) H.A. Schulze, JUL-1347 (1976)
- (13) D.P. Harmon and C.B. Scott, Nucl. Technol., 35, 343 (1977).
- (14) J.J. Saurwein, C.M. Miller and C.A. Young, GA-A16258 (1981).
- (15) M.R. Everett, L.W. Graham and F. Ridealgh, "Graphite structures for Nuclear Reactors", conference originated by the Nuclear Energy Group of the Institution of Mechanical Engineers. (London) 7-9 March, 1972.
- (16) M. Hrovat, H. Nickel and K. Koizlik, Jü1-969-Rw (1973).
- (17) E. Balthesen and H. Ragoss, "Physical Metallurgy of Reactor Fuel Elements", Proceedings of an International conference, Berkeley Castle, 2-7 Sept., 1973.
- (18) 荒井長利, 私信
- (19) C.F. Wallroth, J.F. Holzgraf and D.D. Jensen, GA-A 13943 (1977).

謝 辞

一連のOGL-1照射は、JMTR照射1課、2課、3課、ホットラボ、計画課、東海ホットラボ及び工作課に所属する多数の方々の献身的努力によって進められているものである。また、下川純一前燃料工学部長には、終始絶大なご支援とご指導をいただいた。これらの方々に対し、著者一同、深く感謝の意を表す。

Table 4.2 Results of post-irradiation acid-leaching experiment.

	compact	1/(number of particles)	uranium leaching fraction
1st OGL-1	750P2-1(1-201)	6.7×10^{-5}	2.5×10^{-7}
	750P3-1(1-210)	6.5×10^{-5}	3.6×10^{-5}
	750P3-9(1-218)	6.5×10^{-5}	4.3×10^{-5}
2nd OGL-1	760P2-10(2-201)	8.1×10^{-5}	4.0×10^{-5}
	760P4-9(2-209)	8.5×10^{-5}	1.0×10^{-6}
	760P3-7(2-220)	8.6×10^{-5}	$2.2 \times 10^{-6} (*)$

* BOL leaching-fraction is 2×10^{-6} .

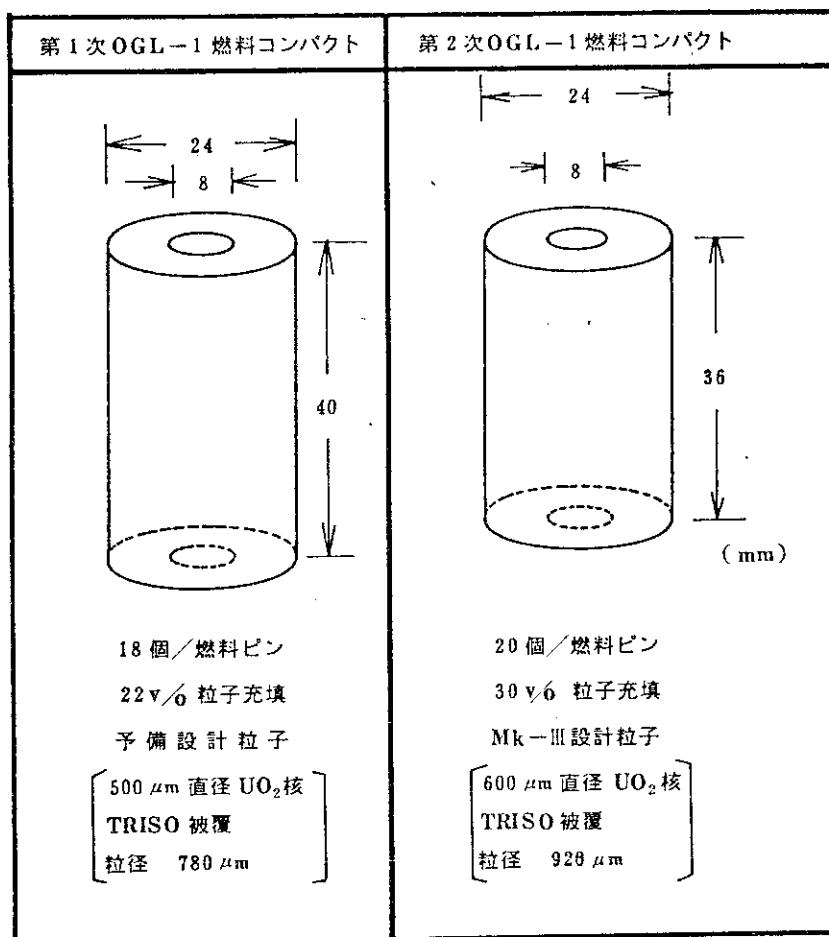


Fig.4.1 Specifications of fuel compacts used for 1st and 2nd OGL-1 Experiments

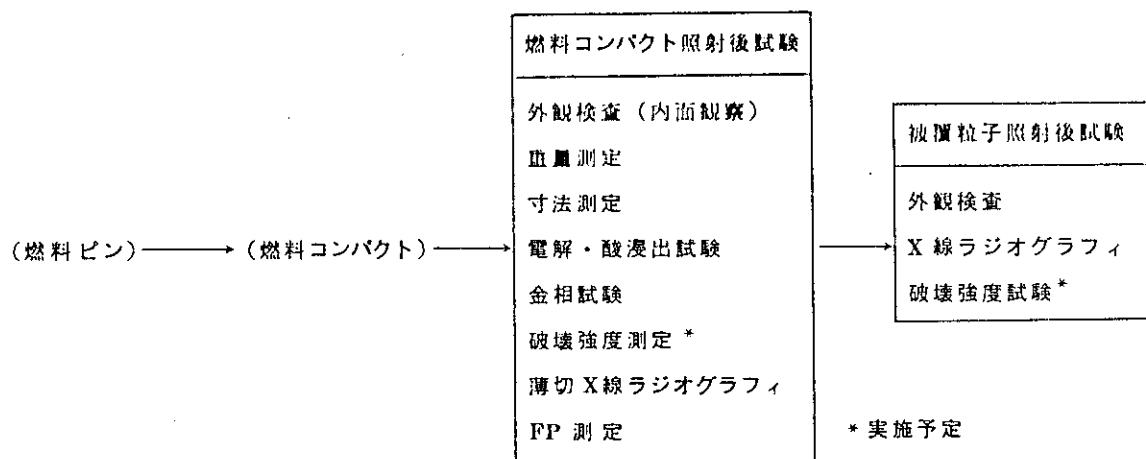
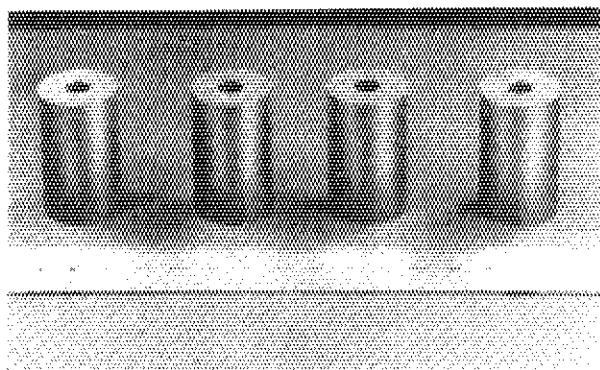
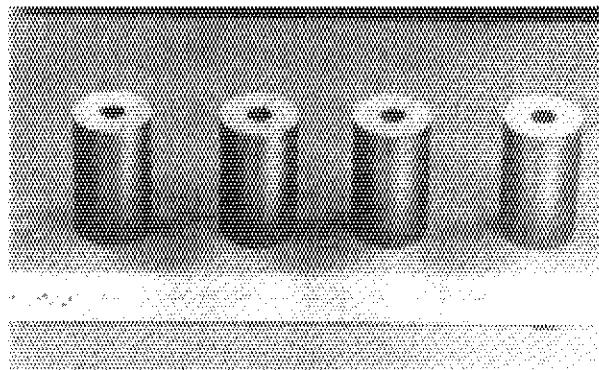


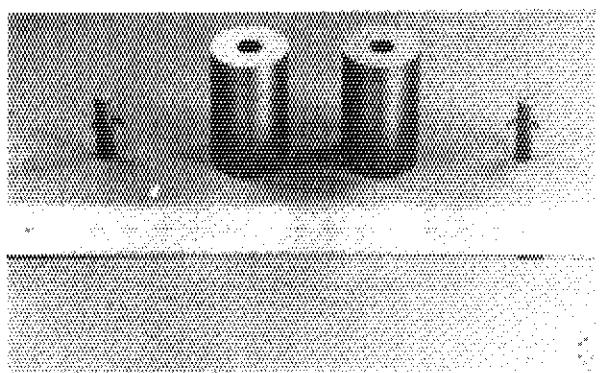
Fig.4.2 PIE procedure for 1st- and 2nd-OGL-1 fuel compacts



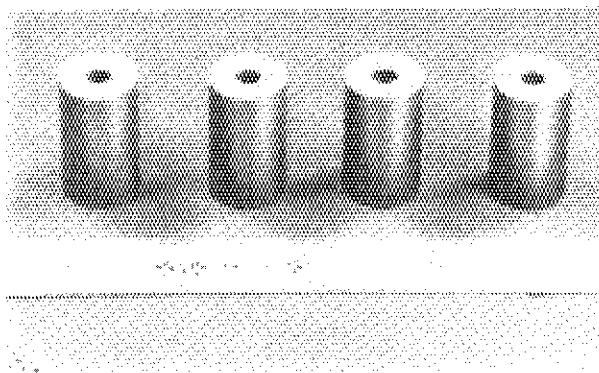
750P1-1(left)~750P1-4(right)



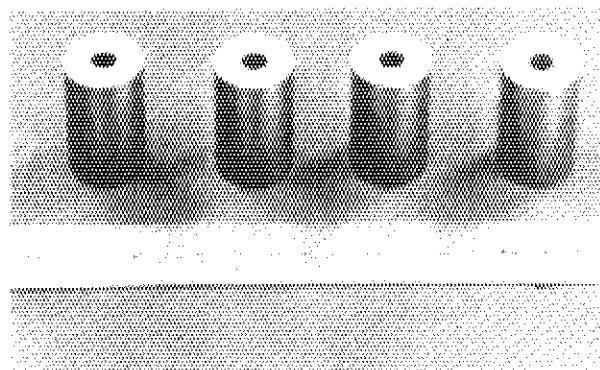
750P1-5(left)~750P1-8(right)



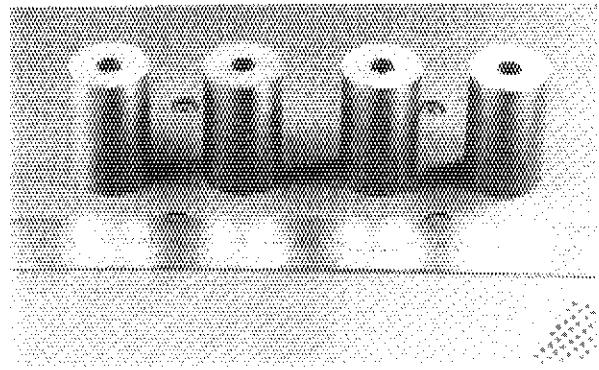
750P1-9(left) and 750P1-10



750P1-11(left)~750P1-14(right)

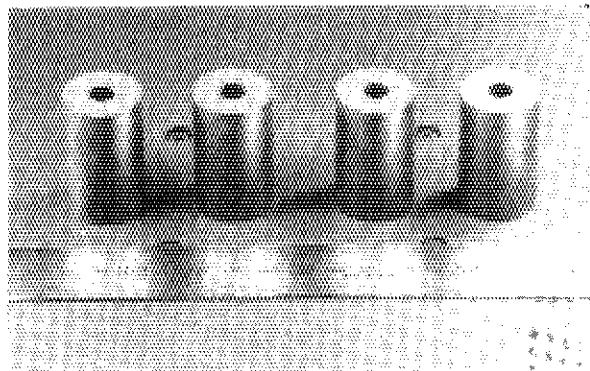


750P1-15(left)~750P1-18(right)

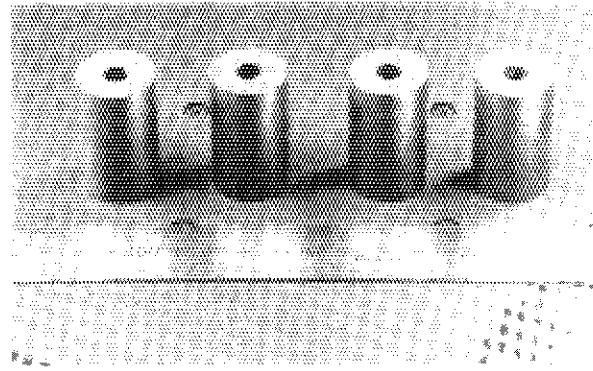


750P2-1(left)~750P2-4(right)

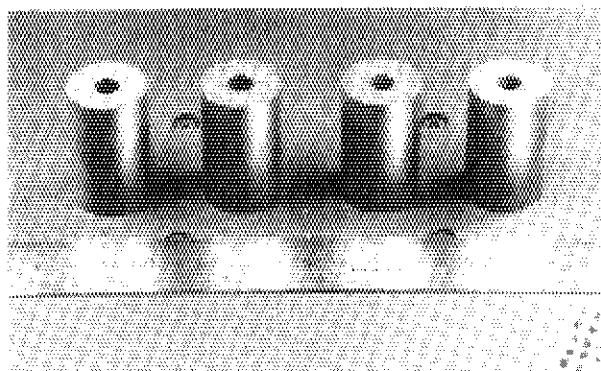
Fig. 4.3(1) Post-irradiation appearance of 1st OGL-1 fuel compacts.



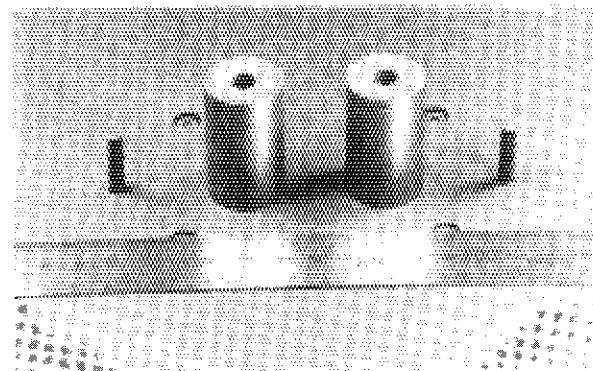
750P2-5(left)~750P2-8(right)



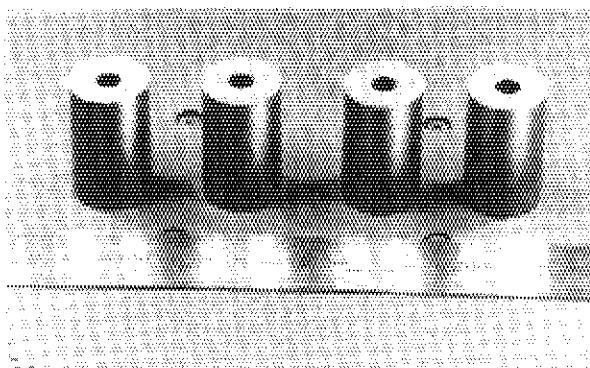
750P2-9(left)~750P2-12(right)



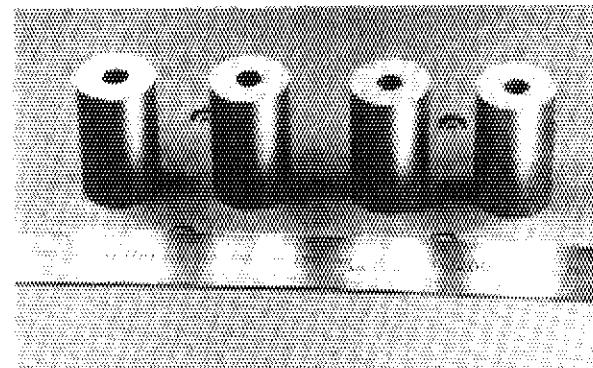
750P2-13(left)~750P2-16(right)



750P2-17(left) and 750P2-18

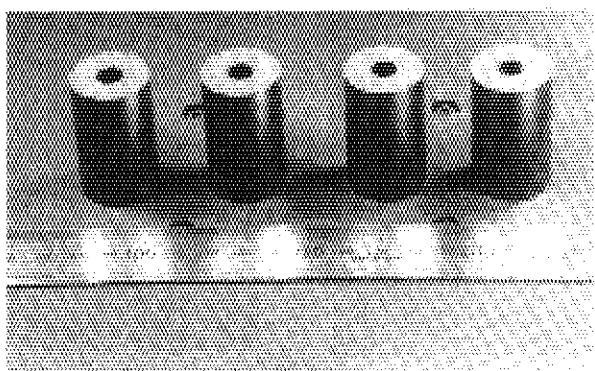


750P3-1(left)~750P3-4(right)

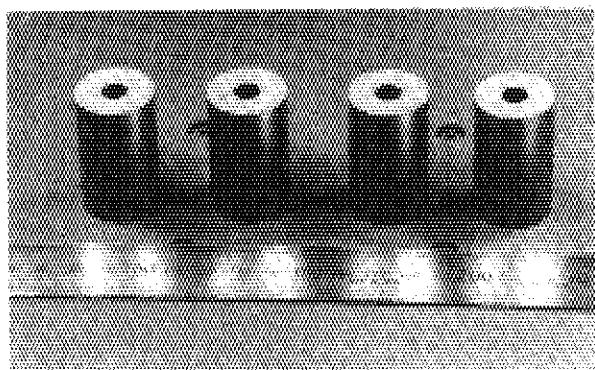


750P3-5(left)~750P3-8(right)

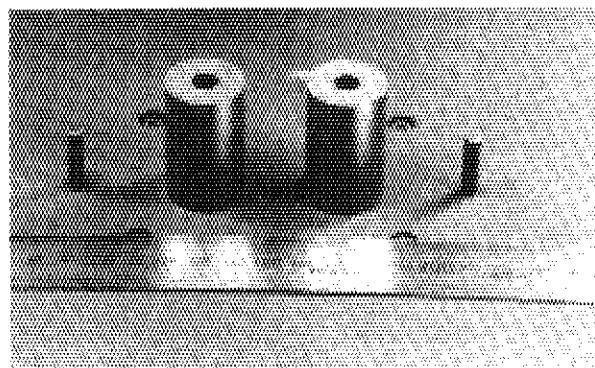
Fig. 4.3(2) Post-irradiation appearance of 1st OGL-1 fuel compacts.



750P3-9(left)~750P3-12(right)

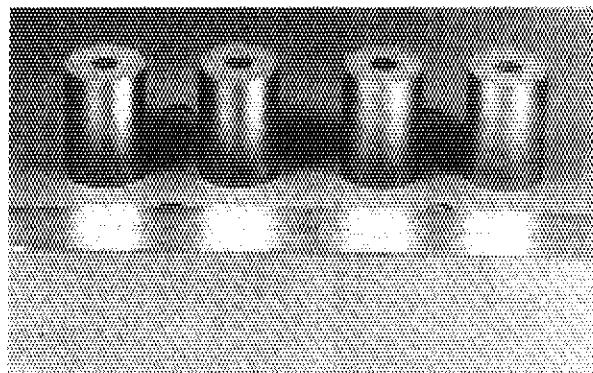


750P3-13(left)~750P3-16(right)

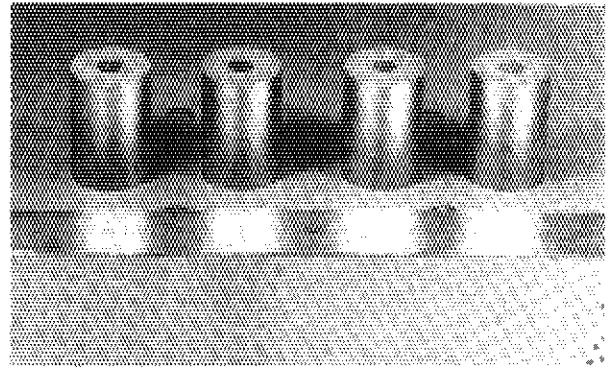


750P3-17(left) and 750P3-18

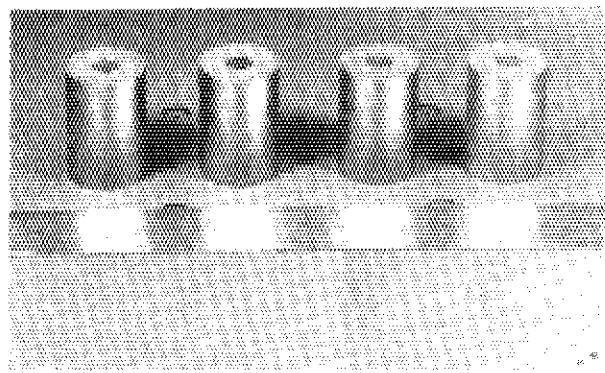
Fig. 4.3(3) Post-irradiation appearance of 1st OGL-1 fuel compacts.



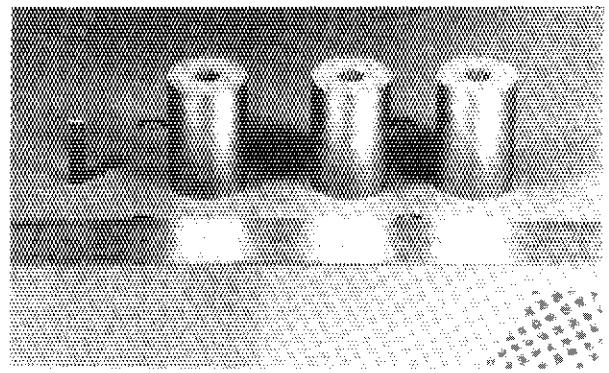
760P2-1(left)~760P2-4(right)



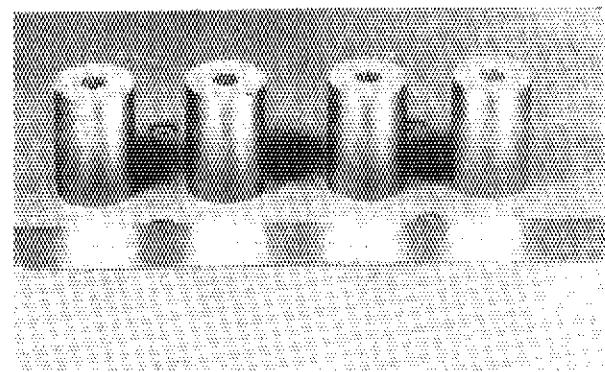
760P2-5(left)~760P2-8(right)



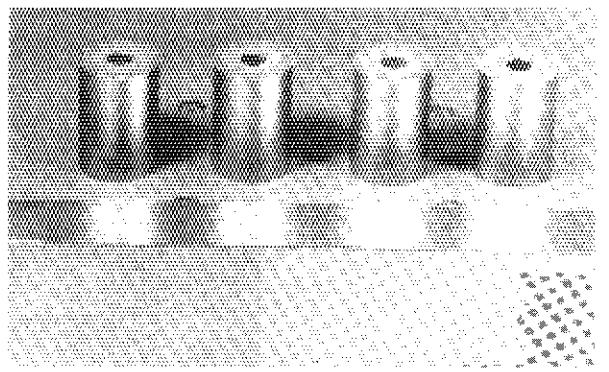
760P2-9(left)~760P2-12(right)



760P2-13(left)~760P2-15(right)

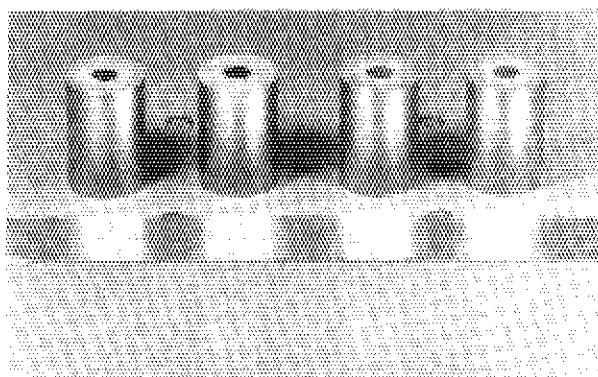


760P3-2(left)~760P3-5(right)

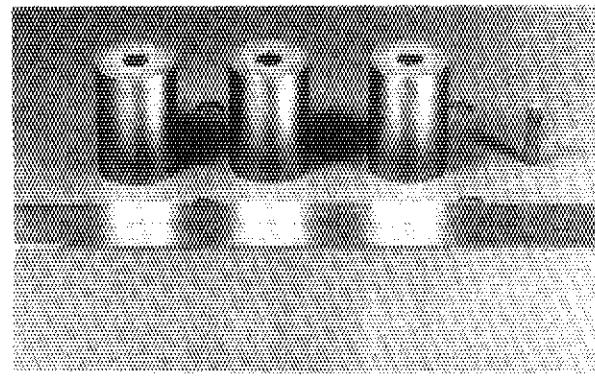


760P3-6(left)~760P3-9(right)

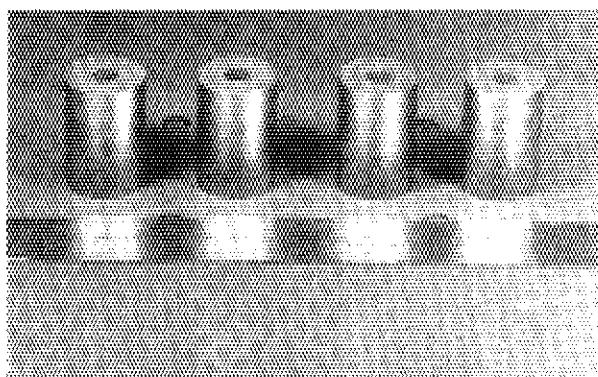
Fig. 4 4(1) Post-irradiation appearance of 2nd OGL-1 fuel compacts.



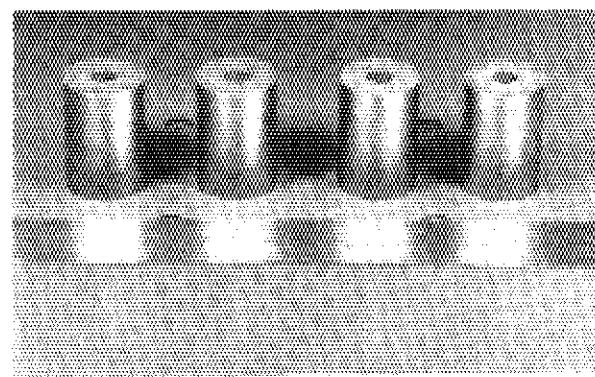
760P3-10(left)~760P3-13(right)



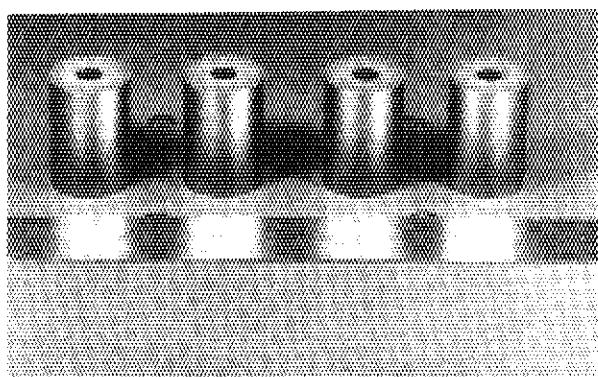
760P3-14(left)~760P3-16(right)



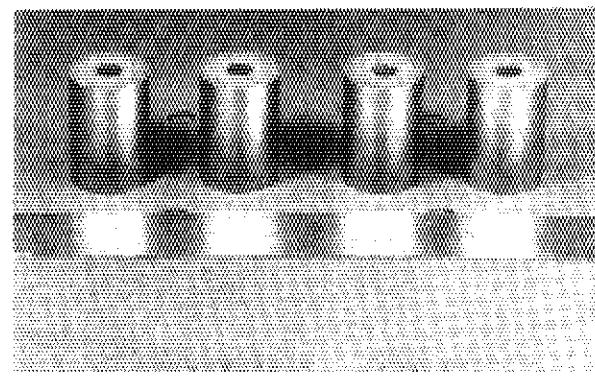
760P4-1(left)~760P4-4(right)



760P4-5(left)~760P4-8(right)

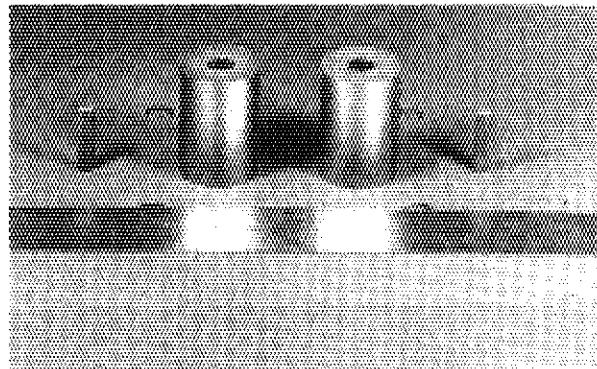


760P4-9(left)~760P4-12(left)

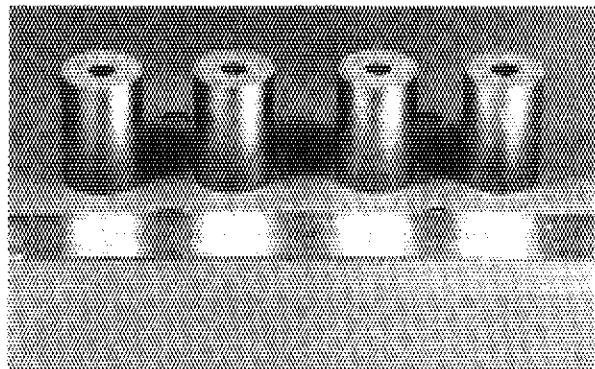


760P4-13(left)~760P4-16(right)

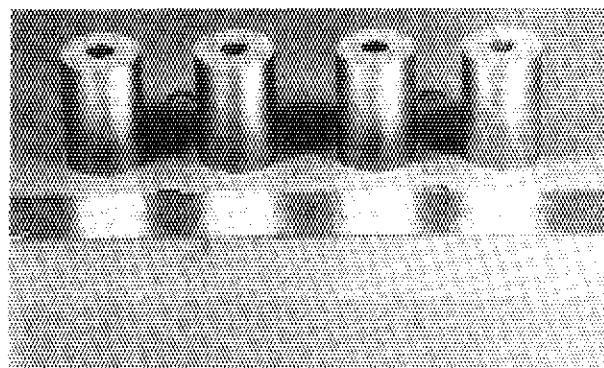
Fig 4.4(2) Post-irradiation appearance of 2nd-OGL-1 fuel compacts.



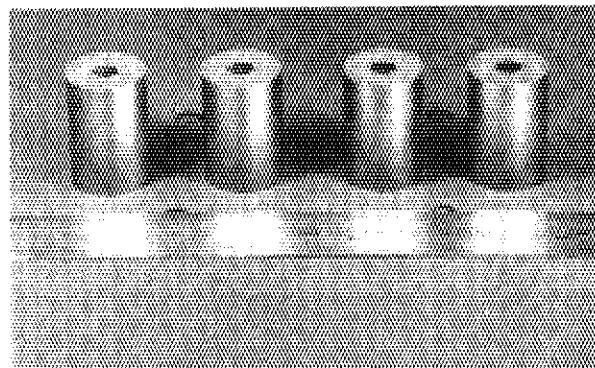
760P4-17(left) and 760P4-18



760P5-1(left)~760P5-4(right)



760P5-5(left)~760P5-8(right)



760P5-9(left)~760P5-12(right)

Fig. 4.4(3) Post-irradiation appearance of 2nd OGL-1 fuel compacts.

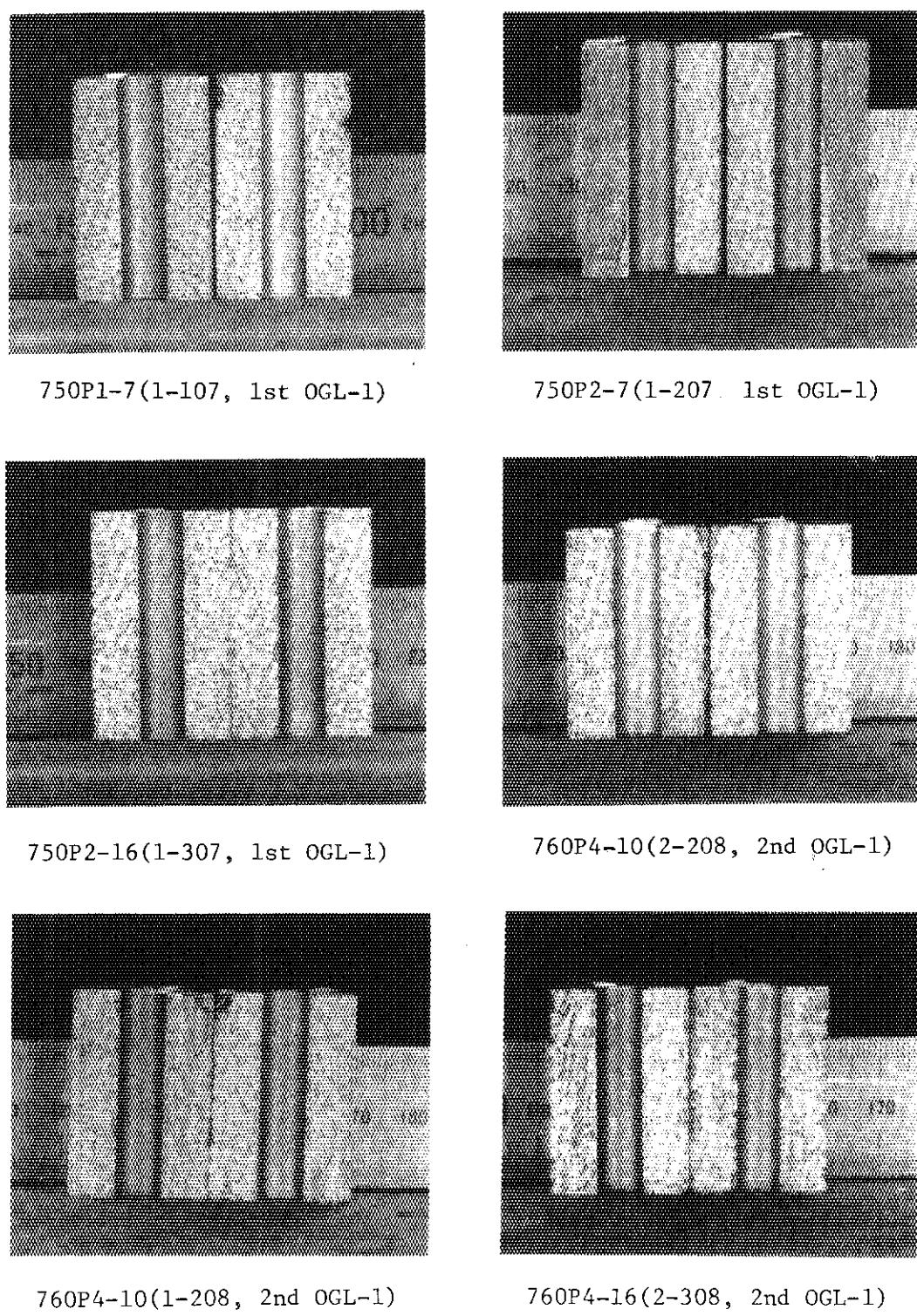


Fig. 4.5 Post-irradiation appearance of inner surface of selected fuel compacts.

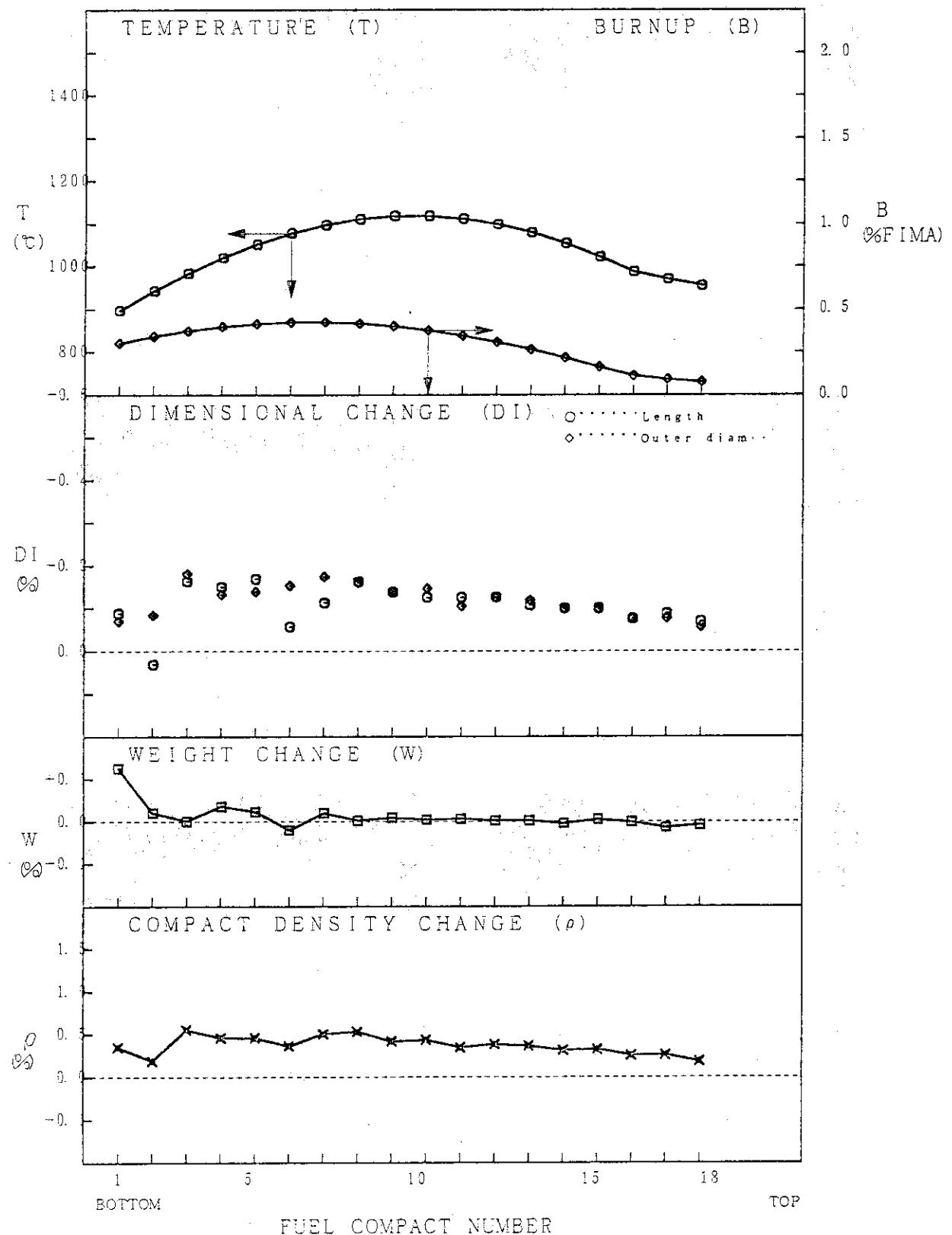


Fig. 4.6(1) Property changes of 1st OGL-1 fuel compacts
(No. 1 fuel pin)

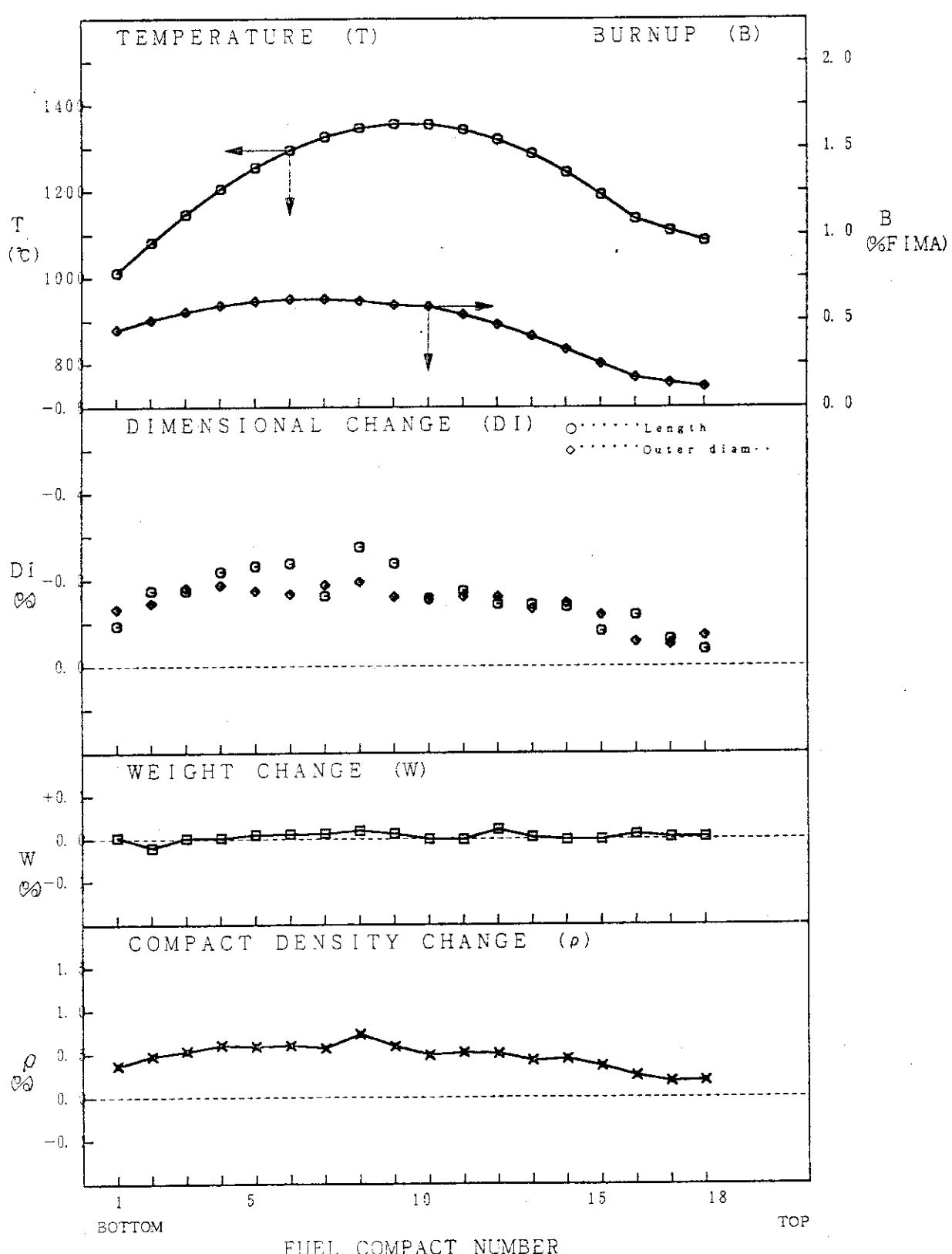


Fig.4.6(2) Property changes of 1st OGL-1 fuel compacts
(No. 2 fuel pin)

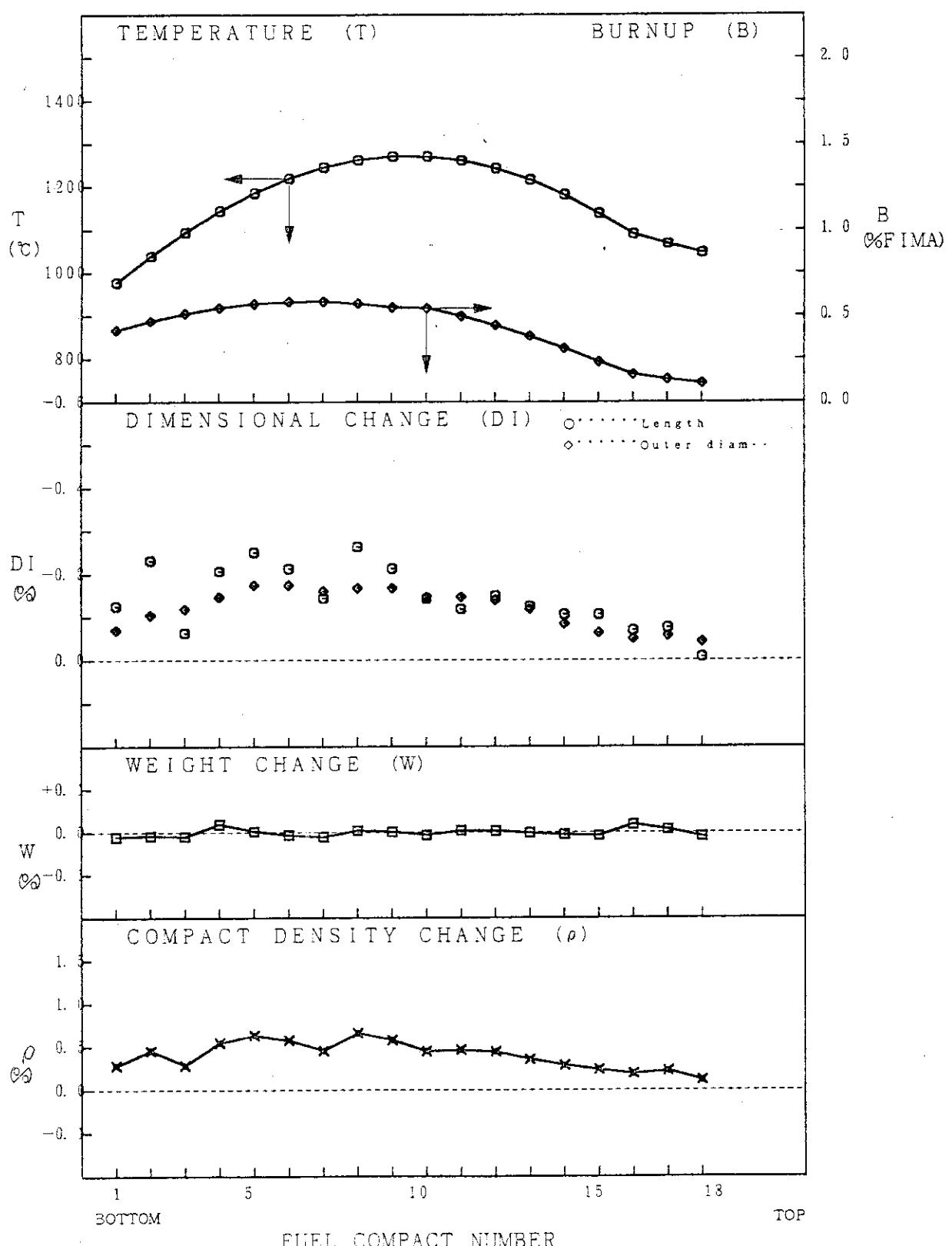


Fig.4.6(3) Property changes of 1st OGL-1 fuel compacts
(No. 3 fuel pin)

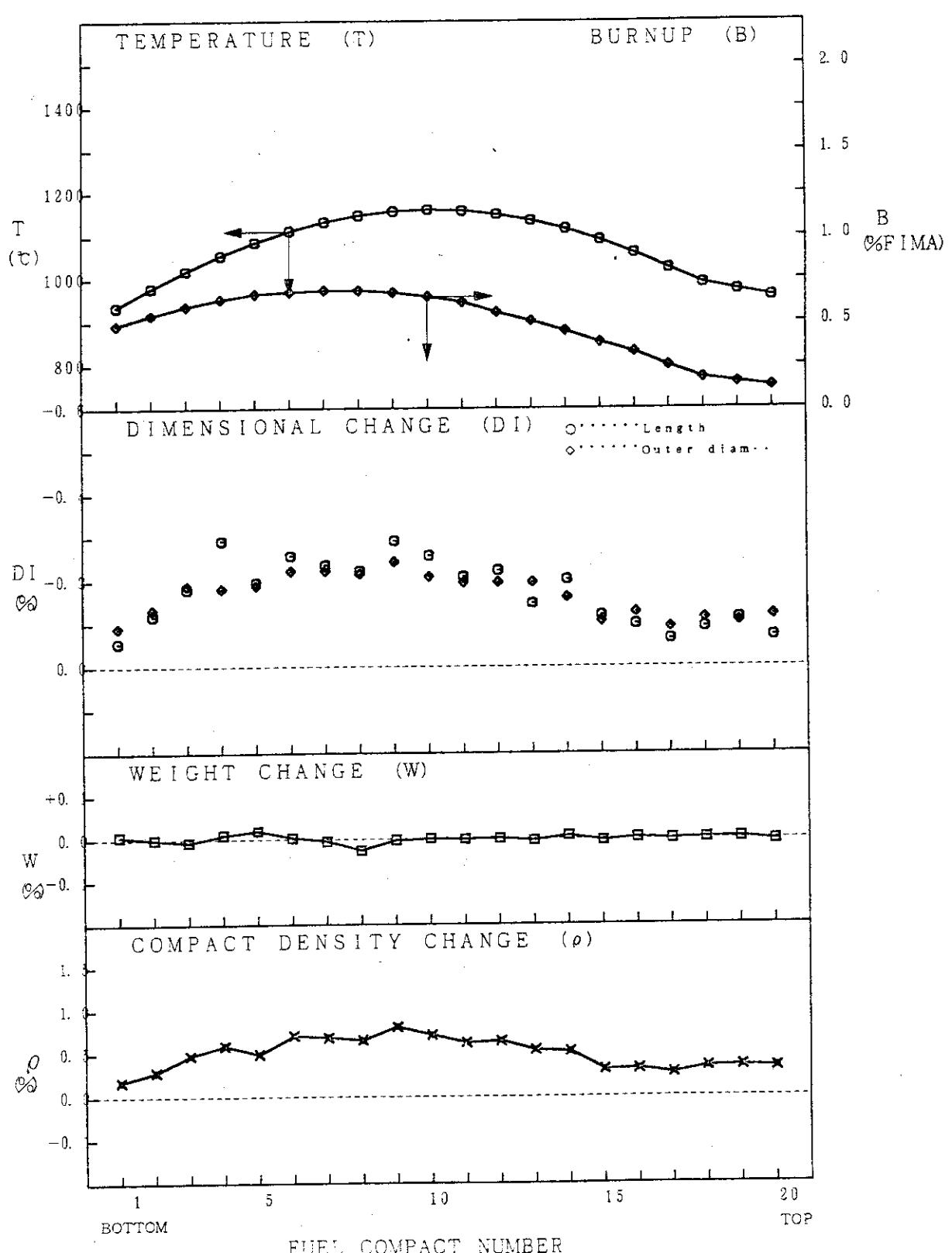


Fig.4.7(1) Property changes of 2nd OGL-1 fuel compacts
(No. 1 fuel pin)

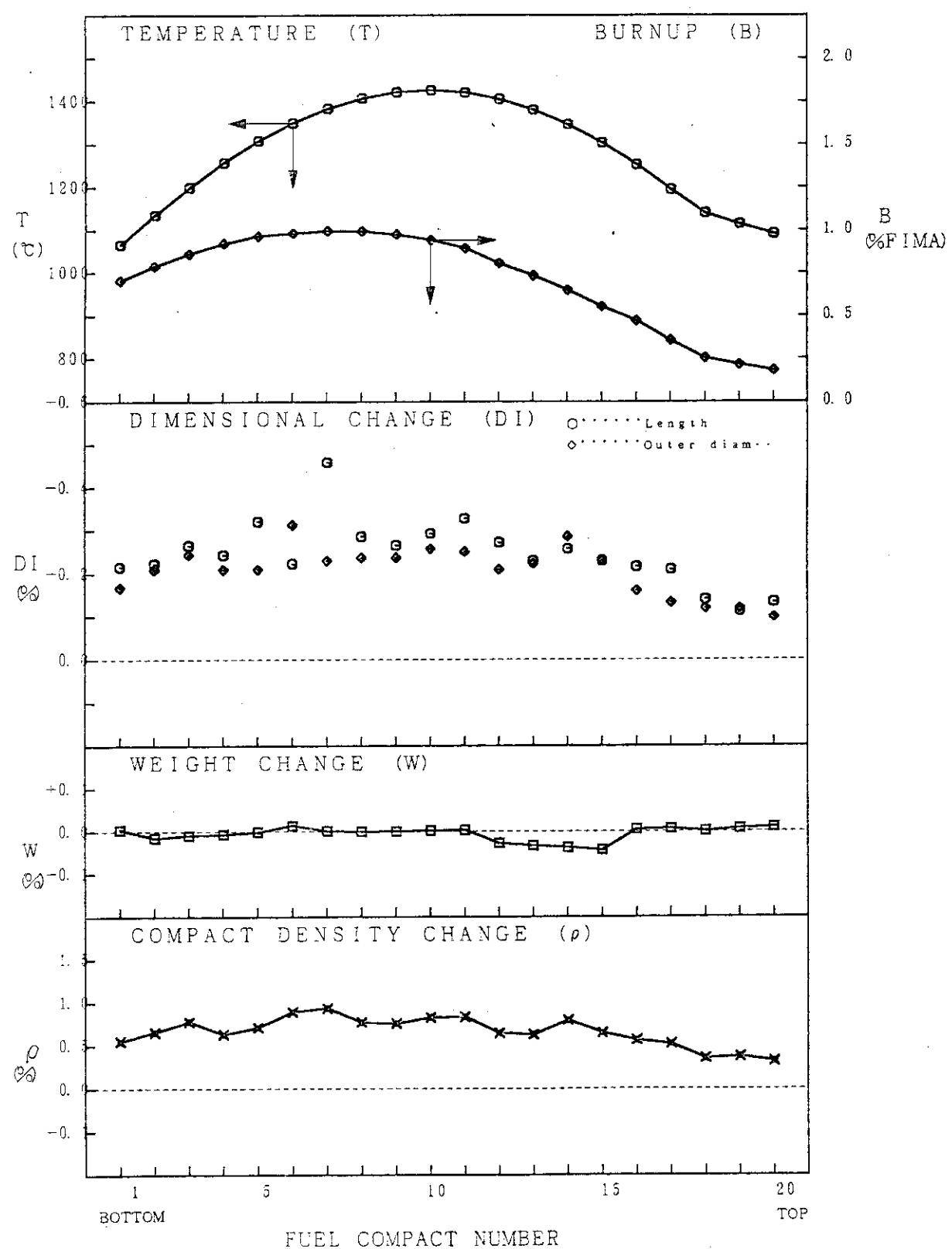


Fig.4.7(2) Property changes of 2nd OGL-1 fuel compacts
(No. 2 fuel pin)

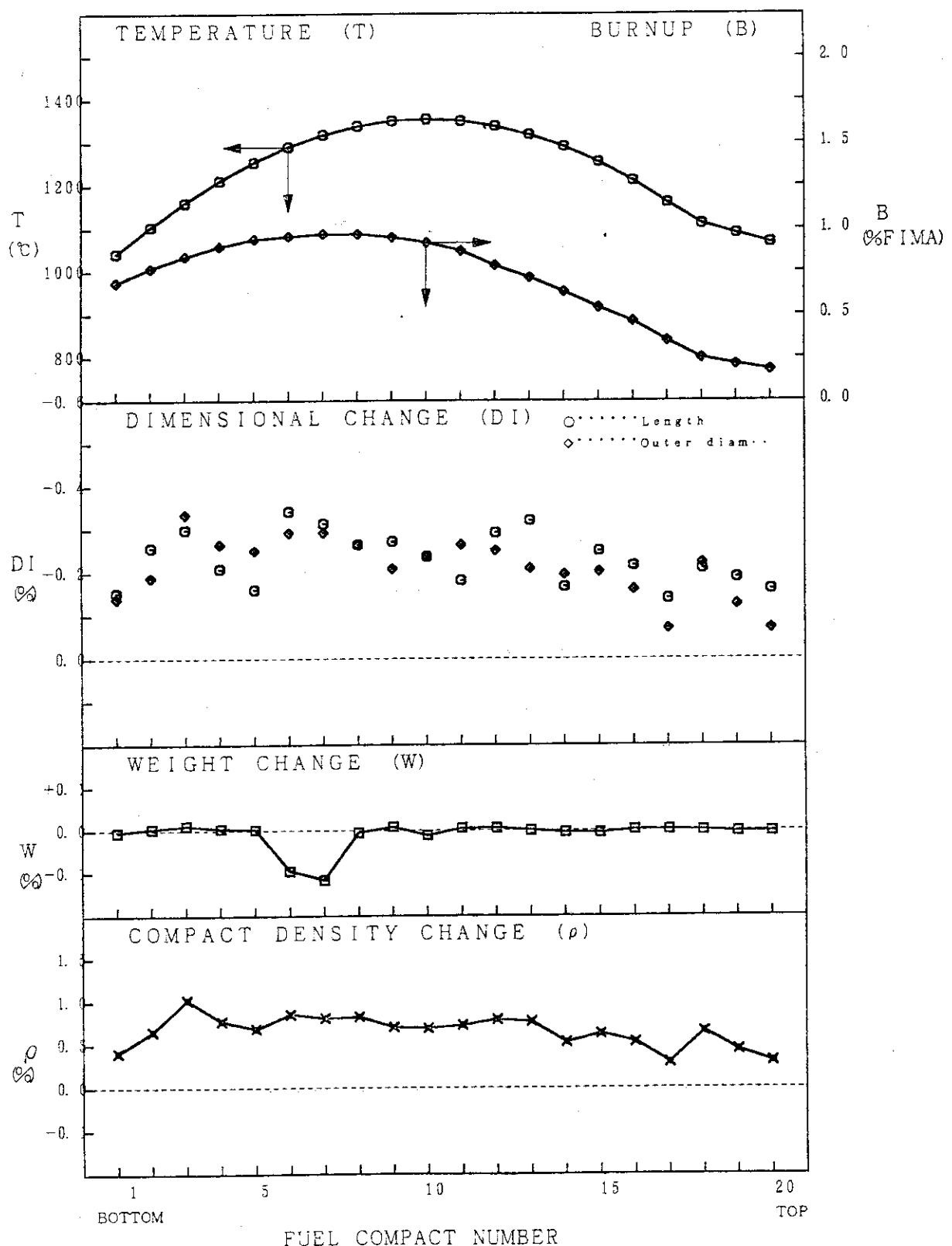


Fig.4.7(3) Property changes of 2nd OGL-1 fuel compacts
(No. 3 fuel pin)

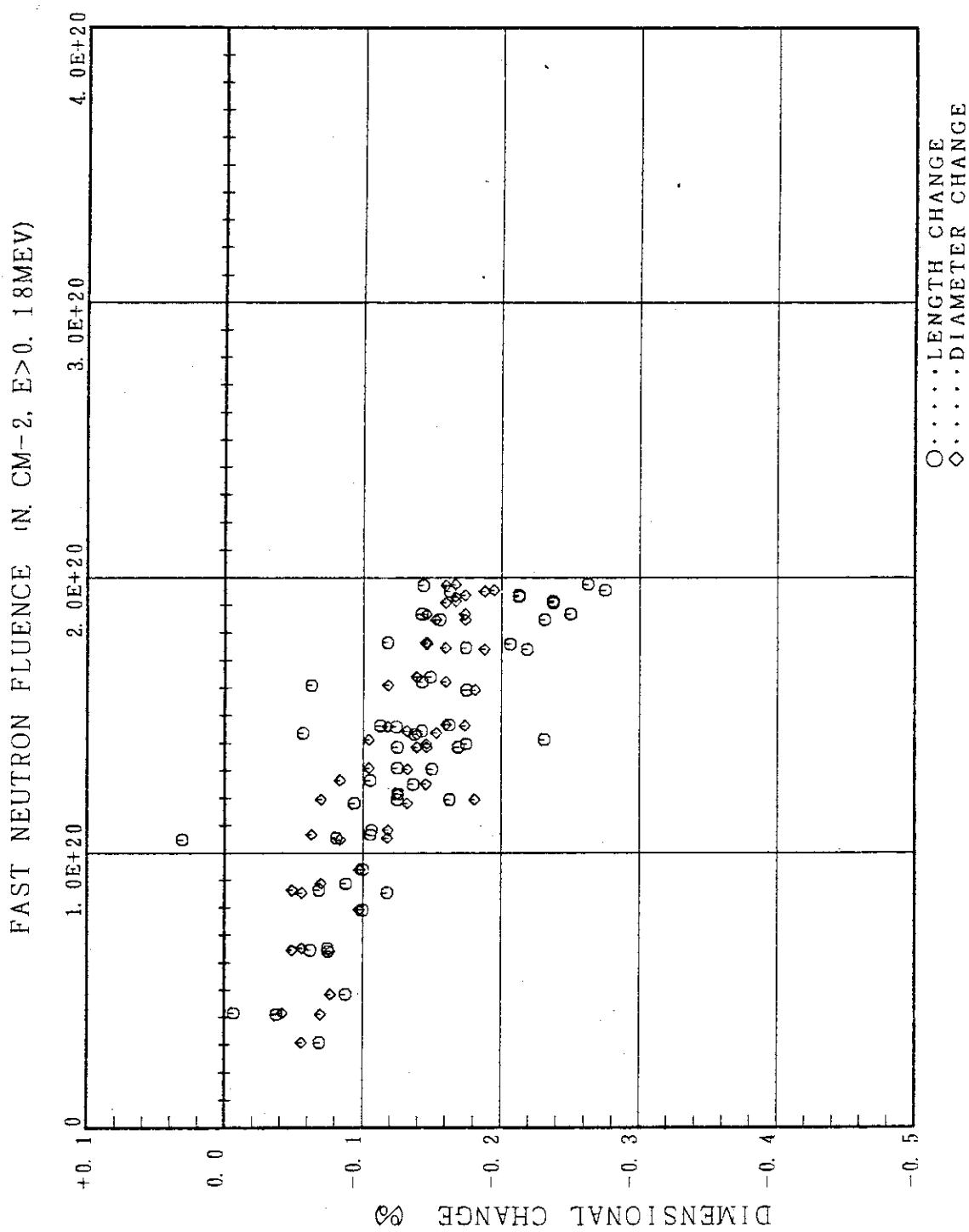


Fig.4.8 Dimensional change of 1st OGL-1 fuel compacts

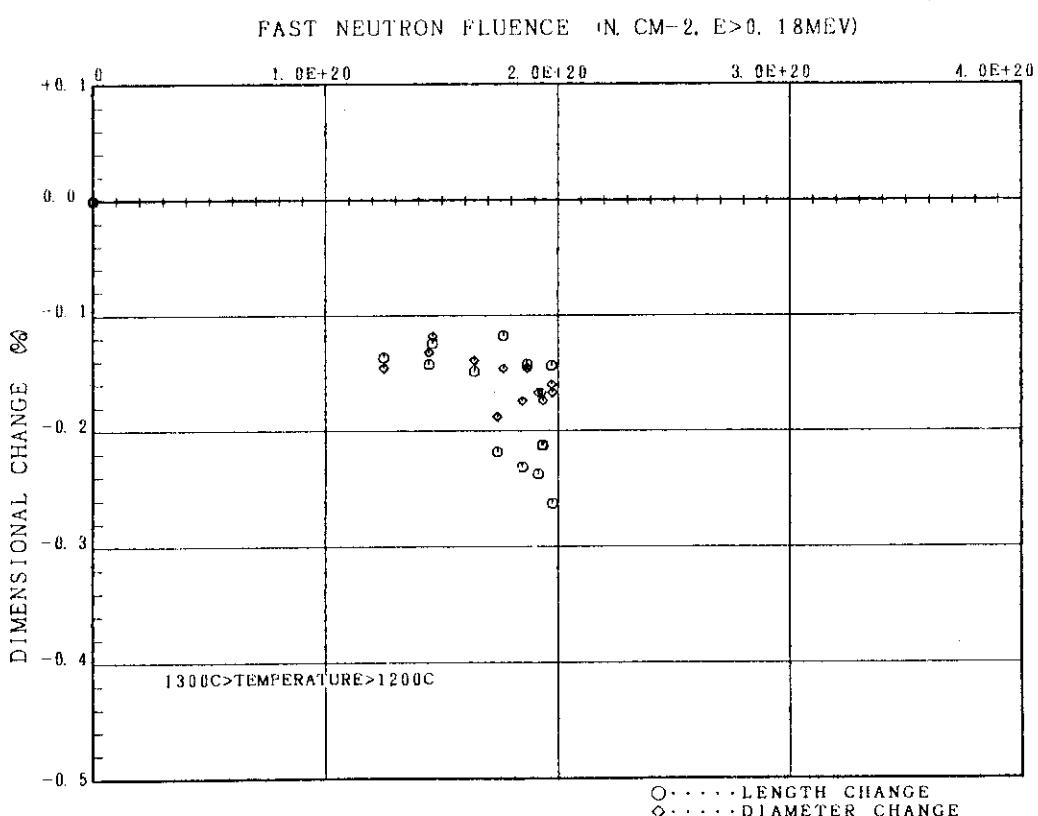
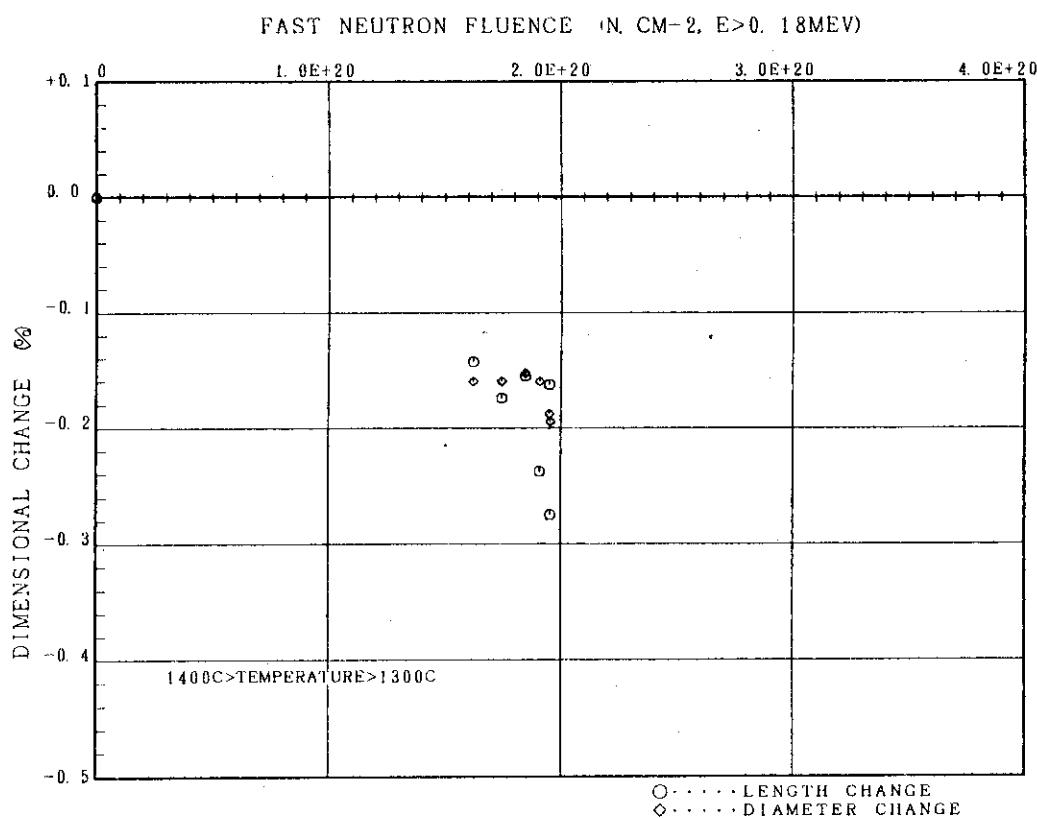


Fig.4.9(1) Dimensional change of 1st OGL-1 fuel compacts, classified into irr. temp. range

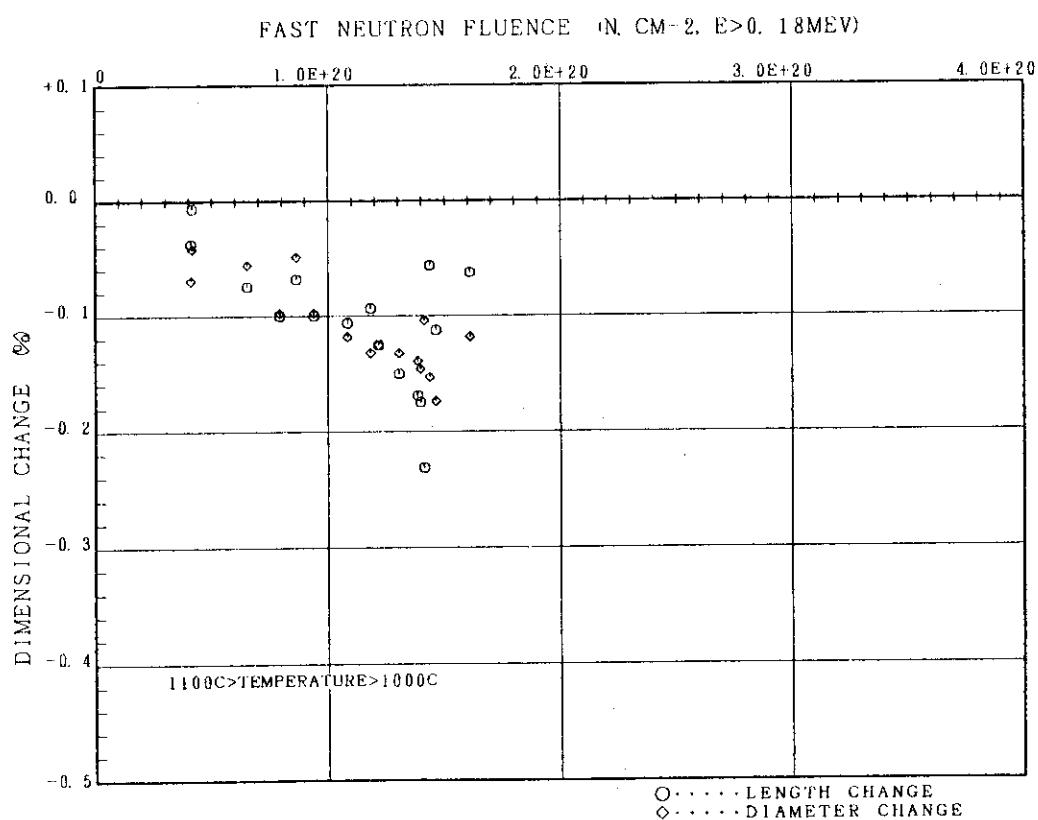
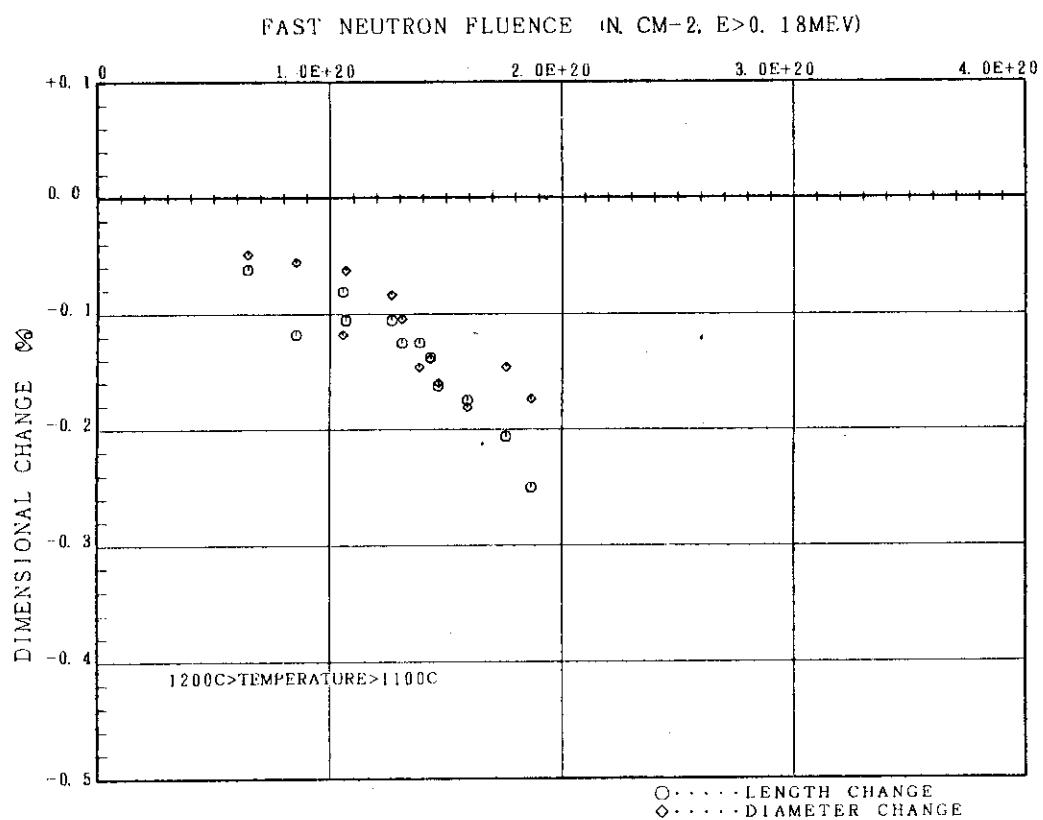


Fig.4.9(2) Dimensional change of 1st OGL-1 fuel compacts, classified into irrad. temperature-range

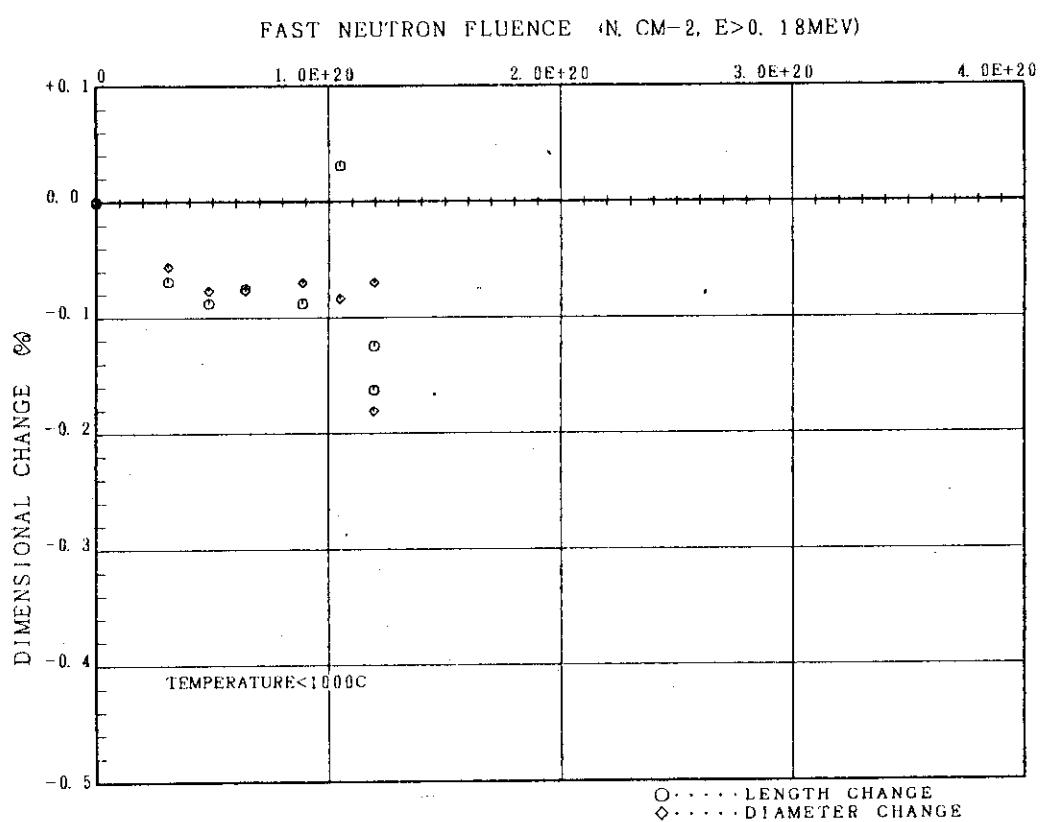


Fig.4.9(3) Dimensional change of 1st OGL-1 fuel compacts, classified into irrad. temperature-range

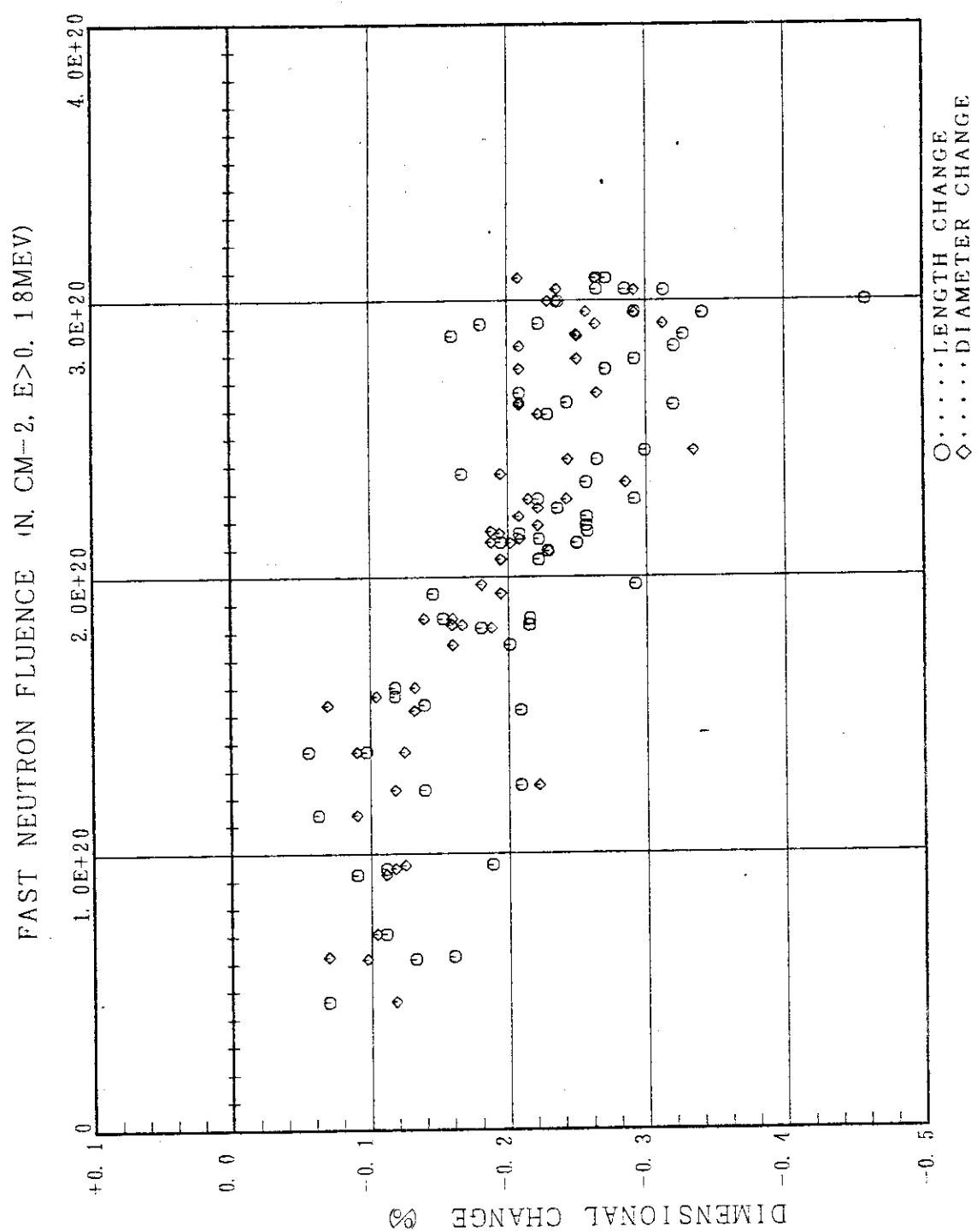


Fig.4.10 Dimensional change of 2nd OGL-1 fuel compacts

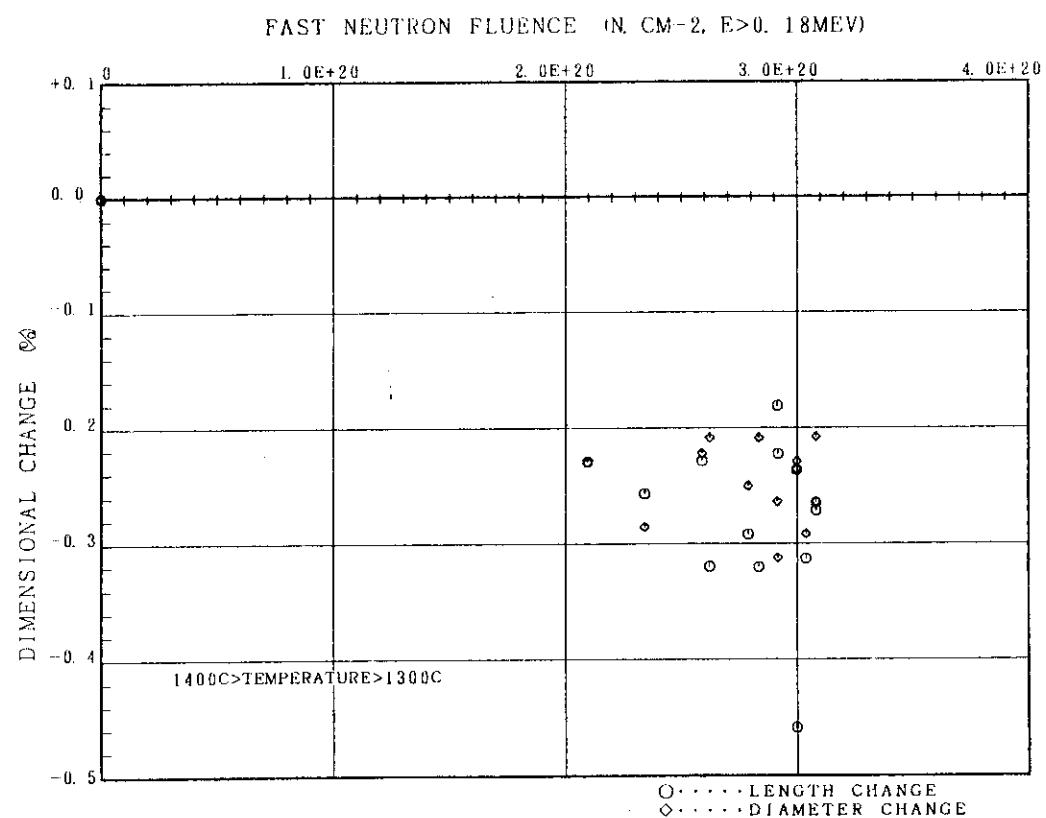
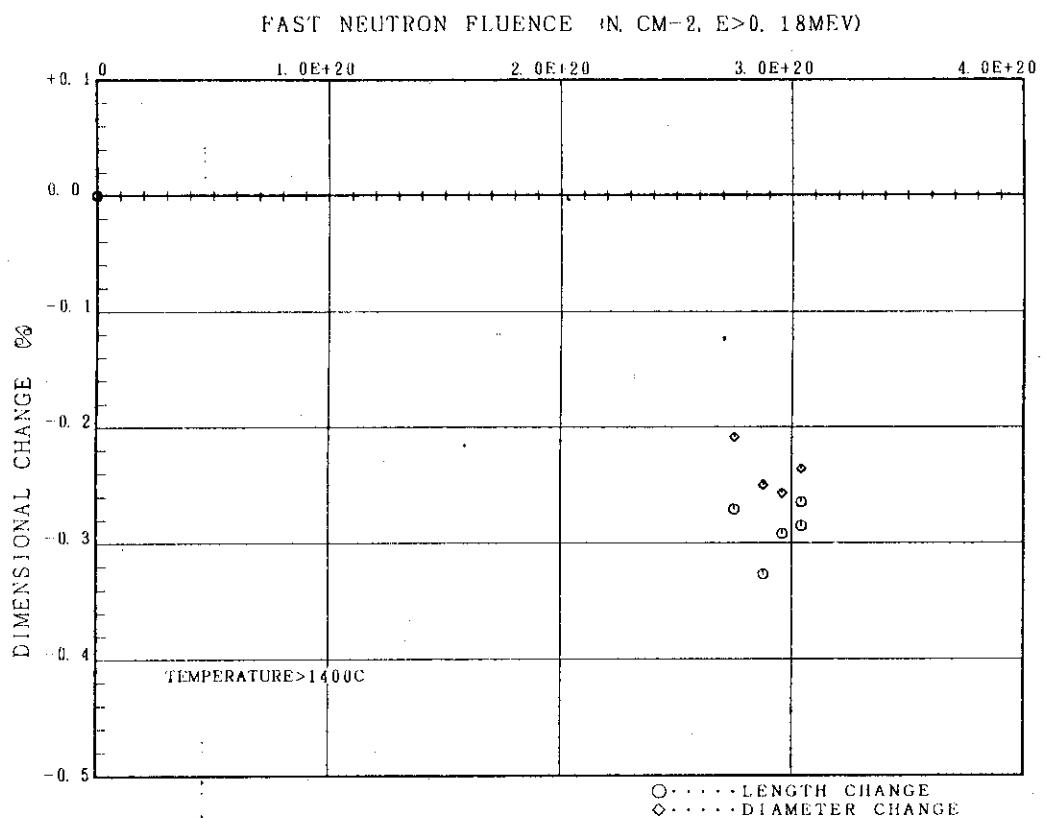


Fig.4.11(1) Dimensional change of 2nd OGL-1 fuel compacts, classified into irrad. temperature-range

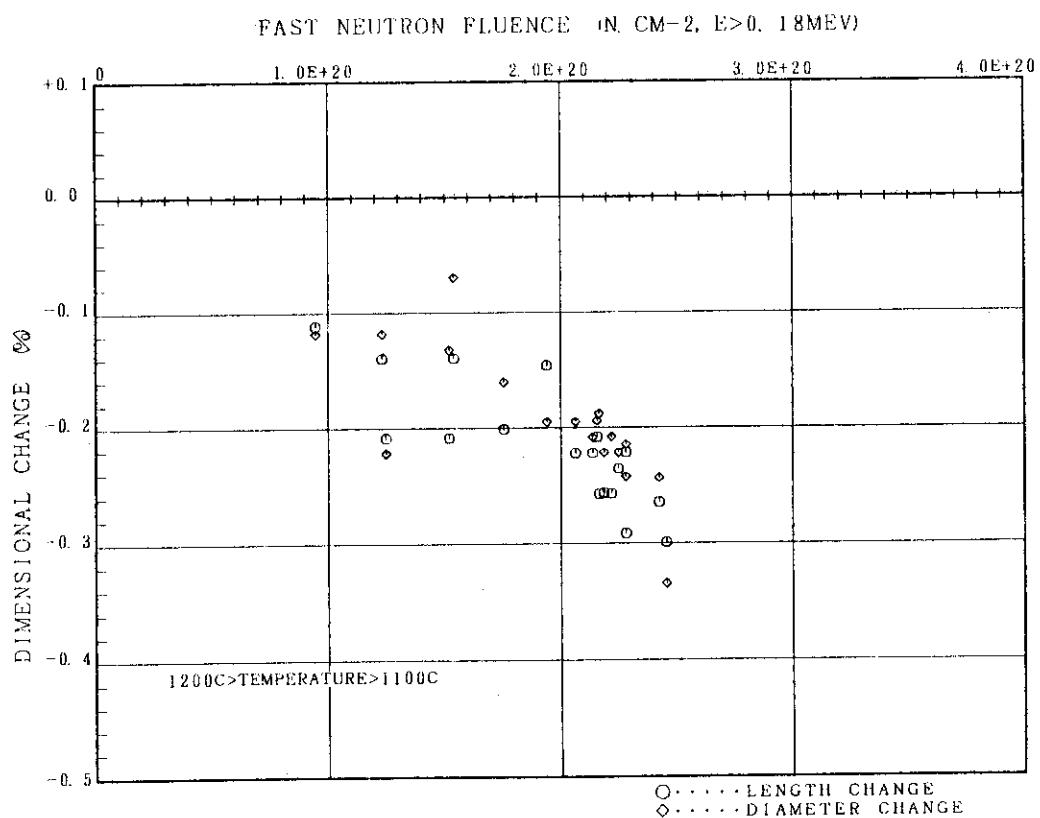
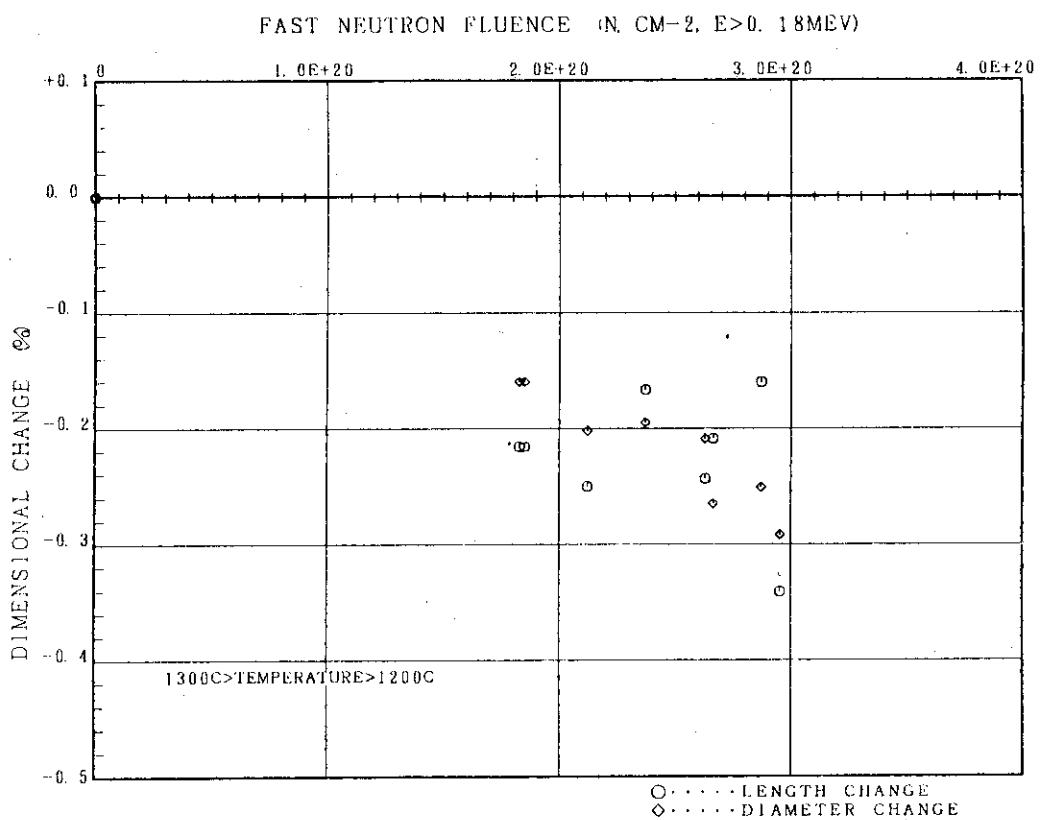


Fig.4.11(2) Dimensional change of 2nd OGL-1 fuel compacts, classified into irrad. temperature-range

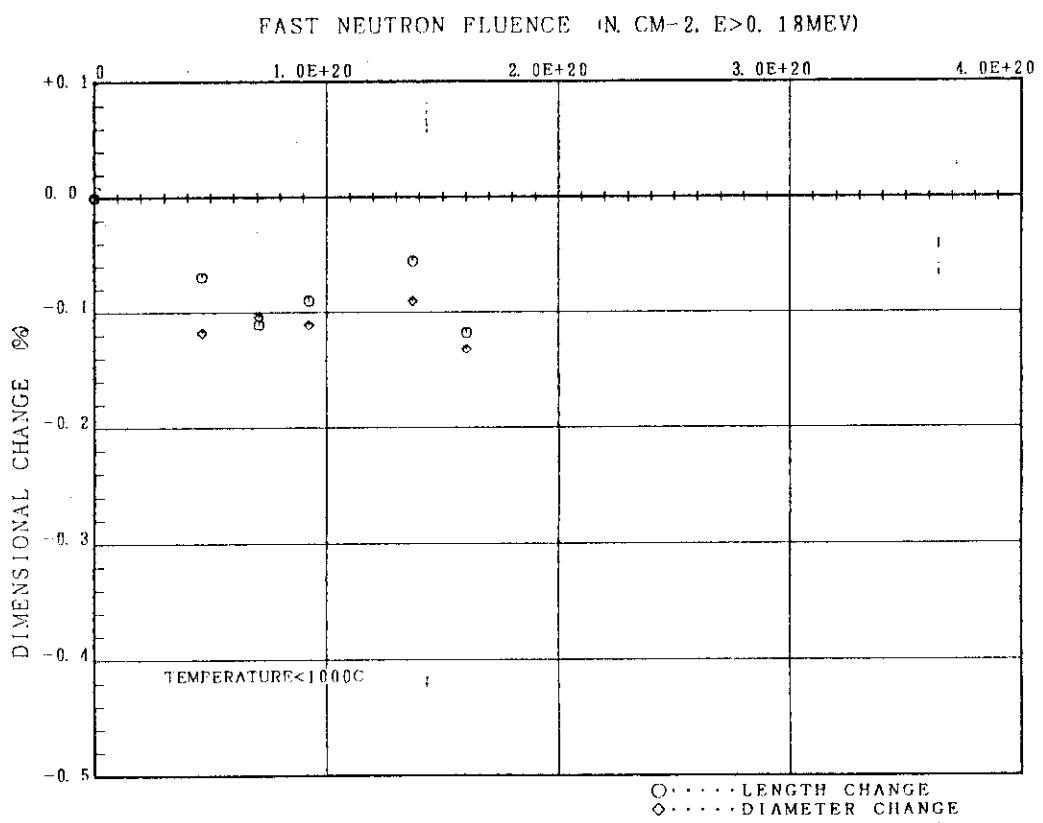
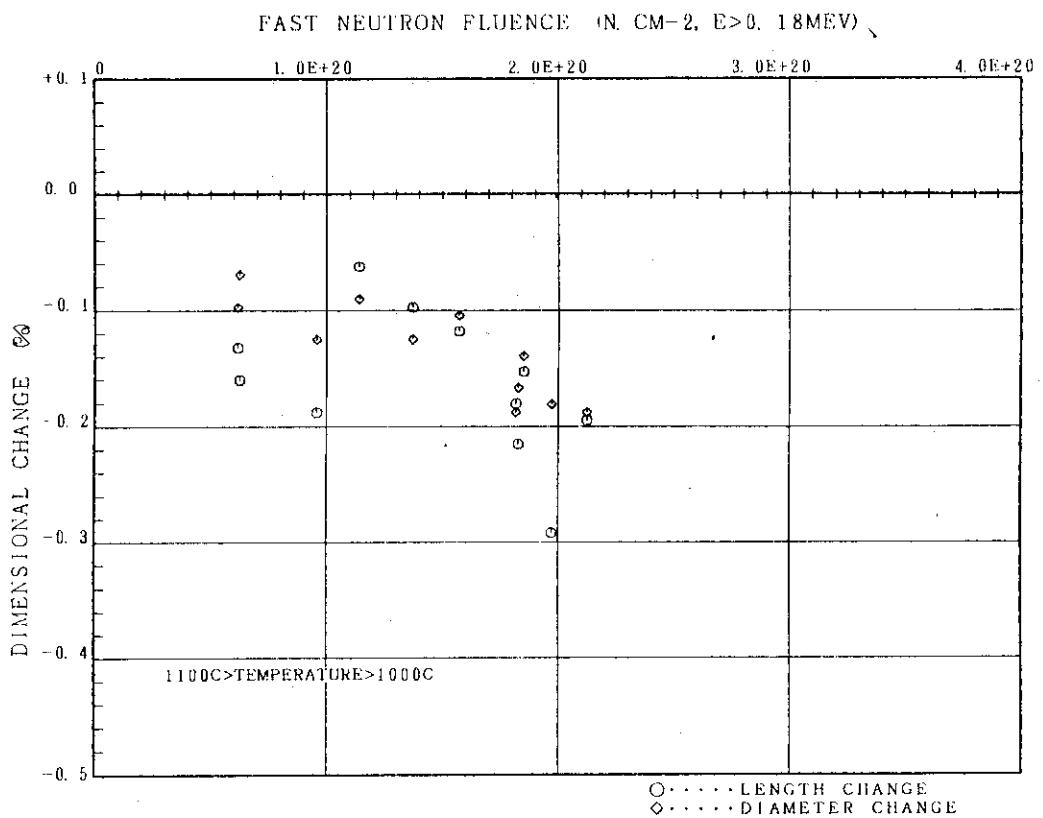


Fig.4.11(3) Dimensional change of 2nd OGL-1 fuel compacts, classified into irrad. temperature-range

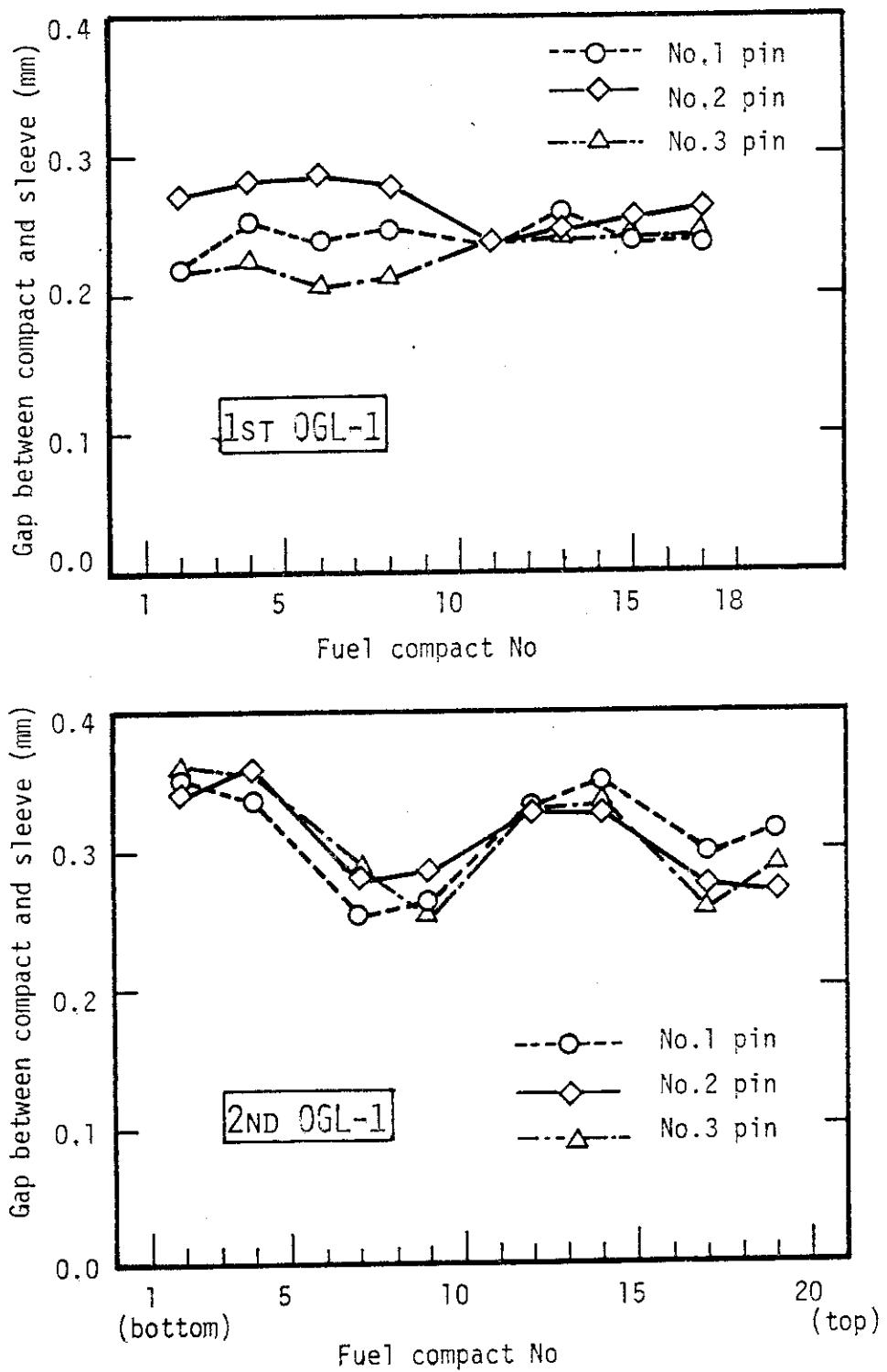


Fig. 4.12 EOL gap-profiles through fuel-pin axis.

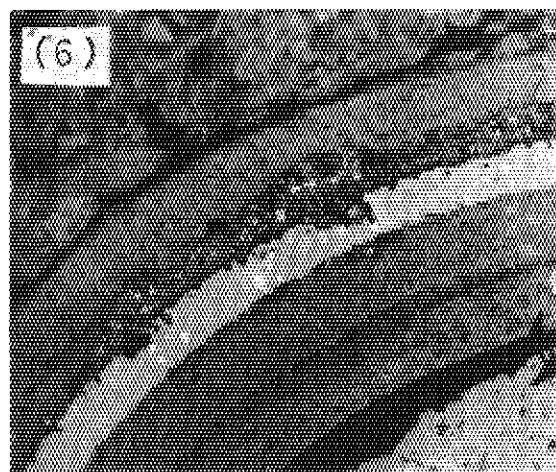
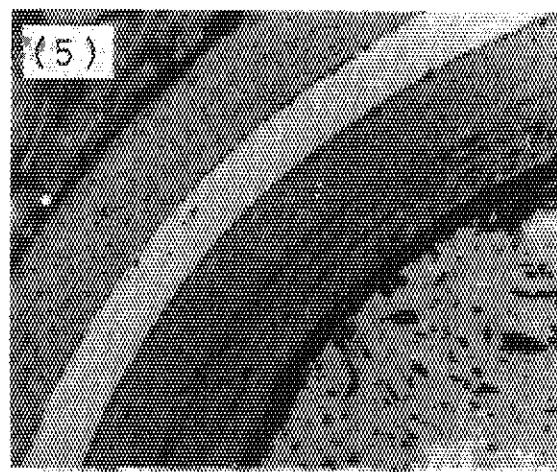
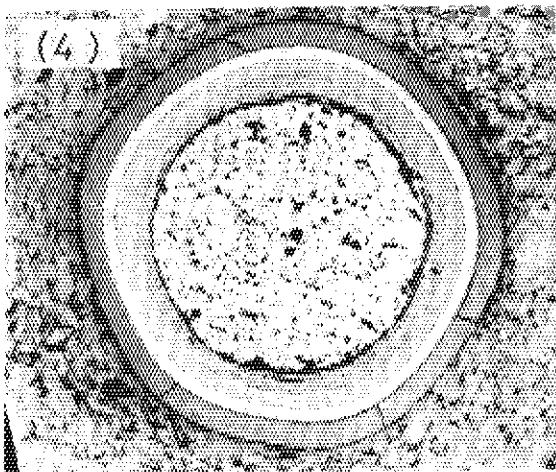
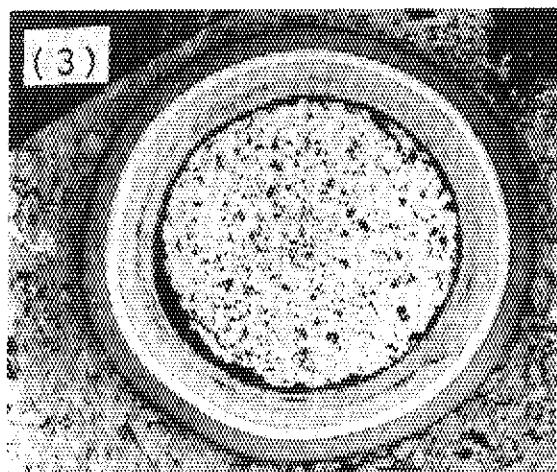
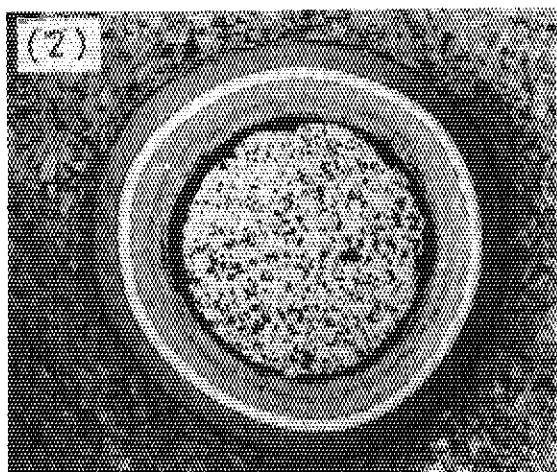
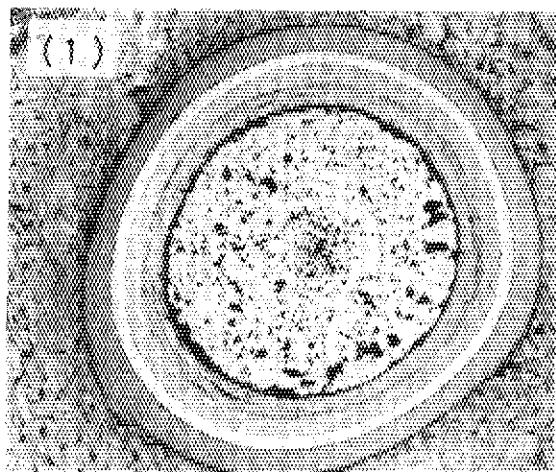


Fig. 4.13(1) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(l-103, 750P1-3).

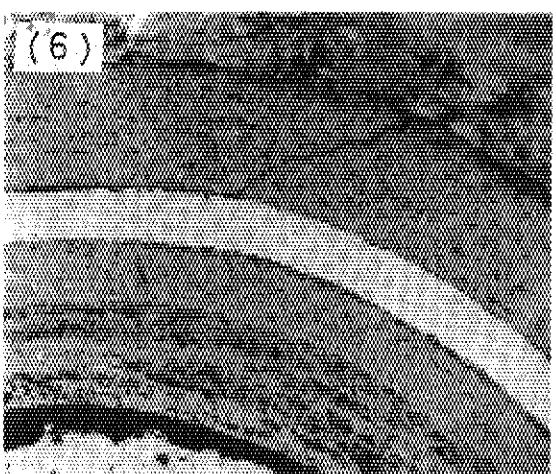
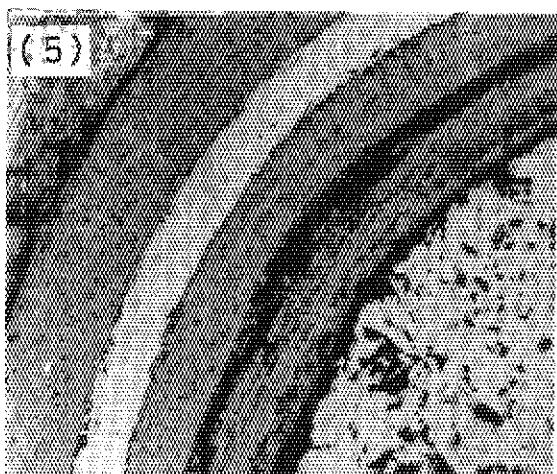
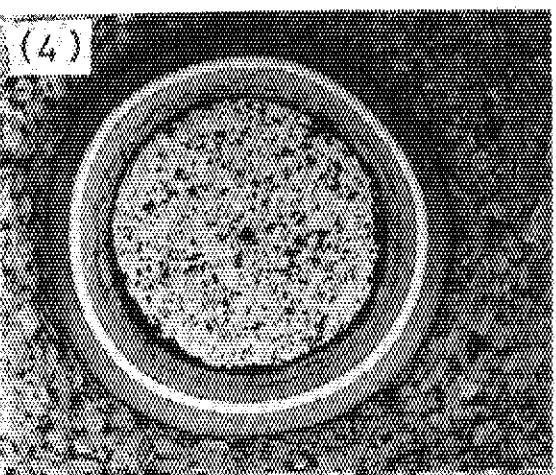
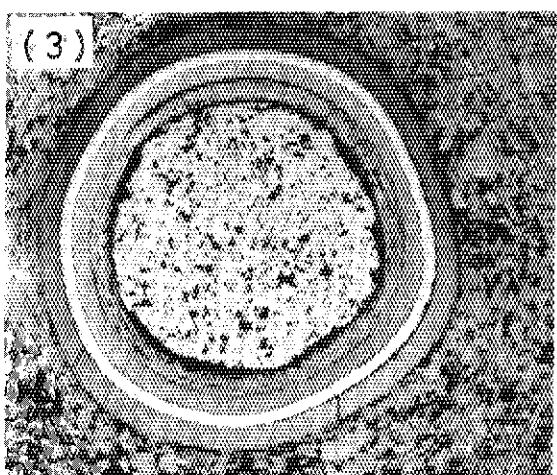
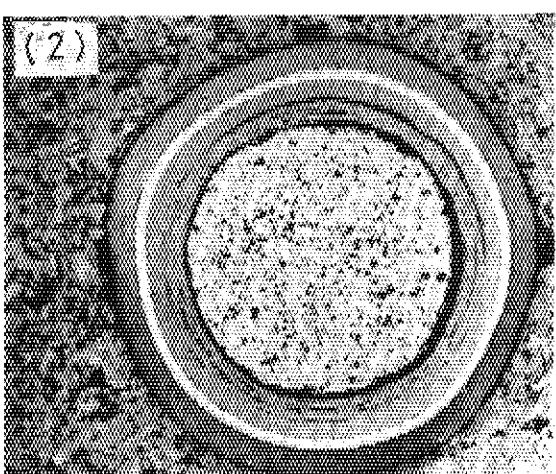
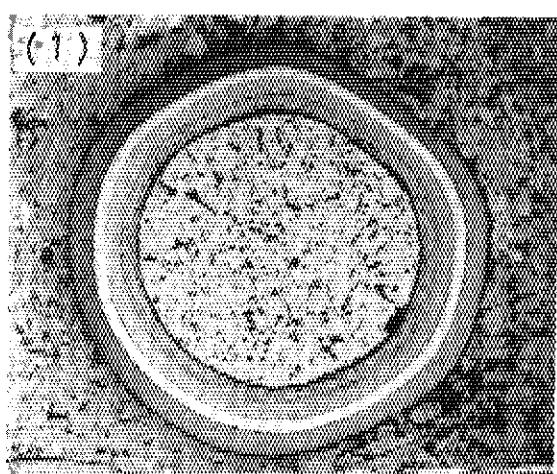


Fig. 4.13(2) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-109, 750P1-9).

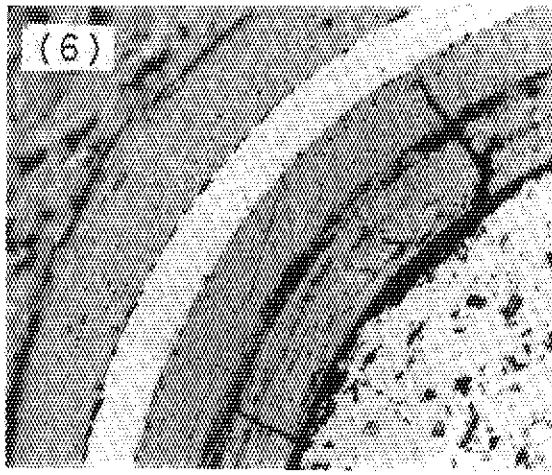
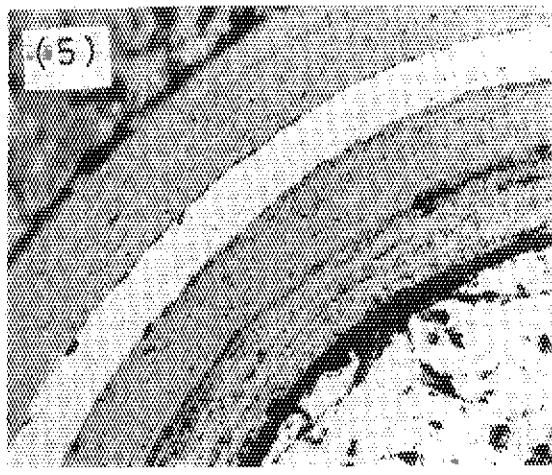
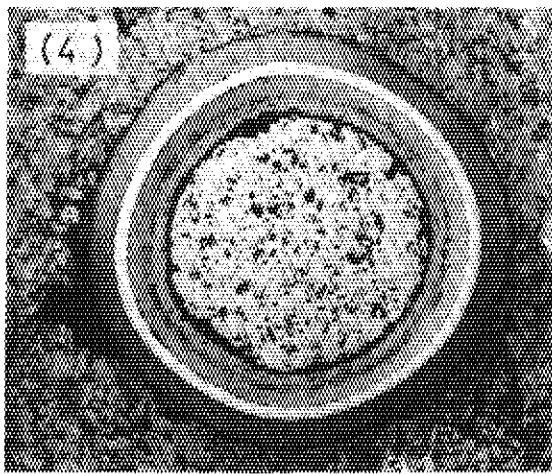
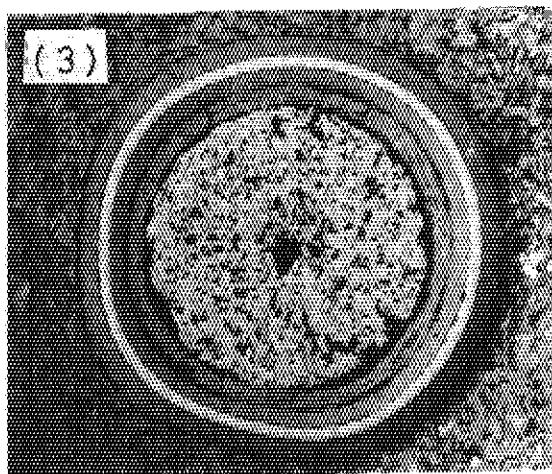
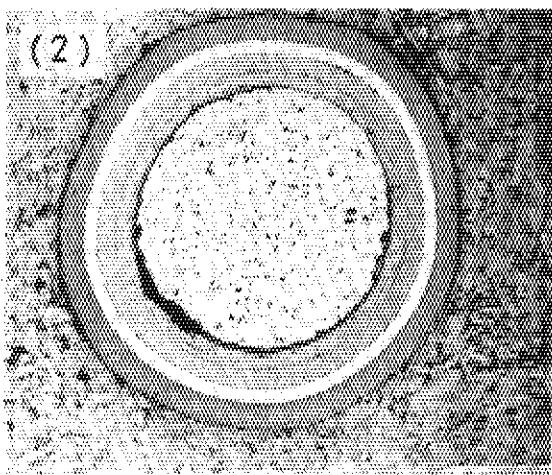
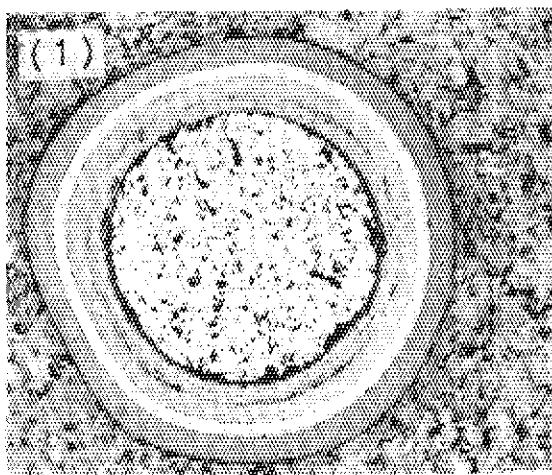


Fig. 4.13(3) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-113, 750P1-13).

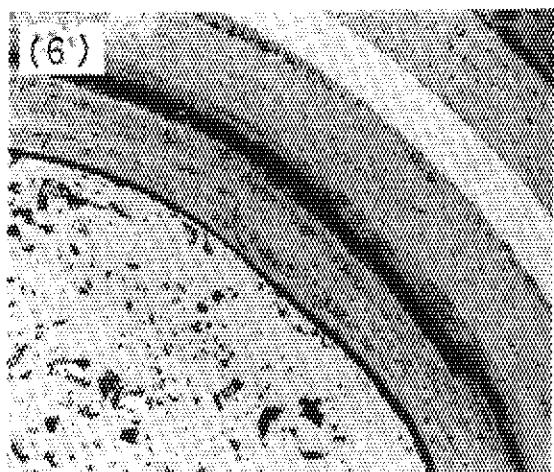
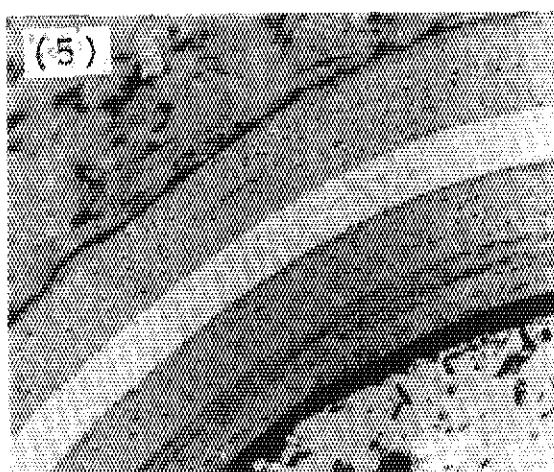
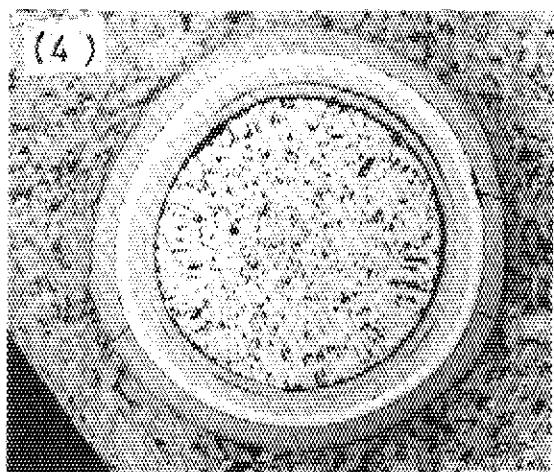
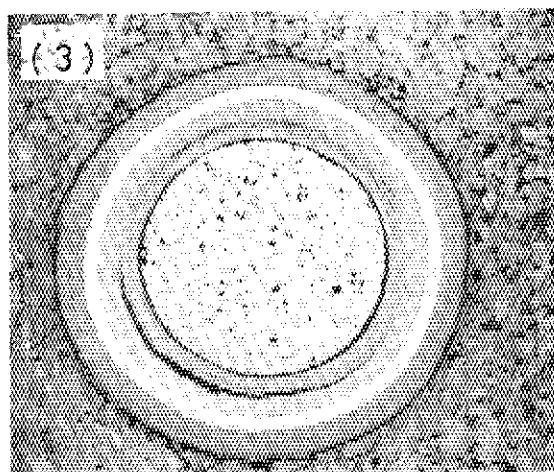
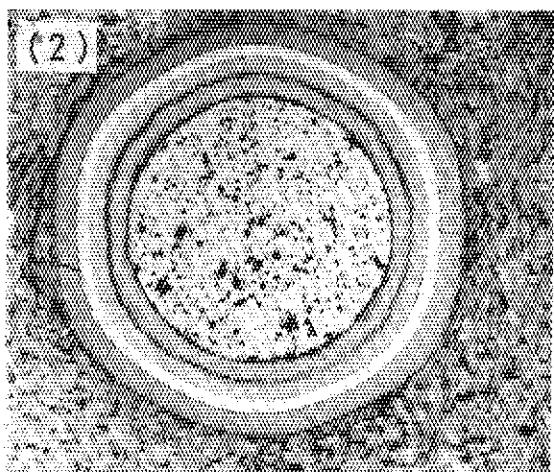
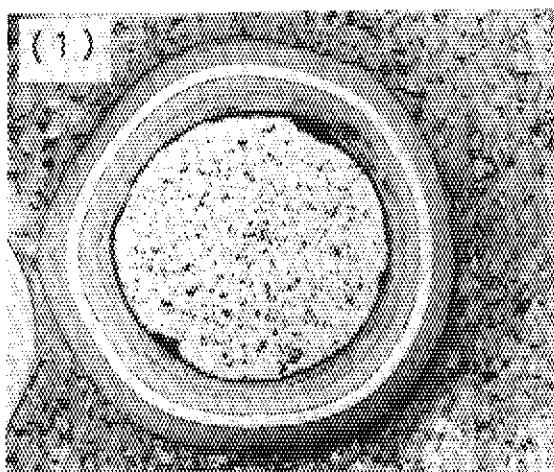


Fig. 4.13(4) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-203, 750P2-3).

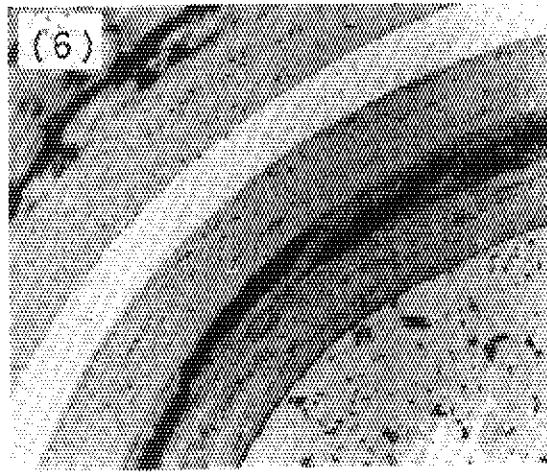
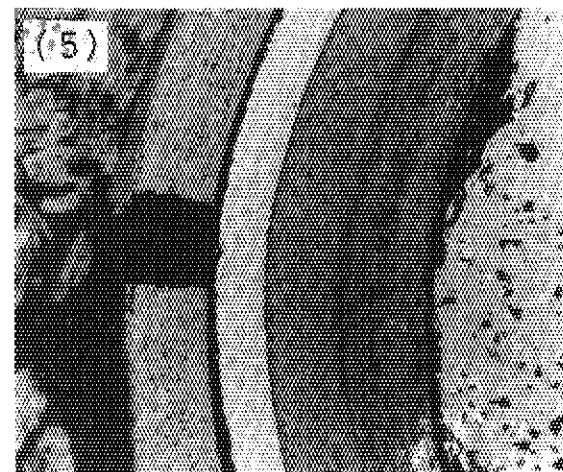
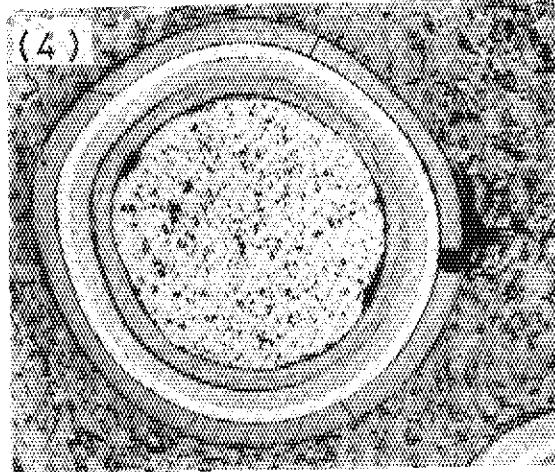
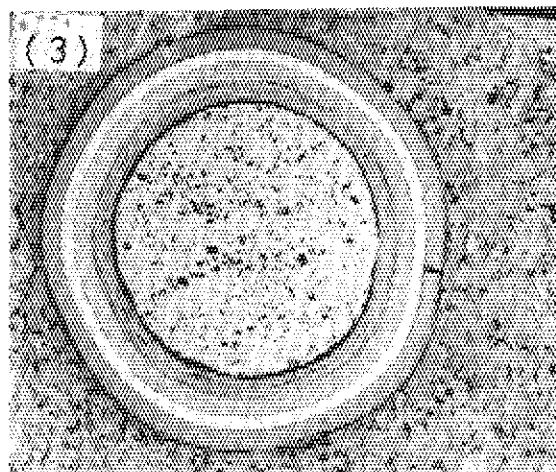
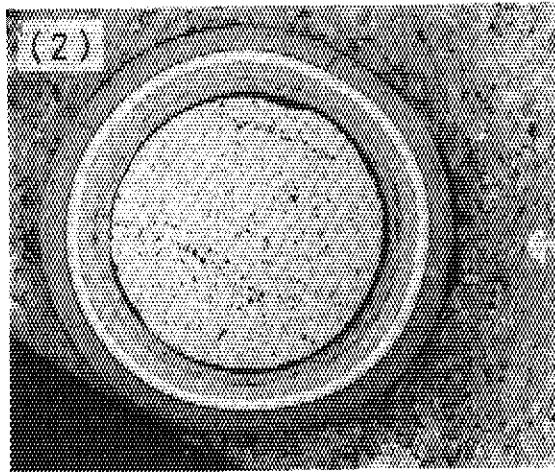
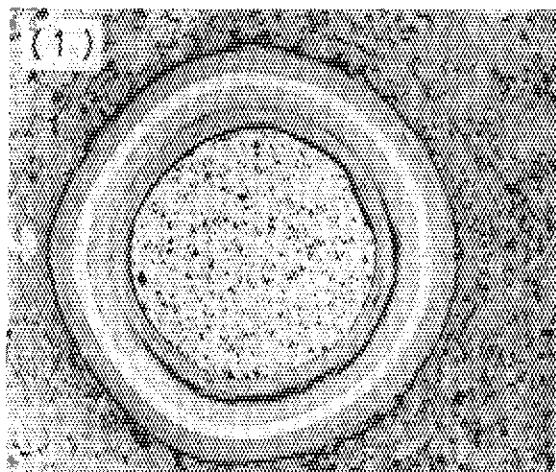


Fig. 4.13(5) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-209, 75OP2-9).

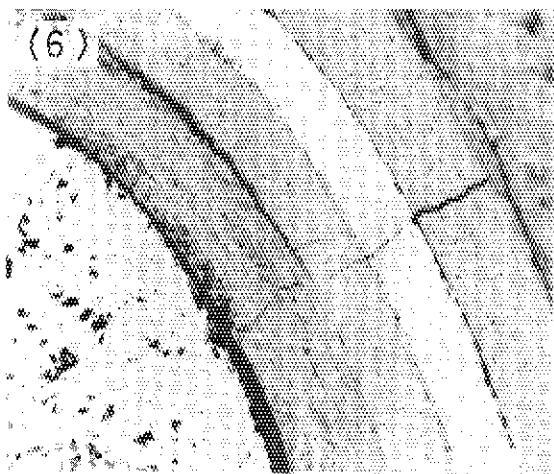
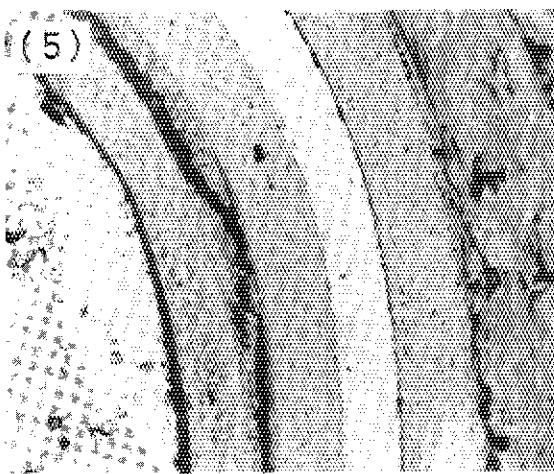
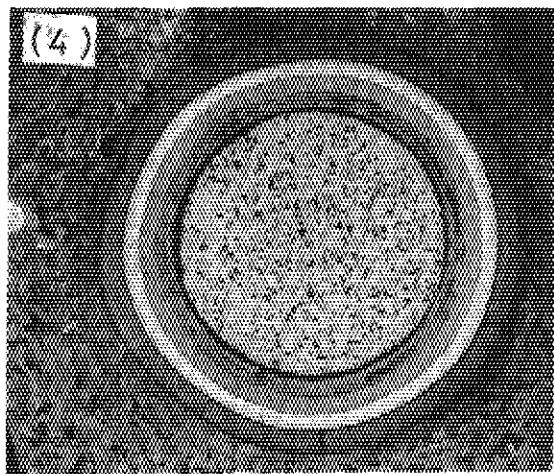
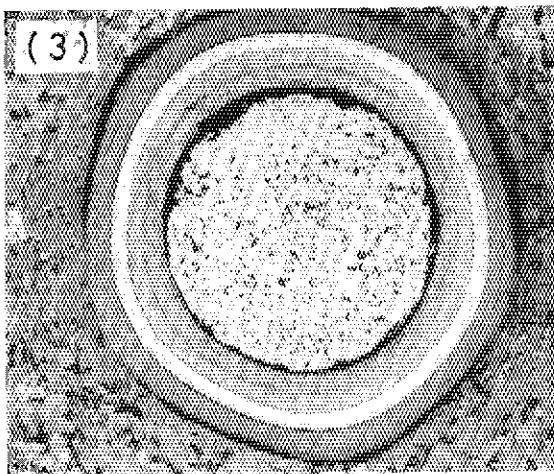
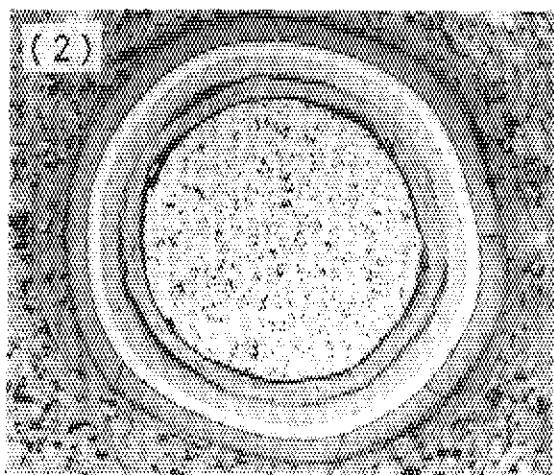
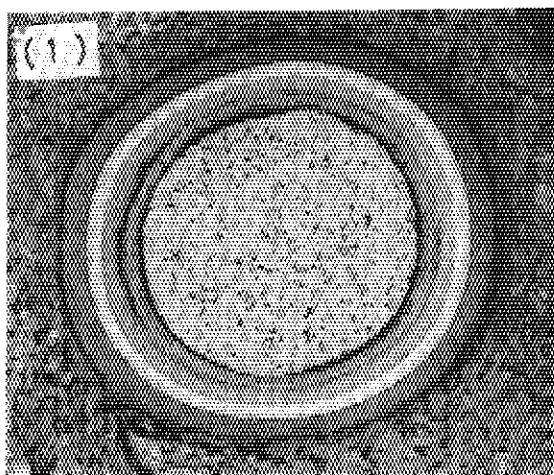


Fig. 4.13(6) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-213, 750P3-4).

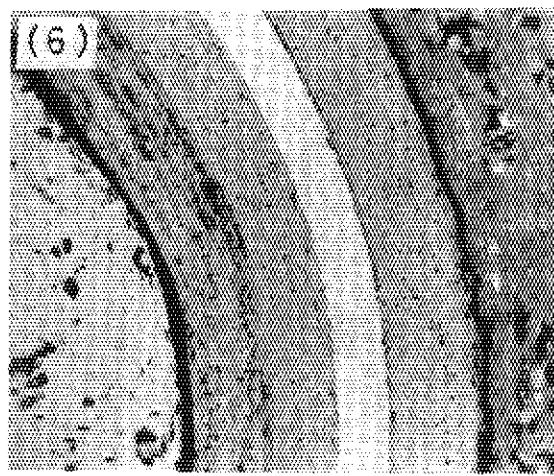
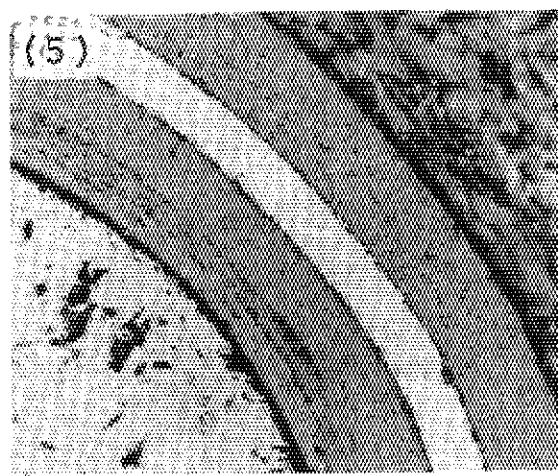
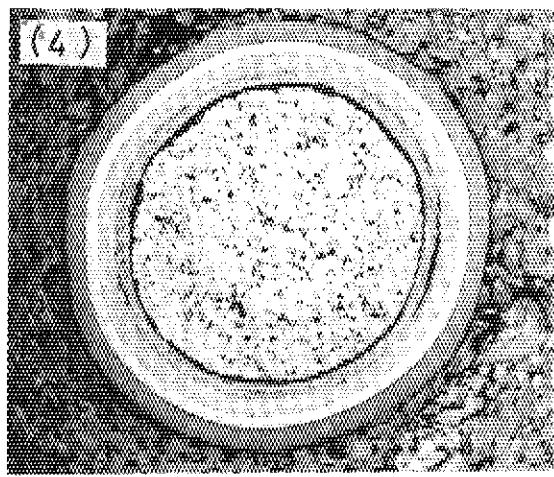
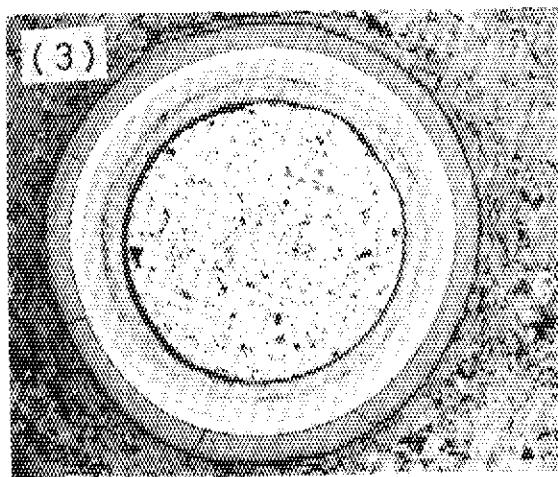
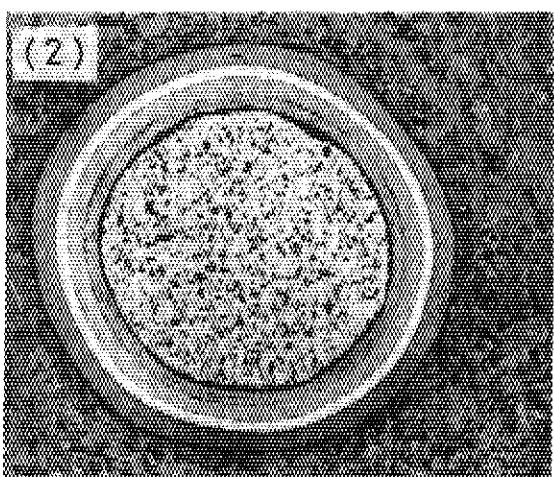
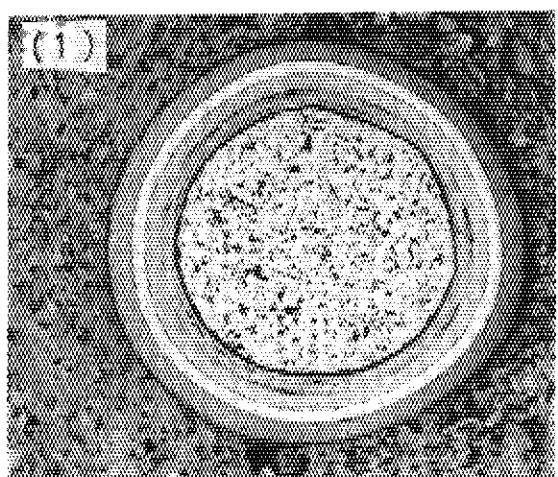


Fig. 4.13(7) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-302, 750P2-11).

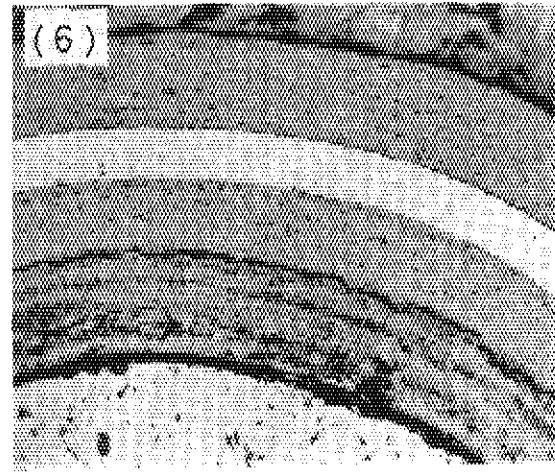
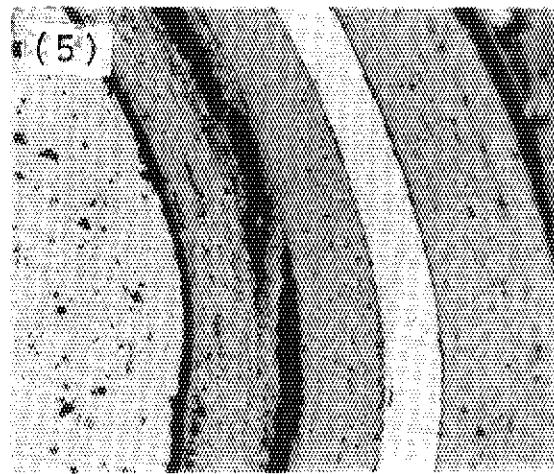
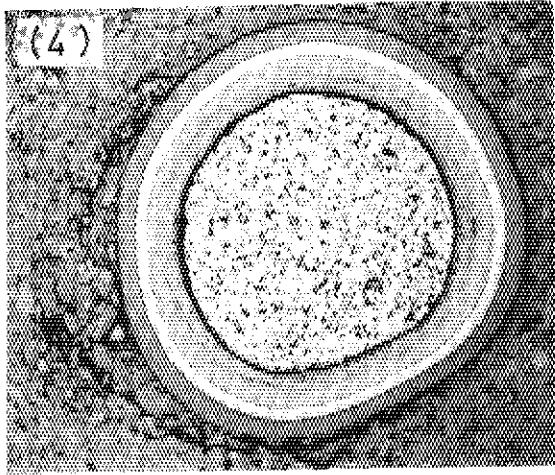
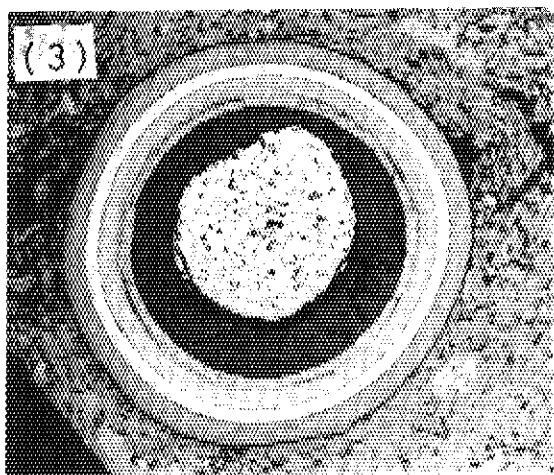
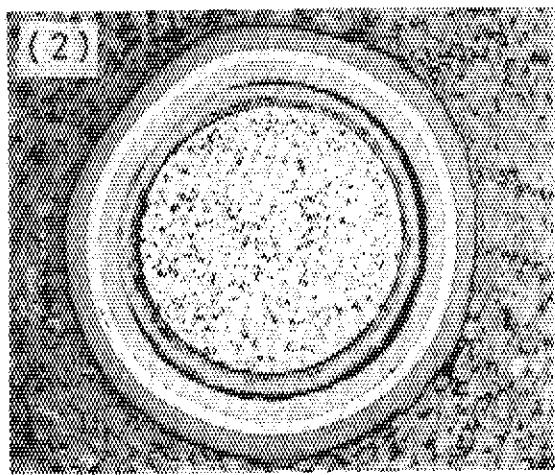
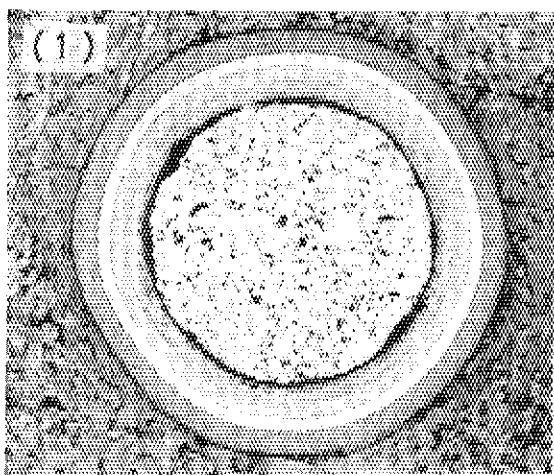


Fig. 4.13(8) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-309, 750P2-18).

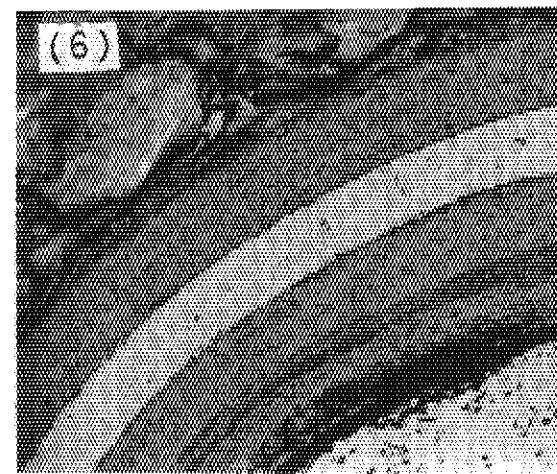
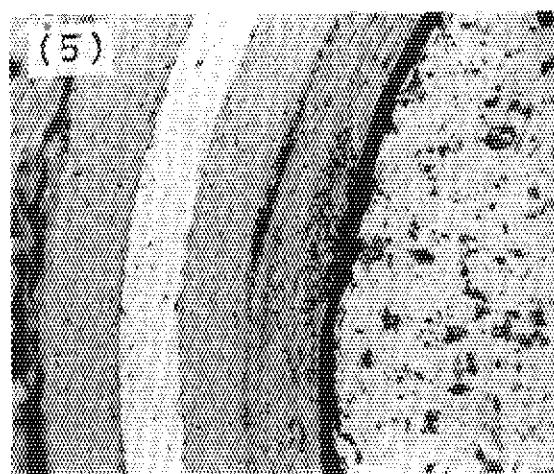
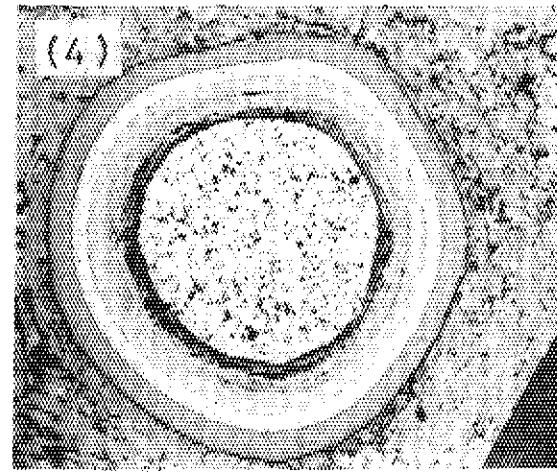
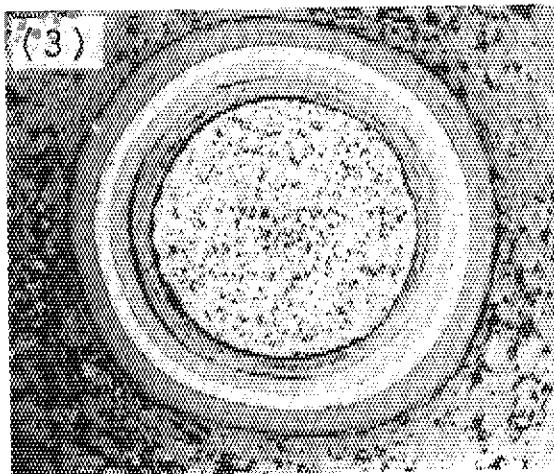
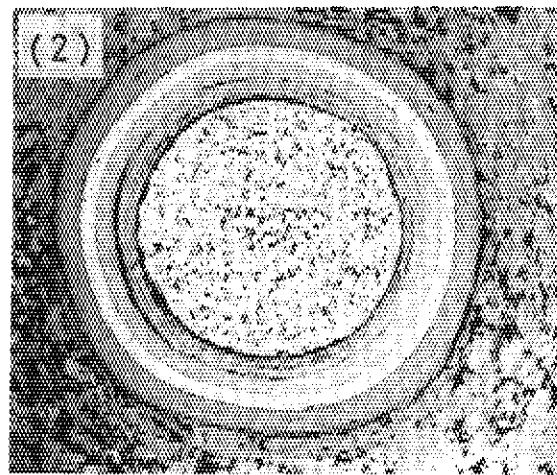
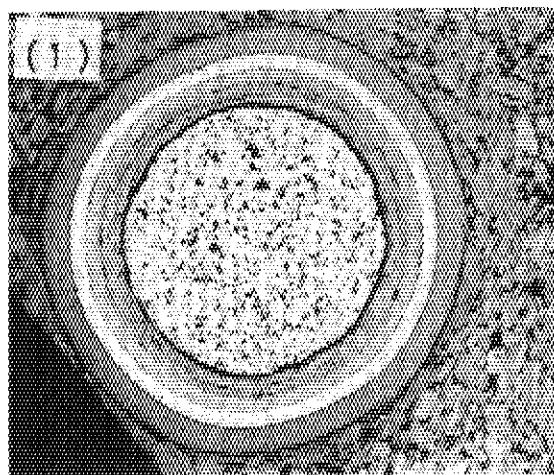


Fig. 4.13(9) Ceramographs of 1st OGL-1 fuel compact(1-313, 750P3-13).

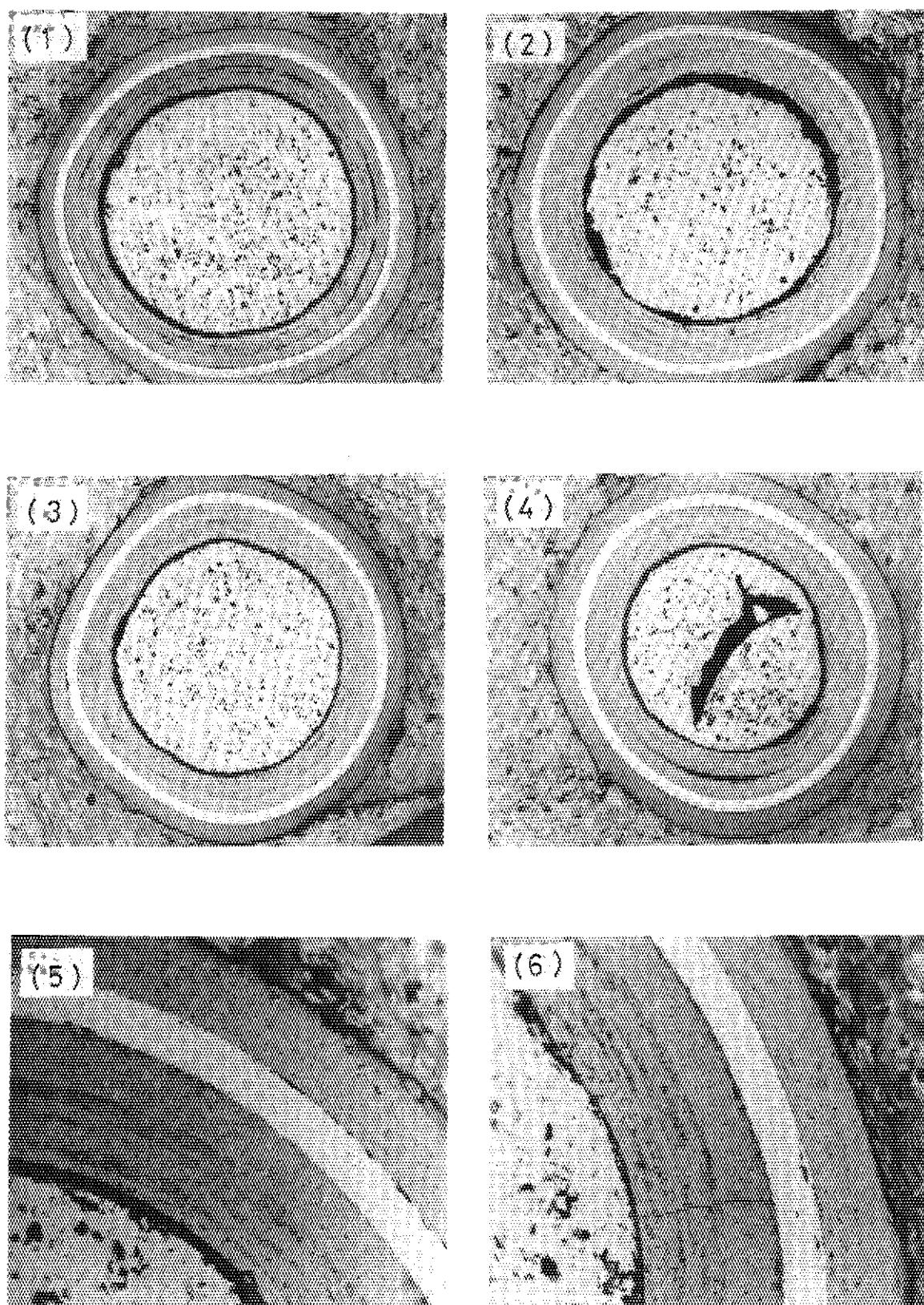


Fig. 4.14(1) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-103 760P2-3).

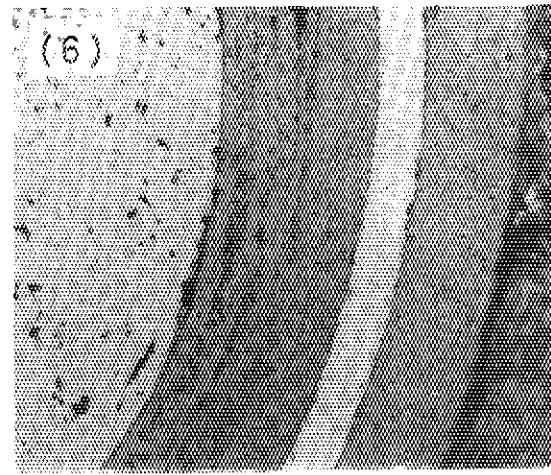
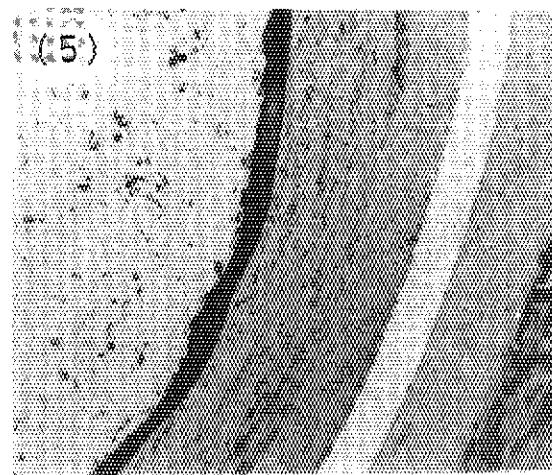
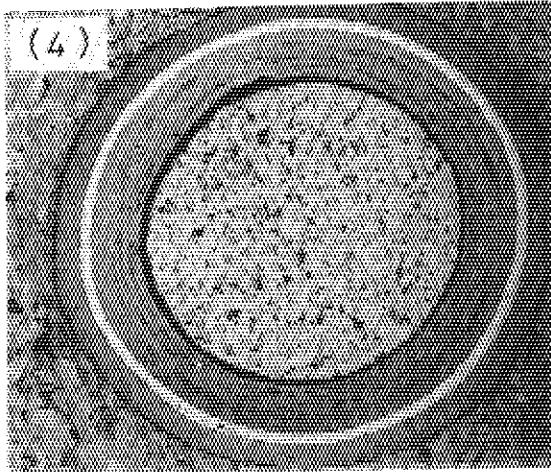
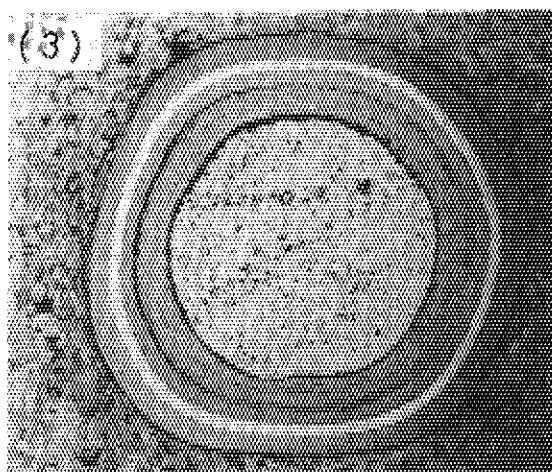
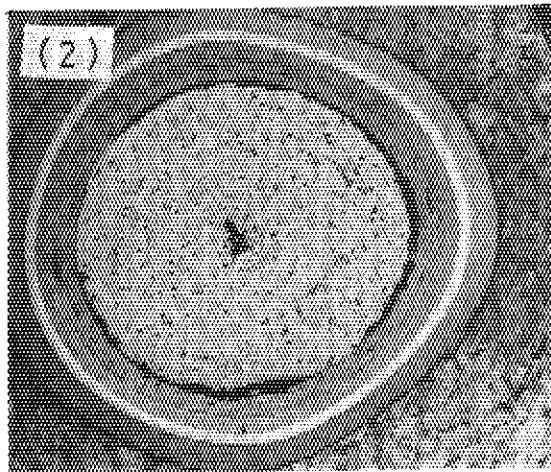
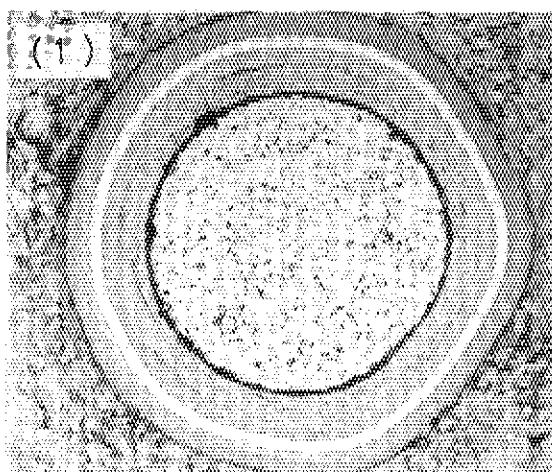


Fig. 4.14(2) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-110, 760P4-2).

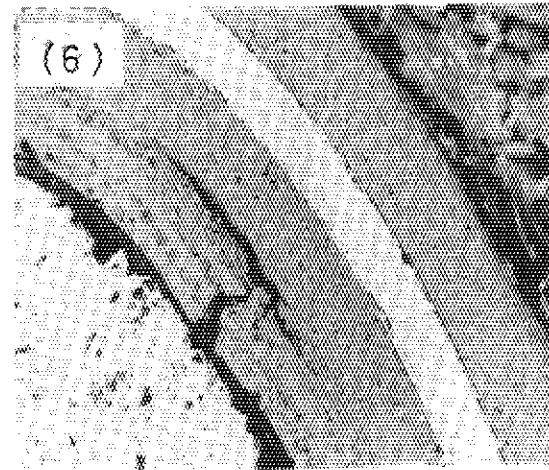
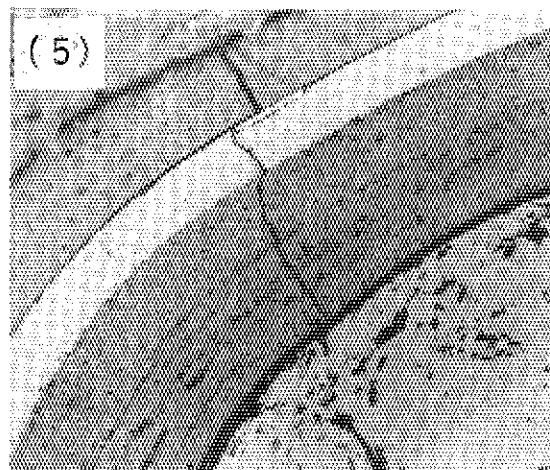
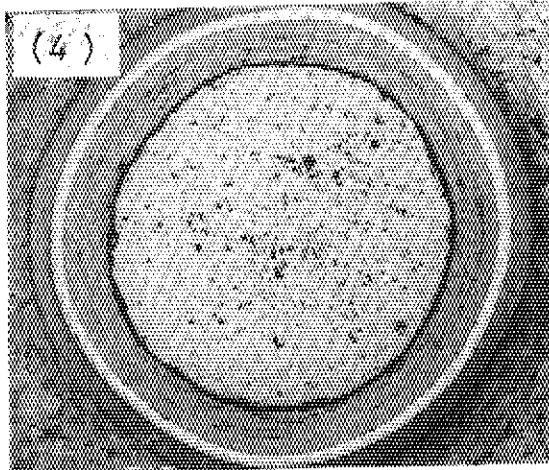
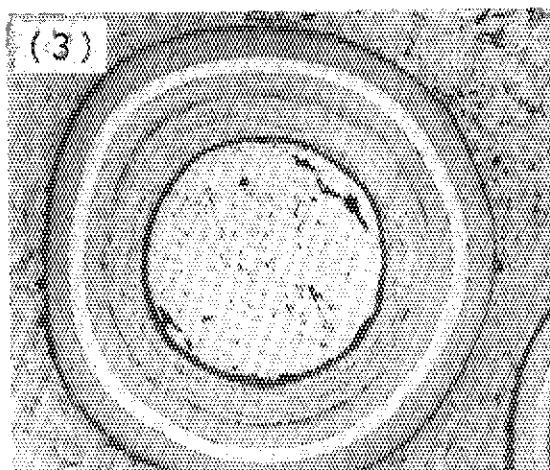
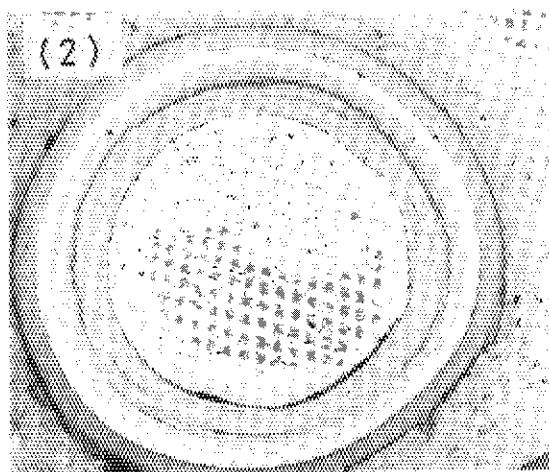
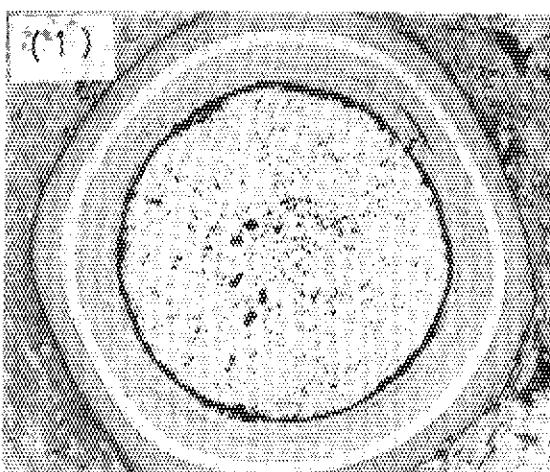


Fig. 4.14(3) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-115, 760P5-1).

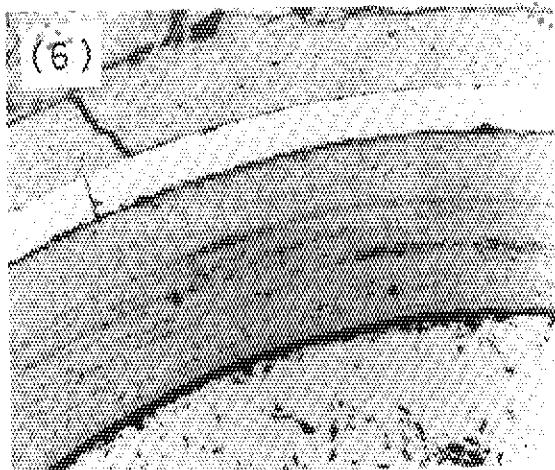
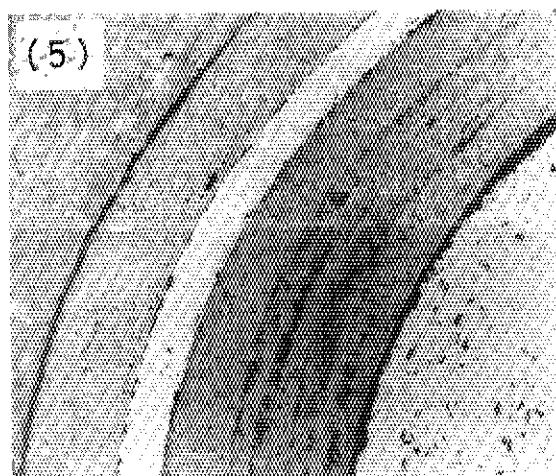
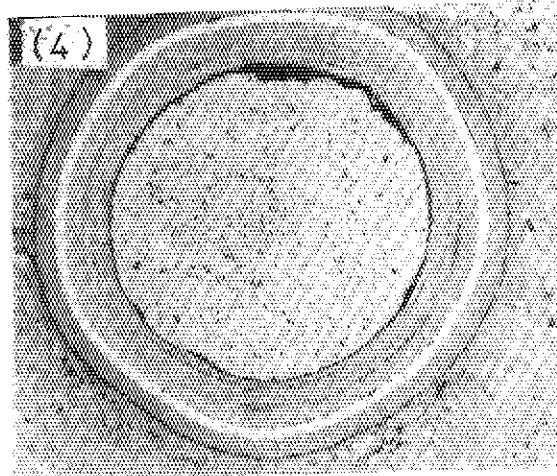
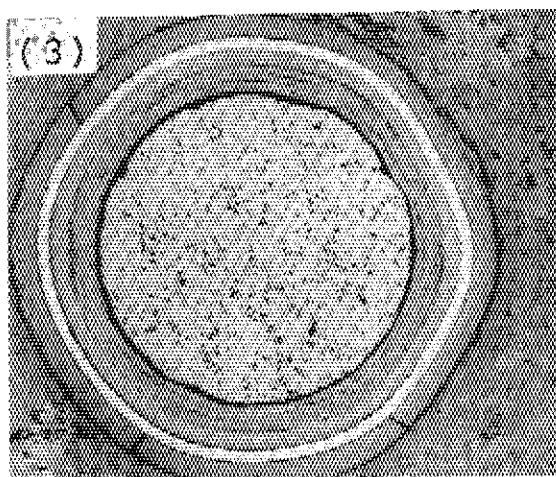
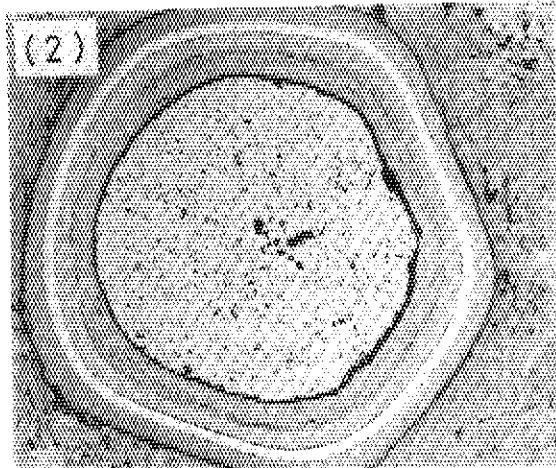
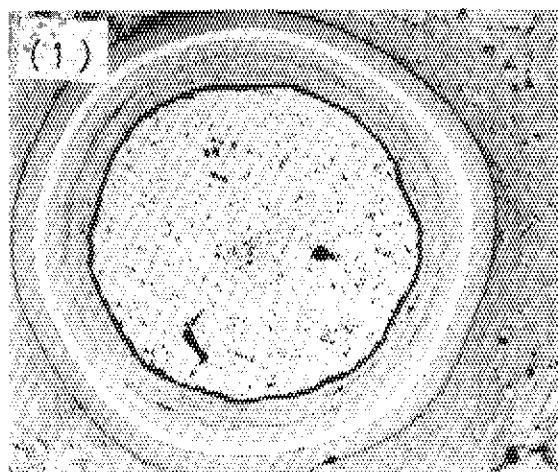


Fig. 4.14(4) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-203, 760P2-8).

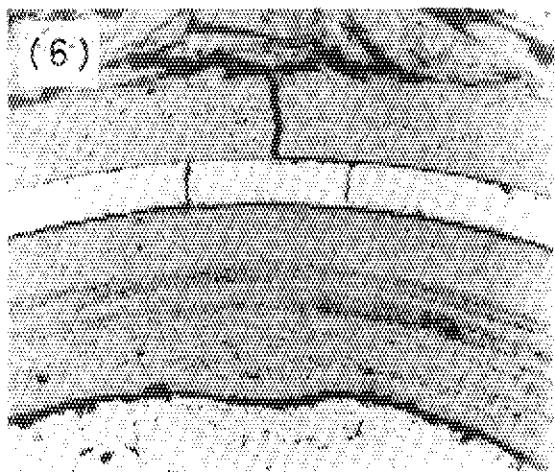
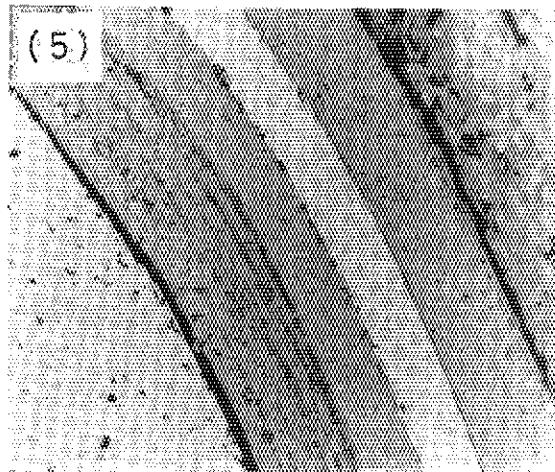
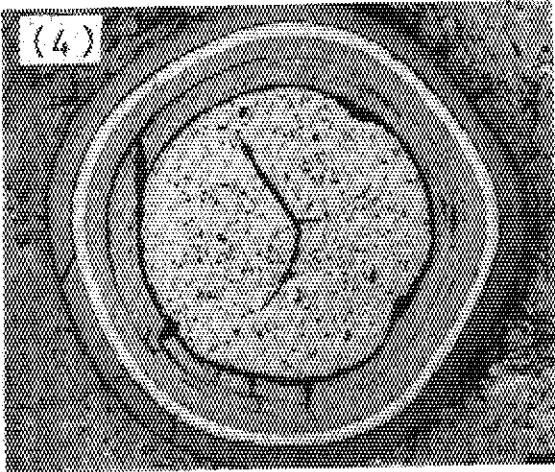
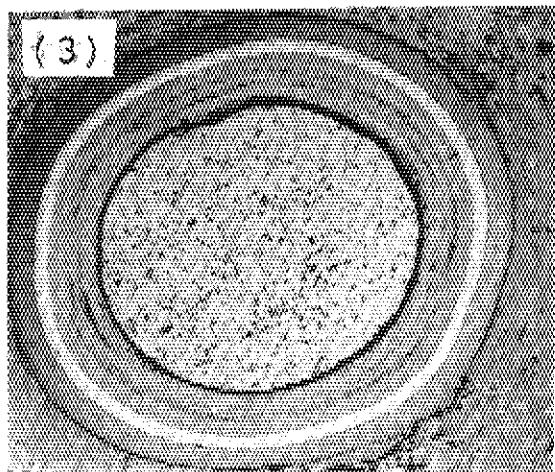
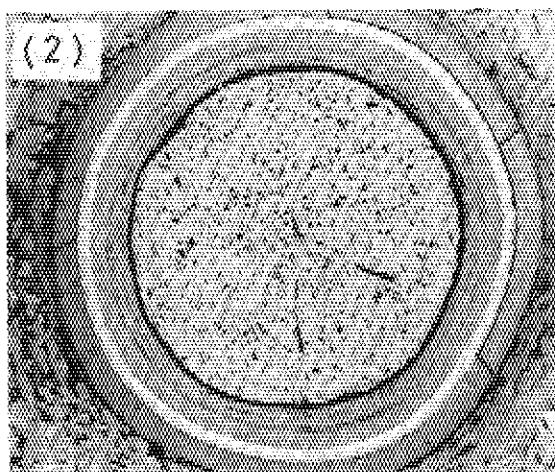
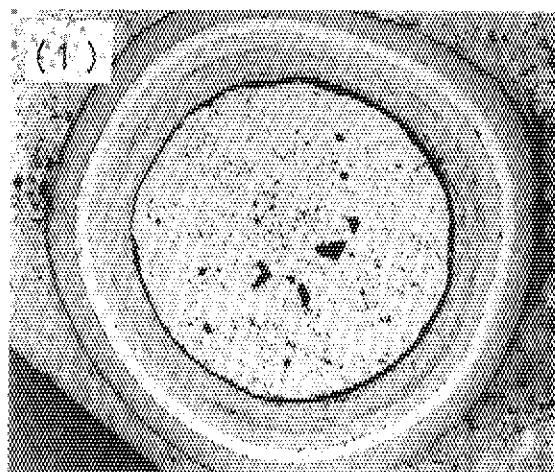


Fig. 4.14(5) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-210, 760P4-8).

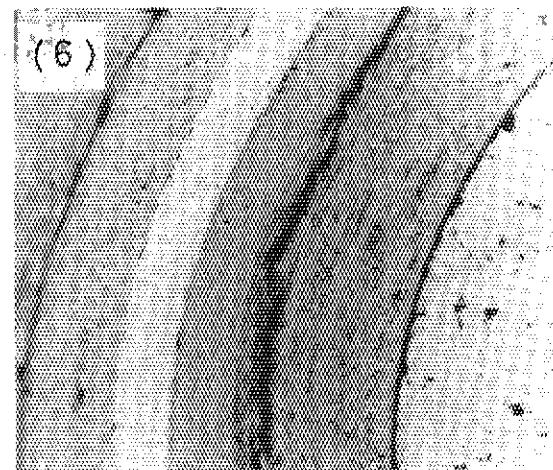
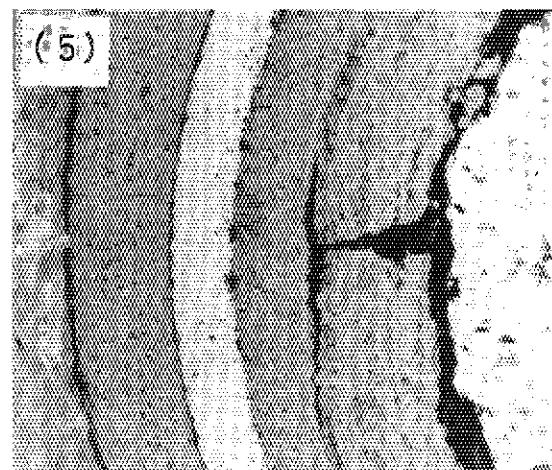
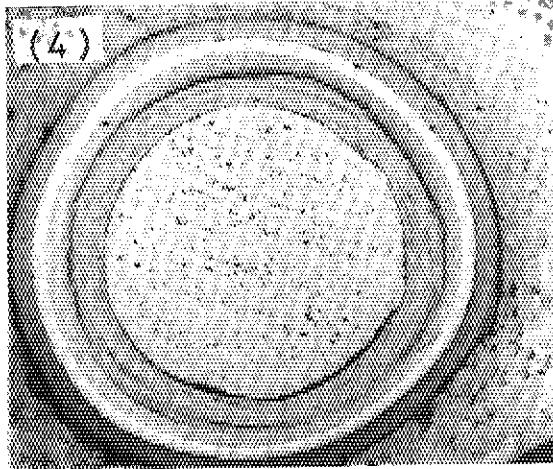
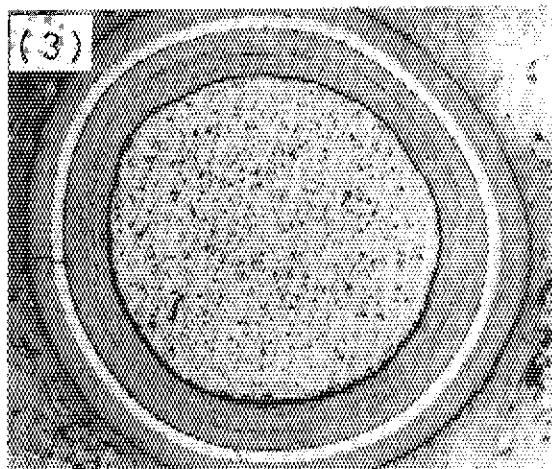
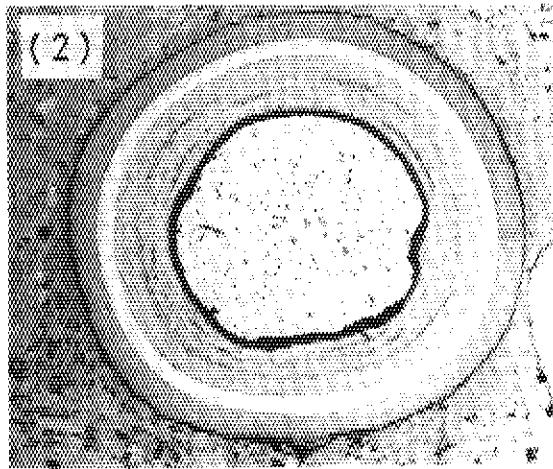
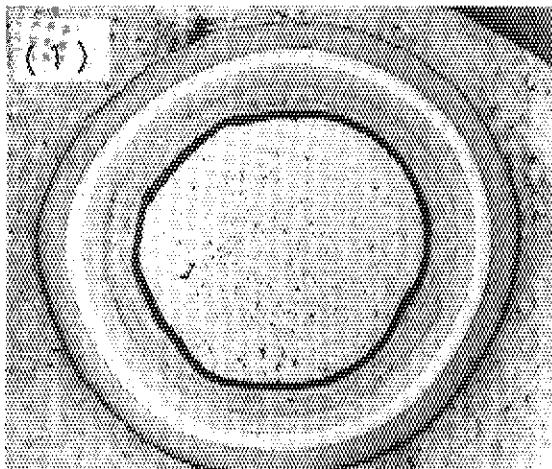


Fig. 4.14(6) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-215, 760P5-5).

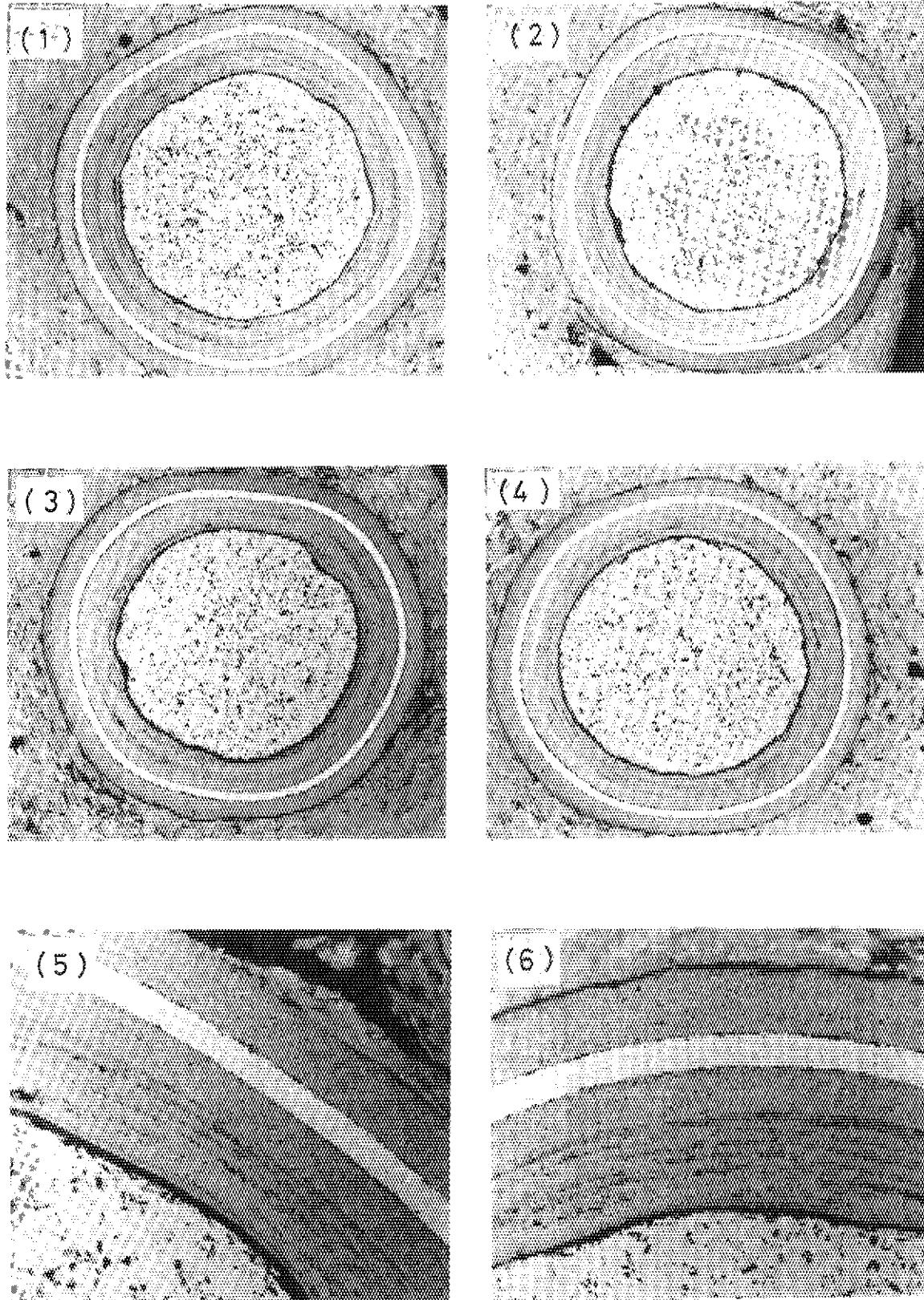


Fig. 4.14(7) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-303, 760P2-13).

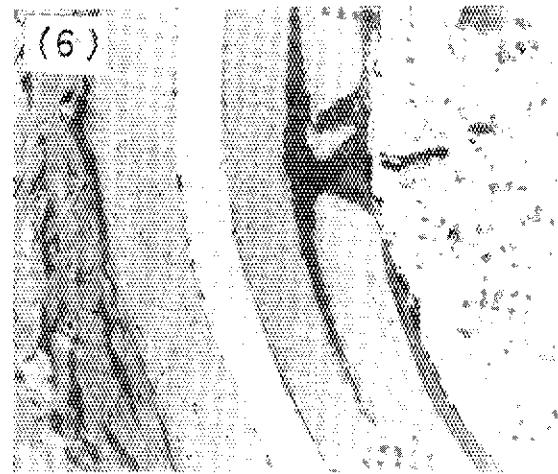
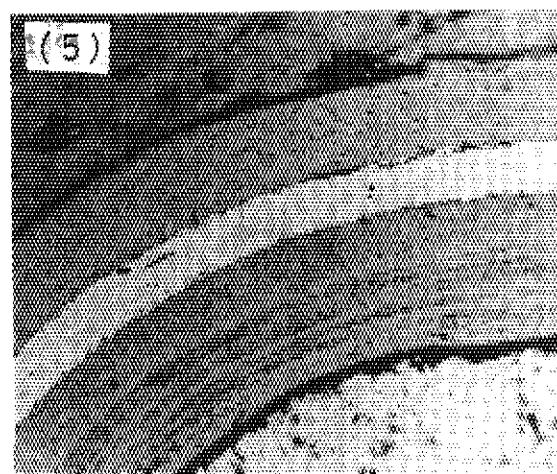
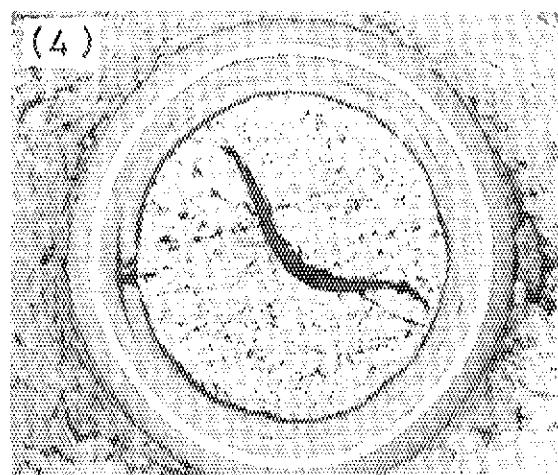
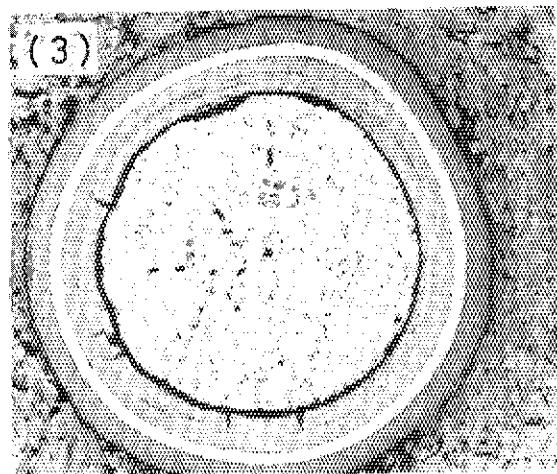
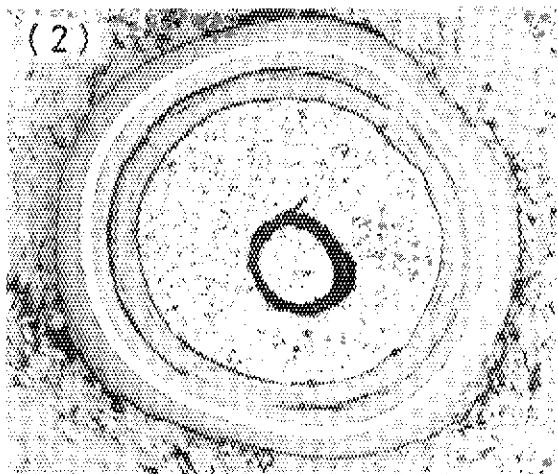
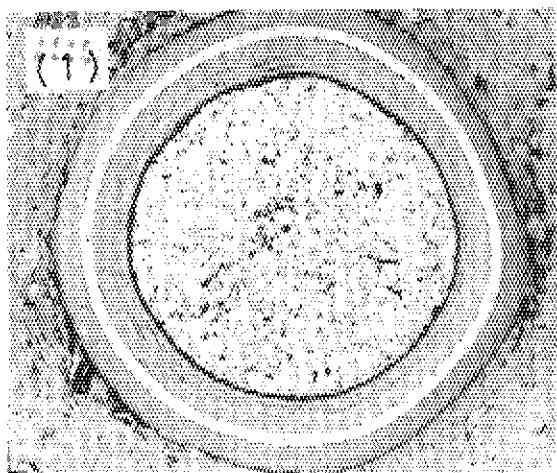


Fig. 4.14(8) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-310, 760P4-14).

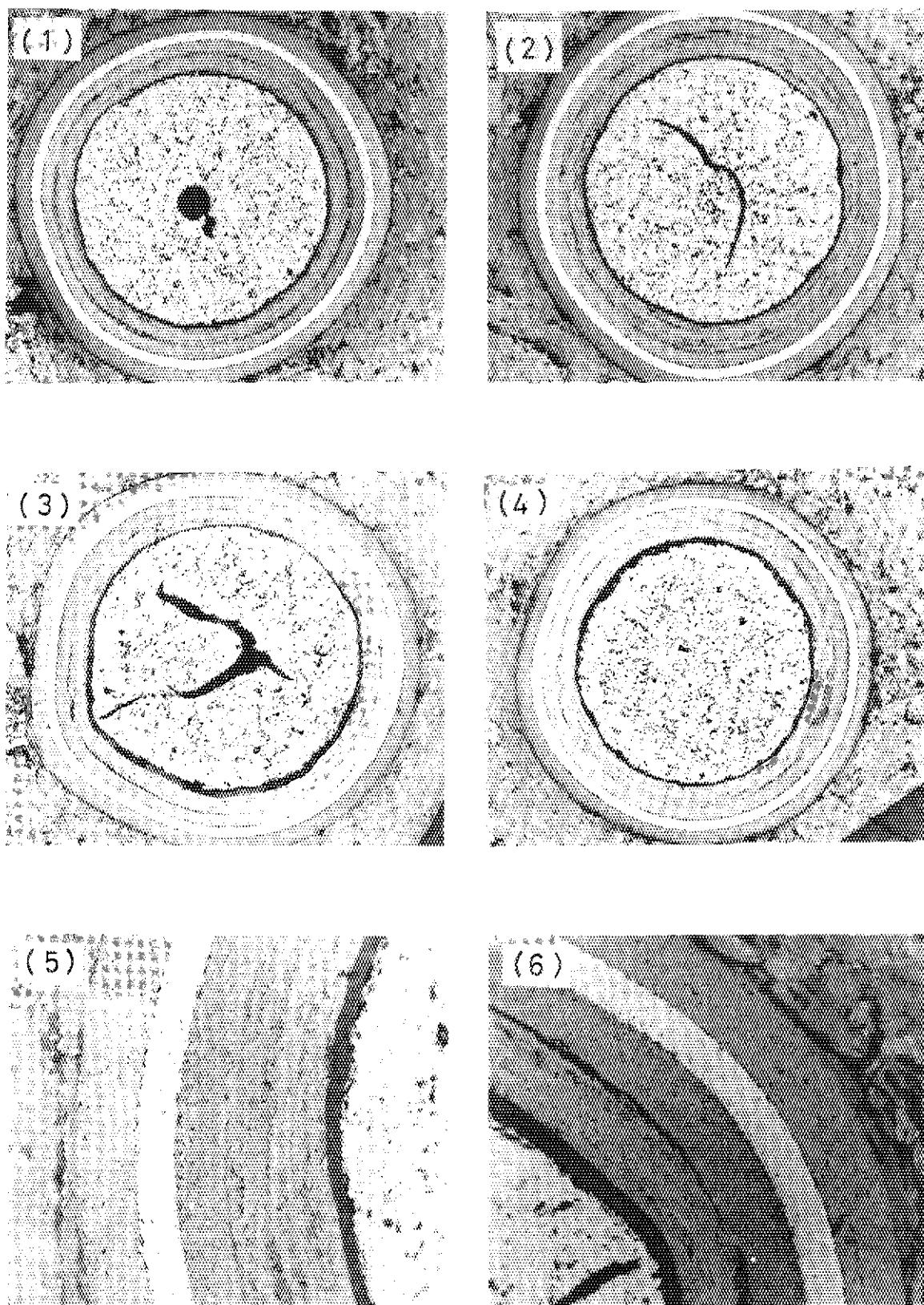


Fig. 4.14(9) Ceramographs of 2nd OGL-1 fuel compact(2-315, 760P5-9).

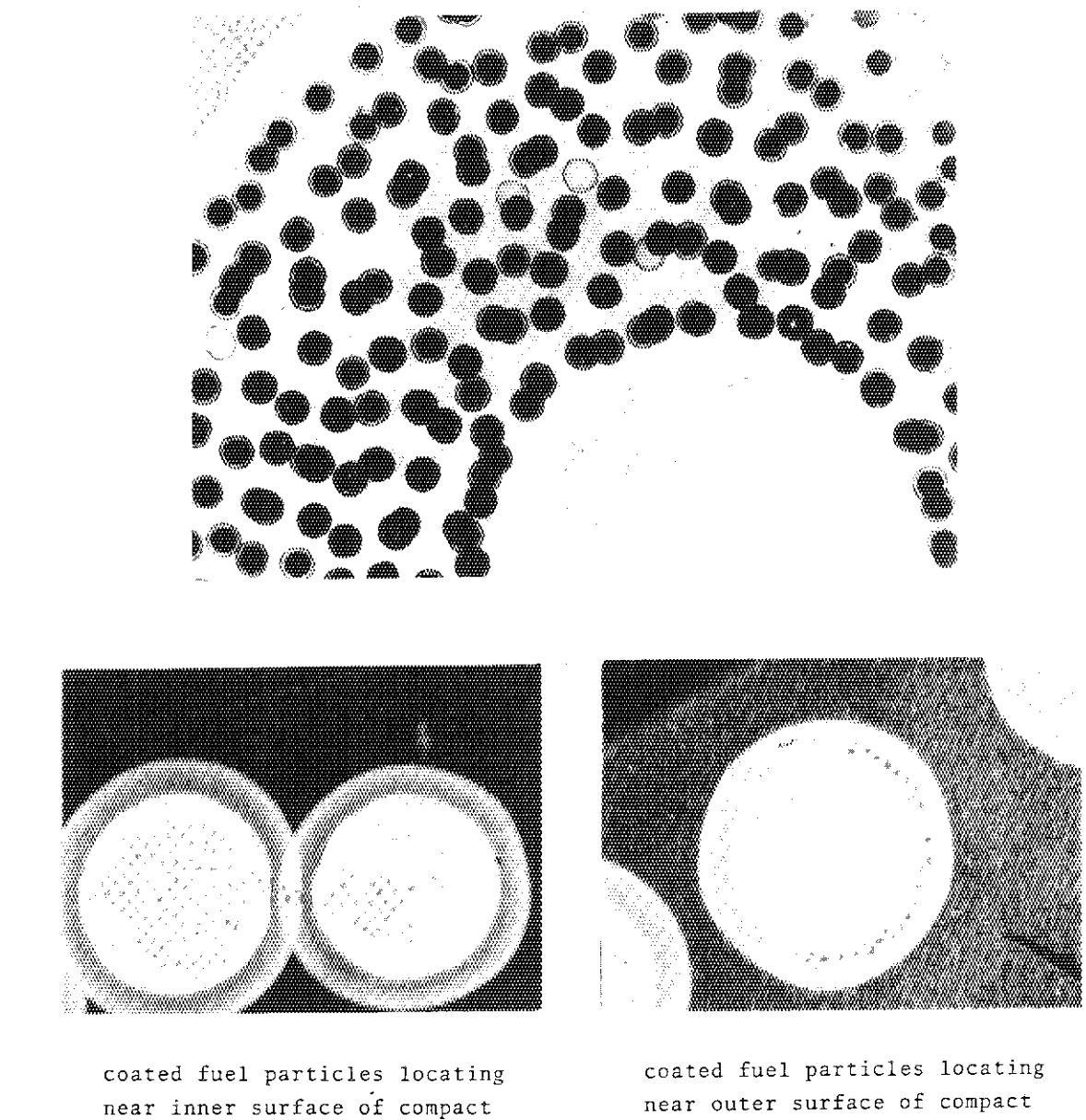


Fig. 4.15(1) X-ray microradiographs of 1st OGL-1 sliced fuel-compact (1-203, 750P2-3).

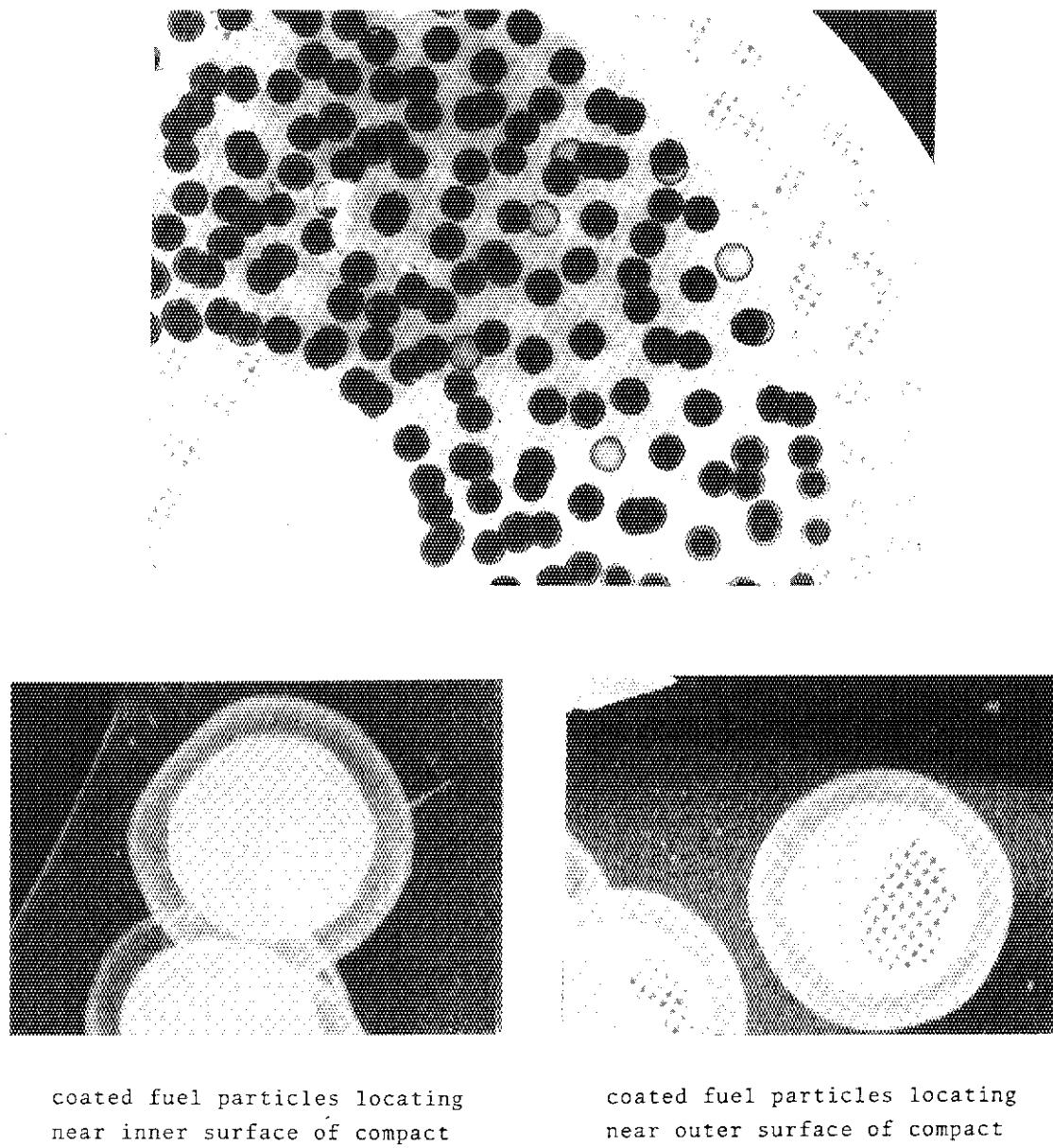
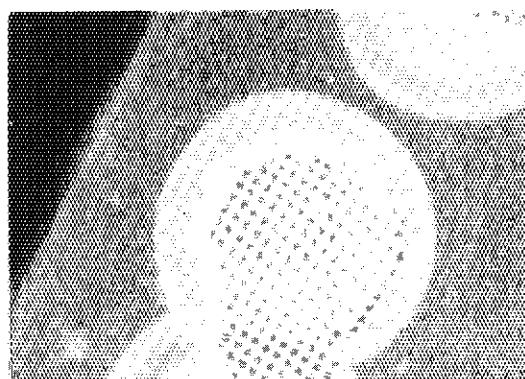
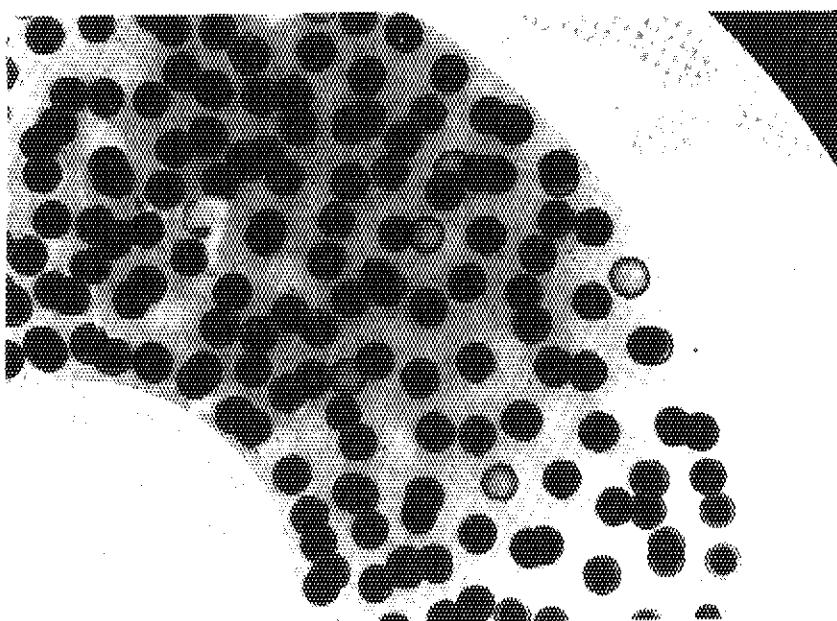
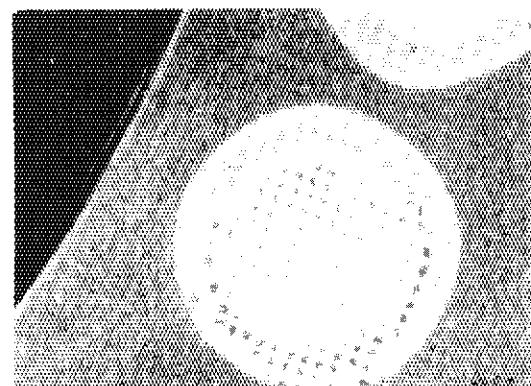


Fig. 4.15(2) X-ray microradiographs of 1st OGL-1 sliced fuel-compact
(1-209, 750P2-9).

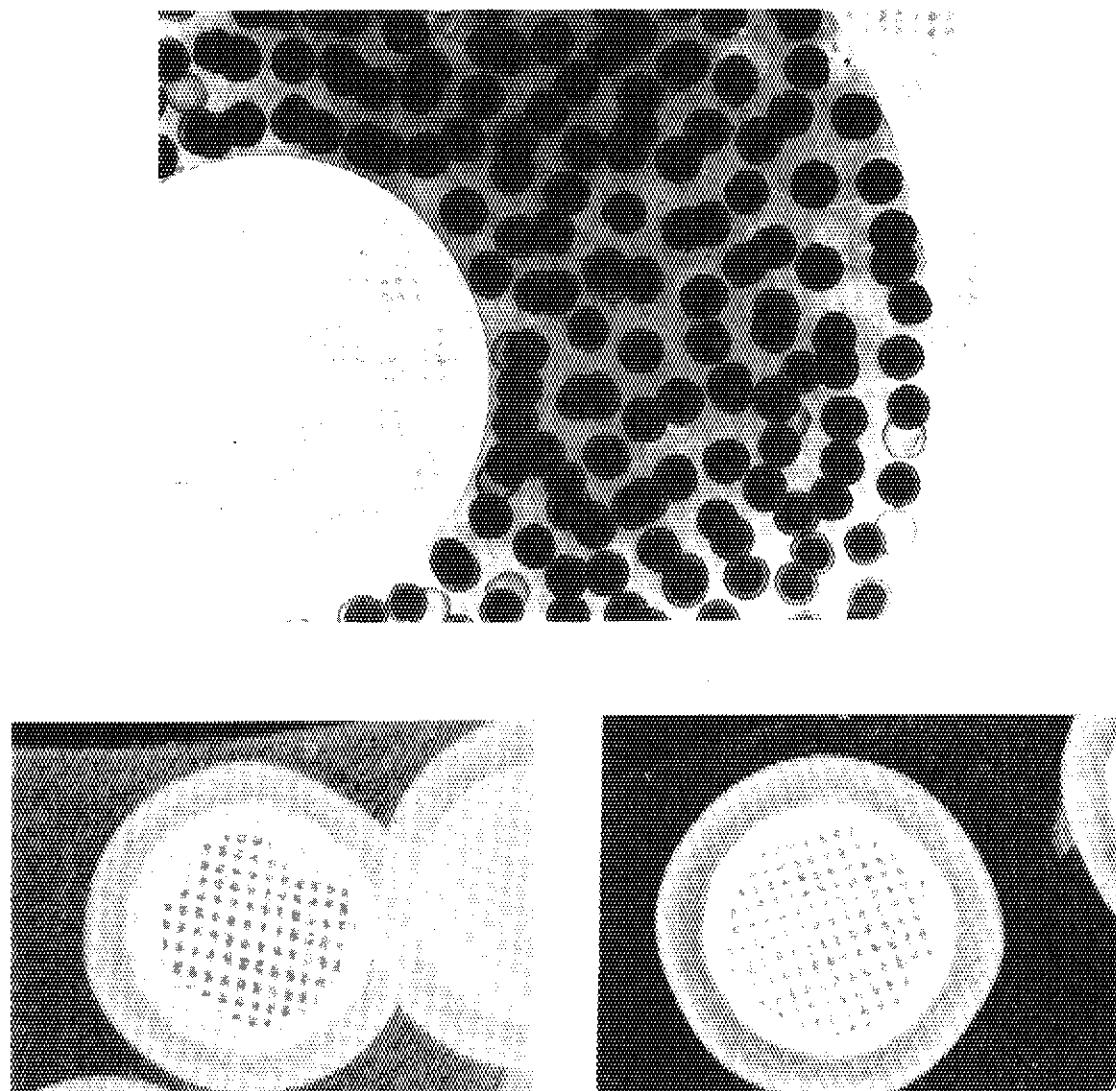


coated fuel particles locating
near inner surface of compact



coated fuel particles locating
near outer surface of compact

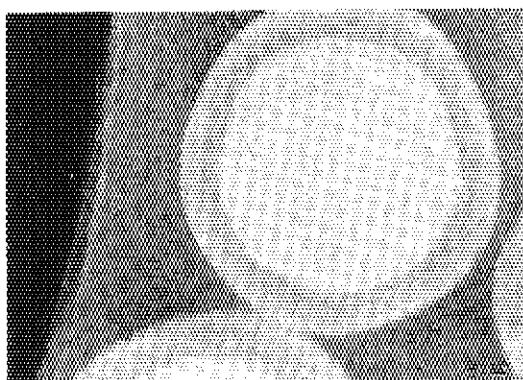
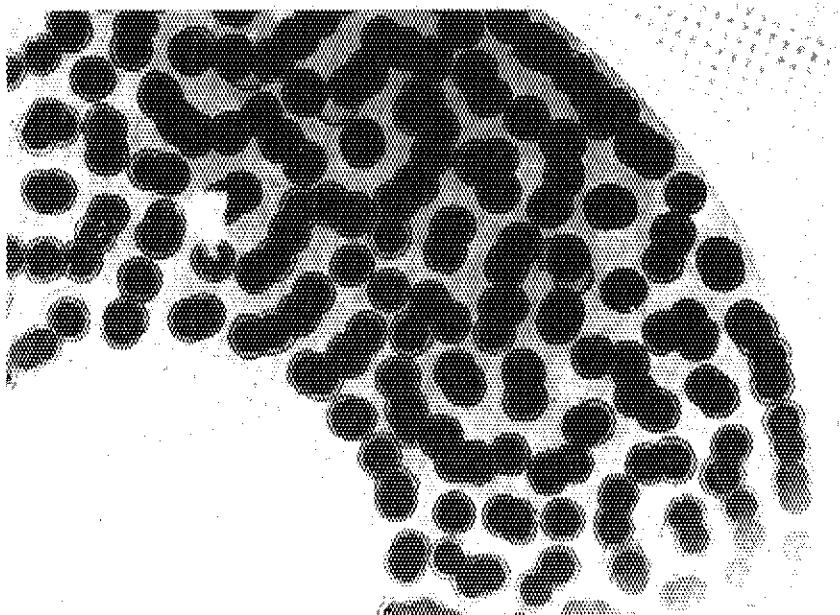
Fig. 4.15(3) X-ray microradiographs of 1st OGL-1 sliced fuel-compact
(1-213, 750P3-4).



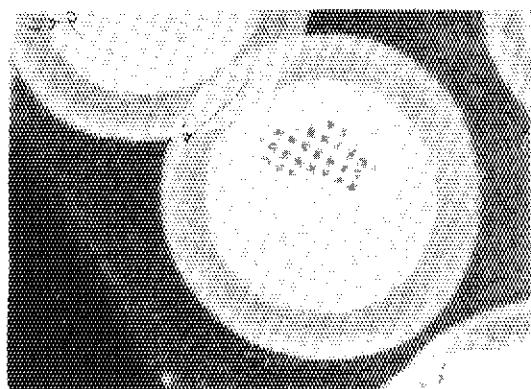
coated fuel particles locating
near inner surface of compact

coated fuel particles locating
near outer surface of compact

Fig. 4.16(1) X-ray microradiographs of 2nd OGL-1 sliced fuel-compact
(2-203, 760P2-8).

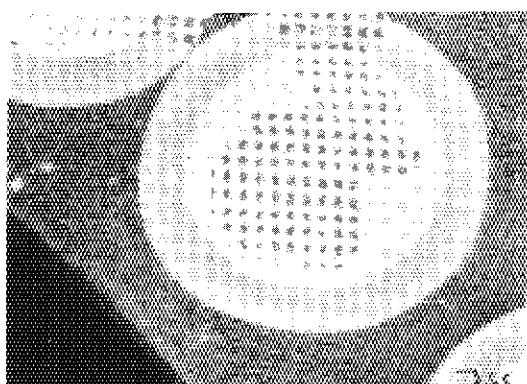
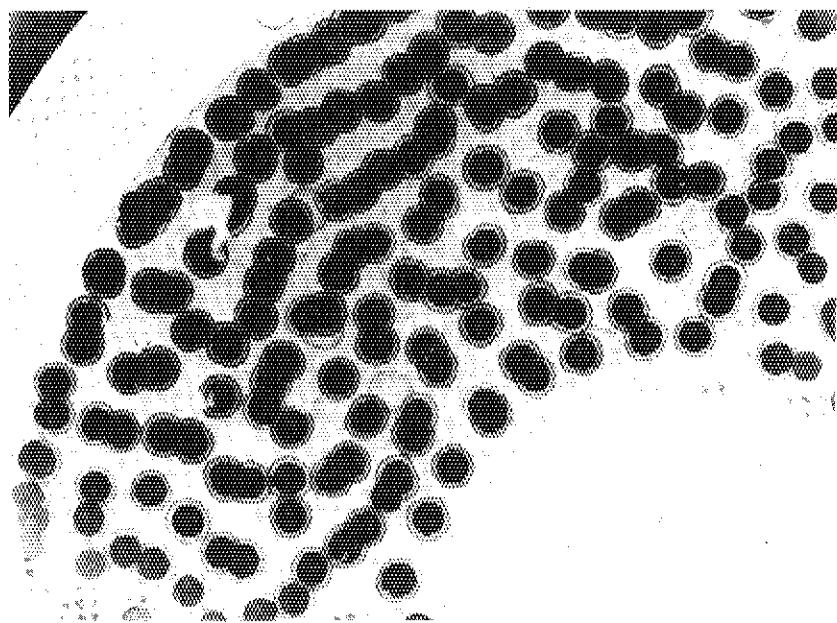


coated fuel particles locating
near inner surface of compact

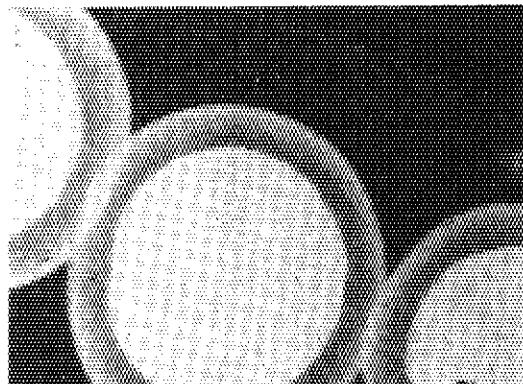


coated fuel particles locating
near outer surface of compact

Fig. 4.16(2) X-ray microradiographs of 2nd OGL-1 sliced fuel-compact
(2-210, 760P4-8).

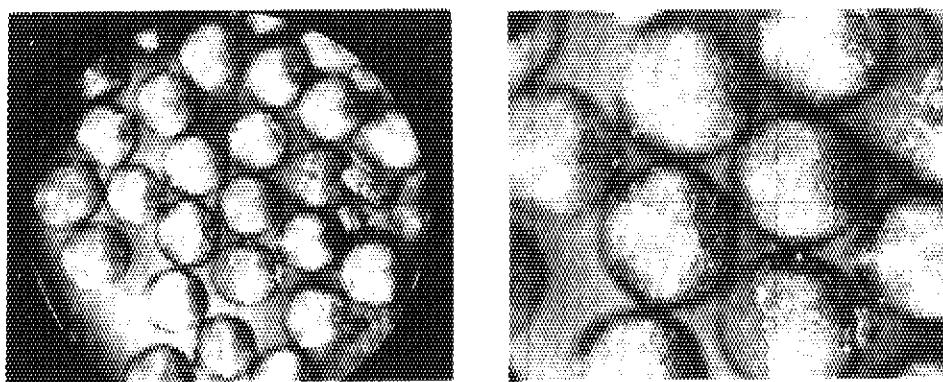


coated fuel particles locating
near inner surface of compact

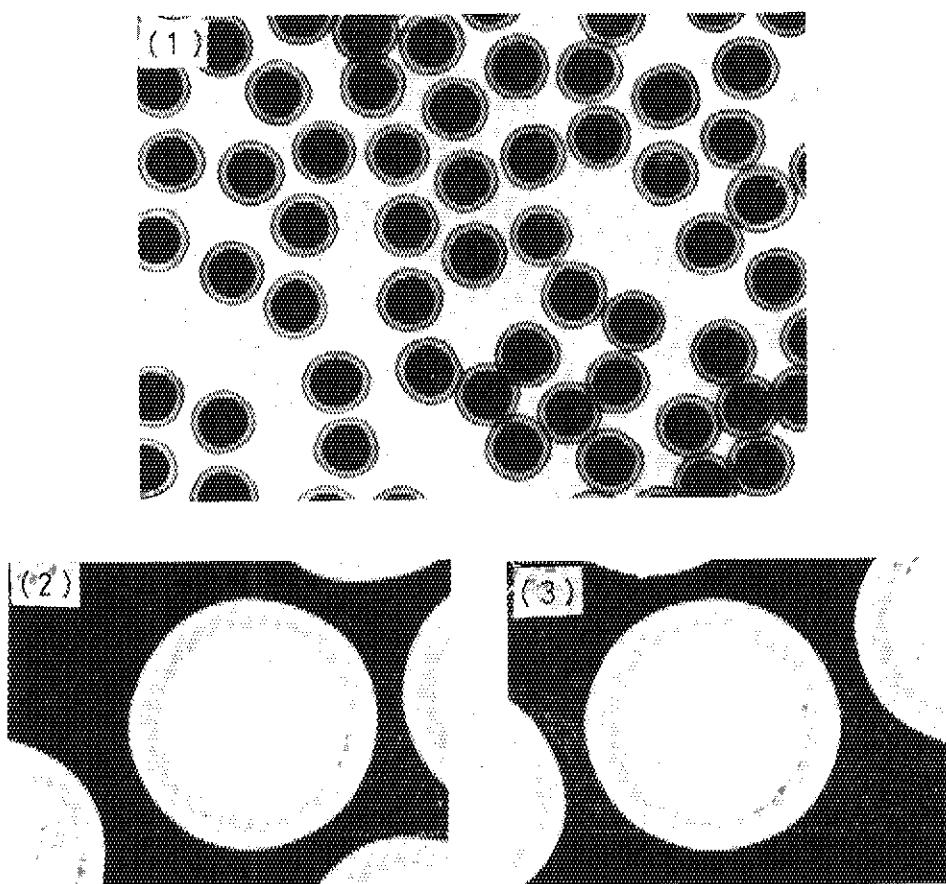


coated fuel particles locating
near outer surface of compact

Fig. 4.16(3) X-ray microradiographs of 2nd OGL-1 sliced fuel-compact
(2-215, 760P5-5).

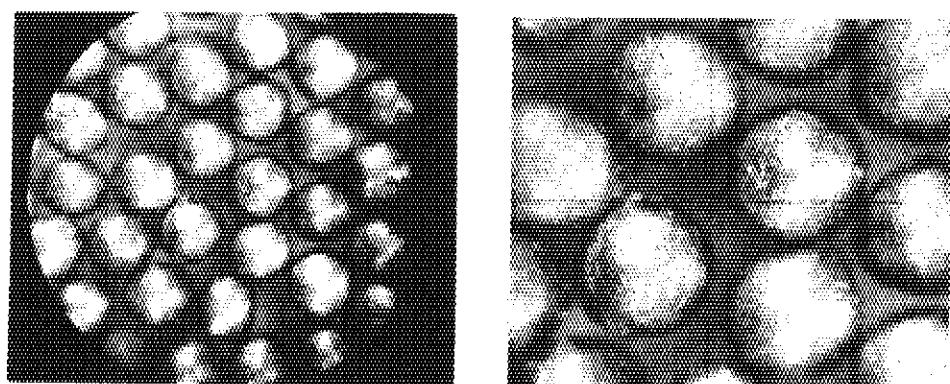


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

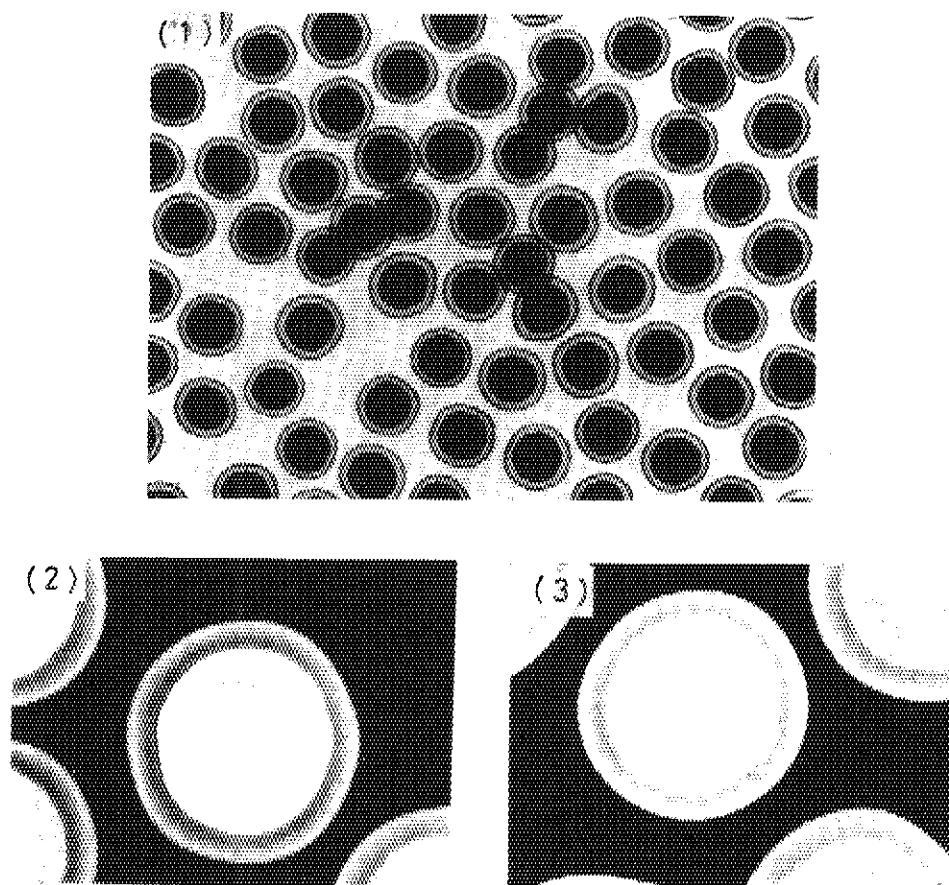


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.17(1) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(l-110, 750P1-10).

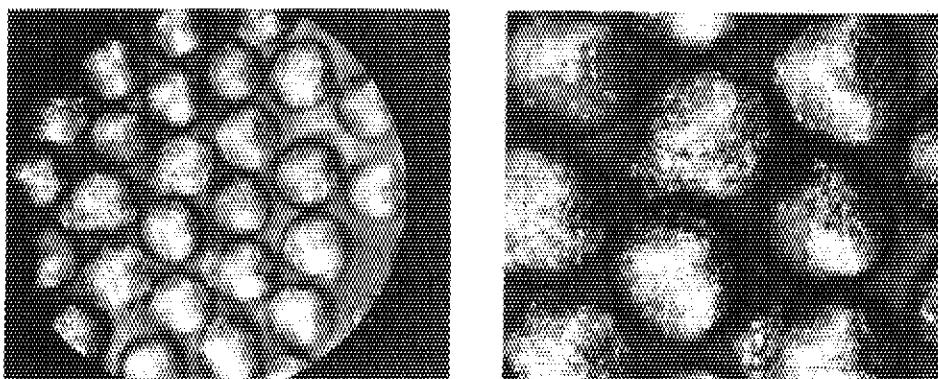


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

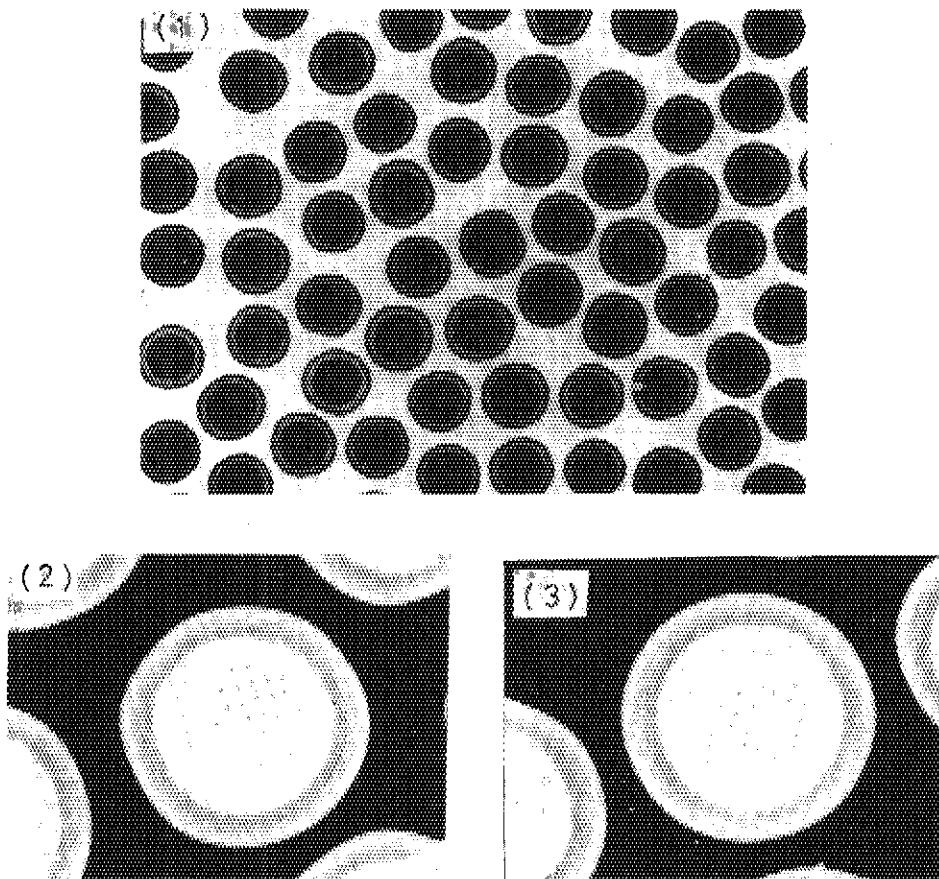


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.17(2) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact (l-201, 750P2-1).

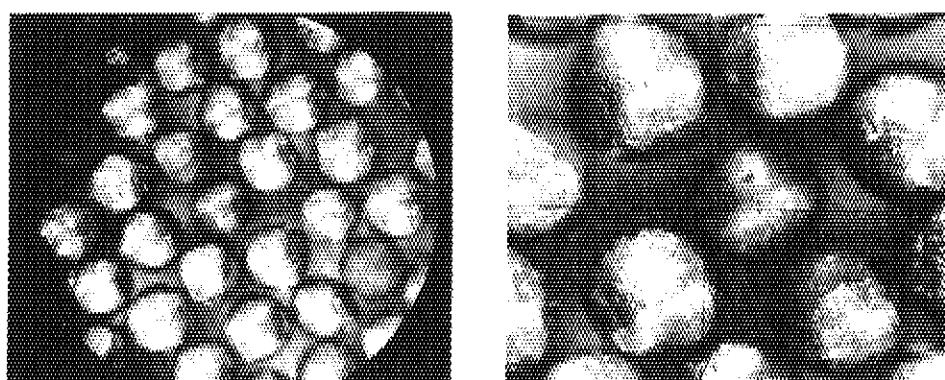


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

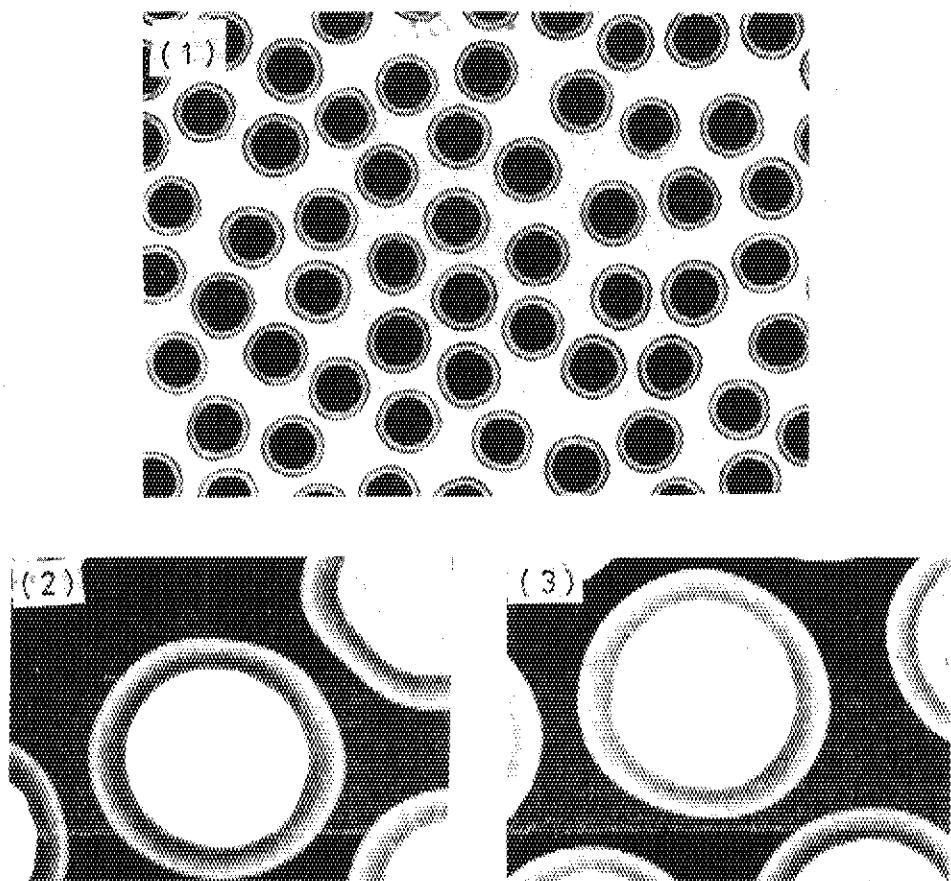


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.17(3) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(1-210, 750P3-1).

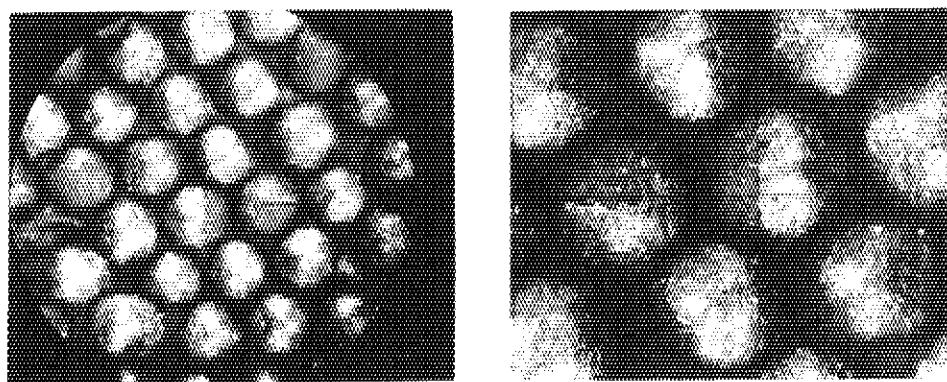


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration
of fuel compact.

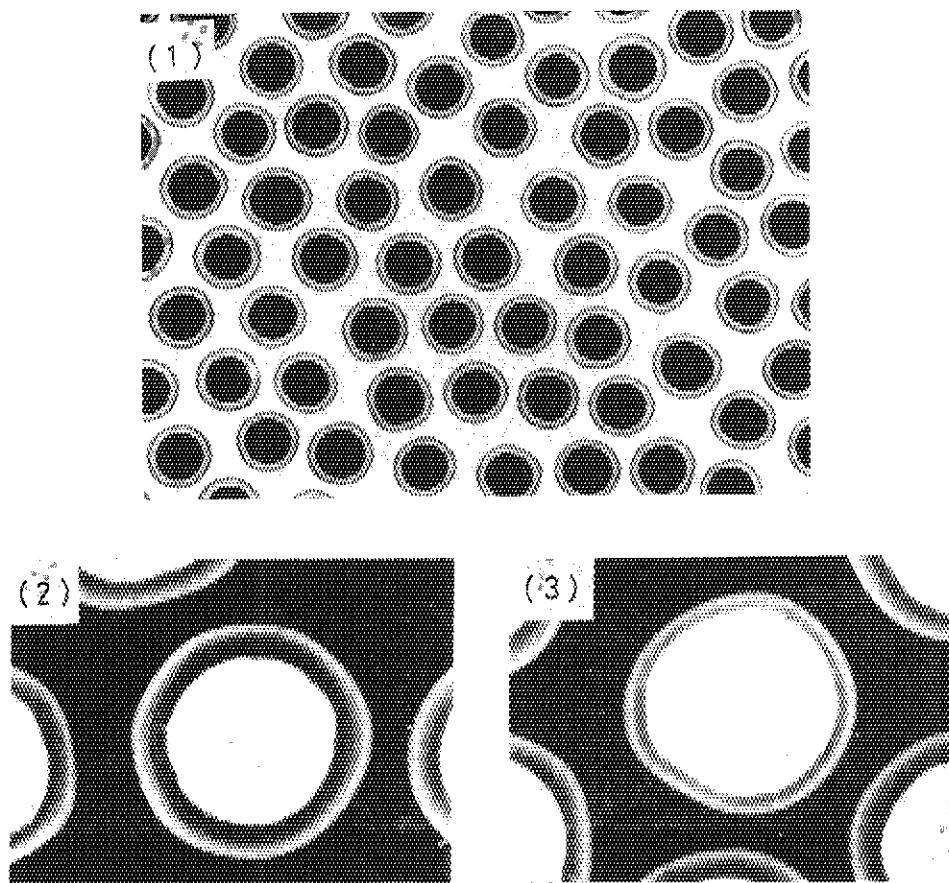


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration
of fuel compact.

Fig. 4.17(4) Surface inspection and X-ray microradiography of coated
fuel particles after disintegration of compact(1-218, 750P3-9).

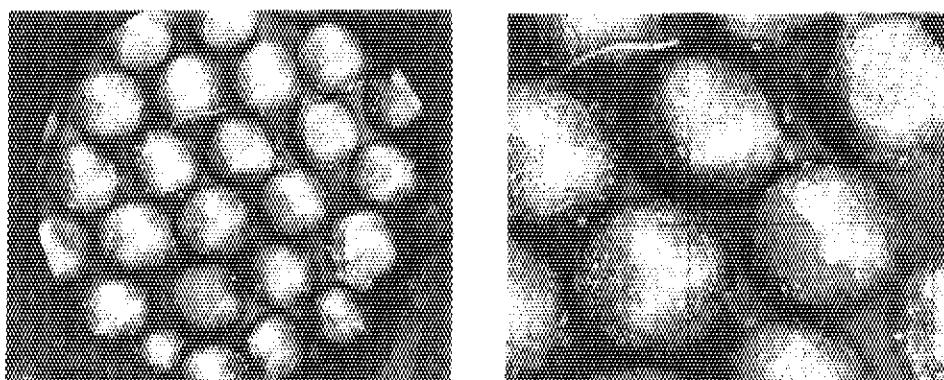


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

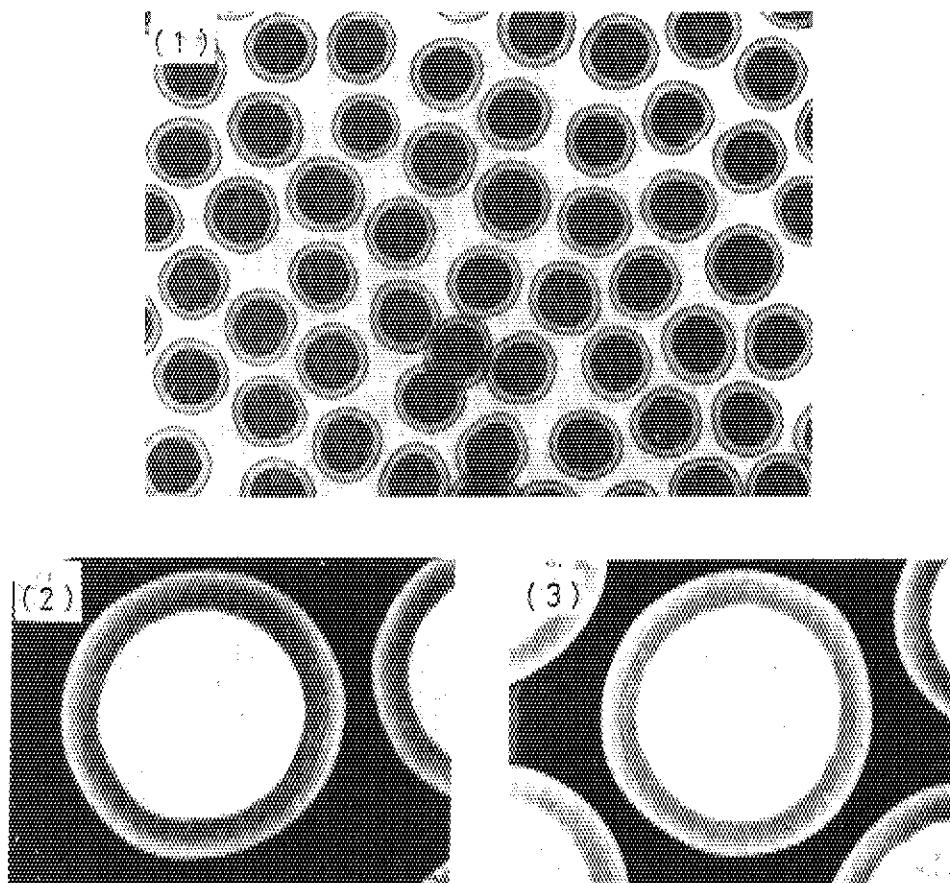


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.17(5) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(1-310, 750P3-10).

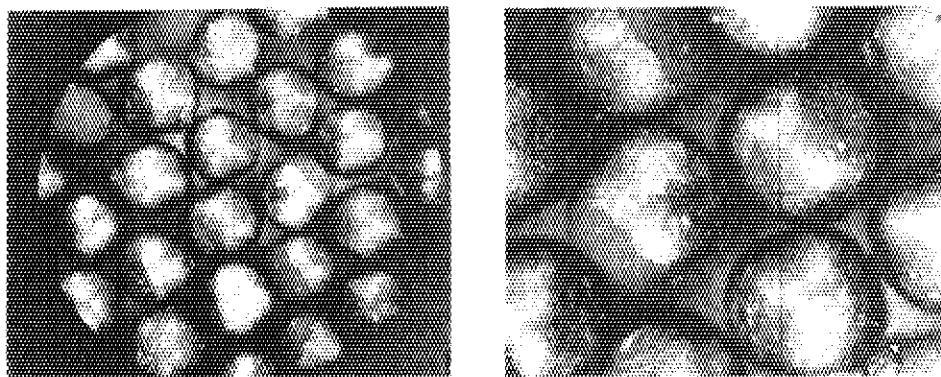


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

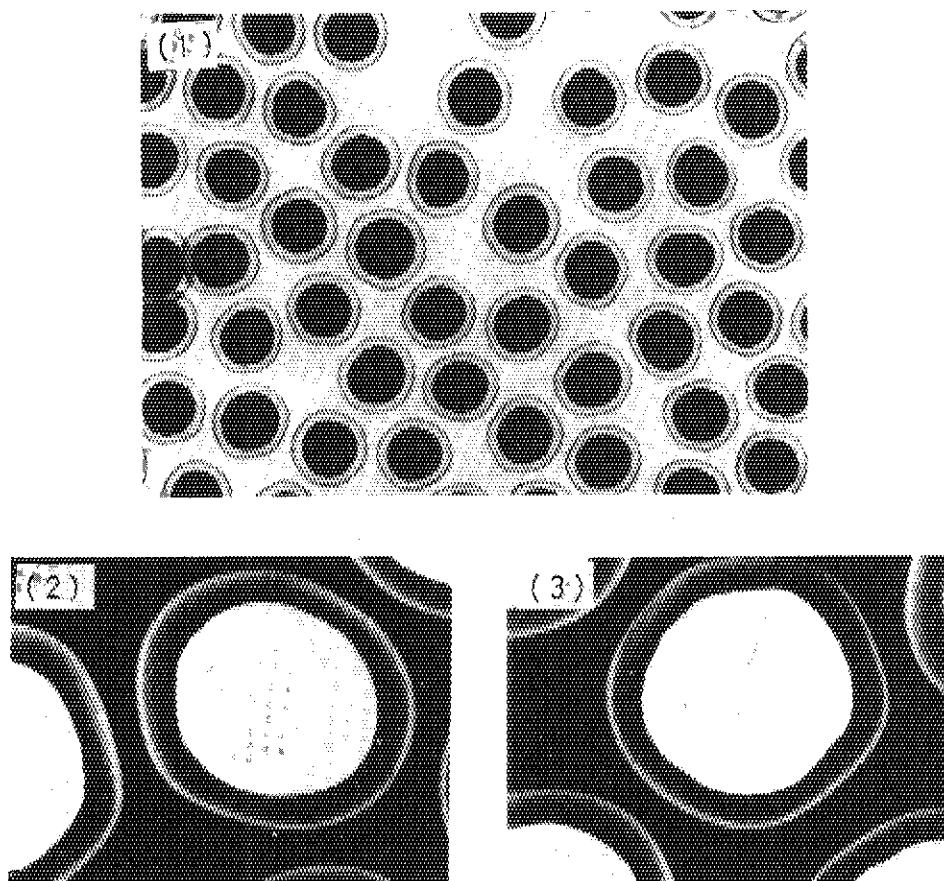


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.18(1) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(2-109, 760P4-3).

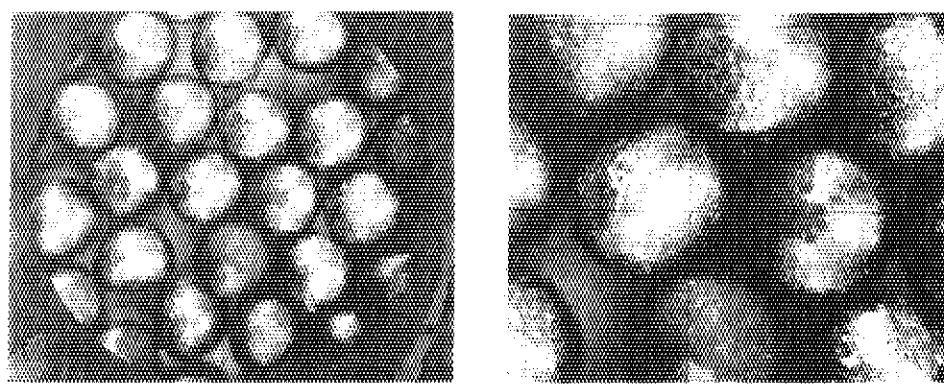


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

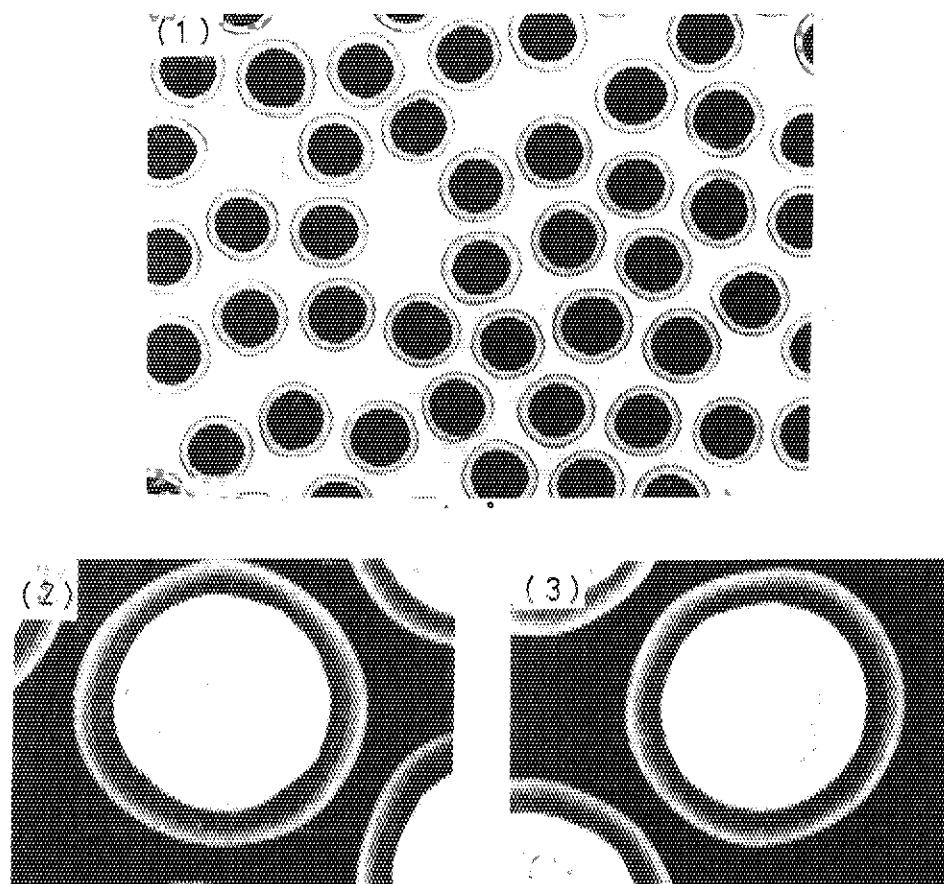


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.18(2) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(2-201, 760P2-10).

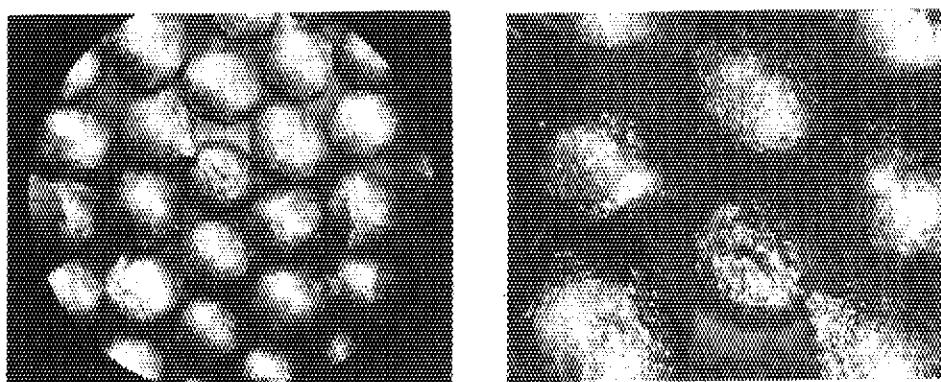


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

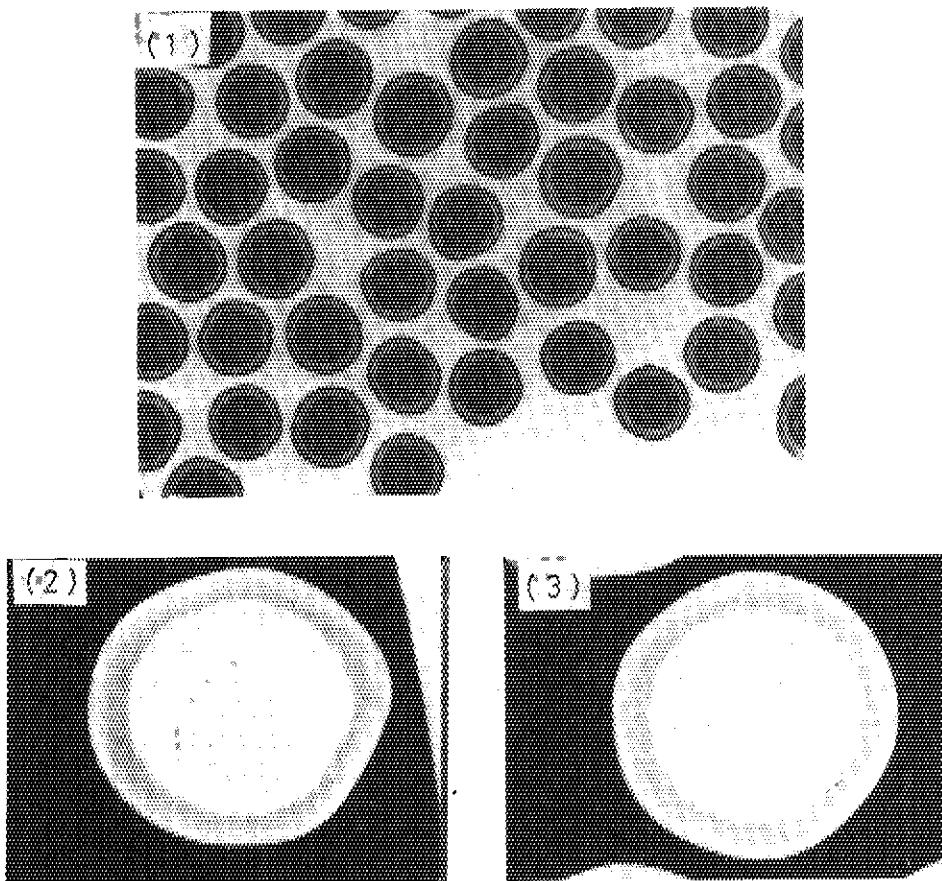


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.18(3) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(2 209, 760P4-9).

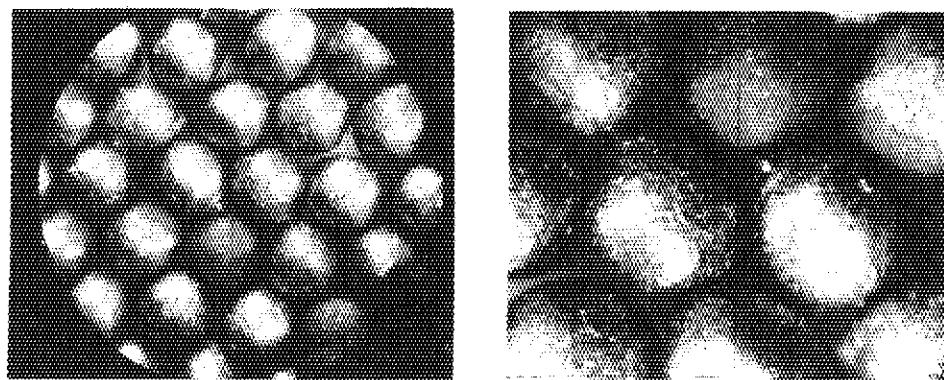


Surface appearance of coated fuel particles after disintegration
of fuel compact.

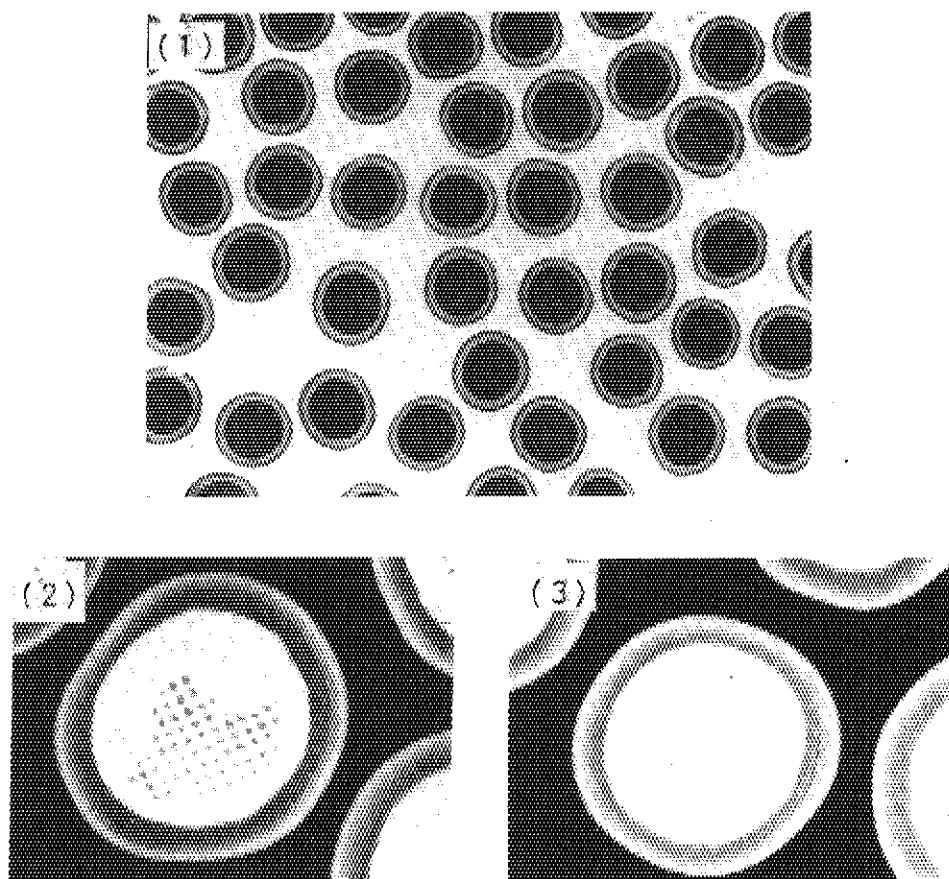


X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration
of fuel compact.

Fig. 4.18(4) Surface inspection and X-ray microradiography of coated
fuel particles after disintegration of compact(2-220, 760P3-7).



Surface appearance of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.



X-ray microradiographs of coated fuel particles after disintegration of fuel compact.

Fig. 4.18(5) Surface inspection and X-ray microradiography of coated fuel particles after disintegration of compact(2-309,760P4-15).

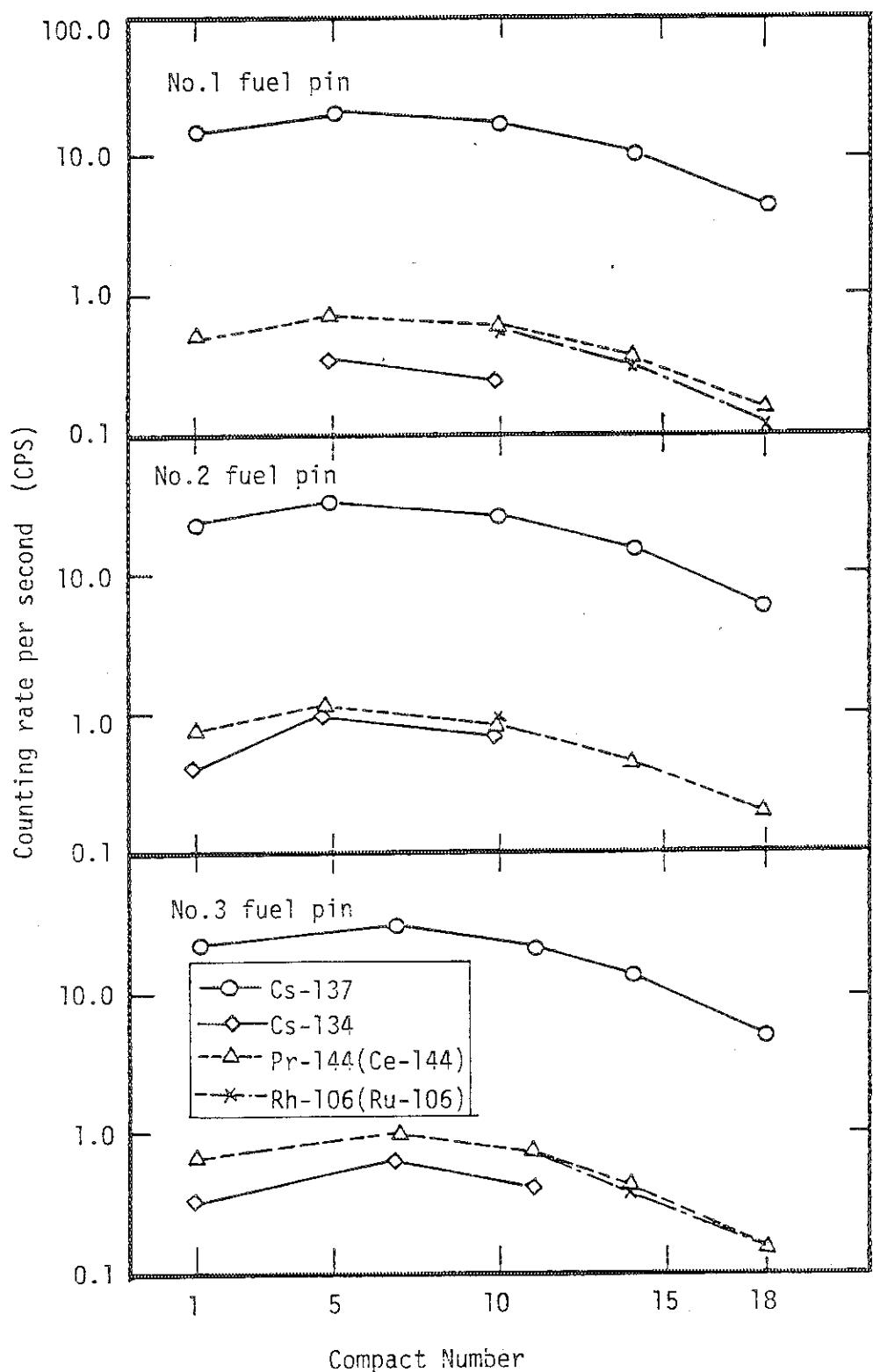


Fig.4.19 Fission-product profiles through fuel pins of 1st OGL-1 fuel body.

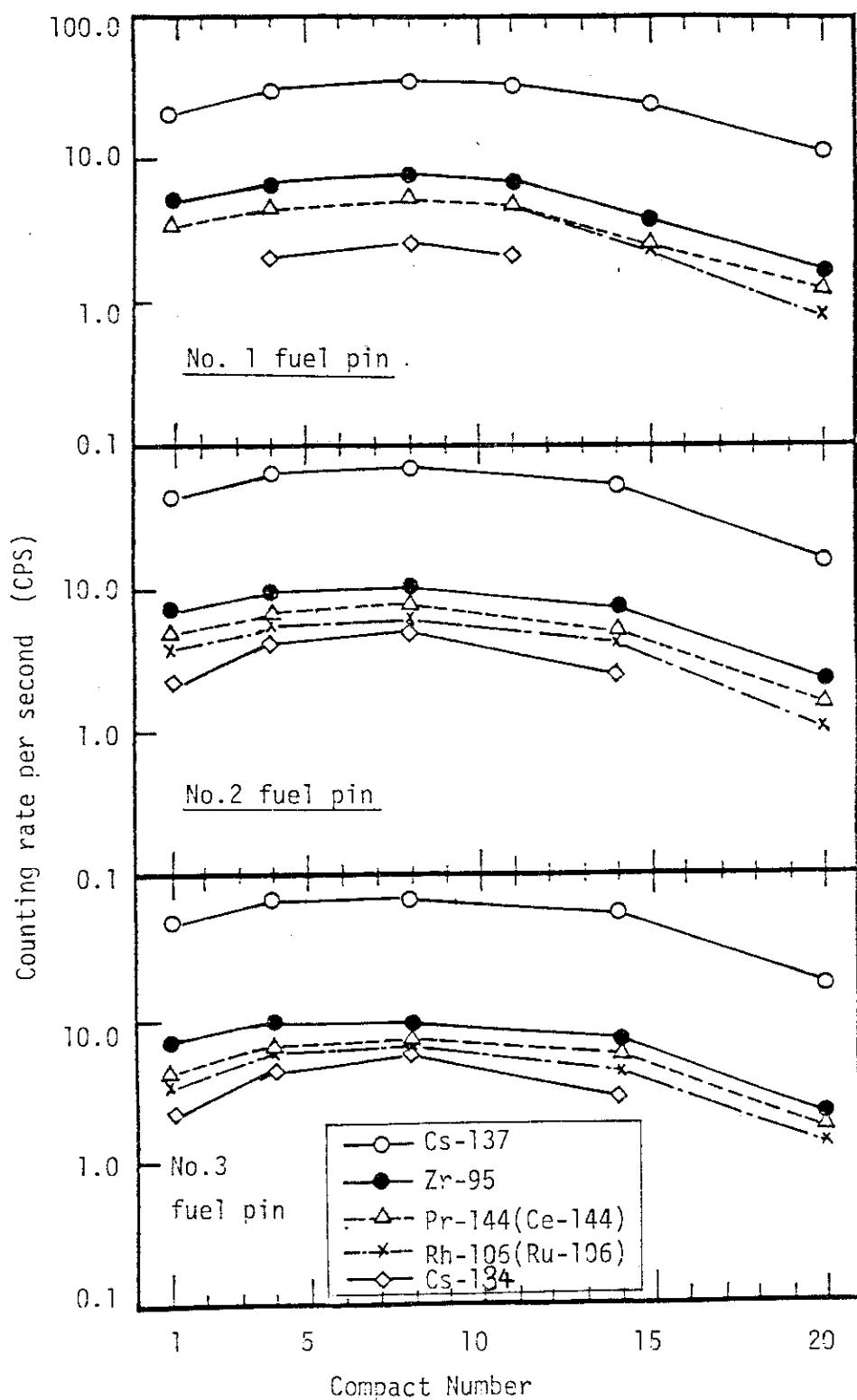


Fig. 4.20 Fission-product profiles through fuel pins
of 2nd OGL-1 fuel body.

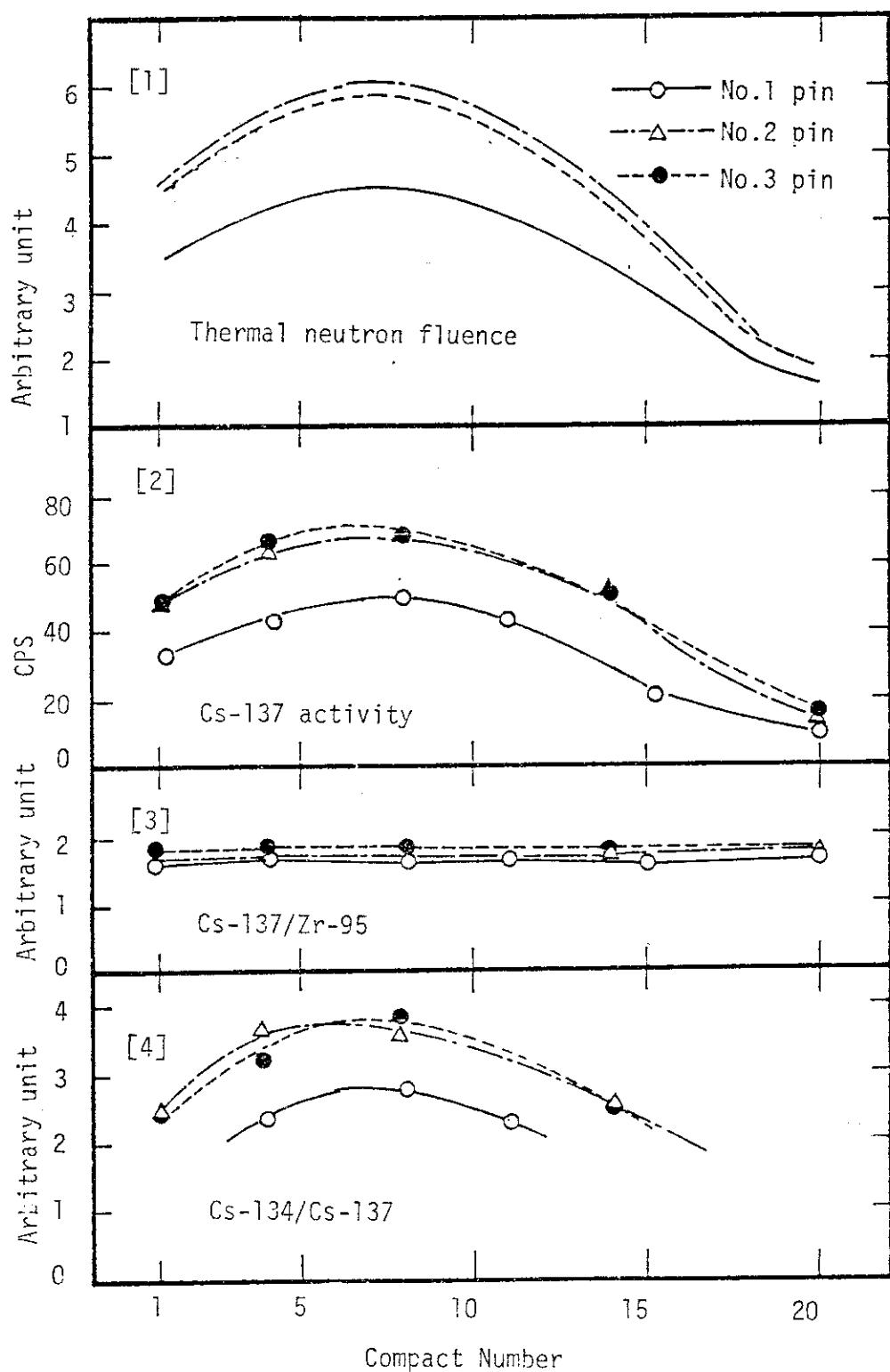


Fig. 4.21 Effect of neutron flux on fission-product generation.

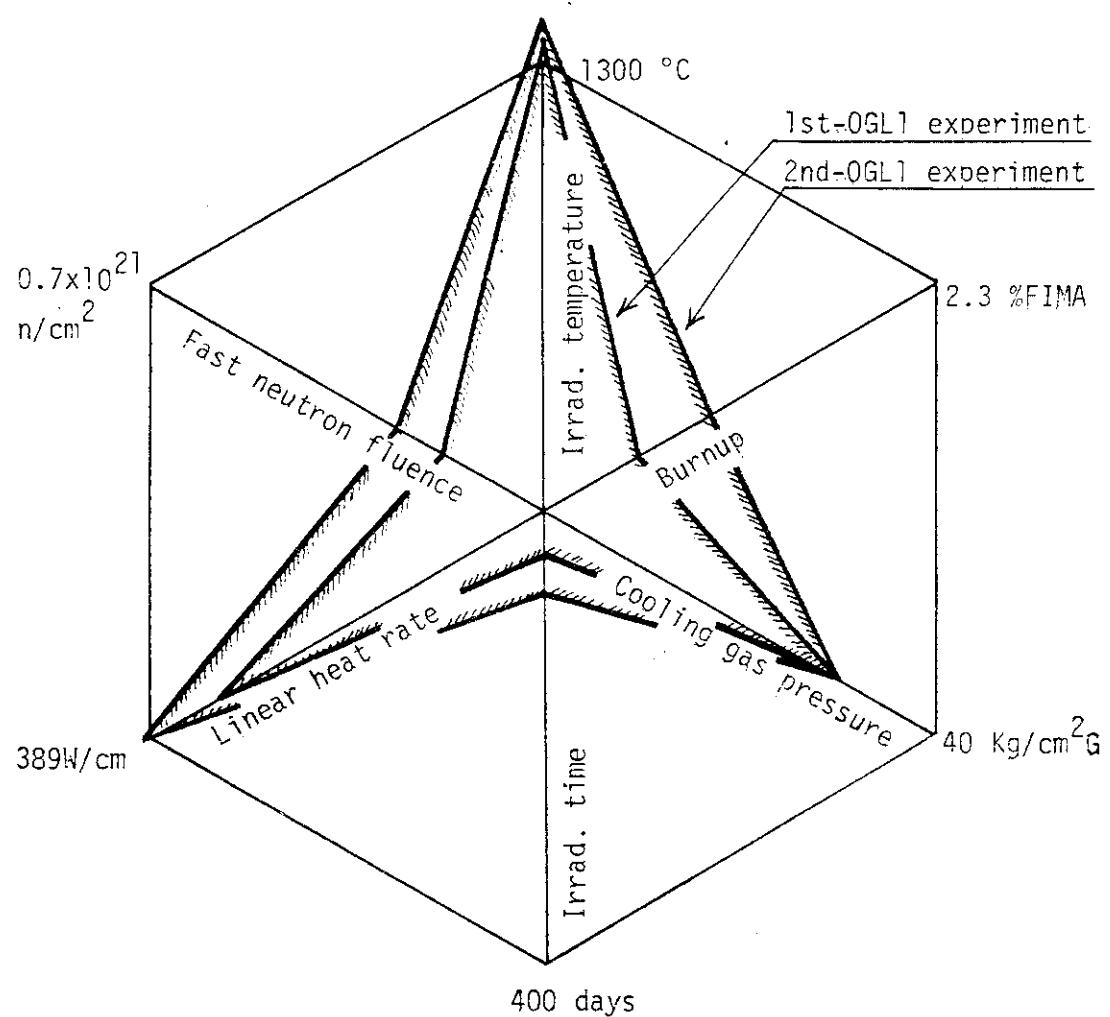


Fig. 4.22 Comparison of irradiation conditions of OGL-1 experiments and VHTR design.

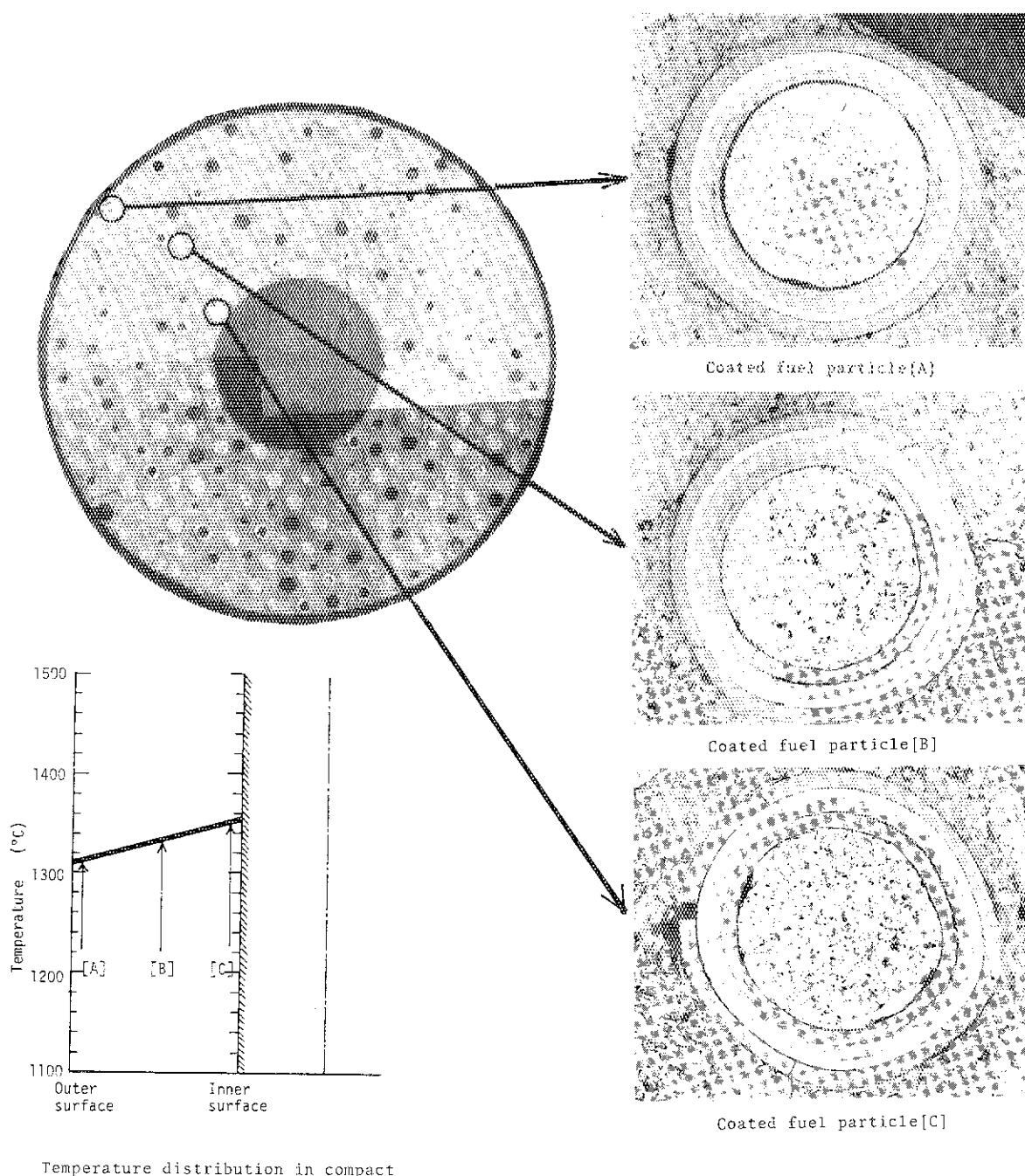


Fig. 4.23 Ceramographs of coated fuel particles and temperature distribution in 1st OGL-1 fuel-compact(1-209, 750P2-9).

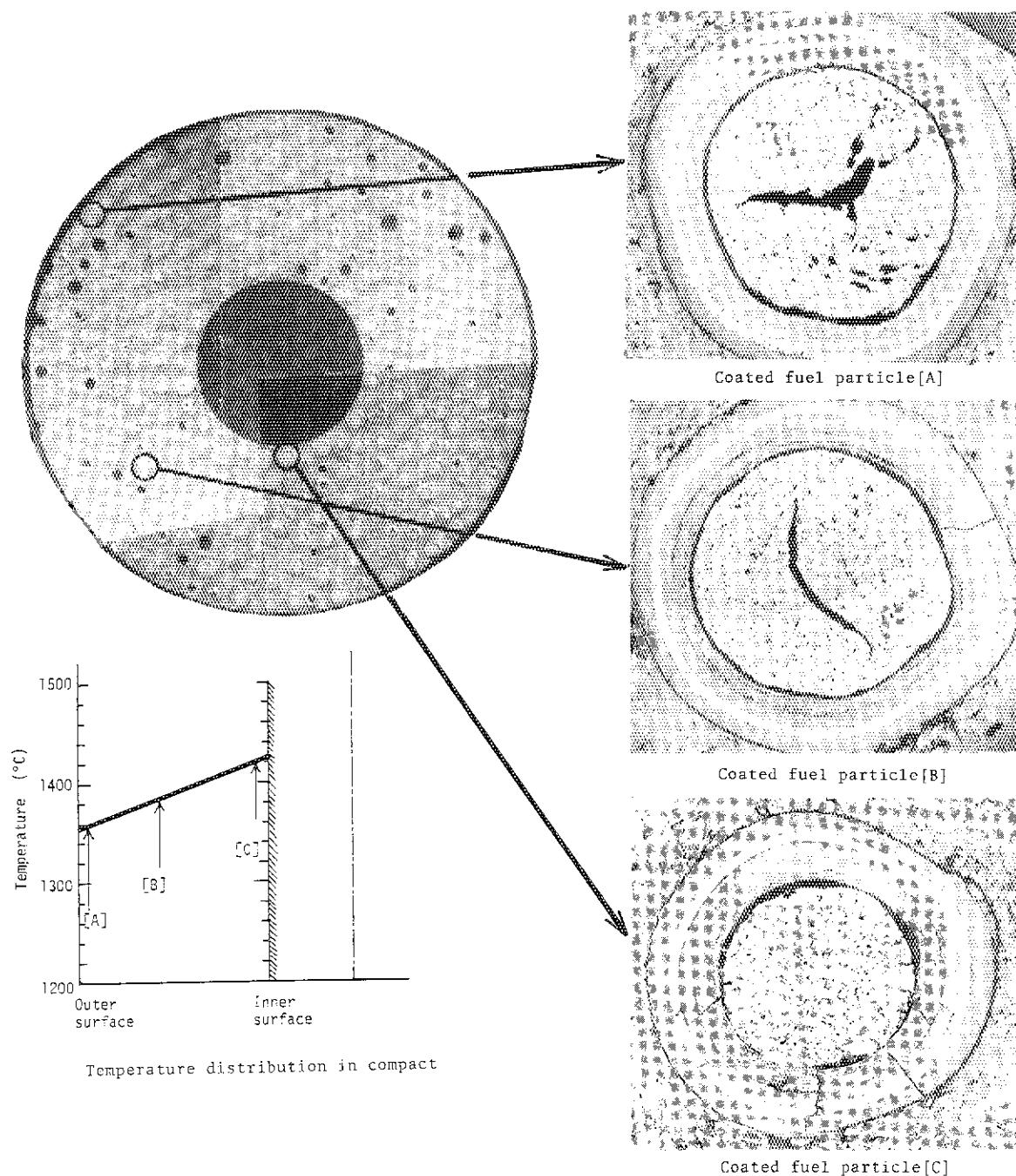


Fig. 4.24 Ceramographs of coated fuel particles and temperature distribution in 2nd OGL-1 fuel-compact(2-210, 760P4-8).

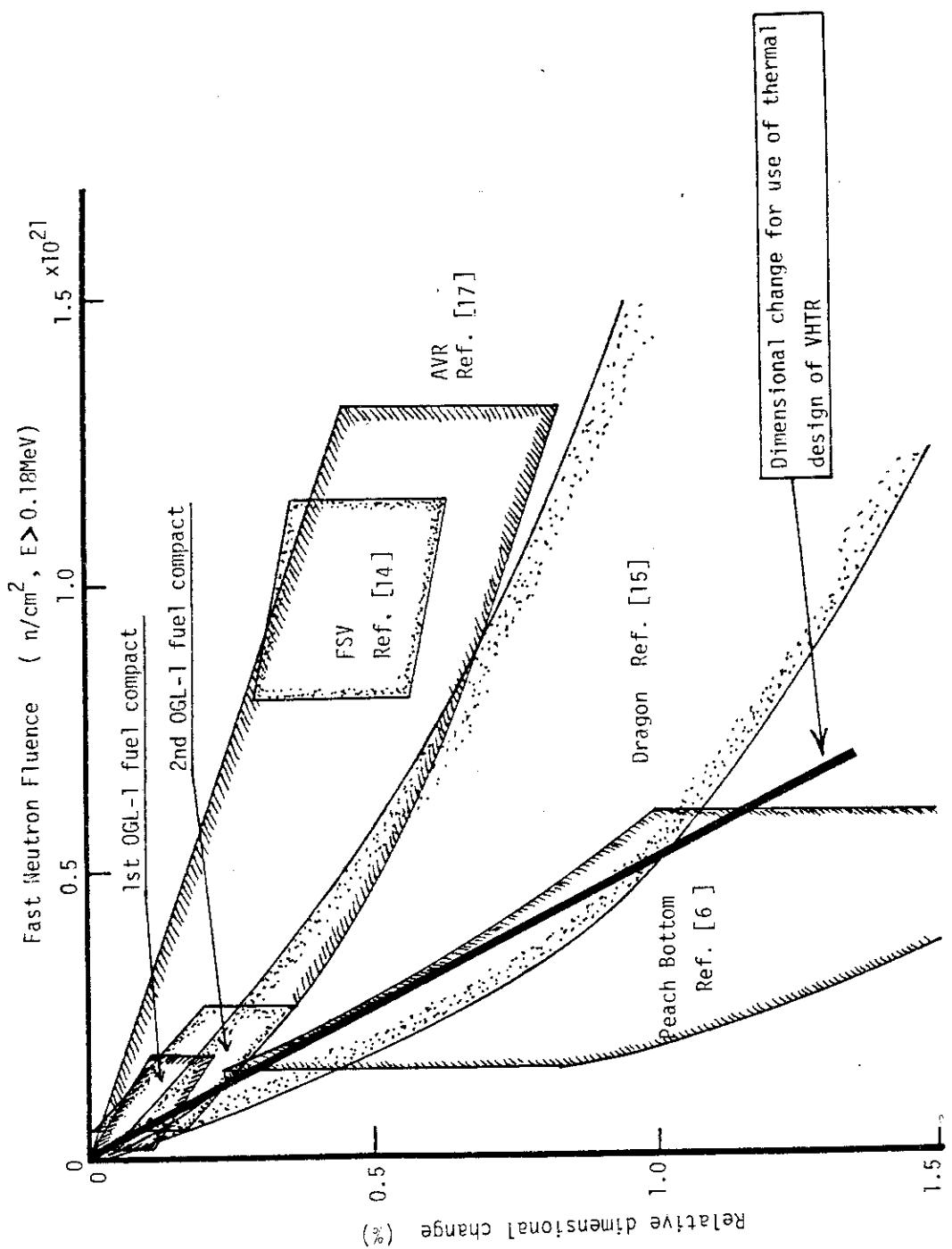


Fig. 4.25 Comparison of dimensional changes of various HTR fuels.

付 錄

App. 1.1 Characterization of coated particle for the 1st OGL-1 fuel.

Batch No.		Spec.	No. of samples	75OPC-1	75OPC-2	75OPC-3
UO_2 kernel		isotope ratio (w/o) (^{235}U)	12.0 ± 0.1	1	$^{234}\text{U}:0.0946$, $^{236}\text{U}:0.0349$, $^{238}\text{U}:87.92$	$^{235}\text{U}:11.95$
		diameter (μm)	500 ± 20	100	517	511
		std. dev. (μm)	<30	100	10.4	14.1
		O/U ratio	2.00 ± 0.01	2	2.01	2.01
		density (o/o TD)	95 ± 1.5	2	94.9	95.7
		sphericity (>95 o/o)	<1.1 , (>95 o/o)	100	100	100
Coating layer	1st layer	thickness (μm)	40 ± 5	40	42.7	40.8
		std. dev. (μm)	<5.4	40	4.6	4.5
		density (g/cm^3)	1.1 ± 0.1	2	1.18	1.14
	2nd layer	thickness (μm)	30 ± 5	40	32.2	32.5
		std. dev. (μm)	<3.8	40	2.9	3.2
		density (g/cm^3)	1.80 ± 0.05	10	1.82	1.83
		OPTAF	<1.03	2	1.007	0.986
	3rd layer	crystallite size (\AA)	30 ± 10	2	25	26
		thickness (μm)	25 ± 5	40	25.7	24.8
		std. dev. (μm)	<3.2	40	0.9	0.66
		density (g/cm^3)	$>3.20^{*1}$	10	3.204	3.204
		C/Si ratio	<1.10	2	1.02	1.02
	4th layer	free Si (w/o)	<0.5	2	0.1	0.1
		thickness (μm)	45 ± 5	40	46.4	43.0
		std. dev. (μm)	<5.4	40	3.3	3.4
		density (g/cm^3)	1.80 ± 0.05	2	1.80	1.77
Coated particle		OPTAF	<1.03	2	0.992	0.996
		crystallite size (\AA)	30 ± 10	2	30	31
		diameter (μm)		100	792	766
		std. dev. (μm)		100	18.6	19.6
		density (g/cm^3)		2	4.45	4.46
		U fraction (w/o)		2	61.9	61.7
		sphericity (>95 o/o)		100	100	100
	crushing load (Kg)			50	2.33 (94)	2.27 (94)
				2	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$
	contaminated U (\AA) ^{*2} fraction (B) ^{*3}				$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$
				2	2×10^{-5}	3×10^{-4}
						3×10^{-4}

^{*1} Confidence limit : 95 o/o^{*2} Failed particle fraction^{*3} Defective Sic layer fraction

App. 1.1 Continued

impurities (ppm)	As <1	1	<0.1	<0.1	<0.1
	Al <500		<20	<20	<20
	S <1		<0.2	<0.2	0.3
	C <300		<10	<10	10
	Ca <200		<20	20	40
	Cd <1		<0.3	<0.3	<0.3
	Cl <25		<10	<10	<10
	Cr <30		<10	<10	<10
	Cu <10		<5	<5	<5
	F <25		<10	<10	<10
	Fe <500		20	<20	<20
	Mg <100		10	10	4
	Mo <25		<5	<5	<5
	N <200		<10	<10	<10
	Ni <70		<20	<20	<20
	Pb <5		<1	<1	<1
	Si <200		40	<20	60
	Sn <20		<1	<1	2
	V.I <30 (volatile impurity)		17	<5	14

App.1.2 Chractarization of coated particles for the 2nd OGL-1 fuel.

Batch No.		Spec.	No. of sample	760PC-1	760PC-2	760PC-3	760PC-4	760PC-5
	isotope ratio (w/o)	12.0 ± 0.01 $^{235}_{238}\text{U}$	1	$^{234}\text{U}:0.0933$, $^{235}\text{U}:11.998$, $^{236}\text{U}:0.0351$ $^{238}\text{U}:87.874$				
UO_2 kernel	diameter (μm)	600 ± 50	100	581.5	585.3	598.6	603.7	
	std. dev. (μm)	<50	100	27.4	22.4	22.0	20.6	
	O/U ratio	$2.00-2.01$	2	2.01	2.01	2.01	2.01	
	density (o/o TD)	96 ± 1.5	2	96.4	96.2	95.3	96.0	
	sphericity ($>95\%$ o/o)	<1.1	100	95	100	98	98	
	impurities (ppm)							
	Ag < 1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
	Al < 500	1	<20	<20	<20	<20	<20	
	B < 1	1	0.6	0.7	0.8	0.7		
	C < 300	1	15	15	10	10		
	Ca < 200	1	25	25	25	25		
	Cd < 1	1	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	
	Cl < 25	1	<10	<10	<10	<10		
	Cr < 30	1	<10	<10	<10	<10		
	Cu < 10	1	<5	<5	<5	<5		
	F < 25	1	<10	<10	<10	<10		
	Fe < 500	1	<20	<20	<20	<20		
	Mg < 100	1	3	3	3	3		
	Mo < 25	1	<5	<5	<5	<5		
	N < 200	1	<10	<10	<10	<10		
	Ni < 70	1	<20	<20	<20	<20		
	Pb < 5	1	<1	<1	<1	<1		
	Si < 200	1	<20	70	70	70		
	Sn < 20	1	5	6	5	5		
	volatile impurities (ul/g UO_2)	< 80	1	16	17	15	28	
	1st layer	thickness (μm)	60 ± 7	40	61.2	59.8	59.0	58.5
		std.dev. (μm)	<9	40	8.5	8.9	8.9	7.4
		density (g/cm^3)	1.10 ± 0.01	2	1.16	1.16	1.19	1.15
	Coating layer	thickness (μm)	30 ± 5	40	27.1	28.0	30.2	30.0
		std.dev. (μm)	<3.8	40	1.9	2.6	2.9	2.0
		density (g/cm^3)	1.85 ± 0.05	10	1.839	1.855	1.860	1.860
		OPTAF	<1.05	5	1.011	1.015	1.014	1.009
		crystallite size (\AA)	30 ± 10	2	27.7	28.4	27.5	27.9
	3rd layer	thickness (μm)	25 ± 5	40	22.0	24.6	25.5	25.4
		std.dev. (μm)	<3.2	40	1.1	0.9	1.0	1.0
		density (g/cm^3)	>3.2 *1	10	3.205	3.206	3.209	3.208
		C/Si	$1.00-1.10$	2	1.02	1.02	1.02	1.01
		free Si (w/o)	<0.5	2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	4th layer	thickness (μm)	45 ± 5	40	41.7	42.1	44.7	42.8
		std.dev. (μm)	<5.4	40	4.2	4.1	4.2	3.0
		density (g/cm^3)	1.85 ± 0.05	2	1.814	1.881	1.857	1.876
		OPTAF	<1.03	5	1.002	0.997	0.999	0.997
		crystallite size (\AA)	30 ± 10	2	32.1	32.8	33.0	32.1
	coated particle	diameter (μm)	920 ± 40	100	886.3	886.9	895.0	889.6
		std.dev. (μm)	<35	100	33.7	34.1	31.6	27.0
		sphericity	<1.1	100	99	100	97	97
			($>95\%$ o/o)					
		crushing load (Kg) *2	>2.0	50	2.25	2.12	2.41	2.37
		contaminated U (A) *3	$<5 \times 10^{-5}$	2	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$
			(B) *3	$<1 \times 10^{-3}$	1.8×10^{-4}	9×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}
								1.5×10^{-5}

*1 Confidence limit : 95 o/o

*2 Failed particle fraction

*3 Defective SiC layer fraction

App.1.3 Characterization of graphite powder for the 1st and 2nd OGL-1 fuel compacts.

Name		natural graphite (Ringsdorff, KR-316)	artificial graphite (Kropfmühl, FP-99.99)
Grain size	+71µm	- 3.2%	-100µm - 100%
	+40µm	- 15.5%	- 63µm - 95%
	+32µm	- 9.5%	- 36µm - 71%
	+25µm	- 12.3%	
	+20µm	- 14.3%	
	+15µm	- 13.9%	
	+10µm	- 13.6%	
	+ 5µm	- 11.6%	
	- 5µm	- 6.1%	
Specific surface area		4.8 m ² /g	1.23 m ² /g
Density	real density	2.259 g/cm ³	2.15 g/cm ³
	pored density		0.54 g/cm ³
	settled density		0.90 g/cm ³
Ash		60 ppm	30 ppm
Impurities (ppm)	Ag	0.1	
	Al	2.5	
	B	0.05	0.04
	Ca	6	
	Cd	0.1	
	Co	0.02	
	Cr	2.1	
	Fe	11	
	Mo	1.9	
	Ni	3.1	
	S	38	
	Si	31	
	Ti	1	
	V	0.1	
Dy+Eu+Gd+Sm		0.02	
Equivalent boron content		0.144	

App. 1.4 Characterization of the 1st OGL-1 fuel compacts.

Item	Dimension (mm) mean value			U (g)	Weight (g)	Coated particle loading fraction (v/o)	Matrix density (g/cm ³)	H.F. (o/o)	Contaminated U fraction	
	outer diameter	inner diameter	length						A ^{*2}	B ^{*3}
Spec.	24.0±0.1	8.0±0.05	40±1			22 ± 1	≥ 1.65		≤ 10 ⁻⁴	
75OP1-1	23.99	8.01	39.87	9.74	36.741	22.1	1.68			
75OP1-2	23.99	8.01	39.99	9.74	36.790	22.0	1.68			
75OP1-3	23.98	8.01	39.93	9.74	36.744	22.1	1.68			
75OP1-4	23.96	8.01	40.00	9.74	36.752	22.1	1.68			
75OP1-5	23.99	8.01	39.95	9.74	36.747	22.0	1.68			
75OP1-6	23.99	8.01	39.98	9.74	36.769	22.0	1.68	4.1		
75OP1-7	23.98	8.01	39.97	9.74	36.768	22.0	1.68			
75OP1-8	23.98	8.01	39.99	9.74	36.780	22.0	1.68			
75OP1-9	23.99	8.01	40.00	9.74	36.720	22.0	1.67			
75OP1-10	23.99	8.01	39.98	9.74	36.723	22.0	1.68			
75OP1-11	23.99	8.01	39.98	9.74	36.718	22.0	1.68	4.3	2x10 ⁻⁵	
75OP1-12	23.97	8.01	39.96	9.74	36.747	22.1	1.68			
75OP1-13	23.97	8.01	39.97	9.74	36.796	22.1	1.69			
75OP1-14	23.99	8.01	39.99	9.74	36.776	22.0	1.68			
75OP1-15	23.99	8.01	39.96	9.74	36.802	22.0	1.68			
75OP1-16	24.00	8.01	39.99	9.74	36.798	22.0	1.68	3.7		
75OP1-17	23.99	8.01	39.98	9.74	36.782	22.0	1.68			
75OP1-18	23.98	8.01	39.98	9.74	36.793	22.0	1.68			
75OP1-19	23.98	8.01	40.00	9.74	36.770	22.0	1.68			
75OP1-20	23.99	8.01	40.01	9.74	36.769	22.0	1.68			
75OP2-1	23.99	8.02	40.03	9.74	36.848	22.0	1.68			
75OP2-2	24.00	8.02	40.09	9.74	36.832	22.0	1.67			
75OP2-3	23.96	8.02	40.02	9.74	36.818	22.1	1.68			
75OP2-4	23.99	8.02	40.07	9.74	36.819	22.0	1.68			
75OP2-5	23.96	8.02	40.02	9.74	36.823	22.1	1.68			
75OP2-6	23.98	8.02	40.05	9.74	36.835	22.0	1.68	4.7		
75OP2-7	23.98	8.02	40.03	9.74	36.845	22.0	1.68			
75OP2-8	23.99	8.02	40.02	9.74	36.841	22.0	1.68			
75OP2-9	23.99	8.02	40.02	9.74	36.783	22.0	1.68			
75OP2-10	23.99	8.01	40.03	9.74	36.834	22.0	1.68			
75OP2-11	23.99	8.02	40.05	9.74	36.834	22.0	1.68	0.6	3x10 ⁻⁵	
75OP2-12	23.99	8.02	40.03	9.74	36.821	22.0	1.68			
75OP2-13	23.99	8.02	40.01	9.74	36.793	22.0	1.68			
75OP2-14	23.99	8.01	40.03	9.74	36.798	22.0	1.68			
75OP2-15	23.99	8.02	40.04	9.74	36.805	22.0	1.68			
75OP2-16	23.99	8.02	40.08	9.74	36.823	22.0	1.68	0.0		
75OP2-17	23.99	8.02	40.03	9.74	36.849	22.0	1.68			
75OP2-18	23.99	8.02	40.02	9.74	36.863	22.0	1.68			
75OP2-19	23.99	8.01	39.99	9.74	36.844	22.0	1.68			
75OP2-20	23.99	8.01	40.04	9.74	36.863	22.0	1.68			

*1 Homogeneity of U in compact

*2 Failed particle fraction

*3 Defective SiC layer fraction

App.1.4 Continued

Item	Dimension (mm) (mean value)			U (g)	Weight (g)	Coated particle loading fraction (v/o)	Matrix density (g/cm ³)	H.F. ^{*1} (o/o)	Contaminated U fraction	
	outer diameter	inner diameter	length						A ^{*2}	B ^{*3}
Spec.	24.0±0.1	8.0±0.05	40±1			22 ± 1	≥1.65		≤10 ⁻⁴	
75OP3-1	24.04	8.00	40.17	9.35	36.693	21.8	1.65			
75OP3-2	24.03	8.01	40.19	9.35	36.710	21.8	1.66			
75OP3-3	24.01	8.01	40.33	9.35	36.741	21.8	1.65			
75OP3-4	24.02	8.01	40.37	9.35	36.708	21.8	1.65			
75OP3-5	24.03	8.01	40.37	9.35	36.709	21.7	1.65		2.5	
75OP3-6	24.03	8.01	40.31	9.35	36.704	21.8	1.65			
75OP3-7	24.04	8.01	40.36	9.35	36.656	21.7	1.65			
75OP3-8	24.02	8.02	40.35	9.35	36.778	21.8	1.65			
75OP3-9	24.01	8.01	40.37	9.35	36.720	21.8	1.65			
75OP3-10	24.02	8.01	40.37	9.35	36.754	21.7	1.65		4.1	3x10 ⁻⁵
75OP3-11	24.02	8.02	40.36	9.35	36.798	21.8	1.66			1x10 ⁻³
75OP3-12	24.01	8.01	40.37	9.35	36.698	21.8	1.65			
75OP3-13	24.02	8.01	40.34	9.35	36.769	21.8	1.65			
75OP3-14	24.02	8.01	40.35	9.35	36.748	21.8	1.65			
75OP3-15	24.00	8.01	40.34	9.35	36.758	21.8	1.66			
75OP3-16	24.02	8.01	40.36	9.35	36.742	21.8	1.65		2.0	
75OP3-17	24.02	8.01	40.34	9.35	36.754	21.8	1.65			
75OP3-18	24.02	8.02	40.37	9.35	36.771	21.8	1.65			
75OP3-19	24.02	8.01	40.38	9.35	36.731	21.8	1.65			
75OP3-20	24.03	8.01	40.37	9.35	36.817	21.7	1.65			

*1 Homogeneity of U in compact

*2 Failed particle fraction

*3 Defective SiC layer fraction

App.1.5 Characterization of the 2nd OGL-1 fuel compacts.

Item	Dimension (mm) (mean value)			U (g)	weight (g)	Coated particle loading fraction (v/o)	Matrix density (g/cm ³)	H.F. *1 (o/o)	Contaminated U fraction	
	outer diameter	inner diameter	length						A ^{*2}	B ^{*3}
Spec.	24.0±0.1	8.0±0.05	36±1.0			30 ± 1	1.65	10	1x10 ⁻⁴	
760P1-1	24.06	8.02	36.12	11.98	36.588	30.1	1.69			
760P1-2	24.02	8.01	36.05	11.98	36.066	30.2	1.71			
760P1-3	24.01	8.02	36.01	11.98	36.623	30.3	1.71	3.7		
760P1-4	24.02	8.02	35.92	11.98	36.623	30.3	1.71	4.2	<2x10 ⁻⁵	
760P1-5	24.01	8.01	36.00	11.98	36.066	30.2	1.71			2x10 ⁻⁵
760P1-6	24.03	8.02	36.02	11.98	36.585	30.1	1.70	3.0		
760P1-7	24.02	8.01	36.01	11.98	36.638	30.2	1.71			
760P1-8	24.02	8.01	35.98	11.98	36.625	30.3	1.70			
760P2-1	23.96	7.98	35.93	12.13	37.010	30.4	1.72			
760P2-2	23.96	7.98	36.00	12.13	37.023	30.5	1.72			
760P2-3	23.96	8.00	36.00	12.13	37.140	30.7	1.73	2.5		
760P2-4	23.94	8.00	36.00	12.13	37.148	30.8	1.73			
760P2-5	23.96	8.00	35.99	12.13	36.815	30.3	1.73		<2x10 ⁻⁵	
760P2-6	23.94	8.00	35.94	12.13	36.838	30.4	1.73			6.4x10 ⁻⁴
760P2-7	23.94	8.00	35.99	12.13	36.854	30.3	1.73	4.4		
760P2-8	23.95	8.00	35.93	12.13	36.844	30.3	1.73			
760P2-9	23.97	8.00	35.96	12.13	36.812	30.3	1.73			
760P2-10	23.98	8.00	36.00	12.13	36.813	30.2	1.72			
760P2-11	23.95	8.00	35.89	12.13	36.825	30.4	1.74	0.4		
760P2-12	23.95	8.00	35.94	12.13	36.876	30.4	1.74			
760P2-13	23.94	8.00	35.95	12.13	36.839	30.4	1.74			
760P2-14	23.94	8.00	35.94	12.13	36.861	30.4	1.74			
760P2-15	23.95	8.00	36.00	12.13	36.835	30.3	1.73			
760P3-1	23.97	8.02	36.06	12.11	37.272	29.7	1.73			
760P3-2	23.99	8.01	36.07	12.11	37.260	29.7	1.73			
760P3-3	23.98	8.02	36.01	12.11	37.269	29.7	1.74			
760P3-4	23.99	8.02	36.00	12.11	37.276	29.7	1.73	3.4		
760P3-5	23.99	8.02	36.03	12.11	37.276	29.7	1.73		<2x10 ⁻⁵	
760P3-6	24.04	8.00	35.95	12.11	37.046	29.7	1.71			1.2x10 ⁻⁴
760P3-7	24.01	7.99	35.92	12.11	37.075	29.8	1.72			
760P3-8	24.01	7.99	35.93	12.11	37.106	29.8	1.72	5.8		
760P3-9	24.01	8.00	35.88	12.11	37.102	29.8	1.72			
760P3-10	24.01	7.99	35.93	12.11	37.099	29.8	1.72			
760P3-11	24.03	8.00	35.98	12.11	37.106	29.7	1.72	2.0		
760P3-12	24.01	8.00	35.96	12.11	37.107	29.0	1.72			
760P3-13	24.01	8.00	35.93	12.11	37.107	29.8	1.72			
760P3-14	24.03	8.00	35.92	12.11	37.118	29.8	1.72			
760P3-15	24.01	8.00	35.93	12.11	37.117	29.8	1.72			
760P3-16	24.00	8.00	35.93	12.11	37.124	29.8	1.73			
760P4-1	24.05	8.02	36.04	12.29	37.317	29.5	1.72			
760P4-2	24.05	8.02	36.01	12.29	37.303	29.6	1.72			
760P4-3	24.05	8.01	36.06	12.29	37.324	29.5	1.72			
760P4-4	24.05	8.02	36.05	12.29	37.319	29.5	1.72	2.5		
760P4-5	24.05	8.02	36.06	12.29	37.320	29.5	1.72			
760P4-6	24.05	8.02	36.05	12.29	37.256	29.6	1.71			
760P4-7	24.02	8.00	35.95	12.29	37.155	29.7	1.72			
760P4-8	24.02	8.00	35.98	12.29	37.158	29.8	1.72		<2x10 ⁻⁵	
760P4-9	24.02	8.00	35.92	12.29	37.170	29.7	1.72	0.6		3x10 ⁻⁴
760P4-10	24.03	8.00	35.95	12.29	37.160	29.7	1.72			
760P4-11	24.02	8.00	35.99	12.29	37.133	29.8	1.72			
760P4-12	24.02	8.00	35.96	12.29	37.144	29.7	1.71			
760P4-13	24.02	8.00	35.91	12.29	37.135	29.8	1.71			
760P4-14	24.02	8.00	35.94	12.29	37.154	29.8	1.72	1.3		
760P4-15	24.03	8.00	35.94	12.29	37.143	29.7	1.71			
760P4-16	24.02	8.00	35.93	12.29	37.156	29.7	1.71			
760P4-17	24.03	8.00	35.97	12.29	37.145	29.7	1.71			
760P4-18	24.02	8.00	35.96	12.29	37.143	29.7	1.71			

App.1.5 Continued

760PS-1	23.95	8.01	36.04	12.68	37.558	30.3	1.73			
760PS-2	23.95	8.01	36.05	12.68	37.555	30.3	1.73			
760PS-3	23.97	8.01	36.01	12.68	37.563	30.3	1.73	3.8		
760PS-4	23.97	8.00	35.97	12.68	37.551	30.3	1.73			
760PS-5	23.97	8.01	36.02	12.68	37.569	30.3	1.73		$<2 \times 10^{-5}$	
760PS-6	23.98	8.01	36.04	12.68	37.569	30.3	1.73	4.2		3.4×10^{-4}
760PS-7	24.01	8.01	36.06	12.68	37.579	30.1	1.72			
760PS-8	23.97	8.02	36.01	12.68	37.571	30.3	1.73			
760PS-9	23.96	8.01	36.04	12.68	37.566	30.3	1.73	4.0		
760PS-10	23.96	8.01	35.99	12.68	37.563	30.3	1.74			
760PS-11	23.96	8.00	35.96	12.68	37.542	30.4	1.74			
760PS-12	23.97	8.01	36.03	12.68	37.555	30.3	1.73			

*1 Homogeneity of U in compact.

*2 Failed particle fraction.

*3 Defective SiC layer fraction.

App.1.6 Characterization of graphite for the 1st OGL-1 fuel assembly

Name	Spec.	IG-11	SE2-24
Bulk density (g/cm ³)		1.78	1.72
Shore hardness		53	40-43
Electric resistance ($\mu\Omega\text{cm}$)		1078	1100
Flexual strength (Kg/cm ²)		368	280
Compressive strength (Kg/cm ²)		791	—
Tensile strength (Kg/cm ²)	$\leq 130^*$	263	—
Ash (%)	≤ 0.20	0.17	0.002
Impurities (ppm)	B Ti	≤ 3 13.26	0.169 —

* IG-11

App.1.7 Characterization of graphite fiber for the 1st OGL-1 fuel pins

Density (g/cm ³)	2.0
Diameter (μm)	8
Tensile strength (Kg/mm ²)	100
Modulus of elasticity (Kg/cm ²)	1000
C content (%)	99.79
Ash (%)	0.21
Impurities (ppm)	Fe Ca B Mg Si 31.1 688 N.D 19.7 47.22

App. 1.8 Results of mashinings of graphite sleeves, plugs and blocks for the 1st OGL-1 fuel assembly.

Name	Sleeve No.	Spec.	Results		
			No. 1	No. 2	No. 3
Graphite sleeve	outer diameter (mm)	30.0 \pm 0.5	29.95-30.00	29.95-30.01	29.95-30.03
	inner diameter (mm)	24.2 \pm 0.5	24.20, 24.20	24.25, 24.28	24.24, 24.21
	length (mm)	800 \pm 4	799.0	799.3	799.2
	weight (g)		358.6	354.2	358.5
	screw (mm)	M 27 x 1.5	succes	succes	succes
	length (mm)		25	25	
Plug	screw (mm)	M 27 x 1.5	succes	succes	succes
	weight (g)		u:24.0,d:24.2	u:23.9,d:24.3	u:23.8,d:24.3
	outer diameter (mm)	80.0 \pm 0.2		79.97-80.02	
	inner diameter (mm)	No.1 hole No.2 hole No.3 hole	32.66-32.75 32.65-32.81 32.65-32.69		
	length (mm)		280.0 \pm 0	279.9	
	weight (g)			1083.3	
Graphite block No. 1	outer diameter (mm)	80.0 \pm 0.2		80.01-80.11	
	inner diameter (mm)	No.1 hole No.2 hole No.3 hole	32.67-32.74 32.65-32.70 32.66-32.69		
	length (mm)		285.0 \pm 0	284.8	
	weight (g)			989.3	
	outer diameter (mm)	80.0 \pm 0.2		80.14	
	inner diameter (mm)	No.1 hole No.2 hole No.3 hole	32.68-32.70 32.68-32.69 32.68-32.69		
Graphite block No. 3	length (mm)		280.0 \pm 0	279.8	
	weight (g)			1100.7	

App. 1.9 Characterization of graphite for the 2nd OGL-1 fuel assembly.

Name		IG-11
	Spec.	
Bulk density (g/cm ³)		1.78
Shore hardness		53
Flexual strength (Kg/cm ²)		373
Compressive strength (Kg/cm ²)		802
Tensile strength (Kg/cm ²)	≤130	236
Young's modulus (Kg/cm ²)		1035
Poisson's ratio		0.11
Termal conductivity (Kcal/m hr °C)		120
Electric resistance (μΩcm)		1073
Anisotropy		1.04
Ash (ppm)	≤300	23
Impurities (ppm)	Ag	N.D
	Al	<10
	B	≤ 3
	Ca	<10
	Cd	N.D
	Co	N.D
	Cr	<1
	Cu	<5
	Fe	<50
	Mo	N.D
	Ni	<20
	Si	<50
	Ti	<20
	V	<5

App. 1.10 Impurities in graphite
fiber for the 2nd OGL-1 fuel pins.

Elements	ppm
Ag	ND
Al	<10
B	<0.1
Ca	<10
Cd	ND
Co	ND
Cr	<1
Cu	<5
Fe	<50
Mo	ND
Ni	<20
Si	<50
Ti	<20
V	<5

App. 1.11 Results of mashinings of graphite sleeves, plugs and blocks for the 2nd OGL-1 fuel assembly.

Name	sleeve No.	Spec.	Results		
			No.1	No.2	No.3
Graphite sleeve	outer diameter (mm)	30.0 ± 0.3	29.97-30.04	29.97-30.01	29.95-30.01
	inner diameter (mm)	24.2 ± 0.10 -0.05	24.27	24.27	24.27
	length (mm)	800 ± 4	800.3	800.5	800.2
	weight (g)		358	358	358
	screw (mm)	M 26 x 1.5	success	success	success
	length (mm)		25	25	25
plug	screw (mm)	M 26 x 1.5	success	success	success
	weight (g)		u:22.8,d:22.4	u:22.8,d:22.7	u:22.7,d:23.5
	outer diameter (mm)	80.0 ± 0.2		80.0	
	inner diameter (mm)	No.1 hole		32.7	
		No.2 hole	32.6 ± 0.3	32.7	
		No.3 hole		32.7	
Graphite block No.1	length (mm)	285.0 ± 0.3		285.0	
	weight (g)			1161	
	outer diameter (mm)	80.0 ± 0.2		80.0	
	inner diameter (mm)	No.1 hole		32.7	
		No.2 hole	32.6 ± 0.3	32.7	
		No.3 hole		32.7	
Graphite block No.2	length (mm)	285.0 0 -0.3		284.8	
	weight (g)			1119	
	outer diameter (mm)	80.0 ± 0.2		80.0	
	inner diameter (mm)	No.1 hole		32.7	
		No.2 hole	32.6 ± 0.3	32.7	
		No.3 hole		32.7	
Graphite block No.3	length (mm)	270.0 ± 0.3		270.0	
	weight (g)			1087	

App. 1.12 Charactarization of the 1st OGL-1 fuel pins.

fuel pin No.		No.1	No.2	No.3
	spec.			
length (mm)	800 ± 4	799.0	799.3	799.2
straightness (mm)	$\leq 1/2000$	0.3/2000	0.25/2000	0.25/2000
fuel stack length (mm)	720 ± 5	719.5	723.2	723.5
U (g)		175.32	171.81	171.81
weight (g)		1106.9	1101.2	1105.6

App. 1.13 Chractarization of the 2nd OGL-1 fuel pins.

fuel pin No.		No.1	No.2	No.3
	spec.			
length (mm)	800 ± 4	800.2	800.4	800.3
straightness (mm)	$\leq 1/2000$	$\leq 1/2000$	$\leq 1/2000$	$\leq 1/2000$
fuel stack length (mm)	720 ± 5	721	720	720
U (g)		245.66	245.66	245.66
weight (g)		1168	1167	1169

App. 2

ループ内ヘリウム中の FP 濃度の変化は次式で表わされる。

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = R - C \cdot V \cdot \lambda - C \cdot F \quad ①$$

ここで

V : ループ内ヘリウム量 (約6000 g)

C : ループ内 FP 濃度 (個/g・He)

R : FP 放出速度 (個/sec)

F : 精製系ヘリウム流量 (g/sec)

λ : 崩壊定数 (1/sec)

t : 照射開始後時間 (sec)

①式で左辺はループ内全体の FP 量の変化を表わしている。右辺の第1項は燃料からヘリウムガスに放出される FP 量で、第2項は OGL-1 ループ内で崩壊する FP 量、第3項は精製系で除去される FP 量である。ループから漏れるヘリウムに含まれる FP 量も①式に含めるべきであるが、漏れ量が精製系流量の 1/1000 以下と少ないので無視した。また、ループ内の FP の混合は速やかに行なわれると仮定している。これはループ内のヘリウム流量が 30~50 g/sec であり、ループ内を 2~3 分で一巡するので、照射開始後、数時間経過すれば、上記の仮定は妥当であると考えられる。右辺第3項の精製系で除去する FP 量の割合は、精製系入口および精製系出口で FP 量を測定して求めた結果 99% 以上と得られた。①式を解くと

$$R = C \cdot V \cdot \left(\lambda + \frac{F}{V} \right) \cdot \frac{1}{1 - e^{-(\lambda+F/V) \cdot t}} \quad ②$$

②式から R が求まる。一方 R/B の B は次式から求まる。

$$B = \frac{W \cdot \ell}{E} \cdot \eta \quad ③$$

ここで

W : OGL-1 燃料の熱出力 (w/cm)

ℓ : OGL-1 燃料の長さ (cm)

E : 1核分裂当たりのエネルギー (w・sec)

η : FP の核分裂収率

③式からわかるように B は燃料内で単位時間に生成する FP 量である。②式および③式から R/B が求められる。

App. 3

黒鉛ブロックの直径、燃料孔径、長さ、真直度および曲り、黒鉛スリーブの外径、内径、長さ、真直度および曲りは、黒田精工製寸法測定装置により測定した。これらの寸法の測定方法を以下に述べる。

黒鉛ブロックおよび黒鉛スリーブを、立てた状態で、その上端と下端を寸法測定装置に固定し、その外側面および内側面上を、軸方向に測定子を移動させ、測定子の半径方向の変位量と軸方向の移動距離を測定する。測定子の半径方向の変位量から、黒鉛ブロックの直径、燃料孔径、真直度および曲り、黒鉛スリーブの外径、内径、真直度および曲りが、軸方向の移動距離から黒鉛ブロックおよび黒鉛スリーブの長さが求められる。なお、長さ及び真直度に関しては、測定子を外側面上を移動させた場合と内側面上を移動させた場合と2種得られる。黒鉛ブロックの外径及び内径の測定位置および方向を、Fig.A 3-1 に示す。

黒鉛ブロックの曲りは、3次元座標を用いてあらわす。長さ方向をZ軸に、これと垂直にX、Y軸をとる。ブロック上端からの距離ZにおけるX軸の正方向の指示値を X_1 、負方向の指示値を X_2 で示せば、直径 X_D は、 $X_D = (X_1 - X_2)$ により、曲り X_B は、 $X_B = (X_1 + X_2)/2$ により求められる。Y軸方向の直径 Y_D および曲り Y_B も同様にして求められる。 X_D 、 X_B 、 Y_D 、 Y_B はZの各点に対して測定する。なお、大きな曲りの場合には、測定子が最大径をはずれた位置をスキヤンするから、 X_D および Y_D がそのままX、Y方向の直径にならないが、第1次および第2次OGL-1の黒鉛ブロックの曲りは、ごくわずかであるので、 X_D 及び Y_D をそのまま直径とみなしてさしつかえない。

黒鉛ブロックとX、Y軸との位置関係および測定位置を、第1次黒鉛ブロックについて Fig. A 3-2 に、第2次について Fig. A 3-3 に示す。黒鉛ブロック内の燃料孔の曲りについても、黒鉛ブロックの曲りと同様に求めた。第1次の黒鉛ブロックの燃料孔の測定位置を、Fig. A 3-4 及び Fig. A 3-5 に、第2次のそれを Fig. A 3-6 に示す。なお、黒鉛ブロックの曲りは、X軸(0°方向)については上方向を、Y軸(90°方向)については右方向を正に、燃料孔の曲りはX軸(0°方向)については、中心から外に向う方向を正に、Y軸(90°方向)については右方向を正にとった。

黒鉛スリーブの外径は、Fig. A 3-7 に示す長さ方向の位置において、90°及び337°方向について測定したが、第2次 OGL-1 の No. 3 の黒鉛スリーブのみ 337° および 37° 方向について測定した。スリーブ内径の測定方向は全て、0° および 90° 方向である。外径の場合、スキヤン方向が 90° および 337° とずれているのは、スリーブ外側面上にパッド等の凸部があるためである。なお真直度の符号は、Fig. A 3-7 のように定めた。

黒鉛スリーブの曲りの測定方向及び測定位置を、第1次 OGL-1 については Fig. A 3-8 に、第2次 OGL-1 については Fig. A 3-9 に示す。測定値の符号は、これらの図に示すとおり外径基準の場合、0° 方向に対しては上側を、90° 方向に対しては右側を正に、内径基準の場合 0° 方向に対しては下側を、90° 方向に対しては左側を正にとる。内径基準の場合のX、Y 方向の曲りの成分は、それぞれ、 $(X_1 + X_2)/2$ 、 $(Y_1 + Y_2)/2$ であるが、外径基準の場合は、337° 方向の測定値を、0° 方向に換算しなければならない。ここで、 X_1 及び Y_1 は、測定子の正方向の指

示値を、 X_2 及び Y_2 は同様に負方向の指示値である。換算方法を次に示す。

黒鉛スリーブに曲りが生じ、ある測定位置において、Fig. A 3-10 に示すようにスリーブ断面の中心が O' になったとする。ここで、 O は基準点におけるスリーブ断面の中心である。この場合曲りは OO' により示され、 X , Y 成分はそれぞれ OB 及び OA である。 XX' 軸に対して θ (23°) だけ傾いた OW 方向に対してスリーブの曲りを測定しているから、曲りの測定値は OO'' である。次の関係を用いて OO'' から OB を求める。

$$OB' = \frac{OO''}{\cos \theta}, \quad OA' = OA \tan \theta$$

$BB' = OA'$ であるから、

$$OB = OB' - OA' = \frac{OO''}{\cos \theta} - OA \tan \theta$$

である。

寸法測定装置の測定精度は、黒鉛ブロック及び黒鉛スリーブとも、外径について ± 0.01 、内径について ± 0.02 、外径基準の長さについて ± 0.1 、外径基準の真直度について ± 0.02 、内径基準の真直度について ± 0.2 mm である。

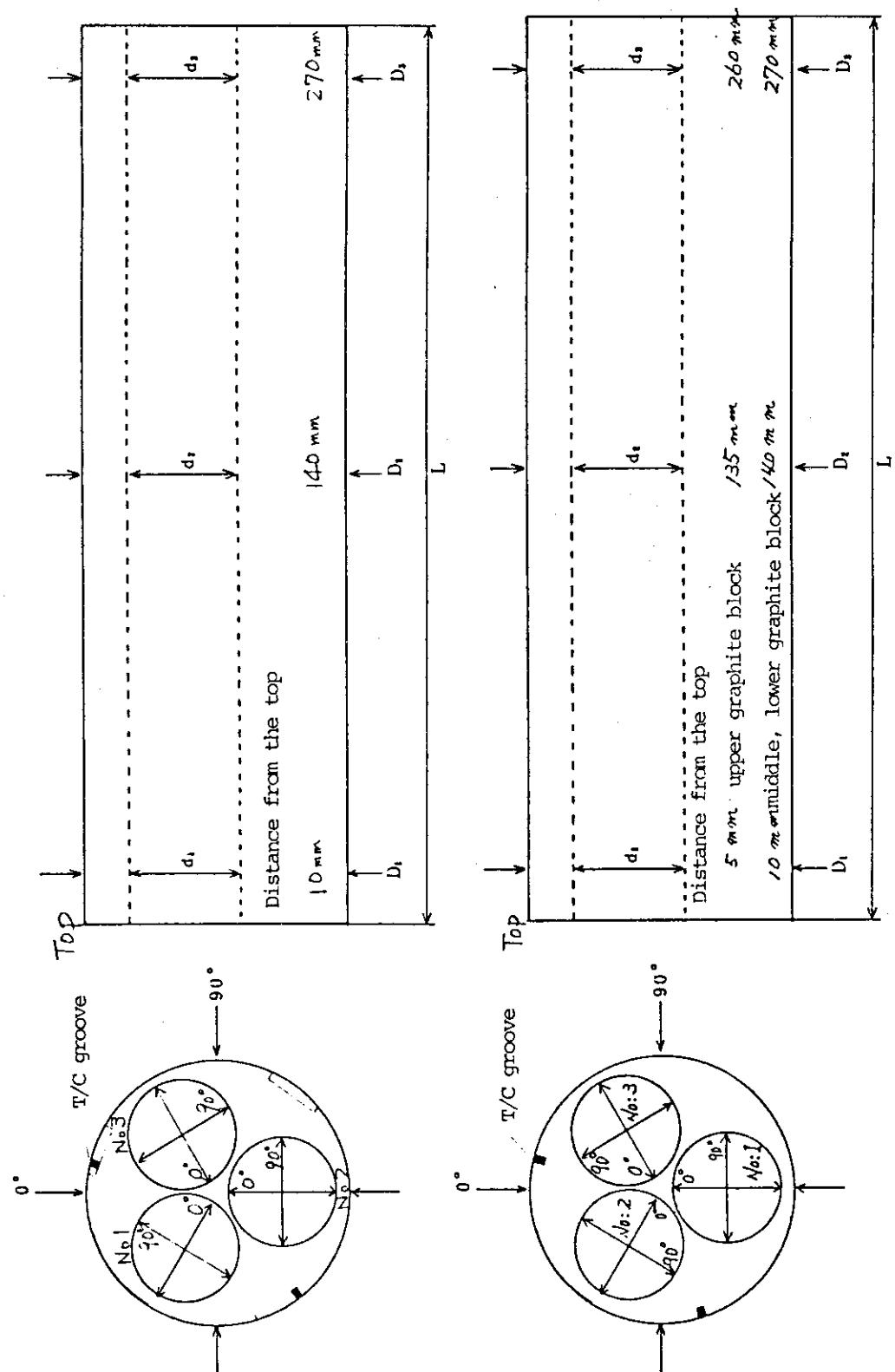


Fig. A3.1 Measuring position of graphite block diameter and fuel hole diameter.
upper: 1st OGL-1, lower: 2nd OGL-1.

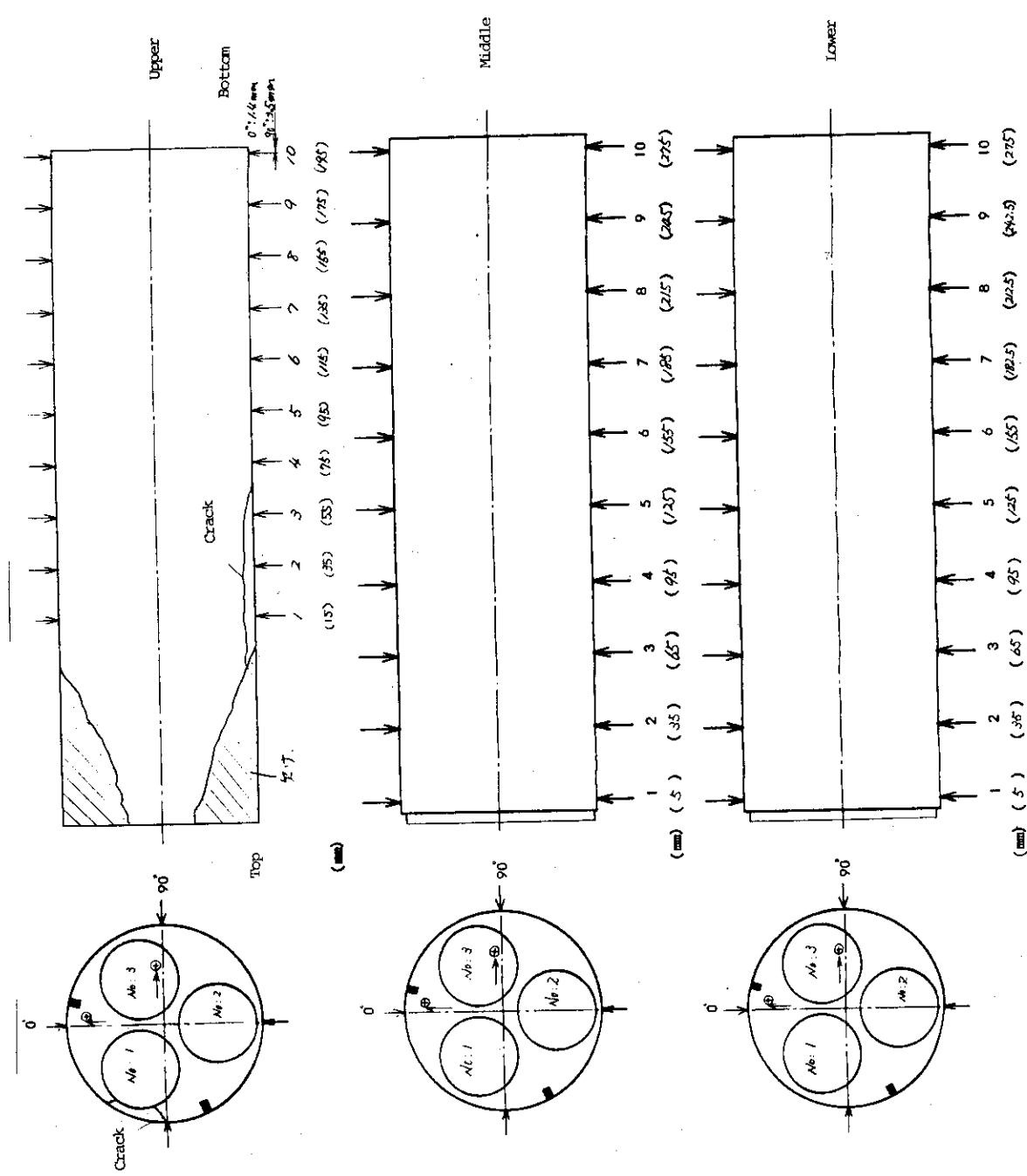


Fig. A3.2 Measuring position of graphite block bowing for 1st OGL-1

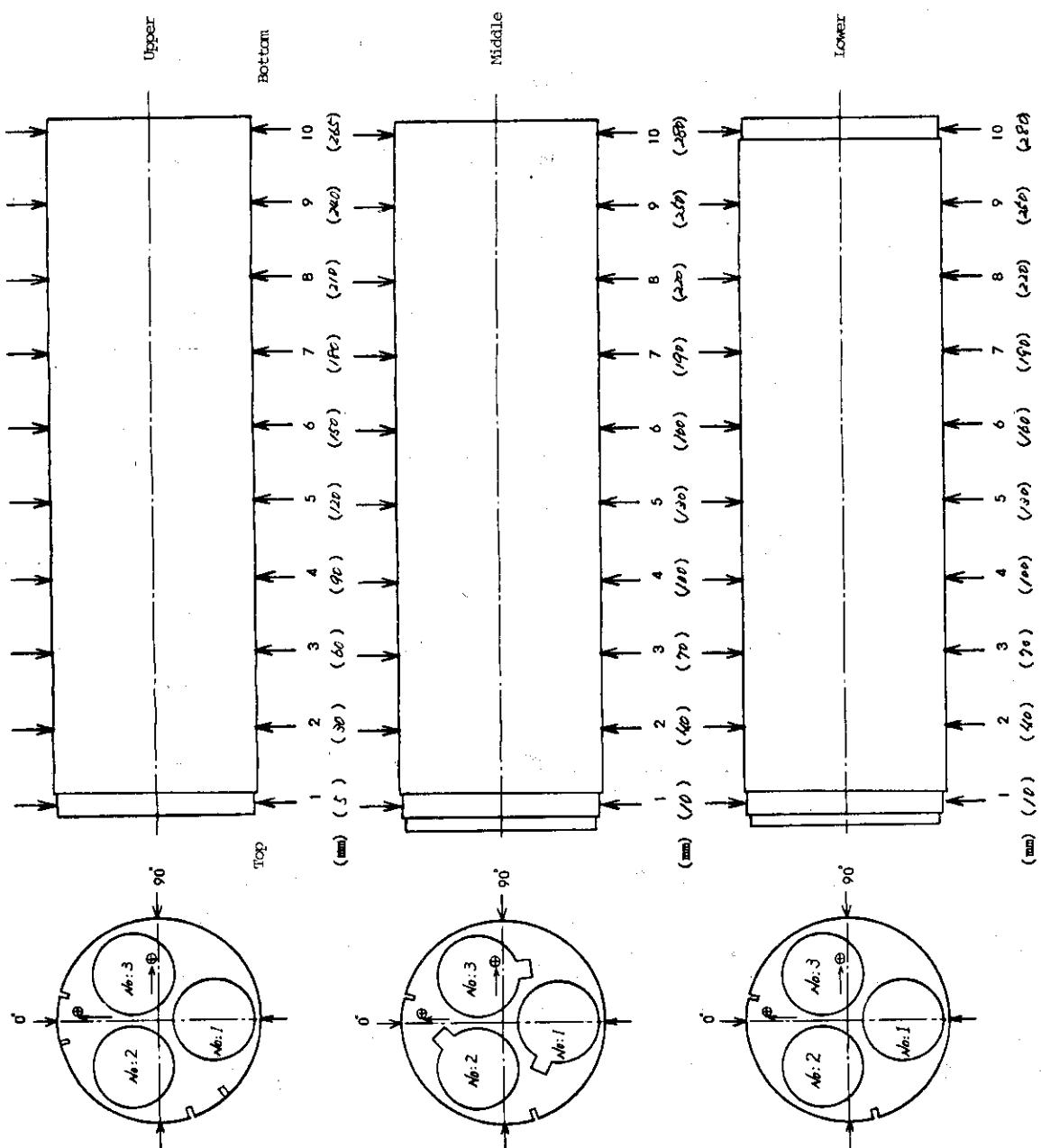


Fig. A3.3 Measuring position of graphite block bowing for 2nd OGIL-1

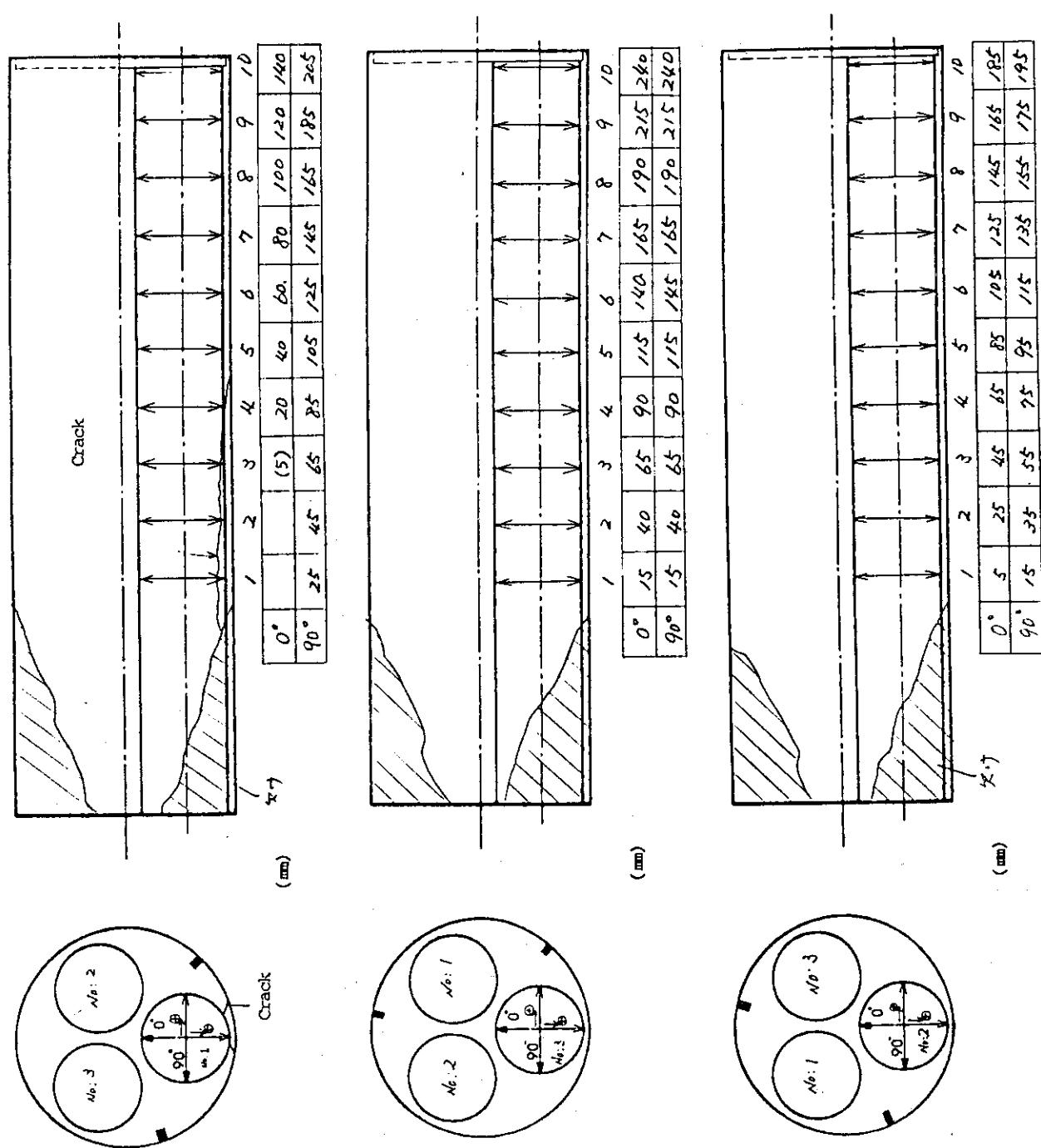


Fig. A3.4 Measuring position of fuel hole bowing in upper graphite block
for 1st OGL-1

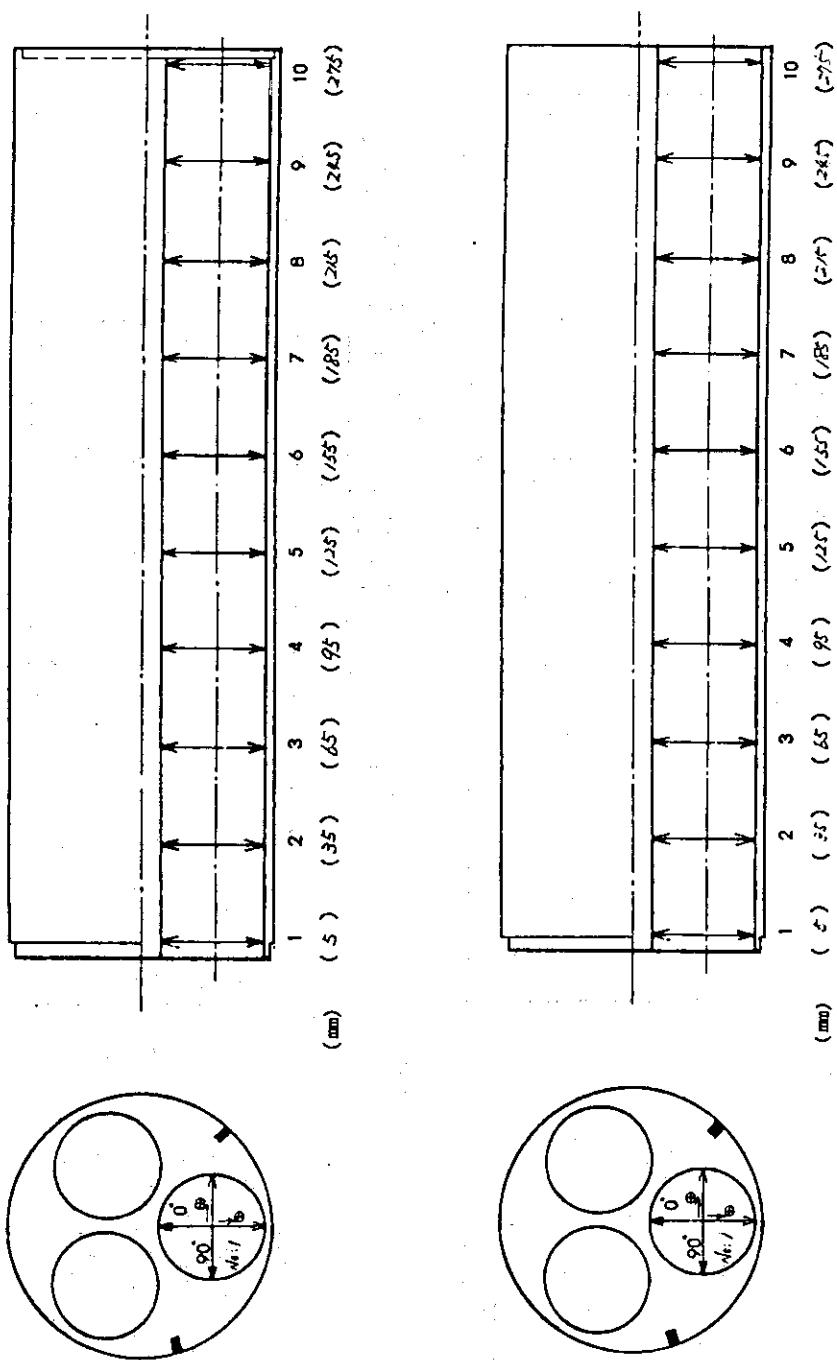


Fig. A3.5 Measuring position of fuel hole bowing in middle (top) and lower (bottom) graphite block for 1st OGL-1

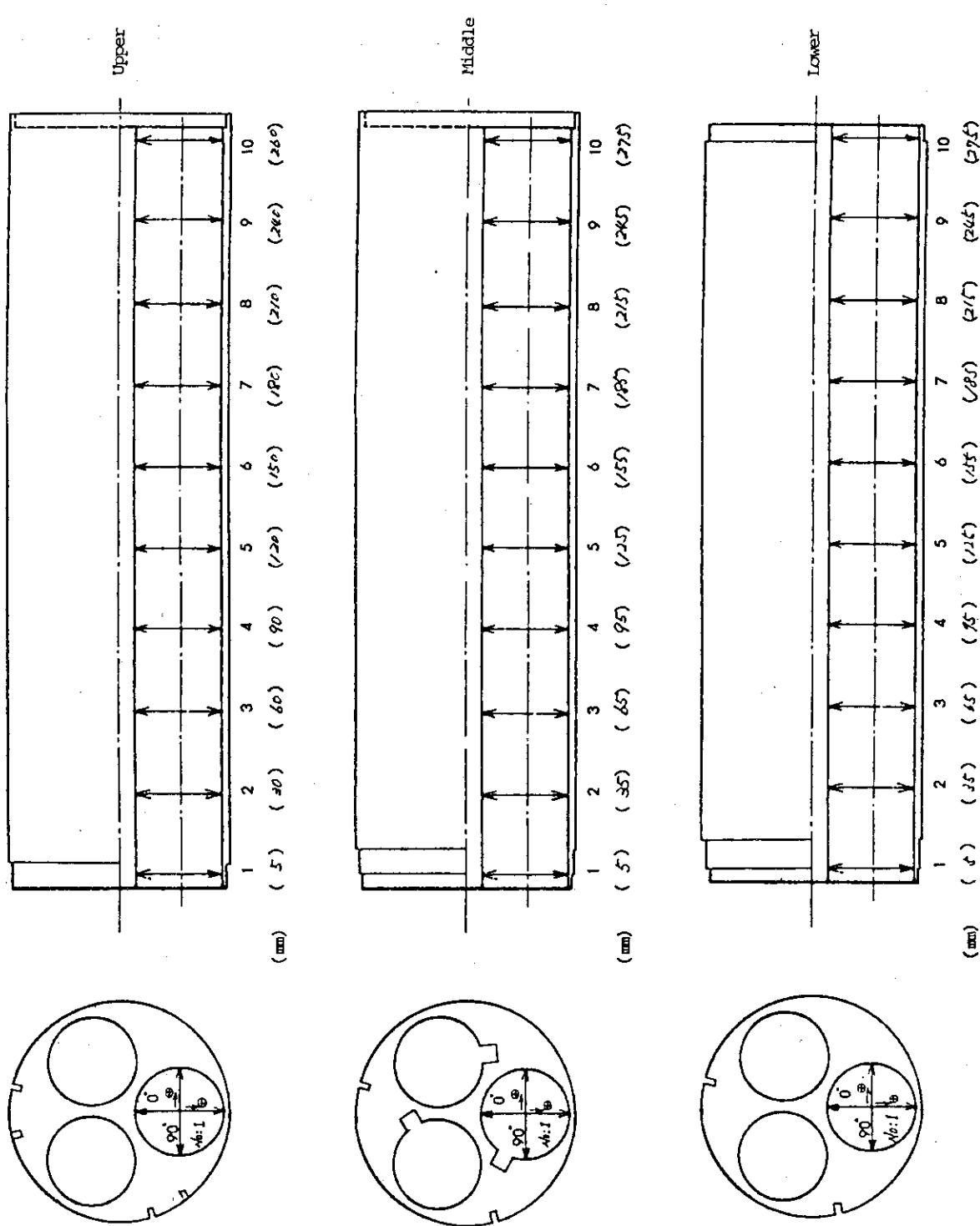


Fig. A3.6 Measuring position of fuel hole bowing in graphite block for 2nd OCL-1

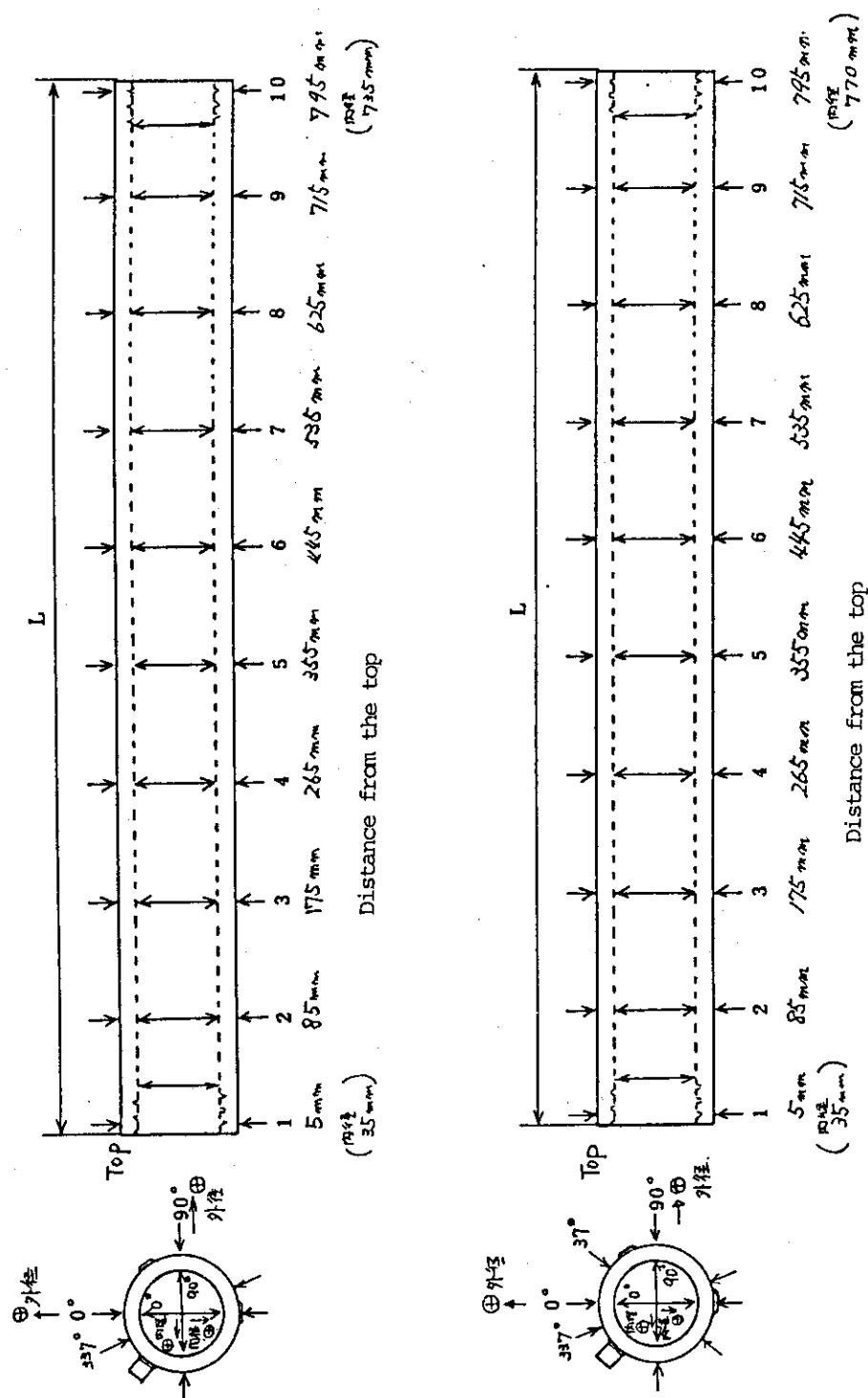


Fig. A3.7 Measuring position and measuring direction of outer and inner diameter of graphite sleeve. upper: 1st OGL-1, Lower: 2nd OGL-1

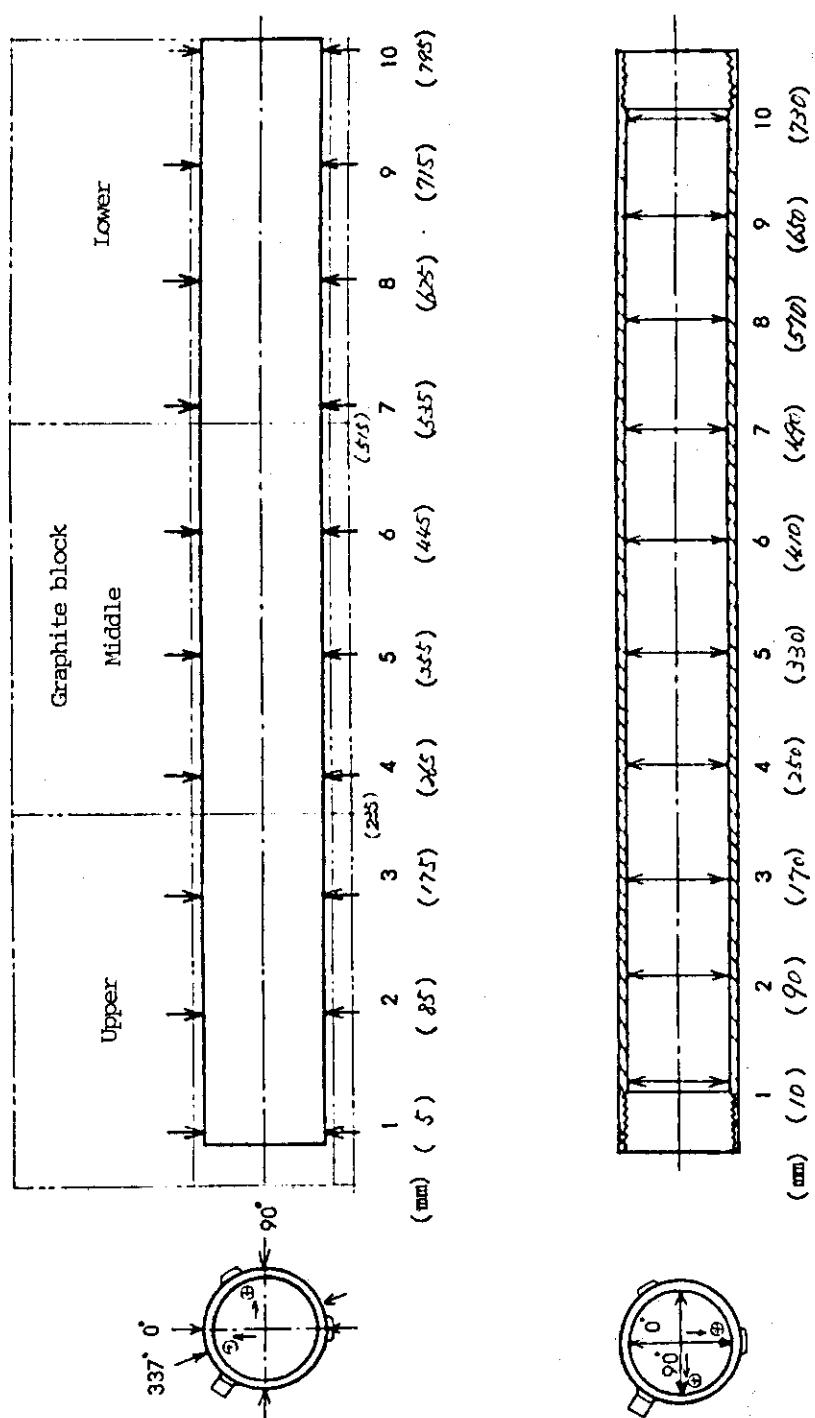


Fig. A3.8 Measuring position at bowing of graphite sleeve for 1st OGL-1

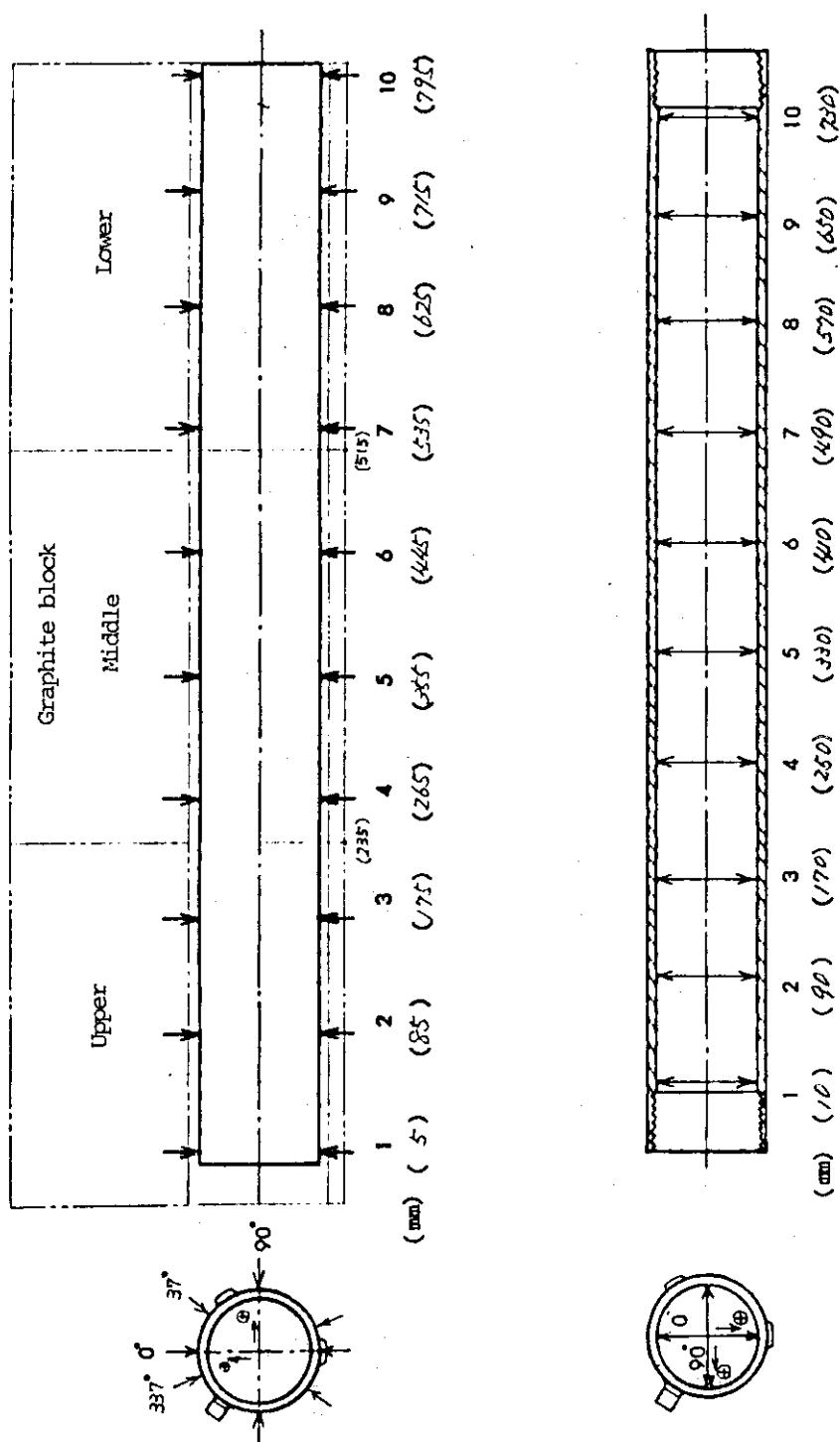


Fig. A3.9 Measuring position at bowing of graphite sleeve for 2nd OGL-1

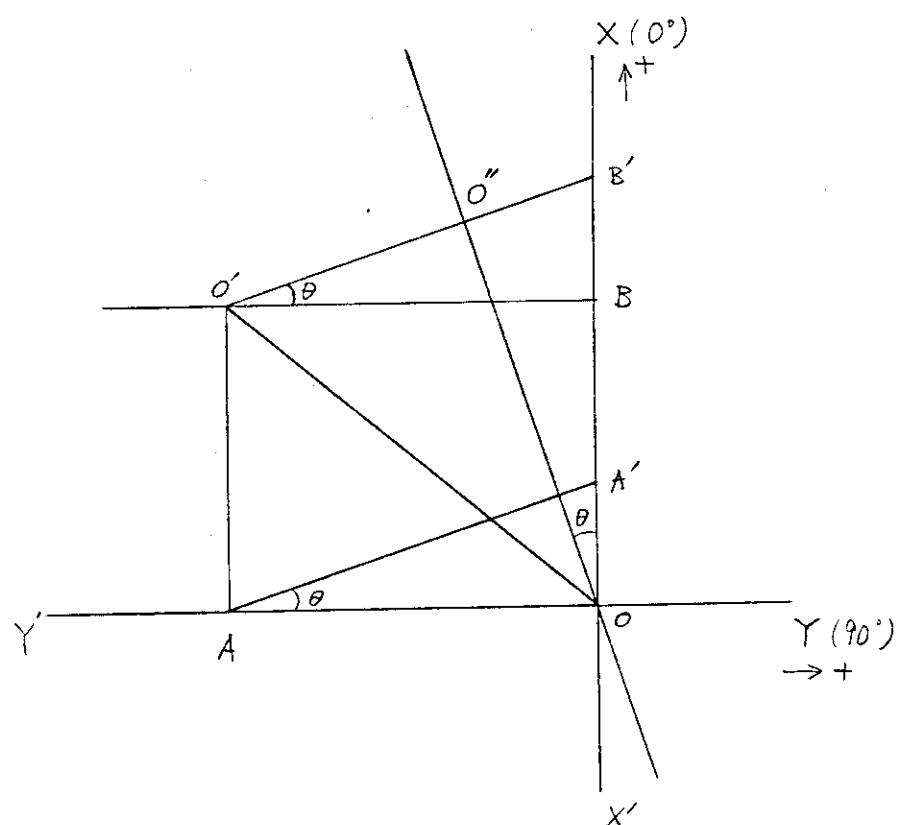


Fig. A3.10 Geometrical relation of graphite sleeve center
between before and after bowing

App. 4.1 Irradiation conditions of 1st OGL-1 fuel compacts

FUEL PIN NO 1

L M N	NAME	TEMP (C)	POW(W/CM)	BURN(FIMA)	BURN(FIFA)	F.NEUTRON
1 1 1	750P1-01	896.889	156.616	0.302	2.489	0.887E+20
1 1 2	750P1-02	942.320	176.418	0.341	2.813	0.105E+21
1 1 3	750P1-03	983.731	192.782	0.372	3.069	0.119E+21
1 1 4	750P1-04	1020.477	205.400	0.397	3.275	0.130E+21
1 1 5	750P1-05	1052.022	214.013	0.414	3.409	0.139E+21
1 1 6	750P1-06	1077.865	218.462	0.423	3.482	0.144E+21
1 1 7	750P1-07	1097.608	218.662	0.423	3.485	0.146E+21
1 1 8	750P1-08	1111.022	214.601	0.415	3.421	0.147E+21
1 1 9	750P1-09	1117.983	206.372	0.299	3.291	0.143E+21
1 1 10	750P1-10	1118.288	194.120	0.375	3.094	0.139E+21
1 1 11	750P1-11	1111.893	178.092	0.344	2.839	0.131E+21
1 1 12	750P1-12	1098.862	158.596	0.307	2.527	0.122E+21
1 1 13	750P1-13	1079.459	136.011	0.263	2.167	0.108E+21
1 1 14	750P1-14	1053.695	110.782	0.214	1.766	0.938E+20
1 1 15	750P1-15	1021.814	83.393	0.161	1.329	0.792E+20
1 1 16	750P1-16	986.858	56.570	0.109	0.902	0.641E+20
1 1 17	750P1-17	969.752	46.534	0.090	0.742	0.484E+20
1 1 18	750P1-18	954.496	38.704	0.075	0.617	0.308E+20

FUEL PIN NO 2

L M N	NAME	TEMP (C)	POW(W/CM)	BURN(FIMA)	BURN(FIFA)	F.NEUTRON
1 2 1	750P2-01	1011.545	231.088	0.448	3.688	0.118E+21
1 2 2	750P2-02	1082.339	260.298	0.505	4.160	0.140E+21
1 2 3	750P2-03	1147.274	284.448	0.551	4.538	0.159E+21
1 2 4	750P2-04	1205.216	302.060	0.587	4.841	0.174E+21
1 2 5	750P2-05	1255.028	315.772	0.611	5.038	0.185E+21
1 2 6	750P2-06	1295.639	322.339	0.624	5.146	0.191E+21
1 2 7	750P2-07	1326.258	322.627	0.625	5.148	0.195E+21
1 2 8	750P2-08	1346.522	316.645	0.613	5.053	0.195E+21
1 2 9	750P2-09	1356.031	304.493	0.590	4.858	0.191E+21
1 2 10	750P3-01	1354.522	286.413	0.580	4.778	0.185E+21
1 2 11	750P3-02	1342.288	262.762	0.522	4.385	0.174E+21
1 2 12	750P3-02	1319.457	233.997	0.476	3.919	0.162E+21
1 2 13	750P2-04	1286.328	200.676	0.408	3.364	0.144E+21
1 2 14	750P3-05	1243.595	163.450	0.333	2.740	0.125E+21
1 2 15	750P3-06	1191.765	123.041	0.250	2.060	0.106E+21
1 2 16	750P3-07	1135.966	83.464	0.170	1.399	0.854E+20
1 2 17	750P3-08	1109.224	68.656	0.140	1.150	0.645E+20
1 2 18	750P2-09	1085.629	57.104	0.116	0.957	0.410E+20

FUEL PIN NO 3

L M N	NAME	TEMP (C)	POW(W/CM)	BURN(FIMA)	BURN(FIFA)	F.NEUTRON
1 3 1	750P2-10	976.949	214.428	0.415	3.422	0.120E+21
1 3 2	750P2-11	1038.521	241.537	0.468	3.856	0.141E+21
1 3 3	750P2-12	1094.319	263.942	0.511	4.212	0.161E+21
1 3 4	750P2-13	1143.516	281.812	0.544	4.486	0.176E+21
1 3 5	750P2-14	1185.248	293.007	0.567	4.677	0.187E+21
1 2 6	750P2-15	1219.114	299.104	0.579	4.774	0.194E+21
1 2 7	750P2-16	1244.725	299.376	0.580	4.783	0.197E+21
1 2 8	750P2-17	1261.717	293.818	0.569	4.688	0.198E+21
1 3 9	750P2-18	1269.999	282.543	0.547	4.507	0.193E+21
1 3 10	750P3-10	1269.533	265.771	0.541	4.456	0.187E+21
1 3 11	750P3-11	1260.303	243.824	0.496	4.087	0.176E+21
1 3 12	750P3-12	1242.237	217.130	0.442	2.640	0.164E+21
1 3 13	750P3-13	1215.357	186.213	0.379	3.119	0.146E+21
1 3 14	750P3-14	1180.525	151.666	0.208	2.541	0.126E+21
1 3 15	750P3-15	1137.462	114.173	0.232	1.913	0.107E+21
1 3 16	750P3-16	1090.190	77.452	0.158	1.298	0.864E+20
1 3 17	750P3-17	1067.079	63.707	0.130	1.067	0.652E+20
1 3 18	750P3-18	1046.589	52.992	0.108	0.888	0.415E+20

TEM.....MEAN TEMERATURE OF COMPACT
 POW(W/CM).....TOTAL POWER OF COMPACT
 BURN(FIMA).....TOTAL BURNUP EXPRESSED AS PERCENT FIMA
 BURN(FIFA).....TOTAL BURNUP EXPRESSED AS PERCENT FIFA
 F.NEUTRON.....FAST NEUTRON FLUENCE(N.CM-2,E>0.18MEV)

App. 4.2 Irradiation conditions of 2nd OGL-1 fuel compacts

FUEL PIN NO 1

L	M	N	NAME	TEMP (C)	POW(W/CM)	BURN(FIMA)	BURN(FIFA)	F.NEUTRON
1	1	1	760P2-05	935.435	188.088	0.484	3.986	0.137E+21
1	1	2	760P2-04	979.346	210.797	0.542	4.467	0.160E+21
1	1	3	760P2-03	1019.421	230.176	0.592	4.877	0.182E+21
1	1	4	760P2-02	1055.193	245.930	0.632	5.211	0.197E+21
1	1	5	760P2-01	1086.134	257.805	0.663	5.463	0.212E+21
1	1	6	760P4-06	1111.992	265.610	0.674	5.555	0.219E+21
1	1	7	760P4-05	1132.517	269.229	0.683	5.631	0.225E+21
1	1	8	760P4-04	1147.394	268.604	0.682	5.618	0.228E+21
1	1	9	760P4-03	1156.678	263.741	0.669	5.516	0.228E+21
1	1	10	760P4-02	1160.262	254.718	0.646	5.327	0.222E+21
1	1	11	760P4-01	1157.917	241.679	0.613	5.054	0.216E+21
1	1	12	760P5-04	1149.693	224.828	0.553	4.557	0.206E+21
1	1	13	760P5-03	1135.709	204.434	0.503	4.144	0.194E+21
1	1	14	760P5-02	1116.088	180.812	0.445	3.665	0.176E+21
1	1	15	760P5-01	1090.871	154.338	0.380	3.129	0.157E+21
1	1	16	760P3-06	1060.194	125.433	0.323	2.662	0.137E+21
1	1	17	760P3-05	1024.366	94.549	0.243	2.007	0.114E+21
1	1	18	760P3-04	989.775	67.155	0.173	1.425	0.923E+20
1	1	19	760P3-03	973.564	56.897	0.147	1.208	0.709E+20
1	1	20	760P3-02	958.635	48.204	0.124	1.023	0.463E+20

FUEL PIN NO 2

L	M	N	NAME	TEMP (C)	POW(W/CM)	BURN(FIMA)	BURN(FIFA)	F.NEUTRON
1	2	1	760P2-10	1066.531	273.864	0.704	5.803	0.183E+21
1	2	2	760P2-09	1135.897	306.924	0.789	6.504	0.214E+21
1	2	3	760P2-08	1199.824	335.144	0.862	7.102	0.242E+21
1	2	4	760P2-07	1257.345	358.081	0.921	7.588	0.263E+21
1	2	5	760P2-06	1307.512	375.368	0.965	7.954	0.283E+21
1	2	6	760P4-12	1349.560	386.736	0.981	8.088	0.292E+21
1	2	7	760P4-11	1382.922	392.006	0.995	8.198	0.300E+21
1	2	8	760P4-10	1406.791	391.093	0.992	8.179	0.304E+21
1	2	9	760P4-09	1421.167	384.012	0.974	8.031	0.304E+21
1	2	10	760P4-08	1425.689	370.877	0.941	7.757	0.296E+21
1	2	11	760P4-07	1420.230	351.893	0.893	7.359	0.288E+21
1	2	12	760P5-08	1405.114	327.354	0.805	6.636	0.275E+21
1	2	13	760P5-07	1380.401	297.657	0.732	6.034	0.259E+21
1	2	14	760P5-06	1346.507	263.265	0.647	5.337	0.234E+21
1	2	15	760P5-05	1303.859	224.719	0.553	4.555	0.209E+21
1	2	16	760P3-11	1253.085	182.632	0.470	3.876	0.183E+21
1	2	17	760P3-10	1194.876	137.663	0.355	2.922	0.152E+21
1	2	18	760P3-09	1139.523	97.779	0.252	2.075	0.123E+21
1	2	19	760P3-08	1114.086	82.839	0.213	1.758	0.945E+20
1	2	20	760P3-07	1090.807	70.182	0.181	1.490	0.617E+20

FUEL PIN NO 3

L	M	N	NAME	TEMP (C)	POW(W/CM)	BURN(FIMA)	BURN(FIFA)	F.NEUTRON
1	3	1	760P2-15	1041.832	266.715	0.686	5.652	0.185E+21
1	3	2	760P2-14	1104.203	298.912	0.768	6.334	0.217E+21
1	3	3	760P2-13	1160.846	326.405	0.839	6.916	0.245E+21
1	3	4	760P2-12	1211.084	348.735	0.897	7.390	0.266E+21
1	3	5	760P2-11	1254.211	365.571	0.940	7.746	0.287E+21
1	3	6	760P4-18	1289.960	376.642	0.956	7.877	0.295E+21
1	3	7	760P4-17	1317.973	381.776	0.969	7.984	0.304E+21
1	3	8	760P4-16	1338.130	381.152	0.967	7.971	0.308E+21
1	3	9	760P4-15	1350.265	373.991	0.949	7.822	0.308E+21
1	3	10	760P4-14	1354.400	361.193	0.916	7.554	0.300E+21
1	3	11	760P4-13	1350.449	342.705	0.870	7.167	0.291E+21
1	3	12	760P5-12	1338.420	318.811	0.784	6.463	0.279E+21
1	3	13	760P5-11	1318.390	289.888	0.713	5.876	0.262E+21
1	3	14	760P5-10	1290.375	256.392	0.631	5.197	0.237E+21
1	3	15	760P5-09	1254.466	218.854	0.538	4.436	0.212E+21
1	3	16	760P3-16	1211.039	177.870	0.458	3.775	0.185E+21
1	3	17	760P3-15	1160.235	134.070	0.345	2.846	0.154E+21
1	3	18	760P3-14	1111.252	95.228	0.245	2.021	0.125E+21
1	3	19	760P3-13	1088.403	80.677	0.208	1.712	0.958E+20
1	3	20	760P3-12	1067.352	68.353	0.176	1.451	0.625E+20

TEM.....MEAN TEMERATURE OF COMPACT
 POW(W/CM).....TOTAL POWER OF COMPACT
 BURN(FIMA).....TOTAL BURNUP EXPRESSED AS PERCENT FIMA
 BURN(FIFA).....TOTAL BURNUP EXPRESSED AS PERCENT FIFA
 F.NEUTRON.....FAST NEUTRON FLUENCE(N.CM-2,E>0.18MEV)

App. 4.3(1) SUMMARY OF POST-IRRADIATION DATA OF OGL-1 EXPERIMENT

DATA OF DIMENSION, VOLUME, DENSITY AND WEIGHT
FUEL PIN NO 1

NO	NAME	OUTER-DIAM (mm)	STD (mm)	INNER-DIAM (mm)	STD (mm)	LENGTH (mm)	STD (mm)	VOLUME (cm ³)	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT (g)
1	750P1-01	23.96832	0.00687	8.00166	0.00687	39.83000	0.01871	15.96820	2.30115	36.74519
2	750P1-02	23.97166	0.00372	8.01333	0.01374	40.00499	0.03354	16.03751	2.29447	36.79764
3	750P1-03	23.93999	0.01000	8.00333	0.01106	39.86499	0.02062	15.93891	2.30531	36.74413
4	750P1-04	23.92999	0.01155	8.00167	0.00373	39.93999	0.01225	15.95471	2.30436	36.76537
5	750P1-05	23.95667	0.00472	7.99333	0.01374	39.88249	0.03897	15.97593	2.30067	36.75536
6	750P1-06	23.94833	0.00687	8.00333	0.00745	39.95500	0.01118	15.98742	2.29941	36.76166
7	750P1-07	23.94167	0.00372	8.00166	0.00898	39.92999	0.03535	15.96823	2.30298	36.77449
8	750P1-08	23.94499	0.01118	8.00999	0.00817	39.92000	0.03536	15.96506	2.30381	36.78043
9	750P1-09	23.95833	0.01951	7.99500	0.00500	39.94749	0.04867	16.00363	2.29467	36.72313
10	750P1-10	23.95833	0.04059	7.99999	0.01000	39.92749	0.02165	15.99311	2.29626	36.72433
11	750P1-11	23.95999	0.00817	8.00167	0.00373	39.93250	0.02278	15.99679	2.29543	36.71959
12	750P1-12	23.93832	0.00687	8.00000	0.00577	39.91249	0.02861	15.95707	2.30289	36.74736
13	750P1-13	23.93832	0.01951	8.00500	0.00500	39.92749	0.02385	15.96055	2.30545	36.79622
14	750P1-14	23.96167	0.00687	8.00833	0.00687	39.95000	0.02738	16.00296	2.29797	36.77437
15	750P1-15	23.96333	0.00471	8.00833	0.00373	39.92249	0.01920	15.99445	2.30100	36.80330
16	750P1-16	23.97832	0.00372	8.01166	0.00687	39.95750	0.02947	16.02933	2.29563	36.79736
17	750P1-17	23.97333	0.00745	8.01333	0.00471	39.94499	0.02693	16.01598	2.29625	36.77673
18	750P1-18	23.96832	0.00687	8.00833	0.00687	39.95500	0.01118	16.01495	2.29719	36.78935

App. 4.3(2) DATA OF DIMENSION, VOLUME, DENSITY AND WEIGHT
FUEL PIN NO 2

JAERI-M 83-012

NO	NAME	OUTER-DIAM (mm)	STD (mm)	INNER-DIAM (mm)	STD (mm)	LENGTH (mm)	STD (mm)	VOLUME (cm ³)	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT (g)
1	750P2-01	23.95500	0.00500	8.00499	0.00957	39.99500	0.01500	16.01262	2.30067	36.83977
2	750P2-02	23.96500	0.00500	8.01666	0.00745	40.01999	0.01581	16.03183	2.29698	36.82480
3	750P2-03	23.91666	0.01105	8.00166	0.00898	39.94749	0.01920	15.93771	2.31013	36.81813
4	750P2-04	23.94666	0.00943	8.00499	0.00764	39.98000	0.01000	15.99407	2.30210	36.81999
5	750P2-05	23.92166	0.00687	8.00333	0.00943	39.92999	0.02121	15.93739	2.31068	36.82616
6	750P2-06	23.93999	0.00577	8.00999	0.00577	39.95000	0.01581	15.96954	2.30682	36.83890
7	750P2-07	23.93832	0.00687	8.00833	0.00687	39.95999	0.02739	15.97187	2.30712	36.84897
8	750P2-08	23.94499	0.00500	8.01166	0.01213	39.91750	0.02948	15.96323	2.30829	36.84773
9	750P2-09	23.95332	0.01374	8.00666	0.01106	39.92749	0.02166	15.98225	2.30177	36.78740
10	750P3-01	23.99832	0.01344	7.99500	0.01118	40.10500	0.02061	16.12715	2.27519	36.69240
11	750P3-02	23.99165	0.01067	8.00333	0.00471	40.11499	0.01658	16.11687	2.27772	36.70970
12	750P3-03	23.97166	0.01772	8.00166	0.00687	40.26999	0.01225	16.14966	2.27554	36.74913
13	750P3-04	23.98666	0.00943	8.00167	0.00373	40.30750	0.02385	16.18747	2.26774	36.70897
14	750P3-05	23.99333	0.00745	8.00166	0.00687	40.31499	0.03354	16.20062	2.26581	36.70760
15	750P3-06	24.00166	0.01344	8.00833	0.00373	40.28249	0.00433	16.19684	2.26606	36.70299
16	750P3-07	24.02333	0.02688	8.00666	0.01247	40.31000	0.03240	16.24168	2.25715	36.65990
17	750P3-08	24.01166	0.00898	8.01666	0.00943	40.31999	0.00707	16.22287	2.26709	36.77879
18	750P3-09	23.99500	0.00500	8.00666	0.00745	40.34999	0.01581	16.21469	2.26471	36.72159

App. 4.3(3) DATA OF DIMENSION, VOLUME, DENSITY AND WEIGHT
FUEL PIN NO 3

JAERI-M 83-012

NO	NAME	OUTER-DIAM (mm)	STD (mm)	INNER-DIAM (mm)	STD (mm)	LENGTH (mm)	STD (mm)	VOLUME (cm ³)	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT (g)
1	750P2-10	23.97499	0.00763	8.01333	0.00745	39.97749	0.02278	16.03151	2.29733	36.82967
2	750P2-11	23.96500	0.00500	8.01333	0.00471	39.95250	0.02586	16.00645	2.30101	36.83099
3	750P2-12	23.95999	0.00577	8.00333	0.00471	40.00000	0.03082	16.02299	2.29779	36.81743
4	750P2-13	23.95833	0.01344	8.00666	0.00471	39.92999	0.01871	15.99077	2.30134	36.80013
5	750P2-14	23.94832	0.00372	8.01000	0.01414	39.93500	0.03201	15.97606	2.30338	36.79897
6	750P2-15	23.95166	0.00898	8.00666	0.00943	39.95000	0.02550	15.98875	2.30178	36.80254
7	750P2-16	23.94833	0.00687	8.00666	0.00745	40.01749	0.04265	16.01074	2.29985	36.82236
8	750P2-17	23.95332	0.00472	8.01833	0.01344	39.92000	0.01581	15.97340	2.30696	36.84993
9	750P2-18	23.94666	0.00745	8.00499	0.01118	39.92999	0.01225	15.97407	2.30766	36.86266
10	750P3-10	23.98332	0.00472	8.00833	0.00898	40.31500	0.00500	16.18204	2.27115	36.75183
11	750P3-11	23.98666	0.00943	8.00833	0.00687	40.31250	0.01920	16.18610	2.27353	36.79962
12	750P3-12	23.98332	0.01374	8.00166	0.00687	40.31000	0.00707	16.18340	2.26769	36.69901
13	750P3-13	23.99500	0.01118	7.99833	0.00687	40.28749	0.01640	16.19380	2.27052	36.76840
14	750P3-14	23.99666	0.01247	8.00833	0.00898	40.30750	0.01300	16.19928	2.26837	36.74593
15	750P3-15	23.98500	0.00958	8.00833	0.01067	40.29999	0.01225	16.17857	2.27184	36.75520
16	750P3-16	24.00499	0.00763	8.01166	0.00687	40.33499	0.00500	16.22230	2.26544	36.74832
17	750P3-17	24.00665	0.00745	8.01333	0.00471	40.31000	0.0	16.21295	2.26708	36.75606
18	750P3-18	24.00999	0.00817	8.02166	0.00373	40.36749	0.00829	16.23694	2.26440	36.76697

App. 4.4(1) SUMMARY OF POST-IRRADIATION DATA OF OGL-1 EXPERIMENT

DATA OF DIMENSION, VOLUME, DENSITY AND WEIGHT
FUEL PIN NO 1

JAERI-M 83-012

NO	NAME	OUTER-DIAM (mm)	STD (mm)	INNER-DIAM (mm)	STD (mm)	LENGTH (mm)	STD (mm)	VOLUME (cm ³)	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT (g)
1	760P2-05	23.93999	0.05260	7.98666	0.00745	35.96750	0.00433	14.38813	2.55884	36.81689
2	760P2-04	23.90999	0.02708	7.97833	0.00373	35.95999	0.01225	14.34833	2.58900	37.14783
3	760P2-03	23.90999	0.02887	7.97666	0.00471	35.93750	0.01786	14.34011	2.58971	37.13673
4	760P2-02	23.91666	0.03727	7.97166	0.01344	35.89250	0.01639	14.33342	2.58325	37.02686
5	760P2-01	23.91499	0.02872	7.96832	0.00687	35.86249	0.00829	14.32068	2.58487	37.01706
6	760P4-06	23.99666	0.00745	8.00167	0.00373	35.95750	0.01090	14.45407	2.57759	37.25664
7	760P4-05	23.99832	0.00687	8.00333	0.00471	35.97250	0.01090	14.46161	2.58045	37.31743
8	760P4-04	23.99666	0.01491	8.00499	0.00957	35.97250	0.02385	14.45859	2.58039	37.30885
9	760P4-03	23.99165	0.02410	7.99833	0.01213	35.95749	0.02861	14.44878	2.58313	37.32303
10	760P4-02	23.99832	0.00372	8.00833	0.00898	35.91750	0.01786	14.43723	2.58380	37.30293
11	760P4-01	24.00665	0.00745	8.00666	0.00471	35.96249	0.02385	14.46738	2.57938	37.31689
12	760P5-04	23.92166	0.03236	7.98666	0.00943	35.89000	0.02000	14.33240	2.61999	37.55069
13	760P5-03	23.92332	0.05022	7.99000	0.01000	35.95749	0.01479	14.36010	2.61570	37.56172
14	760P5-02	23.91499	0.02986	7.98833	0.00898	35.97499	0.01658	14.35659	2.61606	37.55775
15	760P5-01	23.92667	0.03590	7.99166	0.00898	35.99750	0.01639	14.37983	2.61173	37.55629
16	760P3-06	24.00999	0.02309	7.98333	0.01106	35.91750	0.02278	14.46433	2.56125	37.04677
17	760P3-05	23.96832	0.00372	8.01499	0.00764	36.00999	0.01225	14.43069	2.58308	37.27563
18	760P3-04	23.95833	0.01344	8.01833	0.00373	35.96999	0.01225	14.39963	2.58868	37.27606
19	760P3-03	23.95166	0.00687	8.01499	0.00764	35.97000	0.01732	14.39212	2.58958	37.26956
20	760P3-02	23.96333	0.01375	8.00999	0.00577	36.03999	0.01414	14.43822	2.58055	37.25850

App. 4.4(2) DATA OF DIMENSION, VOLUME, DENSITY AND WEIGHT
FUEL PIN NO 2

JAERI-M 83-012

NO	NAME	OUTER-DIAM (mm)	STD (mm)	INNER-DIAM (mm)	STD (mm)	LENGTH (mm)	STD (mm)	VOLUME (cm ³)	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT (g)
1	760P2-10	23.94167	0.02544	7.98499	0.01607	35.92999	0.00707	14.37612	2.56077	36.81396
2	760P2-09	23.91499	0.02986	7.98666	0.01700	35.88249	0.03031	14.32043	2.57018	36.80609
3	760P2-08	23.89333	0.01374	7.98499	0.01258	35.83000	0.01871	14.27106	2.58148	36.84050
4	760P2-07	23.88832	0.03236	7.97499	0.00500	35.89999	0.00707	14.29669	2.57758	36.85080
5	760P2-06	23.89166	0.01772	7.97333	0.00471	35.82249	0.01640	14.27107	2.58121	36.83659
6	760P4-12	23.94499	0.03452	7.97666	0.00745	35.87500	0.02061	14.36237	2.58652	37.14856
7	760P4-11	23.95999	0.02582	7.97833	0.01067	35.81999	0.00707	14.35983	2.58593	37.13350
8	760P4-10	23.96832	0.01772	7.97833	0.01067	35.84750	0.01785	14.38209	2.58372	37.15923
9	760P4-09	23.95833	0.02267	7.98499	0.01258	35.82500	0.00500	14.35659	2.58903	37.16966
10	760P4-08	23.95332	0.01886	7.98333	0.01106	35.87000	0.01581	14.36862	2.58610	37.15869
11	760P4-07	23.95999	0.01527	7.97833	0.00898	35.83000	0.0	14.36384	2.58676	37.15584
12	760P5-08	23.91832	0.03891	7.99166	0.00898	35.90749	0.01299	14.33261	2.62120	37.56870
13	760P5-07	23.95833	0.04879	7.98166	0.00898	35.97499	0.03775	14.41821	2.60510	37.56087
14	760P5-06	23.91832	0.03891	7.98166	0.00687	35.94499	0.00500	14.35209	2.61662	37.55403
15	760P5-05	23.91499	0.02753	7.98499	0.01258	35.93250	0.01479	14.34113	2.61862	37.55403
16	760P3-11	23.99333	0.03144	7.99166	0.01067	35.89999	0.00707	14.43097	2.57138	37.10753
17	760P3-10	23.97665	0.01375	7.98499	0.00500	35.85500	0.00500	14.39336	2.57765	37.10097
18	760P3-09	23.98000	0.01633	7.98166	0.01067	35.83249	0.03345	14.39033	2.57823	37.10159
19	760P3-08	23.98332	0.01491	7.97999	0.00816	35.89499	0.00500	14.42066	2.57327	37.10823
20	760P3-07	23.98500	0.02363	7.97499	0.01258	35.87500	0.01118	14.41717	2.57182	37.07843

App. 4.4(3) DATA OF DIMENSION, VOLUME, DENSITY AND WEIGHT
FUEL PIN NO 3

JAERI--M 83--012

NO	NAME	OUTER-DIAM (mm)	STD (mm)	INNER-DIAM (mm)	STD (mm)	LENGTH (mm)	STD (mm)	VOLUME (cm ³)	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT (g)
1	760P2-15	23.90833	0.02544	7.98166	0.01213	35.94499	0.01118	14.33860	2.56881	36.83316
2	760P2-14	23.89499	0.02566	7.98833	0.00898	35.84250	0.00433	14.27678	2.58197	36.86223
3	760P2-13	23.86333	0.02687	7.97833	0.01067	35.83749	0.02385	14.23673	2.58787	36.84283
4	760P2-12	23.88998	0.01826	7.98166	0.01067	35.86749	0.01299	14.28298	2.58190	36.87726
5	760P2-11	23.88499	0.01893	7.98000	0.01528	35.83250	0.02947	14.26309	2.58185	36.82523
6	760P4-18	23.95332	0.02868	7.97666	0.00943	35.83499	0.00500	14.35760	2.58451	37.10739
7	760P4-17	23.95166	0.01463	7.97833	0.01067	35.85249	0.02278	14.36161	2.58337	37.10136
8	760P4-16	23.95499	0.02218	7.98833	0.01213	35.83749	0.01920	14.35560	2.58809	37.15363
9	760P4-15	23.98334	0.03726	7.97833	0.01067	35.84500	0.00500	14.40135	2.57935	37.14613
10	760P4-14	23.95999	0.03464	7.97166	0.00687	35.85500	0.00866	14.37685	2.58397	37.14943
11	760P4-13	23.95166	0.01864	7.97499	0.00764	35.84750	0.00433	14.36110	2.58592	37.13669
12	760P5-12	23.91167	0.04375	7.98499	0.01118	35.91998	0.01225	14.33165	2.62055	37.55679
13	760P5-11	23.91165	0.01572	7.98999	0.00577	35.84250	0.01090	14.29845	2.62559	37.54182
14	760P5-10	23.90833	0.03484	7.98499	0.00764	35.93250	0.03345	14.33212	2.62073	37.56059
15	760P5-09	23.91165	0.03578	7.98499	0.00957	35.95000	0.03082	14.34359	2.61882	37.56322
16	760P3-16	23.96500	0.02500	7.97832	0.00898	35.85249	0.01299	14.37961	2.58170	37.12389
17	760P3-15	23.98833	0.02114	7.99166	0.01067	35.87500	0.01658	14.41416	2.57506	37.11726
18	760P3-14	23.97166	0.01951	7.98000	0.00577	35.84499	0.01500	14.38483	2.58036	37.11806
19	760P3-13	23.97499	0.02217	7.98499	0.01118	35.86499	0.00500	14.39512	2.57762	37.10513
20	760P3-12	23.99333	0.02494	7.99166	0.00373	35.89999	0.0	14.43097	2.57124	37.10545