

JAERI - M  
88-107

OGL-1燃料体の燃料コンパクトと  
黒鉛スリーブの照射寸法変化

1988年6月

林 君夫・湊 和生・小林 紀昭・飛田 勉  
菊池 輝男・黒羽根史朗・足立 守・福田 幸朔

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷㈱

OGL-1 燃料体の燃料コンパクトと黒鉛スリーブの照射寸法変化

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部

林 君夫・湊 和生・小林紀昭・飛田 勉・菊池輝男<sup>+</sup>

黒羽根史朗<sup>+</sup>・足立 守<sup>+</sup>・福田幸朔

(1988年5月18日受理)

第1次～第9次OGL-1燃料体の燃料コンパクトと黒鉛スリーブの照射寸法変化データをまとめた。高速中性子照射量の範囲は $4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ )以下、燃料コンパクトの温度は約 $900 \sim 1400^\circ\text{C}$ 、黒鉛スリーブの温度は約 $800 \sim 1050^\circ\text{C}$ である。これらの条件下では燃料コンパクトの寸法変化は収縮方向であり、その収縮率は高速中性子照射量に対してほぼ直線的に増大した。長さ方向の燃料コンパクトの収縮率は外径の収縮率より約20%大きかった。燃料コンパクトの照射温度の寸法変化挙動への影響は明確にはみられなかった。これは高速中性子照射量が低いレベルにあり、従って寸法変化が小さかった為、温度の違いによる影響が寸法変化測定データのバラツキにかくされたものと考えられる。

Irradiation-induced Dimensional Changes of Fuel Compacts  
and Graphite Sleeves of OGL-1 Fuel Assemblies

Kimio HAYASHI, Kazuo MINATO, Fumiaki KOBAYASHI  
Tsutomu TOBITA, Teruo KIKUCHI<sup>+</sup>, Shiro KUROBANE<sup>+</sup>  
Mamoru ADACHI<sup>+</sup> and Kousaku FUKUDA

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

(Received May 18, 1988)

Experimental data are summarized on irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts and graphite sleeves of the first to ninth OGL-1 fuel assemblies. The range of fast-neutron fluence is up to  $4 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup> (E>0.18 MeV); and that of irradiation temperature is 900 - 1400°C for fuel compacts and 800 - 1050°C for graphite sleeves. The dimensional change of the fuel compacts was shrinkage under these test conditions, and the shrinkage fraction increased almost linearly with fast-neutron fluence. The shrinkage fraction of the fuel compacts was larger by 20 % in the axial direction than in the radial direction. Influence of the irradiation temperature on the dimensional-change behavior of the fuel compacts was not observed clearly; presumably the influence was hidden by scatter of the data because of low level of the fast-neutron fluence and the resultant small dimensional changes.

Keywords: Dimension, Change, Fuel, Irradiation, Graphite, Matrix,  
Coated Fuel Particle, Neutron, Shrinkage

---

<sup>+</sup> Department of Research Reactor Operation

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実 験 .....	2
2.1 試料 .....	2
2.2 照 射 .....	2
2.3 寸法測定 .....	3
3. 結 果 .....	4
3.1 燃料コンパクトの照射寸法変化 .....	4
3.1.1 高速中性子照射量依存性 .....	4
3.1.2 寸法変化の異方性 .....	4
3.1.3 照射温度の影響 .....	5
3.1.4 原料黒鉛粉の違いによる影響 .....	5
3.2 黒鉛スリーブの照射寸法変化 .....	5
3.3 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ .....	6
4. 解析および考察 .....	7
4.1 燃料コンパクト寸法変化率のデータ処理 .....	7
4.2 密封キャプセル照射データとの関連 .....	8
4.3 高温工学試験研究炉 (HTTR) の設計条件との関連 .....	9
4.4 外国データとの比較 .....	9
4.5 寸法変化挙動の機構 .....	10
4.6 黒鉛スリーブの照射寸法変化とコンパクト・スリーブ間のギャップ .....	13
5. 結 論 .....	14
謝 辞 .....	14
文 献 .....	15
付録1 燃料コンパクトの照射条件データ .....	50
付録2 燃料コンパクトの照射寸法変化の数値データ .....	70
付録3 燃料コンパクトの照射条件および寸法変化のプロット .....	90
付録4 燃料コンパクトの外径変化率と高速中性子照射量の関係 .....	101

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental .....	2
2.1 Specimen .....	2
2.2 Irradiation .....	2
2.3 Measurement of dimension .....	3
3. Results .....	4
3.1 Irradiation-induced dimensional change of fuel compacts .....	4
3.1.1 Dependence of fast-neutron fluence .....	4
3.1.2 Anisotropy of dimensional change .....	4
3.1.3 Influence of irradiation temperature .....	5
3.1.4 Influence of different graphite-filler materials .....	5
3.2 Irradiation-induced dimensional change of graphite sleeves .....	5
3.3 Gap between fuel compact and graphite sleeve .....	6
4. Analysis and discussion .....	7
4.1 Data processing of dimensional changes of fuel compacts .....	7
4.2 Relation with data obtained by closed-capsule irradiation ....	8
4.3 Relation with design condition of High Temperature Test Reactor (HTTR) .....	9
4.4 Comparison with foreign data .....	9
4.5 Mechanism of dimensional-change behavior .....	10
4.6 Dimensional change of graphite sleeves and gap between fuel compact and graphite sleeve .....	13
5. Conclusions .....	14
Acknowledgements .....	14
References .....	15
Appendix 1 Data on irradiation conditions of fuel compacts .....	50
Appendix 2 Numerical data of irradiation-induced dimensional change of fuel compacts .....	70
Appendix 3 Figures of irradiation conditions and dimensional changes of fuel compacts .....	90
Appendix 4 Figures of dimensional change of outer diameter of fuel compacts as a function of fast-neutron fluence .....	101

## 1. はじめに

原研で開発中のピン・イン・ブロック型高温ガス炉用燃料は被覆燃料粒子（以下、被覆粒子と略す）を黒鉛に分散させて製造した燃料コンパクトを黒鉛製の筒（黒鉛スリーブと称する）に挿入する構造となっている（Fig. 1 参照）。燃料コンパクトと黒鉛スリーブとは機械的干渉をしないように極くわずかのギャップをとっている。このギャップ幅は第9次までの OGL-1 燃料体では直径で 0.2 mm である。この空間ギャップが存在すると、その部分で温度ギャップが生じることになる。温度ギャップの値は燃料コンパクトの線出力やギャップ幅に依存するが数十℃程度またはそれ以上に達するものであり、燃料照射挙動に重要な影響を与える。

黒鉛および炭素材料は一般に高速中性子照射によって寸法変化を生じることが知られており、燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの照射寸法変化を正確に知ることは燃料温度変化挙動を把握し燃料設計を進めるうえで重要である。

OGL-1 は原研大洗研究所の材料試験炉（JMTR）に設置した炉内ガスループである<sup>(1)</sup>。このループを用いることによって原研で建設予定の高温工学試験研究炉（HTTR, Fig. 1 参照）と基本的に同一の仕様の燃料の照射が可能である。OGL-1 では燃料体あたり最大で 60 個の燃料コンパクト（この場合の燃料棒は 3 本）が照射されている。本報告書は現在までの照射後試験によって測定された第1次～第9次 OGL-1 燃料体の燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの照射寸法変化のデータをまとめたものである。

OGL-1 は JMTR の反射体領域に設置されているため、燃料領域で照射されるスリーブガスキャプセルや密封キャプセルに比べると熱中性子束、高速中性子束ともに低い値となる。本報告書の高速中性子照射量範囲を越える JMTR キャプセル照射に伴う寸法変化データについては別に報告する予定である。

## 2. 実 験

### 2.1 試 料

第1次～第9次 OGL-1 燃料の仕様の概要を Table 1 に示す。第1次～第5次燃料体については詳細な仕様が既に報告されている。<sup>(2)(3)</sup> 燃料コンパクトには外径 24 mm (3本棒タイプ：1次, 2次, 4次, 5次, 7次燃料体) と, 36 mm (1本棒タイプ：3次, 6次, 8次, 9次燃料体) の2種類があり, それに応じて黒鉛スリーブの寸法も2種類ある。燃料コンパクトの模式図を Fig. 2 に示す。原料マトリックス黒鉛は第7次燃料体を除けば全て同一銘柄である。すなわち石油コークス系人造黒鉛粉 (西独 Ringsdorff 社製) 20% と天然黒鉛粉 (西独 Kropfmuhl 社製) 80% の混合物である。これを  $P_2N_8$  と呼ぶことにする。第7次燃料体の黒鉛粉は3本の燃料棒のうち燃料棒 No. 3 は上と同じ組成の西独製品であるが, 燃料棒 No. 1 と No. 2 については国産品 (日本カーボン㈱製) が用いられた。これはマトリックス黒鉛粉の銘柄の違いによる燃料照射挙動の違いを調べるためである。

燃料コンパクトの製造フローを Fig. 3 に示す。原料黒鉛粉に対して重量で20%のフェノール樹脂バインダーを加え被覆粒子のまわりをマトリックス材がおおうようにし (オーバーコートと呼ぶ, Fig. 4 参照), 成型する。成型は Fig. 5 に示す金型ダイスを用いて両押し法による温間プレス法によって行なう。これを不活性ガス中で  $800^{\circ}\text{C}$  で予備焼成した後真空中で  $1800^{\circ}\text{C}$ , 1時間の焼成を行なうことによって燃料コンパクトを製造する。被覆粒子の充填率は30 vol.% である。

黒鉛スリーブの材質は全て東洋炭素㈱製の IG-110 である。これは微粒等方性の石油コークス系黒鉛 IG-11 (焼成温度  $2800^{\circ}\text{C}$ ) を高純度精製処理したものである。

### 2.2 照 射

OGL-1 燃料体の構造の概要を Fig. 6 に示す。燃料棒の本数から1本棒型と3本棒型がある。いずれも燃料棒は黒鉛ブロックの燃料棒挿入孔に挿入される構造となっている。燃料棒挿入孔 (冷却チャンネル) には冷却材 He が下から上に向かって流れる。

各供試燃料体の照射条件の概要を Table 2 にまとめる。前項と同様, 第1次～第5次燃料体については文献<sup>(2)(3)</sup>に照射条件の詳細が記述されている。Table 2 に示した数値のうちで熱中性子および高速中性子照射量については放射化測定用ワイヤ (Co および Fe 製) を用いた実測値を基本的に採用し, 合わせて核計算結果や照射日数等を考慮して再評価した値である。<sup>(4)</sup> また, 燃焼度および線出力は熱計算から求めた値であり, 照射条件の指標として示したものである。なお, 燃焼度については別に FP 生成量から求めた数値と比較して最終的に確定する予定である。

Fig. 7(a) は TRUMP コードによって計算した照射中の燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの温度を1例として示したものである。<sup>(5)</sup> この計算結果を用いて, 各照射サイクルごとに照射時間の重みをつけて平均した第5次および第8次燃料体の照射温度の軸方向分布を Fig. 7(b) および 7(c) <sup>(6)</sup>



に示す。Fig. 7(b)には黒鉛ブロック内の熱中性子照射量 ( $E < 0.683 \text{ eV}$ ,  $E$  は中性子エネルギー) の分布も合わせて示してある。各燃料体について、燃料コンパクトごとの照射条件 (照射温度, 燃焼度, 高速中性子照射量) をまとめて付録 1 に示す。

付録 1 および上の図からわかるように、高速中性子照射量 ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) は約  $4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  までの範囲であり、照射温度範囲は燃料コンパクトについては約  $900 \sim 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、黒鉛スリーブについては約  $800 \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$  の範囲にある。

## 2.3 寸法測定

### (1) 燃料コンパクト

燃料コンパクトの外径および長さは照射前後ともにマイクロメータで測定した。内径については照射前はイミクロメータで測定し、照射後は内径測定器で測定した。これらの測定精度は  $\pm 0.01 \text{ mm}$  程度であり、これに対して内径および外径は  $8 \sim 36 \text{ mm}$  であるから相対誤差は  $\pm 0.1\%$  程度であると言える。

照射前の測定箇所はコンパクト外径は上, 中, 下の 3 箇所について各々直角に合計 6 箇所, 内径は上, 下 2 箇所, 長さは周方向  $90^\circ$  ごとに 4 箇所である。それらの値の平均値を照射前の寸法として採用した。

照射後試験における測定箇所数は照射前の測定箇所数と同じである。ただし測定位置は照射前後で同じとは限らない。照射後も何箇所かの測定値を平均した値を採用した。

### (2) 黒鉛スリーブ

照射前の黒鉛スリーブ内径はシリンダーゲージ (ボアゲージ) で測定し、外径はノギスで測定した。照射後は内径, 外径ともに Fig. 8 に示す専用の寸法測定装置<sup>(7~9)</sup>によって測定した。スリーブ内面は機械加工されており、測定精度は照射前は  $\pm 0.01 \text{ mm}$  程度, 照射後は  $\pm 0.02 \text{ mm}$  程度である。スリーブ外面はリブ (冷却チャンネルとのギャップを確保するための突起) 部分が手加工であり、ノギスの測定精度は  $\pm 0.05 \text{ mm}$  程度である。相対精度を考えると、内径は約  $24 \text{ mm}$  および約  $36 \text{ mm}$  であるから  $0.1\%$  程度, 外径は  $30 \text{ mm}$  および  $46 \text{ mm}$  であるから  $0.2\%$  程度である。

測定箇所は軸方向の燃料コンパクト中央位置において 20 箇所, それぞれ直角に X, Y 方向 2 箇所である。

照射後試験における測定位置は内径, 外径ともに軸方向については  $5 \text{ mm}$  間隔であり, 周方向には内径は直交する 2 箇所, 外径はリブ部を避けて約  $60^\circ$  の角度で 2 方向測定した。

### (3) 照射寸法変化率の定義

照射前後の寸法測定値を用いて,

$$\text{照射寸法変化率}(\%) = \frac{\text{照射後の寸法} - \text{照射前の寸法}}{\text{照射前の寸法}} \times 100$$

と定義する。ここに寸法とは燃料コンパクトの内径, 外径および長さ, および黒鉛スリーブの内径および外径を意味するものとする。また, 燃料コンパクトの外径と黒鉛スリーブ内径との差, すなわち直径ギャップについても上と同様に定義する。ただし, 黒鉛スリーブの照射前後の測定位置は厳密には同じとは言えない。同じ軸方向位置に対して同じ測定器で (従って同じ測定精度で) 測定した例は第 8 次 OGL-1 燃料体の場合に限られる。

### 3. 結 果

#### 3.1 燃料コンパクトの照射寸法変化

各燃料コンパクトごとの平均照射温度，高速中性子照射量，外径，内径および長さの変化率，および長さ変化率と外径変化率の比をまとめて付録2に示す。また付録3に燃料コンパクトごとに平均照射温度，燃焼度，照射寸法変化，重量変化をプロットした図をまとめる。

ここでは典型的な例として第4次，第5次，第9次燃料体のコンパクトの直径と長さの変化率を照射位置に対してプロットしたものをFig.9に示す。炉心内の中性子束分布により，燃料棒の軸方向中央付近（下から8番目のコンパクト）で高速中性子照射量は最大になる。いずれの燃料棒についても高速中性子照射量の分布と燃料コンパクト外径および長さの変化率の分布とがよく対応していることがわかる。また，外径変化率に比べて長さの変化率のほうがやや大きいこともわかる。

##### 3.1.1 高速中性子照射量依存性

高速中性子照射量に対する照射寸法変化率の関係を求める。付録4には第1次～第9次燃料体の全ての燃料棒について高速中性子照射量と外径変化率をプロットしたものをまとめる。上と同様に典型例（5次および9次燃料体）について，外径および長さの変化率のプロットをFig.10(a)およびFig.10(b)に示す。

これらの図および付録4の各図からわかるように照射寸法変化は収縮側にあり，その収縮率はある程度のバラツキはあるものの高速中性子照射量に対してほぼ直線的に増加している。また1本の燃料棒において照射量の低い燃料コンパクトは上端および下端に位置するもので照射温度も低い，照射温度による寸法変化挙動の違いは特に見られない。またFig.10からも直径変化率より長さの変化率のほうがわずかに大きいことがわかる。

##### 3.1.2 寸法変化の異方性

前項に示した例について燃料コンパクトごとに長さ変化率と直径変化率の関係をFig.11(a)およびFig.11(b)に示す。これらの図の下側の部分には長さ変化率と直径変化率の比(異方性因子と呼ぶ)を示している。この比は燃料コンパクトごとに多少のバラツキはあるものの，常に1.0以上であり，5次燃料体(燃料棒3)で1.23，9次燃料体で1.13とわずかに1.0より大きい値となっている。

Table 3は上で定義した異方性因子を各燃料体の燃料棒ごとに求めたものである。この表には①高速中性子照射量最大位置の3個の燃料コンパクト(下側からNo.7, 8, 9)の異方性因子の平均値，および②燃料棒全体にわたる異方性因子の平均値を示している。Fig.12(a)およびFig.12(b)は上記①，②の各々の異方性因子の平均値を，各燃料棒の最大高速中性子照射量に対してプロットしたものである。これらの図表からわかるように，異方性因子はいずれも1.0より大きく，それらの平均値は約1.2である。すなわち，直径方向に比べて長さ方向の収縮率が約20%大きいということになる。

### 3.1.3 照射温度の影響

これまでの OGL-1 照射における燃料コンパクトの平均照射温度はほぼ  $900^{\circ}\text{C}$ ~ $1400^{\circ}\text{C}$  の範囲にある。しかし 3.1.1 項に記したように寸法変化率を高速中性子照射量に対してプロットするとそれらはほぼ 1 本の直線で示される関係となり、照射温度の違いによる影響は殆んど見られなかった。

照射温度の影響を調べるため、照射温度をいくつかの領域に分けて、その温度領域ごとに外径変化率と高速中性子照射量のプロットを行なった。Fig.13 はそれらのデータを最小 2 乗法によって直線近似したものである。温度領域の違いによる寸法変化挙動の違いは殆んど見られない。仮にそれらの直線の勾配のごくわずかな違いに注目しても、照射温度の高低との系統的な関係は見られず、全てのデータは寸法測定のパラッキの範囲内におさまっていると見るべきである。

### 3.1.4 原料黒鉛粉の違いによる影響

第 7 次 OGL-1 燃料体の照射は黒鉛マトリックスの原料黒鉛粉の違いによる照射挙動の違いを調べることを目的としたものであった。燃料棒 3 の燃料コンパクトのマトリックス黒鉛は西独製の石油コークス系人造黒鉛 20% と天然黒鉛 80% の混合物 ( $\text{P}_2\text{N}_8$ ) であるが、燃料棒 1 と燃料棒 2 のマトリックス黒鉛は国産品である。

燃料棒 2 と燃料棒 3 とは殆んど同様な照射条件で照射されたので直接的な比較が可能である。Fig. 14 に 3 本の燃料棒の外径変化率を高速中性子照射量に対してプロットしたものを示す。また Fig. 15 は高速中性子照射量に対して、それら 3 本の燃料棒の外径変化率を全て 1 つのグラフ上にプロットしたものである。Fig. 14(b) と Fig. 14(c) の比較からわかるように多少のパラッキはあるものの燃料棒 2 と燃料棒 3 で寸法変化挙動に殆んど違いは見られない。また Fig. 15 からわかるように、3 本の燃料棒を比較してみても、高速中性子照射量の最大値が異なるだけで、寸法変化率との関係は 3 本の燃料ともに違いが見られない。

## 3.2 黒鉛スリーブの照射寸法変化<sup>(2)(3)</sup>

第 1 次および第 2 次 OGL-1 燃料体の黒鉛スリーブ外径の照射前後の値を Fig.16 および Fig. 17 に示す<sup>(2)</sup>。外径約 30 mm に対して照射前後の差はいずれも 0.1 mm 以下であり、変化率にして 0.3% 以下であることがわかる。しかし、スリーブ外径は手加工の部分があるうえ、照射前の測定はノギス、照射後は寸法測定装置を用いたものであり厳密な比較は行なえない。

Fig. 18 ~ 20 は第 3 次 ~ 第 5 次 OGL-1 燃料体の黒鉛スリーブの内径の照射前後の変化率を黒鉛スリーブ軸方向に対してプロットしたものである<sup>(3)</sup>。内径は全て機械加工されており、また照射前の寸法はシリンダーゲージ (精度  $\pm 0.01\text{mm}$ ) によって測定したもので、上の結果より測定精度は高い。3.3 節で示すように軸方向に内径プロフィールは最大で 0.1% 程度変化する。これに対して、照射前後の測定位置は軸方向で同じではないので、照射寸法変化を厳密に求めることはできない。

しかしながら、次に述べるような一般的傾向は認められる。すなわち、まず内径の変化率は軸方向に一様ではなく、高速中性子束分布<sup>(9)</sup> にほぼ対応した分布となっている。また、JMTRC に

よる核的モックアップ実験<sup>(9)</sup>では3本棒型の燃料体では炉心側の2本の燃料棒と反炉心側の1本の燃料棒では高速中性子束のピーク比について約1.4という値が得られていたが、内径変化率についてもこれと同じ比が得られた。さらに、第3次、第4次、第5次燃料体はこの順に高速中性子照射量が大きくなっており、(照射温度の違いがあるため厳密な比較はできないが)内径変化率もこの順に大きくなっていることがわかる。以上、第3次～第5次燃料体について、黒鉛スリーブ内径の変化は基本的には高速中性子照射量に対応していることがわかる。

第8次 OGL-1 燃料体の黒鉛スリーブについては、照射の前後に同じ寸法測定装置を用いて内径を測定することができた。このため照射寸法変化率データの精度が高く、上より更に厳密な議論ができる。Fig. 21はこの燃料体の燃料コンパクトの寸法変化率と、燃料コンパクト位置における黒鉛スリーブ内径の変化率を軸方向位置に対してプロットしたものである。この図から、黒鉛スリーブ内径の照射寸法変化が高速中性子照射量分布に良く対応していることがわかる。高速中性子照射量が最大となる位置(ほぼ軸方向中央)で、燃料コンパクトの寸法変化率がおよそ-0.2%であるのに対して黒鉛スリーブ内径の変化率はおよそ-0.07%であり、燃料コンパクトの収縮率のほうが大きいことがわかる。

### 3.3 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ

高温ガス炉燃料開発という観点からすると、まず燃料体製造時における燃料コンパクト外径と黒鉛スリーブ内径の差、すなわち製造時直径ギャップとその照射中の変化挙動が問題になる。

3.2節で取り上げた第8次燃料体について、照射前と照射後の直径ギャップの値を燃料棒軸方向位置についてFig. 22にプロットする。照射前の直径ギャップは0.25～0.35mmであったのに対して、照射後には各位置で0.05mm程度ギャップが広がっていることがわかる。これは、Fig. 21に示したように燃料コンパクトの収縮率のほうが黒鉛スリーブの収縮率よりも大きいためである。

上述のようにコンパクト・スリーブ間のギャップの照射に伴う変化は、製造時のギャップおよび燃料コンパクトと黒鉛スリーブの各々の照射寸法変化によって決まる。しかし、現在までの実験範囲では黒鉛スリーブは燃料コンパクトに比べて照射寸法変化率が小さいうえに、その変化を精度の良い同一の装置で照射前後に測定したデータは前述のように第8次 OGL-1 燃料体でしか得られていない。このため、現状では照射に伴うギャップ変化について広い照射量範囲にわたる信頼すべき知見は得られていない。

次に、ギャップに関連した問題として、黒鉛スリーブ内径の軸方向分布(プロフィール)の問題があげられる。Fig. 23はその1例を示したものである。軸方向に0.05mm程度の内径プロフィールの幅があり、両端と中央部で内径が大きくなっている。これは、内面の機械加工の際の工具のブレと持ちかえのためであると考えている。このような軸方向プロフィールがあるため、内径の軸方向測定位置を正確に定めない限り照射による変化率を精度良く求めることができない。照射後測定に用いた寸法測定装置を用いれば上に示したような詳細なプロフィールを求めることができ、同一軸方向位置における寸法変化率を求めることができる。

## 4. 解析および考察

以下の4.1節から4.5節までは燃料コンパクトの寸法変化挙動に関してデータ整理と考察を行なう。また、4.6節において黒鉛スリーブの寸法変化とギャップの変化についてデータを検討し今後の課題について述べる。

### 4.1 燃料コンパクト寸法変化率のデータ処理

3章で得られた寸法変化率データのうち、燃料コンパクトの外径の変化率データについてはデータ数が多く、また統計的な変動の範囲で良い整合性を持っているように思われる。そこで、以下に示すように燃料コンパクトの外径変化率( $\Delta D/D$ )を高速中性子照射量( $E > 0.18 \text{ MeV}$ )のべき関数として表現するために最小2乗法によって整理することを試みた。

#### (1) 最小2乗法の適用

まず、%で示した外径変化率 $\Delta D/D$ をとりこれを $y$ とする。一方高速中性子照射量 $\phi$ を $10^{21}$ 単位で表わし、これを $x$ とする。すなわち

$$y \equiv (\Delta D/D) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$x \equiv \phi \text{ (n/cm}^2, E > 0.18 \text{ MeV)} / 10^{21} \quad (2)$$

と定義する。寸法変化率 $y$ は、照射開始時( $x = 0$ )にゼロであることに注意して、 $y$ が

$$f(x) = C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + \dots + C_n x^n \quad (3)$$

のような $x$ のべき関数で表わされると仮定する。問題は適当な $n$ までの項について係数 $C_1, C_2, \dots, C_n$ を定めることである。

3次関数を例にとり

$$f(x) = C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 \quad (4)$$

とおく。実験データとして $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, N$ なる $N$ 個のデータが求められたとする。これに対して

$$\begin{aligned} Z &\equiv \sum_{i=1}^N \{ f(x_i) - y_i \}^2 \\ &\equiv \sum_{i=1}^N \{ C_1 x_i + C_2 x_i^2 + C_3 x_i^3 - y_i \}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

を最小にするように係数 $C_1, C_2, C_3$ を定める。 $C_1, C_2, C_3$ は区間 $(-\infty, +\infty)$ の実数であり、 $Z$ がこの範囲で最小値をとるためには極小値をとることが必要条件となる。従って(5)式の両辺を $C_1, C_2, C_3$ で偏微分してその偏微分係数をゼロとおく。これが最小2乗法の原理である。以下の表式では $\Sigma$ の範囲 $i = 1, N$ の表記を省略する。

$$\frac{\partial Z}{\partial C_1} = \Sigma 2 x_i \{ C_1 x_i + C_2 x_i^2 + C_3 x_i^3 - y_i \} = 0$$

$$\therefore C_1 \Sigma x_i^2 + C_2 \Sigma x_i^3 + C_3 \Sigma x_i^4 - \Sigma x_i y_i = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_2} = \Sigma 2 x_i^2 \{ C_1 x_i + C_2 x_i^2 + C_3 x_i^3 - y_i \} = 0$$

$$\therefore C_1 \Sigma x_i^3 + C_2 \Sigma x_i^4 + C_3 \Sigma x_i^5 - \Sigma x_i^2 y_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_3} = \Sigma 2 x_i^3 \{ C_1 x_i + C_2 x_i^2 + C_3 x_i^3 - y_i \} = 0$$

$$\therefore C_1 \Sigma x_i^3 + C_2 \Sigma x_i^4 + C_3 \Sigma x_i^5 - \Sigma x_i^3 y_i = 0 \quad (8)$$

(6), (7), (8)式をまとめて行列式の形にすると

$$\begin{pmatrix} \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 \\ \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 \\ \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma x_i y_i \\ \Sigma x_i^2 y_i \\ \Sigma x_i^3 y_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

となる。この行列式を Gauss-Jordan の消去法<sup>(10)</sup>によって解いて  $C_1, C_2, C_3$  を求めた。

## (2) 寸法変化データの統計処理の結果

上の方法によって1次～9次 OGL-1 燃料体の照射データについて次式を得た。

$$\Delta D/D(\%) = -1.68 \phi + 1.40 \phi^2, \quad 0 \leq \phi \leq 0.4 \quad (10)$$

$\phi$  = 高速中性子照射量 ( $10^{25} \text{ n/m}^2$  単位,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ )

この式と実測データとのフィッティングは、Fig.24の例に示すようにほぼ良好である。具体的数字をあげると、例えば  $\phi = 0.3$  (すなわち  $3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) の高速中性子照射量の時、 $\Delta D/D = -0.38\%$  となる。ただし、(10)式の適用範囲は  $\phi \leq 0.4$  であり、これを越えると全く異常な数値となることに注意を要する。

次の4.2節に示すように、密封キャプセル照射データを用いてより広い照射量範囲の近似式を得ており、(10)式のかわりにむしろ次節の(11)式を用いるよう推奨する。

## 4.2 密封キャプセル照射データとの関連

1章でも述べたように OGL-1 照射では燃料コンパクト数は多いものの、高速中性子照射量は低い範囲に限られる。一方、密封キャプセルを用いて  $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) 程度、すなわち、OGL-1 照射より1桁近い高照射量までの燃料コンパクト寸法変化データが取得されている。それらの照射データについては別に報告する予定である。

ここでは、OGL-1 照射と密封キャプセル照射データを全て含めて寸法変化率の近似式を4.1節と同じ方法で求めた結果のみを以下に示す。

$$\Delta D/D(\%) = -1.10 \phi + 0.215 \phi^2, \quad 0 \leq \phi \leq 3 \quad (11)$$

(10)(11)式を導びく際に3次以上のべき関数多項式を用いることも試みた。しかし実測データとのフィッティングが良すぎて近似曲線が奇妙な形となったので、それらは採用しなかった。密封キャプセル照射データ ( $\Delta D/D$ ) と(11)式のフィッティング状況を Fig. 25 に示す。良好な近似であると考えられる。具体的数値を求めてみると、 $\phi = 1$  ( $10^{25}$  n/m<sup>2</sup>,  $E > 0.18$  MeV) で  $\Delta D/D = -0.88\%$  である。また  $\phi = 0.3$  とおくと  $\Delta D/D = -0.31\%$  となり、4.1節の場合の  $\Delta D/D = -0.38\%$  に近い値となる。包括的な近似式としては(11)式を推奨する。ただし、(10)(11)式のような近似式は新しいデータが取得されるにつれて、係数が修正されるのは当然であるが、具体的数値は大きくは変わらないであろうと考えている。

なお、密封キャプセル照射における温度範囲も OGL-1 照射の場合と同様に 900～1400°C 程度であるが、照射温度による寸法変化率への影響は特に見られていない。ただし4.4節にも記述するように、密封キャプセル照射では照射サイクルごとの照射温度レベルの変動が大きかったこともあり、見掛け上、寸法変化率に対する照射温度の効果が現れていないだけで実際には照射温度の影響はありうるものと考えている。

#### 4.3 高温工学試験研究炉 (HTTR) の設計条件との関連

HTTR の現時点での設計条件は、高速中性子照射量 ( $E > 0.18$  MeV) は平均で  $7 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup> 最大で  $1.3 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup> である。これらの照射量範囲は OGL-1 照射の照射量範囲は越えるが、密封キャプセル照射の照射量範囲の中に含まれるものである。照射温度を 900～1400°C 程度とすれば、(12)式から燃料コンパクト外径変化率 ( $\Delta D/D$ ) は平均で  $-0.66\%$ 、最大で  $-1.06\%$  程度となる。ただし4.2節に記述したように、密封キャプセル照射データでは照射温度の影響が正しく評価されていない可能性があり、照射温度によっては係数2程度以内の不確定さを見込む必要があると考える。

#### 4.4 外国データとの比較<sup>(2)(3)(11)</sup>

OGL-1 照射およびキャプセル照射によって原研で取得した燃料コンパクトの寸法変化を高速中性子照射量に対してプロットし、外国データと比較したのが Fig. 26 である。<sup>(3)(11)</sup> OGL-1 照射の高速中性子照射量は低い範囲にあるが、密封キャプセルによる照射結果も含めてこれら HTTR 参照用燃料コンパクトの照射寸法変化は AVR 燃料要素 (燃料球) の照射寸法変化と同程度であることがわかる。

諸外国の燃料要素の模式図を Fig. 27<sup>(12)</sup> に示す。西独の AVR 燃料は、OGL-1 照射および密封キャプセルによる HTTR 用参照燃料と同じ組成のマトリックス黒鉛、および同じくフェノール樹脂バインダーを用いて (A3 マトリックスと呼ぶ) オーバーコート法によって製造したものである。ただし成型法は HTTR 用参照燃料が両押成型法であるのに対して、AVR 用燃料はラバープレスによる等方的加圧成型法である。<sup>(13)</sup> A3 (おそらく A3-3) マトリックスの照射寸法挙動には Fig. 28 に示すように高照射量領域において明瞭な温度依存性があらわれている。<sup>(14)</sup>

OECD Dragon 炉プロジェクトの燃料は HTTR 用燃料と同一製法 (オーバーコートおよび両

押成型による燃料コンパクト製造)で製造された。しかし、マトリックス黒鉛に針状コークスを使用したため寸法変化に異方性が見られる。すなわち燃料コンパクトの軸方向より径方向の収縮のほうが大きい。<sup>(15)</sup>また Fig. 26 に見られるように HTTR 参照用燃料に比べて寸法収縮率がかなり大きい。

米国の Fort St. Vrain 炉燃料はスラグ注入法 (hot-slug injection) という方法によって製造する。<sup>(16)</sup>これは金型ダイスに充填したルーズな被覆粒子および黒鉛 (充填率調整用) の間隙にスラグ状のマトリックス材を高温高压で注入する方法である。この時、注入を容易にするため、黒鉛粉末 (フィラー) 含有率をより少なく、逆にバインダーをより多くして流動性を高めている。この方法では被覆粒子充填率が ~60 vol. % と他の炉の燃料 (~30 vol. %) に比べて高く被覆粒子が互いに接しているため、燃料コンパクト (fuel rod と称する) の照射寸法変化は黒鉛マトリックスよりも被覆粒子自体の寸法収縮に依存すると言われており、その寸法変化は HTTR 用参照燃料や AVR 燃料よりも小さく現れている。<sup>(17,18)</sup>

Fig. 29 は燃料コンパクトの製法の違いによる構造および照射挙動の違いを模式的に示したものである。<sup>(14)(19)</sup>TRISO 被覆粒子より黒鉛マトリックスのほうが照射収縮率が大きいので照射量の増加に伴って TRISO 被覆粒子はマトリックスから圧縮応力を受ける。オーバーコート型ではこの圧縮応力は等方的であり、極めて高い照射量になると、強度の関係でマトリックスに経方向クラックが入る。スラグ注入型では TRISO 被覆粒子にかかる応力は非等方的であり、照射量の増加に伴って隣接粒子の間隙にある黒鉛マトリックスにクラックが発生する。この時、被覆粒子の最外被覆層とマトリックスとの結合が強すぎると最外被覆層の破損が生じる。これはスラグ注入による製造時にバインダーが最外 PyC 層の開気孔中に入りこむためにおこるもので、照射<sup>(17,19)</sup>だけでなく焼成時に最外被覆層の破損が生じることも観察されている。<sup>(20)</sup>

HTTR 参照燃料コンパクトではこのような破損モードによる被覆粒子破損が観察された例はない。

#### 4.5 寸法変化挙動の機構<sup>(21-23)</sup>

本報告の結果を従来の同種の試験の結果に比較する時特徴的なこととして、①コンパクト外径の収縮率に比べて、長さの収縮率がわずかに (~20%) 大きかったこと、および②照射温度の違いによる寸法変化挙動の違いが殆んど見られなかったこと、があげられる。これらの点も含めて燃料コンパクトの照射寸法変化の機構について考察する。

まず、TRISO 被覆粒子から成る燃料コンパクトでは中性子照射による寸法変化は黒鉛炭素マトリックスの寸法変化に支配される。これは被覆層の 1 つである SiC の照射寸法変化が、例えば 1040°C、 $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) で 0.05% の膨張<sup>(24,25)</sup>とごくわずかであり、従って被覆粒子全体としての寸法変化もごくわずかであることによる。

##### (1) 燃料コンパクトの照射寸法変化の異方性

本報告と同じ原料黒鉛と製法によって製造した燃料コンパクト (76F-6A キャプセル照射燃料, 76FP 1A 1~7)<sup>(26)</sup> の照射では、 $> 1.3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) の高速中性子照射量に對して



## 長さの収縮率 &lt; 直径の収縮率

(12)

となっている。例えば  $1.6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) では長さの収縮率は 0.8%, 直径の収縮率は 1.1% であった。同様な現象は 72F-8A および 72F-9A キャプセル照射による照射の結果にも見られている。

すなわち本実験の結果とは全く逆である。そこで、まず現象自体の再現性が問題となる。1つ考えられることは、本報告の OGL-1 照射のように高速中性子照射量が低い時 ( $\leq 0.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ) には

## 長さの収縮率 &gt; 直径収縮率

(13)

となり、照射量がさらに増えると、逆に不等式(12)が成立するようになることである。

文献(21)では不等式(12)が成立したことについて、次のような説明を行なった。すなわち、黒鉛粉末は通常鱗片状を呈し、その寸法は c 軸方向よりも a 軸方向のほうが大きいから、燃料コンパクトの成型に際し一部の黒鉛粉末の層面は成型圧と垂直方向に配列する<sup>(27)</sup>。しかし、黒鉛・炭素マトリックスにおいて、バインダー炭素と多結晶黒鉛材とでは高速中性子による照射収縮率は前者のほうが大きい<sup>(28)</sup> ことから、黒鉛粉の c 軸方向の膨張はバインダー炭素の収縮によって吸収され、コンパクト長さ方向の寸法変化はマクロ的には収縮となるはずである。一方、コンパクト直径方向では、黒鉛粉の a 軸方向の収縮とバインダー炭素の収縮が加算される。以上のことから長さ方向より直径方向のほうが収縮率が大きくなるものと解釈された。

この解釈によって高照射量側で不等式(12)が成立することは説明できるものの、低照射量の時に不等式(13)が成立することは説明できない。この理由について現在検討中である。

(2) 多結晶黒鉛材料の照射寸法変化<sup>(22,23)</sup>

燃料コンパクトの黒鉛マトリックスの照射寸法変化を考える際には、多結晶黒鉛材料の照射寸法変化の豊富なデータが参考になる。<sup>(23)(29,30)</sup> ただし多結晶黒鉛材料は原料黒鉛粉(フィラー)とピッチ系などのバインダーとの成分から成っているが焼成温度が高い(IG-110 黒鉛の場合 2800°C) ため、バインダーの黒鉛化度も高い。これに対して黒鉛マトリックスも同様に黒鉛粉とバインダーから成るものの焼成温度が低い(原研の HTRR 用標準燃料コンパクトの場合 1800°C) ため、バインダーの黒鉛化度は多結晶黒鉛材に比べて低い。後で述べるように黒鉛化度の違いを念頭において両者の照射寸法変化挙動を比較する必要がある。

まず多結晶黒鉛材の微結晶(結晶子, crystallite, ほぼ単結晶と考えることができる)の低温(典型的には液体ヘリウム温度程度)における高速中性子による照射損傷を考える。この時の照射損傷の基本的プロセスは、高速中性子の弾性衝突および非弾性衝突によって炭素原子が格子位置からはじき出され、生じた 1 次はじき出し原子(PKA)のエネルギーが十分高い場合には他の炭素原子と衝突して、はじき出しカスケードを作ることである。温度が十分低く、はじき出された原子の移動度が小さい場合には、それらは格子間原子となり、もとの格子位置には空孔が形成されることになる。その結果、層面内(a軸方向)では空孔のために収縮し、逆に層間には格子間原子が割りこむため層面と垂直方向(c軸方向)には膨張する。照射温度が高くなると、格子間原子と空孔の点欠陥だけでなく欠陥集合体や新たな層面が作られるようになり、その寸法変化挙動は複雑になる。

熱分解黒鉛では、結晶配向性が大きいため、単結晶黒鉛の場合と同様な照射寸法変化挙動が巨視的に観察される。<sup>30)</sup>

これに対して多結晶黒鉛材料の巨視的寸法変化は原料黒鉛粉の微結晶の大きさや格子定数、微結晶の内部や周囲の気孔、バインダー等の照射による変化の影響をうける。松尾<sup>(23)</sup>は、種々の黒鉛材料の照射寸法収縮率が850°C~約1200°Cの温度範囲で温度上昇と共に大きくなることを見いだした。その理由として、これらの温度では主に空孔およびその集合した欠陥が寸法変化に影響し、照射温度が高くなるに従ってより複雑な欠陥が生成されるようになるためであるとの考え方を提案した。

多結晶黒鉛材では微結晶のc軸方向の膨張は気孔によって吸収され、a軸方向の収縮が残るため、巨視的には主に照射寸法収縮として現れる。照射量が増加し巨視的な寸法収縮が進むと、それに伴って内部に応力が蓄積されるようになり、ある限界の照射量に達するとマイクロクラックの発生を伴って巨視的に膨張に転ずるようになる。<sup>30,31)</sup>この現象は“turnaround”として知られており、これが現れる照射量は照射温度によって異なることが知られている。

ただし、多結晶黒鉛材における微結晶の配列方向は完全に等方的でなく配向性を持っているので、方向によって寸法変化率も異なる。

### (3) 黒鉛マトリックスの照射寸法変化の機構

照射初期における寸法収縮率は、黒鉛マトリックスのほうが多結晶黒鉛材より一般に大きい。<sup>(23)(28)</sup>その原因は前に述べたように黒鉛マトリックスは焼成温度が低いためバインダーの黒鉛化度が低いことが最も重要なものとしてあげられる。

最終焼成温度が1100°Cと低い温度で焼成された炭素材料であるASR-0RBやASR-1RBではIG-110など多結晶黒鉛材料に比べて大きい照射寸法収縮率を示した。<sup>(23)</sup>そのほかの炭素・黒鉛材料の照射試験からも黒鉛化の低い材料ほど照射初期の寸法収縮率の大きいことが知られている。<sup>(28,32-35)</sup>

これらの実験結果から、“照射黒鉛化”の考え方が提案された。Delleら<sup>(35)</sup>は西独の黒鉛炭素マトリックスの照射寸法変化挙動が①黒鉛の照射損傷と②炭素の黒鉛化から成り立っていると考えた。そして、前者は照射温度に依存し、照射温度より高温でのアニールによって回復がおこるが、後者の黒鉛化過程は不可逆的に起こるものと考えた。

この考え方によって本報告の結果を説明することが可能である。すなわち、本報告の実験では高速中性子照射量が低く、また照射温度が900°C~1400°Cと高いため、黒鉛の照射損傷（はじき出し損傷）の効果は照射中の回復の影響のためにあまり大きくない。一方、炭素成分の黒鉛化が進みこれが支配的な機構になるため照射収縮が観察され、照射温度の影響が顕著には現われなかったものと考えられることができる。

また、いったん炭素成分の黒鉛化が進むと、その後は多結晶黒鉛材料と同様にturnaroundが生じるということで、一般に黒鉛炭素マトリックスの高照射量側で報告されているturnaroundも説明できる。ただし、本報告書の範囲ではturnaroundは見られない。これは高速中性子照射量が、最大で $\sim 4 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup> (E>0.18 MeV)と通常の黒鉛マトリックスの温度条件でturnaroundの見られる照射量範囲より1桁近く小さかったためであると考えている。

黒鉛炭素マトリックスの照射寸法変化挙動を定量的・分析的に評価するために次のような実験

が考えられる。すなわち、バインダー材料（ここではフェノール樹脂）のみを成型し燃料コンパクトと同じ条件で炭化させて照射しその寸法変化を測定する。一方、照射前後にこの材料のX線回折をとり、黒鉛化の進行（格子定数変化および結晶子の大きさの変化）とマクロ的な照射寸法変化挙動との関連を調べる。この時、照射温度の違いによる黒鉛化の進行と照射寸法変化挙動の違いを調べることに興味深い。

#### (4) 燃料コンパクトの照射寸法変化に対する照射温度の影響

4.4節に示したようにA3マトリックスの照射寸法変化については照射温度の影響が明瞭に現れている（Fig. 28）。しかしOGL-1照射では高速中性子照射量が低い（ $\leq 4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ）ため寸法収縮率が小さく、その測定上のバラツキおよび製造条件のわずかな違いによる寸法変化（の真値の）バラツキの中に、照射温度の違いによる影響がかくされてしまった可能性が強い。

一方、密封キャプセルについては4.2節に記述したように照射サイクルごとに照射温度が相当大きく変化したため、高速中性子照射量は十分大きい（ $\leq 3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ）にもかかわらず結果的に照射温度の違いによる影響が明瞭に現れなかったものと解釈した。

今後の照射試験においてはこれらの点に留意し、できるだけ一定の温度で高照量まで照射してその時の寸法変化データを取得するという試験を少くとも一度は行うべきである。

#### 4.6 黒鉛スリーブの照射寸法変化とコンパクト・スリーブ間のギャップ

黒鉛材については4.5節に記述したように燃料コンパクトよりも照射寸法変化が小さい。そのうえOGL-1照射では高速中性子照射量が低いので、長期照射を行わない限り測定法や製造条件の変動によるバラツキに対して精度の高い寸法変化データを取得するのは難しい。

しかし、照射後試験に用いている寸法測定装置は極めて測定精度が高いので、照射前に同一の装置によって測定するか、または同程度の精度で測定できれば信頼しうるデータの入手が可能となる。8次OGL-1燃料体についてはこれを実施した。また現在製作中の第12次燃料体については照射前の寸法測定の実施を予定している。

燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップについて付言しておく。ピン・イン・ブロック型のこの燃料形式では製造時および使用中（炉停止時を含む）に両者の間で機械的干渉がおこらないように設計される。燃料コンパクトと黒鉛スリーブの熱膨張率を比べると黒鉛スリーブのほうが大きいので、<sup>(22,23,36)</sup>高温での出力運転時には両者のギャップ幅は拡大する方向にある。また本報告でも示したように高速中性子照射量の増加に伴う寸法収縮率はHTTRの条件下では燃料コンパクトのほうが大きいので、この点からもギャップ幅は拡大する方向にある。

このことは機械的干渉という点からすると安全側にある。事実、今までOGL-1照射およびJMTRキャプセル照射において、コンパクト・スリーブ間のギャップ閉塞のために燃料コンパクトが取り出せなかったという例は皆無である。しかしながら、ギャップ幅の増加はギャップ熱伝達率の低下をもたらす、従って出力および冷却材温度条件が一定のもとでは燃料温度の上昇をもたらす。HTTRの設計には当然このことは考慮されている。また、ギャップを持たない一体化燃料の製造研究を高性能燃料の開発の一環として行なっている。<sup>(37,38)</sup>

## 5. 結 論

高温ガス炉研究開発の一環として OGL-1 燃料体の燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの照射寸法変化挙動の研究を行なった。OGL-1 燃料体は高温工学試験研究炉 (HTTR) を模擬した高温・高圧の炉内ガスループ OGL-1 で照射したものである。燃料コンパクトの温度は 900 ~ 1400°C, 黒鉛スリーブの温度は 800 ~ 1050°C 程度で HTTR の条件を満たしているが, 高速中性子照射量は最大で  $\sim 4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) と HTTR の最大照射量 ( $1.3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) には到達していない。

本試験によって以下の結論を得た。

- (1) 燃料コンパクトの寸法変化率は高速中性子照射量に対してほぼ直線的に変化した。この時照射温度の違いによる効果は明瞭には見られなかった。
- (2) 燃料コンパクトの寸法変化率と高速中性子照射量との関係を統計的に整理して, OGL-1 照射だけについては本文 4.1 節 (ii) 式を, OGL-1 と JMTR キャプセル照射全体については (i) 式を得た。HTTR の設計への参照用としては (ii) 式を推奨する。
- (3) 燃料コンパクトの長さの収縮率は外径の収縮率よりも約 20% 大きかった。密封キャプセル照射において, 高速中性子照射量が OGL-1 照射の場合より大きい時には逆の傾向が見られた。
- (4) 黒鉛スリーブの照射寸法変化に関して精度の良いデータは第 8 次燃料体照射の場合に限られるが, 一般的傾向としては高速中性子照射量の増加に伴って寸法収縮率も増加することが確認された。また黒鉛スリーブの収縮率は燃料コンパクトの収縮率よりも小さいことが確められた。

今後の課題としては, OGL-1 照射については①照射温度を一定に保ったまま高速中性子照射量を十分多くし ( $\sim 1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ), HTTR に近い条件下での燃料コンパクトの寸法変化挙動, および照射温度の影響を調べること, および②黒鉛スリーブの照射前後の寸法を精度良く測定し, 燃料棒内のギャップ変化挙動について信頼しうるデータを取得することがあげられる。また JMTR 密封キャプセル照射や海外炉照射によって一定の温度条件下で高い高速中性子照射量まで照射を行なって燃料コンパクト寸法変化に対する照射温度の影響を調べることが必要である。

本研究のデータを HTTR の設計に用いる場合には, (ii) 式または今後のデータ取得に伴って修正される式を用いることが適当であるが, その際には照射温度の違いによる不確定さに対する考慮が必要である。

## 謝 辞

本報告の OGL-1 照射試験を進めるにあたって, 燃料体の設計および照射を担当された原研大洗研究所材料試験炉部照射 1 課, 照射 2 課, 照射 3 課および計画課の各位, 燃料体の製作および組立を担当された東海研技術部工作課の各位, 照射後試験に協力された東海研研究炉管理部ホットラボ管理室の各位に深く感謝します。特にホットラボ管理室の鈴木紘氏および糸永文雄氏には寸法測定のための計画・調整をして頂いたことに感謝します。また本報告書の作成にあたって激励を賜った燃料・材料工学部近藤達男部長および柴是行次長に感謝します。

## 5. 結 論

高温ガス炉研究開発の一環として OGL-1 燃料体の燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの照射寸法変化挙動の研究を行なった。OGL-1 燃料体は高温工学試験研究炉 (HTTR) を模擬した高温・高圧の炉内ガスループ OGL-1 で照射したものである。燃料コンパクトの温度は 900 ~ 1400°C, 黒鉛スリーブの温度は 800 ~ 1050°C 程度で HTTR の条件を満たしているが, 高速中性子照射量は最大で  $\sim 4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) と HTTR の最大照射量 ( $1.3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) には到達していない。

本試験によって以下の結論を得た。

- (1) 燃料コンパクトの寸法変化率は高速中性子照射量に対してほぼ直線的に変化した。この時照射温度の違いによる効果は明瞭には見られなかった。
- (2) 燃料コンパクトの寸法変化率と高速中性子照射量との関係を統計的に整理して, OGL-1 照射だけについては本文 4.1 節 (10) 式を, OGL-1 と JMTR キャプセル照射全体については (11) 式を得た。HTTR の設計への参照用としては (11) 式を推奨する。
- (3) 燃料コンパクトの長さの収縮率は外径の収縮率よりも約 20% 大きかった。密封キャプセル照射において, 高速中性子照射量が OGL-1 照射の場合より大きい時には逆の傾向が見られた。
- (4) 黒鉛スリーブの照射寸法変化に関して精度の良いデータは第 8 次燃料体照射の場合に限られるが, 一般的傾向としては高速中性子照射量の増加に伴って寸法収縮率も増加することが確認された。また黒鉛スリーブの収縮率は燃料コンパクトの収縮率よりも小さいことが確められた。

今後の課題としては, OGL-1 照射については①照射温度を一定に保ったまま高速中性子照射量を十分多くし ( $\sim 1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ,  $E > 0.18 \text{ MeV}$ ), HTTR に近い条件下での燃料コンパクトの寸法変化挙動, および照射温度の影響を調べること, および②黒鉛スリーブの照射前後の寸法を精度良く測定し, 燃料棒内のギャップ変化挙動について信頼しうるデータを取得することがあげられる。また JMTR 密封キャプセル照射や海外炉照射によって一定の温度条件下で高い高速中性子照射量まで照射を行なって燃料コンパクト寸法変化に対する照射温度の影響を調べる必要がある。

本研究のデータを HTTR の設計に用いる場合には, (11) 式または今後のデータ取得に伴って修正される式を用いることが適当であるが, その際には照射温度の違いによる不確定さに対する考慮が必要である。

## 謝 辞

本報告の OGL-1 照射試験を進めるにあたって, 燃料体の設計および照射を担当された原研大洗研究所材料試験炉部照射 1 課, 照射 2 課, 照射 3 課および計画課の各位, 燃料体の製作および組立を担当された東海研技術部工作課の各位, 照射後試験に協力された東海研研究炉管理部ホットラボ管理室の各位に深く感謝します。特にホットラボ管理室の鈴木紘氏および糸永文雄氏には寸法測定のための計画・調整をして頂いたことに感謝します。また本報告書の作成にあたって激励を賜った燃料・材料工学部近藤達男部長および柴是行次長に感謝します。

## 文 献

- (1) 松永朔郎, 他, "高温ヘリウムインパイルガスループ (OGL-1) の建設と性能試験", 日本原子力学会誌 21 (1979) 245.
- (2) 井川勝市, 他, "OGL-1 第1次, 第2次燃料体の照射試験", JAERI-M 83-012 (1983) p.9.
- (3) 福田幸朔, 他, "OGL-1 第3次, 第4次および第5次燃料体の照射試験", JAERI-M 86-092 (1986) p.5.
- (4) 燃料照射研究室, 被覆粒子燃料照射研究状況報告・第35号 (原研未公開所内報), p.9
- (5) 福田幸朔, 他, "OGL-1 燃料棒の照射温度評価", JAERI-M 84 (183).
- (6) K. Hayashi et al., "In-pile release behavior of metallic fission products in graphite materials of an HTGR fuel assembly", J. Nucl. Mater. 149(1987)57.
- (7) 文献(2), p.232 (Appendix 3).
- (8) Y. Ishida et al., ANS Winter Meeting, Washington D.C. (1982).
- (9) 湊 和生, 他, "OGL-1 照射済み燃料棒の曲がり解析", JAERI-M 83-055 (1983).
- (10) 例えば, 篠崎壽夫, 松下祐輔編, 工学のための応用数値計算法入門 (上), 8版 (1985, コロナ社) p.50.
- (11) 福田幸朔, 他, "多目的高温ガス炉参照燃料のインパイルガスループ (OGL-1) による照射試験", 日本原子力学会誌 26 (1984) 57.
- (12) M.R. Everett, B. Blackstone, R. Krefeld and W.W. Delle, Nuclear Performance: Proc. BNES Intern. Conf. 15-19 Oct. 1973, London, 24-5.
- (13) M. Hrovat, H. Nickel and K. Koizlik, "Über die Entwicklung eines Matrixmaterials zur Herstellung gepresster Brennelemente für Hochtemperatur-Reactoren", Jül-969-RW(1973) p.43.
- (14) 日本原子力研究所原子炉研修所, 原子炉研修所講義テキスト, 燃料編, 第II分冊, p.345.
- (15) M.R. Everette, L.W. Graham and F. Ridealgh, "Graphite structures for nuclear reactors", conference by Nuclear Energy Group of the Institution of Mechanical Engineers (London) 7-9 March 1972.
- (16) R.E. Bullock, "Review, HTGR fuel rods: carbon-carbon composites designed for high weight and low strength", Nucl. Technol. 35 (1977) 343.

- (17) C.B. Scott and P. Harmon, "Irradiation performance of Fort St. Vrain high-temperature gas-cooled reactor fuel in capsule F-30", Nucl. Technol. 35 (1977) 442.
- (18) R.E. Bullock, "Full-fluence tests of experimental thermosetting fuel rods for the high-temperature gas-cooled reactor", Nucl. Technol. 52 (1981) 246.
- (19) M.R. Everett and R. Blackstone, "Irradiation behavior of HTR fuel compacts", ref.(12), 29-5.
- (20) A.J. Caputo, D.R. Johnson and C.K. Bayne, "Performance of Triso-coated HTGR fissile fuel particles during in-block carbonization", ORNL/TM-6779 (1979).
- (21) 飛田 勉, 他, "被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験(II), (JMTRによる 71 F-6 A, 72 F-8 A, 72 F-9 A キャプセルの照射)", JAERI-M 83-153 (1983) p.12.
- (22) 菊池輝男, 他, "燃料コンパクト用マトリックス材の照射による物性変化", JAERI-M 82-206 (1982) p. 19 および p. 37.
- (23) 松尾秀人, "高温ガス炉用黒鉛材料の寸法および物理的性質に及ぼす高温照射の影響", JAERI-M 87-207 (1987).
- (24) R.J. Price, "Effect of fast-neutron irradiation on pyrolytic silicon carbide", J. Nucl. Mater. 33 (1969) 17.
- (25) R. Price, "Properties of silicon carbide for nuclear fuel particle coatings", Nucl. Technol. 35 (1977) 320.
- (26) 菊池輝男, 他, "被覆粒子燃料コンパクトの照射挙動試験(III), (JMTRによる 76 F-6 A キャプセルの照射)", JAERI-M 84-106 (1984) 4.
- (27) 菊池輝男, 他, "高温ガス炉用燃料コンパクトの熱膨張", JAERI-M 9052 (1980).
- (28) R.E. Bullock, "Irradiation-induced dimensional changes of poorly crystalline carbons", Carbon 17 (1979) 447.
- (29) R.E. Nightingale, Nuclear Graphite, Academic Press (1962).
- (30) B.T. Kelly, "Graphite-the most fascinating nuclear material", Carbon 20 (1982) 2.
- (31) G.B. Engle, "Irradiation behavior of nuclear graphites at elevated temperatures", Carbon 9 (1971) 539.
- (32) R.J. Price, "High-temperature neutron irradiation of highly oriented carbons and graphites", Carbon 12 (1972) 159.
- (33) G.B. Engel, "The influence of pitch-binder core content on the properties and irradiation behavior of molded graphite", Carbon 9 (1971) 383.

- (34) W.W. Delle, G. Haag, G. Nickel, H.A. Schulze and R.-E. Schulze, "Influence of the irradiation induced graphitization of graphitic materials on their property behavior under fast neutron exposure at high temperatures", 4th London Intern. Conf. on Carbon and Graphite, 23-27 Sept. 1974, London, p.741.
- (35) R.-E. Schulze, H.A. Schulze and W. Delle, "Irradiation behaviour of graphitic matrix materials for HTGR - Effect of irradiation parameters and influence of material variations - ", 5th London Intern. Carbon and Graphite Conf., 18-22 Sept. 1978, vol.II, p.904.
- (36) H. Matsuo, S. Nomura, H. Imai, T. Oku and M. Eto, "Effects of high temperature neutron irradiation on the physical, chemical and mechanical properties of fine-grained isotropic graphite", Proc. IAEA Specialists' Meeting on Graphite Component Structural Design: JAERI-M 86-192 (1986) p.138.
- (37) 飛田 勉, 福田幸朔, "ラバープレス法による高温ガス炉燃料の試作", 日本原子力学会, 昭和60年秋の分科会, 1985年10月2日~5日, 東北大, H55.
- (38) 飛田 勉, 福田幸朔, "ラバープレス法による高温ガス炉燃料の成形試験", 日本原子力学会, 昭和61年年会, 1986年3月26日~29日, 京大, F28.



Table 1(a) Outline of specification of OGL-1 fuels

Fuel number	First	Second	Third
Number of rods	3	3	1
Number of compacts	54	60	20
Compact I.D. (mm) <sup>*1</sup>	8.0 ±0.05	8.0 ±0.05	18.0 ±0.1
Compact O.D. (mm) <sup>*1</sup>	24.0 ±0.1	24.0 ±0.1	36.0 ±0.1
Compact length(mm)	40 ±1	36 ±1.0	36.0 ±1.0
Sleeve I.D. (mm) <sup>*1</sup>	24.2 <sup>+0.5</sup> <sub>-0</sub>	24.2 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.05</sub>	36.2 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.05</sub>
Sleeve O.D. (mm) <sup>*1</sup>	30.0 ±0.5	30.0 ±0.3	46.0 ±0.2
Comment on fuel	Preliminary design <sup>*2</sup>	Mk-III <sup>*3</sup>	Mk-III <sup>*3</sup>

\*1 Inner diameter(I.D.), outer diameter(O.D.).

\*2 Preliminary design: kernel diameter 500±20μm, buffer layer 40±5μm, IPyC 30±5μm, SiC 25±5μm, OPyC 45±5μm; loading fraction of coated fuel particles 22±1 vol. %.

\*3 First conceptual design: Kernel diameter 600±30μm, buffer layer 60±7μm, IPyC 30±5μm, SiC 25±5μm, OPyC 45±5μm; loading fraction of coated fuel particles 30±1 (after third fuel, 30±2) vol. %.

Table 1(b) Outline of specification of OGL-1 fuels

Fuel number	Fourth	Fifth	Sixth
Number of rods	3	3	1
Number of compacts	60	60	20
Compact I.D. (mm) <sup>*1</sup>	8.0 ±0.1	8.0 <sup>*3</sup>	18.0 ±0.1
Compact O.D. (mm) <sup>*1</sup>	24.0 ±0.1	24.0 <sup>*3</sup>	36.0 ±0.1
Compact length(mm)	36.0 ±0.5	36.0 <sup>*3</sup>	36.0 ±0.5
Sleeve I.D. (mm) <sup>*1</sup>	24.2 $\begin{matrix} +0.10 \\ -0.05 \end{matrix}$	24.2 <sup>*3</sup>	36.2 $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.05 \end{matrix}$
Sleeve O.D. (mm) <sup>*1</sup>	30.0 ±0.2	30.0 <sup>*3</sup>	46.0 ±0.2
Comment on fuel	Mk-III <sup>*2</sup>	Mk-III <sup>*2</sup>	Mk-III <sup>*2</sup>

\*1 Inner diameter(I.D.), outer diameter(O.D.).

\*2 See Table 1(a).

\*3 The same specification as for the fourth fuel.

Table 1(c) Outline of specification of OGL-1 fuels

Fuel number	Seventh	Eighth	Ninth
Number of rods	3	1	1
Number of compacts	60	20	20
Compact I.D. (mm) <sup>*1</sup>	8.0 <sup>*2</sup>	18.0 <sup>*5</sup>	18.0 <sup>*5</sup>
Compact O.D. (mm) <sup>*1</sup>	24.0 <sup>*2</sup>	36.0 <sup>*5</sup>	36.0 <sup>*5</sup>
Compact length(mm)	36.0 <sup>*2</sup>	36.0 <sup>*5</sup>	36.0 <sup>*5</sup>
Sleeve I.D. (mm) <sup>*1</sup>	24.2 <sup>*2</sup>	36.2 <sup>*5</sup>	36.2 <sup>*5</sup>
Sleeve O.D. (mm) <sup>*1</sup>	30.0 <sup>*2</sup>	46.0 <sup>*5</sup>	46.0 <sup>*5</sup>
Comment on fuel	Mk-III <sup>*3</sup> Domestic matrix <sup>*4</sup>	Mk-III <sup>*3</sup> Biso- particle <sup>*6</sup>	Mk-III <sup>*3</sup> Mass- production <sup>*7</sup>

\*1 Inner diameter(I.D.), outer diameter(O.D.).

\*2 The same specification as for the fourth fuel.

\*3 See Table 1(a).

\*4 Domestic graphite matrix was used for rods 1 and 2.

\*5 The same specification as for the sixth fuel.

\*6 Biso-coated fuel particles were mixed by one wt.% with the rest triso-coated fuel particles in compacts 8 and 9.

\*7 Coated fuel particles were produced by an enlarged apparatus.

Table 2(a) Outline of irradiation conditions of OGL-1 fuels

Fuel assembly number	First	Second	Third
Irrad. period	March 1977- June 1977	Dec. 1977- Feb. 1979	March 1979- July 1979
Irrad. cycles *1	2(#39,40)	4(#42-45)	2(#46,47)
Irrad. time (efpd) *2	39.0	71.6	40.7
Max. burnup (MWd/t) *3	4478	6807	4279
Max fuel temp. (°C)	1442*3	1468*3	1322*3
Max. outlet temp. of coolant (°C)	1075	1020	932
Max. thermal-neutron fluence( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) *4	1.53	2.84	1.45
Max. fast-neutron fluence( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) *5	1.24	1.96	0.89
Max. linear heat rate (kW/m) *3	318	370	640

\*1 Irradiation cycles of the Japan Materials Testing Reactor (JMTR).

\*2 Irradiation time in effective full power days.

\*3 Calculated from heat generation.

\*4 Energy < 0.683 eV, fuel compact position.

\*5 Energy > 0.18 MeV, fuel compact position.

Table 2(b) Outline of irradiation conditions of OGL-1 fuels

Fuel assembly number	Fourth	Fifth	Sixth
Irrad. period	Nov. 1979- June 1980	Dec. 1980- April 1982	June 1982- July 1982
Irrad. cycles *1	4(#48-51)	7(#52-58)	1(#59)
Irrad. time (efpd) *2	78.0	142.3	21.9
Max. burnup (MWd/t) *3	13599	23733	3580
Max. fuel temp (°C)	1350 *6	1362 *6	1480 *6
Max. outlet temp. of coolant (°C)	925	1010	904
Max. thermal-neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) *4	3.24	4.84	0.69
Max. fast-neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) *5	2.32	3.79	0.41
Max. linear heat rate (kW/m) *3	440	447	820

\*1 Irradiation cycles of the Japan Materials Testing Reactor (JMTR).

\*2 Irradiation time in effective full power days.

\*3 Calculated from heat generation.

\*4 Energy < 0.683 eV, fuel compact position.

\*5 Energy > 0.18 MeV, fuel compact position.

\*6 Measured by W/Re thermocouple.

Table 2(c) Outline of irradiation conditions of OGL-1 fuels.

Fuel assembly number	Seventh	Eighth	Ninth
Irrad. period	Nov. 1982- June 1983	Jan. 1984- June 1984	Jan. 1985- March 1986
Irrad. cycles *1	3(#60,61,63)	3(#64-66)	7(#67-73)
Irrad. time (efpd) *2	58.0	53.8	145.5
Max. burnup (MWd/t) *3	10500	8285	22062
Max. fuel temp (°C)	1380 *6	1391 *7	1343 *7
Max. outlet temp. of coolant (°C)	1031	913	906
Max. thermal-neutron fluence ( $10^{24}n/m^2$ ) *4	2.15	1.70	-
Max. fast-neutron fluence ( $10^{24}n/m^2$ ) *5	1.60	1.20	2.84
Max. linear heat rate (kW/m)	475	825	810

\*1 Irradiation cycles of the Japan Materials Testing Reactor (JMTR).

\*2 Irradiation time in effective full power days.

\*3 Calculated from heat generation.

\*4 Energy < 0.683 eV, fuel compact position.

\*5 Energy > 0.18 MeV, fuel compact position.

\*6 Estimated from other thermocouple readings.

\*7 Measured by W/Re thermocouple.

Table 3 Anisotropy factor of irradiation-induced dimensional change  
(length to outer-diameter change ratio)

Fuel Rod*1	Max. fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> )	Temp.*2 (°C)	Anisotropy*2 factor (-)	Average anisotropy*3 factor (-)
1-1	0.89	1109	1.02	1.06
1-2	1.20	1343	1.25	1.14
1-3	1.22	1259	1.25	1.24
2-1	1.41	1145	1.10	1.03
2-2	1.92	1404	1.44	1.20
2-3	1.95	1335	1.13	1.12
3-1	0.88	1347	-*4	-
4-1	1.67	1079	1.10	1.02
4-2	2.27	1393	1.17	1.20
4-3	2.30	1254	1.13	1.12
5-1	2.72	1123	1.24	1.39
5-2	3.69	1281	1.12	1.20
5-5	3.75	1339	1.24	1.23
6-1	0.41	1467	-	-
7-1	1.15	1195	1.39	1.45
7-2	1.55	1348	1.21	1.32
7-3	1.58	1331	1.21	1.03
8-1	1.19	1289	1.58	-
9-1	2.81	1375	1.09	1.13
mean			1.23	1.18

\*1 Fuel assembly number - rod number

\*2 Average temperature at the maximum fast-neutron-fluence position (compacts 7,8 and 9); length to outer-diameter changes  $|\Delta L/L|/|\Delta D/D|$  at the same position.

\*3 Average for all compacts in the rod.

\*4 Not listed because of large scatter.

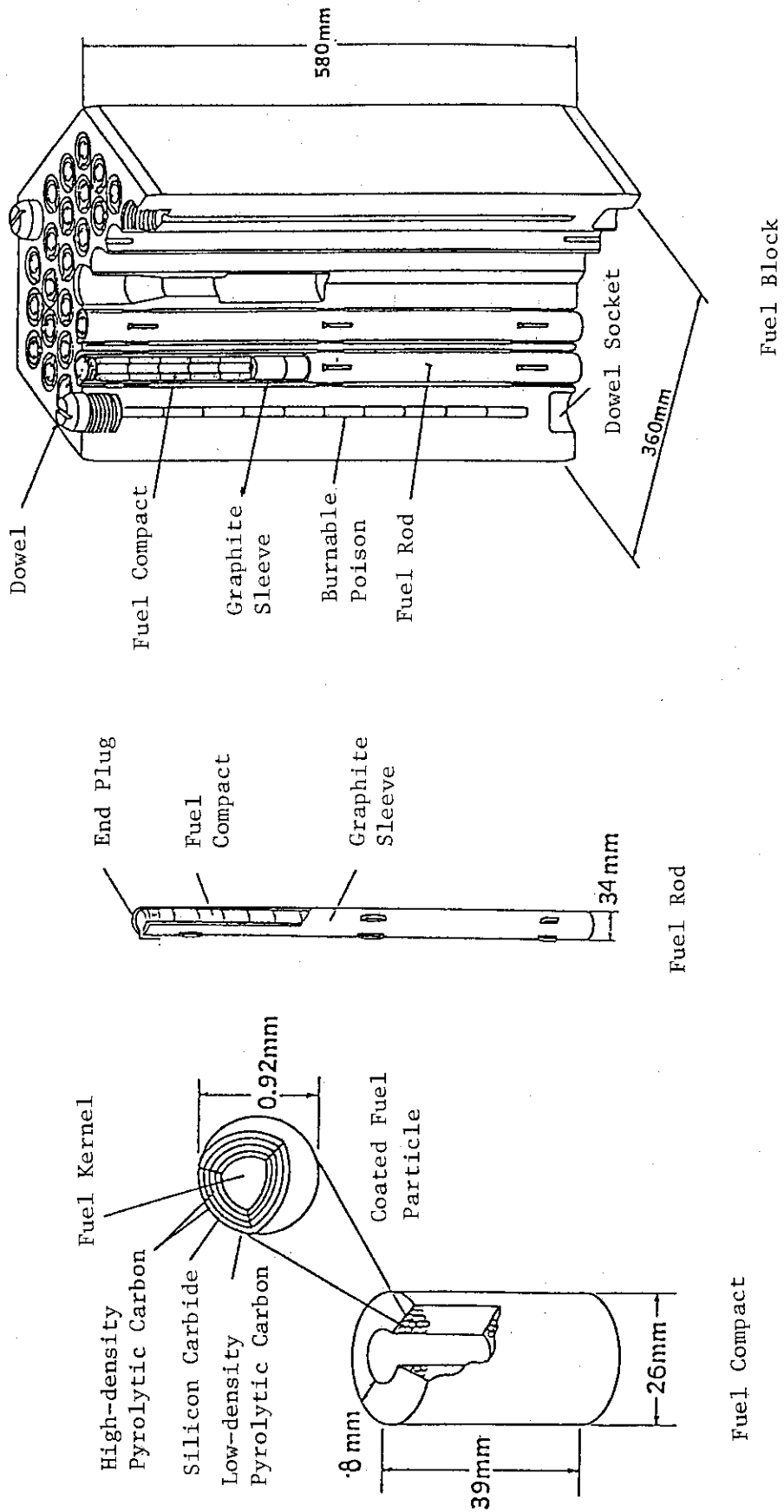


Fig. 1 Design structure of fuel assembly of High Temperature Test Reactor (HTR).



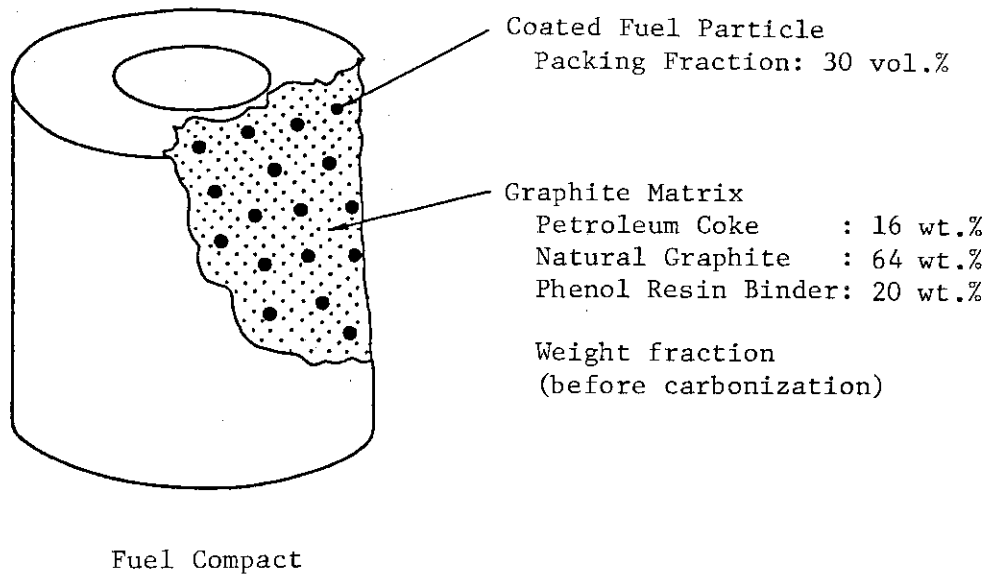


Fig. 2 Composition of fuel compact.

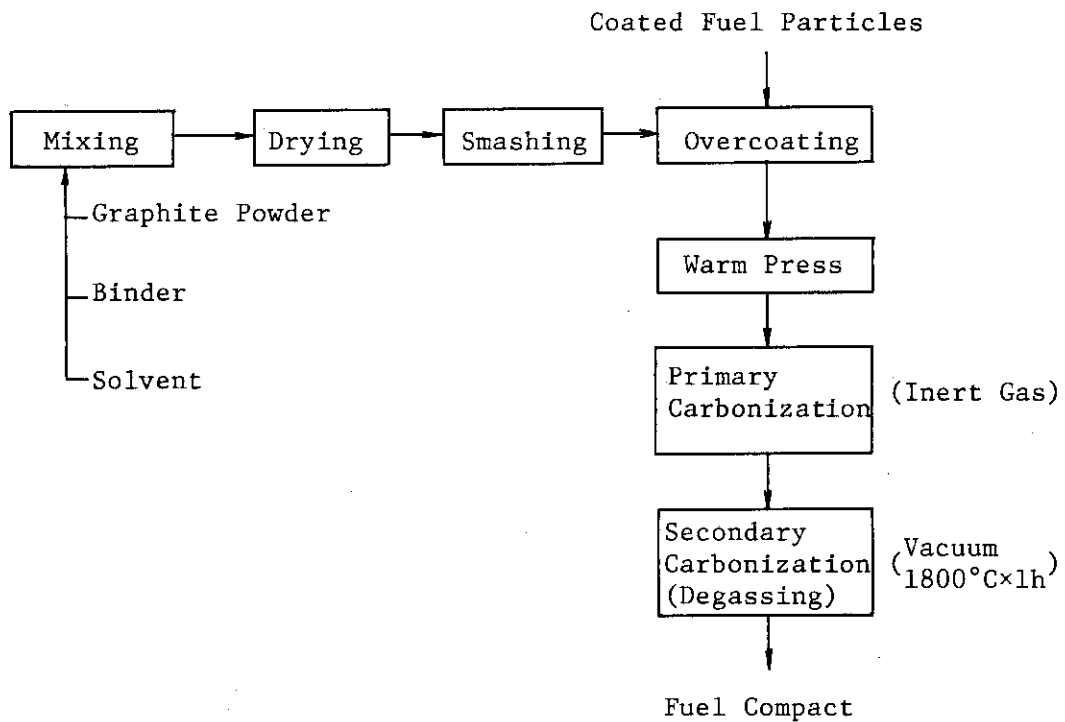


Fig. 3 Flow diagram of fuel compact production.

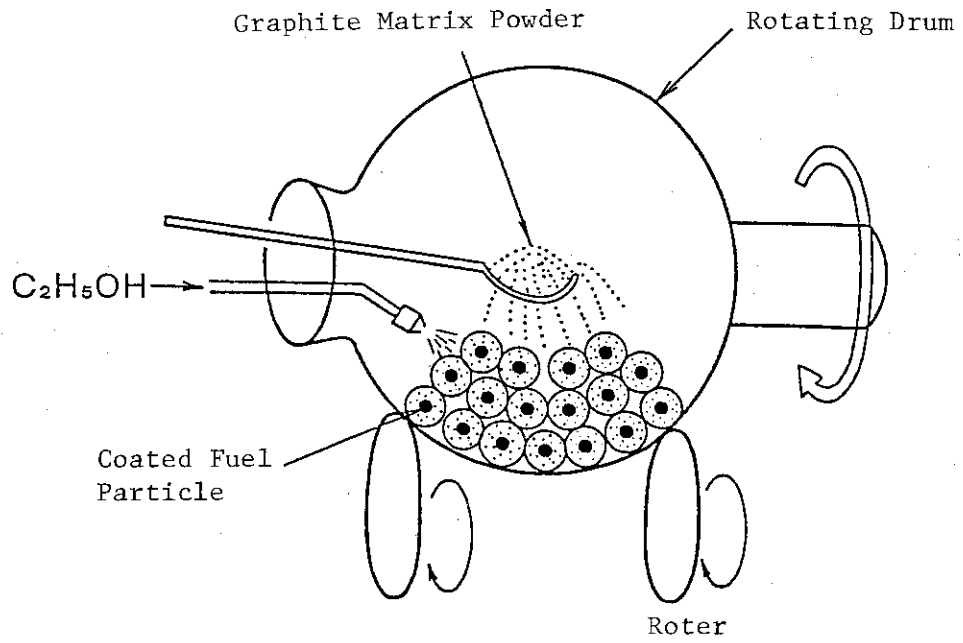


Fig. 4 Apparatus for overcoating of graphite matrix on coated fuel particles.

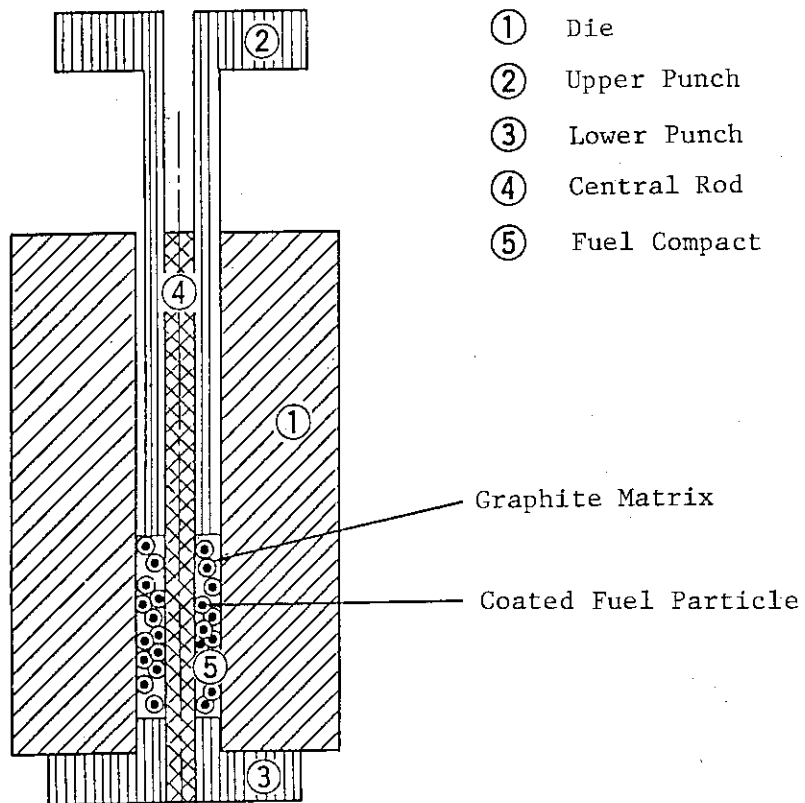
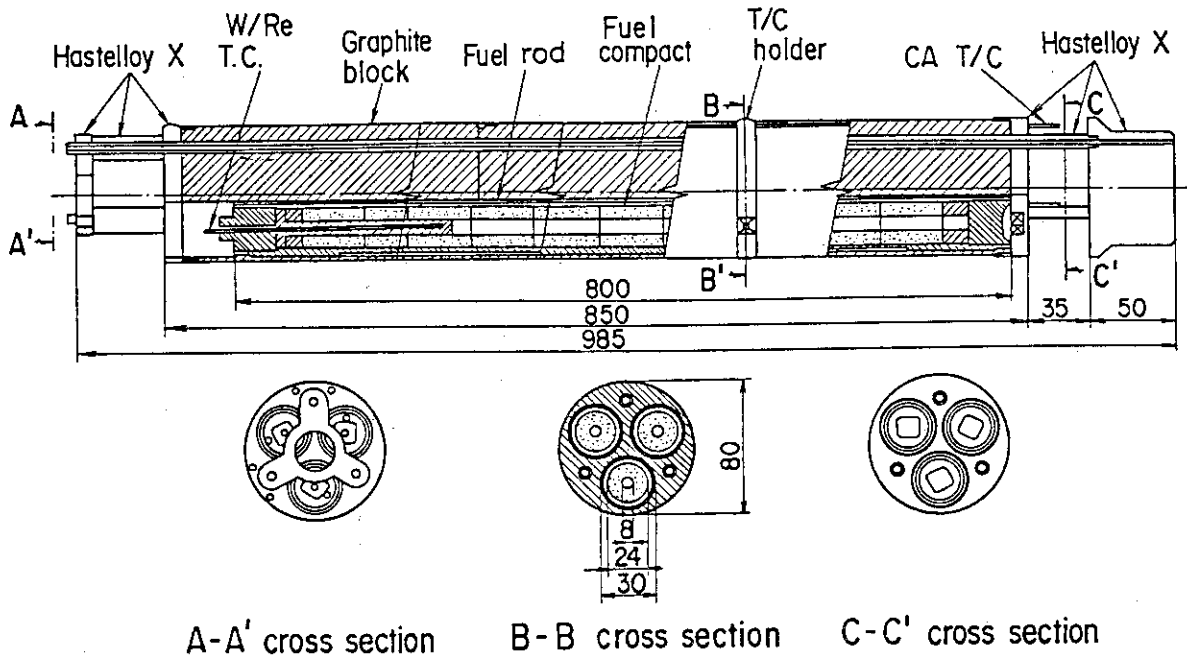


Fig. 5 Die for molding into hollow fuel compact.

[A] OGL-1 fuel assembly (three fuel-rod type)



[B] OGL-1 fuel assembly (single fuel-rod type)

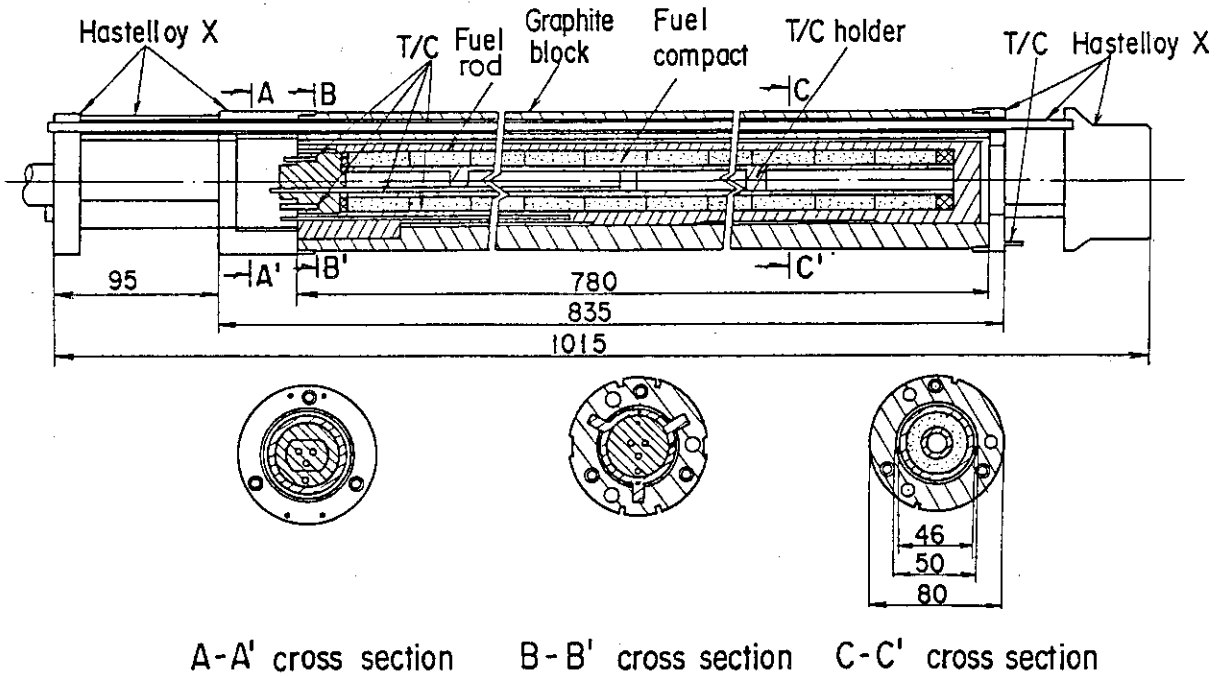


Fig. 6 Structure of OGL-1 fuel assemblies holding three and a single rod.

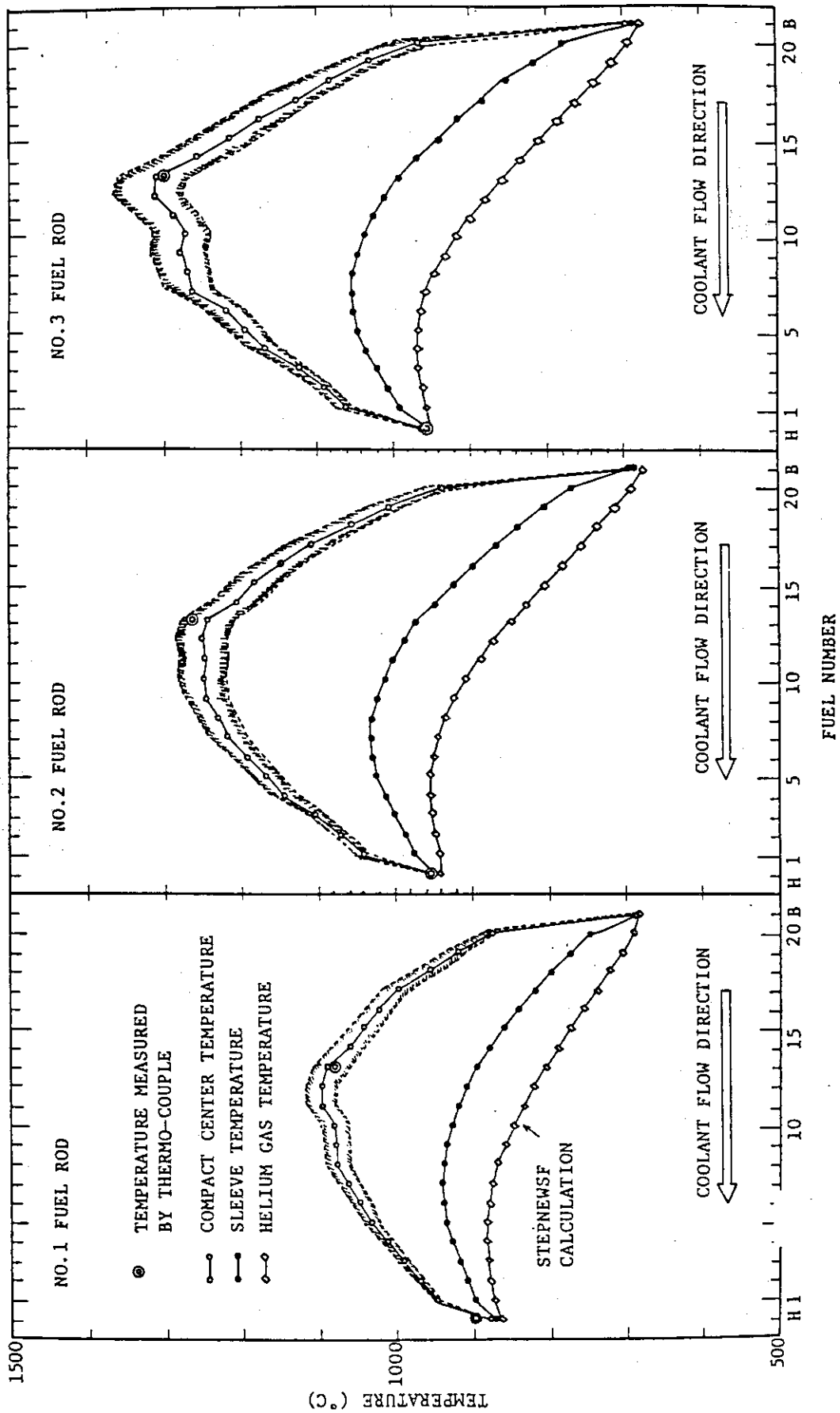


Fig. 7(a) Temperature calculated by TRUMP code for 5th OGL-1 fuel assembly, (first half of 52nd JMTR cycle)(5)

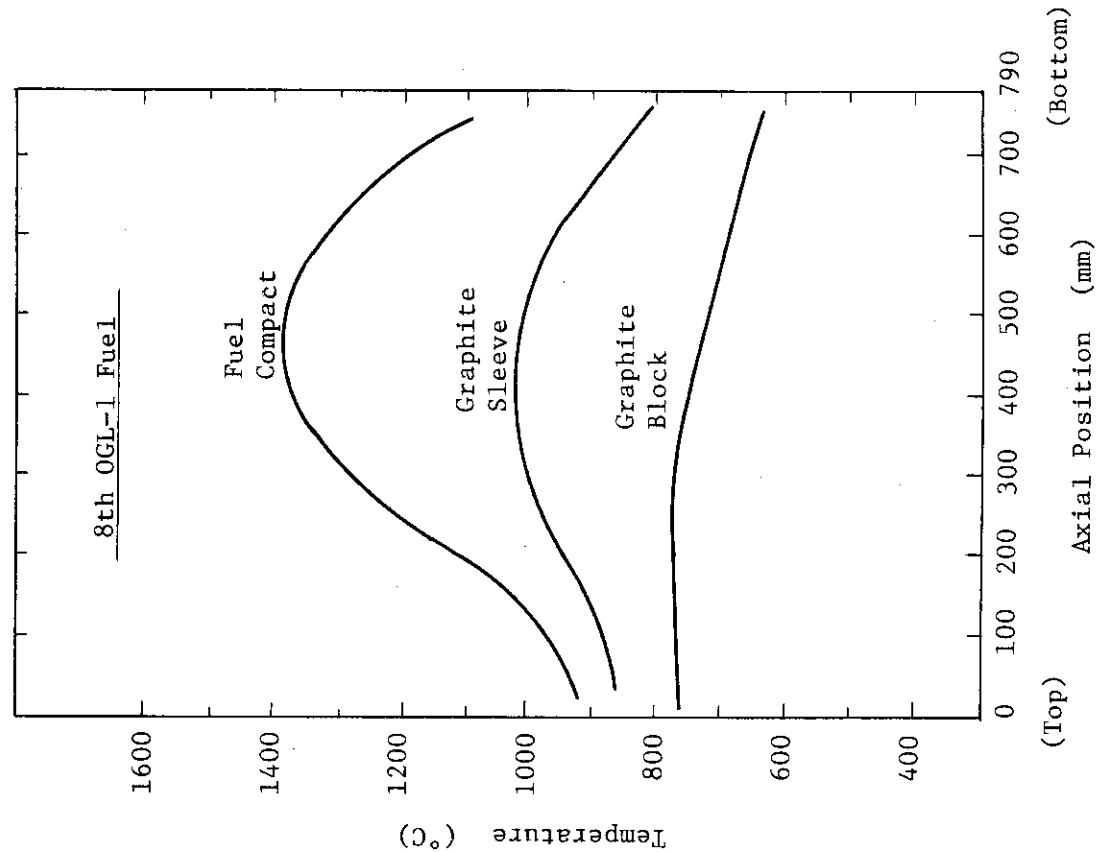


Fig. 7(c) Time-averaged temperature of fuel compacts, graphite sleeves and block of eighth OGL-1 fuel assembly.

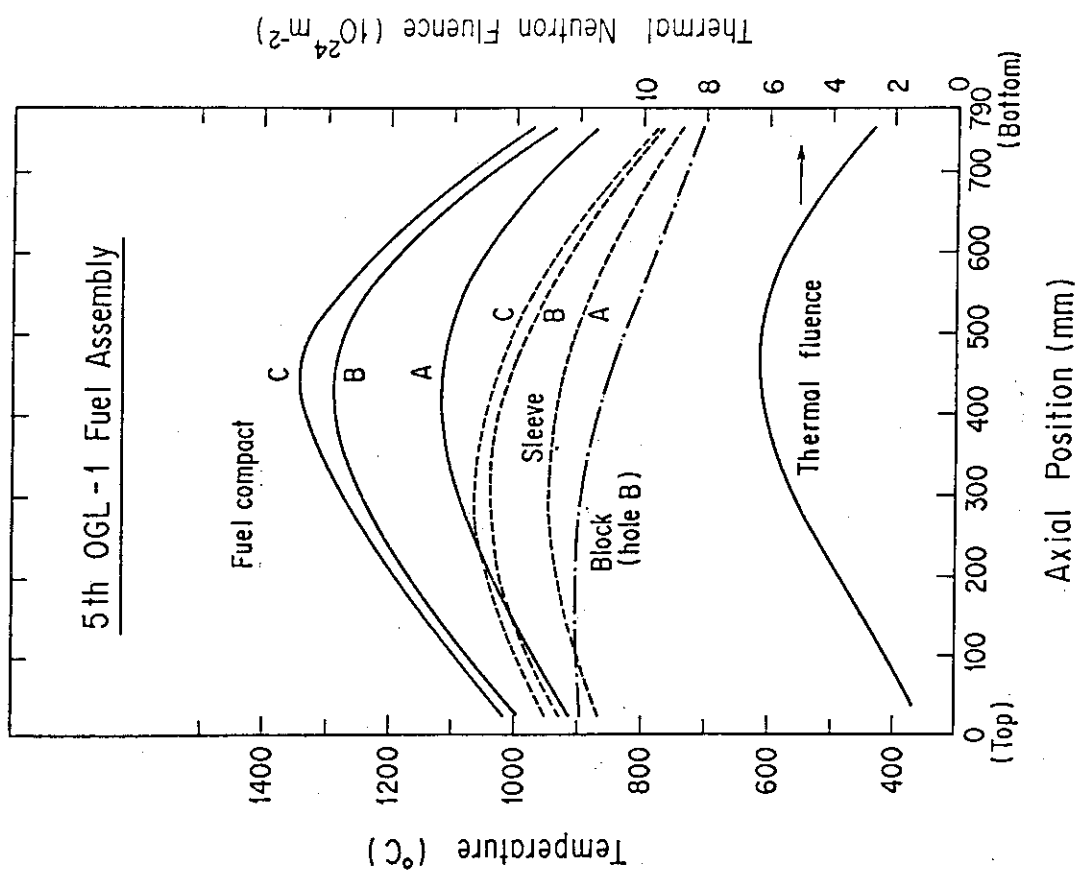


Fig. 7(b) Time-averaged temperature of fuel compacts and graphite sleeves of rods A, B and C and graphite block of fifth OGL-1 fuel assembly.

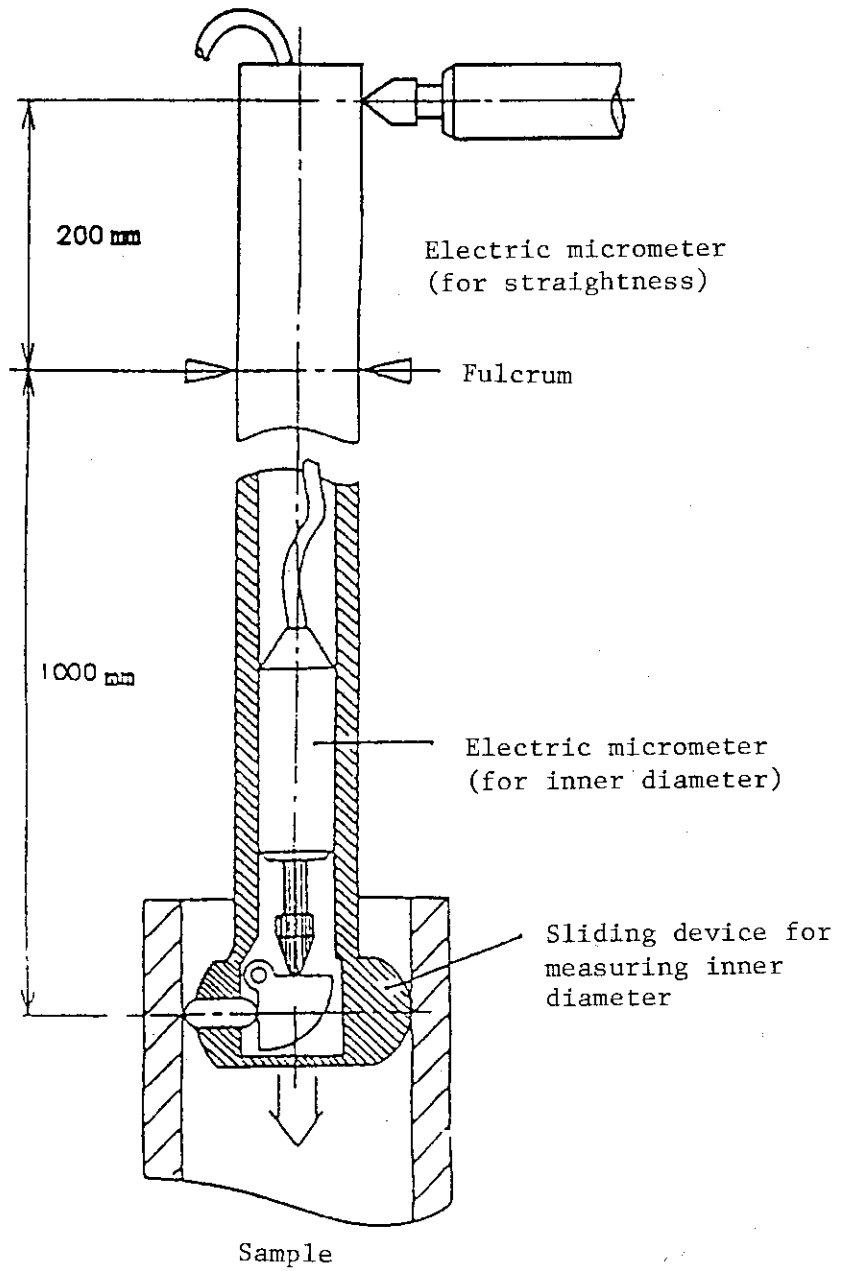


Fig. 8(a) Apparatus using a sliding guage to measure the bowing and inner-diameter profile of graphite sleeve<sup>(6)</sup>.

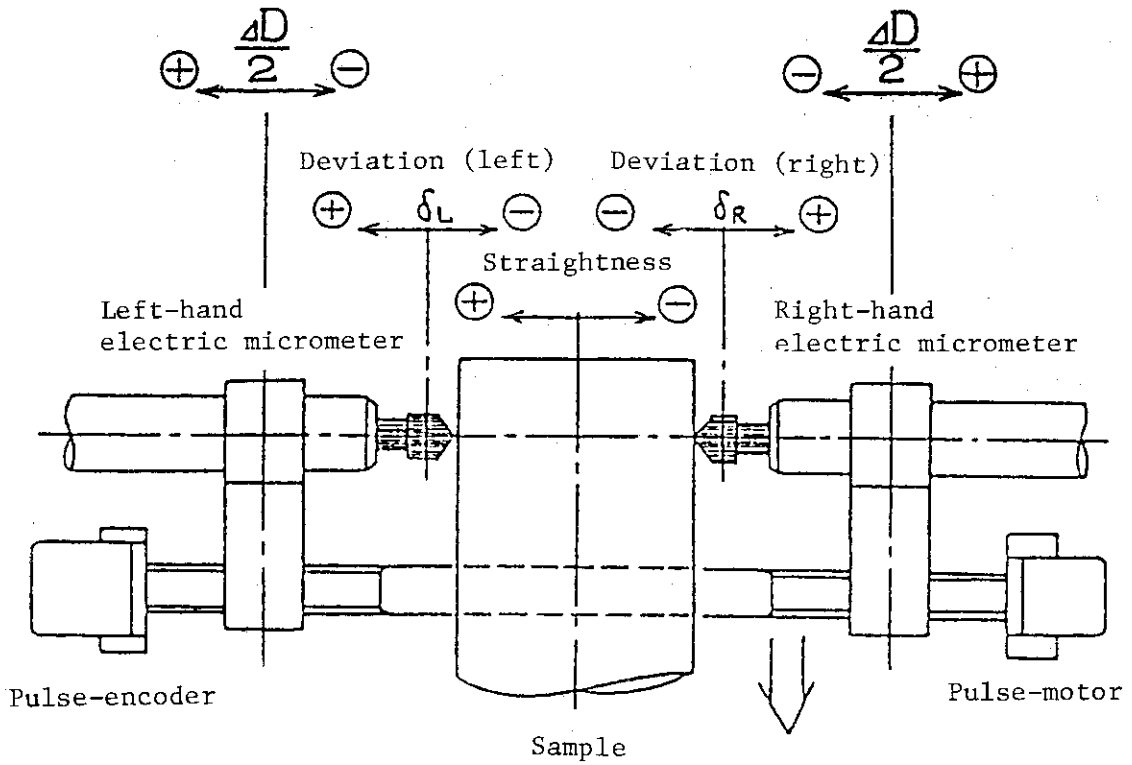


Fig. 8(b) Apparatus to measure the outer-diameter profile of graphite sleeve<sup>(6)</sup>.

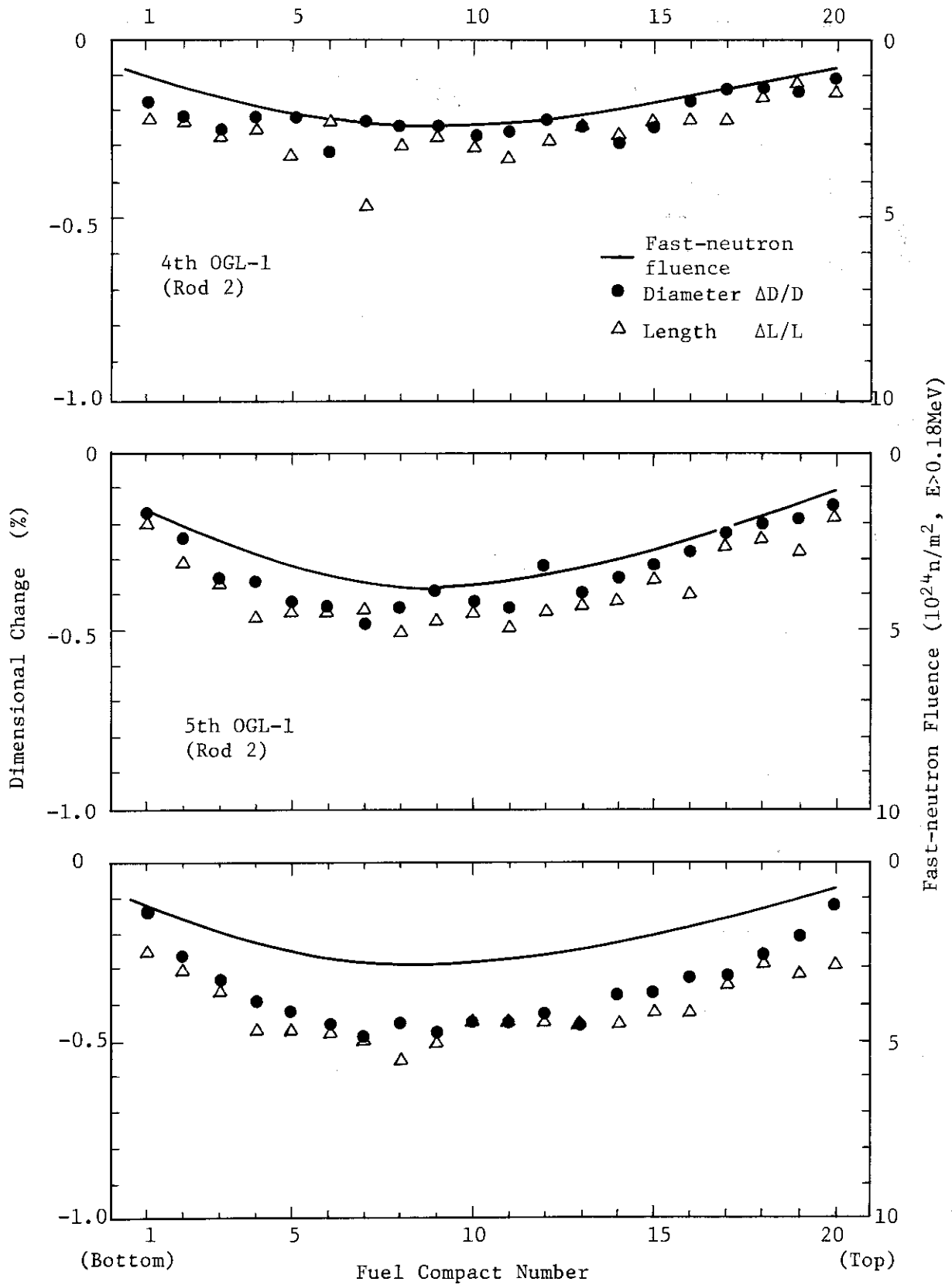


Fig. 9 Typical results of irradiation-induced changes of outer diameter and length of fuel compacts in OGL fuel assemblies.



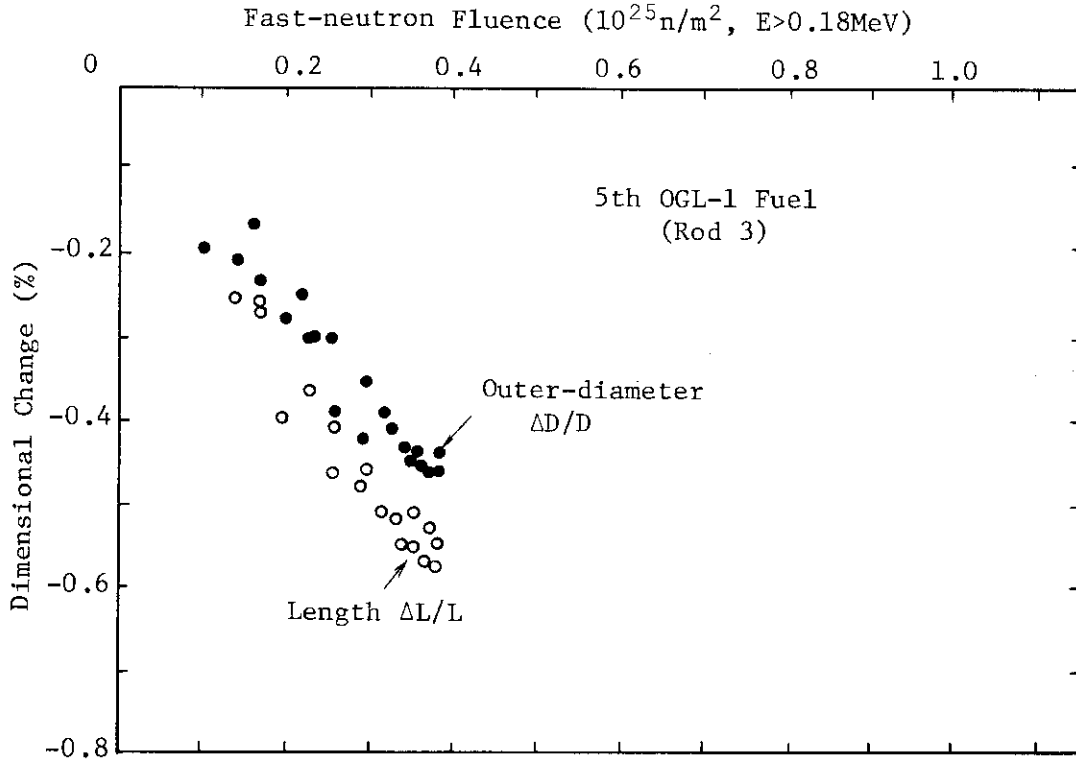


Fig. 10(a) Relationship between fast-neutron fluence and irradiation-induced changes of outer-diameter and length of fuel compacts (fifth OGL-1 fuel assembly, rod 3).

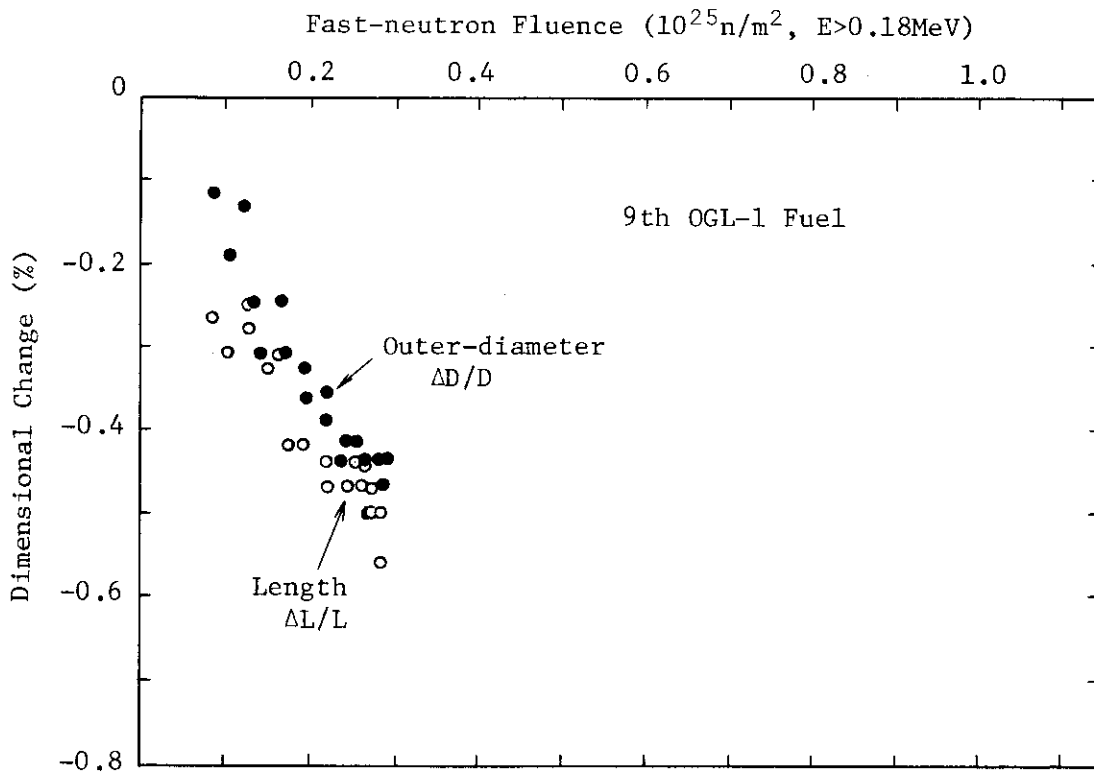


Fig. 10(b) Relationship between fast-neutron fluence and irradiation-induced changes of outer-diameter and length of fuel compacts (ninth OGL-1 fuel assembly).

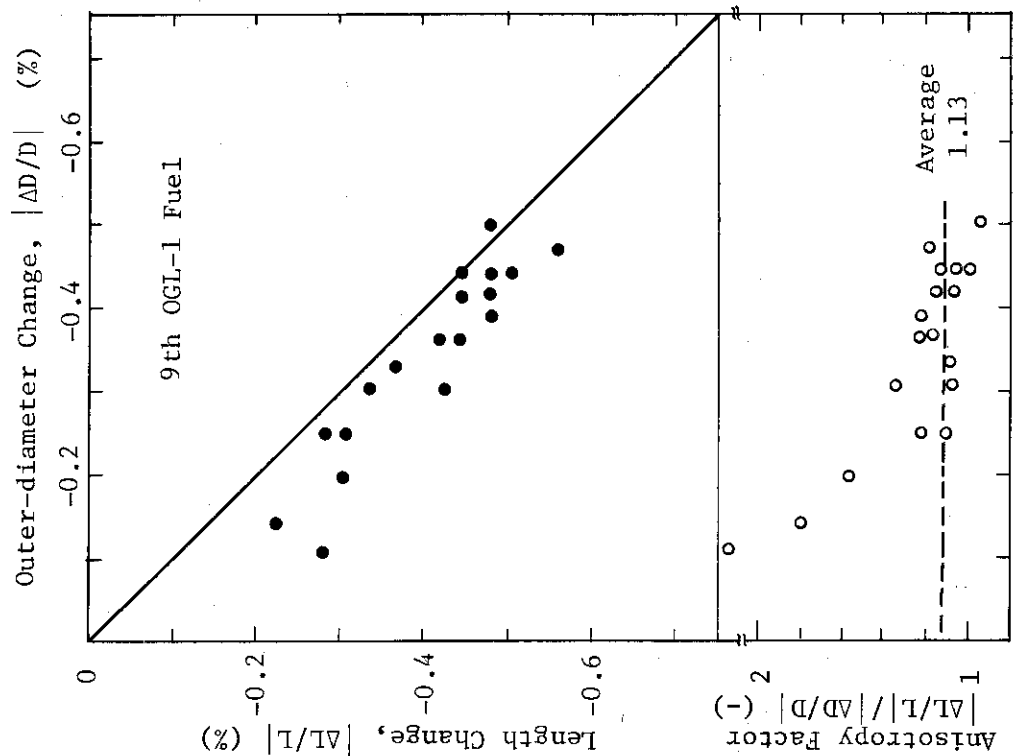


Fig. 11(a) Relationship between irradiation-induced changes of outer diameter and length of fuel compacts (fifth OGL-1 fuel assembly, rod 3).

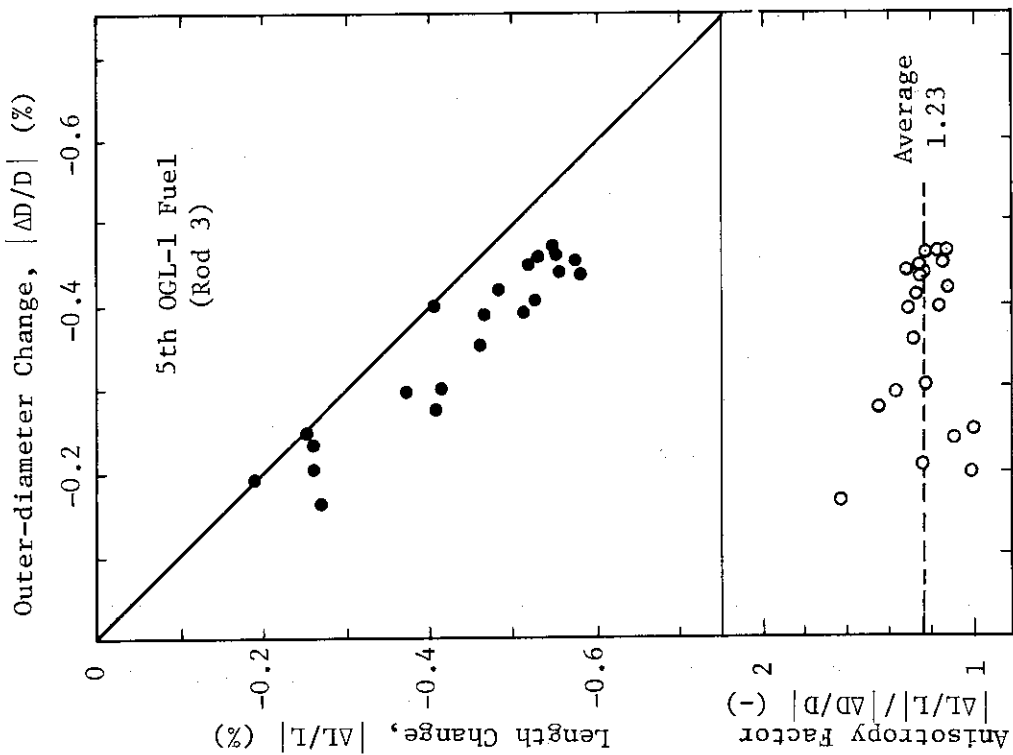


Fig. 11(b) Relationship between irradiation-induced changes of outer diameter and length of fuel compacts (ninth OGL-1 fuel assembly).

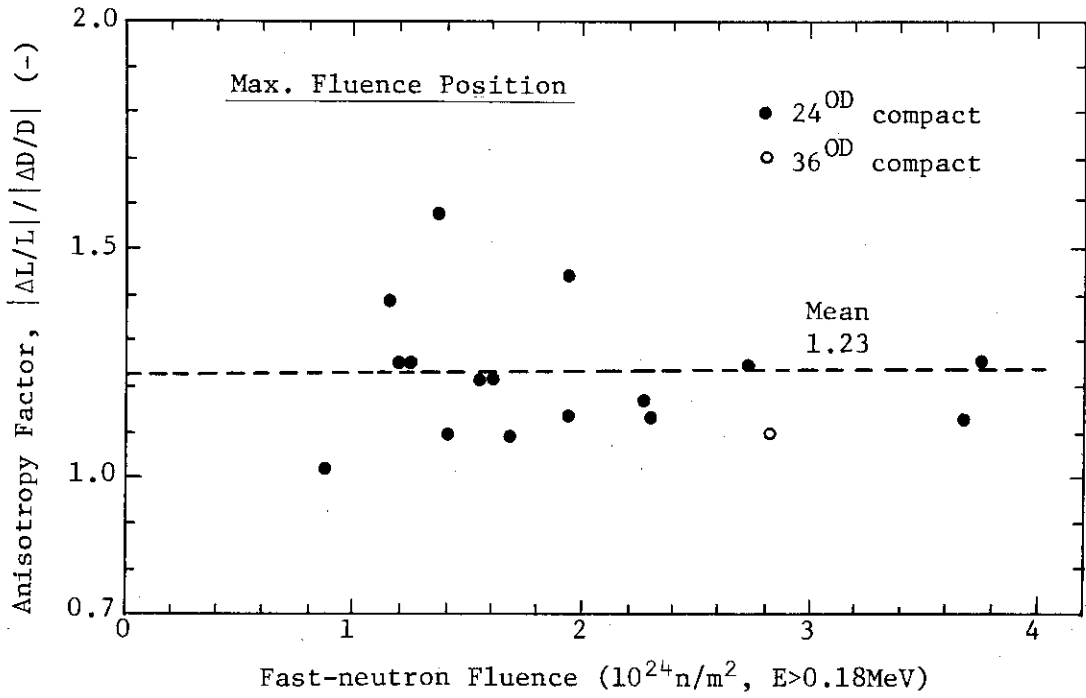


Fig. 12(a) Ratio of axial to radial dimensional changes as a function of fast-neutron fluence (maximum fluence position).

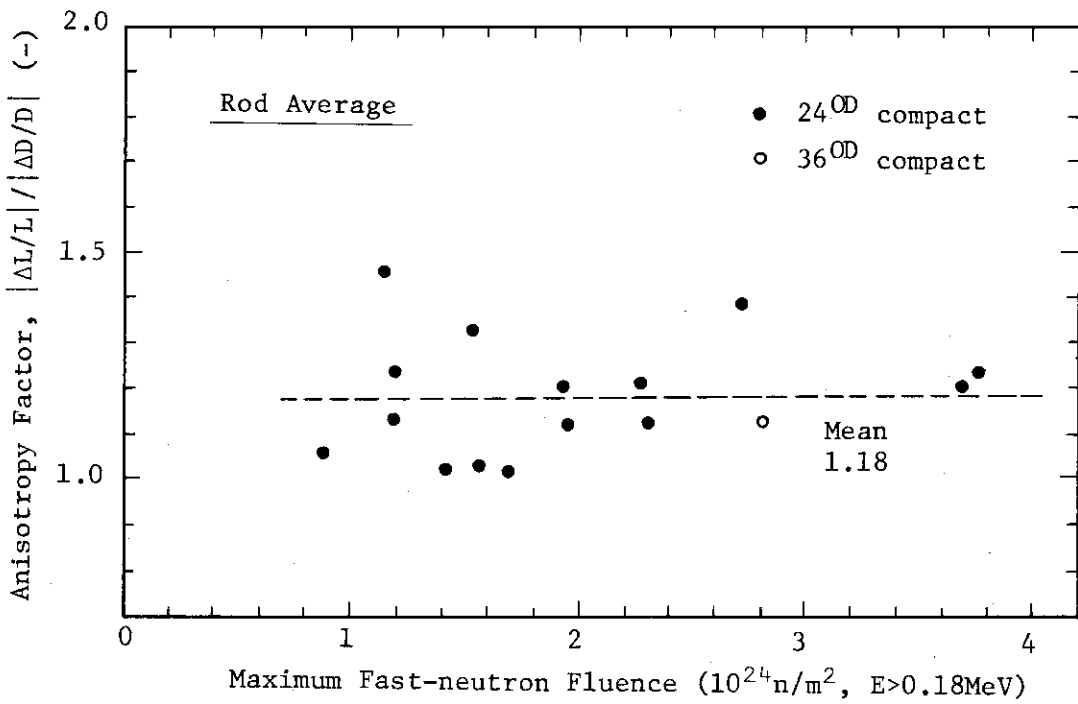


Fig. 12(b) Ratio of axial to radial dimensional changes as a function of fast-neutron fluence (rod average).

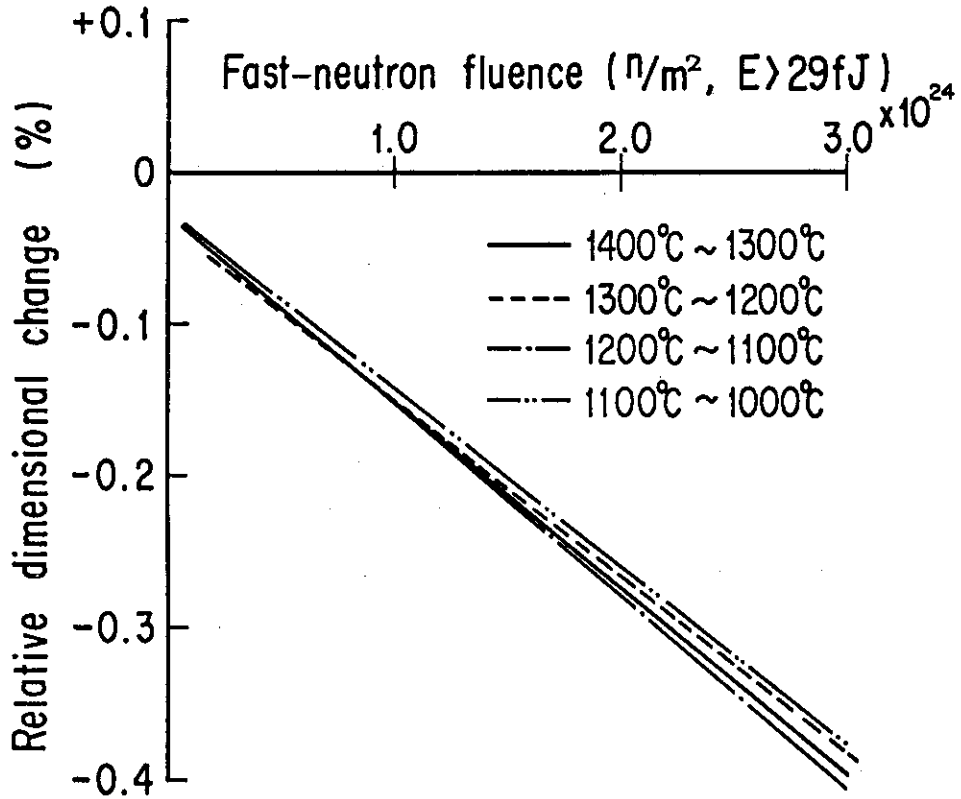


Fig. 13 Effect of irradiation temperature on dimensional change of fuel compact as a function of fast-neutron fluence.

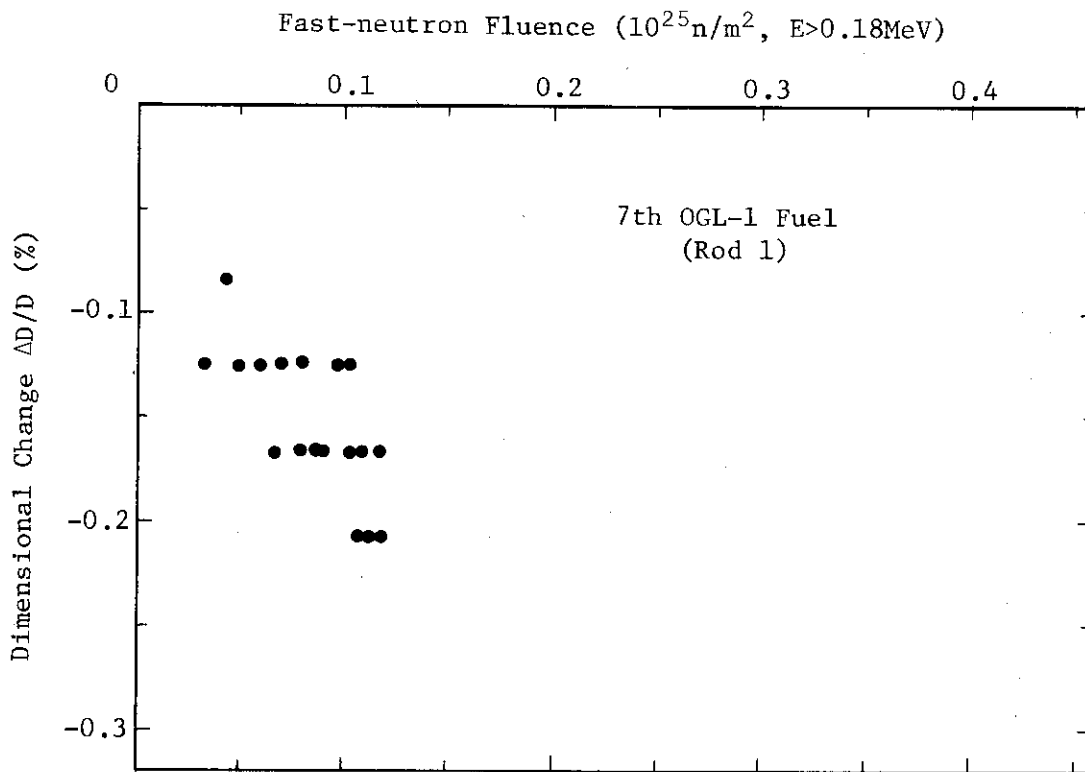


Fig. 14(a) Irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts of seventh OGL-1 fuel assembly (rod 1) as a function of fast-neutron fluence.

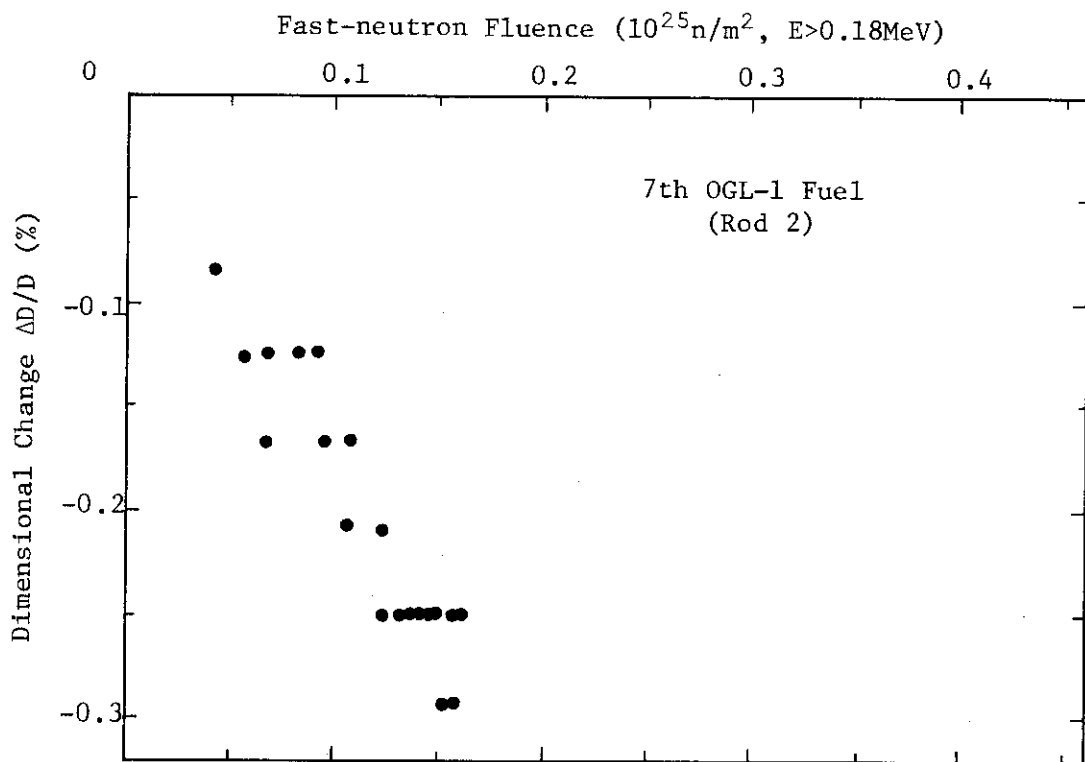


Fig. 14(b) Irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts of seventh OGL-1 fuel assembly (rod 2) as a function of fast-neutron fluence.

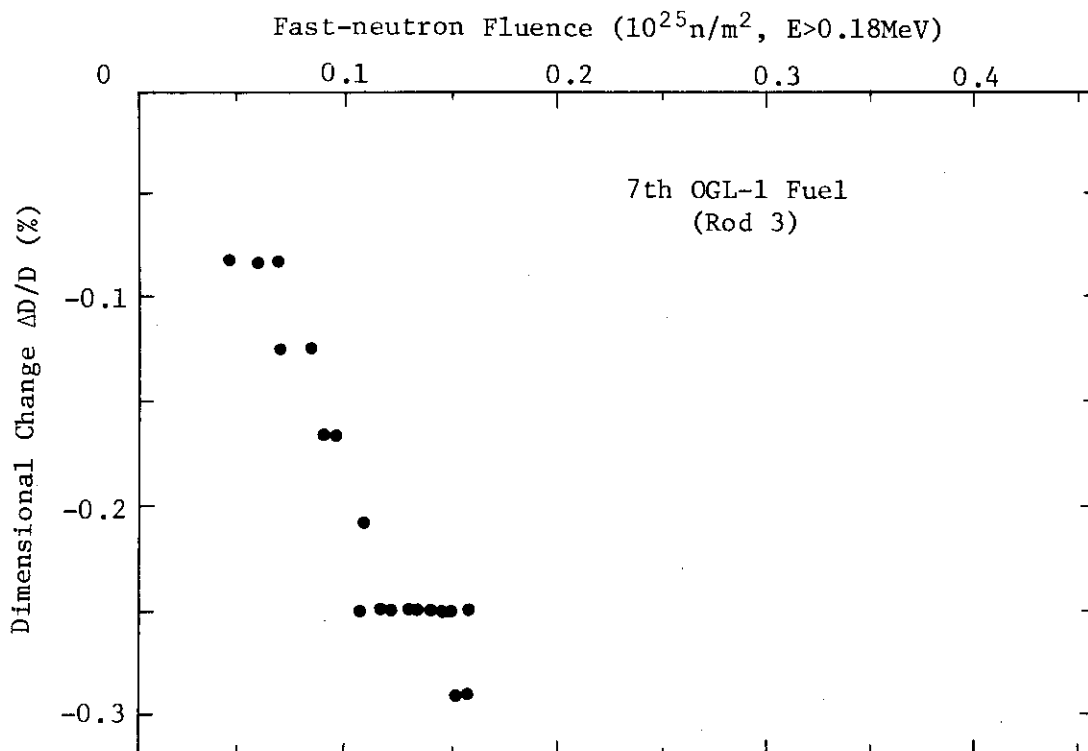


Fig. 14(c) Irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts of seventh OGL-1 fuel assembly (rod 3) as a function of fast-neutron fluence.

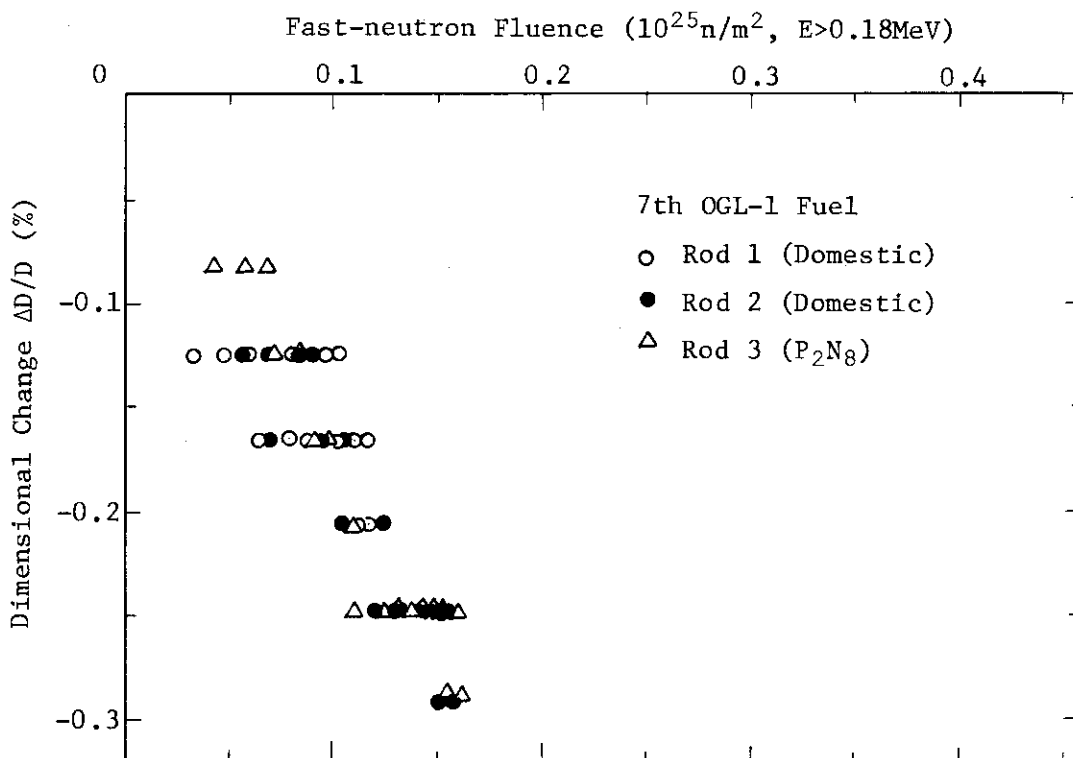


Fig. 15 Summary of irradiation-induced dimensional changes of fuel compacts of seventh OGL-1 fuel assembly as a function of fast-neutron fluence.

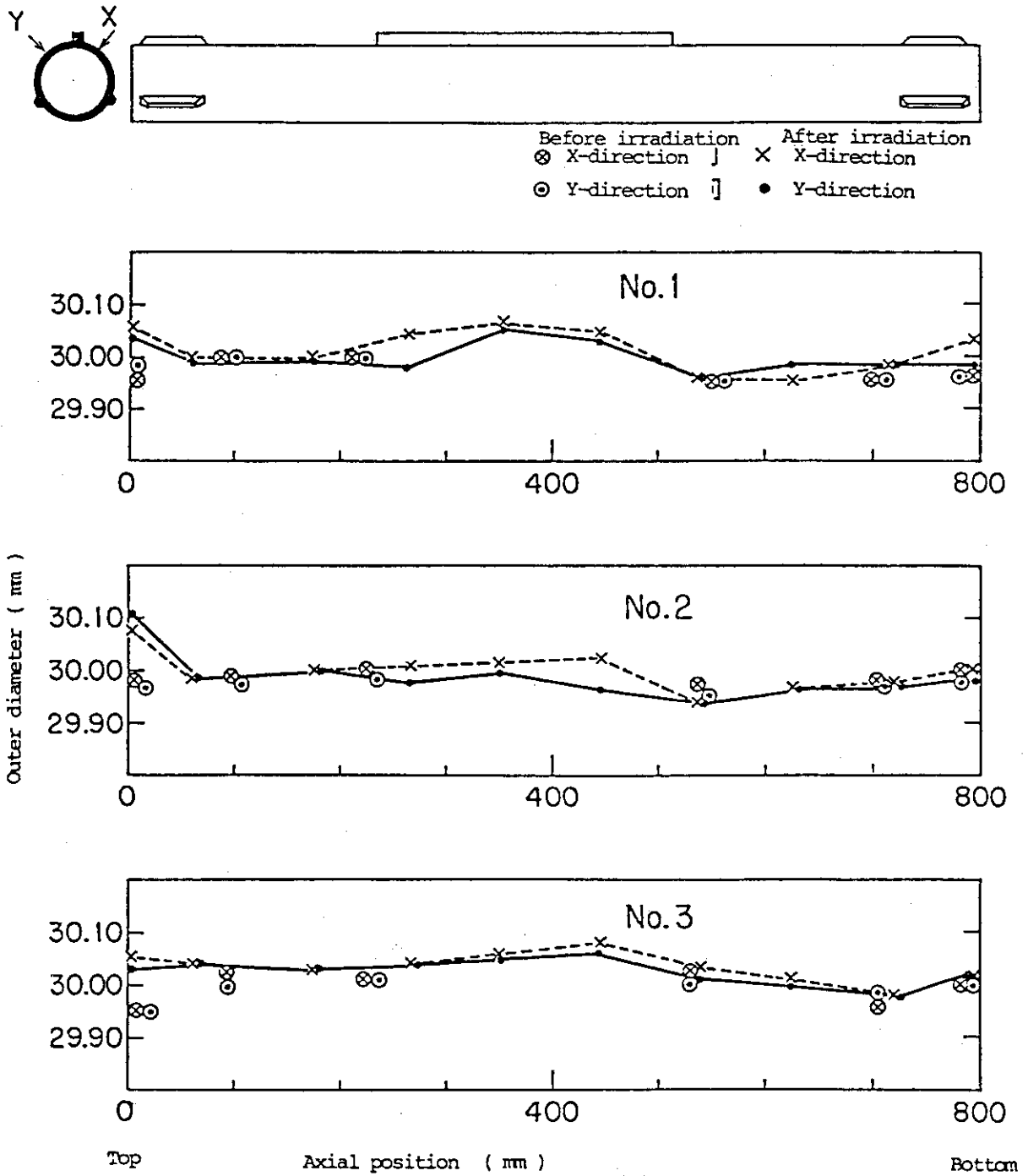


Fig. 16 Outer diameter of graphite sleeves of first OGL-1 fuel assembly before and after irradiation<sup>(2)</sup>.

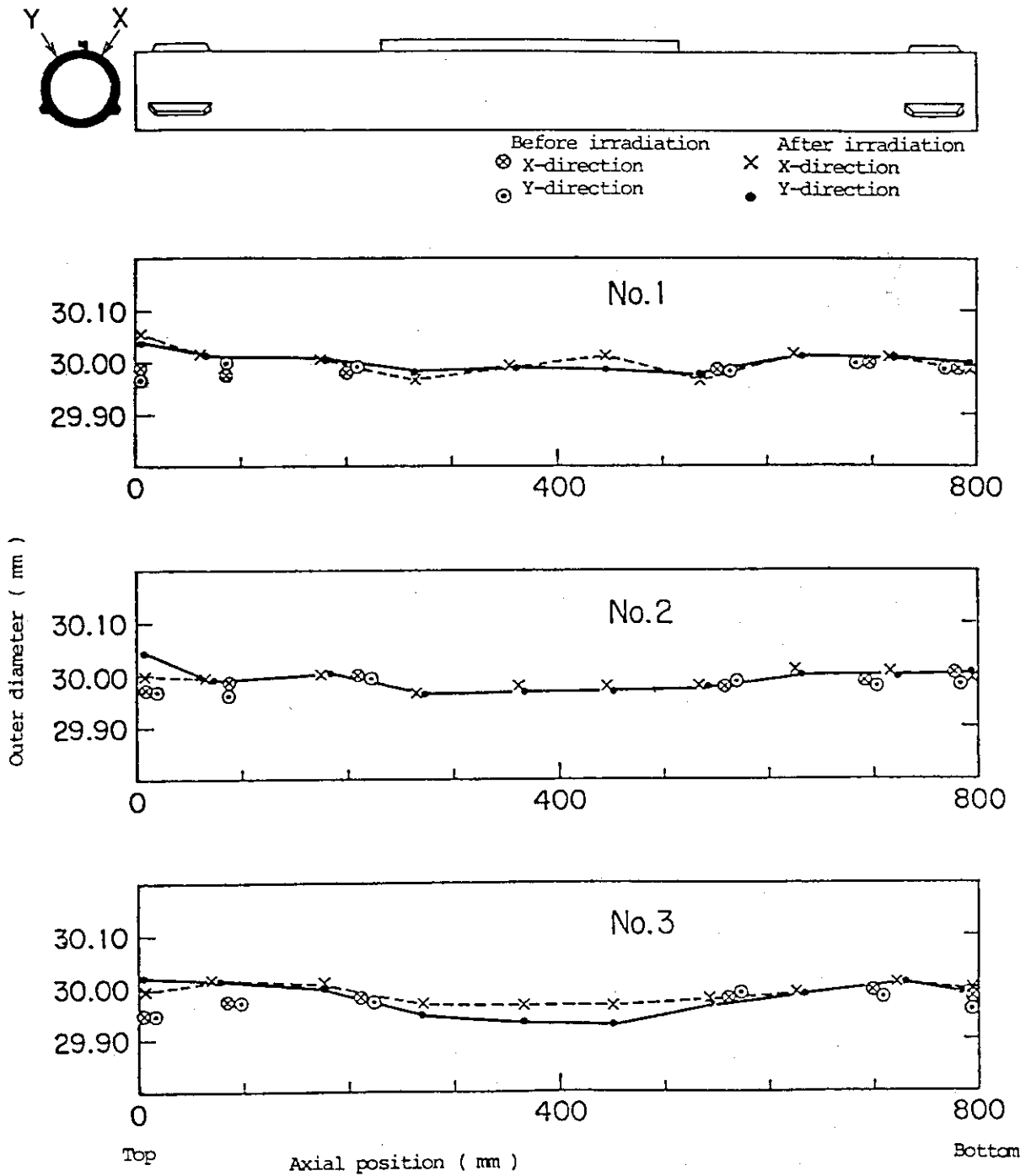


Fig. 17 Outer diameter of graphite sleeves of second OGL-1 fuel assembly before and after irradiation<sup>(2)</sup>.



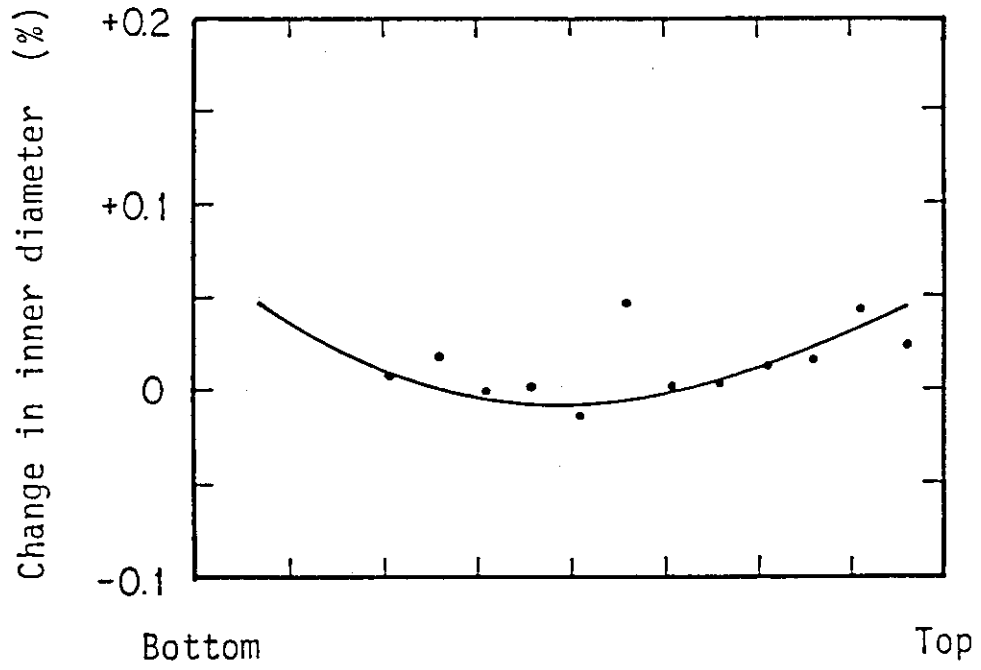


Fig. 18 Change in inner diameter of third OGL-1 graphite sleeve by irradiation<sup>(3)</sup>.

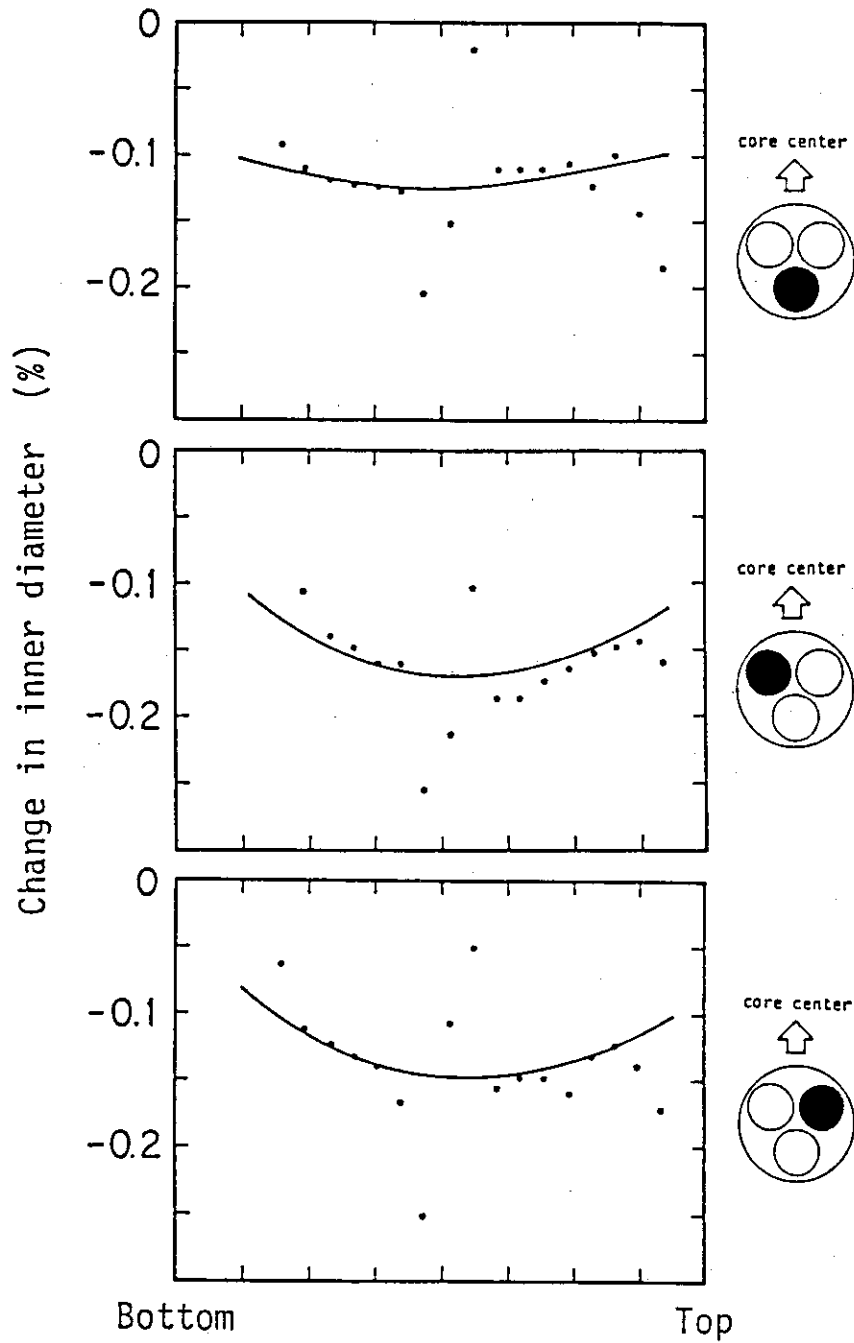


Fig. 19 Change in inner diameter of fourth OGL-1 graphite sleeves by irradiation<sup>(3)</sup>.

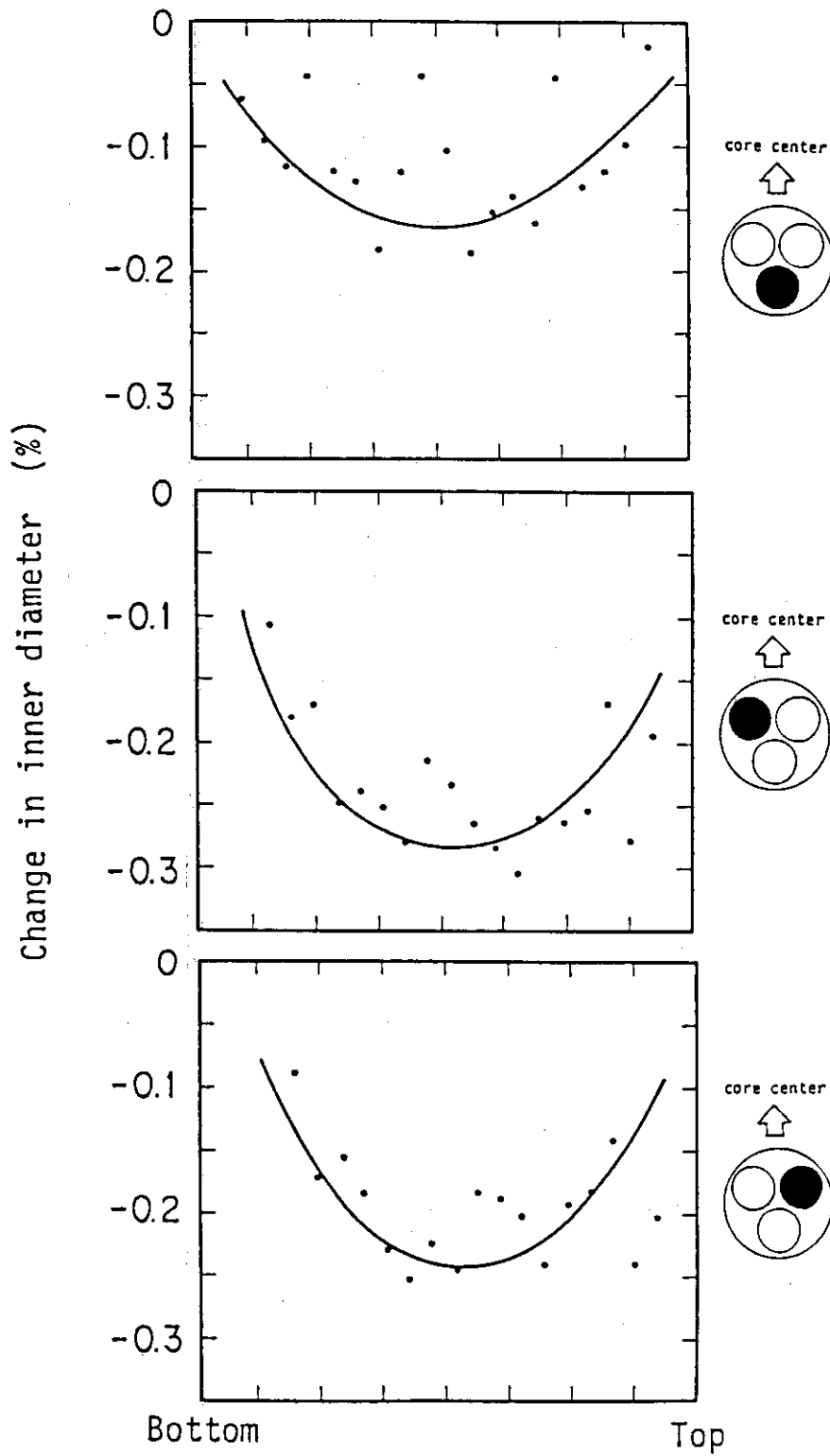


Fig. 20 Change in inner diameter of fifth OGL-1 graphite sleeves by irradiation<sup>(3)</sup>.

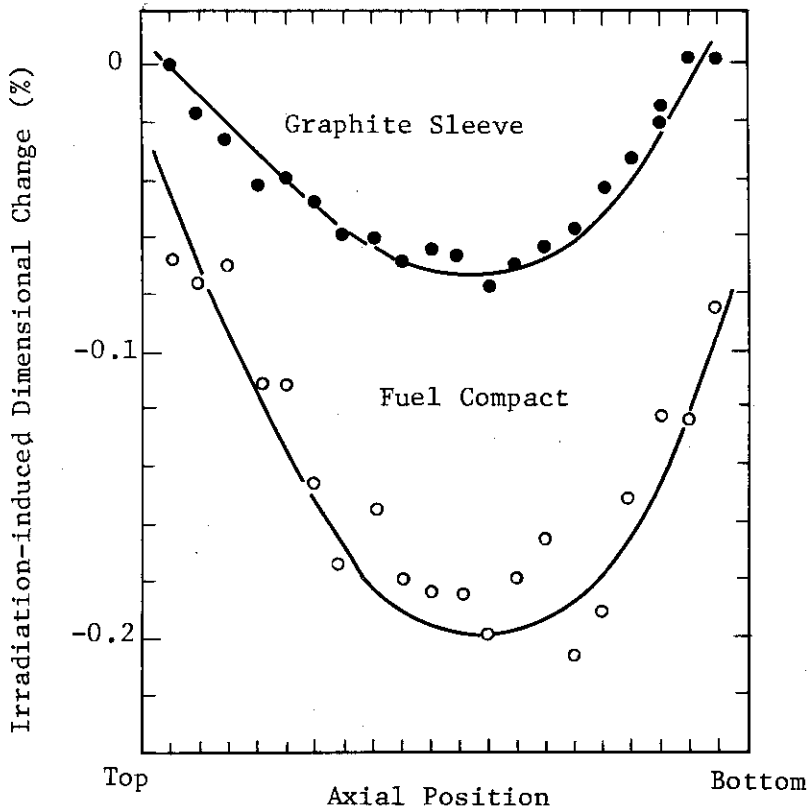


Fig. 21 Axial profile of irradiation-induced dimensional changes of graphite sleeve and fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

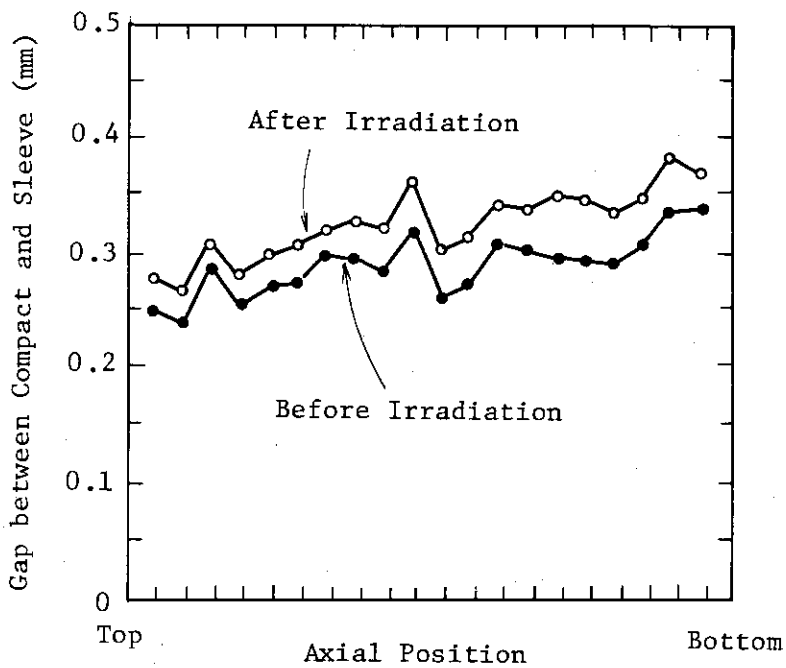


Fig. 22 Gap between fuel compact and graphite sleeve of eighth OGL-1 fuel assembly before and after irradiation.

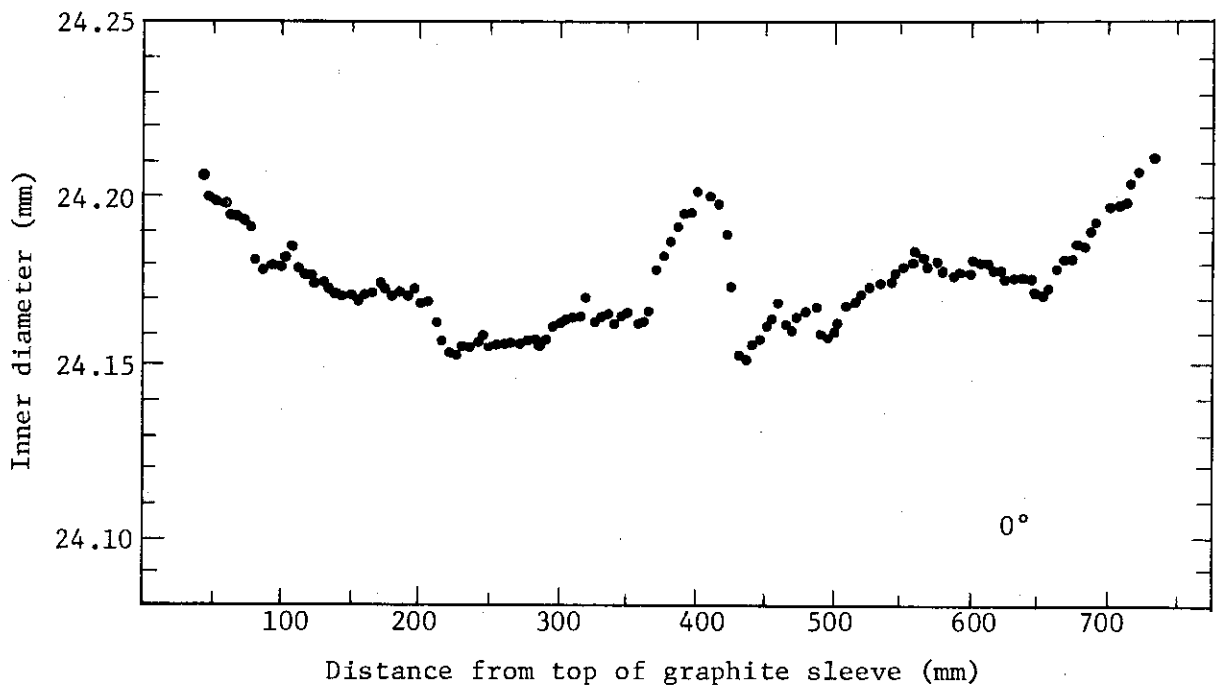
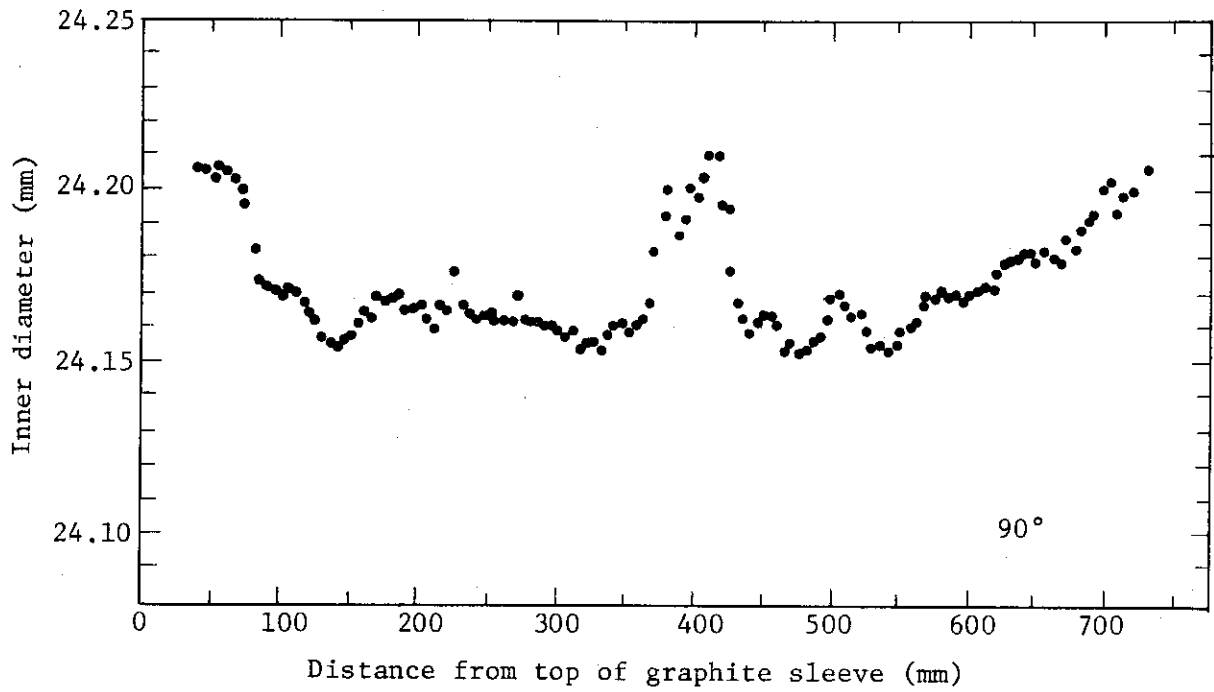


Fig. 23 Axial profile of graphite sleeve inner-diameter of fifth OGL-1 fuel assembly (rod 1).

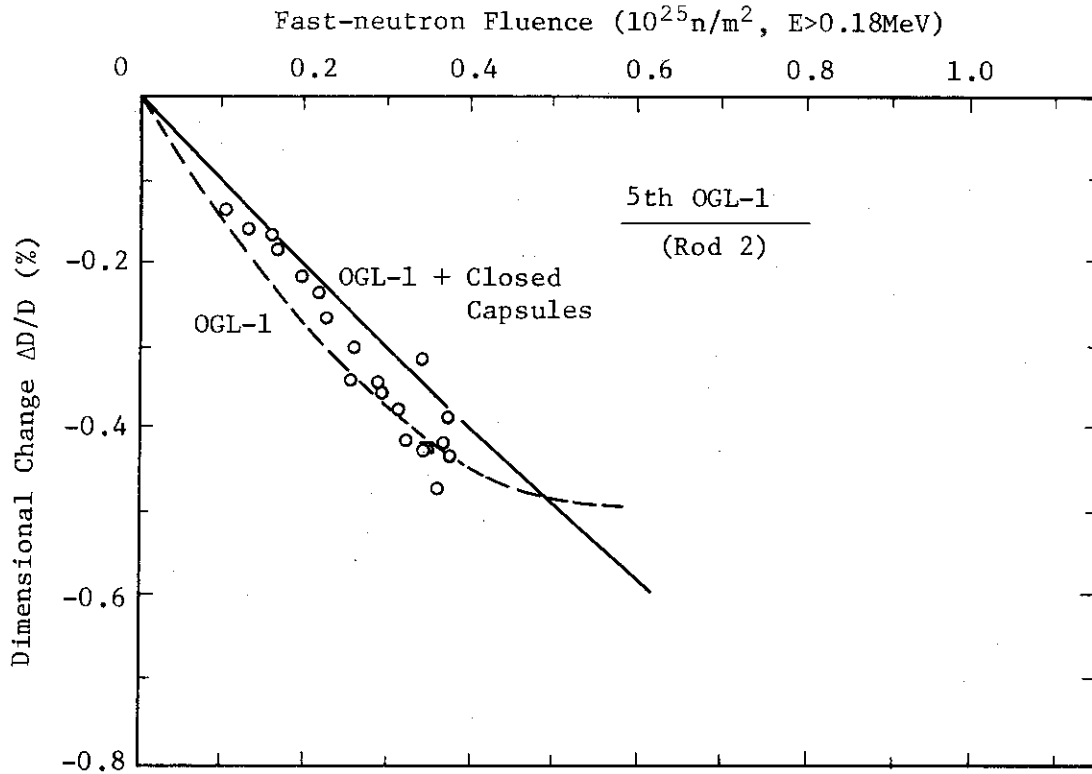


Fig. 24 Typical example of comparison of dimensional change of fuel compacts obtained by OGL-1 irradiation with best-fitted curves obtained by least squares method; see eqs.(10) and (11) in the text.

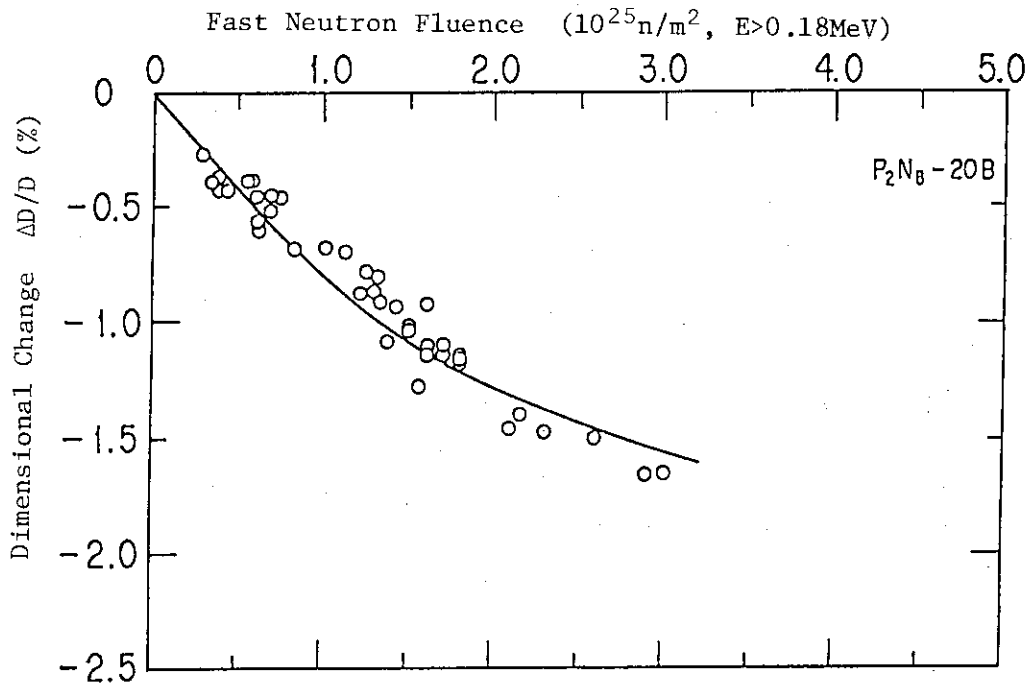


Fig. 25 Comparison of dimensional change data of fuel compacts obtained by closed-capsule irradiation with a best-fitted curve obtained by least squares method; see eq.(11) in the text.

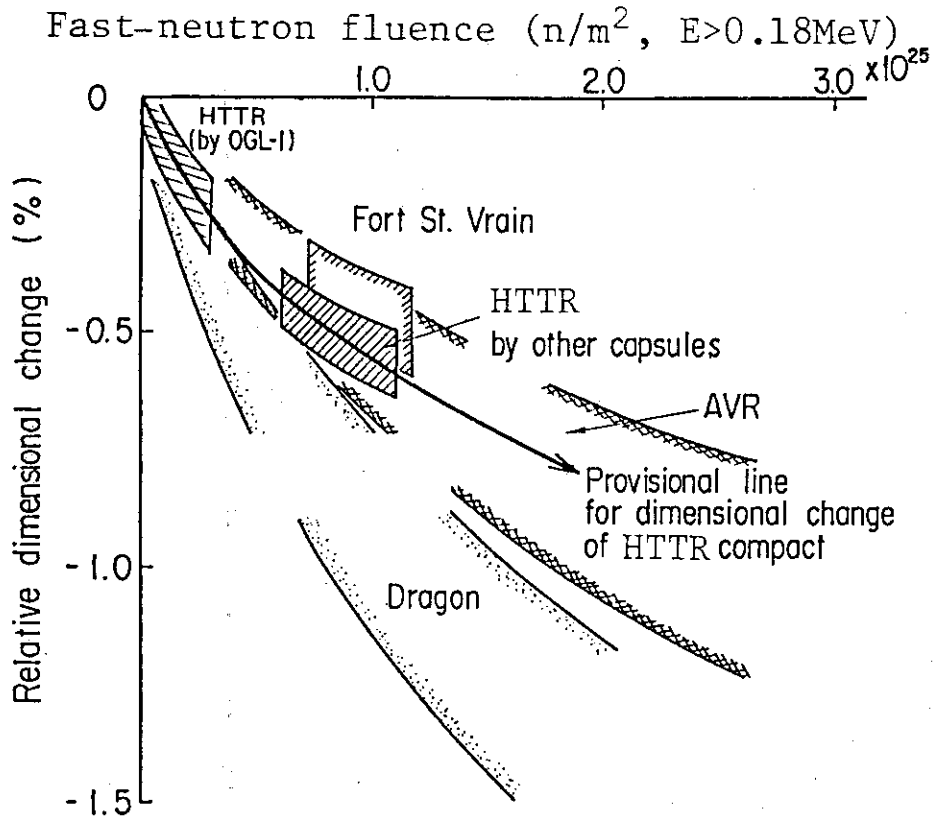


Fig. 26 Comparison of dimensional changes of HTTR reference fuel and various HTGR fuels<sup>(2)(11)</sup>.

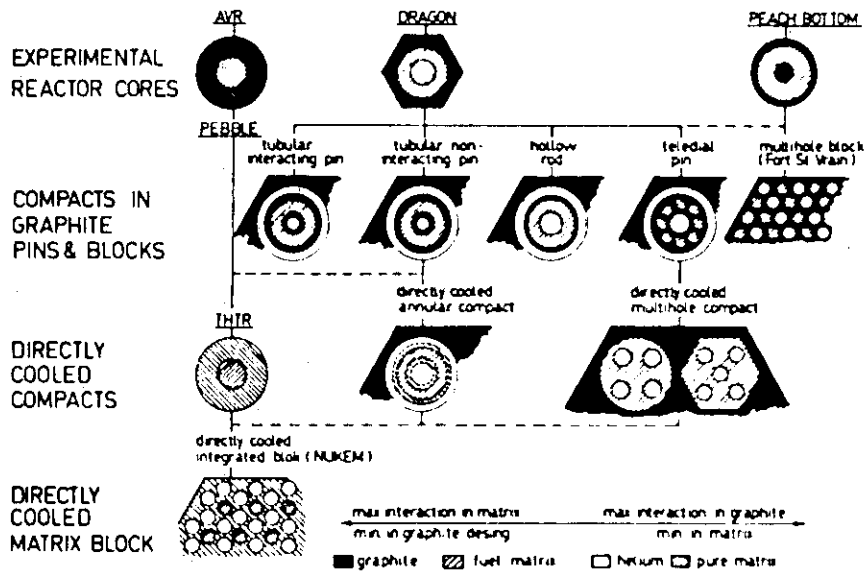


Fig. 27 HTR fuel element designs<sup>(12)</sup>.

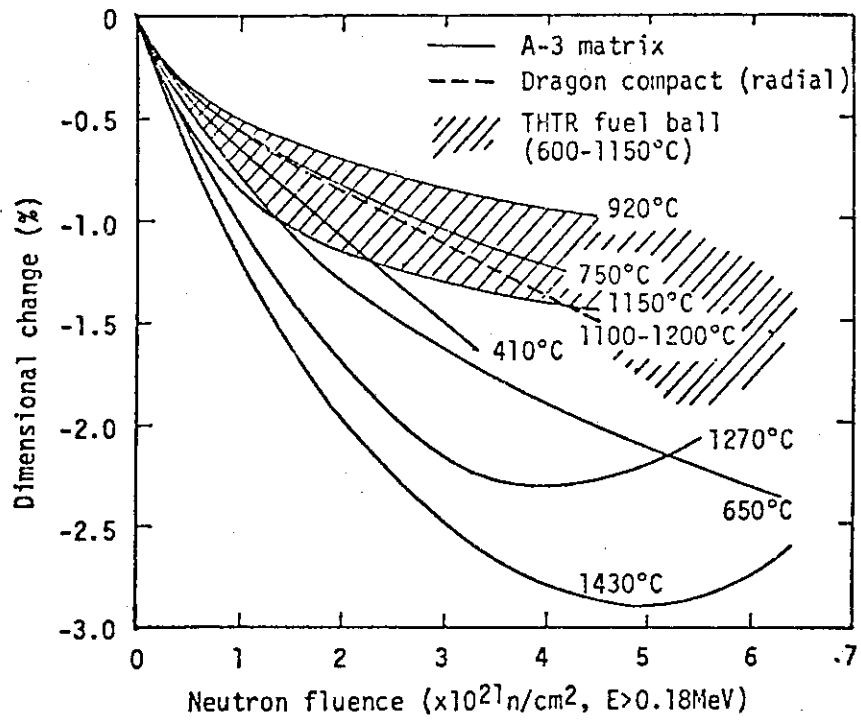


Fig. 28 Dimensional changes of fuel compact (Dragon) and A3 matrix as a function of fast-neutron fluence<sup>(14)</sup>.

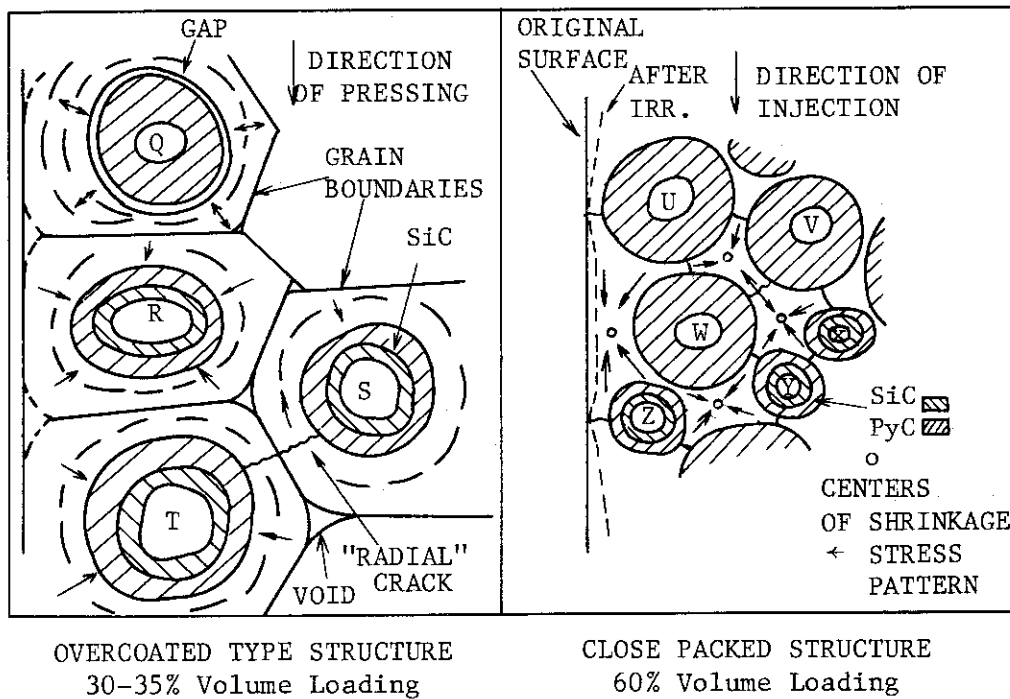


Fig. 29 Schematics of structure and irradiation behavior of fuel compacts produced by overcoating and slug-injection methods.<sup>(14)(19)</sup>



## 付録1 燃料コンパクトの照射条件データ

以下の表は燃料コンパクトごとに名称、平均照射温度、燃焼度、高速中性子照射量を示したものである。平均照射温度はSTPDSP 2コード計算による各照射サイクルごとの温度に照射時間の重みをかけて平均したものである。燃焼度は% fima (fissions per initial metal atom) および% fifa (fissions per initial fissile atom) で示した。この燃料の場合 fissile atom は  $^{235}\text{U}$  だけを考え、fima の値を  $^{235}\text{U}$  濃縮度で除したものを fifa とした。

表の最後の欄に示したFP インベントリ相対値は燃焼度プロフィール相対値を評価するために用いたもので、8次 OGL-1 燃料体燃料コンパクトの  $\gamma$  線スペクトロメトリの結果から  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  の量の相対分布をとったものである。

Table A1.1(a) Irradiation conditions of fuel compacts of 1st OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	750P1-01	897	0.23	1.9	0.42	0.72
2	750P1-02	942	0.26	2.1	0.55	0.81
3	750P1-03	984	0.28	2.3	0.66	0.88
4	750P1-04	1020	0.30	2.5	0.75	0.94
5	750P1-05	1052	0.31	2.6	0.82	0.98
6	750P1-06	1078	0.32	2.7	0.87	1.00
7	750P1-07	1098	0.32	2.7	0.90	1.00
8	750P1-08	1111	0.31	2.6	0.90	0.98
9	750P1-09	1118	0.30	2.5	0.88	0.94
10	750P1-10	1118	0.29	2.4	0.85	0.90
11	750P1-11	1112	0.27	2.3	0.80	0.85
12	750P1-12	1099	0.24	2.0	0.73	0.76
13	750P1-13	1079	0.21	1.7	0.65	0.65
14	750P1-14	1054	0.17	1.4	0.57	0.53
15	750P1-15	1022	0.13	1.1	0.49	0.40
16	750P1-16	987	0.08	0.7	0.41	0.27
17	750P1-17	970	0.07	0.6	0.33	0.22
18	750P1-18	954	0.06	0.5	0.24	0.19
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched; rod 1:2:3 = 0.68:1.16:1.16.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18$ MeV).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.1(b) Irradiation conditions of fuel compacts of 1st OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}\text{n/m}^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	750P2-01	1012	0.39	3.3	0.56	0.72
2	750P2-02	1082	0.44	3.7	0.74	0.81
3	750P2-03	1147	0.48	4.0	0.89	0.88
4	750P2-04	1205	0.51	4.3	1.01	0.94
5	750P2-05	1255	0.53	4.4	1.11	0.98
6	750P2-06	1296	0.54	4.5	1.17	1.00
7	750P2-07	1326	0.54	4.5	1.21	1.00
8	750P2-08	1347	0.53	4.4	1.22	0.98
9	750P2-09	1356	0.51	4.3	1.18	0.94
10	750P3-01	1354	0.49	4.1	1.15	0.90
11	750P3-02	1342	0.46	3.8	1.07	0.85
12	750P3-03	1319	0.41	3.4	0.99	0.76
13	750P3-04	1286	0.35	2.9	0.88	0.65
14	750P3-05	1244	0.29	2.4	0.77	0.53
15	750P3-06	1192	0.22	1.8	0.66	0.40
16	750P3-07	1136	0.15	1.2	0.55	0.27
17	750P3-08	1109	0.12	1.0	0.44	0.22
18	750P3-09	1086	0.10	0.9	0.33	0.19
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched; rod 1:2:3 = 0.68:1.16:1.16.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table AL.1(c) Irradiation conditions of fuel compacts of 1st OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	750P2-10	977	0.39	3.3	0.57	0.72
2	750P2-11	1039	0.44	3.7	0.67	0.81
3	750P2-12	1094	0.48	4.0	0.91	0.88
4	750P2-13	1144	0.51	4.3	1.03	0.94
5	750P2-14	1185	0.53	4.4	1.13	0.98
6	750P2-15	1219	0.54	4.5	1.19	1.00
7	750P2-16	1245	0.54	4.5	1.23	1.00
8	750P2-17	1262	0.53	4.4	1.24	0.98
9	750P2-18	1270	0.51	4.3	1.20	0.94
10	750P3-10	1270	0.49	4.1	1.17	0.90
11	750P3-11	1260	0.46	3.8	1.09	0.85
12	750P3-12	1242	0.41	3.4	1.00	0.76
13	750P3-13	1215	0.35	2.9	1.89	0.65
14	750P3-14	1181	0.29	2.4	0.78	0.53
15	750P3-15	1137	0.22	1.8	0.67	0.40
16	750P3-16	1090	0.15	1.2	0.56	0.27
17	750P3-17	1067	0.12	1.0	0.45	0.22
18	750P3-18	1047	0.10	0.9	0.34	0.19
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched; rod 1:2:3 = 0.68:1.16:1.16.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ )

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.2(a) Irradiation conditions of fuel compacts of 2nd OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%Fima)	*2 Burnup (%Fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	760P2-05	935	0.32	2.7	0.64	0.60
2	760P2-04	979	0.38	3.2	0.84	0.71
3	760P2-03	1019	0.44	3.6	0.99	0.81
4	760P2-02	1055	0.47	3.9	1.12	0.87
5	760P2-01	1086	0.50	4.2	1.25	0.93
6	760P4-06	1112	0.52	4.3	1.33	0.96
7	760P4-05	1133	0.54	4.5	1.39	1.00
8	760P4-04	1147	0.54	4.5	1.42	1.00
9	760P4-03	1157	0.54	4.5	1.42	1.00
10	760P4-02	1160	0.53	4.4	1.38	0.98
11	760P4-01	1158	0.51	4.3	1.33	0.95
12	760P5-04	1150	0.49	4.1	1.26	0.91
13	760P5-03	1136	0.45	3.8	1.18	0.84
14	760P5-02	1116	0.42	3.5	1.07	0.78
15	760P5-01	1091	0.38	3.2	0.95	0.71
16	760P3-06	1060	0.35	2.9	0.84	0.64
17	760P3-05	1024	0.29	2.4	0.72	0.54
18	760P3-04	990	0.25	2.1	0.60	0.46
19	760P3-03	974	0.21	1.8	0.48	0.39
20	760P3-02	959	0.17	1.4	0.37	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched; rod 1:2:3 = 0.74:1.13:1.13.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18$ MeV).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.2(b) Irradiation conditions of fuel compacts of 2nd OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	760P2-10	1067	0.50	4.1	0.87	0.60
2	760P2-09	1136	0.59	4.9	1.14	0.71
3	760P2-08	1200	0.67	5.6	1.35	0.81
4	760P2-07	1257	0.72	6.0	1.52	0.87
5	760P2-06	1308	0.77	6.4	1.70	0.93
6	760P4-12	1350	0.79	6.6	1.81	0.96
7	760P4-11	1383	0.83	6.9	1.89	1.00
8	760P4-10	1407	0.83	6.9	1.93	1.00
9	760P4-09	1421	0.83	6.9	1.93	1.00
10	760P4-08	1426	0.81	6.7	1.87	0.98
11	760P4-07	1420	0.78	6.5	1.81	0.95
12	760P5-08	1405	0.75	6.3	1.72	0.91
13	760P5-07	1380	0.69	5.8	1.60	0.84
14	760P5-06	1347	0.64	5.4	1.45	0.78
15	760P5-05	1304	0.59	4.9	1.29	0.71
16	760P3-11	1253	0.53	4.4	1.14	0.64
17	760P3-10	1195	0.45	3.7	0.98	0.54
18	760P3-09	1140	0.38	3.2	0.81	0.46
19	760P3-08	1114	0.32	2.7	0.66	0.39
20	760P3-07	1091	0.26	2.1	0.50	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched; A:B:C = 0.74:1.13:1.13.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18$  MeV).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eight OGL-1 fuel assembly.

Table A1.2(c) Irradiation conditions of fuel compacts of 2nd OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	760P2-15	1042	0.50	4.1	0.88	0.60
2	760P2-14	1104	0.59	4.9	1.16	0.71
3	760P2-13	1161	0.67	5.6	1.37	0.81
4	760P2-12	1211	0.72	6.0	1.55	0.87
5	760P2-11	1254	0.77	6.4	1.72	0.93
6	760P4-18	1290	0.79	6.6	1.84	0.96
7	760P4-17	1318	0.83	6.9	1.92	1.00
8	760P4-16	1338	0.83	6.9	1.96	1.00
9	760P4-15	1350	0.83	6.9	1.96	1.00
10	760P4-14	1354	0.81	6.7	1.90	0.98
11	760P4-13	1350	0.78	6.5	1.84	0.95
12	760P5-12	1338	0.75	6.3	1.74	0.91
13	760P5-11	1318	0.69	5.8	1.63	0.84
14	760P5-10	1290	0.64	5.4	1.47	0.78
15	760P5-09	1254	0.59	4.9	1.31	0.71
16	760P3-16	1211	0.53	4.4	1.16	0.64
17	760P3-15	1160	0.45	3.7	1.00	0.54
18	760P3-14	1111	0.38	3.2	0.82	0.46
19	760P3-13	1088	0.32	2.7	0.67	0.39
20	760P3-12	1067	0.26	2.1	0.51	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched; A:B:C = 0.74:1.13:1.13.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.3 Irradiation conditions of fuel compacts or 3rd OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	770P1-01	1068	0.31	2.6	0.38	0.60
2	770P1-02	1132	0.37	3.1	0.51	0.71
3	770P1-03	1189	0.42	3.5	0.61	0.81
4	770P1-04	1239	0.45	3.8	0.70	0.87
5	770P1-05	1280	0.48	4.0	0.78	0.93
6	770P1-06	1313	0.50	4.1	0.83	0.96
7	770P1-07	1336	0.52	4.3	0.87	1.00
8	770P1-08	1351	0.52	4.3	0.89	1.00
9	770P1-09	1355	0.52	4.3	0.89	1.00
10	770P1-10	1351	0.51	4.2	0.87	0.98
11	770P1-11	1337	0.49	4.1	0.84	0.95
12	770P1-12	1314	0.47	3.9	0.80	0.91
13	770P1-13	1282	0.44	3.6	0.75	0.84
14	770P1-14	1241	0.40	3.4	0.69	0.78
15	770P1-15	1192	0.37	3.1	0.61	0.71
16	770P1-16	1135	0.33	2.8	0.54	0.64
17	770P1-17	1071	0.28	2.3	0.46	0.54
18	770P1-18	1013	0.24	2.0	0.39	0.46
19	770P1-19	988	0.20	1.7	0.32	0.39
20	770P1-20	966	0.16	1.3	0.24	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 12.0% enriched.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E>0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eight OGL-1 fuel assembly.



Table Al.4(a) Irradiation conditions of fuel compacts of 4th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	780P1-55	887	0.52	2.6	0.72	0.60
2	780P1-54	928	0.61	3.1	0.96	0.71
3	780P1-53	966	0.70	3.5	1.15	0.81
4	780P1-52	999	0.75	3.8	1.31	0.87
5	780P1-51	1027	0.80	4.0	1.47	0.93
6	780P1-40	1051	0.82	4.1	1.57	0.96
7	780P1-39	1068	0.85	4.3	1.64	1.00
8	780P1-38	1081	0.85	4.3	1.69	1.00
9	780P1-37	1087	0.85	4.3	1.69	1.00
10	780P1-27	1088	0.84	4.2	1.69	0.98
11	780P1-26	1083	0.82	4.1	1.59	0.95
12	780P1-25	1072	0.78	3.9	1.52	0.91
13	780P1-24	1055	0.72	3.6	1.42	0.84
14	780P1-14	1033	0.67	3.4	1.30	0.78
15	780P1-13	1005	0.61	3.1	1.15	0.71
16	780P1-12	973	0.55	2.8	1.01	0.64
17	780P1-11	935	0.46	2.3	0.88	0.54
18	780P1-10	903	0.40	2.0	0.74	0.46
19	780P1-09	887	0.33	1.7	0.61	0.39
20	780P1-08	873	0.27	1.3	0.46	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.90% enriched; rod 1:2:3 = 0.62:1.19:1.19.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18$  MeV).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.4(b) Irradiation conditions of fuel compacts of 4th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	780P1-60	1056	0.99	5.0	0.98	0.60
2	780P1-59	1127	1.17	5.9	1.31	0.71
3	780P1-58	1193	1.34	6.7	1.56	0.81
4	780P1-57	1251	1.43	7.2	1.79	0.87
5	780P1-56	1302	1.53	7.7	1.99	0.93
6	780P1-45	1342	1.58	8.0	2.13	0.96
7	780P1-44	1375	1.65	8.3	2.22	1.00
8	780P1-43	1396	1.65	8.3	2.29	1.00
9	780P1-42	1407	1.65	8.3	2.29	1.00
10	780P1-41	1407	1.62	8.1	2.24	0.98
11	780P1-31	1396	1.57	7.9	2.15	0.95
12	780P1-30	1375	1.50	7.5	2.06	0.91
13	780P1-29	1343	1.38	7.0	1.92	0.84
14	780P1-28	1302	1.29	6.5	1.76	0.78
15	780P1-20	1252	1.17	5.9	1.56	0.71
16	780P1-19	1193	1.05	5.3	1.37	0.64
17	780P1-18	1127	0.89	4.5	1.19	0.54
18	780P1-17	1071	0.76	3.8	1.01	0.46
19	780P1-16	1045	0.64	3.2	0.82	0.39
20	780P1-15	1022	0.51	2.6	0.62	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.90% enriched; rod 1:2:3 = 0.62:1.19:1.19.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.4(c) Irradiation condition of fuel compacts of 4th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	780P1-50	991	0.99	5.0	1.00	0.60
2	780P1-49	1049	1.17	5.9	1.32	0.71
3	780P1-48	1101	1.34	6.7	1.58	0.81
4	780P1-47	1146	1.43	7.2	1.81	0.87
5	780P1-46	1185	1.53	7.7	2.02	0.93
6	780P1-36	1216	1.58	8.0	2.16	0.96
7	780P1-35	1240	1.65	8.3	2.25	1.00
8	780P1-34	1256	1.65	8.3	2.32	1.00
9	780P1-33	1265	1.65	8.3	2.32	1.00
10	780P1-32	1265	1.62	8.1	2.27	0.98
11	780P1-23	1258	1.57	7.9	2.18	0.95
12	780P1-22	1243	1.50	7.5	2.09	0.91
13	780P1-21	1220	1.38	7.0	1.95	0.84
14	780P1-07	1189	1.29	6.5	1.79	0.78
15	780P1-06	1151	1.17	5.9	1.58	0.71
16	780P1-05	1106	1.05	5.3	1.39	0.64
17	780P1-04	1054	0.89	4.5	1.21	0.54
18	780P1-03	1009	0.76	3.8	1.02	0.46
19	780P1-02	987	0.64	3.2	0.84	0.39
20	780P1-01	968	0.51	2.6	0.63	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.90% enriched; rod 1:2:3 = 0.62:1.19:1.19.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E>0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.5(a) Irradiation conditions of fuel compacts of 5th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	790P40	880	1.09	5.5	1.18	0.60
2	790P39	933	1.29	6.5	1.57	0.71
3	790P38	973	1.47	7.4	1.87	0.81
4	790P37	1019	1.58	8.0	2.15	0.87
5	790P36	1055	1.69	8.5	2.39	0.93
6	790P35	1076	1.74	8.8	2.56	0.96
7	790P34	1098	1.82	9.2	2.67	1.00
8	790P33	1135	1.82	9.2	2.75	1.00
9	790P32	1136	1.82	9.2	2.75	1.00
10	790P31	1130	1.78	9.0	2.70	0.98
11	790P30	1110	1.73	8.7	2.59	0.95
12	790P29	1106	1.65	8.3	2.48	0.91
13	790P28	1103	1.53	7.7	2.31	0.84
14	790P27	1089	1.42	7.1	2.12	0.78
15	790P26	1069	1.29	6.5	1.87	0.71
16	790P25	1050	1.16	5.9	1.65	0.64
17	790P24	1026	0.98	4.9	1.43	0.54
18	790P23	1003	0.84	4.2	1.21	0.46
19	790P22	975	0.71	3.6	0.99	0.39
20	790P21	953	0.56	2.8	0.74	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.85% enriched; rod 1:2:3 = 0.72:1.14:1.14.

\*3 Fast-neutron fluence (E>0.18MeV).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.5(b) Irradiation conditions of fuel compacts of 5th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	790P60	954	1.73	8.7	1.60	0.60
2	790P59	1027	2.04	10.3	2.13	0.71
3	790P58	1080	2.33	11.7	2.54	0.81
4	790P57	1135	2.50	12.6	2.91	0.87
5	790P56	1197	2.68	13.5	3.25	0.93
6	790P55	1228	2.76	13.9	3.47	0.96
7	790P54	1248	2.88	14.5	3.62	1.00
8	790P53	1296	2.88	14.5	3.73	1.00
9	790P52	1300	2.88	14.5	3.73	1.00
10	790P51	1293	2.82	14.2	3.66	0.98
11	790P50	1285	2.73	13.8	3.51	0.95
12	790P49	1274	2.62	13.2	3.36	0.91
13	790P48	1257	2.42	12.2	3.13	0.84
14	790P47	1241	2.24	11.3	2.87	0.78
15	790P46	1214	2.04	10.3	2.54	0.71
16	790P45	1189	1.84	9.3	2.24	0.64
17	790P44	1160	1.55	7.8	1.94	0.54
18	790P43	1111	1.32	6.7	1.64	0.46
19	790P42	1073	1.12	5.7	1.34	0.39
20	790P41	1044	0.89	4.5	1.01	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.85% enriched; rod 1:2:3 = 0.72:1.14:1.14.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured by rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.5(c) Irradiation conditions of fuel compacts of 5th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	790P20	1001	1.73	8.7	1.63	0.60
2	790P19	1053	2.04	10.3	2.16	0.71
3	790P18	1109	2.33	11.7	2.58	0.81
4	790P17	1167	2.50	12.6	2.96	0.87
5	790P16	1224	2.68	13.5	3.30	0.93
6	790P15	1260	2.76	13.9	3.52	0.96
7	790P14	1299	2.88	14.5	3.68	1.00
8	790P13	1357	2.88	14.5	3.79	1.00
9	790P12	1361	2.88	14.5	3.79	1.00
10	790P11	1333	2.82	14.2	3.71	0.98
11	790P10	1310	2.73	13.8	3.56	0.95
12	790P09	1312	2.62	13.2	3.41	0.91
13	790P08	1297	2.42	12.2	3.18	0.84
14	790P07	1286	2.24	11.3	2.92	0.78
15	790P06	1235	2.04	10.3	2.58	0.71
16	790P05	1208	1.84	9.3	2.27	0.64
17	790P04	1175	1.55	7.8	1.97	0.54
18	790P03	1131	1.32	6.7	1.67	0.46
19	790P02	1092	1.12	5.7	1.36	0.39
20	790P01	1062	0.89	4.5	1.02	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.85% enriched; rod 1:2:3 = 0.72:1.14:1.14.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.6 Irradiation conditions of fuel compacts of 6th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	*3 Fast fluence ( $10^{24}\text{n/m}^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	800P1-20	980	0.26	1.3	0.18	0.60
2	800P1-19	1107	0.31	1.6	0.24	0.71
3	800P1-18	1202	0.35	1.8	0.28	0.81
4	800P1-17	1281	0.38	1.9	0.32	0.87
5	800P1-16	1345	0.40	2.0	0.36	0.93
6	800P1-15	1389	0.42	2.1	0.38	0.96
7	800P1-14	1442	0.43	2.2	0.40	1.00
8	800P1-13	1470	0.43	2.2	0.41	1.00
9	800P1-12	1488	0.43	2.2	0.41	1.00
10	800P1-11	1494	0.43	2.2	0.40	0.98
11	800P1-10	1489	0.41	2.1	0.39	0.95
12	800P1-09	1473	0.39	2.0	0.37	0.91
13	800P1-08	1457	0.36	1.8	0.35	0.84
14	800P1-07	1428	0.34	1.7	0.32	0.78
15	800P1-06	1383	0.31	1.6	0.28	0.71
16	800P1-05	1335	0.28	1.4	0.25	0.64
17	800P1-04	1278	0.23	1.2	0.21	0.54
18	800P1-03	1234	0.20	1.0	0.18	0.46
19	800P1-02	1164	0.17	0.9	0.15	0.39
20	800P1-01	1093	0.13	0.7	0.11	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.7555% enriched.

\*3 Fast-neutron fluence ( $E > 0.18\text{MeV}$ ).

\*4 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.7(a) Irradiation conditions of fuel compacts of 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

Position	Compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*3 Burnup (%fifa)	Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	Relative FP inventory
(bottom)						
1	81OP1-01	984	0.47	2.4	0.50	0.60
2	81OP1-02	1034	0.55	2.8	0.66	0.71
3	81OP1-03	1079	0.63	3.2	0.79	0.81
4	81OP1-04	1118	0.68	3.4	0.91	0.87
5	81OP1-05	1153	0.73	3.7	1.01	0.93
6	81OP1-06	1181	0.75	3.8	1.08	0.96
7	81OP1-07	1204	0.78	4.0	1.13	1.00
8	81OP1-08	1219	0.78	4.0	1.16	1.00
9	81OP1-09	1229	0.78	4.0	1.16	1.00
10	81OP1-10	1231	0.76	3.9	1.14	0.98
11	81OP1-11	1227	0.74	3.8	1.09	0.95
12	81OP1-12	1215	0.71	3.6	1.04	0.91
13	81OP1-13	1198	0.65	3.3	0.97	0.84
14	81OP1-14	1173	0.61	3.1	0.89	0.78
15	81OP1-15	1142	0.55	2.8	0.79	0.71
16	81OP1-16	1106	0.50	2.5	0.70	0.64
17	81OP1-17	1063	0.42	2.1	0.60	0.54
18	81OP1-18	1019	0.36	1.8	0.51	0.46
19	81OP1-19	1001	0.30	1.5	0.42	0.39
20	81OP1-20	984	0.24	1.2	0.31	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated from STPDSP2 code (rod 1:2:3 = 0.74:1.21:1.05); 19.694% enriched.

\*3 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.



Table A1.7(b) Irradiation conditions of fuel compacts of 7th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

Position	Compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*3 Burnup (%fifa)	Fast fluence ( $10^{24}\text{n/m}^2$ )	*4 Relative FP inventory
(bottom)						
1	81OP2-01 FPD40	1068	0.76	3.9	0.68	0.60
2	81OP2-02 FPD39	1133	0.90	4.6	0.90	0.71
3	81OP2-03 FPD38	1193	1.03	5.2	1.07	0.81
4	81OP2-04 FPD37	1247	1.10	5.6	1.23	0.87
5	81OP2-05 FPD36	1293	1.18	6.0	1.37	0.93
6	81OP2-06 FPD35	1332	1.21	6.2	1.46	0.96
7	81OP2-07 FPD34	1362	1.27	6.4	1.52	1.00
8	81OP2-08 FPD33	1384	1.27	6.4	1.57	1.00
9	81OP2-09 FPD32	1396	1.27	6.4	1.57	1.00
10	81OP2-10 FPD31	1399	1.24	6.3	1.54	0.98
11	81OP2-11 FPD30	1392	1.21	6.1	1.48	0.95
12	81OP2-12 FPD29	1376	1.16	5.9	1.41	0.91
13	81OP2-13 FPD28	1351	1.07	5.4	1.32	0.84
14	81OP2-14 FPD27	1317	0.99	5.0	1.21	0.78
15	81OP2-15 FPD26	1274	0.90	4.6	1.07	0.71
16	81OP2-16 FPD25	1224	0.81	4.1	0.94	0.64
17	81OP2-17 FPD24	1167	0.69	3.5	0.82	0.54
18	81OP2-18 FPD23	1108	0.58	3.0	0.69	0.46
19	81OP2-19 FPD22	1084	0.50	2.5	0.57	0.39
20	81OP2-20 FPD21	1063	0.39	2.0	0.42	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated from STPDSP2 code (rod 1:2:3 = 0.74:1.21:1.05); 19.694% enriched.

\*3 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

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

Position	Compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*3 Burnup (%fifa)	Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*3 Relative FP inventory
(bottom)						
1	81OP3-01	1064	0.66	3.4	0.69	0.60
2	81OP3-02	1127	0.78	4.0	0.91	0.71
3	81OP3-03	1184	0.89	4.5	1.09	0.81
4	81OP3-04	1235	0.96	4.9	1.25	0.87
5	81OP3-05	1279	1.02	5.2	1.39	0.93
6	81OP3-06	1315	1.06	5.4	1.49	0.96
7	81OP3-07	1343	1.10	5.6	1.55	1.00
8	81OP3-08	1363	1.10	5.6	1.60	1.00
9	81OP3-09	1374	1.10	5.6	1.60	1.00
10	81OP3-10	1377	1.08	5.5	1.57	0.98
11	81OP3-11	1371	1.05	5.3	1.50	0.95
12	81OP3-12	1358	1.00	5.1	1.44	0.91
13	81OP3-13	1333	0.93	4.7	1.34	0.84
14	81OP3-14	1302	0.86	4.4	1.23	0.78
15	81OP3-15	1263	0.78	4.0	1.09	0.71
16	81OP3-16	1215	0.71	3.6	0.96	0.64
17	81OP3-17	1161	0.60	3.0	0.83	0.54
18	81OP3-18	1104	0.51	2.6	0.70	0.46
19	81OP3-19	1081	0.43	2.2	0.58	0.39
20	81OP3-20	1060	0.34	1.7	0.43	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated from STPDSP2 code (rod 1:2:3 = 0.74:1.21:1.05); 19.694% enriched.

\*3 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts of eighth OGL-1 fuel assembly.

Table A1.8 Irradiation conditions of fuel compacts of 8th OGL-1 fuel assembly

Position	Compact name	Temp. (°C)	*2 Burnup (%fima)	*2 Burnup (%fifa)	Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*3 Relative FP inventory
(bottom)						
1	820P1-01	1097	0.60	3.0	0.52	0.60
2	820P1-02	1164	0.71	3.6	0.68	0.71
3	820P1-03	1223	0.81	4.0	0.82	0.81
4	820P1-04	1274	0.87	4.4	0.94	0.87
5	820P1-05	1316	0.93	4.7	1.04	0.93
6	820P1-06	1348	0.96	4.9	1.12	0.96
7	820P1-07	1370	1.00	5.1	1.16	1.00
8	820P1-08	1382	1.00	5.1	1.20	1.00
9	820P1-09	1384	1.00	5.1	1.20	1.00
10	820P1-10	1376	0.98	4.9	1.18	0.98
11	820P1-11	1358	0.95	4.7	1.13	0.95
12	820P1-12	1330	0.91	4.6	1.08	0.91
13	820P1-13	1292	0.84	4.3	1.01	0.84
14	820P1-14	1245	0.78	3.9	0.92	0.78
15	820P1-15	1188	0.71	3.6	0.82	0.71
16	820P1-16	1124	0.64	3.2	0.72	0.64
17	820P1-17	1052	0.54	2.7	0.62	0.54
18	820P1-18	990	0.46	2.3	0.53	0.46
19	820P1-19	963	0.39	2.0	0.43	0.39
20	820P1-20	940	0.31	1.6	0.32	0.31
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code: 19.709% enriched.

\*3 Average of relative activity of fission products measured for rotating fuel compacts.

Table A1.9 Irradiation conditions of fuel compacts of 9th OGL-1 fuel assembly.

Position	Fuel compact name	*1 Temp. (°C)	*2 Burnup (fima)	*2 Burnup (fifa)	Fast fluence ( $10^{24}n/m^2$ )	*3 Relative FP inventory
(bottom)						
1	830P1-01 FP1	1104	1.56	8.2	1.22	0.584
2	830P1-02 FP2	1168	1.83	9.6	1.62	0.684
3	830P1-03 FP3	1225	2.09	10.9	1.93	0.783
4	830P1-04 FP4	1273	2.28	11.9	2.22	0.854
5	830P1-05 FP5	1313	2.45	12.8	2.47	0.917
6	830P1-06 FP6	1344	2.54	13.3	2.64	0.952
7	830P1-07 FP7	1366	2.60	13.6	2.75	0.975
8	830P1-08 FP8	1378	2.67	14.0	2.84	1.000
9	830P1-09 FP9	1381	2.66	13.9	2.84	0.997
10	830P1-10 FP10	1374	2.61	13.7	2.78	0.977
11	830P1-11 FP11	1358	2.55	13.3	2.67	0.954
12	830P1-12 FP12	1333	2.41	12.6	2.56	0.904
13	830P1-13 FP13	1298	2.27	11.9	2.39	0.852
14	830P1-14 FP14	1255	2.11	11.1	2.19	0.791
15	830P1-15 FP15	1202	1.92	10.1	1.93	0.719
16	830P1-16 FP16	1148	1.71	8.9	1.70	0.639
17	830P1-17 FP17	1072	1.49	7.8	1.48	0.557
18	830P1-18 FP18	1008	1.28	6.7	1.25	0.478
19	830P1-19 FP19	981	1.06	5.5	1.02	0.397
20	830P1-20 FP20	958	0.87	4.6	0.77	0.326
(top)						

\*1 Time-averaged temperature of fuel compacts calculated from heat generation (STPDSP2 code).

\*2 Calculated by STPDSP2 code; 19.126% enriched.

\*3 Relative activity of  $^{144}\text{Ce}$  measured for rotating fuel compacts.

## 付録2 燃料コンパクトの照射寸法変化の数値データ

以下の表には燃料コンパクトごとに平均照射温度，高速中性子照射量，外径変化率 ( $\Delta D/D$ )，内径変化率 ( $\Delta d/d$ )，長さ変化率 ( $\Delta L/L$ )，および長さ変化率と外径変化率の比を示した。平均照射温度は STPDSP2 コード計算による各照射サイクルごとの温度に照射時間の重みをかけて平均したものである。高速中性子照射量 ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) は本文 2.2 節に記述したようにフルエンスモニタ用の Fe 製ワイヤの  $^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$  反応によって生じた  $^{54}\text{Mn}$  の放射能を測定することによって求めたものを基本とし，実測値のないもの等について再評価したものである。

Table A2.1(a) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (first fuel, rod 1).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/D }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	897	0.416	-0.070	-0.104	-0.088	1.26
2	942	0.551	-0.083	-0.042	-0.031	(0.37)
3	984	0.660	-0.181	-0.083	-0.163	0.90
4	1020	0.750	-0.132	-0.104	-0.150	1.14
5	1052	0.823	-0.139	-0.208	-0.169	1.22
6	1078	0.868	-0.153	-0.083	-0.056	(0.37)
7	1098	0.895	-0.174	-0.104	-0.113	(0.65)
8	1111	0.904	-0.160	-0.0	-0.163	1.02
9	1118	0.877	-0.139	-0.187	-0.137	0.99
10	1118	0.850	-0.146	-0.125	-0.125	0.86
11	1112	0.796	-0.104	-0.104	-0.125	1.20
12	1099	0.732	-0.125	-0.125	-0.125	1.00
13	1079	0.651	-0.118	-0.062	-0.106	0.90
14	1054	0.570	-0.097	-0.021	-0.100	1.03
15	1022	0.488	-0.097	-0.021	-0.100	1.03
16	987	0.407	-0.076	-0.021	-0.075	0.99
17	970	0.325	-0.076	-0.042	-0.088	1.16
18	954	0.244	-0.056	-0.021	-0.069	1.23
(top)						
						average 1.06

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.1(b) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (first fuel, rod 2).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	1012	0.56	-0.132	-0.125	-0.094	(0.71)
2	1082	0.74	-0.146	-0.042	-0.175	1.20
3	1147	0.89	-0.181	-0.229	-0.175	0.97
4	1205	1.01	-0.188	-0.187	-0.218	1.16
5	1255	1.11	-0.174	-0.208	-0.231	1.33
6	1296	1.17	-0.167	-0.125	-0.237	1.42
7	1326	1.21	-0.188	-0.145	-0.162	(0.86)
8	1347	1.22	-0.194	-0.041	-0.275	1.42
9	1356	1.18	-0.160	-0.104	-0.237	1.48
10	1354	1.15	-0.153	-0.063	-0.156	1.02
11	1342	1.07	-0.160	-0.083	-0.174	1.09
12	1319	0.99	-0.160	-0.104	-0.143	0.89
13	1286	0.88	-0.132	-0.104	-0.142	1.08
14	1244	0.77	-0.146	-0.104	-0.136	0.93
15	1192	0.66	-0.118	-0.042	-0.081	0.69
16	1136	0.55	-0.055	-0.042	-0.118	(2.15)
17	1109	0.44	-0.049	-0.021	-0.062	1.27
18	1086	0.33	-0.069	-0.042	-0.037	(0.54)
(top)						
						average 1.14

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.1(c) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (first fuel, rod 3).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	977	0.57	-0.070	-0.042	-0.125	(1.79)
2	1039	0.76	-0.104	-0.209	-0.231	(2.22)
3	1094	0.91	-0.118	-0.146	-0.062	(0.53)
4	1144	1.03	-0.146	-0.142	-0.206	1.41
5	1185	1.13	-0.174	-0.062	-0.250	1.44
6	1219	1.19	-0.174	-0.104	-0.212	1.22
7	1245	1.23	-0.160	-0.166	-0.144	0.90
8	1262	1.24	-0.167	-0.042	-0.262	1.57
9	1270	1.20	-0.167	-0.062	-0.212	1.27
10	1270	1.17	-0.146	-0.083	-0.142	0.97
11	1260	1.09	-0.146	-0.042	-0.118	0.81
12	1242	1.00	-0.139	-0.104	-0.149	1.07
13	1215	0.89	-0.118	-0.146	-0.124	1.05
14	1181	0.78	-0.083	-0.021	-0.105	1.27
15	1137	0.67	-0.063	-0.021	-0.105	1.67
16	1090	0.56	-0.049	-0.042	-0.068	1.39
17	1067	0.45	-0.056	-0.042	-0.074	1.32
18	1047	0.34	-0.042	-0.083	-0.006	(0.14)
(top)						
						average 1.24

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).



Table A2.2(a) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (second fuel, rod 2).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	$\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
(bottom)						
1	935	0.64	-0.090	-0.354	-0.056	(0.62)
2	979	0.84	-0.132	-0.519	-0.118	0.89
3	1019	0.99	-0.188	-0.478	-0.181	0.96
4	1055	1.12	-0.181	-0.479	-0.292	(1.61)
5	1086	1.25	-0.188	-0.542	-0.195	1.04
6	1111	1.33	-0.222	-0.229	-0.257	1.16
7	1133	1.39	-0.222	-0.208	-0.236	1.06
8	1147	1.42	-0.215	-0.125	-0.222	1.03
9	1156	1.42	-0.243	-0.146	-0.291	1.20
10	1160	1.38	-0.208	-0.083	-0.257	1.24
11	1158	1.33	-0.194	-0.104	-0.208	1.07
12	1150	1.26	-0.194	-0.104	-0.222	1.14
13	1136	1.18	-0.195	-0.187	-0.146	(0.75)
14	1116	1.07	-0.160	-0.208	-0.201	1.25
15	1091	0.95	-0.104	-0.167	-0.118	1.13
16	1060	0.84	-0.125	-0.270	-0.097	0.78
17	1024	0.72	-0.090	-0.000	-0.062	0.69
18	990	0.60	-0.111	-0.021	-0.090	0.81
19	974	0.48	-0.104	-0.000	-0.111	1.07
20	959	0.37	-0.118	-0.000	-0.069	(0.58)
(top)						
						average 1.03

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.2(b) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (second fuel, rod 2).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	1067	0.87	-0.167	-0.188	-0.215	1.29
2	1136	1.14	-0.209	-0.104	-0.222	1.06
3	1200	1.35	-0.244	-0.125	-0.264	1.08
4	1257	1.52	-0.209	-0.313	-0.243	1.16
5	1308	1.70	-0.209	-0.333	-0.320	1.53
6	1350	1.81	-0.312	-0.229	-0.223	(0.71)
7	1383	1.89	-0.229	-0.209	-0.459	(2.00)
8	1407	1.93	-0.236	-0.209	-0.285	1.21
9	1421	1.93	-0.236	-0.188	-0.264	1.12
10	1426	1.87	-0.257	-0.208	-0.292	1.14
11	1420	1.81	-0.250	-0.271	-0.327	1.31
12	1405	1.72	-0.209	-0.291	-0.271	1.30
13	1380	1.60	-0.222	-0.292	-0.229	1.03
14	1347	1.45	-0.285	-0.292	-0.257	0.90
15	1304	1.29	-0.229	-0.250	-0.229	1.00
16	1253	1.14	-0.160	-0.104	-0.215	1.34
17	1195	0.98	-0.132	-0.000	-0.209	1.58
18	1140	0.81	-0.118	-0.229	-0.139	1.18
19	1114	0.66	-0.118	-0.063	-0.111	0.94
20	1091	0.50	-0.097	-0.187	-0.132	1.36
(top)						
						average 1.20

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.2(c) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (second fuel, rod 3).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	$\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
(bottom)						
1	1041	0.88	-0.139	-0.229	-0.153	1.10
2	1104	1.16	-0.188	-0.146	-0.257	1.37
3	1160	1.37	-0.334	-0.209	-0.299	0.90
4	1211	1.55	-0.264	-0.167	-0.209	0.79
5	1254	1.72	-0.251	-0.188	-0.160	(0.64)
6	1289	1.84	-0.291	-0.229	-0.341	1.17
7	1317	1.92	-0.291	-0.209	-0.313	1.08
8	1338	1.96	-0.264	-0.146	-0.264	1.00
9	1350	1.96	-0.208	-0.209	-0.271	1.30
10	1354	1.90	-0.236	-0.292	-0.236	1.00
11	1350	1.84	-0.234	-0.250	-0.181	0.77
12	1338	1.74	-0.250	-0.312	-0.291	1.16
13	1318	1.63	-0.209	-0.125	-0.320	1.53
14	1290	1.47	-0.195	-0.312	-0.167	0.86
15	1254	1.31	-0.202	-0.312	-0.250	1.24
16	1211	1.16	-0.160	-0.209	-0.216	1.35
17	1160	1.00	-0.069	-0.042	-0.139	(2.01)
18	1111	0.82	-0.222	-0.250	-0.209	0.94
19	1088	0.67	-0.125	-0.125	-0.188	1.50
20	1067	0.51	-0.069	-0.042	-0.160	(2.32)
(top)						
						average 1.12

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.3 Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (third fuel).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	1068	0.384	-0.056	-0.148	-0.056	1.00
2	1132	0.508	-0.074	-0.166	-0.125	1.69
3	1189	0.607	-0.083	-0.166	-0.146	1.76
4	1239	0.696	-0.093	-0.213	-0.146	1.57
5	1280	0.776	-0.111	-0.222	-0.104	0.94
6	1313	0.830	-0.139	-0.222	-0.181	1.30
7	1336	0.865	-0.144	-0.240	-0.083	0.58
8	1351	0.892	-0.153	-0.268	-0.556	(3.63)
9	1355	0.892	-0.153	-0.213	-0.104	0.68
10	1351	0.874	-0.162	-0.240	-0.069	0.43
11	1337	0.837	-0.172	-0.222	-0.063	0.37
12	1314	0.803	-0.023	-0.203	-0.077	3.35
13	1282	0.749	-0.088	-0.129	-0.118	1.34
14	1241	0.687	-0.088	-0.222	-0.007	0.08
15	1192	0.607	-0.083	-0.185	-0.021	0.25
16	1135	0.535	-0.051	-0.129	-0.035	0.69
17	1071	0.464	-0.056	-0.203	-0.014	0.25
18	1013	0.392	-0.051	-0.157	+0.035	-
19	988	0.321	-0.005	-0.157	-0.021	4.20
20	966	0.241	-0.028	-0.129	+0.056	-
(top)						average

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=36 mm) and inner diameter (d=18 mm).

Table A2.4(a) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (fourth fuel, rod 1).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	887	0.73	-0.090	-0.354	-0.056	(0.62)
2	928	0.96	-0.132	-0.519	-0.118	0.89
3	966	1.15	-0.188	-0.478	-0.181	0.96
4	999	1.31	-0.181	-0.479	-0.292	(1.61)
5	1027	1.47	-0.188	-0.542	-0.195	1.04
6	1051	1.57	-0.222	-0.229	-0.257	1.16
7	1068	1.64	-0.222	-0.208	-0.236	1.06
8	1081	1.49	-0.215	-0.125	-0.222	1.03
9	1087	1.49	-0.243	-0.146	-0.291	1.20
10	1088	1.44	-0.208	-0.083	-0.257	1.24
11	1083	1.59	-0.194	-0.104	-0.208	1.07
12	1072	1.52	-0.194	-0.104	-0.222	1.14
13	1055	1.42	-0.195	-0.187	-0.146	0.75
14	1033	1.30	-0.160	-0.208	-0.201	1.26
15	1005	1.15	-0.104	-0.167	-0.118	1.13
16	973	1.01	-0.125	-0.270	-0.097	0.78
17	935	0.88	-0.090	-0.000	-0.062	0.69
18	903	0.74	-0.111	-0.021	-0.090	0.81
19	887	0.61	-0.104	-0.000	-0.111	1.07
20	873	0.46	-0.118	-0.000	-0.069	(0.58)
(top)						
						average 1.02

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.4(b) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (fourth fuel, rod 2).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	$\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
(bottom)						
1	1056	0.98	-0.167	-0.188	-0.215	1.29
2	1127	1.31	-0.209	-0.104	-0.222	1.06
3	1193	1.56	-0.244	-0.125	-0.264	1.08
4	1251	1.79	-0.209	-0.313	-0.243	1.16
5	1302	1.99	-0.209	-0.333	-0.320	1.53
6	1343	2.13	-0.312	-0.229	-0.223	(0.71)
7	1375	2.22	-0.229	-0.209	-0.459	(2.00)
8	1396	2.29	-0.236	-0.209	-0.285	1.21
9	1407	2.29	-0.236	-0.188	-0.264	1.12
10	1407	2.24	-0.257	-0.208	-0.292	1.14
11	1396	2.15	-0.250	-0.271	-0.327	1.31
12	1375	2.06	-0.209	-0.291	-0.271	1.30
13	1343	1.92	-0.222	-0.292	-0.229	1.03
14	1302	1.76	-0.285	-0.292	-0.257	0.90
15	1252	1.56	-0.229	-0.250	-0.229	1.00
16	1193	1.37	-0.160	-0.104	-0.215	1.34
17	1127	1.19	-0.132	-0.000	-0.209	1.58
18	1071	1.01	-0.18	-0.229	-0.139	1.18
19	1045	0.82	-0.118	-0.063	-0.111	0.94
20	1022	0.82	-0.097	-0.187	-0.132	1.36
(top)						
						average 1.20

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.4(c) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (fourth fuel, rod 3).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	991	1.00	-0.139	-0.229	-0.153	1.10
2	1049	1.32	-0.188	-0.146	-0.257	1.37
3	1101	1.58	-0.334	-0.209	-0.299	0.90
4	1146	1.81	-0.264	-0.167	-0.209	0.79
5	1185	2.02	-0.251	-0.188	-0.160	(0.64)
6	1216	2.16	-0.291	-0.229	-0.341	1.17
7	1240	2.25	-0.291	-0.209	-0.313	1.08
8	1256	2.32	-0.264	-0.146	-0.264	1.00
9	1265	2.32	-0.208	-0.209	-0.271	1.30
10	1265	2.27	-0.236	-0.292	-0.236	1.00
11	1258	2.18	-0.234	-0.250	-0.181	0.77
12	1243	2.09	-0.250	-0.312	-0.291	1.16
13	1220	1.95	-0.209	-0.125	-0.320	1.53
14	1189	1.79	-0.195	-0.312	-0.167	0.86
15	1151	1.58	-0.202	-0.312	-0.250	1.24
16	1106	1.39	-0.160	-0.209	-0.216	1.35
17	1054	1.21	-0.069	-0.042	-0.139	(2.01)
18	1009	1.02	-0.222	-0.250	-0.209	0.94
19	987	0.84	-0.125	-0.125	-0.188	1.50
20	968	0.63	-0.069	-0.042	-0.160	(2.32)
(top)						
						average 1.12

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.5(a) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (fifth fuel, rod 1).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	880	1.18	-0.104	-0.334	-0.236	(2.07)
2	933	1.57	-0.146	-0.376	-0.278	1.90
3	973	1.87	-0.208	-0.458	-0.271	1.30
4	1019	2.15	-0.208	-0.645	-0.278	1.34
5	1055	2.39	-0.236	-0.686	-0.410	1.74
6	1076	2.56	-0.320	-0.645	-0.535	1.67
7	1098	2.67	-0.271	-0.375	-0.361	1.33
8	1135	2.75	-0.305	-0.562	-0.368	1.21
9	1136	2.75	-0.292	-0.521	-0.347	1.19
10	1130	2.70	-0.306	-0.562	-0.424	1.39
11	1110	2.59	-0.299	-0.354	-0.333	1.11
12	1106	2.48	-0.278	-0.500	-0.375	1.35
13	1103	2.31	-0.229	-0.312	-0.333	1.45
14	1089	2.12	-0.250	-0.479	-0.208	(0.83)
15	1069	1.87	-0.229	-0.479	-0.292	1.28
16	1050	1.65	-0.187	-0.333	-0.250	1.34
17	1026	1.43	-0.208	-0.291	-0.271	1.30
18	1003	1.21	-0.146	-0.478	-0.187	1.28
19	975	0.99	-0.097	-0.333	-0.194	(2.00)
20	953	0.74	-0.069	-0.271	-0.125	(1.81)
(top)						
						average 1.39

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).



Table A2.5(b) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (fifth fuel, rod 2).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	954	1.60	-0.174	-0.394	-0.195	1.12
2	1027	2.13	-0.243	-0.540	-0.313	1.29
3	1080	2.54	-0.347	-0.420	-0.361	1.04
4	1135	2.91	-0.354	-0.499	-0.465	1.31
5	1197	3.25	-0.417	-0.830	-0.438	1.05
6	1228	3.47	-0.424	-0.850	-0.437	1.03
7	1248	3.62	-0.472	-0.707	-0.437	1.00
8	1296	3.73	-0.431	-0.603	-0.501	1.16
9	1300	3.73	-0.389	-0.790	-0.466	1.20
10	1283	3.66	-0.417	-0.660	-0.438	1.05
11	1285	3.51	-0.424	-0.624	-0.486	1.15
12	1274	3.36	-0.320	-0.520	-0.444	1.39
13	1257	3.13	-0.382	-0.562	-0.424	1.11
14	1241	2.87	-0.347	-0.375	-0.410	1.18
15	1214	2.54	-0.306	-0.562	-0.347	1.13
16	1189	2.24	-0.264	-0.438	-0.389	1.47
17	1160	1.94	-0.222	-0.500	-0.250	1.13
18	1111	1.64	-0.188	-0.355	-0.236	1.26
19	1073	1.34	-0.167	-0.727	-0.264	1.58
20	1044	1.01	-0.139	-0.209	-0.174	1.25
(top)						
						average 1.20

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=25 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.5(c) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (fifth fuel, rod 3).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	$\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
(bottom)						
1	1001	1.63	-0.166	-0.395	-0.271	1.63
2	1053	2.16	-0.250	-0.521	-0.250	1.00
3	1109	2.58	-0.299	-0.438	-0.410	1.37
4	1167	2.96	-0.354	-0.563	-0.458	1.29
5	1224	3.30	-0.409	-0.708	-0.521	1.27
6	1260	3.52	-0.451	-0.771	-0.515	1.14
7	1299	3.68	-0.458	-0.750	-0.569	1.24
8	1357	3.79	-0.465	-0.624	-0.548	1.18
9	1361	3.79	-0.444	-0.667	-0.577	1.30
10	1333	3.71	-0.465	-0.729	-0.528	1.14
11	1310	3.56	-0.444	-0.625	-0.555	1.25
12	1312	3.41	-0.437	-0.625	-0.549	1.26
13	1297	3.18	-0.395	-0.500	-0.512	1.30
14	1286	2.92	-0.423	-0.521	-0.479	1.13
15	1235	2.58	-0.395	-0.521	-0.459	1.16
16	1208	2.27	-0.299	-0.459	-0.369	1.23
17	1175	1.97	-0.277	-0.478	-0.402	1.45
18	1131	1.67	-0.236	-0.354	-0.257	1.09
19	1092	1.36	-0.208	-0.146	-0.257	1.24
20	1062	1.02	-0.194	-0.375	-0.195	1.01
(top)						
						average 1.23

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.6 Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (sixth fuel).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	980	0.177	-0.037	-0.158	-0.070	1.89
2	1107	0.235	-0.032	-0.185	-0.062	1.94
3	1202	0.280	-0.070	-0.158	-0.090	1.29
4	1281	0.321	-0.074	-0.158	-0.111	1.50
5	1345	0.358	-0.094	-0.130	-0.222	2.29
6	1389	0.383	-0.088	-0.241	-0.104	1.18
7	1442	0.400	-0.083	-0.204	-0.111	1.34
8	1470	0.412	-0.102	-0.176	-0.104	1.02
9	1488	0.412	-0.083	-0.222	-0.187	2.25
10	1494	0.404	-0.060	-0.204	-0.201	3.35
11	1489	0.387	-0.088	-0.204	-0.132	1.50
12	1473	0.371	-0.107	-0.167	-0.125	1.17
13	1457	0.346	-0.116	-0.241	-0.160	1.38
14	1428	0.317	-0.056	-0.139	-0.035	0.63
15	1383	0.280	-0.079	-0.194	-0.111	1.41
16	1335	0.247	-0.074	-0.185	-0.097	1.31
17	1278	0.214	-0.056	-0.176	-0.063	1.13
18	1234	0.181	-0.051	-0.185	-0.181	3.55
19	1164	0.148	-0.028	-0.121	-0.076	2.71
20	1093	0.111	-0.046	-0.176	-0.014	0.30
(top)						average

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=36 mm) and inner diameter (d=36 mm).

Table A2.7(a) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (seventh fuel, rod 1).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	984	0.50	-0.125	-0.250	-0.195	1.56
2	1001	0.66	-0.167	-0.250	-0.195	1.17
3	1019	0.79	-0.167	0.0	-0.278	1.66
4	1063	0.91	-0.167	0.0	-0.222	1.33
5	1106	1.01	-0.125	0.0	-0.334	(2.67)
6	1142	1.08	-0.167	0.0	-0.250	1.50
7	1173	1.13	-0.208	0.0	-0.278	1.34
8	1198	1.16	-0.167	0.0	-0.195	1.17
9	1215	1.16	-0.167	-0.125	-0.278	1.66
10	1227	1.14	-0.208	-0.125	-0.250	1.20
11	1231	1.09	-0.208	-0.125	-0.250	1.20
12	1229	1.04	-0.167	-0.125	-0.278	1.66
13	1219	0.97	-0.125	-0.250	-0.278	(2.22)
14	1204	0.89	-0.167	0.0	-0.278	1.66
15	1181	0.79	-0.125	-0.250	-0.222	1.78
16	1153	0.70	-0.125	-0.250	-0.195	1.56
17	1118	0.60	-0.125	-0.250	-0.167	1.34
18	1079	0.51	-0.125	-0.125	-0.195	1.56
19	1034	0.42	-0.083	-0.249	-0.111	1.34
20	985	0.31	-0.124	-0.125	-0.083	(0.67)
(top)						
						average 1.45

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.7(b) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (seventh fuel, rod 2).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	1063	0.68	-0.125	-0.125	-0.195	1.56
2	1084	0.90	-0.125	-0.125	-0.195	1.56
3	1108	1.07	-0.167	-0.250	-0.278	1.66
4	1167	1.23	-0.208	-0.250	-0.250	1.20
5	1224	1.37	-0.250	-0.250	-0.278	1.11
6	1274	1.46	-0.250	-0.250	-0.278	1.11
7	1317	1.52	-0.292	-0.375	-0.361	1.24
8	1351	1.57	-0.292	-0.250	-0.306	1.05
9	1376	1.57	-0.250	-0.250	-0.333	1.33
10	1392	1.54	-0.250	-0.375	-0.333	1.33
11	1399	1.48	-0.250	-0.374	-0.334	1.34
12	1396	1.41	-0.250	-0.375	-0.361	1.44
13	1384	1.32	-0.250	-0.250	-0.361	1.44
14	1362	1.21	-0.250	-0.250	-0.361	1.44
15	1332	1.07	-0.208	-0.250	-0.195	0.94
16	1293	0.94	-0.167	-0.375	-0.222	1.33
17	1247	0.82	-0.125	-0.375	-0.222	1.78
18	1193	0.69	-0.166	-0.125	-0.195	1.17
19	1133	0.57	-0.125	-0.0	-0.139	1.11
20	1068	0.42	-0.083	-0.125	-0.111	1.34
(top)						
						average 1.32

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.7(c) Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (seventh fuel, rod 3).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	1060	0.69	-0.083	-0.250	-0.139	(1.67)
2	1081	0.91	-0.166	-0.250	-0.167	1.01
3	1104	1.09	-0.208	-0.374	-0.167	0.80
4	1161	1.25	-0.250	-0.250	-0.223	0.89
5	1215	1.39	-0.250	-0.125	-0.222	0.89
6	1263	1.49	-0.250	-0.374	-0.305	1.22
7	1302	1.55	-0.291	-0.250	-0.305	1.05
8	1333	1.60	-0.250	-0.250	-0.361	1.44
9	1358	1.60	-0.291	-0.250	-0.333	1.14
10	1371	1.57	-0.291	-0.374	-0.277	0.95
11	1377	1.50	-0.250	-0.374	-0.194	0.78
12	1374	1.44	-0.250	-0.374	-0.250	1.00
13	1364	1.34	-0.250	-0.374	-0.333	1.33
14	1343	1.23	-0.250	-0.374	-0.195	0.78
15	1315	1.09	-0.250	-0.250	-0.139	(0.56)
16	1279	0.96	-0.166	-0.250	-0.222	1.34
17	1235	0.83	-0.125	-0.374	-0.250	(2.00)
18	1184	0.70	-0.125	-0.250	-0.111	0.89
19	1127	0.58	-0.083	-0.374	-0.083	1.00
20	1064	0.43	-0.083	-0.250	-0.028	(0.34)
(top)						
						average 1.03

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=24 mm) and inner diameter (d=8 mm).

Table A2.8 Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (eighth fuel).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/D }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	940	0.52	-0.084	-0.222	-0.222	2.64
2	963	0.68	-0.139	-0.222	-0.222	1.60
3	990	0.82	-0.111	-0.277	-0.277	2.50
4	1052	0.94	-0.111	-0.333	-0.333	3.00
5	1124	1.04	-0.195	-0.278	-0.278	1.43
6	1188	1.12	-0.223	-0.388	-0.388	1.74
7	1245	1.16	-0.167	-0.278	-0.278	1.66
8	1292	1.20	-0.167	-0.278	-0.278	1.66
9	1330	1.20	-0.195	-0.277	-0.277	1.42
10	1358	1.18	-0.195	-0.277	-0.277	1.42
11	1376	1.13	-0.167	-0.389	-0.389	2.33
12	1384	1.08	-0.195	-0.333	-0.333	1.71
13	1382	1.01	-0.167	-0.333	-0.333	1.99
14	1370	0.92	-0.167	-0.278	-0.278	1.66
15	1348	0.82	-0.139	-0.277	-0.277	1.99
16	1316	0.72	-0.111	-0.222	-0.222	2.00
17	1274	0.62	-0.111	-0.222	-0.222	2.00
18	1223	0.53	-0.056	-0.277	-0.277	4.95
19	1164	0.43	-0.085	-0.167	-0.167	1.96
20	1097	0.32	-0.083	-0.055	-0.055	0.66
(top)						average

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=36 mm) and inner diameter (d=18 mm).

Table A2.9 Data on irradiation-induced dimensional change of OGL-1 fuel compacts (ninth fuel).

Compact Number	Temp. <sup>*1</sup> (°C)	Fast neutron fluence ( $10^{24}$ n/m <sup>2</sup> ) (E>0.18MeV)	Dimensional change (%)			Anisotropy $\frac{ \Delta L/L }{ \Delta D/L }$
			O.D. ( $\Delta D/D$ )	I.D. ( $\Delta d/d$ )	Length ( $\Delta L/L$ )	
(bottom)						
1	1104	1.22	-0.139	-0.33	-0.250	(1.80)
2	1168	1.62	-0.250	-0.44	-0.306	1.22
3	1225	1.93	-0.333	-0.44	-0.362	1.09
4	1273	2.22	-0.389	-0.50	-0.473	1.22
5	1313	2.47	-0.416	-0.61	-0.473	1.14
6	1344	2.64	-0.444	-0.61	-0.473	1.07
7	1366	2.75	-0.500	-0.61	-0.473	0.95
8	1378	2.84	-0.444	-0.61	-0.500	1.13
9	1381	2.84	-0.472	-0.61	-0.556	1.18
10	1374	2.78	-0.444	-0.61	-0.500	1.13
11	1358	2.67	-0.444	-0.55	-0.445	1.00
12	1333	2.56	-0.416	-0.55	-0.445	1.07
13	1298	2.39	-0.444	-0.61	-0.445	1.00
14	1255	2.19	-0.361	-0.55	-0.444	1.23
15	1202	1.93	-0.361	-0.55	-0.417	1.16
16	1148	1.70	-0.305	-0.39	-0.417	1.37
17	1072	1.48	-0.305	-0.39	-0.333	1.09
18	1008	1.25	-0.250	-0.39	-0.278	1.11
19	981	1.02	-0.194	-0.33	-0.306	(1.58)
20	958	0.77	-0.111	-0.28	-0.278	(2.50)
(top)						average 1.13

\*1 Time-averaged temperature of fuel compact.

\*2 Outer diameter (D=36 mm) and inner diameter (d=18 mm).



### 付録3 燃料コンパクトの照射条件および寸法変化 のプロット

以下の図は付録1にまとめた平均照射温度，照射寸法変化等を燃料棒軸方向の燃料コンパクト番号に対してプロットしたものである。

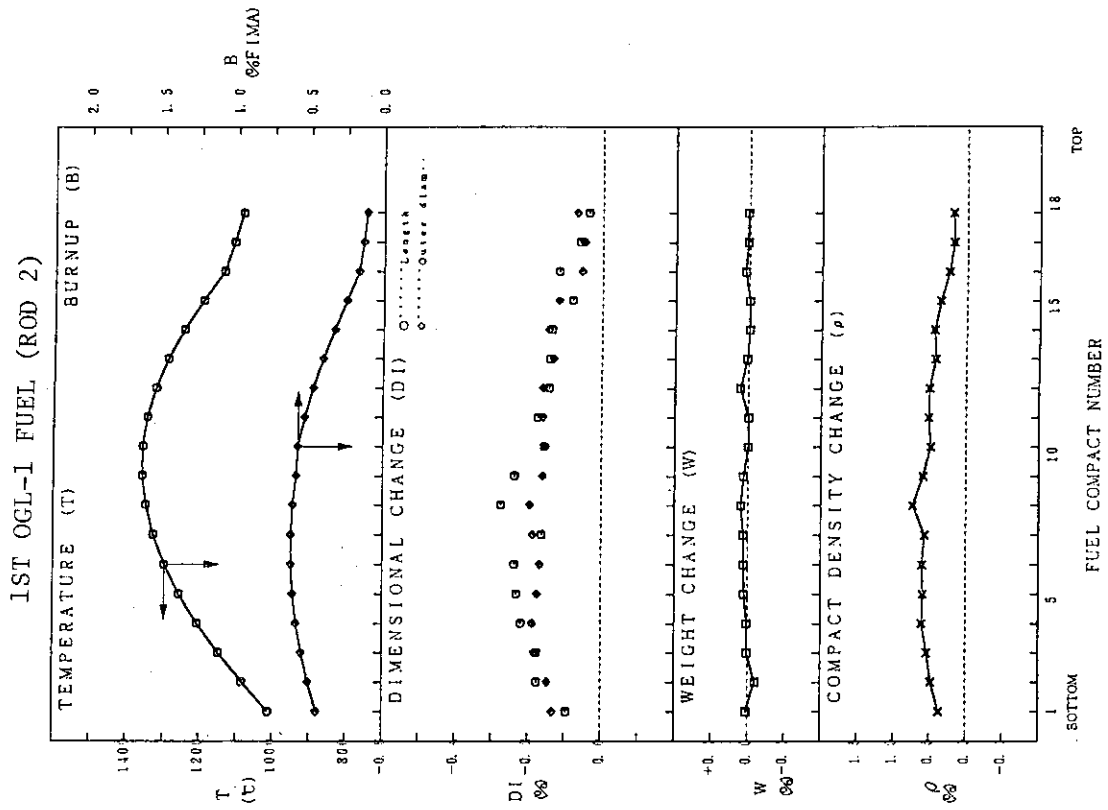


Fig. A3.1(b) Property changes of 1st OGL-1 fuel compacts (rod 2).

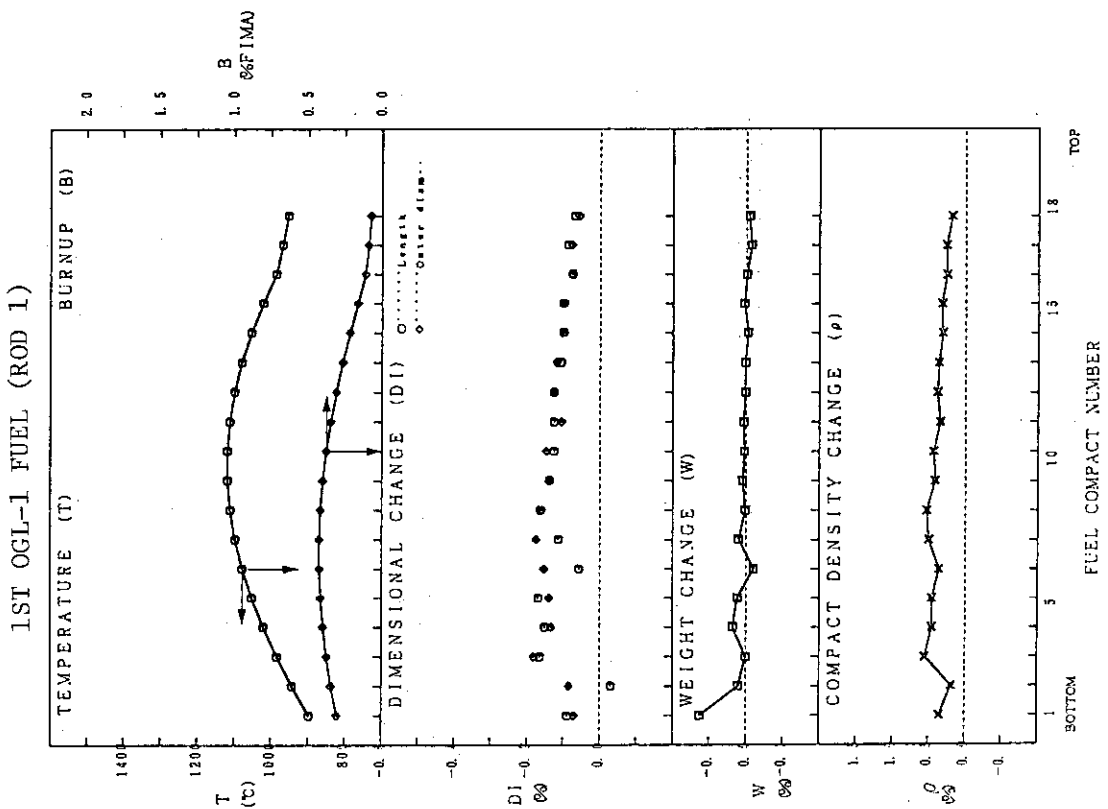


Fig. A3.1(a) Property changes of 1st OGL-1 fuel compacts (rod 1).

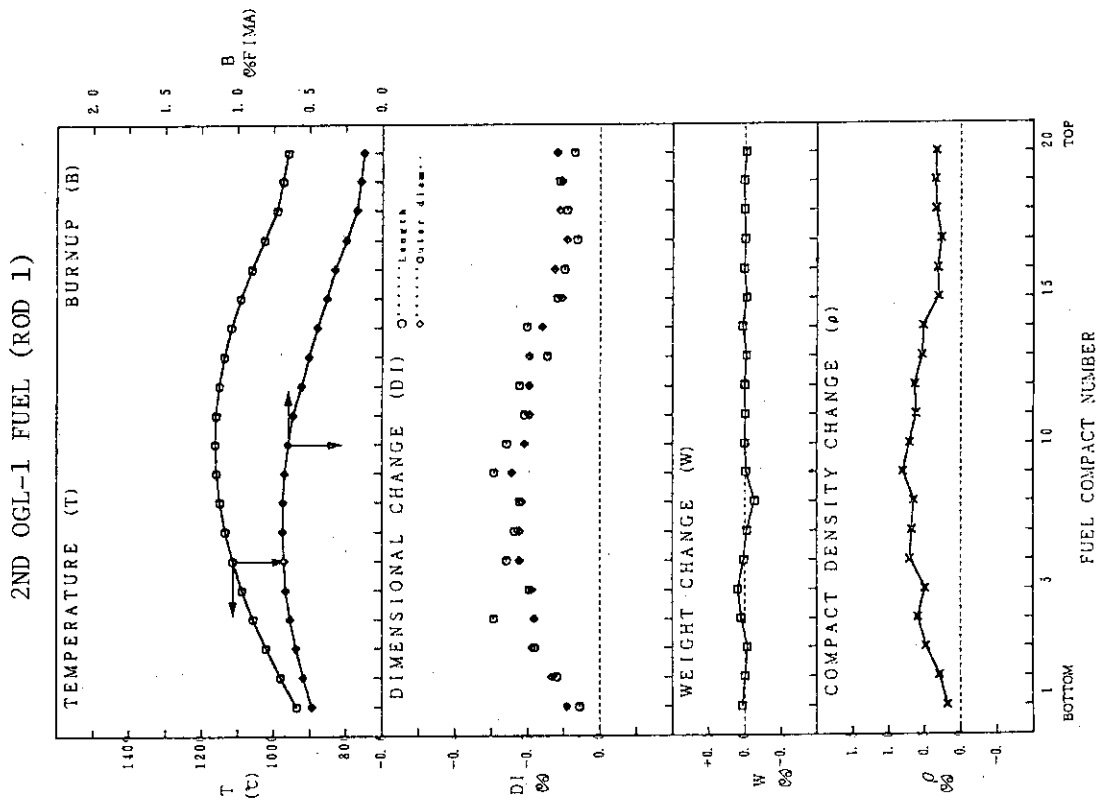


Fig. A3.2(a) Property changes of 2nd OGL-1 fuel compacts (rod 1).

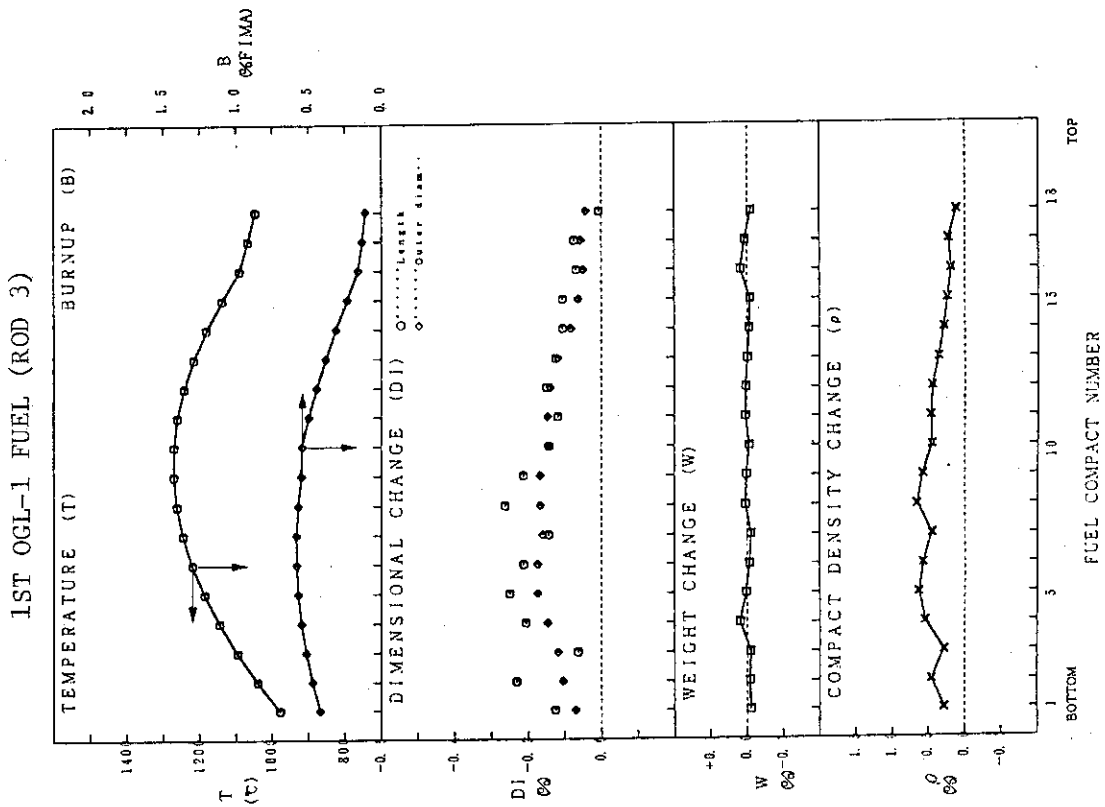


Fig. A3.1(c) Property changes of 1st OGL-1 fuel compacts (rod 3).

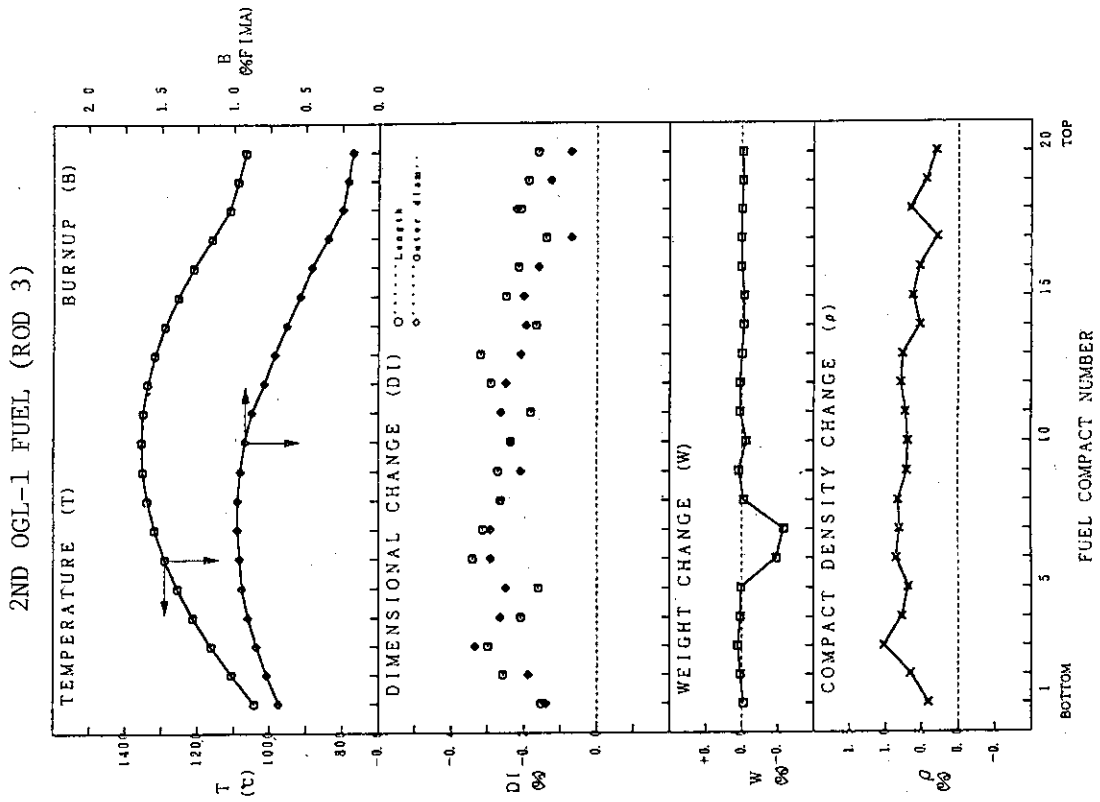


Fig. A3.2(c) Property changes of 2nd OGL-1 fuel compacts (rod 3).

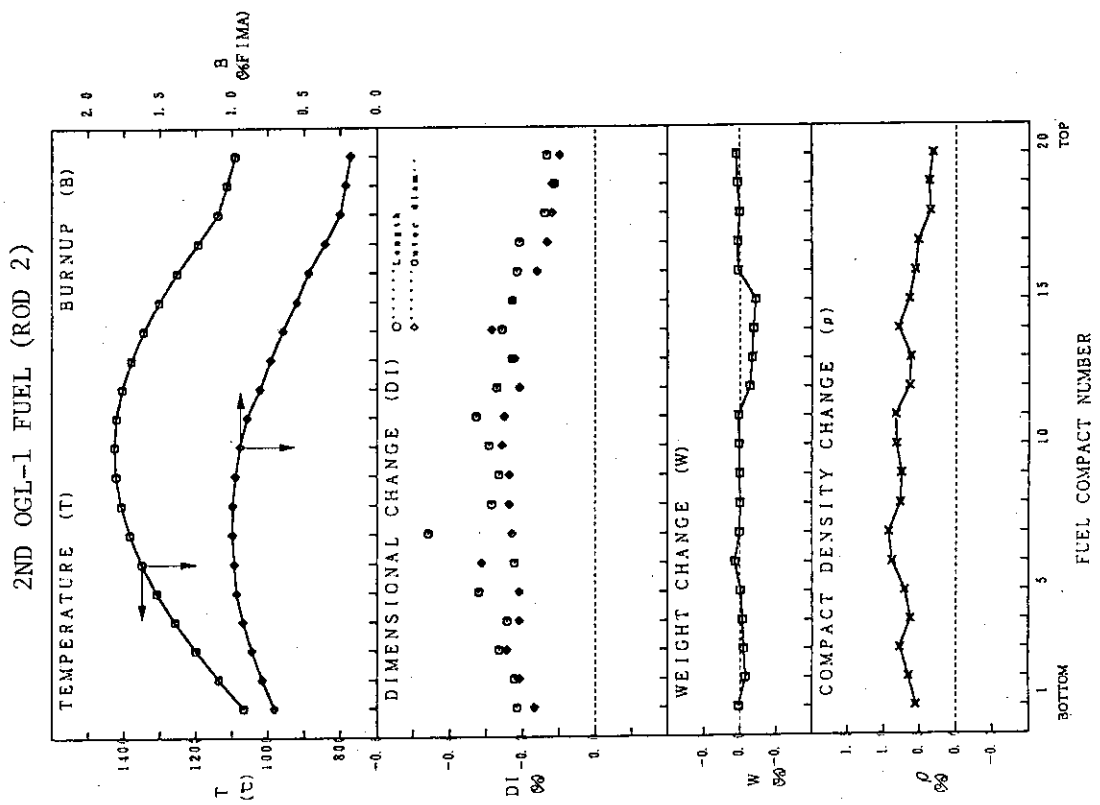


Fig. A3.2(b) Property changes of 2nd OGL-1 fuel compacts (rod 2).

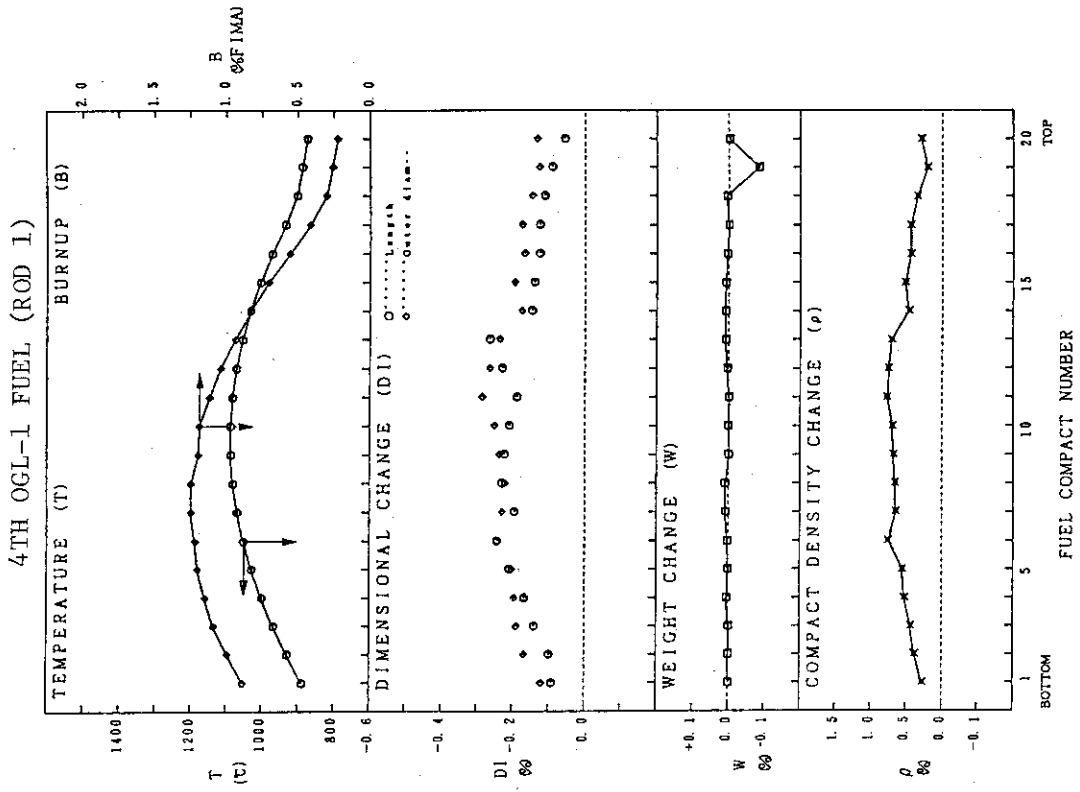


Fig. A3.4(a) Property changes of 4th OGL-1 fuel compacts (rod 1).

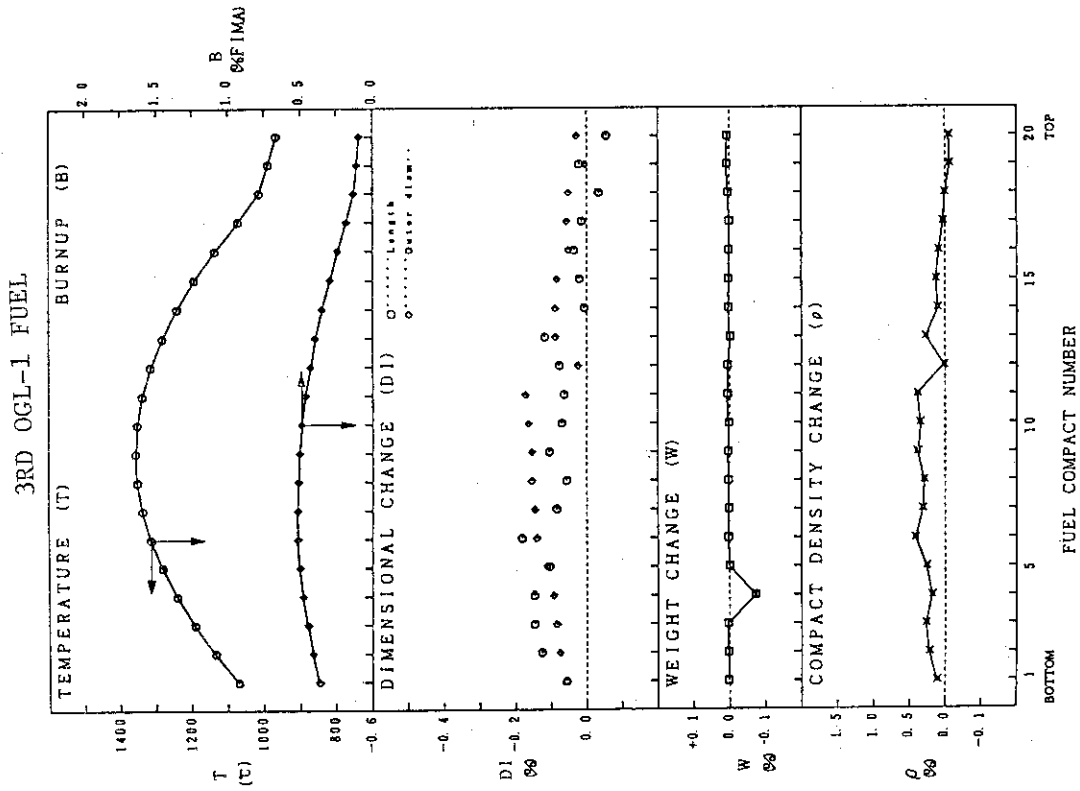


Fig. A3.3 Property changes of 3rd OGL-1 fuel compacts.

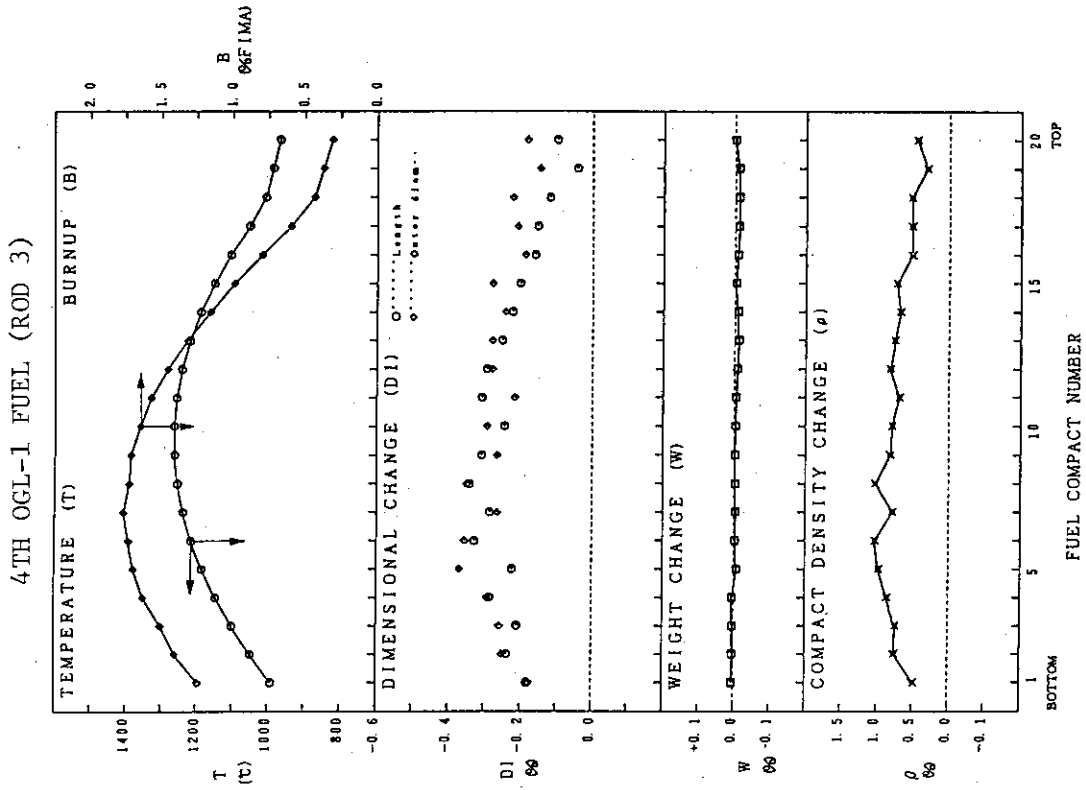


Fig. A3.4(c) Property changes of 4th OGL-1 fuel compacts (rod 3).

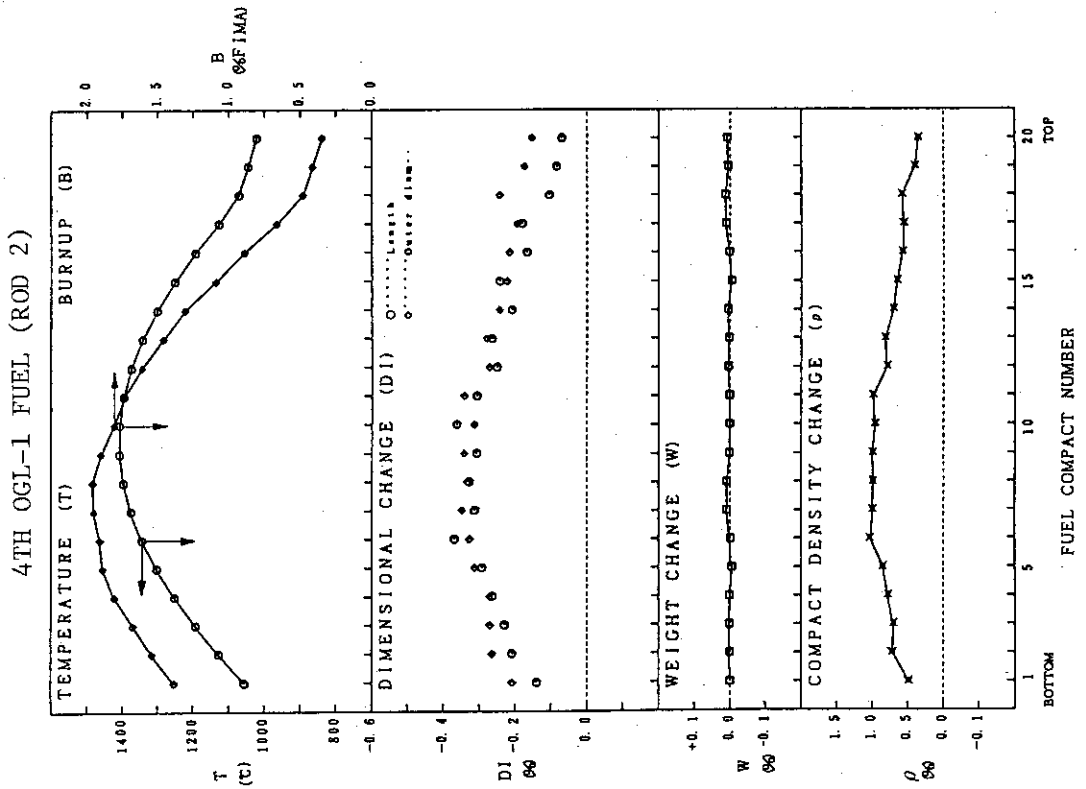


Fig. A3.4(b) Property changes of 4th OGL-1 fuel compacts (rod 2).

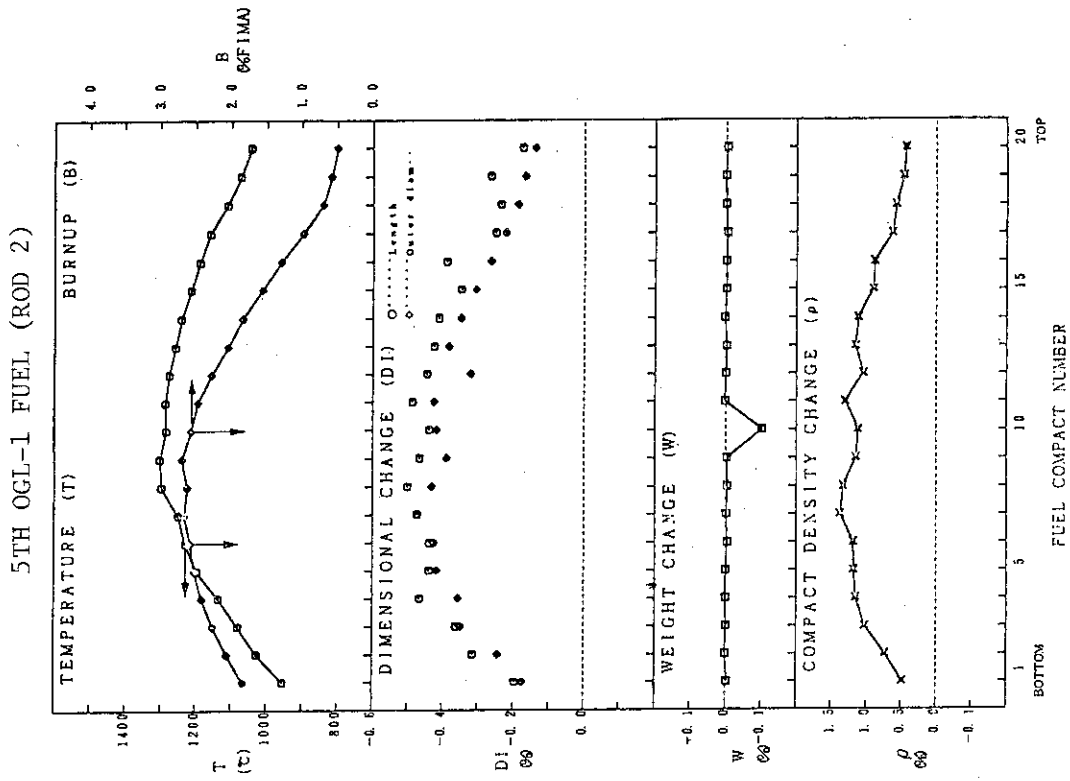


Fig. A3.5(b) Property changes of 5th OGL-1 fuel compacts (rod 2).

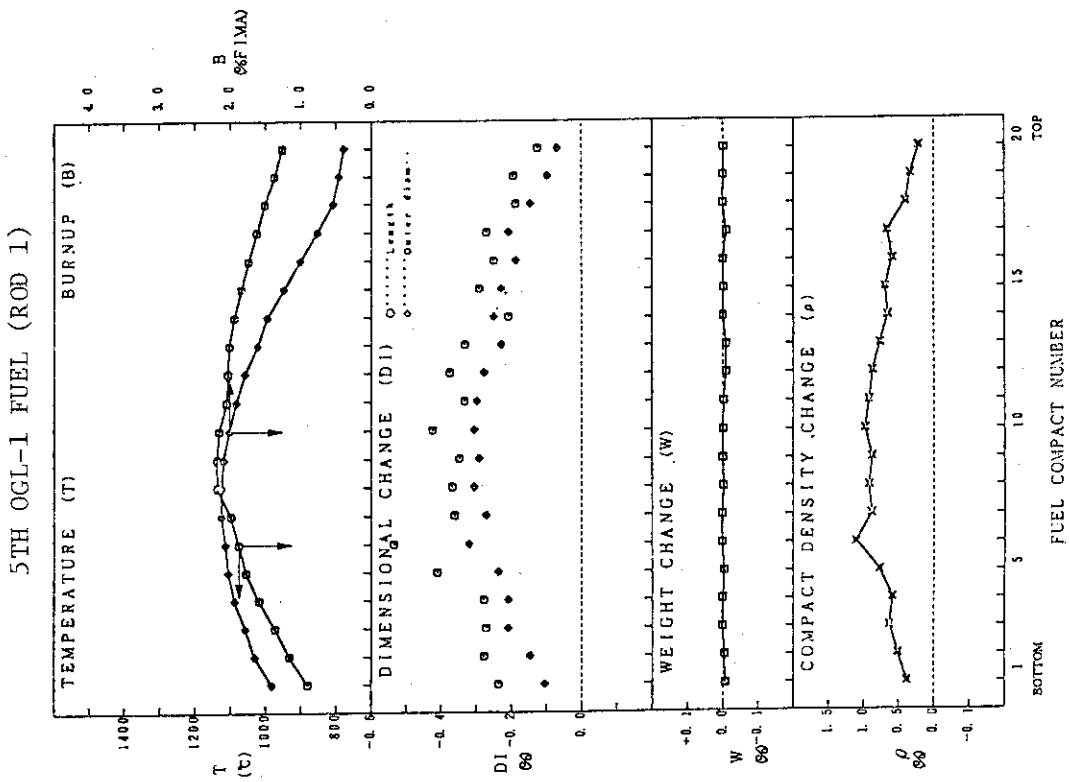


Fig. A3.5(a) Property changes of 5th OGL-1 fuel compacts (rod 1).

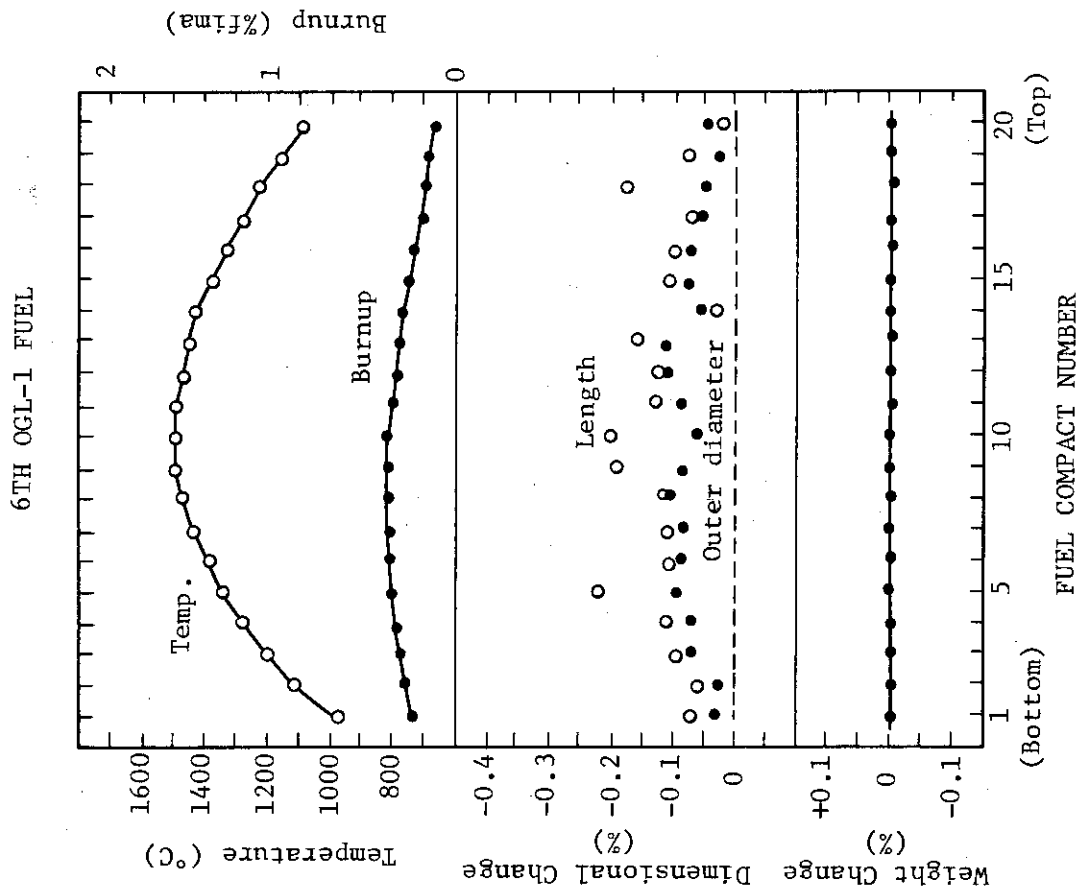


Fig. A3.6 Property changes of 6th OGL-1 fuel compacts.

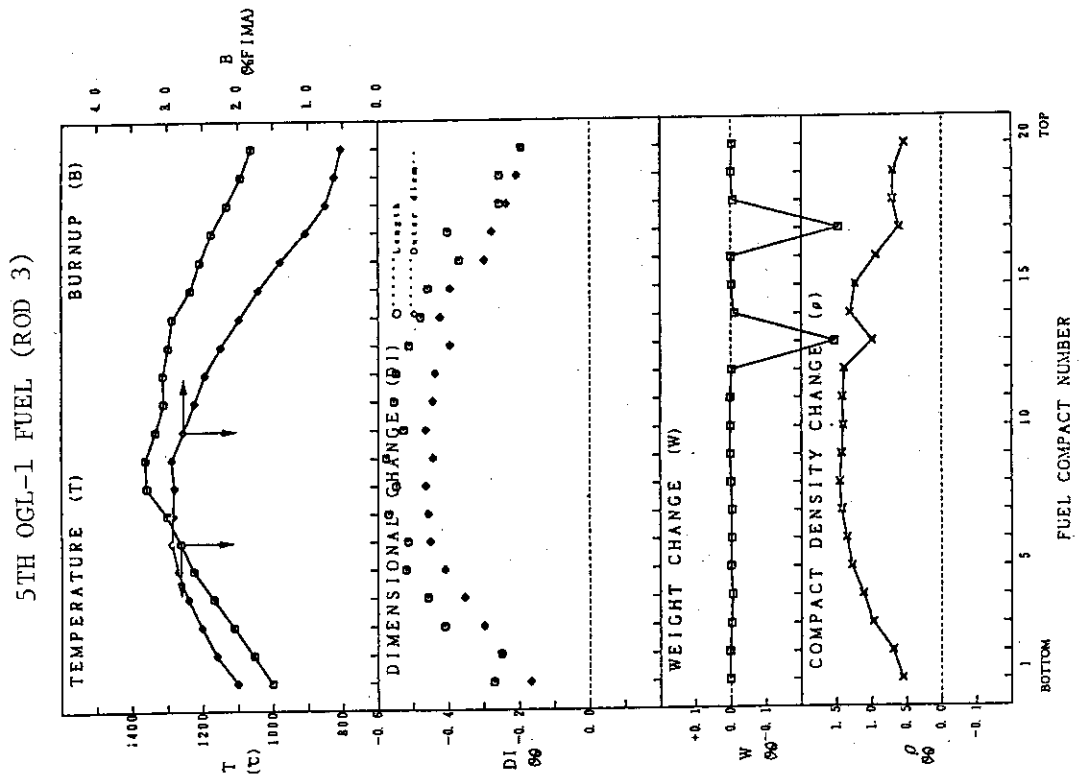


Fig. A3.5(c) Property changes of 5th OGL-1 fuel compacts (rod 3).



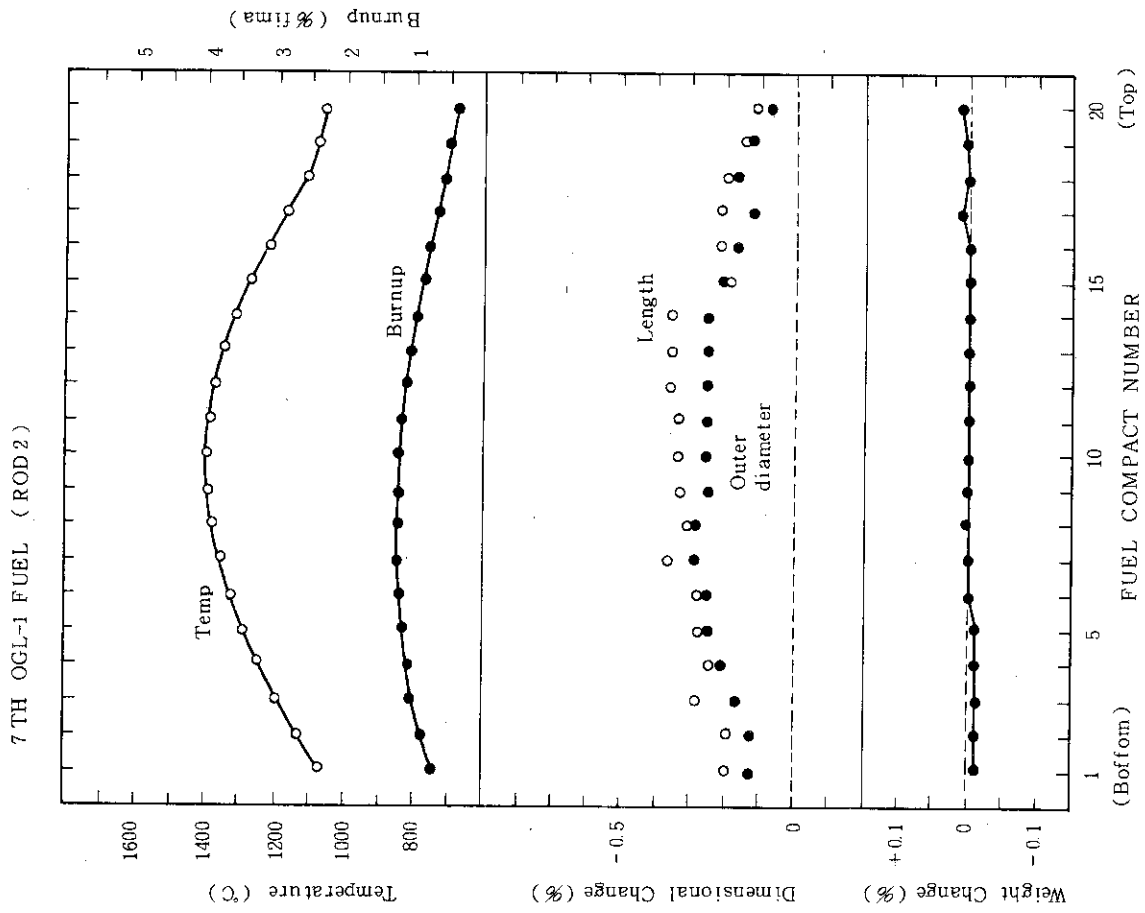


Fig. A3.7(b) Property changes of 7th OGL-1 fuel compacts (rod 2).

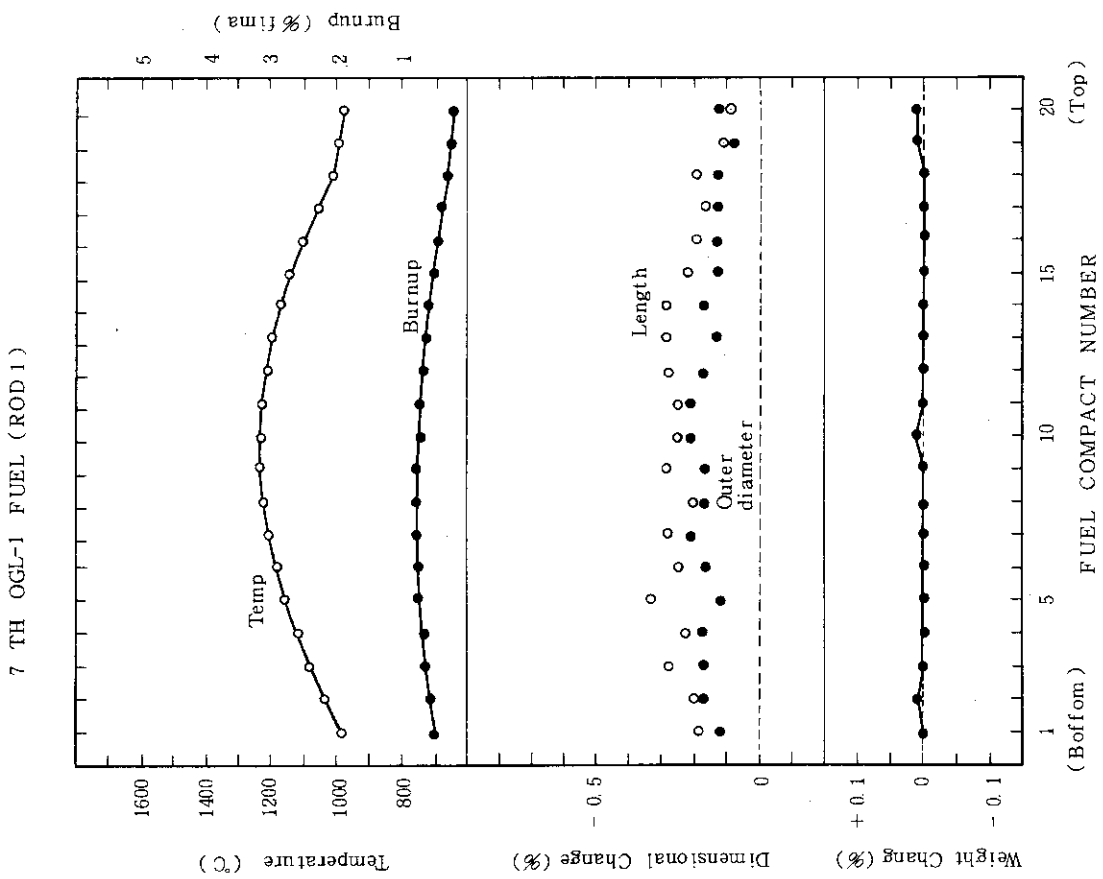


Fig. A3.7(a) Property changes of 7th OGL-1 fuel compacts (rod 1).

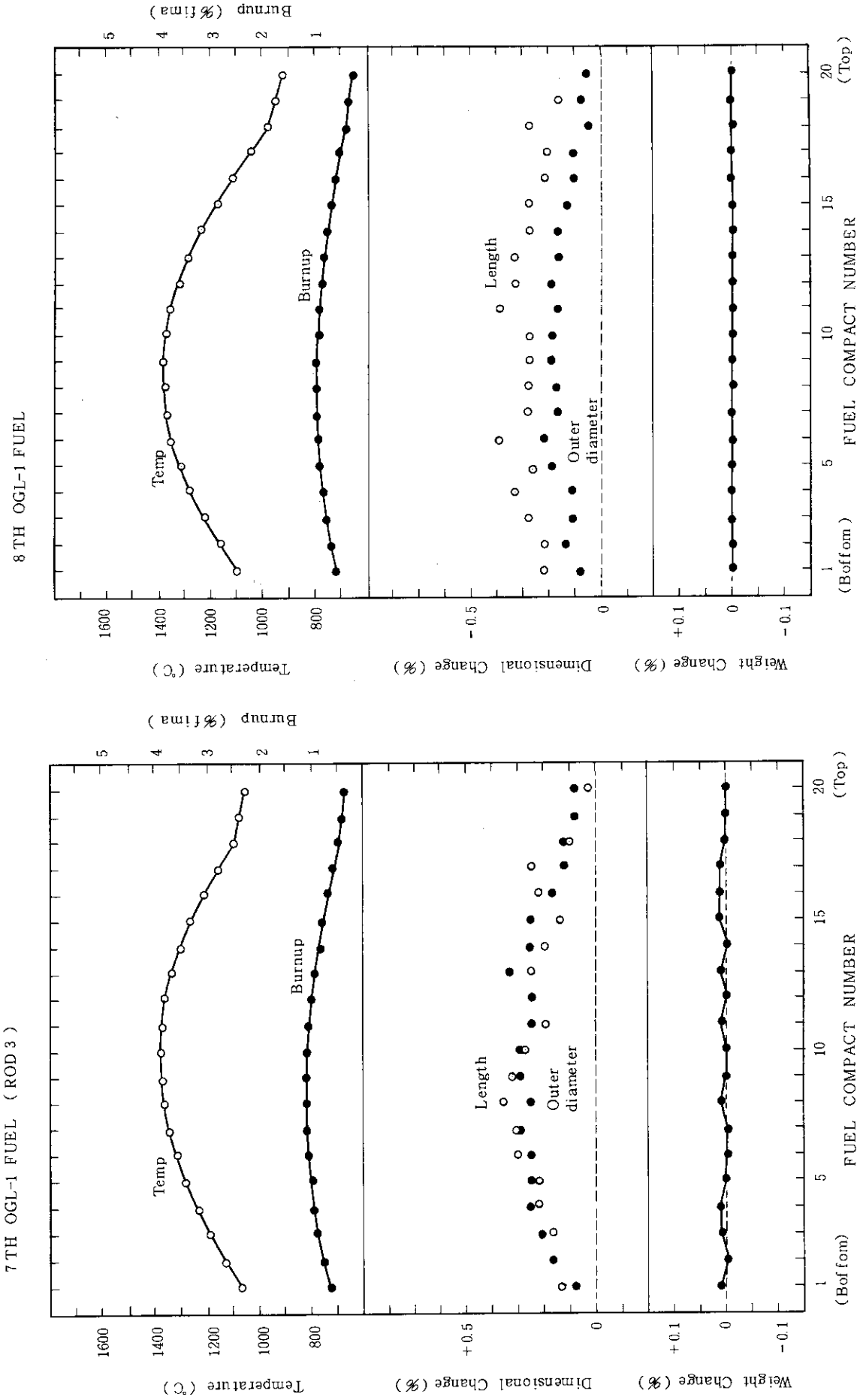


Fig. A3.8 Property changes of 8th OGL-1 fuel compacts.

Fig. A3.7(c) Property changes of 7th OGL-1 fuel compacts (rod 3).

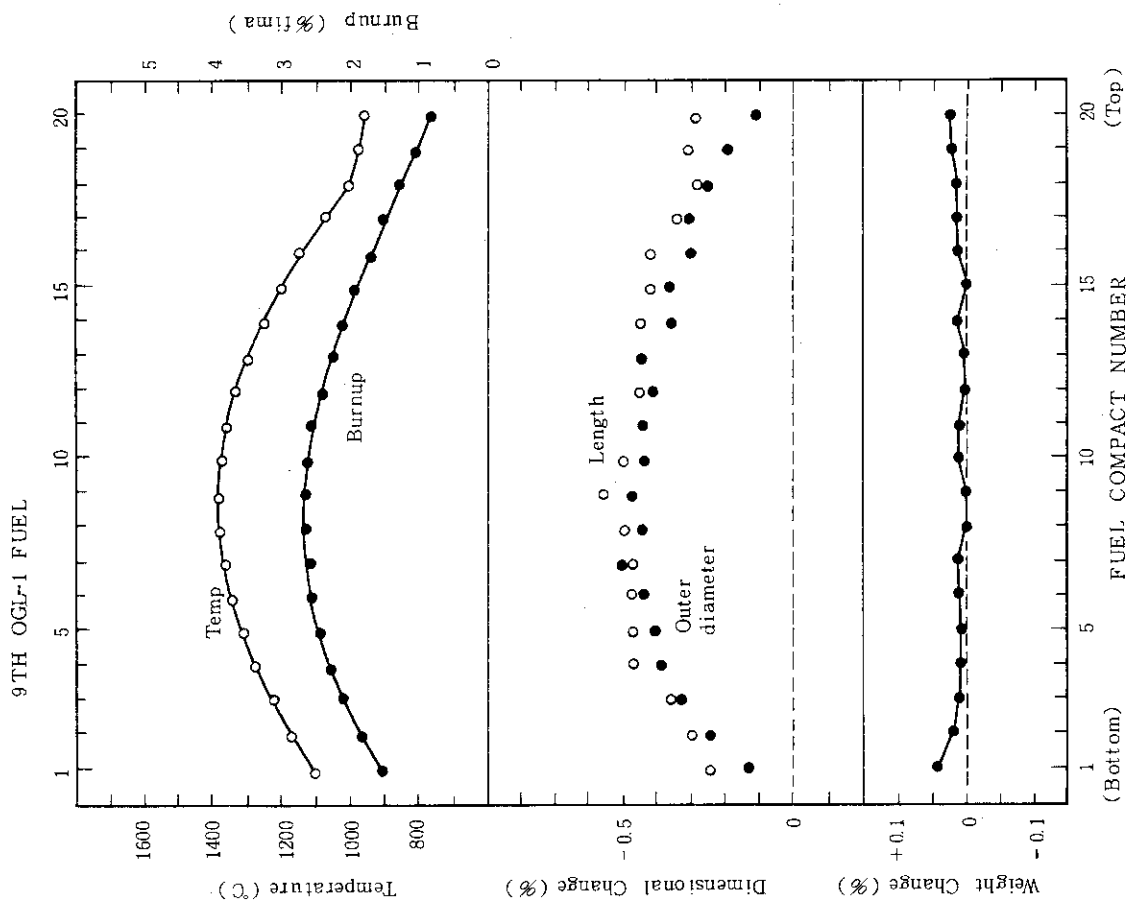


Fig. A3.9 Property changes of 9th OGL-1 fuel compacts.

## 付録4 燃料コンパクトの外径変化率と高速中性子照射量の関係

以下の図においては、燃料コンパクトごとに高速中性子照射量 ( $E > 0.18 \text{ MeV}$ ) に対して外径変化率 ( $\Delta D/D$ ) を%で表示してプロットしている。

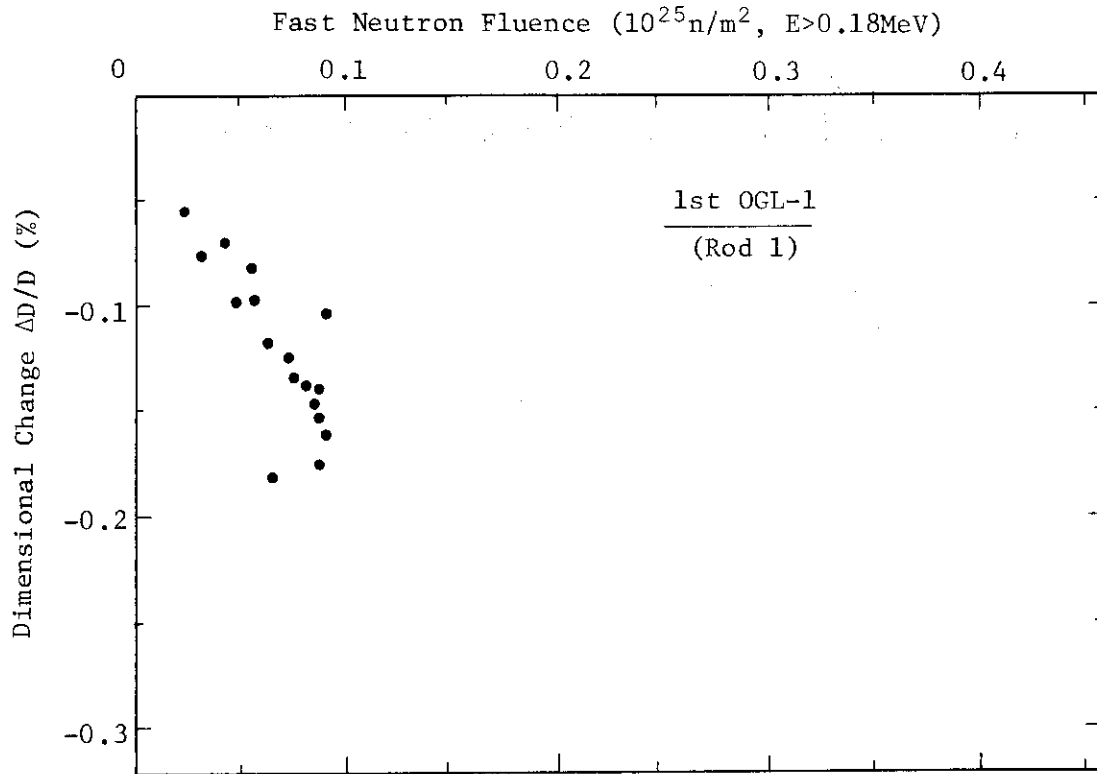


Fig. A4.1(a) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 1st OGL-1 fuel assembly (rod 1).

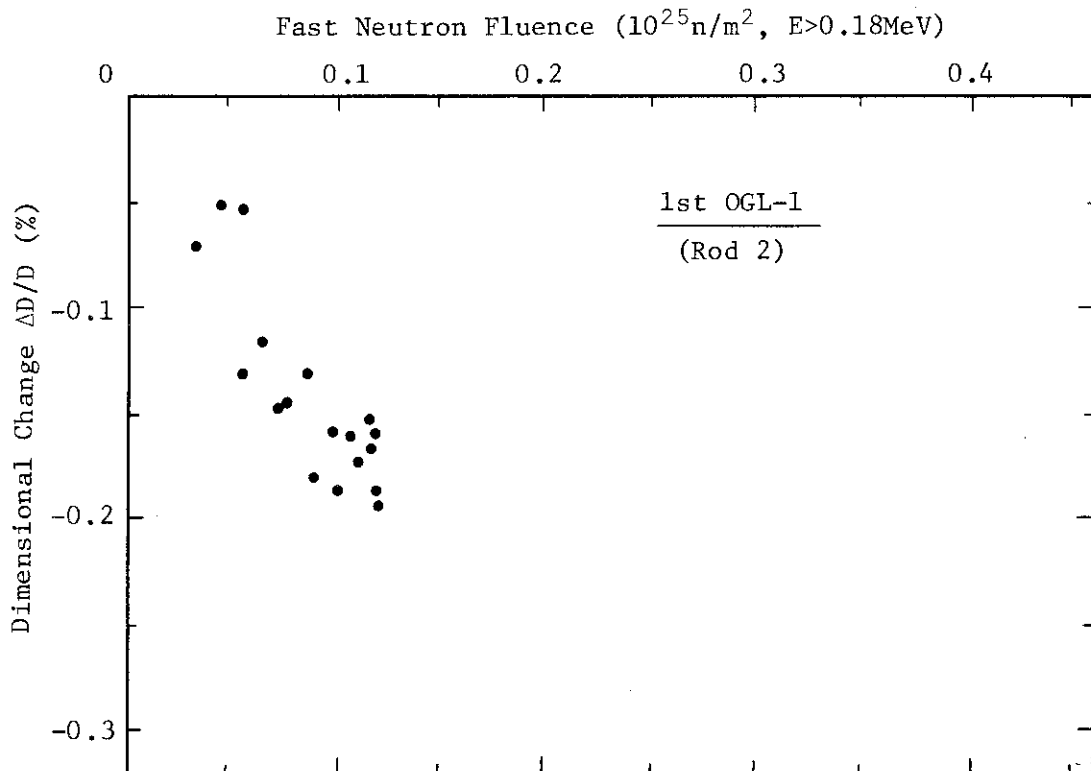


Fig. A4.1(b) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 1st OGL-1 fuel assembly (rod 2).

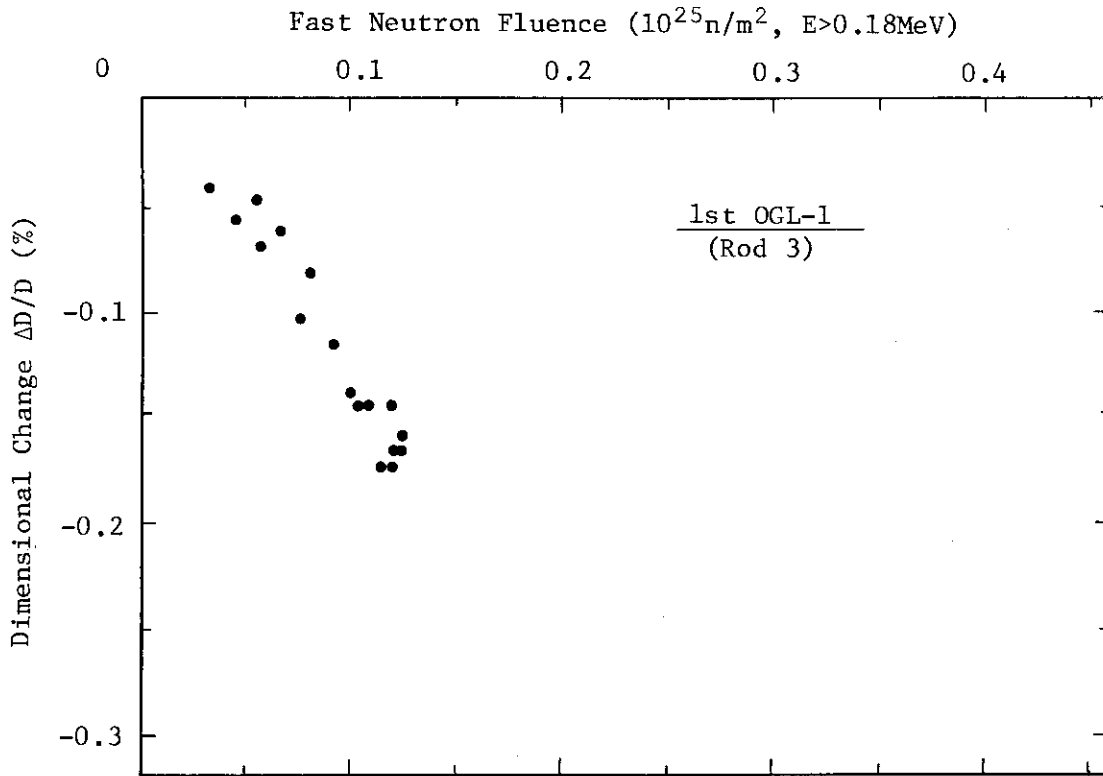


Fig. A4.1(c) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 1st OGL-1 fuel assembly (rod 3).

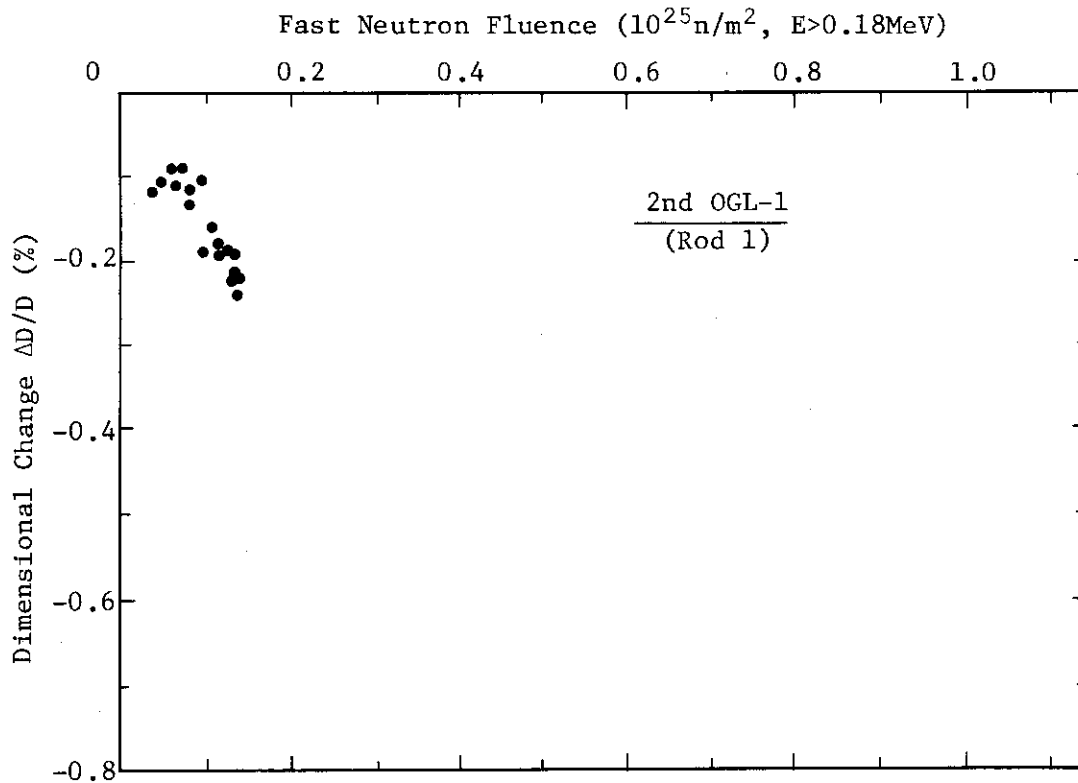


Fig. A4.2(a) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 2nd OGL-1 fuel assembly (rod 1).

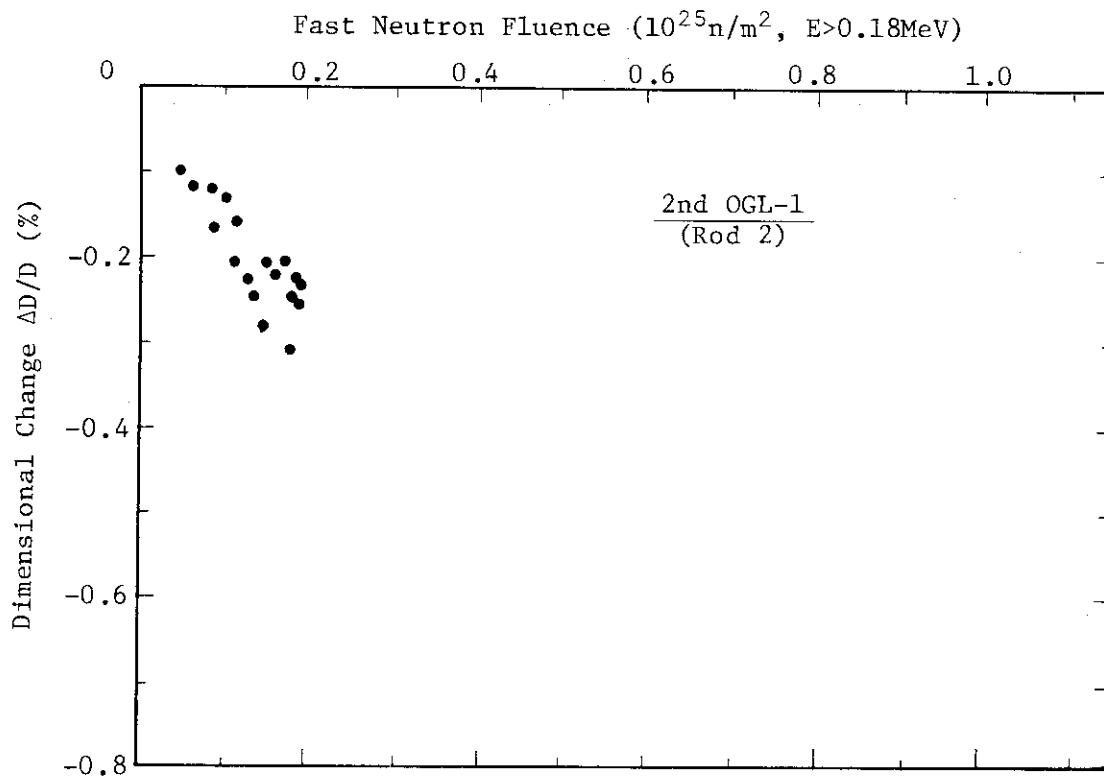


Fig. A4.2(b) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 2nd OGL-1 fuel assembly (rod 2).

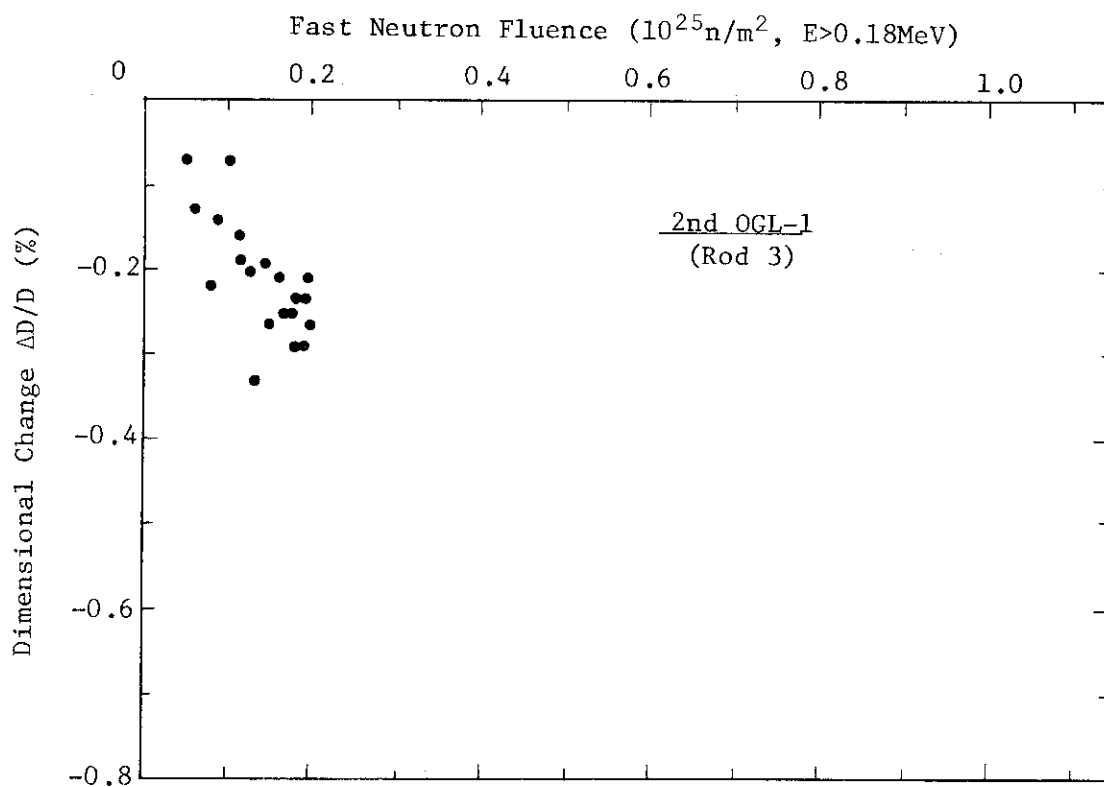


Fig. A4.2(c) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 2nd OGL-1 fuel assembly (rod 3).

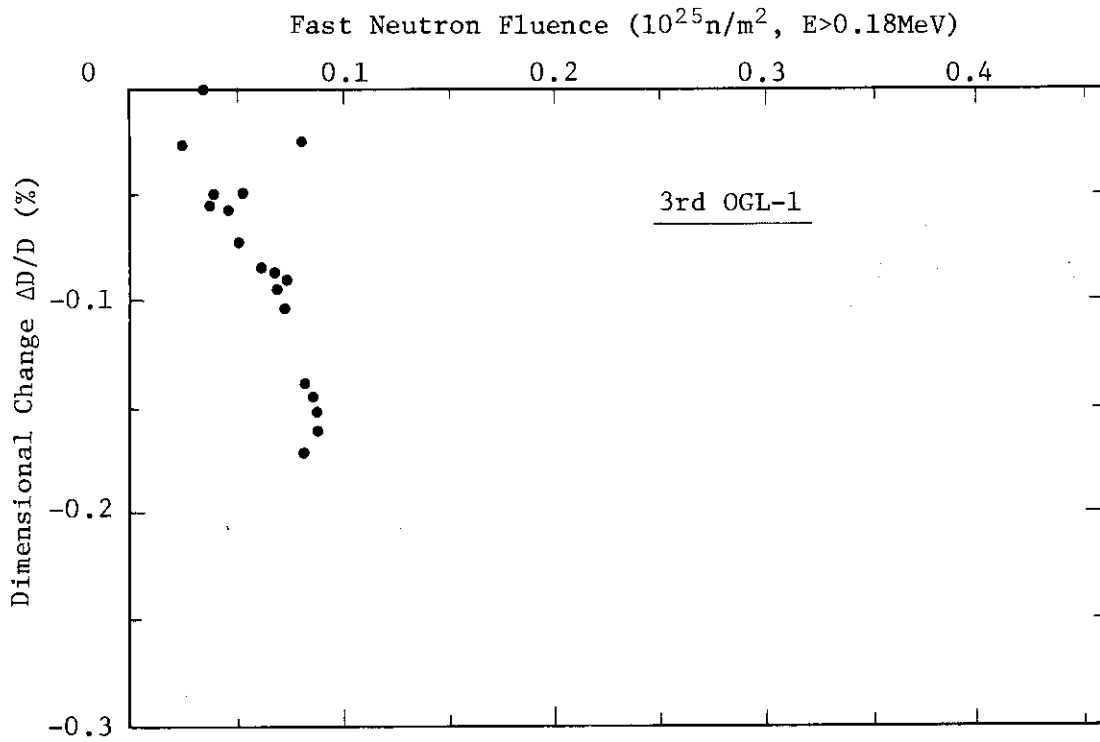


Fig. A4.3 Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 3rd OGL-1 fuel assembly.

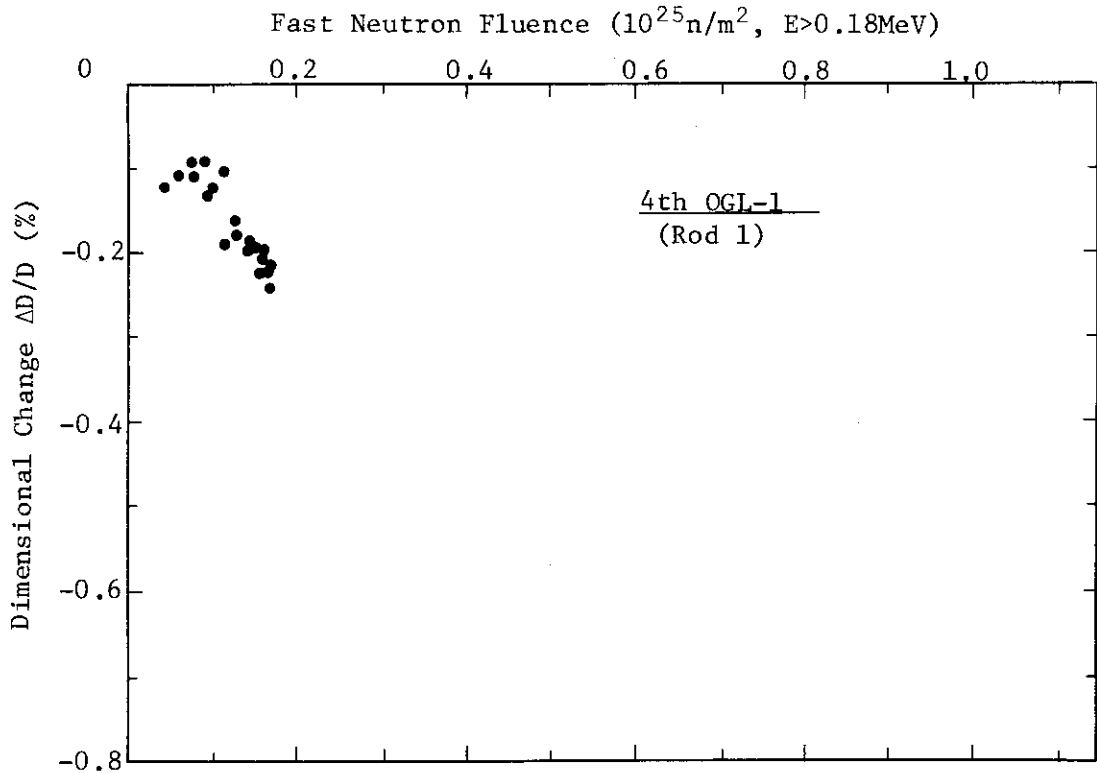


Fig. A4.4(a) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 4th OGL-1 fuel assembly (rod 1).



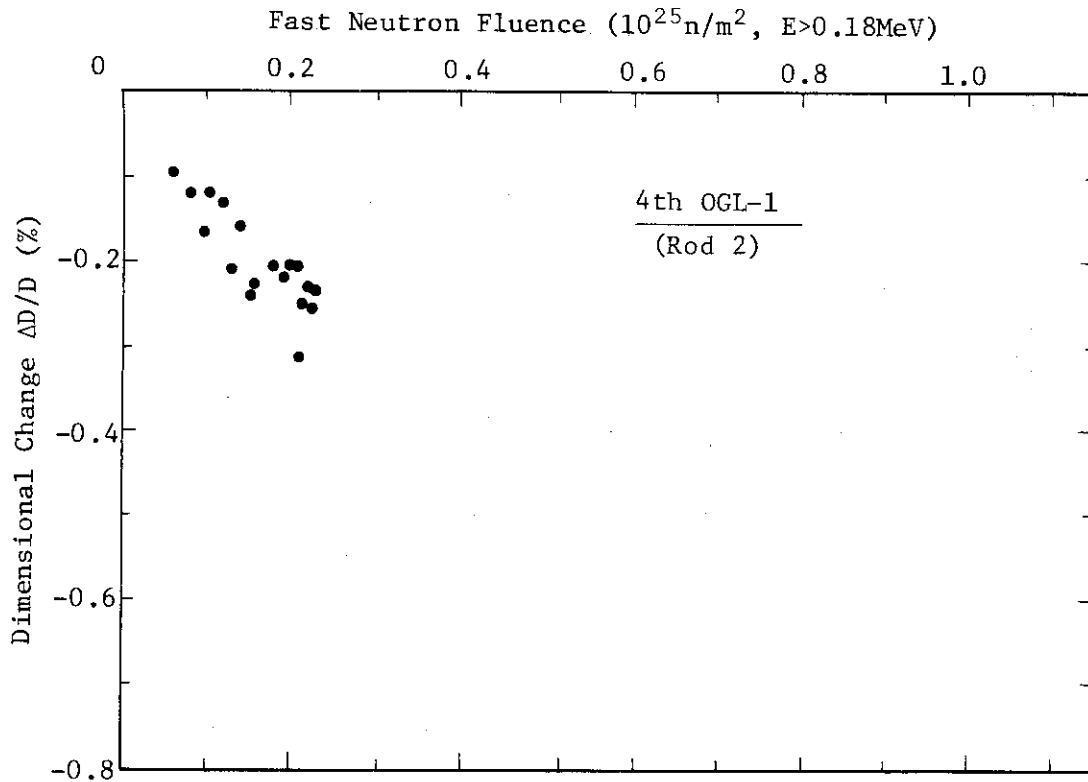


Fig. A4.4(b) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 4th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

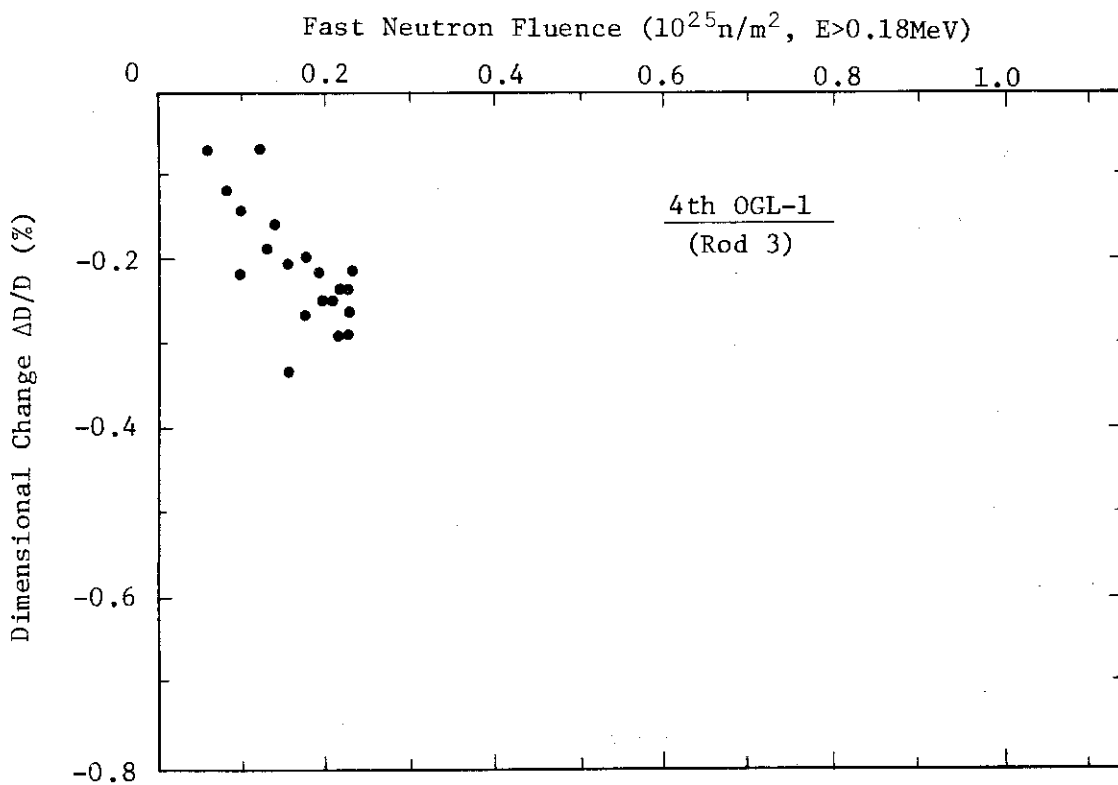


Fig. A4.4(c) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 4th OGL-1 fuel assembly (rod 3)

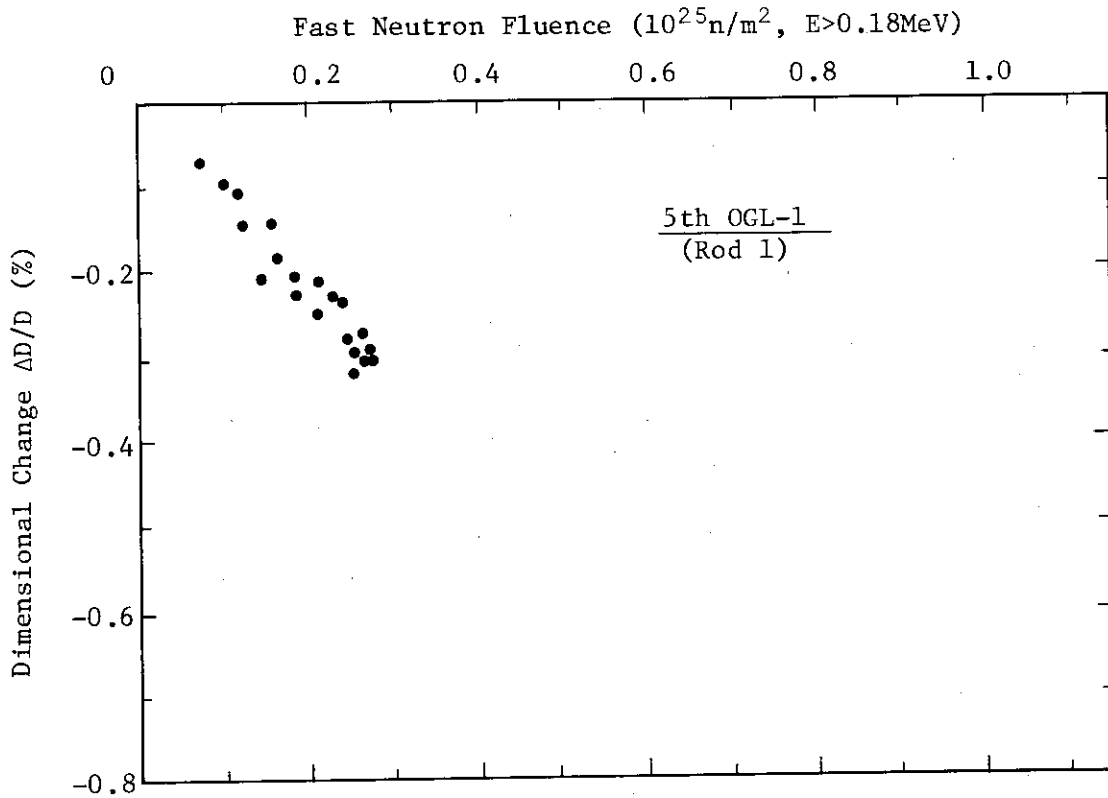


Fig. A4.5(a) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 5th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

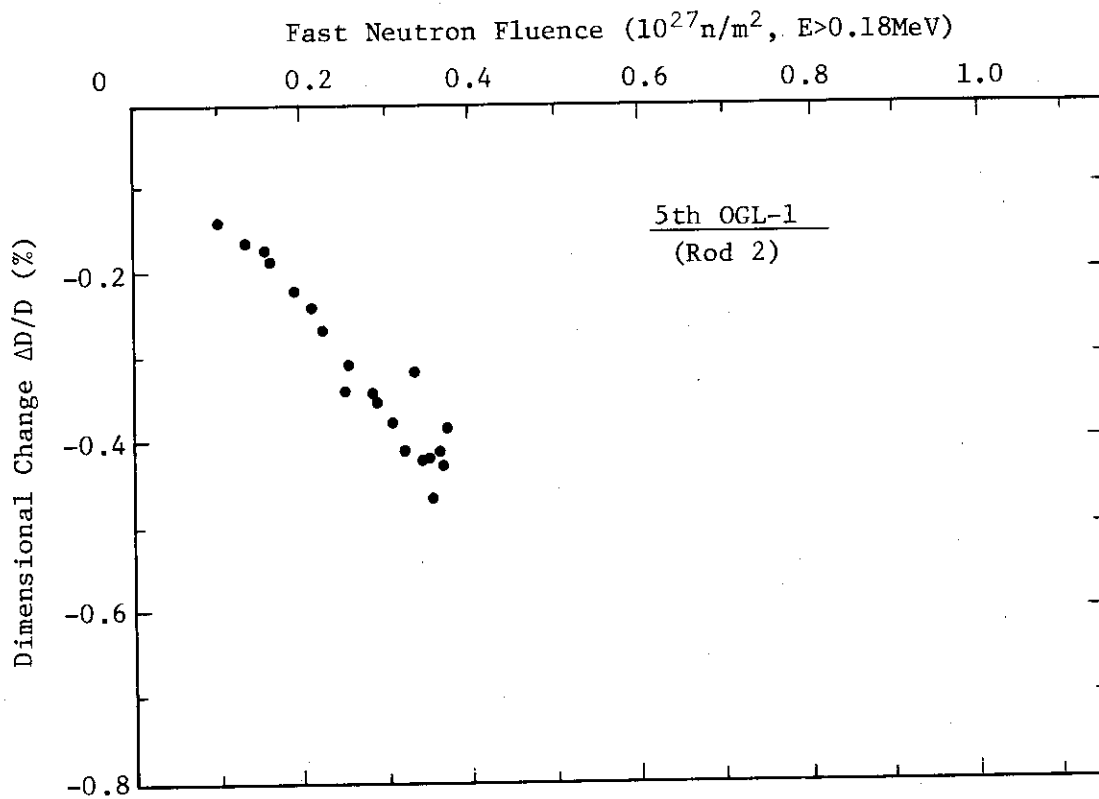


Fig. A4.5(b) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 5th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

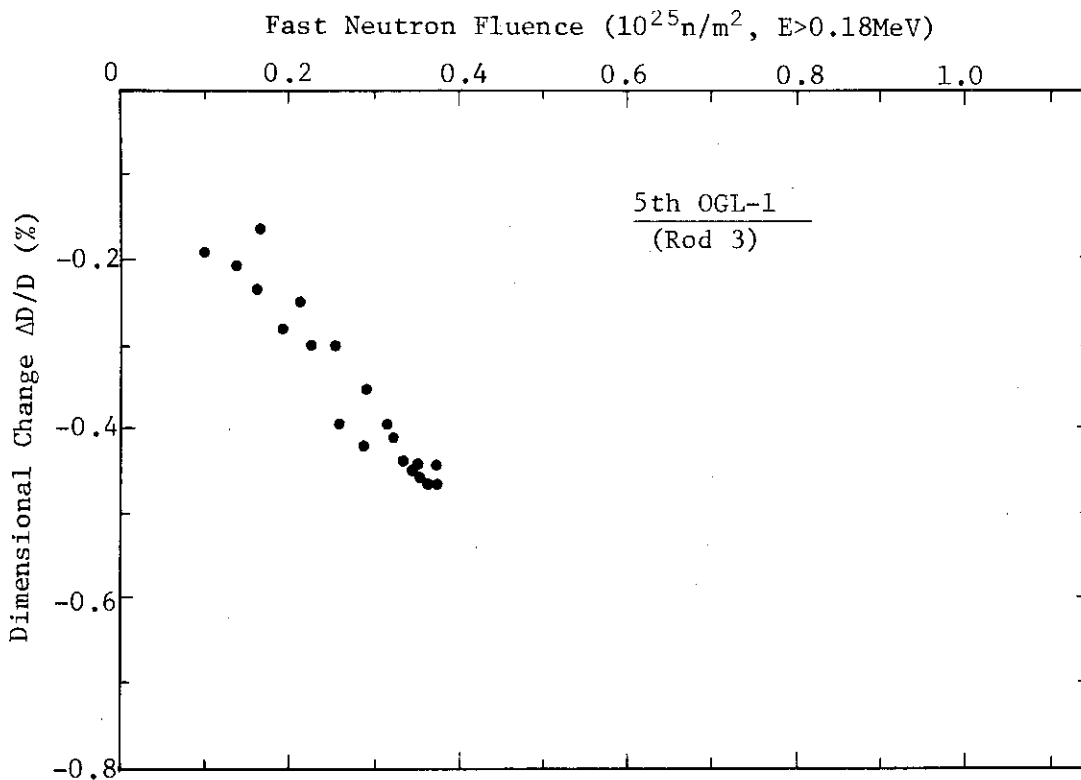


Fig. A4.5(c) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 5th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

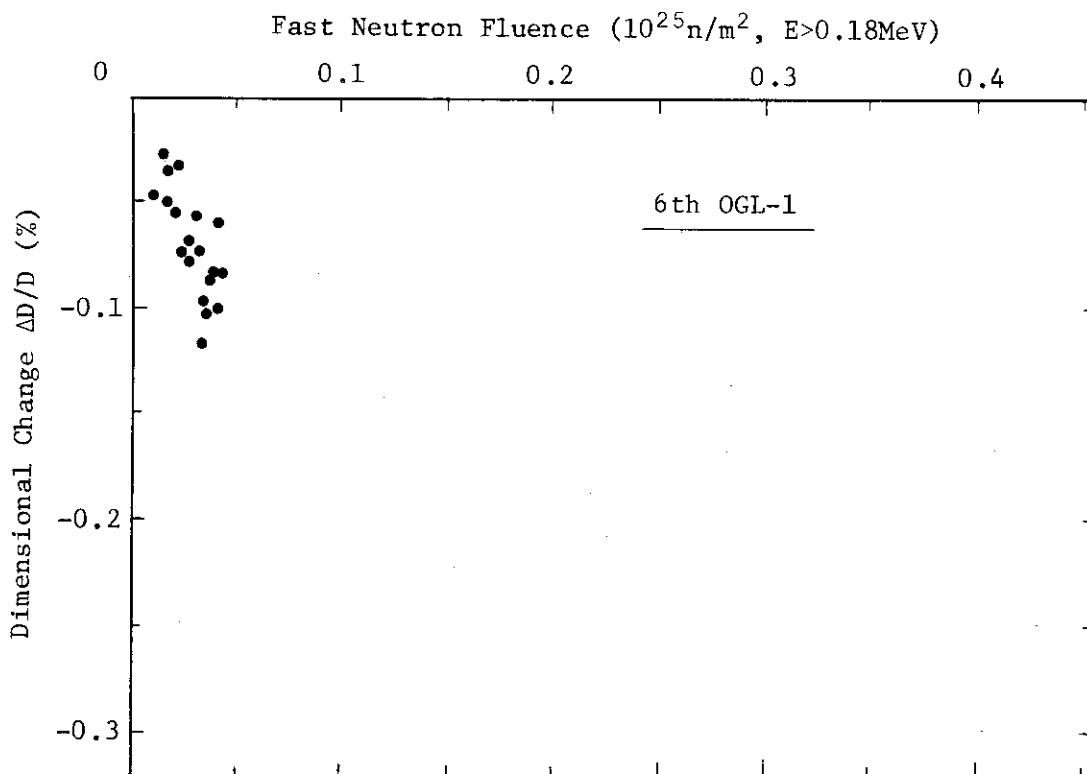


Fig. A4.6 Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 6th OGL-1 fuel assembly.

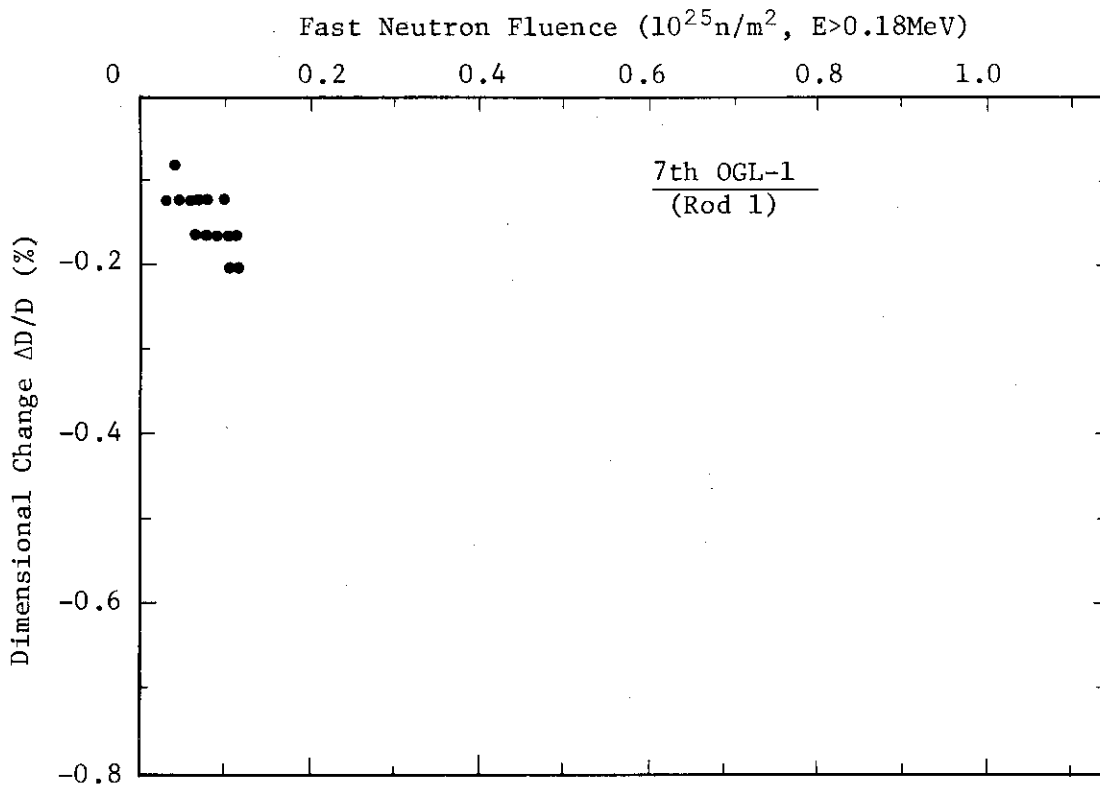


Fig. A4.7(a) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 7th OGL-1 fuel assembly (rod 1).

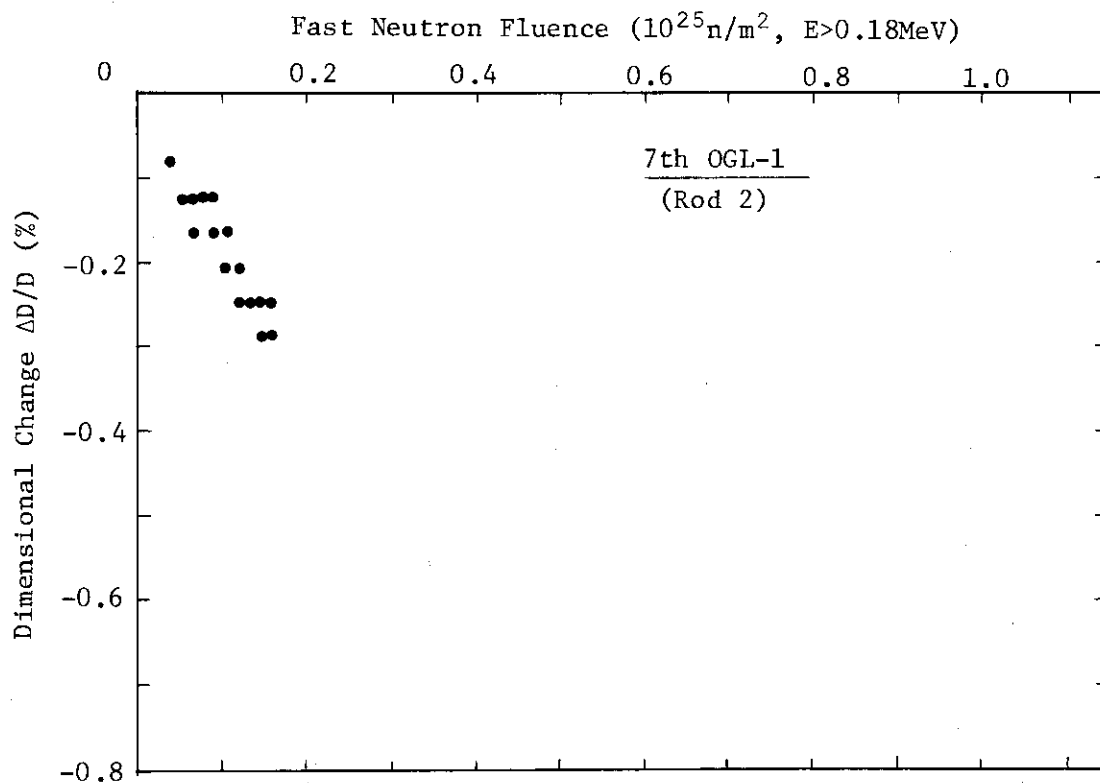


Fig. A4.7(b) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 7th OGL-1 fuel assembly (rod 2).

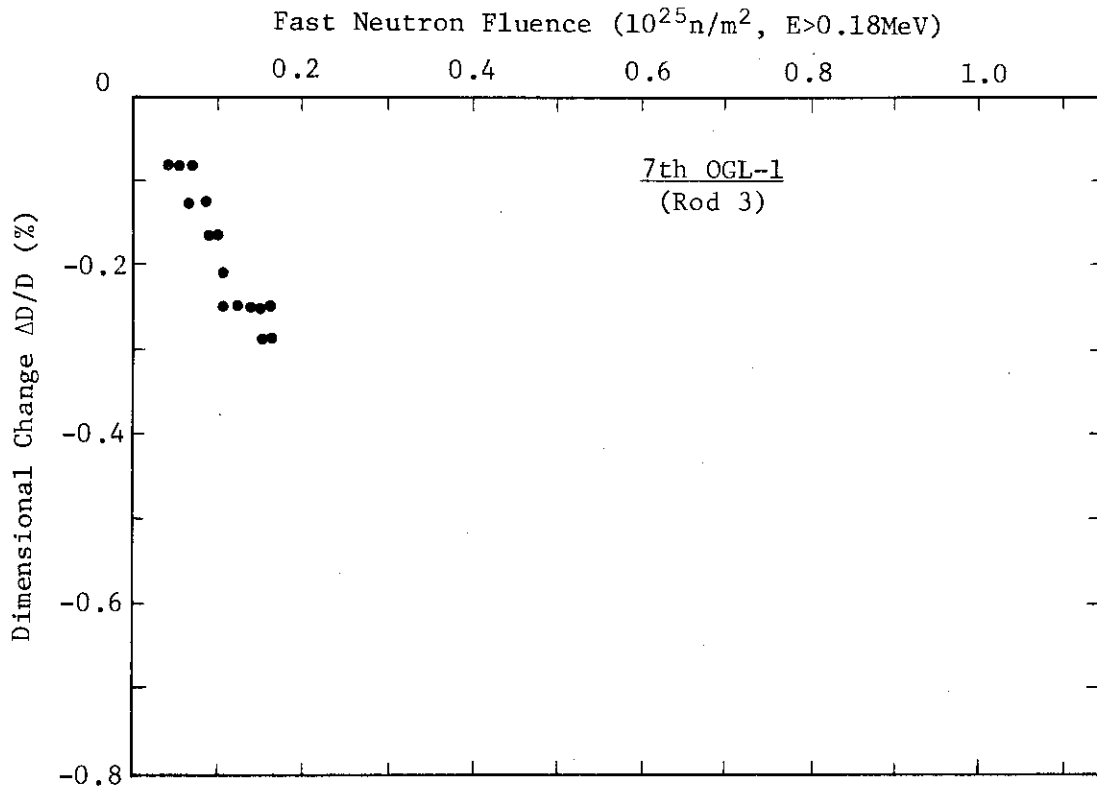


Fig. A4.7(c) Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 7th OGL-1 fuel assembly (rod 3).

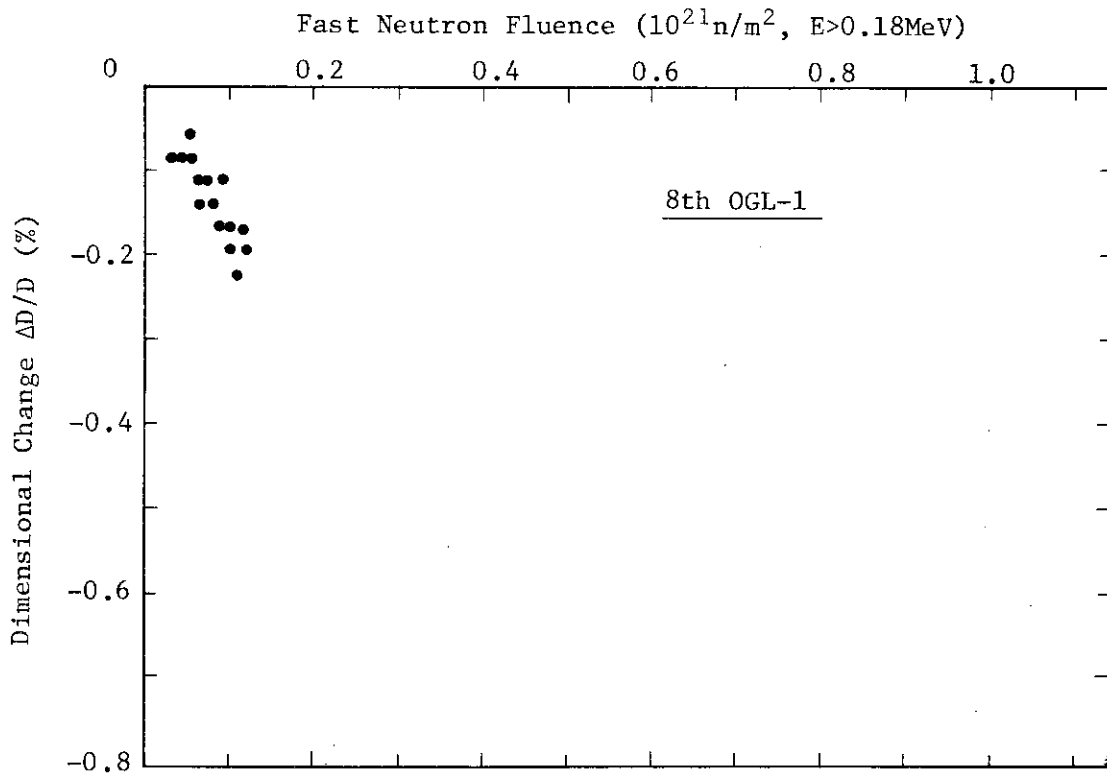


Fig. A4.8 Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 8th OGL-1 fuel assembly.

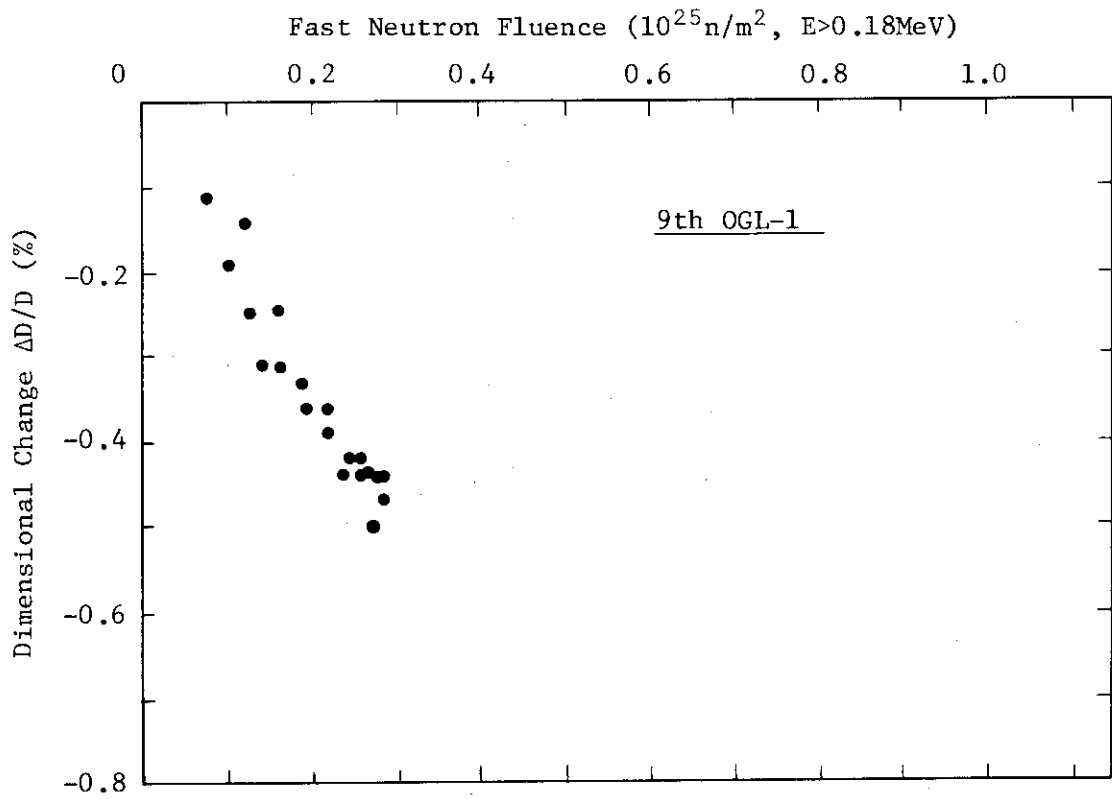


Fig. A4.9 Irradiation-induced dimensional change of outer diameter of fuel compacts of 9th OGL-1 fuel assembly.