

JAERI - M
90-009

OGL-1 高温照射黒鉛ブロックの特性変化

1990年2月

松尾 秀人・湊 和生・今井 久

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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 榎高野高速印刷

OGL-1 高温照射黒鉛ブロックの特性変化

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部

松尾 秀人・湊 和生・今井 久

(1990年1月11日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心用黒鉛材料 IG-110 の諸特性に対する高温照射効果は、JMTR, JRR-2 及び HFR 等でのキャプセル照射実験によってかなり明らかにされてきている。しかし、実際の炉心黒鉛ブロックでは温度や中性子照射量がブロックの位置によって異なり、発生した照射及び熱応力が照射効果に影響することも考えられる。このため大型黒鉛ブロックの諸特性の照射効果を明らかにするための一つの方法として、OGL-1 で照射した第4次～第7次黒鉛ブロックから試験片を採取し、熱膨張率、電気比抵抗、ヤング率等の特性変化を調べ、小型試験片の照射効果と比較した。熱膨張率の照射による変化傾向は、小型試験片の照射効果と必ずしも一致しないがその照射による変化量は小さく、小型試験片の特性値の変動内であった。また、電気比抵抗やヤング率は小型試験片の場合と類似した変化傾向を示した。

Effect of High Temperature Neutron Irradiation on
Physical Properties of OGL-1 Graphite Block

Hideto MATSUO, Kazuo MINATO and Hisashi IMAI

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

(Received January 11, 1990)

Irradiation experiments on the small specimens of the IG-110 graphite for the HTTR have been carried out in the JMTR, JRR-2, and HFR, and the effect of high temperature neutron irradiation on physical properties of the graphite material has become clear. However, a full-scale graphite block has distributions of temperature and neutron fluence in actual service conditions. These may lead to the generation of stress in the blocks and then the property changes in addition to irradiation effects.

In order to clarify the property changes of a large graphite block, thermal expansivity, electrical resistivity and Young's modulus were measured for the specimens taken from the four OGL-1 graphite blocks, the fourth to seventh graphite blocks, and compared with the results previously obtained for small specimens. The thermal expansivity showed a little different irradiation behavior and did not necessarily coincide with those of small specimens for each graphite block, however the overall changes of the four graphite blocks were not so clear within the scattering of data for the measured values. Electrical resistivity and Young's modulus showed similar changes to those of small specimens, respectively.

Keywords: Graphite, HTTR, OGL-1, High Temperature, Irradiation Effect,
Physical Property, Thermal Expansivity, Electrical Resistivity,
Young's Modulus

目 次

1. はじめに	1
2. 実験方法	1
2.1 試料	1
2.2 照射及び照射条件	1
2.3 試験片の加工	2
2.4 測定方法	2
2.4.1 かさ密度	2
2.4.2 熱膨張率	2
2.4.3 電気比抵抗	3
2.4.4 ヤング率	3
3. 実験結果及び考察	3
3.1 黒鉛ブロックの特性変化分布	3
3.2 特性変化の照射量依存性	4
4. まとめ	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental procedure	1
2.1 Material	1
2.2 Irradiation and irradiation conditions	1
2.3 Test specimens	2
2.4 Measurement methods	2
2.4.1 Bulk density	2
2.4.2 Thermal expansivity	2
2.4.3 Electrical resistivity	3
2.4.4 Young's modulus	3
3. Results and discussion	3
3.1 Distributions of properties in the graphite blocks	3
3.2 Irradiation effects on the properties	4
4. Summary	5
References	6

1. はじめに

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Testing Reactor, HTTR) の主要炉心構造黒鉛材料の諸特性は中性子照射によって変化するほか、酸化や応力などによっても影響を受ける。HTTRの炉心黒鉛候補材料 IG-110の諸特性の高温照射効果に関する研究は、JMTR, JRR-2 及び HFRなどでキャプセル照射実験によって行われてきてその照射挙動はかなり明らかにされてきている^{(1)~(3)}。しかしながら、炉内環境では中性子照射ばかりでなく酸化や応力の影響も受けることが予想されるがそれらの複合効果についての研究は現在まで全く報告されていない。中性子照射と酸化が複合した場合、比較的照射量の低い領域では照射寸法変化は酸化の影響を受けないが、その他の特性は照射と酸化がそれぞれ独立に影響した場合の変化が明らかにされていればその複合効果を求めることができる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これまでの IG-110 黒鉛の諸特性の高温照射効果に関する研究はキャプセル照射によって行われてきている。この照射実験では不活性ガス中で試料の照射が行われるため諸特性の変化に対する酸化の影響はなく、また、小さい試験片であるため応力がない状態での中性子照射効果のみが明らかにされる。しかしながら、実際の炉心黒鉛ブロックは形状が大きいので温度や中性子照射量がブロック内の位置によって異なる。このためブロック内部には照射及び熱応力が発生し、応力と照射が複合して諸特性に影響することも考えられるのでその複合効果についても知見を得ておくことが必要である。この報告書は、JMTRの OGL-1 で照射した大型黒鉛ブロックから試験片を採取して熱膨張率、電気比抵抗、ヤング率などの各特性を測定し、照射黒鉛ブロックの特性分布の変化を調べるとともにキャプセル照射の場合の照射効果と比較した結果についてまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 試料

測定に供した試験片は、OGL-1で高温ガス炉用燃料の照射試験研究に用いた黒鉛ブロックから試験用燃料を取り出した直径 80mm, 長さ 785mmの大きさを有する第4次~第7次黒鉛ブロック4本から採取した。Fig.1にその形状及び寸法を示した。試験体の材質はHTTRの炉心黒鉛候補材料と同じ石油コークス系微粒等方性黒鉛材料 IG-110 (東洋炭素(株)製)である。

なお、照射前の特性測定では、第4次~第7次の4本の照射用試験体のそれぞれの加工に使用した同一素材ブロックから試験片を採取して測定に供した。

2.2 照射及び照射条件

試験体の照射は日本原子力研究所大洗研究所の JMTR に設置してある OGL-1 照射設備で行

1. はじめに

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Testing Reactor, HTTR) の主要炉心構造黒鉛材料の諸特性は中性子照射によって変化するほか、酸化や応力などによっても影響を受ける。HTTRの炉心黒鉛候補材料 IG-110の諸特性の高温照射効果に関する研究は、JMTR, JRR-2 及び HFRなどでキャプセル照射実験によって行われてきてその照射挙動はかなり明らかにされてきている^{(1)~(3)}。しかしながら、炉内環境では中性子照射ばかりでなく酸化や応力の影響も受けことが予想されるがそれらの複合効果についての研究は現在まで全く報告されていない。中性子照射と酸化が複合した場合、比較的照射量の低い領域では照射寸法変化は酸化の影響を受けないが、その他の特性は照射と酸化がそれぞれ独立に影響した場合の変化が明らかにされていればその複合効果を求めることができる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これまでの IG-110 黒鉛の諸特性の高温照射効果に関する研究はキャプセル照射によって行われてきている。この照射実験では不活性ガス中で試料の照射が行われるため諸特性の変化に対する酸化の影響はなく、また、小さい試験片であるため応力がない状態での中性子照射効果のみが明らかにされる。しかしながら、実際の炉心黒鉛ブロックは形状が大きいので温度や中性子照射量がブロック内の位置によって異なる。このためブロック内部には照射及び熱応力が発生し、応力と照射が複合して諸特性に影響することも考えられるのでその複合効果についても知見を得ておくことが必要である。この報告書は、JMTRの OGL-1で照射した大型黒鉛ブロックから試験片を採取して熱膨張率、電気比抵抗、ヤング率などの各特性を測定し、照射黒鉛ブロックの特性分布の変化を調べるとともにキャプセル照射の場合の照射効果と比較した結果についてまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 試料

測定に供した試験片は、OGL-1で高温ガス炉用燃料の照射試験研究に用いた黒鉛ブロックから試験用燃料を取り出した直径 80mm, 長さ 785mmの大きさを有する第4次～第7次黒鉛ブロック4本から採取した。Fig.1にその形状及び寸法を示した。試験体の材質はHTTRの炉心黒鉛候補材料と同じ石油コークス系微粒等方性黒鉛材料 IG-110 (東洋炭素(株)製)である。

なお、照射前の特性測定では、第4次～第7次の4本の照射用試験体のそれぞれの加工に使用した同一素材ブロックから試験片を採取して測定に供した。

2.2 照射及び照射条件

試験体の照射は日本原子力研究所大洗研究所の JMTRに設置してある OGL-1 照射設備で行

った。Fig.2に試験体の軸方向の照射量及び照射温度の分布を示した。照射温度はK熱電対で測定し、また、中性子照射量は $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ 反応から評価した。

まず、軸方向の照射温度は試験体の上部ほど高くなっており、また軸方向の中性子照射量は試験体の中央よりもやや下側が最も高く、その上部及び下部では次第に低くなっている。この照射量の分布は第4次～第7次の4本とも同じであり、それぞれの試験体の最高中性子照射量を図中に示した。また、Fig.3及びFig.4には黒鉛ブロックの周方向の照射量分布を示した。なお、これらの中性子照射量の分布はJMTRCにおける実験⁽⁶⁾から得られたものである。

2.3 試験片の加工

OGL-1照射黒鉛ブロックから試験片を加工するには照射黒鉛粉末の飛散による内部被ばくを避けるため特別にグローブボックスを製作した。このグローブボックスの内装機器は黒鉛ブロック切断機、精密加工旋盤、超音波洗浄器などから構成される。Fig.5にはグローブボックスの全体写真を、Fig.6には黒鉛ブロック切断機を示した。

黒鉛ブロックから試験片を採取する際には、まず、予め決められた位置で直径方向に切断して黒鉛ブロックを輪切りにした後、軸方向に切断して試験片素材を製作した。この場合、Fig.1に示したように、比較的スペースがあり、炉中心方向に近い周辺部から素材を採取した。

これらの素材から精密加工旋盤を用いて、熱膨張率測定用として $\phi 5 \times 20 \text{ mm}$ 、電気比抵抗及びヤング率測定用として $\phi 10 \times 75 \text{ mm}$ のそれぞれの大きさの試験片をそれらの長さ方向が黒鉛ブロックの軸方向に平行になるようにして同一採取場所について2ヶ加工した。これらの試験片を加工後超音波洗浄を行い、測定に供した。

2.4 測定方法

2.4.1 かさ密度

室温で最小目盛 $10 \mu\text{m}$ のマイクロメーターで測定した寸法と、最高感度 0.1 mg の直示天秤で測定した重量からかさ密度を求めた。

2.4.2 熱膨張率

理学電機株製の示差膨張型微小定荷重熱膨張測定装置を用いて毎分 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ の昇温及び降温速度で真空中で測定した。測定は室温から最高 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ まで可能であるが、照射温度が $900 \text{ }^\circ\text{C}$ よりも低かったので照射温度まで行い、その際標準試料として熔融透明石英ガラスを使用した。また、長さ 20 mm の2個の熔融透明石英ガラスの標準試料を用いて3回のブランクテストを行ってその平均値を補正し、測定試料の絶対熱膨張量を求めた。なお、熱膨張率、微分熱膨張係数、平均熱膨張係数は次のようにして求めた。

室温及び温度 $T(^\circ\text{C})$ での試験片の長さをそれぞれ L_0 、 L とすると $(L - L_0)/L_0$ は次の多項式で表わすことができる。

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \sum_{i=0}^n A_i \cdot T^i$$

ここで、係数 A_i は室温から 50℃ 毎に測定した各温度における L の実測値から最小自乗法を用いて求めた。また、 n の最適値は残差分析から決定した。通常、 n の値は 2～5 である。 L_0 は室温での測定値であり、厳密には測定毎に異なる。このため基準温度を 20℃ とした場合の熱膨張率の多項式を求め、その式を用いて 20℃ から 400℃ 及び照射温度までの平均熱膨張係数、400℃ における微分熱膨張係数を求めた。

2.4.3 電気比抵抗

電気比抵抗は、試験片に 100mA の直流を流し、電圧降下法により室温で測定した。各試験片について測定位置を変えて 3 回測定し、その平均値を測定値とした。また、同一採取場所の 2 個の試験片の実測値の平均値をその場所における値とした。

2.4.4 ヤング率

チタン酸バリウムを発振子とする 100 KHz の超音波が長さ 75mm の試験片を伝播する速度をオシロスコープにより室温で測定し、このほかかさ密度と重力の加速度の値を用いてヤング率を求めた。超音波伝播速度測定では 1 個の試験片について 3 回測定し、その平均値を試験片の実測値とした。また、電気比抵抗と同様、同一採取場所の 2 個の試験片の実測値の平均値をその場所における値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 黒鉛ブロックの特性変化分布

Table 1～Table 8 に第 4 次～第 7 次黒鉛ブロックから採取した試験片の熱膨張率、電気比抵抗、ヤング率のそれぞれの測定結果を、また Fig. 7～Fig. 10 にはそれらを図示した。電気比抵抗とヤング率の両者はいずれの黒鉛ブロックでも照射によって増加したが、熱膨張率はそれらとは少し異なった照射による変化を示した。

第 4 次黒鉛ブロックの場合、Fig. 7 に示したように電気比抵抗とヤング率の照射による増加率は黒鉛ブロックの上部程大きい値を示した。しかし、これらの増加率の分布は Fig. 2 に示した黒鉛ブロックの中性子照射量の分布とは必ずしも一致しない。また、熱膨張率は逆に照射前よりも低下し、ブロックの下部程その減少量は大きい値を示した。なお、照射前のそれぞれの特性値は黒鉛ブロックの加工に使用したそれぞれの素材ブロックから採取した試験片についての実測値である。Fig. 2 に示したように、黒鉛ブロックの上部では中性子照射量が低く、また照射温度が高い。このため黒鉛ブロックの特性変化はブロックの上部ほど照射によって生成した照射欠陥が熱回復して照射の影響は小さくなると考えられるが、電気比抵抗やヤング率の実測値はそのような

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \sum_{i=0}^n A_i \cdot T^i$$

ここで、係数 A_i は室温から 50℃ 毎に測定した各温度における L の実測値から最小自乗法を用いて求めた。また、 n の最適値は残差分析から決定した。通常、 n の値は 2～5 である。 L_0 は室温での測定値であり、厳密には測定毎に異なる。このため基準温度を 20℃ とした場合の熱膨張率の多項式を求め、その式を用いて 20℃ から 400℃ 及び照射温度までの平均熱膨張係数、400℃ における微分熱膨張係数を求めた。

2.4.3 電気比抵抗

電気比抵抗は、試験片に 100mA の直流を流し、電圧降下法により室温で測定した。各試験片について測定位置を変えて 3 回測定し、その平均値を測定値とした。また、同一採取場所の 2 個の試験片の実測値の平均値をその場所における値とした。

2.4.4 ヤング率

チタン酸バリウムを発振子とする 100 KHz の超音波が長さ 75mm の試験片を伝播する速度をオシロスコープにより室温で測定し、このほかかさ密度と重力の加速度の値を用いてヤング率を求めた。超音波伝播速度測定では 1 個の試験片について 3 回測定し、その平均値を試験片の実測値とした。また、電気比抵抗と同様、同一採取場所の 2 個の試験片の実測値の平均値をその場所における値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 黒鉛ブロックの特性変化分布

Table 1～Table 8 に第 4 次～第 7 次黒鉛ブロックから採取した試験片の熱膨張率、電気比抵抗、ヤング率のそれぞれの測定結果を、また Fig. 7～Fig. 10 にはそれらを図示した。電気比抵抗とヤング率の両者はいずれの黒鉛ブロックでも照射によって増加したが、熱膨張率はそれらとは少し異なった照射による変化を示した。

第 4 次黒鉛ブロックの場合、Fig. 7 に示したように電気比抵抗とヤング率の照射による増加率は黒鉛ブロックの上部程大きい値を示した。しかし、これらの増加率の分布は Fig. 2 に示した黒鉛ブロックの中性子照射量の分布とは必ずしも一致しない。また、熱膨張率は逆に照射前よりも低下し、ブロックの下部程その減少量は大きい値を示した。なお、照射前のそれぞれの特性値は黒鉛ブロックの加工に使用したそれぞれの素材ブロックから採取した試験片についての実測値である。Fig. 2 に示したように、黒鉛ブロックの上部では中性子照射量が低く、また照射温度が高い。このため黒鉛ブロックの特性変化はブロックの上部ほど照射によって生成した照射欠陥が熱回復して照射の影響は小さくなると考えられるが、電気比抵抗やヤング率の実測値はそのような

考えを必ずしも反映してはいない。また、熱膨張率は照射量の低い領域では照射による減少量が小さい値を示している。

第5次黒鉛ブロックの照射条件は、第4次黒鉛ブロックに比較して照射温度はほとんど同じであるが照射量が高い。Fig.8に示したように、電気比抵抗やヤング率については照射量が増加したため飽和していく傾向が黒鉛ブロックの上部に現われていると考えられる。また、熱膨張率は照射によって低下し、その低下量は照射量分布と類似してはいるが、照射量が高い程小さい。

第6次黒鉛ブロックの照射量は最も低い。Fig.9から明らかなように、この場合にも黒鉛ブロックの上部になるにしたがって電気比抵抗とヤング率の照射による増加量は大きい値を示している。しかし、熱膨張率は逆に照射によって低下し、その低下量はブロックの下部ほど大きい。

Fig.10に示した第7次黒鉛ブロックの場合では、ブロックの上部になるにしたがって電気比抵抗の増加率が大きくなるのが認められる。照射によって熱膨張率は全体として低下し、ヤング率は増加し、この両者は黒鉛ブロックの下部で極大値を示す。このように第7次黒鉛ブロックの場合でも照射による特性変化の分布と照射量のブロック内での分布は必ずしも良く対応してはいない。

3.2 特性変化の照射量依存性

第4次～第7次黒鉛ブロックから採取した試験片の20～400℃での平均熱膨張率をFig.11～Fig.16に、電気比抵抗をFig.17に、ヤング率をFig.18に照射量の関数としてそれぞれの特性変化を示した。

照射温度は665～870℃でかなり幅広い範囲であり、また測定値の変動が大きい。Fig.11に示した全体的な傾向としては熱膨張率の絶対値は全ての照射温度領域で照射量が増大するにしたがって増加するような傾向が見受けられる。しかし、それぞれの黒鉛ブロックについてみると、照射前の値がかなり異なるとともに少しずつ異なった変化傾向が認められた。Fig.12～Fig.16に示した非照射試料の実測値で規格化した結果が示すように、第4次黒鉛ブロックの場合には熱膨張率は照射量が増大するにしたがって減少する傾向を示した。また、第5、6、7次黒鉛ブロックの場合にも照射量の増加とともにわずかに減少する傾向を示している。

熱膨張率は、非照射試料に応力を付加した場合には、圧縮応力の場合には増加し、引張り応力の場合には減少することが既に明らかにされている^{(7)~(10)}。また、応力を付加中に照射した場合には照射と応力の両者が同時に作用していることになり、その複合効果として巨視的な熱膨張率が変化する⁽¹¹⁾。

黒鉛ブロックが照射を受ける場合には照射量や温度分布がその内部で異なっているために照射効果も異なる結果、全体として巨視的な形状に影響を及ぼすとともに、照射応力が誘起される。この実験に供した第4次～第7次の4本の黒鉛ブロックの寸法変化測定ではその直径や長さ方向の寸法変化は殆んど認められていない。しかし、全体としてFig.19に示したような曲がりを実測されている⁽¹²⁾。これらの結果は照射後室温で測定した値であるが、高温での照射中は拘束されていて曲がりには生じていなかったと考えられる。したがって、照射中には黒鉛ブロックの各部で炉中心側には引張り、外側では圧縮の2つの応力が発生していたことになり、採取した試験片の

位置によって試験片が受けた応力が異なることになる。

OGL-1 黒鉛ブロックは JMTR の中心方向を基準にして黒鉛ブロック自体にその方向を刻印して照射された。そのブロックから試験片を加工する場合にはできるだけその方向に近い場所から採取して試験を行った。このため、Fig.19 に示したように、試験片は引張り応力が働いている部分から採取していることになる。

このことから、熱膨張率が照射前に比較して低下した原因は照射中に引張り応力が影響していたためであると理解される。また、ブロック内の各部で照射量が多い領域で変化量が小さいことは、照射による増加が他の場所に比較して大きいため、応力による減少の影響が打ち消し合うようになる結果であると考えられる。

一方、キャプセル照射による小型試験片の熱膨張率の照射による変化は、この照射温度領域では照射量の増加とともに大きくなった後減少する。この実験で得られた照射量の増加に伴う熱膨張率の低下はキャプセル照射の場合には認められていない⁽²⁾⁽³⁾⁽¹³⁾。しかし、これらの熱膨張率の照射による変化をキャプセル照射による小型試験片の結果と比較してみると、照射量が非常に少ない領域での変化であるため測定値の変動内である。また、電気比抵抗は照射量の増加とともに次第に大きくなる傾向を示し、ヤング率は照射の初期に増加した後はほぼ一定の値になり、全体的にはキャプセル照射の場合と同様な変化傾向を示している。この電気比抵抗やヤング率の両者も応力付加によって影響は受けるが⁽⁸⁾⁽⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾。照射量の低い領域でも照射による変化が極めて大きいので応力の影響はその照射による変化に包含されてしまっているためであると考えられる。

4. ま と め

第4次～第7次 OGL-1 照射黒鉛ブロックから採取した試験片の熱膨張率、電気比抵抗、及びヤング率などについての実験及び考察結果は次のようにまとめられる。

- (1) 熱膨張率は照射によって減少し、キャプセル照射の場合と異なった変化傾向が認められた。この低下の原因は、黒鉛ブロックの各部の照射効果が異なることに起因して照射中に発生した引張り応力による影響であると推定される。
- (2) 電気比抵抗及びヤング率は照射によって増加し、この変化傾向はキャプセル照射の場合と殆んど同じであった。この両者の照射初期における増加量は非常に大きいため、熱膨張率の場合のように黒鉛ブロック内に発生した応力による影響は照射による増加に包含されていると考えられる。

位置によって試験片が受けた応力が異なることになる。

OGL-1 黒鉛ブロックは JMTR の中心方向を基準にして黒鉛ブロック自体にその方向を刻印して照射された。そのブロックから試験片を加工する場合にはできるだけその方向に近い場所から採取して試験を行った。このため、Fig.19 に示したように、試験片は引張り応力が働いている部分から採取していることになる。

このことから、熱膨張率が照射前に比較して低下した原因は照射中に引張り応力が影響していたためであると理解される。また、ブロック内の各部で照射量が多い領域で変化量が小さいことは、照射による増加が他の場所に比較して大きいため、応力による減少の影響が打ち消し合うようになる結果であると考えられる。

一方、キャプセル照射による小型試験片の熱膨張率の照射による変化は、この照射温度領域では照射量の増加とともに大きくなった後減少する。この実験で得られた照射量の増加に伴う熱膨張率の低下はキャプセル照射の場合には認められていない⁽²⁾⁽³⁾⁽¹³⁾。しかし、これらの熱膨張率の照射による変化をキャプセル照射による小型試験片の結果と比較してみると、照射量が非常に少ない領域での変化であるため測定値の変動内である。また、電気比抵抗は照射量の増加とともに次第に大きくなる傾向を示し、ヤング率は照射の初期に増加した後はほぼ一定の値になり、全体的にはキャプセル照射の場合と同様な変化傾向を示している。この電気比抵抗やヤング率の両者も応力付加によって影響は受けるが⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾。照射量の低い領域でも照射による変化が極めて大きいので応力の影響はその照射による変化に包含されてしまっているためであると考えられる。

4. ま と め

第4次～第7次 OGL-1 照射黒鉛ブロックから採取した試験片の熱膨張率、電気比抵抗、及びヤング率などについての実験及び考察結果は次のようにまとめられる。

- (1) 熱膨張率は照射によって減少し、キャプセル照射の場合と異なった変化傾向が認められた。この低下の原因は、黒鉛ブロックの各部の照射効果が異なることに起因して照射中に発生した引張り応力による影響であると推定される。
- (2) 電気比抵抗及びヤング率は照射によって増加し、この変化傾向はキャプセル照射の場合と殆んど同じであった。この両者の照射初期における増加量は非常に大きいため、熱膨張率の場合のように黒鉛ブロック内に発生した応力による影響は照射による増加に包含されていると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Nomura S., et al., JAERI-M 8068 (1979)
- 2) Matsuo H., et al., JAERI-M 86-192, 138-143 (1986)
- 3) 松尾秀人, JAERI-M 87-207 (1988)
- 4) Brocklehurst, J.E., et al., J. Nucl. Mater., 35, 183 (1970)
- 5) Matsuo H., Fujii K., and Imai H., J. Nucl. Mater., 152, 283 (1988)
- 6) 湊和生, 他. JAERI-M 83-055 (1983)
- 7) Gazda I.W., Carbon 8, 511 (1970)
- 8) Hart P.E., Carbon 10, 234 (1972)
- 9) Matsuo H. and Sasaki Y., Carbon 15, 190 (1977)
- 10) Matsuo H. and Sasaki Y., Carbon 23, 51 (1985)
- 11) Price R.J., GA-A16402 (1981)
- 12) 福田幸朔, 他. JAERI-M 89-007 (1989)
- 13) Engle G.B., GA-A14690 (1971)
- 14) Losty H.H.W. and Orchard J.S., Proc. 5th Carbon Conf., Vol.1, 519 (1962)
- 15) Jenkins, G.M., J. Nucl. Mater., 5, 280 (1962)
- 16) Oku T. and Eto M., Carbon 11, 639 (1973)
- 17) Eto M. and Oku T., J. Nucl. Mater., 45, 347 (1972/1973)
- 18) Eto M. and Oku T., J. Nucl. Mater., 46, 315 (1973)

Table 1 Experimental results on thermal expansivity for 4th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² (E > 29fJ)	Irradiation temperature (°C)	α_{400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20-400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{20-Tirr}$ ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20-400}/α_0 20-400
Unirradiated	—	—	5.166	4.499	—	—
TE4-1-1	1.65	665	4.893	3.901	4.817	0.867
TE4-1-2	2.10	690	5.319	4.167	4.923	0.926
TE4-2-1	2.30	710	5.241	4.336	5.075	0.964
TE4-2-2	2.53	740	5.369	4.246	5.137	0.944
TE4-3-1	2.55	760	5.378	4.257	5.141	0.946
TE4-3-2	2.45	780	5.709	4.369	5.142	0.971
TE4-4-1	2.25	795	5.558	4.320	5.320	0.960
TE4-4-2	1.95	805	5.696	4.447	5.431	0.988
TE4-5-1	1.70	810	5.553	4.366	5.382	0.970
TE4-5-2	1.30	810	5.866	4.502	5.579	1.001
TE4-6-1	1.10	810	5.833	4.476	5.555	0.995
TE4-6-2	0.60	805	5.978	4.673	5.633	1.039

Table 2 Experimental results on Young's modulus and electrical resistivity for 4th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² (E > 29fJ)	Irradiation temperature (°C)	Young's modulus (GPa)	Young's modulus (GPa) (Mean)	Electrical resistivity (mΩ·cm)	Electrical resistivity (mΩ·cm) (Mean)
Unirradiated	—	—	8.73	8.73	1.17	1.17
TC4-1-1	1.95	680	11.2	11.2	1.80	1.76
TC4-1-2			11.1		1.71	
TC4-2-1	2.45	725	11.3	11.4	1.76	1.76
TC4-2-2			11.4		1.75	
TC4-3-1	2.50	770	11.4	11.6	1.95	1.88
TC4-3-2			11.7		1.81	
TC4-4-1	2.10	800	11.3	11.5	1.95	1.99
TC4-4-2			11.6		2.02	
TC4-5-1	1.50	810	12.1	11.6	1.92	2.03
TC4-5-2			11.0		2.13	
TC4-6-1	0.85	805	12.0	11.8	1.95	2.06
TC4-6-2			11.6		2.16	

Table 3 Experimental results on thermal expansivity for 5th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² (E > 29fJ)	Irradiation temperature (°C)	α_{400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20-400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{20}\text{-Tirr}$ ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{20-400}/\alpha_{20-400}$
Unirradiated	—	—	4.915	4.343	—	—
TE5-1-1	2.70	710	5.217	4.188	4.946	0.964
TE5-1-2	3.50	730	5.394	4.174	5.095	0.961
TE5-2-1	3.80	765	5.417	4.339	5.248	0.999
TE5-2-2	4.05	780	5.716	4.393	5.495	1.011
TE5-3-1	4.05	790	5.368	4.200	5.221	0.967
TE5-3-2	3.95	815	5.676	4.221	5.340	0.971
TE5-4-1	3.60	830	5.800	4.499	5.632	1.035
TE5-4-2	3.30	840	5.666	4.419	5.572	1.017
TE5-5-1	2.75	845	5.338	4.115	5.338	0.947
TE5-5-2	2.20	850	5.729	4.576	5.635	1.053
TE5-6-1	1.70	850	5.538	4.337	5.486	0.998
TE5-6-2	1.05	850	5.706	4.369	5.572	1.009

Table 4 Experimental results on Young's modulus and electrical resistivity for 5th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² ($E > 29$ fJ)	Irradiation temperature (°C)	Young's modulus (GPa)	Young's modulus (GPa) (Mean)	Electrical resistivity (m Ω ·cm)	Electrical resistivity (m Ω ·cm) (Mean)
Unirradiated	—	—	9.08	9.08	1.19	1.19
TC5-1-1	3.10	720	10.6	11.1	1.85	1.90
TC5-1-2			11.6		1.94	
TC5-2-1	4.00	765	11.8	11.6	1.98	2.03
TC5-2-2			11.3		2.08	
TC5-3-1	4.00	805	11.6	11.6	1.98	2.07
TC5-3-2			11.6		2.16	
TC5-4-1	3.45	835	11.6	11.5	2.16	2.19
TC5-4-2			11.4		2.21	
TC5-5-1	2.50	850	11.3	11.3	2.21	2.21
TC5-5-2			11.2		2.21	
TC5-6-1	1.40	850	11.5	11.6	2.10	2.12
TC5-6-2			11.7		2.13	

Table 5 Experimental results on thermal expansivity for 6th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² (E > 29 eV)	Irradiation temperature (°C)	α_{400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20-400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{20-400}/\alpha_{20}$
Unirradiated	—	—	4.449	3.836	—	—
TE6-1-1	0.32	695	4.521	3.619	4.428	0.943
TE6-1-2	0.41	715	4.548	3.624	4.586	0.945
TE6-2-1	0.47	730	4.938	3.822	4.640	0.996
TE6-2-2	0.50	755	4.576	3.724	4.569	0.971
TE6-3-1	0.50	765	4.648	3.670	4.600	0.957
TE6-3-2	0.48	780	4.730	3.774	4.722	0.984
TE6-4-1	0.44	790	4.975	4.029	4.803	1.050
TE6-4-2	0.38	800	4.823	3.818	4.839	0.995
TE6-5-1	0.33	800	5.058	4.003	5.016	1.044
TE6-5-2	0.26	800	4.986	3.921	4.952	1.022
TE6-6-1	0.21	800	5.012	3.916	4.977	1.021
TE6-6-2	0.12	800	5.065	3.938	4.978	1.027

Table 6 Experimental results on Young's modulus and electrical resistivity for 6th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² (E > 29fJ)	Irradiation temperature (°C)	Young's modulus (GPa)	Young's modulus (GPa) (Mean)	Electrical resistivity (mΩ·cm)	Electrical resistivity (mΩ·cm) (Mean)
Unirradiated	---	---	9.12	9.12	1.07	1.07
TC6-1-1	0.37	705	9.91	10.1	1.58	1.57
TC6-1-2			10.3		1.56	
TC6-2-1	0.49	740	10.8	10.5	1.62	1.58
TC6-2-2			10.1		1.53	
TC6-3-1	0.50	775	10.9	10.6	1.57	1.60
TC6-3-2			10.3		1.63	
TC6-4-1	0.41	795	10.7	11.0	1.68	1.71
TC6-4-2			11.3		1.74	
TC6-5-1	0.31	800	11.0	11.1	1.63	1.66
TC6-5-2			11.1		1.69	
TC6-6-1	0.16	800	11.2	10.9	1.66	1.64
TC6-6-2			10.6		1.62	

Table 7 Experimental results on thermal expansivity for 7th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m ² (E > 29fJ)	Irradiation temperature (°C)	α_{400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20-400} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_{20} ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{20-400}/\alpha_{20}$ 20-400
Unirradiated	—	—	4.811	4.206	—	—
TE7-1-1	1.15	730	5.037	3.905	4.835	0.928
TE7-1-2	1.45	755	4.887	3.897	4.822	0.927
TE7-2-1	1.65	775	5.377	3.985	5.145	0.947
TE7-2-2	1.75	800	5.204	4.053	5.107	0.964
TE7-3-1	1.75	815	5.522	4.253	5.392	1.011
TE7-3-2	1.70	835	5.200	4.017	5.201	0.955
TE7-4-1	1.60	850	5.519	4.160	5.453	0.989
TE7-4-2	1.40	865	5.297	4.069	5.342	0.967
TE7-5-1	1.20	870	—	—	—	—
TE7-5-2	0.90	870	5.256	4.048	5.326	0.962
TE7-6-1	0.70	870	5.238	4.007	5.283	0.953
TE7-6-2	0.45	870	5.126	3.975	5.248	0.945

Table 8 Experimental results on Young's modulus and electrical resistivity for 7th OGL-1 graphite block

Specimen NO.	Neutron fluence 10^{24} n/m^2 ($E > 29 \text{ fJ}$)	Irradiation temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Young's modulus (GPa)	Young's modulus (GPa) (Mean)	Electrical resistivity ($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$)	Electrical resistivity ($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$) (Mean)
Unirradiated	—	—	9.64	9.64	1.15	1.15
TC7-1-1	1.35	745	12.1	12.0	1.56	1.57
TC7-1-2			11.8		1.57	
TC7-2-1	1.70	785	12.4	12.1	1.62	1.64
TC7-2-2			11.8		1.66	
TC7-3-1	1.75	825	12.6	12.5	1.71	1.77
TC7-3-2			12.3		1.82	
TC7-4-1	1.50	860	12.3	12.3	1.83	1.82
TC7-4-2			12.3		1.80	
TC7-5-1	1.05	870	12.1	12.0	1.85	1.87
TC7-5-2			11.9		1.89	
TC7-6-1	0.55	870	11.8	11.8	1.91	1.91
TC7-6-2			11.7		1.91	

OGI-1 Graphite Block

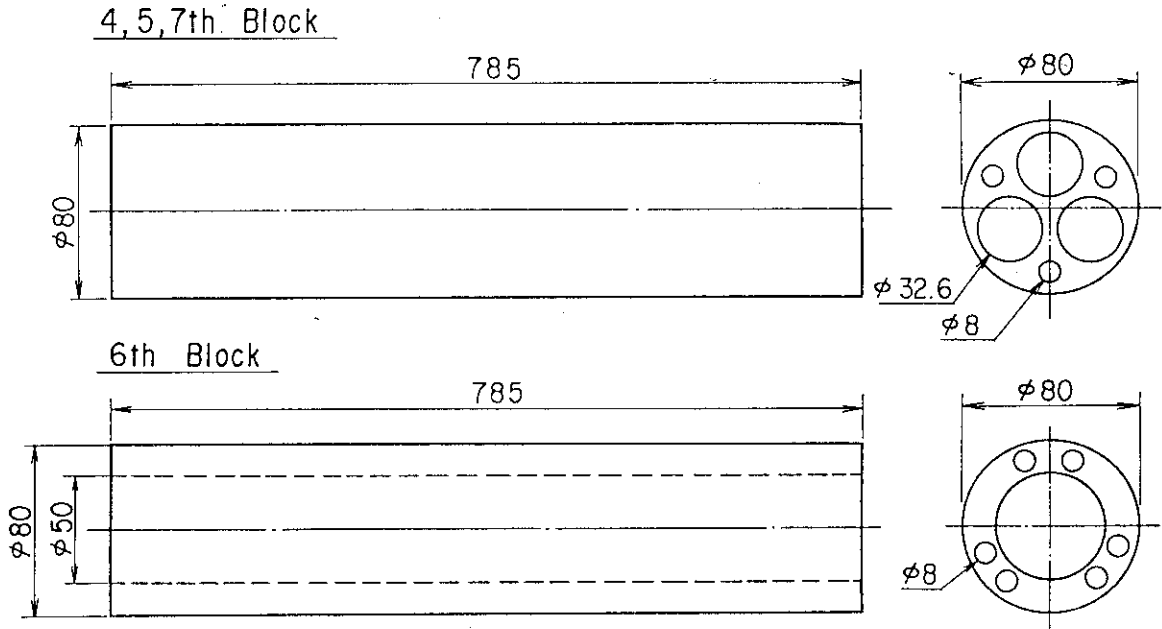


Fig. 1 Shape and dimension of OGI-1 graphite blocks

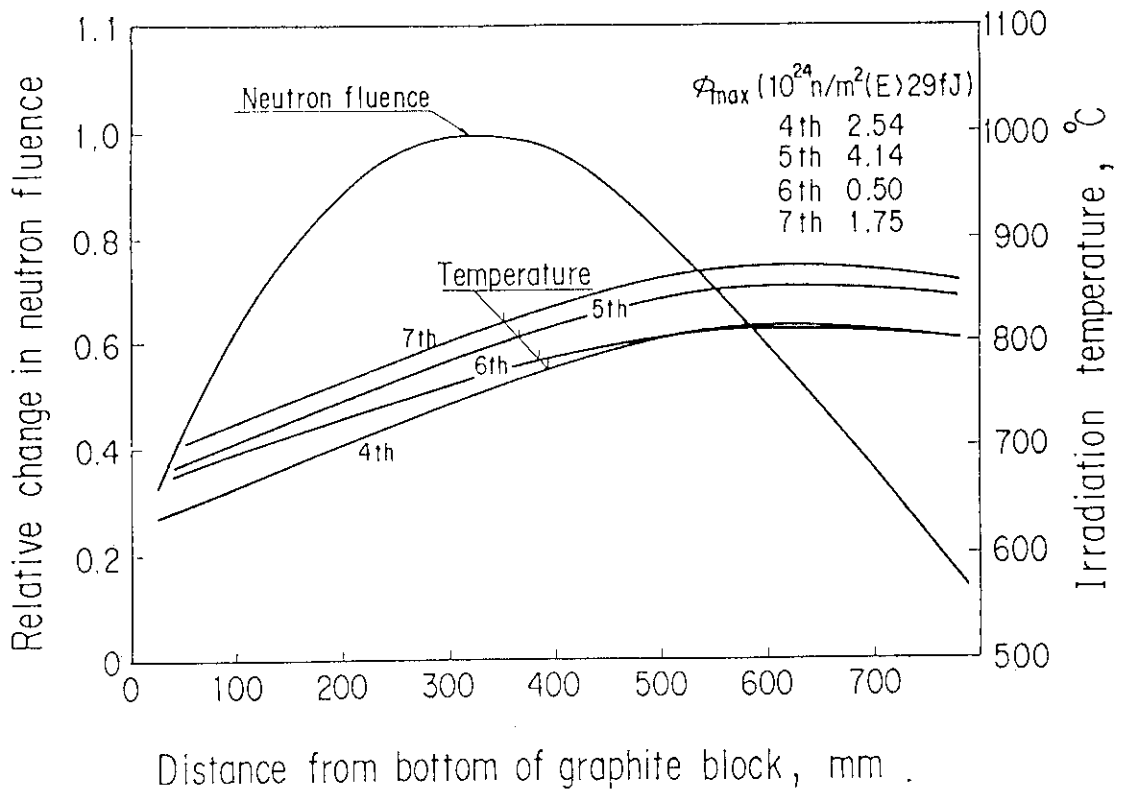


Fig. 2 Distributions of neutron fluence and irradiation temperature in the axial direction for the four graphite blocks

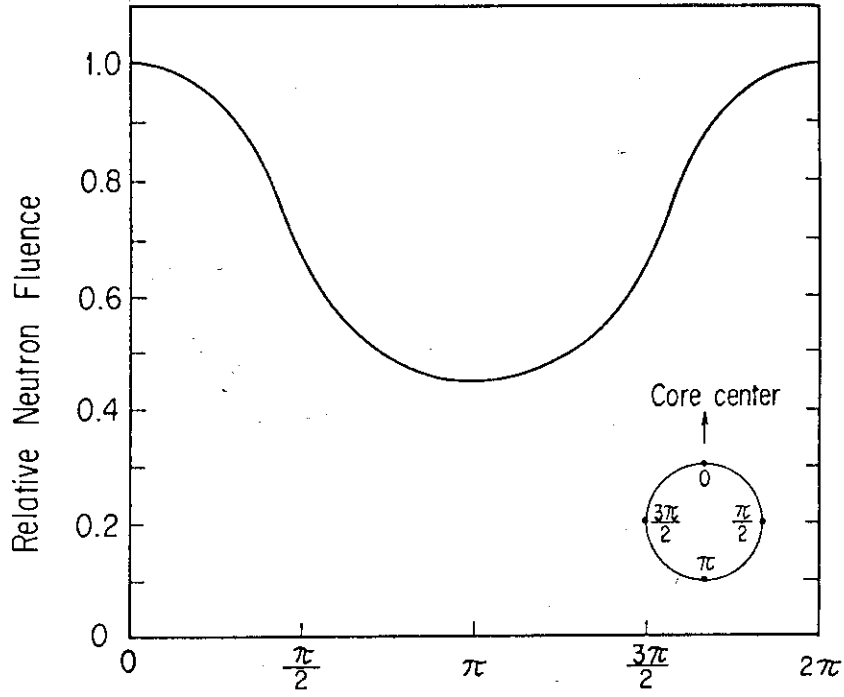


Fig. 3 Distribution of neutron fluence in the circumferential direction for the 4, 5, 7th OGL-1 graphite blocks

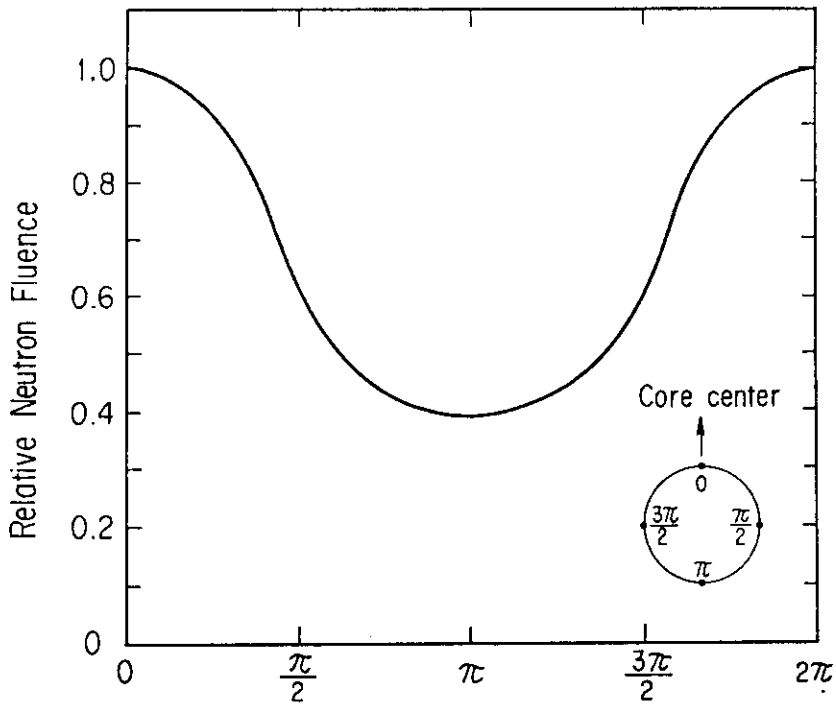


Fig. 4 Distribution of neutron fluence in the circumferential direction for the 6th OGL-1 graphite block

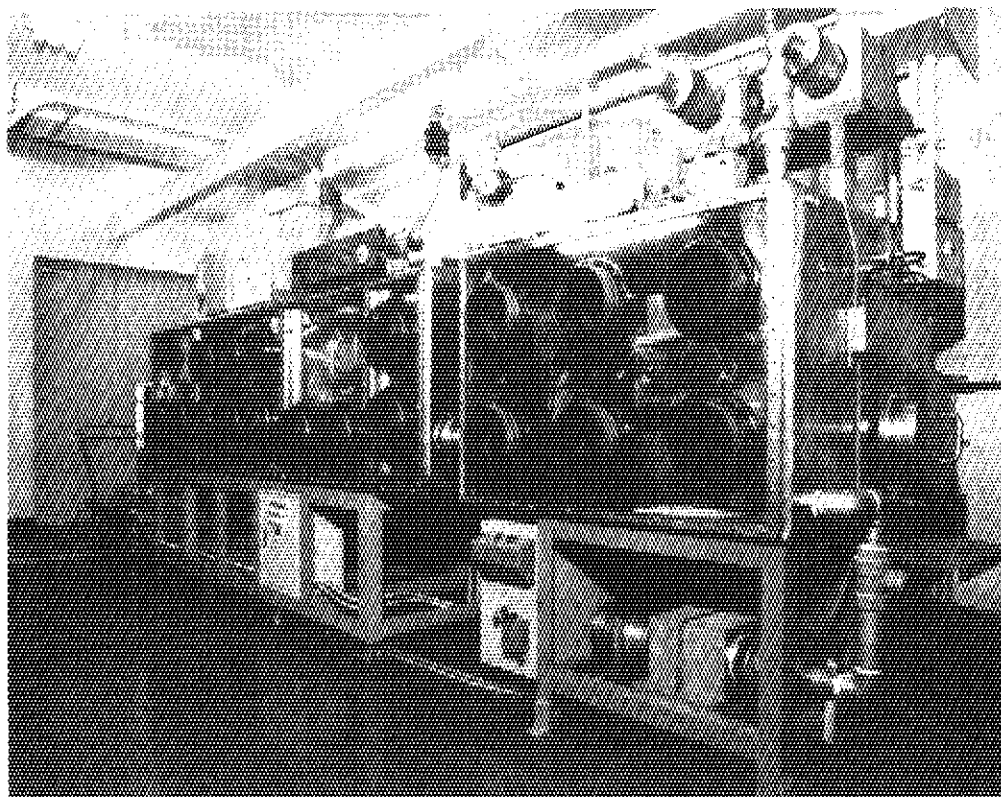


Fig. 5 Glove boxes for machining test specimens

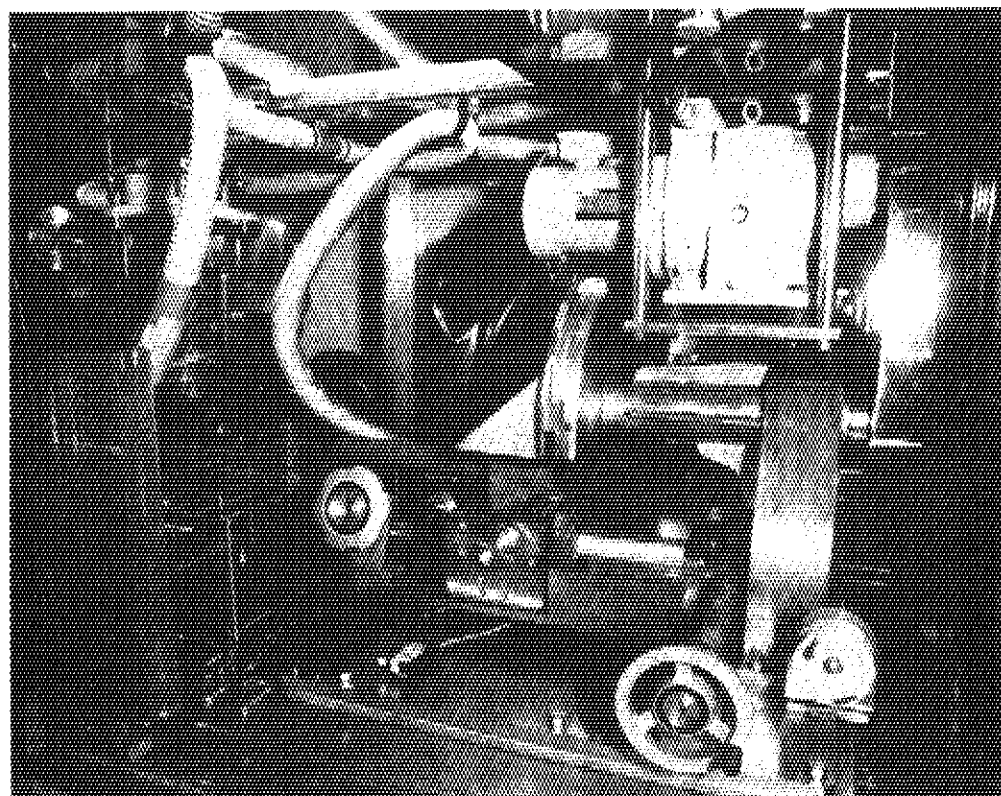


Fig. 6 A cutting machine in the glove box

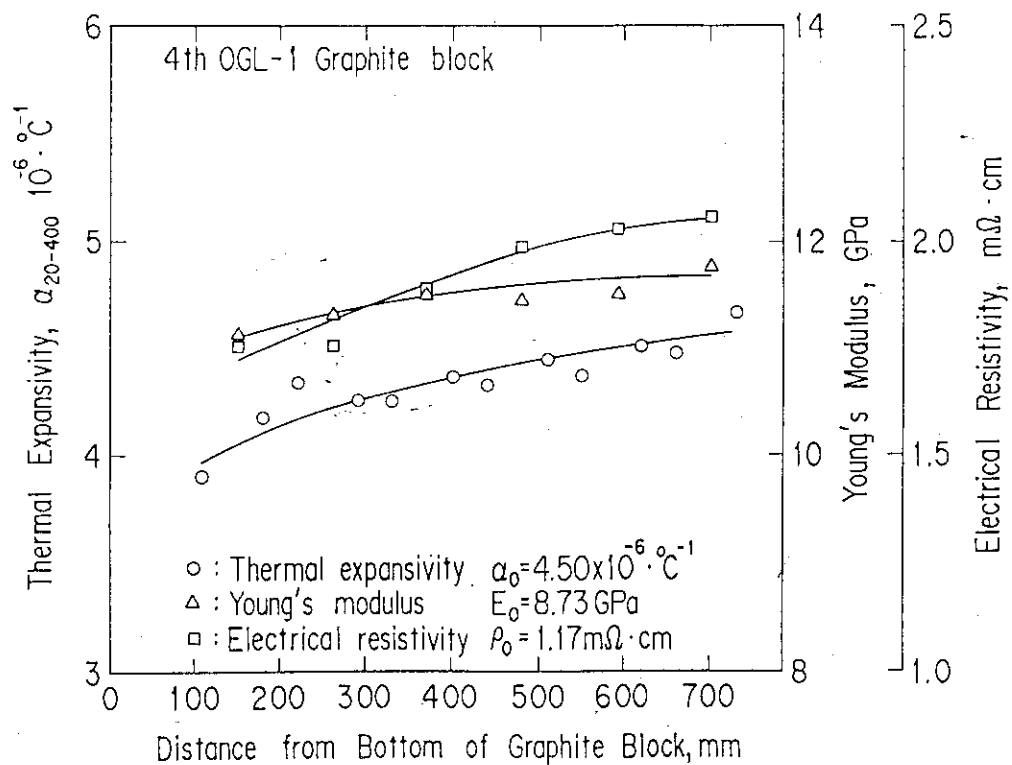


Fig. 7 Changes in thermal expansivity, electrical resistivity and Young's modulus for the 4th graphite block

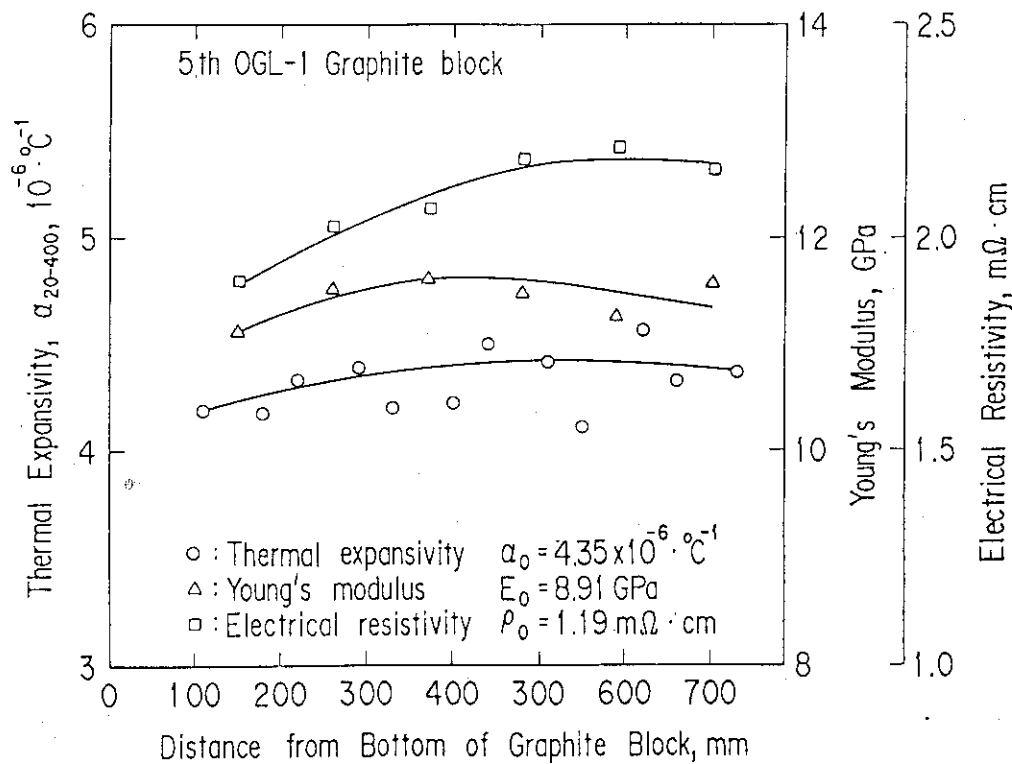


Fig. 8 Changes in thermal expansivity, electrical resistivity and Young's modulus for the 5th graphite block

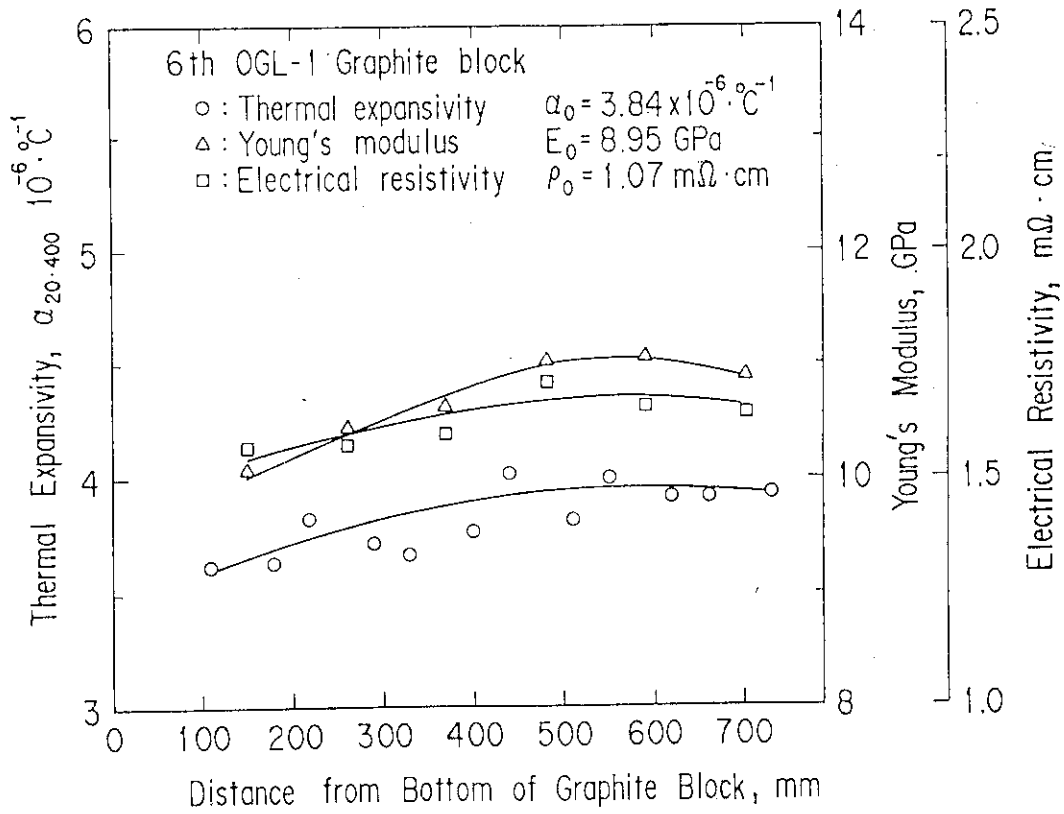


Fig. 9 Changes in thermal expansivity, electrical resistivity and Young's modulus for the 6th graphite block

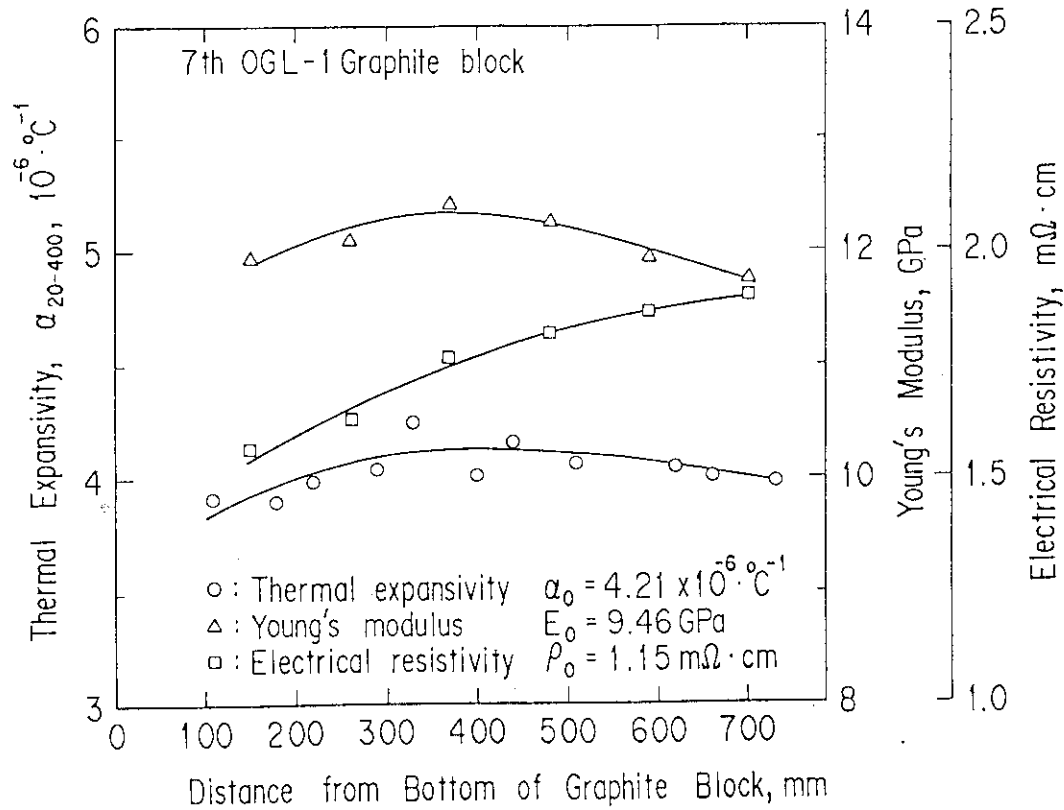


Fig. 10 Changes in thermal expansivity, electrical resistivity and Young's modulus for the 7th graphite block

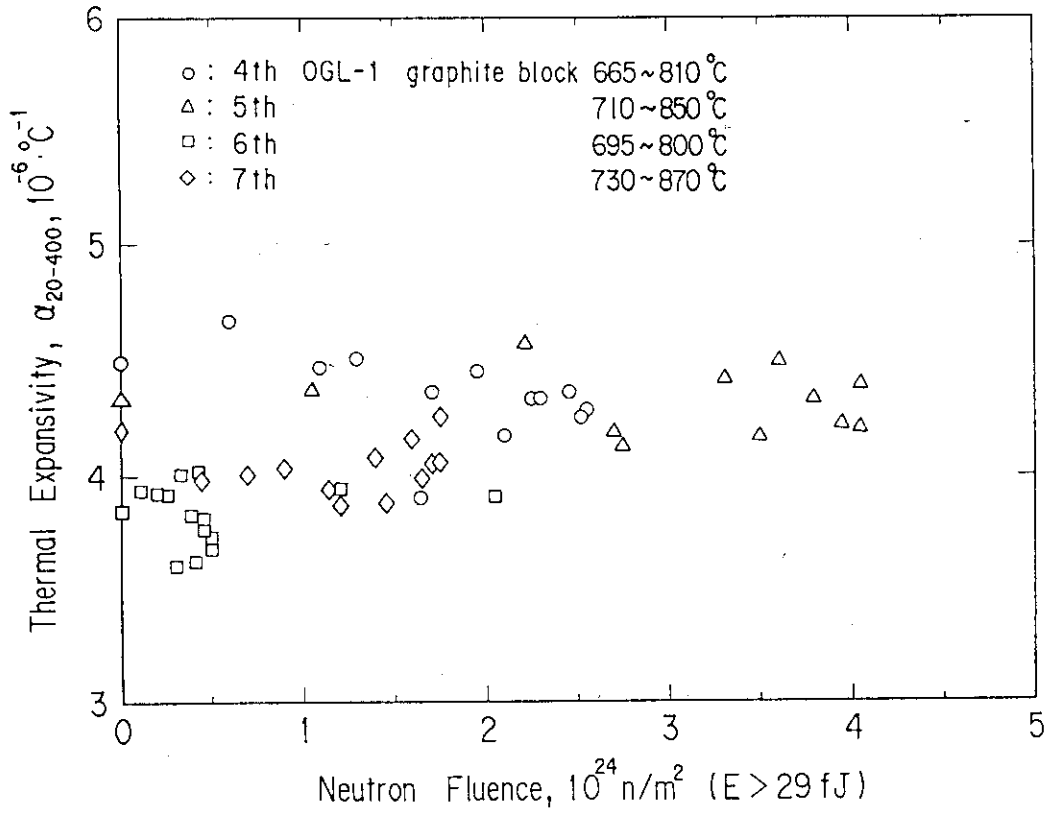


Fig. 11 Changes in thermal expansivity as a function of neutron fluence

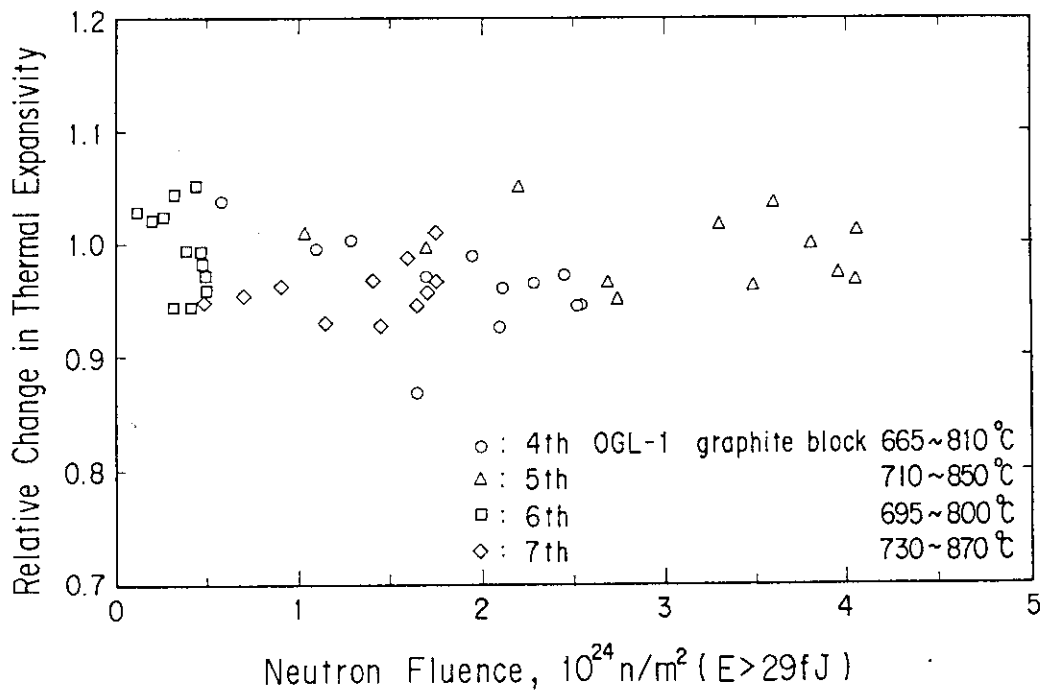


Fig. 12 Relative changes in thermal expansivity as a function of neutron fluence

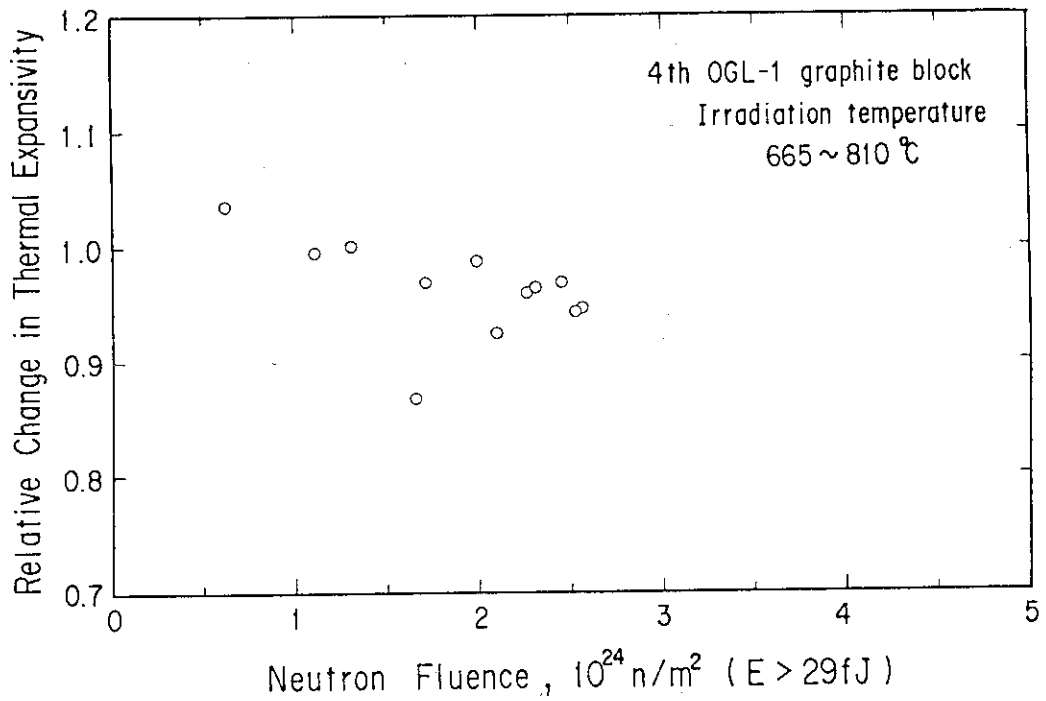


Fig. 13 Relative changes in thermal expansivity of the 4th graphite block as a function of neutron fluence

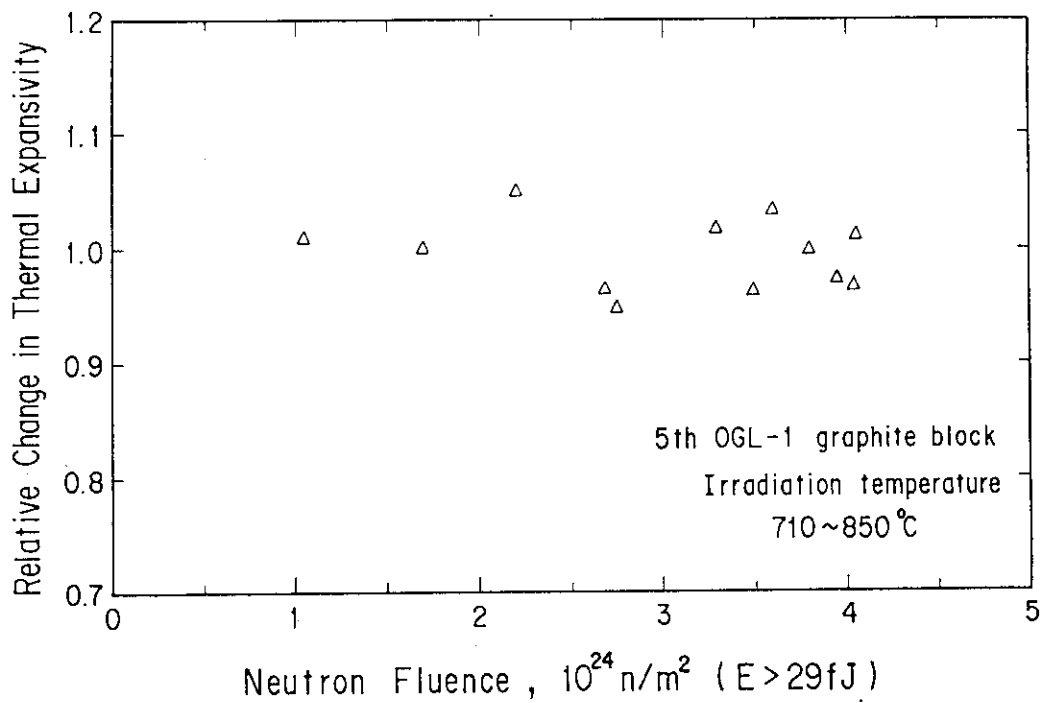


Fig. 14 Relative changes in thermal expansivity of the 5th graphite block as a function of neutron fluence

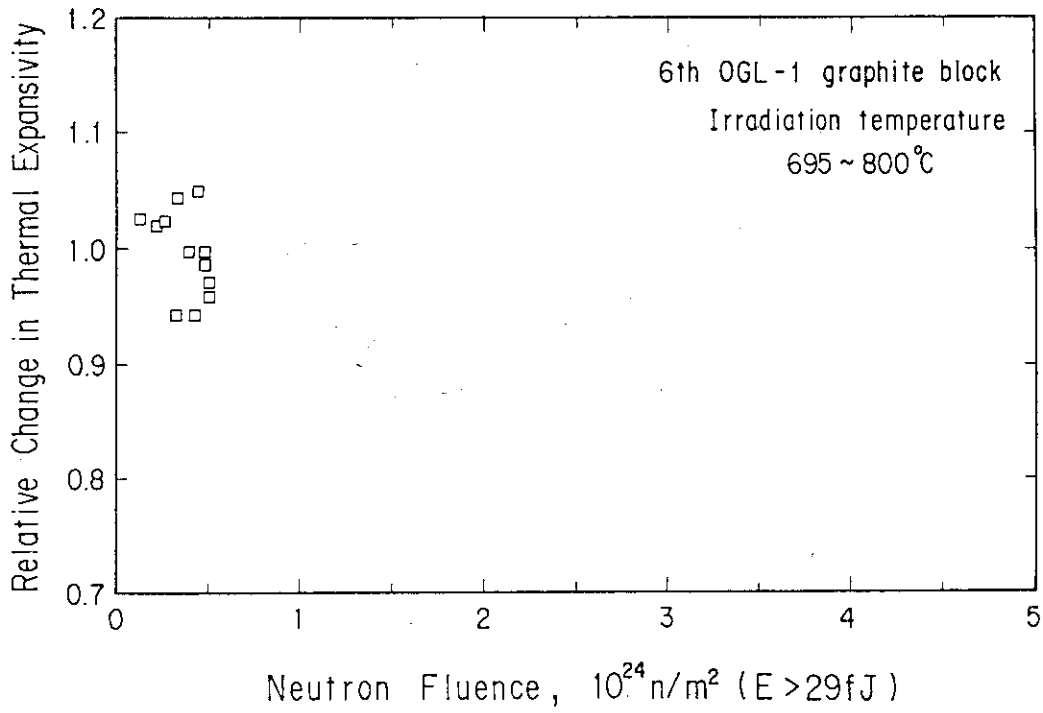


Fig. 15 Relative changes in thermal expansivity of the 6th graphite block as a function of neutron fluence

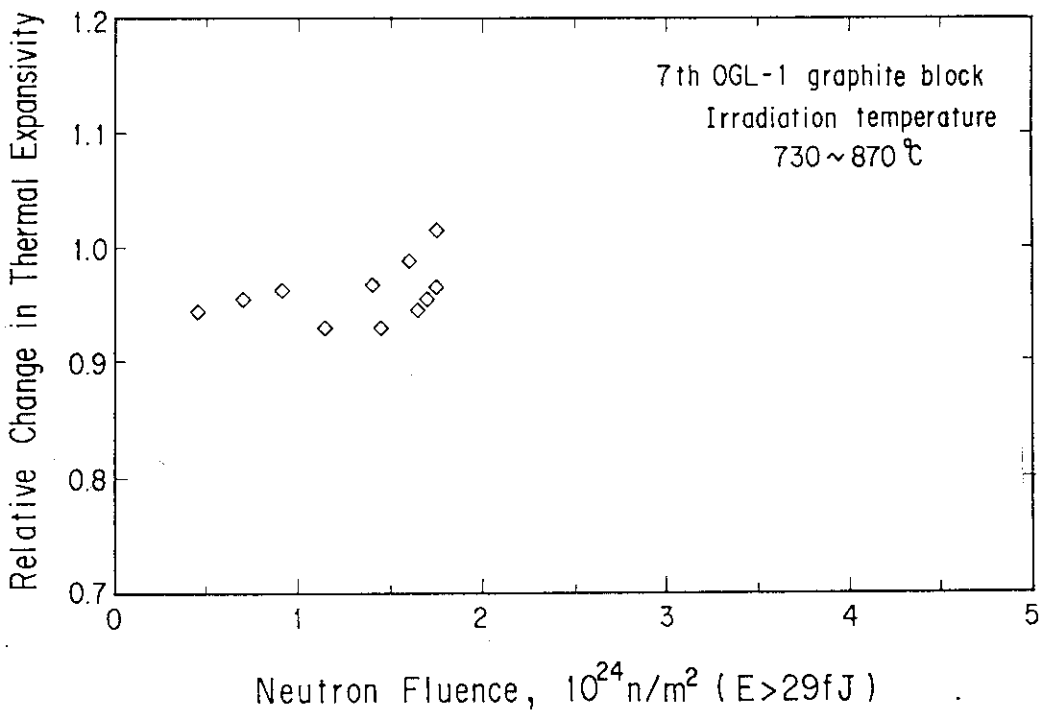


Fig. 16 Relative changes in thermal expansivity of the 7th graphite block as a function of neutron fluence

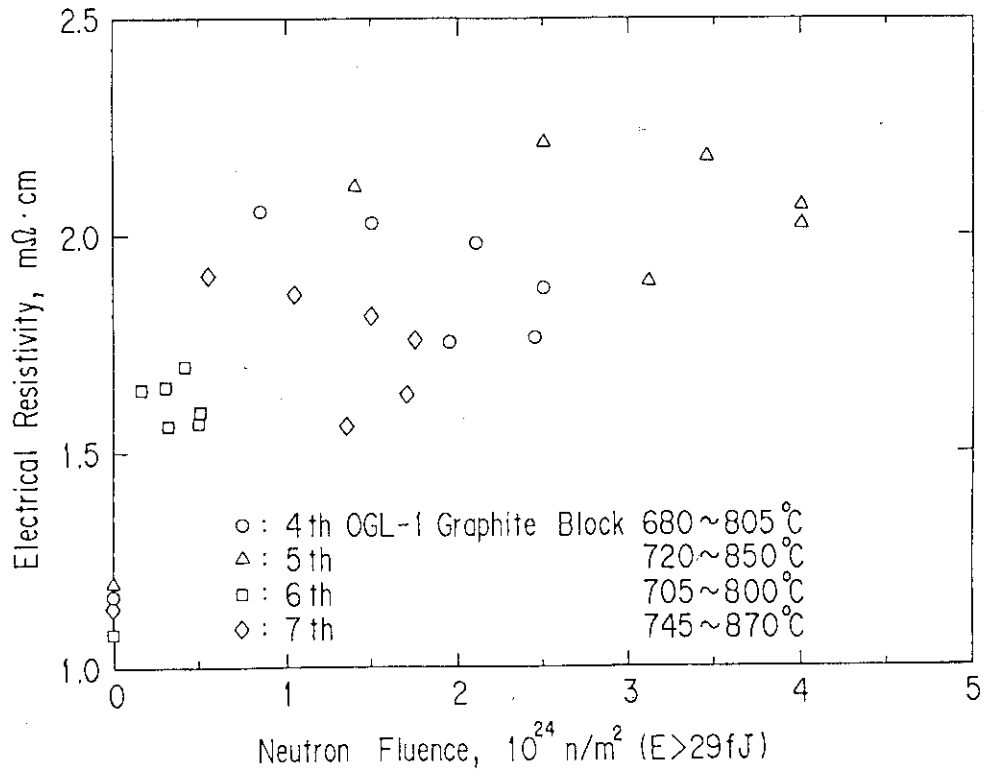


Fig. 17 Changes in electrical resistivity as a function of neutron fluence

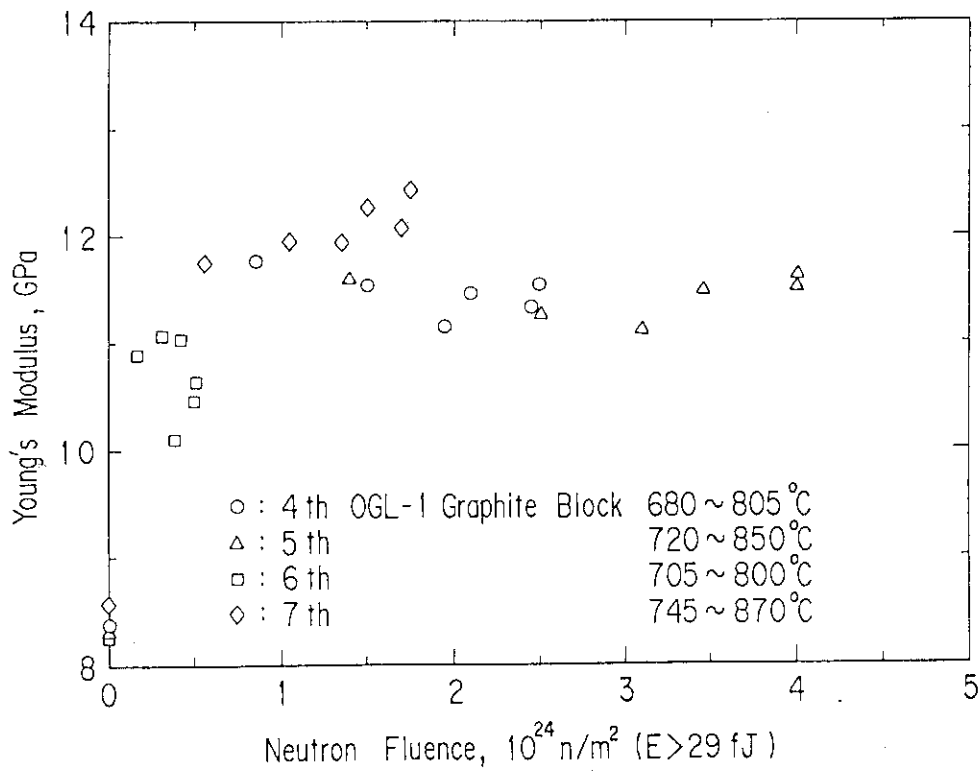
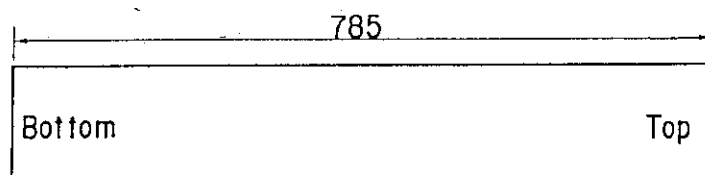
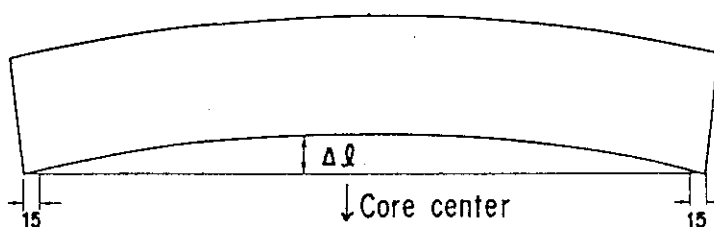


Fig. 18 Changes in Young's modulus as a function of neutron fluence

Unirradiated



Irradiated



Block NO.	Δl (mm)
4	0.18
5	0.22
6	0.06
7	0.08

Fig. 19 Bowing of OGL-1 graphite block¹²⁾