

JAERI - M
87-207

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

1988年1月

松尾 秀人

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, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株式会社

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

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

松尾 秀人

(1987年12月8日受理)

原子炉用黒鉛材料を含めた10種類の多結晶黒鉛材料や炭素材料をJMTRで800～1335℃で最高 $2.84 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 29 \text{ fJ}$)まで中性子照射し、寸法、体積、密度、熱膨張率、熱伝導度、電気比抵抗、ヤング率などの照射効果を調べた。

巨視的な寸法はPOCO黒鉛を除き照射によって収縮したが、この収縮率は照射温度が850℃付近で最も小さく、照射温度がその温度よりも低くても高くても大きくなる傾向を示した。熱膨張係数は照射によって照射の初期には増加したが、照射量がさらに増加すると次第に減少する傾向を示した。熱伝導度は照射によって減少し、電気比抵抗やヤング率は照射によって増加したが、これらの性質の照射初期における変化率は照射温度が低い程大きい値を示した。さらに、以上の実験結果をHFRで照射して得られた結果と比較検討した。

Effects of High Temperature Neutron Irradiation
on Dimensional Changes and Physical Properties
of Nuclear Graphites for HTGR

Hideto MATSUO

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

(Received December 8, 1987)

Ten kinds of polycrystalline graphites and carbon materials, including nuclear graphites, were irradiated in JMTR up to a maximum neutron fluence of 2.84×10^{25} n/m² (E>29fJ) at 800-1335°C, and effects of neutron irradiation on dimensional changes, volume, bulk density, thermal expansivity, thermal conductivity, electrical resistivity, and Young's modulus were studied.

Macroscopic dimensional shrinkages were observed for all samples except for POCO graphite. The shrinkage rates showed the smallest value at irradiation temperature of around 850°C and larger values at below and above 850°C as well. Coefficient of thermal expansion increased in the initial small range of neutron fluence, followed by decrease with neutron fluence. After irradiation, thermal conductivity decreased and electrical resistivity and Young's modulus increased. The changes in the initial small range of neutron fluence were larger for the case of lower irradiation temperatures. The results were compared with the experimental results obtained from irradiation in HFR.

Keywords: HTGR, Polycrystalline Graphite, Carbon Material, Nuclear Graphite, Irradiation Effect, Dimensional Change, Volume Change, Bulk Density Change, Thermal Expansivity, Thermal Conductivity, Electrical Resistivity, Young's Modulus

目 次

1. はじめに	1
2. 実験方法	2
2.1 試料	2
2.2 照射	2
2.3 測定方法	3
2.3.1 寸法変化	3
2.3.2 熱膨張係数	3
2.3.3 熱伝導度	3
2.3.4 電気比抵抗	3
2.3.5 ヤング率	4
3. 実験結果および考察	5
3.1 寸法, 体積, 密度変化	5
3.1.1 寸法変化	5
3.1.2 寸法変化におよぼす気孔の影響	6
3.1.3 寸法変化におよぼすバインダーの影響	7
3.1.4 体積および密度の変化	8
3.2 熱膨張係数	8
3.3 熱伝導度, 電気比抵抗, ヤング率	9
4. まとめ	11
謝 辞	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental procedure	2
2.1 Sample	2
2.2 Irradiation	2
2.3 Measurement methods	3
2.3.1 Dimensional changes	3
2.3.2 Thermal expansion coefficient	3
2.3.3 Thermal conductivity	3
2.3.4 Electrical resistivity	3
2.3.5 Young's modulus	4
3. Results and discussion	5
3.1 Length, volume, and bulk density changes	5
3.1.1 Dimensional changes	5
3.1.2 Effect of porosity	6
3.1.3 Effect of binder	7
3.1.4 Changes in volume and bulk density	8
3.2 Thermal expansion coefficient	8
3.3 Thermal conductivity, electrical resistivity, and Young's modulus	9
4. Summary	11
Acknowledgements	11
References	12

List of Tables

- Table 1 Graphites used in the present experiment
- Table 2 Irradiation capsules for the present experiment
- Table 3 Measurement methods and conditions
- Table 4 Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(1)
- Table 4 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(2)
- Table 4 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(3)
- Table 4 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(4)
- Table 4 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(5)
- Table 4 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(6)
- Table 4 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of IG-110(7)
- Table 5 Changes in dimension, volume and bulk density of H451(1)
- Table 5 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of H451(2)
- Table 5 (continued) Changes in dimension, volume and bulk density of H451(3)
- Table 6 Changes in dimension, volume and bulk density of PGX
- Table 7 Changes in dimension, volume and bulk density of ASR-0RB
- Table 8 Changes in dimension, volume and bulk density of ASR-1RB
- Table 9 Changes in dimension, volume and bulk density of 7477PT
- Table 10 Changes in dimension, volume and bulk density of ATR-2E
- Table 11 Changes in dimension, volume and bulk density of SM1-24
- Table 12 Changes in dimension, volume and bulk density of AXM-5Q1
- Table 13 Changes in dimension, volume and bulk density of AXF-5Q1

- Table 14 Changes in coefficient of thermal expansion of IG-110(1)
- Table 14(continued) Changes in coefficient of thermal expansion of IG-110(2)
- Table 14(continued) Changes in coefficient of thermal expansion of IG-110(3)
- Table 15 Changes in coefficient of thermal expansion of H451(1)
- Table 15(continued) Changes in coefficient of thermal expansion of H451(2)
- Table 16 Changes in coefficient of thermal expansion of PGX
- Table 17 Changes in coefficient of thermal expansion of 7477PT
- Table 18 Changes in coefficient of thermal expansion of ATR-2E
- Table 19 Changes in coefficient of thermal expansion of SMI-24
- Table 20 Changes in coefficient of thermal expansion of AXM-5Q1
- Table 21 Changes in coefficient of thermal expansion of AXF-5Q1
- Table 22 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of IG-110(1)
- Table 22(continued) Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of IG-110(2)
- Table 23 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of H451
- Table 24 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of PGX
- Table 25 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of 7477PT
- Table 26 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of ATR-2E
- Table 27 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of SMI-24
- Table 28 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of AXM-5Q1
- Table 29 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity and Young's modulus of AXF-5Q1
- Table 30 Time constant and saturation thermal conductivity of IG-110, H451 and ATR-2E graphites

List of Figures

- Fig.1 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 800 - 900 °C
- Fig.2 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 910 - 1090 °C
- Fig.3 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 1150 - 1250 °C
- Fig.4 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 550 - 650 °C
- Fig.5 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 745 - 900 °C
- Fig.6 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 910 - 1090 °C
- Fig.7 Dimensional changes of H451 graphite irradiated at 800 - 1000 °C
- Fig.8 Dimensional changes of H451 graphite irradiated at 1080 - 1280 °C
- Fig.9 Dimensional changes of ATR-2E graphite irradiated at 960 - 1100 °C
- Fig.10 Relation between dimensional changes and irradiation temperature for IG-110 graphite
- Fig.11 Volume changes of IG-110 graphite irradiated at 800 - 900 °C
- Fig.12 Volume changes of IG-110 graphite irradiated at 900 - 1100 °C
- Fig.13 Volume changes of IG-110 graphite irradiated at 1100 - 1280 °C
- Fig.14 Volume changes of H451 graphite irradiated at 800 - 1280 °C
- Fig.15 Volume changes of ATR-2E graphite irradiated at 960 - 1100 °C
- Fig.16 Changes in bulk density of IG-110 graphite irradiated at 850 - 1280 °C
- Fig.17 Changes in bulk density of H451 graphite irradiated at 800 - 1280 °C
- Fig.18 Changes in bulk density of ATR-2E graphite irradiated at 960 - 1100 °C

- Fig.19 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 800 - 900 °C
- Fig.20 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 800 - 900 °C
- Fig.21 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 910 - 1090 °C
- Fig.22 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 910 - 1090 °C
- Fig.23 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 1150 - 1280 °C
- Fig.24 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 1150 - 1280 °C
- Fig.25 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 750 - 900 °C
- Fig.26 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 750 - 900 °C
- Fig.27 Changes in CTE of H451 graphite irradiated at 845 - 900 °C
- Fig.28 Relative changes in CTE of H451 graphite irradiated at 845 - 900 °C
- Fig.29 Changes in CTE of H451 graphite irradiated at 980 - 1090 °C
- Fig.30 Relative changes in CTE of H451 graphite irradiated at 980 - 1090 °C
- Fig.31 Changes in CTE of H451 graphite irradiated at 1150 - 1280 °C
- Fig.32 Relative changes in CTE of H451 graphite irradiated at 1150 - 1280 °C
- Fig.33 Changes in CTE of ATR-2E graphite irradiated at 950 - 1100 °C
- Fig.34 Relative changes in CTE of ATR-2E graphite irradiated at 950 - 1100 °C
- Fig.35 Changes in thermal conductivity of IG-110 graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.36 Relative changes in thermal conductivity of IG-110 graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.37 Changes in thermal conductivity of H451 graphite irradiated at 800 - 1200 °C

- Fig.38 Relative changes in thermal conductivity of H451 graphite irradiated at 800 - 1200 °C
- Fig.39 Changes in thermal conductivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.40 Relative changes in thermal conductivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.41 Changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 800 - 1335 °C
- Fig.42 Relative changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 800 - 1335 °C
- Fig.43 Changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 585 - 1335 °C
- Fig.44 Relative changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 585 - 1335 °C
- Fig.45 Changes in electrical resistivity of H451 graphite irradiated at 800 - 1200 °C
- Fig.46 Relative changes in electrical resistivity of H451 graphite irradiated at 800 - 1200 °C
- Fig.47 Changes in electrical resistivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.48 Relative changes in electrical resistivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.49 Changes in Young's modulus of IG-110 graphite irradiated at 800 - 1335 °C
- Fig.50 Relative changes in Young's modulus of IG-110 graphite irradiated at 800 - 1335 °C
- Fig.51 Changes in Young's modulus of H451 graphite irradiated at 800 - 1200 °C
- Fig.52 Relative changes in Young's modulus of H451 graphite irradiated at 800 - 1200 °C
- Fig.53 Changes in Young's modulus of ATR-2E graphite irradiated at 1000 - 1200 °C
- Fig.54 Relative changes in Young's modulus of ATR-2E graphite irradiated at 1000 - 1200 °C

1. はじめに

高温ガス炉ではその炉心構造材料としての用途に応じて適切な性質を有する種々の黒鉛材料が使用されている。これらの黒鉛材料の物理的、化学的および機械的性質、ならびにそれらの諸性質の中性子照射効果などは材料の種類によって著しく異なるとともに、放射線照射、応力、温度、冷却材中の不純物などの使用される環境条件によって影響を受ける。このため黒鉛材料を使用するに際してはその諸性質に及ぼすこれらの種々の因子の影響を前もって明らかにしておく必要がある。

原子炉用黒鉛材料は、黒鉛減速型原子炉の主要炉心構造材料として使用されてきているため、その巨視的な寸法や物理的性質の高温照射効果については従来から数多くの研究報告がなされてきている。また、これらの研究に基づいて原子炉用材料として適切な性質を有する黒鉛材料の開発も行われてきている。中性子照射効果の中では、特に照射による巨視的な寸法変化は黒鉛構造物の設計や安全解析にとって極めて重要な性質であるが、この照射による巨視的な寸法変化は材料の種類によって異なった傾向を示すことが知られている。しかし、照射データが蓄積されてくるにしたがって照射量の比較的到低い領域では等方性材料ほど照射寸法安定性に秀れていることが次第に明らかになってきている。これらの実験事実も重要な選定基準として高温工学試験研究炉ではその炉心候補材料として等方性材料が選定されている。炉心材料として使用するためにはその材料が使用される条件下での照射効果のデータが不可欠であり、その高温照射効果を調べるため JMTR, JRR-2, およびオランダの HFR での照射試験研究を進めてきた。

高温工学試験研究炉の炉心候補材料である微粒等方性黒鉛材料の照射効果はすでに一部報告されているが、^{1, 2)} この報告書では寸法変化、熱膨張係数、熱伝導度、ヤング率、電気比抵抗などについて JMTR でさらに照射試験を行って調べた結果について記述するとともに、これらの諸性質の照射による変化を他の黒鉛材料の照射効果とも比較検討した結果をまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 試料

この研究に用いた試料を Table 1 に示した。このうち IG-110 は原研で開発研究を進めている高温工学試験研究炉の燃料体および反動反射体用, PGX は固定反射体用, ASR-ORB は炉床部断熱用としてそれぞれ使用される予定の候補材料である。また, H 451 はアメリカの HTGR 用炉心黒鉛材料として開発研究が行われてきた準等方性黒鉛材料であり, ATR-2E は西ドイツの HTGR 用黒鉛材料, SM 1-24 はイギリスの黒鉛減速型原子炉の炉心材料としても使用されている原子炉用黒鉛材料である。7477PT は微粒等方性黒鉛材料であって IG-110 と極めて類似した性質を有し, AXM-5Q1 や AXF-5Q1 は超微粒のフィラーを用いて製造された等方性黒鉛材料である。

供試用の試験片は大型の素材ブロックから加圧成型材では加圧方向に平行および垂直方向, 押し出し材では押し出し方向に平行および垂直の 2 方向から採取し, 微結晶の C 軸方向の配向が大きい方向を AG, それに垂直方向を WG とした。また, 両者の方向を区別できない材料については方向の表示は示していない。なお, Table 1 の照射前の物性値は照射に供した試料の照射前の測定値の平均値である。照射中の試験片からの脱ガスおよび試験片加工時のひずみを除去するために試験片は加工後超音波で洗浄し, 黒鉛材料は予定最高照射温度よりも高い温度で, また炭素質材料 ASR-ORB と ASR-IRB は 1100°C で 1~2 時間それぞれ真空中で加熱した後諸特性の測定を行い, 照射に供した。

2.2 照射

試料は日本原子力研究所大洗研究所の JMTR で, 燃料体領域の K-6 或は G-6 照射孔で照射した。各照射キャプセルの照射条件を Table 2 に示した。

照射キャプセルは, 試料を入れる熱媒体, 内筒, 外筒, 熱電対, フラックスモニターから主に構成される。照射用試料は外径 40mm の黒鉛製の熱媒体に入れて長さ約 650 mm の照射キャプセルに装填した後, 内筒内を真空にしてから高純度ヘリウムを充填した。内筒と外筒の間のガス圧力を変えることによりガンマ発熱で発生した熱の伝達を調節して照射温度を制御した。測温用には 1 本の照射キャプセル当り 5 本の直径 1.6 mm の WRe/5-26 を使用して試料の温度を測定し, そのうちのキャプセル中心付近の 1 本は温度制御用とした。

試料の中性子照射量を評価するために 1 本の照射キャプセルについて 4 個の高純度のフラックスモニターを熱媒体中のできるだけ試料に近い場所に装填した。そのフラックスモニターの放射能の測定結果を用いて $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ の反応から 1 MeV 以上のエネルギーの中性子照射量を求め, その値を 2.02 倍³⁾して中性子エネルギーが 0.18 MeV (29 fJ) 以上の場合の照射量とした。

各試験片の照射温度は、キャプセル内の異なった位置での5本の熱電対による実測値をもとにして内挿によって求めた。試験片の照射温度は、原子炉の運転中はもちろん運転サイクルが変わった場合には必ずしも同じであるとは限らない。このため原子炉が全出力運転をしている場合における最高温度と全出力運転時でも低い温度の5%の期間での温度を除いた最低温度の間を照射温度とし、また運転サイクル数が多くなった場合には各サイクルにおけるその最高温度と最低温度の平均温度をもとにして、全運転期間中における照射温度範囲を求めた。なお、測定結果をグラフにプロットする場合の照射温度領域はその平均温度を基準にして設定した。

2.3 測定方法

Table 3に測定方法を示し、その概要を以下に記する。

2.3.1 寸法変化

高精度の指針測微計（津上製作所製）を用いて室温で測定した。測定の際には、 $10 \times 25 \text{ mm}$ の試験片について、長手方向では10回、それに垂直方向では12回測定し、それらの平均値をそれぞれの方向の測定値とした。なお、この測定装置の最小目盛は $1 \mu\text{m}$ 、測定圧は 200 g 、測定精度は戻り誤差で $0.2 \mu\text{m}$ 、全精度で $0.3 \mu\text{m}$ であった。また、体積および密度の変化は寸法および重量測定から求めた。

2.3.2 熱膨張係数

溶融透明石英ガラスを標準試料とする示差膨張型熱膨張計（リガク製）で $\phi 5 \times 20 \text{ mm}$ の試験片について室温から 900°C まで毎分 5°C の昇温および降温速度で測定した。測定では、測定値にベースラインの変動と標準試料の熱膨張量などを補正して各温度における試料の絶対熱膨張量を求めた。熱膨張の測定値は3次又は4次の多項式で表わしてその各係数は最小自乗法を用いて決定した。このようにして求めた多項式を用いて 20°C を基準温度としての平均熱膨張係数と各温度における微分熱膨張係数を求めた。なお、 900°C 以上での熱膨張率は最小自乗法により決定した式から求めた。

2.3.3 熱伝導度

コールラウッシュ法により真空中 20°C において測定した。この測定では、直径 5 mm 、長さ 75 mm の形状を有し、その軸方向の断面積が一樣な試験片にその平均温度が 20°C になるように電気抵抗の大小に応じて $5 \sim 20 \text{ A}$ の直流を流した。その際に試験片の軸方向の中心を最高温度とする放物線状の温度分布を生じるので、軸方向の3点における温度を $\phi 0.1 \text{ mm}$ のT(銅・コンスタンタン)熱電対で測定して熱伝導度を求めた。

2.3.4 電気比抵抗

試験片に 100 mA の直流を流し、電圧降下法により室温で測定した。測定では1本の試験片について3回測定し、その平均値を測定値とした。

2.3.5 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、密度、重力加速度からヤング率を求めた。測定では 1 本の試験片について 3 回測定し、その平均値を測定値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 寸法, 体積, 密度変化

3.1.1 寸法変化

Table 4～Table Bに測定した全ての試料の寸法, 体積, かさ密度などの照射による変化を, Fig. 1～Fig. 9にはこれらの実測値を照射量の関数として図示した。なお, これらの結果を示している記号のうち, AGは微結晶の配向でそのC軸方向がより揃っている方向, WGはそれに垂直方向を意味する。石油コークス系微粒等方性材料IG-110の照射による寸法変化の結果のうちFig. 1～Fig. 3はJMTRでの照射試験結果, Fig. 4～Fig. 6はJMTRとHFRの2つの原子炉での照射試験結果を一緒にプロットしたものである。これらの結果から明らかなように, IG-110の寸法は照射によって収縮し, 照射量が増加するにしたがってその収縮率は次第に大きくなる。この照射寸法収縮率は照射温度によってかなり異なり, またAGの寸法収縮率がWGの方向の値よりもわずかに小さい。

なお, JMTRとHFRの異なった原子炉で照射した結果を比較する場合には中性子照射量だけでなく, 中性子束の影響も考慮する必要がある。^{4,5)} Brocklehurstら⁴⁾は, 430～450℃で最高約 10^{22} n/cm² (DNE)までDFRとPLUTOで多結晶黒鉛材料を照射し, 寸法変化率や熱伝導度の変化に対して中性子束の影響があるとしている。しかし, KennedyとEathley⁵⁾は, HFIR, ORR, その他3種類の原子炉で400～900℃で最高約 40×10^{25} n/m² ($E > 0.75$ MeV)まで多結晶黒鉛材料を照射して寸法変化率やヤング率の変化を調べ, 照射効果に対しては中性子束の大小の影響はないとしている。

このように照射効果に及ぼす中性子束の影響はまだ明確ではないと言える。JMTRの燃料領域の照射孔の高速中性子束は約 $3 \sim 4 \times 10^{14}$ n/cm²·s ($E > 29$ fJ)³⁾, HFRではGG-14キャプセルの場合¹⁾に試料の照射量と全出力運転時の照射日数から求めた中性子束は最高約 4.3×10^{14} n/cm²·sで両者の原子炉の中性子束には大きな差はない。IG-110をJMTRとHFRで照射した結果の比較では寸法変化率の測定値のバラツキが大きく, 異なった原子炉で照射した場合に得られるデータは同じ収縮の傾向は示すが同じ値であるかどうかは明確ではない。また, Fig. 7およびFig. 8に示した石油コークス系準等方性材料H451の寸法変化率もIG-110とほぼ同じような変化傾向であり, ATR-2EもFig. 9に示したように照射によって寸法は収縮する。

さらに, IG-110の照射寸法収縮率の照射温度依存性をみるために, 各照射温度での実測値ならびにHFRで照射して得られたデータ¹⁾から照射量が 3×10^{25} n/m² ($E > 29$ fJ)での寸法収縮率を内挿によって求め, 照射温度との関係を示したのがFig. 10である。この図から明らかなように, IG-110の照射寸法収縮率は照射温度によって著るしく異なる。すなわち, 照射寸法収縮率は照射温度が850℃付近で最も小さく, 照射温度がそれよりも低くても或は高くてもいずれも大きくなっているのが認められる。これらの寸法収縮率の変化傾向は他の材料で得られている傾向⁶⁾ともかなり良く一致する。しかし, 文献⁶⁾では寸法収縮率は照射温度が1100℃以上で

単純な増加を示さないが、この実験でのその変化挙動はデータ数が少ないこともあって明確ではない。このように寸法収縮率は照射温度に大きく依存するが、これらの結果は生成した照射欠陥の寸法収縮に対する影響が照射温度によって異なることを示している。

原子炉用黒鉛材料の巨視的な照射寸法変化に影響を及ぼす因子としては、微結晶の大きさや格子定数、微結晶の内部や周囲の気孔、バインダーなどの照射による変化を考える必要がある。まず、微結晶の格子定数の照射による変化については熱分解黒鉛を 1300~1500°C で照射した場合の変化が得られている⁷⁾。この結果によると、熱処理しない試料の場合には照射量の増加とともに層面間隔 C_0 が減少する。これに対して、熱処理した試料の C_0 は照射によってほとんど変化しない。また、微結晶の大きさの照射による変化では、熱分解黒鉛の C 軸方向の微結晶の大きさ L_c は、照射前に L_c の大きい試料ほど照射の初期に急激に小さくなり、その後は照射量が増えてもあまり変化しない。このように微結晶の大きさや層面間隔は照射によって変化する。

Henson ら⁸⁾ は、300~1350°C で照射した黒鉛材料の巨視的な寸法や微結晶の格子定数の変化を測定し、解析した。この結果によると、照射量が増加するにしたがって微結晶の C_0 は急激に増加し、 a_0 は収縮するが、その後は漸次増加あるいは減少する。また、照射温度が低ければ低い程それらの変化率は大きい。この結果、寸法変化に対して、照射温度が 300°C 以上では非常に小さな格子間原子のクラスターはあまり影響を及ぼさないが、空孔やそのグループの役割が重要になるとした。また、照射温度が 650°C 以下では、ループを形成している空孔は寸法変化に対してあまり大きな影響をもっていないが、650°C よりも高い温度では空孔単独は少なく、空孔や格子間原子のループ、空孔の線欠陥などが多く形成され影響を及ぼすとした。

Reynolds と Thrower⁹⁾ は、照射による微結晶の C 軸方向の増加は、格子間原子の小さなクラスターの生成とこれらのクラスターが大きく成長して 1 つの層面を形成するという 2 つの原因によって生じているとしている。

また、Bokros と Price⁸⁾ によると、照射温度が 500°C よりも低い場合には寸法収縮率は微結晶の大きさにほとんど影響されないが、照射温度がそれよりも高くなると微結晶の大きさ L_c が小さい程寸法収縮率は大きくなる。このことは、格子間原子は照射温度が 500°C よりも低い温度でクラスター化するが、微結晶がそのクラスターよりも十分に大きいために寸法収縮は微結晶の大きさに影響されない。しかし、照射温度が 500°C 以上では格子間原子のクラスターがさらに大きくなるために巨視的な寸法の収縮は微結晶の大きさによって影響されるようになることを示唆している。

これらの実験結果ならびにその解析から、照射温度が 850°C 付近までは生成した照射欠陥は空孔、格子間原子やそれが集合した欠陥が主であると考えられる。照射温度が高くなるにしたがって格子間原子の欠陥が次第に大きくなり、850°C 付近では新しい層面が微結晶内につくられるような状態になっていくために寸法収縮率は次第に小さくなる。また、850°C よりも高い温度では空孔およびその集合した欠陥が主に影響し、照射温度が高くなるにしたがってより複雑な空孔の欠陥が生成されるようになるために寸法収縮率も大きくなると考えられる。

3.1.2 寸法変化におよぼす気孔の影響

原子炉用黒鉛材料の照射寸法収縮率は、これまでに示したように、微結晶内に生成した照射欠

陥の種類，すなわち微結晶の構造の照射による変化によってかなり異なる。この他に，原子炉用黒鉛材料は多孔質材料であるためにその巨視的な照射寸法変化は気孔によって影響を受ける。この気孔の影響をみるための1つとして超微粒のフィラーが用いられていて等方性材料で高密度の AXM-5Q1 と AXF-5Q1 の2種類のPOCO 黒鉛の巨視的な寸法の照射による変化を調べた。これらの結果を Table 12 および Table 13 に示したが，他の試料の寸法が収縮を示す照射条件下でもこれらの試料の寸法は照射によって必ずしも収縮するとは限らないことを示している。これらの2つの試料の照射前の熱膨張係数は Table 1 に示したように他の試料に比較してかなり大きい値である。多結晶黒鉛材料の巨視的な熱膨張係数は，微結晶の熱膨張係数やその配向性，気孔などによって影響される。巨視的な熱膨張係数が大きい材料では微結晶のC軸方向の大きな熱膨張がその周囲の気孔によって吸収される割合が小さく，そのC軸方向の影響が大きくなる。このことから，先に述べたように，照射によって微結晶の寸法がC軸方向では膨張し，a軸方向では収縮した場合に，AXM-5Q1 や AXF-5Q1 のような熱膨張係数の大きい材料ではその微結晶のC軸方向の寸法変化の影響が熱膨張係数の小さい材料に比較して大きく出るようになる。この結果，微結晶のC軸方向の膨張が全体として巨視的な寸法収縮率が小さくなる方向により大きく作用するようになると思われる。このような照射寸法変化率と熱膨張係数との関連についてはこれまでにいくつか報告されており，^{9,11,12)} 以上の結果はこれらの文献とも矛盾しない。

3.1.3 寸法変化におよぼすバインダーの影響

原子炉用黒鉛材料の照射寸法変化に及ぼす他のもう1つの因子としてバインダーがある。原子炉用黒鉛材料のバインダーは，その含有量は多くはないが非晶質である。先に述べたように，照射寸法変化に対しては結晶構造の完全性も影響するため結晶が十分に発達していないバインダーの影響も検討する必要がある。このために非晶質の炭素成分の含有量が多い ASR-ORB と ASR-IRB の2種類の材料について照射による巨視的な寸法変化を調べた。ASR-ORB や ASR-IRB は他の試料と異なり製造時の最終焼成温度が 1100°C であって未黒鉛化成分を多く含んでいる炭素材料である。これらの試料の照射による寸法変化の測定結果を Table 7 および Table 8 に示した。2つの試料の寸法収縮率は類似した条件で照射した他の試料に比較して大きい値を示す。このことは未黒鉛化成分の照射による寸法の収縮は黒鉛化している材料よりも大きいことを示している。結晶構造が十分に発達していない炭素材料の巨視的な寸法に及ぼす照射効果については，この実験を行った照射温度領域とは異なるが，従来からも調べられている。これらの結果では，照射寸法収縮率は結晶の完全性にも依存し，結晶がより発達している材料ほど照射による寸法変化は小さいことや，^{7,13,14)} 照射によって黒鉛化が進む，いわゆる照射黒鉛化の考え^{15,16)} も報告されている。ASR-ORB や ASR-IRB の照射寸法変化についての実験結果はこれらの報告とも類似している。なお，この実験で比較のために使用した ASR-ORB と ASR-IRB の2つの試料の原料は全く同じである。両者で異なるのは製造時のピッチの含浸回数で ASR-IRB が ASR-ORB よりも1回多く，そのため ASR-IRB の密度が大きい。このため ASR-IRB が ASR-ORB よりも未黒鉛化成分をより多く含んでいる。しかし，その含有量の違いが寸法収縮率にどのように影響を及ぼしているかについてはデータが少ないために明確ではなく，実験誤差の範囲内であると考えられる。また，照射キャプセル 84 M-37 A で照射した ASR-

ORB 試料の寸法収縮率は、81 M-36 A キャプセルで照射した試料の値に比較して、照射量が少いにもかかわらず AG と WG の両方向とも大きい。このことは、試験片の違いによる測定値のバラツキの他に、81 M-36 A キャプセルで照射した場合にはその最高照射温度がこれらの材料の製造時の最終焼成温度以上になっているために、照射に加えて 1100°C よりも高い温度になったことによる熱処理や 1100°C よりも低い温度でも長時間の熱処理による影響などが寸法収縮率の結果にあらわれているとも考えられる。

3.1.4 体積および密度の変化

以上示したように、AXM-5 Q1 と AXF-5 Q1 の 2 つの POCO 黒鉛を除いて原子炉用黒鉛材料の巨視的な寸法は AG と WG の両方向とも照射によって収縮し、その寸法収縮率は素材ブロックからの試験片の採取方向、すなわち微結晶の配向によって異なる。このことは、完全な等方性材料を除いて、体積や密度とともに試験片の形状が照射によって変化することを示している。この体積や密度が照射によってどのように変化するかを照射量の関数として示したのが Fig. 11 ~ Fig. 18 である。IG-110 と H 451 の両方の試料とも体積は照射によって小さくなり、照射量が増えるにしたがってその体積収縮は次第に大きくなる傾向を示している。先に示したように、寸法収縮率は AG と WG の両方向で異なるので、試験片は照射によってその形状が変化しながら全体として体積が収縮して高密度化することができる。

このように照射によって体積が収縮するが、照射量が次第に増えるにしたがってその体積収縮も次第に大きくなり、それに伴って内部に応力が蓄積されるようになる。この収縮が続いてもはや発生した応力を内部で抑えられなくなる極限に達するとマイクロクラックの発生を伴って逆に体積が膨張するようになる。この現象は、“turnaround” として知られ、それが現われる照射量領域は照射温度によっても異なることはすでに数多く報告されている。IG-110 については、この実験を行った照射条件下ではその現象はまだ現われてはいないといえることができる。

3.2 熱膨張係数

Table 14 ~ Table 21 に全測定試料の熱膨張係数 (CTE) の測定結果を、また Fig. 19 ~ Fig. 34 には熱膨張係数やその相対変化を照射量の関数として示した。この表で、 CTE_{400} は 400°C における熱膨張係数、 CTE_{20-400} 、 CTE_{20-500} 、 $CTE_{20-T_{irr}}$ は 20°C を基準とした場合の 400°C、500°C、照射温度 (T_{irr}) までのそれぞれの平均熱膨張係数を表わす。

IG-110 の熱膨張係数は照射量が増えるにしたがってわずかに増加するが、その後は次第に減少する。これらの照射による変化は照射温度によっても異なり、照射温度が高い程 CTE の極大値を示す照射量は高い方にずれていく傾向を示している。これらの結果のうち、Fig. 25 および Fig. 26 は JMTR と HFR の異なった原子炉で照射した場合の結果をプロットしたものである。CTE は照射量の低い領域では増加し、照射量がさらに増えると減少する傾向が認められる。また H 451 も IG-110 とほぼ同じ変化傾向を示しており、これらの結果は報告されている等方性材料や準等方性材料の変化傾向とも類似している。^{17,18)}

これらの熱膨張係数の照射による変化では、照射前の熱膨張係数が大きい AXM-5 Q1 や

AXF-5Q1の熱膨張係数は照射によって減少し、その減少率は測定した全試料の中で最も大きい。巨視的な熱膨張係数がこのように照射によって増加したり減少したりする原因としては照射による微結晶の構造変化とそれがその周囲に及ぼす影響を考える必要がある。すなわち、照射量が増加すると微結晶のC軸とa軸方向の非等方的な寸法変化が次第に大きくなるとともに照射前から存在していた気孔が次第に小さくなって微結晶のC軸方向の大きな熱膨張を吸収する割合が小さくなるために巨視的な熱膨張係数は大きくなる。しかし、照射量がさらに増えると微結晶の寸法変化がさらに進み、遂にはマイクロクラックがその層間や周囲に発生するようになる。このため微結晶のC軸方向の大きな熱膨張はこのマイクロクラックによって吸収されるようになる。照射前の熱膨張係数の大きい材料では微結晶のわずかな変化でもその周囲に影響を及ぼしやすいために照射量が低い領域でもマイクロクラックが発生する。このため巨視的な熱膨張係数が大きい等方性材料ほど照射によって早く影響を受け、その熱膨張係数は照射量の低い領域で減少しはじめると考えられる。

また、微結晶の照射による変化では、比較的到低い温度で照射した場合には先に述べたように格子間原子のクラスターが生成され、照射量の増加とともに次第に1つの層面を形成するようになる。このためそのクラスターが小さい時には層面間隔も大きくなってC軸方向の熱膨張係数も大きい。照射が進むにしたがって照射欠陥も次第に大きくなって1つの層面のようにになると熱膨張係数も減少する傾向を示すようになると考えられる。また、照射欠陥が微結晶の大きさに比較して非常に小さい場合にはその影響が少ないために微結晶が比較的小さい等方性材料ほど照射の比較的早い時期に影響が出てくると考えられる。

また、高温で照射した場合には照射温度が高くなるにしたがって最大値を示すCTEは高照射量側にずれる。このことは、照射量が多くなると微結晶のa軸方向の収縮が大きくなるので微結晶間にすき間ができ、このすき間によって微結晶の熱膨張が吸収される割合が大きくなるのでより多く照射しなければCTEは増加しないことになると考えられる。

3.3 熱伝導度、電気比抵抗、ヤング率

Table 22～Table 29に実験に供した全ての試料の20°Cにおける熱伝導度、電気比抵抗、ヤング率の測定結果を、またIG-110、H451、ATR-2Eの各試料についての熱伝導度の変化ならびに照射前に対する相対変化をFig. 35～Fig. 40に、電気比抵抗の結果をFig. 41～Fig. 48に、ヤング率の結果をFig. 49～Fig. 54に照射温度をパラメータとしてそれぞれ照射量の関数として示した。

(1) 熱伝導度

Fig. 35およびFig. 36に示したように、IG-110試料の熱伝導度は照射量が増えるにしたがって比較的照射の初期に急激に減少した後は照射量が増えてもほとんど変化しなくなる。この減少割合は照射温度によって異なり、照射温度が低い程大きい。これらの変化傾向はAGとWGの両方向ともほぼ同じである。また、Fig. 37～Fig. 40に示したH451とATR-2E試料の場合では、データ数がIG-110に比較して少ないが、熱伝導度の照射による変化傾向はIG-110とほぼ同じであるのが認められる。

このように多結晶黒鉛材料の熱伝導度は照射によって減少し、照射量が増えるにしたがって一定の値を示すようになる。この熱伝導度の照射による変化は次式で与えられる。

$$K = K_s + (K_0 - K_s) \exp(-\phi t / \tau)$$

ここで、 K は照射量 ϕt まで照射した後の熱伝導度、 K_0 は照射前の値、 K_s は飽和後の熱伝導度、 τ は時定数であり、 τ が小さい材料ほど照射初期の変化が大きくて照射量の少ない領域で飽和するようになる。図に示した結果ではデータ数が少なく、またデータのバラツキも大きい、これらの測定値から照射量の多い領域で熱伝導度はすでに飽和し、測定値の最小値を飽和値として τ を求めた。この結果をTable 30に示したが、 τ と K_s の両者とも照射温度、試料の種類ならびに微結晶の配向方向によって異なる。平均照射温度が同じH 451とIG-110を比較してみると、照射前の熱伝導度の大きいH 451がIG-110よりも K_s は大きい。しかし、H 451の時定数 τ は必ずしもAGとWGの両方向でIG-110の値よりも大きいとは限らない。このためH 451がIG-110よりも熱伝導度が照射によって飽和しにくい材料であるとは現在のデータからは言えず、さらにデータを蓄積して関係を求める必要があると考えられる。

(2) 電気比抵抗

電気比抵抗は照射の初期に急激に増加するが、その後は照射量が増えてもほとんど変化しない。この照射の初期の増加率は照射温度が低い程大きい。また、照射温度が高い場合には電気比抵抗は照射量が増えるにしたがってゆるやかに増加し、遂には飽和して照射温度に無関係に一定の値を示すようになる。

なお、照射した原子炉が異なった場合の結果をIG-110について比較検討した。Fig.41およびFig. 42はJMTR照射だけで得られた結果であり、これらの結果とHFRでの照射実験結果と一緒にプロットしたのがFig. 43およびFig. 44である。電気比抵抗は照射量が増加するにしたがって飽和し、その飽和値も異なった原子炉で照射した結果にはほとんど差がない。このことから電気比抵抗に関してはJMTRとHFRの異なった原子炉で照射した場合の照射効果に違いは認められないといえることができる。

(3) ヤング率

ヤング率は照射によって増加する。この増加率は照射の初期に大きく、その後は照射量が増えるにしたがって次第に小さくなるが、照射初期の増加率は照射温度が低い程大きい傾向を示す。また、測定データのバラツキが大きい、IG-110のデータはすでに報告されている測定値²⁾とも変化傾向は類似してはいるが必ずしもデータは一致していない。これらは試験片を採取した素材ブロックの違い、照射条件や測定方法の違いなどに起因していると考えられる。

4. ま と め

以上得られた実験結果ならびに考察は次のようにまとめられる。

- (1) 寸法は POCO 黒鉛を除いて照射により収縮する。この寸法収縮率は照射温度が 850°C 付近で最も小さく、照射温度がその温度よりも高くても低くても大きくなる。
- (2) 寸法収縮率は熱膨張係数と関係があり、熱膨張係数の大きい材料ほど寸法収縮率は小さくなる。
- (3) 炭素材料の照射寸法収縮率は黒鉛材料よりも大きい。
- (4) 照射により POCO 黒鉛を除いて体積は収縮し、高密度化する。
- (5) 熱膨張係数は照射の初期に増加した後、照射量がさらに増えると減少する。この変化は照射温度によって異なり、照射温度が高い程その極大値を示す照射量は高照射量側にずれる。

これらの寸法変化や熱膨張係数に対する実験結果から以下に示す照射温度の影響が考えられる。

① 照射温度が 850°C 以下の場合

空孔や格子間原子のグループが生成されるが、その格子間原子は 1 つの大きなグループまでには生長していない。格子間原子の小さなグループが生成されると層面が歪むとともにその歪んだ層面が a 軸方向に縮む。その結果、巨視的な寸法収縮率が大きくなる。また面間隔が大きくなるので c 軸方向の熱膨張係数が大きくなることになる。

② 照射温度が 850°C の場合

格子間原子の新しい層面が形成されると考えられる。この場合には面間隔はほとんど変化しないので微結晶の c 軸方向の熱膨張係数は変化せず、そのため巨視的な熱膨張係数もあまり変化しないと考えられる。また、新しい層面の形成により c 軸方向の寸法が大きくなり、全体としては寸法収縮率が小さくなると考えられる。

③ 照射温度が 850°C 以上の場合

格子間原子が 1 つの層面に生長するとともに空孔の線欠陥が生じる。その結果、微結晶の a 軸方向の寸法収縮が大きくなるとともにバインダーの寸法も収縮し、微結晶間にすき間ができる。このすき間が微結晶の熱膨張を吸収するようになり、全体としての熱膨張係数が小さくなる。

- (6) 熱伝導度は照射により減少し、照射量が多くなると飽和する。その減少率は照射の初期に大きく、また照射温度が低い程大きい。
- (7) 電気比抵抗やヤング率は照射によって増加し、その増加率は照射の初期に大きく、照射量が増えるにしたがって次第に小さくなり、飽和する。また照射温度が低い程照射初期の変化が大きい。

謝 辞

この照射試験研究を遂行するにあたり研究ならびに試験実施計画の策定にあたり御指導をいただきました今井 久 黒鉛材料研究室長、照射キャプセルの設計、製作、照射ならびに中性子照射量の評価などに御協力をいただきました大洗研究所ならびに東海研究所の関係者に感謝致します。

4. ま と め

以上得られた実験結果ならびに考察は次のようにまとめられる。

- (1) 寸法は POCO 黒鉛を除いて照射により収縮する。この寸法収縮率は照射温度が 850°C 付近で最も小さく、照射温度がその温度よりも高くても低くても大きくなる。
- (2) 寸法収縮率は熱膨張係数と関係があり、熱膨張係数の大きい材料ほど寸法収縮率は小さくなる。
- (3) 炭素材料の照射寸法収縮率は黒鉛材料よりも大きい。
- (4) 照射により POCO 黒鉛を除いて体積は収縮し、高密度化する。
- (5) 熱膨張係数は照射の初期に増加した後、照射量がさらに増えると減少する。この変化は照射温度によって異なり、照射温度が高い程その極大値を示す照射量は高照射量側にずれる。

これらの寸法変化や熱膨張係数に対する実験結果から以下に示す照射温度の影響が考えられる。

① 照射温度が 850°C 以下の場合

空孔や格子間原子のグループが生成されるが、その格子間原子は 1 つの大きなグループまでには生長していない。格子間原子の小さなグループが生成されると層面が歪むとともにその歪んだ層面が a 軸方向に縮む。その結果、巨視的な寸法収縮率が大きくなる。また面間隔が大きくなるので c 軸方向の熱膨張係数が大きくなることになる。

② 照射温度が 850°C の場合

格子間原子の新しい層面が形成されると考えられる。この場合には面間隔はほとんど変化しないので微結晶の c 軸方向の熱膨張係数は変化せず、そのため巨視的な熱膨張係数もあまり変化しないと考えられる。また、新しい層面の形成により c 軸方向の寸法が大きくなり、全体としては寸法収縮率が小さくなると考えられる。

③ 照射温度が 850°C 以上の場合

格子間原子が 1 つの層面に生長するとともに空孔の線欠陥が生じる。その結果、微結晶の a 軸方向の寸法収縮が大きくなるとともにバインダーの寸法も収縮し、微結晶間にすき間ができる。このすき間が微結晶の熱膨張を吸収するようになり、全体としての熱膨張係数が小さくなる。

- (6) 熱伝導度は照射により減少し、照射量が多くなると飽和する。その減少率は照射の初期に大きく、また照射温度が低い程大きい。
- (7) 電気比抵抗やヤング率は照射によって増加し、その増加率は照射の初期に大きく、照射量が増えるにしたがって次第に小さくなり、飽和する。また照射温度が低い程照射初期の変化が大きい。

謝 辞

この照射試験研究を遂行するにあたり研究ならびに試験実施計画の策定にあたり御指導をいただきました今井 久 黒鉛材料研究室長、照射キャプセルの設計、製作、照射ならびに中性子照射量の評価などに御協力をいただきました大洗研究所ならびに東海研究所の関係者に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Nomura S. et al., JAERI-M 8068 (1979), Unpublished data
- 2) Matsuo H. et al., JAERI-M 86-192, 138 (1987)
- 3) JAERI-M 83-053, JMTR照射ハンドブック,(1983)
- 4) Brocklehurst J.E., Kelly B.T. and Gilchrist K.E. 15th Biennial Conference on Carbon, 546 (1981)
- 5) Kennedy C.R. and Eathery W.P., *ibid* 552 (1981)
- 6) Van der Berg M, Everett M.R. and Kingsbury A., 12th Biennial Conference on Carbon, 307 (1975)
- 7) Price R.J., Carbon, 12, 159 (1974)
- 8) Henson R.W., Perks A.J. and Simmons J.H.W. Carbon, 6, 789 (1968)
- 9) Reynolds W.N. and Thrower P.A., Phil. Mag. 12, 573 (1965)
- 10) Bokros J.C. and Price R.J., Carbon, 5, 301 (1967)
- 11) Engle G.B. and Koyama K., Carbon, 6, 455 (1968)
- 12) 松尾秀人, JAERI-M 8367 (1979)
- 13) Nightingale R.E. "Nuclear Graphite" Academic Press Inc., New York and London, 1962
- 14) Engle G.B., Carbon, 9, 383 (1971)
- 15) Delle W. Haag G. Kichle H., Schulze H.A. and Schulze R.E., 4th Intern. Conf. on Industr. Carbon and Graphite, London 741 (1974)
- 16) Schulze R.E., Schulze H.A. and Delle W., Proc. 5th London Intern. Carbon and Graphite Conf. Vol.2 904 (1978)
- 17) Blackstone R., Graham L.W., Everett M.R. and Delle W., Radiation Damage in Reactor materials Vol.2, 543 (1969) IAEA-SM-120/H-8
- 18) Engle G.B. Carbon, 9, 539 (1971)

Table 1 Graphites used in the present experiment

Material	Coke	Production method	Manufacturer	Bulk density (g/cm ³)	Direction	CTE 20-400°C (10 ⁻⁶ .°C ⁻¹)	Anisotropy of CTE	Thermal conductivity (W/mK)	Young's modulus (GPa)	Electrical resistivity (mΩ·cm)
IG-110	Petroleum	Isostatic pressing	Toyo TANSO	1.76	AG WG	4.04 3.79	1.07	120 138	7.81 8.36	1.184 1.114
H451	Petroleum	Extrusion	GLCC	1.72	AG WG	4.16 3.49	1.19	144 155	8.52 8.76	0.860 0.794
PGX	Petroleum	Molding	UCC	1.75	AG WG	2.89 2.32	1.25	91 97	5.87 7.14	1.455 1.216
ASR-ORB	Coal	Vibration molding	SIGRI	1.66						
ASR-IRB	Coal	Vibration molding	SIGRI	1.73						
7477PT	Petroleum	Isostatic pressing	LE CARBONE -LORRAINE	1.76		3.95		90	7.28	1.532
ATR-2E	Coal	Extrusion	SIGRI	1.80	AG WG	4.77 4.48	1.06	167 177	8.62 9.87	0.819 0.735
SMI-24	Petroleum	Molding	Angro Great Lakes	1.77	AG WG	4.26 3.56	1.20	178 182	6.94 7.48	0.794 0.750
AXM-5Q1			POCO	1.75		7.41			11.57	1.663
AXF-5Q1			POCO	1.82		7.57			13.67	1.389

CTE : Coefficient of Thermal Expansion, AG : Against Grain, WG : With Grain

Table 2 Irradiation capsules for the present experiment

Irradiation capsule	Irradiation period	Reactor operation cycle	Irradiation hole	Neutron fluence (Max.) $10^{25}n/m^2$ ($E > 29fJ$)	Irradiation temperature ($^{\circ}C$) (Max.)
78M-9A	1981.2.28 ~1982.4.7	53~58	K-6	2.83	1210
80M-18A	1982.3.13 ~1983.2.18	58~61	G-6	2.12	1335
81M-36A	1983.5.28 ~1985.2.28	63~67	G-6	2.84	1250
83M-6A	1985.3.3 ~1985.3.31	68	G-6	0.66	1010
84M-37A	1986.1.14 ~1986.3.31	72~73	G-6	1.18	1055

Table 3 Measurement methods and conditions

Measurements	Measurement methods	Specimen size mm	Measurement temperature(°C)
Dimensional change	High accuracy comparator	10 × 10 × 25	RT
Thermal expansivity	Push rod type dilatometer	φ5 × 20 φ5 × 10	RT ~ 900
Thermal conductivity	Kohlrausch method	φ5 × 75	20
Young's modulus	Measurement of ultrasonic wave propagation time	φ5 × 75 φ5 × 50	RT
Electrical resistivity	Potential drop method	φ5 × 75 φ5 × 50	RT

RT : Room Temperature

Table 4 Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-II0 (1)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ ($E>29fJ$)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)	
						Direction				
1	254	78M-9A	890~1070	980	1.68	AG	-0.373	-1.238	1.253	
							WG			-0.463
							WG			-0.416
2	255	"	970~1140	1055	2.40	AG	-0.393	-1.471	1.492	
							WG			-0.542
							WG			-0.548
3	256	"	1040~1180	1110	2.83	AG	-1.122	-3.200	3.310	
							WG			-1.122
							WG			-1.140
4	264	"	1070~1210	1140	2.76	WG	-1.325	-3.814	3.966	
							WG			-1.348
							AG			-1.186
5	265	"	1060~1200	1130	2.66	WG	-1.279	-3.466	3.585	
							AG			-1.018
							WG			-1.210
6	258	80M-18A	1050~1180	1115	0.88	AG	-0.645	-1.867	1.860	
							WG			-0.600
							WG			-0.630
7	259	"	1150~1290	1220	1.70	AG	-1.049	-3.345	3.429	
							WG			-1.108
							WG			-1.228

Table 4 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-110 (2)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{22}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
8	260	80M-18A	1140~1175	1208	2.12	AG	-0.800	-2.904	2.956
						WG	-1.090		
						WG	-1.041		
9	261	"	1210~1335	1273	1.91	AG	-1.386	-4.131	4.271
						WG	-1.325		
						WG	-1.477		
10	262	"	1140~1260	1200	1.32	AG	-0.880	-2.667	3.131
						WG	-0.927		
						WG	-0.882		
11	263	"	1150~1290	1220	1.70	AG	-0.982	-3.142	3.205
						WG	-1.098		
						WG	-1.096		
12	267	"	1050~1180	1115	0.88	WG	-0.747	-1.954	1.947
						AG	-0.583		
						WG	-0.635		
13	268	"	1140~1275	1208	2.12	WG	-1.024	-2.855	2.094
						AG	-0.822		
						WG	-1.036		
14	269	"	1180~1320	1250	1.80	WG	-1.331	-3.989	4.119
						AG	-1.306		
						WG	-1.405		

Table 4 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-110 (3)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
15	270	80M-18A	1140~1260	1200	1.32	WG	-0.850	-2.599	2.635
						AG	-0.879		
						WG	-0.892		
16	271	"	1140~1270	1205	1.80	WG	-1.354	-3.527	3.620
						WG	-1.157		
						AG	-1.058		
17	272	"	1180~1310	1245	2.10	WG	-1.220	-3.764	3.875
						WG	-1.344		
						AG	-1.247		
18	296	81M-36A	980~1140	1060	2.00	WG	-0.639	-1.699	1.663
						AG	-0.484		
						WG	-0.584		
19	297	"	1025~1160	1093	2.56	WG	-1.161	-3.357	3.420
						WG	-1.234		
						AG	-1.000		
20	298	"	1130~1210	1170	2.82	WG	-1.778	-4.674	4.823
						AG	-1.474		
						WG	-1.499		
21	299	"	1095~1195	1145	2.50	WG	-1.457	-4.132	4.232
						AG	-1.258		
						WG	-1.475		

Table 4 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-110 (4)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
22	300	81M-36A	990~1125	1058	1.68	WG	-0.925	-2.551	2.541
						AG	-0.744		
						WG	-0.905		
23	306	"	980~1140	1060	2.00	WG	-0.647	-1.793	1.758
						AG	-0.467		
						WG	-0.689		
24	307	"	1025~1160	1093	2.56	WG	-1.314	-3.518	3.594
						WG	-1.183		
						AG	-1.078		
25	308	"	1130~1210	1170	2.82	WG	-1.593	-4.768	4.943
						WG	-1.691		
						AG	-1.563		
26	309	"	1095~1195	1145	2.50	WG	-1.440	-4.288	4.421
						AG	-1.366		
						WG	-1.541		
27	310	"	990~1125	1058	1.68	WG	-0.915	-2.602	2.618
						AG	-0.840		
						WG	-0.866		
28	393	83M-6A	830~880	855	0.49	WG	-0.063	-0.172	0.177
						AG	-0.047		
						WG	-0.062		

Table 4 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-110 (5)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ ($E > 29fJ$)	Dimensional change		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
29	394	83M-6A	970~1000	985	0.66	WG	-0.108	-0.420	0.420
						AG	-0.153		
						WG	-0.159		
30	395	"	970~1010	990	0.62	WG	-0.116	-0.380	0.382
						WG	-0.150		
						AG	-0.115		
31	403	"	830~880	855	0.49	AG	-0.026	-0.204	0.202
						WG	-0.099		
						WG	-0.079		
32	404	"	970~1000	985	0.66	AG	-0.089	-0.448	0.445
						WG	-0.179		
						WG	-0.179		
33	405	"	970~1010	990	0.62	AC	-0.142	-0.428	0.434
						WG	-0.150		
						WG	-0.140		
34	397	84M-37A	805~960	883	0.53	WG	-0.038	-0.196	0.159
						AG	-0.072		
						WG	-0.087		
35	398	"	825~950	888	1.00	WG	-0.074	-0.352	0.534
						WG	-0.190		
						AG	-0.089		

Table 4 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-110 (6)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
36	399	84M-37A	900~995	948	1.17	WG	-0.145	-0.576	0.574
						AG	-0.207		
						WG	-0.224		
37	400	"	970~1020	995	1.12	WG	-0.150	-0.604	0.595
						AG	-0.214		
						WG	-0.240		
38	407	"	805~960	883	0.53	AG	-0.020	0.100	-0.129
						WG	0.013		
						WG	0.107		
39	408	"	825~950	888	1.00	AG	-0.080	-0.336	0.325
						WG	-0.144		
						WG	-0.111		
40	409	"	900~995	948	1.17	AG	-0.140	-0.092	0.480
						WG	-0.110		
						WG	-0.246		
41	410	"	970~1020	995	1.12	AG	-0.144	-0.513	0.495
						WG	-0.205		
						WG	-0.162		
42	431	"	980~1045	1013	0.76	WG	-0.108	-0.260	0.245
						WG	-0.092		
						AG	-0.057		

Table 4 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of IG-110 (7)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
43	432	84M-37A	920 ^v 1005	963	1.18	WG	-0.164	-0.416	0.407
						AG	-0.119		
						WG	-0.135		
44	441	"	980 ^v 1045	1013	0.76	AG	-0.066	-0.260	0.158
						WG	-0.079		
						WG	-0.115		

Table 5 Changes in dimension, volume, and bulk density of H451 (1)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ ($E > 29fJ$)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
1	276	80M-18A	1020~1140	1080	0.78	WG	-0.578	-1.413	1.382
						WG	-0.442		
						AG	-0.398		
2	277	"	1140~1270	1205	1.80	WG	-1.389	-3.535	3.621
						AG	-1.087		
						WG	-1.100		
3	278	"	1180~1310	1245	2.10	WG	-1.493	-3.656	3.766
						AG	-1.103		
						AG	-1.105		
4	286	"	1210~1335	1273	1.91	AG	-1.203	-3.750	3.829
						WG	-1.450		
						AG	-1.145		
5	287	"	1180~1320	1250	1.80	AG	-1.144	-3.417	3.481
						AG	-1.095		
						WG	-1.216		
6	288	"	1120~1240	1180	1.12	AG	-0.693	-2.025	2.034
						AG	-0.603		
						WG	-0.747		
7	279	81M-36A	1045~1175	1110	2.67	WG	-1.521	-3.698	3.801
						AG	-1.104		
						WG	-1.117		

Table 5 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of H451 (2)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
8	280	81M-36A	1130~1210	1170	2.78	WG	-1.867	-4.609	4.802
						AG	-1.359		
						AG	-1.453		
9	281	"	1075~1180	1128	2.36	WG	-1.494	-3.622	3.716
						AG	-1.020		
						AG	-1.150		
10	289	"	1045~1175	1110	2.67	AG	-1.253	-3.804	3.903
						AG	-1.143		
						WG	-1.455		
11	290	"	1130~1210	1170	2.78	AG	-1.555	-4.839	5.033
						WG	-1.910		
						AG	-1.454		
12	291	"	1075~1180	1128	2.36	AG	-1.170	-3.784	3.898
						WG	-1.463		
						AG	-1.211		
13	316	83M-6A	780~820	800	0.31	WG	-0.005	0.152	-0.204
						AG	0.079		
						AG	0.081		
14	317	"	970~1005	988	0.66	WG	-0.116	-0.264	0.227
						AG	-0.076		
						AG	-0.075		

Table 5 (continued) Changes in dimension, volume, and bulk density of H451 (3)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction			
15	326	83M-6A	780~820	800	0.31	AG	-0.001	0.032	-0.087
						AG	0.022		
						WG	0.011		
16	327	"	970~1005	988	0.66	AG	-0.091	-0.302	0.258
						WG	-0.120		
						AG	-0.090		
17	319	84M-37A	800~950	875	0.61	WG	-0.022	0.040	-0.064
						AG	0.056		
						WG	0.009		
18	320	"	840~960	900	1.05	WG	-0.086	-0.216	0.139
						WG	-0.100		
						AG	-0.033		
19	321	"	920~1005	963	1.18	WG	-0.103	-0.236	0.134
						AG	-0.024		
						WG	-0.109		
20	328	"	800~950	875	0.61	AG	-0.023	0.024	-0.088
						WG	0.017		
						AG	0.028		
21	329	"	840~960	900	1.05	AG	-0.031	0	-0.070
						WG	0.003		
						AG	0.029		

Table 6 Changes in dimension, volume, and bulk density of PGX

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	511	83M-6A	790~830	810	0.35	AG	0.007	0.132	-0.138
						WG	0.068		
						WG	0.059		
2	528	"	970~1010	990	0.59	WG	-0.190	-0.512	0.515
						AG	-0.101		
						WG	-0.222		
3	513	84M-37A	980~1020	1000	1.06	AG	-0.279	-0.775	0.395
						WG	-0.237		
						WG	-0.260		
4	530	"	980~1020	1000	1.06	WG	-0.269	-0.713	0.166
						AG	-0.214		
						WG	-0.230		

Table 7 Changes in dimension, volume and bulk density of ASR-IRB

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	367	81M-36A	970~1140	1055	1.83	AG	-0.762	-3.715	3.857
						WG	-1.463		
						WG	-1.536		
2	370	84M-37A	970~1055	1013	0.68	AG	-1.951	-6.532	6.764
						WG	-2.377		
						WG	-2.351		
3	371	"	970~1055	1013	0.68	AG	-2.004	-6.365	6.607
						WG	-2.258		
						WG	-2.242		

Table 8 Changes in dimension, volume, and bulk density of ASR-IRB

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	377	81M-36A	970~1140	1055	1.83	AG WC WG	-0.384 -1.789 -1.602	-3.731	3.876

Table 9 Changes in dimension, volume, and bulk density of 7477PT

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	205	78M-9A	890~1070	980	1.68		-0.409 -0.201 -0.361	-0.976	1.001
2	206	"	970~1140	1055	2.40		-0.312 -0.202 -0.393	-0.897	0.921
3	218	"	1070~1210	1140	2.76		-0.603 -0.917 -0.818	-2.315	2.378
4	96	80M-18A	1020~1140	1080	0.78		-0.543 -0.487 -0.501	-1.525	1.548
5	97	"	1120~1240	1180	1.12		-0.697 -0.671 -0.669	-2.019	2.060

Table 10 Changes in dimension, volume, and bulk density of ATR-2E

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29fJ)	Dimensional change (%)		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	240	78M-9A	870 ^o 1050	960	1.50	WG	-0.512	-1.979	2.057
						AG	-0.280		
						AG	-0.338		
2	241	"	950 ^o 1120	1035	2.26	WG	-0.660	-1.270	1.289
						AG	-0.268		
						AG	-0.353		
3	242	"	1020 ^o 1180	1100	2.75	WG	-1.269	-2.731	2.811
						AG	-0.703		
						AG	-0.780		
4	247	"	870 ^o 1050	960	1.50	AG	-0.358	-1.242	1.254
						AG	-0.383		
						WG	-0.508		
5	248	"	950 ^o 1120	1035	2.26	AG	-0.476	-1.406	1.426
						WG	-0.638		
						AG	-0.305		
6	249	"	1020 ^o 1180	1100	2.75	AG	-0.829	-2.563	2.631
						AG	-0.760		
						WG	-0.997		

Table 11 Changes in dimension, volume, and bulk density of SMI-24

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29FJ)	Dimensional change		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	178	78M-9A	1040 ^v 1180	1110	2.83	WG	-1.417	-3.769	3.947
						AG	-1.068		
						WG	-1.337		
2	192	"	1060 ^v 1200	1130	2.66	AG	-1.273	-4.231	3.854
						WG	-1.498		
						WG	-1.525		

Table 12 Changes in dimension, volume, and bulk density of AXM-5Q1

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29FJ)	Dimensional change		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	336	81M-36A	960 ^v 1105	1033	1.47	WG	0.190	0.404	-0.422
						AG	0.059		
						WG	0.153		

Table 13 Changes in dimension, volume, and bulk density of AXF-5Q1

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C, Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29FJ)	Dimensional change		Volume change (%)	Bulk density change (%)
						Direction	(%)		
1	346	81M-36A	960 ^v 1105	1033	1.47	WG	0.252	0.509	-0.515
						AG	0.123		
						WG	0.130		

Table 14 Changes in coefficient of thermal expansion of IG-110 (1)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29fJ)	Direction	CTE ₄₀₀			CTE ₂₀₋₄₀₀			CTE ₂₀₋₅₀₀			CTE ₂₀₋₁₁₇₇		
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0
1	60	78M-9A	880 ^o ±1060 (970)	1.63	AG	4.93	4.96	1.01	4.29	4.35	1.01	4.44	4.51	1.02	4.95	5.22	1.05
2	61	"	960 ^o ±1130 (1045)	2.36	AG	4.91	4.87	0.99	4.32	4.17	0.97	4.46	4.35	0.98	5.06	5.09	1.01
3	62	"	1030 ^o ±1190 (1110)	2.80	AG	4.81	4.50	0.94	4.21	4.06	0.96	4.36	4.19	0.96	5.05	5.15	1.02
4	78	"	1070 ^o ±1210 (1140)	2.78	WG	4.54	4.15	0.91	3.98	3.53	0.89	4.12	3.69	0.90	4.80	4.53	0.94
5	79	"	1070 ^o ±1200 (1135)	2.71	WG	4.59	4.15	0.90	3.96	3.61	0.91	4.13	3.75	0.91	4.79	4.60	0.96
6	8	80M-18A	1005 ^o ±1120 (1063)	0.73	AG	4.71	5.33	1.13	4.06	4.80	1.18	4.22	4.94	1.17	4.96	5.77	1.16
7	9	"	1005 ^o ±1120 (1063)	0.73	AG	4.71	5.20	1.10	4.06	4.65	1.15	4.22	4.80	1.14	4.96	5.70	1.15
8	10	"	1155 ^o ±1290 (1223)	1.65	AG	4.71	5.09	1.08	4.06	4.73	1.17	4.22	4.83	1.14	5.21	5.74	1.10
9	11	"	1155 ^o ±1290 (1223)	1.65	AG	4.71	4.92	1.04	4.06	4.60	1.13	4.22	4.69	1.11	5.21	5.59	1.07
10	12	"	1190 ^o ±1320 (1255)	2.08	AG	4.71	4.59	0.97	4.06	4.23	1.04	4.22	4.33	1.03	5.39	5.26	0.98
11	13	"	1190 ^o ±1320 (1255)	2.08	AG	4.71	4.30	0.91	4.06	3.94	0.97	4.22	4.04	0.96	5.39	4.98	0.92
12	14	"	1190 ^o ±1315 (1253)	1.77	AG	4.71	4.61	0.98	4.06	4.14	1.02	4.22	4.26	1.01	5.39	5.11	0.95
13	15	"	1190 ^o ±1315 (1253)	1.77	AG	4.71	4.69	1.00	4.06	4.32	1.06	4.22	4.42	1.05	5.39	5.21	0.97
14	16	"	1110 ^o ±1230 (1170)	1.05	AG	4.71	4.75	1.01	4.06	4.26	1.05	4.22	4.39	1.04	5.16	5.42	1.05
15	17	"	1110 ^o ±1230 (1170)	1.05	AG	4.71	4.86	1.03	4.06	4.47	1.10	4.22	4.58	1.09	5.16	5.60	1.09
16	65	"	1145 ^o ±1265 (1205)	1.36	AG	4.76	4.66	0.98	4.35	4.37	1.00	4.46	4.45	1.00	5.21	5.60	1.07
17	66	"	1050 ^o ±1190 (1120)	0.90	AG	4.79	4.91	1.03	4.45	4.49	1.01	4.54	4.60	1.01	5.10	5.64	1.11
18	82	"	1050 ^o ±1190 (1120)	0.90	WG	4.72	4.70	1.00	3.99	4.47	1.12	4.17	4.54	1.09	4.99	5.46	1.09
19	83	"	1145 ^o ±1265 (1205)	1.36	WG	4.65	4.61	0.99	3.99	4.27	1.07	4.15	4.35	1.05	5.43	5.57	1.03
20	158	"	1025 ^o ±1150 (1088)	0.80	AG	4.51	4.79	1.06	3.93	4.34	1.10	4.08	4.46	1.09	4.71	5.27	1.12

Table 14 (continued) Changes in coefficient of thermal expansion of IG-110 (2)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29eJ)	Direction	CTE ₄₀₀			CTE ₂₀₋₄₀₀			CTE ₂₀₋₅₀₀			CTE _{20-Tirr}		
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0
21	159	80M-18A	1150 [±] 1280 (1215)	1.72	AG	4.49	4.51	1.00	3.89	4.25	1.09	4.04	4.32	1.07	4.69	5.24	1.12
22	193	"	1140 [±] 1270 (1205)	2.12	AG	4.54	4.13	0.91	4.02	4.05	1.01	4.15	4.09	0.99	4.92	5.27	1.07
23	194	"	1210 [±] 1335 (1273)	1.93	AG	4.62	4.71	1.02	4.14	4.39	1.06	4.27	4.47	1.05	5.13	5.14	1.00
24	198	"	1150 [±] 1280 (1215)	1.72	WG	4.18	4.02	0.96	3.61	3.71	1.03	3.76	3.79	1.01	4.64	4.62	1.00
25	199	"	1140 [±] 1270 (1205)	2.12	WG	4.10	3.71	0.90	3.53	3.39	0.96	3.68	3.48	0.95	4.58	4.51	0.98
26	203	"	1210 [±] 1335 (1273)	1.93	WG	4.28	4.27	1.00	3.64	4.01	1.10	3.81	4.08	1.07	4.78	4.84	1.01
27	204	"	1125 [±] 1245 (1185)	1.18	WG	4.25	4.38	1.03	3.53	4.02	1.14	3.71	4.12	1.11	4.63	5.03	1.09
28	191	81M-36A	950 [±] 1135 (1043)	1.34	AG	4.54	5.17	1.14	3.99	4.54	1.14	4.13	4.71	1.14	4.69	5.66	1.21
29	192	"	990 [±] 1145 (1068)	2.20	AG	4.54	4.85	1.07	3.99	4.27	1.07	4.13	4.42	1.07	4.74	5.30	1.12
30	195	"	990 [±] 1145 (1068)	2.20	AG	4.54	4.50	0.99	3.99	3.94	0.99	4.13	4.09	0.99	4.74	4.98	1.05
31	196	"	1120 [±] 1206 (1163)	2.84	AG	4.54	4.36	0.96	3.99	3.95	0.99	4.13	4.06	0.98	4.83	4.98	1.03
32	197	"	1120 [±] 1206 (1163)	2.84	AG	4.54	4.15	0.91	3.99	3.64	0.91	4.13	3.78	0.91	4.83	4.70	0.97
33	200	"	980 [±] 1130 (1029)	0.85	WG	4.24	4.56	1.08	3.60	3.70	1.03	3.77	3.91	1.04	4.44	4.81	1.08
34	201	"	928 [±] 1130 (1029)	0.85	WG	4.24	4.50	1.06	3.60	3.72	1.03	3.77	3.91	1.04	4.44	4.73	1.07
35	202	"	950 [±] 1135 (1043)	1.34	WG	4.24	4.60	1.08	3.60	3.91	1.09	3.77	4.08	1.08	4.44	4.88	1.10
36	205	"	950 [±] 1135 (1043)	1.34	WG	4.24	4.62	1.09	3.60	3.77	1.05	3.77	3.97	1.05	4.44	4.81	1.08
37	206	"	990 [±] 1145 (1068)	2.20	WG	4.24	3.95	0.93	3.60	3.62	1.01	3.77	3.72	0.99	4.49	4.70	1.05
38	207	"	1120 [±] 1206 (1163)	2.84	WG	4.24	3.84	0.91	3.60	3.38	0.94	3.77	3.51	0.93	4.60	4.50	0.98
39	334	"	928 [±] 1130 (1029)	0.85	AG	4.56	4.91	1.08	3.93	4.29	1.09	4.08	4.45	1.09	4.63	5.24	1.13
40	319	83M-6A	790 [±] 840 (815)	0.35	WG	4.45	4.43	1.00	3.92	3.38	0.86	4.08	3.65	0.89	4.48	4.36	0.97

Table 14 (continued) Changes in coefficient of thermal expansion of IG-110 (3)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence (E>29fJ)	Direction	CTE ₄₀₀			CTE ₂₀₋₄₀₀			CTE ₂₀₋₅₀₀			CTE _{20-Tirr}		
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0
41	320	83M-6A	830 [±] 880 (855)	0.49	WG	4.46	4.87	1.09	3.97	4.02	1.01	4.10	4.23	1.03	4.55	4.81	1.06
42	321	"	970 [±] 1010 (990)	0.66	WG	4.44	4.64	1.05	3.80	4.04	1.06	3.96	4.20	1.06	4.55	4.91	1.08
43	322	"	970 [±] 1010 (990)	0.58	WG	4.52	4.70	1.04	3.86	4.13	1.07	4.02	4.28	1.06	4.60	4.96	1.08
44	338	"	790 [±] 840 (815)	0.35	AG	4.51	4.98	1.10	3.86	3.93	1.02	4.02	4.18	1.04	4.40	4.73	1.08
45	339	"	830 [±] 880 (855)	0.49	AG	4.36	4.72	1.08	3.80	3.65	0.96	3.93	3.90	0.99	4.38	4.50	1.03
46	340	"	970 [±] 1010 (990)	0.66	AG	4.54	4.68	1.03	4.05	4.06	1.00	4.18	4.23	1.01	4.76	4.96	1.04
47	341	"	970 [±] 1010 (990)	0.58	AG	4.36	4.89	1.12	3.85	3.79	0.98	3.99	4.05	1.02	4.59	4.86	1.06
48	326	84M-37A	800 [±] 955 (878)	0.55	WG	4.44	4.80	1.08	3.73	3.71	0.99	3.91	3.99	1.02	4.49	4.97	1.11
49	327	"	830 [±] 950 (890)	1.01	WG	4.68	4.85	1.04	3.98	3.81	0.96	4.15	4.08	0.98	4.67	5.29	1.13
50	328	"	910 [±] 1000 (955)	1.17	WG	4.66	4.96	1.06	3.85	3.92	1.02	4.06	4.19	1.03	4.77	5.32	1.12
51	329	"	970 [±] 1020 (995)	1.10	WG	4.59	5.01	1.09	3.95	3.91	0.99	4.11	4.19	1.02	4.71	5.24	1.11
52	330	"	975 [±] 1050 (1013)	0.74	WG	4.68	4.87	1.04	3.97	3.87	0.97	4.14	4.13	1.00	4.81	5.50	1.14
53	331	"	920 [±] 1005 (963)	1.18	WG	4.71	5.06	1.07	4.17	4.03	0.97	4.31	4.29	1.00	5.03	5.31	1.06
54	345	"	800 [±] 955 (878)	0.55	AG	4.47	4.95	1.11	3.97	3.84	0.97	4.09	4.12	1.01	4.54	5.00	1.10
55	346	"	830 [±] 950 (890)	1.01	AG	4.79	6.08	1.27	4.22	4.62	1.09	4.37	4.97	1.14	4.85	5.86	1.21
56	347	"	910 [±] 1000 (955)	1.17	AG	4.66	5.24	1.12	4.14	4.09	0.99	4.27	4.38	1.03	4.83	5.49	1.14
57	348	"	970 [±] 1020 (995)	1.10	AG	4.44	4.96	1.12	4.00	4.00	1.00	4.12	4.24	1.03	4.69	5.17	1.10
58	349	"	975 [±] 1050 (1013)	0.74	AG	4.44	4.95	1.11	3.77	3.81	1.01	3.94	4.10	1.04	4.59	5.32	1.16
59	350	"	920 [±] 1005 (963)	1.18	AG	4.75	5.25	1.11	4.15	4.11	0.99	4.30	4.40	1.02	4.85	5.55	1.14

Table 15 Changes in coefficient of thermal expansion of H451 (1)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron Fluence 10 ²⁵ n/m ² (>29FJ)	Direction	CTE ₄₀₀		CTE ₂₀₋₄₀₀		CTE ₂₀₋₅₀₀		CTE _{20-Tirr}					
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0			
1	135	80M-18A	1130 [±] 1270 (1200)	1.80	WG	3.88	4.16	1.07	3.38	3.77	1.12	3.52	3.87	1.10	4.43	4.59	1.04
2	141	"	1170 [±] 1300 (1235)	2.10	WG	3.89	3.93	1.01	3.38	3.53	1.04	3.52	3.64	1.03	4.52	4.52	1.00
3	143	"	1200 [±] 1330 (1265)	1.85	WG	3.95	4.19	1.06	3.45	3.81	1.10	3.58	3.91	1.09	4.56	4.72	1.04
4	149	"	1130 [±] 1270 (1200)	1.80	AG	4.56	4.82	1.06	4.06	4.44	1.09	4.20	4.55	1.08	5.11	5.23	1.02
5	156	"	1170 [±] 1300 (1235)	2.10	AG	4.64	4.78	1.03	4.14	4.43	1.07	4.27	4.52	1.06	5.27	5.21	0.99
6	157	"	1200 [±] 1330 (1265)	1.85	AG	4.58	4.98	1.09	4.10	4.59	1.12	4.22	4.69	1.11	5.17	5.47	1.06
7	136	81M-36A	928 [±] 1130 (1029)	0.85	WG	3.90	4.67	1.20	3.40	3.77	1.11	3.54	3.98	1.12	4.25	4.89	1.15
8	137	"	950 [±] 1135 (1043)	1.34	WG	3.90	4.37	1.12	3.40	3.64	1.07	3.54	3.82	1.08	4.25	4.58	1.08
9	140	"	990 [±] 1145 (1068)	2.20	WG	3.90	4.10	1.05	3.40	3.28	0.96	3.54	3.48	0.98	4.25	4.31	1.01
10	144	"	1120 [±] 1206 (1163)	2.84	WG	3.90	4.05	1.04	3.40	3.37	0.99	3.54	3.54	1.00	4.38	4.27	0.97
11	145	"	928 [±] 1130 (1029)	0.85	WG	3.90	4.33	1.11	3.40	3.65	1.07	3.54	3.82	1.08	4.25	4.45	1.05
12	147	"	950 [±] 1135 (1043)	1.34	AG	4.58	5.33	1.16	4.09	4.36	1.07	4.22	4.60	1.09	4.94	5.44	1.10
13	152	"	990 [±] 1145 (1068)	2.20	AG	4.58	4.93	1.08	4.09	4.19	1.02	4.22	4.36	1.03	4.94	5.00	1.01
14	153	"	1120 [±] 1206 (1163)	2.84	AG	4.58	4.73	1.03	4.09	3.98	0.97	4.22	4.15	0.98	5.07	5.04	0.99
15	354	83M-6A	820 [±] 870 (845)	0.47	WG	4.23	4.65	1.10	3.70	3.67	0.99	3.84	3.91	1.02	4.33	4.51	1.04
16	355	"	970 [±] 1000 (985)	0.66	WG	4.16	4.61	1.11	3.62	3.55	0.98	3.76	3.80	1.01	4.47	4.57	1.02
17	374	"	820 [±] 870 (845)	0.47	AG	4.86	5.27	1.08	4.33	4.31	1.00	4.47	4.54	1.02	4.96	5.06	1.02
18	375	"	970 [±] 1000 (985)	0.66	AG	4.75	5.34	1.12	4.25	4.55	1.07	4.38	4.75	1.08	5.04	5.40	1.07
19	357	84M-37A	800 [±] 950 (875)	0.61	WG	4.09	4.57	1.12	3.47	3.57	1.03	3.63	3.83	1.06	4.29	4.88	1.14
20	358	"	840 [±] 960 (900)	1.05	WG	4.18	4.51	1.08	3.67	3.72	1.01	3.80	3.93	1.03	4.33	4.76	1.10

(注) 81M-36 A照射試料の照射前の値は同一素材から採取した他の試験片 (銘柄選定用試験片) の4~5本の平均値である。

Table 15 (continued) Changes in coefficient of thermal expansion of H451 (2)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (>29FeJ)	Direction	CTE ₄₀₀			CTE ₂₀₋₄₀₀			CTE ₂₀₋₅₀₀			CTE _{20-Tirr}	
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
21	359	84M-37A	970 \pm 1055 (1013)	0.67	WG	4.21	4.47	1.06	3.68	3.59	0.98	3.82	3.82	4.51	4.98	1.10
22	377	"	800 \pm 950 (875)	0.61	AG	4.64	5.06	1.09	4.10	4.24	1.03	4.24	4.46	4.81	5.33	1.11
23	378	"	840 \pm 960 (900)	1.05	AG	4.84	5.16	1.07	4.32	4.12	0.95	4.45	4.40	5.01	5.48	1.09
24	379	"	970 \pm 1055 (1013)	0.67	AG	4.74	5.19	1.09	4.22	4.40	1.04	4.36	4.61	5.04	5.66	1.12

Table 16 Changes in coefficient of thermal expansion of PGX

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (>29FeJ)	Direction	CTE ₄₀₀			CTE ₂₀₋₄₀₀			CTE ₂₀₋₅₀₀			CTE _{20-Tirr}	
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
1	394	83M-6A	970 \pm 1010 (990)	0.61	AG	3.44	3.40	0.99	2.84	2.80	0.99	3.77	2.96	3.55	3.74	1.05
2	419	"	970 \pm 1010 (990)	0.61	WG	2.87	3.09	1.08	2.25	2.31	1.03	2.41	2.50	3.02	3.30	1.09
3	396	84M-37A	980 \pm 1020 (1000)	1.05	AG	3.39	3.53	1.04	2.94	2.81	0.96	3.06	3.00	3.65	3.94	1.08
4	411	"	980 \pm 1020 (1000)	1.05	WG	2.82	2.88	1.02	2.38	2.28	0.96	2.50	2.44	3.08	3.23	1.05

Table 17 Changes in coefficient of thermal expansion of 7477PT

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (>29FeJ)	Direction	CTE ₄₀₀			CTE ₂₀₋₄₀₀			CTE ₂₀₋₅₀₀			CTE _{20-Tirr}	
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
1	10	78M-9A	880 \pm 1060 (970)	1.63		4.58	5.14	1.12	3.97	4.42	1.11	4.12	4.60	4.64	5.29	1.14
2	11	"	960 \pm 1130 (1045)	2.36		4.65	4.97	1.07	4.02	4.32	1.07	4.16	4.49	4.80	5.29	1.10
3	12	"	1070 \pm 1210 (1140)	2.78		4.63	4.76	1.03	4.00	4.04	1.01	4.15	4.22	4.90	5.27	1.08
4	12	80M-18A	1025 \pm 1150 (1088)	0.80		4.46	4.88	1.09	3.85	4.34	1.13	3.99	4.48	4.69	5.34	1.14
5	13	"	1125 \pm 1245 (1185)	1.18		4.50	4.79	1.06	3.90	4.33	1.11	4.05	4.45	4.79	5.30	1.11

Table 18 Changes in coefficient of thermal expansion of ATR-2E

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29EJ)	Direction	CTE ₄₀₀		CTE ₂₀₋₄₀₀		CTE ₂₀₋₅₀₀		CTE _{20-Tirr}			
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
1	100	78N-9A	860 ^o 1040 (950)	1.48	WG	5.08	5.17	1.02	4.39	4.49	1.02	4.56	5.11	5.16	1.01
2	101	"	950 ^o 1120 (1035)	2.23	WG	5.14	4.67	0.91	4.47	4.11	0.92	4.63	4.25	4.89	0.95
3	102	"	1020 ^o 1180 (1100)	2.73	WG	5.20	4.49	0.86	4.57	3.98	0.87	4.72	4.11	4.69	0.88
4	112	"	860 ^o 1040 (950)	1.48	AG	5.31	5.71	1.08	4.73	5.02	1.06	4.88	5.18	5.75	1.06
5	113	"	950 ^o 1120 (1035)	2.23	AG	5.43	5.28	0.97	4.82	4.61	0.96	5.00	4.76	5.51	1.00
6	114	"	1020 ^o 1180 (1100)	2.73	AG	5.36	4.73	0.88	4.76	4.19	0.88	4.51	4.32	4.95	0.89

Table 19 Changes in coefficient of thermal expansion of SMI-24

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29EJ)	Direction	CTE ₄₀₀		CTE ₂₀₋₄₀₀		CTE ₂₀₋₅₀₀		CTE _{20-Tirr}			
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
1	13	78N-9A	1030 ^o 1190 (1110)	2.80	AG	4.86	4.57	0.94	4.26	3.96	0.93	4.41	4.10	4.98	1.00
2	14	"	1070 ^o 1200 (1135)	2.71	WG	4.25	4.01	0.94	3.56	3.35	0.94	3.73	3.49	4.65	0.99

Table 20 Changes in coefficient of thermal expansion of AXM-5Q1

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29EJ)	Direction	CTE ₄₀₀		CTE ₂₀₋₄₀₀		CTE ₂₀₋₅₀₀		CTE _{20-Tirr}			
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$
1	254	81N-36A	928 ^o 1130 (1029)	0.85		7.77	8.52	1.10	7.33	7.53	1.03	7.44	7.75	8.49	1.05
2	255	"	990 ^o 1145 (1068)	2.20		7.92	7.69	0.97	7.49	7.32	0.98	7.60	7.42	8.23	1.00

Table 21 Changes in coefficient of thermal expansion of AXF-5Q1

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron Fluence $10^{25}n/m^2$ (E>29EJ)	Direction	CTE ₄₀₀		CTE ₂₀₋₄₀₀		CTE ₂₀₋₅₀₀		CTE _{20-Tirr}					
						Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	α/α_0	Unirradiated $\alpha_0, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	Irradiated $\alpha, 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$	α/α_0
1	282	81M-36A	950±1135 (1043)	1.34		8.03	9.06	1.13	7.60	8.08	1.06	7.71	8.30	1.08	8.34	9.03	1.08
2	283	"	1120±1206 (1163)	2.84		7.94	6.83	0.86	7.53	6.41	0.85	7.64	6.49	0.85	8.33	7.23	0.87

Table 22 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of IG-110 (1)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ ($E > 29EJ$)	Direction	Electrical resistivity, ($m\Omega \cdot cm$)			Thermal conductivity, (W/mK)			Young's modulus, (GPa)		
							Unirradiated ρ_0	Irradiated ρ	ρ/ρ_0	Unirradiated K_0	Irradiated K	K/K_0	Unirradiated E_0	Irradiated E	E/E_0
1	42	78M-9A	1060°1210	1135	2.44	AG	1.204	2.276	1.890	125	52.4	0.419	6.86	12.9	1.89
2	43	"	1000°1130	1065	1.95	AG	1.218	2.373	1.948	118	48.3	0.409	6.83	12.2	1.78
3	52	"	1060°1210	1135	2.44	WG	1.141	1.955	1.713	138	48.8	0.354	7.37	12.9	1.76
4	53	"	1000°1130	1065	1.95	WG	1.139	2.262	1.986	130	54.6	0.420	7.38	12.6	1.70
5	110	80M-18A	1110°1250	1180	1.15	AG	1.253	2.575	2.055	124	47.1	0.380	8.15	9.82	1.21
6	111	"	1110°1250	1180	1.15	AG	1.257	2.209	1.757	115	66.9	0.582	7.96	9.81	1.23
7	112	"	1090°1235	1163	1.95	AG	1.212	2.162	1.784	117	68.1	0.582	7.68	10.33	1.35
8	120	"	1110°1250	1180	1.15	WG	1.128	2.010	1.782	135	66.7	0.494	9.02	10.54	1.17
9	121	"	1090°1235	1163	1.95	WG	1.095	2.003	1.829	144	76.8	0.533	8.86	10.54	1.19
10	123	"	1090°1235	1163	1.95	WG	1.055	1.914	1.814	136	76.1	0.560	8.87	11.13	1.26
11	18	"	965°1075	1020	0.60	AG	1.169	1.976	1.690	-	-	-	7.45	10.24	1.37
12	19	"	1155°1305	1230	1.47	AG	1.179	2.105	1.785	-	-	-	7.64	9.81	1.28
13	20	"	1060°1215	1138	2.08	AG	1.176	2.270	1.930	-	-	-	7.58	10.01	1.32
14	21	"	1210°1340	1275	2.03	AG	1.145	1.936	1.691	-	-	-	6.99	9.34	1.34
15	27	"	1155°1305	1230	1.47	WG	1.103	1.971	1.787	-	-	-	7.99	10.51	1.32
16	28	"	1060°1215	1138	2.08	WG	1.150	2.223	1.933	-	-	-	8.40	10.39	1.24
17	29	"	1210°1340	1275	2.03	WG	1.146	1.936	1.689	-	-	-	8.08	9.82	1.22
18	30	"	1170°1290	1230	1.59	WG	1.062	1.783	1.679	-	-	-	8.08	10.34	1.28
19	105	81M-36A	1090°1250	1170	2.80	AG	1.181	2.222	1.881	121	49.2	0.406	8.58	10.82	1.26
20	106	"	1090°1250	1170	2.80	AG	1.253	2.297	1.833	117	57.6	0.491	7.75	10.50	1.36

Table 22 (continued) Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of IG-110 (2)

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence $10^{25}n/m^2$ ($E > 29EJ$)	Direction	Electrical resistivity, ($m\Omega \cdot cm$)			Thermal conductivity, (W/mK)			Young's modulus, (GPa)		
							Unirradiated ρ_0	Irradiated ρ	ρ/ρ_0	Unirradiated K_0	Irradiated K	K/K_0	Unirradiated E_0	Irradiated E	E/E_0
21	124	81M-36A	1090 \pm 1250	1170	2.80	WG	1.033	1.946	1.884	144	61.3	0.427	9.54	12.26	1.29
22	22	"	940 \pm 1130	1035	1.10	AG	1.209	2.493	2.062	-	-	-	7.36	10.63	1.44
23	23	"	975 \pm 1140	1058	1.90	AG	1.148	2.567	2.236	-	-	-	7.02	11.42	1.63
24	24	"	1030 \pm 1230	1130	1.63	AG	1.137	2.397	2.108	-	-	-	7.32	10.67	1.46
25	31	"	960 \pm 1135	1048	1.57	WG	1.127	2.472	2.193	-	-	-	8.69	11.69	1.35
26	32	"	1002 \pm 1153	1078	2.40	WG	1.149	2.471	2.151	-	-	-	7.45	11.34	1.52
27	33	"	1130 \pm 1210	1170	2.80	WG	1.114	2.190	1.966	-	-	-	7.19	10.97	1.53
28	56	"	1130 \pm 1210	1170	2.68	AG	1.137	2.135	1.878	-	-	-	9.45	12.08	1.28
29	57	"	1025 \pm 1150	1088	2.00	AG	1.105	2.212	2.002	-	-	-	9.43	11.56	1.23
30	68	"	1085 \pm 1190	1138	2.42	WG	1.079	2.144	1.987	-	-	-	9.51	11.92	1.25
31	69	"	976 \pm 1115	1046	1.58	WG	1.087	2.144	1.972	-	-	-	9.29	11.51	1.24
32	231	83M-6A	890 \pm 940	915	0.61	AG	1.167	1.944	1.666	116	54.3	0.469	8.14	11.73	1.44
33	232	"	890 \pm 940	915	0.61	AG	1.178	1.936	1.643	116	56.3	0.485	7.85	11.78	1.50
34	233	"	990 \pm 1050	1020	0.39	AG	1.175	1.739	1.480	127	60.4	0.475	8.30	11.07	1.33
35	251	"	890 \pm 940	915	0.61	WG	1.144	1.872	1.636	120	49.3	0.411	8.41	12.02	1.43
36	252	"	890 \pm 940	915	0.61	WG	1.150	1.882	1.636	124	54.9	0.443	8.18	11.64	1.42
37	253	"	990 \pm 1050	1020	0.39	WG	1.147	1.684	1.468	128	65.0	0.510	8.09	11.18	1.38

Table 23 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of H451

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron Fluence $10^{25}n/m^2$ ($E>29fJ$)	Direction	Electrical resistivity, ($m\Omega\cdot cm$)		Thermal conductivity, (w/mK)		Young's modulus, (GPa)				
							Unirradiated ρ_0	Irradiated ρ	ρ/ρ_0	Unirradiated K_0	Irradiated K	K/K_0	Unirradiated E_0	Irradiated E	E/E_0
1	63	80M-18A	1110~1250	1180	1.15	WG	0.837	1.679	2.006	147	88.1	0.599	7.55	10.06	1.33
2	64	"	1110~1250	1180	1.15	WG	0.808	1.646	2.037	147	89.2	0.607	8.57	10.52	1.23
3	65	"	1090~1235	1163	1.95	WG	0.817	1.734	2.122	170	90.7	0.534	7.98	9.73	1.22
4	73	"	1110~1250	1180	1.15	AG	0.832	1.674	2.012	140	89.5	0.639	9.33	10.60	1.14
5	74	"	1090~1235	1163	1.95	AG	0.829	1.750	2.111	138	89.9	0.651	8.84	10.22	1.16
6	75	"	1090~1235	1163	1.95	AG	0.835	1.744	2.089	143	86.8	0.607	9.11	10.22	1.12
7	66	81M-36A	1090~1250	1170	2.80	WG	0.819	1.924	2.349	139	60.4	0.433	8.11	10.18	1.26
8	76	"	1090~1250	1170	2.80	AG	0.846	1.920	2.270	142	66.0	0.464	8.94	10.68	1.20
9	76	"	940~1130	1035	1.10	WG	0.771	1.916	2.485	-	-	-	9.56	12.42	1.30
10	77	"	1030~1230	1130	1.63	WG	0.770	1.983	2.575	-	-	-	9.39	11.56	1.23
11	78	"	1025~1150	1088	2.00	WG	0.775	1.966	2.537	-	-	-	8.83	10.58	1.20
12	86	"	975~1140	1058	1.90	AG	0.894	2.400	2.685	-	-	-	7.88	10.27	1.30
13	87	"	1130~1210	1170	2.68	AG	0.895	2.072	2.315	-	-	-	7.95	9.70	1.22
14	88	"	976~1115	1046	1.58	AG	0.875	2.014	2.302	-	-	-	7.87	9.77	1.24
15	145	83M-6A	890~940	915	0.61	WG	0.752	1.454	1.934	171	77.3	0.453	10.07	12.44	1.24
16	155	"	890~940	915	0.61	AG	0.874	1.693	1.937	157	58.2	0.372	8.21	10.28	1.25

Table 24 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of PGX

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29EJ)	Direction	Electrical resistivity, (mΩ·cm)		Thermal conductivity, (W/mK)		Young's modulus, (GPa)				
							Unirradiated ρ ₀	Irradiated ρ	Unirradiated K ₀	Irradiated K	Unirradiated E ₀	Irradiated E	E/E ₀		
1	331	83M-6A	990°±1050	1020	0.39	WG	1.216	1.873	1.540	96.7	64.4	0.666	7.14	8.36	1.17
2	341	"	990°±1050	1020	0.39	AG	1.455	2.201	1.513	90.8	59.7	0.657	5.87	6.81	1.16

Table 25 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of 7477PT

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29EJ)	Direction	Electrical resistivity, (mΩ·cm)		Thermal conductivity, (W/mK)		Young's modulus, (GPa)				
							Unirradiated ρ ₀	Irradiated ρ	Unirradiated K ₀	Irradiated K	Unirradiated E ₀	Irradiated E	E/E ₀		
1	2	78M-9A	1000°±1130	1065	1.95		1.560*1	2.721	1.744	87.1*1	39.6	0.455	6.55	11.3	1.74
2	3	"	1000°±1130	1065	1.95		1.560*1	2.703	1.733	87.1*1	38.8	0.445	6.57	11.2	1.70
3	1	80M-18A	1110°±1250	1180	1.15		1.572*1	2.439	1.552	92*1	47.5	0.516	6.89	9.99	1.45
4	2	"	1090°±1235	1163	1.95		1.572*1	2.163	1.376	92*1	65.4	0.711	6.25	9.54	1.53
5	35	"	1170°±1290	1230	1.59		1.462	1.976	1.352	-	-	-	8.77	11.47	1.31
6	36	"	965°±1075	1020	0.60		1.467	2.087	1.423	-	-	-	8.67	11.37	1.31

* 1 5ヶの試験片の測定値の平均値

Table 26 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of ATR-2E

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29EJ)	Direction	Electrical resistivity, (mΩ·cm)		Thermal conductivity, (W/mK)		Young's modulus, (GPa)				
							Unirradiated ρ ₀	Irradiated ρ	Unirradiated K ₀	Irradiated K	Unirradiated E ₀	Irradiated E	E/E ₀		
1	30	78M-9A	1060°±1210	1135	2.44	WG	0.727	1.768	2.432	181	81.6	0.451	9.58	13.1	1.36
2	31	"	1060°±1210	1135	2.44	WG	0.710	1.735	2.444	180	81.3	0.452	10.3	13.5	1.31
3	32	"	1000°±1130	1065	1.95	WG	0.769	1.920	2.497	169	73.4	0.434	9.72	11.6	1.19
4	36	"	1060°±1210	1135	2.44	AG	0.833	1.989	2.388	163	66.4	0.407	8.73	11.6	1.33
5	37	"	1060°±1210	1135	2.44	AG	0.829	1.991	2.402	176	74.5	0.423	8.58	11.3	1.31
6	38	"	1000°±1130	1065	1.95	AG	0.796	2.004	2.518	163	76.7	0.471	8.55	11.7	1.36

Table 27 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of SMI-24

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron Fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29fJ)	Direction	Electrical resistivity, (mΩ·cm)			Thermal conductivity, (W/mK)			Young's modulus, (GPa)		
							Unirradiated ρ ₀	Irradiated ρ	ρ/ρ ₀	Unirradiated K ₀	Irradiated K	K/K ₀	Unirradiated E ₀	Irradiated E	E/E ₀
1	1	78M-9A	1000~1130	1065	1.95	WG	0.750	1.875	2.500	1.82	73.3	0.403	7.48	12.6	1.68
2	4	"	1060~1210	1135	2.44	AG	0.794	1.912	2.408	1.78	70.3	0.395	6.94	12.3	1.78

Table 28 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of AXM-5Q1

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron Fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29fJ)	Direction	Electrical resistivity, (mΩ·cm)			Thermal conductivity, (W/mK)			Young's modulus, (GPa)		
							Unirradiated ρ ₀	Irradiated ρ	ρ/ρ ₀	Unirradiated K ₀	Irradiated K	K/K ₀	Unirradiated E ₀	Irradiated E	E/E ₀
1	102	81M-36A	960~1135	1048	1.57		1.678	2.877	1.715	-	-	-	11.61	10.93	0.94
2	103	"	1002~1153	1078	2.40		1.647	2.696	1.637	-	-	-	11.52	11.40	0.99

Table 29 Changes in electrical resistivity, thermal conductivity, and Young's modulus of AXF-5Q1

NO.	Specimen NO.	Irradiation capsule	Irradiation temp. (°C)	Irradiation temp. (°C) (Mean)	Neutron Fluence 10 ²⁵ n/m ² (E>29fJ)	Direction	Electrical resistivity, (mΩ·cm)			Thermal conductivity, (W/mK)			Young's modulus, (GPa)		
							Unirradiated ρ ₀	Irradiated ρ	ρ/ρ ₀	Unirradiated K ₀	Irradiated K	K/K ₀	Unirradiated E ₀	Irradiated E	E/E ₀
1	122	81M-36A	1130~1210	1170	2.80		1.385	2.023	1.461	-	-	-	14.03	13.42	0.96
2	123	"	1085~1190	1138	2.42		1.393	2.091	1.501	-	-	-	13.30	12.47	0.94

Table 30 Time constant and saturation thermal conductivity
of IG-110, H451 and ATR-2E graphites

Sample	Direction	Irradiation temperature(°C)	Time constant ($10^{25}n_i/m^2$)	Saturation thermal conductivity(W/mK)
IG-110	AG	1050	0.70	47
	WG	1050	0.73	49
H451	AG	1050	0.95	58
	WG	1050	0.65	60
ATR-2E	AG	1100	0.63	66
	WG	1100	0.67	73

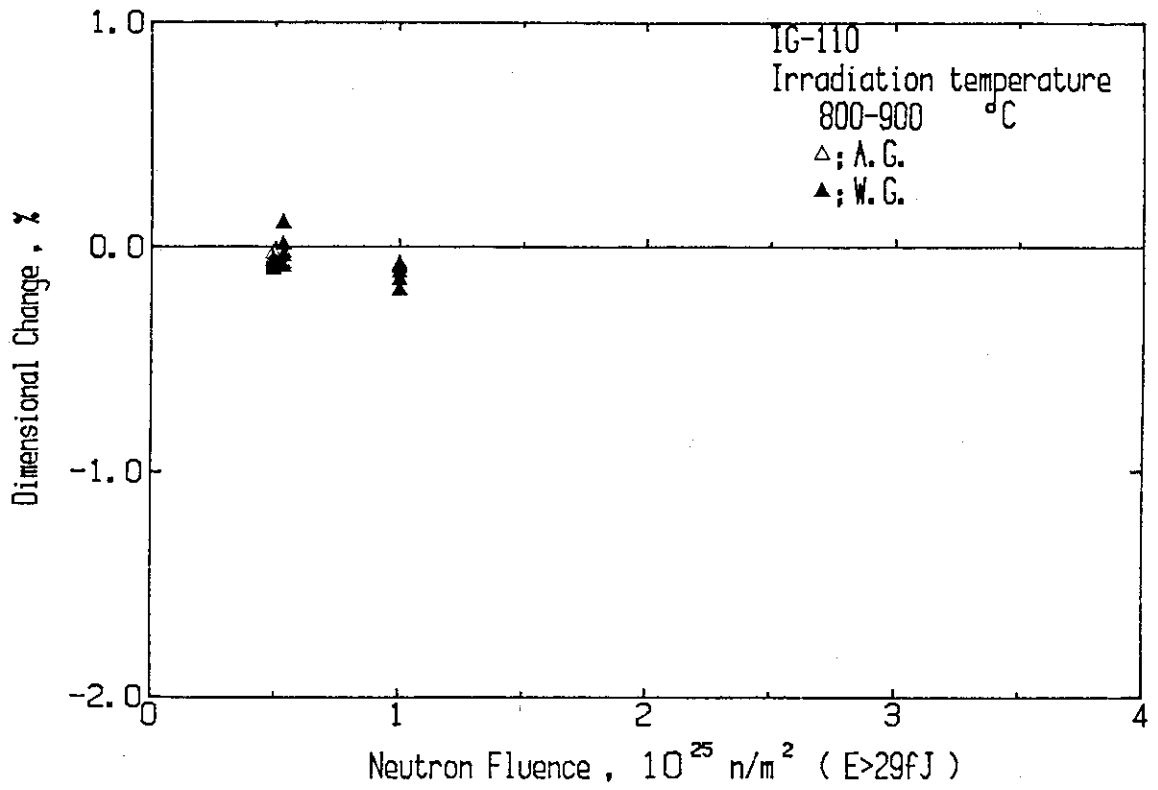


Fig. 1 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 800-900°C

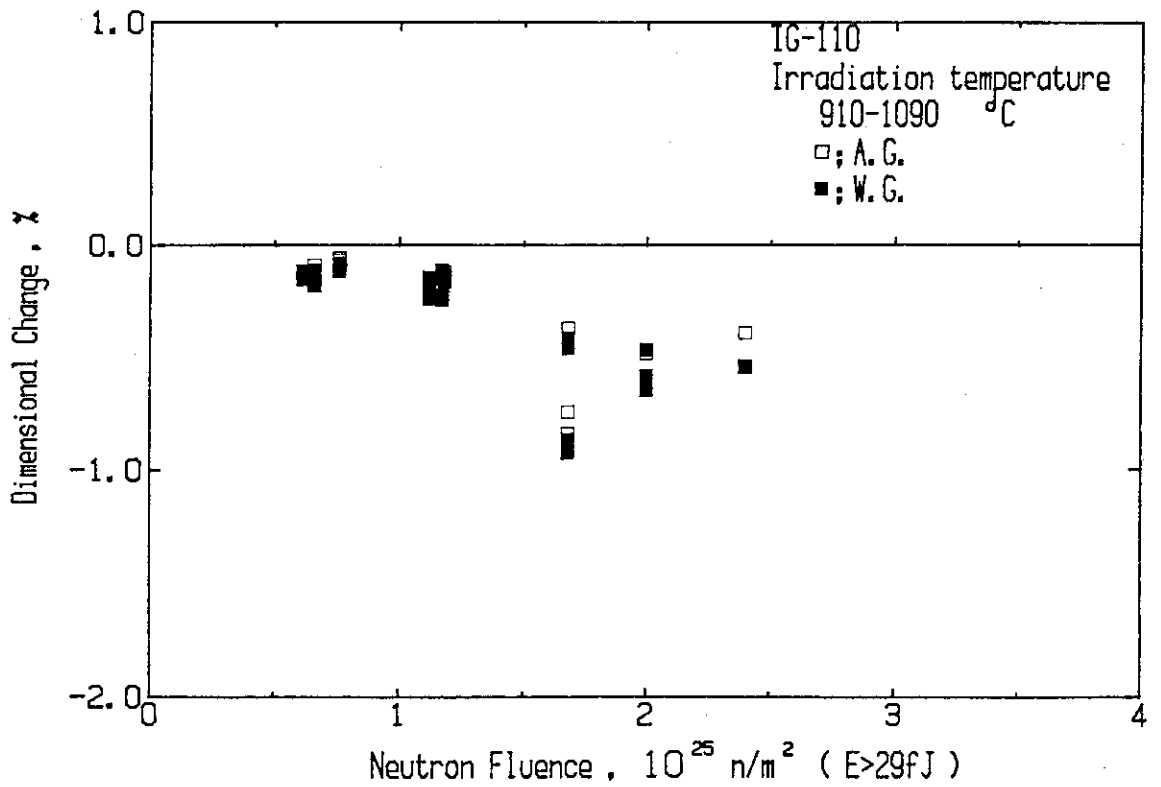


Fig. 2 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 910-1090°C

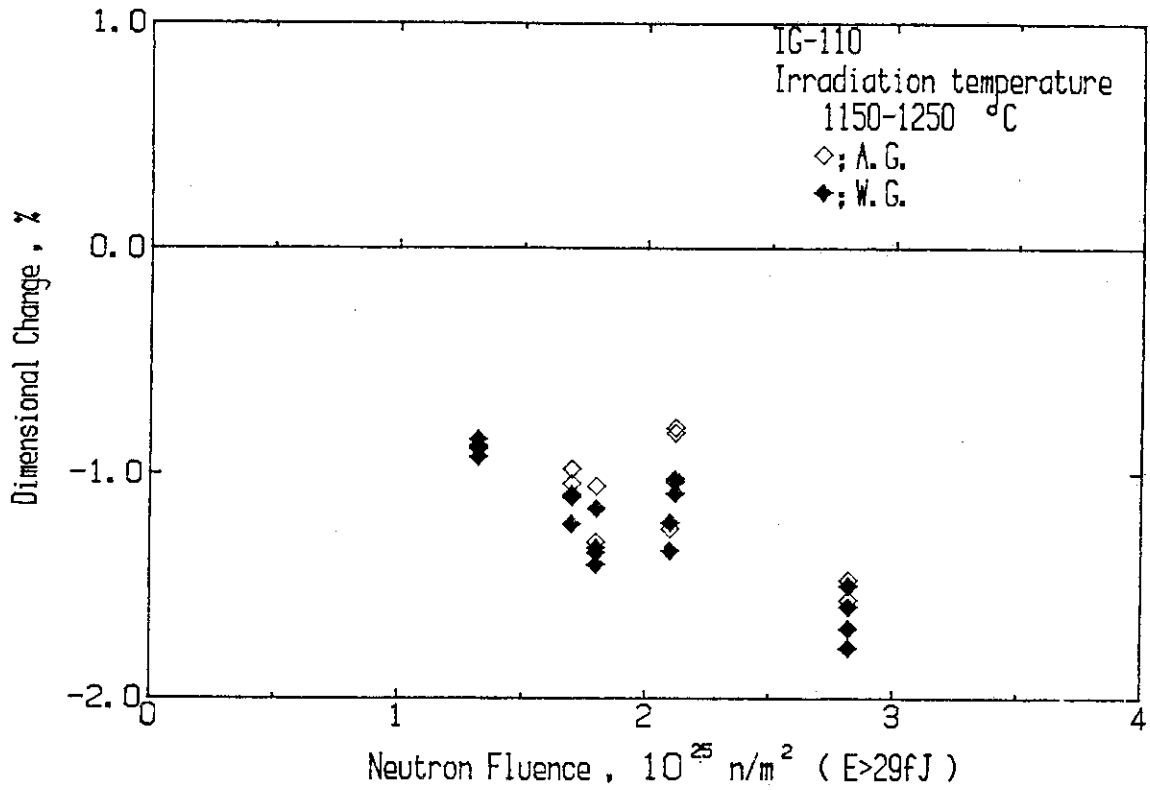


Fig. 3 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 1150-1250°C

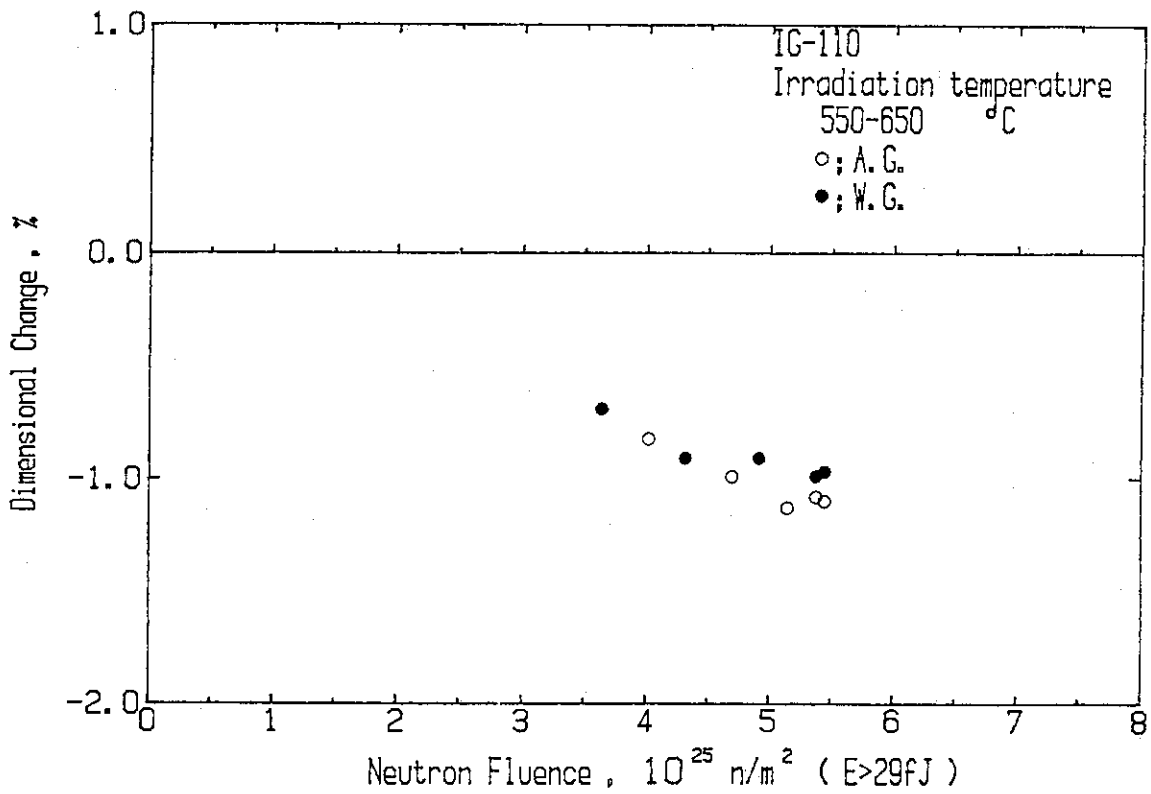


Fig. 4 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 550-650°C

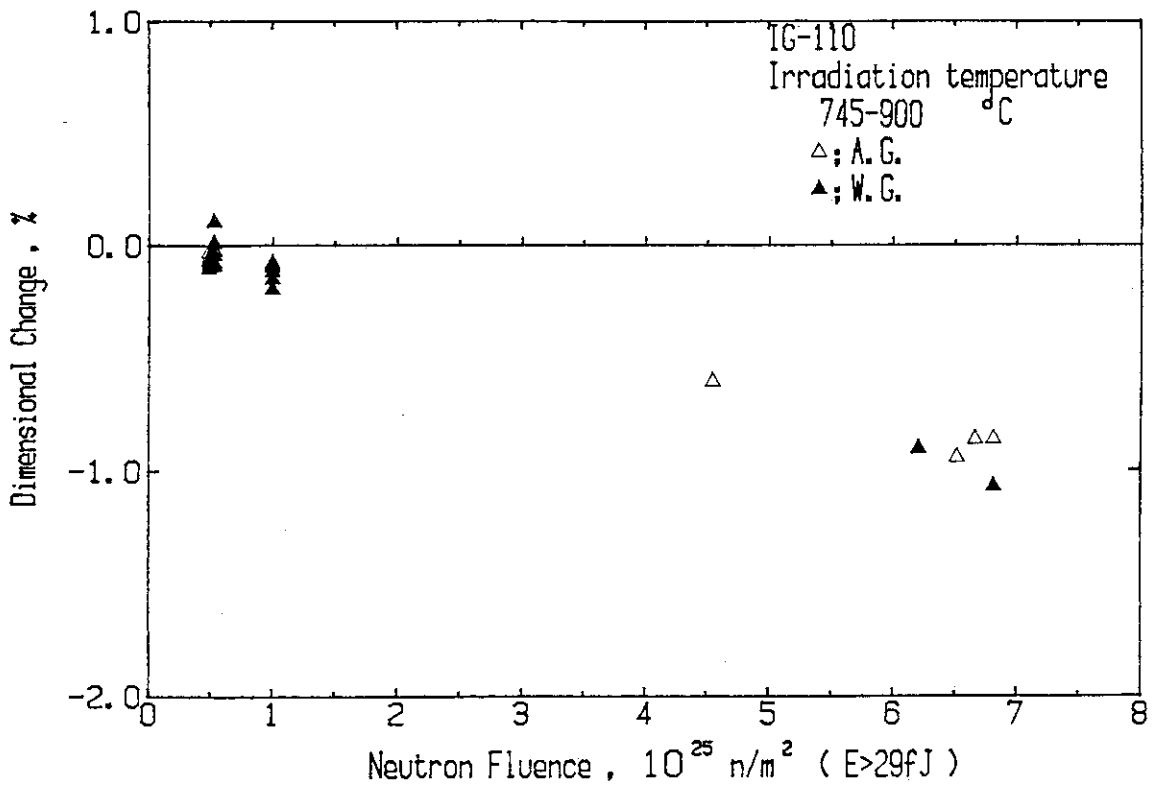


Fig. 5 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 745-900°C

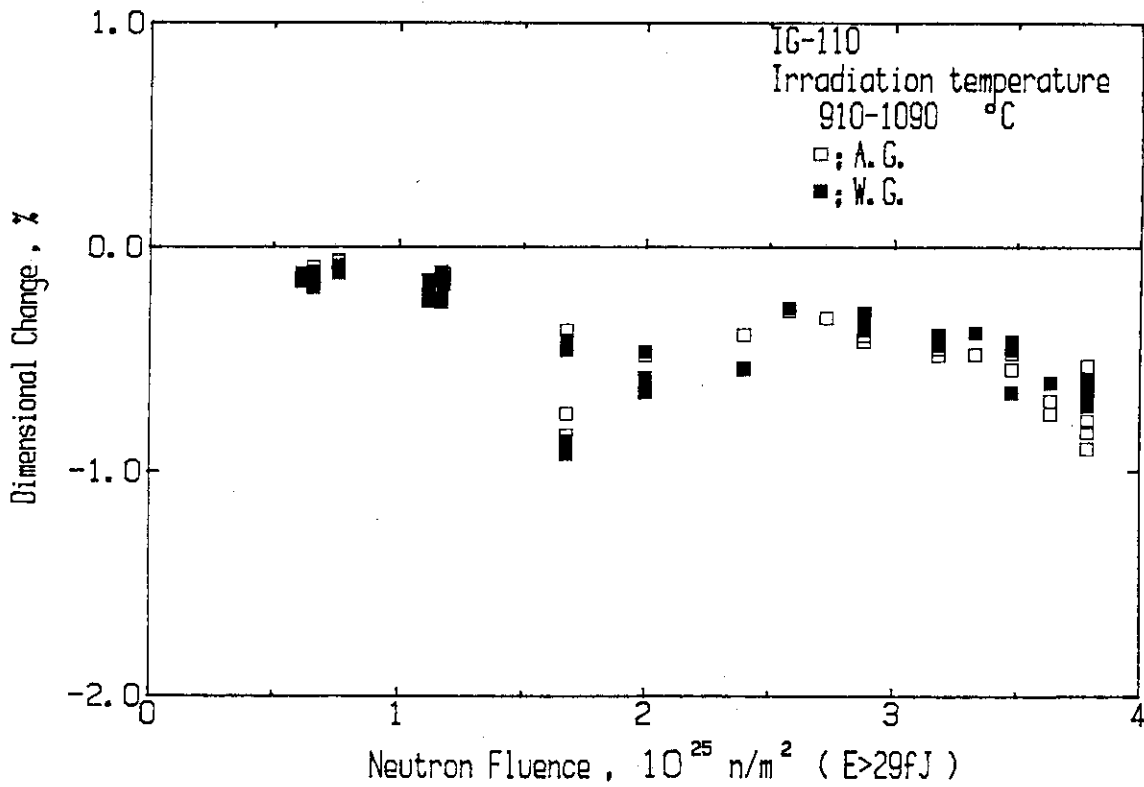


Fig. 6 Dimensional changes of IG-110 graphite irradiated at 910-1090°C

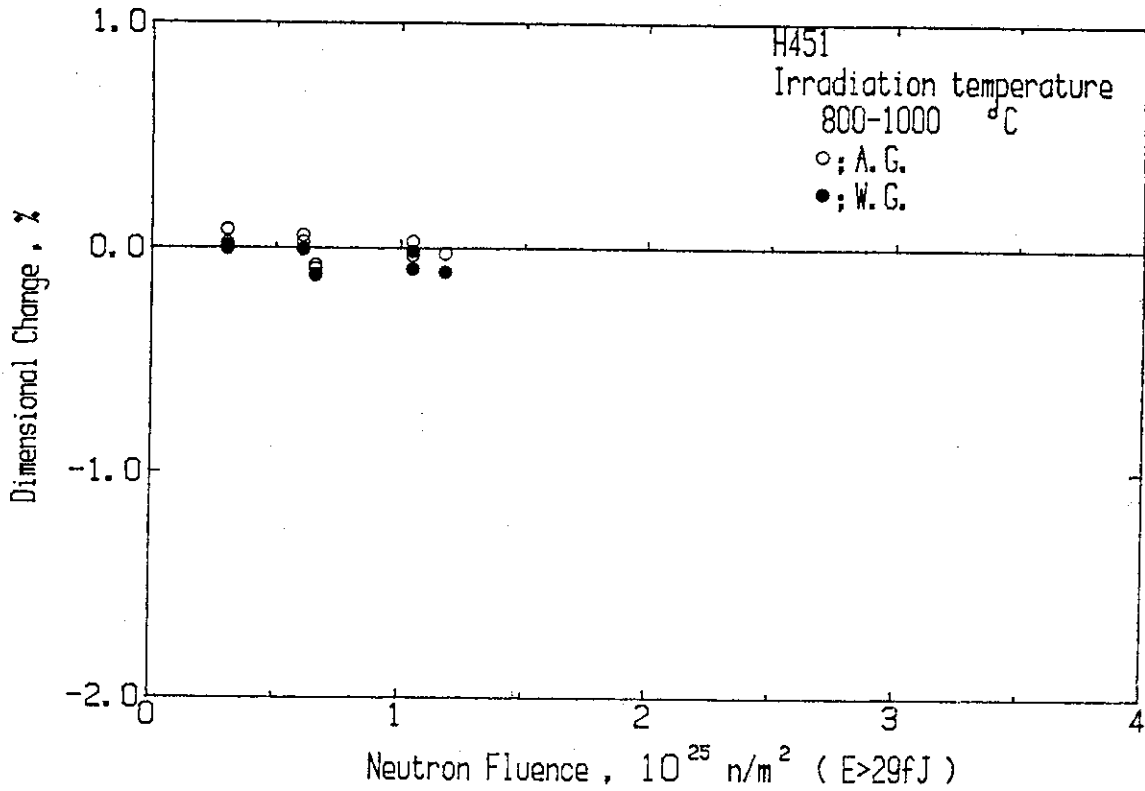


Fig. 7 Dimensional changes of H451 graphite irradiated at 800-1000°C

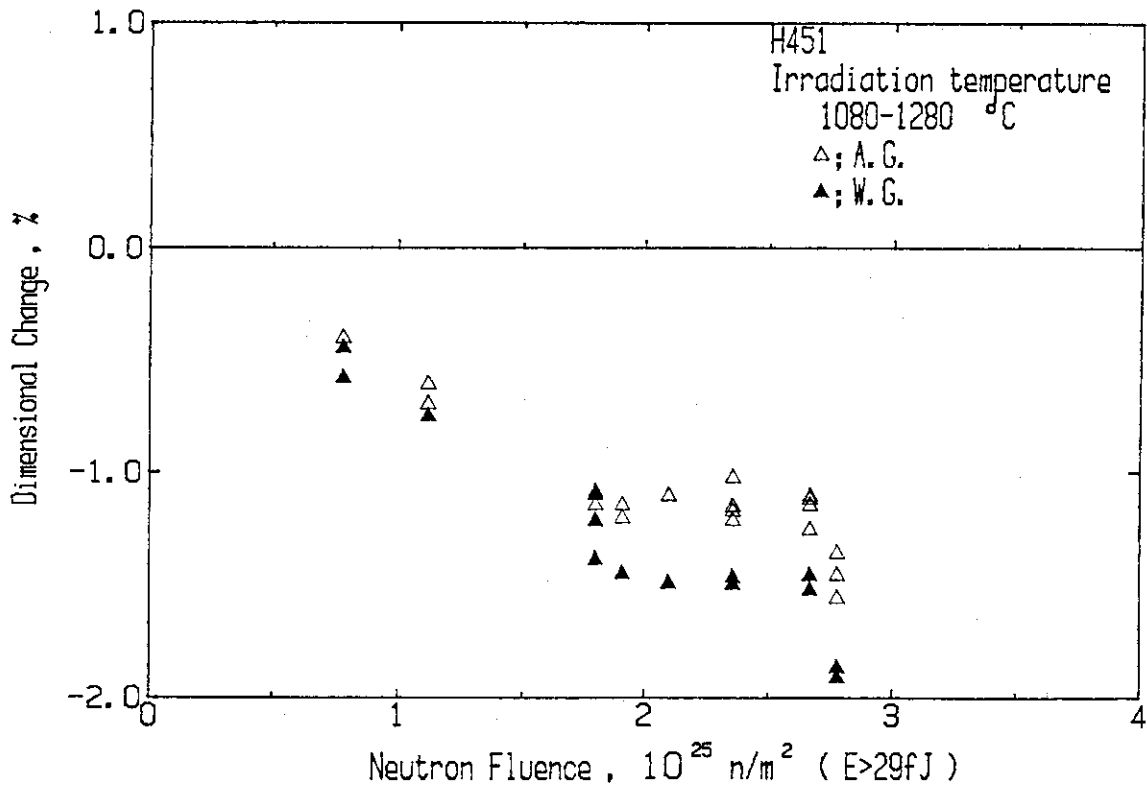


Fig. 8 Dimensional changes of H451 graphite irradiated at 1080-1280°C

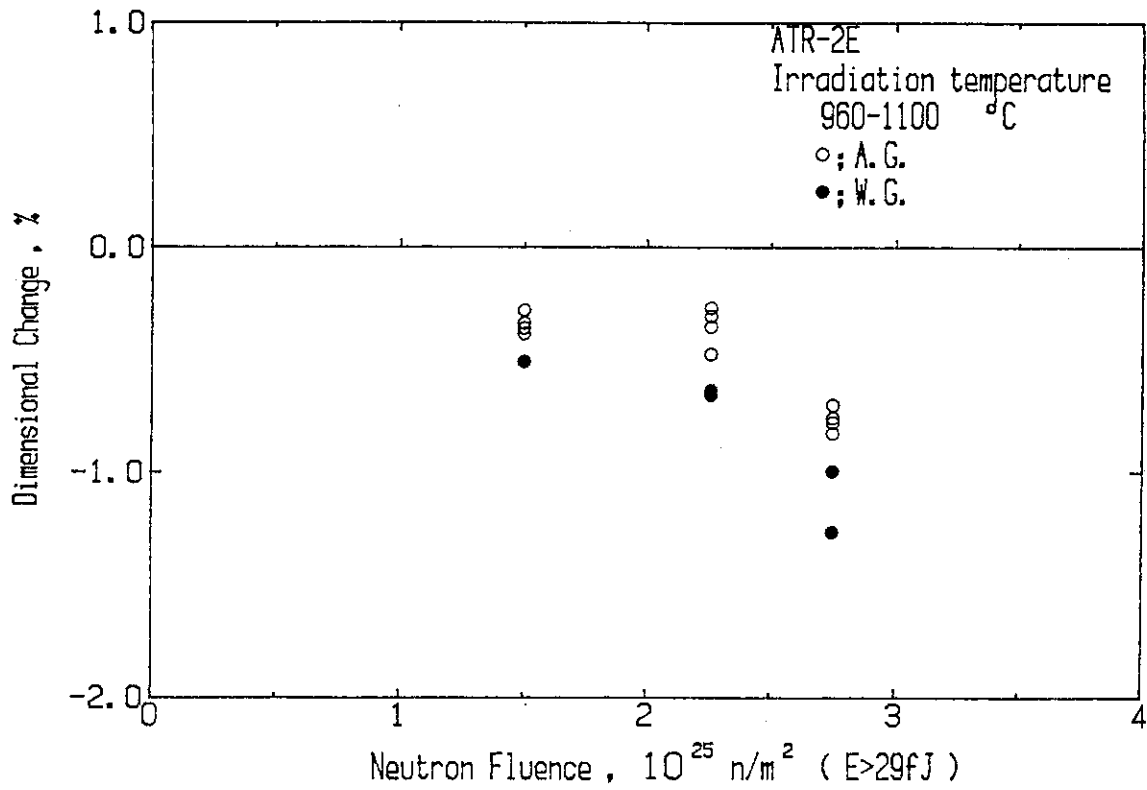


Fig. 9 Dimensional changes of ATR-2E graphite irradiated at 960-1100°C

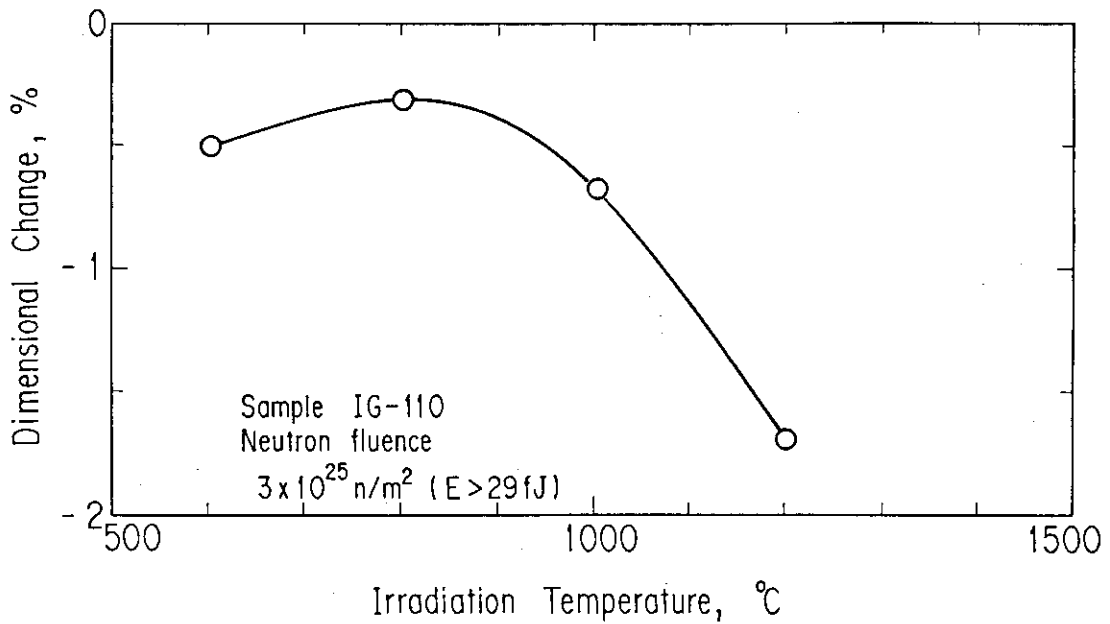


Fig. 10 Relation between dimensional changes and irradiation temperature for IG-110 graphite

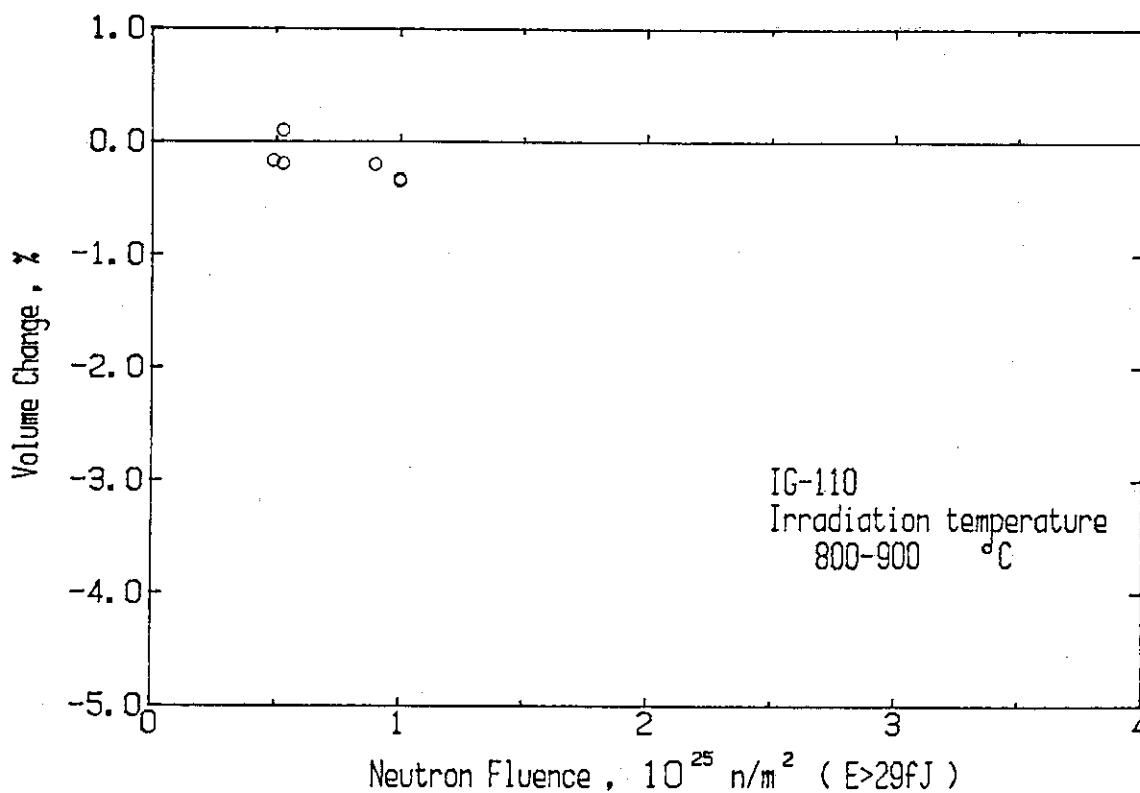


Fig. 11 Volume changes of IG-110 graphite irradiated at 800-900°C

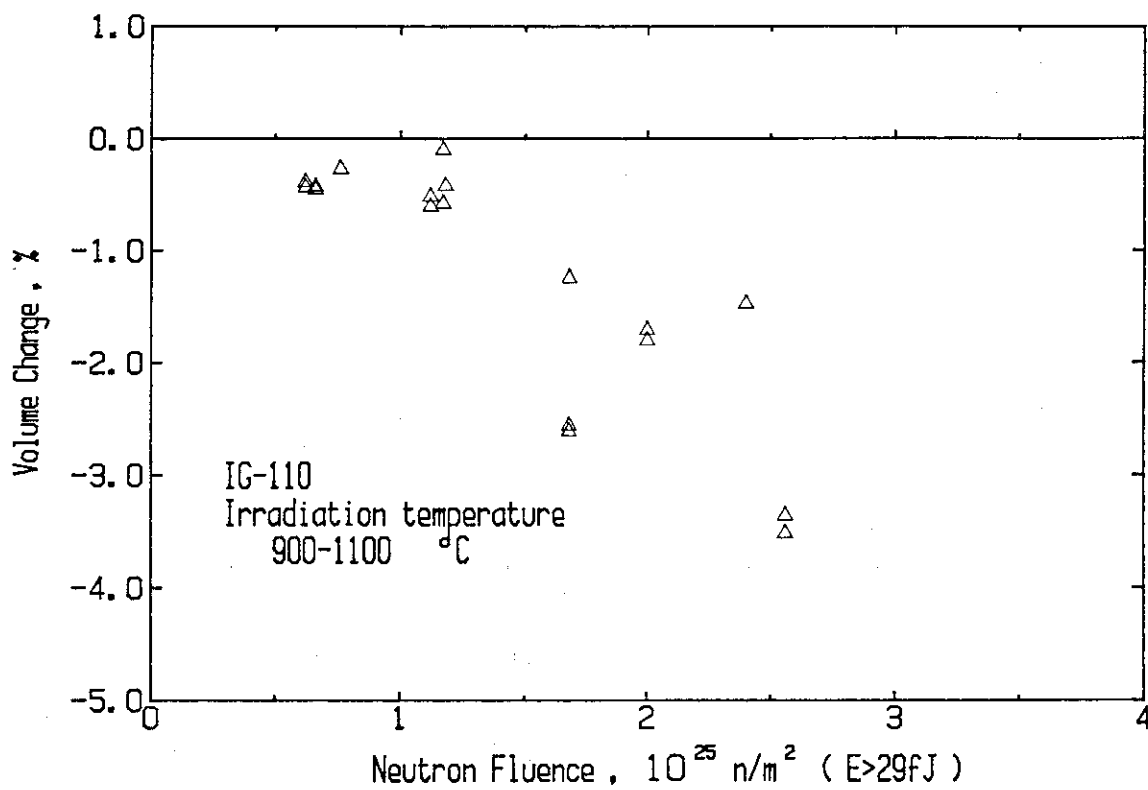


Fig. 12 Volume changes of IG-110 graphite irradiated at 900-1100°C

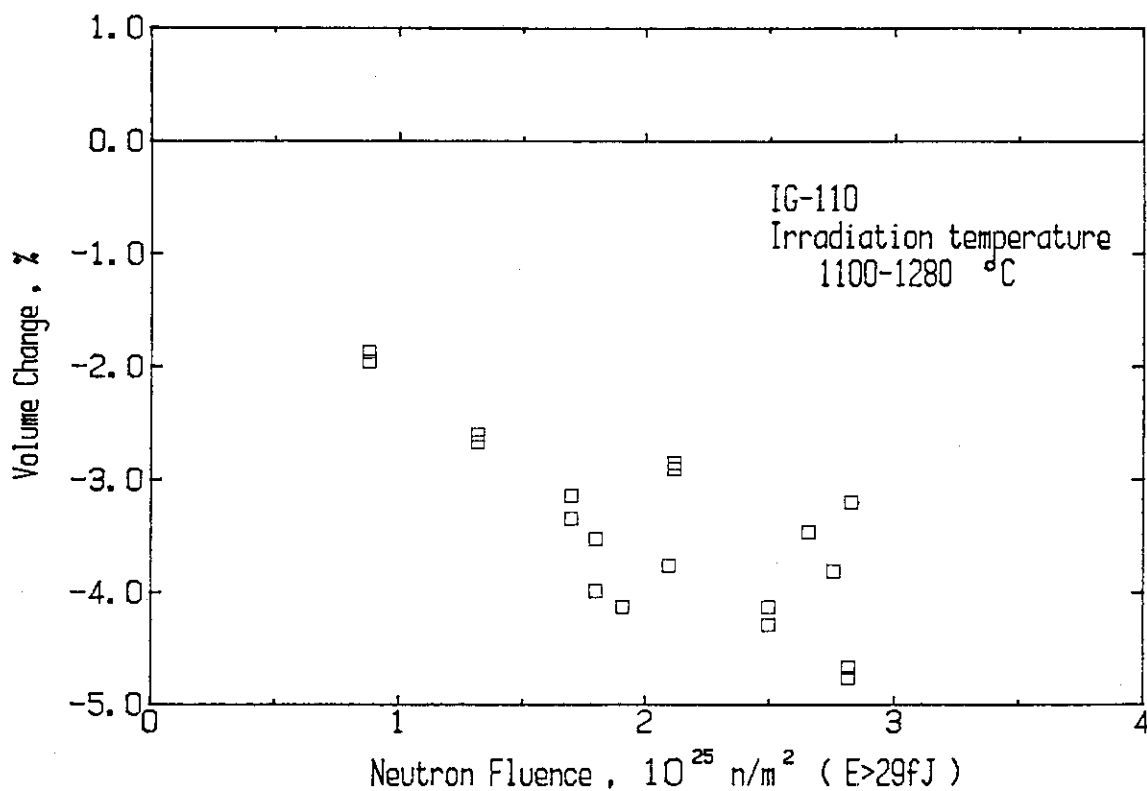


Fig. 13 Volume changes of IG-110 graphite irradiated at 1100-1280°C

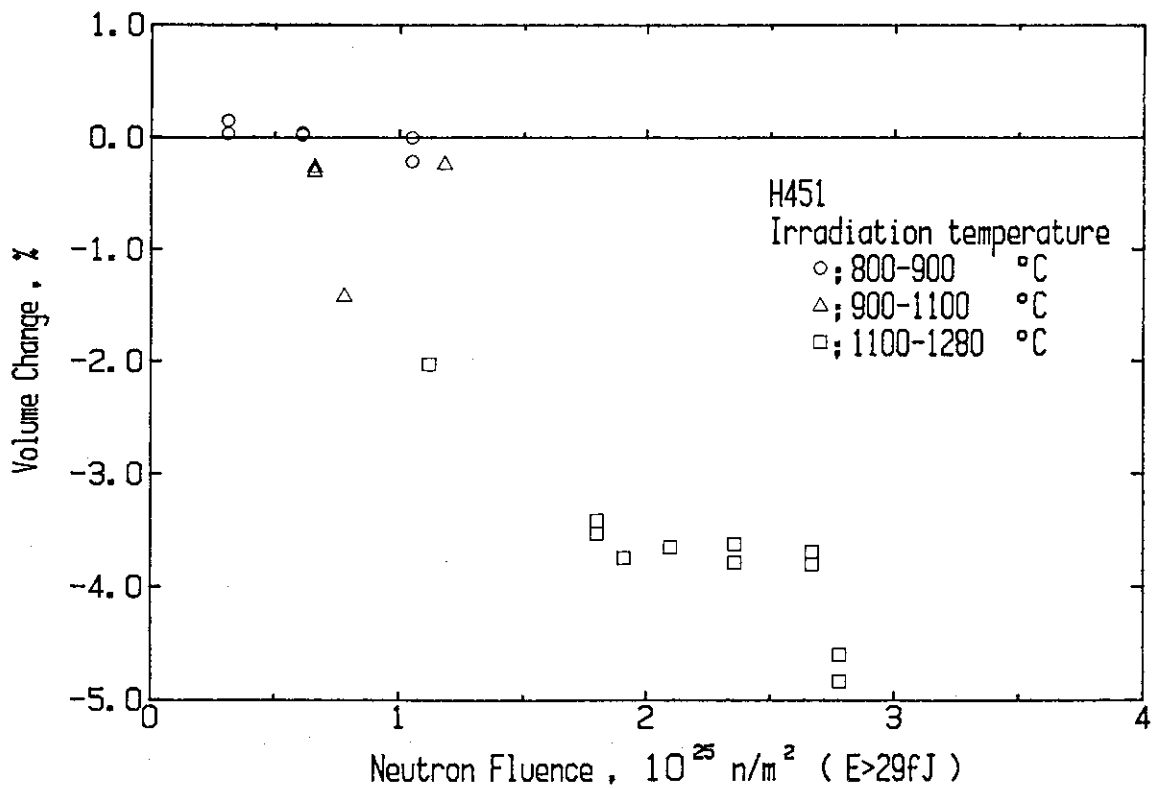


Fig. 14 Volume changes of H451 graphite irradiated at 800-1280°C

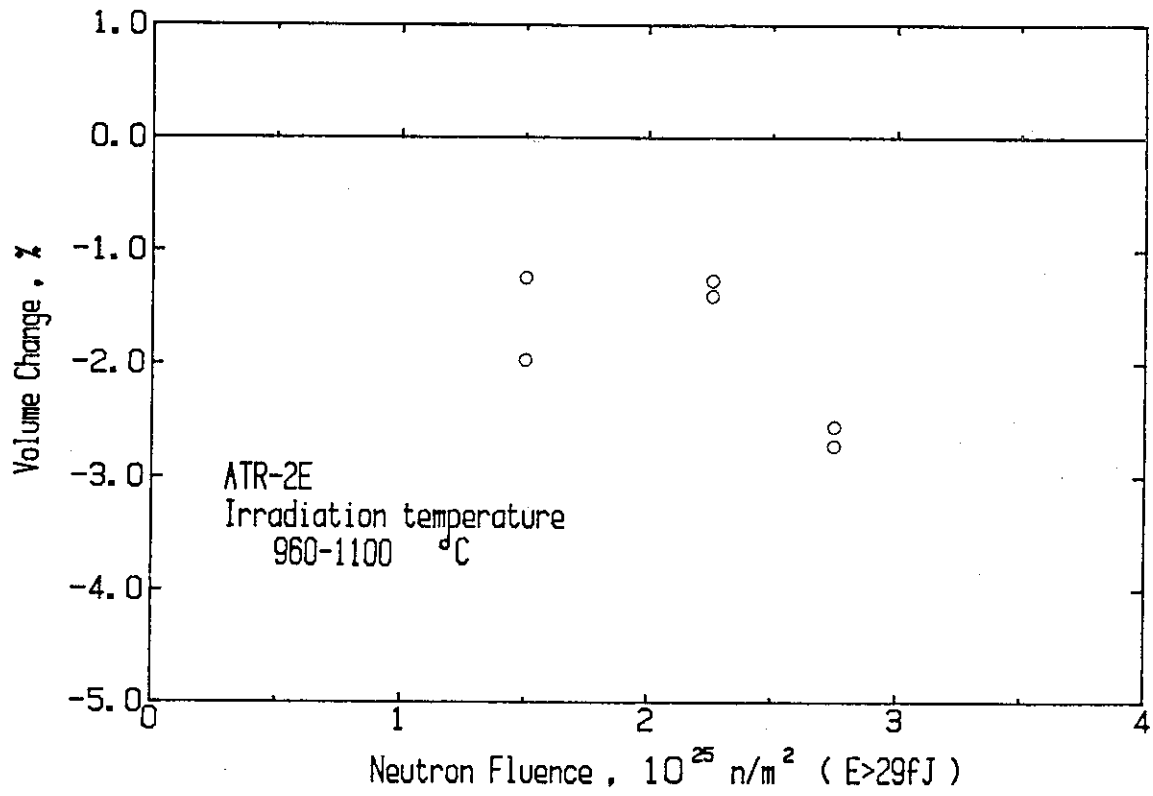


Fig. 15 Volume changes of ATR-2E graphite irradiated at 960-1100°C

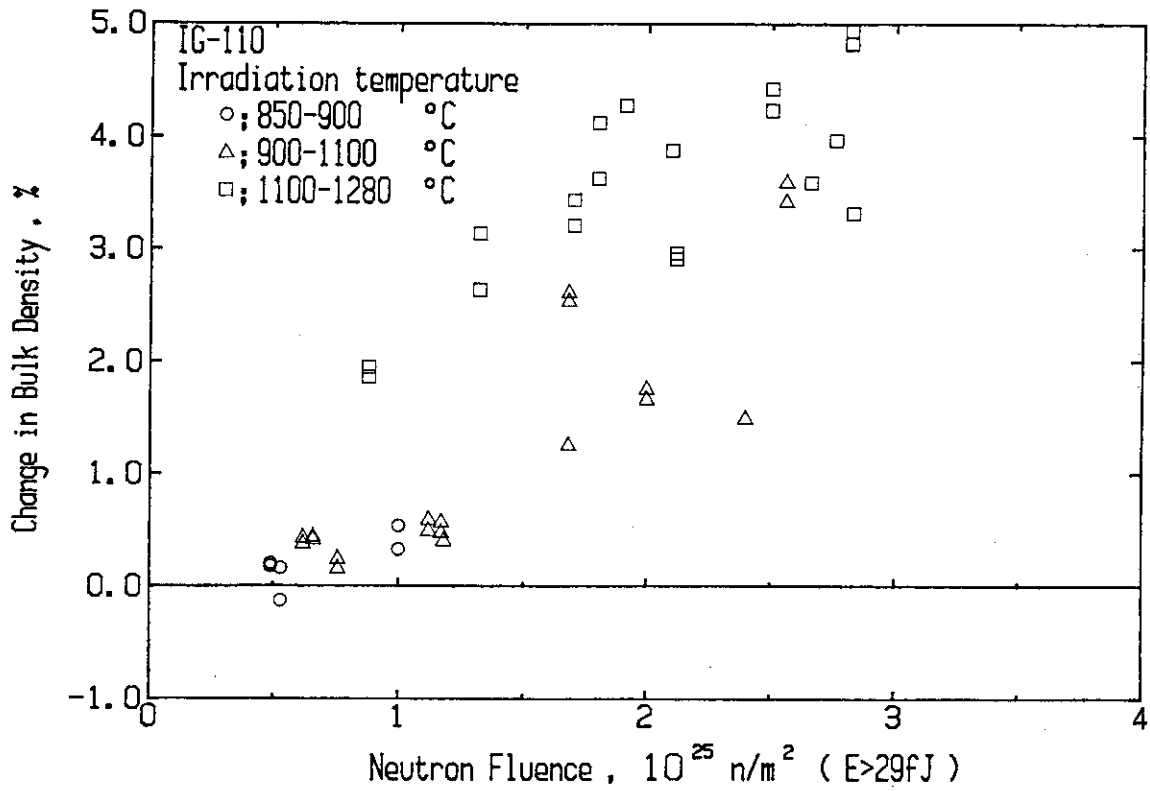


Fig. 16 Changes in bulk density of IG-110 graphite irradiated at 850-1280°C

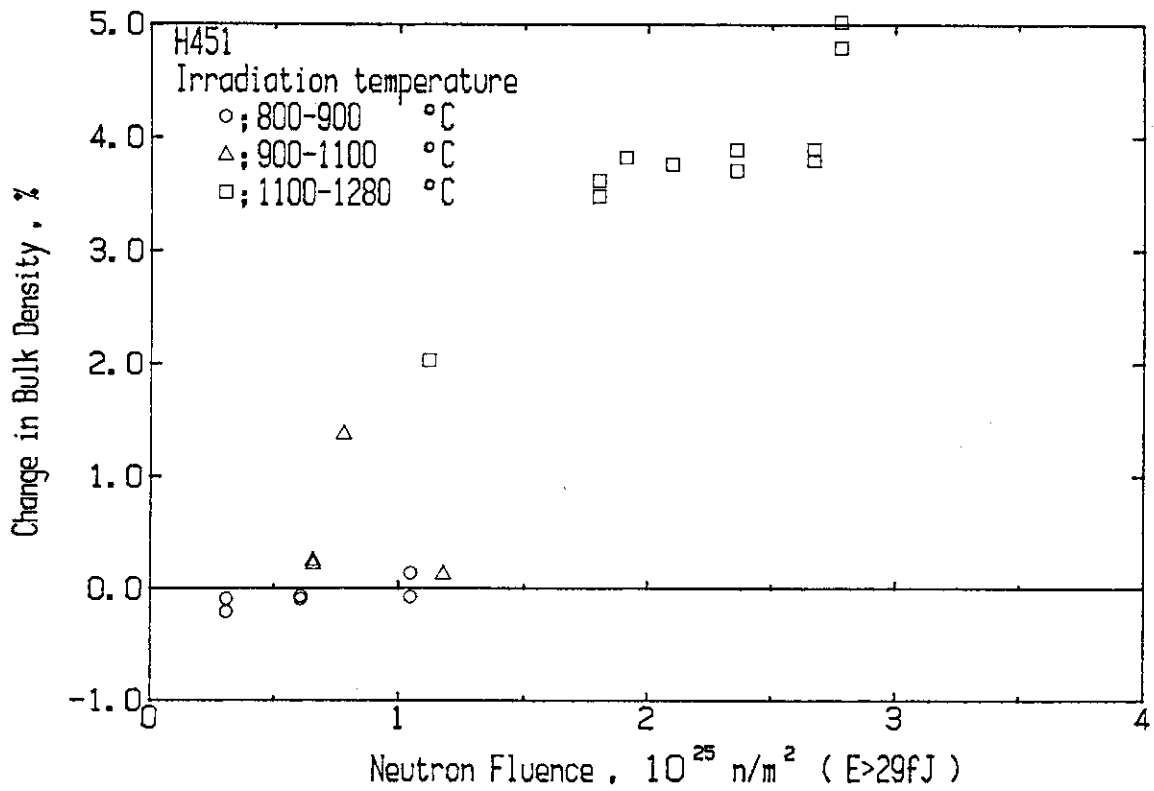


Fig. 17 Changes in bulk density of H451 graphite irradiated at 800-1280°C

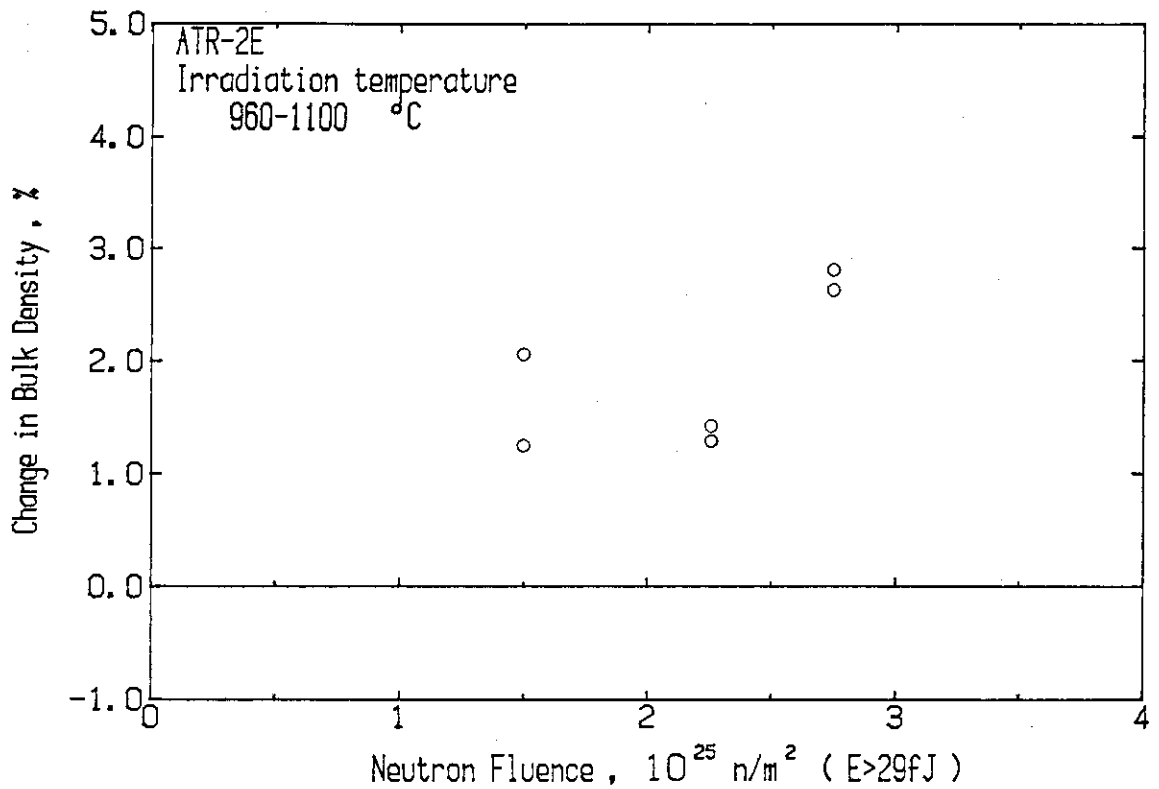


Fig. 18 Changes in bulk density of ATR-2E graphite irradiated at 960-1100°C

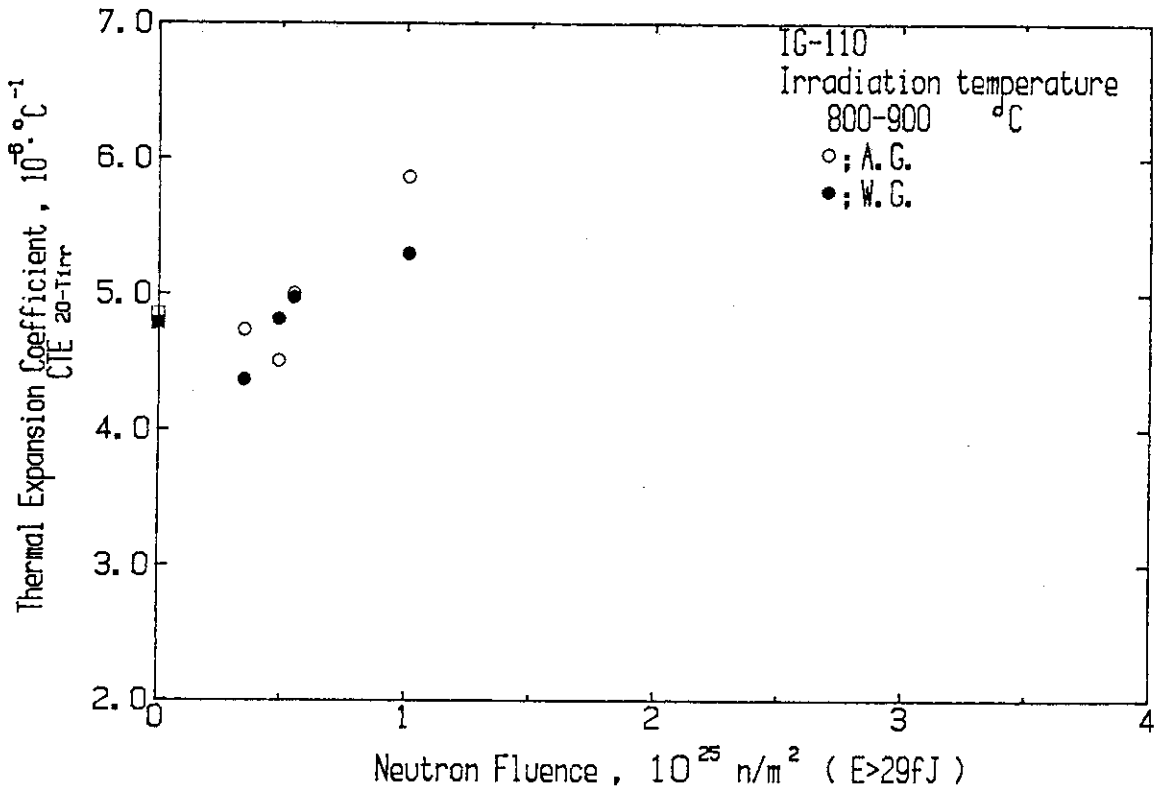


Fig. 19 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 800-900°C

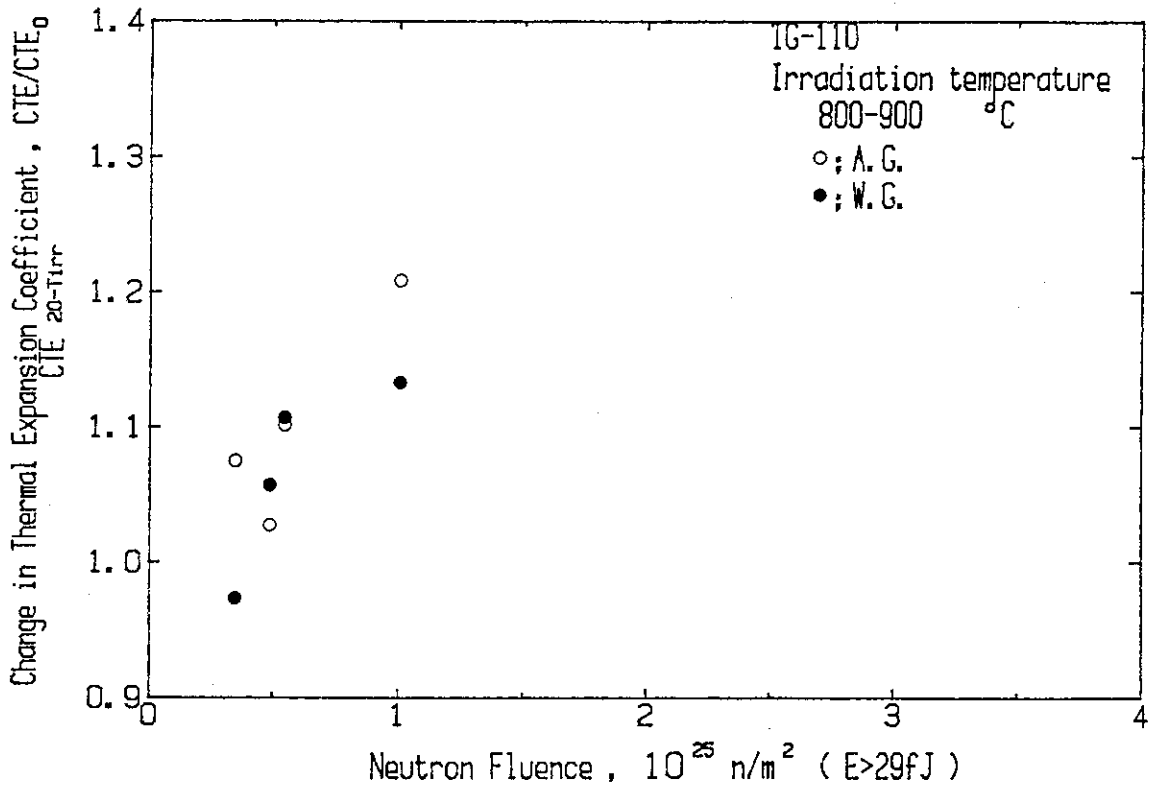


Fig. 20 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 800-900°C

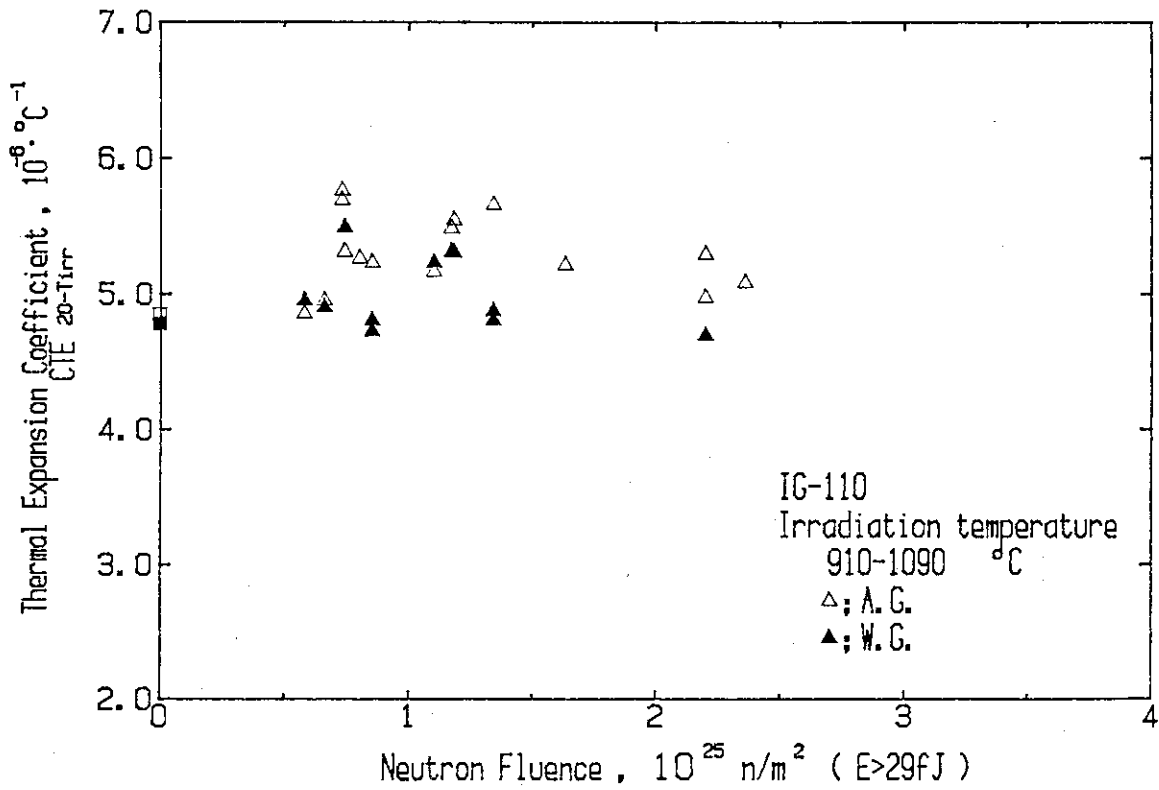


Fig. 21 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 910-1090°C

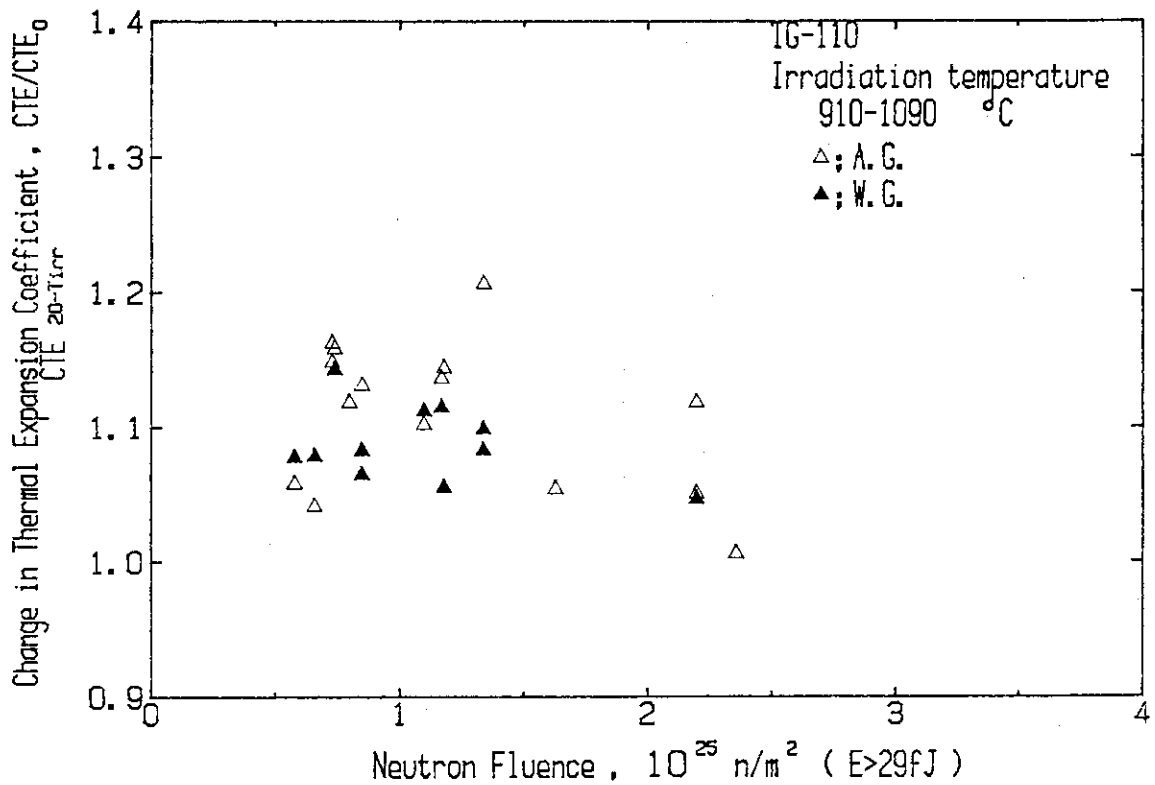


Fig. 22 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 910-1090°C

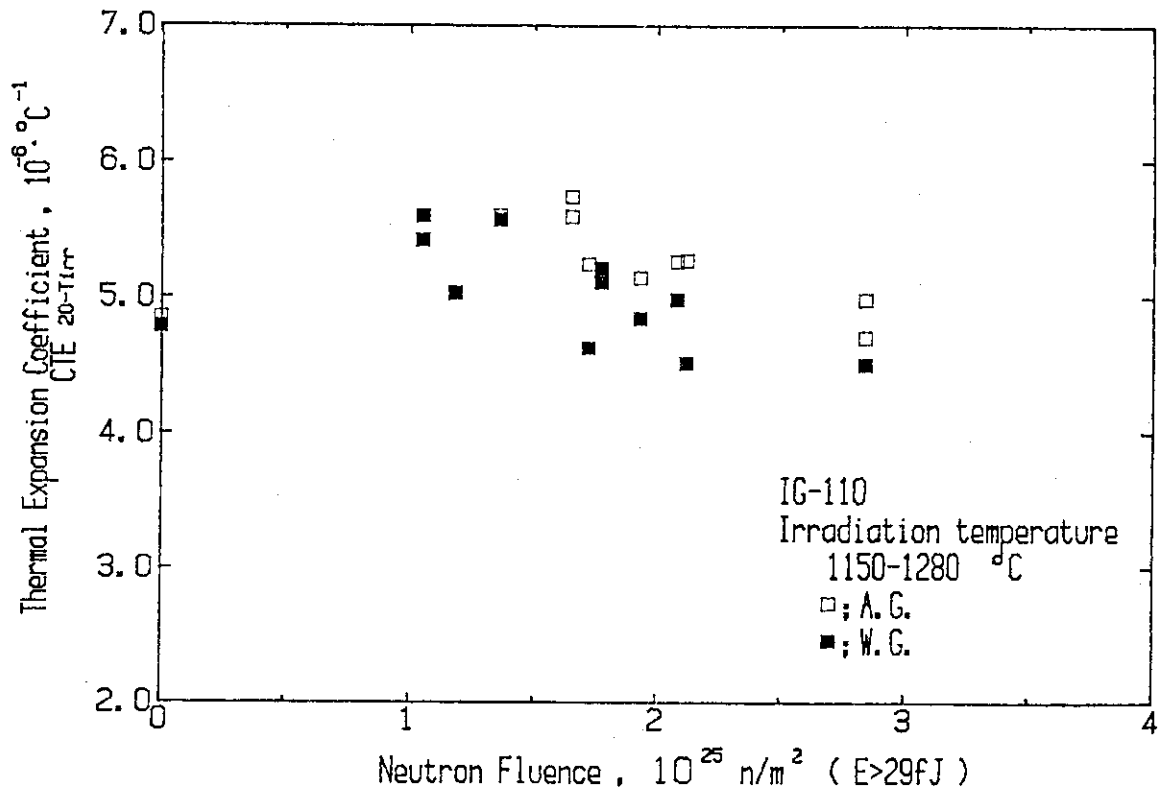


Fig. 23 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 1150-1280 $^{\circ}\text{C}$

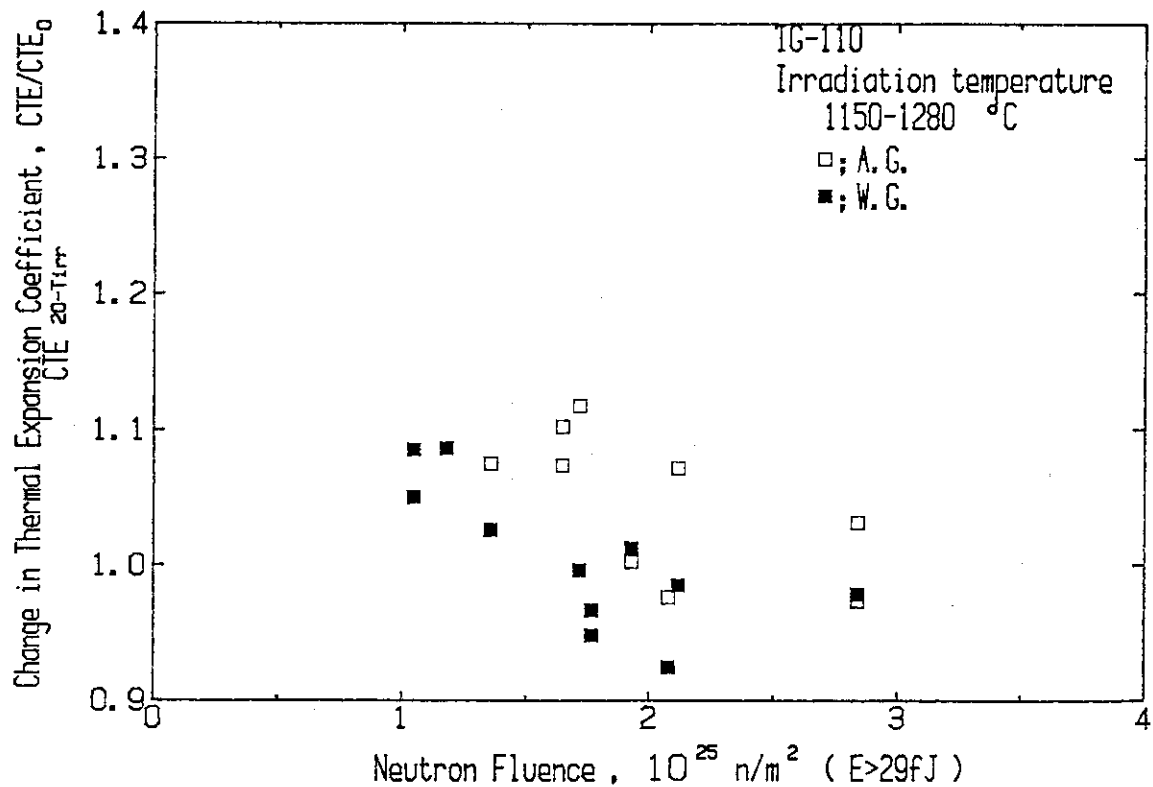


Fig. 24 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 1150-1280 $^{\circ}\text{C}$

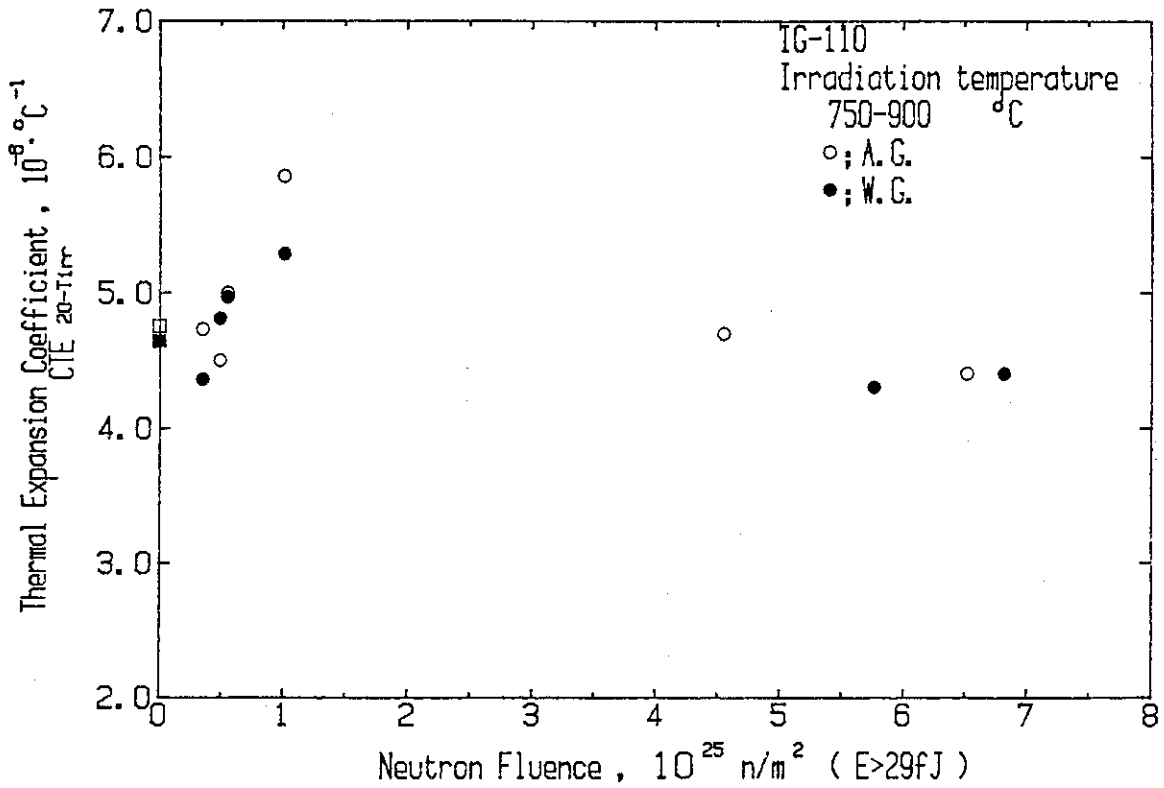


Fig. 25 Changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 750-900°C

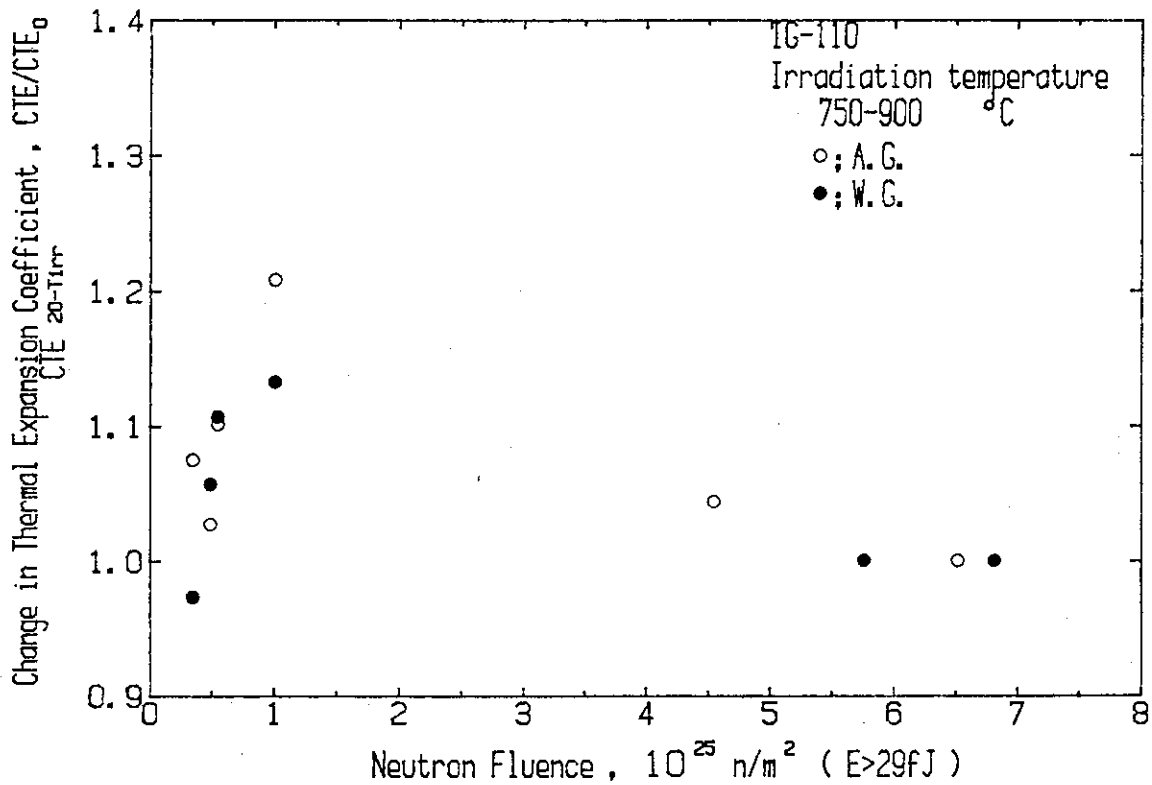


Fig. 26 Relative changes in CTE of IG-110 graphite irradiated at 750-900°C

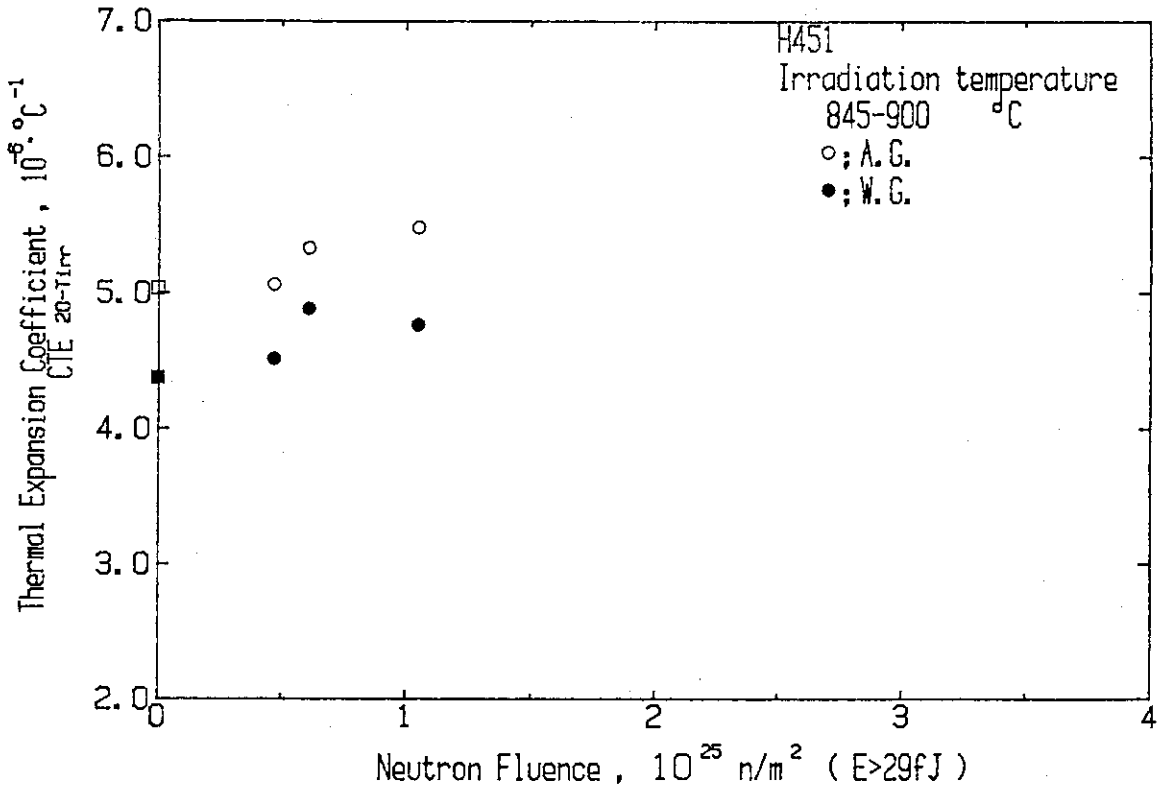


Fig. 27 Changes in CTE of H451 graphite irradiated at 845-900°C

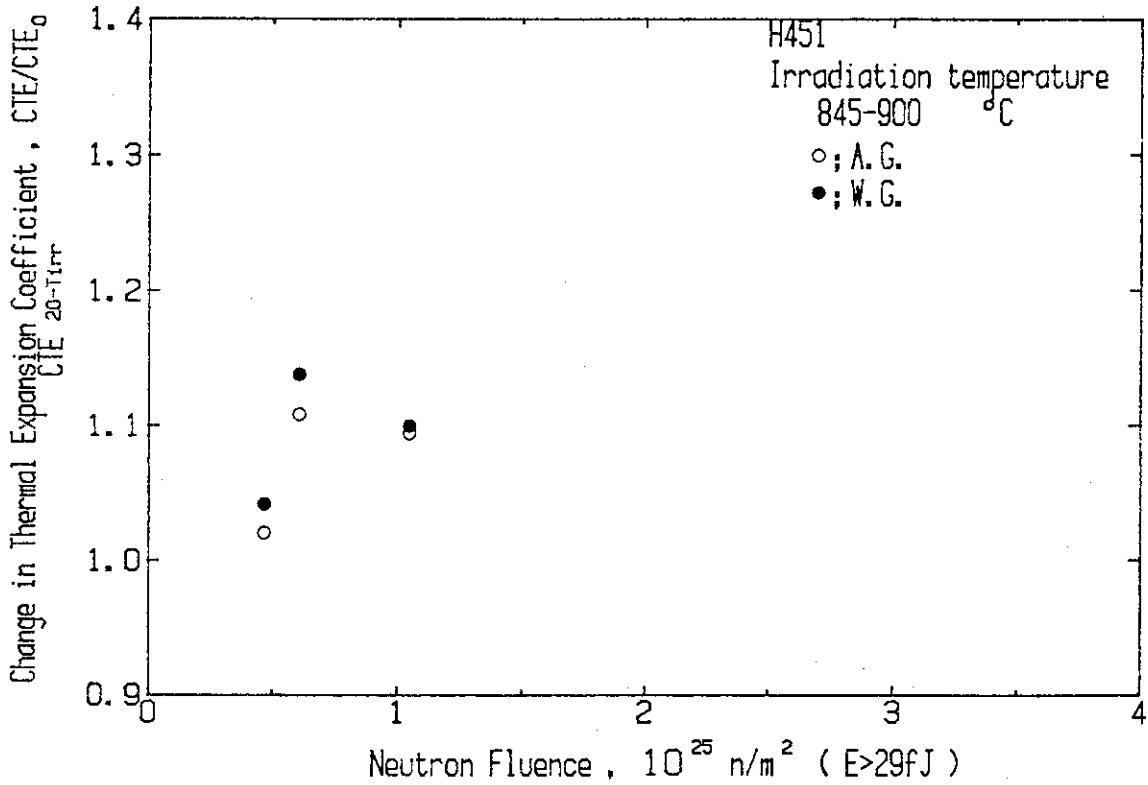


Fig. 28 Relative changes in CTE of H451 graphite irradiated at 845-900°C

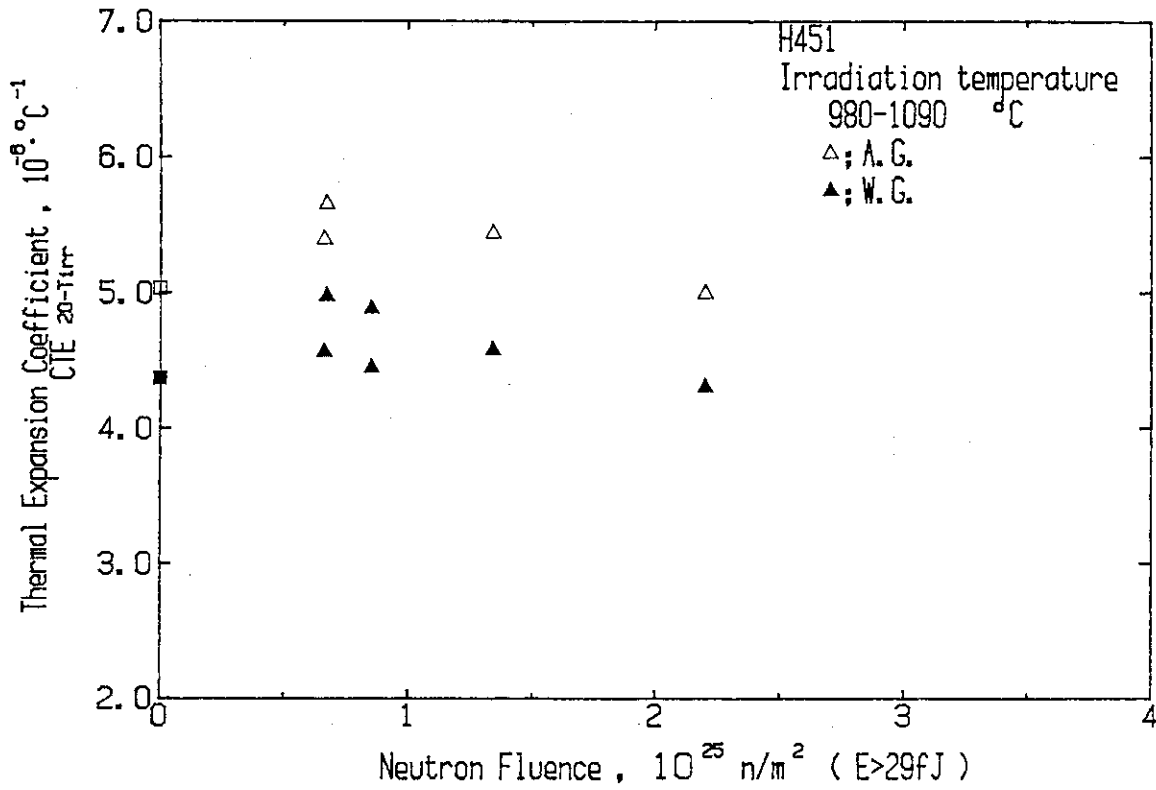


Fig. 29 Changes in CTE of H451 graphite irradiated at 980-1090°C

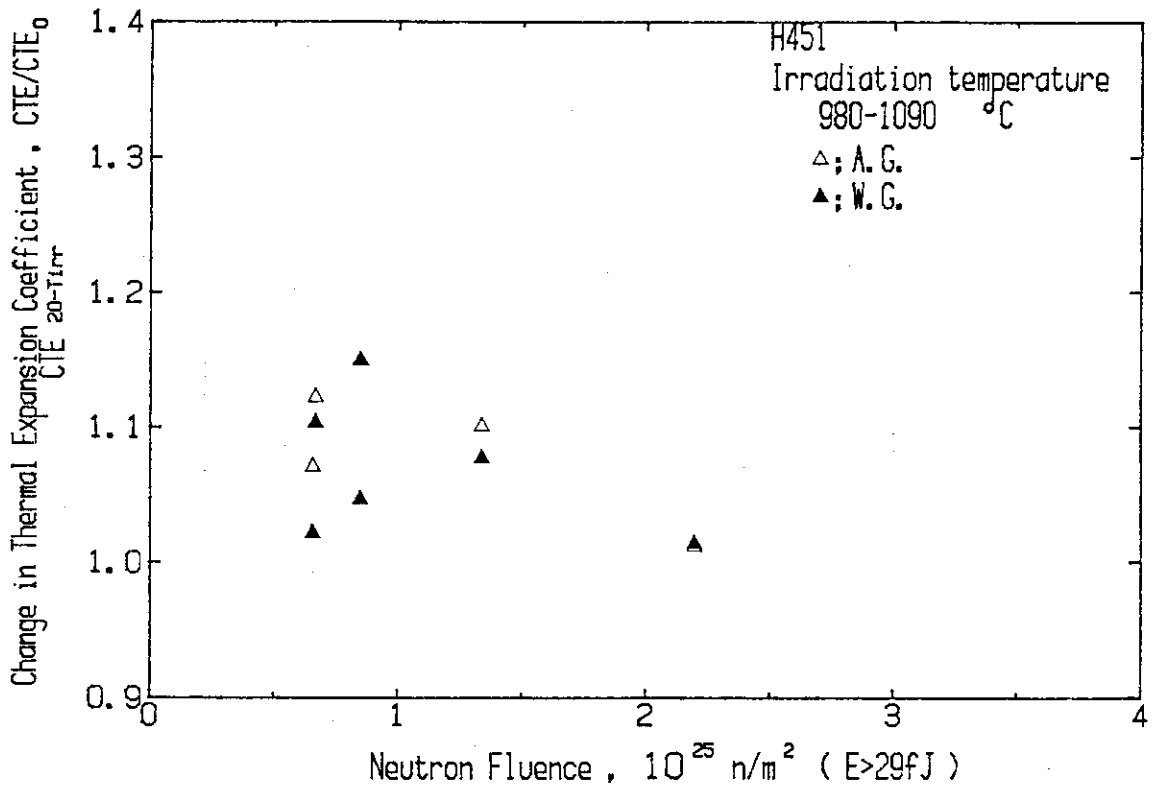


Fig. 30 Relative changes in CTE of H451 graphite irradiated at 980-1090°C

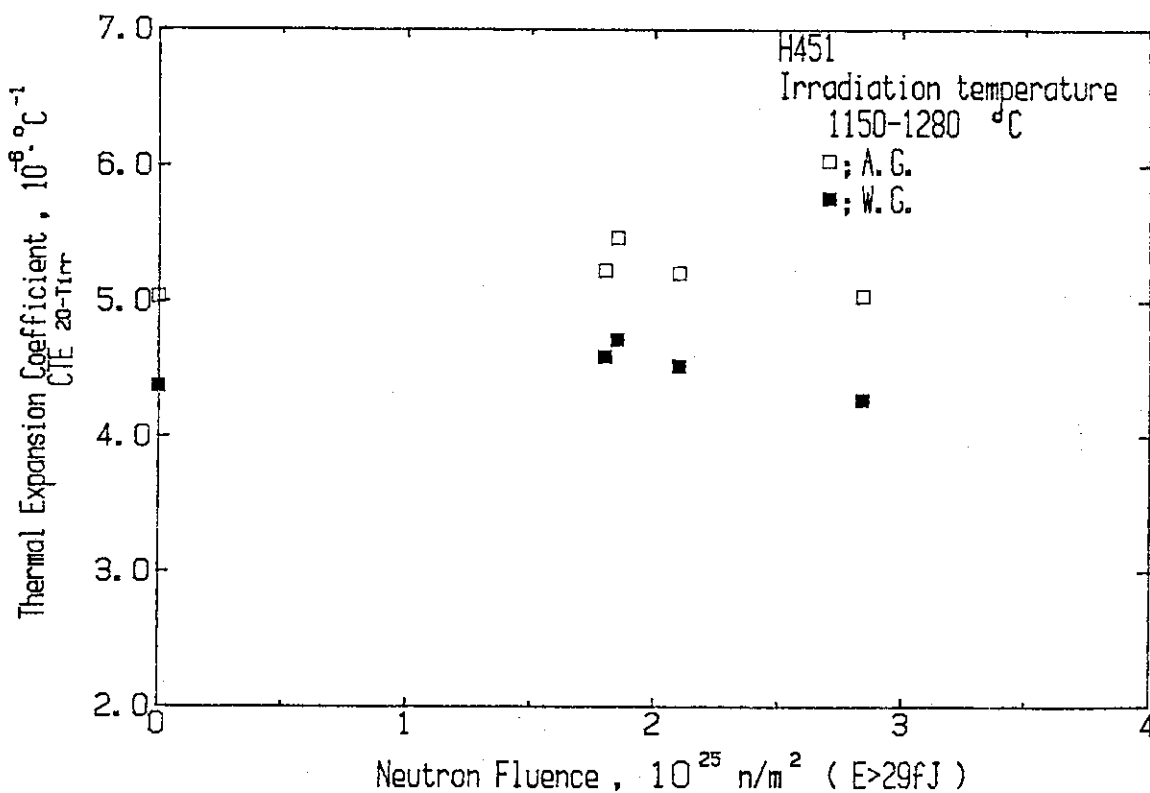


Fig. 31 Changes in CTE of H451 graphite irradiated at 1150-1280°C

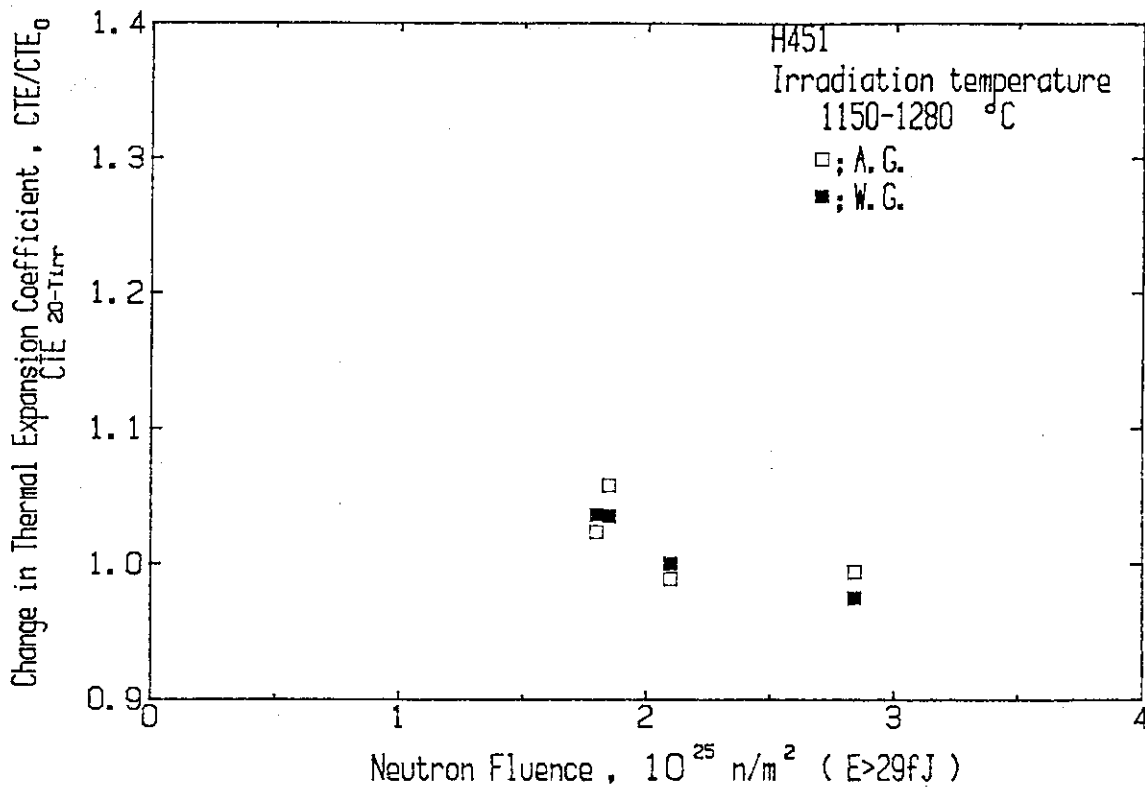


Fig. 32 Relative changes in CTE of H451 graphite irradiated at 1150-1280°C

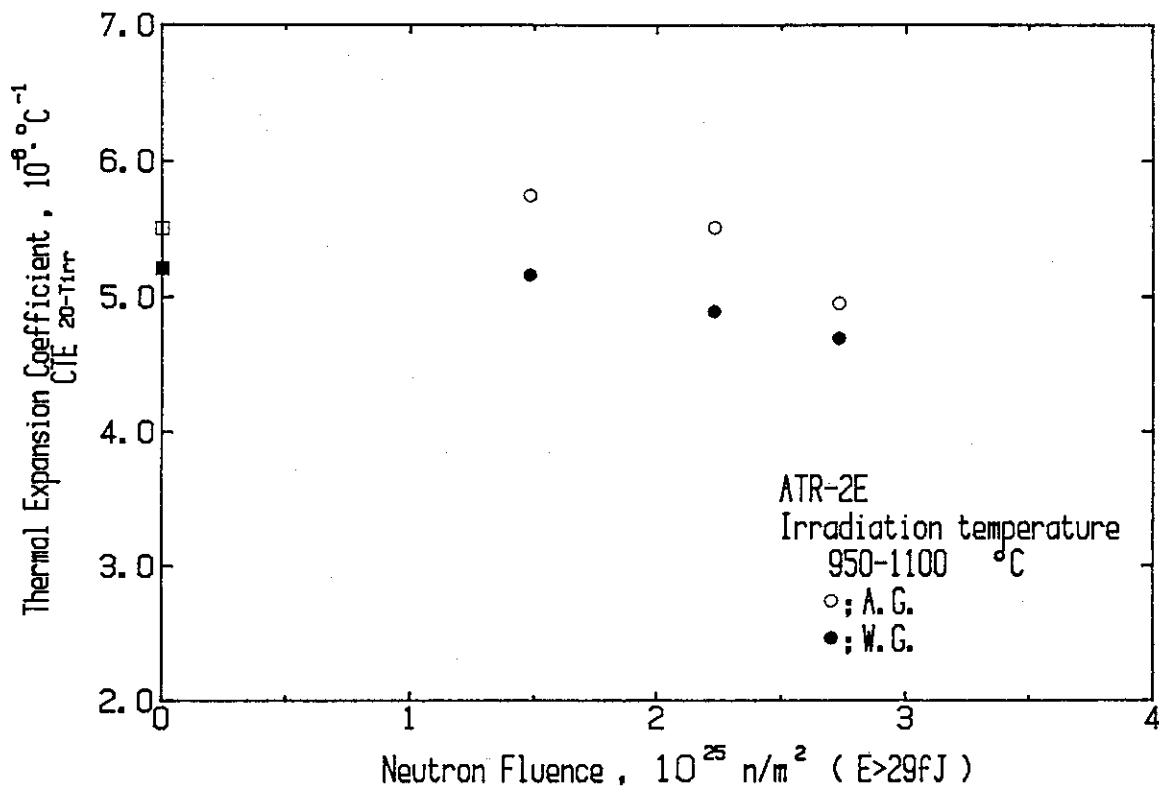


Fig. 33 Changes in CTE of ATR-2E graphite irradiated at 950-1100°C

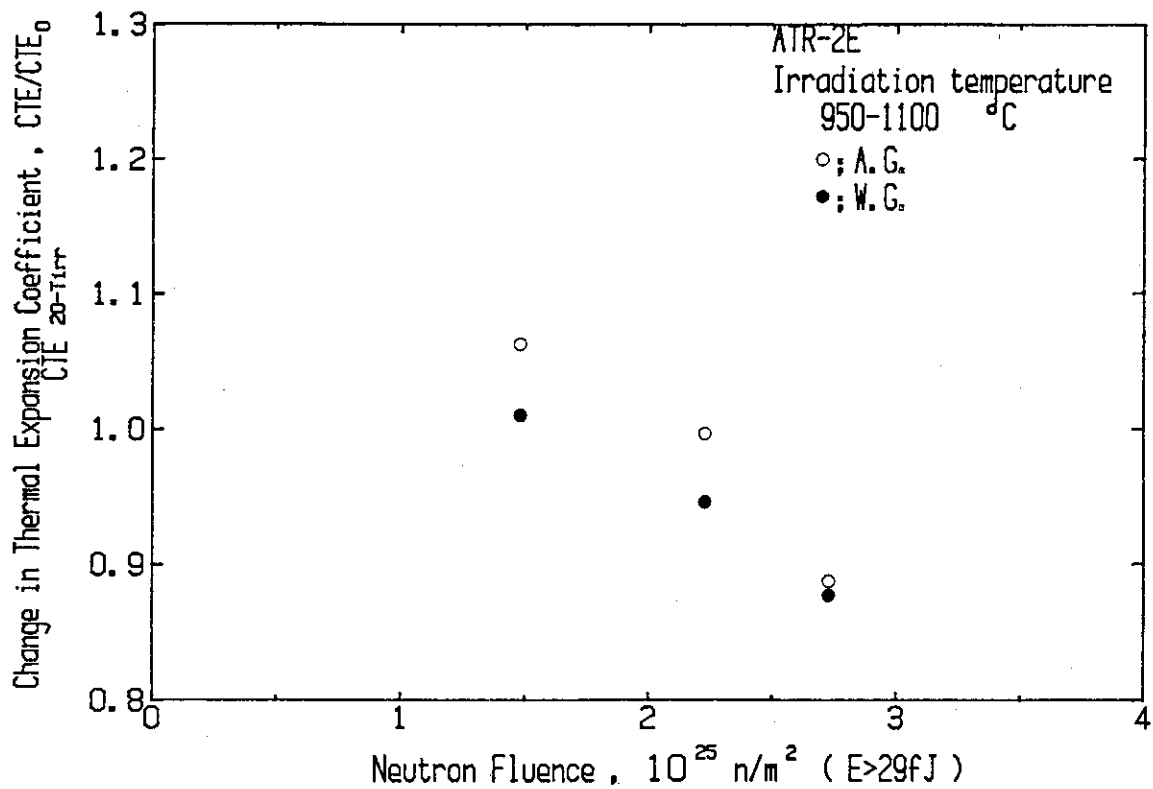


Fig. 34 Relative changes in CTE of ATR-2E graphite irradiated at 950-1100°C

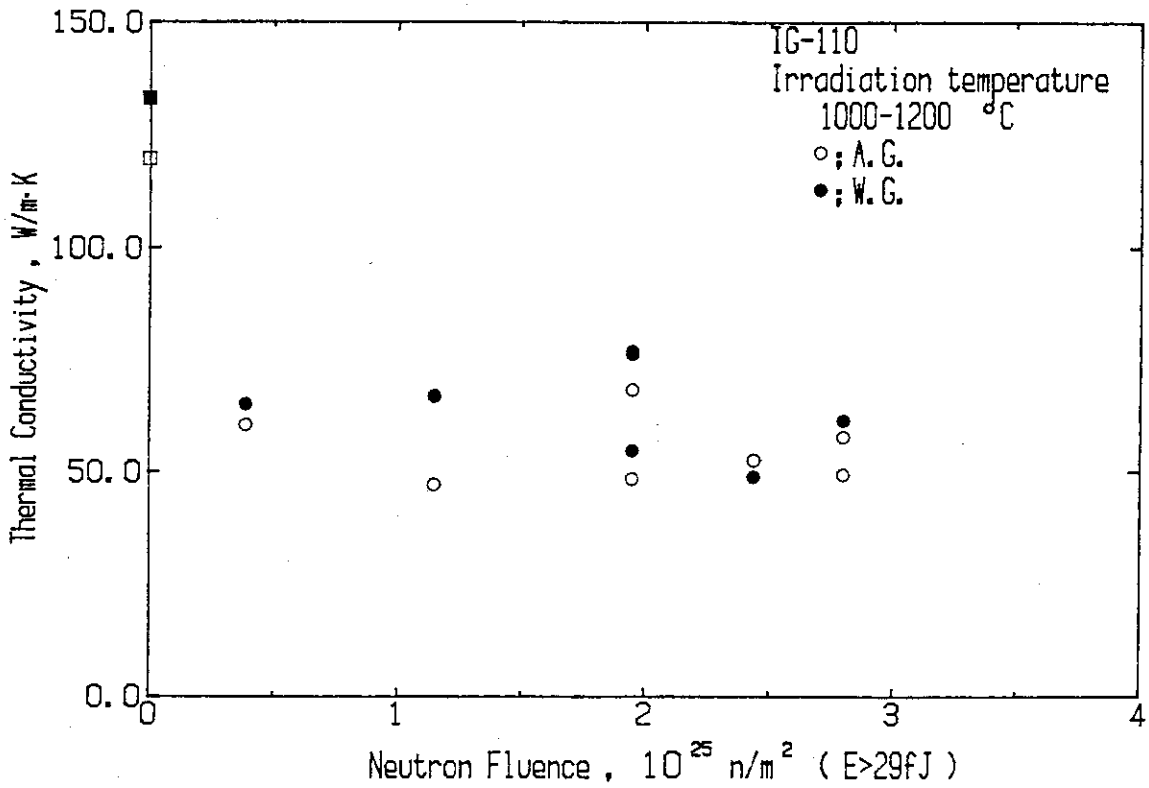


Fig. 35 Changes in thermal conductivity of IG-110 graphite irradiated at 1000-1200°C

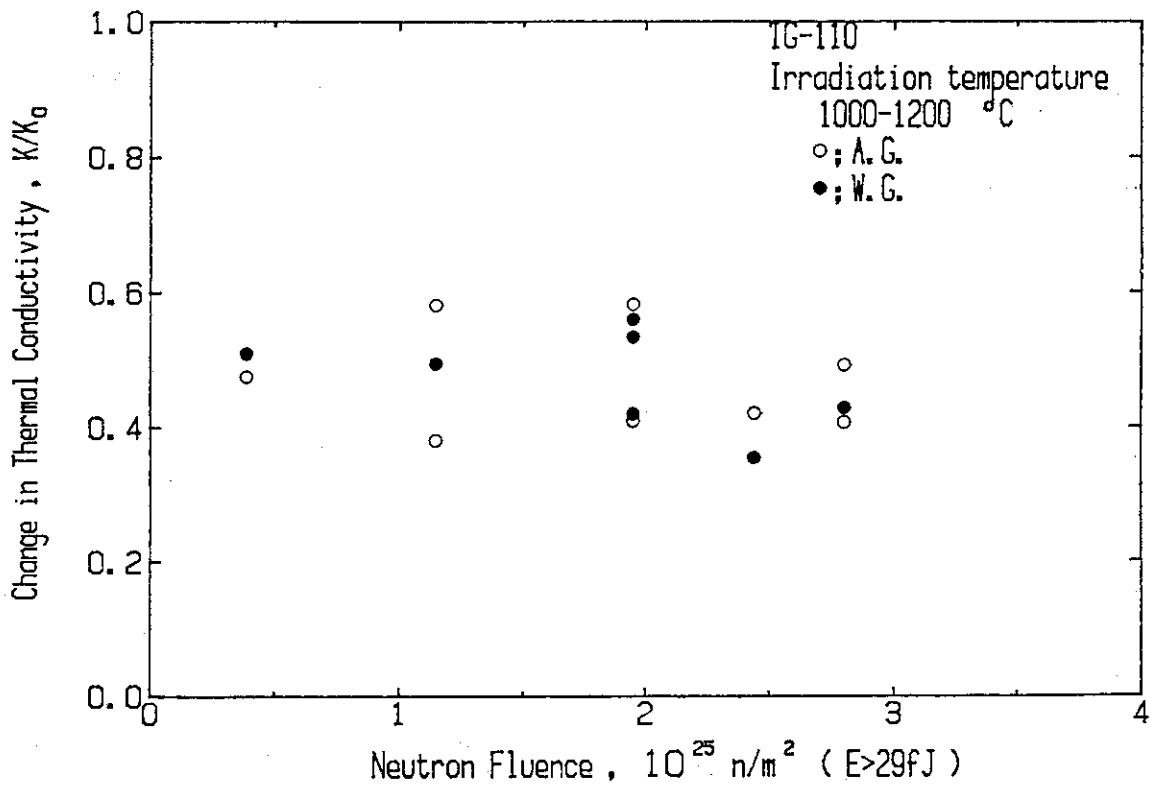


Fig. 36 Relative changes in thermal conductivity of IG-110 graphite irradiated at 1000-1200°C

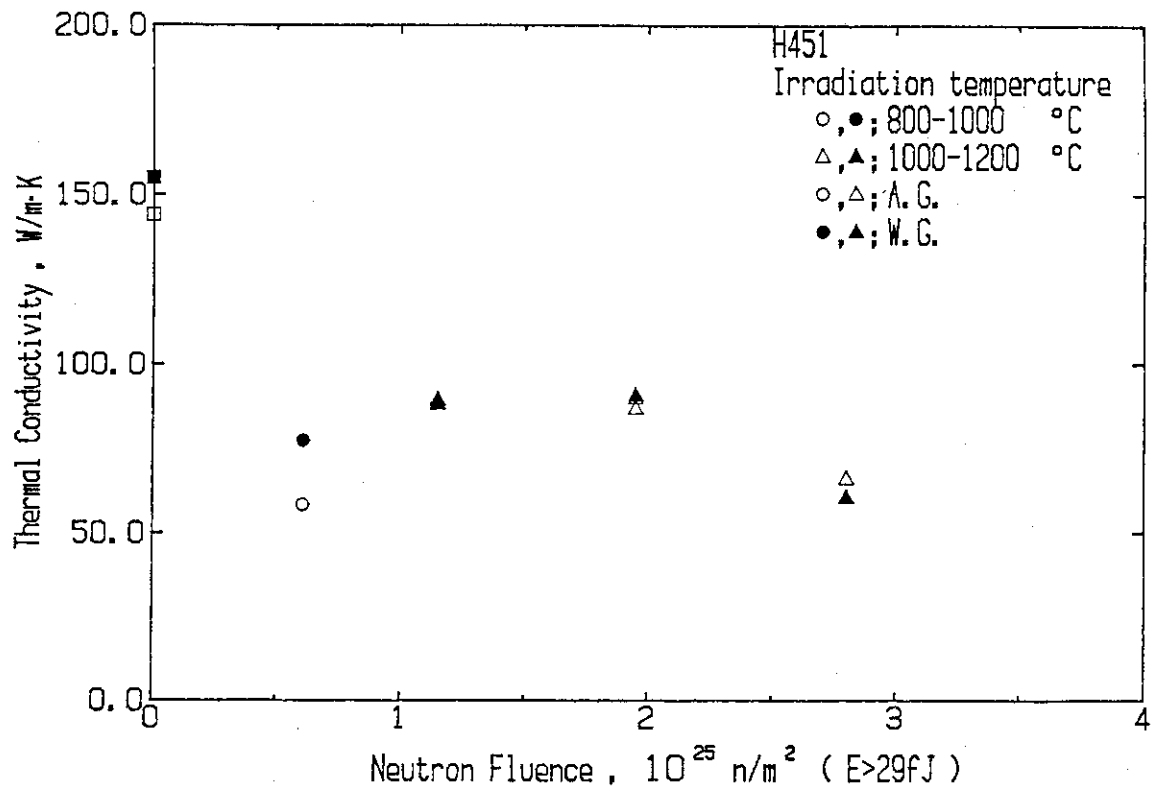


Fig. 37 Changes in thermal conductivity of H451 graphite irradiated at 800-1200°C

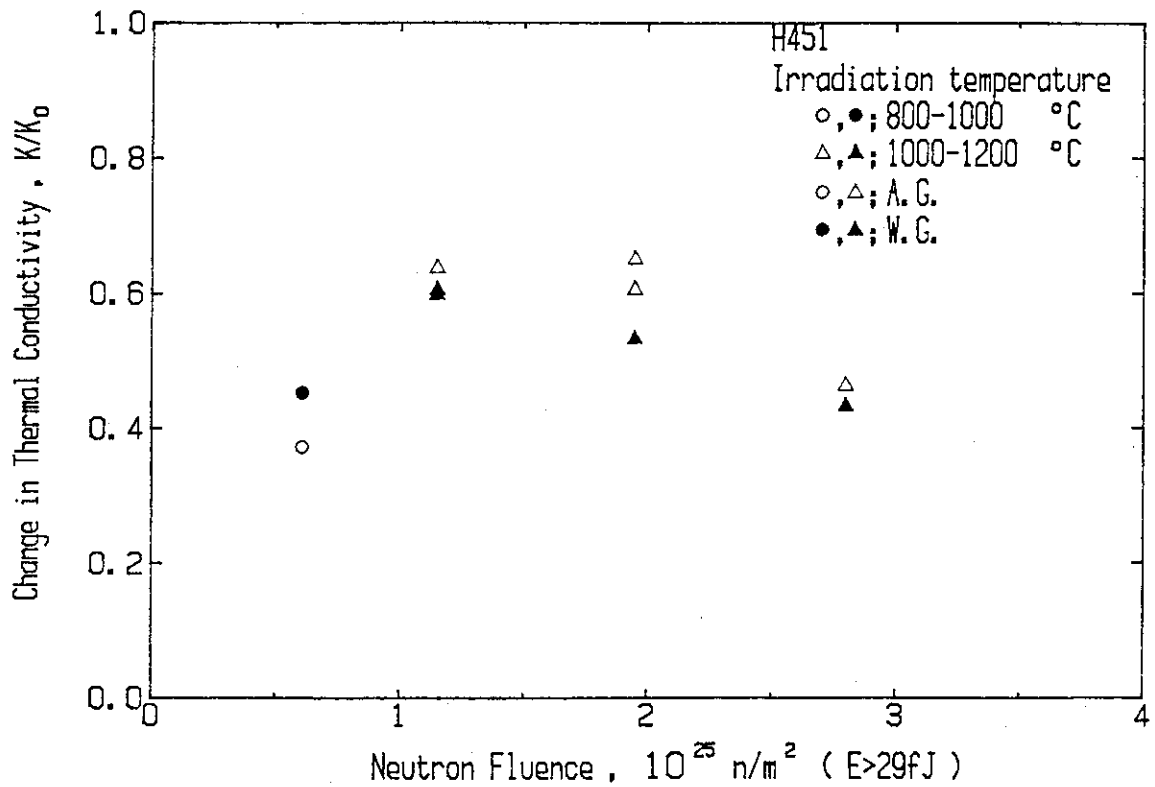


Fig. 38 Relative changes in thermal conductivity of H451 graphite irradiated at 800-1200°C

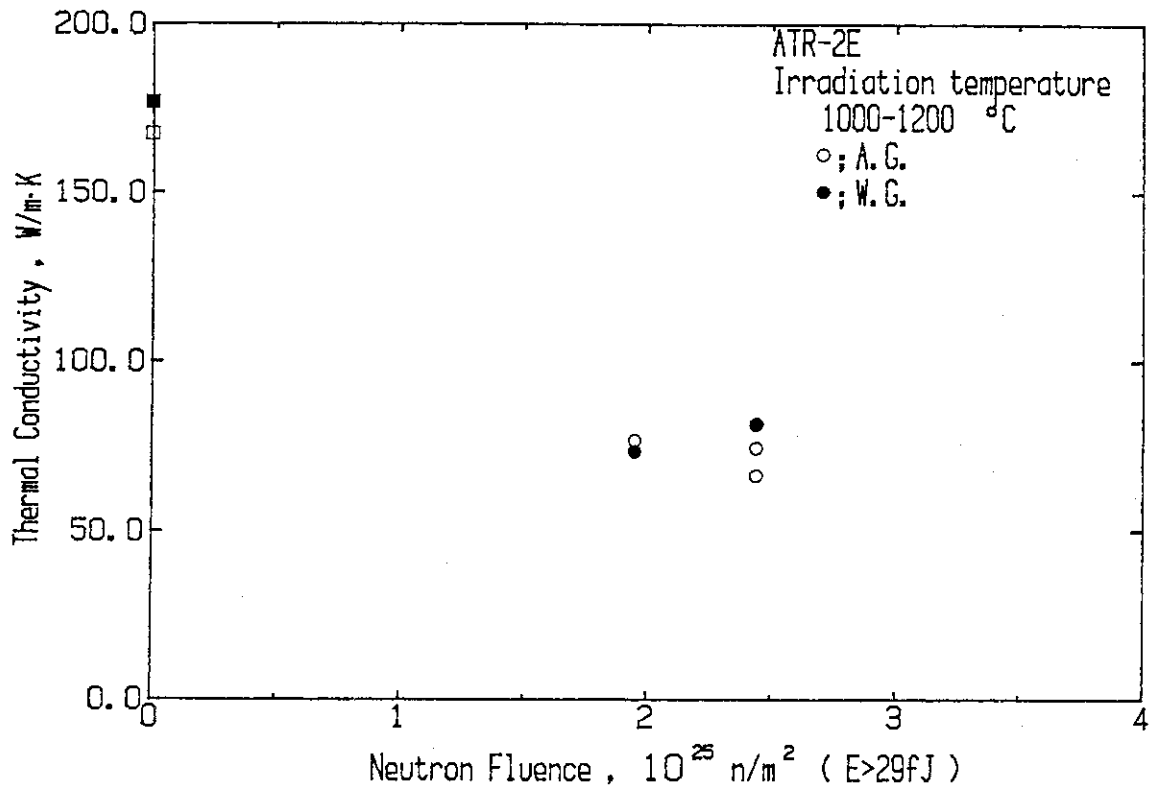


Fig. 39 Changes in thermal conductivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000-1200°C

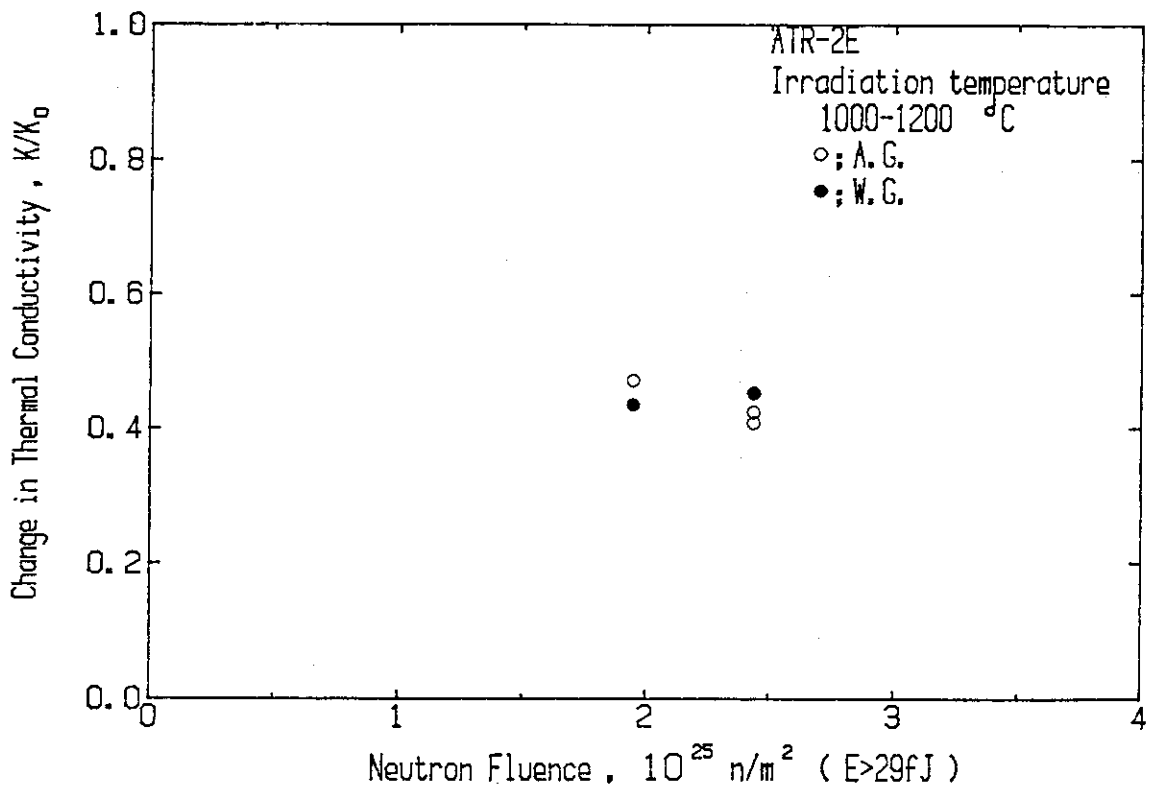


Fig. 40 Relative changes in thermal conductivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000-1200°C

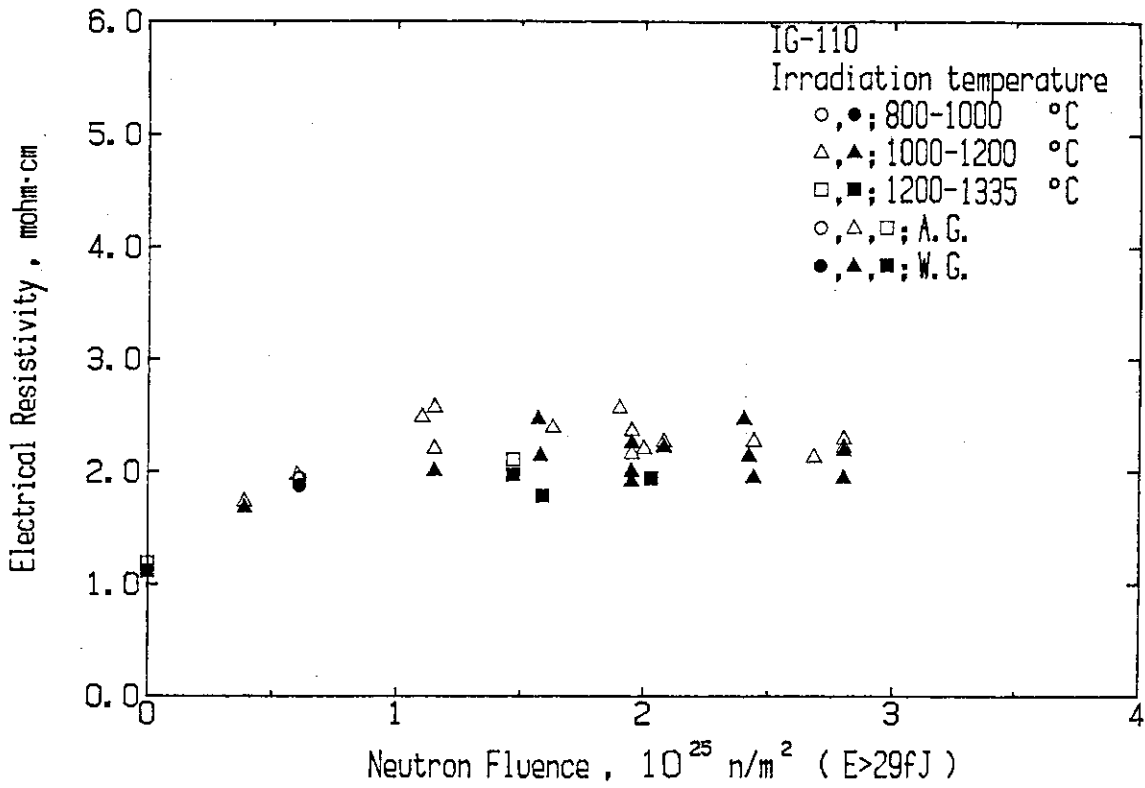


Fig. 41 Changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 800-1335°C

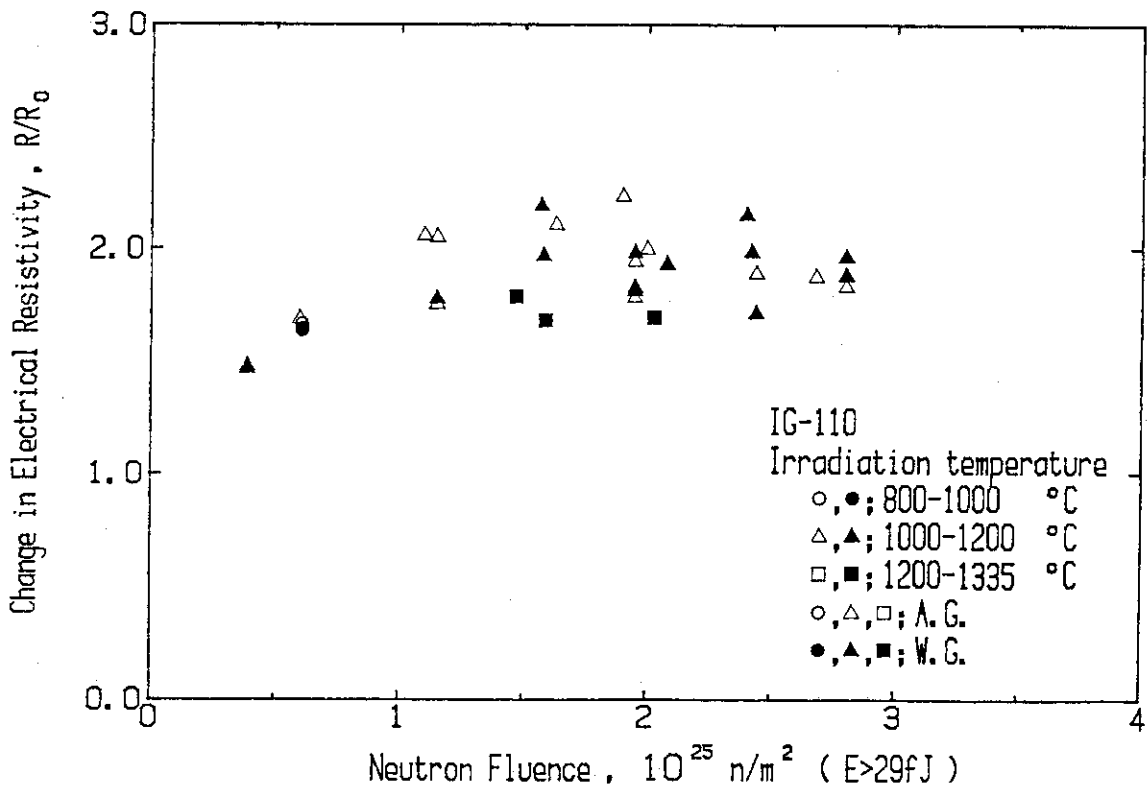


Fig. 42 Relative changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 800-1335°C

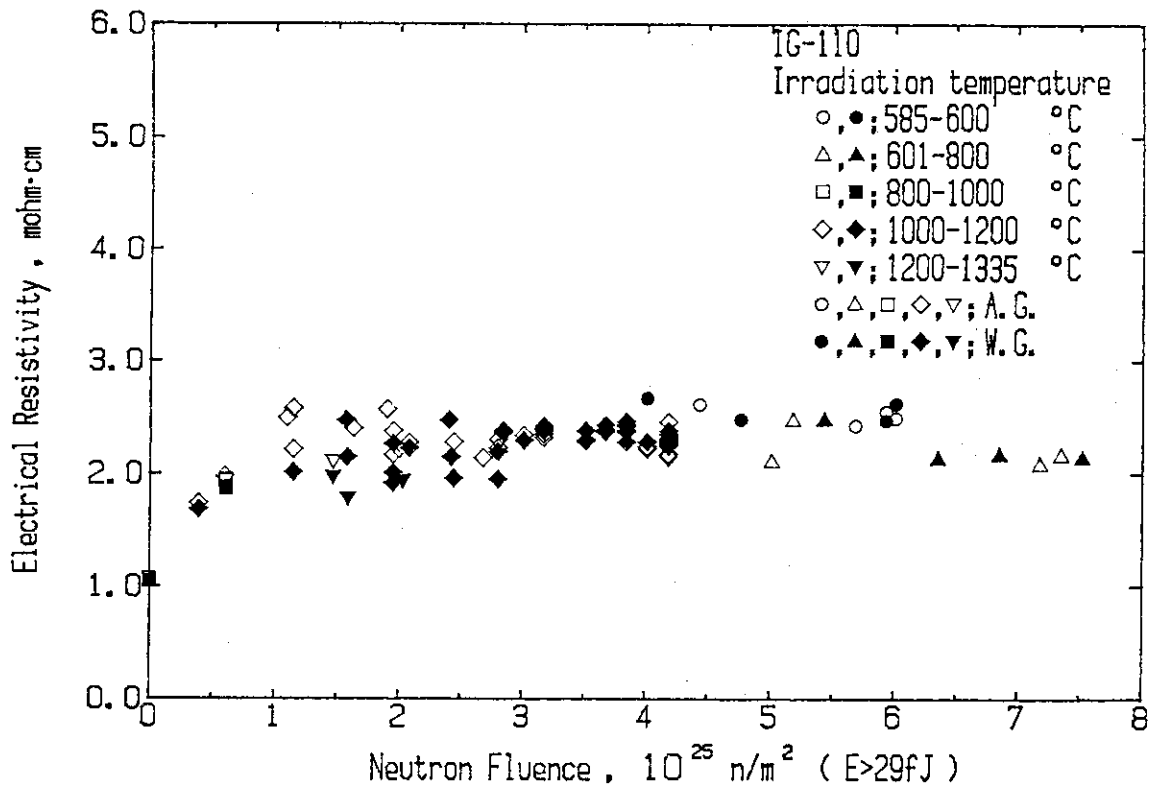


Fig. 43 Changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 585-1335°C

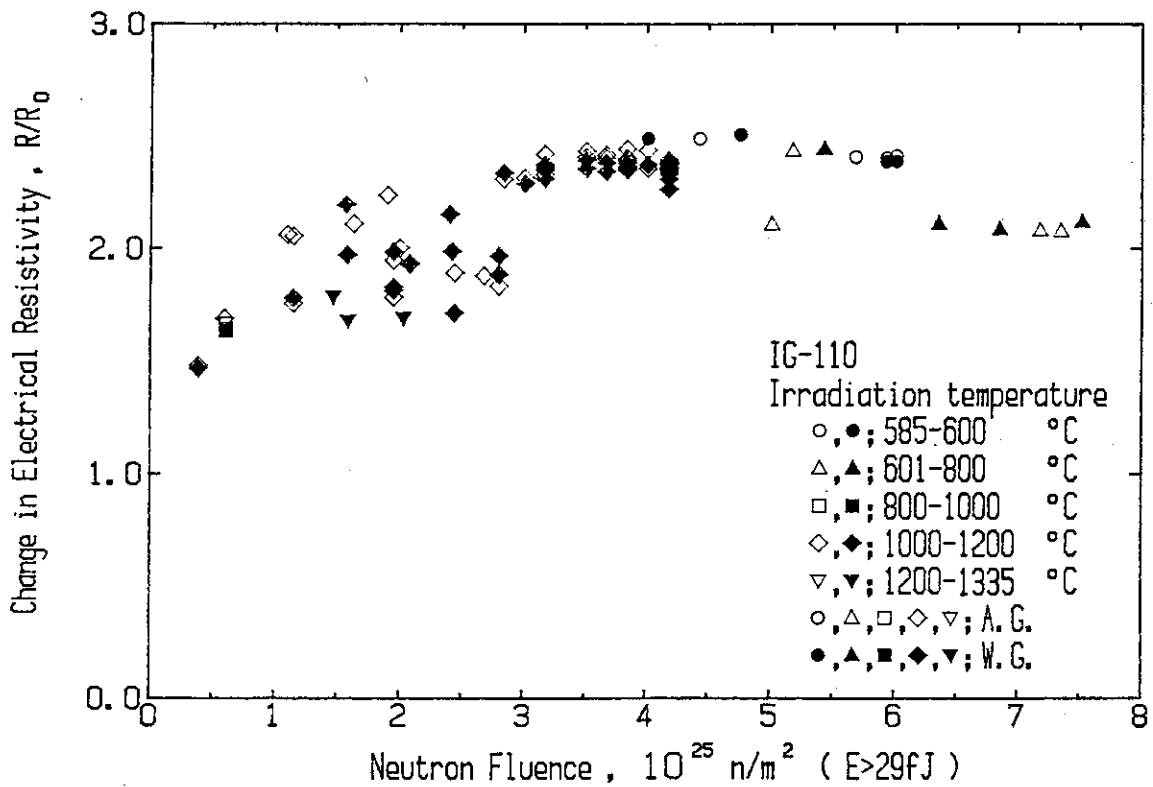


Fig. 44 Relative changes in electrical resistivity of IG-110 graphite irradiated at 585-1335°C

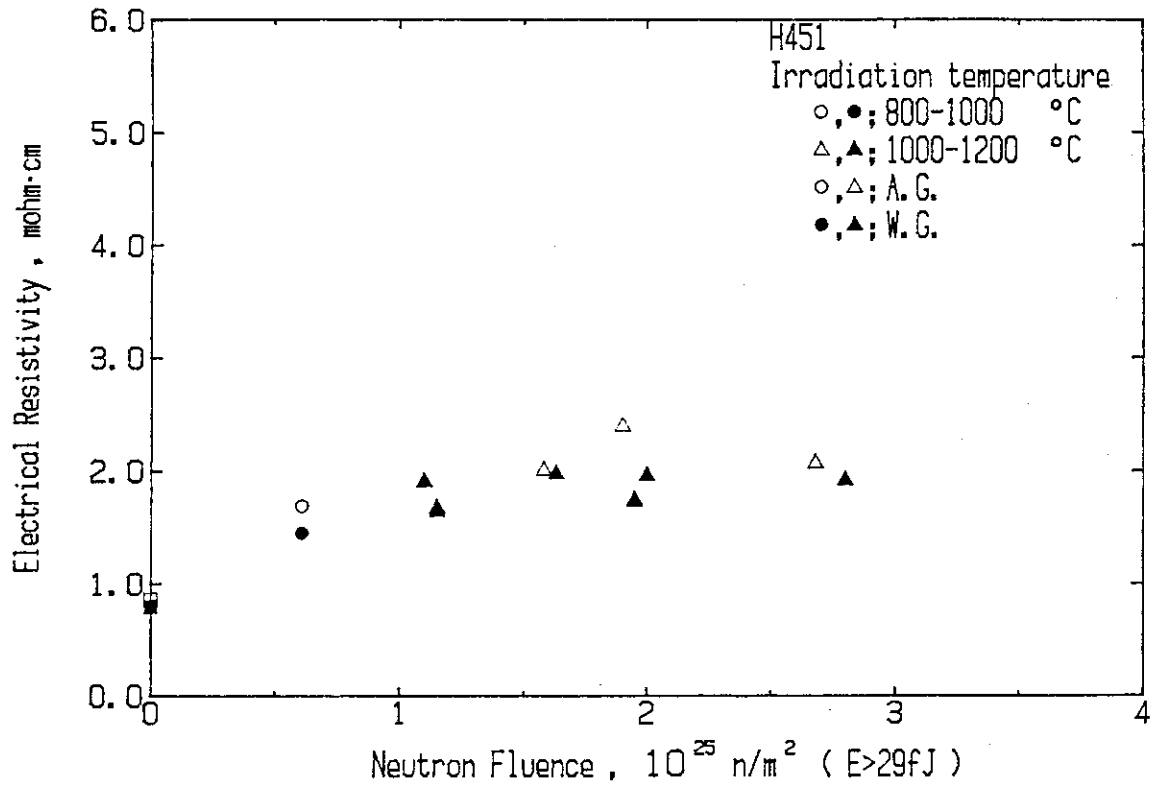


Fig. 45 Changes in electrical resistivity of H451 graphite irradiated at 800-1200°C

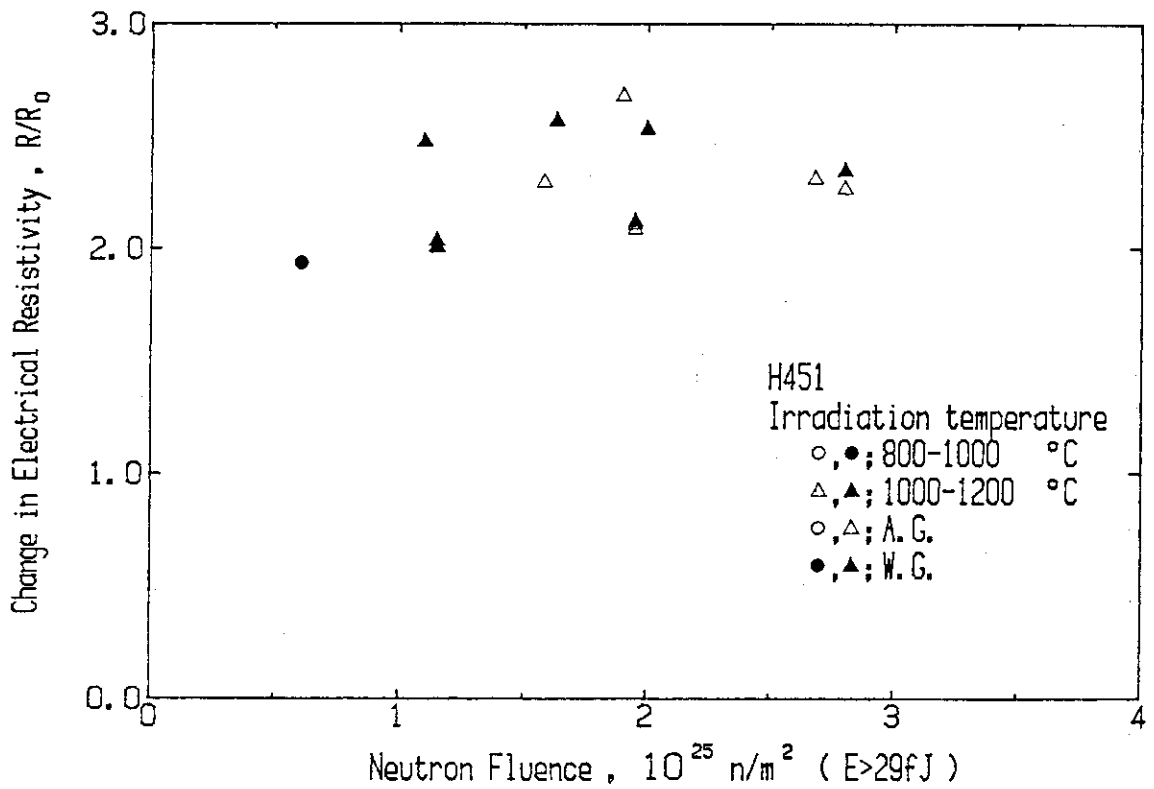


Fig. 46 Relative changes in electrical resistivity of H451 graphite irradiated at 800-1200°C

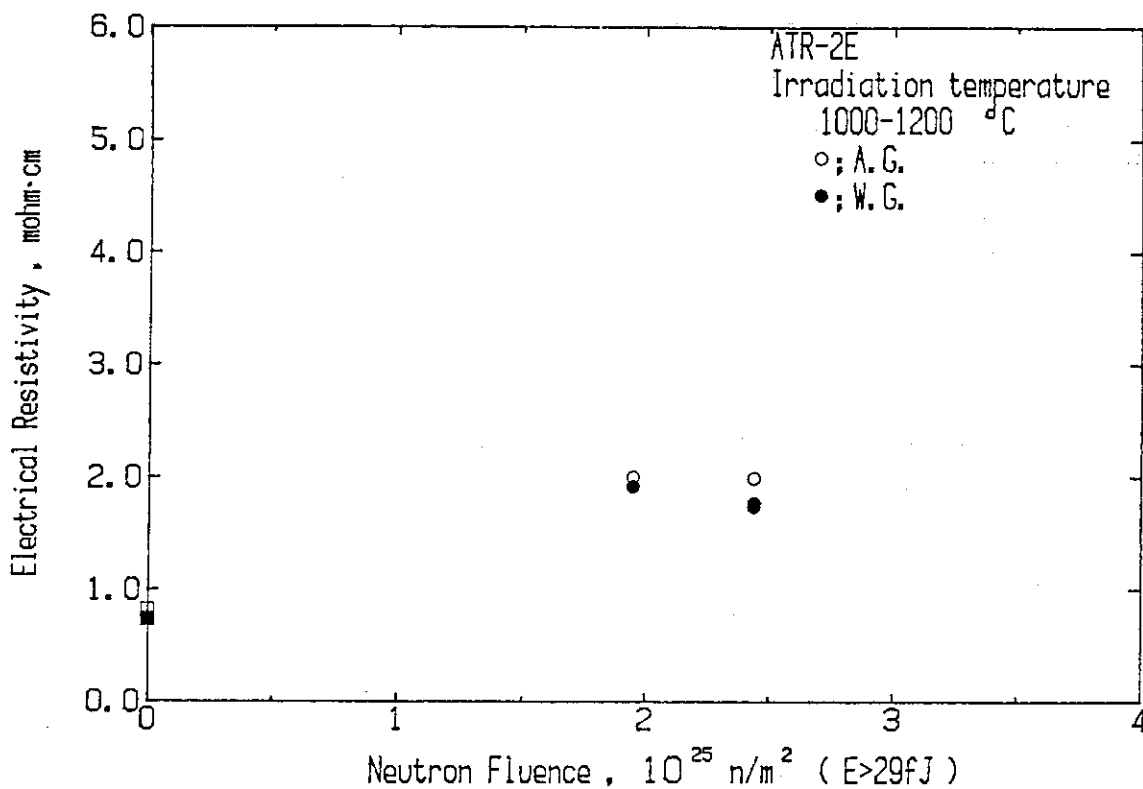


Fig. 47 Changes in electrical resistivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000-1200°C

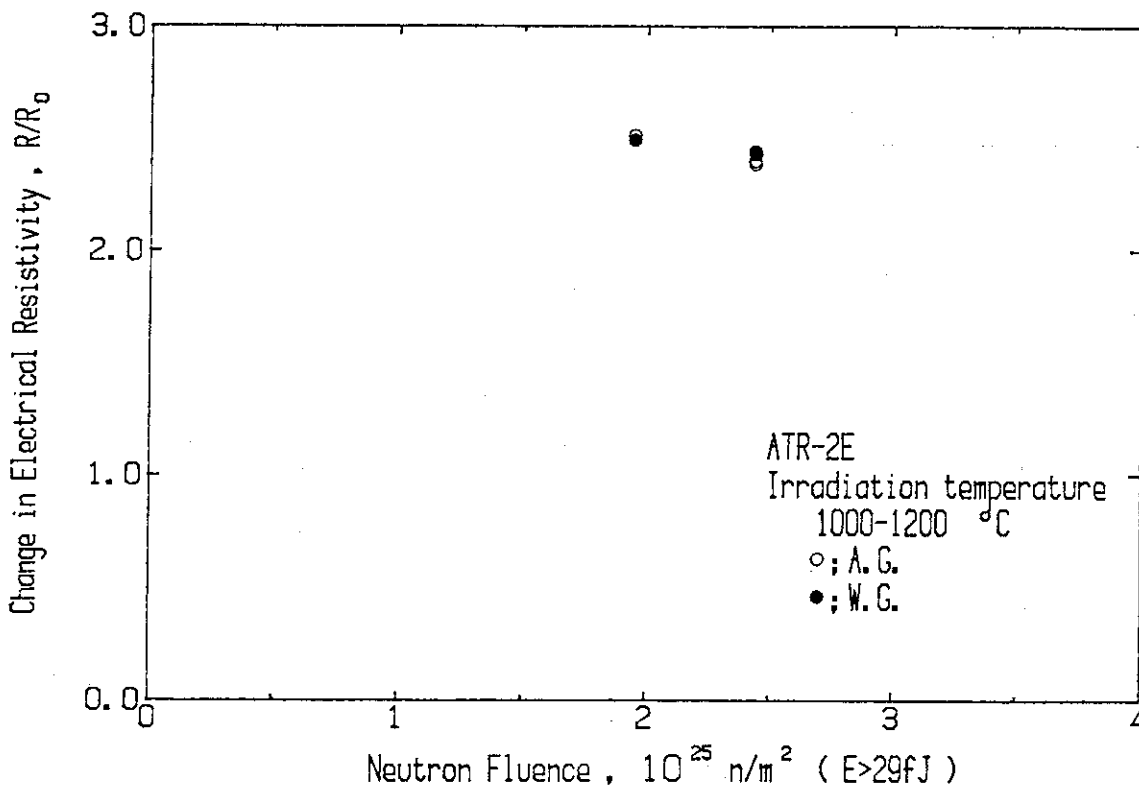


Fig. 48 Relative changes in electrical resistivity of ATR-2E graphite irradiated at 1000-1200°C

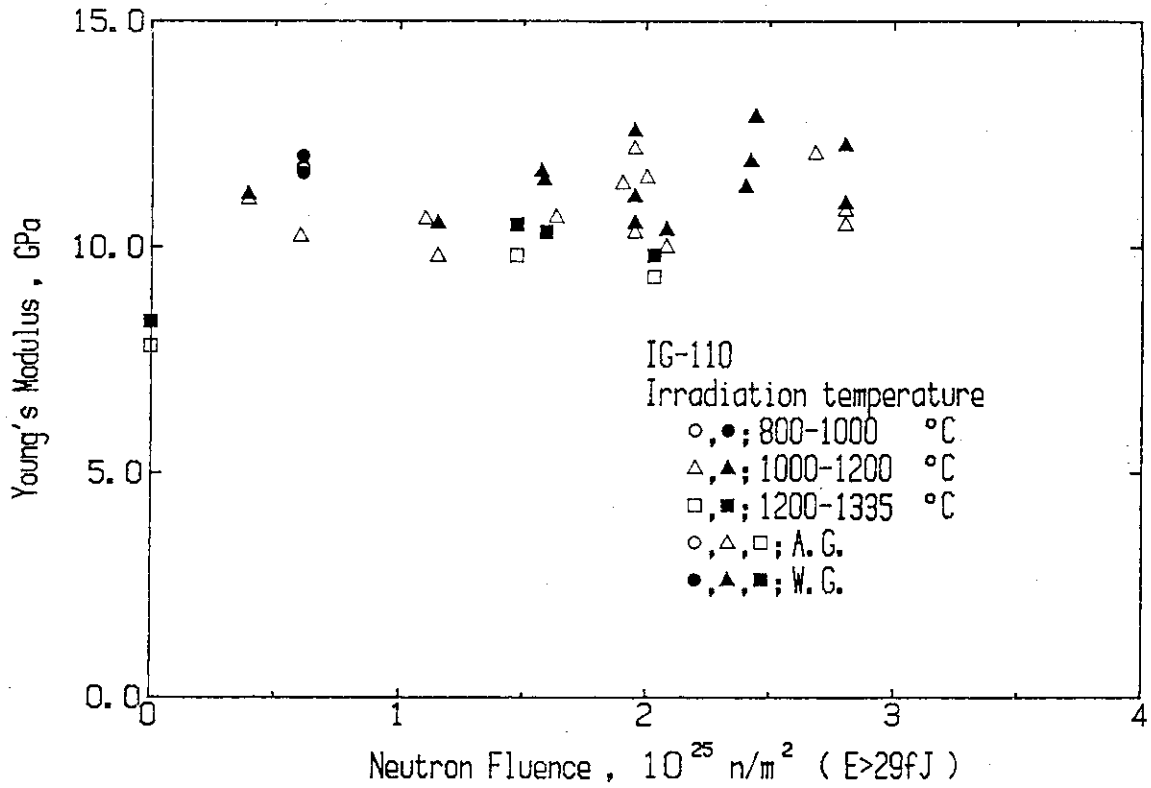


Fig. 49 Changes in Young's modulus of IG-110 graphite irradiated at 800-1335°C

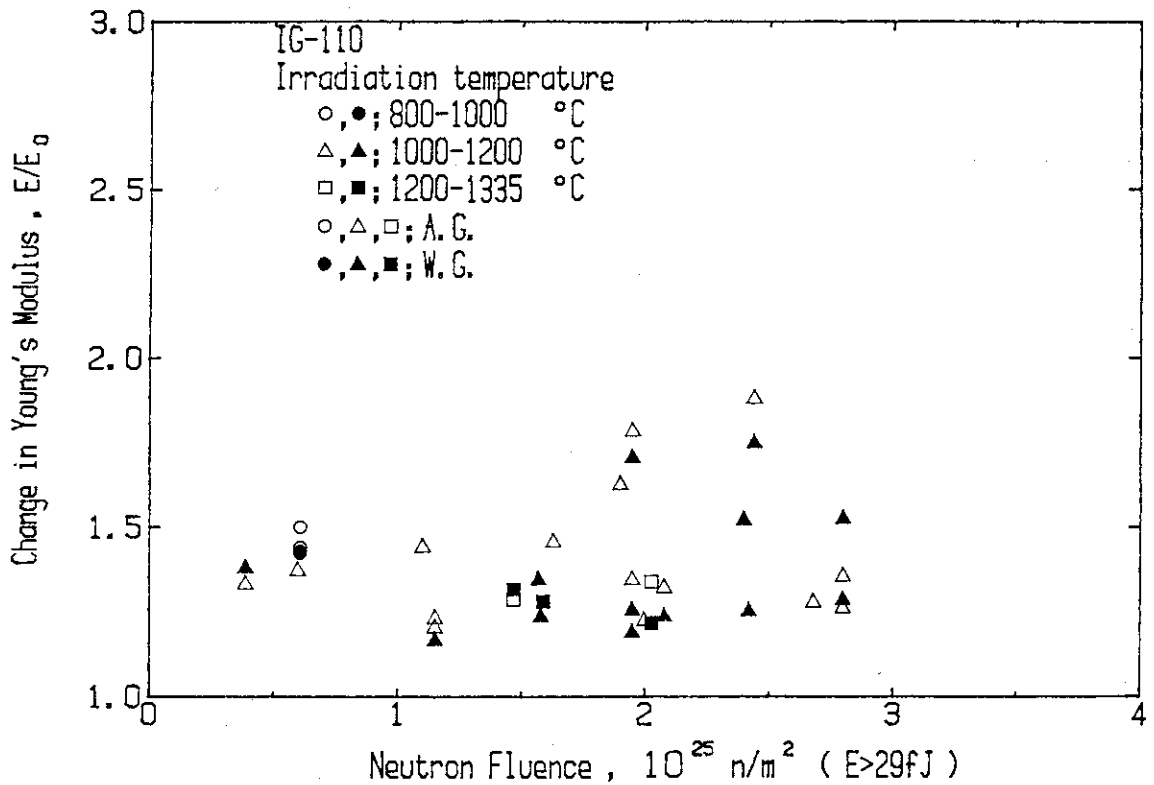


Fig. 50 Relative changes in Young's modulus of IG-110 graphite irradiated at 800-1335°C

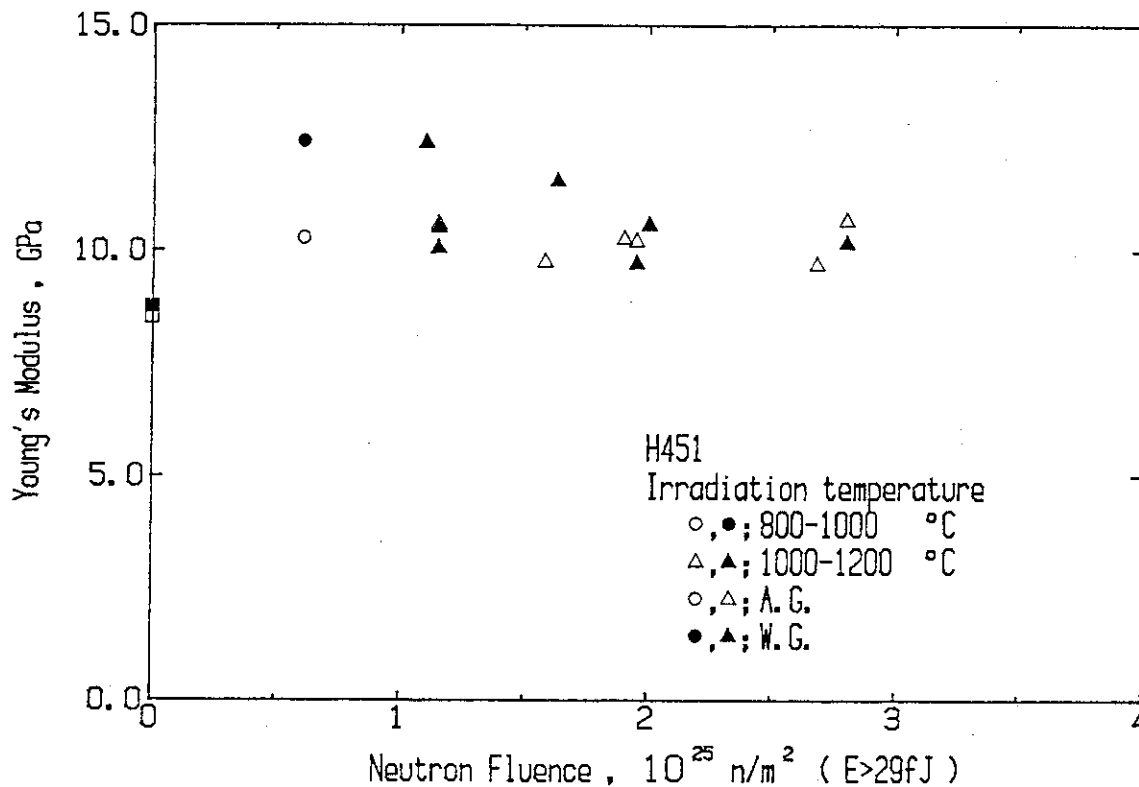


Fig. 51 Changes in Young's modulus of H451 graphite irradiated at 800-1200°C

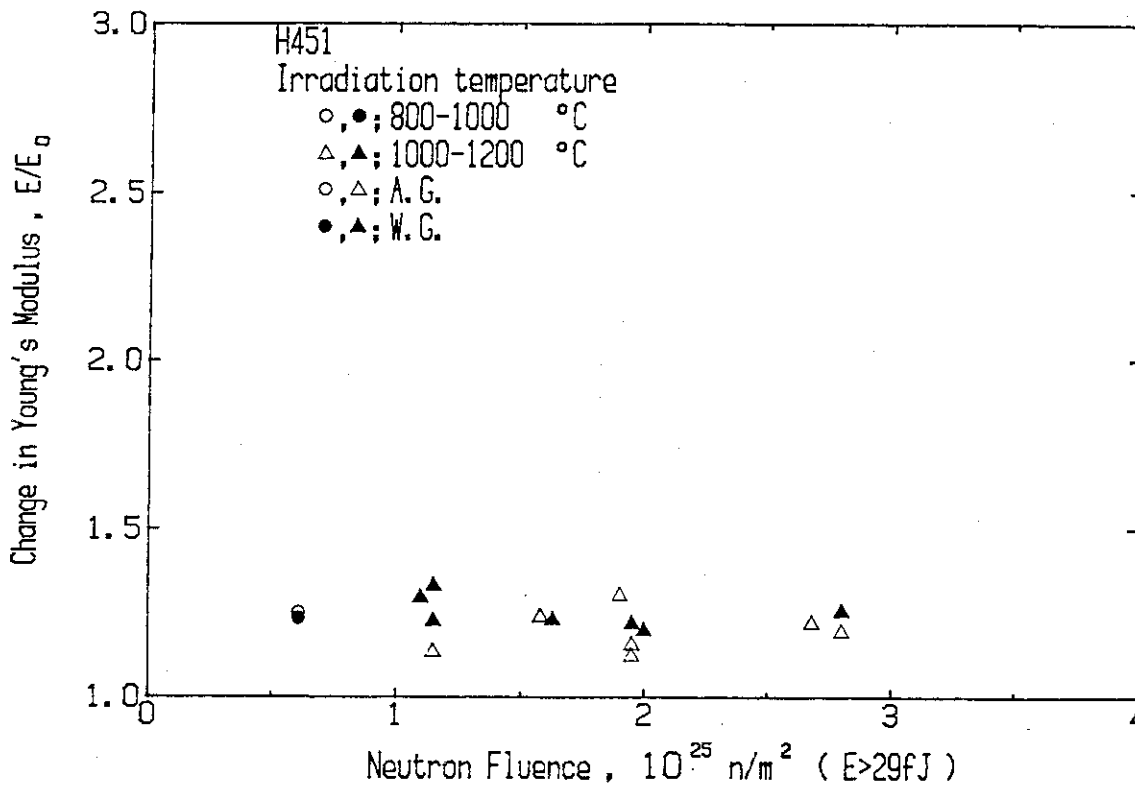


Fig. 52 Relative changes in Young's modulus of H451 graphite irradiated at 800-1200°C

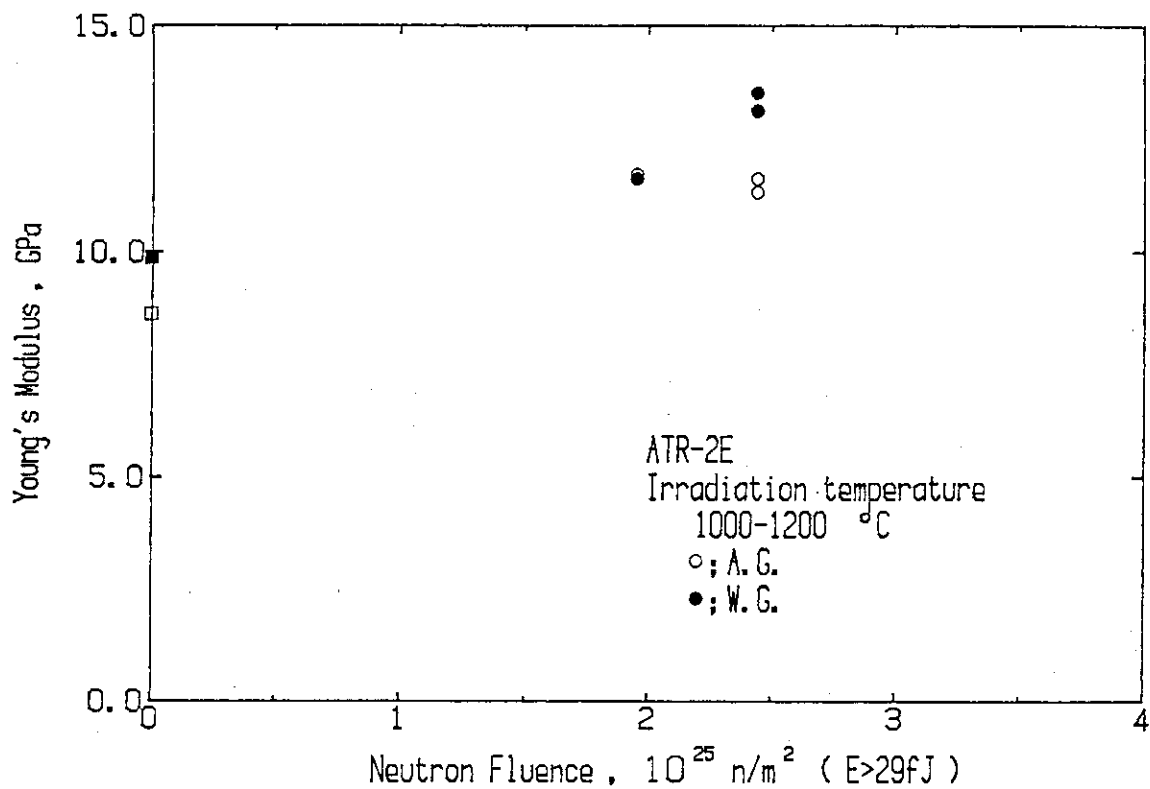


Fig. 53 Changes in Young's modulus of ATR-2E graphite irradiated at 1000-1200°C

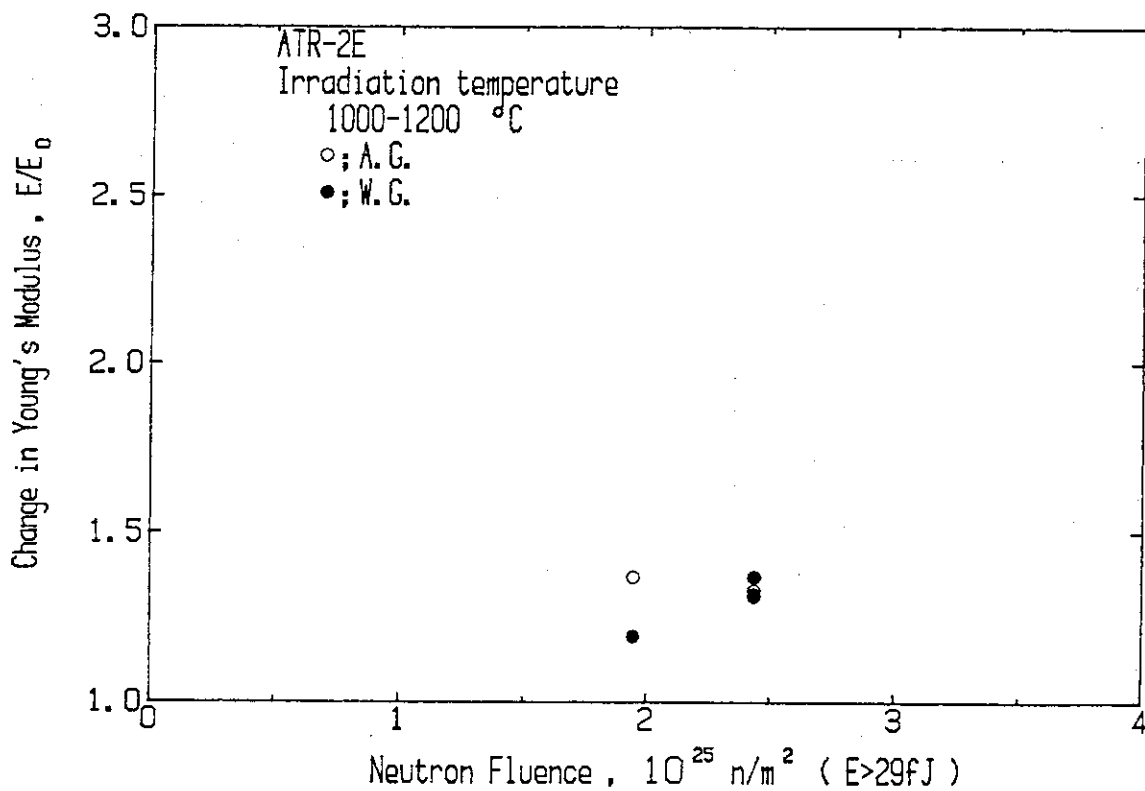


Fig. 54 Relative changes in Young's modulus of ATR-2E graphite irradiated at 1000-1200°C