

JAERI-M

7 6 4 7

高温ガス炉用黒鉛の機械的性質に及ぼす高温照射効果

1978年4月

奥 達 雄・衛 藤 基 邦・藤 崎 勝 夫

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温ガス炉用黒鉛の機械的性質に及ぼす高温照射効果

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

奥 達雄・衛藤基邦・藤崎勝夫

(1978年3月28日受理)

高温ガス炉用各種黒鉛の応力-ひずみ関係、ヤング率、引張強さ、曲げ強さおよび圧縮強さに及ぼす照射効果を、200-300°Cと800-1400°Cにおいて、 $7.4 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ および $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$)の範囲において調べ、さらに照射前後の黒鉛の破壊基準および破壊までのひずみエネルギー等を検討した。

その結果次の結論が得られた。(1) ヤング率、引張強さおよび曲げ強さは照射量に対して互いに類似の傾向を示した。(2) 圧縮強さの照射量による変化は、引張強さ等と異なり、照射温度および黒鉛の銘柄に大きく依存した。(3) 曲げ破壊ひずみエネルギーは低い照射温度では照射量の増加とともに減少する傾向を示し、高い照射温度では増加する傾向を示した。(4) 黒鉛の破壊基準は定ひずみエネルギー説 ($\alpha = 0.5$) および定ひずみ説 ($\alpha = 1$) からずれており、照射温度の増加とともに、 $\alpha \simeq 0.5$ から $\alpha \simeq 1$ へ移行していく傾向が見られた。

High-Temperature Irradiation Effects on Mechanical Properties
of HTGR Graphites

Tatsuo OKU, Motokuni ETO, and Katsuo FUJISAKI

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment,
JAERI

(Received March 28, 1978)

The irradiation effects on stress-strain relation, Young's modulus, tensile strength, bending strength and compressive strength of HTGR graphites were studied in irradiation temperature ranges of 200-300°C and 800-1400°C and in neutron fluences up to 7.4×10^{20} n/cm² and 3×10^{21} n/cm² (> 0.18 Mev). Fracture criteria and strain energy to fracture of the unirradiated and the irradiated graphites were also examined.

(1) Neutron fluence dependences are similar in Young's modulus, tensile strength and bending strength. (2) The change of compressive strength and of tensile and bending strengths with neutron fluence differ ; the former varies with graphite kind. (3) At lower irradiation temperatures the bending fracture strain energy decreases with increasing neutron fluence and at higher irradiation temperatures it increases. (4) The fracture criteria of graphites deviates from the constant strain energy theory ($\alpha = 0.5$) and the constant strain theory ($\alpha = 1$), shifting from $\alpha \cong 0.5$ to $\alpha \cong 1$ with increasing irradiation temperature.

Keywords : High-Temperature Gas-cooled Reactor Graphite, Mechanical Property, Irradiation Effect, Young's Modulus, Tensile Strength, Bending Strength, Compressive Strength, Fracture Criterion, Fracture Energy, Stress-Strain Relationship

目 次

1.	まえがき	1
2.	実験方法	2
3.	実験結果と考察	4
3.1	応力-ひずみ曲線	4
3.2	ヤング率	4
3.3	引張強さおよび曲げ強さ	5
3.4	圧縮強さおよび圧縮破壊ひずみ	6
3.5	曲げひずみエネルギー	6
3.6	破壊基準	7
4.	結論	19
	参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedures	2
3. Results and Discussion	4
3.1 Stress-strain Curve	4
3.2 Young's modulus	4
3.3 Tensile and Flexural Strength	5
3.4 Compressive Strength and Compressive Fracture Strain	6
3.5 Bending Strain Energy	6
3.6 Fracture Criterion	7
4. Conclusion	19
References	20

1. ま え が き

黒鉛材料のヤング率，強度等に及ぼす比較的低温（約500℃以下）での照射効果に関する研究は，炭酸ガス冷却炉用石油コークス系異方性黒鉛等についてLosty & Orchard¹⁾，Kelly²⁾，Reynolds³⁾，およびTaylor⁴⁾らによって1960年代前半から後半にかけて比較的多く行われている。高温ガス冷却炉の開発にともない，1970年代前半から500℃以上の高温での照射データも得られるようになったが，1000℃程度以上における照射効果に関する資料は，とくに機械的性質に関しては比較的少ないようである。

日本原子力研究所で開発研究中の多目的高温ガス実験炉では，黒鉛材料から構成される燃料要素および反射体は400°-1250℃の温度で $1\sim 2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$)の中性子照射をうけると考えられている。⁵⁾ 高温ガス冷却炉用に開発された各種の等方性および準等方性黒鉛材料の高温照射効果に関する各種性質データはOECDのDragon Project，米国のGAなどによって報告されている。^{6) 7) 8)} とくに破壊基準については，低温（～150℃）照射した黒鉛の場合，定ひずみエネルギー則が成り立ち，高温（～1000℃以上）照射した黒鉛の場合，定ひずみ則にしたがうといわれている^{6) 9)}が，これは各種黒鉛銘柄について広範囲の条件の下で確かめられたものではなく，また理論的にも十分な説明が与えられておらず，いまだ明確な結論とは言い難いと思われる。中性子照射をうけた黒鉛の破壊基準を明確にさせることは，高温ガス冷却炉の炉心構造設計において黒鉛構造物内の評価された発生応力に対して安全余裕度を評価する上で重要である。

この報告は，ギルソナイトコークス系等方性黒鉛，石油コークス系準等方性および微粒等方性黒鉛，針状石油コークス系異方性黒鉛4系統7種類の黒鉛材料について，ヤング率，応力-ひずみ関係，引張強さ，圧縮強さ，曲げ強さに及ぼす200-300℃および800-1400℃における照射効果と照射前後の黒鉛の破壊基準および破壊までのひずみエネルギー等を検討したものである。圧縮強さに及ぼす照射効果については別途に詳しく報告したので，必要最小限にとどめる。¹⁰⁾

2. 実験方法

供試材料として、ギルソナイトコークス系等方性黒鉛；IM-2（加圧成型材），IM2-24（加圧成型高純度材）IE1-24（押出成型材），石油コークス系微粒等方性黒鉛；7477PT（等方加圧成型材），IG-11（等方加圧成型材），石油コークス系準等方性黒鉛；SM1-24（加圧成型材）針状石油コークス系異方性黒鉛；H-327（押出成型材）を用いた。それぞれの素材から試験片を加圧方向に平行方向と垂直方向，押出方向に平行方向と垂直方向に採取し，それぞれ，//，⊥と表した。各材料の室温における主な性質を Table 1 に示す。

ヤング率及び曲げ強さ測定用試験片は $5\phi \times 50$ mm の丸棒，圧縮試験片は $6\phi \times 12$ mm，引張試験片は平行部 $5\phi \times 21$ mm，つかみ部の直径 8 mm，肩部の半径が 30 mm であった。引張試験用のチャックは肩の面で力を受ける方式を採用した。引張，圧縮試験におけるひずみの値はクロスヘッドの変位から治具等の変位を補正して求めた。引張，圧縮，曲げ試験ともにインストロン型試験機を用いて 0.5 mm/min のクロスヘッドで行った。曲げ試験は内スパン 19.8 mm，外スパン 39.6 mm の 4 点曲げによって行った。ヤング率の測定は 100 KHz の超音波（たて波）の試験片中の伝播速度を測定する方法を用いて行い， $E = \rho v^2$ （E，ヤング率， ρ ：密度， v ：伝播速度）からヤング率を求めた。

中性子照射は，JRR-2 と JMTR を用いて行った。JRR-2 では，200～300℃，最大 7.4×10^{19} n/cm²（>0.18 MeV）まで，JMTR では 400～1410℃，最大 3.7×10^{21} n/cm²（>0.18 MeV）まで照射を行った。各試験片の照射条件は，キャプセル内に装填されていた 7 本の熱電対により温度を，計算による推定中性子束のキャプセル軸方向の分布から照射量を求めた。

Table 1 Room Temperature Properties of Tested Graphites

Coke	Brand	Forming	Density [g/cm ³]	Dir.	Young's Modulus [10 ³ kg/mm ²]	Poisson's Ratio	Tensile Strength [kg/mm ²]	Compressive Strength [kg/mm ²]	Bending Strength [kg/mm ²]
	IM-2	M	1.78	//	1.22	0.15	2.24	7.98	3.43
				⊥	1.21	0.18	2.12	7.31	3.51
Gilsonite	IM2-24	M	1.78	//	1.21	0.16	1.98	7.30	2.76
				⊥	1.30	0.20	2.18	7.09	3.18
	IE1-24	E	1.80	//	1.42	-	2.84	6.15	3.50
				⊥	1.18	-	1.54	5.32	-
	7477PT	IM	1.74	//	0.98	0.12	2.24	8.49	3.48
				⊥	0.99	0.11	2.07	7.96	3.38
Petroleum	SM1-24	M	1.77	//	0.95	-	1.68	5.44	2.81
				⊥	0.99	0.17	1.53	5.23	2.55
	IG-11	IM	1.78	//	1.00	0.14	3.43	8.89	4.40
				⊥	1.01	0.15	2.95	8.94	3.93
	H-327	E	1.78	//	1.51	-	1.23	3.20	2.60
				⊥	0.71	0.06	0.70	2.80	1.49

M=Molded, E=Extruded, IM=Isostatically Molded

3. 実験結果と考察

3.1 応力-ひずみ曲線

引張応力-ひずみ曲線に及ぼす高温照射の影響を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) はギルソナイトコークス系等方性黒鉛 (IM-2) の結果であり、770°C、840°C の照射温度では照射量が $4.5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) から $7.6 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで増加することによってヤング率と破壊強度が増加し、破壊ひずみは約 0.3% から 0.2% へ減少することがわかる。これに対して Fig. 1 (b) から明らかなように、石油コークス系微粒等方性黒鉛 (7477PT) の場合 785°C で $4.9 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで照射することによってヤング率と強度の増加は IM-2 黒鉛の場合と同様であるが、破壊ひずみの減少はわずかである。また、Fig. 1 (c) に示すように、針状石油コークス系異方性黒鉛 (H-327) の場合、押出軸に平行方向の試料と垂直方向の試料では様子が大きく異なり、垂直方向の試料の方が強度は低い¹⁾が延性は大きい。しかし、前二者の黒鉛と異なる点は破壊応力と破壊ひずみが IM-2 および 7477PT 黒鉛の約 $\frac{1}{2}$ になっていることである。

圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす照射の影響を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) の IM-2 黒鉛の場合 770°C、980°C でそれぞれ、 $4.3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) と $3.3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで照射することにより、引張応力-ひずみ曲線の場合と同様にヤング率および破壊応力の増加と破壊ひずみの大きな減少を生じた。破壊ひずみは非照射時の約 5% から 1.5~2.5% へと 50% 以上減少している。7477PT 黒鉛の場合 Fig. 2 (b) のように 300°C 以下で $1.2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで照射するとヤング率、強度ともに増加し、破壊ひずみは減少することがわかる。しかし、960°C で $3.7 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで照射した場合、ヤング率と破壊応力は増加するが、破壊ひずみはほとんど変化しないのが特徴的である。H-327 黒鉛の場合、Fig. 2 (c) に示すように、950°C、 $3.4 \sim 3.6 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで照射することにより、IM-2 黒鉛の場合と同様の挙動を示すが、そのほか照射後異方性が大きくなっている。すなわち、// 方向の試料の破壊ひずみは約 3% から約 1% へ、⊥ 方向の試料の場合約 3% から約 2% へ減少している。破壊ひずみの照射による減少率は引張りの場合より圧縮の場合の方が大きくかつ 10% 以上であった。引張、圧縮の両者の場合において残留ひずみは全ひずみの約 $\frac{1}{10}$ であるので、¹⁾ 照射によるひずみの減少は大部分弾性ひずみであると考えられる。これらの結果は低温 ($\sim 150^\circ\text{C}$) 照射の結果⁴⁾と類似した傾向をもっている。

3.2 ヤング率

100 KHz の超音波たて波の速度から求めたヤング率に及ぼす中性子照射の影響を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a) はギルソナイトコークス系黒鉛 (IM-2, IE1-24) の場合を示す。620

～1130℃の間では相対ヤング率（照射後ヤング率/照射前ヤング率）の照射量依存性に大差がない。すなわち、 $0.5 \sim 1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) までは照射量の増加にともない直線的に相対ヤング率が増加し、その後、 $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) まではヤング率が減少する。 $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) 以上では、ヤング率はほとんど変化しない。しかし、1130～1430℃で照射したIM-2黒鉛では $1 \times 10^{21} \sim 2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の間で大きく減少し、 $1.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ において照射前に近い値にもどっていることがわかる。しかし、Dragon Projectで得られているギルソナイト系黒鉛に関する照射データによると、600～1400℃において $1 \sim 3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の範囲では、ヤング率の増加は20%以上となることを示しており⁶⁾、ここで得られた結果と違っている。

7477PT黒鉛の場合、Fig. 3 (b)のように、630℃から1420℃間の温度領域によってヤング率の照射量依存性が異なっている。照射温度の上昇とともにヤング率の増加率は減ってくるのがわかる。 $0.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) ではIM-2の黒鉛の場合と同様にヤング率は約40%の増加を示した。これに対してH-327黒鉛では、Fig. 3 (c)に示すように、平行方向と垂直方向の相対ヤング率 (E/E_0) に大きな差は見られないが、照射温度が高くなるにつれて、ヤング率の増加は小さくなっていく。550～980℃で照射後のヤング率は60%前後の増加を示しているのに対して、1100～1430℃では40～20%以下の増加となっている。この結果はEveretteらによる石油コークス系押出材に関するデータとよく一致している⁷⁾。IG-11黒鉛のヤング率の照射による変化はFig. 3 (b)に示すように比較的小さいように見られる。また、SM1-24黒鉛のヤング率は630～1420℃の照射温度範囲で、照射効果に大きな差異は見られなかった。この結果はAGLの照射データ¹³⁾と大略合致していると思なすことができる。

3.3 引張強さおよび曲げ強さ

ギルソナイトコークス系等方性黒鉛 (IM-2, IE1-24) の引張試験片について若干照射を行ったが、照射後試験前に試験片をキャプセルから取り出し中破損したりあるいは試験中誤って折損したため、照射前の値と十分比較できるほどの結果が得られなかった。7477PT黒鉛とH-327黒鉛の相対引張強さ (σ_t / σ_0) に及ぼす照射量の影響をFig. 4に示す。Fig. 4 (a)は7477PT黒鉛の引張強さの場合を示す。これはヤング率の照射量依存性とときわめて類似している。すなわち、 $0.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) までは照射量とともに強度が上昇し、 $0.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) 以上 $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$)の間ではゆるやかな変化を示し、およそ40～60%照射前に比べて増加している。H-327黒鉛の場合もFig. 4 (b)に示すように7477PT黒鉛の場合と同様にヤング率の照射量依存性と類似している。

次に曲げ強さに及ぼす照射量の影響をFig. 5に示す。ギルソナイトコークス系黒鉛の曲げ強さの照射量依存性 (Fig. 5 (a)) はヤング率の照射量依存性 (Fig. 3 (a)) と類似していることがわかる。データは照射温度によってばらついており、760～1350℃の間では照射温度による明瞭な差異は見出されなかった。

7477PT黒鉛の場合 (Fig. 5 (b)) はギルソナイトコークス系黒鉛の場合と違って、 $1 \times$

10^{21} n/cm^2 ($>0.18 \text{ MeV}$) 以上の照射により相対曲げ強さ (σ_b / σ_0) が飽和または若干減少の傾向にあることがわかる。

H-327 黒鉛の場合 (Fig. 5 (c)) はギルソナイトコークス系黒鉛の場合とほぼ同じ傾向を示しているが、相対曲げ強さが最小になる照射量が若干増加し、 $2 \times 10^{21} \sim 3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) になっている点が異っている。この傾向はヤング率の照射量依存性と酷似している。ヤング率と同様相対曲げ強さについても大きな異方性は見られなかった。

3.4 圧縮強さおよび圧縮破壊ひずみ

ギルソナイトコークス系黒鉛 (IM-2, IE 1-24) と石油コークス系黒鉛 (7477PT, H-327) の相対圧縮強さ (σ_c / σ_0) と圧縮破壊ひずみ (ϵ_{cf}) の照射量依存性を Fig. 6 (d) に示す。IM-2 黒鉛の場合、Fig. 6 (a) に示すように異方性は認められず、圧縮強さは $525 \sim 1430^\circ\text{C}$ の間で約 $2.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) まで照射したとき、およそ 10% の増加を示し、 $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上で 30% 以上の増加の傾向を示している。圧縮破壊ひずみは $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ において照射前の 2.1% から照射後の約 1.7% へ 20% 減少している。 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上の照射量においては、破壊ひずみはほぼ一定となる傾向がある。ギルソナイトコークス系押出材黒鉛 (IE 1-24) の場合も Fig. 6 (b) と Fig. 6 (c) に示すように IM-2 黒鉛の場合とほぼ類似の傾向を示しているが、高照射時の圧縮強さの増加はいちじるしい。また、圧縮強さには異方性は見られなかったが、圧縮破壊ひずみには若干異方性が見られる。

7477PT 黒鉛の場合、Fig. 6 (d) に示すように、 $680 \sim 960^\circ\text{C}$ で約 $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$) まで相対圧縮強さはほとんど変化せず、 $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上で約 10% 程度の増加を示している。一方、 $1080 \sim 1240^\circ\text{C}$ では、 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の照射量で 10~20% の圧縮強さの増加を示した。これに対して、圧縮破壊ひずみは照射前の 2.5% から $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ で 1.7% 前後まで減少し、照射量の増加にともない再び圧縮破壊ひずみはわずかに増加する傾向が見られる。また、7477PT 黒鉛の圧縮破壊ひずみは試験した範囲では、照射温度にほとんどよらないことがわかる。

H-327 黒鉛の場合 Fig. 6 (e) と Fig. 6 (f) に示すように、 $690 \sim 1420^\circ\text{C}$ において相対圧縮強さは、約 $1.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ までは異方性は大きくないが、 $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上において異方性が見られる。すなわち、押出軸方向の圧縮強さは押出軸に垂直な方向の圧縮強さより増加率が大きくなっている。また、押出方向の圧縮強さは単調な増加を示すが、押出軸に垂直な方向の圧縮強さは $1.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上の照射量でほとんど一定となっている。圧縮破壊ひずみは Fig. 6 (f) に示すように、 $1.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ において押出軸方向で約 2.1% から 1.2% へ約 43%、垂直方向で約 3.1% から 2.2% へ約 30% 減少し、それ以上の照射量ではほとんど一定となった。

3.5 曲げひずみエネルギー

黒鉛の応力-ひずみ関係をフックの法則によって記述できると仮定すれば、丸棒の 4 点曲げ試験

におけるひずみエネルギー (U_b) は,

$$U_b = \sigma_b^2 / 8E \quad (1)$$

によって表わされる。ここで、 σ_b は曲げ強さ、 E はヤング率である。照射による U_b 、 σ_b 、 E の変化をそれぞれ ΔU_b 、 $\Delta \sigma_b$ 、 ΔE とすれば

$$\Delta U_b / U_b = 2 \Delta \sigma_b / \sigma_b - \Delta E / E \quad (2)$$

したがって

$$\Delta U_b / U_b \begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0 \quad (3)$$

に対応して

$$\Delta \sigma_b / \sigma_b \begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} \frac{1}{2} \Delta E / E \quad (4)$$

となるはずである。ここで、(4) 式の E と ΔE は照射前後で同一の試験片について測定するので、誤差は比較的少なく、高々 2~3% と見なされるが、左辺の σ_b と $\Delta \sigma_b$ については照射前後で別々の試験片を使用するので、若干の誤差が導入されることになる。たとえば、IM2-24 黒鉛の曲げ強さの相対誤差は照射前後で 7~8% である。Fig. 7 に IM2-24 黒鉛と SMG 黒鉛の曲げひずみエネルギーの照射による変化を示す。IM2-24 黒鉛において () 内の数字は試験片の個数を示す。この図から明らかなように曲げひずみエネルギーは照射により増加または減少する。この増減は照射条件とくに照射温度によって異なることがわかる。すなわち、一般に照射量の増加とともに照射温度が高いとき曲げひずみエネルギーは増加し、低い照射温度のときは減少する傾向にある。いずれの銘柄の黒鉛においても、曲げひずみエネルギーが不変となるような傾向は見られなかった。照射による曲げひずみエネルギーの変化量は上記の誤差よりもはるかに大きく、曲げひずみエネルギーは照射により変化することが認められる。さらに、応力-ひずみ関係の非直線性の効果を考慮した場合、照射前の曲げひずみエネルギーを若干小さく見つめる可能性があり、これは $\Delta U_b / U_b$ をわずかに小さくする傾向にある。しかし、いずれにしてもこの実験からは照射前後で曲げひずみエネルギーが不変となるような結論は得られない。この事実はこれまで黒鉛の破壊ひずみエネルギーが照射前後で一定であるとする考えに反するものである。^{1) 4)}

照射後破壊までのひずみエネルギーが減少するのは、塑性変形の大きな金属材料においてみられる一般的な現象であるが、破壊までのひずみエネルギーが照射によって増加する原因は不明である。黒鉛の圧縮破壊のエネルギーの照射による変化についてはすでに報告しており¹⁰⁾、破壊強度のヤング率に対する依存性を調べると、 $E^{1/2}$ に比例しているかのように見えるが、破壊エネルギーを調べるとやはり照射によって増加または減少していると認められる事実を得ている。したがって、破壊エネルギーが照射前後で一定という考えは、近似的には許容され、かつ利用する価値は認められるけれども、厳密には後述の破壊基準として受け入れられるべき事実ではないと考えられる。

3.6 破壊基準

黒鉛の破壊基準に及ばず中性子照射効果については、Losty と Orchard¹⁾ のほか多くの人が

検討を試みているが、黒鉛の銘柄や材質および照射条件もいろいろであり、明確な結論が得られているとは言い難い。黒鉛について各種の破壊基準が提案され、実験事実と比較検討されているが、それらの中で多軸応力下の黒鉛の破壊に関する実験事実ともっともよく合致するといわれているのが最大ひずみエネルギー説である。しかし、中性子照射後の多軸破壊基準に関してはまだ知見が得られていないようである。

ここでは、IM2-24黒鉛について、引張強さと曲げ強さの照射前後におけるヤング率に対する依存性を調べることにより単軸引張および応力勾配下の繊維最大引張応力破壊基準を検討する。JRR-2における照射前後の引張強さ (σ_t) と曲げ強さ (σ_b) およびJMTRにおける照射前後の曲げ強さのヤング率に対する依存性を Fig. 8 に示す。ここで特徴的なことは照射条件はほぼ同じであると考えられるにもかかわらず、照射後ヤング率のばらつきが大きく増加していることである。JRR-2において200-300°Cで照射した場合引張強さと曲げ強さは平均的に

$$\sigma_t = 0.112E^{0.40} \quad (5)$$

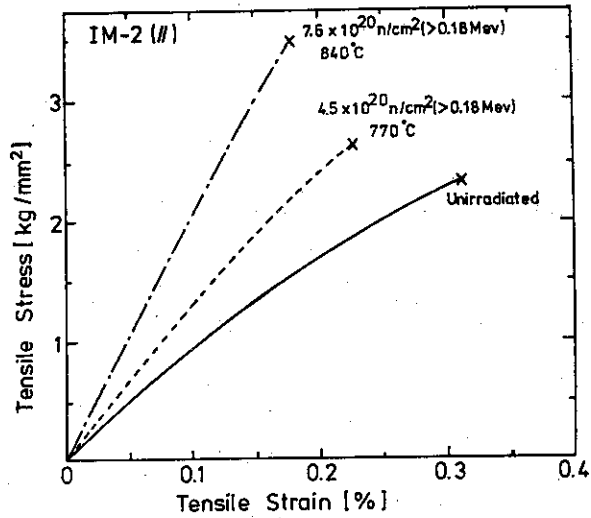
$$\sigma_b = 0.291E^{0.34} \quad (6)$$

によって表される。Fig. 8 から明らかのように、Losty & Orchard¹⁾ および Taylor らが比較的低温照射した黒鉛について得ている $\sigma_f \propto E^{1/2}$ という関係と比較すると強さは若干低い方にずれている。しかしながら、880°C~1400°CにおいてJMTRで照射した場合、曲げ強さは

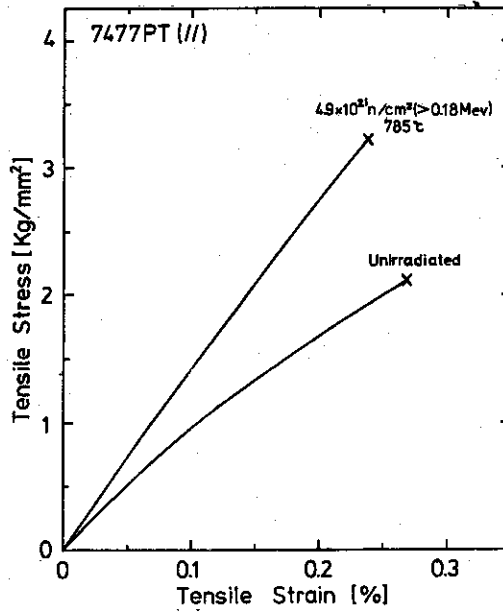
$$\sigma_b = 2.63 \times 10^{-4} E^{1.34} \quad (7)$$

にしたがう。これは、Everette らが高温照射後のギルソナイト系黒鉛について得ている

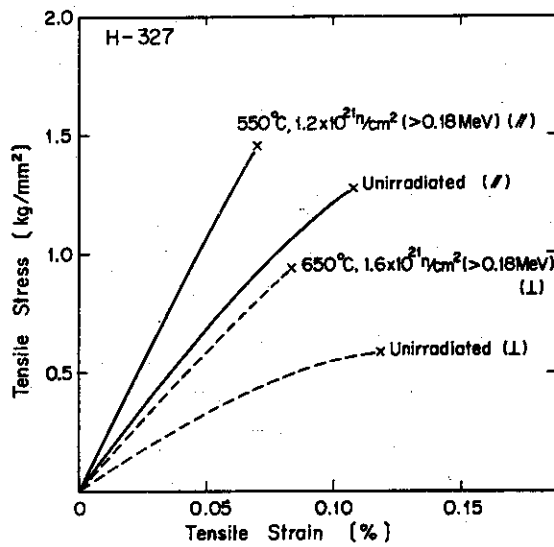
$\sigma_b \propto E$ という関係と比べると、強さは若干高い方へずれている。ここで言えることは、黒鉛の破壊基準は照射温度によって異なり、照射温度が低いときは定ひずみエネルギー則に近く、照射温度が高くなると定ひずみ則に近くなるが、いずれの場合も両者の法則からずれているのが認められるということである。ここで、強さのヤング率依存性は平均的にはそれぞれ(5)~(7)式によって表されると考えるべきである。これらの式は、照射条件を考慮すれば照射前のヤング率と強さおよび照射後のヤング率から照射後の強さを推定できることを示すと同時に照射前後の黒鉛について、単軸と応力勾配下の破壊の基準を与えるものであると考えることができる。しかし、高温照射データがまだ少ないことなどからさらに広範囲の照射条件に関するデータを今後取得することが必要である。また、照射後の黒鉛の多軸破壊に関する基準の検討は今後の課題である。



(a) IM-2 ()

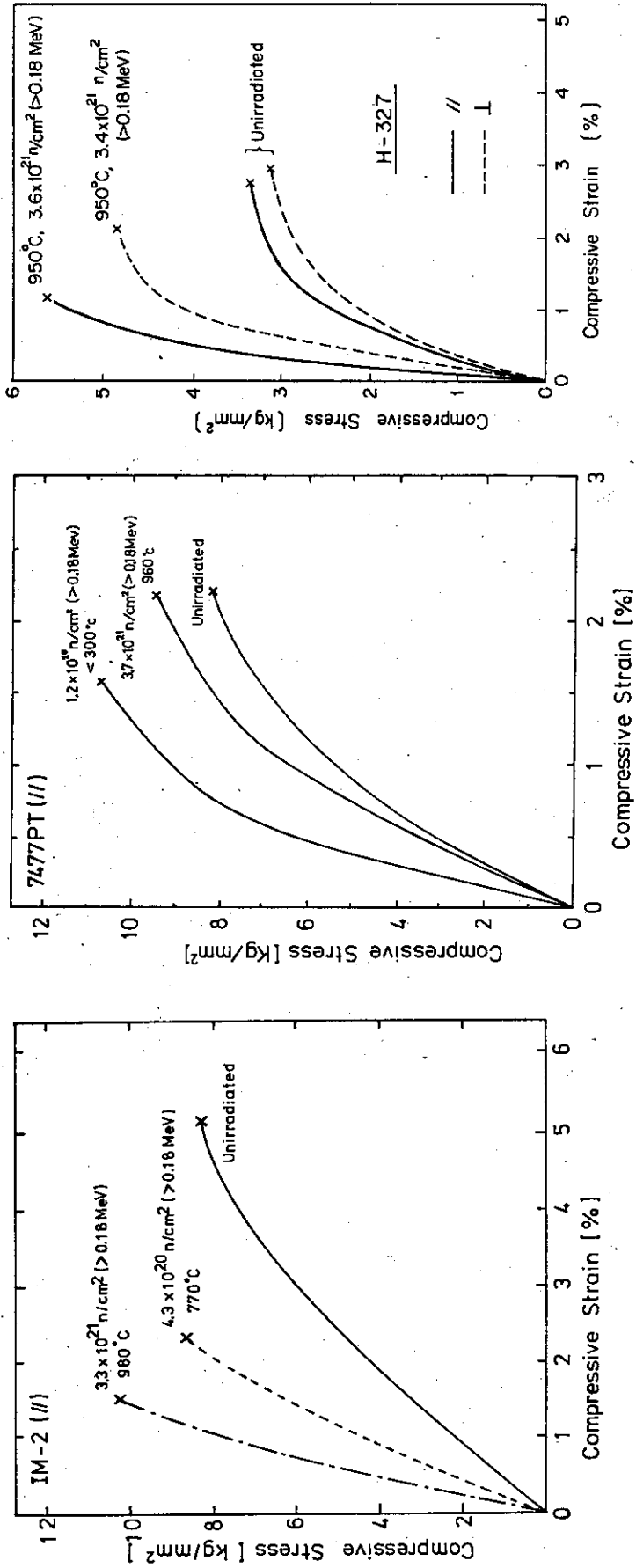


(b) 7477PT ()



(c) H-327

Fig. 1 Tensile stress-strain curves of graphites

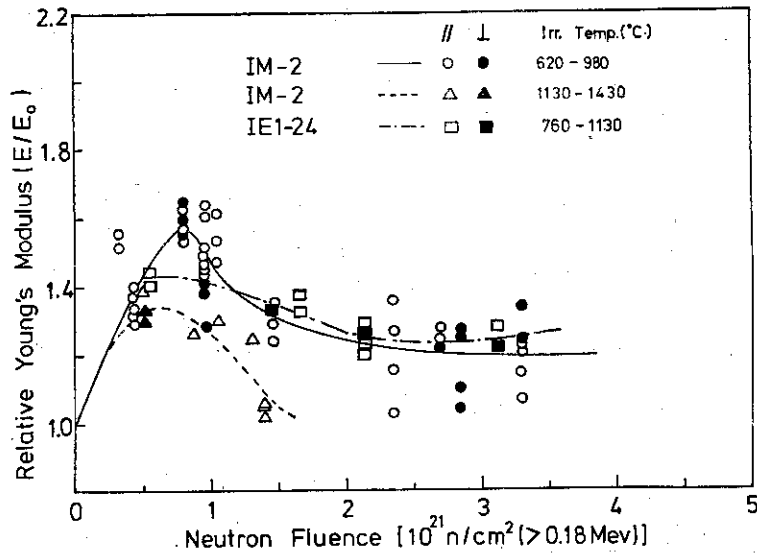


(a) IM-2 ()

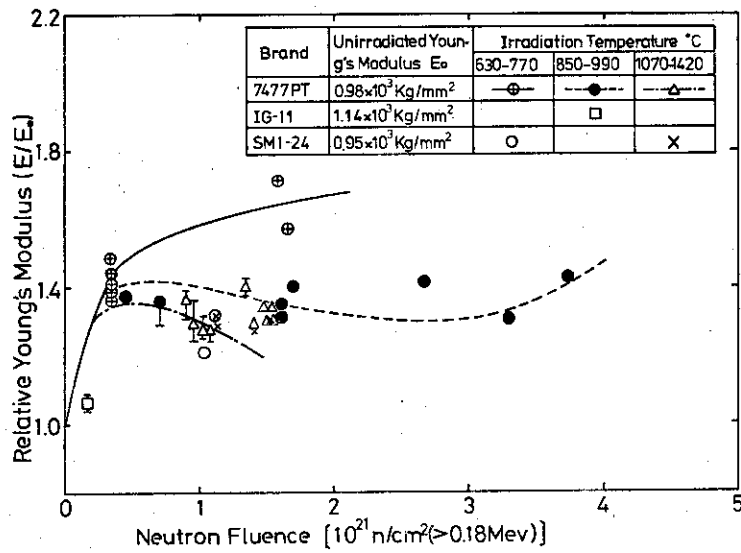
(b) 7477PT ()

(c) H-327

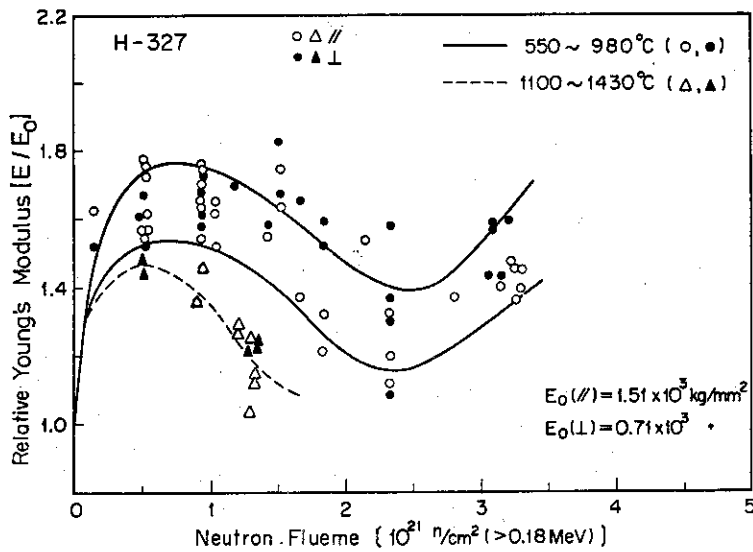
Fig. 2 Compressive stress-strain curves of graphites



(a) IM-2 and IE1-24

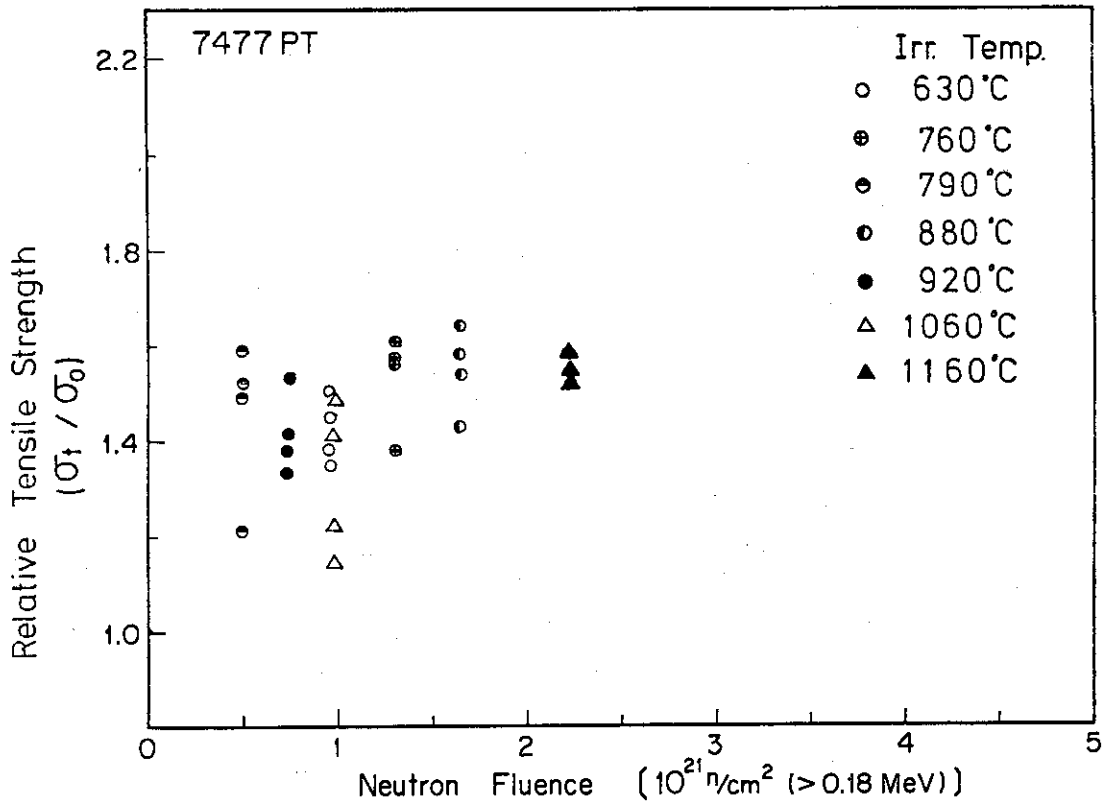


(b) 7477PT, SM1-24, and IG-11

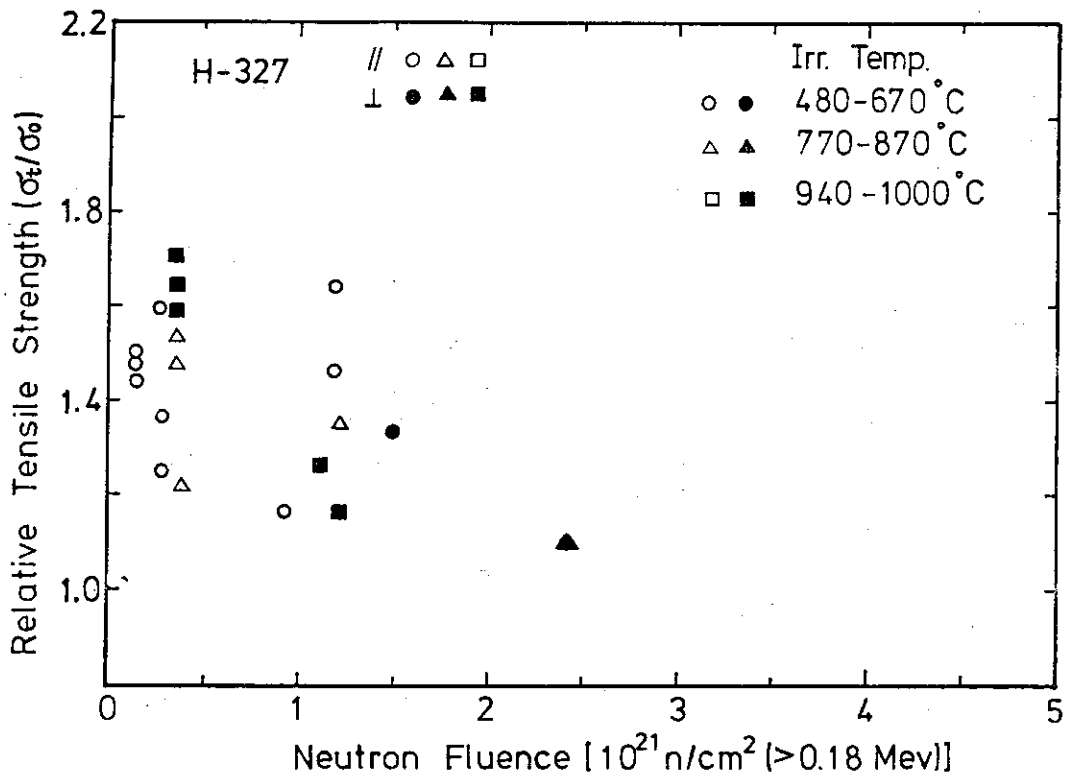


(c) H-327

Fig. 3 Relative Young's moduli of graphites as a function of neutron fluence

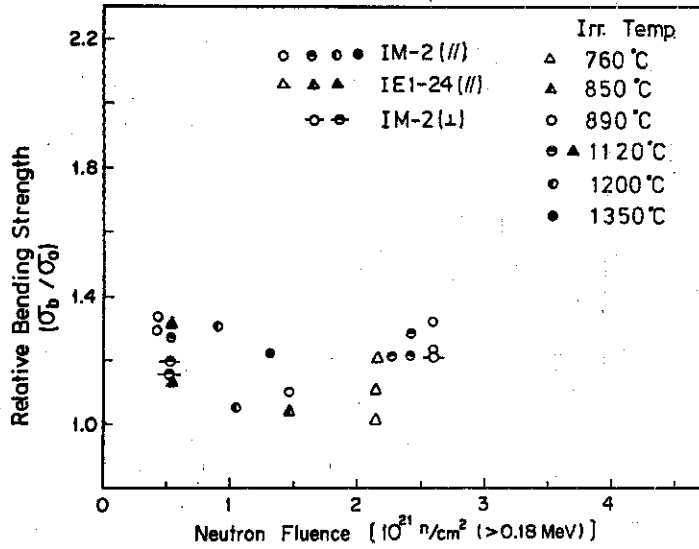


(a) 7477PT

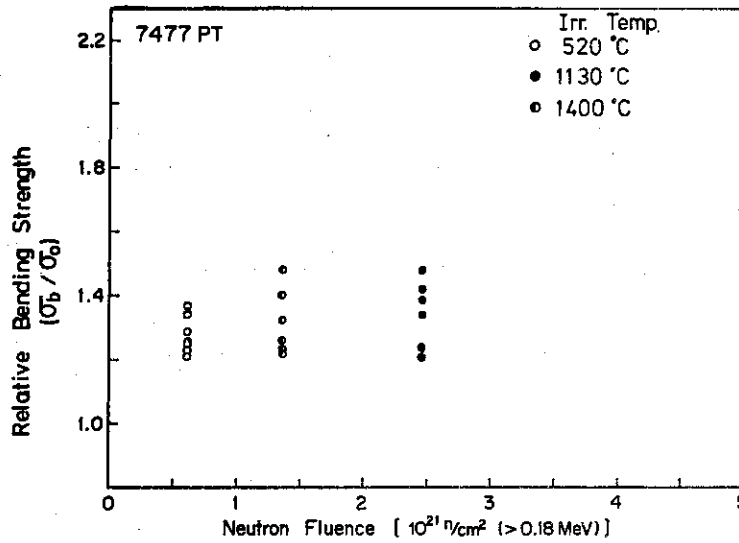


(b) H-327

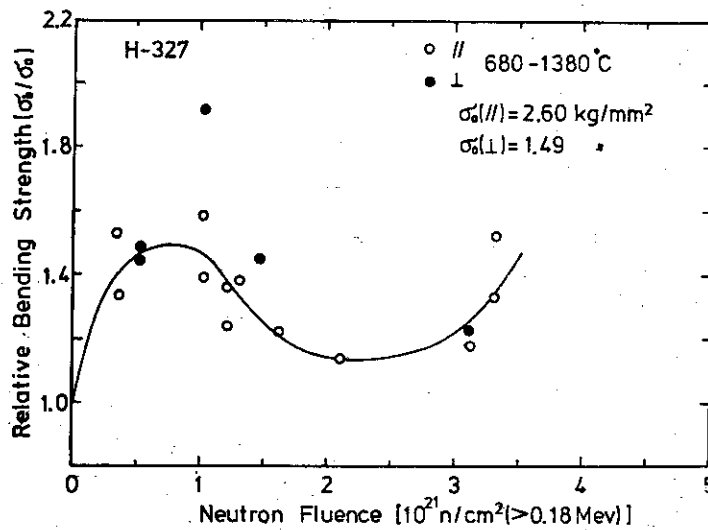
Fig. 4 Relative tensile strengths of graphites as a function of neutron fluence



(a) IM-2 and IE1-24

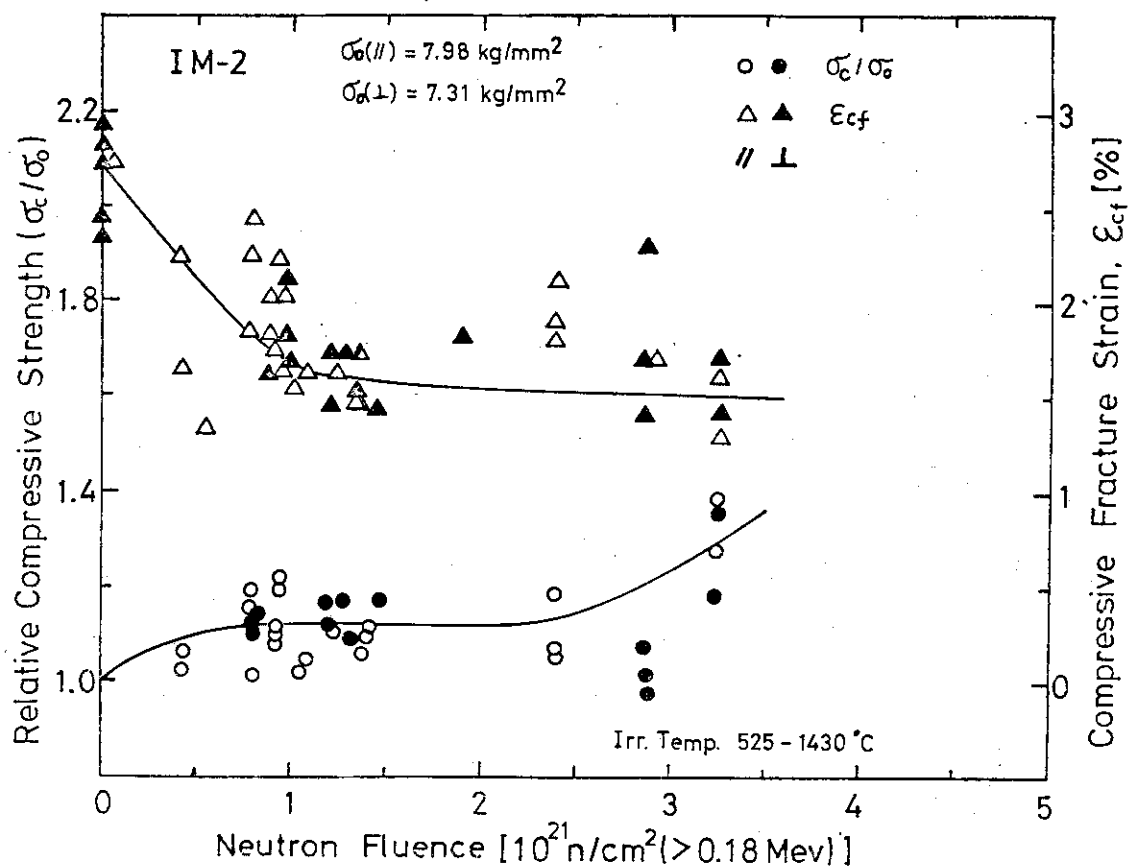


(b) 7477PT

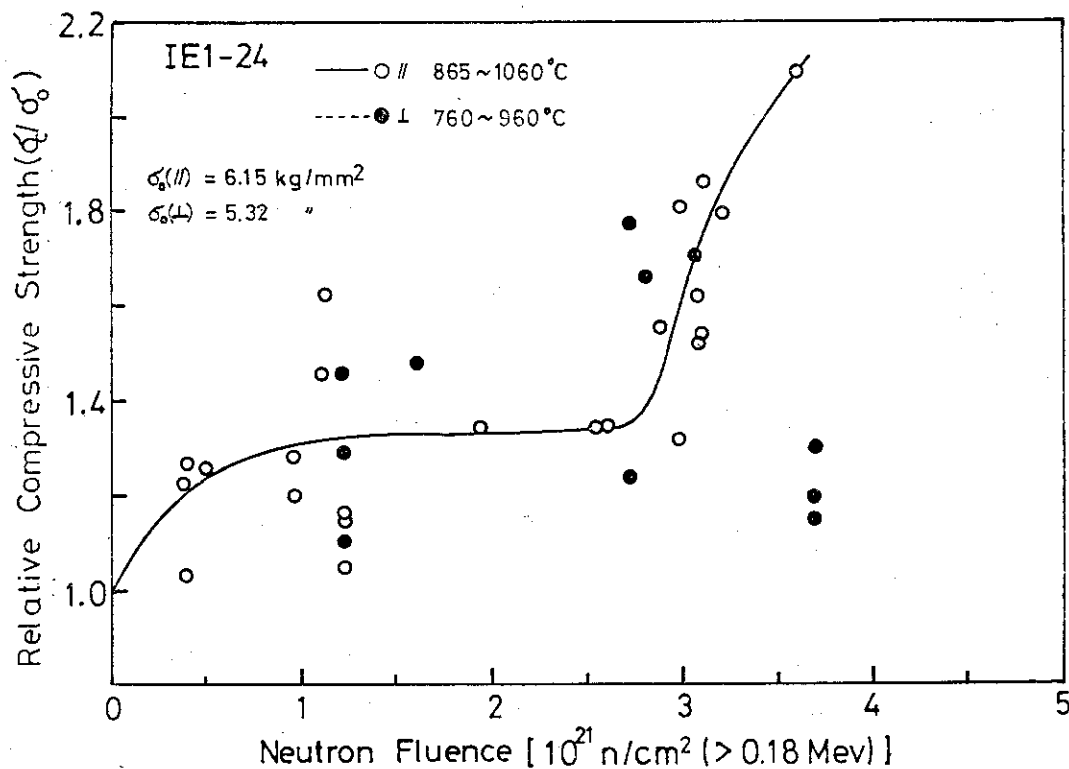


(c) H-327

Fig. 5 Relative bending strengths of graphites as a function of neutron fluence

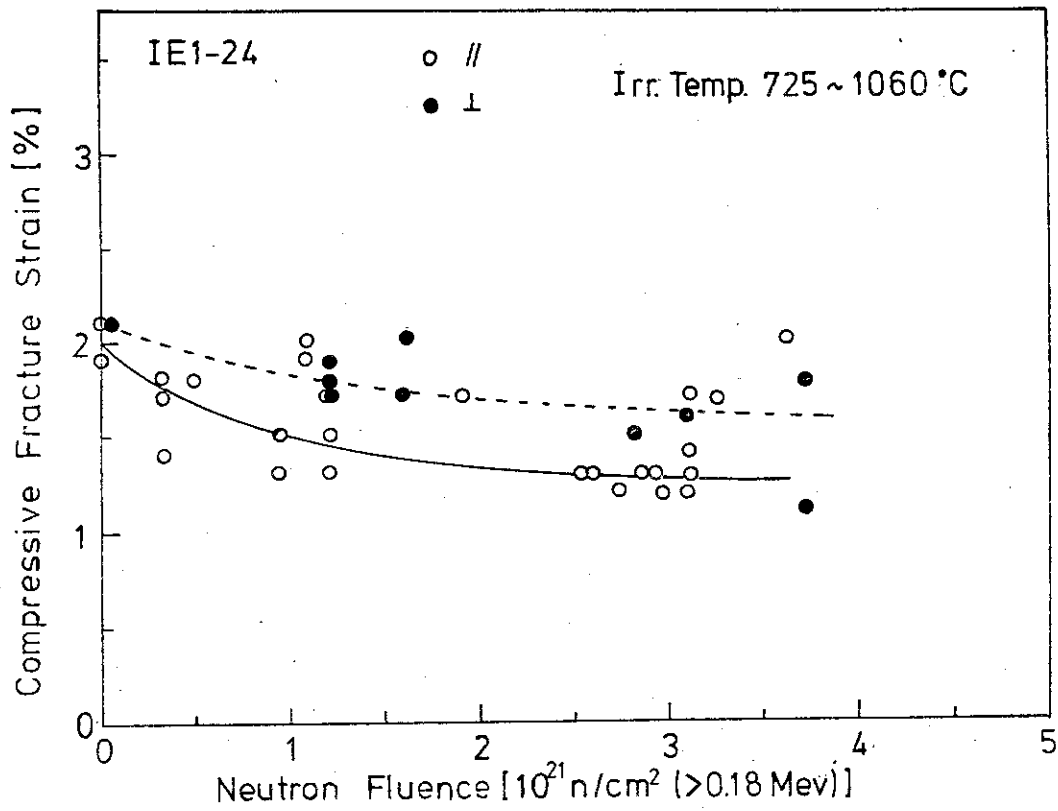


(a) IM-2

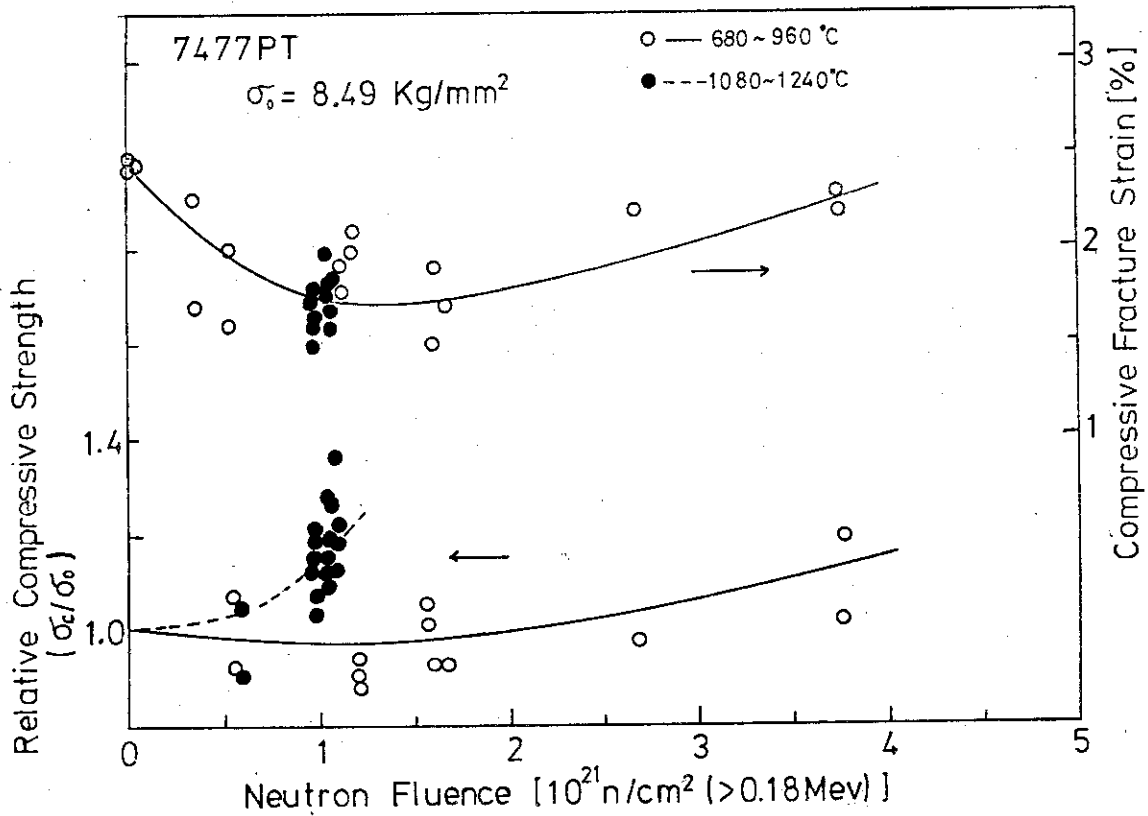


(b) IE1-24, relative compressive strength

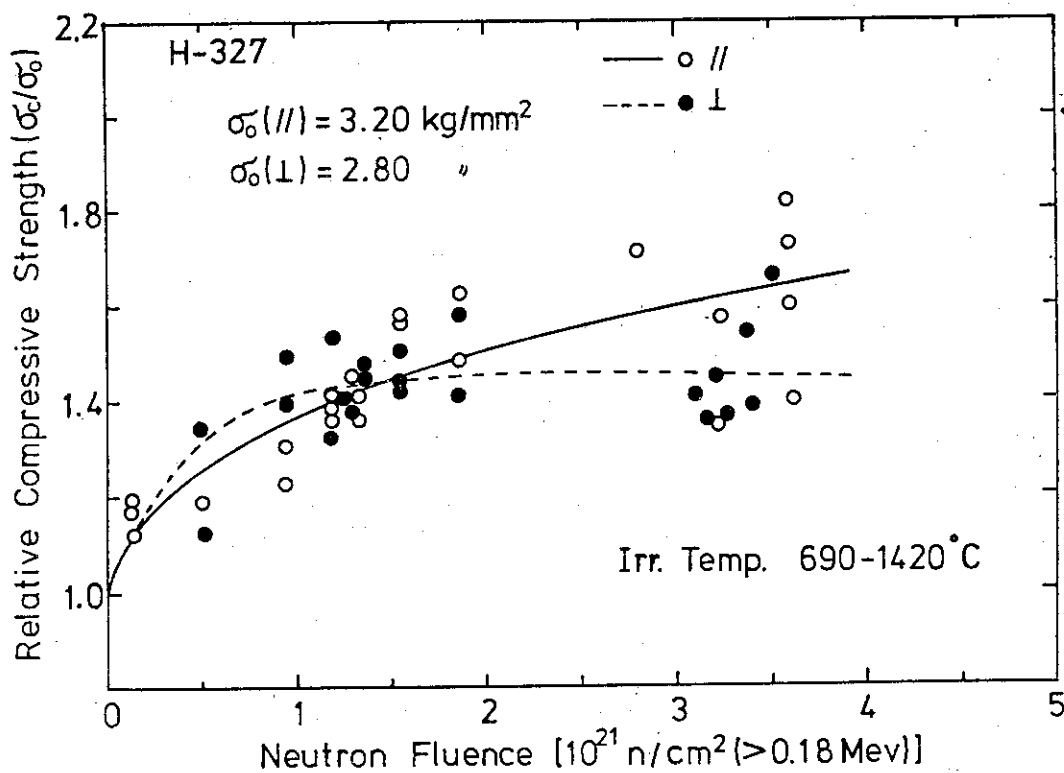
Fig. 6 Relative compressive strengths and fracture strains of graphites as a function of neutron fluence



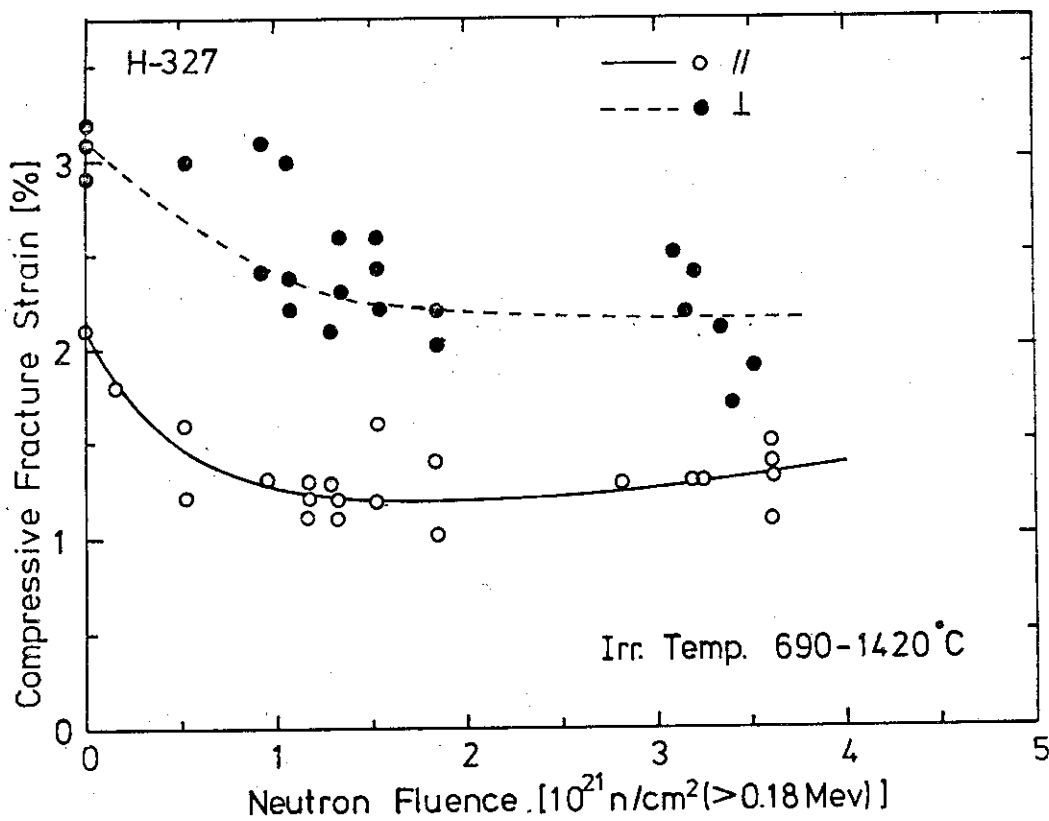
(c) IE1-24, fracture strain



(d) 7477PT



(e) H-327, relative compressive strength



(f) H-327, fracture strain

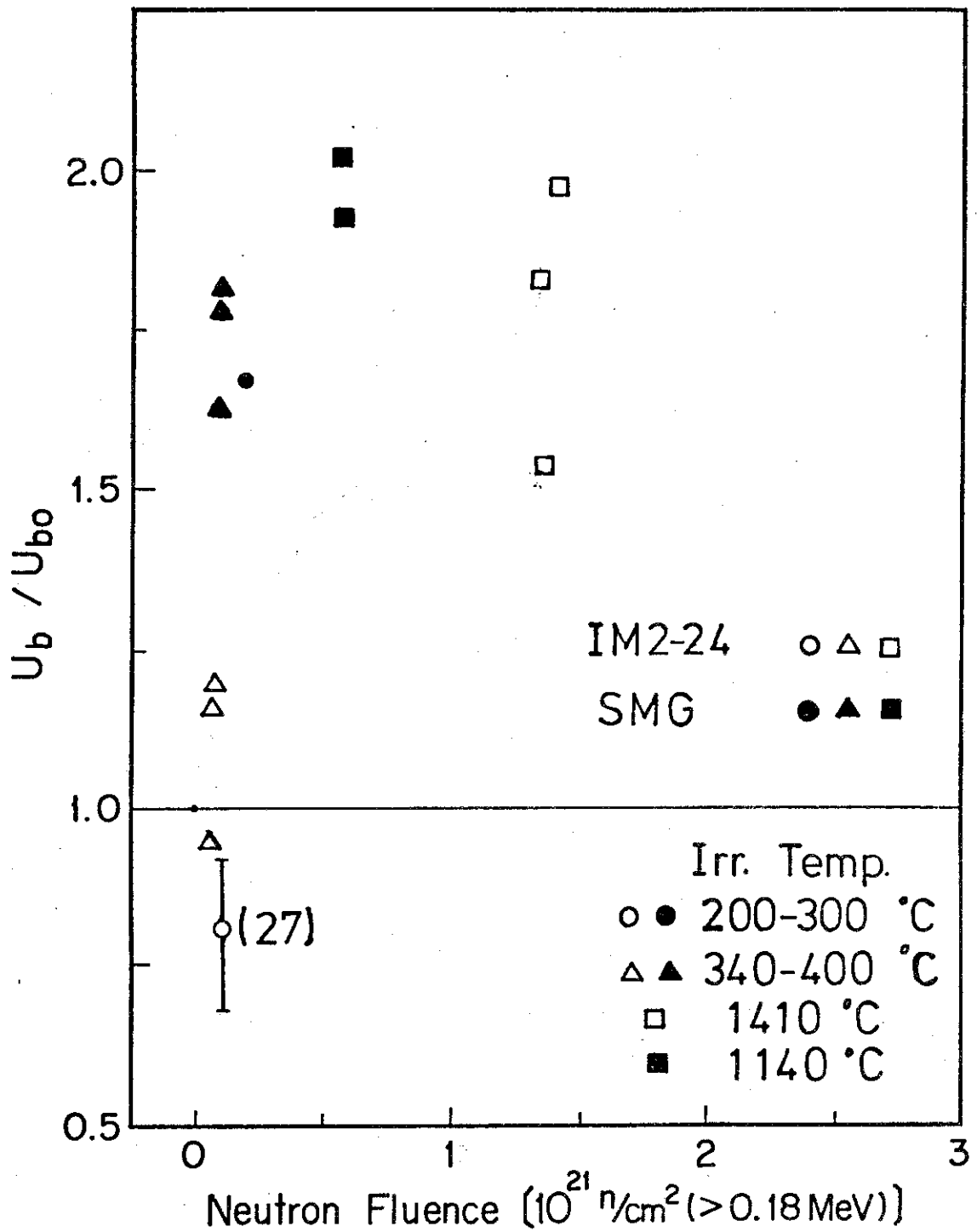
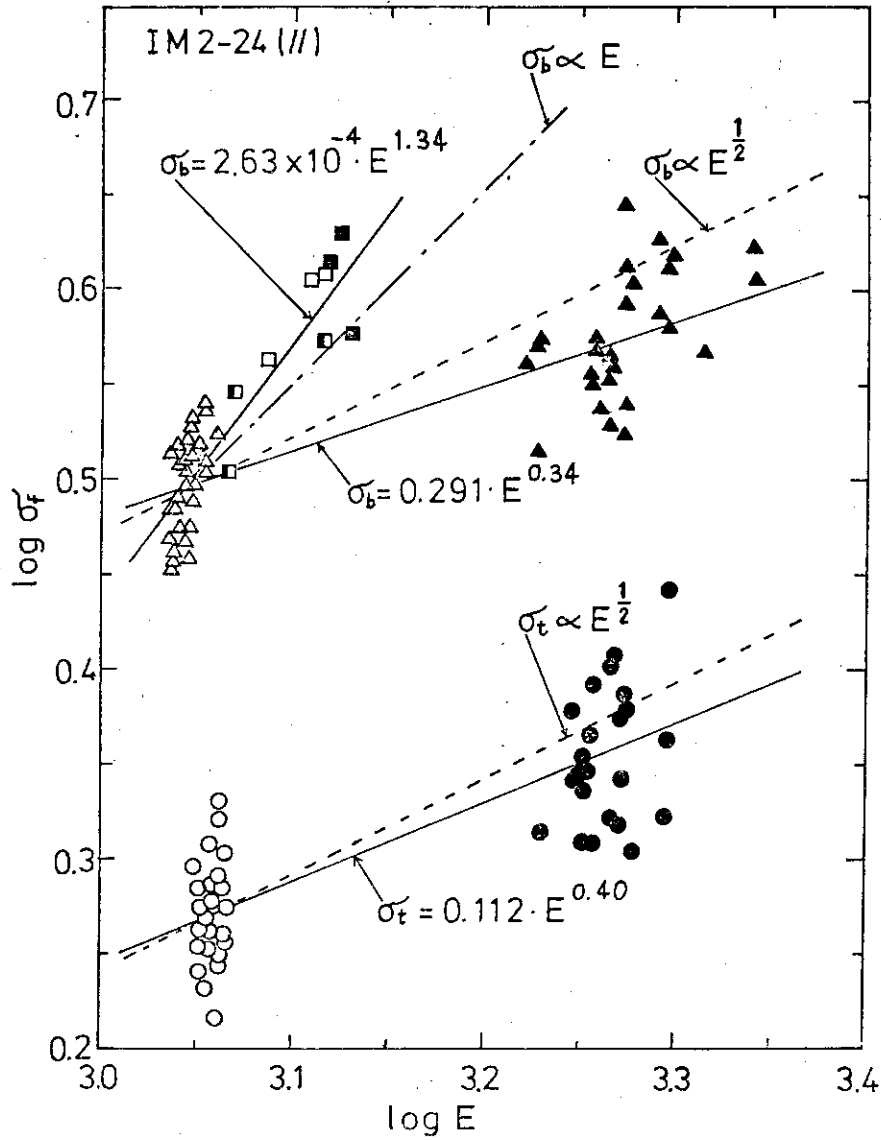


Fig. 7 Bending strain energy changes of graphites as a function of neutron fluence



○ △	Unirradiated	T _{irr.} [°C]	Φ n/cm ² (>0.18 Mev)
● ▲	Irradiated	200-300	7.4 x 10 ¹⁹
□	"	800-1040	1.6 x 10 ²¹ -2.0 x 10 ²¹
▣	"	1140	2.5 x 10 ²¹
■	"	1400	1.3 x 10 ²¹
○ ●	Tensile Strength, σ _t		
△ ▲	Bending Strength, σ _b		
□ ▣			
■			

Fig. 8 Tensile strength and bending strength of IM2-24 graphite as a function of Young's modulus

4. 結 論

ギルソナイトコークス系等方性黒鉛 (IM-2, IE1-24), 石油コークス系準等方性および微粒等方性黒鉛 (SM1-24, 7477PT, IG-11), 針状石油コークス系異方性黒鉛 (H-327) の4系統の黒鉛材料のヤング率, 応力-ひずみ関係, 引張強さ, 圧縮強さ, 曲げ強さに及ぼす200-300°Cおよび800-1200°Cにおける照射効果と照射前後の黒鉛の破壊基準および破壊までの曲げひずみエネルギー等を検討した結果, 次の結論が得られた。

(1) 引張および圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす照射効果; 黒鉛の銘柄に関係なく, ヤング率と強度の増加が見られた。IM-2とH-327黒鉛の破壊ひずみは照射により大きく減少したが, 7477PT黒鉛の破壊ひずみは引張, 圧縮とも照射によりほとんど変化しなかった。また, 同一の照射条件では, 圧縮破壊ひずみの減少率が引張破壊ひずみの減少率より大きかった。

(2) ヤング率に及ぼす照射効果; 照射温度に関係なく低照射量での急な立上りと $1 \times 10^{21} \sim 3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$)でのプラトー領域および高照射量での再増加が見られた。照射温度が高くなるにつれて, ヤング率の増加率は減少することがわかった。また, 相対ヤング率の照射量依存性は, 素材の方向によって異なる様子は見られなかった。

(3) 引張強さおよび曲げ強さに及ぼす照射効果; 引張強さと曲げ強さの照射量依存性はヤング率の照射量依存性とほぼ類似の傾向と増加率を示した。ただし, IM-2黒鉛の曲げ強さだけがヤング率の増加率より若干小さかった。

(4) 圧縮強さと圧縮破壊ひずみに及ぼす照射効果; 圧縮強さの照射による変化は引張強さや曲げ強さの照射による増加とやや異なり, H-327黒鉛以外は増加率がきわめて小さかった。7477PT黒鉛では, ヤング率の照射量依存性と違って照射温度の増加にともない増加率が大きくなる傾向を示した。圧縮破壊ひずみは約 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ (0.18 MeV)までの間で20~40%減少し, $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 以上照射量の増加にともないほとんど一定かあるいは若干増加の傾向を示した。

(5) 曲げひずみエネルギーに及ぼす照射効果; 曲げ破壊ひずみエネルギーを(1)式によって, 表すと, 照射によって曲げひずみエネルギーは変化する。照射温度が低いとき, 曲げひずみエネルギーは照射量の増加とともに減少し, 照射温度が高いとき増加する傾向にある。

(6) 破壊基準に及ぼす照射効果; IM2-24黒鉛の引張強さ及び曲げ強さのヤング率依存性を調べると, 照射前後の材料を含め,

$$\sigma_f = A \cdot E^\alpha$$

によって表される。ここで, A , α は定数で, 強さの種類と黒鉛銘柄に依存する。 $\alpha = 0.34 \sim 1.34$ となり, 破壊基準は定ひずみエネルギー説 ($\alpha = \frac{1}{2}$) および, 定ひずみ説 ($\alpha = 1$) からずれている。しかし, 照射温度が高くなると $\alpha \simeq \frac{1}{2}$ から $\alpha \simeq 1$ へ破壊基準が移行していく傾向が見られた。

参 考 文 献

- 1) H.H.W. Losty and J.S.Orchard, Proc. 5th Carbon Conf, vol 1, P. 519 (1962)
- 2) B.T. Kelly, Phil Mag. 9, 721 (1964)
- 3) W.N. Reynolds, Phil. Mag. 11, 357 (1965)
- 4) R. Taylor, et al, Carbon, 5, 519 (1967)
- 5) 青地哲男, 下川純一, 安野武彦ほか, JAERI-M 6845 (1977)
- 6) M.R. Everette, L.W. Graham, and F. Ridealgh, "Graphite Structures for Nuclear Reactors" (1972) P.321
- 7) R.J. Price, GA-A13524 (1975)
- 8) J.E. Brockl ehurst, TRGPRT ORT 2731 (S) (1975)
- 9) M.R. Everette, F.Ridealgh, High Temp. - High Press. 4, 329 (1972)
- 10) 衛藤基邦, 奥 達雄, 藤崎勝夫, 佐々木泰一 炭素, No.87, P. 123 (1976)
- 11) T. Oku, M. Eto et al, Carbon, 15, 3 (1977)
- 12) 奥 達雄, 衛藤基邦ほか, 炭素 No.89, 48 (1977)
- 13) "Graphite Characterization Survey A.G.L. SM2-24(SM1-24)"; Anglo Great Lakes Corporation Ltd.(1975)