

JAERI - M
91-153

高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における
設計用データの解説

1991年10月

石原 正博・伊与久達夫・豊田 純二*
佐藤 貞夫・塩沢 周策

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における
設計用データの解説

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

石原 正博・伊与久達夫・豊田 純二*

佐藤 貞夫・塩沢 周策

(1991年9月3日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR) の燃料体, 制御棒案内ブロック等の炉心黒鉛構造物として使用する黒鉛材料は, 原子炉級微粒等方性黒鉛 (IG-110黒鉛) であり, 現在までこの材料に対する引張強度, 圧縮強度, 縦弾性係数, 熱膨張率等のデータを, 照射特性も含め精力的に取得してきた。これまでの取得データに基づいて, HTTRの「炉心黒鉛構造設計方針」で設計用データを規定した。

本報告は, HTTRの炉心黒鉛構造物用の材料に対する設計用データとその設定方法について解説したものである。

An Explication of Design Data of the Graphite Structural Design Code
for Core Components of High Temperature Engineering Test Reactor

Masahiro ISHIHARA, Tatsuo IYOKU, Junji TOYOTA^{*}
Sadao SATO and Shusaku SHIOZAWA

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 3, 1991)

The core graphite material used for the core graphite components such as fuel blocks, control rod blocks etc. of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) is nuclear grade fine-grained isotropic graphite (IG-110). The material data on properties such as tensile strength, compressive strength, Young's modulus, thermal expansion etc., including the effect of irradiation on these properties have been acquired up to now. From these obtained data the design data were stipulated by the graphite structural design code for core graphite components of HTTR in order to design the core graphite structures.

This report explicates these design data for the core graphite components of the HTTR.

Keywords: HTTR, Graphite, Design Code, Design Data, Gas-cooled Reactor, Brittle Material, Core Component

* TOYO TANSO Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 設計用データの解説	4
3. 結 言	29
謝 辞	29
参考文献	29
付録1 「炉心黒鉛構造設計方針」で規定する設計データ	31
付録2 設計用データの関係式	41

Contents

1. Introduction	1
2. Explanation of the Design Data	4
3. Conclusion	29
Acknowledgements	29
Reference	29
Appendix 1 Design Data Stipulated by the Graphite Structural Design Code for Core Graphite Components	31
Appendix 2 Polynominal Expressions of the Design Data	41

1. はじめに

現在日本原子力研究所では、高温ガス炉の基盤技術の確立と高度化、高温における先端的基礎研究を目的として高温工学試験研究炉（以下「HTTR」と言う。）の建設の準備を進めている。本原子炉は、ヘリウムガス冷却黒鉛減速型の熱中性子炉である⁽¹⁾。

HTTRの炉内構造物は、高温のガスを得るため耐熱性に優れた黒鉛構造物により構成され、黒鉛構造物は、その機能及び交換の可能性等を考慮して、炉心黒鉛構造物と炉心支持黒鉛構造物に分類される。第1.1図にHTTRの黒鉛構造物を示す。

炉心黒鉛構造物は、第1.1図に示すように、燃料体の黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック等から構成され、黒鉛材料の物性値等に与える高速中性子の照射量の影響が顕著になり、照射効果を設計上考慮する必要がある。炉心黒鉛構造物に使用する材料は、耐放射線性、耐腐食性及び高強度の原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110黒鉛）であり、この材料に対するデータは、照射特性を中心に精力的に取得してきた。IG-110黒鉛の代表的な特性を第1.1表に示す。

本報告は、これまでの取得データに基づいてHTTRの「炉心黒鉛構造設計方針」⁽²⁾で規定している設計用データについて解説したものである。なお、本設計方針で規定している設計用データを付録1に示す。

第1.1表 IG-110黒鉛の特性値 (標準値)

(未照射材)

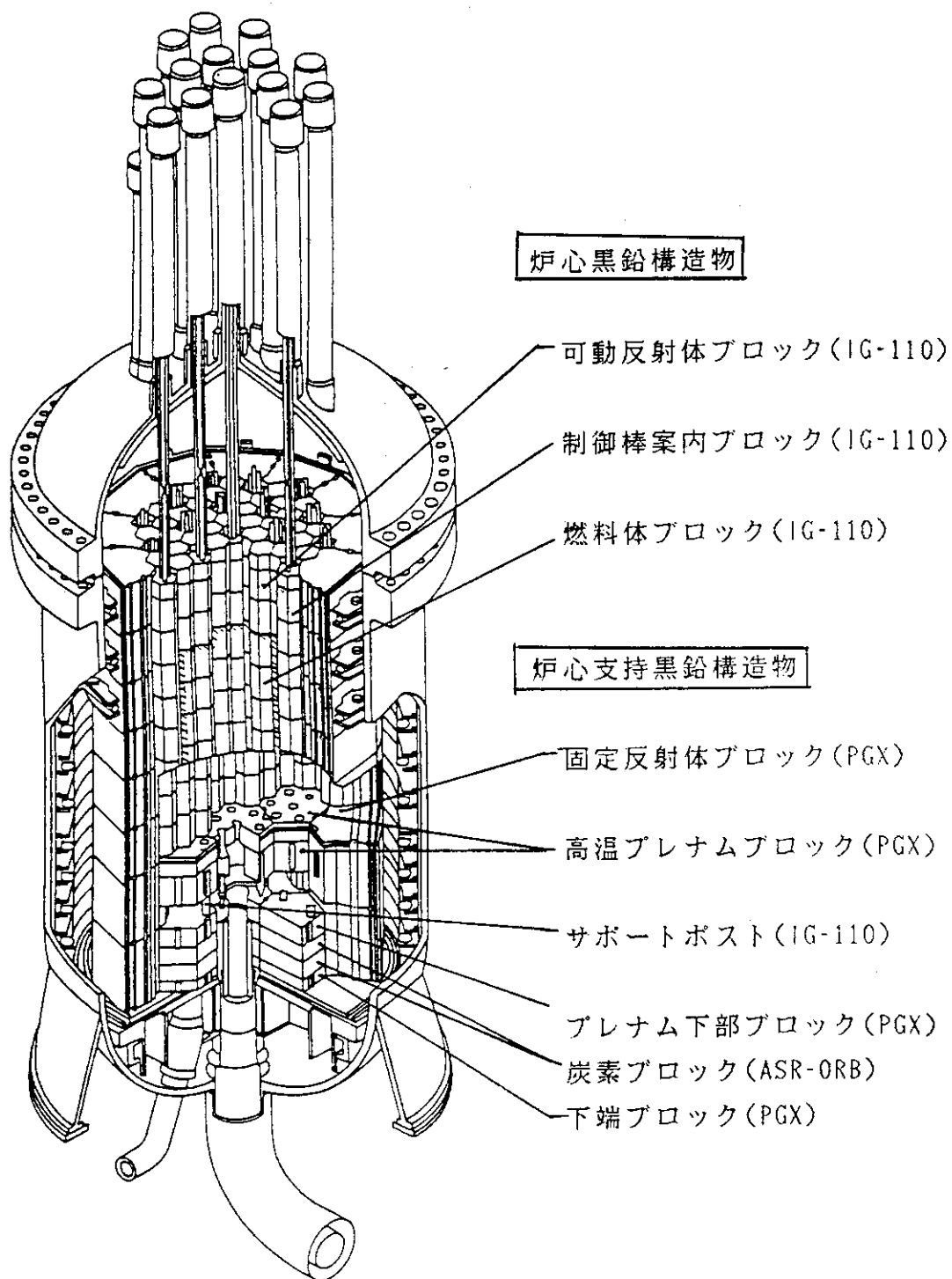
	IG-110黒鉛
かさ密度** (g^*/cm^3)	1.78
平均引張強さ** (kg/cm^2)	258
平均圧縮強さ** (kg/cm^2)	784
縦弾性係数** ($10^5 \text{kg}/\text{cm}^2$)	0.81
($\pm \frac{1}{3}$ Su 勾配) ***	
平均熱膨張係数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$) (20~400°C)	4.06
熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$) (400°C)	0.19
灰分**** (ppm)	100以下
粒径 (μm)	20 (平均)

*: 質量の単位

**: 室温での値

***: 応力-ひずみ曲線における基準引張強さ及び基準圧縮強さの1/3の点を結んだ直線の勾配

****: 耐腐食性を必要としない部材には適用しない。



第1.1図 HTTRの黒鉛構造物

2. 設計用データの解説

設計用データの解説を、付録1に示す別表及び別図ごとに述べる。なお、ここで規定している設計データは、新たなる材料データの取得等の最新の知見により随時見直されるべきものである。

(1) 別表第1 IG-110黒鉛の基準強さ（未照射材及び未酸化材、室温）

IG-110黒鉛の基準強さ（未照射材及び未酸化材、室温）は、次のとおり定めた。材料試験によって得られた強度データについて正規分布が適合性の良いことを確認の上⁽³⁾、⁽⁴⁾以下の式で定めた。なお、IG-110黒鉛の強度データの正規、対数正規、ワイブル分布に対する相関係数を第2.1表に示す。また、IG-110黒鉛の引張強度データの各確率分布に対する分布図を第2.1(a)～(c)図に示す。さらに、第2.2表にIG-110黒鉛の引張及び圧縮強度データを示す。

$$S u = \bar{X} - \left(k_1 + \frac{k_2}{\sqrt{n}} \right) \sigma$$

- ここで、
- $S u$: 基準強さ (kg/cm²)
 - \bar{X} : 材料試験により得られた強度データの平均強さ (kg/cm²)
 - σ : 材料試験により得られた強度データの標準偏差 (kg/cm²)
 - n : 強度データの個数
 - k_1 : 2.326 (99%非破壊確率に相当)
 - k_2 : 1.645 (サンプリングによる誤差を考慮し、標本の標準偏差が母集団の標準偏差と同じとした場合の片側95%の信頼度に相当)

また、実用上差し支えない範囲で基準強さを下げることができること（材料の強度のクラス分け）とした理由は次のとおりである。黒鉛構造物に想定される発生応力の大小により各構造物を分類し、構造物別（あるいはそれらの必要強度レベル）ごとに基準強さを設定する方法を採用したとしても、それらの基準強さ

が素材受け入れ時にサンプリングによる誤差を考慮して非破壊確率99%で検定されるため、構造設計における信頼性を損なうことなく設計上の自由度を増すことができるためである。また、応力制限は、その下げた基準強さに基づいて行うので安全性を損なうこともない。

なお、黒鉛材料の強度は、黒鉛構造物をとりまく環境効果により変化するが、基準強さは室温雰囲気、かつ未酸化材の材料強度データに基づいて設定し、これに環境効果を考慮する。具体的は、酸化により強度が減少するため、これを(5)に示すとおり考慮する。また、高温⁽⁵⁾及び高ひずみ速度⁽⁴⁾では強度が増加するが、この効果についてはデータが十分蓄積された段階で考慮するものとする。IG-110黒鉛の高温における引張強さの変化を第2.2図に示す。

なお、黒鉛材料の強度は照射により増加^{(4)・(9)}するため、これを(4)に示すとおり考慮する。

(2) 別表第2 IG-110黒鉛の縦弾性係数及びポアソン比（未照射材及び未酸化材、室温）

1) IG-110黒鉛の縦弾性係数（未照射材及び未酸化材、室温）は次のとおり定めた。

室温における引張と圧縮のそれぞれの応力-ひずみ曲線の平均値を設計曲線とし、引張と圧縮の基準強さの1/3の点を結ぶ直線の勾配（割線係数）を縦弾性係数と定めた。第2.3図に代表的な応力-ひずみ曲線の実測データと設計曲線を示す⁽⁴⁾。

縦弾性係数をこのように設定したのは、黒鉛材料の応力-ひずみの関係が僅かに非直線性を示すため、応力を過小及び過大評価しないように、本指針で定めた最も小さな応力制限値に対応させたためである。参考までに、米国のASMEで検討された高温ガス炉用炉心支持黒鉛構造物の技術基準 ASME Sec. III, Div. 2, Subsection CE (draft)では、縦弾性係数は基準引張強さと基準圧縮強さの1/3点を結ぶ直線の勾配とすることを規定している。

2) IG-110黒鉛のポアソン比（未照射材及び未酸化材、室温）は、引張又は圧縮試験結果から得られた実測値の平均値とした。⁽⁴⁾なお、ポアソン比が応力に与える影響は小さいことを確認している。

(3) 別表第3 IG-110黒鉛の遷移クリープパラメータ及びクリープポアソン比

1) IG-110黒鉛の遷移クリープパラメータは次のとおり定めた。

照射クリープ特性のうち、遷移クリープひずみに関する遷移クリープパラメータは、遷移クリープひずみを次式で表すときの定数である。

$$\varepsilon^T = a \cdot \sigma [1 - \exp(-b \cdot \Phi)]$$

ここで ε^T : 遷移クリープひずみ
 σ : 応力 (kg/cm²)
 Φ : 高速中性子照射量 (10²¹ n/cm², E > 29fJ)
 a 、 b : 遷移クリープパラメータ

遷移クリープパラメータ a 、 b は、各種準等方性黒鉛にて得られている値⁽⁶⁾⁽⁷⁾ ($a = 0.7 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ 、 $b = 20 \sim 67$) について、黒鉛スリーブを模擬した中空円筒モデルを用いた感度解析を実施し、応力値に与える影響の小さいことを確認⁽⁴⁾の上、これらの中間的な値とした。なお、感度解析の結果を第2.3表に示す。

2) IG-110黒鉛のクリープポアソン比は次のとおり定めた。

IG-110黒鉛のクリープポアソン比は、次式で表す他の原子炉用黒鉛材料の実測データの最適近似式⁽⁸⁾に準じて定めた。第2.4図に他の原子炉用黒鉛材料の単軸クリープ試験により得られた最適近似曲線と実測データを示す。

$$\nu^T = -\varepsilon_T / \varepsilon_L = 0.3 + 0.05 |\varepsilon_L|$$

ここで ν^T : クリープポアソン比
 ε_L : 縦方向のクリープひずみ (%)
 ε_T : 横方向のクリープひずみ (%)

クリープポアソン比については応力の感度解析を実施し、応力値に与える影響の小さいことを確認の上、 $\nu^T = 0.3$ とした。

(4) 別図第1 IG-110黒鉛の照射による強度変化 (未酸化材、室温)

IG-110黒鉛の照射による強度変化 (未酸化材、室温) は次のとおり定めた。

引張強さの強度変化については、「炉心黒鉛構造設計方針」策定後、新たに取得した照射温度 800℃及び 1200℃、高速中性子照射量 $0.5 \times 10^{21} \sim 1.1 \times 10^{21}$

$^{21}\text{n/cm}^2$ ($E > 29\text{fJ}$) の照射後強度試験結果 (室温) ⁽⁹⁾ を含めて設定した。照射前後の強度データの破壊確率分布図を第2.5(a)図に示す。高速中性子照射量が $0.5 \times 10^{21} \sim 1.1 \times 10^{21}\text{n/cm}^2$ の範囲では、各照射温度とも変化率と高速中性子照射量との間に相関が認められないため、設計曲線はこの範囲で一定とした。引張強さの照射による強度変化の設計曲線を第2.5(b)図に示す。

圧縮強さに関しても、同様の試験を行ったが、現在までの実測データでは照射温度による変化率の違いはみられていない。かつ、第2.5(c)図に示すように高速中性子照射量の増加にともない変化率も増加しているため、実測データ ⁽⁴⁾ の変化率の平均値を高速中性子照射量で多項式近似し、これを照射効果に関する設計曲線とした。

(5) 別図第2 IG-110黒鉛の酸化による強度変化 (未照射材、室温)

IG-110黒鉛の酸化 (未照射材、室温) による強度変化は、均一酸化前後の強度データを基に定めた。第2.6図にIG-110黒鉛の引張強さ及び圧縮強さの酸化による強度変化の実測データ ⁽⁴⁾、⁽¹⁰⁾、⁽¹²⁾、⁽²⁶⁾ を示す。

なお、別図第2に規定されるIG-110黒鉛の酸化による強度変化では、酸化率が1%まで変化がないとしているが、これは酸化率が1%程度では強度変化が小さく、ばらつきの範囲と考えられるためである。

(6) 別図第3 IG-110黒鉛の設計疲れ曲線 (未照射材及び未酸化材、室温)

IG-110黒鉛の設計疲れ曲線 (未照射材及び未酸化材、室温) は、次のとおり定めた。

黒鉛材料の疲れ強度は、応力サイクルの最大応力 (σ_{max}) と最小応力 (σ_{min}) の応力比 R ($\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$) に依存するため、各応力比に対して疲れ試験を実施し、基準強さと同様な統計処理を施し、基準強さと整合させることにより、設計疲れ曲線を定めた。なお、統計処理においては、Priceの疲れモデル ⁽¹¹⁾ により [最大付加応力 (σ_{max}) と平均強さ (S) との比が疲れ寿命 (N_f) の1次式 ($\log(\sigma_{\text{max}}/S) = A + B \log N_f$) で表される] 最適疲れ曲線を求め、この1次式からの偏差が正規分布すると仮定し、サンプリングによる誤差を考慮して非破壊確率99%とした。第2.7図に応力比が $R = -1$ におけるIG-110黒鉛

の疲れ試験データ⁽¹⁷⁾を示す。

なお、疲れ強度の環境効果として酸化効果及び照射効果がある。酸化効果については、第2.8図にIG-110黒鉛の酸化効果⁽¹³⁾を示すように、酸化後の強度減少に基づいてデータを整理すると未酸化材の結果と一致する。このことより、疲れ評価における酸化効果については、酸化後の基準強さに基づき、疲れ曲線を補正することで考慮する。また、照射効果については、第2.9図にIG-110黒鉛の照射効果⁽¹⁴⁾を示すように、照射後の強度増加に基づいてデータを整理すると、未照射材の結果と一致する。このことより、疲れ評価における照射効果については、照射後の基準強さに基づき、疲れ曲線を補正することで考慮する。

(7) 別図第4 IG-110黒鉛の縦弾性係数の温度効果（未照射材及び未酸化材）

IG-110黒鉛の縦弾性係数の温度効果（未照射材及び未酸化材）は、室温値（20℃）を基準にした実測データの変化率^{(4)・(15)・(16)}の平均値を温度で多項式近似し、これを温度効果に関する設計曲線とした。第2.10図にIG-110黒鉛の縦弾性係数の温度効果による変化率の実測データと設計曲線を示す。

(8) 別図第5 IG-110黒鉛の縦弾性係数の照射効果（未酸化材）

IG-110黒鉛の縦弾性係数の照射効果（未酸化材）は次のとおり定めた。

照射温度400℃、600℃、800℃、1000℃、及び1200℃の照射による変化率^{(9)・(18)~(24)}の平均値を高速中性子照射量で多項式近似し、これを照射効果に関する設計曲線とした。第2.11(a)~(c)図に縦弾性係数の変化率の照射効果に関する実測データと設計曲線を示す。

また、照射後の縦弾性係数と近似式（設計曲線）の関係は以下のとおりである。

$$E(T, \Phi, t) = E(T) \cdot [1 + \Delta E(T, \Phi, t)]$$

ここで、

$E(T, \Phi, t)$: 照射材（高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t ）の
使用温度 T 時の縦弾性係数（kg/cm²）

$E(T)$: 未照射材の使用温度 T 時の縦弾性係数（kg/cm²）

$\Delta E(T, \Phi, t)$: 照射による縦弾性係数の変化率

T : 使用温度（℃）

- t : 照射温度 (°C)
 Φ : 高速中性子照射量 (10^{21} n/cm², E > 29fJ)

(9) 別図第6 IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果 (未照射材及び未酸化材)

IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果 (未照射材及び未酸化材) は、軸方向及び径方向の実測データ⁽²⁵⁾の平均値を温度で多項式近似し、これを温度効果に関する設計曲線とした。第2.12図にIG-110黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果に関する実測データと設計曲線を示す。

(10) 別図第7 IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の照射効果 (未酸化材)

IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の照射効果 (未酸化材) は次のとおり定めた。照射温度800°C、1000°C、及び1200°Cの照射による変化率⁽⁹⁾・⁽¹⁸⁾・⁽¹⁹⁾・⁽²⁵⁾の平均値を高速中性子照射量で多項式近似し、これを照射効果に関する設計曲線とした。なお、600°C以下の照射温度に対しては、H-451黒鉛を参考に、上記設計曲線を外挿した。第2.13(a)~(c)図に平均熱膨張係数の変化率の照射効果に関する実測データと設計曲線を示す。

また、照射後の平均熱膨張係数と近似式 (設計曲線) の関係は以下のとおりである。

$$\bar{\alpha}(T, \Phi, t) = \bar{\alpha}(T) \cdot [1 + \Delta \bar{\alpha}(T, \Phi, t)]$$

ここで、

$\bar{\alpha}(T, \Phi, t)$: 照射材 (高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t) の室温 (20°C) から使用温度 T までの平均熱膨張係数 (°C⁻¹)

$\bar{\alpha}(T)$: 未照射材の室温 (20°C) から使用温度 T までの平均熱膨張係数 (°C⁻¹)

$\Delta \bar{\alpha}(T, \Phi, t)$: 照射による平均熱膨張係数の変化率

T : 使用温度 (°C)

t : 照射温度 (°C)

Φ : 高速中性子照射量 (10^{21} n/cm², E > 29fJ)

(11) 別図第8 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率（未酸化材）

IG-110黒鉛の照射による寸法変化率（未酸化材）は次のとおり定めた。

照射温度600℃、800℃、1000℃、及び1200℃の照射による変化率⁽⁹⁾、⁽¹⁸⁾、⁽¹⁹⁾、⁽²⁷⁾の平均値を照射量及び照射温度依存性が全体でバランスするように高速中性子照射量で多項式近似し、これを照射効果に関する設計曲線とした。

なお、400℃の照射温度に対しては、上記設計曲線を外挿した。

第2.14(a)～(d)図にIG-110黒鉛の寸法変化率の照射効果に関する実測データと設計曲線を示す。また、第2.15図に照射による寸法変化率と照射温度の関係を示す。寸法変化率の設計曲線が、照射温度及び高速中性子照射量に対して全体でバランスよく設定されていることがわかる。

(12) 別図第9 IG-110黒鉛の照射による定常クリープ係数（未酸化材）

IG-110黒鉛の照射による定常クリープ係数（未酸化材）は次のように定めた。

定常クリープ係数 M^S の設計曲線の照射温度依存性は、石油コークス系黒鉛（海外データ）の照射試験結果⁽⁸⁾、⁽²⁴⁾、⁽²⁸⁾に基づいて、IG-110黒鉛の実測値（照射温度600℃～1000℃）と整合させることにより、これを照射効果に関する設計曲線とした。第2.16図に定常クリープ係数の照射効果に関する実測データと設計曲線を示す。

(13) 別図第10 IG-110黒鉛の熱伝導率の温度効果（未照射材及び未酸化材）

IG-110黒鉛の熱伝導率の温度効果（未照射材及び未酸化材）は、軸方向及び径方向の実測データの平均値⁽⁴⁾、⁽²⁹⁾を温度で多項式近似し、これを温度効果に関する設計曲線とした。第2.17図にIG-110黒鉛の熱伝導率の温度効果に関する実測データと設計曲線を示す。

(14) 別図第11 IG-110黒鉛の熱伝導率の照射効果（未酸化材）

IG-110黒鉛の熱伝導率の照射効果（未酸化材）は次のとおり定めた。

黒鉛材料の熱伝導率は中性子照射により減少し、この減少率は照射温度が低温ほど大きく、照射温度が高温になるに従って小さくなる。この照射効果は、黒鉛

材料に共通な一般的傾向として良く知られている。それ故IG-110黒鉛の照射後の熱伝導率の算出に必要な照射による熱伝導率の変化率には、一般に使用されているPriceの熱伝導計算モデル⁽²⁸⁾⁽³¹⁾を使用し設計曲線とした。すなわち、照射材の熱伝導率の設定では、IG-110黒鉛の未照射材の熱伝導率にPriceの熱伝導計算モデルによる変化率を乗じる簡便な方法を採用している。なお、Priceの熱伝導計算モデルによる熱伝導率の照射による変化率とIG-110黒鉛の熱伝導率の照射による変化率（実測データ）との比較を第2.18図に示す。同図より両者に良い相関が得られていることから、この方法の妥当性を確認している。

また、照射後の熱伝導率と設定した設計曲線との関係は以下のとおりである。

$$K(T, \Phi, t) = K(T) \cdot \Delta K(T, \Phi, t)$$

ここで、

- $K(T, \Phi, t)$: 照射材（高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t ）の照射後
使用温度 T 時の熱伝導率（ $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ）
- $K(T)$: 未照射材の使用温度 T における熱伝導率
（ $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ）
- $\Delta K(T, \Phi, t)$: 照射による熱伝導率の変化率（Priceの熱伝導率計算
モデルを使用）
- T : 使用温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）
- t : 照射温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）
- Φ : 高速中性子照射量（ 10^{21} n/cm², $E > 29\text{fJ}$ ）

第2.1表 各分布に対する強度データの相関係数

		分布関数		
		正規	ログノーマル	ワイブル
IG-110	引張	0.995	0.994	0.985
黒鉛	圧縮	0.995	0.993	0.979

第2.2表 IG-110黒鉛の強度データ

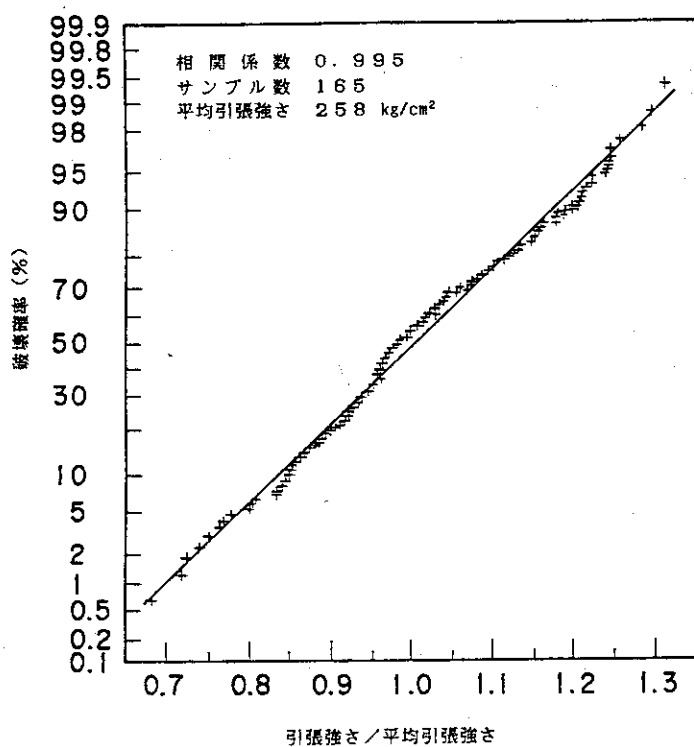
	平均強さ (kg/cm ²)	標準偏差 (kg/cm ²)	測定個数
引張強さ	258	24.8	362
圧縮強さ	784	65.4	373

第2.3表 遷移クリープパラメータの感度解析結果

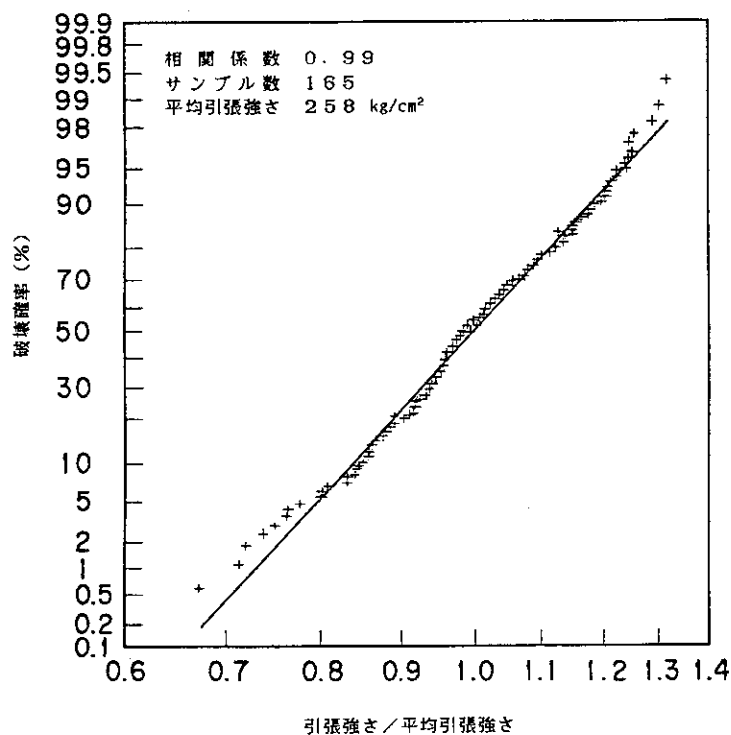
遷移クリープパラメータ		最大発生応力*1
a 10 ⁻⁵ (kg/cm ²) ⁻¹	b (10 ²¹ n/cm ² , E>29fJ) ⁻¹	
1.0 ^{・2}	45 ^{・2}	1.00
0.7	20	0.99
0.7	67	0.99
1.5	20	1.01
1.5	67	1.01
0	0	0.98

*1: a=1.0×10⁻⁵(kg/cm²)⁻¹, b=45(10²¹n/cm²)⁻¹のときの
最大発生応力で規格化している。

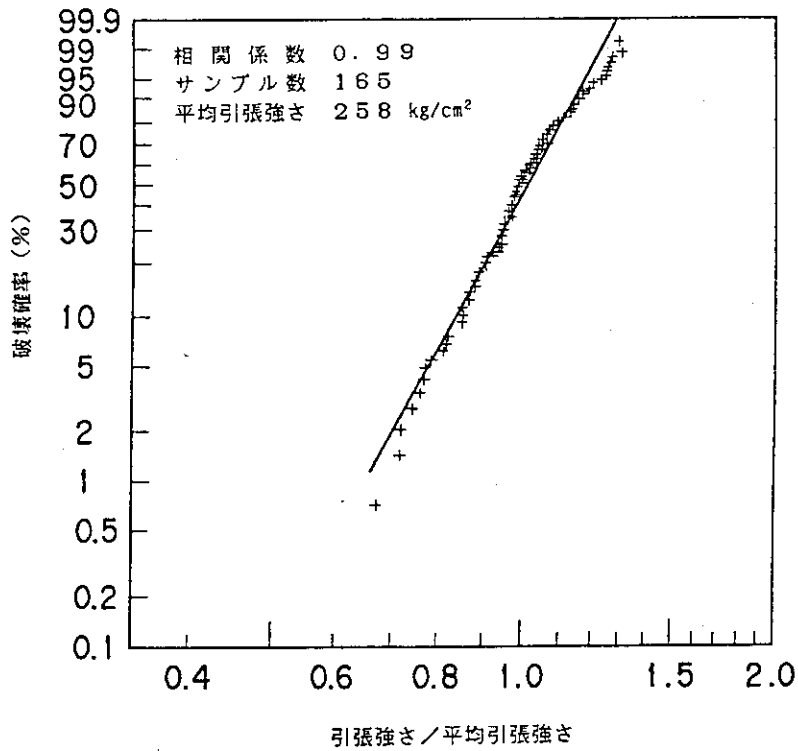
*2: 設計用データとして規定されている遷移クリープパラメータ



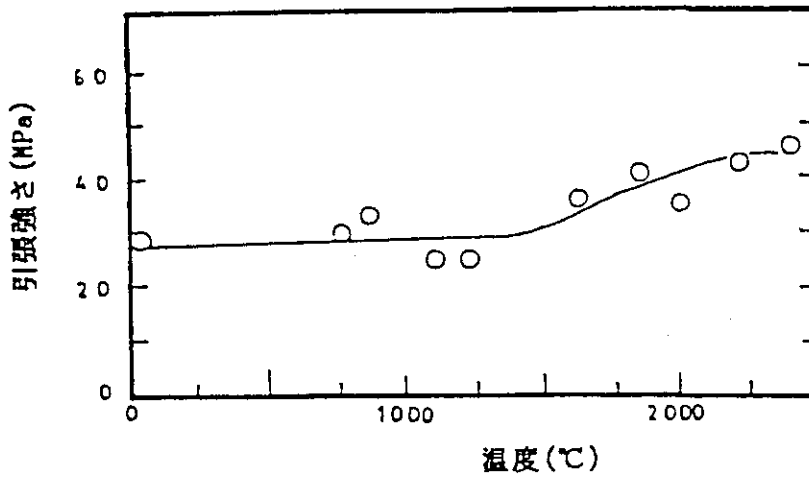
第2.1(a)図 IG-110黒鉛引張強度データの正規分布の相関係数と強度-破壊確率の関係



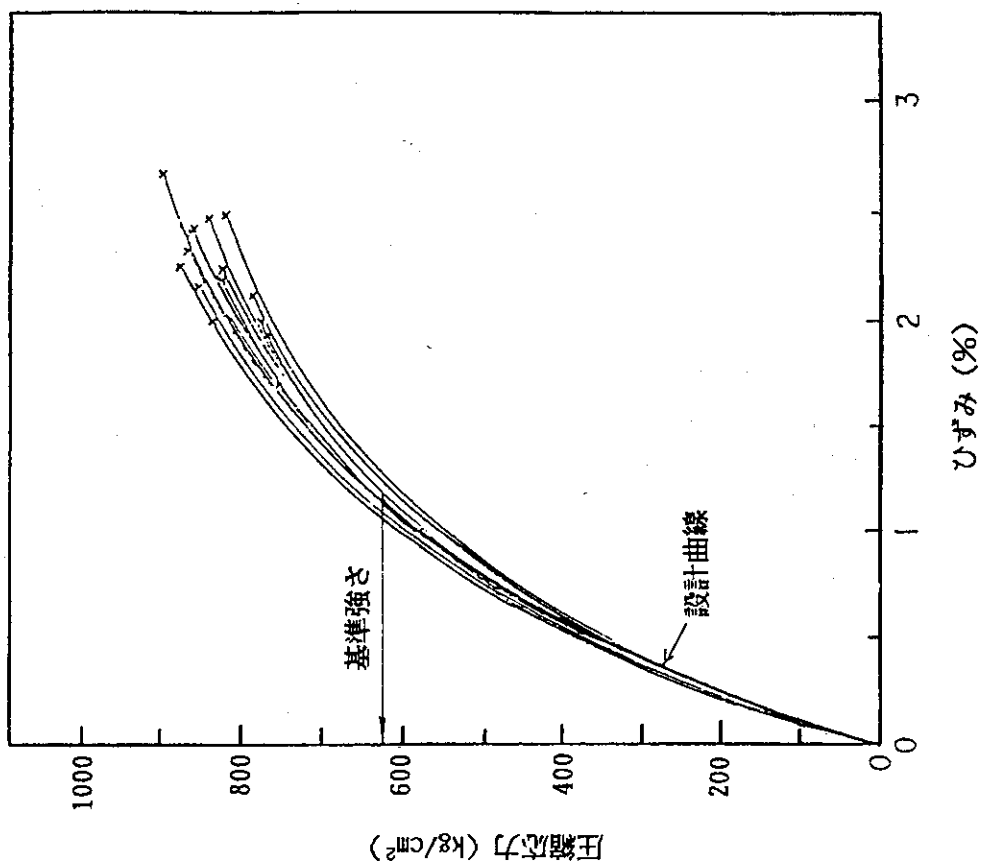
第2.1(b)図 IG-110黒鉛引張強度データのログノーマル分布の相関係数と強度-破壊確率の関係



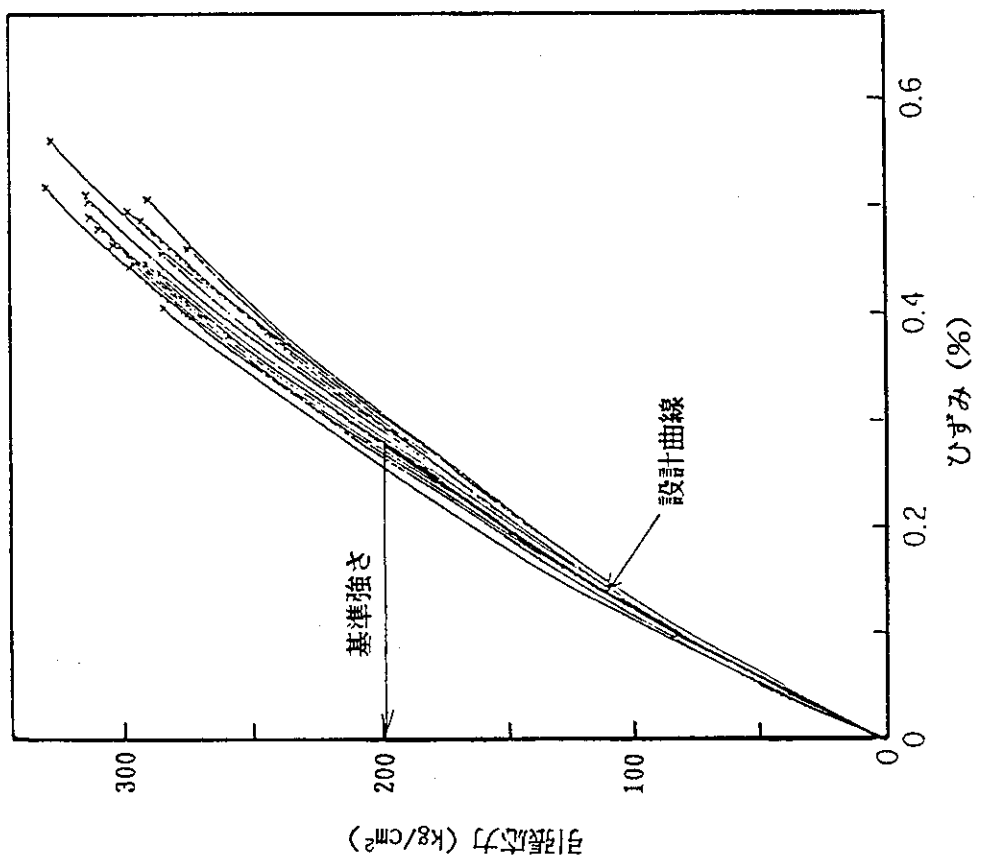
第2.1(c)図 IG-110黒鉛引張強度データのワイブル分布の相関係数と強度-破壊確率の関係



第2.2図 IG-110黒鉛の高温における引張強さの変化

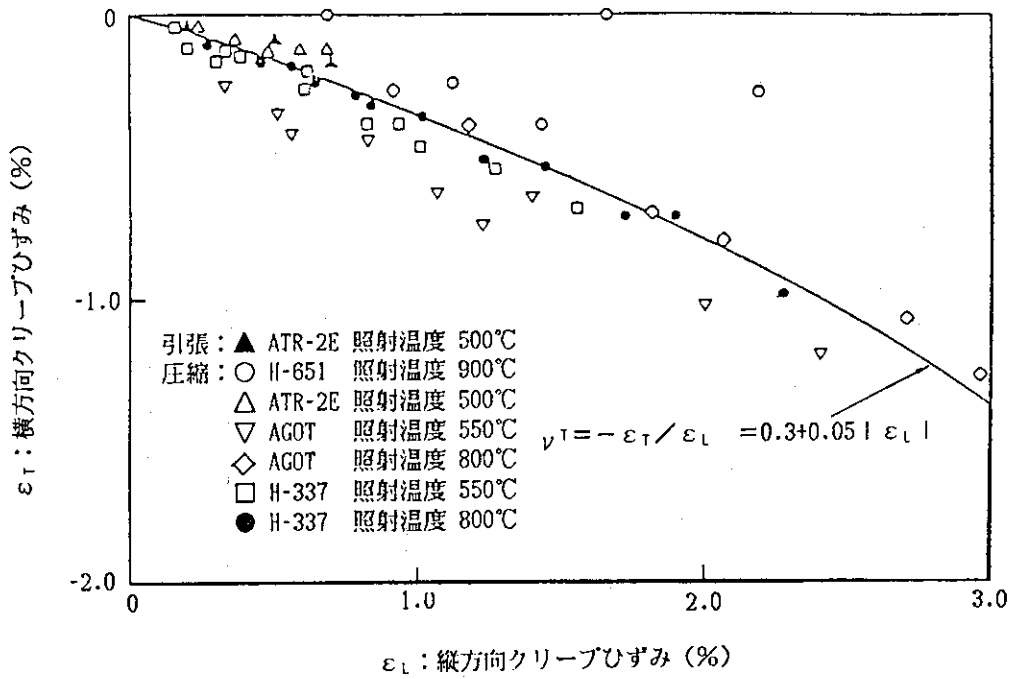


(2) 圧縮

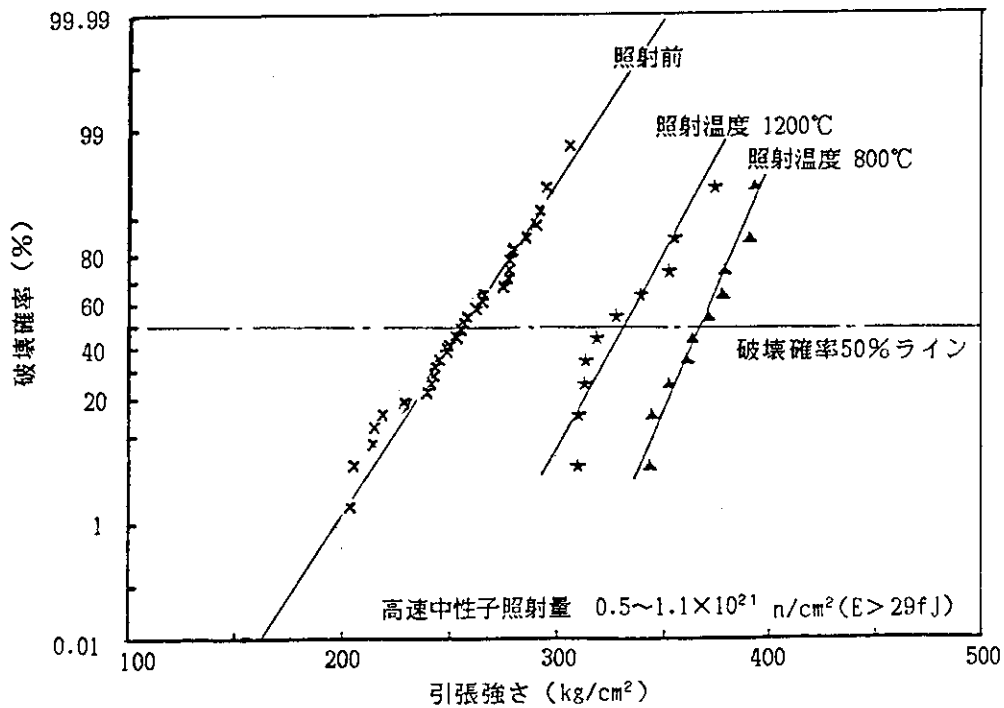


(1) 引張

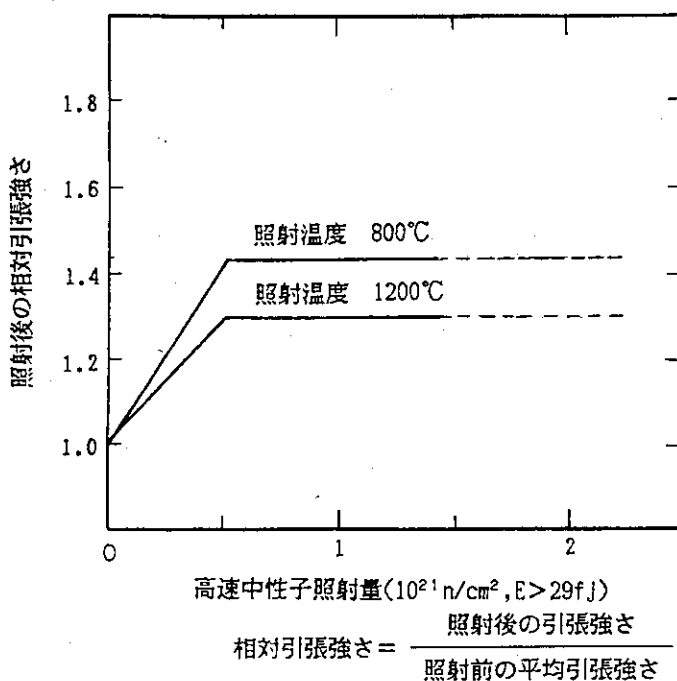
第2.3図 IG-110黒鉛の応力-ひずみ曲線の実測データと設計曲線の比較
(未酸化材, 室温)



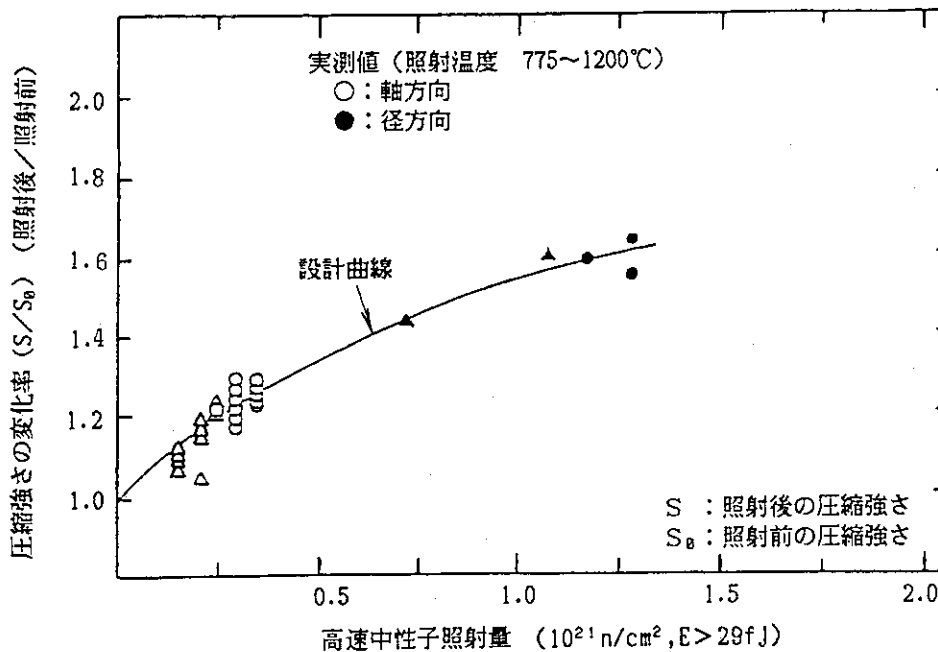
第2.4図 原子炉級黒鉛材料のクリープポアソン比 (ν^T) の海外実測データ



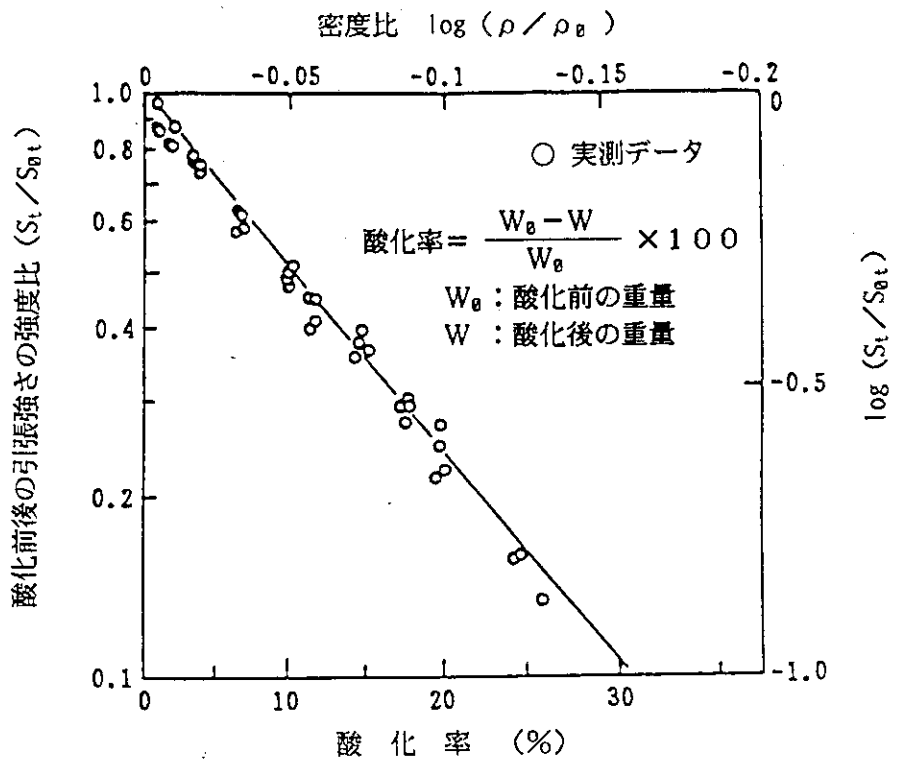
第2.5(a)図 IG-110黒鉛の照射前後の引張強さの破壊確率の評価
 (未酸化材, 室温)



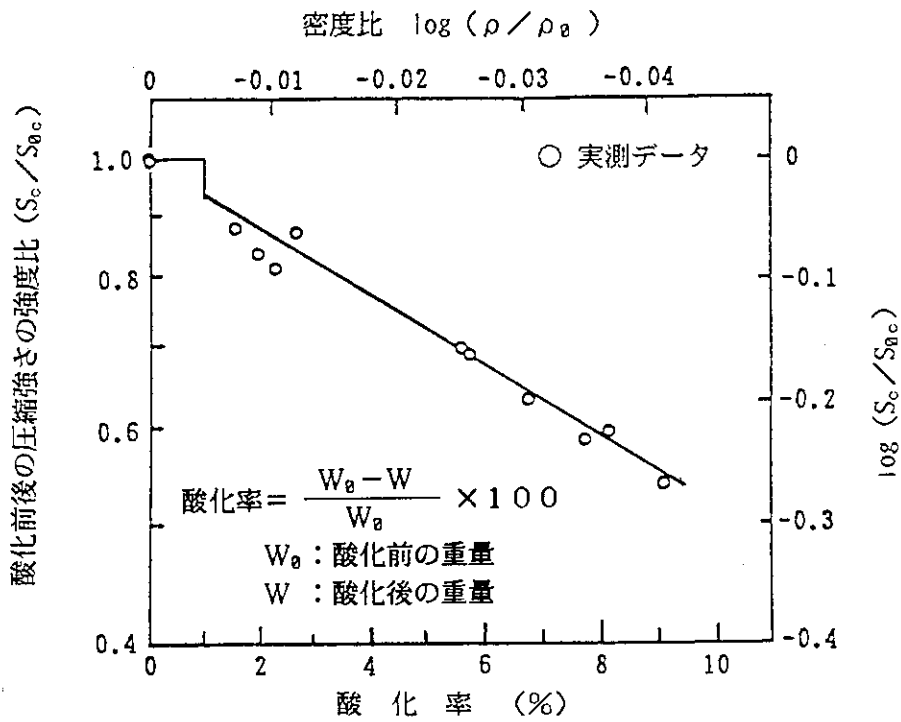
第2.5(b)図 IG-110黒鉛の照射による強度変化(未酸化材, 室温)の設計曲線



第2.5(c)図 IG-110黒鉛の照射による圧縮強さの変化率の実測データと設計曲線の比較(未酸化材, 室温)



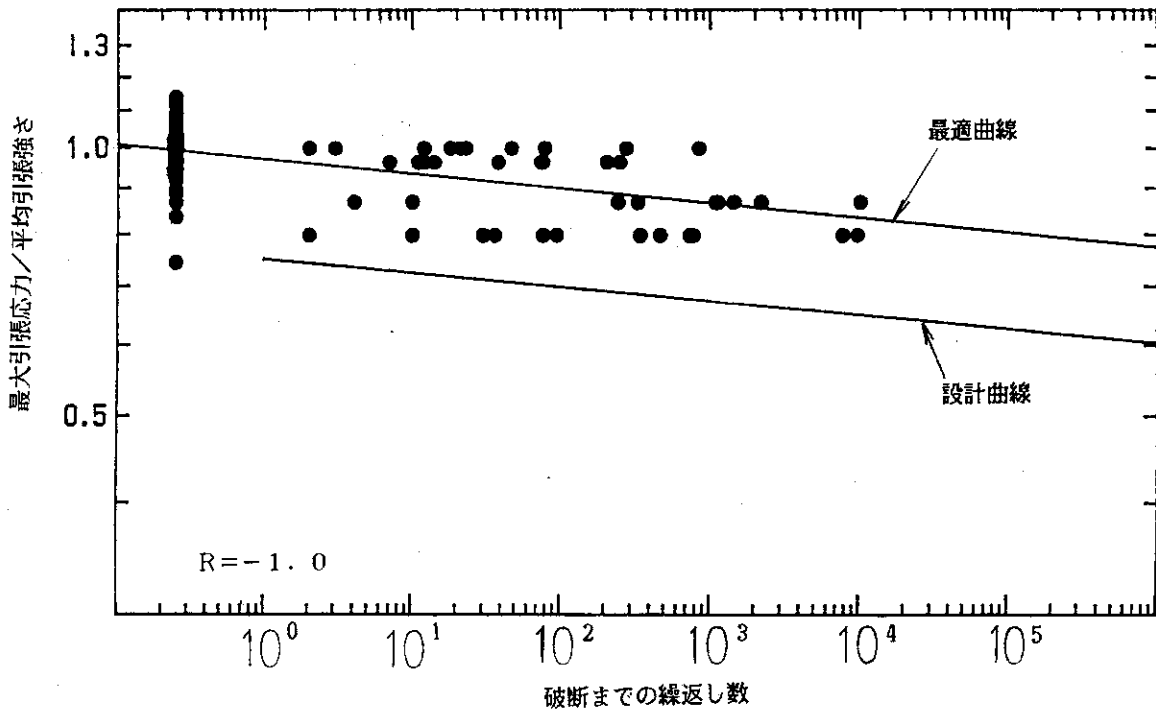
(a)引張強さ



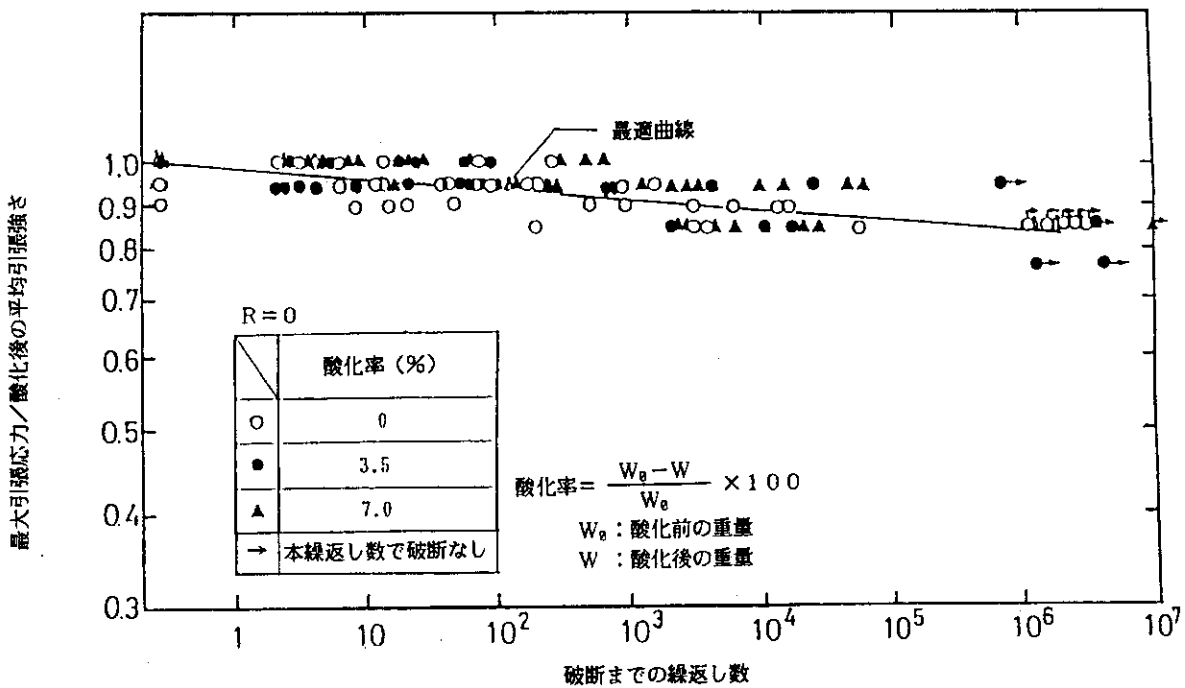
(b)圧縮強さ

第2.6図 IG-110黒鉛の酸化による強度変化の実測データ(室温)

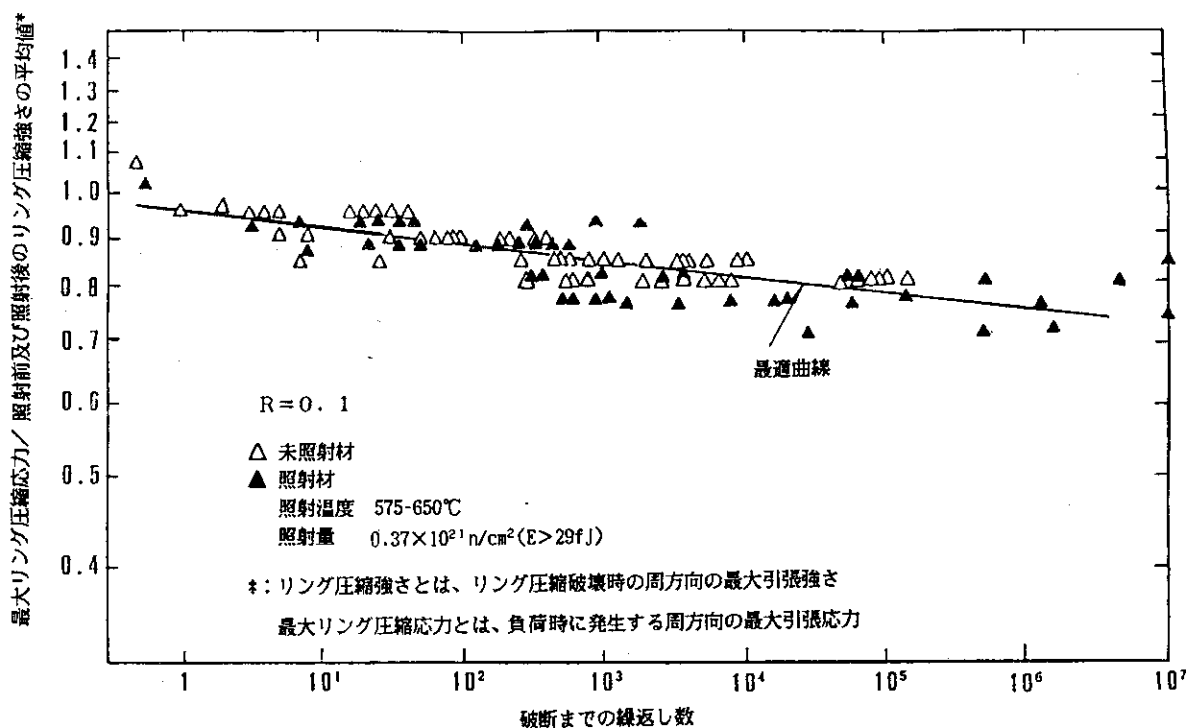
S_t, S_c : 酸化後の引張及び圧縮強さ
 S_{0t}, S_{0c} : 酸化前の引張及び圧縮強さ
 ρ, ρ_0 : 酸化後及び酸化前の密度



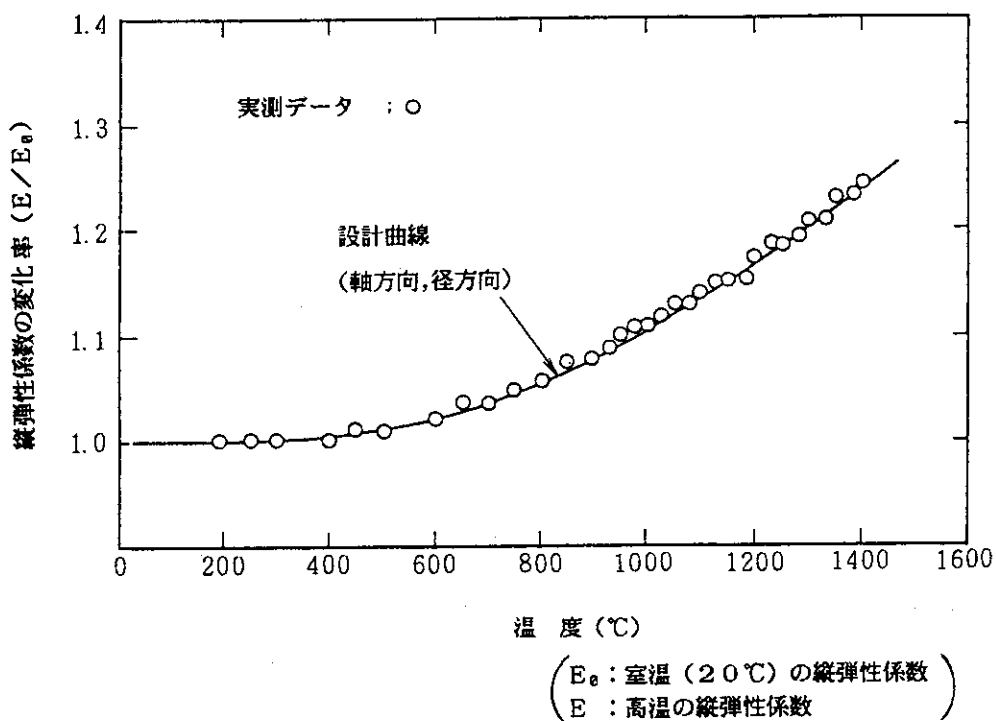
第2.7図 IG-110黒鉛の疲れ試験実測データと設計曲線の比較
(未酸化材, 室温)



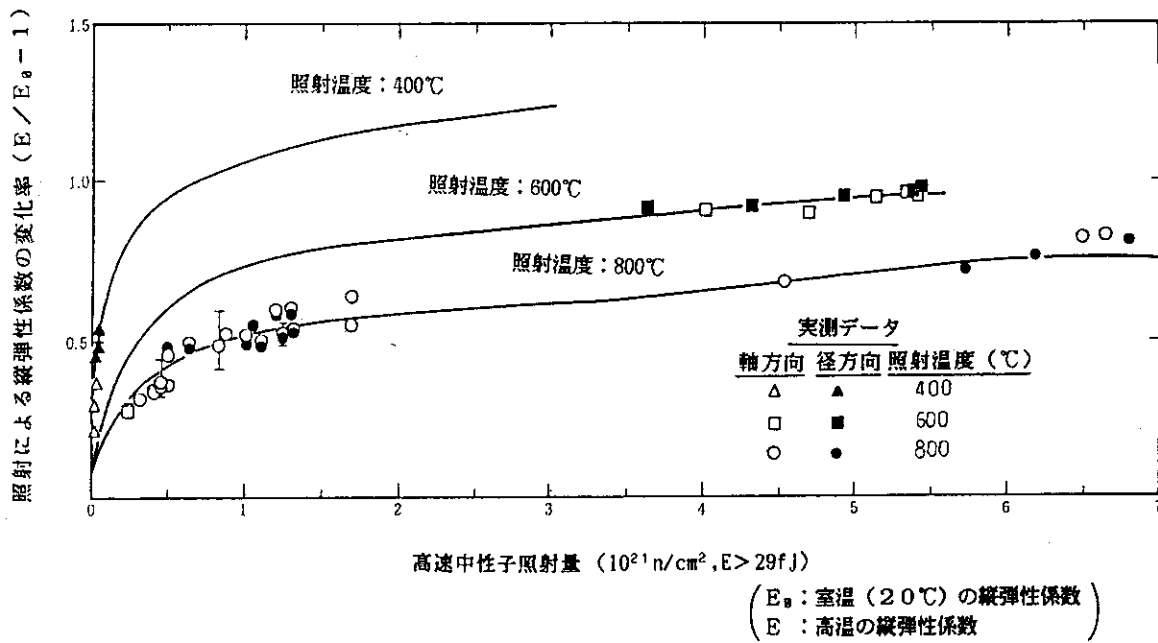
第2.8図 IG-110黒鉛の酸化材の疲れ試験結果 (室温)



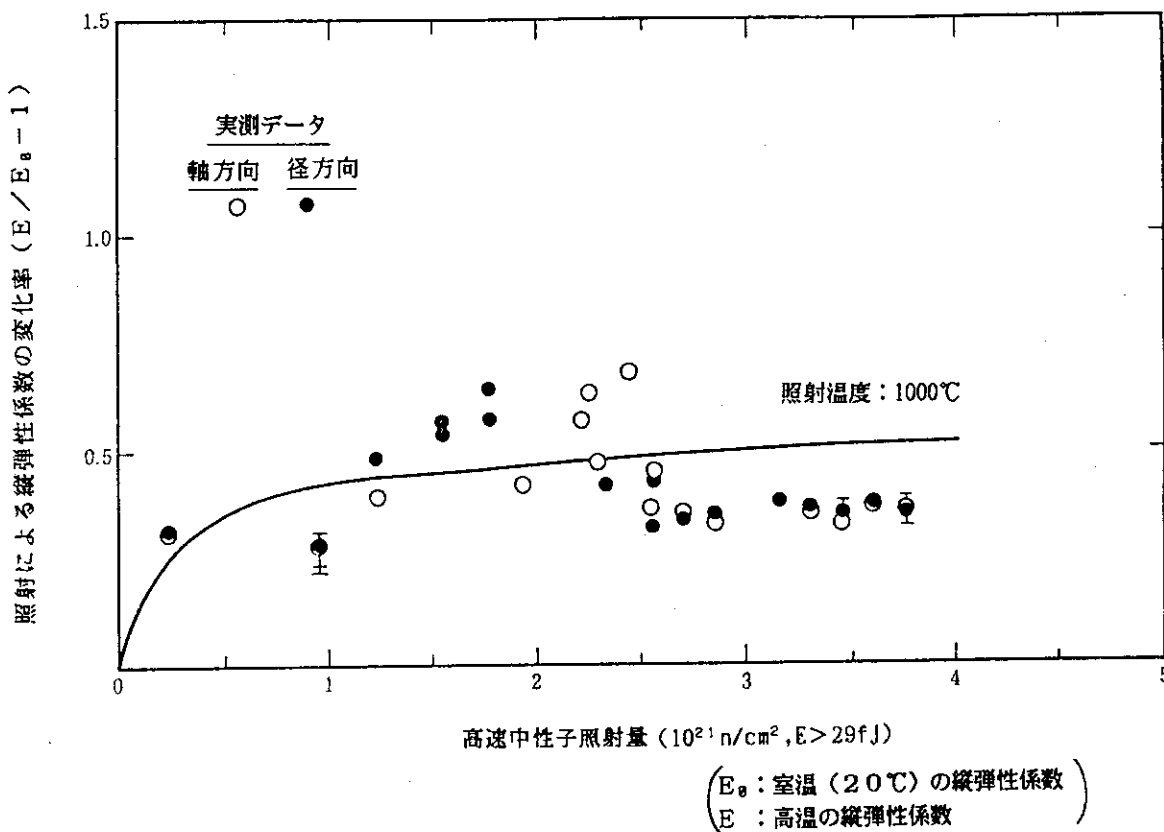
第2.9図 IG-110黒鉛の照射材の疲れ試験結果（未酸化材、室温）



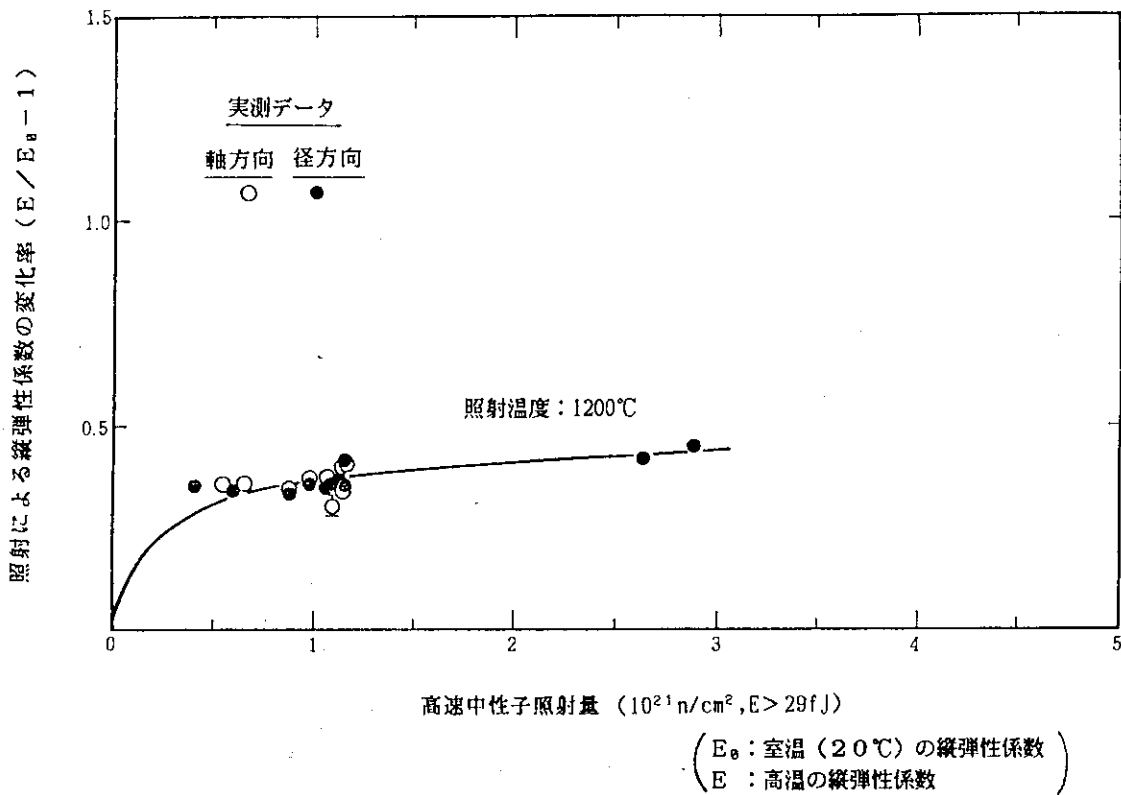
第2.10図 IG-110黒鉛の縦弾性係数の温度効果による変化率の実測データと設計曲線の比較（未照射・未酸化材）



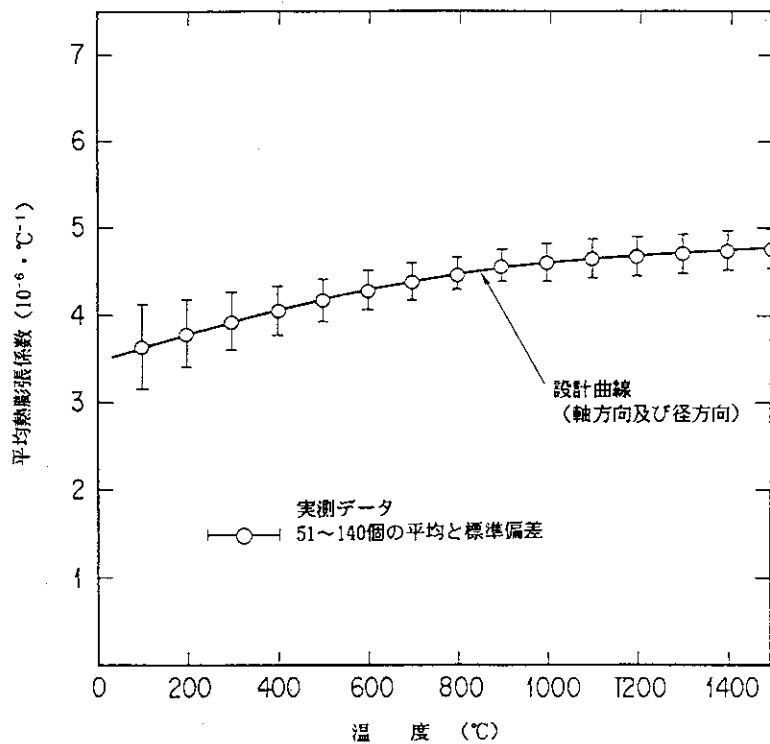
第2.11(a)図 IG-110 黒鉛の照射による縦弾性係数の変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



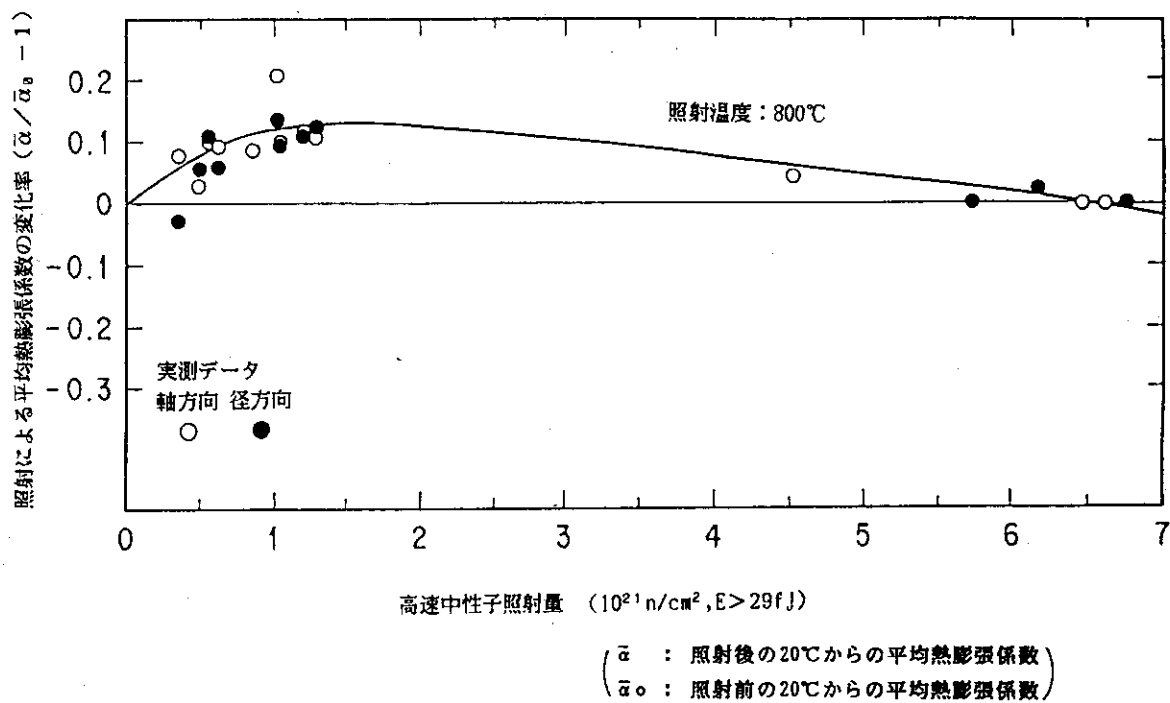
第2.11(b)図 IG-110 黒鉛の照射による縦弾性係数の変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



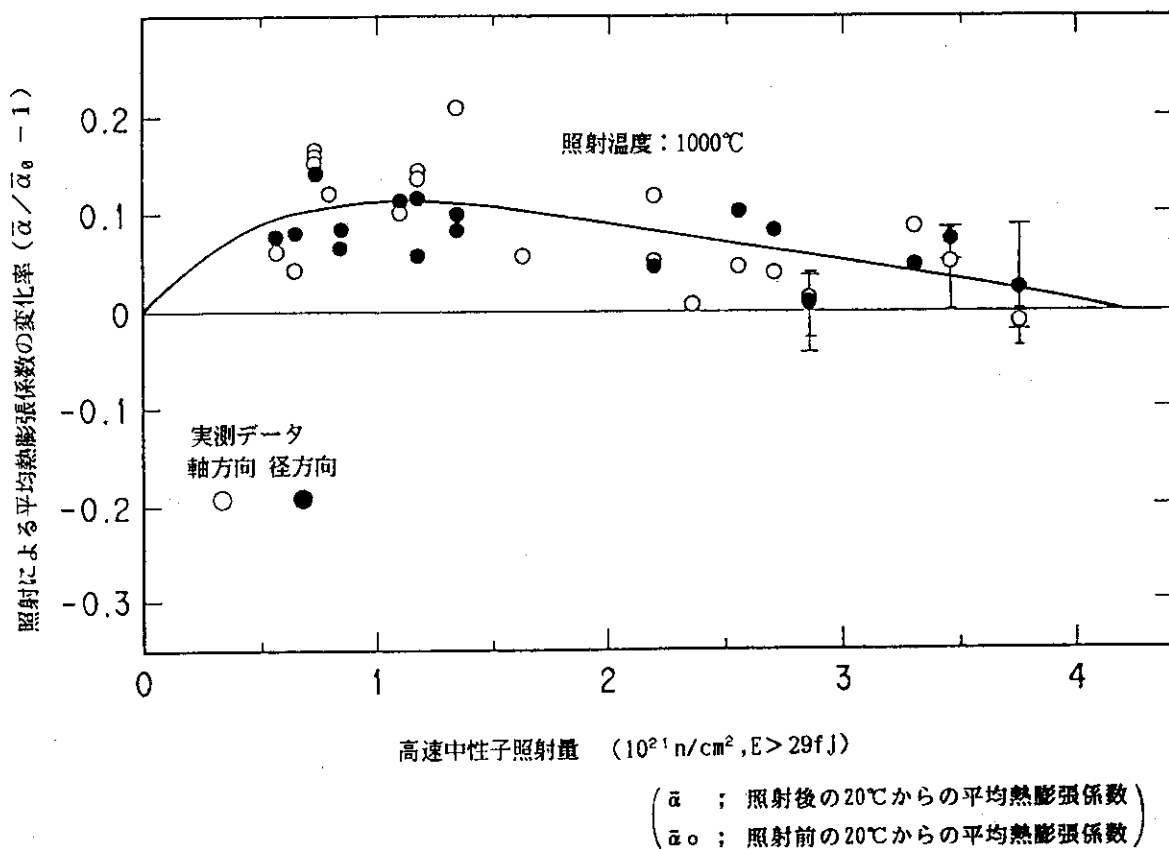
第2.11(c)図 IG-110黒鉛の照射による縦弾性係数の変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



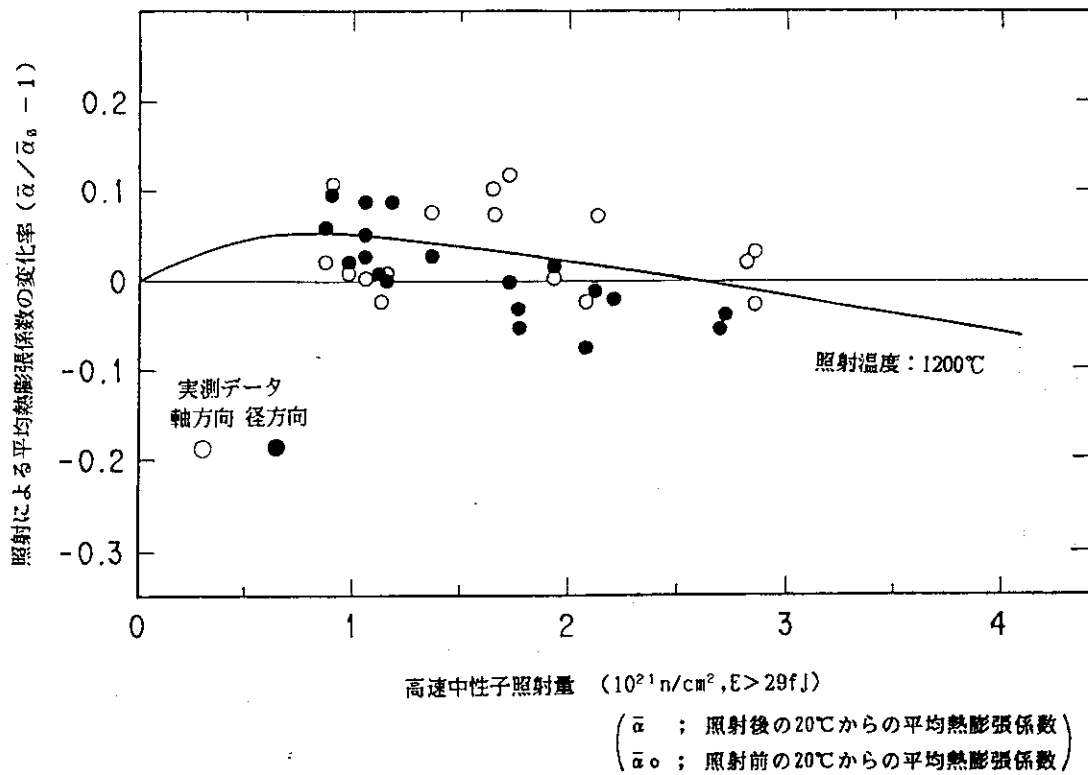
第2.12図 IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果による実測データと設計曲線 (未照射・未酸化材)



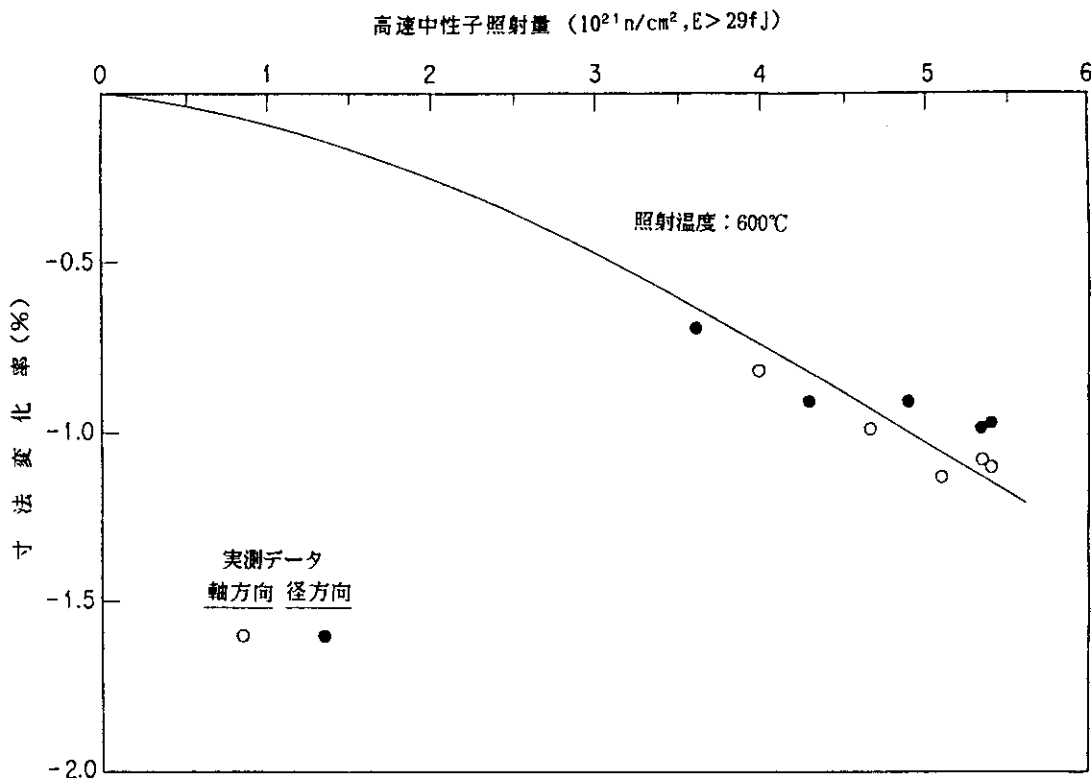
第2.13(a)図 IG-110 黒鉛の照射による平均熱膨張の変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



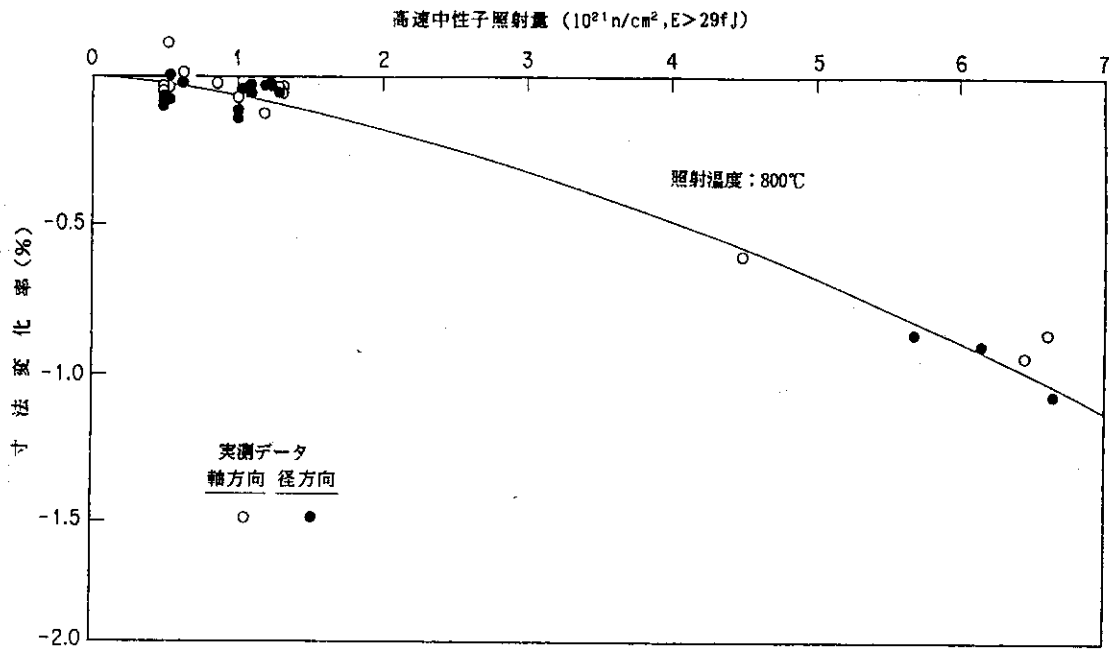
第2.13(b)図 IG-110 黒鉛の照射による平均熱膨張の変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



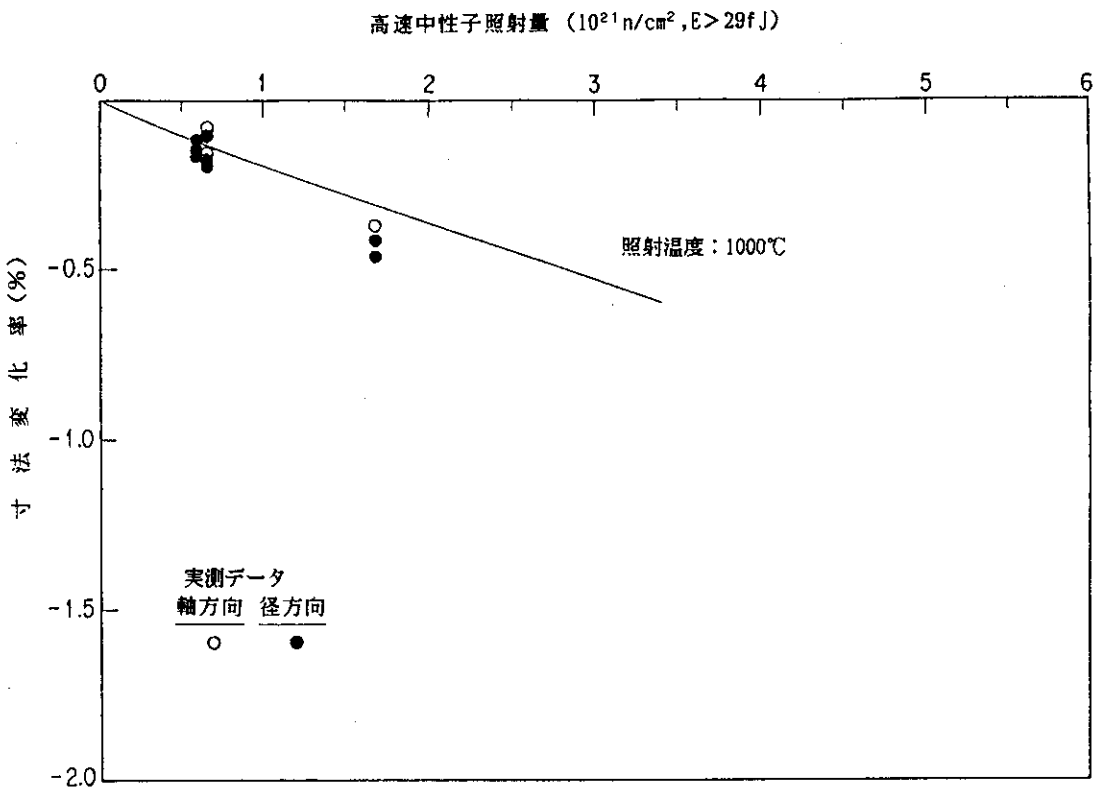
第2.13(c)図 IG-110黒鉛の照射による平均熱膨張の変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



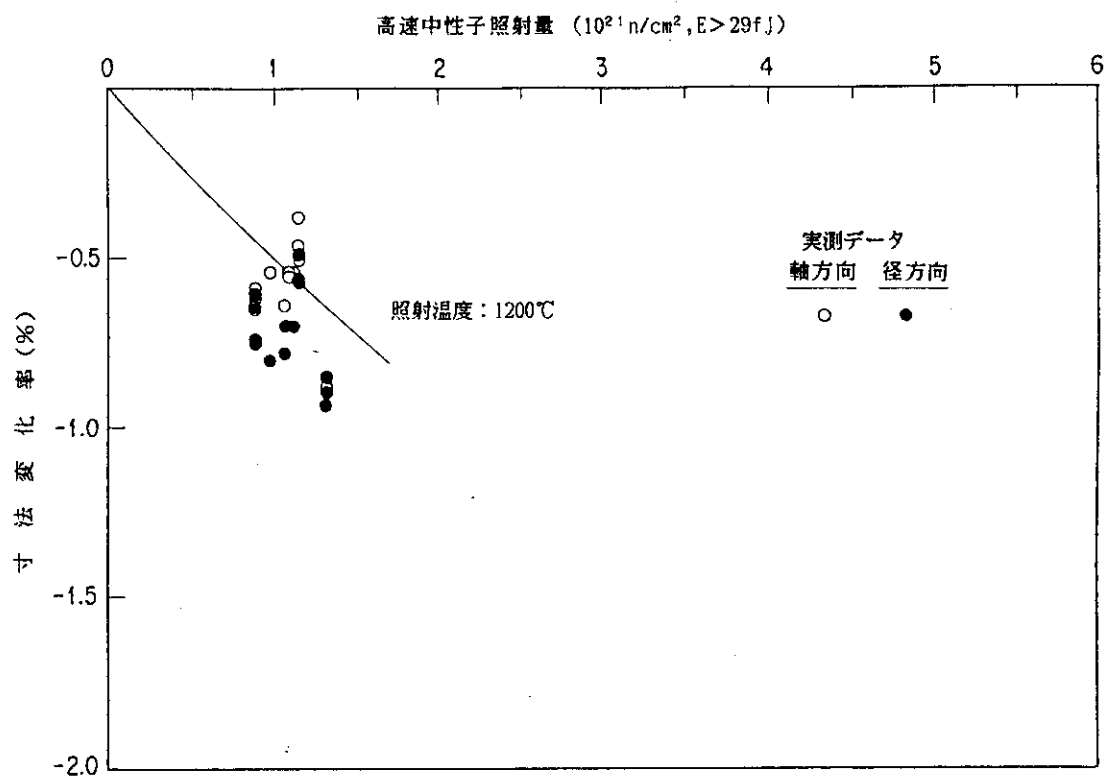
第2.14(a)図 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



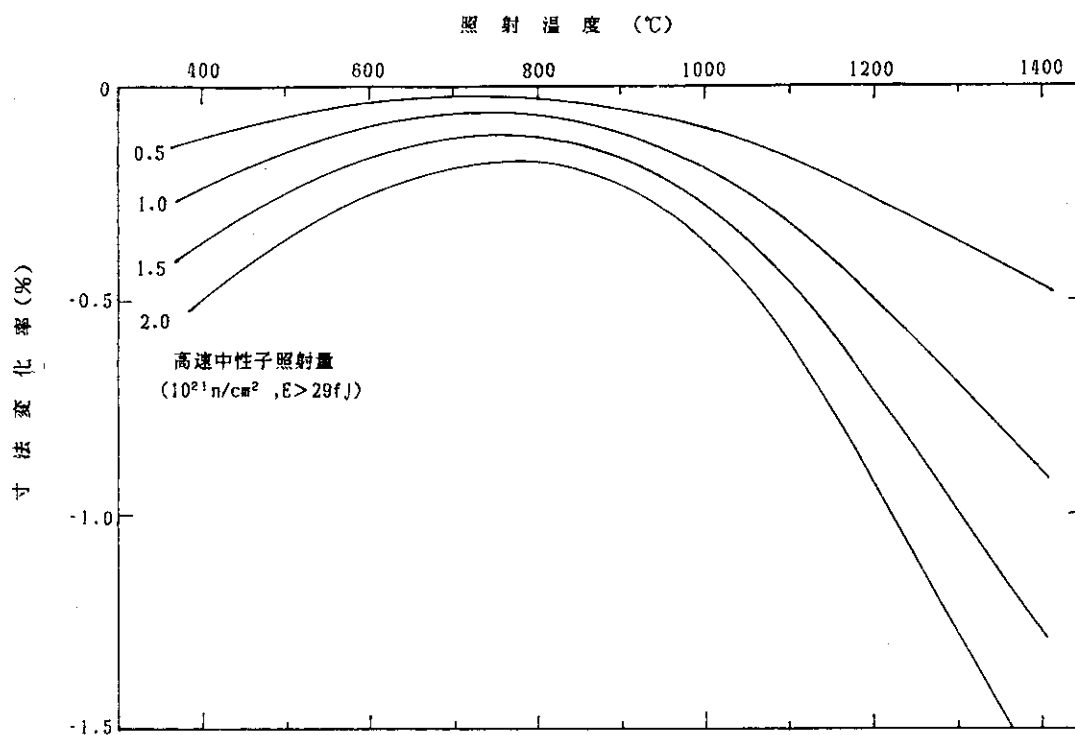
第2.14(b)図 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率の実測データと設計曲線の比較
(未酸化材)



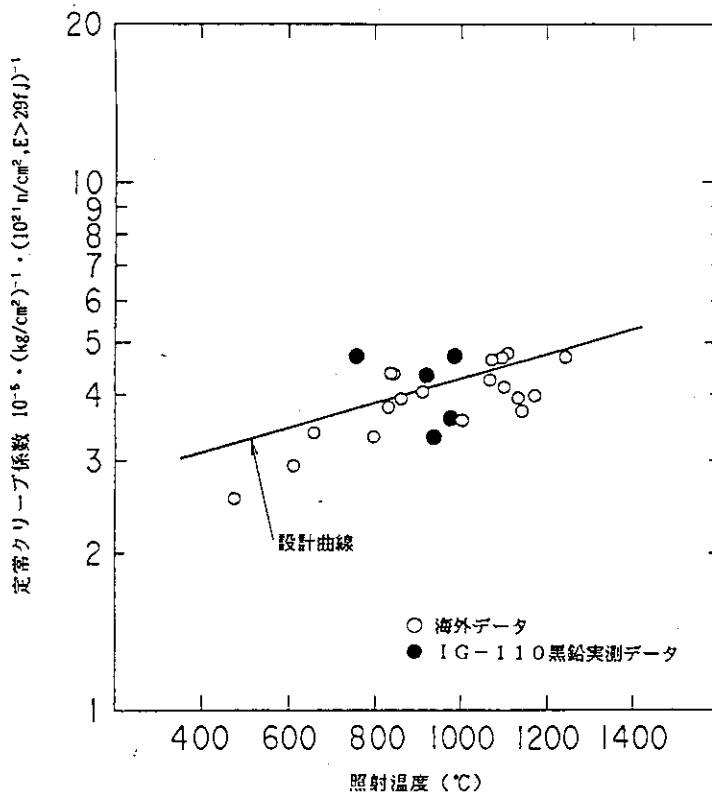
第2.14(c)図 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率の実測データと設計曲線の比較
(未酸化材)



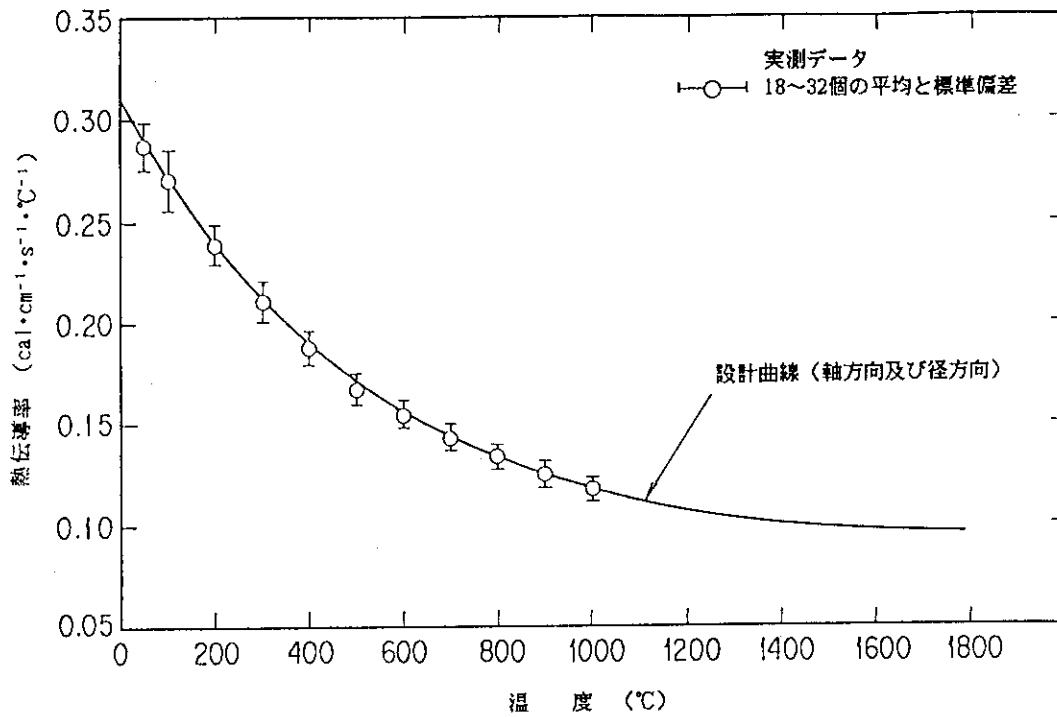
第2.14(d)図 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率の実測データと設計曲線の比較
(未酸化材)



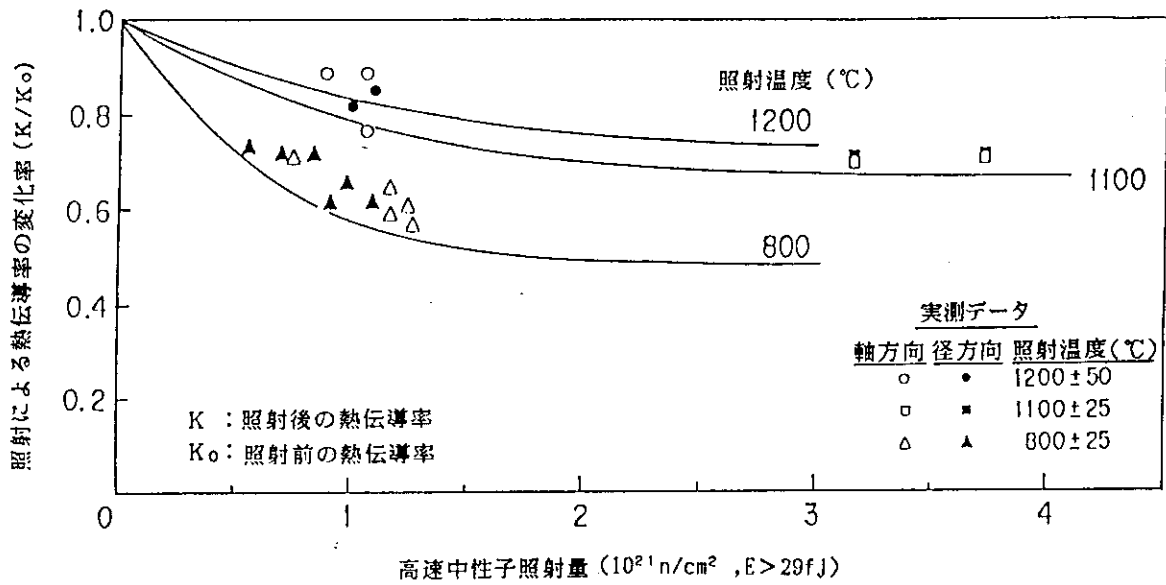
第2.15図 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率と照射温度の関係
(未酸化材)



第2.16図 IG-110黒鉛の照射による定常クリープ係数の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



第2.17図 IG-110黒鉛の熱伝導率の温度効果による実測データと設計曲線の比較 (未照射・未酸化材)



第2.18図 IG-110 黒鉛の照射前後の熱伝導率の変化率(K/K_0)の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)

3. 結言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の構造設計では、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」で規定している設計データを用いる。本設計データについて、炉心黒鉛構造設計方針策定後の材料データの新たなる取得により、設計データの見直しを行っている。実際の炉心黒鉛構造物の設計に本設計データを適用するに際しては、これらの改定も含めてその内容を明確にしておく必要がある。そのため、炉心黒鉛構造物の設計用データの設定方法について、本方針策定後の材料データ取得による変更も含めて解説した。なお、ここで規定している設計データは、新たなる材料データの取得等の最新の知見により随時見直されるべきものである。

謝辞

本報をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三次長、HTTR原子炉開発室田中利幸室長、高温工学部高温材料強度研究室衛藤基邦室長、荒井長利主任研究員に深く感謝致します。また、実験データを御提示頂いた高温工学部の高温材料強度研究室及び燃料材料工学部の界面工学研究室の関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 斎藤伸三他、日本原子力学会誌、Vol. 32, No. 9, 847 (1990)
- (2) 高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針, JAERI-M 89-006 (1989)
- (3) 荒井他（原研）、私信（非公開資料）(1989)
- (4) 黒鉛構造設計基準検討ワーキンググループ（原研）、私信（非公開資料）(1986)
- (5) 佐藤他、日本材料強度学会誌、Vol. 20, No. 3, 99 (1985)
- (6) G. Jouquet et al., High temp.-high press., Vol. 9, 151 (1977)

3. 結言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の構造設計では、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」で規定している設計データを用いる。本設計データについて、炉心黒鉛構造設計方針策定後の材料データの新たなる取得により、設計データの見直しを行っている。実際の炉心黒鉛構造物の設計に本設計データを適用するに際しては、これらの改定も含めてその内容を明確にしておく必要がある。そのため、炉心黒鉛構造物の設計用データの設定方法について、本方針策定後の材料データ取得による変更も含めて解説した。なお、ここで規定している設計データは、新たなる材料データの取得等の最新の知見により随時見直されるべきものである。

謝辞

本報をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三次長、HTTR原子炉開発室田中利幸室長、高温工学部高温材料強度研究室衛藤基邦室長、荒井長利主任研究員に深く感謝致します。また、実験データを御提示頂いた高温工学部の高温材料強度研究室及び燃料材料工学部の界面工学研究室の関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 斎藤伸三他、日本原子力学会誌、Vol. 32, No. 9, 847 (1990)
- (2) 高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針, JAERI-M 89-006 (1989)
- (3) 荒井他（原研）、私信（非公開資料）(1989)
- (4) 黒鉛構造設計基準検討ワーキンググループ（原研）、私信（非公開資料）(1986)
- (5) 佐藤他、日本材料強度学会誌、Vol. 20, No. 3, 99 (1985)
- (6) G. Jouquet et al., High temp.-high press., Vol. 9, 151 (1977)

3. 結言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の構造設計では、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」で規定している設計データを用いる。本設計データについて、炉心黒鉛構造設計方針策定後の材料データの新たなる取得により、設計データの見直しを行っている。実際の炉心黒鉛構造物の設計に本設計データを適用するに際しては、これらの改定も含めてその内容を明確にしておく必要がある。そのため、炉心黒鉛構造物の設計用データの設定方法について、本方針策定後の材料データ取得による変更も含めて解説した。なお、ここで規定している設計データは、新たなる材料データの取得等の最新の知見により随時見直されるべきものである。

謝辞

本報をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部齋藤伸三次長、HTTR原子炉開発室田中利幸室長、高温工学部高温材料強度研究室衛藤基邦室長、荒井長利主任研究員に深く感謝致します。また、実験データを御提示頂いた高温工学部の高温材料強度研究室及び燃料材料工学部の界面工学研究室の関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 齋藤伸三他、日本原子力学会誌、Vol. 32, No. 9, 847 (1990)
- (2) 高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針, JAERI-M 89-006 (1989)
- (3) 荒井他（原研）、私信（非公開資料）(1989)
- (4) 黒鉛構造設計基準検討ワーキンググループ（原研）、私信（非公開資料）(1986)
- (5) 佐藤他、日本材料強度学会誌、Vol. 20, No. 3, 99 (1985)
- (6) G. Jouquet et al., High temp.-high press., Vol. 9, 151 (1977)

- (7) M. F. Oconner et al., Carbon 80, 586 (1980)
- (8) R. J. Price, GA-A16402 (1981)
- (9) 荒井他 (原研)、私信 (非公開資料) (1990)
- (10) 田中他 (原研)、私信 (非公開資料) (1983)
- (11) G. B. Engle, GA-A14690 (1977)
- (12) M. Eto and F. B. Growcock, NUREG/CR-2316
- (13) 石山他、日本原子力学会誌、Vol. 29, No. 7, 651 (1987)
- (14) 石山他 (原研)、私信 (非公開資料) (1985)
- (15) 実験炉用黒鉛銘柄選定ワーキンググループ (原研)、私信 (非公開資料) (1981)
- (16) 小西他 (原研)、私信 (非公開資料) (1987)
- (17) 石山他、JAERI-M 86-145 (1986)
- (18) 野村他、JAERI-M 8068 (1979)
- (19) D. Mindermann, HBK-TN-08/83 (1983) (非公開文献)
- (20) 日本原子力研究所動力炉開発・安全研究管理部 (原研)、私信 (非公開資料) (1982)
- (21) 衛藤他 (原研)、私信 (非公開資料) (1986)
- (22) 衛藤他 (原研)、私信 (非公開資料) (1987)
- (23) 荒井他 (原研)、私信 (非公開資料) (1989)
- (24) 奥 他 (原研)、私信 (非公開資料) (1987)
- (25) 松尾 (原研)、私信 (非公開資料) (1988)
- (26) 依田他 (原研)、私信 (非公開資料) (1983)
- (27) 松尾、JAERI-M 87-207 (1988)
- (28) H. J. Veringa et al., RCN-75-112 (1975)
- (29) 松尾 (原研)、私信 (非公開資料) (1987)
- (30) R. J. Price, Gulf-GA-A12615 (LTR-GA-3) (1973)
- (31) GA社, GLP-5588 (1978)

付録 1 「炉心黒鉛構造設計方針」で規定する設計データ

H T T R の「炉心黒鉛構造設計方針」では以下の設計用データを規定している。

別表第 1	I G - 1 1 0 黒鉛の基準強さ (未照射材及び未酸化材、室温)
別表第 2	I G - 1 1 0 黒鉛の縦弾性係数及びポアソン比 (未照射材及び未酸化材、室温)
別表第 3	I G - 1 1 0 黒鉛の遷移クリープパラメータ及び クリープポアソン比
別図第 1	I G - 1 1 0 黒鉛の照射による強度変化 (未酸化材、室温)
別図第 2	I G - 1 1 0 黒鉛の酸化による強度変化 (未照射材、室温)
別図第 3	I G - 1 1 0 黒鉛の設計疲れ曲線 (未照射材及び未酸化材、室温)
別図第 4	I G - 1 1 0 黒鉛の縦弾性係数の温度効果 (未照射材及び未酸化材)
別図第 5	I G - 1 1 0 黒鉛の縦弾性係数の照射効果 (未酸化材)
別図第 6	I G - 1 1 0 黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果 (未照射材及び未酸化材)
別図第 7	I G - 1 1 0 黒鉛の平均熱膨張係数の照射効果 (未酸化材)
別図第 8	I G - 1 1 0 黒鉛の照射による寸法変化率 (未酸化材)
別図第 9	I G - 1 1 0 黒鉛の照射による定常クリープ係数 (未酸化材)
別図第 1 0	I G - 1 1 0 黒鉛の熱伝導率の温度効果 (未照射材及び未酸化材)

別図第11 IG-110 黒鉛の熱伝導率の照射効果

(未酸化材)

なお、上記設計用データの関係式をまとめて付録2に示す。

別表第1 IG-110黒鉛の基準強さ
(未照射材及び未酸化材, 室温)

	基準強さ (kg/cm ²)
引張強さ	198
圧縮強さ	626

ただし、機能上の重要度が低くかつ高応力状態にさらされない黒鉛構造物に対しては、実用上差し支えのない範囲で基準強さを下げること（強度のクラス分け）ができる。また、今後の強度データにより基準強さを変更することもできる。

別表第2 IG-110黒鉛の縦弾性係数及びポアソン比
(未照射材及び未酸化材, 室温)

縦弾性係数 (kg/cm ²)	8.1×10^4
ポアソン比	0.14

別表第3 IG-110黒鉛の遷移クリープパラメータ及びクリープポアソン比

遷移クリープパラメータ

$$a = 1 \times 10^{-5} (\text{kg/cm}^2)^{-1}$$

$$b = 4.5 \quad (10^{21} \text{n/cm}^2, E > 29 \text{fJ})^{-1}$$

ただし、 a 、 b は下記関係式における定数

$$\varepsilon^T = a \cdot \sigma [1 - \exp(-b \cdot \Phi)]$$

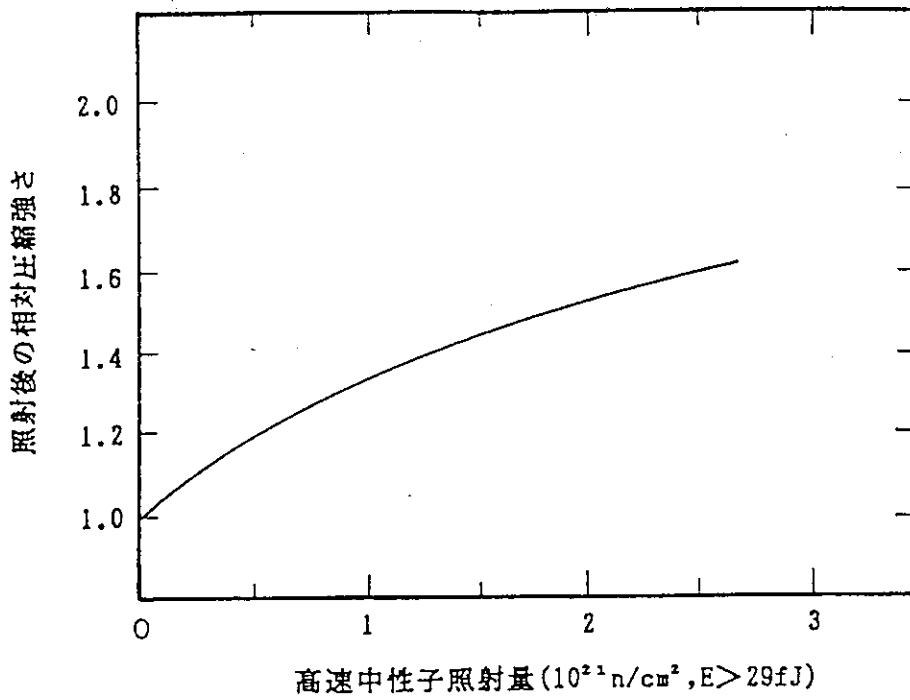
ここで、 ε^T : 遷移クリープひずみ

σ : 応力 (kg/cm^2)

Φ : 高速中性子照射量 ($10^{21} \text{n/cm}^2, E > 29 \text{fJ}$)

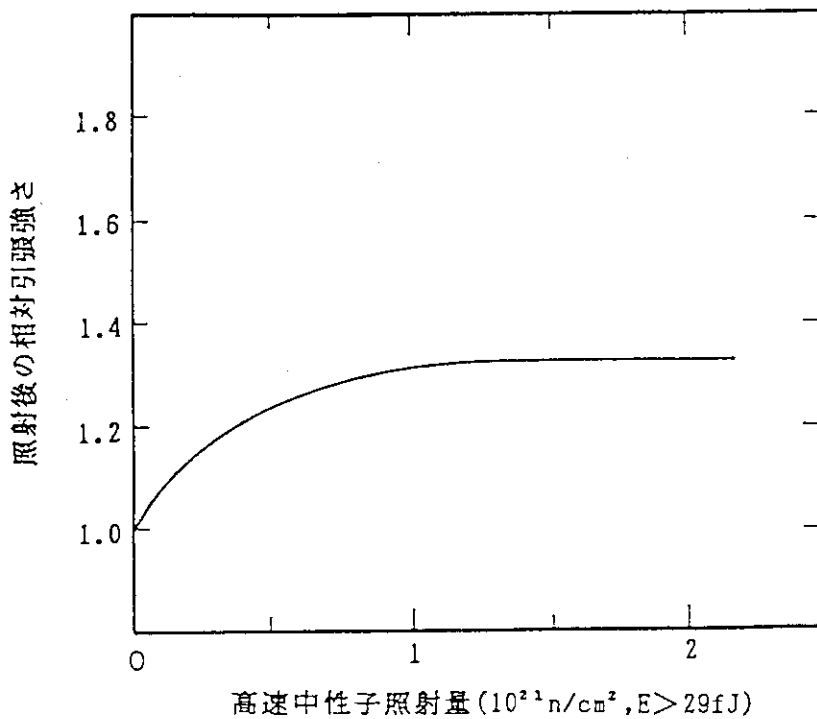
クリープポアソン比 (ν^T)

$$\nu^T = 0.30$$



$$\text{相対圧縮強さ} = \frac{\text{照射後の圧縮強さ}}{\text{照射前の平均圧縮強さ}}$$

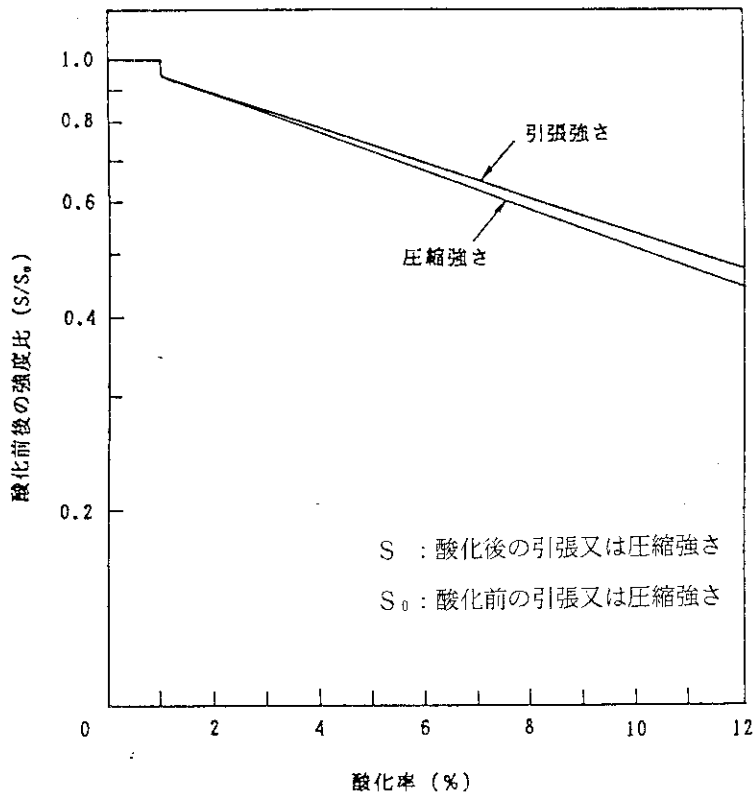
(a) 圧縮強さ



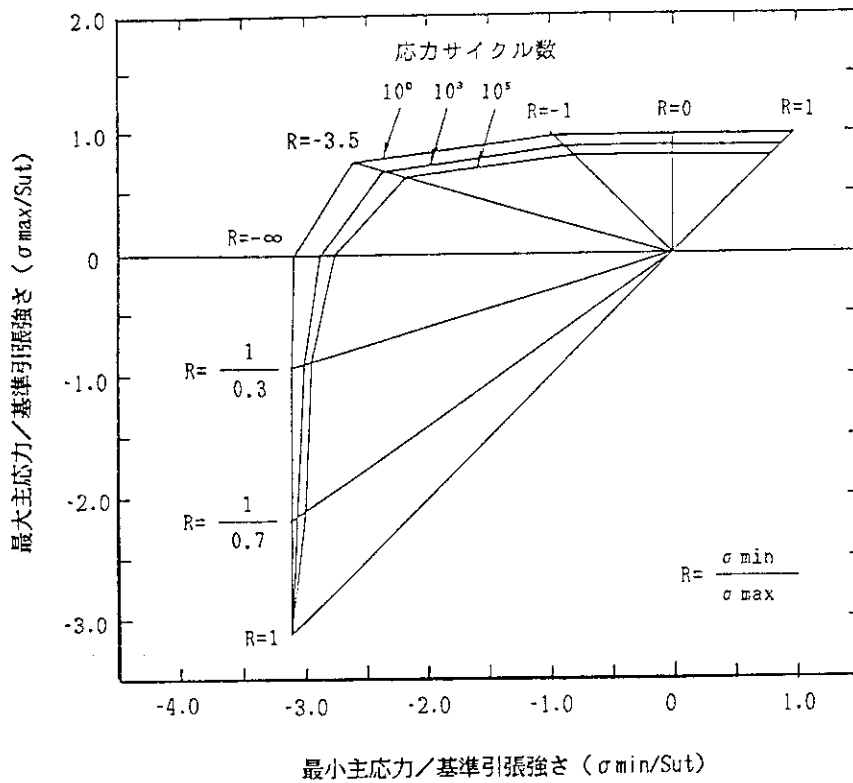
$$\text{相対引張強さ} = \frac{\text{照射後の引張強さ}}{\text{照射前の平均引張強さ}}$$

(b) 引張強さ

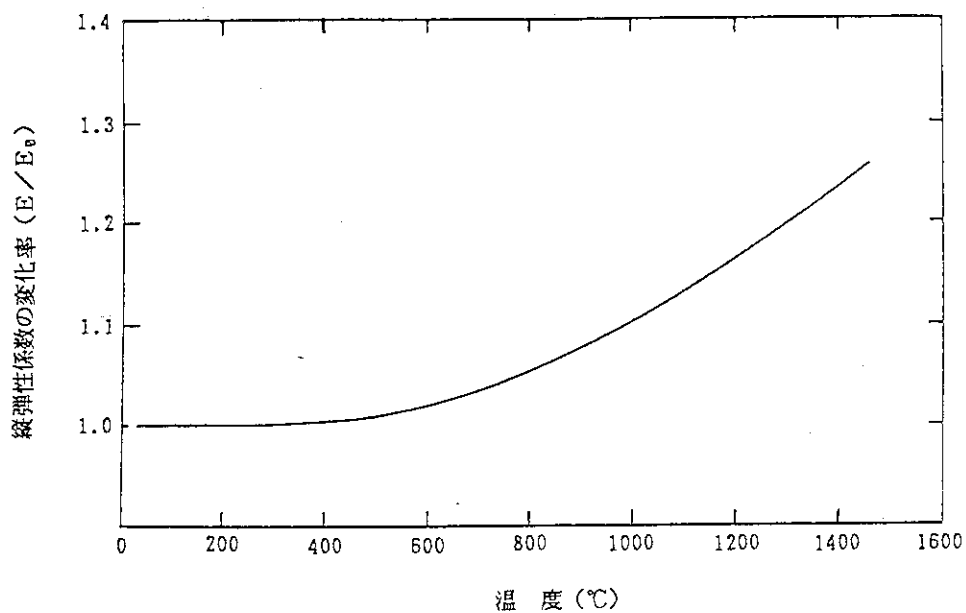
別図第1 IG-110 黒鉛の照射による強度変化



別図第2 IG-110黒鉛の酸化による強度変化
 (未照射材, 室温)

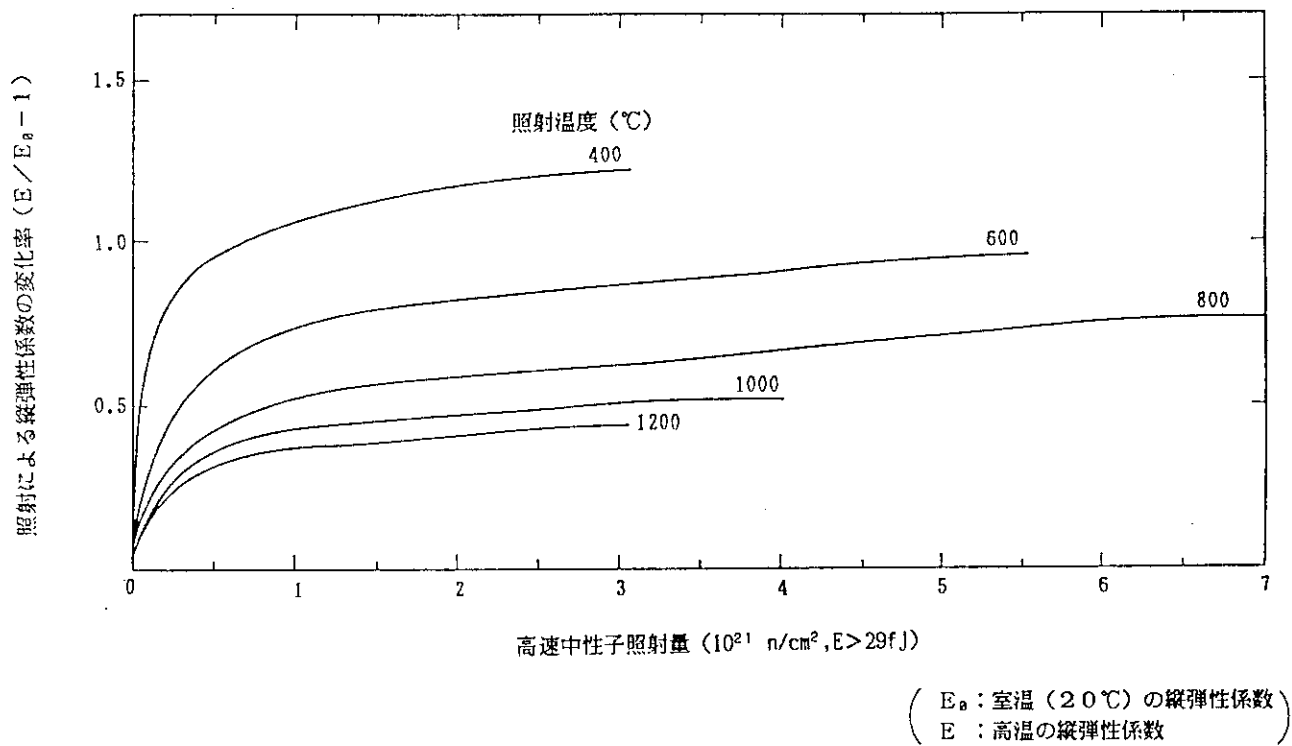


別図第3 IG-110黒鉛の設計疲れ曲線 (未照射材及び未酸化材, 室温)



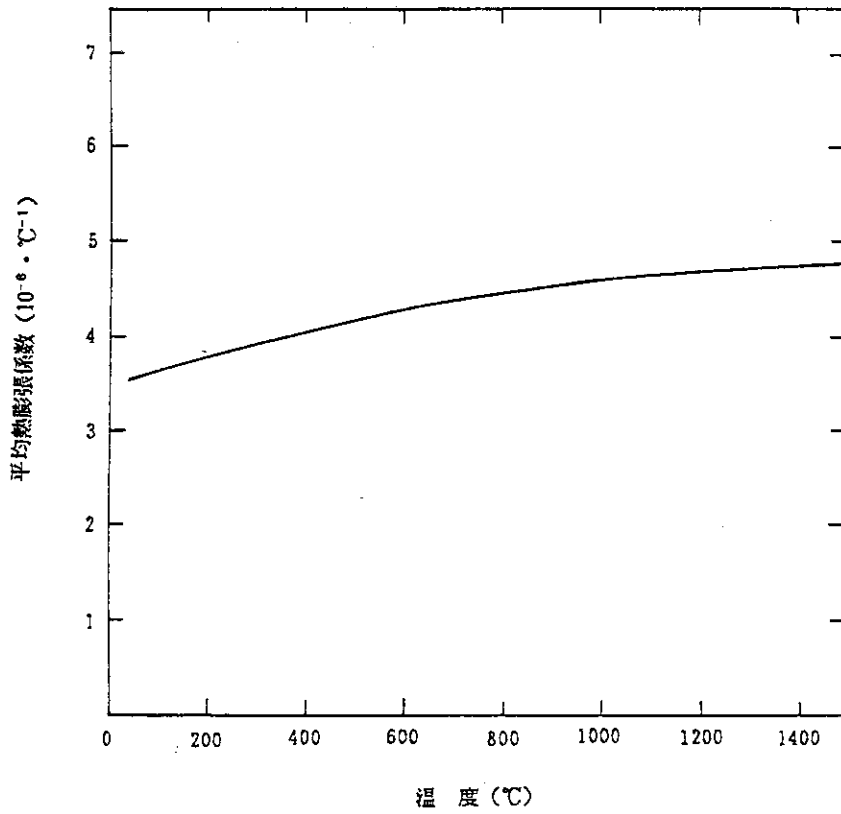
(E₀ : 室温 (20°C) の縦弾性係数)
 (E : 高温の縦弾性係数)

別図第4 IG-110黒鉛の縦弾性係数の温度効果 (未照射材及び未酸化材)

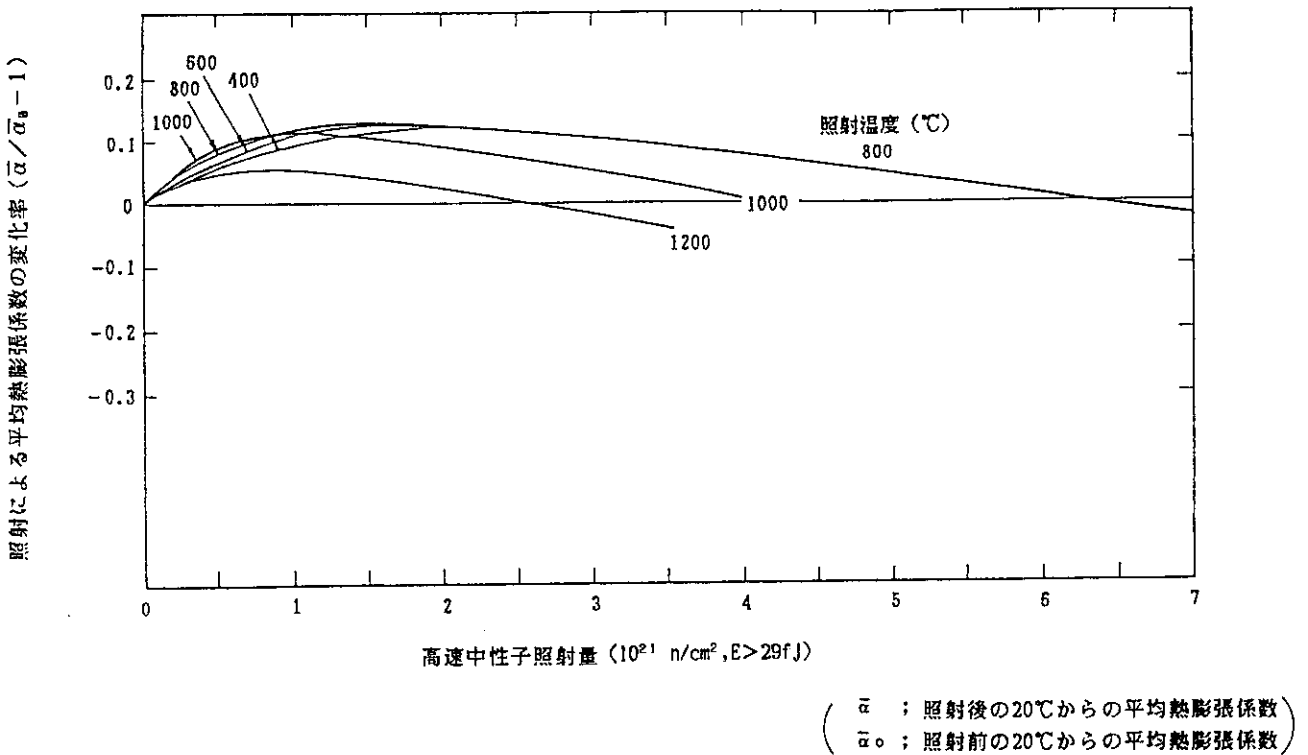


(E₀ : 室温 (20°C) の縦弾性係数)
 (E : 高温の縦弾性係数)

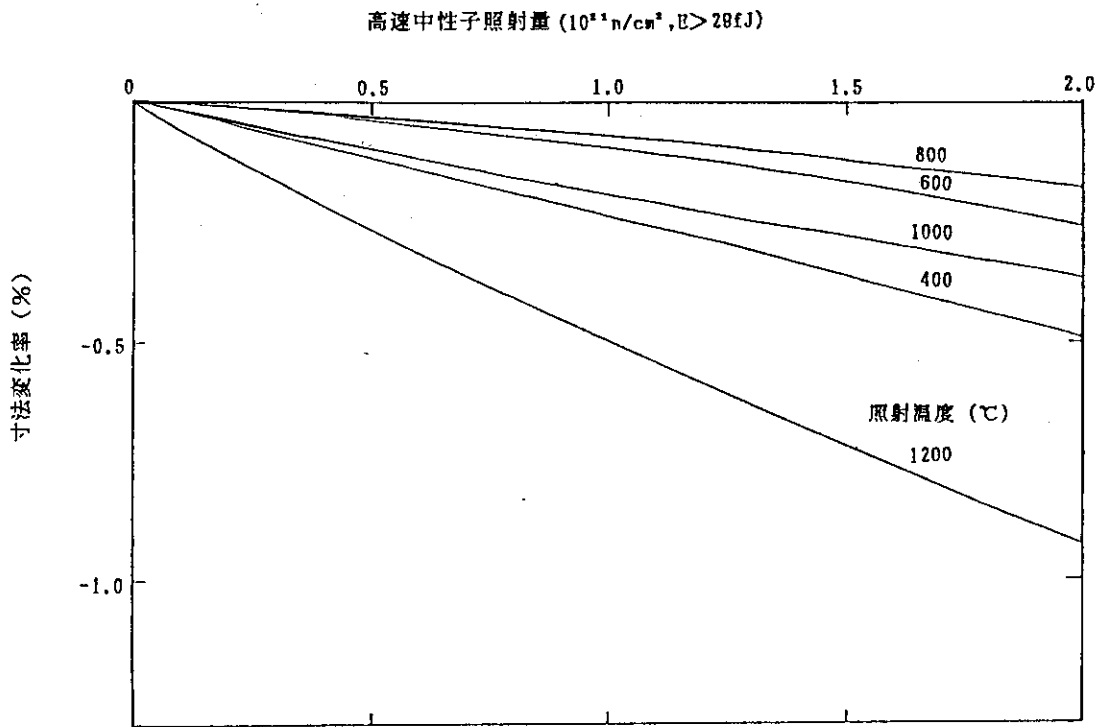
別図第5 IG-110黒鉛の縦弾性係数の照射効果 (未酸化材)



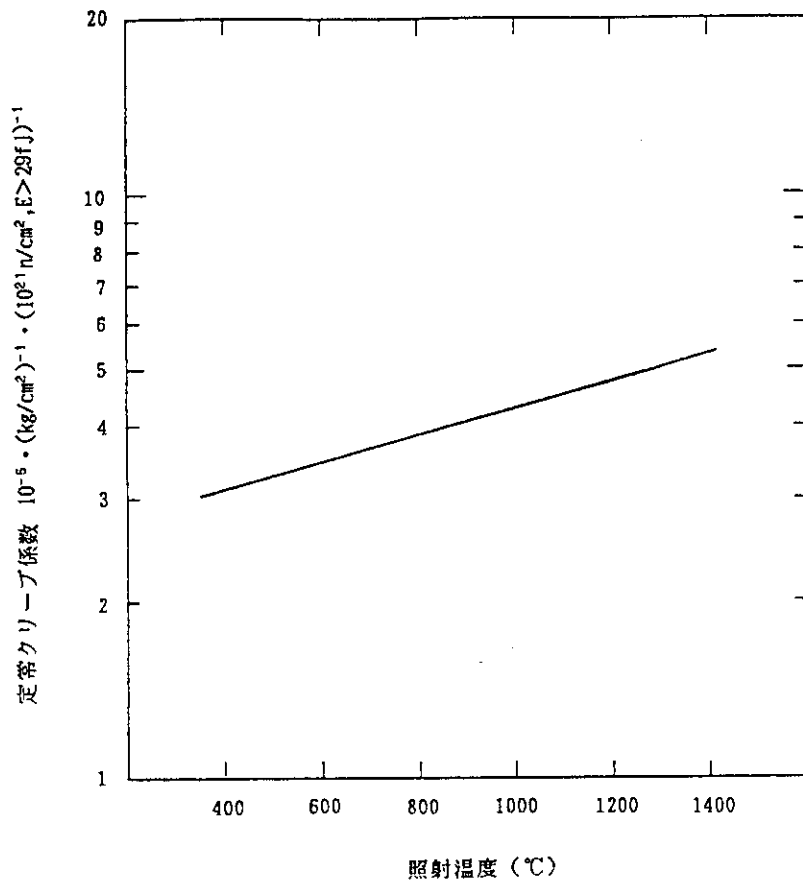
別図第6 IG-110 黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果 (未照射材及び未酸化材)



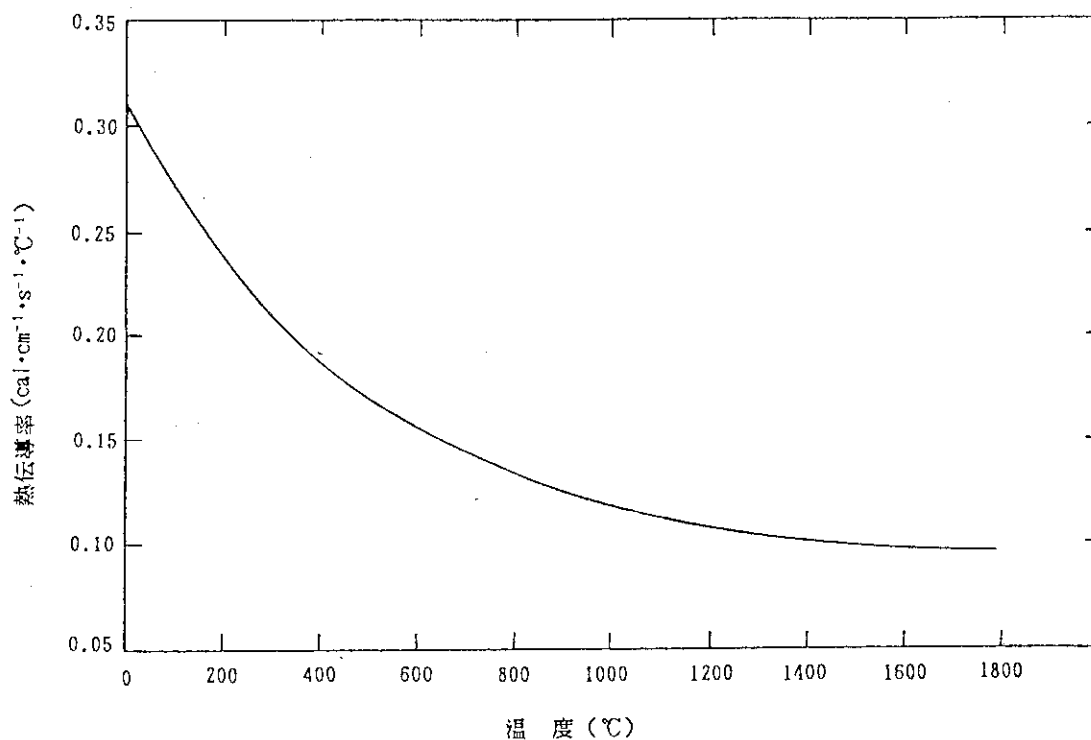
別図第7 IG-110 黒鉛の平均熱膨張係数の照射効果 (未酸化材)



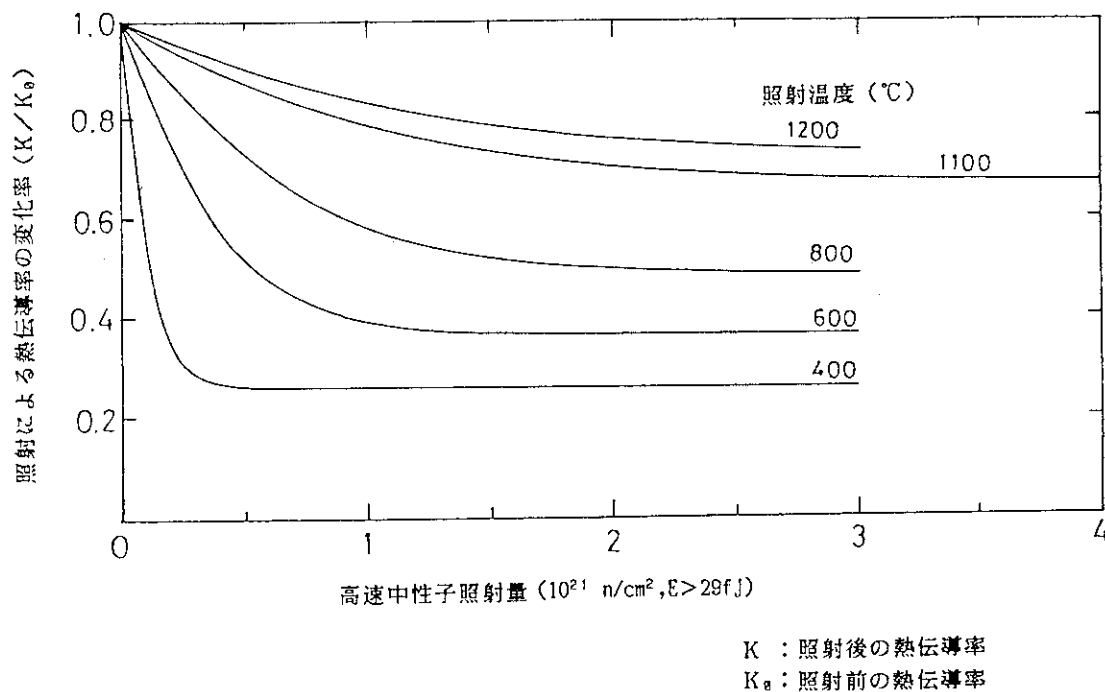
別図第8 IG-110黒鉛の照射による寸法変化率 (未酸化材)



別図第9 IG-110黒鉛の照射による定常クリープ係数 (未酸化材)



別図第10 IG-110 黒鉛の熱伝導率の温度効果 (未照射材及び未酸化材)



別図第11 IG-110 黒鉛の熱伝導率の照射効果 (未酸化材)

付録 2 設計用データの関係式

- 付表 - 1 縦弾性係数の温度効果関係式
- 付表 - 2 縦弾性係数の照射効果関係式
- 付表 - 3 平均熱膨張係数の温度効果関係式
- 付表 - 4 平均熱膨張係数の照射効果関係式
- 付表 - 5 寸法変化の照射効果関係式
- 付表 - 6 定常クリープ係数の照射効果関係式
- 付表 - 7 熱伝導率の温度効果関係式
- 付表 - 8 熱伝導率の照射効果関係式

付表-1 縦弾性係数の温度効果関係式

$$E_{(T)} = E_{20} \cdot f_{E(T)}$$

使用単位

$E_{(T)}$: 温度 T における縦弾性係数 (kg/cm^2)

E_{20} : 室温 (20°C) 時の縦弾性係数 (kg/cm^2)

$f_{E(T)}$: 温度 T における縦弾性係数の変化率

$$f_{E(T)} = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4 + C_5 \cdot T^5$$

T : 温度 ($^\circ\text{C}$)

材質	IG-110
T	$20 \leq T \leq 1700$
E_{20}	8.1×10^4
C_0	1.0
C_1	1.3328×10^{-5}
C_2	-1.5281×10^{-7}
C_3	4.4335×10^{-10}
C_4	-2.5016×10^{-13}
C_5	4.8723×10^{-17}

横弾性係数は、 $G = E / 2 (1 + \nu)$ で求める。

付表-2 縦弾性係数の照射効果関係式

$$E(T, \phi, t) = E_{(T)} \cdot [1 + \Delta E_{(T, \phi, t)}]$$

使用単位

$E(T, \phi, t)$: 照射材 (高速中性子照射量 ϕ 、照射温度 t) の
使用温度 T 時の 縦弾性係数 (kg/cm^2)

$E_{(T)}$: 未照射材の使用温度 T における縦弾性係数 (kg/cm^2)

$\Delta E_{(T, \phi, t)}$: 未照射材の室温 (20°C) に対する照射後 (高速中性子
照射量 ϕ 、照射温度 t) の縦弾性係数の変化率

$$\Delta E_{(T, \phi, t)} = [(E_{(T, \phi, t)} / E_{20}) - 1]$$

$$= [\sum_{i=1}^5 a_i \cdot (\phi^{1/2})^i]_t$$

E_{20} : 未照射材の室温 (20°C) 時の縦弾性係数 (kg/cm^2)

T : 使用温度 ($^\circ\text{C}$)

t : 照射温度 ($^\circ\text{C}$) [ただし、 $t=400, 600, 800, 1000, 1200$]

ϕ : 高速中性子照射量 ($10^{21} \text{ n}/\text{cm}^2$, 中性子エネルギー $E > 29\text{fJ}$)
[ただし、 $\phi \leq 3$]

材質	IG-110				
a_i t	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
400	3.38800	-5.21558	4.51991	-1.95697	3.28586×10^{-1}
600	9.18521×10^{-1}	4.66177×10^{-1}	-1.14053	5.90802×10^{-1}	-9.76594×10^{-2}
800	6.66703×10^{-1}	2.21082×10^{-1}	-6.43065×10^{-1}	3.26913×10^{-1}	-5.13699×10^{-2}
1000	2.87062×10^{-1}	1.24626	-1.98542	1.07922	-2.00842×10^{-1}
1200	2.64406×10^{-1}	1.17643	-2.03928	1.21596	-2.49847×10^{-1}

ただし、照射後変化率は使用温度 T での変化率を室温時の変化率と同じと仮定している。

付表-3 平均熱膨張係数の温度効果関係式

$$\bar{\alpha}_{(T)} = \bar{\alpha}_{400} \cdot f_{\bar{\alpha}(T)}$$

使用単位

$\bar{\alpha}_{(T)}$: 室温 (20°C) から温度 T までの平均熱膨張係数 (°C⁻¹)

$\bar{\alpha}_{400}$: 室温 (20°C) から 400°C までの平均熱膨張係数 (°C⁻¹)

$f_{\bar{\alpha}(T)}$: 温度 T における平均熱膨張係数の変化率

$$f_{\bar{\alpha}(T)} = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2$$

T : 温度 (°C)

材質	IG-110
T	100 ≤ T ≤ 1500
$\bar{\alpha}_{400}$	4.06 × 10 ⁻⁶
C ₀	0.853157
C ₁	4.26564 × 10 ⁻⁴
C ₂	-1.42849 × 10 ⁻⁷

付表-4 平均熱膨張係数の照射効果関係式

$$\bar{\alpha}(T, \Phi, t) = \bar{\alpha}_{(T)} \cdot [1 + \Delta\bar{\alpha}_{(T, \Phi, t)}]$$

使用単位

$\bar{\alpha}(T, \Phi, t)$: 照射材 (高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t) の室温 (20°C) から使用温度 T までの平均熱膨張係数 (°C⁻¹)

$\bar{\alpha}_{(T)}$: 未照射材の室温 (20°C) から使用温度 T までの平均熱膨張係数 (°C⁻¹)

$\Delta\bar{\alpha}_{(T, \Phi, t)}$: 未照射材と照射材 (高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t) の室温 (20°C) 時から使用温度 T までの平均熱膨張係数の変化率

$$\Delta\bar{\alpha}_{(T, \Phi, t)} = [(\bar{\alpha}_{(T, \Phi, t)} / \bar{\alpha}_{(T)}) - 1]$$

$$= [\sum_{i=1}^5 a_i \cdot \Phi^i]_t$$

T : 使用温度 (°C)

t : 照射温度 (°C) [ただし、 $t=400, 800, 1000, 1200$]

Φ : 高速中性子照射量 (10²¹ n/cm², 中性子エネルギー $E > 29$ fJ)
[ただし、 $\Phi \leq 3$]

材質	IG-110				
a_i t	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
400	1.09307×10^{-1}	7.29076×10^{-3}	-3.21848×10^{-2}	1.01388×10^{-2}	-9.72275×10^{-4}
800	2.04390×10^{-1}	-1.12636×10^{-1}	2.64706×10^{-2}	-2.98755×10^{-3}	1.28728×10^{-4}
1000	2.61749×10^{-1}	-2.12411×10^{-1}	7.24604×10^{-2}	-1.17731×10^{-2}	7.18589×10^{-4}
1200	1.57047×10^{-1}	-1.59415×10^{-1}	6.42720×10^{-2}	-1.25461×10^{-2}	9.40941×10^{-4}

付表-5 寸法変化の照射効果関係式

$$\varepsilon(\Phi, t) = \left[\sum_{i=1}^5 a_i \cdot \Phi^i \right]_t$$

使用単位

$\varepsilon(\Phi, t)$: 照射材(高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t)の照射後室温時の寸法変化率(照射ひずみ)

t : 照射温度(°C) [ただし、 $t=400, 600, 800, 1000, 1200$]

Φ : 高速中性子照射量(10^{21} n/cm², 中性子エネルギー $E > 29$ fJ)
[ただし、 $\Phi \leq 3$]

材質	IG-110				
a_i t	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
400	-2.25836×10^{-3}	-1.70481×10^{-4}	6.54192×10^{-5}	-1.44072×10^{-5}	0.0
600	-6.42060×10^{-4}	-2.52533×10^{-4}	-6.95441×10^{-5}	1.98859×10^{-5}	-1.4396×10^{-6}
800	-4.82929×10^{-4}	-2.32468×10^{-4}	1.68841×10^{-5}	-9.2599×10^{-7}	0.0
1000	-2.09457×10^{-3}	2.55297×10^{-4}	-8.80229×10^{-5}	1.81984×10^{-5}	-1.6926×10^{-6}
1200	-5.85461×10^{-3}	1.21891×10^{-3}	-4.17281×10^{-4}	5.69279×10^{-5}	0.0

付表-6 定常クリープ係数の照射効果関係式

$$M^s = C_1 \cdot \exp(C_2 \cdot t + C_3)$$

使用単位

M^s : 照射温度 t 時の定常クリープ係数

$(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1} (10^{21} \text{ n/cm}^2, \text{中性子エネルギー } E > 29 \text{ fJ})^{-1}$

t : 照射温度 ($^{\circ}\text{C}$)

材質	IG-110
t	$400 \leq t \leq 1400$
C_1	1.2×10^{-5}
C_2	5.37×10^{-4}
C_3	0.736

付表-7 熱伝導率の温度効果関係式

$$K_{(T)} = K_{20} \cdot f_{K(T)}$$

使用単位

$K_{(T)}$: 温度 T における熱伝導率 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

K_{20} : 室温 (20°C) 時の熱伝導率 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

$f_{K(T)}$: 温度 T における熱伝導率の変化率

$$f_{K(T)} = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4$$

T : 温度 ($^\circ\text{C}$)

材質	IG-110
T	$20 \leq T \leq 1800$
K_{20}	0.3
C_0	1.02748
C_1	-1.3589×10^{-3}
C_2	1.1127×10^{-6}
C_3	-4.7648×10^{-10}
C_4	8.6949×10^{-14}

付表-8 熱伝導率の照射効果関係式

$$K(T, \Phi, t) = K_{(T)} \cdot \Delta K_{(T, \Phi, t)}$$

使用単位

- $K(T, \Phi, t)$: 照射材 (高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t) の照射後
 使用温度 T 時の熱伝導率 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
 $K_{(T)}$: 未照射材の使用温度 T における熱伝導率 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
 $\Delta K_{(T, \Phi, t)}$: 未照射材と照射材 (高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t) の
 使用温度 T での変化率 (Priceの熱伝導率計算モデルを使用)
 T : 使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 t : 照射温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 Φ : 高速中性子照射量 (10^{21} n/cm^2 , 中性子エネルギー $E > 29\text{fJ}$)

Priceの熱伝導率計算モデル

$$K'(T, \Phi, t) = \left\{ \alpha \left[\frac{1}{K_0(T)} + \frac{b}{K_b'(T)} + \frac{d}{K_d'(T)} \right] \right\}^{-1}$$

ただし、

$$d = \frac{K_d'(RT)}{\alpha} \left[\frac{1}{K_i(RT)} - \frac{1}{K_0(RT)} \right]$$

$$K_i(RT) = K_{\text{sat}}^{RT}(t) + [K_0(RT) - K_{\text{sat}}^{RT}(t)] \exp[-\Phi / \tau(t)]$$

$$K_0(RT) = \left\{ \alpha \left[\frac{1}{K_0(RT)} + \frac{b}{K_b'(RT)} \right] \right\}^{-1}$$

$$K_{\text{sat}}^{RT}(t) = \exp[C + D \cdot t]$$

$$\tau(t) = A + B \cdot t$$

付表-8 熱伝導率の照射効果関係式 (続き)

ここで、

$K'(T, \Phi, t)$: Priceの熱伝導率計算モデルでの照射材 (高速中性子照射量 Φ 、照射温度 t) の使用温度 T 時の熱伝導率 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

1 / K_U : 結晶の格子振動の調和に依存する熱抵抗 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)⁻¹

b / K_b' : 結晶境界での散乱による熱抵抗 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)⁻¹

d / K_d' : 照射欠陥による熱抵抗 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)⁻¹

RT : 室温 (27°C)

T : 使用温度 (°C) [27~1527°C]

t : 照射温度 (°C) [350~1527°C]

Φ : 高速中性子照射量 (10^{21} n/cm², 中性子エネルギー $E > 29\text{fJ}$)

$K_{\text{sat}}^{\text{RT}}(t)$: 照射温度 t での照射量に対する飽和熱伝導率 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

$\tau(t)$: 照射温度 t に対する時定数 (10^{21} n/cm²)

$K_i(\text{RT})$: 照射後の室温における熱伝導率 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

$K_0(\text{RT})$: 未照射材の室温における熱伝導率 ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

なお、 $K_U(T)$, $K_b'(T)$, $K_d'(T)$ は H-451 黒鉛の値及び定数 (A, B, C, D, α , b) は準等方性黒鉛の値を使用した。

$K_U(T)$, $K_b'(T)$, $K_d'(T)$: 別表-1

A, B, C, D, α , b : 別表-2

IG-110 黒鉛の照射後の熱伝導率計算に使用する変化率 $\Delta K(\tau, \Phi, t)$ は、次式のとおりである。

$$\Delta K(\tau, \Phi, t) = \frac{K'(T, \Phi, t)}{K_0(T)}$$

別表-1 熱伝導率の照射による変化率の計算に用いる関数値

使用温度 (°C)	$K_U(T)$ ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)	$K_b'(T)$ ($10^4\cdot\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)	$K_d'(T)$ (----)
-173	93.5	2.88	4.46
-123	48.8	5.95	3.835
- 73	12.8	9.60	3.21
- 23	6.38	13.25	3.115
27	4.79	16.65	3.02
77	3.56	19.58	3.13
127	2.90	22.5	3.24
177	2.56	24.75	3.375
227	2.22	27.0	3.51
277	2.065	28.65	3.585
327	1.91	30.3	3.66
377	1.775	31.5	3.72
427	1.64	32.7	3.78
477	1.56	33.7	3.83
527	1.48	34.7	3.88
577	1.41	35.1	3.895
627	1.34	35.5	3.91
677	1.285	35.75	3.925
727	1.23	36.0	3.94
777	1.165		
827	1.10		
877	1.055		
927	1.01		
977	0.975		
1027	0.94		
1077	0.91		
1127	0.88		
1177	0.86		
1227	0.84		
1277	0.82		
1327	0.80		
1377	0.783		
1427	0.765		
1477	0.753		
1527	0.74	36.0	3.94

別表-1 熱伝導率の照射による変化率の計算に用いる定数値

記号	値	単 位	記号	値	単 位
A	-0.3059	10^{21} n/cm ²	D	1.222×10^{-3}	°C
B	9.5×10^{-4}	10^{21} n/cm ² -°C	α	5.707	---
C	-3.430	---	b	6.165	°C ⁻¹