

JAERI-M  
91-154

高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計  
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

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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、お申し込みください。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）で複写による実費領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, Tokaimura, 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 ニッセイエプロ株式会社

高温工学試験研究炉・炉心支持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) の炉心支持黒鉛構造物として使用される材料は、原子炉級微粒等方性黒鉛 (IG-110 黒鉛)、原子炉級準等方性黒鉛 (PGX 黒鉛) 及び ASR-ORB 炭素であり、現在までこれらの材料に対する引張強度、圧縮強度、縦弾性係数、熱膨張係数等のデータを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「炉心支持黒鉛構造設計方針」で設計用データを規定した。

本報告は、HTTR の炉心支持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 Support 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 graphite and carbon materials used for the core support graphite components of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) are nuclear grade fine-grained isotropic graphite (IG-110), nuclear grade medium-grained near-isotropic graphite (PGX) and coarse-grained carbon (ASR-ORB). The material data on properties such as tensile strength, compressive strength, Young's modulus, thermal expansion etc. of these graphites and carbon have been acquired up to now. From these obtained data the design data were stipulated by the graphite structural design code of core support graphite components of HTTR in order to design the core support graphite structures.

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

Keywords: HTTR, Graphite, Carbon, Design Code, Design Data, Gas-cooled Reactor, Brittle Material, Core Support 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 .....	23
謝 辞 .....	23
参考文献 .....	24
付録1 「炉心支持黒鉛構造設計方針」で規定する設計データ .....	25
付録2 設計用データの関係式 .....	36

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Explanation of the Design Data .....	4
3. Conclusion .....	23
Acknowledgements .....	23
Reference .....	24
Appendix 1 Design Data Stipulated by the Graphite Structural Design Code for Core Support Graphite Components .....	25
Appendix 2 Polynominal Expressions of the Design Data .....	36

## 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<sup>(1)</sup>。

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に使用する黒鉛構造物を示す。

炉心支持黒鉛構造物は、第1.1図に示すように、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト及び炉床部断熱層から構成する。原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110黒鉛）は、耐放射線性、耐腐食性及び高強度を有しており、サポートポスト及びキー等に使用される。原子炉級準等方性黒鉛（PGX黒鉛）は、大型の構造物、即ち、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック及び炉床部断熱層に使用される。炭素（ASR-ORB炭素）は、断熱性と長期にわたる寸法安定性に優れ、炉床部断熱層に使用される。IG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の代表的な特性は第1.1表のとおりであり、現在まで、これらの材料に対するデータを精力的に取得してきた。

本報告は、これまでの取得データに基づいてHTTRの「炉心支持黒鉛構造設計方針」<sup>(2)</sup>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, PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の特性値(標準値)

(未照射材)

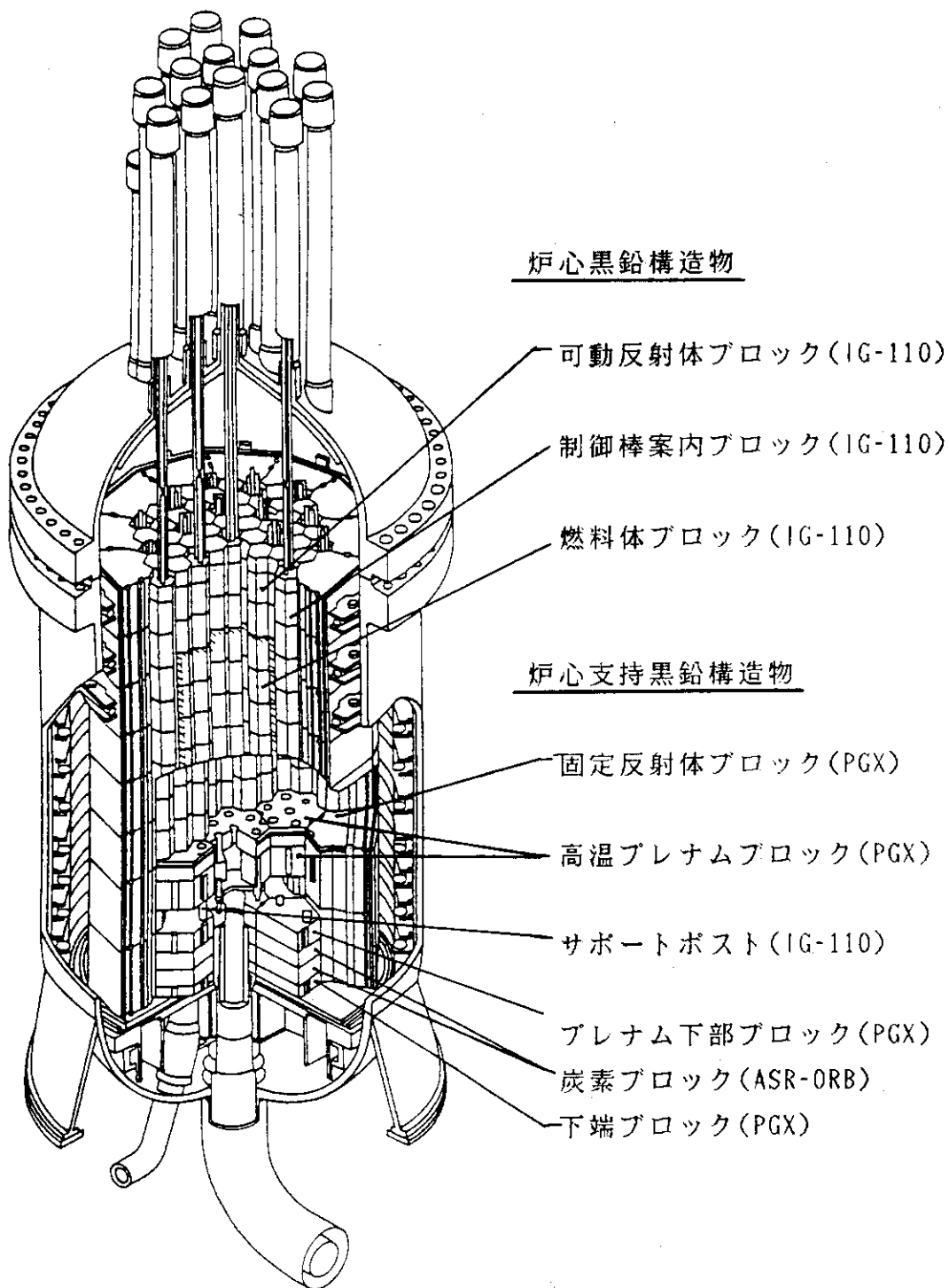
	IG-110黒鉛	PGX黒鉛	ASR-ORB炭素
かさ密度** (g <sup>*</sup> /cm <sup>3</sup> )	1.78	1.73	1.65
平均引張強さ** (kg/cm <sup>2</sup> )	258	83(径方向)	69(径方向)
平均圧縮強さ** (kg/cm <sup>2</sup> )	784	312(径方向)	514(径方向)
縦弾性係数** (10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	0.81	0.66(径方向)	0.89(径方向)
(± $\frac{1}{3}$ Su勾配) ***			
平均熱膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	4.06	2.34(径方向)	4.40(径方向)
(20~400°C)		2.87(軸方向)	4.89(軸方向)
熱伝導率 (cal/cm·s·°C)	0.19	0.18(径方向)	0.024
(400°C)			
灰分**** (ppm)	100以下	7,000以下	5,000以下
粒径 (μm)	20	800以下	2,000以下

\*: 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に示した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、材料データの新たなる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 黒鉛及び炭素材料の基準強さ(未酸化材、室温)

黒鉛及び炭素材料の基準強さ(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<sup>(3)(4)</sup>、以下の式で定めた。なお、これらの黒鉛及び炭素材料の強度データの正規、対数正規及び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、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の強度データを示す。

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

- ここで  $S_u$  : 基準強さ (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\bar{X}$  : 材料試験により得られた強度データの平均強さ (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma$  : 材料試験により得られた強度データの標準偏差 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $n$  : 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)ごとに基準強さを選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、これに環境効果等を考慮する。具体的には、酸化により強度が減少するため、これを考慮する。また、高温<sup>(5)</sup>及び高ひずみ速度<sup>(4)</sup>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。

## (2) 別表第2 黒鉛及び炭素材料の縦弾性係数及びポアソン比（未酸化材、室温）

### 1) 黒鉛及び炭素材料の縦弾性係数（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 $1/4$ 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(a)-(c)図に代表的な応力-ひずみ曲線の実測データと設計曲線の比較を示す<sup>(4)</sup>。

縦弾性係数をこのように設定したのは、黒鉛及び炭素材料の応力-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、本指針の設計方針で定められ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。このことは米国ASMEの方法で求めた縦弾性係数より本指針で定める縦弾性係数の方が高くなり、本設定方法が米国ASMEの方法より保守的であるといえる。

### 2) 黒鉛及び炭素材料のポアソン比（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<sup>(4)</sup>。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) 別図第1 黒鉛材料の酸化による強度変化（室温）

黒鉛材料の酸化による強度変化（室温）は均一酸化前後の強度データを基に定めた。第2.4(a)及び(b)図にIG-110黒鉛及びPGX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<sup>(6)~(8)・(19)</sup>を示す。

なお、別図第1-(a)及び(b)に規定されるIG-110及びPGX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。

#### (4) 別図第2 黒鉛及び炭素材料の設計疲れ曲線（未酸化材、室温）

黒鉛及び炭素材料の設計疲れ曲線（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（ $\sigma_{max}$ ）と最小応力（ $\sigma_{min}$ ）の応力比 $R$ （ $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ）に依存するため、疲れ試験は各応力比に対して試験を実施し、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<sup>(21)</sup>により「最大付加応力（ $\sigma_{max}$ ）と平均強さ（ $S$ ）との比が疲れ寿命（ $N_f$ ）の1次式（ $\log(\sigma_{max}/S) = A + B \log N_f$ ）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2.5(a)-(c)図に応力比が $R = -1$ におけるIG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の各々の疲れ試験データ<sup>(9)・(10)</sup>を示す。

なお、疲れ強度の環境効果として酸化効果がある。酸化効果については、第2.6図にIG-110黒鉛の酸化効果<sup>(11)</sup>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。

#### (5) 別図第3 IG-110黒鉛のサポートポストの設計限界座屈応力（未酸化材、室温）

サポートポストの設計限界座屈応力（未酸化材、室温）は次のとおり定めた。

軸圧縮荷重を受けるサポートポストの座屈応力は、サポートポストの形状、材質及びポストシートとの接触状態に依存するため、HTTRのサポートポストを

模擬した破壊試験により定めた。HTTRのサポートポストの細長比(=4L/D : Lはサポートポスト長さ、Dはサポートポストの直径)は16と小さく、ランキン型の短柱座屈式に試験結果が適合することを確認している。第2.7図はその結果を示したもので、図中の各実験点は8~9個の試験結果の平均値である<sup>(12)</sup>。

なお、設計限界座屈応力は、基準圧縮強さ(S<sub>uc</sub>)を基準として定めた。

#### (6) 別図第4 黒鉛及び炭素材料の縦弾性係数の温度効果(未酸化材)

縦弾性係数の温度効果(未酸化材)は次のとおり定めた。

縦弾性係数の温度効果は、室温値(20℃)を基準にした実測データの変化率<sup>(4)(13)~(15)</sup>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2.8(a)-(c)図にIG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素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。

#### (7) 別図第5 黒鉛及び炭素材料の平均熱膨張係数の温度効果(未酸化材)

平均熱膨張係数の温度効果(未酸化材)は次のとおり定めた。

平均熱膨張係数の温度効果は、軸方向及び径方向の実測データ<sup>(16)~(18)</sup>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2.9(a)-(c)図にIG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素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。

#### (8) 別図第6 黒鉛及び炭素材料の熱伝導率の温度効果(未酸化材)

熱伝導率の温度効果(未酸化材)は次のとおり定めた。

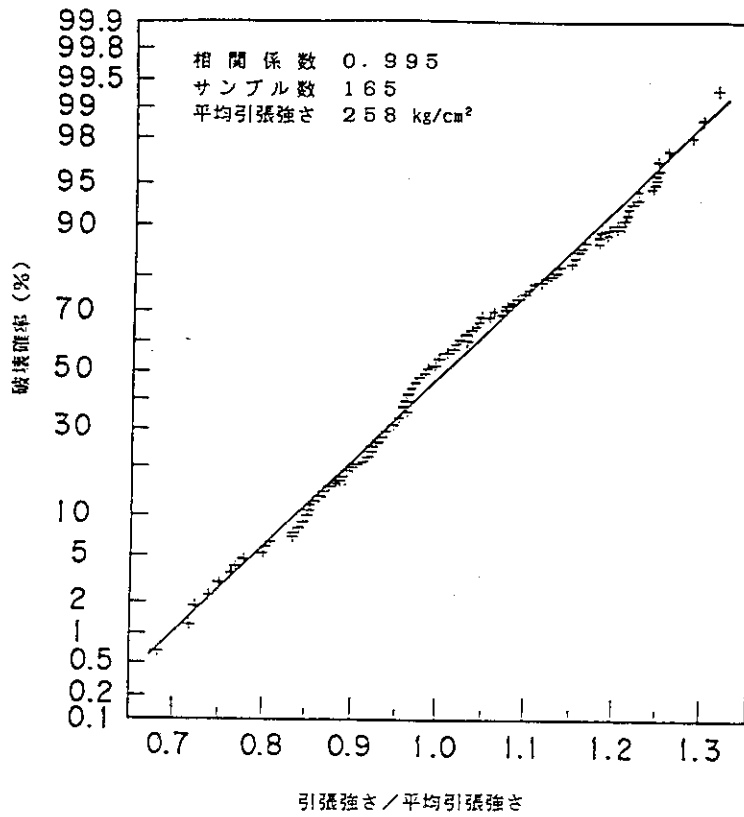
熱伝導率の温度効果は、軸方向又は径方向の実測データの平均値<sup>(4)(20)</sup>を温度で多項式近似し、これを温度効果に関する設計曲線とした。第2.10(a)-(c)図にIG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の熱伝導率の温度効果に関する実測データと設計曲線を示す。

第2.1表 各分布に対する強度データの相関係数

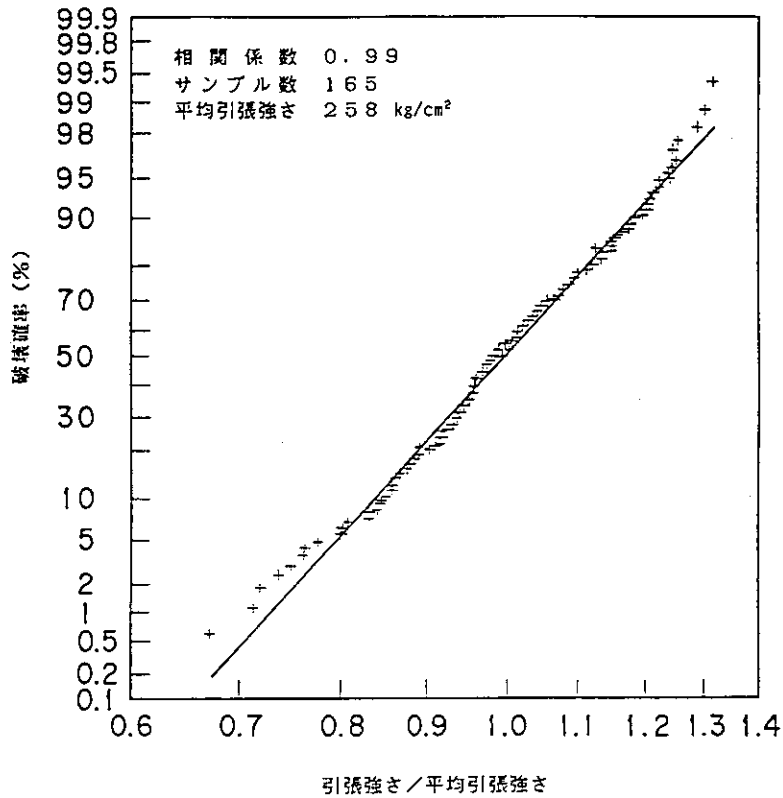
		分布関数		
		正規	ログノーマル	ワイブル
IG-110 黒鉛	引張	0.995	0.994	0.985
	圧縮	0.995	0.993	0.979
PGX 黒鉛 (径方向)	引張	0.996	0.988	0.994
	圧縮	0.982	0.988	0.935
ASR-ORB 炭素 (径方向)	引張	0.977	0.979	0.956
	圧縮	0.986	0.983	0.986

第2.2表 黒鉛及び炭素材料の強度データ

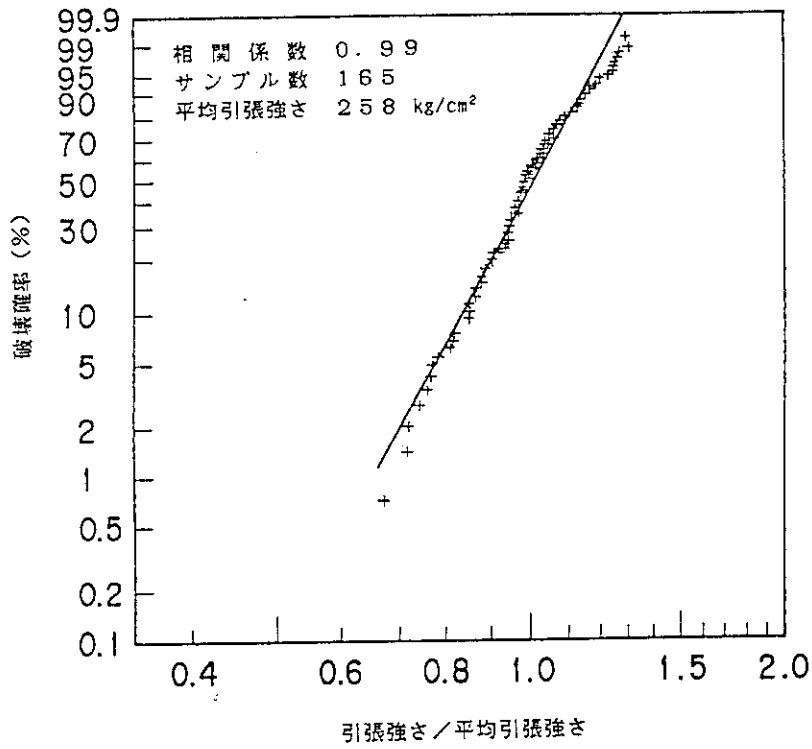
		引張強さ			圧縮強さ		
		平均強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kg/cm <sup>2</sup> )	測定個数	平均強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kg/cm <sup>2</sup> )	測定個数
IG-110黒鉛		258	24.8	362	784	65.4	373
PGX黒鉛	軸方向	82	6.8	101	330	23.4	87
	径方向	83	11.9	102	312	18.6	271
ASR-ORB 炭素	軸方向	66	5.8	26	591	41.3	20
	径方向	69	7.5	30	514	33.0	20



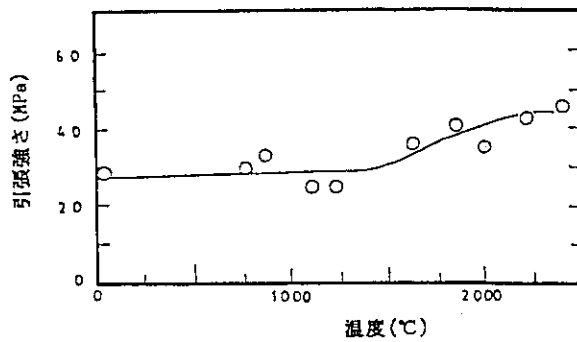
第2.1図(a) IG-110黒鉛引張強度データの正規分布の相関係数と強度-破壊確率の関係



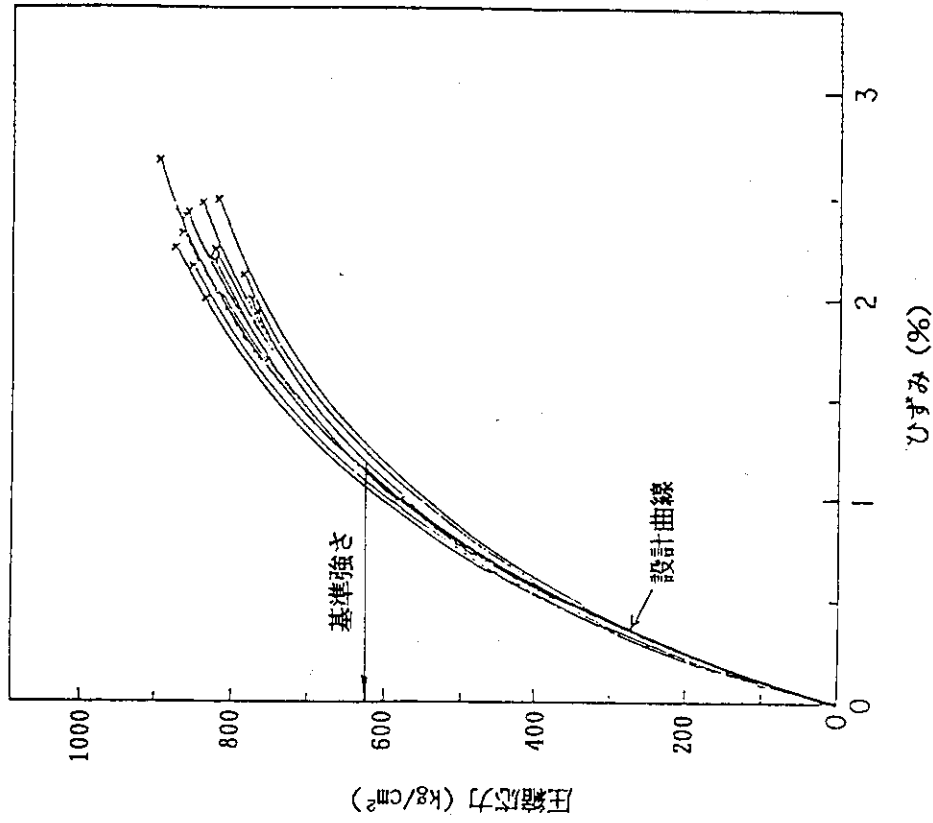
第2.1図(b) IG-110黒鉛引張強度データのログノーマル分布の相関係数と強度-破壊確率の関係



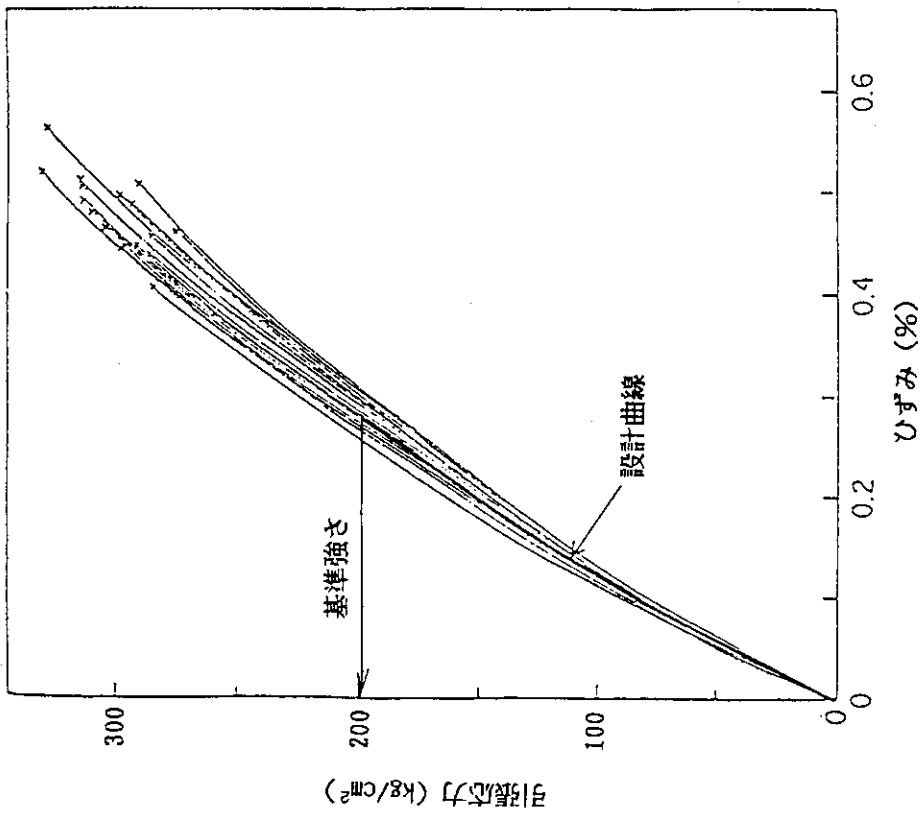
第2.1図(c) IG-110黒鉛引張強度データのワイブル分布の相関係数と強度-破壊確率の関係



第2.2図 IG-110黒鉛の高温における引張強さの変化



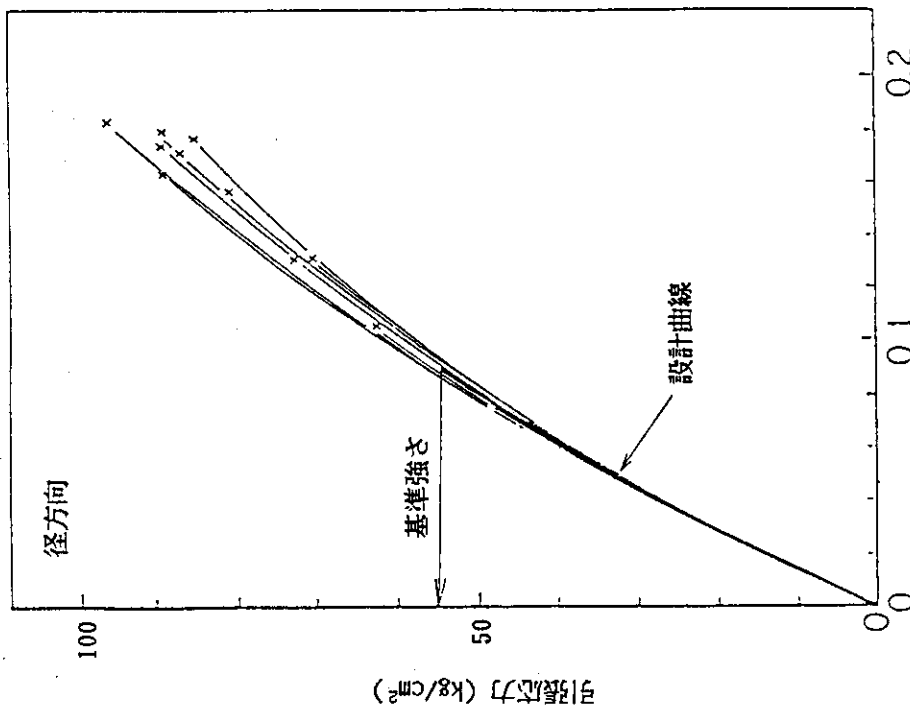
(2) 圧縮



(1) 引張

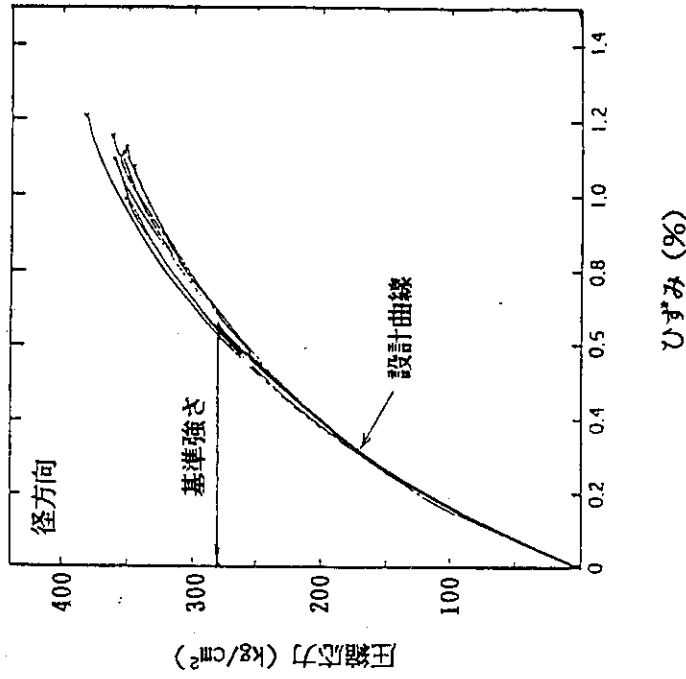
第2.3(a)図 IG-110黒鉛の応力-ひずみ曲線の実測データと設計曲線の比較  
(未酸化材, 室温)





ひずみ (%)

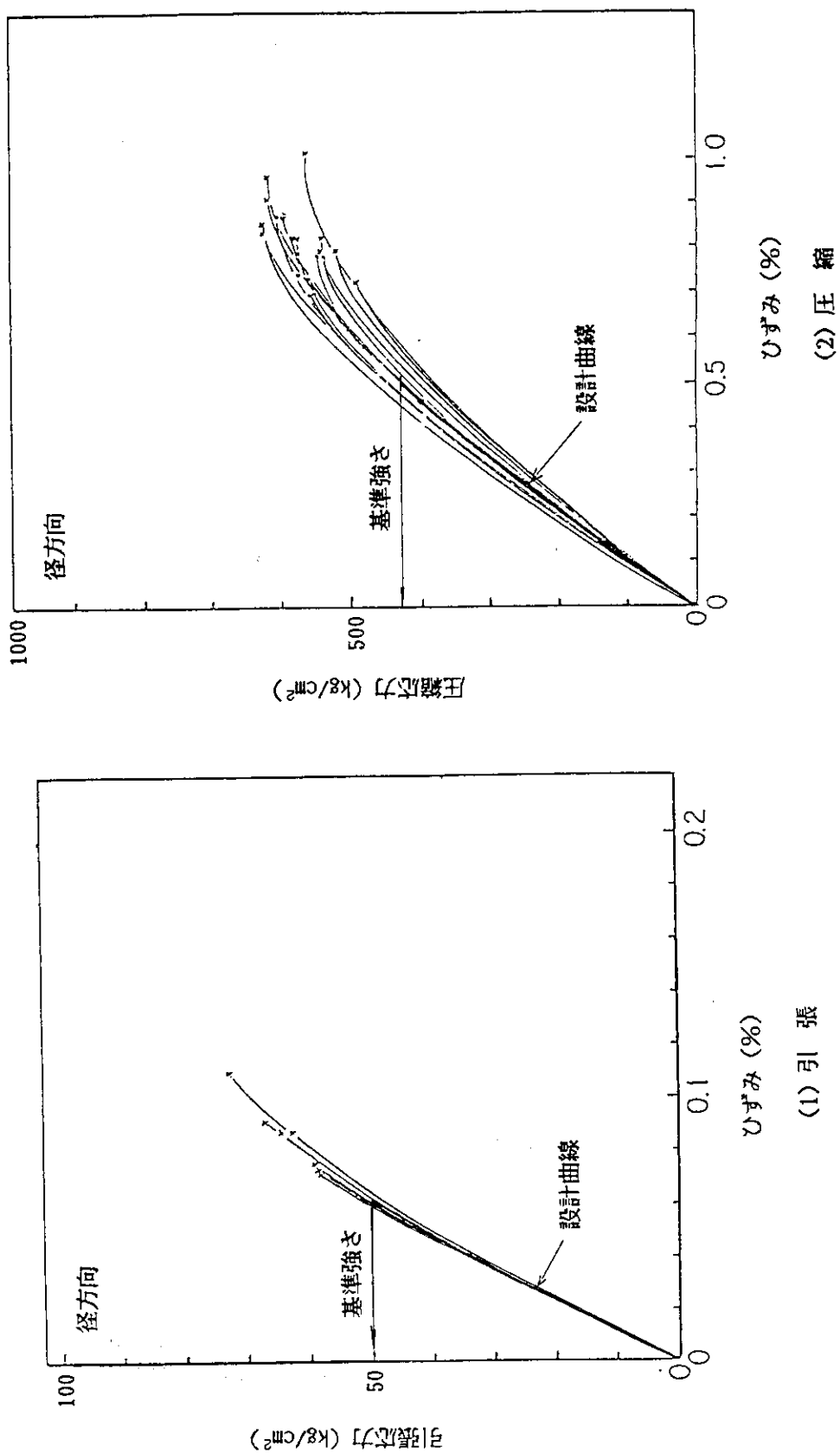
(1) 引張



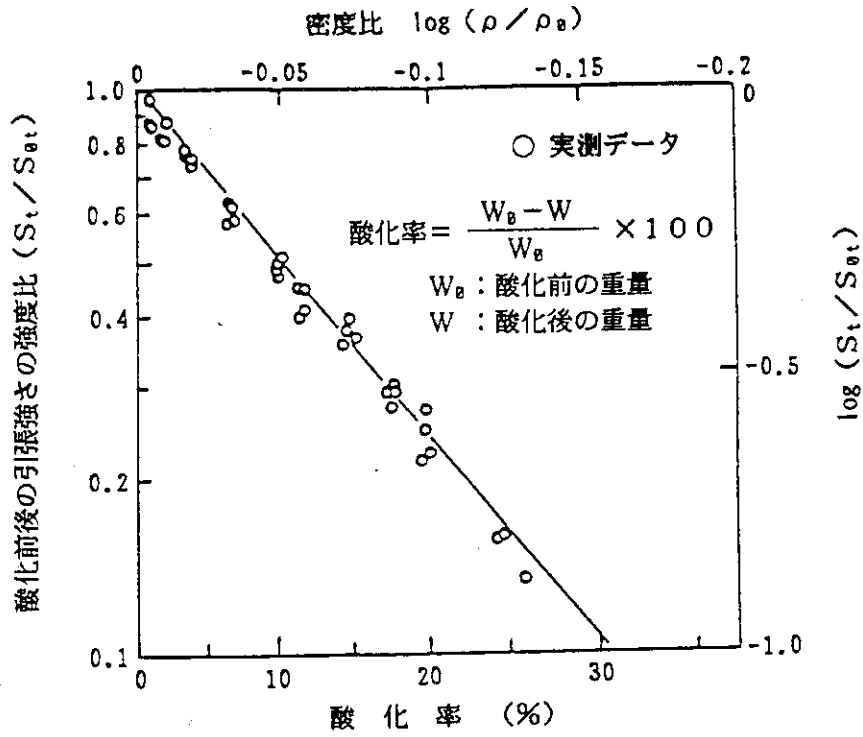
ひずみ (%)

(2) 圧縮

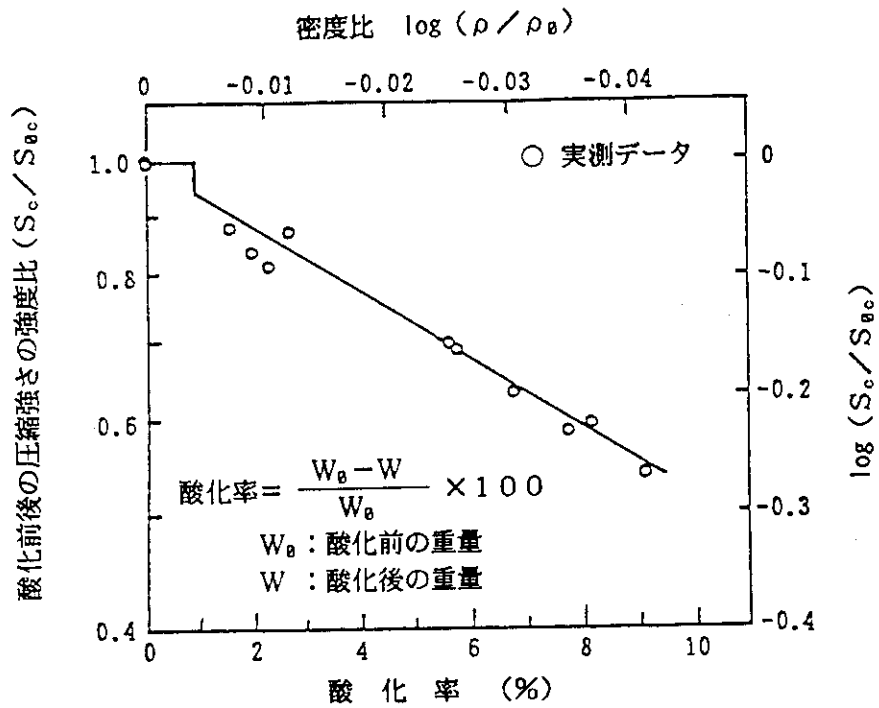
第2.3(b)図 PGX黒鉛の応力-ひずみ曲線の実測データと設計曲線の比較  
(未酸化材, 室温)



第2.3(c)図 ASR-ORB炭素の応力-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)



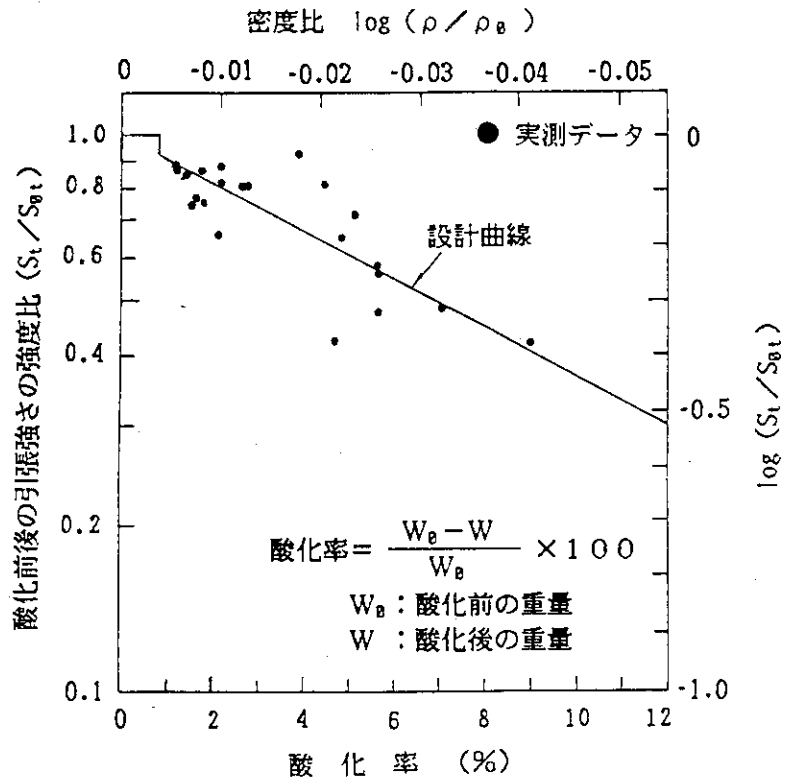
(1) 引張強さ



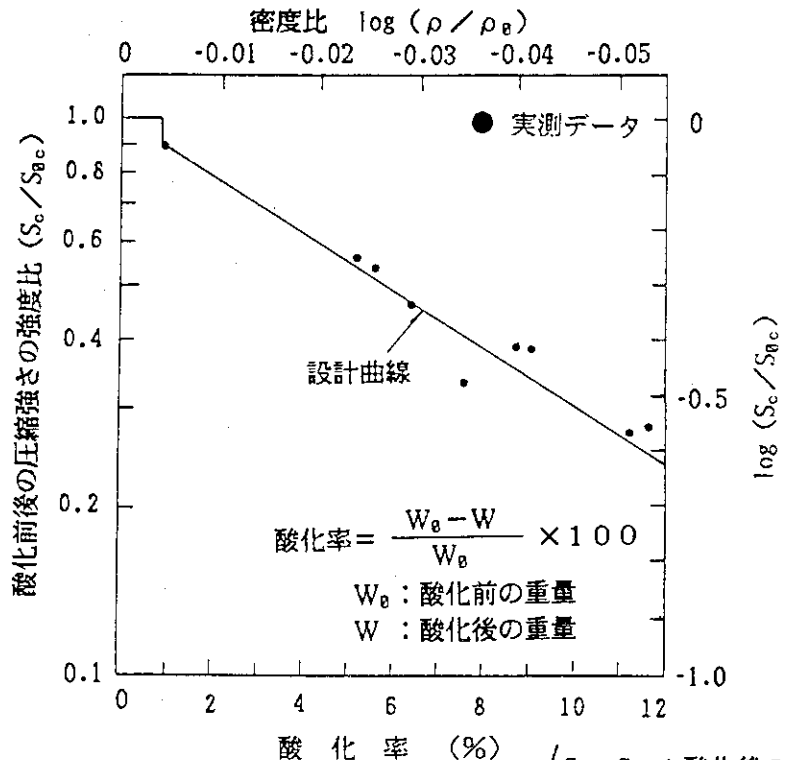
(2) 圧縮強さ

$$\left( \begin{array}{l} S_t, S_c : \text{酸化後の引張及び圧縮強さ} \\ S_{0t}, S_{0c} : \text{酸化前の引張及び圧縮強さ} \\ \rho, \rho_0 : \text{酸化後及び酸化前の密度} \end{array} \right)$$

第2.4(a)図 IG-110黒鉛の酸化による強度変化の実測データ(室温)



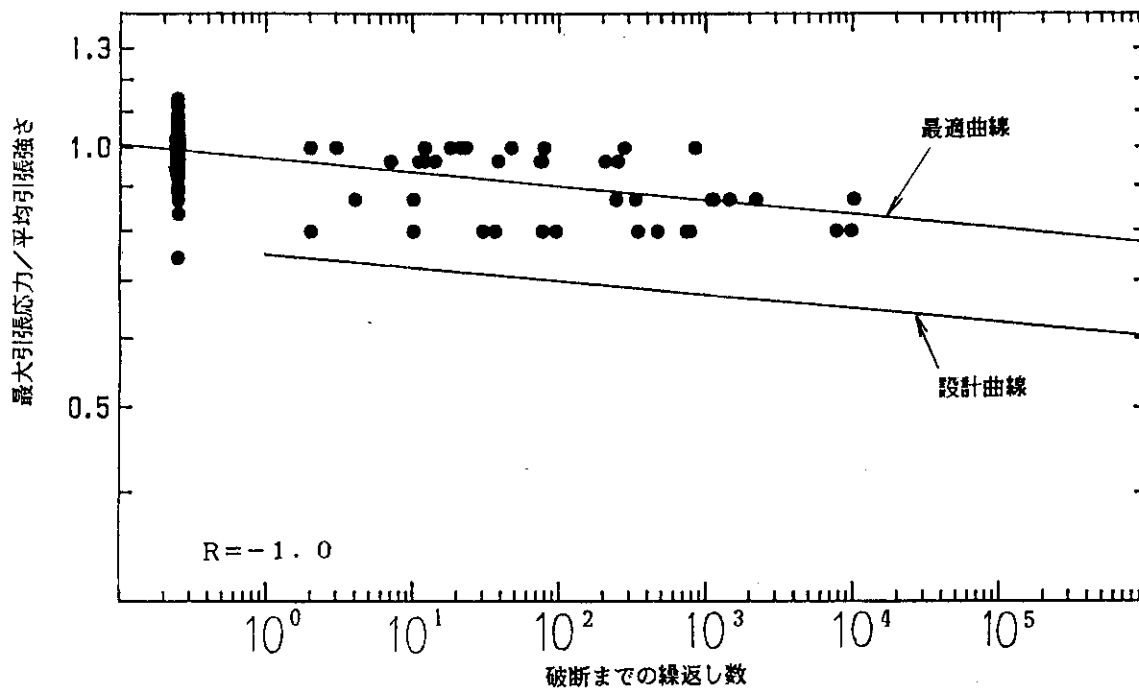
(1) 引張強さ



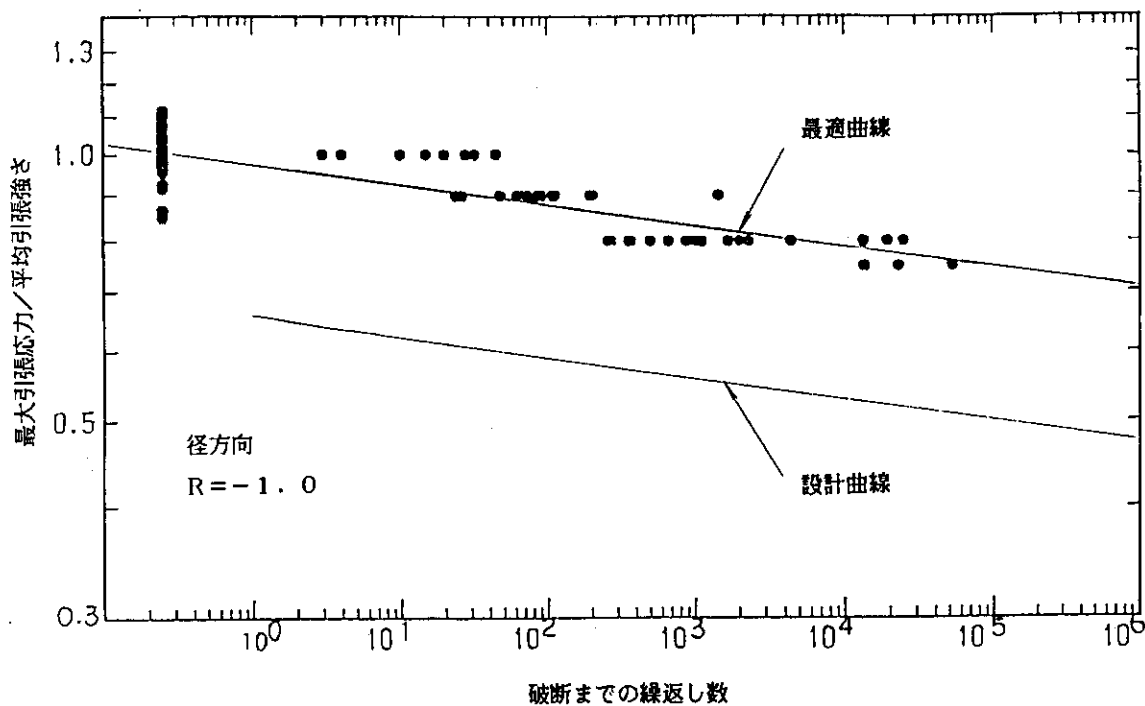
(2) 圧縮強さ

( $S_t, S_c$  : 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)  
( $\rho, \rho_0$  : 酸化後及び酸化前の密度)

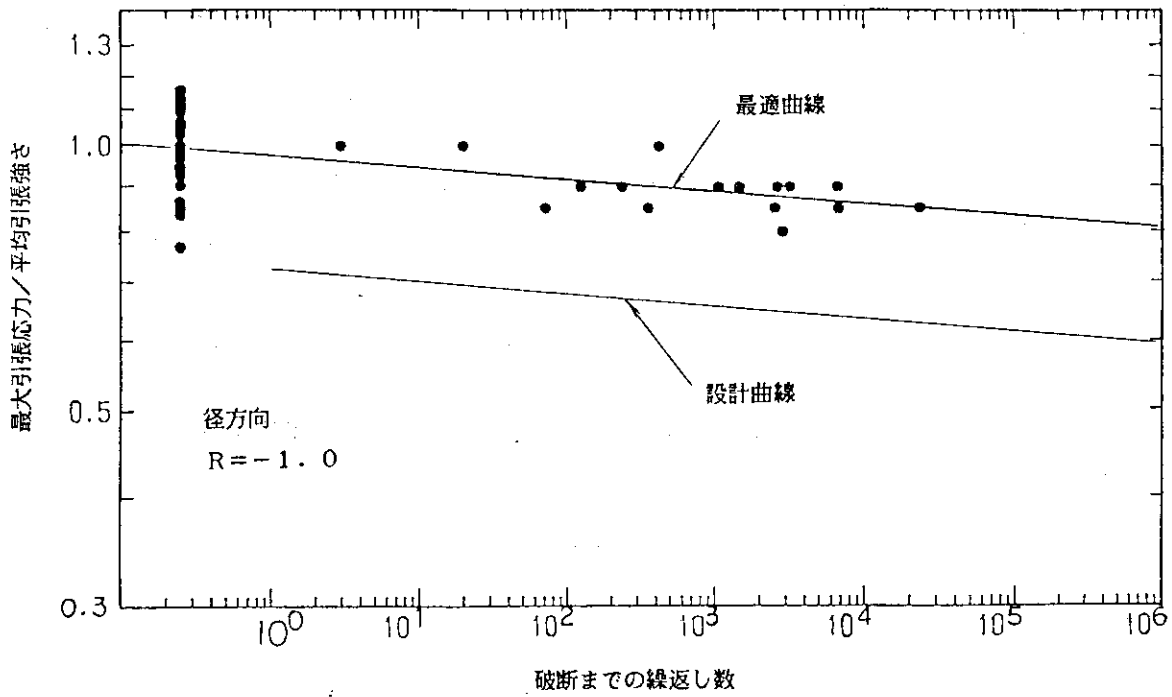
第2.4(b)図 PGX黒鉛の酸化による強度変化の実測データ(室温)



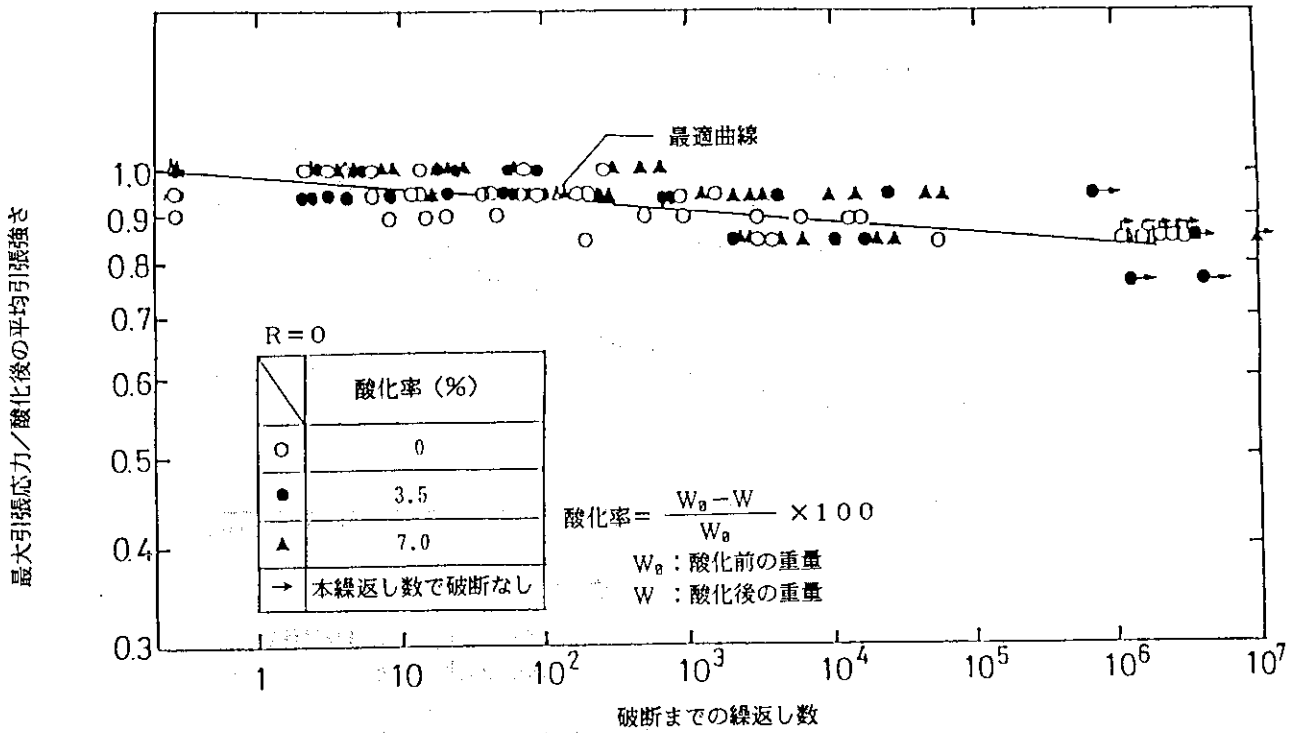
第2.5(a)図 IG-110黒鉛の疲れ試験の実測データと設計曲線の比較  
(未酸化材, 室温)



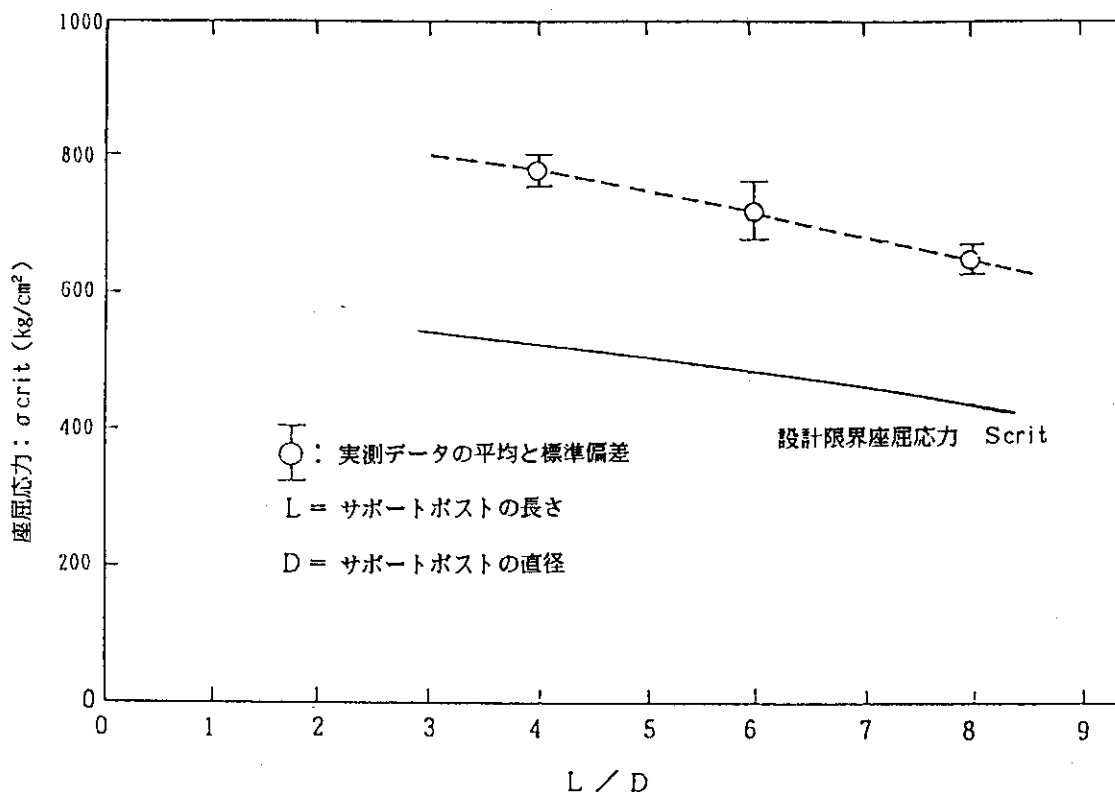
第2.5(b)図 PGX黒鉛の疲れ試験の実測データと設計曲線の比較  
(未酸化材, 室温)



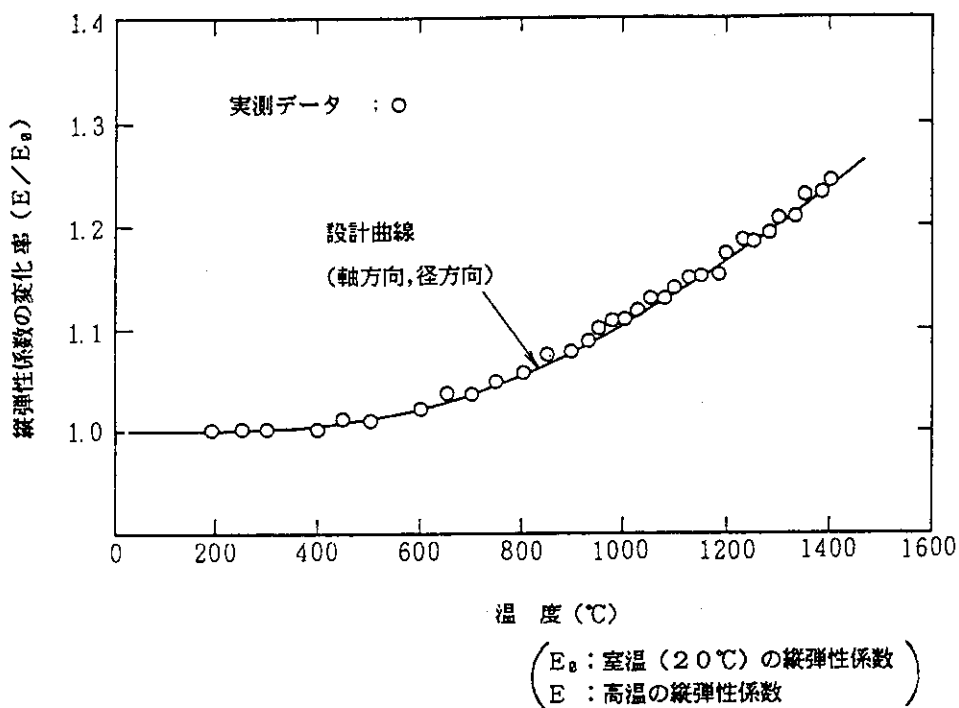
第2.5(c)図 ASR-ORB炭素の疲れ試験の実測データと設計曲線の比較  
(未酸化材, 室温)



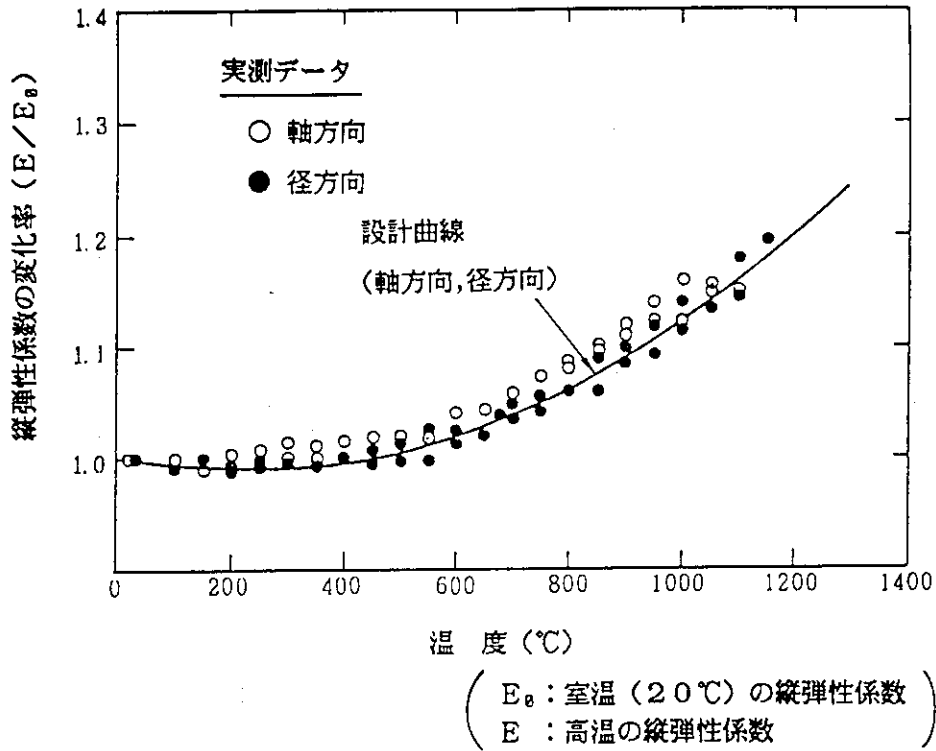
第2.6図 IG-110黒鉛の酸化材の疲れ試験結果 (室温)



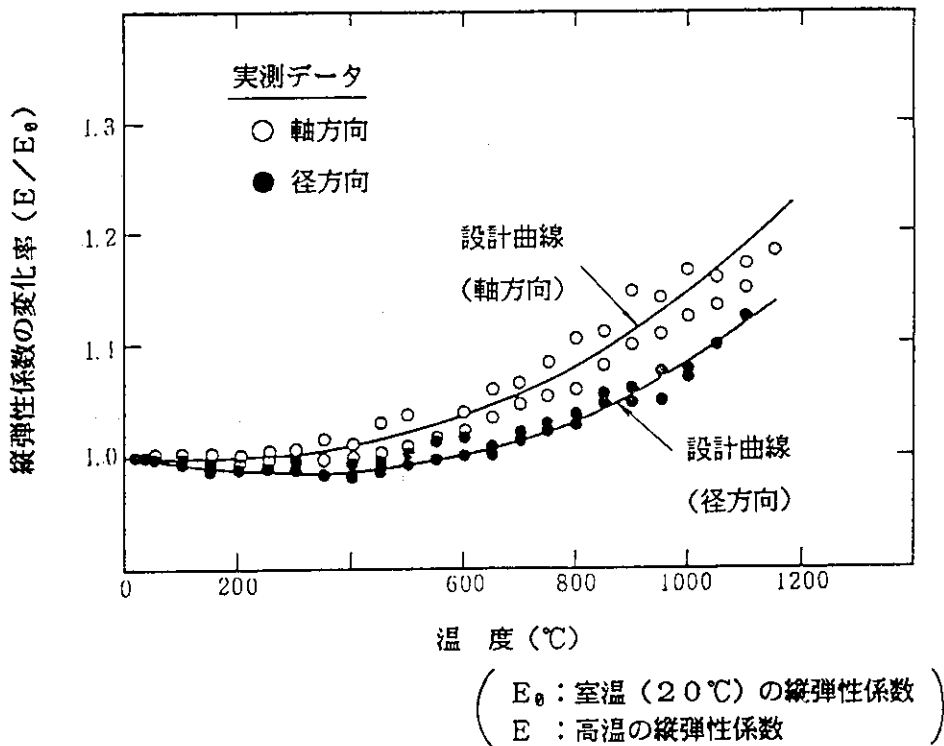
第2.7図 IG-110黒鉛のサポートポストの座屈試験結果（未酸化材，室温）



第2.8(a)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（未酸化材）

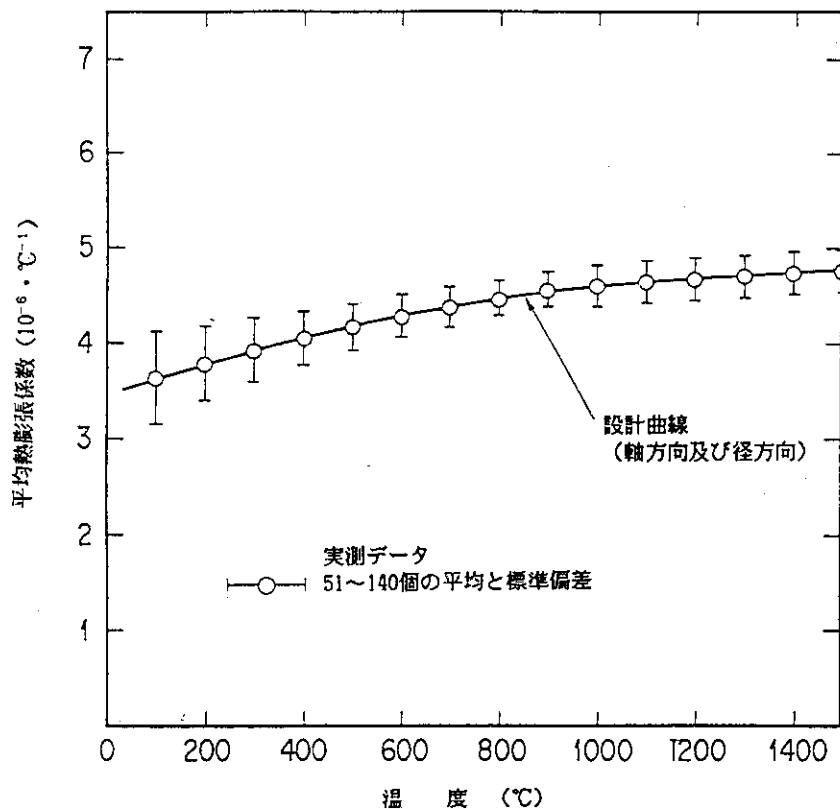


第2.8(b)図 PGX黒鉛の縦弾性係数の温度効果による変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)

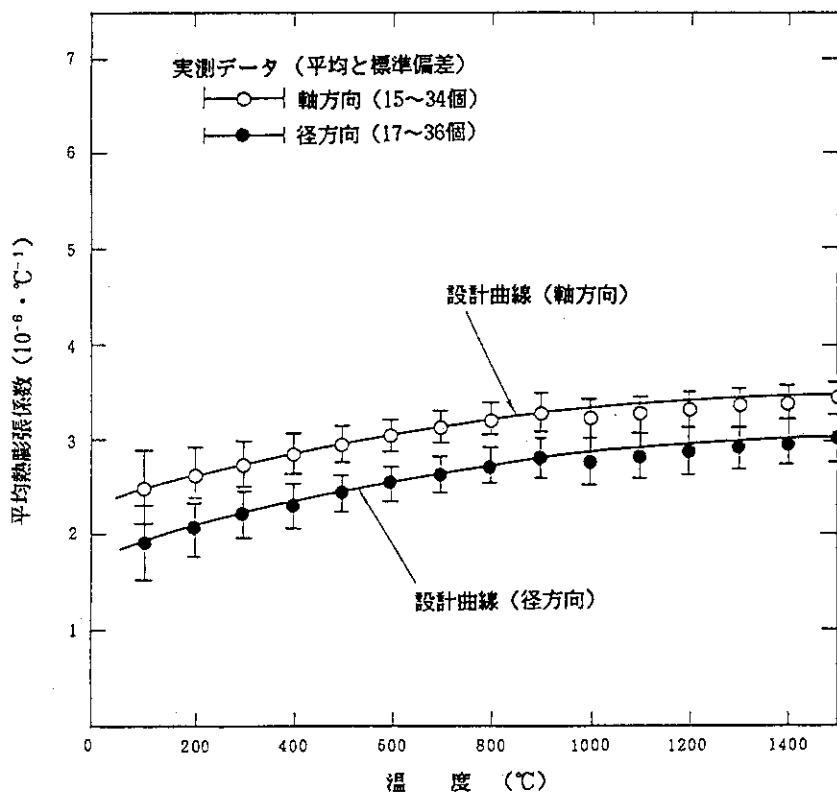


第2.8(c)図 ASR-ORB炭素の縦弾性係数の温度効果による変化率の実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)

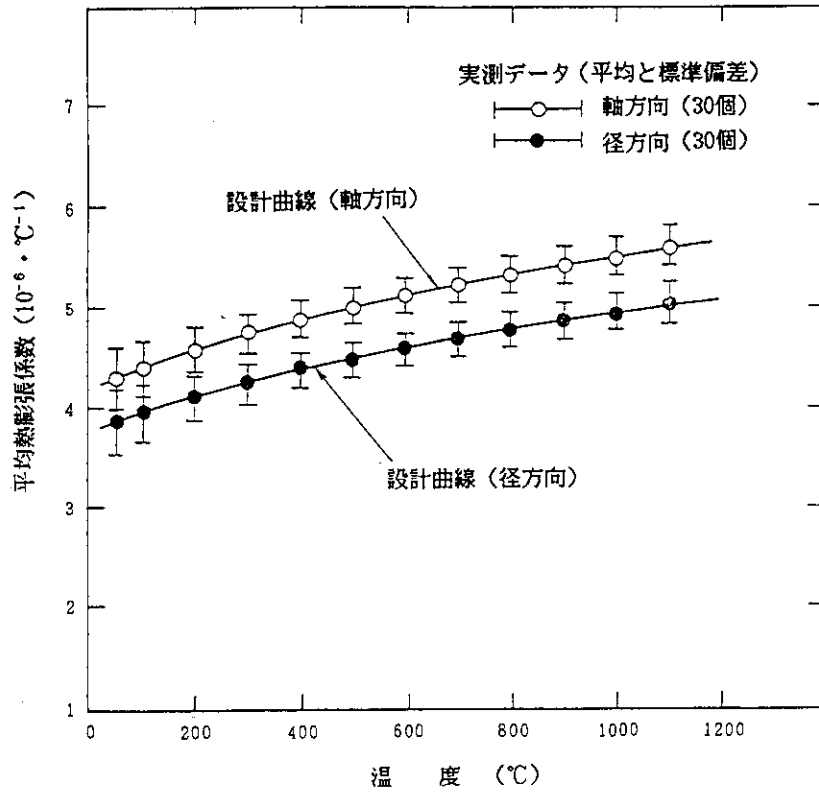




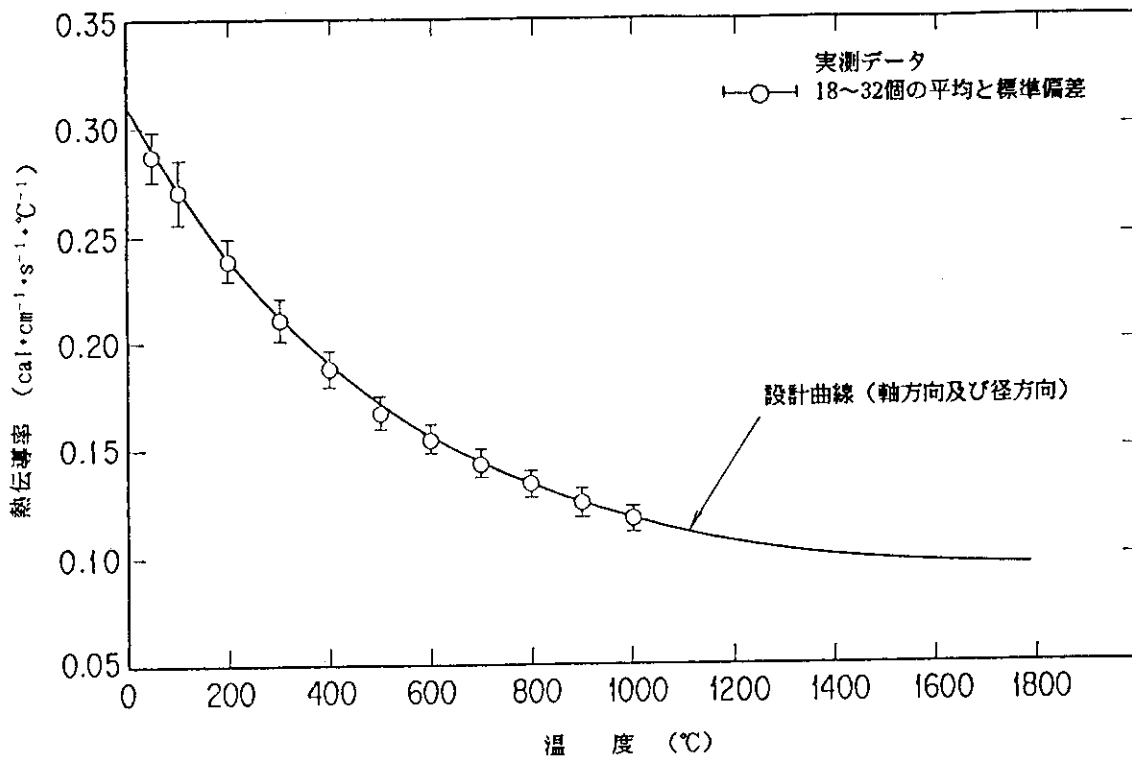
第2.9(a)図 IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果による実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



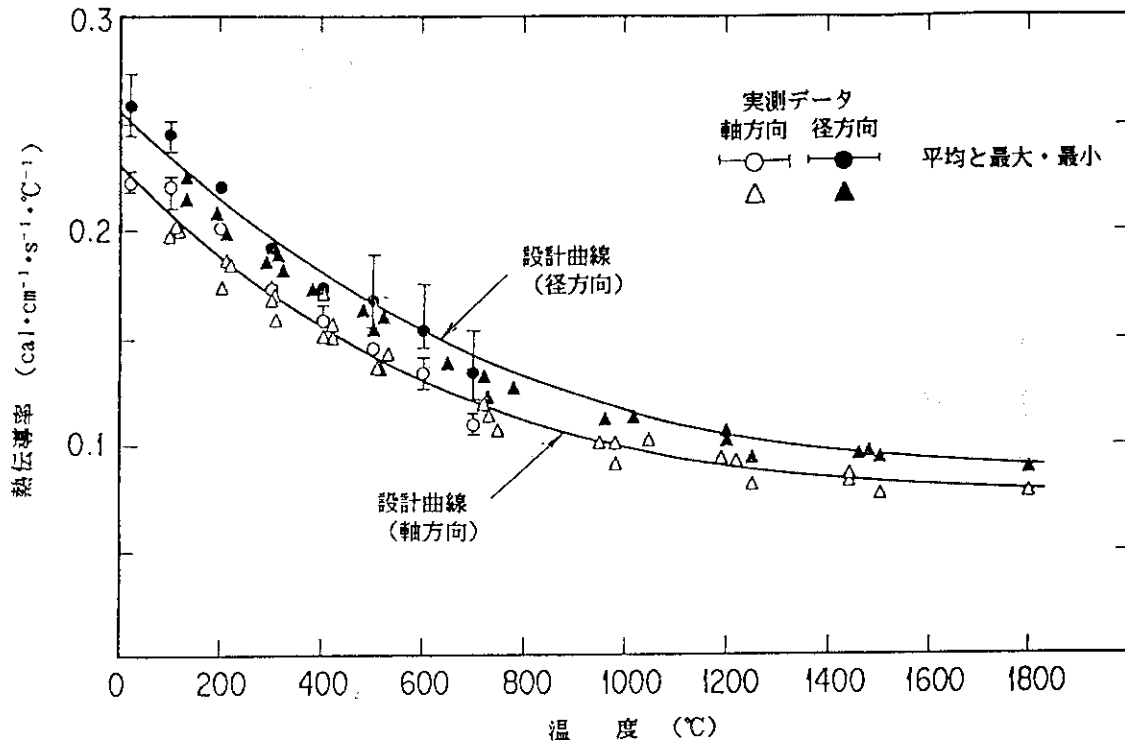
第2.9(b)図 PGX黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果による実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



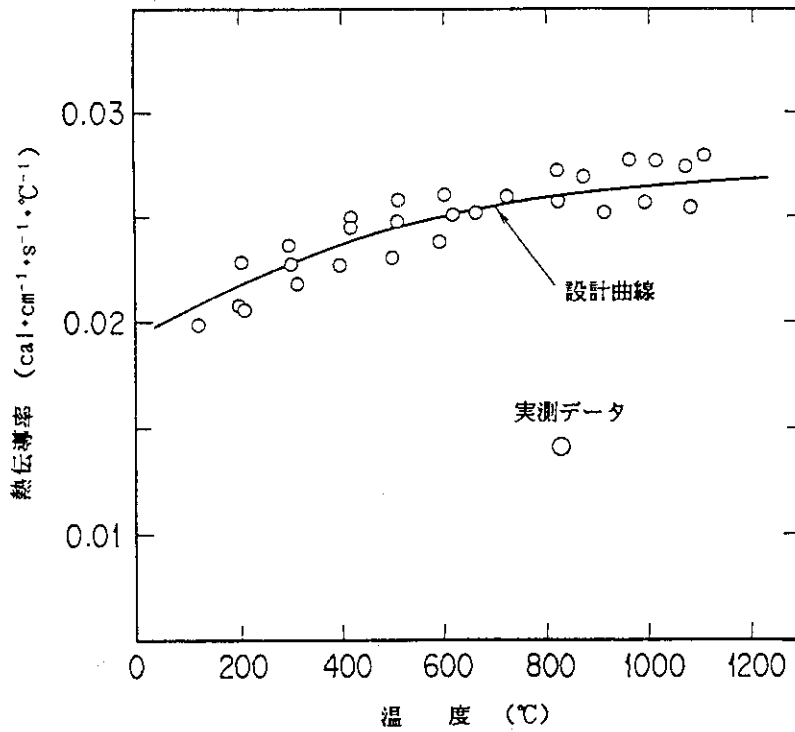
第2.9(c)図 ASR-ORB炭素の平均熱膨張係数の温度効果による実測データと設計曲線の比較 (未酸化材)



第2.10(a)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 (未酸化材)



第2.10(b)図 PGX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 (未酸化材)



第2.10(c)図 ASR-ORB炭素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 (未酸化材)

## 3. 結言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心支持黒鉛構造物の構造設計では、「高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針」で規定している設計データを用いる。本設計データを実際の炉心支持黒鉛構造物の設計に適用するに際しては、その内容を明確にしておく必要がある。そのため、炉心支持黒鉛構物の設計用データの設定方法について解説した。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。

### 3. 結言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心支持黒鉛構造物の構造設計では、「高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針」で規定している設計データを用いる。本設計データを実際の炉心支持黒鉛構造物の設計に適用するに際しては、その内容を明確にしておく必要がある。そのため、炉心支持黒鉛構物の設計用データの設定方法について解説した。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, 99-114 (1985)
- (6) 田中 他(原研)、私信(非公開資料)(1983)
- (7) R. J. Price and L. A. Beavan, GA-A16270 (1961)
- (8) M. Eto and F. B. Growcock, NUREG/CR-2316
- (9) 石山 他, JAERI-M 86-145 (1986)
- (10) 小西 他(原研)、私信(非公開資料)(1989)
- (11) 石山 他, 日本原子力学会誌 Vol. 29, No. 7, 651 (1987)
- (12) 菊池 他, JAERI-M 9109 (1980)
- (13) 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)
- (14) 小西 他(原研)、私信(非公開資料)(1987)
- (15) 小西 他(原研)、私信(非公開資料)(1988)
- (16) 松尾(原研)、私信(非公開資料)(1988)
- (17) 松尾(原研)、私信(非公開資料)(1988)
- (18) 松尾(原研)、私信(非公開資料)(1988)
- (19) 依田他(原研)、私信(非公開資料)(1983)
- (20) 松尾(原研)、私信(非公開資料)(1987)
- (21) G. B. Engle, GA-A14690 (1977)

付録 1 「炉心支持黒鉛構造設計方針」で規定する設計データ

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

- 別表第 1 黒鉛及び炭素材料の基準強さ（未酸化材、室温）
- 別表第 2 黒鉛及び炭素材料の縦弾性係数及びポアソン比  
（未酸化材、室温）
- 別図第 1-(a) I G - 1 1 0 黒鉛の酸化による強度変化（室温）
- 別図第 1-(b) P G X 黒鉛の酸化による強度変化（室温）
- 別図第 2-(a) I G - 1 1 0 黒鉛の設計疲れ曲線  
（未酸化材、室温）
- 別図第 2-(b) P G X 黒鉛の設計疲れ曲線（未酸化材、室温）
- 別図第 2-(c) A S R - 0 R B 炭素の設計疲れ曲線  
（未酸化材、室温）
- 別図第 3 I G - 1 1 0 黒鉛のサポートポストの  
設計限界座屈応力（未酸化材、室温）
- 別図第 4-(a) I G - 1 1 0 黒鉛の縦弾性係数の温度効果  
（未酸化材）
- 別図第 4-(b) P G X 黒鉛の縦弾性係数の温度効果（未酸化材）
- 別図第 4-(c) A S R - 0 R B 炭素の縦弾性係数の温度効果  
（未酸化材）
- 別図第 5-(a) I G - 1 1 0 黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果  
（未酸化材）
- 別図第 5-(b) P G X 黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果  
（未酸化材）
- 別図第 5-(c) A S R - 0 R B 炭素の平均熱膨張係数の温度効果  
（未酸化材）
- 別図第 6-(a) I G - 1 1 0 黒鉛の熱伝導率の温度効果

(未酸化材)

別図第6-(b) P G X 黒鉛の熱伝導率の温度効果 (未酸化材)

別図第6-(c) A S R - O R B 炭素の熱伝導率の温度効果

(未酸化材)

なお、上記設計用データの関係式として、縦弾性係数の温度効果関係式、平均熱膨張係数の温度効果関係式及び熱伝導率の温度効果関係式を付録2に示す。



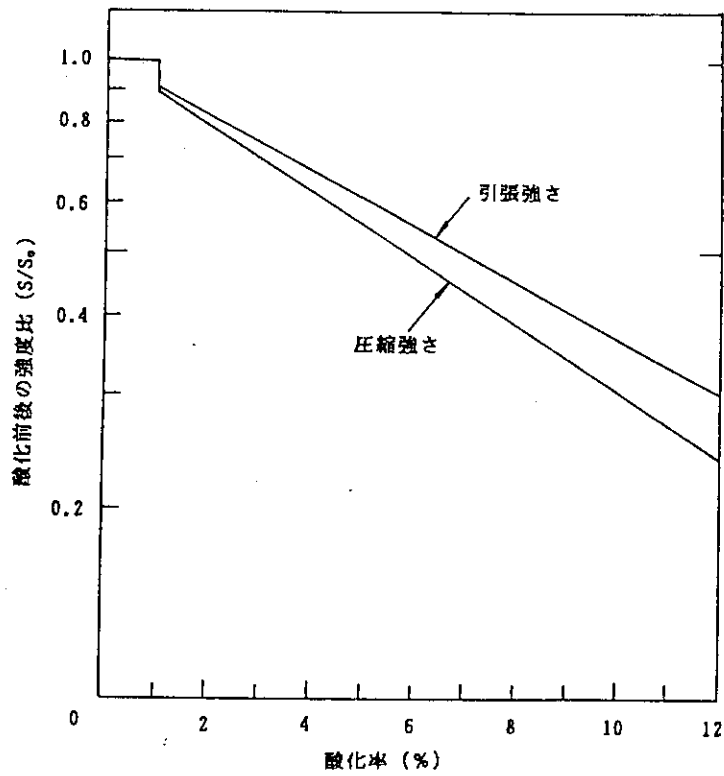
別表第1 黒鉛及び炭素材料の基準強さ (未酸化材, 室温)

		基 準 強 さ ( kg/cm <sup>2</sup> )		
		I G - 1 1 0 黒 鉛	P G X 黒 鉛	A S R - 0 R B 炭 素
引張強さ	軸 方 向	1 9 8	6 5	5 0
	径 方 向		5 3	4 9
圧縮強さ	軸 方 向	6 2 6	2 7 1	4 7 9
	径 方 向		2 6 6	4 2 4

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（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。

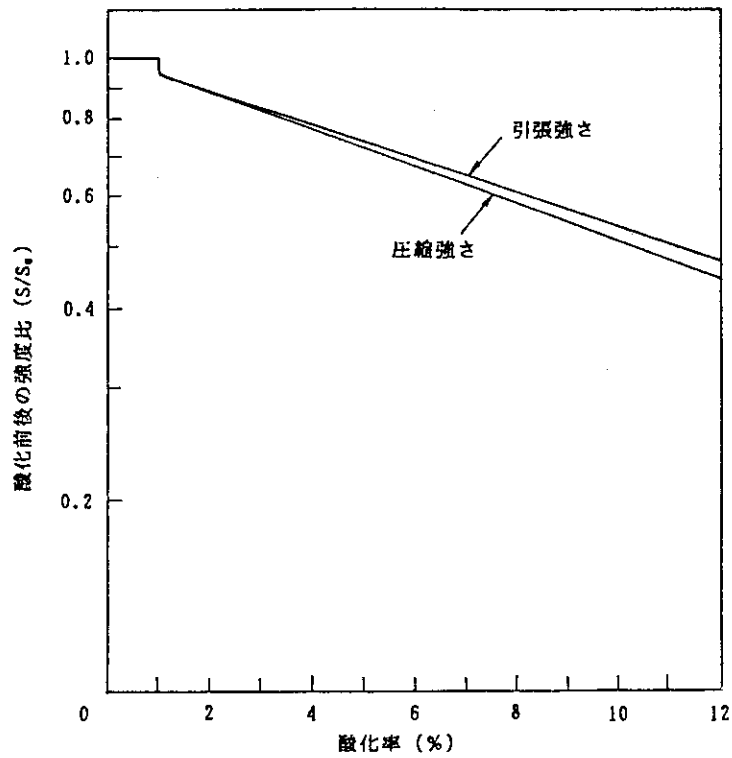
別表第2 黒鉛及び炭素材料の縦弾性係数及びポアソン比 (未酸化材, 室温)

		I G - 1 1 0 黒 鉛	P G X 黒 鉛	A S R - 0 R B 炭 素
縦弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	軸 方 向	8.5 × 10 <sup>4</sup>	5.4 × 10 <sup>4</sup>	8.0 × 10 <sup>4</sup>
	径 方 向		6.9 × 10 <sup>4</sup>	8.9 × 10 <sup>4</sup>
ポ ア ソ ン 比		0. 1 4	0. 1 1	0. 1 8



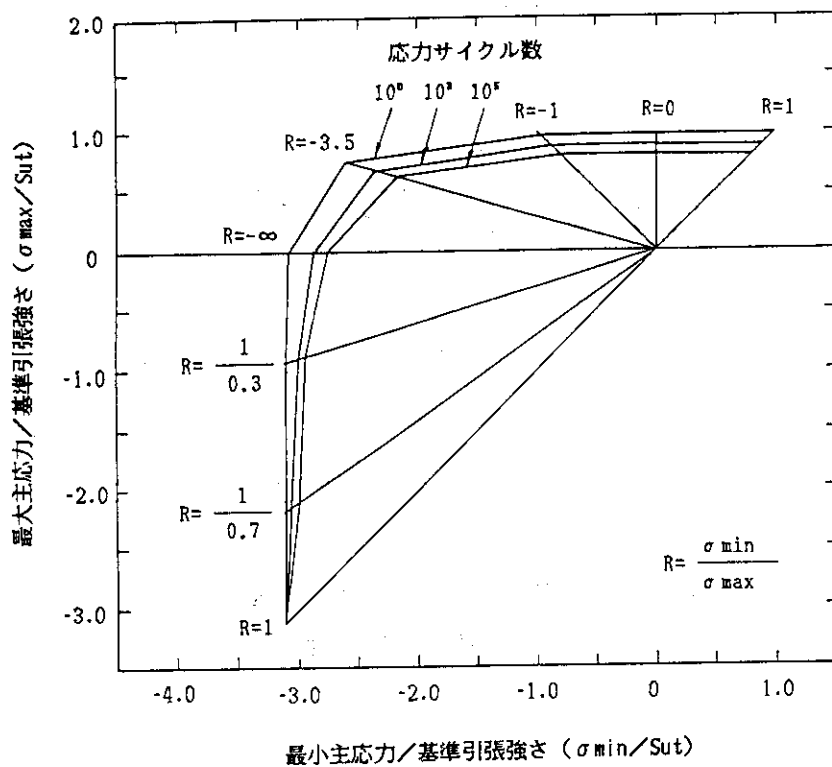
S ; 酸化後の引張又は圧縮強さ  
 S₀ ; 酸化前の引張又は圧縮強さ

別図第1-(a) IG-110黒鉛の酸化による強度変化(室温)

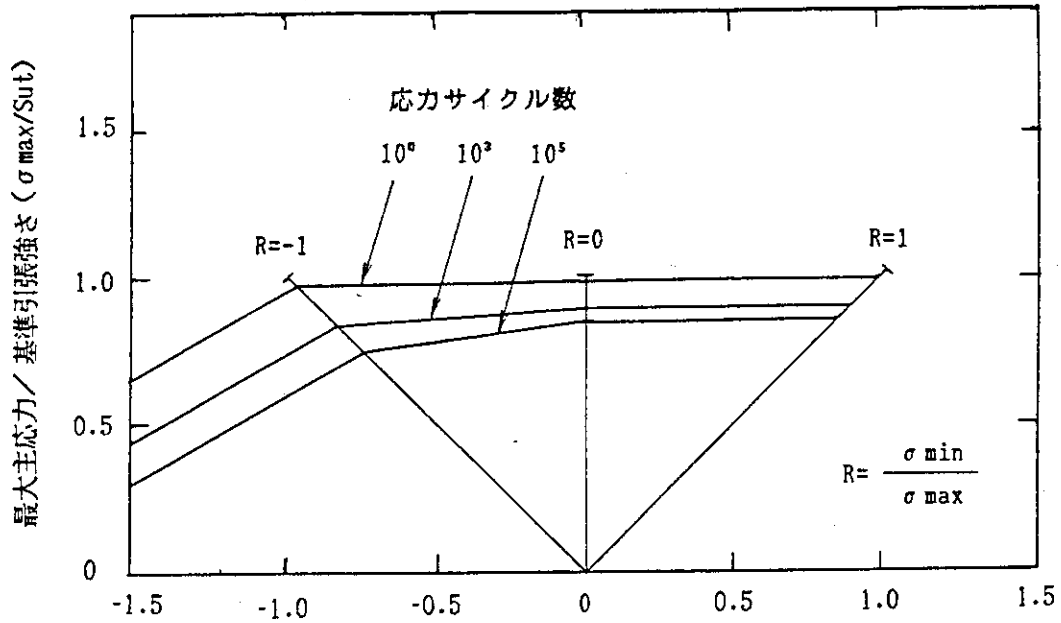


S ; 酸化後の引張又は圧縮強さ  
 S₀ ; 酸化前の引張又は圧縮強さ

別図第1-(b) PGX黒鉛の酸化による強度変化(室温)

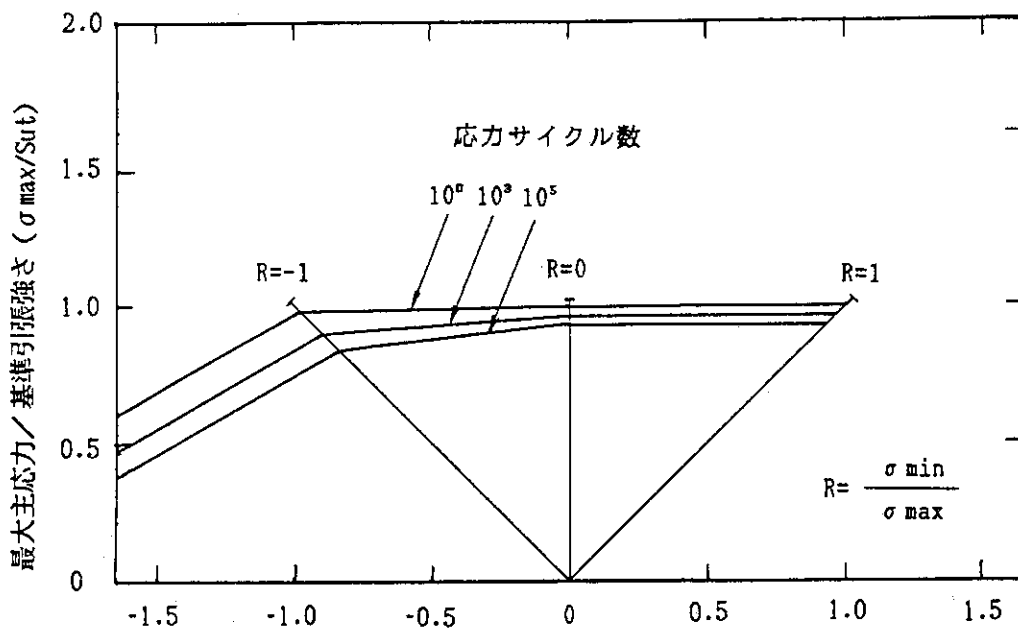


別図第2-(a) IG-110黒鉛の設計疲れ曲線 (未酸化材, 室温)



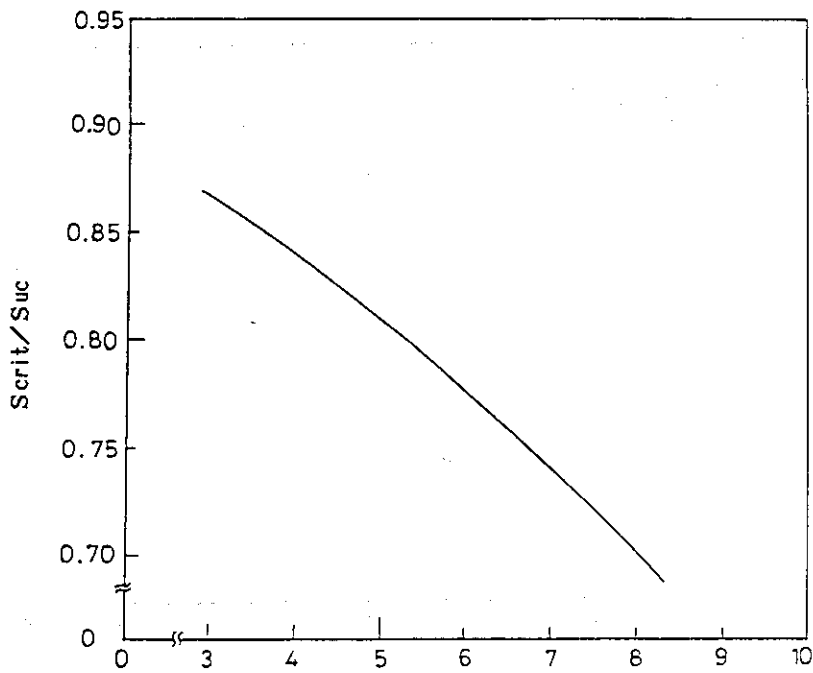
最小主応力/基準引張強さ ( $\sigma_{min}/S_{ut}$ )

別図第 2-(b) PGX 黒鉛の設計疲れ曲線 (未酸化材, 室温)



最小主応力/基準引張強さ ( $\sigma_{min}/S_{ut}$ )

別図第 2-(c) ASR-ORB 炭素の設計疲れ曲線 (未酸化材, 室温)

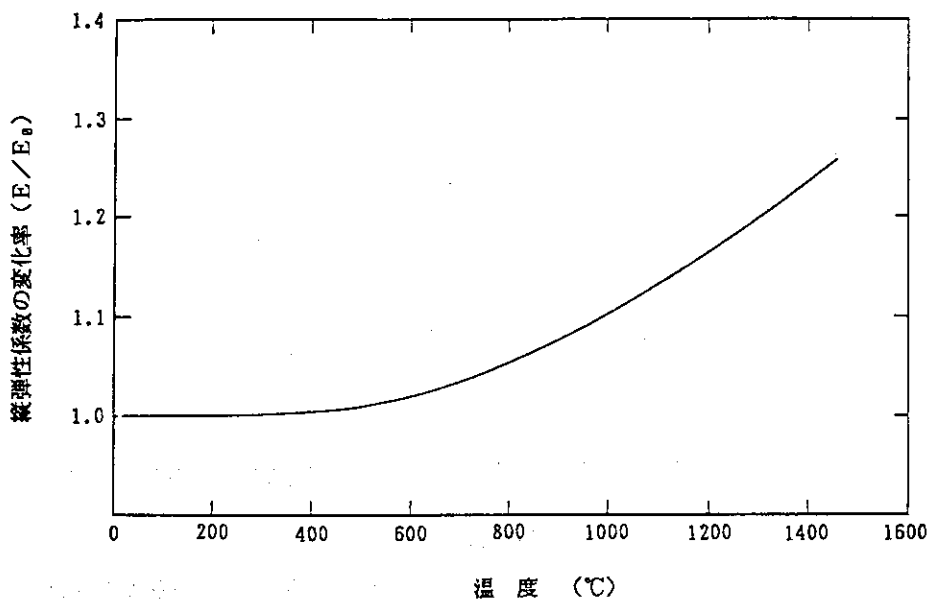


ポスト長さ/ポスト直径 (L/D)

Suc : 基準圧縮強さ

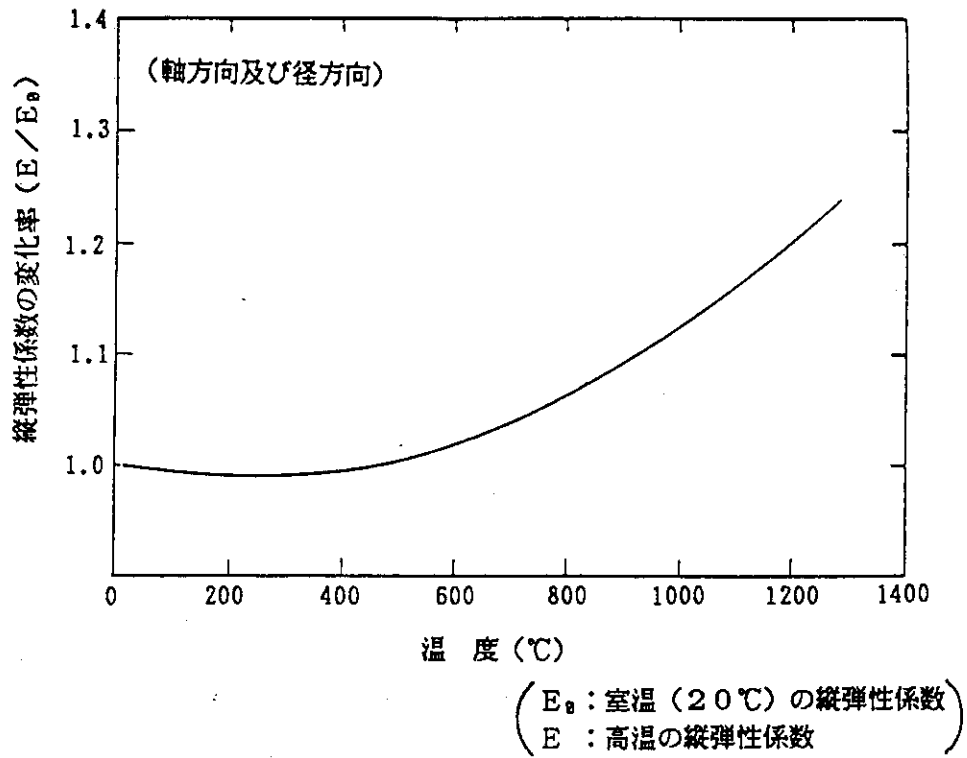
Scrit : 設計限界座屈応力

別図第3 IG-110黒鉛のサポートポストの設計限界座屈応力 (未酸化材, 室温)

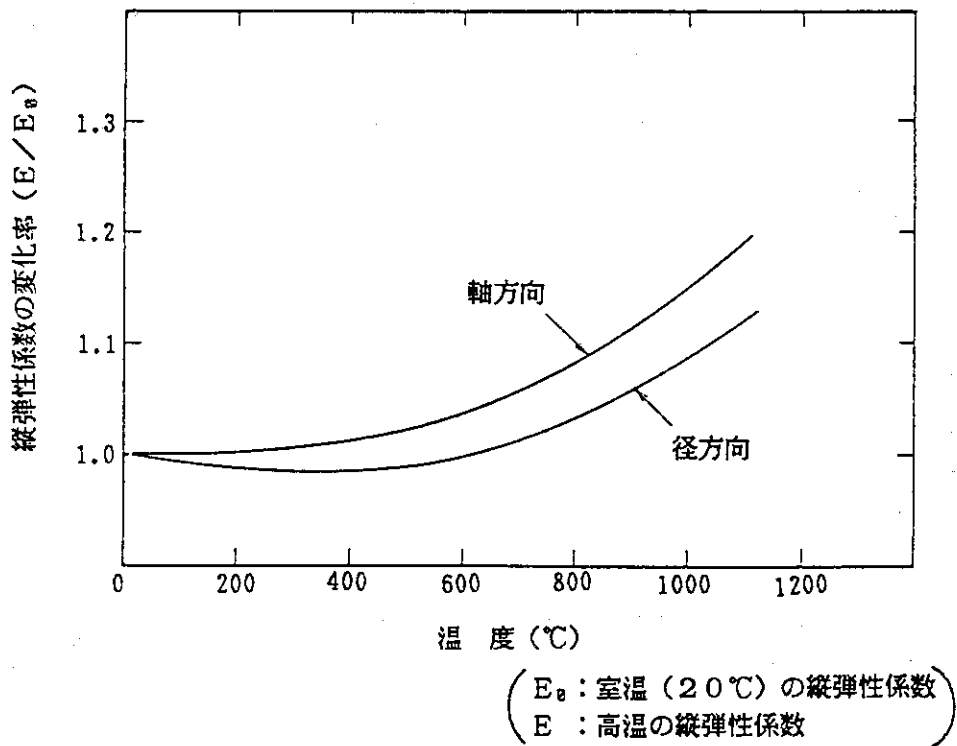


(E<sub>0</sub> : 室温 (20°C) の縦弾性係数  
E : 高温の縦弾性係数)

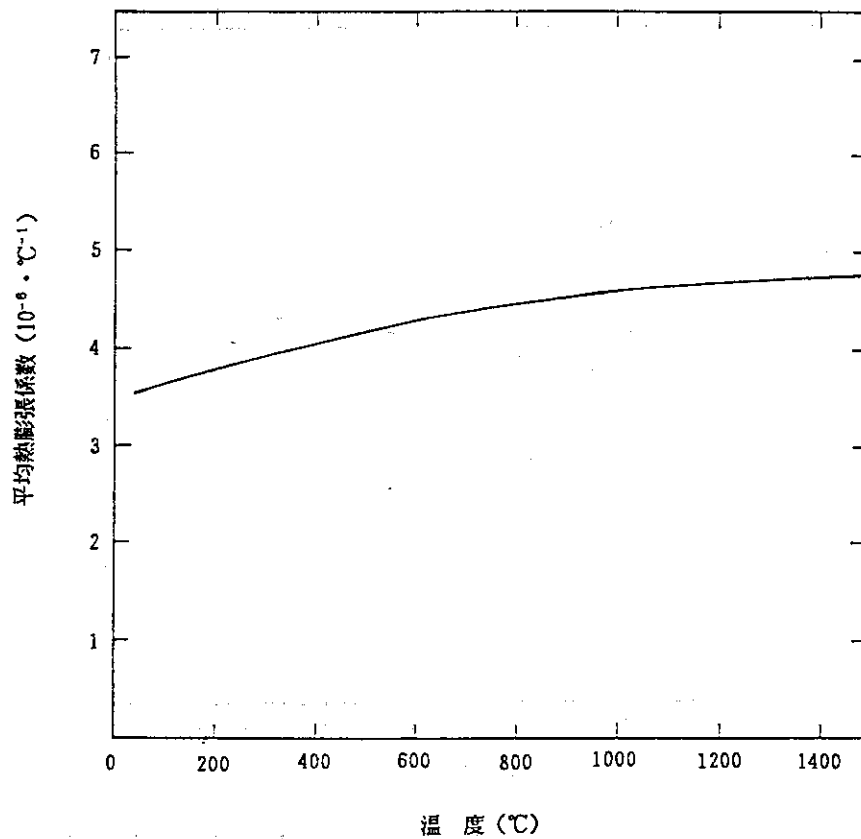
別図第4-(a) IG-110黒鉛の縦弾性係数の温度効果 (未酸化材)



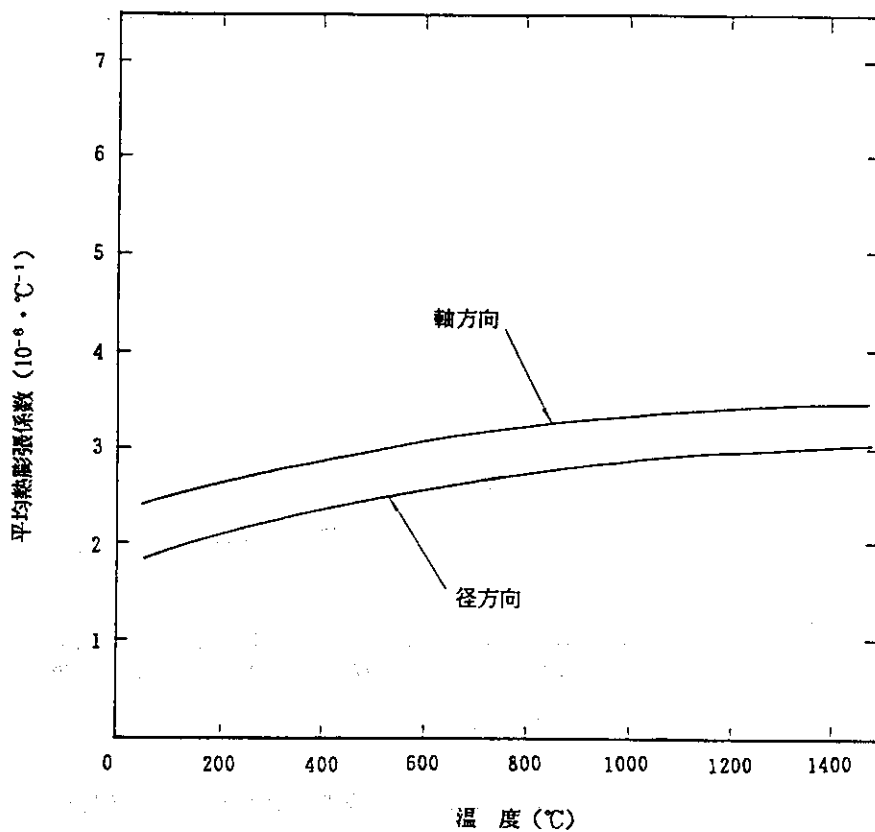
別図第 4-(b) PGX黒鉛の縦弾性係数の温度効果 (未酸化材)



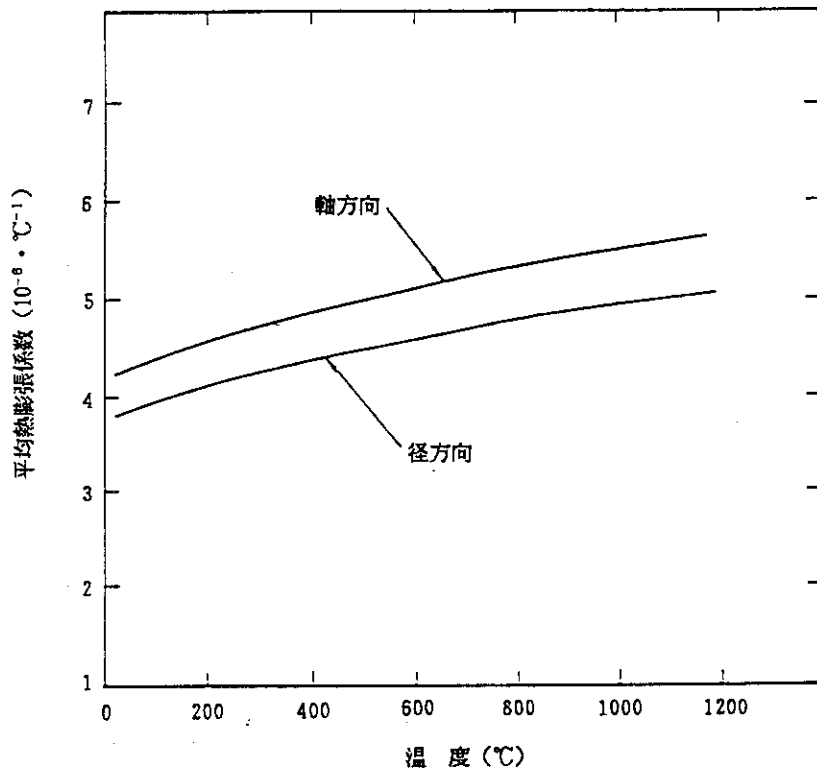
別図第 4-(c) ASR-ORB炭素の縦弾性係数の温度効果 (未酸化材)



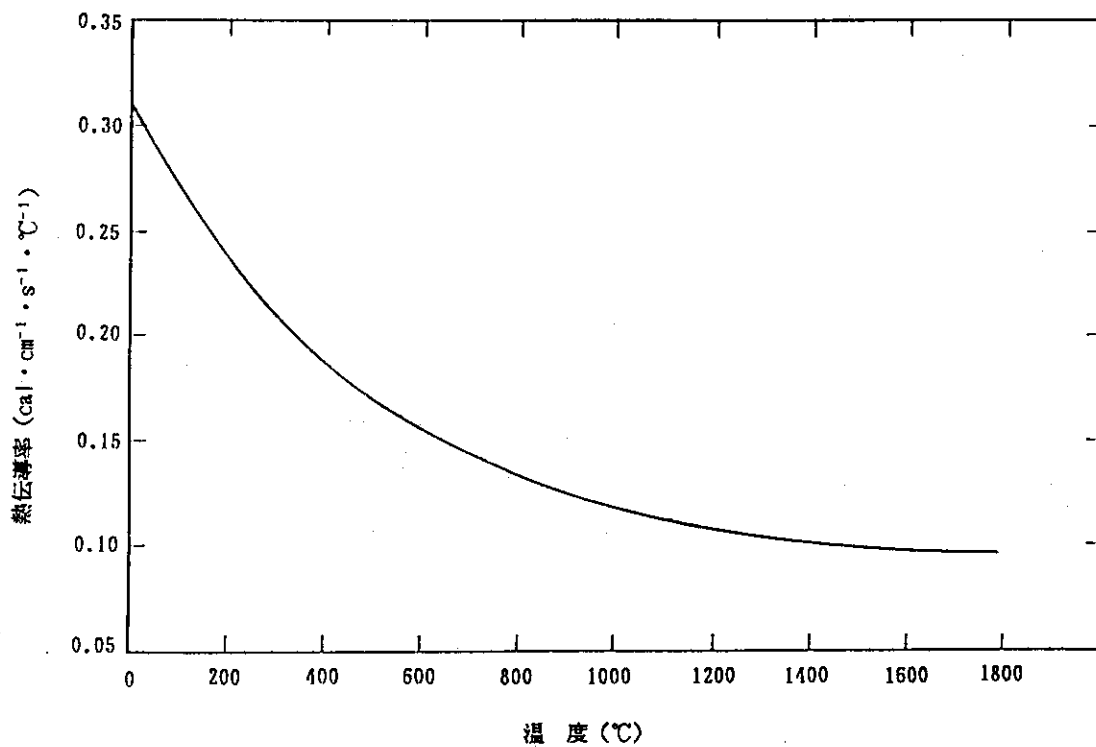
別図第5-(a) IG-110黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果 (未酸化材)



別図第5-(b) PGX黒鉛の平均熱膨張係数の温度効果 (未酸化材)

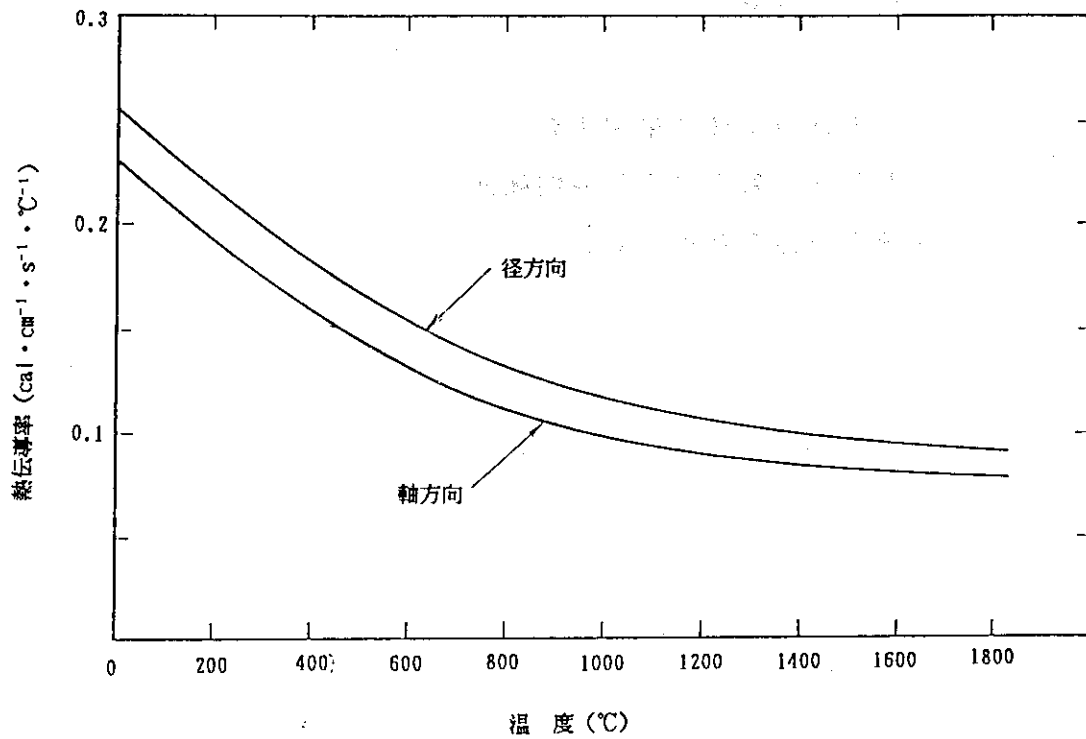


別図第5-(c) ASR-ORB炭素の平均熱膨張係数の温度効果 (未酸化材)

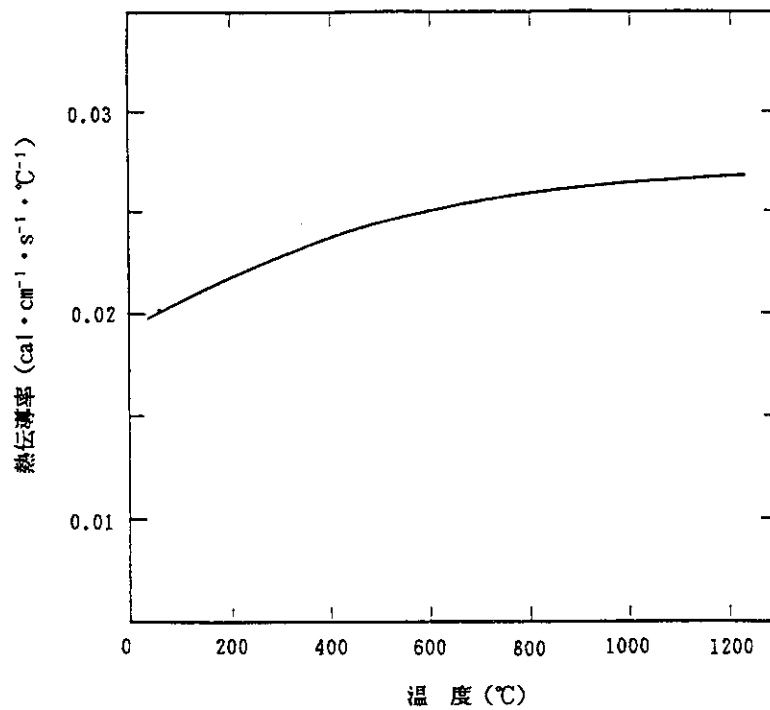


別図第6-(a) IG-110黒鉛の熱伝導率の温度効果 (未酸化材)





別図第 6-(b) PGX 黒鉛の熱伝導率の温度効果 (未酸化材)



別図第 6-(c) ASR-ORB 炭素の熱伝導率の温度効果 (未酸化材)

付録 2 設計用データの関係式

表 A - 1 縦弾性係数の温度効果関係式

表 A - 2 平均熱膨張係数の温度効果関係式

表 A - 3 熱伝導率の温度効果関係式

表A-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<sup>2</sup>)

$E_{20}$  : 室温 (20℃) 時の縦弾性係数 (kg/cm<sup>2</sup>)

$f_{E(T)}$  : 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 (℃)

材質	IG-110	P G X		A S R - O R B	
		軸方向	径方向	軸方向	径方向
T	20 ≤ T ≤ 1700	20 ≤ T ≤ 1400	20 ≤ T ≤ 1400	20 ≤ T ≤ 1100	20 ≤ T ≤ 1100
$E_{20}$	8.5 × 10 <sup>4</sup>	5.4 × 10 <sup>4</sup>	6.9 × 10 <sup>4</sup>	8.0 × 10 <sup>4</sup>	8.9 × 10 <sup>4</sup>
$C_0$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$C_1$	1.3328 × 10 <sup>-5</sup>	-1.0752 × 10 <sup>-4</sup>	-3.5163 × 10 <sup>-5</sup>	-9.0284 × 10 <sup>-5</sup>	-9.0284 × 10 <sup>-5</sup>
$C_2$	-1.5281 × 10 <sup>-7</sup>	2.3596 × 10 <sup>-7</sup>	1.1946 × 10 <sup>-7</sup>	1.1619 × 10 <sup>-7</sup>	1.1619 × 10 <sup>-7</sup>
$C_3$	4.4335 × 10 <sup>-10</sup>	-5.6448 × 10 <sup>-12</sup>	6.0729 × 10 <sup>-11</sup>	5.5751 × 10 <sup>-11</sup>	5.5751 × 10 <sup>-11</sup>
$C_4$	-2.5016 × 10 <sup>-13</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0
$C_5$	4.8723 × 10 <sup>-17</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0

横弾性係数は、 $G = E / 2 (1 + \nu)$  で求める。

表 A-2 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℃) から温度 T までの平均熱膨張係数 (°C<sup>-1</sup>)

$\bar{\alpha}_{400}$  : 室温 (20℃) から 400℃ までの平均熱膨張係数 (°C<sup>-1</sup>)

$f_{\bar{\alpha}(T)}$  : 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	P G X		A S R - O R B	
		軸方向	径方向	軸方向	径方向
T	100 ≤ T ≤ 1500	20 ≤ T ≤ 1500	20 ≤ T ≤ 1500	20 ≤ T ≤ 1100	20 ≤ T ≤ 1100
$\alpha_{400}$	4.06 × 10 <sup>-6</sup>	2.87 × 10 <sup>-6</sup>	2.35 × 10 <sup>-6</sup>	4.9 × 10 <sup>-6</sup>	4.4 × 10 <sup>-6</sup>
C <sub>0</sub>	0.853157	0.814175	0.750637	0.857495	
C <sub>1</sub>	4.26564 × 10 <sup>-4</sup>	5.39489 × 10 <sup>-4</sup>	7.04419 × 10 <sup>-4</sup>	3.96978 × 10 <sup>-4</sup>	
C <sub>2</sub>	-1.42849 × 10 <sup>-7</sup>	-1.79731 × 10 <sup>-7</sup>	-2.18617 × 10 <sup>-7</sup>	-1.08866 × 10 <sup>-7</sup>	

表A-3 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 (cal·cm<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>)

$K_{20}$  : 室温 (20°C) 時の熱伝導率 (cal·cm<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>)

$f_{K(T)}$  : 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 (°C)

材質	IG-110	P G X		A S R - O R B
		軸 方 向	径 方 向	
T	20 ≤ T ≤ 1800	20 ≤ T ≤ 1600	20 ≤ T ≤ 1600	20 ≤ T ≤ 1100
$K_{20}$	0.3	0.225	0.25	0.0196
$C_0$	1.02748	1.01626	1.01891	0.988315
$C_1$	-1.3589 × 10 <sup>-3</sup>	-1.0159 × 10 <sup>-3</sup>	-8.9988 × 10 <sup>-4</sup>	7.2818 × 10 <sup>-4</sup>
$C_2$	1.1127 × 10 <sup>-6</sup>	5.3802 × 10 <sup>-7</sup>	4.0293 × 10 <sup>-7</sup>	-4.6650 × 10 <sup>-7</sup>
$C_3$	-4.7648 × 10 <sup>-10</sup>	-1.0007 × 10 <sup>-10</sup>	-5.8516 × 10 <sup>-11</sup>	1.0452 × 10 <sup>-10</sup>
$C_4$	8.6949 × 10 <sup>-14</sup>	0.0	0.0	0.0