

JAERI-Tech

94-035



HTTR炉心支持黒鉛構造物の許容表面欠陥
に対する破壊力学的評価

1994年12月

石原正博・伊与久達夫・塩沢周策・辻 延昌*

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

本レポートは、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、お申し越しください。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。

This report is 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. 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

HTTR 炉心支持黒鉛構造物の許容表面欠陥に対する破壊力学的評価

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・塩沢 周策・辻 延昌*

(1994年11月25日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心支持黒鉛構造物には、耐熱特性に優れた黒鉛及び炭素材料が用いられる。これらの材料は脆性材料であるために、加工や取扱い工程において表面に割れ等が生じる可能性がある。そこで、外観検査における合否の判定基準を定めるために、構造物の表面に生じる割れ等に対する許容欠陥寸法を定量的に求めることが必要である。このため、本報告では黒鉛及び炭素材料の表面の割れ等に対する許容欠陥寸法を破壊力学的観点から検討し、定量的に定めた。

Fracture Mechanical Evaluation of Allowable Surface Flaw
for Core Support Graphite Components in the HTTR

Masahiro ISHIHARA, Tatsuo IYOKU, Shusaku SHIOZAWA
and Nobumasa TSUJI*

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

(Received November 25, 1994)

Graphite and carbon materials are used for core support components in the High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR) due to their excellent heat-resistant properties. In the machining or handling process of the component fabrication surface flaws and so forth are possibly formed since these materials are brittle. In order to determine the pass/fail criteria in a visual inspection, it is necessary to quantitatively determine the allowable flaw size on the surface of the core support components. Accordingly, allowable flaw sizes for these graphite and carbon materials are quantitatively evaluated on the basis of the fracture mechanics approach in this report.

Keywords: HTTR, Graphite, Carbon, Allowable Flaw Size, Fracture Mechanics, Core Support Component

*Fuji Electric Company

目 次

1. はじめに	1
2. 応力拡大係数の評価方法	4
3. 許容欠陥寸法の評価	11
4. 結言	44
謝辞	44
参考文献	45
付録 A PGX 黒鉛の表面模様	46
付録 B 外観検査用許容欠陥寸法の限界見本	58

Contents

1. Introduction	1
2. Evaluation Method of the Stress Intensity Factor	4
3. Evaluation of the Allowable Flaw Size	11
4. Concluding Remarks	44
Acknowledgements	44
References	45
Appendix A Appearance of PGX Graphite	46
Appendix B Allowable Flaw Size Sample for Visual Inspection	58

1. はじめに

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心側部及び下部は、固定反射体、高温プレナムブロック、サポートポスト、炉床部断熱層等の炉心支持黒鉛構造物により支持される。このうち、特に大型の固定反射体ブロック、高温プレナムブロック等には米国UCAR社製の粗粒準等方性黒鉛（PGX黒鉛）が、また高強度が要求されるサポートポスト等には東洋炭素（株）製の微粒等方性黒鉛（IG-110黒鉛）が、さらに断熱性能が要求される炉床部断熱層の炭素ブロックには独SIGRI社製の粗粒準等方性炭素（ASR-ORB炭素）が用いられる。これら黒鉛及び炭素の特性を第1.1表に示す(1)。これらの炉心支持黒鉛構造物は、燃料体ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等の炉心黒鉛構造物を支持し、荷重を圧力容器に伝えるとともに熱遮へい等の機能を有している。HTTRの炉心支持黒鉛構造物を第1.1図に示す。

これら黒鉛及び炭素材料にはその取扱工程において付着物が着いたり、また脆性材料であるため金属材料に比べると衝撃荷重に弱く破損し易いため、構造物の機械加工や取扱工程において、その表面に割れ、欠けが生じる可能性がある。このため、このような炉心支持黒鉛構造物の外観検査では、「有害な割れ、欠け及び付着物が無いこと。」が判定基準となる。ここで、「有害」とは上記機能に支障をきたすことで、特に有害な割れについては荷重支持機能の観点から定量的な検討を必要とする。

そこで、破壊力学的手法を適用して炉心支持黒鉛構造物の表面に生じる割れに対する許容欠陥寸法を評価した。炉心支持黒鉛構造物に発生する応力分布が複雑であるため、許容欠陥寸法を評価するために必要な応力拡大係数はハンドブック等から直接得ることができない。この複雑な応力状態に対して、白鳥ら(2,3)は、表面き裂の深さ方向及び幅方向に任意に分布する応力に対して、き裂前縁各点の応力拡大係数を効果的に解析評価する方法を提案している。そこで、本報においては、白鳥らの方法の黒鉛構造物への適応性を検討し、彼らの手法を用いて求めた不均一応力下での応力拡大係数から許容欠陥寸法を評価した。

第1.1表 IG-110黒鉛, PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の特性値

(未照射材)

		IG-110黒鉛	PGX黒鉛	ASR-ORB炭素
かさ密度*	(g/cm ³)	1.78	1.73	1.65
平均引張強さ*	(kg/cm ²)	258	83(T)	69(T)
平均圧縮強さ*	(kg/cm ²)	784	312(T)	514(T)
縦弾性係数*	(kg/cm ²)	0.81×10 ⁵	0.66×10 ⁵ (T)	0.89×10 ⁵ (T)
	(± $\frac{1}{3}$ Su勾配)**			
平均熱膨張係数	(10 ⁻⁶ /°C)	4.06	2.34(T)	4.40(T)
(20~400°C)			2.87(L)	4.89(L)
熱伝導率	(kcal/m·s·°C)	1.9×10 ⁻²	1.8×10 ⁻² (T)	2.4×10 ⁻²
(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

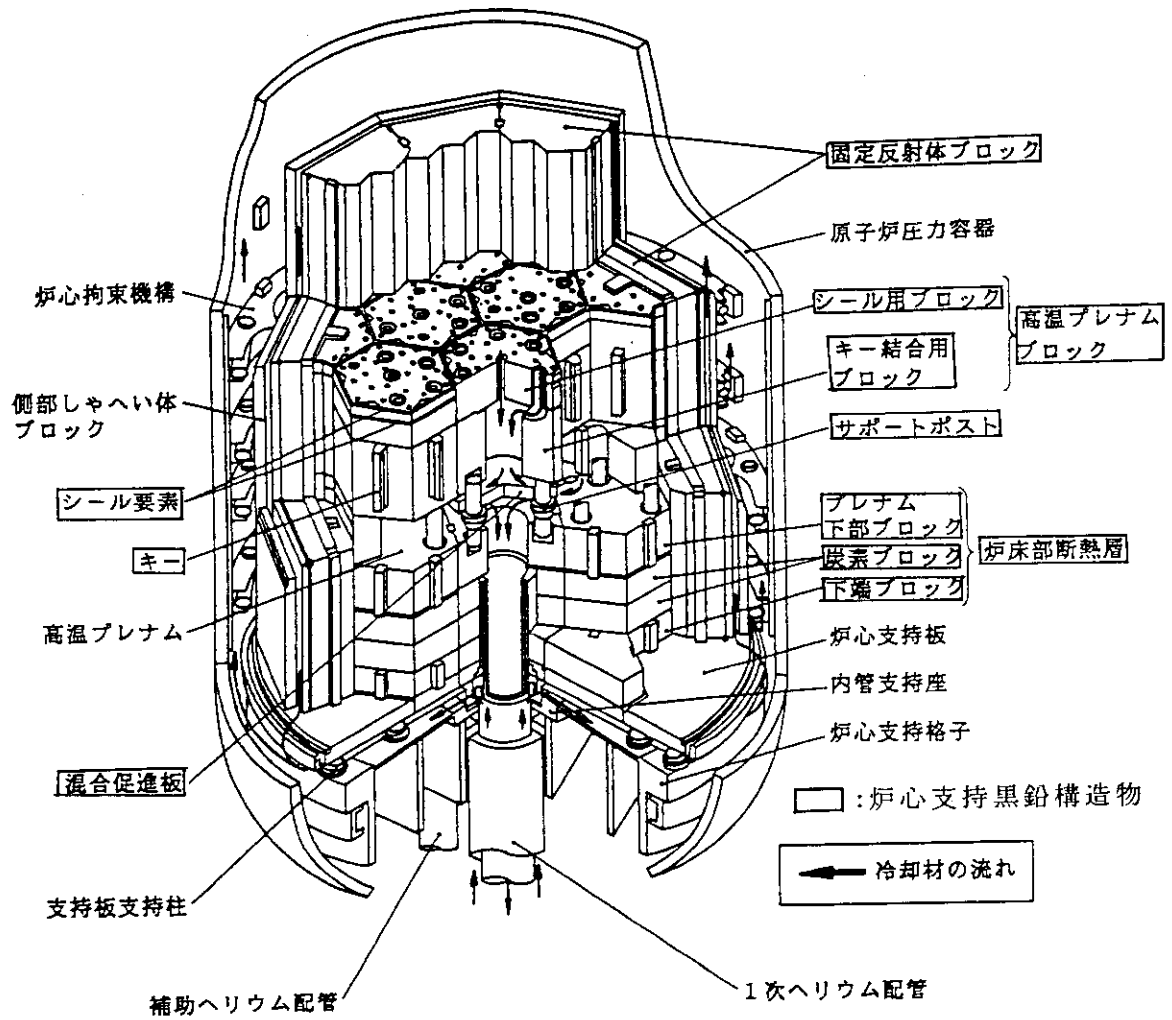
* : 室温での値

** : 応力-歪曲線における引張及び圧縮基準強さの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。

T : 素材の長軸方向に垂直な方向 (径方向)

L : 素材の長軸方向に平行な方向 (軸方向)



第 1.1 図 HTTR の炉心支持黒鉛構造物

2. 応力拡大係数の評価方法

黒鉛材料の破壊靱性値はモードⅠ型の方がモードⅡ型よりも小さくなるため⁽⁴⁻⁶⁾、炉心支持黒鉛構造物の表面に生じる割れに対してはモードⅠ型の応力拡大係数 (K_I) を評価すればよい。一般に3次元き裂の K_I を計算する方法としては、き裂形状をモデルに取り入れた3次元有限要素法 (FEM) 応力解析を行い開口変位法等により直接 K_I を計算する方法がある。許容欠陥寸法を評価するためには、き裂形状 (長さ及び深さ) をパラメータとした多数のケースについて K_I を計算する必要がある。このき裂をモデル化した3次元FEM応力解析では、数多くの解析ケースについての解析メッシュが必要となるとともに、解析結果の精度を上げるため細分割した多数の要素を用いた詳細な解析を行う必要があるため解析時間が膨大となり現実的ではない。そこで、本報告における K_I の評価では、き裂形状をモデル化しない体系でのFEM応力解析より求めた深さ方向の応力分布とき裂形状だけで決まる重み関数とから K_I を評価する白鳥らの開発した手法を用いた。

ここでは、白鳥らの手法により求めた K_I とき裂形状をモデルに取り入れた3次元FEM応力解析で求めた K_I とを比較し、複雑な応力分布を有する炉心支持黒鉛構造物への白鳥らの手法の適応性を検討した。なお、き裂をモデル化した3次元FEM応力解析には、NISAI-ENDUREコード⁽⁷⁾を用いた。

2.1 NISAI-ENDUREによるき裂のモデル化

有限要素法により K_I を解析する場合、き裂先端での応力解析結果が K_I に影響を与えるため、解析メッシュを細かくし詳細な解析を行う必要がある。また、解析に用いる要素タイプ、適用する解法により K_I の解析結果が異なる。そこで、解析メッシュサイズ、使用する要素タイプ、 K_I の計算のための解法等のき裂のモデル化を検討し、 K_I が既に求められている体系についてのNISAI-ENDUREコードを用いた K_I と既に求められている K_I との比較から解析モデルを最適化した。

2.1.1 解析モデル

中央に3次元半だ円表面き裂を有する平板で、その上下端に一樣な引張荷重が負荷される体系を想定した。この体系に対する解析モデルは、第2.1図に示すように対称性を考慮すると1/4の部分についての解析を実施すればよい。第2.2図にこの体系に対する3次元のメッシュ分割を示す。解析に用いた要素は20節点六面体2次要素で、き裂前縁には中間節点を1/4分点に移動した要素⁽⁸⁾を用いた。また、分割した要素数は約600である。き裂の形状は、代表的なケースとしてき裂長さ $2a=10\text{mm}$ 、き裂深さ $b=2\text{mm}$ 及び $2a=4\text{mm}$ 、 $b=2\text{mm}$ の2種類とした。また、応力拡大係数の解法としては、エネルギー開放率法及び開口変位法を用いた。

2.1.2 解析結果

NISAI-ENDURE コードによる K_I 値の計算結果とハンドブック⁽⁹⁾に載ってい

るNewman & Rajuにより計算された K_I との比較を第2.3図に示す。図より NISAI-
-ENDURE コードによる K_I は、エネルギー開放率法を用いればほぼ5%程度の誤差
でNewman & Rajuの値に一致すると分かる。したがって、NISAI-
-ENDUREコード
を用いた解析では、20節点六面体2次要素及び中間節点を1/4分点に移動した要素
を用い、第2.2図に示す程度に細かなメッシュ分割を行ってエネルギー開放率法に
より K_I を解析すれば十分な精度が得られることが明らかとなった。

2.2 白鳥らの手法の検討

2.2.1 解析モデル

解析モデルとして、キー結合用ブロックの最も応力の集中するキー溝部に3次
元半だ円表面き裂を想定し、地震時にキーにより負荷されるキー反力を負荷荷重
とした。第2.4図に解析モデルを示す。解析ではZ方向の対称性を考慮して1/2の
部分についてモデル化し、上面の変位を拘束した。このため、き裂形状は1/4だ円
としている。

(1) NISAI- -ENDUREコードによる解析モデル

メッシュ分割を第2.5図に示す。解析に用いる要素は20節点六面体2次要素で、
き裂前縁には中間節点を1/4分点に移動した要素を用い、 K_I を十分な精度で得る
ために第2.2図を参考にメッシュ分割を行った。代表的なケースとして、き裂形状
はき裂の長さ $2a=20\text{mm}$ 、き裂の深さ $b=10\text{mm}$ とした。また、応力拡大係数の解法とし
てはエネルギー開放率法を用い、比較のため開口変位法も用いた。

(2) 白鳥らの手法

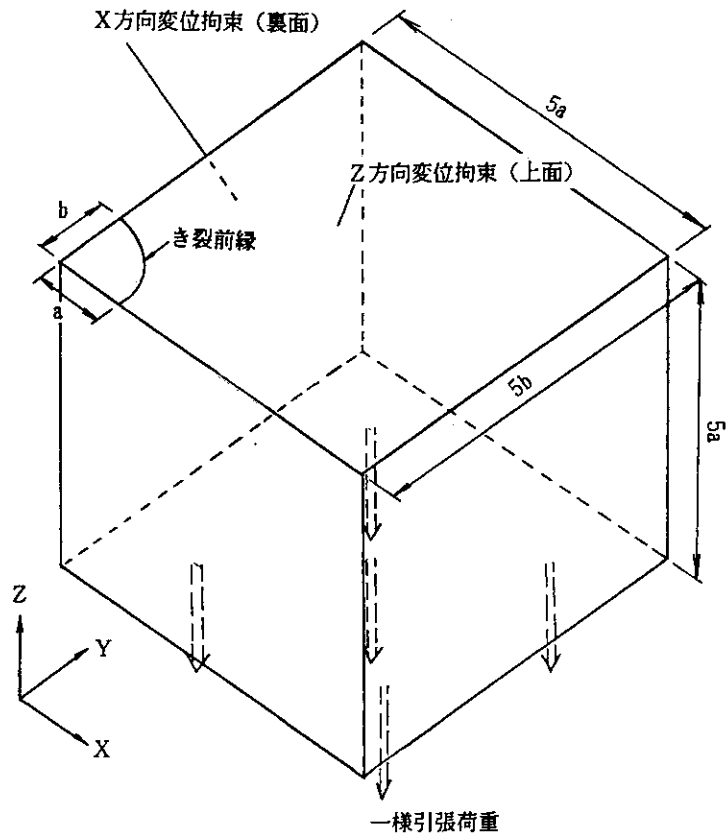
白鳥らの手法では、き裂形状をモデル化しない体系でのFEM応力解析より求
めた深さ方向の応力分布とき裂形状だけで決まる重み関数とから K_I を評価するた
め、き裂をモデル化しない場合の応力解析を行い、想定するき裂深さ方向の応力
分布を3次の多項式により定める必要がある。第2.6(1)図はキー結合用ブロックの
キー溝部の2次元FEM応力解析結果を示したものである。同図で、第2.4図に示
したき裂はA点に位置し、き裂の深さ方向(y方向)の応力分布は次式のように
定められる。

$$\sigma / \sigma_0 = -9360y^3 + 1010y^2 - 43.4y + 1.0 \quad (1)$$

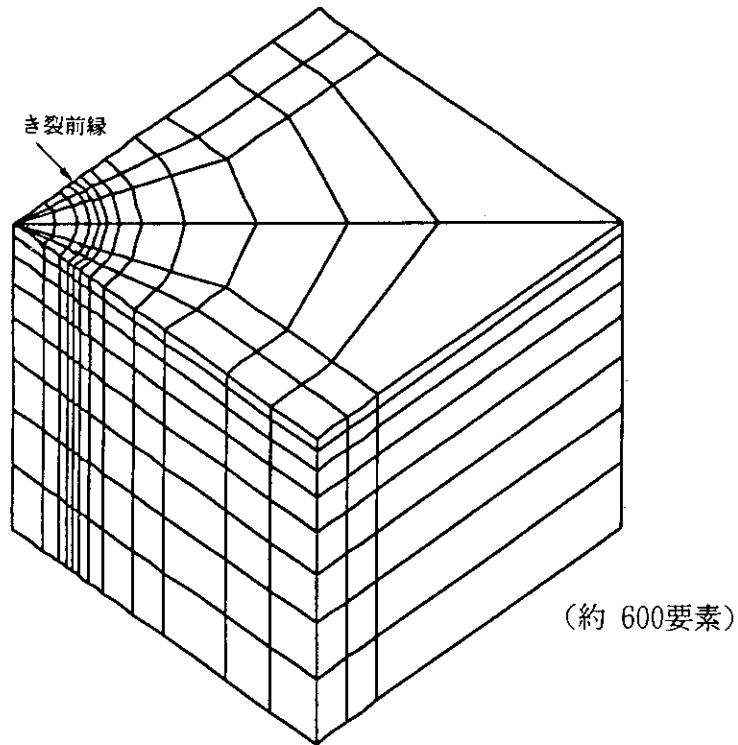
ここで、 σ は最大主応力(MPa)、 σ_0 はA点での最大主応力の最大値($y=0$ で σ_0
= 4 MPa)、 y はA点からのき裂の深さ方向の長さ(m)である。

2.2.2 解析結果

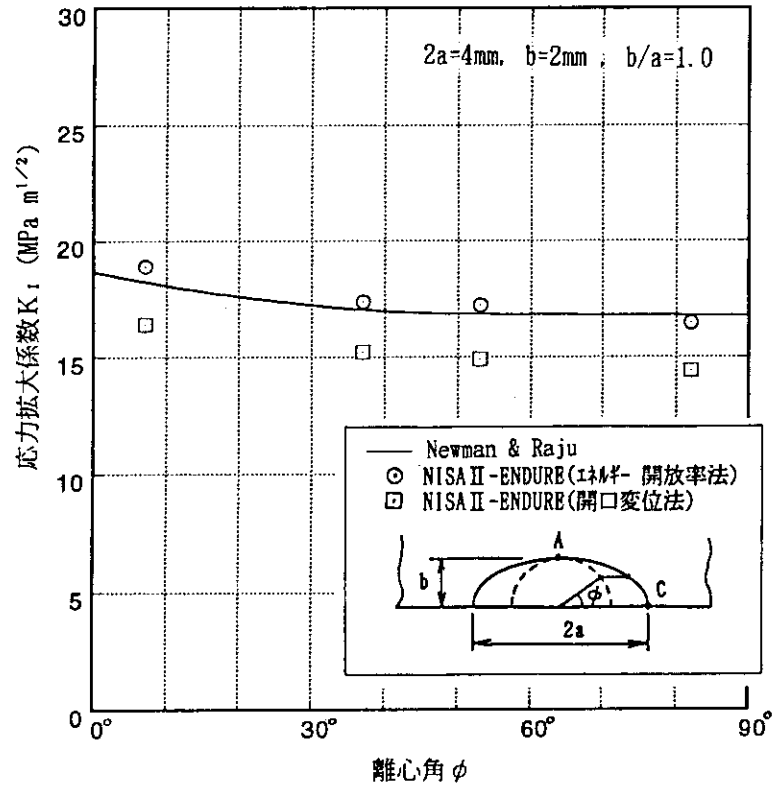
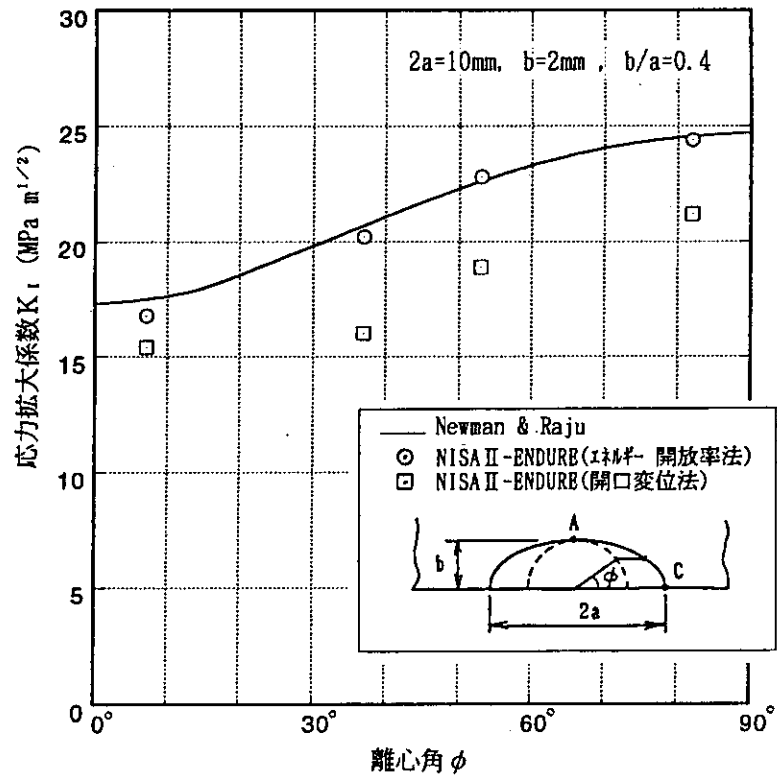
両者により求まる K_I を第2.7図に比較して示す。図より白鳥らの手法で求まる
 K_I は、エネルギー開放率法を用いた3次元FEM応力解析による K_I とよく一致
していることがわかる。したがって、許容欠陥寸法の算出においては、白鳥らの
方法を用いて K_I が評価できることが明らかとなった。



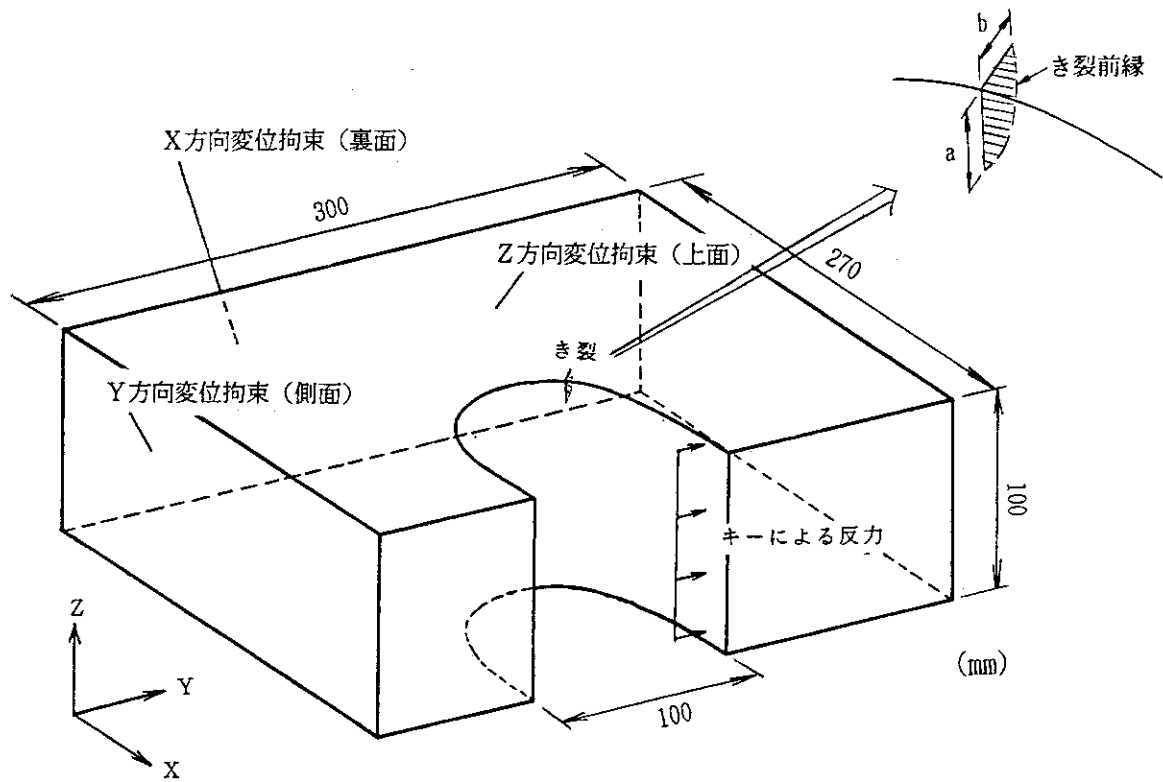
第2.1図 3次元半だ円表面き裂を有する平板に一様な引張荷重が加わった体系の解析モデル



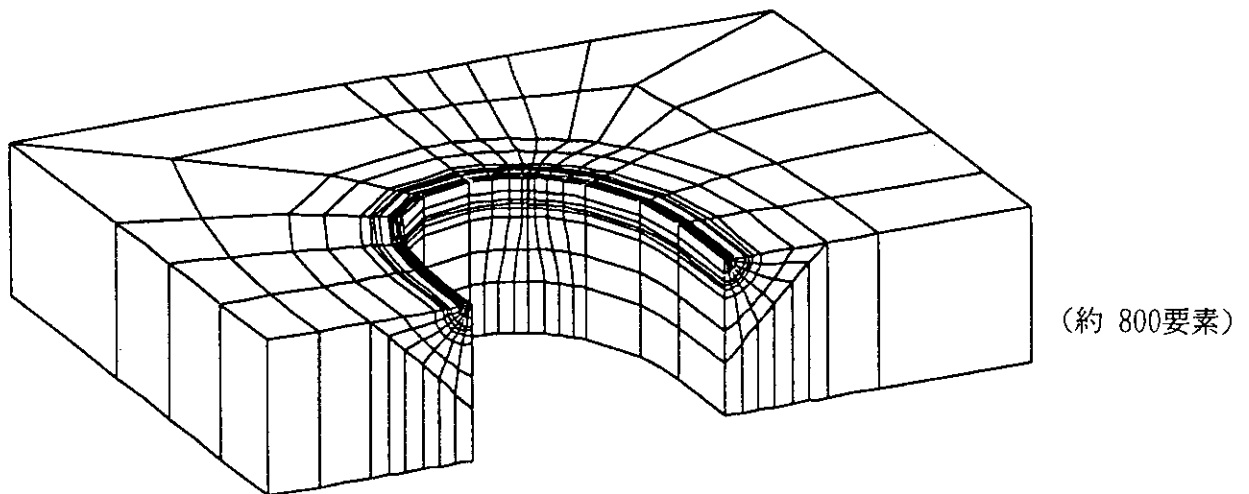
第2.2図 NISAI-ENDUREの解析メッシュ図



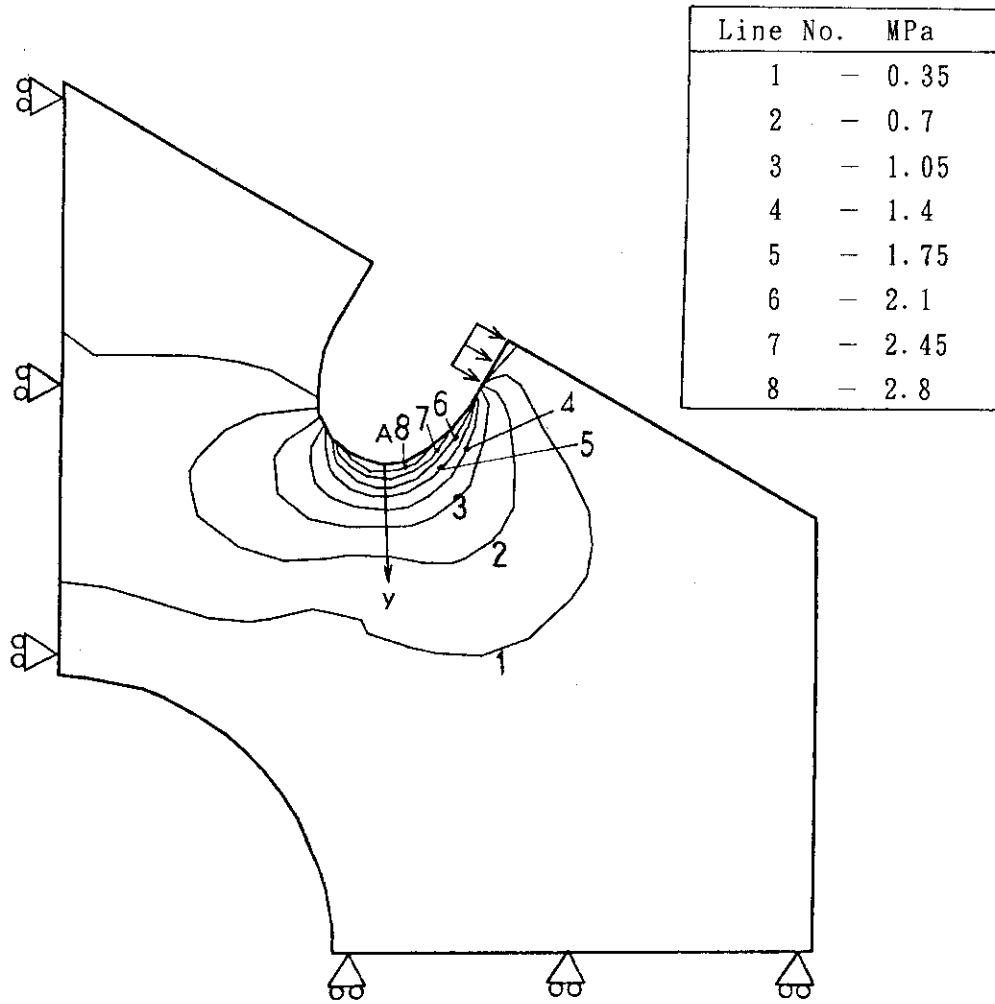
第2.3図 NISAII-ENDUREによる応力拡大係数 K_I とNewman & Rajuによる K_I との比較



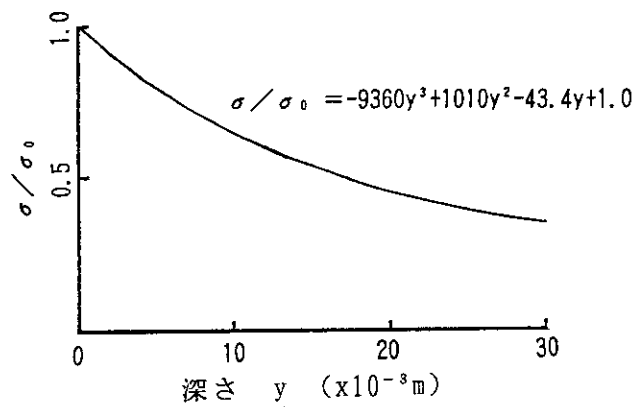
第2.4図 キー結合用ブロックの解析モデル



第2.5図 NISAI-ENDUREの解析メッシュ図



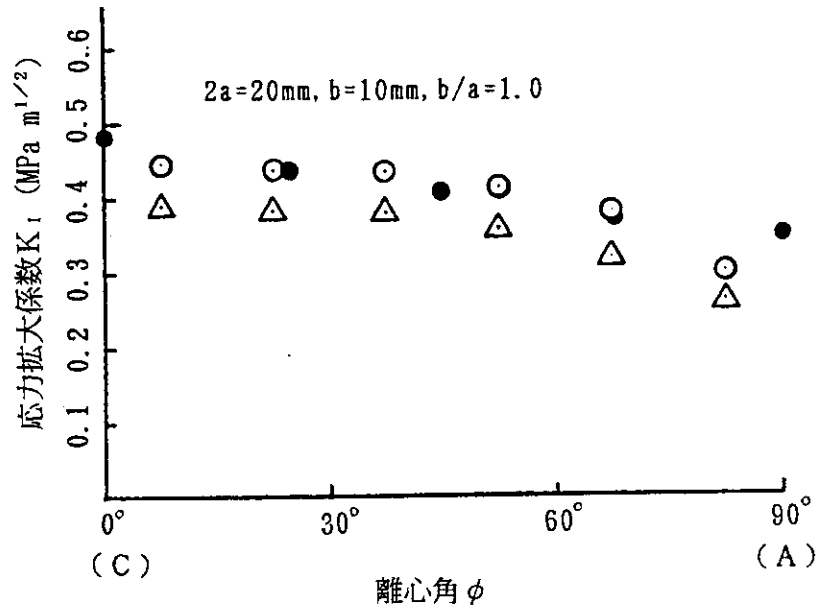
(1) 最大主応力分布



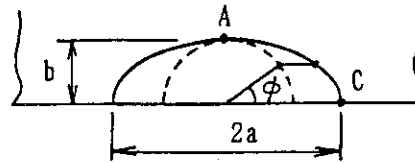
引張応力の深さ方向分布 (A上)

(2) 最大主応力のき裂深さ方向 (y 方向) の応力分布

第 2.6 図 キー結合用ブロックのキー溝部の 2 次元有限要素法応力解析結果



- 白鳥らの手法
- ⊙ き裂モデル3次元FEM解析 (エネルギー解放率法)
- △ き裂モデル3次元FEM解析 (開口変位法)



第2.7図 NISAH-ENDUREによる応力拡大係数 K_I と白鳥らの手法による K_I との比較

3. 許容欠陥寸法の評価

黒鉛の加工表面には、打痕等の外部要因による割れ、欠けの他に、特に粗粒黒鉛であるPGX黒鉛に見られる材料特有の表面模様がある。この表面模様は、外部要因による割れ、欠けとは性状が異なるので、区別して扱う。これに関しては、付録Aに示す。また、欠けについては一般に鋭角部分が無いためき裂として進展することは想定しなくてよい。

H T T Rの炉心支持黒鉛構造物の内、サポートポストやキー溝コーナー部等に特に応力が集中する。これらの高い応力の発生する部位（第3.1表参照）での許容欠陥寸法は小さくなる。一方、それ程応力が集中しない部位においては K_1 が小さく、許容欠陥寸法は大きくなる。このため、許容欠陥寸法は高応力の発生する部位とそれ以外の部位に分けて評価した。許容欠陥寸法の設定手順を第3.5図に示す。

3.1 高応力の部位

構造物に発生する応力を高く評価すると許容欠陥寸法を小さく見積り保守的な評価となるため、第3.1表に示した高応力の発生する部位について各材料毎に最も発生応力の高い部位を選定した。各材料について許容欠陥寸法を評価するために選んだ発生応力の高い部位は以下の通りである。なお、PGX黒鉛については、シール用ブロックのダウエル孔内面及びキー結合用ブロックのキー溝コーナー部の発生応力が同程度に高いため、この2箇所を対象とした。

- i) IG-110黒鉛 : ポストシート球面部
- ii) PGX 黒鉛 : シール用ブロックのダウエル孔内面及び
キー結合用ブロックのキー溝コーナー
- iii) ASR-ORB炭素 : 周辺内管貫通ブロックの外表面

3.1.1 初期き裂の形状

初期き裂として、割れを初期き裂とみなしてき裂の進展を評価する場合に一般的に用いられている3次元半だ円表面き裂及び3次元1/4だ円コーナ-き裂を想定する。黒鉛構造物の表面にある場合には半だ円表面き裂、特に割れが構造物の角部にある場合には1/4だ円コーナ-き裂でモデル化する。き裂の方向は、モードIによる破壊を想定し、発生している引張応力に直交する方向とする。表面及び角部に想定したき裂の形状を第3.6図に示す。同図に示すように、き裂寸法のパラメータは、き裂の長さ $2a$ 及びき裂の深さ b である。この他に、割れが面内にあっても深さが測定できない場合を考慮して、一様引張応力場における貫通き裂も想定した。

3.1.2 応力拡大係数 K_1 の評価

き裂形状をモデル化しない体系でのFEM応力解析より求めた深さ方向の応力

分布とき裂形状だけで決まる重み関数とから K_I を求める白鳥らの方法により K_I を計算する。 K_I の計算手順を第3.7図に、またき裂形状による重み関数 K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 を第3.2表に示す。引張応力の高い部位について2次元FEM応力解析により計算した応力分布を第3.3表及び第3.8図から3.11図に示す。ただし、ピークとなる表面での最大主応力の値は、保守側に基準強さ（Su値）⁽¹⁰⁾に等しくなるよう荷重を設計値より大きく設定して解析している。き裂の長さ $2a$ 及び深さ b をパラメータとした各部位における K_I の計算結果を第3.12図から第3.15図に示す。図中実線はき裂の最深点（A点）での K_I を、また破線はき裂表面（C点）での K_I を表す。A点での K_I は、き裂の長さ $2a$ が長い程大きくなるが、き裂の深さ b が大きくなるにつれて極大点をもつようになる。これは、黒鉛構造物に発生する最大主応力が表面で最大になり、内部に入るにしたがって低下しているためである。

なお、一様引張応力場における貫通き裂に対する K_I は、下式により計算される。

$$K_I = \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 σ は一様引張応力、 $2a$ はき裂の長さである。

3.1.3 破壊靱性値 K_{Ic}

IG-110黒鉛、PGX黒鉛及びASR-ORB炭素の三種類の材料の破壊靱性値 K_{Ic} として、円板形試験片を用いた佐藤らによる測定値⁽¹¹⁾を用いる。これらの材料に対する破壊靱性値 K_{Ic} は以下の通りである。

IG-110黒鉛	:	0.79 ± 0.017 (MPa m ^{1/2})
PGX黒鉛	:	0.60 ± 0.034 (MPa m ^{1/2})
ASR-ORB炭素	:	0.64 ± 0.015 (MPa m ^{1/2})

ここで、±の値は標準偏差を示す。

3.1.4 許容欠陥寸法の評価

第3.12図から第3.15図に示した K_I の計算結果より $K_I < K_{Ic}$ が成り立つき裂寸法の範囲を第3.16図から第3.19図に示す。また、これらの図には貫通き裂に対して $K_I < K_{Ic}$ となるき裂の範囲も示す。これより、許容欠陥寸法として佐藤ら⁽¹¹⁾の考え方に従い、繰り返し荷重によるき裂の進展や K_I 測定誤差等の不確かさを考慮してき裂寸法に対し安全係数2を考慮する。具体的には、第3.16図から第3.19図において、き裂長さ及び深さをそれぞれ1/2倍した範囲を許容欠陥寸法とする。ここで定めた各々の黒鉛及び炭素材料の高応力部位に対する許容欠陥寸法を第3.4表に示す。なお、PGX黒鉛については、第3.17図と第3.18図から定まる許容欠陥寸法のうち厳しい方の寸法により定めた。

3.2 高応力の発生しない部位

高応力の発生しない部位の応力分布は様々であるが、発生する最大主応力は低く設計基準強さ（ S_u 値）の半分以下となっている。具体的には、

IG-110黒鉛 : 5.0MPa 以下

P G X黒鉛 : 2.0MPa 以下

である。なお、ASR-ORB炭素については、高応力の発生する部位が広範囲になるため、高応力の発生しない部位での許容欠陥寸法を保守的に第3.4表に示す値とする。

高応力の発生しない部位の評価モデルとしては、保守的に上記に示す発生応力が一様引張応力として3次元半だ円表面き裂や3次元1/4だ円コーナ-き裂に加わるものとし3.1節と同様の評価を行う。

本評価モデルを用いて計算した K_I を第3.20図及び第3.21図に示す。これらの計算結果より、 $K_I < K_{Ic}$ が成り立つき裂寸法の範囲を第3.22図及び3.23図に示す。同図には、貫通き裂に対する $K_I < K_{Ic}$ が成り立つき裂寸法の範囲も合わせて示す。許容欠陥寸法としては、3.1節と同様に繰り返し荷重によるき裂の進展や K_I 測定誤差等の不確かさを考慮して、き裂寸法に対し安全係数を2とする。このようにして定めた高応力の発生しない部位に対する許容欠陥寸法を第3.5表に示す。

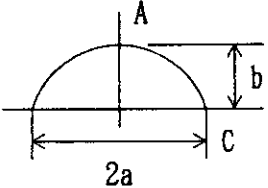
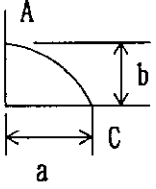
3.3 外観検査における許容欠陥寸法

3.1及び3.2節において炉心支持黒鉛構造物の許容欠陥寸法を強度上の観点から面内及び角部に割れが存在する場合に対して定めた。実際の黒鉛及び炭素構造物の外観検査としては、割れが面内にある場合と角部にある場合について各々許容欠陥寸法を定めることは煩雑であるため、これらを包絡するように外観検査に用いる許容欠陥寸法を第3.6表のとおり規定した。なお、本表の許容欠陥寸法は強度上の観点から、割れを初期き裂とみなして構造物が破壊するか否かで判定したものである。外観検査で要求される欠けの判断については、シール性能、遮へい性能等の機能上の要求を満足していることを確認することが必要である。また、割れが本表の許容寸法を超えた場合には、それが初期き裂とならないように滑らかに仕上げる等の処置を行うことが必要である。さらに、ここで定めた許容欠陥寸法に基づいた限界見本を付録Bに示す。

第3.1表 炉心支持黒鉛構造物のうち高い応力の発生する部位

材 料	高い応力の発生する部位	説明図
IG-110黒鉛	<ul style="list-style-type: none"> ・ サポートポスト球面部 ・ ポストシート球面部 	第3.1図 第3.2図
P G X 黒鉛	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固定反射体のキー溝コーナー ・ シール用ブロックのダウエル孔周囲及び内面 ・ キー結合用ブロックのキー溝コーナー ・ プレナム下部ブロックのキー溝コーナー ・ 下端ブロックのキー溝コーナー 	第3.3図 第3.3図 第3.3図 第3.3図 第3.3図
ASR-ORB炭素	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中心ブロック及び周辺内管貫通ブロックの外面及び貫通孔内面 	第3.4図

第3.2表 き裂形状による重み関数 K_0, K_1, K_2, K_3

き裂形状	b/a	き裂先端の位置	重み関数 / σ_0 / \sqrt{b}			
			K_0	K_1	K_2	K_3
			$\sigma_0 \sqrt{b}$	$\sigma_0 \sqrt{b}$	$\sigma_0 \sqrt{b}$	$\sigma_0 \sqrt{b}$
半楕円表面き裂 	0.2	A	1.961	0.827	0.522	0.381
		C	0.982	0.847	0.754	0.684
	0.4	A	1.724	0.670	0.407	0.290
		C	1.248	1.045	0.914	0.818
	0.6	A	1.513	0.532	0.312	0.219
		C	1.324	1.105	0.961	0.858
	1.0	A	1.182	0.343	0.192	0.132
		C	1.294	1.084	0.951	0.854
1/4楕円コーナークリACK 	0.2	A	2.043	0.849	0.528	0.381
		C	1.084	0.935	0.832	0.753
	0.4	A	1.869	0.714	0.422	0.291
		C	1.385	1.159	1.012	0.906
	0.6	A	1.713	0.596	0.339	0.230
		C	1.471	1.226	1.068	0.954
	1.0	A	1.425	0.429	0.236	0.157
		C	1.425	1.170	1.055	0.947

重み関数の値は、文献(2), (3) より引用した。

$$K_i / (\sigma_0 \sqrt{b}) = F \cdot (\pi / Q)^{1/2}, \quad Q = 1 + 1.464(b/a)^{1.65}$$

但し、本表はき裂深さ b と厚さ t の比 b/t が 0.2 の場合の値を示しており、実際の計算では、 b/t が 0.2 を超える場合については文献(2), (3) に記載の値 ($b/t = 0.4, 0.6, 0.8$) を内挿して用いている。

第3.3表 高い応力の発生する部位の応力分布

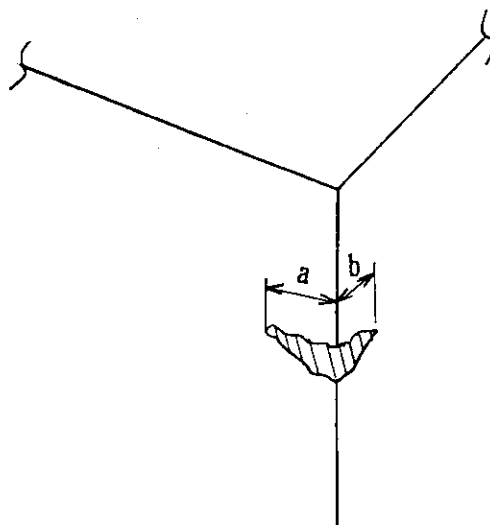
材 料	構造物・部位	引張応力 $\sigma = (\alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + \delta) \sigma_0$				応力分布図	
		σ_0 (MPa)	α	β	γ		δ
IG-110黒鉛	ポストシート球面部	19.4	-278704	11958	-173.4	1.000	第 3.8図
PGX黒鉛	シール用ブロックのダウエル孔	4.41	-141800	5858.9	-97.9	1.000	第 3.9図
	キー結合用ブロックのキー溝 コーナー	4.41	-2686.4	509.4	-33.7	1.000	第3.10図
ASR-ORB 炭素	周辺内管貫通ブロック外面	2.94	-77.9	66.7	-17.7	1.000	第3.11図

* y は表面からの距離 [m]

第3.4表 高い応力の発生する部位に対する許容欠陥寸法

材 料	割 れ の 許 容 寸 法 (mm)			
	面 内 に あ る 割 れ			角 部 に あ る 割 れ
	長 さ (2a)	深 さ (b)	長 さ (深 さ が 不 明 な 場 合)	長 さ* a
IG-110黒鉛	1.5	0.5	0.5	—
P G X 黒鉛	20	6	6	5
ASR-0RB炭素	70	16	15	12

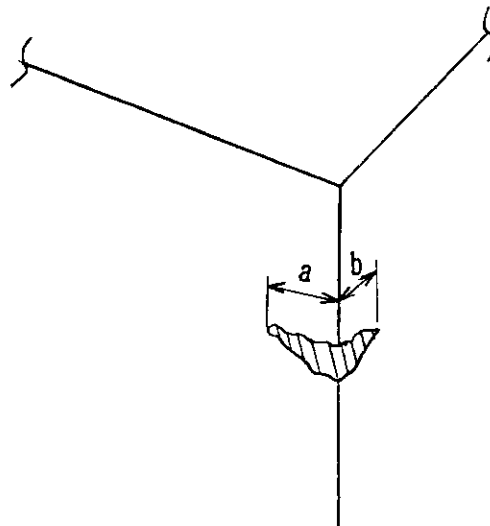
* 寸法の長い方とする



第3.5表 高応力の発生しない部位に対する許容欠陥寸法

材 料	割 れ の 許 容 寸 法 (mm)			
	面 内 に あ る 割 れ			角 部 に あ る 割 れ
	長 さ ($2a$)	深 さ (b)	長 さ (深 さ が 不 明 な 場 合)	長 さ * a
IG-110黒鉛	17	7	8	6
P G X 黒鉛	60	24	28	22

* 寸法の長い方とする

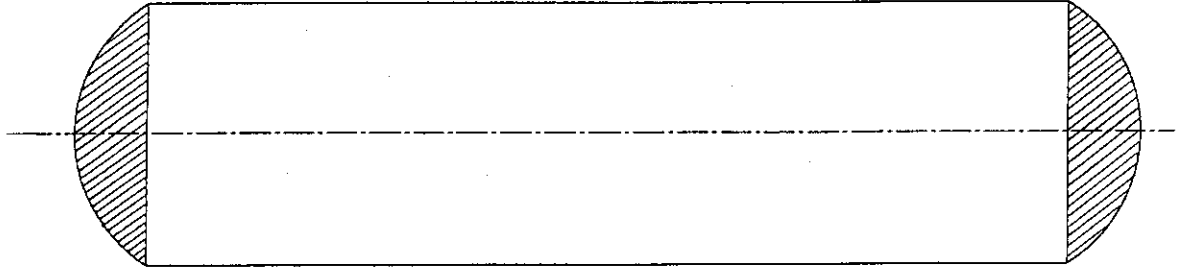


第3.6表 外観検査用許容欠陥寸法

材 料	許容欠陥寸法	対 称 部 位
IG-110黒鉛	長さ*1.5mm以下 かつ、深さ0.5mm以下	サポートポスト球面部 ポストシート球面部
	長さ*17mm以下 かつ、深さ6mm以下	上記以外
P G X 黒鉛	長さ*20mm以下 かつ、深さ5mm以下	固定反射体のキー溝コーナー シール用ブロックのダウエル孔 周囲及び内面 キー結合用ブロックのキー溝 プレナム下部ブロックのキー溝 コーナー 下端ブロックのキー溝コーナー
	長さ*60mm以下 かつ、深さ22mm以下	上記以外
ASR-ORB炭素	長さ*70mm以下 かつ、深さ12mm以下	全面

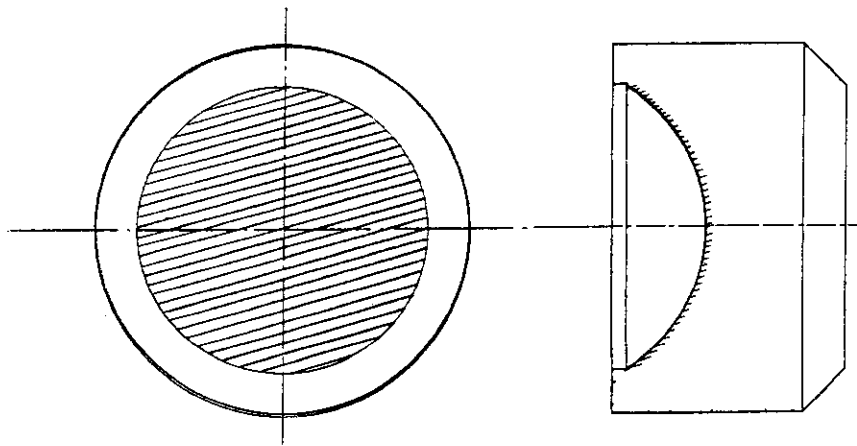
* 長さは平面内の広がりのうち最大のものをとる。

なお、割れが角部にある場合は、許容欠陥寸法は深さとして判定する。また、割れの深さが不明な場合は、長さが深さに対する判定基準を超えないこと。



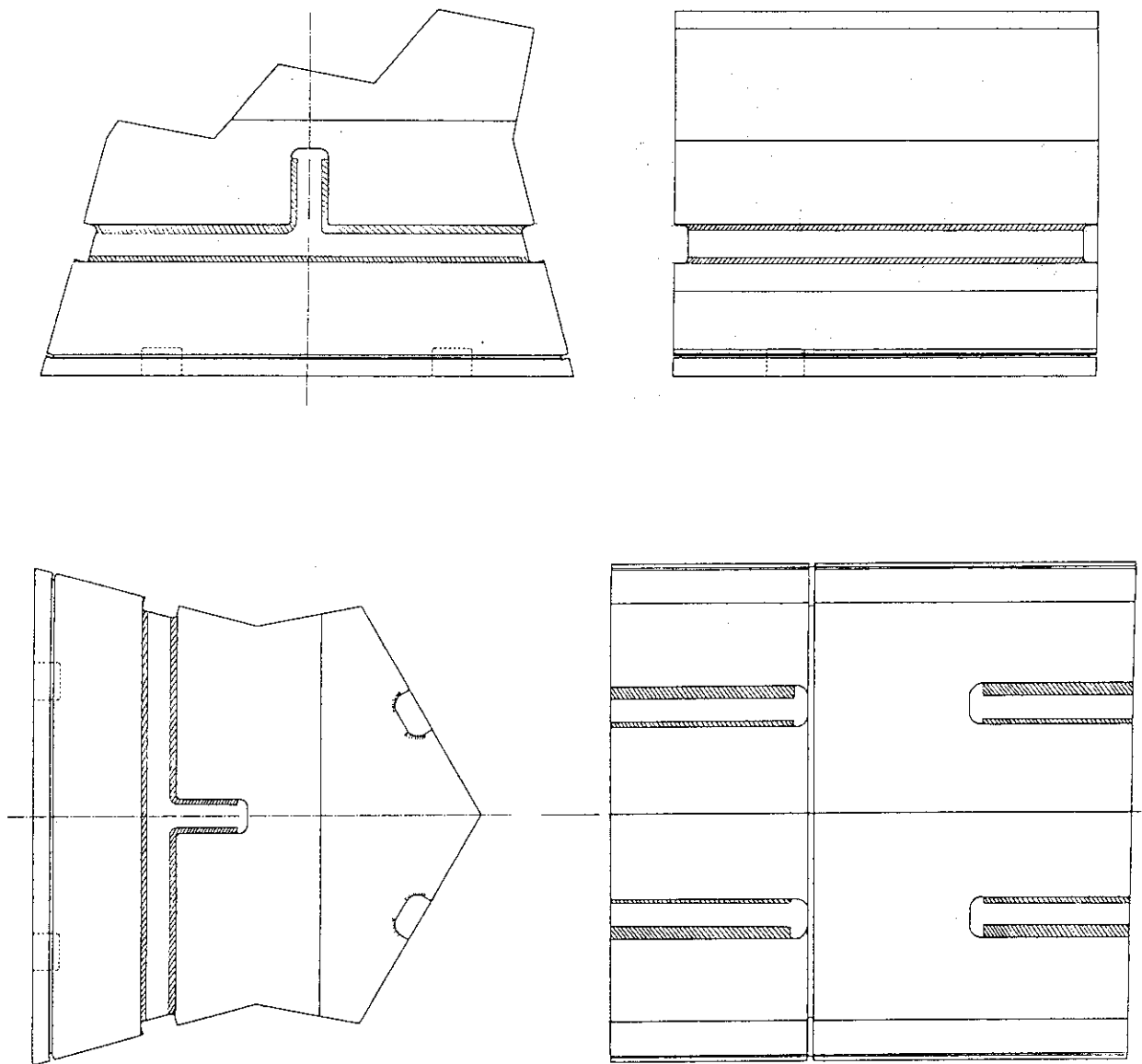
サポートポスト球面部

第3.1図 「高い応力の発生する部位」の説明図 (IG-110黒鉛)



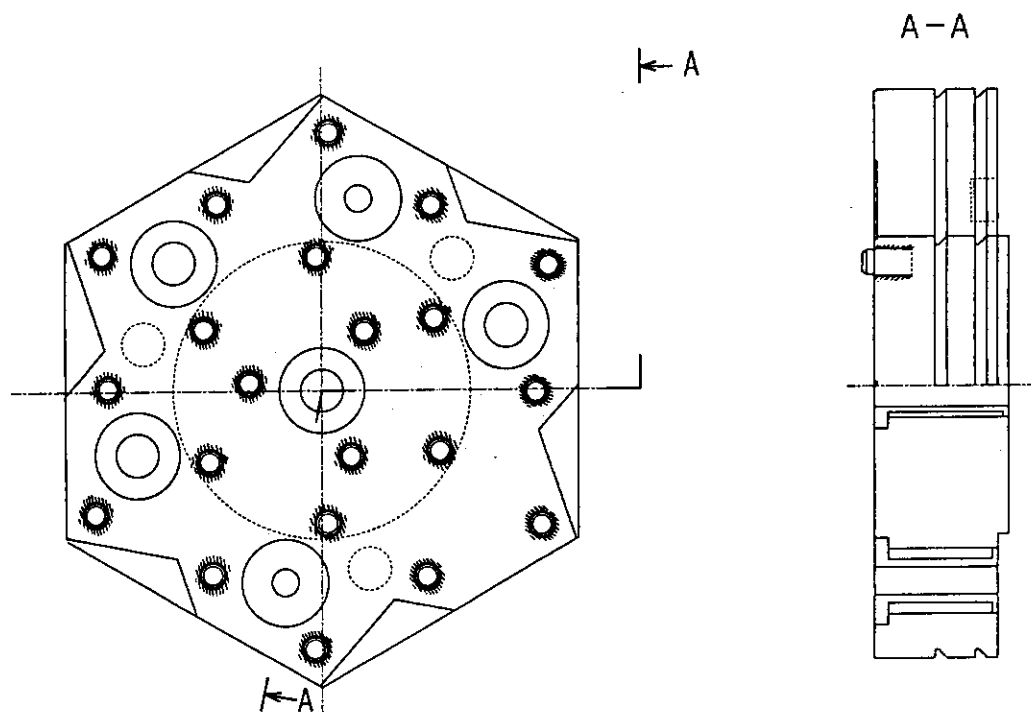
ポストシート球面部

第3.2図 「高い応力の発生する部位」の説明図 (IG-110黒鉛)

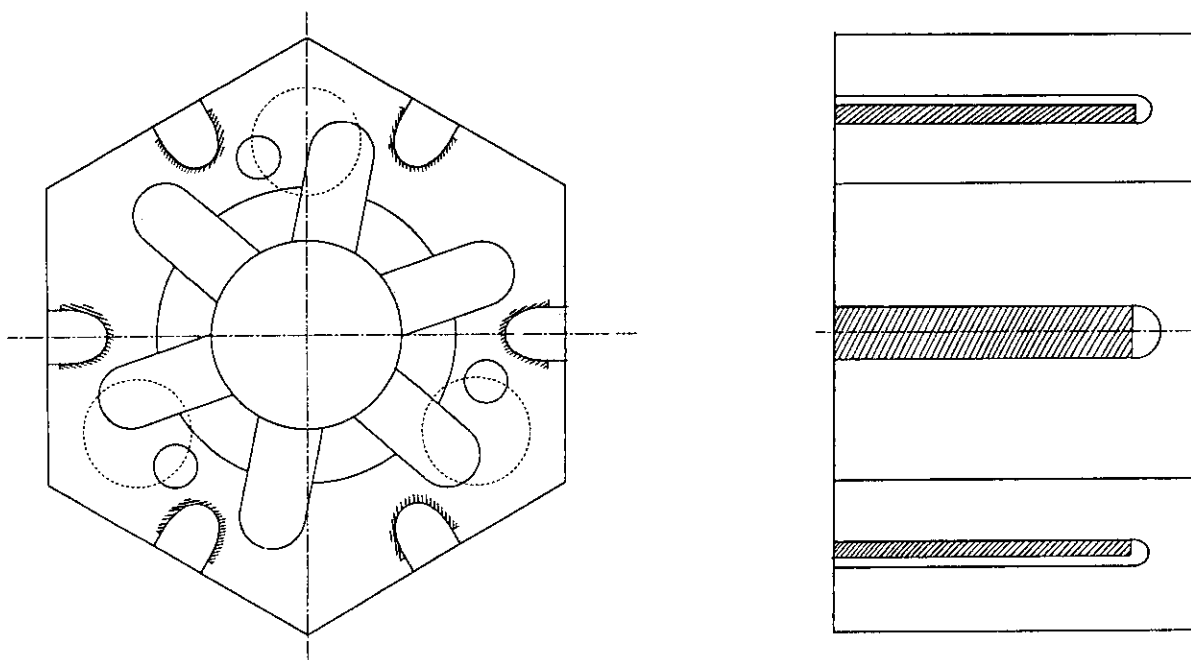


固定反射体キー溝コーナー

第3.3図(1/3) 「高い応力の発生する部位」の説明図 (PGX 黒鉛)



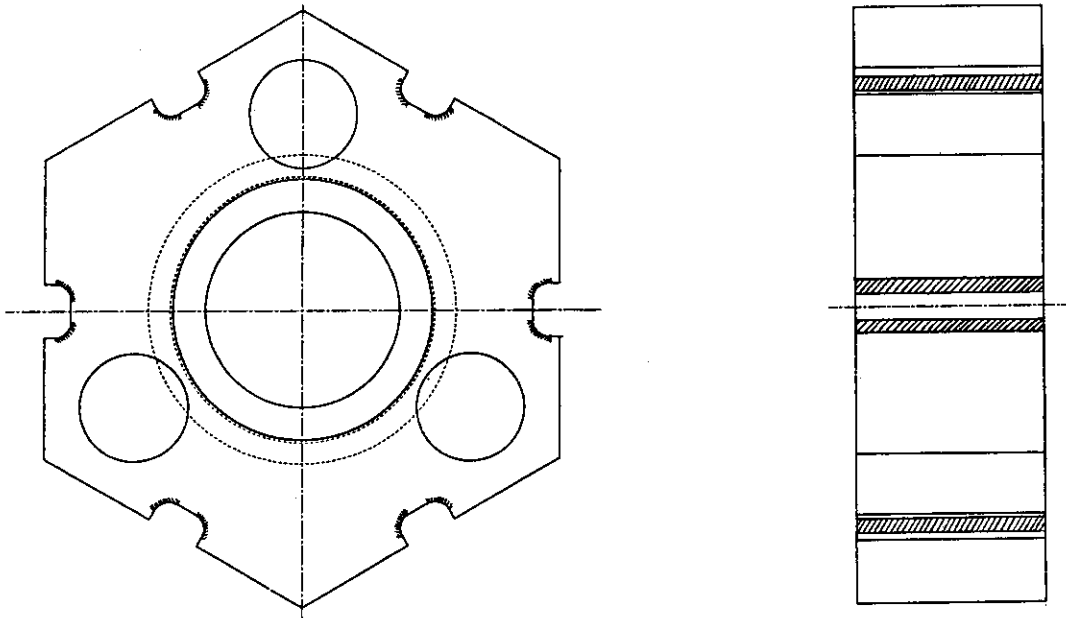
シール用ブロックのダウエル孔周囲及び内面



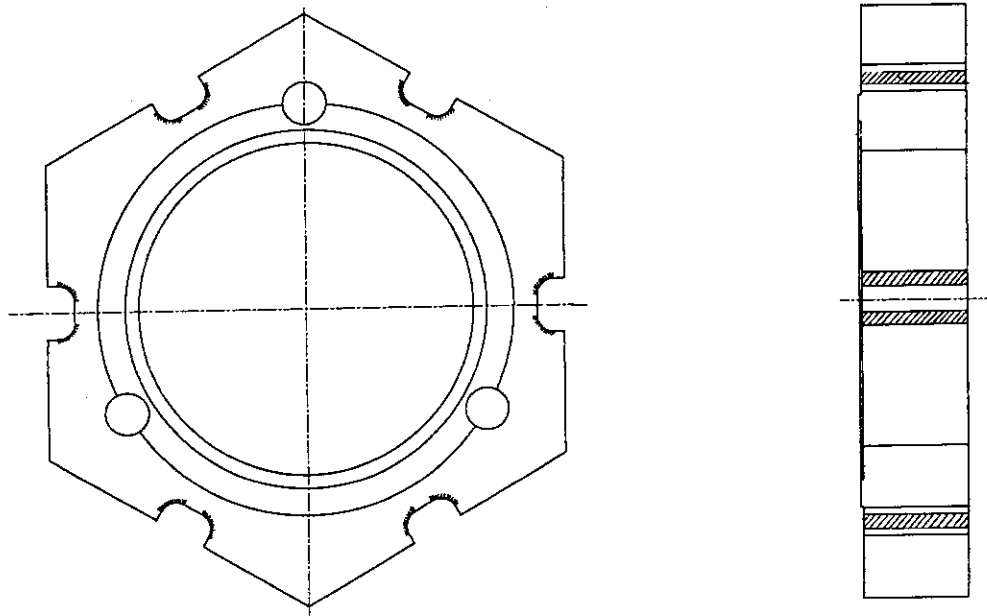
キー結合用ブロックのキー溝コーナー

* 隣接する固定反射体（7段目）の同形のキー溝も対象である。

第3.3図(2/3) 「高い応力の発生する部位」の説明図 (PGX黒鉛)

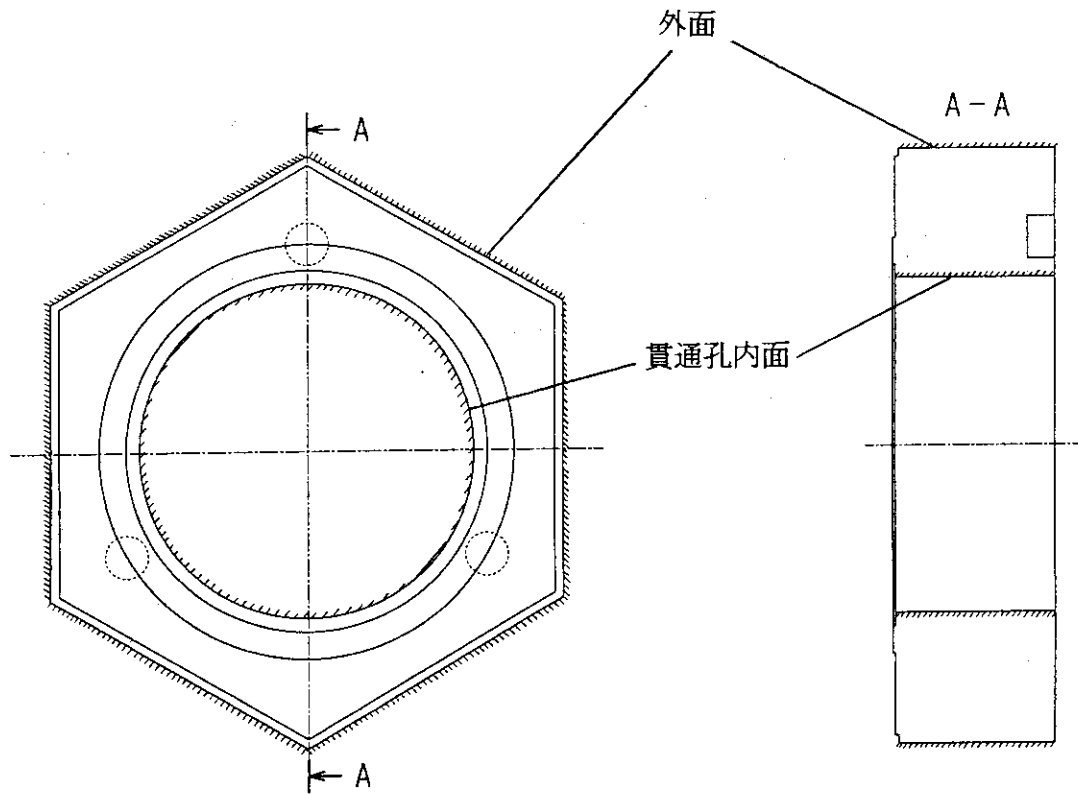


プレナム下部ブロックのキー溝コーナー



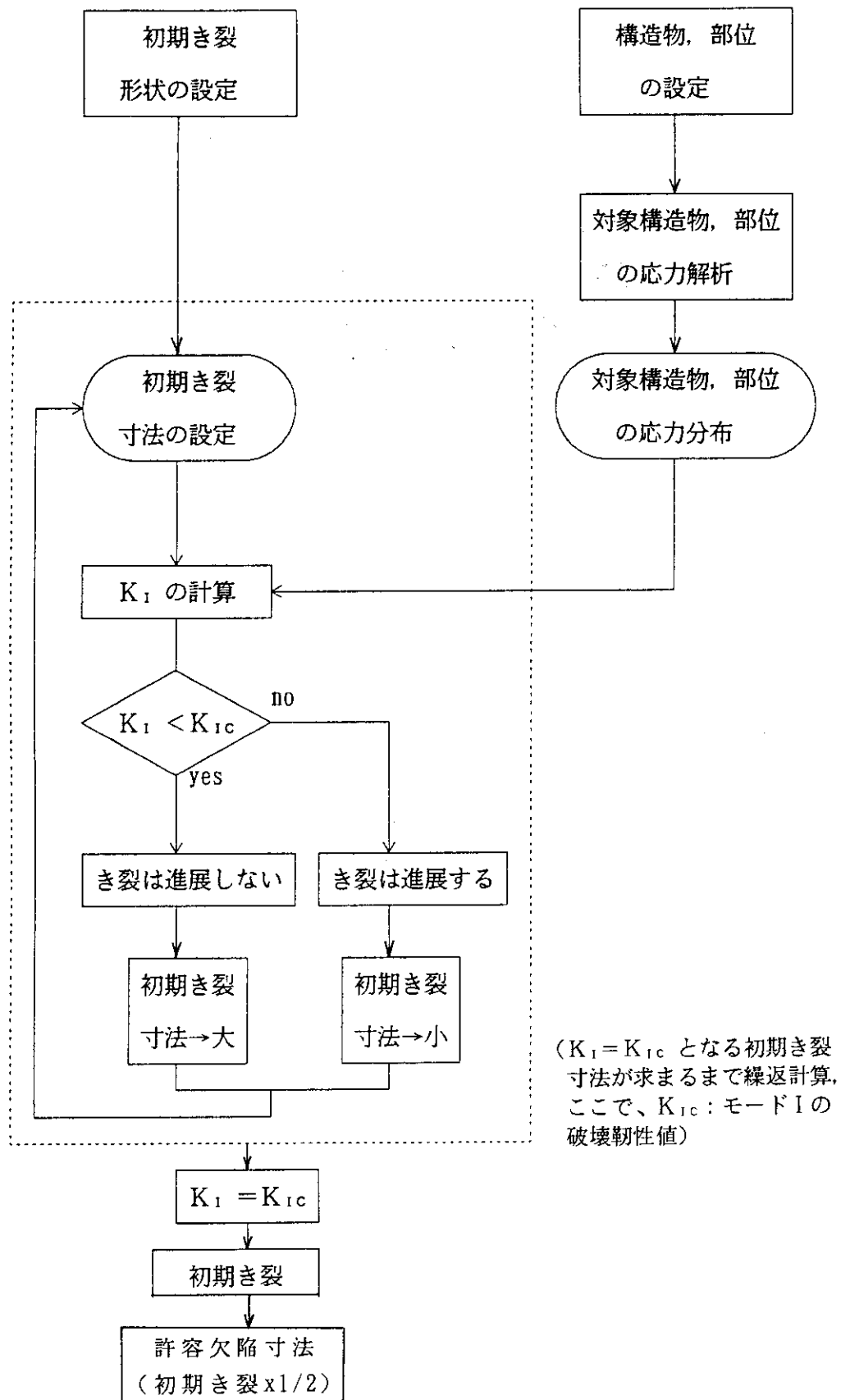
下端ブロックのキー溝コーナー

第3.3図(3/3) 「高い応力の発生する部位」の説明図 (PGX黒鉛)

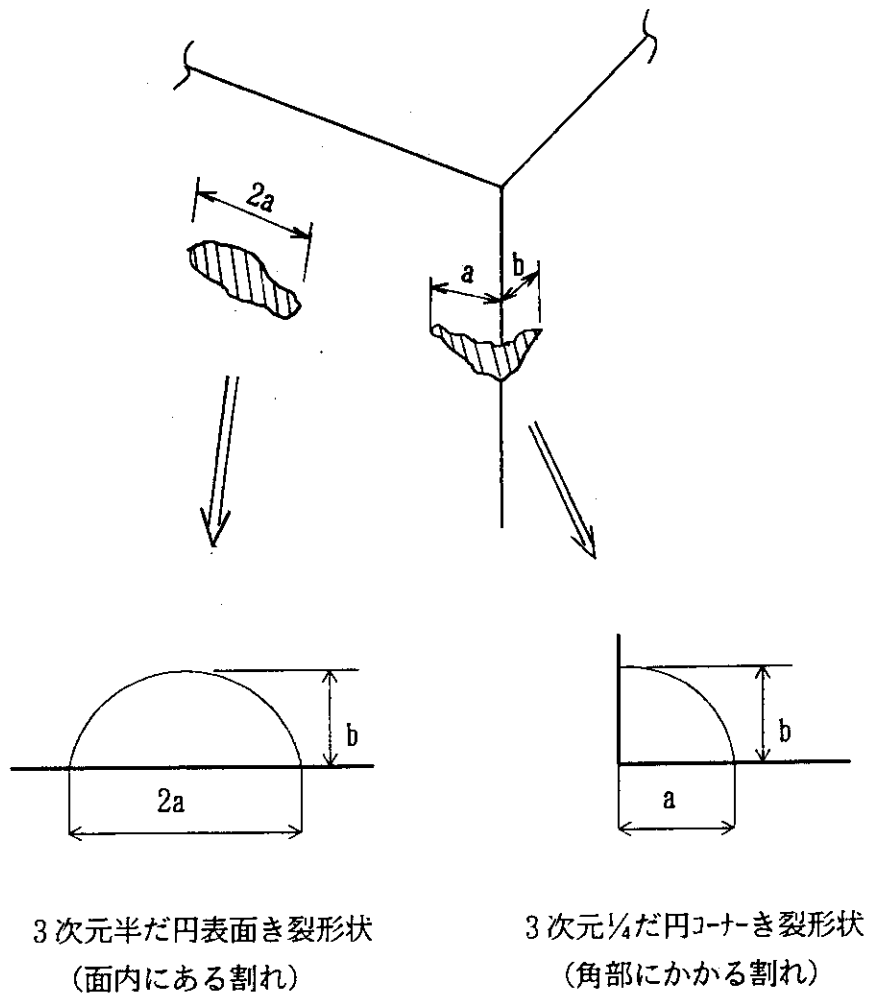


炭素ブロック(中心ブロック及び周辺内管貫通ブロック) 外面/貫通孔内面

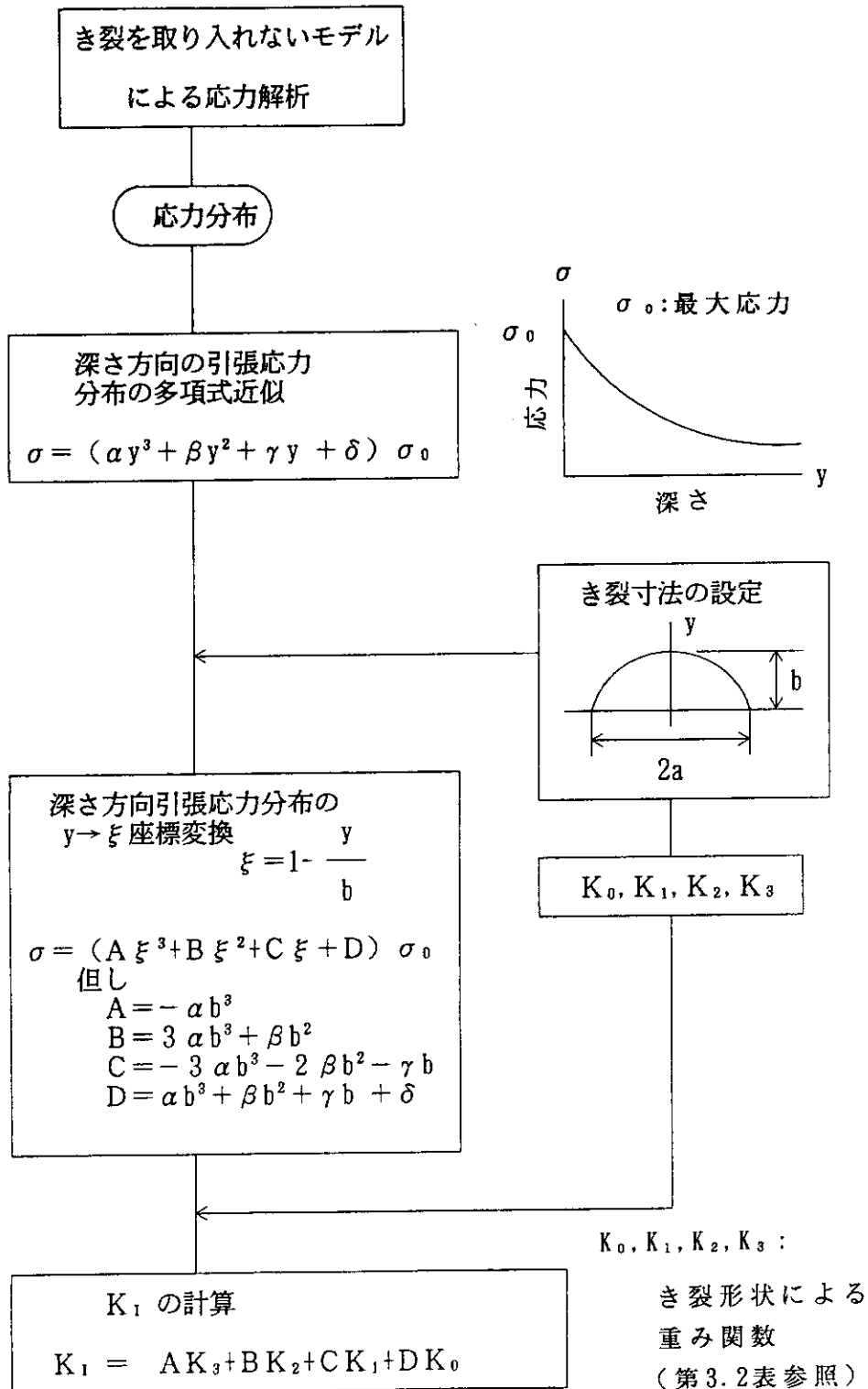
第3.4図 「高い応力の発生する部位」の説明図 (ASR-ORB炭素)



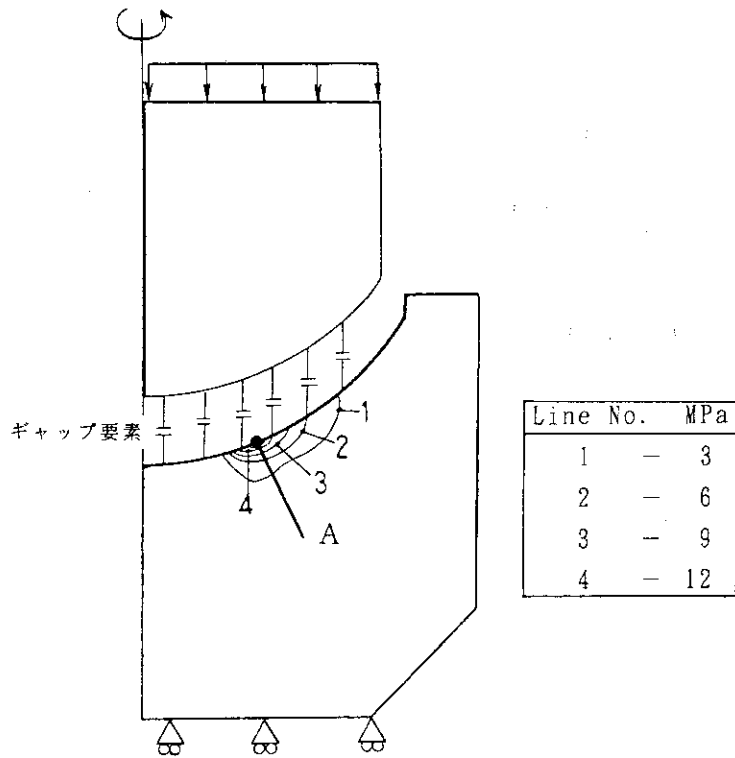
第 3.5 図 破壊力学的手法による許容欠陥寸法の設定手順



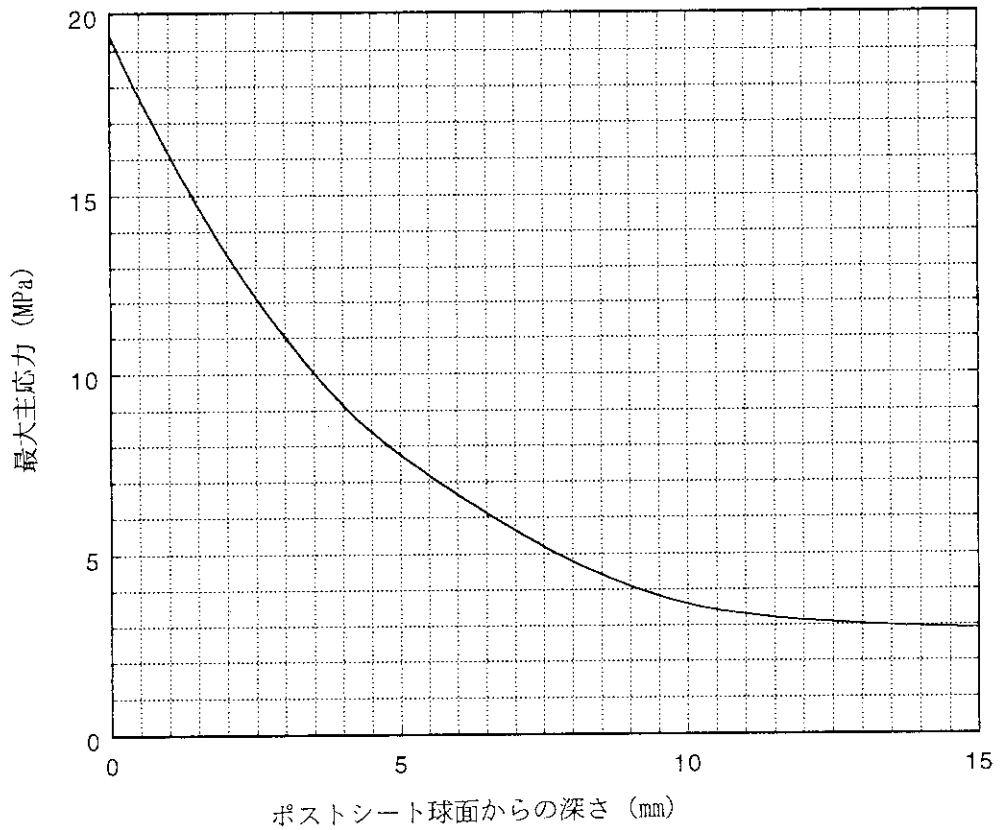
第3.6図 初期き裂の形状



第3.7図 応力拡大係数 K_1 の計算手順

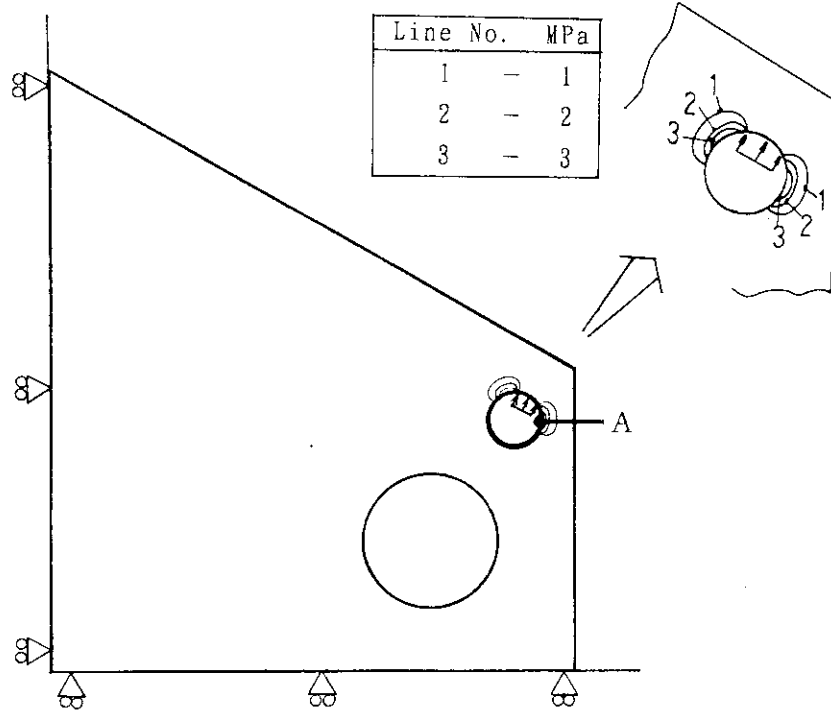


(1) 解析モデル及び最大主応力分布

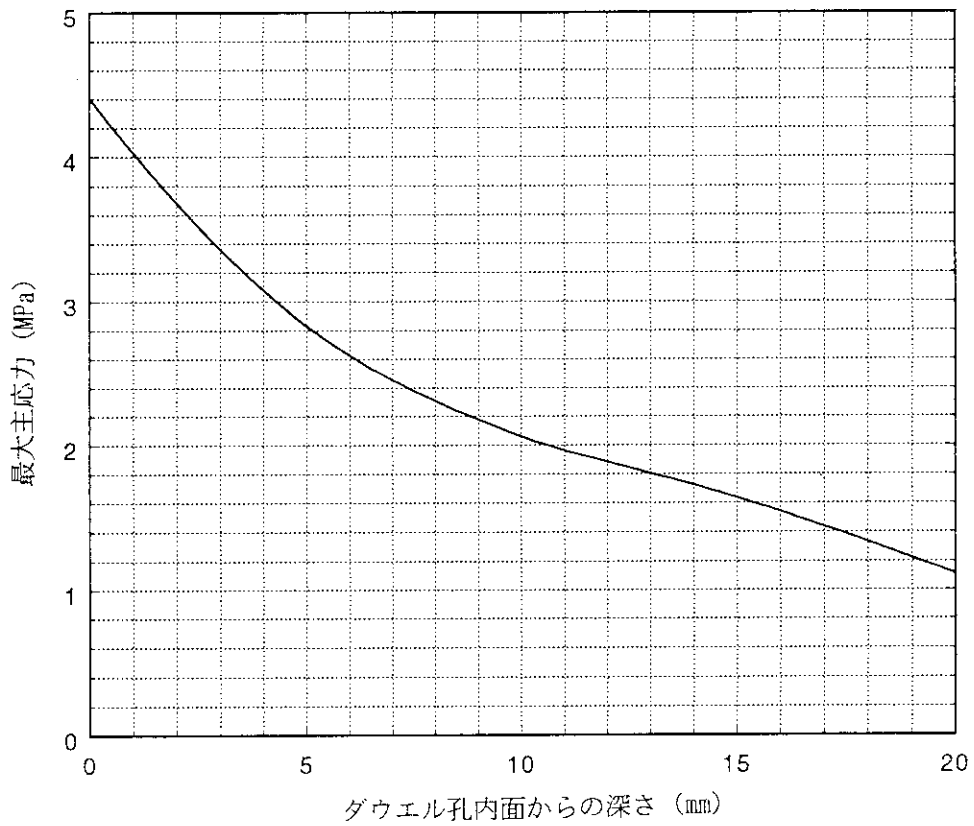


(2) 直線 A 上の最大主応力分布

第3.8図 2次元有限要素法によるポストシート球面部に対する
応力解析結果 (IG-110 黒鉛)

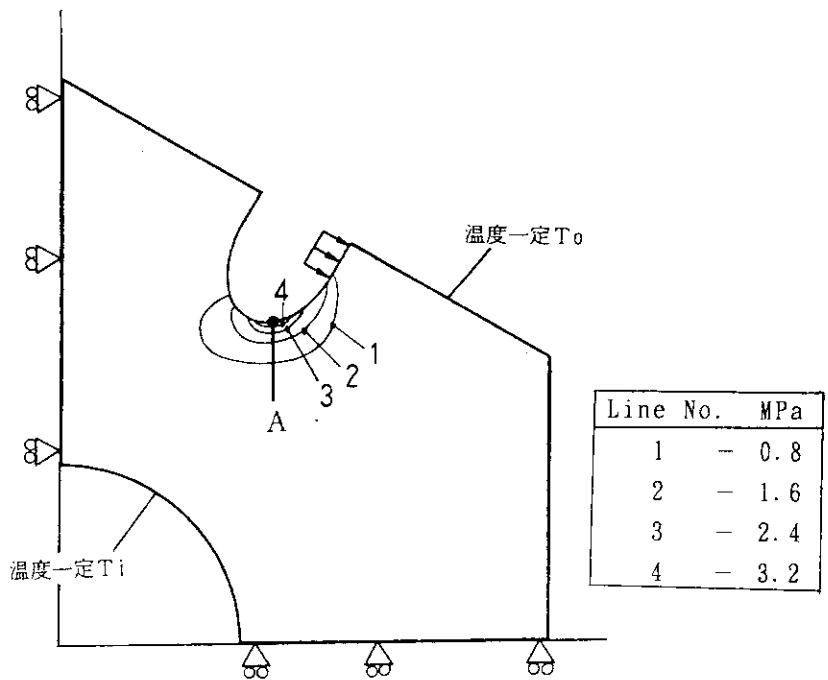


(1) 解析モデル及び最大主応力分布

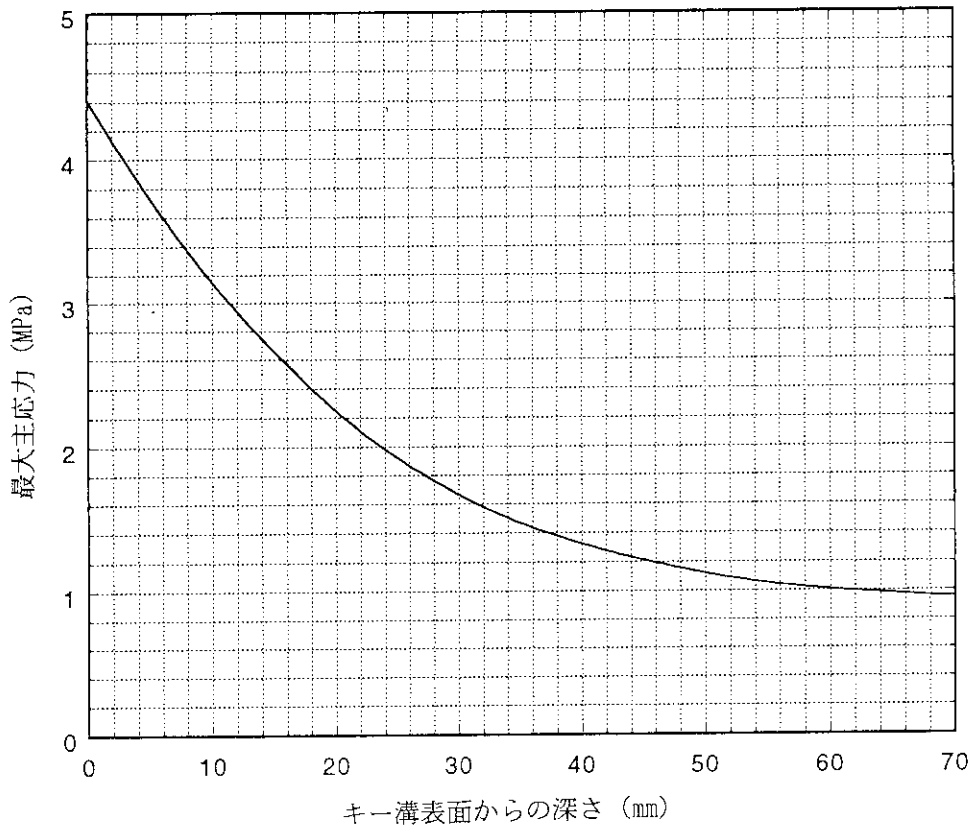


(2) 直線 A 上の最大主応力分布

第 3.9 図 2次元有限要素法によるシール用ブロックのダウエル孔に対する
応力解析結果 (PGX 黒鉛)

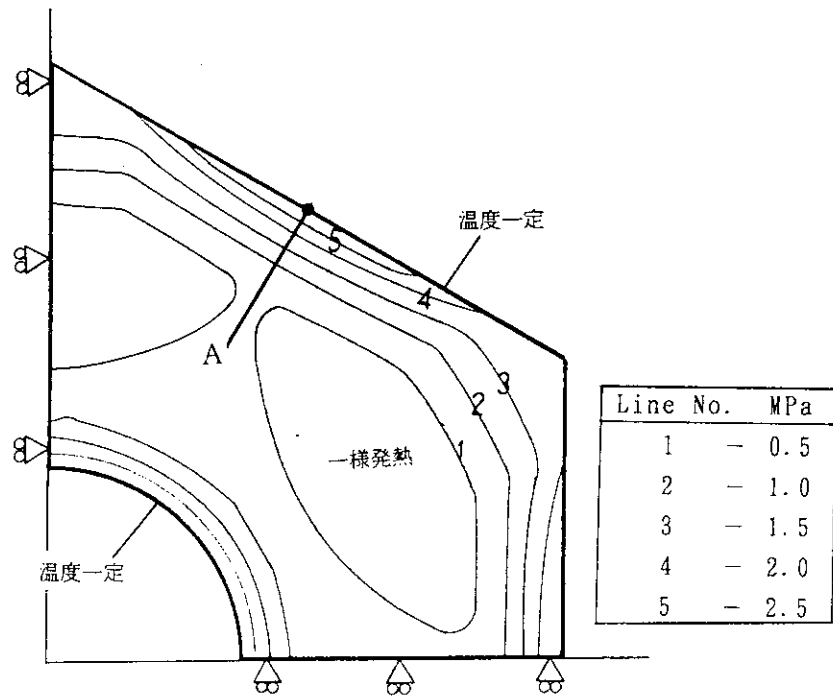


(1) 解析モデル及び最大主応力分布

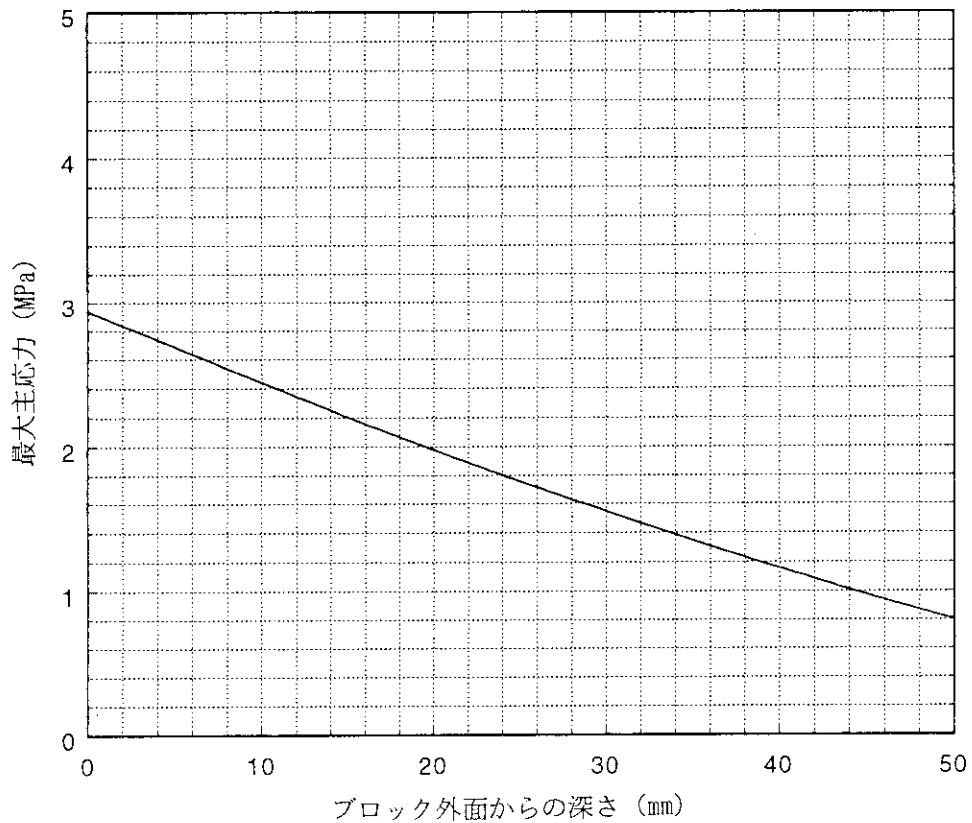


(2) 直線 A 上の最大主応力分布

第 3.10 図 2次元有限要素法によるキー結合用ブロックのキー溝コーナー部に対する応力解析結果 (PGX 黒鉛)

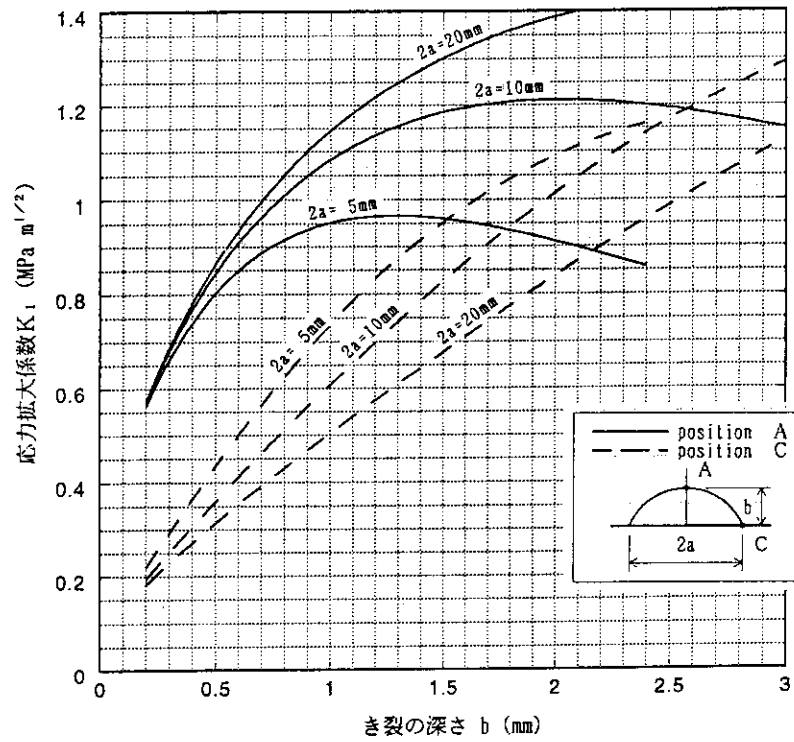


(1) 解析モデル及び最大主応力分布



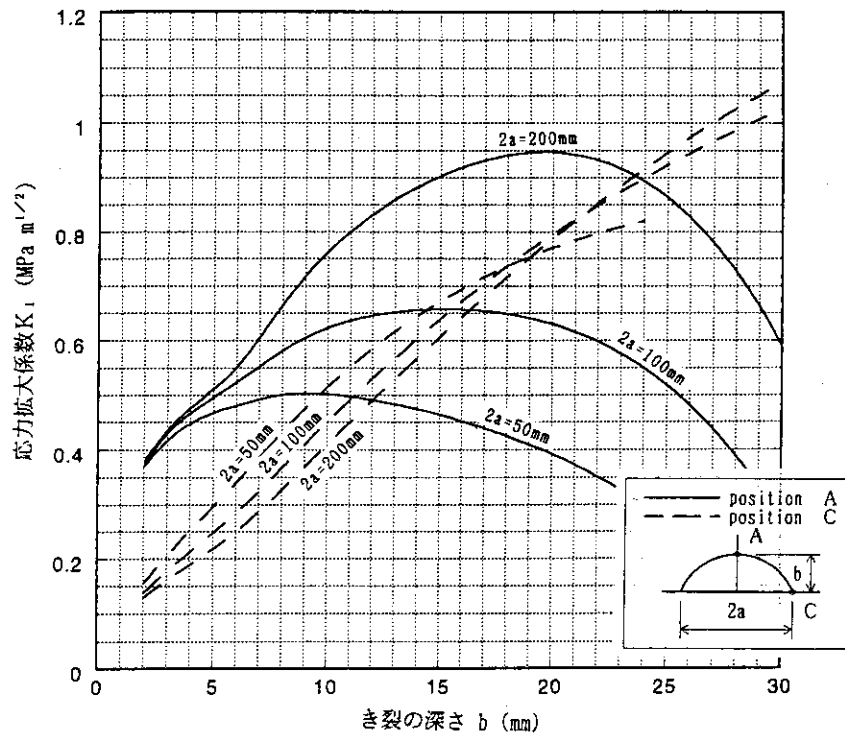
(2) 直線 A 上の最大主応力分布

第3.11図 2次元有限要素法による周辺内管貫通ブロック (炭素ブロック) 外面に対する応力解析結果 (ASR-ORB炭素)

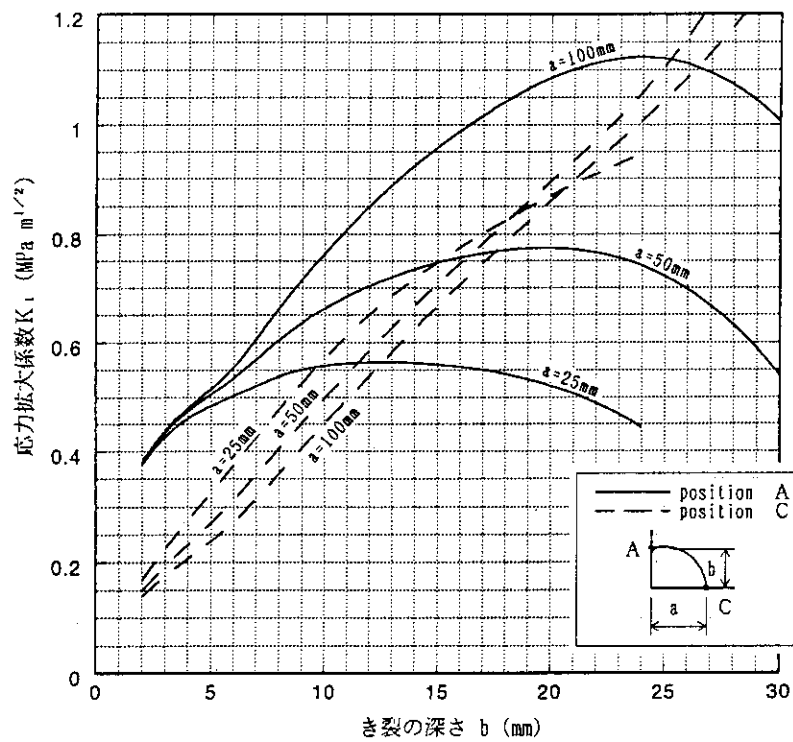


3次元半だ円表面き裂の場合

第3.12図 ポストシート球面部に対する応力拡大係数 K_I の計算結果 (IG-110黒鉛)

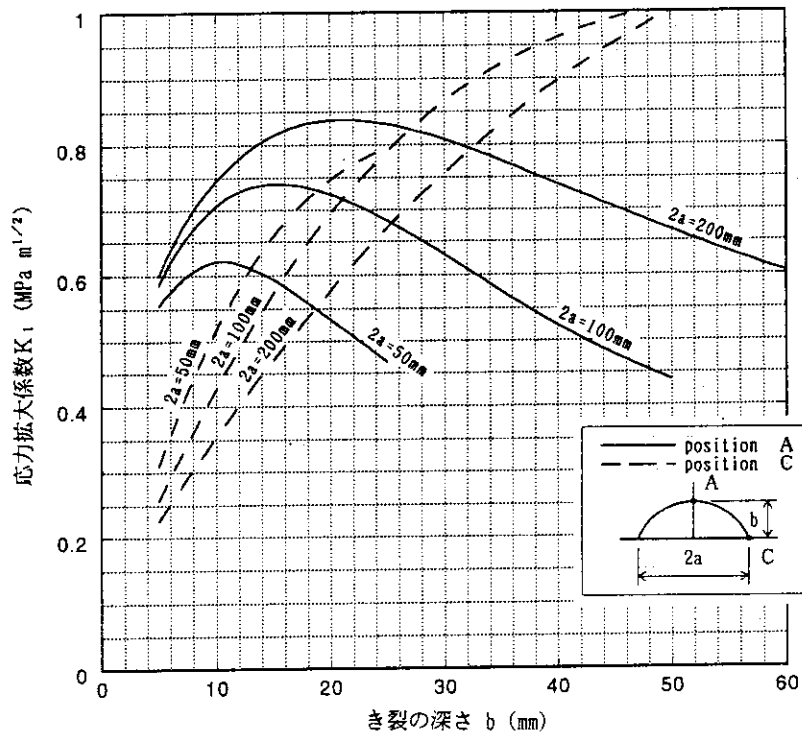


3次元半だ円表面き裂の場合

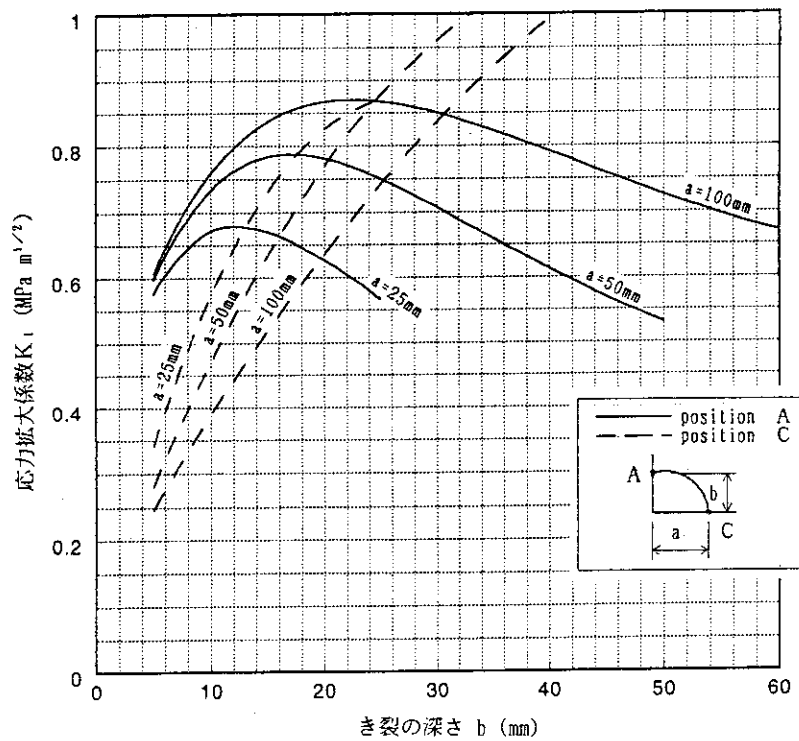


3次元 1/4だ円コーナークリACKの場合

第 3.13 図 シール用ブロックのダウエル孔内面に対する応力拡大係数 K_I の計算結果 (PGX 黒鉛)

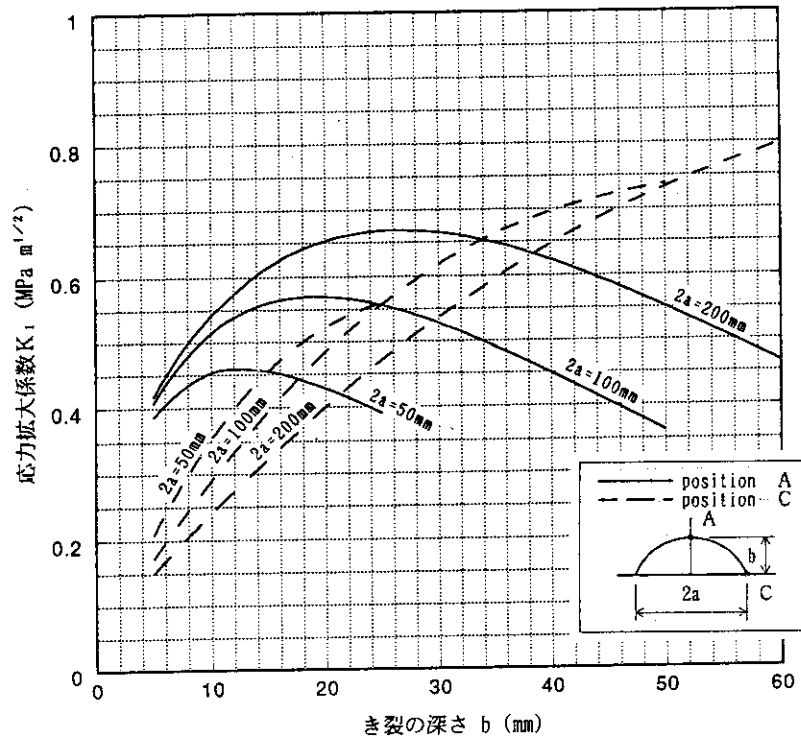


3次元半だ円表面き裂の場合

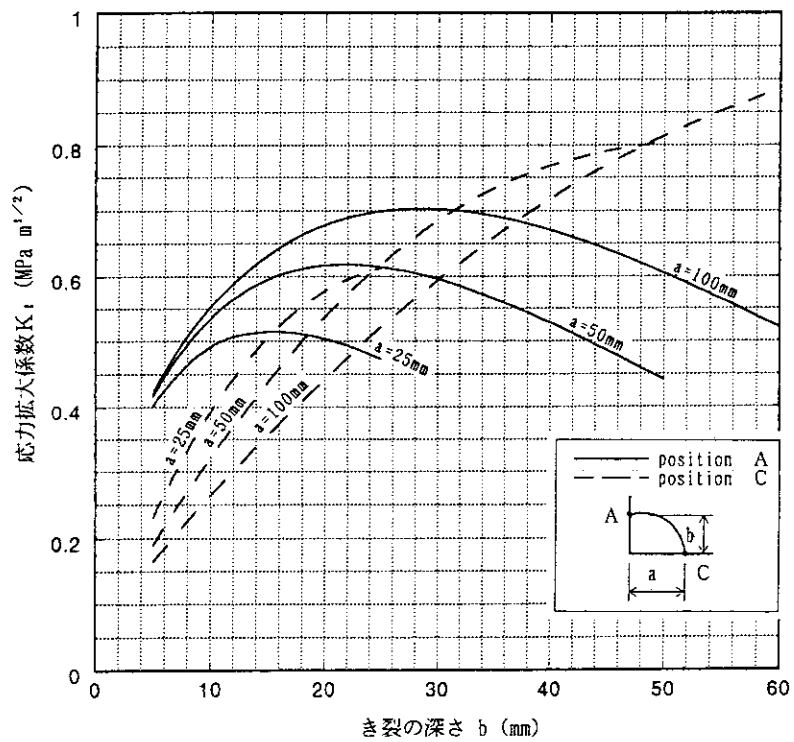


3次元 1/4だ円コーナーき裂の場合

第3.14図 キー結合用ブロックのキー溝コーナーに対する応力拡大係数 K_I の計算結果 (PGX 黒鉛)

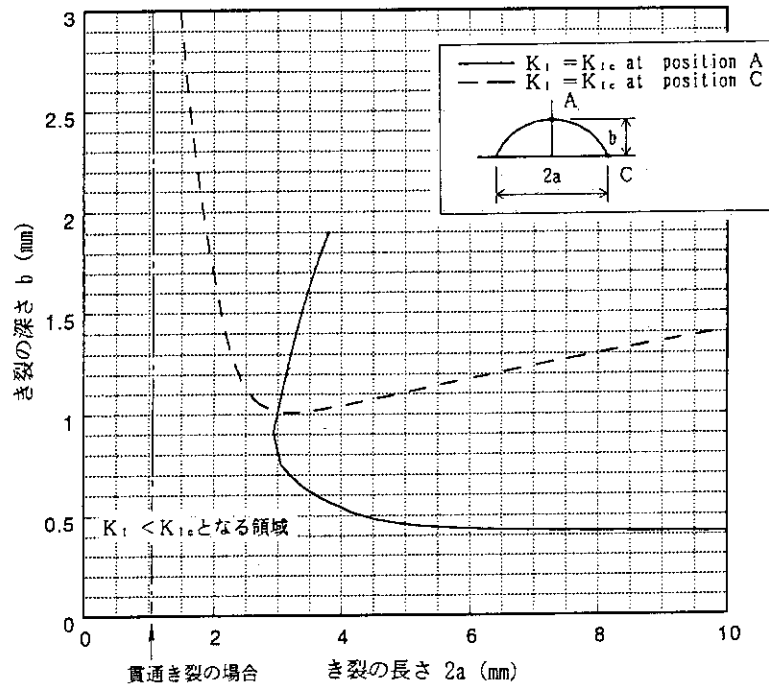


3次元半だ円表面き裂の場合



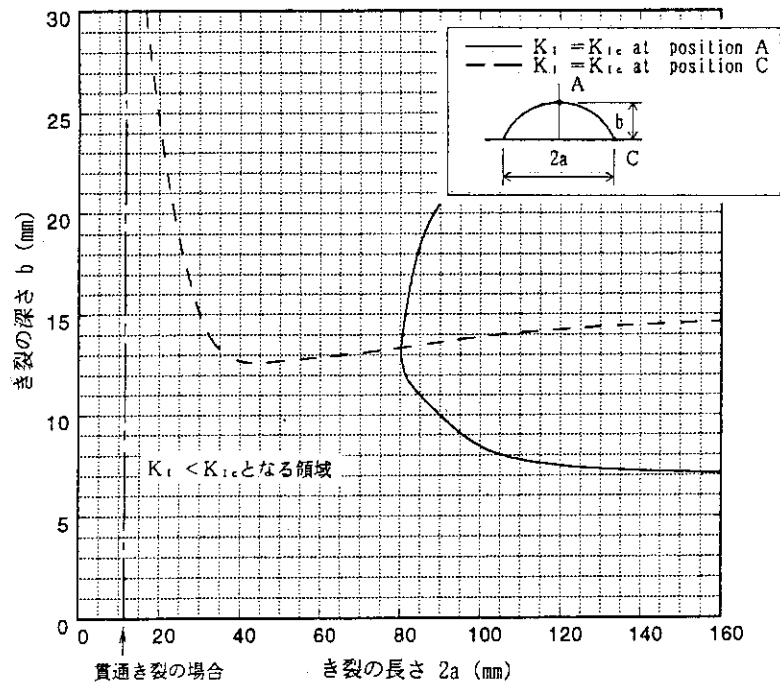
3次元 1/4だ円コーナ-き裂の場合

第3.15図 周辺内管貫通ブロック（炭素ブロック）外面に対する応力拡大係数 K_I の計算結果（ASR-ORB炭素）

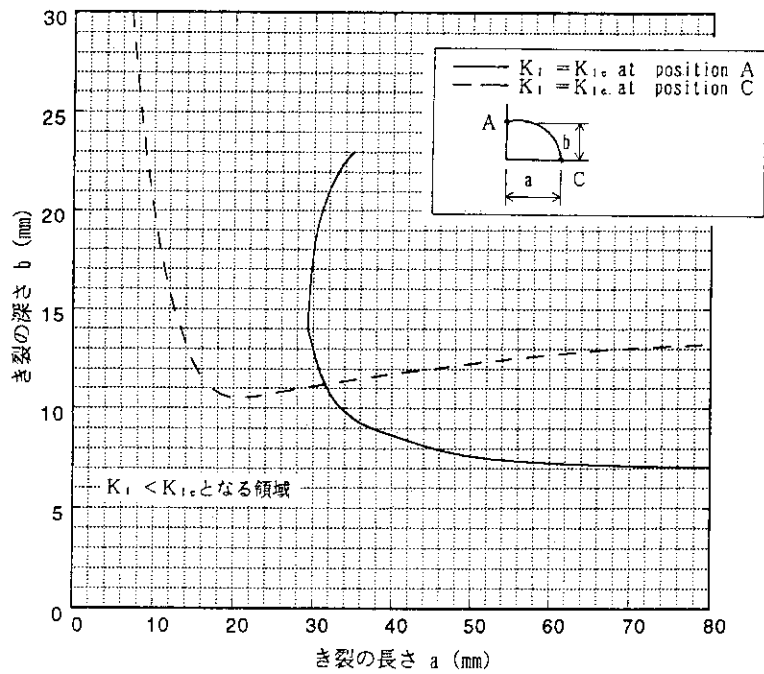


3次元半だ円表面き裂の場合

第3.16図 ポストシート球面で $K_I < K_{Ic}$ となる領域 (IG-110 黒鉛)

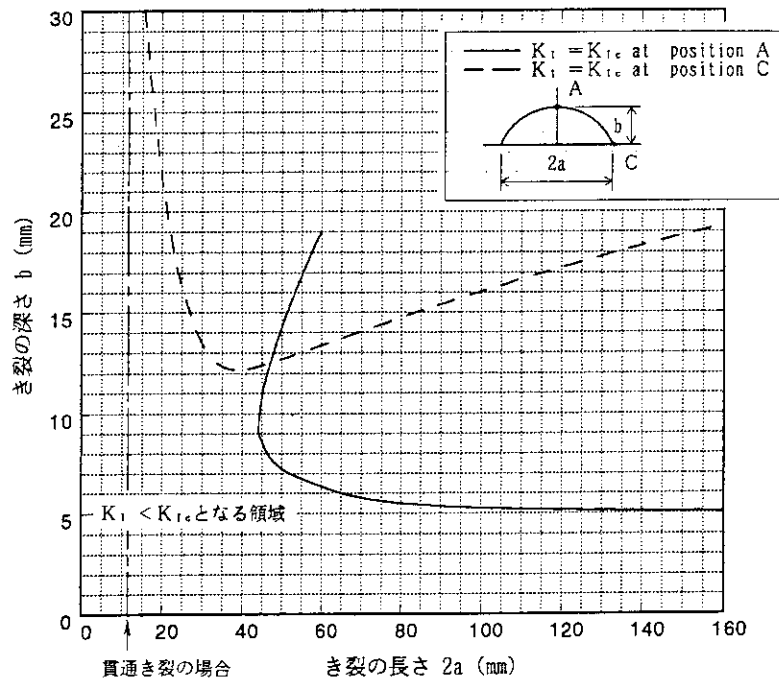


3次元半だ円表面き裂の場合

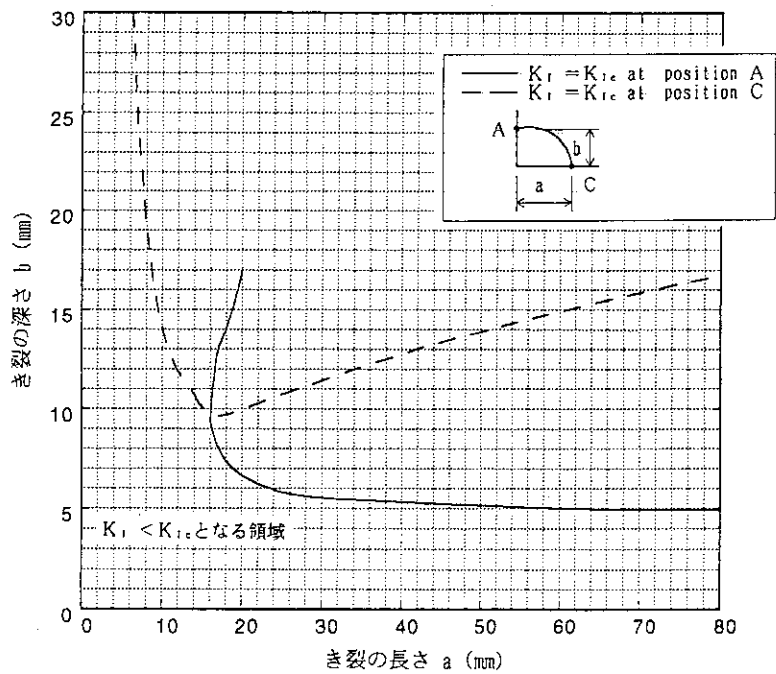


3次元 1/4だ円コーナーき裂の場合

第3.17図 シール用ブロックのダウエル孔内面で $K_I < K_{Ic}$ となる領域 (PGX 黒鉛)

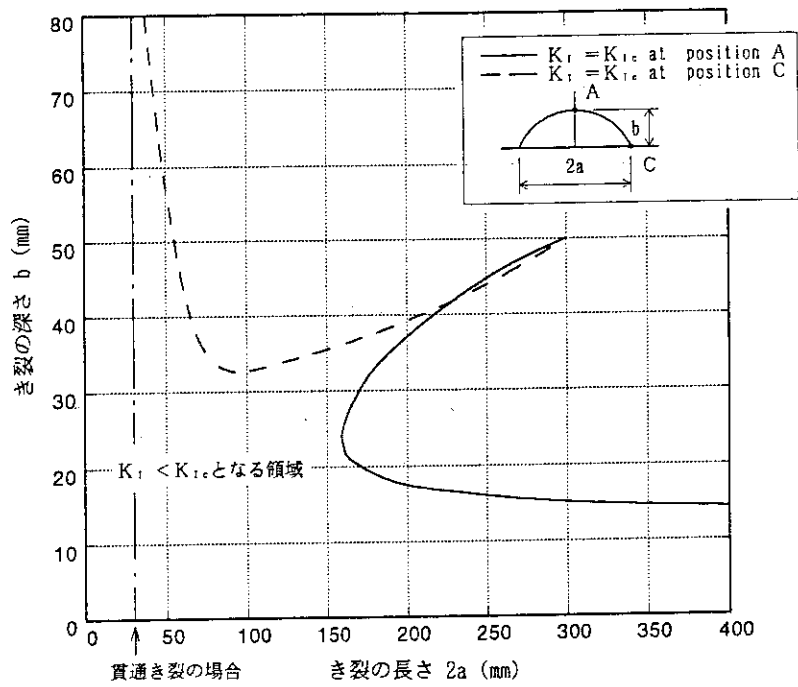


3次元半だ円表面き裂の場合

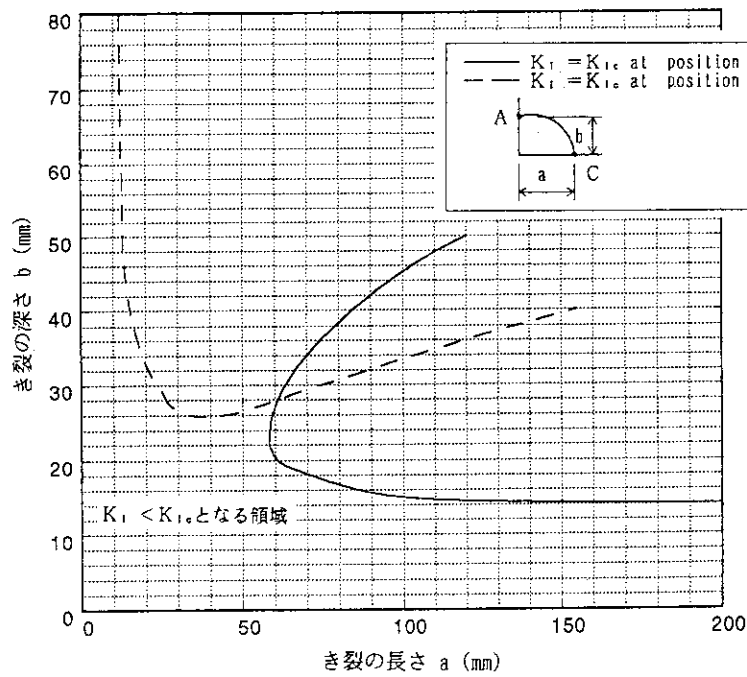


3次元 1/4だ円コーナ-き裂の場合

第3.18図 キー結合用ブロックのキー溝コーナー部で $K_I < K_{Ic}$ となる領域 (PGX 黒鉛)

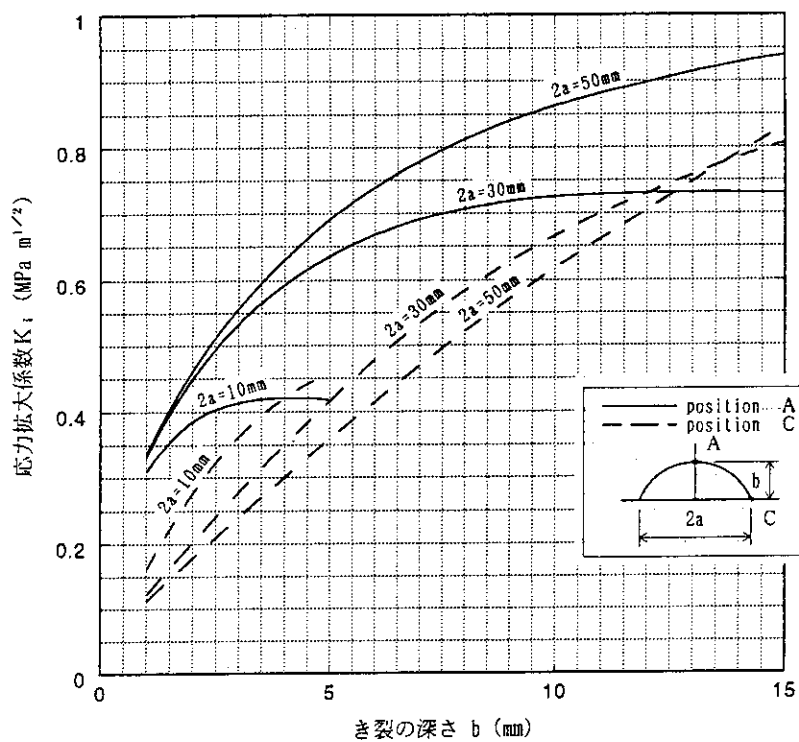


3次元半だ円表面き裂の場合

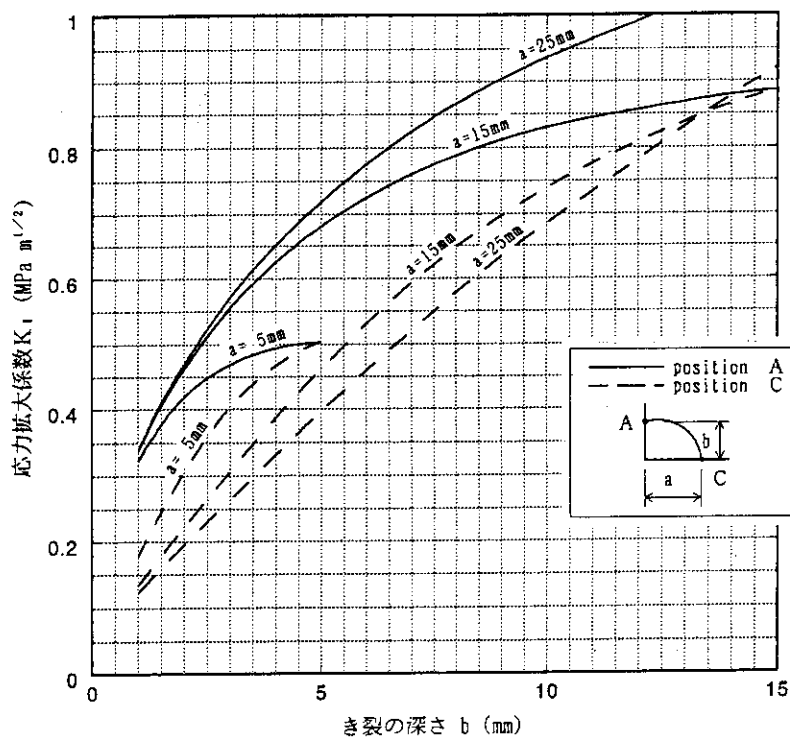


3次元 1/4だ円コーナ-き裂の場合

第3.19図 周辺内管貫通ブロック（炭素ブロック）外面で $K_I < K_{Ic}$ となる領域（ASR-ORB炭素）

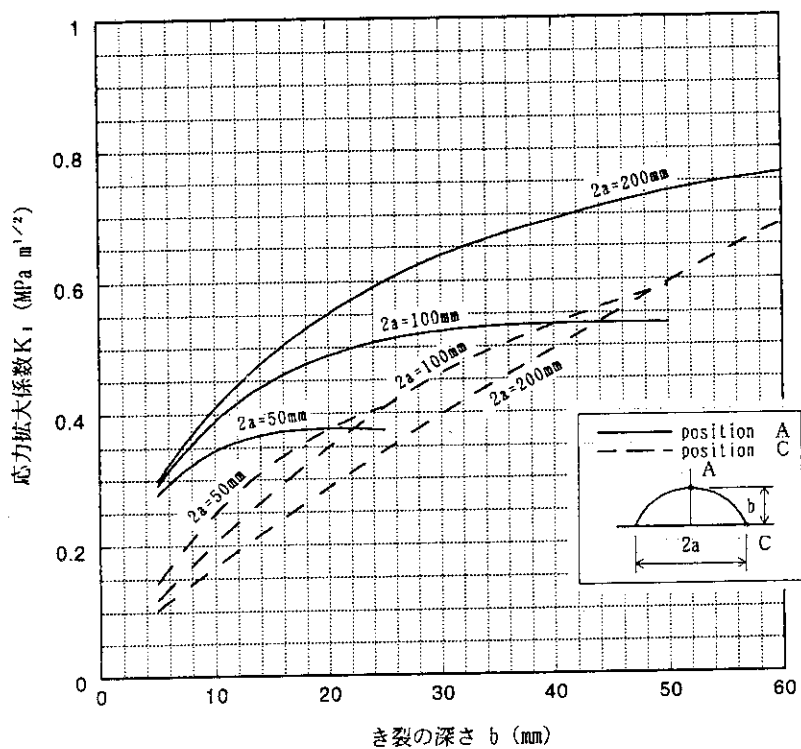


3次元半だ円表面き裂の場合

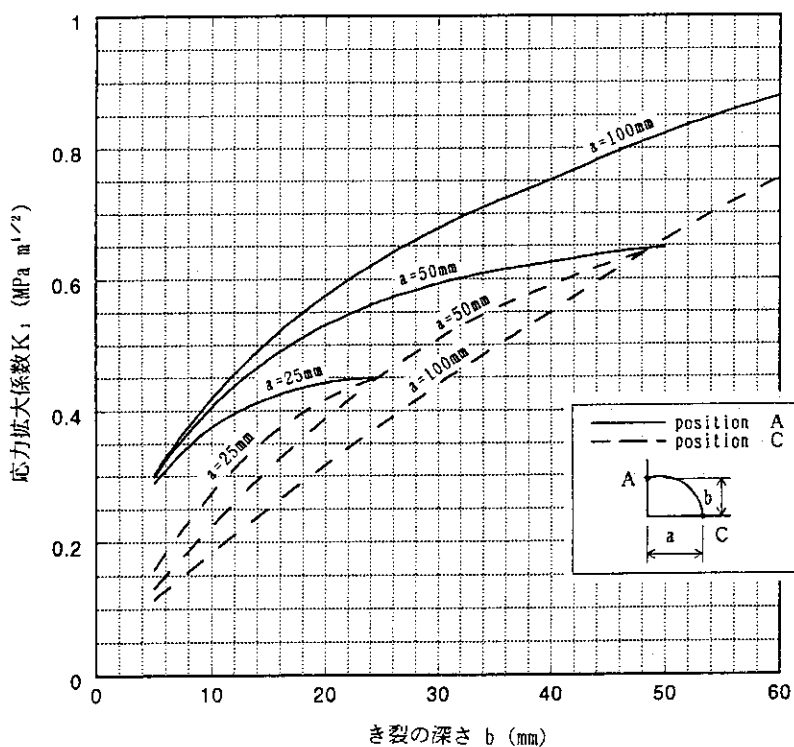


3次元 1/4だ円コーナーき裂の場合

第3.20図 高応力の発生しない部位に対する応力拡大係数 K の計算結果 (IG-110 黒鉛)

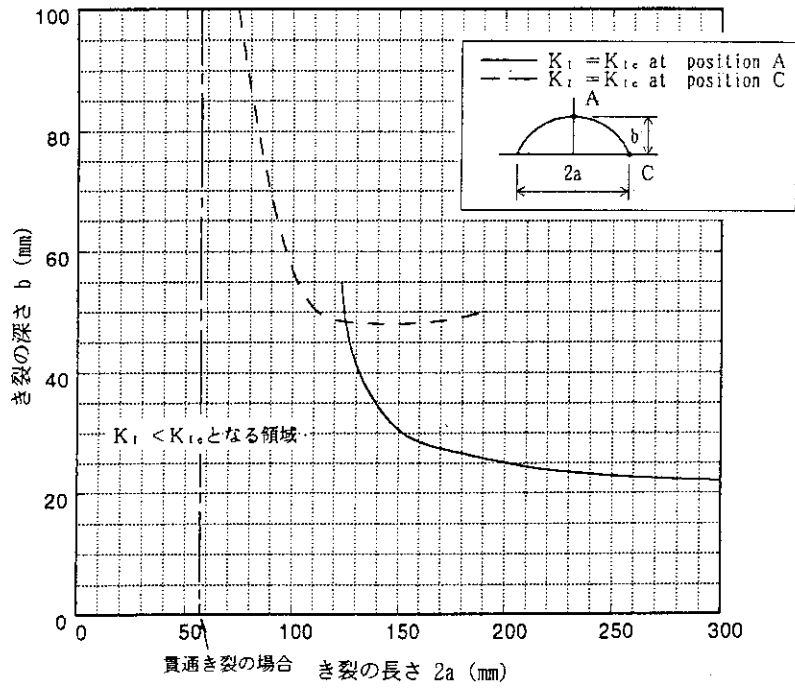


3次元半だ円表面き裂の場合

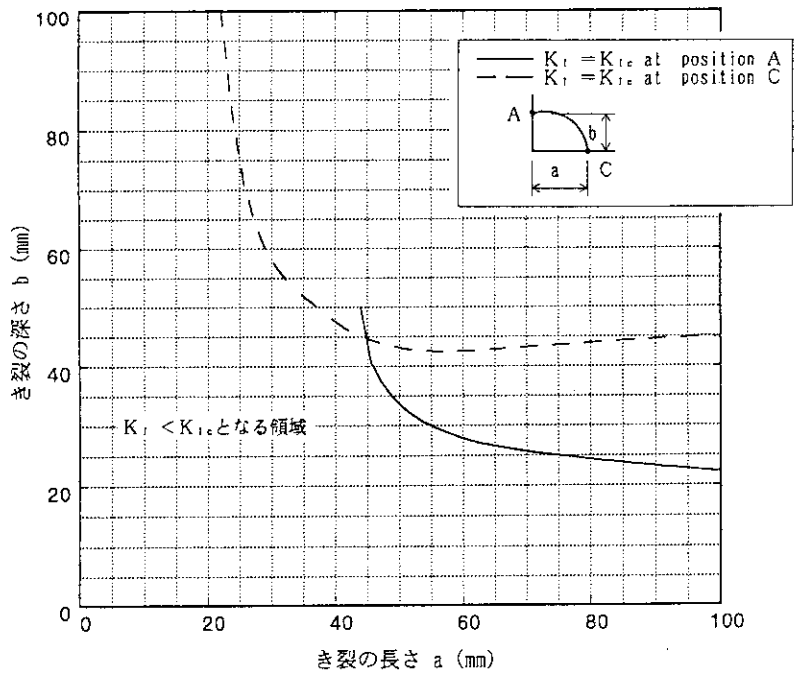


3次元 1/4だ円コーナ-き裂の場合

第3.21図 高応力の発生しない部位に対する応力拡大係数 K_I の計算結果 (PGX 黒鉛)



3次元半だ円表面き裂の場合



3次元 1/4だ円コーナ-き裂の場合

第3.23図 高応力の発生しない部位で $K_I < K_{Ic}$ となる領域 (PGX 黒鉛)

4. 結言

H T T R 炉心支持黒鉛構造物の表面に生じる割れ等に対する許容欠陥寸法について、破壊力学的手法を用いて定量的に検討した。その結果得られた結論は以下のとおりである。

1. 有限要素法により応力拡大係数を求める際、エネルギー開放率法による計算の方が開口変位法よりも精度よく応力拡大係数が評価できる。
2. き裂を含まない応力分布とき裂形状により定まる重み関数から応力拡大係数を求める方法が、複雑な応力分布を有するHTTRの炉心支持黒鉛構造物に適用できる。
3. 許容欠陥寸法を破壊力学的手法を用いて定量的に検討し、高応力の発生する部位とそれ以外の部位について、表面および角部に割れが存在する場合について各々許容欠陥寸法を求めた。
4. 上記3.の許容欠陥寸法を包絡するように外観検査用の許容欠陥寸法を規定するとともに、外観検査に用いる限界見本を作成した。

謝 辞

本報告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飛岡利明部長及び田中利幸調査役並びに関係各位に感謝致します。

4. 結言

H T T R 炉心支持黒鉛構造物の表面に生じる割れ等に対する許容欠陥寸法について、破壊力学的手法を用いて定量的に検討した。その結果得られた結論は以下のとおりである。

1. 有限要素法により応力拡大係数を求める際、エネルギー開放率法による計算の方が開口変位法よりも精度よく応力拡大係数が評価できる。
2. き裂を含まない応力分布とき裂形状により定まる重み関数から応力拡大係数を求める方法が、複雑な応力分布を有するHTTRの炉心支持黒鉛構造物に適用できる。
3. 許容欠陥寸法を破壊力学的手法を用いて定量的に検討し、高応力の発生する部位とそれ以外の部位について、表面および角部に割れが存在する場合について各々許容欠陥寸法を求めた。
4. 上記3.の許容欠陥寸法を包絡するように外観検査用の許容欠陥寸法を規定するとともに、外観検査に用いる限界見本を作成した。

謝 辞

本報告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 飛岡利明部長及び田中利幸調査役並びに関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 石原、伊与久、豊田、佐藤、塩沢、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、JAERI-M 91-154(1991)
- 2) 白鳥、三好、谷川、任意分布を受ける表面き裂の応力拡大係数の解析（第2報、平板中の半だ円表面き裂に対する影響係数の解析とその応用）、日本機械学会論文集（A編）、Vol.52, No. 474, pp. 360(1986)
- 3) 白鳥、三好、酒井、任意分布を受ける表面き裂の応力拡大係数の解析（第4報、影響係数データベースの応力集中部材への応用）、日本機械学会論文集（A編）Vol. 53, No. 492, pp. 1651(1987)
- 4) H. Awaji and S. Sato, J. Eng. Mater. Tech, Vol.100, No.2 pp.175(1978)
- 5) 淡路、佐藤、材料 20-306, pp. 243(1979)
- 6) 佐藤、淡路、川又、車田、奥、日本原子力学会誌、Vol.28, No.12(1986)
- 7) "NISAI User's Manual", Engineering Mechanics Research Corp., USA (1992)
- 8) R. S. Barsoum; Int. J. Numerical Method in Eng., Vol.10, PP.25 (1976)
- 9) J. C. Newman and I. S. Raju, STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, vol.2, pp.712, Pergamon Press (1987)
- 10) 伊与久、石原、豊田、塩沢、高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針の解説、JAERI-M 91-070(1991)
- 11) 佐藤、車田、川又、永井、井出、辻、石原、高温ガス炉(HTTR)炉心支持黒鉛の許容欠陥寸法の評価、学振炭素材料117委員会、117-228-C2(1994)

付録 A P G X 黒鉛の表面模様

正常に製造された P G X 黒鉛の加工表面によく見られる模様としては、次のようなものがある。

- (1) ボイド／ピット：写真 No. 1
- (2) ミックスボール：写真 No. 2～6

以下に、各々の模様の特徴について説明する。

(1) ボイド／ピット

加工表面に空隙ができる。空隙の形は不定形であるが、クラックのように著しく細長くはない。生成の原因は、熱処理工程において原料中の不純物等が蒸発して空隙となるか、あるいは機械加工において局部的に結合の弱い粒子の集まりが引き出されることによる

(2) ミックスボール

局部的にボール状の、光沢の違う部分や小さな空隙が密集したスポンジ状の部分が出る。ミックスボールは原料の混合工程において通常できるものであり、材料製造後、表面を仕上げると表面模様として見え易くなる。

P G X 黒鉛に見られる材料特有の表面模様（ボイド／ピット及びミックスボール）及び P G X 黒鉛表面の渦流探傷試験（E T）で検出した E T 信号の高い部分（ S/N_{max} 値が2.5から3.0の探傷部位、ここで S は欠陥信号出力、 N_{max} は最大ノイズ信号出力である(*1))について、4点曲げ強度試験を行いミックスボール等の強度に与える影響を調べた。試験に当たっては、ボイド／ピット、ミックスボール及び E T 信号の高い部位が試験片の中央となるように試験片を採取した。試験片形状は、長さ200mm、幅30mm、厚さ15mmの矩形で、4点曲げ荷重は、厚さ15mmの方向に外スパン150mm、内スパン50mmの治具により加えた。

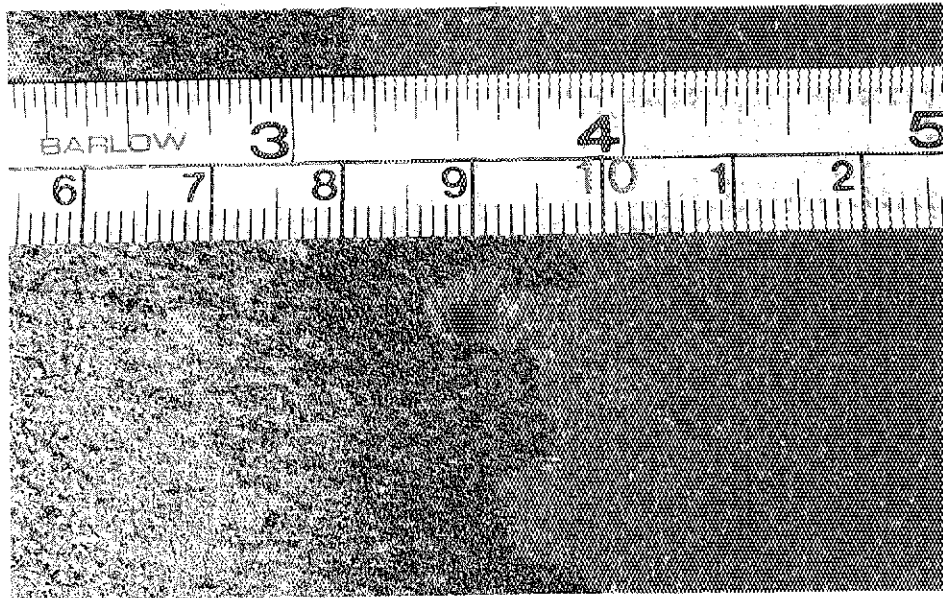
試験片表面の写真及びその概略スケッチ並びに4点曲げ強度を付表A.1に示す。得られた4点曲げ強度を累積度数との関係でプロットしたものを付図A.1に示す。

同図には、HTTRの受け入れ検査で得た4点曲げ強度データも比較のため示した。図より、表面模様（ボイド／ポット及びミックスボール）及びET信号検出部分の入った試験片の強度は実機材料の強度分布に良く一致しており、PGX黒鉛材料特有の表面模様、 $S/N_{max} < 3$ のET信号の検出部で強度特性に有意な低下は認められない。

以上より、表面模様のある材料の強度への影響は、本来の強度データのばらつきの範囲であるため、有害な割れとして取り扱わなくてもよい。

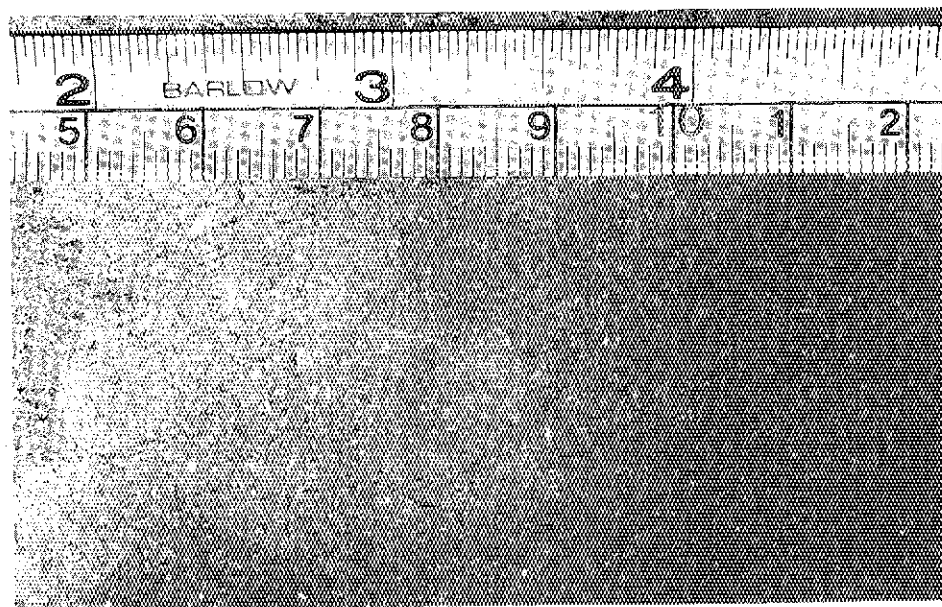
*1)石原他、HTTRのIG-110黒鉛構造物の受入検査における渦流探傷試験、JAERI-M 93-197(1993)

写真 No.1 模様の種類 ボイド/ピット



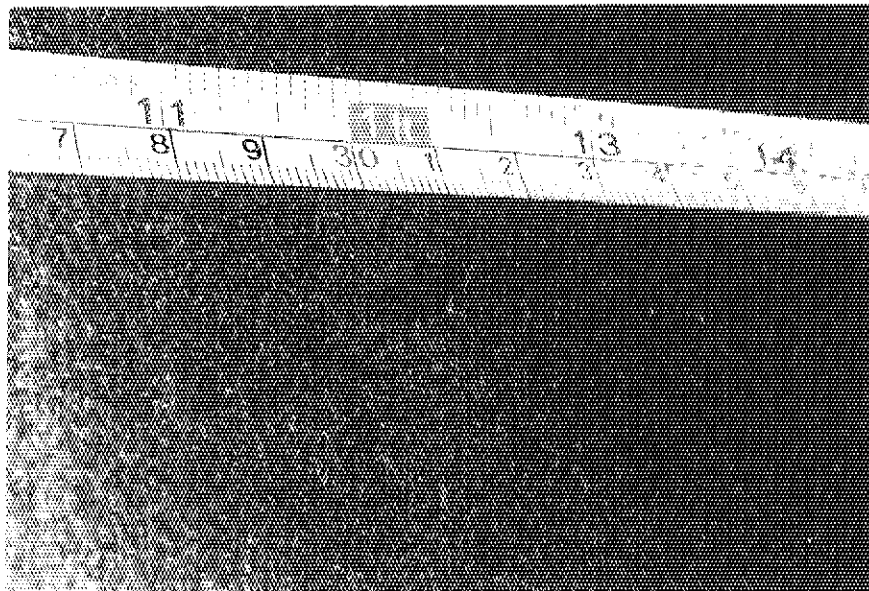
説明：直径5mm程度のボイド/ピットが見られる。
これは、機械加工時に結合の弱い粒子の集まりが脱落したものである。

写真 No.2 模様の種類 ミックスボール



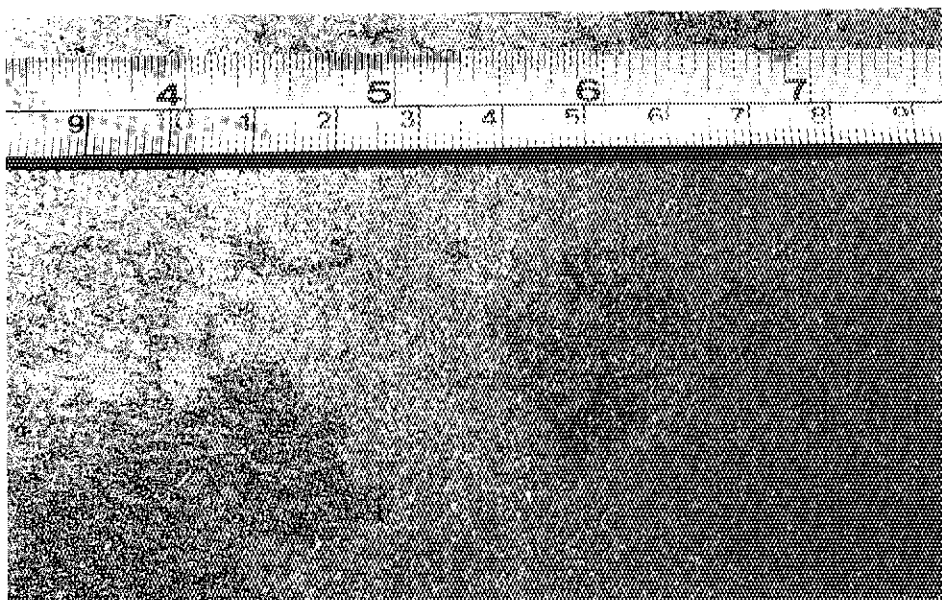
説明：長さ25mm程度の線状模様が見られる。
これは、ミックスボールの境界である。一般にミックスボールは丸い形をしており、境界も曲線となる。

写真 No.3 模様の種類 ミックスボール



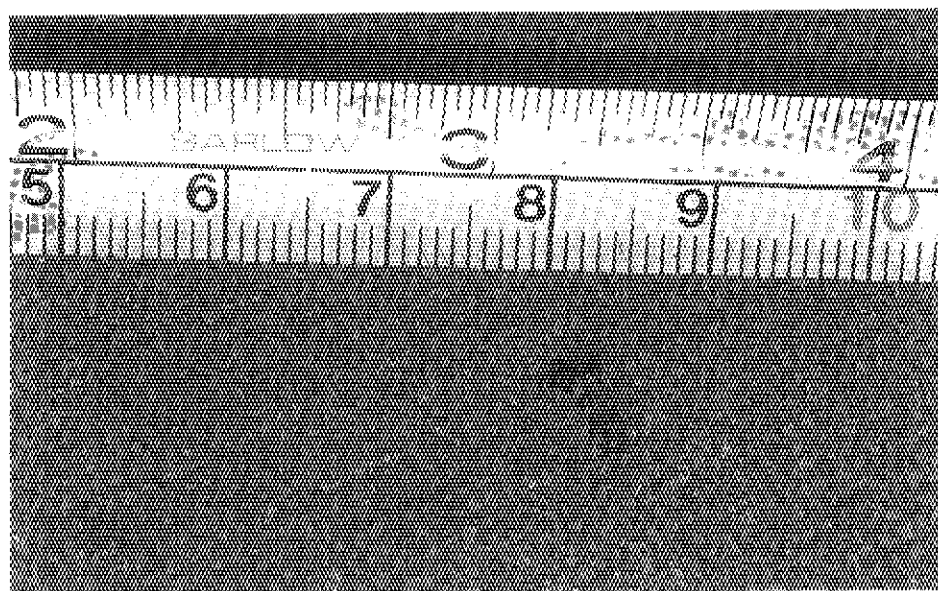
説明：長さ20mm程度のミックスボールが見られる。
これは、周囲とは光沢が異なるミックスボールの例である。

写真 No.4 模様の種類 ミックスボール



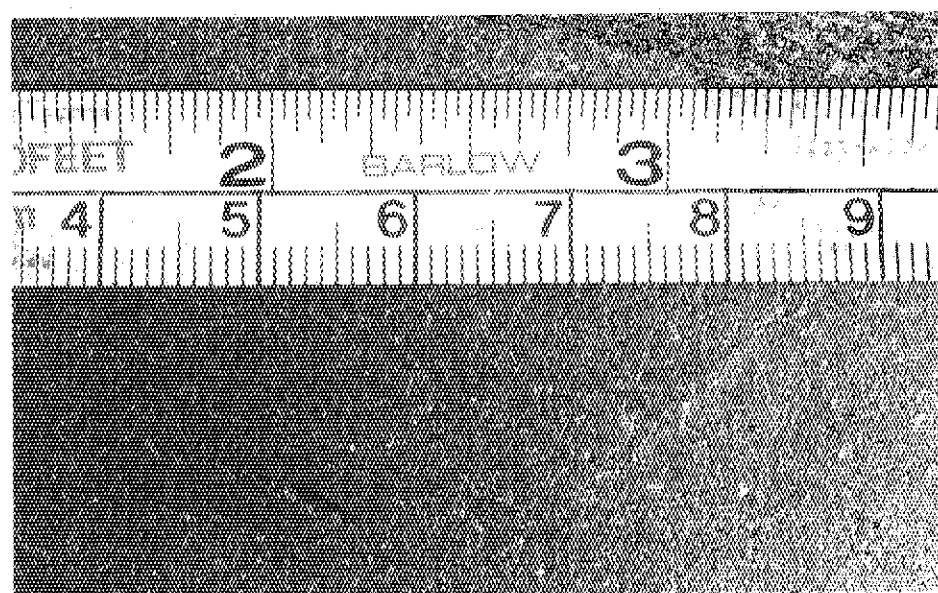
説明：長さ30mm程度のミックスボールが見られる。
これは、スポンジ状ミックスボールの例である。

写真 No.5 模様の種類 ミックスボール



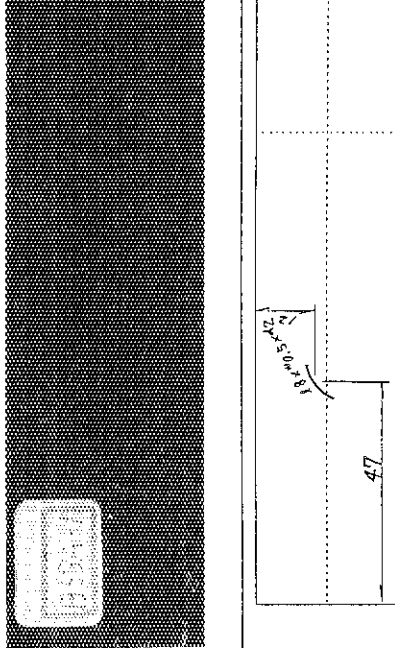
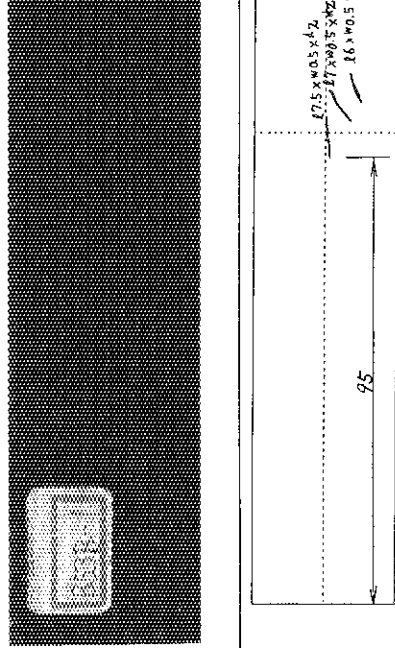
説明：長さ10mm程度のミックスボールが見られる。
これは、スポンジ状ミックスボールの例である。

写真 No.6 模様の種類 ミックスボール

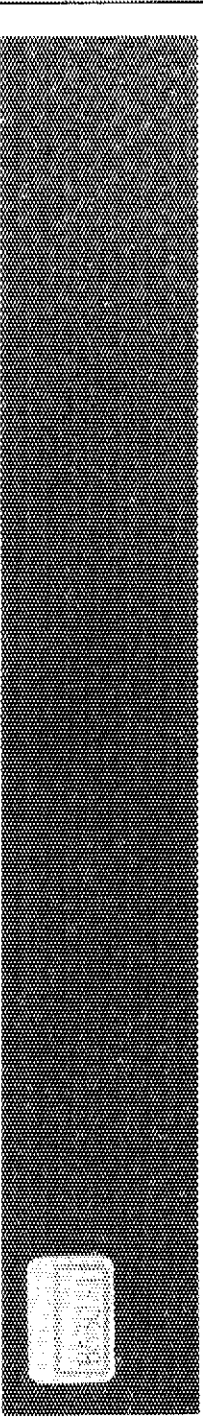
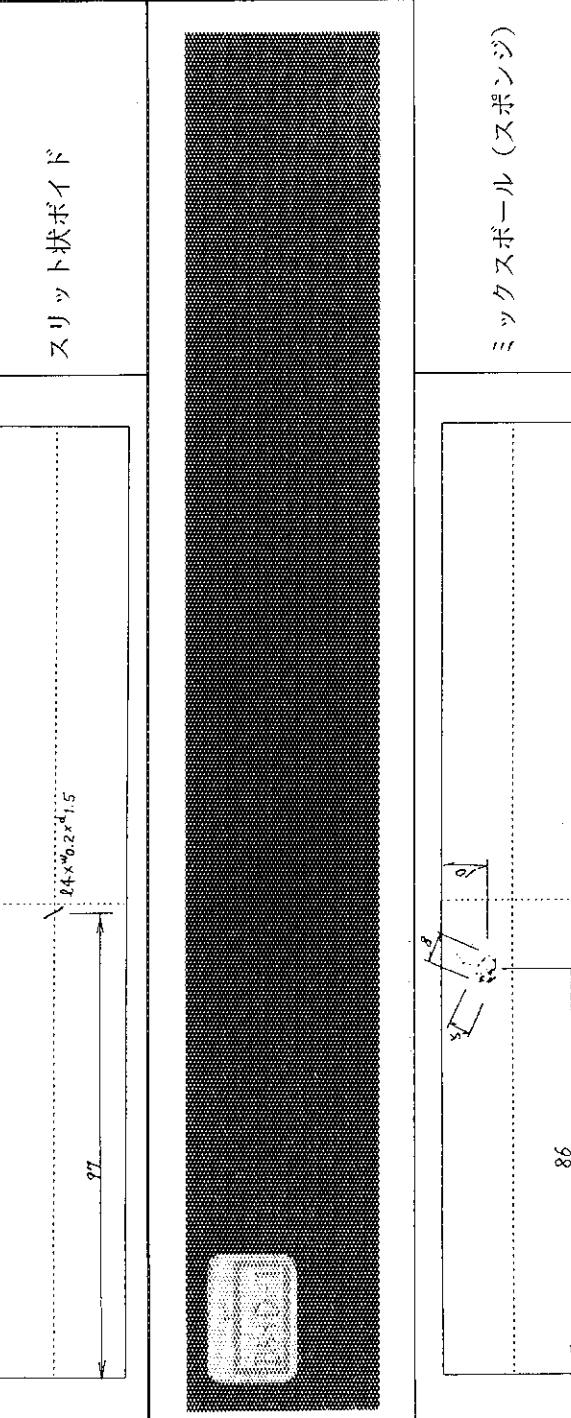


説明：ミックスボールの中に長さ15mm程度のボイド／ピットが見られる。
これは、ミックスボールが分離したために生ずる。

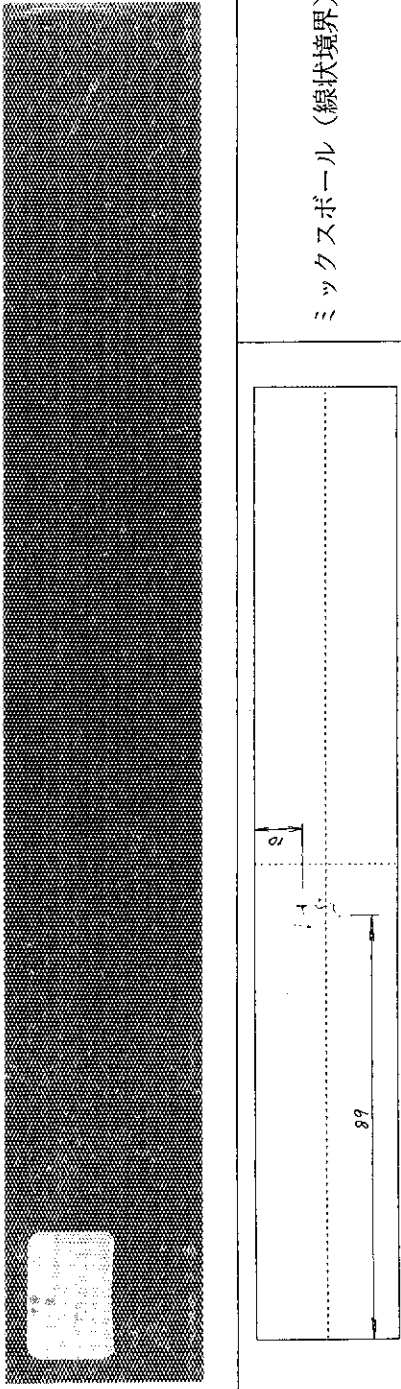
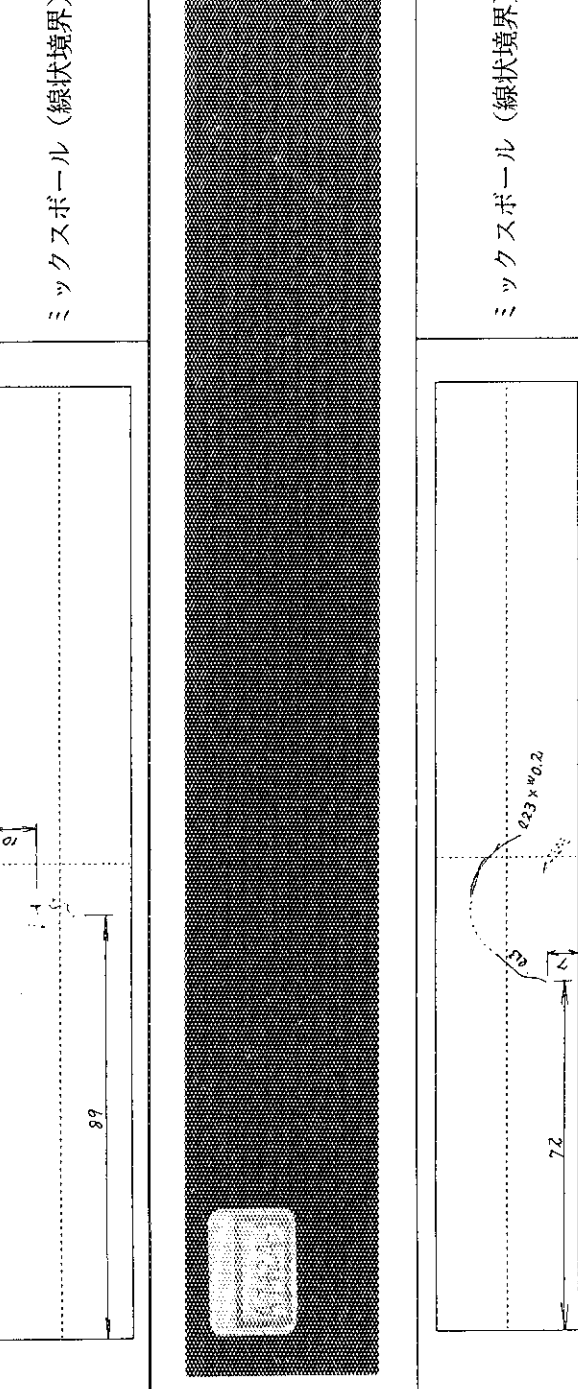
付表 A.1 試験片表面のポイド／ピット及びミックスボールの形状 (1/6)

試験片 no.	曲げ強さ (MPa)	試験片表面模様 上段：写真, 下段：スケッチ (試験片寸法; h 30 × ϕ 200 × t 15mm)	試験片の表面の特徴
B 5 3 A - 1	9.59		スリット状ポイド
B 5 3 B - 1	10.83		スリット状ポイド

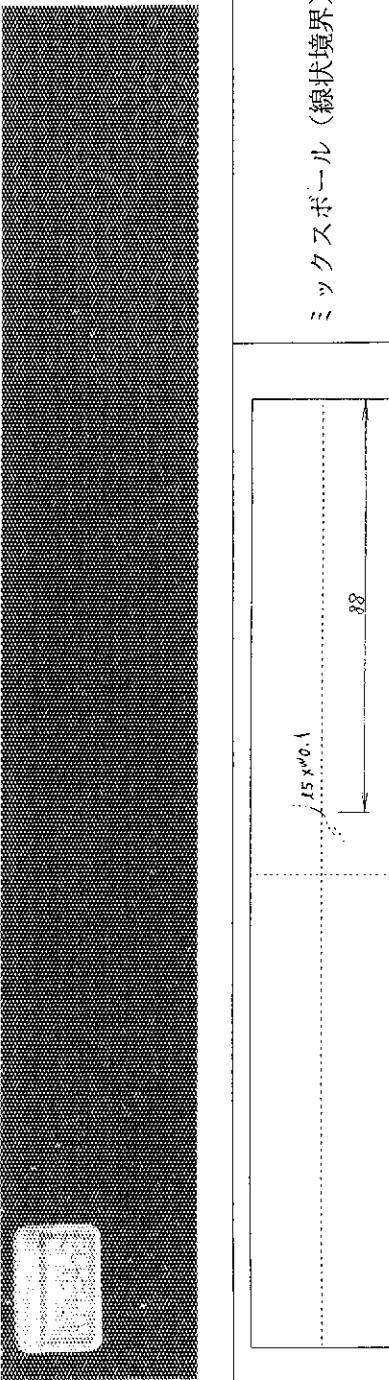
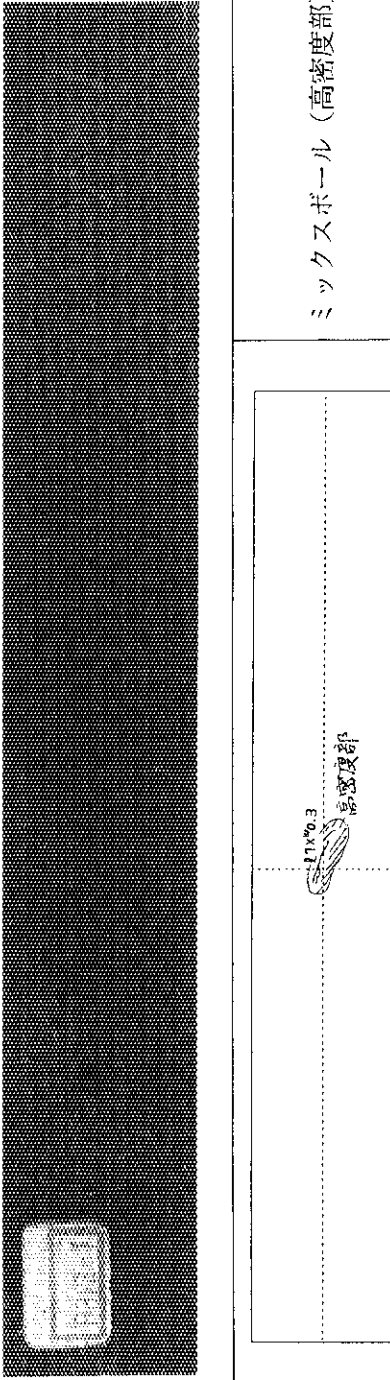
付表 A.1 試験片表面のポイド／ピット及びミックスボールの形状 (2/6)

試験片 no.	曲げ強さ (MPa)	試験片表面模様 上段：写真，下段：スケッチ (試験片寸法；h 30×ℓ 200×t 15mm)	試験片の表面の特徴
B 5 3 C - 1	10.36		スリット状ポイド
B 5 3 D - 1	12.52		ミックスボール (スポンジ)

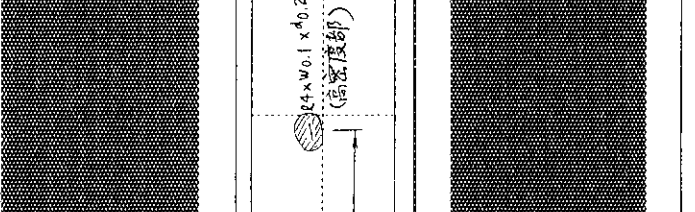
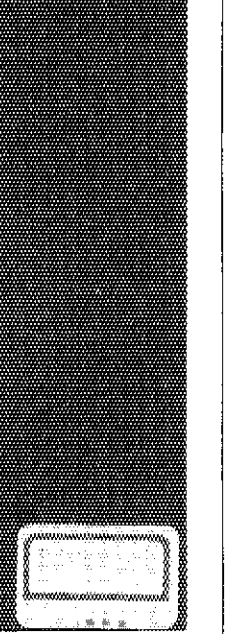
付表 A.1 試験片表面のボイド／ピット及びミックスボールの形状 (3/6)

試験片 no.	曲げ強さ (MPa)	試験片表面模様 上段：写真, 下段：スケッチ (試験片寸法; h 30 × ϕ 200 × t 15mm)	試験片の表面の特徴
B 4 4 - 1	10.85		ミックスボール (線状境界)
A 7 4 2 A - 1	8.78		ミックスボール (線状境界)

付表 A.1 ミックスボールのポイド／ピット及びミックスボールの形状 (4/6)

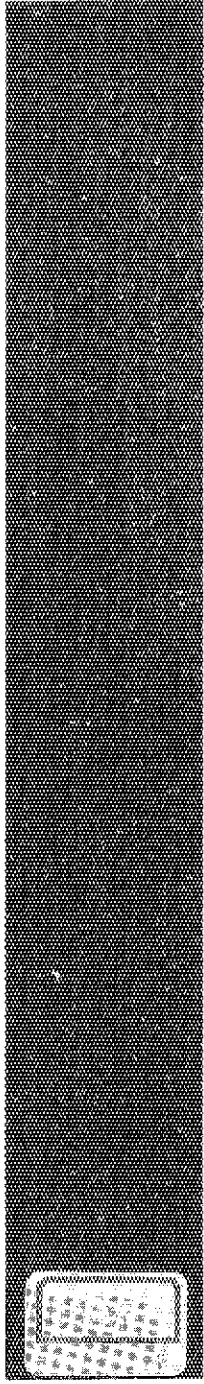
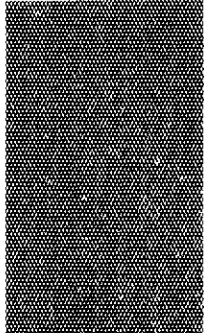
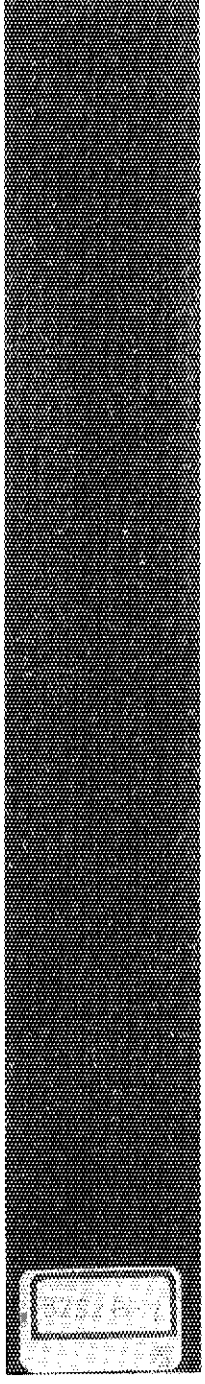
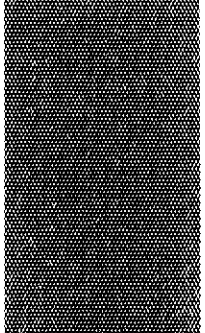
試験片 no.	曲げ強さ (MPa)	試験片表面模様 上段：写真，下段：スケッチ (試験片寸法；h 30×ℓ 200×t 15mm)	試験片の表面の特徴
A 7 4 2 A - 2	8.02		ミックスボール (線状境界)
B 3 1 2 - 1	11.83		ミックスボール (高密度部)

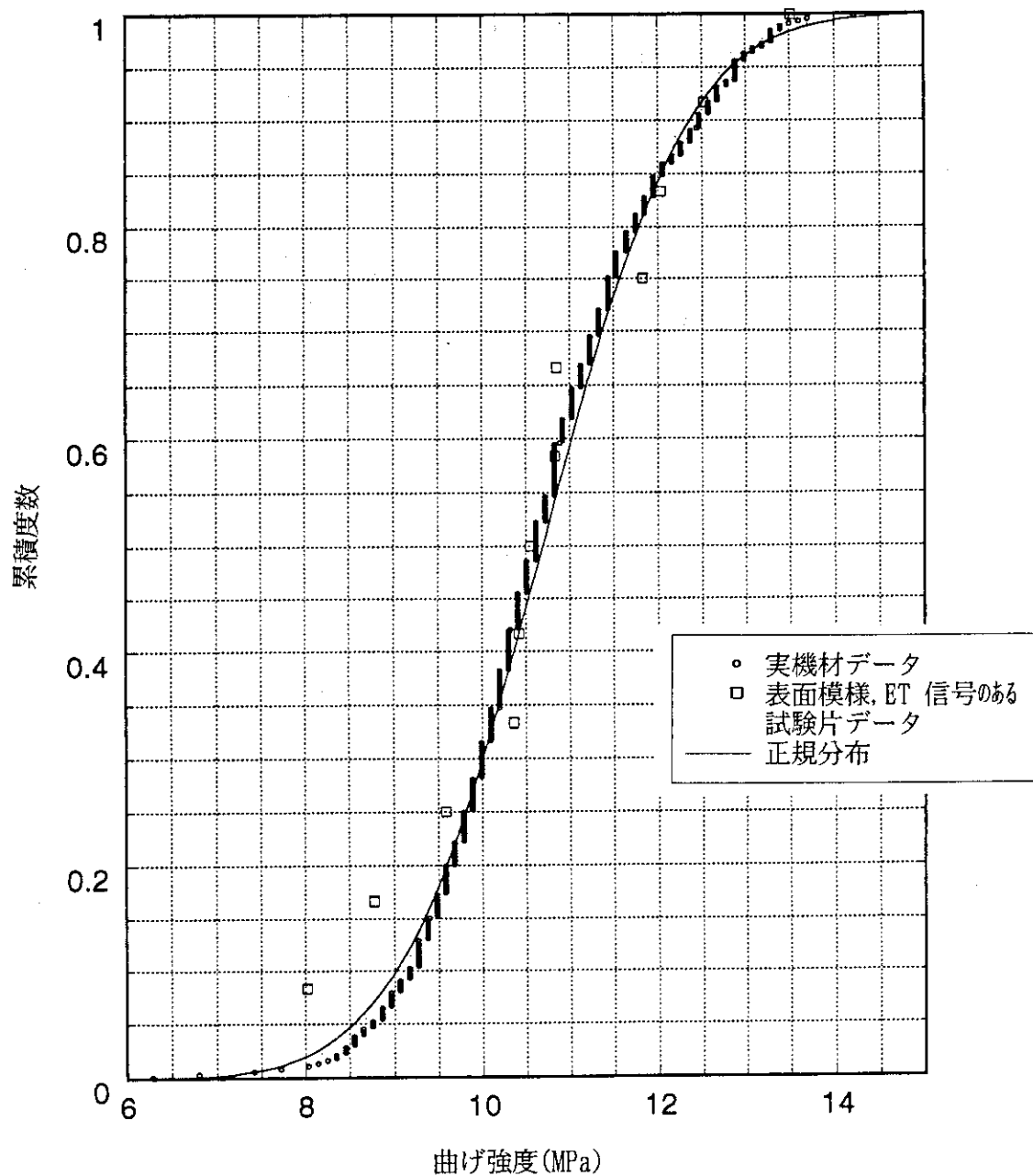
付表 A.1 試験片表面のポイド／ピット及びミックスボールの形状 (5/6)

試験片 no.	曲げ強さ (MPa)	試験片表面模様 上段：写真, 下段：スケッチ (試験片寸法; h 30 × ϕ 200 × t 15mm)	試験片の表面の特徴
B 6 6 1 - 1	12.04		ミックスボール (高密度部)
B 3 2 2 - 1	13.51		E T 信号検出 (S/N=2.60)

(特に記述すべき表面模様無し)

付表 A.1 試験片表面のポイド／ピット及びミックスボールの形状 (6/6)

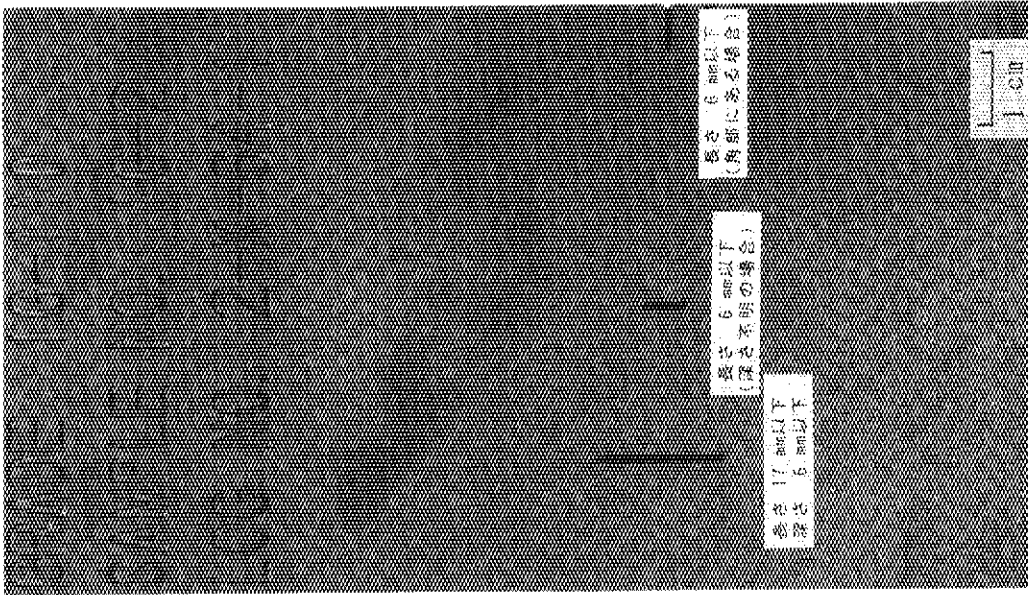
試験片 no.	曲げ強さ (MPa)	試験片表面模様 上段：写真, 下段：スケッチ (試験片寸法; h 30 × ϕ 200 × t 15mm)	試験片の表面の特徴
B 2 5 2 A - 1	10.42		
		(特に記述すべき表面模様無し)	E T 信号検出 (S/N=2.87)
B 2 5 2 B - 1	10.55		
		(特に記述すべき表面模様無し)	E T 信号検出 (S/N=2.73)



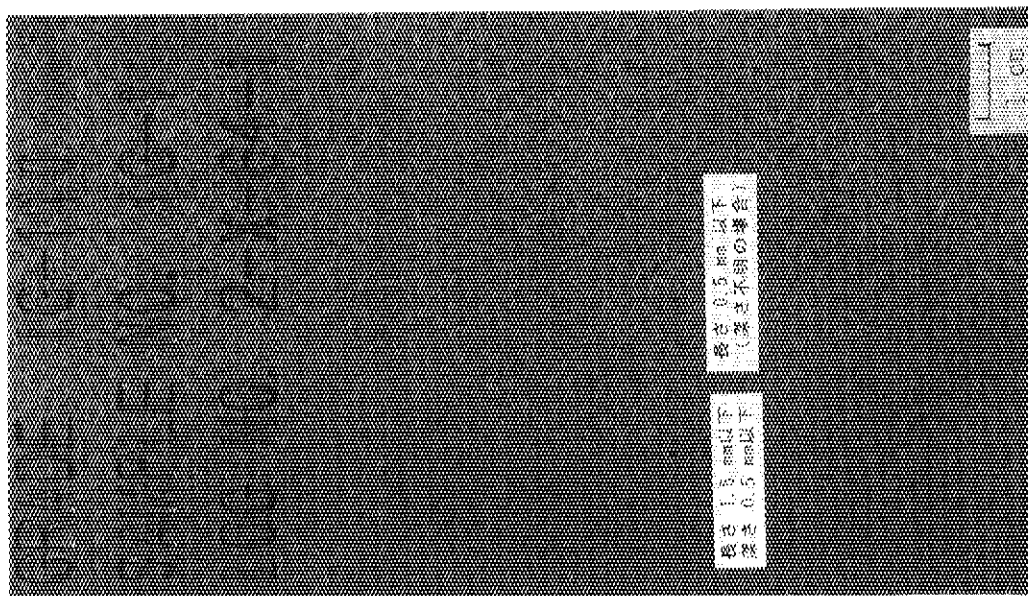
付図 A.1 PGX 黒鉛材料の曲げ強度分布

付録 B 外観検査用許容欠陥寸法の 限界見本

実際の黒鉛構造物の外観検査を行う場合は、あらかじめ許容欠陥寸法に相当した割れを入れた限界見本と実際の欠陥とを比較し合否を判断することになる。そこで、本報で設定した許容欠陥寸法に相当する限界見本を作成した。作成した限界見本の写真を付図B.1に示す。

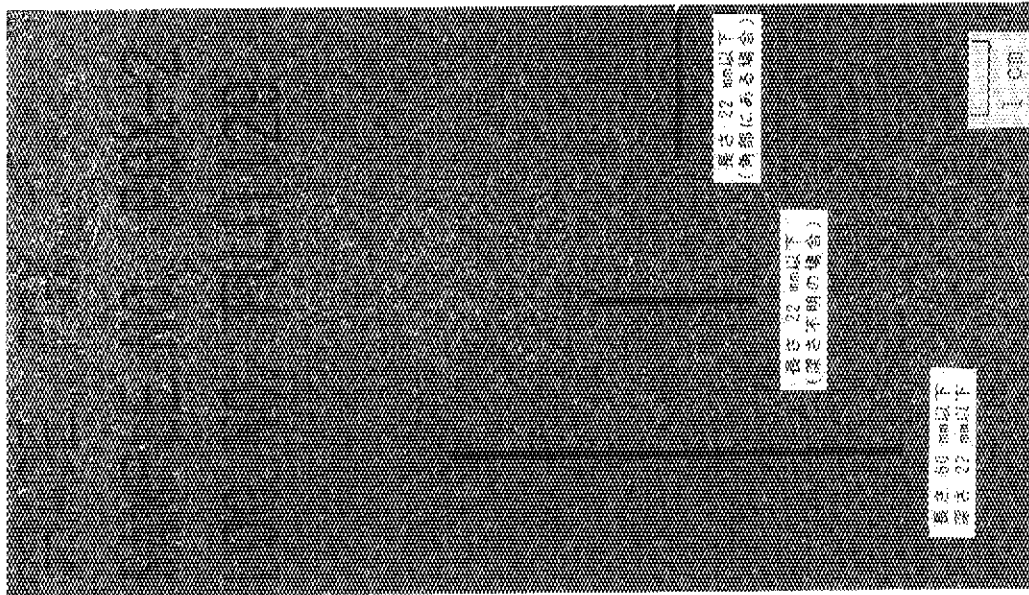


それ以外の部位

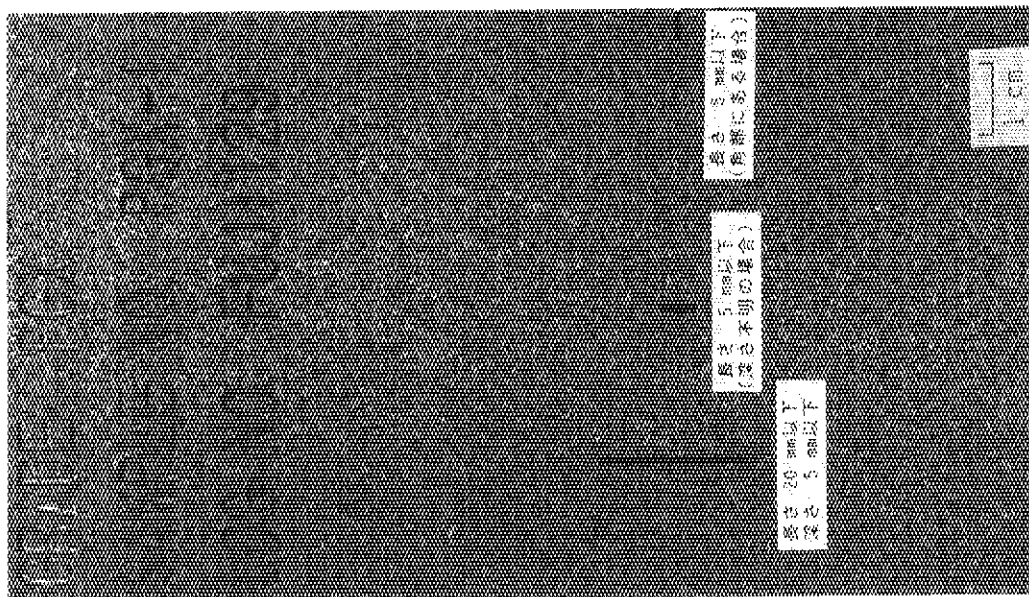


高い応力の発生する部位

付図B.1 外観検査用限界見本 (IG-110 黒鉛) (1/3)

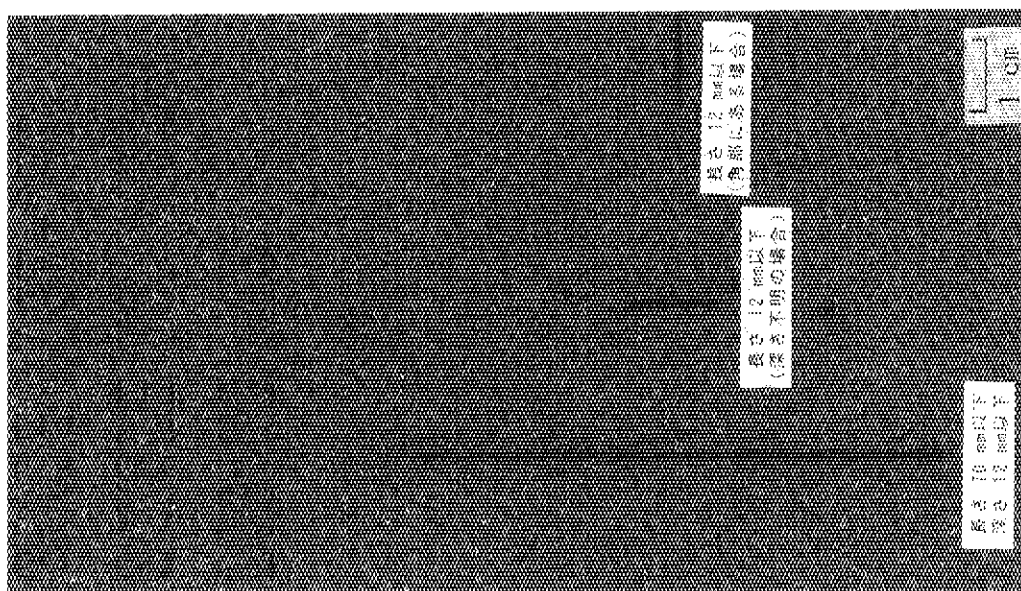


それ以外の部位



高い応力の発生する部位

付図B.1 外観検査用限界見本 (PGX黒鉛) (2/3)



高い応力の発生する部位

付図B.1 外観検査用限界見本 (ARS-ORB炭素) (3/3)