

# 黒鉛の破壊基準に関する検証

佐藤千之助\*, 車田 亮\*, 川又 清弘\*,

千葉 篤志\*\*, 西山 裕孝\*\*\*

(平成3年8月31日受理)

## A Verification on the Fracture Criterion of a Graphite

Sennosuke SATO\*, Akira KURUMADA\*,  
Kiyohiro KAWAMATA\*, Atsushi CHIBA\*\*,  
and Yutaka NISHIYAMA\*\*\*,

*Abstract:* In this paper, a previously proposed fracture criterion based on the fracture mechanics approach of an isotropic graphite IG-11 for core components of the high temperature engineering testing reactor (HTTR) under multiaxial stresses is verified based on data by the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). From the fracture criterion, allowable design stresses corresponding to the survival probability of 99% at the 95% confidence level (99/95), so-called the specified minimum ultimate strengths are presented for the safety design under multiaxial stresses of the graphite IG-11.

### 1. 緒 論

高温工学試験研究炉の炉心構造材としての黒鉛は一般に脆性的な破壊挙動を示し、材料の信頼性が比較的低いため、その健全性評価のための慎重な調査研究が進められている。特に多軸応力下における黒鉛の破壊基準に関する調査研究は黒鉛構造設計の基本となるものであるた

め、特に慎重な検討が必要である。筆者らは先に破壊力学的方法による一つの破壊基準を提唱し、自らの実験データに基づき検証を行った<sup>(1,2)</sup>。本報告は主として日本原子力研究所の西山ら<sup>(3)</sup>により黒鉛IG-11について取得された多軸応力下の実験データと新たに独自に取得した2~3の破壊力学的諸性質を用い、先に提唱した破壊基準の再検証を行ったものである。そして破壊の確率論に

---

\*茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

\*\*茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻 (日立市中成沢町)

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

\*\*\*日本原子力研究所東海研究所 (茨城県那珂郡東海村)

Tokai Institute, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11, Japan

もとづき、黒鉛IG-11についての多軸応力下の設計基準線図を与えた。

## 2. 脆性材料の多軸応力下の破壊基準

さきに淡路および佐藤<sup>(1,2)</sup>は脆性材料の多軸応力下の破壊基準を破壊力学的に検討し、以下の3つの場合に分けて提示した。

### 2.1 モード I 型破壊の条件

き裂先端のモード I 応力拡大係数 $K_I$ がモード I 破壊靱性値 $K_{Ic}$ に達すると破壊する。すなわち、

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

これは巨視的には最大主応力説に対応し、脆性材料の破壊に適用される。この破壊基準はFig. 1の二軸応力場に示すと線 [1] の直線ABCとなり、脆性破壊の主として問題となる引張応力の支配的な応力場である。図において座標軸は横に最大主応力 $\sigma_1$ 、縦軸には正の領域では中間主応力 $\sigma_2$ 、負の領域では最小主応力 $\sigma_3$ をとっている。

### 2.2 モード II 型破壊の条件

き裂先端のモード II 応力拡大係数 $K_{II}$ がモード II 破壊靱性値 $K_{IIc}$ に達するとき裂は伝播する。すなわち、

$$K_{II} = K_{IIc} \quad (2)$$

しかし、圧縮応力が支配的な応力場では圧縮応力によるき裂の拘束効果により、発生したき裂が拘束され最終破断するためにはさらに大きな荷重を必要とする。その破壊の条件は次式で表される。

$$\tau_{max} = \tau_0 + \zeta (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

ここに $\tau_0$ は材料内のき裂に作用する限界の純粋せん断応力であり、単軸引張強度 $\sigma_t$ と以下の関係がある。

$$\tau_0 = \left( \frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \right) \sigma_t \quad (4)$$

また、 $\zeta (\sigma_1 + \sigma_3)$ の項は、もとのき裂が伝播開始してから最終破断するまでのせん断応力の増分を表し、 $\zeta$ は圧縮応力 $(\sigma_1 + \sigma_3)$ によるき裂の拘束量を表す係数である<sup>(1)</sup>。(3)式は内部摩擦係数を考慮したCoulomb-

Navier<sup>(4)</sup>の破壊条件と形式的に同じであるが、 $\tau_0$ や $\zeta$ の破壊力学的根拠を定量的に明らかにしている。(3)式をFig. 1中に示すと線 [2] の直線APRとなる。点Qは材料が鈍せん断応力状態においてモード II 型破壊を起こすと仮想した点 $(\tau_0, -\tau_0)$ である。また、線[2]の直線APRは $\sigma_c$ を単軸圧縮強度とすると、次式で表される。

$$\sigma_3 = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \left( \frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \right) - 1 \right\} \sigma_1 - 1 \quad (5)$$

線 [2] の直線APの延長線と $\sigma_1$ の横軸との交点はCoulomb-Mohr<sup>(5)</sup>の破壊基準における見掛けの引張強度を示すものである。しかし、この見掛けの引張強度 $\sigma_t'$ は我々の破壊基準によれば(5)式から次式のようにその破壊力学的意義が説明される。

$$\sigma_t' = \frac{\sigma_t \cdot \sigma_c (K_{IIc}/K_{Ic})}{\sigma_c - \sigma_t (K_{IIc}/K_{Ic})} \quad (6)$$

### 2.3 せん断破壊の条件

圧縮応力によるき裂の拘束が大きくなると、き裂が伝播する以前に材料固有のせん断強度 $\tau_c$ に達すると破壊する。すなわち、

$$\tau_{max} = \tau_c \quad (7)$$

この条件は延性材料の破壊に一般に適用される最大せん断応力説に対応する。(7)式をFig. 1中に示すと線 [3] の直線RSとなる。ここで点Rは材料固有のせん断強度の大きさによって変わりうる点である。

### 2.4 破壊基準の確率論的補正

き裂の伝播によって破壊を生ずるときの材料の破壊強度は、き裂や欠陥の大きさや分布形状および応力の分布に依存し、ばらつきが大きくなる。Weibullの破壊の確率論<sup>(6)</sup>はこれらの現象をよく説明する理論の一つとして広く知られている。淡路と佐藤<sup>(7,8)</sup>はこの理論を多軸応力場に拡張している。Fig. 1の場合、二軸の応力比 $\mu$ と均一性係数 $m$ を導入して確率論的補正を施すと、図のC点およびA点の近くに丸みを帯びた曲線になる。この確率論的補正の例として、引張り—引張りの二軸応力場と引張り—圧縮の二軸応力場の理論について述べる。まず、引張り—引張り二軸応力場の場合、一様な一軸引

張り二軸引張りの応力下における試験片の破壊強度の比は, その二軸応力場を  $(S, \mu S)$  ( $\mu \leq 1$ ) とすると,

$$\frac{S^*}{S_t} = \left[ \frac{1}{1 + \mu^m} \right]^{1/m} \quad (8)$$

と表される。ここに  $S_t$  は一軸引張強度,  $S^*$  は二軸引張りのときの強度である。Fig. 2 の二軸引張りの第一象限は  $S^*/S_t$  の値を横軸の  $\sigma_1$  にとり, 二軸応力比  $\mu$  を 0.5 から 1.0 まで変えたときの  $m=5$  に対応する  $S^*/S_t$  を表示したものである。

つぎに, 引張り一圧縮の二軸応力下での強度との比  $S^*/S_t$  は次式のように表せる。

$$\frac{S^*}{S_t} = \left\{ \frac{1}{1 + (\mu^*/\omega)^m} \right\}^{1/m} \quad (9)$$

ここで  $S^*$  は引張り一圧縮の二軸応力下での強度,  $\mu^*$  は  $\tau/S$  を表す。ここで  $S$  および  $\tau$  は直線 AP 上の任意の引張応力およびせん断応力である。また,  $\omega$  は  $\tau_c$

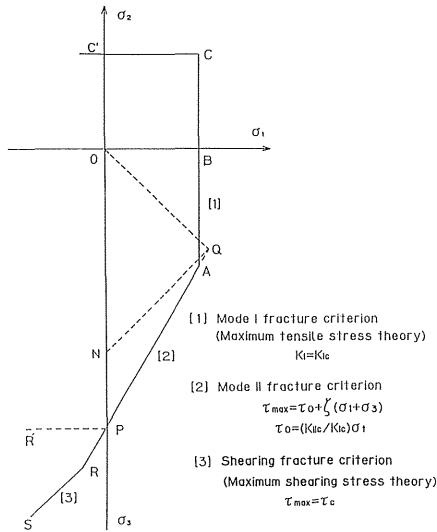


Fig. 1 Macroscopic fracture criteria under multiaxial stress state

$/S_t$  を表し,  $\tau_c$  はせん断強度である。圧縮応力が支配的な応力場においてせん断強度は圧縮応力に比例して増大するので, その場合には適宜  $\omega$  の値を修正する。たとえば, Q 点では  $K_{IIc}/K_{Ic}$  とし, A 点では A 点でのせん断応力  $\tau_A$  と  $S_t$  の比を  $\omega$  とする。Fig. 2 の第 4 象限はこの補正をした曲線を示す。

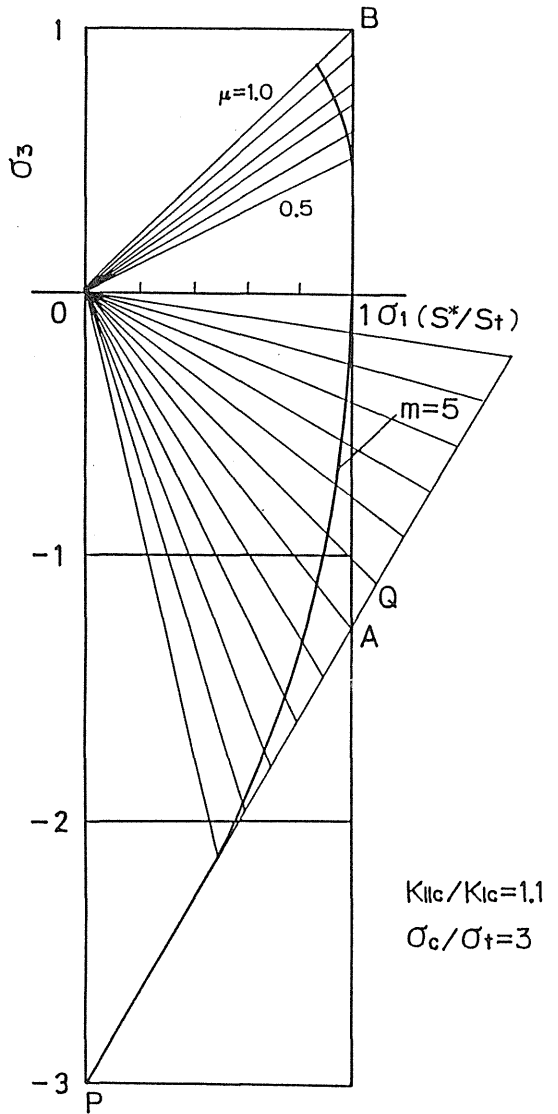


Fig. 2 Influence of probabilistic correction on biaxial stress fracture.

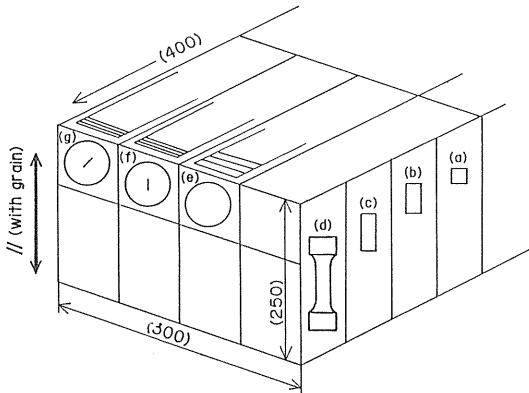
### 3. 実験方法

#### 3.1 試料黒鉛

本研究において用いた試料黒鉛IG-11は東洋炭素(株)製のラバープレス法により製造された微粒等方性黒鉛であり、日本原子力研究所が現在建設中の高温工学試験研究炉の主要な炉心構成材料として予定されている。

Fig. 3は本研究に用いた試験片形状および採取方向を示したもので、矢印(←→)で示す方向がwith-grain方向であり、//方向と記号付け、それに垂直方向がacross-grain方向で⊥方向と記号付けた。また、同図には試験の種類とそれに用いる試験片の形状も合わせて示した。

また、モードIおよびモードIIの破壊靱性試験片は円板の中心に長さ12mm、スリット先端の曲率半径が20μm以下の鋭い先端をもつスリットを//および⊥方向の物性が測定できるように方向に注意して加工した。



	shape	test piece
(a)	φ10×10	compressive strength (//)
(b)	φ10×20	
(c)	φ10×25	
(d)	φ16×60 (φ10×20)	
(e)	φ30×6	Diametral compressive strength (//),(⊥)
(f)	φ30×3	mode I and mode II fracture toughness (//),(⊥)
(g)	φ30×3	

Fig. 3 Cuttings of specimens

#### 3.2 実験装置

種々の材料試験には5 tonのインストロン型材料試験機を用い、クロスヘッドスピードは0.5mm/min一定として一連の実験を行った。

#### 3.3 実験方法

##### 3.3.1 圧縮強度試験

Fig. 4は圧縮試験の測定要領を示す。試験に際しては圧縮荷重が均一に負荷するように球面座を介して実験した。また、円柱の上下端面の摩擦を低減させるため薄くグリースを塗り、圧縮をした。本研究においては従来安易に取扱われてきた圧縮強度試験方法の再検討を行った。そのため圧縮強度試験片はFig. 5に示すJISの人造黒鉛の試験片基準<sup>(9)</sup>φ10×10mm、ASTMの黒鉛の試験片基準<sup>(10)</sup>のφ10×20mm、最近のファインセラミックスの試験片基準<sup>(11)</sup>のφ10×25mmおよびショールダーを有する改良型の円柱型試験片を用いて比較検討を試みた。

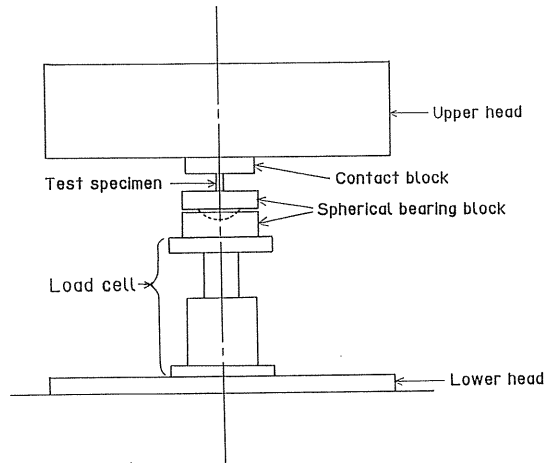


Fig. 4 Elements of compressive strength load train

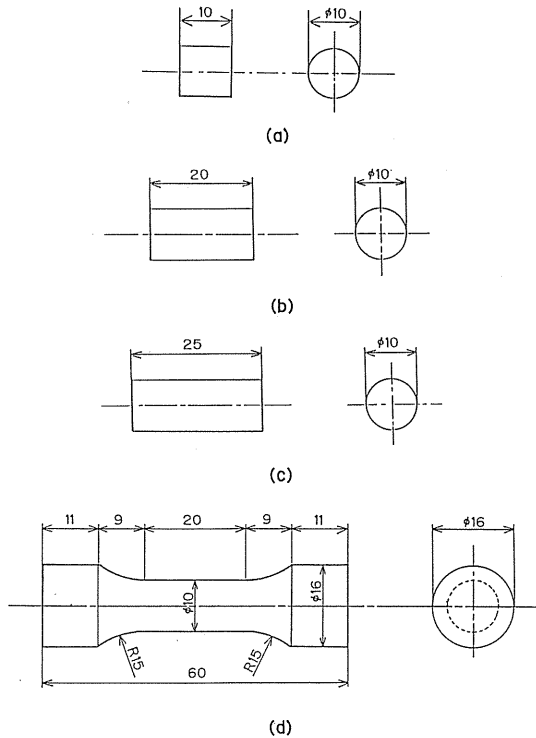


Fig. 5 Shapes of compression specimen

3.3.2 圧裂強度試験

円板の直径方向圧縮による圧裂強度は接触部からのき裂の誘発を防止するため鋼製の円弧型圧子を用い、Hertzの接触幅 $2b$ を考慮した淡路と佐藤<sup>(12)</sup>の開発した方法により求めた。Fig. 6 (a)はその圧裂試験の測定要領を示す。この圧裂強度試験は試験片の円板中心に圧裂方向に圧縮応力が、またそれに垂直方向には引張り応力が存在するため、二軸応力場における非常に簡単な試験である。ここで、圧裂試験において破壊する時の応力のうち引張り成分を圧裂引張強度 $\sigma_{HI}$ とすると次式で求められる。

$$\sigma_{HI} = \{1 - 1.15 (b/R)^2 + 0.22 (b/R)^3\} \sigma_P \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

ここで $\sigma_P$ は集中荷重 $P$ により圧縮された円板（直径 $2R$ 、厚さ $h$ ）の直径軸上に生ずる一様引張応力 $P/(\pi Rh)$ 、 $b$ は円弧型圧子による接触幅の半長であり、圧感紙（富士フィルム・プレスケール低圧用）を圧子の試験片間にはさみ、その圧痕から測定した。また、円板中心の圧縮応力成分 $\sigma_{HC}$ と $\sigma_{HI}$ との比はFig. 7に示すように接触幅比 $b/R$ の関数として数値計算されている。また、本研究に用いた円弧型圧子の内半径は34.5mmで、試料円板半径に対する比は1.05である。

3.3.3 破壊靱性試験

モード I およびモード II の破壊靱性値 $K_{IC}$ 、 $K_{IIC}$ は Fig. 6 (b) に示すように中心スリットを有する円板の圧裂試験においてスリットの傾き角 $\theta$ を変える方法により求めた<sup>(13)</sup>。モード I およびモード II の破壊靱性値 $K_{IC}$ および $K_{IIC}$ は次式により求められる。

$$K_{IC}, K_{IIC} = N_{IH, IIC} \sigma_P (\pi c)^{1/2} \quad (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}) \quad (11)$$

ここで $\sigma_P$ は集中荷重 $P$ により圧縮された円板の直径軸上に生ずる一様引張応力 $P/(\pi Rh)$ であり、 $C$ はスリットの半長、 $N_{IH, IIC}$ はHertzの接触圧を考慮したモード I およびモード II の無次元応力拡大係数で、接触幅およびスリット長さの比の関数である。接触幅 $2b$ は前項の圧裂強度試験の場合と同様に圧感紙により求めた。また、モード I および II の破壊靱性試験に対応する $c/R=0.4$ のときの中心スリットの角度 $\theta$ は0および $25.2^\circ$ である<sup>(13)</sup>。

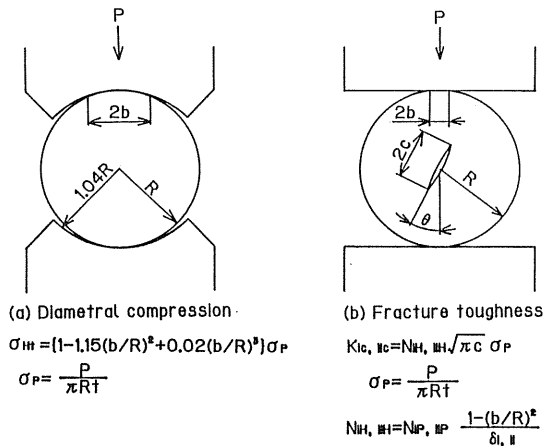


Fig. 6 Testings for disk specimens

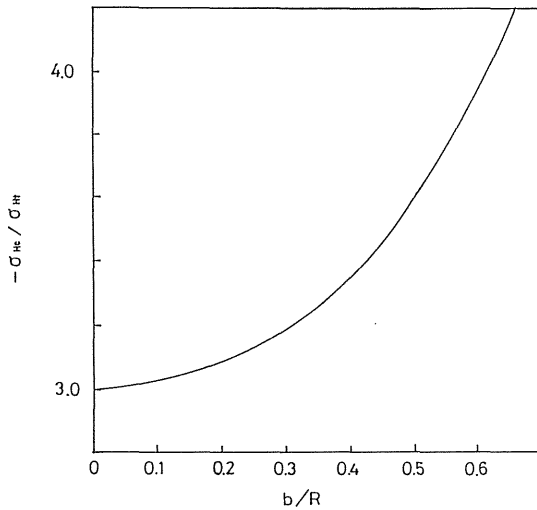


Fig. 7 Influence of contact width on principal stress ratio at center of disk specimens in diametral compression

#### 4. 実験結果および考察

Table 1 は本実験に用いた黒鉛IG-11において得られた機械的および破壊力学的性質の平均値、試験片数および標準偏差等を一括して示したものである。以下、ここに得られた結果について簡単に説明する。

##### 4.1 圧縮強度

Photo. 1 は圧縮強度試験における各試験片形式の典型的な破壊状況を示したものである。圧縮破壊はすべり面のせん断応力が限界値に達した時に発生し、そのすべり面の角度はおおよそ $60\sim 70^\circ$ であった。

圧縮強度 $\sigma_c$ は、Table 1 に示すように、試験片形式により多少の差異が認められる。圧縮試験において試験片の高さが低い $\phi 10\times 10$  (JIS) の場合は端面の接触部における拘束の影響を受け、圧縮強度を高めにする傾向を示す。 $\phi 10\times 20$ 程度以上の高さを有する試験片はその拘束の影響が小さく無視できるように考えられる。改良型の圧縮試験片による $\sigma_c$ は $\phi 10\times 20\text{mm}$ の $\sigma_c$ と $\phi 10\times 25\text{mm}$ の $\sigma_c$ の中間の値を示している。また、すべての $\sigma_c$ の平均値は $80.0\text{MPa}$ となり $\phi 10\times 20\text{mm}$ の $\sigma_c$ の値と最も近い値を示した。これらのことより、圧縮試験片にはASTM規格のような直径の2倍程度の高さが必要である

ように思われる。したがって、本研究における圧縮強度 $\sigma_c$ はこの $\phi 10\times 20\text{mm}$ の $\sigma_c$ の値を用いて $80.7\text{MPa}$ とした。

##### 4.2 圧縮強度および破壊靱性値

Photo. 2 (a) および (b) はそれぞれacross-grain およびwith-grain方向の圧裂強度試験、モードIおよびモードIIの破壊靱性試験における典型的な破壊状況を示す。圧裂強度試験においては直径軸上に圧裂によるき裂が見られ、2次的に発生した半円板の曲げによると考えられるき裂も見られる。モードIの破壊靱性試験の場合は、スリット先端より直径軸上にモードI型のき裂が見られ、モードII型の破壊靱性試験の場合は、スリット先端よりモードII型のき裂が発生し、徐々にき裂進展方向をモードI型に変えながら進展するのが見られる。

圧縮引張強度はそれぞれ平均すると//方向で $15.6\text{MPa}$ 、 $\perp$ 方向で $14.8\text{MPa}$ であった。また、黒鉛IG-11の $\perp$ 方向のモードIおよびモードIIの破壊靱性値はそれぞれ $0.82\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ となった。また、それらの比は $K_{IIc}/K_{Ic}=1.27$ となり他の黒鉛の値 $1.1\sim 1.3$ と同様の傾向を示した<sup>(13)</sup>。圧縮強度および破壊靱性値の比より純粋せん断破壊を生ずると仮想した点Qの座標は $(\pm 32.89)$ と求まり、後述のFig. 8にこの点を示した。

前項の圧縮強度、圧裂強度および破壊靱性値の比より本研究の破壊基準の考え方をを用いると一様引張強度が推定できる。この強度を推定引張強度 $\sigma_t^*$ と名付けると次式で表される。

$$\sigma_t^* = \frac{K_{Ic}}{K_{IIc}} \cdot \frac{\sigma_{Ht}, \sigma_c}{\sigma_{Ht} (1 + \sigma_{Hc}/\sigma_{Ht}) + \sigma_c} \quad (12)$$

ここで $(-\sigma_{Hc}/\sigma_{Ht})$ は圧縮試験における円板の中心部の圧縮応力 $\sigma_{Hc}$ と引張応力 $\sigma_{Ht}$ の比で、Fig. 7により算出される。上式より求めた $\sigma_t^*$ の値は $25.5\text{MPa}$ となり、黒鉛IG-11の引張強度 $25.6\text{MPa}$ <sup>(14)</sup>の値と非常によく一致している。このことは本研究で提出する破壊基準の一つの妥当性を示すものと考えられる。

Table 1 Experimental results of IG-11 Graphite

	Direction	Shape	n	Average ( $S_d$ )	Cv	$\sigma$
Compressive strength $\sigma_c$ (MPa)		$\phi 10 \times 10$	10	84.5 (0.463)	0.006	240.0
		$\phi 10 \times 20$	10	80.7 (2.44)	0.030	42.0
		$\phi 10 \times 25$	10	76.7 (5.24)	0.068	18.0
		modified ( $\phi 10 \times 20$ )	10	78.2 (3.63)	0.046	27.0
Diametral compressive strength $\sigma_{nc}$ (MPa)	⊥	$\phi 30 \times 6$	15	15.6 (1.02)	0.085	18.5
			8	14.8 (1.48)	0.100	12.0
mode I fracture toughness $K_{IC}$ (MPa $m^{1/2}$ )		$\phi 30 \times 3$	5	0.80	-	-
			5	0.82	-	-
mode II fracture toughness $K_{IIC}$ (MPa $m^{1/2}$ )	⊥	$\phi 30 \times 3$	5	0.99	-	-
			5	1.04	-	-
$K_{IIC}/K_{IC}$		-	-	1.23	-	-
			⊥	-	1.27	-
Deduced tensile strength $\sigma_t^*$ (MPa)		-	-	26.7	-	-
			⊥	-	25.5	-

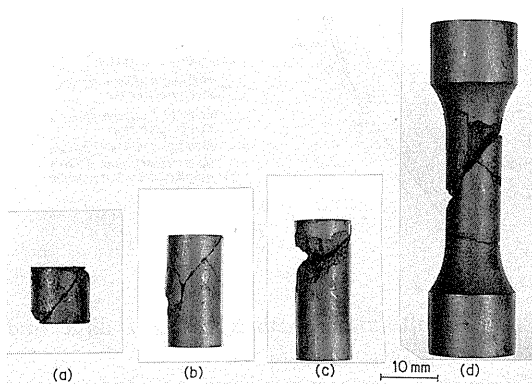


Photo. 1 Typical fractures in compressive strength tests of IG-11 graphite

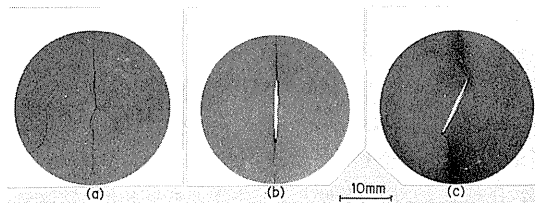


Photo. 2 (a) Typical fractures in (a) diametral compressive strength (b) mode I and (c) mode II fracture toughness tests of IG-11 graphite (across grain)

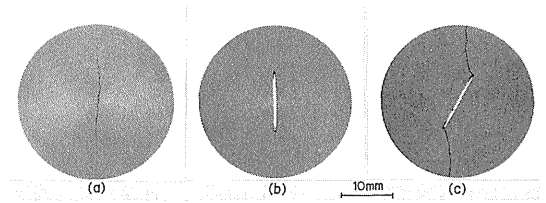


Photo. 2 (b) Typical fractures in (a) diametral compressive strength (b) mode I and (c) mode II fracture toughness tests of IG-11 graphite (with grain)

### 4.3 破壊基準線図および設計基準線図

Fig. 8は本研究により得られた実験結果を用いて、縦軸 ( $\sigma_2, \sigma_3$ ) に長手 (//) 方向の物性を示し、横軸 ( $\sigma_1$ ) に横 ( $\perp$ ) 方向の物性を示した場合の黒鉛IG-11の多軸応力下の破壊基準を示す。各軸上および圧裂試験の点の周りにある範囲はそのデータの最大値, 最小値の範囲を示す。

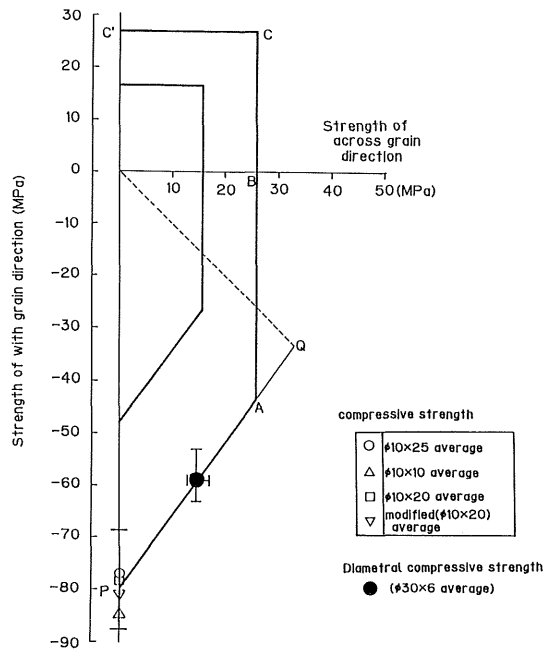


Fig. 8 Fracture criteria of IG-11 under multiaxial stresses

Fig. 9は西山の<sup>(3)</sup>データとわれわれの破壊基準とそれ以外の下記に示す4つの破壊基準との対応を示したものである。西山らのデータは特に第1象限において著しいばらつきがある。これは彼等の実験が非常に薄肉(厚さ2mm)の内圧引張形試験片を採用しているための実験条件のばらつきを反映しているものとみられる。この領域のばらつきに対応するWeibullの均一性係数mは約2である。最近の石山<sup>(20)</sup>のこの領域の再検討によると、ばらつきが小さく、m=4.3程度になる。この領域でのさきの筆者らの実験ではm=5であった。また、Jortner<sup>(15)</sup>の実験ではm=4.2であった。なお、西山ら<sup>(3)</sup>の第4象限の等引張圧縮領域のばらつきは幾分少なく、m=5程度である。この値も単軸の引張や圧縮強度試験のm=20に比較すればばらつきが大きい。しかし、本研究では西山ら<sup>(3)</sup>のデータのばらつきをそのまま採用し第1象限ではm=2、第4象限ではm=5とした破壊基準線図を参考のために示した。また、Fig. 9の第4象限には次の破壊基準線図も比較した。

(1) 修正モール基準<sup>(2)</sup>

$$\sigma_1/S_t - \sigma_3/S_c = 1 \tag{13}$$

(2) 修正最大ひずみエネルギー基準<sup>(16)</sup>

$$\begin{aligned} (\sigma_1/S_t)^2 - 2\nu(\sigma_1/S_t)(\sigma_3/S_c) \\ + (\sigma_3/S_c)^2 = 1 \end{aligned} \tag{14}$$

(3) 修正最大せん断ひずみエネルギー基準<sup>(3)</sup>

$$\begin{aligned} (\sigma_1/S_t)^2 - (\sigma_1/S_t)(\sigma_3/S_c) \\ + (\sigma_3/S_c)^2 = 1 \end{aligned} \tag{15}$$

(4) 最大主応力基準+修正クーロン・モール基準<sup>(17)</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= S_t \\ \sigma_3 &= \alpha\sigma_1 - S_c \end{aligned} \tag{16}$$

ここで西山らの報告<sup>(3)</sup>によれば、(1)と(3)は部分的にしか実験データを満足しないことが分かっている。(4)は圧縮強度と仮想引張強度の比を表す $\alpha$ の値の根拠が明確でなく破壊基準としては問題が残るとし、(2)の基準を破壊基準として推奨している。この(2)の基準は実験データをほぼ全体的に満足し、われわれの提案した破壊基準線図によく類似している。しかし、西山らは、(2)の基準によらず(4)に基づく設計最小強度を設計基準としている。これでは、破壊基準と設計基準とが整合していないことになる。本研究では、前述の破

壊基準を基にする設計基準としてASME section III subsection CE<sup>(18)</sup>にならい非破壊確率99%、信頼度95%の特定最小極限強度Suを使用することにし、試料数を10の場合とした。この基準はMIL-HDBK-5Cの値<sup>(19)</sup>に相当する。

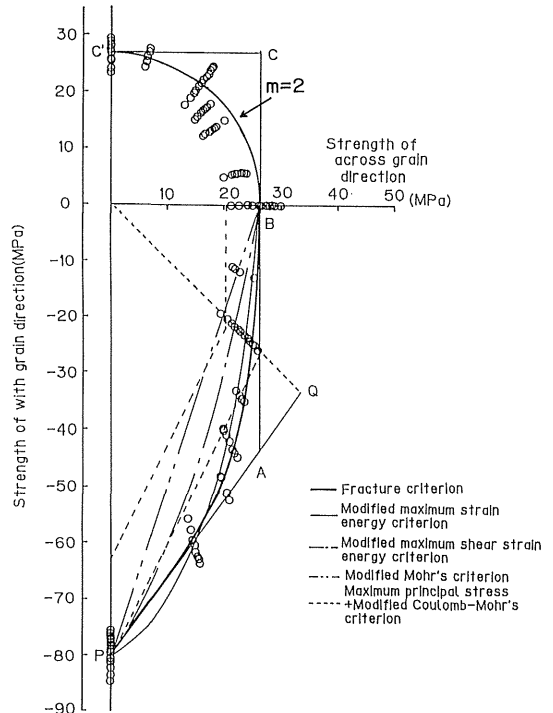


Fig. 9 Multiaxial fracture strength data and fracture criteria

Table 2は算出した座標点を一括して示したものである。これを基に、設計基準線図を示すとFig.10の内側の太線となる。外側の点Aおよび点Cで丸みをおびた太線は西山らの<sup>(3)</sup>データのばらつきをそのまま採用して第1象限ではm=2、第4象限ではm=5として計算した、本研究で提案した破壊基準線図である。また、内側の曲線は本研究で提案した非破壊確率99%、信頼度95%(99/95)の設計基準線図である。この設計基準線図は多軸応力場の実験データをよく満足するのみならず、引張、圧縮および引張強度とモードIとモードIIの破壊靱性値の比から簡単に設定することができ、他の黒鉛材料のみでなく、多くの脆性材料にも適用することができるものである。なお、第1象限のばらつきを石山の再検討にならい、m=5とした場合を点線で示した。



Table 2 The coordinate points in the fracture criterion and the specified minimum ultimate strength of IG-11 corresponding to the survival probability 99% at a confidence level of 95% (99/95)

point	$\bar{\sigma}$ MPa	$S_d$ MPa	$S_u$ MPa
A	25.5	3.11	15.8
	-43.5	5.22	-26.5
B	25.5	3.11	15.8
	26.7	3.23	16.4
C	25.5	3.11	15.8
	26.7	3.23	16.4
C'	25.5	3.11	15.8
	26.7	3.23	16.4
P	-80.7	9.7	-49.0

$S_d$  is a standard deviation.

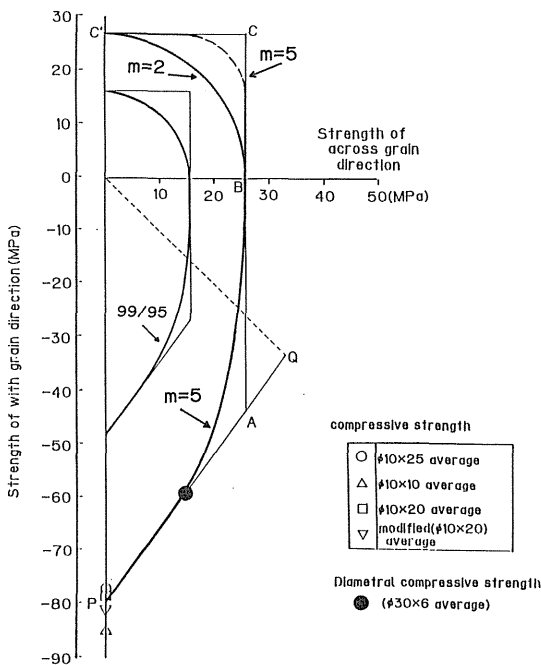


Fig.10 Fracture criteria of IG-11 under multiaxial stresses

### 5. 結 論

以上, 本研究は, 高温工学試験研究炉の主要な炉心構成材料とされる黒鉛IG-11について, 日本原子力研究所の西山らのデータに加えて, 新たに圧縮強度, 圧裂強度および破壊靱性試験を行った。特に圧縮強度は従来の試験片規格を再検討し, ASTM規格に準拠した方法の妥当性を示した。それらの結果を用いて筆者らが先に提唱した多軸応力下における破壊基準の検証を行いその妥当性を示した。筆者らの破壊基準線図は比較的簡単で少数の試験により決定することができる利点がある。また, それによる破壊基準線図は二軸応力下の種々の条件下の数多くの実験データを満足しており, この破壊基準線図の妥当性を示した。また, 試験片数10の場合の信頼度95%の非破壊確率99%に対する特定最小極限強度 $S_u$ に基づく設計基準線図を示した。これにより, 設計箇所が多軸応力場における強度設計の安全性を確認することができる。

### 参 考 文 献

- (1) 佐藤・淡路・川又・車田・奥, 日本原子力学会誌, 28 (1986), 1172.
- (2) S. Sato et al., Nucl. Eng. and Design, 103 (1987), 291.
- (3) 日本原子力学会1989年秋の大会予稿集, 第2分冊, K-7 (1989).
- (4) J. C. Jaeger, Elasticity, Fracture and Flow, 3rd ed. (Metheum, 1969).
- (5) B. Paul, Fracture, II, Ed. : H. Liebowitz (Academic Press, New York and London, 1986), 387.
- (6) W. Weibull, J. Appl. Mech. ASME, 18 (1951), 293.
- (7) 淡路・佐藤, 材料, 27-295 (1978), 349.
- (8) S. Sato, H. Awaji and M. Miyauchi, High Temperatures-High Pressures, 12 (1980), 23.
- (9) JIS R 7222-1962.
- (10) ASTM-E 9-81.
- (11) JIS R 1608-1990.
- (12) H. Awaji and S. Sato, J. of Engineering Materials and Technology 101-2, (1979), 139.
- (13) 淡路英夫, 佐藤千之助, 材料, 28 306, (1979), 244.
- (14) JAERI-MEMO 9641, (1981), 62.

- (15) J. Jortner, : AFML-TR-73-170, (1973) . Boiler and Pressure Vessel Code, Subsection  
(16) R. E. Ely, Ceram. Bull., 47, 489 (1968) . CE Design Requirements for Graphite Core  
(17) F. H. Ho, et al., Proc. SMIRT, L 4 / 6 , Supports (1982) .  
127 (1983) . (19) 上山忠夫 : 構造信頼性, 日科技連 (1984) , 50.  
(18) ASME code, Section III, Division 2 ASME (20) 石山新太郎, 私信 (1991) .