高温ガス炉用黒鉛の強度の統計的性質

奥 達雄*・衛藤基邦*
 藤崎勝夫*・佐々木泰一*

(昭和52年1月12日受理)

Statistical Properties of Strengths of Graphites
 for High Temperature Gas-Cooled Reactor

Tatsuo OKU, Motokuni ETO, Katsuo FUJISAKI and Yasuichi SASAKI

Japan Atomic Energy Research Institute,
 Tokai-Mura, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

The statistical distribution of the tensile and bending strengths has been studied on the gilsocarbon isotropic graphite (IM2-24) and the petroleum coke fine-grained isotropic graphite (7477PT) and the irradiation effect on the statistical nature of strength has also been studied on the former graphite.

As a result, the data of tensile and bending strengths can be well approximated by both the Weibull and the normal distributions. Both the Weibull modulus, m and the normalizing factor, σ_0 in the Weibull statistics of strengths of irradiated graphite increased as compared with those for unirradiated one. The effect of specimen volume on strengths was not large as predicted by the Weibull theory. The experimental value of the bending to tensile strength ratio was larger than the calculated one based on the Weibull statistics. However, results based on the pseud-Weibull statistics, in which only the m value in the Weibull parameters m and σ_0 is taken as the same value in the tensile and bending strengths, was comparatively consistent with the experimental value for 7477PT graphite. In conclusion, the weakest link model is considered to be able to apply approximately but not exactly to the fracture of graphite.

1. ま え が き

多結晶黒鉛材料は表面および内部に多くのクラックや気孔などの“きず”をもっているため、金属に比べて破壊強度が大きくばらつくことはよく知られている。したがって、高温ガス炉の炉心黒鉛構造物の安全設計や安全性の検討を行う際に、少数の小型試験片に関する強度の平均値のみに依存したとすると安全余裕度を正當に評価できない可能性がある。このような場合、黒鉛の強度のばらつきを統計的分布として一つの手法にもとづいて整理し、破壊の確率を定義したのち、炉心黒鉛構造物の破壊を確率統計的に評価するのが合理的であると考えられる。黒鉛の強度に対してワイブル統計を応用する最初の試みは、佐藤¹⁾によって行われており、比較的よく適合する結果を得ている。黒鉛の実際の破壊現象がどのような確率統計モデルに適合するかということを検討することによって、黒鉛の破壊機構を議論している例²⁾はあ

るが、破壊機構の説明に成功した例はないようである。しかし、黒鉛の強度の統計的性質に関するデータは、まだきわめて少なく、十分とはいえない。とくに高温ガス炉用高強度の黒鉛については強度の実験値といろいろな統計分布モデルとの適合性や統計分布に及ぼす中性子照射の影響に対する二、三の研究例^{3)~5)}があるに過ぎず、確かな結論はまだ得られていない。

ここでは、ギルソカーボン系等方性黒鉛(IM2-24)と石油コークス系微粒等方性黒鉛(7477PT)の引張、曲げ、圧縮強さを同一個所から採取した約30本についてそれぞれ求め、ワイブルの統計論および正規分布によって結果を整理し、黒鉛の強度の統計的側面を明らかにすることおよびそれに及ぼす中性子照射の影響を検討することを目的とした。なお、曲げ強さについては、体積効果、統計モデルの違いの影響を検討した。圧縮強さについては別途に報告⁶⁾したので、ここではとくに必要な場合を除いては言及しない。

* 日本原子力研究所燃料工学部黒鉛材料研究室
 茨城県那珂郡東海村

2. ワイブル分布と正規分布

黒鉛の破壊強度がワイブル統計にしたがうとすれば、破壊の確率 P_f は次式で表わされる²⁾。

$$P_f = 1 - \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad (1)$$

ここで、 σ は引張破壊応力(引張強さ、曲げ強さ)、 σ_u はこの応力以下では破壊の確率がゼロとなる応力であり、 σ_0 は規格化因子、 V は引張応力部分の体積、 m はワイブルのモジュラスであり、均一性係数とも呼ばれる。単軸引張の場合(1)式は次のようになる。

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_t - \sigma_u}{\sigma_{0t}} \right)^{m_t} V_t \right] \quad (2)$$

ここで、 σ_t は引張強さ、 m_t は引張強さに対するワイブルモジュラス、 σ_{0t} は引張強さに対する規格化因子、 V_t は試験片の平行部の体積である。

次に、丸棒の4点曲げの場合、 $\sigma_u = 0$ とすれば、(1)式は次のようになる¹⁾。

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{0b}} \right)^{m_b} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{m_b+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m_b}{2}+2\right)} \cdot \left(V_1 + \frac{V_2}{m_b+1} \right) \right] \quad (3)$$

ここで、 σ_b は4点曲げ強さ、 m_b は曲げ強さに対するワイブルモジュラス、 Γ はガンマ関数、 σ_{0b} は曲げ強さに対する規格化因子、 V_1, V_2 はそれぞれ内側および内側と外側スパンの間の引張応力部分の体積であり、 $\Gamma\left(\frac{m_b+1}{2}\right) / \sqrt{\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{m_b}{2}+2\right)$ は応力分布因子である。また、中立面は断面の中心を通るものと仮定した。

$m_t, m_b, \sigma_{0t}, \sigma_{0b}$ は実験により次のようにして得られる。 N 個の試験片から得られた N 個の σ_t, σ_b を小さい順に並べたとき、 j 番目の破壊強度に対応する確率は

$$P_f = \frac{j-0.3}{N+0.4} \quad \text{または} \quad \frac{j}{N+1} \quad (4)$$

によって与えられる⁷⁾。ここでは、中央値において $1/2$ の破壊の確率を与え、かつ j 番目の確率が $2j$ 番目の確率の $1/2$ となる前者の式を用いて整理した。(2)式および(3)式を2度対数をとれば、引張りと曲げの場合、それぞれ次式から $m_t, m_b, \sigma_{0t}, \sigma_{0b}$ を求めることができる。

$$\log \log \left(\frac{1}{1-P_f} \right) = m_t \log (\sigma_t - \sigma_u) + \log \left(\frac{V_t}{\sigma_{0t}^{m_t}} \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \log \log \left(\frac{1}{1-P_f} \right) \\ &= m_b \log \sigma_b + \log \left(\frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_{0b}^{m_b}} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{m_b+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m_b}{2}+2\right)} \cdot \left(V_1 + \frac{V_2}{m_b+1} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

次に、黒鉛の破壊強度が正規分布にしたがう場合、破壊の確率 P_f は次式によって表わされる。

$$P_f = 0.5 \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi} \mu} \int_{\sigma}^{\sigma} \exp \left[- \frac{1}{2\mu^2} (\sigma - \bar{\sigma})^2 \right] d\sigma \quad (7)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は破壊強度の平均値、 μ は標準偏差である。

(7) 式は引張強さや曲げ強さなどの種類によらない。

3. 実験方法

供試黒鉛材料の主な性質を Table 1 に示す。試験片のブロックからの採取は、単軸加圧成型材の場合、加圧方向に平行な軸方向をもつように行った。引張試験片は試験部の直径 5 mm、長さ 21 mm で、つかみ部の直径 8 mm、全長 60 mm である。引張り、曲げ試験片ともに、0.5 mm/min のクロスヘッド速度で実験を行った。曲げ強さは内スパン 20 mm、外スパン 40 mm の4点曲げ試験によって次式から求めた。

$$\sigma_b = \frac{8(l_0 - l_i)}{\pi d^3} \cdot P \quad (8)$$

ここで、 l_i, l_0 はそれぞれ内スパンと外スパンの大きさ、 d は試験片の直径、 P は破壊荷重である。

ギルソカーボン系等方性黒鉛(IM2-24)については、中性子照射を行い、強度の統計的性質に及ぼす照射効果を調べた。中性子照射は JRR-2 炉心内照射装置により 200-300°C で $7.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$) まで行った。

4. 実験結果と考察

4.1 黒鉛ブロック内の強度分布

ギルソカーボン系等方性黒鉛(IM2-24)ブロック(直径 50 cm、長さ 15 cm)内の強度分布に関する結果について述べる。円柱状のブロックの断面の4分円部分から

Table 1 Properties of Tested Graphites.

Brand	Apparent Density [g/cm ³]	BAF	Resistivity [10 ⁻⁴ Ω · cm]	Young's Modulus [10 ³ kg/mm ²]
IM2-24 (II)	1.78	1.00	10	1.21
7477PT (II)	1.74	1.01	16.5	0.98

Table 2 Strength Distribution in the IM2-24 Block.

Radial Distance from the Center of the Block [mm]	Tensile Strength [kg/mm ²]		Bending Strength [kg/mm ²]	
	Unirr.	Irr.	Unirr.	Irr.
160-178(5)*	1.77±0.07	2.30±0.15	3.08±0.15	3.60±0.12
178-196(5)*	1.92±0.14	2.35±0.11**	3.05±0.24	3.93±0.27
196-214(5)*	1.88±0.11	2.26±0.27	3.08±0.22	3.92±0.38
214-232(5)*	1.84±0.19	2.15±0.31	3.31±0.03	3.85±0.22
232-250(5)*	1.82±0.10	2.18±0.18	3.14±0.15	3.58±0.24
Average	1.85±0.13	2.24±0.24	3.14±0.20	3.78±0.29
Median	1.84	2.22	3.19	3.72

* Number of specimen. ** Average of four values.

同心円状に18mmおきに中心からの距離 $R=160-250$ mmの間を5つの帯に切断し、各部分から引張、圧縮、曲げ試験片を組にしてそれぞれ60本ずつ採取した。それぞれの試験片の採取箇所に対応させて順次番号をつけ、偶数番号の試験片を非照射で実験し、奇数番号の試験片は照射したのち試験を行った。石油コークス系微粒等方性黒鉛(7477 PT)についても同様に試験片の採取と番号付けを行った。

ブロック内の半径方向の強度分布を5つの各帯状部分に関する平均としてTable 2に示す。引張強さ、曲げ強さともに、照射前後において類似の傾向を示した。ここではブロック内の強度の分布は平均的にみて、大きな偏りがないものとみなし、これらのデータを用いてブロックの強度を統計的に検討することにした。

4.2 ワイブル分布による取扱い

石油コークス系微粒等方性黒鉛(7477 PT)の引張強さと曲げ強さを(4)式の破壊の確率 P_f に対して整理したのがFig.1である。図中の実線と点線はそれぞれ $\sigma_u=0$ とおいた(2)式と(3)式および(7)式でデータ点を近似した場合を示す。ここで、 m_t 、 m_b 、 σ_{0t} 、 σ_{0b} の求め方は次に示す。破壊しない確率を $S_m (=1-P_f)$ としたとき、

Fig. 1 Fracture probability as a function of strengths of 7477PT graphite. ()=number of specimen.

$\log \log (1/S_m)$ と $\log \sigma_t$ および $\log \sigma_b$ の関係をプロットするとFig.2のようになる。ここで、両者の関係が直線関係にあると仮定して、最小二乗法により勾配と切片を求め、 $\sigma_u=0$ とおいた(5)式と(6)式から、それぞれ、 m_t 、 m_b 、 σ_{0t} 、 σ_{0b} を求めた。直径5mmの試験片に関する引張強さ(σ_t)と曲げ強さ(σ_b)に対して破壊の確率(P_f)は次式によって表される。

$$P_f(\sigma_t) = 1 - \exp \left[-1412.3 \left(\frac{\sigma_t}{2.922} \right)^{21} \right] \quad (9)$$

$$m_b = 21, V_t = 412.3 \text{ mm}^3, \sigma_{0t} = 2.922 \text{ kg/mm}^2$$

$$P_f(\sigma_b) = 1 - \exp \left[-2.692 \left(\frac{\sigma_b}{3.605} \right)^{23} \right] \quad (10)$$

$$m_b = 23, V_b = V_t + \frac{V_2}{m_b + 1} = 204.5 \text{ mm}^3, \sigma_{0b} = 3.605 \text{ kg/mm}^2$$

Fig. 2 $\log \log (1/S_m)$ vs. $\log \sigma$ for 7477 graphite.

Fig. 3 Fracture probability as a function of strengths of IM2-24 graphite.

$T_{irr}=200-300^\circ\text{C}$, $=7.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($>0.18 \text{ MeV}$)
()=number of specimen.

Fig. 4 $\log \log (1/S_m)$ vs. $\log \sigma$ for IM2-24 graphite when $\sigma_u = 0$.

一方、ギルソカーボン系等方性黒鉛(IM2-24)の引張強さ(σ_t)と曲げ強さ(σ_b)の破壊の確率曲線をFig.3とFig.4に示す。7477 PT黒鉛の場合(Fig.1とFig.2)と同様の方法で m_t , m_b , σ_{0t} , σ_{0b} を求めて、(9)式と(10)式のように表すと次式が得られる。

$$P_f(\sigma_t) = 1 - \exp\left[-412.3 \left(\frac{\sigma_t}{2.814}\right)^{16}\right] \quad (11)$$

$$m_t = 16, V_t = 412.3 \text{ mm}^3, \sigma_{0t} = 2.814 \text{ kg/mm}^2$$

$$P_f(\sigma_b) = 1 - \exp\left[-3.832 \left(\frac{\sigma_b}{3.476}\right)^{18}\right] \quad (12)$$

$$m_b = 18, V_b = V_1 + \frac{V_2}{m_b + 1} = 206.6 \text{ mm}^3, \sigma_{0b} = 3.476 \text{ kg/mm}^2$$

7477 PT黒鉛とIM2-24黒鉛の強度の統計的性質を比較すると、7477 PT黒鉛の方がIM2-24黒鉛より強度のばらつきが小さく(m が大きい)、 σ_0 の値は大きいことがわかる。

7477 PT黒鉛の場合、もしワイブル統計が適用できるものと仮定すれば、(9)式と(10)式から

$$V_t \approx 2 \left(V_1 + \frac{V_2}{24} \right) \quad (13)$$

であるから、応力分布の影響としては同じ強度比(σ/σ_0)の増加に対して単軸引張りの方が曲げよりも破壊の確率を大きくする傾向にあることがわかる。

4.3 ワイブル分布に及ぼす中性子照射効果

IM2-24黒鉛を200~300°Cで $7.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($> 0.18 \text{ MeV}$)まで照射した場合、破壊の確率曲線はFig.3とFig.4のようになる。また、破壊の確率は次のように表わされる。

$$P_f(\sigma_t) = 1 - \exp\left[-412.3 \left(\frac{\sigma_t}{4.357}\right)^{10}\right] \quad (14)$$

$$P_f(\sigma_b) = 1 - \exp\left[-4.972 \left(\frac{\sigma_b}{4.202}\right)^{15}\right] \quad (15)$$

m の値は照射により引張強さの場合16から10へ、曲げ強さの場合18から15へ減少し、ばらつきが増加していることがわかる。今までの結果は(1)式において $\sigma_u = 0$ と仮定して整理したものであるが、 $\sigma_u \neq 0$ としてFig.3をもとにして σ_u の値を求めて整理するとFig.5のようになり、 m の値が小さくなる。その場合においても照射により m の値は2.6から1.1へ減少することがわかる。Fig.4から明らかに、照射後の引張強さと曲げ強さは、圧縮強さの場合⁶⁾とほぼ同様に上に凸の曲線あるいは折れ線状となり、

ワイブル分布への適合性は全体としてはよくない。しかし、何らかの原因でばらつきが照射後増加したとすると全体としては2つの m 値をもつ複合ワイブル分布とでもいうべきもので表すのが妥当かもしれない。照射後 m の値が小さくなる理由の一つとして、照射条件(照射温度と照射量)がすべての試料について一定になっていない可能性のあることなどが考えられる。しかし、照射損傷そのものも m 値に影響を与える可能性もあり、これらの

Fig. 5 $\log (1/S_m)$ vs. $\log (\sigma_t - \sigma_u)$ for IM-24 graphite when $\sigma_u \approx 0$.

問題は今後の検討課題の一つである。

4.4 正規分布による取扱い

7477PT 黒鉛および IM2-24 黒鉛の引張強さ、曲げ強さの平均値と標準偏差を Table 3 に示す。標準偏差の大小関係と m 値の大小関係の値のばらつきとよく対応している。正規分布への適合度を χ^2 分布によって検定すると、有意水準 1~5% で理論分布への適合度に欠けるものはないことが確かめられている⁸⁾。

4.5 体積効果と応力分布の影響

7477PT 黒鉛の曲げ強さについて、体積効果を調べるため、直径 5mm の試料のほかに直径 8mm と 15mm の試料も用いた。得られた曲げ強さの平均値と標準偏差を Table 3 に、また Table 4 にはワイブル分布で表示したときのパラメータをここで試験した 2 種類の黒鉛と引張強さについても示した。引張強さと曲げ強さを引張応力部分の体積に対してプロットすると Fig. 6 のようになる。ここで引張強さの中で体積の大きい方のデータの外径 28mm、内径 24mm の黒鉛スリーブ(円筒)の軸方向の引張強さである。引張強さの場合、実験値はワイブル統計による予想値より大きい強度を示す。しかし、15φ の試料は引張強さの場合と同様に引張部分の体積増加に対して

Fig. 6 Strengths of 7477PT graphite as a function of the volume of tensile stress portion.

ワイブル統計による予測は実験値より小さい値となっている。今までの若干の研究例^{2), 4), 8), 9)}によると強度に及ぼす体積効果は実際にはワイブル統計で予測されるほど大きくないことが知られている。8φ の試料の曲げ強さが 15φ の試料の曲げ強さより小さいのはワイブル統計における体積効果としては説明できないように思われる。8φ の試料の曲げ強さを正規分布とワイブル分布で近似したときでも標準偏差、ワイブルパラメータの値から見て統計的にとくに異常な分布を示しているとは認められなかった。

応力分布因子は(3)式から明らかのように、 m_b の増加にともない減少する傾向にある。したがって、体積と σ/σ_0 が同じであれば、 m_b が大きいほど応力分布因子が小さく、かつ破壊の確率が小さくなる傾向にあることがわかる。そこで、引張りと曲げの場合を考えると、引張部分の体積と m が等しいとき、一様な応力分布である単軸引張の場合が応力勾配のある曲げの場合より応力分布因子が大きくなるので、 σ/σ_0 の同じ増加に対して引張強さの方が曲げ強さより

Table 3 Values of Average and Standard Deviation of Tensile Strength and Bending Strength.

Brand		Tensile Strength σ_t [kg/mm ²]	Bending Strength σ_b [kg/mm ²]
7477PT (#)	5mm dia	2.16 ± 0.12	3.30 ± 0.16
	8mm dia	—	2.91 ± 0.16
	15mm dia	—	3.07 ± 0.15
IM2-24 (#)	Unirradiated	1.85 ± 0.13	3.14 ± 0.20
	Irradiated	2.24 ± 0.24	3.78 ± 0.29

Table 4 Weibull Parameters in Tensile Strength and Bending Strength.

Brand	Specimen		m	σ_0 [kg/mm ²]	V [mm ³]	Stress Distribution Factor
7477PT (#)	5mm dia Unirradiated	Tensile	21	2.922	412.3	1
		Bending	23	3.605	204.5	0.01317
	8mm dia Unirradiated	Bending	22	3.260	786.8	0.01402
		Bending	24	3.734	4595	0.01240
IM2-24 (#)	5mm dia Unirradiated	Tensile	16	2.814	412.3	1
		Bending	18	3.476	206.6	0.01855
	5mm dia Irradiated	Tensile	10	4.357	412.3	1
		Bending	15	4.202	208.6	0.02384

1) $V=V_t$ for tensile test; $V=V_b=V_1 + \frac{V_2}{m_b+1}$ for bending test.

2) Stress distribution factor in bending strength $= \Gamma(\frac{m_b+1}{2}) / \sqrt{\pi} \cdot \Gamma(\frac{m_b}{2}+2)$

も破壊の確率を大きくする傾向にあるといえる。

次に破壊の確率をワイブル分布と正規分布で近似したとき、5φの試料を例にとるとFig.1のようになる。8φと15φの試料についても同様の結果が得られた。これら大きさの異なる3種の曲げ試験片による結果では、低い破壊確率の範囲でワイブル分布の方が正規分布よりも破壊の確率を大きく見つめることになり、設計への応用の立場からはワイブル分布を用いる方が安全側の評価となることがわかる。

4.6 曲げ強さと引張強さの比較

黒鉛の変形-破壊までのエネルギーが引張りと曲げで等しいという、いわゆる定ひずみエネルギー則にしたがうと仮定すれば、

引張強さの場合

$$U_t = \sigma_t^2 / 2E \quad (16)$$

曲げ強さ(丸棒、4点曲げ)の場合

$$U_b = \sigma_b^2 / 8E \quad (17)$$

となる。ここでEはヤング率である。もし、

$$U_t = U_b \quad (18)$$

と仮定すれば

$$\sigma_b = 2\sigma_t \quad (19)$$

となる。これは完全弾性体およびグリフィス理論に適合する脆性材料に対して成立する関係である。

次に、ワイブル統計において、 $\sigma_u = 0$ とすれば、(2)式と(3)式の P_f を等しくおいて次式が得られる。

$$\frac{\sigma_b^{m_b}}{\sigma_t^{m_t}} = \frac{\sigma_{ob}^{m_b}}{\sigma_{ot}^{m_t}} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{\Gamma(\frac{m_b}{2} + 2)}{\Gamma(\frac{m_t}{2} + 1)} \cdot \frac{V_t}{V_1 + \frac{V_2}{m_b + 1}} \quad (20)$$

黒鉛の強度に対してワイブル統計が適用できるとすれば、 $m_b = m_t$ および $\sigma_{ob} = \sigma_{ot}$ となるはずであるが、実際には若干異なる値が得られるので、 m の値の差が比較的小さ

い場合だけ実際上は m_b の値を用いることにすると次式が得られる。

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_t} = \frac{\sigma_{ob}}{\sigma_{ot}} \left(\sqrt{\pi} \cdot \frac{\Gamma(\frac{m_b}{2} + 2)}{\Gamma(\frac{m_t}{2} + 1)} \cdot \frac{V_t}{V_1 + \frac{V_2}{m_b + 1}} \right)^{\frac{1}{m_b}} \quad (21)$$

ワイブル統計では、 $\sigma_{ob} = \sigma_{ot}$ となり、 $\sigma_{ob} \neq \sigma_{ot}$ とする限りワイブル統計ではないので、ここでは(21)式を擬ワイブル統計(pseud-Weibull statistics)による結果と呼ぶことにする。

7477 PT黒鉛とIM2-24黒鉛の場合にワイブル統計および(21)式を適用し、それぞれ実験値と比較すればTable 5のようになる。ここで σ_b 、 σ_t には中央値を用いた。Table 5から明らかなように実験値は定ひずみ則による結果とワイブル統計による計算値の間になっており、擬ワイブル統計の計算値は照射したIM2-24黒鉛の場合を除いて実験値に近い値となっている。7477 PT黒鉛では(21)式(擬ワイブル統計)による予測と実験値が割合よく合致しているが、若干前者が後者より小さいことを示している。IM2-24黒鉛の場合、実験値より計算値の方が若干小さい値となっている。また、照射したIM2-24黒鉛ではその差が照射前より大きくなっている。これは、Table 4から明らかなように照射後曲げと引張りでの m の値の差が照射前に比べて大きくなっていることが一つの原因であると思われる。MarshallとPriddle¹⁰⁾は、引張強さにおける体積(V_t)と曲げ強さにおける引張応力部分の体積(V_b)がほぼ等しい($V_t \approx V_b$)ときは実験値とワイブル統計にもとづく計算値との差は余りないが、 $V_b \gg V_t$ となると、 σ_b / σ_t の実験値が計算値より大きくなるという結果を得ている。これはここで得られた傾向と一致している。佐藤⁹⁾は、 σ_t 、 σ_b として平均値を用いて両者の比を実験と計算により比較し、

Table 5. Comparison of calculated values evaluated from Weibull and pseud-Weibull statistics with experimental values of the ratio of the bending strength to the tensile strength.

Brand	Specimen	Median		σ_b / σ_t				
		σ_b	σ_t	Experiment	Constant Strain Energy	m	Calculation	
		kg/mm ²	kg/mm ²				Weibull	Pseud-Weibull
7477 PT (#)	5mm dia.	3.29	2.14	1.54*	2	23	1.24	1.54
	8mm dia.	2.91	—	1.36*	2	22	1.18	1.32
	15mm dia.	3.08	—	1.46*	2	24	1.09	1.39
IM2-24 (#)	5mm dia. Unirradiated	3.19	1.84	1.73	2	18	1.30	1.60
	5mm dia. Irradiated	3.72	2.22	1.68	2	15	1.34	1.29

* These values were calculated using the value of σ_t for 5 mm dia. specimen.

よく一致する結果を得ている。

4.7 破壊の機構との関連

ワイブルパラメータ m と σ_0 の値は、Table 4 から明らかなように引張強さと曲げ強さの場合異なっていることがわかる。このことは試験法の差違に依存しないでワイブルパラメータを一定値にきめることができないことを意味する。この事実は、Brocklehurst⁴⁾、Price & Cobb²⁾ の結論とも一致する。また、曲げ強さ (σ_b) と引張強さ (σ_t) の比については、前述のように、ワイブル統計による予測値は実験値と一致しない。したがって、ワイブル統計論の根本仮定である最弱リンクモデルは厳密には黒鉛の破壊には適用できないことがわかる。しかしながら、ワイブル統計は体積効果と応力分布の効果を同時に記述できるという正規分布にはない特徴をもっているため、上記の適合度を考慮に入れてこれを近似的に用いることには十分な有用性が認められる。ワイブル統計が実際の黒鉛の強度分布と厳密に一致しない理由としては、試料体積の増加にともないクラックなどの最弱部がワイブル統計で予測されるほどあらたにふえないこと、応力-ひずみ関係に非直線性があることおよび引張と圧縮の応力-ひずみ関係がひずみの増加にともない差を生じ、曲げ試験における中立面が移動することなどが考えられる。

5. 結 論

ギルソカーボン系等方性黒鉛 (IM2-24) と石油コークス系微粒等方性黒鉛 (7477 PT) の引張強さと曲げ強さについてワイブル分布と正規分布を適用し、さらに照射した IM2-24 黒鉛の強さの統計分布も調べた結果、次の結論が導かれた。

1) 引張強さ、曲げ強さともにワイブル分布と正規分布でよく近似できることが明らかとなり、両者のどの分布を用いても大差ないことが判明した。しかしながら、破壊の確率の低いところで両分布にわずかな差を生じ、正規分布よりワイブル分布の方が高い破壊の確率を与えることがかわった。したがって、設計への応用を考慮すると低確率側ではワイブル分布の方が安全側の評価となる。

2) ワイブル分布におけるばらつきの程度を表わすワイブルモジュラス m は、引張強さおよび曲げ強さともに 20 前後の値となった。ギルソカーボン系等方性黒鉛 (IM2-24) の引張強さと曲げ強さに関するワイブルモジュラス m は 200-300°C、 $7.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 0.18 \text{ MeV})$

の照射により減少することがわかった。これは、照射により強度のばらつきが増加することを示している。

3) 引張強さおよび曲げ強さに及ぼす試験片体積の影響はワイブル統計で予測されるほど大きくなかった。しかし、直径 8mm の試験片の曲げ強さはワイブル統計で予測される値よりも小さかった。

4) 引張強さと曲げ強さがワイブル統計にしたがうと仮定すれば、応力分布の破壊確率に及ぼす影響としては、応力比の増加に対して一様な応力分布を示す引張強さの方が非均一応力分布の曲げ強さよりも大きい破壊確率を与える傾向にあることがわかった。

5) 曲げ強さと引張強さの比の実験値はワイブル統計にもとづく計算値より大きく、一般に両者は合致しなかった。しかし、ワイブルパラメータ m と σ_0 のうち m だけを引張りと曲げに共通の値を用いた擬ワイブル統計による計算値と実験値は、石油コークス系微粒等方性黒鉛 (7477 PT) の場合比較的よく一致した。一方、ギルソカーボン系等方性黒鉛 (IM2-24) では、照射前後とも実験値より計算値の方が小さいという結果が得られた。

6) 引張強さと曲げ強さについて、ワイブルパラメータを一定値に定めることができないことおよび曲げ強さと引張強さの比が実験と計算では必ずしもよく一致しないことなどから、黒鉛の破壊に対してワイブル統計論の根本仮定である最弱リンクモデルは厳密には適用できないと考えられる。

終りに本研究の内容について種々有益な討論をいただいた日本原子力研究所、荒井長利氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 佐藤千之助, 炭素, No.38, 20(1964)
- 2) R.J. Price and H.R.W. Cobb, USAEC Report Conf-70115, P.547 (1972)
- 3) V. Lungagnani and R. Krefeld, USAEC Report Conf-701105, P.663 (1972)
- 4) J. E. Brocklehurst and M. I. Darby, TRG Report 2302 (S) (1973)
- 5) J. E. Brocklehurst, TRG Report 2731 (S) (A Review) (1975)
- 6) 衛藤基邦, 奥 達雄, 藤崎勝夫, 佐々木泰一, 炭素, No.87, 123(1976)
- 7) E. Y. Robinson, UCRL-50622 (1969)
- 8) 荒井長利, 私信
- 9) J. Amesz, J. Dones, and F. Lanza, USAEC Report Conf-730601, P.221 (1973)
- 10) P. Marshall and E. K. Priddle, Carbon 11, 627 (1973)