原子炉用黒鉛の破壊靱性に及ぼす切り欠き鋭さ 及び試験片寸法の影響

奥 達 雄・石山新太郎・衛 藤 基 邦・後 藤 泰 男*・浦 島 和 浩*・稲 垣 道 夫*

(日本原子力研究所東海研究所, 319-11 茨城県那珂郡東海村)
* 豊橋技術科学大学, 440 豊橋市天伯町

Effects of Notch Sharpness and Size of Specimen on the Fracture Toughness of Nuclear Graphites

Tatsuo OKU, Shintaro ISHIYAMA, Motokuni ETO, Yasuo GOTO*,
Kazuhiro URASHIMA* and Michio INAGAKI*

(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11)
* Toyohashi University of Technology, Tempaku-cho, Toyohashi-shi 440

The target of this research is to find the conditions for obtaining the valid fracture toughness value of nuclear graphite. The effects of the notch sharpness and size of specimen on the elastic-plastic fracture toughness values are examined. (1) The maximum notch root radius of curvature required for obtaining nearly constant fracture toughness values depends upon the kind of graphite, ca. 0.25 mm for the fine-grained isotropic graphite; IG-110 and ca. 1.2 mm for the coarse-grained near isotropic graphite, PGX. (2) The minimum specimen thickness for obtaining nearly constant fracture toughness values depends upon the kind of graphite, ca. 10 mm for IG-110 and ca. 20 mm for PGX. (3) The conditions that the specimen should satisfy for obtaining the valid fracture toughness values vary with the kind of graphite. (4) The linear elastic-plastic fracture toughness is applicable to IG-110 graphite, and evaluation by the elastic-plastic fracture mechanics is not always necessary for IG-110, but it is considered that for PGX the correct fracture toughness values are not obtained unless the elastic-plastic fracture mechanics approach is applied.

[Received February 17, 1988; Accepted March 24, 1988]

Key-words : Nuclear graphite, Fracture toughness, Specimen size, Notch root radius of curvature, Validity

1. 緒 言

高温ガス冷却炉の炉心黒鉛構造物内の応力集中個所近傍の潜在き裂の先端においては、内部発生応力あるいは外部応力の作用によりき裂が発生し、進展する可能性がある。黒鉛ブロック内の発生応力は原子炉が長時間運転後停止したときに生じるので、その際特にき裂が進展する可能性が大きい。黒鉛材料中のき裂の発生及び進展の可能性を評価するには、存在するき裂の形状と大きさ、応力拡大係数又は J 積分値及び破壊靱性値に関する情報を得ることが必要である。これまでいくつかの黒鉛について線形弾性破壊力学が応用され、破壊靱性値が得られている^{1)~4)}。しかしながら、有効な破壊靱性値を得るための諸条件についてはほとんど検討が行われていない。

本研究の目標は、原子炉用黒鉛の有効な破壊靱性値を得るための条件を明確にすることである。ここでは、その条件の一つであると考えられる破壊靱性値に及ぼす切り欠き鋭さと試験片寸法の影響を検討することを目的とした。

2. 実験方法

供試材料は微粒等方性黒鉛 IG-110 及び粗粒準等方性黒鉛 PGX である。素材ブロックと試験片の方向を図1のように定義した。各方向の一般的機械的性質を表1に示す。試験片はコンパクトテンション型 (CT) で、その厚さが 20 mm のものを基準とし、更にすべての寸法が 2 倍及び 3 倍となるような試験片を製作した。CT 基準試験片の形状とサイズを図2に示す。厚さ 20 mm の試験片については人工切り欠き部先端をカミソリ刃等により切り欠き先端の曲率半径 ρ が 0.015~2.5 mm となるように加工した。曲率半径の大きさは拡大投影器によって測定した。万能材料試験機を用いて試験片に 0.005 mm/min のクロスヘッド速度で引張り荷重を加え、そのとき試験片の切り欠き先端から進展して行くき裂の長さを 50 倍のコンパレータを用いて測定した。切り欠きをささむ試験片の両端に各 2 本の銅線を埋め込み、それぞれ、電流電圧端子とし、き裂の進展に伴う電位差の変化を測定した。き裂の進展量と電位差との関係をあらかじめ求めておくことによって、電位差の変化からき裂の進展量を推定した。電位差の変化率とき裂の進

Fig. 1. Cutting scheme for CT specimens in the block.

Table 1. Mechanical properties of tested graphites.

Property	IG-110		PGX	
Direction	z	x(y)	z	x(y)
Apparent Density g/cm ³	1.75		1.74	
Young's Modulus GPa	9.61	10.2	6.65	8.12
Poisson's Ratio	0.14	0.14	0.11	0.11
Tensile Strength MPa	24.9	24.0	7.87	7.19
Compressive Strength MPa	73.4	69.6	33.7	30.6
Bending Strength MPa	34.3	32.8	15.0	15.0

展量との関係は図3に示すように IG-110 については3種類の厚さの試験片についてはほぼ直線になることが分かる。また、PGXについても同様の結果が得られた。図3の中に PGX の場合の電位差の変化率とき裂の進展量との関係を直線と式で示してある。線形弾性破壊靱性値は ASTM-E 399 に規定されている方法により、また、弾塑性破壊靱性値は ASTM-E 813 に規定されている方法により評価した。ASTM-E 399 によれば応力拡大係数 K_Q は次式によって与えられる。

Fig. 2. Geometry of standard CT specimen.

Fig. 3. Relationship between increase in electrical potential and crack length.

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} \cdot f(a/W) \quad (1)$$

ここで、

$$f(a/W) = (2 + a/W)(0.886 + 4.64 a/W - 13.32 a^2/W^2 + 14.72 a^3/W^3 - 5.6 a^4/W^4)/(1 - a/W)^{3/2}$$

P_Q は荷重-荷重線変位曲線における原点での接線の勾配の95%セカント線と曲線との交点に相当する荷重であり、 B は試験片の厚さ、 W は試験片の幅である。また、ASTM-E 813 によれば裂進展開始に対応する J 積分値 J_I は次式によって与えられる。

$$J_I = \frac{A_i}{B \cdot b} \cdot f(a_0/W) \quad (2)$$

ここで、

$$f(a_0/W) = 2[(1 + \alpha)/(1 + \alpha)]$$

$$\alpha = [(2a_0/b)^2 + 2(2a_0/b) + 2]^{1/2} - [(2a_0/b) + 1]$$

$$b = W - a_0$$

A_i は P_i に対応する曲線下の面積であり、 a_0 はき裂長さである。 J_I に対応する K_I 値は、次式によって評価した。

$$K_I(J_I) = [EJ_I/(1 - \nu^2)]^{1/2} \quad (3)$$

3. 結果と考察

3.1 荷重-荷重線変位曲線

CT 基準試験片 (20 mm 厚さ) について切り欠き先端曲線半径、 ρ が 0.015 mm の IG-110 黒鉛の場合の荷重-

荷重線変位曲線の例を図4に示す。最大荷重より小さい荷重でき裂が発生し、進展し始める。図中にある数本の縦軸に平行な直線はき裂が進展したとき、き裂長さを測定した点を示している。図には電位差法による結果も同時に示してある。電位差が増加し始める点に対応する荷重を P_{IEP} とし、この点をき裂進展開始点とみなした。厚さ 60 mm の試験片でき裂先端の曲率半径が 0.1 mm の IG-110 と PGX 黒鉛について荷重-荷重線変位曲線を図5に示す。この図でも電位差が増加し始める点に対応する荷重及び最大荷重がそれぞれの黒鉛に対して示され

Fig. 4. Load-load line displacement curve for IG-110 standard CT standard specimen.

Fig. 5. Load-load line displacement curves for IG-110 and PGX graphites ($B=60$ mm).

ている。PGX 黒鉛の場合、IG-110 黒鉛の場合に比べて最大荷重に対してかなり低い荷重でき裂の進展が始まっていることが分かる。

3.2 破壊抵抗曲線 (J - R 曲線)

き裂進展に伴う J 積分値の変化を調べると図6と図7が得られる。図6は IG-110 黒鉛の例であり、 $\rho = 0.25$ mm の場合である。データ点を直線で近似したとき、その直線と縦軸との交点を J_{in} によって定義すると、 J_{in} は 82 J/m^2 となる。また、 dJ/da は 16.5 kPa であった。図7(a), (b) は PGX 黒鉛の例であり、 $\rho = 0.6$ mm の場合である。これは IG-110 黒鉛の場合と異なることが分かる。PGX 黒鉛の場合まず異方性があり、 X 方向の試験片が Y 方向の試験片より J_{in} 値が小さいことが特徴的である。図7の例では X 方向の J_{in} 値が 59 J/m^2 、 Y 方向の J_{in} 値が 85 J/m^2 である。また、 dJ/da は両者でほぼ等しく、 18.3 kPa となった。また、 J_{in} 値は P_{IEP} に対応する J_{IEP} 値より若干大きい傾向がみられた。

3.3 破壊靱性値

IG-110 と PGX の両黒鉛について K_{Iq} 、 $K_{I\max}$ 、 $K_I(J)$ 及び J_{IEP} の値を表2に示す。IG-110 と PGX の X 方向については K_{Iq} と $K_I(J)$ はほぼ等しい値を示している。PGX 黒鉛の場合 $K_{I\max}$ に大きな相違はないにもかかわらず、 J_{IEP} は大きく異なっている。これは成形時の結晶子の優先配向を反映しているものと考えられる。PGX 黒鉛の場合弾塑性破壊力学に基づく J 積分値によって破壊靱性値を評価しなければ正しい値は得られないと判断される。図6と図7から分かるように、 J_{in} 値は曲線を直線で近似しているの、真のき裂発生点に近いと思われる J_{IEP} が J_{in} より小さいのは当然の結果である。

3.4 J_{IEP} 値に及ぼすき裂先端曲率半径の影響

IG-110 と PGX 黒鉛について、切り欠き先端曲率半径に対する弾塑性破壊靱性値 J_{IEP} の変化を示したのが

Fig. 6. Relation between J -integral and crack extension (J - R curve) for IG-110 graphite.

Fig. 7. J - R curves for PGX graphite.
(a) PGX (X), (b) PGX (Y).

図8である。IG-110 黒鉛では $\rho \leq 0.25$ mm で J_{IEP} はほぼ一定であり、 $\rho \geq 0.25$ mm において J_{IEP} が大きく増加しているのがみられる。これに対して、PGX 黒鉛では、 J_{IEP} は $\rho \leq 1.2$ mm においてはほぼ一定であり、 $\rho \geq 1.2$ mm でわずかに増加するにすぎない。これらの事実はそれぞれの黒鉛におけるコークスフィラー粒子の大きさの影響を反映しているものと考えられる。すなわちコークスフィラー粒子の大きさはIG-110 黒鉛の場合 20 μ m、PGX 黒鉛の場合 760 μ m とされているが、 ρ の値をフィラー粒子の大きさ以下にすればほぼ一定の破壊靱性値が得られることが分かる。したがってこのことが有効な破壊靱性値を得るための一つの条件であるとみなすことができる。

3.5 J_{IEP} 値に及ぼす試験片厚さの影響

試験片の厚さを 5 mm～60 mm まで変えて J_{IEP} 値を測定した結果が図9である。IG-110 黒鉛では厚さ 10 mm～60 mm のときほぼ一定の J_{IEP} 値が得られるのに対して厚さ 5 mm の場合わずかに小さい J_{IEP} 値となっている。一方、PGX 黒鉛の場合、厚さ 20 mm～60 mm では

Table 2. Fracture toughness values.

Specimen	IG-110	PGX	
	X	X	Y
K_{I0} MPa $\cdot \sqrt{m}$	0.92 ± 0.04 (5)	0.55 ± 0.05 (4)	0.56 ± 0.05 (5)
K_{Imax} MPa $\cdot \sqrt{m}$	1.03 ± 0.04 (5)	0.80 ± 0.03 (4)	0.85 ± 0.02 (5)
$K_I (J_{IEP})$ MPa $\cdot \sqrt{m}$	0.912 ± 0.028 (3)	0.533 ± 0.053 (3)	0.776 ± 0.102 (5)
J_{IEP} 10^{-4} MPa $\cdot m$	0.849 ± 0.052 (3)	0.424 ± 0.086 (3)	0.743 ± 0.190 (5)
ρ mm	~ 0.25	~ 0.6	

J_{IEP} 値に大きな変化がないのに対して 5 mm～10 mm では J_{IEP} 値が大きく低下している。これらの事実はき裂の進展に伴うき裂前縁のプロセスゾーンの大きさが黒鉛の種類によって異なることによるものと考えられるが、詳細は明かでない。いずれにしても、IG-110 黒鉛では厚さ 10 mm 以上、PGX 黒鉛では厚さ 20 mm 以上の試験片を用いることが有効な破壊靱性値を得るための一つの条件であるといえる。

4. 結 論

高温ガス炉用微粒等方性黒鉛 IG-110 と粗粒準等方性黒鉛 PGX について、弾塑性破壊靱性値に及ぼす試験片切り欠き先端曲率半径の影響及び試験片厚さの影響をし

Fig. 8. Effect of notch root radius on J -integral, J_{IEP} for IG-110 and PGX graphites.

Fig. 9. Effect of specimen thickness on J_{1EP} for IG-110 and PGX graphites.

らべ、ほぼ一定の破壊靱性値が得られるための条件を検討した。その結果、次の結論が得られた。

(1) ほぼ一定の破壊靱性値を得るために必要な最大の切り欠き先端曲率半径の大きさは黒鉛の種類に依存する。すなわち、微粒等方性の IG-110 黒鉛では約 0.25 mm、粗粒準等方性黒鉛 PGX では約 1.2 mm となった。

また、粗粒黒鉛 PGX では切り欠き先端の曲率半径には大きく依存しなかった。

(2) ほぼ一定の破壊靱性値を得るために必要な最小の試験片厚さもまた黒鉛の種類に依存する。すなわち、最小試験片厚さは微粒等方性の IG-110 黒鉛では約 10 mm、粗粒準等方性黒鉛 PGX では約 20 mm となった。

(3) 上記の二つの結論により有効な破壊靱性値を得るために試験片のみたすべき条件は黒鉛の種類によって異なることが明かになった。

(4) 微粒等方性黒鉛 IG-110 では、線形弾性破壊力学が適用できて、必ずしも弾塑性破壊力学による評価は必要ないと判断される。しかし、粗粒準等方性黒鉛 PGX では、弾塑性破壊力学による評価法を用いなければ、正しい破壊靱性値は得られないと判断された。

文 献

- 1) P. Marshall and E.K. Priddle, *Carbon*, 11, 541-46 (1973).
- 2) S.W. Freiman and J.J. Mecholsky, *J. Mater. Sci.*, 13, 1249-60 (1978).
- 3) S. Sato, Y. Imamura, K. Kawamata, H. Awaji and T. Oku, *Nucl. Eng. & Design*, 617 (1980).
- 4) F.H. Ho, R.E. Vollman and A.D. Cull, ASTM STP 791 (1982) pp. II-598-614.