球面接触を有する円柱状黒鉛構造物の健全性評価[†]

石原正博* 伊与久達夫* 二川正敏**

Evaluation of Structural Integrity on Cylindrical Graphite Component with Spherical Contact

by

Masahiro ISHIHARA*, Tatsuo IYOKU* and Masatoshi FUTAKAWA**

A support post, which is used as a permanent core-support component in the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), is a cylindrical graphite component with spherical contact and one of the most essential elements for the integrity of the core. Therefore, the support post was examined to verify its structural integrity using full-scale and 1/2-scale models. Moreover the elastic-plastic stress was calculated by the FEM code "ABAQUS" under a two-dimensional axisymmetric condition. The following conclusions were mainly obtained;

- (1) The inclination angle of support post has little effect on the fracture load in the range from 0 to 1 degree.
- (2) The strength of support post was not affected by the cyclic loads which take account of the seismic load.
- (3) The fracture load of the support post which was oxidized to simulate the air ingress accident in the HTTR is sufficiently larger than the maximum design load.
- (4) It is confirmed from these results that the support post has a sufficient structural integrity.

Key words: Support post, Graphite, HTTR, Structural integrity, Fracture load, Oxidation, Seismic load, Spherical contact

1 緒 言

黒鉛減速ヘリウムガス冷却型の高温ガス炉である高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心は、Fig. 1 に示すように高温プレナムブロック、炉心支持ポスト等の炉心支持黒鉛構造物により支持される構造となっている¹⁾。この六角柱状の高温プレナムブロックは、おのおの互いにキー要素により結合され、その下部に位置する

3 対のポスト/シート構造物により支持されている。ポストは、直径 150 mm、長さ 600 mm の微粒等方性 IG-110 黒鉛製の円柱状支持構造要素で、その両端が球面形状となっている。これは、その上下に位置する球面座を有するシートと球面接触することにより軸荷重のみをポストに負荷させると共に、地震時等に生ずるポスト/シート構造物の上・下高温プレナムブロック間の水平方向相対変位をポストの傾斜により吸収させるためである。

このポスト/シート構造物に負荷する主要な荷重は、燃料体黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック等の死荷重および地震時に炉心および炉心支持構造物の振動により生ずる地震荷重である。地震時にはポスト/シート構造物は、繰返し荷重およびポストの傾斜による軸荷重に耐えることが要求される。また、ポストの酸化の観点から、HTTR において最も厳しい 1 次冷却系二重管破断事故による空気酸化においても、その健全性を確保しなければならない²⁾。さらに、炉心支持機能を確保するためには、酸化事故後においても地震荷重に

Fig. 1. Core support graphite structure of HTTR.

[†] 原稿受理 平成 4 年 4 月 27 日 Received Apr. 27, 1992

* 日本原子力研究所大洗研究所 〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀, Japan Atomic Energy Res. Inst., Oarai Res. Establishment, Higashiibaraki-gun, Ibaraki, 311-13

** 正会員 日本原子力研究所東海研究所 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根, Japan Atomic Energy Res. Inst., Tokai Res. Establishment, Naka-gun, Ibaraki, 319-11

耐えることが要求される。

ポストの破壊が球面接触構造に起因した破壊様式であり, その材料がぜい性を示す黒鉛材料であること等から, ポストの構造設計は, ポスト/シートを模擬した 1/6 スケールモデルの破壊試験結果を基になされている。しかしながら, 黒鉛材料の強度は, いわゆる体積効果による強度低下を示すことが知られており,^{4),5),5),6)} この効果は IG-11 黒鉛の強度についても認められている。

それゆえ, ポスト/シート構造物の破壊荷重に対するポストの傾斜角, 体積効果, 繰返し荷重および酸化の影響を明らかにするために, 実スケールおよび 1/2 スケールを用いた要素試験を実施した。得られた各種条件下における破壊荷重と HTTR の設計における負荷荷重との比較から, ポスト/シート構造物の構造健全性を評価した。

2 実 験

2・1 供試材および試験体

本実験に用いた黒鉛材料は, 石油コークス系微粒等方性で高純度化処理した原子炉用 IG-110 黒鉛および高純度化処理を施さない IG-11 黒鉛である。前者の IG-110 黒鉛は, HTTR のポスト/シート構造物に使用される。IG-110 黒鉛の代表的な特性を Table I に示す。なお, IG-11 黒鉛の特性については, 灰分のデータ以外はほぼ同一である。実スケールおよび 1/2 スケールモデルの試験体は, それぞれ IG-11 および IG-110 黒鉛素材ブロックより採取した。

Fig. 2 および Table II に本試験に供した試験体形

Table I. Typical properties of IG-110 graphite.

Density	(kg/m ³)	1.78×10 ³
Mean tensile strength	(MPa)	25.3
Mean compressive strength	(MPa)	76.8
Young's modulus	(GPa)	8.3
Ash content	(ppm)	<100
Mean grain size	(μm)	20

(a) Support post

(b) Post seat

Fig. 2. Geometry of test specimen.

Table II. Dimensions of test specimen.

	Length (mm)						N*
	Lp	Dp	Rp	Ls	Ds	Rs	
Full-scale model	600	150	88	100	154	91	13
1/2-scale model	300	75	44	50	77	45.5	12

*) The number of specimens.

Fig. 3. Test specimen set in testing apparatus.

状・寸法を示す。実スケールモデルの試験体はポスト傾斜実験および繰返し荷重負荷実験に, 一方 1/2 スケールモデルの試験体は酸化実験に供した。

2・2 実験方法

本実験は, 以下に示す 3 種類の項目について実施した。軸圧縮実験においては, 容量 3000 kN の油圧式試験機を用いた。Fig. 3 に実験装置に装着した試験体の写真を示す。

2・2・1 ポスト傾斜時の圧縮実験 ポスト傾斜時における圧縮実験は, 0 度, 0.62 度および 0.94 度の

Fig. 4. Position of strain gages on test specimen.

傾斜角において実施した。なお、HTTR の設計において想定される最大ポスト傾斜角は 0.62° であり、その 1.5 倍までの傾斜角を実験条件とした。傾斜計により実スケールモデルの試験体をそれぞれ所定の傾斜角に設定後、ポスト/シート試験体が破断するまで軸圧縮荷重 (10 kN/sec) を負荷した。実験においては、Fig. 4 に示すようにポスト胴部の軸方向 3 箇所の位置に取付けた合計 20 個のひずみゲージ (ゲージ長: 5 mm) により、ポスト胴部に生ずるひずみを計測した。

2・2・2 繰返し荷重負荷実験 繰返し荷重負荷実験は、30~165 kN, 30~300 kN および 100~340 kN の 3 種類の負荷荷重範囲において、設計上要求される 200 回の繰返し荷重を三角波 (10 kN/sec) で負荷することにより実施した。なお、HTTR の設計上想定される通常運転時の負荷荷重および地震時に生ずる最大負荷荷重は、おのおの約 35 kN および約 130 kN と見積られている。本構造物に対する疲労損傷の度合を調べるため、繰返し荷重負荷後の試験体の軸荷重負荷 (荷重負荷速度: 10 kN/sec) による破壊実験を実施した。同時に軸方向 3 箇所の位置に取付けた 20 個のひずみゲージにより軸方向の変形挙動を調べた (Fig. 4 参照)。

2・2・3 酸化実験 一般に黒鉛の酸化形態は温度と時間に依存し、約 500°C 程度の温度域では内部まで酸化されるいわゆる“内部酸化”となるが、さらに高温になるにつれて表面での酸化量が大きくなり、いわゆる“表面酸化”の形態となる⁸⁾。酸化実験では 1/2 スケールモデルの試験体を 550°C , 650°C および 800°C の各温度にて電気炉中大気雰囲気で酸化させ、酸化率を酸化時間により制御した。なお、酸化率 R (%) は次式により定義する。

$$R = (w_0 - w) / w_0 \times 100 \quad (1)$$

ここで、 w_0 および w は、おのおの酸化処理前後の試験体の重量である。

HTTR におけるポストの酸化率が当該構造物の寿命末期において約 1% 程度、また最も酸化される二重管破断事故時において約 15% 程度と評価されていることから、酸化率を 550°C の温度では寿命末期程度の約 1% まで、また 650°C および 850°C の温度では事故時の 2 倍の約 30% 程度までとした。

酸化実験においては、以下の 2 つの項目を実施した。なお、酸化率分布測定実験は、破壊試験用酸化試験体の酸化率分布を推定するために実施した。

(1) 酸化率分布測定実験

ポスト胴部の表面から内部への酸化率分布を調べるために、1/2 スケールモデルの IG-110 黒鉛試験体を 550°C , 650°C および 800°C の温度において酸化処理

した。酸化処理後の試験体を表面から 1 mm ずつ切削し、切削後の重量から酸化率分布を求めた。酸化率分布は、1 mm ごとの厚さに対する酸化処理前後の重量を w_0 および w として、式 (1) を用いて計算した。

(2) 酸化後の軸圧縮実験

550°C , 650°C および 800°C の各温度において酸化処理させた 1/2 スケールモデルの IG-110 黒鉛試験体の軸圧縮実験 (荷重負荷速度: 2 kN/sec) を実施し、破壊荷重を測定した。破壊試験体の酸化率は約 30% までとした。なお、この値は HTTR で想定されている最も厳しい酸化事故におけるポストの酸化率の約 2 倍に相当する。

3 応力解析

有限要素法による計算コード“ABAQUS”⁹⁾を用いて、ポスト/シートを模擬した軸対称二次元弾塑性応力解析を実施した。解析モデルを Fig. 5 に示す。解析には、8 節点アイソパラメトリック要素を用い、サポートポストとシートの接触部には接触要素を用いた。さらに、接触部での摩擦力も考慮した。解析に用いた材料特性値は以下のとおりである。

(1) 弾性領域

- 弾性係数 8.7 GPa
- 弾性限界 31.5 MPa

なお、式 (2) により計算される応力ひずみ曲線と弾性係数 8.7 GPa による応力ひずみ直線の交点の応力レベルとした。

(2) 塑性領域

- 応力ひずみの構成式¹⁰⁾

$$\varepsilon = 1.003 \times 10^{-4} \sigma - 1.507 \times 10^{-7} \sigma^2 + 2.472 \times 10^{-8} \sigma^3 \quad (\sigma > 31.5 \text{ MPa}) \quad (2)$$

Fig. 5. Stress analysis model for support post and post seat.

Fig. 6. Relationship between longitudinal strain and compressive load.

(ϵ ; ひずみ, σ ; 応力 (MPa))

- ボアソン比 0.14
- 摩擦係数 0.25¹¹⁾

なお, 降伏曲面には Von Mises の降伏条件を適用した。

4 結果および考察

4.1 ポスト傾斜角の影響

4.1.1 軸方向変形挙動 軸方向で3レベル (H, M, L) に取付けた軸方向のひずみゲージの計測結果を Fig. 6 に示す。各図とも測定されたひずみの上, 下限値を示す。荷重に対するひずみの変化は, 軸方向のレベル H, M および L ではほぼ同じであり (Fig. 6 (a) 参照), また傾斜角による軸方向変形挙動の差異は認められなかった (Fig. 6 (b) 参照)。さらに, 最大傾斜角の 0.94 度に対するひずみ変化を, Fig. 6 (c) に示す。胴部軸方向の A および B 側に生ずるポスト傾斜によるひずみにも差異は認められなかった。これらは, ポスト端部の球面接触変形により約 1 度程度までの傾斜による胴部軸ひずみへの影響が緩和されたためと考えられる。

4.1.2 破壊荷重 実スケールモデルの軸圧縮荷重による破壊後の試験体は, Fig. 7 に示すように, ポスト端部の球面部分が円すい状の破片となり, その他は粉々の破片となっている。ポストは, 球面接触部近傍において破壊した。また, ポスト接触部の破片には, ポスト軸心のまわりに円弧状の光沢部分が観察された。この光沢部分は 0° および 0.94° の傾斜角で差異がほとんどなかった。

ポスト傾斜角による破壊荷重の変化を Fig. 8 に示す。ポストの傾斜角が約 1 度以内では, 破壊荷重はほぼ同じであり, 傾斜角の影響を受けないことがわかる。

後述する疲労試験後の破壊荷重データも含め 12 体の試験体の平均破壊荷重 P_{m} およびその標準偏差 s は, おのおの 913 kN および 74.9 kN であった。これらのデータから, 信頼度 95%, 非破壊確率 99% で定められる最小破壊荷重 P_{fmin} は, 以下の式により求められる¹²⁾。

$$P_{fmin} = P_m - (2.326 + 1.645/\sqrt{n})s \quad (3)$$

ここで, n は試験データの個数, 2.326 および 1.645 はおのおの正規分布の片側 99% および 95% 確

Fig. 7. Fracture test specimen.

Fig. 8. Effect of post inclination angle on fracture load.

率の分位数である。上式により計算した最小破壊荷重を Fig. 8 に示す。これより、通常運転時および地震時におけるポストの設計裕度（最小破壊荷重／負荷荷重）は、20 および 5.4 となり十分安全余裕が確保されることが分かる。

4・2 体積効果の影響

Fig. 9 は、実スケールモデルと 1/6 スケールモデルのポストに対する破壊強度の体積依存性について示したものである。なお、ポストの破壊強度は、破壊荷重をポスト胴部の断面積で除することにより求めた断面平均の公称応力とした。同図には、円柱状試験片を用いた実験より IG-11 黒鉛の圧縮強度について認められている体積依存性も併せて示す。縦軸はポストおよび円柱状試験片の圧縮強度を、それらの試験片を採取した素材ブロックの圧縮強度で規格化している。ポストの破壊強度の体積に対する変化、すなわち、体積効果は円柱状試験片について得られているものとはほぼ同様の傾向を示している。

円柱状試験片の場合、圧縮負荷による黒鉛材料の破壊は、せん断応力に起因し、荷重軸に対し 45° 方向に沿った破面が観測されることが佐藤らにより指摘されている¹³⁾。そこで、軸圧縮荷重が 245 kN, 461 kN およ

Fig. 9. Volume effect on compressive strength of support post.

P : Axial compressive load
τ : Principal shearing stress

Fig. 10. Results of FEM analyses.

び 931 kN の場合のせん断応力分布について FEM による接触解析結果から検討した。Fig. 10 に示す弾塑性応力解析で得られたポストに発生するせん断応力は、ポストとシート接触部外周傍で最大となっており、その分布は Fig. 7 のポストの破片が円錐状になっていることとも良く対応している。これより、ポストの軸圧縮強度は、Fig. 9 に示すように圧縮破壊の体積効果と同様な傾向を示すものと考えられる。

4・3 繰返し荷重負荷実験

実スケールモデルの試験体に 30～165 kN, 30～300 kN および 100～340 kN の 3 種類の繰返し荷重を 200 回負荷したが疲労破壊は生じなかった。繰返し荷重負荷後の破壊実験におけるポスト胴部の軸方向ひずみは、Fig. 6(b) に示すように繰返し荷重を与えないものと比較して差異が認められなかった。また、繰返し荷重負荷後のポスト／シート構造物の破壊強度も、繰返し荷重を負荷しないものと比較して差異が認められなかった (Fig. 8 参照)。したがって、ポストの破壊荷重の約 1/3 程度の繰返し荷重負荷は、圧縮荷重下における胴部の変形挙動および破壊強度に影響しないことが明らかとなった。

本試験での繰返し荷重は、HTTR の設計上想定される地震時繰返し荷重の約 2 倍以上の荷重レベルであるので、この実験結果から HTTR におけるポストは地震時の繰返し荷重負荷状態下でも十分健全であることがわかる。

4・4 酸化の影響

4・4・1 酸化率分布 Fig. 11 は、酸化率分布の計測結果を示したものである。同図 (a) に示すように、550°C 大気中酸化処理後の試験体では、ポストの直径がわずかながら減少したが、内部領域での密度変化が認められず、酸化は表面領域に限られた。同図 (b) に示すように、650°C での試験体は、ポスト直径において

Fig. 11. Burn-off profile of 1/2-scale test specimen.

寸法減少を示し、さらに酸化表面から 10 mm 程度まで密度減少も示した。800°C での試験体は、他の温度で酸化させたものよりもポスト直径において大きな寸法減少を示したが、内部領域での密度変化はほとんど認められなかった (Fig. 11(c) 参照)。

4・4・2 破壊荷重 Fig. 12 は、ポスト/シート試験

Fig. 12. Effect of oxidation on fracture load.

体の酸化後の破壊荷重と酸化量との関係について示したものである。酸化率が大きくなるに従いポスト/シート試験体の破壊荷重は減少した。これを酸化率と酸化後の破壊荷重について最小二乗法を用いて一次近似することにより、以下の関係式を得た。

$$F'_{mf} = 221.7 - 0.202 \times R / 100 \quad (4)$$

ここで、 F'_{mf} は酸化後の平均破壊荷重 (kN)、 R は酸化率 (%) である。式 (4) により計算される平均破壊荷重を Fig. 12 に示す。酸化後の破断荷重と式 (4) により求まる酸化後の平均破断荷重との偏差が正規分布するものとして、式 (3) を用いて計算した 95% 信頼度、99% 非破壊確率での酸化後の最小破壊強度を Fig. 12 に示す。通常運転時の寿命末期 (酸化率約 1%) および最も厳しい酸化事故時 (酸化率約 15%) に設計上最大の地震による負荷荷重を仮定しても、ポストの設計裕度 (酸化後の破壊荷重/負荷荷重) は、約 5.1 および約 4.3 となる。このことより、通常運転時および最も厳しい酸化事故時においても十分安全裕度が確保されることが分かった。

5 結 論

球面接触を有する円柱状黒鉛構造物であるサポートポストの軸圧縮実験を実施し、破壊荷重およびポスト胴部の軸ひずみを測定した。また、二次元軸対称弾塑性応力解析を実施し、発生応力値を評価した。その結果以下の結論を得た。

(1) ポストの傾斜角は、約一度までは軸方向のひずみおよび破壊荷重にほとんど影響しない。

(2) ポストの破壊強度と円柱状試験片について得られている圧縮強度に対する体積効果は、ほぼ同様な傾向を示した。

(3) 破壊荷重の約 1/3 程度で 200 回の圧縮疲労荷重を負荷しても、ポストの破壊荷重および胴部に生ずる変形挙動は影響されない。

(4) 酸化後の破壊実験より酸化事故時においてもポ

スト／シート構造物は十分な強度を有することが明らかとなった。

(5) 以上より、種々の条件下におけるポストの破壊荷重は、最大設計荷重に対して十分な安全裕度を有していることが明らかとなり、その健全性が確認された。

最後に、本実験に協力を得た富士電機(株)エネルギー本部原子力事業部原子力設計部三木俊也、神坐圭介両氏、および本解析においてご助力頂いた(株)CSK 白井浩史氏はじめ関係諸氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 田中利幸, 数土幸夫, 馬場 治, 原子力学会誌, 32-9, 852 (1990).
- 2) T. Iyoku, S. Maruyama, S. Shiozawa and F. Okamoto, ICON-1, Tokyo, Japan (1991), Vol. 2, 258 (1991).
- 3) K. Kikuchi, K. Sanokawa, H. Ikawa and T. Okuma, Eng. Fract. Mech., 19-6, 1013 (1984).
- 4) J. E. Blocklehurst, Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 13, 145 (1977).
- 5) 石原正博, 淡路英夫, 佐藤千之助, 清野定紀, 炭素, No. 118, 124 (1984).
- 6) 石山新太郎, 奥 達雄, 原子力学会誌, 30-2, 181 (1988).
- 7) 稲垣嘉之, 伊与久達夫, 豊田純二, 佐藤貞夫, 塩沢周策, JAERI-M90-020 (1990).
- 8) R. E. Nightingale, "Nuclear Graphite", Academic Press Inc., 394 (1962).
- 9) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: "ABAQUS User's manual Ver. 4.6" (1987).
- 10) 荒井長利, 私信
- 11) 二川正敏, 菊地賢司, JAERI-M 85-054 (1985).
- 12) 石原正博, 伊与久達夫, 豊田純二, 佐藤貞夫, 塩沢周策, JAERI-M91-154 (1991).
- 13) 佐藤千之助, 淡路英夫, 川又清弘, 車田 亮, 奥 達雄, 原子力学会誌, 28-12, 1172 (1986).

書 評

"flotation"

—THEORY, REAGENTS AND ORE TESTING—

Ronald D. Crozier (著)

(1992年, Pergamon Press 発行, 15.2×23.5 cm, 356ページ, £65.00)

フローテーション法(浮選法, 浮遊選鉱法)は, 採掘された鉱石中の黄銅鉱, 方鉛鉱, 閃亜鉛鉱などの有用鉱物を回収するための湿式分離法の中で最も重要な方法である。まず鉱石を微粉碎した水中に懸濁させ, 起泡剤および捕収剤などの浮選試薬を添加する。2種類以上の有用鉱物の相互分離のためには活性剤や抑制剤などを添加する必要がある。懸濁液(パルプ)中に気泡を発生させ, 目的とする鉱物粒子を気泡に付着せしめて液面上昇したフロスを採取する。このような分離法をフローテーション法と呼んでいる。

本書は13章から成っており, その内容は次のようである。第1章フローテーションの基礎, 第2章フローテーションの機構, 第3章硫化鉱物のフローテーション, 第4章チオール型捕収剤の化学, 第5章S-H型捕収剤, 第6章フロソ特性, 第7章起泡剤の化学的特性, 第8章調節剤, 第9章硫化剤(抑制および活性作用), 第10章選鉱工場の歴史的変遷, 第11章硫化鉱物処理の実操業, 第12章非金属鉱物のフローテーション, 第13章フローテーション試験法, である。

フローテーション法は, 最近ではコロイド物質, 溶存イオン, 微生物の回収も可能なことが認められており, 化学工業, 食品工業, 廃水処理, 資源リサイクリング, 海水中有用成分の回収などにも応用されている。このように広い応用分野をもつフローテーション法を理解する上でも本書は好適の書といえる。

(京都大学工学部 中廣 吉孝)