



JAEA-Technology

2006-048



JP0650668

HTTR 炉心の初装荷 IG-110 黒鉛の特性値

Characteristics of First Loaded IG-110 Graphite in HTTR Core

角田 淳弥 柴田 大受 塙 悟史
石原 正博 伊与久 達夫 沢 和弘

Junya SUMITA, Taiju SHIBATA, Satoshi HANAWA
Masahiro ISHIHARA, Tatsuo IYOKU and Kazuhiro SAWA

原子力基礎工学研究部門
耐熱燃料・材料開発グループ

High Temperature Fuel & Material Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

October 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to

Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

HTTR 炉心の初装荷 IG-110 黒鉛の特性値

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門核熱応用工学ユニット
角田 淳弥・柴田 大受・塙 悟史⁺¹
石原 正博⁺²・伊与久 達夫・沢 和弘

(2006年 9月12日受理)

原子炉級微粒等方性黒鉛であるIG-110黒鉛は、耐放射線性、耐腐食性及び高強度を有しており、高温工学試験研究炉(HTTR)の燃料体、制御棒案内ブロック、サポートポスト等に使用されている。HTTRの炉内黒鉛構造物の設計・製作にあたり、日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)では、HTTR用の黒鉛構造設計方針を策定し、それまでの研究開発の結果に基づいて設計用データを定めている。

本報は、HTTR炉内構造物について高速中性子照射、酸化等による物性値、強度等の経年変化を調べるサーバイランスマルチ試験の基礎データとして活用することを目的として、HTTRの炉内に装荷されたIG-110黒鉛の特性値についてまとめるとともに、黒鉛構造設計方針で規定されている設計用データと比較検討したものである。比較検討の結果、炉内に装荷されたIG-110黒鉛の強度特性が良好で、黒鉛構造設計方針で規定される応力制限値に対して十分な安全性が確保されることを示した。

原子力科学研究所(駐在)：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

⁺¹大洗研究開発センター技術開発部

⁺²経営企画部

Characteristics of First Loaded IG-110 Graphite in HTTR Core

Junya SUMITA, Taiju SHIBATA, Satoshi HANAWA⁺¹,
Masahiro ISHIHARA⁺², Tatsuo IYOKU and Kazuhiro SAWA

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 12, 2006)

IG-110 graphite is a fine-grained isotropic and nuclear-grade graphite with excellent resistivity on both irradiation and corrosion and with high strength. The IG-110 graphite is used for the graphite components of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) such as fuel and control rod guide blocks and support posts. In order to design and fabricate the graphite components in the HTTR, the Japan Atomic Energy Research Institute (the Japan Atomic Energy Agency at present) had established the graphite structural design code and design data on the basis of former research results. After the design code establishment, the IG-110 graphite components were fabricated and loaded in the HTTR core.

This report summarized the characteristics of the first loaded IG-110 graphite as basic data for surveillance test, measuring material characteristics changed by neutron irradiation and oxidation. By comparing the design data, it was shown that the first loaded IG-110 graphite had excellent strength properties and enough safety margins to the stress limits in the design code.

Keywords: HTTR, IG-110 Graphite, Strength, Graphite Structural Design Code

⁺¹ Technology Development Department, Oarai Research and Development Center

⁺² Policy Planning and Administration Department

目 次

1.はじめに	1
2.初装荷IG-110黒鉛の材料特性	4
3.考察	8
3.1 基準強さ	8
3.2 応力制限値に対する破壊確率	8
3.3 強度の密度依存性	9
3.4 強度データの確率分布	9
3.5 ポイント応力の制限	9
4.まとめ	18
謝辞	18
参考文献	18

Contents

1. Introduction	1
2. Material properties of first loaded IG-110 graphite	4
3. Discussions	8
3.1 Specified minimum ultimate strength	8
3.2 Fracture probability to stress limit	8
3.3 Dependency of strength on density	9
3.4 Strength data probability distribution	9
3.5 Limit of point stress	9
4. Conclusions	18
Acknowledgements	18
References	18

This is a blank page.

1. はじめに

高温のガスを炉外に取出せる高温ガス炉は固有の安全性にも優れた原子炉として位置づけられ、特に 950°C 以上の高温のガスを取り出すことを目標とした超高温ガス炉（VHTR）は、第四世代原子炉システム（GEN-IV）の一つとして、国際的にも精力的な研究開発が展開されようとしている。我が国では、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す）大洗研究開発センターの高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor：以下、「HTTR」と略す）を用いて、高温ガス炉の研究開発を進めている。HTTR は熱出力 30MW、黒鉛減速、ヘリウムガス冷却の我が国初の高温ガス炉で、1998 年 11 月に初臨界に達した後、出力上昇試験及び高温ガス炉の固有の安全性を実証する安全性実証試験を進め、2004 年 4 月に初めて原子炉出口冷却材温度 950°C を達成している。今後は、安全性実証試験を継続すると共に、核熱による発電と水素製造を目指した高温ガス炉の技術基盤の確立及び高温ガス炉の技術の高度化等の研究開発に用いられる予定である⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

Fig.1.1 に HTTR 原子炉内部の構造を示す⁽¹⁾。HTTR の炉内の構造物には、IG-110 黒鉛（原子炉級微粒等方性黒鉛）、PGX 黒鉛（原子炉級準等方性黒鉛）及び ASR-0RB 炭素（断熱性炭素）が用いられている。原子炉用炉内構造物として脆性材料である黒鉛の設計基準が国内に無いため、HTTR の炉内黒鉛構造物の設計にあたり、日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）では、所内外の専門家の協力を得て HTTR 用の黒鉛構造設計方針を策定するとともに⁽⁶⁾、それまでの研究開発の結果に基づいて設計用データを定めた。^{(7),(8)}また、HTTR の炉内黒鉛構造物の製作にあたり、設計基準で定められた材料の特性を保証するため、黒鉛検査基準を定めた⁽⁹⁾。Table1.1 に、黒鉛構造設計方針の設計用データにおける IG-110、PGX、ASR-0RB の代表的な特性を示す⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。黒鉛構造設計方針では、炉内黒鉛構造物を、炉心を支持し炉の寿命期間中交換を計画しない炉心支持黒鉛構造物と、炉心を構成し一定期間使用後に交換する炉心黒鉛構造物とに分類している。特に、950°C の高温の出口ガス温度を達成するには高い熱応力等に耐える高強度かつ耐放射線性、耐腐食性の黒鉛材料が必須で、このため東洋炭素㈱製の IG-110 黒鉛（耐放射線性、耐腐食性及び高強度材）を HTTR の燃料体、制御棒案内ブロック等の炉心黒鉛構造物やサポートポスト等の炉心支持黒鉛構造物に使用している。なお、IG-110 黒鉛の未高純度化材である IG-11 黒鉛については、優れた強度特性、耐照射性等の利点から VHTR 炉内構造物への適用が検討されている状況である。

本報は、HTTR 炉内構造物について高速中性子照射、酸化等による物性値、強度等の経年変化を調べるサーベイランス試験の基礎データとして活用することを目的として、HTTR の炉内に装荷された IG-110 黒鉛（以下、「初装荷 IG-110 黒鉛」という）の特性値についてまとめるとともに、黒鉛構造設計方針で規定されている設計用データと比較検討したものである。

Table 1.1 Typical properties of graphite and carbon in design data of graphite structural design code for HTTR⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾.

	(unirradiated material)		
	IG-110 graphite	PGX graphite	ASR-0RB carbon
Bulk density(Mg/m ³) [*]	1.78	1.73	1.65
Mean tensile strength(MPa) [*]	25.3	8.1	6.8
Mean compressive strength(MPa) [*]	76.8	30.6	50.4
Young's modulus(GPa) [*] $(\pm \frac{1}{3}S_u)^{**}$	7.9	6.5	8.7
Mean thermal expansion coefficient (293~673K) (10 ⁻⁶ K)	4.06	2.34	4.40
Thermal conductivity(W/(m·K)) (673K)	80	75	10
Ash(ppm)	max.100	max.7000	max.5000
Garin size(μm)	mean 20	max.800	max.2000

*: at room temperature

**: Determined from the cord joining two points (one point is the one-third of the specified minimum tensile strength and the other is the one-third of the specified minimum compressive strength) on the stress-strain curve.

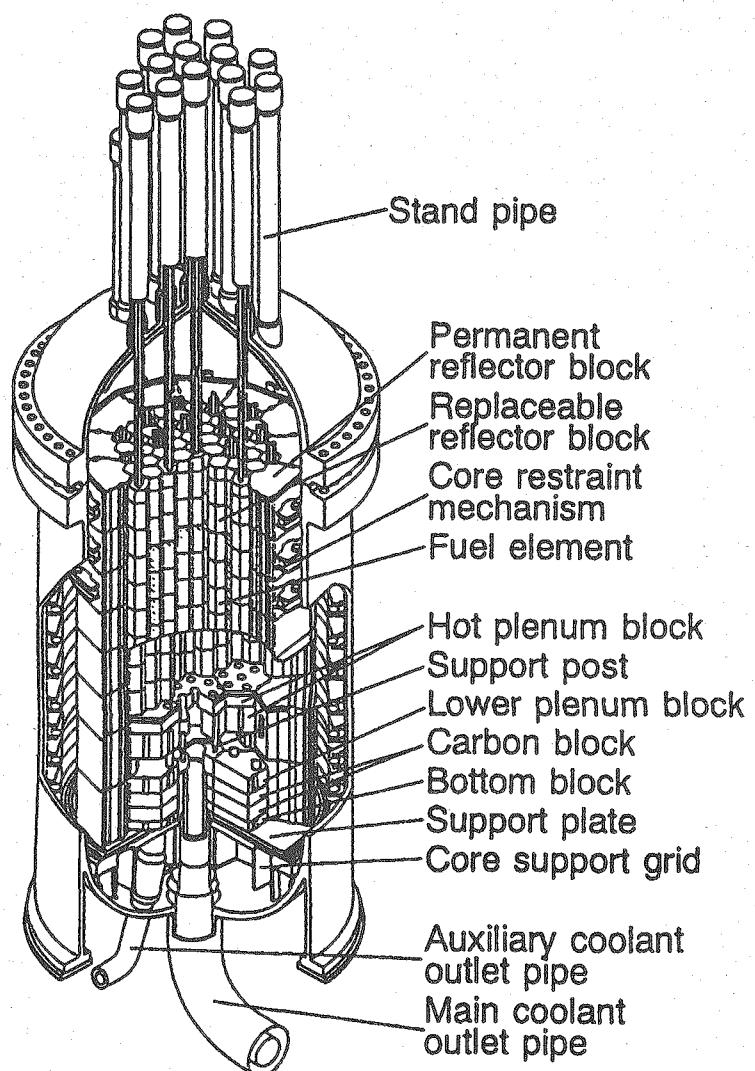


Fig.1.1 Bird's-eye view of reactor vessel and core of HTTR⁽¹⁾.

2. 初装荷 IG-110 黒鉛の材料特性

IG-110 黒鉛は、石油系コークスを原料とし、静水圧成形(Cold Isostatic Pressing)、一次焼成、ピッヂ含浸、二次焼成、黒鉛化、高純度化等の工程を経て製作される等方性黒鉛である。HTTR の黒鉛の受け入れに際して定められた黒鉛検査基準⁽⁹⁾においては、黒鉛の材料検査として、原料の段階で銘柄検査(原料の種類)、素材の段階で銘柄検査(かさ密度、固有抵抗、熱膨張係数、灰分、曲げ強さ、組織検査、異方比)、不純物検査(ほう素当量、放射化性不純物)、機械的強度検査(引張強さ、圧縮強さ)を実施することとしている。その中で、検査の具体的な判定基準については、設計等で変わり得るものであることから、黒鉛検査基準における本文では一般的な表現で規定されており、具体的なものは解説に示されている。

HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛について、取得した代表的な材料特性データについて、以下に述べる。

(1) 銘柄検査

1) かさ密度

高純度化前の素材(ログ)側部又は下部より試験片を採取し、寸法、重量を測定してかさ密度を求めた。Table 2.1 にかさ密度の平均とその標準偏差を示す。黒鉛検査基準では、かさ密度の判定基準の具体的な目安値として 1.74g/cm^3 (1.74Mg/m^3) 以上が示されている。Table 2.1 に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛のかさ密度の平均値は 1.77Mg/m^3 と目安値を上回り、かつ、ばらつきが少ないものとなっている。

2) 固有抵抗

高純度化前の素材(ログ)側部又は下部より試験片の試験片を採取し、電圧降下法により室温における固有抵抗を求めた。黒鉛検査基準では、固有抵抗の判定基準の具体的な目安値として、 $1300\mu\Omega\text{cm}$ ($13\mu\Omega\text{m}$) 以下が示されている。Table 2.1 に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の固有抵抗の平均値は $10.4\mu\Omega\text{m}$ (径方向) 及び $11.3\mu\Omega\text{m}$ (軸方向) と目安値を十分下回るものである。なお、径方向とは素材の水平方向、軸方向とは素材の鉛直方向を言う。

3) 熱膨張係数

高純度化前の素材(ログ)側部又は下部より試験片の試験片を採取し、毎分 3°C の昇温速度で室温から 673°C まで昇温し、試験片の伸びを計測し室温と 673°C の 2 点間の熱膨張係数を求めた。黒鉛検査基準では、熱膨張係数の判定基準の具体的な目安値として、室温～ 400°C の範囲で $3.4 \sim 4.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ が示されている。Table 2.1 に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の熱膨張係数の平均値は $3.89 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と目安値の範囲内にある。

4) 灰分

高純度化前の素材(ログ)下部より採取した黒鉛粉末を約 800°C で灰化させ、灰分量を求めた。Table 2.2 にその結果を示す。灰分は最大で 8ppm であり、目安値である 100ppm を大きく下回り良好な結果となっている。なお、灰分量は黒鉛の酸化特性に大きく影響し、灰分の少ないもの程耐酸化特性の優れたものである。

5) 曲げ強さ

高純度化前の素材(ログ)側部又は下部より試験片の試験片を採取し、万能試験機を用いて3点曲げ法により曲げ強度を測定した。荷重は3kg/secの均一速度で負荷した。Table 2.3に曲げ強さの平均と標準偏差を示す。黒鉛検査基準では、曲げ強さの判定基準の具体的な目安値として、 320kg/cm^2 (31.4MPa) 以上が示されている。Table 2.3に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の曲げ強さの平均値は 41.6MPa と目安値よりも3割以上高くなっている。

6) 異方比

2)で示した固有抵抗値の径方向に対する軸方向の比を異方比と定義した。Table 2.1に示すように異方比の平均は約 1.09 であり、目安値である 1.15 を下回るものである。

(2) 不純物検査

1) ほう素等量

HTTR における核設計の観点から、高純度化後の素材について、ほう素(B)、ガドリニウム(Gd)、サマリウム(Sm)及びカドミウム(Cd)の不純物を制限している。Bについてはクルクミン吸光光度法、Gd、Sm、及び Cd については、誘導結合プラズマ原子発光分析法により各元素量を定量した。黒鉛検査基準では、ほう素当量の判定基準の具体的な目安値として 1ppm 以下が示されている。Table 2.2 に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛のほう素当量は 1ppm を十分下回るものである。

2) 放射化性不純物

黒鉛検査基準では、放射化性不純物の測定元素として、Si、Fe、Al、Ni、V、Ca 及び Li を規定しているが、(1)銘柄検査のうち 4)の灰分検査で測定した灰分が 90ppm 以下であれば、Li を除いて省略した。Li は誘導結合プラズマ原子発光分析法により定量した。Li はトリチウムの発生源の一つであり、黒鉛検査基準では判定基準の具体的な目安値として定量できる下限値である 0.01ppm 以下が示されている。Table 2.2 に示すように初装荷 IG-110 では、全て 0.01ppm 以下となっている。

(3) 機械的強度検査

1) 引張強さ

高純度化前の素材(ログ)下端部よりきね型の試験片を採取し、万能試験機を用いて破断時の最大荷重を計測した。荷重は 3kg/sec の均一速度で負荷した。Table 2.4 に HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の引張強さの平均及び標準偏差、並びに黒鉛構造設計方針の設計データを示す。初装荷 IG-110 黒鉛のデータは、平均強度が高く標準偏差の小さな良好なものである。

黒鉛検査基準では、受入れ検査において引張強さの基準強さを満足するよう下記の判定を規定している。

$$\bar{X} \geq S_u + (k_1 + \frac{k_2}{\sqrt{n}})\sigma \quad (2-1)$$

\bar{X} : 材料試験により得られた強度データの平均強さ(MPa)

S_u : 基準強さ(MPa)

σ : 材料試験により得られた強度データの標準偏差(MPa)

n : 強度データの個数

k_1 : 2.326(99%非破壊確率に相等)

k_2 : 1.645(サンプリングによる誤差を考慮し、標本の標準偏差が母集団の標準偏差と同じとした場合の片側 95%の信頼度に相当)

ここで、基準強さ S_u については黒鉛構造設計方針に設計用データとして示されている 198 kg/cm² (19.4MPa) を用い、また Table 2.4 に示すデータを用いると、(2-1)式の右辺は 23.0MPa となる。Table 2.4 に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の引張強さの平均値は 29.6MPa であるため、黒鉛検査基準で示された(2-1)式が十分満足されている。

2) 圧縮強さ

高純度化前の素材(ログ)下端部より試験片の試験片を採取し、インストロン型材料試験機を用いて破断時の最大荷重を計測した。加圧のクロスヘッド速度は 5mm/min の均一速度である。Table 2.4 に HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の圧縮強さの平均及び標準偏差、並びに黒鉛構造設計方針策定に用いられたデータを示す。初装荷 IG-110 黒鉛のデータは、平均強度が高く標準偏差の小さな良好なものである。

黒鉛検査基準では、圧縮強さも引張強さと同様に判定基準の具体的な目安値として、(2-1) 式が示されている。圧縮の基準強さ S_u については、黒鉛構造設計方針では 626 kg/cm² (61.4MPa) が設計用データとして示されている。この S_u 値と Table 2.4 に示すデータを用いて式(3-1)の右辺を求めるとき 67.2MPa となる。Table 2.4 に示すように、HTTR の初装荷 IG-110 黒鉛の圧縮強さの平均値は 82.6MPa であるため、黒鉛検査基準で示された(2-1)式が十分満足されている。

Table 2.1 Typical properties of HTTR first loaded IG-110 graphite.

	Average	Standard deviation	Number of specimens	Design standard
Bulk density(Mg/m ³)	1.77	0.0068	64	>1.74
Electrical resistivity ($\mu\Omega\text{m}$) at RT	10.4 (radius) 11.3 (axial)	0.35 (radius) 0.45 (axial)	64	<13
Coefficient of thermal expansion($10^{-6}/\text{K}$) at RT~673°C	3.89	0.16	64	3.4~4.6
Anisotropy	1.09	0.039	64	<1.15

Table 2.2 Impurities of HTTR first loaded IG-110 graphite.

	Lower limit	measured (max.)
Ash (ppm)	<100	8
Boron equivalent (ppm)	<1	0.59
Lithium impurity (ppm)	<0.01	<0.01

Table 2.3 Bending strength data of HTTR first loaded IG-110 graphite.

	Average	Standard deviation	Number of specimens	Design standard
Bending strength (MPa)	41.6	2.13	64	31.4

Table 2.4 Tensile and compressive data of HTTR first loaded IG-110 graphite.

Tensile strength (MPa)	Average	Standard deviation	Number of specimens	S _u value
HTTR first loaded data	29.6	1.49	640	26.1
Design data	25.3	2.43	362	19.4
Compressive strength (MPa)	Average	Standard deviation	Number of specimens	S _u value
HTTR first loaded data	82.6	2.36	320	76.9
Design data	76.9	6.41	373	61.4

3. 考察

3.1 基準強さ

黒鉛構造設計方針における IG-110 黒鉛の基準強さ S_u は、強度試験より得られたデータからサンプリングによる誤差を考慮して、非破壊確率 99% で定められる引張強さ及び圧縮強さとして、以下の式で定められている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

$$S_u = \bar{X} - (k_1 + \frac{k_2}{\sqrt{n}})\sigma \quad (3-1)$$

式中の記号は(2-1)式と同様である。黒鉛構造設計方針策定時の HTTR の設計用データにおける IG-110 黒鉛の S_u 値は、Table 2.4 に示したとおり引張 19.4 MPa、圧縮 61.4 MPa、(3-1)式から求めた初装荷 IG-110 黒鉛の S_u 値は、引張 26.1 MPa、圧縮 76.9 MPa と、設計時の S_u 値に比べて 1.2~1.3 倍程度大きく、初装荷 IG-110 黒鉛は強度の大きい良好な黒鉛となっている。HTTR の黒鉛ブロックの照射誘起残留応力の計算例⁽¹⁰⁾に運転状態 I 及び II における膜応力の制限値($1/3 S_u$)を示したのが Fig. 3.1 である。初装荷燃料の S_u 値が大きくなつたことから、設計時の膜応力の制限値と比較して裕度が大きくなり、黒鉛構造物の寿命延長の可能性があることが示された。

3.2 応力制限値に対する破壊確率

3.1 で求めた信頼度 95%/非破壊確率 99% の際の基準強さ S_u に基づき、応力制限値に対する破壊確率を検討した。応力制限係数を α (応力制限値/基準強さ)とした場合、非破壊確率 P は以下の式で求めることができる。

$$Z = \frac{\bar{X} - \alpha S_u}{\sigma} \quad (3-2)$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (3-3)$$

したがって、破壊確率 P_r は以下の式で表される。

$$P_r = 1 - P \quad (3-4)$$

引張及び圧縮強さについて、応力制限係数と破壊確率との関係を Figs. 3.2, 3.3 に示す。初装荷 IG-110 黒鉛のデータは設計時のデータに比べて応力制限係数に対する破壊確率が非常に小さい良いものであることがわかる。また、黒鉛構造設計方針においては、運転状態 I 及び II における膜応力に対する安全率は基本的な安全率であり、構造物の機能及び重要度を考慮して、炉心黒鉛では 3 に、炉心支持黒鉛では 4 に規定されている。初装荷 IG-110 黒鉛では、図中の $\alpha=1/3$ 及び $1/4$ に相当するところでは、破壊確率が極めて小さくなることは明白である。

3.3 強度の密度依存性

黒鉛のような多孔質材料では、材料に含まれる微小欠陥が亀裂の発生・伝播に関与し材料強度に影響を与える。同一の材料では、単純には微小欠陥の数量が少なければ密度は大きいので、材料強度と密度は比例する傾向を示すと考えられる。そこで、初装荷 IG-110 黒鉛について、密度と強度の関係を検討した。密度と曲げ強さ、引張強さ、圧縮強さの関係をそれぞれ Figs. 3.4 – 3.6 に示す。傾向を比較するため、各データは取得されたデータの平均値で規格化してある。曲げ強さに関しては、密度の増加に伴い曲げ強さも増加する傾向が見られる。曲げ強さは 3 点曲げ試験で測定しており、引張応力が加わる試験片表面の欠陥状態が曲げ強さに敏感に影響を与えたと推測される。一方、引張強さ及び圧縮強さについては、曲げ強さで見られたような顕著な密度依存性は見られない。初装荷 IG-110 黒鉛については、製造時の密度のばらつきが少なく良好なものであったため、引張強さ及び圧縮強さに顕著な影響が見られるほど大きな密度のばらつきではなかったためと推測される。また、圧縮強さについては、曲げ強さ、引張強さに比べてデータのばらつきが少ないことがわかる。

以上から、例えば密度と強度との間に強い相関関係が認められれば、密度検査により強度検査を簡略化することも考えられるが、このような狭い範囲での密度の違いは強度検査の簡略化に直接反映できないことが明らかとなった。

3.4 強度データの確率分布

IG-110 黒鉛の強度データをワイブル分布、正規分布および対数正規分布へプロットすることでその統計的性質を確認した。Fig.3.7(1)-(3)はそれぞれ初装荷 IG-110 黒鉛の引張強度データのワイブルプロット、正規プロットおよび対数正規プロットである。なお、引張強度は平均強度で規格化しており、実線は最適近似直線を示している。Fig.3.7(1)よりワイブル係数は $m=24.7$ であり、設計方針策定期と比較して非常にばらつきの少ないデータであった。図中、 r は相関係数を示しており、引張強度データは正規分布への適合が最も良いことがわかる。

圧縮強度データについても同様にワイブルプロット、正規プロットおよび対数正規プロットを行った。それぞれを Fig.3.8(1)-(3)に示す。圧縮強度は平均強度で規格化しており、実線は最適近似直線を示している。図中、 r は相関係数を示しており、圧縮強度データについても正規分布へ最も適合が良いことがわかる。

すなわち、以上の検討から、構造物の破壊確率を調べる場合には、正規分布に基づく統計論を適用するのが適切であることがわかる。

3.5 ポイント応力の制限

黒鉛材料は単軸引張強さよりも応力勾配を有する曲げ強さが高い強度を示す。そのため、黒鉛構造設計方針⁽⁶⁾では応力勾配下の強度特性を考慮して膜応力および膜+曲げ応力（ポイント応力）を制限している。一般的に、脆性材料の応力勾配下での強度特性については、古くから Weibull 強度理論により説明されてきた⁽¹¹⁾。そこで、ポイント応力の制限についても、Weibull 強度理論⁽¹¹⁾により検討する。ここでは、評価モデルとして矩形断面を有する 3 点曲げとし、曲げ応力に引張応力が同時に作用する場合のポイント応力の制限値を検討する。Weibull 係数をパラメータとした場合の膜応力とポイント応力の関係を Fig.3.9 に示す。同図より、Weibull 係数が小さいほど、すなわち強度がばらつく材料ほどポイント応力と膜応力の比は大きくなることが理解される。

次に、初装荷 IG-110 黒鉛のポイント応力に対する破壊曲線と黒鉛構造設計方針で規定する応力制限値を比較する。Fig.3.10 は、Weibull 強度理論により予測した初装荷 IG-110 黒鉛の破壊曲線と、黒鉛構造設計方針⁽⁶⁾で規定している炉心黒鉛構造物の運転状態別のポイント応力と膜応力に対する

る設計上の応力制限値の関係を示したものである。なお、破壊曲線を求めるために用いた Weibull 係数は $m=24.7$ で、Fig.3.7(1)より定めた値である。同図より、初装荷 IG-110 黒鉛は炉心黒鉛構造物の設計上の応力制限値に対して十分安全側にあることがわかる。

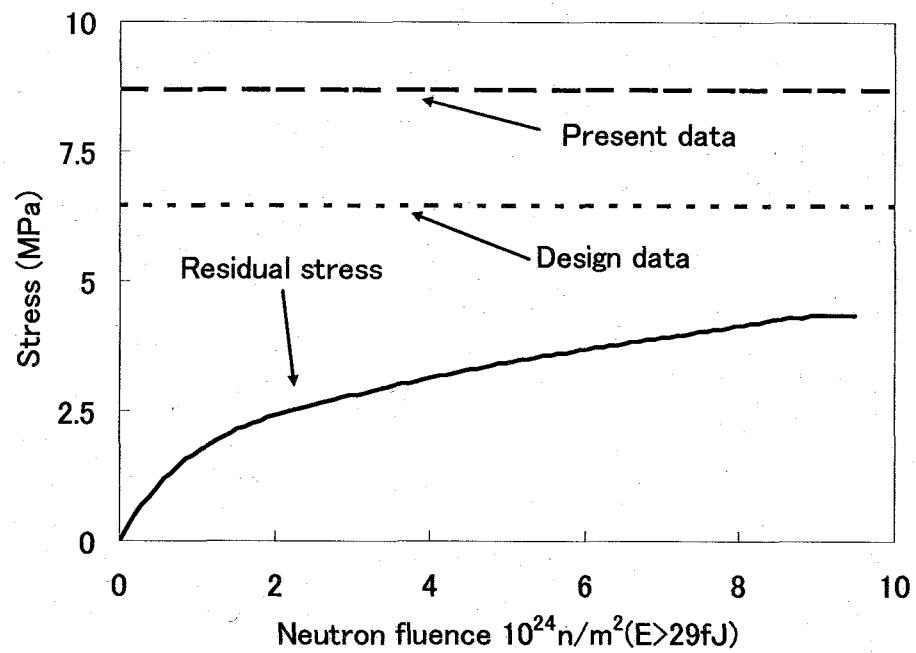


Fig. 3.1 Example of calculated residual stress for graphite blocks during HTTR operation and limit of stress

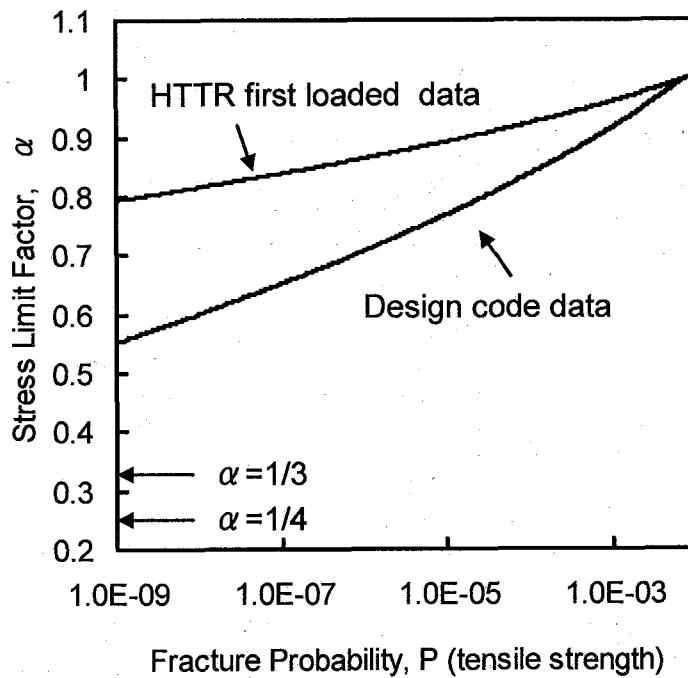


Fig. 3.2 Fracture probability of HTTR first loaded IG-110 graphite (tensile).

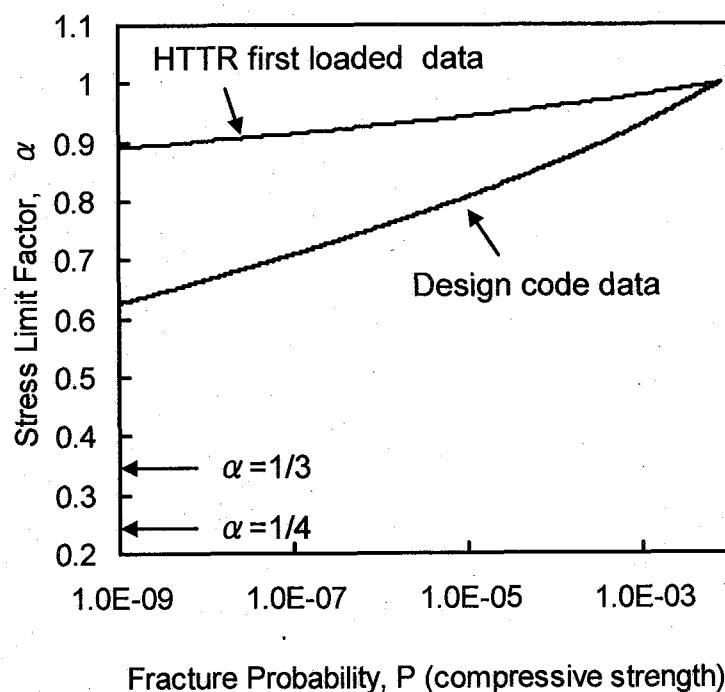


Fig. 3.3 Fracture probability of HTTR first loaded IG-110 graphite (compressive).

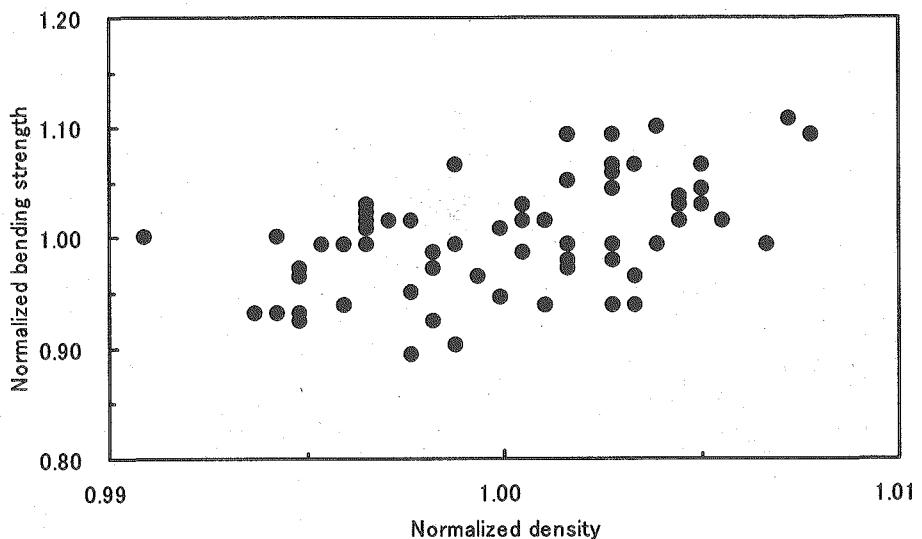


Fig.3.4 Bending strength and density of HTTR first loaded IG-110 graphite.

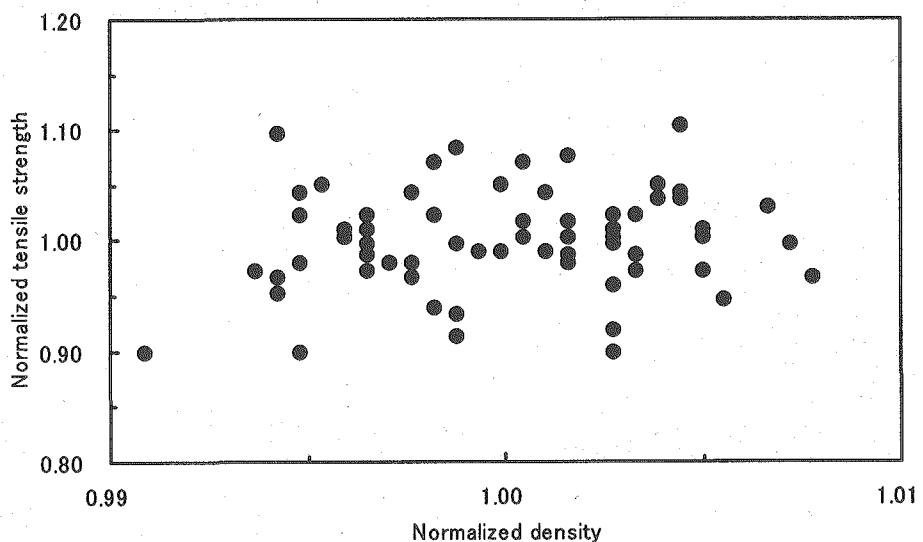


Fig.3.5 Tensile strength and density of HTTR first loaded IG-110 graphite.

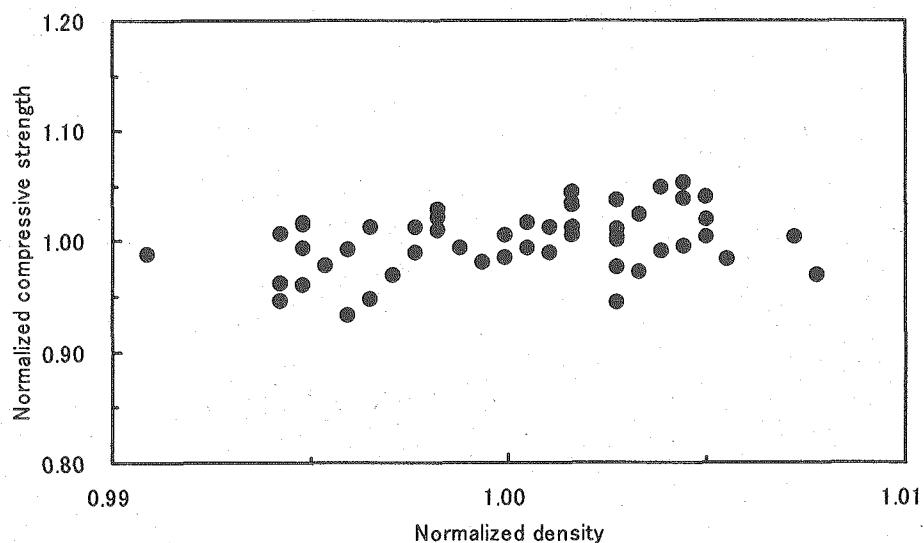


Fig.3.6 Compressive strength and density of HTTR first loaded IG-110 graphite.

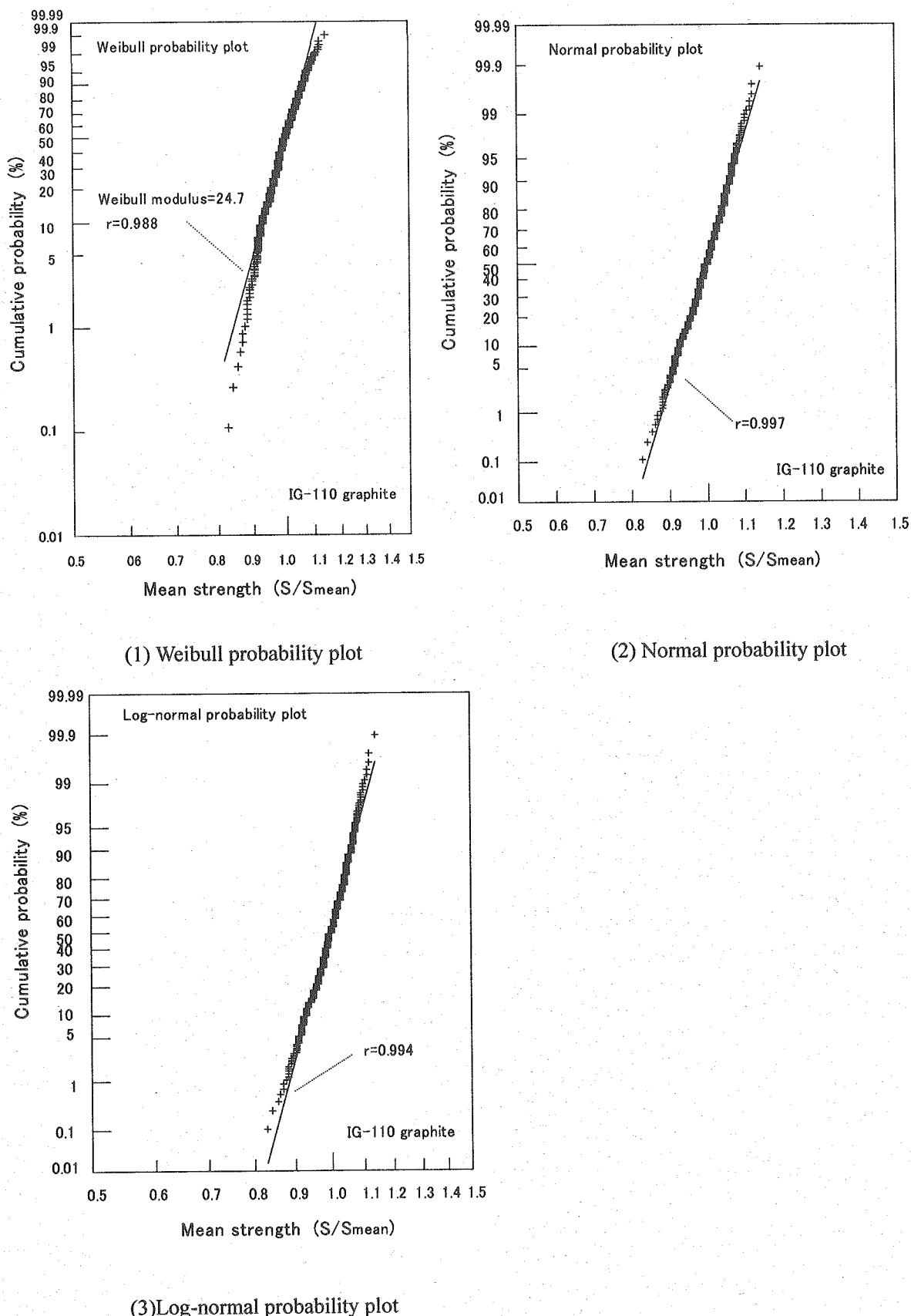
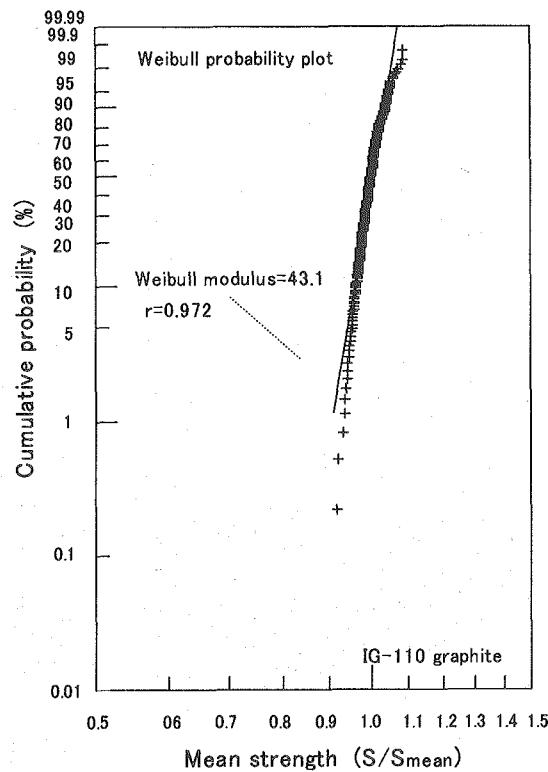
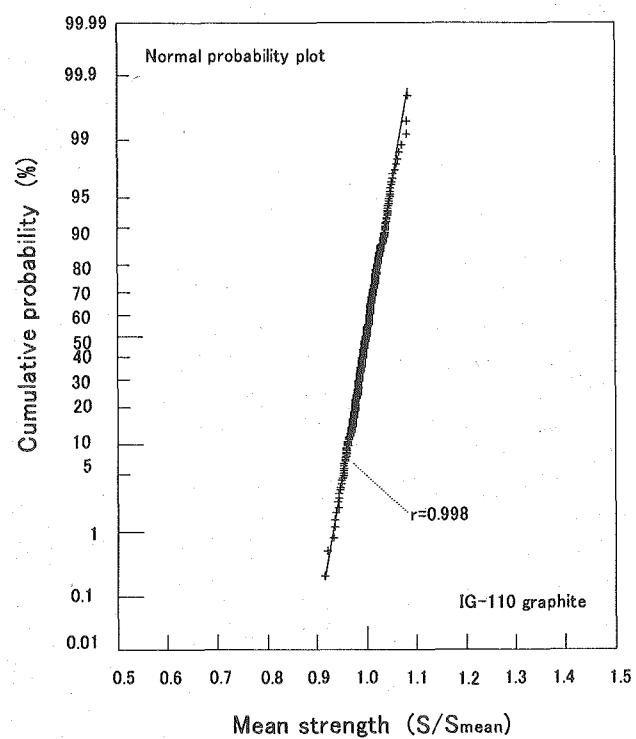


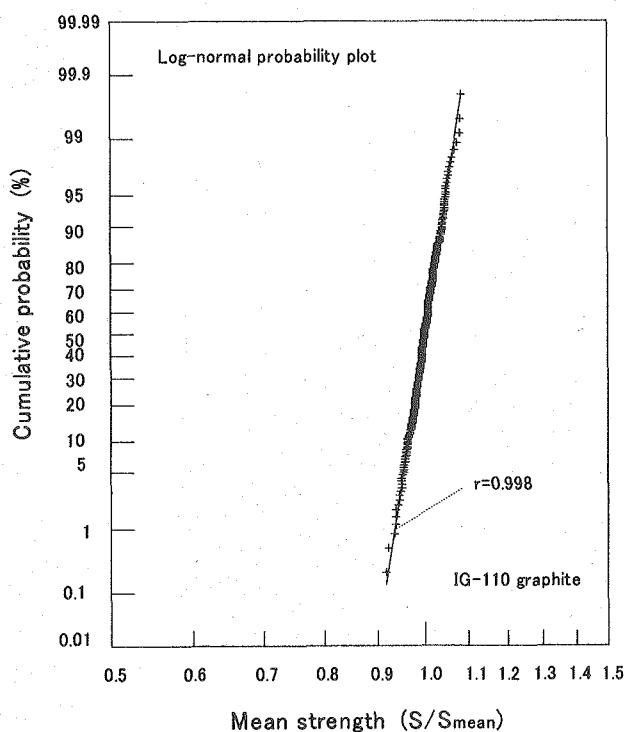
Fig.3.7 Probability plot of tensile strength for HTTR first loaded IG-110 graphite.



(1) Weibull probability plot



(2) Normal probability plot



(3) Log-normal probability plot

Fig.3.8 Probability plot of compressive strength for HTTR first loaded IG-110 graphite.

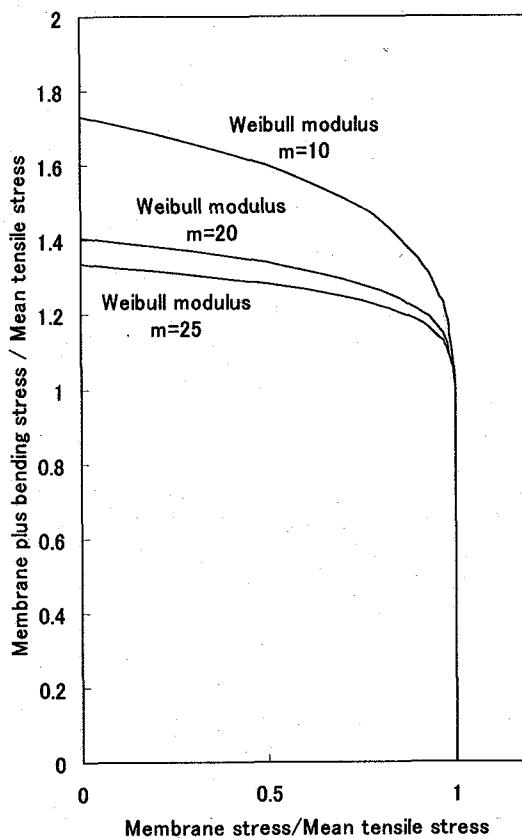


Fig.3.9 Relation between membrane stress and point stress obtained by Weibull theory.

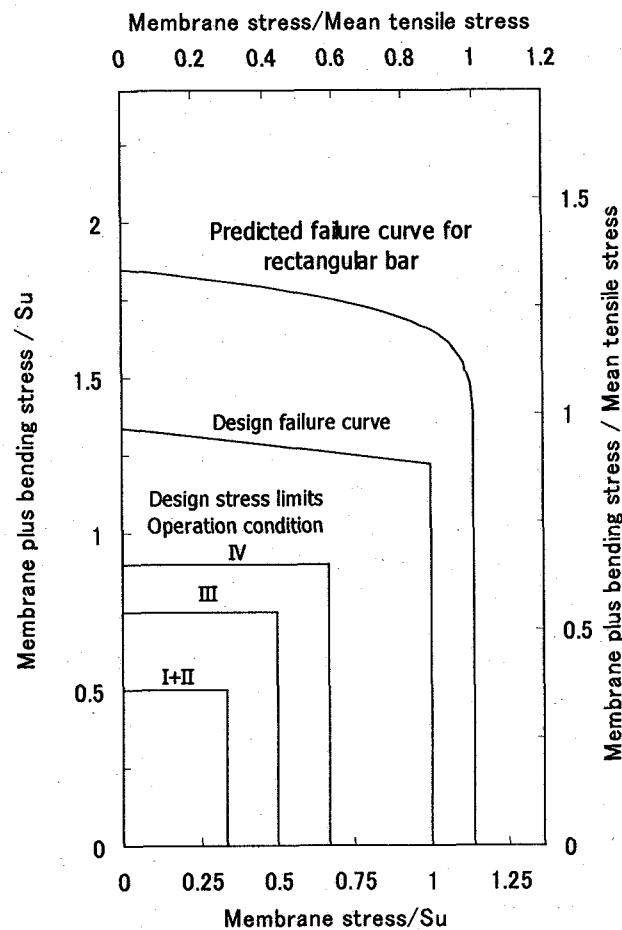


Fig.3.10 Membrane stress and point stress failure curves by Weibull theory and design stress limits for core graphite components.

4. まとめ

大洗研究開発センターで稼動中の HTTR の炉内黒鉛構造物の設計・製作に当たっては、国内に脆性材料である黒鉛の設計基準が無かったことから、所内外の専門家の協力を得て黒鉛構造設計方針を策定するとともに、それまでの研究開発の結果に基づいて設計用データを定め、さらに設計基準で定められた材料の特性を保証するための黒鉛検査基準を定めている。そこで、HTTR 炉内構造物について高速中性子照射、酸化等による物性値、強度等の経年変化を調べるサーベイランス試験の基礎データとして活用することを目的として、HTTR の炉内に装荷された黒鉛のうち、高温の出口ガス温度を達成するために重要な高強度かつ耐放射線性、耐腐食性の IG-110 黒鉛について、受入れ検査で得た特性値をまとめるとともに、黒鉛構造設計方針で規定されている設計用データと比較検討し、以下の結論を得た。

- (1) 初装荷 IG-110 黒鉛のデータは、密度、強度のばらつきが少なく、良好なものである。
- (2) 初装荷 IG-110 黒鉛の強度及び破壊確率等を評価し、設計用データより優れた強度特性であることを示した。
- (3) 初装荷 IG-110 黒鉛のデータは、炉心黒鉛構造物の設計上の応力制限値に対して十分安全であることを示した。

謝辞

本検討を行うにあたり、データの取得等にご協力くださった東洋炭素株式会社の小西隆志氏、山地雅俊氏に感謝いたします。また、本報をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂きました高温工学試験研究炉部 HTTR 技術課長の藤本望氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) S.Saito, et. al, "Design of High Temperature Engineering Test Reactor," JAERI-1332(1994).
- (2) 中川繁昭、坂場成昭、高田英治、橘幸男他、「HTTR 安全性実証試験(SR-1/S1C-1)の試験計画」、JAERI-Tech 2003-049(2003).
- (3) 中川繁昭、坂場成昭、高松邦吉、高田英治他「HTTR 安全性実証試験(SR-3/S1C-3/SF-2)の試験計画」、JAERI-Tech 2005-015(2005).
- (4) Tetsuo Nishihara and Yoshiyuki Inagaki, "Development of Control Technology for the HTTR Hydrogen Production System", Nuclear Technology 153(1), p.100-106(2006)
- (5) 西原哲夫、武田哲明、「高温ガス炉電力水素併産システム(GTHTR300C)の導入シナリオに関する検討、1」、JAERI-Tech 2005-049(2005).
- (6) 大洗研究所高温工学試験研究炉設計室他、「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」、JAERI-M 89-006(1989).
- (7) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説」、JAERI-M 91-153(1991).
- (8) 石原正博、伊与久達夫、豊田純二、佐藤貞夫、塩沢周策、「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).
- (9) 豊田純二、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策、「高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準」、JAERI-M 91-102(1991).

- (10) Tatsuo Oku and M. Ishihara, "Lifetime Evaluation of Graphite Components for HTGRs", Nuclear Engineering and Design, 227, [602], 209-217 (2004).
- (11) W. Weibull, "Ing. Vetenskaps Akad. Handl. No.151 (1939).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アトト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot s^{-1} = (b)$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = (b)$	
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}	
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^1 \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジユール	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	C		$s \cdot A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	フアード	F		C/V
電気抵抗	オーム	Ω		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
コンダクタンス	ジemens	S		A/V
磁束密度	テスラ	T		$m^{-2} \cdot kg \cdot s^3 \cdot A^2$
インダクタンス	ヘンリー	H		$V \cdot s$
セルシウス温度	セリシウス度 ^(d)	°C		Wb/m^2
光強度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種)放射能吸収線量, 質量エネルギー一分与, カーマ	ベクレル	Bq	$lm^2 \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv		$kg \cdot s^{-2}$

表6. 國際単位系と併用されるが國際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) rad$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) rad$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) rad$
リットル	L	$1l=1 dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーバ	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) ln10(Np)$

表7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される數値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600) m/s
アーサー	a	$1a=1 dam^2=10^6 m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バルス	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=1000 hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボルツマ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 國際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 Gy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-3} nm$
ガニマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャニスター	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr=(101325/760) Pa$
カロリ	cal	$1 atm=101325 Pa$
ミクロ	p	$1 p=1 \mu m=10^{-6} m$