

JAERI-M  
91-083

高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説

1991年5月

伊与久 達夫・石原 正博・豊田 純二・塩沢 周策

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）まで、お申し込みください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ニッセイエプロ株式会社

高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

伊与久 達夫・石原 正博・豊田 純二・塩沢 周策

(1991年4月16日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の健全性評価は、「炉心黒鉛構造設計方針」に基づいて行うこととしている。本方針を、HTTRの炉心黒鉛構造物の健全性評価に適用するに際しては、その内容を明確にしておく必要がある。そのため、本報告は、HTTRの燃料体等の炉心黒鉛構造物の設計を念頭にして、「炉心黒鉛構造設計方針」における応力制限の考え方、疲労制限の考え方、酸化評価に対する考え方、照射挙動を考慮した熱・照射応力解析手法等について、具体的に解説したものである。

An Explication of the Graphite Structural Design Code of Core  
Components for the High Temperature Engineering Test Reactor

Tatsuo IYOKU, Masahiro ISHIHARA, Junji TOYOTA and Shusaku SHIOZAWA

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 16, 1991)

The integrity evaluation of the core graphite components for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) will be carried out based upon the Graphite Structural Design Code for core components.

In the application of this design code, it is necessary to make clear the basic concept to evaluate the integrity of core components of HTTR.

Therefore, considering the detailed design of core graphite structures such as fuel graphite blocks, etc. of HTTR, this report explicates the design code in detail about the concepts of stress and fatigue limits, integrity evaluation method of oxidized graphite components and thermal irradiation stress analysis method etc.

Keywords: HTTR, Graphite, Design Code, Gas-cooled Reactor, Carbon, Brittle Material, Core Component

目 次

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1. はじめに .....          | 1  |
| 2. 炉心黒鉛構造設計方針の解説 ..... | 3  |
| 3. 結 言 .....           | 24 |
| 謝 辞 .....              | 24 |
| 参考文献 .....             | 24 |
| 付 録 炉心黒鉛構造設計方針 .....   | 25 |

Contents

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 1  |
| 2. Explication of the Graphite Structural Design Code for Core<br>Components ..... | 3  |
| 3. Concluding Remarks .....  | 24 |
| Acknowledgements .....   | 24 |
| References .....   | 24 |
| Appendix Graphite Structural Design Code for Core Components .....                 | 25 |

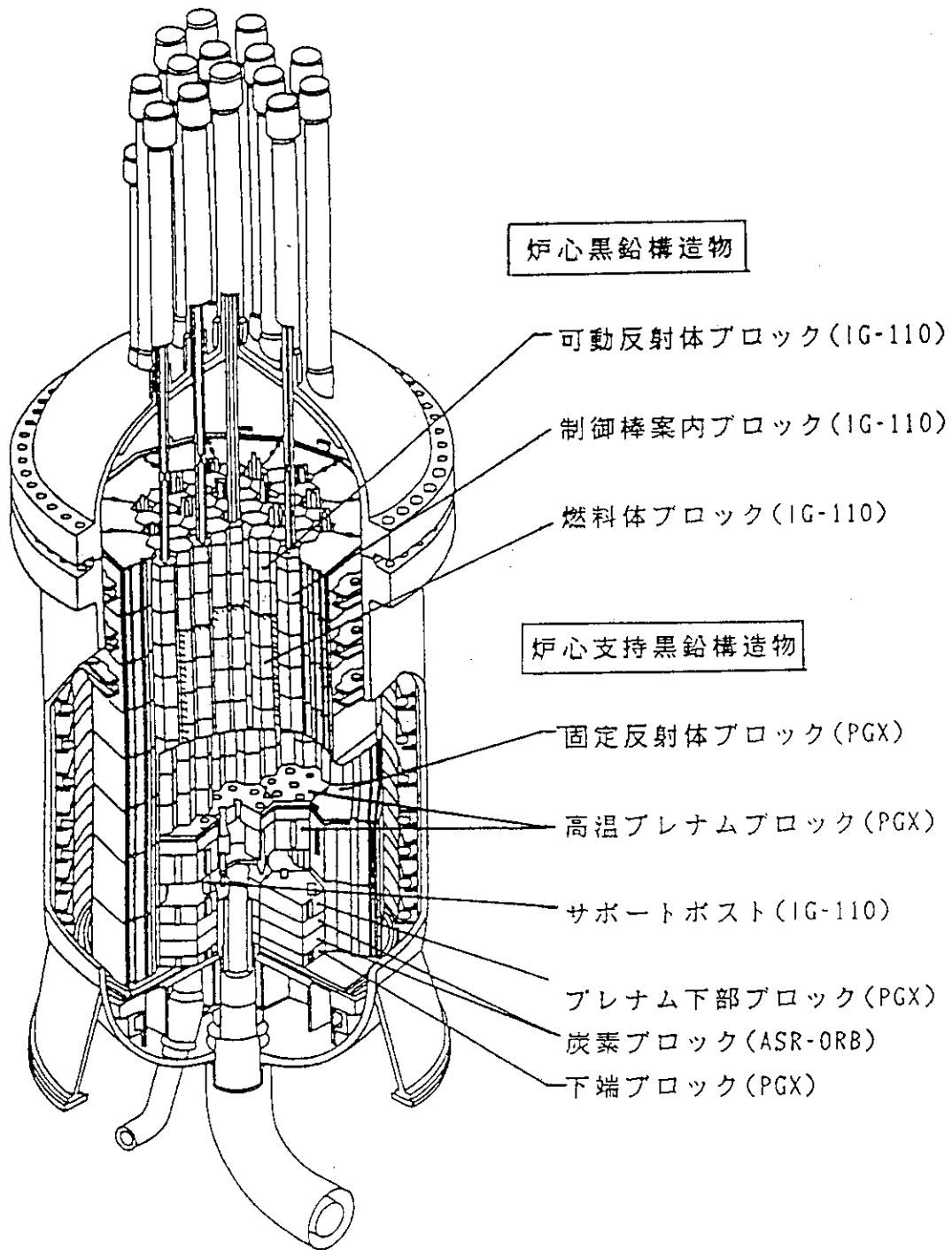
## 1. はじめに

現在日本原子力研究所では、高温ガス炉の基盤技術の確立と高度化、高温における先端的基礎研究を目的として高温工学試験研究炉（以下、「HTTR」と言う。）の建設の準備を進めている。本原子炉は、黒鉛減速型のヘリウムガス冷却炉である<sup>(1)</sup>。

HTTRの炉内構造物は、高温のガスを得るため耐熱性に優れた黒鉛構造物により構成され、黒鉛構造物は、その機能及び交換の可能性等を考慮して、炉心黒鉛構造物と炉心支持黒鉛構造物に分類される。第1. 1図にHTTRに使用する黒鉛構造物を示す。

炉心黒鉛構造物は、第1. 1図に示すように、燃料体の黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック等から構成される。これらの炉心黒鉛構造物は、高速中性子照射量が多く黒鉛材料の物性値等に与える高速中性子の照射の影響が顕著になるため、照射効果を設計上考慮する必要がある。黒鉛材料は、高速中性子の照射による寸法変化及びクリープ現象を生ずるため、原子炉停止時にはこれらの照射による残留ひずみに起因する照射応力が発生し、その影響は照射量の増加と共に大きくなる。また、運転中には黒鉛構造物内の温度分布により熱応力が発生する。このため、炉心黒鉛構造物の健全性評価では照射挙動を考慮した熱・照射応力解析を行う必要がある。これら黒鉛構造物の健全性評価は、「HTTR炉心黒鉛構造設計方針」<sup>(2)</sup>に基づいて行う。

本報告は、本設計方針を適用するにあたり、その解説をしたものである。なお、本設計方針を付録に示す。



第1.1図 HTTR の黒鉛構造物

## 2. 炉心黒鉛構造設計方針の解説

### 2. 1 序

#### 2. 1.1 用語の定義

本節は、本方針で用いる用語を定義したものである。

- 1) (2)項の垂直応力は、一般には互いに垂直な3成分(3軸応力)をもつ。
- 2) (4)項の膜応力の考え方は次のとおりである。

応力評価の対象とする断面内で、それぞれの垂直応力ごとに平均値をとった時、これに等しい応力をその断面の膜応力という。なお、せん断力についても同様に考えるものとする。

- 3) (5)項の曲げ応力の考え方は、つぎのとおりである。

応力評価の対象とする断面に分布する垂直応力の膜応力からの変化成分を曲げ応力という。

構造物の肉厚方向に分布する応力に正味の曲げモーメントと等しいようなモーメントによって生ずる応力分布を、曲げ応力成分という。また、もとの応力分布の最大値から膜応力と曲げ応力を引いたものがピーク応力成分となる。

下図において、

膜応力 ( $\sigma_m$ )

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma(y) dy \quad \text{----- (1.1)}$$

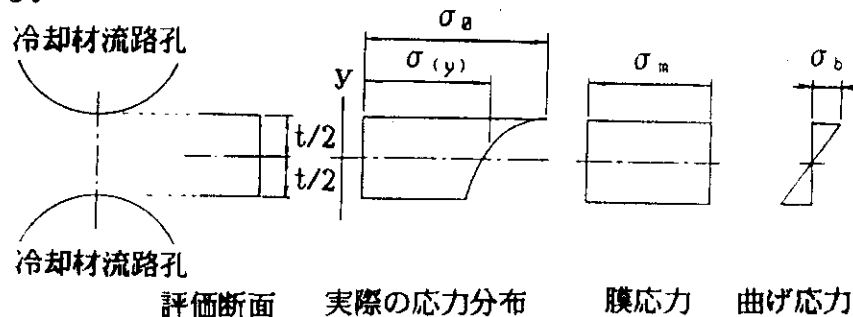
曲げ応力 ( $\sigma_b$ )

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} y \sigma(y) dy \quad \text{----- (1.2)}$$

ピーク応力 (F)

$$F = \sigma_b - \sigma_m - \sigma_b \quad \text{----- (1.3)}$$

となる。



- 4) (6)項の照射応力は、高速中性子照射を受けた黒鉛材料内のひずみにより発生する応力である。炉心黒鉛構造物は、その配置場所の関係上、中性子照射量が炉心支持黒鉛構造物に比べて多く、このため炉心黒鉛構造物では、照射寸法変化及び照射クリープを考慮した解析により照射応力の評価を行う。



- 5) (8)項の1次応力は、外荷重が作用している構造物において、それらの力とバランスのために構造物部材内に発生する応力である。即ち、その特性は、自己制御性がないことである。換言すると、それは外荷重により発生する応力で、その応力が材料の肉厚全体にわたって引張強さ又は圧縮強さを超えて増加すると、ついには破断に至るものである。
- 6) (9)項の2次応力は、構造物の自己拘束によって発生する応力である。即ち、その特性は自己制御性があることである。2次応力の代表例は熱応力及び照射応力である。
- 7) (10)項のピーク応力は、局部不連続性、応力集中の影響又は局部的熱応力により付加される応力の増加分である。
- 8) (14)項の基準強さは、黒鉛材料の強度のバラツキが大きいことを勘案して定める。
- 9) (15)から(18)項までは、構造設計上の各運転状態を示したものである。それぞれの運転状態は、構造物に加わる荷重の発生頻度又は、可能性を考慮して、発生し易い荷重状態に対しては厳しい応力制限を、また発生がまれ、もしくはほとんど考えられない荷重状態に対しては、ゆるやかな応力制限を与えるために設定されたものである。
- イ.各運転状態を別な表現で説明すると、次のようになる。
- (イ) 運転状態Ⅰとは、計画的な運転状態又はこれらの間の計画的移行をいう。
- (ロ) 運転状態Ⅱとは、原子炉施設の寿命程度の期間中に予想される機器の単一故障、運転員の単一誤操作等の事象によって、原子炉が通常運転状態からはずれるような状態をいう。
- (ハ) 運転状態Ⅲとは、発生頻度が十分に低い事象によって引き起こされる状態をいう。即ち、運転状態Ⅱでいう単一機器の故障、運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち、その発生頻度が十分に低いと考えられるものを運転状態Ⅲとして分類したものである。この場合、米国のANSI等における分類を参考にしている。
- (ニ) 運転状態Ⅳとは、発生頻度が極めて低く、原子炉施設の寿命中に起こるとは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが、万一発生した場合の設計の妥当性を評価するために特に設けたものをいう。
- ロ. 構造物の設計に考慮される運転状態の分類について  
 実際の原子炉施設の運転状態としては種類の事象が想定されるが、構造物の構造設計上はこれらすべてを摘出する必要はない。  
 例えば、事象としてはあり得ても、対象とする構造物の構造設計上影響を与えないものは当然考慮する必要はなく、またある事象を結果としてそれに似た他の事象に安全側に包含して構造設計することにより、設定する事象の数を少なくすることができる。
- 10) (19)のブロックの軸方向及び径方向は、以後差し仕えのない範囲で「

軸方向」「径方向」と略す。

## 2. 1.2 適用範囲

本節は、本指針方針が適用される黒鉛構造物を規定したものである。

## 2. 1.3 使用材料

本節は、本方針が適用される原子炉の使用材料について規定したものである。

原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110又は相当品）は、耐放射線性、耐腐食性及び高強度を有している。IG-110黒鉛の代表的な特性を第2.1.1表に示す。

また、検査の考え方は以下のとおりである。

### (1) 銘柄検査

炉心黒鉛構造物の構造設計は、上記材料に関する試験研究により取得したデータに基づいて行われる。一方、上記材料は原料の種類、製造工程にも由来する特性値のバラツキがある。そこで、高温工学試験研究炉用として使用する材料が設計上考慮されている範囲内の特性（試験研究により取得したデータと著しく異なること）を有しているかを確認する観点から、以下の銘柄を保証する検査をおこなう。

- ・原料コークスの種類及び粒径の範囲
- ・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

黒鉛材料の銘柄は、原料の種類並びに熱処理条件でほぼ決定される。黒鉛材料の原料の種類を確認するために、原料コークスの種類及び粒径の範囲を検査する。また、製造工程においては、熱処理条件が著しく異なった場合には、一般にかさ密度、固有抵抗、熱膨張係数の値が異なってくるので、これらを検査する。さらに、それらに要求される機能の重用度に鑑み、灰分、曲げ強さ及び組織検査を行う。また、黒鉛材料では、等方性が要求されるので異方比検査を行う。

### (2) 不純物検査

不純物検査として灰分の検査を行う。本検査は、加工による汚染はないことより、素材段階で実施してもよいものとする。

### (3) 機械的強度検査

機械的強度検査は、基準引張強さ及び基準圧縮強さを保証するために実施する。

### (4) 非破壊検査

黒鉛構造物の素材及び加工品に対しては、構造物の健全性を保証するため非破壊試験による欠陥検査を行う。

非破壊試験としては素材及び加工品の段階で、高応力状態が想定され、かつ、安全機能上重要な構造物又は部位（たとえば、制御棒案内ブロックのダウエル孔及びダウエルソケット）に対してそれぞれ目的に応じた試験を採用する。

まず、素材の段階としては、表面欠陥はその後の加工により取除かれるため、内部欠陥の検出を目的とした試験を行う。非破壊試験としては黒鉛材料に対する適用性及び比較的検出感度が良く、かつ、作業性に優れた超音波探傷試験又はそれに準ずる試験を採用する。

次に、加工品段階での試験としては、加工品の表層の表面欠陥の検出を目的とした試験を行う。非破壊試験としては、黒鉛材料に対する適用性及び作業性を加味して、渦流探傷試験又はそれに準ずる試験を採用する。

なお、上記にて規定した検査項目について、JIS（鉄鋼、非鉄）の材料規格との比較を第2.1.2表に示す。

## 2. 2 応力評価の方法

本節は、本方針で用いる黒鉛材料の応力評価の考え方を示したものである。

なお、これと同様の黒鉛材料の照射挙動等を十分モデル化できる他の方法によってもよいこととする。

### (1) 応力解析の方法

イ) 黒鉛材料の応力-ひずみ挙動は、僅かに非線形性を示すが、塑性の影響は少ない。また、設計上制限している応力範囲では、この挙動はほぼ直線的であり、弾性応力解析で十分である。従って、原則として、弾性解析による設計としている。

ロ) 照射寸法変化及び照射クリープを考慮した解析の考え方は、次のとおりである。

黒鉛材料は、原子炉内で構造物内温度分布による熱応力が発生し、さらに高速中性子照射下では寸法変化挙動を示すとともに、照射状態においてもクリープ変形を生ずるため、これらのひずみに起因する照射応力が発生する。このため、炉心黒鉛構造物の設計では、熱応力及び黒鉛材料の照射挙動を考慮した解析が必要となる。照射寸法変化及び照射クリープを考慮した解析においては、第2.2.1図に示すような黒鉛材料の照射挙動<sup>(3)</sup>を十分モデル化するように第2.2.2図(a)に示すMaxwell-Kelvinモデルを用いる。第2.2.2図(a)における支配方程式は次のとおりである。

$$\text{弾 性} \quad \epsilon^E = \frac{\sigma}{E^E}$$

$$\text{定常クリープ} \quad \dot{\epsilon}^S = M^S \cdot \sigma \cdot \dot{\Phi}$$

$$\text{遷移クリープ} \quad \dot{\epsilon}^T = M^T \cdot (\sigma - \epsilon^T \cdot E^T) \cdot \dot{\Phi}$$

$$\text{全ひずみ} \quad \varepsilon = \varepsilon^E + \varepsilon^S + \varepsilon^T + \varepsilon^{Th} + \varepsilon^I$$

ここで、

- $\dot{\Phi}$  : 高速中性子照射量の増分
- $\varepsilon^E$  : 弾性ひずみ
- $\varepsilon^S$  : 照射による定常クリープひずみ
- $\dot{\varepsilon}^S$  : 照射による定常クリープひずみ速度
- $\varepsilon^T$  : 照射による遷移クリープひずみ
- $\dot{\varepsilon}^T$  : 照射による遷移クリープひずみ速度
- $\varepsilon^{Th}$  : 熱ひずみ
- $\varepsilon^I$  : 照射ひずみ
- $\sigma$  : 応力
- $E^E$  : 弾性率 (線形)
- $M^S$  : 定常クリープ係数
- $E^T$  : 遷移クリープの弾性率
- $M^T$  : 遷移クリープ係数

なお、ここで示した各ひずみは、直接応力の発生をもたらすひずみを表す。例えば、照射ひずみ ( $\varepsilon^I$ ) は、黒鉛ブロック内に不均一の照射寸法変化が生じた場合に、その寸法変化の差に起因して生じるひずみを表し、黒鉛ブロックが一樣に収縮した場合は照射ひずみは零となる。

このモデルを用いて、第2.2.2図(b)に示すステップ状の応力が照射下で作用した場合の機械的ひずみ応答は第2.2.2図(c)のようになる。

#### ハ) 応力解析フローチャート

炉心黒鉛構造物に対する、通常時 (長期荷重) と異常時 (地震を含む短期荷重) の応力解析フローチャートを第2.2.3図に示す。

#### ニ) 応力解析手順

##### 1) 長期荷重

通常運転時の長期荷重に対する応力解析は、第2.2.3図の通常時の応力の箇所で示すように行う。通常運転時の応力 ( $\sigma_N$ ) の算出に当たっては、以下のひずみを考慮する。

$$\sigma_N = E^E (\varepsilon^E + \varepsilon^S + \varepsilon^T + \varepsilon^{Th} + \varepsilon^I)$$

ここで、照射による遷移及び定常クリープひずみ並びに照射ひずみは時間 (照射量) の関数であるので、熱・照射荷重を求めるための照射寸法変化及び照射クリープを考慮した解析は時間を追って計算する。

##### 2) 短期荷重

短期荷重は、第2.2.3図に示すように異常時熱荷重 (熱過渡) と地震荷重に大別される。

熱過渡: 異常時熱荷重による応力 ( $\sigma_T$ ) は、以下に示すように、通常運転時の応力を算出する際考慮していた通常運転時の熱ひずみ ( $\varepsilon^{Th}$ ) の代わりに、異常時の熱ひずみ ( $\varepsilon^{Th'}$ ) を考慮する。

$$\sigma_T = E^E (\varepsilon^T + \varepsilon^S + \varepsilon^I + \varepsilon^{Th'} + \varepsilon^E)$$

ここで、 $\varepsilon^{Th'}$  : 異常時の熱ひずみ

具体的には、 $\varepsilon^{Th} = 0$  として、通常運転時の応力計算と別個に異常時の熱ひずみ ( $\varepsilon^{Th'}$ ) を求めて、加算する。

地震 : ①通常運転時における地震

地震時原子炉停止による異常時熱荷重 (異常時の熱ひずみ  $\varepsilon^{Th'}$ ) は、原子炉停止後十分時間が経過した後最大になるため、地震時の応力 ( $\sigma_s$ ) は、以下に示すように通常運転時の応力に地震応力を加算する。

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E^E (\varepsilon^T + \varepsilon^S + \varepsilon^I + \varepsilon^{Th} + \varepsilon^E + \varepsilon^{E'}) \\ &= \sigma_N + E^E \cdot \varepsilon^{E'}\end{aligned}$$

ここで、 $\varepsilon^{E'}$  : 地震荷重によるひずみ

$\sigma_N$  : 通常運転時の応力

②熱過渡時における地震

短期の熱過渡異常と地震を組み合わせた場合の、地震時の応力 ( $\sigma_s$ ) は、以下に示すように熱過渡時の応力に地震応力を加算して求める。

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E^E (\varepsilon^T + \varepsilon^S + \varepsilon^I + \varepsilon^{Th'} + \varepsilon^E + \varepsilon^{E'}) \\ &= \sigma_T + E^E \cdot \varepsilon^{E'}\end{aligned}$$

(2) 酸化に対する考慮

原子炉の通常運転時には、冷却材中の不純物と黒鉛材料との間に酸化反応が生じる可能性があるため、黒鉛構造物の強度評価には、酸化による疲れ強度と基準強さの減少及び寸法減少 (減肉) を考慮する。更に、水侵入及び空気侵入事故時においては、炉心の著しい崩壊を防ぐとともに、炉心の冷却が可能であることが要求される。

炉心黒鉛構造物の設計としては、水侵入及び空気侵入事故時の酸化を考慮しても、崩壊熱が除去可能な形状及び臨界未満の状態を維持するに十分な強度を有することが必要である。具体的には、燃料が黒鉛ブロックから脱落しないように設計する。これは、高温ガス炉の場合、燃料が黒鉛ブロック内に留まっていれば臨界未満の状態は維持でき、炉容器冷却系等により燃料の冷却が可能であるためである。

イ. 項において、寸法減少として酸化効果を考慮するのが適しているものは、1次応力を評価する際荷重を支持する断面積及び寸法の大小が重要となる黒鉛構造物 (例えば、黒鉛スリーブの底板) である。また、ロ. 項においては、黒鉛酸化解析で求まる酸化率分布に基づいて、酸化率が12%以上の部分は強度部材として期待せず、酸化率が12%以下の部分に対してのみ酸化による強度変化の設計用データを用いて酸化効果を考慮する。これは、主にピーク応力等の局所的な箇所での応力評価の際に適用する。さらに、疲れ評価においては、疲れ評価する箇所での酸化後の基準強さに基づき疲れ曲線

を補正することで酸化効果を考慮する。これは、第 2.2.4 図に示す<sup>(4)</sup>のように酸化後の強度減少に基づき疲れ強度を評価すると未酸化材のものと一致することから定めたものである。

## 2. 3 構造の規格

### 2. 3.1 膜応力、(膜+曲げ) 応力及び全応力の制限

一般的な応力制限に対しては、金属材料では最大せん断応力説を技術基準に採用しており、最大せん断応力の2倍をもって「応力強さ」と定義(応力強さが降伏点に等しくなったとき、材料に降伏現象が生じる。)し、この応力強さをを用いて応力制限を行っている。一方、黒鉛材料は第 2.3.1 図<sup>(5)(6)</sup>に示すような破壊挙動を示すため、引張応力が支配的な領域では最大主応力説に基づき、また圧縮応力が支配的な領域では実験データに基づき、最大主応力を修正した破壊基準を採用しており、黒鉛材料の単軸引張強さ及び圧縮強さに基づいて「基準強さ」を定義し、この基準強さをを用いて応力制限を行う。

黒鉛材料の応力制限については、我が国で実績のある金属材料の安全率を参考に、十分安全側に定める。ここで、応力制限は安全率と基準強さの設定に関係してくるので、基準強さを金属材料の応力強さの定め方と同等又はそれ以上の保守性をもたせて定める。次に基本的な膜応力に対する黒鉛構造物の応力制限について、安全率を金属材料の炉心支持構造物と同程度となるように定める。更に、これを基に応力勾配下での応力制限〔(膜+曲げ) 応力及び全応力〕を定める。具体的には、曲げ強さが単軸引張強さの約1.5倍であることから、(膜+曲げ) 応力の制限値を膜応力の制限値の1.5倍又はそれ以下に、局所的な高応力を含む全応力の制限を切欠き感度試験データを参考に基準強さ程度に定める。炉心黒鉛構造物に適用する各運転状態に対する応力制限を第 2.3.2 図に示す。

黒鉛材料では、応力の制限において2次応力を1次応力と同等に扱う。その考え方は次のとおりである。金属材料の場合、2次応力は大きな塑性変形により応力緩和されるので、1次応力と区別して扱っている。これに対して極めて小さな変形しか生じない黒鉛材料は、破断ひずみが小さいため局所的なひずみが僅かしか吸収できないので、黒鉛材料では2次応力を1次応力と同等に扱う。また、局所的な高応力を含む全応力は、それが繰返されると疲れ破壊の原因になるとともに長時間負荷されると静的疲れ破壊の原因となるため、両者の破壊を防止するよう全応力を制限している。

### 2. 3.2 疲れ制限

黒鉛材料の疲れ破壊を防止するために、金属材料と同様に全応力に振幅に対して疲れ制限をする必要がある。金属材料では、運転状態Ⅲ及びⅣの疲れ評価を不用とし、運転状態Ⅰ及びⅡに対して疲れ制限を設けているが、黒鉛材料では繰返し数が少なくても全応力による亀裂伝播により疲れ破壊挙動を示すため、運転状態Ⅰ及びⅡのみならず、Ⅰ～Ⅲ並びにⅠ～Ⅳの全応力に

対しても疲れ制限を設ける。

金属材料では、運転状態Ⅰ及びⅡでの疲れ制限として、疲れ累積係数を1以下としている。黒鉛材料では、運転状態Ⅰ～Ⅳでは金属材料の運転状態Ⅰ及びⅡと同様に疲れ累積係数を1以下とするが、運転状態Ⅰ及びⅡ並びにⅠ～Ⅲでは、疲れ累積係数を米国における炉心支持黒鉛構造物の設計方針に関する検討状況を踏まえ、それぞれ1/3並びに2/3以下とする。

なお、黒鉛材料の設計疲れ曲線は、繰り返し荷重が負荷された場合の基準強さに相当するので、材料試験時のサンプリングによる誤差を考慮して、非破壊確率が、99%となるように統計的処理したものを基準強さと整合させて定める。更に、黒鉛材料の疲れ曲線は、繰り返し負荷される応力形態により異なるので、応力比を関数として定める。炉心黒鉛構造物に適用する各運転状態に対する疲れ制限を第2.3.2図に示す。

### 2. 3.3 特別な応力制限

純せん断荷重のみ加わる構造物に対しては、一般的な応力制限に加えて特別な応力制限として、純せん断応力の制限を以下のように設ける。

一般に黒鉛材料のせん断強さは、引張強さよりも大きいことから、純せん断応力の制限は、引張の基準強さにより設定する。各運転状態において、この基準引張強さに対する断面平均の純せん断応力の安全率は、膜応力に対する安全率と同じとする。

### 2. 3.4 その他の制限

黒鉛材料の強度は、強度部材の寸法が粒径の大きさに近づくに従い、著しく低下する。このため、粒径効果を妥当と考えられる方法で考慮する場合以外は、第2.3.3図<sup>(7)</sup>に示すように、強度部材の最小寸法が酸化効果を寸法減少として考慮した後でも最大粒子直径の10倍以上となるようにすること。

### 2. 3.5 荷重の種類

本節は、炉心黒鉛構造物の荷重の種類について規定したものである。

- 1) ②の他の構造物重量は、対象とする炉心黒鉛構造物が支持している静的垂直荷重である。
- 2) ③の地震荷重は、地震動により生じる炉心構造物の動的垂直荷重及び動的水平荷重である。炉心黒鉛構造物の構造設計で考慮する地震動は、設計用最強地震動 ( $S_1$ ) 及び設計用限界地震動 ( $S_2$ ) である。
- 3) ④の熱荷重は、炉心黒鉛構造物の部材内の熱応力である。
- 4) ⑤の流体振動は、冷却材の流れに起因した炉心黒鉛構造物の振動による動的荷重である。
- 5) ⑥の照射ひずみは、高速中性子照射を受けた黒鉛材料内のひずみにより発生する応力である。
- 6) ⑦の関連構造物との摩擦相互作用は、隣接した構造物との熱膨張差によ

り摺動した時に生じる摩擦力である。

## 2. 3.6 運転状態と基準地震動の組合せ及び対応する許容応力

耐震評価を行う際に必要となる地震荷重と他の荷重との組合せ及び対応する許容応力は、使用材料に無関係に運転状態及び地震の発生頻度から定められるものであるから、軽水炉に通常用いられているものと同様の考え方を採用する。

第 2.1.1 表 IG-110黒鉛特性値 (標準値)

(未照射材)

|                             |                                       |       |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------|
| かさ密度**                      | (g*/cm <sup>3</sup> )                 | 1.78  |
| 平均引張強さ**                    | (kg/cm <sup>2</sup> )                 | 258   |
| 平均圧縮強さ**                    | (kg/cm <sup>2</sup> )                 | 784   |
| 縦弾性係数**                     | (10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | 0.81  |
| (± $\frac{1}{3}$ Su 勾配) *** |                                       |       |
| 平均熱膨張係数<br>(20~400°C)       | (10 <sup>-6</sup> /°C)                | 4.06  |
| 熱伝導率<br>(400°C)             | (cal/cm·s·°C)                         | 0.19  |
| 灰分****                      | (ppm)                                 | 100以下 |
| 粒径                          | (μm)                                  | 20    |

\*: 質量の単位

\*\* : 室温での値

\*\*\* : 応力-ひずみ曲線における基準引張強さ及び基準圧縮強さの  
1/3の点を結んだ直線の勾配

\*\*\*\* : 耐腐食性を必要としない部材には適用しない。



第 2.1.2 表 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目と JIS (鉄鋼・非鉄) の材料規格との比較 (1/5)

| 検査項目                | J I S (鉄鋼・非鉄)  | 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目           | 備 考   |
|---------------------|--|-----------------------------|---|
| 1. 製造方法             | 鋼塊の種類(リムド、キルド鋼等)から圧延・鍛造の鍛錬比及び熱処理条件等の指定がある。検査としては、必要に応じて成績表を提出する。                                 | 原料の種類・粒径の範囲                 | 銘柄を保証するための検査項目。<br>黒鉛業界では熱処理条件等の製造条件が、ノウハウとなつてゐるため検査項目としていない。但し、黒鉛の銘柄は、原料の種類並びに熱処理条件ではほぼ決定され、且つ、熱処理条件が著しく異なつた場合には一般にかさ密度、固有抵抗、熱膨張係数、灰分等が異なつてくるので、これらを製造方法の検査の代用として選定してゐる。 |
| 2. 化学分析             | 通常は、溶鋼分析であるが、注文者の要求があるときは、製品分析を行うことができる。   | 灰分                          | 銘柄及び不純物検査として灰分の測定を行う。不純物量と酸化量とは相関係数があるため、灰分の検査で酸化特性を保証する。   |
| 3. 機械的特性<br>(1)引張試験 | 材料規格によっては、注文者の指定があるとき機械的性質に関する試験及び検査の一部又は全部を省略することができるものもある。<br>(a)引張強さ<br>(b)降伏点・耐力<br>(c)伸び・絞り | (a)引張強さ<br>(b)---<br>(c)--- | (a)黒鉛の基準引張強さは非破壊確率99%、信頼度95%で定めてゐる。<br>(b)黒鉛は降伏現象は示さないもので検査項目としていない。<br>(c)黒鉛は脆性材料であり、金属でいう伸び・絞りは起こさないもので検査項目としていない。  |

第 2.1.2 表 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目と JIS (鉄鋼・非鉄) の材料規格との比較 (2/5)

| 検査項目                | J I S (鉄鋼・非鉄)   | 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目                                | 備 考  |
|---------------------|---|--|--|
| 3. 機械的特性<br>(1)引張試験 | 以下、材料規格によっては注文者の必要に応じて指定できるものもある。<br>(d)引張クリーブ試験<br><br>(e)引張クリーブ破断強さ<br>(f)引張リラクセーション試験<br>(g)高温引張試験 | (d)-----<br><br>(e)-----<br>(f)-----<br>(g)----- | (d)黒鉛は2000℃位から熱クリーブが有意になる。HTTRの仕様はそれより十分低い温度であるため検査項目としていない。<br>(e)同上<br>(f)同上<br>(g)黒鉛は高温になれば強度は上がるが、設計では保守的に室温での値を使用している。よって、検査項目としていない。 |
| (2)圧縮試験             | -----   | 圧縮強さ   | 黒鉛の基準圧縮強さは非破壊確率99%、信頼度95%で定めている。<br>また、延性に富んだ金属材料は圧縮試験に適さないため、一般には行われていない。   |
| (3)曲げ試験             | 材料規格によっては指定されているものもある。<br>(a)曲げ強さ (鋳鉄)<br>(b)曲げ性  | (a)曲げ強さ<br>(b)-----                              | 黒鉛構造設計は、最大主応力で行っているため曲げ強さは銘柄を保証するための検査項目としている。   |
| (4)衝撃試験             | 材料規格によっては指定されているものもある。また、注文者の必要に応じて指定できるものもある。  | -----  | 延性材料の脆性破壊を把握するために測定するものであり、脆性材料である黒鉛には必要ない。また、応力制限では1次応力と2次応力を区別していいなく、一回限りのどれ一つの応力も制限を設けている。  |

第 2.1.2 表 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目と JIS (鉄鋼・非鉄) の材料規格との比較 (3/5)

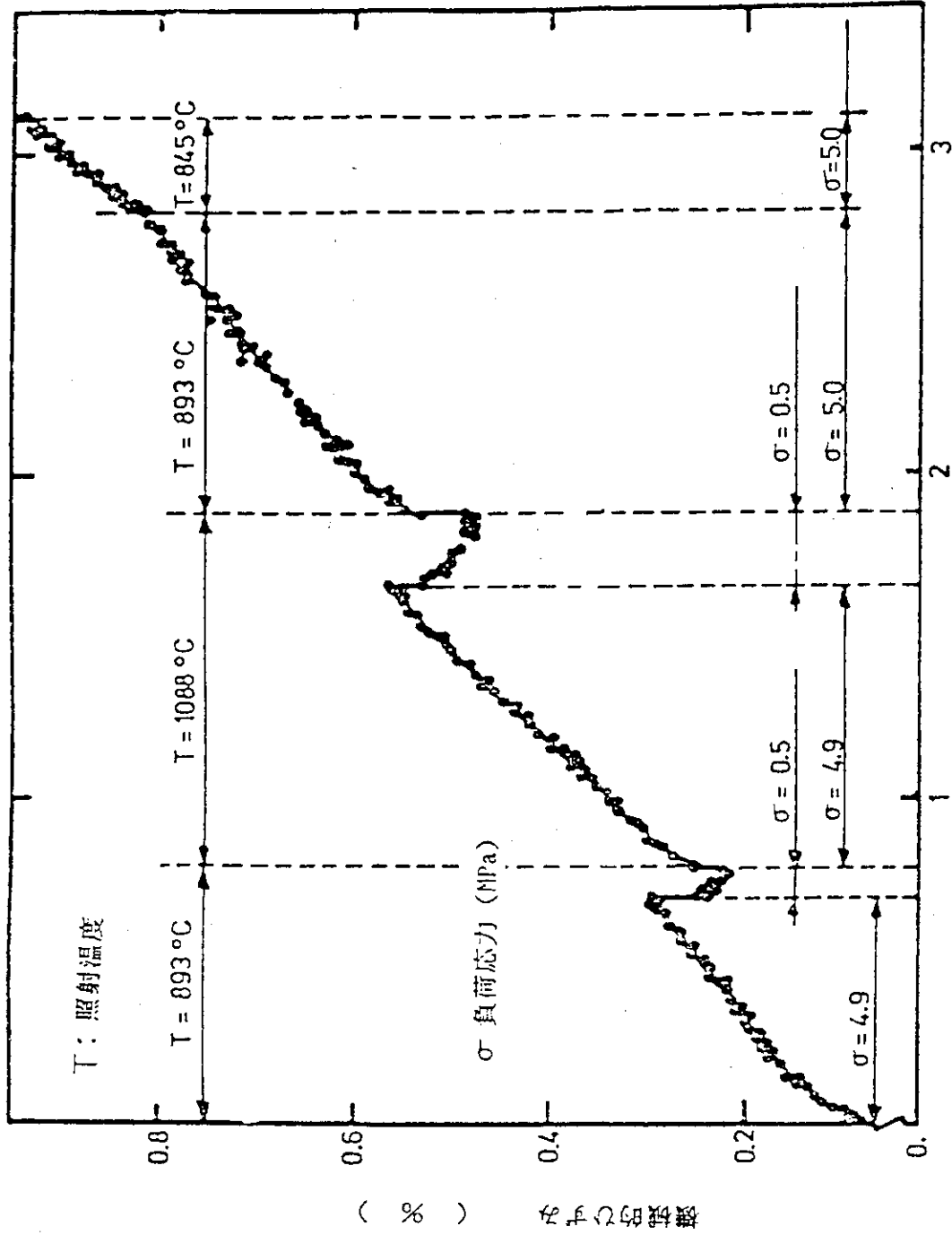
| 検査項目                 | J I S (鉄鋼・非鉄)                                  | 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目 | 備 考  |
|----------------------|--|-------------------|--|
| (5)硬さ試験              | 材料規格によっては指定されているものもある。また、注文者の必要に応じて指定できるものもある。 | -----             | 金属では硬さを組織変化の確認及び他の機械的特性を推定するために必要に応じて測定しているが、黒鉛では他の機械的特性との相関が必ずしもあてはまらない。但し、銘柄を示す特性の一つでしかない。他の銘柄は他の検査により十分保証されているため検査項目としていない。 |
| 4. 物理的特性<br>(1)熱膨張係数 | 物理的性質の試験は受渡し当事者間の協定による。<br>-----               | 熱膨張係数             | 銘柄を保証するための検査項目。  |
| (2)異方比               | -----  | 異方比               | 銘柄を保証するための検査項目。成形方法(ラバープレス、押し出し、型込め等)により異方比が異なる。検査としては、各方向の特性(熱膨張係数又は固有抵抗)の比で表す。   |
| (3)固有抵抗              | 材料規格(非鉄)によっては体積抵抗率及び導電率検査を行うものもある。             | 固有抵抗              | 銘柄を保証するための検査項目。  |

第 2.1.2 表 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目と JIS (鉄鋼・非鉄) の材料規格との比較 (4/5)

| 検査項目    | J I S (鉄鋼・非鉄)   | 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目 | 備 考   |
|---------|---|-------------------|---|
| 5. 疲れ試験 | 材料規格によっては、注文者の必要に応じて指定できるものもある。<br>(a) 回転曲げ疲れ試験<br>(b) 平面曲げ疲れ試験 | -----             | J I S では高サイクル疲れを考慮して、回転曲げ・平面曲げ疲れ試験を規格化しているが、引張圧縮疲れ試験は規格化されていない。H T T R の仕様は低サイクル疲れ領域も必要であるため、それに適した引張圧縮疲れ試験を採用し、設計曲線を定めてい<br>る。但し、銘柄検査で銘柄が保証されれば設計曲線と同じとし、検査項目としていない。 |
| 6. 密度   | 重量  | かさ密度              | 銘柄を保証するための検査項目。<br>金属では、密度は材質で決まる。且つ、素材寸法の規格もあるため、素材重量が規定されている。しかし、黒鉛は銘柄毎にかさ密度が異なる。   |
| 組織検査    | 材料規格によっては、注文者の必要に応じて指定できるものもある。検査規格としては、非金属介在物、結晶粒度、マクロ組織等がある。  | 光学顕微鏡による組織検査      | 銘柄を保証するための検査項目。   |

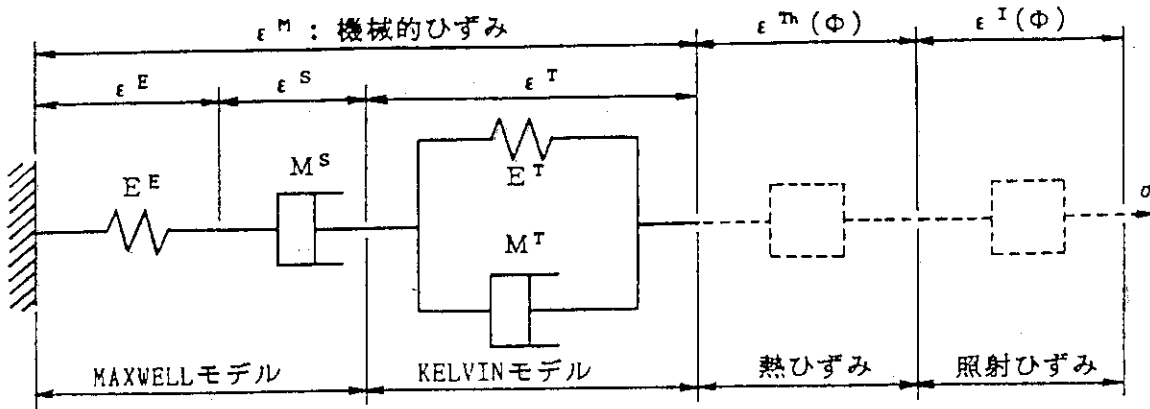
第 2.1.2 表 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目と JIS (鉄鋼・非鉄) の材料規格との比較 (5/5)

| 検査項目   | J I S (鉄鋼・非鉄)  | 黒鉛構造設計指針で規定した検査項目  | 備 考   |
|--------|--|--|---|
| 非破壊検査  | 材料規格によっては、注文者の必要に応じて指定できるものもある。<br>(a)超音波探傷試験<br>(b)渦流探傷試験<br>(c)放射線透過試験<br>(d)浸透試験<br>(e)磁粉探傷試験<br>等。 | (a)超音波探傷試験<br>(b)渦流探傷試験<br>(c)放射線透過試験 (必要に応じて)<br>(d)-----<br>(e)----- | 黒鉛は浸透試験は汚染を防ぐため磁粉探傷試験は磁性体でないため行わない。               |
| 腐食耐食試験 | 材料規格によっては、注文者の必要に応じて指定できるものもある。検査としては、溶解、電気化学、高温酸化、高温腐食、耐侯性試験等がある。                                     | -----  | 高温酸化については鉛柄 (特に灰分) が保証されれば、その挙動は同じと考え、検査項目としていない。 |

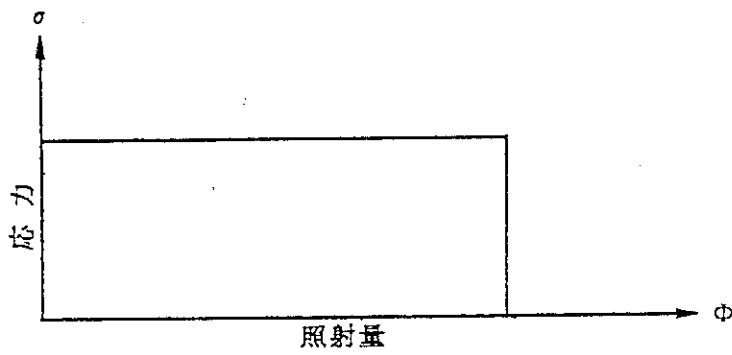


高速中性子照射量 (10<sup>21</sup> n/cm<sup>2</sup> DNE)

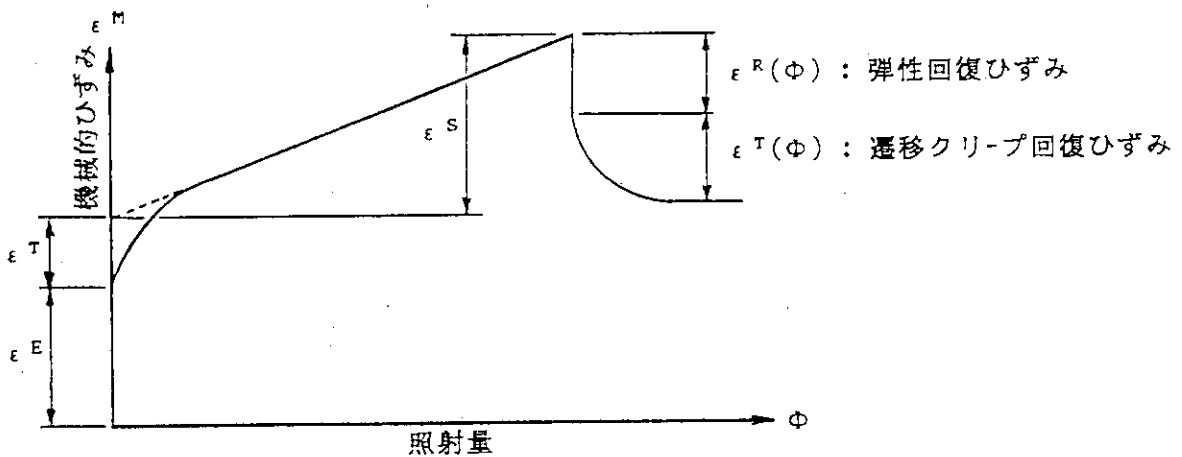
第 2.2.1 図 黒鉛の照射試験による照射クリープひずみの実測例<sup>(3)</sup>



(a) モデル



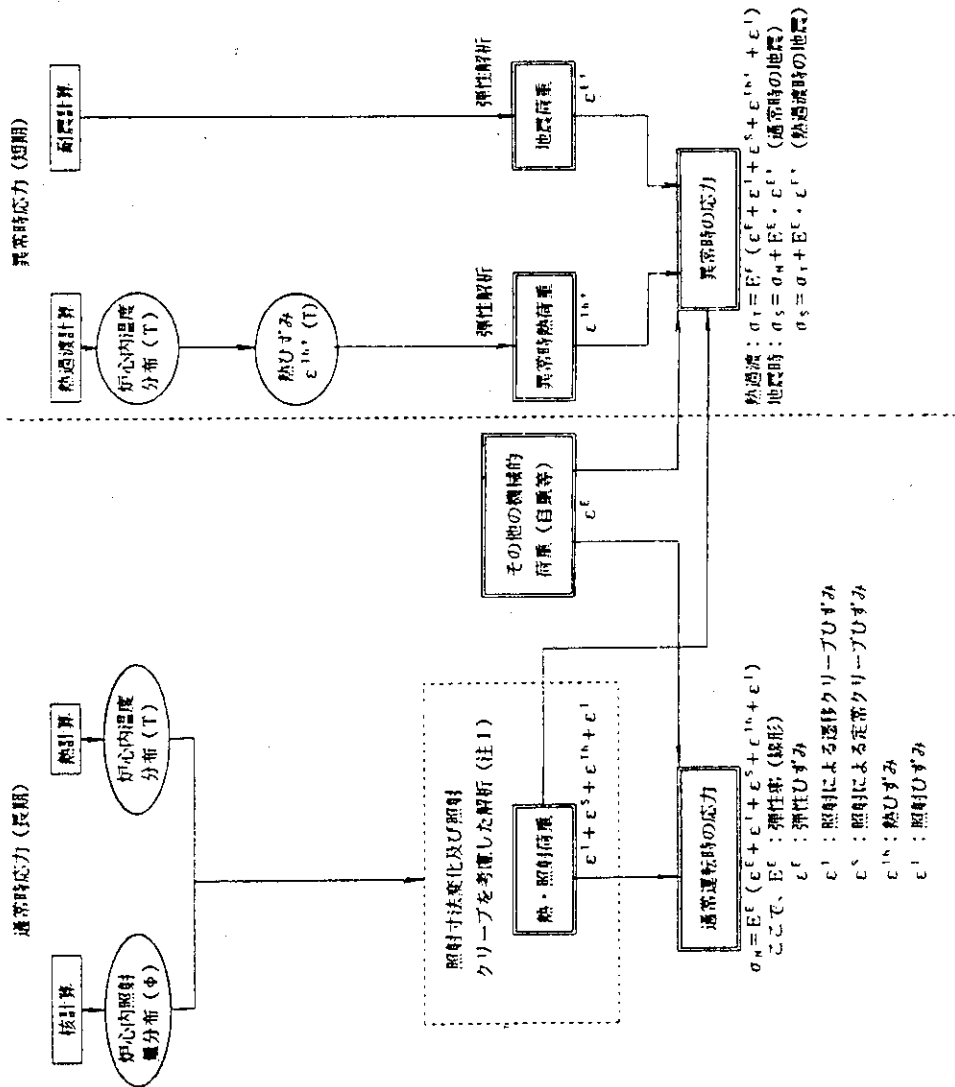
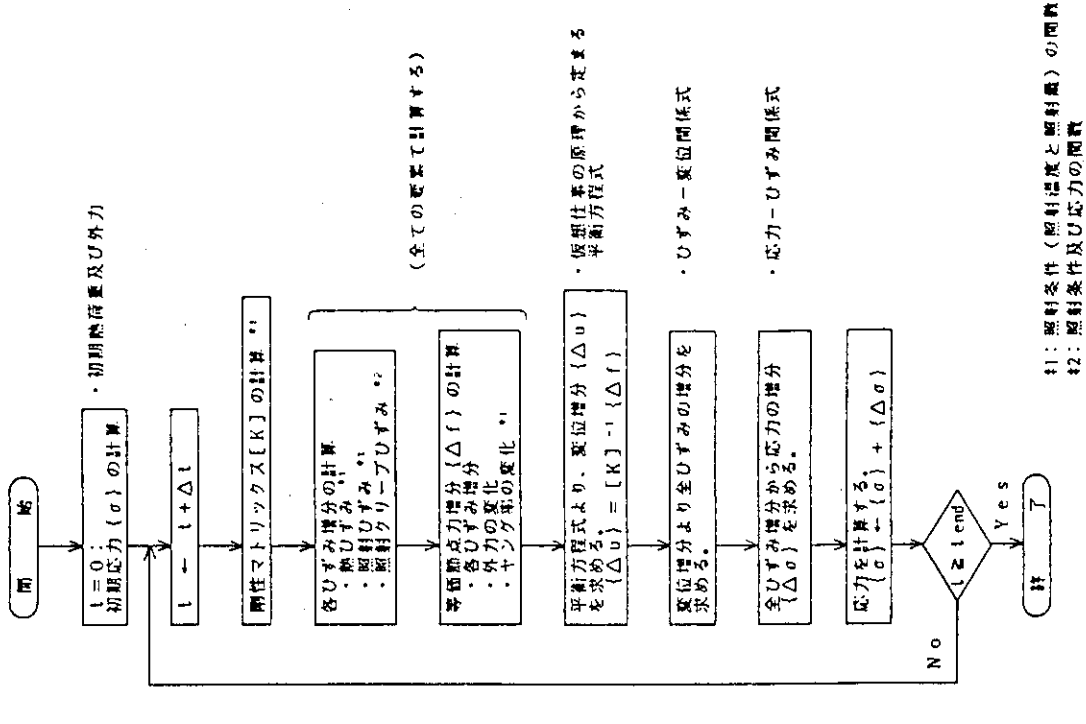
(b) 入カステップ関数



(c) ひずみ応答

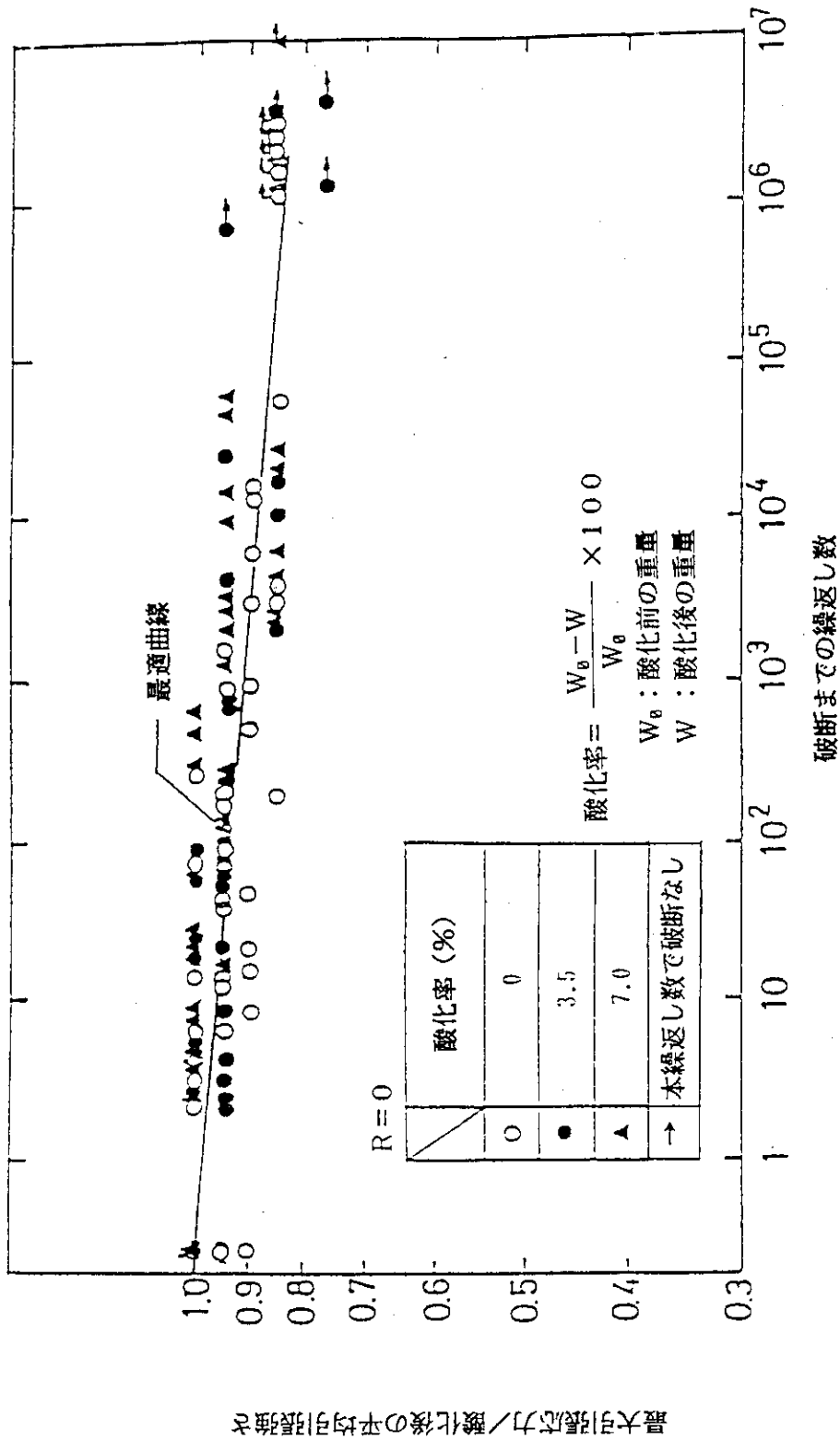
第 2.2.2 図 Maxwell-Kelvin モデル

(注1) 照射寸法変化及び照射クリープを考慮した解析の流れ

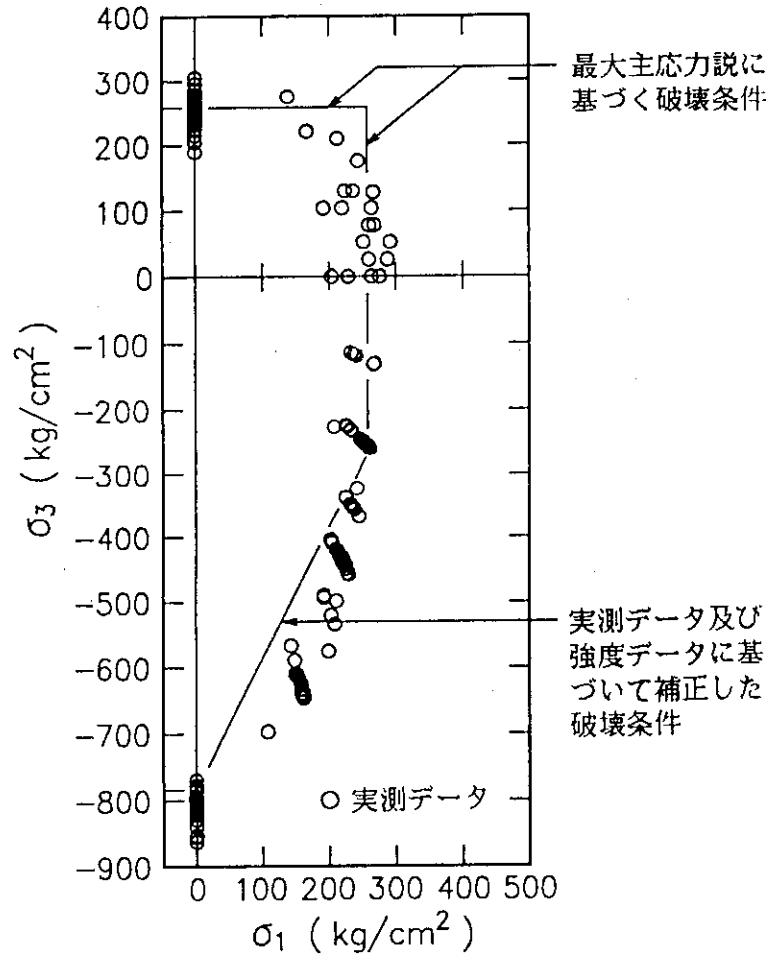


第 2.2.3 図 炉心黒鉛構造物の応力解析フローチャート





第 2.2.4 図 IG-110 黒鉛の酸化材の疲れ試験結果 (室温)<sup>(4)</sup>



第 2.3.1 図 IG-110 黒鉛の 2 軸破壊条件<sup>(5,6)</sup>  
 ( $\sigma_1, \sigma_2$  は 2 軸応力場の主応力成分)

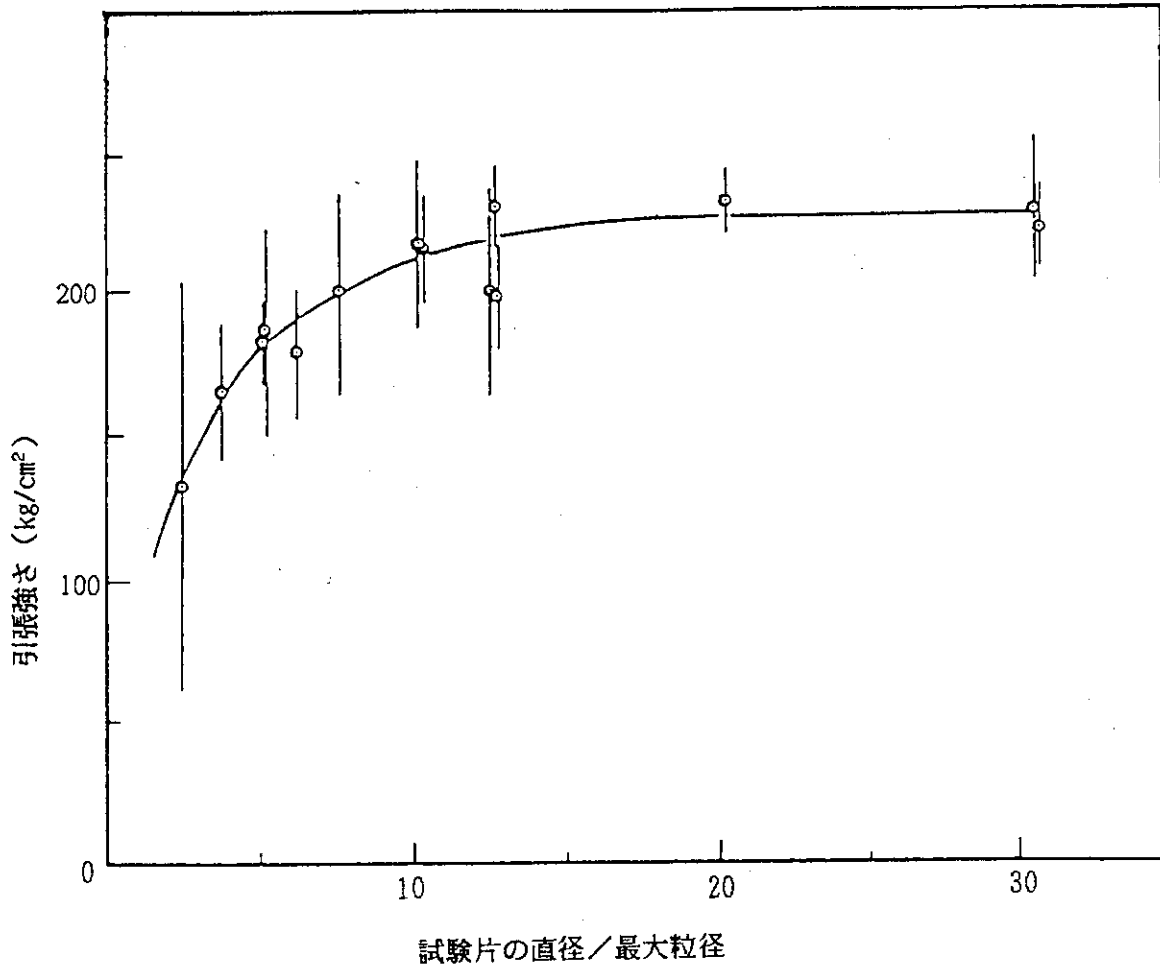
| 応力の種類<br>運転状態 | 1次+2次応力   |   |   |
|---------------|---|---|---|
|               | 膜応力<br>(P <sub>m</sub> , Q <sub>m</sub> )   | ポイント応力<br>(P <sub>p</sub> , Q <sub>p</sub> )  | 全応力   |
| I 及び II       | $\begin{array}{c} \boxed{P_m+Q_m} \\ \circlearrowleft S_m \\ S_m = \frac{1}{3} S_u \end{array}$ | $\begin{array}{c} \boxed{P_p+Q_p} \\ \circlearrowleft S_p \\ S_p = \frac{1}{2} S_u \end{array}$ | $\begin{array}{c} \boxed{P_p+Q_p+F} \\ \circlearrowleft S_f \\ \text{及び} \\ \circlearrowleft U_s \\ S_f = 0.9 S_u \quad \text{注1)} \\ U_s \leq \frac{1}{3} \end{array}$ |
| III*          | $\begin{array}{c} \circlearrowleft 1.5 S_m \\ 1.5 S_m = \frac{1}{2} S_u \end{array}$            | $\begin{array}{c} \circlearrowleft 1.5 S_p \\ 1.5 S_p = \frac{3}{4} S_u \end{array}$            | $\begin{array}{c} \circlearrowleft S_f \\ \text{及び} \\ \circlearrowleft U_s \\ S_f = 0.9 S_u \quad \text{注2)} \\ U_s \leq \frac{2}{3} \end{array}$                      |
| IV*           | $\begin{array}{c} \circlearrowleft 2 S_m \\ 2 S_m = \frac{2}{3} S_u \end{array}$                | $\begin{array}{c} \circlearrowleft 1.8 S_p \\ 1.8 S_p = \frac{9}{10} S_u \end{array}$           | $\begin{array}{c} \circlearrowleft \frac{1}{0.9} S_f \\ \text{及び} \\ \circlearrowleft U_s \\ \frac{1}{0.9} S_f = S_u \quad \text{注3)} \\ U_s \leq 1.0 \end{array}$      |

P<sub>m</sub>: 1次膜応力  
 Q<sub>m</sub>: 2次膜応力  
 P<sub>p</sub>: 1次ポイント応力  
 (1次膜応力+1次曲げ応力)  
 Q<sub>p</sub>: 2次ポイント応力  
 (2次膜応力+2次曲げ応力)  
 F: ビーク応力  
 U<sub>s</sub>: 疲れ累積係数  
 S<sub>m</sub>: 許容膜応力限界  
 S<sub>p</sub>: 許容ポイント応力限界  
 S<sub>f</sub>: 許容全応力限界  
 S<sub>u</sub>: 基準強さ

\* 構造健全性の評価は不要であるが、制御棒及び停止系制御要素のそう入機能が確保されること及び崩壊熱除去可能な形状が維持されることが要求される。ここで、運転状態III又はIVにおいて、本図の制限を満足することは、これらの要求を確認する方法の1つである。

- 注1) 運転状態 I 及び II を含む疲れ累積係数の制限
- 注2) 運転状態 I、II 及び III を含む疲れ累積係数の制限
- 注3) 運転状態 I、II、III 及び IV を含む疲れ累積係数の制限

第 2.3.2 図 炉心黒鉛構造物に適用する各運転状態に対する応力及び疲れ制限



第 2.3.3 図 黒鉛材料の引張強さに及ぼす試験片の寸法効果<sup>(7)</sup>  
 (IMI-24黒鉛；原子炉級等方性黒鉛、最大粒径約 1 mm)

### 3. 結 言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の健全性評価には、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」を用いることとしている。本方針をHTTRの燃料体等の炉心黒鉛構造物の健全性評価に適用するに際しては、その内容を明確にしておく必要がある。そのため、「炉心黒鉛構造設計方針」をHTTRの炉心黒鉛構造物の設計を念頭に具体的に解説した。

### 謝 辞

本報をまとめるにあたり、適切な御助言を頂いた高温工学部高温材料強度研究室の荒井長利氏に深く感謝致します。また、実験データを御提示頂いた高温工学部の高温材料強度研究室及び燃料材料工学部の界面工学研究室の関係各位並びに終始御指導、御協力頂いた高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室の各位に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- (1) 斎藤伸三他、”高温工学試験研究炉の設計と研究開発”、日本原子力学会誌、Vol.32, No.9, 847 (1990).
- (2) 高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006 (1989).
- (3) Jouquet, G. et al., "Continuously Measured Irradiation Creep Strain of Two Reactor Graphites", High Temperatures - High Pressures, 9, 151, (1977).
- (4) 石山他、日本原子力学会誌、Vol.29, No.7, 651 (1987).
- (5) 西山他、”微粒等方性黒鉛の巨視的多軸破壊基準”、日本原子力学会秋の大会 (1989).
- (6) 衛藤他、”高温ガス炉用黒鉛製管状試験片の内圧破壊試験”、日本学術振興会炭素材料第117委員会(1988).
- (7) Brocklehurst, J.E., "Fracture in Polycrystalline Graphite", TRG REPORT 2731(s) (1975).

### 3. 結 言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の健全性評価には、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」を用いることとしている。本方針をHTTRの燃料体等の炉心黒鉛構造物の健全性評価に適用するに際しては、その内容を明確にしておく必要がある。そのため、「炉心黒鉛構造設計方針」をHTTRの炉心黒鉛構造物の設計を念頭に具体的に解説した。

### 謝 辞

本報をまとめるにあたり、適切な御助言を頂いた高温工学部高温材料強度研究室の荒井長利氏に深く感謝致します。また、実験データを御提示頂いた高温工学部の高温材料強度研究室及び燃料材料工学部の界面工学研究室の関係各位並びに終始御指導、御協力頂いた高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室の各位に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- (1) 斎藤伸三他、”高温工学試験研究炉の設計と研究開発”、日本原子力学会誌、Vol.32, No.9, 847 (1990).
- (2) 高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006 (1989).
- (3) Jouquet, G. et al., "Continuously Measured Irradiation Creep Strain of Two Reactor Graphites", High Temperatures - High Pressures, 9, 151, (1977).
- (4) 石山他、日本原子力学会誌、Vol.29, No.7, 651 (1987).
- (5) 西山他、”微粒等方性黒鉛の巨視的多軸破壊基準”、日本原子力学会秋の大会 (1989).
- (6) 衛藤他、”高温ガス炉用黒鉛製管状試験片の内圧破壊試験”、日本学術振興会炭素材料第117委員会(1988).
- (7) Brocklehurst, J.E., "Fracture in Polycrystalline Graphite", TRG REPORT 2731(s) (1975).

### 3. 結 言

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心黒鉛構造物の健全性評価には、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」を用いることとしている。本方針をHTTRの燃料体等の炉心黒鉛構造物の健全性評価に適用するに際しては、その内容を明確にしておく必要がある。そのため、「炉心黒鉛構造設計方針」をHTTRの炉心黒鉛構造物の設計を念頭に具体的に解説した。

### 謝 辞

本報をまとめるにあたり、適切な御助言を頂いた高温工学部高温材料強度研究室の荒井長利氏に深く感謝致します。また、実験データを御提示頂いた高温工学部の高温材料強度研究室及び燃料材料工学部の界面工学研究室の関係各位並びに終始御指導、御協力頂いた高温工学試験研究炉開発部HTTR原子炉開発室の各位に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- (1) 斎藤伸三他、”高温工学試験研究炉の設計と研究開発”、日本原子力学会誌、Vol.32, No.9, 847 (1990)。
- (2) 高温工学試験研究炉黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006 (1989)。
- (3) Jouquet, G. et al., "Continuously Measured Irradiation Creep Strain of Two Reactor Graphites", High Temperatures - High Pressures, 9, 151, (1977)。
- (4) 石山他、日本原子力学会誌、Vol.29, No.7, 651 (1987)。
- (5) 西山他、”微粒等方性黒鉛の巨視的多軸破壊基準”、日本原子力学会秋の大会 (1989)。
- (6) 衛藤他、”高温ガス炉用黒鉛製管状試験片の内圧破壊試験”、日本学術振興会炭素材料第117委員会(1988)。
- (7) Brocklehurst, J.E., "Fracture in Polycrystalline Graphite", TRG REPORT 2731(s) (1975)。

## 付録 炉心黒鉛構造設計方針

以下に「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針」を示す。

## 1. 序

## 1.1 用語の定義

- (1) 「炉心黒鉛構造物」とは、炉心を構成する黒鉛構造物をいい、原子炉の運転中、一定期間使用後に交換する構造物である。
- (2) 「垂直応力」とは、対象面に対し垂直方向に作用する応力成分をいう。
- (3) 「せん断応力」とは、対象面に対して接線方向に作用する応力成分をいう。
- (4) 「膜応力」とは、断面の垂直応力の平均値に等しい当該断面に垂直な応力成分をいう。
- (5) 「曲げ応力」とは、垂直応力の平均値からの変化成分をいう。
- (6) 「照射応力」とは、中性子照射による寸法変化及びクリープ現象によるひずみに起因する応力をいう。
- (7) 「ポイント応力」とは、(4)及び(5)に定義した膜応力と曲げ応力成分を加算して得られる最大引張、あるいは最大圧縮応力をいい、形状不連続又は応力上昇により生ずる非線形成分を除外した対象面での最大引張、あるいは最大圧縮応力をいう。
- (8) 「1次応力」とは、外力、内力及びモーメントに対して単純な平衡の法則を満足する垂直応力又はせん断応力をいう。
- (9) 「2次応力」とは、隣接部分の拘束又は自己拘束により生ずる垂直応力又はせん断応力をいう。
- (10) 「ピーク応力」とは、応力集中又は局部熱応力及び局部照射応力により、1次応力又は2次応力に付加される応力の増加分をいう。
- (11) 「全応力」とは、膜、曲げ及びピーク応力の総和をいう。
- (12) 「応力サイクル」とは、対象部における全応力が初期値より最大値に達し、更に最小値をとおり初期値に復帰する状態である。
- (13) 「疲れ累積係数」とは、各応力サイクルにおける実際の繰返し回数と最大-最小応力の組に対して設計疲れ曲線から求まる許容繰返し回数との比を全ての応力サイクルについて加えたものをいう。
- (14) 「基準強さ」とは、設計において黒鉛構造物の構造強度を評価する場合に使用する黒鉛材料の基準となる引張強さ又は圧縮強さをいう。
- (15) 「運転状態Ⅰ」とは、原子炉施設の通常運転時の状態をいう。
- (16) 「運転状態Ⅱ」とは、運転状態Ⅰ、運転状態Ⅲ、及び運転状態Ⅳ以外の状態をいう。
- (17) 「運転状態Ⅲ」とは、原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転の停止が緊急に必要とされる状態をいう。



- (18) 「運転状態Ⅳ」とは、原子炉施設の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。
- (19) 「ブロックの軸方向」とは、黒鉛を型込め単軸成形又は押出し成形にて製造した材料では、成形時の加圧方向に平行な方向をいう。等方成形にて製造した等方性材料では、便宜上長手方向に平行な方向と定める。  
「ブロックの径方向」とは、「ブロックの軸方向」に垂直な方向をいう。

## 1.2 適用範囲

本設計方針は、「高温工学試験研究炉」で使用する炉心黒鉛構造物に適用する。高温工学試験研究炉で使用する炉心黒鉛構造物は、燃料体の黒鉛ブロック、黒鉛スリーブ、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック、照射試験用ブロック等である。

## 1.3 使用材料

炉心黒鉛構造物に使用する材料は、原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110相当）とする。なお、使用材料は別途定める「黒鉛検査基準」に適合するものとする。

## 2. 応力評価の方法

### (1) 応力解析の方法

炉心黒鉛構造物の設計は、原則として、照射応力の解析においては照射寸法変化及び照射クリープを考慮した解析、その他の応力解析においては弾性解析による設計とする。

ただし、設計の妥当性が実験等により証明される場合には、その他の方法によっても設計することができる。

### (2) 酸化に対する考慮

酸化された黒鉛構造物の設計は、次のように考慮を払うこと。

#### イ. 寸法減少（減肉）

黒鉛構造物内の酸化率分布において、酸化率が80%を超えた黒鉛部分は、減肉したものとして、機能及び強度の評価を行う。また、最大の酸化率が80%以下の酸化率分布に対して、構造強度評価をする上で寸法減少として酸化効果を考慮することが適しているものについては、構造物内の酸化率分布より求まる全酸化量をそれと等価な腐食厚さに換算した分だけ寸法が減少したものとして取り扱う。

#### ロ. 強度低下

黒鉛構造物内の酸化率分布を考慮して、強度評価を行う。強度と酸化率との関係は、付図1に示すとおりとする。また、疲れ評価においても同様の考慮を払う。

### 3. 構造の規格

炉心黒鉛構造物は運転状態Ⅰ及びⅡで健全であること並びに運転状態Ⅲ及びⅣでは制御棒挿入を阻止しないこと及び崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認すること。運転状態Ⅰ及びⅡで健全であることを示すために、3.1～3.3の制限を満足すること。また、制御棒挿入を阻止しないこと及び崩壊熱除去可能な形状を維持することを確認する方法は幾とおりに考えられるが、その中の1つは、3.1～3.3の運転状態Ⅲ又はⅣの制限を満足することである。

#### 3.1 膜応力、(膜+曲げ) 応力及び全応力の制限

##### 3.1.1 運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣに関する制限

イ. 各々の運転状態において生ずる主応力は次の(1)、(2)及び(3)の制限を満足すること。

ロ. 多軸応力状態の最大及び最小主応力を各々  $\sigma_1$  及び  $\sigma_3$  とする時、 $\sigma_1$  が正、 $\sigma_3$  が負で、かつ  $\sigma_3$  が運転状態別に次の(1)式より定まる応力値 ( $S_j$ ) 以下の場合には、 $\sigma_3$  は次の(2)式の制限を満足すること。

$$S_j = -\alpha_m (S_{uc} - 2\alpha_m S_{ut}) \quad \text{----- (1)}$$

$$\sigma_3 \geq -\alpha_m (S_{uc} - 2\sigma_1) \quad \text{----- (2)}$$

$\alpha_m$  : 運転状態別応力制限値の安全率の逆数 (応力制限値/基準強さ)

$S_{uc}$  : 基準圧縮強さ

$S_{ut}$  : 基準引張強さ

##### (1) 運転状態Ⅰ及びⅡに関する制限

運転状態Ⅰ及びⅡにおいて生ずる主応力は次の1)、2)及び3)の制限を満足すること。

- 1)  $(P_m + Q_m) \leq S_m$
- 2)  $(P_p + Q_p) \leq S_p$
- 3)  $(P_p + Q_p + F) \leq S_f$

$P_m$  : 1次膜応力

$Q_m$  : 2次膜応力

$P_b$  : 1次曲げ応力

$Q_b$  : 2次曲げ応力

$P_p$  : 1次ポイント応力 ( $P_p = P_m + P_b$ )

$Q_p$  : 2次ポイント応力 ( $Q_p = Q_m + Q_b$ )

$F$  : ピーク応力

$S_m$  : (1次+2次) の膜応力に対する許容応力限界で基準強さの3分の1の値

$S_p$  : (1次+2次) の膜及び曲げ応力の和 (ポイント応力) に対する許容応力限界で基準強さの2分の1の値

$S_f$  : 全応力に対する許容応力限界で基準強さの10分の9の値

##### (2) 運転状態Ⅲに関する制限

運転状態Ⅲにおいて生ずる主応力は次の1)、2)及び3)の制限を満足すること。

$$1) \quad (P_m + Q_m) \leq 1.5 S_m$$

$$2) \quad (P_p + Q_p) \leq 1.5 S_p$$

$$3) \quad (P_p + Q_p + F) \leq S_f$$

ここに用いる記号は全て3.1.1(1)に定めるところによる。

### (3) 運転状態Ⅳに関する制限

運転状態Ⅳにおいて生ずる主応力は次の1)、2)及び3)の制限を満足すること。

$$1) \quad (P_m + Q_m) \leq 2.0 S_m$$

$$2) \quad (P_p + Q_p) \leq 1.8 S_p$$

$$3) \quad (P_p + Q_p + F) \leq S_f / 0.9$$

ここに用いる記号は全て3.1.1(1)に定めるところによる。

## 3.2 疲れ制限

### 3.2.1 疲れ評価法

(1) 炉心黒鉛構造物の寿命期間中に、設計上発生すると想定した各種の応力サイクル(i)の繰返し回数nを定める。各種の応力サイクル(i)に対する繰返し回数は運転計画により定める。

(2) 疲れ評価が必要とされる黒鉛構造物の各点において、各種の応力サイクル(i)の最大応力( $\sigma_{max}$ )及び最小応力( $\sigma_{min}$ )を求め、応力比(R)を算出する。

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

(3) 各種の応力サイクル(i)について最大応力( $\sigma_{max}$ )、最小応力( $\sigma_{min}$ )及び応力比( $R_i$ )に対応する許容繰返し回数 $N_1$ 、 $N_2$ 、…、 $N_i$ を設計疲れ曲線より求める。

(4) 各種の応力サイクル(i)に対して、実際の最大繰返し回数( $n_i$ )と許容繰返し回数( $N_i$ )との比(疲れ係数) $U_1$ 、 $U_2$ 、…、 $U_i$ を算出する。

$$U_1 = \frac{n_1}{N_1}, \quad U_2 = \frac{n_2}{N_2}, \quad \dots, \quad U_i = \frac{n_i}{N_i}$$

(5) 疲れ累積係数 $U_s$ を求め、 $U_s$ が各運転状態にわたる制限値を超えないことを確認する。

$$U_s = \sum_i U_i$$

### 3.2.2 運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣに関する制限

各々の運転状態において生ずる主応力は次の(1)、(2)及び(3)の制限を満足すること。

#### (1) 運転状態Ⅰ及びⅡに関する制限

運転状態Ⅰ及びⅡを含めた疲れ累積係数は次の制限を満足すること。

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{3}$$

$n_i$  : 炉心黒鉛構造物の寿命期間中に設計上発生すると想定した各種の応力サイクル(i)の繰返し回数

$N_i$  : 各種応力サイクル(i)の最大応力( $\sigma_{max}$ )と最小応力( $\sigma_{min}$ )の組に対して、設計疲れ曲線より求まる許容繰返し回数

### (2) 運転状態 I、II 及び III に関する制限

運転状態 I、II 及び III を全て含めた疲れ累積係数は次の制限を満足すること。

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{2}{3}$$

ここに用いる記号は3.2.2(1)に定めるところによる。

### (3) 運転状態 I、II、III 及び IV に関する制限

運転状態 I、II、III 及び IV を全て含めた疲れ累積係数は次の制限を満足すること。

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0$$

ここで用いる記号は3.2.2(1)に定めるところによる。

## 3.3 特別な応力制限

規定3.3は運転状態 I、II、III 及び IV に対して適用する。

### (1) 純せん断応力の制限

純せん断荷重を受ける炉心黒鉛構造物は、規定3.1及び3.2に定める応力制限の他に断面平均のせん断応力 $\bar{\tau}$ が次の制限を満足すること。この場合の基準強さは各材料の基準引張強さ $S_{ut}$ と同じとする。

イ. 運転状態 I 及び II

$$\bar{\tau} \leq 0.33 S_{ut}$$

ロ. 運転状態 III

$$\bar{\tau} \leq 0.5 S_{ut}$$

ハ. 運転状態 IV

$$\bar{\tau} \leq \frac{2}{3} S_{ut}$$

## 3.4 その他の制限

規定3.4は炉心黒鉛構造物に対する設計条件として適用するものである。

### (1) 寸法の制限

炉心黒鉛構造物の最小厚さ、及び面と孔並びに孔と孔との最小端面間距離は、原子炉冷却材中の不純物等による酸化効果を考慮した後で、最大粒子直径の10倍以上であること。

ただし、黒鉛材料の強度に影響を及ぼす材料の粒径効果を妥当と考えられる方法で考慮する場合はこの限りではない。

### 3.5 荷重の種類

炉心黒鉛構造物の構造設計において考慮する荷重の種類は、次に定めるとおりとする。

- ①自重
- ②他の構造物重量
- ③地震荷重
- ④熱荷重
- ⑤流体振動
- ⑥照射ひずみ
- ⑦関連構造物との摩擦相互作用

### 3.6 運転状態と基準地震動の組合せ及び対応する許容応力

炉心黒鉛構造物の構造設計におけるプラントの運転状態と基準地震動との組合せ及びその場合の許容応力は以下に定めるとおりとする。

| 組み合わせ<br>すべき運転状態       | 基準地震動 | 設計用最強地震動<br>( $S_1$ )  | 設計用限界地震動<br>( $S_2$ )  |
|------------------------|-------|--|--|
| 運転状態Ⅰ<br>運転状態Ⅱ         |       | 運転状態Ⅲの許容応力   | $S_2$ 地震時に制御棒緊急挿入を阻止しないこと、及び崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認する。 <sup>*5</sup> |
| 運転状態Ⅲ                  |       | $S_1$ 地震時に制御棒緊急挿入を阻止しないこと、及び崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認する。 <sup>*3</sup> |  |
| 運転状態Ⅳ(L) <sup>*1</sup> |       |  | 評価不要 <sup>*4</sup>   |
| 運転状態Ⅳ(S) <sup>*2</sup> |       |  |  |

\*1 運転状態Ⅳ(L)：運転状態Ⅳのうち、長時間のものが作用している状態

\*2 運転状態Ⅳ(S)：運転状態Ⅳのうち、短時間のものが作用している状態

\*3 確認する方法の1つは、運転状態Ⅳの許容応力を満足することである。

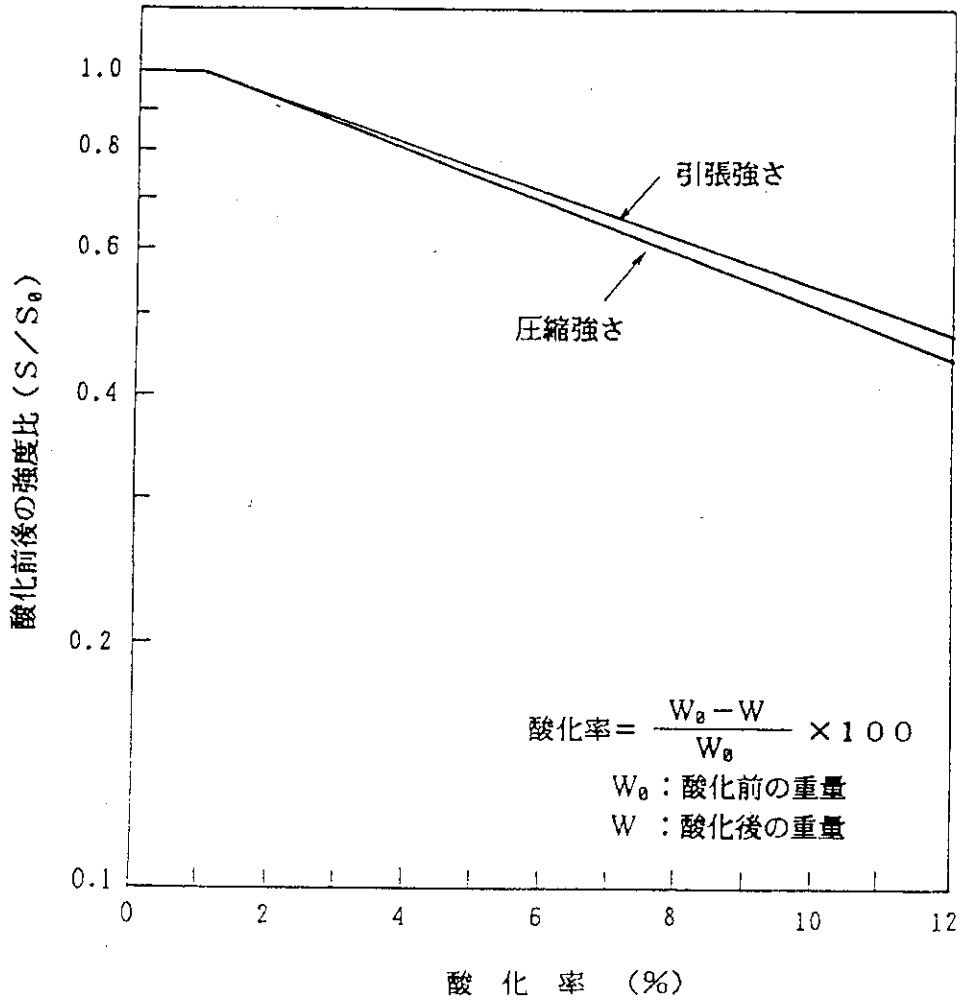
\*4 運転状態Ⅳ(S)と設計用最強地震動が同時に発生することは、確率的に十分小さいことより評価は不要とする。

\*5 確認する方法の1つは、運転状態Ⅳの許容応力を満足することである。

\*6 運転状態Ⅳと設計用限界地震動が同時に発生することは、確率的に十分小さいことより評価は不要とする。

なお、基準地震動 $S_1$ 及び $S_2$ は、各々設計用最強地震及び設計用限界地震

によりもたらされる地震動で、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について」（原子力安全委員会、昭和56年7月20日）の定めによるものとする。



$S$  : 酸化後の引張又は圧縮強さ  
 $S_0$  : 酸化前の引張又は圧縮強さ

付図 1 IG-110黒鉛の酸化による強度変化 (室温)