

JAERI - M  
92-019

黒鉛ブロックの熱・照射応力解析コード  
VIENUS の 検 証

1992年2月

伊与久達夫・石原 正博・白井 浩史\*  
塩沢 周策・湊 和生

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）あて、お申しこしてください。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, 1992

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 榎原子力資料サービス

黒鉛ブロックの熱・照射応力解析コード VIENUS の検証

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・白井 浩史\*

塩沢 周策・湊 和生<sup>+</sup>

(1992年1月29日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心黒鉛構造物は、高速中性子照射下で照射寸法変化 (照射収縮) を示すとともに HTTR の使用温度域においてクリープ挙動を示す。このため、HTTR の燃料体等の炉心黒鉛構造物の構造設計には、これらの挙動を考慮した熱・照射応力解析コード VIENUS を用いる。本コードは、有限要素法による 2 次元線形粘弾性応力解析コードで、高速中性子の照射環境下での黒鉛の物性値の変化、熱ひずみ、照射による寸法変化及びクリープ現象を考慮した解析が可能である。

本コードの有効性を明らかにするために、第 8 次 OGL-1 燃料体の照射試験と Peach Bottom 炉の燃料体の照射試験結果に基づき検証解析を実施した。本報告は、このコード検証結果についてまとめたものである。

Verification of Thermal-Irradiation Stress Analytical  
Code VIENUS of Graphite Block

Tatsuo IYOKU, Masahiro ISHIHARA, Hiroshi SHIRAI\*  
Shusaku SHIOZAWA and Kazuo MINATO<sup>+</sup>

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

(Received January 29, 1992)

The core graphite components of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) show both the dimensional change (irradiation shrinkage) and creep behavior due to fast neutron irradiation under the temperature and the fast neutron irradiation conditions of the HTTR. Therefore, thermal/irradiation stress analytical code, VIENUS, which treats these graphite irradiation behavior, is to be employed in order to design the core components such as fuel block etc. of the HTTR. The VIENUS is a two dimensional finite element visco-elastic stress analytical code to take account of changes in mechanical properties, thermal strain, irradiation-induced dimensional change and creep in the fast neutron irradiation environment.

Verification analyses were carried out in order to prove the validity of this code based on the irradiation tests of the 8th OGL-1 fuel assembly and the fuel element of the Peach Bottom reactor. This report describes the outline of the VIENUS code and its verification analyses.

---

<sup>+</sup> Department of Fuels and Materials Research  
<sup>\*</sup> CSK Corp.

Keywords: HTTR, Stress Analysis, Visco-elastic Stress, Graphite,  
Verification Analysis, Core Components, Irradiation,  
Stress, Strain, Creep, Finite Element Method

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 計算モデル .....	3
2.1 黒鉛の照射挙動 .....	3
2.2 粘弾性の構成方程式 .....	5
2.3 変動照射条件下における物性値の取扱い .....	8
2.4 有限要素法による定式化 .....	10
3. VIENUS コード .....	21
3.1 プログラム構成 .....	21
3.2 計算フロー .....	21
3.3 システム構成 .....	22
4. 検証解析 .....	26
4.1 第8次 OGL-1 燃料体照射試験 .....	26
4.2 Peach Bottom 燃料体照射試験 .....	30
5. 結 言 .....	62
謝 辞 .....	62
参考文献 .....	63

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Calculation Model .....	3
2.1 Irradiation Behavior of Graphite .....	3
2.2 Constitutive Equation of Visco-elasticity .....	5
2.3 Modeling of Property Change under Changing Irradiation Condition .....	8
2.4 Application of Finite Element Method .....	10
3. The VIENUS Code .....	21
3.1 Structure of the VIENUS Code .....	21
3.2 Calculation Flow of the VIENUS Code .....	21
3.3 Program System of the VIENUS Code Operation .....	22
4. Verification Analyses .....	26
4.1 Irradiation Experiment of the 8th OGL-1 Fuel Assembly .....	26
4.2 Irradiation Experiment of the Fuel Element of Peach Bottom Reactor .....	30
5. Conclusions .....	62
Acknowledgements .....	62
References .....	63

## 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。Fig.1.1にHTTRの原子炉本体構造説明図を示す。

HTTRの炉内構造物は、高温のガスを得るために耐熱性に優れた黒鉛構造物で構成している。この炉内黒鉛構造物は、その機能及び交換の可能性等を考慮して、炉心黒鉛構造物及び炉心支持黒鉛構造物に分類される。炉心黒鉛構造物は、燃料体の黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック等から構成し、高速中性子照射量が高いため、黒鉛材料の物性値等に与えるその影響を設計上考慮する必要がある。一方、炉心支持黒鉛構造物ではこの中性子照射量は少なく、設計上照射効果を考慮する必要はない。黒鉛材料は、高速中性子の照射下において寸法変化及びクリープ挙動を示すため、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、原子炉運転中には黒鉛構造物内に生ずる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。ここで、黒鉛材料の高速中性子照射による寸法変化及びクリープ挙動を考慮した応力解析は、一般の金属材料で行われている応力解析に比べ特殊であり、汎用の解析コードをそのまま用いることは出来ない。そのため、黒鉛材料の照射挙動を適切に考慮した解析コードV I E N U S<sup>(1)</sup> (Visco-elastic stress analytical code by neutron irradiation strain) を開発した。

本報は、黒鉛材料の照射挙動及びその計算モデルを説明すると共に、本解析コードの妥当性を実験に基づき検証した結果について述べたものである。本計算コードの検証に用いた実験は、第8次 OGL-1燃料体の照射試験とPeach Bottom炉の燃料体の照射試験である。



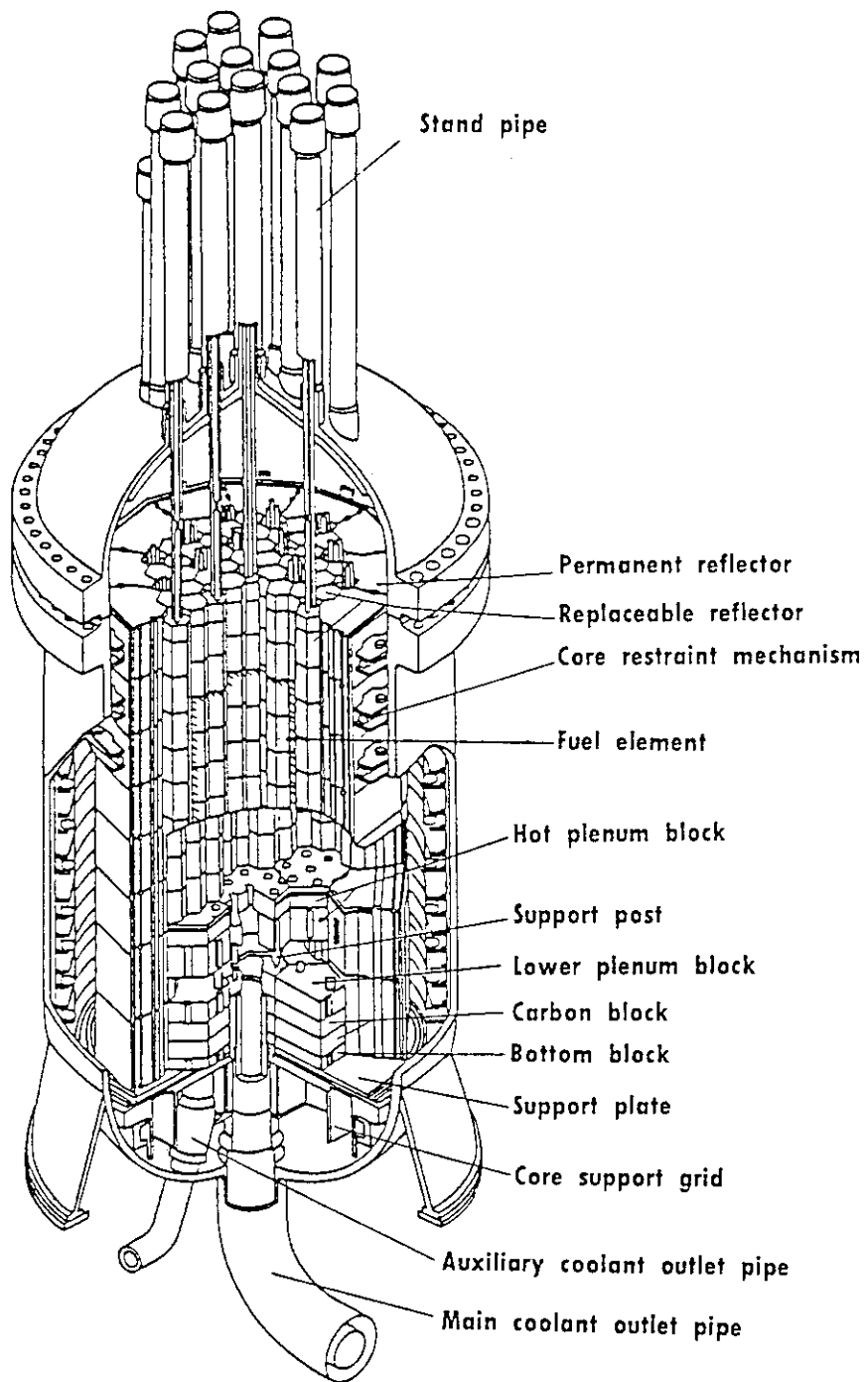


Fig. 1.1 Core and core support components arrangement of the HTTR

## 2. 計算モデル

### 2.1 黒鉛の照射挙動

黒鉛材料の照射効果は、高速の中性子が炭素原子に衝突し炭素原子を変位させることにより生じる<sup>(2)(3)</sup>。ここで、炭素原子の変位しきいエネルギーは、結晶の方向により異なるが、約30～60 eVである。中性子が炭素原子に衝突し伝達する最大のエネルギーは、正面衝突を仮定すれば、入射中性子のエネルギーの約1/3である。すなわち、約100 eV以上のエネルギーを持つ中性子が炭素原子を変位させ得る。しかし、衝突する中性子エネルギーのレベルに応じて変位する炭素原子の数が異なる。中性子照射による黒鉛材料の性質変化の程度は、原子変位の結果生じる格子間原子と空孔の存在によることより、変位原子数の生成割合の関数として中性子照射による材料の性質変化を表すことが出来る。この考えに基づいて定義されたものが損傷関数で、この関数は各エネルギーレベル毎の変位原子の生成割合を表す。Fig. 2.1は、黒鉛材料の損傷関数のエネルギーレベル依存性を示したものである<sup>(4)</sup>。ここで、黒鉛材料の照射損傷は、エネルギーレベルの高い中性子により支配されている。

これらのことより、黒鉛材料の照射特性を調べるためには、厳密には、エネルギー群毎に照射効果を求める必要がある。このため、基礎的な物性研究のような場合には、損傷関数を用いることもある。しかし、設計評価においては、黒鉛材料の性質変化に及ぼす照射損傷の目安として、一般の材料と同様に照射量を用いている。これは、HTTRの黒鉛材料の照射データが、加速器による同一エネルギーレベルでの照射ではなく、HTTRと同じ熱中性子炉であるJMTR等の原子炉で照射したもので、原子炉内の中性子スペクトルは両者でほぼ等しいことより、損傷関数を用いなくても十分に照射特性を把握できるためである。なお、ここで、しきいエネルギーレベルをどこに設定するかにより照射量は異なってくる。黒鉛の場合、海外では0.18MeV以上のエネルギーを持つ中性子照射量、あるいはDIDO炉によるニッケル等価照射量等がよく用いられている<sup>(5)</sup>。炉心黒鉛構造の設計においては、Fig. 2.1に示すように、黒鉛材料の照射損傷は、エネルギーレベルの高い中性子により支配されていること及び海外の照射実績等に基づき0.18Me

V(29fJ) 以上の中性子照射量で黒鉛材料の照射効果を考慮している。

黒鉛材料が照射されると、寸法変化が生じるとともに縦弾性係数等の機械的特性や熱伝導率等の熱的特性が変化する。以下、熱・照射応力解析に関連する材料特性の照射効果を、HTTR炉心黒鉛構造物に使用するIG-110黒鉛を中心に述べる<sup>(6)(7)</sup>。

### (1) 照射寸法変化(照射ひずみ)

黒鉛材料は照射により寸法が変化し、その変化挙動は、結晶子の大きさ、結晶子の配向、原料の種類、気孔率等の黒鉛の組織・構造並びに照射量、照射温度に大きく依存することが知られている。ここで、黒鉛ブロック内で照射量又は照射温度の不均一性が生ずると、この照射寸法変化に起因する不均一なひずみが黒鉛ブロック内に発生し、いわゆる2次応力が黒鉛ブロックに作用する。

この照射寸法変化は、等方性材料であるIG-110黒鉛ではほぼ等方的である。Fig. 2.2に、IG-110黒鉛の照射寸法変化の照射量依存性を示す。照射温度が400℃から1200℃の範囲で、照射量が $2 \times 10^{25}$  ( $m^{-2}, E > 29fJ$ ) までは、ほぼ単調に収縮している。照射寸法変化の照射温度依存性は、照射温度が400℃から上昇するに従い変化率は減少し約800℃で極値になり、それ以後変化率は照射温度の増加とともに大きくなる傾向を示している。

### (2) 縦弾性係数

IG-110黒鉛の縦弾性係数の温度及び照射量依存性を、Fig. 2.3(a)及び(b)に示す。縦弾性係数は照射により増加する。縦弾性係数の照射による変化率は、一般に、照射温度の上昇とともに小さくなり、かつ照射初期に急激に上昇しその後一定値に飽和する傾向にある。

### (3) 熱膨張係数

熱膨張係数の照射による変化は、結晶の熱膨張が変化する事及び照射による結晶の寸法変化により気孔率が変化する事により生じるとされている。

IG-110黒鉛の熱膨張係数の温度及び照射量依存性を、Fig. 2.4(a)及び(b)に各々示す。IG-110黒鉛の熱膨張係数は、Fig. 2.4(b)に示すように、

照射初期に増加し照射にともなって最大値を示しその後減少している。

#### (4) 熱伝導率

IG-110黒鉛の熱伝導率の温度及び照射量依存性を、Fig. 2.5(a)及び(b)に示す。熱伝導率は照射により減少する。熱伝導率の照射による減少率は、一般に、照射温度の上昇とともに小さくなり、照射初期に急激に大きくなりその後飽和する傾向にある<sup>(8)</sup>。IG-110黒鉛の場合、Fig. 2.5(b)に示すように、照射温度400℃で、熱伝導率は燃焼初期急激に減少し、照射前の値の約30%で飽和している。

#### (5) 照射クリープ

一般に、黒鉛材料の熱クリープが問題になるのは約2000℃である。しかし、黒鉛材料は低温においても照射を受けるとクリープ挙動を示す。応力変動を伴う場合の照射クリープ試験の結果の例をFig. 2.6に示す<sup>(9)</sup>。図において、応力の増加或は減少直後でのクリープひずみ速度の急激な変化は、遷移クリープによる効果である。また、その後クリープひずみ速度が一定となり、定常クリープ領域となる。このように、黒鉛材料の照射クリープ挙動は、高温における金属のクリープ挙動と類似な傾向を示す。IG-110黒鉛の定常クリープ係数をFig. 2.7に示す。

## 2.2 粘弾性の構成方程式

VIENUSコードにおいては、Fig. 2.6に示す黒鉛材料の照射試験データ等に基づき、黒鉛材料の照射クリープ現象を適切に表現できるMaxwell-Kelvinモデル<sup>(8)</sup>を用いた。本レオロジーモデルを、Fig. 2.8に示す。定常クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}^s$ は、

$$\dot{\epsilon}^s = M^s \sigma \dot{\Phi} \quad (2.1)$$

ここで、 $M^s$ ：定常クリープ係数

$\sigma$ ：応力

$\dot{\Phi}$ ：高速中性子照射量の増分

遷移クリープひずみ速度  $\dot{\varepsilon}^T$  は、

$$\dot{\varepsilon}^T = M^T (\sigma - \varepsilon^T E^T) \dot{\Phi} \quad (2.2)$$

ここで、 $M^T$ : 遷移クリープ係数

$E^T$ : 遷移クリープの弾性率

で表すことが出来る。従って、照射クリープひずみ速度  $\dot{\varepsilon}^C$  は、

$$\dot{\varepsilon}^C = \dot{\varepsilon}^S + \dot{\varepsilon}^T \quad (2.3)$$

となる。

熱・照射応力解析では、通常の応力解析で考慮される弾性ひずみ、熱ひずみの他に、照射ひずみ及び照射クリープひずみも考慮する。黒鉛構造物内に生ずる全ひずみ  $\varepsilon$  は、Fig. 2.8 に示すように次式となり、熱・照射応力はこのひずみに基づいて計算する。

$$\varepsilon = \varepsilon^E + \varepsilon^C + \varepsilon^\theta + \varepsilon^W \quad (2.4)$$

ここで、 $\varepsilon^E$ : 弾性ひずみ

$\varepsilon^C$ : 照射クリープひずみ

$\varepsilon^\theta$ : 熱ひずみ

$\varepsilon^W$ : 照射ひずみ

以上述べた黒鉛材料における照射挙動の構成方程式は、単軸に対するものである。実際の黒鉛構造物に発生する多軸応力状態での構成方程式は、単軸に対するものを拡張して、マトリックス表示することが出来る。多軸における全ひずみは、式(2.4)より、

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^E\} + \{\varepsilon^C\} + \{\varepsilon^\theta\} + \{\varepsilon^W\} \quad (2.5)$$

となる。 $\{\sigma\}$  を応力マトリックス、 $[D]$  を弾性マトリックスとすれば、

$$\{\varepsilon^E\} = [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (2.6)$$

ここで、式(2.6)における各マトリックスの成分は、x-y平面における横等方性を仮定した場合の平面ひずみ、または一般化平面ひずみ解析の場合には、次のようになる。

$$\{\varepsilon^E\}^T = \{\varepsilon^E_x, \varepsilon^E_y, \varepsilon^E_z, \gamma^E_{xy}\}$$

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}\}$$

$$[D] = \begin{vmatrix} 1/E_R & -\nu_{RR}/E_R & -\nu_{RA}/E_A & 0 \\ & 1/E_R & -\nu_{RA}/E_A & 0 \\ \text{S y m.} & & 1/E_A & 2(1+\nu_{RR})/E_R \end{vmatrix}$$

ここで、 $E_R$  : x-y平面内での縦弾性係数

$E_A$  : x-y平面に垂直な方向の縦弾性係数

$\nu_{RR}$  : x-y平面内でのポアソン比

$\nu_{RA}$  : x-y平面に垂直な方向のひずみに対するx-y平面に水平方向のポアソン比

また、式(2.1)(2.2)(2.3)は下記に示すようにマトリックス表示することが出来る。

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}^C\} &= \{\dot{\varepsilon}^S\} + \{\dot{\varepsilon}^T\} \\ &= [M^S] \{\sigma\} \Phi + [M^T] (\{\sigma\} - [E^T] \{\varepsilon^T\}) \dot{\Phi} \quad (2.7) \end{aligned}$$

ここで、 $[M^S]$  : 定常クリープのモビリティマトリックス

$[M^T]$  : 遷移クリープのモビリティマトリックス

$[E^T]$  : 遷移クリープの弾性マトリックス

式(2.7)における  $[M^S]$ 、 $[M^T]$ 及び $[E^T]$ は、等方性を仮定することにより、次のように表せる。

$$[M^S] = \begin{vmatrix} M^S & -\nu_c M^S & -\nu_c M^S & 0 \\ & M^S & -\nu_c M^S & 0 \\ & \text{Sym.} & M^S & 2(1+\nu_c)M^S \end{vmatrix}$$

$$[M^T] = \begin{vmatrix} M^T & -\nu_c M^T & -\nu_c M^T & 0 \\ & M^T & -\nu_c M^T & 0 \\ & \text{Sym.} & M^T & 2(1+\nu_c)M^T \end{vmatrix}$$

$$[E^T] = \begin{vmatrix} 1/E^T & -\nu^T/E^T & -\nu^T/E^T & 0 \\ & 1/E^T & -\nu^T/E^T & 0 \\ & \text{Sym.} & 1/E^T & 2(1+\nu^T)/E^T \end{vmatrix}$$

- ここで、  
 $M^S$  : 定常クリープ係数  
 $M^T$  : 遷移クリープ係数  
 $E^T$  : 遷移クリープの弾性係数  
 $\nu_c$  : クリープポアソン比  
 $\nu^T$  : 遷移クリープの弾性のポアソン比

### 2.3 変動照射条件下における物性値の取扱い

熱・照射応力解析に必要な照射寸法変化や弾性係数、熱膨張係数等の物性値の照射量依存性は、JMTR炉等の原子炉を用いた照射試験により得られたデータより定めている<sup>(6)</sup>。これらの物性値は、照射量及び照射温度の関数となる。照射試験においては、黒鉛材料の基礎的照射特性を調べる目的及び炉内での実験という制約から、一定の温度で照射したデータを中心に取得している。このため、黒鉛材料の照射データは、一般に等温曲線としての照射特性を示している。

一方、HTTRの黒鉛ブロックの熱・照射応力は、照射温度が変動する場合も含め種々の照射条件に対して解析する必要がある。ここで、変動照射条件下における照射ひずみや弾性係数、熱膨張係数等の物性値の取扱いとしては、定照射量、定物性値及び累積損傷の3種類のシフティングルールが提案されている<sup>(11)</sup>。こ

これらのシフティングルールは、照射量が照射ひずみが収縮から膨張に逆転する程度まで多くなると、その差違が著しくなる。しかし、H T T R条件下での照射量ではその差違は僅かであるため、取扱の簡便さ及び現象論的にも適切であることから定照射量シフティングルールをVIENUSコードに採用している。

以下に、定照射量シフティングルールの考え方<sup>(11)</sup>を、照射ひずみと物性値に分けて述べる。

黒鉛が温度  $T$  で照射量  $0$  から  $\Phi$  まで照射された場合の照射ひずみ  $\varepsilon^w$  は、照射試験より Fig. 2.8 に示す  $\varepsilon^w(T, \Phi)$  のように得られているものとする。ここで、黒鉛ブロックが温度  $T_1$  で照射量  $\Phi_0$  から  $\Phi_1$  まで照射され、その後温度  $T_2$  で照射量  $\Phi_1$  から  $\Phi_2$  まで照射を受けた場合の照射ひずみ  $\varepsilon^w_{T_1-T_2}$  を考える。照射温度  $T$  で照射量  $\Phi$  から  $\Phi + \Delta\Phi$  まで照射を受けた場合の照射ひずみの増分量を  $\Delta\varepsilon^w(T, \Phi, \Delta\Phi)$  とすると、照射温度  $T$  が一定である場合は、

$$\Delta\varepsilon^w(T, \Phi, \Delta\Phi) = \varepsilon^w(T, \Phi + \Delta\Phi) - \varepsilon^w(T, \Phi) \quad (2.8)$$

である。定照射量シフティングルールの考え方は、上式が照射温度が変化した場合にも成立すると仮定したものである。この仮定により、 $\varepsilon^w_{T_1-T_2}$  は、

$$\begin{aligned} \varepsilon^w_{T_1-T_2} &= \varepsilon^w(T_1, \Phi_1) - \varepsilon^w(T_1, \Phi_0) \\ &\quad + \varepsilon^w(T_2, \Phi_2) - \varepsilon^w(T_2, \Phi_1) \end{aligned} \quad (2.9)$$

と表すことができる。 $\varepsilon^w_{T_1-T_2}$  は、Fig. 2.9 において、 $A \rightarrow B \rightarrow E$  に相当する。同図において、直線  $BC$  と直線  $EF$  の長さは等しく、曲線  $BE$  は曲線  $CF$  を平行移動したものである。これを一般化して、照射量  $\Phi_{i-1}$  から  $\Phi_i$  までの間を温度  $T_i$  で照射されると、 $\Phi_0$  から  $\Phi_n$  まで照射を受けたときの照射ひずみの累積値  $\varepsilon^w$  は次式のようになる。

$$\varepsilon^w = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon(T_i, \Phi_{i-1}, \Phi_i - \Phi_{i-1}) \quad (2.10)$$



弾性係数、熱膨張係数等の物性値を代表して記号Mで表す。温度Tで、照射量0からΦまで照射された場合の物性値が、照射試験によりM(T, Φ)と得られているとする。このとき、照射量Φ<sub>i-1</sub>からΦ<sub>i</sub>までの間を温度T<sub>i</sub>で照射されると、Φ<sub>0</sub>からΦ<sub>n</sub>まで照射を受けたときの物性値Mは、定照射量シフティングルールを用いれば、次式のようになる。

$$M = \sum_{i=1}^n \Delta M (T_i, \Phi_{i-1}, \Delta \Phi_i) \quad (2.11)$$

$$\text{ここで、} \Delta M (T_i, \Phi_{i-1}, \Delta \Phi_i) = M (T_i, \Phi_i) - M (T_i, \Phi_{i-1})$$

$$\Delta \Phi_i = \Phi_i - \Phi_{i-1}$$

## 2. 4 有限要素法による定式化

### (1) ひずみと変位の関係式

全ひずみ{ε}は、全変位を{u}とすると、

$$\{\varepsilon\} = [A] \{u\} \quad (2.12)$$

と表せる。ここで、[A]は微分演算子マトリックスである。式(2.12)における各マトリックスの成分は、平面ひずみまたは一般化平面ひずみ解析の場合、次のようになる。

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}\}$$

$$\{u\}^T = \{u_x, u_y, u_z\}$$

$$[A] = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{vmatrix}$$

VIENUSコードにおいては、照射履歴による応力解析にひずみ増分法を用いた。このことより、式(2.12)を増分形で次式のように表す。

$$\{\Delta \varepsilon\} = [A] \{\Delta u\} \quad (2.13)$$

## (2) 応力とひずみの関係

式(2.5)の全ひずみの式より、弾性ひずみは次式のように表せる。

$$\{\varepsilon^E\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^C\} - \{\varepsilon^{\theta}\} - \{\varepsilon^W\} \quad (2.14)$$

弾性ひずみ  $\{\varepsilon^E\}$  と応力  $\{\sigma\}$  は、弾性マトリックスを  $[D]$  とすれば以下の関係が成り立つ。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^E\} \quad (2.15)$$

上式を増分形で書くと次のようになる。

$$\{\Delta \sigma\} = [D] \{\Delta \varepsilon^E\} - [D][\Delta D]^{-1} \{\sigma\} \quad (2.16)$$

式(2.15)より、

$$\{\varepsilon^E\} = [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (2.17)$$

である。式(2.14)、(2.17)を式(2.16)に代入すると、

$$\begin{aligned} \{\Delta \sigma\} = [D] ( \{\Delta \varepsilon\} - \{\Delta \varepsilon^C\} - \{\Delta \varepsilon^{\theta}\} \\ - \{\Delta \varepsilon^W\} - [\Delta D]^{-1} \{\sigma\} ) \end{aligned} \quad (2.18)$$

を得る。

## (3) 変分法による定式化

解析の対象となる物体の領域を  $V$ 、その物体に対する力学的境界条件が与えられている表面を  $S$  とすると、仮想仕事の原理より、

$$\int_V \delta \{ \varepsilon \}^T \{ \sigma \} dV - \int_S \delta \{ u \} \{ F \} dS = 0 \quad (2.19)$$

であり、増分形で表示すれば、次式のようになる。

$$\int_V \delta \{ \Delta \varepsilon \}^T \{ \Delta \sigma \} dV - \int_S \delta \{ \Delta u \} \{ \Delta F \} dS = 0 \quad (2.20)$$

解析の対象となる物体の領域を有限要素に分割し、節点の変位増分マトリックスを  $\{ \Delta d \}$  とすると、変位増分ベクトル  $\{ \Delta u \}$  は、形状関数  $[N]$  を用いて、

$$\{ \Delta u \} = [N] \{ \Delta d \} \quad (2.21)$$

と表せる。

全ひずみ増分  $\{ \Delta \varepsilon \}$  は、式 (2. 2 1) を式 (2. 1 3) に代入して求める。

$$\{ \Delta \varepsilon \} = [B] \{ \Delta d \} \quad (2.22)$$

ここで、 $[B] = [A][N]$

応力増分  $\{ \Delta \sigma \}$  は、式 (2. 2 2) を式 (2. 1 8) に代入して求める。

$$\begin{aligned} \{ \Delta \sigma \} = [D] ( [B] \{ \Delta d \} - \{ \Delta \varepsilon^c \} - \{ \Delta \varepsilon^{\theta} \} \\ - \{ \Delta \varepsilon^w \} - [\Delta D]^{-1} \{ \sigma \} ) \end{aligned} \quad (2.23)$$

式 (2. 2 1) (2. 2 2) (2. 2 3) を式 (2. 1 9) に代入すると、

$$\begin{aligned} \int_V \delta \{ \Delta d \}^T [B]^T [D] ( [B] \{ \Delta d \} - \{ \Delta \varepsilon^c \} - \{ \Delta \varepsilon^{\theta} \} \\ - \{ \Delta \varepsilon^w \} - [\Delta D]^{-1} \{ \sigma \} ) dV \\ - \int_S \delta \{ \Delta d \}^T [N]^T \{ \Delta F \} dS = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

すなわち、

$$\begin{aligned}
 \delta \{ \Delta d \}^T \int_V [B]^T [D] [B] dV \{ \Delta d \} & \\
 = \delta \{ \Delta d \}^T \int_S [N]^T \{ \Delta F \} dS & \\
 + \delta \{ \Delta d \}^T \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon \theta \} dV & \\
 + \delta \{ \Delta d \}^T \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon^C \} dV & \\
 + \delta \{ \Delta d \}^T \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon^W \} dV & \\
 + \delta \{ \Delta d \}^T \int_V [B]^T [D] [\Delta D]^{-1} \{ \sigma \} dV & \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

上式において、 $\delta \{ \Delta d \}$  は、任意の仮想節点変位増分ベクトルであることより、常に上式が成立するためには、

$$\begin{aligned}
 \int_V [B]^T [D] [B] dV \{ \Delta d \} &= \int_S [N]^T \{ \Delta F \} dS \\
 + \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon \theta \} dV &+ \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon^C \} dV \\
 + \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon^W \} dV &+ \int_V [B]^T [D] [\Delta D]^{-1} \{ \sigma \} dV \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

でなければならない。ここで、

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (2.27)$$

$$\{ \Delta f^F \} = \int_S [N]^T \{ \Delta F \} dS \quad (2.28)$$

$$\{ \Delta f^\theta \} = \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon \theta \} dV \quad (2.29)$$

$$\{ \Delta f^C \} = \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon^C \} dV \quad (2.30)$$

$$\{ \Delta f^W \} = \int_V [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon^W \} dV \quad (2.31)$$

$$\{ \Delta f^D \} = \int_V [B]^T [D] [\Delta D]^{-1} \{ \sigma \} dV \quad (2.32)$$

とおけば、式(2.26)の要素の平衡方程式は、次式のように一般的な形となる。

$$\begin{aligned}
 [K] \{ \Delta d \} &= \{ \Delta f^F \} + \{ \Delta f^\theta \} + \{ \Delta f^C \} \\
 &+ \{ \Delta f^W \} + \{ \Delta f^D \} \quad (2.33)
 \end{aligned}$$

- ここで、 $[K]$  : 要素剛性マトリックス  
 $\{\Delta d\}$  : 節点変位増分マトリックス  
 $\{\Delta f^F\}$  : 外荷重による等価節点荷重増分マトリックス  
 $\{\Delta f^\theta\}$  : 熱ひずみによる等価節点荷重増分マトリックス  
 $\{\Delta f^C\}$  : 照射クリープひずみによる等価節点荷重増分マトリックス  
 $\{\Delta f^W\}$  : 照射ひずみによる等価節点荷重増分マトリックス  
 $\{\Delta f^D\}$  : 弾性マトリックスの変化による等価節点荷重増分マトリックス

全ての要素の平衡方程式を連立方程式とすることにより解析対象領域全体の平衡方程式が得られる。

熱・照射応力解析は、各要素の応力状態及び照射条件は微小時間 $\Delta t$ の間で一定に保たれると仮定し、 $\Delta t$ 間での各ひずみ増分を算出し、そのひずみ増分と等価な接点力の増分を計算する。この操作を全ての要素について行い、式(2.33)のような解析対象領域全体の平衡方程式を組み立てる。この平衡方程式より、変位増分を求める。この変位増分から式(2.21)の変位とひずみの関係からひずみ増分を算出し、式(2.18)の応力とひずみの関係から応力増分を求め、これを前ステップの値に加える。ここで、各解析ステップのひずみ増分は、前ステップの応力解析結果をもとにオイラー法等による数値積分により計算するため、熱・照射応力解析では、各ステップ毎に繰り返し計算を行って誤差を抑えるか、又は、時間増分幅の感度解析を行い誤差を推定して解の精度を保証する。

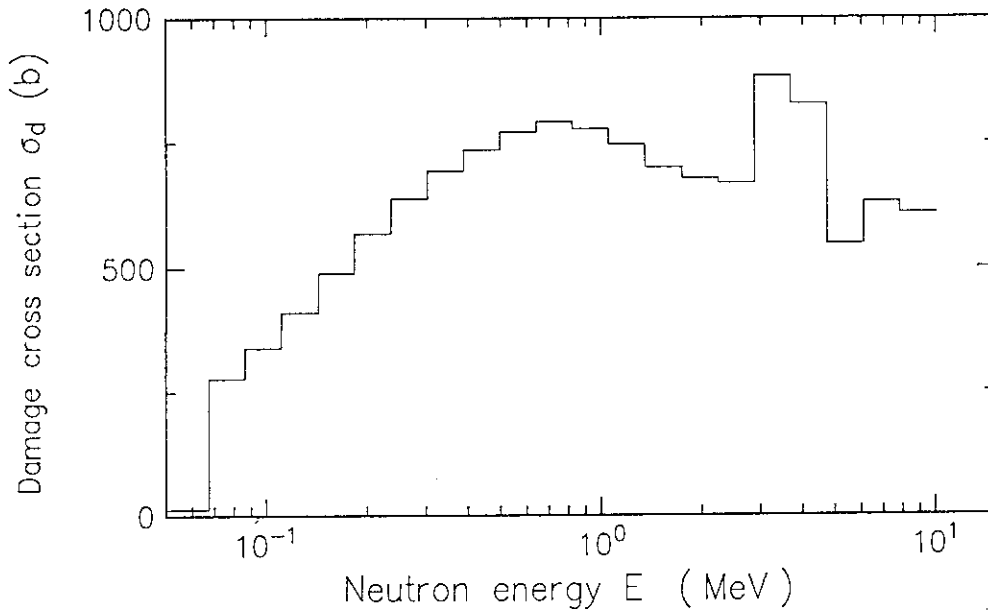


Fig. 2.1 Damage cross section of graphite as a function of neutron energy

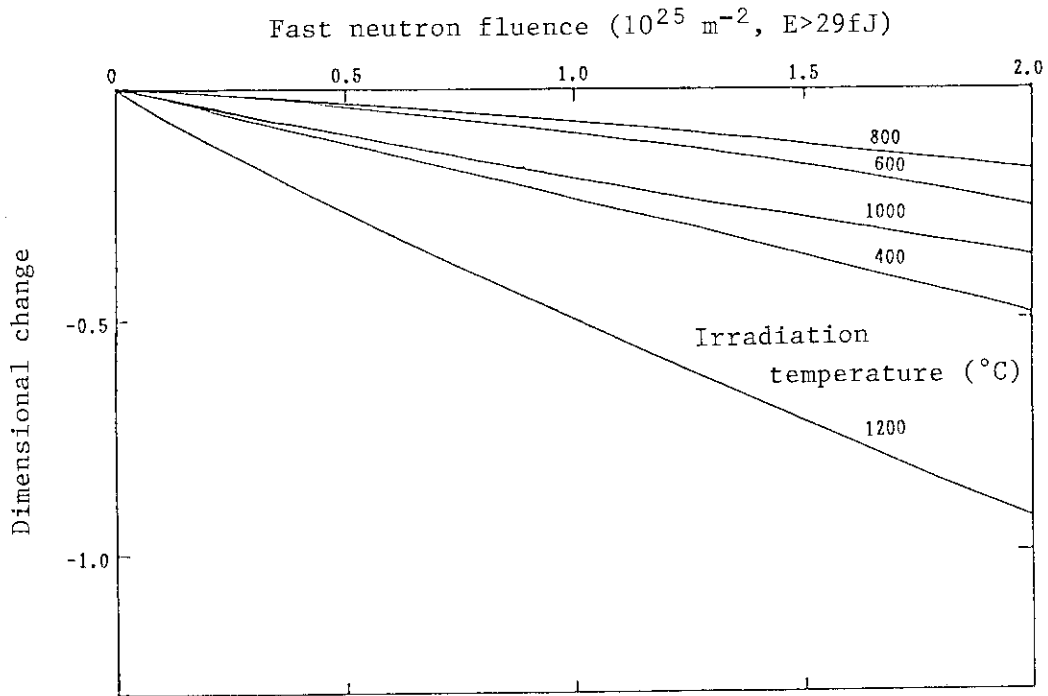


Fig. 2.2 Irradiation-induced dimensional change of IG-110 graphite (Unoxidized graphite)

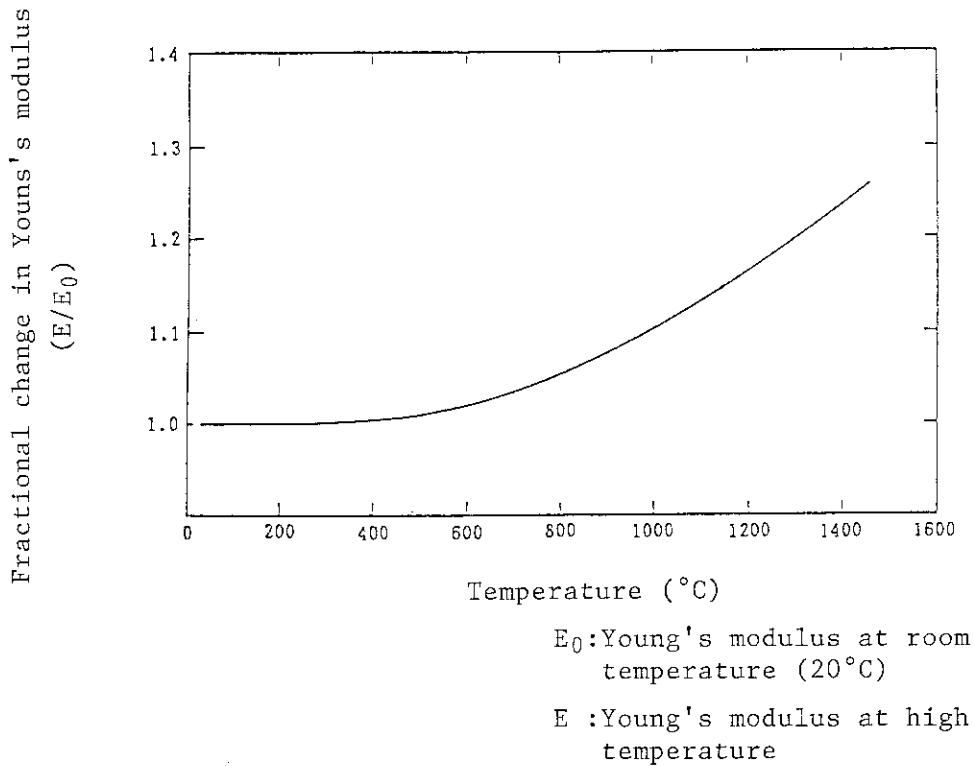


Fig. 2.3(a) Temperature dependence of Young's modulus of IG-110 graphite (Unirradiated and unoxidized graphite)

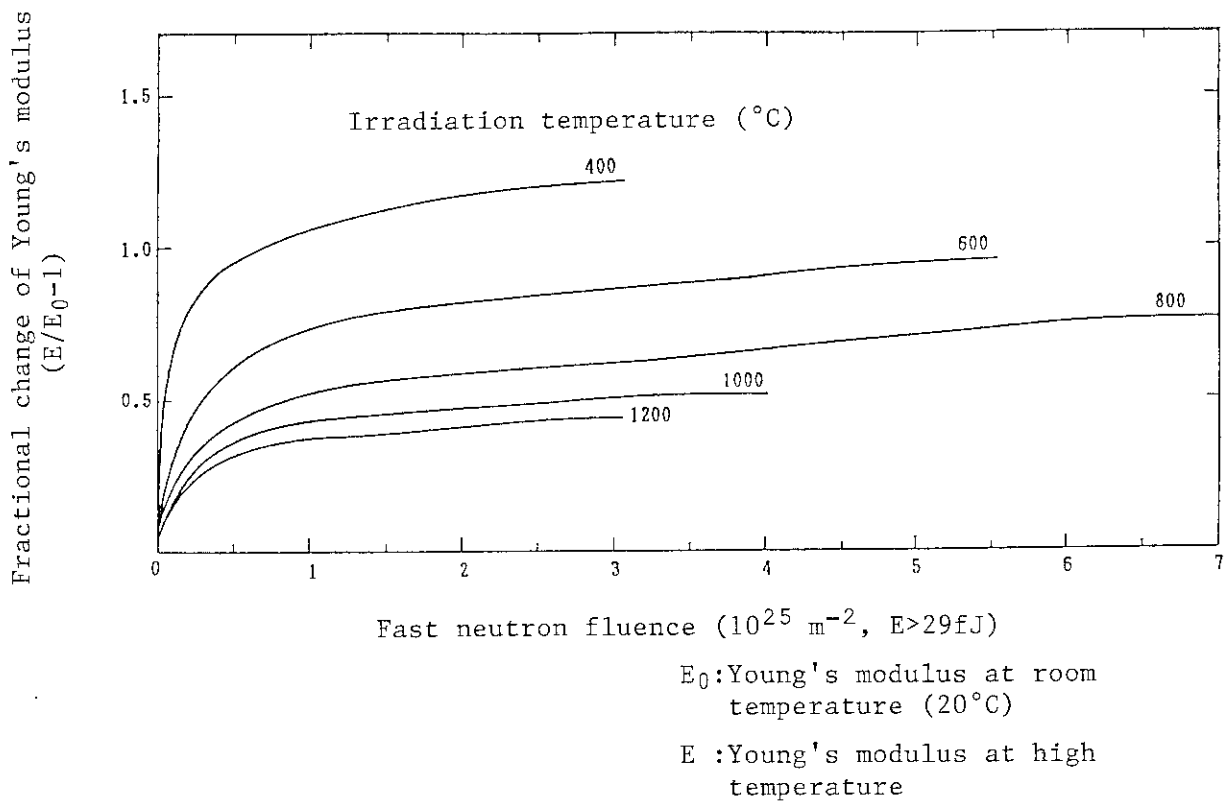
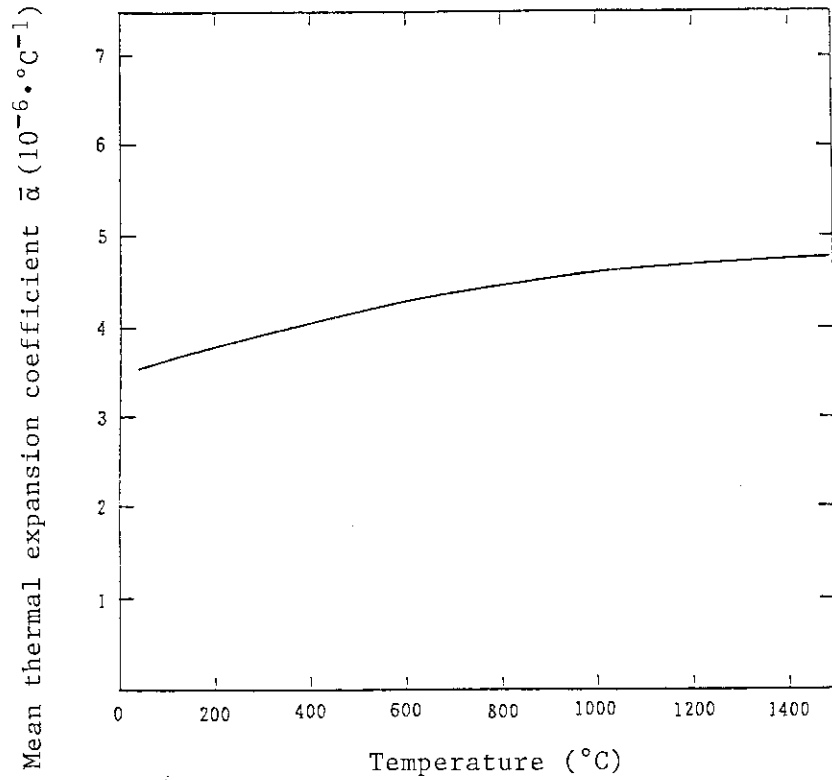
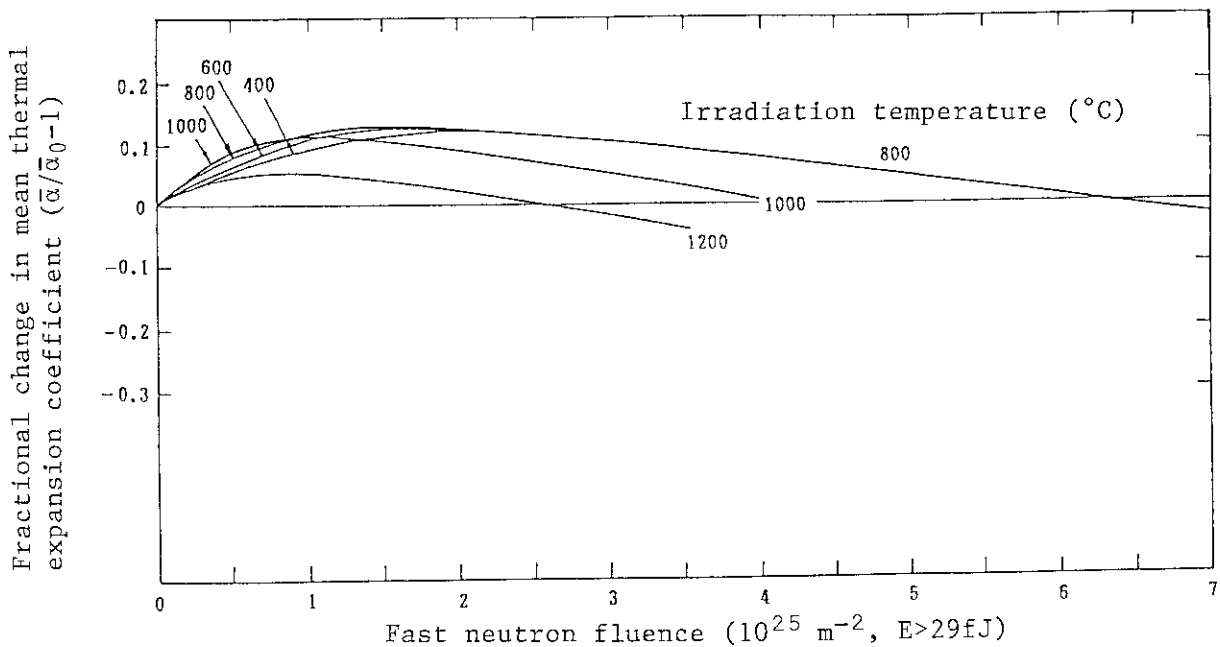


Fig. 2.3(b) Effect of irradiation on Young's modulus of IG-110 graphite (Unoxidized graphite)



( $\bar{\alpha}$ : From 20°C to high temperature)

Fig. 2.4(a) Temperature dependence of mean thermal expansion coefficient of IG-110 graphite (Unirradiated and unoxidized graphite)



$\bar{\alpha}$ ; Mean thermal expansion coefficient after irradiation

$\bar{\alpha}_0$ ; Mean thermal expansion coefficient before irradiation

Fig. 2.4(b) Effect of irradiation on mean thermal expansion coefficient of IG-110 graphite (Unoxidized graphite)



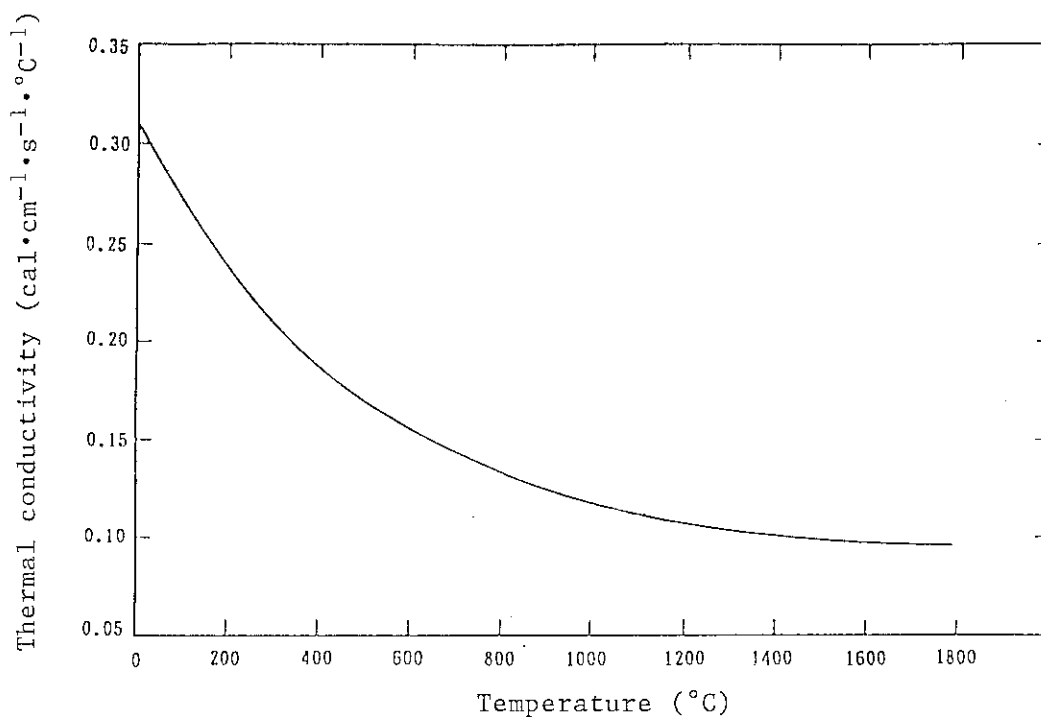
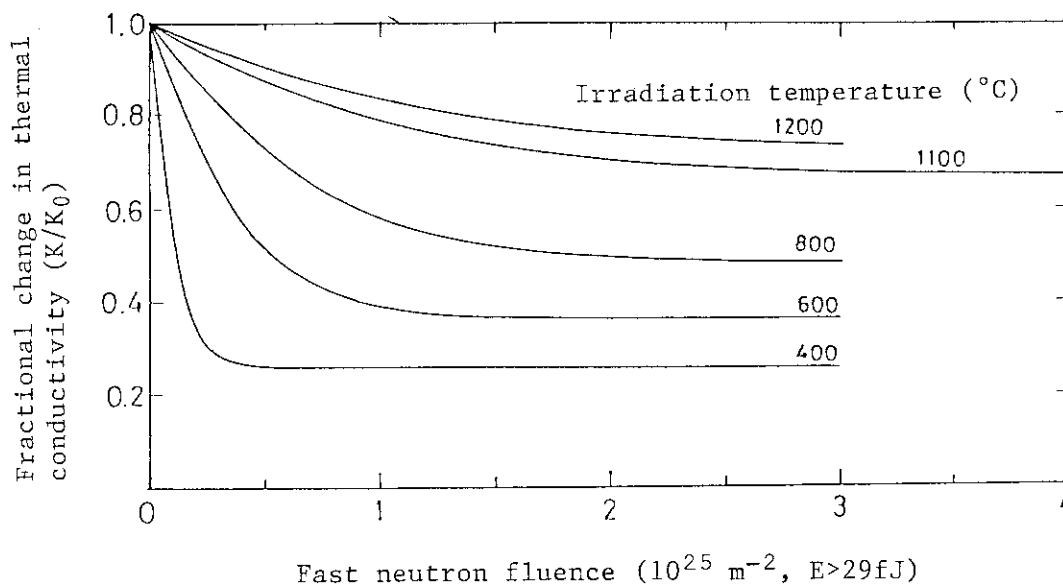


Fig. 2.5(a) Effect of temperature on thermal conductivity of IG-110 graphite (Unirradiated and unoxidized graphite)



K : Thermal conductivity after irradiation  
 K<sub>0</sub>: Thermal conductivity before irradiation

Fig. 2.5(b) Irradiation dependence of thermal conductivity of IG-110 graphite (Unoxidized graphite)

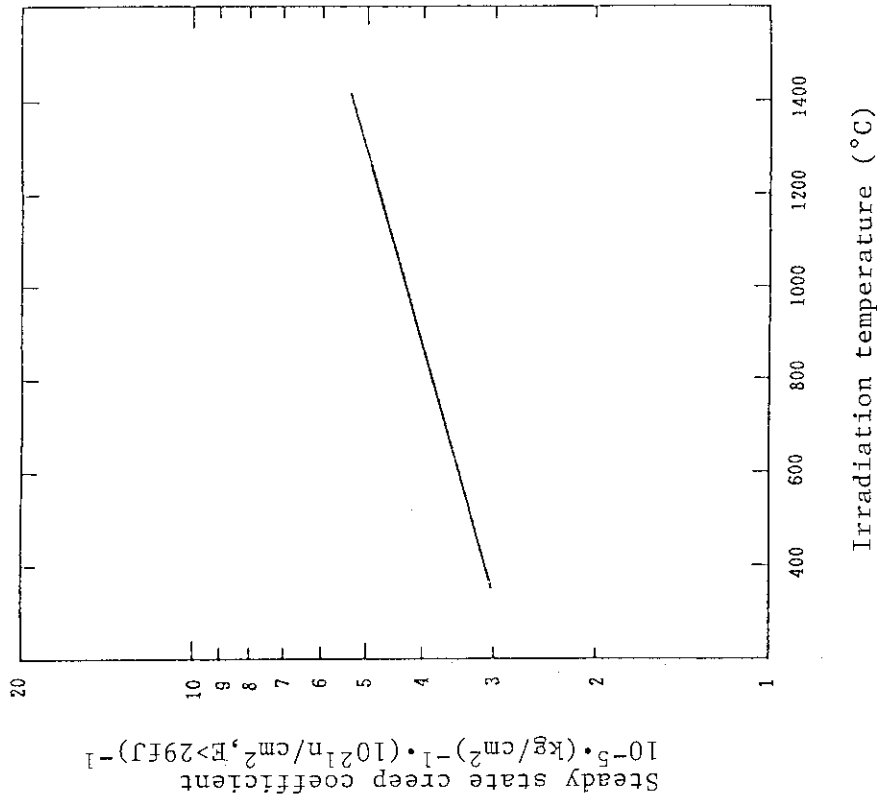


Fig. 2.7 Irradiation-induced steady state creep coefficient of IG-110 graphite

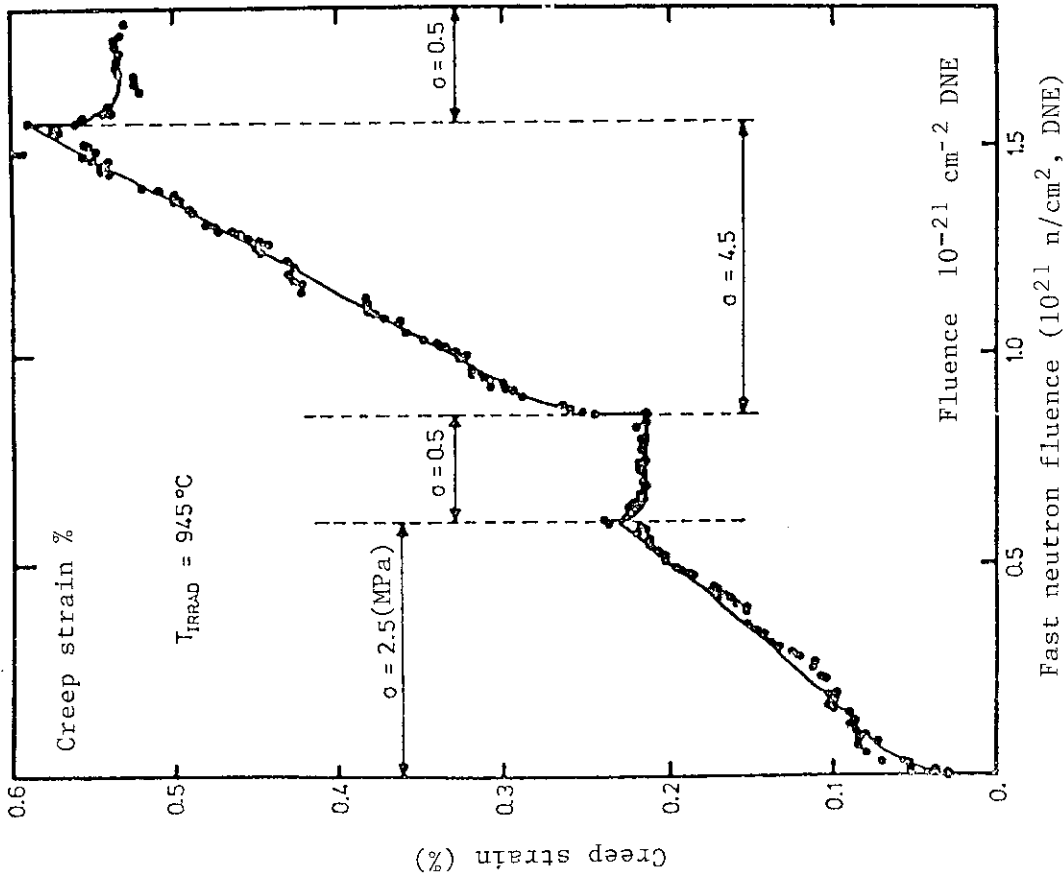


Fig. 2.6 Creep strain records of experiment ORPHEE 03 (7)

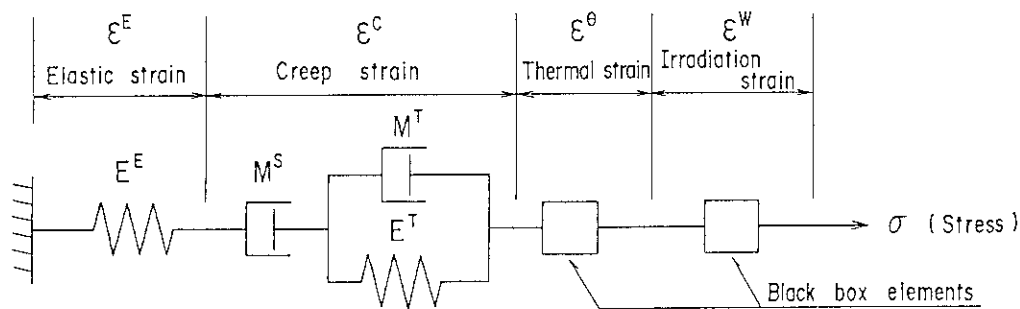


Fig. 2.8 Rheology model of graphite in the VIENUS code

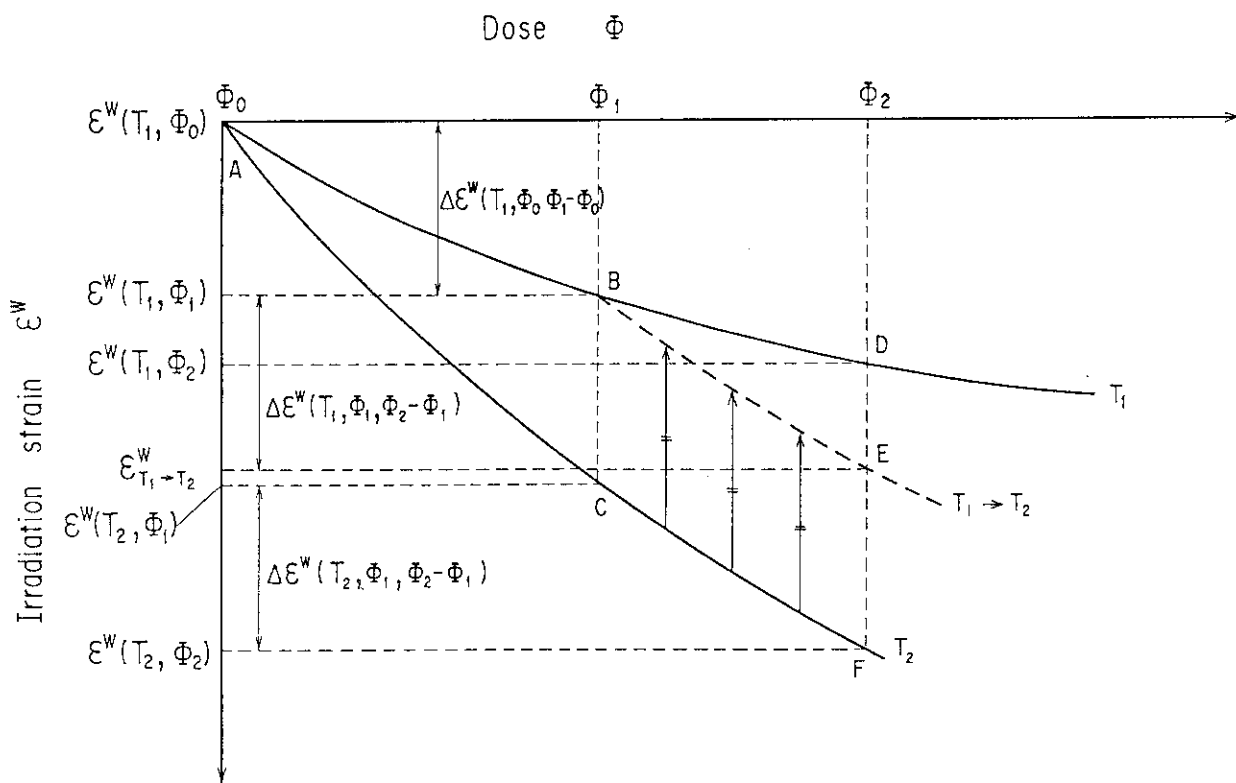


Fig. 2.9 Concept of constant dose shifting rule

### 3. VIENUS コード

#### 3. 1 プログラム構成

VIENUSコードの主要な部分についてのプログラム構成を、Fig. 3.1 に示す。本コードは、B1からB5の5つのモジュールから構成されている。このうちB4のモジュールは、高速中性子の照射による各要素毎の物性値の変化量を計算する部分であり、2.3変動照射条件下における物性値の取扱いで述べた定照射量シフティングルールに従って、各解析ステップ毎の物性値を計算する。モジュールB2を構成するC2は、各要素の剛性マトリックスを計算する部分であり、D1, D2にて求められる[B]、[D]をもとに数値積分を行う。また、C3は等価節点荷重の計算部分である。等価節点荷重として計算されるひずみは、熱ひずみ、照射ひずみ及び照射クリープひずみであり、これらのひずみ増分は、各々D3, D4及びD5で計算される。

#### 3. 2 計算フロー

VIENUSコードは、原子炉運転中及び原子炉停止後残留ひずみに起因して発生する黒鉛ブロックの熱・照射応力を計算する。この際、入力データとして原子炉運転中の黒鉛ブロック内の温度分布の履歴が必要となり、これについては他の伝熱解析コードにより求める。VIENUSコードは、この照射温度履歴を基に、黒鉛ブロックに生じる熱ひずみ、照射ひずみ及び照射クリープひずみの各増分を解析ステップ毎に計算し応力の増分を求め、順次加算することにより原子炉運転中の熱・照射応力を算出する。また、炉停止後熱ひずみが開放されそれまでに蓄積された残留ひずみにより発生する照射応力は、炉停止後黒鉛ブロックの温度を室温一定とすることにより熱ひずみを黒鉛ブロックから取り除いて、照射クリープ等による残留ひずみから計算する。

VIENUSコードの計算フローを、Fig. 3.2 に示す。

### 3.3 システム構成

VIENUSによりHTTRの黒鉛ブロックの熱・照射応力を計算するために、本コードの前処理及び後処理、入力データとなる黒鉛ブロック内の温度分布履歴の算出等に各種周辺プログラムを整備している。黒鉛ブロックの熱・照射応力の計算・評価用システム構成をFig.3.3に示す。以下に、各サポートプログラムの機能の概要を述べる。

#### (1) 前処理プログラム(VIENUS-PRE)

熱・照射応力の入力データとして必要な黒鉛ブロック内の温度データは、汎用構造解析コードABAQUS<sup>(1,2)</sup>を用いて算出している。ABAQUSによる解析結果の出力ファイルを、VIENUSコードでは直接読め込めないため、これを変換する機能を持たせたものが前処理プログラム"VIENUS-PRE"である。

#### (2) 図形出力プログラム(VIENUS-PLOT)

図形出力プログラム"VIENUS-PLOT"は、VIENUSの解析結果を図形出力するためのもので、変位図及び等応力線図を出力する。

#### (3) 応力評価プログラム(VIENUS-EVAL)

熱・照射荷重に対する黒鉛ブロックの構造健全性評価は、VIENUSコードによる応力解析結果と黒鉛構造設計方針<sup>(6)</sup>で規定される許容応力とを比較することにより行う。応力評価プログラム"VIENUS-EVAL"は、応力評価すべき断面の節点番号を入力データとして、各解析ステップ毎の発生応力を黒鉛構造設計方針に基づき評価するためのものである。

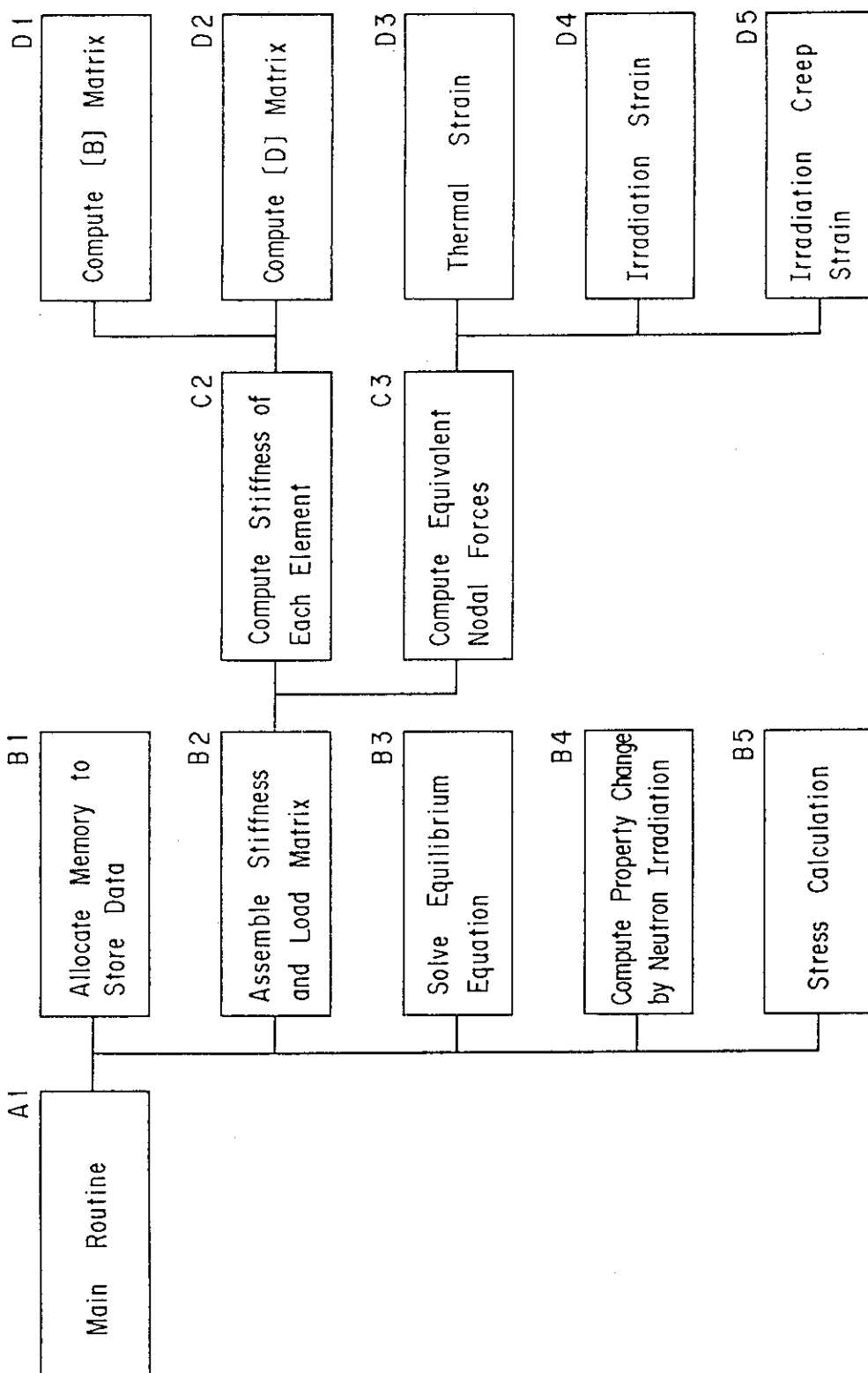


Fig. 3.1 Program structure of VIENUS code

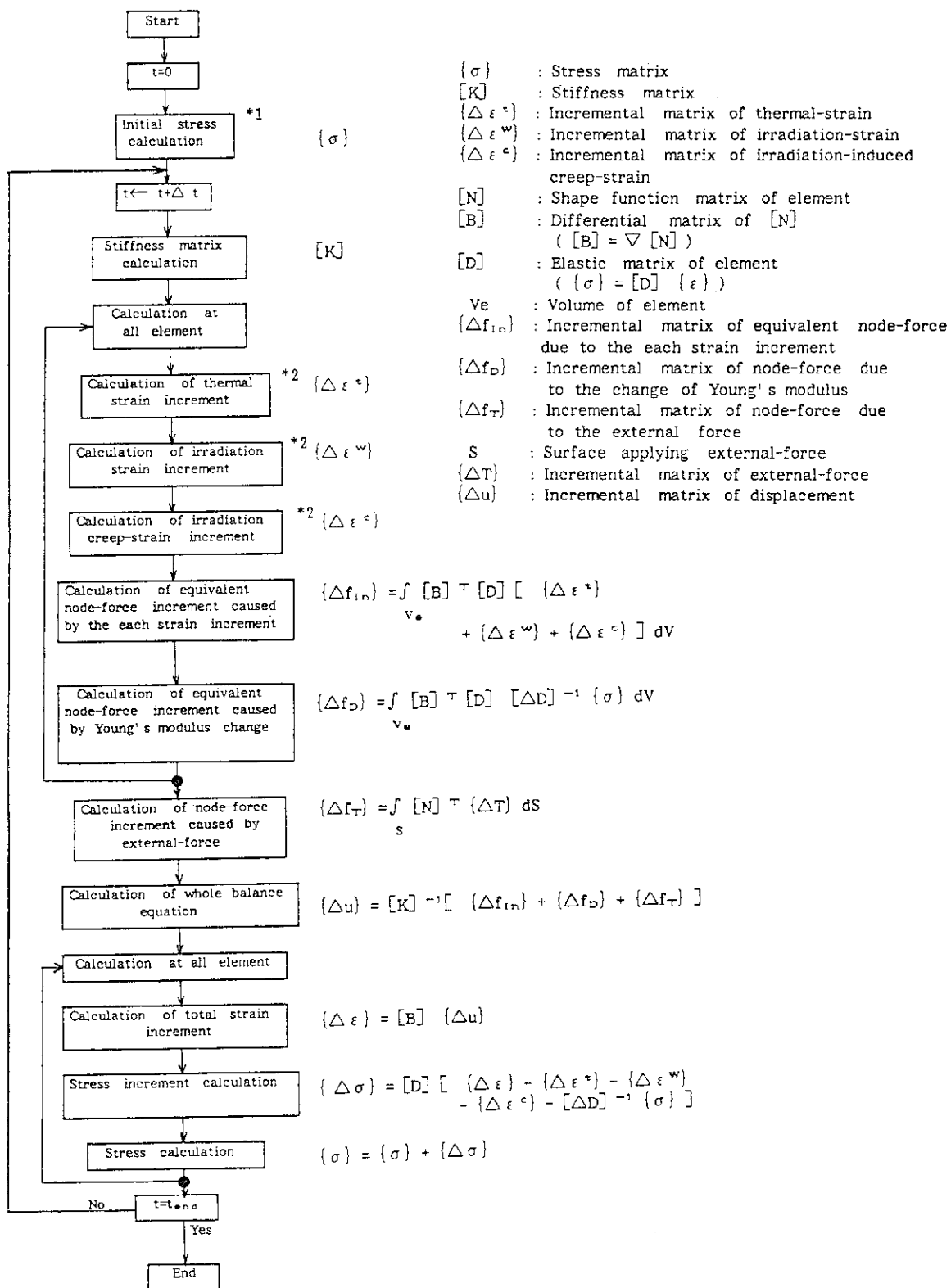


Fig. 3.2 Calculation flow of VIENUS code

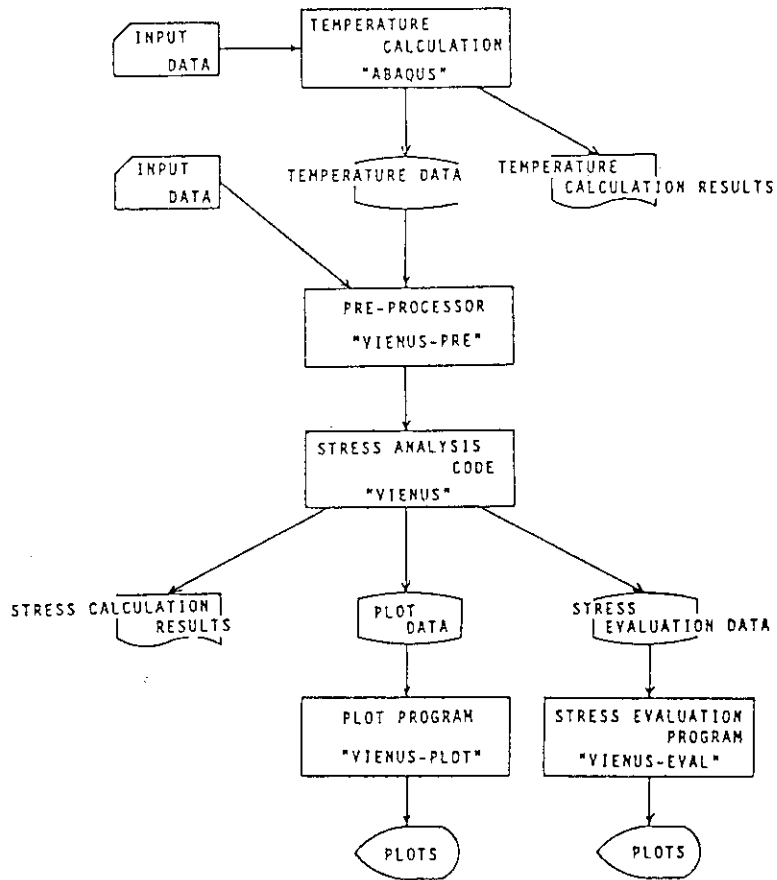


Fig. 3.3 Code system to calculate the thermal/irradiation stress of graphite block



## 4. 検証解析

### 4. 1 第8次 OGL-1 燃料体照射試験

#### (1) 照射試験の概要

OGL-1 (大洗ガスループ1号) は、J M T R の反射体領域に設置された高温高圧のヘリウムガスループである。OGL-1 を用いた照射試験の特徴は、H T T R の燃料体型式であるいわゆるピン・イン・ブロック型の燃料体を、冷却材である高圧ヘリウムガス雰囲気中で照射できることである。

OGL-1 による高温ガス炉用燃料の照射試験は、昭和52年3月から開始され、現在までに12体の照射が終了している<sup>(13)(14)</sup>。これらの照射試験のうち、VIENUSの検証に用いるのに最適なものは、構造、照射条件等から、第8次OGL-1燃料体の黒鉛スリーブの照射寸法変化である。

#### 1) 照射試料

第8次OGL-1燃料体の構造をFig. 4.1に示す。外径36mm、内径18mm、長さ36mmの燃料コンパクト20個を、Fig. 4.2に示すIG-110黒鉛製の黒鉛スリーブに装荷し、端栓を施して燃料棒としている。この燃料棒1本を、外径80mm、内径50mm、長さ約800mmの黒鉛ブロックに挿入し、照射試験用燃料体を構成している。冷却材のヘリウムガスは、燃料棒と黒鉛ブロックの間及び黒鉛ブロック外側を下から上へ流れる。燃料体各部及び燃料体出入口のヘリウムガスの温度を測定するために、

Fig. 4.1に示すように燃料体の各所に熱電対が取付けられている。黒鉛スリーブの温度は、Fig. 4.2に示すように、黒鉛スリーブ上端部から215mmのJ M T R炉心側及びその反対側の2点で測定されている。また、黒鉛ブロックには、熱中性子及び高速中性子の照射量測定のためのフルエンスモニタが装荷されている。

#### 2) 黒鉛スリーブの照射条件

第8次OGL-1燃料体の照射は、J M T R 第64～66サイクルの3原子炉サイクルの間実施された。各サイクルにおける実効照射時間をTable 4.1に示す。照射期間は、約54日間である。

黒鉛スリーブの内面及び外面の照射温度の評価値をTable 4.2 及び 4.3に各々示す。これらの温度は、熱電対により測定されたヘリウムガスの温度を基に、OGL-1 静特性熱計算コードSTPDSP2<sup>(15)</sup> を用いて評価した値である。熱電対による黒鉛スリーブの測定値を、Table 4.4 に示す。なお、熱電対による温度測定の軸方向位置は、下から16番目の燃料コンパクト位置に対応している。

黒鉛ブロックに装荷したフルエンスモニタの測定結果から、黒鉛ブロックにおける炉心側軸方向最大の高速中性子照射量 $\Phi$ は、

$$\Phi = 1.46 \times 10^{24} \text{ (m}^{-2}, E>29\text{fJ)}$$

である。JMTRCにおける核的モックアップ等で得られた高速中性子照射量の軸方向及び周方向の相対分布<sup>(16)</sup>を、Fig. 4.3 (a) 及び(b) に示す。検証解析では、これらより黒鉛スリーブ各部の照射量を定めた。

### 3) 黒鉛スリーブの照射寸法変化

東海研ホットラボに設置されているOGL-1 燃料体寸法測定装置<sup>(16)</sup>を用いて、照射前後に、黒鉛スリーブの内径が測定されている。この装置は、電気マイクロメータにより、軸方向5mm間隔で2方向の内径を測定することができる。照射前後における黒鉛スリーブの内径をTable 4.5 に示す。ただし、Table 4.5 に示した値は、各燃料コンパクト軸方向位置に対応する測定値の平均値である。

## (2) 検証解析

VIENUSコードの検証解析では、上記(1)の照射試験条件を入力とし、黒鉛スリーブの熱・照射応力解析を実施して、黒鉛スリーブ内径の照射寸法変化を求めた。この解析結果を実験値と比較することによりコードの妥当性を検討した。

### 1) 解析条件

第8次OGL-1 燃料体照射後試験における黒鉛スリーブは、Fig. 4.2 に示すように軸対称の構造であるため、解析では軸対称モデルを用いた。検証解析における要素分割図及び境界条件をFig. 4.4 に示す。有限要素メッシュは、黒鉛スリーブのうち燃料コンパクトの装荷されている部分(720mm)のみを軸対称でモデル化した。VIENUSコードへの温度及び照射量の入力値は以下のとおりとした。Table 4.

6 にSTPDSP2コード<sup>(15)</sup>による照射温度の計算値と熱電対による照射温度の実測値を示す。また、Table 4.7 はこれより両者の比較を示したものである。同表より、温度実測値はSTPDSP2コードによる黒鉛スリーブ内外面温度の計算値よりも平均で10.2%大きい。従って、本検証解析でのVIENUSコードへの温度分布の入力値は、STPDSP2コードにより得られた黒鉛スリーブの軸方向及び径方向の温度計算結果を+10.2%補正して用いた。また、Table 4.4 及び4.7に示したように、炉心側と炉心反対側での測定温度には、照射期間を通して平均温度より約74℃、比率にすると7.23%の差がある。軸対象の解析モデルでは、この周方向の温度分布を考慮できないので、本検証解析においては、この温度分布を周方向の平均温度からの温度変動幅の半分としたパラメータ解析を実施した。これは、黒鉛スリーブの内径変化率が黒鉛スリーブ全体の照射挙動に起因するものであることより、黒鉛スリーブの体積を考慮したものである。

また、VIENUSコードへの照射量の軸方向分布は、Fig. 4.3(a)の分布を用いた。なお、高速中性子照射量は、Fig. 4.3(b)に示したように相対値ベースで $0.91 \pm 0.27$ の周方向分布を有する。標準ケースの解析では、これらの平均値である0.91を用いた。高速中性子照射量の周方向の分布については温度分布と同様のパラメータ解析を実施した。

## 2) 物性値

第8次OGL-1燃料体の黒鉛スリーブは、IG-110黒鉛を使用している。このことより、検証解析には、以下に示すIG-110黒鉛の物性値（設計用データ）<sup>(6)(7)</sup>を用いた。

### ① 熱伝導率

熱伝導率の温度及び照射量依存性は、Fig. 2.5(a)及び(b)に示す値を用いた。

### ② 弾性係数

縦弾性係数の温度及び照射量依存性は、Fig. 2.3(a)及び(b)に示す値を用いた。なお、Fig. 2.3(a)の室温・未照射の縦弾性係数 $E_0$ は、9.8 GPaとし、ポアソン比は、0.14とした。

## ③ 平均熱膨張係数

平均熱膨張係数の温度及び照射量依存性は、Fig. 2.4(a)及び(b)に示す値を用いた。

## ④ 照射寸法変化（照射ひずみ）

照射ひずみとなる照射寸法変化の照射温度及び照射量依存性は、Fig. 2.2に示す値を用いた。

## ⑤ 照射クリープ定数

遷移クリープ及び定常クリープのパラメータを、照射クリープひずみ $\varepsilon^c$ との関係で以下に示す。

$$\varepsilon^c = \{1 - \exp(-b\Phi)\} a\sigma / E_0 + M_c\sigma\Phi$$

ここで、 $E_0 = 9.8$  (GPa)

$$a = 1.0$$

$$b = 4.5 \{(10^{24} \text{ m}^{-2})^{-1}\}$$

$$M_c = 1.22 \times 10^{-5} \exp(5.37 \times 10^{-4} T_1 + 0.736) \cdot \{(\text{MPa})^{-1} (10^{24} \text{ m}^{-2})^{-1}\}$$

$T_1$  : 照射温度 (°C)

$\Phi$  : 高速中性子照射量 ( $10^{24} \text{ n/m}^2, E > 29 \text{ fJ}$ )

$\sigma$  : 応力 (MPa)

なお、遷移クリープのパラメータ  $a$ ,  $b$  は、Fig. 2.8 の係数と以下の関係にある。

$$a = E_0 / E^T, \quad b = M^T \cdot E^T$$

クリープポアソン比は、0.3を用いた<sup>(6)(7)</sup>。

## 3) 解析結果

黒鉛スリーブの内径変化率の解析結果を、Fig. 4.5 に示す。図中の解析値は、実線が高速中性子照射量と照射温度を周方向の平均値とした標準ケースの結果で、

破線が周方向の高速中性子照射量と照射温度の変動を考慮した解析結果である。

解析値と実験値を比較すると、黒鉛スリーブの両端部を除き両者は良く一致している。この両端部での解析と実測値の差異については、主に以下の3点が考えられる。

- ①両端部の内径変化率は0.01%程度で、実際の照射前後の寸法変化は僅か $3.6\mu\text{m}$ であるので、寸法測定誤差（変化率で約0.025%）の影響を受ける値である。
- ②照射量の大きな黒鉛スリーブ中央部が評価上重要であるために、解析においてはFig. 4.4に示したように黒鉛スリーブを円筒でモデル化し端部の形状を忠実にモデル化していない。
- ③境界条件である端部の照射量は核計算自体その誤差が他の箇所 비해大きい。

これ等の理由により、黒鉛スリーブの両端部で解析値と実験値が良く一致しないと考えられる。ただし、解析と実験の比較において重要なのは、照射による影響が明確に現れかつ照射条件も明らかな箇所での比較であり、この箇所は黒鉛スリーブ中央である。

以上より、解析で得られた黒鉛スリーブ中央の内径変化率は、周方向の高速中性子照射量と照射温度の変動を考慮すると、実験値とよい一致を示している。

#### 4. 2 Peach Bottom 燃料体照射試験

##### (1) 照射試験の概要

Peach Bottom 炉（蒸気タービン発電用実験炉）は、米国の高温ガス炉であり、1967年から運転を開始し、1974年に運転を終了した。GAT社では、Peach Bottom 炉を用いて燃料体黒鉛ブロックの照射試験を実施し、熱・照射応力解析コードの検証が可能なデータを取得している。Peach Bottom 炉で照射された主な試験燃料体の照射条件を Table 4.8 に示す<sup>(17)</sup>。ここで、試験燃料体には、燃料ピンが6本のもの（FTE-14, -15）及び8本のもの（FTE-2, -3, -4, -5, -6）の2種類がある。試験燃料体の黒鉛ブロックは、米国GLC社製のH-327黒鉛である。黒鉛ブロックの照射後試験では、照射による寸法変化、径方向切断による円周方向残留ひずみの測定等を実施している。

VIENUS コードの検証解析は、照射試験体の数が多くかつ熱・照射応力解析に必要なデータが公開されているFTE-6（燃料ピンが8本）の試験燃料体黒鉛ブロックとした。なお、解析値と実験値は、照射前後における黒鉛ブロックの外径変化及び炉停止時の残留ひずみに起因する円周方向の照射応力による溝間寸法変化により比較した。

### 1) 照射試料

Peach Bottom 炉による照射試験は、Fig. 4.6 に示すような黒鉛製の燃料スリーブに試験燃料体を高さ方向に3又は6体収納して実施している。試験燃料体には、黒鉛ブロックと燃料温度を測定するために2箇所熱電対を配している。Fig. 4.7 に燃料ピンが8本の試験燃料体の平断面図を示す。黒鉛ブロックは、高さ790 mm、外径約70 mm、内径約28mmの中空円筒である。冷却材のヘリウムガスは、燃料スリーブの外周を下降流となって流れる。

### 2) 照射後試験

照射試験後、試験燃料体を炉外に取り出し Fig. 4.8 に示すように中空円筒の黒鉛ブロック胴部をリング状に輪切りにし、そのリングを径方向に切断する。照射後試験においては、図に示すように、照射前後の外径のひずみ及び切断前後の外径と溝間寸法を測定している。ここで、外径ひずみ（照射前後の外径寸法変化量／照射前の外径寸法）を $\epsilon_D$ 、外径変化量（切断前の外径－切断後の外径）を $\Delta D$ 、溝間寸法変化量（切断前の溝間寸法－切断後の溝間寸法）を $\Delta G$ とする。炉停止時の残留ひずみに起因する照射応力に対応する外径変化量 $\Delta D$ と溝間寸法変化量 $\Delta G$ を、本検証解析の比較項目とした。Table 4.9 に、燃料ピン8本の照射試験体の外径変化量 $\Delta D$ と溝間寸法変化量 $\Delta G$ の測定結果をまとめて示す<sup>(17)</sup>

<sup>(18)</sup>。 $\epsilon_D$  が負になるのは、照射ひずみにより黒鉛ブロック全体が収縮するためである。 $\Delta D$ と $\Delta G$ が負になるのは、径方向切断後リング状の黒鉛ブロックが収縮することを示している。炉停止時の面内応力分布を推定するために、 $\Delta D / \Delta G$ 比を示す。この比が1に近い程円周方向応力は、径方向に渡って均一化し、1より小さくなるに従い、内周部に比べ外周部ほど収縮させるような、径方向に沿った不均一応力分布になる。本試験燃料体の $\Delta D / \Delta G$ 比は、0.2 から0.4 の範

囲にあり、各試験体とも、炉停止時の円周方向応力はほぼ等しい径方向分布になることが分かる。なお、黒鉛ブロックの熱・照射応力は、照射温度と照射量に大きく依存するため、Table 4.9 に黒鉛ブロックの平均温度と照射量を併せて示す。

### 3) 熱・照射条件

熱・照射応力解析を実施するにあたり、運転期間を通じた冷却、照射、燃料の発熱条件等の入力データが必要となる。このため、VIENUS コードの検証解析では、熱・照射応力の解析に必要な全てのデータが公開されている FTE-6 の試験燃料体 3 体のうち最下段の試験燃料体 (Table 4.8 に示す Body ID が 1 のもの) を対象とした<sup>(17)</sup><sup>(18)</sup>。FTE-6 の Body 1 の試験燃料体の熱・照射条件をまとめて Table 4.10 に示す。同表に示す数値は、核・熱計算コードを用いて推定した平均値<sup>(18)</sup>を示す。熱的境界条件の精度については、熱電対で測定した温度と熱計算コードで得られた測定箇所の温度を比較することで、計算コードの推定値は、黒鉛ブロックの温度で約±10%の範囲でばらつくと評価<sup>(18)</sup>している。照射量は直接測定していないが、Cs-137 と Cs-134 を対象とした燃料ピンのγ線エネルギー分析により熱中性子照射量を測定している。測定値と計算値の炉心軸方向の相対比較を Fig. 4.9 に示す。熱・照射応力解析は、図中の Body 1 の中央で、計算値は測定値に比べ約10%程度大きめに推定している。

## (2) 検証解析

上記(1)の照射試験に基づき、VIENUS コードを用いて、燃料体黒鉛ブロックの熱・照射応力解析を実施し、外径変化量と溝間寸法変化量を実験値と解析値で比較する。なお、燃料体黒鉛ブロックの温度分布履歴は、汎用有限要素法計算コード”ABAQUS”を用いて計算した。

### 1) 解析条件

Peach Bottom 炉の試験燃料体黒鉛ブロックは、Fig. 4.7 に示したように中空円筒の胴部に燃料挿入孔が円周上に規則的に8孔設けられた構造である。黒鉛ブロックに挿入する燃料ピンは、同一ブロック内では同一である。これらより、解析の対象となる黒鉛ブロックは、構造及び熱・照射条件上も黒鉛ブロック中心軸に

対してほぼ対称となる。解析モデルは、解析の目的が外径変化量と溝間寸法変化量を実験値と解析値で比較することから、黒鉛ブロックの水平断面 1/2領域とした。これは、構造及び熱・照射条件の観点からも十分に解析対象をモデル化している。伝熱解析においては、2次元の8節点伝熱要素を用いた。伝熱解析に用いた熱的境界条件を、Table 4.10 及び Fig. 4.10 に示す。伝熱解析は、Table 4.10に示す各Power day 毎に実施した。

応力解析時の有限要素メッシュ分割図を、Fig. 4.11 に示す。要素は8節点一般化平面ひずみ要素を用いて、面外自由度についてはx軸回転のみを拘束した。黒鉛ブロック径方向切断後の応力解析は、切断部の要素の剛性を他の要素の剛性に比べ十分小さく（実際の剛性の $10^{-6}$ ）することで模擬した。

## 2) 物性値

Peach Bottom 炉の試験燃料体黒鉛ブロックは、H-327黒鉛を使用している。伝熱解析における黒鉛及び燃料の熱伝導率は、Table 4.10 に示したとおりである。熱・照射応力解析には、以下に示すH-327黒鉛の物性値<sup>(17)(19)(20)</sup>を用いた。なお、H-327黒鉛は異方性があり、ブロック軸方向と径方向で物性値が異なる。検証解析は、黒鉛ブロックの平面内（ブロック径方向）の熱・照射応力による残留ひずみを問題とするため、ブロック径方向の物性値を使用した。

### ① 弾性係数

縦弾性係数の照射温度及び照射量依存性を、Fig. 4.12 に示す。未照射材の平均の縦弾性係数は、ブロック軸方向で 11.88 GPa, ブロック径方向で 4.78 GPa である。ポアソン比は、0.117を用いた。

### ② 平均熱膨張係数（熱ひずみ）

Fig. 4.13 に、H-327黒鉛のブロック軸方向及び径方向の熱ひずみを示す。照射による熱ひずみの変化は、10%以下と僅かであることより、照射による熱ひずみの変化は考慮しない。



## ③ 照射寸法変化（照射ひずみ）

照射ひずみとなる照射寸法変化の照射温度及び照射量依存性を、Fig. 4.14 に示す。

## ④ 照射クリープ定数

ブロック径方向の遷移クリープ及び定常クリープのパラメータを、照射クリープひずみ  $\varepsilon^c$  との関係で以下に示す。

$$\varepsilon^c = \{1 - \exp(-b\Phi)\} a\sigma + M_c\sigma\Phi$$

$$\text{ここで、 } a = 9.044 \times 10^{-5} \exp(1.72 \times 10^{-3} T_1)$$

$$b = 5 \{ (10^{24} \text{ m}^{-2})^{-1} \}$$

$$M_c = 2.306 \times 10^{-5} \exp(1.42 \times 10^{-3} T_1)$$

$$\{ (\text{MPa})^{-1} (10^{24} \text{ m}^{-2})^{-1} \}$$

$T_1$  : 照射温度 (°C)

$\Phi$  : 高速中性子照射量 (  $10^{24} \text{ m}^{-2}, E > 29 \text{ fJ}$  )

$\sigma$  : 応力 (MPa)

## 3) 解析結果

燃焼初期及び燃焼末期における黒鉛ブロックの断面内温度分布を、各々 Fig. 4.15 (a) と (b) に示す。運転時、円筒形状の黒鉛ブロックには、高温の内周部と低温の外周部の温度差により、内周部で圧縮、外周部で引張の熱応力が、面内方向及び面外方向で発生する。Fig. 4.16 は、黒鉛ブロック内で最高温度と最低温度になる位置での温度履歴を示す。両者の温度差は、燃焼初期で約 130 °C、燃焼末期で約 190 °C となり、燃焼とともに黒鉛の熱伝導率が低下することに起因してその差は大きくなる。燃焼期間を通じて平均温度差は、約 160 °C である。

原子炉停止時室温雰囲気での黒鉛ブロック内の最大主応力分布を、Fig. 4.17 に示す。Fig. 4.18 は、燃焼初期、黒鉛ブロック内で最大の引張応力と圧縮応力が発生する位置での応力履歴を示したものである。燃焼初期及び各運転サイクル変更直後は、遷移クリープにより急激に応力が緩和されている。また、各運転状態変更直後、急激に応力が増加する理由は、Table 4.10 に示すように、燃料の発熱密

度の変更にもともなう熱応力の変化によるものである。熱応力は、照射ひずみとともに照射クリープにより緩和され、残留ひずみが蓄積して原子炉停止時にはFig. 4.17 に示すような照射応力（残留応力）が発生する。なお、Fig. 4.17 には面外方向の応力成分も含まれている。面内の最大主応力は、リング内周部で大きな周方向の引張応力が発生し、外周部に向かうにしたがいその応力は低下している。この面内の残留応力は、Fig. 4.8 に示すような燃料ピン挿入孔を貫通する方向にスリットを入れることにより開放され、リング全体として収縮（Fig. 4.8 のDとGが切断後小さくなる。）する。

リング切断後の最大主応力分布を、Fig. 4.19 に示す。図中の応力は面外方向の成分であり、径方向切断後も開放されず、残留している。原子炉運転中は、リング内周部は外周部に比べて高温となり、この熱膨張差に起因して内周部で圧縮、外周部で引張の応力が発生するが、照射クリープによりこれらの応力が緩和され、原子炉停止時に応力が反転し、リング内周部で大きな引張応力が発生している。

解析で得られた外径ひずみ、溝間寸法変化量及び外径変化量をTable 4.11 に示す。VIENUSコードの解析結果は、実測値よりも2～5倍大きな値を示している。この解析値と実測値の相違を、Table 4.9 の照射試験結果に基づき検討する。各照射試験（Table 4.9 のElement No. が各照射試験に対応する。）での3体の試験燃料体の測定値を比較すると、FTE-3 と FTE-4 では3体ともほぼ同程度の値となっているが、今回検証解析の対象とした FTE-6 Body ID 1 の試験燃料体の測定値は同一照射試験の他の2体に比べ約 1/2～1/3 と小さい。照射データは一般にばらつきが大きくなることを勘案すると、本試験燃料体の照射データは下限値に近い値と推定され、本試験燃料体の平均的な値を他の2体の実測値より求めると実測値の約 2～3倍となる。この照射データのばらつきを考慮しても、解析結果は試験結果に比べ同等または大きい値を示す。

以上より、本コードを黒鉛構造物の構造設計に用いることは、保守的な評価結果を与えると言える。従って、本コードをHTTRの炉内黒鉛構造物の粘弾性解析に用いることは妥当である。

Table 4.1 Irradiation time of the 8th OGL-1 fuel

Cycle		Irradiation time ( EFPH )*
64 th	The first half	206.1
	The latter half	69.9
65 th	The first half	290.3
	The latter half	198.5
66 th	The first half	290.2
	The latter half	235.7
Total		1290.7

\* Effective full power hour

Table 4.2 Graphite sleeve inner surface temperature calculated by the STPDSP2 code

Compact No.	Temperature ( °C )		
	64th cycle*	65th cycle*	66th cycle*
1	738, 863	838, 843	860, 866
2	782, 908	881, 885	896, 903
3	821, 949	921, 925	930, 938
4	857, 987	957, 960	960, 970
5	887, 1020	988, 992	988, 998
6	912, 1047	1015, 1018	1011, 1022
7	931, 1070	1036, 1039	1030, 1042
8	943, 1086	1052, 1055	1045, 1057
9	950, 1096	1062, 1065	1054, 1067
10	951, 1100	1065, 1069	1059, 1071
11	945, 1098	1063, 1067	1058, 1071
12	934, 1090	1055, 1059	1053, 1065
13	916, 1076	1041, 1045	1043, 1054
14	894, 1056	1021, 1026	1028, 1038
15	866, 1031	997, 1003	1008, 1018
16	834, 1001	967, 974	985, 994
17	798, 967	934, 941	957, 966
18	779, 936	906, 913	928, 935
19	766, 922	892, 899	916, 923
20	753, 909	879, 886	906, 912

\* ; (the first half, the latter half)

Table 4.3 Graphite sleeve outer surface temperature calculated by the STPDSP2 code

Compact No.	Temperature ( °C )					
	64th cycle*		65th cycle*		66th cycle*	
1	699.	825	800.	806	825.	830
2	737.	864	838.	843	856.	862
3	772.	900	873.	878	885.	892
4	803.	933	905.	910	912.	919
5	831.	962	934.	938	936.	944
6	854.	987	958.	962	957.	965
7	872.	1008	978.	982	974.	983
8	885.	1024	993.	997	988.	998
9	893.	1035	1004.	1008	998.	1008
10	896.	1041	1009.	1013	1004.	1014
11	894.	1042	1010.	1014	1006.	1016
12	887.	1038	1006.	1010	1005.	1014
13	875.	1029	997.	1002	999.	1008
14	858.	1015	983.	988	989.	998
15	837.	997	964.	971	975.	984
16	811.	974	942.	949	958.	966
17	782.	947	915.	923	937.	945
18	766.	922	892.	899	914.	921
19	755.	910	881.	888	905.	911
20	744.	899	870.	877	896.	902

\* : (the first half, the latter half)

Table 4.4 Graphite sleeve temperature measured by themocouples

Cycle		Temperature ( °C )	
		Core side	Vessel side
64 th	The first half	992	855
	The latter half	1138	988
65 th	The first half	1122	974
	The latter half	1125	981
66 th	The first half	1104	945
	The latter half	1108	959

Table 4.5 Measured inner diameter change of graphite sleeve

Compact No.	Before irr. ( mm )	After irr. ( mm )	Fractional change
1	36.261	36.263	0.0055
2	36.253	36.255	0.0055
3	36.230	36.226	-0.0110
4	36.224	36.213	-0.0304
5	36.221	36.206	-0.0414
6	36.222	36.202	-0.0552
7	36.220	36.198	-0.0607
8	36.216	36.191	-0.069
9	36.216	36.189	-0.0746
10	36.228	36.205	-0.0635
11	36.238	36.215	-0.0635
12	36.217	36.193	-0.0663
13	36.213	36.191	-0.0608
14	36.215	36.194	-0.0580
15	36.212	36.195	-0.0469
16	36.211	36.197	-0.0387
17	36.217	36.202	-0.0414
18	36.22	36.211	-0.0248
19	36.22	36.214	-0.0166
20	36.224	36.224	0.0

Table 4.6 Comparison between measure and analysis result of graphite sleeve temperature

Cycle		Measured temp. ( °C )		Caluculated temp. ( °C )	
		Core side T1	Vessel side T2	Core side T3	Vessel side T4
64	The first half	992	855	834	811
	The latter half	1138	988	1001	974
65	The first half	1122	974	967	942
	The latter half	1125	981	974	949
66	The first half	1104	945	985	958
	The latter half	1108	959	994	966



Table 4.7 Evaluation of graphite sleeve temperature

Cycle		Difference of measure and analysis value $\alpha^*$ ( % )	Difference of core side and vessel side value $\beta^*$ ( % )
64 th	The first half	12.3	7.42
	The latter half	7.65	7.06
65 th	The first half	9.81	7.06
	The latter half	9.55	6.84
66 th	The first half	11.0	7.76
	The latter half	11.0	7.21
Mean value		10.2	7.23

$$* ; \alpha = 100 \times \{ (T1+T2)-(T3+T4) \} / ( T3+T4 )$$

$$\beta = 100 \times | T1-T2 | / ( T1+T2 )$$

where T1, T2, T3 and T4 are defined in Table 4.6.

Table 4.8 Summary of irradiation conditions of Peach Bottom test element

Element No.	Body ID	Operating period ( EFPD )		EOL Fluence ( $10^{25}$ n/m <sup>2</sup> , E>29fJ )	Mean temperature during operation ( °C )
		BOL	EOL		
FTE-2	1	29	435	1.27	736
	2			1.70	950
FTE-3	1	276	435	0.41	703
	2			0.54	890
	3			0.34	860
FTE-4	1	276	812	1.40	743
	2			1.94	970
	3			1.26	955
FTE-5	1	29	1068	2.73	742
	2			3.67	953
	3			2.58	963
FTE-6	1	270	1035	2.10	769
	2			2.83	998
	3			1.96	998
FTE-14	1	435	812	1.01	830
	2			1.44	1367
	3			1.05	1273
FTE-15	1	385	897	1.46	668
	2			2.05	1114
	3			1.62	1079

Table 4.9 After cutting dimensional change of Peach Bottom eight-hole teledial elements

Element No.	Body ID	Change of dimension after cutting $\Delta D, \Delta G$ ( mm )			EOL Fluence ( $10^{25}$ n/m <sup>2</sup> , $E > 29$ fJ )	$T_B^*$ ( °C )
		$\Delta G$	$\Delta D$	$\Delta D/\Delta G$		
FTE-2	1	-0.207	-0.052	0.25	1.27	736
	2	----	----		1.70	950
FTE-3	1	-0.305	-0.053	0.17	0.41	703
	2	-0.262	-0.048	0.18	0.54	890
	3	-0.240	-0.044	0.18	0.34	860
FTE-4	1	-0.207	-0.056	0.27	1.40	743
	2	-0.309	-0.062	0.20	1.94	970
	3	-0.213	-0.038	0.18	1.26	955
FTE-5	1	----	----		2.73	742
	2	-0.110	-0.043	0.39	3.67	953
	3	-0.071	-0.023	0.32	2.58	963
FTE-6	1	-0.056	-0.016	0.29	2.10	769
	2	-0.134	-0.039	0.29	2.83	998
	3	-0.133	-0.037	0.28	1.96	998

\* ; Mean block temperature during reactor operation.

Table 4.10 Thermal data of FTE-6 test element during operation

Power day	Fluence ( $10^{25} \text{ n/m}^2$ ,E>29fJ)	Heat generation ( $\text{MW/m}^2$ )		Conductivity ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )			Conductance ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) Sleeve- graphite	Gap length (mm) Fuel- graphite	Coolant temp. (K)	Film coeff. ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
		Fuel	Graphite*)	Fuel	Graphite	Sleeve				
270	0.0	46.4581	0.9781	8.85	65.41	68.79	2119.6	0.1245	660	1191.2
319	0.12	54.2522	1.1422	8.34	58.99	59.91	2183.2	0.1524	666	1174.8
369	0.265	60.7649	1.2793	8.05	53.76	53.3	2221.8	0.1778	673	1188.4
414	0.4	61.6548	1.2981	7.95	50.96	48.69	2218.4	0.188	673	1187.8
414	0.4	52.207	1.0992	7.69	50.44	45.27	2077.0	0.2184	667	1094.2
556	0.75	51.5913	1.0862	7.34	48.73	41.63	2027.1	0.254	661	1214.0
628	0.935	55.3319	1.165	7.22	45.13	37.16	2097.5	0.2692	663	1203.2
678	1.074	59.4537	1.2517	7.13	42.13	33.77	2174.7	0.2896	657	1169.7
777	1.347	60.9629	1.2835	7.11	40.02	31.23	2220.1	0.2997	657	1169.7
777	1.347	60.8854	1.2819	7.1	38.41	29.22	2242.2	0.3023	660	1186.1
827	1.489	50.0079	1.0529	7.05	38.2	27.77	2136.6	0.3124	655	1031.1
877	1.616	50.687	1.0672	6.99	36.39	26.1	2177.5	0.3175	660	1042.5
917	1.716	36.0242	0.7585	6.92	36.78	25.29	1956.6	0.3226	632	897.1
947	1.768	59.3841	1.2503	6.94	32.02	22.99	2364.9	0.3251	659	1101.5
976	1.854	54.7953	1.1537	6.94	31.75	22.59	2309.2	0.3302	650	1047.0
1023	1.981	49.7973	1.0484	6.92	31.49	22.17	2240.5	0.3327	644	1010.7
1035	2.10	49.8568	1.0497	6.91	30.53	21.59	2252.5	0.3327	644	1010.7

\*) H-327 graphite

Table 4.11 Results of verification analysis

Item	Test result	Analysis
Fuel body diam. strain $\varepsilon_D$ ( % )	-0.1	-0.24
Groove change $\Delta G$ ( mm )	-0.056	-0.271
Outer diam. change $\Delta D$ ( mm )	-0.016	-0.078

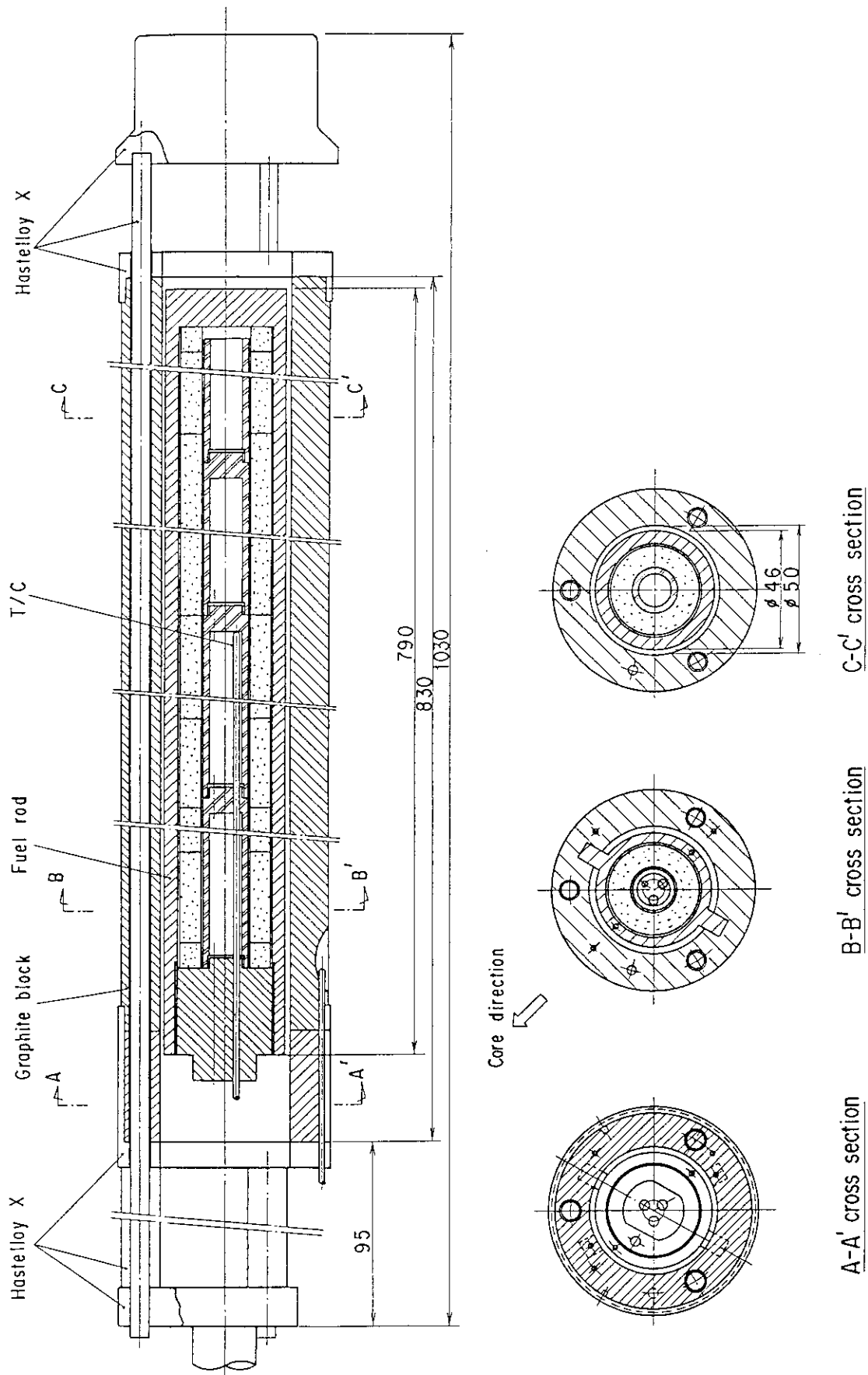
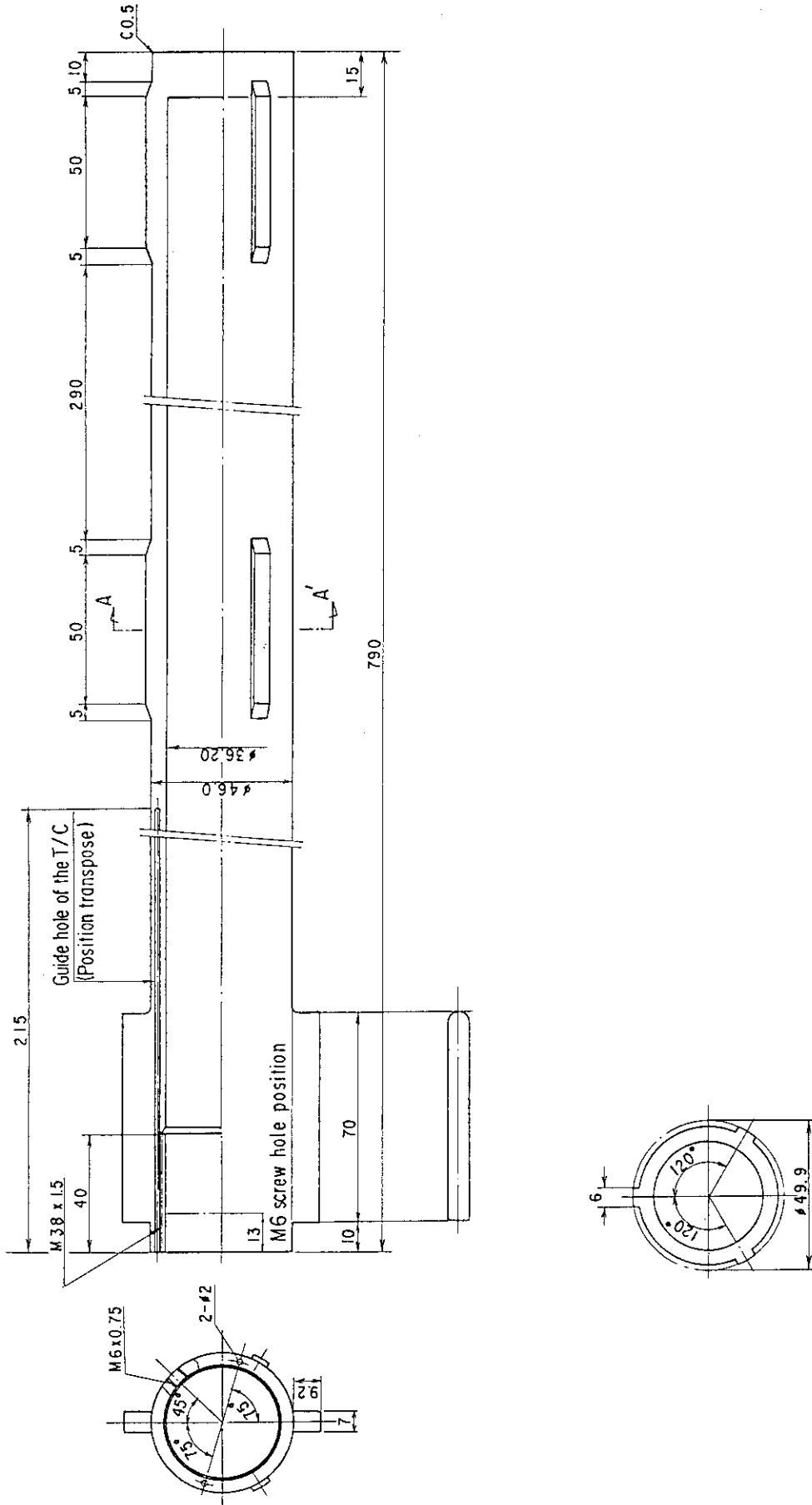


Fig. 4.1 Structure of 8th OGL-1 fuel assembly



A-A' cross section

Fig. 4.2 Graphite sleeve of 8th OGL-1 fuel assembly

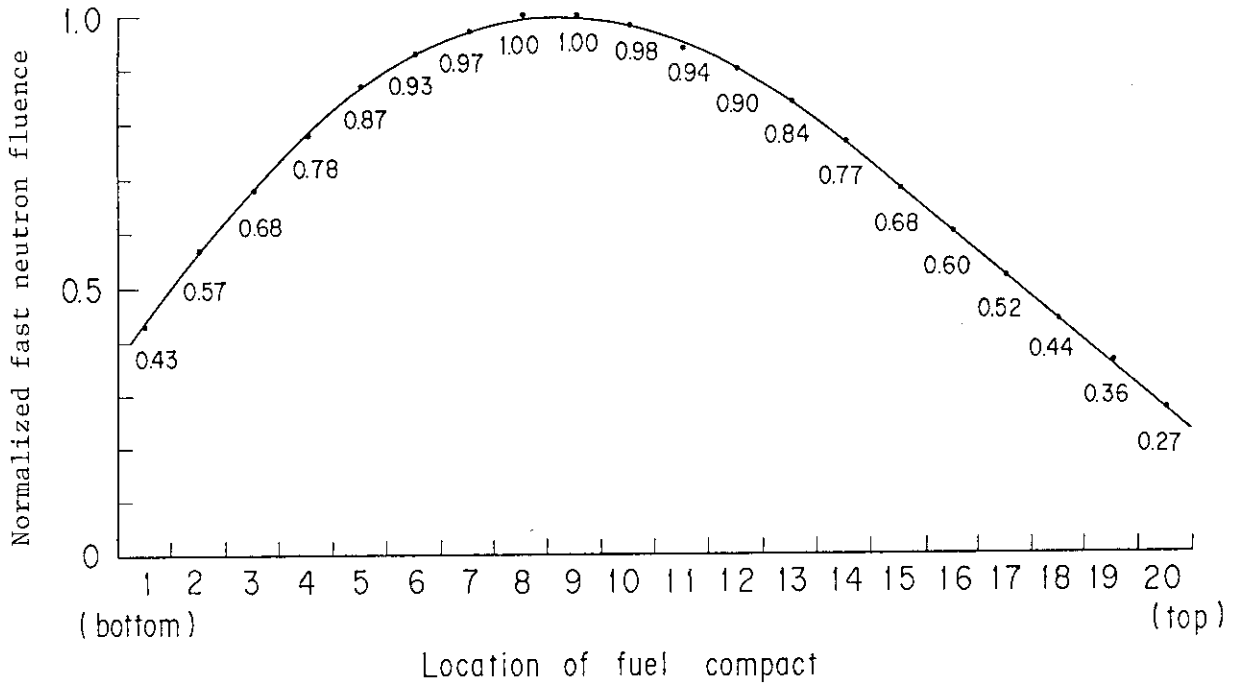


Fig. 4.3(a) Fast neutron fluence distribution along the axial direction of graphite sleeve

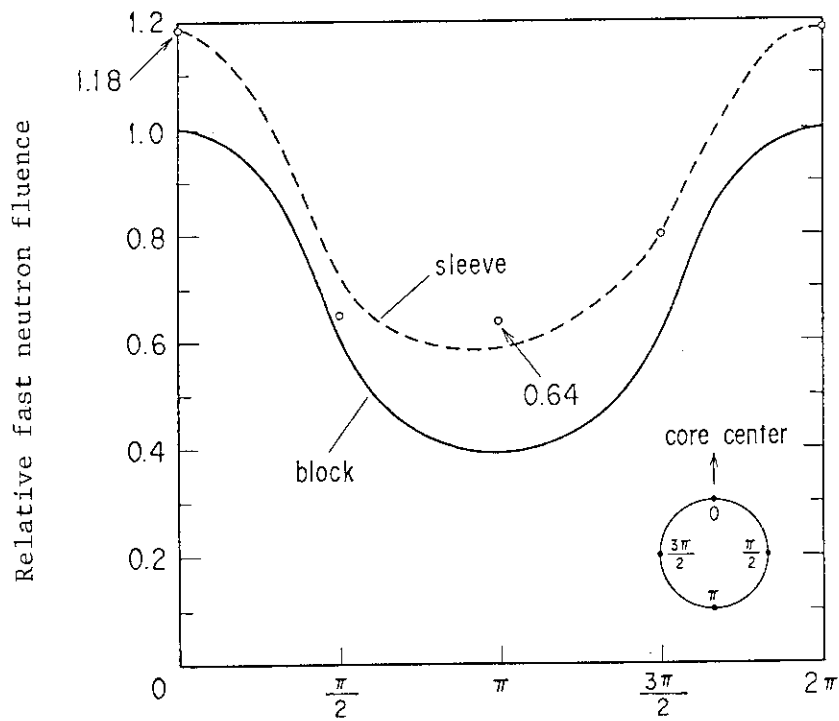
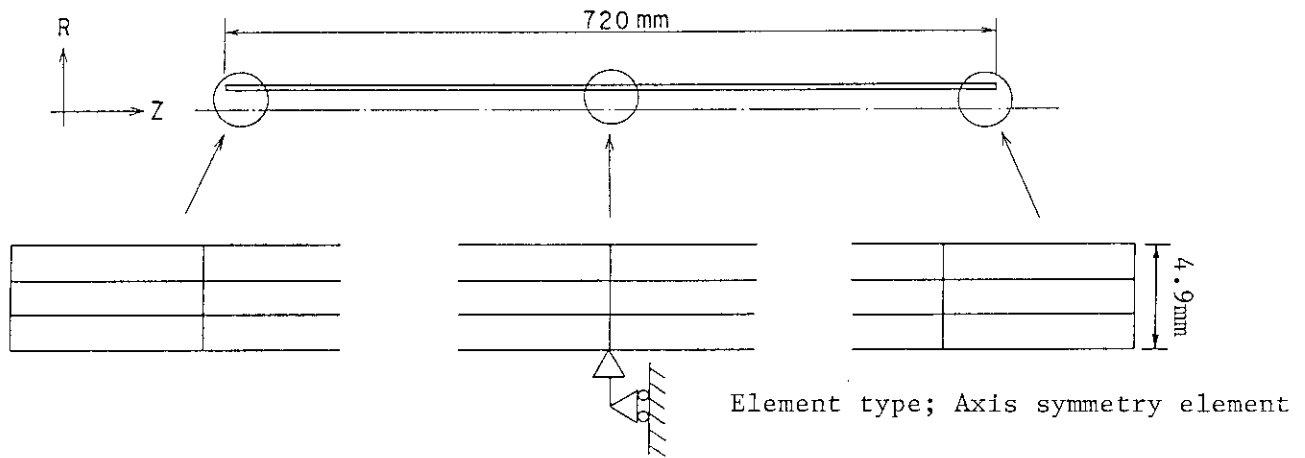


Fig. 4.3(b) Fast neutron fluence distribution along the circumferential direction of graphite sleeve





- Only the part of graphite sleeve where fuel compacts loaded is modeled by FEM
- The number of finite elements is 240, 3 for radial direction, 80 for axial direction

Fig. 4.4 Finite element modeling for the analysis of the inner diameter change of the graphite sleeve

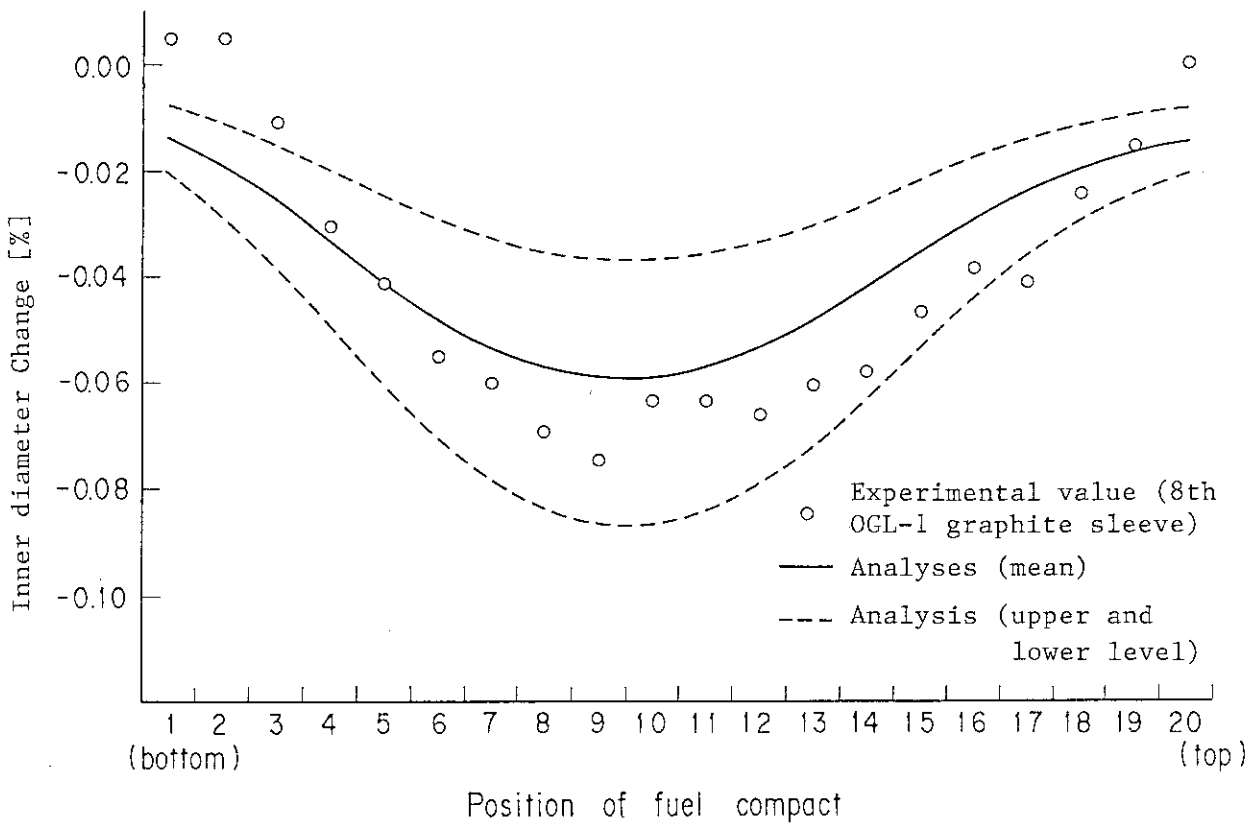


Fig. 4.5 Comparison of the inner diameter change of the graphite sleeve between the experiment value and the analyses value of VIENUS code

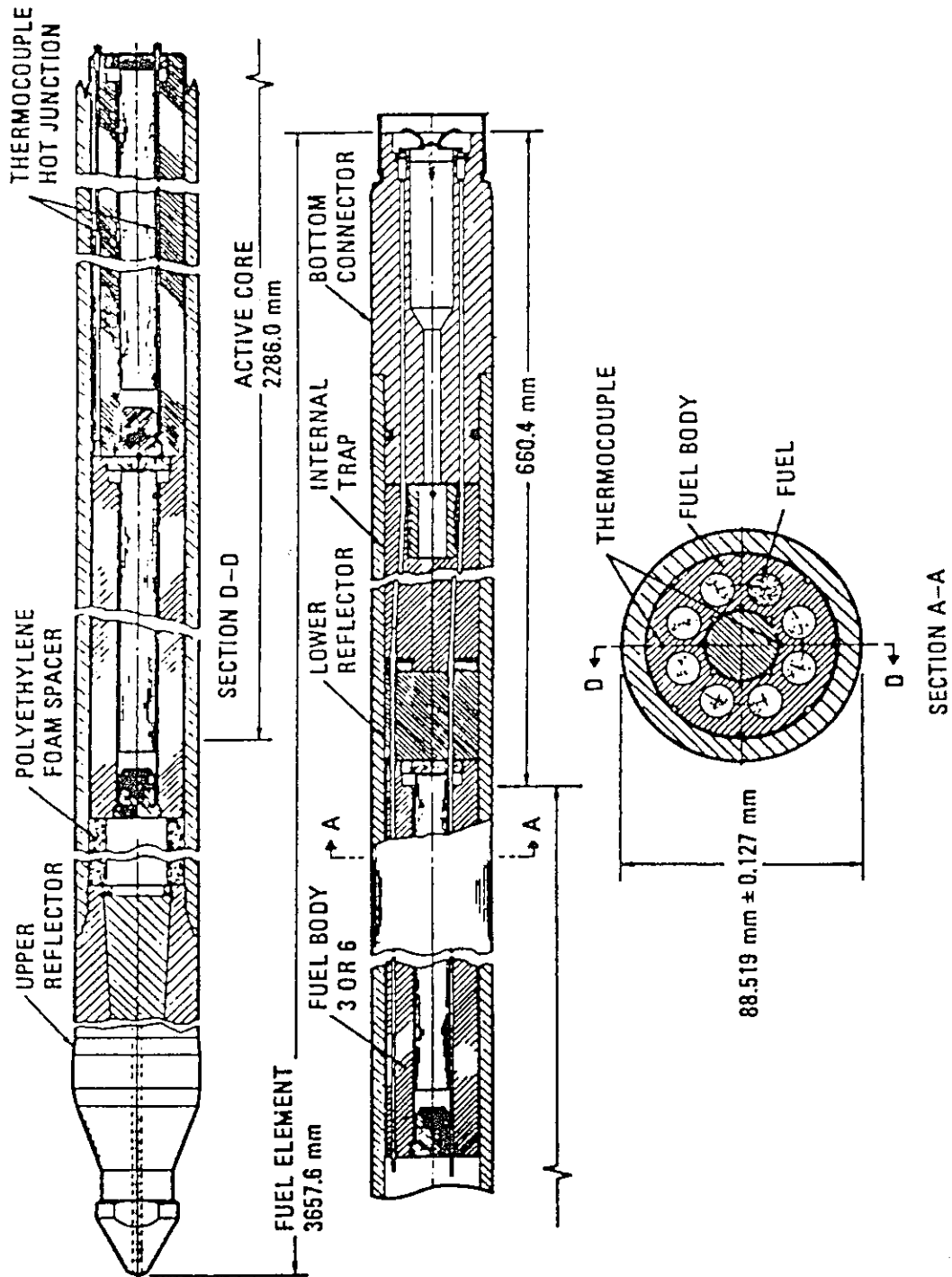
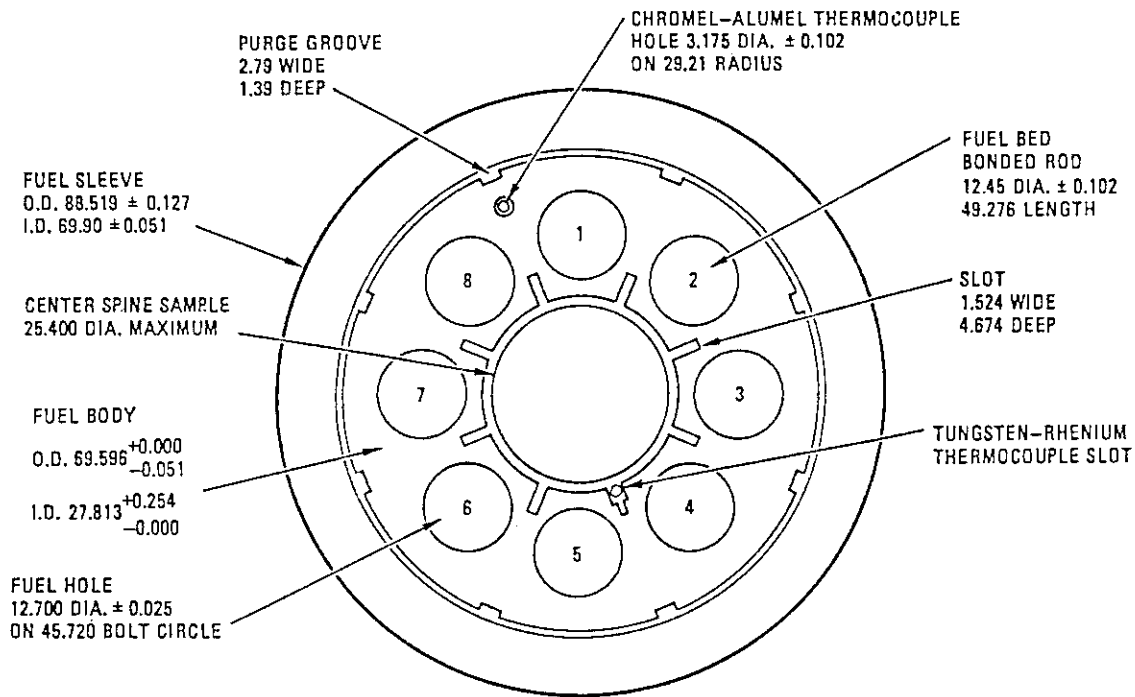


Fig. 4.6 Overall structure of Peach Bottom fuel test element



ALL DIMENSIONS  
IN MILLIMETERS

Fig. 4.7 Cross-sectional view of fuel test element with 8 fuel pines of Peach Bottom reactor

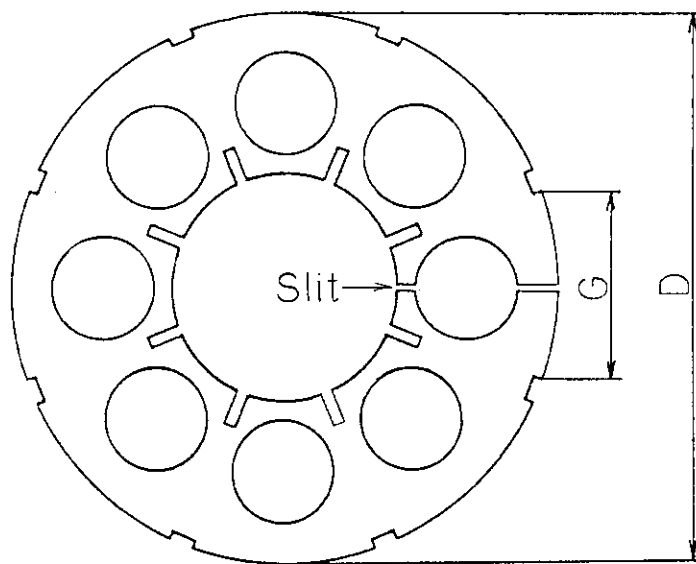


Fig. 4.8 Dimensional change measurements of graphite blocks slices cutted from the fuel test element of Peach Bottom reflector

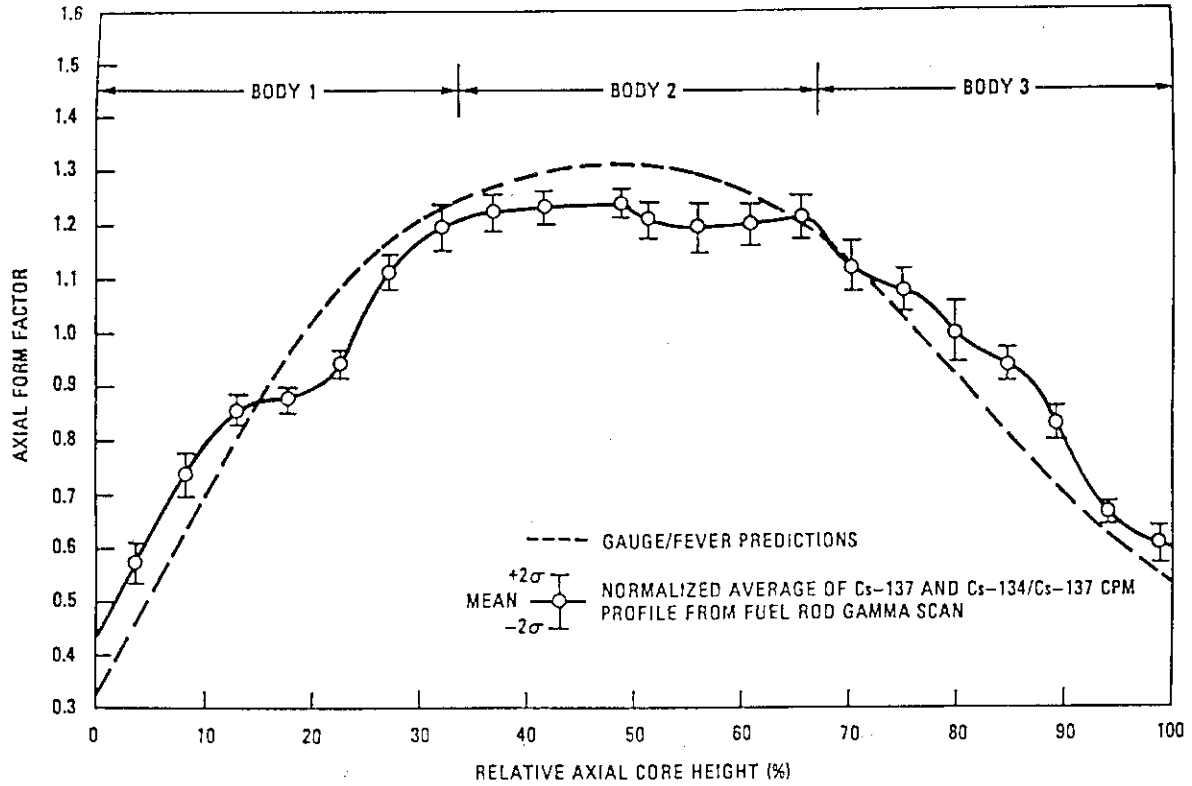


Fig. 4.9 Comparison of relative thermal fast neutron fluence between calculation and measurement of FTE-6 fuel test element

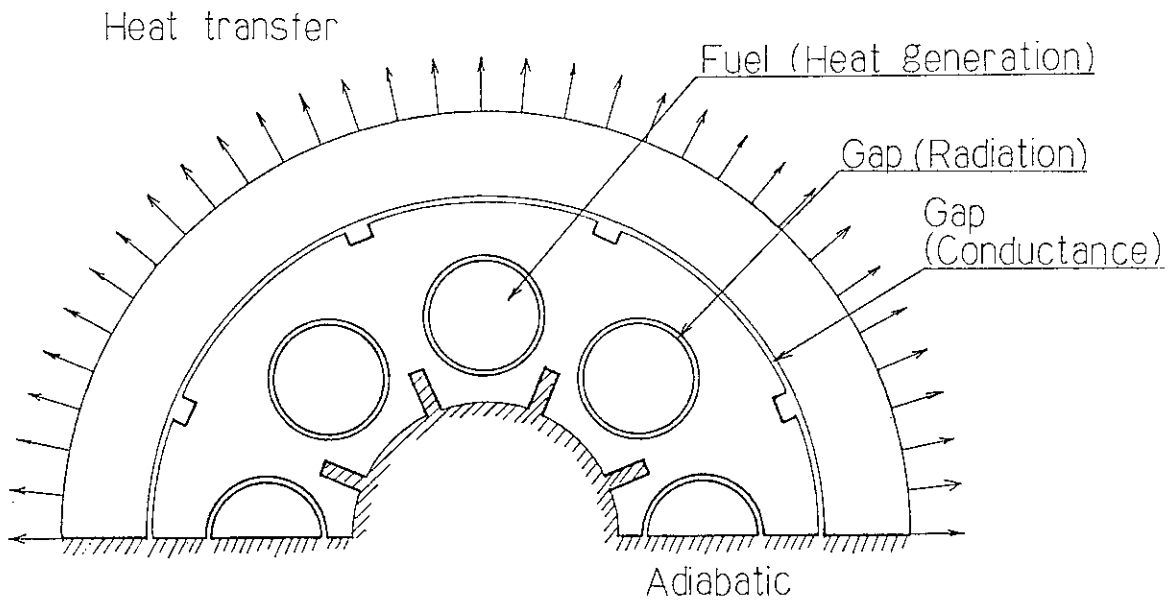


Fig. 4.10 Thermal boundary condition

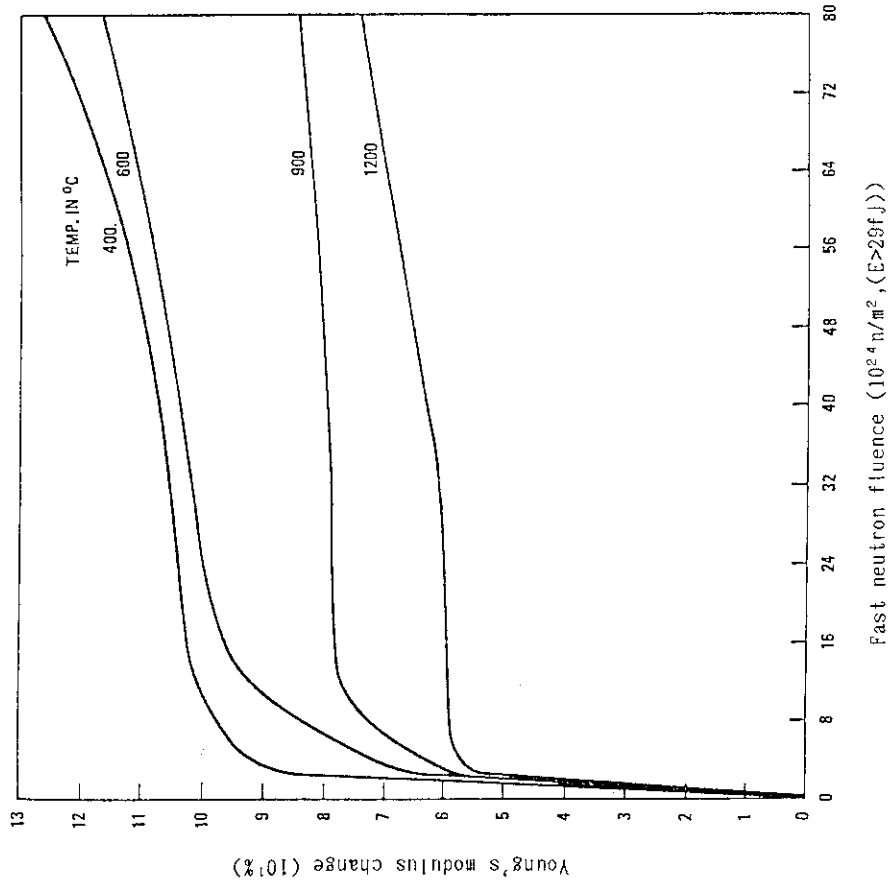


Fig. 4.12 Young's modulus change of H-327 graphite as a function of fast neutron fluence

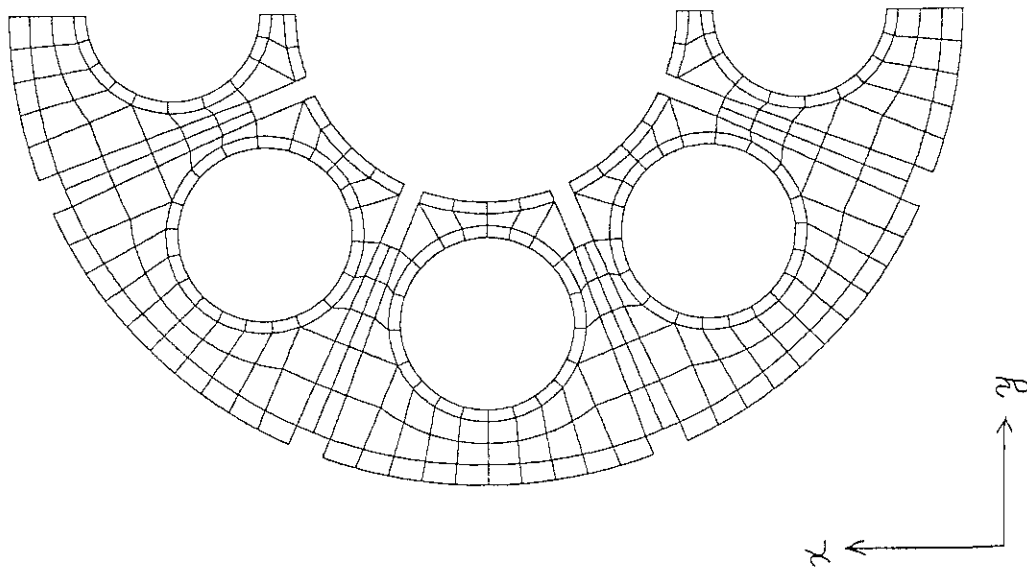


Fig. 4.11 Finite element meshes for graphite block in FTE-6 fuel test element

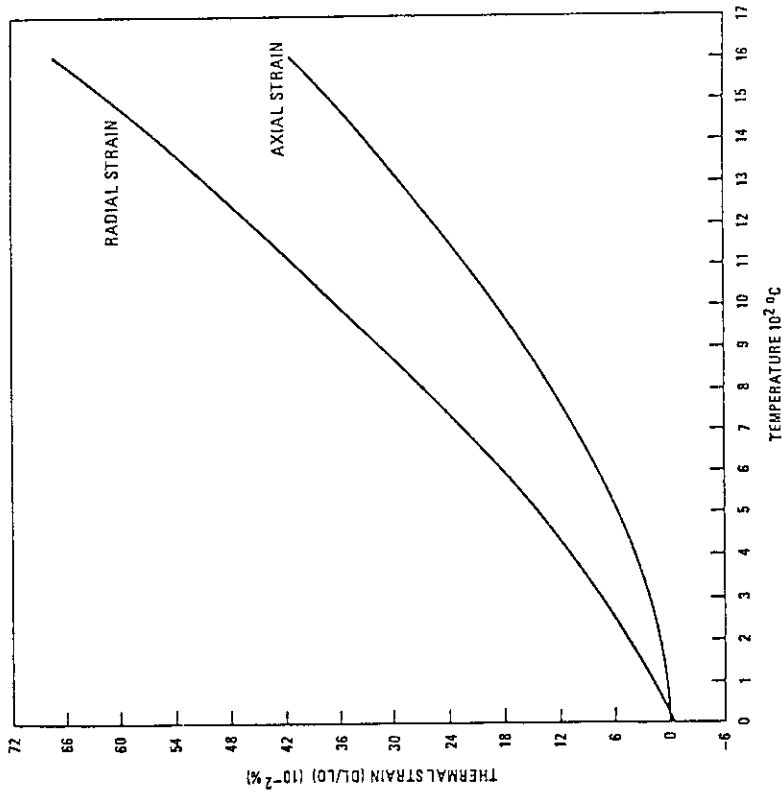


Fig. 4.13 Thermal strain of H-327 graphite as a function of temperature

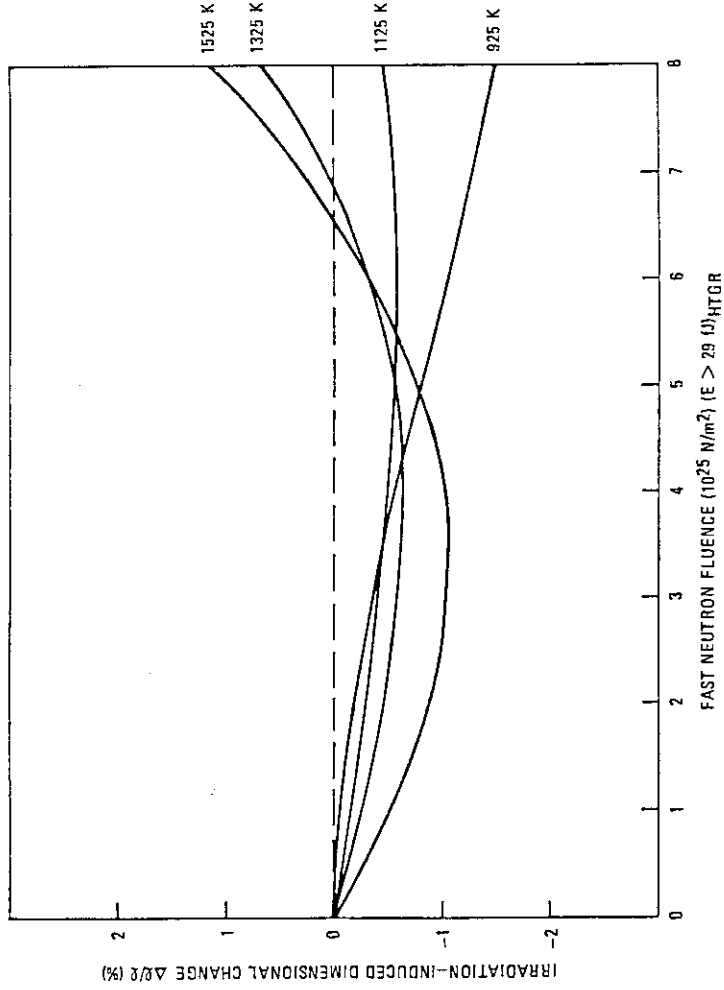


Fig. 4.14 Irradiation-induced dimensional change of H-327 graphite

NT11	VALUE
1	+8.00E+02
2	+8.40E+02
3	+8.80E+02
4	+9.20E+02
5	+9.60E+02
6	+1.00E+03
7	+1.04E+03
8	+1.08E+03
9	+1.12E+03
10	+1.16E+03
11	+1.20E+03

(unit : K)

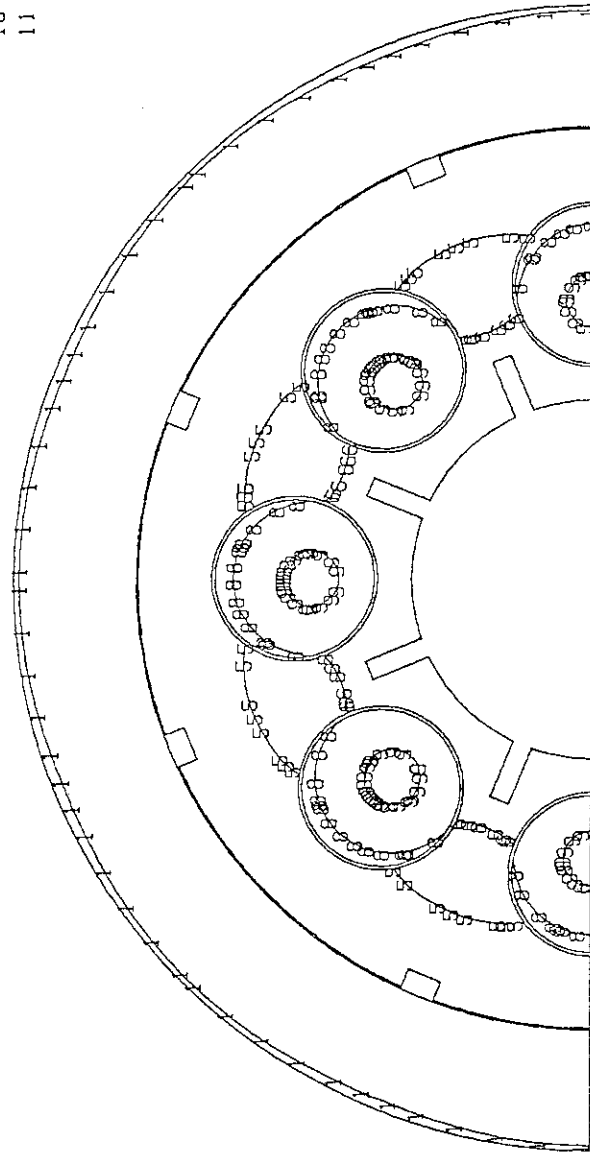


Fig. 4.15(a) Temperature distribution calculated by ABAQUS code at the beginning of life of FTE-6 fuel test element

NT11	VALUE
1	+8.00E+02
2	+8.50E+02
3	+9.00E+02
4	+9.50E+02
5	+1.00E+03
6	+1.05E+03
7	+1.10E+03
8	+1.15E+03
9	+1.20E+03
10	+1.25E+03
11	+1.30E+03

(unit : K)

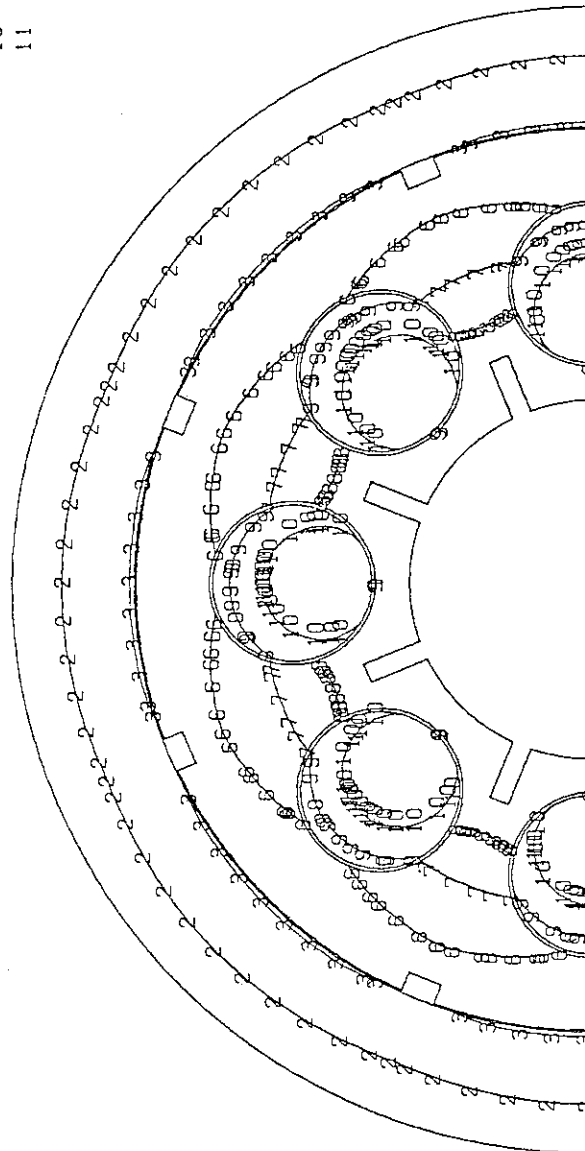


Fig. 4.15(b) Temperature distribution calculated by ABAQUS code at the end of life of FTE-6 fuel test element



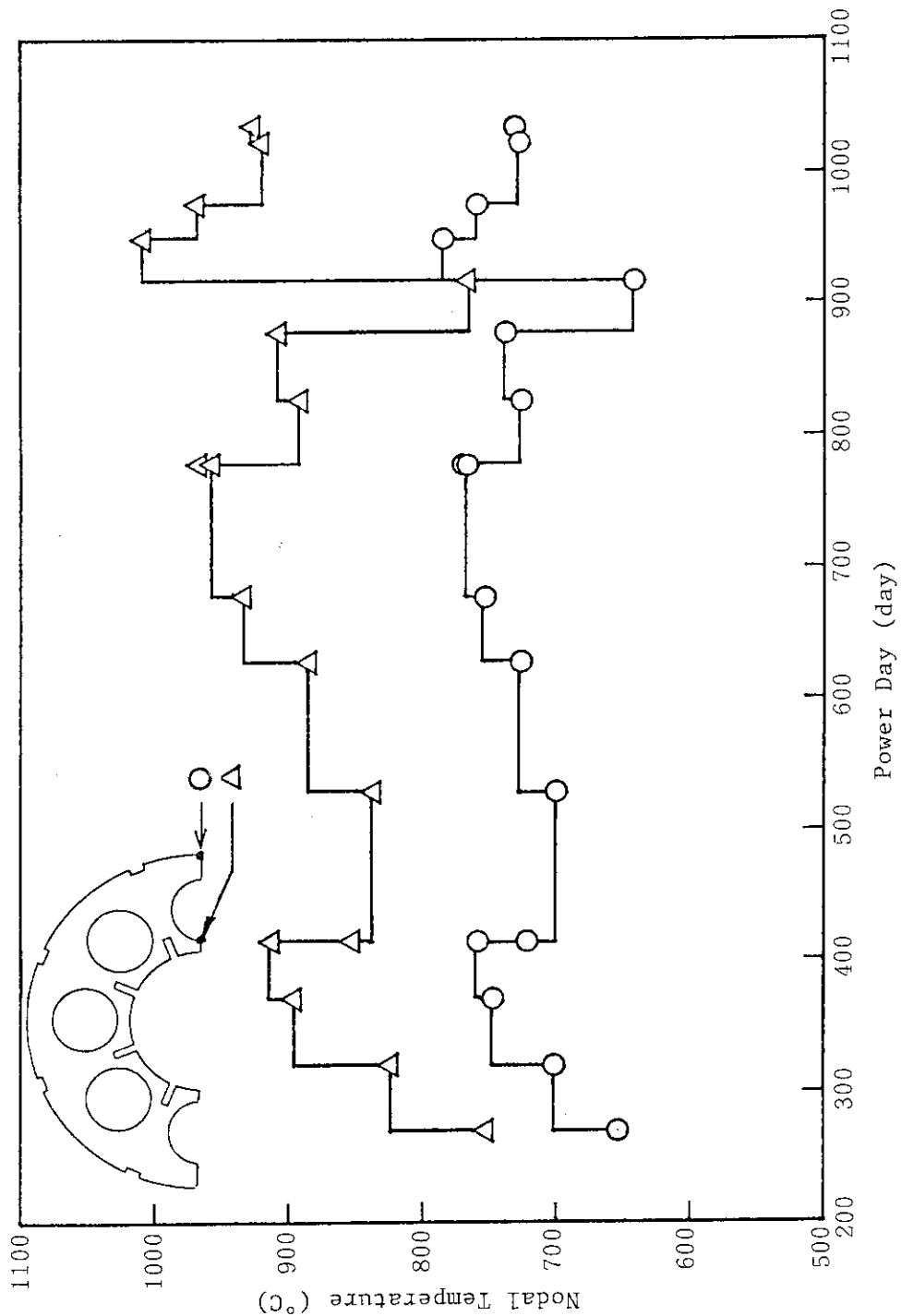


Fig. 4.16 Temperature history of FET-6 fuel test element  
 (Δ: maximum temperature within a fuel block)  
 (○: minimum temperature within a fuel block)

NO.	STRESS
1	0.313
2	0.786
3	1.259
4	1.732
5	2.205
6	2.678
7	3.151
8	3.624
9	4.097
10	4.570

(unit: MPa)

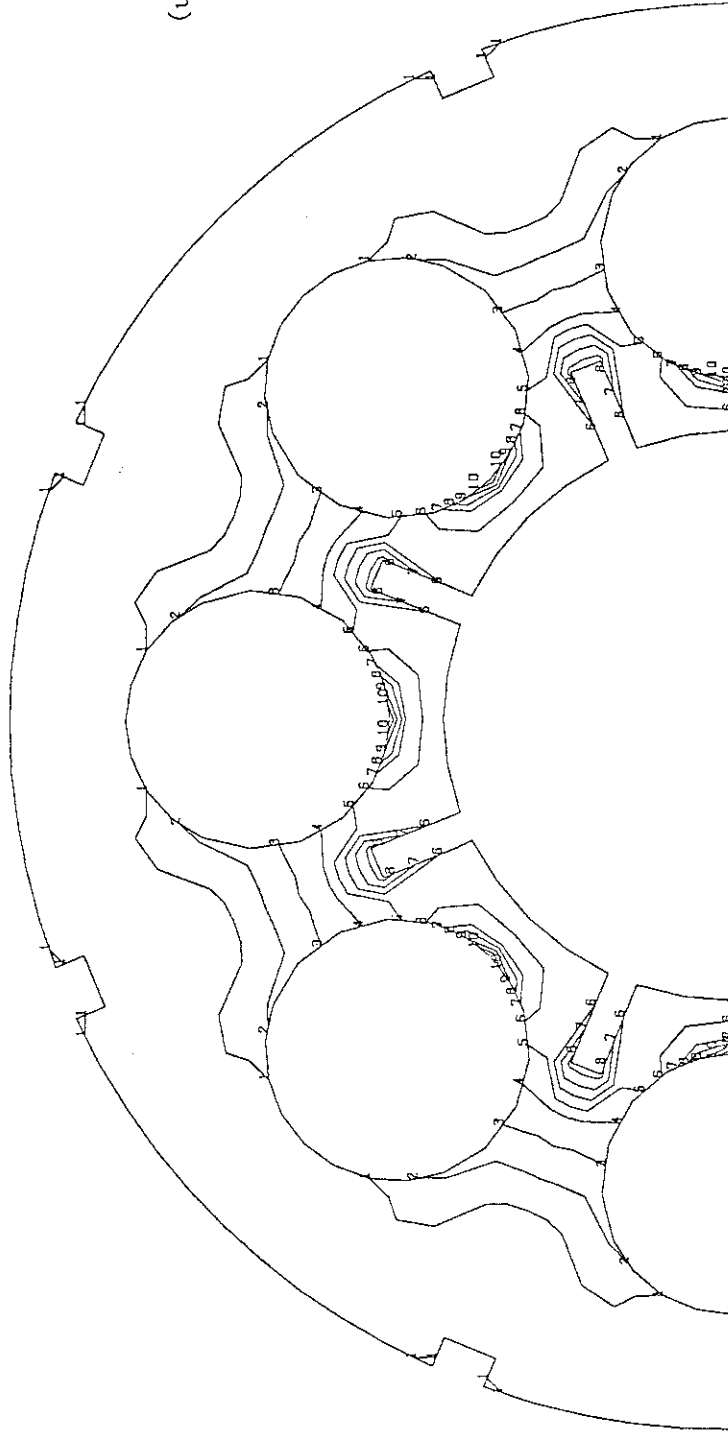


Fig. 4.17 Irradiation (shut-down) stress (principal stress) at the end of life of FTE-6 fuel test element

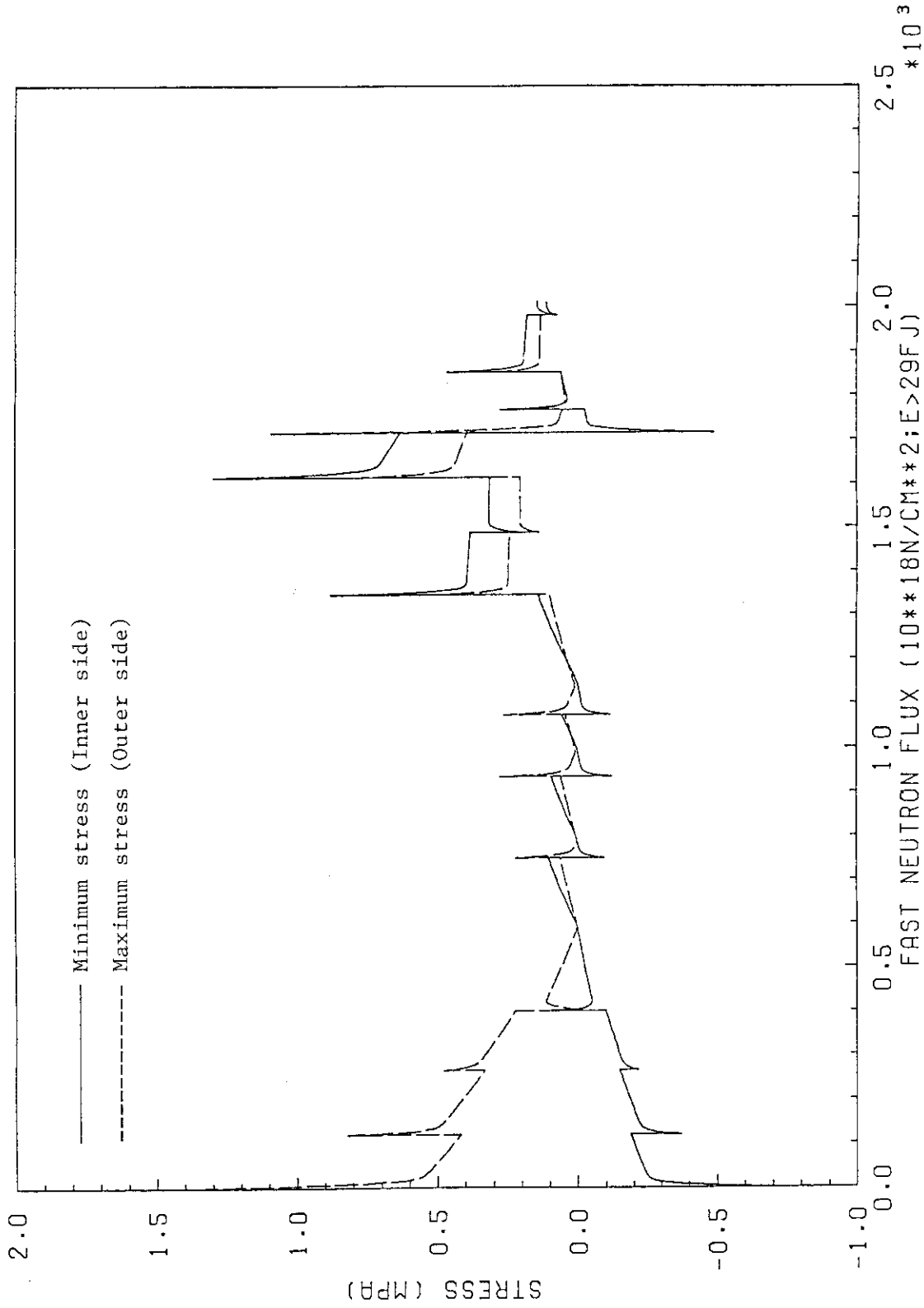


Fig. 4.18 Maximum (outer side) and minimum (inner side) stress history of FTE-6 fuel test element

NO.	STRESS
1	0.442
2	0.902
3	1.361
4	1.821
5	2.280
6	2.740
7	3.199
8	3.659
9	4.118
10	4.578

(unit: MPa)

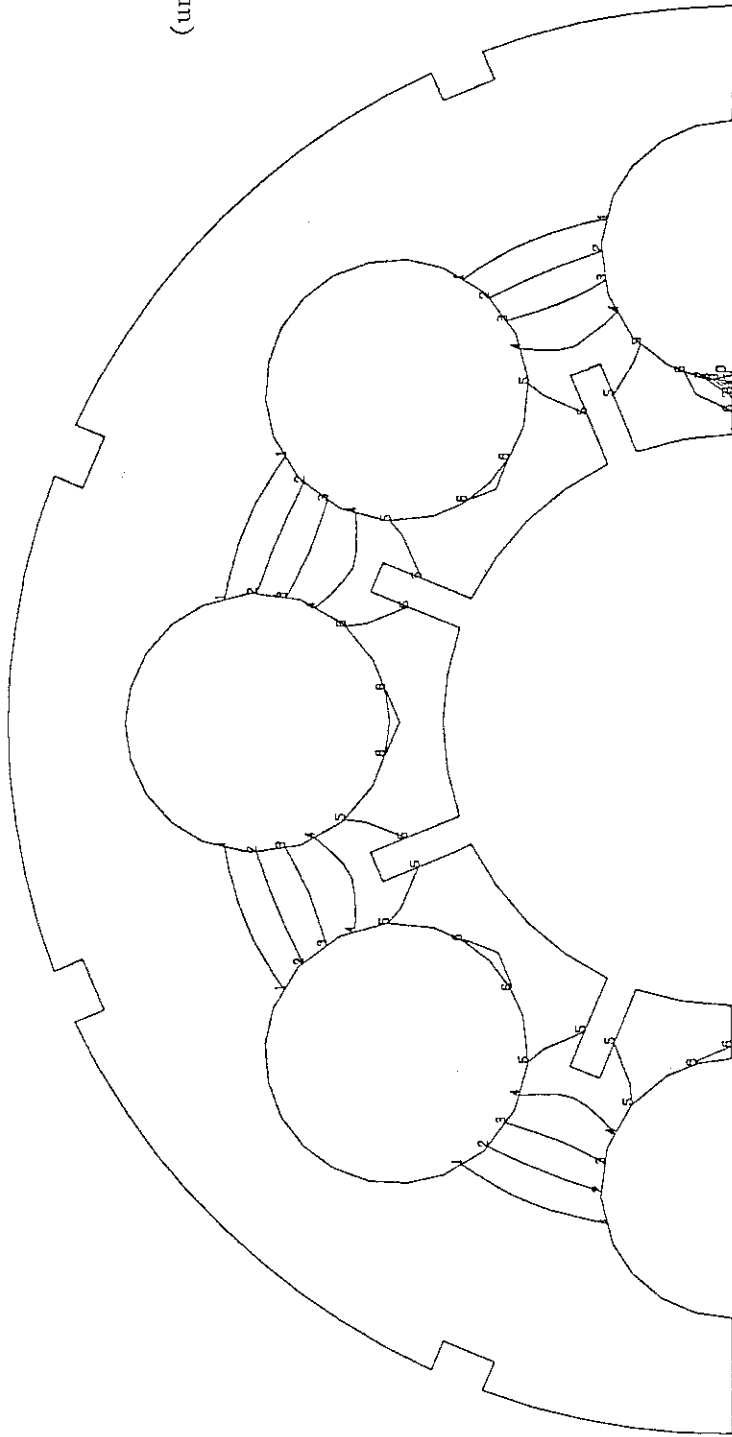


Fig. 4.19 Maximum principal stress distribution after radial direction cutting of FTE-6 fuel test element

## 5. 結 言

燃料体の黒鉛ブロック等の炉心黒鉛構造物に原子炉運転時及び原子炉停止時に発生する熱・照射応力は、構造健全性を評価する上で重要となる。この熱・照射応力は、黒鉛材料の照射挙動が金属等の他の材料に比べ特殊であるため、汎用の解析コードをそのまま用いることはできないことから、黒鉛ブロックの熱・照射応力を解析するためのコード "VIENUS" を開発している。

本計算コードについて、第8次OGL-1燃料体における黒鉛スリーブの照射後試験結果及び米国 Peach Bottom 炉における燃料体照射後試験結果に基づいて検証解析を実施した。検証解析の結果、VIENUS コードで計算した熱・照射応力は、実験値と比較して同等または大きい値を示した。これは、黒鉛ブロックの健全性を評価する上で保守的な結果を与えることとなり、本解析コードが黒鉛構造物の設計上有効であることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、適切な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部の斎藤伸三次長及び同部HTTR原子炉開発室田中利幸室長に感謝の意を表す。また、終始有益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主任研究員に感謝の意を表す。

## 5. 結 言

燃料体の黒鉛ブロック等の炉心黒鉛構造物に原子炉運転時及び原子炉停止時に発生する熱・照射応力は、構造健全性を評価する上で重要となる。この熱・照射応力は、黒鉛材料の照射挙動が金属等の他の材料に比べ特殊であるため、汎用の解析コードをそのまま用いることはできないことから、黒鉛ブロックの熱・照射応力を解析するためのコード "VIENUS" を開発している。

本計算コードについて、第8次OGL-1燃料体における黒鉛スリーブの照射後試験結果及び米国 Peach Bottom 炉における燃料体照射後試験結果に基づいて検証解析を実施した。検証解析の結果、VIENUS コードで計算した熱・照射応力は、実験値と比較して同等または大きい値を示した。これは、黒鉛ブロックの健全性を評価する上で保守的な結果を与えることとなり、本解析コードが黒鉛構造物の設計上有効であることが明らかとなった。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、適切な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部の斎藤伸三次長及び同部HTTR原子炉開発室田中利幸室長に感謝の意を表す。また、終始有益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主任研究員に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- (1) T. Iyoku et al., "Development of Thermal/Irradiation Stress Analytical Code "VIENUS" for HTTR Graphite Block", J. Nucl. Sci. and Tech., 28[10], pp.921-931(1991).
- (2) B.T.Kelly.; "Physics of Graphite" ,Applied Science Pubishers,London and New Jersey.
- (3) R.E.Nightingale.; "Nuclear Graphite" ,Academic Press(1962).
- (4) W.L.Zijp and H.C.Rieffe.; "Comparison of the Annual Available Damage Fluences in DFR,EBR-2 and HFR" ,RCN-161,Petten,January 1972.
- (5) 長谷川, 三島 監修.;「原子炉材料ハンドブック」,日本工業新聞社,昭52.
- (6) 伊与久 他.;「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説」, JAERI-M 91-083(1991).
- (7) 石原 他.;「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) R.J.Price.; "Review of the Thermal Conductivity of Nuclear Graphite under HTGR Conditions" ,Gulf-GA-12615(1973).
- (9) G.Jouquet, et al.; "Continuously Measured Irradiation Creep Strain of Two Reactor Graphites" ,High Temp.-High Press.,9,151
- (10) R.J.Price.; "Irradiation-induced Creep in Graphite:A Review" , GA-A16402(1981).
- (11) R.J.Price and G.Haag.; "Property Changes in Graphite Irradiated at Changing Temperature" , GA-A15270(1979).
- (12) Hibbit,Karlsson & Sorensen, Inc.,ABAQUS User's Manual Ver4.6(1987).
- (13) 井川 他.;「OGL-1第1次,第2次燃料体の照射試験」,JAERI-M 83-012(1983).
- (14) 福田 他.;「OGL-1第3次,第4次及び第5次燃料体の照射試験」, JAERI-M 86-092(1986).
- (15) 福田 他.;「OGL-1燃料棒の照射温度評価」, JAERI-M 84-183(1984).
- (16) 湊 他.;「OGL-1照射済み燃料棒の曲がり解析」, JAERI-M 83-055(1983).

- (17) F.K.Tzung and W.G.Homeyer.; "Comparison of Residual Stress Predictions and Measurements for Graphite Bodies from Peach Bottom Fuel Test Elements" ,GA-A14663(1978).
- (18) C.F.Wallroth, et al.; "Postirradiation Examination and Evaluation of Peach Bottom Fuel Test Element FTE-6" ,GA-A13943(1977).
- (19) "Safety Analysis Report Use of H-451 Graphite in Fort St. Vrain Fuel Elements" ,Gneral Atomic Company, GLP-5588(1977).
- (20) R.J.Price and L.A.Beavan.; "Final Report on Graphite Irradiation Test OG-3" ,GA-A14211(1977).