

JAERI-M

5513

高温ガス炉用多重殻型燃料体の照射
に伴う温度および応力変化の解析
計算コード MULSHES

1974年1月

荒井 長利・佐藤 貞夫

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温ガス炉用多重殻型燃料体の照射に伴う温度および
応力変化の解析：計算コード MULSHES

日本原子力研究所・動力炉開発管理室

荒井長利・佐藤貞夫

(1973年12月受理)

MULSHES コードは、高温ガス炉で照射される多重殻型燃料体（多重円筒型燃料棒、多重球殻型燃料）の照射中における温度および応力変化を解析するためのものである。本報告書はこのコードの計算モデルおよび使用法を解説したものである。

本コードは、原子炉内における照射条件の空間的・時間的変化を考慮し、燃料体材料である黒鉛材料の特徴的な材料特性、すなわち、物性値の異方性と各種の照射効果の影響を解析することができるもので、以下のような特徴を有している。

- (1) 冷却材流れ方向に非一様な熱出力分布および高速中性子束分布が考慮されている。
- (2) 熱出力と高速中性子束の他、冷却材流量についても照射に伴う時間的変化が考慮されている。
- (3) 黒鉛材料などに特徴的な弾性変形や熱変形の非等方性が考慮されている。
- (4) 黒鉛材料の照射効果として、熱的機械的物性値の変化、照射変形、照射クリープが考慮されている。
- (5) 隣接層の機械的干渉の有無にかかわらず、その境界の状態に応じて、燃料体中の温度分布と応力分布とが相互に矛盾なく計算される。

本コードは FACOM-230/60 用 FORTRAN IV で書かれており、所要記憶容量は 85 K 語となっている。

MULSHES : A Computer Program For Predicting The
Temperature And Stress Changes Of Multi-Shell
Type Fuel Elements Under High-Temperature
Reactor Irradiation

Taketoshi ARAI and Sadao SATO
Office of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI
(Received December 22, 1973)

The Code MULSHES is for predicting the changes of temperature and stress in multi-shell type fuel elements, such as cylindrical fuel pin and spherical fuel, under irradiation in a high-temperature gas cooled reactor. The calculational model and usage of the code are described.

The code, which takes space-and time-dependent irradiation conditions into consideration, can analyze the anisotropies of the graphitic materials and their irradiation effects.

Features of the code are as follows:

- (1) Nonuniform distributions of the heat generation and fast neutron dose in the coolant-flow direction are considered.
- (2) Variation with time of the heat generation, fast neutron dose and coolant flow are considered.
- (3) Anisotropic characteristics of the elastic deformation and thermal expansion of graphitic materials are treated.
- (4) Irradiation effects of graphitic materials are treated, including thermal and mechanical property changes, irradiation-induced dimensional changes and creep deformation.
- (5) Temperature and stress distributions in the fuels are obtained for the boundary conditions between shells, regardless of the existence of mechanical interaction.

The code MULSHES is written in FORTRAN-IV for computer FACOM 230/60, and the core memory necessary is about 85 kilowords.

目 次

1. はじめに	1
2. 計算モデル	5
2.1 計算モデルの概要	5
2.1.1 形状体系と座標系	5
2.1.2 照射条件	5
2.1.3 温度問題の基本的な仮定	8
2.1.4 応力問題の基本的な仮定	8
2.2 温度計算式	9
2.2.1 半径方向温度計算式	9
2.2.2 熱伝達率	11
2.2.3 冷却材温度計算	13
2.2.4 温度反復計算法	15
2.3 応力計算式	15
2.3.1 異方性材料の粘弾性応力問題について	15
2.3.2 軸対称構造物の粘弾性応力計算式	22
(1) 中空円筒の応力計算式	22
(2) 中実円筒の応力計算式	27
(3) 接触圧力計算式	28
2.3.3 球対称構造物の粘弾性応力計算式	31
(1) 球殻の応力計算式	31
(2) 中実球の応力計算式	34
2.3.4 応力反復計算法	36
2.3.5 炉停止時応力計算法	37
2.4 物性値の取り扱い	37
2.4.1 熱的物性値	37
2.4.2 機械的物性値	38
2.5 運転時、炉停止時条件の与え方	39
2.6 温度・応力計算の結合	40
3. 計算コード	43
3.1 計算コードの構成	43
3.2 計算フロー	44
3.3 入力データ	44
3.4 出力データ	46
3.5 計算例	47
4. ま と め	48

1. はじめに

近年、黒鉛減速ヘリウム冷却炉、いわゆる高温ガス炉が新しい動力・エネルギープラントとして注目されてきた。この高温ガス炉の燃料体概念として特徴的なことは、第1に被覆燃料粒子の採用、第2に黒鉛材料の使用、第3に高温ヘリウムによる熱除去を挙げることができる。具体的な燃料体形式では既に幾つかのものが設計され、または、試験的な実用化に入っている。その代表的なものがブロック型燃料体および球型燃料体である。ブロック型燃料体にはドラゴンプロジェクトの設計研究における棒状型および米国GGA社設計における燃料孔型とがある。これらの3種についての燃料体構造概念をFig. 1.1に示した。材質概念を明確にするため、日本原子力研究所で開発中の多目的高温ガス実験炉に対して設計された、Fig. 1.2の単管型燃料棒を例にとってみよう。この燃料棒は、被覆燃料粒子と黒鉛粉に粘結材を用いて焼き固めたいわゆる燃料コンパクトまたは燃料ペレットと、黒鉛材よりなるスリーブいわゆる黒鉛スリーブとからなる。この例のように高温ガス炉における燃料体または炉心構造物には、黒鉛または黒鉛を基材とする材料が数多く使用されている。従来の動力炉でも黒鉛が減速材として炉心構造物となっている例は、例えば、Magnox、AGR、MSBR、USSRの軽水炉などである。これらと高温ガス炉用黒鉛との最も著しい相違は、後者での温度が 1000°C を越える程に高温になるということである。

さて、炉心材料として黒鉛を使用する場合、その機械的挙動に関連して注意しておかなければならない材料特性として以下のことが挙げられる。

- i) 素材、成形法によって以下の性質が異なる。
- ii) 弾性変形として近似できる応力範囲が小さく、塑性変形が著しい。また、変形には異方性がある。
- iii) 熱変形に異方性がある。
- iv) 炉心で高速中性子の照射を受けると非等方的な変形を示す。
- v) 応力が発生している状態で高速中性子の照射を受けるとクリープ現象が誘起される。
- vi) 以上の4つの変形現象にはそれぞれ異なった温度依存性および高速中性子照射量依存性がある。

これらの材料特性から、黒鉛材料が炉心構造物として使用される場合には、燃料設計または炉心構造設計において、その機械的挙動を把握するために少なくとも異方性粘弾性解析が必要であることが理解されるであろう。

さらに、炉心におかれた具体的な黒鉛構造物について考えてみよう。先ず第1に熱変形と照射変形の共存によってもたらされる特異な応力発生現象についてである。原子炉運転時に構造物内に発生している温度勾配によって熱変形差および照射変形差が起る。ところで一般的に高温ガス炉の使用温度では高温程大きな照射収縮を示すという特性、すなわち、熱変形と逆の特性を示す。このことによって、部材の最大応力が原子炉停止時に発生することになる。従って、強度設計上、炉停止時の応力評価が不可欠の項目として考えられなければならない。

第2は、従来の金属材料やセラミックスで構成された燃料体などと異なり、著しい照射による寸法変化が起ることと関連して、多重層構造物の場合に問題となる機械的干渉の可能性とその影響についてである。実用型の高温ガス炉の燃料体として、熱的性能の面から2重管型燃料棒が有望視されているが、この燃料棒形式の場合にはここでいう機械的干渉の可能性とその影響を十分検討する必要がある。

第3は、原子炉運転に伴う炉心核特性の変化との関連についてである。炉心内の出力分布および高速中性子束は、元来三次元的な分布を有し、しかもこれらが燃焼に伴って変化していく。黒鉛材料においてはその材料特性および機械的挙動が温度および高速中性子照射量に著しい関係を有していることは前述の通りである。従って、黒鉛構造物の機械的挙動を把握するためには、具体的な温度、高速中性子照射量などの照射条件の変化を考慮する必要がある。この3点は、炉心におかれた具体的な黒鉛構造物の機械的な問題が熱的な問題と不可分の関係にあるということの例と考えることができる。

以上の考察によって、黒鉛材料を燃料体または炉心構造物として使用する場合には、黒鉛の複雑な材料特性を考慮し、熱的問題と不可分のものとして構造設計を行うことの必要性が理解されるであろう。筆者らは、多目的高温ガス実験炉第2次予備設計において、単管型燃料棒の構造解析を行なった。これは IRINDIC-CREEP コード¹⁾を用いたものであり、主として、照射変形と照射クリープの影響を明らかにした。本研究で開発された新しい計算コード MULSHES は従来の IRINDIC-CREEP コードの解析範囲を上記の考察に沿って拡張したものである。すなわち、計算モデル上拡張された重要な点は次の3つである。

- i) 材料特性のうち、弾性変形、熱変形、クリープ変形に異方性を新たに考慮したこと。
- ii) 構造形態として軸対称多重円筒および球対称多重球殻が扱えること。
- iii) 構造物の半径方向および軸方向温度分布を炉心出力分布に対応して定めるようにしたこと。

本計算コード MULSHES は黒鉛材料より構成された高温ガス炉燃料体の構造設計のために開発されたものである。このコードによって、黒鉛材料の使用に伴って生ずる様々な機械的挙動の解析が可能となるであろう。なお、本計算コードで仮定された形状体系であれば、黒鉛材料以外の金属材料やセラミックスで構成された一般的な多重層構造物の温度、応力、クリープ問題の解析も可能である。

本書は、計算コード MULSHES の計算モデルおよびその使用法について記述したものである。

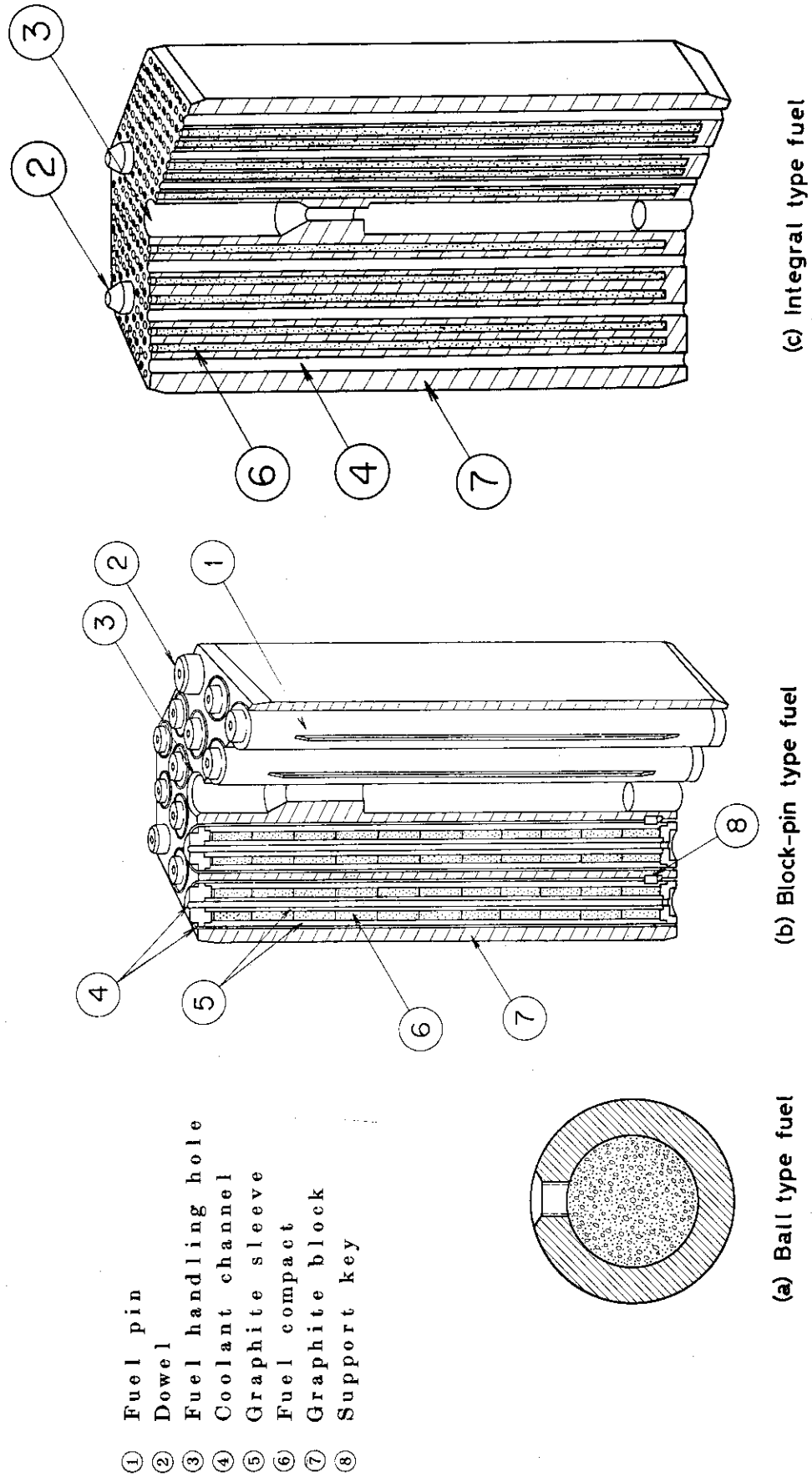


Fig. 1.1 Typical fuel elements for high temperature reactors

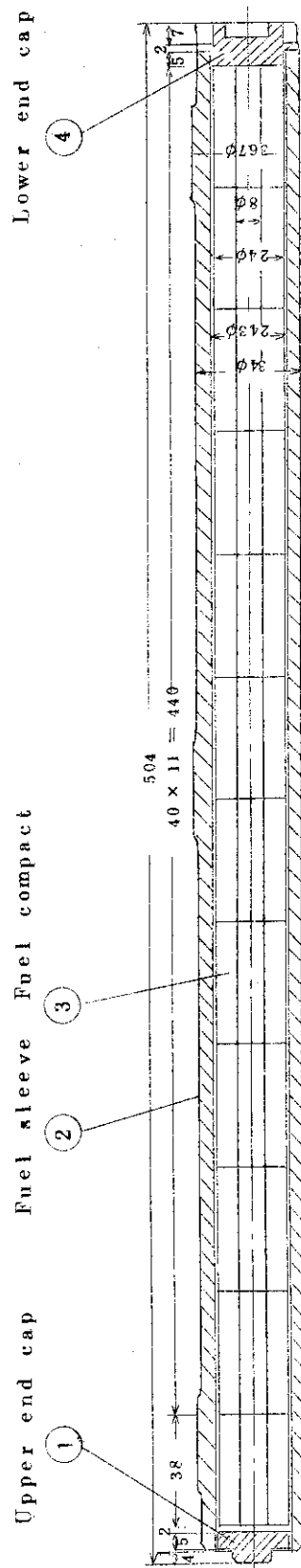


Fig.1.2 A Fuel pin designed for the Multipurpose Experimental High Temperature Reactor at JAERI

2. 計算モデル

2.1 計算モデルの概要

2.1.1 形状体系と座標系

本計算モデルは、高温ガス炉での任意の照射時間における、冷却材流れ方向（軸方向）の任意の位置における多重層構造物の温度問題および応力問題を解くためのものである。ここで対象とする多重層構造物は、軸対称多重円筒および球対称多重球殻とである。後述するように軸方向各位置におけるこれら構造物の半径方向の特性が、半径方向次元問題の解として得られる。従って、本計算モデルでは軸対称多重円筒の場合に、いわゆる長尺ものと短尺ものとの区別はなく、全て長尺ものとする。また、球対称多重球殻の場合は、軸方向に連続して存在するもののうち、指定された軸方向各位置に多重球殻があるものとする。

炉心軸方向（Z-方向）は冷却材流れ方向と一致させ、原点を冷却材入口とする。炉心軸方向の形状体系を Fig. 2.1 に示した。一般に炉心軸方向長さ H_c (cm) は L 個（最大 20）に等分割される。これによって軸方向の座標が冷却材入口から冷却材出口まで $1, 2, 3, \dots, \ell, \dots, L, L+1$ と定められる。

軸方向各位置における半径方向の多重構造モデルを Fig. 2.2 に示した。すなわち、多重層構造物は機械的構造物である固体領域 (Stationary region) とこれらの間に存在する間隙部 (Gap region) とからなる。固体領域は、黒鉛その他の材料からなるもので、内側より第 1 層、第 2 層、……、第 j 層、……、第 J 層 (J は最大 5) と命名され、各層の材質は任意に指定される。また間隙部はいわゆる間隙 (クリアランス) または冷却材流路を意味するもので、一般に第 j 固体領域の内側の間隙層を第 j 層とする。なお、この多重層構造物の最内層すなわち中央部は固体領域 (中実円筒または中実球) でも、間隙部であっても良い。また最外層は間隙部 (断熱層または冷却材流路空間) と考えるものとする。今、2 重管型 (円環型) 燃料棒の場合を例にとれば、内側の黒鉛スリーブが固体領域の第 1 層、続いて燃料コンパクトが第 2 層、外側の黒鉛スリーブが第 3 層となり、間隙部のそれは内側の冷却材流路が第 1 層、内側の黒鉛スリーブと燃料コンパクトとの間隙部が第 2 層、外側の黒鉛スリーブと燃料コンパクトとの間隙部が第 3 層、外側の冷却材流路が第 4 層となる (Fig. 1.1 (b))。

各固体領域、例えば、第 j 層の寸法は内半径 $R_{1,j}$ (cm) および厚さ ΔR_j (cm) で与えられる。また数値解析の必要上第 j 層の内部は K_j 個（最大 20）に等分割される。第 j 層を例にとって半径方向の座標を Fig. 2.3 に示した。この図において内側および外側の分割点は、周辺部の代表点を意味する。すなわち、周辺部が固体領域であればその表面の点、また、冷却材流路であれば冷却材主流温度点と考えるものとする。

2.1.2 照射条件

本計算モデルで得られる照射挙動は、照射時間 Δt 日毎の断続的な変化として得られる。全照射時間にはモデル上の制限はないが、解析する照射範囲は時間ステップ数 I を与えることによって定められるものとする。

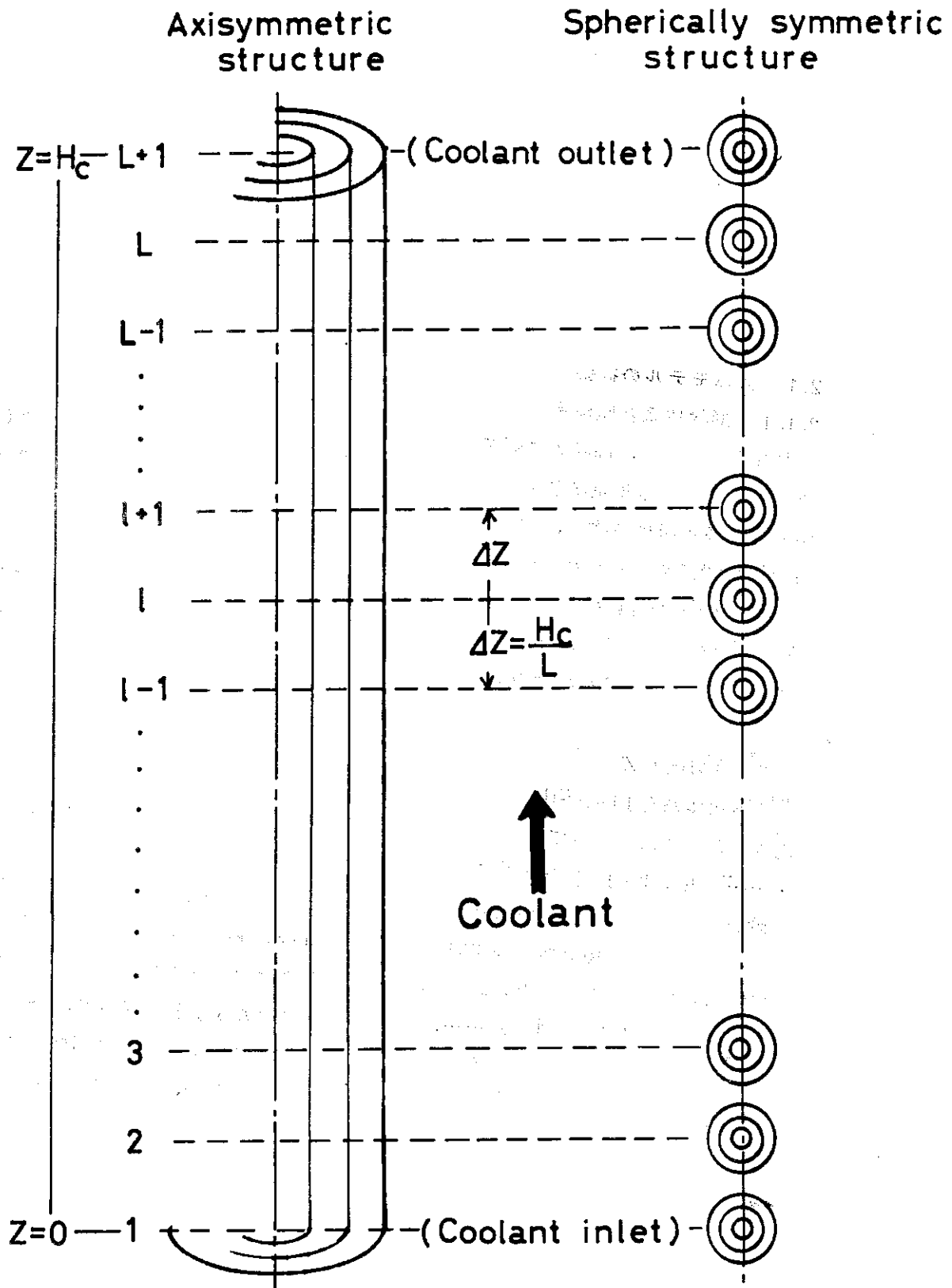


Fig. 2.1 Structure and coordinate in the axial direction

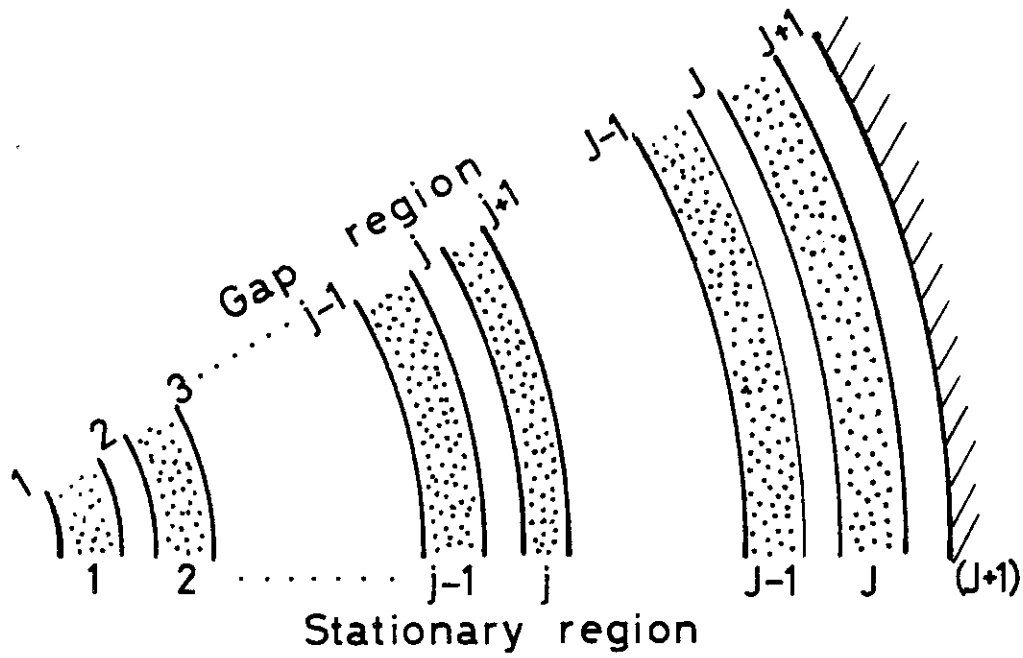


Fig. 2.2 Multi-shells layout

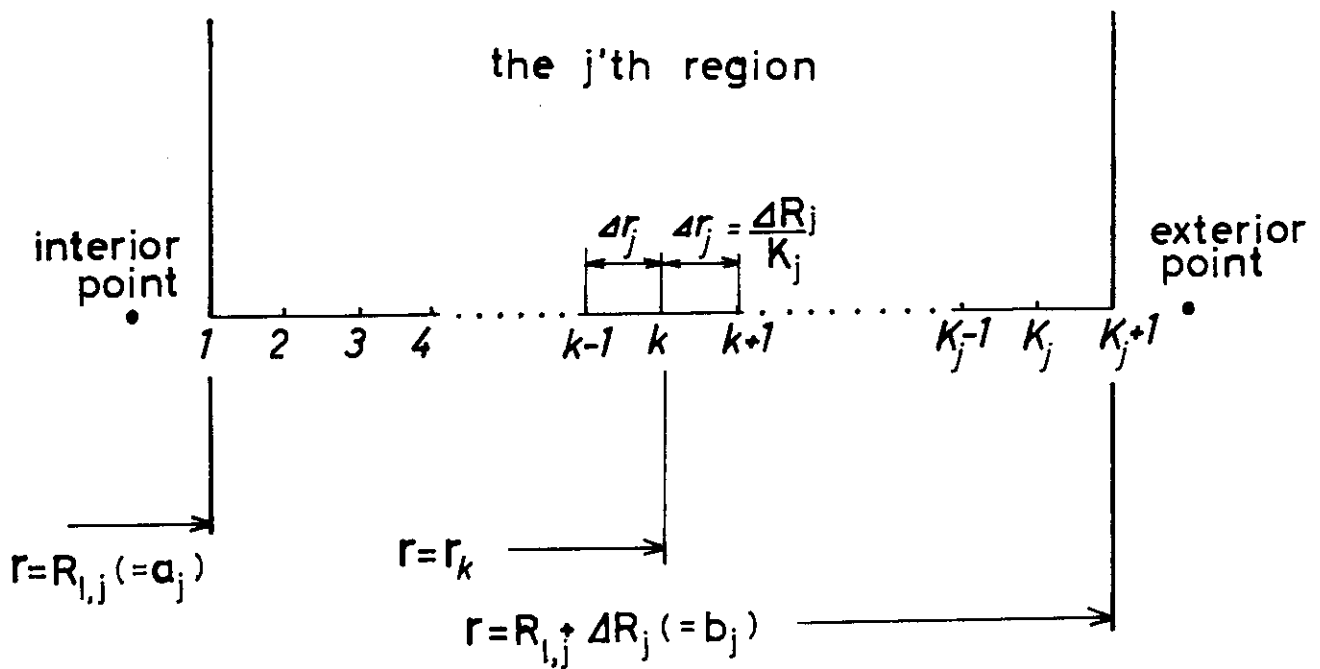


Fig. 2.3 Radial coordinate of the j 'th stationary region

照射条件のうち、照射時間に関して一定のものは、冷却材入口温度および圧力である。照射時間とともに変化するものは、冷却材入口流量、発熱量および高速中性子照射量である。ただし後者の2つは照射時間に対して層毎の相違（半径方向分布）は不変であるが、軸方向の分布は変り得るものとする。

2.1.3 温度問題の基本的な仮定

温度問題の詳しい計算法については第2.2節で記述される。ここにそれらの前提となる基本的な仮定を列挙しておく。

- ① 固体領域内の熱発生率は(i)層毎の相違、(ii)軸方向位置の相違、(iii)照射時間変化が考慮できるものとする。ただし、層毎の相違は軸方向および照射時間に関して不変であるものとする。なお、各層内では熱発生が一様であるものとする。
- ② 固体領域内部での熱移動は半径方向の熱伝導のみを考える。また、熱伝導率は温度依存および照射依存（高速中性子照射量依存）が考慮できるものとする。ただし、各層の内部での温度依存は省略し、平均温度に対する平均的な値を用いることとする。
- ③ 固体領域の内外境界面における熱移動は、周辺部が冷却材流路である場合は強制対流熱伝達によるものとする。また、周辺部がいわゆる間隙の場合は充填材の熱伝導、隣接固体層との間のふく射熱伝達、さらには隣接固体層と接触している場合には接触熱伝達によるものとする。
- ④ 各冷却材流路の流量は入口において与えられ、照射に伴う変化が考慮できるものとする。冷却材はヘリウムとする。冷却材ヘリウムの温度上昇は各軸方向位置における固体面からの伝熱量に基づいて計算される。なお、このヘリウムの物性値は入口圧力および温度上昇を考慮して定められる。
- ⑤ いわゆる間隙に充填される物質はヘリウムとする。このヘリウムの物性値も間隙の平均温度および入口圧力を考慮して定められるものとする。
- ⑥ 以上を考慮して、各軸方向位置において多重層の温度分布が求められることから、この温度分布は各固体層の変形と密接に関連している。従って、本計算によって得られる温度分布は、以下に述べる応力問題をも満足するものとする。
- ⑦ 各固体領域に対する熱伝導方程式は一次元の3点差分近似式により解くものとする。

2.1.4 応力問題の基本的な仮定

応力・ひずみ問題の詳細な計算式については、第2.3節で記述される。ここにそれらの前提となる基本的な仮定を列挙する。

- ① 本計算コードでは黒鉛材料をはじめとする高温ガス炉用構造材を念頭においている。従って、次のような材料特性が考慮されるものとする。
 - a) 弾性変形
 - b) 熱変形
 - c) 高速中性子の照射による変形
 - d) 高温クリープ
 - e) 高速中性子の照射によるクリープ
- ② 黒鉛材料の一般的特性としての材料の異方性として次のものが考慮される。

- a) 弾性変形（ヤング率およびポアソン比）の異方性
- b) 熱変形（熱膨張係数）の異方性
- c) 照射変形の異方性

ただし、現実の黒鉛材料の製造法および測定データの現状を考慮して、横等方性（transverse isotropy）であるものとする。

さらに、本計算上の制限から、多重球殻の中央部が中実球である場合には、この中実球については上記3種の物性値は完全に等方的であるものとする。

- ③ 黒鉛材料の一般的な材料特性として、物性値の温度依存性および高速中性子の照射による変化がある。本計算モデルでは、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数、および照射変形についてこのような考慮がなされるものとする。ただし、温度依存性については照射変形のみが各固体層の温度分布に対応して分割点毎に考慮されるが、他の3者は各層の平均温度に対する値であり層内で一定とする。
- ④ 本計算モデルでは軸方向各位置について軸対称または球対称多重構造物の材料の異方性を考慮した粘弾性解析が実行される。本計算モデルの粘弾性解析の基本的な特徴は以下の通りである。
 - i) 軸対称、または球対称を仮定した一次元モデルである。
 - ii) 軸対称構造物については一般的な平面ひずみ条件を仮定する。
 - iii) 上記②で仮定した横等方性は次のように考えるものとする。すなわち、軸対称構造物では半径方向と接線方向、球対称構造物では接線方向と方位角方向、のそれぞれの物性値が等しいとする。
 - iv) クリープ変形として、定常温度クリープおよび定常照射クリープを考える。クリープ変形は定容積変化とし、クリープ変形の異方性係数には横等方性または完全等方性を仮定する。両クリープ現象とも温度依存性を考慮するが、この際の温度は各固体領域の平均温度とする。
 - v) 軸対称および球対称構造物の半径方向の拘束は、隣接層間の機械的干渉すなわち接触圧力のみを考える。ただし、球対称構造物では、機械的干渉の起るような問題は除外するものとする。なお、軸対称構造物の軸方向端部での荷重および拘束は無いものとする。
- ⑤ 本計算モデルで考える炉停止時とは、考えている多重構造物が運転時の温度より低いある一定の温度状態におかれることを意味する。
- ⑥ 解法は与えられた照射時間間隔毎に解を求めていくひずみ増分理論を基本としている。各時間間隔でのクリープひずみを求める解法手順はMendelson²⁾の方法による。各固体領域の応力・ひずみの増分は応力関数を用いた解析解を用いるものとする。

2.2 温度計算式

2.2.1 半径方向温度分布の計算

今、任意の軸方向位置における第 j 層について考えてみる。この第 j 層の内部の熱伝導方程式は第 2.1.3 節の仮定に基づいて次のようになる。

$$\lambda_j \frac{1}{r^\rho} \frac{d}{dr} \left(r^\rho \frac{dT}{dr} \right) + Q_j = 0 \quad (2.2.1)$$

また、内外表面における境界条件は一般的な熱伝達とする。すなわち

内表面 $r = R_{I,j}$ において

$$\lambda_j \frac{dT}{dr} = h_j (T - T_j^*) \quad (2.2.2)$$

外表面 $r = R_{I,j} + \Delta R_j$ において

$$-\lambda_j \frac{dT}{dr} = h_{j+1} (T - T_{j+1}^*) \quad (2.2.3)$$

以上の式において

ρ : 1 (円筒), 2 (球)

λ_j : 第 j 層の熱伝導率 $\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

Q_j : 第 j 層の熱発生率 $\text{cal/cm}^3 \cdot \text{s}$

h_j : 第 j 層の内表面の熱伝達率 $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

h_{j+1} : 第 j 層の外表面の熱伝達率 $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

T_j^* : 第 j 層の内側周囲温度 $^\circ\text{C}$

T_{j+1}^* : 第 j 層の外側周囲温度 $^\circ\text{C}$

ただし、内側および外側の周囲温度は、周囲が冷却材のときは冷却材主流温度、間隙のときは、隣接固体面の表面温度である。

上記 3 式を Fig. 2.3 に与えた分割点座標系における差分近似式に変換する。各分割点を含む体積要素についての積分から次のような差分式を得る。

内部分割点 ($k=2 \sim K_j$) に対して

$$K_{k-1,k} T_{k-1} + K_{k,k} T_k + K_{k+1,k} T_{k+1} + (V_{k-1,k} + V_{k+1,k}) Q_j = 0 \quad (2.2.4)$$

内側境界点 ($k=1$) に対して

$$K_{k,k} T_k + K_{k+1,k} T_{k+1} + V_{k+1,k} Q_j + K_{k-1,k} T_j^* = 0 \quad (2.2.5)$$

外側境界点 ($k=K_j+1$) に対して

$$K_{k-1,k} T_{k-1} + K_{k,k} T_k + V_{k-1,k} Q_j + K_{k+1,k} T_{j+1}^* = 0 \quad (2.2.6)$$

となる。これらの式において、

$$K_{k-1,k} = \begin{cases} h_j r_k^\rho & (k=1) \\ \frac{\lambda_j}{\Delta r_j} \left(r_k + \frac{\Delta r_j}{2} \right)^\rho & (k=2 \sim K_j+1) \end{cases}$$

$$K_{k+1,k} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\lambda_j}{\Delta r_j} \left(r_k + \frac{\Delta r_j}{2} \right)^\rho & (k=1 \sim K_j) \\ h_{j+1} r_k^\rho & (k=K_j+1) \end{array} \right\} \quad (2.2.7)$$

$$K_{k,k} = -(K_{k-1,k} + K_{k+1,k}) \quad (k=1 \sim K_j+1)$$

また,

$$\left. \begin{array}{l} V_{k-1,k} = \frac{\Delta r_j}{2} \left(r_k - \frac{\Delta r_j}{4} \right)^\rho \\ V_{k+1,k} = \frac{\Delta r_j}{2} \left(r_k + \frac{\Delta r_j}{4} \right)^\rho \end{array} \right\} \quad (2.2.8)$$

である。

式(2.2.4), (2.2.5), (2.2.6) によって各層の熱伝導率, 内外境界における熱伝導率および周囲温度を与えれば全ての分割点温度が得られる。

本計算モデルでは, 多重層構造物を扱っているので, 全ての固体領域の熱伝導率, 内外境界における熱伝導率および周囲温度を仮定し, 固体領域の全分割点温度に対する連立方程式を構成し, これをマトリックス法により解くことにしている。このための数値解析プログラムは係数マトリックスが三項バンド型に対するものである。得られた温度分布により境界条件を修正する。この反復計算は

$$\left| T_k^{n+1} - T_k^n \right| \leq \epsilon_T \quad (2.2.9)$$

が満たされたとき終了する。

なお, 内外境界条件の変化は応力計算および冷却材温度計算に基づくものである。これらの変更手順については第2.6節で説明する。

2.2.2 熱伝達率

各固体領域の内外境界における熱伝達率は以下の計算式で与えられる。なお, 接触している場合(接触熱伝達による)を除き, 間隙における熱伝達率は, 照射量および温度に依存しない一定値として入力で与える場合と, これらの依存を考慮してコード内で下記の式により計算する場合と, の2つの選択が許されている。

① 周囲が隣接固体層との間隙であるときは, 充填気体の熱伝導による

$$h_j = \frac{\lambda_j^g}{\delta_j + \mu_{j-1} + \mu_j} \quad (2.2.10)$$

または, ふく射熱伝達による

$$h_j = \sigma \frac{(T_1' + T_2')(T_1'^2 + T_2'^2)}{\frac{1}{\epsilon_{j-1}} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\epsilon_j} - 1 \right)} \quad (2.2.11)$$

ここで

λ_j^G : 間隙気体の熱伝導率 $\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

δ_j : 間隙幅 cm

μ_{j-1}, μ_j : 周辺固体の表面あらさ cm

$\epsilon_{j-1}, \epsilon_j$: 周辺固体の射出率

T'_1, T'_2 : 周辺固体の表面温度 $^\circ\text{K}$

S_1, S_2 : 周辺固体の表面積 cm^2 , $S_1 = r_{j-1}^2 (k = K_{j-1} + 1)$, $S_2 = r_j^2 (k_j = 1)$

σ : ステファン・ボルツマン 常数 $= 1.35 \times 10^{-12} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}^4$

② 周囲が隣接固体と接触しているときは、接触熱伝達による³⁾

$$h_j = \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\lambda^S}\right)_{j-1} + \frac{1}{h_0 \xi_j} + \left(\frac{\mu}{\lambda^S}\right)_j} - \frac{\lambda_j^G}{\mu_{j-1} + \mu_j} \left\{ \frac{P_j}{H} + \frac{\lambda_j^G}{\mu_{j-1} + \mu_j} \right\} \quad (2.2.12)$$

ただし, $H = \text{Min}(H_{B_{j-1}}, H_{B_j})$

ここで

$\lambda_{j-1}^S, \lambda_j^S$: 周辺固体の熱伝導率 $\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

$H_{B_{j-1}}, H_{B_j}$: 周辺固体のブリネルかたさ kg/cm^2

h_0, ξ_j : 接触点における熱コンダクタンス $h_0 = 1.4 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ (固定) とその補正係数

P_j : 接触面押付け圧力 (接触圧力) kg/cm^2

③ 周囲が冷却材流路であるときは、強制対流熱伝達による

$$h_j = \left(\frac{\lambda_j^G \text{Nu}}{D_e} \right)_j \quad (2.2.13)$$

ここで

Nu_j : ヌッセルト数

D_{e_j} : 冷却材流路の等価直径 cm

λ_j^G : 冷却材の熱伝導率 $\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

ただし,

軸対称構造物の場合

$$\text{Nu}_j = a \text{Re}_j^b \text{Pr}_j^c \left(\frac{T'_c}{T'_w} \right)_j \quad (2.2.14)$$

ただし, $\text{Nu}_j < \text{Nu}'_j$ のとき, $\text{Nu}_j = \text{Nu}'_j$

$$D_{e_j} = 4(A/U)_j \quad (2.2.15)$$

ここで

$T'_{c,j}$: 冷却材主流温度 $^{\circ}\text{K}$

T'_w : 固体の壁面温度 $^{\circ}\text{K}$, ただし, 最内層または最外層以外の流路では $T'_w = (T'_1 + T'_2)/2$ とする。

A_j : 冷却材流路断面積 cm^2

U_j : 冷却材流路のぬれ縁 cm

N'_u : 層流領域におけるヌッセルト数

Pr_j : 冷却材のプラントル数

Re_j : レイノルズ数 $= (WD_c/A\gamma\upsilon)_j$; W_j = 冷却材流量 g/s , γ_j = 冷却材比重量 g/cm^3 , υ_j = 冷却材動粘性係数 cm^2/s

球対称構造物の場合⁴⁾

$$N_u = 1.33 \frac{f}{1-f} + \left(\frac{2}{3} Re \right)^{0.5} + 0.005 Re \quad (2.2.18)$$

ただし, $N_u < 7$ のとき, $N_u = 7$

$$D_e = \frac{2}{3} \frac{f}{1-f} d_k \quad (2.2.19)$$

ここで,

f : 炉心冷却材体積比

d_k : 球の外直径 cm

Re : レイノルズ数 $= (WD_c/A\gamma\upsilon)$

2.2.3 冷却材温度計算

冷却材の温度 T_c は軸方向分割点 ($\ell = 2, \dots, L, L+1$) に対して計算される。各軸方向分割点の冷却材温度は, その分割点における半径方向温度分布 (固体面からの伝熱量) と矛盾なく定められる。

軸対称構造物における冷却材温度は, 半径方向の温度分布から冷却材流路への伝熱量を固体表面の熱流束を基に計算し, これより軸方向メッシュ間の冷却材温度上昇を求めて算出される。今, Fig. 2.4 のように 2 つの固体領域 j^s-1, j^s の間隙 j が冷却材流路であるとするとき, 軸方向位置 ℓ における冷却材温度 $T_{c,j}(\ell)$ は次式により計算される。

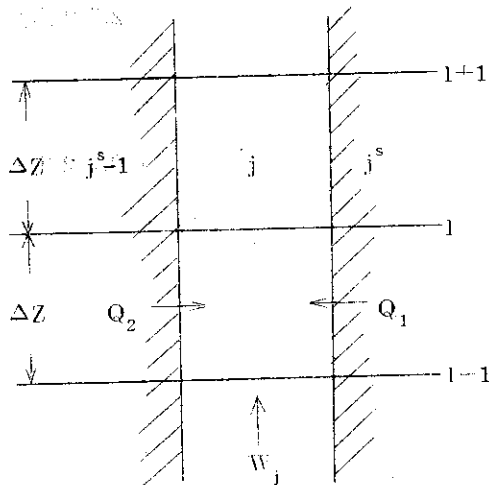


Fig. 2.4 Model for calculating the coolant temperature in the j 'th flowing region at the ℓ 'th axial point.

$$T_{c,j}(\ell) = T_{c,j}(\ell-1) + \frac{\bar{Q}_{s,j}(\ell)}{W_j C_{p,j}} \quad (2.2.20)$$

ここで、 $\bar{Q}_{s,j}(\ell)$ は $z = \ell \sim \ell-1$ における平均伝熱量で

$$\bar{Q}_{s,j}(\ell) = \frac{1}{2} \left\{ Q_{s,j}(\ell) + Q_{s,j}(\ell-1) \right\} \quad (2.2.21)$$

$z = \ell$ における j 層への伝熱量は j^s-1 層の外表面からの伝熱量 Q_2 と j^s 層の内表面からの伝熱量 Q_1 との和

$$Q_{s,j}(\ell) = Q_2 + Q_1 \quad (2.2.22)$$

で与えられ、 Q_2 、 Q_1 はそれぞれの表面の熱流束 $q_{2,j^{s-1}}$ と q_{1,j^s} とから次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= q_{2,j^{s-1}} \cdot 2\pi h_{j^{s-1}} \cdot \Delta z \\ Q_1 &= q_{1,j^s} \cdot 2\pi a_{j^s} \cdot \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (2.2.23)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} q_{2,j^{s-1}} &= -\frac{\lambda_{j^{s-1}}^s}{2\Delta r_{j^{s-1}}} (3T_{K+1} - 4T_K + T_{K-1})_{j^{s-1}} \\ q_{1,j^s} &= -\frac{\lambda_{j^s}^s}{2\Delta r_{j^s}} (3T_1 - 4T_2 + T_3)_{j^s} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.24)$$

この冷却材温度反復計算は

$$\left| T_c^n - T_c^{n-1} \right| \leq \xi_{TC} \quad (2.2.25)$$

が満たされたとき終了する。

球対称構造物では、冷却材流路が球の外側に限定されるので、この場合の各軸方向分割点の冷却材温度は与えられた球の軸方向発熱分布から直接次式により定められる。

$$T_c(\ell) = T_c(\ell-1) + \frac{\bar{Q}(\ell)}{W C_p} \Delta z \cdot N \quad (2.2.26)$$

ここで、 $\bar{Q}(\ell)$ は $z = \ell \sim \ell-1$ の平均伝熱量で次式により与えられる。

$$\bar{Q}(\ell) = \frac{1}{2} \{ Q_s(\ell) + Q_s(\ell-1) \} \quad (2.2.27)$$

ただし、 $z = \ell$ における伝熱量 $Q_s(\ell)$ は

$$Q_s(\ell) = \sum_{j=1}^J Q_j V_j \quad \text{cal/s} \cdot \text{cm} \quad (2.2.28)$$

以上の式において

Q_j : j 層の熱発生率 $\text{cal/cm}^3 \cdot \text{s}$

V_j : j 層の体積 cm^3

N : 単位長さ当りの球構造物の数 n/cm

2.2.4 温度反復計算法

任意の照射時間の各軸方向分割点における温度計算手順の詳細についてここで述べる。本計算モデルにおいて温度反復計算が必要とされるのは、第1に温度計算に必要な物性値に温度依存性を考慮していること、第2に軸対称構造物で機械的干渉による接触熱伝達を考慮していること、すなわち、応力・ひずみ計算と関連があることによる。

温度分布反復計算を通して固定されている量は、発熱量と寸法である。半径方向温度計算に関連する量は

- i) 間隙を構成する隣接2固体面の温度
- ii) 固体および間隙気体の熱伝導率
- iii) 冷却材温度
- iv) 接触圧力

である。半径方向温度分布反復計算内部においては、i) が変更されうる量であり、他はすべて固定される。iii) およびiv) は軸対称構造物の場合のみ変更されうる量で、iii) が冷却材温度計算により、iv) が応力・ひずみ計算の結果変更される。

軸対称構造物に対する温度計算は次のようにして行なわれる。まず、冷却材温度および全ての熱伝導率を仮定した上で半径方向温度分布反復計算が実行される。この収束条件、前記(2.2.9)式が満たされると応力計算が実行され、隣接層間の機械的干渉のある場合の接触圧力が新たに定められる。次いで冷却材温度計算が実行される。冷却材温度計算に関する収束条件、前記(2.2.2.5)式が満たされないときは境界条件に係わる上記ii), iii), iv)が全て修正され半径方向温度分布の再計算に戻る。本計算モデルでは、冷却材温度が収束すれば考えている軸方向位置における運転時の温度、応力計算が完了することになる(第2.6節参照)。

球対称構造物の場合は、冷却材温度があらかじめ定められるところから、まず間隙気体の熱伝導率を仮定して半径方向温度の反復計算が実行される。この半径方向温度分布と上記ii)の固体および間隙気体の熱伝導率とは、各固体層の平均温度 T_{av} が

$$|T_{av}^n - T_{av}^{n-1}| \leq \epsilon$$

を満たしたとき満足したものとする。この後に応力・ひずみ計算が実行される。この場合、層間の機械的干渉が生ずるような問題は考えていないので、接触圧力に伴う温度境界条件の変更は行なわれない。また、冷却材温度に関する反復計算が不要なので、以上で運転時の温度、応力計算が完了したことになる。

2.3 応力計算式

2.3.1 異方性材料の粘弾性応力問題

我々の問題は、材料に物性値の異方性があり、かつ、変形現象として弾性変形、熱変形、照射変形、照射クリープおよび温度クリープが発生し得る、軸対称または球対称構造物の応力解析を行うことである。これは、異方性材料の粘弾性応力問題の一つである。次節以後に軸対称および球対称構造物に対する計算式について詳述するが、これらの計算式の基本となる一般的

事柄について本節に述べることにする。

本研究の主眼は照射中における黒鉛構造物の機械的挙動の究明にある。そこで先ず、工学的取扱いという観点を離れて黒鉛材料の幾つかの機械的挙動の特性について述べておく必要がある。黒鉛材料の照射を伴わない状態での機械的挙動では次のような複雑な挙動が実験的に確認されている。

- i) 高温においては応力-ひずみ関係に荷重速度の影響が予想される (rate-effect)。
- ii) 一般に応力-ひずみ関係が非線形である。従って塑性変形体と考える必要がある (plasticity)。
- iii) さらに、負荷時-負荷減少時における応力-ひずみ関係が非線形である (non-linearity in unloading and reloading)。
- iv) 多孔質材料であるため塑性変形において体積変化が伴う (volumetric change deformation)。
- v) 変形に異方性がある (anisotropy)。

また、高速中性子の照射を受けることによって生ずる変化として、機械的挙動に関連して重要な事柄は次の3つがある。

- i) 機械的物性値が変化する。
- ii) 見掛け上の体積変化が起る。これは一般的には非等方的寸法変化となる (照射変形)。
- iii) 材料に応力が発生している状態ではクリープが発生する (照射クリープ)。

黒鉛材料の以上のような複雑な現象を全て考慮することには多くの困難がある。従って、工学的設計の立場から黒鉛材料を扱う場合には次のような配慮のもとに幾つかの単純化を行なう必要がある。第1は、弾性近似の仮定である。弾性近似を仮定する以上、塑性変形が無視できないような過大な荷重がかかっている場合の解析には適用されない。第2は、異方性の現実的取り扱いである。多くの黒鉛構造物では、その素材の製造法との関連で、2つの方向に独立した異方性があることが知られている。すなわち、横等方性の仮定が成り立つものとされる。この具体的方法については後で述べる。

以上述べたことに基づいて、本計算モデルの構成方程式を直交する3主軸を x_1, x_2, x_3 方向として一般化された Hooke の法則で表わす。

$$\epsilon_{ij} = \sum_j^3 S_{ij} \sigma_{ij} + \alpha_{ij} T + \eta_{ij} + \epsilon_{ij}^0 \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (2.3.1)$$

ここで、 ϵ_{ij} , σ_{ij} はそれぞれ全ひずみ、全応力の ij 成分である。右辺第1項は弾性変形を意味し、 S_{ij} は弾性係数である。第2項以下はそれぞれ熱変形、照射変形およびクリープ変形である。これらについて異方性の具体的内容を含めて本計算モデルの取り扱いについて述べる。

先ず弾性変形を ϵ_{ij}^E で表わす。

$$\varepsilon_{ij}^E = \sum_j^3 S_{ij} \sigma_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (2.3.2)$$

直交座標系において独立な応力ひずみは6つであるが、弾性係数の対称性 $S_{ij}=S_{ji}$ 、さらには、本問題で仮定している横等方性の性質によって、独立な弾性係数は5つとなる。今、直交軸、 x_1, x_2, x_3 において、主軸 x_2 に垂直な1-3平面内で物性値が等方であるとする。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= S_{33} \\ S_{12} &= S_{32} (=S_{21} = S_{23}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.3)$$

これらを用いて式(2.3.2)を書き表わすと

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^E \\ \varepsilon_{22}^E \\ \varepsilon_{33}^E \\ \varepsilon_{12}^E \\ \varepsilon_{23}^E \\ \varepsilon_{31}^E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} \quad (2.3.4)$$

さらに、本問題では軸対称または球対称問題を扱っているので、この対称軸を1つの主軸とすることができ剪断成分に関する関係が省略される。したがって

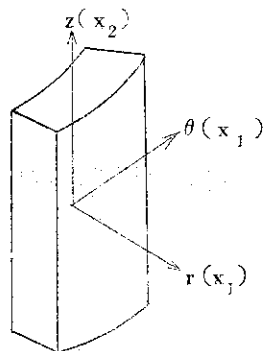
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1^E \\ \varepsilon_2^E \\ \varepsilon_3^E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{12} \\ S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (2.3.5)$$

ただし、ここで添字の簡略化 $ii \rightarrow i$ を行っている。4つの弾性係数 $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{22}$ と縦弾性係数(ヤング率) E 、ポアソン比 ν との関係は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_2}, \quad S_{13} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.6)$$

ここで、 E_1, E_2 はそれぞれ x_1, x_2 方向の縦弾性係数であり、 ν_{ij} は、 j 方向の縮みの i 方向の伸びに対するポアソン比である。

Cylindrical
coordinates



Spherical
coordinates

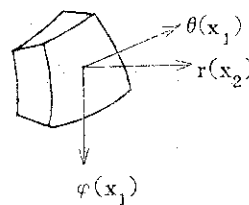


Fig.2.5 Relations between coordinates systems and directions of the anisotropy

さて、軸対称問題の場合は、上述の直交座標系 (x_1, x_2, x_3) と円筒座標系 (r, θ, z) を次のように対応させる。

$$x_1 \rightarrow r, x_2 \rightarrow z, x_3 \rightarrow \theta$$

また球対称構造物の場合には、直交座標系 (x_1, x_2, x_3) と球座標系 (r, θ, φ) を次のように対応させるものとする。

$$x_1 \rightarrow r, x_2 \rightarrow \theta, x_3 \rightarrow \varphi$$

座標関係を明確にするため、これらの関係を Fig. 2.5 に示した。

これより、軸対称問題の場合 (2.3.6) 式のヤング率とポアソン比は

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_r, E_2 = E_z \\ \nu_{12} &= \nu_{rz} \equiv \nu_2 \\ \nu_{13} &= \nu_{r\theta} \equiv \nu_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.7)$$

となる。以上によって、軸対称構造物における弾性変形における応力・ひずみ関係は以下の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r^E &= \frac{1}{E_1} \sigma_r - \frac{\nu_1}{E_2} \sigma_\theta - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_z \\ \epsilon_\theta^E &= -\frac{\nu_1}{E_1} \sigma_r + \frac{1}{E_1} \sigma_\theta - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_z \\ \epsilon_z^E &= -\frac{\nu_2}{E_2} \sigma_r - \frac{\nu_2}{E_2} \sigma_\theta + \frac{1}{E_2} \sigma_z \end{aligned} \right\} \quad (2.3.8)$$

また、球対称問題の場合のヤング率とポアソン比は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_\theta, E_2 = E_r \\ \nu_{12} &= \nu_{\theta r} \equiv \nu_2 \\ \nu_{13} &= \nu_{\theta\varphi} \equiv \nu_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.9)$$

よって、球対称構造物における弾性変形における応力・ひずみ関係は以下の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r^E &= \frac{1}{E_2} \sigma_r - \frac{2\nu_2}{E_2} \sigma_\theta \\ \epsilon_\theta^E &= -\frac{\nu_2}{E_2} \sigma_r + \frac{1-\nu_1}{E_1} \sigma_\theta \end{aligned} \right\} \quad (2.3.10)$$

次に熱変形、照射変形 $\epsilon_{ij}^T, \epsilon_{ij}^G$ を前述の直交座標系で表わすと、

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1^T \\ \epsilon_2^T \\ \epsilon_3^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} T, \quad \begin{pmatrix} \epsilon_1^G \\ \epsilon_2^G \\ \epsilon_3^G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{pmatrix} \quad (2.3.11)$$

さらに、構等方性に基づいて前述の弾性変形と同様それぞれを円筒座標系、球座標系で記せば、

円筒座標系

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r^T \\ \varepsilon_\theta^T \\ \varepsilon_z^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} T, \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_r^G \\ \varepsilon_\theta^G \\ \varepsilon_z^G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix} \quad (2.3.12)$$

球座標系

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r^T \\ \varepsilon_\theta^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_1 \end{pmatrix} T, \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_r^G \\ \varepsilon_\theta^G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_2 \\ \eta_1 \end{pmatrix} \quad (2.3.13)$$

となる。

次にクリープ変形 ε_{ij}^C について述べる。全クリープひずみは考えている負荷時間にわたっての積分値である。

$$\varepsilon_{ij}^C = \int_0^\tau \dot{\varepsilon}_{ij}^C(\tau) d\tau \quad (2.3.14)$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}^C(\tau)$ は時間 τ におけるクリープひずみ速度である。負荷変動が微小とみなされる時間間隔 $\Delta\tau$ においては、

$$\Delta \varepsilon_{ij}^C = \dot{\varepsilon}_{ij}^C \Delta\tau \quad (2.3.15)$$

と近似できる。

異方性材料のクリープ変形は直交異方性塑性理論を拡張することによって定式化される。直角座標系 (x_1, x_2, x_3) の 3 主軸方向のクリープひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{ij}^C$ は次の式で表わされる。⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{11}^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} (A_{11} \bar{\sigma}_{11} - A_{12} \bar{\sigma}_{22} - A_{13} \bar{\sigma}_{33}) \\ \Delta \varepsilon_{22}^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} (A_{22} \bar{\sigma}_{22} - A_{21} \bar{\sigma}_{11} - A_{23} \bar{\sigma}_{33}) \\ \Delta \varepsilon_{33}^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} (A_{33} \bar{\sigma}_{33} - A_{31} \bar{\sigma}_{11} - A_{32} \bar{\sigma}_{22}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.16)$$

ここで、 A_{ij} はクリープ変形の異方性係数 (anisotropy parameter)

$\bar{\sigma}$ は時間間隔 $\Delta\tau$ における平均応力

また、 $\Delta \varepsilon_{eq}^C$, σ_{eq} は相当クリープひずみ増分 (equivalent creep strain increment) および相当応力 (equivalent stress) と呼ばれ、それぞれ以下の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{eq}^C &= \frac{1}{G^2} \{ A_{12} (A_{23} \Delta \varepsilon_{11}^C - A_{31} \Delta \varepsilon_{22}^C)^2 \\ &\quad + A_{23} (A_{31} \Delta \varepsilon_{22}^C - A_{12} \Delta \varepsilon_{33}^C)^2 + A_{31} (A_{12} \Delta \varepsilon_{33}^C - A_{23} \Delta \varepsilon_{11}^C)^2 \} \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{A_{12} (\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{22})^2 + A_{23} (\bar{\sigma}_{22} - \bar{\sigma}_{33})^2 + A_{31} (\bar{\sigma}_{33} - \bar{\sigma}_{11})^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.17)$$

ただし、 $G = A_{12} A_{23} + A_{23} A_{31} + A_{31} A_{12}$

さて、当面の中心的問題である黒鉛材料について、異方性クリープ変形に対して、このよう

な異方性塑性理論の具体的適用については、上記の異方性パラメータの値を知らなければならぬ。ここでは、多くの黒鉛材料の構造解析と同じように、定容積変化の仮定および横等方性の仮定を行うものとする。すなわち、定容積変化の仮定

$$\Delta \varepsilon_{11}^C + \Delta \varepsilon_{22}^C + \Delta \varepsilon_{33}^C = 0 \quad (2.3.18)$$

より次の関係が成り立つものとする。

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= A_{21} + A_{31} = A_{12} + A_{31} \\ A_{22} &= A_{12} + A_{32} = A_{13} + A_{23} \\ A_{33} &= A_{13} + A_{23} = A_{31} + A_{23} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.19)$$

すなわち独立なパラメータは3つ (A_{11} , A_{22} , A_{33}) または (A_{12} , A_{23} , A_{31}) となる。さらに前述の弾性係数と同様な横等方性 ($x_2 \perp (x_1 - x_3)$) を仮定すれば、

$$A_{11} = A_{33} \text{ または } A_{12} = A_{23} = \frac{1}{2} A_{22} \quad (2.3.20)$$

となり、独立なパラメータは2つとなる。以後2つの独立なパラメータを

$$\left. \begin{aligned} A_1 &\equiv A_{11} \\ A_2 &\equiv A_{22} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.21)$$

ととるものとする。

以上によって、軸対称構造物および球対称構造物に対するクリープ変形法則は具体的に次のようになる。

軸対称構造物

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_r^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} \left\{ A_1 \bar{\sigma}_r - \left(A_1 - \frac{A_2}{2} \right) \bar{\sigma}_\theta - \frac{A_2}{2} \bar{\sigma}_z \right\} \\ \Delta \varepsilon_\theta^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} \left\{ A_1 \bar{\sigma}_\theta - \left(A_1 - \frac{A_2}{2} \right) \bar{\sigma}_r - \frac{A_2}{2} \bar{\sigma}_z \right\} \\ \Delta \varepsilon_z^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} \left\{ A_2 \bar{\sigma}_z - \frac{A_2}{2} \bar{\sigma}_r - \frac{A_2}{2} \bar{\sigma}_\theta \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.22)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{eq}^C &= \frac{1}{2 A_2 \left(A_1 - \frac{A_2}{4} \right)^2} \left\{ \left[\frac{A_2}{2} \Delta \varepsilon_r^C - \left(A_1 - \frac{A_2}{2} \right) \Delta \varepsilon_z^C \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + \left[\left(A_1 - \frac{A_2}{2} \right) \Delta \varepsilon_z^C - \frac{A_2}{2} \Delta \varepsilon_\theta^C \right]^2 + \left(A_1 - \frac{A_2}{2} \right) \left[\Delta \varepsilon_\theta^C - \Delta \varepsilon_r^C \right]^2 \right\} \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{\frac{A_2}{2} (\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_z)^2 + \frac{A_2}{2} (\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_\theta)^2 + \left(A_1 - \frac{A_2}{2} \right) (\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.23)$$

球対称構造物

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_r^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} \cdot A_2 (\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta) \\ \Delta \varepsilon_\theta^C &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^C}{\sigma_{eq}} \cdot \frac{A_2}{2} (\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.24)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{eq}^C &= \frac{1}{A_2 (A_1 - \frac{A_2}{4})} \left\{ \frac{A_2}{2} \Delta \varepsilon_\theta^C - (A_1 - \frac{A_2}{2}) \Delta \varepsilon_r^C \right\}^2 \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{A_2} \cdot \left| \bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta \right| \end{aligned} \right\} \quad (2.3.25)$$

さて、相当クリープひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{eq}^C$ は、一般に、相当応力 σ_{eq} ，全相当ひずみ ε_{eq} ，温度 T ，時間 τ ，および負荷経路の関数である。

$$\Delta \varepsilon_{eq}^C = F(\sigma_{eq}, \varepsilon_{eq}, T, \tau) \quad (2.3.26)$$

本問題では、照射クリープおよび温度クリープ現象を考慮するが、いずれも定常クリープを考慮するものとする。すなわち

$$\Delta \varepsilon_{eq}^C = F(\sigma_{eq}, \varepsilon_{eq}, T) \Delta \tau \quad (2.3.27)$$

さて、定常照射クリープのひずみ速度は近似的に応力に比例することが多くの単軸クリープ実験から知られている。

$$\Delta \varepsilon_{eq}^{CG} = K'_{CG}(\Gamma) \sigma_{eq} \cdot \Delta \tau \quad (2.3.28)$$

多くの照射実験と同様に、ひずみ速度を高速中性子照射量 γ に対して表わすものとする。

$$\Delta \varepsilon_{eq}^{CG} = K_{CG}(\Gamma) \sigma_{eq} \cdot \Delta \gamma \quad (2.3.29)$$

この K_{CG} が照射クリープ定数と呼ばれるものでもある。 K_{CG} の温度依存性は、本問題での各層の平均温度をとることによって考慮される。

次に、定常温度クリープについては、本計算モデルでは次のような関数関係を仮定する。

$$\Delta \varepsilon_{eq}^{CT} = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_c} \right)^m \exp(\kappa T) \Delta \tau \quad (2.3.30)$$

ただし、 $T[^\circ K]$

ここで、 m ， κ ， σ_c は物質によって定まる定数である。

ところで、以上のような異方性塑性理論を基礎とするクリープ法則とは異なる半実験的な照射クリープ法則が Stevens⁶⁾らによって提案されている。この法則ではパラメータとしてクリープポアソン比 ν_c (Poisson's ratio in creep) が新たな量として導入されている。式(2.3.22) および (2.3.24) に対応する関係は以下の式で与えられる。

軸対称構造物

$$\Delta \varepsilon_r^{CG} = \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^{CG}}{\sigma_{eq}} \{ \bar{\sigma}_r - \nu_c (\bar{\sigma}_\theta + \bar{\sigma}_z) \}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{\theta}^{CG} &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^{CG}}{\sigma_{eq}} \{ \bar{\sigma}_{\theta} - \nu_c (\bar{\sigma}_z + \bar{\sigma}_r) \} \\ \Delta \varepsilon_z^{CG} &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^{CG}}{\sigma_{eq}} \{ \bar{\sigma}_z - \nu_c (\bar{\sigma}_r + \bar{\sigma}_{\theta}) \} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.31)$$

球対称構造物

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_r^{CG} &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^{CG}}{\sigma_{eq}} (\bar{\sigma}_r - 2 \nu_c \bar{\sigma}_{\theta}) \\ \Delta \varepsilon_{\theta}^{CG} &= \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^{CG}}{\sigma_{eq}} \{ -\nu_c \bar{\sigma}_r + (1 - \nu_c) \bar{\sigma}_{\theta} \} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.32)$$

以上、(2.3.1)式で与えられる一般化されたHookeの法則における計算モデルの取り扱いを述べた。なお、以後の記述を簡明にするため、(2.3.1)式の右辺第2項以後の主軸方向の非弾性ひずみをまとめて g_i とおく。すなわち

$$g_i = \alpha_i T + \eta_i + \varepsilon_i^G \quad (2.3.33)$$

ところで、以上の記述から明らかなように、本計算モデルは一般的クリープ問題を扱っているため、ひずみ増分法による解法が必要となる。すなわち

$$\Delta \varepsilon_i = \sum_j S_{ij} \Delta \sigma_j + \Delta g_i \quad (2.3.34)$$

$$\text{ただし、} \Delta g_i = \Delta(\alpha_i T) + \Delta \eta_i + \Delta \varepsilon_i^G \quad (2.3.35)$$

応力・ひずみ増分を求める解析手順はMendelsonらの方法によるが、その具体的内容は第2.3.4節に述べられる。

2.3.2 軸対称構造物の粘弾性応力計算式

(1) 中空円筒の応力計算式

本節で与えられた構造物の境界条件を考慮して具体的な応力計算式を導出する。本問題の性格上、前節の式(2.3.2.9)、(2.3.3.0)に与えたごとく、考えている時間間隔での関係式が必要とされる。しかし、以後では記述を簡明にするため時間に関する変分記号 Δ を省略することにする。

円筒座標系における応力・ひずみ関係は前節での結果を用いて

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_{\theta} \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_1 & -\nu_1/E_1 & -\nu_2/E_2 \\ -\nu_1/E_1 & 1/E_1 & -\nu_2/E_2 \\ -\nu_2/E_2 & -\nu_2/E_2 & 1/E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_{\theta} \\ \sigma_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g_r \\ g_{\theta} \\ g_z \end{pmatrix} \quad (2.3.31)$$

ただし、

$$\begin{pmatrix} g_r \\ g_{\theta} \\ g_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 T \\ \alpha_1 T \\ \alpha_2 T \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_r^G \\ \varepsilon_{\theta}^G \\ \varepsilon_z^G \end{pmatrix} \quad (2.3.32)$$

さて、考えている中空円筒が無限に長いものとし、一般的な平面ひずみの状態にあるものとする。 z 方向が対称軸であるから、ひずみ・変位関係および平衡方程式はそれぞれ次式で与えられる。

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \epsilon_z = \frac{dw}{dz} = C \text{ (一定)} \quad (2.3.33)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2.3.34)$$

(2.3.33) 式で u, w はそれぞれ r 方向および z 方向の変位を意味する。また、この式からひずみの適合条件式が導びかれる。

$$\frac{d}{dr} (r \epsilon_\theta) = \epsilon_r \quad (2.3.35)$$

また、考えている中空円筒は Fig. 2.6 に示したように内半径 a 、外半径 b で、内圧 P_a 、外圧 P_b を受けるものとし、円筒端部での荷重がないものとする。したがって、次の 3 つの境界条件が適用されるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -P_a \quad (r=a) \\ \sigma_r &= -P_b \quad (r=b) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.36)$$

および

$$2\pi \int_a^b \sigma_z r dr = 0 \quad (2.3.37)$$

以上が本問題の基本式である。まず、 $\epsilon_z = C$ であることから、(2.3.31) 式の第 3 式から、

$$\sigma_z = \nu_2(\sigma_r + \sigma_\theta) - E_2(g_z - C) \quad (2.3.38)$$

これと (2.3.31) の第 1, 2 式より

$$\epsilon_r = \frac{1}{A} \sigma_r - \frac{1}{B} \sigma_\theta + \nu_2(g_z - C) + g_r \quad (2.3.39)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{1}{B} \sigma_r + \frac{1}{A} \sigma_\theta + \nu_2(g_z - C) + g_\theta \quad (2.3.40)$$

ただし、

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{E_1} - \frac{\nu_2^2}{E_2}, \quad \frac{1}{B} = \frac{\nu_1}{E_1} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \quad (2.3.41)$$

さて、本問題の場合、境界条件が半径方向の応力で与えられることを考慮し、次式で定義される応力関数 χ を用いて解析解を導出する。

$$\chi = r \sigma_r \quad (2.3.42)$$

半径応力 σ_r および円周応力 σ_θ は、上式 (2.3.42) および平衡方程式 (2.3.34) により、応力関数 χ を用いて次のように表わすことができる。

$$\sigma_r = \frac{\chi}{r} \quad (2.3.43)$$

$$\sigma_\theta = \frac{d\chi}{dr} \quad (2.3.44)$$

したがって、式(2.3.3.9)と(2.3.4.0)の ε_r および ε_θ を式(2.3.4.3)と式(2.3.4.4)を使って応力関数 χ にて表わし、さらにこれを式(2.3.3.5)に代入して整理すれば、次式に示すような χ に関する微分方程式が得られる。

$$r^2 \frac{d^2 \chi}{dr^2} + r \frac{d\chi}{dr} - \chi = \Lambda r^2 \left\{ \frac{g_r - g_\theta}{r} - \frac{d}{dr} (g_\theta + \nu_2 g_z) \right\} \quad (2.3.4.5)$$

上式は Euler または Cauchy の微分方程式と呼ばれるものであり、右辺=0 とおいた斉次方程式の解 χ_1 および χ_2 はそれぞれ $\chi_1 = r$, $\chi_2 = r^{-1}$ で与えられる。したがって原方程式の一般解 χ は c_1, c_2 を境界条件によって定まる定数であるとして、次式にて与えられる。

$$\chi = c_1 r + c_2 r^{-1} + \chi_s \quad (2.3.4.6)$$

χ_s は原方程式(2.3.4.5)の特解であり、ここでは以下のように定数変化法を用いて求める。すなわち、 c_3, c_4 を r の関数として特解 χ_s を

$$\chi_s = c_3(r) \chi_1 + c_4(r) \chi_2 \quad (2.3.4.7)$$

とおき、さらに、

$$\frac{dc_3}{dr} \chi_1 + \frac{dc_4}{dr} \chi_2 = 0 \quad (2.3.4.8)$$

なる条件を仮定する。式(2.3.4.6)を式(2.3.4.5)に代入し、かつ、 χ_1, χ_2 が斉次方程式の解であることと式(2.3.4.8)の条件式を利用すれば、次の式が導びかれる。

$$\frac{dc_3}{dr} \frac{d\chi_1}{dr} + \frac{dc_4}{dr} \frac{d\chi_2}{dr} = \Lambda \left\{ \frac{g_r - g_\theta}{r} - \frac{d}{dr} (g_\theta + \nu_2 g_z) \right\} \quad (2.3.4.9)$$

式(2.3.4.8)と式(2.3.4.9)が c_3 と c_4 に関する連立方程式であるから、これを領域 $[a, r]$ について解くことによって次のような c_3 および c_4 が得られる。

$$c_3 = \frac{\Lambda}{2} \left\{ \int_a^r \frac{r(g_r - g_\theta)}{r} dr + [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] - [g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r)] \right\} \quad (2.3.5.0)$$

$$c_4 = -\frac{\Lambda}{2} \left\{ \int_a^r r(g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr + a^2 [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] - r^2 [g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r)] \right\} \quad (2.3.5.1)$$

したがって、特解 χ_s が次式で与えられる。

$$\chi_s = \frac{\Lambda}{2} \left\{ [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] \left[r - \frac{a^2}{r} \right] + r \int_a^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr - r^{-1} \int_a^r r(g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \right\} \quad (2.3.5.2)$$

以上によって、原方程式(2.3.4.5)の一般解 χ が次式で与えられる。

$$\chi = c_1 r + c_2 r^{-1} + \frac{\Lambda}{2} \{ [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] \left[r - \frac{a^2}{r} \right] + r \int_a^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr - r^{-1} \int_a^r r(g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \} \quad (2.3.5.3)$$

したがって、式(2.3.4.3)と式(2.3.4.4)によって次に示すような半径応力 σ_r と円周応力 σ_θ

の一般式が得られる。

$$\sigma_r(r) = c_1 + c_2 r^{-2} + \frac{A}{2} \left\{ \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] + I_1(r) - I_2(r) \right\} \quad (2.3.54)$$

$$\sigma_\theta(r) = c_1 - c_2 r^{-2} + \frac{A}{2} \left\{ \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] - 2 [g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r)] + I_1(r) + I_2(r) \right\} \quad (2.3.55)$$

ここで、

$$I_1(r) = \int_a^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr \quad (2.3.56)$$

$$I_2(r) = \frac{1}{r^2} \int_a^r r (g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \quad (2.3.57)$$

次いで、境界条件 (2.3.36) 式に対して定数 c_1, c_2 を定めると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= -\frac{a^2}{a^2 - b^2} P_a + \frac{b^2}{a^2 - b^2} P_b \\ &+ \frac{A}{2} \left\{ [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] - \frac{b^2}{a^2 - b^2} [I_1(b) - I_2(b)] \right\} \\ c_2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2 - b^2} P_a - \frac{a^2 - b^2}{a^2 - b^2} P_b \\ &+ \frac{A}{2} \left\{ a^2 [g_\theta(a) + \nu_2 g_z(a)] - \frac{a^2 - b^2}{a^2 - b^2} [I_1(b) - I_2(b)] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.58)$$

この c_1 と c_2 を式 (2.3.54), (2.3.55) に代入すれば、 σ_r と σ_θ に関する最終的な応力計算式として次式を得る。

$$\sigma_r(r) = -\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}{\left(\frac{r}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1\right]} P_a - \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{r}{a}\right)^2 - 1\right]}{\left(\frac{r}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1\right]} P_b - \frac{A}{2} \left\{ \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{r}{a}\right)^2 - 1\right]}{\left(\frac{r}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1\right]} [I_1(b) - I_2(b)] - I_1(r) + I_2(r) \right\} \quad (2.3.59)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}{\left(\frac{r}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1\right]} P_a - \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{r}{a}\right)^2 + 1\right]}{\left(\frac{r}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1\right]} P_b$$

$$-\frac{A}{2} \left\{ \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{r}{a}\right)^2 + 1\right]}{\left(\frac{r}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1\right]} \left[I_1(b) - I_2(b) \right] - I_1(r) - I_2(r) + 2 \left[g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r) \right] \right\} \quad (2.3.60)$$

両式から分るように右辺第1項が内圧の効果，第2項が外圧の効果，第3項が非弾性ひずみの効果である。本コードではこれらの効果を区別して取扱っている。すなわち，応力成分として内外圧によるものを $\sigma^B(r)$ ，また非弾性ひずみの効果のうち，熱変形によるものを $\sigma^T(r)$ ，照射変形によるものを $\sigma^D(r)$ ，クリープひずみによるものを $\sigma^C(r)$ としている。またひずみ成分についても応力成分と同様に弾性ひずみを $\epsilon^B(r)$ ，熱ひずみを $\epsilon^T(r)$ ，照射変形を $\epsilon^D(r)$ ，クリープひずみを $\epsilon^C(r)$ と表わすことにしている。

さて，次に軸方向の応力 σ_z を求める。 σ_z を得るためには先ず軸方向のひずみ $\epsilon_z = C$ （定数）を求める必要がある。この定数 C は軸方向に関する拘束条件式（2.3.37）によって定められる。式（2.3.59），（2.3.60）を σ_z の式（2.3.38）に代入して C を求めると，

$$C = \frac{2}{b^2 - a^2} \left\{ \int_a^b r g_z dr - \frac{\nu_2}{E_2} (a^2 P_a - b^2 P_b) \right\} \quad (2.3.61)$$

が得られる。したがって，式（2.3.38）により軸方向の応力 σ_z として次式を得る。

$$\sigma_z(r) = \frac{2 E_2}{b^2 - a^2} \int_a^b r g_z dr - E_2 g_z(r) - \nu_2 A \left\{ \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[I_1(b) - I_2(b) \right] - I_1(r) + g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r) \right\} \quad (2.3.62)$$

以上によって r, θ, z 方向のすべての応力計算式が得られた。なお，ひずみの計算は式（2.3.31）によって全応力に対する全ひずみとして定めることができる。

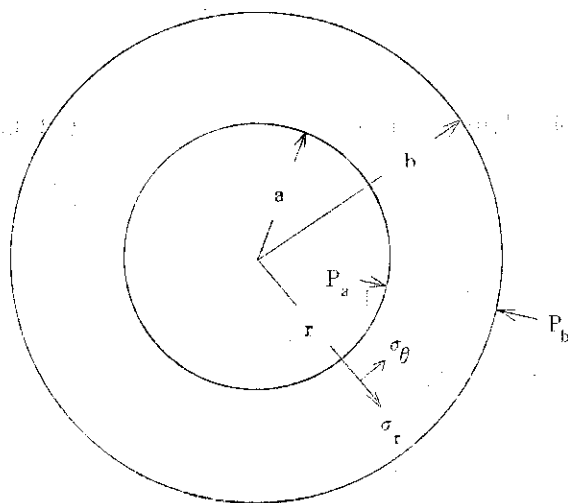


Fig.2.6 Cylindrical and spherical shell model

(2) 中実円筒の応力計算式

中実円筒の問題も中空円筒の場合と同様に応力関数 x に関する微分方程式 (2.3.4.5) を解くものとする。今の場合、積分範囲が $[0, b]$ であり、また一般的な境界条件を $\sigma_r(b) = -P_b$ とする。

さて、中空円筒の場合と同様に先ず齊次方程式の解を求め、次いで特解を定数変化法を用いて求めると、式 (2.3.5.0) と式 (2.3.5.1) の c_3, c_4 に代るものとして次式を、さらに式 (2.3.5.2) の特解 x_s に代るものとして式 (2.3.5.2 a) を得る。

$$c_3 = \frac{A}{2} \left\{ \int_0^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr + [g_\theta(0) + \nu_2 g_z(0)] - [g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r)] \right\} \quad (2.3.5.0 a)$$

$$c_4 = -\frac{A}{2} \left\{ \int_0^r r (g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr - r^2 [g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r)] \right\} \quad (2.3.5.1 a)$$

$$x_s = \frac{A}{2} \left\{ r [g_\theta(0) + \nu_2 g_z(0)] + r \int_0^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr - r^{-1} \int_0^r r (g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \right\} \quad (2.3.5.2 a)$$

ただし、

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{E_1} - \frac{\nu_2^2}{E_2}$$

ところで、原方程式 (2.3.4.5) の一般解式 (2.3.5.3) で $r=0$ のとき応力関数が有限であるところから $c_2=0$ でなければならない。したがって、原方程式 (2.3.4.5) の中実円筒における一般解は次式で与えられる。

$$x = c_1 r + \frac{A}{2} \left\{ r [g_\theta(0) + \nu_2 g_z(0)] + r \int_0^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr - r^{-1} \int_0^r r (g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \right\} \quad (2.3.5.3 a)$$

以下、中空円筒の場合と同様にして、中実円筒における σ_r と σ_θ の最終的な応力計算式として次式を得る。

$$\sigma_r(r) = -P_a - \frac{A}{2} \left\{ I_1(b) - I_2(b) - I_1(r) + I_2(r) \right\} \quad (2.3.5.9 a)$$

$$\sigma_\theta(r) = -P_b - \frac{A}{2} \left\{ I_1(b) - I_2(b) - I_1(r) - I_2(r) + 2 [g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r)] \right\} \quad (2.3.6.0 a)$$

ただし、

$$I_1(r) = \int_0^r \frac{g_r - g_\theta}{r} dr \quad (2.3.5.6 a)^*$$

$$I_2(r) = \frac{1}{r^2} \int_0^r r (g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \quad (2.3.57a)^*$$

さらにまた、軸方向ひずみ $\varepsilon_z = C$ および軸方向応力 σ_z はそれぞれ次式で表わされる。

$$C = \frac{2}{b^2} \int_0^b r g_z dr + \frac{2\nu_2}{E_2} P_b \quad (2.3.61a)$$

$$\sigma_z(r) = \frac{2E_2}{b^2} \int_0^b r g_z dr - E_2 g_z(r)$$

$$-A\nu_2 \{ I_1(b) - I_2(b) - I_1(r) + g_\theta(r) + \nu_2 g_z(r) \} \quad (2.3.62a)$$

(3) 接触圧力計算式

円筒殻の接触圧力は焼ばめ問題と同様な考察から求められる。Fig. 2.7 に示すように円筒殻第 $j-1$ 層と第 j 層との接触を考える。ここで、第 $j-1$ 層の内半径を r_{j-1} 、第 $j-1$ 層の外半径と第 j 層の内半径を r_j 、第 j 層の外半径を r_{j+1} とし、第 $j-1$ 層と第 j 層との間の接触圧力 P_j が第 $j-1$ 層の内圧 P_{j-1} と第 j 層の外圧 P_{j+1} を受けてつり合っているものとする。

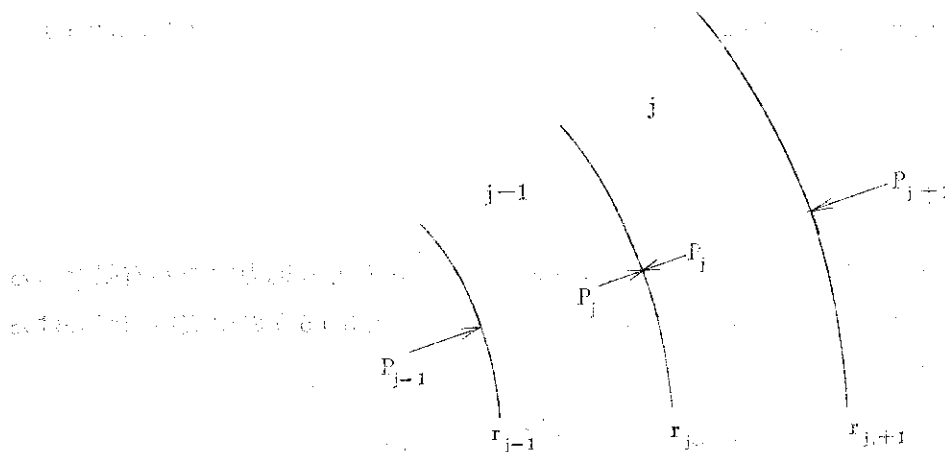


Fig. 2.7 Relations between external and interfacial pressures of the two cylindrical layers in balance.

* 本問題では、熱ひずみおよび照射ひずみに対して少くとも横等方性を仮定していること、さらにまた、この両者について軸対称性を仮定していることを考慮すると、クリープひずみも含めて非弾性ひずみに対して

$$I_1(c) = 0$$

また、

$$\begin{aligned} I_2(0) &= \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r^2} \int_0^r r (g_r + g_\theta + 2\nu_2 g_z) dr \\ &= \frac{1}{2} \{ g_r(0) + g_\theta(0) + 2\nu_2 g_z(0) \} \end{aligned}$$

である。

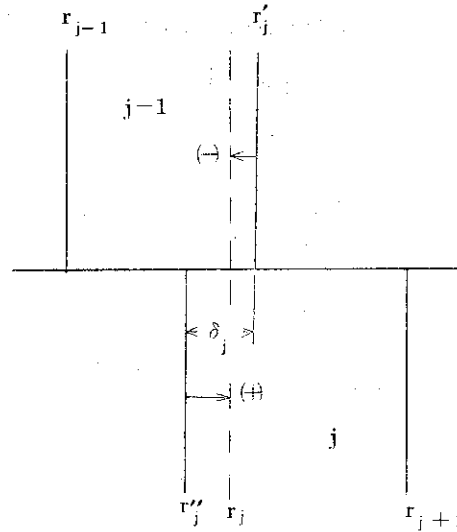


Fig.2.8 Relations between radial geometries of two layers with or without external and interfacial pressures

次に、この接触圧力が解放された自由状態を考える。この状態で Fig.2.8 に示すように、第 $j-1$ 層（内筒）の外半径が r'_j 、第 j 層（外筒）の内半径が r''_j となるものとする。そして、この r'_j と r''_j との差を δ_j とおく。すなわち、

$$\begin{aligned}\delta_j &= r'_j - r''_j \\ &= (r'_j - r_{j-1}) - (r''_j - r_j)\end{aligned}\quad (2.3.63)$$

ここで、 $(r'_j - r_{j-1})$ は内外半径 r_{j-1} , r_j の第 $j-1$ 層が内外圧 P_{j-1} と P_j を受けるときの外半径の弾性変形と考えることができるから

$$r'_j - r_{j-1} = r_j \epsilon_{\theta}^E(r_j)_{j-1}\quad (2.3.64)$$

また、 $(r''_j - r_j)$ は内外半径 r_j , r_{j+1} の第 j 層が内外圧 P_j , P_{j+1} を受けるときの内半径の弾性変形と考えることができるから

$$r''_j - r_j = r_j \epsilon_{\theta}^E(r_j)_j\quad (2.3.65)$$

ところで、内外圧を受ける円筒の $r = r_j$ における第 $j-1$ 層と第 j 層のひずみ $\epsilon_{\theta}^E(r_j)_{j-1}$, $\epsilon_{\theta}^E(r_j)_j$ と円周応力 $\sigma_{\theta}^E(r_j)_j$, $\sigma_{\theta}^E(r_j)_{j-1}$ は、それぞれ前述の式 (2.3.40) と (2.3.60) から次式で表わされる。

$$\epsilon_{\theta}^E(r_j)_{j-1} = -\frac{1}{B_{j-1}} \sigma_r^E(r_j)_{j-1} + \frac{1}{A_{j-1}} \sigma_{\theta}^E(r_j)_{j-1} - \nu_{2j-1} C_{j-1}\quad (2.3.66)$$

$$\epsilon_{\theta}^E(r_j)_j = -\frac{1}{B_{j-1}} \sigma_r^E(r_j)_{j-1} + \frac{1}{A_j} \sigma_{\theta}^E(r_j)_j - \nu_{2j} C_j\quad (2.3.67)$$

$$\sigma_{\theta}^E(r_j)_{j-1} = \frac{2}{\beta_{j-1}^2 - 1} P_{j-1} - \frac{\beta_{j-1}^2 + 1}{\beta_{j-1}^2 - 1} P_j \quad (2.3.68)$$

$$\sigma_{\theta}^E(r_j)_j = \frac{\beta_j^2 + 1}{\beta_j^2 - 1} P_j - \frac{2\beta_j^2}{\beta_j^2 - 1} P_{j+1} \quad (2.3.69)$$

ただし、

$$C_{j-1} = -\frac{2}{\beta_{j-1}^2 - 1} \left(\frac{\nu_2}{E_2} \right)_{j-1} (P_{j-1} - \beta_{j-1}^2 P_j) \quad (2.3.70)$$

$$C_j = -\frac{2}{\beta_j^2 - 1} \left(\frac{\nu_2}{E_2} \right)_j (P_j - \beta_j^2 P_{j+1}) \quad (2.3.71)$$

$$\beta_{j-1} = \frac{r_j}{r_{j-1}}, \quad \beta_j = \frac{r_{j+1}}{r_j} \quad (2.3.72)$$

さらにまた、半径応力 $\sigma_r^E(r_j)$ は

$$\sigma_r^E(r_j)_{j-1} = \sigma_r^E(r_j)_j = -P_j \quad (2.3.73)$$

で与えられる。これらによって式(2.3.63)の条件式は最終的に次式のように整理される。

$$\omega_{j,j-1} P_{j-1} + \omega_{j,j} P_j + \omega_{j,j+1} P_{j+1} = D_j \quad (2.3.74)$$

あるいは、

$$P_j = \frac{1}{\omega_{j,j}} (D_j - \omega_{j,j-1} P_{j-1} - \omega_{j,j+1} P_{j+1}) \quad (2.3.75)$$

ただし、

$$\omega_{j,j-1} = -\frac{2}{\beta_{j-1}^2 - 1} \left(\frac{1}{A} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \right)_{j-1} \quad (2.3.76)$$

$$\begin{aligned} \omega_{j,j} = & \left(\frac{1}{A} \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} + \frac{1}{B} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \frac{2}{\beta^2 - 1} \right)_j \\ & + \left(\frac{1}{A} \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} - \frac{1}{B} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \frac{2}{\beta^2 - 1} \right)_{j-1} \end{aligned} \quad (2.3.77)$$

$$\omega_{j,j+1} = -\frac{2\beta_j^2}{\beta_j^2 - 1} \left(\frac{1}{A} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \right)_j \quad (2.3.78)$$

$$D_j = \left(\frac{\delta}{r} \right)_j \quad (2.3.79)$$

次に、上記の特殊な場合として内側の第 $j-1$ 層が中空円筒である場合の接触圧力計算式について示す。

この場合、式(2.3.68)と式(2.3.70)の $\sigma_{\theta}^E(r_j)_{j-1}$ および C_{j-1} が異なるのみであり、上記

と全く同様に求めることができる。すなわち、 $\sigma_{\theta}^E(r_j)_{j-1}$ 、 C_{j-1} は前述の式(2.3.60a)と(2.3.61a)とから

$$\sigma_{\theta}^E(r_j)_{j-1} = -P_j \quad (2.3.68a)$$

$$C_{j-1} = \left(\frac{2\nu_2}{E_2} \right)_{j-1} P_j \quad (2.3.70a)$$

で与えられるので、第 $j-1$ 層が中実円筒である場合の接触圧力計算式は、次式にて表わすことができる。

$$P_j = \frac{1}{\omega_{j,j}} (D_j - \omega_{j,j+1} P_{j+1}) \quad (2.3.75a)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \omega_{j,j} = & \left(\frac{1}{A} \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} + \frac{1}{B} + \frac{\nu_2^2}{E_2} \frac{2}{\beta^2 - 1} \right)_j \\ & + \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{B} + 2 \frac{\nu_2^2}{E_2} \right)_{j-1} \end{aligned} \quad (2.3.77a)$$

であり、 β_j 、 $\omega_{j,j+1}$ および D_j は前と全く同様それぞれ式(2.3.72)、(2.3.78)、(2.3.79)で与えられる。

式(2.3.74)は接触圧力 P_{j-1} 、 P_j 、 P_{j+1} の間の関係を与えている。多重接触の最内層の内面および最外層の外面の圧力はそれぞれ内圧、外圧として既知量である。したがって、今、接触層数を J 層とし、各層間の接触圧力を順に $P_2, P_3, \dots, P_J$ とすれば、 $(J-1)$ 個の接触圧力が未知数となる。本コードでは式(2.3.75)、(2.3.75a)を用いた反復計算によって接触圧力 $P_2, P_3, \dots, P_j, \dots, P_{J-1}, P_J$ を求めることにしている。

なお、つり合い状態での接触点の半径 r_j は未知量であるが、この反復計算の中では r_j' と r_j'' の平均値、すなわち

$$r_j = \frac{1}{2} (r_j' + r_j'') \quad (2.3.80)$$

を仮定している。

以上の漸化式(2.3.75)、(2.3.75a)を用いた反復計算は

$$\left| P_j^n - P_j^{n-1} \right| = \xi_p \quad (2.3.81)$$

が満足されたときに終了する。

2.3.3 球対称構造物の粘弾性応力計算式

(1) 球殻の応力計算式

形状、内外面の外圧、温度分布および変形が球の中心に関して完全に対称である場合を想定し、前節の軸対称構造物の場合と同様の解析により、応力計算式を導出する。

第2.3.1節の結果により球殻に関する応力とひずみの関係式は次式で与えられる。

$$\epsilon_r = \frac{1}{E_2} \sigma_r - \frac{2\nu_2}{E_2} \sigma_\theta + g_r \quad (2.3.82)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{\nu_2}{E_2} \sigma_r + \frac{1-\nu_1}{E_1} \sigma_\theta + g_\theta \quad (2.3.83)$$

さて、球対称の場合の平衡方程式および半径方向の変位 u とひずみ ϵ との関係は次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (2.3.84)$$

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (2.3.85)$$

また境界条件は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -P_a & (r=a) \\ \sigma_r &= -P_b & (r=b) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.86)$$

円筒問題のときと同様、応力関数 $\chi = r \sigma_r$ を用いると、半径応力 σ_r および円周応力 σ_θ は次のように表わされる。

$$\sigma_r = \frac{\chi}{r} \quad (2.3.87)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{d\chi}{dr} + \frac{\chi}{r} \right) \quad (2.3.88)$$

また χ に関する微分方程式は以下になる。

$$r^2 \frac{d^2 \chi}{dr^2} + 2r \frac{d\chi}{dr} - 2 \frac{E_1}{E_2} \frac{1-\nu_2}{1-\nu_1} \chi = \frac{2E_1}{1-\nu_1} r^2 \left(\frac{g_r - g_\theta}{r} - \frac{dg_\theta}{dr} \right) \quad (2.3.89)$$

先ず右辺 = 0 とおいた斉次方程式の一般解 χ_1, χ_2 は、

$$\chi_1 = r^{n_1}, \quad \chi_2 = r^{n_2} \quad (2.3.90)$$

で与えられるから、原方程式の一般解 χ は、 c_1, c_2 を境界条件によって定まる定数として、次式にて与えられる。

$$\chi = c_1 \chi_1 + c_2 \chi_2 + \chi_s \quad (2.3.91)$$

ここに n_1, n_2 は特性方程式

$$n^2 + n - 2 \frac{E_1}{E_2} \frac{1-\nu_2}{1-\nu_1} = 0$$

の2根、

$$\begin{aligned} n_1 &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8 \frac{E_1}{E_2} \frac{1-\nu_2}{1-\nu_1}} \\ n_2 &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8 \frac{E_1}{E_2} \frac{1-\nu_2}{1-\nu_1}} \end{aligned} \quad (2.3.92)$$

である。 χ_s は原方程式 (2.3.89) の特解であり、第 2.3.2 節(1)と同様に定数変化法によって

求める。

今、 c_3, c_4 が r の関数として、特解 χ_s が次式で書き表わせるものとする。すなわち、

$$\chi_s = c_3(r) \chi_1 + c_4(r) \chi_2 \quad (2.3.93)$$

さらに、

$$\frac{dc_3}{dr} \chi_1 + \frac{dc_4}{dr} \chi_2 = 0 \quad (2.3.94)$$

なる仮定を置く。式(2.3.93)を原方程式(2.3.89)に代入して、 χ_1, χ_2 が斉次方程式の解であることと式(2.3.94)を利用すれば、次式が導びかれる。

$$\frac{dc_3}{dr} \frac{d\chi_1}{dr} + \frac{dc_4}{dr} \frac{d\chi_2}{dr} = \frac{2E_1}{1-\nu_1} \left(\frac{g_r - g_\theta}{r} - \frac{dg_\theta}{dr} \right) \quad (2.3.95)$$

したがって、式(2.3.94)と(2.3.95)を連立させて c_3, c_4 を求めると、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} c_3 &= A^* \left\{ \frac{g_\theta(a)}{a^{n_1-1}} - \frac{g_\theta(r)}{r^{n_1-1}} + \int_a^r \frac{g_r - n_1 g_\theta}{r^{n_1}} dr \right\} \\ c_4 &= -A^* \left\{ \frac{g_\theta(a)}{a^{n_2-1}} - \frac{g_\theta(r)}{r^{n_2-1}} + \int_a^r \frac{g_r - n_2 g_\theta}{r^{n_2}} dr \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.96)$$

ただし、

$$A^* = 2E_1 / (1-\nu_1)(n_1-n_2) \quad (2.3.97)$$

この c_3 と c_4 を式(2.3.93)に代入すれば特解 χ_s として次式が得られる。

$$\chi_s = A^* \{ r I_1(r) - r I_2(r) \} \quad (2.3.98)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} I_1(r) &= \left(\frac{r}{a} \right)^{n_1-1} \left\{ g_\theta(a) - g_\theta(r) + r^{n_1-1} \int_a^r \frac{g_r - n_1 g_\theta}{r^{n_1}} dr \right\} \\ I_2(r) &= \left(\frac{r}{a} \right)^{n_2-1} \left\{ g_\theta(a) - g_\theta(r) + r^{n_2-1} \int_a^r \frac{g_r - n_2 g_\theta}{r^{n_2}} dr \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.99)$$

以上によって、原方程式(2.3.89)の一般解 χ が得られ、さらに式(2.3.87)と(2.3.88)によって次に示すような応力の一般式が得られる。

$$\sigma_r(r) = c_1 r^{n_1-1} + c_2 r^{n_2-1} + A^* \{ I_1(r) - I_2(r) \} \quad (2.3.100)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta(r) &= \frac{n_1+1}{2} c_1 r^{n_1-1} + \frac{n_2+1}{2} c_2 r^{n_2-1} \\ &\quad + \frac{A^*}{2} \{ (n_1+1) I_1(r) - (n_2+1) I_2(r) \} \end{aligned} \quad (2.3.101)$$

次いで本問題における境界条件、式(2.3.86)によって定数 c_1, c_2 を定めると、最終的な応力計算式が次のように得られる。

$$\sigma_r(r) = - \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} \left(\frac{r}{a}\right)^{n_2-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1} \left(\frac{r}{a}\right)^{n_1-1}}{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1}} P_a - \frac{\left(\frac{r}{a}\right)^{n_1-1} \left(\frac{r}{a}\right)^{n_2-1}}{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1}} P_b$$

$$+ A^* \left\{ \left[I_1(b) - I_2(b) \right] \left\{ \frac{\left(\frac{r}{a}\right)^{n_2-1} - \left(\frac{r}{a}\right)^{n_1-1}}{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1}} \right\} + I_1(r) - I_2(r) \right\} \quad (2.3.102)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{(n_1+1) \left(\frac{r}{a}\right)^{n_1-1} \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1} - (n_2+1) \left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} \left(\frac{r}{a}\right)^{n_2-1}}{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1}} \frac{P_a}{2}$$

$$- \frac{(n_1+1) \left(\frac{r}{a}\right)^{n_1-1} - (n_2+1) \left(\frac{r}{a}\right)^{n_2-1}}{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1}} \frac{P_b}{2}$$

$$+ \frac{A^*}{2} \left\{ \left[I_1(b) - I_2(b) \right] \left\{ \frac{(n_2+1) \left(\frac{r}{a}\right)^{n_2-1} - (n_1+1) \left(\frac{r}{a}\right)^{n_1-1}}{\left(\frac{b}{a}\right)^{n_1-1} - \left(\frac{b}{a}\right)^{n_2-1}} \right\} \right.$$

$$\left. + (n_1+1) I_1(r) - (n_2+1) I_2(r) \right\} \quad (2.3.103)$$

円筒問題の応力計算式と同様、右辺第1項が内圧の効果、第2項が外圧の効果、第3項が非弾性ひずみの効果である。

(2) 中実球の応力計算式

本来、中実球であっても物性値の非等方性は存在するのが一般的であるが、ここでは解析解を求める上で問題のない、すべての物性値が等方的である中実球に限って考えるものとする。これは本節の(1)で $n_1 = 1$ 、 $n_2 = -2$ とした場合に相当し、このときの応力計算式は前節の方法と全く同様に求めることができる。

応力関数 χ に関する微分方程式は

$$r^2 \frac{d^2 \chi}{dr^2} + 2r \frac{d\chi}{dr} - 2\chi = \frac{2E}{1-\nu} r^2 \left(\frac{g_r - g_\theta}{r} - \frac{dg_\theta}{dr} \right) \quad (2.3.89a)$$

であって、式(2.3.94)の c_3 および c_4 に代るものとして次式を、さらに特解 χ_s としては式(2.3.96)と全く同じ形の式(2.3.96a)を得る。

$$\left. \begin{aligned} c_3 &= \bar{A} \left\{ g_{\theta}(0) - g_{\theta}(r) + \int_0^r \frac{g_r - g_{\theta}}{r} dr \right\} \\ c_4 &= \bar{A} \left\{ r^3 g_{\theta}(r) - \int_0^r r^2 (g_r + 2 g_{\theta}) dr \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.96a)$$

$$\chi_s = \bar{A} \{ r I_1(r) - r I_2(r) \} \quad (2.3.98a)$$

ただし,

$$\bar{A} = 2E/3(1-\nu) \quad (2.3.97a)$$

$$\left. \begin{aligned} I_1(r) &= \int_0^r \frac{r g_r - g_{\theta}}{r} dr - g_{\theta}(r) + g_{\theta}(0) \\ I_2(r) &= \frac{1}{r^3} \int_0^r r^2 (g_r + 2 g_{\theta}) dr - g_{\theta}(r) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.99a)^*$$

よって原方程式 (2.3.89a) の一般解 χ は

$$\chi = c_1 r + \bar{A} \{ r I_1(r) - r I_2(r) \} \quad (2.3.104)$$

で与えられ, これを球殻の場合と同様に式 (2.3.87), (2.3.88) に代入して $\sigma_r, \sigma_{\theta}$ に対する応力の一般式を求めると次式を得る。

$$\sigma_r(r) = c_1 + \bar{A} \{ I_1(r) - I_2(r) \} \quad (2.3.100a)$$

$$\sigma_{\theta}(r) = c_1 + \frac{\bar{A}}{2} \{ 2 I_1(r) + I_2(r) \} \quad (2.3.101a)$$

さて, 一般的な境界条件

$$\sigma_r = -P_b \quad (r=b) \quad (2.3.86^{**})$$

を用いて定数 c_1 を定め, これを上式に代入すると, 等方性中実球に対する最終的な応力計算式として次式が得られる。

$$\sigma_r(r) = -P_b - \bar{A} \{ I_1(b) - I_2(b) - I_1(r) + I_2(r) \} \quad (2.3.102a)$$

$$\sigma_{\theta}(r) = -P_b - \bar{A} \{ I_1(b) - I_2(b) - I_1(r) - \frac{1}{2} I_2(r) \} \quad (2.3.103a)$$

中実球の応力計算式は物性値が等方の場合の球殻問題で $a=0$ とおいたものと等しい。

* 今の場合, 物性値がすべて等方であり, かつ球対称問題であることから, $I_1(r), I_2(r)$ の積分項は $r=0$ を含めて存在し,

$$I_1(0) = 0$$

$$I_2(0) = \frac{1}{3} \{ g_r(0) - g_{\theta}(0) \} = 0$$

となる。

** 球対称多重構造物である球状燃料の場合, 本計算コードでは接触圧力を考えないことにしているが, より一般的な応力計算式を与える意味でこのようにしている。

2.3.4 応力反復計算法

本計算モデルにおいて、任意の照射時間の各軸方向分割点に対する応力・ひずみ計算に反復計算が必要とされるのは次の理由による。

- i) 物性値ならびにいくつかの変形現象、すなわち、縦弾性係数、ポアソン比、熱膨張係数、照射変形、照射クリープ定数および温度クリープ速度に材料温度の依存性を考慮していること。
- ii) 照射クリープおよび温度クリープによる応力緩和を扱っていること。すなわち、考えている時間間隔での全応力の変化を考慮してクリープひずみを定めなければならないこと。
- iii) 固体層間の接触圧力を考慮していること。すなわち、この接触圧力が温度分布およびクリープひずみによって変更されうるものであること。

上記 i) は半径方向温度分布の計算結果に付随して定められるものであり、ii) および iii) に影響する。上記 ii) は i) の結果を用い、iii) を仮定して計算される。この結果は iii) に影響する。上記 iii) は i) および ii) の結果を用いて計算され、i) および ii) に影響する。以下これについて詳しく説明する。

i) は半径方向温度分布から直接計算されるもので、これ自身では内部の反復計算ループはもたない。

ii) は内外圧による応力増分 $\Delta\sigma^E$ 、熱応力の増分 $\Delta\sigma^T$ 、および照射変化に伴う応力増分 $\Delta\sigma^D$ を既知量と仮定した上で、クリープひずみ増分 $\Delta\epsilon^C$ と全応力 σ (すなわちクリープ応力緩和量 $\Delta\sigma^C$) とを矛盾なく定めることであり、これは1つの内部反復計算ループを構成する。この反復計算手順は Mondelson らの方法による。すなわち以下の手順である。

a) クリープひずみ増分 $\Delta\epsilon^{C'}$ の推定、これに伴う応力量 $\Delta\sigma^{C'}$ の計算。

b) a) に基づく全応力 σ の推定

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma^E + \Delta\sigma^T + \Delta\sigma^D + \Delta\sigma^{C'}$$

c) クリープ法則による(第2.3.1節、式(2.3.2.9)など)クリープひずみ増分 $\Delta\epsilon^C$ と応力緩和 $\Delta\sigma^C$ の計算。

d) 新しい全応力の計算

$$\sigma^n = \sigma_0 + \Delta\sigma^E + \Delta\sigma^T + \Delta\sigma^D + \Delta\sigma^C$$

以上の c), d) を反復する。この反復計算は

$$|\sigma^n - \sigma^{n-1}| \leq \xi_\sigma \quad (2.3.105)$$

が満されたときに終了する。

iii) は接触圧力が発生する場合に使用される。これは、熱変形、照射変形およびクリープ変形を既知量として接触圧力を定めるための内部反復計算ループと、半径方向温度分布の再計算によって上記4つの変形と接触圧力とを矛盾なく定めるための外部反復計算ループ、とがある。内部反復計算ループでは、前述の(2.3.8.1)式が収束判定条件である。外部反復計算ループは主として、

a) 半径方向の温度分布の再計算により、熱変形、照射変形を修正する部分。

b) クリープ法則に基づいてクリープ変形を求める前述のクリープひずみ反復計算ループ。

c) 接触圧力による弾性変形を求める部分。

d) a), b), c)によって修正されてきた熱変形, 照射変形, クリープ変形および弾性変形を用いて, 接触点における寸法関係が満足されるかどうか判定する部分。

e) 接触が起っている場合に, 接触圧力を求める圧力内部反復ループ。

から構成される。上記 d) の寸法関係に対する収束判定条件は, 考えている接触箇所 j における円筒の外半径を r'_j , 外筒の内半径を r''_j として

$$|r'_j/r''_j - 1| \leq \epsilon_{PD} \quad (2.3.106)$$

である。この条件が満たされないときは e) が実行される。e) では変位の誤差分

$$\delta_j = r'_j - r''_j$$

に相当する接触圧力の補正 ΔP_j が求められ, 新しい接触圧力を $P_j = P_j + \Delta P_j$ として上記 b) に戻る。

なお, 本計算モデルでは上記 iii) の接触圧力は, 第 2.1.4 節の応力問題の基本的な仮定で述べたように軸対称問題についてのみ考慮される。すなわち, 球対称問題では隣接層間の機械的干渉の生ずるような問題は考えていないので球対称構造物に関しては iii) 項は存在しない。

2.3.5 炉停止時応力計算法

黒鉛構造物の炉停止時における応力値の重要性についてはまえがきに述べた。また, 本問題における炉停止時状態の定義については応力問題の基本的な仮定 (第 2.1.4 節) のところで述べた。言い換えると, 炉停止時の応力とは, 運転時において黒鉛の照射変形およびクリープによってもたらされる永久ひずみが生じている状態で, 熱変形が部分的に減少する際の応力という。原子炉の停止によって, 炉心がある一定の温度に下げられ, これに伴って熱変形の部分的な減少が起る。ここでは原子炉停止時間が短いか, または, 十分に温度が低いために有意な温度クリープ現象が起らないものとする。以上によって, ここで考えている炉停止時の応力問題は, 結局, 原子炉運転時を基準状態とする熱応力問題である。具体的な計算手順は, 運転時応力手順のうち, 半径方向温度分布の影響およびクリープひずみの影響を除いたものと同様である。従って, これ以上の記述は省略する。

2.4 物性値の取り扱い

温度・応力計算に必要な諸物性値は個々の運転状態を模擬できるように一応照射量および温度による変化を考慮する。しかし, 運転条件に個々の材料の物性値の変化を反映させるためには相当量の実験データが必要とされる。現在のところ個々の材料, 例えば黒鉛材料の照射量や温度による材質変化が明らかになっているものは極めて少ない。そこで物性値が照射量および温度に依存するものとするか, または依存しないものとするかは本コードの使用者の選択に任されている。すなわち, 温度および照射量に依存すると考えられる物性値は, 以下に示すように, 両者を変数とする多項式で表わされており, その係数を使用者が定めることにしている。なお, 問題としている温度および照射量範囲でそれら物性値の変化を 1 つの多項式で表現できない場合は, 温度または照射量の範囲を最高 4 つの範囲に分割して与えることができる。

2.4.1 熱的物性値

温度計算には, 各固体領域については熱伝導率, 冷却流路については熱伝達率および温度上昇の計算に必要な物性値, さらに, いわゆる間隙領域でその熱伝達率が内部計算される場合の

間隙気体の熱伝導率が必要である。

固体領域の熱伝導率 λ^S (cal/cm·s·°C) はその領域の平均高速中性子照射量 γ (10^{20} n/cm²) およびその領域の平均温度 T (°C) に依存するものと考えている。すなわち、その値は次の計算式で与えられる。

$$\lambda^S = \lambda_0^S \left\{ \sum_{i=0}^7 (a_i + b_i T + c_i T^2) \gamma^i \right\} \left\{ \sum_{i=0}^7 d_i T^i \right\} \quad (2.4.1)$$

本計算コードでは、間隙気体または冷却材としてヘリウムを考えている。今の場合、熱伝導率 λ^G (cal/cm·s·°C)、比熱 C_p^G (cal/g·°C)、比重 γ^G (g/cm³)、動粘性係数 ν^G (cm²/s)、プラントル数 P_r^G が必要となるが、以下に与える式としてコード内で計算される。なお、これらの式における圧力 P^G (kg/cm²) は冷却材入口圧力とされる。温度 T は、間隙気体の場合周辺固体面の平均温度、冷却材の場合冷却材主流温度、にそれぞれとられる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda^G &= (7.50262 \times 10^{-6}) (\beta) (T^*)^{0.69} \quad (\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) \\ C_p^G &= 1.24037 \quad (\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}) \\ \gamma^G &= 11.0803 / \Psi \quad (\text{g/cm}^3) \\ \nu^G &= (3.7281 \times 10^{-8}) (\alpha) (\Psi) (T^*)^{0.68} \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \\ P_r^G &= C_p^G \gamma^G \nu^G / \lambda^G \quad (-) \end{aligned} \right\} \quad (2.4.2)$$

ただし、

$$P^* = 14.2235 P^G \quad (\text{psi})$$

$$T^* = 273.15 + T \quad (^\circ\text{K})$$

$$\alpha = 1 + \varphi [0.175 + \varphi (0.7557 - 0.405\varphi)]$$

$$\beta = 1 + \varphi [0.575 + \varphi (0.5017 - 0.204\varphi)]$$

$$\Psi = 33392.7 \frac{T^*}{P^*} - \frac{8941.8}{P^* + 165.376} + 335.123$$

$$\varphi = \frac{\Psi}{33392.7 \frac{T^*}{P^*} - \frac{8941.8}{(P^* + 165.376)^2} P^*} - 1$$

2.4.2 機械的物性値

応力計算に必要な物性値のうち縦弾性係数 E (kg/cm²)、ポアソン比 ν 、熱膨張係数 α (°C⁻¹)、および照射変形 η は一般的に横等方性があるとしている。

ここで、これらの物性値の横等方性について再度述べておく。本計算モデルでは次のような横等方性を考える。すなわち、直交座標系 (x_1, x_2, x_3) において、平面 (1-3) 内では物性値は等しく、この平面に直交する x_2 一方向の物性値と異なるものとする。すなわち、上述の物性値それぞれについて x_1 一方向および x_3 一方向の物性値 (例えば E_1, E_3 など) が与えられなければならない。

また、本計算モデルで考えている2種の対称構造物の座標系と上記の x_1 一方向、 x_2 一方向との関係は次のように一意的に定められている。

$$\text{軸対称構造物} \quad (r, \theta, z) \leftrightarrow (x_1, x_1, x_2)$$

球対称構造物 $(r, \theta, \varphi) \leftrightarrow (x_2, x_1, x_3)$

さて、実際に実験的に得られている物性値と本計算モデルにおける x_1 一方向との関係を明らかにしておく必要がある。説明を簡明にする為、黒鉛材料を例にとる。黒鉛ブロックの製造は押出し (extrusion) または型押し (molding, pressing) がある。先ず第1に、この製造法によって物性値の異方性が異なることに注意しておかねばならない。押出成形材または型押し成形材についての現実の物性値の測定は、押出しまたは型押し方向に垂直な方向 ($\perp$) と平行な方向 ($\parallel$) とについて行なわれている。そして、垂直な方向 ($\perp$) については物性値が等方であることが知られている。

従って、円筒の対称軸方向 (z) または球の半径方向 (r) である x_2 一方向を成形方向に平行な方向 ($\parallel$) に、そして、等方平面方向である x_1 一方向を成形方向に垂直な方向 ($\perp$) に一致させなければならない。すなわち、 $E_1 = E_{\perp}$, $E_2 = E_{\parallel}$, $\alpha_1 = \alpha_{\perp}$, $\alpha_2 = \alpha_{\parallel}$ などとする。

ところで、物性値の異方性が小さい場合や、本問題での中実球の場合のように、近似的に等方性を仮定する場合がある。今、任意の物性値 X について、その測定値が $X_{\perp}$, $X_{\parallel}$ であるとすると、近似的等方値 $\bar{X}$ は

$$\bar{X} = \sqrt[3]{1 + X_{\parallel} + 2 X_{\perp} + \dots} \quad (2.4.3)$$

また、 $X_{\parallel} \approx X_{\perp}$ のときは

$$\bar{X} \approx \frac{X_{\parallel} + 2 X_{\perp}}{3} \quad (2.4.4)$$

となる。

以上、異方性のある物性値について本計算モデルにおける方向の取り扱いについて述べたが、それぞれの方向の物性値に対して、次に示すような多項式で表現される照射量 r および照射温度 T の依存を考えるものとしている。

$$\alpha = \alpha_0 \left(\sum_{i=0}^7 a_i r^i \right) \left(\sum_{i=0}^7 b_i T^i \right) \quad (2.4.5)$$

$$E = E_0 \left(1 + \sum_{i=0}^7 a_i r^i \right) \left(\sum_{i=0}^7 b_i T^i \right) \quad (2.4.6)$$

$$\nu = \nu_0 \left(\sum_{i=0}^7 a_i r^i \right) \left(\sum_{i=0}^7 b_i T^i \right) \quad (2.4.7)$$

$$\eta = \sum_{i=0}^7 (a_i + b_i T + c_i T^2) r^i \quad (2.4.8)$$

また、2.3.1 節で述べた照射による定常クリープ定数 K_c は材料の平均温度 T の関数として次の式で考えるものとする。

$$K_c = K_{c_0} \left(\sum_{i=0}^7 b_i T^i \right) \quad (2.4.9)$$

2.5 運転条件、炉停止時条件の与え方

本計算モデルは運転時における炉心内の状態をできる限り模擬するため運転条件の空間変化

および時間変化を考慮し、各照射時間において温度計算と応力計算とを同時に行うこととしている。

本問題における運転条件は次の5つである。

- i) 冷却材入口圧力と入口温度
- ii) 冷却材流量
- iii) 熱発生率
- iv) 高速中性子照射量
- v) 炉停止時の冷却材圧力と温度

これらのうち、冷却材入口圧力 P_c (kg/cm^2)、入口温度 T_c ($^{\circ}\text{C}$) および炉停止時の冷却材圧力 P_{cs} 、温度 T_s は運転時間を通じて一定とする。その他は、以下に述べるような空間分布および時間変化を考えるものとする。

冷却材流量は次に示すような形で与えられる。

$$W_j(\tau) = W_{av} \cdot W_r(j) \cdot W_p(j, \tau) \quad (2.5.1)$$

ここに、

$W_j(\tau)$: 照射時間 τ における第 j 層の冷却材流量 (g/s)

W_{av} : 基準冷却材流量 (g/s)

$W_r(j)$: 第 j 層の半径方向分布係数 (—)

$W_p(j, \tau)$: 第 j 層の時間依存係数 (—)

これより、任意の照射時間 τ' に対する時間依存係数 $W_p(j, \tau')$ は $W_p(j, \tau)$ の線型内挿によって定められる。

熱発生率および高速中性子照射量は次のような形で与えられる。

$$Q_j(z, \tau) = Q_{av} \cdot Q_r(j) \cdot Q_p(z, \tau) \quad (2.5.2)$$

$$\gamma_j(z, \tau) = \gamma_{av} \cdot \gamma_r(j) \cdot \gamma_p(z, \tau) \quad (2.5.3)$$

ここに、

$Q_j(z, \tau), \gamma_j(z, \tau)$: 照射時間 τ における第 j 層の軸方向位置 z の熱発生率 ($\text{cal/cm}^3 \cdot \text{s}$) と高速中性子照射量 (10^{20} n/cm^2)

Q_{av} : 基準熱発生率 ($\text{cal/cm}^3 \cdot \text{s}$)

γ_{av} : 基準高速中性子照射量 (10^{20} n/cm^2)

$Q_r(j), \gamma_r(j)$: 第 j 層の半径方向分布係数 (—)

$Q_p(z, \tau), \gamma_p(z, \tau)$: 軸方向依存係数 (—)

これにより、任意の照射時間 τ' 、任意の軸方向位置 z' に対する $Q_p(z', \tau')$ 、 $\gamma_p(z', \tau')$ はそれぞれ $Q_p(z, \tau)$ 、 $\gamma_p(z, \tau)$ の線型内挿により求められる。

2.6 温度・応力計算の結合

これ迄述べてきた温度反復計算法 (第 2.2.4 節)、応力反復計算法 (第 2.3.4 節) を結合させ、物理量と反復計算ループとの関係を明示したのが Fig. 2.9 である。これが軸方向各位置における温度・応力計算の内容である。以下、これについて概説する。

軸方向第 1 分割点 (入口点) においては冷却材温度計算が省略される。第 2 分割点以後出口

点 ($\ell = L + 1$) 迄は下記の計算手順が適用される。

先ず、発熱量、冷却材流量などの運転条件を定め、温度境界条件を仮定する。球構造物の場合の冷却材温度はここで計算されて定められる。次いで、固体および間隙気体の熱伝導率などの熱的物性値を仮定し、半径方向温度分布反復計算を実行する。球構造物の場合はここで物性値と半径方向温度分布とを矛盾なく定めるための反復計算が施される。半径方向温度分布が定まったところで温度依存を考慮した機械的物性値を設定し、熱変形、照射変形による応力を計算する。次に、クリープひずみとクリープ応力緩和量を求めるための反復計算を実行する。この反復計算が完了すると全応力と全ひずみが定まる。ここで層間の接触有無判定を行う。この接触有無は軸対称構造物についてのみ行なわれ、接触している場合は接触圧力とこれによる応力を定め、温度境界条件を変更して半径方向の温度分布の再計算に戻る。この場合、熱変形、照射変形、クリープ変形および弾性変形を考慮した接触点の寸法関係が満足するまで反復計算によりクリープ変形と弾性変形を修正する。これが満されると冷却材温度計算に移る。冷却材温度に関する収束条件が満されないときは、すべての温度境界条件を変更して半径方向温度分布計算に戻る。これが満足して初めて運転時の温度・応力計算が完了したことになる。球構造物の場合は冷却材温度の再計算がないのでクリープひずみに関する反復計算が終了したところで完了する。続いて炉停止時の応力・ひずみ計算が実行され、以上で任意の照射時間の各軸方向分割点の温度および応力計算がすべて完了したことになる。

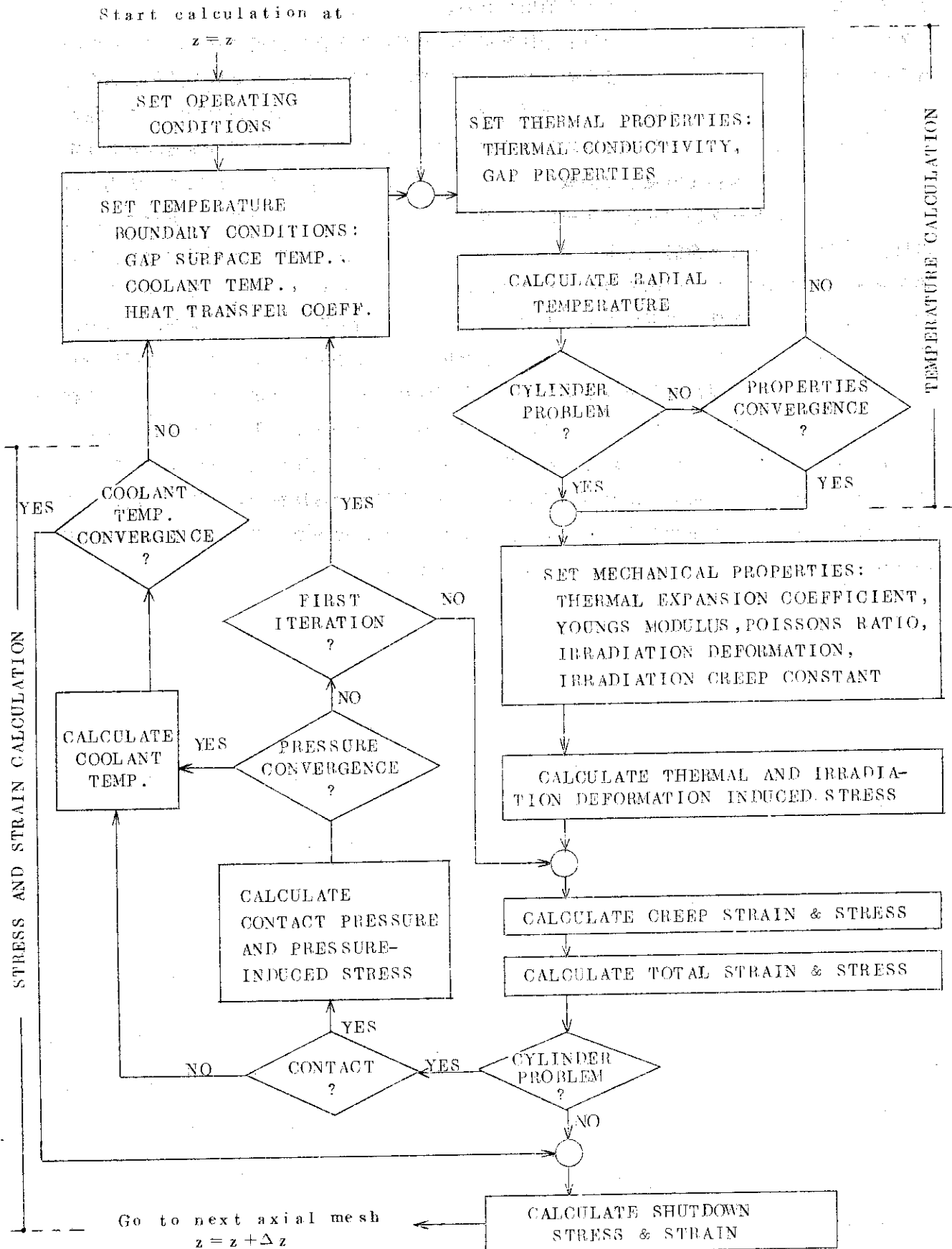


Fig.2.9 Combination of temperature and stress calculations

3. 計 算 コ ー ド

前章までに計算モデルをはじめ数値計算上の主要な部分について述べてきた。ここでは計算コードMULSHESについてさらに詳細な説明を施すものとする。

本計算コードはカード枚数が3500枚、プログラム言語はFORTRAN IV, 使用機種はFACOM230-60であり、所要記憶容量は85K語である。

3.1 コードの構成

本計算コードMULSHESは以下のような9つの主要部分から構成される。これらの主要部分はそれぞれの機能を有機的かつ効果的に駆使するためそれぞれがさらにサブプログラム化されており、メインプログラムの他に25個のサブプログラムと3項連立一次方程式を解くための内蔵プログラム一つを有している。なお、この内蔵プログラムは原研版サブルーチンライブラリーとしてFACOM230-60に登録されているものである。

(i) 主指令部分

これがメインプログラムであり、入力データの読込から出力データの書出しまで計算の流れをコントロールする。すなわち、入力量に基づき形状体系を定めた上で、各時間ステップ、各軸方向分割点での運転条件の設定、物性値計算、温度計算、応力計算の指令を司る。

(ii) 入力・出力部分

この部分は主指令部分の指令に基づいて入力データの読込みおよび出力データの書出しを行う。なお、入力データと出力データについては次節で詳しく述べる。

(iii) 半径方向温度分布の計算部分

冷却材温度および熱伝達率を既知量として各固体領域の各分割点における温度を計算する。

(iv) 応力計算部分

この部分は熱応力、照射応力の増分計算および内外圧によって発生する応力を計算する。

(v) 物性値の計算部分

この部分では、温度依存および照射依存を考慮した熱的・機械的物性値の設定を行う。

(vi) クリープひずみ増分とクリープ応力増分の計算部分

この部分は与えられたクリープ法則を適用し、定められた照射時間中における全応力とクリープひずみ変化とを矛盾なく定めるための反復計算を行う。

(vii) 接触圧力計算部分

焼ばめ理論に基づいた接触圧力計算と接触圧力に関する収斂判定を行う。

(viii) 冷却材温度計算部分

軸方向分割点における温度上昇計算と冷却材温度に関する収斂判定を行う。

(ix) 炉停止時の応力・ひずみ計算部分

この部分は炉停止時の応力とひずみの計算を行う。

3.2 計算フロー

前章第 2.2.4 節、第 2.3.4 節および第 2.6 節で本計算モデルの主要な部分を占める温度計算と応力計算の計算手順について詳細に述べた。ここでは本計算モデルの全体の計算手順について説明する。本コード MULSHES の全体の計算流れは Fig. 3.1 に示してある。

まず、物性値データおよびケースデータを読み、それに基づいて計算体系の定数および必要な値の初期設定がなされる。次いで時間ステップを順次進める。ある時間ステップ i 、すなわち、照射時間 τ_i に対して軸方向第 1 分割点（入口点）から軸方向出口点迄順次計算を行う。この際軸方向各分割点ごとに運転条件（照射条件）、反復計算に必要な初期値の設定、温度計算に必要な物性値の設定を行う。さらに、数値計算上温度計算と応力計算に必要な各分割点における寸法と定数を定め、以後は第 2.6 節で述べた温度・応力計算を実行する。この温度・応力計算には隣接層間の接触のある場合の接触圧力計算と軸対称構造物の場合の冷却材温度計算との 2 つの外部反復計算ループが含まれている。運転時の温度・応力計算、炉停止時の応力計算の軸方向全分割点に対する計算が完了したところでこれらの結果を印刷し、次の時間ステップへ進む。指定された時間ステップ I の計算が完了すると終りとなる。終ったらこれが最終ケースであるかを判別し、最終ケースでないときはケースデータを再び読み上述の計算が繰返される。

3.3 入力データ

本計算コードの入力データとしては、各固体領域の材料物性値を与える半固定的なデータ（物性値入力データ）と個々の計算条件を指定するデータ（ケース入力データ）の 2 種類がある。

物性値データは各固体領域の材料ごとに与える必要はなく、予め幾つかの材料物性値を入力しておき、ケースデータの方で計算条件に応じこれを任意に配列指定する。この物性値データは、はじめに入力材料の数（最大 5）を読み込んで、この数だけ以下の内容のデータを順次与えることになっている。すなわち、

- ① 材料の名称
- ② 機械的・熱的物性値と照射依存の有無および照射特性
- ③ 上記物性値の温度依存の有無と温度特性
- ④ 照射クリープ定数と照射クリープポアソン比および照射クリープ定数の温度依存の有無と温度特性
- ⑤ クリープの異方性係数と温度クリープに関する材料定数
- ⑥ 照射変形の有無と照射変形特性
- ⑦ その他の物性値

ケースデータは、ケースごとに必ずケースの内容を記述したタイトルカードを読み込み、続いてデータオプションのカードを読むことになっている。このデータオプションカードは入力データが必要最小限になるように工夫されているものである。ケースデータは次の 9 個のデータグループに分類され、この順に入力される。

- ① 基本計算パラメータ

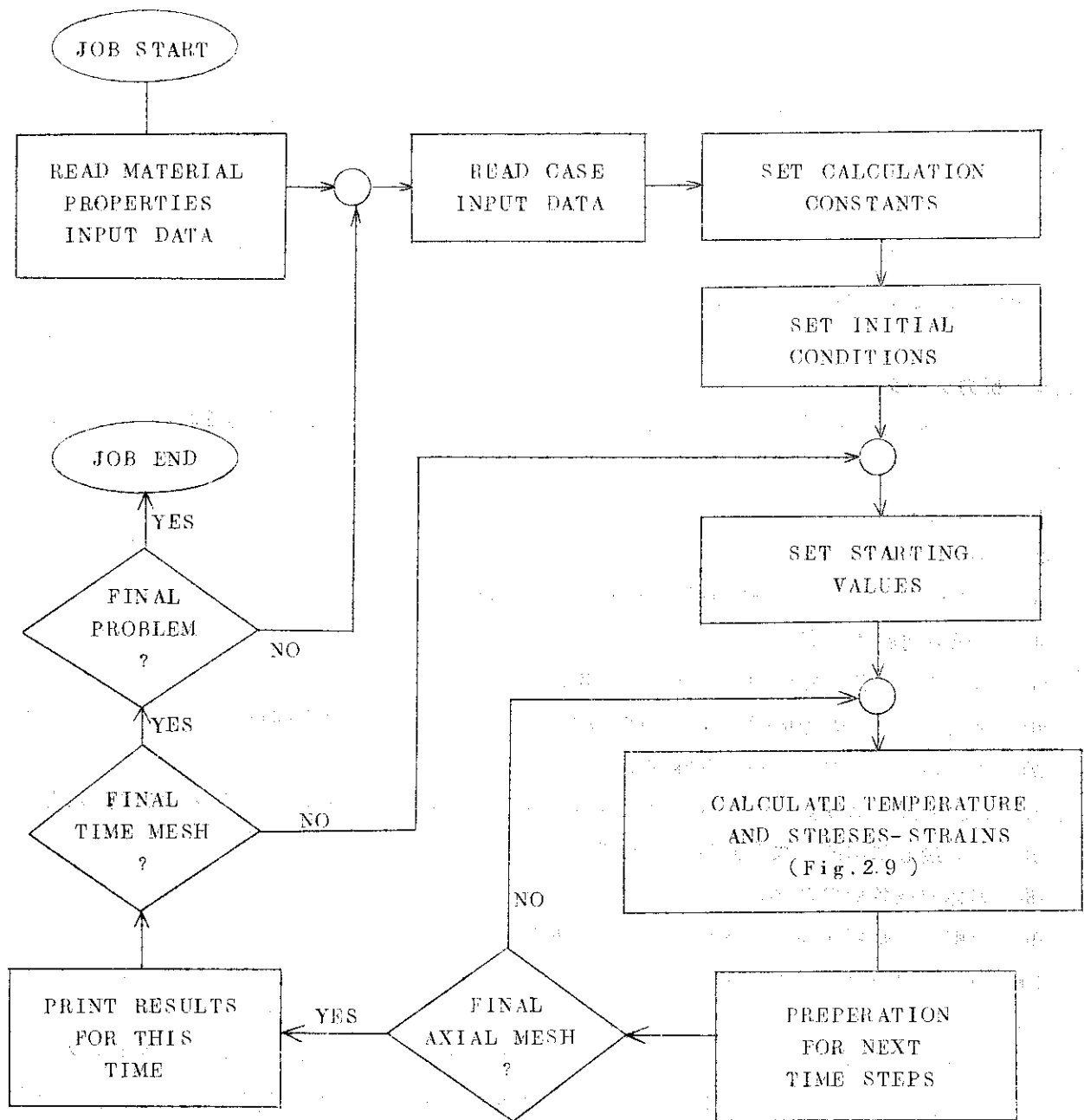


Fig.3.1 Calculation flow diagram of MULSHES

- ② 寸法関係
- ③ 材料指定
- ④ 照射条件
- ⑤ 運転パラメータ
- ⑥ 運転条件
- ⑦ 計算パラメータ
- ⑧ 炉停止時条件
- ⑨ Job 終了カード

以上の物性値データおよびケースデータのそれぞれの入力群に対する詳細な内容と入力形式とをまとめて Table 3.1, 3.2 に示した。

3.4 出力データ

本コードは各時間ステップに対して、領域ごと、軸方向に次の諸量出力される。具体的には巻末に示した計算例を参照されたい。

- ① 機械的・熱的物性値
- ② 運転条件と照射条件
- ③ 冷却材流路における内外面の熱流束と冷却材温度
- ④ 半径方向温度分布
- ⑤ 運転時および炉停止時の内外表面の 3 軸応力と周方向のひずみ
- ⑥ 運転時および炉停止時の 3 軸方向の最大引張応力とその半径方向位置
- ⑦ 運転時および炉停止時の内外寸法

これらの諸量は最低 5 頁にわたって出力される。ただし第 1 時間ステップについては、入力データのうち最も基本的な次の諸量が印刷される。

- ⑧ 固体領域各層の名称とその初期寸法
- ⑨ 運転時と炉停止時の冷却材圧力および炉停止時温度
- ⑩ 数値計算パラメータ
- ⑪ クリープパラメータ

以上の他に、ケースデータにおけるチェックプリントの出力オプション IPRINT をノンゼロとすると、周方向の運転時・炉停止時における全応力と全ひずみおよび周方向の応力とひずみの増分 $\Delta\sigma_{\theta}^{T,D,C}$, $\Delta\epsilon_{\theta}^{T,D,C}$ の各半径方向の分布が出力される。各層の内外表面の値以外に、これら半径方向の分布も出力させると時間ステップの増加によって出力ページが相当な数となる。したがって、これらの出力は計算チェックのときとか特別に必要な場合のみ行なわれる。

軸方向の最大メッシュ数は 21 であるが、実際の計算結果の出力に際しては 11 メッシュ点以上のときは 1 つおき、すなわち 11 ポイントのみ出力させて印刷ページの削減を計っている。なお、反復計算の途中において未収束を生じた場合は、メッセージを印刷した後、収束したメッシュ点までの結果を出力して次のケースに移るようになっている。

3.5 計算例

ここでは、前節で述べてきた入力データと出力データの説明を補足する意味で計算コード MULSHES を用いて行った計算の一例を示す。ここに示す計算例は日本原子力研究所において現在進められている多目的高温ガス実験炉の予備設計段階における燃料要素を対象として行ったものである。ただし、熱発生率、照射量および流量の時間変化は考えていない。熱発生率および流量は予備設計初期炉心の最高温度チャンネルにおける値を使用している。⁷⁾ なお、照射量の軸方向分布は一様とした。

燃料は、発熱部である燃料コンパクトと非発熱部である黒鉛スリーブとからなる中空型燃料棒であり、これらの物性値は次のごとく仮定している。すなわち、燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの機械的物性値は等方とし、これらの物性値の照射量および温度による変化は考えない。照射変形は、燃料コンパクトについてはドラゴンの標準燃料粒子の実験データ⁸⁾を、黒鉛スリーブについては準等方性のギルソナイト系黒鉛における実験データ⁹⁾を使用している。クリープ変形については照射クリープについてのみ考慮し、クリープ定数はギルソナイト系黒鉛の実験データ⁹⁾のうち最下値を温度の2次式で近似して、これを燃料コンパクトと黒鉛スリーブに使用している。

以上の計算例についての物性値入力データ、ケース入力データおよび計算結果の出力の一部はまとめて巻末に掲載した。

なお、この種の問題で数値計算上の困難が発生することがあるが、これは主に応力計算（クリープひずみの反復計算）において生ずることが多く、この場合には単位時間幅 Δt を小さくすれば概ね解決できる。

現在までの経験によれば、半径方向の温度分布を求める際の反復回数は半径方向全メッシュ点の3倍程度は用意しておいた方がよい。また、反復計算のための加速因子はほとんどの場合 0.5 ~ 1.0 の範囲が収束し易い。なお、接触圧力計算の外側ループの収束判定因子は 10^{-5} 以下とするのが望ましい。 2×10^{-5} 以下のオーダーでは接触点の寸法は5桁目まで一致し、6桁目で1~2の範囲の差を生ずる。この6桁目の1~2の差は、一計算例によると接触圧力にして $\pm 1 \text{ kg/cm}^2$ 未満であった。

MULSHES の計算時間は個々のケースによって異なるが、例えば、層間の機械的干渉のない場合で、軸方向21メッシュの計算に対して、一層（約13メッシュ/層）あたり14秒/時間ステップであった。一つの層間に接触があって、しかも軸方向のすべての点で接触している場合にはほぼ接触していない場合の2倍の時間を要する。

4. ま と め

本報告書で記述されているMULSHES コードは、原子炉内における照射条件の空間的・時間的变化および黒鉛材料に特徴的な物性値の異方性や各種の照射効果を考慮し、高温ガス炉で用いられる多重殻型燃料体（多重円筒型燃料棒、多重球殻燃料）の温度・応力変化を詳細に解析するためのものである。

この計算コードは、黒鉛構造物の使用における機械的挙動の解析を主な目標としているものであり、弾性変形、熱変形、照射変形、照射クリープなどの異方性（横等方性）を考慮した、一次元の異方性粘弾性応力解析モデルを基本としている。しかし、黒鉛材料の機械的物性値の温度依存性、多重層間の機械的干渉の影響などを考慮するため、半径方向一次元の温度計算および冷却材温度上昇計算が、上記の応力計算に連結されている。

なお、本計算コードの計算モデルの中には、現段階において実験的に十分には確認されていない数式モデルによって記述されている幾つかの機械的現象や熱的現象が含まれている。したがって、これらに対しては、入力データを調整することによって、計算コードの使用者が計算モデルや計算定数の選定を行なえるようになっている。

今後実験的な確認を必要とする数式モデルは、その殆んどが黒鉛材料に関するものであるが、特に重要と考えられる熱的・機械的問題として以下のものがあげられる。

(i) 黒鉛材料の接触熱伝達

(ii) 黒鉛材料の照射変形に対する照射中温度変化の影響

(iii) 黒鉛材料の照射クリープ変形の異方性

(iv) 被覆燃料粒子と黒鉛の混合結合体（燃料コンパクト）の照射クリープ変形

今後、これらに関する実験的知見に基づいて計算モデルの必要な改良を行なっていくことにしたい。

MULSHES コードは、当面、以下の解析に使用していく予定である。

(i) 黒鉛材料にみられる各種の異方性変形の応力特性への影響

(ii) 上記の実験的検討課題に関する、数値計算によるパラメータサーベイ

(iii) 多目的高温ガス実験炉燃料体に対する参考計算

謝 辞

本計算コードを作成するにあたり当設計班の方々にはテストランに対するデータの供与など色々と御援助を賜わった。また、ヘリウムの物性値については当設計班の瀬谷東光氏が整備されたものを使用させていただいた。また、本稿を草するに当り、当設計班長下川純一氏より幾つかの貴重な助言をいただいた。これらの方々に対し深甚なる謝意を表します。

4. ま と め

本報告書で記述されているMULSHES コードは、原子炉内における照射条件の空間的・時間的变化および黒鉛材料に特徴的な物性値の異方性や各種の照射効果を考慮し、高温ガス炉で用いられる多重殻型燃料体（多重円筒型燃料棒、多重球殻燃料）の温度・応力変化を詳細に解析するためのものである。

この計算コードは、黒鉛構造物の使用における機械的挙動の解析を主な目標としているものであり、弾性変形、熱変形、照射変形、照射クリープなどの異方性（横等方性）を考慮した、一次元の異方性粘弾性応力解析モデルを基本としている。しかし、黒鉛材料の機械的物性値の温度依存性、多重層間の機械的干渉の影響などを考慮するため、半径方向一次元の温度計算および冷却材温度上昇計算が、上記の応力計算に連結されている。

なお、本計算コードの計算モデルの中には、現段階において実験的に十分には確認されていない数式モデルによって記述されている幾つかの機械的現象や熱的現象が含まれている。したがって、これらに対しては、入力データを調整することによって、計算コードの使用者が計算モデルや計算定数の選定を行なえるようになっている。

今後実験的な確認を必要とする数式モデルは、その殆んどが黒鉛材料に関するものであるが、特に重要と考えられる熱的・機械的問題として以下のものがあげられる。

- (i) 黒鉛材料の接触熱伝達
- (ii) 黒鉛材料の照射変形に対する照射中温度変化の影響
- (iii) 黒鉛材料の照射クリープ変形の異方性
- (iv) 被覆燃料粒子と黒鉛の混合結合体（燃料コンパクト）の照射クリープ変形

今後、これらに関する実験的知見に基づいて計算モデルの必要な改良を行なっていくことにしたい。

MULSHES コードは、当面、以下の解析に使用していく予定である。

- (i) 黒鉛材料にみられる各種の異方性変形の応力特性への影響
- (ii) 上記の実験的検討課題に関する、数値計算によるパラメータサーベイ
- (iii) 多目的高温ガス実験炉燃料体に対する参考計算

謝 辞

本計算コードを作成するにあたり当設計班の方々にはテストランに対するデータの供与など色々と御援助を賜わった。また、ヘリウムの物性値については当設計班の瀬谷東光氏が整備されたものを使用させていただいた。また、本稿を草するに当り、当設計班長下川純一氏より幾つかの貴重な助言をいただいた。これらの方々に対し深甚なる謝意を表します。

Table 3.1 Input specification (MATERIAL PROPERTIES INPUT DATA)

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
0	Number of materials MATR (≤ 5)	I10
1	Name of the M'th material MNAME(M,1) ~ MNAME(M,20)	20A4
2 2-1	Irradiation-dependent physical and mechanical properties CONDI(M), IICR(M), KICR(M), NIFCR(M), PICR(M,1) ~ PICR(M,4) CONDI(M): Thermal conductivity of the M'th material cal/cms ^{°C} IICR(M): Parameter to specify the irradiation dependence (IICR(M) $\neq$ 0) or independence (IICR(M) = 0) of the thermal conductivity of the M'th material. The following data are necessary only if IICR(M) $\neq$ 0 . KICR(M): Unit of fast neutron dose in the correlations = 0 E > 0.18 MeV unit $\neq$ 0 DNE unit (Dido Nickel Equivalent) NIFCR(M): Number of the divided ranges for the correlations (≤ 4). PICR(M,1): Fast neutron dose at the upper boundaries of the ~PICR(M,4) divided ranges 10 ²⁰ n/cm ² .	E10.3, 3I10, 4E10.3
2-2	ALI(M), IIA1(M), KIA1(M), NIFAL(M), PIA1(M,1) PIA1(M,4) ALI(M): Thermal expansion coefficient α_1 of the M'th material $^{\circ}\text{C}^{-1}$. IIA1(M): Parameter to specify the irradiation dependence (IIA1(M) $\neq$ 0) or independence (IICR(M) = 0) of the thermal expansion coefficient α_1 of the M'th material. KIA1(M): NIFAL(M): PIA1(M,1): } the same as above ~PIA1(M,4)	E10.3, 3I10, 4E10.3
2-3	A2I(M), IIA2(M), KIA2(M), NIFA2(M), PIA2(M,1) ~ PIA2(M,4) A2I(M): Thermal expansion coefficient $\alpha_{//}$ of the M'th material $^{\circ}\text{C}^{-1}$. IIA2(M): Parameter to specify the irradiation dependence (IIA2(M) $\neq$ 0) or independence (IICM(M) = 0) of the thermal expansion coefficient $\alpha_{//}$ of the M'th material. KIA2(M): NIFA2(M): PIA2(M,1): } the same as above ~PIA2(M,4)	E10.3, 3I10, 4E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
2-4	$E1I(M)$, $I1E1(M)$, $K1E1(M)$, $N1E1(M)$, $P1E1(M,1) \sim P1E1(M,4)$ $E1I(M)$: Young's modulus E_I of the M'th material kg/cm². $I1E1(M)$: Parameter to specify the irradiation dependence ($I1E1(M) \neq 0$) or independence ($I1E1(M)=0$) of the Young's modulus E_I of the M'th material. $K1E1(M)$: $N1E1(M)$: } the same as above $P1E1(M,1)$: $\sim P1E1(M,4)$ }	E10.3, 3I10, 4E10.3
2-5	$E2I(M)$, $I1E2(M)$, $K1E2(M)$, $N1E2(M)$, $P1E2(M,1) \sim P1E2(M,4)$ $E2I(M)$: Young's modulus E_I of the M'th material kg/cm². $I1E2(M)$: Parameter to specify the irradiation dependence ($I1E2(M) \neq 0$) or independence ($I1E2(M)=0$) of the Young's modulus E_I of the M'th material. $K1E2(M)$: $N1E2(M)$: } the same as above $P1E2(M,1)$: $\sim P1E2(M,4)$ }	E10.3, 3I10, 4E10.3
2-6	$PN1I(M)$, $IIPN1(M)$, $KIPN1(M)$, $NIPN1(M)$, $PIP1(M,1) \sim PIP1(M,4)$ $PN1I(M)$: Poisson's ratio ν_I of the M'th material. $IIPN1(M)$: Parameter to specify the irradiation dependence ($IIPN1(M) \neq 0$) or independence ($IIPN1(M)=0$) of the Poisson's ratio ν_I of the M'th material. $KIPN1(M)$: $NIPN1(M)$: } the same as above $PIP1(M,1)$: $\sim PIP1(M,4)$ }	E10.3, 3I10, 4E10.3
2-7	$PN2I(M)$, $IIPN2(M)$, $KIPN2(M)$, $NIPN2(M)$, $PIP2(M,1) \sim PIP2(M,4)$ $PN2I(M)$: Poisson's ratio ν_I of the M'th material. $IIPN2(M)$: Parameter to specify the irradiation dependence ($IIPN2(M) \neq 0$) or independence ($IIPN2(M)=0$) of the Poisson's ratio ν_I of the M'th material. $KIPN2(M)$: $NIPN2(M)$: } the same as above $PIP2(M,1)$: $\sim PIP2(M,4)$ }	E10.3, 3I10, 4E10.3
2-8	$AICRO(M,1,1)$, $AICR1(M,1,1)$, $AICR2(M,1,1)$ These are the coefficients of the polynomial equation (2.4.1) in the text, and are necessary only if $IICR(M) \neq 0$. $AICRO(M,1,1)$, $AICR1(M,1,1)$ and $AICR2(M,1,1)$ are, respectively, the zero-order, first-order and second-order coefficients of the second order polynomial equation of temperature, which is zero-order coefficient of the seventh-order polynomial equation of fast neutron dose, in the first correlation region.	3E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
	The next card gives AICR0(M,1,2), AICR1(M,1,2) and AICR2(M,1,2), and this procedure goes on to the eighth card which gives the seventh-order coefficients of the seventh-order polynomial equation in the first correlation region. The above procedure continues up to the last correlation region (NIFCR(M)).	
2-9	AIA1(M,N,K) AIA1(M,N,K) is the K-th-order coefficient of the seventh-order polynomial equation of fast neutron dose in the N-th correlation region, and are necessary only if IIA1(M) ≠ 0. See the equation (2.4.5) in the text. The first card gives eight data, from AIA1(M,1,1) to AIA1(M,1,8), in ascending order of K. The next card gives eight data for the second correlation region. This procedure continues up to the last correlation region (NIFA1(M)).	8E10.3
2-10	AIA2(M,N,K) These data are necessary only if IIA2(M) ≠ 0. See the equation (2.4.5) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
2-11	AIE1(M,N,K) These data are necessary only if IIE1(M) ≠ 0. See the equation (2.4.6) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
2-12	AIE2(M,N,K) These data are necessary only if IIE2(M) ≠ 0. See the equation (2.4.6) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
2-13	AIPN1(M,N,K) These data are necessary only if IIPN1(M) ≠ 0. See the equation (2.4.7) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
2-14	AIPN2(M,N,K) These data are necessary only if IIPN2(M) ≠ 0. See the equation (2.4.7) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
3	Temperature-dependent physical and mechanical properties	
3-1	ITCR(M), NTFCR(M), PTCR(M,1),, PTCR(M,4) ITCR(M) :- Parameter to specify the temperature dependence (ITCR(M) ≠ 0) or independence (ITCR(M) = 0) of the thermal conductivity of the M'th material. The following data are necessary only if ITCR(M) ≠ 0. NTFCR(M) : Number of the divided ranges for the correlations (≤ 4). PTCR(M,1) : Temperature at the upper boundaries of the ~ PTCR(M,4) divided ranges °C	2I10, 4E10.3
3-2	ITA1(M), NTF1(M), PTA1(M,1) ~ PTA1(M,4)	2I10, 4E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
3-3	ITA1(M) : Parameter to specify the temperature dependence ($ITA1(M) \neq 0$) or independence ($ITA1(M)=0$) of the thermal expansion coefficient α_1 of the M'th material NTFA1(M) : PTA1(M,1): } the same as the above ~ PTA1(M,4)) ITA2(M), NTFA2(M), PTA2(M,1) ~ PTA2(M,4) ITA2(M) : Parameter to specify the temperature dependence ($ITA2(M) \neq 0$) or independence ($ITA2(M)=0$) of the thermal expansion coefficient α_2 of the M'th material. NTFA2(M) : PTA2(M,1): } the same as above ~ PTA2(M,4))	2I10, 4E10.3
3-4	ITE1(M), NTFE1(M), PTE1(M,1) ~ PTE1(M,4) ITE1(M) : Parameter to specify the temperature dependence ($ITE1(M) \neq 0$) or independence ($ITE1(M)=0$) of the Young's modulus E_1 of the M'th material NTFE1(M) : PTE1(M,1): } the same as above ~ PTE1(M,4))	2I10, 4E10.3
3-5	ITE2(M), NTFE2(M), PTE2(M,1) ~ PTE2(M,4) ITE2(M) : Parameter to specify the temperature dependence ($ITE2(M) \neq 0$) or independence ($ITE2(M)=0$) of the Young's modulus E_2 of the M'th material NTFE2(M) : PTE2(M,1): } the same as above ~ PTE2(M,4))	2I10, 4E10.3
3-6	ITPN1(M), NTFPN1(M), PTPN1(M,1) ~ PTPN1(M,4) ITPN1(M) : Parameter to specify the temperature dependence ($ITPN1(M) \neq 0$) or independence ($ITPN1(M)=0$) of the Poisson's ratio ν_1 of the M'th material. NTFPN1(M) : PTPN1(M,1): } the same as above ~ PTPN1(M,4))	2I10, 4E10.3
3-7	ITPN2(M), NTFPN2(M), PTPN2(M,1),, PTPN2(M,4) ITPN2(M) : Parameter to specify the temperature dependence ($ITPN2(M) \neq 0$) or independence ($ITPN2(M)=0$) of the Poisson's ratio ν of the M'th material. NTFPN2(M) : PTPN2(M,1): } the same as above ~ PTPN2(M,4))	2I10, 4E10.3
3-8	ATCR(M,N,K) ATCR(M,N,K) is the K-th-order coefficient of the seventh-order polynomial equation of temperature in the N-th correlation region, and are necessary only if ITCR(M) $\neq 0$.	8E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
	See the equation (2.4.1) in the text. The first card gives eight data, from $ATCR(M,1,1)$ to $ATCR(M,1,8)$, in ascending order of K. The next card gives eight data for the second correlation region. This procedure continues up to the last correlation region ($NTFCR(M)$).	
3-9	$ATAl(M,N,K)$ These data are necessary only if $ITAl(M) \neq 0$. See the equation (2.4.5) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
3-10	$ATA2(M,N,K)$ These data are necessary only if $ITA2(M) \neq 0$. See the equation (2.4.5) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
3-11	$ATE1(M,N,K)$ These data are necessary only if $ITE1(M) \neq 0$. See the equation (2.4.6) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
3-12	$ATE2(M,N,K)$ These data are necessary only if $ITE2(M) \neq 0$. See the equation (2.4.6) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
3-13	$ATPN1(M,N,K)$ These data are necessary only if $ITPN1(M) \neq 0$. See the equation (2.4.7) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
3-14	$ATPN2(M,N,K)$ These data are necessary only if $ITPN2(M) \neq 0$. See the equation (2.4.7) in the text. The card arrangement is the same as above.	8E10.3
4	Irradiation-induced creep constant and Poisson's ratio in creep	
4-1	$CKGI(M)$, $ITKG(M)$, $NTFKG(M)$, $PTKG(M,1) \sim PTKG(M,4)$, $PNCGI(M)$ $CKGI(M)$: Irradiation-induced creep constant of the M'th material $(kg/cm^2 \cdot 10^{20} n/cm^2)^{-1}$. $ITKG(M)$: Parameter to specify the temperature dependence ($ITKG(M) \neq 0$) or independence ($ITKG(M) = 0$) of the M'th material. The following two data are necessary only if $ITKG(M) \neq 0$. $NTFKG(M)$: Number of the divided ranges for the correlations (≤ 4). $PTKG(M,1)$: Temperature at upper boundaries of the divided $\sim PTKG(M,4)$ ranges $^{\circ}C$. $PNCGI(M)$: Poisson's ratio in irradiation creep	E10.3, 2I10, 5E10.3
4-2	$ATKG(M,N,K)$ $ATKG(M,N,K)$ is the K-th-order coefficient of the seventh-order polynomial equation of temperature in the N-th correlation region, and are necessary only if $ITKG(M) \neq 0$. See the equation (2.4.9) in the text.	8E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
	The first card gives eight data, from ATKG(M,1,1) to ATKG(M,1,8), in ascending order of K. The next card gives eight data for the second correlation region. This procedure continues up to the last correlation region (NTEKG(M)).	
5	Creep compliance constant and thermal creep parameter AP1I(M), AP2I(M), CKTI(M), CSGI(M), CMI(M) AP1I(M) : Anisotropic coefficient in creep of the M'th material in the perpendicular direction AP2I(M) : Anisotropic coefficient in creep of the M'th material in the parallel direction. CKTI(M) : κ CSGI(M) : $\sigma_c \text{ kg/cm}^2$ CMI(M) : m Calculational parameters for thermal creep. See the equation (2.3.30) in the text.	5E10.3
6	Irradiation-induced dimensional change data ID1(M), KGD1(M), KTD1(M), NFD1(M), PT1(M,1)~PT1(M,4) ID1(M) : Parameter to specify the M'th material whether it has dimensional change ($ID1(M) \neq 0$) or not ($ID1(M)=0$), in perpendicular direction ($\eta_{\perp}$). The following data are necessary only if $ID1(M) \neq 0$. KGD1(M) : Unit of fast neutron dose in the correlations. = 0 E 0.18 MeV unit $\neq 0$ DNE unit (Dido Nickel Equivalent) KTD1(M) : Parameter to specify the type of temperature variables in the correlations = 1 T $^{\circ}\text{C}$ = 2 T/1000 $^{\circ}\text{C}$ = 3 $\ln(T/1000)$ $^{\circ}\text{C}$ NFD1(M) : Number of the divided ranges for the correlations (≤ 4) PT1(M,1) : Temperature at the upper boundaries of the divided ~PT1(M,4) ranges $^{\circ}\text{C}$	4I10, 4E10.3
6-1	ID2(M), KGD2(M), KTD2(M), NFD2(M), PT2(M,1)~PT2(M,4) ID2(M) : Parameter to specify the M'th material whether it has dimensional change ($ID2(M) \neq 0$) or not ($ID2(M)=0$), in parallel direction ($\eta_{\parallel}$). KGD2(M): KTD2(M): NFD2(M): PT2(M,1): ~PT2(M,4) the same as above.	4I10, 4E10.3
6-2	AD10(M,1,1), AD11(M,1,1), AD12(M,1,1) These are the coefficients of the polynomial equation (2.4.8) in the text, and are necessary only if $ID1(M) \neq 0$. AD10(M,1,1), AD11(M,1,1) and AD12(M,1,1) are, respectively, the zero-order, first-order and second-order coefficients of the second order polynomial equation of temperature, which is zero-order coefficient of the seventh-order polynomial equation of fast neutron dose, in the first correlation region.	3E10.3
6-3		

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
6-4	The next card gives $AD10(M,1,2)$, $AD11(M,1,2)$ and $AD12(M,1,2)$, and this procedure goes on to the eight card which gives the seventh-order coefficients of the seventh-order polynomial equation in the first correlation region. The above procedure continues up to the last correlation region ($NFD1(M)$). $AD20(M,1,1)$, $AD21(M,1,1)$, $AD22(M,1,1)$ These are the coefficients of the polynomial equation (2.4.8) in the text, and are necessary only if $ID2(M) \neq 0$. The card arrangement is the same as above.	3E10.3
7	Miscellaneous data $EM(M)$, $UR(M)$, $HB(M)$ $EM(M)$: Emissivity of the M'th material $UR(M)$: Surface roughness of the M'th material cm $HB(M)$: Brinell hardness of the M'th material kg/cm²	3E10.3

The above procedure continues to the last material (MATR).

Table 3.2 Input specification (CASE-INPUT DATA)

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
00	Title of this case ITITLE(1) ~ ITITLE(20)	20A4
01	Data options INC(1) ~ INC(9) INC(i) = i : The i'th group data are necessary in this case. INC(i) = 0 : The i'th group data remain the same as the previous case, and i'th group cards are omitted in this case.	9I5
1	Basic calculation parameters IFTYPE, JMAX, LMAX, KP(1) ~ KP(JMAX) IFTYPE : Type of the structure = 1 Rod (Cylinder) = 2 Ball JMAX : Number of the stationary regions (≤ 5) LMAX : Number of the axial subdivisions (≤ 20) KP(j) : Number of the mesh points in the j'th stationary region (≤ 20)	8I5
2	Dimensions RI(1), ..., RI(j), ..., RI(JMAX), RI(JMAX1) Inner radius of the j'th stationary region cm, where JMAX1 = JMAX + 1. RI(JMAX1) is necessary only if IFTYPE = 1.	6E10.3
2-1		
2-2	DERI(1) ~ DERI(JMAX) DERI(j) : Thickness of the j'th stationary region cm	5E10.3
2-3	HC Axial length (or height) cm	E10.3
3	Material assignments	5I5
3-1	MATN(1) ~ MATN(JMAX) MATN(j) : Material NO.(M) of the j'th stationary region.	5I5
3-2	IDDR(1) ~ IDDR(JMAX) IDDR(j) : Option to specify the model in irradiation-induced dimensional change, IDDR(j) = 0 for the anisotropic model, and IDDR(j) $\neq$ 0 for the isotropic model (See the section §2.4.2).	
4	Irradiation conditions (See the section 2.5 in the text)	E10.3
4-1	GAV Reference fast neutron dose $10^{20}n/cm^2$	
4-2	IIG, LLG IIG : Number of the data points to specify the time dependent fast neutron dose ($2 \leq IIG \leq 21$). LLG : Number of the data points to specify the axial fast neutron dose distribution ($2 \leq LLG \leq 21$).	8E10.3
4-3	TAUPG(1) ~ TAUPG(IIG) Irradiation times day	

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
4-4	HPG(1) ~ HPG(LLG) Axial locations cm	8E10.3
4-5	GRP(1) ~ GRP(JMAX) Radial distribution factors of the fast neutron dose relative to the reference.	5E10.3
4-6	GAP(1,1) ~ GAP(1,LLG) Axial distribution factors of the fast neutron dose at the irradiation time TAUPG(1). The next card gives LLG-th data, from GAP(2,1) to GAP(2,LLG), in ascending order. This procedure continues up to the last irradiation time TAUPG(IIG).	8E10.3
5	Operating parameters	
5-1	NFR(1) ~ NFR(JMAX1) Designation of the flowing regions. NFR(j) = 0 for flowing region, NFR(j) = 0 for gap region.	6I5
5-2	IFR(1) ~ IFR(JMAX1) Designation of the substances in gap regions. IFR(j) = 1 for Helium gas, otherwise not permitted.	6I5
5-3	JPCI(1) ~ JPCI(JMAX1) Initial conditions of the gap regions. JPCI(j) = 0 for separate, JPCI(j) = 0 for contact.	6I5
5-4	ANC, BNC, CNC, DNC, UNC, IGC(1) ~ IGC(JMAX1) ANC : a BNC : b CNC : c DNC : d $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Coefficients of the heat transfer} \\ \text{correlation, eq.(2.2.14) in the text.} \end{array}$ UNC : Nusselt number for laminar flow. The above data are necessary only if IFTYPE=1 and IGC(j)=0. IGC(j) : Option to specify the heat transfer coefficient of the j'th flowing region. = 0 Calculated by the code ≠ 0 Input constant	5E10.3, 6I5
5-5	HGC(1) ~ HGC(JMAX1) Heat transfer coefficients of the gap regions cal/cm ² s°C. But, when IGC(1) ~ IGC(JMAX1)=0, this card should be blank.	6E10.3
5-6	CDH(1) ~ CDH(JMAX1) Correction factors of thermal conductance, ξ_j . See the equation (2.2.12) in the text.	6E10.3
6	Operating conditions (See the Section 2.5 and 2.2 in the text)	
6-1	QAV, WAV, TI, PI, TGG, FV, AF, BNZ QAV : Reference heat generation rate cal/cm ³ s WAV : Reference coolant flow rate g/s TI : Core inlet temperature °C PI : Core inlet pressure kg/cm ² TGG : Guess value for calculation of radial inlet temperature °C The following data are necessary only if IFTYPE = 2. FV : Coolant volume fraction in the core AF : Coolant flow area cm ² BNZ : Number of the ball structures per unit axial length n/cm	8E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
6-2	IIQ, IIW, LLQ IIQ : Number of the data points to specify the time dependent heat generation rate ($2 \leq IIQ \leq 21$). IIW : Number of the data points to specify the time dependent coolant flow rate ($2 \leq IIW \leq 21$). LLQ : Number of the data points to specify the axial heat generation rate distribution ($2 \leq LLQ \leq 21$).	3I5
6-3	TAUPQ(1) ~ TAUPQ(IIQ) Irradiation times day	8E10.3
6-4	TAUPQ(1) ~ TAUPW(IIW) Irradiation times day	8E10.3
6-5	HPQ(1) ~ HPQ(LLQ) Axial locations cm	8E10.3
6-6	QRP(1) ~ QRP(JMAX) Radial distribution factors of the heat generation rate relative to the reference.	5E10.3
6-7	WRP(1) ~ WRP(JMAX1) Radial distribution factors of the coolant flow rate relative to the reference.	6E10.3
6-8	QAP(1,1) ~ QAP(1,LLQ) Axial distribution factors of the heat generation rate at the irradiation time TAUPQ(1). The next card gives LLQ-th data, from QAP(2,1) to QAP(2,LLQ), in ascending order. This procedure continues up to the last irradiation time TAUPQ(IIQ).	8E10.3
6-9	WTP(j,1) ~ WTP(j,IIW) Time dependent factors of the coolant flow rate in the j'th flowing region. The next card gives IIW-th data, from WTP(j+1,1) to WTP(j+1,IIW), in ascending order in the j+1'th flowing region.	8E10.3
7	Calculation parameters	
7-1	DTAU, DECGG, DECTG, XIPC, XIPD, XISC, XITC, XITM DTAU : Unit time interval day DECGG : Initial incremental guess value of irradiation creep strain cm/cm DECTG : Initial incremental guess value of thermal creep strain cm/cm XIPC : Convergence criterion for inner loop of pressure iteration kg/cm ² XIPD : Convergence criterion for outer loop of pressure iteration cm/cm XISC : Convergence criterion for creep strain and stress iteration kg/cm ² XITC : Convergence criterion for coolant temperature iteration °C XITM : Convergence criterion for radial temperature iteration °C	8E10.3
7-2	ALPI, ALPC, ALTC, ALTM ALPI : Acceleration parameter for pressure iteration	4E10.3

group No.	DATA and DESCRIPTION	FORMAT
7-3	ALPC : Acceleration parameter for creep strain and stress iteration. ALTC : Acceleration parameter for coolant temperature iteration. ALTM : Acceleration parameter for radial temperature iteration IMAX, IHTR, ICM, NIT, NTP, IPRINT, NC1, NC2 IMAX : Number of the calculation time steps IHTR : Option to specify the model for heat transfer in gap region = 1 Conduction heat transfer = 2 Radiation heat transfer = 3 Conduction and radiation heat transfer ICM : Option to specify the irradiation-induced creep model. = 1 Equation (2.3.22), (2.3.24) in the text. = 2 Equation (2.3.31), (2.3.32) in the text. NIT : Maximum iteration count for radial temperature iteration NTP : Interval count of the time steps to print the results IPRINT: Option to specify the printing of check data, If IPRINT$\neq$0, check data are printed. NC1 : Interval count of the time steps to print check data (IPRINT$\neq$0). NC2 : Interval count of the axial points to print check data (IPRINT$\neq$0).	815
8	Shutdown conditions TSD, PSD, TFB TSD : Shutdown temperature $^{\circ}\text{C}$ PSD : Shutdown coolant pressure kg/cm^2 TFB : Standard temperature $^{\circ}\text{C}$	3E10.3
9	Final case card ICEND If this case is the final one in the job, ICEND=999. If not so, ICEND=0 or blank.	

記 号 表

A_{ij}	: クリープ変形の異方性係数
$A, A^*, \bar{A}$	: 定数, 式 (2.3.41), (2.3.97), (2.3.97a)
a	: 内半径, 式 (2.2.14) 係数
a_i	: 多項式の係数 (2.4 節)
B	: 定数, 式 (2.3.41)
b	: 外半径, 式 (2.2.14) 指数
b_i	: 多項式の係数 (2.4 節)
C	: 軸方向ひずみ定数
C_P	: 冷却材の比熱
c_1, c_2, c_3, c_4	: 積分定数, r の関数
c	: 式 (2.2.14) 指数
c_i	: 多項式の係数 (2.4 節)
D_j	: $(\delta/r)_j$, 式 (2.3.79)
d	: 式 (2.2.14) 指数
d_i	: 多項式の係数 (2.4 節)
$E, E_1, E_2, E_{\perp}, E_{\parallel}$	: ヤング率
g_r, g_{θ}, g_z	: 非弾性ひずみ
h_j	: 熱伝達率
I_1, I_2	: 非弾性ひずみの応力に関する関数, 式 (2.3.56), (2.3.57), (2.3.56a), (2.3.57a), (2.3.99), (2.3.99a)
J, j	: 領域層数, 層の番号
$K_{k,k}$	: 熱コンダクタンス
K_C, K_{CG}	: 照射クリープ定数
k	: 径方向分割点番号
m	: 温度クリープに関する材料定数, 式 (2.3.30)
n_1, n_2	: 特性方程式の根, 式 (2.3.92)
P_a, P_b, P_j	: 内圧, 外圧, 接触圧力
Q_j	: 熱発生率
Q, Q_1, Q_2, Q_S	: 冷却材流路への伝熱量
q_1, q_2	: 冷却材流路の表面熱流束
R_{Ij}	: 内側内半径
r	: 任意の径方向寸法, 径方向座標
S_{ij}	: 弾性係数 (コンプライアンス)
T	: 温度
T_G	: 冷却材主流温度

u	: 半径方向変位
$V_{k,k}$	: 分割点を含む体積要素体積
W_j	: 冷却材流量
w	: z 軸方向変位
z	: 軸方向座標
$\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_{\perp}, \alpha_{//}$	: 熱膨張係数
β_j	: 外半径と内半径の比 (b/a) _j
γ	: 照射量
γ^G	: 比重量 (間隙部)
Δ	: 増分演算子
δ_j	: 焼ばめひろ
$\varepsilon_r, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_z$	: ひずみ
$\varepsilon_r^C, \varepsilon_{\theta}^C, \varepsilon_z^C$	: クリープひずみ
ε_{eq}^C	: 相当クリープひずみ
$\eta, \eta_1, \eta_2, \eta_{\perp}, \eta_{//}$	: 照射変形量
θ	: 周方向座標
κ	: 温度クリープに関する材料定数, 式 (2.3.3.0)
$\lambda, \lambda^S, \lambda^G$	: 熱伝導率
ξ	: 収束判定因子
ρ	: 形状指数 (=1:円筒, =2:球)
σ_c	: 温度クリープに関する材料定数, 式 (2.3.3.0)
$\sigma_r, \sigma_{\theta}, \sigma_z$	: 応力
σ_{eq}	: 相当応力
τ	: 照射時間
ν^c	: 照射クリープポアソン比
$\nu, \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_{\perp}, \nu_{//}$	: ポアソン比
χ	: 応力関数
χ_1, χ_2, χ_s	: 微分方程式の解, 特解
ω_{ij}	: 接触圧力計算に関する係数 (2.3.2.3節)

下添字

1, 2, 3	: 座標
i	: 座標, 時間ステップ番号
j	: 層の番号
k	: 半径方向分割点番号
$r, \theta, z(\varphi)$	: 径方向, 周方向, 軸方向 (方位角方向)

上添字

- C : クリープ効果
 D : 照射変形効果
 E : 弾性効果 (圧力効果)
 G : 間隙領域
 S : 固体領域
 n : 繰返し反復数

参 考 文 献

- 1) 荒井長利, 佐藤貞夫: “黒鉛スリーブの照射に伴う応力・ひずみの解析”,
JAERI-memo 4689 (1971)
- 2) A. Mendelson, M. H. Hirschberg, and S. S. Manson, J. Basic Engr. 81 (D),
p. 585 (1959)
- 3) 日本機械学会: 伝熱工学資料 第2版, p. 125 (1966)
- 4) R. Jeschar: “Wärmeübergang in Mehrkernschüttungen aus Kugeln”,
Archiv für das Eisenhüttenwesen Heft 6 (1964)
- 5) 宮川松男: クリープ変形理論と設計, 日刊工業新聞社, p. 65 (1963)
- 6) D. W. Stevens: “An Explicit Solution for Stresses in Pyrocarbon-Coated Fuel Particles”, Nucle. Tech., vol. 10 (1971)
- 7) 宮本喜晟, 鈴木邦彦: “高温ガス実験炉予備設計の炉心熱設計とその検討”,
JAERI-memo 4431 (1971)
- 8) Dragon 12 th Annual Report (1970)
- 9) M. R. Everett, L. W. Graham, et al: “Irradiation Data on Gilsocarbon Graphites for High-Temperature Nuclear Reactors”, IAEA-SM-120/H-8 (1968)

入出力データーリスト
 入力データー (CASE INPUT DATA)

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8.....9

HTGR HOLLOW ROD FUEL										SAMPLE PROBLEM NO. 000									
1	2	3	4	5	6	7	8	9		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0.4	1	2	20	15	10														
0.8			1.21																
250.			0.49																
1	1	2																	
0	0	0																	
1.	2	2																	
0.			1000.																
0.			250.																
1.			1.																
0.			0.																
50.	0	0	0	1															
1	1	1	1																
0	0	0	0	0															
0.023	0	0	0.8							0.4	0.15	4.36	0	0	0	0			
24.48	1.									400.	40.	1000.							
2	2	21																	
0.			1000.																
0.			1000.																
0.			1000.																
0.			1000.																
200.0	0	0	112.5							25.0	37.5	50.0	62.5	75.0	87.5				
200.0	0	0	212.5							125.0	157.5	190.0	162.5	175.0	187.5				
1.	0.		0.							225.0	237.5	250.0							
1.			0.							9.8									
1.			.6908							.5475									
.3916			.3288							.2832									
.1520			.1163							.1091									
1.			.6908							.5475									
.3916			.3288							.2832									
.1520			.1163							.1091									
1.			1.																
40.			.00001							.1									
1.			1.							0.8									
200.	2	1	100	25.															
999																			

入出力データリスト
出力データ

```

.....
* INPUT DATA *
.....

.... STATIONARY REGION NO.
1 DRAGON STANDARD FUEL COMPACT (30 PERCENT VOLUME LOADING)
2 EXTRUDED GILSOCARBON GRAPHITE REF.16 (IAEA-SM-120/H-8)

.... OPERATING PRESSURE (KG/50.CM) 40.0
.... SHUTDOWN PRESSURE (KG/50.CM) 40.0

.... CALCULATION PARAMETER
: UNIT TIME INTERVAL (DAY) 40.00
: NUMBER OF TIME INTERVAL 3
: NUMBER OF AXIAL DIVISION 20
: NUMBER OF LAYER DIVISION 15 10

.... CREEP PARAMETER
REGION ANISOTROPY CREEP POISSONS
NO. (1) (2) RATIO
1 1.00 1.00 0.0
2 1.00 1.00 0.0

.... THERMAL CREEP PARAMETER
REGION MATERIAL CONSTANTS
NO. SIGMA-C M KAPPA
1 0.0 0.0 0.0
2 0.0 0.0 0.0

.... CONVERGENCE CRITERIA
PCALC (KG/50.CM) 0.100000
PCALC ( CM/CM ) 0.10E-04
CREEP (KG/50.CM) 0.100000
TEMP ( C ) 0.050000
TCOOL ( C ) 0.050000

.... ACCELERATION FACTOR
PCALC INNER LOOP 1.00
CREEP 1.00
TEMP 0.80
TCOOL 0.80

RADIUS (CM) THICKNESS (CM)
0.4000 0.8000
1.2100 0.4900

25.0
200.0

```

..... IRRADIATION DIMENSIONAL CHANGE IN RADIAL (PERCENT)

..... YOUNGS MODULUS AT OPERATING (10**5 KG/SQ.CM)

L	1	IN	1	OUT	2	IN	2	OUT
1	-0.62	-0.32	-0.00	-0.00				
3	-0.38	-0.26	-0.00	-0.00				
5	-0.44	-0.31	-0.00	-0.00				
7	-0.52	-0.36	-0.01	-0.00				
9	-0.54	-0.41	-0.03	-0.02				
11	-0.54	-0.44	-0.06	-0.04				
13	-0.57	-0.45	-0.09	-0.07				
15	-0.59	-0.41	-0.11	-0.10				
17	-0.57	-0.51	-0.13	-0.12				
19	-0.56	-0.52	-0.14	-0.13				
21	-0.61	-0.56	-0.16	-0.15				

L	1	1	2	1	2	1	2
1	0.50	0.50	1.30	1.30			
3	0.50	0.50	1.30	1.30			
5	0.50	0.50	1.30	1.30			
7	0.50	0.50	1.30	1.30			
9	0.50	0.50	1.30	1.30			
11	0.50	0.50	1.30	1.30			
13	0.50	0.50	1.30	1.30			
15	0.50	0.50	1.30	1.30			
17	0.50	0.50	1.30	1.30			
19	0.50	0.50	1.30	1.30			
21	0.50	0.50	1.30	1.30			

.... IRRADIATION DIMENSIONAL CHANGE IN AXIAL (PERCENT)

.... POISSONS RATIO AT OPERATING CONDITION

L	1 IN	1 OUT	2 IN	2 OUT
1	-0.62	-0.32	-0.01	-0.01
3	-0.38	-0.26	-0.01	-0.01
5	-0.44	-0.31	-0.01	-0.01
7	-0.52	-0.36	-0.01	-0.01
9	-0.54	-0.41	-0.05	-0.03
11	-0.54	-0.44	-0.08	-0.06
13	-0.57	-0.48	-0.12	-0.10
15	-0.59	-0.51	-0.15	-0.13
17	-0.57	-0.51	-0.17	-0.16
19	-0.56	-0.52	-0.19	-0.18
21	-0.61	-0.56	-0.22	-0.21

L	1	1	2	1	2
	PN1	PN2	PN1	PN2	
1	0.25	0.25	0.30	0.30	
3	0.25	0.25	0.30	0.30	
5	0.25	0.25	0.30	0.30	
7	0.25	0.25	0.30	0.30	
9	0.25	0.25	0.30	0.30	
11	0.25	0.25	0.30	0.30	
13	0.25	0.25	0.30	0.30	
15	0.25	0.25	0.30	0.30	
17	0.25	0.25	0.30	0.30	
19	0.25	0.25	0.30	0.30	
21	0.25	0.25	0.30	0.30	

... THERMAL EXPANSION COEFFICIENT (1/10**6 C)

.... YOUNGS MODULUS AT SHUTDCWN (10**5 KG/50.CM)

L	1	A ₁	A ₂	1	A ₁	A ₂	2
1	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
3	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
7	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
9	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
11	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
13	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
15	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
17	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
19	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
21	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00

L	E ₁	E ₂	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂
1	0.50	0.50	1.30	1.30		
3	0.50	0.50	1.30	1.30		
7	0.50	0.50	1.30	1.30		
9	0.50	0.50	1.30	1.30		
11	0.50	0.50	1.30	1.30		
13	0.50	0.50	1.30	1.30		
15	0.50	0.50	1.30	1.30		
17	0.50	0.50	1.30	1.30		
19	0.50	0.50	1.30	1.30		
21	0.50	0.50	1.30	1.30		

.... THERMAL CONDUCTIVITY (CAL/CM.S.C)

..... COLLISIONS RATIO AT SHUTDOWN CONDITION

L	HC (CM)	1	2
1	0.0	0.020	0.060
3	25.0	0.020	0.080
5	50.0	0.020	0.080
7	75.0	0.020	0.080
9	100.0	0.020	0.080
11	125.0	0.020	0.080
13	150.0	0.020	0.080
15	175.0	0.020	0.080
17	200.0	0.020	0.080
19	225.0	0.020	0.080
21	250.0	0.020	0.080

L	1	PN1	PN2	1	PN1	PN2	2
1	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
5	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
7	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
9	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
11	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
13	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
15	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
17	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
19	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	
21	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	

DATE 79-11-30 PAGE 2

HTGR HOLLOW ROD FUEL SAMPLE PROBLEM NO. 000

IRRADIATION TIME = 80.0 DAY

--- I - 3

..... IRRADIATION CREEP CONST. (1/(KG/CM²-E26-N/CM²))

L	HC	1	2
1	0.0	2.97	1.90
3	25.0	2.30	1.55
5	50.0	2.54	1.77
7	75.0	2.84	2.03
9	100.0	2.97	2.26
11	125.0	3.02	2.43
13	150.0	3.13	2.62
15	175.0	3.22	2.78
17	200.0	3.19	2.88
19	225.0	3.17	2.94
21	250.0	3.35	3.07

..... FAST NEUTRON DOSE DISTRIBUTION (10*20 N/50.CM)

L	HC	1	2
1	0.0	4.00	4.00
3	25.0	4.00	4.00
5	50.0	4.00	4.00
7	75.0	4.00	4.00
9	100.0	4.00	4.00
11	125.0	4.00	4.00
13	150.0	4.00	4.00
15	175.0	4.00	4.00
17	200.0	4.00	4.00
19	225.0	4.00	4.00
21	250.0	4.00	4.00

..... COOLANT FLOW RATE (G/S)

REGION NO.	1	2	3
	0.0	0.0	9.80

..... OPERATING DIMENSIONS (CM)

L	1	2	3
1	0.399	1.198	1.214
3	0.400	1.199	1.214
5	0.400	1.199	1.215
7	0.399	1.198	1.215
9	0.399	1.198	1.215
11	0.399	1.198	1.215
13	0.399	1.198	1.215
15	0.399	1.198	1.215
17	0.399	1.198	1.215
19	0.399	1.198	1.215
21	0.399	1.197	1.215

..... SHUTDOWN DIMENSIONS (CM)

L	1	2	3
1	0.398	1.195	1.211
3	0.399	1.197	1.211
5	0.399	1.196	1.211
7	0.398	1.195	1.211
9	0.398	1.195	1.211
11	0.398	1.195	1.211
13	0.398	1.194	1.210
15	0.398	1.194	1.210
17	0.398	1.194	1.210
19	0.398	1.194	1.209
21	0.398	1.194	1.209

..... POWER DISTRIBUTION (CAL/CM**3.S)

L	HC	1	2
1	0.0	24.873	0.0
3	25.0	14.340	0.0
5	50.0	12.887	0.0
7	75.0	11.888	0.0
9	100.0	9.383	0.0
11	125.0	7.520	0.0
13	150.0	6.361	0.0
15	175.0	5.305	0.0
17	200.0	3.719	0.0
19	225.0	2.674	0.0
21	250.0	3.108	0.0

..... SURFACE HEAT TRANSFER COEFFICIENT (CAL/CM**2.S.C)

L	HC	1	2	3
1	0.0	0.0	0.0634	0.0378
3	25.0	0.0	0.0638	0.0398
5	50.0	0.0	0.0639	0.0409
7	75.0	0.0	0.0636	0.0418
9	100.0	0.0	0.0637	0.0426
11	125.0	0.0	0.0640	0.0431
13	150.0	0.0	0.0642	0.0435
15	175.0	0.0	0.0644	0.0438
17	200.0	0.0	0.0648	0.0440
19	225.0	0.0	0.0650	0.0442
21	250.0	0.0	0.0650	0.0443

DATE 79-11-30 PAGE 3

SAMPLE PROBLEM NO. 000

HTGR HOLLOW ROD FUEL

IRRADIATION TIME = 80.0 DAY

..... SURFACE HEAT FLUX (CAL/SQ.CM-S)

L	1	2	3
1	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0

..... RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION (C)

L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.0	1222.6	1220.9	1216.2	1208.5	1198.3	1170.4	1153.0	1133.4	1111.7	1087.8
3	25.0	1024.7	1023.7	1020.9	1016.5	1010.4	994.1	983.9	972.4	959.7	945.7
5	50.0	1077.6	1076.7	1074.2	1070.3	1065.0	1050.5	1041.5	1031.3	1020.0	1007.7
7	75.0	1143.7	1142.9	1140.6	1137.0	1132.1	1118.8	1110.5	1101.1	1090.7	1079.3
9	100.0	1163.6	1163.0	1161.1	1158.1	1154.1	1143.2	1136.4	1128.7	1120.2	1110.8
11	125.0	1164.3	1163.8	1162.3	1160.0	1156.8	1148.3	1142.9	1136.9	1130.2	1122.9
13	150.0	1182.7	1182.3	1181.0	1179.0	1176.4	1169.2	1164.7	1159.6	1154.0	1147.8
15	175.0	1197.0	1196.6	1195.6	1193.9	1191.7	1185.7	1181.9	1177.7	1172.9	1167.8
17	200.0	1184.1	1183.8	1183.1	1181.9	1180.4	1178.5	1176.2	1173.5	1170.5	1167.2
19	225.0	1175.5	1175.4	1174.8	1174.0	1172.9	1171.5	1169.8	1167.9	1165.8	1163.4
21	250.0	1121.7	1121.5	1121.0	1120.9	1120.6	1205.1	1202.9	1200.4	1197.7	1194.7

..... COOLANT TEMPERATURE DISTRIBUTION (C)

L	1	2	3
1	0.0	0.0	400.0
3	0.0	0.0	550.3
5	0.0	0.0	661.3
7	0.0	0.0	762.3
9	0.0	0.0	852.5
11	0.0	0.0	921.2
13	0.0	0.0	978.6
15	0.0	0.0	1026.6
17	0.0	0.0	1064.9
19	0.0	0.0	1090.0
21	0.0	0.0	1113.0

DATE 79-11-30 PAGE 5

SAMPLE PROBLEM NO. 000

HTGR HOLLOW ROD FUEL

--- I = 3 IRRADIATION TIME = 80.0 DAY

--- MAXIMUM TENSILE STRESS AND ITS RADIAL POSITION

.... MAX. OPERATING RADIAL STRESS (KG/SQ.CM)

L	1	2
1	18. (7)	0. (1)
3	6. (6)	0. (1)
5	7. (7)	0. (1)
7	9. (7)	0. (1)
9	7. (7)	0. (5)
11	6. (7)	0. (5)
13	5. (7)	1. (5)
15	4. (7)	1. (5)
17	3. (7)	0. (5)
19	2. (7)	0. (5)
21	3. (7)	0. (5)

.... MAX. OPERATING TANGENTIAL STRESS (KG/SQ.CM)

L	1	2
1	66. (1)	21. (11)
3	21. (1)	12. (11)
5	27. (1)	10. (11)
7	30. (1)	8. (11)
9	26. (1)	5. (1)
11	20. (1)	6. (1)
13	18. (1)	7. (1)
15	15. (1)	7. (1)
17	11. (1)	5. (1)
19	8. (1)	4. (1)
21	9. (1)	5. (1)

.... MAX. OPERATING AXIAL STRESS (KG/SQ.CM)

L	1	2
1	66. (1)	21. (11)
3	21. (1)	12. (11)
5	27. (1)	10. (11)
7	30. (1)	8. (11)
9	26. (1)	7. (1)
11	20. (1)	8. (1)
13	18. (1)	9. (1)
15	15. (1)	8. (1)
17	11. (1)	6. (1)
19	8. (1)	5. (1)
21	9. (1)	6. (1)

** CALCULATION TIME ** 96 (SEC)

.... MAX. SHUTDOWN RADIAL STRESS (KG/SQ.CM)

L	1	2
1	26. (7)	2. (5)
3	10. (7)	1. (5)
5	11. (7)	1. (5)
7	12. (7)	1. (5)
9	10. (7)	2. (5)
11	8. (7)	2. (5)
13	7. (7)	1. (5)
15	6. (7)	1. (5)
17	4. (7)	1. (5)
19	3. (7)	1. (5)
21	4. (7)	1. (5)

.... MAX. SHUTDOWN TANGENTIAL STRESS (KG/SQ.CM)

L	1	2
1	91. (1)	20. (1)
3	36. (1)	12. (1)
5	39. (1)	12. (1)
7	42. (1)	16. (1)
9	35. (1)	23. (1)
11	28. (1)	20. (1)
13	24. (1)	19. (1)
15	21. (1)	17. (1)
17	14. (1)	12. (1)
19	10. (1)	9. (1)
21	12. (1)	11. (1)

.... MAX. SHUTDOWN AXIAL STRESS (KG/SQ.CM)

L	1	2
1	91. (1)	20. (1)
3	36. (1)	12. (1)
5	39. (1)	11. (1)
7	42. (1)	17. (1)
9	35. (1)	25. (1)
11	28. (1)	22. (1)
13	24. (1)	20. (1)
15	21. (1)	18. (1)
17	14. (1)	13. (1)
19	10. (1)	10. (1)
21	12. (1)	12. (1)