

JAERI - M  
87-160

高温ガス炉炉心総合熱流動解析コード  
(TEMPEST) の開発

1987年10月

鈴木 邦彦

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

高温ガス炉炉心総合熱流動解析コード (TEMPEST) の開発

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

鈴木 邦彦

(1987年9月8日受理)

高温ガス炉の開発において、原子炉出口ガスの高温化は重要な開発目標の一つである。その目標達成のためには、高温特性に優れた燃料要素の研究開発を行うだけでなく、同じ出力に対して燃料の健全性を損なわずにより高温の原子炉出口ガスを得ることができる適切な炉心設計を行う必要がある。そこで、高温ガス炉の炉心熱設計に役立てるために、炉心の冷却材流量配分を定めて定常熱流動解析を行い温度分布を計算するとともに、且つ高温ガス炉に特有な被覆燃料粒子についてその健全性を支配する重要な因子である燃料核移動距離及びパラジウムによるSiC被覆層腐食量を計算する炉心総合熱流動解析コードTEMPESTを開発した。TEMPESTコードは、炉心を多並列チャンネルで模擬し、更にそれらを流量調節領域に対応した群に区分する。そして各チャンネルにおいて、定常1次元の熱伝導方程式を燃料体の熱膨張及び高速中性子照射による変形を考慮して解いて温度分布を計算する。TEMPESTコードの内蔵データのうち、現在、日本原子力研究所(原研)が開発を進めている高温工学試験研究炉(HTTR)の燃料体形状に対する熱伝達率、摩擦損失係数、燃料コンパクトや黒鉛スリーブの熱伝導率などの材料データ及び燃料性能評価式などは、原研で取得された実験データを踏まえて安全側に評価したものであり、HTTRの設計に使用できる。

本報告書は、TEMPESTコードの解析モデル、数値解析手法、プログラム構成、及び使用方法について述べたものである。

Development of Thermal Hydraulic Analysis Code  
for High Temperature Gas-Cooled Reactor Core (TEMPEST)

Kunihiko SUZUKI

Department of Power Reactor Projects  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 8, 1987)

In the development of HTGR, it is one of the major purposes to get higher temperature of reactor outlet gas. For that purpose, not only research and development of fuel element which is superior in high temperature characteristics, but also appropriate core design is necessary, which can produce higher temperature of reactor outlet gas without failure of fuel under the same reactor power.

Therefore, a steady state core thermal hydraulic analysis code, TEMPEST for the high temperature-gas cooled reactor core was developed, which calculates the coolant flow and fuel temperature distributions in the core and analyzes fuel kernel migration and SiC layer attack by Pd in coated particle fuels, which are important factors to evaluate the integrity of High Temperature Gas-Cooled Reactor fuel.

The "TEMPEST" code represents the whole core by the multi-channel model and can deal with a set of channel assigned to flow control regions. In each channel, one-dimensional steady state heat conduction equation is applied in consideration of the dimensional changes of fuel rods caused by thermal expansion and irradiation of fast neutron.

The "TEMPEST" code itself has the data of heat transfer coefficient, friction factor, and material properties such as thermal conductivities of fuel compact and graphite sleeve, and equations for the evaluation fuel integrity.

Among these data, data for fuel element of High Temperature Test Reactor (HTTR) which Japan Atomic Energy Institute (JAERI) has been engaged in research and development for are evaluated conservatively based on the experimental data obtained in JAERI, and useable for HHTR

core design.

The present report describes the analytical model, analytical methods and the program structure of the code.

Keywords: HTGR, Core, Coolant Flow Control, Thermal-Hydraulic Design, Temperature, Coated Particle Fuel, SiC, Kernel Migration, Pd Attack, Dimensional Change, Computer, Program Structure

## 目 次

1. まえがき	1
2. 解析モデル	2
3. 基礎式	5
3.1 出力分布	5
3.2 冷却材流量調節	8
3.3 冷却材圧力損失	9
3.4 冷却材流動様式の判定	12
3.5 熱伝達率	12
3.6 冷却材温度及び燃料体温度分布	14
3.7 熱膨張及び高速中性子照射による燃料体の変形量	20
3.8 接触熱伝達計算	23
3.9 ホットスポット温度計算	24
3.10 燃料核移動距離計算	26
3.11 Pd 腐蝕量計算	26
3.12 燃料温度、燃料核移動距離及びPdによるSiC層腐蝕量の炉心内体積割合の計算	27
4. プログラムの構成	29
5. 使用法	39
5.1 入力	39
5.2 出力	39
6. 計算例	47
6.1 炉心構成と計算モデル	47
6.2 計算条件	47
6.3 計算結果	47
7. 結論	56
謝辞	57
参考文献	58
付録	59
付録1 入力リスト	59
付録2 出力リスト	60
付録3 使用ファイル	71
付録4 ヘリウムの物性値	72

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Analytical Model .....	2
3. Basic Equations .....	5
3.1 Power distribution .....	5
3.2 Coolant flow control .....	8
3.3 Coolant pressure drop .....	9
3.4 Evaluation of flow regime .....	12
3.5 Coefficient of heat transfer .....	12
3.6 Coolant and fuel temperature distribution .....	14
3.7 Dimensional change of fuel rod induced by thermal expansion and fast neutron irradiation .....	20
3.8 Contact resistance between sleeve and fuel .....	23
3.9 Hot spot temperature .....	24
3.10 Kernel migration of coated particle fuel .....	26
3.11 SiC corrosion induced by paradium .....	26
3.12 Volumetric fraction of fuel temperature, kernel migration length and SiC corrosion thickness .....	27
4. Program Structure .....	29
5. Manual .....	39
5.1 Input .....	39
5.2 Output .....	39
6. Examples .....	47
6.1 Core structure and analytical model .....	47
6.2 Calculation condition .....	47
6.3 Calculation results .....	47
7. Conclusion .....	56
Acknowledgement .....	57
References .....	58
Appendixes .....	59
A-1 Input list .....	59
A-2 Output list .....	60
A-3 Disk file .....	71
A-4 Material properties of helium gas .....	72

## 1. ま え が き

現在日本原子力研究所が研究開発を進めている高温工学試験研究炉 (HHTR = High Temperature Engineering Test Reactor) は、原子炉出口冷却材ガス温度 950°C を目標している。このような高温ガス炉では、一般に炉心構成物の温度範囲が広く、かつ、燃焼、制御棒操作、流量調節などによってもその温度分布が変るため、炉心反応度に及ぼす温度の影響が大きく核特性と熱特との相関は他のガス炉には見られない程大きい。さらに、燃料温度や熱流束、レイノルズ数などの熱流動特性上の制約条件も厳しいため、核特性と熱流動特性相互のフィードバックを考慮する必要がある。そのため、米国 ORNL で開発された中性子拡散コード CITATION<sup>(1)</sup>コードと著者らが開発した高温ガス炉用熱流動計算コード DEGA<sup>(2)</sup>を基に、3次元核熱結合炉心燃焼特性解析コード CITDEGA<sup>(3)</sup>の開発を進めてきた。一方、これとは別に熱設計手法の開発や設計計算のために独立した炉心総合熱流動計算コード "TEMPEST" の開発が平行して進められてきた。両コードは開発の途中で得られた知見をお互いに反映し合い、補完し合っている。

TEMPEST は、炉心 3次元の出力分布及び高速中性子束分布を基にして冷却材の流量配分を定め、冷却材温度、圧力損失、並びに燃料や黒鉛の温度等の炉心熱流動特性を求めると共に、被覆燃料粒子の健全性を評価する上で重要な指標である燃料核の移動距離及び SiC 被覆層のパラジウムによる腐蝕量を算出する。

TEMPEST の解析モデルは、炉心を多数の並列チャンネルで表わし更に、それぞれを流量調節領域に区分して取り扱うことができる。本コードは、各チャンネルにおいて、熱膨張や高速中性子照射による寸法変化を考慮した半径方向 1次元の熱伝導方程式を解いて温度分布を求める。このとき、炉心出力分布として、径方向メッシュ分割が正三角形をした座標系 (3次元三角形配列) による拡散コード CITATION の計算結果を用いる。そして、異物質間での出力のスパイクを考慮するために、燃料濃縮度などの物質組成が異なる炉心軸方向の境界面では、両方の物質から外挿した 2つの出力値に対して温度を計算する。一方、温度分布が確定したら燃料コンパクトを新たに細分化し、その点における温度を内挿により求めた後被覆燃料粒子の核移動距離及び SiC 層のパラジウムによる腐蝕量を計算する。そしてこれを基に温度、核移動距離及び SiC 層腐蝕量の体積割合の分布を求める。

以下、第 2 章では解析モデルについて、第 3 章では使用する基礎式について、第 4 章ではプログラムの構成について、第 5 章では使用法について、第 6 章では計算例についてそれぞれ述べる。



## 2. 解析モデル

六角形断面を持つ黒鉛ブロックに燃料を装荷した、いわゆるブロック型燃料を用いた炉心を主な解析対象に考える。この場合、核設計での径方向計算メッシュとしては、正三角形メッシュを単位とする方が炉心出力分布計算のための物質境界を良く表わすことができるので便利である。このため、本計算コードの入力データである炉心出力分布としては、3次元三角形配列によるメッシュ分割に対する出力分布を前提とする。具体的には、上記メッシュによる核設計コード CITATION の計算結果を、磁気ファイルを介して使用する。解析モデルの例として、HTTR の総合調整設計初期段階において検討された炉心 (Fig. 2.1) の場合について Fig. 2.2 に示す。

一般に、燃料温度の上昇を抑えて原子炉出口冷却材温度の高温化を達成するためには、発熱量に応じて冷却材流量を設定するなどのいわゆる、炉心冷却材流量調節を行う必要がある。そのため、解析モデルでは六角形燃料ブロックの1辺を底辺とする正三角形メッシュを単位として、炉心を流量調節領域に区分する。そして、流量調節領域毎の温度や出力ピーキング係数を指標にして、冷却材流量を配分する。

本コードの対象とする計算チャンネルは、以下の燃料体に対応して定められ、Fig. 2.3 に示す。

- ① 中実型燃料 (外面冷却)
- ② 中空型燃料 ( " )
- ③ 円環型燃料 (内外面冷却)
- ④ セミピン型燃料 (内面冷却)
- ⑤ マルチホール型燃料 (ブロック冷却型)

取り扱う流量調節領域の総数は最大19、また、流量調節領域内の計算チャンネルの数は最大100である。

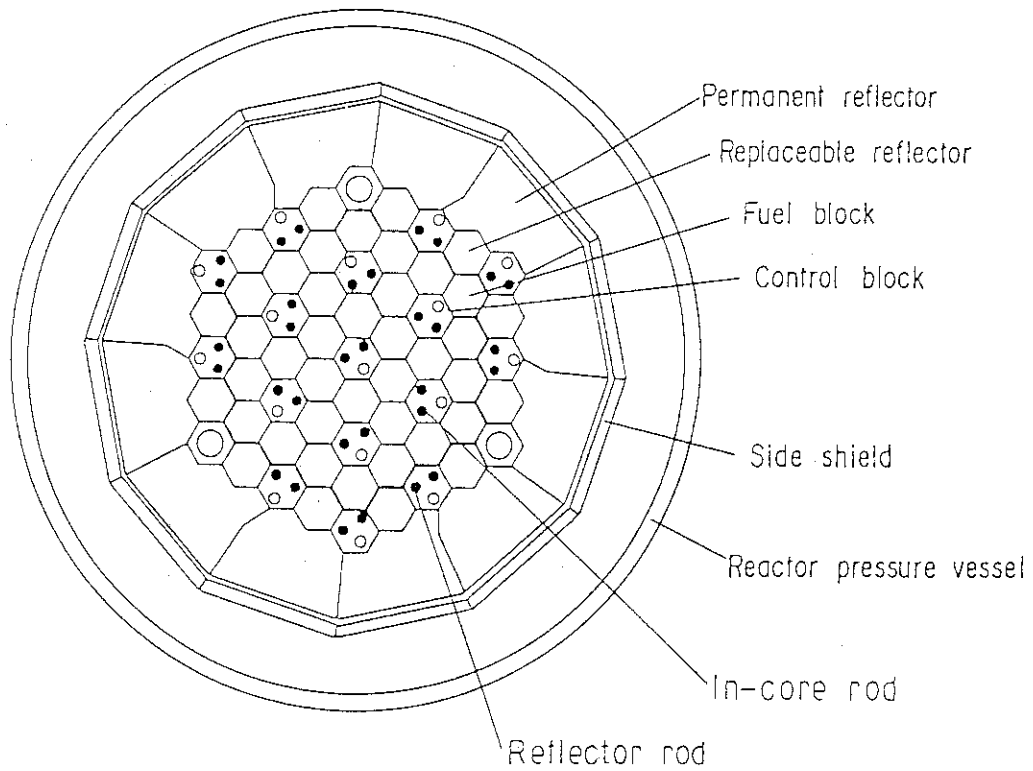


Fig. 2.1 Cross section of reactor core

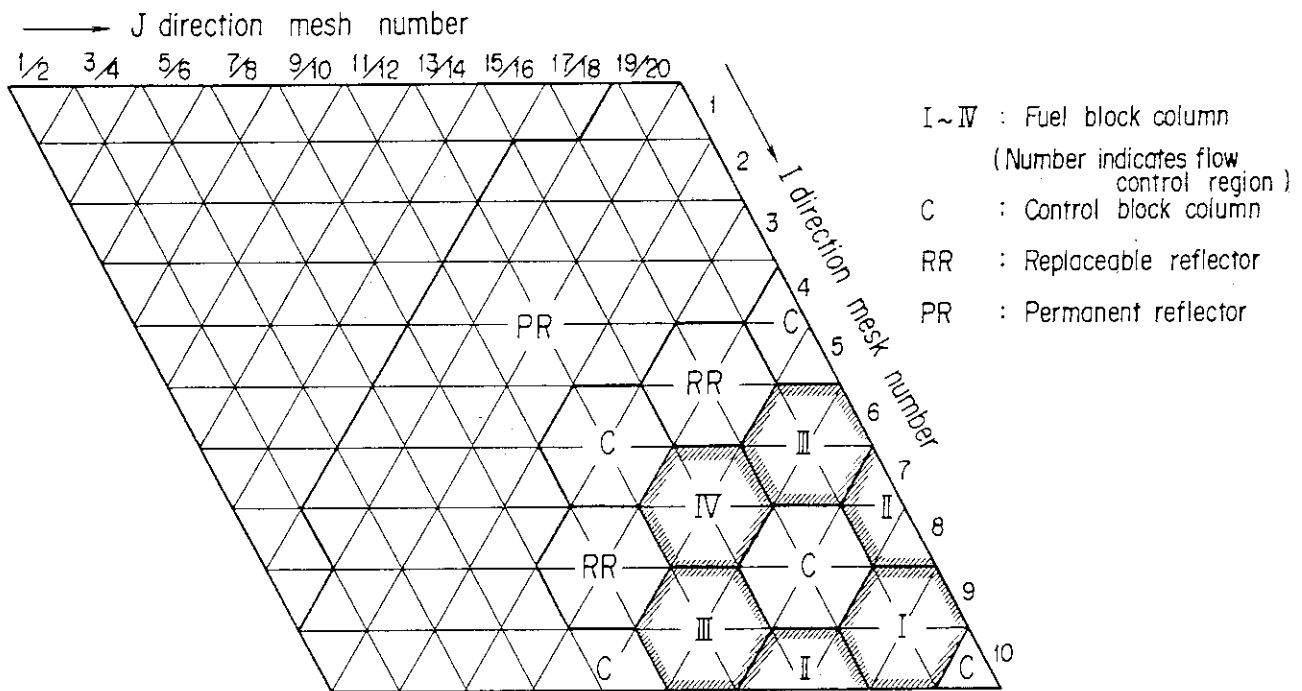


Fig. 2.2 Example of analytical model of TEMPEST code for reactor core

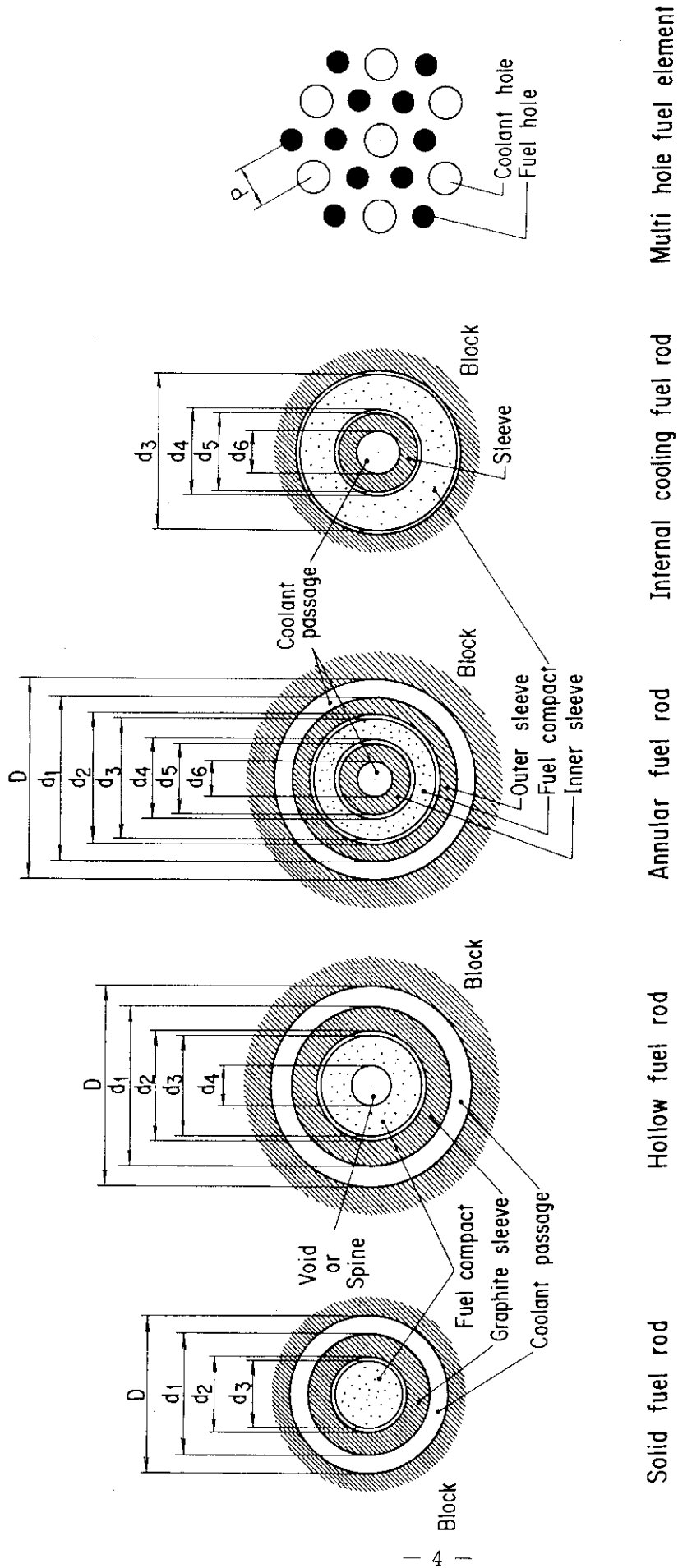


Fig. 2.3 Fuel channel geometry used in TEMPEST code

### 3. 基礎式

#### 3.1 出力分布

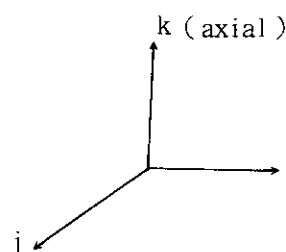
炉心3次元の核設計計算 (CITATIONコードによる計算)により得られた炉心3次元の出力分布,  $q_{ijk}$  を用いて, 以下に述べる無次元の熱特性パラメータを計算し, また, 出力分布や中性子束分布の内外挿を行う。

##### 3.1.1 熱特性パラメータの計算

###### (1) 軸方向積分出力, $P_{ij}$

$$P_{ij} = Q_{ij} / N_{fuel, ij} \quad (3.1.1)$$

$$Q_{ij} = S_{ij} \sum_k q_{ijk} \times \ell_{ijk} \quad (3.1.2)$$



ここで, 添字  $i, j$  は径方向メッシュ番号,  $k$  は軸方向メッシュ番号を示し,  $S$  は径方向三角形メッシュの面積,  $\ell$  は軸方向メッシュ長,  $N_{fuel, ij}$  は三角形メッシュ当りの燃料チャンネル数である。従って,  $ij$  は計算チャンネルと1義的に対応し, これと等価な  $N_{fuel, ij}$  本の燃料チャンネルを代表する。

###### (2) 領域毎出力ピーキング係数, $PF1(M)$

$$PF1(M) = \bar{P}_{orifice}(M) / \bar{P}_{core} \quad (3.1.3)$$

$$\bar{P}_{orifice}(M) = \sum_{ij \in orifice M} Q_{ij} / \sum_{ij \in orifice M} N_{fuel, ij} \quad (3.1.4)$$

$$\bar{P}_{core} = \sum_{ij} Q_{ij} / \sum_{ij} N_{fuel, ij} \quad (3.1.5)$$

###### (3) 領域内出力ピーキング係数, $PF2(M)$

$$PF2(M) = P_{ij \in orifice M}^{max} / \bar{P}_{orifice(M)} \quad (3.1.6)$$

###### (4) 軸方向出力ピーキング係数 $PFA(ij)$

$$PFA(ij) = \frac{(q_{ijk})_{eij}^{max} \times S_{ij} / N_{fuel, ij}}{P_{ij} / L_{ij}} \quad (3.1.7)$$

ここで,  $L_{ij}$  は炉心有効発熱長である。

###### (5) 炉心最大出力ピーキング係数, $PF$

$$PF = PF1 \times PF2 \times PFA \quad (3.1.8)$$

### 3.1.2 軸方向出力分布の内外挿

炉心出力分布及び中性子束分布は解析モデルで示したメッシュ体積の中心に位置している。隣接するメッシュの物質組成が異なる場合、余剰黒鉛などによる出力スパイクが生じていることも考えられるので、メッシュ境界の値をFig. 3.1のように1次式で両方の物質側から外挿して求める。ただし、同一物質内の核計算出力点が1点しか無い場合には、その値をその物質側の外挿値としている。

### 3.1.3 炉心中性子束分布の内外挿

炉心出力分布と同様に1次式で内外挿を行うが、炉心出力分布の場合と違ってFig. 3.2に示すように物質当りのメッシュポイント数とは無関係に一次式で内外挿する。また、炉心出力分布の点数と対応をとるために、物質組成が異なるメッシュ境界では同じ点を重複して定義する。

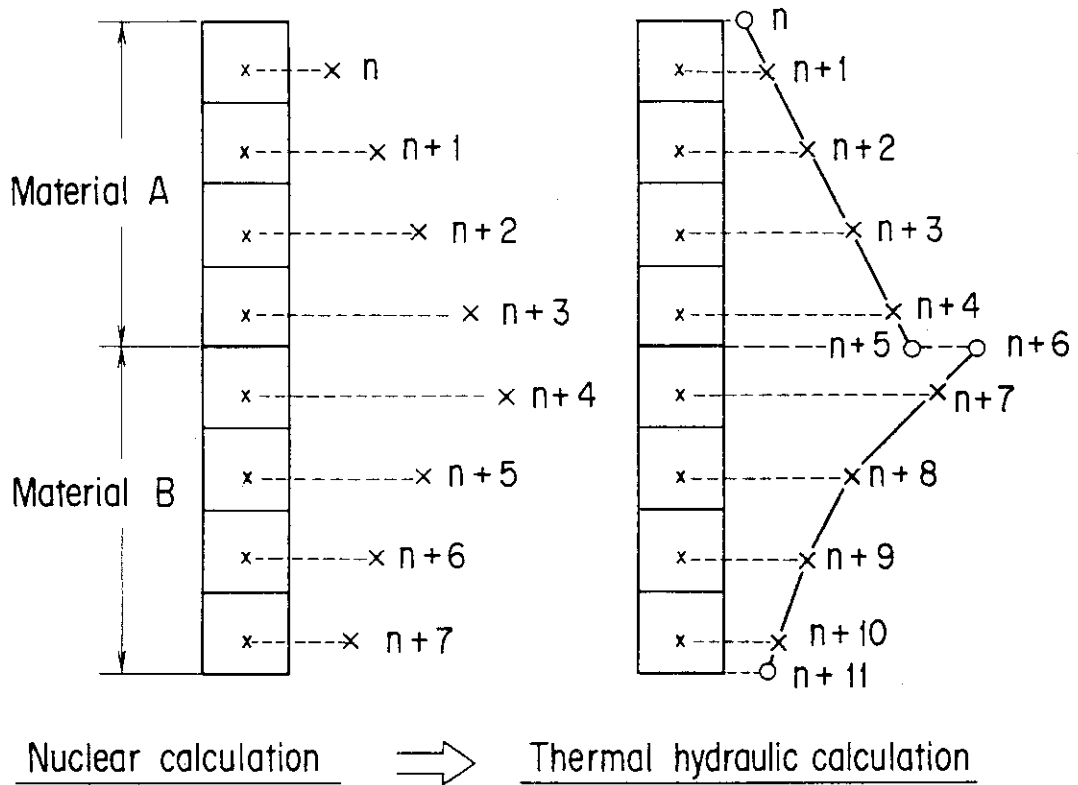


Fig. 3.1 Addition of mesh point of power distribution used for thermal hydraulic calculation

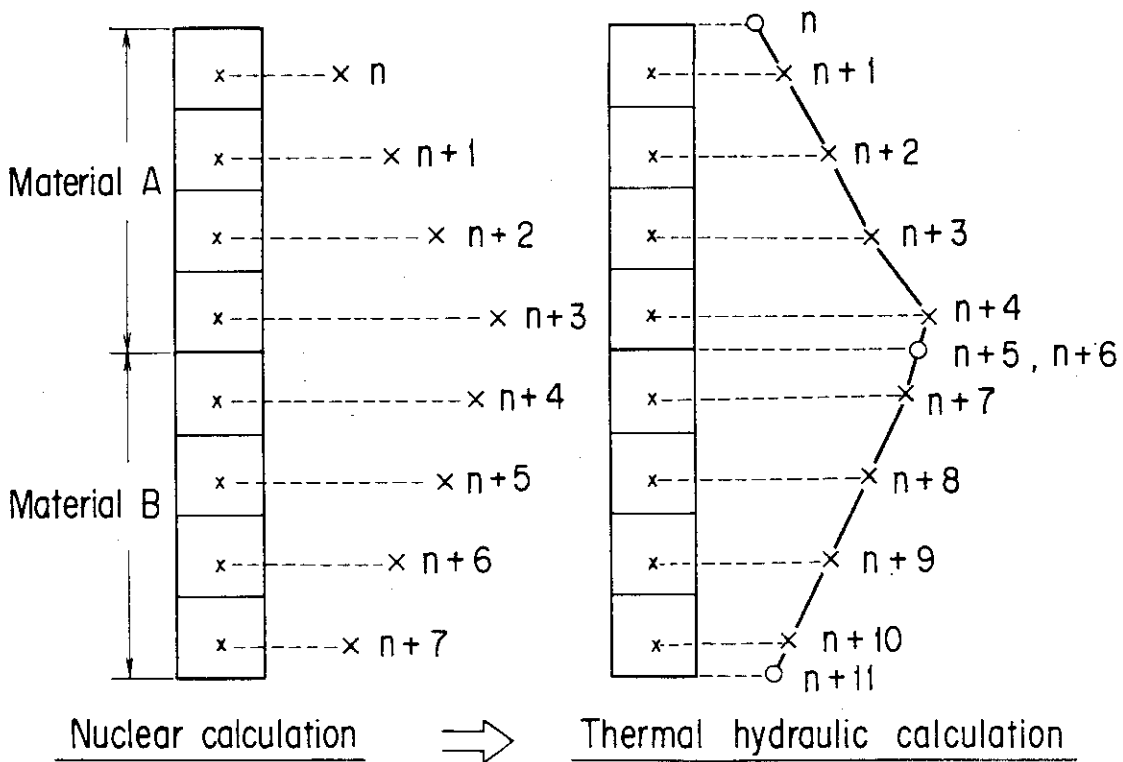


Fig. 3.2 Addition of mesh point of fast neutron flux distribution used for thermal hydraulic calculation

### 3.2 冷却材流量調節

核設計計算によって得られた炉心出力分布をもつ炉心に対して冷却材の流量調節を行って、温度分布やその他の熱特性値を計算する。流量調節の方式としては以下の5方式を考え、各方式が計算できるようにしてある。

- 1) 全チャンネル一定流量調節方式
- 2) 領域出口冷却材温度一定方式
- 3) 領域最高燃料温度一定方式
- 4) 最小限界熱流束比一定方式
- 5) 最小レイノルズ数一定方式

以下に、これらの流量調節方式の計算方法について述べる。

- 1) 全チャンネル一定流量調節方式

仮想的に全ての冷却チャンネルに等しく冷却材が流れる場合であり、流量調節領域  $i$  の冷却材流量 ( $W(i)$ ) は次式で与えられる。

$$W(i) = N_{\text{chan}}(i) \times \frac{W_T}{N_{\text{GES}}} \quad (3.2.1)$$

ここで、 $W(i)$  : 領域  $i$  の流量

$W_T$  : 炉心全流量

$N_{\text{chan}}(i)$  : 領域  $i$  のチャンネル数

$N_{\text{GES}}$  : 炉心全チャンネル数

- 2) 領域出口冷却材温度一定方式

炉心出口に於いて、各流量調節領域出口の冷却材温度が等しくなるように冷却材流量を配分する方式である。領域  $i$  の冷却材流量 ( $W(i)$ ) は次式で与えられる。

$$W(i) = N_{\text{chan}}(i) \times \frac{W_T}{N_{\text{GES}}} P_1(i) \quad (3.2.2)$$

ここで、 $P_1(i)$  は領域  $i$  の出力ピーキング係数であり、(3.1.3) 式の  $PF1(M)$  と同じものである。他は (3.2.1) 式と同じである。

- 3) 領域内燃料最高温度一定方式

各領域における燃料最高温度が全て等しくなるように流量配分する方式である。領域内の各チャンネル間での流動抵抗の差に基づく流量の再配分を考慮しない場合、領域  $i$  の冷却材流量  $W(i)$  の予想値は次式で与えられる。

$$W(i) = \frac{W_T}{\sum_j^{NGR} W_{\text{crit}}(j) N_{\text{chan}}(j)} W_{\text{crit}}(i) \cdot N_{\text{chan}}(i) \quad (3.2.3)$$

ここで、 $W_{\text{crit}}(i)$  は目安とした燃料最高温度とするのに必要なチャンネルの冷却材流量 (限界流量と呼ぶ) のうち、領域  $i$  で最大のものである。限界流量は別途チャンネル毎に繰り返し計算

によって定められる。(3.2.3)式で設定した流量を用いて燃料最高温度を求め、各領域とも同じになるまで繰り返し計算を行う。

#### 4) 最小限界熱流束比一定流量調節方式

一般にガスは加熱されることによって粘性が増し、入口のレイノルズ数が大きくない場合、流れは乱流から層流に遷移する。しかし、原子力ロケットなどのように強く加熱された場合、見掛けのレイノルズ数が乱流域にあっても熱伝達率などの流れの特性が、層流の特性を示すようになることがあり、逆遷移あるいは層流化現象と呼ばれている。層流化が発生すると燃料温度が上昇するので、発生の有無を判定あるいは余裕を評価する必要がある。層流化の原因としては、この他にも流路の縮小などによるガス流れの加速などが知られており、それぞれの場合について判定式が提案されているが、ここでは、次式で示す加熱の強さの度合いを示す無次元の熱流束パラメータに着目する。

$$q^+ = \frac{q'' w}{C_p \cdot G \cdot T} \quad (3.2.4)$$

ここで、 $q^+$ は無次元熱流束パラメータ、 $q'' w$ は加熱面の熱流束、 $C_p$ はガスの比熱、 $G$ は質量流量、 $T$ はガスの絶対温度である。詳しくは3.4節で述べるように、 $q^+$ の値が或る値を越えたとき層流化が発生すると考え、この値を限界熱流束( $q^+_{crit}$ )と呼ぶ。そして、 $q^+_{crit}$ と $q^+$ の比を限界熱流束比と呼び、この値が大きいほど層流化発生に対する余裕が大きい。従って、チャンネルの軸方向での最小値を最小限界熱流束比とし、領域内での最小値がいずれの領域においても等しくなるように流量を配分する。繰り返し計算の手順は、3)の燃料最高温度一定方式と同様であるが、領域流量 $W(i)$ は次式で補正する。

$$W^{(K+1)}(i) = \left[ \frac{QR_{min}}{QR^{(K)}(i)} \right]^{1/2.465} \cdot W^{(K)}(i) \quad (3.2.5)$$

ここで、 $QR(i)$ 及び $QR_{min}$ はそれぞれ限界熱流束比の領域内及び炉心内の最小値、 $K$ 及び $K+1$ は繰り返し計算の回数である。

#### 5) 最小レイノルズ数一定流量調節方式

低レイノルズ数領域での流動不安定発生の恐れへの対処の1つとして、極端に低いレイノルズ数のチャンネルを生じさせないようにするため、各領域の最小レイノルズ数が等しくなるように流量を配分する。計算手順は3)と同様である。

### 3.3 冷却材圧力損失

流れ方向(軸方向)の冷却材圧力損失 $\Delta P$ は、流れの1次元の運動方程式により求めた次式により求める。

$$\Delta P = \frac{\lambda}{2g\gamma} \cdot \frac{L}{D_e} \cdot \left(\frac{W}{A}\right)^2 + \frac{1}{g} \left(\frac{W}{A}\right)^2 \left(\frac{1}{\gamma_{out}} - \frac{1}{\gamma_{in}}\right) \quad (3.3.1)$$



ここで、 $\lambda$ は摩擦損失係数、 $g$ は重力加速度、 $\gamma$ は軸方向計算メッシュにおける冷却材平均比重量、 $L$ 、 $D_e$ 、 $A$ は、それぞれ流路長、等価直径、流路断面積、 $W$ は冷却材流量、 $\gamma_{out}$ 、 $\gamma_{in}$ はそれぞれ、メッシュ出口及び入口における冷却材比重量である。なお、上式の第1項は摩擦損失、第2項は加熱による加速損失であり、水頭差は無視している。

摩擦損失係数は、流路の形状及び流れの状態に応じて以下の式で計算する。なお、HTTRの模擬燃料棒を用いた伝熱流動実験及び HENDEL T<sub>1</sub>の試験結果によれば、層流域では理論値に良く一致すること、遷移域の値は乱流域の特性値を外挿した値であること、乱流域の値は計算値より大きいことが示されており、圧力損失を大きく見積る側であり、余裕をもって設計評価に用いることができる。

### 3.3.1 管内流に対する摩擦損失係数

セミピン型燃料、マルチホール型燃料の冷却材流路及び円環型燃料内側流路の冷却材圧力損失計算で用いる摩擦損失係数は、流路壁の粗さや流れの状態に応じて、以下のように計算する。

(1) 層流域、( $Re \leq Re_L$ )

$$\lambda = 64 / Re \quad (3.3.2)$$

ここで、 $Re$ 及び $Re_L$ はレイノルズ数である。 $Re_L$ は、次の項目(3)で述べる乱流域の摩擦損失係数評価式によるレイノルズ数4000のときの $\lambda$ と、(3.3.2)式で計算される $\lambda$ とが等しくなるときのレイノルズ数である。

(2) 遷移域、( $Re_L < Re < 4000$ )

$$\lambda = \lambda_{4000} \quad (3.3.3)$$

ここで、 $\lambda_{4000}$ は、次に述べる乱流域の摩擦損失係数評価式を用いて計算した $Re=4000$ のときの値である。

(3) 乱流域、( $Re \geq 4000$ )

乱流域の摩擦損失係数は、流路の粗さを考慮して以下に示す Cole-Brook<sup>(4)</sup>の式を用いて計算する。

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \log \left( \frac{e}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.3.4)$$

ここで、

- $e$  : 等価粗さ ( $e = \epsilon / D_e$ )
- $\epsilon$  : 壁面粗さ (不規則突起の平均値) (cm)
- $D_e$  : 等価直径 (cm)

### 3.3.2 環状流路の流れに対する摩擦損失係数

中空型燃料及び円環型燃料の外周冷却流路は、燃料棒とブロックとの間に形成される環状流路である。環状流路の摩擦損失係数は、管内流の場合におけるパラメータに加えて流路の内外比( $\alpha$ )

も考慮して計算する。

(1) 層流域, ( $Re \leq Re_L$ )

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \frac{(1-\alpha)^2}{(1+\alpha^2) - \frac{(1-\alpha^2)}{\ln(1/\alpha)}} \quad (3.3.5)$$

ここで,  $\alpha$  : 流路の内外径比 ( $\alpha = d_i / d_o$ )

$d_i$  : 流路の内径

$d_o$  : " の外径

$Re_L$  は, 遷移域との境界レイノルズ数であり, 次の項目(3)で述べる乱流域の摩擦損失係数評価式によるレイノルズ数4000のときの $\lambda$ と, (3.3.5)式で計算される $\lambda$ とが等しくなるときのレイノルズ数である。

(2) 遷移域, ( $Re_L < Re < 4000$ )

$$\lambda = \lambda_{4000} \quad (3.3.6)$$

ここで,  $\lambda_{4000}$  は次に述べる乱流域の摩擦損失係数評価式を用いて計算した  $Re=4000$  のときの値である。

(3) 乱流域, ( $Re \geq 4000$ )

乱流域の摩擦損失係数は, 流路の内外径比と粗さとの影響を相乗的に考慮して以下のように計算する。

$$\begin{aligned} \lambda &= F(Re, \alpha, e) \\ &= f_{geom} \cdot \lambda_e(Re, e) \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

ここで,  $Re$ ,  $\alpha$ ,  $e$  はそれぞれ, レイノルズ数, 流路の内外径比及び相対粗さである。また,  $\lambda_e$  は流路の粗さによる効果を考慮した(3.3.3)式のCole-brookの式から求まる摩擦損失係数の値である。

一方,  $f_{geom}$  は環状流路の形状効果を考慮するためにMaubach<sup>(5)</sup>の手法を用いて次式で計算したものである。

$$f_{geom} = \lambda_p(Re, \alpha) / \lambda_p(Re, 0.0) \quad (3.3.8)$$

ここで,  $\lambda_p(Re, \alpha)$ 及び $\lambda_p(Re, 0.0)$ はMaubachによる次式を用いて計算される, 内外径比がそれぞれ,  $\alpha$ 及び, 零のときの摩擦損失係数である。

$$1/\sqrt{\lambda_p} = 2.035 \log(Re\sqrt{\lambda_p}) + \frac{5.5 - 1.25 \log 8 - GG}{\sqrt{8}} \quad (3.3.9)$$

ここで,  $GG$ は次式で計算される。

$$GG = \frac{3.966 + 1.25 \times \frac{\alpha + \alpha^{0.343}}{1 + \alpha^{0.343}}}{1 + \frac{\alpha + \alpha^{0.343}}{1 + \alpha^{0.343}}} + 2.5 \log \left\{ 2 \left( 1 + \frac{\alpha + \alpha^{0.343}}{1 + \alpha^{0.343}} \right) \right\} \quad (3.3.10)$$

### 3.4 冷却材流動様式の判定

ヘリウムガスが強く加熱された場合、見掛けのRe数は乱流域の値であっても熱伝達率などの流れの振る舞いが層流のものとなることが知られていて、「層流化現象」或いは「逆遷移」と呼ばれている。炉心設計上、熱伝達率が本来の値より低下することは、燃料の健全性確保の観点から重大な支障となる。そこで、本コードでは、層流化現象発生の有無の判定に用いられるパラメータとして提案されている以下のパラメータを算出する。

加速度パラメータ, K

$$K = \frac{\nu}{u} \cdot \frac{du}{dx} \quad (3.4.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} = \frac{4}{Re} q^+ \quad (\text{管内流}) \end{array} \right. \quad (3.4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} = \frac{4}{Re} \cdot q^+ \cdot \frac{D_i}{D_o + D_i} \quad (\text{環状流路, 内面加熱}) \end{array} \right. \quad (3.4.3)$$

ここで、 $\nu$  : 動粘性係数  
 $u$  : 平均流速  
 $x$  : 流れ方向の長さ  
 $D_i, D_o$  : 環状流路の内径, 外径  
 $Re$  : レイノルズ数

$q^+$  は次に述べる加熱の強さの度合いを表わす熱流束パラメータである。

熱流束パラメータ,  $q^+$

$$q^+ = \frac{q''}{G \cdot C_p \cdot T}$$

ここで、 $q''$  : 加熱面熱流束 (cal/cm $\cdot$ s)  
 $G$  : 質量流束 (g/s cm $^2$ )  
 $C_p$  : 比熱 (cal/g $^{\circ}$ C)  
 $T$  : 流体温度 (K)

なお、Coonら<sup>(6)</sup>によれば、 $K > 1.5 \times 10^{-6}$ の条件で層流化が起りうるとしている。

### 3.5 熱伝達率

燃料チャンネルの冷却材熱伝達率、 $h$ は次式で計算する。

$$h = \frac{k}{De} Nu \quad (3.5.1)$$

ここで、 $k$ は冷却材の熱伝導率、 $De$ は燃料冷却チャンネルの等価直径である。ヌッセルト数  $Nu$  はチャンネルの流路形状及び流れの状態に応じて、以下の式で計算する。

### 3.5.1 管内流路におけるヌッセルト数

セミピン型燃料、マルチホール型燃料の冷却材流路及び円環型燃料の内側流路の熱伝達計算で用いる。

(1) 層流域, ( $Re \leq Re_L$ )

$$Nu = 4.36 \quad (3.5.2)$$

ここで、 $Re_L$ は、次の項目で述べる遷移域 ( $Re_L < Re < 5000$ ) に於けるヌッセルト数計算式による値が 4.36 となるときのレイノルズ数である。

(2) 遷移域, ( $Re_L < Re < 5000$ )

Hausen<sup>(7)</sup>の式を、乱流域 ( $Re \geq 5,000$ ) に適用されるヌッセルト数計算式と連続になるように下式で修正して用いる。

$$Nu = \frac{Nu_{T, 5000}}{Nu_{H, 5000}} \cdot Nu_H(Re) \cdot \left(\frac{T_B}{T_w}\right)^m \quad (3.5.3)$$

ここで、 $Nu_H(Re)$ はHausenの式、 $Nu_{H, 5000}$ は $Re=5000$ のときのHausenの式で求めた値、 $T_B$ 、 $T_w$ はそれぞれ、流体と伝熱面の絶対温度、 $m$ は温度効果補正係数である。また、 $Nu_{T, 5000}$ は次の項目(3)で述べる乱流域のヌッセルト数計算式で求めたレイノルズ数が5000のときの値である。Hausenの式を以下に示す。

$$Nu_H = 0.116 (Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3} \quad (3.5.4)$$

ここで、 $Pr$ はプラントル数である。

(3) 乱流域, ( $Re > 5000$ )

乱流域のヌッセルト数は、次式で計算する。

$$\begin{aligned} Nu &= Nu_T(Re, Pr) \cdot \left(\frac{T_B}{T_w}\right)^{0.5} \\ &= 0.02 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{T_B}{T_w}\right)^{0.5} \end{aligned} \quad (3.5.5)$$

係数 0.02 は、1090°C ~ 1370°C の高温ヘリウムを用いた Coates<sup>(8)</sup>らの試験結果に基づいて定めた。又、伝熱壁面とヘリウムガスとの温度差に帰因する熱伝達率の低下を考慮する温度効果補正係数の値 0.5 は、Petukhov<sup>(9)</sup>らの試験結果に基づいて定めた。

### 3.5.2 環状流路におけるヌッセルト数

中空型燃料及び円環型燃料の外周冷却流路の熱伝達計算で用いる。

#### (1) 層流域, ( $Re \leq Re_L$ )

環状流路の内面加熱の場合について, Dwyer<sup>(10)</sup> が求めた理論値を基に, 流路の内外径比 $\alpha$ の3次式でフィッティングした次式を用いて計算する。

$$Nu = -4.827 \alpha^3 + 12.75 \alpha^2 - 12.25 \alpha + 9.71 \quad (3.5.6)$$

#### (2) 遷移域, ( $Re_L < Re < 5,000$ )

管内流に対するHausenの式を, 流路の内外径比を考慮して乱流域に適用されるヌッセルト数計算式と $Re=5000$ で連続となるように下式で修正して用いる。

$$Nu = \frac{Nu_{T, 5000}}{Nu_{H, 5000}} \cdot Nu_H(Re) \cdot \left(\frac{T_B}{T_w}\right)^{0.5} \quad (3.5.7)$$

ここで,  $Nu_H(Re)$ は(3.5.4)式で示されるHausenの式,  $Nu_{H, 5000}$ は同式で求めた $Re=5000$ のときのヌッセルト数,  $Nu_{T, 5000}$ は次の項目(3)で述べる乱流域のヌッセルト数計算式で求めた $Re=5000$ のときの値である。

#### (3) 乱流域, ( $Re \geq 5000$ )

乱流域のヌッセルト数は, Dall Donne等<sup>(11)</sup>による式を用いる。但し, 温度効果の補正は冷却材バルク温度と壁温との比で行い, 指数もPotukhovら<sup>(9)</sup>の実験データを参考にして0.5とした。

$$Nu = 0.018 (1/\alpha)^{0.2} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{T_B}{T_w}\right)^{0.5} \quad (3.5.8)$$

## 3.6 冷却材温度及び燃料体温度分布

### 3.6.1 冷却材温度

冷却材の軸方向エンタルピー分布,  $I(z)$ を次式で求める。

$$I(z) = I_e + \frac{1}{W} \int_{-\frac{H_c}{2}}^z q_L(z) dz - \frac{10^{-7}}{2J} (u^2 - u_e^2) \quad (3.6.1)$$

$$= I_e + \frac{1}{W} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{q_L(k) + q_L(k-1)}{2} \cdot \{z(k) - z(k-1)\} - \frac{10^{-7}}{2J} (u^2 - u_e^2) \right] \quad (3.6.2)$$

ここで,

- $z$  : 軸方向座標 (cm)  
 $I_e$  : 炉心入口エンタルピー (cal/g)

W	： 冷却材流量	(g/s)
Hc	： 炉心高さ	(cm)
q <sub>L</sub>	： 燃料チャンネル線出力密度	(cal/cm・s)
u	： 冷却材平均流速	(cm/s)
u <sub>e</sub>	： " (炉心入口)	( " )
J	： 熱の仕事当量	(J/cal)

冷却材の温度分布は、エンタルピー分布 I(z) と温度、圧力の関数であるエンタルピーとから計算される。

$$I = I(P, \theta) \quad (3.6.3)$$

ここで、P： 冷却材圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)

θ： " 温度 (°C)

このとき、圧力 P は (3.3.1) 式の冷却材圧力損失から計算される圧力を用いる。従って、冷却材の温度、圧力は、(3.6.1) 式、(3.6.2) 式及び (3.6.3) 式から繰り返し計算で同時に計算される。

### 3.6.2 燃料体温度分布

燃料体の温度分布は、軸方向の熱の流れが少ないことと、燃料最高温度を高めに評価し安全側であることから径方向 1 次元の定常熱伝導方程式を解いて求める。それぞれの燃料体型式に対応した燃料体温度分布計算式を以下に示す。

#### (1) 中実型及び中空型燃料棒 (Fig. 2.3 参照)

冷却材と燃料棒との熱伝達には、強制対流熱伝達及び黒鉛ブロックを媒介とする熱放射による熱伝達を考慮する。黒鉛ブロックの冷却孔壁で断熱という境界条件のもとに、燃料棒の外面温度 T<sub>1</sub>(z)、黒鉛ブロック冷却孔壁温度 T<sub>B</sub>(z) 及び熱放射による伝熱量 q<sub>R</sub>(z) を (3.6.4) 式～(3.6.6) 式を用いて計算する。

$$T_1(z) = \frac{q_L(z) - q_R(z)}{2\pi R_1 \cdot h_w(z)} + \nu(z) \quad (3.6.4)$$

$$q_R(z) = \epsilon_{\text{eff}} \cdot \sigma \cdot \{ (T_1(z) + 273.15)^4 - (T_B(z) + 273.15)^4 \} 2\pi R_1 \quad (3.6.5)$$

$$T_B(z) = \frac{q_R(z) + \gamma q_L(z)}{2\pi R h_B(z)} + \nu(z) \quad (3.6.6)$$

ここで、q<sub>L</sub>(z)： 燃料棒線出力密度 (cal/cm・s)

γ： 黒鉛ブロック中での発熱割合 (q<sub>L</sub>に対する比)

ε<sub>eff</sub>： 総合熱放射係数

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{R_1}{R} \left( \frac{1}{\epsilon_g} - 1 \right)} \quad (3.6.7)$$

- $\epsilon_g$  : 黒鉛の熱放射率  
 $R$  : 黒鉛ブロック流路孔の半径 (cm)  
 $R_1$  : 燃料棒の外径 (cm)  
 $\nu(z)$  : 冷却材温度  
 $h_w(z)$  : 燃料棒の熱伝達率  
 $h_B(z)$  : 黒鉛ブロック流路孔の熱伝達率  
 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン常数  
 $(\sigma = 1.35437 \times 10^{-12} \text{ (cal/cm}^2 \text{ s K}^4\text{)})$

黒鉛スリーブ内面の温度  $T_2(z)$  は次式で計算される。

$$\begin{aligned}
 T_2(z) = & \frac{\alpha \cdot q_L(z)}{2\pi k_s (T_1(z), \Phi(z))} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \\
 & + \frac{\beta \cdot q_L(z)}{4\pi k_s (T_1(z), \Phi(z))} \cdot \left\{ 1 - \frac{2R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \right\} + T_1(z) \quad (3.6.8)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha$  及び  $\beta$  はそれぞれ、燃料コンパクト及び黒鉛スリーブに於ける発熱割合、 $k_s$  は黒鉛スリーブの熱伝導率 (cal/cm·s·°C) で温度 (°C) 及び高速中性子 ( $E \geq 29$  fJ) の照射依存性を考慮することができる。照射量  $\Phi(z)$  は 3.6 節に述べる熱膨張率の照射依存性評価で用いられるのと同じである。また、 $R_2$  は黒鉛スリーブの内径である。

黒鉛スリーブと燃料コンパクト間のギャップの伝熱は、ギャップに存在するヘリウムガスの熱伝導と熱放射によるとすると、燃料コンパクト外面温度  $T_3(z)$  は次式で計算される。

$$\begin{aligned}
 T_3(z) = & \frac{\alpha q_L(z)}{\frac{2\pi k_g(P_1, \nu)}{\ln \left( \frac{R_2}{R_3} \right)} + \epsilon_{\text{eff}} \cdot \sigma (T_2K + T_3K)(T_2K^2 + T_3K^2) 2\pi R_3} \\
 & + T_2(z) \quad (3.6.9)
 \end{aligned}$$

ここで、 $k_g(P_1, \nu)$  : ヘリウムの熱伝導率 (cal/cm s °C)

$P_1$  : 原子炉入口冷却材圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\nu$  : ギャップのヘリウムガス温度 (°C)

$$\left( \nu = \frac{T_2(z) + T_3(z)}{2} \right)$$

$R_3$  : 燃料コンパクト外径

$T_2K, T_3K$  : 黒鉛スリーブ内面温度及び燃料コンパクト外面の絶対温度 (K)

$\epsilon_{\text{eff}}$  は (3.6.7) 式と同じ総合熱放射係数で、(3.6.9) 式では次式で計算される値を用いる。

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{R_3}{R_2} \left( \frac{1}{\epsilon_g} - 1 \right)} \quad (3.6.10)$$

燃料コンパクトの中心（中実型燃料棒の場合）或いは内面（中空型燃料棒の場合）に燃料最高温度が生じ、次式で計算される。

中実型燃料棒の場合

$$T_F^{\max}(z) = T_4(z) = \frac{\alpha \cdot q_L(z)}{4 \pi k_c} \quad (3.6.11)$$

中空型燃料棒の場合

$$T_F^{\max}(z) = T_4(z) = \frac{\alpha \cdot q_L(z)}{4 \pi k_c} \left\{ 1 + \frac{2 R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln \left( \frac{R_4}{R_3} \right) \right\} \quad (3.6.12)$$

ここで、 $k_c$  : 燃料コンパクトの熱伝導率 (cal/cm s °C)

$R_4$  : " の内径 (cm)

(2) 円環型燃料棒 (Fig. 2.3 参照)

燃料棒の内外面で除熱されるので燃料棒線出力が内外に分配されることを除けば、燃料コンパクトの表面温度までの計算は、中実型及び中空型燃料棒の場合と同じである。従って、内外の線出力を  $q_L^{\text{out}}(z)$ 、 $q_L^{\text{in}}(z)$  とすれば、この値と温度  $T_1(z) \sim T_6(z)$  に関する以下の式 (3.6.13) 式 ~ (3.6.20) 式) を連立させて解く。

外側流路に接する黒鉛スリーブの表面温度  $T_1(z)$  は次式で計算できる。

$$T_1(z) = \frac{q_L^{\text{out}}(z) + 0.5 \beta q_L(z) - q_R^{\text{out}}(z)}{2 \pi R_1 h_w^{\text{out}}(z)} + \nu^{\text{out}}(z) \quad (3.6.13)$$

ここで、 $q_R^{\text{out}}(z)$  は (3.6.5) 式によって示される外側流路への放射伝熱量である。また、 $\nu^{\text{out}}(z)$  は外側流路の冷却材温度であり、(3.6.2) 式における  $q_L(z)$  として  $q_L^{\text{out}}(z) + (\beta/2 + \gamma) \cdot q_L(z)$  を用いて計算される。

内側流路に接する黒鉛スリーブの表面温度  $T_6(z)$  は次式で計算される。

$$T_6(z) = \frac{q_L^{\text{in}}(z) + 0.5 \beta q_L(z) - q_R^{\text{in}}(z)}{2 \pi R_6 h_w^{\text{in}}(z)} + \nu^{\text{in}}(z) \quad (3.6.14)$$

ここで、 $q_L^{\text{in}}(z)$ 、 $R_6$  及び  $h_w^{\text{in}}(z)$  は内側への線出力、内側スリーブ内径及び内側流路の熱伝達率である。また、 $q_R^{\text{in}}(z)$  は内側流路にダミーの黒鉛棒を置いた場合に黒鉛スリーブから熱放射で伝わる分の線出力である。計算は (3.6.5) 式同様の式を用いる。ただし、ダミーの黒鉛棒を入れなない場合には、(3.6.14) 式の  $q_R^{\text{in}}(z)$  は零となる。また、 $\nu^{\text{in}}(z)$  は内側流路の冷却材温度であり、(3.6.2) 式の  $q_L(z)$  として  $q_L^{\text{in}}(z) + (\beta/2) \cdot q_L(z)$  を用いて計算される。

外側流路に接する黒鉛スリーブの内面温度  $T_2(z)$  は次式で計算される。

$$T_2(z) = \frac{q_L^{\text{out}}(z)}{2 \pi k_s(T_1(z), \phi(z))} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) + T_1(z) + \frac{(\beta/2) q_L(z)}{4 \pi k_s(T_1(z), \phi(z))} \left\{ 1 - \frac{2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \right\} \quad (3.6.15)$$



内側流路に接する黒鉛スリーブの外表面温度  $T_5(z)$  は次式で計算される。

$$T_5(z) = \frac{q_L^{in}(z)}{2\pi k_s(T_6(z), \Phi(z))} \ln\left(\frac{R_5}{R_6}\right) + T_6(z) - \frac{(\beta/2) q_L(z)}{4\pi k_s(T_6(z), \Phi(z))} \left\{ 1 - \frac{2R_6^2}{R_5^2 - R_6^2} \ln\left(\frac{R_5}{R_6}\right) \right\} \quad (3.6.16)$$

ここで、 $R_5$  は内側スリーブの外径である。

燃料コンパクトの外表面温度  $T_3(z)$  及び内面温度  $T_4(z)$  は、それぞれ、以下の式で計算される。

$$T_3(z) = \frac{q_L^{out}(z)}{2\pi k_g(P_1, \nu_1) \ln\left(\frac{R_2}{R_3}\right) + \epsilon_1 \sigma (T_2K + T_3K) (T_2K^2 + T_3K^2) 2\pi R_3} + T_2(z) \quad (3.6.17)$$

$$T_4(z) = \frac{q_L^{in}(z)}{2\pi k_g(P_1, \nu_2) \ln\left(\frac{R_4}{R_5}\right) + \epsilon_2 \sigma (T_4K + T_5K) (T_4K^2 + T_5K^2) 2\pi R_4} + T_5(z) \quad (3.6.18)$$

ここで、 $\nu_1, \nu_2$  : ギャップのヘリウムガス温度

$$\nu_1 = (T_2(z) + T_3(z)) / 2$$

$$\nu_2 = (T_5(z) + T_4(z)) / 2$$

$\epsilon_1, \epsilon_2$  : 総合熱放射係数

$$\epsilon_1 = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{R_3}{R_2} \left( \frac{1}{\epsilon_g} - 1 \right)}$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{R_5}{R_4} \left( \frac{1}{\epsilon_g} - 1 \right)}$$

$T_4K, T_5K$  : 燃料コンパクト内面及び内側スリーブ外表面の絶対温度 (K)

一方、円環型燃料棒の内外流路への線出力  $q_L^{out}(z)$  及び  $q_L^{in}(z)$  と燃料コンパクト内外面の温度  $T_3(z)$  及び  $T_4(z)$  との間には、次の関係が成り立つ。

$$q_L^{in}(z) = \frac{\alpha q_L(z)}{2 \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \cdot \left\{ 1 - \frac{2R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) \right\} + \frac{2\pi k_c}{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \{ T_3(z) - T_4(z) \} \quad (3.6.19)$$

$$q_L^{out}(z) = \frac{-\alpha q_L(z)}{2 \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \left\{ 1 - \frac{2R_3^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) \right\} - \frac{2\pi k_c}{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \{ T_3(z) - T_4(z) \} \quad (3.6.20)$$

なお、円環型燃料棒における径方向最高温度  $T_F^{\max}(z)$  は次式で計算される。

$$T_F^{\max}(z) = \frac{q''(z)}{4 k_c \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \left\{ R_3^2 \ln\left(\frac{R_m}{R_4}\right) + R_4^2 \ln\left(\frac{R_3}{R_m}\right) - R_m^2 \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) \right\} \\ + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \left\{ T_3(z) \ln\left(\frac{R_m}{R_4}\right) + T_4(z) \ln\left(\frac{R_3}{R_m}\right) \right\} \quad (3.6.21)$$

$R_m$  は燃料最高温度が生じる半径で、次式で計算される。

$$R_m = \sqrt{\frac{1}{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \left\{ \frac{1}{2} (R_3^2 - R_4^2) + \frac{2 k_c}{q''(z)} (T_3(z) - T_4(z)) \right\}} \quad (3.6.22)$$

ここで、 $q''(z)$  は燃料コンパクトの平均発熱密度で、線出力  $q_L(z)$  と次の関係がある。

$$q''(z) = \frac{q_L(z)}{\pi (r_3^2 - r_4^2)} \quad (3.6.23)$$

(3) セミピン型燃料 (Fig. 2.3 参照)

Fig. 2.3 に示すような内面冷却型燃料棒であるから、燃料コンパクト表面温度の計算までは円環型燃料の内側と同様の計算となる。ただし、計算で用いる熱流束が異なるので以下に示す。

$$T_1(z) = \frac{q_L(z)}{2 \pi R_6 h_w(z)} + \nu(z) \quad (3.6.24)$$

$$T_2(z) = \frac{(1-\beta) q_L(z)}{2 \pi k_s (T_6(z), \Phi(z))} \ln\left(\frac{R_5}{R_6}\right) + T_6(z) \\ + \frac{\beta q_L(z)}{4 \pi k_s (T_6(z), \Phi(z))} \left\{ 1 - \frac{2 R_6^2}{R_5^2 - R_6^2} \ln\left(\frac{R_5}{R_6}\right) \right\} \quad (3.6.25)$$

$$T_3(z) = \frac{(1-\beta) q_L(z)}{\frac{2 \pi k_g (P_1, \nu)}{\ln\left(\frac{R_4}{R_5}\right)} + \epsilon_{\text{eff}} \sigma (T_2K + T_3K) (T_2K^2 + T_3K^2) 2 \pi R_4} \quad (3.6.26)$$

$$T_F^{\max}(z) = T_4(z) = \frac{\alpha q_L(z)}{4 \pi k_c} \left\{ -1 + \frac{2 R_3^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) \right\} \quad (3.6.27)$$

(4) マルチホール型燃料 (Fig. 2.3 参照)

Fig. 3.3 に示される等価セルで置き換えて計算する。

$$T_1(z) = \frac{n \cdot q_L(z)}{2 \pi R_6 h_w(z)} + \nu(z) \quad (3.6.28)$$

$$T_2(z) = \frac{q_L(z)}{2\pi k_s (T_1(z), \phi(z))} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) + T_1(z) \quad (3.6.29)$$

$$T_3(z) = \frac{q_L(z)}{\frac{2\pi k_g (P_1, \nu)}{\ln \left( \frac{R_2}{R_3} \right)} + \epsilon_{eff} \cdot \sigma (T_2K + T_3K) (T_2K^2 + T_3K^2) \cdot 2\pi R_3} \quad (3.6.30)$$

$$T_4(z) = \frac{q_L(z)}{4\pi k_c} \quad (3.6.31)$$

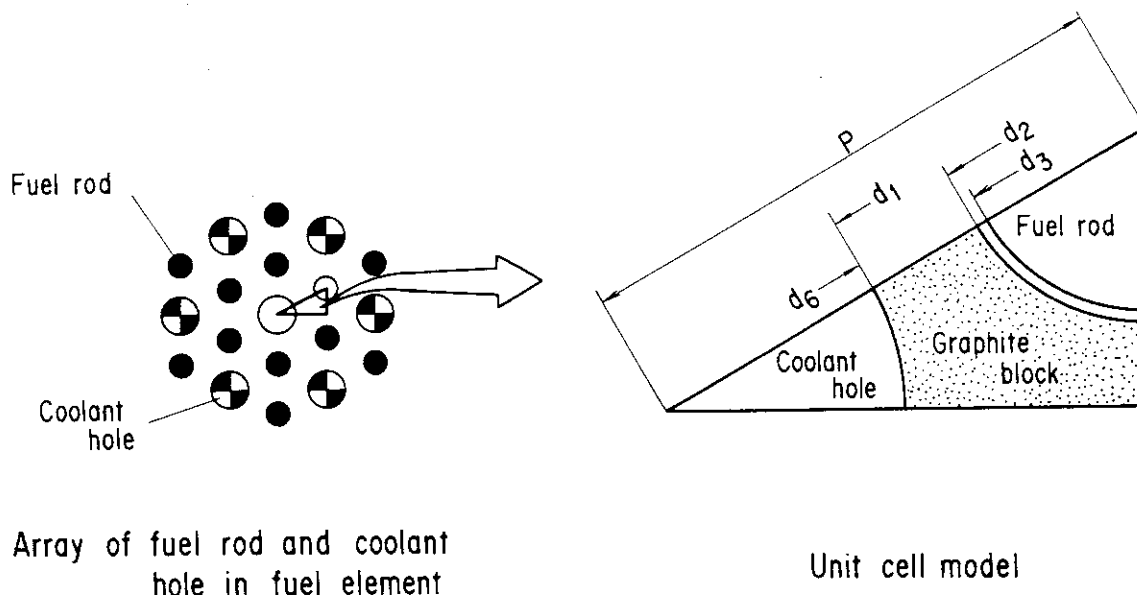


Fig. 3.3 Unit cell model for the calculation of multi hole fuel element

### 3.7 熱膨張及び高速中性子照射による燃料体の変形量

燃料コンパクトや黒鉛スリーブ（或いは黒鉛ブロック）は、その温度分布或いは高速中性子照射量の分布によって膨張或いは収縮するので、その評価は応力評価上だけではなく、燃料コンパクト / 黒鉛スリーブ（黒鉛ブロック）間のような狭い隙間の熱伝達（ギャップ熱伝達）を評価する上でも非常に重要である。以下に、熱膨張、照射変形に帰因する変形量の計算式を示す。

#### 3.7.1 熱膨張による寸法変化

熱膨張率 $\alpha$ は、温度 $T$ 及び高速中性子照射量 $(\phi)$ の関数としてサブルーチンで与えられる。

黒鉛（スリーブ又はブロック）…………… FEXPS ( $T, \phi$ )

燃料コンパクト …………… FEXPC ( $T, \phi$ )

なお、現在は、それぞれ、IG 11黒鉛、cpf 30%充填率燃料コンパクトの設計データが内蔵

されている。

以下に各燃料型式毎に寸法変化計算式を示す。

(1) 中実型燃料棒

黒鉛スリーブ

$$XXR_1 = XR_1 \{ 1 + f_s \cdot \alpha_s(T_1(z) \cdot \Phi(z)) \} \quad (3.7.1)$$

$$XXR_2 = XR_2 \{ 1 + f_s \cdot \alpha_s(T_2(z) \cdot \Phi(z)) \} \quad (3.7.2)$$

ここで,  $XXR$  : 熱膨張後の黒鉛スリーブ半径

$XR$  : 熱膨張前の " (高速中性子照射による変形含む)

添字 1 及び 2 は, それぞれ, 黒鉛スリーブ外径及び内径を示す。また,  $f_s$  は次式で計算される。

$$f_s = \frac{1 + \nu_s}{1 - \nu_s} \cdot \frac{T_2(z) - T_1(z)}{2 \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \cdot \left\{ \frac{-2(1 - \nu_s)}{1 + \nu_s} \cdot \frac{R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) + \frac{3 - \nu_s}{2(1 + \nu_s)} \right\} \quad (3.7.3)$$

ここで,  $\nu_s$  は黒鉛のポアソン比である。

燃料コンパクト

$$XXR_3 = XR_3 \{ 1 + f_F \alpha_F(T_3(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.4)$$

ここで,  $XR_3$  及び  $XXR_3$  は, それぞれ, 熱膨張前後の燃料コンパクト半径である。また,  $f_F$  は次式で計算される。

$$f_F = (1 + \nu_F) \left\{ T_3(z) + \frac{q_L(z)}{8\pi k_c} \right\} \quad (3.7.5)$$

ここで,  $\nu_F$  は燃料コンパクトのポアソン比である。

(2) 中空型燃料棒

黒鉛スリーブの熱膨張による伸びについては, 中実型燃料の (3.7.1) ~ (3.7.3) 式と同じであるので, 省略する。

燃料コンパクト

$$XXR_3 = XR_3 \{ 1 + f_F \cdot \alpha_F(T_3(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.6)$$

$$XXR_4 = XR_4 \{ 1 + f_F \cdot \alpha_F(T_4(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.7)$$

ここで,  $XR_4$  及び  $XXR_4$  は, それぞれ, 熱膨張前後の燃料コンパクト内径である。また,  $f_F$  は次式で計算される。

$$f_F = (1 + \nu) \left[ T_3(z) + \frac{q_L(z)}{8\pi k_c} \left\{ 1 - \frac{2R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} + \left( \frac{2R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} \right)^2 \ln \left( \frac{R_3}{R_4} \right) \right\} \right] \quad (3.7.8)$$

(3) 円環型燃料棒

外側黒鉛スリーブについては, (3.7.1) ~ (3.7.3) 式と全く同じであり, 内側黒鉛スリーブについては温度  $T_6(z)$ ,  $T_5(z)$  及び半径  $R_6$ ,  $R_5$  を対応すれば良いので, ここでは省略する。

燃料コンパクト

$$XXR_3 = XR_3 \{ 1 + f_F \cdot \alpha_F (T_3(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.9)$$

$$XXR_4 = XR_4 \{ 1 + f_F \cdot \alpha_F (T_4(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.10)$$

ここで、 $f_F$  は次式で計算される。

$$f_F = \frac{q_L(z)(1+\nu)}{8\pi k_c \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \left\{ \frac{R_3^2 + R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) - 1 \right\} \\ + \frac{(1+\nu)}{2 \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)} \left[ \left\{ 1 - \frac{2R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) \right\} \cdot T_4(z) - \left\{ 1 - \frac{2R_3^2}{R_3^2 - R_4^2} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right) \right\} \cdot T_3(z) \right] \quad (3.7.11)$$

(4) セミピン型燃料

黒鉛スリーブについては、円環型燃料棒の内側スリーブと同様であるので、ここでは省略する。

燃料コンパクト

$$XXR_3 = XR_3 \{ 1 + f_F \cdot \alpha_F (T_4(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.12)$$

$$XXR_4 = XR_4 \{ 1 + f_F \cdot \alpha_F (T_3(z), \Phi(z)) \} \quad (3.7.13)$$

ここで、 $f_F$  は次式で計算される。

$$f_F = (1+\nu) \left[ T_3(z) + \frac{q_L(z)}{8\pi k_c} \left\{ -1 - \frac{2R_3^2}{R_3^2 - R_4^2} + \left( \frac{2R_3^2}{R_3^2 - R_4^2} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.7.14)$$

(5) マルチホール型燃料

冷却孔については、ブロックが一様な温度であると仮定して次式で計算する。

$$XXR_6 = XR_6 (1 + \alpha_s (T_1(z), \Phi(z)) \cdot T_1(z)) \quad (3.7.15)$$

燃料挿入孔及び燃料棒については、中実型燃料棒のスリーブ及び燃料棒に対する計算式(3.7.1)式～(3.7.5)式を適用する。

3.7.2 高速中性子照射による寸法変化

寸法変化率( $\Delta L/L$ )は、温度 $T$ 及び高速中性子照射量 $\Phi$ の関数としてサブルーチンで与えられる。

黒鉛(スリーブ又はブロック) .....SFUNC( $T, \Phi$ )

燃料コンパクト .....CFUNC( $T, \Phi$ )

なお、現在はそれぞれ、IG11黒鉛、30% cpf 充填率燃料コンパクトの設計データが内蔵されている。また、温度 $T$ はその時点までずっと続いたと仮定し、照射量はその時点の高速中性子束と燃焼日数との積で計算する。

寸法変化は次式で計算する。

$$XR_i = R_i (1 + SFUNC(T, \phi)) \quad (\text{黒鉛}) \quad (3.7.16)$$

$$XR_j = R_j (1 + CFUNC(T, \phi)) \quad (\text{燃料コンパクト}) \quad (3.7.17)$$

ここで, XR : 照射後の寸法

R : 未照射時の寸法

i : i = 1, 2 又は及び 5, 6

j : j = 3 又は 3, 4

### 3.8 接触熱伝達計算

普通は, 燃料コンパクトと黒鉛スリーブとは接触することがないように初期ギャップが定められる。しかし極端に高温になった場合や, 繰り返し計算の途中などで黒鉛スリーブと燃料コンパクトが接触した場合でも計算が続行できるように, 次のように接触熱伝達計算を行う。

固体の接触面間の熱伝達は接触面の表面の状態による影響が大きく数式的に取り扱うことは非常に困難であるが, 便宜的な計算式として以下の式<sup>(12)</sup>を用いて計算する。

$$h_g = \left\{ \frac{1}{\frac{\delta_c}{k_c} + \frac{1}{h_o} + \frac{\delta_s}{k_s}} - \frac{k_g}{\delta_c + \delta_s} \right\} \cdot \frac{P_c}{H} + \frac{k_g}{\delta_c + \delta_s} \quad (3.8.1)$$

ここで,  $h_g$  : 熱コンダクタンス

$\delta$  : 粗さ

k : 熱伝導率

H : 硬さ

添字 c, s, g : コンパクト, スリーブ及び He ガスの意味

また,  $P_c$  は次式で計算する。

$$P_c = \frac{t}{r_i} \cdot \frac{1}{\frac{1 - \nu_c}{E_c} + \frac{1}{E_s} \left\{ \left( \frac{r_i^2 + r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right) + \nu_s \right\}} \quad (3.8.2)$$

ここで, t : 焼きばめしろ

$\nu$  : ポアソン比

E : ヤング率

r : 半径

添字 c, s : コンパクト及びスリーブの意味

添字 o, i : スリーブの外径, 内径の意味

### 3.9 ホットスポット温度計算

原子炉出力，冷却材流量などの設計変数の不確かさ或いは設計上重要な項目に設定した余裕による燃料最高温度への影響を評価するために，以下に述べるホットスポット温度を算出する。

ホットスポットに寄与すると考えられる不確定要因を次の2種類に分類して，それぞれ，別個に計算する。

#### (1) システムティック因子（非統計的因子）

統計的性質が少なく全炉心に作用する因子のことを言う。しかし，本来は公称値に入れるべきであるが設計の便宜上採用するものや，統計的性質が少ないが全炉心に作用して長時間続く可能性があるものも含まれる。システムティック因子の例をTable 3.1に示す。システムティック因子を考慮した温度はシステムティック温度と呼ばれ，次式で計算する。

$$T_s = T_{in} + \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{i=1}^m f_{ij} \Delta T_j \quad (3.9.1)$$

ここで， $T_s$ ：システムティック温度

$T_{in}$ ：炉心入口冷却材温度

$f_{ij}$ ：温度差 $\Delta T_j$ に作用するシステムティック因子 $i$ の係数（ $i=1\sim m$ ， $m$ はシステムティック因子の数）

$\Delta T_{ij}$ ：公称温度差

$j=1$  ……冷却材温度上昇

$j=2$  ……境界膜温度差

$j=3$  ……黒鉛スリーブ（又は黒鉛ブロック）部の温度差

$j=4$  ……黒鉛スリーブ（又は，黒鉛ブロック）と燃料コンパクト間のギャップ温度差

$j=5$  ……燃料コンパクト内温度差

#### (2) ランダム因子（統計的因子）

統計的な特性が強いもの，或いは，統計的特性は少ないが限定された範囲とか，短時間しか作用しない因子であり，その例をTable 3.2に示す。ランダム因子を考慮した温度をランダム温度と呼び，次式で計算する。

$$T_R = T_s + \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{\ell} g_{ij} \Delta T_j \right)^2} \quad (3.9.2)$$

ここで， $T_R$ ：ランダム温度

$T_s$ ：システムティック温度

$g_{ij}$ ：温度差 $\Delta T_j$ に作用するランダム因子 $i$ の係数（ $i=1\sim n$ ， $n$ はランダム因子の数）

Table 3.1 Example of systematic factor for hot spot analysis

1. 熱出力及びその分布に関する不確かさ
  - 熱出力校正
  - 径方向出力分布
  - 軸方向出力分布
2. 冷却材流量に関わる不確かさ
  - 原子炉圧力容器内の流量配分
  - 流量調節領域の流量調整
  - “ ” の中での再配分
3. 冷却材温度に関わる不確かさ
  - 炉心入口温度
4. 余裕として見積っておきたいもの
  - 運転余裕

Table 3.2 Example of random factor for hot spot analysis

1. 製造公差
  - コンパクトの内外径
  - スリーブの内外径
  - 燃料棒挿入孔径（流路等価直径，流路断面積）
  - 核分裂物質の装荷（濃縮度や装荷量）
2. 物性値の不確かさ
  - 冷却材比熱
  - “ ” 熱伝導率（熱伝達率への影響）
  - “ ” 粘性係数（流量分布や熱伝達率への影響）
  - スリーブの熱伝導率
  - コンパクトの熱伝導率
3. 熱伝達率の不確かさ
4. ギャップコンダクタンスの不確かさ
5. 核設計計算誤差



### 3.10 燃料核移動距離計算

高温ガス炉燃料に特徴的な現象に、被覆粒子燃料の燃料核移動がある。これは、被覆粒子燃料が高温でかつ温度勾配があるところに置かれると、燃料核の部分が高温側にアメバーのように移動するという現象である。結果的に粒子の被覆層が損傷し、FP保持能力が劣化するので問題となる。この移動距離が被覆層厚さを越えた場合には、もはや燃料が破損していることは明白であるが、核移動距離がどれ位になったら粒子破損とするかは、使用する粒子の仕様、評価に用いる温度に基づいて別途評価する必要がある。そこで、本コードは被覆粒子燃料が健全であるか破損しているかの判定は行わずに、次式<sup>(13)</sup>を用いて核移動距離KMLを計算する。

$$KML = 200 \exp\left(-\frac{14800}{T_k}\right) \cdot \frac{T_G}{T_k^2} \cdot \Delta\tau \quad (3.10.1)$$

ここで、KML：核移動距離 ( $\mu$ )

$T_k$ ：温度 (K)

$T_G$ ：温度勾配 ( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )

$\Delta\tau$ ：燃焼ステップ照射日数 (日)

温度及び温度勾配としては、燃焼ステップの始まりのときの分布を用いて計算する。なお、評価温度として、公称温度、及び3.9節で述べたホットスポット温度をオプションで選択できる。

### 3.11 Pd 腐蝕量計算

CPfの被覆層のうち、金属FPを閉じ込める役割を持つSiC層がパラジウム(Pd)に腐蝕されて減肉することが近年知られるようになってきた。この現象も燃料核移動の場合と同じくFP保持能力が劣化するので問題となる。しかし、使用すべき評価式や破損の判定は、使用する粒子の製造仕様、評価に用いる温度に基づいて別途評価すべきである。そこで、本コードでは、以下の3種類の計算式でPdによるSiC層腐蝕量を計算する。

$$X = m \cdot t^n \quad (3.11.1)$$

$$m = A \exp(-Q/RT) \quad (3.11.2)$$

ここで、X：腐蝕量 ( $\mu$ )

m：腐蝕速度 ( $\mu / \text{h}^n$ )

t：燃焼時間 (h)

R：ガス定数 ( $R = 8.314 \text{ J/mol K}$ )

T：温度 (K)

n：定数

A：定数 ( $\mu / \text{h}^n$ )

Q：活性化エネルギー ( $\text{J/mol}$ )

n, A, Qは定数であり、出典により次のようになる。

出典	A ( $\mu / h^n$ )	Q (J/mol)	n
① T. N. Tiegs <sup>(14)</sup>	46.2	$1.38 \times 10^5$	1.0
② K. Bongartz <sup>(15)</sup>	1197	$1.24 \times 10^5$	0.5
③ F. Montgomery <sup>(16)</sup>	2114	$1.79 \times 10^5$	1.0

温度及び温度勾配としては、燃焼ステップの始まりのときの分布を用いて計算する。なお、評価温度として、公称温度、及び3.9節で述べたホットスポット温度をオプションで選択できる。

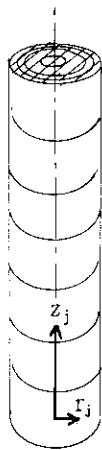
### 3.12 燃料温度、燃料核移動距離及びPdによるSiC層腐蝕量の炉心内体積割合の計算

燃料の温度、核移動距離及びSiC層腐蝕量の値が、局所的に或る値を越えたからといって、それがそのまま、核分裂生成物の大量放出を意味するわけではない。しかし、これらの特性値をもつ燃料体が全燃料体に占める割合は、燃料体が核分裂生成物を保持する能力の劣化程度の指標と考えられる。そこで、以下のようにして、特性値が或る値を越える体積が全燃料体積に占める体積割合分布を計算する。

#### (1) 微分スペクトラムの計算

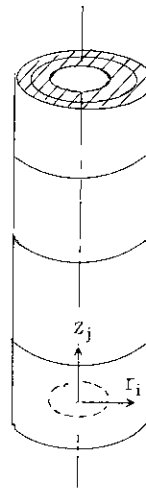
円柱及び中空円筒の燃料コンパクトを軸方向及び半径方向に等分割し、その微小体積を $v(r_i, z_j)$ とする。

円柱コンパクト



- 中実型燃料棒
- マルチホール型燃料

中空円筒コンパクト



- 中空型燃料棒
- 円環型燃料棒
- セミピン型燃料棒

微小体積の中心における特性値を、3.6節、3.10節及び3.11節に述べた方法で計算し、その特性値の大きさに従って微小体積を以下のように分類する。

$$\delta_{chan}(K) = \frac{1}{V_{chan}} \sum_i \sum_j v(r_i(K), z_j(K)) \quad (3.12.1)$$

ここで、

$\delta_{chan}(K)$  : 温度、核移動距離或いはSiC層腐蝕量が  $(K-1) \cdot \Delta L$  と  $K \cdot \Delta L$  の間にある燃料体積がチャンネルの全燃料体積に占める割合

- $\Delta L$  : 温度, 核移動距離或いは SiC 層腐蝕量のきざみ幅
- $V_{\text{chan}}$  : チャンネルの全燃料体積
- $v(r_i(K), Z_j(K))$  : 温度, 核移動距離或いは SiC 層腐蝕量が  $(K-1) \cdot \Delta L$  と  $K \cdot \Delta L$  との間に属する分割メッシュの体積

$\delta_{\text{chan}}(K)$  はチャンネルにおける温度, 核移動距離及び SiC 腐蝕量の体積割合の微分スペクトラムであり, 同様の手順を繰り返して, 流量調節領域毎及び炉心における微分スペクトラムを計算する。

(2) 積分スペクトラムの計算

積分スペクトラムは, (1) で得られた微分スペクトラム  $\delta(K)$  を次のように積分して求められ, 温度や核移動距離或いは SiC 層腐蝕量が或る値以上である燃料の体積割合を示すものである。

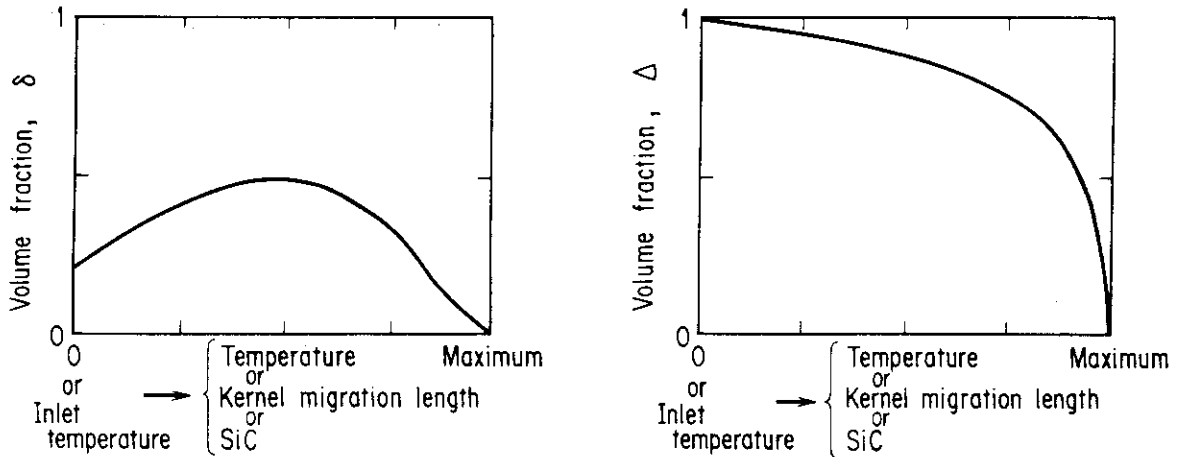
$$\Delta(K) = \sum_{j=k+1} \delta_{(j)} \quad (3.12.2)$$

ここで,

$\Delta(K)$  : 温度, 核移動距離或いは SiC 層腐蝕量が,  $(K+1) \Delta L$  以上である燃料体積が全燃料体積に占める割合

$\delta_{(j)}$  : 微分スペクトラム ( (3.12.1) 式の  $\delta_{\text{chan}}$  )

微分スペクトラム及び積分スペクトラムの例を Fig. 3.4 に示す。



(a) Differential spectrum of volume fraction (b) Integral spectrum of volume fraction

Fig. 3.4 An example of volume fraction spectrum of fuel temperature, kernel migration length and SiC-corrosion thickness by Pd

## 4. プログラムの構成

プログラムは3つの段階に大別される。最初の段階では計算対象とする炉心の形状データや流量調節領域の区分などの属性データを入力する。次に、それらを基に磁気ディスク上の核設計計算の結果得られた3次元出力分布や中性子束分布を処理して、流量調節領域や燃料冷却チャンネルあたりの出力分布特性を計算する。

2番目の段階では指定された流量調節方式に従って、各流量調節領域への冷却材流量を配分する。

最後に確定した冷却材流量分布を用いて、冷却材温度分布、圧力分布、燃料温度分布、燃料核移動量、パラジウムによるSiC層腐蝕量を算出する。燃料温度、核移動量、SiC層腐蝕量については燃料全体に占める体積割合も計算する。

プログラムのフローチャートをFig. 4.1に示す。また、全サブルーチンの機能を以下に述べる。

TEMPESTコードは、メインプログラムを含む以下の47個のサブプログラムから構成される。Fig. 4.2に本プログラムの構成を示す。

- (1) BLOCKD : 工学的不確定因子の値を与えるブロックデータサブルーチン ( (FHS (j, i), j = 1 ~ 8), i = 1 ~ 30 )
- (2) CALC : 指定されたチャンネルの温度スペクトラム, 核移動距離スペクトラム, Pd腐蝕量スペクトラムを計算してTSPECT (500), CPSPCT (500), PDSPC1 (500), PDSPC2 (500), PDSPC3 (500) に一時格納して磁気ファイル1及び2に書き出す。CALCではコンパクトの分割メッシュが熱計算の結果と異なり細分化されるので、新たなメッシュ点に対応した温度を計算するのが主である。
- (3) CFLOW : 指定された炉心流量調節領域区分に従って、冷却材を配分する。流量調節方式としては5種類指定することが可能である。
- (4) CFUNC : 高速中性子の照射による燃料コンパクトの照射変形割合を計算する。温度(°C)照射量 ( $E > 29 \text{ f J}, \times 10^{20} \text{ nvt}$ ) の関数である。
- (5) CKML : 燃料核移動量を計算する。温度(°C)及び温度勾配(°C/cm)の関数である。
- (6) CMESH : サブルーチンLVMXから読み込まれたi, j, k方向のサブゾーンの長さ及びメッシュ分割数を基に、メッシュ数、メッシュインタフェース並びに中点の座標、体積を計算しプリントする。
- (7) COPY : COPY (A, B, N)で配列Aの先頭からN個の数を配列Bの先頭から順に転送する。
- (8) COPYD : 全入力データをボリューム5から読み込み、ファイル番号4に書く。計算プログラムの実行時にはファイル4からデータを読み処理を行う。
- (9) DEGA3 : 冷却チャンネルの流量及び軸方向発熱分布とから燃料棒の温度分布、冷却材温度、圧力などの熱流動特性を計算する。燃料ステップ毎に高速中性子照射量を積算する。
- (10) DELVOL : 燃料コンパクトの温度、燃料核移動量、Pd腐蝕量などの体積割合を計算する

ために、コンパクトのメッシュ分割を行い、メッシュ毎の体積を計算する。

(11) ETA: ETA (T, P)で、温度T(°C)、圧力P(kg/cm<sup>2</sup>)の関数として冷却材の粘性係数(g/s・cm)を求める。現在、ヘリウムの物性値が入っている。

(12) FB: 冷却材流路の摩擦損失係数を求めるサブルーチンFRICの補助ルーチンである。現在、円環流路の乱流に対する摩擦損失係数及び粗さがある流路の摩擦損失係数を計算するようになっている。

(13) FEXPC: 燃料コンパクトの熱膨張係数を温度、高速中性子照射量の関数として計算する。

(14) FEXPS: 黒鉛スリーブの熱膨張係数を温度、高速中性子照射量の関数として計算する。

(15) FILM: 燃料棒と冷却材或いは黒鉛ブロックと冷却材の間の熱伝達を解析し、表面温度を計算する。ピン-イン-ブロック型燃料の場合には、燃料棒から黒鉛ブロックへのふく射伝熱も考慮できる。

(16) FLAM: FLAM(T, P)で冷却材の熱伝導率(cal/cm・s・°C)を温度T<sub>cpc</sub>、圧力P(kg/cm<sup>2</sup>)の関数として計算する。

(17) FLUID: 冷却材の層流化現象発生の有無を予測するのに必要な、加速度パラメータ、熱流束パラメータ及び剪断応力パラメータを計算する。特に熱流束パラメータは、層流化現象発生の場合の値との比を限界熱流束パラメータと呼び、流量調節方式4の指標として用いられる。

(18) FNU: 燃料棒や黒鉛ブロックと冷却材との間の熱伝達率を、流路の内外径比及びレイノルズ数の関数として計算する。

(19) FRIC: 冷却材流路の摩擦損失係数を、流路の内外径比、レイノルズ数及び相対粗さの関数として計算する。

(20) FT4: 変数の4乗を計算するための関数サブルーチン

(21) FUTEM: 円環型燃料の場合に、軸方向メッシュにおける内外の流路へ流れる線出力を定める。それと同時に冷却材の温度、圧力及び燃料棒の温度分布も定める。

(22) GAISOU: 核設計で得られた炉心出力分布及び中性子束分布を熱流動計算用に内外挿してファイル38に書く。

(23) GAP: 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間ギャップ或いはマルチホール型燃料体の燃料棒と黒鉛ブロック間ギャップの熱伝達計算を行う。

(24) HDV: HDV(T, P)で冷却材密度(g/cm<sup>3</sup>)を温度T(°C)、圧力P(kg/cm<sup>2</sup>)の関数として計算する。現在はヘリウムの値である。

(25) HDI: HDI(T, P)で冷却材のエンタルピー(cal/g)を温度T(°C)圧力P(kg/cm<sup>2</sup>)の関数として計算する。

(26) HOTSPT: 公称温度計算結果に、サブルーチンBLOCKDで与えられた高温点係数を適用して、システムティック温度、ランダム温度を計算する。

(27) H4CON: 黒鉛の熱伝導率を温度(°C)及び高速中性子照射量(10<sup>20</sup> nvt)の関数として計算する。IG-110黒鉛の熱伝導率を計算するサブルーチンSLAMで参照される。

(28) INOR: 径方向のメッシュ(i, j)が属する流量調節領域番号を読み込み、領域毎に記憶する。また、メッシュに含まれるチャンネル数及び燃料の有効発熱長を読み込む。

(29) INPUT: 炉心形状設定のためのデータ入力をコントロールするプログラムでありサブル

ーチンLVMX, CMESH, KOMP, KMOT, OVER, INORを使用する。そして、出力分布ファイル(CITATIONコードからの出力ファイル32相当のファイル10～)から読み込んだ値と比較し、もし、一致しなければエラーメッセージを出力して計算を中止する。

(30) KMOT: 炉心形状設定のためにサブルーチン INPUT 或いは KOMP から呼ばれ、KOMP で初期設定した物質番号及び OVER で再設定した物質番号を 2 次元の平面単位で軸方向メッシュ毎に出力する。

(31) KOMP: 炉心の物質構成を区分するために設けられた領域区分であるゾーン毎に物質番号の初期設定を行う。サブルーチン INPUT から呼ばれる。

(32) LVMX: サブルーチン INPUT から呼ばれ、炉心の物質を配置するゾーンの X, Y, Z 方向の長さ及びメッシュ分割数を読み込み、炉心全体のゾーン数(LMAX)を決定する。

(33) MAIN: 燃焼ステップ数及び各燃焼ステップの間隔(日数)と流量調節方式のオプション指定を読んだ後、全入力データを COPYD で読みファイル 4 にストアする。また、可変ディメンジョンの大きさを決め、指定した値を越えた場合にはメッセージを出して計算を中止する。

サブルーチン INPUT により入力データを読み込んだ後、サブルーチン ORIF により出力分布特性値を計算する。最後に CFLOW を呼び炉心熱流動特性計算を実施する。これらの計算を燃焼ステップ毎にすすめるための DO ループをコントロールする。

(34) MAP: 径方向のメッシュ(i, j)が属する流量調節領域及び燃料体の識別番号を 2 次的に印刷する。

(35) MEMSET: MEMSET(value, A, n)によって、配列 A に値 value を n 個セットする。

(36) ORIF: MAIN プログラムに呼ばれて、3.1 節で述べた出力分布に関する特性値を計算する。また、サブルーチン GAISOU を呼び、軸方向出力分布及び中性子束分布の内外挿を行う。

(37) OUTSPC: サブルーチン PRCNT から呼ばれ、燃料温度、核移動距離、Pd 腐蝕量について、それぞれ、チャンネル毎、領域毎、或いは炉心全体に於ける体積割合の表を印刷する。

(38) OVER: サブルーチン INPUT から呼ばれ、炉心を構成する物質の組み合わせの範囲を示すゾーンを、入力データにより設定する。

(39) PDAK: 被覆燃料粒子 SiC 層の Pd による腐蝕量を求めるために必要な腐蝕反応速度を、温度、温度勾配の関数として計算する。

(40) POWER: 核設計計算によって得られた炉心出力分布及び中性子束分布を、それぞれ、ディスクファイル 10～及びディスクファイル 50～から読み込み、チャンネルの軸方向出力分布、軸方向出力ピーキング係数及び高速中性子束分布を定める。尚、いずれも軸方向分布の値は相対値であり、絶対値はサブルーチン CFLOW において、入力データ(炉心平均線出力、燃焼期間或いは燃焼ステップ)を基に定められる。

(41) PRCNT: プリントオプションの NPR1 の値に対応して、チャンネル毎、流量調毎或いは炉心を単位とする温度、核移動距離及び SiC 層腐蝕量の体積割合スペクトラムを計算してプリントアウトする。その際、File 1 及び File 2 から参照したチャンネル毎のスペクトラムデータを加算した後、サブルーチン SUMDAT で規格化を行い、サブルーチン OUTSPC でプリントアウトする。

(42) PRINTA: サブルーチン ORIF で呼ばれ、正三角形メッシュ毎或いは正味の燃料チャンネルあたりの軸方向出力分布をプリントアウトする。

(43) PROPER：冷却材の熱流動計算に必要な密度，比熱，粘性係数及び熱伝導率を，温度，圧力の関数を用いて計算する。また，レイノルズ数及びプラントル数を計算して，温度補正をする前の熱伝達率を求める。

(44) SECT：単チャンネル計算における軸方向の単位長，即ち，メッシュでの冷却材温度上昇及び圧力損失を流路形状を考慮して求める。

(45) SFUNC：高速中性子照射による黒鉛スリーブの照射変形割合を計算する。温度，照射量 ( $E > 29 \text{ f J}, \times 10^{20} \text{ nvt}$ ) の関数である。

(46) SLAM：黒鉛スリーブの熱伝導率を温度( $^{\circ}\text{C}$ )及び高速中性子照射量( $\times 10^{20} \text{ nvt}$ ) の関数として計算する。現在，IG110の設計データが使用されている。照射による影響評価のために，H 451 黒鉛のデータをサブルーチンH 4CONで計算して参照している。

(47) SUMDAT：サブルーチンPRCNTから呼ばれ，温度，核移動距離及びSiC層腐蝕量について，全燃料体積に対する相対的な体積割合を計算する。

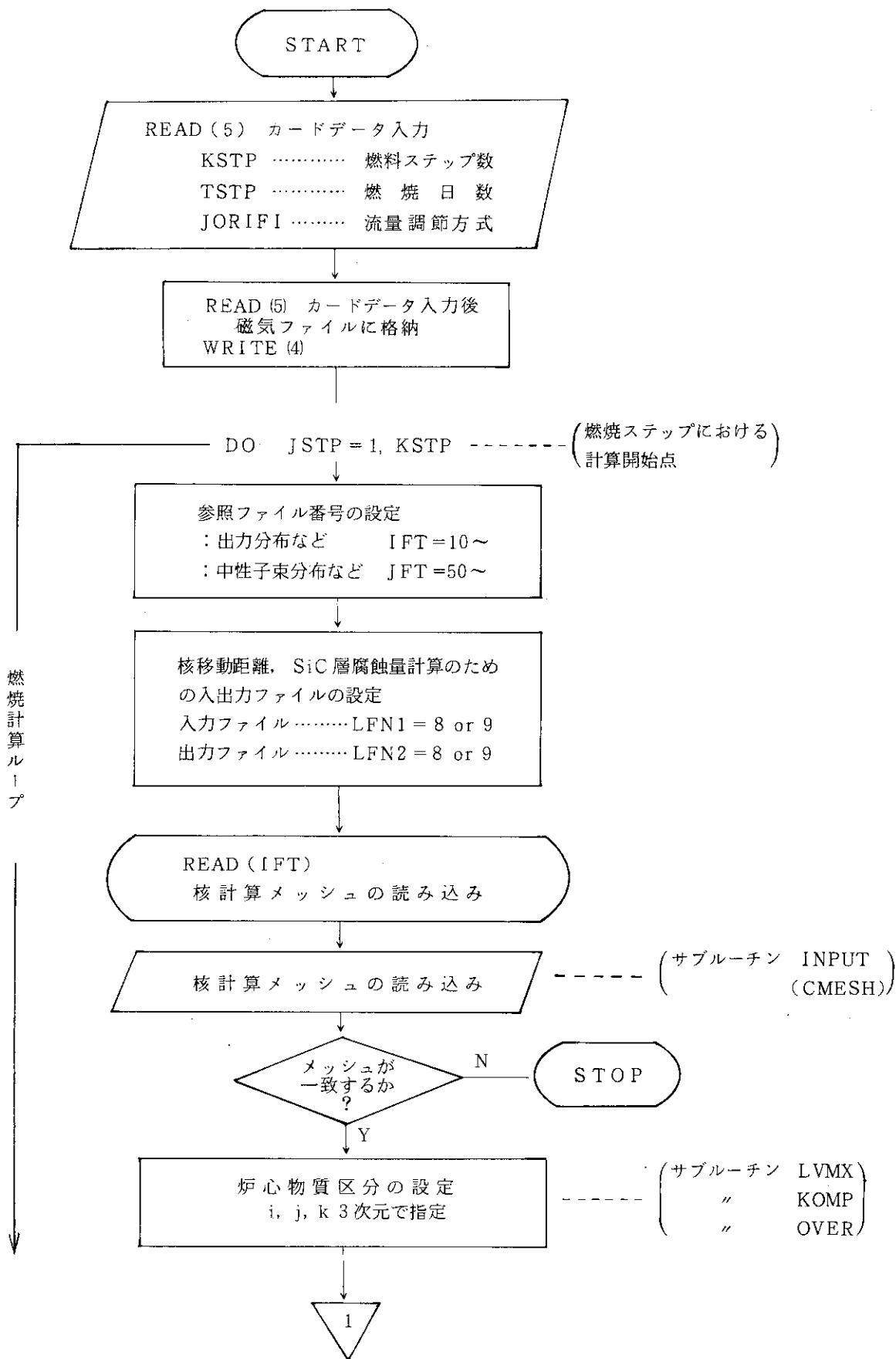


Fig. 4.1 Flow chart of TEMPEST code(1)



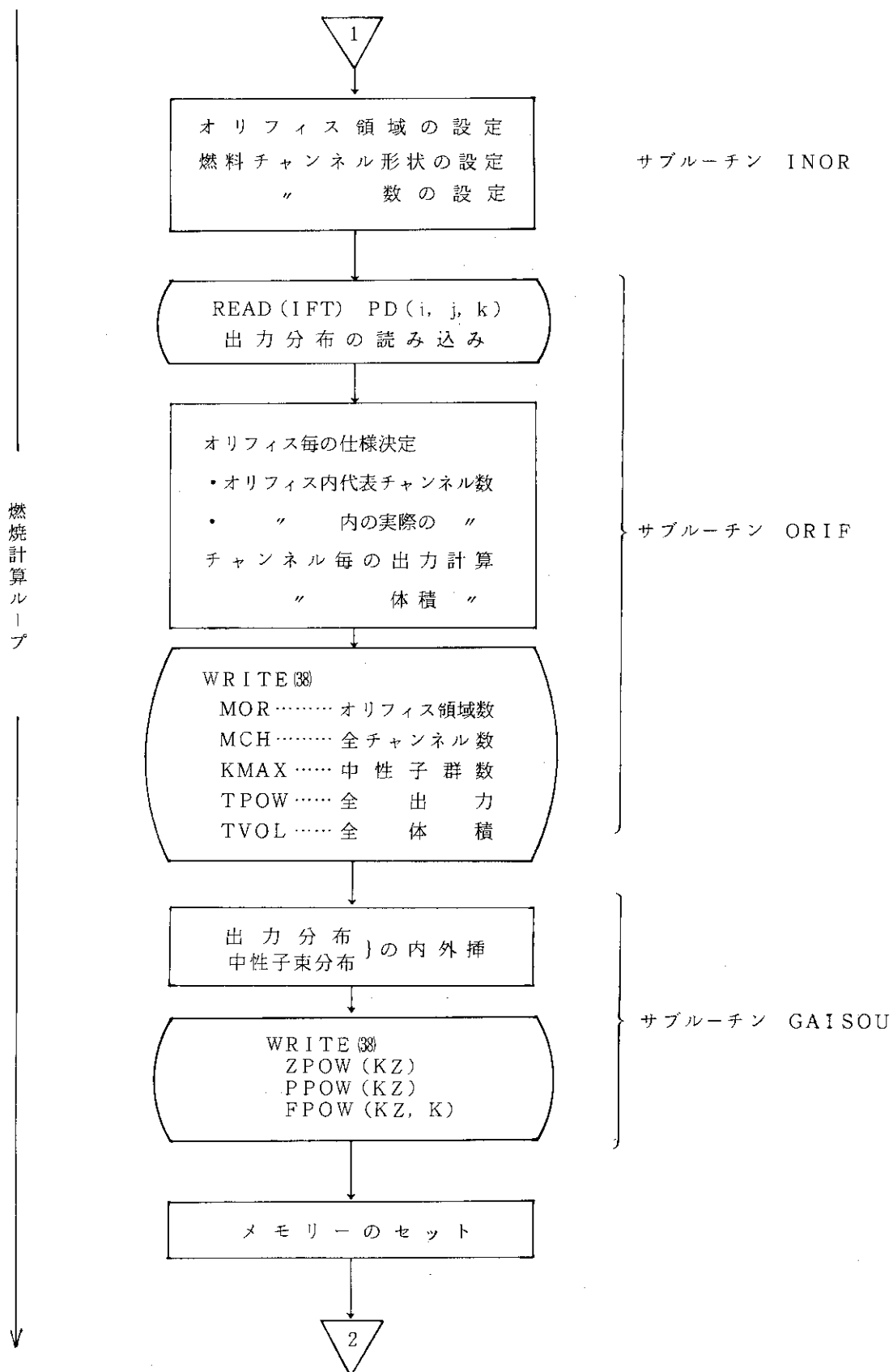


Fig 4.1 (Continued) (2)

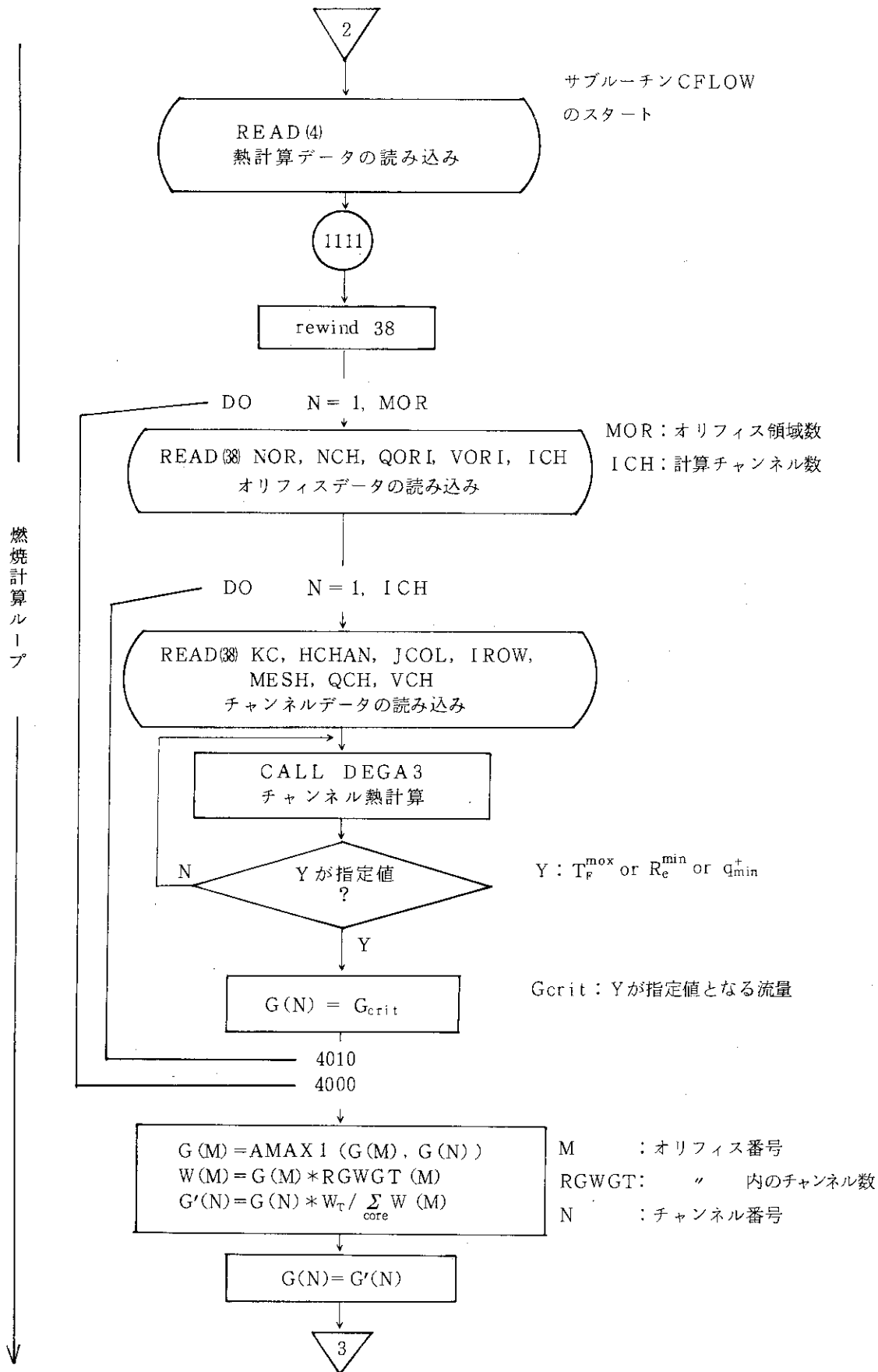
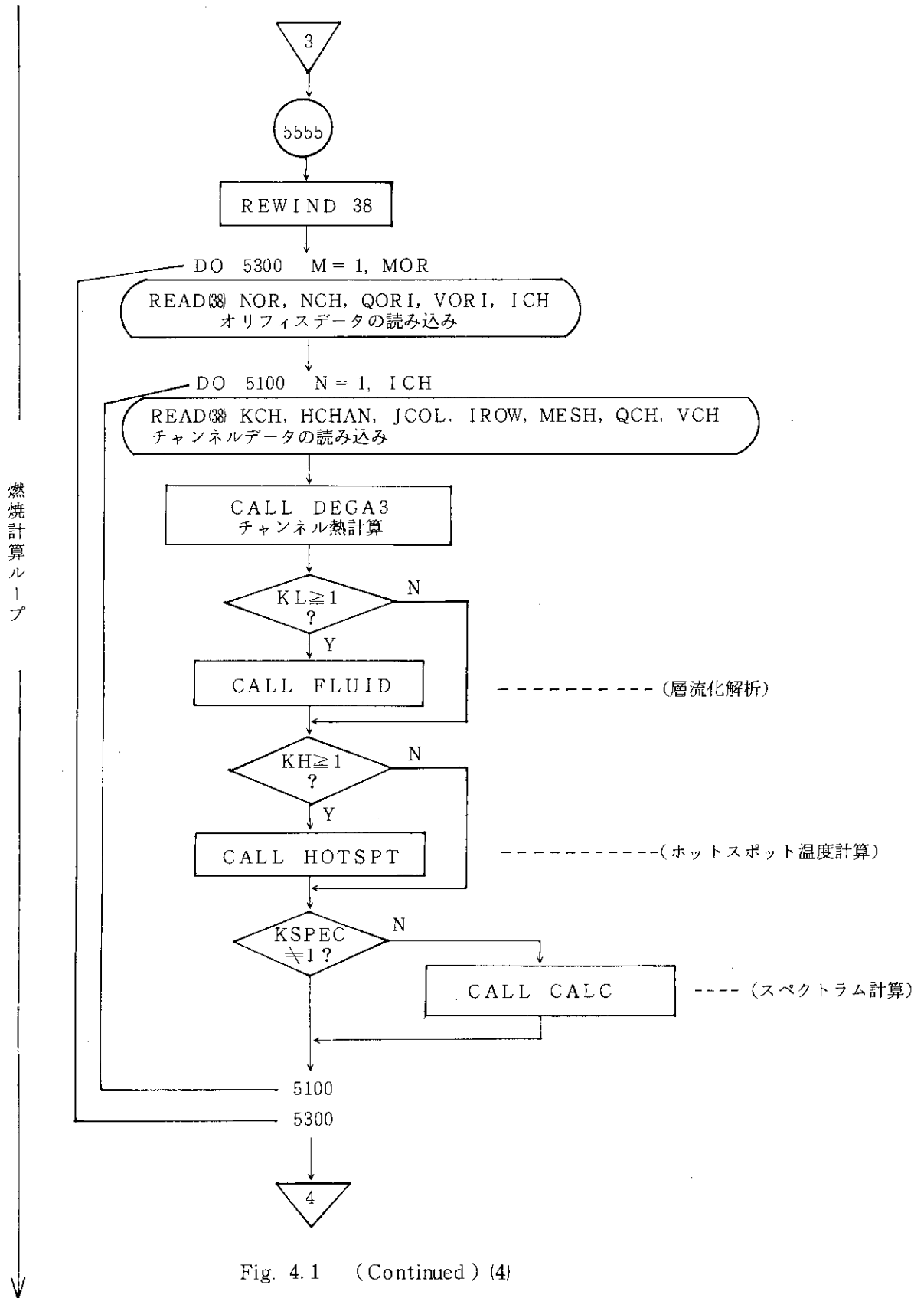


Fig. 4.1 (Continued) (3)



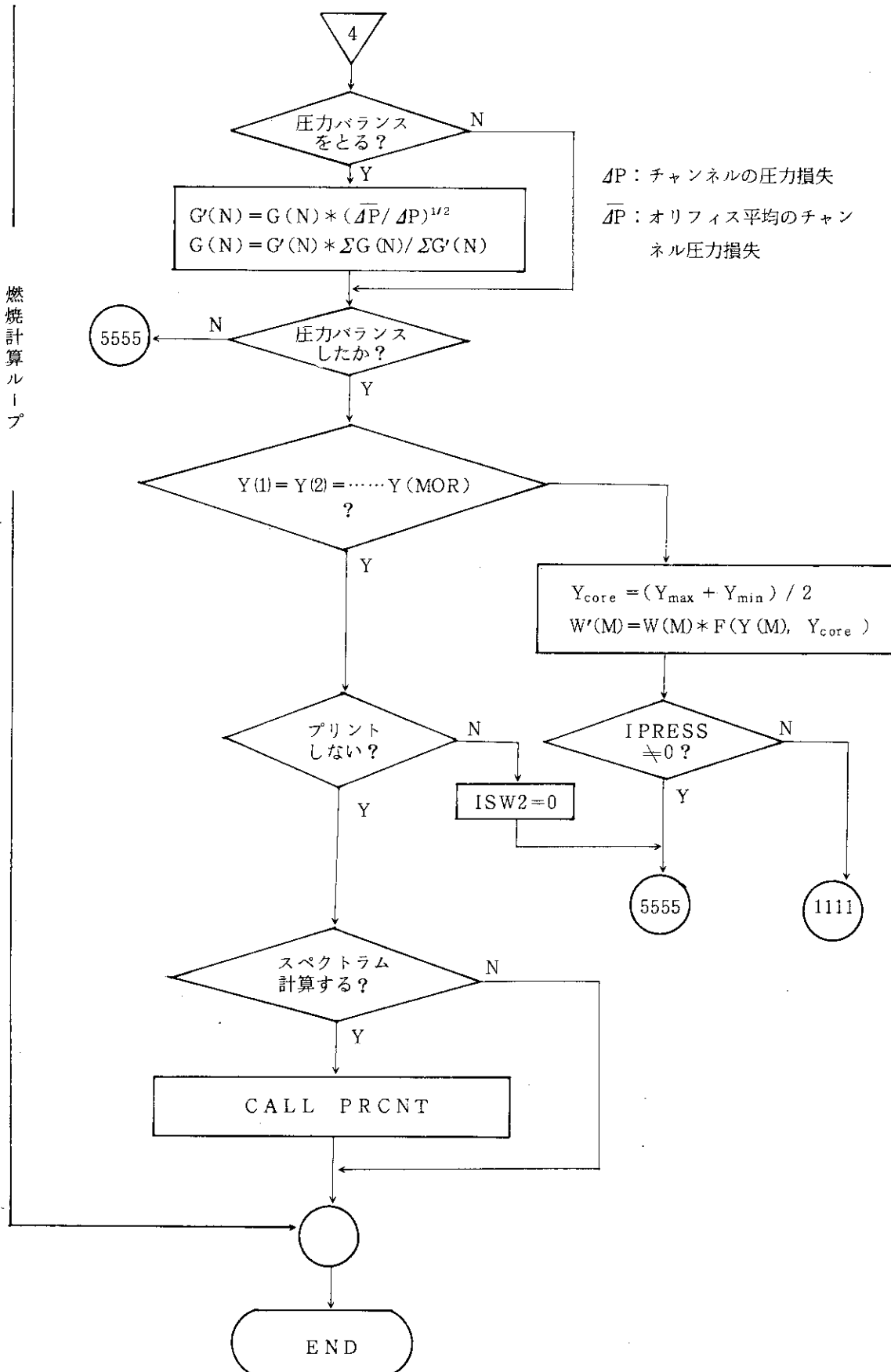


Fig. 4.1 (Continued) (5)

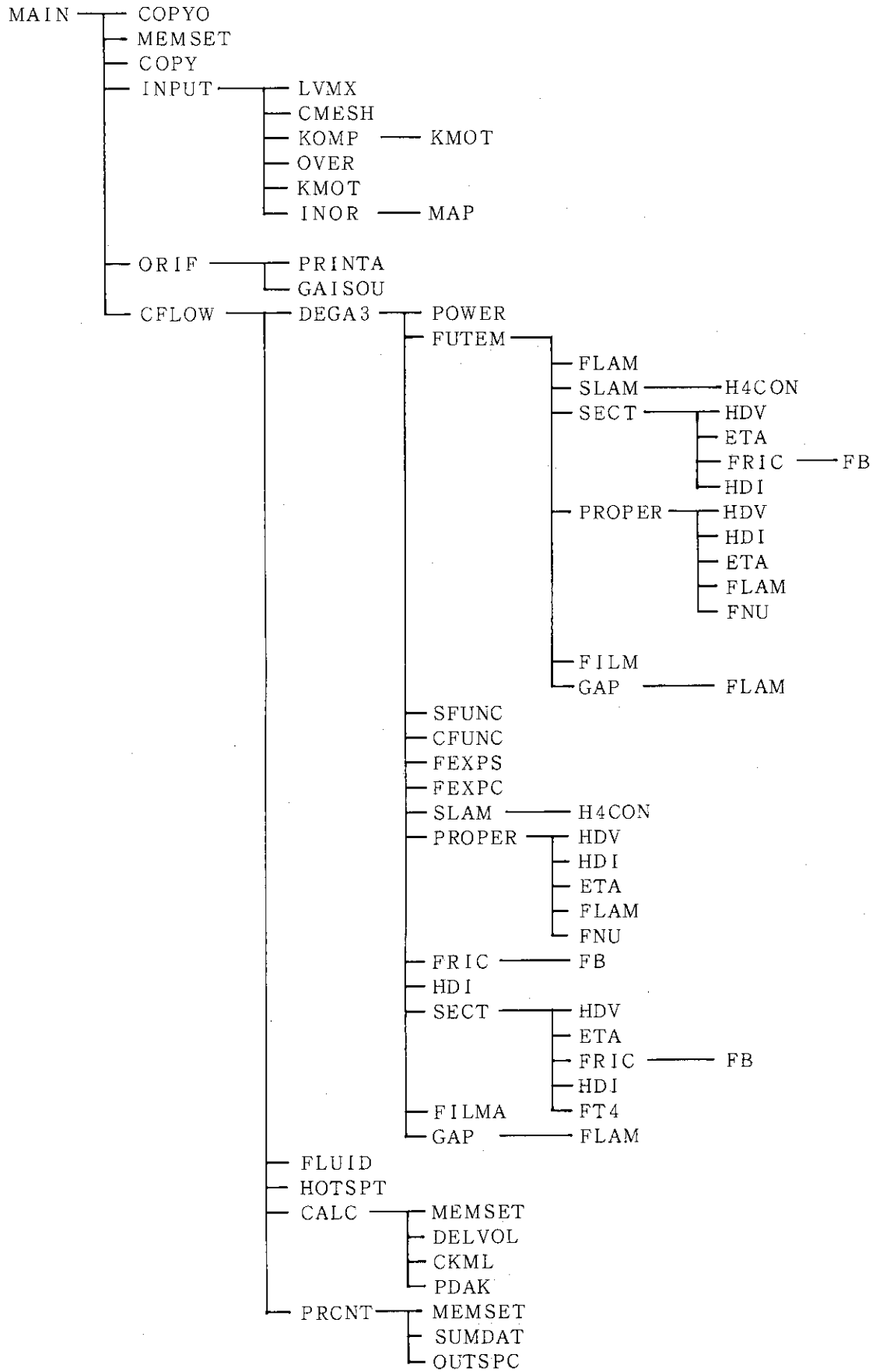


Fig. 4.2 Program structure of TEMPEST code

## 5. 使 用 法

### 5.1 入 力

本コードの入力は、サブルーチンCOPYDによって全て磁気ディスク上に記憶される。その後、サブルーチンINPUTに制御された以下のサブルーチンによって、逐次読み込まれる。

- LVMX…… モデルの計算メッシュ分割データ
- KOMP…… 物質区分指示データ（出力分布評価用）の初期設定
- OVER…… “ （ “ ” ）の再配置
- INOR…… 流量調節領域及びチャンネル区分の指定

最後に、熱流動特性計算関係の入力データが、サブルーチンCFLOWの最初の部分で読み込まれる。尚、炉心出力分布などを与える磁気ファイルの内容については、付録3で述べる。

上記各入力データの詳細な内容及び入力形式は一括してTable 5.1に示す。

### 5.2 出 力

本コードの出力データは4つのグループに大別される。1番目は炉心出力分布計算に用いられた形状、寸法及び出力分布特性パラメータ、2番目は炉心冷却材流量調節に関する結果、3番目は各チャンネル毎の詳細な熱流動特性データ、4番目は、燃料温度、核移動距離及びSiC層腐蝕量の体積割合である。

#### (1) 炉心形状データ

- 1) X, Y, Z方向の分割メッシュに関するデータ
- 2) 物質配置に関するデータ（座標区分及び物質番号）
- 3) メッシュに含まれるチャンネルの数
- 4) “ ” の有効発熱長

#### (2) 流量調節データ

- 1) 流量調節方式区分番号
- 2) 流量調節領域に属するチャンネルの番号
- 3) 流量調節の指標とした特性値

#### (3) 燃料冷却チャンネルデータ

- 1) 冷却チャンネルの形状、発熱分布に関するデータ
- 2) 冷却材温度のチャンネル軸方向分布
- 3) 燃料棒温度の “ ”
- 4) 冷却材の物性値、流束及びレイノルズ数
- 5) 限界熱流束比等の層流化現象評価のための諸特性値の軸方向分布
- 6) ホットスポット温度

Table 5.1 Input data for TEMPEST

Group Card	FORTTRAN DATA	Format
<u>DATA0</u>	Main routine での read	
card 1	KSTP : 燃焼ステップ数 ( $\leq 20$ )	16 I 5
card 2	TSTP(j) : jステップと(j-1)ステップとの燃焼日数の間隔  (サブルーチンCFLOWの変数PHIMに対応し、ステップ毎にPHIMとしてCFLOWに転送される)	
card 3	JORIFI(j) : jステップ目の計算における炉心流量調節方式のオプション  (サブルーチンCFLOWの変数KORIFIに対応し、ステップ毎にKORIFIとしてCFLOWに転送される)  KORIFIの値によって次の流量調節方式とする。 1=全チャンネル一定流量調節方式 2=領域出口冷却材温度一定方式 3=領域最高燃料温度一定方式 4=最小限界熱流束比一定方式 5=最小レイノルズ数一定方式	16 I 5
<u>DATA1</u>		
card 1	KMAX : 核設計のための拡散計算で用いた中性子のエネルギー群数	16 I 5
<u>DATA2</u>	(MSHJ(j), XSHJ(j), j=1, NREGJ) MSHJ(j) : J方向j番目の領域内の計算点の数( $\leq 211$ ) XSHJ(j) : " 領域の長さ (cm) (MSHJ(j)=0でDATA2の読み込み終了)	6(I3, E9.0)
<u>DATA3</u>	(MSHI(i), XSHI(i), i=1, NREGI) MSHI(i) : I方向i番目の領域内の計算点の数( $\leq 211$ ) " 領域の長さ (cm) (MSHI(i)=0でDATA3の読み込み終了)	6(I3, E9.0)
<u>DATA4</u>	(MSHKB(k), XSHKB(k), k=1, NREGKB) MSHKB(k) : 軸方向k番目の領域の計算点の数( $\leq 211$ ) " 領域の長さ (cm)	6(I3, E9.0)

Table 5.1 (continued)

Group Card	FORTTRAN DATA	Format
	(MSHKB(k)=0でDATA4の読み込み 終了)	
<u>DATA5</u>	(NXTR1(j), j=1, NREGJ) NXTR1(j): J方向j番目の領域の物質番号 (初期設定である。NREGI回繰り返し, さらにNREGKB回繰り返す)	24 I 3
<u>DATA6</u>		
Card 1	M : DATA5で初期設定した物質番号を再配置 するための物質番号	18 I 4
Card 2	(JL(i), JR(i), IT(i), IB(i), KBF(i), KBB(i), i=1, 3) JL(i) : 物質Mを再配置する領域番号のJ方向の始点 JR(i) : " " 終点 IT(i) : 物質Mを再配置する領域番号のI方向の始点 IB(i) : " " 終点 KBF(i) : " " KB方向の始点 KBB(i) : " " " 終点 (Card 2はJL(i)=0で終了し, Card 1 へもどる, M=0でDATA6の読み込み終 了)	
<u>DATA7</u>		
Card 1	M : オリフィス番号 CHAN : オリフィス内の計算チャンネル数	14, 2F9.0
Card 2	(JL(i), JR(i), IT(i), IB(i), i=1, 3) JL : オリフィスMに属するメッシュ番号のJ方向の始点 JR : " " " 終点 IT : " " I方向の始点 IB : " " " 終点	3(4I4, 8X)
<u>DATA8</u>		
Card 1	M : チャンネル番号 HCH : チャンネルMの高さ(長さ) NCH : チャンネルMに属するメッシュのメッシュあたりのチャンネル数	14, 2F9.0
Card 2	(JL(i), JR(i), IT(i), IB(i), i=1, 3)	3(4I4, 8X)



Table 5.1 (Continued)

Group / Card	FORTTRAN DATA	Format
	JL(i) : チャンネルMに属するメッシュ番号のJ方向の始点 JR(i) : " " 終点 IT(i) : " I方向の始点 IB(i) : " " 終点	
DATA 9		
Card 1	(TITL1(i), i = 1, 18)	18A4
Card 2	FLAMS : スリーブの熱伝導率 (cal/cm °C) (実際は関数 SLAM(T, $\Phi$ ) で計算される FLAMS = 1.0 を入力する。)	8F9.0
	FLAMC : コンパクトの熱伝導率 (cal/cm °C)	
	ALPHAS : スリーブの熱膨張係数 ( / °C) (実際は関数 FEXPS(T, $\Phi$ ) で計算されるが 絶対値を ALPHAS で入力する。)	
	ALPHAC : コンパクトの熱膨張係数 ( / °C) (実際は関数 FEXPC(T, $\Phi$ ) で計算される。 ALPHAC = 1.0 を入力する。)	
	GNEUS : スリーブのポアソン係数	
	GNEUC : コンパクトの "	
	EUT : 熱伝達率計算式の温度補正項の指数 $h = h_0 \left( \frac{\Theta}{T_w} \right)^{EU}$	
	h : 熱伝達率 (温度補正後)	
	h <sub>0</sub> : " (温度補正項なしの値)	
	$\Theta$ : 冷却材バルク温度 (K)	
	T <sub>w</sub> : 伝熱面温度 (K)	
Card 3	P1 : 原子炉入口冷却材圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	8F9.0
	TH1 : " 温度 (°C)	
	HBL : 軸方向反射体厚さ (cm)	
	EE : 冷却材チャンネル壁粗さ(平均粗さ)(cm)	
	DHI : 内側流路等価直径 (cm)	
	FKI : " 断面積 (cm <sup>2</sup> )	
	DHO : 外側流路等価直径 (cm)	
	FKO : " 断面積 (cm <sup>2</sup> ) (DHI ~ FKO は固定流路形状オプションの KD(Card 8) が 1 のときのみ有効であり、 その他の場合は無視する)	

Table 5.1 (Continued)

Group Card	FORTRAN DATA		Format
Card 4	D6	: 内側スリーブ内径又はKG=3のときの流路 孔径 (cm)	8F9.0
	D5	: " 外径 (cm)	
	D4	: 燃料コンパクト内径 (cm)	
	D3	: " 外径 (cm)	
	D2	: 外側スリーブ内径又はKG=3のときの燃料 棒挿入孔径 (cm)	
	D1	: 外側スリーブ外径又はKG=3のときの燃料 棒直径 (cm)	
	D	: 流路孔径 (cm)	
Card 5	AAX	: 環状燃料棒の場合(KG=-1)の内外流量配 分繰り返し計算の加速因子	8F9.0
	FLA	: 境膜熱伝達計算に於ける熱放射の熱流束計算 の加速因子	
	XIR	: 境膜熱伝達計算に於ける熱放射の熱流束計算 の収束判定因子	
	PEPS	: 流量調節領域内流量配分計算に於ける圧力バ ランス判定因子(Card 12のIPRESS=0 のとき有効)	
Card 6	ALPHA	: 全発熱量のうち燃料コンパクトでの発熱割合	8F9.0
	BETA	: " 黒鉛スリーブ "	
	GAMMA	: " 黒鉛ブロック "	
	(ALPHA+BETA+GAMMA=1)		
	EB	: 黒鉛ブロック の熱放射係数	
	EP	: 黒鉛芯 の "	
	ESIN	: 内側スリーブ内面の "	
ESOUT	: 外側スリーブ外面の "		
Card 7	TMACC	: 流量調節方式3(KORIFI=3)のときの燃 料最高温度の初期設定値(°C)	8F9.0
	FLOSUM	: 原子炉全流量(KORIFI≥3で入力)	
	QRMICC	: 流量調節方式4(KORIFI=4)のときの最 小限界熱流束比の初期設定値	
	REMICC	: 流量調節方式5(KORIFI=5)のときの最 小レイノルズ数の初期設定値	

Table 5.1 (Continued)

Group Card	FORTRAN DATA	Format
Card 8	<p>オプションカード</p> <p>KG : 燃料形状オプション</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-1 = 円環型燃料棒</li> <li>0 = 中空型燃料棒</li> <li>1 = 中実型燃料棒</li> <li>2 = セミピン型燃料棒 (内面冷却型)</li> <li>3 = マルチホール燃料体</li> </ul> <p>KBC : 燃料チャンネルと黒鉛ブロックとの間の境界条件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 = 断熱条件</li> <li>1 = 等温条件</li> </ul> <p>KQB : 黒鉛スリーブ及び黒鉛ブロックにおける発熱分布の与え方</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 = 燃料棒の発熱分布と同じ軸方向発熱分布とし、絶対値はCard 6で与える</li> <li>1 = 入力データで読み込む</li> </ul> <p>KD : 冷却材流路諸元の設定法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 = Card 4で入力した燃料棒諸元から算出する</li> <li>1 = Card 3の入力で指定された値とする</li> </ul> <p>KF : 高速中性子照射量を評価する際に用いる中性子束のうち下限のエネルギー群の群番号 (群番号は高エネルギーから順に設定するものとする)</p> <p>ISW : プリント出力のオプション</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-2 = 最終結果の一覧表</li> <li>-1 = " 及び KORIFI = 3, 4, 5のiteration途中結果の一覧表</li> <li>0 = 上記ISW = 1の場合に加えて個々のチャンネル毎の詳細結果</li> <li>1 = チェックプリントを含む全プリント文の実行</li> </ul> <p>KL : 層流化解析オプション</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 = 解析せず</li> <li>1 = 解析する</li> </ul>	24 I 3

Table 5.1 (Continued)

Group Card	FORTTRAN DATA	Format
	KH : 高温点解析オプション 0 = 計算せず(システムティック因子入力せず) 1 = 計算する。ただし、ランダム温度は公称温度から評価する。 (システムティック因子は入力しない) 2 = 計算する。ただし、ランダム温度はシステムティック温度から評価する(システムティック因子を入力する)	
Card 9	QLAV : 炉心平均線出力密度 (cal/cms)	8F9.0
Card 10	GG : 炉心平均チャンネル流量 (g/s) (EQNPIN(i), i = 1, 4) EQNPIN(i) : 冷却孔あたりの燃料棒の数 (KG = 3 のときのみ有効) i : 流量調節領域の番号	8F9.0
Card 11	((FHSO1(i, j), j = 1, 5), i = 1, 4) FHSO1(i, j) : 径方向出力分布の不確かさに関するシステムティック因子 j : 各温度差 $\Delta T_j$ { j = 1 ... 冷却材温度上昇 (°C) j = 2 ... 境界膜温度差 (°) j = 3 ... スリーブ内温度差 (°) j = 4 ... ギャップ温度差 (°) j = 5 ... 燃料コンパクト内温度差 (°)	8F9.0
Card 12	i : 流量調節領域番号 IPRESS : 流量調節領域内チャンネルの流量を圧力バランスをとって計算するオプション { 0 = 計算せず 1 = 計算する KSPEC : 燃料温度、核移動距離及び Pd による SiC 腐蝕量の体積割合スペクトラム計算オプション { 0 = 計算せず 1 = 計算する	24I3
Card 13	NUMR : 体積割合スペクトラム計算のための燃料コンパクト半径方向分割メッシュ数 ( $\leq 12$ )	24I3

Table 5.1 (Continued)

Group Card	FORTRAN DATA	Format
Card 14	NUMZ : 同上, ただし, 軸方向分割メッシュ数	
	ISTMP : 核移動距離計算で使用する温度の指定 { = 1 ... 公称温度で評価 = 2 ... システィマティック温度で評価 = 3 ... ランダム温度で評価	
	NPR1 : 体積割合スペクトラムのプリントオプション = 1 ... チャンネルについてののみ = 2 ... 流量調節領域についてののみ = 3 ... 炉心についてののみ = 4 ... チャンネルと流量調節領域について = 5 ... 流量調節領域と炉心について = 6 ... チャンネルと炉心について = 7 ... 全て出力	
	T。 : 燃料温度体積割合スペクトラム計算における最低温度 (°C)	8 E 9.0
	DET : 同じく温度のきざみ幅 (°C)	
DKML : 核移動距離の体積割合スペクトラム計算における移動距離のきざみ幅 ( $\mu$ )		

## 6. 計 算 例

本章では、コードの使用法に関連し前章までの説明を補足する意味で、TEMPEST コードを用いて行った計算の一例を示す。ここに示す計算例は、現在日本原子力研究所が研究開発を進めている高温工学試験研究炉（HTTR）の総合調整設計炉心のベースとなった参考炉心を対象として行った炉心熱流動解析である。Fig. 6.1 及び Fig. 6.2 に参考炉心の垂直断面及び水平断面を示す。

### 6.1 炉心構成と計算モデル

試験炉の炉心部は、30の燃料カラム（燃料ブロックを積上げた黒鉛ブロック柱）と7つの制御カラム（制御棒挿入用ブロックを積み上げた黒鉛ブロック柱）で構成される。いずれも平径（六角形ブロックの対面間距離）360 mm、高さ570 mmの六角形ブロックを5段積み上げたもので、炉心等価直径2.3 m、高さ2.85 mで熱出力30 MW、炉心平均出力密度 $2.5 \text{ w/cm}^3$ である。燃料体には、孔径42 mmの冷却材流路が33個設けられ、その中に外径35 mmの中空型燃料棒が挿入されている。Fig. 6.3 に示すように炉心中心の7カラムを流量調節領域Ⅰ、次の列の燃料カラムを領域Ⅱ、3列目の2カラムを領域Ⅲ、3列目のコーナーの1カラムを領域Ⅳに区分し、それぞれの領域毎に冷却材の流量を調節する。ここで、炉心の形状は $60^\circ$ 回転対称だからFig. 6.4 に示す1/6炉心の解析モデルを用いる。

### 6.2 計算条件

計算条件をTable 6.1 に示す。また、TEMPESTコードの入力フォーマットに沿った計算例の入力データリストを付録1に示す。なお、使用した炉心出力分布は予備的な燃料装荷に基づいて行った核計算の結果であり、実際の設計では、燃焼が進んだ場合の評価を踏まえて更に検討する必要があるが、計算例では便宜的に、この出力分布を用い、燃焼が進んでも変わらないとした。

ホットスポット温度の計算に用いたシステムティック因子とランダム因子の値を、それぞれ、Table 6.2 及び Table 6.3 に示す。

### 6.3 計算結果

TEMPESTコードの出力データリストを付録2に示す。炉心の燃焼が200日進んだ時点の結果であり、主要な炉心特性をTable 6.4 に示す。燃料核移動距離およびPdによるSiC層腐蝕量は、公称温度を用いて評価したものである。

Table 6.1 Analytical condition of sample problem

<u>1. 熱出力</u>	
原子炉熱出力	30 MW <sub>t</sub>
燃料発熱割合	100 %
炉心高さ (ブロック段数)	5 段
平均出力密度	2.5 W/cm <sup>3</sup>
燃焼日数	200 日
<u>2. 冷却材</u>	
炉心入口圧力	4 MP <sub>a</sub>
"    温度	400 °C
炉心出口温度	950 °C
炉心有効流量割合	90 %
炉心冷却材流量	9.5 kg/s
流量調節方式	流量調節方式 1 (3.2 節参照)
流量調節内流量再配分	考慮する
<u>3. 燃料チャンネル寸法</u>	
燃料棒挿入孔径	42 mm
黒鉛スリーブの内外径	35/27 mm
燃料コンパクトの内外径	11/27.3 mm
有効発熱長 (炉心)	2760 mm
燃料チャンネル数	33 個/ブロック
<u>4. 物性値など</u>	
(1) 熱放射係数 (黒鉛ブロック, 黒鉛スリーブ, 燃料コンパクト)	0.8
(2) 熱伝導率	
燃料コンパクト	0.03 cal/cm s °C
黒鉛スリーブ	k      "
$k = f_n \times 0.28 \times (1.04543 - 2.37648 \times 10^{-3} t + 3.64841 \times 10^{-6} t^2)$	
ここで, t : 温度 (°C)	
$f_n$ : 高速中性子照射前後の熱伝導率の比 (温度, 照射量の関数, 文献(17)参照)	
(3) 熱膨張係数, $\alpha$	(1/°C)
燃料コンパクト	
$\alpha = 1.1750 \times 10^{-6} + 3.2233 \times 10^{-9} t - 2.99418 \times 10^{-12} t^2$	
$+ 1.5819 \times 10^{-15} t^3 - 3.47866 \times 10^{-19} t^4$	
ここで, t : 温度 (°C)	

Table 6.1 (Continued)

黒鉛スリーブ

$$\alpha = 4 \times 10^{-6} \times (0.796073 + 5.63595 \times 10^{-4} t - 1.48360 \times 10^{-7} t^2 + 2.70680 \times 10^{-11} t^3)$$

ここで、 $t$  : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

高速中性子照射がある場合は10%増とする。

## (4) 被覆燃料性能評価式

燃料核移動距離, KML ( $\mu$ )

$$\text{KML} = 200 \exp\left(-\frac{14800}{T}\right) \cdot \frac{T_c}{T^2} \cdot \Delta\tau$$

ここで、 $T$  : 温度 ( $^{\circ}\text{K}$ ) $T_c$  : 温度勾配 ( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ) $\Delta\tau$  : 燃焼ステップ日数(5) PdによるSiC層腐蝕量,  $X$  ( $\mu$ )

## ① Tiegの式

$$X = 46.2 \exp\left(-\frac{1.358 \times 10^5}{RT}\right) \cdot \tau$$

## ② Bongartzの式

$$X = 1197 \exp\left(-\frac{1.24 \times 10^5}{RT}\right) \cdot \tau^{\frac{1}{2}}$$

## ③ Montgomeryの式

$$X = 2114 \exp\left(-\frac{1.795 \times 10^5}{RT}\right) \cdot \tau$$

ここで、 $R$  : ガス定数 ( $R = 8.314 \text{ J/mol K}$ ) $T$  : 温度 ( $\text{K}$ ) $\tau$  : 燃焼ステップ時間 ( $\text{h}$ )



Table 6.2 Systematic factor for hot spot analysis of sample problem

因 子	相対誤差	冷却材 温度上昇 $\Delta T_1$	膜温度差 $\Delta T_2$	スリーブ 温度差 $\Delta T_3$	ギャップ 温度差 $\Delta T_4$	コンパクト 温度差 $\Delta T_5$
1. 熱出力・分布						
1.1 出力較正	0.0 2	1.0 2	1.0 2	1.0 2	1.0 2	1.0 2
1.2 径方向出力分布	0.0 3	1.0 3	1.0 3	1.0 3	1.0 2	1.0 3
1.3 軸方向出力分布 *)	0.0 4	1.0	1.0 4	1.0 4	1.0 4	1.0 4
2. 冷却材流量						
2.1 炉内流量配分	0.0 6	1.0 6	1.0 7	1.0	1.0	1.0
2.2 領域内再配分	0.0 4	1.0 4	1.0 5	1.0	1.0	1.0
2.3 領域流量調整	0.0 5	1.0 5	1.0 6	1.0	1.0	1.0
3. 冷却材温度						
3.1 炉心入口温度	0.0 2	8 °C	1.0	1.0	1.0	1.0
4 運転余裕	0.0 2	1.0 2	1.0 2	1.0 2	1.0 2	1.0 2

\*) 核計算によるものでブロックの上下端にのみ適用する。

Table 6.3 Random factor for hot spot analysis of sample problem

因 子	偏 差	冷 却 材 温 度 上 昇	膜 温 度 差	ス リ ー プ 温 度 差	ギ ャ ッ プ 温 度 差	コ ン タ クト 温 度 差
1. 製造公差						
1.1 コンパクト内径	0.005556	0.003704 <sup>*</sup>	0.003704	0.003704	0.003704	0.009546
1.2 " 外径	0.002778	0.007408 <sup>*</sup>	0.007408	0.007408	0.438921	0.010329
1.3 スリーブ内径	0.002775	0.0	0.0	0.011633	0.331976	0.0
1.4 " 外径	0.002174	0.0	0.02631	0.00918	0.0	0.0
1.5 挿入孔径	0.004	0.0	0.0528	0.0	0.0	0.0
1.6 燃料装荷	0.05	0.05 <sup>*</sup>	0.05	0.05	0.05	0.05
2. 物性値						
2.1 冷却材比熱	0.002	0.002	0.000667	0.0	0.0	0.0
2.2 " 熱伝導率	0.03	0.0	0.02	0.0	0.03	0.0
2.3 " 粘性係数	0.03	0.0	0.0396	0.0	0.0	0.0
2.4 スリーブ熱伝導率	0.005	0.0	0.0	0.005	0.0	0.0
2.5 コンタクト "	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05
3. 熱伝達率	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
4. ギャップコンダクタンス	0.05	0.0	0.0	0.0	0.05	0.0
5. 核計算誤差	0.1	0.1 <sup>*</sup>	0.1	0.1	0.1	0.1

(注) \*出力分布の軸方向依存性を考慮する。

Table 6.4 Major results of thermal hydraulic calculation of sample problem by TEMPEST code

<u>燃料最高温度</u>	
公称温度	1228 °C
システマティック温度 (Table 6.2 のシステマティック因子による)	1367 °C
ランダム温度 (同上及び Table 6.3 のランダム因子による)	1492 °C
<u>炉心冷却材圧力損失</u>	5 kPa
<u>最大燃料核移動距離</u>	6.4 $\mu$ (0.05 %) *)
<u>Pd による SiC 層腐蝕量の最大値</u>	
① Tiegs の式による (Table 6.1 参照)	5.2 $\mu$ (0.03 %) *)
② Bongartz の式による ( " )	4.8 $\mu$ (0.07 %) *)
③ Montgomery の式による ( " )	7.4 $\mu$ (0.06 %) *)

\*) 最大値となる燃料が全燃料に占める体積割合を示す。

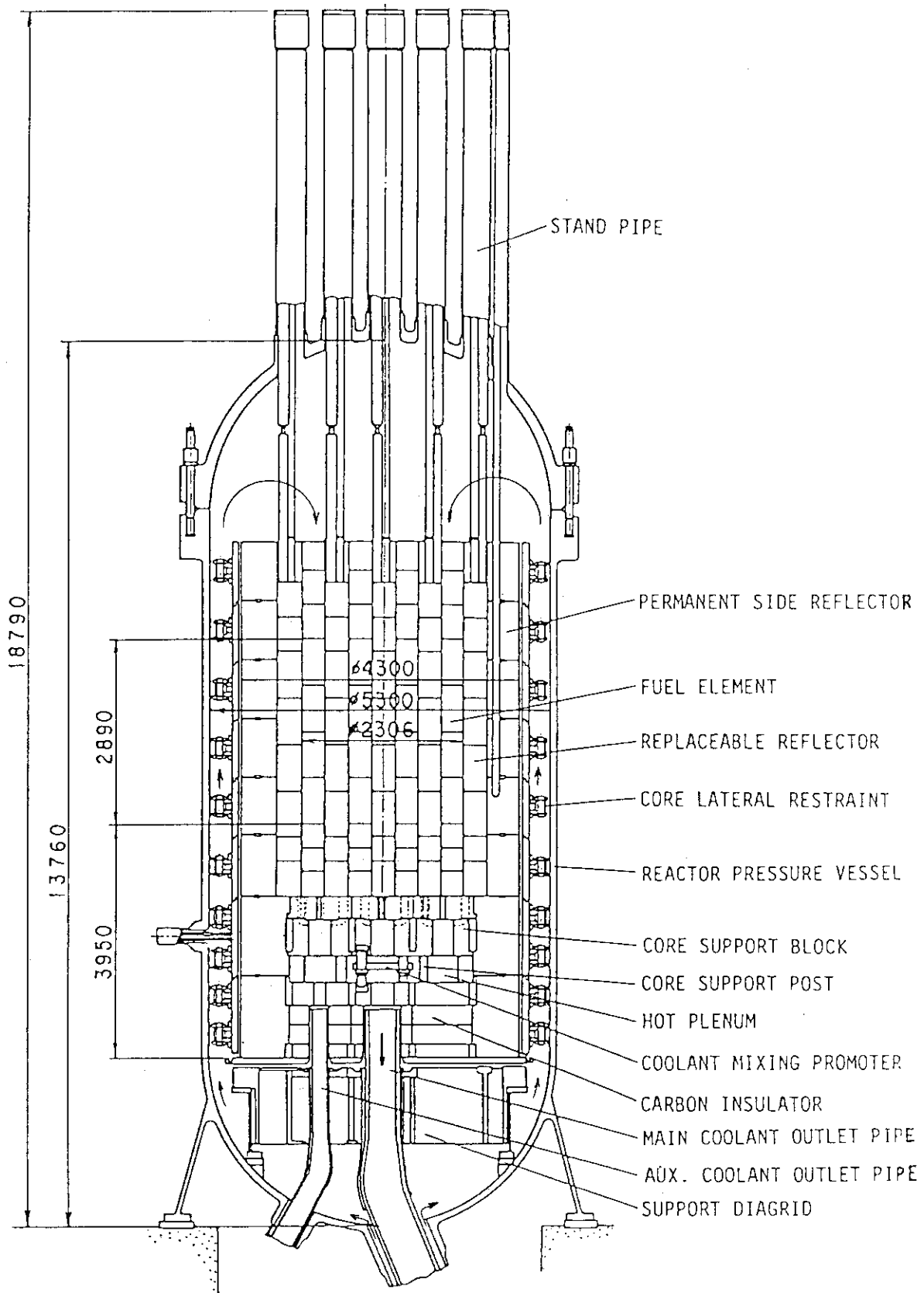


Fig. 6.1 View of reactor vertical cross-section

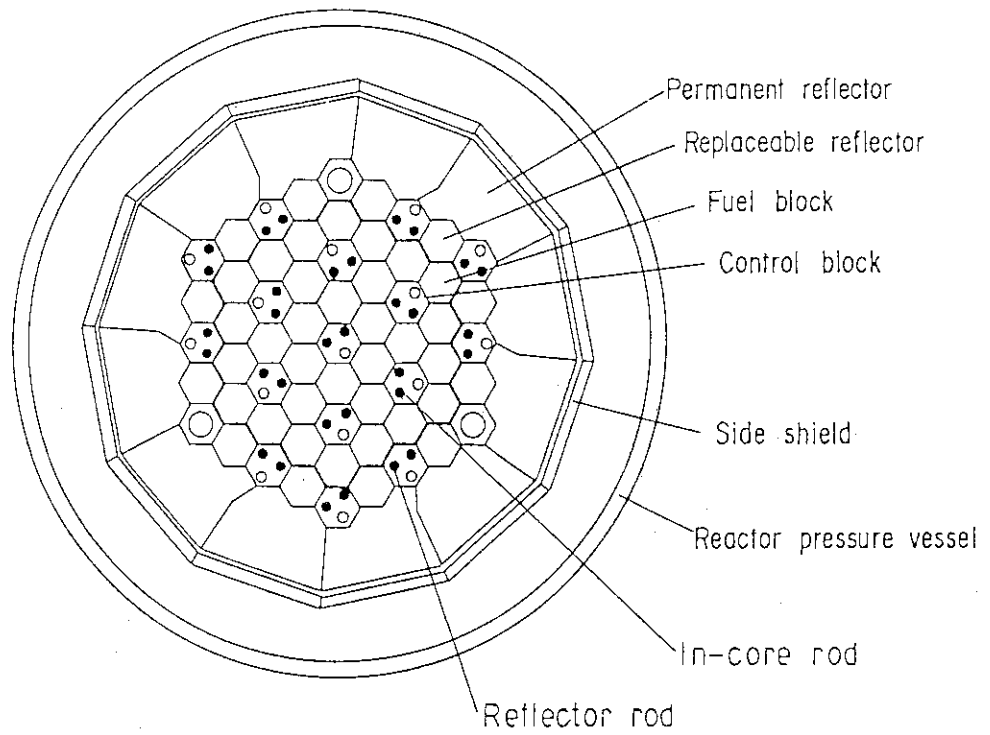


Fig. 6.2 Cross-section of reactor core

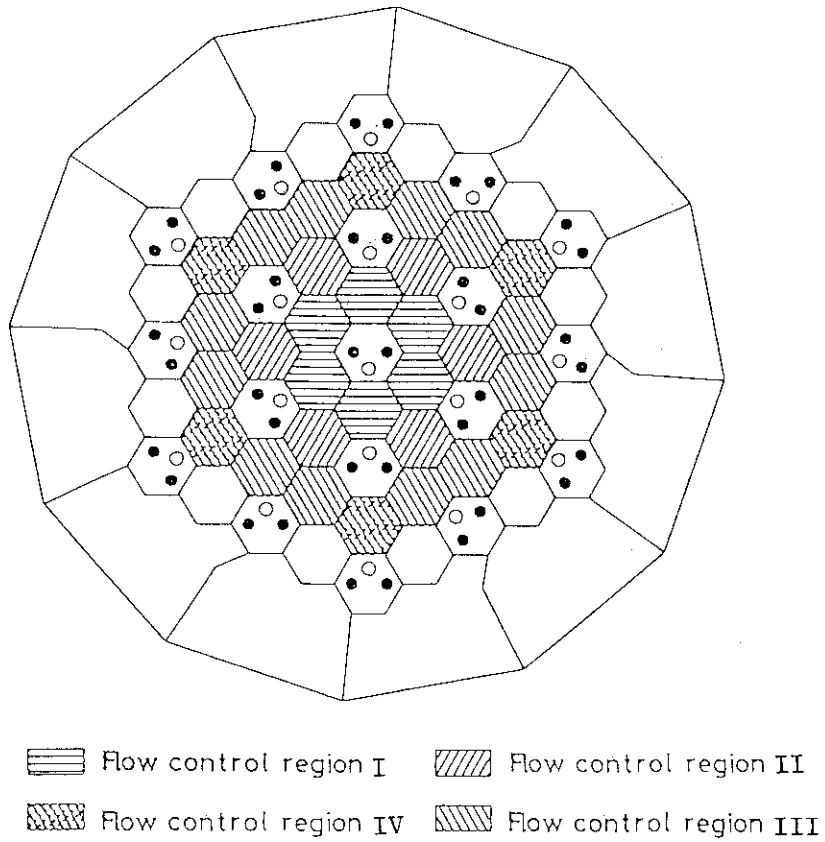


Fig. 6.3 Division of core into flow control region

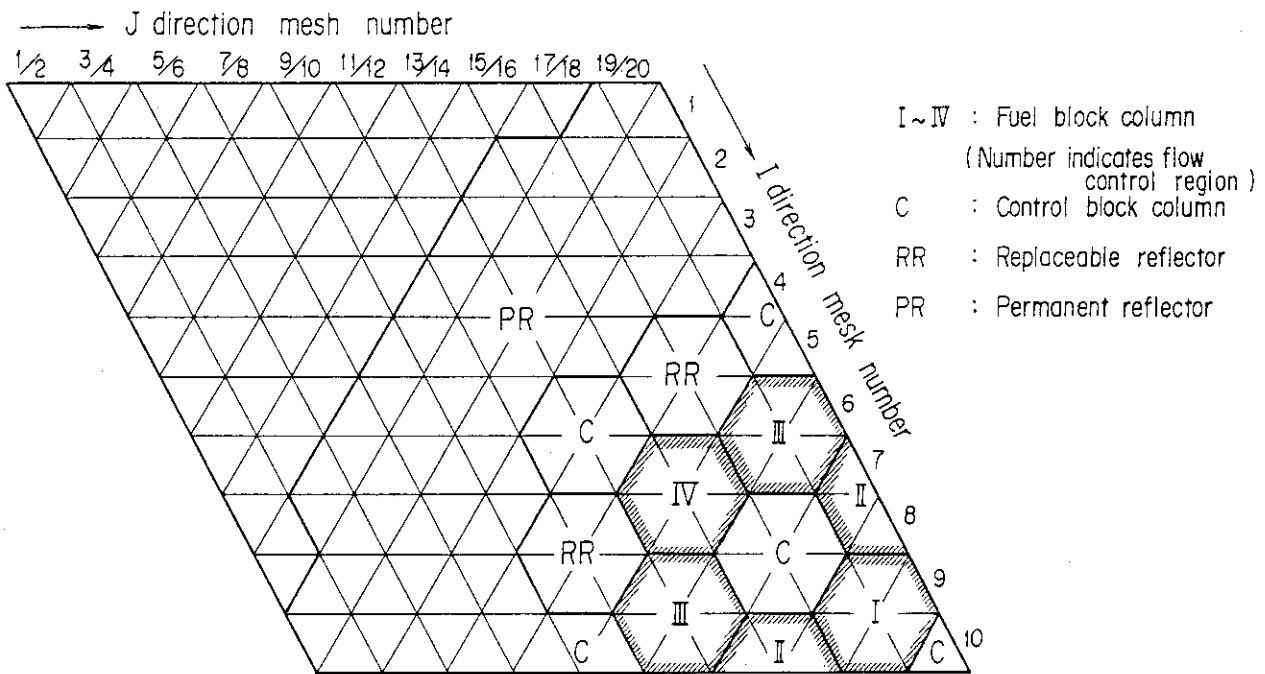


Fig. 6.4 Analytical model for TEMPEST sample problem

## 7. 結 論

高温ガス炉炉心総合熱流動解析コードTEMPESTを開発し、その解析モデル、数値解析手法、プログラム構成、及び使用方法について本報告書にまとめた。

本コードは、以下の機能を有する。

- (1) 核計算コードCITATIONで計算された3次元の出力分布を用いて、各種の無次元熱特性パラメータを計算する。また、物質構成の異なる点での出力分布及び中性子束分布の内外挿を行う。
- (2) 炉心を流量調節領域に分け、冷却材の流量配分を行う。
- (3) 加熱による層流化現象の発生の有無を判定するための各種パラメータを計算する。
- (4) 熱膨張や高速中性子照射による燃料棒の寸法変化を考慮して、半径方向1次元の熱伝導方程式を解いて温度分布を計算する。
- (5) システムティック因子及びランダム因子を用いて、ホットスポット温度を計算する。
- (6) 被覆燃料粒子の健全性を評価する上で重要な指標である燃料核の移動距離及びパラジウムによるSiC層の腐食量を計算する。
- (7) 燃料温度、核移動距離、SiC層腐食量が或る値あるいは或る値以上となる燃料体が全燃料体に占める体積割合分布を計算する。

現在、更に使い易くするために以下の機能を追加する改良を進めている。

### 1) 軸方向チャンネルの流量が変化する場合

ブロック型炉心の場合、ブロック積層面間を流れるクロス流れのために、チャンネルの冷却材流量が軸方向のブロック毎に異なる。このような場合に対応するために、流路網モデルによる流量配分解析の結果を用いて計算する。

### 2) 流量調節方式の追加

各流量調節領域間の流量比が、指定された値になるように全流量を配分する。

### 3) 燃料体形状の追加

球状燃料を用いるペブルベッド炉心をも取り扱えるようにする。

## 謝 辞

TEMPESTコードは著者が開発した単チャンネルコードを基にセンチュリリサーチセンタ(株)に発注して作成したものである。核熱結合炉心燃焼計算コードCITDEGAの熱流動計算部分を担当された中野鴻氏、つづいて改良作業を担当された内山悦雄氏、及び吉田一氏に感謝致します。また、PdによるSiC層腐食量計算について協力戴いた土井猛氏(現在、石川島播磨重工業株式会社)、実際の炉心熱流動計算への適用にあたって有益な御意見を戴いた笠羽道博氏(現在、石川島播磨重工業株式会社)に感謝致します。

開発にあたって助言と便宜を図って戴いた、宮本喜晟前多目的高温ガス実験炉設計室長(現HENDEL開発試験室長)、齊藤伸三高温工学試験研究炉設計室長並びに平野光将主任研究員に深く感謝致します。また、燃料コンパクト及び黒鉛スリーブの物性値に関するサブルーチンを提示して戴いた佐藤貞夫氏に深く感謝致します。



## 参 考 文 献

- (1) T.B. Fower, "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", ORNL-TM-2496 (Rev. 2) (1971)
- (2) 鈴木邦彦私信, "ガス冷却炉用チャンネル熱計算コードDEGA-3"
- (3) 高野誠等, "CITDEGA 3次元核熱結合炉心燃焼特性解析コード—使用手引書—" JAERI-M 85-048 (1985).
- (4) F. Cole-Brook, J. Inst. Engr. 11, 133 (1938-39)
- (5) K. Maubach, "Reibungsgesetze turbulenter Stromungen", Chemie-Ing.-Technik, 42 (15), 995-1004 (1970)
- (6) W.C. Coon, "Transition from the turbulent to the laminar regime for internal convective flow with large property variations", Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, C, 92, No. 3, 506-512 (1970)
- (7) H. Hausen, Z. Ver deut. Ingr., Beich Verfahrenstech, 4, 91-98 (1943)
- (8) N.H. Coates and A.F. Galli, "Film coefficient of heat transfer for helium at 2000°F to 2500°F in turbulent flow", Report 6856, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, March (1966)
- (9) B.S. Petukhov, "Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties", Adv. Heat Transf. 6, 503-504 (1970)
- (10) O.E. Dwyer, "On the transfer of heat to fluid flowing through pipes, annuli, and parallel plates", Nuclear Science and Engineering, 17, 336-344 (1963)
- (11) M. Dall Donne and E. Meervald, "Heat transfer and friction coefficient for turbulent flow of air in smooth annuli at high temperatures", Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 787-809 (1973)
- (12) 日本機械学会編, 伝熱工学資料改訂第2版 (1975).
- (13) M. Wagner-Loffer, "Ameba behavior of UO<sub>2</sub> coated particle fuel", REAKTOR TAGUNG, 378-382 (1975)
- (14) T.N. Tiegs, "Fission product Pd-SiC interaction in irradiated coated particle fuels", ORNL/TM-7203 (1980)
- (15) K. Bongartz et al., "A universal model for coated particle failure", Smirt paper C4/2 (1981)
- (16) F. Montgomery, "Fission-product SiC reaction in HTGR fuel", DOE/ET/35300-T3 (1981)



付録2 出力リスト

\*\* GEMKAZ4 MAR-1986 -J9114.CJT3D.DATA(R2C30)-  
 \*\* BURN UP CALC. FOR 1/6 CORE MODEL

NUMBER OF COLUMNS = 20  
 NUMBER OF ROWS = 10  
 NUMBER OF PLANES = 36  
 NUMBER OF ENERGY TYPES = 6

DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO	DX	NO																																																			
	1	6.017	2	18.050	3	30.083	4	42.117	5	54.150	6	66.183	7	78.216	8	90.250	9	102.283	10	114.316	11	126.350	12	138.383	13	150.416	14	162.449	15	174.483	16	186.516	17	198.549	18	210.583	19	222.616	20	234.649																														
DY	1	6.017	2	24.067	3	42.117	4	60.167	5	78.216	6	96.266	7	114.316	8	132.366	9	150.416	10	168.466																																																		
DZ	1	7.125	2	21.375	3	35.625	4	49.875	5	64.125	6	78.375	7	92.625	8	106.875	9	121.125	10	135.375	11	149.625	12	163.875	13	178.125	14	192.375	15	206.625	16	220.875	17	235.125	18	249.375	19	263.625	20	277.875	21	292.125	22	306.375	23	320.625	24	334.875	25	349.125	26	363.375	27	377.625	28	391.875	29	406.125	30	420.375	31	434.625	32	448.875	33	463.125	34	477.375	35	491.625

ORIFICE SPECIFICATION

ORIFICE NUMBER 1    NUMBER OF CHANNELS IN THIS ORIFICE    6.000  
 17 19 10 10    18 20 9 9

ORIFICE NUMBER 2    NUMBER OF CHANNELS IN THIS ORIFICE    6.000  
 14 16 10 10    20 20 7 7    19 20 8 8

ORIFICE NUMBER 3    NUMBER OF CHANNELS IN THIS ORIFICE    12.000  
 12 14 9 9    11 13 10 10    18 20 6 6  
 17 19 7 7

ORIFICE NUMBER 4    NUMBER OF CHANNELS IN THIS ORIFICE    6.000  
 14 16 7 7    13 15 8 8

ORIFICE NUMBER AT EACH INTERVALS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	3	3	3	2	2
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	0	0	0	2	2
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1

CHANNEL SPECIFICATION

CHANNEL NUMBER    1  
 CHANNEL HEIGHT    276.  
 NUMBER OF CHANNELS IN MESH    5.5  
 11 19 10 10    12 14 9 9    18 20 9 9  
 13 15 8 8    19 20 8 8    14 20 7 7  
 18 20 6 6

CHANNEL NUMBER AT EACH INTERVALS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

!!! CORE-FLOW DISTRIBUTION WITH THE MANNER KORIFI = 1 !!!

\*\*\* CFLOW \*\*\* CRITICAL FLOW AND ASSIGNED FLOW OF CHANNELS

TOTAL CORE FLOW . . . . . = 1562.120  
 TARGET TEMPERATURE . . . . . = 0.0  
 SUM OF CRITICAL FLOW . . . . . = 1562.120  
 MULTIPLICATION FACTOR . . . . . = 1.00000000

REGION NUMBER		CHANNEL NUMBER	CHANNEL CRITICAL FLOW	NUMBER OF CHANNELS	REGION CRITICAL FLOW	ASSIGNED CHANNEL FLOW	ASSIGNED REGION FLOW	CHANNEL PERFORMANCE FOR ASSIGNED FLOW									
			9.467400	33.0000	312.424	9.467400	312.424	ZN	T-OUT	TF-N	RE-OUT	P-LOSS	PF2	PFR	PFA		
1	(18, 9)	9.467400	48.3	55.2	0.0	1329.2	55.2	55.2	999.4	1157.43	2909.	0.048492	1.01917	0.97234	1.89569		
2	(19, 9)	9.467400	45.3	55.2	0.0	1280.9	55.2	55.2	965.1	1117.47	3025.	0.047546	0.96091	0.91675	1.88266		
3	(20, 9)	9.467400	46.7	55.2	0.0	1199.5	55.2	55.2	982.3	1138.26	2997.	0.048019	0.99004	0.94655	1.88683		
4	(17, 10)	9.467400	45.3	55.2	0.0	1176.9	55.2	55.2	965.1	1117.47	3025.	0.047546	0.96091	0.91675	1.88266		
5	(18, 10)	9.467400	46.7	55.2	0.0	1199.5	55.2	55.2	982.3	1138.26	2997.	0.048019	0.99004	0.94655	1.88683		
6	(19, 10)	9.467400	51.4	55.2	0.0	1265.8	55.2	55.2	1034.5	1199.20	2914.	0.049500	1.07894	1.02936	1.90267		
2		9.467400		33.0000	312.424	9.467400	312.424								PF1 = 0.95405		
7	(20, 7)	9.467400	42.8	55.2	0.0	1238.1	55.2	55.2	945.1	1082.21	3059.	0.046921	0.92791	0.88433	1.84709		
8	(19, 8)	9.467400	49.1	55.2	0.0	1231.7	55.2	55.2	1018.0	1167.81	2926.	0.049011	1.03197	1.00256	1.86864		
9	(20, 8)	9.467400	47.4	55.2	0.0	1208.5	55.2	55.2	999.3	1146.51	2869.	0.048477	1.02012	0.97320	1.85766		
10	(14, 10)	9.467400	42.8	55.2	0.0	1138.7	55.2	55.2	945.1	1082.21	3059.	0.046921	0.92791	0.88433	1.84710		
11	(15, 10)	9.467400	49.1	55.2	0.0	1231.7	55.2	55.2	1018.0	1167.81	2926.	0.049011	1.03197	1.00256	1.86864		
12	(16, 10)	9.467400	47.4	55.2	0.0	1208.5	55.2	55.2	999.3	1146.51	2869.	0.048477	1.02012	0.97320	1.85766		
3		9.467400		66.0000	624.848	9.467400	624.848								PF1 = 1.01108		
13	(18, 6)	9.467400	48.7	55.2	0.0	1327.2	110.4	110.4	1027.3	1164.78	2925.	0.049149	1.00649	1.01765	1.82395		
14	(19, 6)	9.467400	48.7	55.2	0.0	1230.2	110.4	110.4	1027.9	1165.02	2926.	0.049164	1.00747	1.01863	1.82532		
15	(20, 6)	9.467400	45.2	55.2	0.0	1182.1	110.4	110.4	989.9	1120.87	2884.	0.048096	0.94652	0.93701	1.79934		
16	(17, 7)	9.467400	45.5	55.2	0.0	1189.1	110.4	110.4	995.0	1127.34	2876.	0.048264	0.95460	0.96518	1.79811		
17	(18, 7)	9.467400	52.3	55.2	0.0	1285.7	110.4	110.4	1074.5	1216.09	2854.	0.050522	1.03222	1.09421	1.82337		
18	(19, 7)	9.467400	48.0	55.2	0.0	1224.9	110.4	110.4	1025.1	1160.30	2928.	0.049088	1.00287	1.01399	1.80597		
19	(12, 9)	9.467400	48.7	55.2	0.0	1230.0	110.4	110.4	1027.3	1164.78	2925.	0.049164	1.00650	1.01765	1.82395		
20	(13, 9)	9.467400	45.5	55.2	0.0	1189.1	110.4	110.4	995.0	1127.34	2876.	0.048264	0.95460	0.96518	1.79811		
21	(14, 9)	9.467400	52.3	55.2	0.0	1285.7	110.4	110.4	1074.5	1216.09	2854.	0.050522	1.03222	1.09421	1.82337		
22	(11, 10)	9.467400	48.7	55.2	0.0	1230.2	110.4	110.4	1027.9	1165.02	2926.	0.049164	1.00747	1.01863	1.82531		
23	(12, 10)	9.467400	45.2	55.2	0.0	1182.1	110.4	110.4	989.9	1120.87	2884.	0.048080	0.94652	0.93701	1.79934		
24	(13, 10)	9.467400	48.0	55.2	0.0	1224.9	110.4	110.4	1025.1	1160.30	2928.	0.049088	1.00287	1.01399	1.80597		
4		9.467400		33.0000	312.424	9.467400	312.424								PF1 = 1.07092		
25	(14, 7)	9.467400	51.6	55.2	0.0	1255.9	55.2	55.2	1040.5	1189.83	2905.	0.049591	0.97016	1.03897	1.85467		
26	(15, 7)	9.467400	52.9	55.2	0.0	1277.3	55.2	55.2	1056.3	1209.60	3031.	0.050018	0.99422	1.06474	1.87459		
27	(16, 7)	9.467400	51.5	55.2	0.0	1263.1	55.2	55.2	1045.2	1196.71	2898.	0.049728	0.97730	1.04662	1.87613		

28 (13, 8)	9.467400	52.9	55.2	0.0	0.0	1277.3	55.2	1392.3	55.2	1056.3	1209.60	2881.	0.050018	0.99422	1.06473	1.89459
29 (14, 8)	9.467400	51.5	55.2	0.0	0.0	1263.1	55.2	1377.0	55.2	1045.2	1196.71	2898.	0.049728	0.97730	1.04662	1.87613
30 (15, 8)	9.467400	57.9	55.2	0.0	0.0	1355.1	55.2	1479.2	55.2	1117.5	1281.28	2793.	0.051804	1.08680	1.16389	1.89791

TOTAL 165.0000 1562.12036 1562.120

PRESSURE BALANCE ITERATION COUNT =

PRESSURE BALANCE ITERATION COUNT = 1

1	9.467400	33.0000	312.424	9.467400	312.424	PF1 = 0.95405										
1 (18, 9)	9.434407	48.3	55.2	0.0	0.0	1222.3	55.2	1331.2	55.2	1001.5	1159.10	2955.	0.048248	1.01917	0.97234	1.89569
2 (19, 9)	9.530796	45.3	55.2	0.0	0.0	1173.6	55.2	1277.3	55.2	961.4	1114.45	3052.	0.048035	0.96091	0.91675	1.88266
3 (20, 9)	9.483739	46.7	55.2	0.0	0.0	1198.6	55.2	1305.2	55.2	981.3	1137.46	3003.	0.048096	0.99004	0.94455	1.88683
4 (17, 10)	9.530796	45.3	55.2	0.0	0.0	1173.6	55.2	1277.3	55.2	961.4	1114.45	3052.	0.048035	0.96091	0.91675	1.88266
5 (18, 10)	9.483739	46.7	55.2	0.0	0.0	1198.6	55.2	1305.2	55.2	981.3	1137.46	3003.	0.048096	0.99004	0.94455	1.88683
6 (19, 10)	9.530796	45.3	55.2	0.0	0.0	1173.6	55.2	1277.3	55.2	961.4	1114.45	3052.	0.048035	0.96091	0.91675	1.88266
7 (20, 7)	9.588017	42.8	55.2	0.0	0.0	1132.5	55.2	1231.5	55.2	1001.5	1148.23	2904.	0.048203	1.02012	0.97220	1.85766
8 (19, 8)	9.381311	49.1	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864
9 (20, 8)	9.432845	47.4	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864
10 (14, 10)	9.588017	42.8	55.2	0.0	0.0	1132.5	55.2	1231.5	55.2	1001.5	1148.23	2904.	0.048203	1.02012	0.97220	1.85766
11 (15, 10)	9.381311	49.1	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864
12 (16, 10)	9.432845	47.4	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864

2	9.467400	33.0000	312.424	9.467400	312.424	PF1 = 0.95303										
7 (20, 7)	9.588017	42.8	55.2	0.0	0.0	1132.5	55.2	1231.5	55.2	1001.5	1148.23	2904.	0.048203	1.02012	0.97220	1.85766
8 (19, 8)	9.381311	49.1	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864
9 (20, 8)	9.432845	47.4	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864
10 (14, 10)	9.588017	42.8	55.2	0.0	0.0	1132.5	55.2	1231.5	55.2	1001.5	1148.23	2904.	0.048203	1.02012	0.97220	1.85766
11 (15, 10)	9.381311	49.1	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864
12 (16, 10)	9.432845	47.4	55.2	0.0	0.0	1236.7	55.2	1347.1	55.2	1023.7	1172.24	2904.	0.048248	1.05197	1.00256	1.86864

3	9.467400	66.0000	624.848	9.467400	624.848	PF1 = 1.01108										
13 (18, 6)	9.454668	48.7	55.2	0.0	0.0	1230.7	110.4	1328.0	110.4	1028.0	1165.45	2920.	0.049072	1.00649	1.01765	1.82395
14 (19, 6)	9.455203	48.7	55.2	0.0	0.0	1231.1	110.4	1328.4	110.4	1028.7	1165.77	2919.	0.049042	1.00747	1.01863	1.82232
15 (20, 6)	9.559617	45.2	55.2	0.0	0.0	1176.2	110.4	1269.5	55.2	984.3	1115.60	3023.	0.048859	0.94652	0.95701	1.79934
16 (17, 7)	9.542982	45.5	55.2	0.0	0.0	1184.3	110.4	1277.0	110.4	990.3	1122.97	3007.	0.048813	0.95460	0.96518	1.79811
17 (18, 7)	9.327266	52.3	55.2	0.0	0.0	1296.2	110.4	1401.0	55.2	1084.7	1225.52	2797.	0.049347	1.08222	1.09421	1.82337
18 (19, 7)	9.462547	48.0	55.2	0.0	0.0	1225.3	110.4	1325.2	55.2	1025.4	1160.59	2926.	0.049042	1.00287	1.01399	1.80597
19 (12, 9)	9.455203	48.7	55.2	0.0	0.0	1230.8	110.4	1328.1	110.4	1028.1	1165.54	2920.	0.049042	1.00650	1.01765	1.82395
20 (13, 9)	9.542982	45.5	55.2	0.0	0.0	1184.3	110.4	1277.0	110.4	990.3	1122.97	3007.	0.048813	0.95460	0.96518	1.79811
21 (14, 9)	9.327266	52.3	55.2	0.0	0.0	1296.2	110.4	1401.0	55.2	1084.7	1225.52	2797.	0.049347	1.08222	1.09421	1.82337
22 (11, 10)	9.455203	48.7	55.2	0.0	0.0	1231.1	110.4	1328.4	110.4	1028.7	1165.78	2919.	0.049042	1.00747	1.01863	1.82232
23 (12, 10)	9.561145	45.2	55.2	0.0	0.0	1176.1	110.4	1269.4	55.2	984.2	1115.52	3023.	0.048859	0.94652	0.95701	1.79934
24 (13, 10)	9.462547	48.0	55.2	0.0	0.0	1225.3	110.4	1325.2	55.2	1025.4	1160.59	2926.	0.049042	1.00287	1.01399	1.80597

4	9.467400	33.0000	312.424	9.467400	312.424	PF1 = 1.07092										
25 (14, 7)	9.519618	51.6	55.2	0.0	0.0	1252.9	55.2	1364.9	55.2	1037.0	1187.10	2926.	0.050003	0.97016	1.03897	1.89467
26 (15, 7)	9.478871	52.9	55.2	0.0	0.0	1276.6	55.2	1391.6	55.2	1055.6	1208.99	2885.	0.050125	0.99422	1.06474	1.89459
27 (16, 7)	9.508463	51.5	55.2	0.0	0.0	1260.8	55.2	1374.6	55.2	1042.5	1194.68	2914.	0.050003	0.97730	1.04662	1.87613
28 (13, 8)	9.478871	52.9	55.2	0.0	0.0	1276.6	55.2	1391.6	55.2	1055.6	1208.99	2885.	0.050125	0.99422	1.06473	1.89459

29 (14, 8) 9.506463 51.5 55.2 0.0 0.0 1360.8 55.2 1374.6 55.2 55.2 1042.5 1194.68 2914. 0.050003 0.97730 1.04662 1.87613  
 30 (15, 8) 9.3514110 57.9 55.2 0.0 0.0 1365.1 55.2 1490.0 55.2 55.2 1129.3 1290.23 2732. 0.050049 1.08680 1.16389 1.89791

TOTAL 165.0000 1562.12036 1562.120

PRESSURE BALANCE ITERATION COUNT =

PRESSURE BALANCE ITERATION COUNT = 2

1		9.467400		33.0000		312.424		9.467400		312.424		PF1 = 0.95405	
CHIM	ZQ	CHFR	ZL	TS	ZS	TR	ZR	ZN	T.OUT	TF.N	RE.OUT	P.LOSS	PF2
1 (18, 9)	9.425817	48.3	55.2	0.0	1222.8	55.2	1331.7	55.2	55.2	1002.0	1159.53	2952.	0.048157
2 (19, 9)	9.543268	45.3	55.2	0.0	1172.9	55.2	1276.6	55.2	55.2	960.6	1113.86	3057.	0.048111
3 (20, 9)	9.490122	46.7	55.2	0.0	1198.3	55.2	1304.8	55.2	55.2	980.9	1137.15	3006.	0.048157
4 (17, 10)	9.543268	45.3	55.2	0.0	1172.9	55.2	1276.6	55.2	55.2	960.6	1113.86	3057.	0.048111
5 (18, 10)	9.490122	46.7	55.2	0.0	1198.3	55.2	1304.8	55.2	55.2	980.9	1137.15	3006.	0.048157
6 (19, 10)	9.311782	51.4	55.2	0.0	1275.2	55.2	1389.9	55.2	55.2	1043.1	1207.55	2850.	0.048203
PF1 = 0.95405													
2		9.467400		33.0000		312.424		9.467400		312.424		PF1 = 0.95303	
CHIM	ZQ	CHFR	ZL	TS	ZS	TR	ZR	ZN	T.OUT	TF.N	RE.OUT	P.LOSS	PF2
7 (20, 7)	9.612742	42.8	55.2	0.0	1131.3	55.2	1230.2	55.2	55.2	936.9	1075.62	3121.	0.048065
8 (19, 8)	9.366755	49.1	55.2	0.0	1237.5	55.2	1348.0	55.2	55.2	1024.7	1173.00	2898.	0.048172
9 (20, 8)	9.422681	47.4	55.2	0.0	1211.0	55.2	1318.9	55.2	55.2	1002.1	1148.74	2950.	0.048080
10 (14, 10)	9.612742	42.8	55.2	0.0	1131.3	55.2	1230.2	55.2	55.2	936.9	1075.62	3121.	0.048065
11 (15, 10)	9.366755	49.1	55.2	0.0	1237.5	55.2	1348.0	55.2	55.2	1024.7	1173.00	2898.	0.048172
12 (16, 10)	9.422681	47.4	55.2	0.0	1211.0	55.2	1318.9	55.2	55.2	1002.1	1148.74	2950.	0.048080
PF1 = 0.95303													
3		9.467400		66.0000		624.848		9.467400		624.848		PF1 = 1.01108	
CHIM	ZQ	CHFR	ZL	TS	ZS	TR	ZR	ZN	T.OUT	TF.N	RE.OUT	P.LOSS	PF2
13 (18, 6)	9.452936	48.7	55.2	0.0	1231.0	110.4	1328.3	110.4	1028.3	1165.68	2919.	0.049026	1.00649
14 (19, 6)	9.451468	48.7	55.2	0.0	1231.3	110.4	1328.6	110.4	1029.0	1166.01	2917.	0.049026	1.00747
15 (20, 6)	9.577449	45.2	55.2	0.0	1175.1	110.4	1268.5	110.4	963.2	1114.60	3030.	0.048965	0.94652
16 (17, 7)	9.565269	45.5	55.2	0.0	1182.9	110.4	1275.5	110.4	988.9	1121.71	3017.	0.048996	0.95460
17 (18, 7)	9.298322	52.3	55.2	0.0	1298.4	110.4	1402.9	110.4	1086.8	1227.51	2786.	0.049072	1.08222
18 (19, 7)	9.458811	48.0	55.2	0.0	1225.5	110.4	1325.4	110.4	1025.6	1160.82	2925.	0.049011	1.00287
19 (12, 9)	9.451468	48.7	55.2	0.0	1231.0	110.4	1328.4	110.4	1028.4	1165.77	2918.	0.048996	1.00650
20 (13, 9)	9.565269	45.5	55.2	0.0	1182.9	110.4	1275.5	110.4	988.9	1121.71	3017.	0.048996	0.95460
21 (14, 9)	9.298322	52.3	55.2	0.0	1298.4	110.4	1402.9	110.4	1086.8	1227.51	2786.	0.049072	1.08222
22 (11, 10)	9.451468	48.7	55.2	0.0	1231.3	110.4	1328.7	110.4	1029.0	1166.01	2917.	0.049026	1.00747
23 (12, 10)	9.578980	45.2	55.2	0.0	1175.0	110.4	1268.4	110.4	983.1	1114.51	3031.	0.048965	0.94652
24 (13, 10)	9.458811	48.0	55.2	0.0	1225.5	110.4	1325.4	110.4	1025.6	1160.82	2925.	0.049011	1.00287
PF1 = 1.01108													
4		9.467400		33.0000		312.424		9.467400		312.424		PF1 = 1.07092	
CHIM	ZQ	CHFR	ZL	TS	ZS	TR	ZR	ZN	T.OUT	TF.N	RE.OUT	P.LOSS	PF2
25 (14, 7)	9.534939	51.6	55.2	0.0	1252.0	55.2	1364.0	55.2	55.2	1035.9	1186.31	2932.	0.050125
26 (15, 7)	9.471041	52.9	55.2	0.0	1277.1	55.2	1392.1	55.2	55.2	1056.1	1209.40	2882.	0.050049
27 (16, 7)	9.521762	51.5	55.2	0.0	1260.0	55.2	1373.6	55.2	55.2	1041.5	1193.89	2820.	0.050156
28 (13, 8)	9.471041	52.9	55.2	0.0	1277.1	55.2	1392.1	55.2	55.2	1056.1	1209.40	2882.	0.050049
29 (14, 8)	9.521762	51.5	55.2	0.0	1260.0	55.2	1373.6	55.2	55.2	1041.5	1193.89	2920.	0.050156
PF1 = 1.07092													

30 (15, 8) 9.283888 57.9 55.2 0.0 0.0 1367.1 55.2 1492.1 55.2 1131.7 1292.03 2720. 0.050247 1.08680 1.16389 1.89791

-----  
TOTAL 165.0000 1562.12036 1562.120

PRESSURE BALANCE ITERATION COUNT =

PRESSURE BALANCE ITERATION COUNT = 3

NO. OF CHANNELS IN EACH ORIFICE REGION 6 6 12 6



FUEL TEMPERATURE SPECTRUM (O/D) SCALE(DEG)		CORE									
TEMP.I	5.00 I	10.00 I	15.00 I	20.00 I	25.00 I	30.00 I	35.00 I	40.00 I	45.00 I	50.00 I	
400.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
450.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
500.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
550.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
600.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
650.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
700.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
750.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
800.01	0.0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
850.01	0.1009	I	0.3026	I	0.1513	I	0.2018	I	0.2675	I	
900.01	0.1009	I	0.3333	I	0.5855	I	0.4978	I	0.4189	I	
950.01	0.5329	I	0.6162	I	0.2675	I	0.1996	I	0.5175	I	
1000.01	1.3246	I	0.7961	I	1.8684	I	1.9978	I	0.2171	I	
1050.01	3.7018	I	3.1733	I	3.4584	I	3.8794	I	0.8380	I	
1100.01	4.5965	I	2.7698	I	3.5746	I	3.1557	I	1.8926	I	
1150.01	1.4101	I	0.5526	I	0.7632	I	3.0921	I	4.0724	I	
1200.01	0.3180	I	0.1491	I	0.3136	I	0.1996	I	1.7983	I	
1250.01	0.0658	I	I	I	0.0329	I	0.0658	I	0.2149	I	
1300.01	I	I	I	I	I	I	I	I	0.0	I	
1350.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1400.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1450.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1500.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1550.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1600.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1650.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1700.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1750.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1800.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1850.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1900.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
1950.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2000.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2050.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2100.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2150.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2200.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2250.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2300.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2350.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2400.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2450.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2500.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2550.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2600.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2650.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2700.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2750.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2800.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
2850.01	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	

TOTAL VOLUME 158153.3 (CH-3)









### 付録3 使用ファイル

TEMPESTが使用するファイルについて以下に説明する。ファイルの番号がFortranのユニット機番に対応している。

- File 1 …… チャンネル毎の温度スペクトラムが書かれる。(燃焼ステップが進むと保存されない。)
- File 2 …… チャンネル毎の核移動距離及びパラジウムによるSiC層腐蝕量のスペクトラムが書き込まれている。(1つの燃焼ステップだけに対応し、燃焼ステップが進むと新しく置き換えられる。)
- File 4 …… 入力データ専用のファイルでカードリーダーに対応する。
- File 5 …… File 4の内容をコピーしたもの、個々のサブルーチンでの入力は、このファイルから読まれる。
- File 8 } …… 核移動距離及びSiC腐蝕量を計算するために、燃焼ステップ毎に入力、出力関係  
File 9 } …… を入れ換えて時間についての加算を行う。  
サブルーチンCALCでのボリュームLFN1及びLFN2に対応する。
- File A (A=10 ~ 30) …… 核設計計算における燃焼ステップ毎の炉心出力分布を与えるファイルで、CITATIONコードの32番のファイルに対応する。
- File B (B=50 ~ 70) …… File Aと同様であるが、炉心内の中性子束分布を与えるファイルで、CITATIONコードの9番のファイルに対応する。
- なお、File A及びFile Bは、入力データのKSTPで指定した燃焼ステップ数と同じ数だけのファイルを指定しなければならない。
- File 38 …… File A及びFile Bを基に、炉心の熱流動計算で繰り返し参照し易いように、軸方向出力分布、中性子束分布及び熱流動計算データをまとめたもので、サブルーチンORIFで作成される。一時的なファイルを1つ指定するだけで良い。内容は、プログラムで作成される。

## 付録4 ヘリウムの物性値

冷却材としての主要な物性値は、密度、比熱、熱伝導率及び粘度である。Cederberg<sup>\*</sup> がまとめたものに基づいて以下に各項目ごとに記述する。

(1) 密度,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

$$\rho = P/RT - \rho^2 \cdot B(T) - \rho^3 \cdot C(T) \quad (\text{A4.1})$$

$$B(T) = 4.5 \times 10^{-4} + 5.42 / (1890 + T) \quad (\text{A4.2})$$

$$C(T) = 1.7 \times 10^{-7} + 4.2 \times 10^{-3} / (1890 + T) + 25.3 / (1890 + T)^2 \quad (\text{A4.3})$$

但し、Rはガス定数 ( $R = 2.07723 \times 10^{-3}$  MPa・m<sup>3</sup>/(kg・K))である。また、P、Tはそれぞれ圧力 (MPa)、温度 (K)である。

C(T) = 0としても相対誤差は以下に示すように小さいので今回の計算では省略する。

圧力 4 MPa, 温度 400 °C以上…………… 0.004 %以下

圧力 10 MPa, 温度 400 °C以上…………… 0.03 %以下

従って、

$$\rho = \left( \sqrt{1 + \frac{4P \cdot B(T)}{RT}} - 1 \right) / 2 \cdot B(T) \quad (\text{A4.4})$$

(2) 定圧比熱,  $c_p$  [kJ/(kg・K)]

温度 0 ~ 3000 °C, 圧力 0.02 ~ 20 MPa の範囲では、並進のエネルギーのモードによって決まり、一定値となる。

$$c_p = \frac{5}{2} R = 5.192 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (\text{A4.5})$$

(3) 熱伝導率,  $\lambda$  [W/(m・K)]

$$P \leq 0.1 \text{ MPa}, \lambda_0 = 2.97 \times 10^{-3} T^{0.69} + \frac{9.23 \times 10^9 (T - 273.16)}{(T - 273.16)^5 + 4.29 \times 10^{14}} \quad (\text{A4.6})$$

$$P > 0.1 \text{ MPa}, \lambda = \lambda_0 + 2.33 \times 10^{-4} \cdot \rho + 2.39 \times 10^{-6} \cdot \rho^2 \quad (\text{A4.7})$$

実験データとの比較を Fig. A4.1 及び A4.2 に示す。

(4) 粘度,  $\eta$  [N・s/m<sup>2</sup>]

$$P \leq 0.1 \text{ MPa}, \eta_0 = 3.78 \times 10^{-7} T^{0.69} + \frac{5 \times 10^{-7}}{0.52 + T/569.6} \quad (\text{A4.8})$$

\* ) N. V. Cederbeg, V. N. Popov, N. A. Morosva, Thermodynemičeskije i teplofizičeskije svojstva gelija, Moskau, Atomizdat (1969)

$$P > 0.1 \text{ MPa}, \quad \eta = \eta_0 + 2.67 \times 10^{10} \cdot \rho^2 \quad (\text{A4.9})$$

ここで、P, Tはそれぞれヘリウムガスの圧力 (MPa), 温度 (K) である。  
実験データとの比較をFig. A4.3及びA4.4に示す。



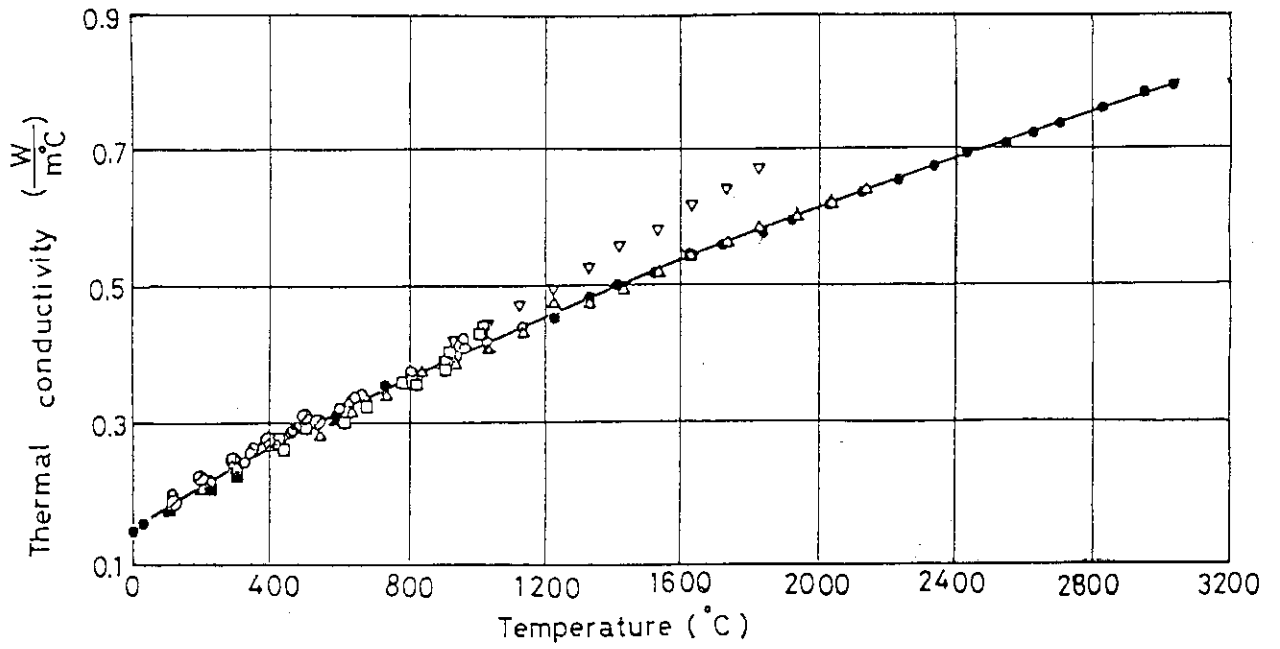


Fig A 4.1 Thermal conductivity of helium(Pressure : 0.1 MPa)

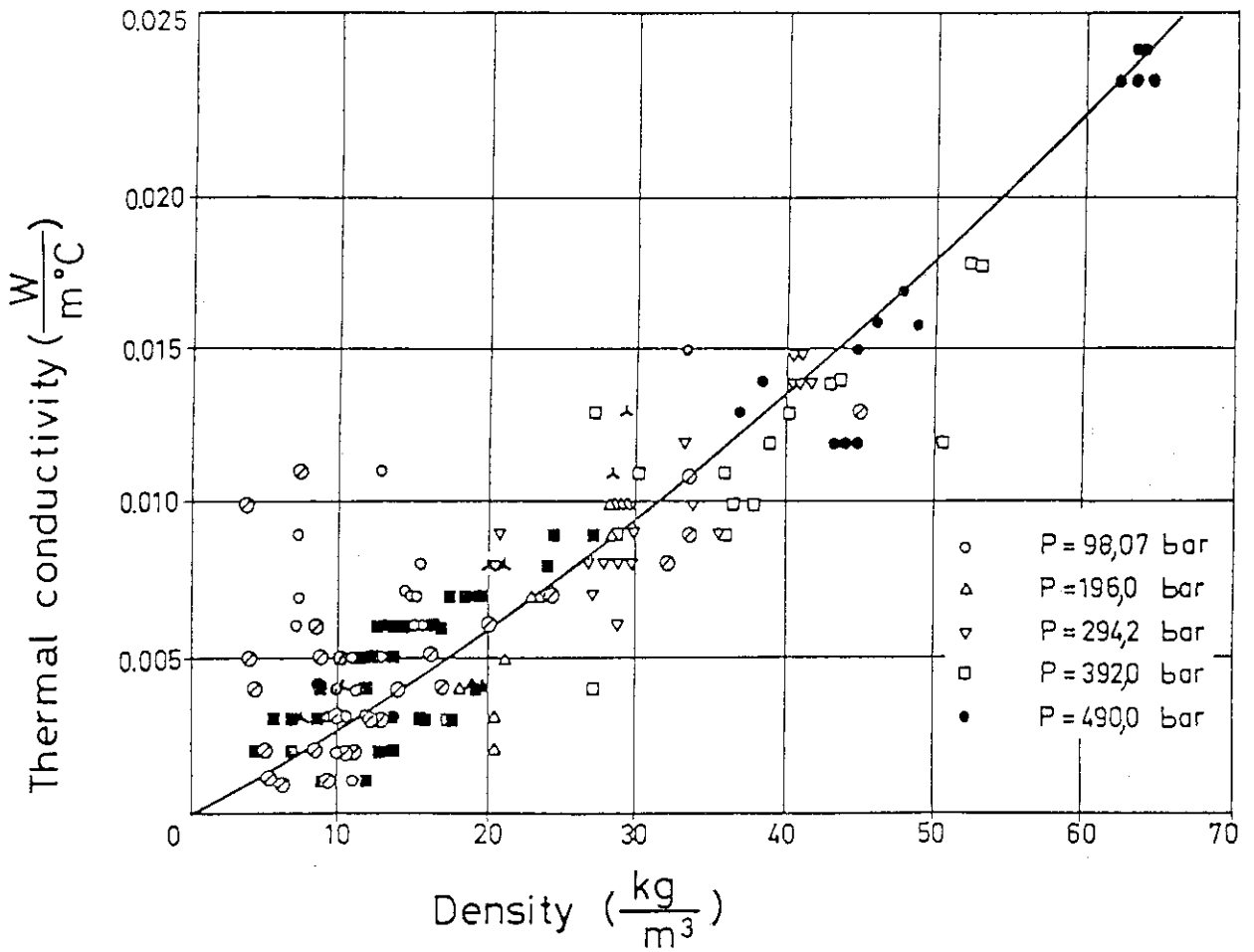


Fig. A4.2 Pressure dependency of thermal conductivity of helium.

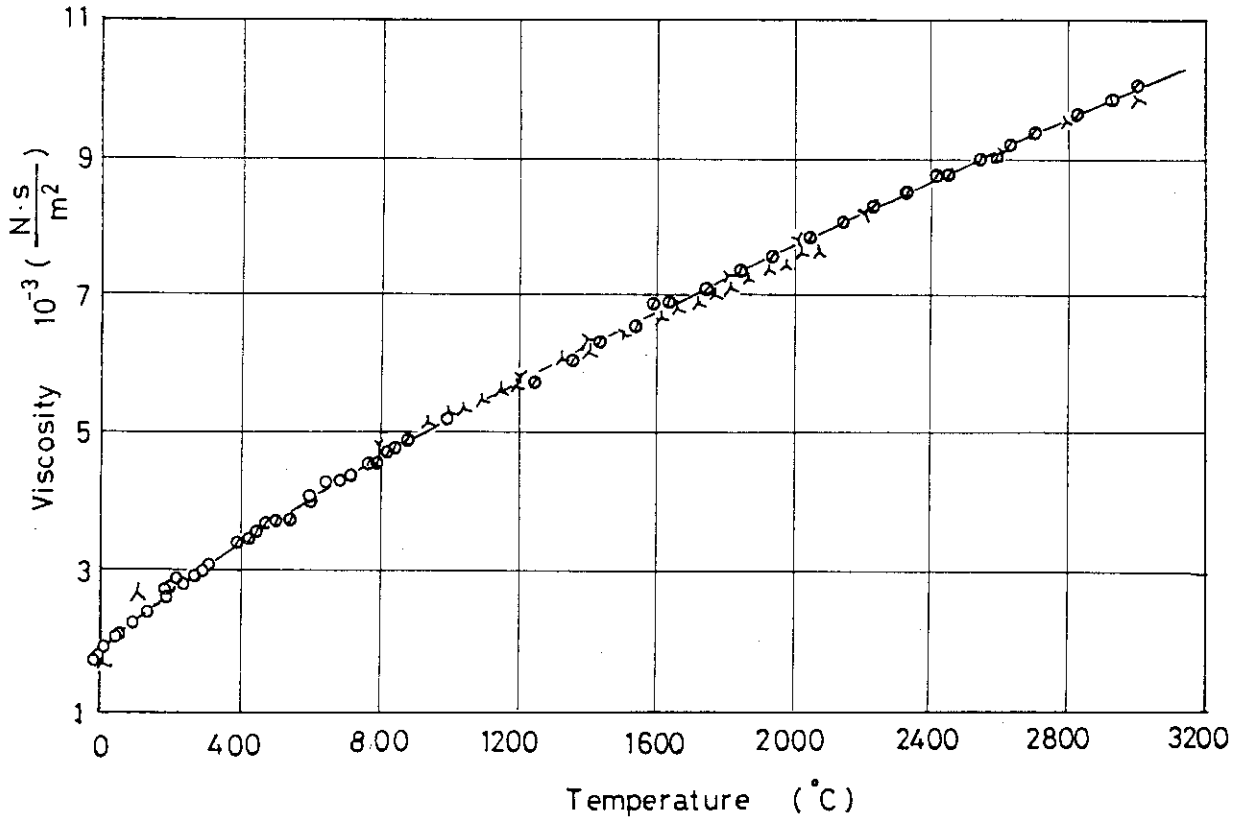


Fig. A4.3 Viscosity of helium (Pressure : 0.1 MPa).

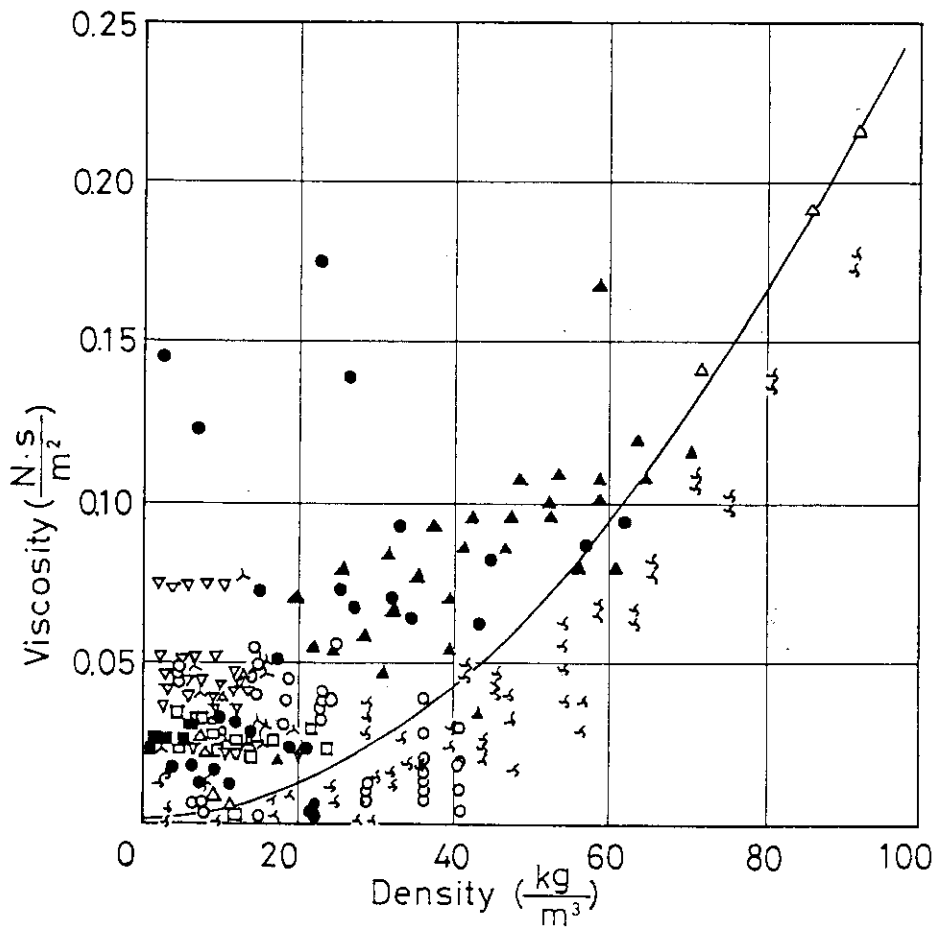


Fig. A4.4 Pressure dependency of viscosity of helium.