

JAERI-M

4 8 8 3

高温ガス冷却炉における核分裂生成物の  
非定常拡散放出量評価用コード

-FECUND-

1 9 7 2 年 7 月

牧野正彦<sup>\*</sup>、安川 茂

日 本 原 子 力 研 究 所  
Japan Atomic Energy Research Institute

高温ガス冷却炉における核分裂生成物の  
非定常拡散放出量評価用コード  
-FECUND-

日本原子力研究所動力炉開発管理室

牧野正彦<sup>\*</sup>・安川 茂

(1972年6月26日受理)

高温ガス冷却炉々心における核分裂生成物の放出量を計算するために本コードを開発した。核分裂生成物が被覆燃料粒子から放出され、その後燃料マトリックス、黒鉛スリーブなどの各層を移行して一次冷却系に放出され、さらに一次冷却ループを経て炉心に戻ってくる過程を計算の対象とした。炉心を単一燃料要素よりなるチャンネルで代表させ、対象とする燃料要素は、中実、中空円筒型、円環型ならびに球型燃料要素である。核分裂生成物の放出挙動を被覆燃料粒子体系と燃料要素体系に大別して取扱い、各々の体系で崩壊による消滅、濃度拡散、熱拡散による移動、反跳移動、先行核の崩壊等に起因する生成の諸過程をとり入れて、径方向一次元・非定常拡散問題を取り扱っている。燃料要素における核分裂生成物の濃度分布を算出する際に径方向だけでなく軸方向の拡散移動を考慮し、反復計算により径一軸方向の整合計算を行ない、また親一娘核種の結合計算も可能にしている。本コードはFORTRAN-IVで書かれており、1 燃焼ステップ当りの計算時間はIBM-360で30秒程度であった。

---

\* 外来研究員：日本揮発油株式会社

FECUND Code for Calculating Unsteady-State Diffusion of  
Fission Products in High Temperature Gas-Cooled Reactor

Masahiko Makino\* and Shigeru Yasukawa  
Office of Power Reactor Projects, JAERI

(Received June 26, 1972 )

A computer code FECUND has been developed for calculating the unsteady diffusion of fission products in fuel elements of a high temperature gas-cooled reactor. In the code, the reactor core is treated as a single fuel channel and fission product releases are calculated from the layers of coated fuel particles to the outermost surface and from the layers of a fuel channel to a primary coolant loop. Fuel channels treated here are solid and hollow cylindrical, annular and spherical fuel channels. Elementary processes of fission product migration in coated fuel particles include  $\beta$ -decay, generation by fission yield, transmutation of precursors etc., concentration diffusion and fission recoil, and in the fuel channel include  $\beta$ -decay, release of fission products from the coated fuel particles and concentration and thermal diffusion. These are treated as one-dimensional and radial unsteady diffusion problem.

Because of the nature of fission product chains, the parent-daughter pairs of nuclides are treated simultaneously in the code. In calculating the space distribution of fission products in a fuel channel, their movements not only in radial but also in axial directions, by both concentration and thermal diffusions, are taken into consideration.

The FECUND code is written in FORTRAN-IV and the calculation time for a typical problem is about 30 sec with IBM-360.

---

\* Visiting Researcher (Japan Gasoline Co., Ltd.)

## 目 次

まえがき	1
1 基本的考え方	2
1.1 燃料要素の体系	2
1.2 F. P. 放出の素過程	2
1.3 F. P. 生成源	2
1.4 冷却材ループ	6
1.5 F. P. の非定常挙動	6
1.6 諸物性値の設定	7
2 被覆燃料粒子からの F. P. の放出	8
2.1 被覆層破損のある場合の拡散放出	8
2.1.1 解析モデル	8
2.1.2 拡散外挿距離 = 0 の場合の定常ならびに非定常解析解	11
2.1.3 拡散外挿距離 $\neq$ 0 の場合の定常ならびに非定常解析解	13
2.1.4 拡散放出に関する平衡到達時間	16
2.2 被覆層破損のない場合の拡散放出	16
2.2.1 解析モデル	16
2.2.2 多重 c. f. p. 中の平衡濃度分布の解析解	19
2.2.3 多重 c. f. p. 中の非定常濃度分布の計算	26
2.2.4 拡散放出に関する平衡到達時間	30
2.3 被覆燃料粒子よりの反跳放出	34
2.4 記号説明	34
3 燃料チャンネルにおける F. P. の拡散	37
3.1 非定常拡散方程式とその解法	37
3.1.1 解析モデル	37
3.1.2 非定常拡散方程式の差分化	39
3.1.3 非定常拡散差分方程式の解法と反復計算	43
3.2 境界条件の設定	47
3.2.1 物理モデル	47
3.2.2 燃料チャンネル体系別の境界条件	48
3.2.3 濃度境界層厚さ	50
3.3 各領域に於ける F. P. 生成源	53
3.3.1 F. P. 生成源の種類	53
3.3.2 F. P. の軸方向移動量	55

3.4	一次冷却材ループ中でのF.P.の物質移動	58
3.5	記号説明	60
4	タイムステップの設定	63
4.1	F.P.放出評価用の燃焼ステップ内タイムメッシュのコード内 設定方法	63
4.2	タイムステップ間の調整	64
5	諸物理量の設定	66
5.1	温度分布の燃焼依存性の設定	66
5.2	濃度拡散係数の設定	68
5.3	熱拡散係数の設定	70
5.4	固一気相界面における隔壁係数の設定	73
5.5	He冷却材の粘性係数・密度・流速の設定	78
6	計算コード	79
6.1	コードの構成	79
6.2	計算のフロー	80
6.3	入力データ	80
6.4	出力データの説明	116
	あとがき	120
	謝辞	120
	参考文献	121
	付録1 コード内変数名称表	
	付録2 固定定数ライブラリー	
	付録3 サンプル入・出力データ	

## ま え が き

高温ガス炉では被覆燃料粒子を用いているが、高温であるために核分裂生成物 (Fission Products, 以下F.P.と略す) が燃料要素から放出し易くなっている。被覆層が破損している場合も含めて、F.P. が被覆燃料粒子からどの位放出され、さらに一次冷却系への位放出されるかを知ることが重要である。高温ガス炉に於けるF.P. の放出量を計算するコードには今までにFREVPAP-6<sup>(1)</sup>, 8<sup>(2)</sup>, 9<sup>(3)</sup> FIPERX<sup>(4)</sup>, RAD2<sup>(5)</sup>, RAD-MP<sup>(6)</sup>等が開発されてきているが、FIPERXを除いた計算コードは被覆燃料粒子、燃料要素を一点近似に取扱っている。着目するF.P. 核種の燃料要素中での移動挙動は、媒体の種類や温度などの空間変化に大きく依存するので、その濃度分布を求めるにはFIPERXの様な拡散コードの使用が望ましい。しかし多核種の結合を取り入れる場合には、拡散計算を行なうと計算時間が増えるので実際的でなく、そのような場合には一点近似で多核種の結合を取り扱えるRAD2, RAD-MPなどの計算コードの使用が望ましい。

そこで、今回新たに高温ガス炉の燃料要素内でのF.P. の拡散挙動をできるだけ正確、且つ統一的に評価することを目的に計算コードFECUND\*の開発を行なうことにし、親・娘核種の結合計算も含ませた。コード作成にあたり上述の他に次の項目も計算対象に含めた。即ち燃料チャンネル体系に、中実・中空円筒、円環燃料チャンネル、球形燃料要素を計算対象とし、さらに燃料チャンネル内に気相ギャップの存在を許し、F.P. の濃度拡散の他に熱拡散も計算対象とし、非定常計算用のタイムステップのコード内設定を行なえるようにした。また被覆燃料粒子から放出されたF.P. を燃料チャンネル中での生成源に結びつけ、一次冷却材ループも含ませたシステムを計算の対象とした。以下にこのコード作成にあたって採られた基本的な考え方、理論計算の方法、コード構成、入力形式、出力量等についての記述を行なう。

---

\* Eission products Evaluation Code for UNsteady Diffusion, fecund : 創造力豊かな

# 1 基本的考え方

## 1.1 燃料要素の体系

高温ガス冷却炉燃料要素の最小要素として被覆燃料粒子 (coated fuel particles, 以下 c.f.p. と略す) を取扱い, その体系を Fig. 1.1 に示す。c.f.p. は中心に燃料核があり, そのまわりを多重被覆層がとりまいているが, F.P. の挙動の観点から被覆層破損のある c.f.p. と被覆層破損のない c.f.p. とに分類し, 前者についてははだかの燃料核として取扱う。さらに c.f.p. 中の燃料物質の種類 (例えば Th, U, Pu) によって F.P. の挙動が異なり, c.f.p. を燃料物質によっても分類する。

単一燃料要素とそれを取りまく冷却チャンネル (これを以降燃料チャンネルと呼ぶ) で炉心を代表させ, 燃料要素としては Fig. 1.2 に示す様に, 中実・中空円筒型のもの, 円環型のもの, 球型の要素を本コードの対象とした。球型燃料要素の場合は, 炉心そのものを単一チャンネルと考え, 1つの球型燃料要素とそれを取りまく冷却材が炉心断面で他のものを代表しているとする。燃料チャンネルは燃料マトリックス, スリーブ冷却材等から成り, 燃料マトリックスはさらに c.f.p. と黒鉛分散体から成っている。さらに本コードでは燃料チャンネル中に静止した気相の存在を許し, F.P. の移動媒体として拡散抵抗の小さな存在を認める。

燃料要素内での F.P. の拡散移動を評価する際に, c.f.p., 燃料チャンネル共に径方向にメッシュ分割して径方向の F.P. の濃度分布を求めるが, 燃料チャンネルでは軸方向もメッシュ分割して径一軸方向での拡散移動を評価する。

## 1.2 F.P. 放出の素過程

c.f.p., 燃料チャンネル内の F.P. 移動方程式中に, 蓄積項,  $\beta$  崩壊と中性子捕獲による消滅項, 拡散移動項 (濃度拡散, 熱拡散), 生成速度項を取り入れ,  $\partial c / \partial t = -\nabla \cdot \{-D \cdot \nabla C - D^T \cdot \nabla \ln T\} - (\lambda + \sum_a \sigma_a \cdot \phi) \cdot C + B$  で示される F.P. の径方向 (球・円筒座標) 一次元拡散問題を解く。さらに c.f.p. からの F.P. の放出過程に反跳移動項を加える。上に述べた F.P. 移動方程式が燃料要素中の各々の移動媒体に於いて成立するとし, 媒体間の境界面で F.P. 物質流束が連続, 濃度の比が一定値 (隔壁係数) をとると仮定する。外部境界条件として, c.f.p. 体系では F.P. の系外への直線外挿距離を導入, 外挿距離のところで濃度が零値をとるものとし, また燃料チャンネル体系では燃料要素と冷却材境界において冷却材流れの影響を組み入れた。

## 1.3 F.P. 生成源

被覆燃料粒子中に於ける F.P. 生成源を本コードでは入力量とし, 燃料核当りの量として与える。またそこでの F.P. 生成速度も入力量とし, 被覆層各層に於ける F.P. 生成源分布も燃料汚染分布の形で入力量として取扱う。燃料チャンネル体系中での F.P. 生成源は 3 項からなり, そのうち第 1 のものは c.f.p. から放出された F.P. を源とし, 燃料マトリックスに於いて Fig. 1.3 に示す様な均一生成源としてモデル化した項である。第 2 のものは着目 F.P. 核

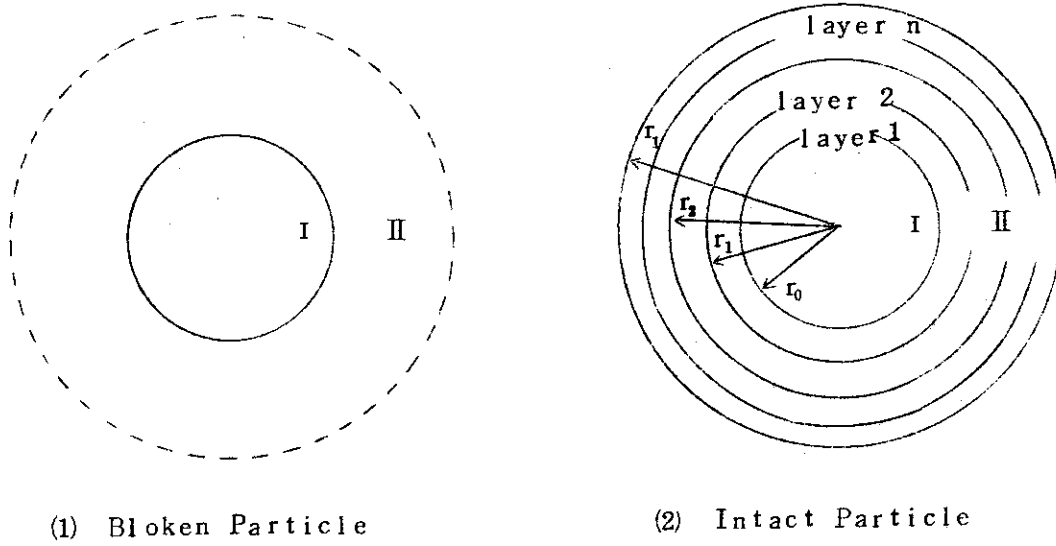
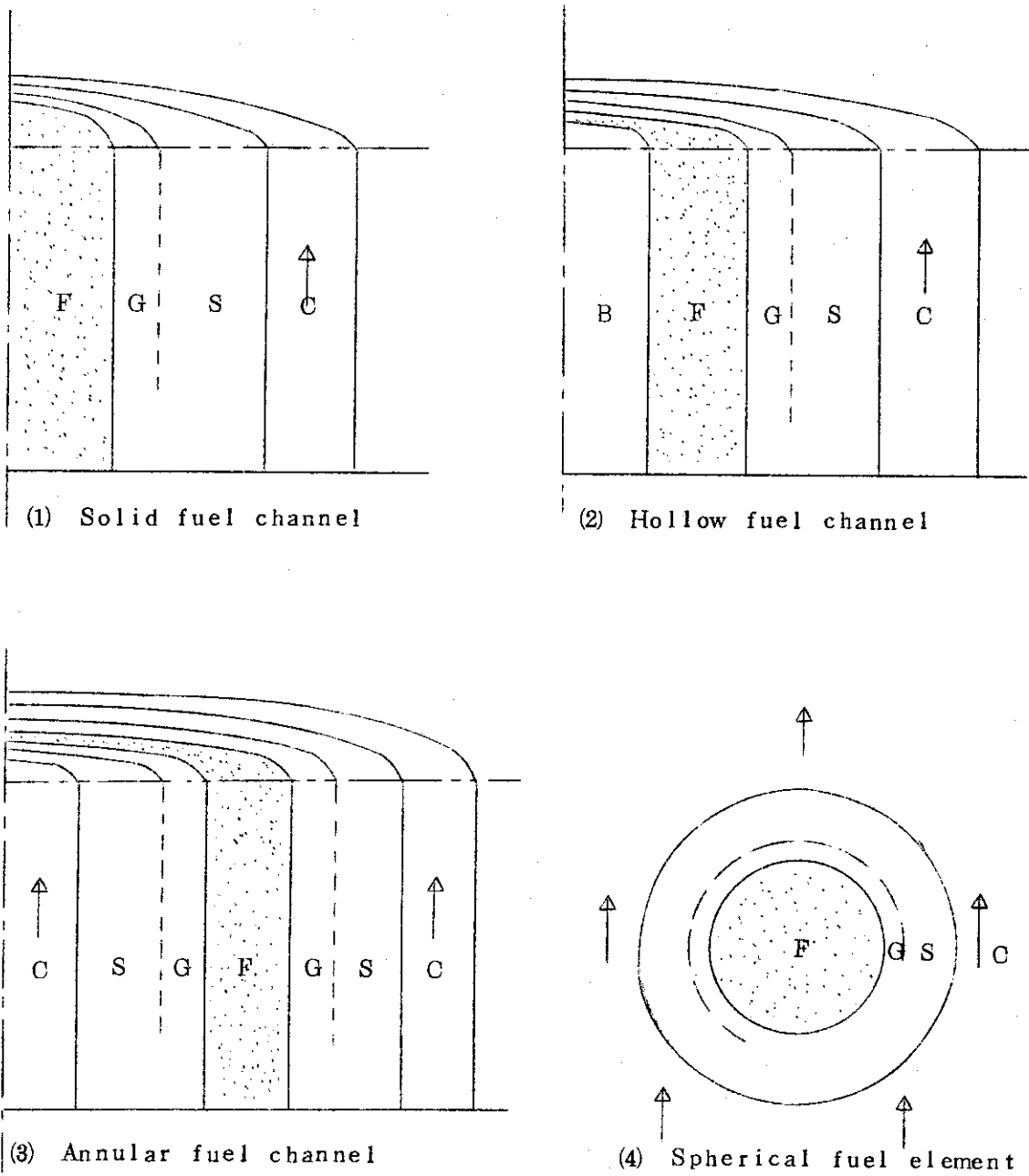


Fig. 1.1 Geometries of coated fuel particles. Region I; fuel kernel, Region II: coating layers.





F : Fuel matrix  
 S : Sleeve  
 C : Coolant  
 G : Gas(He) gap  
 B : Gas(He) bond

Fig. 1.2 Geometries of fuel channels.

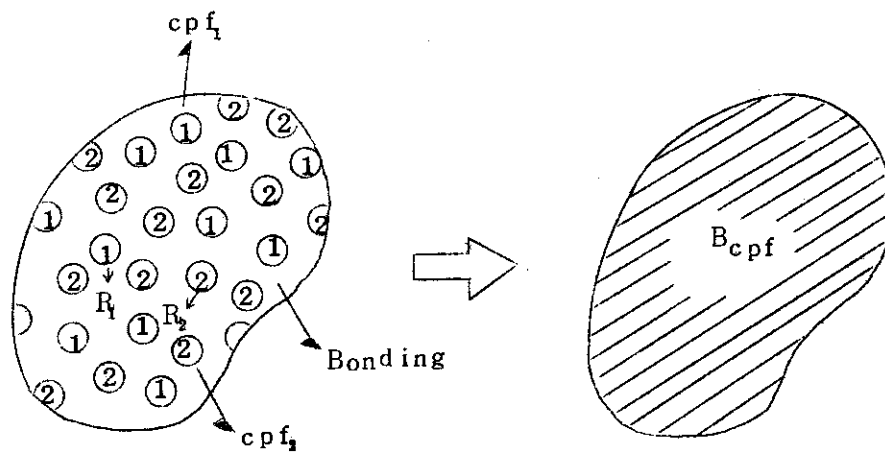


Fig. 1.3 Description of homogenized fission products source from released f. p. from c. f. p. in fuel matrix  
 $R_l$ : release rate of f. p. from a c. f. p. of type  $l$ ,  $B_{c p f}$ ; homogenized f. p. source in fuel matrix.

種の親核種が、燃料チャンネル中を拡散移動している過程で $\beta$ 崩壊あるいは中性子捕獲を起しそれが着目核種に対して生成源になるものである。第3に、軸方向の拡散移動量を径方向一次元拡散の問題を解く場合の一種の生成源として取扱う。

F. P. の軸方向移動量の評価は、軸メッシュ各に径方向濃度分布を計算した後、径メッシュ各に軸方向濃度分布を2次式フィッティングして、その濃度分布を用いて軸方向物質流束を算出する方法にて求めるのでイタレーション計算が必要となる。本コードにおいて、イタレーションを行なって反復修正している量には上述のF. P. の軸方向移動量の他に、F. P. の濃度・熱拡散係数、固相一気相界面の隔壁係数、原子炉入口に於ける冷却材中のF. P. 濃度などがある。

#### 1.4 冷却材ループ

一次冷却材ループ中にはプラントの諸要素例えば、熱交換器やポンプ弁類が存在し、そこでF. P. の物質収支を厳密に取扱うことは困難であり、本コードでの計算対象としない。炉心に於けるF. P. の移動量を計算する際に、冷却材の流れの影響は大きく、その冷却材がループをなしているので、炉心外の冷却材ループ中のF. P. の移動現象を取扱わねばならなくなり、流れにより運ばれる移動 $\beta$ 崩壊による消滅、親核種よりの生成、プラント諸要素への沈着、F. P. 純化系での除去を簡略化して取扱うにとどめた。

炉心内には数多くの燃料チャンネルが存在し、各々のチャンネルを流れる冷却材が炉心出口でまとめられ、冷却材ループを構成するが、本コードはこれを簡略化して単一チャンネルモデルを採用し、一本の燃料チャンネル中の冷却材に全炉心を代表させている。

#### 1.5 F. P. の非定常挙動

本コードでは、燃料核中のF. P. 生成速度、燃料要素における温度分布が入力量であり、それぞれ他の計算コードの計算結果を利用することを前提としている。その各々の入力量に対し、異なるタイムステップ毎にデータを入力できるようにしてあり、特に後者を燃焼ステップと呼ぶことにする。

燃料要素におけるF. P. の拡散移動を本コードでは非定常挙動としてとらえ、前二者の他にもうひとつのタイムステップを設け、燃焼ステップ内をさらに細分割してそのタイムステップを設ける。F. P. 拡散移動の非定常性の目安として、c. f. p. からの拡散放出に関する平衡到達時間、 $L^*$ を算出し、 $L^*$ を基準として第3のタイムステップをコード内でセットできるようにした。c. f. p. 体系に対しては $L^*$ 時間以降に拡散定常解析を用い、 $L^*$ 時間以前で非定常数値計算を行なう(但し破損c. f. p. 中のF. P. 拡散に関しては、非定常解析解を用いる)。燃料チャンネル体系に対してはF. P. の拡散に関し、すべて非定常数値計算を行ない、タイムステップはc. f. p. 体系、チャンネル体系とも同じものを用いる。

\*  $L^*$ の算出方法については2.1.4, 2.2.4節に詳述する。

### 1.6 諸物性値の設定

燃料要素における F. P. の放出挙動を評価する際に必要な物性値や基本物理量として、移動媒体の物性値、F. P. 核種や冷却材ガスの物性値がある。前者については、炉型式や使用物質の相異によって異なるのでほとんど入力処理となるが、一方 F. P. 核種や冷却材ガスの物性値は、基本物理量を用いてある程度推算が可能なものもある。本コードでは気相中に於ける F. P. 核種の濃度拡散係数、熱拡散係数の推算、固相-気相界面に於ける F. P. 核種の濃度拡散係数、熱拡散係数の推算、固相-気相界面に於ける F. P. の濃度隔壁係数の推算、He ガスの粘度、密度の推算をコード内で行ない、さらに F. P. 核種の物性値の温度、圧力、濃度依存性も推算によって処理するようにしている。

## 2 被覆燃料粒子からのF.P.の放出

被覆燃料粒子からのF.P.の放出量の評価は、燃料マトリックスに於けるF.P.生成量、すなわち源密度を与えることになり、最終的には一次冷却材中のF.P.濃度レベルに直接結びつくものである。その計算は重要である。被覆燃料粒子からのF.P.の放出挙動には、拡散、反跳、ロックアウト、化学反応、格子欠陥への捕獲等の諸プロセスが考えられているが<sup>(7)</sup>、本コードではそれらの諸プロセスのうち定量的に取扱いが容易な拡散と反跳プロセスを対象とした。F.P.放出率は上記のプロセスのみならず被覆層破損の有無によっても異なるし、半減期の長短によっては非定常放出も問題となる。本コードでは被覆燃料粒子からのF.P.の放出プロセスをFig. 2.1の様に分類し、全放出率、 $f$ を次式で算出した。

$$f = K (f_{DK} + f_{RK}) + (1-K) (f_{DC} + f_{RC}) \quad (2-1)$$

但し、 $K$ ：被覆層の破損した被覆燃料粒子の粒子数の割合 [-]

$f_{DK}$ ：被覆層破損のある場合の拡散放出率 [-]

$f_{RK}$ ：被覆層破損のある場合の反跳放出率 [-]

$f_{DC}$ ：被覆層破損のない場合の拡散放出率 [-]

$f_{RC}$ ：被覆層破損のない場合の反跳放出率 [-]

以下の各章でこの分類に従って各々の放出率の算出方法と平衡到達時間の計算式を説明する。

### 2.1 被覆層破損のある場合の拡散放出

被覆層破損のあるc. f. p.からのF.P.の放出は、これを被覆層なしのはだかの燃料核からのF.P.の放出とみなして近似する。燃料核中のF.P.の拡散移動に関しては、定常、非定常解析が得られるが、境界条件の相違（燃料核外表面でF.P.濃度がゼロかゼロでない値を有するかの相違）により解析解の形が異なるので、各々の境界条件について解析解を示す。初期条件としてF.P.の濃度分布 $C(r, t_0)$ を与えた場合の解析解を示し、各々のタイムメッシュ点でのF.P.濃度分布、拡散放出率を評価する。

#### 2.1.1 解析モデル

被覆層破損のあるc. f. p.の幾何形状とF.P.濃度分布の概念図をFig. 2.2に示した。F.P.の拡散方程式を(2-2)式に示し、 $D_0$ 、 $\lambda$ 、 $B_0$ の値は時間 $t_0$ から $t_0 + \Delta t$ の間は、径方向で一定とする。初期条件を(2-3)式に、境界条件を(2-4)より(2-5)式に示す。ここで $l_{DK}$ はFig. 2.2に示した様にF.P.濃度分布の系外への外挿距離とする。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \lambda C + B_0 \quad ; t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \quad (2-2)$$

$$C = C(r, t_0) \quad ; t = t_0 \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad ; r = 0 \quad (2-4)$$

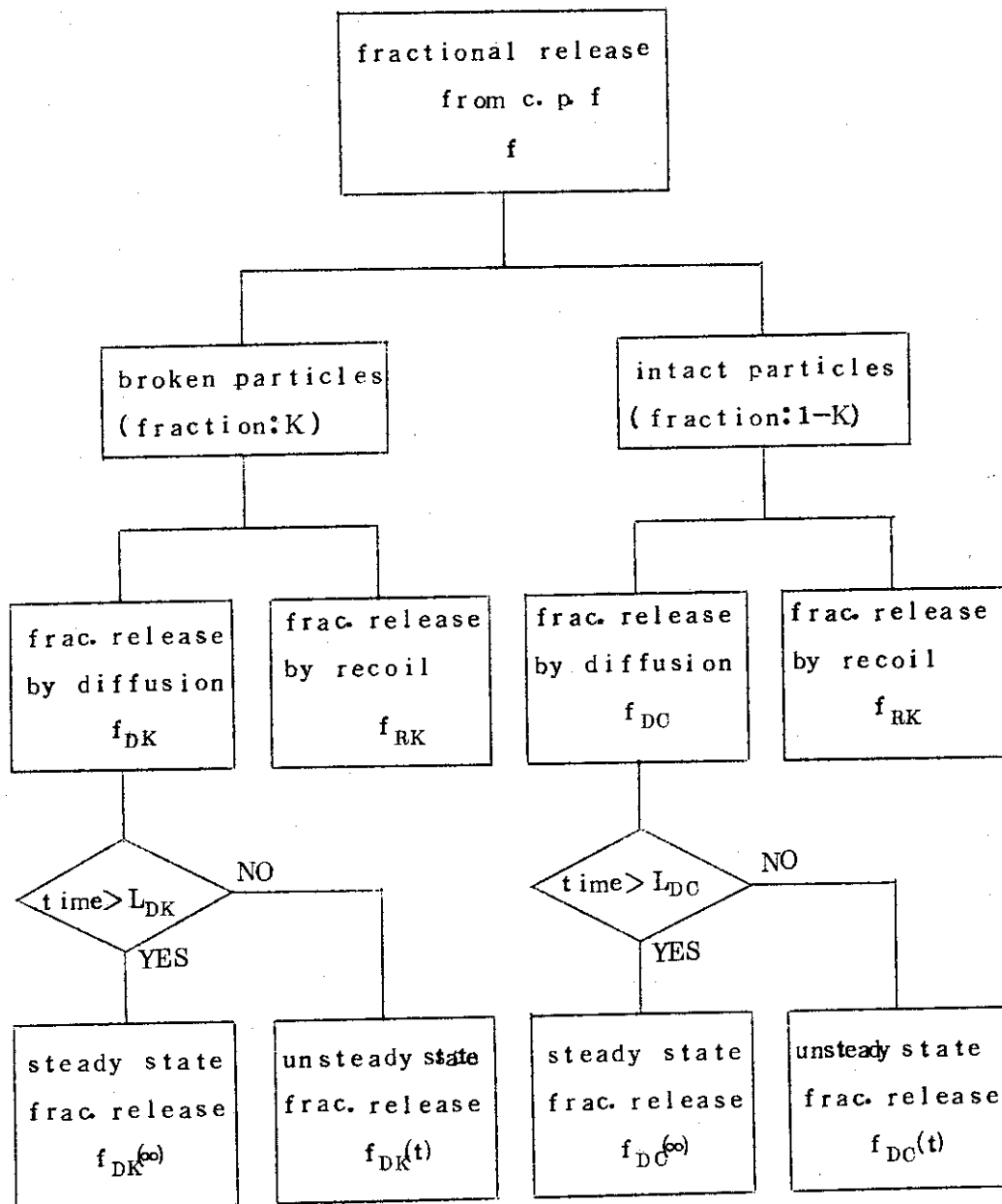
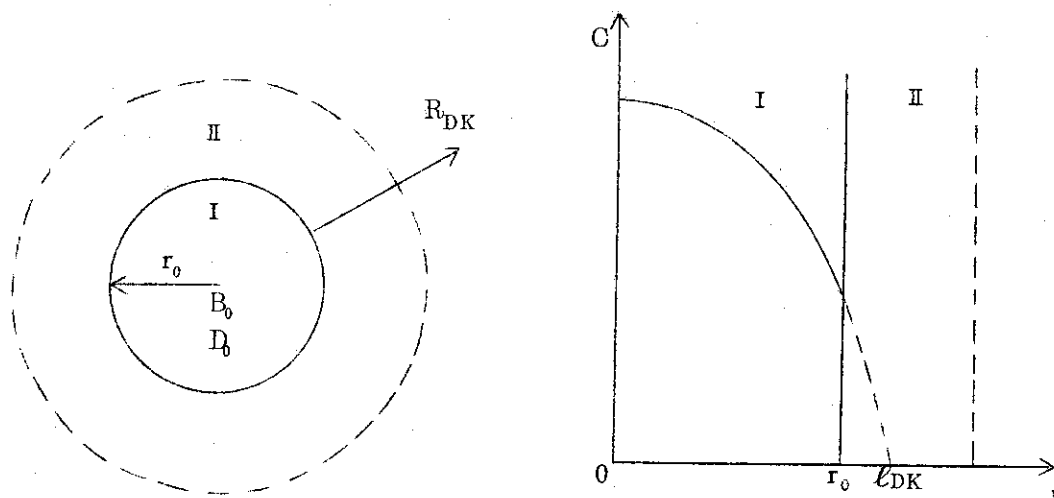


Fig. 21 Fractional release from coated fuel particles for a certain fission product.  $L_{DK}$ ,  $L_{DC}$  are the times to equilibrium state for diffusional release from broken, intact particles, respectively.



(1) Geometry of a bloken particle      (2) Concentration profile

Fig. 2.2 Model of F. P. profile in a bloken particle. Region I: fuel kernel, Region II: coating layers,  $L_{DK}$ : linear extrapolation distance,  $R_{DK}$ : release rate.

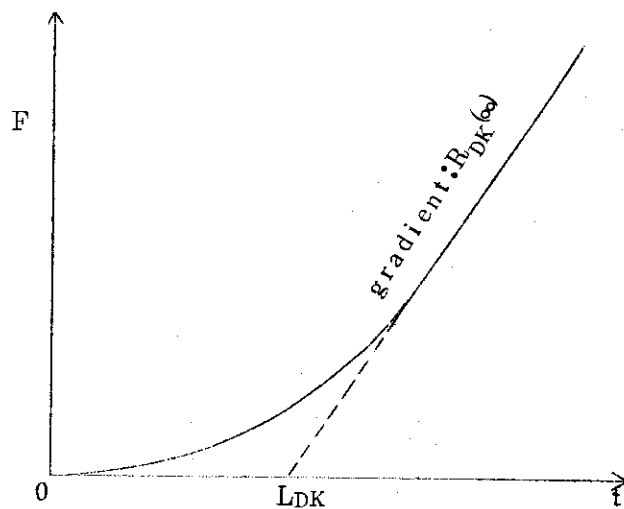


Fig. 2.3 Definition of the time  $L_{DK}$  to equilibrium state.  
 F: release quantity.

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{1}{l_{DK}} C = 0 & ; r = r_0, l_{DK} \neq 0 & (2-5a) \\ C = 0 & ; r = r_0, l_{DK} = 0 & (2-5b) \end{cases}$$

次の諸量の無次元化を行なう。

$$\phi = \frac{\lambda C}{B_0}, \quad x = \frac{r}{r_0}, \quad D_0' = \frac{D_0}{\lambda r_0^2}, \quad t' = \lambda t, \quad l_{DK}' = \frac{l_{DK}}{r_0},$$

$$W_0 = (D_0')^{-\frac{1}{2}} = r_0 \sqrt{\frac{\lambda}{D_0}}. \quad (2-6)$$

これらを用いて拡散方程式と初期・境界条件式を書き換えると(2-7)式から(2-10)式の様に表示される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t'} = D_0' \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \phi + 1 \quad ; t_0' \leq t' \leq t_0' + \Delta t' \quad (2-7)$$

$$\phi = \phi(x, t_0') \quad ; t' = t_0' \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad ; x = 0 \quad (2-9)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{1}{l_{DK}'} \phi = 0 & ; x = 1, l_{DK}' \neq 0 & (2-10a) \\ \phi = 0 & ; x = 1, l_{DK}' = 0. & (2-10b) \end{cases}$$

### 2.1.2 拡散外挿距離 = 0 の場合の定常ならびに非定常解析解

#### (1) F. P. 濃度分布

非定常状態の F. P. の濃度分布は、定常状態の濃度分布の結果に非定常項を加えることにより得られるので、はじめに定常状態の F. P. 濃度分布式を示す。式の誘導は別の報告書にゆずることとし、結果のみを記すと

$$\phi(x, \infty) = 2w_0^2 \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^{j-1}}{j^2 \pi^2 + W_0} \cdot \frac{\sin(k_j x)}{k_j x} \right] \quad (2-11)$$

$$\phi(0, \infty) = 1 - w_0 \operatorname{cosech} w_0 \quad (2-12)$$



$$\doteq \frac{\frac{\omega_0^2}{6} \left( 1 + \frac{\omega_0^2}{20} + \frac{\omega_0^4}{840} + \frac{\omega_0^6}{60480} \right)}{1 + \frac{\omega_0^2}{6} + \frac{\omega_0^4}{120} + \frac{\omega_0^6}{5040}} ; \omega_0 \leq 0.15 \quad (2-12a)$$

非定常状態の F. P. 分布式は、初期濃度の値を用いて次の様に示される。

$$\begin{aligned} \phi(x, t'_0 + \Delta t') &= \phi(x, \infty) - 2\omega_0^2 \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^{j-1}}{j^2 \pi^2 + \omega_0^2} \cdot \frac{\sin(k_j x)}{k_j x} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \right] \\ &+ \frac{2}{x} \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \sin(k_j x) \cdot e^{-D_0 k_j^2 \Delta t'} \cdot \left\{ \int_0^1 x \cdot \phi(x, t'_0) \cdot \sin(k_j x) dx \right\} \right] \end{aligned} \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned} \phi(0, t'_0 + \Delta t') &= \phi(0, \infty) - 2\omega_0^2 \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^{j-1}}{j^2 \pi^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \right] \\ &+ 2\pi \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ j \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \cdot \left\{ \int_0^1 x \phi(x, t'_0) \cdot \sin(k_j x) dx \right\} \right] \end{aligned} \quad (2-14)$$

ここで定数  $k_j$  は (2-15) 式で表わされ、 $\int_0^1 x \phi(x, t'_0) \sin(k_j x) dx$  の積分はシンプソン公式によって数値積分を行なっている。また  $\sum_{j=1}^{\infty}$  の計算は (2-16) 式で示される収束判定を満す項までとることとした。すなわち、

$$k_j = j\pi \quad (2-15)$$

$$\left[ \sum_{j=1}^J \{ \dots \} - \sum_{j=1}^{J-1} \{ \dots \} \right] / \sum_{j=1}^J \{ \dots \} \leq 10^{-6} \quad (2-16)$$

(2) F. P. 拡散放出率:  $f_{DK}$

濃度分布式の場合と同様に、非定常放出率は定常放出率と初期濃度の寄与分等の項から成立している。結果のみを記すと、

$$f_{DK}(\infty) = \frac{R_{DK}(\infty)}{\frac{4}{3} \pi r_0 B_0} = \frac{3}{\omega_0^2} (\omega_0 \coth \omega_0 - 1) \quad (2-17)$$

$$\doteq \frac{1 + \frac{1}{10} \omega_0^2 + \frac{1}{280} \omega_0^4}{1 + \frac{1}{6} \omega_0^2 + \frac{1}{120} \omega_0^4} \quad ; \omega_0 \leq 0.15 \quad (2-17a)$$

$$f_{DK}(t'_0 + \Delta t') = \frac{R_{DK}(t'_0 + \Delta t')}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 B_0}$$

$$= f_{DK}(\infty) - 6 \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{j^2 \pi^2 + \omega_0^2} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \right]$$

$$- 6 \pi D_0' \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ j \cdot (-1)^j \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \cdot \left\{ \int_0^1 x \psi(x, t_0') \sin(k_j x) dx \right\} \right] \quad (2-18)$$

$R_{DK}(\infty)$ ,  $R_{DK}(t)$  はそれぞれ被覆層破損のある c. f. p. 1 個当りの平衡拡散放出速度、非定常拡散放出速度であり、燃料マトリックス中の F. P. 生成源の評価の際に用いられる。

### 2.1.3 拡散外挿距離 $\approx 0$ の場合の定常ならびに非定常解析解

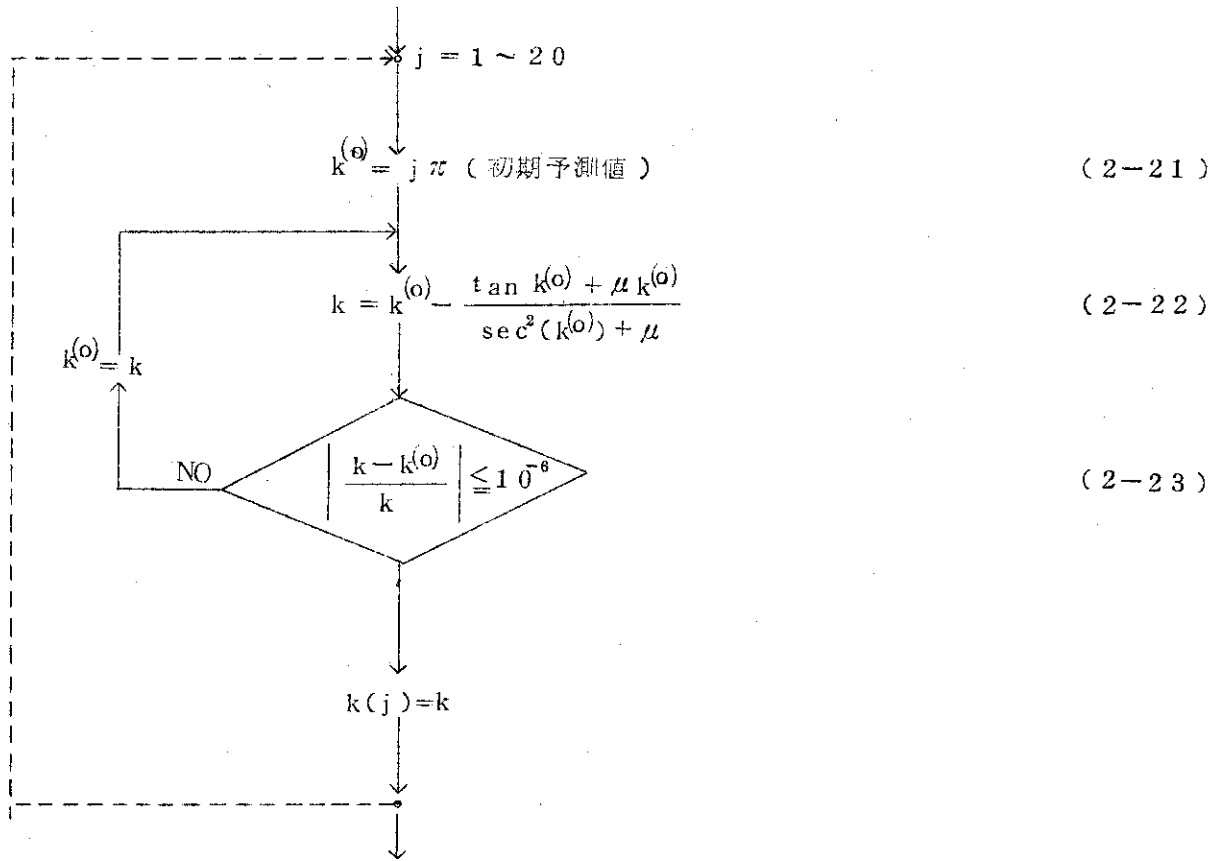
#### (1) 定数 $k_j$ の算出

境界条件 (2-10a) 式より定められる  $k_j$  は方程式 (2-19) 式の根となり、その正根のうちから小さい順に  $k_1, k_2, \dots, k_j, \dots$  と並べる。

$$\tan k + \mu k = 0, \quad (2-19)$$

$$\text{但し } \mu = \frac{l_{DK}'}{1 - l_{DK}'} \quad (2-20)$$

(2-19) 式の根  $k_j$  を求め方にニュートン・ラプソン法を適用し、コード内では次の計算フローで固有値を 20 個求めている。



固有直  $k_j$  に関する量として  $\nu_j$  を次の様に定義する。

$$\nu_j = 1 + \mu + \mu^2 k_j^2 \tag{2-24}$$

(2) F. P. 濃度分布

定常分布を固有値  $k_j$  を用いて表わすと、

$$\psi(x, \infty) = \frac{2}{D_0'} (1 + \mu) \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ - \frac{1}{(k_j^2 + \omega_0^2) \cos k_j} \cdot \frac{\sin(k_j x)}{\nu_j k_j x} \right], \tag{2-25}$$

$$\psi(0, \infty) = \frac{2}{D_0'} (1 + \mu) \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ - \frac{1}{(k_j^2 + \omega_0^2) \cdot \cos k_j} \cdot \frac{1}{\nu_j} \right]. \tag{2-26}$$

非定常濃度分布は、定常分布と初期濃度による寄与分等が含まれる。

$$\begin{aligned} \psi(x, t_0' + \Delta t') = & \psi(x, \infty) - \frac{2(1+\mu)}{D_0'} \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ -\frac{e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'}}{(k_j^2 + \omega_0^2) \cos k_j} \frac{\sin(k_j x)}{\nu_j k_j x} \right] \\ & + \frac{2}{x} \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{\sin(k_j x)}{\nu_j \cos^2 k_j} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \left\{ \int_0^1 x \cdot \psi(x, t_0') \sin(k_j x) dx \right\} \right] \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\begin{aligned} \psi(0, t_0' + \Delta t') = & \psi(0, \infty) - \frac{2(1+\mu)}{D_0'} \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ -\frac{e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'}}{(k_j^2 + \omega_0^2) \cos k_j} \cdot \frac{1}{\nu_j} \right] \\ & + 2 e^{-\Delta t'} \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{k_j}{\nu_j \cos^2 k_j} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \left\{ \int_0^1 x \cdot \psi(x, t_0') \sin(k_j x) dx \right\} \right] \end{aligned} \quad (2-28)$$

(3) F. P. 拡散放出率:  $f_{DK}$

定常放出率と非定常放出率を次に示す。

$$f_{DK}(\infty) = \frac{R_{DK}(\infty)}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 B_0} = 6(1+\mu)^2 \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{(k_j^2 + \omega_0^2) \nu_j} \right], \quad (2-29)$$

$$\begin{aligned} f_{DK}(t_0' + \Delta t') &= \frac{R_{DK}(t_0' + \Delta t')}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 B_0} \\ &= f_{DK}(\infty) - 6(1+\mu)^2 \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{(k_j^2 + \omega_0^2) \nu_j} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \right] \\ &\quad - 6 D_0' (1+\mu)^2 \cdot e^{-\Delta t'} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{k_j}{\nu_j \cos k_j} \cdot e^{-D_0' k_j^2 \Delta t'} \right. \\ &\quad \left. \cdot \left\{ \int_0^1 x \cdot \psi(x, t_0') \sin(k_j x) dx \right\} \right] \end{aligned} \quad (2-30)$$

### 2.1.4 拡散放出に関する平衡到達時間

本コードではF. P. の拡散放出率の計算に際し、平衡到達時間以前には非定常計算を行い、それ以降では定常計算を行っている。被覆層破損のあるc. f. p. からのF. P. の拡散放出に関する平衡到達時間の算出法を以下に示す。平衡到達時間、 $L_{DK}$ 、は(2-31)式に示す如く一個のc. f. p. からのF. P. の全放出量、 $F$ 、が決まったとし、Fig. 2.3に示される如く $F$ の漸近線(傾き： $R_{DK}(\infty)$ )と時間軸との交点として定義される量である。但し、

$$F(t) = \int_0^t R_{DK}(t) dt. \quad (2-31)$$

解析的に平衡到達時間を求める際に、(2-2)式で示される拡散方程式中の $B_0$ 、 $D_0$ は時間依存性がなく一定とし、初期条件を： $t=0$ で $C=0$ とし、外側境界条件を： $r=r_0$ で $C=0$ とした。コード内では $D_0$ の代表値として燃焼ステップの初期の値を用いる。平衡到達時間の無次元量、 $\tau_{DK}$ 、の解析解を次に示す。<sup>(8)</sup>

$$\tau_{DK} = \frac{D_0 L_{DK}}{r_0^2}, \quad (2-32)$$

$$\tau_{DK} = \frac{1 - 0.5\omega_0(\omega_0 \operatorname{cosech}^2 \omega_0 + \coth \omega_0)}{\omega_0^2 (1 - \omega_0 \coth \omega_0)} \quad (2-33)$$

$$\doteq \frac{1 - 0.5\omega_0}{\omega_0^2 (1 - \omega_0)} \quad ; \quad \omega_0 \geq 25 \quad (2-33a)$$

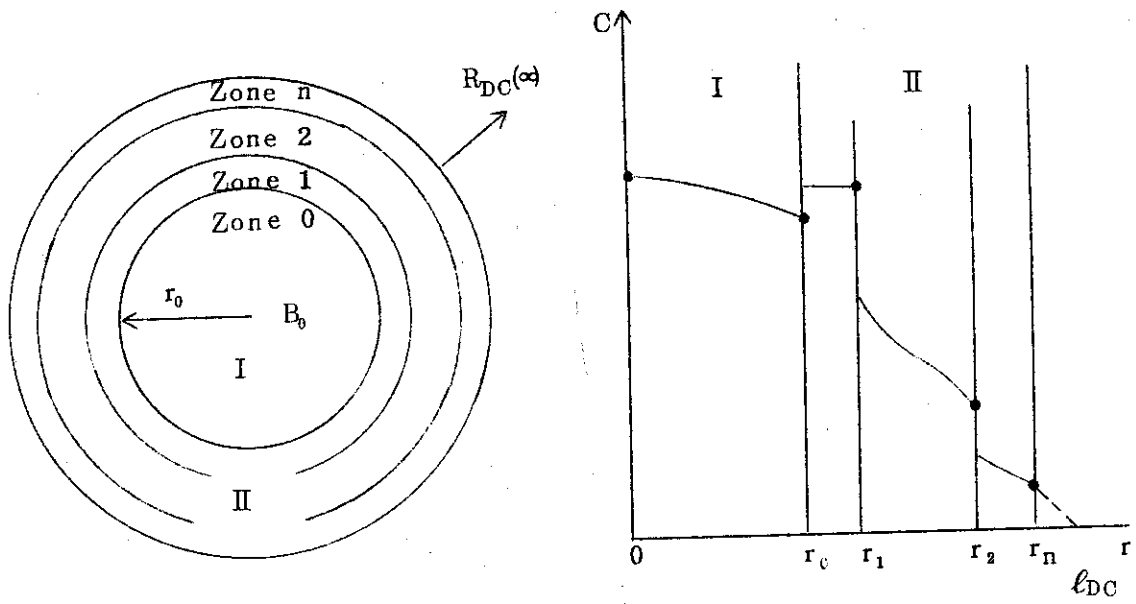
$$\doteq \frac{\frac{1}{15} + \frac{1}{120}\omega_0^2 + \frac{1}{3200}\omega_0^4}{1 + \frac{4}{15}\omega_0^2 + \frac{1}{40}\omega_0^4 + \frac{1}{1200}\omega_0^6} \quad ; \quad \omega_0 \leq 0.15. \quad (2-33b)$$

## 2.2 被覆層破損のない場合の拡散放出

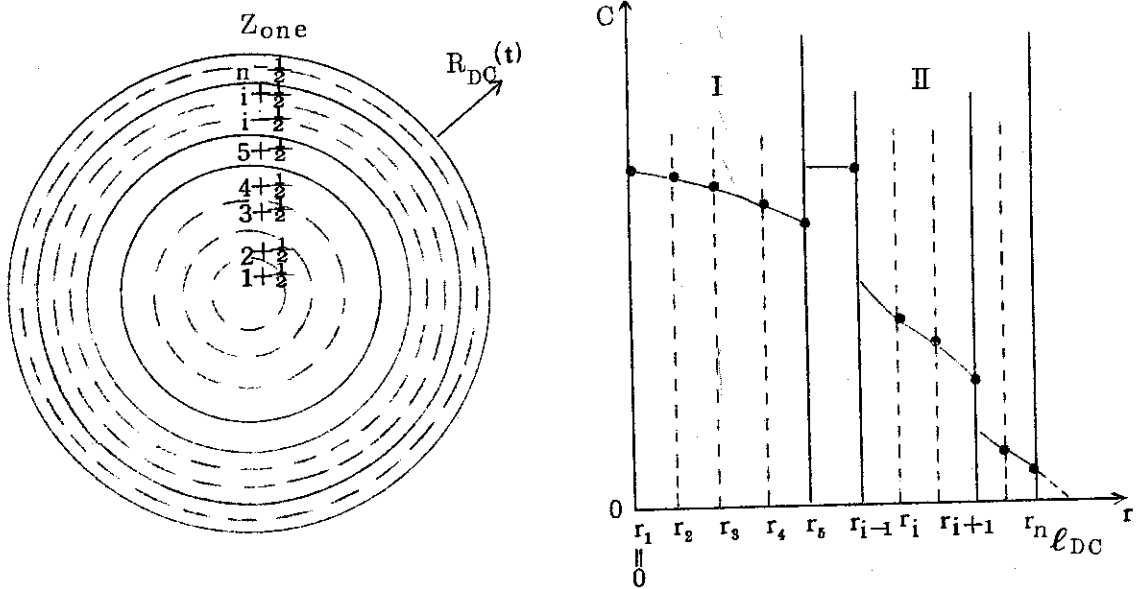
被覆層破損のない多重c. f. p. からのF. P. の拡散放出を評価するために、最初にc. f. p. 内の濃度分布を計算する必要がある。その濃度分布を計算する際に定常状態に対しては解析解を用い、非定常状態に対しては径方向をメッシュ分割して数値計算を行なう。被覆層破損のある場合と同様に、c. f. p. 外部における境界条件の相違によって解法が異なる。さらにまた被覆層が大きな拡散障害物になることに基ずく数値解法上の問題点が存在する。このことは特に短半減期F. P. 核種の拡散問題を解く場合に起るが、本コードではこの場合の解法も取扱った。

### 2.2.1 解析モデル

被覆層破損のない多重c. f. p. の幾何形状とF. P. 濃度分布の概念図をFig. 2.4に示す。定常状態のF. P. 濃度分布の計算の際には燃料核も各被覆層もともにメッシュ分割する必要はない。しかし非定常状態の計算の際には各層を更にメッシュ分割して数値計算を行うので、両



(1) For steady state calculation of F. P. profile



(2) For unsteady state calculation of F. P. profile

Fig 2.4 Description of radial mesh points and F. P. profile in a intact coated particle. Region I: fuel kernel, Region II: coating layers,  $l_{DC}$ : linear extrapolation distance,  $R_{DC}$ : release rate

者の体系のモデル化を Fig. 2.4 に示した。F. P. の拡散方程式を無次元化して (2-34) 式に示し、初期条件を (2-35) 式に示す。境界条件としては各層の界面での条件を (2-36), (2-37) 式に示し、中心と最外層での条件を (2-38) 式から (2-39) 式に示す。各層を示す添字には、Fig. 2.4 (1) に示した番号付けを採用した。図中の  $l_{DC}$  は F. P. 濃度分布の系外への外挿距離とする。

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t'} = D_i' \cdot \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right) - \phi_i + \zeta_i(x); \quad i=0, 1, \dots, n \quad (2-34)$$

初期条件

$$\phi_i = \phi_i(x, t_0') \quad ; \quad t = t_0' \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (2-35)$$

境界条件

$$D_i' \frac{\partial \phi_i}{\partial x} = D_{i+1}' \frac{\partial \phi_{i+1}}{\partial x} \quad ; \quad x = \alpha_i \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2-36)$$

$$\phi_{i+1}(\alpha_i) = \phi_i \phi_i(\alpha_i) \quad ; \quad x = \alpha_i \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2-37)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} x \phi_0 = 0 \quad ; \quad x \rightarrow 0 \quad (2-38)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_n}{\partial x} + \frac{1}{l'_{DC}} \phi_n = 0 & ; \quad x = 1, l'_{DC} \neq 0 \\ \phi_n = 0 & ; \quad x = 1, l'_{DC} = 0 \end{cases} \quad (2-39a)$$

$$\begin{cases} \phi_n = 0 & ; \quad x = 1, l'_{DC} = 0 \end{cases} \quad (2-39b)$$

ここで無次元量は次によって定義される。

$$\phi_i(x) = \frac{\lambda U_i(r)}{B_0}, \quad D_i' = \frac{D_i}{r_n^2 \lambda}, \quad \zeta_i(x) = \frac{B_i(r)}{B_0}, \quad \alpha_i = \frac{r_i}{r_n},$$

$$\omega_i = (D_i')^{-\frac{1}{2}} = r_n \sqrt{\frac{\lambda}{D_i}} \quad ; \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (2-40a)$$

$$\phi_i = \frac{C_{i+1}(r_i)}{C_i(r_i)} \quad ; \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2-40b)$$

$$x = \frac{r}{r_n}, \quad l'_{DC} = \frac{l_{DC}}{r_n}, \quad t' = \lambda t. \quad (2-40c)$$

被覆層中の燃料汚染に基づく F. P. 生成源を  $\rho_i(x)$  とし, Fig. 2.5 にその概念的な様子を  
示し, (2-41) 式にその表式を示した。

$$\rho_i(x) = \rho_i(\alpha_i) \cdot \frac{1 + \zeta_i \frac{\alpha_i}{x}}{1 + \zeta_i} ; \quad \alpha_{i-1} \leq x \leq \alpha_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2-41)$$

$$\rho_0(\alpha_0) = 1, \quad \rho_0 = 0. \quad (2-42)$$

## 2.2.2 多重 c. f. p. 中の平衡濃度分布の解析解

(i) 濃度分布, 平衡拡散放出率の一般解

拡散方程式 (2-34) 式の定常状態における一般解は, 任意定数  $A_i, B_i$  を含めて  
(2-43) 式で表わされる。各層の外部境界の濃度は,  $x$  を  $\alpha_i$  と置くことにより得られ,  
(2-44) 式で示される。その際に任意定数  $A_i, B_i$  の代わりに  $A_i^*, B_i^*$  を導入しておく。

$$\phi_i(x) = \frac{1}{x} \{ A_i \sinh(\omega_i x) + B_i \cosh(\omega_i x) \} + \rho_i(\alpha_i) \frac{1 + \zeta_i \frac{\alpha_i}{x}}{1 + \zeta_i} ; \quad \alpha_{i-1} \leq x \leq \alpha_i, \quad i=0, 1, \dots, n \quad (2-43)$$

$$\phi_i(\alpha_i) = \frac{1}{\alpha_i} \{ A_i^* + B_i^* \} + \rho_i(\alpha_i) ; \quad i=0, 1, \dots, n \quad (2-44)$$

但し,

$$A_i^* = A_i \sinh(\omega_i \alpha_i) ; \quad i=0, 1, \dots, n \quad (2-45)$$

$$B_i^* = B_i \cosh(\omega_i \alpha_i) ; \quad i=0, 1, \dots, n \quad (2-46)$$

平衡拡散放出速度,  $R_{DC}(\infty)$  は次式により計算され,

$$R_{DC}(\infty) = -D_n \cdot \frac{dC}{dr} \Big|_{r_n} \cdot 4\pi r_n^2. \quad (2-47)$$

平衡拡散放出率は, (2-39a), (2-39b) 式の境界条件の相違より次の様  
に示される。

$$f_{DC}(\infty) = \frac{R_{DC}(\infty)}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 B_0}$$



$$= \begin{cases} \frac{3}{\alpha_0^3} \cdot \frac{D_n'}{l'_{DC}} \cdot \{A_n^* + B_n^* + \rho_{n(1)}\} & ; l'_D \approx 0 \quad (2-48a) \\ \frac{3}{\alpha_0^3} \cdot D_n' \cdot \{A_n^* (1 - \omega_n \coth \omega_n) + B_n^* (1 - \omega_n \tanh \omega_n) + \frac{\rho_{n(1)} \zeta_n}{1 + \zeta_n}\} & ; l'_{DC} = 0. \quad (2-48b) \end{cases}$$

コード内の計算では、有効数字を保持するため、次の判定を行なっている。

$$\omega_n < 0.1 \text{ のとき } 1 - \omega_n \coth \omega_n \doteq -\frac{\omega_n^2}{3} \frac{1 + \frac{\omega_n^2}{10} + \frac{\omega_n^4}{280}}{1 + \frac{\omega_n^2}{6} + \frac{\omega_n^4}{120}} \quad (2-49)$$

濃度分布式中に含まれる任意定数  $A_i, B_i$  即ち  $A_i^*, B_i^*$  を境界条件を用いて  $i = 0, \dots, n$  に対して解けば、 $A_n^*, B_n^*$  の値も求まり平衡拡散放出率が求まる。

(2) 長半減期 F. P. 核種の場合の  $A_i^*, B_i^*$  の解法

境界条件式を (2-34) 式に適用すると、 $A_i^*, B_i^*$  に関して次の連立方程式が成立し<sup>(9)</sup>、

$$B_0^* = 0, \quad (2-50)$$

$$A_i^* + b_{i,i} B_i^* + a_{i,i+1} A_{i+1}^* + b_{i,i+1} B_{i+1}^* = q_i \quad ; \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2-51)$$

$$A_i^* + B_i^* + a_{i,i+1} A_{i+1}^* + b_{i,i+1} B_{i+1}^* = q_i' \quad ; \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2-52)$$

$$A_n^* + b_{n,n} B_n^* = q_n, \quad (2-53)$$

係数は次式で与えられる。

$$b_{i,i} = \frac{\omega_i \alpha_i \tanh(\omega_i \alpha_i) - 1}{\omega_i \alpha_i \coth(\omega_i \alpha_i) - 1} \quad ; \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2-54)$$

$$a_{i, i+1} = - \frac{D'_{i+1}}{D'_i} \cdot \frac{\sinh(\omega_{i+1}\alpha_i)}{\sinh(\omega_{i+1}\alpha_{i+1})} \cdot \frac{\omega_{i+1}\alpha_i \coth(\omega_{i+1}\alpha_i) - 1}{\omega_i\alpha_i \coth(\omega_i\alpha_i) - 1}$$

;  $i=0, 1, \dots, n-1$  (2-55)

$$b_{i, i+1} = - \frac{D'_{i+1}}{D'_i} \cdot \frac{\cosh(\omega_{i+1}\alpha_i)}{\cosh(\omega_{i+1}\alpha_{i+1})} \cdot \frac{\omega_{i+1}\alpha_i \tanh(\omega_{i+1}\alpha_i) - 1}{\omega_i\alpha_i \coth(\omega_i\alpha_i) - 1}$$

;  $i=0, 1, \dots, n-1$  (2-56)

$$q_i = \frac{\alpha_i \rho_i(\alpha_i) \cdot \frac{\zeta_i}{1+\zeta_i} - \alpha_{i+1} \rho_{i+1}(\alpha_{i+1}) \cdot \frac{\zeta_{i+1}}{1+\zeta_{i+1}} \cdot \frac{D'_{i+1}}{D'_i}}{\omega_i \alpha_i \coth(\omega_i \alpha_i) - 1}$$

;  $i=0, 1, \dots, n-1$  (2-57)

$$a'_{i, i+1} = - \frac{1}{\phi_i} \cdot \frac{\sinh(\omega_{i+1}\alpha_i)}{\sinh(\omega_{i+1}\alpha_{i+1})} \quad ; \quad i=0, 1, \dots, n-1 \quad (2-58)$$

$$b'_{i, i+1} = - \frac{1}{\phi_i} \cdot \frac{\cosh(\omega_{i+1}\alpha_i)}{\cosh(\omega_{i+1}\alpha_{i+1})} \quad ; \quad i=0, 1, \dots, n-1 \quad (2-59)$$

$$q'_i = - \frac{1}{\phi_i} \left\{ \alpha_i \rho_i(\alpha_i) \phi_i - \alpha_{i+1} \rho_{i+1}(\alpha_{i+1}) \frac{\frac{\alpha_i}{\alpha_{i+1}} + \zeta_{i+1}}{1+\zeta_{i+1}} \right\}$$

;  $i=0, 1, \dots, n-1$  (2-60)

$$b_{n, n} = \begin{cases} \frac{l_{DC'}(\omega_n \tanh \omega_{n-1}) + 1}{l_{DC'}(\omega_n \coth \omega_{n-1}) + 1} & ; l_{DC'} \neq 0 & (2-61a) \\ 1.0 & ; l_{DC} = 0 & (2-61b) \end{cases}$$

$$q_n = \begin{cases} \frac{\rho_n(1) \cdot \left[ \frac{\zeta_n I'_{DC}}{1+3n} - 1 \right]}{I'_{DC} (\omega_n \coth \omega_n - 1) + 1} & ; I'_{DC} \approx 0 \quad (2-62a) \\ -\rho_n(1) & ; I'_{DC} = 0 \quad (2-62b) \end{cases}$$

係数の表示式から明らかな様に、 $\omega_i$  の値が大きくなると  $b_{i,i}$  の値は 1.0 に近づき、 $a_{i,i+1}$ ,  $a'_{i,i+1}$  の値は各々  $b_{i,i+1}$ ,  $b'_{i,i+1}$  の値に近づき、 $q_i$  と  $q'_i$  の値が異っている場合には (2-51), (2-52) 式の関係は計算機の有効数字以内では解くことが不可能になる。その様なケースについては短半減期 F.P. 核種として取扱い(3)で解説する。ここでは  $\omega_i$  の値が小さいケースのコード上の取扱いを次に示す。

$$X < 0.1 \text{ のとき } X \coth(X) - 1 \approx \frac{X^2}{3} \frac{1 + \frac{X^2}{10} + \frac{X^4}{280}}{1 + \frac{X^2}{6} + \frac{X^2}{120}} \quad (2-63)$$

$A_i^*$ ,  $B_i^*$  を解くための連立方程式をマトリックスベクトル記法を用いて表示すると(2-64) 式の様になる。

$b_{0,0} \quad   \quad b_{0,1} \quad a_{0,1}$ $  \quad   \quad b'_{0,1} \quad a'_{0,1}$	$b_{1,1} \quad   \quad b_{1,2} \quad a_{1,2}$ $  \quad   \quad b'_{1,2} \quad a'_{1,2}$	$b_{i-1,i-1} \quad   \quad b_{i-1,i} \quad a_{i-1,i}$ $  \quad   \quad b'_{i-1,i} \quad a'_{i-1,i}$	$b_{i,i} \quad   \quad b_{i,i+1} \quad a_{i,i+1}$ $  \quad   \quad b'_{i,i+1} \quad a'_{i,i+1}$	$b_{n-1,n-1} \quad   \quad b_{n-1,n} \quad a_{n-1,n}$ $  \quad   \quad b'_{n-1,n} \quad a'_{n-1,n}$ $b_{n,n} \quad  $	$B_0^* \quad   \quad 0$ $A_0^* \quad   \quad q_0$ $B_1^* \quad   \quad q_0'$ $A_1^* \quad   \quad q_1$ $B_2^* \quad   \quad q_1'$ $\vdots \quad   \quad \vdots$ $\vdots \quad   \quad \vdots$ $A_{i-1}^* \quad   \quad q_{i-1}$ $B_i^* \quad   \quad q'_{i-1}$ $A_i^* \quad   \quad q_i$ $B_{i+1}^* \quad   \quad q'_i$ $\vdots \quad   \quad \vdots$ $\vdots \quad   \quad \vdots$ $A_{n-1}^* \quad   \quad q_{n-1}$ $B_n^* \quad   \quad q'_{n-1}$ $A_n^* \quad   \quad q_n$
--	--	--	--	---	---

(2-64)

(3) 短半減期 F. P. 核種の場合の  $A_i^*$ ,  $B_i^*$  の解法

多重被覆の c. f. p. 中での短半減期の F. P. の核種は、拡散移動に比して  $\beta$  崩壊による消滅の方が大きく、実質的に拡散問題としての取扱いが困難になる。コード上で F. P. 核種が短半減期であるかどうかの判定を次式で行い、

$$\omega_i = r_n \sqrt{\frac{\lambda}{D_i}} > 5 \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-65)$$

この関係を満足する被覆層  $j$  が存在する場合、計算対象となる F. P. 核種を短半減期核種とみなし、その前後の被覆層  $j-1$ ,  $j+1$  に於ける  $A_i^*$ ,  $B_i^*$  を次式で計算する。\*

$$A_{j-1}^* + b_{j-1, j-1} B_{j-1}^* = q_{j-1} \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-66)$$

$$a'_{j, j+1} A_{j+1}^* + b'_{j, j+1} B_{j+1}^* = q'_j \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-67)$$

係数は被覆層  $j-1$  で次の様に与えられる。

$$b_{j-1, j-1} = \frac{g_{j-1} \alpha_{j-1}^{-1} + \omega_{j-1} \alpha_{j-1} \tanh(\omega_{j-1} \alpha_{j-1})}{g_{j-1} \alpha_{j-1}^{-1} + \omega_{j-1} \alpha_{j-1} \coth(\omega_{j-1} \alpha_{j-1})} \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-68)$$

$$g_{j-1} = \frac{\alpha_{j-1}^{-2} [h_{j-1} + \rho_{j-1}(\alpha_{j-1}) \cdot \left\{ \frac{\zeta_{j-1}}{1 + \zeta_{j-1} \alpha_{j-1}} - g_{j-1} \right\}]}{g_{j-1} \alpha_{j-1}^{-1} + \omega_{j-1} \alpha_{j-1} \coth(\omega_{j-1} \alpha_{j-1})} \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-69)$$

但し、
$$g_{j-1} = \frac{D_j'}{D_{j-1}'} \cdot \frac{1 - \omega_j \alpha_{j-1}}{\alpha_{j-1}} \cdot \phi_{j-1} \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-70)$$

$$h_{j-1} = \frac{D_j'}{D_{j-1}'} \cdot \frac{\rho_j(\alpha_j)}{(1 + \zeta_j) \alpha_{j-1}} \cdot [1 - \omega_j \alpha_j (1 + \zeta_j)] \quad ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-71)$$

被覆層  $j+1$  で次の様に示される。

\* 被覆層  $j$  に於ける F. P. の拡散を無視して  $j-1$  層の外側境界条件、 $j+1$  層の内側境界条件を新たに設定した。詳細については別の報告書にゆずる。

$$a_{j, j+1}' = \tanh(\omega_{j+1} \alpha_j) \coth(\omega_{j+1} \alpha_{j+1}) \cdot \frac{g_{j+1} \alpha_j^{-1 + \omega_{j+1} \alpha_j} \coth(\omega_{j+1} \alpha_j)}{g_{j+1} \alpha_{j-1}^{-1 + \omega_{j+1} \alpha_j} \tanh(\omega_{j+1} \alpha_j)}$$

$$; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-72)$$

$$q_j' = \frac{\cosh(\omega_{j+1} \alpha_{j+1})}{\cosh(\omega_{j+1} \alpha_j)} \cdot \frac{\alpha_j^2 [h_{j+1} + \rho_{j+1}(\alpha_{j+1}) \left\{ \frac{\zeta_{j+1}}{1 + \zeta_{j+1} \alpha_j} - g_{j+1} \right\}]}{g_{j+1} \alpha_j^{-1 + \omega_{j+1} \alpha_j} \tanh(\omega_{j+1} \alpha_j)}$$

$$; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-73)$$

但し,  $g_{j+1} = \frac{D_j'}{D_{j+1}'} \cdot \frac{1 - \omega_j \alpha_j}{\alpha_j} \cdot \frac{1}{\phi_j} ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-74)$

$$h_{j+1} = \frac{D_j'}{D_{j+1}'} \cdot \frac{\rho_j(\alpha_j)}{(1 + \zeta_j) \alpha_j} \cdot [1 - \omega_j \alpha_j (1 - \zeta_j)] ; j = j_1, j_2, \dots \quad (2-75)$$

短半減期核種の場合の  $A_j^*$ ,  $B_j^*$  を解くためのマトリックスベクトル方程式は次の様になる。

$$\begin{array}{r}
 10 \quad \left[ \begin{array}{c} b_{0,0} \quad 1 \quad 0 \quad 0 \\ b_{0,0} \quad 10 \quad b_{0,1} \quad a_{0,1} \\ 10 \quad 10 \quad b'_{0,1} \quad a'_{0,1} \\ \vdots \\ b_{1,1} \quad 1 \quad b_{1,2} \quad a_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ b'_{j-2, j-1} \quad a'_{j-2, j-1} \\ b_{j-1, j-1} \quad 1 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \\ 0 \quad 0 \quad 1 \quad a'_{j, j+1} \\ b_{j+1, j+1} \quad 1 \quad b_{j+1, j+2} \quad a_{j+1, j+2} \\ \vdots \\ b_{n-1, n-1} \quad 1 \quad b_{n-1, n} \quad a_{n-1, n} \\ \vdots \\ b_{n-1, n} \quad 1 \quad a'_{n-1, n} \\ b_{n, n} \quad 1 \end{array} \right] \cdot \begin{array}{c} \begin{array}{c} B_0^* \\ A_0^* \\ B_1^* \\ A_1^* \\ \vdots \\ B_{j-1}^* \\ A_{j-1}^* \\ B_j^* \\ A_j^* \\ B_{j+1}^* \\ A_{j+1}^* \\ \vdots \\ A_{n-1}^* \\ B_n^* \\ A_n^* \end{array} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ q'_{j-2} \\ q_{j-1} \\ 0 \\ 0 \\ a_j' \\ q_{j+1} \\ \vdots \\ q_{n-1} \\ q'_{n-1} \\ q_n \end{array} \\
 \end{array} = \begin{array}{c} 0 \\ q_0 \\ q'_0 \\ q_1 \\ \vdots \\ q'_{j-2} \\ q_{j-1} \\ 0 \\ 0 \\ a_j' \\ q_{j+1} \\ \vdots \\ q_{n-1} \\ q'_{n-1} \\ q_n \end{array}$$

$$(2-76)$$

層  $j$  が (2-65) 式の条件を満たす場合、 $A_j^*$ 、 $B_j^*$  の実際の値を求めることが不可能であるので、強制的にゼロになる様にマトリックス要素の値を変更し、対角要素を 1.0 とし他を 0.0 とする。(2-65) 式の条件を満たす層が連続する場合にはその連続する層で  $A_j^* = 0$ 、 $B_j^* = 0$  となるように対角要素を 1.0 とし、他を 0.0 とし、その連続層の前後の層で  $a$ 、 $b$ 、 $q$ 、 $q'$  を前述の通り求める。 $A_j^*$ 、 $B_j^*$  の値を強制的にゼロにしているので、第  $j$  層の濃度分布は正しく求められないので、(2-43) 式を用いることができなくなり、次に第  $j$  層境界の濃度計算法を示す。特に最外層については平衡拡散放出率の計算法も示す。

$\omega_0 > 5$  の時、

$$\psi(0) = 1,$$

$\omega_j > 5$ 、 $\omega_{j+1} \leq 5$  の時、

$$\begin{aligned} \psi_j(\alpha_j) = \frac{1}{\phi_j} \cdot \psi_{j+1}(\alpha_j) = \frac{1}{\phi_j} \cdot \left[ \frac{1}{\alpha_j} \left\{ \frac{\sinh(\omega_{j+1}\alpha_j)}{\sinh(\omega_{j+1}\alpha_{j+1})} \cdot A_{j+1}^* \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\cosh(\omega_{j+1}\alpha_j)}{\cosh(\omega_{j+1}\alpha_j)} \cdot B_{j+1}^* + \rho_{j+1}(\alpha_{j+1}) \cdot \frac{1+\zeta_{j+1} \frac{\alpha_{j+1}}{\alpha_j}}{1+\zeta_{j+1}} \right\} \right] \\ ; j=0, 1, \dots, n-1 \quad (2-77) \end{aligned}$$

$\omega_j > 5$ 、 $\omega_{j+1} > 5$  の時、

$$\psi_j(\alpha_j) \doteq \rho_j(\alpha_j) \quad ; j=0, 1, \dots, n-1 \quad (2-78)$$

$\omega_j > 5$ 、 $\omega_{j-1} \leq 5$  の時、

$$\begin{aligned} \psi_j(\alpha_{j-1}) = \phi_{j-1} \psi_{j-1}(\alpha_{j-1}) = \phi_{j-1} \cdot \left[ \frac{1}{\alpha_{j-1}} \{ A_{j-1}^* + B_{j-1}^* \} + \rho_{j-1}(\alpha_{j-1}) \right] ; \\ j = 1, 2, \dots, n \quad (2-79) \end{aligned}$$

$\omega_j > 5$ 、 $\omega_{j-1} > 5$  の時、

$$\psi_j(\alpha_{j-1}) \doteq \frac{1+\zeta_j \frac{\alpha_j}{\alpha_{j-1}}}{1+\zeta_j} \cdot \rho_j(\alpha_j) \quad ; j=1, 2, \dots, n \quad (2-80)$$

$\omega_n > 5$  の時,

$$\psi_n(1) = \begin{cases} 0.0 & ; l'_{DC} = 0 & (2-81a) \\ \rho_n(1) \cdot \frac{\left[ \frac{\omega_n - 1 + \zeta_n}{1 + \zeta_n} \right]}{\left[ (\omega_n - 1) l'_{DC} + 1 \right]} l'_{DC} & ; l'_{DC} \neq 0 & (2-81b) \end{cases}$$

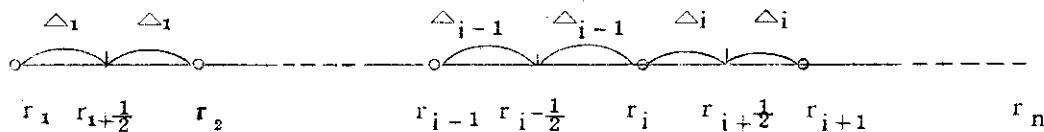
$$f_{DC}^{(\infty)} = \begin{cases} \frac{3}{\alpha_0^3} \cdot D_n' \rho_n(1) \cdot \left[ \frac{\omega_n - 1 + \zeta_n}{1 + \zeta_n} \right] & ; l'_{DC} = 0 & (2-82a) \\ \frac{3}{\alpha_0^3} \cdot D_n' \rho_n(1) \cdot \frac{\left[ \frac{\omega_n - 1 + \zeta_n}{1 + \zeta_n} \right]}{\left[ (\omega_n - 1) l'_{DC} + 1 \right]} & ; l'_{DC} \neq 0. & (2-82b) \end{cases}$$

2.2.3 多重 c. f. p. 中の非定常濃度分布の計算

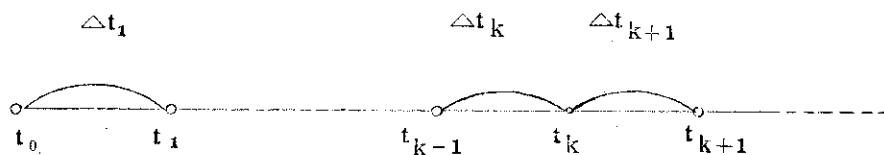
(1) 径座標, 時間座標のメッシュ分割と無次元量

被覆層破損のない c. f. p. 体系における非定常濃度分布の計算の際には, 燃料核, 各被覆層をメッシュ分割し, 時間座標についてもメッシュ分割して数値計算を行う。径方向メッシュ点を (2-83) 式で示し, 添字に i を用い, 時間メッシュ点を (2-84) 式で示し, 添字に k を用いる。

$$r_i = r_1 + 2(\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_{i-1}); j = 2, 3, \dots, n \quad (2-83)$$



$$t_k = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_{k-1} \quad (2-84)$$



径方向メッシュ間の領域を  $i + \frac{1}{2}$ ,  $i - \frac{1}{2}$  の記号を付して区別し, それらの領域で必要となる物性値に  $i + \frac{1}{2}$ ,  $i - \frac{1}{2}$  などの表示をする。基礎となる拡散方程式, 初期ならびに境界条件は前述のように (2-34) 式より (2-39) 式で与えられる。次に示す無次元量を導入し,

$$\psi_{i+\frac{1}{2}}(x, t'_k) = \frac{\lambda C_{i+\frac{1}{2}}(r, t_k)}{B_0(t_k)} \cdot D'_{i+\frac{1}{2}}(k) = \frac{D_{i+\frac{1}{2}}(t_k)}{r_n^2 \lambda}, \quad \rho_{i+\frac{1}{2}}(k) = \frac{B_{i+\frac{1}{2}}(t_k)}{B_0(t_k)}$$

$$; i=1, 2, \dots, n-1 \quad (2-85a)$$

$$\phi(i, k) = \frac{C_{i+\frac{1}{2}}(r_i, t_k)}{C_{i-\frac{1}{2}}(r_i, t_k)}, \quad \alpha_i = \frac{r_i}{r_n} \quad ; i=1, 2, \dots, n \quad (2-85b)$$

$$x = \frac{r}{r_n}, \quad l'_{D0} = \frac{l_{D0}}{r_n}, \quad \Delta'_i = \frac{\Delta_i}{r_n}, \quad t'_k = \lambda t_k \quad (2-85c)$$

今導入した濃度に関する無次元数 $\psi$ を更に変形して $F$ を新たに定義する。

$$F(i, k) = \alpha_i \psi_{i-\frac{1}{2}}(\alpha_i, t'_k) \quad ; i=2, 3, \dots, n \quad (2-86a)$$

$$F(1, k) = \psi_{i+\frac{1}{2}}(\alpha_1, t'_k) \quad (2-86b)$$

F. P. 濃度の時間変動項は重みづけの係数 $\Omega$ を導入して、 $t_{k-1}$ における濃度の時間微分と $t_k$ における濃度の時間微分を用いて $\Omega$ で加重平均した量として近似する。但し $\Omega$ は $0 < \Omega < 1$ で一定値とする。

$$\frac{\partial C_{i+\frac{1}{2}}(r, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_{k-1} \sim t_k} = \frac{C_{i+\frac{1}{2}}(r, t_k) - C_{i+\frac{1}{2}}(r, t_{k-1})}{\Delta t_k}$$

$$= \Omega \frac{\partial C_{i+\frac{1}{2}}(r, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_k} + (1-\Omega) \frac{\partial C_{i+\frac{1}{2}}(r, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_{k-1}}$$

$$; i=1, 2, \dots, n-1. \quad (2-87)$$

無次元化の際に現われた $B_0$ は燃料核内の一様F. P. 生成源である。

(2) 濃度分布の数値解

濃度分布に関して径方向メッシュ、時間メッシュ点で差分化を行なうと、濃度 $F$ に関する次の連立方程式が得られる。

$$-U(i, k) \cdot F(i+1, k) + V(i, k) \cdot F(i, k) - W(i, k) \cdot F(i-1, k) = X(i, k-1, k)$$

$$; i=1, 2, \dots, n. \quad (2-88)$$

ここで係数 $U, V, W, X$ は次式で与えられる。



$$U(i, k) = \Delta t'_k \cdot r(i, k) \quad ; i=2, 3, \dots, n-1 \quad (2-89)$$

$$W(i, k) = \Delta t'_k \cdot r(i-1, k) \cdot \phi(i-1, k) \quad ; i=2, 3, \dots, n-1 \quad (2-90)$$

$$V(i, k) = (1 + \Omega \cdot \Delta t'_k) \cdot H(i, k) + \Delta t'_k \cdot r(i, k) \cdot \left[1 + \frac{2\Delta i'}{\alpha_i}\right] \cdot \phi(i, k) \\ + \Delta t'_k \cdot r(i-1, k) \cdot \left[1 - \frac{2\Delta i'_{i-1}}{\alpha_i}\right] \quad ; i=2, 3, \dots, n-1 \quad (2-91)$$

$$X(i, k-1, k) = \alpha_i \Delta i'_{i-1} \cdot \left[1 - \frac{\Delta i'_{i-1}}{2\alpha_i}\right] \cdot K(i-1, k-1, k) + \alpha_i \Delta i'_i \cdot \left[1 + \frac{\Delta i'}{2\alpha_i}\right] \cdot K(i, k-1, k) \\ + [1 - (1 - \Omega) \Delta t'_k] \cdot H(i, k-1) \cdot F(i, k-1) \\ + \frac{1 - \Omega}{\Omega} \cdot \Delta t'_k \times \left[ r(i, k-1) \cdot F(i+1, k-1) + r(i-1, k-1) \cdot \phi(i-1, k-1) \cdot F(i-1, k-1) \right. \\ \left. - \left\{ r(i, k-1) \cdot \left[1 + \frac{2\Delta i'}{\alpha_i}\right] \cdot \phi(i, k-1) + r(i-1, k-1) \cdot \left[1 - \frac{2\Delta i'_{i-1}}{\alpha_i}\right] \right\} \cdot F(i, k-1) \right] \\ ; i=2, 3, \dots, n-1, \quad (2-92)$$

但し,

$$r(i, k) = \frac{\Omega}{2\Delta i'_i} \cdot D'_{i+\frac{1}{2}}(k) \quad ; i=1, 2, \dots, n-1 \quad (2-93)$$

$$H(i, k) = \Delta i'_{i-1} \cdot \left[1 - \frac{\Delta i'_{i-1}}{2\alpha_i}\right] + \Delta i'_i \cdot \left[1 + \frac{\Delta i'}{2\alpha_i}\right] \cdot \phi(i, k) \quad ; i=2, 3, \dots, n-1 \quad (2-94)$$

$$K(i, k-1, k) = \Omega \cdot \Delta t'_k \left[ \rho_{i+\frac{1}{2}}(k) + \frac{1-\Omega}{\Omega} \rho_{i+\frac{1}{2}}(k-1) \right] \quad ; i=1, 2, \dots, n-1 \quad (2-95)$$

$i=1, n$  に対する  $U, V, W, X$  の表式は,

$$U(1, k) = 0, \quad (2-96)$$

$$V(1, k) = 1, \quad (2-97)$$

$$X(1, k-1, k) = 0, \quad (2-98)$$

$$W(n, k) = \begin{cases} 0 & ; I'_{DC} = 0 \\ \frac{D'_{n-\frac{1}{2}}(k)}{2\alpha_{n-1} (\Delta'_{n-1})^2} \cdot \phi(n-1, k); & I'_{DC} \neq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} (2-99a) \\ (2-99b) \end{array}$$

$$V(n, k) = \begin{cases} 1 & ; I'_{DC} = 0 \\ 1 + \frac{D'_{n-\frac{1}{2}}(k)}{2(\Delta'_{n-1})^2} \left[ 1 + \frac{2\Delta'_{n-1}(2\Delta'_{n-1}+1)}{I'_{DC}} \right]; & I'_{DC} \neq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} (2-100a) \\ (2-100b) \end{array}$$

$$X(n, k) = \begin{cases} 0 & ; I'_{DC} = 0 \\ \rho_{n-\frac{1}{2}}(k) & ; I'_{DC} \neq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} (2-101a) \\ (2-101b) \end{array}$$

$\Gamma$ に関する連立方程式(2-88)式をマトリックスベクトル式で表わすと次式になる。

$$\begin{bmatrix} V(1, k)-U(1, k) & & & & & & & & \\ -W(2, k) & V(2, k)-U(2, k) & & & & & & & \\ & -W(3, k) & V(3, k)-U(3, k) & & & & & & \\ & & & \ddots & & & & & \\ & & & -W(i, k) & V(i, k)-U(i, k) & & & & \\ & & & & & \ddots & & & \\ & & & & & & -W(n-1, k) & V(n-1, k)-U(n-1, k) & \\ 0 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & -W(n, k) & V(n, k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma(1, k) \\ \Gamma(2, k) \\ \Gamma(3, k) \\ \vdots \\ \Gamma(i, k) \\ \vdots \\ \Gamma(n-1, k) \\ \Gamma(n, k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(1, k-1, k) \\ X(2, k-1, k) \\ X(3, k-1, k) \\ \vdots \\ X(i, k-1, k) \\ \vdots \\ X(n-1, k) \\ X(n, k-1, k) \end{bmatrix} \quad (2-102)$$

(2-102)式を解いて得られる無次元濃度,  $\Gamma$ の値を(2-86a), (2-86b)式に代入し, さらにその結果を(2-85a)に代入すると濃度分布,  $U(r, t)$ が求まり, これを用いて非定常拡散放出率,  $f_{DC}(t'_k)$ を求めると次式に示す結果を得る。

$$f_{DC}(t'_k) = \frac{R_{DC}(t_k)}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 B_0(t_k)}$$

$$= \begin{cases} \frac{3}{\alpha_0^3} \cdot \frac{D'_{n-\frac{1}{2}}(k)}{2\Delta'_{n-1}} \cdot \frac{\phi(n-1, k) \cdot \Gamma(n-1, k)}{\alpha_{n-1}} & ; I'_{DC} = 0 \\ \frac{3}{\alpha_0^3} \cdot \frac{D'_{n-\frac{1}{2}}(k)}{I'_{DC}} \cdot \Gamma(n, k) & ; I'_{DC} \neq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} (2-103a) \\ (2-103b) \end{array}$$

ここで $\alpha_0$ は燃料核の半径を(2-40a)式によって無次元化した量である。

2.2.4 拡散放出に関する平衡到達時間

(1) 解析モデル

多重 c. f. p. からの F. P. 放出に関する平衡到達時間,  $L_{DC}$  の定義は, 2.1.4 で説明した被覆層破損のある c. f. p. の場合の定義と同じであるが, 具体的な解析上のモデル化に差異がある。多重 c. f. p. 体系を Fig. 2.6 に示す様に燃料核と二重被覆層の 3 領域に分け, 多重被覆層の中から F. P. の拡散係数が一番小さくなる被覆層を最外層に選び領域 2 とし, 燃料核を領域 0 とし, 領域 1 にはそれ以外の被覆層がすべて含まれるとする。第 1 領域の物性値は F, P. の拡散係数が二番目に小さくなる被覆層の物性値 (拡散係数, 燃料汚染率等) で代表させる。他に計算に必要な物性値として, 領域 1 と 2 の間の隔壁係数,  $\phi$  の値があり, それを領域 2 に選んだ被覆層の内側境界面に於ける  $\phi$  の値で代表させた。領域 1 の外半径,  $r_1$  を  $r_1 = r_2 - \Delta r_2$  とし, ここで  $r_2$  は c. f. p. の半径,  $\Delta r_2$  は領域 2 に選んだ被覆層の厚さとする。

解析的に平衡到達時間を求める際に, 諸物性値を燃焼初期ステップで代表させ, 濃度に対する初期条件, 境界条件を:  $t = 0$  で  $c = 0$ ,  $r = r_2$  で  $c = 0$  とし, 燃料核から被覆層への F. P. の放出速度を一定の条件のもとに解析解を導いた。

(2) 平衡到達時間の解析解

無次元諸量を次の様に定義すると,

$$\alpha_i = \frac{r_i}{r_2} \quad ; i = 0, 1, 2 \quad (2-104a)$$

$$\alpha_i' = \alpha_i - \alpha_0, \quad \omega_i = r_2 \sqrt{\frac{\lambda}{D_i}}, \quad \rho_i = \frac{B_i}{B_0} \quad ; i = 1, 2 \quad (2-104b)$$

$$\phi = \frac{C_2(r_1)}{C_1(r_1)}, \quad (2-104c)$$

平衡到達時間,  $L_{DC}$  の無次元量,  $\tau_{DC}$  は次の様に示され,

$$\tau_{DC} = \frac{D_2 L_{DC}}{(r_2)^2}, \quad (2-105)$$

$$\tau_{DC} = \frac{H'}{H} - \frac{\Delta'}{\Delta}. \quad (2-106)$$

ここで,

$$H = \cosh(\omega_2 \alpha_2') - \frac{3\rho_1}{\omega_1 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_2')$$

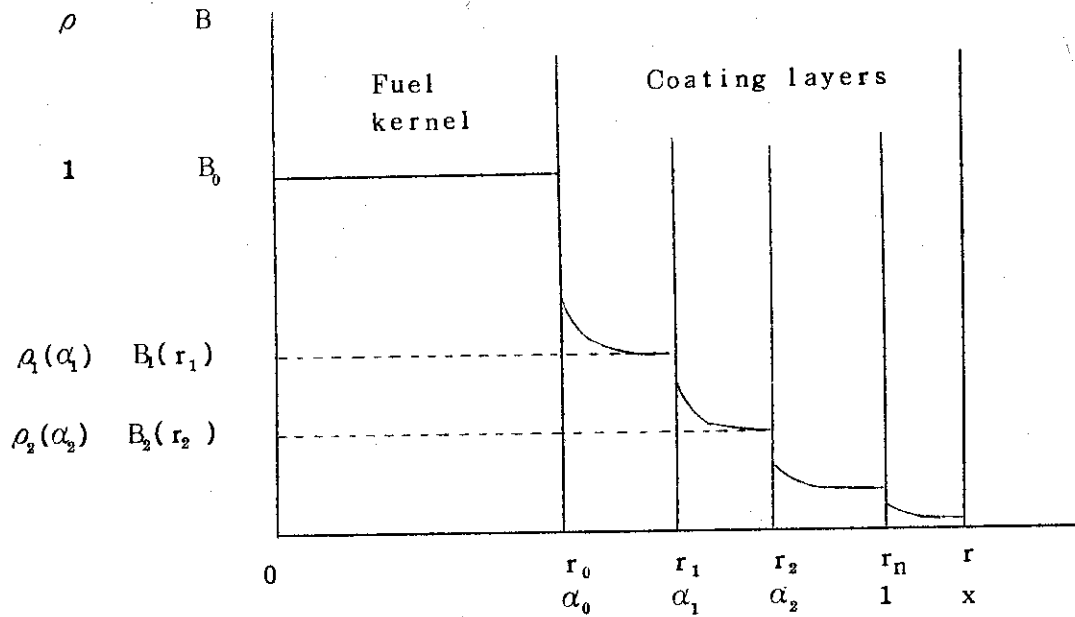
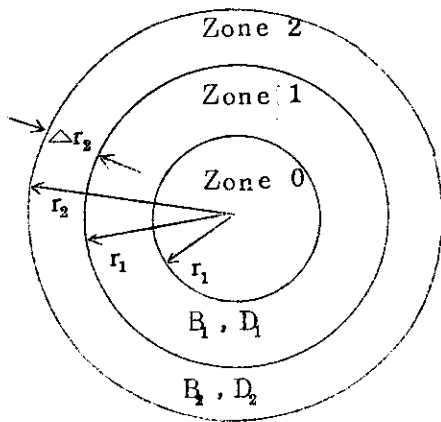


Fig. 2.5 Fuel contamination profile in a coated particle  
 $r$ : radial distance,  $x$ : normalized radial distance,  
 $B$ : F. P. birth rate,  $\rho$ : normalized F. P. birth rate.



Zone 0 ; fuel kernel  
 Zone 1,2 ; coating layers

Fig. 2.6 Description of a dual coated fuel particle.  
 Zone 2 is selected as the coating layer which has the lowest diffusion coefficient and other coating layers are involved in Zone 1.  
 $B_1, D_1$  are selected as those in the layer which has the second lowest diffusion coefficient.

$$\begin{aligned}
 & + \frac{3\rho_2}{\omega_2 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') \\
 & + \frac{3\rho_2 \phi}{\omega_1 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \cdot \left\{ \cosh(\omega_2 \alpha_2') - \cosh(\omega_2 \alpha_1') \right\} \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \\
 & - \frac{3\rho_2}{\omega_2 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_2') \cdot \Delta_I \tag{2-107}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi' = & \frac{\alpha_2'}{2\omega_2} \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_2') + \frac{3(\rho_2 \phi - \rho_1)}{2\omega_1 \omega_2 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \times \left[ -\frac{1}{\omega_2} \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_2') \right. \\
 & + \left. \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \alpha_1' \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_2') + \alpha_2' \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_2') \right] \\
 & + \frac{3\rho_2}{2\omega_2^2 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \times \left[ -\frac{1}{\omega_2} \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') \right. \\
 & + \left. \alpha_1' \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') + \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \alpha_1' \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \right] \\
 & + \frac{3\rho\phi}{2\omega_1 \omega_2 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \times \left[ \frac{1}{\omega_2} \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \right. \\
 & - \left. \alpha_1' \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') - \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \alpha_1' \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') \right] \\
 & - \frac{3\rho_2}{2\omega_2^2 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \times \left[ \left\{ \alpha_2' \cdot \cosh(\omega_2 \alpha_2') - \frac{1}{\omega_2} \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_2') \right\} \cdot \Delta_I \right. \\
 & \left. + \omega_2 \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_2') \cdot \Delta_I' \right] \tag{2-108}
 \end{aligned}$$

$$\Delta = \cosh(\omega_2 \alpha_2') \cdot \Delta_I \tag{2-109}$$

$$\Delta' = \frac{\alpha_2'}{2\omega_2} \cdot \sinh(\omega_2 \alpha_2') \cdot \Delta_I + \cosh(\omega_2 \alpha_2') \cdot \Delta_I' \quad (2-110)$$

$$\Delta_I = \cosh(\omega_1 \alpha_1') \cdot \cosh(\omega_2 [\alpha_2' - \alpha_1']) + \phi \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \cdot \sinh(\omega_2 [\alpha_2' - \alpha_1']) \quad (2-111)$$

$$\Delta_I' = \frac{\alpha_1'}{2\omega_2} \times \left\{ \left[ \frac{\omega_1}{\omega_2} + \frac{\phi(\alpha_2' - \alpha_1')}{\alpha_1'} \right] \cdot \cosh(\omega_2 [\alpha_2' - \alpha_1']) \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \right. \\ \left. + \frac{\alpha_2' - \alpha_1'}{\alpha_1'} + \phi \cdot \sinh(\omega_2 [\alpha_2' - \alpha_1']) \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') \right\} \quad (2-112)$$

ここで  $f_{DK}(\infty)$  は燃料核からの F. P. の平衡拡散放出率であり、(2-17)式で示される値を用いる。短半減期核種については、次の判定を行い、 $\tau_{DC}$  の値を求める。

$\omega_2 (\alpha_2' - \alpha_1') \geq 25$ ,  $\rho_2 \neq 0$  のとき、

$$\frac{\Pi'}{\Pi} = \alpha_2' - \alpha_1' + \alpha_1' \phi + \frac{2}{\omega_2} + \left\{ \frac{2\phi}{\omega_1} + \alpha_1' \frac{\omega_1}{\omega_2} + \phi(\alpha_2' - \alpha_1') \right\} \cdot \tanh(\omega_1 \alpha_1') \quad (2-113)$$

$$\frac{\Delta'}{\Delta} = 4\omega_2 \left\{ 1 + \phi \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \tanh(\omega_1 \alpha_1') \right\} \quad (2-114)$$

$\omega_2 (\alpha_2' - \alpha_1') \geq 25$ ,  $\rho_2 = 0$  のとき、

$$\Pi' = \frac{\alpha_2'}{2\omega_2} + \frac{3\rho_1}{2\alpha_0 \omega_1 \omega_2 f_{DK}(\infty)} \left\{ \left( \frac{1}{\omega_2} - \alpha_2' \right) \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1) - \frac{\omega_1}{\omega_2} \alpha_1' \cdot \cosh(\omega_1 \alpha_1') \right\} \quad (2-115)$$

$$\Pi = 1 - \frac{3\rho_1}{\omega_1 \alpha_0 f_{DK}(\infty)} \cdot \sinh(\omega_1 \alpha_1') \quad (2-116)$$

$$\Delta' = 2\alpha_2' - \alpha_1' + \alpha_1' \phi + \left\{ \alpha_2' \phi \frac{\omega_2}{\omega_1} + \alpha_1' \frac{\omega_1}{\omega_2} + \phi(\alpha_2' - \alpha_1') \right\} \cdot \tanh(\omega_1 \alpha_1') \quad (2-117)$$

$$\Delta = 2\omega_2 \left\{ 1 + \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \tanh(\omega_1 \alpha_1') \right\}. \quad (2-118)$$

### 2.3 被覆燃料粒子よりの反跳放出

本コードでは c. f. p. 内の反跳プロセスと拡散プロセスを独立に取扱っており、その場合の反跳放出率を被覆層破損のある時に  $f_{RK}$ 、ない時に  $f_{RC}$  とし、各々を (2-119)、(2-120) 式で与えている。<sup>(9)</sup>

$$\begin{aligned} f_{RK} &= \frac{R_{RK}}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 B_0} \\ &= \frac{3}{4} \cdot \left( \frac{l_{RK}}{r_0} \right) - \frac{1}{16} \left( \frac{l_{RK}}{r_0} \right)^3, \end{aligned} \quad (2-119)$$

$$\begin{aligned} f_{RC} &= \frac{R_{RC}}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 B_0} \\ &= \frac{\bar{\rho}_n}{\alpha_0^3} \left[ \frac{3}{4} \left( \frac{l_{RC}}{r_n} \right) - \frac{1}{16} \left( \frac{l_{RC}}{r_n} \right)^3 \right], \end{aligned} \quad (2-120)$$

但し、

$$\bar{\rho}_n = \frac{\rho_n(1)}{1 + \zeta_n} \times \left[ 1 + \zeta_n \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{RC}}{r_n} \right) - \frac{1}{6} \left( \frac{l_{RC}}{r_n} \right)^2 + \frac{1}{24} \left( \frac{l_{RC}}{r_n} \right)^3 \right\} \right]. \quad (2-121)$$

ここで、 $l_{RK}$ 、 $l_{RC}$  は各々燃料核、最外被覆層中に於ける F. P. の反跳距離であり、 $\rho_n(1)$ 、 $\zeta_n$  は (2-41) 式で既に与えられている最外被覆層に於ける燃料汚染を記述するパラメータである。

### 2.4 記号説明

本章で使用した物理量とそれを無次元化した量ならびに添字に対する記号の説明と元単位を以下にまとめて示した。元単位はすべて c. g. s. 系で統一した。

- B ; F. P. の生成速度, [g-mol/cm<sup>3</sup>/sec]
- C ; F. P. の濃度, [g-mol/cm<sup>3</sup>]
- D ; F. P. の拡散係数, [cm<sup>2</sup>/sec]
- F ; 1個の c. f. p. よりの F. P. の全放出量, [g-mol]

- $K$  ; 被覆層破損率, [ - ]  
 $L$  ; F. P. の拡散放出に関する平衡到達時間, [ sec ]  
 $l_D$  ; F. P. の拡散外挿距離, [ cm ]  
 $l_R$  ; F. P. の反跳距離, [ cm ]  
 $R$  ; 1 個の c. f. p. よりの F. P. の放出速度, [ g - mol / sec ]  
 $r$  ; 径座標, [ cm ]  
 $t$  ; 時間座標, [ sec ]  
 $\Delta t$  ; 時間メッシュ巾, [ sec ]  
 $\Delta$  ; 径方向メッシュ巾, [ cm ]  
 $\lambda$  ; F. P. の崩壊定数, [ 1 / sec ]

## 無次元量

- $A^*$  ; (2-45) 式で定義される定数  
 $B^*$  ; (2-46) 式で定義される定数  
 $D'$  ; (2-6), (2-40 a) 式等で定義される拡散係数  
 $f$  ; c. f. p. よりの F. P. の放出率  
 $k_j$  ; (2-15), (2-19) 式で計算される定数  
 $l'_D$  ; (2-6), (2-40 c) 式で定義される拡散外挿距離  
 $t'$  ; (2-6) 式で定義される時間座標  
 $x$  ; (2-6), (2-40 c) 式で定義される径座標  
 $\alpha$  ; (2-40 a) 式等で定義される c. f. p. の各領域の外半径  
 $\alpha'$  ; (2-104 b) 式で定義される被覆層厚み  
 $\Gamma$  ; (2-86) 式で定義される F. P. 濃度  
 $\Delta'$  ; (2-85 c) 式で定義される径メッシュ巾  
 $\zeta$  ; (2-41) 式で定義される燃料汚染分布を示すパラメータ  
 $\mu$  ; (2-20) 式で定義される定数  
 $\rho$  ; (2-40 a), (2-85 a) 式等で定義される燃料汚染率  
 $\tau$  ; (2-32), (2-105) 式で定義される F. P. 拡散放出に関する平衡到達時間  
 $\phi$  ; (2-40 b) 式等で定義される F. P. の隔壁係数  
 $\psi$  ; (2-40 a), (2-85 b) 式等で定義される F. P. 濃度  
 $\Omega$  ; (2-87) 式で定義される F. P. 濃度の時間変動項に対する重みづけパラメータ  
 $\omega$  ; (2-6), (2-40 a) 式等で定義される。拡散一崩壊パラメータ

## 添 字

- DC ; 多重被覆 c. f. p. よりの F. P. の拡散放出を示す。  
 DK ; 燃料核よりの F. P. の拡散放出を示す。  
 i ; 被覆各層あるいは径メッシュ点を示す。  
 k ; タイムメッシュ点を示す。  
 n ; 最外被覆層を示す。



RC ; 多重被覆 c. f. p. よりの F. P. の反跳放出を示す。

RK ; 燃料核よりの F. P. の反跳放出を示す。

O ; 燃料核あるいは初期点を示す。

### 3 燃料チャンネルにおける F. P. の拡散

対象となる燃料チャンネル体系は Fig. 1.2 に示した様に、中実円筒，中空円筒，円環，球形燃料チャンネルである。各々の体系で濃度拡散，熱拡散， $\rho$ 崩壊による消滅，生成項をとり入れて径方向の非定常拡散問題を解く。円筒型チャンネルでは軸方向の拡散リーク量が問題となり，更に熱拡散係数，固相中の濃度拡散係数，気相-固相界面での隔壁係数等が F. P. 濃度に従属関係にあるので，径方向一次元拡散方程式の解法に反復計算過程を採用する。燃料チャンネル内の F. P. の拡散問題を解く際に，燃料要素の最外境界で冷却材の流れの影響が入り，更に冷却材がループを構成しているので，その中での F. P. の物質移動も問題となる。以下の各節でこれを解説する。

#### 3.1 非定常拡散方程式とその解法

燃料チャンネル体系に気相が存在する場合，例えば気体ボンディング材，燃料マトリックスと黒鉛スリーブ層の間の空隙等がある場合には，F. P. の熱拡散移動が無視できなくなり c. f. p. 体系の場合では考慮しなかった熱拡散項をここでは取り入れる。本章では燃料チャンネルにおける非定常拡散方程式を径方向一次元問題として，解くことを考え，円筒形状，球形状に対し拡散方程式を差分化し，上述の反復計算過程を導入して濃度を求める方法を説明する。

##### 3.1.1 解析モデル

燃料チャンネルにおける径メッシュの取り方と F. P. 濃度分布の概念図を各々の体系について Fig. 3.1 に示す。冷却材流れのある最外層でのメッシュ点を濃度境界層端に取り中心からの距離を  $r_b$  とする。内部に冷却材流れのある円環燃料チャンネルでは更に  $r_a$  が存在し，それをメッシュ点の  $r_i$  に対応させる。燃料チャンネル中の各層を更に等分割にメッシュ切り，メッシュ間での F. P. の径方向非定常拡散方程式を (3-1) 式に示す\*。

$$\frac{\partial C_{i+\frac{1}{2}}}{\partial t} = -\nabla(j_{C_{i+\frac{1}{2}}} + j_{T_{i+\frac{1}{2}}}) - \lambda_{i+\frac{1}{2}} C_{i+\frac{1}{2}} + B_{i+\frac{1}{2}} \quad i=1,2,\dots,b-1 \quad (3-1)$$

ここで  $j_C$ 、 $j_T$  は径方向の濃度拡散流束，熱拡散流束であり，

$$j_{C_{i+\frac{1}{2}}} = D_{i+\frac{1}{2}} \nabla C_{i+\frac{1}{2}} \quad i=1,2,\dots,b-1 \quad (3-2)$$

$$j_{T_{i+\frac{1}{2}}} = D_{i+\frac{1}{2}}^T \nabla \ln T_{i+\frac{1}{2}} \quad i=1,2,\dots,b-1 \quad (3-3)$$

球座標では

$$-\nabla(j_C + j_T) = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + D^T \cdot \left( \frac{\partial^2 \ln T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \ln T}{\partial r} \right) \quad (3-4)$$

円筒座標では

$$-\nabla(j_C + j_T) = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + D^T \cdot \left( \frac{\partial^2 \ln T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \ln T}{\partial r} \right) \quad (3-5)$$

\* 添字  $i+\frac{1}{2}$ 、 $i-\frac{1}{2}$  はメッシュ間中点の意味ではなく，メッシュ間の媒体を示す添字である。

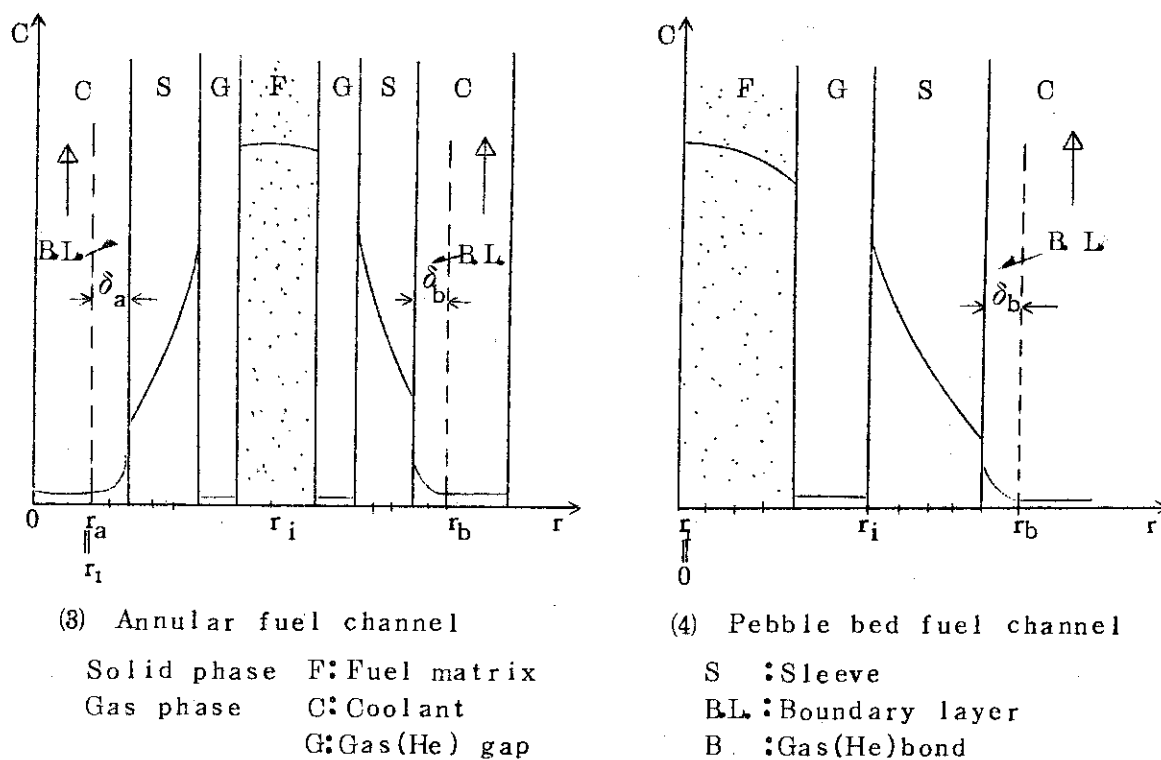
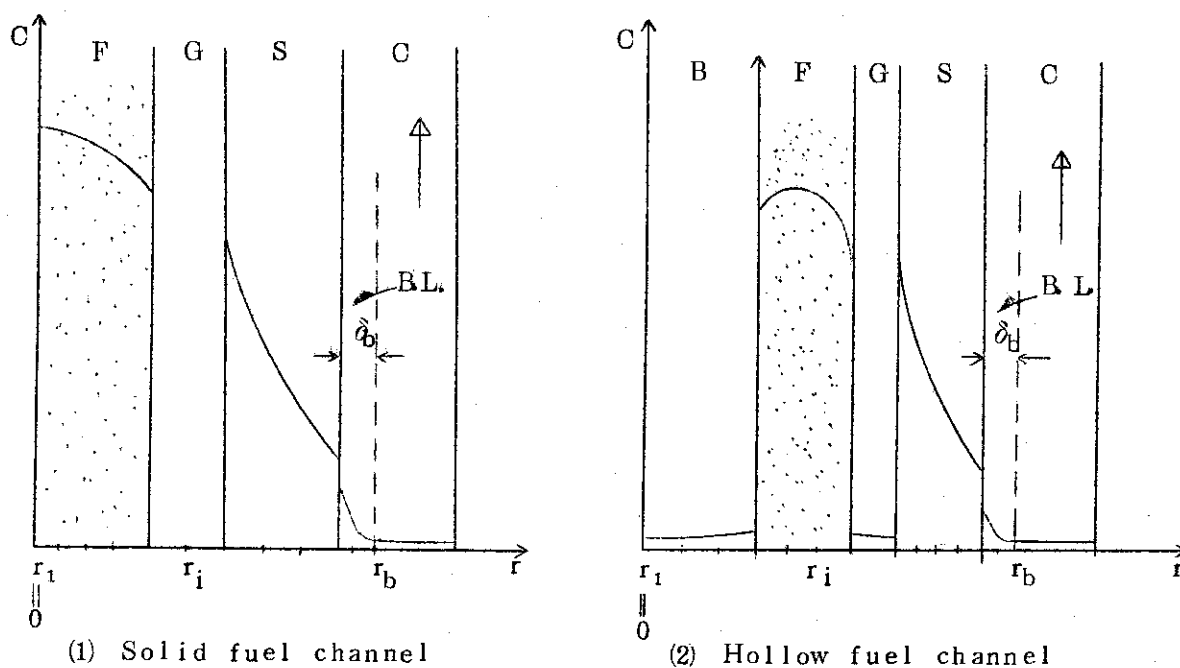


Fig. 3.1 Models of F.P. profiles in fuel channels,  $\delta_a$  and  $\delta_b$ : concentration boundary layer thicknesses in coolant flow.

初期条件は

$$C_{i+\frac{1}{2}} = C_{i+\frac{1}{2}}(r, t_{k-1}) \quad ; \quad t = t_{k-1} \quad i = 1, 2, \dots, b-1 \quad (3-6)$$

内部境界条件は

$$C_{i+\frac{1}{2}}(r_i, t_k) = \phi(i, k) \cdot C_{i-\frac{1}{2}}(r_i, t_k) \quad ; \quad r = r_i \quad i = 2, 3, \dots, b-1 \quad (3-7)$$

$$j_{C_{i-\frac{1}{2}}} + j_{T_{i-\frac{1}{2}}} = j_{C_{i+\frac{1}{2}}} + j_{T_{i+\frac{1}{2}}} \quad ; \quad r = r_i \quad i = 2, 3, \dots, b-1 \quad (3-8)$$

球座標での外部境界条件は

$$\lim_{r \rightarrow 0} r C_{1+\frac{1}{2}}(r, t_k) = 0 \quad ; \quad r \rightarrow 0 \quad (3-9)$$

$$j_{C_{b-\frac{1}{2}}}(r_b, t_k) + j_{T_{b-\frac{1}{2}}}(r_b, t_k) + \mu_b(k) \cdot C_{b-\frac{1}{2}}(r_b, t_k) = \nu_b(k) \quad ; \quad r = r_b \quad (3-10)$$

円筒座標での外部境界条件を,

$$j_{C_{1+\frac{1}{2}}}(r_a, t_k) + j_{T_{1+\frac{1}{2}}}(r_a, t_k) + \mu_a(k) \cdot C_{1+\frac{1}{2}}(r_a, t_k) = \nu_a(k) \quad ; \quad r = r_a \quad (3-11)$$

$$j_{C_{b-\frac{1}{2}}}(r_b, t_k) + j_{T_{b-\frac{1}{2}}}(r_b, t_k) + \mu_b(k) \cdot C_{b-\frac{1}{2}}(r_b, t_k) = \nu_b(k) \quad ; \quad r = r_b \quad (3-12)$$

と表わし、 $\mu$ 、 $\nu$ の係数については3.2節で説明する。

拡散方程式中の崩壊定数 $\lambda$ に添字 $i + \frac{1}{2}$ を付したのは、イタレーションプロセスの過程で $\lambda$ の値を変更することがあるからである。 $D^T$ は熱拡散係数を示し、 $T$ は絶対温度を示す。

### 3.12. 非定常拡散方程式の差分化

径メッシュ点、時間メッシュ点を2.2.3と同様に表示し、各々(2-83)、(2-84)式で定義する。隔壁係数 $\phi$ 、重みづけ係数 $\Omega$ も同様に定義し、(3-1)式の非定常拡散方程式を各燃料チャンネル体系ごとに差分化する。

(1) 円筒形状燃料チャンネルにおける差分方程式

メッシュ点におけるF.P.濃度 $F$ を次の様に定義すると、

$$F(i, k) = C_{i-\frac{1}{2}}(r_i, t_k) \quad ; \quad i = 2, 3, \dots, b \quad (3-13)$$

$$F(1, k) = C_{1+\frac{1}{2}}(r_1, t_k) \quad (3-13a)$$

濃度 $F$ に関して次の連立方程式が得られ、

$$-U(i, k) \cdot F(i+1, k) + V(i, k) \cdot F(i, k) - W(i, k) \cdot F(i-1, k) = X(i, k-1, k) \quad (3-14)$$

$i = 1, 2, \dots, b$

係数 U, V, W と X は次の様に与えられる\*。

$$U(i, k) = \Delta t_k \cdot \gamma(i, k) \cdot r_{i+\frac{1}{2}} \quad : \quad i=2,3,\dots, b-1 \quad (3-15)$$

$$W(i, k) = \Delta t_k \cdot \gamma(i-1, k) \cdot \phi(i-1, k) \cdot r_{i-\frac{1}{2}} \quad : \quad i=2,3,\dots, b-1 \quad (3-16)$$

$$V(i, k) = (1 + \lambda_{i-\frac{1}{2}} \Omega \cdot \Delta t_k) \cdot H(i, k) + \Delta t_k \cdot \gamma(i, k) \cdot \phi(i, k) \cdot r_{i+\frac{1}{2}} \\ + \Delta t_k \cdot \gamma(i-1, k) \cdot r_{i-\frac{1}{2}} \quad : \quad i=2,3,\dots, b-1 \quad (3-17)$$

$$X(i, k-1, k) = r_i \cdot \Delta_{i-1} \left[ 1 - \frac{\Delta i - 1}{2r_i} \right] \cdot K(i-1, k-1, k) + r_i \cdot \Delta_i \left[ 1 + \frac{\Delta i}{2r_i} \right] \cdot K(i, k-1, k) \\ + [1 - \lambda_{i-\frac{1}{2}} (1 - \Omega) \cdot \Delta t_k] \cdot H(i, k-1) \cdot \Gamma(i, k-1) \\ + \left( \frac{1 - \Omega}{\Omega} \right) \cdot \Delta t_k \times [r_{i+\frac{1}{2}} \cdot \gamma(i, k-1) \cdot \Gamma(i+1, k-1) + r_{i-\frac{1}{2}} \cdot \gamma(i-1, k-1) \cdot \phi(i-1, k-1) \\ \cdot \Gamma(i-1, k-1) - \{r_{i+\frac{1}{2}} \cdot \gamma(i, k-1) \cdot \phi(i, k-1) + r_{i-\frac{1}{2}} \cdot \gamma(i-1, k-1)\} \cdot \Gamma(i, k-1)] \\ + \Delta t_k \cdot \beta(i, k) \cdot r_{i+\frac{1}{2}} \cdot \{A(i+1, k) - A(i, k)\} \\ - \Delta t_k \cdot \beta(i-1, k) \cdot r_{i-\frac{1}{2}} \cdot \{A(i, k) - A(i-1, k)\} \\ + \left( \frac{1 - \Omega}{\Omega} \right) \cdot \Delta t_k \times [\beta(i, k-1) \cdot r_{i+\frac{1}{2}} \{A(i+1, k-1) - A(i, k-1)\} \\ - \beta(i-1, k-1) \cdot r_{i-\frac{1}{2}} \{A(i, k-1) - A(i-1, k-1)\}] \quad : \quad i=2,3,\dots, b-1 \quad (3-18)$$

但し,

$$A(i, k) = \ln T(r_i, t_k) \quad : \quad i=1,2,\dots, b \quad (3-19)$$

$$\gamma(i, k) = \frac{\Omega}{2\Delta_i} D_{i+\frac{1}{2}}(t_k) \quad : \quad i=1,2,\dots, b-1 \quad (3-20)$$

$$\beta(i, k) = \frac{\Omega}{2\Delta_i} D_{i+\frac{1}{2}}^T(t_k) \quad : \quad i=1,2,\dots, b-1 \quad (3-21)$$

$$H(i, k) = r_i \left[ \Delta_{i-1} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta i - 1}{2r_i} \right) + \Delta_i \cdot \left( 1 + \frac{\Delta i}{2r_i} \right) \cdot \phi(i, k) \right] \quad : \quad i=2,3,\dots, b \quad (3-22)$$

$$K(i, k-1, k) = \Omega \cdot \Delta t_k \cdot [B_{i+\frac{1}{2}}(t_k) + \left( \frac{1 - \Omega}{\Omega} \right) \cdot B_{i+\frac{1}{2}}(t_{k-1})] \quad : \quad i=1,2,\dots, b-1 \quad (3-23)$$

\* FIPERX コード〔4〕では F. P. 生成源が媒体間で連続量として取扱われているが本コードでは不連続を許し、更に熱拡散の項も取り入れている。

中空, 中実円筒燃料チャンネルの  $i = 1$  に於いては

$$U(1, k) = \frac{\Delta t_k}{(\Delta_1)^2} \cdot D_{1+\frac{1}{2}}(t_k), \quad (3-24)$$

$$V(1, k) = \frac{\Delta t_k}{(\Delta_1)^2} \cdot D_{1+\frac{1}{2}}(t_k) + \lambda_{1+\frac{1}{2}} \cdot \Delta t_k, \quad (3-25)$$

$$X(1, k-1, k) = \Delta t_k \cdot \left[ \frac{1}{(\Delta_1)^2} \cdot D_{1+\frac{1}{2}}^T(t_k) \cdot \{A(2, k) - A(1, k)\} + B_{1+\frac{1}{2}}(t_k) \right]. \quad (3-26)$$

円環燃料チャンネルの  $i = 1$  に於いては

$$U(1, k) = \frac{\Delta t_k}{2(\Delta_1)^2} \cdot D_{1+\frac{1}{2}}(t_k), \quad (3-27)$$

$$V(1, k) = \Delta t_k \cdot \left[ \frac{1}{2(\Delta_1)^2} \cdot D_{1+\frac{1}{2}}(t_k) + \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{\Delta_1} \right) \cdot \mu_a(k) + \lambda_{1+\frac{1}{2}} \right], \quad (3-28)$$

$$X(1, k) = \Delta t_k \cdot \left[ \frac{1}{2(\Delta_1)^2} \cdot D_{1+\frac{1}{2}}^T(t_k) \cdot \{A(2, k) - A(1, k)\} + \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{\Delta_1} \right) \cdot \nu_a(k) + B_{1+\frac{1}{2}}(t_k) \right]. \quad (3-29)$$

$i = b$  に於ける  $W, V, X$  の表示は,

$$W(b, k) = \frac{\Delta t_k}{2(\Delta_{b-1})^2} \cdot D_{b-\frac{1}{2}}(t_k) \cdot \phi(b-1, k), \quad (3-30)$$

$$V(b, k) = \Delta t_k \cdot \left[ \frac{1}{2(\Delta_{b-1})^2} \cdot D_{b-\frac{1}{2}}(t_k) + \left( \frac{1}{r_b} + \frac{1}{\Delta_{b-1}} \right) \cdot \mu_b(k) + \lambda_{b-\frac{1}{2}} \right], \quad (3-31)$$

$$X(b, k) = \Delta t_k \cdot \left[ \frac{1}{2(\Delta_{b-1})^2} \cdot D_{b-\frac{1}{2}}^T(t_k) \cdot \{A(b-1, k) - A(b, k)\} + \left( \frac{1}{r_b} + \frac{1}{\Delta_{b-1}} \right) \cdot \nu_b(k) + B_{b-\frac{1}{2}}(t_k) \right]. \quad (3-32)$$

$\mu_a, \mu_b, \nu_a, \nu_b$  は境界条件より決る定数で 3.2.1. にその値の求め方を示す。

(2) 球型燃料チャンネルにおける差分方程式

F. P. 濃度  $\Gamma$  をメッシュ点で次の様に定義すると,

$$\Gamma(i, k) = r_i \cdot C_{i-\frac{1}{2}}(r_i, t_k) \quad (3-33)$$

$$\Gamma(1, k) = r_1 \cdot C_{1+\frac{1}{2}}(r_1, t_k) \quad (3-33a)$$

濃度  $\Gamma$  に関して次の連立方程式が得られ,

$$-U(i, k) \cdot \Gamma(i+1, k) + V(i, k) \cdot \Gamma(i, k) - W(i, k) \cdot \Gamma(i-1, k) = X(i, k-1, k) \quad (3-34)$$

:  $i = 1, 2, \dots, b$

係数  $U, V, W$  と  $X$  は次の様与えられる。

$$U(i, k) = \Delta t_k \cdot \gamma(i, k) \quad (3-35)$$

:  $i = 2, 3, \dots, b-1$

$$W(i, k) = \Delta t_k \cdot \gamma(i-1, k) \cdot \phi(i-1, k) \quad (3-36)$$

:  $i = 2, 3, \dots, b-1$

$$V(i, k) = (1 + \lambda \Omega \Delta t_k) \cdot H(i, k) + \Delta t_k \cdot \gamma(i, k) \cdot \left[ 1 + \frac{2\Delta i}{r_i} \right] \cdot \phi(i, k) \\ + \Delta t_k \cdot \gamma(i-1, k) \cdot \left[ 1 - \frac{2\Delta i-1}{r_i} \right] \quad ; i=2, 3, \dots, b-1 \quad (3-37)$$

$$X(i, k) = r_i \cdot \Delta_{i-1} \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta i-1}{2r_i} \right] \cdot K(i-1, k-1, k) + r_i \cdot \Delta_i \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta i}{2r_i} \right] \cdot K(i, k-1, k) \\ + [1 - \lambda(1-\Omega) \cdot \Delta t_k] \cdot H(i, k-1) \cdot F(i, k-1) \\ + \left( \frac{1-\Omega}{\Omega} \right) \cdot \Delta t_k \times [\gamma(i, k-1) \cdot F(i+1, k-1) + \gamma(i-1, k-1) \cdot \phi(i-1, k-1) \cdot F(i-1, k-1) \\ - \{\gamma(i, k-1) \cdot \phi(i, k-1) \cdot \left[ 1 + \frac{2\Delta i}{r_i} \right] + \gamma(i-1, k-1) \cdot \left[ 1 - \frac{2\Delta i-1}{r_i} \right]\} \cdot F(i, k-1)] \\ + \Delta t_k \cdot \beta(i, k) \cdot \left[ A(i+1, k) - \left( 1 + \frac{2\Delta i}{r_i} \right) \cdot A(i, k) \right] \\ - \Delta t_k \cdot \beta(i-1, k) \cdot \left[ \left( 1 - \frac{2\Delta i-1}{r_i} \right) \cdot A(i, k) - A(i-1, k) \right] \\ + \left( \frac{1-\Omega}{\Omega} \right) \cdot \Delta t_k \times [\beta(i, k-1) \{ A(i+1, k-1) - \left( 1 + \frac{2\Delta i}{r_i} \right) \cdot A(i, k-1) \} \\ - \beta(i-1, k-1) \cdot \{ \left( 1 - \frac{2\Delta i-1}{r_i} \right) \cdot A(i, k-1) - A(i-1, k-1) \}] \\ ; i=2, 3, \dots, b-1 \quad (3-38)$$

但し

$$A(i, k) = r_i \cdot \ell_n T(r_i, t_k) \quad ; t=1, 2, \dots, b \quad (3-39)$$

$$\gamma(i, k) = \frac{\Omega}{2\Delta i} \cdot D_{i+\frac{1}{2}}(t_k) \quad ; i=1, 2, \dots, b-1 \quad (3-40)$$

$$\beta(i, k) = \frac{\Omega}{2\Delta i} \cdot D_{i+\frac{1}{2}}^T(t_k) \quad ; i=1, 2, \dots, b-1 \quad (3-41)$$

$$H(i, k) = \Delta_{i-1} \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta i-1}{2r_i} \right] + \Delta i \left[ 1 + \frac{\Delta i}{2r_i} \right] \cdot \phi(i, k) \quad ; i=2, 3, \dots, b \quad (3-42)$$

$$K(i, k-1, k) = \Omega \cdot \Delta t_k \cdot \left[ B_{i+\frac{1}{2}}(t_k) + \left( \frac{1-\Omega}{\Omega} \right) \cdot B_{i+\frac{1}{2}}(t_{k-1}) \right] \\ ; i=1, 2, \dots, b-1 \quad (3-43)$$

$i=1$ ,  $b$  に於ける  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $X$  の表示は,

$$U(1, k) = 0, \quad (3-44)$$

$$V(1, k) = 1. \quad (3-45)$$

$$X(1, k-1, k) = 0, \tag{3-46}$$

$$W(b, k) = \frac{\Delta t_k \cdot r_b}{2 r_{b-1} (\Delta_{b-1})^2} \cdot D_{b-\frac{1}{2}}(t_k) \cdot \phi(b-1, k), \tag{3-47}$$

$$V(b, k) = \Delta t_k \cdot \left[ \frac{1}{2(\Delta_{b-1})^2} \cdot D_{b-\frac{1}{2}}(t_k) + \left( \frac{2}{r_b} + \frac{1}{\Delta_{b-1}} \right) \cdot \mu_b(k) + \lambda \right], \tag{3-48}$$

$$X(b, k) = \Delta t_k \cdot r_b \cdot \left[ \frac{1}{2(\Delta_{b-1})^2} \cdot D_{b-\frac{1}{2}}^T(t_k) \cdot [A(b-1, k) - A(b, k)] + \left( \frac{2}{r_b} + \frac{1}{\Delta_{b-1}} \right) \cdot \nu_b(k) + B_{b-\frac{1}{2}}(t_k) \right]. \tag{3-49}$$

ここで  $\mu_b, \nu_b$  は境界条件より決る定数で 3.2.1. にその値の求め方を示す。

### 3.1.3. 非定常拡散差分方程式の解法と反復計算

各燃料チャンネル体系についての F. P. の非定常拡散方程式を径方向一次元差分方程式に変形する方法を前節で述べてきたが、本節ではその差分方程式を各 (i, k) 点について濃度  $\Gamma(i, k)$  を求める方法を述べる。径方向一次元拡散問題として差分方程式を解く際には、F. P. の濃度拡散係数、熱拡散係数、隔壁係数の値に反復計算が必要になる。更に軸方向の F. P. の濃度ならびに熱拡散移動量を考慮に入れるとやはり反復計算が必要となる。気相ボンド、気相ギャップの存在する燃料チャンネル体系では、その気相中の F. P. の拡散の問題は径方向よりも軸方向で重要となる。本節でこれらの反復計算方法を説明する。

#### (1) 径方向一次元差分方程式の解法

すべてのチャンネル体系で差分方程式は 3.1.2. で示されたように (3-50) 式で表わされ、それをマトリックスベクトル記法を用いて書き表わすと (3-51) 式になる。

$$-U(i, k) \cdot \Gamma(i+1, k) + V(i, k) \cdot \Gamma(i, k) - W(i, k) \cdot \Gamma(i-1, k) = X(i, k-1, k) \tag{3-50}$$

; i = 1, 2, \dots, b

$$M(k) \cdot \vec{\Gamma}(k) = \vec{X}(k-1, k), \tag{3-51}$$

$$M(k) = \begin{bmatrix} V(1, k) - U(1, k) & & & & & \\ -W(2, k) & V(2, k) - U(2, k) & & & & \\ & -W(3, k) & V(3, k) - U(3, k) & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & -W(i, k) & V(i, k) - U(i, k) & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & -W(b-1, k) & V(b-1, k) - U(b-1, k) \\ & & & & & & -W(b, k) & V(b, k) \end{bmatrix}. \tag{3-52}$$

$\vec{\Gamma}(k), \vec{X}(k-1, k)$  は列ベクトルであり、その成分は各々  $\Gamma(i, k), X(i, k-1, k)$ ,  $i = 1 \sim b$  となる。(3-51) 式が解かれるための条件は、 $M(k), \vec{X}(k-1, k)$  が濃度ベクトル  $\vec{\Gamma}(k)$  に独立でなければならぬが、後述する様に  $\lambda, B, D, D^T, \phi$  の各量は濃度依存性を持っているのでその条件が満たされていない。そこで反復計算が必要に



なる。その方法は次項の(2)で説明することとし、ここではある反復計算過程における(3-51)式の解法上の問題点とそのコード内処理方法を示す。

第1に今回のタイムステップ $t_k$ における $\vec{X}(k-1, k)$ の値は前回のタイムステップにおける濃度 $\vec{T}(k-1)$ の関数となっており、 $\vec{T}(k)$ を求める際に $\vec{T}(k-1)$ の値が必要となり、これをコード入力値とする。タイムステップの取り方については4.1で説明する。

第2に燃料チャンネル中に気相ボンドや空隙が存在する場合には、そこでのF.P.の濃度拡散係数は固相中に比してかなり大きな値を持つことが予想され、その場合(3-51)式のマトリックスの行列式がかなり小さい値(すなわち零に近い値)になりMの逆行列を求めることが計算機の有効数字以内で処理し切れなくなることがある。そこで、コード内では気相中のF.P.の濃度拡散係数の値が、固相中の拡散係数のうち一番小さな値の $10^6$ 倍以上である時次の様に気相中の拡散係数の値をセットし、

$$D_G(i, k) = 10^6 \times \text{Min}_i [D_s(i, k)] \quad (3-53)$$

マトリックス計算上の非正則性を取り除く。気相中のF.P.の熱拡散係数は5.3章(5-2)式に示す様に濃度拡散係数の関数係となっており、その値を求める際には上述の条件を適用する。冷却材中の諸物性値は境界条件を決定する際に重要な役割を果しているため、そこで拡散係数の値の変更を行わない。

## (2) 反復計算方法

方程式(3-51)式の中で $M(k)$ 、 $\vec{X}(k-1, k)$ は濃度 $\vec{T}(k)$ の従属関係にあり、それを解く際に反復計算を行なう必要がある。ここでは反復計算の回数を示すインデックスを導入する。円筒燃料チャンネル体系ではF.P.の軸方向移動量を考慮に入れるために軸方向メッシュを示すインデックス $Z_n$ も導入し、(3-51)式を書き直すと(3-54)式になる。

$$M_{Z_m}^{\xi-1}(k) \cdot \vec{T}_{Z_m}^{\xi}(k) = \vec{X}_{Z_m}^{\xi-1}(k-1, k), \quad (3-54)$$

$$M_{Z_m}^{\xi-1}(k) = \text{Function}(\vec{T}_{Z_m}^{\xi-1}(k), \dots),$$

$$\vec{X}_{Z_m}^{\xi-1}(k-1, k) = \text{Function}(\vec{T}_{Z_m}^{\xi-1}(k), \vec{B}_{Z_m}^{\xi-1}(k), \dots),$$

$$\vec{B}_{Z_m}^{\xi-1}(k) = \text{Function}(\vec{T}_{Z_{m-1}}^{\xi-1}(k), \vec{T}_{Z_m}^{\xi-1}(k), \vec{T}_{Z_{m+1}}^{\xi-1}(k), \dots),$$

ここで $B_{Z_m}$ は軸メッシュ $Z_m$ におけるF.P.の軸方向移動量であり、その算出法を3.3.2に示すが、その値は軸メッシュ $Z_{m-1}$ 、 $Z_m$ 、 $Z_{m+1}$ におけるF.P.濃度から算出される。 $M_{Z_m}^{\xi-1}(k)$ 、 $\vec{X}_{Z_m}^{\xi-1}(k-1, k)$ が反復計算過程の中で $\vec{T}_{Z_m}^{\xi-1}(k)$ 等とどのような関数関係にあるかは次項(3)で説明することとし、ここでは反復計算過程とタイムステップの進め方について説明する。

タイムステップ $k=0$ で $\vec{T}(0)$ は初期値として与えられている。次のタイムステップ $k=1$ で $\xi=1$ の計算に際し、 $\vec{T}_{Z_m}^{\xi-1}(1)$ の値の代わりに $\vec{T}_{Z_m}^0(0)$ の値を用いて $M_{Z_m}^0(1)$ 、 $\vec{X}_{Z_m}^0(0, 1)$ の値を算出し、軸メッシュ $Z_m$ の $m=1$ から順に次式により $\vec{T}_{Z_m}^1(1)$ を算出す

る。

$$M_{Zm}^0(1) \cdot \bar{\Gamma}_{Zm}^1(1) = \bar{X}_{Zm}^0(0, 1) \quad ; m=1, 2, \dots, M. \quad (3-55)$$

$\xi = 2$  では上で求めた  $\bar{\Gamma}_{Zm}^1(1)$  の値を用いて  $M_{Zm}^1(1)$ ,  $\bar{X}_{Zm}^1(0, 1)$  の値を算出し、次式により  $\bar{\Gamma}_{Zm}^2(1)$  を算出する。

$$M_{Zm}^1(1) \cdot \bar{\Gamma}_{Zm}^2(1) = \bar{X}_{Zm}^1(0, 1) \quad ; m=1, 2, \dots, M. \quad (3-56)$$

以下同様にしてタイムステップ  $k = 1$  で次の条件が満足されるまで反復計算を行なう。

$$\left| \frac{\bar{\Gamma}_{Zm}^\xi(1) - \bar{\Gamma}_{Zm}^{\xi-1}(1)}{\bar{\Gamma}_{Zm}^\xi(1)} \right| \leq \epsilon_{IT} \quad ; m=1, 2, \dots, M. \quad (3-57)$$

タイムステップ  $k = k$  の時 ( $k \geq 2$ )、 $\xi = 1$  の計算に際して  $\bar{\Gamma}_{Zm}^{\xi-1}(k)$  の値の代わりに  $\bar{\Gamma}_{Zm}(k-1)$  の値を用いて  $M_{Zm}^0(k)$ ,  $\bar{X}_{Zm}^0(k-1, k)$  の値を算出し  $m = 1$  から順に次式により  $\bar{\Gamma}_{Zm}^1(k)$  の値を算出し、

$$M_{Zm}^0(k) \cdot \bar{\Gamma}_{Zm}^1(k) = X_{Zm}^0(k-1, k) \quad ; m=1, 2, \dots, M. \quad (3-58)$$

$\xi = 2$  以降では  $\bar{\Gamma}_{Zm}^{\xi-1}(k)$  の値を用いて  $M_{Zm}^{\xi-1}(k)$ ,  $\bar{X}_{Zm}^{\xi-1}(k-1, k)$  の値を算出し (3-54) 式より  $\bar{\Gamma}_{Zm}^\xi(k)$  の値を求め、次の条件が満足されるまで反復計算を繰返す\*。

$$\left| \frac{\bar{\Gamma}_{Zm}^\xi(k) - \bar{\Gamma}_{Zm}^{\xi-1}(k)}{\bar{\Gamma}_{Zm}^\xi(k)} \right| \leq \epsilon_{IT} \quad ; m=1, 2, \dots, M. \quad (3-59)$$

コード内には反復計算の最大回数をオプションで指示できる様にした。

(3) イタレーション項目

(i) F. P. の諸物性値

固相中の F. P. の濃度拡散係数は 5.2 節中の (5-2) 式で与えられる濃度依存性を有しており、気相中の F. P. の熱拡散係数は 5.3 節 (5-10) 式に示される濃度依存性を持っている。固相-気相界面に於ける F. P. の隔壁係数も 5.4 節 (5-29) 式に示される濃度依存性を持ち、この 3 者はイタレーション項目に組み込まれる。前 2 者の物性値は径メッシュ間の中点  $r_{i+\frac{1}{2}}$  で定められるので、代表濃度  $C_{Zm}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k)$  も、円筒型ならびに球型の燃料チャンネルに対し各々 (3-60), (3-61) 式で求まる濃度の値を用いる。

$$C_{Zm}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{1}{2} \{ \bar{\Gamma}_{Zm}^{\xi-1}(i, k) \cdot \phi^{\xi-1}(i, k) + \bar{\Gamma}_{Zm}^{\xi-1}(i+1, k) \} \cdot \Delta \quad (3-60)$$

\*  $\epsilon_{IT}$  は反復計算用の収束判定基準値でコード入力値として取扱っている。

$$C_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i, k)}{r_i} \cdot \phi^{\xi-1}(i, k) + \frac{\Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i+1, k)}{r_{i+1}} \right\}. \quad (3-61)$$

## (ii) F. P. の軸方向移動量

円筒型燃料チャンネル体系に於いて F. P. は径方向のみならず軸方向にも拡散移動する。軸方向の拡散移動量の評価の際に軸メッシュの F. P. 濃度の結合が必要となり、反復計算が必要となる\*。軸方向拡散移動量  $B_{Z_m}(k)$  の評価方法を 3.3.2. に示すが、ここではその拡散移動量を、径方向拡散方程式、(3-1) 式中のどの項に組み入れるかを説明する。第 1 に  $B_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k)$  が正の値をもつ場合、軸メッシュ  $Z_m$  において F. P. が軸方向で着目領域の外部から流入することになるので径方向拡散方程式中の生成項に  $B_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k)$  を組み込む必要が生じる。すなわち、

$$B^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) = B_{cfp}(i+\frac{1}{2}, k) + B_p(i+\frac{1}{2}, k) + B_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k). \quad (3-62)$$

ここで  $B_{cfp}$ ,  $B_p$  は 3.3.1. に示すように c. f. p. からの放出による生成源、 $B_p$  は拡散移動した親核種の崩壊あるいは中性子捕獲に基づく生成源である。つぎに  $B_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k)$  が負の値を持つ場合、軸メッシュ  $Z_m$  において F. P. は軸方向で着目領域の外部へ流出することになり、生成源に組み入れないで、崩壊項に組み込む。すなわち、

$$\lambda_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{B_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k)}{C_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k)}, \quad (3-63)$$

$$\lambda^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) = \lambda - \lambda_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k). \quad (3-64)$$

ここで  $\lambda$  は F. P. の崩壊定数であり、 $C_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k)$  は (3-60) 式で示される F. P. 濃度である。燃料チャンネル内にある気相中で F. P. の軸方向拡散速度は速く、短時間のうちに軸方向で均一の濃度になつてしまうと考えられる。これを拡散問題として正攻法で取扱いと気相中での F. P. の軸方向移動量の収束性が良くないので次に示す様に気相-固相界面での隔壁係数の値を反復計算によって修正してゆく方法で処理することにした。

## (iii) 気相-固相界面における F. P. の隔壁係数

円筒型燃料チャンネル体系に流れのない気相、即ち気相ボンド、気相ギャップが存在する時に、この層内において軸方向の F. P. の濃度分布は一様になつていてと考えられる。対象とする界面は燃料マトリックスに隣接する媒体が流れのない気相である場合であつてその様な界面に限る。隔壁係数をイタレーション項目に組み込む時の補正係数  $f$  を (3-65) 式で示し、以下にその値の設定の方法を説明する。

$$\phi_m^{\xi}(i, k) = \phi_m^{\xi-1}(i, k) \times f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k). \quad (3-65)$$

燃料マトリックスとその内側の静止した気相との界面においては、 $\xi = 1, k = 1$  のとき、  
 $f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) = 1.0$

\* 軸方向の F. P. の拡散移動量を評価する際に反復計算が必要となる理由については 3.3.2. 節に詳述する。

$\xi = 1, k \geq 2$  のとき,

$$f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) = f_{Z_m}(i, k-1) \quad (3-67)$$

$\xi \geq 2$  のとき

$$f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) = \frac{\Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) \times \sum_{m=1}^M (\Delta Z_m)}{\sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) \times \phi_m^{\xi-1}(i, k)}{\phi_m^{\xi-1}(i, k)} \cdot \Delta Z_m \right\}} \quad (3-68)$$

燃料マトリックスとその外側の静止した気相との界面においては,

$\xi = 1, k = 1$  のとき

$$f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) = 1.0 \quad (3-70)$$

$\forall \xi = 1, k \geq 2$  のとき

$$f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) = f_{Z_m}(i, k-1)$$

$\xi \geq 2$  のとき

$$f_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) = \frac{\sum_{m=1}^M \left\{ \phi_m^{\xi-1}(i, k) \cdot \Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) \times \Delta Z_m \right\}}{\phi_m^{\xi-1}(i, k) \cdot \Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i, k) \times \sum_{m=1}^M (\Delta Z_m)} \quad (3-71)$$

ここで  $\phi^{\xi-1}$  は前回の反復計算に用いられた隔壁係数の値であり、 $\phi^{\xi-1}$  は前回の反復計算で得られた F. P. 濃度の値を用いて (5-29) 式より計算される濃度依存性のある隔壁係数の値である\*。上記以外の気相-固相界面における隔壁係数の値の反復計算は  $\phi_m^{\xi}(i, k) = \phi_m^{\xi-1}(i, k)$  として行なう。特に初期ステップの  $\xi = 1$  に於ける  $\phi$  の値のセットは 3.4.節で取扱う。

#### (v) 原子炉入口における冷却材中の F. P. 濃度

一次冷却系はループを構成しているので、原子炉出口における F. P. は短い時間遅れで原子炉入口まで運ばれる。その際入口における F. P. 濃度の設定に反復計算が必要となり、3.4.節でその設定の方法を説明する。

### 3.2 境界条件の設定

球形、円筒型燃料チャンネル体系における外部境界条件式を前節の (3-9) 式から (3-12) 式に示したが、そこでは係数  $\mu_a, \mu_b, \nu_a, \nu_b$  の値については言及してこなかった。本節では各燃料チャンネル体系における  $\mu, \nu$  の値の求め方とその物理的意味を説明する。冷却材流れのある最外層のメッシュ点の取り方に関するモデルと濃度境界層厚さの算出方法についても本節で説明する。

#### 3.2.1. 物理モデル

燃料チャンネル中での F. P. の拡散移動を (3-1) 式で記述する際、流れによる F. P. の

\* Freundlich の等温吸着式を用いると隔壁係数の値に濃度依存性があるが、その値をコード内で設定するというオプションを指定する場合には隔壁係数の値に濃度依存性をとり入れない。5.4.節を参照せよ。

移動の項を取入れていない。冷却材の軸方向流れによる F. P. の移動を外部境界条件式の中に入れる場合に、境界点として冷却材—スリーブ界面を取るとそこでは冷却材流速がほとんど零になると考えられ、流れによる移動項を正しく評価できなくなる。本コードでは冷却材中に F. P. の濃度境界層を設定し、境界層内では冷却材の流れがないとし、その外部で乱流流れになっているとし、濃度境界層端を境界面としてその内部に (3-1) 式を適用する。境界面外側での冷却材中で F. P. は完全混合されてのるものと仮定して一定濃度とし、境界面における F. P. の物質収支より境界条件式中の  $\mu$ ,  $\nu$  の値を求める方法を次節で説明する。軸方向の流れによる F. P. の移動を考慮に入れるため、濃度境界層厚さを軸方向で一定の厚さにしなければならぬが、その代表値の取り方を 3.2.3. 節で説明する。

3.2.2. 燃料チャンネル体系別の境界条件

(1) 円筒型燃料チャンネル体系の外側外部境界条件

冷却材流れの近傍における F. P. の濃度分布と物質収支の様子を Fig. 3.2 (1) に示し軸方向の第 m 番目のメッシュ点に添字 m を付して F. P. の物質収支式を立てると、

$$\begin{aligned}
 & - \left[ D_{Z_m}(r_b, t_k) \cdot \frac{\partial C_{Z_m}(r_b, t_k)}{\partial r} + D_{Z_m}^T(r_b, t_k) \cdot \frac{\partial \ln T_{Z_m}(r_b, t_k)}{\partial r} \right] \cdot 2\pi r_b \cdot \Delta Z_m \\
 & + \left[ U_{Z_{m-1}} \cdot C_{Z_{m-1}}(r_b, t_k) - U_{Z_m} \cdot C_{Z_m}(r_b, t_k) \right] \cdot \pi (r_{OUT}^2 - r_b^2) \\
 & + \left[ B_{Z_m}(r_b, t_k) - \lambda \cdot C_{Z_m}(r_b, t_k) \right] \cdot \pi (r_{OUT}^2 - r_b^2) \cdot \Delta Z_m = 0. \quad (3-72)
 \end{aligned}$$

ここで (3-12) 式の境界条件との対応から  $\mu$ ,  $\nu$  は求まり、

$$\mu_b(k) = \frac{r_{OUT}^2 - r_b^2}{2 r_b} \cdot \left[ \frac{U_{Z_m}(t_k)}{\Delta Z_m} + \lambda \right] \quad (3-73)$$

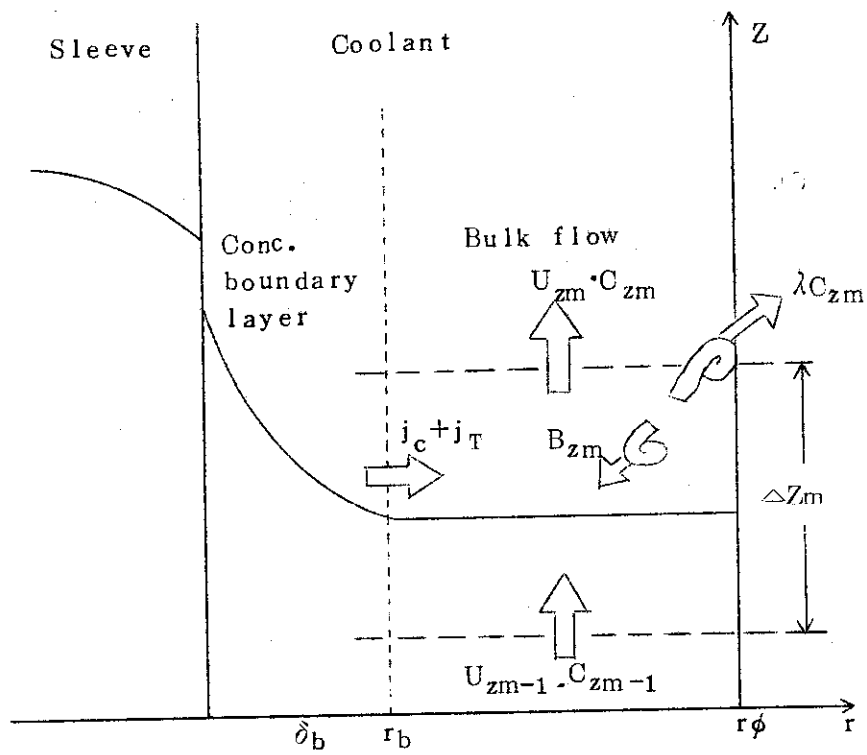
$$\nu_b(k) = \frac{r_{OUT}^2 - r_b^2}{2 r_b} \cdot \left[ \frac{U_{Z_{m-1}}(t_k) \cdot C_{Z_{m-1}}(r_b, t_k)}{\Delta Z_m} + B_{Z_m}(r_b, t_k) \right]. \quad (3-74)$$

ここで  $r_{OUT}$  は冷却材通路の外半径であり、 $\Delta Z$ ,  $U$  は各々軸メッシュ巾、冷却材流速である。

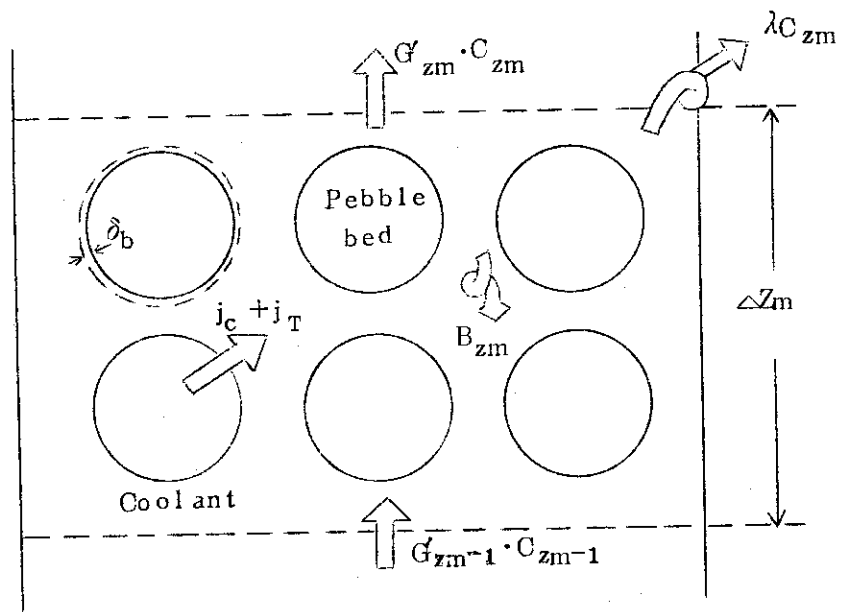
$\nu_b(k)$  の表示式からもわかる様にある軸メッシュ  $Z_m$  においてチャンネル径方向の濃度分布の算出を行う際に  $Z_{m-1}$  メッシュの計算結果が利用できるという前提になっている。これを繰返すと冷却材入口濃度の値が必要になるが、これについては 3.4. 節で説明する。前述の如く、冷却材バルク領域における F. P. の濃度は径方向で一定の値をとるものとしたので、これは濃度境界層端における F. P. 濃度と同値になるはずである。その濃度は (3-12) 式の境界条件を与えることによって解かれるので、即ち冷却材バルク領域における F. P. 濃度も同時に求まることになる。

(2) 円筒型燃料チャンネル体系の内側外部境界条件

中実ならびに中空円筒燃料チャンネルでは内側に冷却材の流れがないので、第 1 メッシュ点が  $r_a = r_1 = 0.0$  であることから (3-11) 式の  $\mu_a$ ,  $\nu_a$  の値は共にゼロになる。



(1) Cylindrical fuel channel



(2) Pebble bed fuel channel

Fig. 3.2 Models of fission products concentration profile and mass balance inside coolant bulk flow.

環状燃料チャンネルでは内側にも冷却材の流れがあり、その流れに対して(1)で説明したと同様の物質収支式をたてると  $\mu_a$ 、 $\nu_a$  の値が求まる。すなわち、

$$\mu_a(k) = -\frac{r_1}{2} \cdot \left[ \frac{U_{Z_m}(t_k)}{\Delta Z_m} + \lambda \right] \quad (3-75)$$

$$\nu_a(k) = -\frac{r_1}{2} \cdot \left[ \frac{U_{Z_{m-1}}(t_k) \cdot C_{Z_{m-1}}(r_1, t_k)}{\Delta Z_m} + B_{Z_m}(r_1, t_k) \right] \quad (3-76)$$

また、内側と外側の冷却材流れは同一方向をとるものと仮定し、それらのチャンネル入口濃度の値は共に等しいとした。ただし冷却材流速は内側と外側で異ってもよいとした。

(3) 球形燃料チャンネル体系の外側外部境界条件

ペブル・ベット型炉では球状燃料が炉心中に密に充填されている。これをモデル化する炉心を軸方向にメッシュ切りしてその軸メッシュ内での F. P. の物質収支式を以下の様なたて、その F. P. の物質収支の概念図を Fig. 3.2(2) に示した。

$$\begin{aligned} & - \left[ D_{Z_m}(r_b, t_k) \cdot \frac{\partial C_{Z_m}(r_b, t_k)}{\partial r} + D_{Z_m}^T(r_b, t) \cdot \frac{\partial \lambda_{nT_{Z_m}}(r_b, t_k)}{\partial r} \right] \cdot 4\pi r_b^2 \cdot \frac{\epsilon \cdot \bar{S}_{Z_m} \cdot \Delta Z_m}{\frac{4}{3} \pi r_b^3} \\ & + \left[ \frac{G'}{\rho_{Z_{m-1}}} \cdot C_{Z_{m-1}}(r_b, t_k) - \frac{G'}{\rho_{Z_m}} \cdot C_{Z_m}(r_b, t_k) \right] \\ & + \left[ B_{Z_m}(r_b, t_k) - \lambda \cdot C_{Z_m}(r_b, t_k) \right] \cdot (1-\epsilon) \cdot \bar{S}_{Z_m} \cdot \Delta Z_m = 0. \end{aligned} \quad (3-77)$$

(3-10) 式の境界条件との対応から  $\mu_b$ 、 $\nu_b$  が求まり、

$$\mu_b(k) = \frac{r_b}{3\epsilon} \cdot \left[ \frac{G'(t_k)}{\rho_{Z_m}(t_k) \cdot \bar{S}_{Z_m} \cdot \Delta Z_m} + (1-\epsilon)\lambda \right] \quad (3-78)$$

$$\nu_b(k) = \frac{r_b}{3\epsilon} \cdot \left[ \frac{G'(t_k) \cdot C_{Z_{m-1}}(r_b, t_k)}{\rho_{Z_{m-1}}(t_k) \cdot \bar{S}_{Z_m} \cdot \Delta Z_m} + (1-\epsilon) \cdot B_{Z_m}(r_b, t_k) \right]. \quad (3-79)$$

球形燃料チャンネルの場合には冷却材流速の分布が複雑であるので、その代わりに冷却材質量流量  $G'$  [g/sec]、冷却材密度  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]、炉断面積  $\bar{S}$  [cm<sup>2</sup>]、球状燃料の充填率  $\epsilon$  を用いた。

323. 濃度境界層厚さ

燃料チャンネル中を径方向にメッシュ切りする際に、境界点の位置  $r_a$ 、 $r_b$  を濃度境界層端に取ることを既に述べてきた。本節では各燃料チャンネル体系ごとに濃度境界層厚さの推算方法を説明し、さらにその軸方向変化、時間変化に対するコード内処理方法を説明する。

(1) 円筒型燃料チャンネル体系の外側冷却材

冷却材の流れは乱流流れであり、冷却材中の F. P. の濃度境界層の厚さ  $\delta_b$  はレイノルズ数  $Re$  を用いて次の様に求まる。(10)

$$\frac{De}{\delta_b} = 0.014 \cdot \left( \frac{r_{OUT}}{r_{IN}} \right)^{0.35} \cdot Re^{0.8} \cdot S_c^{0.53} \quad ; S_c \leq 5 \quad (3-80a)$$

$$\frac{De}{\delta_b} = 0.02 \cdot \left( \frac{r_{OUT}}{r_{IN}} \right)^{0.53} \cdot Re^{0.8} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad ; Sc > 5 \quad (3-80b)$$

$$Re = \frac{De \cdot G_b}{\eta}, \quad Sc = \frac{\eta}{\rho D} \quad (3-81)$$

$$De = 2(r_{OUT} - r_{IN}) \quad (3-82)$$

ここで  $De$  は冷却材流路の相当直径であり、 $r_{OUT}$ 、 $r_{IN}$  は冷却材通路の外半径、内半径である。

#### (2) 環状燃料チャンネル体系の内側冷却材

円筒型燃料チャンネル体系のうち内側に冷却材が流れているのは円環型燃料チャンネル体系のみであり、その中で冷却材流れに乱流を仮定すると F. P. の濃度境界層厚さ  $\delta_a$  は次の様に求まる。(10)

$$\frac{De}{\delta_a} = 0.023 \cdot Re^{0.83} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (3-83)$$

$$Re = \frac{De \cdot G_a}{\eta}, \quad Sc = \frac{\eta}{\rho D} \quad (3-84)$$

$$De = 2 r'_{OUT} \quad (3-85)$$

ここで  $G_a$  は内側の冷却材質量流量、 $[g/sec/cm^2]$  であり、 $r'_{OUT}$  は内側冷却材通路の半径である。

#### (3) 球型燃料チャンネル体系の冷却材

球型燃料が炉心内に密に充填されている体系内での F. P. の濃度境界層厚さ  $\delta_b$  は次の様に求まる。(10)

$$\frac{De}{\delta_b} = \frac{1}{1-\epsilon} (2.0 + 0.75 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}}) \quad (3-86)$$

$$Re = \frac{De \cdot G'}{\eta \bar{S}_{Zm}}, \quad Sc = \frac{\eta}{\rho D} \quad (3-87)$$

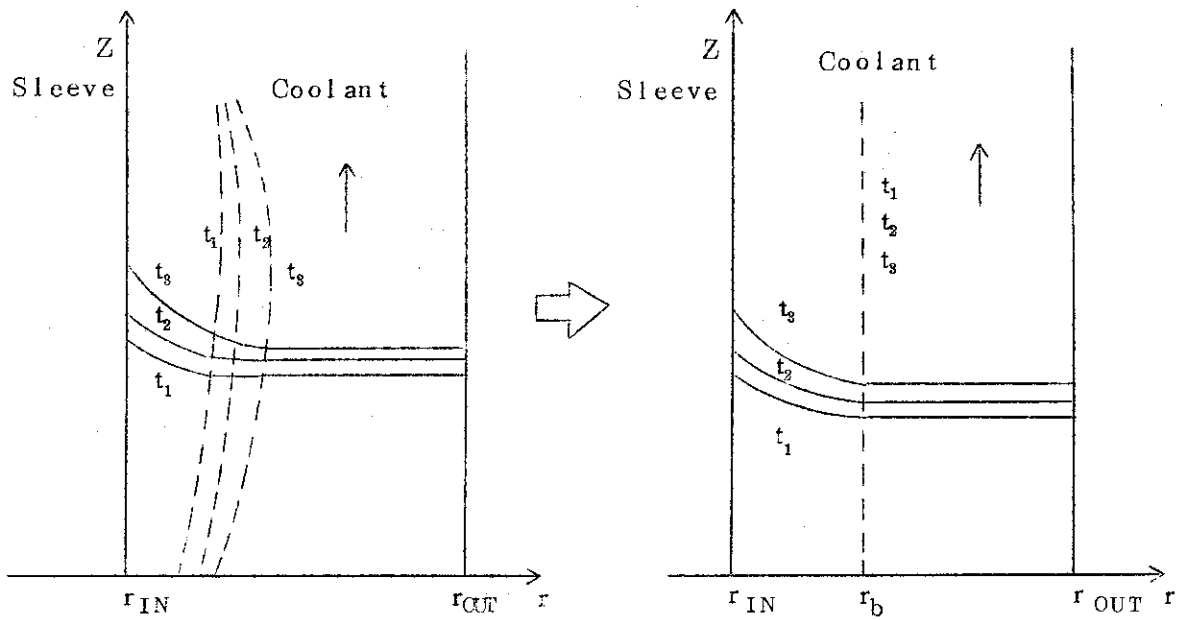
$$De = 2 r_s \quad (3-88)$$

ここで  $G'$  は全冷却の材質量流量で、その次元は  $[g/sec]$  とし、 $\bar{S}_{Zm}$  はある軸メッシュ  $Z_m$  に於ける平均炉断面積、 $r_s$  は球型燃料の半径である。

#### (4) 時間、空間変化をする境界層厚さの模倣方法

濃度境界層厚さは燃焼ステップと共に変化するが、燃料チャンネルにおいて径方向一次元拡散方程式を解くにあたり、境界点は時間に対して一定の位置にならなければならないとしているので、燃焼ステップ内で一定の位置とする。円筒型燃料チャンネル体系では Fig. 3.3 (1) に示すように、濃度境界層厚さが軸方向で分布を持っているものと考えら





(1) Concentration boundary layer profile along coolant flow

(2) Model of the position of boundary point  $r_b$

Fig. 3.3 Model of F. P. concentration profile in boundary layer.  $t_1, t_2, t_3$ : each time step.

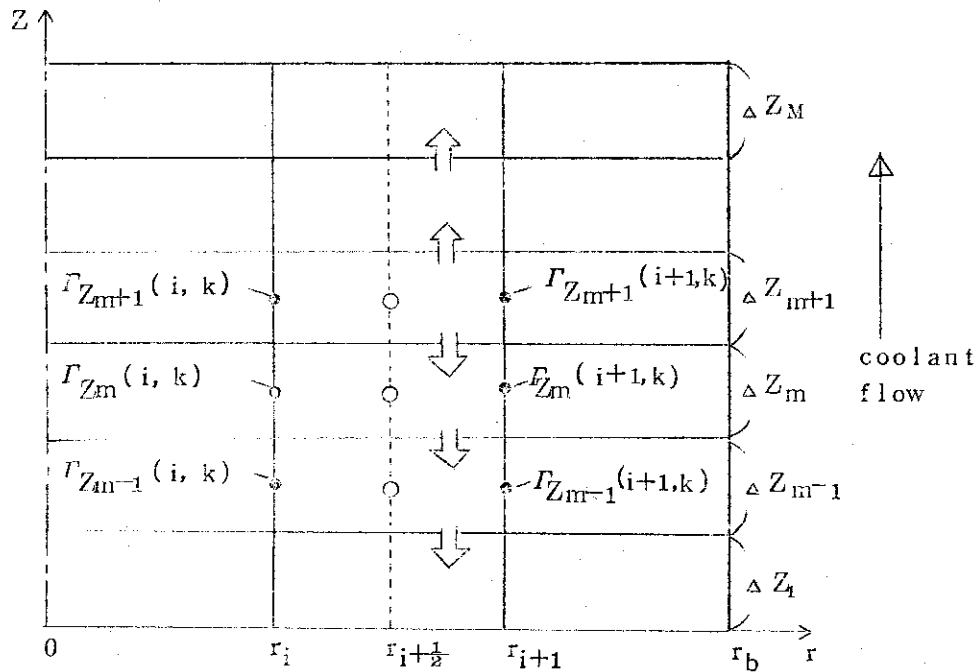


Fig. 3.4 Description of transports of fission products by diffusion in axial direction.

れる。これらの変化や分布を際限なく取り入れると計算が複雑になり、本コードでは濃度境界層厚さは軸方向で一定の値をとるとして、代表的に軸方向長さの中間近傍における濃度境界層厚みで代表させた。その様子を Fig. 3.3 (2) に示した。境界層厚みの時間変化に対しては、各燃焼ステップを評価するものとし、その場合ステップの中間の時間でそのステップを代表させる。

#### (5) 物質移動係数の算出

冷却材中の F. P. の拡散移動を知る定量的な目安として物質移動係数がある。これは各燃料チャンネル体系に対して次式で算出する。

$$k_a = \frac{D}{\delta_a}, \quad k_b = \frac{D}{\delta_b} \quad (3-89)$$

### 3.3 各領域に於ける F. P. 生成源

燃料要素からの着目 F. P. 核種の放出挙動を評価する際に、その F. P. 核種の生成速度の値が必要になる。厳密に F. P. 核種の生成速度を評価するためには、 $\beta \cdot \gamma$ -崩壊、中性子捕獲核分裂による生成を含む F. P. チェイン方程式を解けばよいが、現実問題として F. P. の多くの核種の拡散とチェイン方程式を同時に解くことは計算時間の観点から不可能に近い。本コードでは着目 F. P. 核種の燃料要素各領域における生成速度をコード内で評価することになっているために、その親核種の挙動を計算対象に含め、拡散移動している親核種の消滅速度 ( $\beta \cdot \gamma$ -崩壊、中性子捕獲のうちどれか) を着目 F. P. 核種の生成速度項に取り入れた。燃料マトリックス中では c. f. p. から放出された F. P. が生成源に組み入れられ、軸方向の拡散移動量もその値が正であれば\*生成源に組み入れられる。

#### 3.3.1. F. P. 生成源の種類

燃料チャンネル各領域における F. P. 生成源の種類に、c. f. p. より放出された F. P. による生成源  $B_{c,fp}$ 、拡散移動した親核種の崩壊あるいは中性子捕獲による生成源  $B_p$  を考慮し、更に円筒型燃料チャンネルの固相中では軸方向拡散移動によって領域に入ってくる F. P. 源  $B_Z$  も考慮する。着目 F. P. 核種とその親核種の各領域における生成源の評価は異なり、分類して Table 3.1 に示す。本節では前二者の評価方法を示し、 $B_Z$  の評価方法を次節に示す。燃料マトリックス中における  $B_{c,fp}$  の値を求める際には c. f. p. からの F. P. の放出速度、 $R$  値の値が必要になり、その評価方法を 2.1, 2, 3 節に示してきた。c. f. p. から放出された F. P. が燃料マトリックス中における F. P. の生成源になっている。すなわち、

$$B_{c,fp} = \sum_{\ell} [N^{\ell} \times \{K^{\ell} \cdot (R_{DK}^{\ell} + R_{RK}^{\ell}) + (1-K^{\ell}) \cdot (R_{DC}^{\ell} + R_{BC}^{\ell})\}], \quad (3-90)$$

$$N^{\ell} = \frac{V^{\ell}}{\frac{4}{3}\pi(r_n^{\ell})^3} \quad (3-91)$$

ここで  $K$  は被覆層の破損した被覆燃料粒子の存在率、 $N$  は c. f. p. の数密度であり (3-91)

\* その値が負の場合の取扱いも含めて 3.1.3 節(3 項)にその取扱い方を説明した。

Table 3.1 Fission products source in each medium

Medium	Parent	Daughter
Fuel matrix	$B_{cfp} + B_z ; B_z \geq 0$	$B_{cfp} + B_p + B_z ; B_z \geq 0$
	$B_{cfp} ; B_z < 0$	$B_{cfp} + B_p ; B_z < 0$
Sleeve	$B_z ; B_z \geq 0$	$B_p + B_z ; B_z \geq 0$
	$0 ; B_z < 0$	$B_p ; B_z < 0$
Gas phase	0	$B_p$

Note 1. Symbol description

$B_{cfp}$  ; source from released f.p. from c.f.p.

$B_z$  ; source from transported f.p. in axial direction.

$B_p$  ; source from decay or neutron capture of diffusing parent nuclide.

Note 2. Gas phase involves He bonds, gap and coolant.

Note 3. In case of pebble bed fuel channel,  $B_z$  is dropped.

式より算出される。Vは燃料マドリックス内におけるc. f. p. の体積率， $r_n$ はc. f. p. の半径である。添字 $l$ はc. f. p. の種類を示すインデックスである。拡散移動した親核種が $\beta$ -崩壊して着目F. P. 源になるか，または中性子捕獲により着目F. P. 源になるかにより $B_p$ の値は次の様に分かれる。

$$\lambda_p \cdot C_p(i+\frac{1}{2}, k) \quad ; \beta \text{崩壊の場合} \quad (3-92a)$$

$$B_p(i+\frac{1}{2}, k) = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_p \cdot C_p(i+\frac{1}{2}, k) \quad ; \beta \text{崩壊の場合} \\ \left[ \sum_{q=1}^2 \{ \sigma_p^q \cdot \varphi^q(k) \} \right] \times C_p(i+\frac{1}{2}, k) \quad ; \text{中性子の捕獲の場合} \end{array} \right. \quad (3-92b)$$

$$C_p(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{1}{2} [C_p(i, k) \cdot \phi_p(i, k) + C_p(i+1, k)] \quad (3-93)$$

ここで $\sigma$ ， $\varphi$ はそれぞれ微視吸収断面積，中性子束であり，エネルギー群数を2群で取扱う。添字 $p$ は親核種を示すインデックスである。

### 3.32. F. P. の軸方向移動量

円筒型燃料チャンネル体系におけるF. P. の軸方向移動量を厳密に評価しようとするれば，F. P. の移動方程式を： $\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{j} - \lambda C + B$ とし，F. P. の物質流束 $\vec{j}$ を $r-Z$ 二次元体系での拡散流束と考え， $\vec{j} = -D \cdot \nabla C + D^T \cdot \nabla \ln T$ とすれば， $\nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$ となり，F. P. の移動方程式を $r-Z$ 二次元問題として解けばよいことになる。しかるに本コードは $r$ 方向一次元問題を取扱っているので，軸方向移動量を独立に評価しなければならない。径・軸方向のF. P. の流束 $j_r$ ， $j_Z$ に関して，

$$-\nabla_r j_r = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + D^T \cdot \left( \frac{\partial^2 \ln T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \ln T}{\partial r} \right), \quad (3-94)$$

$$-\nabla_Z j_Z = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} + D^T \cdot \frac{\partial^2 \ln T}{\partial Z^2}, \quad (3-95)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla_r j_r - \lambda C + B - \nabla_Z j_Z \quad (3-96)$$

の仮定を行い，F. P. の二次元拡散問題を(3-96)式の様に記述し，ある軸メッシュ $Z_m$ に於ける軸方向移動量 $B_{Zm}$ を： $B_{Zm} = -\nabla_Z j_{Zm}$ と表わし，それをBあるいは $\lambda$ の項に組み入れて一次元拡散問題に帰着させた。軸方向移動量 $B_{Zm}$ はF. P. 濃度 $C_{Zm-1}$ ， $C_{Zm}$ ， $C_{Zm+1}$ におけるF. P. 濃度の前回の反復計算結果 $C_{Zm-1}^{\xi-1}$ ， $C_{Zm}^{\xi-1}$ ， $C_{Zm+1}^{\xi-1}$ を用いて軸方向で2次フィッティングして， $C_Z^{\xi-1} = aZ^2 + bZ + c$ の形の軸方向濃度分布を求め，(3-95)式により軸方向移動量を求める。軸方向の最上端，最下端においては3点近似が行えないので外部へのF. P. のもれはないものとした。その様子をFig. 3.4.に示す。

(1) 中間軸メッシュ点\*における $B_{Zm}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k)$ の値

反復計算回数，タイムステップ数，径メッシュ番号，軸メッシュ番号を示すインデックスを各々 $\xi$ ， $k$ ， $i$ ， $m$ として， $B_{Zm}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k)$ の値の算出法を以下に示す。

\* 軸方向の最上端を除いた軸メッシュを示す。

$\xi \geq 2$  のとき,

$$\begin{aligned}
 B_{Z_m}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) &= -\nabla_Z j Z_m^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) \\
 &= 2D_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) \times \left[ \frac{\Gamma_{Z_{m-1}}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k)}{\{H_Z(m-1)+H_Z(m)\} \cdot H_Z(m-1)} - \frac{\Gamma_{Z_m}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k)}{H_Z(m-1) \cdot H_Z(m)} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\Gamma_{Z_{m+1}}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k)}{H_Z(m) \cdot \{H_Z(m-1)+H_Z(m)\}} \right] + 2D_{Z_m}^T \xi-1(i+\frac{1}{2}, k) \times \\
 &\quad \times \left[ \frac{A_{Z_{m-1}}(i+\frac{1}{2}, k)}{\{H_Z(m-1)+H_Z(m)\} \cdot H_Z(m-1)} - \frac{A_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k)}{H_Z(m-1) \cdot H_Z(m)} + \frac{A_{Z_{m+1}}(i+\frac{1}{2}, k)}{H_Z(m) \cdot \{H_Z(m-1)+H_Z(m)\}} \right] \\
 &\qquad\qquad\qquad : m=2,3,\dots, M-1 \quad (3-97)
 \end{aligned}$$

但し,

$$\Gamma(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{1}{2}[\Gamma(i, k) \cdot \phi(i, k) + \Gamma(i+1, k)] \quad (3-98)$$

$$A(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{1}{2}[A(i, k) + A(i+1, k)] \quad (3-99)$$

$$H_Z(m) = \frac{1}{2}[\Delta Z_m + \Delta Z_{m+1}] \quad : m=1,2,\dots, M-1 \quad (3-100)$$

$\xi = 1, k \geq 2$  のとき,

$$\begin{aligned}
 B_{Z_m}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) &= -\nabla_Z j Z_m^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k-1) \\
 &= 2D_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k-1) \times \left[ \frac{\Gamma_{Z_{m-1}}(i+\frac{1}{2}, k-1)}{\{H_Z(m-1)+H_Z(m)\} \cdot H_Z(m-1)} - \frac{\Gamma_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k-1)}{H_Z(m-1) \cdot H_Z(m)} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\Gamma_{Z_{m-1}}(i+\frac{1}{2}, k-1)}{H_Z(m) \cdot \{H_Z(m-1)+H_Z(m)\}} \right] + 2D_{Z_m}^T(i+\frac{1}{2}, k-1) \times \left[ \frac{A_{Z_{m-1}}(i+\frac{1}{2}, k)}{\{H_Z(m-1)+H_Z(m)\} \cdot H_Z(m-1)} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{A_{Z_m}(i+\frac{1}{2}, k)}{H_Z(m-1) \cdot H_Z(m)} + \frac{A_{Z_{m+1}}(i+\frac{1}{2}, k)}{H_Z(m) \cdot \{H_Z(m-1)+H_Z(m)\}} \right] \\
 &\qquad\qquad\qquad : m=2,3,\dots, M-1 \quad (3-101)
 \end{aligned}$$

$\xi = 1, k = 1$  のとき,

$$B_{Z_m}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) = 0.0 \quad (3-102)$$

(2) 入口軸メッシュ点<sup>\*</sup>に於ける  $B_{Z_1}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k)$  の値

$\xi \geq 2$  のとき

$$B_{Z_1}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) = -\nabla_Z j Z_1^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{8}{(\Delta Z_2)^2 + 3(\Delta Z_1)(\Delta Z_2) + 2(\Delta Z_1)^2} \times$$

\* 燃料チャンネルにおける冷却材入口の軸メッシュを示す。

$$\begin{aligned} & \times \{ D_{Z_1}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) \cdot \{ \Gamma_{Z_2}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) - \Gamma_{Z_1}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) \} \\ & + D_{Z_1}^T(i+\frac{1}{2}, k) \cdot \{ A_{Z_2}(i+\frac{1}{2}, k) - A_{Z_1}(i+\frac{1}{2}, k) \} \} \end{aligned} \quad (3-103)$$

$\xi = 1, k \geq 2$  のとき

$$\begin{aligned} B_{Z_1}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) &= -\nabla_{Z_1} j_{Z_1}(i+\frac{1}{2}, k-1) = \frac{8}{(\Delta Z_2)^2 + 3(\Delta Z_1)(\Delta Z_2) + 2(\Delta Z_1)^2} \times \\ & \times \{ D_{Z_1}(i+\frac{1}{2}, k-1) \cdot \{ \Gamma_{Z_2}(i+\frac{1}{2}, k-1) - \Gamma_{Z_1}(i+\frac{1}{2}, k-1) \} \\ & + D_{Z_1}^T(i+\frac{1}{2}, k-1) \cdot \{ A_{Z_2}(i+\frac{1}{2}, k) - A_{Z_1}(i+\frac{1}{2}, k) \} \} \end{aligned} \quad (3-104)$$

$\xi = 1, k = 1$  のとき,

$$B_{Z_1}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) = 0.0 \quad (3-105)$$

(3) 出口軸メッシュ点\*における  $B_{Z_M}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k)$  の値

$\xi \geq 2$  のとき

$$\begin{aligned} B_{Z_M}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) &= -\nabla_{Z_M} j_{Z_M}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) = \frac{8}{(\Delta Z_{M-1})^2 + 3(\Delta Z_{M-1})(\Delta Z_M) + 2(\Delta Z_M)^2} \times \\ & \times \{ D_{Z_M}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) \cdot \{ \Gamma_{Z_{M-1}}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) - \Gamma_{Z_M}^{\xi-1}(i+\frac{1}{2}, k) \} \\ & + D_{Z_M}^T(i+\frac{1}{2}, k) \cdot \{ A_{Z_{M-1}}(i+\frac{1}{2}, k) - A_{Z_M}(i+\frac{1}{2}, k) \} \} \end{aligned} \quad (3-106)$$

$\xi = 1, k \geq 2$  のとき,

$$\begin{aligned} B_{Z_M}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) &= -\nabla_{Z_M} j_{Z_M}(i+\frac{1}{2}, k-1) = \frac{8}{(\Delta Z_{M-1})^2 + 3(\Delta Z_{M-1})(\Delta Z_M) + 2(\Delta Z_M)^2} \times \\ & \times \{ D_{Z_M}(i+\frac{1}{2}, k-1) \cdot \{ \Gamma_{Z_{M-1}}(i+\frac{1}{2}, k-1) - \Gamma_{Z_M}(i+\frac{1}{2}, k-1) \} \\ & + D_{Z_M}^T(i+\frac{1}{2}, k-1) \cdot \{ A_{Z_{M-1}}(i+\frac{1}{2}, k) - A_{Z_M}(i+\frac{1}{2}, k) \} \} \end{aligned} \quad (3-107)$$

$\xi = 1, k = 1$  のとき

$$B_{Z_M}^{\xi}(i+\frac{1}{2}, k) = 0.0 \quad (3-108)$$

\* 燃料チャンネルにおける冷却材出口の軸メッシュを示す。

### 3.4 一次冷却系ループ中のF.P.の物質移動

燃料チャンネル内で冷却材流れにより運ばれるF.P.の量を境界条件式中に組み入れる方法を3.2.2節で記述し、原子炉入口における冷却材中のF.P.濃度の値が必要であることを説明してきた。冷却材入口のF.P.濃度を評価するためには、冷却材ループ中におけるF.P.の物質移動を取扱わねばならない。そのためには着目しているF.P.の物質収支に関して次の各項を考慮に入れるべきである：(i)非定常蓄積項 (ii)拡散移動項 (iii)流れにより運ばれる移動項 (iv) $\beta$ あるいは $\gamma$ 崩壊による消滅項 (v)親核種よりの生成項 (vi)炉心通過時の炉心燃料要素より流入する生成項 (vii)ループ中の配管、プラント諸機器への沈着項 (viii)F.P.純化系での除去項等である。一次冷却系ループにはFig. 3.5. に示すように、プラント諸機器、F.P.純化系等が挿入されているので、ループ中での物質移動現象を詳細に取扱うのは大変困難である。本コードでは炉心外の一次系ループ中で(i), (iii), (iv), (v), (vi), (vii), (viii)による寄与をかなり大胆にモデル化して取り入れて冷却材入口におけるF.P.濃度を求めている。

炉心内には多数の燃料チャンネルが存在しているが、本コードでは炉心を1本の燃料チャンネルで代表するいわゆる単一チャンネルモデルを採用し、その様子をFig. 3.6. (1), (2)に示した。Fig. 3.6. (3)に示した球型燃料要素よりなるチャンネルの場合、炉心内の軸メッシュにおいて1つの球燃料がすべての他のものを代表するとして取扱った。

#### (1) 入口のF.P.濃度

冷却材入口におけるF.P.濃度 $C_{ZIN}(t_k)$ はループ一巡時間 $\tau$ 、純化系への流量バイパス率 $\alpha(t_k)$ 、配管、プラント諸機器への沈着率 $\beta(t_k)$ 、出口濃度 $C_{ZOUT}(t_k - \tau)$ を用いて次の様に表わされる。

$$C_{ZIN}(t_k) = \{1 - \alpha(t_k)\} \cdot \{1 - \beta(t_k)\} \cdot \left\{ [C_{ZOUT}(t_k - \tau) - \frac{B(t_k)}{\lambda}] e^{-\lambda\tau} + \frac{B(t_k)}{\lambda} \right\}. \quad (3-109)$$

ここで $B(t_k)$ は時刻 $t_k$ における親核種からの生成速度であり、着目F.P.核種の親核種が計算対象の場合には $B(t_k) = 0$ とし、着目F.P.核種が計算対象の場合で更にその親核種が $\lambda$ -precursor\* の場合に限って $B(t_k) = \lambda_p C_{ZOUTp}(t_k - \tau)$ とする。

#### (2) 出口のF.P.濃度

環状燃料チャンネルではFig. 3.6 (2)に示す様に燃料要素の中心と外側に冷却材が流れていて、出口濃度は異なる。その各々を $C_{ZOUT}^{(1)}$ 、 $C_{ZOUT}^{(2)}$ とするとそれが合流した後のF.P.濃度 $C_{ZOUT}$ の値は体積率で加重平均して次の様に求まる。

$$C_{ZOUT} = \frac{\frac{G^{(1)} \cdot S^{(1)}}{\rho^{(1)}} C_{ZOUT}^{(1)} + \frac{G^{(2)} \cdot S^{(2)}}{\rho^{(2)}} C_{ZOUT}^{(2)}}{\frac{G^{(1)} \cdot S^{(1)}}{\rho^{(1)1}} + \frac{G^{(2)} \cdot S^{(2)}}{\rho^{(2)}}}. \quad (3-110)$$

\* 炉心外の冷却系ループ中で中性子束はゼロなので $\sigma$ -precursor の場合親核種からの寄与分はない。

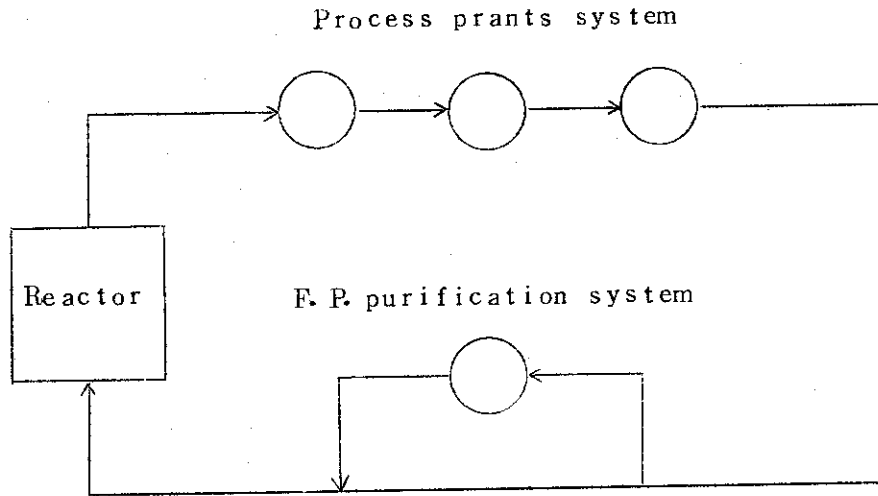


Fig. 3.5 Schematic diagram of primary coolant loop.

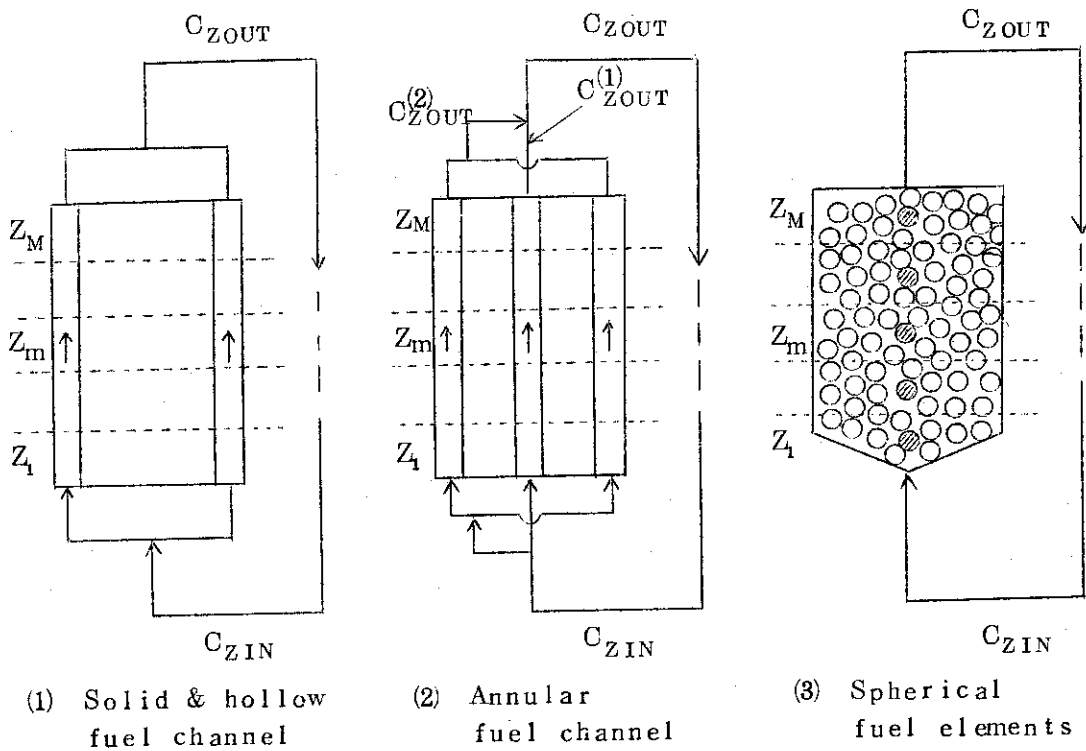


Fig. 3.6 Description of single channel models and coolant flow.



$$S^{(1)} = \pi (r'_{\text{OUT}})^2, \quad S^{(2)} = \pi \{ (r_{\text{OUT}})^2 - (r_{\text{IN}})^2 \} \quad (3-111)$$

ここで(1), (2)は各々中心, 外側冷却材を示すインデックスであり,  $G$ は冷却材の質量流量 [ $g/cm^2/sec$ ],  $S$ は流路断面積,  $\rho$ は冷却材密度である。

冷却材入口における F. P. 濃度  $C_{ZIN}(t_k)$  を評価する際に出口濃度  $C_{ZOUT}(t_{k-\tau})$  の値が必要であり, さらに冷却材ループ一巡時間  $\tau$  はタイムステップ巾に比較して短い時間であるので  $C_{ZOUT}(t_{k-\tau}) \approx C_{ZOUT}(t_k)$  と近似することができる。入口濃度を求めるには反復計算が必要になりその設定の方法を次に示す。

$$\xi \geq 2 \text{ のとき} \quad C_{ZOUT}^{\xi}(t_{k-\tau}) = C_{ZOUT}^{\xi-1}(t_k) \quad (3-112)$$

$$\xi = 1, k \geq 2 \text{ のとき} \quad C_{ZOUT}^{\xi}(t_{k-\tau}) = C_{ZOUT}(t_{k-1}) \quad (3-113)$$

$$\xi = 1, k = 1 \text{ のとき} \quad C_{ZOUT}^{\xi}(t_{k-\tau}) = 0.0 \quad (3-114)$$

### 3.5 記号説明

#### (1) 物 理 量

$B$  : F. P. の生成速度 [ $g\text{-mol}/cm^3/sec$ ]

$B_{\text{cfp}}$  : c. f. p. より放出された F. P. による燃料マトリックス中の F. P. の生成速度 [ $g\text{-mol}/cm^3/sec$ ]

$B_p$  : 拡散移動した親核種よりの娘 (着目) 核種の生成速度 [ $g\text{-mol}/cm^3/sec$ ]

$B_Z$  : F. P. の軸方向移動速度 [ $g\text{-mol}/cm^2/sec$ ]

$C$  : F. P. の濃度 [ $g\text{-mol}/cm^3$ ]

$D$  : F. P. の濃度拡散係数 [ $cm^2/sec$ ]

$D_e$  : 冷却材通路の相当直径 [ $cm$ ]

$D^T$  : F. P. の熱拡散係数 [ $g\text{-mol}/cm/sec$ ]

$G$  : 円筒型燃料チャンネル体系における冷却材質量流量 [ $g/cm^2/sec$ ]

$G'$  : 球型燃料を使用した時の冷却材の質量流量 [ $g/sec$ ]

$j$  : 径-軸二次元を考慮した F. P. 拡散流束 [ $g\text{-mol}/cm^2/sec$ ]

$j_r$  : 径方向の F. P. 拡散流束 [ $g\text{-mol}/cm^2/sec$ ]

$j_Z$  : 軸方向の F. P. 拡散流束 [ $g\text{-mol}/cm^2/sec$ ]

$j_c$  : 径方向の F. P. の濃度拡散流束 [ $g\text{-mol}/cm^2/sec$ ]

$j_T$  : 径方向の F. P. 熱拡散流束 [ $g\text{-mol}/cm^2/sec$ ]

$k$  : F. P. の冷却材中の物質移動係数 [ $cm/sec$ ]

$K$  : 被覆層破損率 [-]

$M$  : (3-52)式で定義されるマトリックス [ $cm^2$ ] -円筒座標 [ $cm$ ] -球座標

$N$  : 燃料マトリックスに於ける c. f. p. の数密度 [ $n/cm^3$ ]

$r$  : 径座標および半径 [ $cm$ ]

- $R$  : 1 個の c. p. p より F. P. の放出速度 [ $g\text{-mol}/\text{sec}$ ]  
 $R_e$  : 冷却材のレイノルズ数 [-]  
 $S$  : 球型燃料を使用した炉心の炉心断面積 [ $\text{cm}^2$ ]  
 $S_c$  : 冷却材中の F. P. のシュミット数 [-]  
 $T$  : 絶対温度 [ $^{\circ}\text{K}$ ]  
 $t$  : 時間座標 [ $\text{sec}$ ]  
 $\Delta t$  : 時間ステップ巾 [ $\text{sec}$ ]  
 $u$  : 冷却材流速 [ $\text{cm}/\text{sec}$ ]  
 $V$  : 燃料マトリックスにおける c. p. f. の体積率 [-]  
 $X$  : (3-18), (3-38) 式等で定義される F. P. 生成項 [ $g\text{-mol}/\text{cm}^3$ ]  
 $\vec{X}$  : その成分が  $X(i)$ ,  $i = 1 \sim b$  である列ベクトル [ $g\text{-mol}/\text{cm}^3$ ]  
 $Z$  : 軸座標 [ $\text{cm}$ ]  
 $\Delta Z$  : 軸方向メッシュ巾 [ $\text{cm}$ ]  
 $\alpha$  : 一次冷却材ループ中の F. P. 純化系への流量バイパス率 [-]  
 $\beta$  : 一次冷却材ループ中の F. P. の配管, フラント諸機器への沈着率 [-]  
 $\Gamma$  : (3-13), (3-33) 式等で定義される F. P. 濃度 [ $g\text{-mol}/\text{cm}^3$ ]—円筒座標,  
 [ $g\text{-mol}/\text{cm}^3$ ]—球座標  
 $\vec{\Gamma}$  : その成分が  $\Gamma(i)$ ,  $i = 1 \sim b$  である列ベクトル [ $g\text{-mol}/\text{cm}^3$ ]—円筒座標,  
 [ $g\text{-mol}/\text{cm}^3$ ]—球座標  
 $\delta$  : 冷却材中の F. P. 濃度境界層厚さ [ $\text{cm}$ ]  
 $\Delta$  : 径方向メッシュ巾 [ $\text{cm}$ ]  
 $\epsilon$  : 球型燃料の炉心内充填率 [-]  
 $\epsilon_{IT}$  : 反復計算用の収束判定基準値 [-]  
 $\eta$  : 冷却材の粘性係数 [ $g/\text{cm}/\text{sec}$ ]  
 $\lambda$  : F. P. の崩壊定数 [ $1/\text{sec}$ ]  
 $\mu$  : (3-11), (3-12) 式等で記述される境界条件式中のパラメータ [ $\text{cm}/\text{sec}$ ]  
 $\nu$  : (3-11), (3-12) 式等で記述される境界条件式中のパラメータ [ $g\text{-mol}/\text{cm}^2/\text{sec}$ ]  
 $\rho$  : 冷却材の密度 [ $g/\text{cm}^3$ ]  
 $\sigma$  : F. P. の中性子捕獲断面積 [barn]  
 $\tau$  : 一次冷却材ループ一巡時間 [ $\text{sec}$ ]  
 $\varphi$  : 中性子束 [ $n/\text{cm}^2/\text{sec}$ ]  
 $\phi$  : F. P. の濃度隔壁係数 [-]  
 $\Omega$  : (2-87) 式で定義される F. P. 時間変動項の重みづけパラメータ [-]
- (2) 添 字
- $a$  : 径方向内部境界点を示す。  
 $b$  : 径方向外部境界点を示す。  
 $c$  : F. P. の濃度拡散を示す。  
 DC : 多重被覆 c. p. f. より F. P. の拡散放出を示す。

- DK : 燃料核よりの F. P. の拡散放出を示す。
- $g$  : 中性子のエネルギー群を示す。
- G : 気相媒体を示す。
- $i$  : 径メッシュ点を示す。
- $i+\frac{1}{2}$  : 径メッシュ点の中間を示す。
- IN : 円筒型燃料チャンネル外部冷却材通路の内側壁面を示す。
- k : 時間メッシュ点を示す。
- $\ell$  : c. f. p. 体系の種類を示す。
- m : 軸方向メッシュ点を示す。
- M : 冷却材出口の軸メッシュ点を示す。
- OUT : 円筒型燃料チャンネル外部冷却材通路の外側壁面を示す。
- OUT<sup>r</sup> : 円環燃料チャンネル内部冷却材通路半径を示す。
- p : 着目 F. P. 核種に関する親核種を示す。
- RC : 多種被覆 c. f. p. よりの F. P. の反跳放出を示す。
- BK : 燃料核よりの F. P. の反跳放出を示す。
- S : 固相媒体を示す。
- T : F. P. の熱拡散を示す。
- ZIN : 冷却材のチャンネル入口を示す。
- ZOUT : 冷却材のチャンネル出口を示す。
- $\xi$  : 反復計算の回数を示す。

## 4 タイムステップの設定

燃料要素体系でのF.P.の放出挙動を評価する際に、本コードでは次の諸量はあらかじめ与えられているとしている。第1にc.f.R中の燃料核内でのFP生成速度の計算結果があらかじめ与えられているとし、第2に燃料要素内の温度分布の計算結果が与えられているとしている。前者はFPのβ崩壊・中性子捕獲等のチェーンを追って計算すべきものであり、その両者のタイムステップの取り方は一般的に異っている。燃料要素内でのF.P.の非定常拡散を評価する際のタイムステップの取り方は、その拡散移動速度の相異により前二者のタイムステップの取り方とも異っている。本コードにおけるタイムステップに次の3種を用意した。(i)燃料核におけるF.P.生成速度を与えるためのタイムステップ(外部入力)、(ii)温度等のデータを与えるための燃焼ステップ(外部入力)、(iii)c.f.Rならびに燃料チャンネル中でのE.P.非定常拡散計算用のタイムメッシュ(外部入力またはオプションによるコード内設定)。以下の節で(iii)のタイムメッシュのコード内設定方法を説明し、さらに3者のタイムステップ間の調整方法も説明する。

### 4.1 FP放出評価用の燃焼ステップ内タイムメッシュのコード内設定方法

燃料要素内におけるE.P.の拡散挙動の非定常性を計る目安になる時間として、c.f.pにおける平衡到達時間Lを採用し、c.f.p.体系、燃料チャンネル体系両者におけるE.P.の非定常拡散計算用のタイムステップに同じものを用いる。2.1.4、2.2.4節で各々LDK、LDcの算出法を示したが、ここではc.f.p.タイプを区別するのにℓ、軸メッシュにz<sub>m</sub>のインデックスを用いて、代表的なLの算出方法を以下に示す。

$$L = \text{Max.} \left[ L_B(z_m, \ell) + L_{DK}(z_m, \ell) + L_{Dc}(z_m, \ell) \right]; \dots\dots\dots (4-1)$$

但しL<sub>B</sub>は燃料核中のFPの生成速度に関する平衡到達時間である。着目燃焼ステップ内においてFP放出評価のためのタイムメッシュコード内で設定させる場合には、燃料要素からのFPの非定常放出挙動を一次遅れ近似し、その時定数τを、 $\tau = L/3$ と近似することによりタイムメッシュの切り方の目安とする。<sup>\*</sup>

燃焼ステップは、T<sub>j</sub>とその中のタイムメッシュ、t<sub>k</sub><sup>(j)</sup>の関係をFig.4.1に示し、平衡到達時間Lと時定数τを用いてタイムメッシュの区切り方を以下に説明する。

L < T<sub>1</sub> のとき、

$$\frac{t_k^{(j)}}{\tau} = -\ell_n \left[ \exp\left(-\frac{t_{k-1}^{(j)}}{\tau}\right) - \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_j}{\tau}\right)}{\eta_{\max}} \right] ; j=1 \dots\dots (4-2)$$

$$\Delta t_k^{(j)} = \Delta T_j ; j=2,3,\dots\dots (4-3)$$

\* F.P.の非定常放出挙動の評価に関してはF.P.の非定常拡散方程式を時間、空間で差分化してF.P.の濃度分布を解き、決してその非定常性を一次遅れ近似しているということはなく、ここではタイムメッシュの切り方を説明しているにすぎない。

$T_1 \leq L < T_J$  のとき,

且つ,  $T_{n-1} \leq L < T_n$ ,  $T_{n-1} \leq \tau < T_n$  に対して,

$$\frac{t_k^{(j)}}{\tau} = -\ell_n \left[ \exp\left(-\frac{t_{k-1}^{(j)}}{\tau}\right) \frac{\exp\left(-\frac{T_{j-1}}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{T_j}{\tau}\right)}{n_{\max}} \right]$$

$$; j=1, 2, \dots, n' \quad (4-4)$$

$$\frac{t_k^{(j)}}{\tau} = -\ell_n \left[ \exp\left(-\frac{t_{k-1}^{(j)}}{\tau}\right) - \frac{\exp\left(-\frac{T_{j-1}}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{T_j}{\tau}\right)}{n_{\min}} \right]$$

$$; j=n'+1, \dots, n \quad (4-5)$$

$$\Delta t_k^{(j)} = \Delta T_j \quad ; j=n+1, \dots, J. \quad (4-6)$$

$T_J \leq L$  のとき,

$$\Delta t_k^{(j)} = \frac{\Delta T_j}{n_{\min}} \quad ; j=1, 2, \dots, J. \quad (4-7)$$

ここで  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  は燃焼ステップ内の最大, 最小のメッシュ分割数であり, コードの入力量とする。

#### 4.2 タイムステップ間の調整

三種のタイムステップの中で F.P. 放出評価用のタイムステップは燃焼ステップ内でメッシュ分割して得られる。F.P. 放出評価用のタイムステップでの諸物性値の設定に際しては燃焼ステップで入力されたデータを内挿して求める。また c.f.p. 内での F.P. の生成速度を入力するためのタイムステップは他のタイムステップと独立であり, c.f.p. からの F.P. の放出挙動を評価する際に, Fig. 4.2 に示す様に, 放出評価用タイムステップ間で F.P. 生成速度の入力データを時間平均する。c.f.p. からの F.P. の放出速度は燃料チャンネル体系における F.P. の生成速度と関連しているので, c.f.p. からの F.P. の放出速度を各タイムステップ毎にストアしておき, 燃料体系での F.P. の放出挙動を評価する際に用いる。

c.f.p. ならびに燃料チャンネルからの F.P. の放出評価用のタイムステップに同じタイムステップを用いる。それを基にして F.P. の濃度分布を求めるときに両体系とも非定常数値計算が行なわれるが, c.f.p. 体系で平衡到達時間以降では拡散平衡解析による計算が行なわれる。

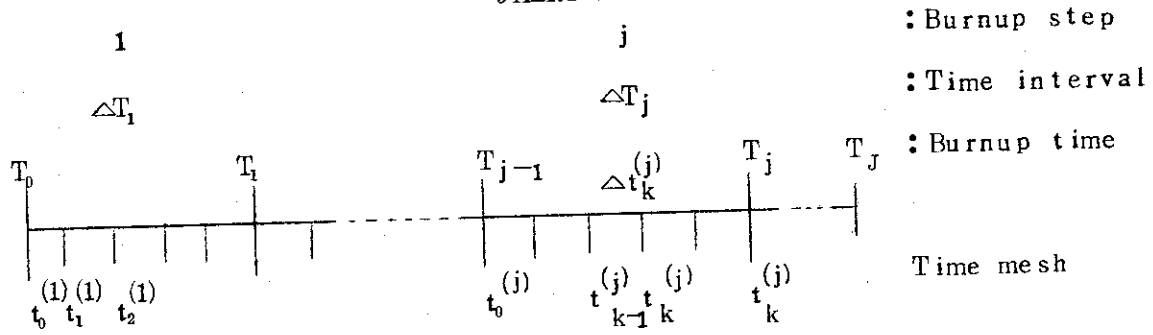


Fig. 4.1 Relationship between time mesh  $t_k^{(j)}$  for F.P. release calculation and burnup step  $T_j$  for data input.

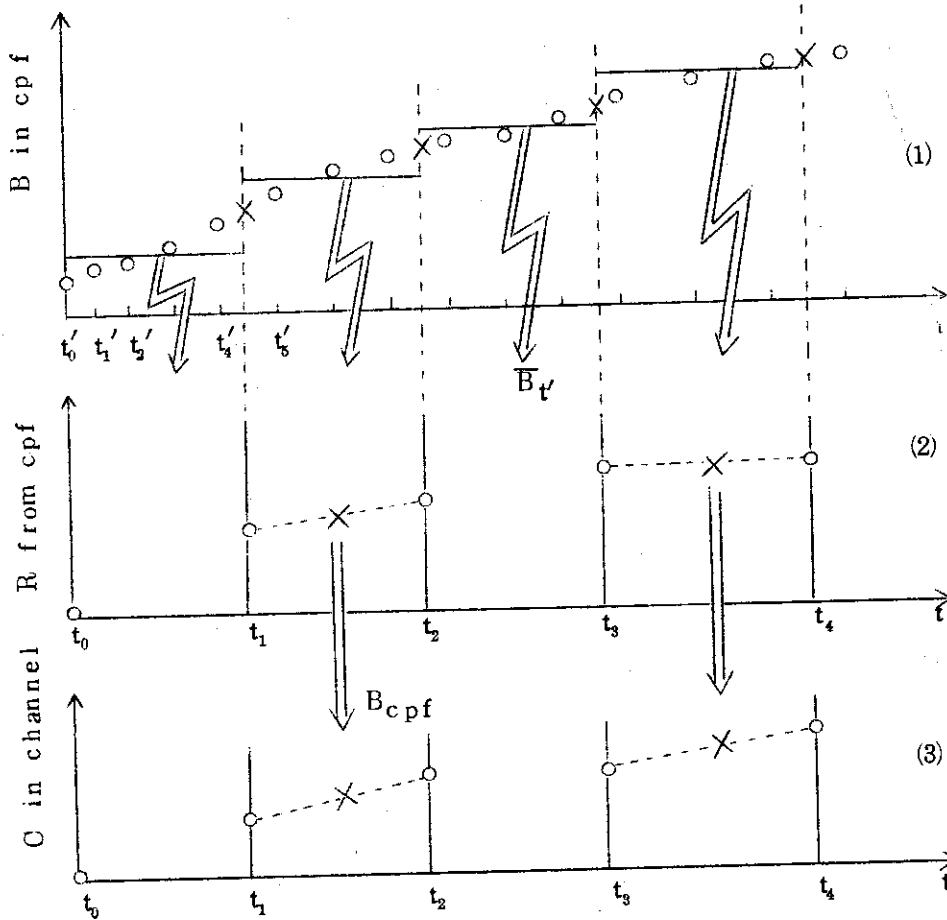


Fig. 4.2 Descriptions of time-step for three different types and adjustment of physical properties among them.

- (1) F.P. birth rates in a c.p.f. are inputted along time step,  $t_k$ .
- (2) F.P. release rates from c.p.f. are calculated along time step,  $t_k$ , using time averaged birth rates,  $B'_t$ .
- (3) F.P. concentrations in a fuel channel are calculated along time step,  $t_k$ , using F.P. source from c.p.f.,  $B_{cpf}$ .

## 5 諸物理量の設定

燃料要素からのF.P.の放出挙動を評価する際に、F.P.核種のもっている諸物性、移動媒体のもつ諸物性は重要な役割を果たしている。F.P.核種のもつ物性には、濃度拡散係数、熱拡散係数、界面における隔壁係数、崩壊定数などがあり、移動媒体のもつ物性には、密度、粘性係数、温度、圧力、流速などがある。一般的に物性値は温度、圧力、依存性を有しており、特にその中の温度は燃焼依存性、c.f.p.内、燃料チャンネル内における空間変化を有しており、このために諸物性値の設定を複雑なものとしている。以下の各節で(i)体系内における温度分布(空間、時間)の設定方法 (ii)諸物性値の温度、圧力等の依存性の定式化、(iii)F.P.核種の物性値推算に必要な基礎定数の3項目に主眼を置いて、温度、濃度拡散係数、隔壁係数、Heの粘性係数、密度、流速の設定方法について説明する。

### 5.1 温度分布の燃焼依存性の設定

温度分布に関して本コードはすべて外部入力量として取扱う。温度に関する入力は多岐に亘り、c.f.p.内径方向温度分布、燃料チャンネル内径方向温度分布、軸方向温度分布があり、さらにそれらの燃焼点毎の変化がある。本コードで取扱う径方向、軸方向メッシュポイント、タイムステップのすべての点での温度を入力することは困難であり、代表的な(空間-時間)点での温度の入力方法と、その場合他の(空間-時間)点での温度の設定方法を本節で説明する。

#### (1) 時間領域における温度の入力と内挿方法

本コードでは燃焼ステップ内にタイムメッシュを切って関連の計算を行なうことを既に説明したが、温度に関する入力データはFig. 5.1(1)に示す様に各燃焼ステップの初期と最終ステップの終期に入力し、その間にある各タイムメッシュ点における温度は直線内挿によって求める。

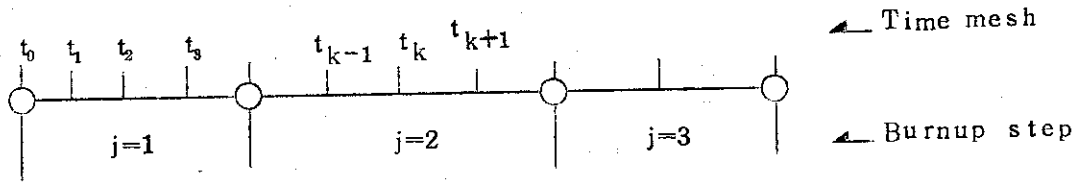
#### (2) 径方向温度分布の入力と内挿方法

Fig. 5.1(2)に示す様に、F.P.移動媒体の界面のメッシュ点で温度を入力しなければならないが、さらに同じ媒体中でメッシュポイントを数多く取っている場合は、媒体中の任意のメッシュポイントで温度の入力を許し、その場合にそのメッシュ点の座標も同時に入力する。温度をデータとして入力していないメッシュ点における温度はその前後の入力座標間で線型近似の内挿を行って求める。

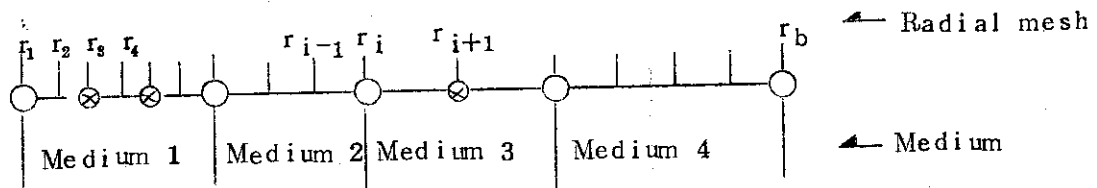
燃料チャンネルにおける入力温度は温度そのものの値[°C]を入力するが、c.f.p.内の温度分布については、最外表面からの温度上昇分[°C]を入力するので、温度の絶対値の計算には燃料マトリックスの温度を加えてやらなければいけない。メッシュ点の間で定義されるF.P.の諸物性値(濃度拡散係数等)を設定する際の代表温度としては、メッシュ点間で相加重平均した温度を用いる。

#### (3) 軸方向温度分布の入力方法

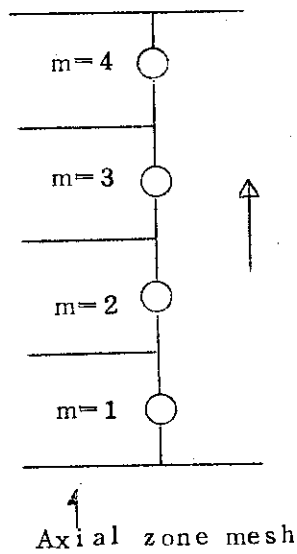
Fig. 5.1(3)に示す様に軸方向の温度の入力はすべての軸メッシュ点で行ない、代表点としての軸方向メッシュの中心の温度を使用する。



(1) Temperature input points along time coordinate



(2) Temperature input points along radial coordinate;  
 O: must be input, X: may be input



(3) Temperature input points along axial coordinate;  
 the points are placed at the middle of each axial zone.

Fig. 5.1 Input data points of temperature along time, radial and axial coordinates.



## 5.2 濃度拡散係数の設定

F.P.核種の燃料要素における濃度拡散係数の値は拡散移動媒体の種類、温度、F.P.濃度に依存している。拡散媒体として、c.f.p.体系では燃料核と被覆各層があり、燃料チャンネル体系では燃料マトリックス、スリーブ、冷却材、気相ボンド、気相ギャップ等がある。固相中のF.P.核種*i*の拡散係数は、一般的に核種*i*とそれ以外の核種の濃度に依存する量であり、本計算コードでは燃料チャンネル体系に対しては核種*i*の濃度依存性を取り入れ、c.f.p.体系に対しては濃度依存性を無視した。本節では固相中のF.P.の拡散係数と気相中の拡散係数の設定方法を示す。

## (1) 固相中のF.P.の拡散係数

c.f.p.体系における核種*i*の拡散係数の設定に際しては温度効果を取り入れ次式で表わした。

$$D_i = D_i^0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_{D_i}}{R_g T}\right) \quad (5-1)$$

燃料チャンネル体系におけるF.P.濃度分布を計算する際には反復計算過程を採用しているので、固相中の拡散係数に濃度依存性を取り入れることが可能であり、核種*i*の拡散係数を次式で表わした。

$$D_i = D_i^0 \cdot F(C_i) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_{D_i}}{R_g T}\right) \quad (5-2)$$

ここで $F(C_i)$ は濃度の増加に従って大きくなる関数で、実際には濃度に関して複雑な関数形をしているが本コードでは次の様に線型近似をした。

$$F(C_i) = \begin{cases} 1.0 & ; C_i \leq C_i^0 & (5-3a) \\ 1.0 + f_i \times (C_i - C_i^0) & ; C_i \geq C_i^0 & (5-3b) \end{cases}$$

ここで $C_i^0$ は核種*i*について拡散係数が一定の値を保つための限界濃度とし、 $f_i$ の値と共に入力値とする。Fig. 5.2に黒鉛中でのBaの拡散係数の濃度依存性を一例として示し、<sup>[11]</sup>(5-3)式の有効性を例示した。

## (2) 気相中のF.P.の拡散係数

Hirschfelder等<sup>[12]</sup>によれば、気相Gにおける核種*i*の拡散係数、 $D_{i,G}$ は次の様に表わされる。

$$D_{i,G} = 1.8583 \times 10^{-3} \frac{\sqrt{T^3 \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_G}\right)}}{P \cdot \sigma_{i,G}^2 \cdot \Omega_{i,G}^{(1)*}} \quad (5-4)$$

$$\sigma_{i,G} = \frac{1}{2} (\sigma_i + \sigma_G) \quad (5-5)$$

$$\Omega_{i,G}^{(1)*} = \Omega_{i,G}^{(1)*} (T_{i,G}^*) \quad (5-6)$$

$$T_{i,G}^* = \frac{T}{(\epsilon_{i,G}/k)} \quad (5-7)$$

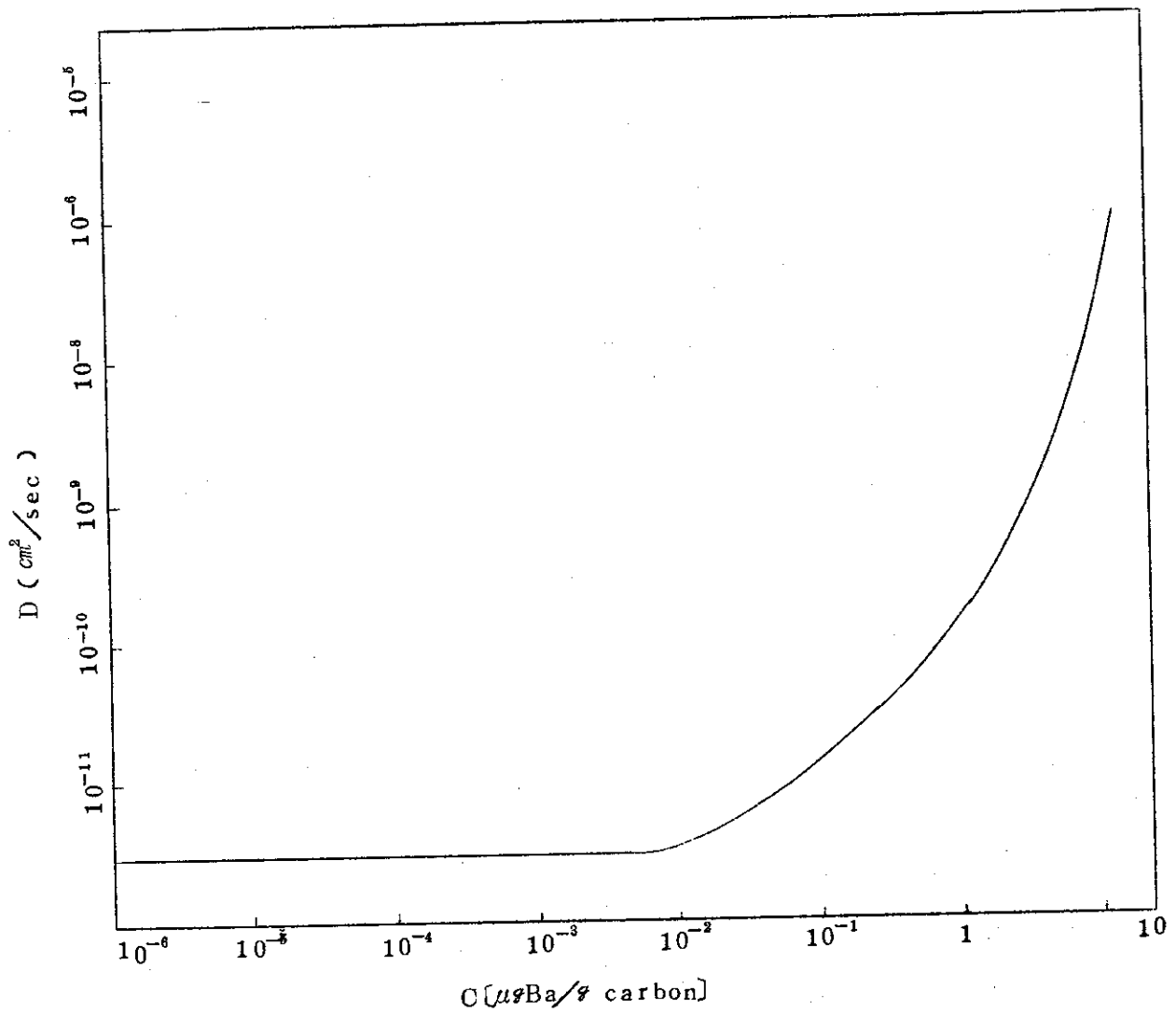


Fig. 5.2 The effect of concentration on the diffusion coefficient of Ba in graphite [11] at  $1000^\circ\text{C}$ .

$$\frac{\epsilon_{i,0}}{k} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_i}{k}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{k}\right)} \quad (5-8)$$

衝突積分関数  $\Omega_{i,0}^{(1)*}$  は無次元固有温度,  $T_{i,0}^*$  の関数として計算されており,  $\Omega^{(1)*} = a \cdot (T^*)^b$  の形でフィッティングして Table A2 にそのフィッティング式を示し, 核種  $i$  の原子直径  $\sigma_i$  の値を Table A4 に示す。  $\epsilon, k$  は各々原子間の相互作用最小エネルギー, ボルツマン定数であるが,  $\epsilon_j/k$  は固有温度と呼ばれ, 核種  $j$  について固有の値を有し, 沸点からの推算が可能であり; [14]

$$\epsilon_j/k \approx 1.39 \times T_{bpj}^{(760)} \quad ; j = i, 0 \quad (5-9)$$

1 気圧下における沸点を Table A4 に示す。 [15] 不活性原子の He, k<sub>r</sub>, xe と気体分子の Br<sub>2</sub>, I<sub>2</sub> については (5-9) 式から  $\epsilon/k$  の値を算出しないで, Table A3 に示す値を直接用いる。 [15] F.P.核種が気体状態で 2 原子分子を形成する場合には,  $N_i, \sigma_i$  は各々分子量, 分子直径となり, 原子量, 原子直径の 2 倍の値を用いる。 Table A5 に F.P.核種が気体になった時, 1 原子で存在するかあるいは 2 原子分子で存在するかを示す。

現在 H T G R 炉に用いられている気体は He であるので, その物性値をコード内で内蔵するが, He 以外の気体が存在する場合には  $M_0, \sigma_0, \epsilon_0/k$  の値の入力を必要とする。

### (3) 物理量の記号説明

C ; F.P.濃度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]

C ; 拡散係数が一定値を保つ限界濃度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]

D ; F.P.の濃度拡散係数 [cm<sup>2</sup>/sec]

D<sup>0</sup> ; F.P.の濃度拡散係数頻度因子 [cm<sup>2</sup>/sec]

△E<sub>D</sub> ; F.P.の濃度拡散係数の活性化エネルギー [kcal/g-mol]

M ; 原子量 [g/g-mol]

P ; 気相全圧 [atm]

R<sub>G</sub> ; 気体定数 = 1.9872 × 10<sup>3</sup> [kcal/g-mol/°k]

T ; 温度 [°k]

T<sub>bp</sub><sup>(760)</sup> ; 760 mmHg (1 気圧) 下における沸点 [°k]

T\* ; (5-7) 式で定義される無次元固有温度 [-]

ε/k ; 固有温度 [°k]

σ ; 原子直径 [Å]

Ω<sup>(1)\*</sup> ; 衝突積分関数 [-]

### 5.3 熱拡散係数の設定

気相中における F.P.核種の熱拡散係数の値は気体分子運動論より推算が可能であり, 本節で説明する。気相中における F.P.核種  $i$  のモル分率を  $x_i$  で示すと, 熱拡散係数の値,  $D_i^T$  は  $x_i \times (1-x_i)$  に比例する。本コードでは F.P.核種の濃度 (モル分率と考えることもできる) を求める問題を扱っており, 熱拡散係数は濃度を求めるために必要な量となっているので, その両者を

評価するためには反復計算過程が必要となる。

気相において、 $D_i^T \propto x_i (1-x_i)$ 、液相において、 $D_i^T \propto x_i (1-x_i) T$  の関係が確められているが（但し、 $T$  は絶対温度）、<sup>[16]</sup> 固相中における熱拡散係数についての実験なり理論の存在が見出されていない。本コードでは固相中の F.P. 核種の熱拡散係数をメモリー上では用意しておくが、濃度・温度依存性がないとして一定として取扱い、特に入力できない場合にはゼロとする。気相中の熱拡散係数の値はコード内でセットする。

(1) 気相中の F.P. 核種の熱拡散係数

気相 G 中における F.P. 核種  $i$  の熱拡散比  $k^T$ 、モル分率  $x_i$  を次の様に定義する。

$$k^T = \frac{D^T}{\rho D_{i0}} \quad (5-10)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\rho} \quad , \quad x_G \simeq 1 \quad (5-11)$$

$$\rho = \frac{P}{R_G \cdot T} \quad (5-12)$$

ここで  $D_{i0}$  は気相中の濃度拡散係数の値で 5.2 節で求めてあり、 $C_i$  は気相中の F.P. 核種の濃度であり、 $k^T$  の値が推算できれば、熱拡散係数  $D^T$  の値が推算できる。次にその推算方法を示す。

$$k_T = \frac{x_i \cdot x_G}{6k_{i,G}} \cdot \frac{S^{(i)} \cdot x_i - S^{(G)} \cdot x_G}{x_k + y_k} \cdot (6C_{i,G}^* - 5) \quad (5-13)$$

$$S^{(i)} = \left( \frac{M_i + M_G}{2M_G} \right) \cdot \frac{k_{i,G}}{k_i} - \frac{15}{4A_{i,G}^*} \cdot \left( \frac{M_G - M_i}{2M_i} \right) - 1 \quad (5-14)$$

$$S^{(G)} = \left( \frac{M_i + M_G}{2M_i} \right) \cdot \frac{k_{i,G}}{k_G} - \frac{15}{4A_{i,G}^*} \cdot \left( \frac{M_i - M_G}{2M_G} \right) - 1 \quad (5-15)$$

$$k_{i,G} = 1.9891 \times 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{T(M_i + M_G) / 2M_i \cdot M_G}}{(\sigma_{i,G})^2 \cdot \Omega_{i,G}^{(4)*}} \quad (5-16)$$

$$k_j = 1.9891 \times 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{T/M_j}}{(\sigma_j)^2 \cdot \Omega_{j,j}^{(4)*}} \quad ; j = i, G \quad (5-17)$$

$$X_k = \frac{x_i^2}{k_i} + \frac{2x_i \cdot x_G}{k_{i,G}} + \frac{x_G^2}{k_G} \quad (5-18)$$

$$y_k = \frac{x_i^2}{k_i} \cdot U^{(i)} + \frac{2x_i \cdot x_G}{k_{i,G}} \cdot U^{(y)} + \frac{x_G^2}{k_G} \cdot U^{(G)} \quad (5-19)$$

$$U^{(i)} = \frac{4}{15} \cdot A_{i,G}^* - \frac{1}{12} \left( \frac{12}{5} B_{i,G}^* + 1 \right) \cdot \frac{M_i}{M_G} - \frac{1}{2} \frac{(M_i - M_G)^2}{M_i \cdot M_G} \quad (5-20)$$

$$U^{(g)} = \frac{4}{15} A_{i,G}^* - \frac{1}{12} \left( \frac{12}{5} B_{i,G}^* + 1 \right) \cdot \frac{M_G}{M_i} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(M_G - M_i)^2}{M_i \cdot M_G}, \quad (5-21)$$

$$U^{(y)} = \frac{4}{15} A_{i,G}^* \cdot \frac{(M_i + M_G)^2 (k_{i,G})^2}{4M_i \cdot M_G \cdot k_i \cdot k_G} - \frac{1}{12} \cdot \left( \frac{12}{5} B_{i,G}^* + 1 \right) \\ - \frac{5}{32 A_{i,G}^*} \cdot \left( \frac{12}{5} B_{i,G}^* - 5 \right) \cdot \frac{(M_i - M_G)^2}{M_i \cdot M_G}, \quad (5-22)$$

$$A_{i,G}^* = \frac{\Omega_{i,G}^{(4)*}}{\Omega_{i,G}^{(1)*}}, \quad (5-23)$$

$$B_{i,G}^* = \frac{5 \Omega_{i,G}^{(2)*} - 4 \Omega_{i,G}^{(3)*}}{\Omega_{i,G}^{(1)*}}, \quad (5-24)$$

$$C_{i,G}^* = \frac{\Omega_{i,G}^{(2)*}}{\Omega_{i,G}^{(1)*}} \quad \circ \quad (5-25)$$

衝突積分関数,  $\Omega_{i,G}^{(1)*}$ ,  $\Omega_{i,G}^{(2)*}$ ,  $\Omega_{i,G}^{(3)*}$ ,  $\Omega_{i,G}^{(4)*}$  は (5-7) 式で定義される無次元固有温度,  $T_{i,G}^*$  の関数として計算されており, Table A 2 にそのフィッティング式を示す。<sup>[13]</sup> 原子直径  $\sigma_i$ , 原子量  $M_i$ , 固有温度  $\epsilon_i/k$  については 5.2 節で説明した。

## (2) 物理量の記号説明

C ; F.P.濃度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]

D ; F.P.の濃度拡散係数 [cm<sup>2</sup>/sec]

D<sup>T</sup> ; F.P.の熱拡散係数 [g-mol/cm/sec]

k<sup>T</sup> ; F.P.の熱拡散比 [-]

M ; 原子量 [g/g-mol]

P ; 気相全圧 [atm]

R<sub>G</sub> ; 気体定数 = 82055 [atm · cm<sup>3</sup>/°K/g-mol]

T ; 絶対温度 [°K]

T<sup>\*</sup> ; (5-7) 式で定義される無次元固有温度 [-]

x ; モル分率 [-]

$\epsilon/k$  ; 固有温度 [°K]

$\rho$  ; 気相モル密度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]

$\sigma$  ; 原子直径 [Å]

$\Omega_{i,G}^{(1)*}$ ,  $\Omega_{i,G}^{(2)*}$ ,  $\Omega_{i,G}^{(3)*}$ ,  $\Omega_{i,G}^{(4)*}$  ; 衝突積分関数 [-]

#### 5.4 固相-気相界面における隔壁係数の設定

本コードではF.P.移動媒体の境界面でF.P.の濃度ギャップを想定しており、そのギャップを隔壁係数という形で入力させている。固相-固相境界面でのFPの隔壁係数の値は1.0に近い値を取ると思われるので、入力値が不明の場合にコード内で1.0とセットする。それに対し固相-気相境界面におけるFPの濃度ギャップは大きく、本節でそこでの隔壁係数の値の設定方法を説明する。その方法には、固相-気相界面におけるFPの吸着平衡関係が実験データとして存在する場合の設定方法と、データが存在しない場合の設定方法があり、以下に両者の方法を説明する。

##### (1) 固相-気相界面で吸着平衡関係のデータが存在する場合の隔壁係数の設定方法

固相-気相界面におけるFPの吸着平衡関係に Freundlich 吸着等温式がよく現象を説明すると提案されており、<sup>[2]</sup> その吸着等温式は4つの実験定数  $a_{Fr}$ ,  $b_{Fr}$ ,  $c_{Fr}$ ,  $d_{Fr}$  を用いて次の様に示される。

$$\ln p = [a_{Fr} + b_{Fr} \left(\frac{10^3}{T}\right)] + [c_{Fr} + d_{Fr} \left(\frac{10^3}{T}\right)] \times \ln C'_s, \quad (5-26)$$

但し、

$P$  ; 界面での気相中のF.P.分圧 [ atm ]

$C'_s$  ; 界面での固相中のF.P.濃度 [  $\mu$  g-mol/g ]

$T$  ; 界面温度 [ °k ]。

気相、固相中のF.P.濃度  $C_v$ ,  $C_s$  の単位を [ g-mol/cm<sup>3</sup> ] で表わすと、

$$C_v = \frac{1}{8205447} \cdot \frac{P}{T}, \quad (5-27)$$

$$C_s = 10^6 \cdot \rho_s \cdot C'_s, \quad (5-28)$$

但し、 $\rho_s$  ; 固相密度 [ g/cm<sup>3</sup> ] である。

F.P.の界面における隔壁係数の値は、 $C_v$  と  $C_s$  の比となり  $\phi = C_v/C_s$  または  $\phi = C_s/C_v$  となるが、代表として前者を採用すると次式で表わされる。

$$\phi = \frac{C_v}{C_s} = \frac{10^6}{820545 \cdot T \cdot \rho_s} \cdot \frac{P}{C'_s} \quad (5-29)$$

$$\ln \frac{P}{C'_s} = [a_{Fr} + b_{Fr} \left(\frac{10^3}{T}\right)] + [c_{Fr} + d_{Fr} \left(\frac{10^3}{T}\right) - 1] \times \ln C'_s. \quad (5-30)$$

F.P.の濃度を評価する際には  $\phi$  の値が必要であるが、 $\phi$  が F.P.濃度  $C'_s$  の関数となっているので、3.1.3で導入した反復計算回数を示すインデックス  $\xi$  を用いて、 $\phi$  の評価を反復計算項目に組み入れ、

$\xi = 1$ ,  $k = 1$  のとき、

$$c_{Fr} + d_{Fr} \left( \frac{10^3}{T} \right) - 1 = 0, \quad (5-31)$$

$\xi = 1, k \geq 2$  のとき,

$$\ln \left( \frac{P}{C_s} \right)^\xi = \left[ a_{Fr} + b_{Fr} \left( \frac{10^3}{T} \right) \right] + \left[ c_{Fr} + d_{Fr} \left( \frac{10^3}{T} \right) - 1 \right] \times \ln C_s' (t_{k,1}), \quad (5-32)$$

$\xi \geq 2$  のとき,

$$\ln \left( \frac{P}{C_s} \right)^\xi = \left[ a_{Fr} + b_{Fr} \left( \frac{10^3}{T} \right) \right] + \left[ c_{Fr} + d_{Fr} \left( \frac{10^3}{T} \right) - 1 \right] \times \ln C_s'^{\xi-1} (t_k) \quad (5-33)$$

とする。<sup>\*</sup>一例として Table 5.1 に  $T_s = 688$  グラファイト表面における Rb, Sr, Cs, Ba の Freundlich 定数を示し、<sup>[2]</sup> Fig. 5.3 に代表として  $C_s$  の  $P - C_s'$  の関係をプロットした。

(2) 固相 - 気相界面での吸着平衡関係のデータが存在しない場合の隔壁係数のコード内設定方法

Freundlich 定数は固相媒体の種類により大きくその値が異なり、概して入手困難であるので本コードではその様な場合にコード内で吸着関係を設定できるようにした。吸着関係を定める場合、F.P.核種が界面温度で固体、液体、気体のうちのどの相状態になっているかで設定方法が異なるので、はじめに F.P.の相状態判定を説明し、次いで各々の状態における隔壁係数の設定方法を説明する。

(i) F.P.の相状態(固, 液, 気)の判定

Table A 4 に各 F.P.元素の融点  $T_{mp}$ 、沸点  $T_{bp}$  を示し、<sup>[15]</sup> 界面温度  $T$  のとる範囲により、F.P.の相状態の判定を次の様に行なう。

$$\left\{ \begin{array}{ll} T < T_{mp} & \text{のとき 固体,} \\ T_{mp} \leq T < T_{bp} & \text{のとき 液体,} \\ T_{bp} \leq T & \text{のとき 気体.} \end{array} \right.$$

F.P.元素の沸点は、気相の全圧  $P_G$  に依存しており、Table A 4 に  $P_0 = 100, 760$  [mm Hg] の時の沸点を示してあるが、任意圧力における沸点は次式により求める。

$$T_{bp} = T_{bp}^{(760)} + \frac{T_{bp}^{(760)} - T_{bp}^{(100)}}{\log 7.6} \cdot \log P_G, \quad (5-34)$$

\* 気相中における F.P.の軸方向移動を考慮する場合の隔壁係数の反復計算方法を 3.1.3 (3) で説明したが本節での説明は  $\phi^{\xi-1}$  の説明であって、 $f_{zn}^{\xi-1}(i, k)$  についての説明は行っていない。

Table 5.1 Freundlich isotherm constants for alkali metal and alkaline earth fission products sorbed by TS-688 graphite [2].

Element	$a_{Fr} *$	$b_{Fr} *$	$c_{Fr} *$	$d_{Fr} *$
Rb	14.1	-34.1	-9.0	16.8
Sr	10.00	-38.1	0.079	4.10
Cs	26.6	-55.7	-14.5	24.2
Ba	6.48	-33.7	-1.304	7.55

Note. Dimensional units of  $a_{Fr}$ ,  $b_{Fr}$ ,  $c_{Fr}$ ,  $d_{Fr}$  are according to Eq. (5-26).



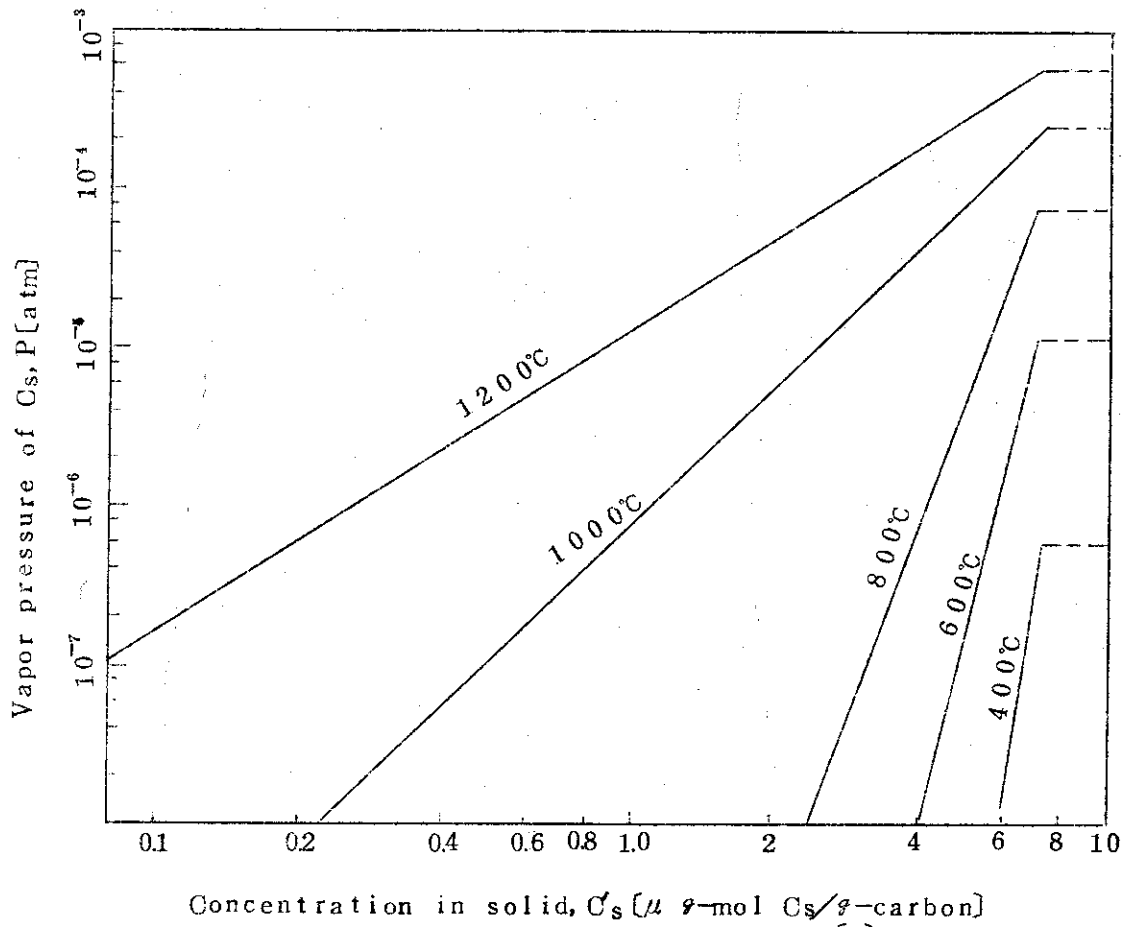


Fig.5.3 Freundlich isotherm of Cesium [2]

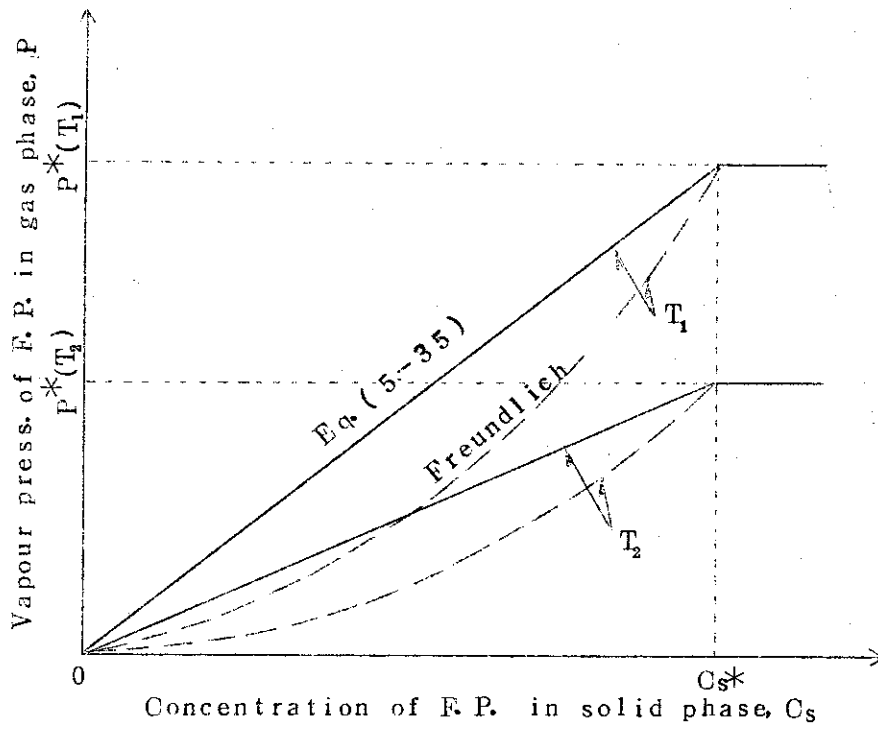


Fig. 5.4 Descriptions of the adsorption isotherms by eq. (5-26) and of Freundlich isotherm.

但し,

- $T_{\text{bfp}}$  ; 任意圧  $P_0$  における沸点 [°k]
- $T_{\text{bfp}}^{(760)}$  ; 760mmHg における沸点 [°k]
- $T_{\text{bfp}}^{(100)}$  ; 100mmHg における沸点 [°k]
- $P_0$  ; 気体の全圧 [atm]。

(ii) 固体, 液体状 F.P. の吸着関係

F.P. が固表面で単一層をなす時の濃度を飽和濃度,  $C_s^*$  とし, その時の気相中の F.P. の飽和蒸気圧を  $p^*$  とし,  $p - C_s$  の関係を Fig. 5.4 に示す様に線型近似する。隔壁関数の表示も含めて以下に吸着関係を示す。

$$p = \frac{p^*}{C_s^*} \cdot C_s, \quad (5-35)$$

$$C_v = \frac{1}{820545} \cdot \frac{p}{T}, \quad (5-36)$$

$$\phi = \frac{C_v}{C_s} = \frac{1}{820545} \cdot \frac{p^*}{T \cdot C_s^*}, \quad (5-37)$$

但し,

- $p$  ; 界面での気相中の F.P. 蒸気圧 [atm]
- $C_s$  ; 界面での固相中の F.P. 濃度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]
- $C_v$  ; 界面での気相中の F.P. 濃度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]
- $T$  ; 界面の温度 [°k]。

F.P. 核種の飽和蒸気圧  $p^*$  は固体状の時と液体状の時とも定数 A, B, C, D を用いて表わされ, それらの値を Table A 5 に示す。固相中の飽和濃度  $C_s^*$  は, F.P. が固相表面に単一層をなす時の濃度として求めた。

$$\log p^{*'} = A - \frac{B}{T} + C \cdot T + D \cdot \log T, \quad p^* = \frac{p^{*'}}{760}, \quad (5-38)$$

$$C_s^{*'} = 15976 \times 10^{-5} \cdot \frac{\rho_s \cdot \gamma_s}{(\sigma/2)^2}, \quad (5-39)$$

但し,

- $p^{*'}$  ; 気相中での F.P. 飽和蒸気圧 [mmHg]
- $p^*$  ; 気相中での F.P. 飽和蒸気圧 [atm]
- $C_s^{*'}$  ; 固相中での F.P. 飽和濃度 [g-mol/cm<sup>3</sup>]
- $T$  ; 界面温度 [°k]
- $\rho_s$  ; 固相密度 [g/cm<sup>3</sup>]
- $\gamma_s$  ; 固相表面の比表面積 [m<sup>2</sup>/g]
- $\sigma$  ; F.P. 原子直径 [Å] Table

## (四) 気相状 F.P. の隔壁係数の設定方法

気体状 F.P. の場合には固相-気相界面での蒸発 (または凝縮) のプロセスがなく, 固相の空隙率  $\epsilon_s$  [-] を用いて隔壁係数  $\phi$  を次の様に設定する。

$$\phi = \frac{C_v}{C_s} = \frac{1}{\epsilon_s} \quad (5-40)$$

## 5.5 He 冷却材の粘性係数・密度・流速の設定

HTR 炉に用いられる冷却材には現在 He ガスのみが考えられており, 本コードでは He ガスに関する物性値を内蔵データとして取扱った。粘性係数については Makavetskas らの測定結果<sup>[17]</sup> を用いた。

$$\begin{aligned} \eta = & 9.80549 \times 10^{-5} \{ 1899036 + 457218 \times 10^{-3} \cdot T \\ & - 232064 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 189097 \times 10^{-9} \cdot T^3 - 628213 \times 10^{-13} \cdot T^4 \\ & + 249 \times 10^6 \left( \frac{1.03291 \times 10^4 \cdot P}{T + 273.15} \right)^{1.12} \} \quad (5-41) \end{aligned}$$

ここで,  $\eta$  は He の粘性係数 [ $g/cm/sec$ ],  $T$  は温度 [ $^{\circ}C$ ],  $P$  は全圧 [ $atm$ ] であり, 本式の適用範囲は温度  $0 \sim 1020^{\circ}C$ , 圧力  $1 \sim 500 atm$  である。He ガスを理想気体として取扱うとその密度  $\rho$  [ $g/cm^3$ ] は  $\rho = 4878 \times 10^{-2} \cdot (P/T)$  と示され, ここで  $T$  [ $^{\circ}K$ ],  $p$  [ $atm$ ] である。

冷却材流速の値は 3.2 節に説明した境界条件の設定の際に用いられる。特に球型燃料チャンネルでは流速の代わりに質量流量を用いているので, ここでは円筒型燃料チャンネルにおける冷却材流速の設定方法を説明し, 流速  $u$  [ $cm/sec$ ] を  $u = G/\rho$  と設定する。ここで  $\rho$  は He ガスの密度 [ $g/cm^3$ ],  $G$  は He ガス質量 [ $g/sec/cm^2$ ] である。

## 6 計算コード

## 6.1 コードの構成

本コードのMAINおよびSUBROUTINEの構成をFig. 6.1に示した。また、COMMON BLOCKの構成と、アウトプット位置についてOVERLAY SEGMENT毎にTable 6.1に示した。以下に各々のSUBROUTINEの機能を説明する。

RECUND	本コードのMAINプログラムで、CPCONT, CHEVLのオーバーレイ・チェインプログラムのコントロールを行なう。
INPUT	インプットデータの読み込みのコントロールを行う。
INPUT 1	カードNo 1~23のインプットデータの読み込みとそのチェック、ならびにデータのプリントアウトを行なう。
INPUT 2	カードNo 24~65のインプットデータの読み込みとチェック、ならびにプリントアウトを行なう。
LINEC	インプットデータをプリントアウトする際のライン数のカウントを行なう。
ARRAY	二次元配列を一次元配列に変換する。
CONVT	基本実定数を倍精度実定数に変換する。
DGELG	マトリックス方程式解法ルーチン(倍精度計算で行なう)。
CPCONT	c.f.pからのFPの放出評価のための計算フローのコントロールとタイム・ステップの決定および題字のプリント。
TIMEL	c.f.pからのFPの拡散放出に関する平衡到達時間の算出およびプリント。
CPFTML	平衡到達時間算出のためのc.f.p内の代表温度の設定。
DIFCPL	平衡到達時間算出のためのc.f.p内のFPの代表拡散係数の設定。
CPFEVL	c.f.pからのFPの拡散ならびに反跳放出量評価用フローのコントロールと計算タイトルのプリント。
SSKFN	燃料核中でのFP濃度分布の解析解を求める際の定数 $k_j$ の算出。
BBCPF	c.f.p内のFPの生成速度の算出。
CPFTEM	c.f.p内の温度分布とFPの温度拡散係数の設定。
CPFUST	破損c.f.p内のFPの定常および非定常濃度分布の解析解の計算と非破損c.f.p内のFPの非定常濃度分布の計算フローのコントロール及び計算諸量のプリント。
CPFSTD	非破損c.f.p内のFPの定常濃度分布の算出と計算諸量のプリント。
HANCHO	c.f.pからのFPの反跳放出率の算出。
FIPCPF	非破損c.f.p内のFPの非定常濃度分布の算出と計算諸量のプリント。

CONV	(2-16)式で示される収束判定。
CHEVL	燃料チャンネルにおけるFP拡散移動量評価用フローのコントロールおよび計算タイトルのプリント。
TEMCH	燃料チャンネルにおける温度分布の設定。
DIFNCH	燃料チャンネルにおけるF.P.濃度拡散係数の設定。
DELAB	冷却材中のF.P.濃度境界層厚さの計算およびプリント。
FIPRO	燃料チャンネル中のFP濃度分布算出のための反復計算のコントロールおよび計算結果のプリント。
PHICAL	固相-気相界面におけるF.P.隔壁係数の温度・濃度依存性の設定。
PHIF	気相中におけるF.P.の軸方向移動量を考慮した時のE.P.隔壁係数の補正係数の設定。
HMCAL	(3-22)式等で示される $H(i,k)$ の計算。
DIFTEM	気相中のE.P.熱拡散係数の設定。
CINT	原子炉入口における冷却材中F.P.濃度の設定。
BCHNL	燃料チャンネルにおけるF.P.生成源の計算。
INTFC	燃料チャンネルにおけるF.P.拡散方程式の境界条件の設定。
CALC	燃料チャンネルにおけるFPの非定常拡散差分方程式のマトリックス計算及び計算結果のプリント。

### 6.2.2 サブルーチンの計算フロー

FECUNDコードの計算フローの詳細を以下に図示する。FECUNDコードは3つのSEGMENTから成り、OVERLAYが行なわれている。各々のSEGMENTを構成する代表的なSUBROUTINEを選んで、その計算フローを以下に示す。

### 6.3 入力データ

FECUNDコードの入力形式をTable 6.2に示し、Remarksの欄に入力データの内容と単位を示した。本コードでは計算内容をコントロールするオプションを多数用意しており、オプションの選択によりデータの入力が必要なくなるものも多数あるので、各々の入力データにcard type No.を割り振り、そのNo.と共にデータを入力し、入力データの数を減らすことを可能にした。カードの配列方法をFig. 6.2に示すが、例としては付録2のサンプル入力を参照するとよい。第1ケースの計算では必要なデータをすべて入力しなければならないが、第2ケース以降の計算では、以前のケースで入力したデータを再び入力する必要はない。

オプションに関しては、Table 6.3に計算フローのコントロール用のオプションを説明し、Table 6.4に出力形式のコントロール用のオプションを説明する。また計算フローをコントロールするオプションの数値毎に入力の必要なカード説明をTable 6.5に示す。

Table 6.1 Constituent of COMMON BLOCKs and output places

OVERLAY SEGMENT	SUBROUTINE	COMMON BLOCK NAME				OUTPUT PLACE
		MCOM	OPFC1	CPFC2	CHNCOM	
SEG. 1	FECUND	*				*
	INPUT	*				*
	INPUT 1	*				*
	INPUT 2	*				*
	LINEC	*				
SEG. 2	CPCONT	*	*	*		*
	TIMEL	*	*	*		*
	CPFTML	*	*	*		
	DIFCPL	*	*	*		*
	CPFEVL	*	*			
	SSKFN	*	*			
	BBCPF	*	*			
	CPFTEM	*	*	*		
	CPFUST	*	*			*
	CPFSTD	*	*			*
	HANCHO	*	*			*
	FIPCPF	*	*			*
SEG. 3	CHEVL	*			*	*
	TEMCH	*			*	
	DIFNCH	*			*	*
	DELAB	*			*	*
	FIPRO	*			*	
	PHICAL	*			*	
	PHIF	*			*	
	HMCAL	*			*	
	DIFTEM	*			*	
	CINT	*			*	
	BCHNL	*			*	
	INTFC	*			*	
CALC	*			*	*	

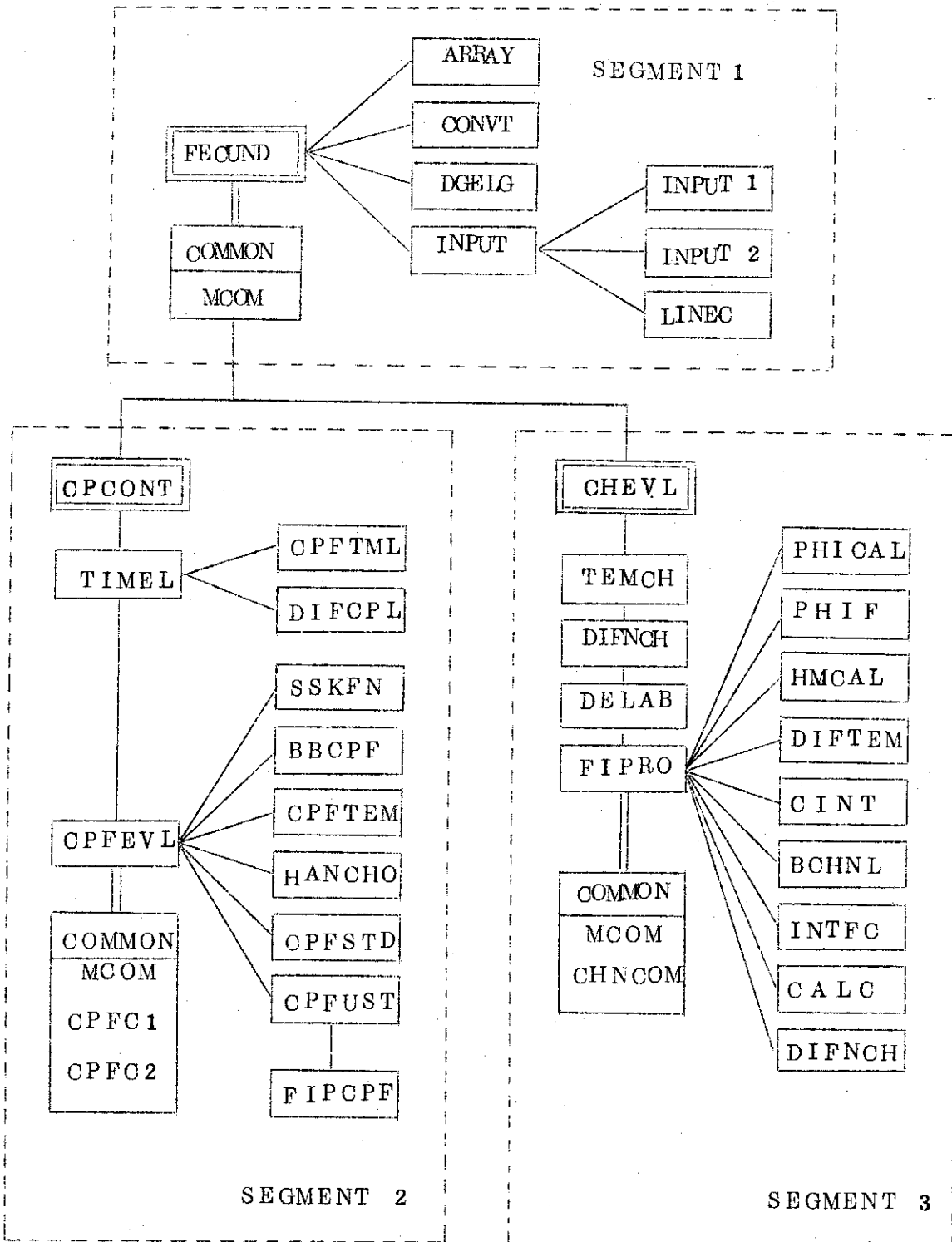


Fig. 6.1 Block diagram of the FECUND code.

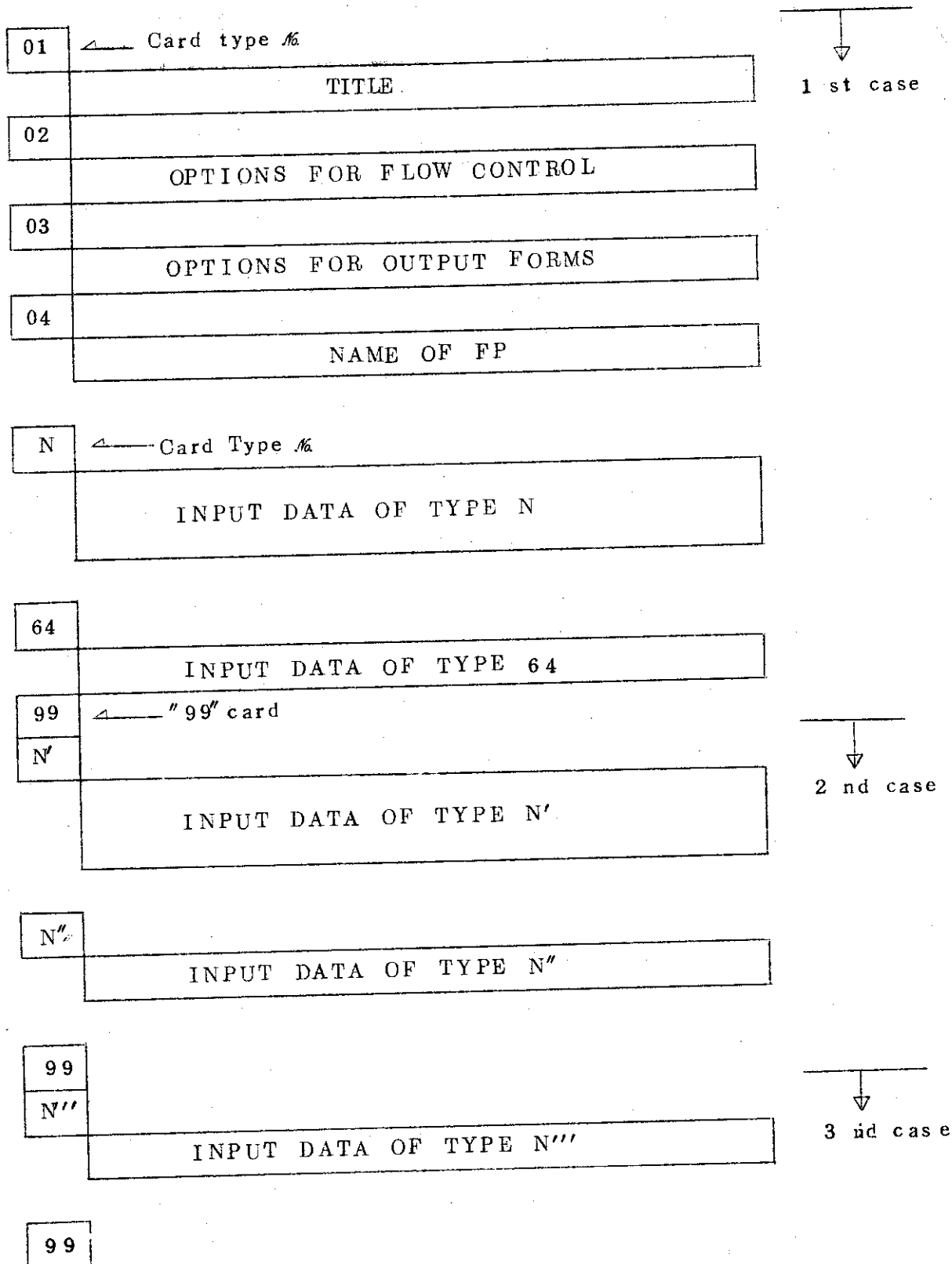
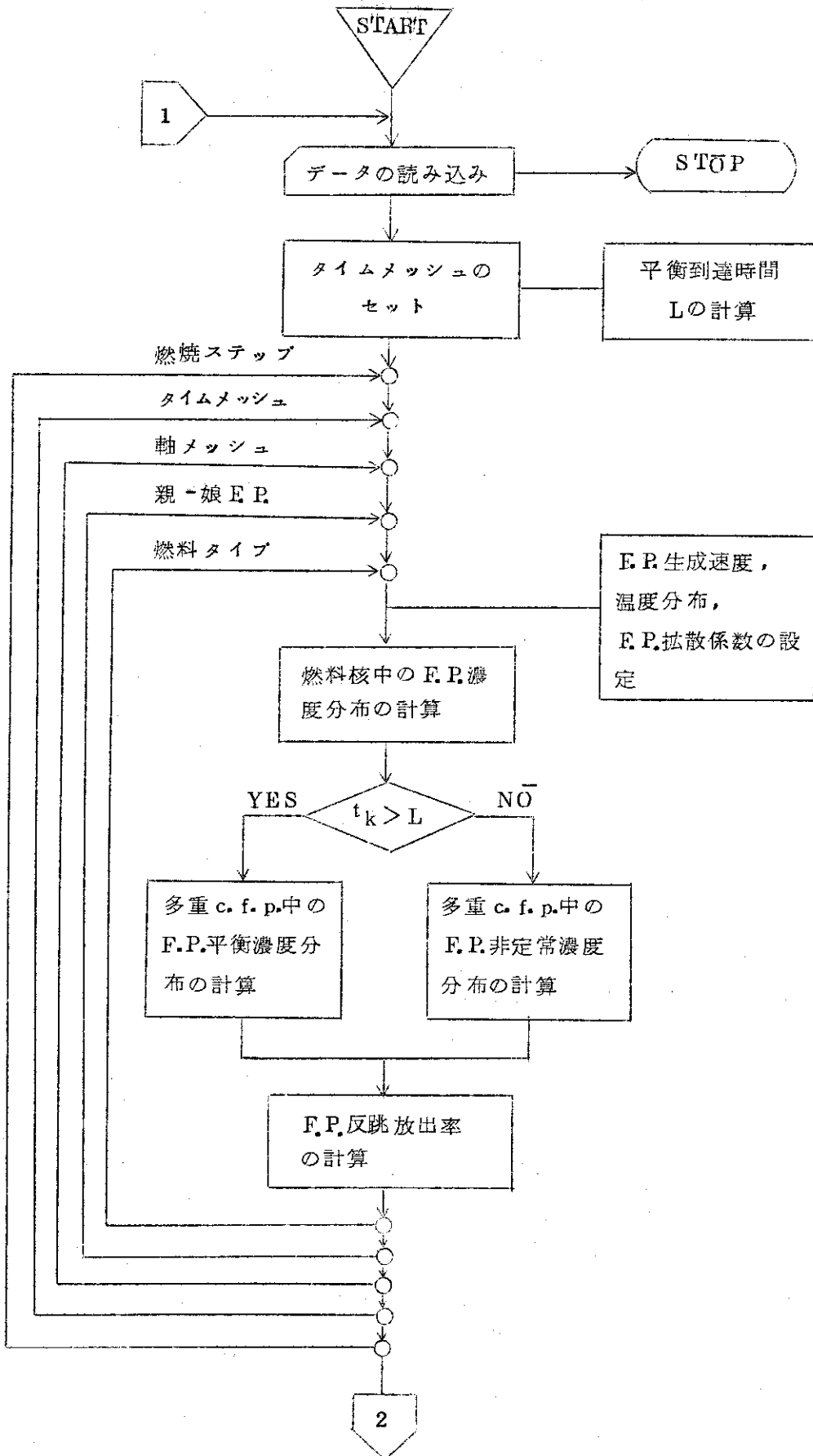


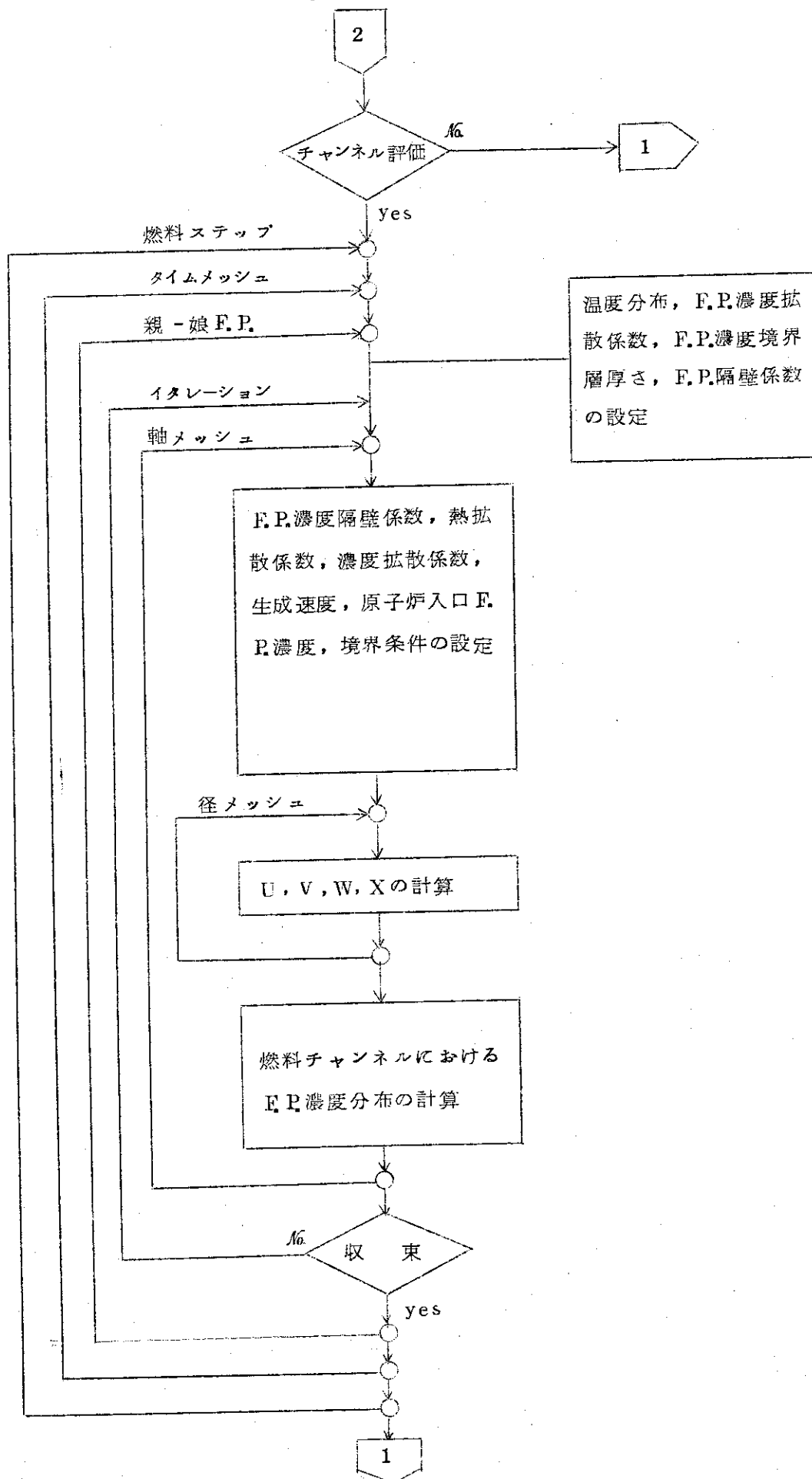
Fig. 6.2 Arrangement of input data cards



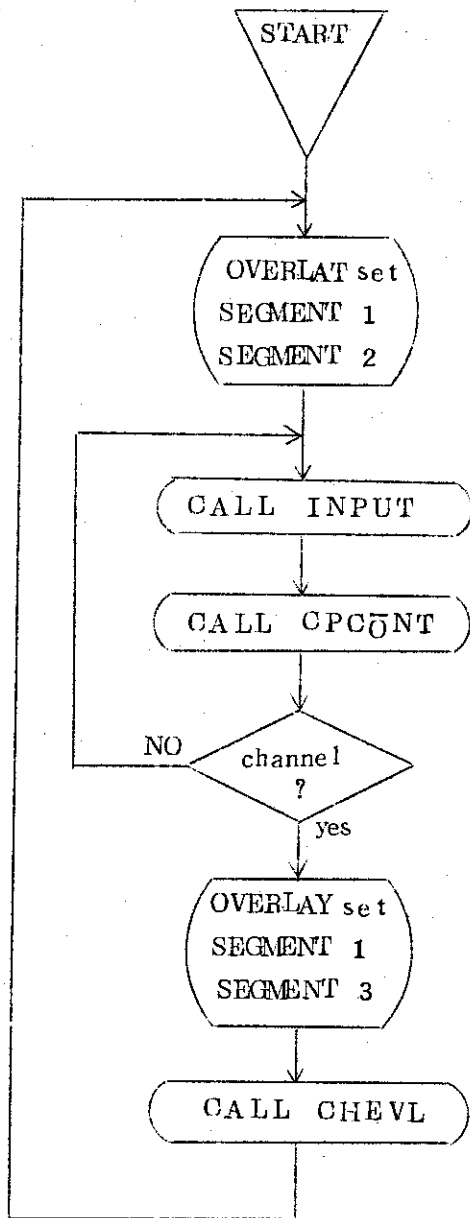
6.2 計算のフロー

6.2.1 計算フロー・ダイアグラム

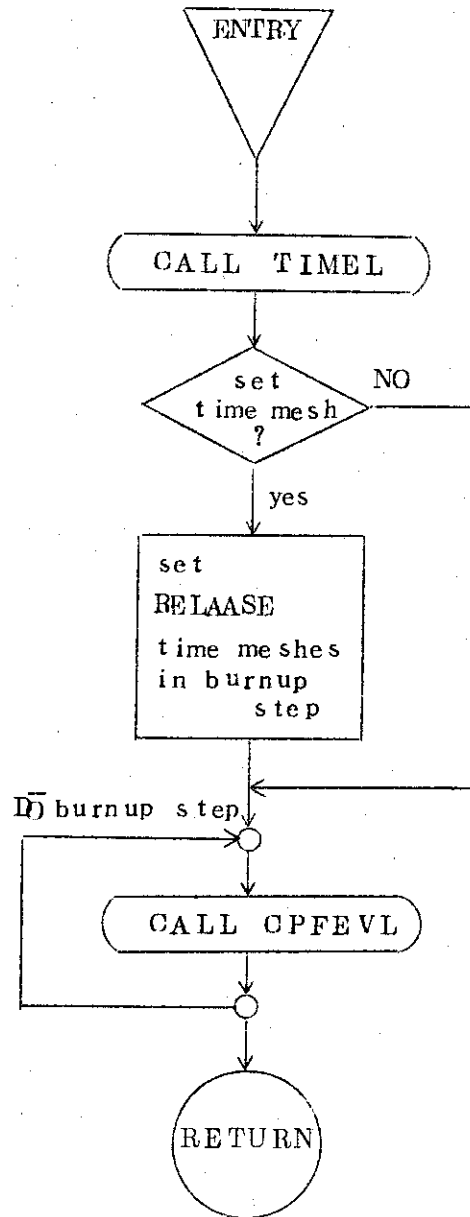




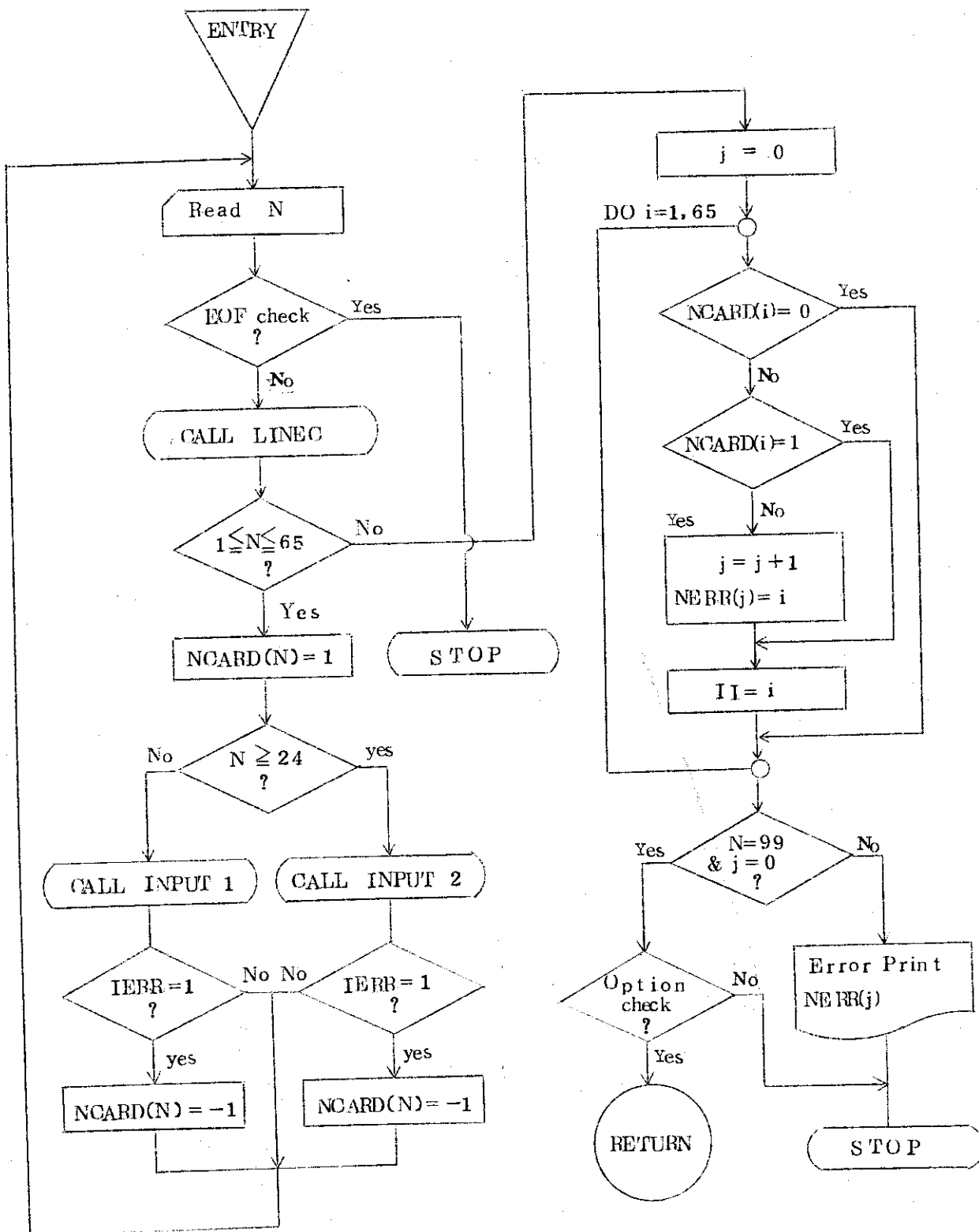
(1) MAINの計算フロー



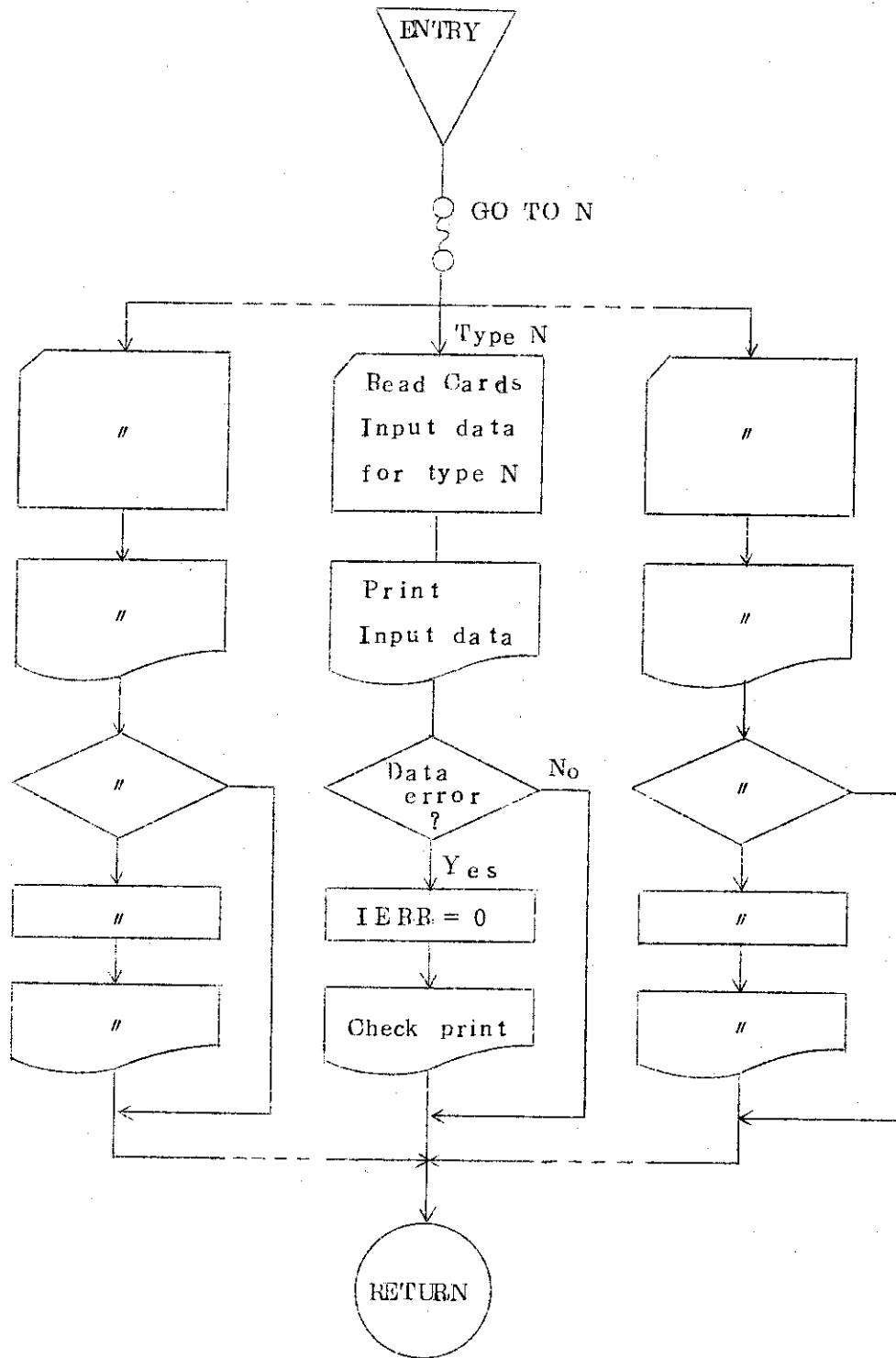
(2) CPCONTの計算フロー



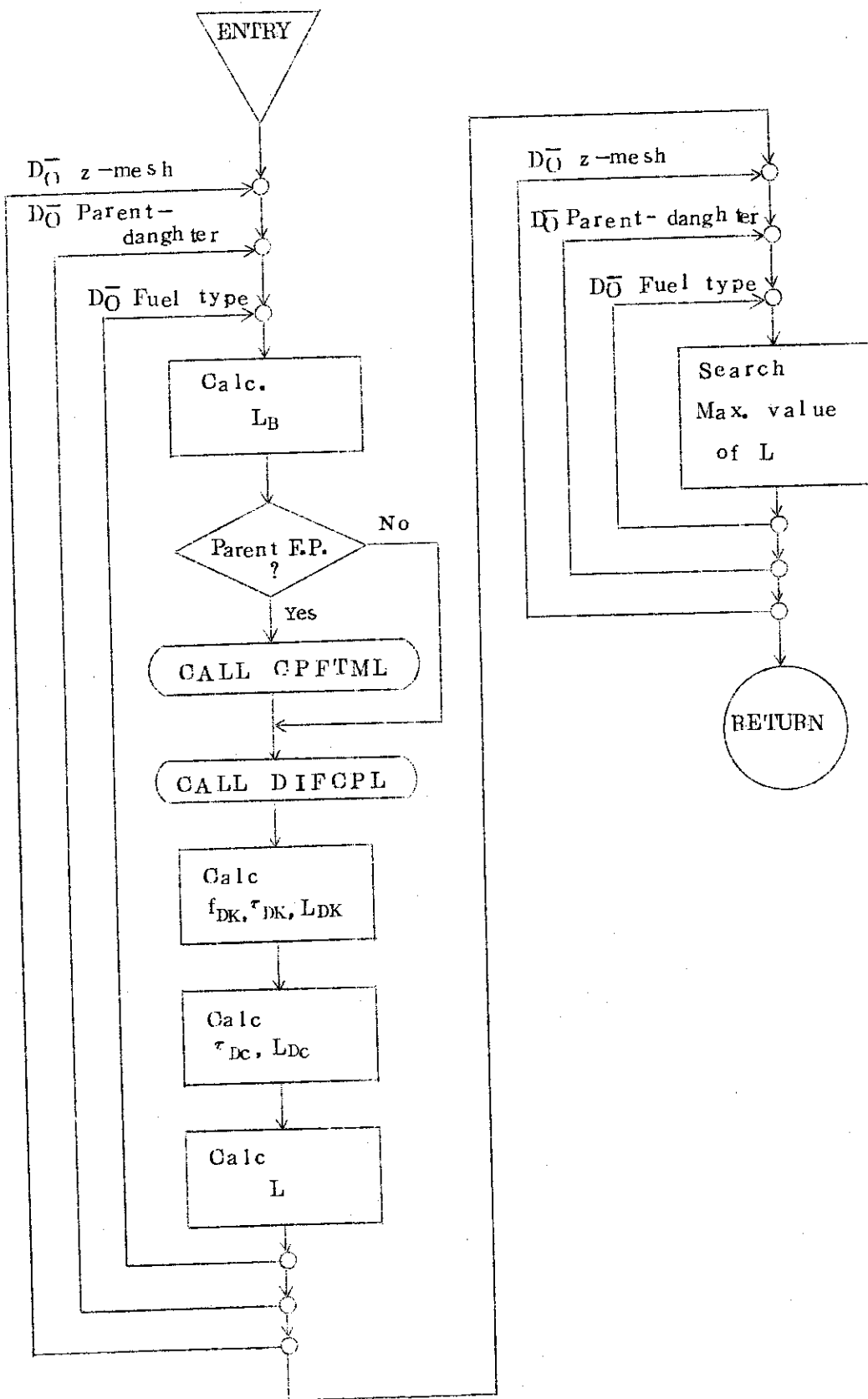
(3) INPUT の計算フロー



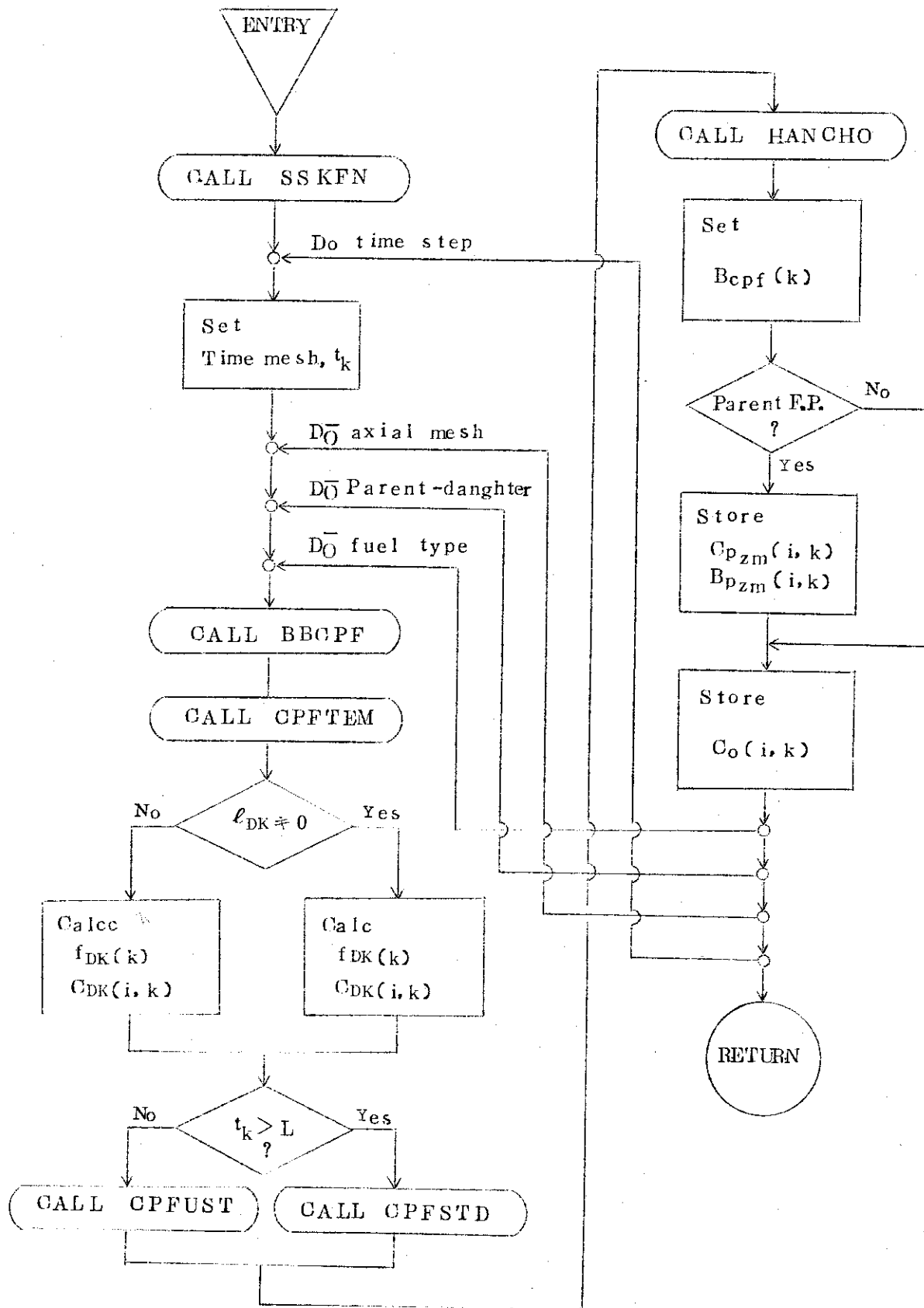
(4) INPUT1(N=1~23), INPUT2(N=24~65)の計算フロー



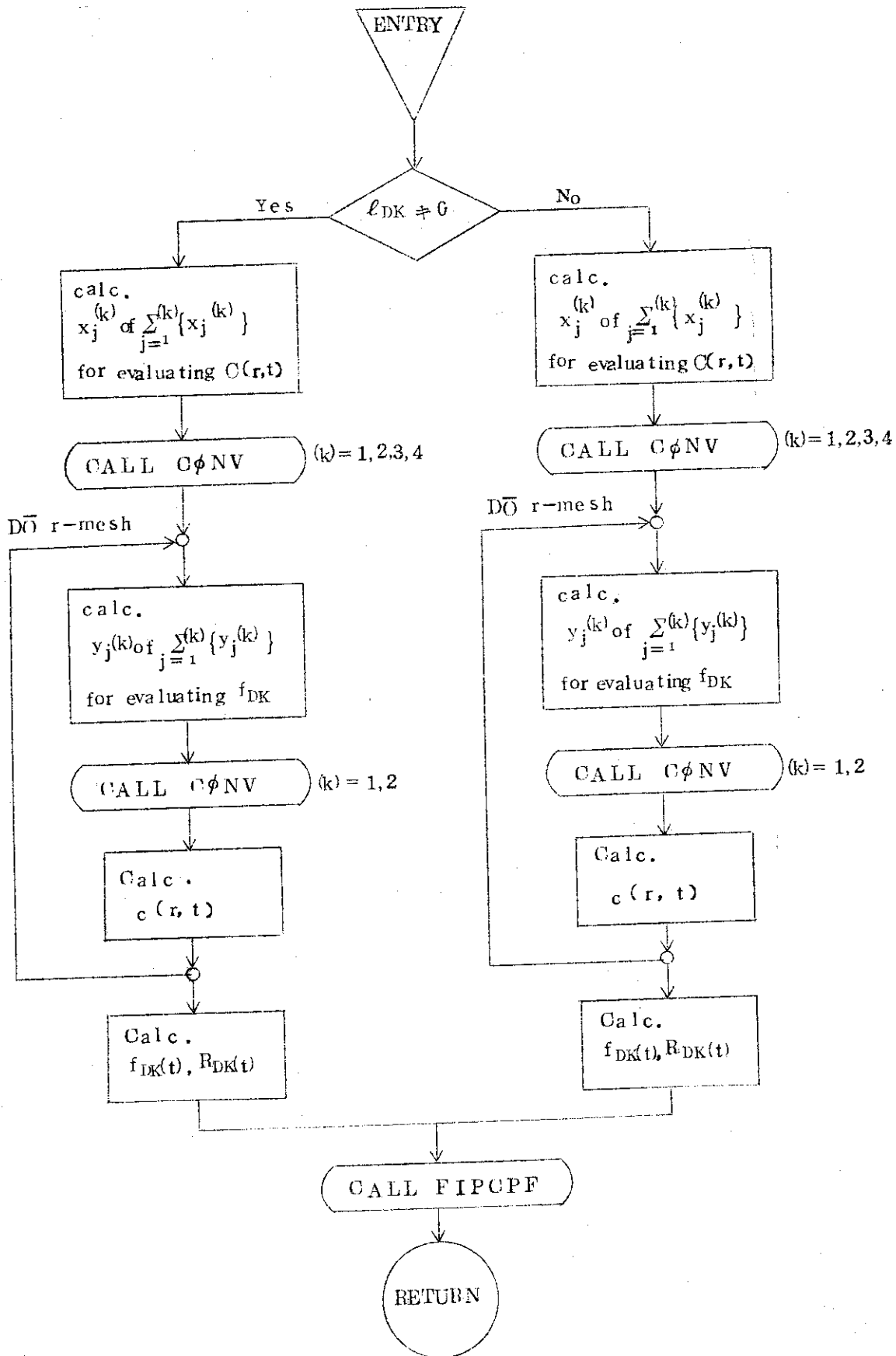
(5) TIMEL の計算フロー



(8) CPFEVL の計算フロー

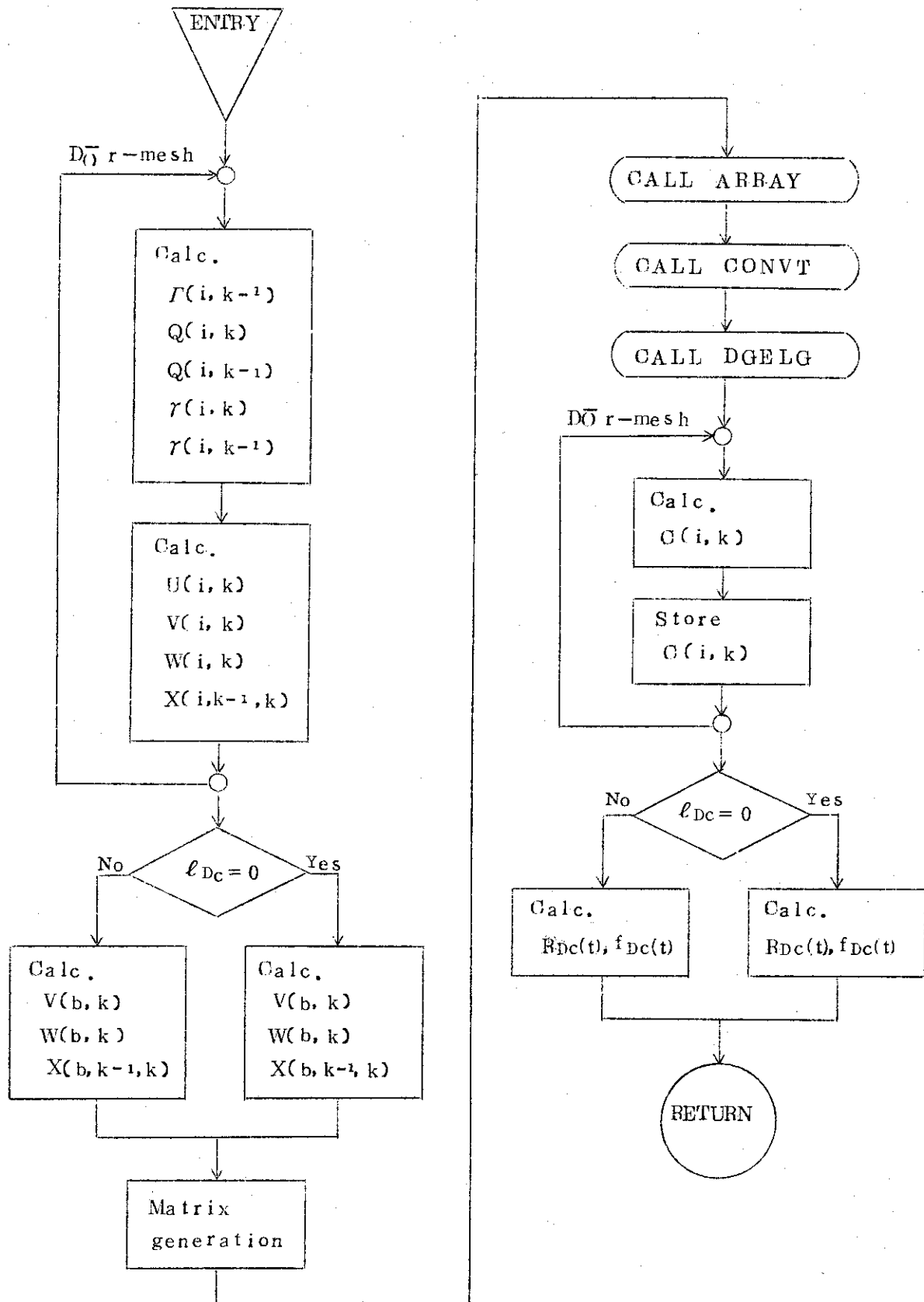


(7) CPFUST の計算フロー

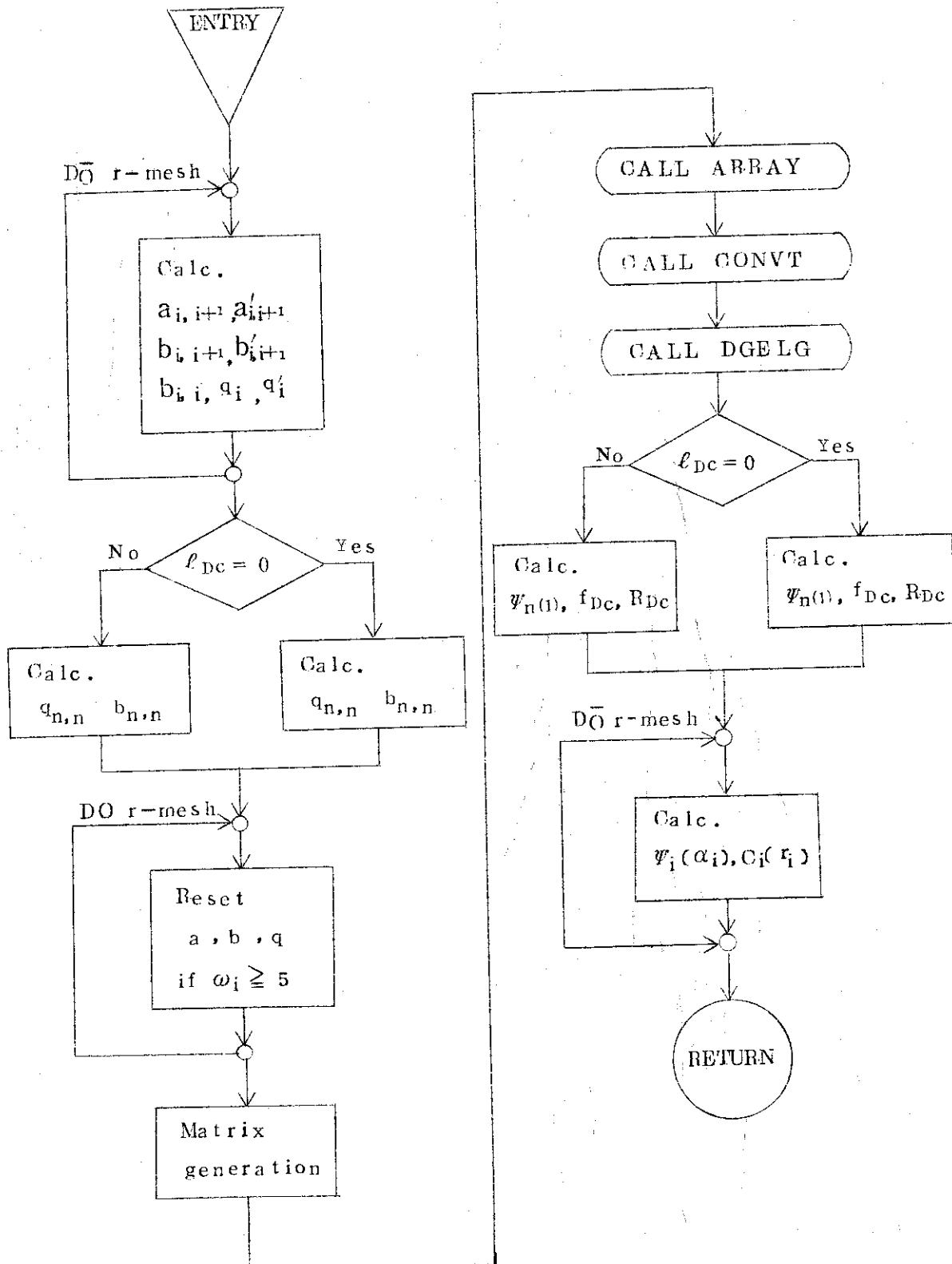




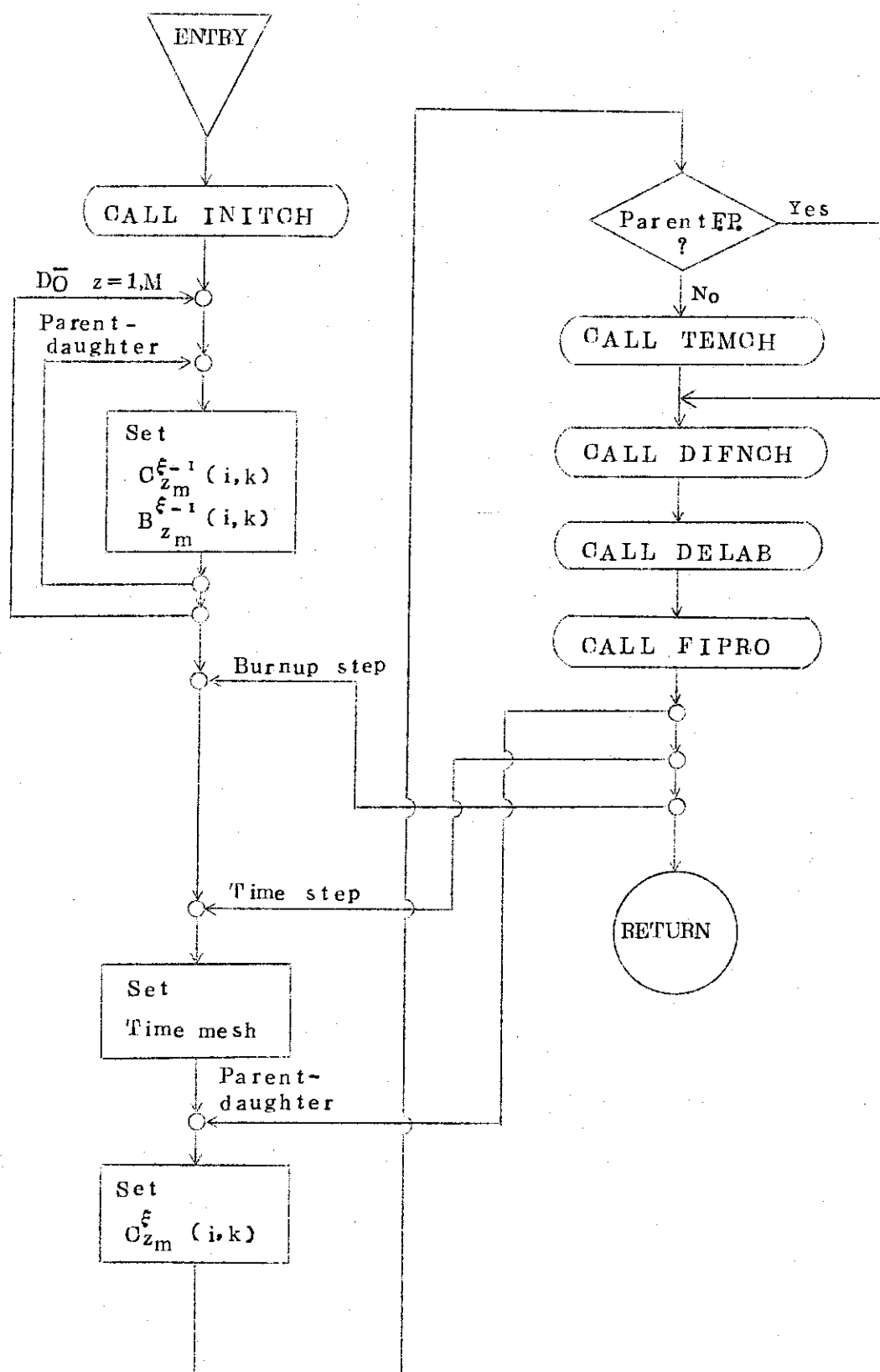
(8) FIPCPF の計算フロー



(9) OPFSTDの計算フロー

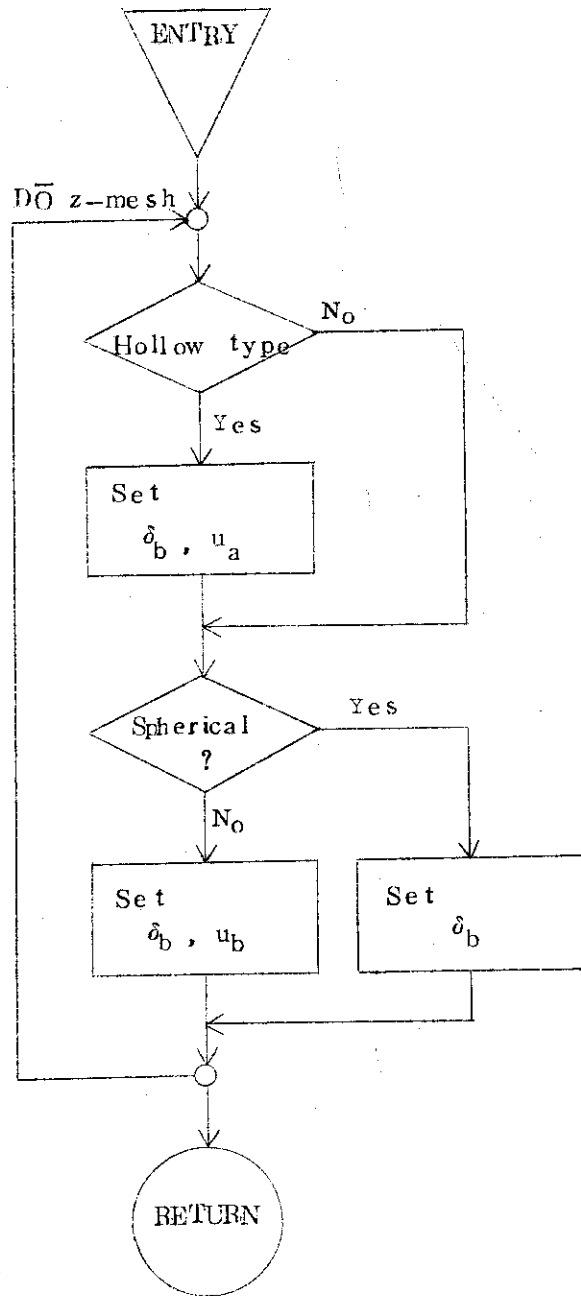
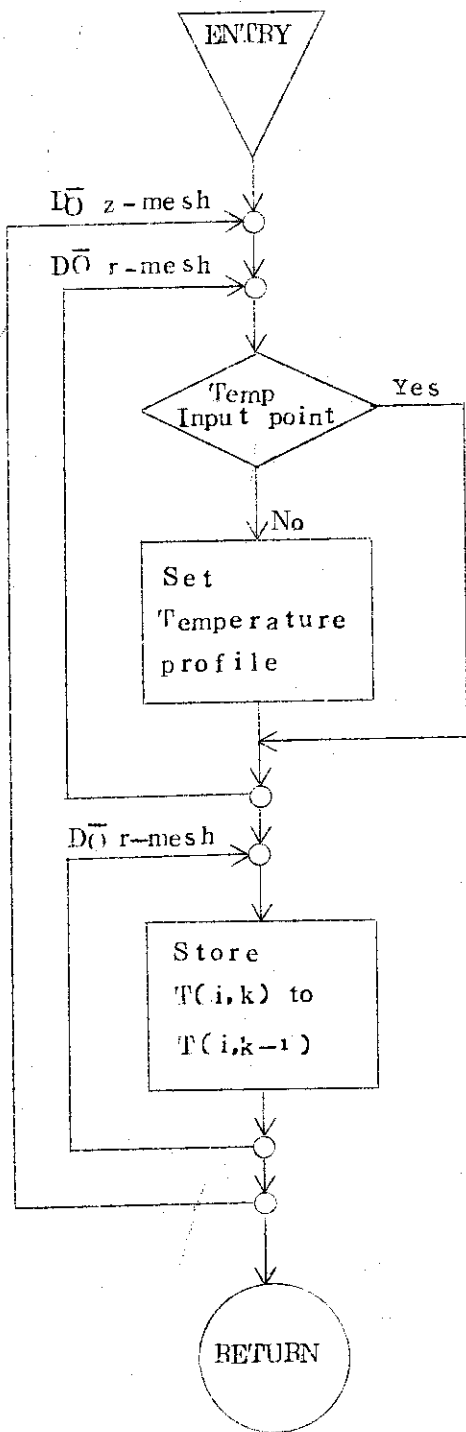


00 CHEVLの計算フロー

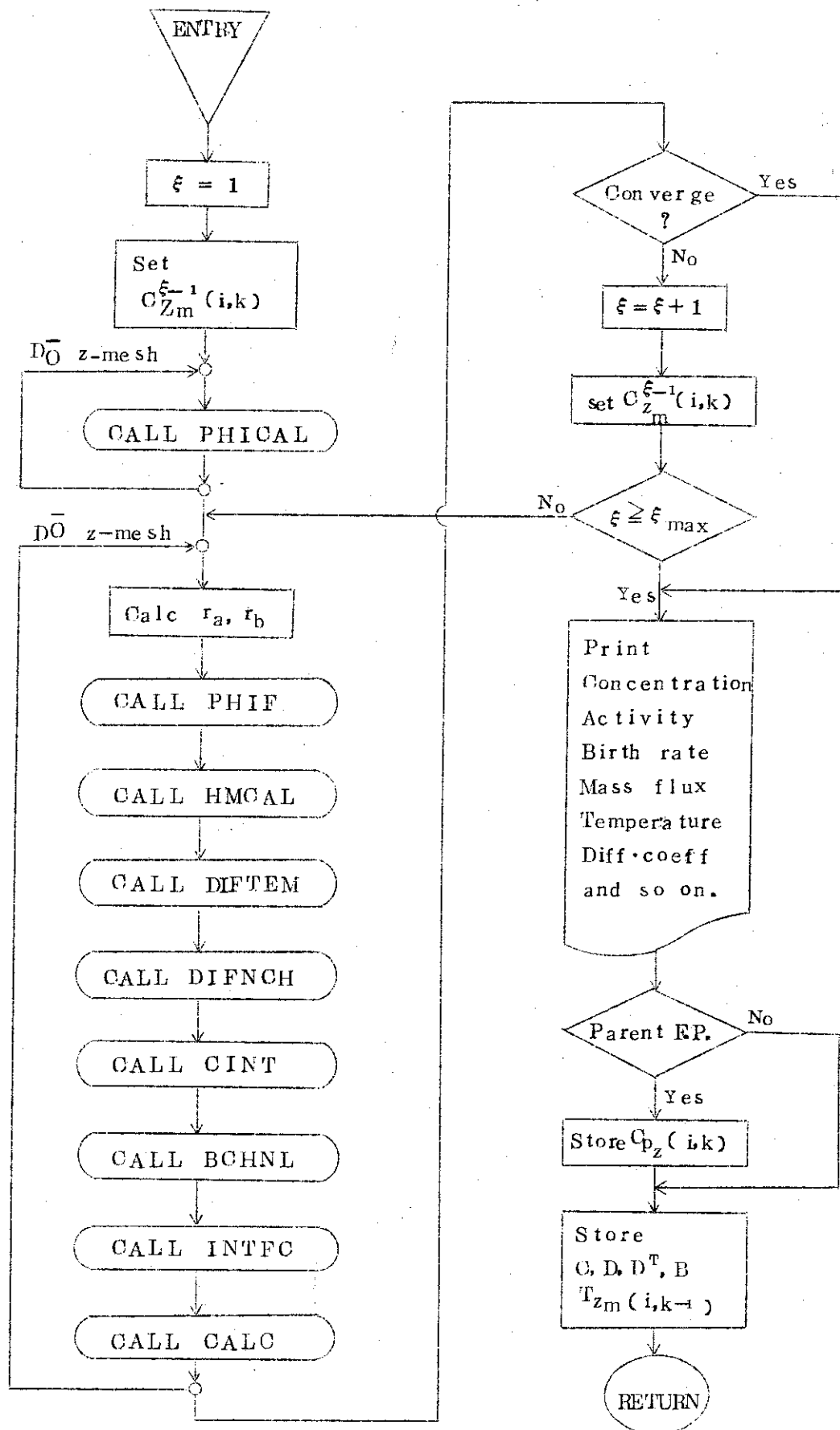


(1) TEMCH の計算フロー

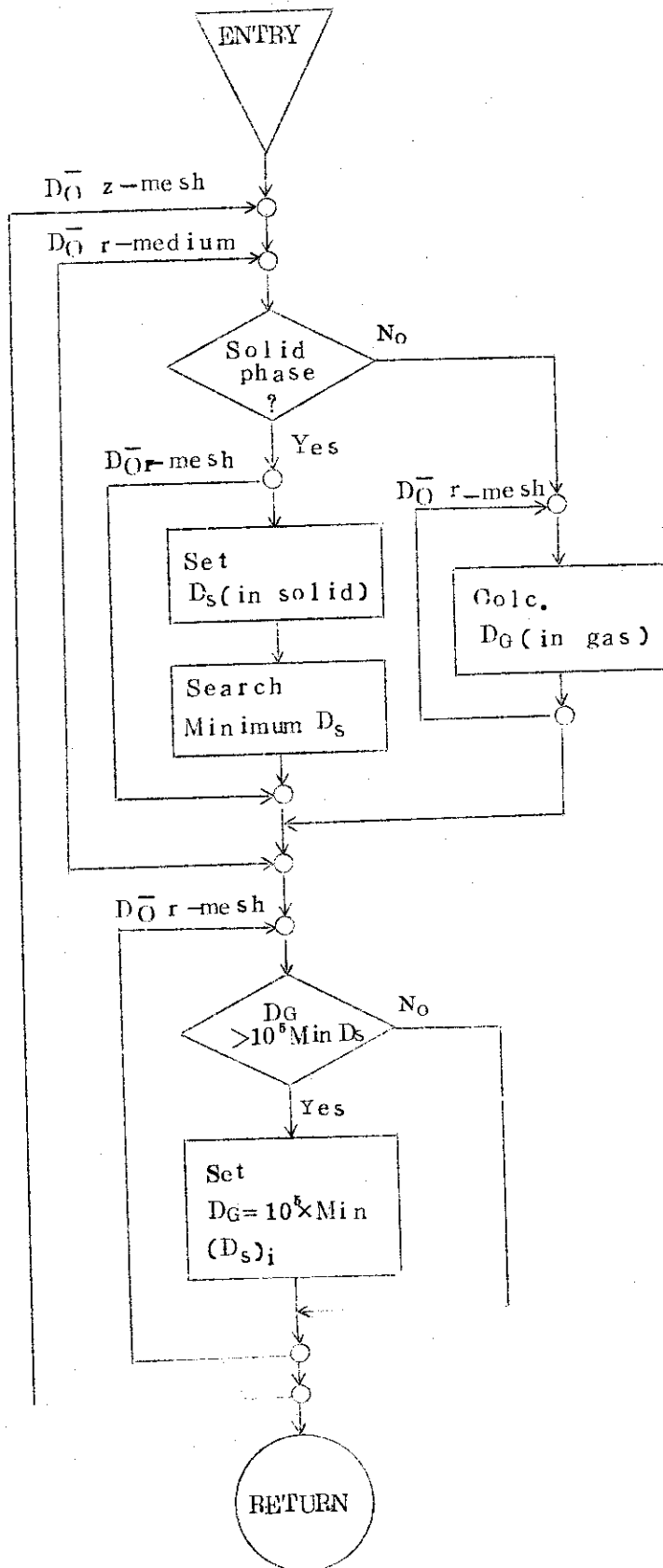
(2) DELAB の計算フロー



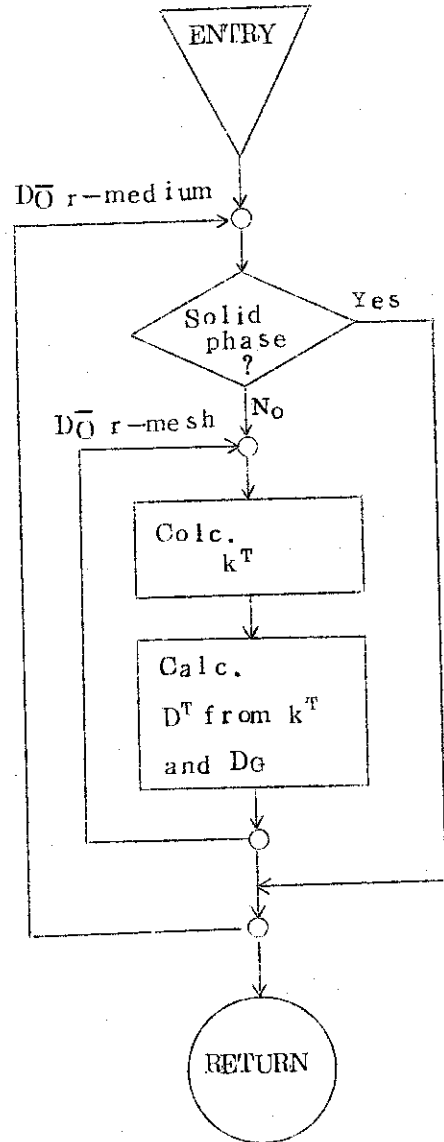
03 FIPR $\bar{0}$  の計算フロー



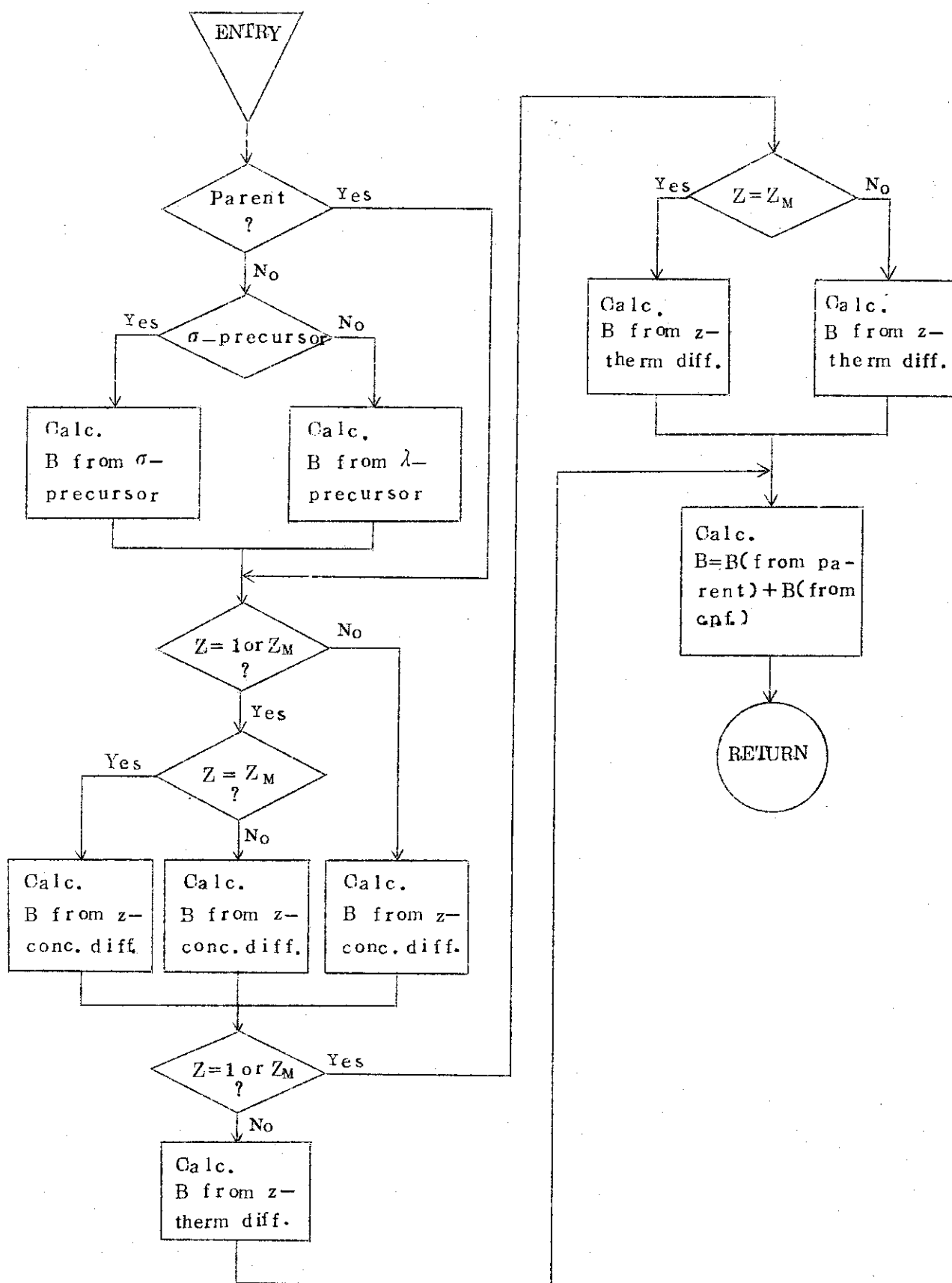
(4) DIFNCHの計算フロー



(5) DIFTEMの計算フロー



(10) BCHNL の計算フロー



(7) CALCの計算フロー

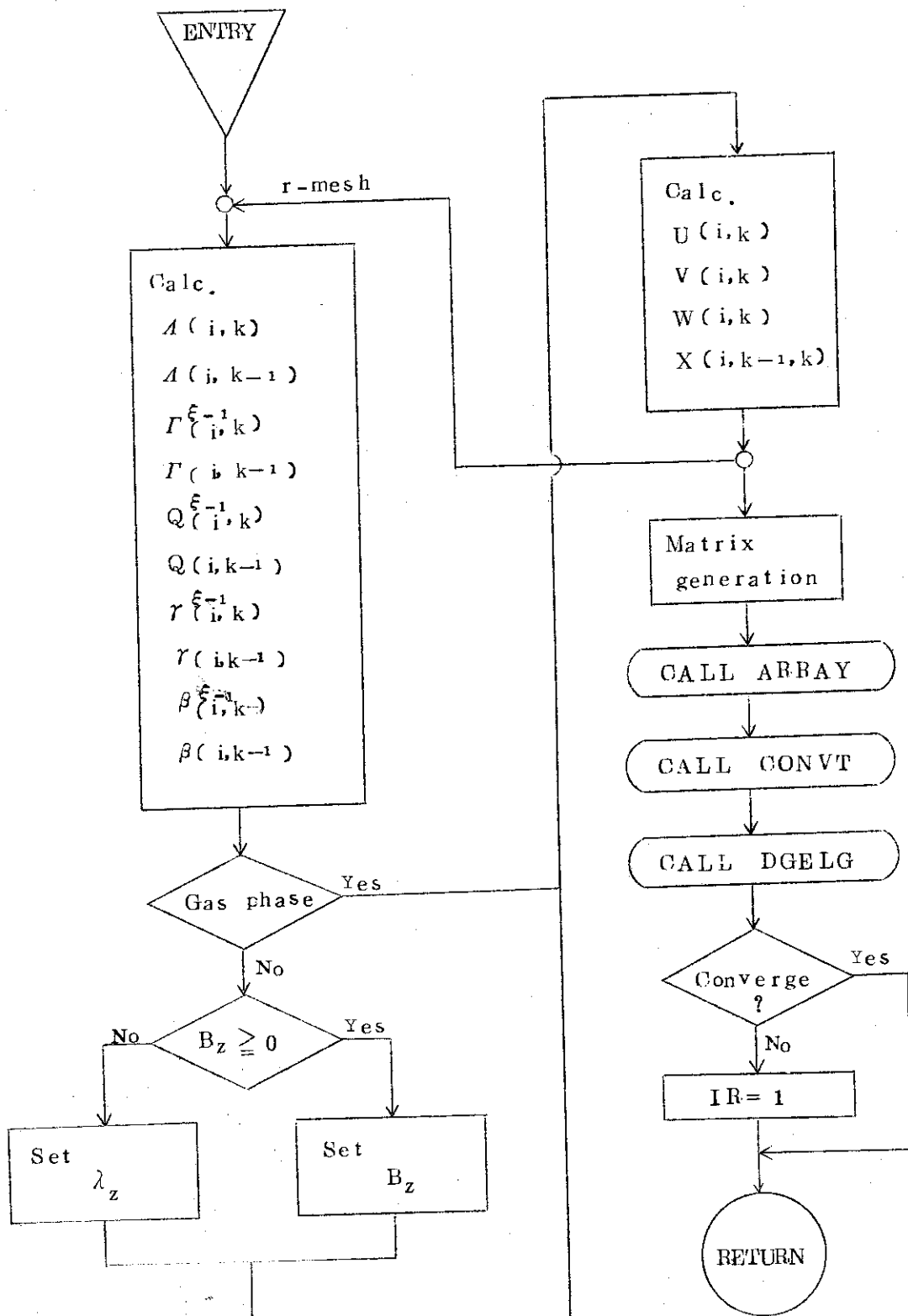




Table 6.2 Input variables and READ FORMAT

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
1	TITLE(i)(i=1, 18)	2X 18A4		Title. * Card type No. is followed by each input data cards (I2).
2	JOPTI(i)(i=1, 10)	2X, 24I3		Options for control of calculations. * See Table 6.3.
3	JOPTO(i)(i=1, 7)	2X, 24I3		Options for output forms. * See Table 6.4.
4	FPNAME(i)(i=1, J1)	2X, A8 4X, A8		Name of F.P. nuclide. * J1=2 if JOPTI(2)=1 i=1 : parent, i=2 : daughter * J1=1 if JOPTI(2)=2 i=1 : daughter
5	NFMX NZMX NCL NCGAS MCSGMX NBMX ITSBK	2X, 24I3	<i>l</i> M     J  K'	Number of c.f.p. types. (Max. 2) Number of axial meshes in a fuel channel. (Max. 16) Number of mediums in a fuel channel. (Max. 8) Number of mediums of gaseous phase in a fuel channel. (Max. 7) Number of gas-solid medium interfaces in a fuel channel. (Max. 7) Number of burnup steps. (Max. 10) * Burnup steps are prepared as data inputted points. Number of time points, when F.P. birth rates in fuel kernels are inputted. (BIRTH time mesh) (Max. 50). * BIRTH time mesh is independent on burnup step.

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
5	NTMAX		Nmax	Maximum number of RELEASE time meshes in every burnup step. (Max. 10) * Burnup steps are subdivided into time meshes (RELEASE time mesh) for calculating unsteady diffusional behavior of F.P.
	NTMIN		$\xi$ Nmin	Minimum number of RELEASE time meshes in every burnup step. (Max. 10)
	NZITMX		max	Maximum number of iteration calculation for F.P. behavior in a fuel channel.
	MPTMX			Number of radial points, where temperature rises are inputed, in a c.f.p. (Max. 30)
	MCTMX			Number of radial points, where temperatures are inputed, in a fuel channel. (Max. 30)
6	NPL(i)(i=1, NFMX)	2X, 24I3		Number of mediums in a c.p.f. (Max. 8) * Fuel kernel and each coating layer are called as medium.
7	DO i=1, NFMX RP(j,i)(j=1,NPL(i))	2X, 6E12.0	$r_i$	Outer radius of each medium in a c.f.p. [ cm]
8	DO i=1, NFMX NPM(j,i)(j=1,NPL(i))	2X, 24I3		Number of radial meshes in every medium in a c.f.p. * Total number of radial meshes in a c.f.p. (NPM(1,i)+NPM(2,i)+...+NPM(NPL(i),i)) should be smaller than 30.
9	RC(i)(i=1,NCL)	2X, 6E12.0	$r_i$	Outer radius of each medium in a fuel channel. [ cm]

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
10	NCM(i)(i=1,NCL)	2X, 24I3		Number of radial meshes in every medium in a fuel channel. * Total number of radial meshes in a fuel channel should be smaller than 30.
11	JSG(i)(i=1, NCL)	2X, 24I3		Classification of mediums in a fuel channel. =1 : Fuel matrix, =2 : Solid phase except fuel matrix, =3 : Gas phase except coolant, =4 : Coolant.
12	MCSG(i)(i=1,MCSGMX)	2X, 24I3		Inside medium No. of gas-solid medium interface in a fuel channel.
13	ZMESH(i)(i=1,NZMX)	2X, 6E12.0	$\Delta Z$	Axial mesh interval in a fuel channel. [cm]
14	DO i=1, NFMX DO j=1, NBMX RAPTP(k,j,i) (k=1, NZMX)	2X, 6E12.0	K	Fraction of broken particle. [-]
15	VOL(i)(i=1,NFMX)	2X, 6E12.0	V	Fractional volume of c.f.p. in a fuel matrix. [-] * All particles are regarded as intact particles.
16	MPT(i)(i=1,MPTMX)	2X, 24I3		Radial mesh point No., where temperature rise is inputed, in a c.f.p.
17	MCT(i)(i=1,MCTMX)	2X, 24I3		Radial mesh point No., where temperature is inputed, in a fuel channel.
18	DO i=1, NBMX+1 DO j=1, NFMX DTP(k,i,j) (k=1, MPTMX)	2X, 6E12.0	$T_i$	Temperature rise from outer most surface of intact particle. [°C] * Subscript k corresponds to i of MPT(i).

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
19	DO i=1, NBMX+1 DO j=1, NZMX TC(k,j,i) (k=1, MCTMX)	2X, 6E12.0	$T_i$	Temperature distribution in a fuel channel. [ $^{\circ}\text{C}$ ] * Subscript k corresponds to i of MCT(i). * Temperature data are required at medium interfaces, at least.
20	TBURN(i) (i=1, NBMX)	2X, 6E12.0	$T_j$	End time of each burnup step. [day]
21	NTRP(i) (i=1, NBMX)	2X, 24I3	K	Number of RELEASE time meshes in every burnup step. * These cards are required if JOPTI(4)=2 and/or JOPTI(1)=2.
22	DO i=1, NBMX TSRP(i,j) (j=1, NTRP(i))	2X, 6E12.0	$t_k$	RELEASE time mesh point in every burnup step. [day] * These cards are required if JOPTI(4)=2 and/or JOPTI(1)=2. * RELEASE time mesh point should be counted as time from the beginning of each burnup step.
23	TSBK(i)(i=1,ITSBK)	2X, 6E12.0	$t'_k$	BIRTH time mesh points when F.P. birth rates, in a fuel kernel, are inputted. [day]
24	DO i=1, NBMX DENSS(j,i)(j=1,NCL)	2X, 6E12.0		Density of solid phase at gas-solid medium interface in a fuel channel. [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] * Subscript j of DENSS(j,i) corresponds to the inner medium No. of gas-solid medium interface. * These cards are required if JOPTI(8)=1.
25	DO i=1, NBMX SPESS(j,i)(j=1,NCL)	2X, 6E12.0	$\gamma_p$	Specific surface area of solid phase at gas-solid medium interface in a fuel channel. [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]

CARD TYPE	FORTTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
25				<p>* Subscript j of SPESS(j,i) corresponds to the inner medium No. of gas-solid medium interface.</p> <p>* These cards are required if JOPTI(8)=1.</p>
26	DO i=1, NBMX POROS(j,i)(j=1,NCL)	2X, 6E12.0	$\epsilon_p$	<p>Porosity of solid phase at gas-solid medium interface in a fuel channel. [-]</p> <p>* Subscript j of POROS(j,i) corresponds to the inner medium No. of gas-solid medium interface.</p> <p>* These cards are required if JOPTI(8)=1.</p>
27	DO i=1, IIO FLOC(i,j)(j=1,NBMX)	2X, 6E12.0	G	<p>Coolant mass flow rate in coolant channels. [ g/cm<sup>2</sup>/sec ]</p> <p>* In case of spherical fuel elements coolant mass flow rate in a reactor core should be given in[g/sec] .</p> <p>* IIO=2 in case of annular fuel channel (i=1 : outside coolant, i=2 : inside coolant).</p> <p>* IIO=1 for the other channels.</p>
28	DO i=1, NBMX PGAS(j,i)(j=1,NCL)	2X, 6E12.0	P	<p>Total pressure at gas phase in a fuel channel. [atm]</p>
29	PB	2X, 6E12.0	$\epsilon$	<p>Packing fraction of spherical fuel elements in a reactor core.</p> <p>-</p> <p>* This card is required if JOPTI(5)=4.</p>
30	PBSUR(i)(j=1,NZMX)	2X, 6E12.0	S	<p>Reactor core cross section in case of spherical fuel elements.</p>

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
				* These cards are required if JOPTI(5)=4.
31	DO i=1, J1 DO j=1, NFMX DO m=1, NZMX CFPOP(m,k,j,i) (k=1, LL)	2X, 6E12.0	C(r,o)	Initial concentration distribution of F.P. in c.f.p. [ $\text{g-mol/cm}^3$ ] * LL : number of radial mesh point in c.f.p. * Concentration of F.P. in the outer medium should be inputed at the medium interface. * k=1 corresponds to the center of c.f.p. * These cards are required if JOPTI(6)=2.
32	DO i=1, J1 DO j=1, NZMX CFPOC(k,j,i) (k=1, MCR)	2X, 6E12.0	C(r,o)	Initial concentration distribution of F.P. in a fuel channel. [ $\text{g-mol/cm}^3$ ] * MCR : number of radial mesh points in a fuel channel. * Concentration of F.P. in the outer medium should be inputed at the medium interface. * k=1 corresponds to the inner boundary layer in case of annular fuel channel, and to the center of fuel channel for the other channel. * These cards are required if JOPTI(6)=2.
33	DO i=1, J1 DO j=1, NFMX DO l=1, NZMX BK(l,k,j,i) (k=1, ITSBK)	2X, 6E12.0	B <sub>o</sub>	F.P. birth rate in a fuel kernel in c.f.p. [ $\text{g-mol/cm}^3/\text{sec}$ ] * Subscript k corresponds to k of TSBK(k). * These cards are not required if JOPTI(1)=2.

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
34	DO i=1, NFMX CONT(j,i) (j=1, NPL(i))	2X 6E12.0	$\rho_i(d_i)$	Fuel contamination at outer surface of each medium in c.f.p. [-] * CONT(1, i)=1.0. * Definition is shown in Eq.(2-40).
35	DO i=1, NFMX CONTP(j,i) (j=1, NPL(i))	2X, 6E12.0	$\xi_i$	Fuel contamination parameter in each medium in c.f.p. [-] * CONTP (1,i)=0.0. * Definition is shown in Eq.(2-41).
36	DO i=1, J1 DO j=1, NBMX DO l=1, NTRP(j) BFPCP(j,l,m,i) (m=1, NZMX)	2X, 6E12.0	$B_{\text{cpf}}$	F.P. source, from released F.P. from c.f.p., in a fuel matrix. [g-mol/cm <sup>3</sup> /sec] * These cards are required if JOPTI(1)=2.
37	DO i=1, J1 DO j=1, NBMX CZIN(j,l,i) (l=1, NTRP(j))	2X, 6E12.0	$C_{\text{ZIN}}$	Concentration of F.P. in coolant at reactor entrance. [g-mol/cm <sup>3</sup> ] * These cards are required if JOPTI(7)=2.
38	DO i=1, J1 DO j=1, NFMX DIFOP(k,j,i) (k=1, NPL(j))	2X, 6E12.0	$D^0$	Frequency factor of concentration diffusion coefficient for F.P. diffusing in medium in c.f.p. [cm <sup>2</sup> /sec]
39	DO i=1, J1 DIFOC(j,i)(j=1,NCL)	2X 6E12.0	$D^0$	Frequency factor of concentration diffusion coefficient for F.P. diffusing in solid medium in a fuel channel. [cm <sup>2</sup> /sec]
40	DO i=1, J1 DO j=1, NFMX DIFEP(k,j,i) (k=1, NPL(j))	2X, 6E12.0	$\Delta E_D$	Activation energy of conc. diff. coeff. for F.P. diffusing in medium in c.f.p. [kcal/g-mol]
41	DO i=1, JJ DIFEC(j,i)(j=1,NCL)	2X, 6E12.0	$\Delta E_D$	Activation energy of conc. diff. coeff. for F.P. diffusing in solid medium in a fuel channel. [kcal/g-mol]

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
42	RECOK(i)(i=1,NFMX)	2X, 6E12.0	$l_{RK}$	Recoil length of F.P. in fuel kernel. [cm]
43	RECOC(i)(i=1,NFMX)	2X, 6E12.0	$l_{RC}$	Recoil length of F.P. in the outermost coating layer. [cm]
44	EXTRK  EXTRC	2X, 6E12.0	$l_{DK}$  $l_{DC}$	Linear extrapolation distance of F.P. from outermost surface of fuel kernel. [cm]  Linear extrapolation distance of F.P. from the surface of outermost coating layer. [cm]
45	DO i=1, J1 DO j=1, NFMX PARTP(l,j,i) (l=1, NPL(j))	2X, 6E12.0	$\phi$	Partition coefficient of F.P. at inner surface of each medium in c.f.p. [-] * $\phi_i = C_{i+1}(R_i)/C_i(r_i)$ .
46	DO i=1, J1 PARTC(j,i)(j=1,NCL)	2X, 6E12.0	$\phi$	Partition coefficients of F.P. at inner surface of each medium in a fuel channel. - * $\phi_i = C_i(r_i)/C_{i+1}(r_i)$ . * At gas-solid medium interfaces its coefficients are calculated.
47	DO i=1, J1 DO j=1, NCL AFR(j,i),BFR(j,i), CFR(j,i),DFR(j,i)	2X, 6E12.0	$a_{Fr}$ $b_{Fr}$ $c_{Fr}$ $d_{Fr}$	Freundlich isotherm constants of F.P. at gas-solid medium interfaces in a fuel channel. * Subscript j corresponds to the inner medium No. of gas-solid interface. * These cards are required if JOPTI(8)=2. * Dimensions of these constants are followed by Eq.(5-26).
48	RAND(i)(i=1, J1)	2X, 6E12.0	$\lambda$	Decay constant of F.P. [1/sec]
49	SIGA(i)(i=1,2)	2X, 6E12.0	$\sigma_p^{(g)}$	2-group absorption cross section of parent F.P. [barn]



CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
				* This card is required if JOPTI(2)=1 and JOPTI(10)=2. * i=1 : thermal, i=2 : fast.
50	DO i=1, 2 DO j=1, ITSBK FLUXN(k,j,i) (k=1, NZMX)	2X, 6E12.0	$\varphi$ (g)	2-group neutron flux in a fuel channel [n/cm <sup>2</sup> /sec] * Subscript j correspond S to j of TSBK(j). * i=1 : thermal, i=2 : fast.
51	NATOM(i)(i=1, J1)	2X, 24I3		Atomic number of F.P.
52	MASS(i)(i=1, J1)	2X, 24I3	$M_i$	Mass number of F.P.
53	SMI(i)(i=1, J1), SMG	2X, 6E12.0	$M_i$ $M_G$	Atomic weight of F.P. [amu] Atomic weight of coolant gas. [amu]
54	SIGI(i)(i=1, J1), SIGG	2X, 6E12.0	$\sigma_i$ $\sigma_G$	Atomic diameter of F.P. [ $\text{\AA}$ ] Atomic diameter of coolant gas. [ $\text{\AA}$ ]
55	IGR(i)(i=1, J1)	2X, 24I3		Number of atoms for gaseous state of F.P.
56	TMP(i)(i=1, J1)	2X, 6E12.0	$T_{mp}$	Melting point of F.P. [ $^{\circ}\text{K}$ ]
57	TBP760(i)(i=1, J1), TBP100(i)(i=1, J1)	2X, 6E12.0	$T_{bp}^{(760)}$ $T_{bp}^{(100)}$	Boiling point of F.P. under pressure of 760 mmHg. [ $^{\circ}\text{K}$ ] Boiling point of F.P. under pressure of 100 mmHg. [ $^{\circ}\text{K}$ ]
58	DO i=1, J1 AGS(i), BGS(i), CGS(i), DGS(i)	2X, 6E12.0	A B C D	Temperature coefficients for vapour pressure of solid state F.P. * These cards are required if JOPTI(8)=1. * Dimensions of these constants are followed by Eq. (5-38).

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
59	DO i=1, J1 AGL(i), BGL(i), CGL(i), DGL(i)	2X, 6E12.0	A B C D	Temperature coefficients for vapour pressure of liquid state F.P. * These cards are required if JOPTI(8)=1. * Dimensions of these constants are followed by Eq. (5-38).
60	PURIF(i) (i=1, NBMX)	2X, 6E12.0	$\alpha$	Coolant flow by-pass fraction to the F.P. purification system. [-] * These cards are required if JOPTI(7)=1.
61	DO i=1, J1 PLATE(j,i) (j=1, NBMX)	2X, 6E12.0	$\beta$	F.P. plateout fraction in a cool- ant loop. [-] * These cards are required if JOPTI(7)=1.
62	EIG(i)(i=1, J1)  EGG	2X, 6E12.0	$(\epsilon/K)_i$  $(\epsilon/K)_G$	Lenard-Johnes parameter of F.P. nuclide. [ $^{\circ}$ K] * In case of gaseous F.P. nuclide it is preferable to give data. See Table A3.  Lenard-Johnes parameter of cool- ant gas. [ $^{\circ}$ K] * See Table A3.
63	TLOOP  WEIGH  EPSZ	2X, 6E12.0	$\tau$  $\Omega$  $\epsilon_{IT}$	Circulation time of coolant flow in a primary loop. [sec] * Data is required if JOPTI(7)=1.  Weighing parameter for F.P. accumulation term. [-] * Definition is shown in Eq.(2-87).  Convergency factor for iteration calculation of F.P. in a fuel channel. -

CARD TYPE	FORTRAN SYMBOL	FORMAT	SYMBOL IN TEXT	REMARKS
64	DO i=1, J1 DIFFCC(j,i) (j=1, NCL)	2X, 6E12.0	$f_i$	Concentration coefficient of F.P. diffusion coeff. in solid phase in a fuel channel. [ $\text{cm}^3/\text{g-mol}$ ] * Definition is shown in Eq.(5-3 <sub>b</sub> ).
65	DO i=1, J1 CDIREF(j,i) (j=1, NCL)	2X, 6E12.0	$C_i^0$	Reference concentration for F.P. diffusion coeff. in solid phase in a fuel channel. [ $\text{g-mol}/\text{cm}^3$ ] * Definition is shown in Eq.(5-3 <sub>b</sub> ).

Table 6.3 Options, JOPTI(i), for controls of calculational flow

SYMBOL	VALUE	CONTENTS
JOPTI(1)	= 1	Calculations of F.P. behaviors in c.f.p. and in a fuel channel.
	= 2	Calculations of F.P. behaviors in a fuel channel. * F.P. source from released F.P. from c.f.p. in fuel matrix is required as input data.
	= 3	Calculations of F.P. behaviors only in c.f.p.
JOPTI(2)	= 1	Coupling calculations for parent-daughter F.P. pair.
	= 2	Calculations only for the single F.P. nuclide.
JOPTI(3)	= 1	Iterative calculations for F.P. behaviors in a fuel channel.
	= 2	Once through calculations for F.P. behaviors in a fuel channel.
JOPTI(4)	= 1	RELEASE time meshes are prepared in the code.
	= 2	RELEASE time mesh points in every burnup step are required as input data.
JOPTI(5)	= 1	Cylindrical solid fuel channel.
	= 2	Cylindrical hollow fuel channel.
	= 3	Annular fuel channel.
	= 4	Spherical fuel element.
JOPTI(6)	= 1	Initial concentrations of F.P. are zero, in c.f.p. and/or a fuel channel.
	= 2	Initial concentration distributions of F.P. in c.f.p. and/or a fuel channel are required as input data.
JOPTI(7)	= 1	Concentrations of F.P. in coolant at reactor entrance are prepared in the code.
	= 2	They are required as input data.
JOPTI(8)	= 1	F.P. partition coefficients at gas-solid medium interfaces in a fuel channel are prepared in the code.
	= 2	Freundlich isotherm constants of F.P. at gas-solid medium interfaces in a fuel channel are required as input data.
JOPTI(9)	= 1	Evaluation of thermal diffusion of F.P. in gas phase in

SYMBOL	VALUE	CONTENTS
	= 2	a fuel channel. No evaluation of thermal diffusion of F.P.
JOPTI(10)	= 1	Parent nuclide is $\lambda$ -precursor.
	= 2	Parent nuclide is $\sigma$ -precursor. * This option is required if JOPTI(2)=1.

Table 6.4 Options for control of output forms

SYMBOL	VALUE	CONTENTS
JOPTO(1)	= 1	[ n/cm <sup>3</sup> ] : Dimension of F.P. concentration for outputs.
	= 2	[ g-mol/cm <sup>3</sup> ] : Dimension of F.P. concentration for outputs.
JOPTO(2)	= 1	Outputs of various quantities concerning parent-daughter pair.
	= 2	Outputs of various quantities concerning daughter only.
JOPTO(3)	= 1	Outputs of various quantities about F.P. at every radial point in c.f.p.
	= 2	No output of various quantities about F.P. at every radial point in c.f.p.
JOPTO(4)	= 1	Outputs of F.P. concentrations and birth rates in a fuel channel at each iteration calculation.
	= 2	No output of them at each iteration calculation, but outputs of them only after convergence.
JOPTO(5)	= 1	Outputs of F.P. inventories in every medium in a fuel channel.
	= 2	No output of them.
JOPTO(6)	= 1	Outputs of F.P. total activities in every medium in a fuel channel.
	= 2	No output of them.
JOPTO(7)	= 1	Outputs of F.P. effective R/B in a fuel channel.
	= 2	No output of them.

Table 6.5 Required input cards for each option value of JOPTI

CARD TYPE	JOPTI (1)			JOPTI(4)	JOPTI(7)	JOPTI(8)
	= 1	= 2	= 3	= 1	= 1	= 1
1						
2	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*		*
4						
5	*	*	*	*	*	*
6	*		*	*		
7	*		*	*		
8	*		*	*		
9	*	*				*
10	*	*		*		
11	*	*	*	*	*	*
12	*	*				*
13	*	*			*	
14	*		*			
15	*		*			
16	*		*	*		
17	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*		
19	*	*	*	*	*	*
20	*	*	*	*	*	*
21						
22						
23	*		*			
24	*	*				*
25	*	*				*
26	*	*				*
27	*	*			*	
28	*	*			*	*
29						
30						
31						
32						
33	*		*			
34	*		*	*		
35	*		*	*		

JAERI-M 4883

CARD TYPE	JOPTI (1)			JOPTI(4)	JOPTI(7)	JOPTI(8)
	= 1	= 2	= 3	= 1	= 1	= 1
36						
37						
38	*		*	*		
39	*	*				
40	*		*	*		
41	*	*				
42	*		*			
43	*		*			
44	*		*			
45	*		*	*		
46						
47						
48	*	*	*	*	*	
49						
50						
51	*	*				*
52	*	*				*
53	*	*				*
54	*	*				*
55	*	*				*
56						*
57						*
58						*
59						*
60					*	
61					*	
62	*	*			*	*
63	*	*			*	*
64						
65						



## 6.4 出力データの説明

本コードの出力は次の3種に大別される。即ち(i)インプット諸量のアウトプット、(ii)c.f.p.からのF.P.放出に関する諸量のアウトプット、(iii)燃料チャンネル中でのF.P.移動挙動に関する諸量のアウトプット、である。(i)についてはカード毎ごとにインプット・データのアウトプットを行なうので、本節では(ii)、(iii)についての説明を行なう。アウトプットの形式に関するオプションをTable 6.4に示した。

## 6.4.1 被覆燃料粒子からのF.P.放出に関する出力量

## (1) 体形幾何形状

c.f.p.燃料タイプ毎の、被覆層破損率、燃料マトリックス中のc.f.p.体積率。

## (2) 平衡到達時間と無次元平衡到達時間

c.f.p.燃料タイプ毎、被覆層破損ならびに非破損毎、親ならびに娘F.P.核種毎、軸メッシュ毎の平衡到達時間と無次元平衡到達時間。

## (3) c.f.p.からのF.P.放出率

c.f.p.燃料タイプ毎、被覆層破損ならびに非破損毎、親ならびに娘F.P.核種毎、軸メッシュ毎の、c.f.p.からの拡散、反跳放出率。

## (4) 諸物性値

c.f.p.燃料タイプ毎、親ならびに娘F.P.核種毎、領域毎、タイムメッシュ毎の温度、F.P.生成速度、F.P.拡散係数、F.P.濃度隔壁係数の内外挿値。

## (5) F.P.濃度、放射能分布

タイムメッシュ毎、軸メッシュ毎、c.f.p.内径メッシュ毎に計算されたF.P.濃度 $C_i$ を出力する。その濃度に対応する放射能 $AC_i$ を次式により求め出力する。

$$AC_i = \frac{6.02544 \times 10^{13}}{3.7} \lambda \cdot C_i \quad (6-1)$$

但し、

$$\begin{aligned} AC_i & ; \text{F.P.放射能} & [C_i / \text{cm}^3] \\ C_i & ; \text{F.P.濃度} & [\text{g-mol} / \text{cm}^3] \\ \lambda & ; \text{F.P.崩壊定数} & [1 / \text{sec}] \end{aligned}$$

## (6) F.P.の径方向物質流束

タイムメッシュ毎、軸メッシュ毎、c.f.p.各層界面毎に径方向の物質流束 $j_m$ を次式により算出し出力する。

被損c.f.p.において、

$$j_m = \frac{R_{DK}(t)}{4\pi r_0^2} \quad (6-2)$$

但し、

$j_m$  ; 燃料核表面からのF.P.の物質流速 [ g-mol/cm<sup>2</sup>/sec ]

$r_0$  ; 燃料核半径 [ cm ]

$R_{DK}(t)$  ; 燃料核よりのF.P.の拡散放出速度 [ g-mol/sec ]

非破損のc.f.p.における定常状態で、

$$\frac{\alpha_m \cdot j_m}{D_m' \cdot r_m \cdot B_0} = \frac{1}{\alpha_m} \cdot \{A_m^* + B_m^*\} + \rho_m(\alpha_m) \cdot \frac{\xi_m}{1 + \xi_m} - \{A_m^* \cdot \omega_m \cdot \coth(\omega_m \cdot \alpha_m) + B_m^* \cdot \omega_m \cdot \tanh(\omega_m \cdot \alpha_m)\} ; m=0,1,2,\dots, n-1 \quad (6-3)$$

$$j_m = \frac{R_{DK}(\infty)}{4\pi r_n^2} ; m=n, \quad (6-4)$$

但し、記号は2.2.2と同じであり、

$B_0$  ; 燃料核におけるF.P.生成速度 [ g-mol/cm<sup>3</sup>/sec ]

$r_n$  ; c.f.p.半径 [ cm ]

非破損c.f.p.における非定常状態で

$$j_m = -D(m - \frac{1}{2}) \cdot \frac{C_m - \phi_{m-1} \cdot C_{m-1}}{r_m - r_{m-1}} \quad (6-5)$$

とする。

#### 6.4.2 燃料チャンネル中のF.P.の拡散に関する出力量

##### (1) 冷却材中のF.P.濃度境界層厚さ

タイムメッシュ毎、軸メッシュ毎の内側ならびに外側冷却材中のF.P.濃度境界層厚さを出力する。その際に冷却材の温度、質量流量、粘性係数、密度、流速、レイノルズ数、シェミット数、F.P.物質移動係数も同時に出力し、球型燃料要素体系では、さらに球型燃料の充填率、炉断面積を出力する。

##### (2) 諸物性値

タイムメッシュ毎、領域毎に温度の内外挿値を出力し、さらに親ならびに娘にF.P.核種毎の濃度拡散係数、熱拡散係数、濃度拡散係数の計算値を出力する。

##### (3) F.P.生成源

タイムメッシュ毎、領域毎にF.P.生成源を(i)c.f.p.より放出されたF.P.源、(ii)親核種の消滅による生成源、(iii)軸方向移動による生成源、(iv)全生成源に分けて各々の量を出力する。

##### (4) F.P.濃度、放射能分布

タイムメッシュ毎、領域毎、親ならびに娘F.P.核種毎にF.P.濃度を出力し、放射能についても(6-1)式と同様の計算を行なって出力する。反復計算毎の出力を行なうか収束後のみ出力を行なうかは、オプションによる選択とする。

(5) F.P.の径方向物質流速

タイムメッシュ毎，領域毎，F.P.親ならびに娘核種毎に径方向物質流束を次式により求め，出力する。

円筒型燃料チャンネル体系で，

$$j_i = -D(i - \frac{1}{2}) \cdot \frac{\Gamma(i) - \phi(i-1) \cdot \Gamma(i-1)}{r_i - r_{i-1}} - D^T(i - \frac{1}{2}) \cdot \frac{A(i) - A(i-1)}{r_i - r_{i-1}}$$

球型燃料要素体系で，

(6-6)

$$j_i = -D(i - \frac{1}{2}) \cdot \frac{\frac{\Gamma(i)}{r_i} - \frac{\phi(i-1) \cdot \Gamma(i-1)}{r_{i-1}}}{r_i - r_{i-1}} - D^T(i - \frac{1}{2}) \cdot \frac{\frac{A(i)}{r_i} - \frac{A(i-1)}{r_{i-1}}}{r_i - r_{i-1}} \quad (6-7)$$

但し，

$j_i$  ; メッシュ点  $r_i$  における F.P. 物質流束 [g-mol/cm<sup>2</sup>/sec]

$D$  ; F.P. の濃度拡散係数 [cm<sup>2</sup>/sec]

$D^T$  ; F.P. の熱拡散係数 [g-mol/cm/sec]

$\phi$  ; F.P. の濃度隔壁係数 [ - ]

$\Gamma$  ;  $A$  は 3.1.2 で説明した量である。

(6) F.P. の各媒体中の全量，全放射能

タイムメッシュ毎，軸メッシュ毎，F.P. 親ならびに娘核種毎に，各媒体における F.P. 全量， $IC_m$  を次式より求め，出力する。

円筒型燃料チャンネル体系で，

$$IC_m = \int_{r_{m_1}}^{r_{m_2}} \Gamma(r) \cdot 2\pi r \cdot \Delta z \cdot dr \quad (6-8)$$

球型燃料要素体系で，

$$IC_m = \int_{r_{m_1}}^{r_{m_2}} \Gamma(r) \cdot 4\pi r \cdot dr \quad (6-9)$$

但し，

$IC_m$  ; 媒体  $m$  のある軸メッシュにおける F.P. 全量 [g-mol]

$r_{m_1}$  ; 媒体  $m$  の内側表面の径座標 [cm]

$r_{m_2}$  ; 媒体  $m$  の外側表面の径座標 [cm]

$\Delta z$  ; 軸メッシュインターバル [cm]

$$IA_m = \frac{6.02544 \times 10^{13}}{3.7} \cdot \lambda \cdot IC_m \quad (6-10)$$

$IC_m$ ,  $IA_m$  の出力に関しては，オプションによる選択とする。

(7) F.P. の燃料チャンネルからの実効放出率  $R/B$

燃料チャンネルからの F.P. の実効放出率  $R/B$  の定義は，燃料マトリックス中で c.f.p. から放出された F.P. 源，親核種からの F.P. 源が最終的に冷却材中へどの位の割合で放出されたかを示す量である。実効放出率  $R/B$  を次式で定義し，タイムステップ毎，軸メッシュ毎，親ならびに娘 F.P. 核種毎にオプションにより出力する。

円筒型燃料チャンネル体系の外側冷却材界面で、

$$\overline{R/B}_b = \frac{2 r_b \cdot j_b}{\sum_{i=M1+1}^{M2} \{ (r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot B(i - \frac{1}{2}) \}} \quad (6-11)$$

円環燃料チャンネル体系の内側冷却材界面で、

$$\overline{R/B}_a = \frac{-2 r_a \cdot j_a}{\sum_{i=M1+1}^{M2} \{ (r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot B(i - \frac{1}{2}) \}} \quad (6-12)$$

球型燃料要素体系で、

$$\overline{R/B} = \frac{3 r_b^2 \cdot j_b}{\sum_{i=M1+1}^{M2} \{ (r_i^3 - r_{i-1}^3) \cdot B(i - \frac{1}{2}) \}} \quad (6-13)$$

但し、

- $r_a, r_b$  ; 燃料チャンネル内・外境界点半径 [cm]  
 $j_a, j_b$  ; 内側ならびに外側境界点におけるFPの物質流束 [g-mol/cm<sup>2</sup>/sec]  
 $M1, M2$  ; 燃料マトリックスの内面と外面の径メッシュ点  
 $B$  ; 燃料マトリックスにおけるFP生成速度 [g-mol/cm<sup>3</sup>/sec]

## あ と が き

FECUNDコードに多くのオプションを用意し、多種に亘る計算が可能となるよう配慮したが、さらに下記の項目について、今後改良を加えたほうがよいと考えている。

- (1) 燃料核中におけるF. P.生成速度の算出のために、同質量数のF. P.の崩壊チェインを考慮して、F. P.核種の生成速度を評価する。
- (2) c. f. p.におけるF. P.の挙動に、拡散と反跳外のプロセスをも考慮の対象に取り入れる。
- (3) 一次冷却系におけるF. P.の物質移動現象をさらに詳細化して取り扱う。
- (4) 反射体や冷却材をとりまく黒鉛へのF. P.の拡散移行を評価できるようにする。
- (5) 気相ポンド、ギャップからF. P.を連続に除去可能にする(F. P.パーシシステム)。
- (6) F. P.の拡散は体系の寸法に大きく影響されるので燃焼に伴う寸法変化を取り扱えるようにする。
- (7) 親と娘F. P.核種の組合せを連続してコード内で行なえようし、多核種のチェインを一般的に取り扱えるようにする。
- (8) 原子炉緊急停止時に起ると考えられる現象を取り扱えるようにする。

FECUNDコードでは多くの物性値を用いているが、その中でも特に移動媒体界面におけるF. P.濃度隔壁係数、固相媒体中でのF. P.の拡散係数の値等のデータの収集が必要である。今後の計画としては実験データの解析を通じてコードの精度検討を行なう予定である。今まで行なったサンプル計算の結果からはF. P.放出に関して特に重要な量に、被覆層破損率、スリーブ中でのF. P.の拡散係数値があげられ、それらの実験データの情報を得ることは特に大切であると考えられる。

## 謝 辞

本計算コードを作成するにあたり日本アイ・ビー・エム社の堀敏行氏にはコーディングを全面的にしてくださいここに深く感謝の意を表します。また岩本多実燃料照射研究室長、有賀武夫、鈴木勝男熱中性子炉設計班員からは貴重な討論と検討をいただき、十河吉子嬢、関直恵嬢には補助作業の協力を得、能沢正雄熱中性子炉設計班長からは有益な助言をいただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

## あ　と　が　き

FECUNDコードに多くのオプションを用意し、多種に亘る計算が可能となるよう配慮したが、さらに下記の項目について、今後改良を加えたほうがよいと考えている。

- (1) 燃料核中におけるF. P. 生成速度の算出のために、同質量数のF. P. の崩壊チェインを考慮して、F. P. 核種の生成速度を評価する。
- (2) c. f. p. におけるF. P. の挙動に、拡散と反跳外のプロセスをも考慮の対象に取り入れる。
- (3) 一次冷却系におけるF. P. の物質移動現象をさらに詳細化して取り扱う。
- (4) 反射体や冷却材をとりまく黒鉛へのF. P. の拡散移行を評価できるようにする。
- (5) 気相ボンド、ギャップからF. P. を連続に除去可能にする(F. P. パージシステム)。
- (6) F. P. の拡散は体系の寸法に大きく影響されるので燃焼に伴う寸法変化を取り扱えるようにする。
- (7) 親と娘F. P. 核種の組合せを連続してコード内で行なえようし、多核種のチェインを一般的に取り扱えるようにする。
- (8) 原子炉緊急停止時に起ると考えられる現象を取り扱えるようにする。

FECUNDコードでは多くの物性値を用いているが、その中でも特に移動媒体界面におけるF. P. 濃度隔壁係数、固相媒体中でのF. P. の拡散係数の値等のデータの収集が必要である。今後の計画としては実験データの解析を通じてコードの精度検討を行なう予定である。今まで行なったサンプル計算の結果からはF. P. 放出に関して特に重要な量に、被覆層破損率、スリーブ中でのF. P. の拡散係数値があげられ、それらの実験データの情報を得ることは特に大切であると考えられる。

## 謝　　辞

本計算コードを作成するにあたり日本アイ・ビー・エム社の堀敏行氏にはコーディングを全面的にいただきここに深く感謝の意を表します。また岩本多実燃料照射研究室長、有賀武夫、鈴木勝男熱中性子炉設計班員からは貴重な討論と検討をいただき、十河吉子嬢、関直恵嬢には補助作業の協力を得、能沢正雄熱中性子炉設計班長からは有益な助言をいただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [1] L. R. Zunwalt, et al; "FREVP-6 Code for Estimating Metallic Fission Product Release", GAMD-7656 (1967)。
- [2] L. R. Zunwalt, et al; "FREVP-8 Computer Code for Calculating the Release of Metallic Fission Products", GA-8476 (1968)。
- [3] L. R. Zunwalt; "Improved FREVP(-9) Code for Calculating the Release of Metallic Fission Products From HTGR Fuel Cores", GAMD-8813 (1968)。
- [4] B. Forutanpour and B. Roos; "FIPEX A FORTRAN V Program for the Solution of One-Dimensional Linear and Non-linear Diffusion Problems", GA-9904 (1969)。
- [5] F. E. Vanslager; "RAD2, A Computer Program for calculating Fission Product Radioactivities", GAMD-6519 (1965)。
- [6] 篠田 度, 鈴木勝男, 「多目的高温ガス実験炉予備設計における放射性物質存在量分布の解析」, JAERI-memo 4550 (未) (1971)。
- [7] J. W. Prados and J. L. Scott; "Models for Fission- Gas Release from Coated Fuel Particle", ORNL-3421 (1965)。
- [8] R. W. Dunlop and T. D. Gulden; "Diffusion Model for Release of Fission Products from coated Particle Fuels", Nuc. Sci. Eng., 32, 407 (1968)。
- [9] H. Walther; "Calculation of Release of Fission Products from Coated Fuel Particles", Nuklconik, 11, 171 (1968)。
- [10] 化学工学便覧
- [11] R. H. Flowers; "The Relation of Fission Product Release Limitations to the Design and Operation of A Large HTR Station", AERE-R 6575 (1970)。
- [12] J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss and R. B. Bird; "Molecular Theory of Gases and Liquids", John Wiley & Sons, Inc., (1954)。
- [13] 動力炉・核燃料開発事業団, 山本文雄氏よりの私信。
- [14] 佐藤一雄; 「物性定数推算法」, 丸善 (1965)。
- [15] R. Gary; "Vapor Pressure of the Chemical Elements", (1963)
- [16] R. B. Bird, et al; "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc., (1960)。
- [17] 佐野川好母, 「ヘリウムガスの物性値を計算するサブプログラム (HELIUM)」, JAERI-memo 4158 (未) (1970)。

## 付録1 コード内変数名称表

FECUNDで使用されているFORTRAN SYMBOLとテキスト(FECUND説明書)の数式中の変数名, 説明章節との対照をTable A 1に示した。FORTRAN SYMBOLはCOMMON BLOCKに現われるものに限定し, 特にインプット諸量に関してはカードを記しTable 6. 2との比較ができるようにし, 内容の説明を省略した。

## 付録2 固定定数ライブラリー

原子の衝突積分関数 $\Omega^*$ の無次元固有温度 $T^*$ に関するフィッティングをTable A 2に示し[13], 希ガス等の元素, 分子に対する固有温度 $\epsilon/k$ の値をTable A 3に示す[16], 各F. P. 元素の原子直径, 融点, 沸点(100, 760 mmHgの圧力下)をTable A 4に示し[15], 蒸気圧に関する定数等をTable A 5に示す[15]。前二者の固定定数はコード内のライブラリーとしたが, 後二者の固定定数は入力処理とした。

## 付録3 サンプル入・出力データ

サンプル計算の計算対象として, 多目的高温ガス実験炉第2次予備設計炉心のSr-90を選んだ。Fig. A 1にサンプル計算の幾何形状を示し, Table A 6に入力リスト, Table A 7にサンプル計算出力リストを示す。



Table A.1 List of FORTRAN symbols

FORTTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
AA (m)	CHNCOM	$\mu_a$	3.2.2	Boundary condition const.
AAMAT (30, 30)	MCOM			Working area.
AB (m)	CHNCOM	$\mu_b$	3.2.2	Boundary condition const.
ABM (30, 30)	MCOM			Working area.
ACC ( $i_{rc}$ , m)	CHNCOM	$AC_i$	6.4	Activity of F.P. at r-mesh point.
ACI ( $i_{mc}$ , m)	"	$IA_m$	6.4	Total activity of F.P. in medium.
AFR ( $i_{mc}$ , n)	MCOM	$a_{FR}$	5.4	Input, No. 47.
AGL (n)	"	A	5.4	Input, No. 59.
AGS (n)	"	A	5.4	Input, No. 58.
ALPI ( $i_{rp}$ )	CPFC1	$\alpha_i$	2.2	Dimensionless radius.
AMAT (30, 30)	MCOM			Working area.
BA (m)	CHNCOM	$\nu_a$	3.2.2	Boundary condition const.
BB ( $i_{rp}$ )	CPFC1	$\bar{B}$	4.2	Time averaged birth rate of F.P. in fuel kernel.
BB1 ( $i_{rc}$ , m)	CHNCOM	$B_p$	3.3.1	Source from precursor nuclide.
BB2 ( $i_{rc}$ , m)	"	$B_z$	3.3.2	Source from thermal diffusion in Z-direction.
BB3 ( $i_{rc}$ , m)	"	$B_z$	3.3.2	Source from conc. diff. in Z-direction.
BC (m)	"	$\nu_b$	3.2.2	Boundary condition const.
BCHN ( $i_{rc}$ , m)	CHNCOM	$B_{i+\frac{1}{2}}(k)$	3.1.2	F.P. source in a fuel channel.
BCHOLD( $i_{rc}$ , m, n)	"	$B_{i+\frac{1}{2}}(k-1)$	3.1.2	F.P. source in a fuel channel.
BET ( $i_{rc}$ )	"	$\beta(i, k)$	3.1.2	Transform of therm. diff. coeff.
BETO ( $i_{rc}$ )	"	$\beta(i, k-1)$	3.1.2	Transform of therm. diff. coeff.
BFCP(j, k, m, n)	MCOM	$B_{cfp}$	3.3.1	Input, No. 36.
BFR ( $i_{mc}$ , n)	"	$b_{FR}$	5.4	Input, No. 47.

FORTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
BGL (n)	MCOM	B	5.4	Input, No. 59
BGS (n)	"	B	5.4	Input, No. 58
BK (m, k', l, n)	"	B <sub>o</sub>	1.3	Input, No. 33.
BV (30)	"			Working area.
CAPAR(i <sub>rc</sub> , m)	CHNCOM	C <sub>p</sub> (i)	3.3.1	Stored concentration of precursor F.P.
CCHNEW (i <sub>rc</sub> , m)	"	C <sup>ξ</sup> (i, k)	3.1.3	Concentration of F.P.
CCHOLD (i <sub>rc</sub> , m, n)	"	C(i, k-1)	3.1.2	Concentration of F.P.
CCI	"	C <sub>zin</sub> (k)	3.4	Inlet conc. of F.P. in coolant.
CDIREF(i <sub>mc</sub> , n)	DCOM	C <sub>i</sub> <sup>o</sup>	5.2	Input, No. 65.
CFPOC(i <sub>rc</sub> , m, n)	MCOM	C(i, o)	3.	Input, No. 32.
CFPOP(m, i <sub>xp</sub> , l, n)	"	C(i, o)	2.	Input, No. 31.
CFR (i <sub>mc</sub> , n)	"	C <sub>Fr</sub>	5.4	Input, No. 47.
CGL (n)	"	C	5.4	Input, No. 59.
CGS (n)	"	C	5.4	Input, No. 58.
COLD (i <sub>rc</sub> , m)	CHNCOM	C <sup>ξ-1</sup> (i, k)	3.1.3	Concentration of F.P.
CONT (i <sub>mp</sub> , l)	MCOM	ρ <sub>i</sub>	2.2.1	Input, No. 34.
CONTP (i <sub>mp</sub> , l)	"	ξ <sub>i</sub>	2.2.1	Input, No. 35
COO	CHNCOM	C <sub>ZOUT</sub>	3.4	Outlet concentration of F.P. in coolant.
COP (j, k)	"	C <sub>ZOUTp</sub>	3.4	Outlet concentration of precursor F.P. in coolant.
CPOLD(m, i <sub>rp</sub> , l, n)	CPFC1	C(r, t <sub>o</sub> )	2.1	Initial concentration of F.P. in c.f.p.
CUI(k, i <sub>rp</sub> )	"	C(r, t <sub>k</sub> )	2.1	Concentration of F.P. in c.f.p.
CUIZ	"	C(r, t <sub>k</sub> )	2.1	Concentration of F.P. in c.f.p.
CUZ	"	C(o, t <sub>k</sub> )	2.1	Concentration of F.P. at center of c.f.p.
CZIN(j, k, n)	MCOM	C <sub>ZIN</sub>	3.4	Input, No. 37.

FORMAT SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
DAVE(m,n,l)	CPFC1	$D_0$	2.1.1	Zone averaged diff. coeff. of F.P. in fuel kernel.
DDAVE	"	$D_0$	2.1.1	Zone averaged diff. coeff. of F.P. in fuel kernel.
DDMX1	"	$D_2$	2.2.4	Lowest value of diff. coeff. of F.P. among coating layers.
DDMX2	"	$D_1$	2.2.4	Next lowest value of diff. coeff. of F.P. among coating layers.
DELTA (m)	CHNCOM	$\delta_a$	3.2.3	Concentration boundary layer thickness.
DELTA (m)	"	$\delta_b$	3.2.3	Concentration boundary layer thickness.
DEN (l)	CPFC1	$N_l$	3.3.1	Number density of c.f.p. in fuel matrix.
DENSS(i <sub>mc</sub> , j)	MCOM	$\rho_s$	5.4	Input, No. 24.
DFR (i <sub>mc</sub> , n)	MCOM	$d_{Fr}$	5.4	Input, No. 47.
DGL (n)	"	D	5.4	Input, No. 59.
DGS (n)	"	D	5.4	Input, No. 58.
DIFC(i <sub>rc</sub> , m)	CHNCOM	D(i, k)	3.1.2	Diff. coeff. of F.P. in fuel channel.
DIFCOL(i <sub>rc</sub> , m, n)	"	D(i, k-1)	3.1.2	Diff. coeff. of F.P. in fuel channel.
DIFCPF(i <sub>rp</sub> )	CPFC1	D(i, k)	2.2.2	Diff. coeff. of F.P. in c.f.p.
DIFF(i <sub>rc</sub> , m)	CHNCOM	D(i, k)	3.1.3	Diff. coeff. of F.P. when $D_G \geq 10^5 \times \text{Min}(D_S)$ in fuel channel.
DIFEC(i <sub>mc</sub> , n)	MCOM	$4E_D$	5.2	Input, No. 41.
DIFEP(i <sub>mp</sub> , l, n)	"	$4E_D$	5.2	Input, No. 40.
DIFFCC(i <sub>mc</sub> , n)	"	$F(C_i)$	5.2	Input, No. 64.

FORMAT SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
DIFT( $i_{rc}, m$ )	CHNCOM	$D^T(i, k)$	3.1.2	Therm. diff. coeff. of F.P. in fuel channel.
DIFTO( $i_{rc}, m$ )	"	$T\epsilon-1$ $D(i, k)$	3.1.2	Therm. diff. coeff. of F.P.
DIFTOL( $i_{rc}, m, n$ )	"	$D^T(i, k-1)$	3.1.2	Therm. diff. coeff. of F.P.
DIFOC( $i_{mc}, n$ )	MCOM	$D^0$	5.2	Input, No. 39.
DIFOP( $i_{mp}, \ell, n$ )	"	$D^0$	5.2	Input, No. 38.
DITT( $i_{rc}, m$ )	CHNCOM	$D^T(i, k)$	3.3.2	Thermal diff. coeff. of F.P.
DP ( $i_{rp}$ )	CPFC1	$D'$	2.2.1	Dimensionless conc. diff. coeff. of F.P.
DTP( $i_{rp}, j, \ell$ )	MCOM	$4T_i$	5.1	Input, No. 18.
EFRB (m)	CHNCOM	R/B	6.4	Effective R/B.
EGG	MCOM	$(\epsilon/K)_G$	5.2	Input, No. 62.
EIG (n)	MCOM	$(\epsilon/K)_i$	5.2	Input, No. 62.
EN	CPFC1	$E_n$	2.2.1	$= D_n / \ell_{DC}$
ENP	"	$E'_n$	2.2.1	$= E_n / r_n / \lambda$
EPSZ	MCOM	$\epsilon_{IT}$	3.1.3	Input, No. 63.
EUM	CPFC1	$\mu$	2.1.3	Transform of eigen value.
EXTRC	MCOM	$\ell_{DC}$	2.2.1	Input, No. 44.
EXTRK	"	$\ell_{DK}$	2.1.1	Input, No. 44.
FFDC	CPFC1	$f_{DC}$	2.2	Fractional release of F.P. from c.f.p.
FFDK	"	$f_{DK}$	2.1	Fractional release of F.P. from c.f.p.
FFRC	"	$f_{RC}$	2.3	Fractional release of F.P. from c.f.p.
FFRK	"	$f_{RK}$	2.3	Fractional release of F.P. from c.f.p.
FINV ( $i_{mc}, m$ )	CHNCOM	$IC_m$	6.4	Total inventory of F.P. in medium.

FORTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
FL (2)	CHNCOM			
FLOC(2,j)	MCOM	G	3.2.3	Input, No. 27.
FLUXN(m,k',g)	"	$\varphi$	3.3.1	Input, No. 50
FLX(j,k,m,g)	"	$\varphi$	3.3.1	Neutron flux.
FPNAME (n)	"		6.3	Input, No. 4.
FRAF (l)	"		3.3.1	Fraction of c.f.p. type.
GGMT(m,i <sub>rp</sub> ,l.n)	CPFC1	$r(i, k)$	2.2.3	Transform of conc. diff. coeff. of F.P.
GM (i <sub>rp</sub> )	"	$r(i, k)$	2.2.3	Transform of conc. diff. coeff. of F.P.
GM (i <sub>rc</sub> )	CHNCOM	$r(i, k)$	3.1.2	Transform of conc. diff. coeff. of F.P.
GMB (i <sub>rp</sub> )	CPFC1	$\Gamma(i, k)$	3.1.2	Transform of concentration of F.P.
GMB (i <sub>rc</sub> )	CHNCOM	$\Gamma(i, k)$	3.1.2	Transform of concentration of F.P.
GMO (i <sub>rp</sub> )	CPFC1	$r(i, k-1)$	2.2.3	Transform of conc. diff. coeff. of F.P.
GMO (i <sub>rc</sub> )	CHNCOM	$r(i, k-1)$	3.1.2	Transform of conc. diff. coeff. of F.P.
HH (i <sub>rc</sub> ,3)	"	H(i, k)	3.1.2	Transform of r-mesh interval.
HZ (m)	"	H <sub>Z</sub> (m)	3.3.2	Transform of Z-mesh interval.
IGR (n)	MCOM		5.1	Input, No. 55.
IM1	CPFC1	2	2.2.4	Coating layer No. which has the lowest diff. coeff. of F.P.
IM2	"	1	2,2.4	Coating layer No. which has the next lowest diffusion coeff. of F.P.
IPAGE	MCOM			Page No. for output.

FORTTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
ITBO ( $n, \ell$ )	CPFC1		4.1	Time mesh point No. $k'$ of TSBK( $k'$ ) which time, TSRP( $j, k$ ) follows.
ITSBK	MCOM	$K'$	4.1	Input, No. 5.
JH	CPFC2		5.1	Temp. input sequent No. $i$ of MCT( $i$ ) at fuel matrix outer surface.
JJ	MCOM		1.3	= 2 if JOPTI(2)=1. = 1 if JOPTI(2)=2.
JL	CPFC2		5.1	Temp. input sequent No. $i$ of MCT( $i$ ) at fuel matrix inner surface.
JOPTI(10)	MCOM		6.3	Input, No. 2.
JOPTO(7)	"		6.3	Input, No. 3.
NH	CPFC2			Radial mesh point No. at fuel matrix outer surface.
NL	"			Radial mesh point No. at fuel matrix inner surface.
WNB	MCOM			= NBMX+1.
NNC	CPFC2			Radial mesh point No. near the middle point of fuel matrix.
NNPM( $i_{mp}, \ell$ )	CPFC1			Radial mesh point No. at each medium outer surface in c.f.p.
NN1	CPFC2			= NL.
NN2	"			= NH.
NPL ( $\ell$ )	MCOM			Input, No. 6.
NPM ( $i_{mp}, \ell$ )	"			Input, No. 8.
NTMAX	"	$N_{max}$	4.1	Input, No. 5.
NTMIN	"	$N_{min}$	4.1	Input, No. 5
NTRP( $j$ )	"	$K$	4.1	Input, No. 21.
NZITMX	"		3.1.3	Input, No. 5.
NZMX	"	$M$	3.3.2	Input, No. 5.

FORTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
OMR	MCOM		2.2.3	Input, No. 44.
OMZ	CPFC1	$\omega_o$	2.1.1	Diffusion-decay parameter.
OOMZ ( $i_{rp}^*$ )	"	$\omega_i$	2.2.1	Diffusion-decay parameter.
PARTC( $i_{mc}, n$ )	MCOM	$\phi(i, k)$	3.1.1	Input, No. 46.
JSG ( $i_{mc}$ )	"			Input, No. 11.
MASS (n)	"	$M_i$	5.1	Input, No. 52.
MCR	"	b	3.1.2	Number of radial meshes in a fuel channel.
MCSG ( $i_{mc}$ )	"			Input, No. 12.
MCSGMX	"			Input, No. 5.
MCT ( $i_{rc}$ )	"		5.1	Input, No. 17.
MCTMX	"		5.1	Input, No. 5.
MPT( $i_{rp}$ )	"		5.1	Input, No. 16.
MPTMX	"		5.1	Input, No. 5.
MTCPF(j)	"	K	4.1	Number of time meshes in every burnup step.
NATOM (n)	"			Input, No. 51.
NBMX	"	J	4.1	Input, No. 5.
NCGAS	"			Input, No. 5.
NCL	"			Input, No. 5
NCM ( $i_{mc}$ )	"			Input, No. 10.
NC1	CPFC2			Half of number of r-mesh points in a fuel matrix.
NC2	"			Number of r-mesh point in a fuel matrix.
NFMX	MCOM		2.	Input, No. 5.
PARTCC( $i_{rc}$ )	CHNCOM	$\phi(i, k)$	3.1.1	Partition coeff. of F.P.
PARTCO( $i_{rc}, m$ )	"	$\phi(i, k)$	3.1.1	Partition coeff. of P.F. for OUTPUT.

FORTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
PARTP( $i_{mp}, n$ )	MCOM	$\phi_i^\xi$	2.2.1	Input, No. 45.
PARTV( $i_{rc}, m$ )	CHNCOM	$\phi_i^\xi$	3.1.3	Partition coeff. of F.P.
PB	MCOM	$\xi$	3.2.3	Input, No. 29.
PBSUR ( $m$ )	"	$\bar{S}_Z$	3.2.3	Input, No. 30.
PGAS( $i_{mc}, j$ )	"	P	5.1	Input, No. 28.
PLATE ( $j, n$ )	"	$\beta$	3.4	Input, No. 61.
POROS ( $i_{mc}, j$ )	"	$\xi$	5.4	Input, No. 26.
PURIF ( $j$ )	"	$\alpha$	3.4	Input, No. 60.
Q ( $i_{rp}$ )	CPFC1		2.2.3	$Y_i \times B(i, k)$ .
Q ( $i_{rc}$ )	CHNCOM		3.1	$= r_i \times B(i, k)$ or $= B(i, k)$ .
QO ( $i_{rp}$ )	CPFC1		2.2.3	$= Q^{\xi-1}(i_{rp})$ .
QO ( $i_{rc}$ )	CHNCOM		3.1	$= Q^{\xi-1}(i_{rc})$ .
QQT( $m, i_{rp}, \ell, n$ )	CPFC1		2.2.3	$= Q(i_{rp})$ .
RAM ( $i_{rc}$ )	CHNCOM	$\lambda(i, k)$	3.1.2	Transform of temperature.
RAMD ( $j$ )	MCOM		1.2	Input, No. 48.
RAMO ( $i_{rc}$ )	CHNCOM	$\lambda(i, k-1)$	3.1.2	Transform of temperature.
RAPTP( $m, j, \ell$ )	MCOM	K	2.	Input, No. 14.
RC ( $i_{mc}$ )	"	$r_i$	3.1.1	Input, No. 9.
RECOC ( $\ell$ )	"	$\ell_{RC}$	2.3	Input, No. 43.
RECOK ( $\ell$ )	"	$\ell_{RK}$	2.3	Input, No. 42.
RFLUX ( $i_{rc}, m$ )	CHNCOM	$j_i$	6.4	F.P. mass flux in r-direction.
RMESH ( $i_{mc}$ )	MCOM	$\Delta r_i$	3.1.2	Radial mesh interval in every medium in a fuel channel.
ROWI	CHNCOM	$\rho_a$	3.2.2	Inside coolant density.
ROWI ( $i_{rp}$ )	CPFC1	$\rho_i$	2.2	Fuel contamination.
ROWO	CHNCOM	$\rho_b$	3.2.2	Outside coolant density.
RP( $i_{rp}, \ell$ )	MCOM	$r_i$	2.2.1	Input, No. 7.



FORTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
RP1	CPFC1	$r_2$	2.2.4	Radius of coating layer for calculating $L_{DC}$ .
RP2	"	$r_1$	2.2.4	Radius of coating layer for calculating $L_{DC}$ .
RRC	"	$R_{RC}$	2.3	F.P. release rate from c.f.p.
RRDC	"	$R_{DC}$	2.2	F.P. release rate from c.f.p.
RRDK	"	$R_{DK}$	2.1	F.P. release rate from c.f.p.
RRK	"	$R_{RK}$	2.3	F.P. release rate from c.f.p.
RRX ( $i_{rc}$ )	MCOM	$r_i$	3.1.1	Radius of each r-mesh point.
S1	CHNCOM		4.1	Burnup interval.
S2	"		4.1	Burnup interval.
SDN (20, $\ell$ )	CPFC1	$\nu_j$	2.1.3	Transform of eigen value.
SFKN (20, $\ell$ )	"	$k_j$	2.1.2	Eigen value for $\ell_{DK}=0$ .
SIGA (g)	MCOM	$\sigma_P$	3.3.1	Input, No. 49.
SIGG	"	$\sigma_G$	5.2	Input, No. 54.
SIGI (n)	MCOM	$\sigma_i$	5.2	Input, No. 54.
SK ( $i_{rp}$ )	CPFC1	$K(i, k-1, k)$	2.2.3	Transform of F.P. birth rate.
SLD (m, n, $\ell$ )	CPFC2	$L(Z_m, \ell)$	4.1	Time to equilibrium state for F.P. release from c.f.p. $= L_B + L_{DK} + L_{DC}$
SLDB (m, n, $\ell$ )	"	$L_B$	4.1	Time to equilibrium state for F.P. birth in fuel kernel.
SMG	MCOM	$M_G$	5.2	Input, No. 53.
SMI (n)	"	$M_i$	5.2	Input, No. 53.
SPESS ( $i_{mc}, j$ )	"	$r_s$	5.4	Input, No. 25.
SSKN (20, $\ell$ )	CPFC1	$k_j$	2.1.3	Eigen value for $\ell_{DK} \neq 0$ .
SSLD (n)	"	L	4.1	Time to equilibrium state.
Tl(m, $i_{ip}, \ell$ )	CPFC2	$T(i, k)$	5.1	Absolute temperature in c.f.p.

FORTRAN SYMBOL	COMMON BLOCK NAME	SYMBOL IN TEXT	SECTION	REMARKS
TAVE (m, l)	CPFC1	$T_o$	2.1	Averaged temperature in fuel kernel.
TBP100 (n)	MCOM	$T_{bp}^{(100)}$	5.4	Input, No. 57.
TBP760 (n)	"	$T_{bp}^{(760)}$	5.4	Input, No. 57.
TBURN (j)	"	$T_j$	4.1	Input, No. 20.
TC (i <sub>rc</sub> , m, j)	"	$T_i$	5.1	Input, No. 19.
TD (j, k)	"	$t_k$	4.1	Time of each Release time step k, from the beginning of each burnup step j.
TEMCPF(i <sub>rp</sub> )	CPFC1	$T(i, k)$	5.1	Temperature distribution in c.f.p.
TEMP (i <sub>rc</sub> , m)	CHNCOM	$T(i, k)$	3.1.2	Temperature distribution in a fuel channel.
TEMPOL(i <sub>rc</sub> , m)	"	$T(i, k-1)$	3.1.2	Temperature in a fuel channel.
TITLE (20)	MCOM		6.3	Input, No. 1.
TLOOP	"	$\tau$	3.4	Input, No. 63.
TMESH (k)	CHNCOM	$\Delta t_k$	3.1.1	Time mesh interval of TSRP(j, k).
TMP (n)	MCOM	$T_{mp}$	5.4	Input, No. 56.
TSBK (k')	"	$t_k'$	4.2	Input, No. 23.
TSRP (j, k)	"	$t_k$	4.1	Input, No. 22.
TSUI (n, m)	"	R	3.3.1	$= K(R_{DK} + R_{RK}) + (1-K)(R_{DC} + R_{RC})$ .
TTAVE	CPFC1	$T_o$	2.1	Averaged temp. in fuel kernel.
UZ (m, ii)	CHNCOM	$U_{Zm}$	3.2.2	Coolant velocity. ii=1 : outside coolant ii=2 : inside coolant.
VOL (l)	MCOM	V	3.3.1	Input, No. 15.
WEIGH	"	$\Omega$	2.2.3	Input, No. 63.
ZMESH (m)	"	$\Delta Z_m$	3.3.2	Input, No. 13.

Note. Arguments are as follows,

- $i_{rp}$  : r-mesh point in a c.f.p.
- $i_{rc}$  : r-mesh point in a fuel channel.
- $i_{mp}$  : medium (coating layer) in a c.f.p.
- $i_{mc}$  : medium in a fuel channel.
- $m$  : Z-mesh in a fuel channel.
- $j$  : burnup step.
- $k'$  : time mesh point where F.P. birth rate is inputed.
- $k$  : time mesh point for calculating F.P. release.
- : c.f.p. type
- $n$  : parent-daughter
- $g$  : energy group

Table A2 Fitting equations for the collision integral functions

$\Omega^*$	Fitting equations	
$\Omega(1)^*$	$\Omega(1)^* = 1.45 \times (T^*)^{-0.56}$	for $T^* \leq 1.6$
	$\Omega(1)^* = 1.32 \times (T^*)^{-0.31}$	for $1.6 < T^* \leq 3.5$
	$\Omega(1)^* = 1.12 \times (T^*)^{-0.17}$	for $3.5 < T^*$
$\Omega(2)^*$	$\Omega(2)^* = 1.17 \times (T^*)^{-0.54}$	for $T^* \leq 0.95$
	$\Omega(2)^* = 1.20 \times (T^*)^{-0.35}$	for $0.95 < T^* \leq 2.25$
	$\Omega(2)^* = 1.03 \times (T^*)^{-0.16}$	for $2.25 < T^*$
$\Omega(3)^*$	$\Omega(3)^* = 1.04 \times (T^*)^{-0.53}$	for $T^* \leq 0.87$
	$\Omega(3)^* = 1.08 \times (T^*)^{-0.30}$	for $0.87 < T^* \leq 2.20$
	$\Omega(3)^* = 0.97 \times (T^*)^{-0.16}$	for $2.20 < T^*$
$\Omega(4)^*$	$\Omega(4)^* = 1.60 \times (T^*)^{-0.48}$	for $T^* \leq 2.15$
	$\Omega(4)^* = 1.35 \times (T^*)^{-0.24}$	for $2.15 < T^* \leq 5.00$
	$\Omega(4)^* = 1.15 \times (T^*)^{-0.15}$	for $5.00 < T^*$

Table A3 Lennard-Johnes parameters for gaseous elements

Substance	Molecular wt. M	$\overset{\circ}{\text{A}}$	/K $^{\circ}\text{K}$
Light elements:			
H <sub>2</sub>	2.016	2.915	38.0
He	4.003	2.576	10.2
Noble gases:			
Ne	20.183	2.789	35.7
Ar	39.944	3.418	124.
Kr	83.80	3.498	225.
Xe	131.3	4.055	229.
Polyatomic substances:			
A <sub>ir</sub>	28.97	3.617	97.0
N <sub>2</sub>	28.02	3.681	91.5
O <sub>2</sub>	32.00	3.433	113.
CO	28.01	3.590	110.
CO <sub>2</sub>	44.01	3.996	190.
F <sub>2</sub>	38.00	3.653	112.
Cl <sub>2</sub>	70.91	4.115	357.
Br <sub>2</sub>	159.83	4.268	520.
I <sub>2</sub>	253.82	4.982	550.

Table A4 Atomic radii, melting points and boiling points of fission product elements and the others.

Element	Atomic number	Atomic radius (Å)	Melting point (°K)	Boiling point (°K)	
				at 100 mmHg	at 760 mmHg
Zn	30	1.32	692.7	1011	1186
Ga	31	1.22	303	2144	2517
Ge	32	1.22	1210.4	2703	3125
As	33	1.25	1090	2222	2392
Se	34	1.16	490	1548	1823
Br	35	1.13	263.95	281	332
Kr	36	2.01	—	—	—
Rb	37	2.44	312	799	978
Sr	38	2.13	1043	1370	1630
Y	39	1.79	1773	2652	3055
Zr	40	1.60	2125	4081	4598
Nb	41	1.42	2770	4510	5115
Mo	42	1.36	2890	4050	5100
Tc	43	1.34	2400	4000	5000
Ru	44	1.33	2700	4000	4500
Rh	45	1.34	2239	3543	3940
Pd	46	1.37	1823	2931	3385
Ag	47	1.44	1234	2098	2436
Cd	48	1.48	594	888	1043
In	49	1.62	429.32	1961	2323
Sn	50	1.40	505	2518	2995
Sb	51	1.43	903	1933	2335
Te	52	1.43	723	1065	1285
I	53	1.35	368.8	388	456
Xe	54	2.20	—	—	—
Cs	55	2.65	301.8	772	959
Ba	56	2.17	983	1575	1907
La	57	1.86	1193	3160	3643
Ce	58	1.82	1077	—	1673
Pr	59	1.82	1208	—	3573
Nd	60	1.82	1297	2803	3384
Pm	61	1.77	1300	—	—
Sm	62	1.75	1325	1611	1874

Element	Atomic number	Atomic radius Å	Melting point °K	Boiling point °K	
				at 100 mmHg	at 760 mmHg
Eu	63	1.98	1100	1468	1742
Gd	64	1.79	1600	1537	1770
Tb	65	1.77	1700	—	—
Dy	66	1.77	1773	—	—
Ho	67	1.75	1773	—	—
Er	68	1.75	1800	—	—
Tm	69	1.74	1900	—	—
He	2	1.32	—	—	—

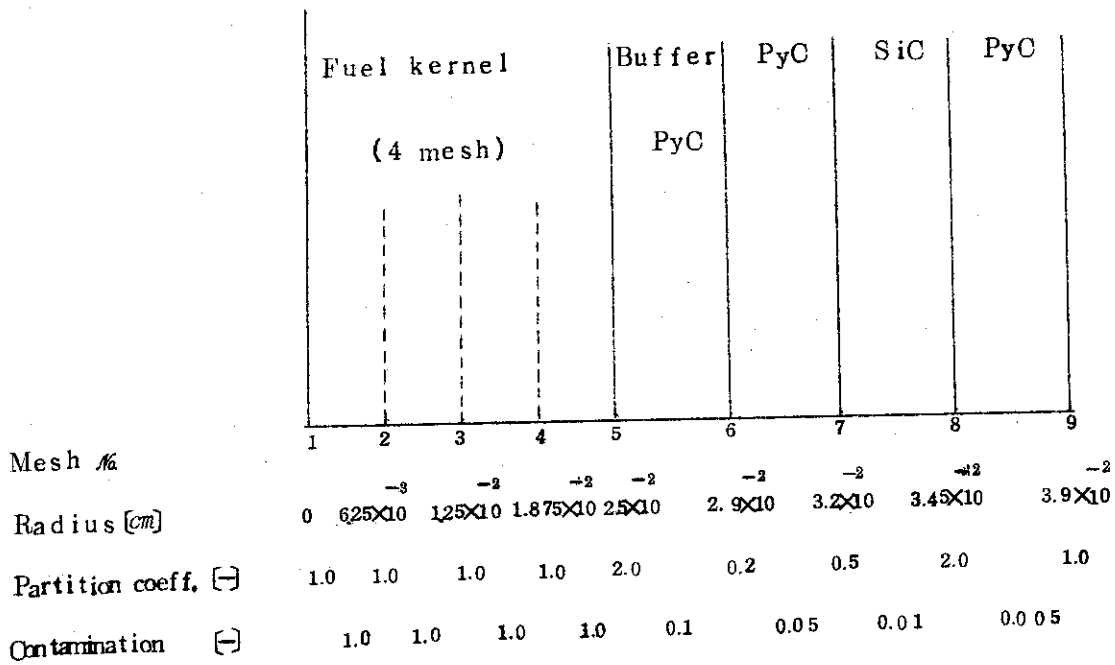
Table A5 Vapor pressure of chemical elements

Element	Atomic no.	No. of atoms for gas	Solid or liquid	$\log p \text{ mmHg} = A - \frac{B}{T} + CT + D \log T \quad T \text{ } ^\circ\text{K}$			
				A	B	C	D
Zn	30	1	S	1.35085x10	7.01186x10 <sup>3</sup>	4.0185x10 <sup>-4</sup>	-1.58311
			l	-7.91900	5.33074x10 <sup>3</sup>	-1.61644x10 <sup>-3</sup>	5.59972
Ga	31	1	S	—	—	—	—
			l	9.0307x10 <sup>-1</sup>	1.34253x10 <sup>4</sup>	-6.0331x10 <sup>-4</sup>	2.95655
Ge	32	1	S	1.70659x10	2.04120x10 <sup>4</sup>	2.5837x10 <sup>-4</sup>	-2.20112
			l	1.00242x10	1.84736x10 <sup>4</sup>	-4.210x10 <sup>-5</sup>	-3.7226x10 <sup>-1</sup>
As	33	1	S	3.12712x10 <sup>2</sup>	2.64024x10 <sup>4</sup>	5.01579x10 <sup>-2</sup>	-1.13035x10 <sup>2</sup>
			l	—	—	—	—
Se	34	1	S	-8.51224x10	7.71691x10 <sup>3</sup>	-203011x10 <sup>-2</sup>	3.66732x10
			l	8.44047	1.04859x10 <sup>4</sup>	-6.26120x10 <sup>-4</sup>	4.08870x10 <sup>-1</sup>
Br	35	2	S	4.44269x10 <sup>2</sup>	1.13100x10 <sup>4</sup>	1.74831x10 <sup>-1</sup>	-1.84175x10 <sup>2</sup>
			l	8.65047	2.04775x10 <sup>3</sup>	-6.10000x10 <sup>-3</sup>	9.58920x10 <sup>-1</sup>
Kr	36	1	S	—	—	—	—
			l	—	—	—	—
Rb	37	1	S	-9.40483x10	1.96126x10 <sup>3</sup>	-3.77169x10 <sup>-2</sup>	4.25753x10
			l	1.58825x10	4.52964x10 <sup>3</sup>	5.86630x10 <sup>-4</sup>	-2.99138
Sr	38	1	S	-2.44375	8.04960x10 <sup>3</sup>	-1.88317x10 <sup>-3</sup>	4.11062
			l	-2.44375	8.04960x10 <sup>3</sup>	-1.88317x10 <sup>-3</sup>	4.11062
Y	39	1	S	9.35095	1.90421x10 <sup>4</sup>	0.00000	0.00000
			l	2.58451x10	2.10900x10 <sup>4</sup>	3.40200x10 <sup>-4</sup>	-4.86113
Zr	40	1	S	-1.36881x10	2.88658x10 <sup>4</sup>	-9.91830x10 <sup>-4</sup>	7.36127
			l	3.75739x10	3.51934x10 <sup>4</sup>	6.50400x10 <sup>-4</sup>	-8.19894
Nb	41	1	S	9.375	3.9639x10 <sup>4</sup>	0.00000	0.50000
			l	9.375	39639x10 <sup>4</sup>	0.00000	0.50000
Mo	42	1	S	-9.32328x10	2.07377x10 <sup>4</sup>	-3.52277x10 <sup>-3</sup>	3.14799x10
			l	-9.15645x10 <sup>2</sup>	-1.18637x10 <sup>6</sup>	1.33986x10 <sup>-1</sup>	3.36163x10

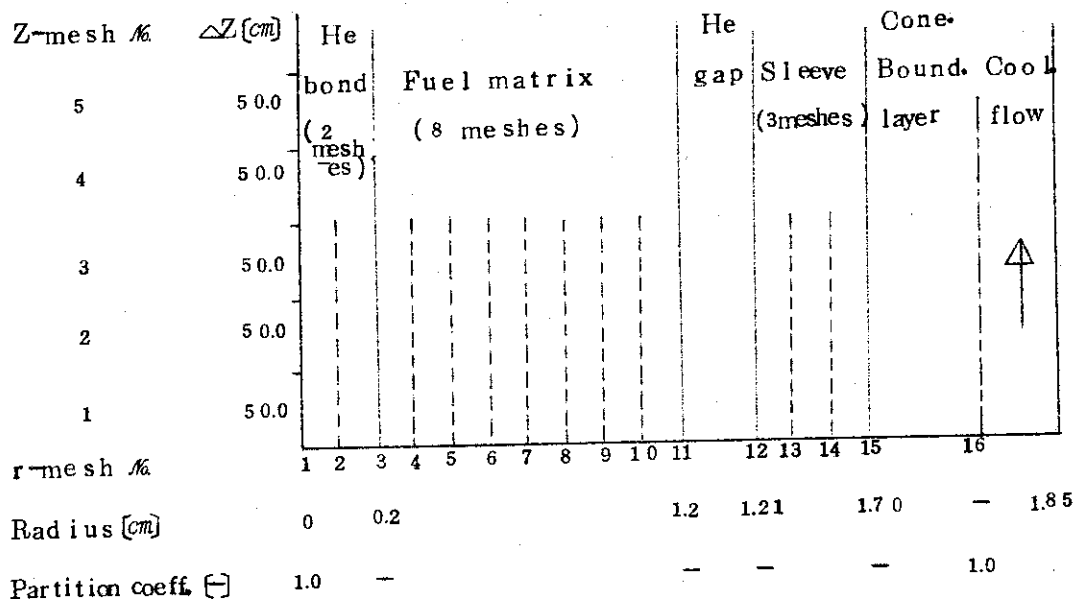


Element	Atomic no.	No. of atoms for gas	Solid of liquid	$\log p \text{ mmHg} = A - \frac{B}{T} + CT + D \log T \quad T \text{ } ^\circ\text{K}$			
				A	B	C	D
Tc	43	1	S	1.11616x10	3.39533x10 <sup>4</sup>	-4.60500x10 <sup>-5</sup>	-1.93580x10 <sup>-1</sup>
			<i>l</i>	-9.01495x10 <sup>2</sup>	-1.19755x10 <sup>5</sup>	-2.19628x10 <sup>-2</sup>	2.66422x10 <sup>2</sup>
Ru	44	1	S	2.44895	3.35128x10 <sup>4</sup>	-3.05540x10 <sup>-4</sup>	2.57203
			<i>l</i>	-1.14565x10	2.97513x10 <sup>4</sup>	-5.49320x10 <sup>-4</sup>	6.41032
Rh	45	1	S	5.74579x10	3.42207x10 <sup>4</sup>	1.66974x10 <sup>-3</sup>	-1.43942x10
			<i>l</i>	-2.64329x10 <sup>2</sup>	-2.24877x10 <sup>4</sup>	-5.96694x10 <sup>-3</sup>	7.92043x10
Pd	46	1	S	-5.51960x10	1.41707x10 <sup>4</sup>	-3.26670x10 <sup>-3</sup>	2.05291x10
			<i>l</i>	8.76587	1.91698x10 <sup>4</sup>	2.34700x10 <sup>-5</sup>	-8.49900x10 <sup>-2</sup>
Ag	47	1	S	2.16819x10	1.56629x10 <sup>4</sup>	6.94590x10 <sup>-4</sup>	-4.01891
			<i>l</i>	1.08081x10	1.43231x10 <sup>4</sup>	-9.01900x10 <sup>-5</sup>	-5.39270x10 <sup>-1</sup>
Cd	48	1	S	4.34803	5.72895x10 <sup>3</sup>	-1.30508x10 <sup>-3</sup>	1.83066
			<i>l</i>	2.52874	5.18071x10 <sup>3</sup>	-8.49610x10 <sup>-4</sup>	2.05627
In	49	1	S	4.70886x10 <sup>2</sup>	2.68917x10 <sup>4</sup>	1.03157x10 <sup>-1</sup>	-1.79483x10 <sup>2</sup>
			<i>l</i>	1.08207x10	1.22981x10 <sup>4</sup>	7.14700x10 <sup>-5</sup>	-8.21590x10 <sup>-1</sup>
Sn	50	1	S	-1.50168x10 <sup>2</sup>	1.08702x10 <sup>4</sup>	-3.68244x10 <sup>-2</sup>	6.21250x10
			<i>l</i>	-9.32188	1.40239x10 <sup>4</sup>	-8.81220x10 <sup>-4</sup>	5.62012
Sb	51	1	S	9.49017	1.37448x10 <sup>4</sup>	-4.39160x10 <sup>-4</sup>	2.31090x10 <sup>-1</sup>
			<i>l</i>	1.95469x10	1.36426x10 <sup>4</sup>	3.35470x10 <sup>-4</sup>	-3.44552
Te	52	2	S	-2.60650x10 <sup>-1</sup>	8.29852x10 <sup>3</sup>	-3.04070x10 <sup>-3</sup>	4.62977
			<i>l</i>	1.82036x10	7.52519x10 <sup>3</sup>	-4.42150x10 <sup>-4</sup>	-2.85496
I	53	2	S	1.88057x10	3.59403x10 <sup>3</sup>	4.43420x10 <sup>-4</sup>	-2.97588
			<i>l</i>	9.96959	3.09735x10 <sup>3</sup>	0.00000	0.00000
Xe	54	1	S	_____	_____	_____	_____
			<i>l</i>	_____	_____	_____	_____
Cs	55	1	S	-2.19482x10 <sup>2</sup>	-1.08868x10 <sup>3</sup>	-8.33619x10 <sup>-2</sup>	9.48875x10
			<i>l</i>	8.22127	4.00605x10 <sup>3</sup>	-6.01940x10 <sup>-4</sup>	-1.96230x10 <sup>-1</sup>

Element	Atomic No.	No. of atoms for gas	Solid of liquid	$\log p \text{ mmHg} = A - \frac{B}{T} + CT + D \log T \quad T \text{ } ^\circ\text{K}$			
				A	B	C	D
Ba	56	1	S	$1.40843 \times 10$	$9.44527 \times 10^3$	$9.64600 \times 10^{-5}$	-1.90149
			<i>l</i>	$1.06372 \times 10$	$8.70364 \times 10^3$	$-1.58400 \times 10^{-5}$	$-9.64810 \times 10^{-1}$
La	57	1	S	$-2.73693 \times 10$	$1.93225 \times 10^4$	$-3.00289 \times 10^{-3}$	$1.24039 \times 10$
			<i>l</i>	$1.30918 \times 10$	$2.16856 \times 10^4$	$1.15130 \times 10^{-4}$	-1.31246
Ce	58	1	S	$1.15800 \times 10$	$2.34000 \times 10^4$	0.00000	0.00000
			<i>l</i>	$1.15800 \times 10$	$2.34000 \times 10^4$	0.00000	0.00000
Pr	59	1	S	8.09800	$1.71880 \times 10^4$	0.00000	0.00000
			<i>l</i>	8.09800	$1.71880 \times 10^4$	0.00000	0.00000
Nd	60	1	S	$-2.69322 \times 10$	$1.40011 \times 10^4$	$-2.72535 \times 10^{-3}$	$1.18639 \times 10$
			<i>l</i>	$-1.30220 \times 10$	$1.27887 \times 10^4$	$-7.03990 \times 10^{-4}$	6.25283
Pm	61	1	S	_____	_____	_____	_____
			<i>l</i>	_____	_____	_____	_____
Sm	62	1	S	$-1.17246 \times 10$	$9.58982 \times 10^3$	$-1.69989 \times 10^{-3}$	6.99972
			<i>l</i>	$4.87102 \times 10$	$1.46197 \times 10^4$	$1.63504 \times 10^{-3}$	$-1.25562 \times 10$
Eu	63	1	S	-8.93847	$8.60116 \times 10^3$	$-2.32125 \times 10^{-3}$	6.36754
			<i>l</i>	$-2.89840 \times 10$	$5.39620 \times 10^3$	$-2.10922 \times 10^{-3}$	$1.19225 \times 10$
Gd	64	1	S	6.36182	$1.10501 \times 10^4$	$-4.12940 \times 10^{-4}$	1.08630
			<i>l</i>	$1.94749 \times 10$	$1.15798 \times 10^4$	$2.51340 \times 10^{-4}$	$-3.23467$
Tb	65	1	S	_____	_____	_____	_____
			<i>l</i>	_____	_____	_____	_____
Dy	66	1	S	_____	_____	_____	_____
			<i>l</i>	_____	_____	_____	_____
Ho	67	1	S	_____	_____	_____	_____
			<i>l</i>	_____	_____	_____	_____
Er	68	1	S	_____	_____	_____	_____
			<i>l</i>	_____	_____	_____	_____
Tm	69	1	S	$-1.79433 \times 10^2$	$2.89719 \times 10^3$	$-2.01939 \times 10^{-2}$	$6.63686 \times 10$
			<i>l</i>	$-2.13357 \times 10^2$	$-7.52000 \times 10$	$-1.95352 \times 10^{-2}$	$7.64662 \times 10$



(1) Geometry of a coated fuel particle.



(2) Geometry of a hollow fuel channel.

Fig. A1 Geometries for Sample Calculation.

Table A6 Input List

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

```

01 SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12
02 001 2 1 2 2 1 1 1 1
03 002 1 1 2 1 1 1
04 SR-90
05 001 5 5 3 4 1 18 2 2 3 6 6
06 005
07 0.025 0.029 0.032 0.0345 0.039
08 004 1 1 1 1
09 0.4 1.2 1.21 1.70 1.85
10 002 8 1 3 1
11 003 1 3 2 4
12 001 2 3 4
13 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0
14 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01
15 0.2
16 001 5 6 7 8 9
17 001 3 11 12 15 16
18 13.7 2.7 1.2 0.8 0.5 0.0
    13.7 2.7 1.2 0.8 0.5 0.0
19 941.0 941.0 742.0 668.0 629.0 525.0
    1040.0 1040.0 874.0 819.0 787.0 704.0
    1053.0 1053.0 945.0 911.0 891.0 838.0
    1075.0 1075.0 1000.0 977.0 963.0 927.0
    1055.0 1055.0 1016.0 1005.0 997.0 979.0
    941.0 941.0 742.0 668.0 629.0 525.0
    1040.0 1040.0 874.0 819.0 787.0 704.0
    1053.0 1053.0 945.0 911.0 891.0 838.0
    1075.0 1075.0 1000.0 977.0 963.0 927.0
    1055.0 1055.0 1016.0 1005.0 997.0 979.0
20 231.4814815
21 002 1
22 115.7407408 231.4814815
23

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....\*

	0.000	3.163	15.818	47.455	79.092	118.638		
	158.184	197.730	237.276	276.822	316.368	355.914		
	395.460	435.006	474.552	514.098	553.644	593.190		
24	0.9	1.1	1.8	1.4				
25	6.0	4.0	2.0	1.0				
26	0.38	0.30	0.28	0.36				
27	4.9795							
28	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0			
33	1.7047	-12 1.7039	-12 1.7008	-12 1.6768	-12 1.6242	-12 1.5920	-12	
	1.5501	-12 1.5099	-12 1.4768	-12 1.4463	-12 1.4179	-12 1.3910	-12	
	1.3658	-12 1.3416	-12 1.3186	-12 1.2798	-12 1.2590	-12 1.2393	-12	
	1.7047	-12 1.7039	-12 1.7008	-12 1.6768	-12 1.6242	-12 1.5920	-12	
	1.5501	-12 1.5099	-12 1.4768	-12 1.4463	-12 1.4179	-12 1.3910	-12	
	1.3658	-12 1.3416	-12 1.3186	-12 1.2798	-12 1.2590	-12 1.2393	-12	
	1.7047	-12 1.7039	-12 1.7008	-12 1.6768	-12 1.6242	-12 1.5920	-12	
	1.5501	-12 1.5099	-12 1.4768	-12 1.4463	-12 1.4179	-12 1.3910	-12	
	1.3658	-12 1.3416	-12 1.3186	-12 1.2798	-12 1.2590	-12 1.2393	-12	
	1.7047	-12 1.7039	-12 1.7008	-12 1.6768	-12 1.6242	-12 1.5920	-12	
	1.5501	-12 1.5099	-12 1.4768	-12 1.4463	-12 1.4179	-12 1.3910	-12	
	1.3658	-12 1.3416	-12 1.3186	-12 1.2798	-12 1.2590	-12 1.2393	-12	
34	1.0	0.1	0.05	0.01	0.005			
35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
38	4.0	-04 8.0	-03 3.8	-05 3.8	-09 3.8	-05		
39		7.7	-04	7.7	-04			
40	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0			
41		30.0		30.0				
42	6.0	-04						
43	6.0	-04						
44	0.0	0.0						
45	1.0	2.0	0.2	0.5	2.0			
46					1.0			
48	7.85	-10						
50	9.5	+12 9.4	+12 6.4	+12 4.2	+12 2.0	+12		

.....1.....\*.....2.....\*.....3.....\*.....4.....\*.....5.....\*.....6.....\*.....7.....\*

9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
9.5	+12	9.4	+12	6.4	+12	4.2	+12	2.0	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12
6.4	+12	5.3	+12	4.6	+12	3.3	+12	2.6	+12

51	038			
52	090			
53	90.0	4.003		
54	2.13	1.27		
55	001			
56	1043.0			
57	1630.0	1370.0		
58	-2.44375	8049.6	-0.00188317	4.11062
59	-2.44375	8049.6	-0.00188317	4.11062
60	0.02			
61	0.20			
62		10.2		
63	60.0	0.5	0.001	
99				

Table A7 Output Form of Sample Calculation

\*\*\*\*\* FICUND CODE INPUT DATA \*\*\*\*\* CASE NO 1 \*\*\*\*\*

CARD NO	L	K	J	(DATA(I,J,K+L),I=1,IMAX)	DO	L=K=J				
		K	J	(DATA(I,J,K),I=1,IMAX)	DO	K=J				
			J	(DATA(I,J),I=1,IMAX)	DO					
				(DATA(I),I=1,IMAX)						

1	TITLE	SAMPLE CALCULATION SR=90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12									
2	OPTION FOR FLOW CONTROL	1	2	1	2	JOPTI(10)	1	1	1	1	0
3	OPTION FOR OUTPUT FORMS	2	1	1	2	JOPTO(7)	1	1			
4	NAME OF FP	J1=1,DAUGHTER =2,PARENT-DAUGHTER FPNAM(J1) SR=90									
5	NO OF TYPES OF FUEL IN CPF (CPF TYPE)	NFMX									1
	NO OF Z-MESHES IN A CHANNEL	NZMX									5
	NO OF R-MEDIUMS IN A CHANNEL	NCL									5
	NO OF GAS PHASES IN A CHANNEL	NCGAS									3
	NO OF GAS-SOLID INTERFACES IN A CHANNEL	MCSGMX									4
	NO OF BURNUP STEPS	NBMX									1
	NO OF BIRTH TIME MESHES	ITSBK									18
	MAX NO OF RELEASE T-MESHES IN BURNUP STEP	NTMAX									2
	MIN NO OF RELEASE T-MESHES IN BURNUP STEP	NTMIN									2
	MAX NO OF ITERATION CALCULATION	NZITMX									3
	NO OF TEMP INPUT R-POINTS IN A CPF	MPTMX									6
	NO OF TEMP INPUT R-POINTS IN A CHANNEL	MCTMX									6
6	NO OF MEDIUMS IN CPF	NPL(NFMX)									5
7	RADIUS OF MEDIUM IN CPF	RP(NPL,NFMX)									(CM)
	J	1	0.2500000E-01	0.2900000E-01	0.3200000E-01	0.3450000E-01	0.3900000E-01				
8	NO OF R-MESHES IN MEDIUM IN CPF	NPH(NPL,NFMX)									1
	J	1	4	1	1	1					
9	RADIUS OF MEDIUM IN A CHANNEL	RC(NCL)									(CM)
	K	1	0.4000000E 00	0.1200000E 01	0.1210000E 01	0.1700000E 01	0.1850000E 01				
10	NO OF R-MESHES IN MEDIUM IN A CHANNEL	NCM(NCL)									1
	J	2	8	1	3						
11	CLASS OF MEDIUM IN A CHANNEL	JSG(NCL)									4
	J	3	1	3	2						
12	OUTER MEDIUM NO OF GAS-SOLID INTERFACE	MCSG(MCSGMX)									4
	J	1	2	3	4						
13	Z-MESH INTERVAL	ZMESH(NZMX)									(CM)
	K	1	0.5000000E 02	0.5000000E 02	0.5000000E 02	0.5000000E 02	0.5000000E 02				
14	BLOKEN FRACTION OF CPF	RAPTP(NZMX,NBMX,NFMX)									(-)
	K	1	0.1000000E-01	0.1000000E-01	0.1000000E-01	0.1000000E-01	0.1000000E-01	0.1000000E-01			
15	VOLUME FRACTION OF CPF IN MATRIX	VOL(NFMX)									(-)
	J	1	0.2000000E 00								
16	TEMPERATURE INPUT R-MESH NO IN CPF	MPT(MPTMX)									9
	J	1	5	6	7	8					
17	TEMPERATURE INPUT R-MESH NO IN A CHANNEL	MCT(MCTMX)									16
	J	1	3	11	12	15					
18	TEMPERATURE RISE IN CPF	DTP(MPTMX,NFMX,NBMX+1)									(DEG.C)
	K	1	0.1370000E 02	0.2700000E 01	0.1200000E 01	0.8000000E 00	0.5000000E 00	0.0			
	J	2	0.1370000E 02	0.2700000E 01	0.1200000E 01	0.8000000E 00	0.5000000E 00	0.0			
19	TEMPERATURE IN A CHANNEL	TC(MCTMX,NZMX,NBMX+1)									(DEG.C)
	K	1	0.9410000E 03	0.9410000E 03	0.7420000E 03	0.6680000E 03	0.6290000E 03	0.5250000E 03			
	J	1	0.1040000E 04	0.1040000E 04	0.8740000E 03	0.8190000E 03	0.7870000E 03	0.7040000E 03			
	J	2	0.1053000E 04	0.1053000E 04	0.9450000E 03	0.9110000E 03	0.8910000E 03	0.8380000E 03			
	J	3	0.1075000E 04	0.1075000E 04	0.1000000E 04	0.9770000E 03	0.9630000E 03	0.9270000E 03			
	J	4	0.1075000E 04	0.1055000E 04	0.1016000E 04	0.1005000E 04	0.9970000E 03	0.9790000E 03			
	J	5	0.9410000E 03	0.9410000E 03	0.7420000E 03	0.6680000E 03	0.6290000E 03	0.5250000E 03			
	J	6	0.1040000E 04	0.1040000E 04	0.8740000E 03	0.8190000E 03	0.7870000E 03	0.7040000E 03			
	J	7	0.1053000E 04	0.1053000E 04	0.9450000E 03	0.9110000E 03	0.8910000E 03	0.8380000E 03			
	J	8	0.1075000E 04	0.1075000E 04	0.1000000E 04	0.9770000E 03	0.9630000E 03	0.9270000E 03			
	J	9	0.1075000E 04	0.1055000E 04	0.1016000E 04	0.1005000E 04	0.9970000E 03	0.9790000E 03			
20	BURN UP STEP	TBURN(NBMX)									(DAY)
	J	1	0.2314815E 03								
21	NO OF RELEASE TIME MESHES	NTRP(NBMX)									2

JAERI-M 4883

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTR 72/4/12

NO	DESCRIPTION	UNIT	VALUE 1	VALUE 2	VALUE 3	VALUE 4	VALUE 5	VALUE 6	VALUE 7	VALUE 8
22	RELEASE TIME MESH	TSRP(NTRP,NBMX)	(DAY)							
	J		0.1157407E 03	0.2314815E 03						
23	BIRTH TIME MESH	TSBK(I,TSBK)	(DAY)							
	0,0		0.3163000E 01	0.1581800E 02	0.4745500E 02	0.7909200E 02	0.1186380E 03			
	0.1581800E 03		0.1877300E 03	0.2372760E 03	0.2768220E 03	0.3163680E 03	0.3537140E 03			
	0.3537600E 03		0.4350060E 03	0.4745520E 03	0.5140980E 03	0.5536440E 03	0.5934900E 03			
24	SOLID DENSITY IN A CHANNEL	DENSS(NCL,NBMX)	(G/CM3)							
	J		0.9000000E 00	0.1100000E 01	0.1800000E 01	0.1400000E 01	0.0			
25	SPECIFIC SURFACE AREA OF SOLID IN CHANNEL	SPSS(NCL,NBMX)	(M2/G)							
	J		0.6000000E 01	0.4000000E 01	0.2000000E 01	0.1000000E 01	0.0			
26	SOLID POROSITY IN A CHANNEL	POROS(NCL,NBMX)	(-)							
	J		0.3800000E 00	0.3000000E 00	0.2800000E 00	0.3600000E 00	0.0			
27	COOLANT MASS FLOW RATE	FLOC(NBMX,IIO)	(G/SEC/CM2)							
	J		0.4979500E 01							
28	GAS PRESSURE	PGAS(NCL,NBMX)	(ATM)							
	J		0.4000000E 02	0.4000000E 02	0.4000000E 02	0.4000000E 02	0.4000000E 02			
33	FP BIRTH RATE IN KERNEL	BK(I,TSBK,NZMX,NFMX,J1)	(G-MOL/CM3/SEC)							
	L K J		0.1704700E-11	0.1703900E-11	0.1700800E-11	0.1676800E-11	0.1624200E-11	0.1592000E-11		
	1 1 1		0.1550100E-11	0.1509900E-11	0.1476800E-11	0.1446300E-11	0.1417900E-11	0.1391000E-11		
			0.1365800E-11	0.1341600E-11	0.1318600E-11	0.1279800E-11	0.1259000E-11	0.1239300E-11		
	1 1 2		0.1704700E-11	0.1703900E-11	0.1700800E-11	0.1676800E-11	0.1624200E-11	0.1592000E-11		
			0.1550100E-11	0.1509900E-11	0.1476800E-11	0.1446300E-11	0.1417900E-11	0.1391000E-11		
			0.1365800E-11	0.1341600E-11	0.1318600E-11	0.1279800E-11	0.1259000E-11	0.1239300E-11		
	1 1 3		0.1704700E-11	0.1703900E-11	0.1700800E-11	0.1676800E-11	0.1624200E-11	0.1592000E-11		
			0.1550100E-11	0.1509900E-11	0.1476800E-11	0.1446300E-11	0.1417900E-11	0.1391000E-11		
			0.1365800E-11	0.1341600E-11	0.1318600E-11	0.1279800E-11	0.1259000E-11	0.1239300E-11		
	1 1 4		0.1704700E-11	0.1703900E-11	0.1700800E-11	0.1676800E-11	0.1624200E-11	0.1592000E-11		
			0.1550100E-11	0.1509900E-11	0.1476800E-11	0.1446300E-11	0.1417900E-11	0.1391000E-11		
			0.1365800E-11	0.1341600E-11	0.1318600E-11	0.1279800E-11	0.1259000E-11	0.1239300E-11		
	1 1 5		0.1704700E-11	0.1703900E-11	0.1700800E-11	0.1676800E-11	0.1624200E-11	0.1592000E-11		
			0.1550100E-11	0.1509900E-11	0.1476800E-11	0.1446300E-11	0.1417900E-11	0.1391000E-11		
			0.1365800E-11	0.1341600E-11	0.1318600E-11	0.1279800E-11	0.1259000E-11	0.1239300E-11		
34	FUEL CONTAMINATION IN CPF	CONT(NPL,NFMX)	(-)							
	J		0.1000000E 01	0.1000000E 00	0.3000000E-01	0.1000000E-01	0.5000000E-02			
35	FUEL CONTAMINATION PARAMETER IN CPF	CONTP(NPL,NFMX)	(-)							
	J		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
38	FP DIFFUSION COEFF FREQUENCY IN CPF	DIFOP(NPL,NFMX,J1)	(CM2/SEC)							
	K J		0.4000000E-03	0.8000000E-02	0.3800000E-04	0.3800000E-08	0.3800000E-04			
39	FP DIFFUSION COEFF FREQUENCY IN CHANNEL	DIFOC(NCL,J1)	(CM2/SEC)							
	J		0.0	0.7700000E-03	0.0	0.7700000E-03	0.0			
40	FP DIFFUSION COEFF ACT ENERGY IN CPF	DIFEP(NPL,NFMX,J1)	(KCAL/G-MOL)							
	K J		0.3000000E 02	0.3000000E 02	0.3000000E 02	0.3000000E 02	0.3000000E 02			
41	FP DIFFUSION COEFF ACT ENERGY IN CHANNEL	DIFEC(NCL,J1)	(KCAL/G-MOL)							
	J		0.0	0.3000000E 02	0.0	0.3000000E 02	0.0			
42	RECOIL LENGTH IN KERNEL	RECOK(NFMX)	(CM)							
			0.6000000E-03							
43	RECOIL LENGTH IN OUTERMOST COATING	RECOC(NFMX)	(CM)							
			0.6000000E-03							
44	EXTRAPOLATION LENGTH IN KERNEL CPF	EXTRK,EXTRC	(CM)							
			0.0	0.0						
45	PARTITION COEFF IN CPF	PARTP(NPL,NFMX,J1)	(-)							
	K J		0.1000000E 01	0.2000000E 01	0.2000000E 00	0.5000000E 00	0.2000000E 01			
46	PARTITION COEFF IN A CHANNEL	PARTC(NCL,J1)	(-)							
	J		0.0	0.0	0.0	0.0	0.1000000E 01			
48	DECAY CONSTANT OF FP	RAMD(J1)	(1/SEC)							
			0.7850000E-09							



JAERI-M 4883

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

50 NEUTRON FLUX		FLUX(NZMX,ITSBK,GROUP)				(N/CM2/SEC)
K	J					
1	1	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	2	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	3	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	4	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	5	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	6	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	7	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	8	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	9	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	10	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	11	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	12	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	13	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	14	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	15	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	16	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	17	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
1	18	0.9500000E 13	0.9400000E 13	0.6400000E 13	0.4200000E 13	0.2000000E 13
2	1	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	2	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	3	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	4	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	5	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	6	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	7	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	8	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	9	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	10	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	11	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	12	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	13	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	14	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	15	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	16	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	17	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
2	18	0.6400000E 13	0.5300000E 13	0.4600000E 13	0.3300000E 13	0.2600000E 13
51	ATOMIC NO OF FP		NATOM(J1)		(-)	
		38				
52	MASS NO OF FP		MASS(J1)		(-)	
		90				
53	ATOMIC WT OF FP AND COOLANT GAS		SMI(J1),SMG		(-)	
		0.9000000E 02 0.4003000E 01				
54	ATOMIC DIAMETER OF FP AND COOLANT GAS		SIGI(J1),SIGG		(A)	
		0.2130000E 01 0.1270000E 01				
55	NO OF ATOMS FOR GAS=STATE OF FP		IGR(J1)			
		1				
56	MELTING POINT OF FP		TMP(J1)		(DEG.K)	
		0.1043000E 04				
57	BOILING POINT UNDER 760 AND 100 MM-HG OF FP		TBP760,TBP100(J1)		(DEG.K)	
		0.1630000E 04 0.1370000E 04				
58	TEMP COEFF FOR VAPOUR PRESS OF SOLID FP		AGS,BGS,CGS,DGS(J1)		( )	
		1 -0.2443750E 01 0.8049600E 04		-0.1883170E-02 0.4110620E 01		
59	TEMP COEFF FOR VAPOUR PRESS OF LIQUID FP		AGL,BGL,CGL,DGL(J1)		( )	
		1 -0.2443750E 01 0.8049600E 04		-0.1883170E-02 0.4110620E 01		
60	COOLANT BY-PASS FRACTION TO PURIF SYSTEM		PURIF(NBMX)		(-)	
		0.2000000E-01				
61	PLATEOUT FRACTION IN COOLANT LOOP		PLATE(NBMX,J1)		(-)	
		1 0.2000000E 00				
62	LENARD-JOHNES PARAM. E/K OF FP-COOLANT GAS		EIG(J1)+EGG		(DEG.K)	
		0.0 0.1020000E 02				
63	CIRCULATION TIME OF COOLANT LOOP		TLOOP		0.6000000E 02 (SEC)	
	WEIGHING PARAMETER FOR FP ACCUMULATION		WEIGH*OMR		0.0000000E 00 (-)	
	CONVERGENCY FACTOR FOR ITERATION PROCESS		EPSZ		0.1000000E-02 (-)	

\*\*\*\*\* F.P. RELEASE EVALUATION \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* C.P.F. \*\*\*\*\*

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

Z-MESH		EQUILB. TIME (DAY)		DIMENSIONLESS EQ. TIME	
		BROKEN	INTACT	BROKEN	INTACT
1	DAUGHTER	0.832073E 00	0.670108E 04	0.666587E-01	0.191332E-02
2	DAUGHTER	0.237467E 00	0.304461E 04	0.666644E-01	0.309612E-02
3	DAUGHTER	0.159197E 00	0.222180E 04	0.666651E-01	0.338663E-02
4	DAUGHTER	0.112838E 00	0.166174E 04	0.666656E-01	0.358808E-02
5	DAUGHTER	0.114817E 00	0.166782E 04	0.666656E-01	0.358086E-02

TYPICAL EQUILB. TIME (DAY) = 0.670191E 04

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* BURNUP STEP = 1 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* TIME STEP = 1 TIME = 0.115741E 03 (DAY) \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* Z-MESH = 1 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*

VOLUME FRACTION= 1.00000

\*\* CPF BROKEN \*\*

FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	62.500	0.297424E-06	0.380114E-02		0.165506E-11	0.855219E 03	0.608742E-09	0.100000E 01
2	125.000	0.280121E-06	0.358001E-02		0.165506E-11	0.852469E 03	0.589119E-09	0.100000E 01
3	187.500	0.230253E-06	0.294268E-02		0.165506E-11	0.849719E 03	0.570036E-09	0.100000E 01
4	250.000	0.131752E-06	0.168381E-02		0.165506E-11	0.846969E 03	0.551483E-09	0.100000E 01
5	320.000	0.111962E-12	0.143090E-08	0.137914E-13		0.844219E 03		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999944E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101794E 01

\*\* CPF INTACT \*\*

FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.389400E-05	0.497798E-01	0.0	0.165506E-11	0.852469E 03	0.608742E-09	0.100000E 01
3	125.000	0.386505E-05	0.494097E-01	0.272875E-14	0.165506E-11	0.849719E 03	0.589119E-09	0.100000E 01
4	187.500	0.381492E-05	0.487689E-01	0.457211E-14	0.165506E-11	0.846969E 03	0.570036E-09	0.100000E 01
5	250.000	0.149671E-04	0.191339E 00	-0.230470E-11	0.165506E-11	0.844219E 03	0.551483E-09	0.200000E 01
6	290.000	0.299282E-06	0.382594E-02	0.199512E-10	0.165506E-12	0.842719E 03	0.107500E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.366272E-06	0.468232E-02	0.220972E-13	0.827528E-13	0.842318E 03	0.504780E-10	0.500000E 00
8	345.000	0.621851E-08	0.794956E-04	0.144782E-17	0.165506E-13	0.842019E 03	0.502641E-14	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.345616E-16	0.827528E-14	0.841519E 03	0.500206E-10	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.609833E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.631735E-02

JAERI-M 4883

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 2 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.831919E-07	0.106321E-02		0.165506E-11	0.970719E 03	0.211462E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.799430E-07	0.102169E-02		0.165506E-11	0.967969E 03	0.205839E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.657108E-07	0.839799E-03		0.165506E-11	0.965219E 03	0.200341E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.375997E-07	0.480532E-03		0.165506E-11	0.962469E 03	0.194967E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.319517E-13	0.408350E-09	0.137919E-13		0.959719E 03		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999984E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101798E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.379818E-05	0.485548E-01	0.0	0.165506E-11	0.967969E 03	0.211462E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.378971E-05	0.484465E-01	0.278886E-14	0.165506E-11	0.965219E 03	0.205839E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.377191E-05	0.482609E-01	0.465517E-14	0.165506E-11	0.962469E 03	0.200341E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.150170E-04	0.191973E 00	-0.819136E-11	0.165506E-11	0.959719E 03	0.194967E-08	0.100000E 01
6	290.000	0.300323E-06	0.383923E-02	0.710942E-10	0.165506E-12	0.958219E 03	0.381795E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.373130E-06	0.476999E-02	0.787476E-13	0.827528E-13	0.957818E 03	0.179646E-09	0.500000E 00
8	345.000	0.196083E-08	0.250667E-04	0.531576E-17	0.165506E-13	0.957519E 03	0.179021E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.388480E-16	0.827528E-14	0.957019E 03	0.178308E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.685467E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.707369E-02

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 3 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.554194E-07	0.708272E-03		0.165506E-11	0.101272E 04	0.314612E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.535933E-07	0.684934E-03		0.165506E-11	0.100997E 04	0.306777E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.440521E-07	0.362995E-03		0.165506E-11	0.100722E 04	0.299106E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.252065E-07	0.322145E-03		0.165506E-11	0.100447E 04	0.291594E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.214202E-13	0.273754E-09	0.137920E-13		0.100172E 04		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999989E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101799E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.378398E-05	0.483733E-01	0.0	0.165506E-11	0.100997E 04	0.314612E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.377828E-05	0.483004E-01	0.279780E-14	0.165506E-11	0.100722E 04	0.306777E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.376853E-05	0.481758E-01	0.466773E-14	0.165506E-11	0.100447E 04	0.299106E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.150180E-04	0.192986E 00	-0.122551E-10	0.165506E-11	0.100172E 04	0.291594E-08	0.100000E 01
6	290.000	0.300349E-06	0.383957E-02	0.106482E-09	0.165506E-12	0.100022E 04	0.371796E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.373906E-06	0.477990E-02	0.117986E-12	0.827528E-13	0.999818E 03	0.269212E-09	0.500000E 00
8	345.000	0.138697E-08	0.177306E-04	0.799681E-17	0.165506E-13	0.999519E 03	0.268336E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.411987E-16	0.827528E-14	0.999019E 03	0.267337E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.726945E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.748847E-02

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 4 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.417845E-07	0.534015E-03		0.165506E-11	0.105122E 04	0.442908E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.379865E-07	0.485476E-03		0.165506E-11	0.104847E 04	0.432505E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.312237E-07	0.399046E-03		0.165506E-11	0.104372E 04	0.422304E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.178662E-07	0.228334E-03		0.165506E-11	0.104097E 04	0.412303E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.151824E-13	0.194034E-09	0.137920E-13		0.104022E 04		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999992E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101799E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.377619E-05	0.482738E-01	0.0	0.165506E-11	0.104847E 04	0.442908E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.377214E-05	0.482220E-01	0.280266E-14	0.165506E-11	0.104572E 04	0.432505E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.376533E-05	0.481335E-01	0.467443E-14	0.165506E-11	0.104297E 04	0.422304E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.190212E-04	0.192026E 00	-0.173346E-10	0.165506E-11	0.104022E 04	0.412303E-08	0.200000E 01
6	290.000	0.300416E-06	0.384042E-02	0.150764E-09	0.165506E-12	0.103872E 04	0.809418E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.374430E-06	0.478660E-02	0.167112E-12	0.827528E-13	0.103832E 04	0.381284E-09	0.500000E 00
8	345.000	0.104650E-08	0.133781E-04	0.113543E-16	0.165506E-13	0.103802E 04	0.380115E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.440439E-16	0.827528E-14	0.103752E 04	0.378782E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.777147E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.799049E-02

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 5 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.388313E-07	0.496272E-03		0.165506E-11	0.104922E 04	0.435322E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.386526E-07	0.493989E-03		0.165506E-11	0.104647E 04	0.425066E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.317713E-07	0.406044E-03		0.165506E-11	0.104372E 04	0.415011E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.181795E-07	0.232338E-03		0.165506E-11	0.104097E 04	0.405153E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.154486E-13	0.197437E-09	0.137920E-13		0.103822E 04		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999992E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101799E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.377569E-05	0.482673E-01	0.0	0.165506E-11	0.104647E 04	0.435322E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.377157E-05	0.482146E-01	0.280299E-14	0.165506E-11	0.104372E 04	0.425066E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.376453E-05	0.481246E-01	0.467504E-14	0.165506E-11	0.104097E 04	0.415011E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.190177E-04	0.191982E 00	-0.170299E-10	0.165506E-11	0.103822E 04	0.405153E-08	0.200000E 01
6	290.000	0.300345E-06	0.383953E-02	0.148107E-09	0.165506E-12	0.103672E 04	0.795336E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.374324E-06	0.478524E-02	0.164163E-12	0.827528E-13	0.103632E 04	0.374641E-09	0.500000E 00
8	345.000	0.106098E-08	0.135633E-04	0.111527E-16	0.165506E-13	0.103602E 04	0.373489E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.438746E-16	0.827528E-14	0.103552E 04	0.372175E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.774161E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.796063E-02

JAERI I-M 4883

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12  
 \*\*\*\*\* TIME STEP = 2 TIME = 0.231481E 03 (DAY) \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* Z-MESH = 1 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*

VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIOUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.275956E-06	0.352678E-02		0.153560E-11	0.855219E 03	0.608742E-09	0.100000E 01
2	62.500	0.259902E-06	0.332161E-02		0.153560E-11	0.852469E 03	0.589119E-09	0.100000E 01
3	125.000	0.213634E-06	0.273028E-02		0.153560E-11	0.849719E 03	0.570036E-09	0.100000E 01
4	187.500	0.122242E-06	0.156228E-02		0.153560E-11	0.846969E 03	0.551483E-09	0.100000E 01
5	250.000	0.103881E-12	0.132762E-08	0.127959E-13		0.844219E 03		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999944E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101794E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIOUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.111115E-04	0.142046E 00	0.0	0.153560E-11	0.852469E 03	0.608742E-09	0.100000E 01
3	125.000	0.110829E-04	0.141681E 00	0.269429E-14	0.153560E-11	0.849719E 03	0.589119E-09	0.100000E 01
4	187.500	0.110339E-04	0.141055E 00	0.446616E-14	0.153560E-11	0.846969E 03	0.570036E-09	0.100000E 01
5	250.000	0.438548E-04	0.560626E 00	-0.676564E-11	0.153560E-11	0.844219E 03	0.551483E-09	0.100000E 01
6	290.000	0.877038E-06	0.112118E-01	0.584585E-10	0.153560E-12	0.842719E 03	0.107500E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.108845E-03	0.139145E-01	0.646284E-13	0.767799E-13	0.842318E 03	0.509780E-10	0.200000E 00
8	345.000	0.674943E-08	0.862827E-04	0.434988E-17	0.153560E-13	0.842019E 03	0.502641E-14	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.375123E-16	0.767799E-14	0.841519E 03	0.500206E-10	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.713390E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.735292E-02

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12  
 \*\*\*\*\* Z-MESH = 2 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*

VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIOUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.771873E-07	0.986471E-03		0.153560E-11	0.970719E 03	0.211462E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.741728E-07	0.947946E-03		0.153560E-11	0.967969E 03	0.205839E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.609679E-07	0.779184E-03		0.153560E-11	0.965219E 03	0.200341E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.348858E-07	0.445848E-03		0.153560E-11	0.962469E 03	0.194967E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.296455E-13	0.378876E-09	0.127964E-13		0.959719E 03		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999984E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101798E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIOUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.110103E-04	0.140752E 00	0.0	0.153560E-11	0.967969E 03	0.211462E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.110023E-04	0.140650E 00	0.263805E-14	0.153560E-11	0.965219E 03	0.205839E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.109886E-04	0.140475E 00	0.438932E-14	0.153560E-11	0.962469E 03	0.200341E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.438757E-04	0.560894E 00	-0.239460E-10	0.153560E-11	0.959719E 03	0.194967E-08	0.100000E 01
6	290.000	0.877497E-06	0.112177E-01	0.207719E-09	0.153560E-12	0.958219E 03	0.381795E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.109467E-03	0.139939E-01	0.229956E-12	0.767799E-13	0.957818E 03	0.179646E-09	0.200000E 00
8	345.000	0.230820E-08	0.295073E-04	0.156444E-16	0.153560E-13	0.957519E 03	0.179021E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.457301E-16	0.767799E-14	0.957019E 03	0.178208E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.869671E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.891573E-02

JAERI-M 4883

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 3 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.514193E-07	0.657151E-03		0.153560E-11	0.101272E 04	0.314612E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.497250E-07	0.635497E-03		0.153560E-11	0.100997E 04	0.306777E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.408725E-07	0.522359E-03		0.153560E-11	0.100722E 04	0.299106E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.233872E-07	0.298893E-03		0.153560E-11	0.100447E 04	0.291594E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.198741E-13	0.253995E-09	0.127965E-13		0.100172E 04		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999989E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101799E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.109910E-04	0.140506E 00	0.0	0.153560E-11	0.100997E 04	0.314612E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.109857E-04	0.140437E 00	0.263226E-14	0.153560E-11	0.100722E 04	0.306777E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.109765E-04	0.140320E 00	0.438232E-14	0.153560E-11	0.100447E 04	0.299106E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.438353E-04	0.260610E 00	-0.357987E-10	0.153560E-11	0.100172E 04	0.291594E-08	0.200000E 01
6	290.000	0.877059E-06	0.112121E-01	0.310933E-09	0.153560E-12	0.100022E 04	0.571796E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.109484E-05	0.139961E-01	0.344404E-12	0.767799E-13	0.999818E 03	0.269212E-09	0.200000E 00
8	345.000	0.175052E-08	0.223781E-04	0.234651E-16	0.153560E-13	0.999519E 03	0.268336E-13	0.200000E 00
9	390.000	0.0	0.0	0.519975E-16	0.767799E-14	0.999019E 03	0.267337E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.988862E-02 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.101076E-01

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 4 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	-0.000	0.387685E-07	0.495471E-03		0.153560E-11	0.105122E 04	0.442908E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.352447E-07	0.450435E-03		0.153560E-11	0.104847E 04	0.432505E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.289701E-07	0.370244E-03		0.153560E-11	0.104572E 04	0.422304E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.165766E-07	0.211853E-03		0.153560E-11	0.104297E 04	0.412303E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.140866E-13	0.180029E-09	0.127966E-13		0.104022E 04		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999992E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101799E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.109805E-04	0.140371E 00	0.0	0.153560E-11	0.104847E 04	0.442908E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.109767E-04	0.140322E 00	0.262922E-14	0.153560E-11	0.104572E 04	0.432505E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.109702E-04	0.140239E 00	0.437840E-14	0.153560E-11	0.104297E 04	0.422304E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.438436E-04	0.560483E 00	-0.306090E-10	0.153560E-11	0.104022E 04	0.412303E-08	0.200000E 01
6	290.000	0.878864E-06	0.112096E-01	0.440048E-09	0.153560E-12	0.103874E 04	0.809418E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.109501E-05	0.139983E-01	0.487639E-12	0.767799E-13	0.103832E 04	0.381284E-09	0.200000E 00
8	345.000	0.142426E-08	0.182073E-04	0.332530E-16	0.153560E-13	0.103802E 04	0.380119E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.599426E-16	0.767799E-14	0.103752E 04	0.378782E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.113996E-01 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.116186E-01

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* Z-MESH = 5 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* F.P. DAUGHTER \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FUEL PARTICLE TYPE = 1 \*\*\*\*\*  
 VOLUME FRACTION= 1.00000  
 \*\* CPF BROKEN \*\*  
 FRACTION = 0.01000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
1	0.000	0.360285E-07	0.460452E-03		0.153560E-11	0.104922E 04	0.435322E-08	0.100000E 01
2	62.500	0.358628E-07	0.458334E-03		0.153560E-11	0.104647E 04	0.425066E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.294781E-07	0.376737E-03		0.153560E-11	0.104372E 04	0.415011E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.168673E-07	0.215568E-03		0.153560E-11	0.104097E 04	0.405153E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.143336E-13	0.183186E-09	0.127966E-13		0.103822E 04		0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.999992E 00 R/B (RECOIL) = 0.179991E-01 R/B (TOTAL) = 0.101799E 01

\*\* CPF INTACT \*\*  
 FRACTION = 0.99000

MESH NO. (-)	RADIUS (MICRON)	CONCENT (MOL/CM3)	ACTIV (CI/CM3)	FLUX (MOL/S/CM2)	BIRTH RATE (MOL/S/CM3)	TEMP (DEG.C)	DIFUSION COEFFICIENT (CM2/S)	PART COEFFICIENT (-)
2	62.500	0.109769E-04	0.140326E 00	0.0	0.153560E-11	0.104647E 04	0.435322E-08	0.100000E 01
3	125.000	0.109730E-04	0.140276E 00	0.263078E-14	0.153560E-11	0.104372E 04	0.425066E-08	0.100000E 01
4	187.500	0.109665E-04	0.140192E 00	0.438099E-14	0.153560E-11	0.104097E 04	0.415011E-08	0.100000E 01
5	250.000	0.438280E-04	0.560284E 00	-0.497136E-10	0.153560E-11	0.103822E 04	0.405153E-08	0.200000E 01
6	290.000	0.876552E-06	0.112056E-01	0.432239E-09	0.153560E-12	0.103672E 04	0.795336E-07	0.200000E 00
7	320.000	0.109460E-05	0.139931E-01	0.478974E-12	0.767799E-13	0.103632E 04	0.374641E-09	0.300000E 00
8	345.000	0.143788E-08	0.183815E-04	0.326628E-16	0.153560E-13	0.103602E 04	0.373489E-13	0.200000E 01
9	390.000	0.0	0.0	0.394604E-16	0.767799E-14	0.103552E 04	0.372175E-09	0.100000E 01

R/B (DIF) = 0.113079E-01 R/B (RECOIL) = 0.219020E-03 R/B (TOTAL) = 0.115269E-01

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\*\*\* FUEL CHANNEL \*\*\*\*\*

HOLLOW TYPE

TIME STEP IS DEFINED BY INPUT DATA

\*\*\* TIME STEP 1 TIME = 115.74(DAY) \*\*\*

\*\*\*\*\* F.P. SR-90 \*\*\*\*\*

COOLANT Z-MESH	BOUNDARY L. THICKNESS (CM)	MASS FLOW (G/CM2/S)	TEMPERATURE (DEG.C)	VISCO. COEFF. (G/CM/S)	DENSITY (G/CM3)	VELOCITY (CM/S)	RE (-)	SC (-)	MASS T. COEFF. (CM/S)
OUTER	1	0.16030E-01	0.49795E 01	0.57700E 03	0.39818E-03	0.22951E-02	0.21696E 04	0.37517E 04	0.28497E 01
	2	0.17688E-01	0.49795E 01	0.74550E 03	0.45197E-03	0.19155E-02	0.25996E 04	0.33052E 04	0.28656E 01
	3	0.18794E-01	0.49795E 01	0.86450E 03	0.48930E-03	0.17151E-02	0.29039E 04	0.30531E 04	0.28809E 01
	4	0.19516E-01	0.49795E 01	0.94500E 03	0.51419E-03	0.16018E-02	0.31087E 04	0.29053E 04	0.28919E 01
	5	0.19893E-01	0.49795E 01	0.98800E 03	0.52732E-03	0.15472E-02	0.32189E 04	0.28329E 04	0.28977E 01

JAER I-M 4883

\*\* ITERATION NO.= 3

SAMPLE CALCULATION SR=90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12

* CONCENTRATION (MCL/CM3)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1	0.0	0.630660E-09	0.651436E-09	0.654670E-09	0.656186E-09	0.651671E-09
1	2	0.20000	0.630661E-09	0.651436E-09	0.654670E-09	0.656186E-09	0.651671E-09
1	3	0.40000	0.631381E-09	0.651501E-09	0.654688E-09	0.656195E-09	0.651677E-09
2	3	0.40000	0.139625E-07	0.148352E-07	0.151493E-07	0.155931E-07	0.155725E-07
2	4	0.50000	0.144517E-07	0.150589E-07	0.153390E-07	0.157492E-07	0.157528E-07
2	5	0.60000	0.146670E-07	0.151593E-07	0.153975E-07	0.157922E-07	0.158063E-07
2	6	0.70000	0.147511E-07	0.151519E-07	0.153370E-07	0.157362E-07	0.157598E-07
2	7	0.80000	0.147716E-07	0.150044E-07	0.151247E-07	0.155656E-07	0.156074E-07
2	8	0.90000	0.147363E-07	0.145850E-07	0.146582E-07	0.152292E-07	0.153117E-07
2	9	1.00000	0.145037E-07	0.134924E-07	0.136939E-07	0.146180E-07	0.147925E-07
2	10	1.10000	0.129662E-07	0.104475E-07	0.116658E-07	0.135171E-07	0.138996E-07
2	11	1.20000	0.343112E-11	0.128483E-08	0.722200E-08	0.115044E-07	0.123602E-07
3	11	1.20000	0.442811E-11	0.645839E-10	0.126712E-09	0.136005E-09	0.134813E-09
3	12	1.21000	0.403510E-11	0.645365E-10	0.126706E-09	0.136007E-09	0.134813E-09
4	12	1.21000	0.105413E-07	0.134172E-07	0.816615E-08	0.431439E-08	0.325717E-08
4	13	1.37333	0.134432E-09	0.135987E-08	0.182663E-08	0.139529E-08	0.118228E-08
4	14	1.53667	0.138116E-11	0.122997E-09	0.376456E-09	0.405224E-09	0.379849E-09
4	15	1.70000	0.181538E-13	0.110713E-14	0.324366E-15	0.178996E-15	0.147893E-15
5	15	1.70000	0.791822E-17	0.859275E-17	0.102293E-16	0.125860E-16	0.145858E-16
5	16	1.71989	0.791919E-17	0.851058E-17	0.945769E-17	0.109705E-16	0.125870E-16

* ACTIVITY (C/GM3)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1	0.0	0.806216E-05	0.832776E-05	0.836910E-05	0.838849E-05	0.833077E-05
1	2	0.20000	0.806218E-05	0.832777E-05	0.836910E-05	0.838849E-05	0.833077E-05
1	3	0.40000	0.807139E-05	0.832859E-05	0.836934E-05	0.838860E-05	0.833085E-05
2	3	0.40000	0.178492E-03	0.189649E-03	0.193664E-03	0.199337E-03	0.199074E-03
2	4	0.50000	0.184747E-03	0.192509E-03	0.196089E-03	0.201333E-03	0.201379E-03
2	5	0.60000	0.187499E-03	0.193791E-03	0.196838E-03	0.201883E-03	0.202064E-03
2	6	0.70000	0.188574E-03	0.193698E-03	0.196063E-03	0.201167E-03	0.201469E-03
2	7	0.80000	0.188836E-03	0.191812E-03	0.193390E-03	0.198986E-03	0.199520E-03
2	8	0.90000	0.188384E-03	0.186490E-03	0.187387E-03	0.194688E-03	0.195741E-03
2	9	1.00000	0.185411E-03	0.172483E-03	0.175059E-03	0.186872E-03	0.189103E-03
2	10	1.10000	0.165756E-03	0.133917E-03	0.149133E-03	0.172799E-03	0.177689E-03
2	11	1.20000	0.438624E-07	0.164248E-04	0.923238E-04	0.147066E-03	0.158009E-03
3	11	1.20000	0.566076E-07	0.825622E-06	0.161984E-05	0.173865E-05	0.172341E-05
3	12	1.21000	0.515836E-07	0.825015E-06	0.161977E-05	0.173868E-05	0.172341E-05
4	12	1.21000	0.134757E-03	0.171521E-03	0.104394E-03	0.551538E-04	0.416387E-04
4	13	1.37333	0.171854E-05	0.173842E-04	0.233512E-04	0.178369E-04	0.151139E-04
4	14	1.53667	0.176563E-07	0.157236E-05	0.481251E-05	0.518027E-05	0.445588E-05
4	15	1.70000	0.232073E-09	0.141532E-10	0.414660E-11	0.228823E-11	0.189062E-11
5	15	1.70000	0.101224E-12	0.109847E-12	0.130771E-12	0.160896E-12	0.186461E-12
5	16	1.71989	0.101237E-12	0.108797E-12	0.120904E-12	0.140244E-12	0.160909E-12

* BIRTH RATE (G-MOLAS/GM3) FROM CPF PARENT			SAMPLE CALCULATION SR=90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.		Z-MESH NO.				
			1	2	3	4	5
1	1+1/2	CPF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2+1/2	CPF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163018E-14	0.162761E-14
2	4+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
2	5+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
2	6+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
2	7+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
2	8+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
2	9+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
2	10+1/2	CPF	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163019E-14	0.162761E-14
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.148572E-14	0.155104E-14	0.158685E-14	0.163018E-14	0.162761E-14
3	11+1/2	CPF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	12+1/2	CPF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	13+1/2	CPF	0.614429E-22	-0.871821E-21	0.244286E-22	0.140090E-20	0.198168E-20
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.196062E-22	-0.319803E-22	-0.360789E-21	-0.217275E-21	0.264514E-21
4	14+1/2	CPF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.140934E-23	0.190739E-22	-0.530030E-22	-0.114707E-21	-0.628079E-24
5	15+1/2	CPF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		PARRENT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



\* FP MASS FLUX (G-MCL/S/CM<sup>2</sup>)  
MEDIUM R-MESH RADIUS  
TYPE NO. (CM)

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12

Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	0.20000	-0.250470E-19	-0.262693E-19	-0.258815E-19	-0.271584E-19	-0.372650E-19
1	3	0.40000	-0.168919E-16	-0.174487E-16	-0.175287E-16	-0.175867E-16	-0.174215E-16
2	4	0.50000	-0.131884E-16	-0.159809E-16	-0.156831E-16	-0.158397E-16	-0.157367E-16
2	5	0.60000	-0.444966E-17	-0.594091E-17	-0.429899E-17	-0.403504E-17	-0.448460E-17
2	6	0.70000	-0.131692E-17	0.357657E-18	0.394129E-17	0.485006E-17	0.373230E-17
2	7	0.80000	-0.241115E-18	0.589779E-17	0.122138E-16	0.136099E-16	0.117171E-16
2	8	0.90000	0.306667E-18	0.136156E-16	0.236606E-16	0.247177E-16	0.217726E-16
2	9	1.00000	0.146986E-17	0.286322E-16	0.430111E-16	0.413074E-16	0.366141E-16
2	10	1.10000	0.697852E-17	0.633352E-16	0.793121E-16	0.683539E-16	0.602795E-16
2	11	1.20000	0.415745E-16	0.153359E-15	0.151938E-15	0.114668E-15	0.994567E-16
3	12	1.21000	0.461731E-15	0.285417E-13	0.127381E-12	0.233985E-12	0.159741E-12
4	13	1.37333	0.474179E-17	0.527256E-16	0.837649E-16	0.766275E-16	0.716921E-16
4	14	1.53667	0.482718E-19	0.471306E-17	0.178198E-16	0.248356E-16	0.270479E-16
4	15	1.70000	0.391198E-21	0.407265E-18	0.429842E-17	0.971034E-17	0.124896E-16
5	16	1.71989	0.374934E-17	0.354425E-17	0.674420E-17	0.119648E-16	0.136492E-16

\* TEMPERATURE (C)

MEDIUM R-MESH RADIUS  
TYPE NO. (CM)

Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1	0.0	0.941008E 03	0.104001E 04	0.105301E 04	0.107501E 04	0.105501E 04
1	2	0.20000	0.941008E 03	0.104001E 04	0.105301E 04	0.107501E 04	0.105501E 04
1	3	0.40000	0.941008E 03	0.104001E 04	0.105301E 04	0.107501E 04	0.105501E 04
2	4	0.50000	0.916133E 03	0.101926E 04	0.103951E 04	0.106563E 04	0.105013E 04
2	5	0.60000	0.891258E 03	0.998508E 03	0.102601E 04	0.105626E 04	0.104526E 04
2	6	0.70000	0.866383E 03	0.977758E 03	0.101251E 04	0.104688E 04	0.104038E 04
2	7	0.80000	0.841508E 03	0.957008E 03	0.999008E 03	0.103751E 04	0.103551E 04
2	8	0.90000	0.816633E 03	0.936258E 03	0.985508E 03	0.102813E 04	0.103063E 04
2	9	1.00000	0.791758E 03	0.915508E 03	0.972008E 03	0.101876E 04	0.102576E 04
2	10	1.10000	0.766883E 03	0.894758E 03	0.958508E 03	0.100938E 04	0.102088E 04
2	11	1.20000	0.742009E 03	0.874008E 03	0.945008E 03	0.100001E 04	0.101601E 04
3	12	1.21000	0.668009E 03	0.819008E 03	0.911008E 03	0.977008E 03	0.100501E 04
4	13	1.37333	0.655009E 03	0.808342E 03	0.904342E 03	0.972342E 03	0.100234E 04
4	14	1.53667	0.642009E 03	0.797675E 03	0.897675E 03	0.967675E 03	0.999675E 03
4	15	1.70000	0.629009E 03	0.787008E 03	0.891008E 03	0.963008E 03	0.997008E 03
5	16	1.71989	0.525009E 03	0.704009E 03	0.838008E 03	0.927008E 03	0.979008E 03

\* CONCENTRATION DIFFUSION COEFF. (CM<sup>2</sup>/S)  
MEDIUM R-MESH RADIUS  
TYPE NO. (CM)

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12

Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1+1/2	0.10000	0.468787E-05	0.540829E-04	0.186496E-03	0.391394E-03	0.537045E-03
1	2+1/2	0.30000	0.468787E-05	0.540829E-04	0.186496E-03	0.391394E-03	0.537045E-03
2	3+1/2	0.45000	0.269543E-08	0.714275E-08	0.826569E-08	0.101457E-07	0.872851E-08
2	4+1/2	0.55000	0.206684E-08	0.592122E-08	0.734360E-08	0.937534E-08	0.836926E-08
2	5+1/2	0.65000	0.156677E-08	0.487839E-08	0.650827E-08	0.865380E-08	0.802229E-08
2	6+1/2	0.75000	0.117326E-08	0.399325E-08	0.575327E-08	0.797868E-08	0.768729E-08
2	7+1/2	0.85000	0.867184E-09	0.324653E-08	0.507249E-08	0.734766E-08	0.736393E-08
2	8+1/2	0.95000	0.632073E-09	0.262059E-08	0.446014E-08	0.675848E-08	0.705190E-08
2	9+1/2	1.05000	0.453869E-09	0.209944E-08	0.391073E-08	0.620899E-08	0.675090E-08
2	10+1/2	1.15000	0.320723E-09	0.166861E-08	0.341907E-08	0.569708E-08	0.646062E-08
3	11+1/2	1.20500	0.468787E-05	0.540829E-04	0.186496E-03	0.391394E-03	0.537045E-03
4	12+1/2	1.29167	0.744211E-10	0.714244E-09	0.215815E-08	0.428757E-08	0.564352E-08
4	13+1/2	1.45500	0.592586E-10	0.622374E-09	0.200704E-08	0.409720E-08	0.530558E-08
4	14+1/2	1.61833	0.468787E-10	0.540829E-09	0.186496E-08	0.391394E-08	0.537045E-08
5	15+1/2	1.70995	0.608795E-01	0.823408E-01	0.990257E-01	0.111003E 00	0.117623E 00

\* THERMAL DIFFUSION COEFF. (CM<sup>2</sup>/GM/S)  
MEDIUM R-MESH RADIUS  
TYPE NO. (CM)

Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1+1/2	0.10000	0.461911E-14	0.617304E-13	0.219001E-12	0.467877E-12	0.618169E-12
1	2+1/2	0.30000	0.461912E-14	0.617304E-13	0.219001E-12	0.467877E-12	0.618169E-12
2	3+1/2	0.45000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	4+1/2	0.55000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	5+1/2	0.65000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	6+1/2	0.75000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	7+1/2	0.85000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	8+1/2	0.95000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	9+1/2	1.05000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	10+1/2	1.15000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	11+1/2	1.20500	0.461911E-14	0.617304E-13	0.219001E-12	0.467877E-12	0.618169E-12
4	12+1/2	1.29167	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	13+1/2	1.45500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	14+1/2	1.61833	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	15+1/2	1.70995	0.491180E-18	0.685992E-18	0.107996E-17	0.183341E-17	0.255148E-17

JAERI-M 4883

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\* PARTITION COEFF. (-)  
RMESH O-RADIUS (CM) Z-MESH NO.

		1	2	3	4	5
3	0.40000	0.221141E 02	0.227708E 02	0.231397E 02	0.237628E 02	0.238960E 02
11	1.20000	0.129057E 01	0.1302667E 01	0.175452E 01	0.118220E 01	0.109070E 01
12	1.21000	0.261240E 04	0.207901E 03	0.644496E 02	0.317217E 02	0.241606E 02
15	1.70000	0.436174E 03	0.776131E 02	0.315370E 01	0.703144E 01	0.986241E 01

\* F.P. INVENTRY (G-MCL)  
MEDIUM TYPE O-RADIUS (CM) Z-MESH NO.

		1	2	3	4	5
1	0.40000	0.396459E-10	0.409327E-10	0.411346E-10	0.412296E-10	0.409458E-10
2	1.20000	0.217939E-07	0.209953E-07	0.228764E-07	0.251504E-07	0.255632E-07
3	1.21000	0.193032E-12	0.294503E-11	0.578005E-11	0.620416E-11	0.614973E-11
4	1.70000	0.464447E-08	0.721339E-08	0.572699E-08	0.369427E-08	0.300401E-08
5	1.71989	0.116340E-17	0.138769E-17	0.169832E-17	0.211102E-17	0.248267E-17

\* F.P. MEDIUM ACTIVITY (C1)  
MEDIUM TYPE O-RADIUS (CM) Z-MESH NO.

		1	2	3	4	5
1	0.40000	0.506822E-06	0.523272E-06	0.525853E-06	0.527067E-06	0.523439E-06
2	1.20000	0.278607E-03	0.268397E-03	0.292445E-03	0.321515E-03	0.326792E-03
3	1.21000	0.246767E-08	0.376484E-07	0.738904E-07	0.793122E-07	0.786164E-07
4	1.70000	0.593735E-04	0.922139E-04	0.732121E-04	0.472264E-04	0.384024E-04
5	1.71989	0.148725E-13	0.177398E-13	0.217109E-13	0.269867E-13	0.317377E-13

\* F.P. EFFECTIVE R/B (-)  
Z-MESH NO.

		1	2	3	4	5
		0.416228E-01	0.476483E-01	0.570719E-01	0.691129E-01	0.814446E-01

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\*\* TIME STEP 2 TIME = 231.48(DAY) \*\*\*

\*\*\*\*\* F.P. SR-90 \*\*\*\*\*

COOLANT	Z-MESH	BOUNDARY L. THICKNESS (CM)	MASS FLOW (G/CM <sup>2</sup> /S)	TEMPERATURE (DEG.C)	VISCO. COEFF. (G/CM <sup>2</sup> /S)	DENSITY (G/CM <sup>3</sup> )	VELOCITY (CM/S)	RE (---)	SC (---)	MASS T. COEFF. (CM/S)
OUTER	1	0.16030E-01	0.49795E 01	0.57700E 03	0.39818E-03	0.22951E-02	0.21696E 04	0.37517E 04	0.28497E 01	0.37978E 01
	2	0.17688E-01	0.49795E 01	0.74550E 03	0.45197E-03	0.19155E-02	0.25996E 04	0.33052E 04	0.28656E 01	0.46551E 01
	3	0.18794E-01	0.49795E 01	0.86450E 03	0.48930E-03	0.17151E-02	0.29033E 04	0.30531E 04	0.28809E 01	0.52689E 01
	4	0.19516E-01	0.49795E 01	0.94500E 03	0.51419E-03	0.16018E-02	0.31087E 04	0.29053E 04	0.28919E 01	0.56878E 01
	5	0.19893E-01	0.49795E 01	0.98800E 03	0.52732E-03	0.15472E-02	0.32185E 04	0.28329E 04	0.28977E 01	0.59128E 01

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI HTGR 72/4/12

\*\* ITERATION NO.= 3

\* CONCENTRATION (MCL/CM<sup>3</sup>)  
MEDIUM R-MESH RADIUS (CM) Z-MESH NO.

			1	2	3	4	5
1	1	0.0	0.132735E-08	0.132344E-08	0.132565E-08	0.133064E-08	0.133182E-08
1	2	0.20000	0.132735E-08	0.132344E-08	0.132565E-08	0.133064E-08	0.133182E-08
1	3	0.40000	0.131248E-08	0.131890E-08	0.132309E-08	0.133258E-08	0.133177E-08
2	3	0.40000	0.283530E-07	0.298250E-07	0.304966E-07	0.317595E-07	0.318219E-07
2	4	0.50000	0.286551E-07	0.298476E-07	0.304864E-07	0.317521E-07	0.318305E-07
2	5	0.60000	0.289647E-07	0.297682E-07	0.303413E-07	0.316514E-07	0.317530E-07
2	6	0.70000	0.291523E-07	0.294554E-07	0.299728E-07	0.314154E-07	0.315521E-07
2	7	0.80000	0.291881E-07	0.286985E-07	0.292677E-07	0.310068E-07	0.312043E-07
2	8	0.90000	0.289721E-07	0.270795E-07	0.280637E-07	0.303931E-07	0.306975E-07
2	9	1.00000	0.279119E-07	0.237216E-07	0.261508E-07	0.295690E-07	0.300505E-07
2	10	1.10000	0.229483E-07	0.168919E-07	0.233926E-07	0.286299E-07	0.293664E-07
2	11	1.20000	0.592771E-12	0.387346E-08	0.176456E-07	0.243054E-07	0.252885E-07
3	11	1.20000	0.947714E-11	0.149313E-09	0.225678E-09	0.217798E-09	0.212616E-09
3	12	1.21000	0.933103E-11	0.149290E-09	0.225689E-09	0.217806E-09	0.212619E-09
3	13	1.21000	0.243764E-07	0.310374E-07	0.145453E-07	0.690919E-08	0.513701E-08
4	12	1.21000	0.572265E-09	0.535518E-08	0.550367E-08	0.354123E-08	0.282701E-08
4	13	1.37333	0.857791E-11	0.685813E-09	0.156993E-08	0.135218E-08	0.115810E-08
4	14	1.53667	0.827372E-13	0.514234E-14	0.149321E-14	0.778390E-15	0.614266E-15
4	15	1.70000	0.360878E-16	0.399113E-16	0.470915E-16	0.547322E-16	0.605815E-16
5	15	1.70000	0.360928E-16	0.394532E-16	0.438734E-16	0.493422E-16	0.544878E-16

\* ACTIVITY (C1/CM<sup>3</sup>)  
MEDIUM R-MESH RADIUS (CM) Z-MESH NO.

			1	2	3	4	5
1	1	0.0	0.169684E-04	0.169184E-04	0.169467E-04	0.170105E-04	0.170256E-04
1	2	0.20000	0.169684E-04	0.169184E-04	0.169467E-04	0.170105E-04	0.170256E-04
1	3	0.40000	0.167784E-04	0.168605E-04	0.169140E-04	0.170353E-04	0.170250E-04
2	3	0.40000	0.362457E-03	0.381274E-03	0.389859E-03	0.406003E-03	0.406801E-03
2	4	0.50000	0.366318E-03	0.381562E-03	0.389729E-03	0.405910E-03	0.406912E-03
2	5	0.60000	0.370277E-03	0.380548E-03	0.387874E-03	0.404622E-03	0.405921E-03
2	6	0.70000	0.372674E-03	0.376549E-03	0.383164E-03	0.401605E-03	0.403353E-03
2	7	0.80000	0.373131E-03	0.366873E-03	0.374150E-03	0.396381E-03	0.398906E-03
2	8	0.90000	0.370371E-03	0.346176E-03	0.358758E-03	0.388537E-03	0.392428E-03
2	9	1.00000	0.356818E-03	0.303250E-03	0.334304E-03	0.378001E-03	0.384157E-03
2	10	1.10000	0.293364E-03	0.215941E-03	0.299044E-03	0.365996E-03	0.375412E-03
2	11	1.20000	0.757781E-08	0.495171E-04	0.225576E-03	0.310714E-03	0.323281E-03
3	11	1.20000	0.121153E-06	0.190878E-05	0.288500E-05	0.278437E-05	0.271801E-05
3	12	1.21000	0.119285E-06	0.190848E-05	0.288510E-05	0.278437E-05	0.271801E-05
3	13	1.21000	0.311621E-03	0.396774E-03	0.185943E-03	0.883251E-04	0.656700E-04
4	12	1.21000	0.731567E-05	0.684591E-04	0.703572E-04	0.452701E-04	0.361396E-04
4	13	1.37333	0.109657E-06	0.876723E-05	0.200695E-04	0.172858E-04	0.148048E-04
4	14	1.53667	0.105769E-08	0.657382E-10	0.190888E-10	0.995071E-11	0.785260E-11
4	15	1.70000	0.461336E-12	0.510214E-12	0.602004E-12	0.699678E-12	0.774456E-12
5	15	1.70000	0.461399E-12	0.504358E-12	0.560864E-12	0.630774E-12	0.696355E-12

JAERI-M 4883

\* BIRTH RATE (G·MOL/S/CM<sup>3</sup>) FROM CPF,PARENT SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12  
 MEDIUM R·MESH FROM CPF,PARENT SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12  
 TYPE NO. Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R·MESH NO.	FROM CPF,PARENT	SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12				
			Z-MESH NO.				
1	1+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
1	2+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
2	3+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	4+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	5+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	6+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	7+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	8+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	9+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
2	10+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180309E-14 0.0 0.180309E-14	0.179575E-14 0.0 0.179575E-14
3	11+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.146142E-14 0.0 0.146142E-14	0.158662E-14 0.0 0.158662E-14	0.168208E-14 0.0 0.168208E-14	0.180308E-14 0.0 0.180308E-14	0.179574E-14 0.0 0.179574E-14
4	12+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
4	13+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.195539E-21 0.0 0.195539E-21	-0.319440E-20 0.0 -0.319440E-20	0.196889E-20 0.0 0.196889E-20	0.440340E-20 0.0 0.440340E-20	0.423257E-20 0.0 0.423257E-20
4	14+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.837510E-22 0.0 0.837510E-22	-0.449830E-21 0.0 -0.449830E-21	-0.125778E-20 0.0 -0.125778E-20	0.464057E-21 0.0 0.464057E-21	0.129344E-20 0.0 0.129344E-20
5	15+1/2	CPF PARRENT TOTAL	0.829995E-23 0.0 0.829995E-23	0.343696E-22 0.0 0.343696E-22	-0.375892E-21 0.0 -0.375892E-21	-0.108931E-21 0.0 -0.108931E-21	0.236650E-21 0.0 0.236650E-21

\* FP MASS FLX (G·MOL/S/CM<sup>2</sup>)  
 MEDIUM R·MESH RADIUS  
 TYPE NO. (CM)

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12  
 Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R·MESH NO.	RADIUS (CM)	SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12				
			Z-MESH NO.				
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	0.20000	-0.526964E-19	-0.525385E-19	-0.517630E-19	-0.543168E-19	-0.745500E-19
1	3	0.40000	0.348492E-15	0.122521E-14	0.238571E-14	-0.378735E-14	0.120372E-15
2	4	0.50000	-0.814199E-17	-0.161380E-17	0.840884E-18	0.742972E-18	-0.756331E-18
2	5	0.60000	-0.639955E-17	0.469769E-17	0.106537E-16	0.944626E-17	0.648571E-17
2	6	0.70000	-0.293853E-17	0.152607E-16	0.239839E-16	0.204238E-16	0.161165E-16
2	7	0.80000	-0.419549E-18	0.302257E-16	0.405667E-16	0.325999E-16	0.267421E-16
2	8	0.90000	0.187273E-17	0.525617E-16	0.610736E-16	0.450888E-16	0.373136E-16
2	9	1.00000	0.670099E-17	0.879953E-16	0.853169E-16	0.556987E-16	0.456279E-16
2	10	1.10000	0.225286E-16	0.143386E-15	0.107868E-15	0.583069E-16	0.461825E-16
2	11	1.20000	0.735986E-16	0.217228E-15	0.196493E-15	0.246369E-15	0.263456E-15
3	12	1.21000	0.665706E-15	0.673156E-13	0.238126E-12	0.393151E-12	0.262068E-12
4	13	1.37333	0.108461E-16	0.112307E-15	0.119469E-15	0.884104E-16	0.798156E-16
4	14	1.53667	0.204510E-18	0.177924E-16	0.483377E-16	0.549122E-16	0.562549E-16
4	15	1.70000	0.243822E-20	0.227084E-17	0.179256E-16	0.324020E-16	0.380787E-16
5	16	1.71989	0.202227E-16	0.261395E-16	0.314748E-16	0.432507E-16	0.434500E-16

\* TEMPERATURE (C)  
 MEDIUM R·MESH RADIUS  
 TYPE NO. (CM)

Z-MESH NO.

MEDIUM TYPE	R·MESH NO.	RADIUS (CM)	SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI INTGR 72/4/12				
			Z-MESH NO.				
1	1	0.0	0.941008E 03	0.104001E 04	0.105301E 04	0.107501E 04	0.105501E 04
1	2	0.20000	0.941008E 03	0.104001E 04	0.105301E 04	0.107501E 04	0.105501E 04
1	3	0.40000	0.941008E 03	0.104001E 04	0.105301E 04	0.107501E 04	0.105501E 04
2	4	0.50000	0.916133E 03	0.101926E 04	0.103951E 04	0.106563E 04	0.105013E 04
2	5	0.60000	0.891258E 03	0.998508E 03	0.102601E 04	0.105626E 04	0.104526E 04
2	6	0.70000	0.866383E 03	0.977758E 03	0.101251E 04	0.104688E 04	0.104038E 04
2	7	0.80000	0.841508E 03	0.957008E 03	0.999008E 03	0.103751E 04	0.103551E 04
2	8	0.90000	0.816633E 03	0.936258E 03	0.985508E 03	0.102813E 04	0.103063E 04
2	9	1.00000	0.791758E 03	0.915508E 03	0.972008E 03	0.101876E 04	0.102576E 04
2	10	1.10000	0.766883E 03	0.894758E 03	0.958508E 03	0.100938E 04	0.102088E 04
2	11	1.20000	0.742009E 03	0.874008E 03	0.945008E 03	0.100001E 04	0.101601E 04
3	12	1.21000	0.668009E 03	0.819008E 03	0.911008E 03	0.977008E 03	0.100501E 04
4	13	1.37333	0.655009E 03	0.808342E 03	0.904342E 03	0.972342E 03	0.100234E 04
4	14	1.53667	0.642009E 03	0.797675E 03	0.897675E 03	0.967675E 03	0.999675E 03
4	15	1.70000	0.629009E 03	0.787008E 03	0.891008E 03	0.963008E 03	0.997008E 03
5	16	1.71989	0.525009E 03	0.704009E 03	0.838008E 03	0.927008E 03	0.979008E 03

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI IHTGR 72/4/12

* CONCENTRATION DIFFUSION COEFF. (CM <sup>2</sup> /S)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1+1/2	0.10000	0.468787E-05	0.540829E-04	0.186496E-03	0.391394E-03	0.537045E-03
1	2+1/2	0.30000	0.468787E-05	0.540829E-04	0.186496E-03	0.391394E-03	0.537045E-03
2	3+1/2	0.45000	0.269543E-08	0.714275E-08	0.826569E-08	0.101457E-07	0.872851E-08
2	4+1/2	0.55000	0.206684E-08	0.592122E-08	0.734360E-08	0.937534E-08	0.836926E-08
2	5+1/2	0.65000	0.156677E-08	0.487839E-08	0.650827E-08	0.865380E-08	0.802229E-08
2	6+1/2	0.75000	0.117326E-08	0.399325E-08	0.575327E-08	0.797868E-08	0.768729E-08
2	7+1/2	0.85000	0.867184E-09	0.324653E-08	0.507249E-08	0.734766E-08	0.736393E-08
2	8+1/2	0.95000	0.632073E-09	0.262059E-08	0.446014E-08	0.675848E-08	0.705190E-08
2	9+1/2	1.05000	0.453869E-09	0.209944E-08	0.391073E-08	0.620899E-08	0.675090E-08
2	10+1/2	1.15000	0.320723E-09	0.166861E-08	0.341907E-08	0.569708E-08	0.646062E-08
3	11+1/2	1.20500	0.468787E-05	0.540829E-04	0.186496E-03	0.391394E-03	0.537045E-03
4	12+1/2	1.29167	0.744211E-10	0.714244E-09	0.215815E-08	0.428757E-08	0.564352E-08
4	13+1/2	1.45500	0.592586E-10	0.622374E-09	0.200704E-08	0.409720E-08	0.550558E-08
4	14+1/2	1.61833	0.468787E-10	0.540829E-09	0.186496E-08	0.391394E-08	0.537045E-08
5	15+1/2	1.70995	0.608795E-01	0.823408E-01	0.990257E-01	0.111003E+00	0.117623E+00

* THERMAL DIFFUSION COEFF. (CM <sup>2</sup> /GM/S)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	1+1/2	0.10000	0.107276E-13	0.126549E-12	0.436818E-12	0.923690E-12	0.126554E-11
1	2+1/2	0.30000	0.107276E-13	0.126549E-12	0.436818E-12	0.923690E-12	0.126554E-11
2	3+1/2	0.45000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	4+1/2	0.55000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	5+1/2	0.65000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	6+1/2	0.75000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	7+1/2	0.85000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	8+1/2	0.95000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	9+1/2	1.05000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	10+1/2	1.15000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	11+1/2	1.20500	0.789031E-16	0.136751E-13	0.841688E-13	0.215835E-12	0.306049E-12
4	12+1/2	1.29167	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	13+1/2	1.45500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	14+1/2	1.61833	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	15+1/2	1.70995	0.264912E-17	0.390693E-17	0.585616E-17	0.831605E-17	0.103401E-16

SAMPLE CALCULATION SR-90 CASE1 JAERI IHTGR 72/4/12

* PARTITION COEFF. (-)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
3	0.40000	0.216026E 02	0.226134E 02	0.230496E 02	0.238331E 02	0.238943E 02	
11	1.20000	0.159879E 02	0.385478E-01	0.127895E-01	0.896087E-02	0.840759E-02	
12	1.21000	0.261240E 04	0.207901E 03	0.644496E 02	0.317217E 02	0.241606E 02	
15	1.70000	0.436174E-03	0.776131E-02	0.315370E-01	0.703144E-01	0.986241E-01	

* F.P. INVENTORY (G=MCL)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	0.40000	0.829793E-10	0.830257E-10	0.832203E-10	0.836613E-10	0.836794E-10	
2	1.20000	0.418031E-07	0.386788E-07	0.453646E-07	0.512782E-07	0.520731E-07	
3	1.21000	0.428984E-12	0.681065E-11	0.102949E-10	0.993542E-11	0.969892E-11	
4	1.70000	0.110006E-07	0.193199E-07	0.134789E-07	0.803975E-08	0.635169E-08	
5	1.71989	0.530231E-17	0.643929E-17	0.784711E-17	0.932661E-17	0.105134E-16	

* F.P. MEDIUM ACTIVITY (CI)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	0.40000	0.106078E-05	0.106138E-05	0.106386E-05	0.106950E-05	0.106973E-05	
2	1.20000	0.534398E-03	0.494459E-03	0.579927E-03	0.655525E-03	0.665687E-03	
3	1.21000	0.548400E-08	0.870654E-07	0.131607E-06	0.127012E-06	0.123988E-06	
4	1.70000	0.140628E-03	0.246980E-03	0.172310E-03	0.102778E-03	0.811981E-04	
5	1.71989	0.677831E-13	0.825179E-13	0.100319E-12	0.119229E-12	0.134400E-12	

* F.P. EFFECTIVE R/B (-)			Z-MESH NO.				
MEDIUM TYPE	R-MESH NO.	RADIUS (CM)	1	2	3	4	5
1	0.40000	0.192854E 00	0.216144E 00	0.248772E 00	0.276064E 00	0.312602E 00	