

JAERI - M
88-266

高温ガス炉におけるFP沈着解析コード

— PLAIN —

1989年1月

馬場 治・露崎 典平・沢 和弘

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 株式会社原子力資料サービス

高温ガス炉におけるFP沈着解析コード

— P L A I N —

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室

馬場 治・露崎 典平・沢 和弘

(1988年12月19日受理)

高温ガス炉における核分裂生成物(FP)の沈着分布を解析するために、計算コードPLAINを開発した。本コードは、以下のような特徴を有している。

- (1) 沈着機構として、配管・機器表面への吸・脱着及び流路壁母材中への拡散をモデル化している。
- (2) 物質伝達率、吸着速度、脱着速度、流路壁母材中の拡散定数及び昇華速度等の各物理定数は、入力データより、計算コードの中で定めている。
- (3) 数値解は、ラプラス空間における基礎式の解析解を逆変換することにより求める。

本報告書は、PLAINで扱っている沈着モデル、各種定数、解法、使用方法及び計算と実験値との比較を述べたものである。

Fission Products Plate-out Analysis Code in the HTGR

- PLAIN -

Osamu BABA, Noriyoshi TSUYUZAKI and Kazuhiro SAWA

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 19, 1988)

Fission products plate-out analysis code in the HTGR, PLAIN, has been developed to calculate the plate-out distribution of high temperature gas cooled reactor. The code includes the following features:

- (1) The adsorption-desorption on the wall and the diffusion into the wall material are considered as a plate-out mechanism.
- (2) Mass transfer coefficient, adsorption rate, desorption rate, diffusion coefficient in the wall material and sublimation rate are calculated in the code.
- (3) Numerical results are calculated by using Laplace inversion method.

This report describes the analytical models, physical and chemical constants, numerical method, users' manuals and the calculational results of experiments.

Keywords: Fission Product, Plateout, Deposition, PLAIN Code, HTGR

目 次

1. まえがき	1
2. 沈着モデル	1
2.1 沈着モデル	1
2.2 改良モデル	3
3. 定 数	5
3.1 流路壁母材中のFPの拡散定数	5
3.2 ガス中のFPの拡散定数	6
3.3 物質伝達率	6
3.4 脱着速度	7
3.5 ペネトレーション係数	7
3.6 昇華速度	8
4. 基礎式の解法	8
4.1 境界条件, 初期条件	9
4.2 Laplace変換による解	9
4.3 逆変換の方法	13
5. 計算プログラム	14
5.1 概 要	14
5.2 サブルーチンプログラム	14
5.3 入力, 出力	16
6. 計算と実験の比較	17
6.1 OGL-1におけるI-131とCs-137の沈着分布	17
6.2 TLG-1におけるI-131とCs-137の沈着分布	18
7. 結 言	19
謝 辞	20
参考文献	21
付録 1 入力フォーマット, OGL-1及びTLG-1の計算例	29
付録 2 親核, 娘核, 孫核のLaplace変換による解	55

Contents

1.	Introduction	1
2.	Fission products plate-out model	1
2.1	Fission products plate-out model	1
2.2	Model modification	3
3.	Parameters in the model	5
3.1	Diffusion coefficient of fission products in the duct wall	5
3.2	Diffusion coefficient of fission products in the primary coolant	6
3.3	Mass transfer coefficient	6
3.4	Desorption velocity	7
3.5	Penetration coefficient	7
3.6	Sublimation velocity	8
4.	Solutions of basic equations	8
4.1	Boundary condition and primary condition	9
4.2	Results in Laplace transform	9
4.3	Inversion method	13
5.	Calculation program	14
5.1	Outline of PLAIN program	14
5.2	Subroutine program	14
5.3	Input and output format	16
6.	Comparison of calculation results with experimental data	17
6.1	Plate-out distribution of ^{131}I and ^{137}Cs in the OGL-1	17
6.2	Plate-out distribution of ^{131}I and ^{137}Cs in the TLG-1	18
7.	Conclusion	19
	Aknowledgments	20
	References	21
Appendix 1	Input format and calculation examples for OGL-1 and TLG-1 experiments	29
Appendix 2	Analytical solutions in Laplace transform for parents, daughter and granddaughter nuclides	55

1. ま え が き

原子炉の1次冷却材中に核分裂生成物(Fission Products),以下FPと略す)が存在すると、冷却材が1次冷却系を循環する際にFPが1次冷却系機器、配管に沈着(Plate-out)する。高温ガス炉においては、冷却材自身あるいは腐食生成物の放射化による冷却材中の放射能が他の炉と比較して格段に少いが、通常運転中でも燃料から微量のFPが放出されるため、1次冷却材のFPの沈着挙動が、遮蔽設計及び安全解析・評価を行う上で特に重要となる。

原研では、材料試験炉(JMTR)に設置した炉内高温ガスループOGL-1(Oarai Gas Loop No.1)¹⁾が、冷却材の種類、圧力、温度、配管内流速、FPの種類、濃度等の点で高温ガス炉の1次冷却系と非常に近い条件で運転されているため、この炉内ループの1次冷却系を用いてFP沈着に関する研究を行っている。^{2),3),4),5),6)} この研究の一環として、FP沈着分布を計算するコードPLAIN(Plate-out Analysis Program based on Iniotakis Model)⁷⁾を開発し、OGL-1における測定結果との比較検討及びFP沈着機構に関するモデルの改良を行った。本報告書はPLAINで扱っている沈着モデル、各種定数、解法、使用方法、計算と実験結果との比較を述べたものである。

2. 沈 着 モ デ ル

高温ガス炉の1次冷却系におけるFP沈着モデルについては、これまでに配管・機器表面への吸-脱着として扱うモデル(Kress and Neill⁸⁾)と吸-脱着の他に流路壁への侵入-拡散も考慮するモデル(Iniotakisら⁹⁾)が提案されている。PLAINコードは最初後者のモデルをもとにして作成したが、解析結果とOGL-1によるFP沈着分布測定結果の比較を行い、モデルの改良の必要が生じたため改良を行い、改良前、後のいずれのモデルでも扱えるようになっている。以下に全体の沈着モデルと、改良点について示す。

2.1 沈着モデル

PLAINコードでは冷却材の流れ及びFP沈着の機構を次のように扱っている。但し、重力及び電磁力の影響は非常に小さいものとして、無視している。

冷却材の流れについては、次の3つの領域に分けている。(Fig.1 参照)

- a. 主流 : 冷却材の乱れが激しく、冷却材中のFPは冷却材と共に流れ、流れと直角方向にはFPの濃度は一定と仮定する。
- b. 物質伝達の領域 : 冷却材流路の表面に近い領域で、冷却材の流れは層流で、FPの濃度は流路壁表面に向かって直線状に変化し、FPの移動はこの濃度勾配による拡散の

1. ま え が き

原子炉の1次冷却材中に核分裂生成物(Fission Products),以下FPと略す)が存在すると、冷却材が1次冷却系を循環する際にFPが1次冷却系機器、配管に沈着(Plate-out)する。高温ガス炉においては、冷却材自身あるいは腐食生成物の放射化による冷却材中の放射能が他の炉と比較して格段に少いが、通常運転中でも燃料から微量のFPが放出されるため、1次冷却材のFPの沈着挙動が、遮蔽設計及び安全解析・評価を行う上で特に重要となる。

原研では、材料試験炉(JMTR)に設置した炉内高温ガスループOGL-1(Oarai Gas Loop No.1)¹⁾が、冷却材の種類、圧力、温度、配管内流速、FPの種類、濃度等の点で高温ガス炉の1次冷却系と非常に近い条件で運転されているため、この炉内ループの1次冷却系を用いてFP沈着に関する研究を行っている。^{2),3),4),5),6)} この研究の一環として、FP沈着分布を計算するコードPLAIN(Plate-out Analysis Program based on Iniotakis Model)⁷⁾を開発し、OGL-1における測定結果との比較検討及びFP沈着機構に関するモデルの改良を行った。本報告書はPLAINで扱っている沈着モデル、各種定数、解法、使用方法、計算と実験結果との比較を述べたものである。

2. 沈 着 モ デ ル

高温ガス炉の1次冷却系におけるFP沈着モデルについては、これまでに配管・機器表面への吸-脱着として扱うモデル(Kress and Neill⁸⁾)と吸-脱着の他に流路壁への侵入-拡散も考慮するモデル(Iniotakisら⁹⁾)が提案されている。PLAINコードは最初後者のモデルをもとにして作成したが、解析結果とOGL-1によるFP沈着分布測定結果の比較を行い、モデルの改良の必要が生じたため改良を行い、改良前、後のいずれのモデルでも扱えるようになっている。以下に全体の沈着モデルと、改良点について示す。

2.1 沈着モデル

PLAINコードでは冷却材の流れ及びFP沈着の機構を次のように扱っている。但し、重力及び電磁力の影響は非常に小さいものとして、無視している。

冷却材の流れについては、次の3つの領域に分けている。(Fig.1 参照)

- a. 主流 : 冷却材の乱れが激しく、冷却材中のFPは冷却材と共に流れ、流れと直角方向にはFPの濃度は一定と仮定する。
- b. 物質伝達の領域 : 冷却材流路の表面に近い領域で、冷却材の流れは層流で、FPの濃度は流路壁表面に向かって直線状に変化し、FPの移動はこの濃度勾配による拡散の

みを考える。

- c. 流路壁表面の領域 : 流路等の表面から FP の平均自由行程程度の厚さの領域を考え、この領域の中では FP の濃度は流路壁に直角方向には一定として、FP の熱運動のみを考える。

FP 沈着の機構については次の 2 つを扱っている。

- a. 吸着-脱着 : 流路壁表面に衝突した FP は一定の割合で表面に吸着し、吸着した FP は更に母材格子の熱運動に励起されて脱着する。
 b. 侵入-拡散-昇華 : 流路壁表面に衝突した FP は一定の割合で母材中に侵入し、母材中の FP の濃度勾配により拡散する。冷却材中の FP 濃度が下った場合には、表面近くより昇華が生じる。

以上のモデルにもとづいて、PLAIN コードでは FP 沈着を次のように表わしている。

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \frac{4h_i}{d} (N_i - N_{wi}) + \lambda_i N_i + V \frac{\partial N_i}{\partial X} - \lambda_{i-1} N_{i-1} = 0 \quad \text{..... ①}$$

$$-h_i (N_i - N_{wi}) - \theta_i M_{oi} + \alpha_i \sqrt{\frac{RT}{2\pi m_i}} N_{wi} - \eta_i \phi_{i\rho=R_i} = 0 \quad \text{..... ②}$$

$$\frac{\partial N_{oi}}{\partial t} + (\theta_i + \lambda_i) M_{oi} - \beta_i \cdot \alpha_i \sqrt{\frac{RT}{2\pi m_i}} N_{wi} - \lambda_{i-1} M_{oi-1} = 0 \quad \text{..... ③}$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} - D_i \left\{ \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi_i}{\partial \rho} \right\} + \lambda_i \phi_i - \lambda_{i-1} \phi_{i-1} = 0 \quad \text{..... ④}$$

$$\frac{\partial M_{Di}}{\partial t} + \lambda_i M_{Di} - \lambda_{i-1} M_{Di-1} = -D_i \left\{ \frac{\partial \phi_i}{\partial \rho_{R=R_i}} - \frac{R_o}{R_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial \rho_{R_o}} \right\} \quad \text{..... ⑤}$$

$$\frac{\partial M_{Di}}{\partial t} + \lambda_i M_{Di} - \lambda_{i-1} M_{Di-1} = (1 - \beta_i) \alpha_i \sqrt{\frac{RT}{2\pi m_i}} N_{wi} - \eta_i \phi_{i\rho=R_i} \quad \text{..... ⑥}$$

ここで

- N : 主流中の FP 濃度 (n/cm³)
 N_w : 壁面領域中の FP 濃度 (n/cm³)
 M_o : 冷却材流路壁表面に吸着している FP 濃度 (n/cm²)
 φ : 冷却材流路壁の母材中に拡散している FP 濃度 (n/cm³)
 M_D : 冷却材流路壁等の母材中に拡散している FP の、壁表面積当りに換算した濃度 (n/cm²)

$$M_D = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \phi \cdot 2\pi r \cdot dr}{2\pi r_i} \quad \text{..... ⑦}$$

- λ : FP の崩壊定数 (1/sec)

- α : 順応係数。壁面に衝突したFPの、表面に吸着する割合で、脱着とは独立に生じるものとする。 (-)
- $1-\beta$: ペネトレーション係数。壁面に衝突したFPの、壁面母材中に直接侵入拡散していく割合 (-)
- η : 昇華速度。一度母材中に拡散侵入したFPが、昇華して再度壁面領域へ出てくる率¹¹⁾ (1/sec)
- θ : 脱着速度。表面に吸着しているFPが脱着して壁面領域へ出てくる率 (1/sec)
- m : FPの質量数
- D : 管壁等の母材中のFP拡散定数 (cm²/sec)
- h : FPの、冷却材中における物質伝達率 (cm/sec)
- d : 水力等価直径 (cm)
- v : 主流中のFPの流速 (=冷却材の流速) (cm/s)
- x : 主流の流れ方向の長さ (cm)
- t : 時間 (sec)
- T : 温度 (°K)
- R : ガス定数 (erg/mol·°K)
- R_i, R_o : 管それぞれの内半径, 外半径 (cm)
- $i, i-1$: FP及びその先行核を表わす

2.2 改良モデル

改良前のモデル (Iniotakisモデル) の特徴は次の2点にあると言える。

- ペネトレーション係数 $1-\beta$ は、FP核種と冷却材流路の材料の組み合わせで定まる一定の値であり、温度あるいは表面吸着率に対する依存性は小さく無視できる。^{9), 10)}
- 昇華速度 η は、冷却材流路壁の母材中へのFPの溶解度の関数となる。¹¹⁾

これに対し、OGL-1によるFP沈着分布あるいはFP濃度が下った場合 (OGL-1照射燃料のFP放出率が下った場合) のFPの離脱挙動から、Iniotakisモデルでは不十分な場合があると考えられたこと、及びFPが母材中に拡散するプロセスをより明確なものとする目的で、次のようにペネトレーション係数及び昇華速度をモデル化した。

(1) ペネトレーション係数

FPが冷却材流路壁の母材中に侵入する際、FPが壁面に衝突して直接入るのではなく、一度表面に吸着した後、表面に入る^{12), 13)}と仮定して、Iniotakisモデルの $1-\beta$ に等価なペネトレーション係数を次のようにして定める。

冷却材流路壁表面をFig.2のようにモデル化し、壁表面のFPの流れを図のように $J_1 \sim J_6$ とすると、それぞれの流れは次のように表わすことができる。

$$J_i = \alpha \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}} N_w$$

$$\begin{aligned}
 J_2 &= \theta_1 M_0 \\
 J_3 &= \theta_2 M_0 \\
 J_4 &= J_5 = \theta_3 \cdot a \cdot \phi_1 \\
 J_6 &= \theta_4 \cdot a \cdot \phi_2
 \end{aligned}$$

但し、ここで

$$\theta_3 = \theta_4 = w \cdot e^{-\frac{Q_D}{RT_w}} \quad (1/\text{sec})$$

W : 格子振動数 (1/sec)

Q_D: 拡散の活性化エネルギー (kcal/mol)

T_w: 冷却材流路の壁面温度 (°K)

更にこれらのFPの流れと拡散の関係は次のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 J_5 - J_6 = J_{\text{net}} &= -D \frac{\partial \phi}{\partial r} \\
 \theta_3 \cdot a \cdot (\phi_1 - \phi_2) &= \theta_3 \cdot a^2 \cdot \left(-\frac{\phi_2 - \phi_1}{a} \right) = -D \frac{\partial \phi}{\partial r} \\
 D = \theta_3 \cdot a^2 \text{ 又は } \theta_3 &= \frac{D}{a^2}
 \end{aligned}$$

ここで、今 $\theta_2 \approx \theta_3$ と近似でき、ベネトレーション係数の定義から $J_3 = (1 - \beta) \cdot J_1$

$$1 - \beta = \frac{J_3}{J_1} = \frac{D}{a^2} \cdot \frac{M_0}{\alpha \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}} N_w} \quad \text{..... ⑧}$$

更に $1 - \beta$ が時間に対し一定であると仮定すると、⑧式の $\frac{\partial M_0}{\partial t} = 0$ とおいて M_0 と N_w の関係を求めることができる。すなわち

$$\frac{M_0}{N_w} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}}}{\theta + \lambda}$$

したがって⑧式より

$$\begin{aligned}
 1 - \beta &= \frac{\beta}{\theta + \lambda} \cdot \frac{D}{a^2} \\
 1 - \beta &= \frac{\frac{D}{a^2} \cdot \frac{1}{\theta + \lambda}}{1 + \frac{D}{a^2} \cdot \frac{1}{\theta + \lambda}} \quad \text{..... ⑨}
 \end{aligned}$$

更に $\frac{D}{a^2} \cdot \frac{1}{\theta + \lambda}$ は正の数であり、FP 沈着の場合、ほとんどの場合十分小さな値である

ので、

$$1 - \beta \doteq \frac{D}{a^2} \cdot \frac{1}{\theta + \lambda} \dots\dots\dots (10)$$

と近似できる。

(2) 昇華速度

昇華速度については、次のように考えることとする。

- ① 昇華に直接寄与するFPは、冷却材流路の母材の格子の第1層のみとする。
- ② 昇華は、母材格子第1層から母材表面への拡散に引き続き、同時に母材表面から壁面領域の冷却材中への昇華（脱着）が同時に起るものとする。

このように仮定すると、昇華速度は次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \eta &= a \cdot w \cdot e^{-\frac{(Q_0 + Q_s)}{RT}} \\ &= a \cdot w \cdot e^{-\frac{Q_0}{RT}} \cdot e^{-\frac{Q_s}{RT}} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここで

$$Q_s : \text{昇華 (脱着) エネルギー (} Q_a \text{)} \quad (\text{kcal/mol})$$

である。

一方、拡散定数Dは

$$D = a^2 \cdot w \cdot e^{-\frac{Q_0}{RT}}$$

であるから、⑪式は拡散定数を用いて次のように表わすことができる。

$$\eta = \frac{D}{a} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \dots\dots\dots (12)$$

3. 定 数

PLAINコードで用いてる各物理定数は、次のように定めている。

3.1 流路壁母材中のFPの拡散定数

拡散定数Dは、次の式で表わしている。

更に $\frac{D}{a^2} \cdot \frac{1}{\theta + \lambda}$ は正の数であり、FP沈着の場合、ほとんどの場合十分小さな値であるので、

$$1 - \beta \doteq \frac{D}{a^2} \cdot \frac{1}{\theta + \lambda} \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

と近似できる。

(2) 昇華速度

昇華速度については、次のように考えることとする。

- ① 昇華に直接寄与するFPは、冷却材流路の母材の格子の第1層のみとする。
- ② 昇華は、母材格子第1層から母材表面への拡散に引き続き、同時に母材表面から壁面領域の冷却材中への昇華（脱着）が同時に起るものとする。

このように仮定すると、昇華速度は次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \eta &= a \cdot w \cdot e^{-\frac{(Q_0 + Q_s)}{RT}} \\ &= a \cdot w \cdot e^{-\frac{Q_0}{RT}} \cdot e^{-\frac{Q_s}{RT}} \dots\dots\dots \textcircled{11} \end{aligned}$$

ここで

$$Q_s : \text{昇華（脱着）エネルギー } (Q_a) \quad (\text{kcal/mol})$$

である。

一方、拡散定数Dは

$$D = a^2 \cdot w \cdot e^{-\frac{Q_0}{RT}}$$

であるから、⑪式は拡散定数を用いて次のように表わすことができる。

$$\eta = \frac{D}{a} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \dots\dots\dots \textcircled{12}$$

3. 定 数

PLAINコードで用いてる各物理定数は、次のように定めている。

3.1 流路壁母材中のFPの拡散定数

拡散定数Dは、次の式で表わしている。

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q_0}{RT}} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、

D_0 : 拡散定数の振動項 (cm²/s)

3.2 ガス中のFPの拡散定数

ガス中のFPの拡散定数 D_g は、実測値と理論式を組み合わせた多くの推算式が提案されているが、PLAINコードでは次の2つの推算式のいずれかを選択することができる。

a. Arnoldの式¹⁴⁾

$$D_g = \frac{0.0837 T^{5/2}}{P (T+C_{12})} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}}{(V_1^{1/3} + V_2^{1/3})^2} \dots\dots\dots(14)$$

$$C_{12} = \left[\frac{2\sqrt{V_1 \cdot V_2}}{V_1 + V_2} \right]^{1/3} \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}$$

ここで

D_g : 冷却材中のFPの拡散定数 (cm²/sec)

P : 全圧 (atm)

C_{12}, C_1, C_2 : 混合ガス, 冷却材のヘリウム, FPガスのSutherland定数 (°K)

M_1, M_2 : 冷却材のヘリウム及びFPの分子量 (—)

V_1, V_2 : 冷却材のヘリウム及びFPの標準沸点における液体分子容 (cc/mol)

b. Hirshfelderの式¹⁵⁾

$$D_g = \frac{0.00092916 T^{3/2}}{P (r_{12})^2 \cdot \varphi} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}} \dots\dots\dots(15)$$

ここで

r_{12} : ヘリウム及びFPの分子の半径の算術平均 (Å)

φ : FPの衝突関数 = $\varphi \left(\frac{K \cdot T}{\epsilon_{12}} \right)$

K : Boltzman定数 (erg/°K)

ϵ_{12} : ヘリウム及びFP分子間の最小エネルギー (erg)

3.3 物質伝達率

物質伝達率 h は乱流及び層流に対して、熱伝達とのアナロジーを利用して、次式でそれぞれ次

のようにして定めている。

(1) 乱流 ($Re \geq 2300$) の場合

$$h = 0.023 \cdot \frac{D_g}{d} \cdot Re^{0.8} \cdot Sc^{0.4} \quad (16)$$

(2) 層流 ($Re < 2300$) の場合

$$h = \frac{D_g}{d} \left\{ 3.66 + \frac{0.0668 \frac{d}{\ell} \cdot Re \cdot Sc}{1 + 0.04 \left(\frac{d}{\ell} \cdot Re \cdot Sc \right)^{2/3}} \right\} \quad (17)$$

ここで

- Re : 主流のレイノルズ数 (—)
- Sc : 主流におけるシュミット数 (—)
- ℓ : 配管の長さ (cm)

である。

また、配管のベンド部等のような乱流促進部における物質伝達 h_B は、補正係数 F_B を用いて次の様に定めている

$$h_B = F_B \cdot h \quad (18)$$

3.4 脱着速度

脱着速度 θ は次の様に吸着エネルギーと冷却材流路壁表面温度より定めている。

$$\theta = w \cdot e^{-\frac{Q_d}{R \cdot T}} \quad (19)$$

ここで Q_d は脱着エネルギー (= 吸着エネルギー) であるが、脱着エネルギーは吸着率 $\sigma (\sigma = \frac{M_o}{K M_\infty})$ 、 K は表面荒さ係数、 M_∞ は FP が一層吸着した時の吸着濃度) を考慮して Levine and Gyftpoulus の理論^{18), 19)} により定めている。

3.5 ペネトレーション係数

改良前のペネトレーション係数は、FP 核種と冷却材流路の母材の種類より定まる一定の値であり、温度等による依存性は考慮していない。この値は FP 沈着実験結果等から定める必要がある。

一方、改良モデルにおけるペネトレーション係数は 2.2 で既に述べたとおりであり、いずれかを選択することができる。

3.6 昇華速度

PLAINコードの中で改良前のモデルに組み込んだ昇華速度は、FPの溶解度と壁面領域のFPの濃度 N_w の関数であり、次式によって表わしている。

$$\eta = \frac{(1-\beta)\alpha}{S_{o\ell}} \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}} N_w \dots\dots\dots (20)$$

$$S_{o\ell} = S_{FP} \cdot e^{-\frac{Q_s}{RT}} \dots\dots\dots (21)$$

ここで

S_{FP} : FPの冷却材流路の母材に対する溶解度 (n/cm³)

Q_s : 溶解度のエネルギー項 (kcal/mol)

である。

一方、改良後のモデルにおける昇華速度は2.2で既に述べたとおりである。昇華速度はいずれかのモデルを選択することができる。

4. 基礎式の解法

PLAINコードでは①～⑥の基礎式を次のようにして解いている。すなわち、

- a. 基礎式をすべてLaplace変換して、Laplace空間で各未知数を解析的に解く。
- b. Laplace空間での解析解を数値解法により逆変換する。

したがって、PLAINコード内での計算は、実際にはbの部分だけである。このような解法をとっているコードの例は非常に少ないが、PLAINでこの方法を採用したのは次の理由による。

- a. FP沈着の計算は基本的に非定常計算であり、計算対象とする時間が減圧事故のように急激で短いものから、数十年後の原子炉寿命末期までの広い範囲にわたっている。
- b. 変数が多い。
- c. a, bにより差分法等による解法では計算時間が非常に長くなる可能性がある。これまでに、前述のKress and Neillモデルを用いて差分法で作成されたコードとしてPADコード²⁰⁾があるが、この場合にも計算時間が非常に長く実用には向かないという欠点があった。
- d. 実際の冷却系を解析する場合、冷却材の流動条件の変化が無視できる程度の範囲でメッシュを切って各メッシュごとに基礎式をたて、連続の条件を与えて続けていく必要があるが、FP沈着解析の場合、主流中のFP濃度のみを、FP量が保存するよう接続すれば良いので、このような解法には非常に都合が良い。
- e. 数値解法によるLaplace逆変換の方法として非常に計算時間が短く、実用上十分な精度が得られると考えられるPapoulis²¹⁾の方法があり、更に計算時間がわずかに長くなるが、高い精度が得られるHonig²²⁾の方法がある。

3.6 昇華速度

PLAINコードの中で改良前のモデルに組み込んだ昇華速度は、FPの溶解度と壁面領域のFPの濃度 N_w の関数であり、次式によって表わしている。

$$\eta = \frac{(1-\beta)\alpha}{S_{o\ell}} \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}} N_w \dots\dots\dots (20)$$

$$S_{o\ell} = S_{FP} \cdot e^{-\frac{Q_s}{RT}} \dots\dots\dots (21)$$

ここで

S_{FP} : FPの冷却材流路の母材に対する溶解度 (n/cm³)

Q_s : 溶解度のエネルギー項 (kcal/mol)

である。

一方、改良後のモデルにおける昇華速度は2.2で既に述べたとおりである。昇華速度はいずれかのモデルを選択することができる。

4. 基礎式の解法

PLAINコードでは①～⑥の基礎式を次のようにして解いている。すなわち、

- a. 基礎式をすべてLaplace変換して、Laplace空間で各未知数を解析的に解く。
- b. Laplace空間での解析解を数値解法により逆変換する。

したがって、PLAINコード内での計算は、実際にはbの部分だけである。このような解法をとっているコードの例は非常に少ないが、PLAINでこの方法を採用したのは次の理由による。

- a. FP沈着の計算は基本的に非定常計算であり、計算対象とする時間が減圧事故のように急激で短いものから、数十年後の原子炉寿命末期までの広い範囲にわたっている。
- b. 変数が多い。
- c. a, bにより差分法等による解法では計算時間が非常に長くなる可能性がある。これまでに、前述のKress and Neillモデルを用いて差分法で作成されたコードとしてPADコード²⁰⁾があるが、この場合にも計算時間が非常に長く実用には向かないという欠点があった。
- d. 実際の冷却系を解析する場合、冷却材の流動条件の変化が無視できる程度の範囲でメッシュを切って各メッシュごとに基礎式をたて、連続の条件を与えて続けていく必要があるが、FP沈着解析の場合、主流中のFP濃度のみを、FP量が保存するよう接続すれば良いので、このような解法には非常に都合が良い。
- e. 数値解法によるLaplace逆変換の方法として非常に計算時間が短く、実用上十分な精度が得られると考えられるPapoulis²¹⁾の方法があり、更に計算時間がわずかに長くなるが、高い精度が得られるHonig²²⁾の方法がある。

PLAINコードは、最初Papoulisの逆変換を用いて作成したが、減圧事故のような急激な変化の場合の計算精度が不十分なため、後にHonigの方法に変更している。本報告書ではHonigの方法に変更したものを述べている。

4.1 境界条件, 初期条件

(1) 境界条件

境界条件としては、冷却材流路の壁面がFPにより汚染されていないものとして、次のものを考える。

- a. 入口における主流中のFP濃度Nは時間tの関数として表わされるものとする。

$$N(t, 0) = F_e(t)$$

- b. 冷却材流路の長さが無限である場合、無限長における主流中のFP濃度Nは0である。

$$N(t, \infty) = 0$$

- c. 冷却材流路の板厚が無限の場合、冷却材流路の壁内へ拡散しているFPの濃度 ϕ は無限厚さの所では0である。

$$\phi(t, x, \infty) = 0$$

- d. 冷却材流路壁に拡散しているFPの濃度は、無限時間後において0ではない。

$$\phi(\infty, t, \rho) \neq 0$$

(2) 初期条件

初期条件としては、システムがクリーンな場合と、既に汚染している場合の2種類を考える。

まずクリーンな場合については、各々のFP濃度が0であるから次のようになる。

$$N(0, x) = 0$$

$$N_w(0, x) = 0$$

$$M_D(0, x) = 0$$

$$\phi(0, x, \rho) = 0$$

$$M_D(0, x) = 0$$

最初からシステムが汚染されている場合には、上の各変数は0ではなく、各値が入ることとなる。

すなわち

$$N(0, x) = N_{t=0}(x)$$

$$M_D(0, x) = M_{D,t=0}(x)$$

$$\phi(0, x, \rho) = \phi_{t=0}(x, \rho)$$

$$M_D(0, x) = M_{D,t=0}(x)$$

4.2 Laplace変換による解

①～⑥の基礎式について、初期条件としてシステムがクリーンな場合については、親核→娘核→孫核の崩壊系列に対して、また、最初から汚染されている場合については親核のみに対して、前述のようにLaplace空間で解析解を求めた。この解をPLAINコードで数値解法により逆変換して

いる。

(1) クリーンな場合の親核の解

親, 娘, 孫核の Laplace 空間での解は, まとめて付録 2 に示すこととし, ここでは解の形, 全体の取扱いとの関連で親核の解についてのみ示す。①～⑥式の解は次のとおりとなる。

$$n = f_c(s) \cdot e^{-G \cdot \frac{x}{v}} \dots\dots\dots ②②$$

$$n_w = h \cdot g \cdot n \dots\dots\dots ②③$$

$$m_o = \frac{1}{s + \lambda + \theta} \cdot \alpha^* \cdot \beta \cdot n_w \dots\dots\dots ②④$$

$$m_D = \frac{1 - \eta \cdot f}{s + \lambda} \cdot (1 - \beta) \cdot \alpha^* \cdot n_w \dots\dots\dots ②⑤$$

ただし

$$\alpha^* = \alpha \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}},$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{D(s + \lambda)} \cdot K_o + \eta},$$

$$g = \frac{1}{h + \alpha^* - \frac{\alpha^* \cdot \beta \cdot \theta}{s + \lambda + \theta} - (1 - \beta) \cdot \alpha^* \cdot \eta \cdot f},$$

$$G = s + \lambda + \frac{4h}{d} (1 - h \cdot g)$$

である。

ここで, s, n, n_w, m_o, m_D はそれぞれ t, N, N_w, M_o, M_D の Laplace 変換を表わし, K_o は 0 次の変形ベッセル関数 $K_o\left(\sqrt{\frac{s + \lambda}{D}} \cdot \rho\right)$ を表わす。

(2) 汚染している場合の解

系統が汚染している場合の解は, $\phi_{t=0}(x, \rho)$ の Laplace 変換も変形ベッセル関数で表わされるとすると次のように表わすことができる。

$$n = f_c(s) \cdot e^{-G^* \cdot \frac{x}{v}} + \frac{F^*}{G^*} \left(1 - e^{-G^* \cdot \frac{x}{v}}\right) \dots\dots\dots ②⑥$$

$$n_w = h \cdot g^* \cdot n + g^* \cdot \left(\frac{\theta}{s + \lambda + \theta} \cdot M_{O_{t=0}} + \frac{\eta^*}{s} \right) \dots\dots\dots (27)$$

$$m_o = \frac{1}{s + \lambda + \theta} (\alpha^* \cdot \beta \cdot n_w + M_{O_{t=0}}) \dots\dots\dots (28)$$

$$m_D = \frac{1}{s + \lambda} \left\{ (1 - \eta \cdot f^*) \cdot (1 - \beta) \cdot \alpha^* \cdot n_w + M_{D_{t=0}} - \frac{\eta^*}{s} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

ただし、ここで

$$G^* = s + \lambda + \frac{4h}{d} (1 - h \cdot g^*),$$

$$F^* = N_{t=0} + \frac{4h}{d} \cdot g^* \cdot \left(\frac{\theta}{s + \lambda + \theta} \cdot M_{O_{t=0}} + \frac{\eta^*}{s} \right),$$

$$g^* = \frac{1}{h + \alpha^* - \frac{\theta}{s + \lambda + \theta} \cdot \alpha^* \cdot \beta - \alpha^* \cdot (1 - \beta) \cdot \eta \cdot f^*},$$

$$\eta^* = \eta \left\{ f^* \cdot u + (\phi_{t=0})_{\rho=R_i} \right\}$$

$$f^* = \frac{1}{\eta + \sqrt{D(s + \lambda)} \cdot \frac{K_1}{K_0}}$$

$$u = D \cdot \left(\frac{\partial \phi_{t=0}}{\partial \rho} \right)_{\rho=R_i} - \eta \cdot (\phi_{t=0})_{\rho=R_i}$$

を表わす。また、s, n, n_w, m_o, m_D, K₀についてはクリーンな場合の解で用いたものと同義で

あり、K₁は1次のベッセル関数 $K_1 \left(\sqrt{\frac{s + \lambda}{D}} \cdot \rho \right)$

(3) 実際の流路への拡張

これらの⑳～㉑式を見ると n_wはnのみにより、m_o, m_Dはいずれも n_wによりそれぞれ表現されている。

冷却材の流れに沿ってFPの沈着分布を求める場合、流れに沿って温度、圧力、流路形状、流速、材質等が変るため、流れに沿ってこれらの条件がほぼ等しいと近似できるように短く分割して、それぞれの部分ごとに①～⑥の基礎式を解いて近似解を求める必要がある。この点から考えると㉑～㉑式の形はnについてのみFPの数を連続するように保存させれば良い。すなわち㉑及び㉑式の f_c(s)は入口のFP濃度であり、(n)_{x=x_{out}}は次の流れの部分の入口の

FP 濃度の Laplace 変換による表示であるので、流れの番号を $i, i + 1$ と表わすと

$$f_c(s)_{i+1} = C_{i+1} \cdot (n_i)_{out}$$

$$= C_{i+1} \cdot f_c(s)_i \cdot e^{-G_i \cdot \frac{x_{iout}}{v_i}} \dots\dots\dots ③①$$

となる。ここで C_{i+1} は、温度、圧力等が変ることによる FP 濃度の補正係数である。したがって任意の i 番目の FP 濃度は、 $i = 1$ の入口濃度 $f_c(s)_1$ を用いて表わすと

$$n_{iout} = f_c(s)_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_i \cdot \exp\left(-\sum_{j=1}^i G_j \frac{x_j}{v_j}\right) \dots\dots\dots ③②$$

と表わすことができ、この n を用いて m_o, m_D をただちに求めることができる。

(4) 流れがワンスルーの場合の扱い

冷却材の流れがワンスルーの場合、あるいは冷却材は閉回路を形成しても FP が途中で沈着及び減衰により実質的に戻ってこないとして扱える場合については、流路の入口での FP 濃度変化 $f_c(s)$ のみで計算できることとなる。 $f_c(s)$ の形としては、Laplace 変換で表示すればいずれの形でも計算できるが、PLAIN ではステップ関数のみが組み込まれている。

(5) 閉回路の取り扱い

冷却材の流れが閉回路を形成している場合で、FP の戻り量が無視できない場合の取扱いを以下に示す。

今閉回路の一巡開始点での FP の発生を N_s とし、一巡する間の FP 濃度が N から N_E に減るとすると、これらの間には次の関係がある。(Fig. 3 参照)

$$N = N_s + N_E \dots\dots\dots ③③$$

一巡する間の FP 濃度低下割合 (一巡する間に通り抜ける割合) を $P(t)$ とすると

$$N_E = N \cdot P(t) \dots\dots\dots ③④$$

③②, ③④式より

$$N = \frac{N_s}{1 - P(t)} \dots\dots\dots ③⑤$$

ここで、この式をステップ関数の和で次のように近似する。

$$N = \sum_i N_{si} \{ \theta(t - a_i) - \theta(t - a_{i+1}) \}$$

これを Laplace 変換して

$$n = \sum_i N_{si} \cdot \frac{e^{-a_i s} \{ 1 - e^{-(a_{i+1} - a_i) s} \}}{s}$$

ステップ関数での近似を行うためには、1 度 $P(t) = 0$ として $P(t)$ を求め、この $P(t)$ により近似関数を作り再度 $P(t)$ を求めることを収束するまで繰り返すことにより取り扱うことができる。

また、 $P(t)$ が 1 に比べて十分小さい時は、 $P(t) = P = \text{一定}$ と考えることができるので、

⑭式は

$$N = \frac{N_s}{1-P} \doteq (1+P) N_s$$

となり⑩, ⑪式の $f_c(s)$ の代わりに $(1+P)f_c(s)$ とすることにより取扱うことができる。

FP 沈着解析では、実用上後者の取扱いで十分なため、PLAINではこの扱いのみが組み込まれている。

4.3 逆変換の方法

Laplace 逆変換の方法については既に述べたように、PLAINではHonigの方法を用いている。これは原関数を $F(t)$ 、Laplace 空間での像関数を $f(s)$ とした場合、次のように逆変換する方法である。

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{v-i\infty}^{v+i\infty} e^{st} \cdot f(s) ds \\ &= \frac{e^{vt}}{T} \left[-\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ f(v) \right\} + \sum_{K=0}^{\infty} \operatorname{Re} \left\{ f\left(v + i \frac{K\pi}{T}\right) \right\} \cos \frac{K\pi}{T} t \right. \\ &\quad \left. - \sum_{K=0}^{\infty} \operatorname{Im} \left\{ f\left(v + i \frac{K\pi}{T}\right) \right\} \sin \frac{K\pi}{T} t \right] - f_1(v, t, T) \dots \dots \textcircled{35} \end{aligned}$$

ここで

$$f_1(v, t, T) = \sum_{K=1}^{\infty} e^{-2vKT} F(2K \cdot T + T)$$

これを近似すると共に f_1 項を省略して、

$$F_N(T) = \frac{e^{v \cdot T}}{T} \left[-\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ f(v) \right\} + \sum_{K=0}^N \operatorname{Re} \left\{ f\left(v + i \cdot \frac{K\pi}{T}\right) \right\} (-1)^K \right] \dots \dots \textcircled{36}$$

により求めるものである。

但し、ここで $\operatorname{Re}(\)$ 及び $\operatorname{Im}(\)$ はそれぞれ $(\)$ 内の実部及び虚部を表わしている。

PLAINコードでは4.2で述べた解を⑩式を用いて逆変換している。但しここで⑩式及び⑪式からわかるように、冷却材の流れの i 番目の部分の逆変換に用いる $i-1$ 以前の項は、⑩式の各 K 項においてそれぞれ既に計算されている項である。 K の項数としては50~200項の計算するために、⑩式の K 項に対し冷却材の流れに沿った各部に対する⑫~⑭式を求めた上で K 項を増加させるということを繰り返す方式を採用している。

5. 計算プログラム

5.1 概要

PLAINコードはFORTRANで書いてあり、冷却材は開及び閉回路の主流と、主流の任意の位置から分岐して下流の任意の位置で合流するバイパス流が1つ扱うことができる。

全体の計算容量を以下に示す。

- | | |
|----------------------|-----------------|
| a. 主流分割数 | 最大 500 |
| b. バイパス流分割数 | 最大 200 |
| c. 主流中の乱流促進部数(エルボ等) | 最大 500 |
| d. バイパス流の乱流促進部数 | 最大 200 |
| e. 流量、温度が等しい時の計算ケース数 | 最大 10 |
| f. 崩壊系列(系統がクリーンな場合) | 最大 3 (親, 娘, 孫核) |

F P沈着解析に必要な機能として次に示すものを備えている。

i) 流路壁の温度計算機能

F P沈着分布解析あるいは実験データとの比較を行う場合、冷却材の流路壁の温度が不明な場合があること、及び特に実験データ解析の場合、冷却材流路壁の温度測定間隔が不十分なことが多く、沈着分布は冷却材流路の壁温度に大きく影響されるため、この機能を設けている。

計算は、冷却材の流れに沿った温度変化と流量からその間の熱の授受を求め、伝熱計算により冷却材流路の壁表面温度を求めるものである。

ii) 熱交換器伝熱管の取扱い

熱交換器伝熱管のように主流が同一条件の多数の流路に分かれて流れる場合、代表の1本についてF P沈着分布を求める。

iii) 純化系の取扱い

純化系がバイパスラインに設けられている場合、この純化系で100% F Pが除去されるとする。

iv) 減圧事故の模擬

冷却材温度、流路壁温度の変化を無視して流速を急速に上げた場合のF P沈着分布、F P残留沈着総量、出口冷却材中のF P総量を求める。

v) 計算結果の保存

汚染がある場合の計算を行うため計算結果の保存ファイル作成機能を有する。
全体の計算のフローをFig. 4に示す。

5.2 サブルーチンプログラム

PLAINは全体の計算をコントロールするMAINプログラムの他に、次の各機能を有するサブ

ルーチンプログラムから成っている。

- 1) ACT : 沈着 F P の密度, 冷却材中の F P 密度を F P の原子数密度から放射能 (Ci) に換算する。
- 2) ALPHAS : α^* ($=\alpha \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}}$) を求める。
- 3) AUTM : 冷却材の流路に沿って流路形状が同一で, バイパス等の冷却材の流出入の無い部分は, 全分割点 (計算メッシュ) のデータを入力する必要はなく, 一括して領域として入力することができる。AUTM はこのような場合, メッシュの再分解 (等分), 再付番を行う。この領域内では主流のガス温度は直線内挿される。
- 4) BESFN : 0 次及び 1 次の変形ベッセル関数を求める。
- 5) BETSUB : 改良モデルの等価ペネトレーション係数 $1 - \beta$ を求める。
- 6) CALTW : 4.1 で述べた冷却材流路壁温度を, ガス温度の変化量より求める。入力した冷却材流路の壁温度を用いるかあるいは本サブルーチンで計算してその値を用いるか, いずれかを選択できる。
- 7) COMP : 脱着速度 θ の計算に用いる吸着熱は吸着率の関数である。PLAIN では吸着率を最初 0 と仮定して, 繰り返し計算により補正する。昇華速度についても同様である。この繰り返し計算のための収束判定を行う。
- 8) DCHECK : 入力データの確認を行う。
- 9) DIFFG : F P の冷却材中の拡散係数を計算する。
- 10) DIFFM : F P の冷却材流路の壁内の拡散係数を計算する。
- 11) ETANEW : 改良モデルの昇華速度 η を計算する。
- 12) ETASUB : INIOTAKIS モデルの昇華速度を計算する。
- 13) FPTOTAL : 領域ごとの F P 沈着総量を放射能量 (Ci) で求め, 出力する。
- 14) FREAD : 既に汚染がある場合の計算の際, 汚染量を記述した File の読み込みを行う。
- 15) FWRITE : 汚染がある場合の計算を次に行うために計算結果を File に書き込む。
- 16) HMASS : 物質伝達率 h を計算する。
- 17) HTRAN : 熱伝達率を計算する。
- 18) INPUT1 : 計算条件を入力する。
- 19) PREOLD : FREAD で読み込んだデータを出力する。
- 20) PRIN0, PRIN1, PRIN2, PRIN3 : 計算結果を出力する。
- 21) QVAPM : 吸着率依存で吸着熱を計算する。
- 22) QVAPR : 吸着率 0 の時の吸着熱を計算する。
- 23) SOLSUB : 冷却材流路壁中の F P の溶解度を計算する。
- 24) SORP : クリーンな場合の主流の沈着量分布を求めるため, Laplace 逆変換を行う。
- 25) SORPB : クリーンな場合のバイパス流の沈着量分布を求めるため, Laplace 逆変換を行う。

- 26) SORPR : 汚染のある主流の沈着量分布を求めるため, Laplace逆変換を行う。
 27) SORPRB : 汚染のあるバイパス流の沈着量分布を求めるため, Laplace逆変換を行う。
 28) THETAO : 昇華速度 θ を計算する。

5.3 入力, 出力

PLAINの入力の方法は付録のTable 1に示す。

カードNo.10のIFPはそれぞれ次のものがPLAINに内蔵されている。

IFP = 1 : Ag - 110 m

IFP = 2 : Cs - 137

IFP = 3 : Cs - 134

IFP = 4 : Cs - 136

IFP = 5 : I - 131

また, カードNo.22のIMは, それぞれ次のものが内蔵されている。

IM = 1 : SUS 304

IM = 2 : ハステロイ - X

IM = 3 : Cr - Mo 鋼

出力は, 5.4の計算例に示すが, 一般に次のように出力される。

a. Input Data Check

タイトル, 入口FP濃度, 冷却材流路に関する条件(ガス温度, 壁温, 動粘性係数等)が出力される。

b. Check the Parameters

次のパラメータが確認用に出力される。

QVAP : 吸着エネルギー (kcal/Mol)

ALPS : $\alpha^* = \alpha \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}}$ (m/s)

DIFG : ガス中のFPの拡散係数 (m²/s)

H : 物質伝達率 (m/s)

DIFM : 流路壁中のFPの拡散係数 (m²/s)

THETA : 脱着速度 θ (1/s)

ETA : 昇華速度 η (1/s)

GAMMA : $= 1 - \beta$ (-)

c. 計算結果

計算結果のうち次のものが出力される。

N : 主流中のFP濃度 (n/m³)

M₀ : 吸着しているFP濃度 (n/m²)

M_D : 流路壁中に拡散しているFPの壁表面当りに換算したFP濃度 (n/m²)

M : M₀ + M_D (n/m²)

PHO : 流路壁内におけるFP密度 = $\phi_{\rho=Ri}$ (n/m³)

GRAD : 流路壁内に拡散しているFPの内表面における濃度勾配 $\frac{\partial \phi}{\partial \rho}$ $\rho=Ri$ (n/m⁴)

更にM₀, M_D, Mについては放射能(μCi)に換算して再度出力する。

出力中のPenetration Factorとあるのは4.2 5)で述べた冷却材流路を一巡する間に低下する濃度割合Pである。

6. 計算と実験の比較

6.1 OGL-1におけるI-131とCs-137の沈着分布

OGL-1の第69サイクルと第70サイクルにおけるI-131とCs-137のそれぞれの沈着分布の計算結果を、OGL-1での実測結果と比較して以下に示す。^{6),23)}

OGL-1の高温運転期間は各サイクル共約20日間で、各サイクルの間には約1ヶ月程度の停止期間がある。このため、半減期が8日程度のI-131は減衰してしまい、前サイクルの沈着分布の影響は測定誤差より小さくなり、前サイクルの影響を無視できる。一方、Cs-137の方は半減期が約30年と長く、OGL-1が完成し、運転開始されてからこれまでの約12年間の沈着は、すべて積算しなければならない。以下に示す計算では、I-131については各サイクル共クリーンな系統として別々に計算を行い(KRST=0)、Cs-137についてはOGL-1での燃料の照射が開始された第39サイクルはクリーンな系統として計算し、それ以後の各サイクルは前のサイクルでの沈着分布がそのまま汚染として残留しているとして、全部のサイクルについて履歴を追ったものである。第69, 70サイクル前後のサイクルは、燃料からのFP放出が比較的多く、そのため沈着分布についても測定できた点が多いこと、各測定値のバックグラウンドの影響が少く統計誤差も小さいことから、この計算例に用いている。

各サイクル、核種間の共通な計算条件は次のとおりである。

- a. NPOINT : 主流のメッシュ数 = 70
- b. NBS : バイパスラインのメッシュ数 = 5
- c. NBPIN : バイパスラインが分岐する主流のメッシュ番号 = 43
- d. NB POT : バイパスラインが再び主流に合流する個所の主流のメッシュ番号 = 60
- e. KDATA : PLAIN内蔵データ使用 = 0
- f. KEYE : FP崩壊系列は考えず親核のみを計算する = 0
- g. KEY1 : 一定定常運転 = 0
- h. KEY2 : ガス中の拡散定数式はHirshfelderの式を用いる = 0
- i. KEY4 : 一巡して戻る量が無視できるので、ワンス・スルーとして計算 = 0
- j. KEY : ペネトレーション係数は、改良モデルの式を使用する = 3
- k. ROUGH : 表面荒さ係数は、通常は非常に大きい¹³⁾がFPの沈着量が少く、単層完全吸

PHO : 流路壁内におけるFP密度 = $\phi_{\rho=Ri}$ (n/m³)

GRAD : 流路壁内に拡散しているFPの内表面における濃度勾配 $\frac{\partial \phi}{\partial \rho}_{\rho=Ri}$ (n/m⁴)

更にM₀, M_D, Mについては放射能(μCi)に換算して再度出力する。

出力中のPenetration Factorとあるのは4.2 5)で述べた冷却材流路を一巡する間に低下する濃度割合Pである。

6. 計算と実験の比較

6.1 OGL-1におけるI-131とCs-137の沈着分布

OGL-1の第69サイクルと第70サイクルにおけるI-131とCs-137のそれぞれの沈着分布の計算結果を、OGL-1での実測結果と比較して以下に示す。^{6),23)}

OGL-1の高温運転期間は各サイクル共約20日間で、各サイクルの間には約1ヶ月程度の停止期間がある。このため、半減期が8日程度のI-131は減衰してしまい、前サイクルの沈着分布の影響は測定誤差より小さくなり、前サイクルの影響を無視できる。一方、Cs-137の方は半減期が約30年と長く、OGL-1が完成し、運転開始されてからこれまでの約12年間の沈着は、すべて積算しなければならない。以下に示す計算では、I-131については各サイクル共クリーンな系統として別々に計算を行い(KRST=0)、Cs-137についてはOGL-1での燃料の照射が開始された第39サイクルはクリーンな系統として計算し、それ以後の各サイクルは前のサイクルでの沈着分布がそのまま汚染として残留しているとして、全部のサイクルについて履歴を追ったものである。第69、70サイクル前後のサイクルは、燃料からのFP放出が比較的多く、そのため沈着分布についても測定できた点が多いこと、各測定値のバックグラウンドの影響が少く統計誤差も小さいことから、この計算例に用いている。

各サイクル、核種間の共通な計算条件は次のとおりである。

- a. NPOINT : 主流のメッシュ数 = 70
- b. NBS : バイパスラインのメッシュ数 = 5
- c. NBPIN : バイパスラインが分岐する主流のメッシュ番号 = 43
- d. NBPOT : バイパスラインが再び主流に合流する個所の主流のメッシュ番号 = 60
- e. KDATA : PLAIN内蔵データ使用 = 0
- f. KEYE : FP崩壊系列は考えず親核のみを計算する = 0
- g. KEY1 : 一定定常運転 = 0
- h. KEY2 : ガス中の拡散定数式はHirshfelderの式を用いる = 0
- i. KEY4 : 一巡して戻る量が無視できるので、ワンス・スルーとして計算 = 0
- j. KEY : ペネトレーション係数は、改良モデルの式を使用する = 3
- k. ROUGH : 表面荒さ係数は、通常は非常に大きい¹³⁾がFPの沈着量が少く、単層完全吸

着（吸着率 100%）の起る可能性は無いので考えないこととして 1.0 とする。

1. TOP : 入力された冷却材流路の壁温度を用いる = 0.0

流路の形状、メッシュの細分についても同様に、各計算ケースに対して共通であるが、これは付録 1 の入力リストに示す。

I-131 の第 69, 70 サイクル計算における入力リストを付録 1, Table 2 及び Table 3 に示し、Cs-137 の第 69, 70 サイクルの計算における入力リストを付録 1, Table 4 及び Table 5 に示す。以上の計算結果を図にプロットとして Fig. 5 ~ Fig. 8 に示す。図中 + 印の点は前述のとおり OGL-1 での実測値を示す。実測値は流動条件に大きな差の無い近接した 2 点でも、大きくばらついているが、計算値は実測値の傾向を良く表わしている。計算結果の 1 例として汚染のある系統として行っている Cs-137 の第 69 サイクルの計算結果を付録 1, Table 6 に示す。

6.2 TLG-1 における I-131 と Cs-137 の沈着分布

JRR-2 に設置された炉内ループ TLG-1 による I-131, Cs-137 の沈着分布測定結果と、PLAIN による計算結果を比較して以下に示す。

TLG-1 の実験は OGL-1 における FP 沈着測定とは異なり、冷却材の流れの中に全長約 2 m の直管の沈着管を挿入して約 500°C 前後の温度で FP を沈着させた後、沈着管を取り出して切断し、沈着量を測定している。したがってこの実験は前の実験結果の影響を受けていないこと、沈着管が短い直管であるため、温度変化が少く、冷却材の流れは一様であることが特徴である。ここでは TLG-1 の報告書にしたがって DEP-4 の実験結果について計算を行う。計算条件を以下に示す。

- a. NPOINT : 計算メッシュ数 = 40
- b. KEY : 昇華速度は改良モデルを使用する = 0
- c. TOP : 管壁温度はガス温度より計算する = 1.0

バイパスラインは無いので、バイパスに関する入力はいずれも 0, KDATA ~ KEY 4 については、OGL-1 の計算条件と同じである。冷却材の流動等の計算条件は、実験条件²⁴⁾より次のように定めている。

- i) 入口／出口ガス温度 : 517 °C / 500 °C
- ii) 圧力 : 11.9 kg / cm² G
- iii) 流量 : 4.8 g / sec
- iv) 試験時間 : 6.12 × 10⁵ sec

沈着管入口の FP 濃度については測定結果が無いいため実験中の FP 濃度は一定と仮定し、沈着管に流入、流出する FP の総量の差が沈着総量に等しいとして推定した値を用いている。

以上の計算条件による I-131 と Cs-137 の入力リストを付録 1, Table 7 及び Table 8 に示し、計算結果を TLG-1 の測定結果と比較して Fig. 9 及び Fig. 10 に示す。図より沈着量及び沈着分布の計算値は、実測値と良く一致している。

7. 結 言

高温ガス炉の1次冷却系におけるFPの沈着挙動を解析するプログラムPLAINを新たに開発し、OGL-1及びTLG-1による実測値とPLAINによる計算値を比較した。

PLAINコードに用いているFP沈着モデルは、冷却材流路表面へのFPの吸着-脱着及び流路壁内面へのFPの拡散侵入を扱ったIniotakisモデルを基本として、拡散侵入速度を決めるペネトレーション係数と、拡散侵入したFPが再び冷却材中に出てくる速度を決める昇華速度を改良したモデルが共に組み込まれている。Iniotakisモデルでは、ペネトレーション係数はFP沈着実験結果から定めなければならず、冷却材流路壁の材料とFPの組み合わせが異なるごとに実験が必要になるのに対し、改良モデルでは、ペネトレーション係数の物理的意味が明らかになるとともに、拡散定数、脱着速度、崩壊定数等のFP沈着実験以外の実験から定められるパラメータで求めることができる。

本コードのFP沈着モデルは、Laplace変換を用いて解析解を求めることができ、この解析解は冷却材中のFPの濃度の連続性を用いて、多くのメッシュ分割した系へ容易に拡張できる形をしている。この解の逆変換は各項の逆変換のFaltungによって求めることは、項数が多過ぎてできないが、数値解法による逆変換を用いて精度良く求めることができる。計算の所要時間はOGL-1の解析の場合で1ケース当たり約4秒(FACOM-M 780, CPU時間)である。

計算結果とOGL-1での実測値の比較では、部分的に10倍程度の差があるが、全体の沈着分布の傾向は良く表わしていると言える。TLG-1の実測値との比較の場合も同様に全体としては良く一致しており、I-131については非常に良く合致していると言える。

以上の結果から、新たに開発したこのPLAINコードは、高温ガス炉の1次冷却系のFP沈着分布を、実用上十分精度良く求めることができると考えられる。

謝 辞

本プログラムは、著者の1人が西独 Jülich 研究所に留学中に得られた知見と、同研究所の Iniotakis 氏との討論でその構想がまとまり、帰国後、解析解を求めると共に各種の Laplace 逆変換法を試みながら試作したものである。ここに、留学中の討論を通して多くの助言と示唆を与えてくれた Jülich 研究所の N. Iniotakis 氏、K. Münchow 氏、J. Malinowski 博士、Dederichs 博士、C. B. von der Decken 教授に深く感謝の意を表します。また、Laplace 逆変換法については、多くの助言を与えて下さった八巻治恵氏（現在、原子力船技術部次長）に深く感謝いたします。

本報告書執筆に当っては、材料試験炉部照射第1課松本実喜夫氏をはじめとする OGL-1 FP 沈着測定研究を行っているグループの方々から貴重なデータの提供を受け、更に解析例については、高温工学試験研究炉設計室の佐々木克徳氏にお願いいたしました。また、本報告書をまとめるにあたり、高温工学試験研究炉設計室長齊藤伸三氏に適切な御助言、御指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松永朔郎, 他「高温ヘリウムインパイルガスループ (OGL-1) の建設と性能試験」原子力学会誌, vol.21, No.3, 39 (1971)
- 2) 片桐政樹, 他「可搬型 Ge(Li) 検出器を使用した FP プレートアウト測定 — OGL-1 FP プレートアウト測定のための予備測定実験 —」, 1978年3月 JAERI-M 7579
- 3) H. Terada, et al; Non-Destructive Measurement of Fission Product Plate-out using In-Situ Ge(Li) Gamma-ray Spectrometer, Proceedings of Second U.S. Japan Seminar on HTGR Safety Technology vol. 1 (1978)
- 4) H. Terada, et al; In-Situ Measurement of Fission Product Plate-out in In-Pile Gas Loop Using Portable Ge(Li) Gamma-Ray Spectrometer, J. Nucl. Sci. Tech. vol. 17, No. 3 225~240 March 1980
- 5) 馬場 治, 他「OGL-1 FP プレートアウト測定における沈着量換算係数」1981年3月 JAERI-M 9593
- 6) 露崎典平, 他「OGL-1 における Cs-137 の沈着分布」1988年11月 JAERI-M 88-225
- 7) O. Baba; F.P. Plate-out Study using In-pile Loop OGL-1, IAEA Specialists' Meeting on Coolant Chemistry, Plate-out and Decontamination in Gas-Cooled Reactors, (1980)
- 8) T.S. Kress, F.H. Neill; A Model for Fission Product Transport and Deposition under Isothermal Conditions ORNL-TM-1274 Oct. 1965
- 9) N. Iniotakis, et al; Initial Results of investigations into Fission Product Deposition in In-pile Experiments, Nucl. Eng. and Design 34 (1975)
- 10) N. Iniotakis; Private information
- 11) N. Iniotakis; Private information
- 12) R.M. Barrer; Gas Flow in Solids, Philosophical Magazine Vol. 28, 1939
- 13) R.L. Woolley; Adsorption/Desorption Characteristics of Caesium on Oxidised Stainless Steel, Jour. of the Chem. Soci. Faraday Transactions I. vol. 74, 1978
- 14) J.H. Arnold; Ind. Eng. Chem., 22, 1091 (1930)
- 15) J.O. Hirshfelder; Chem. Reviews, 44, 205 (1949)
- 16) 日本機化学会; 「伝熱工学資料 改訂第3版」P 28
- 17) H. Hausen; VDI-Z Beich, Verfahrenstech. 4 (1943), 91

- 18) J.D. Levine and E.P. Gyftopoulos, Surface Science, 1, (1964),
171-193
- 19) J.D. Levine and E.P. Gyftopoulos, Surface Science. 1, (1964),
225-241
- 20) F.E. Vanslager and L.D. Mears; PAD a Computer Code for Calculating
the Plate-out Activity Distribution in a Reactor Circuit, GA-
10460, 1971
- 21) Athanasios Papoulis; A New Method of Inversion of the Laplace
Transform, Bock Reviews vol. XIV, No. 4 404 (1955)
- 22) G. Honig; Zur numerischen Loesung partieller
Differentialgleichungen mit Laplace-Transformation, Juel-1550,
Nov. 1978
- 23) 露崎典平, 他「OGL-1におけるFP沈着測定」, 私信
- 24) T. Kitahara, et al.; Effect of Flow Rate on Fission-Product
Deposition from High-Temperature Gas Streams, J. Nucl. Sci.
Technology vol. 13, No. 3, Mar., 1976

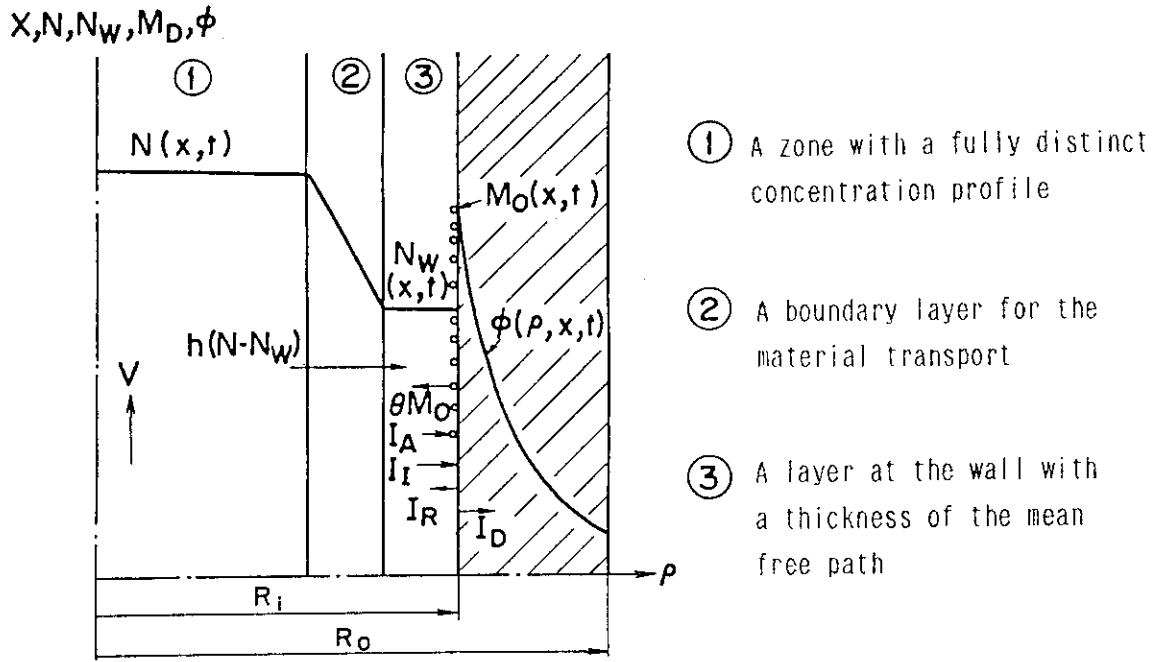


Fig. 1 Schematic Drawing of Plate-out Model ⁹⁾

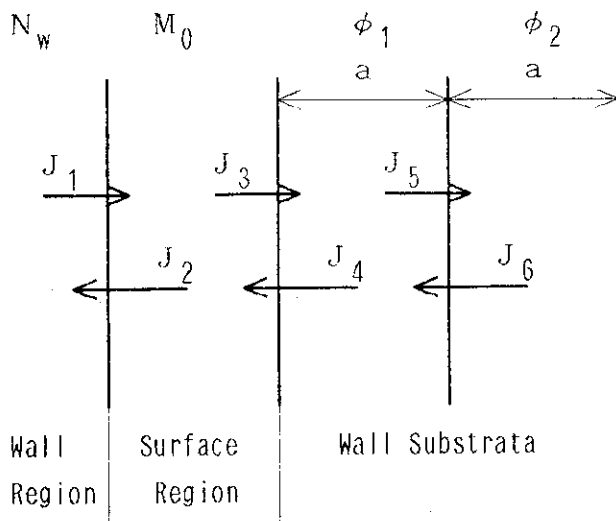


Fig. 2 Penetration to Substrate

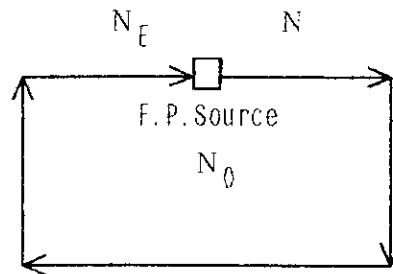


Fig. 3 F.P. Concentration in a Closed Circuit

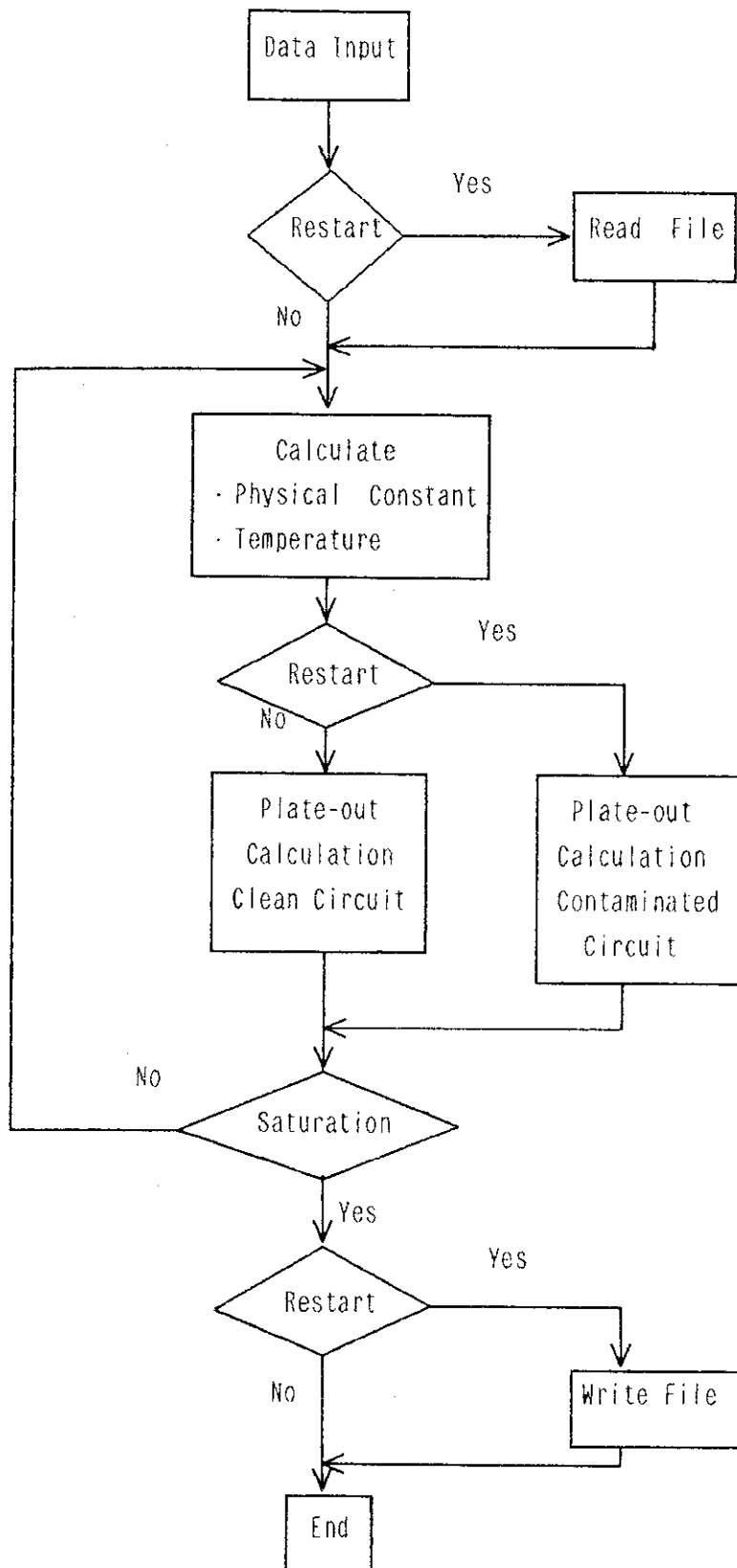


Fig. 4 Calculation Flow in PLAIN Code

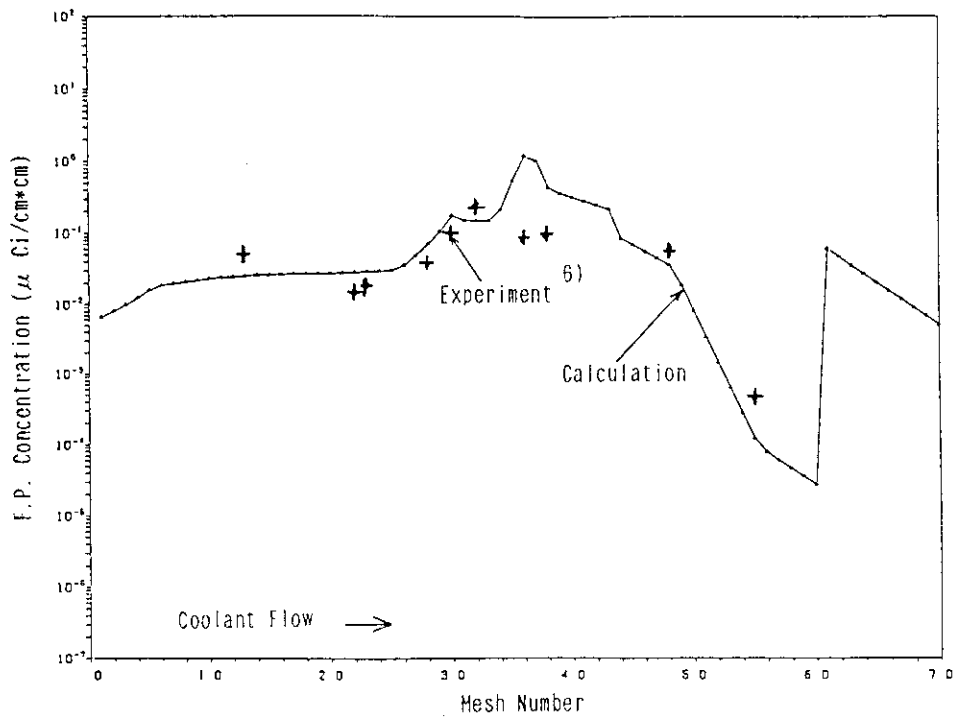


Fig. 5 Plate-out Distribution of I-131 in OGL-1 (69th Cycle)

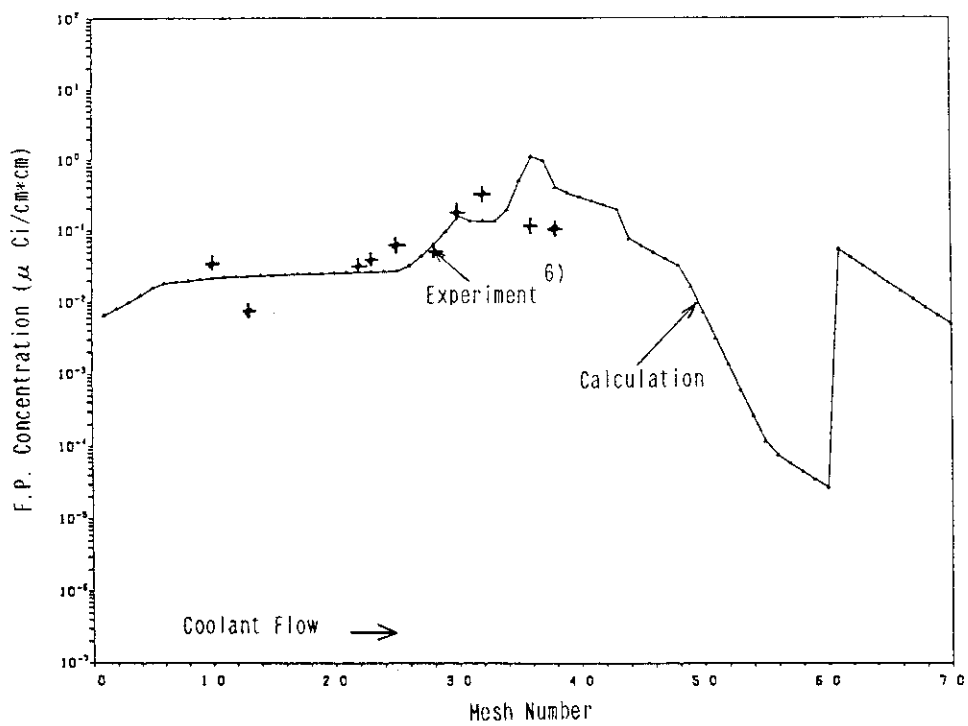


Fig. 6 Plate-out Distribution of I-131 in OGL-1 (70th Cycle)

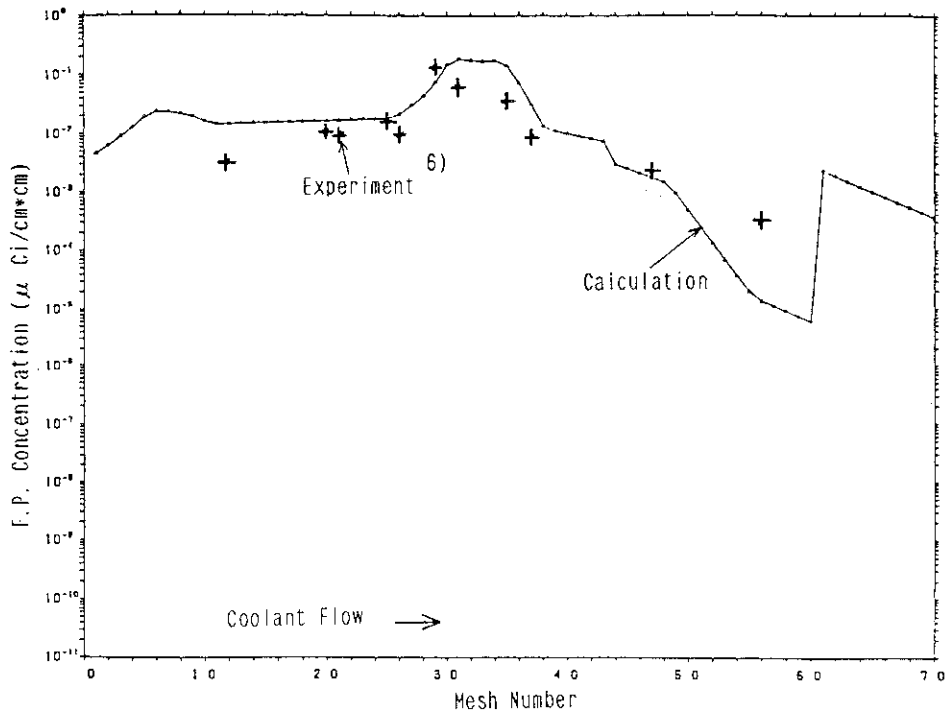


Fig. 7 Plate-out Distribution of Cs-137 in OGL-1 (69th Cycle)

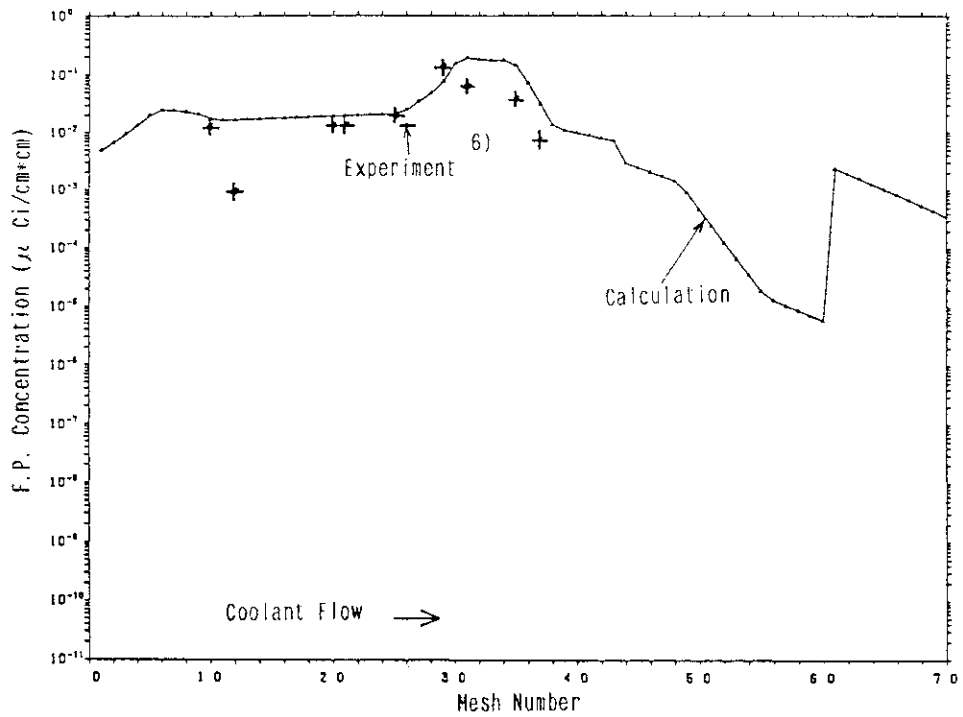


Fig. 8 Plate-out Distribution of Cs-137 in OGL-1 (70th Cycle)

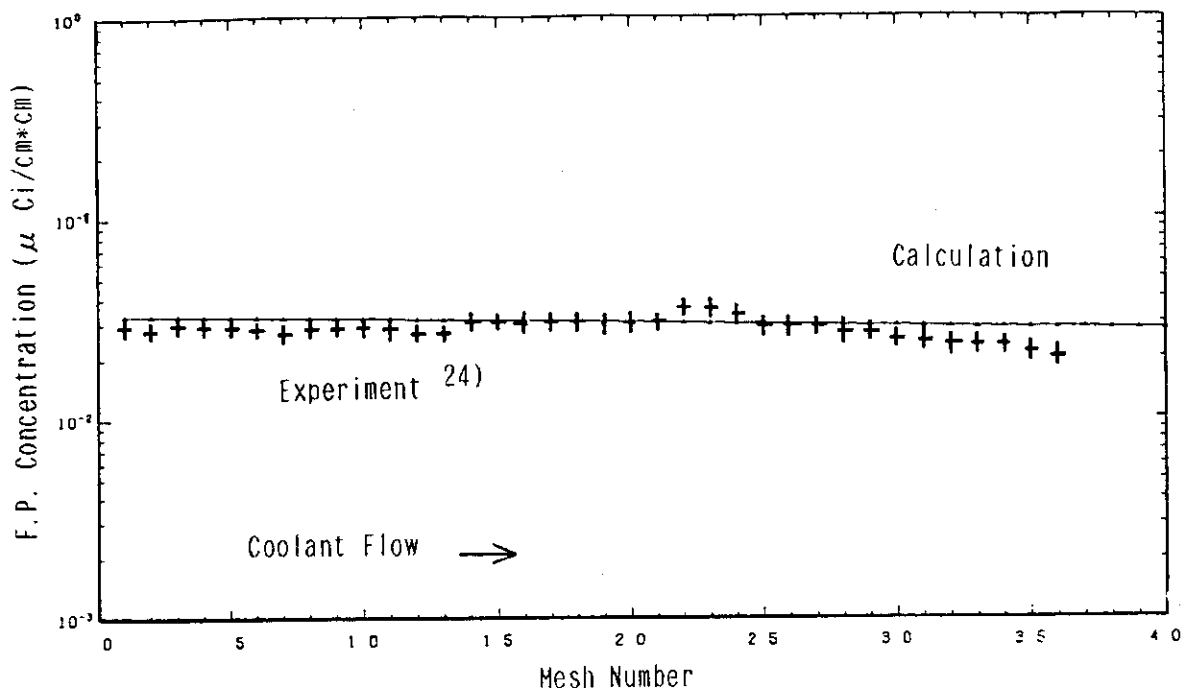


Fig. 9 I-131 Distribution in TLG-1

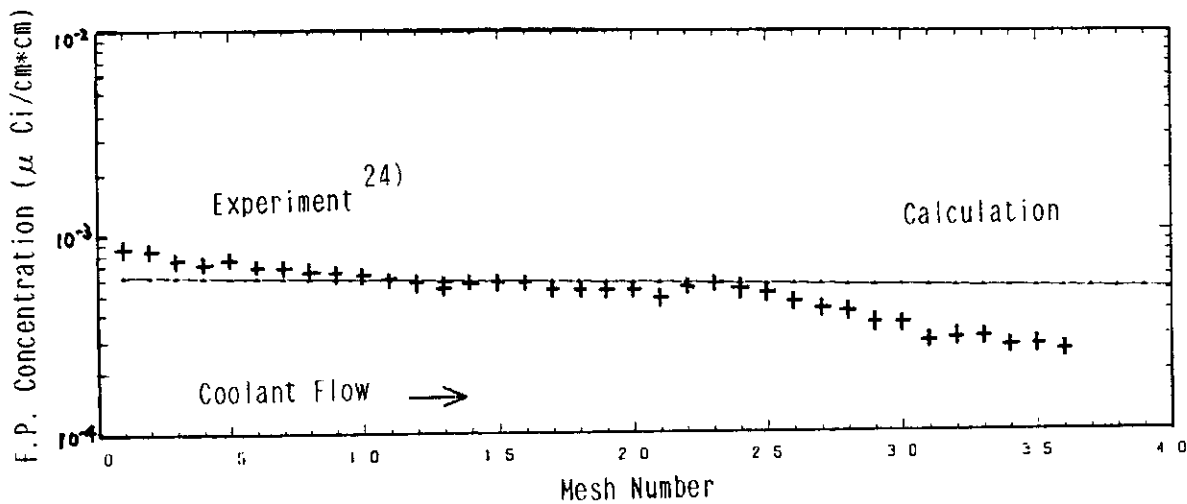


Fig. 10 Cs-137 Distribution in TLG-1

付録 1

入力フォーマット, OGL-1 及び TLG-1 の計算例

Table 1 Input Data Format (1/6)

Card No.	Figure	Type	Column	Data
1	NPOINT KB NBS NBPIN NBPOT KB	I6 I6 I6 I6 I6 I6	1~6 7~12 13~18 19~24 25~30 31~36	Number of mesh point in main circuit. Number of elbow or valve in main circuit, 0; without bypass line 1; with bypass line. Bypass inlet point in main circuit. Bypass return point in main circuit. Number of elbow and/or valve in bypass line.
2	NTIME KRST KDATA NLIM ITRM	I6 I6 I6 I6 I6	1~6 7~12 13~18 19~24 25~30	Number of calculation case in the same flow condition, 0; Calculation and printout 1; Calculation, printout and store -1; Read contamination data, calculation, printout and store. 0; Use FP-data in PLAIN program 10; Input all FP data. Number of term in Laplace inversion, 0; Use preset value = 100. Number of iteration limit, 0; Use preset value = 10.
3	KEYE KEY1 KEY2	I6 I6 I6	1~6 7~12 13~18	Ident number of decay chain, 0; Parent 1; Parent, Daughter 2; Parent, Daughter, Grand daughter. Ident number of operation condition, 0; Constant operation 1; Cyclic start and stop operation. Ident number of FP diffusion coefficient in gas phase, 0; Formula of Hirshfelder 1; Formula of Arnold.

Table 1 Input Data Format (2/6)

Card No.	Figure	Type	Column	Data
3	KEY4 KEY	I6 I6	19~24 25~30	Ident number of circuit 0; Once through or FP concentration in return gas is negligible low 1; A loop with high FP concentration in return gas Ident number ; sublimation velocity, penetration factor -1; Modified model , Modified model 0; Modified model , Iniotakis model 1; Iniotakis model , Iniotakis model 3; Iniotakis model Modified model
4	TIME(I)	8E9.2	1~ 9 10~18 64~72	Operation time to be calculated (seconds) Input from TIME(1) to TIME(NTIME)
5	PRESS ROUGH ESI SATF VELFAC	E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2	1~ 9 10~18 19~27 28~36 37~45	Pressure (Kg/cm*cm G) Roughness factor of the circuit wall Saturation condition for adsorption energy, 0.0; ESI= 1.0 E-3 Feedback factor for adsorption energy modification 0.0; SATF=0.5 Factor for velocity when gas velocity is changed without changing other conditions 0.0; VELFAC= 1.0
6	TITL(I)	18A4	1~72	Title card for parent nuclide
7	TITLX(I)	18A4	1~72	Title card for daughter nuclide
8	TITLY(I)	18A4	1~72	Title card for granddaughter nuclide

Table 1 Input Data Format (3/6)

Card No.	Figure	Type	Column	Data
9	FPIN FPINX FPINY	E12.5 E12.5 E12.5	1~12 13~24 25~36	Parent nuclide concentration at inlet point. (n/m ³) Daughter nuclide concentration at inlet point. (n/m ³) Granddaughter nuclide concentration at inlet point. (n/m ³)
10	IFP IX IY	I6 I6 I6	1~6 7~12 13~18	This card is used when library data in PLAIN card is used. This card is skipped if KDATA=0. Ident number of parent nuclide. Ident number of daughter nuclide, when KEYE=1. Ident number of granddaughter nuclide, when KEYE=2.
11	AMASS DECCON QELF QSUBF QSTRF QVEL QNP QCPF	E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2	1~9 10~18 19~27 28~36 37~45 46~54 55~63 64~72	This card is used when library data is not used. This card is necessary if KDATA=10. All of the value in this card is for parent nuclide. Mass number. (1/sec) Decay constant. (eV) Electron work function. (eV) Heat of sublimation. Orbital strength. Largest number of valence electrons. Polarizability. Specific heat in liquid phase. (Kcal/mol C)
12	QRADF AREP TMELT ALP TECR QITA	E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2 E9.2	1~9 10~18 19~27 28~36 37~45 46~54	Atomic radius. (A) Atomic volume. (cm ³ /mol) Melting point. (C) Accommodation factor. Critical temperature. Sublimation energy. (Kcal/mol)
13	Cards of No.13 and 14 are for daughter nuclide (same physical data).			
16	Cards of No.15 and 16 are for granddaughter nuclide (same physical data).			

Table 1 Input Data Format (4/6)

Card No.	Figure	Type	Column	Data
17	TEMIN TEMOT TSUIN TSUOUT TOP	E12.5 E12.5 E12.5 E12.5 E12.5	1~12 13~24 25~36 37~48 49~60	Cards of No. 17~22 are a set of the information for each region of flow circuit. A new set of the cards is needed for another region which has different geometry of flow path or flow condition. Each region should be divided into more than 2 meshes. Gas temperature at regional inlet point. Gas temperature at regional outlet point. Metal surface temperature at regional inlet point. Metal surface temperature at regional outlet point. Ident number of wall temperature calculation, 0.0; linear interpolation from inlet temperature 1.0; calculate wall temperature from gas temperature
18	FLT PLEN DEQ FAREA	E12.5 E12.5 E12.5 E12.5	1~12 13~24 25~36 37~48	Coolant flow rate. (Kg/sec) Length of the region. (m) Hydraulic equivalent diameter. (m) Cross sectional flow area. (m ²) If there are many flow areas as in a heat exchanger, input flow area of one flow channel. The number of flow channel is input as NPIPE in the card No. 22.
19	BETA DIFM1 DIFM2 SOVVP SOLVP	E12.5 E12.5 E12.5 E12.5 E12.5	1~12 13~24 25~36 37~48 49~60	Penetration factor for parent nuclide. Frequency factor for diffusion coefficient in the wall (cm ² /sec) material. Activation energy for diffusion coefficient in the wall (Kcal/mol) material. Constant in the solubility of FP in the wall substrate. (n/m ³ ·Metal) Exponent factor in the solubility of FP in the wall substrate. (Kcal/mol)

Table 1 Input Data Format (5/6)

Card No.	Figure	Type	Column	Data
20~21				Card No.20 is for daughter nuclide and card No. 21 is for granddaughter. The input item and order are the same as card No.18 and 19.
22	IM KMES NPIPE KW KEND	I6 I6 I6 I6 I6	1~6 7~12 13~18 19~24 25~30	Ident number of wall material. Number of mesh in the region. Number of flow channel or pipes in which coolant flows in parrarel. Dummy Ident number, KEND=0; follow the input data card set of No.17~22, KEND=1; end the data set of flow region. When KEND=1, card set of No.17~22 should be followed.
23~28				Card No.23~28 are the region information in bypassing line. Input data item and the order are the same as card No. 17~22.
29	KI FM	I6 E12.5	1~6 7~18	The number where an elbow or a bend exists. A factor for material transfer coefficient at elbow or bend part. This card is skipped when KB=0. When KB>0, card No.29 is input KB times for each elbow or bend.
30				Card No. 30 is the same as card No. 29 but for bypassing line.
31	MAXBND	I6	1~6	Number of start and stop operation. This card is skipped if KEY1=0.
32	PFAC(I) TIMEA(I) TIMEE(I)	E12.5 E12.5 E12.5	1~12 12~24 25~36	Factor of FP concentration which is input in card No.9. Start time. FP Stop time. FP 0 TIMEA(I) TIMEE(I)

Table 1 Input Data Format (6/6)

Card No.	Figure	Type	Column	Data
33	PENEF	E12.5	1~12	A factor of FP (parent nuclide) which returns after one circulation.
	PENEFX	E12.5	13~24	The same as above but for daughter.
	PENEFY	E12.5	25~36	The same as above but for granddaughter.
	BYPASS	E12.5	37~48	Flow bypassing ratio to coolant purification system in bypassing line.

Table 2 Input Data for I-131 at the 69th Operation Cycle 6)

	70	0	5	43	60	0
	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	3	
1700000.0						
29.40		1.00				
				SAMPLE	69CYCLE	
6.34E+10						
5						
792.		587.		792.		587.
0.05850		6.5		0.08		5.027E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	5	1				
587.		558.		587.		558.
0.05850		6.85		0.059		2.734E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	5	1				
558.		523.		558.		523.
0.05850		18.25		0.0446		1.562E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	15	1				
523.		320.0		523.		320.0
2.659E-03		7.52		0.0119		1.112E-04
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	5	22				
320.0		320.		320.0		320.
0.05850		4.55		0.0527		2.181E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	3	1				
320.		191.0		320.		191.0
2.659E-03		6.87		0.0127		1.267E-04
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	22				
191.0		191.0		191.0		191.0
0.05850		4.9		0.0527		2.181E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	1				
191.0		191.0		191.0		191.0
0.0234		6.63		0.0527		2.181E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	1				
191.0		29.0		191.0		29.0
3.900E-03		12.21		0.0214		3.597E-04
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	7	6				
29.0		29.0		29.0		29.0
0.0234		8.32		0.0527		2.181E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	1				
130.0		130.0		130.0		130.0
0.0585		20.18		0.0527		2.181E-03
0.75		55.0				
---	DIFM1	DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	10	1		1		
191.0		191.0		191.0		191.0
0.0351		3.18		0.0527		2.181E-03
0.75		55.0				
1	5	1		1		

Table 3 Input Data for I-131 at the 70th Operation Cycle 6)

70	0	5	43	60	0
1	1	0	0	0	
0	0	0	0	3	
1730000.0					
29.40		1.00			
			SAMPLE	70CYCLE	
6.28E+10					
5					
785.	583.		785.	583.	
0.05960	6.5		0.08	5.027E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	5	1			
583.	550.		583.	550.	
0.05960	6.85		0.059	2.734E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	5	1			
550.	517.		550.	517.	
0.05960	18.25		0.0446	1.562E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	15	1			
517.	321.0		517.	321.0	
2.709E-03	7.52		0.0119	1.112E-04	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
2	5	22			
321.0	321.		321.0	321.	
0.05960	4.55		0.0527	2.181E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	3	1			
321.	193.0		321.	193.0	
2.709E-03	6.87		0.0127	1.267E-04	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	22			
193.0	193.0		193.0	193.0	
0.05960	4.9		0.0527	2.181E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	1			
193.0	193.0		193.0	193.0	
0.0238	6.63		0.0527	2.181E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	1			
193.0	30.0		193.0	30.0	
3.967E-03	12.21		0.0214	3.597E-04	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	7	6			
30.0	30.0		30.0	30.0	
0.0238	8.32		0.0527	2.181E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	5	1			
129.0	129.0		129.0	129.0	
0.0596	20.18		0.0527	2.181E-03	
0.75	55.0				
---	DIFM1,DIFM2	7.5000D-01	5.5000D+01		
1	10	1	1		
193.0	193.0		193.0	193.0	
0.0358	3.18		0.0527	2.181E-03	
0.75	55.0				
1	5	1	1		

Table 4 Input Data for Cs-137 at the 69th Operation Cycle ⁶⁾

70	0	5	43	60	0
1	-1	0	0	0	
0	0	0	0	3	
1697760.0					
29.60		1.00			
			SAMPLE	69CYCLE(HTRR23.DATA(SAM69C))	
5.63E+11					
2					
781.		577.	781.	577.	
0.0585		6.5	0.08	5.027E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
2	5	1			
577.		558.	577.	588.	
0.0585		6.85	0.059	2.734E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
2	5	1			
588.		523.	588.	523.	
0.0585		18.25	0.0446	1.562E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
2	15	1			
523.		320.0	523.	320.0	
2.659E-03		7.52	0.0119	1.112E-04	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
2	5	22			
320.0		320.	320.0	320.	
0.0585		4.55	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	3	1			
320.		191.0	320.	191.0	
2.659E-03		6.87	0.0127	1.267E-04	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	5	22			
191.0		191.0	191.0	191.0	
0.0585		4.9	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	5	1			
191.0		191.0	191.0	191.0	
0.0234		6.63	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	5	1			
191.0		29.0	191.0	29.0	
3.907E-03		12.21	0.0214	3.597E-04	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	7	6			
29.0		29.0	29.0	29.0	
0.0234		8.32	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	5	1			
130.0		130.0	130.0	130.0	
0.0585		20.18	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
---	DIFM1,DIFM2	3.0000D-01	6.3500D+01		
1	10	1	1		
191.0		191.0	191.0	191.0	
0.0351		3.18	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
1	5	1	1		

Table 5 Input Data for Cs-137 at the 70th Operation Cycle ⁶⁾

70	0	5	43	60	0
1	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	3	
1730880.0					
29.30		1.00			
SAMPLE 70CYCLE(HTRR23.DATA(SAM70C))					
5.58E+11					
2					
772.		560.	772.	560.	
0.0596		6.5	0.08	5.027E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
2	5	1			
560.		550.	560.	550.	
0.0596		6.85	0.059	2.734E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
2	5	1			
550.		517.	550.	517.	
0.0596		18.25	0.0446	1.562E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
2	15	1			
517.		321.0	517.	321.0	
2.709E-03		7.52	0.0119	1.112E-04	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
2	5	22			
321.0		321.	321.0	321.	
0.0596		4.55	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	3	1			
321.		193.0	321.	193.0	
2.709E-03		6.87	0.0127	1.267E-04	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	5	22			
193.0		193.0	193.0	193.0	
0.0596		4.9	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	5	1			
193.0		193.0	193.0	193.0	
0.0238		6.63	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	5	1			
193.0		30.0	193.0	30.0	
3.973E-03		12.21	0.0214	3.597E-04	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	7	6			
30.0		30.0	30.0	30.0	
0.0238		8.32	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	5	1			
129.0		129.0	129.0	129.0	
0.0596		20.18	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
--- DIFM1,DIFM2 3.0000D-01 6.3500D+01					
1	10	1	1		
193.0		193.0	193.0	193.0	
0.0358		3.18	0.0527	2.181E-03	
0.30		63.5			
1	5	1	1		

Table 6 Output List for Cs-137 at 69 Operation Cycle (1/12)

CALCULATION RESULT OF PREVIOUS OPERATION

* SAMPLE 68CYCLE(HTRR23.DAT(SAM68C)) *				

I	N	MO	MD	M
1	0.58067D+12	0.49784D+11	0.22154D+16	0.22155D+16
2	0.60541D+12	0.13188D+12	0.30374D+16	0.30375D+16
3	0.63219D+12	0.38089D+12	0.42783D+16	0.42787D+16
4	0.66118D+12	0.12134D+13	0.61983D+16	0.61995D+16
5	0.69250D+12	0.43209D+13	0.92096D+16	0.92140D+16
6	0.71112D+12	0.95643D+13	0.11570D+17	0.11579D+17
7	0.71451D+12	0.11723D+14	0.11445D+17	0.11457D+17
8	0.71778D+12	0.14404D+14	0.10864D+17	0.10879D+17
9	0.72086D+12	0.17741D+14	0.97049D+16	0.97226D+16
10	0.72371D+12	0.21904D+14	0.80780D+16	0.80999D+16
11	0.72553D+12	0.25554D+14	0.73797D+16	0.74052D+16
12	0.72547D+12	0.27492D+14	0.74585D+16	0.74860D+16
13	0.72537D+12	0.29586D+14	0.75379D+16	0.75675D+16
14	0.72521D+12	0.31849D+14	0.76179D+16	0.76497D+16
15	0.72500D+12	0.34297D+14	0.76983D+16	0.77326D+16
16	0.72474D+12	0.36943D+14	0.77792D+16	0.78162D+16
17	0.72441D+12	0.39807D+14	0.78607D+16	0.79005D+16
18	0.72403D+12	0.42906D+14	0.79426D+16	0.79855D+16
19	0.72358D+12	0.46260D+14	0.80251D+16	0.80714D+16
20	0.72307D+12	0.49892D+14	0.81081D+16	0.81580D+16
21	0.72249D+12	0.53825D+14	0.81916D+16	0.82455D+16
22	0.72184D+12	0.58087D+14	0.82757D+16	0.83338D+16
23	0.72112D+12	0.62706D+14	0.83603D+16	0.84230D+16
24	0.72033D+12	0.67712D+14	0.84455D+16	0.85132D+16
25	0.71946D+12	0.73141D+14	0.85313D+16	0.86045D+16
26	0.71159D+12	0.15386D+15	0.98770D+16	0.10031D+17
27	0.70437D+12	0.71313D+15	0.13486D+17	0.14199D+17
28	0.66940D+12	0.37010D+16	0.17970D+17	0.21671D+17
29	0.49575D+12	0.14730D+17	0.21779D+17	0.36509D+17
30	0.27134D+12	0.49833D+17	0.17338D+17	0.67171D+17
31	0.25127D+12	0.79004D+17	0.72112D+16	0.86215D+17
32	0.22619D+12	0.75363D+17	0.68390D+16	0.82202D+17
33	0.20440D+12	0.71965D+17	0.64810D+16	0.78446D+17
34	0.11107D+12	0.79979D+17	0.24872D+16	0.82466D+17
35	0.51196D+11	0.67666D+17	0.23127D+15	0.67897D+17
36	0.22250D+11	0.34062D+17	0.11381D+14	0.34073D+17
37	0.96383D+10	0.14878D+17	0.40434D+12	0.14878D+17
38	0.42058D+10	0.63399D+16	0.11170D+11	0.63399D+16
39	0.38749D+10	0.52130D+16	0.21221D+10	0.52130D+16
40	0.34788D+10	0.46955D+16	0.19127D+10	0.46955D+16
41	0.31231D+10	0.42294D+16	0.17239D+10	0.42294D+16
42	0.28038D+10	0.38096D+16	0.15538D+10	0.38096D+16
43	0.25172D+10	0.34315D+16	0.14004D+10	0.34315D+16
44	0.21123D+10	0.13920D+16	0.56869D+09	0.13920D+16
45	0.17725D+10	0.11745D+16	0.48031D+09	0.11745D+16
46	0.14874D+10	0.99097D+15	0.40566D+09	0.99097D+15
47	0.12482D+10	0.83613D+15	0.34262D+09	0.83613D+15
48	0.10474D+10	0.70549D+15	0.28937D+09	0.70549D+15
49	0.54623D+09	0.44057D+15	0.29387D+08	0.44057D+15
50	0.29417D+09	0.22819D+15	0.28842D+06	0.22819D+15
51	0.15973D+09	0.11884D+15	0.17123D+04	0.11884D+15
52	0.87494D+08	0.62244D+14	0.55583D+01	0.62244D+14
53	0.48378D+08	0.32797D+14	0.86788D-02	0.32797D+14
54	0.27023D+08	0.17389D+14	0.55387D-05	0.17389D+14
55	0.15262D+08	0.92799D+13	0.11869D-08	0.92799D+13
56	0.12878D+08	0.62646D+13	0.10057D-10	0.62646D+13
57	0.10470D+08	0.51368D+13	0.82536D-11	0.51368D+13
58	0.85115D+07	0.42121D+13	0.67736D-11	0.42121D+13
59	0.69195D+07	0.34539D+13	0.55591D-11	0.34539D+13
60	0.56253D+07	0.28322D+13	0.45623D-11	0.28322D+13
61	0.94560D+09	0.11140D+16	0.14415D+03	0.11140D+16
62	0.76053D+09	0.90430D+15	0.11712D+03	0.90430D+15
63	0.61168D+09	0.73408D+15	0.95161D+02	0.73408D+15
64	0.49197D+09	0.59591D+15	0.77320D+02	0.59591D+15
65	0.39568D+09	0.48375D+15	0.62824D+02	0.48375D+15
66	0.31824D+09	0.39271D+15	0.51046D+02	0.39271D+15
67	0.25596D+09	0.31880D+15	0.41477D+02	0.31880D+15
68	0.20586D+09	0.25881D+15	0.33702D+02	0.25881D+15
69	0.16557D+09	0.21011D+15	0.27384D+02	0.21011D+15
70	0.13317D+09	0.17057D+15	0.22251D+02	0.17057D+15

Table 6 Output List, continued (2/12)

PREVIOUS DATA IN BYPASS LINE

1	0.11093D+09	0.17523D+13	0.47567D+04	0.17523D+13
2	0.10266D+09	0.16216D+13	0.44042D+04	0.16216D+13
3	0.95000D+08	0.15007D+13	0.40779D+04	0.15007D+13
4	0.87914D+08	0.13887D+13	0.37758D+04	0.13887D+13
5	0.81357D+08	0.12852D+13	0.34960D+04	0.12852D+13

Table 6 Output List, continued (3/12)

THIS PROBLEM IS INTERPRETED AS

CONSTANT OPERATION
 ONCE THROUGH LINE
 WITH BYPASS LINE
 INLET POINT 43
 OUTLET POINT 60

*** INPUT DATA CHECK ***

SAMPLE 69CYCLE(HTR23.DAT(SAM69C))

NUMBER OF POINTS = 70
 NUMBER OF TIME = 1

TIME POINTS IN SECOND

0.169780+07

F.P. INFORMATION
 MASS NUMBER = 137.0
 DECAY CONSTANT = 7.3300D-10 1/SEC
 ACCOMODATION COEFF. = 0.63719D+00

 SYSTEM PRESSURE = 29.60 KG/CM*CM
 CONCENTRATION IN GAS = 5.6300D+11 N/M**3

WALL INFORMATION
 SURFACE MICRO ROUGHNESS = 0.10000D+01

Table 6 Output List, continued (4/12)

*** INPUT DATA CHECK ***						
I	GAS TEMP. C	WALL TEMP. C	DYN. VISC. M*M/S	POINT M	DIA. M	VELOCITY M/S
1	760.6	760.6	3.165D-05	1.300D+00	8.000D-02	8.354D+00
2	719.8	719.8	2.963D-05	1.300D+00	8.000D-02	8.025D+00
3	679.0	679.0	2.766D-05	1.300D+00	8.000D-02	7.695D+00
4	638.2	638.2	2.575D-05	1.300D+00	8.000D-02	7.365D+00
5	597.4	597.4	2.389D-05	1.300D+00	8.000D-02	7.035D+00
6	575.1	578.1	2.292D-05	1.370D+00	5.900D-02	1.260D+01
7	571.3	580.3	2.281D-05	1.370D+00	5.900D-02	1.255D+01
8	567.5	582.5	2.269D-05	1.370D+00	5.900D-02	1.249D+01
9	563.7	584.7	2.257D-05	1.370D+00	5.900D-02	1.244D+01
10	559.9	586.9	2.246D-05	1.370D+00	5.900D-02	1.238D+01
11	585.8	585.8	2.337D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.234D+01
12	581.5	581.5	2.318D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.223D+01
13	577.2	577.2	2.299D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.212D+01
14	572.8	572.8	2.280D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.200D+01
15	568.5	568.5	2.260D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.189D+01
16	564.2	564.2	2.241D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.178D+01
17	559.8	559.8	2.223D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.166D+01
18	555.5	555.5	2.204D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.155D+01
19	551.2	551.2	2.185D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.144D+01
20	546.8	546.8	2.166D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.133D+01
21	542.5	542.5	2.147D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.121D+01
22	538.2	538.2	2.129D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.110D+01
23	533.8	533.8	2.110D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.099D+01
24	529.5	529.5	2.092D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.088D+01
25	525.2	525.2	2.073D-05	1.217D+00	4.460D-02	2.076D+01
26	502.7	502.7	1.979D-05	1.504D+00	1.190D-02	1.288D+01
27	462.1	462.1	1.812D-05	1.504D+00	1.190D-02	1.221D+01
28	421.5	421.5	1.651D-05	1.504D+00	1.190D-02	1.153D+01
29	380.9	380.9	1.496D-05	1.504D+00	1.190D-02	1.086D+01
30	340.3	340.3	1.347D-05	1.504D+00	1.190D-02	1.019D+01
31	320.0	320.0	1.275D-05	1.517D+00	5.270D-02	1.105D+01
32	320.0	320.0	1.275D-05	1.517D+00	5.270D-02	1.105D+01
33	320.0	320.0	1.275D-05	1.517D+00	5.270D-02	1.105D+01
34	307.1	307.1	1.230D-05	1.374D+00	1.270D-02	8.456D+00
35	281.3	281.3	1.142D-05	1.374D+00	1.270D-02	8.080D+00
36	255.5	255.5	1.056D-05	1.374D+00	1.270D-02	7.704D+00
37	229.7	229.7	9.730D-06	1.374D+00	1.270D-02	7.328D+00
38	203.9	203.9	8.927D-06	1.374D+00	1.270D-02	6.952D+00
39	191.0	191.0	8.535D-06	9.800D-01	5.270D-02	8.644D+00
40	191.0	191.0	8.535D-06	9.800D-01	5.270D-02	8.644D+00
41	191.0	191.0	8.535D-06	9.800D-01	5.270D-02	8.644D+00
42	191.0	191.0	8.535D-06	9.800D-01	5.270D-02	8.644D+00
43	191.0	191.0	8.535D-06	9.800D-01	5.270D-02	8.644D+00
44	191.0	191.0	8.535D-06	1.326D+00	5.270D-02	3.458D+00
45	191.0	191.0	8.535D-06	1.326D+00	5.270D-02	3.458D+00
46	191.0	191.0	8.535D-06	1.326D+00	5.270D-02	3.458D+00
47	191.0	191.0	8.535D-06	1.326D+00	5.270D-02	3.458D+00
48	191.0	191.0	8.535D-06	1.326D+00	5.270D-02	3.458D+00
49	179.4	179.4	8.189D-06	1.744D+00	2.140D-02	3.413D+00
50	156.3	156.3	7.515D-06	1.744D+00	2.140D-02	3.239D+00
51	133.1	133.1	6.864D-06	1.744D+00	2.140D-02	3.064D+00
52	110.0	110.0	6.236D-06	1.744D+00	2.140D-02	2.889D+00
53	86.9	86.9	5.631D-06	1.744D+00	2.140D-02	2.715D+00
54	63.7	63.7	5.051D-06	1.744D+00	2.140D-02	2.540D+00
55	40.6	40.6	4.495D-06	1.744D+00	2.140D-02	2.366D+00
56	29.0	29.0	4.227D-06	1.664D+00	5.270D-02	2.251D+00
57	29.0	29.0	4.227D-06	1.664D+00	5.270D-02	2.251D+00
58	29.0	29.0	4.227D-06	1.664D+00	5.270D-02	2.251D+00
59	29.0	29.0	4.227D-06	1.664D+00	5.270D-02	2.251D+00
60	29.0	29.0	4.227D-06	1.664D+00	5.270D-02	2.251D+00
61	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
62	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
63	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
64	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
65	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
66	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
67	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
68	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
69	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00
70	130.0	130.0	6.777D-06	2.018D+00	5.270D-02	7.508D+00

*** IN BYPASS LINE ***						
I	GAS TEMP. C	WALL TEMP. C	DYN. VISC. M*M/S	POINT M	DIA. M	VELOCITY M/S
1	191.0	191.0	8.535D-06	6.360D-01	5.270D-02	5.187D+00
2	191.0	191.0	8.535D-06	6.360D-01	5.270D-02	5.187D+00
3	191.0	191.0	8.535D-06	6.360D-01	5.270D-02	5.187D+00
4	191.0	191.0	8.535D-06	6.360D-01	5.270D-02	5.187D+00
5	191.0	191.0	8.535D-06	6.360D-01	5.270D-02	5.187D+00

Table 6 Output List, continued (5/12)

CHECK THE PARAMETERS									
I	QVAP(I)	ALPS(I)	DIFG(I)	H(CI)	DIFM(I)	TETA(I)	ETA(I)	GAMMA(I)	
1	4.4913D+01	6.3681D+01	1.1015D-05	1.4995D-02	1.1266D-18	8.3704D+02	3.5054D-09	1.0907D+01	
2	4.4913D+01	6.2411D+01	1.0288D-05	1.4310D-02	3.1633D-19	3.4086D+02	9.8421D-10	3.0623D+00	
3	4.4913D+01	6.1116D+01	9.5817D-06	1.3630D-02	7.9653D-20	1.2852D+02	2.4784D-10	7.7112D-01	
4	4.4913D+01	5.9792D+01	8.8968D-06	1.2955D-02	1.7728D-20	4.4405D+01	5.5160D-11	1.7162D-01	
5	4.4913D+01	5.8438D+01	8.2335D-06	1.2285D-02	3.4274D-21	1.3888D+01	1.0664D-11	3.3179D-02	
6	4.4913D+01	5.7787D+01	7.9037D-06	2.0651D-02	1.4911D-21	7.7088D+00	4.6396D-12	4.4435D-02	
7	4.4913D+01	5.7861D+01	7.8911D-06	2.0597D-02	1.6426D-21	8.2549D+00	5.1108D-12	1.5902D-02	
8	4.4913D+01	5.7936D+01	7.8786D-06	2.0546D-02	1.8904D-21	8.8366D+00	5.6273D-12	1.7509D-02	
9	4.4913D+01	5.8010D+01	7.8660D-06	2.0489D-02	1.9940D-21	9.4559D+00	6.1930D-12	1.9269D-02	
10	4.4913D+01	5.8085D+01	7.8535D-06	2.0434D-02	2.1894D-21	1.0115D+01	6.8121D-12	2.1195D-02	
11	4.4913D+01	5.8049D+01	8.0494D-06	3.6634D-02	2.0907D-21	9.7904D+00	6.5050D-12	2.0239D-02	
12	4.4913D+01	5.7902D+01	7.9809D-06	3.4431D-02	1.7313D-21	8.5676D+00	5.3867D-12	1.6760D-02	
13	4.4913D+01	5.7755D+01	7.9126D-06	3.4229D-02	1.4309D-21	7.4874D+00	4.4521D-12	1.3852D-02	
14	4.4913D+01	5.7608D+01	7.8446D-06	3.4027D-02	1.1804D-21	6.5343D+00	3.6725D-12	1.1427D-02	
15	4.4913D+01	5.7460D+01	7.7768D-06	3.3826D-02	9.7174D-22	5.8945D+00	3.0235D-12	9.4071D-03	
16	4.4913D+01	5.7312D+01	7.7093D-06	3.3624D-02	7.9838D-22	4.9556D+00	2.4841D-12	7.7289D-03	
17	4.4913D+01	5.7163D+01	7.6420D-06	3.3423D-02	6.5461D-22	4.3064D+00	2.0368D-12	6.3371D-03	
18	4.4913D+01	5.7014D+01	7.5750D-06	3.3221D-02	5.3542D-22	3.7367D+00	1.6665D-12	5.1852D-03	
19	4.4913D+01	5.6865D+01	7.5082D-06	3.3020D-02	4.3733D-22	3.2376D+00	1.3607D-12	4.2337D-03	
20	4.4913D+01	5.6716D+01	7.4416D-06	3.2820D-02	3.5632D-22	2.8008D+00	1.1086D-12	3.4494D-03	
21	4.4913D+01	5.6565D+01	7.3754D-06	3.2619D-02	2.8968D-22	2.4193D+00	9.0131D-13	2.8043D-03	
22	4.4913D+01	5.6415D+01	7.3093D-06	3.2419D-02	2.3499D-22	2.0865D+00	7.3113D-13	2.2748D-03	
23	4.4913D+01	5.6264D+01	7.2435D-06	3.2218D-02	1.9019D-22	1.7966D+00	5.9175D-13	1.8412D-03	
24	4.4913D+01	5.6113D+01	7.1780D-06	3.2018D-02	1.5358D-22	1.5444D+00	4.7885D-13	1.4868D-03	
25	4.4913D+01	5.5961D+01	7.1127D-06	3.1818D-02	1.2373D-22	1.3255D+00	3.8498D-13	1.1978D-03	
26	4.4913D+01	5.5810D+01	6.7782D-06	2.8003D-02	3.8821D-23	5.8389D-01	1.2079D-13	3.7581D-04	
27	4.4913D+01	5.5705D+01	6.1911D-06	2.6317D-02	3.9930D-24	1.1687D-01	1.2424D-14	3.8655D-05	
28	4.4913D+01	5.5201D+01	5.6283D-06	2.4647D-02	3.1483D-25	1.9382D-02	9.7934D-16	3.0477D-06	
29	4.4912D+01	5.0653D+01	4.4414D+01	2.2993D-02	1.8108D-26	5.0342D-03	5.6342D-17	1.7530D-07	
30	4.4900D+01	4.9056D+01	4.5654D-06	2.1356D-02	7.1371D-28	2.6399D-04	2.2206D-18	6.9092D-09	
31	4.4608D+01	4.8237D+01	4.3147D-06	1.6724D-02	1.2002D-28	1.2107D-04	3.7157D-19	1.1504D-09	
32	4.4611D+01	4.8237D+01	4.3147D-06	1.6724D-02	1.2002D-28	1.2002D-28	3.7157D-19	1.1504D-09	
33	4.4614D+01	4.8237D+01	4.3147D-06	1.6724D-02	1.2002D-28	1.2002D-28	3.7157D-19	1.1504D-09	
34	4.4609D+01	4.7710D+01	4.1584D-06	1.7812D-02	3.6230D-29	5.2146D-05	1.1217D-19	3.4727D-10	
35	4.4618D+01	4.6637D+01	3.8531D-06	1.6904D-02	2.7932D-30	8.5470D-06	8.6477D-21	2.671D-11	
36	4.4634D+01	4.5539D+01	3.5576D-06	1.6003D-02	1.6769D-31	1.1661D-06	5.1916D-22	1.6073D-12	
37	4.4639D+01	4.4414D+01	3.2718D-06	1.5109D-02	7.5430D-33	1.3122D-07	2.3353D-23	7.2300D-14	
38	4.4640D+01	4.3259D+01	2.9960D-06	1.4223D-02	2.4260D-34	1.1703D-08	7.5108D-25	2.3253D-15	
39	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	1.2618D-02	3.7700D-35	3.1613D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
40	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	1.2618D-02	3.7700D-35	3.1612D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
41	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	1.2618D-02	3.7700D-35	3.1612D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
42	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	1.2618D-02	3.7700D-35	3.1611D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
43	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	1.2618D-02	3.7700D-35	3.1611D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
44	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	6.0622D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
45	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	6.0622D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
46	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	6.0622D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
47	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	6.0622D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
48	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	6.0622D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16	
49	4.4640D+01	4.2135D+01	2.7437D-06	7.1222D-03	6.4840D-36	9.1701D-10	2.0074D-26	6.2149D-17	
50	4.4640D+01	4.1044D+01	2.5136D-06	6.7064D-03	1.4429D-37	6.3185D-11	4.4673D-28	1.3831D-18	
51	4.4640D+01	3.9923D+01	2.2918D-06	6.2994D-03	2.0816D-39	3.2100D-12	6.4445D-30	1.9952D-20	
52	4.4640D+01	3.8769D+01	2.0785D-06	5.8857D-03	1.7995D-41	1.1378D-13	5.712D-22	1.7248D-22	
53	4.4640D+01	3.7580D+01	1.8738D-06	5.4810D-03	8.4458D-44	2.6250D-15	2.6148D-34	8.0953D-25	
54	4.4640D+01	3.6352D+01	1.6778D-06	5.0840D-03	1.8975D-46	3.6082D-17	5.8747D-37	1.8188D-27	
55	4.4640D+01	3.5081D+01	1.4908D-06	4.6844D-03	1.7338D-49	2.6349D-19	5.3677D-40	1.6618D-30	
56	4.4640D+01	3.4428D+01	1.4007D-06	3.7107D-03	3.5060D-51	1.6973D-20	1.0854D-41	3.3605D-32	

Table 6 Output List, continued (6/12)

I	QVAP(I)	ALPS(I)	DIFG(I)	H(I)	DIFM(I)	TEFA(I)	ETA(I)	GAMMA(I)
57	4.4640D+01	3.4428D+01	1.4007D-06	3.7107D-03	3.5060D-51	1.6973D-20	1.0854D-41	3.3605D-32
58	4.4640D+01	3.4428D+01	1.4007D-06	3.7107D-03	3.5060D-51	1.6973D-20	1.0854D-41	3.3605D-32
59	4.4640D+01	3.4428D+01	1.4007D-06	3.7107D-03	3.5060D-51	1.6973D-20	1.0854D-41	3.3605D-32
60	4.4640D+01	3.4428D+01	1.4007D-06	3.7107D-03	3.5060D-51	1.6973D-20	1.0854D-41	3.3605D-32
61	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
62	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
63	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
64	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
65	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
66	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
67	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
68	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
69	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20
70	4.4640D+01	3.9768D+01	2.2623D-06	1.0737D-02	1.1274D-39	2.0859D-12	3.4906D-30	1.0807D-20

PARAMETERS IN BYPASS LINE

I	QVAP(I)	ALPS(I)	DIFG(I)	H(I)	DIFM(I)	TEFA(I)	ETA(I)	GAMMA(I)
1	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	8.3851D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16
2	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	8.3851D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16
3	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	8.3851D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16
4	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	8.3851D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16
5	4.4640D+01	4.2671D+01	2.8619D-06	8.3851D-03	3.7700D-35	3.1609D-09	1.1672D-25	3.6135D-16

Table 6 Output list, continued (7/12)

 *
 * SAMPLE 69CYCLE(HTTR23,DATA(SAM69C)) *
 *

TIME= 1.6978D+06SEC

N =FP CONCENTRATION IN ATOMS/M**3
 MO=ADSORBED FP ON METAL SURFACE ATOMS/M**2
 MD=DIFFUSED FP IN METAL ATOMS/M**2
 M =TOTAL PLATEOUT FP CONCENTRATION ATOMS/M**2

I	N	MO	MD	M	RHD	GRAD
1	5.6275D+11	4.2632D+10	2.3260D+15	2.3260D+15	1.3263D+20	-3.1704D+25
2	5.8551D+11	1.0664D+11	3.1742D+15	3.1742D+15	3.3175D+20	-1.4047D+26
3	6.1013D+11	2.8821D+11	4.4476D+15	4.4476D+15	8.9650D+20	-6.9966D+26
4	6.3684D+11	8.5030D+11	6.4059D+15	6.4068D+15	2.6433D+21	-3.9790D+27
5	6.6588D+11	2.7722D+12	9.4608D+15	9.4634D+15	8.6170D+21	-2.6543D+28
6	6.8284D+11	5.0918D+12	1.1773D+16	1.1778D+16	1.5824D+22	-5.6132D+28
7	6.8565D+11	4.7938D+12	1.1514D+16	1.1518D+16	1.4906D+22	-2.9548D+28
8	6.8874D+11	4.5149D+12	1.0813D+16	1.0818D+16	1.4044D+22	-1.0841D+28
9	6.9200D+11	4.2504D+12	9.5803D+15	9.5846D+15	1.3224D+22	-3.0229D+27
10	6.9529D+11	3.9975D+12	7.9467D+15	7.9507D+15	1.2436D+22	-6.2095D+27
11	6.7441D+11	4.0024D+12	7.2484D+15	7.2524D+15	1.2451D+22	-8.0015D+27
12	6.7786D+11	4.5820D+12	7.3866D+15	7.3912D+15	1.4250D+22	-2.0592D+28
13	6.8125D+11	5.2519D+12	7.5271D+15	7.5323D+15	1.6328D+22	-3.8453D+28
14	6.8458D+11	6.0272D+12	7.6696D+15	7.6757D+15	1.8733D+22	-6.3401D+28
15	6.8786D+11	6.9255D+12	7.8144D+15	7.8214D+15	2.1516D+22	-9.7831D+28
16	6.9106D+11	7.9677D+12	7.9615D+15	7.9694D+15	2.4744D+22	-1.4490D+29
17	6.9420D+11	9.1783D+12	8.1108D+15	8.1200D+15	2.8490D+22	-2.0875D+29
18	6.9726D+11	1.0587D+13	8.2624D+15	8.2730D+15	3.2844D+22	-2.9481D+29
19	7.0023D+11	1.2227D+13	8.4164D+15	8.4286D+15	3.7910D+22	-4.1022D+29
20	7.0312D+11	1.4139D+13	8.5727D+15	8.5869D+15	4.3811D+22	-5.6455D+29
21	7.0591D+11	1.6375D+13	8.7315D+15	8.7479D+15	5.0694D+22	-7.6960D+29
22	7.0859D+11	1.8984D+13	8.8928D+15	8.9118D+15	5.8732D+22	-1.0425D+30
23	7.1117D+11	2.2042D+13	9.0565D+15	9.0786D+15	6.8130D+22	-1.4052D+30
24	7.1362D+11	2.5628D+13	9.2228D+15	9.2484D+15	7.9131D+22	-1.8880D+30
25	7.1596D+11	2.9838D+13	9.3916D+15	9.4215D+15	9.2023D+22	-2.5323D+30
26	7.2094D+11	6.6779D+13	1.0997D+16	1.1064D+16	2.0442D+23	-1.0443D+31
27	7.3244D+11	3.2485D+14	1.5219D+16	1.5544D+16	9.5749D+23	-1.6563D+32
28	7.2681D+11	1.8418D+15	2.0473D+16	2.2315D+16	4.7400D+24	-3.0824D+33
29	7.1873D+11	1.5374D+16	2.4162D+16	3.7536D+16	2.1533D+25	-6.2476D+34
30	4.7436D+11	5.5838D+16	1.7792D+16	7.3630D+16	4.3526D+25	-4.0513D+35
31	4.4663D+11	8.5329D+16	7.3406D+15	9.2670D+16	3.8766D+25	-6.9787D+35
32	4.0780D+11	8.0980D+16	6.9621D+15	8.7870D+16	3.6783D+25	-6.6163D+35
33	3.7546D+11	7.6835D+16	6.5983D+15	8.3433D+16	3.4900D+25	-6.2842D+35
34	2.0908D+11	8.3304D+16	2.5282D+15	8.5832D+16	2.3512D+25	-7.2568D+35
35	9.6275D+10	6.9913D+16	2.3402D+14	7.0147D+16	7.1166D+24	-6.4809D+35
36	4.1650D+10	3.5100D+16	1.1461D+13	3.5111D+16	1.2614D+24	-3.3253D+35
37	1.7972D+10	1.5308D+16	4.0570D+11	1.5309D+16	1.8667D+23	-1.4615D+35
38	7.8184D+09	6.5163D+15	1.1181D+10	6.5163D+15	2.5521D+22	-6.2380D+34
39	7.2092D+09	5.3572D+15	2.1228D+09	5.3573D+15	1.1591D+22	-5.3314D+34
40	6.6677D+09	4.8249D+15	1.9133D+09	4.8249D+15	1.0447D+22	-4.6215D+34
41	5.8025D+09	4.3455D+15	1.7245D+09	4.3455D+15	9.4152D+21	-4.1623D+34
42	5.2057D+09	3.9138D+15	1.5543D+09	3.9138D+15	8.4657D+21	-3.7487D+34
43	4.6703D+09	3.5249D+15	1.4009D+09	3.5249D+15	7.6480D+21	-3.3763D+34

Table 6 Output List, continued (8/12)

44	3.9149D+09	1.4296D+15	5.6887D+08	1.4296D+15	3.1056D+21	-1.3693D+34
45	3.2817D+09	1.2060D+15	4.8046D+08	1.2060D+15	2.6229D+21	-1.1552D+34
46	2.7510D+09	1.0174D+15	4.0579D+08	1.0174D+15	2.2151D+21	-9.7448D+33
47	2.3060D+09	8.5826D+14	3.4273D+08	8.5826D+14	1.8708D+21	-8.2207D+33
48	1.9331D+09	7.2403D+14	2.8947D+08	7.2403D+14	1.5800D+21	-6.9350D+33
49	1.0042D+09	4.5188D+14	2.9399D+07	4.5188D+14	3.8790D+20	-4.3301D+33
50	5.3882D+08	2.3390D+14	2.8862D+05	2.3390D+14	2.5701D+19	-2.2419D+33
51	2.9153D+08	1.2173D+14	1.7143D+03	1.2173D+14	1.2847D+18	-1.1668D+33
52	1.5914D+08	6.3720D+13	5.5701D+00	6.3720D+13	4.5775D+16	-6.1076D+32
53	8.7703D+07	3.3553D+13	8.7140D-03	3.3553D+13	1.0876D+15	-3.2161D+32
54	4.8834D+07	1.7778D+13	5.5864D-06	1.7778D+13	1.6107D+13	-1.7041D+32
55	2.7499D+07	9.4819D+12	1.2119D-09	9.4819D+12	1.4379D+11	-9.0885D+31
56	2.3185D+07	6.3995D+12	1.0406D-11	6.3995D+12	1.0524D+10	-6.1339D+31
57	1.8827D+07	5.2463D+12	8.5397D-12	5.2463D+12	8.6328D+09	-5.0286D+31
58	1.5288D+07	4.3009D+12	7.0082D-12	4.3009D+12	7.0813D+09	-4.1225D+31
59	1.2414D+07	3.5260D+12	5.7514D-12	3.5260D+12	5.8087D+09	-3.3797D+31
60	1.0081D+07	2.8907D+12	4.7200D-12	2.8907D+12	4.7648D+09	-2.7707D+31
61	1.7572D+09	1.1439D+15	1.6468D+02	1.1439D+15	6.4794D+17	-1.0264D+34
62	1.4116D+09	9.2830D+14	1.3378D+02	9.2830D+14	5.2597D+17	-8.8978D+33
63	1.1340D+09	7.5335D+14	1.0868D+02	7.5335D+14	4.2697D+17	-7.2209D+33
64	9.1100D+08	6.1138D+14	8.8296D+01	6.1138D+14	3.4660D+17	-5.8601D+33
65	7.3184D+08	4.9617D+14	7.1733D+01	4.9617D+14	2.8137D+17	-4.7558D+33
66	5.8791D+08	4.0268D+14	5.8278D+01	4.0268D+14	2.2841D+17	-3.8597D+33
67	4.7229D+08	3.2681D+14	4.7346D+01	3.2681D+14	1.8543D+17	-3.1325D+33
68	3.7941D+08	2.6524D+14	3.8466D+01	2.6524D+14	1.5053D+17	-2.5423D+33
69	3.0479D+08	2.1527D+14	3.1251D+01	2.1527D+14	1.2221D+17	-2.0634D+33
70	2.4485D+08	1.7472D+14	2.5390D+01	1.7472D+14	9.9214D+16	-1.6747D+33

Table 6 Output List, continued (9/12)

```

*****
*
* SAMPLE      69CYCLE(HTTR23.DATA(SAMS9C))
*
*           IN BYPASS LINE
*
*
*****

```

TIME= 1.6978D+06SEC

N =FP CONCENTRATION IN ATOMS/M**3
MO=ADSORBED FP ON METAL SURFACE ATOMS/M**2
MD=DIFFUSED FP IN METAL ATOMS/M**2
M =TOTAL PLATEOUT FP CONCENTRATION ATOMS/M**2

I	N	MO	MD	M	RHO	GRAD
1	2.0573D+08	2.9375D+12	1.1489D+03	2.9375D+12	1.7250D+17	-2.8156D+31
2	1.9029D+08	2.7171D+12	1.0629D+03	2.7171D+12	1.5956D+17	-2.6043D+31
3	1.7600D+08	2.5132D+12	9.8332D+02	2.5132D+12	1.4758D+17	-2.6088D+31
4	1.6279D+08	2.3246D+12	9.0972D+02	2.3246D+12	1.3651D+17	-2.2281D+31
5	1.5057D+08	2.1501D+12	8.4163D+02	2.1501D+12	1.2627D+17	-2.0609D+31

FP PENETRATION FACTOR = 1.6968D-04

NO. OF ITERATION = 3

Table 6 Output List, continued (10/12)

```
*****
*
*                SAMPLE          69CYCLE(HTTR23.DATA(SAM69C))
*
*****
```

TIME= 1.69780+06SEC

MO= ADSORBED ACTIVITY ON METAL SURFACE

MD= DIFFUSED ACTIVITY IN METAL WALL

M = TOTAL ACTIVITY MO+MD

UNIT= MICRO CURIE/CM**2

I	MO	MD	M
1	8.440-08	4.610-03	4.610-03
2	2.110-07	6.290-03	6.290-03
3	5.710-07	8.810-03	8.810-03
4	1.680-06	1.270-02	1.270-02
5	5.490-06	1.870-02	1.880-02
6	1.010-05	2.330-02	2.330-02
7	9.500-06	2.280-02	2.280-02
8	8.950-06	2.140-02	2.140-02
9	8.430-06	1.900-02	1.900-02
10	7.940-06	1.570-02	1.580-02
11	7.940-06	1.440-02	1.440-02
12	9.090-06	1.460-02	1.460-02
13	1.040-05	1.490-02	1.490-02
14	1.200-05	1.520-02	1.520-02
15	1.370-05	1.550-02	1.550-02
16	1.580-05	1.580-02	1.580-02
17	1.820-05	1.610-02	1.610-02
18	2.100-05	1.640-02	1.640-02
19	2.430-05	1.670-02	1.670-02
20	2.810-05	1.700-02	1.700-02
21	3.250-05	1.730-02	1.730-02
22	3.770-05	1.760-02	1.770-02
23	4.380-05	1.790-02	1.800-02
24	5.090-05	1.830-02	1.830-02
25	5.930-05	1.860-02	1.870-02
26	1.330-04	2.180-02	2.190-02
27	6.470-04	3.020-02	3.080-02
28	3.650-03	4.060-02	4.420-02
29	2.650-02	4.790-02	7.440-02
30	1.110-01	3.530-02	1.460-01
31	1.690-01	1.450-02	1.840-01
32	1.600-01	1.380-02	1.740-01
33	1.520-01	1.310-02	1.650-01
34	1.650-01	5.010-03	1.700-01
35	1.390-01	4.640-04	1.390-01
36	6.950-02	2.270-05	6.960-02
37	3.030-02	8.040-07	3.030-02
38	1.290-02	2.220-08	1.290-02
39	1.060-02	4.210-09	1.060-02
40	9.560-03	3.790-09	9.560-03
41	8.610-03	3.420-09	8.610-03
42	7.760-03	3.080-09	7.760-03
43	6.980-03	2.780-09	6.980-03
44	2.830-03	1.130-09	2.830-03
45	2.390-03	9.520-10	2.390-03
46	2.020-03	8.040-10	2.020-03
47	1.700-03	6.790-10	1.700-03
48	1.430-03	5.740-10	1.430-03
49	8.950-04	5.830-11	8.950-04
50	4.630-04	5.720-13	4.630-04
51	2.410-04	3.400-15	2.410-04
52	1.260-04	1.100-17	1.260-04
53	6.650-05	1.730-20	6.650-05
54	3.520-05	1.110-23	3.520-05
55	1.880-05	2.400-27	1.880-05
56	1.270-05	2.060-29	1.270-05
57	1.040-05	1.690-29	1.040-05
58	8.520-06	1.390-29	8.520-06
59	6.990-06	1.140-29	6.990-06
60	5.730-06	9.350-30	5.730-06
61	2.270-03	3.260-16	2.270-03
62	1.840-03	2.650-16	1.840-03
63	1.490-03	2.150-16	1.490-03
64	1.210-03	1.750-16	1.210-03
65	9.830-04	1.420-16	9.830-04
66	7.980-04	1.150-16	7.980-04
67	6.480-04	9.380-17	6.480-04
68	5.260-04	7.620-17	5.260-04
69	4.270-04	6.190-17	4.270-04
70	3.460-04	5.030-17	3.460-04

* MEANS ELBOW OR VALVE SECTION

Table 6 Output List, continued (11/12)

```
*****
*
*          SAMPLE          69CYCLE(HTRR23.DATA(SAM69C))
*
*          IN BYPASS LINE
*
*****
```

TIME= 1.6978D+06SEC

MO= ADSORBED ACTIVITY ON METAL SURFACE

MD= DIFFUSED ACTIVITY IN METAL WALL

M = TOTAL ACTIVITY MO+MD

UNIT= MICRO CURIE/CM**2

I	MO	MD	M
1	5.81D-06	2.28D-15	5.81D-06
2	5.38D-06	2.11D-15	5.38D-06
3	4.97D-06	1.95D-15	4.97D-06
4	4.60D-06	1.80D-15	4.60D-06
5	4.25D-06	1.67D-15	4.25D-06

* MEANS ELBOW OR VALVE SECTION

Table 6 Output List, continued (12/12)

TOTAL PLATE-OUT ACTIVITY IN EACH REGION

UNIT = MICRO CURIE

REGION NO	POINT FROM	TO	PARENT ACTIVITY
1	1	5	0.14205D+03
2	6	10	0.27019D+03
3	11	25	0.41645D+03
4	26	30	0.31175D+04
5	31	33	0.13488D+04
6	34	38	0.62664D+04
7	39	43	0.74508D+02
8	44	48	0.24882D+02
9	49	55	0.19015D+02
10	56	60	0.13548D+00
11	61	70	0.39288D+02

TOTAL PLATE-OUT ACTIVITY IN WHOLE SYSTEM

ACTIVITY OF PARENT NUCLIDE = 0.11719D-01CURIE

TOTAL PLATE-OUT ACTIVITY IN EACH REGION
IN BYPASS LINE

UNIT = MICRO CURIE

REGION NO	POINT FROM	TO	PARENT ACTIVITY
1	1	5	0.27401D-01

TOTAL PLATE-OUT ACTIVITY IN WHOLE SYSTEM

ACTIVITY OF PARENT NUCLIDE = 0.27401D-07CURIE

Table 7 Input Data for I-131 in TLG-1 in-pile Loop 24)

```

40      0      0      0      0      0
 1      0      0      0      0
 0      0      0      0      0
6.12D+05
 11.9      1.0      0.0      0.0      0.0
TLG-1 EXP I-131 WALL TEMP IS CALCULATED 63/11/28 PLAINC
1.9200D+09 0.0      0.0
 5      0      0
517.0      500.0      511.0      494.0      1.0
4.8000D-03 2.000      0.015      1.7670D-04
2.0000D-04 7.500      55.000      1.6000D+25 15.0
 1      40      0      0      1
0.0
    
```

Table 8 Input Data for Cs-137 in TLG-1 in-pile Loop 24)

```

40      0      0      0      0      0
 1      0      0      0      0
 0      0      0      0      0
6.12D+05
 11.9      1.0      0.0      0.0      0.0
TLG-1 EXP CS-137 WALL TEMP IS CALCULATED 63/11/28 PLAINC
3.6700D+10 0.0      0.0
 2      0      0
517.0      500.0      511.0      494.0      1.0
4.8000D-03 2.000      0.015      1.7670D-04
2.0000D-04 0.300      63.500      1.6000D+25 15.0
 1      40      0      0      1
0.0
    
```

付録 2

親核，娘核，孫核の Laplace 変換による解

1. 親核の解 (添字 0)

$$n_0 = \left(\frac{N_p}{S} \right) e^{-G_0 \frac{x}{V}}$$

$$n_{w0} = h_0 \cdot g_0 \cdot n_0$$

$$\Sigma_0 = \frac{1}{S + \lambda_0 + \theta_0} \cdot \frac{\alpha_0^* \cdot \beta_0}{KM_{\infty 0}} \cdot n_{w0}$$

$$m_{D0} = \frac{1 - \eta_0 \cdot f_0}{S + \lambda_0} \cdot (1 - \beta_0) \alpha_0^* \cdot n_{w0}$$

2. 娘核の解 (添字 1)

$$n_1 = \left(\frac{N_D}{S} \right) \cdot c^{-G_1 \frac{x}{V}} + \left(\frac{N_p}{S} \right) \cdot \frac{GG_0}{G_1 - G_0} \cdot \left(e^{-G_0 \frac{x}{V}} - e^{-G_1 \frac{x}{V}} \right)$$

$$n_{w1} = g_1 \{ h_1 \cdot n_1 + \alpha_0^* \cdot GH_0 \cdot g_0 \cdot h_0 \cdot n_0 \}$$

$$\Sigma_1 = \frac{1}{S + \lambda_1 + \theta_1} \left[\lambda_0 \cdot \Sigma_0 + \frac{\alpha_1^* \cdot \beta_1}{KM_{\infty 1}} \cdot n_{w1} \right]$$

$$m_{D1} = \frac{1}{S + \lambda_1} \left[\lambda_0 \cdot m_{D0} + (1 - \eta_1 \cdot f_1) \cdot (1 - \beta_1) \cdot \alpha_1^* \cdot n_{w1} - \lambda_0 \cdot DS_{01} \cdot \eta_1 \cdot f_0 \cdot \left\{ 1 - f_1 (D_1 \sqrt{\frac{S + \lambda_0}{D_0}} K_0 + \eta_1) \right\} \cdot (1 - \beta_0) \cdot \alpha_0^* \cdot n_{w0} \right]$$

3. 孫核の解 (添字 2)

$$n_2 = \left(\frac{N_G}{S} \right) \cdot e^{-G_2 \frac{x}{V}} + \left(\frac{N_D}{S} \right) \cdot \frac{GG_1}{G_2 - G_1} \cdot \left(e^{-G_1 \frac{x}{V}} - e^{-G_2 \frac{x}{V}} \right) + \left(\frac{N_P}{S} \right) \cdot \left[\frac{1}{G_2 - G_0} \cdot \left(e^{-G_0 \frac{x}{V}} - e^{-G_2 \frac{x}{V}} \right) \left(\frac{GG_1 \cdot GG_0}{G_1 - G_0} + GG_2 \right) - \frac{GG_1 \cdot GG_0}{(G_1 - G_0)(G_2 - G_1)} \cdot \left(e^{-G_1 \frac{x}{V}} - e^{-G_2 \frac{x}{V}} \right) \right]$$

$$n_{w2} = g_2 \{ h_2 \cdot n_2 + \alpha_1^* \cdot GH_1 \cdot n_{w1} + \alpha_0^* \cdot GH_2 \cdot n_{w0} \}$$

$$\Sigma_2 = \frac{1}{S + \lambda_2 + \theta_2} \left\{ \lambda_1 \Sigma_1 + \frac{\alpha_2^* \beta_2}{KM_{\infty 2}} n_{w2} \right\}$$

$$m_{D2} = \frac{1}{S + \lambda_2} \left[\lambda_1 \cdot m_{D1} + (1 - \eta_2 \cdot f_2) \cdot (1 - \beta_2) \cdot \alpha_2^* n_{w2} + \eta_2 \cdot \{ f_2 GD_1 - \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot f_1 \} \cdot (1 - \beta_1) \cdot \alpha_1^* \cdot n_{w1} + \eta_2 \cdot \left\{ f_2 \cdot GD_2 + \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot f_1 \cdot \left(D_1 \sqrt{\frac{S + \lambda_0}{D_0}} K_0 + \eta_1 \right) \cdot \lambda_0 \cdot DS_{01} \cdot f_0 - \left(\frac{D_0}{D_1} \cdot DS_{20} + DS_{01} \right) \cdot \lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot f_0 \right\} \cdot (1 - \beta_0) \cdot \alpha_0^* n_{w0} \right]$$

ここで各式中の文字の意味は次のとおりである。

$n, n_w, \Sigma_0, m_D; N, N_w, \frac{M_0}{K \cdot M_{\infty}}$ (=吸収率), M_0 のそれぞれ Laplace 変換を表わす。

D, K_0, K_1 ; 金属中の拡散定数, 0 次及び 1 次の変形ベッセル関数

$$\alpha^*; \alpha \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}}$$

他の文字については以下に示す。

$$\begin{aligned}
 K_{00} &= K_0 \left(\sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} R_i \right) , & K_{01} &= K_0 \left(\sqrt{\frac{S+\lambda_1}{D_1}} R_i \right) , & K_{02} &= K_0 \left(\sqrt{\frac{S+\lambda_2}{D_2}} R_i \right) , \\
 K_{10} &= K_1 \left(\sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} R_i \right) , & K_{11} &= K_1 \left(\sqrt{\frac{S+\lambda_1}{D_1}} R_i \right) , & K_{12} &= K_1 \left(\sqrt{\frac{S+\lambda_2}{D_2}} R_i \right) , \\
 K_0 &= \frac{K_{10}}{K_{00}} , & K_1 &= \frac{K_{11}}{K_{01}} , & K_2 &= \frac{K_{12}}{K_{02}} , \\
 f_0 &= \frac{1}{\sqrt{D_0(S+\lambda_0)} \cdot K_0 + \eta_0} , & f_1 &= \frac{1}{\sqrt{D_1(S+\lambda_1)} \cdot K_1 + \eta_1} , & f_2 &= \frac{1}{\sqrt{D_2(S+\lambda_2)} \cdot K_2 + \eta_2} , \\
 g_0 &= \frac{1}{h_0 + \alpha_0^* - \frac{\alpha_0^* \beta_0 \theta_0}{S + \lambda_0 + \theta_0} - (1 - \beta_0) \alpha_0^* \eta_0 f_0} , & g_1 &= \frac{1}{h_1 + \alpha_1^* - \frac{\alpha_1^* \beta_1 \theta_1}{S + \lambda_1 + \theta_1} - (1 - \beta_1) \alpha_1^* \eta_1 f_1} , & g_2 &= \frac{1}{h_2 + \alpha_2^* - \frac{\alpha_2^* \beta_2 \theta_2}{S + \lambda_2 + \theta_2} - (1 - \beta_2) \alpha_2^* \eta_2 f_2} , \\
 G_0 &= S + \lambda_0 + \frac{4h_0}{d} (1 - h_0 \cdot g_0) , & G_1 &= S + \lambda_1 + \frac{4h_1}{d} (1 - h_1 \cdot g_1) , & G_2 &= S + \lambda_2 + \frac{4h_2}{d} (1 - h_2 \cdot g_2) , \\
 DS_{01} &= \frac{D_0}{D_0(S+\lambda_1) - D_1(S+\lambda_0)} , & DS_{20} &= \frac{D_2}{D_2(S+\lambda_0) - D_0(S+\lambda_2)} , & DS_{12} &= \frac{D_1}{D_1(S+\lambda_2) - D_2(S+\lambda_1)} , \\
 GD_0 &= \lambda_0 \cdot DS_{01} \cdot \left\{ 1 - f_1 \left(D_1 \sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} K_0 + \eta_1 \right) \right\} , \\
 GD_1 &= \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot f_1 \cdot \left\{ D_2 \cdot \sqrt{\frac{S+\lambda_1}{D_1}} \cdot K_1 + \eta_2 \right\} , & GD_1 M &= \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot \left\{ 1 - f_2 \left(D_2 \cdot \sqrt{\frac{S+\lambda_1}{D_1}} \cdot K_1 + \eta_2 \right) \right\}
 \end{aligned}$$

$$GD_2 = -\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot f_0 \cdot \left[(D_2 \cdot \sqrt{\frac{S+\lambda_1}{D_1}} \cdot K_1 + \eta_2) \cdot f_1 \cdot (D_1 \cdot \sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} \cdot K_0 + \eta_1) \cdot DS_{01} - \left(\frac{D_0}{D_1} \cdot DS_{20} + DS_{01} \right) \left(D_2 \cdot \sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} \cdot K_0 + \eta_2 \right) \right]$$

$$GD_2M = -\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot DS_{12} \cdot \left[DS_{01} \cdot f_1 \cdot \left(D_1 \sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} K_0 + \eta_1 \right) \cdot \left\{ 1 - f_2 \cdot \left(D_2 \sqrt{\frac{S+\lambda_1}{D_1}} K_1 + \eta_2 \right) \right\} - \left(\frac{D_0}{D_1} \cdot DS_{20} + DS_{01} \right) \cdot \left\{ 1 - f_2 \cdot \left(D_2 \sqrt{\frac{S+\lambda_0}{D_0}} K_0 + \eta_2 \right) \right\} \right]$$

$$GH_0 = \frac{\theta_1}{S + \lambda_1 + \theta_1} \cdot \frac{\lambda_0 \cdot \beta_0}{S + \lambda_0 + \theta_0} \cdot \frac{M_{\infty 1}}{M_{\infty 0}} + GD_0 \cdot \eta_1 \cdot f_0 \cdot (1 - \beta_0)$$

$$GH_1 = \frac{\theta_2}{S + \lambda_2 + \theta_2} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \beta_1}{S + \lambda_1 + \theta_1} \cdot \frac{M_{\infty 2}}{M_{\infty 1}} + GD_1 M \cdot \eta_2 \cdot f_1 \cdot (1 - \beta_1)$$

$$GH_2 = \frac{\theta_2}{S + \lambda_2 + \theta_2} \cdot \frac{\theta_1}{S + \lambda_1 + \theta_1} \cdot \frac{\lambda_0 + \beta_0}{S + \lambda_0 + \theta_0} \cdot \frac{M_{\infty 2}}{M_{\infty 0}} + GD_2 M \cdot \eta_2 \cdot f_0 \cdot (1 - \beta_0)$$

$$GG_0 = \lambda_0 + h_1 \cdot g_1 \cdot GH_0 \cdot \frac{4h_0}{d} \cdot \alpha_0^* \cdot g_0$$

$$GG_1 = \lambda_1 + h_2 \cdot g_2 \cdot GH_1 \cdot \frac{4h_1}{d} \cdot \alpha_1^* \cdot g_1$$

$$GG_2 = (g_1 \cdot GH_0 + g_2 \cdot GH_2) \cdot \frac{4h_2}{d} \cdot \alpha_0^* \cdot h_0 \cdot g_0$$