

JAERI-M
91-084

高温ガス炉におけるFP沈着解析コード
PLAINの検証

1991年5月

沢 和弘・馬場 治

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費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, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

高温ガス炉におけるFP沈着解析コードPLAINの検証

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

沢 和弘・馬場 治

(1991年4月18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が開発されている。

このPLAINコードの妥当性を示すために、TLG-1試験及びOGL-1試験におけるよう素及びセシウムの沈着分布の解析を行った。計算値と測定値の間には、局所的に最大1桁程度の差はあるが、沈着条件が良く求められる部分では良く一致しており、全体の沈着分布の傾向も正しく求められ、本コードは沈着分布を十分精度良く求めることが出来ることが分かった。

本報告書は、上記の検証計算結果をまとめたものである。

The Verification of Fission Products Plate-out Analysis Code
for HTGR - PLAIN -

Kazuhiro SAWA and Osamu BABA

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

(Received April 18, 1991)

Fission products plate-out analysis code, PLAIN, was developed to calculate the plate-out distribution in the primary circuit of High Temperature Gas-cooled Reactors.

The plate-out densities of iodine and cesium in the TLG-1 and OGL-1 were calculated to show the validity of the PLAIN code. There are an order of the discrepancies between calculated and measured plate-out densities locally, however, the calculated values show good consistent with the measured values as a whole. From the results, it is concluded that the PLAIN code is sufficient to calculate the plate-out distribution practically.

Keywords: Fission Product, Plate-out, PLAIN, Verification, TLG-1, OGL-1,
HTGR

目 次

1. まえがき	1
2. PLAINコードの概要	2
2.1 沈着モデル	2
2.2 解法	4
2.3 定数	4
3. 検証計算	6
3.1 OGL-1における沈着分布	6
3.2 TLG-1における沈着分布	19
4. 結言	21
謝 辞	21
参考文献	21
付録-1 VAMPYR-1における沈着分布	22
付録-2 VAMPYR-1実験のパラメータ計算結果	30

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical Model of PLAIN Code	2
2.1 Plate-out Model	2
2.2 Solutions	4
2.3 Parameters	4
3. Verification	6
3.1 Plate-out Distribution in the OLG-1	6
3.2 Plate-out Distribution in the TLG-1	19
4. Conclusions	21
Acknowledgement	21
References	21
Appendix-1 Plate-out Distributions in the VAMPYR-1	22
Appendix-2 Results of Parameter Study for the VAMPYR-1	30

1. ま え が き

高温ガス炉では、通常運転時に主に被覆燃料粒子の被覆層が破損した燃料から放出された沈着性の核分裂生成物（Fission Product;以下「FP」という）が、1次冷却設備の機器・配管表面に沈着する。これらのFPは、通常運転時における遮へい設計及び安全評価における被ばく線量を定める上で重要であり、これまで、OGL-1を用いてFP沈着挙動の研究が行われている。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）を開発した。PLAINコードで扱っている沈着モデル、各種定数、解法等についてはすでに報告されている。⁽¹⁾

PLAINコードの妥当性を示すために、実験で測定された沈着分布と比較を行うこととした。検証計算を行った実験は、TLG-1試験⁽²⁾及びOGL-1試験⁽³⁾である。

本報告書は、これらの実験結果を用いて行ったPLAINコードの検証計算結果をまとめたものである。

2. P L A I Nコードの概要

本章では、検証計算に使用したP L A I Nコードの沈着モデル、解法及び使用定数についてその概要を述べる。なお、P L A I Nコードの詳細な説明については、すでに報告されている報告書⁽¹⁾を参照されたい。

2.1 沈着モデル

P L A I Nコードで用いている沈着モデルをFig. 1に示す。

冷却材の流れについては次の3領域に分けている。

a. 主流領域：

冷却材の流れが激しいため、F Pの濃度が流れと直角方向に一定となる領域。

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、F Pの濃度が流路表面に向かって直線状に変化し、濃度勾配による拡散によってF Pが移動する領域。

c. 流路壁表面の領域：

F Pの熱運動を考慮する、壁面近傍の領域。

F Pの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F Pは、ある割合で表面に吸着し、吸着したF Pは、壁面母材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F Pは、ある割合で母材内に侵入し、母材中のF Pの濃度勾配により拡散する。冷却材中のF Pの濃度が下がった場合には、表面近くより昇華が生じる。

以上のモデルに従って、P L A I Nコードでは以下の基礎式を用いて計算を行っている。

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \frac{4h_i}{d} \cdot (N_i - N_{w_i}) + \lambda_i N_i + V \frac{\partial N_i}{\partial x} - \lambda_{i-1} N_{i-1} = 0 \quad (1)$$

$$-h_i \cdot (N_i - N_{w_i}) - \theta_i M_{o_i} + \alpha_i \sqrt{\frac{RT}{2\pi m_i}} N_{w_i} - \eta_i \phi_{\rho=R_i} = 0 \quad (2)$$

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

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

$$\frac{\partial M_{Di}}{\partial t} + \lambda_i M_{Di} - \lambda_{i-1} M_{Di-1} = -D_i \left\{ \frac{\partial \phi_i}{\partial \rho_{R=Ri}} - \frac{R_o}{Ri} \cdot \frac{\partial \phi_i}{\partial \rho_{R_o}} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial M_{Di}}{\partial t} + \lambda_i M_{Di} - \lambda_{i-1} M_{Di-1} = (1 - \beta_i) \cdot \alpha_i \sqrt{\frac{RT}{2\pi m_i}} N_{w_i} - \eta_i \phi_{i, \rho=Ri} \quad (6)$$

ここで、

- N : 主流中の F P 濃度 (n/cm^3)
- N_w : 壁面領域中の F P 濃度 (n/cm^3)
- M_o : 壁表面に吸着している F P 密度 (n/cm^2)
- ϕ : 壁母材内に拡散している F P 濃度 (n/cm^3)
- M_D : 壁母材内に拡散している F P 密度 (n/cm^2)
- λ : F P の崩壊定数 (s^{-1})
- α : 順応係数。壁面に衝突した F P が吸着する割合 (-)
- $1 - \beta$: ペネトレーション係数。壁面に衝突した F P が母材内に直接侵入する割合 (-)
- η : 昇華速度。母材内に侵入した F P が、昇華して壁面に出る率 (s^{-1})
- θ : 脱着速度。表面吸着 F P が脱着する率 (s^{-1})
- m : F P の質量数 (g/mol)
- D : 母材内の F P 拡散係数 (cm^2/s)
- h : F P の物質伝達係数 (cm/s)
- d : 水力学等価直径 (cm)
- v : F P の流速 (cm)
- x : 流れ方向の長さ (cm)
- t : 時間 (s)
- T : 温度 (s)
- R : 気体定数 ($erg/mol \cdot K$)
- R_i, R_o : 冷却管の内, 外半径 (cm)
- $i, i-1$: 評価対象 F P, その先行核

2.2 解法

PLAINコードでは、2.1で述べた(1)~(6)の基礎式をラプラス変換して解析解を求め、その解を数値解析法により逆変換して解いている。

解析解を求めるに当たって、2種類の初期条件を選択できる。一つは、評価を行う系統が初めクリーンな状態、即ち、2.1で示したFP濃度、密度等が $t=0$ においてすべて0である場合である。この初期条件は、本検証計算においては、TLG-1実験の計算及びOGL-1実験におけるよう素の計算について用いている。

一方、OGL-1実験における44サイクル以降のCs-137の計算では、各計算時点までに沈着した量をすべて積算して行くことになる。この場合には、初期条件としては最初から系統がFPで汚染されている場合に相当し、各変数は0ではなく、前のサイクルまでの値を入れて計算する。

2.3 定数

(1) ペネトレーション係数

PLAINコードでは、母材内に拡散侵入するFPの割合（ペネトレーション係数）を2つの方法で計算できる。一つは表面吸着FP量と母材内拡散係数を基にペネトレーション係数を算出するものであり、もう一つの方法は、ペネトレーション係数を核種と母材の種類に対して入力で一定値として与えるものである。これらの計算方法の詳細は、前報で詳しく述べた⁽¹⁾。検証計算は、基本的に前者のモデルを用いて行ったが、付録に示すように、VAMPYR-1実験の計算については、ペネトレーション係数を別途入力で与える、後者の方法を用いた計算もあわせて行った。

(2) 昇華速度

PLAINコードでは、母材内に侵入したFPが、昇華して壁面に出る率（昇華速度）を2つの方法で計算できる。一つは、昇華が母材格子第1層から母材表面への拡散と同時に起こるという仮定に基づき、母材内拡散定数を用いて昇華速度を算出するものである。もう一つの方法は、母材内へのFPの溶解度と壁面領域のFP濃度を用いて昇華速度を算出するものである。これらの計算方法の詳細は、前報で詳しく述べた⁽¹⁾。検証計算は、基本的に前者のモデルを用いて行ったが、付録に示すように、VAMPYR-1実験の計算については、後者の方法を用いた計算もあわせて行った。

(3) ガス中のFP拡散定数

PLAINコードでは、ガス中のFP拡散係数を求めるのに、Arnoldの式または、Hirshfelderの式を選択できる。検証計算は、Hirshfelderの式を用いて行った。

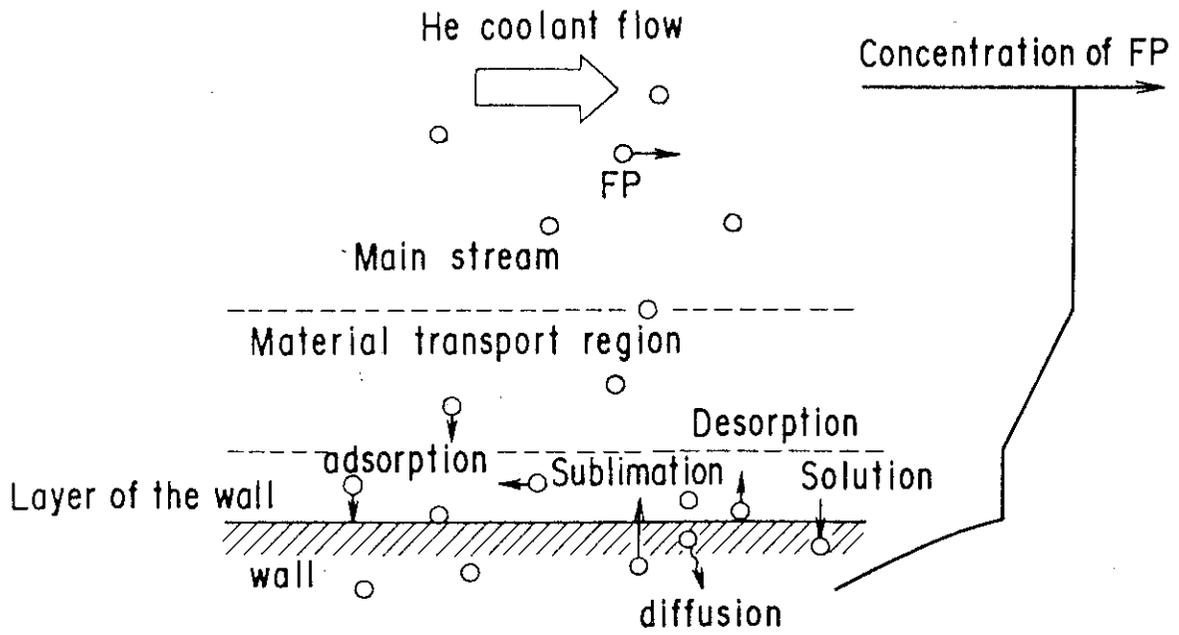


Fig.1 Plate-out Model

3. 検 証 計 算

PLAINコードの検証は、以下に示す異なる2種類の実験で得られた沈着分布を計算し、比較することによって行った。本章では、各実験の概要を述べるとともに、検証計算の方法及び結果を示す。

なお、VAMPYR-1実験⁽⁴⁾の計算についても付録に示した。

3.1 OGL-1における沈着分布^{(3),(5)}

3.1.1 試験の概要

OGL-1 (Oarai Gas Loop No.1) は、高温ガス炉冷却系におけるFPの沈着挙動を研究するために、材料試験炉 (JMTR) に設置された炉内ループであり、冷却材の種類、圧力、温度、配管内流速、FP濃度等の点で高温ガス炉の1次系と非常に近い条件で運転されている。PLAINコードは、OGL-1におけるFPの沈着挙動研究を基に開発、改良されてきた。

OGL-1炉内管で燃料体により加熱されたFPを含むヘリウムガスは、高温配管、熱交換器、冷却器等を通り、燃料体入口へ戻る。その間、FPはこれらの機器・配管内壁面に沈着する。OGL-1の系統図をFig.2に示す。流動条件は、ループ内の位置によって異なるが、主に乱流となっている。燃料体出口のガス温度は最高1,000°Cであり、FPの沈着分布を測定している部位の温度は、約600°C～室温の範囲にわたっている。

OGL-1の高温運転期間は、1サイクル約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。FPの沈着分布は、各サイクルの運転を行った後、機器・配管等の外面からGe(Li)検出器によってその γ 線スペクトルを測定することによって求めている。

3.1.2 計算条件

検証計算は、I-131及びCs-137を対象として行った。I-131は、各サイクルの間の停止期間中に十分減衰するので、その前のサイクルの沈着分布の影響は無視できる。従って、I-131の検証計算は、燃料体からのFPの放出量が比較的多く、各測定値のバックグラウンドの影響が少なく統計誤差も小さい第67～73サイクルについて行った。一方、Cs-137は、半減期が約30年と長く、OGL-1が運転を開始してから機器・配管に沈着したCs-137をすべて積算しなくてはならない。従って、計算は第43～73サイクルにわたって行い、第44サイクル以降は前のサイクルの終了時の沈着量がそのまま残留しているとして履歴を追って計算した。

主要な計算条件を以下に示す。

- ・ 計算核種 I-131, Cs-137
- ・ 圧力 Table 1に示す。
- ・ 入口濃度 各サイクル中の配管入口FP濃度は一定と仮定し、燃料体の発熱量及び放出率を基に計算した値を用いる。

	結果を Table 1 に示す。
ガス及び	Table 1 に示す。
配管温度	途中の温度は直線で変化すると仮定した。
流量	Table 1 に示す。
実験時間	Table 1 に示す。
沈着管材質	ハステロイ X R 及びステンレス鋼

3.1.3 計算結果

I-131 及び Cs-137 の沈着分布の計算結果をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。図中では、測定結果を●で、計算結果は線で示した。測定点には、実験サイクルによって測定を行ったものと行わないものがある。測定値、計算値とも、系統内の温度分布等を反映し、沈着密度も複雑な分布を示している。I-131, Cs-137 共に、計算に用いた沈着条件（FP 濃度、流路形状、等）を正確に求めることが出来、かつ、沈着密度が大きく測定精度が良い上流側で最大 1 桁程度の差が生じている。しかし、全体として、計算値は測定値の傾向を良く表していることから、これらの差は計算モデルに起因するというよりも、測定及び入力データ等の精度から生じているものと考えられる。

なお、ほとんどのケースでメッシュ数にして 45 番目以降の下流側において計算値が測定値を下回っている。この原因としては、OGL-1 の系統内に存在する微量のダストに FP が付着し、下流側まで移動した可能性が考えられるが、実験では確認されていない。

以上のことより、PLAINコードによる計算値と測定値の間には部分的に約 1 桁の差はあるものの、OGL-1 における沈着分布の傾向を全体的に表すことができ、計算結果に適切な余裕を考慮することにより高温ガス炉の設計等に用いることが出来ることが分かった。

Table 1 Calculation condition of OGL-1

OGL-1 Operating Cycle	Pressure (MPa)	Fuel Power (kw)	Coolant Flow (g/s)	Gas								Temperature (°C)		Test Duration (h)	Concentration (n/m ³)	
				T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	I - 131	Cs - 137			
46	3.0	36.9	39.0	839	551	523	466	377	170	30	130	467	2.00 × 10 ¹¹			
47	3.0	37.7	45.0	763	509	465	428	266	169	30	130	509	1.78 × 10 ¹¹			
48	2.9	73.6	80.2	823	583	528	503	326	215	30	130	512	3.26 × 10 ⁸			
49	3.0	73.7	80.0	785	539	480	457	300	201	30	131	462	3.28 × 10 ⁸			
50	2.9	76.1	80.3	806	520	497	473	312	205	30	131	497	3.37 × 10 ⁸			
51	3.0	72.6	80.0	—	521	497	472	286	222	30	130	401	3.23 × 10 ⁸			
52	2.9	65.3	73.4	872	623	575	548	357	227	30	131	475	6.64 × 10 ¹¹			
53	3.0	65.7	74.2	886	633	541	516	340	216	30	130	450	6.61 × 10 ¹¹			
54	3.0	69.9	74.5	846	567	458	438	302	203	30	130	521	7.00 × 10 ¹¹			
55	3.0	70.2	80.0	794	527	461	445	307	216	35	130	519	6.55 × 10 ¹¹			
56	3.0	62.9	76.7	851	606	563	540	356	231	35	129	458	6.12 × 10 ¹¹			
57	3.0	63.5	77.3	842	595	545	524	347	227	35	129	468	6.13 × 10 ¹¹			
58	3.0	63.2	76.2	827	583	532	511	338	226	35	129	525	6.19 × 10 ¹¹			
59	3.0	40.6	48.0	841	585	528	493	297	182	33	129	525	3.01 × 10 ⁸			
60	3.0	67.4	80.4	837	582	520	496	326	221	35	130	465	3.76 × 10 ¹¹			
61	3.0	63.3	80.7	855	620	567	541	348	230	36	130	469	3.51 × 10 ¹¹			
62	3.0	64.8	84.2	664	430	359	344	249	192	34	130	—	—			
63	3.0	62.1	79.9	862	633	581	554	355	233	36	130	458	3.48 × 10 ¹¹			
64	3.0	45.8	55.0	878	645	480	449	280	185	27	130	275	5.30 × 10 ¹¹			
65	2.5	45.8	55.1	857	632	442	415	268	189	27	130	486	5.29 × 10 ¹¹			
66	2.5	46.7	68.0	884	632	590	559	350	231	30	130	519	4.37 × 10 ¹¹			
67	3.0	42.3	59.6	891	664	548	514	310	193	28	130	524	6.53 × 10 ¹⁰	6.53 × 10 ¹⁰		
68	3.0	42.7	60.1	876	642	531	499	309	188	28	130	526	6.54 × 10 ¹⁰	6.54 × 10 ¹⁰		
69	3.0	40.3	58.5	881	657	558	523	320	191	29	130	472	6.34 × 10 ¹⁰	6.34 × 10 ¹⁰		
70	3.0	40.7	59.6	872	640	550	517	321	193	30	129	481	6.28 × 10 ¹⁰	6.28 × 10 ¹⁰		
71	3.0	43.2	64.8	823	612	465	441	288	187	30	129	514	6.13 × 10 ¹⁰	6.13 × 10 ¹⁰		
72	3.0	41.7	64.9	825	623	470	447	291	187	30	129	467	5.91 × 10 ¹⁰	5.91 × 10 ¹⁰		
73	3.0	41.7	63.9	831	627	469	446	290	186	30	129	484	6.00 × 10 ¹⁰	6.00 × 10 ¹⁰		

T₁ : Outlet at Fuel
 T₂ : Flow Partition Tube
 T₃ : Outlet at In-pile Tube
 T₄ : Inlet at No. 1 Heat Exchanger
 T₅ : Outlet at No. 1 Heat Exchanger
 T₆ : Outlet at No. 2 Heat Exchanger
 T₇ : Outlet at Main Cooler
 T₈ : Outlet at Mixing Tee of Cooler

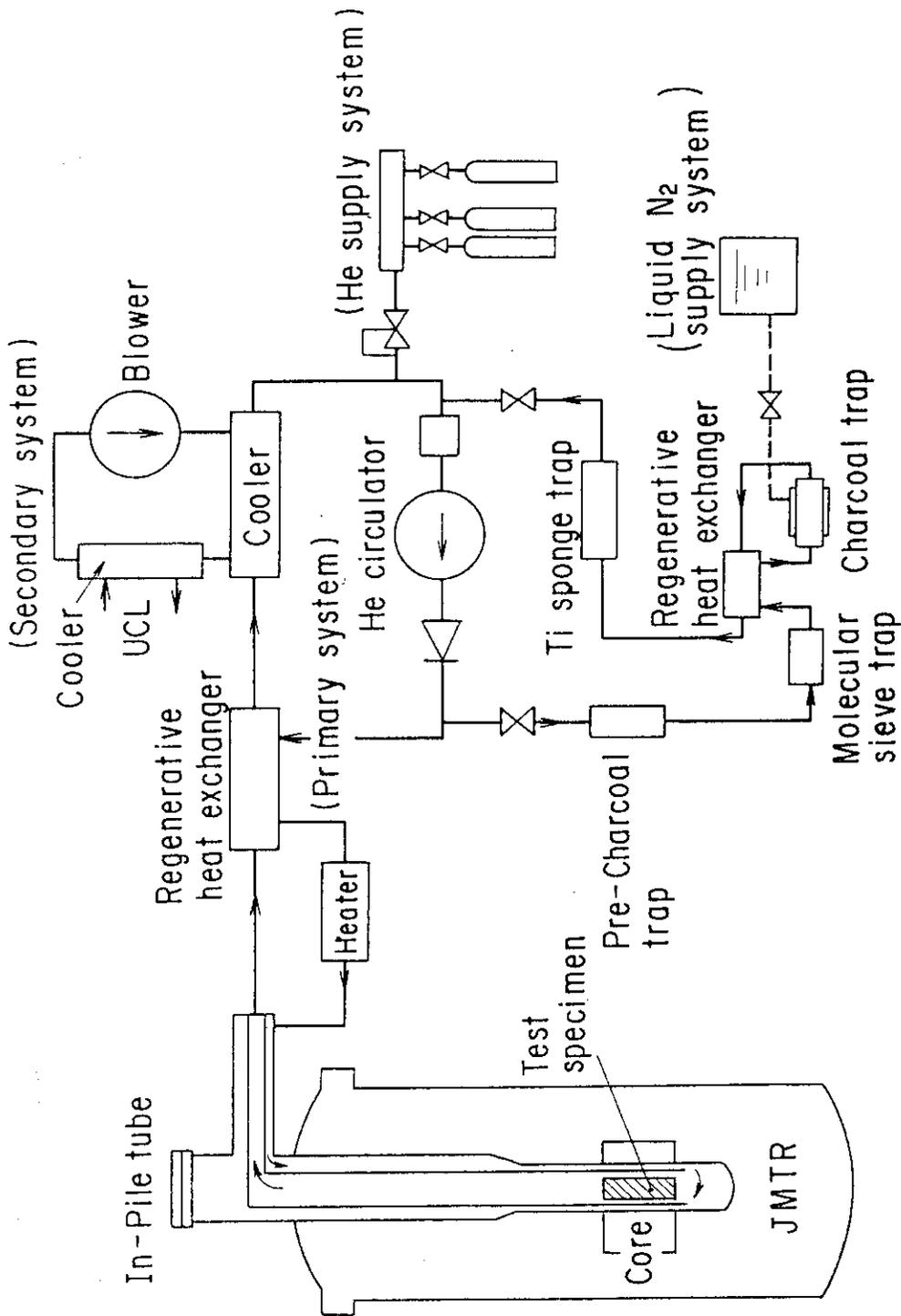


Fig.2 Flow diagram of OGL-1

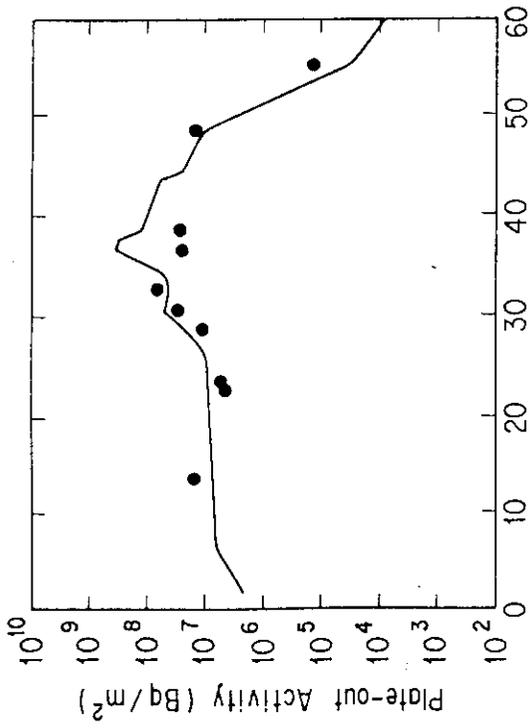


Fig.3 (Continued)

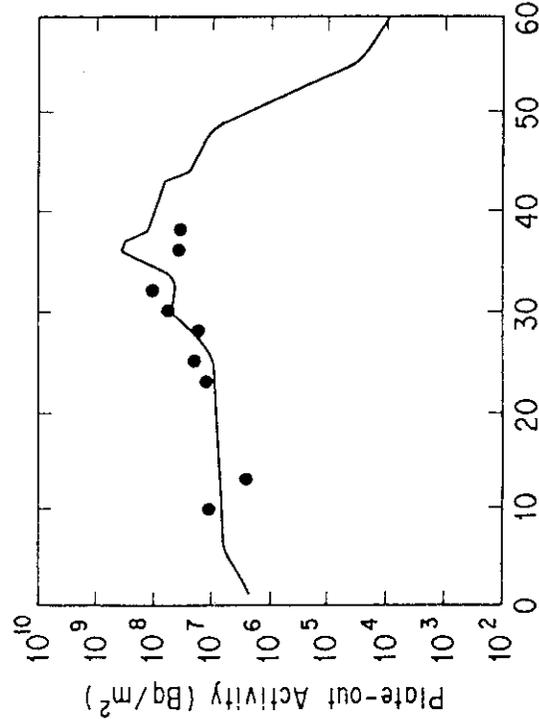


Fig.3 (Continued)

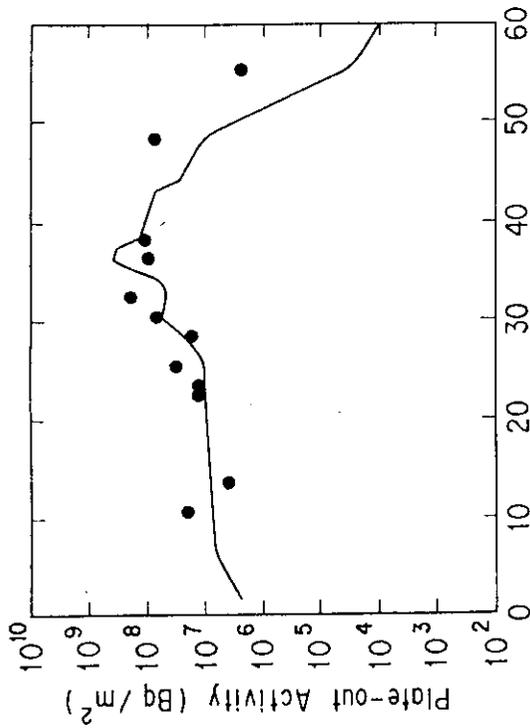


Fig.3 Plate-out distribution of I-131 in OGL-1

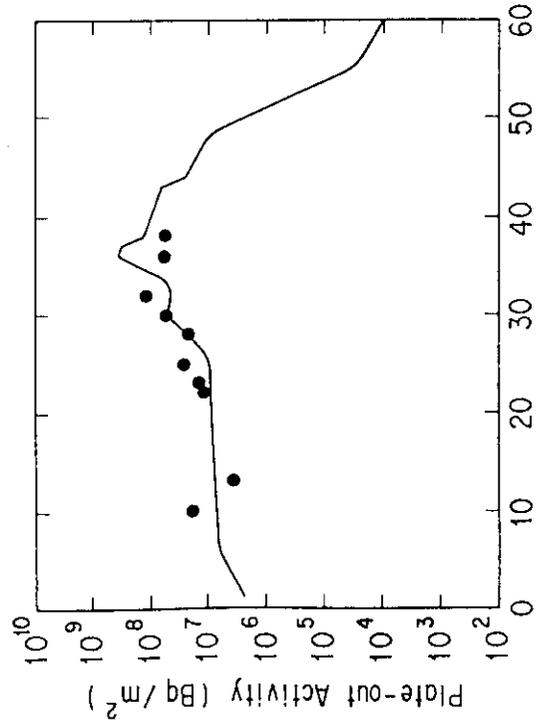


Fig.3 (Continued)

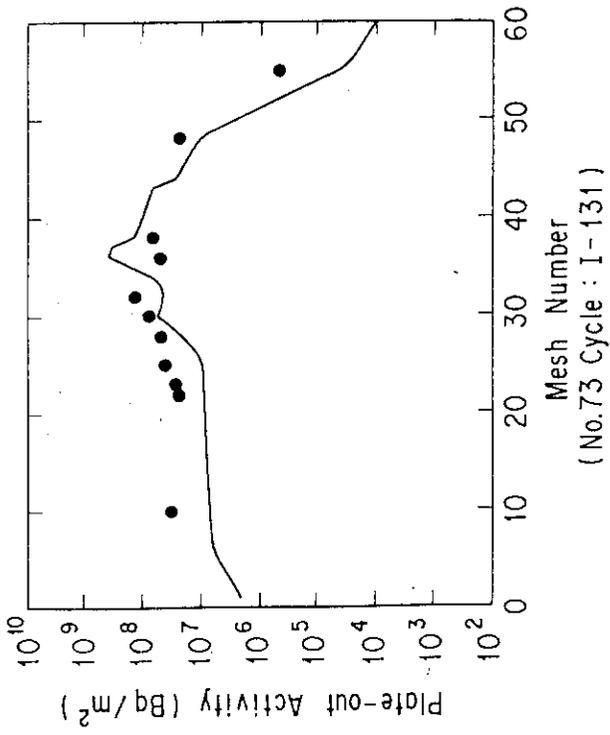


Fig.3 (Continued)

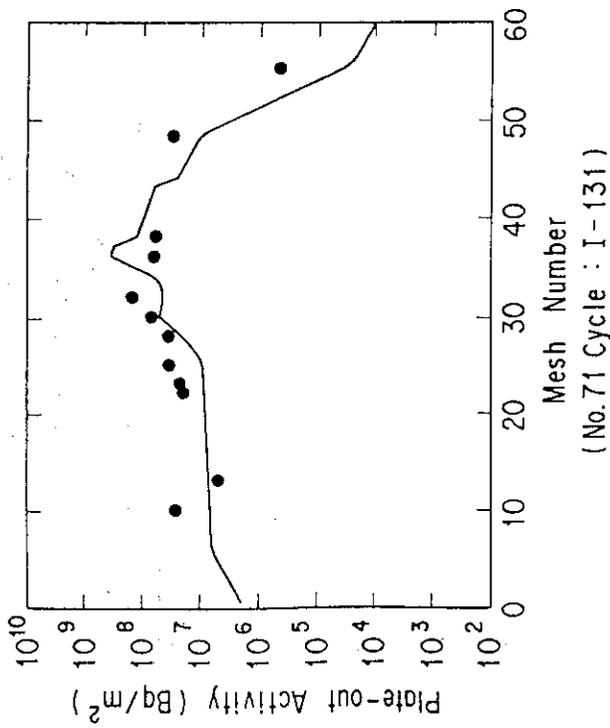


Fig.3 (Continued)

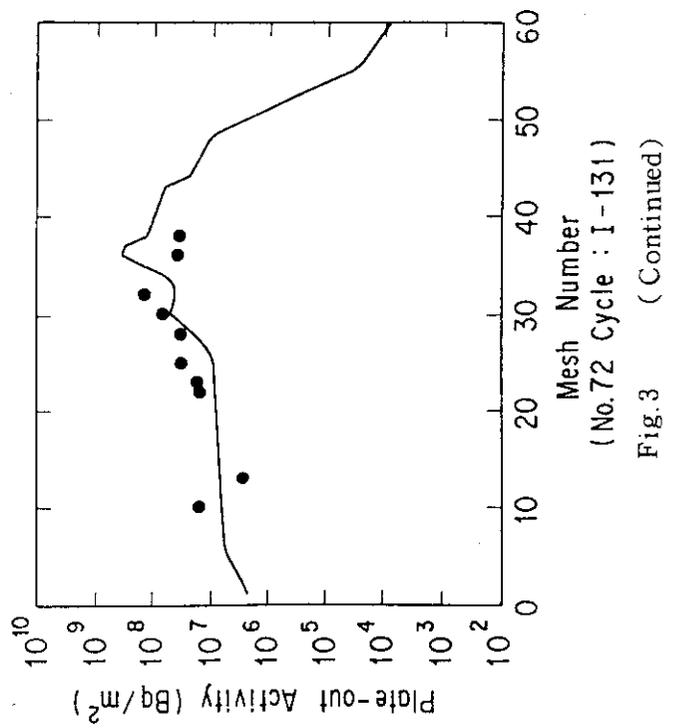


Fig.3 (Continued)

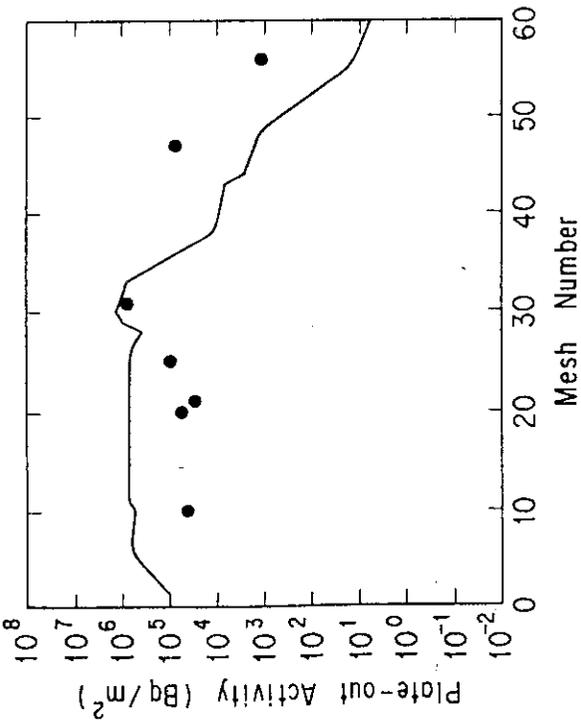


Fig.4 (Continued)

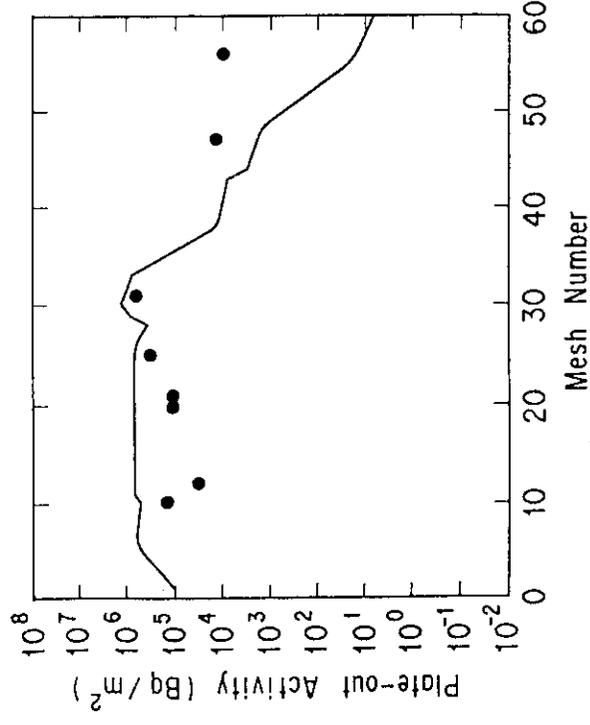


Fig.4 (Continued)

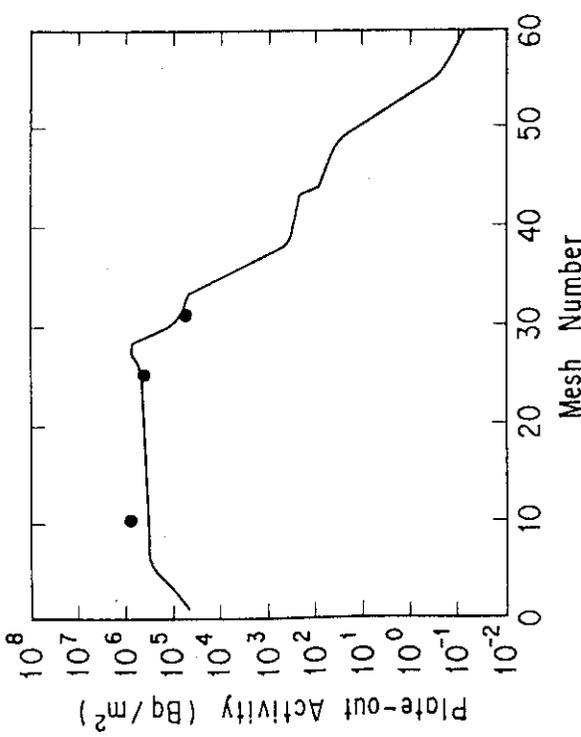


Fig.4 Plate-out distribution of Cs-137 in OGL-1

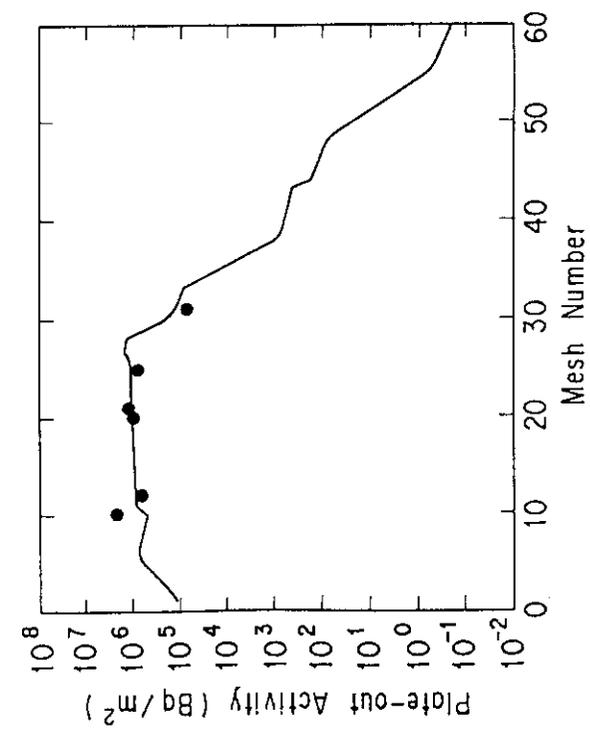


Fig.4 (Continued)

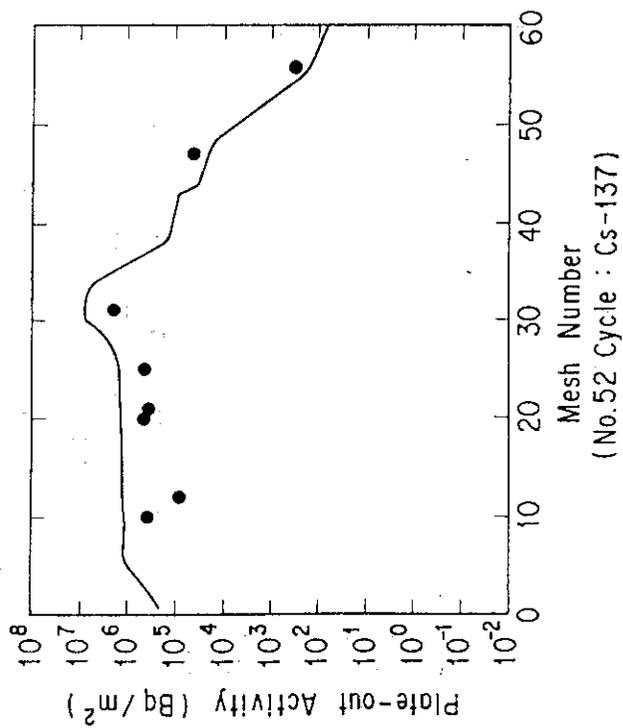


Fig. 4 (Continued)

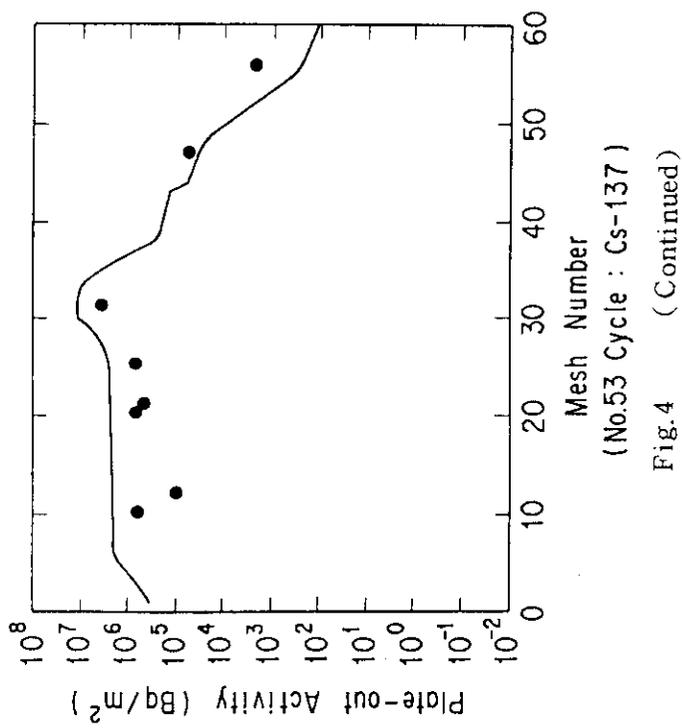


Fig. 4 (Continued)

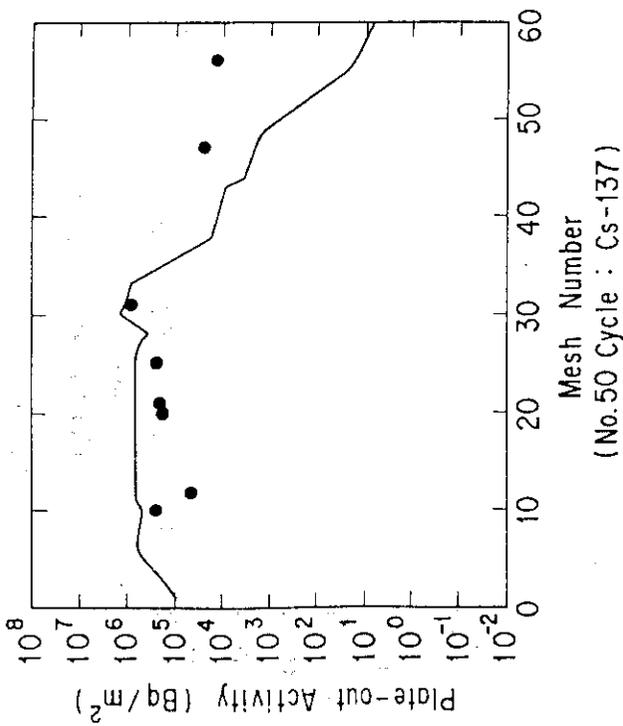


Fig. 4 (Continued)

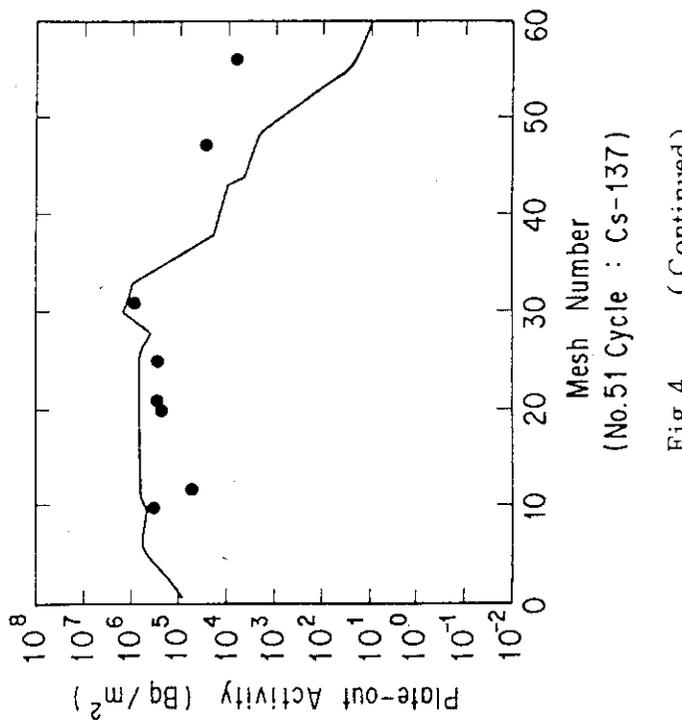


Fig. 4 (Continued)

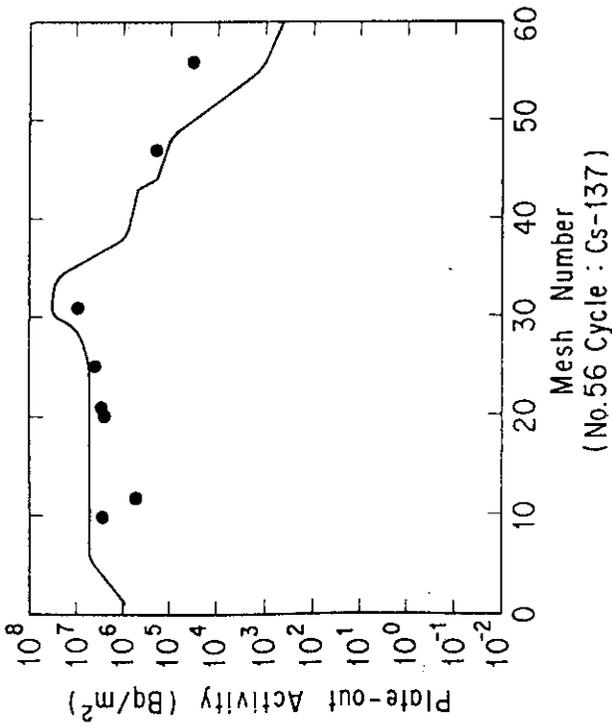


Fig.4 (Continued)

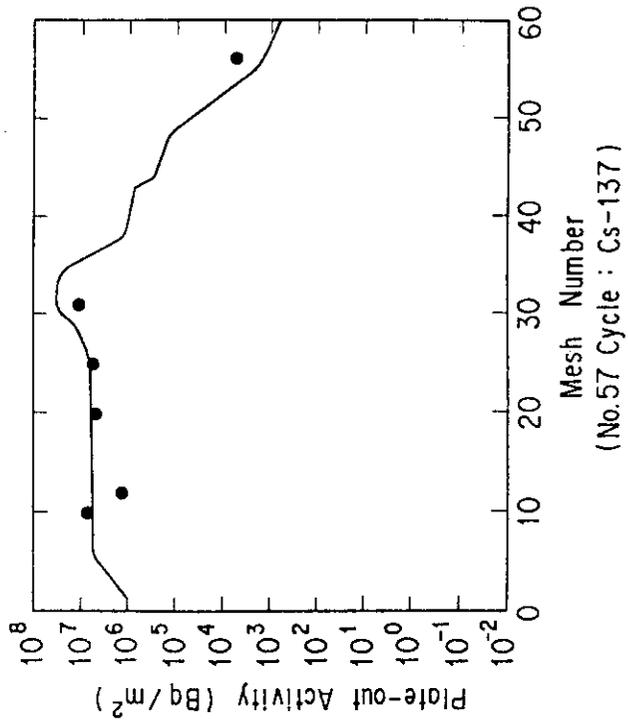


Fig.4 (Continued)

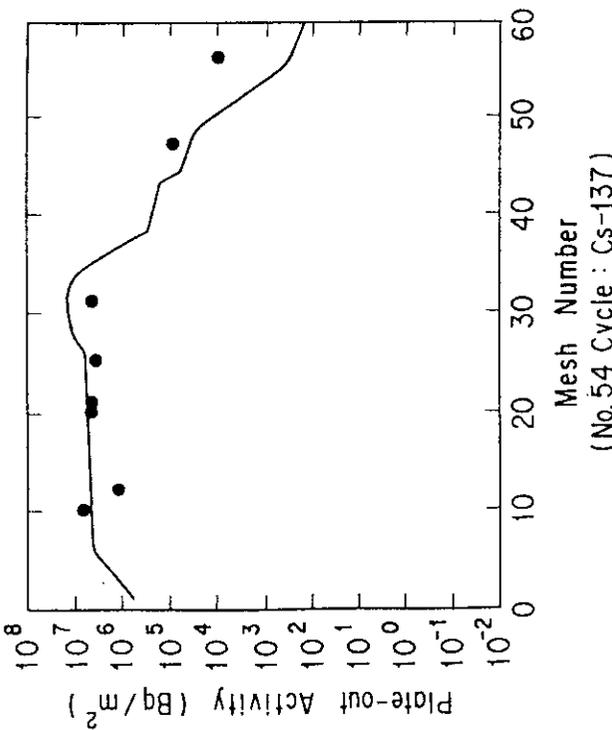


Fig.4 (Continued)

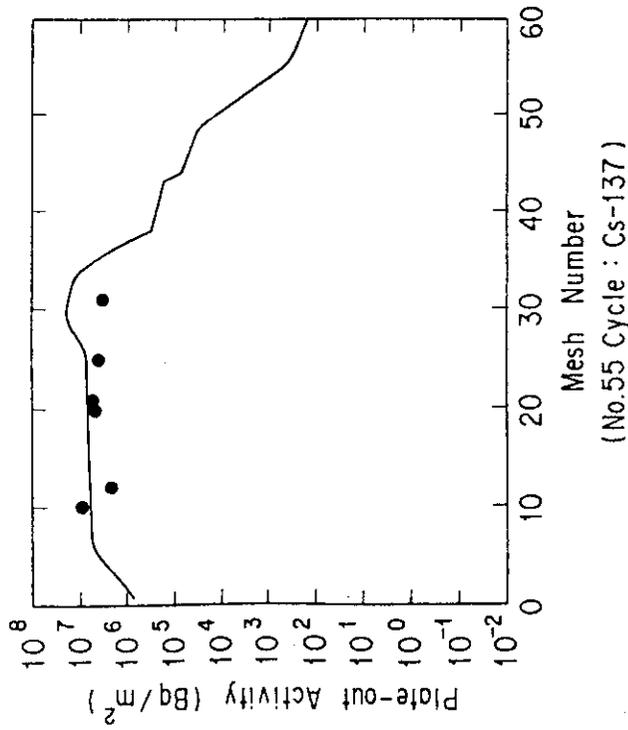


Fig.4 (Continued)

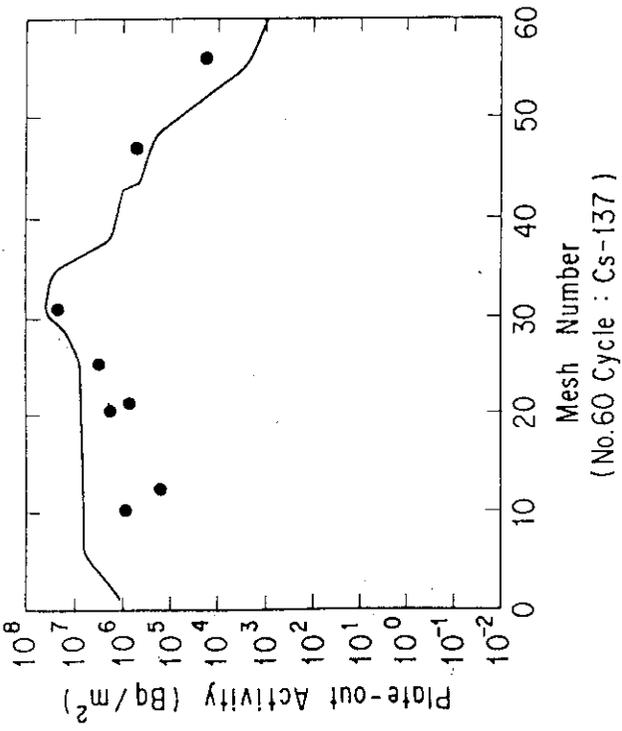


Fig.4 (Continued)

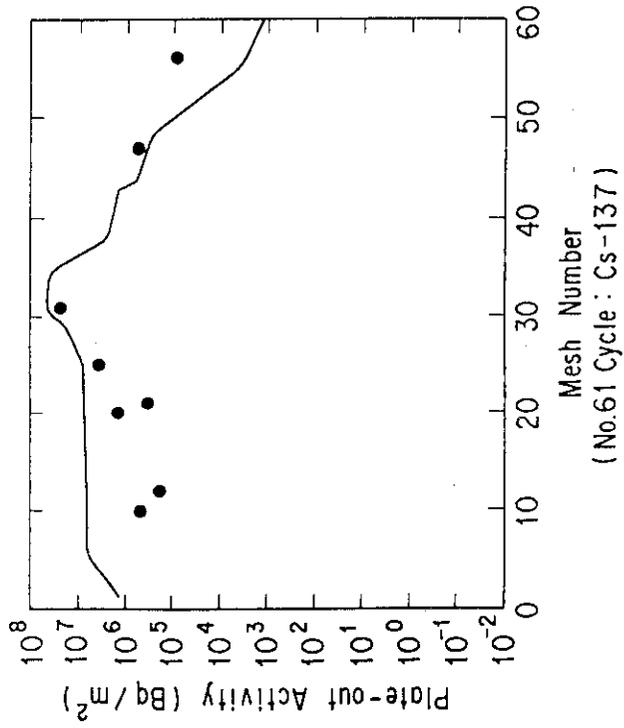


Fig.4 (Continued)

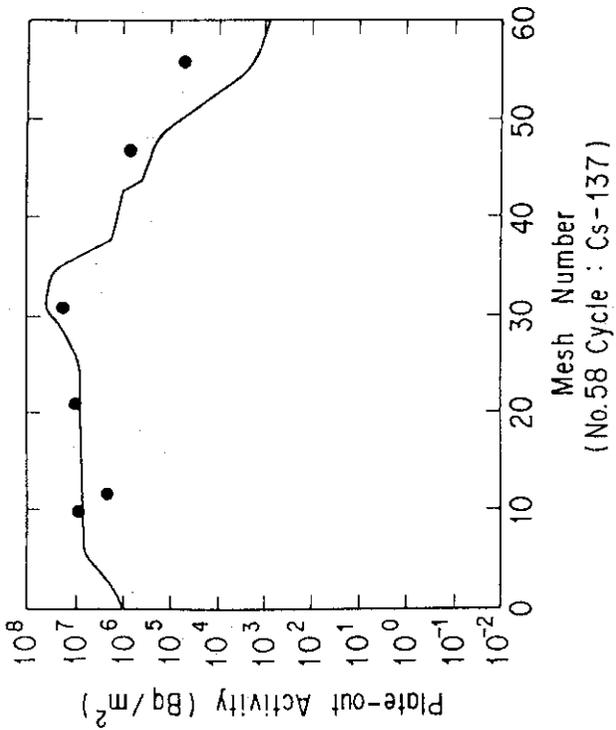


Fig.4 (Continued)

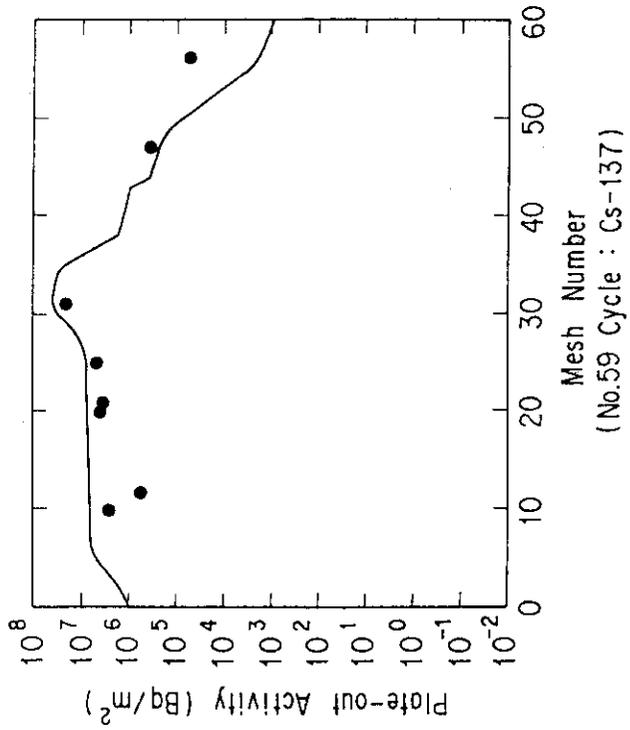
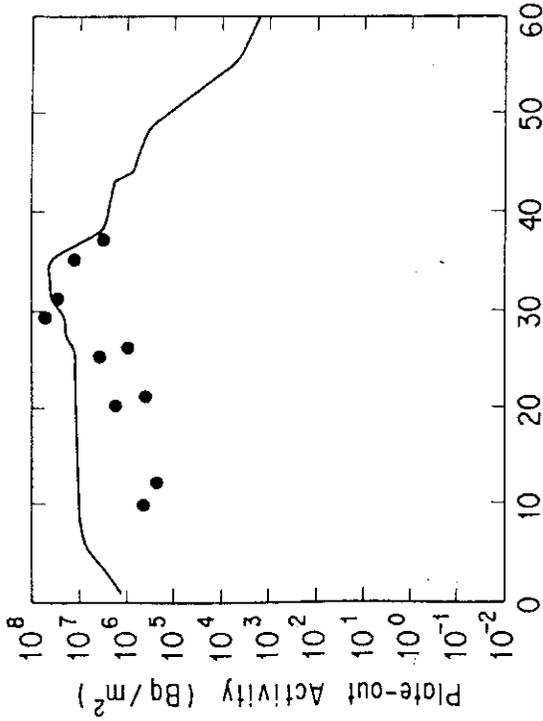
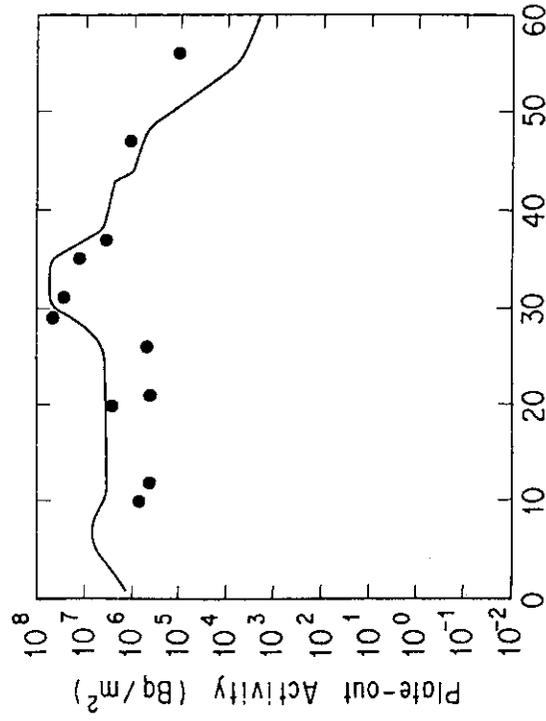


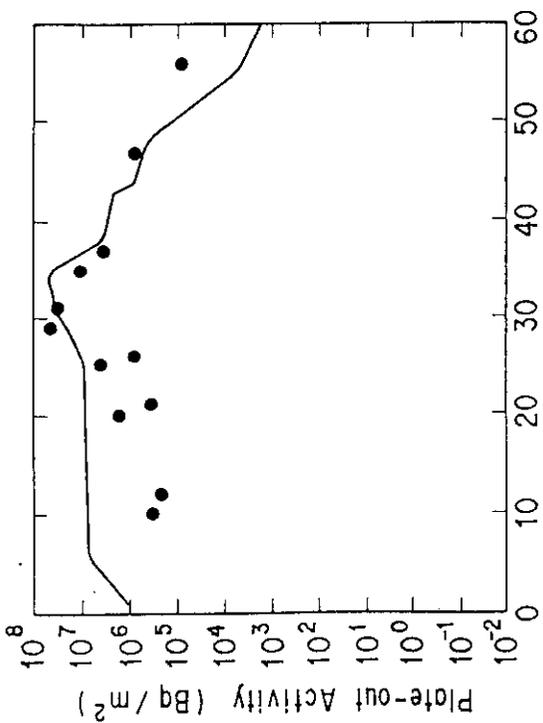
Fig.4 (Continued)



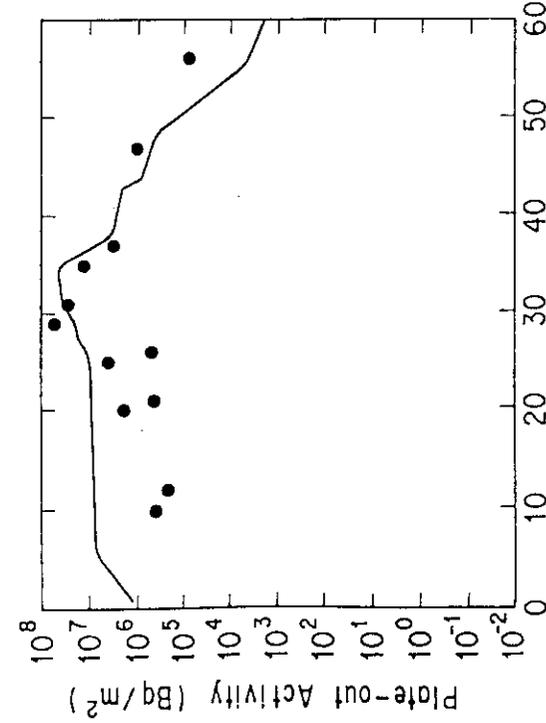
Mesh Number
(No.65 Cycle : Cs-137)
Fig.4 (Continued)



Mesh Number
(No.66 Cycle : Cs-137)
Fig.4 (Continued)



Mesh Number
(No.63 Cycle : Cs-137)
Fig.4 (Continued)



Mesh Number
(No.64 Cycle : Cs-137)
Fig.4 (Continued)

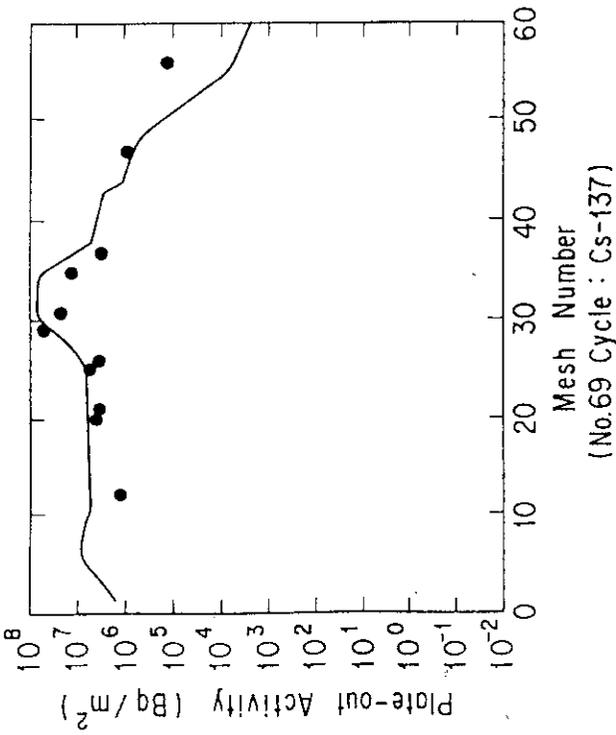


Fig. 4 (Continued)

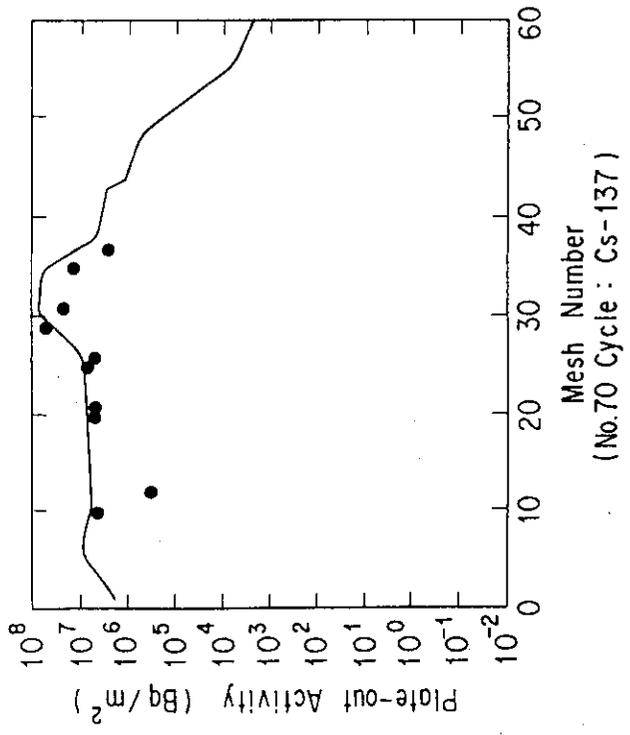


Fig. 4 (Continued)

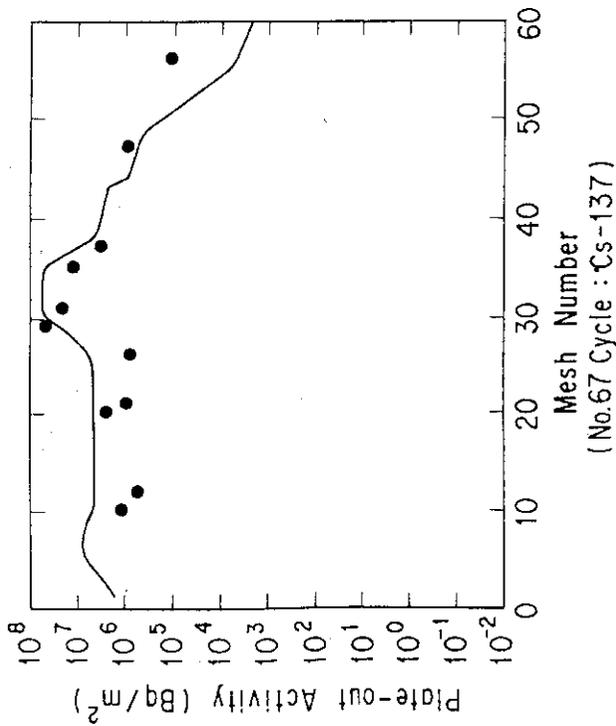


Fig. 4 (Continued)

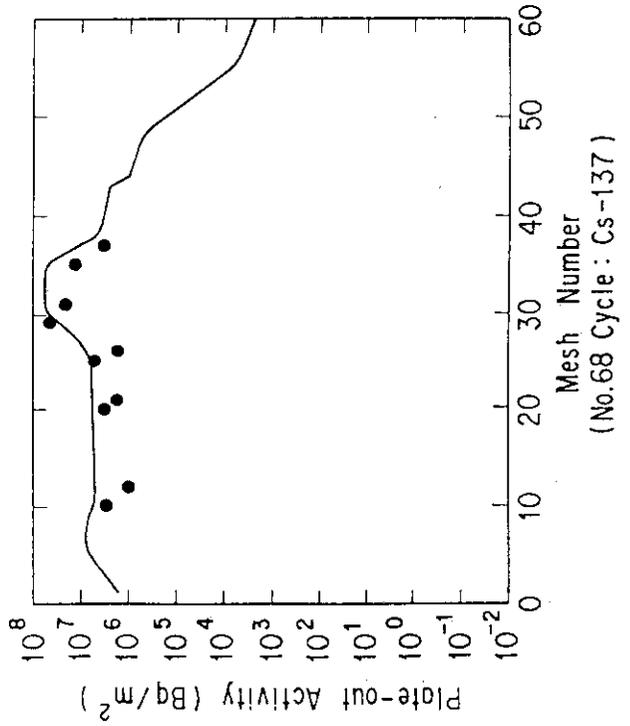


Fig. 4 (Continued)

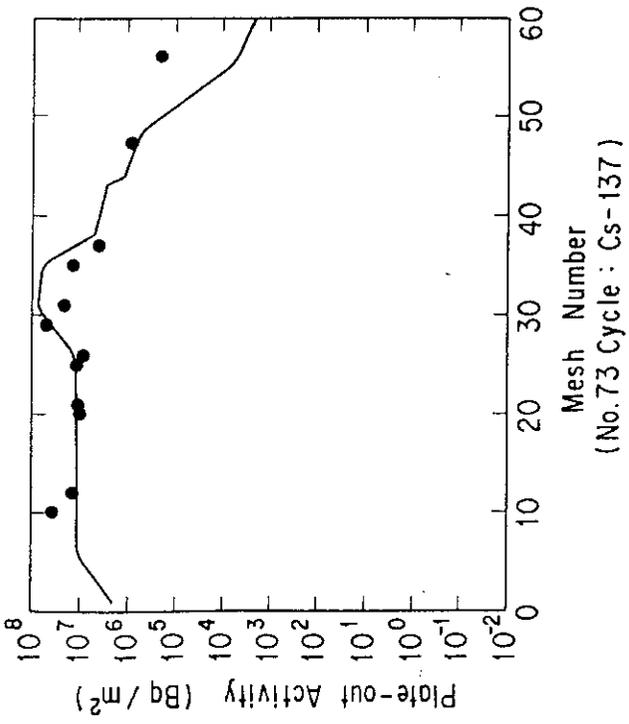


Fig.4 (Continued)

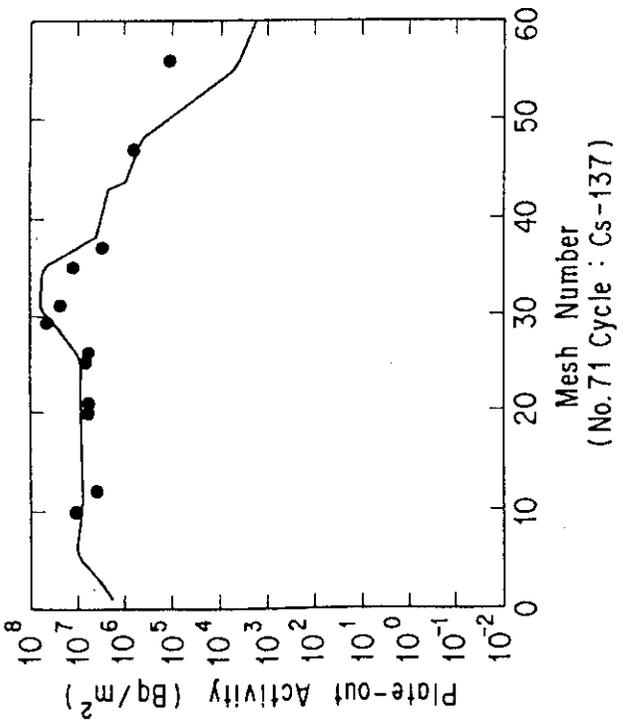


Fig.4 (Continued)

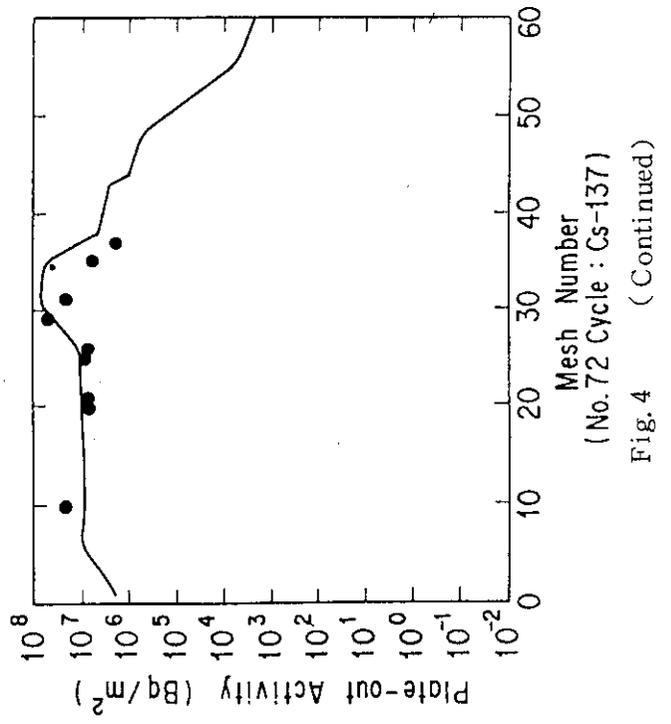


Fig.4 (Continued)

3.2 T L G - 1 における沈着分布⁽²⁾

3.2.1 試験の概要

T L G - 1 は、高温ガス炉冷却系における F P の沈着挙動を研究するために、J R R - 2 に設置された炉内ループである。F P の沈着ループは、T L G - 1 インパイルループの一部として設置されたもので、T L G - 1 炉内管部で照射中の燃料から放出される F P を試験部の沈着管に導き沈着させる。試験部に導くヘリウムガスの流動は可変であるが、主に乱流条件で試験が実施された。沈着管入口のガス温度は 400 ~ 500°C 程度である。

沈着管の沈着分布は、ループを一定時間運転した後、沈着管を 5 cm 長さに切断し、Ge (Li) 検出器によってその γ 線スペクトルを測定することによって求めている。

3.2.2 計算条件

報告書⁽²⁾にしたがって、D E P - 4 の実験結果について I - 131 及び Cs - 137 の沈着分布を計算した。主要な計算条件を以下に示す。

- ・ 計算核種 I - 131, Cs - 137
- ・ 圧力 11.9 kg/cm² · G
- ・ 入口濃度 測定結果がないため、実験中の F P 濃度は一定と仮定し、沈着管に流入、流出する F P 総量の差が沈着総量に等しいとして推定した値を用いる。
- ・ ガス温度 沈着管入口/出口 511°C / 494°C
- ・ 沈着管温度 沈着管入口/出口 517°C / 500°C
- ・ 流量 4.8 g/s
- ・ 実験時間 167 h
- ・ 沈着管材質 ステンレス

3.2.3 計算結果

I - 131 及び Cs - 137 の沈着分布の計算結果をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。図中では、測定結果は●で、計算結果は線で示した。測定及び入力データの精度を考慮すると、I - 131 の計算値は測定値と良く一致している。Cs - 137 は計算値よりも測定値の方が流れ方向に対する沈着密度の勾配が大きいが、共に右下がりの傾向を示しており、計算値と測定値の差は最大 2 倍程度に収まっている。

以上のことより、Cs - 137 についてはファクタ 2 の差はあるものの、P L A I N コードは、T L G - 1 における沈着分布の傾向を良く表すことができ、計算結果に適切な余裕を考慮することにより高温ガス炉の設計等に用いることが出来ることが分かった。

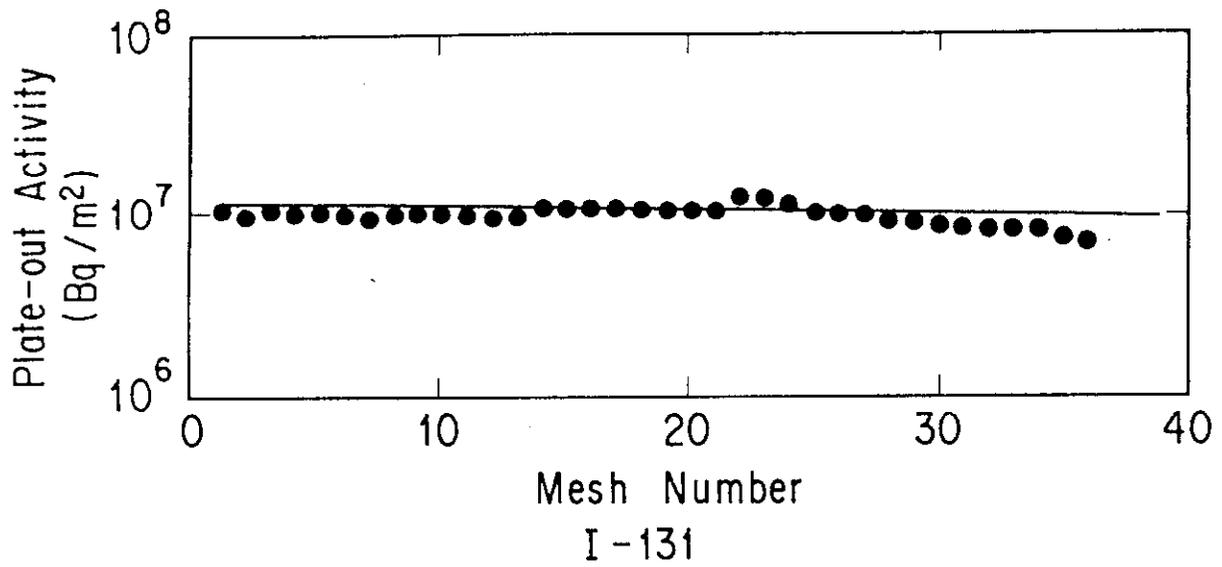


Fig. 5 Plate-out distribution of I-131 in TLG-1

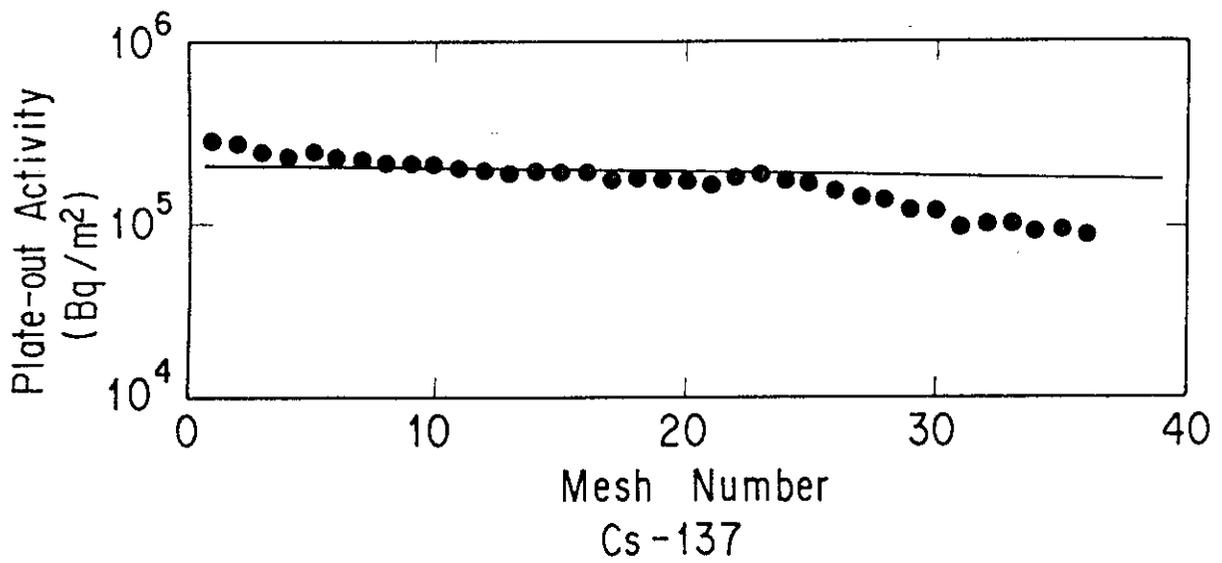


Fig. 6 Plate-out distribution of Cs-137 in TLG-1

4. 結 言

OG L-1 試験及び T L G-1 試験における F P 沈着分布を用いて P L A I N コードの検証計算を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- ① O G L-1 における沈着分布の計算値は、部分的に測定値と約 1 桁の差があるが、全体の傾向は測定値と良く一致している。
- ② T L G-1 における沈着分布の計算値は、I-131 は測定値と良く一致しており、Cs-137 は測定値とファクタ 2 の差があるが、沈着分布の傾向を表している。

以上のことから、P L A I N コードは、適切な余裕を考慮することにより、高温ガス炉の 1 次冷却系の F P 沈着分布評価に十分用いることができることが分かった。

謝 辞

本報告書執筆に当たっては、材料試験炉部照射第 1 課伊藤治彦氏、松本実喜夫氏をはじめとする O G L-1 F P 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、更に解析については原子力データセンターの佐々木克徳氏の協力を頂いた。深く感謝いたします。また、本報告書をまとめるに当たり、種々の御指導を頂いた斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長、田中利幸 H T T R 原子炉開発室長、塩沢周策 H T T R 原子炉開発室長代理に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 馬場 治，露崎典平，沢 和弘，「高温ガス炉における F P 沈着解析コード P L A I N -」，JAERI-M 88-266 (1989)
- (2) T. KITAHARA, et. al., "Effect of Flow Rate on Fission-Product deposition from High-Temperature Gas streams", J. of Nucl. Sci. and Technol., 13 (1976)
- (3) 露崎典平，他，「O G L-1 における Cs-137 の沈着分布」，JAERI-M 88-225 (1988)
- (4) N. INIOTAKIS, et. al., "Initial Results of Investigations into Fission Product deposition in In-Pile Experiments", Nucl. Eng. and Des., 34 (1975)
- (5) 露崎典平，他，「O G L-1 における F P 沈着測定」，原研所内報

4. 結 言

OG L-1 試験及び T L G-1 試験における F P 沈着分布を用いて P L A I N コードの検証計算を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- ① O G L-1 における沈着分布の計算値は、部分的に測定値と約 1 桁の差があるが、全体の傾向は測定値と良く一致している。
- ② T L G-1 における沈着分布の計算値は、I-131 は測定値と良く一致しており、Cs-137 は測定値とファクタ 2 の差があるが、沈着分布の傾向を表している。

以上のことから、P L A I N コードは、適切な余裕を考慮することにより、高温ガス炉の 1 次冷却系の F P 沈着分布評価に十分用いることができることが分かった。

謝 辞

本報告書執筆に当たっては、材料試験炉部照射第 1 課伊藤治彦氏、松本実喜夫氏をはじめとする O G L-1 F P 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、更に解析については原子力データセンターの佐々木克徳氏の協力を頂いた。深く感謝いたします。また、本報告書をまとめるに当たり、種々の御指導を頂いた斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長、田中利幸 H T T R 原子炉開発室長、塩沢周策 H T T R 原子炉開発室長代理に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 馬場 治，露崎典平，沢 和弘，「高温ガス炉における F P 沈着解析コード-P L A I N-」，JAERI-M 88-266 (1989)
- (2) T. KITAHARA, et. al., "Effect of Flow Rate on Fission-Product deposition from High-Temperature Gas streams", J. of Nucl. Sci. and Technol., 13 (1976)
- (3) 露崎典平，他，「O G L-1 における Cs-137 の沈着分布」，JAERI-M 88-225 (1988)
- (4) N. INIOTAKIS, et. al., "Initial Results of Investigations into Fission Product deposition in In-Pile Experiments", Nucl. Eng. and Des., 34 (1975)
- (5) 露崎典平，他，「O G L-1 における F P 沈着測定」，原研所内報

4. 結 言

OG L-1 試験及び T L G-1 試験における F P 沈着分布を用いて P L A I N コードの検証計算を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- ① O G L-1 における沈着分布の計算値は、部分的に測定値と約 1 桁の差があるが、全体の傾向は測定値と良く一致している。
- ② T L G-1 における沈着分布の計算値は、I-131 は測定値と良く一致しており、Cs-137 は測定値とファクタ 2 の差があるが、沈着分布の傾向を表している。

以上のことから、P L A I N コードは、適切な余裕を考慮することにより、高温ガス炉の 1 次冷却系の F P 沈着分布評価に十分用いることができることが分かった。

謝 辞

本報告書執筆に当たっては、材料試験炉部照射第 1 課伊藤治彦氏、松本実喜夫氏をはじめとする O G L-1 F P 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、更に解析については原子力データセンターの佐々木克徳氏の協力を頂いた。深く感謝いたします。また、本報告書をまとめるに当たり、種々の御指導を頂いた斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長、田中利幸 H T T R 原子炉開発室長、塩沢周策 H T T R 原子炉開発室長代理に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 馬場 治，露崎典平，沢 和弘，「高温ガス炉における F P 沈着解析コード P L A I N -」，JAERI-M 88-266 (1989)
- (2) T. KITAHARA, et. al., "Effect of Flow Rate on Fission-Product deposition from High-Temperature Gas streams", J. of Nucl. Sci. and Technol., 13 (1976)
- (3) 露崎典平，他，「O G L-1 における Cs-137 の沈着分布」，JAERI-M 88-225 (1988)
- (4) N. INIOTAKIS, et. al., "Initial Results of Investigations into Fission Product deposition in In-Pile Experiments", Nucl. Eng. and Des., 34 (1975)
- (5) 露崎典平，他，「O G L-1 における F P 沈着測定」，原研所内報

付録一 VAMPYR-1 における沈着分布^{(A-1), (A-2)}

1. 試験の概要

VAMPYR-1 は、西独のユーリッヒ研究所に設置されているペブルベッド型高温ガス実験炉 AVR に設置された高温ガス取出しループであり、実機条件における FP の沈着挙動の研究に用いられている。

VAMPYR-1 は、温度測定チューブ挿入孔にテストチューブを挿入し、それを通して原子炉出口部の高温ヘリウムガスを一定条件のもとで連続的に流すガスサンプリングラインである。VAMPYR-1 の位置及び系統構成を Fig.A.1 及び A.2 に示す。

VAMPYR-1 は、テストチューブ、フィルタ等から構成されている。一定期間の運転を終了した後、テストチューブ及びフィルタは原子炉から取り出され、沈着放射能量の測定が行われる。

テストチューブは、全長約 2.4 m のパイプであり、試験ケースによってそれぞれ異なる寸法、材質のものが用いられている。燃料体出口のガス温度は約 800°C であり、流動条件は層流である。

2. 計算条件

検証計算は、I-131 及び Cs-137 を対象として行った。計算を行った試験ケースは、西独において既に十分な検討評価が行われている、V09 及び V12 試験とした。V09 試験では、テストチューブとして Cr-Mo 鋼を用いているが、V12 試験では、チューブの放射化を避けるためにチタンを用いている。チタンは 1 次冷却設備の構成材としては HTTR (高温工学試験研究炉) や OGL-1 等では使用しない材料であるため、本解析に当たって PLAIN コードの内部入力データとして格子定数、等のチタンの物性データを新たに追加した。

主要な計算条件を以下に示す。

- 計算核種 I-131, Cs-137
- 圧力 11ata
- 入口濃度 テストチューブ及びフィルタに沈着した FP の総量を基に計算した以下の値を用いる。

	I-131	Cs-137	
V09	2.60×10^9	9.63×10^{10}	
V12	2.71×10^9	1.68×10^{11}	(n/m ³)

- ・ガス及び配管温度 計算に用いた配管温度を Fig.A.3 に示す。ガス温度は測定されていないため、配管温度よりも一率75°C高いものと仮定した。
- ・流量 0.66 (g/s)
- ・実験時間 V09 799 (h)
V12 822 (h)
- ・沈着管材料 Cr-Mo 鋼 (V09) 及びチタン (V12)

3. 計算結果

計算結果を I-131 について Fig.A.4 に、Cs-137 について Fig.A.5 に示す。I-131 については、V09 の計算値と測定値は良く一致しているが、V12 における I-131 及び V09、V12 における Cs-137 の計算値と測定値の一致は良くない。図から分かるように、チューブの入口側（高温側）で測定値が計算値を大きく上回っている。この原因として考えられる理由の一つに、VAMPYR-1 では、チューブの入口側で助走区間を取っていないため、乱流促進効果により物質伝達率が大きくなり、測定において入口の沈着密度が大きくなっている可能性がある。しかし、この効果を考慮した解析を行っても計算による沈着密度が測定値に近づくほどは大きくならない。従って、このことが主な原因では無い。

もう一つの原因として、VAMPYR-1 では高温側でチューブ母材内に拡散侵入する FP の量が実際に多く、コード内で計算されたペネトレーション係数が小さい可能性がある。このことを確認するために、ペネトレーション係数として、従来の Iniotakis モデルに基づき、ドイツの KFA で使用している値を入力として計算を行った。この方法は、ペネトレーション係数を核種と母材の種類に対して入力で一定値として与えるものである。本計算では、ペネトレーション係数として以下の値を用いた^{(A-1),(A-3)}。

核種	ペネトレーション係数	
	V09試験	V12試験
I-131	1.6×10^{-5}	7×10^{-5}
Cs-137	3.3×10^{-3}	2×10^{-3}

結果を Fig.A.6 及び A.7 に示す。Iniotakis モデルでは、Cs-137 については計算値と測定値の一致は良くなったが、I-131 については高温部における母材内侵入量が大きい値になり過ぎてむしろ計算値と測定値の一致は悪くなる。なお、Cs-137 について、母材内拡散係数をパラメータとした計算結果を付録-2 に示す。

KFA ではこの原因を、高温側における Ti の相転移による物性の変化と仮定し、測定値と良く一致するように配管の途中でペネトレーション係数を使い分けているようである。従って、本モデルを用いた場合、ペネトレーション係数を計算値と測定値とが合うように選ぶことは P L A I N コードでも可能である。しかしながら、OGL-1 及び TLG-1 では表面吸着 FP

量を基に評価した内部拡散量の計算結果が測定値とよい一致を示していることから、Cs-137及びチタン材におけるI-131の沈着分布はVAMPYR-1特有のもので、汎用性がない可能性がある。AVRにおいてVAMPYR-1を改良したVAMPYR-2実験^(A-4)を行っており、この点については、VAMPYR-2の結果を同様に解析してみれば問題点がより明確になるものと思われる。

4. 参考文献

- (A-1) N. INIOTAKIS, et. al., "Initial Results of Investigation into Fission Product deposition in In-Pile Experiments", Nucl. Eng. and Des., 34 (1975)
- (A-2) 日野竜太郎, 他, 「高温ガス実験炉 (AVR) による安全性試験 (I) LOCA 及び VAMPYR 1 試験結果」, 原研所内報
- (A-3) N. INIOTAKIS, et. al., "Plate-out of Fission Products and its Effect on Maintenance and Repair", Nucl. Eng. Des., 78 (1984)
- (A-4) 稲垣, 山下, 沢, 他, 「高温ガス実験炉 (AVR) による安全性試験 (III) VAMPYR 2 試験の概要と結果」, 原研所内報

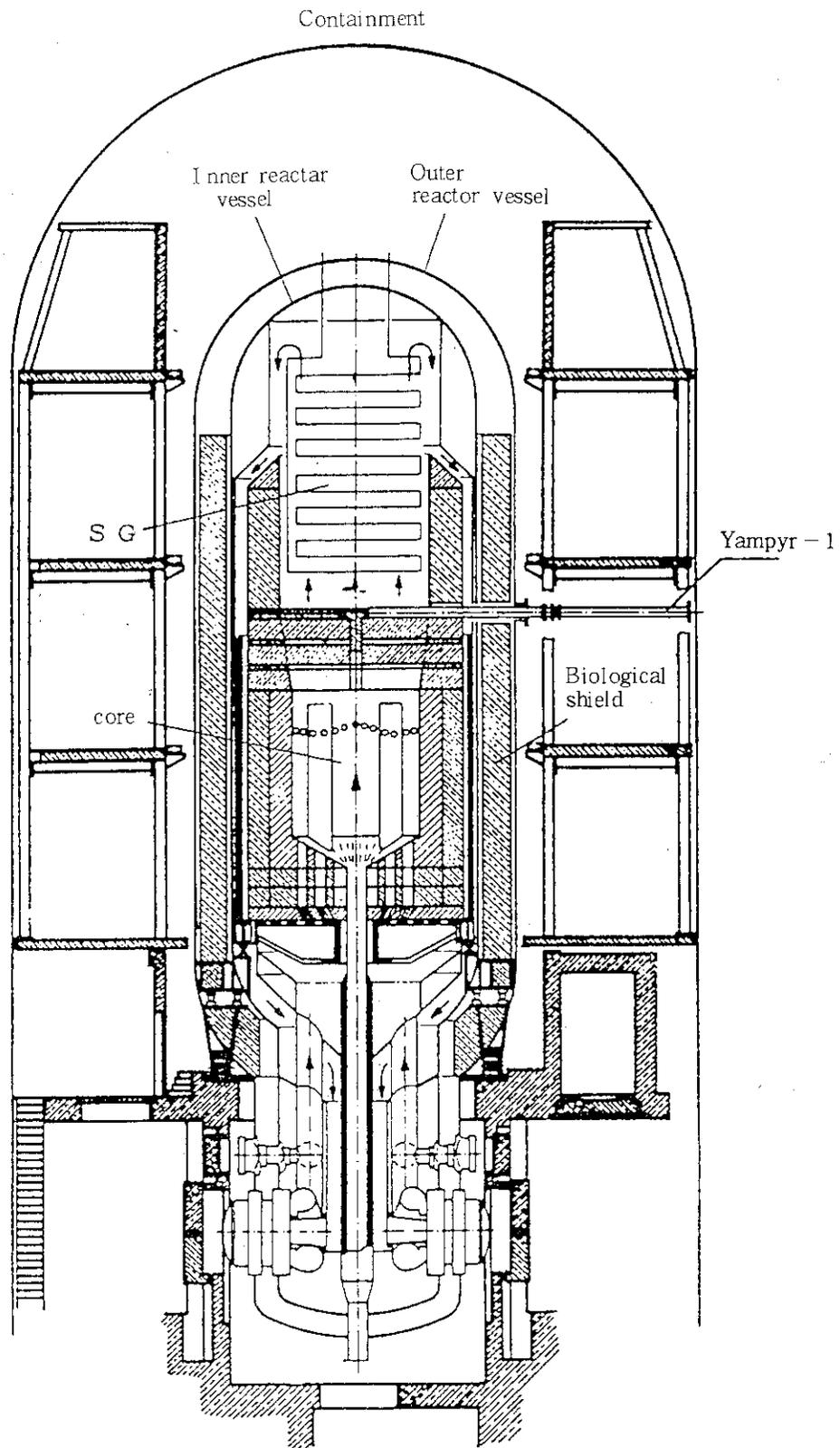


Fig.A.1 AVR and VAMPYR-1

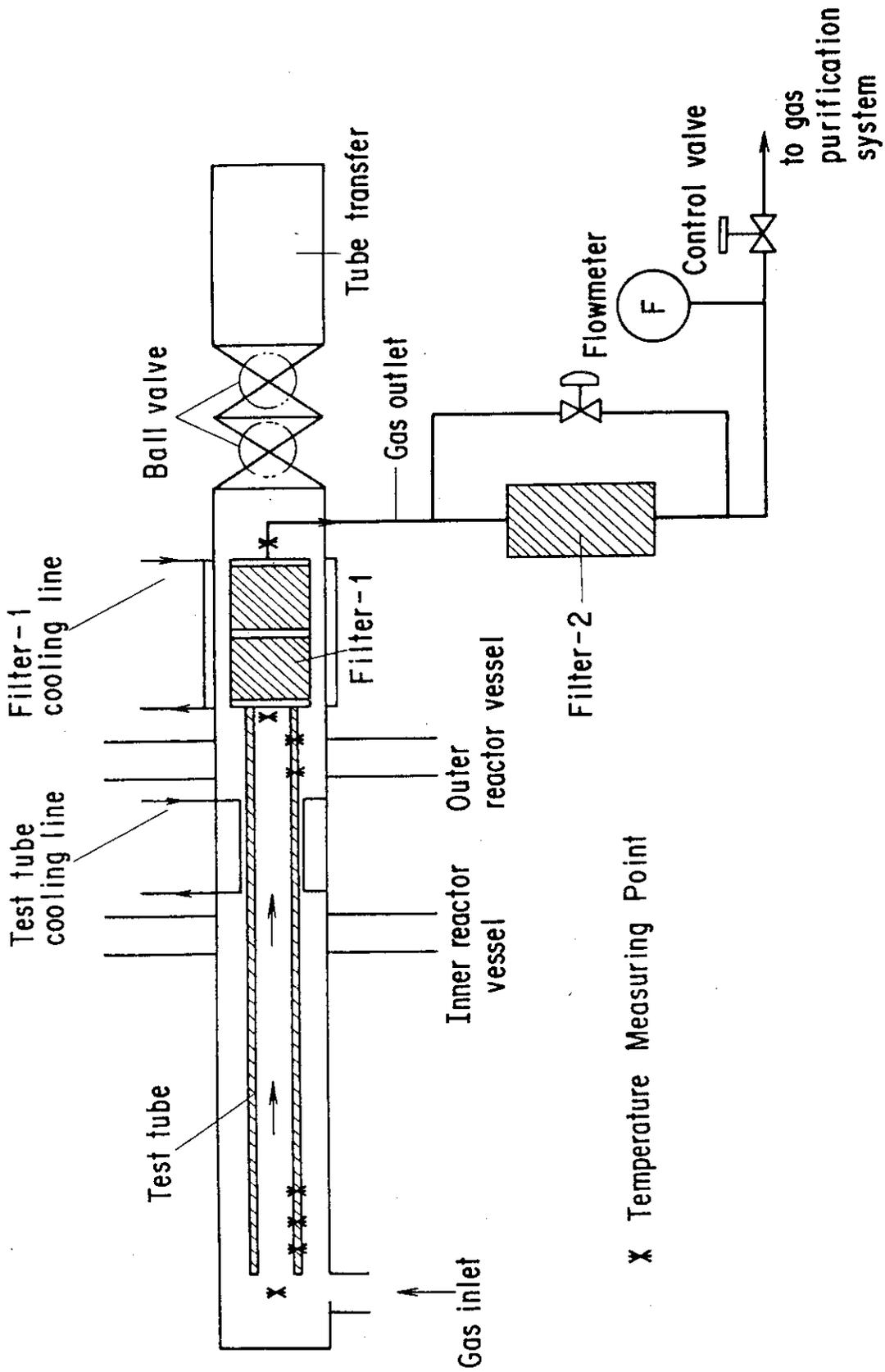


Fig.A.2 Flow diagram of VAMPYR-1

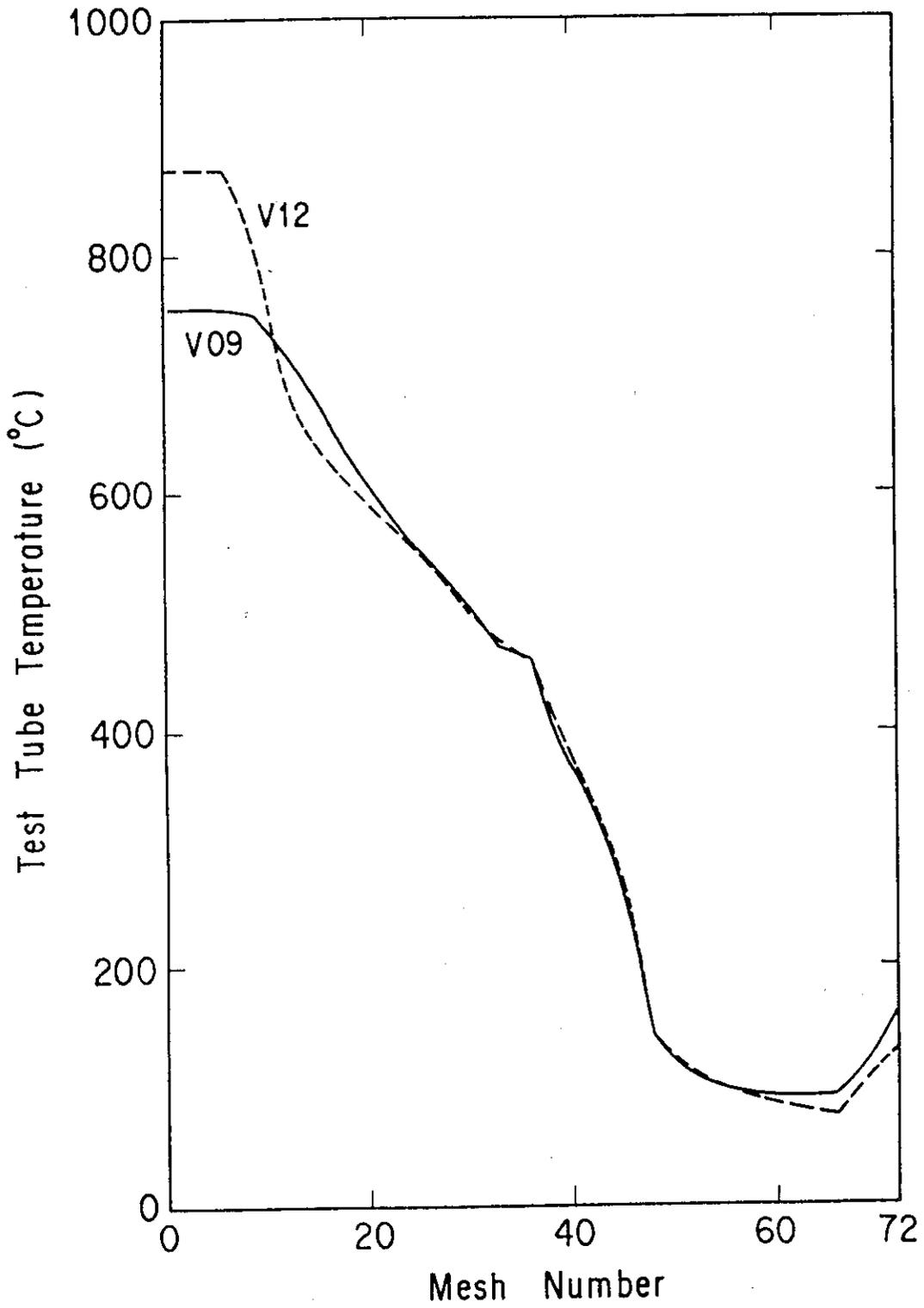


Fig.A.3 Temperature distribution of VAMPYR-1 (V09 and V12)

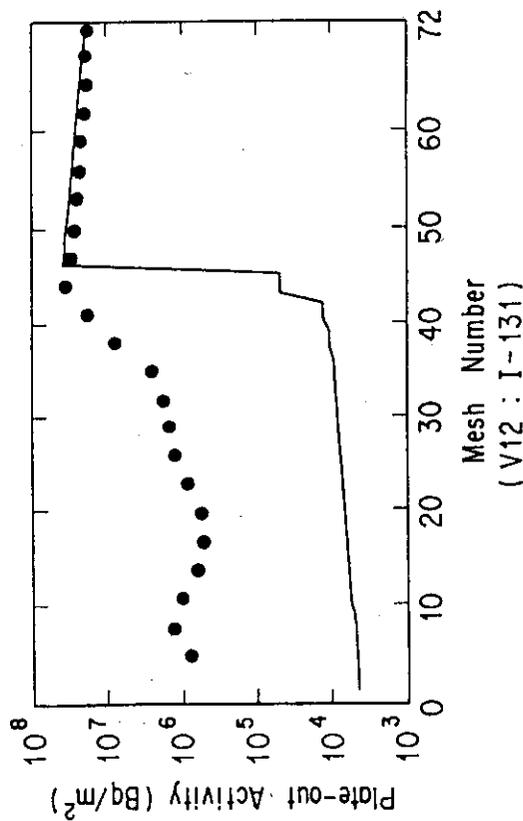
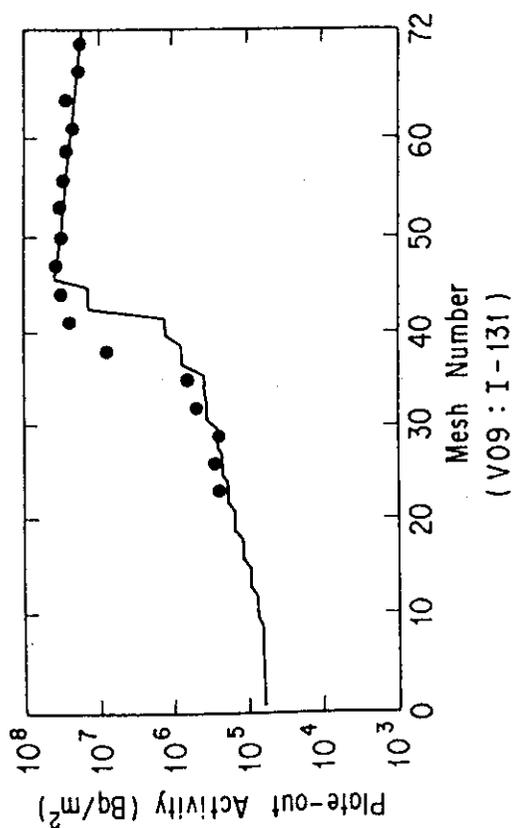
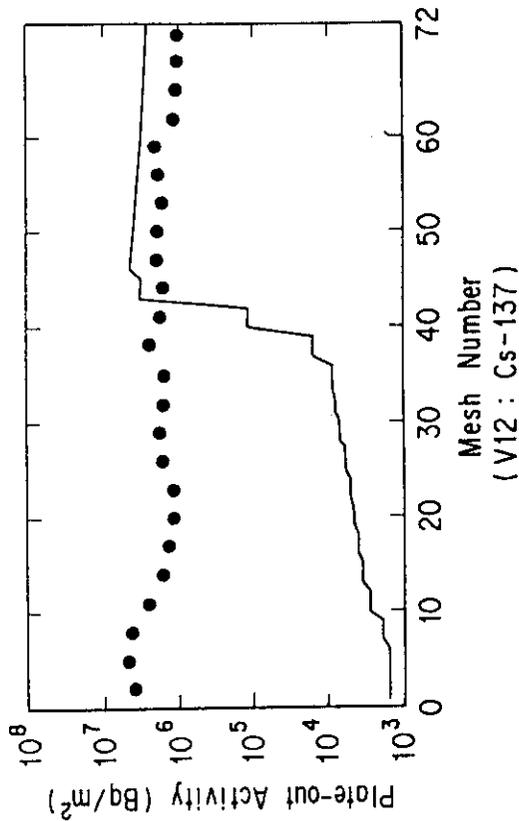
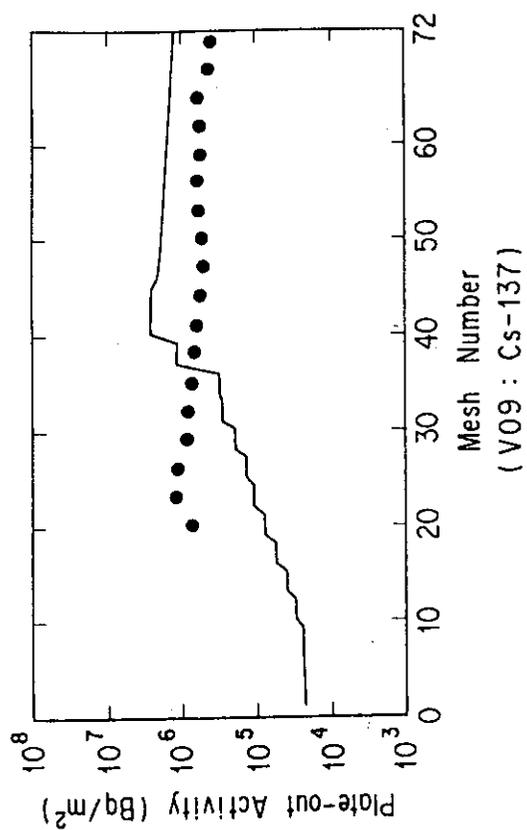


Fig.A.5 Plate-out distribution of Cs-137 in VAMPYR-1

Fig.A.4 Plate-out distribution of I-131 in VAMPYR-1

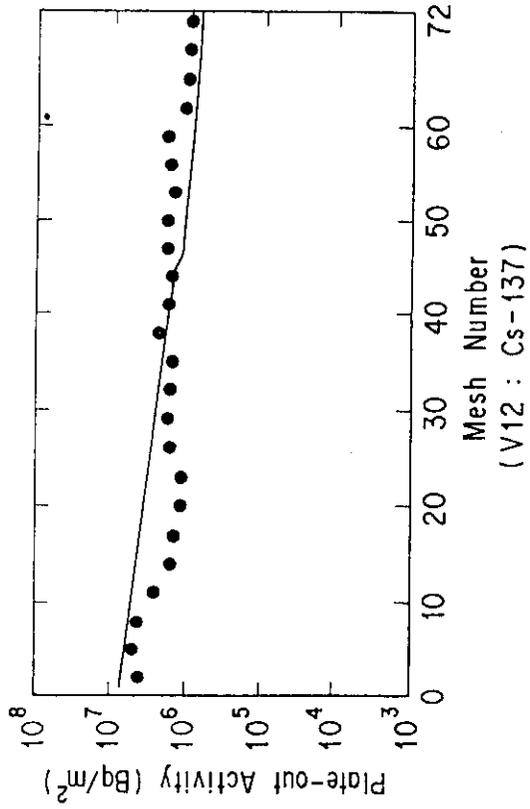
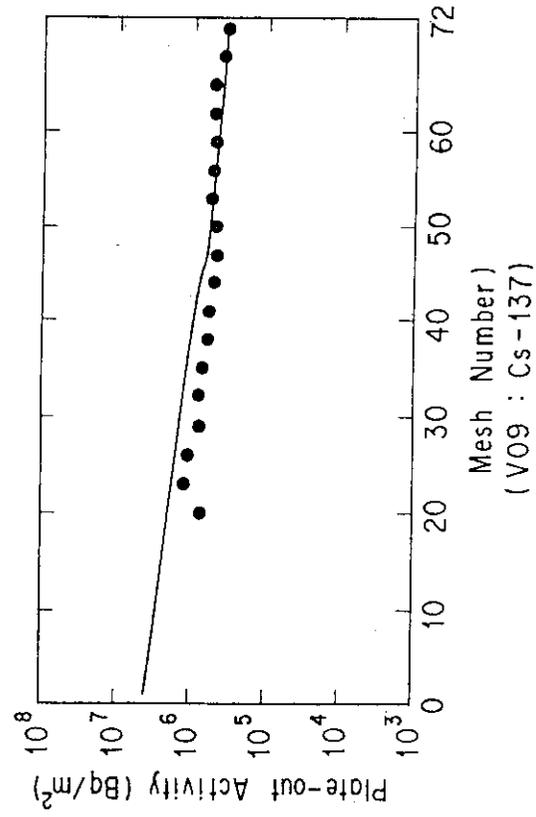


Fig.A.7 Plate-out distribution of Cs-137 in VAMPYR-1 (Iniotakis Model)

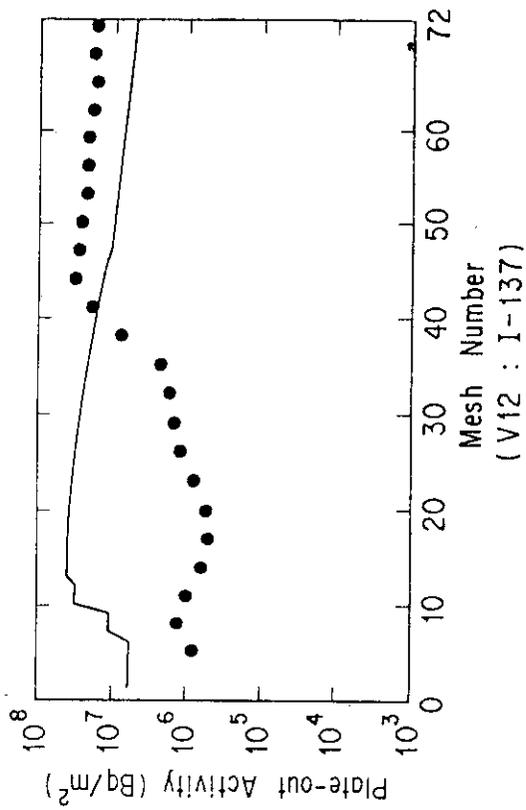
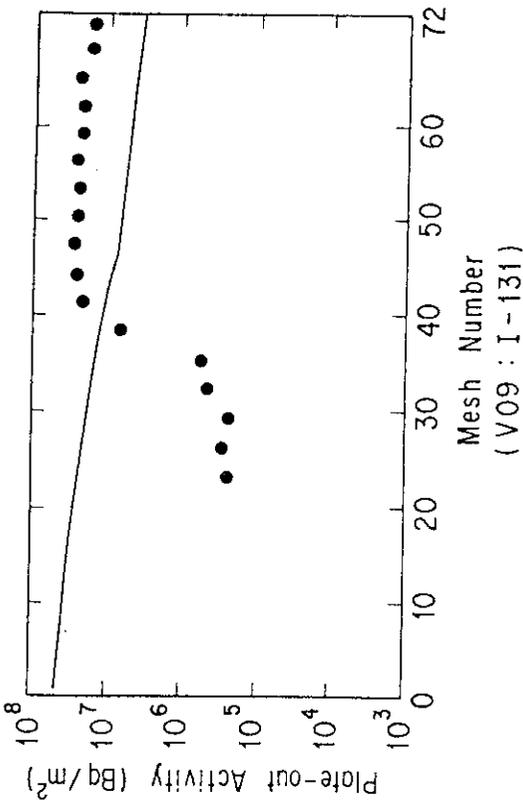


Fig.A.6 Plate-out distribution of I-131 in VAMPYR-1 (Iniotakis Model)

付録-2 VAMPYR-1実験のパラメータ計算結果

本文の2章及び付録-1で述べたように、PLAINコードでは、母材内に拡散侵入するFPの割合（ペネトレーション係数）を2つの方法で計算できる。一つは表面吸着FP量と母材内拡散係数を基にペネトレーション係数を算出するもの（以下、便宜上A方式という。）であり、もう一つはペネトレーション係数を核種と母材の種類に対して入力で一定値として与えるもの（以下、B方式という。）である。従って、母材内拡散FP量は、PLAINコードの入力値としては、A方式では母材内拡散係数の頻度因子及び活性化エネルギーで、B方式ではペネトレーションファクタで定まる。

VAMPYR-1試験のV09及びV12試験におけるCs-137について、A方式によるパラメータ計算を行った（I-131については、母材内拡散係数を変更しても結果はほとんど変わらない）。

A方式は、TLG-1（本文3.1節）及びOGL-1（本文3.2節）の解析に用いた方法であり、母材内拡散係数として、以下に示す値を標準値として用いている。

核種	頻度因子	活性化エネルギー (kcal/mol)
Cs-137	0.30	63.5

パラメータ計算は、頻度因子を標準値に対して0.1, 1, 10, 100倍することによって行った。結果をV09についてFig.B.1に、V12についてFig.B.2に示す。

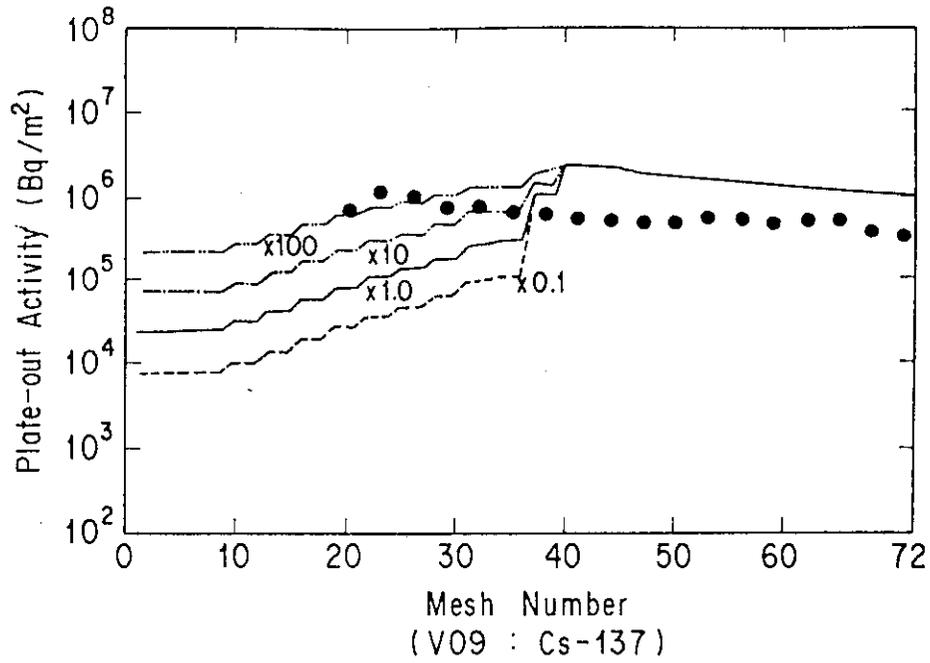


Fig.B.1 Plate-out distribution of Cs-137 in V09 experiment
(Parameter study of diffusion coefficient)

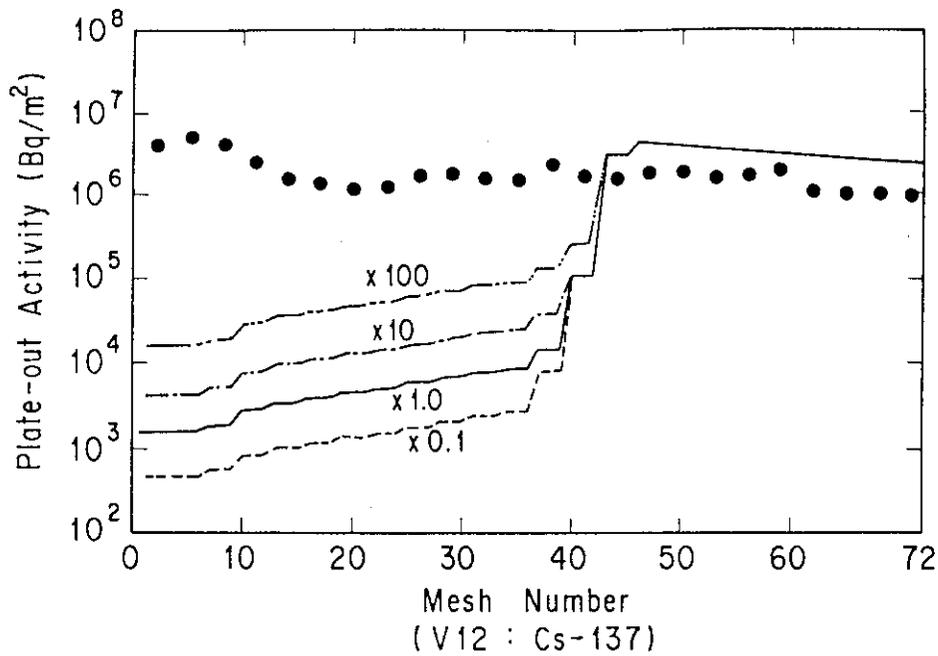


Fig.B.2 Plate-out distribution of Cs-137 in V12 experiment
(Parameter study of diffusion coefficient)