

分置

炉内ソースターム挙動解析コードTRACERの開発

1993年1月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

炉内ソースターム挙動解析コードTRACERの開発

宮木 和美*, 宮原 信哉**

要 旨

燃料破損時にカバーガス空間へ放出されるFPの種類と量(炉内ソースターム)をより現実的に評価するため、その移行過程で起こる物理・化学現象を機構論的に取り扱う解析コードTRACER(Transport phenomena of Radionuclides for Accident Consequence Evaluation of Reactor)を開発し、その機能をMol7C/6炉内ソースターム試験の結果を用いて検証した。

コードの開発にあたっては、既往研究においてその重要性が特に指摘されている不活性ガス・揮発性ガスの気泡生成と冷却材中での振舞い、気泡とナトリウムとの間のFP移行の挙動に関する現状知見、解析モデルについてまず文献調査を行い、コードの開発項目を抽出した。

次に、FPガス気泡の生成と冷却材中での気泡の挙動に関して、機構論的な解析モデルの検討を行い、モデルの作成とプログラミングを実施した。

最後に、今回開発した解析コードの基本機能の確認計算、およびMol7C/6炉内ソースターム試験の結果を例題とした機能検証計算を実施し、実機解析のために必要と考えられる検討課題を抽出できたとともに、今後これらの課題を解決することにより本解析コードが当該事故事象の評価に有効なツールとして活用できる見通しを得た。

* 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室嘱託, (株)東芝

** 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

Development of In-vessel Source Term Analysis Code, TRACER

Kazumi Miyagi * , Shinya Miyahara **

Abstract

To evaluate the species and quantities of fission products (FPs) released into the cover gas in an LMFBR during the fuel pin failure accidents (In-vessel Source Term), the computer code TRACER (Transport phenomena of Radionuclides for Accident Consequence Evaluation of Reactor) has been developed. The code can analyze mechanistically the physical and chemical phenomena of FPs release and transport behavior from the failed fuel to the cover gas through sodium coolant. The code validation was performed through the sample calculations for the results of Mol7C/6 in-pile source term experiment.

In the beginning of this study, the production and transport phenomena of bubbles of the noble gas and volatile FPs in the coolant, and mass transfer between the bubble and coolant were investigated, and the functions needed for the code were clarified. After that, several mechanistic models for the bubble behavior were developed, and the programs were coded.

From the results of the sample calculations, it was confirmed that the code was capable of simulating the FP transport phenomena in the primary system.

* a part-time employee of FBR Plant Safty Engineering Section, OEC, PNC;
Nuclear Engineering Lab., TOSHIBA Corporation

** FBR Plant Safty Engineering Section, Safty Engineering Div., OEC, PNC;

目 次

1. はじめに	1
2. コード開発方針の検討	2
2.1 概 要	2
2.2 M o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験解析結果からの知見整理	2
2.3 F P 移行評価コード (モデル) の調査	3
2.4 開発項目の抽出	3
3. 解析モデルの検討	5
3.1 解析モデルの概要	5
3.2 基本的変数の定義	5
3.3 ナトリウムの1次系内流動モデル	7
3.4 1次系内質量移行モデル	10
3.5 燃料ペレット温度挙動モデル	14
3.6 燃料から冷却材中へのF P放出モデル	15
3.7 気泡挙動モデル	17
3.8 カバーガス・冷却材間F P移行モデル	23
3.9 F P壁面沈着モデル	25
3.10 F P核種の取扱い	26
4. 数値解法	28
5. 解析コードの構造	29
5.1 コードの基本フロー	29
5.2 入出力ファイル	29
6. 例題計算	30
6.1 解析対象	30
6.2 解析条件	31
6.3 検討結果	34
7. まとめ	40
8. 参考文献	41
付録A 改造コード使用説明書	付-1
A.1 概 要	付-1
A.2 プログラム構成	付-1
A.3 サブルーチンの機能	付-1
A.4 入力データ説明書	付-2

A.5 入力データ作成時の注意	付-3
A.6 リスタートおよびプロット使用上の注意	付-3
A.7 サンプル入出力例	付-3

L i s t o f T a b l e s

Table 2-1	Comparison of Analytical Functions and Features in Each Code	42
Table 2-2	Analytical Functions and Features of Improvement Code	44
Table 3.7-1	Relationships for Sphere Drag	46
Table 3.7-2	Recommended Drag Correlations: Standard Drag Curve	47
Table 3.7-3	Absorption Coefficients	48
Table 3.10-1	Decay Chains included in TRACER	49
Table 6-1	MOL7C/6 Fuel Rod Data	52
Table 6-2	Calculation conditions for Coolant (1)	53
Table 6-3	Calculation conditions for Coolant (2)	54
Table 6-4	Calculation conditions for Wall	55
Table 6-5	Cover Gas Data	56
Table 6-6	Coolant Surface Data	56
Table 6-7	Release Constants for Each Element	57
Table 6-8	FP Inventory in MOL7C/6 Fuel Pins	58
Table 6-9	Calculation Condition Summary	59
Table A-1	Description of Input Variables	付- 5
Table A-2	Sample Input/Output List	付-16

L i s t o f F i g u r e s

Fig. 2-1	Dominant Phenomena in Mol7C/6 Source Term Experiment	60
Fig. 2-2	Schematic Illustration for Growth of Bubble Released from Failed Fuel	61
Fig. 2-3	Schematic Illustration of Analytical Model for FP Gas Bubble Behavior	62
Fig. 3.1-1	Structure of New Code and Main Analytical Models	63
Fig. 3.2-1	Definition of Variables used in Model Description	64
Fig. 3.3-1	Definition of Velocities in coolant system	66
Fig. 3.4-1	Mass Transfer Behavior in Primary Coolant System	67
Fig. 3.4-2	Schematic Illustration of Mass Concentration Change due to Coolant Flow	68
Fig. 3.5-1	Specification of Fuel Pellet Temperatures	69
Fig. 3.6-1	FP Release Model based on NUREG-0772 Data	70
Fig. 3.6-2	Model Description of FP Release from Gas Plenum	71
Fig. 3.7-1	Schematic Illustration of Typical Bubble Shapes	72
Fig. 3.7-2	Schematic Illustration of Bubble Expansion	72
Fig. 3.7-3	Drag Coefficient as a Function of Reynolds Number for Water Drops in Air and Air Bubbles in Water, Compared with Standard Drag Curve for Rigid Spherers	73
Fig. 3.7-4	Aerosol Deposition Model in Gas Bubbles	74
Fig. 3.7-5	Decontamination Factor for Ellipsoidal and Spherical Bubbles	74
Fig. 3.8-1	Model Description of FP Transport to Cover Gas	75
Fig. 3.9-1	Model Description of FP Deposition to Wall	76
Fig. 3.10-1	Schematic Illustration of Chemical Species and FP Elements	77
Fig. 5- 1	Flow Diagrams of TRACER Code	78
Fig. 6- 1	General Arrangement of the MOL7C/6 In-Pile Section	82
Fig. 6- 2	Total Activity Transient in Mol7c/6 Test	83
Fig. 6- 3	Activity of Kr/Cs/Rb in Coolant at E/T Position	84
Fig. 6- 4	Activity of Iodines in Coolant at E/T Position	85
Fig. 6- 5	Calculational Geometry for MOL7C/6 Test	86

Fig. 6- 6	Temperature Profile used in Sample calculation	87
Fig. 6- 7	Plenum Gas Pressure Transient of Fuel (Case 1)	88
Fig. 6- 8	Fuel Temperature assumed for Sample Calculation (Case 1) ..	88
Fig. 6- 9	Release Rate of Kr/Xe from Fuel (Case 1)	89
Fig. 6-10	Residual Inventory of Kr/Xe in Fuel (Case 1)	89
Fig. 6-11	Release Rate of Iodines from Fuel (Case 1)	90
Fig. 6-12	Residual Inventory of Iodines in Fuel (Case 1)	90
Fig. 6-13	Release Rate of Rb/Cs from Fuel (Case 1)	91
Fig. 6-14	Residual Inventory of Rb/Cs in Fuel (Case 1)	91
Fig. 6-15	Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 1)	92
Fig. 6-16	Concentration of Iodines in Coolant (Case 1)	93
Fig. 6-17	Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 1) ..	93
Fig. 6-18	Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 1)	94
Fig. 6-19	Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 1)	94
Fig. 6-20	Total Activity of FPs in Coolant (Case 1)	95
Fig. 6-21	Total Activity of FPs in Bubbles (Case 1)	95
Fig. 6-22	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 1)	96
Fig. 6-23	Concentration of Iodines in Coolant (Case 2)	97
Fig. 6-24	Concentration of Iodines in Bubbles (Case 2)	97
Fig. 6-25	Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 2)	98
Fig. 6-26	Concentration of Rb/Cs in Bubbles (Case 2)	98
Fig. 6-27	Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 2) ..	99
Fig. 6-28	Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 2)	99
Fig. 6-29	Total Activity of FPs in Coolant (Case 2)	100
Fig. 6-30	Total Activity of FPs in Bubbles (Case 2)	100
Fig. 6-31	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 2)	101
Fig. 6-32	Plenum Gas Pressure Transient of Fuel (Case 3)	102
Fig. 6-33	Release Rate of Kr/Xe from Fuel (Case 3)	102
Fig. 6-34	Residual Inventory of Kr/Xe in Fuel (Case 3)	103
Fig. 6-35	Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 3)	103
Fig. 6-36	Concentration of Iodines in Coolant (Case 3)	104
Fig. 6-37	Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 3)	104
Fig. 6-38	Total Activity of FPs in Coolant (Case 3)	105
Fig. 6-39	Total Activity of FPs in Bubbles (Case 3)	105

Fig. 6-40	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 3)	106
Fig. 6-41	Concentration of Iodines in Coolant (Case 4)	107
Fig. 6-42	Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 4) ..	107
Fig. 6-43	Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 4)	108
Fig. 6-44	Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 4)	108
Fig. 6-45	Total Activity of FPs in Coolant (Case 4)	109
Fig. 6-46	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 4)	109
Fig. 6-47	Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 5)	110
Fig. 6-48	Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 5) ..	110
Fig. 6-49	Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 5)	111
Fig. 6-50	Total Activity of FPs in Coolant (Case 5)	112
Fig. 6-51	Total Activity of FPs in Bubbles (Case 5)	112
Fig. 6-52	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 5)	113
Fig. 6-53	Total Activity of FPs in Coolant (Case 6)	114
Fig. 6-54	Total Activity of FPs in Bubbles (Case 6)	114
Fig. 6-55	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 6)	115
Fig. 6-56	Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 6)	115
Fig. 6-57	Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 6) ..	116
Fig. 6-58	Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 6)	116
Fig. 6-59	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 7)	117
Fig. 6-60	Total Activity of FPs in Bubbles (Case 7)	117
Fig. 6-61	Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles	118
Fig. A- 1	Construction of TRACER Code	付- 4

1. はじめに

高速増殖炉（以下、FBRと略す）の燃料破損時にナトリウム（以下、Naと略す）中に放出される放射性物質の挙動は、燃料破損の速やかな検出によるプラント異常事象の防止、保守時の被曝線量の低減、および事故時に放出される放射性物質の量評価等に係わる重要な挙動である。このため、燃料破損時に冷却材中に放出され、1次系内冷却材を經由してカバーガス空間へ至る核分裂生成物（以下、FPと略す）の種類とその量（炉内ソースターム）をより現実的に評価するための解析コードを開発することを目的として、これらのFP移行過程で起こる物理・化学的挙動を機構論的に取り扱う解析コードTRACER (Transport phenomena of Radionuclides for Accident Consequence Evaluation of Reactor)を開発し、その機能をMo17C/6炉内ソースターム試験の結果¹⁾を用いて検証した。作業は以下の手順で実施した。

(1)コード開発方針の検討

既往研究¹⁾においてその重要性が特に指摘されている不活性ガス・揮発性ガスの気泡生成と冷却材中での振舞い、気泡とNaとの間のFP移行挙動等についての現状知見、解析モデルについて文献調査を行った。この調査結果を検討し、開発項目を抽出した。

(2)解析モデルの検討、およびプログラミング

FPガス気泡の生成と冷却材中での気泡の挙動に関して、機構論的な解析モデルの検討を行い、モデル作成とプログラミングを実施した。

(3)コード機能の確認

作成した解析コードの基本機能についての確認計算、およびMo17C/6炉内ソースターム試験の結果¹⁾を例題とした機能検証計算を実施し、本解析コードが所期の解析機能を有することを確認した。

以下、各章で上記項目の内容とその結果を記述する。また、解析コードの使用説明書（コードの構成、入出力データ等）については付録として添付した。

2. コード開発方針の検討

2.1 概要

ここでは解析コードの開発方針の検討を、既存コードの調査結果に基づき行った。なお、本検討においては、これまでの試験解析等の知見を反映して、カバーガスへの移行に影響が大きいと見られる

- a. F P ガス気泡の生成
- b. F P ガス気泡の輸送挙動

に重点をおいて行った。以下の各節ではTRACERコードを開発するに際して留意した下記の項目についてまとめる。

- a. M o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験解析結果¹⁾からの知見整理
- b. F P 移行評価コード(モデル)の調査
- c. 開発項目の抽出

2.2 M o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験解析結果からの知見整理

M o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験結果に対して実施された簡易解析コードによるパラメトリックな解析結果¹⁾は、気泡形状で冷却材中に放出されたF Pのカバーガスへの移行特性を把握するために解析コードに必要とされる解析機能に関する情報を提供している。Fig. 2-1に示すM o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験において考えられるF P移行支配要因と上記の解析結果の傾向から以下の項目の重要性が指摘される。

(1) F P 放出速度の考察

F Pは燃料ペレットばかりではなく、ガスプレナムからも放出される。この放出過程が初期気泡径にも影響を与えるため、F P放出に関してガスプレナムからの放出と燃料ペレットからの直接移行を考慮することが必要である。但し、実機評価の観点からは、集合体内燃料ピン東部での気泡の広がりやN a 流路断面割合により制限されるため、ピン東部での扱いと集合体出口での扱いに注意を要する。

(2) 気泡挙動のモデル化

現状のモデルでは気泡の分裂、合体が考慮されていないこと、F P移行過程でのエネルギー移行、質量移行、流体静水圧の変動等による気泡径の変化が扱われていないことから、気泡から液相へのF P移行率を過小評価する可能性がある。このため、分裂、合体を含めた気泡挙動についてモデル化を行うことが必要と考えられる。

(3)気泡から液中への拡散係数

上記の解析結果では、気液間の拡散係数として、ナトリウムの自己拡散係数を使用した場合に気液間FP移行量を過小評価することが明らかにされている。このため、それ以外による下記の移行過程の可能性を検討することが重要である。

- a. 気相、液相の界面近傍での乱流渦拡散
- b. 気泡中のナトリウムミストエアロゾルのプレートアウト、凝縮挙動

2.3 FP移行評価コード（モデル）の調査

気泡中に保持されたFPのカバーガスまでの移行挙動を評価するためには、気泡挙動が何らかの形でモデル化されている必要がある。ここでは、本作業に関連するコード（モデル）の現状調査を行ない、開発項目の整理を行なう。調査したコード（モデル）は以下の通りである。

- a. FTAC²⁾
 - b. RISE³⁾
 - c. EXCUBUL⁴⁾
 - d. LWR関連モデル⁵⁾
 - e. その他⁶⁾
- a. b. c. は仮想的炉心崩壊事故時に生成されるナトリウム蒸気、および燃料蒸気から成る大気泡の炉容器内冷却材中での挙動を対象としたもので、それぞれ動燃、ORN L、CEAで開発されている。この中では、a. の解析機能が広範囲で、モデルも詳細である。c. はLWRの分野におけるFPを含む蒸気の水中のスクラビングによるFP保持効果を評価するために開発されたもので、冷却材が異なるものの想定気泡径は比較的小さく、本作業のスコープとする挙動との類似性は大きいと考えられる。e. は、FBRの研究初期において事故時のカバーガス移行量のスコーピングスタディに使用されたモデルである。これらの各モデルにおいて、主要な解析対象に対するモデルの機能、特徴をTable 2-1にまとめた。

2.4 開発項目の抽出

Table 2-1の各解析コードのモデルの機能、特徴より、コード開発の方針を以下のように設定した。

開発の目標とするコードの基本的枠組みは、体系の設定等の汎用性に優れた構造を基本とし、気泡挙動のエネルギー・質量移行に関するFTACコードの特徴と、気泡の動的挙動についてのLWRコード（モデル）の知見を反映する方向で検討を進めるものとする。Fig. 2-2に燃料破損口からの気泡放出・成長のモデル概念図⁷⁾を、Fig. 2-3にFPガス気

泡挙動モデルの概念図を示す。Table 2-2 に目標とするコードの解析モデルの概要を示す。

3. 解析モデルの検討

3.1 解析モデルの概要

Table 2-2 に示したコード開発に係わる解析モデルは、以下のように分類される。

- a. 燃料ペレット温度挙動
- b. 燃料から冷却材中への F P 放出
- c. F P ガス気泡の生成
- d. Na の 1 次系内流動
- e. 冷却材中気泡挙動
- f. 冷却材中 F P 輸送
- g. カバーガス気液間 F P 移行

これらのうち、Fig. 3.1-1 に示すように、燃料から冷却材中への F P 放出モデル、F P ガス気泡生成モデル、および冷却材中気泡挙動モデルを重点開発項目として位置づけた。特に、冷却材中気泡挙動については、成分割合の設定、気泡上昇速度に係わる F P 輸送現象、分裂・合体を含む気泡形状の変動、気泡・冷却材間熱移行、ガス成分状態方程式、気泡内でのエアロゾルの沈着による減衰、気泡・冷却材間 F P 移行、および化学変化等が重要となる。以下の各節でこれらの各モデルに関する物理モデルを記述する。

3.2 基本的変数の定義

物理モデルを記述するにあたり、使用する主要な変数とその意味を以下のとおり定義する。

a. 冷却材メッシュに関する変数

$x(i)$	メッシュの中心位置の x 方向座標	[m]
$z(i)$	同 z 方向座標	[m]
$x_c(i)$	同 x 方向のメッシュ巾	[m]
$z_c(i)$	同 z 方向のメッシュ巾	[m]
$u_c(i)$	メッシュにおける x 方向の冷却材流速	[m/s]
$w_c(i)$	同 z 方向の冷却材流速	[m/s]
$P_c(i)$	メッシュにおける冷却材圧力	[Pa]
$V_c(i)$	メッシュの体積 (冷却材部)	[m ³]
$T_c(i)$	メッシュにおける冷却材温度	[K]

b. 壁面に関する変数

$A_c(i)$	メッシュにおける壁面面積	[m^2]
$A_{fc}(i)$	メッシュにおける自由液面面積	[m^2]

c. カバーガスに関する変数

V_g	カバーガス体積	[m^3]
H_g	カバーガス高さ	[m]
P_g	カバーガス圧力	[Pa]
T_g	カバーガス温度	[K]
A_{gr}	カバーガス天井表面積	[m^2]
T_{gr}	カバーガス天井温度	[K]
A_{gw}	カバーガス壁面表面積	[m^2]
T_{gw}	カバーガス壁面温度	[K]
m_g	カバーガスから系外への移行質量	[kg/s]

d. 気泡に関する変数

$V_b(i)$	メッシュでの気泡全体体積($V_b(i)/(V_b(i)+V_c(i))$ =持込率)	[m^3]
$T_b(i)$	同 気泡内平均温度	[K]
$P_b(i)$	同 気泡内圧力	[Pa]
$d_e(i)$	メッシュ内の気泡の等価直径	[m]
$N_b(i)$	同 個数	
$u_b(i)$	同 x方向移動速度	[m/s]
$w_b(i)$	同 z方向移動速度	[m/s]

e. 物質濃度に関する変数

$n_b(m, i)$	メッシュでの気泡内の物質mのモル数	[モル]
$n_c(m, i)$	メッシュでの冷却材内の物質mのモル数	[モル]
$n_g(m)$	カバーガス内での気泡内の物質mのモル数	[モル]
$n_{gr}(m)$	カバーガス天井での物質mの表面モル数	[モル]
$n_{gw}(m)$	カバーガス壁面での物質mの表面モル数	[モル]
$n_w(m, i)$	冷却材部壁面での物質mの表面モル数	[モル]
$C_b(m, i)$	メッシュでの気泡内の物質mのモル濃度(= n_b/V_b)	[モル/ m^3]
$C_c(m, i)$	メッシュでの冷却材内の物質mのモル濃度(= n_c/V_c)	[モル/ m^3]
$C_g(m)$	カバーガス内での物質mのモル濃度(= n_g/V_g)	[モル/ m^3]

$S_{g,r}(m)$	カバーガス天井での物質mの表面モル濃度($=n_{g,r}/A_{g,r}$)	[モル/m ²]
$S_{g,w}(m)$	カバーガス壁面での物質mの表面モル濃度($=n_{g,w}/A_{g,w}$)	[モル/m ²]
$S_w(m, i)$	冷却材部壁面での物質mの表面モル濃度 ($=n_w/A_w(i)$)	[モル/m ²]
$S_{g,p}(m, i)$	冷却材壁面での物質mの表面モル濃度	[モル/m ²]

添字 i は該当するメッシュを示す。Fig. 3.2-1に上記各変数を解析対象となる体系に即して示す。なお、以下の解析モデル説明において添字 i、m を簡単のために省略する場合がある。

3.3 ナトリウムの1次系内流動モデル

(1) 仮定

ナトリウムの1次系内流動モデルを作成するに際して以下の仮定をおく。

- 対象とする体系を任意にメッシュ分割し（1～3次元）、各メッシュ点を流路抵抗で連結したネットワーク構造とする。
- 流路に存在する構造物、カバーガス空間は入力データにより任意に設定できる。
- 冷却材は非圧縮性で密度一定とする。
- 本年度はネットワークを構成する冷却材についての運動方程式は解かず、各流路での流速とメッシュ中心での圧力をテーブルで与える。また、それらの時間変化は入力データにより指定されるものとする。
- 気泡の流入による液体の運動量変化、および指定されたメッシュ内での液体体積の時間変化は考慮しない。

(2) 基礎式

a. 質量保存式

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \mathbf{v}) = 0 \quad (3.3-1)$$

ここで、

- ρ_c : 冷却材密度
- t : 時間
- \mathbf{v} : 流速ベクトル

である。

式(3.3-1)を該当するメッシュ i に連結している J 個の流路に対して積分して次式を得る。

$$\frac{\partial m_c(i)}{\partial t} + \sum_j^J (\rho_{c,j} u_j A_j) = 0 \quad (3.3-2)$$

ここで、

- $m_c(i)$: メッシュ i の冷却材質量
- u_j : 流路 j の流速 (メッシュ i から連結メッシュへの方向を正とする)
- $\rho_{c,j}$: メッシュ i に流路 j で連結しているメッシュの冷却材密度。
但し、 u_j が正の時 $\rho_{c,j}$ 、負の時 $\rho_{c,j}$
- A_j : 流路 j の断面積

である。

b. エネルギー保存式

$$\frac{\partial \rho_c e_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c v e_c) = q_b + q_b + q_d \quad (3.3-3)$$

ここで、

- e_c : メッシュ i 内冷却材の比エンタルピー
- q_b : メッシュ i で隣接構造材から流入する単位体積あたりのエネルギー
- q_b : メッシュ i で気泡から流入する単位体積あたりのエネルギー
- q_d : メッシュ i の崩壊熱による単位体積あたりのエネルギー

である。

式 (3.3-3) をメッシュ i に連結している J 個の流路に対して積分して次式を得る。

$$\frac{\partial m_c(i) e_c(i)}{\partial t} + \sum (\rho_{c,j} u_j e_j A_j) = Q_b + Q_b + Q_d$$

ここで、

- $e_c(i)$: メッシュ i 内冷却材の比エンタルピー
- e_j : メッシュ i に流路 j で連結しているメッシュの比エンタルピー
但し、 u_j が正の時 $e_{c,j}$ 、負の時 $e_{c,j}$
- Q_b : 隣接構造材から流入する全エネルギー
- Q_b : 気泡から流入する全エネルギー
- Q_d : 崩壊熱による全エネルギー

であり、それぞれ次式で与えられる。

$$Q_b = \sum h_w(i) A_c(i) (T_w(i) - T_c(i)) \quad (3.3-5)$$

$$Q_b = \sum h_{bj}(i) A_{bj}(i) N_{bj}(i) (T_{bj}(i) - T_c(i)) \quad (3.3-6)$$

$$Q_d = \sum n_c(k, i) f(k, t) \quad (3.3-7)$$

ここで、

$h_w(i)$: メッシュ i 冷却材と壁面間実効熱伝達係数

$A_c(i)$: メッシュ i 冷却材と壁面間伝熱面積

$T_w(i)$: 壁面構造材温度

$T_c(i)$: メッシュ i 冷却材温度

$h_{bj}(i)$: メッシュ i 内の j 群気泡と冷却材間実効熱伝達係数

$A_{bj}(i)$: メッシュ i 内の j 群気泡の表面積

$N_{bj}(i)$: メッシュ i 内の j 群気泡の個数

$T_{bj}(i)$: メッシュ i 内の j 群気泡の温度

$n_c(k, i)$: メッシュ i 冷却材中の物質 k のモル数

$f(k, t)$: 物質 k の単位モルあたりの崩壊熱の時間変化

である。

(3) 冷却材流動を解く際の留意点

a. 気泡輸送に対する速度

冷却材流動の相対運動として解かれる気泡輸送においては冷却材流速の鉛直方向成分と水平方向成分を指定することが必要となる。本解析モデルでは該当メッシュにおいて、連結している流路の方向を重力方向成分として入力し、該当メッシュにおいて鉛直方向速度と水平方向速度を設定する。例えばFig. 3.3-1の点Pにおける両方向の速度は連結流路4に対して

$$\text{水平方向成分 } u(i) = f(u_1, u_2, u_3, u_4)$$

$$\text{鉛直方向成分 } w(i) = f(w_1, w_2, w_3, w_4)$$

とし、メッシュ i 内の気泡はすべて $(u(i), w(i))$ の速度に対する相対速度で運動すると仮定する。

b. エネルギー保存式における境界条件の取扱

エネルギー保存式におけるソースタームのうち、構造材との熱伝達に係わる項については、簡単のために壁面構造材温度 $T_w(i)$ についての過渡的温度計算は行わず、

入力によって指定するものとする。ただし、時間/温度テーブルによる時間変化を考慮するものとする。

3.4 1次系内質量移行モデル

(1) 1次系内質量移行の概要

3.3節において設定されたナトリウムの1次系内流動状態において、冷却材中および気泡中に放出されたFPの1次系内での移行過程はFig. 3.4-1のように

- a. 冷却材中での流動様式に従った移行
- b. 同一メッシュ内での気泡・冷却材間移行
- c. 液面近傍冷却材・カバーガス間移行
- d. 冷却材・構造材壁面間移行
- e. 気泡・カバーガス間移行

のように分類される。Fig. 3.4-1の n_x , C_x , S_x はそれぞれ領域でのモル数、体積モル濃度、表面モル濃度を示す。

冷却材中での流動様式に従った移行過程は、次式で示される。

$$\frac{\partial C_c(m)}{\partial t} + \nabla \cdot (v C_c(m)) = S_c(m) \quad (3.4-1)$$

ここで、

$S_c(m)$: 単位体積、単位時間あたりの物質mの生成物質量である。

式(3.4-1)をメッシュiに連結しているJ個の流路に対して積分して次式を得る。

$$\frac{\partial n_c(m)}{\partial t} + \sum_j^J C_c(m, j) u(j) A(j) = S_c(m) V_c \quad (3.4-2)$$

Fig. 3.4-2に式(3.4-2)の左辺第2項(流入項)の取扱例を示す。この式を時間積分することにより、流動様式に従った移行過程に基づく物質濃度変化が評価される。

(2) 1次系冷却材中での物質濃度変化

Fig. 3.4-1に示されるように、1次系内での物質濃度は、冷却材、壁面、気泡内、カバーガス中で定義される。各領域における物質濃度変化は以下の式で与えられる。尚、ここでは物質mは化学種について考慮し、核種についての扱いは崩壊チェーンの項で説明する。

a. 冷却材中での物質濃度変化

式(3.4-2)における生成物質項を具体的に記述することにより、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial n_c(m, i)}{\partial t} = & - \sum_j^J (C_c(m, j) u(j) A(j)) \\
 & + \sum_l^L k_b(m, l, i) a_b(l, i) N_b(l, i) (C_b(m, l, i) - C_c(m, i)) \\
 & - \sum_{jw}^{JW} \Gamma(m, jw, i) A(jw, i) C_c(m, i) \\
 & + k_g(m) A_g(i) (C_g(m) - C_c(m, i)) \\
 & - \sum_{m' \neq m}^M R(m, m') n_c(m, i) + \sum_{m' \neq m}^M R(m', m) n_c(m, i) \\
 & + S_c(m, i)
 \end{aligned} \tag{3.4-3}$$

ここで、

- $C_c(m, j)$: 流路 j に該当するメッシュでの物質 m の濃度 [モル/ m^3]
- $u(j)$: 流路 j の流速 [m/s]
- $A(j)$: 流路 j の流路面積 [m^2]
- $k_b(m, l, i)$: 気泡群 l の物質 m の移行速度係数 [m/s]
- $a_b(l, i)$: 気泡群 l の表面積 [m^2]
- $N_b(l, i)$: 気泡群 l の個数
- $C_b(m, l, i)$: 気泡群 l 中の物質の濃度 [モル/ m^3]
- $\Gamma(m, jw, i)$: 壁面沈着速度係数 [m/s]
- $A(jw, i)$: メッシュ i に接する壁面 jw の面積 [m^2]
- $k_g(m)$: カバーガス・液面間の物質 m の移行速度係数 [m/s]
- $A_g(i)$: メッシュのカバーガス接触面積 [m^2]
- $C_g(m)$: カバーガス中の物質 m の濃度 [モル/ m^3]
- $R(m, m')$: 物質 m から m' への変換係数 [1/s]
- $S_c(m, i)$: 物質 m の生成率 [モル/ m^3]

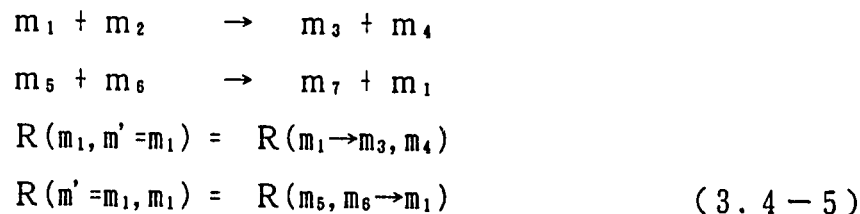
である。式(3.4-3)について、右辺の各項は以下のように記述される。

- (a) 右辺第1項は冷却材流動による物質 m の輸送を示す項であり、該当するメッシュから隣接するメッシュへの冷却材流出方向を正にとり、以下のように示される。

$$\begin{aligned}
 \text{右辺第1項} &= - \sum_j^{J1} C_e(m, i) u(j) A(j) \quad (u(j) \geq 0) \\
 &\quad - \sum_j^{J2} C_e(m, i) u(j) A(j) \quad (u(j) < 0)
 \end{aligned}
 \tag{3.4-4}$$

ここでJ1, J2は冷却材がメッシュiより流出、流入する際の隣接メッシュの番号を示す。

- (b) 右辺第2項は、気泡から冷却材中への物質mの移行を示す項であり、各気泡群1個についての質量移行過程を基準に考慮される。尚、移行係数 k_b の取扱いについては3.7節で記述される。
- (c) 右辺第3項は冷却材中から壁面への沈着を示す項であり、揮発性物質、不揮発性物質に対し、壁面沈着速度係数 $\Gamma(m, jw, i)$ を与えて評価される。沈着速度係数 Γ については3.9節で記述される。
- (d) 右辺第4項はカバーガスに接する冷却材メッシュにおけるカバーガス・冷却材間の物質移行を示す。 k_g はカバーガス・冷却材間の移行速度係数で、カバーガス・冷却材間でバルク領域での瞬時平衡を仮定する場合と、接触界面での平衡を仮定する場合が考慮され、3.8節で記述される。
- (e) 右辺第5項、第6項はそれぞれ物質mから化学変化によって物質 m' へ変換される速度、物質 m' から化学変化によって該当物質mへ変換される速度を表わす。以下のような化学変化において物質 m_1 に着目すれば、



として物質が変換される速度係数が与えられる。

- (f) 右辺第7項はメッシュiにおける物質mの生成率を示し、例えば破損燃料に接した冷却材メッシュにおける物質放出項等を記述する。この項については、3.6節(燃料から冷却材中のFP放出モデル)で記述される。

b. 気泡中での物質濃度変化

気泡中での化学種 m は、ガス成分とエアロゾル成分から構成される。気泡中の圧力変動に伴う膨張、温度変化については簡単のためにガス成分からの寄与のみを考える。気泡中の物質濃度変化は以下の式で記述される。

(a) ガス成分

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_b(m, i)}{\partial t} = & \sum_l^L k_b(m, l, i) a_b(l, i) N_b(l, i) (C_c(m, i) - C_b(m, l, i)) \\ & - \sum_{m' \neq m}^M R(m, m') n_b(m, i) + \sum_{m' \neq m}^M R(m', m) n_b(m', i) \\ & + S_{v,ap}(m', i) - S_{c,oa}(m, i) \end{aligned} \quad (3.4-6)$$

ここで右辺第1項は、冷却材・気泡間の物質移行を示す項で、冷却材中物質濃度変化に係わる式の中に表われるものである。右辺第2項、第3項は気泡内での化学変化により物質 m から他の物質へ変換される項である。また、右辺第4項、第5項は、物質 m の冷却材界面での蒸発、凝縮による気泡中ガス成分の増減を表わす。

(b) エアロゾル成分

気泡内のエアロゾル成分 m の濃度変化は次式で与えられる。

$$\frac{\partial n_b(m, i)}{\partial t} = - \sum_l^L (\beta_1(l) + \beta_s(l) + \beta_d(l)) V_b(l, i) N_b(l, i) C_b(m, l, i) \quad (3.4-7)$$

ここで

- $n_b(m, i)$: メッシュ中の全気泡中の物質 m のモル数 [モル]
- $\beta_1(l)$: 気泡群 l の気泡中において、内部ガス循環(慣性衝突)によるエアロゾル粒子の変化率 [1/s]
- $\beta_s(l)$: 同気泡中において、重力沈降によるエアロゾル粒子の変化率
- $\beta_d(l)$: 同気泡中において、ブラウン運動(拡散)によるエアロゾル粒子の変化率 [1/s]
- $V_b(l, i)$: メッシュにおける気泡群 l の気泡等価体積 [m³]
- $C_b(m, l, i)$: メッシュにおける気泡群 l における物質 m の濃度 [モル/m³]

である。尚、 $\beta_1(l)$, $\beta_s(l)$, $\beta_d(l)$, については後節で詳述される。

c. 壁面での物質濃度変化

冷却材メッシュに隣接する壁面における物質濃度変化は、次式により与えられる。

$$\frac{\partial n_w(m, jw, i)}{\partial t} = \Gamma(m, jw, i)A(jw, i)C_c(m, i) + S_w(m, jw, i) \quad (3.4-8)$$

ここで右辺第1項は、壁面沈着による壁面への移行率を、第2項はそれ以外の生成項を示す。

d. カバーガスでの濃度変化

冷却材メッシュ*i*に隣接するカバーガスでの物質濃度変化は次式で与えられる。

$$\frac{\partial n_g(m)}{\partial t} = k_g(m) \sum_{i=1}^{IS} A_g(i)(C_c(m, i) - C_g(m, i)) - R_l n_g(m) - R_p n_g(m) + S_g(m) \quad (3.4-9)$$

ここで

IS : カバーガスに接する冷却材メッシュ数

R_l : カバーガス境界からの漏洩による変化率 [1/s]

R_p : カバーガス内壁面でのプレートアウトによる変化率 [1/s]

S_g : カバーガスでのその他の生成項

である。

3.5 燃料ペレット温度挙動モデル

冷却材メッシュ中に複数体の燃料集合体内の燃料ピンを複数個の単チャンネルモデルでモデル化する。本年度は集合体内を流れる冷却材と燃料の熱伝達を無視し、FP放出条件を与えるための燃料温度を入力で設定することとする。また、燃料ピン中の温度分布は一樣と仮定し、Fig. 3.5-1に示すように軸方向プロファイルとテーブル入力による温度の過渡変化を考慮する。

軸方向メッシュは等分割 nf メッシュとし、チャンネル数を ih とすれば時刻 t における燃料温度は

$$T_{fu}(n, i) = f(t) \cdot T_{fu0}(n, i), \quad n = 1, nf, \quad i = 1, ih \quad (3.5-1)$$

で与えられる。ここで、

$f(t)$: 時刻 $t=0$ での値を基準とした絶対値の時間変化

T_{fu}, T_{fu0} : 時刻 $t=t, t=0$ での燃料ピン温度(K)

である。

3.6 燃料から冷却材中へのF P放出モデル

(1)概要

M o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験に対する解析¹⁾において、燃料から冷却材中へのF P放出量推定の精度向上の重要性が指摘された。このため、燃料からの直接放出モードとガスプレナムからのガス状放出モードの両者を対象としてモデル化を実施した。燃料から冷却材へのF P放出過程に関しては、燃料ペレットからギャップ、およびギャップから冷却材への2段階の過程を経る。(ただし、事故事象条件に依存して、燃料から直接冷却材へ移行する場合も考えられる。) 炉心損傷事象においては、定常運転中に燃料-被覆管ギャップに蓄積されたF P、および燃料ペレット中に点在するF Pが放出される。従って、

- a. 定常時におけるギャップ中F P量、ペレット内F P量
- b. 過渡時(燃料被覆管破損)における燃料温度とF P放出速度との関係

の2者が事故時のF P放出量を決定することになる。

事象進展が比較的緩慢な事象では、まず、被覆管の破損に伴うF P放出(バースト放出)が生ずるが、これはギャップ内に蓄積していたF Pがピン内部の蓄積ガスの放出と共に放出される現象である(ガス状放出)。次いで被覆管の破損口から蓄積F Pが放出される。この段階は蓄積F Pと共に、燃料体内部からの拡散によるF P放出がなされ、F P放出速度は化学種に依存すると共に燃料温度に強く依存する。即ち、F P放出速度は被覆管の破損形態、燃料温度、燃焼度、および温度履歴に依存する。燃料が溶融すると、燃料体内から気相中へのF P放出メカニズムは液体内の濃度拡散が支配的となり、気相界面の条件も変化するため、F Pの放出速度は、溶融燃料温度、燃料プールの沸騰挙動、および溶融燃料表面のクラスト形成の有無、気相内雰囲気条件(ガス組成、温度、流速等)等に強く依存することが知られている。

(2)放出モード

本解析モデルでは、燃料から冷却材中へのF P放出モードとして、

- a. 燃料ピンからの直接放出(モード1)
- b. ガスプレナムからのガス状放出(モード2)

を考える。

F Pの単位時間あたりの放出率は次式で与えられる。

$$\dot{n}_t(m, i) = \dot{n}_1(m, i) + \dot{n}_2(m, i) \quad (3.6-1)$$

$$\dot{n}_{t,i}(i) = \sum_{m=1}^{MX} [\dot{n}_1(m, i) + \dot{n}_2(m, i)] \quad (3.6-2)$$

ここで

$\dot{n}(m, i)$: 物質mの放出率 [モル/s]

$\dot{n}(i)$: FP物質の放出率 [モル/s]

であり、添字 t, 1, 2 は全モード、モード1, モード2を示す。

FPのうち、ガス状物質の体積放出率は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{g,t}(i) &= \dot{V}_{g,t,1}(i) + \dot{V}_{g,t,2}(i) \\ &= \sum_{m=1}^{Gas} \dot{V}_{g,1}(m, i) + \sum_{m=1}^{Gas} \dot{V}_{g,2}(m, i) \end{aligned} \quad (3.6-3)$$

ここで

$\dot{V}_g(m, i)$: 物質mの体積放出率 [m³/s]

$\dot{V}_{g,t}(i)$: ガス状FPの体積放出率 [m³/s]

である。この時、放出されたFPの気泡中での濃度は

$$C_t(m, i) = C_b(m, i) = \frac{\dot{n}_t(m, i)}{\dot{V}_{g,t}(i)} \quad (3.6-4)$$

で与えられる。ここで、

$C_t(m, i), C_b(m, i)$: 物質mのモル濃度 [モル/m³]

である。また、各物質mのモル分率は、

$$f_c(m, i) = \frac{\dot{n}_t(m, i)}{\dot{n}_{t,i}(i)} \quad (3.6-5)$$

で与えられる。以下に各モードにおける放出モデルについて記述する。

(3)燃料ピンからの直接放出モデル (モード1)

燃料からの直接放出については、NUREG-0772モデル⁴⁾に従い燃料温度の関数として、放出割合を求める。即ち、燃料温度 (T) に依存した放出速度係数 $K(T)$ によって、着目温度での燃料内残留核種の1分間当りの放出割合によって放出速度を与える。放出速度係数は次式で表される。

$$K(t) = -\ln(1-F)/t \quad (3.6-6)$$

ここで

F : 等温加熱による全放出割合

t : 加熱時間

である。Fig. 3.6-1 にモデル概念図と本モデルで使用した放出速度係数の温度依存性を示す。

(4)燃料ピンからのガス状放出モデル (モード2)

燃料ピンからのガス状放出は、破損口径、ガスリザーバ体積、燃料ピンギャップインピーダンスより計算する。放出気体の組成、および化学種の指定は入力で行うものとする。放出時においては、破損口出口部の圧力が上昇し放出速度を緩和することが予想されるが、保守的評価の観点から破損口出口部圧力は入力データにより設定するものとする。また、放出後のガス気泡はピストン流で上方へ運ばれるものとする。

集合体出口からのガス放出については、等価なオリフィスからの放出と仮定し、上部プレナム中へ放出される初期気泡径を設定している。Fig. 3.6-2 にモデル概念を示す。

3.7 気泡挙動モデル

(1)気泡内成分

凝縮性ガス、非凝縮性ガス、エアロゾル粒子を考慮する。化学種はk種、核種については1種類とし、同一化学種については、物理的に同一の振舞いをすると仮定する。エアロゾル粒子については、同一平均径を仮定する。

(2)気泡形状の変化

球形、楕円体、球笠形を考慮する。各形状は離心率 $E (= a/b)$ で判定する。初期形状は球状とする。Fig. 3.7-1に気泡形状の概要を示す。

$$\begin{aligned}
 0.9 < E < 1.1 & \text{ 球形状} \\
 1.1 < E < 3.5 & \text{ 楕円体状} \\
 E > 3.5 & \text{ 球笠状}
 \end{aligned}
 \tag{3.7-1}$$

ここで E を次式で与える。

$$\begin{aligned}
 1/E &= 1 & Ta < 1 \\
 1/E &= [0.81 + 0.206 \tanh \{2(0.8 - \log_{10} Ta)\}]^3 & 1 \leq Ta \leq 39.8 \\
 1/E &= 0.24 & Ta > 39.8 \\
 Ta &= Re M^{0.23} & \text{(Tadaki数)} \\
 Re &= u \rho_c d_* / \mu_c \\
 M &= g \mu_c^4 (\rho_c - \rho_g) / \rho_c^2 \sigma_c^3
 \end{aligned}
 \tag{3.7-2}$$

過渡時、気泡の大きさが変化する場合に Re数 を評価し、E を求めて形状の変化を評価する。

(3) 気泡径の変化

各形状共、等価球を仮定し、Rayleigh の式により評価する。

a. 等価直径

$$d_* = d \quad (\text{球})$$

$$d_* = 2a \left(\frac{1}{E} \right)^{1/3} \quad (\text{楕円体}) \quad (3.7-3)$$

$$d_* = \frac{2^{1/3} a}{\sin \theta} [2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta]^{1/3} \quad (\text{球笠})$$

b. 気泡の膨張

気泡の移動による水頭圧の変動、質量・エネルギー移行を介する気泡内圧の変動より、膨張・収縮を考慮する。粘性の効果を考慮しない。また、上記の d_* に基づき、半径 R を持つ気泡を考える。Fig. 3.7-2に気泡膨張の模式図を示す。

$$R(t) \frac{\partial^2 R(t)}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R(t)}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho_c} (P(R, x) - P(\infty, x)) \quad (3.7-4)$$

$$P(\infty, x) = P_a + g \rho_c (H-x) \quad \text{あるいは}$$

$$P(\infty, x) = P_{11} \quad (\text{圧力指定})$$

c. 上昇速度

気泡上昇に関する方程式は以下の通り。

$$(m_b + \frac{1}{2} m_c) \frac{\partial u_r}{\partial t} = (m_c - m_b) g - C_d \frac{\pi}{8} d_b^2 \rho_c u_r^2 \quad (3.7-5)$$

ここで C_D は摩擦係数で気泡形状に応じた値⁹⁾を用いる。Table 3.7-1, 3.7-2に球形状に対する C_D 、Fig. 3.7-3に C_D の Re 依存性を示す。

ここでは、以下の値を用いる。

$$\begin{aligned} C_D &= 576 M^{1/2} / E_0^{1.5} && \text{球状} \\ C_D &= E_0 / (2.14 + 0.505 E_0) && \text{楕円体} \\ C_D &= 8 / 3 && \text{球笠状} \end{aligned} \quad (3.7-6)$$

尚、 C_D については、種々の表式があり、オプションとして、それらを組み込むこととする。これらより、上昇速度は冷却材との相対速度として求まる。

$$u_r = u_g - u_c \quad (3.7-7)$$

また、コード内では、終端速度による評価式も設定するものとする。

(4) 気泡の分裂・合体

a. 初期気泡径

オリフィスから放出される気泡の場合には、オリフィスの形状及び放出速度によって初期に形成される気泡形状が異なる、ここでは数種の相関式を設定する。

$$\bullet v_g = \frac{\pi d_g^3}{6} = \frac{v_s^{1.2}}{g^{0.6}} \quad (\text{in cm}) \quad (3.7-8)$$

v_s : 表面放出速度 $(\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2)$

$$\bullet v_g = 3.45 [\text{We}]^{0.46} A_i \left[\frac{\sigma_c}{(\rho_c \rho_g)g} \right]^{1/2} \quad (3.7-9)$$

$$\text{We} = v_s^2 \left[\frac{\rho_c d_i}{\sigma_c} \right] \quad (3.7-10)$$

A_i : 放出口面積

d_i : 同 直径

b. 気泡の分裂

気泡分裂条件として、3種の条件を設定する。いずれも表面での乱れに起因するものである。

$$\bullet \text{最大気泡径 } d_{\text{max}} = \frac{\sigma_c}{u_r (\rho_g \rho_c^2)^{1/3}} \quad (3.7-11)$$

• 乱れの成長理論から

$$t(a) \cdot \alpha > 3.8$$

$t(a)$: 乱れの成長に有効な時間

$$= \frac{2d}{u_g} \ln \{ \cot (\lambda/4d) \} \quad (3.7-12)$$

α : 乱れ成長の時定数

λ : 限界安定波長

$$\bullet d_{\text{max}} = \pi \left(\frac{3\sigma_c}{g\rho_c} \right)^{1/2} \quad (3.7-13)$$

c. 気泡の合体

気泡の合体については、

$$\cdot d_{\text{min}} = \pi \left(\frac{\sigma_c}{g \rho_c} \right)^{1/2} \quad (3.7-14)$$

が実験的に求められている。

(5)気泡・冷却材間熱移行

F T A Cコードの方法²⁾に従う。

(6)気泡内成分状態方程式

含有成分の混合物となるが、各々は理想気体として分圧の法則が成立するものとする。

(7)気泡・冷却材間での物質拡散

a. 液相内拡散係数 (移行係数)

球状気泡

$$\text{Sh} = 0.65 \text{Pe}^{1/2} \quad (\text{Re} < 1)$$

$$\text{Pe} = d \cdot u_r / D_c \quad (3.7-15)$$

D_c : 液体内拡散係数

$$\text{Sh} = 1.13 \left(1 - \frac{2.96}{\text{Re}^{1/2}} \right)^{1/2} \text{Pe}^{1/2} \quad (100 < \text{Re} < 400)$$

(3.7-16)

楕円体状

$$\text{Sh} = 1.128 \text{Pe}^{1/2} g(E)/f(E)$$

$$g(E) = \left\{ \frac{8(E^2-1)^{3/2}}{3E^{10/3} [\sin^{-1} [(E^2-1)^{1/2}/E] - (E^2-1)^{1/2}/E^2]} \right\}^{1/2}$$

$$f(E) = 1 + \frac{1}{2E(E^2-1)^{1/2}} \ln \left[\frac{E+(E^2-1)^{1/2}}{E-(E^2-1)^{1/2}} \right]$$

$$\text{Sh} = K_m \cdot d_0 / D_c, \quad K_m : \text{移行係数} \quad (3.7-17)$$

球笠状

$$K_m = \frac{0.975 g^{1/4} D^{1/2}}{d_o^{1/4}} \quad (\text{in cm}) \quad (3.7-18)$$

b. ガス相内拡散

$$\bullet K_g = 2D_g/d_o \quad (3.7-19)$$

$$\bullet \frac{k_g d_o}{D_g} = \frac{2.41}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{d_o f}{D_g} \right)^{1/2} \quad (3.7-20)$$

$$f = 0.5(f_N + f_w)$$

f_N : 気泡の固有振動周期

f_w : 渦による振動周期

D_g : ガス相拡散係数

尚、拡散については乱流状態（気泡内対流あるいは液相界面流れ）により、渦拡散の効果をとり込む。

(8) 気泡内でのエアロゾル挙動

気泡内のエアロゾル成分 m の濃度変化は次式で与えられる。

$$\frac{\partial n_b(m, i)}{\partial t} = - \sum_l (\beta_l(1) + \beta_s(1) + \beta_d(1)) V_b(1, i) N_b(1, i) C_b(m, l, i) \quad (3.4-21)$$

ここで

$n_b(m, i)$: メッシュ中の全気泡中の物質 m のモル数 [モル]

$\beta_l(1)$: 気泡群 l の気泡中において、内部ガス循環（慣性衝突）によるエアロゾル粒子の変化率 [1/s]

$\beta_s(1)$: 同気泡中において、重力沈降によるエアロゾル粒子の変化率

$\beta_d(1)$: 同気泡中において、ブラウン運動（拡散）によるエアロゾル粒子の変化率 [1/s]

$V_b(1, i)$: メッシュにおける気泡群 l の気泡等価体積 [m³]

$C_b(m, l, i)$: メッシュにおける気泡群 l における物質 m の濃度 [モル/m³]

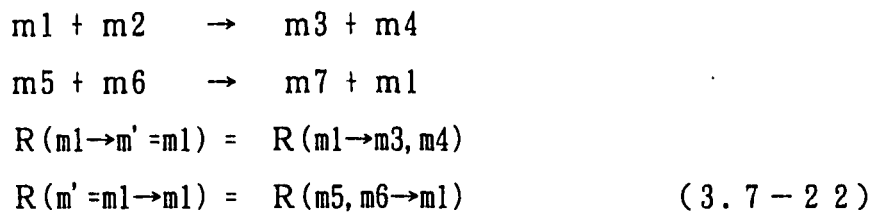
である。

Fig. 3.7-4 に気泡内のエアロゾル挙動についての概念図¹⁰⁾を、Table 3.7-3 に各

沈着挙動の因子に対して気泡形状に依存した係数の比較¹¹⁾を示す。Fig. 3.7-5は気泡形状の相違がDFに及ぼす影響を図示したものの¹¹⁾である。

(9)化学種変化

m種の化学種について考慮し、化学種の変化を以下の変換速度係数で表わす。物質mから化学変化によって物質m'へ変換される速度、物質m'から化学変化uによって該当物質mへ変換される速度に関して、物質mに着目すれば、



として速度係数を与えるものとする。

3.8 カバーガス・冷却材間FP移行モデル

カバーガス/気液間での気泡到達時の移行割合は化学種毎に移行割合(分岐比)を入力で与える。液相中からの拡散移行については、平衡論的移行割合を与えてその量を評価する。Fig. 8-1にモデル概念を示す。

冷却材メッシュに隣接するカバーガスでの物質濃度変化は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial n_g(m)}{\partial t} &= k_g(m) \sum_{i=1}^{IS} A_g(i) (C_c(m, i) - C_g(m, i)) \\
 &\quad - R_l n_g(m) - R_p n_g(m) + S_g(m)
 \end{aligned}
 \tag{3.8-1}$$

ここで

IS : カバーガスに接する冷却材メッシュ数

R_l : カバーガス境界からの漏洩による変化率 (1/s)

R_p : カバーガス内壁面でのプレートアウトによる変化率 (1/s)

S_g : カバーガスでのその他の生成項

である。

k_g(m)はカバーガス・冷却材間の移行速度係数で、カバーガス・冷却材間でバルク領域での瞬間平衡を仮定する場合と、接触界面での平衡を仮定する場合でそれぞれ以下のように記述される。

(バルク領域での瞬時平衡)

$$k_g(m) = \frac{-(C_g(m)')^{n+1} - C_g(m)^n) V_c(i)}{A_g(i) (C_g(m)^n - C_{g,m}(i)^n) \Delta t \sum_i^{IS} V_c(i)} \quad (3.8-2)$$

$$C_g(m)^{n+1} = \alpha \tilde{C}_c(m)^n \quad (3.8-3)$$

$$\tilde{C}_c(m)^n = \frac{\sum_i^{IS} n_c(m, i)^n}{\sum_i^{IS} V_c(i)} \quad (3.8-4)$$

$$\alpha = Kd P_c^0 \frac{Mc}{\rho_c R \tilde{T}^n} \quad (3.8-5)$$

よって、

$$\begin{aligned} & k_g(m) A_g(i) (C_g(m, i) - C_c(m, i)) \\ &= - \frac{(C_g(m)')^{n+1} - C_g(m)^n) V_g}{\Delta t} \frac{V_c(i)}{\sum_i^{IS} V_c(i)} \end{aligned} \quad (3.8-6)$$

と表わされる。

ここで、

- n : 前の時刻ステップを示す添字
- $V_c(i)$: カバーガスに接する冷却材メッシュの体積 [m³]
- Δt : 計算で用いられる時間間隔 [s]
- IS : カバーガスに接する冷却材メッシュの数
- $\tilde{C}_c(m)^n$: カバーガスに接する冷却材メッシュ平均の物質mのモル濃度 [mol/m³]
- Kd : カバーガス・冷却材間における物質mの分配係数
- P_c^0 : 純冷却材物質の蒸気圧 [Pa]
- Mc : 冷却材物質の分子量 [kg/mol]
- ρ_c : 冷却材物質の密度 [kg/m³]
- R : ユニバーサル気体定数 [J/mol·K]
- \tilde{T}^n : カバーガスに接するメッシュ平均温度 [K]

である。

(カバーガス・冷却材界面での平衡)

$$k_g(m) A_g(i) (C_g(m, i) - C_c(m, i))$$

$$= \alpha \cdot k_g(m) \cdot A_g(i) \left(\frac{C_g(m, i)}{\alpha} - C_c(m, i) \right) \quad (3.8-7)$$

ここで

$k_g(m)$: 物質mのカバーガス・冷却材間移行速度係数 [m/s]

$$\left(= \frac{D(m)}{\delta} \right) \quad (3.8-8)$$

$D(m)$: 物質mのガス相での拡散係数 [m²/s]

δ : ガス相での拡散境界厚さ [m]

である。また、 α は式(3.8-5)で与えられる。

3.9 FP壁面沈着モデル

冷却材メッシュに隣接する壁面における物質濃度変化は、既に示されたように

$$\frac{\partial n_w(m, jw, i)}{\partial t} = \Gamma(m, jw, i) A(jw, i) C_c(m, i) + S_w(m, jw, i) \quad (3.9-1)$$

で記述される。ここで右辺第1項は、壁面沈着による壁面への移行率を、第2項はそれ以外の生成項を示す。壁面沈着速度係数 $\Gamma(m, jw, i)$ は不揮発性物質、揮発性物質に対し、以下の式で与えられる。

(不揮発性物質)

$$\Gamma(m, jw, i) = k_w(m) \cdot S_s(m) \quad (3.9-2)$$

$k_w(m)$: メッシュ*i*における冷却材中の物質移動係数 [m/s]

$S_s(m)$: 物質mのステッキング係数

ここで $k_w(m)$ は、次式で与えられる。

$$k_w(m) = 0.023 \cdot Re(i)^{0.83} \cdot Sc^{0.33} \frac{D}{di} \quad (3.9-3)$$

式(3.9-3)は円管内境界層中の拡散支配による物質移動係数を表わす。
ここで

$$\text{Re}(i) : \text{レイノルズ数} \quad \left(= \frac{v \, di}{\nu} \right) \quad (3.9-4)$$

$$\text{Sc}(i) : \text{シュミット数} \quad \left(= \frac{\nu}{D} \right) \quad (3.9-5)$$

D : 液中での拡散係数 [m²/s]

$$\left(= \frac{k \, T}{6 \pi \mu r} \right) \quad (3.9-6)$$

di : 円管直径 (冷却材メッシュの等価直径) [m]

ν : 冷却材の動粘性係数 [m²/s]

μ : 冷却材の粘性係数 [Pa·s]

k : ボルツマン係数 [J/K]

T : 冷却材温度 [K]

r : 冷却材中を移動する原子の半径 [m]

である。

(揮発性物質)

$$\Gamma(m, j, w, i) = k_w'(m) \lambda(m) \quad (3.9-7)$$

$k_w'(m)$: 物質 m の分配係数 (m)

$\lambda(m)$: 物質 m の崩壊定数 (1/s)

Fig. 3.9-1 に移行モデルの概要を示す。

3.10 F P核種の取扱い

Fig. 3.10-1 に本コードで扱う化学種 k とF P核種の核種の取扱いを示す。化学種の変化・移行モードはある相について、

- 化学種 k_i の状態では他相へ移行 (質量移行、エアロゾル沈着等)
- 同相で他の化学種へ変換 (化学変化)
- 化学種 k_i の内、割合 $f_j(k_i)$ を占める核種の崩壊により他の化学種 k_j に移行

の3通りである。

即ち、気泡部については、

$$\begin{aligned} dn_b(k, i)/dt = & -K_m n_b(k, i) - K_c(k) n_b(k, i) - \sum \lambda_j f_j n_b(k, i) \\ & + \sum K_c(l) n_b(l, i) + \sum \sum \lambda_j f_j n_b(l, i) \\ & + S(k, i) \end{aligned} \quad (3.10-1)$$

冷却材部については、

$$\begin{aligned} dn_c(k, i)/dt = & K_m n_b(k, i) - K_c(k) n_c(k, i) - \sum \lambda_j f_j n_c(k, i) \\ & + \sum K_c(l) n_b(l, i) + \sum \sum \lambda_j f_j n_c(l, i) \\ & + W(i) + S(k, i) \end{aligned} \quad (3.10-2)$$

である。ここで、

- K_m : 気泡・冷却材間質量移行係数
- K_c : 他の化学種への変換係数
- λ_j : 化学種 k に含まれる崩壊核種 j の崩壊定数

f_j : 化学種 k に含まれる崩壊核種 j の割合

S : ソースターム

$W(i)$: セル i での流れによる変化率

である。ここで考慮する崩壊核種のチェーンをTable 3-3 に示す。各メッシュ、各相でのFP核種のモル数は、

$$\begin{aligned} n_{b,j} &= \sum f_j n_b(k, i) \\ n_{c,j} &= \sum f_j n_c(k, i) \end{aligned} \quad (3.10-3)$$

で与える。

4. 数値解法

本改造コードの時間積分、空間積分法としては、以下の方法を用いている。

(1) 冷却材中の濃度変化に関わる方程式

- ・時間積分 - 1次オイラー法
- ・空間積分 - 1次風上差分法

(2) 冷却材中のエネルギー方程式

- ・(1) と同

(3) 気泡挙動に関わる方程式

- ・時間積分 - ルンゲクッタ法

(4) その他の方程式

- ・時間積分 - 1次オイラー法

5. 解析コードの構造

5.1 コードの基本フロー

Fig. 5-1に解析コードの流れを図示した。本解析コードは主として以下のモジュールを有している。

- (1) 燃料ピン温度挙動モジュール (FUTEMP)
- (2) 燃料からのFP放出モジュール (FPREL)
- (3) 気泡の動的挙動モジュール (MOBUB)
- (4) 気泡・冷却材間熱伝達モジュール (ETRAN)
- (5) 気泡内ガス成分の化学種変化モジュール (CHEMGS)
- (6) FP崩壊モジュール (FCCHAIN)
- (7) 気液間(気泡・冷却材間)拡散モジュール (MTRAN)
- (8) 気泡内エアロゾル挙動モジュール (AEBUB)
- (9) 冷却材・カバーガス間移行、壁面沈着モジュール (WTRAN)
- (10) カバーガス内挙動モジュール (MCOVER)

これらは、それぞれ空間メッシュに対応してDOループ構造を持ち、入力データで指定されるオプションに応じて解析可能な構造となっている。

5.2 入出力ファイル

改造コードの入出力ファイルは以下の通りである。

- a. FC05 入力ファイル
- b. FC06 プリント出力ファイル
- c. FC11 リスタートファイル
- d. FC12 リスタートファイル
- e. FC15～ プロットデータ出力ファイル

6. 例題計算

本解析では、M o 1 7 C / 6 試験で測定された膨張タンク内の全 γ 線の時間変化と核種別の液中濃度変化に着目することにより、開発された T R A C E R コードの機能検証を実施し、本コードの燃料から放出された F P の 1 次冷却系内挙動解析への適用性を確認した。

6.1 解析対象

(1) M o 1 7 C / 6 試験の概要

本解析の対象とした M o 1 7 C / 6 試験の概要を以下に示す。

試験は1988年 6月20日朝から 6月22日午後 3時にかけてベルギー B R 2 炉で行われた。試験に使用された燃料は K N K II (L M F B R) で 4 年間照射した後に 6 年間冷却した燃料 (平均燃焼度 82 GWD / t) である。本燃料の仕様を Table 6-1 に示す。試験はこの燃料 30 ピンを B R 2 に挿入し、2 日間照射した後、燃料中央の閉塞物 (U O ₂ 濃縮ウラン) により、燃料溶融を起こさせ、燃料中の F P を試験ループ (M o 1 7 C / 6 : Fig. 6-1 参照) 内冷却材に放出させた。試験ループは下部にテストセクションを持ち、1 次冷却材であるナトリウムをループ中央の電磁ポンプで循環させ、ループ上部の熱交換器で 2 次冷却材であるヘリウムによって冷却される。ナトリウム中に放出された F P の γ 線は、冷却材ループ上部にある膨張タンクに設置された G e 半導体 γ 線検出器によって測定された。 γ 線検出器は、膨張タンク内部の F P のみを検出できるように鉛でシールドされたコリメータと接続されている。

試験では、閉塞物への冷却材バルブを閉塞した後に燃料溶融に至り、数本のピンが損傷した。閉塞後 44sec でスクラムにより炉停止した後、ループは冷却運転を行い、計測は局所閉塞事象後 2 日間続けられた。本試験では、燃料ピン破損後数 10 種類の F P が検出され、数種類の核種については長期間 (数時間) にわたり γ 線が検出された

(2) 解析対象とすべき測定データ

膨張タンクに設置された G e 半導体 γ 線検出器によって測定された γ 線計数率の時間変化を Fig. 6-2 に示す。本データは試験ループ 1 次系内での F P 輸送の時間的变化を示すデータであり、ある時間周期での特徴的な計数率ピークを示している。これは、膨張タンク内に γ 線放出核種が周期的に流入していることを示唆している。Fig. 6-3、および Fig. 6-4 に上記 γ 線検出器で測定された K r、C s、R b、および I 核種の膨張タンク内液中濃度の値を示す。これらの値は核種に制限はあるものの γ 線放出核種数の絶対値を示すものである。

本解析では、上記の γ 線計数率時間変化（相対値）と、 γ 線放出核種液中濃度（絶対値）を再現することを試みる。また、この試みの過程で想定される各種の解析パラメータを評価することによって、F Pのナトリウムからカバーガスへの移行挙動について考察することとする。

(3)解析手順

本解析では、改造コードの機能と評価可能な測定データから以下のような手順で考察を進めることとした。

- a. 実験上不確かなパラメータを摘出し、これらのパラメータを系統的に設定して γ 線計数率時間変化（相対値）をできる限り再現するよう解析を進める。
- b. 実験上不確かなパラメータを変動させ、液中／気泡中放射能濃度の解析値のパターンの変化と実験で得られた γ 線計数率時間変化のパターンの類似性について検討する。
- c. 任意の時間で得られた γ 線放出核種液中濃度（絶対値）のうち、実験開始後80秒の値に同時刻での解析値を規格化して、実験での液中への実効放出割合について議論する
- d. 設定すべき主要なパラメータは以下の通りである。

(a)実験上不確かなパラメータ

- ・燃料ピンプレナムギャップからのF P放出に係わるもの（F Pインベントリ、ギャップ幅、燃料破損位置等）
- ・各燃料ピンの破損時刻、燃料温度履歴
- ・冷却材フローパターン

(b)解析コードの機能、あるいは解析体系に起因する設定パラメータ

- ・気泡／ナトリウム間物質移行係数
- ・カバーガス接触液面で上向きの流速ベクトルを持つ気泡群のカバーガスへの移行割合

6.2 解析条件

(1)解析体系

Fig. 6-5に本解析用に設定した冷却材チャンネルに対する解析体系を示す。図中の番号は、解析で用いたメッシュ番号であり、メッシュ番号1が破損燃料部（F P放出部）、番号6、7は膨張タンク部を示している。冷却材は中央のチャンネル（番号1、2、3、4、5）より上昇し、周辺チャンネルより下降する。これらの解析体系に関するデ

ータをTable 6-2 ～ 6-6に示す。冷却材のメッシュ数、各メッシュ間の連結流路数は、それぞれ 16、17 とした。

本解析コードでは、冷却材の流動挙動をフローネットワークモデルで扱うこととしているが、本解析では各点の流速分布、時間変化を入力データにより設定した。また、試験時の閉塞箇所周辺の流速状況についての情報が明かでないことから、閉塞物による局所的流速変動は考慮しないこととする。

(2)直接放出F P放出時定数

Table 6-7 に燃料が過熱された場合に放出されるF P核種の放出時定数を示す。これらは燃料ピンからの直接放出モードに基づく解析に使用された。ギャップからの放出については、ガス放出速度に比例するモデルを使用した。

(3)F P初期インベントリ

Table 6-8 にF Pのインベントリを示す。本解析では、これらの核種の崩壊を考慮したインベントリの時間変化に着目する。

(4)各部挙動と基準パラメータの選定

Mo17C/6試験の予備解析によれば、F Pの冷却材への移行挙動を支配する因子として、

- a. 気泡挙動、
- b. 気泡内拡散移行挙動

の評価上の不確かさを小さくすることが重要と指摘されている。例題計算の基準解析でのパラメータとその設定の際の考え方を以下に記述する。

a. 気泡放出・生成過程

気泡放出・生成過程については、燃料からギャップ中へ放出されたガス量、および燃料からの直接放出ガス量の両方を評価対象とした。即ち、短期間のギャップ放出、および燃料温度に依存した原子状放出を同時に評価した。燃料破損初期においてはギャップ放出、後期においては原子状放出が支配的となる。

ギャップ中の希ガス等F P包含率は解析ケース依存とする。

b. 気泡径の扱い

Mo17C/6試験においては、閉塞物の存在等により燃料集合体の出口近傍での初期気泡形状の同定が困難と考えられる。本解析では、暫定的に気泡放出継続時間幅

を入力して放出気泡の大きさを指定する。本解析では、基準ケースで $\sim 1 \times 10^{-2} \text{m}$ （予備解析では $6 \times 10^{-4} \text{m}$ と報告されている）と設定している。また、放出位置は燃料ピンバンドル部中央領域と仮定した。

c. 気泡挙動

本コードでは、気泡の運動を付加質量を加味した運動方程式と、レーリー方程式を組み合わせ、移動/径変化を解いている。例題計算の予備的検討での傾向として、気泡径は放出時に対して水頭の変化に応じて膨張・収縮し、初期の球形から楕円体状に変形しているが、冷却材を移動する間に分裂は生じていない。なお、解析コードはドラッグ係数として気泡の形状依存の関数、およびRe数の関数を選択できるが、本解析では後者を使用した。例題計算の予備的検討における傾向から、冷却材中の気泡

の循環周期が8～10秒であるが、Mo17C/6試験の γ 線の時間変化が気泡内FPによるものであれば、カバーガスに離脱しにくい非常に小径の気泡が冷却材中に充満している可能性もある。

d. カバーガスへの移行係数

冷却材領域からカバーガス領域へのFPの移行形態としては、液相からの直接移行と気泡からの移行の2通りがある。本解析では、前者については平衡モデルにより、後者については表面に到達し、液面から上向きの流速ベクトルを有する気泡のある割合(α_1)がカバーガスへ抜けていくことを仮定することにより、カバーガスへの移行挙動を評価した。

e. 気液間のFP拡散

本解析では、報告書に記載した式から、

$$k_g = 2 D_g / d_e$$

k_g : 物質移行係数 (m/s)

D_g : ガス相拡散係数 (m²/s)

d_e : 気泡等価直径 (m)

を選択し、パラメータサーベイとして、

$$k_g' = \alpha_2 k_g$$

の式により、 α_2 を変化させることとする。

f. その他

解析時間としては、燃料過熱時間に即して 80 sec とした。

6.3 検討結果

本解析では、

- a. 燃料から放出される希ガス、F P の放出率
- b. 冷却材中での生成気泡の成長挙動
- c. 冷却材中での気泡の輸送挙動
- d. 気泡・冷却材間の F P 物質移行

を解くことにより、各冷却材領域における液中放射能濃度変化、特に膨張タンク領域におけるこれらの物理量が得られた。ここでは、前節で述べた解析方針／条件に基づき基準ケースを設定して解析評価を行い、次に解析パラメータを変化させた解析を行い、その結果より、Mo17C/6 試験結果の考察と本コードの妥当性の検討を行った。

(1) 基準ケース評価

基準ケースの解析条件を以下に列挙する。

- a. 燃料ピンの温度履歴 : Fig. 6-6参照
- b. 燃料内の F P インベントリ : 全燃料の100%
(Table 6-8 参照)
- c. 初期キャリアガス : 初期 60 気圧のギャップからの放出過程を評価。ただし、初期ギャップ中に γ 線放出核種なし。
- d. ギャップ幅 : 50 μ m
- e. 燃料から気泡中への F P 放出割合 : I 100%
R b 100%
C s 100%
- f. 液相からの F P カバーガス移行率 : 平衡過程による移行を考慮
- g. 気泡のカバーガス移行率 (α_1) : 0.75
- h. 気泡／液相間物質移行係数の倍率 (α_2) : 1.00

Fig. 6-7に基準ケース (case 1) におけるプレナム中のガス圧力の時間変化、Fig. 6-8に入力した温度履歴を示す。Fig. 6-9、およびFig. 6-10 にKr90、Xe135 の燃料からの放出率、残留量の時間変化を示す。Fig. 6-9に見られる30sec. 付近の鋭い放出率のピークが特徴的である。同様に、Fig. 6-11、Fig. 6-12 による素の放出率、残留量の時間変化、およびFig. 6-13、Fig. 6-14 にRb89、Rb90、Cs138 に放出率、残留量の時間変化を示す。

Fig. 6-15 には膨張タンクにおける (以下の説明では略す) 冷却材中気泡内の希ガスの放射能濃度の時間変化を示す。ほぼ燃料からの放出率変化に従うが、膨張タンク部カバーガスへの移行率が高いため放出後2巡目以降 (50sec. 以降) はほとんど観測されていない。

Fig. 6-16、Fig. 6-17 にはよう素の冷却材中、および冷却材+気泡中濃度の時間変化を示す。試験開始後26sec. より濃度は増加し、43sec. 後で緩やかなピークを経た後に、液相からカバーガスへの移行率が低いためほぼ一定の濃度で推移している。両図の差がほとんど見られないことから、基準ケースにおける膨張タンク部での挙動の特徴は、

- (a) 気泡内に含まれるよう素は、早期に冷却材中へ移行する。
- (b) 気泡内に残留するよう素があると仮定しても、カバーガスへほとんど移行するために長期的な変動は小さい。

ことと考えられる。これは、Fig. 6-18、Fig. 6-19 のRb/Csの挙動についても同様の傾向が見られる。

Fig. 6-20、Fig. 6-21、およびFig. 6-22 に全FPの冷却材中、気泡中、および冷却材+気泡中での濃度をそれぞれ示す。Fig. 6-21 の気泡中全FP濃度の時間変化から明かなように気泡中のFPは80sec. までに冷却材中、あるいはカバーガス中に移行するという結果が得られた。

(2)パラメータ解析評価

基準ケースの解析により、本コードの特性が見られたが、Fig. 6-2に示された試験結果との比較においてはいまだ満足すべき特性が得られていないと考えられる。このため、前述した解析方針に沿ってパラメータ解析を実施した。

Table 6-9 に基準ケース (case 1) に対して各ケースのパラメータを示す。

a. ケース2

本ケースは基準ケースでの気泡/液相間物質移行係数の倍率： α_2 を1.00から0.01に変更して、気泡中のFPの冷却材中、あるいはカバーガス中に移行する割合を把握するための解析ケースである。

Fig. 6-23、およびFig. 6-24に冷却材中および気泡中のような素の濃度変化を示す。基準ケースに比べ、冷却材中でのような素濃度の値は2/3に減少している。

また、Fig. 6-25、Fig. 6-26のRb/Csの濃度時間変化にも同様の傾向がみられる。冷却材+気泡でのような素、およびRb/Csの濃度時間変化をFig. 6-27、Fig. 6-28に示す。

全FPの冷却材中、気泡中、および冷却材+気泡中での濃度変化についてはFig. 6-29、Fig. 6-30、Fig. 6-31に示す。基準ケースと比較して、

- (a) 40数sec.後の2巡目に現れるピークの絶対値が小さいこと、
- (b) 過渡時後半の濃度が2/3に減少していること

が特徴である。これらより、気泡/液相間物質移行係数が1/100になると、気泡中に留まるFPが増加し、この気泡が液面へ到達し、FPがカバーガスへ移行することにより冷却材+気泡中の濃度は低下すると判断される。

b. ケース3

本ケースは基準ケースの条件に対して、

- (a) ギャップ中に放射性希ガスを全量の50%を想定し、
- (b) ギャップ幅を50 μ mから5 μ mに減少させ、初期のギャップ放出速度を緩和することによる影響を把握するために実施された。

Fig. 6-32にプレナムガス圧力の時間変化、およびFig. 6-33にこの場合の放射性希ガスの放出率を示す。初期がギャップ放出、30sec.以降が直接放出に起因するピークである。Fig. 6-34にKr/Xeの残留量時間変化を示す。

Fig. 6-35に気泡中のKr/Xeの濃度変化を示す。同図の第1ピークと第2ピークの時間差より、気泡の循環周期が8~9sec.であることが判る。第2ピークはその時刻での放出による量に、第1ピークに相当する時刻での放出量のうち一巡目でカバーガスへ移行できないものの寄与が加えられたため生じたものと判断される。同様の現象は後半の直接放出過程でも生じており、30数sec.および40数sec.に周期的なピークが発生している。

Fig. 6-36、Fig. 6-37に冷却材中でのような素、Rb/Csの濃度時間変化を示す。気泡中濃度のような鋭いピークは見られないものの周期的な振る舞いが観察される。絶対値は基準ケースに対して10%程度低下している。

Fig. 6-38、Fig. 6-39、およびFig. 6-40に全FPの冷却材中、気泡中、および冷却材+気泡中での濃度変化を示す。基準ケースに比べ、

- (a) ギャップ放出の寄与が初期に現れること、
- (b) 濃度の絶対値がピークで20%、後半で10%低下すること

が特徴である。

c. ケース 4

本ケースは、ケース 3 に対して気泡／液相間物質移行係数の倍率： α_2 を 1.00 から 0.01 に変更して、気泡中の F P の冷却材中、あるいはカバーガス中に移行する割合を把握するための解析ケースである。

Fig. 6-41、および Fig. 6-42 による素の冷却材中、および冷却材＋気泡中での濃度変化を、Fig. 6-43、および Fig. 6-44 に Rb/Cs の冷却材中、および冷却材＋気泡中での濃度変化を示す。本ケースはケース 2 に対して希ガスの放出パターンのみが変化しているだけで、希ガス以外の核種の濃度変化はケース 2 とほぼ同様となると考えられる。

Fig. 6-45、および Fig. 6-46 に全 F P の冷却材中、および冷却材＋気泡中での濃度変化を示す。33sec. および 42sec. 付近の明瞭なピークが特徴的であるが、実験結果で観察されるこの時刻以降の小ピークを説明することができなかった。

d. ケース 5

本ケースは、ケース 4 に対して気泡のカバーガス移行率 α_1 を 0.75 から 0.25 に減少させて、気泡中に保持される F P 量を大きくした効果を把握するための解析ケースである。

Fig. 6-47 に気泡中の希ガス濃度の時間変化を示す。本ケースの設定条件では気泡中から冷却材への移行速度が小さく、気泡中に保持された F P がカバーガスに移行しにくい条件となっている。このため、気泡の循環の効果が明瞭に現れることが予想され、実際、同図中の過渡変化ではかなりの強度を有する濃度のピークが過渡時後半まで継続している。Fig. 6-48、Fig. 6-49 にはよう素と Rb/Cs の濃度変化を示した。

これらを合わせた全 F P の冷却材中、気泡中、および冷却材＋気泡中での濃度変化を Fig. 6-50、Fig. 6-51、Fig. 6-52 に示す。Fig. 6-52 はこれまでのケースにおいて、最も実験での過渡変化に近い傾向を示している。

e. ケース 6

本ケースは、ケース 4 に対して気泡／液相間物質移行係数の倍率： α_2 を 0.01 から 0.0001 に変更して、気泡／液相間物質移行を更に小さく設定した場合の解析ケースである。

Fig. 6-53、Fig. 6-54、および Fig. 6-55 に全 F P の冷却材中、気泡中、および冷却材＋気泡中での濃度変化を示す。これまでのケースに比べ、冷却材中に移行して、

その後輸送されるF P量は極めて小さいことが判る。参考のために、Kr/Xe、よう素、Rb/Csの濃度変化をFig. 6-56、Fig. 6-57、Fig. 6-58に示す。本ケースの条件では気泡内に保持されるF Pの割合が大きく、かつカバーガスへの気泡移行率が比較的大きいため2巡目までで濃度は減衰する。

f. ケース7

これまでに実施した解析ケースですべてのF P移行パターンが再現された訳ではないが、ここでは実験での濃度過渡変化に最も近いケース5に対して80sec.後の値を絶対測定値に規格化して再評価を行うこととした。これは、冷却材に放出されるインベントリを正確には反映するためである。

各核種別に設定された放出割合は以下の通りである。

希ガス

Kr90 1.0

Xe135 0.5

よう素

I133 0.25

I134 0.333

I135 0.25

I136 1.0

I136m 1.0

揮発性核種

Rb89 0.5

Rb90 1.0

Cs138 0.333

これらの値を用いて行った解析結果のうち、全F Pの冷却材+気泡中、および気泡中の濃度時間変化をFig. 6-59、Fig. 6-60に示す。

Fig. 6-59の時間変化をFig. 6-2の試験結果と比較することにより以下の傾向が得られた。

- (a) 試験で観察される39sec.以降の周期的なピークはF Pを保持した気泡の循環によって説明することが可能である。
- (b) 試験開始後10~30sec.に生ずる緩やかなピークは、燃料ピンガスプレナム中のガス放出時の放出モードと異なる可能性がある。
- (c) 本解析で設定した燃料昇温パターンに従えば、燃料温度最高値に到達した後の最初のピークは本解析結果で示される鋭いピークを持つことが予想されるのに反

して、試験での同時刻での様子は異なっているように見える。

g. 全ケースの傾向の要約

Fig. 6-61 に膨張タンク部の冷却材および冷却材中気泡に保持された全FPの濃度変化について、ケース1～7の解析結果と同図右下に試験における相対濃度変化を示した。これらより判断される改造コードの特性、およびM o 1 7 C / 6 試験解析への適用性は以下の通りである。

- (a) いずれのケースにおいても開始後43sec. のピーク（試験の昇温パターンが解析で仮定したものに近いならばこのピークは2巡目の気泡／冷却材の流入によるものと考えられ、絶対値も過渡時最大となることが予想される）を予測しており、気泡流動モデルは妥当であると考えられる。
- (b) 当初の目的の一つであった試験開始後10～30sec. に生ずる緩やかなピークの再現については、燃料ピンガスプレナム中のガス放出を仮定してサーベイしたものの適切な特性は得られなかった。この原因として、
- ・本解析で考慮していないFPソースの存在の可能性、
 - ・多ピンから成る本試験体における燃料破損の非同時性による放出パターンの変動
- 等が考えられる。今後、濃度変化の放出パターン依存性を把握しておく必要がある。
- (c) 気泡のカバーガス移行率 (α_1) のサーベイ結果より、周期的な濃度ピークを気泡内FPの寄与と仮定すれば、気泡の循環を否定できず発生気泡に対するその割合は小さくないと考えられる。ただし、本解析で設定した冷却材流路形状は気泡のカバーガス移行挙動を扱うには不適切と考えられ、今後改善の余地がある。また、膨張タンク部FP濃度測定条件について、詳細なデータ入手が必要である。
- (d) 気泡／液相間物質移行係数 (α_2) の効果は気泡のカバーガス移行率と組み合わせて重要なものである。本解析では気相中での相互拡散係数から導出される物質移行係数を基準値として、1/100、1/10000 の場合の解析を行った。物質移行係数が小さくなれば成るほど、気泡内FPのカバーガス移行の影響が顕著となるが、試験時の温度条件等から気泡内での存在形態はエアロゾルである可能性もあり、今後、エアロゾル生成、沈着モデルによる移行挙動の検討が必要と考えられる。

7. ま と め

燃料破損時にカバーガス空間へ放出されるF Pの種類と量（炉内ソースターム）をより現実的に評価するため、その移行過程で起こる物理・化学現象を機構論的に取り扱う解析コードTRACER (Transport phenomena of Radionuclides for Accident Consequence Evaluation of Reactor) を開発し、その機能をM o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験の、結果を用いて検証した。以下にそのまとめを示す。

- (1)コードの開発にあたっては、まず開発方針の検討を既往研究および既存コードの調査によって行い、不活性ガス・揮発性ガスの気泡生成と冷却材中での振舞い、気泡とナトリウムとの間のF P移行の挙動がコードの重点開発項目であることを抽出した。
- (2)F Pガス気泡の生成と冷却材中での気泡の挙動に関して、機構論的な解析モデルの検討を行い、モデルの作成とプログラミングを実施した。
- (3)今回開発した解析コードの基本機能の確認計算、およびM o 1 7 C / 6 炉内ソースターム試験の結果を例題とした機能検証計算を実施し、実機解析のために必要と考えられる以下の検討課題を抽出できた。
 - a. 気泡内エアロゾルモデルの改良
 - b. カバーガス／冷却材界面からの気泡移行形態の検討
 - c. 冷却材温度計算モデルの改良
 - d. 冷却材の運動方程式の考慮
 - e. 燃料からのF P放出挙動と、集合体内チャンネルでの気泡挙動の詳細化
 - f. 化学反応、核壊変の一般化
 - g. 計算の安定性と高速化
- (4)今後これらの課題を解決することにより本解析コードが当該事故事象の評価に有効なツールとして活用できる見通しを得た。

8. 参考文献

- 1) 遠藤, 宮原, 石川, "Mo 17 C / 6 流路閉塞炉内試験におけるFP放出移行挙動の解析," PNC ZN9410 92-093, 1992年4月
- 2) T. Tachino et al., "An Approach to the Nuclear Aerosol Source Term Assessment in an HCDA of LMFBR," ORNL/NUREG/TM-404, Oct. 1979
- 3) M. L. Tobias, "Analysis of the Heat and Mass Transfer Process of a UO₂ Bubble in Sodium for the Fuel Aerosol Simulant Test (FAST)," ORNL/NUREG/TM-307, May 1979
- 4) A. B. Reynolds and G. Berthoud, "Analysis of EXCOBULLE Two-Phase Expansion Tests," Nucl. Eng. Design, 67, 1981
- 5) F. J. Moody, "Dynamic and Thermal Behavior of Hot Gas Bubbles Discharged into Water," Nucl. Eng. Design, 95, 1986
- 6) M. F. Kennedy and A. B. Reynolds, "Method for Calculating Vapor and Fuel Transient to the Secondary Containment in an LMFBR Accident," Nucl. Technol., 20, 1973
- 7) M. S. El-Genk and R. M. Kumar, "An Evaluation of Prompt Release of Fission Gas from a Breached Cladding," CONF811103, 1981
- 8) U. S. NRC, "Technical Basis for Estimating Fission Product Behavior during LWR Accidents," NUREG-0772, 1981
- 9) R. Clift, J.R. Grace and M.E. Weber, "Bubble, Drops, and Particles," Academic Press, 1978
- 10) P.C. Owzardski, et al., "Technical Basis and Users' Manual for SPARC -- A Suppression Pool Aerosol Removal Code," NUREG/CR-3317, May 1983
- 11) T. Demitrack and F.J. Moody, "Planetary Ellipsoid Bubble Model for Fission Product Scrubbing," Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.45, 1983

Table 2-1 Comparison of Analytical Functions and Features in Each Code (1/2)

コード 主要解析対象	MOL7C 予備解析コード	FTAC	RISE
(1) 燃料ベレット温度挙動	・温度入力	—	—
(2) 燃料から冷却材中へのFP放出	・燃料からの直接放出 (NUREG0772) ・(気泡放出モデル)	— ・初期条件で気泡組成、気泡径を入力 (個数は計算)	— ・ほぼ同左
(3) Naの1次系内流動	・ネットワークモデル	— (スタグナント)	— (スタグナント)
(4) 気泡挙動			
(a) 成分	・凝縮性ガス, 非凝縮性ガス	・Na蒸気, 非凝縮性ガス 燃料粒子	・同 左
(b) 気泡形状	・球形(多気泡)	・球形, キノコ笠状 (多気泡)	・キノコ笠状 (?)
(c) 気泡径	・相関式に小径化 (単一)	・エネルギー, 質量移行 (多気泡)	・同 左
(d) 上昇速度	・終端速度	・一次元方程式	・終端速度
(e) 分裂、合体	—	—	—
(f) 気泡・Na熱移行	—	・熱伝導・輻射・凝縮	・同 左
(g) ガス成分EOS	—	・ヒリアル気体, 理想気体	・理想気体
(h) 気液間拡散	・対象物質の自己拡散係数	・渦拡散係数考慮	—
(i) 化学変化	—	—	—
(j) 170Vの沈着	—	・燃料粒子沈着	(?)
(5) 気泡・ガス気液間FP移行モデル	・気泡到達後移行 ・拡散移行	・拡散移行なし	・同 左
(6) 壁面沈着	・有	—	—
(7) 備考			

Table 2-1 Comparison of Analytical Functions and Features in Each Code (2/2)

コード 主要解析対象	EXCUBUL	LWRコード(例)	その他
(1) 燃料ペレット温度挙動	—	—	—
(2) 燃料から冷却材中へのFP放出	—	・FPのスクレニングの効果 を評価する目的で、 ノズル出口径から計算 (径)	・初期条件で気泡 組成, 気泡径を 入力
(3) Naの1次系内 流動	— (スタグナント)	—	—
(4) 気泡挙動 (a)成分		・凝縮性ガス 非凝縮性ガス	・Na蒸気, 非凝縮性 ガス, 燃料粒子
(b)気泡形状		・球形, キノコ笠状	・球形(単気泡)
(c)気泡径		・単一	・単一
(d)上昇速度		・終端速度	・一次元方程式
(e)分裂、合体	—	・無次元数で評価 (E_o 数, We 数)	—
(f)気泡・Na熱移行		・対流熱伝達	・対流熱伝達 ・凝縮
(g)ガス成分EDS		・理想気体	・理想気体
(h)気液間拡散		・拡散係数を与える	—
(i)化学変化		(?)	—
(j)エアロゾルの沈着		・気泡形状に応じて 沈着挙動解析	・重力沈降
(5) 気-ガス気液間 FP移行		・可 能	・拡散移行なし
(6) 壁面沈着		—	—
(7) 備 考			

Table 2-2 Analytical Functions and Features of Improvement Code (1/2)

主要解析対象	解析モデル	備 考
(1) 燃料ペレット 温度挙動	<ul style="list-style-type: none"> • 温度入力 	<ul style="list-style-type: none"> • 最終的には過度解析モデル組込み
(2) 燃料から冷却材 中へのFP放出	<ul style="list-style-type: none"> • 燃料からの直接放出 (NUREG0772) • 燃料ピン東部での挙動は無視 • 放出速度を破損口径、ピンギャップインピーダンスより推定 • 集合体出口でガス放出速度から初期気泡径を推定 • 気泡組成は入力 	
(3) Naの1次系内 流動	<ul style="list-style-type: none"> • ネットワークモデル 	<ul style="list-style-type: none"> • 初年度は流速分布を入力
(4) 気泡挙動 a) 成分 b) 気泡形状 c) 気泡径 d) 上昇速度 e) 分裂, 合体 f) 気泡, 冷却材 間熱移行	<ul style="list-style-type: none"> • 凝縮性ガス, 非凝縮性ガス エアロゾル粒子 • 球形, 楕円体 (多気泡), キノコ笠状 • エネルギー, 質量移行, 水頭圧, 分裂により変動 (分布, あるいは平均径) • 終端速度 • 安定性理論により推定 • 熱伝導, 輻射, 凝縮 	<ul style="list-style-type: none"> • 気泡の成長に応じ、 変動可能とする • 1次元の可能性検討 • 合体については、 簡易式

Table 2-2 Analytical Functions and Features of Improvement Code (1/2)

主要解析対象	解析モデル	備 考
g) ガス成分EOS h) 気液間拡散 i) 化学変化 j) エアロゾルの沈着	<ul style="list-style-type: none"> • 理想気体 • 液体, ガス相移行係数 • 考慮 • 考慮 (実効係数で入力) 	<ul style="list-style-type: none"> • 化学種の検討は継続 • 最終的には、沈着、内部ガス流に伴なう沈着、拡散沈着を考慮
(5) カバーガス気液間FP移行モデル	<ul style="list-style-type: none"> • 気液到達後移行 • 拡散移行 	
(6) 壁面沈着	<ul style="list-style-type: none"> • 考慮 	

Table 3.7-1 Relationships for Sphere Drag

Author(s)	Range	Relationship for C_D	Range of deviation in C_D (%)
1. Schiller and Nauman (S1)	$Re < 800$	$\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687})$	+5 to -4
2. Lapple (L3)	$Re < 1000$	$\frac{24}{Re} (1 + 0.125 Re^{0.72})$	+5 to -8
3. Langmuir and Blodgett (L2)	$1 < Re < 100$	$\frac{24}{Re} (1 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38})$	+6 to +1
4. Allen (A5)	(a) $2 < Re < 500$ (b) $1 < Re < 1000$	$10 Re^{-1/2}$ $30 Re^{-0.623}$	-8 to -52 +70 to -15
5. Gilbert <i>et al.</i> (G7)	$0.2 < Re < 2000$	$0.48 + 28 Re^{-0.85}$	+24 to -11
6. Kurten <i>et al.</i> (K8)	$0.1 < Re < 4000$	$0.28 + \frac{6}{Re^{1/2}} + \frac{21}{Re}$	+7 to -6
7. Abraham (A2)	$Re < 6000$	$0.2924(1 + 9.06 Re^{-1/2})^2$	+9 to -6
8. Ihme <i>et al.</i> (I1)	$Re < 10^4$	$0.36 + \frac{5.48}{Re^{0.573}} + \frac{24}{Re}$	+10 to -10
9. Rumpf [see (K8)]	(a) $Re < 10$ (b) $Re < 100$ (c) $Re < 10^5$	$2 + 24/Re$ $1 + 24/Re$ $0.5 + 24/Re$	-3 to -5 +14 to -20 +30 to -39
10. Clift and Gauvin (C6)	$Re < 3 \times 10^5$	$\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687})$ $+ 0.42/(1 + 4.25 \times 10^4 Re^{-1.16})$	+6 to -4
11. Brauer (B11)	$Re < 3 \times 10^5$	$0.40 + \frac{4}{Re^{1/2}} + \frac{24}{Re}$	+20 to -18
12. Tanaka and Inoya (T1)	$Re < 7 \times 10^4$	$\log_{10} C_D = a_1 w^2 + a_2 w + a_3$ where $w = \log_{10} Re$ and $a_1, a_2,$ and a_3 are given for 7 intervals of Re	+6 to -9

Table 3.7-2 Recommended Drag Correlations: Standard Drag Curve

Range	Correlation
(A) $Re < 0.01$	$C_D = 3/16 + 24/Re$
(B) $0.01 < Re \leq 20$	$\log_{10} \left[\frac{C_D Re}{24} - 1 \right] = -0.881 + 0.821v - 0.051v^2$ <p>i.e., $C_D = \frac{24}{Re} [1 + 0.1315 Re^{(0.82 - 0.05v)}]$</p>
(C) $20 \leq Re \leq 260$	$\log_{10} \left[\frac{C_D Re}{24} - 1 \right] = -0.7133 + 0.6305v$ <p>i.e., $C_D = \frac{24}{Re} [1 + 0.1935 Re^{0.6305}]$</p>
(D) $260 \leq Re \leq 1500$	$\log_{10} C_D = 1.6435 - 1.1242v + 0.15581v^2$
(E) $1.5 \times 10^3 \leq Re \leq 1.2 \times 10^4$	$\log_{10} C_D = -2.4571 + 2.55581v - 0.92951v^2 + 0.10491v^3$
(F) $1.2 \times 10^4 < Re < 4.4 \times 10^4$	$\log_{10} C_D = -1.9181 + 0.6370v - 0.06361v^2$
(G) $4.4 \times 10^4 < Re \leq 3.38 \times 10^5$	$\log_{10} C_D = -4.3390 + 1.5809v - 0.15461v^2$
(H) $3.38 \times 10^5 < Re \leq 4 \times 10^5$	$C_D = 29.78 - 5.31v$
(I) $4 \times 10^5 < Re \leq 10^6$	$C_D = 0.11v - 0.49$
(J) $10^6 < Re$	$C_D = 0.19 - 8 \times 10^{-4}/Re$

* Sources of data: Achenbach (A3); Arnold (A7); Bailey and Hiatt (B1); Beard and Pruppacher (B5); Davies (D2); Dennis and Walker (D3); Goin and Lawrence (G9); Goldberg and Florsheim (G10); Gunn and Kinzer (G14); Hoerner (H14); Ihme *et al.* (I1); LeClair (L5); Liebster (L12); Masliyah (M2); Maxworthy (M7, M8); Millikan and Klein (M10); Möller (M11); Pettyjohn and Christiansen (P4); Pruppacher and Steinberger (P8); Rafique (R1); Rimon and Cheng (R8); Roos and Willmarth (R10); Schmiedel (S2); Shakespear (S9); Vlaisnac and Covert (V3); Wieselsberger (W4); Woo (W9).

^b Number of data points: C—149; D—74; E—61; F—52; G—142.

Table 3.7-3 Absorption Coefficients

	PLANETARY ELLIPSOID	SPHERICAL
INERTIAL	$\frac{3 U \tau}{2 b^2} \frac{\left\{ \left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right\} + \left\{ \left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right\}^{3/2} \left\{ \left(\frac{a}{b} \right)^2 - 2 \right\} \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1}}{\left\{ \sqrt{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1} - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \left(\tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1} \right)^2 \right\}}$	$\frac{9}{2} \frac{U \tau}{R^2}$
SEDIMENTATION	$\frac{3}{4} \frac{g \tau}{b U}$	$\frac{3}{4} \frac{g \tau}{R U}$
BROWNIAN DIFFUSION	$6 \sqrt{\frac{D}{U a^2 b \pi}} \frac{\left\{ \left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right\} \sqrt{\frac{1.76 \left(\frac{a}{b} \right)^2}{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1} - \sqrt{2}}}{\left[1 + \sqrt{4 + 2 \left\{ \left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right\}} \right] \frac{\left(\frac{a}{b} \right)^2 \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1}}{\sqrt{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1}}}$	$1.8 \sqrt{\frac{D}{U R^3}}$

U - Bubble velocity

τ - Stokes' characteristic time

g - Acceleration due to gravity

μ_g - Gas viscosity

ρ_p - Particle density

r_p - Particle radius

C_m - Cunningham's slip factor

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{\rho_p}{\mu_g} r_p^2 C_m$$

Table 3.10-1 Decay Chains included in TRACER (1/3)

質量数	元素	崩壊連鎖
85	Kr	[As(2s)→se(31s)→] Br(2.9m)→Kr(11y) →Rb(安定)
86	Rb	Rb(19d)→Sr(安定)
89	Sr	[Se(0.4s)→Br(4.4s)→] Kr(3.2m) →Rb(15m)→Sr(50d)→Y(安定)
90	Sr Y	[Br(1.9s)→Kr(32s)→] Rb(153s) →Sr(29y)→Y(64h)→Zr(安定)
91	Sr Y	[Se(0.3s)→Br(0.5s)→Kr(8.6s)] →Rb(58s)→Sr(9.5h)→Y(59d)→Zr(安定)
93	Y	[Kr(1.3s)→Rb(5.9s)→] Sr(7.4m) →Y(10.2h)→Zr(15x10 ⁶ y)→Nb(安定)
95	Zr Nb ^m Nb	[Kr(0.8s)→Rb(0.4s)→] Sr(24s) →Y(10.3m)→Zr(64d)→Nb(35d)→Mo(安定) ^m Nb(87h)
97	Zr	[Rb(0.2s)→Sr(0.4s)→Y(3.7s)→] Zr(17h)→Nb(12m)→Mo(安定)
99	Mo ^m Tc	[Sr(0.6s)→Y(1.4s)→Zr(2.1s)→Nb(15s)] →Mo(66h)→Tc(2.1x10 ⁵ y)→Ru(安定) ^m Tc(6h)
103	Ru	[Nb(1.5s)→] Mo(60s)→Tc(50s)→ Ru(39d)→Rh(安定)
105	Ru Rh	[Nb(1.8s)→Mo(36s)→] Tc(7.6m) →Ru(4.4h)→Rh(35h)→Pd(安定)
106	Ru	[Nb(1s)→Mo(9.5s)→Tc(36s)] →Ru(367d)→Rh(30s)→Pd(安定)
125	Sb ^m Te	[In(2.3s)→] Sn(9.7d)→Sb(2.7y)→Te(安定) ^m Te(58d)

Table 3.10-1 Decay Chains included in TRACER (2/3)

質量数	元素	崩壊連鎖
127	Sb Te ^m Te	[In(4s)→] Sn(2h)→Sb(4d)→Te(9.4h)→I(安定) ^m Te(109d)
129	^m Te	[In(2.5s)→] Sn(2.2m)→Sb(4.4h)→Te(69m) ^m Te(34d) →I(1.6x10 ⁷ y)→Xe(安定)
131	^m Te I ^m Xe	[In(0.3s)→] Sn(63s)→Sb(23m)→Te(25m) ^m Xe(12d) ^m Te(30h) →I(8d)→Xe(安定)
132	Te I	[In(0.1s)→Sn(40s)→] Sb(2.8m)→Te(78h) →I(2.3h)→Xe(安定)
133	I Xe ^m Xe	[Sn(1.5s)→] Sb(2.7m)→Te(12.4m)→I(21h) →Xe(5.3d)→Cs(安定) ^m Xe(2.2d)
134	Cs	Xe(安定)←Cs(2.1y)→Ba(安定)
135	Xe	[Sb(1.7s)→Te(19s)→] →I(6.6h)→Xe(9.1h) →Cs(3x10 ⁶ y)→Ba(安定)
136	Cs	Cs(13d)→Ba(安定)
137	Cs	[Te(4s)→I(25s)→] Xe(3.8m)→Cs(30y)→Ba(安定)
140	Ba La	[I(0.8s)→Xe(14s)→] Cs(65s)→Ba(13d) →La(40h)→Ce(安定)
141	La Ce	[I(0.5s)→Xe(1.7s)→Cs(25s)] →Ba(18m) →La(3.9h)→Ce(33d)→Pr(安定)
143	Ce	[Cs(1.8s)→Ba(14s)] →La(14m)→Ce(33h) →Pr(14d)→Nd(安定)

Table 3.10-1 Decay Chains included in TRACER (3/3)

質量数	元素	崩壊連鎖
144	Ce	[Xe(1.25s)→Cs(1.0s)→Ba(12s)→La(40s)] →Ce(284d)→Pr(17.3m)→Nd(2×10^{15} y)
145	Pr	[Xe(0.9s)→Cs(0.6s)→Ba(5s)→La(30s)] →Ce(3m)→Pr(6h)→Nd(安定)
147	Nd Pm	[Ce(56s)→] Pr(13m)→Nd(11d)→Pm(2.6y) →Sm(1.1×10^{11} y)
148	Pm ^m Pm	^m Pm(41d) Pm(5.4d) → Sm(8×10^{15} y)
149	Pm	[Ce(5s)] Pr(2.3m)→Nd(1.7h)→Pm(53h) →Sm(安定)
151	Pm Sm	[Ce(1s)Pr(4s)→] Nd(12.4m)→Pm(28h) →Sm(90y)→En(安定)
153	Sm	Pm(5.4m)→Sm(47h)→Eu(安定)
154	Eu	Eu(8.5y)→Gd(安定)
155	Eu	Sm(22m)→Eu(4.9y)→Gd(安定)
156	Eu	Sm(9.4h)→Eu(15d)→Gd(安定)

Table 6-1 MOL7C/6 Fuel Rod Data

Fuel material	PuO ₂ -UO ₂ pellets
Pu content (Pu _{tot} /Pu _{tot} +U _{tot})	30 W%
U-235 enrichment	83 a%
Cladding material	1.4870 cw, a
Cladding diameter	6/5.24 mm
Pin length	1574,5mm(with extended end plug)
Fuel length	600 mm
Pellet diameter	5.09 mm
Fuel pellet density	86.5 % TD
Fuel column linear density	1.904 g/cm
Stoichiometry	1.955-2.00
Blanket length	2x200 mm
Blanket material	UO ₂ depleted
Lower gas plenum	477 mm
Upper gas plenum	40 mm
Mass of mixed oxide	115.5g/rod
Fissile inventory	ca.92 g/rod

Table 6-2 Calculation conditions for Coolant (1)

番号	名称	体積 (m ³)	初期温度 (℃)	高さ (m)
I1	炉心部	2.881x10 ⁻³	(TE47) 710	+ 0.085
I2	炉心出口	6.691x10 ⁻⁴	(TE42) 700	+ 0.575
I3	ハイパスとの 合流部	8.897x10 ⁻⁴	(TE43) 688	+ 1.0
I4	上昇パス下部	1.716x10 ⁻³	(TE77) 530	+ 2.2
I5	上昇パス上部	1.716x10 ⁻³	530	+ 3.1
I6	Expansion Tank 内部	2.736x10 ⁻⁴	474	+ 5.0
I7		5.250x10 ⁻³	(TE6) 393	+ 5.0
I8	熱交換器	1.653x10 ⁻³	393	+ 4.28
I9	ポンプ	6.325x10 ⁻⁴	393	+ 2.0
I10	下降パス上部	5.770x10 ⁻⁴	393	+ 1.3
I11	下降パス中部	2.303x10 ⁻³	393	+ 0.55
I12	下降パス下部	3.856x10 ⁻³	393	- 1.0
I13	炉心下部 プレナム	2.174x10 ⁻⁴	393	- 1.4
I14	炉心入口	6.692x10 ⁻⁴	393	- 1.3
I15	ハイパス	3.480x10 ⁻³	400	- 1.0
I16	ハイパス	2.222x10 ⁻³	400	+ 0.55

Table 6-3 Calculation conditions for Coolant (2)

流路	上流側メッシュ	下流側メッシュ	初期流量 (kg/s)	流路断面積 (m ²)
J1	I1	I2	1.55	1.830x10 ⁻³
J2	I2	I3	1.55	2.091x10 ⁻³
J3	I3	I4	3.1	9.770x10 ⁻⁴
J4	I4	I5	3.1	9.770x10 ⁻⁴
J5	I5	I6	3.1	9.770x10 ⁻⁴
J6	I6	I7	3.1	3.167x10 ⁻²
J7	I7	I8	3.1	1.0x10 ⁻²
J8	I8	I9	3.1	1.0x10 ⁻²
J9	I9	I10	3.1	3.574x10 ⁻⁴
J10	I10	I11	3.1	3.574x10 ⁻⁴
J11	I11	I12	3.1	3.574x10 ⁻⁴
J12	I12	I13	3.1	3.574x10 ⁻⁴
J13	I13	I14	1.55	2.091x10 ⁻³
J14	I14	I1	1.55	1.830x10 ⁻³
J15	I13	I15	1.55	6.377x10 ⁻⁴
J16	I15	I16	1.55	6.377x10 ⁻⁴
J17	I16	I3	1.55	6.377x10 ⁻⁴

Table 6-4 Calculation conditions for Wall

番号	名称	面積(m ²)	高さ(m)	接触する 冷却材番号	初期温度(℃)
W1	炉心部	2.552x10 ⁻¹	± 0	I1	710
W2	炉心出口	5.187x10 ⁻²	+ 0.575	I2	700
W3	ハ [*] イ [*] ス合流部	6.898x10 ⁻²	+ 1.0	I3	688
W4	上昇ハ [*] ス下部	3.862x10 ⁻²	+ 2.2	I4	530
W5		9.930x10 ⁻²	+ 2.2	I4	530
W6	上昇ハ [*] ス上部	3.862x10 ⁻²	+ 3.1	I5	530
W7		9.930x10 ⁻²	+ 3.1	I5	530
W8	Expansion Tank 内部	6.158x10 ⁻³	+ 5.0	I6	474
W9		1.390x10 ⁻¹	+ 5.0	I7	474
W10	熱交換器	2.407x10 ⁻¹	+ 4.28	I8	393
W11		5.281x10 ⁻¹	+ 4.28	I8	393
W12	ポンプ	2.002x10 ⁻¹	+ 2.0	I9	393
W13		1.613x10 ⁻¹	+ 2.0	I9	393
W14	下降ハ [*] ス上部	5.655x10 ⁻²	+ 1.3	I10	393
W15		4.072x10 ⁻²	+ 1.3	I10	393
W16	下降ハ [*] ス中部	2.559x10 ⁻¹	+ 0.55	I11	393
W17		2.047x10 ⁻¹	+ 0.55	I11	393
W18	下降ハ [*] ス下部	4.285x10 ⁻¹	- 1.0	I12	393
W19		3.428x10 ⁻¹	- 1.0	I12	393
W20	炉心下部 フ [*] レ [*] ム	2.776x10 ⁻²	- 1.4	I13	393
W21	炉心入口	5.187x10 ⁻²	- 1.3	I14	393
W22	ハ [*] イ [*] ス下部	2.314x10 ⁻¹	- 1.0	I15	400
W23		3.385x10 ⁻¹	- 1.0	I15	400
W24	ハ [*] イ [*] ス上部	1.382x10 ⁻¹	+ 0.55	I16	400
W25		2.021x10 ⁻¹	+ 0.55	I16	400

Table 6-5 Cover Gas Data

名 称	体 積 (m^3)	初期温度 ($^{\circ}C$)
カバーガス	2.0×10^{-3}	473

Table 6-6 Coolant Surface Data

名 称	冷却材との接触面積 (m^2)	カバーガスとの接触面積 (m^2)	初期温度 ($^{\circ}C$)
液 面	1.790×10^{-2}	1.790×10^{-2}	474

Table 6-7 Release Constants for Each Element

$K = A \cdot \exp(B \cdot T)$ [fraction /min]

	T < 2200.		T < 2200.	
	Coef. A	Coef. B	Coef. A	Coef. B
1	1.00000e-14	7.68000e-03	1.00000e-14	7.68000e-03
2	4.60000e-14	7.68000e-03	4.60000e-14	7.68000e-03
3	3.20000e-11	5.76000e-03	3.20000e-11	5.76000e-03
4	1.36000e-11	7.68000e-03	8.48000e-07	2.62000e-03
5	8.30000e-10	6.22000e-03	1.44000e-05	1.73000e-03
6	7.28000e-10	6.77000e-03	6.40000e-07	3.77000e-03
7	1.00000e-08	6.67000e-03	1.55000e-04	3.03000e-03
8	2.96000e-08	6.77000e-03	1.17000e-05	4.04000e-03
9	1.65000e-07	6.67000e-03	1.89000e-05	4.51000e-03

1 : UO₂, 2 : Sn, 3 : Fe, 4 : Ru, Tc, Mo,
 5 : Zr, Y, Nb, 6 : Ba, Sr 7 : Sb, 8 : Te, Ag,
 9 : Cs, I, Xe, Kr, Rb

Table 6-8 FP Inventory in MOL7C/6 Fuel Pins

KATEGORY	核種	崩壊定数 (SEC^{-1})	半減期	燃料インベントリ (mol)
NOBLE	90 Kr	2.15E-2	32.3S	4.44E-8
GASES	136 I	1.20E-2	84.3S	6.87E-8
移行係数 (90%)	133 I	9.21E-6	20.9h	1.09E-4
	134 I	2.20E-4	52.6m	1.12E-5
	135 I	2.91E-5	6.61h	4.45E-5
	135Xe	2.12E-5	9.09h	1.34E-4
VOLATILES (81%)	89Rb	7.60E-4	15.2m	1.65E-6
	90Rb	4.53E-3	2.55m	2.12E-7
	138Cs	3.59E-4	32.2m	6.55E-6
(90%)	136m I	1.20E-2	84.3S	3.78E-8

Table 6-9 Calculation Condition Summary

ケース No.	ギャップ インベントリ	カバーガス 移行率 (α_1) ¹⁾	気泡 / Na間 移行係数割合 (α_2) ²⁾
1	考慮せず	0.75	1.0
2	考慮せず	0.75	0.01
3	希ガス 50%	0.75	1.0
4	希ガス 50%	0.75	0.01
5	希ガス 50%	0.25	0.01
6	希ガス 50%	0.75	0.0001
7	希ガス 50%	0.25	0.01

1) : 表面到達時に鉛直上向きの速度ベクトルを有する気泡のうち、カバーガスへ移行する割合

2) : 気液間移行係数を $k_s = \alpha_2 k_{s0}$ (k_{s0} は気相部の拡散係数から決まる移行係数) で表現する。

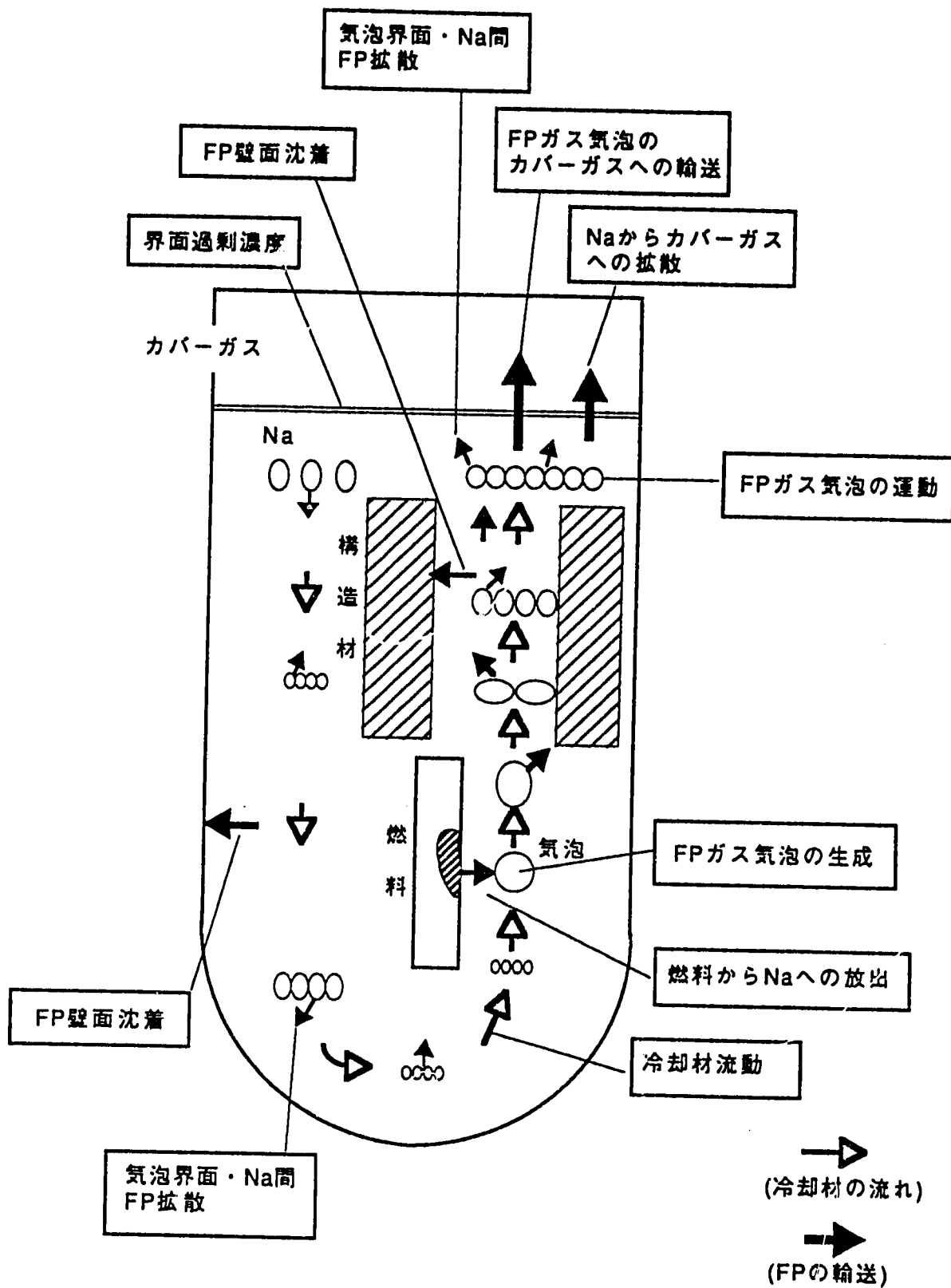
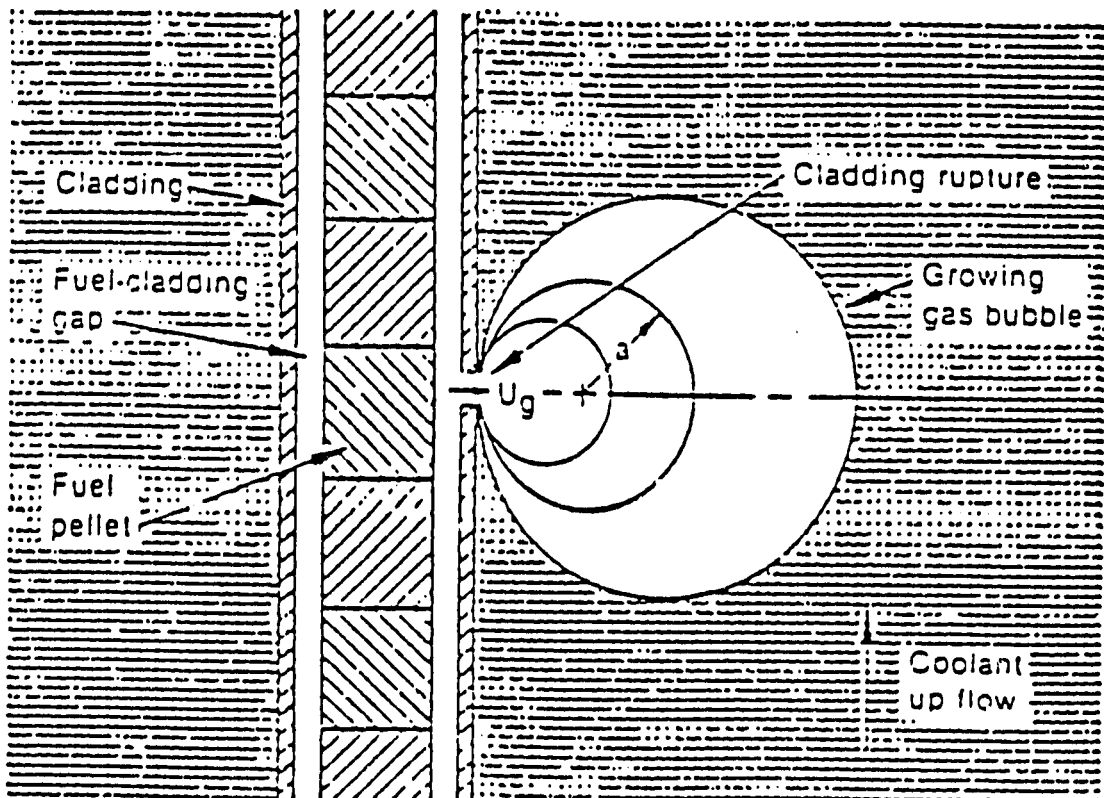
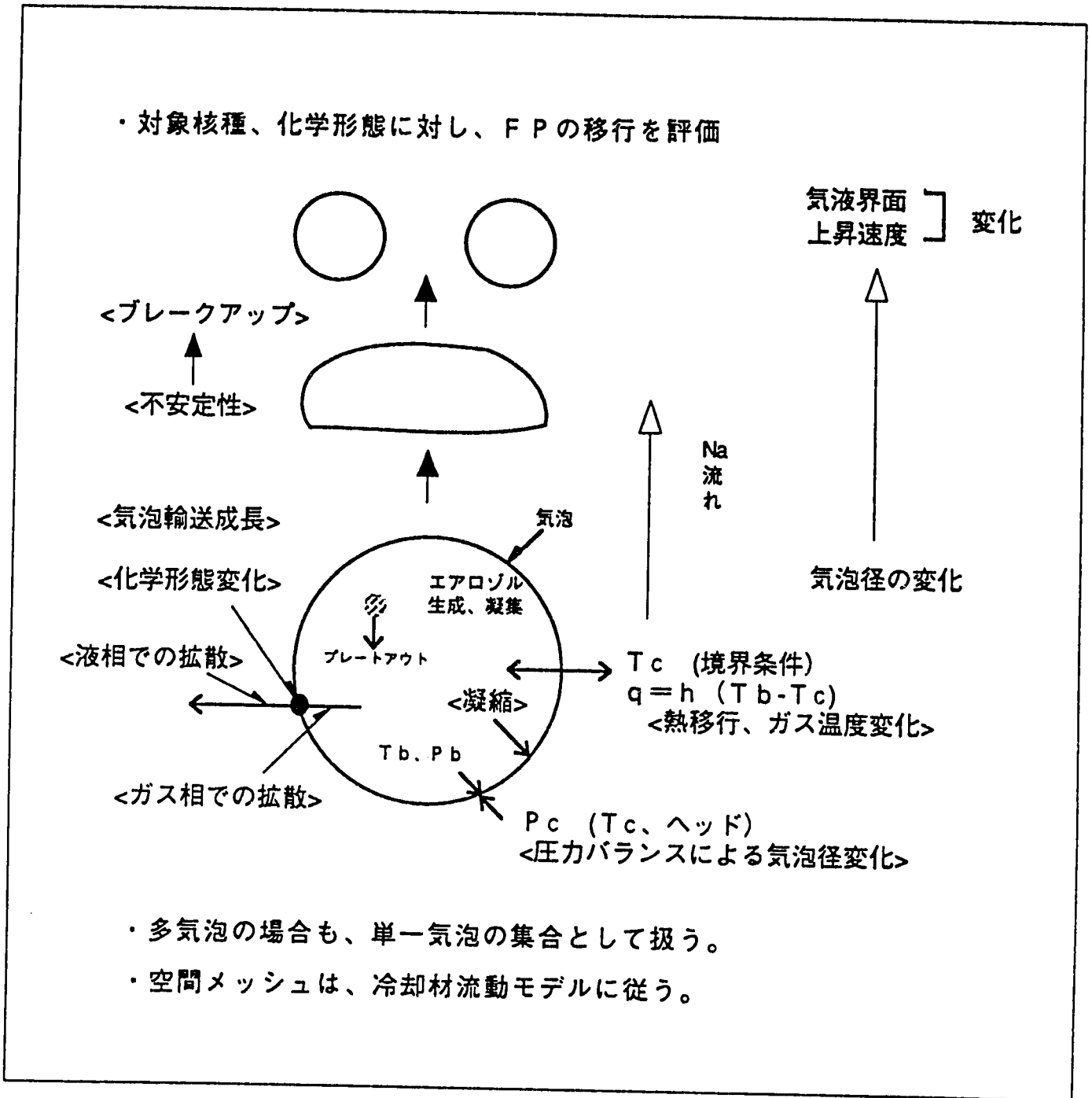


Fig. 2-1 Dominant Phenomena in Mol7C/6 Source Term Experiment



INELJ-1528

Fig. 2-2 Schematic Illustration for Growth of Bubble Released from Failed Fuel



- ・多気泡の場合も、単一気泡の集合として扱う。
- ・空間メッシュは、冷却材流動モデルに従う。

Fig. 2-3 Schematic Illustration of Analytical Model for FP Gas Bubble Behavior

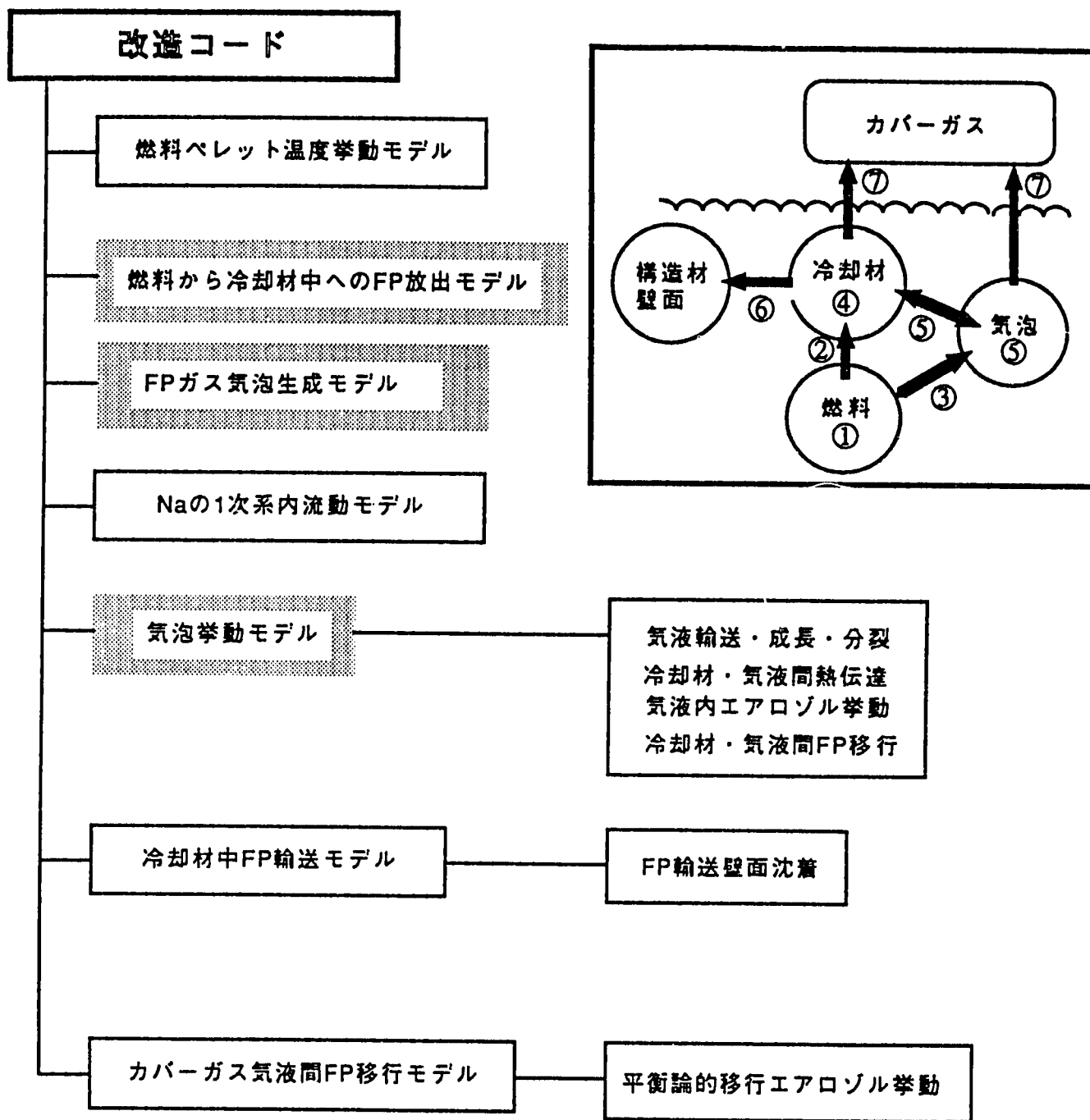


Fig. 3.1-1 Structure of New Code and Main Analytical Models

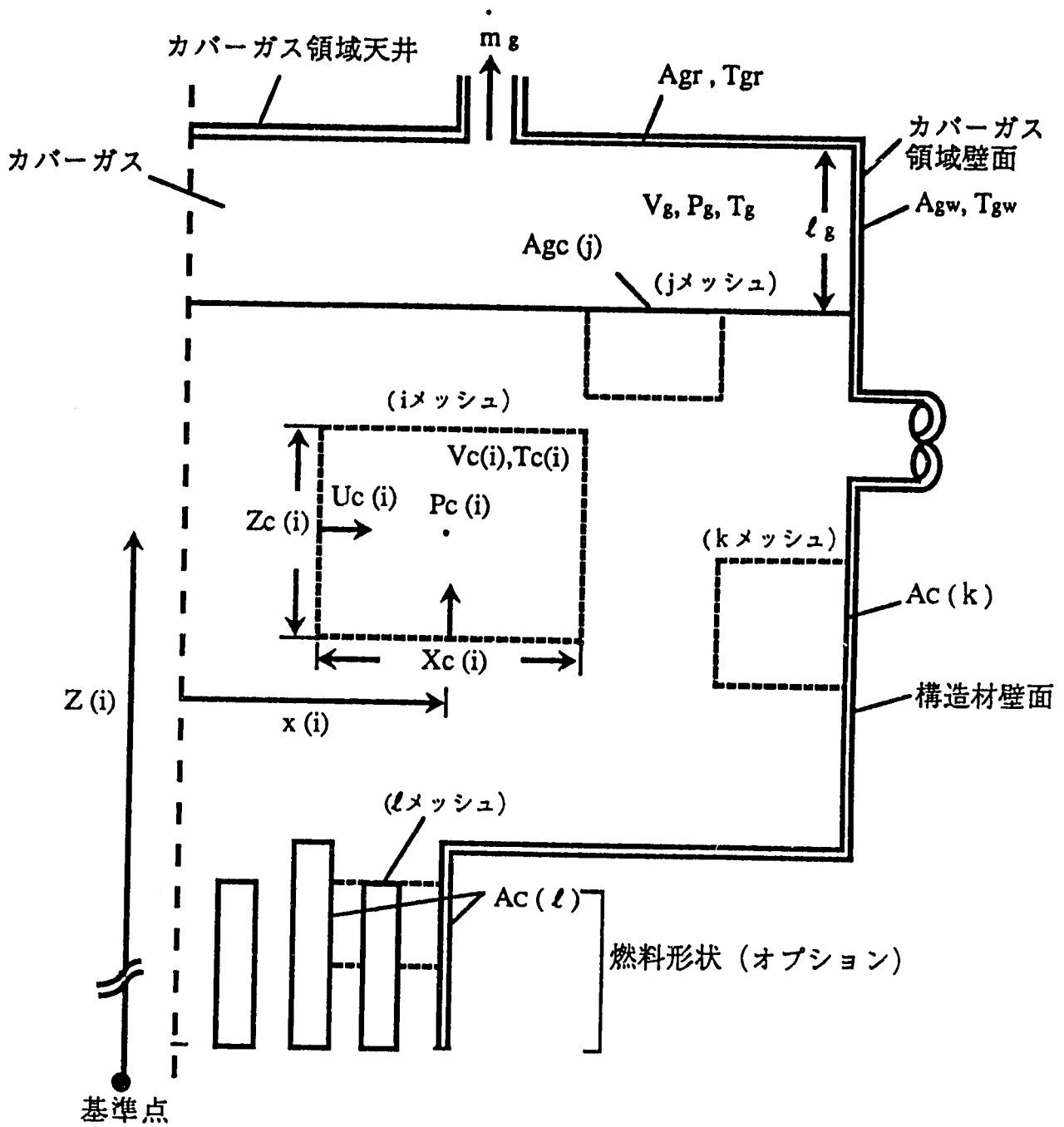


Fig. 3.2-1 Definition of Variables used in Model Description (1/2)

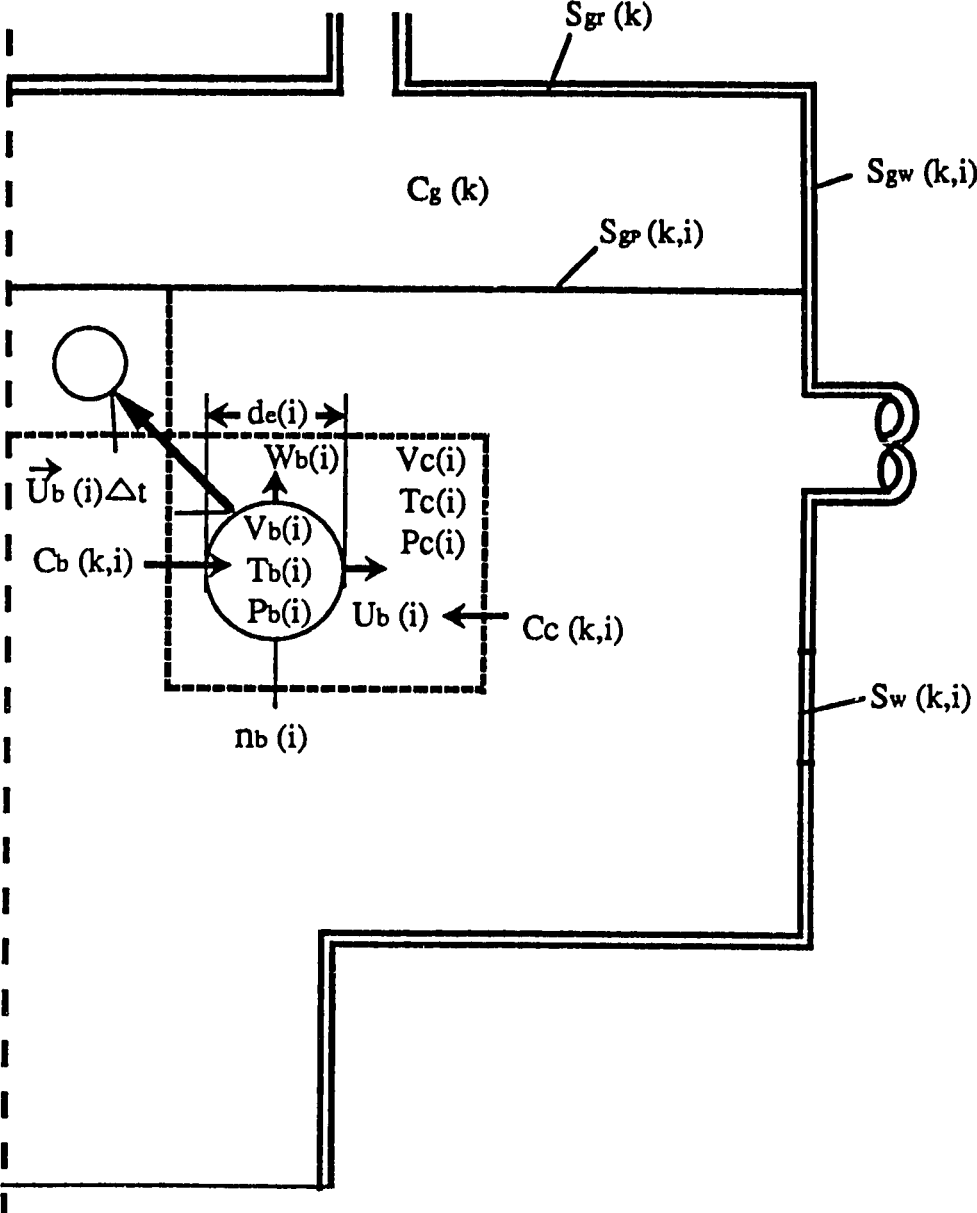


Fig. 3.2-1 Definition of Variables used in Model Description (2/2)

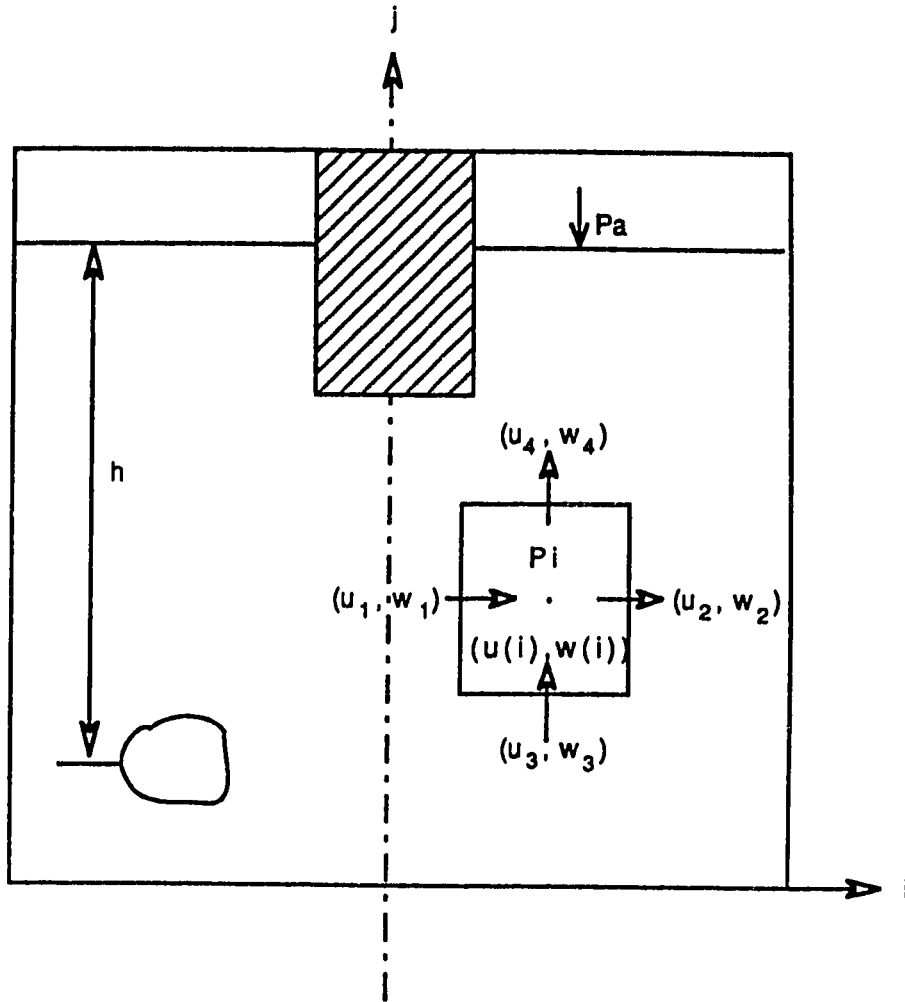


Fig. 3.3-1 Definition of Velocities in coolant system

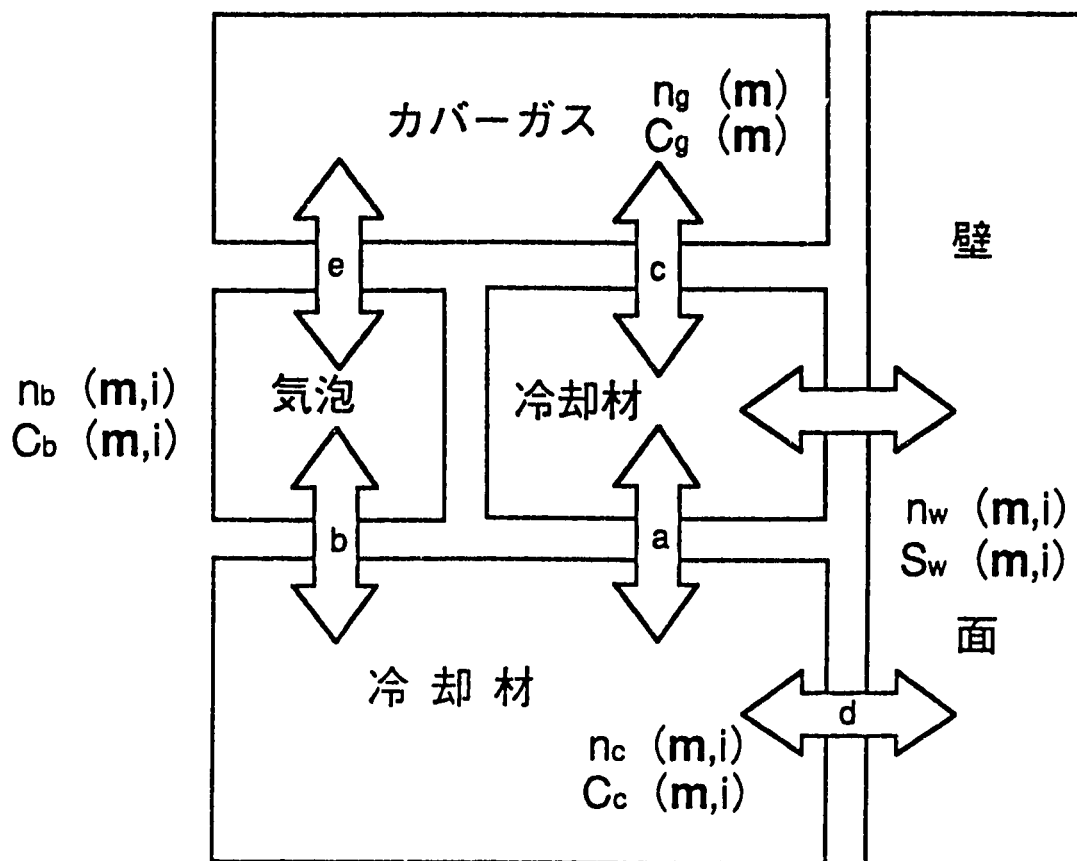


Fig. 3.4-1 Mass Transfer Behavior in Primary Coolant System

$$W_i = \alpha_1 U_i A_1 - \alpha_2 U_{i2} A_2 + \alpha_3 U_i A_3 - \alpha_4 U_{i2} A_4$$

$$\alpha_1 = C_c(m, i1), u_i > 0$$

$$= C_c(m, i), u_i < 0$$

$$\alpha_2 = C_c(m, i), u_{i2} > 0$$

$$= C_c(m, i2), u_{i2} < 0$$

$$\alpha_3 = C_c(m, i3), w_i > 0$$

$$= C_c(m, i), w_i < 0$$

$$\alpha^4 = C_c(m, i), w_{i4} > 0$$

$$= C_c(m, i4), w_{i4} < 0$$

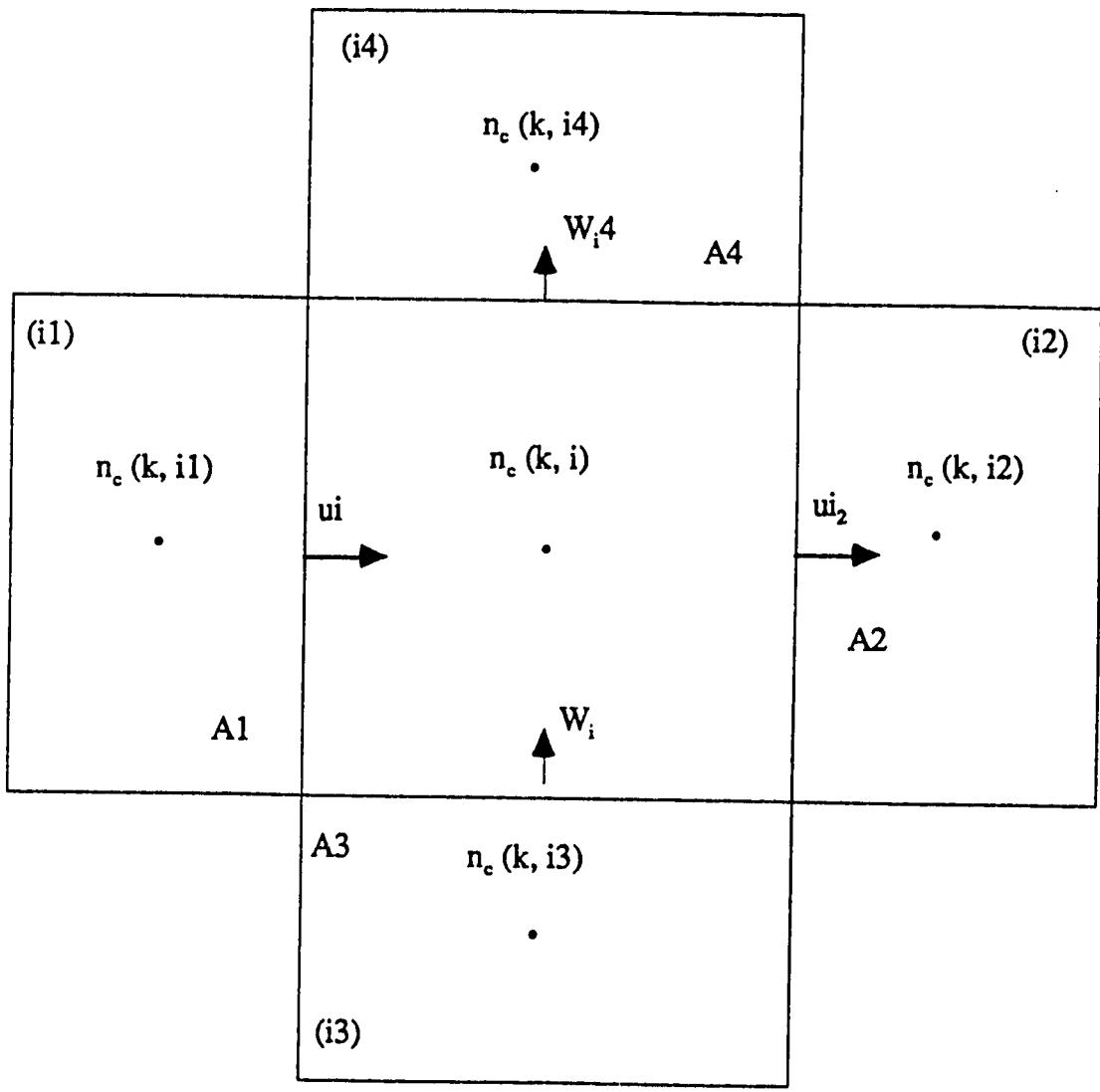


Fig. 3.4-2 Schematic Illustration of Mass Concentration Change due to Coolant Flow

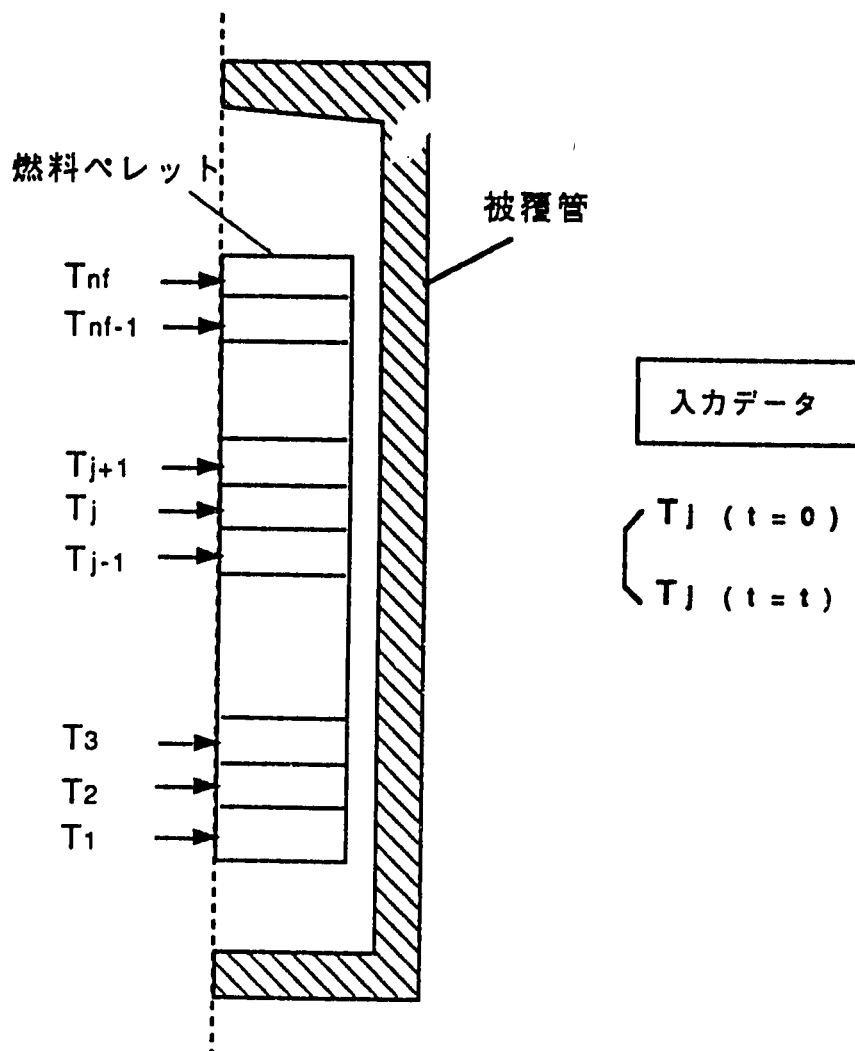
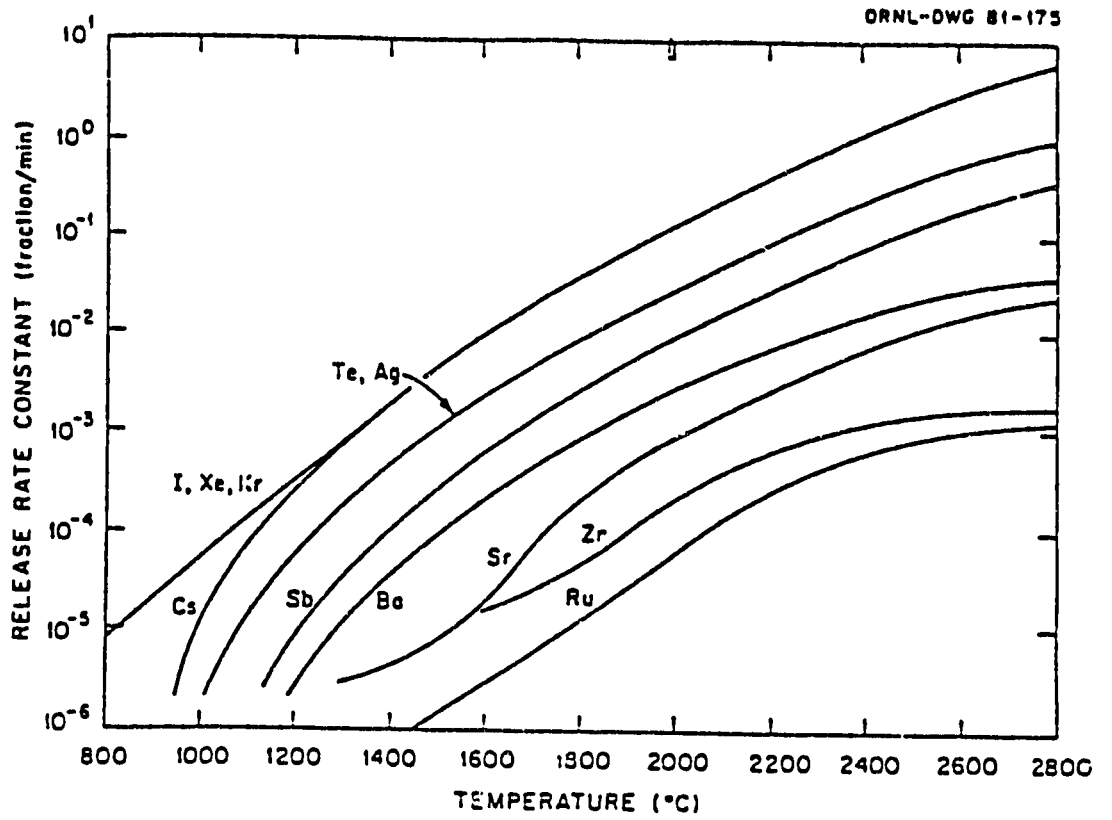
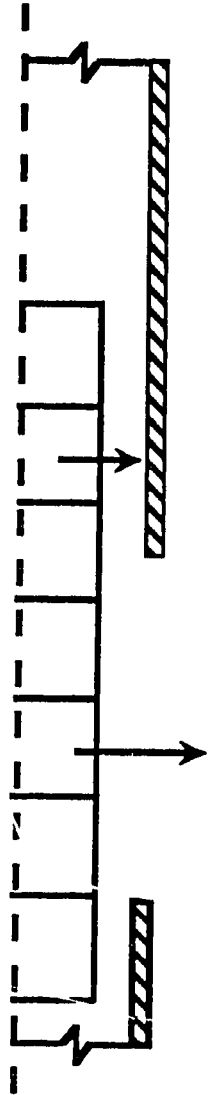


Fig. 3.5-1 Specification of Fuel Pellet Temperatures



Fission product release rate constants from fuel - smoothed curves.

Fig. 3.6-1 FP Release Model based on NUREG-0772 Data

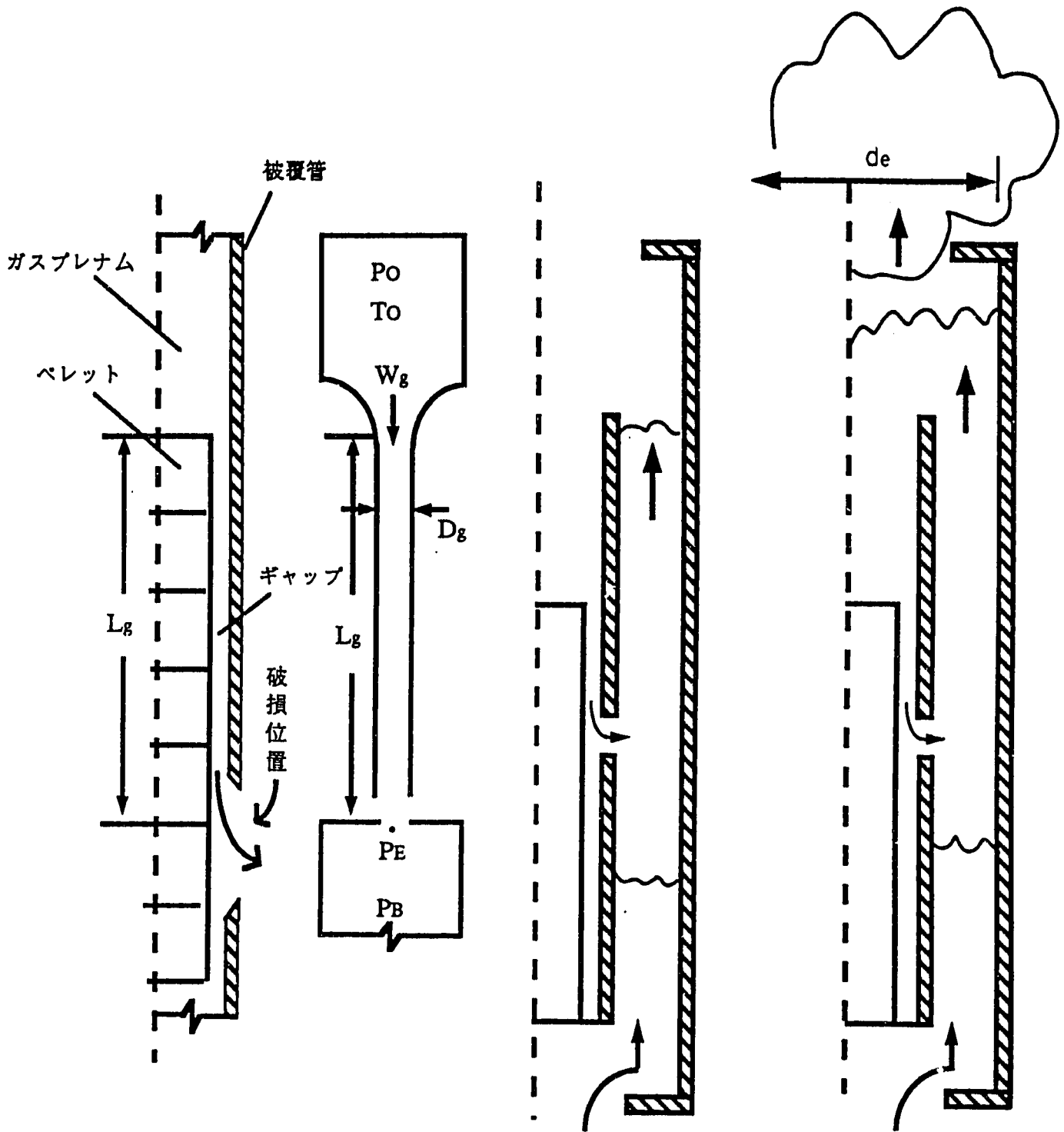


Fig. 3.6-2 Model Description of FP Release from Gas Plenum

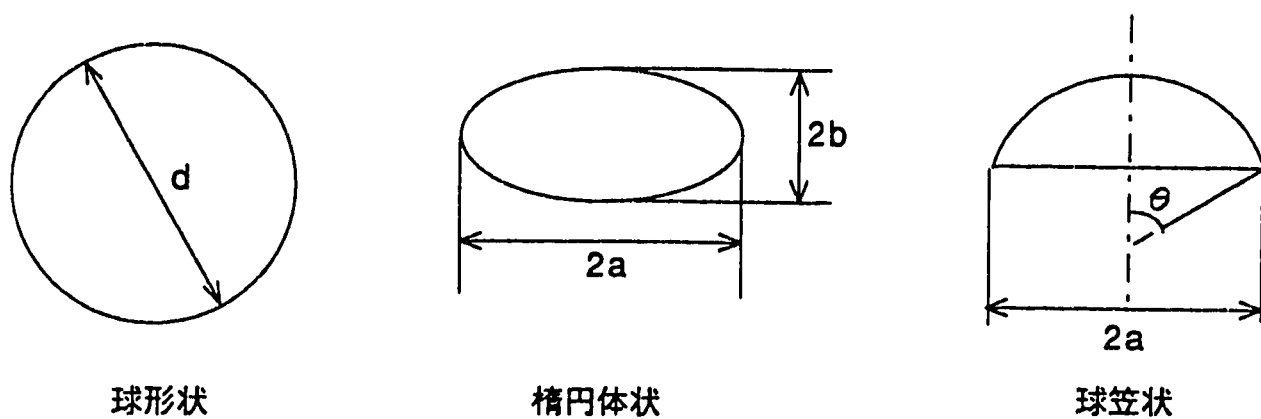


Fig. 3.7-1 Schematic Illustration of Typical Bubble Shapes

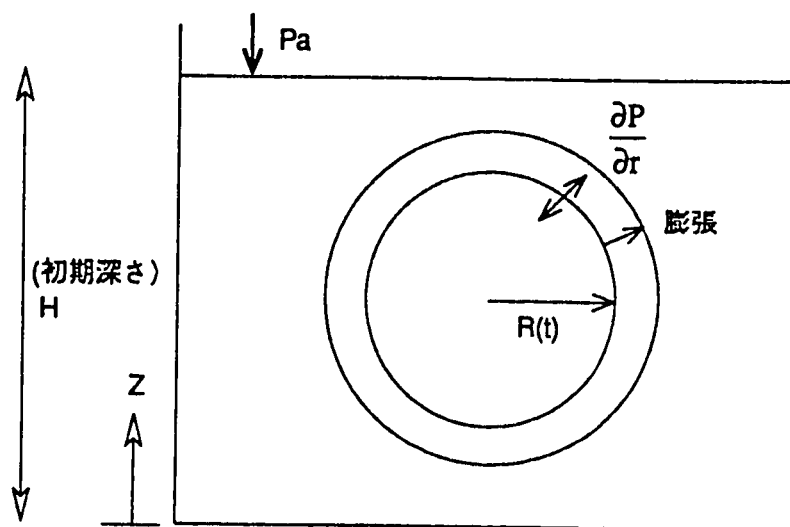


Fig. 3.7-2 Schematic Illustration of Bubble Expansion

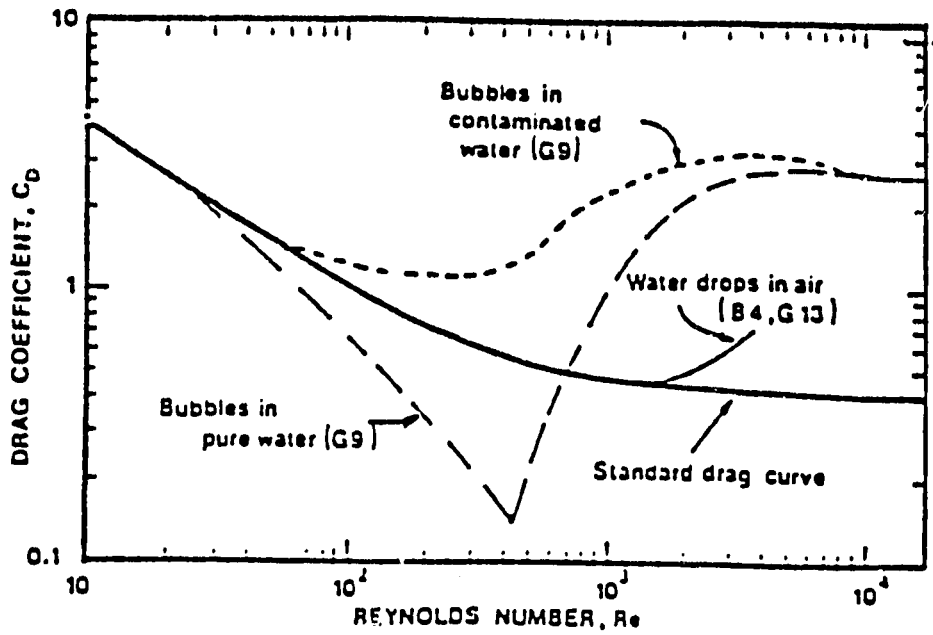


Fig. 3.7-3 Drag Coefficient as a Function of Reynolds Number for Water Drops in Air and Air Bubbles in Water, Compared with Standard Drag Curve for Rigid Spherers

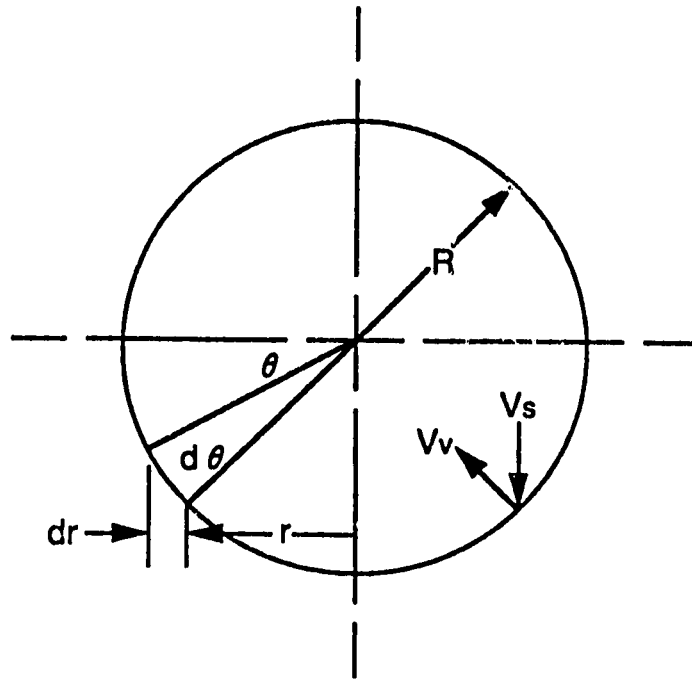


Fig. 3.7-4 Aerosol Deposition Model in Gas Bubbles

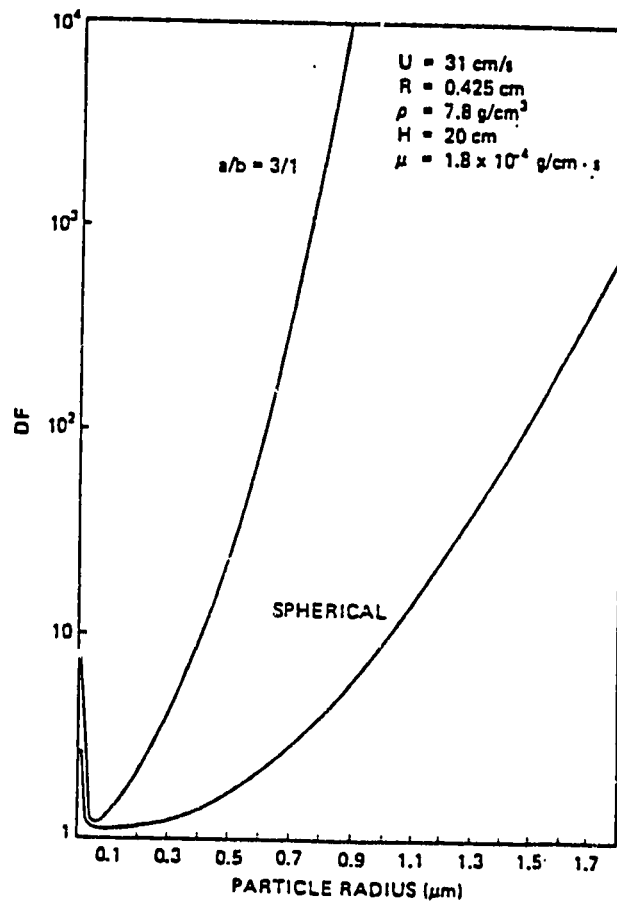
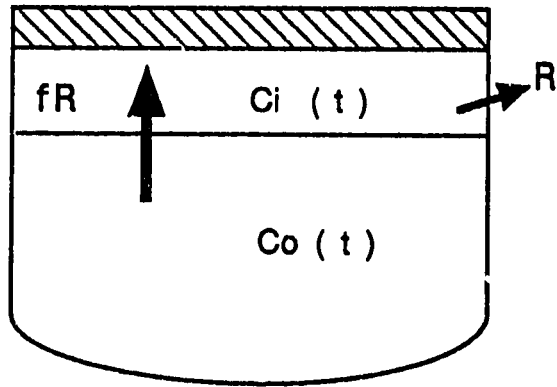


Fig. 3.7-5 Decontamination Factor for Ellipsoidal and Spherical Bubbles



(連続的に移行)

$t = t$ で連続移行で平衡が成立

$$\Delta C_i(t) = fR C_o(t)$$

$\Delta C_i(t)$: 移行量変化率

R : ルーススラブ漏洩率

プールに滞在する期間の崩壊を考慮

Fig. 3.8-1 Model Description of FP Transport to Cover Gas

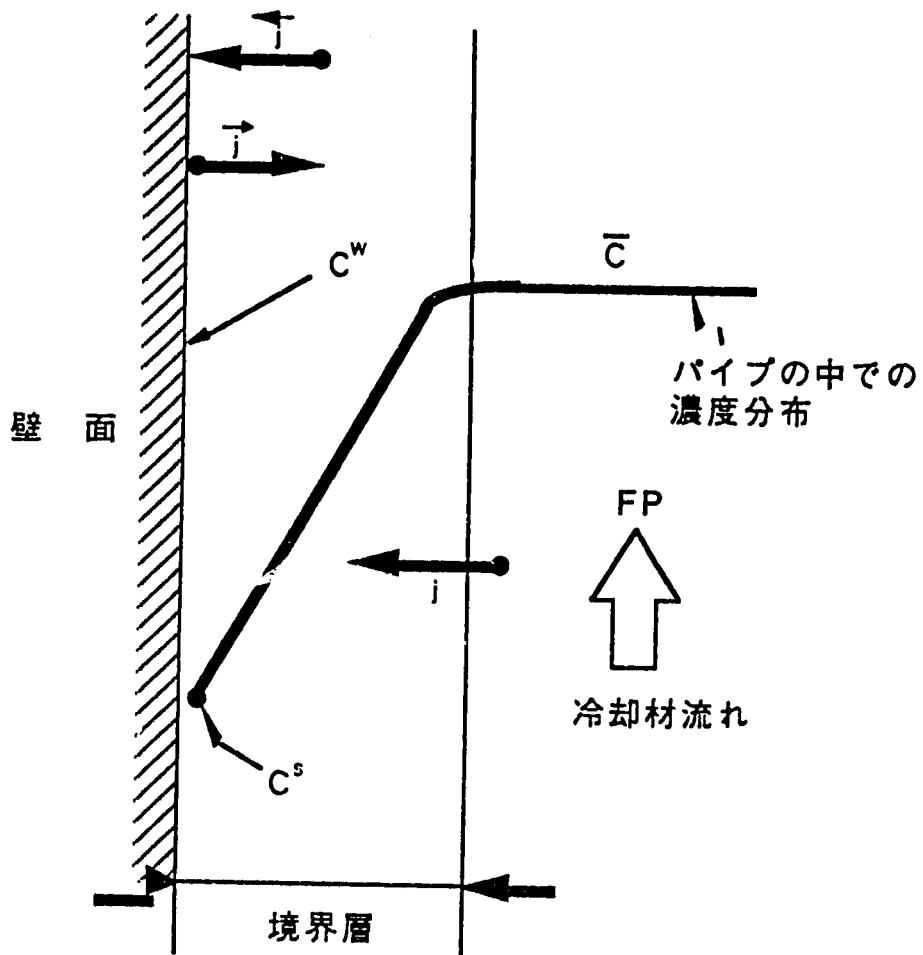
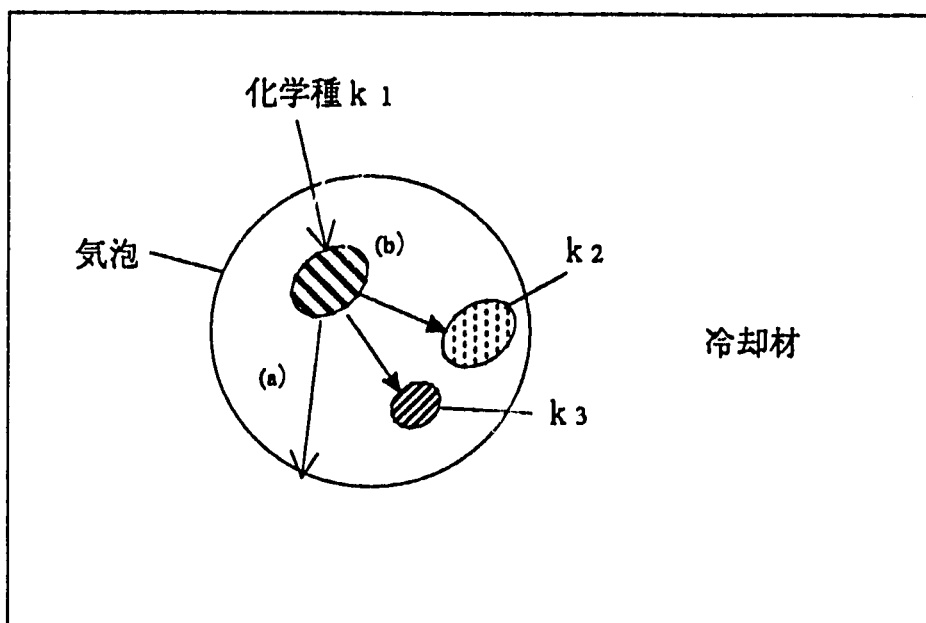
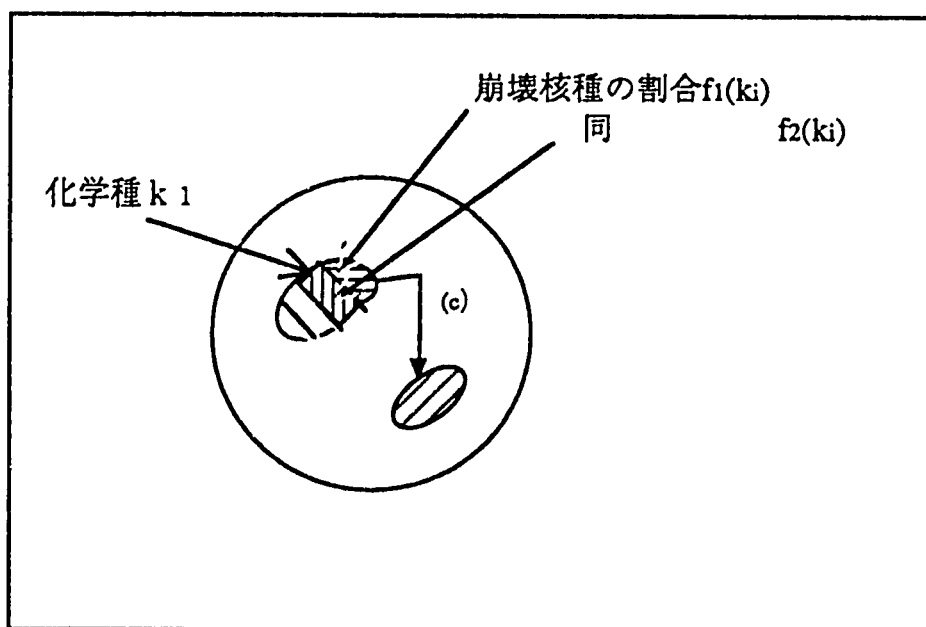


Fig. 3.9-1 Model Description of FP Deposition to Wall

(化学種の数 k_n)



- (a) 化学種 k_1 の状態で他相へ移行 (質量移行、エアロゾル沈着等)
- (b) 同相で化学種 k_2 、 k_3 へ変化 (例 $2\text{CsI} \rightarrow 2\text{Cs} + \text{I}_2$)



- (c) 化学種 k_i の内、割合 $f_1(k_i)$ を占める核種の崩壊により他の化学種 k_j に移行

Fig. 3.10-1 Schematic Illustration of Chemical Species and FP Elements

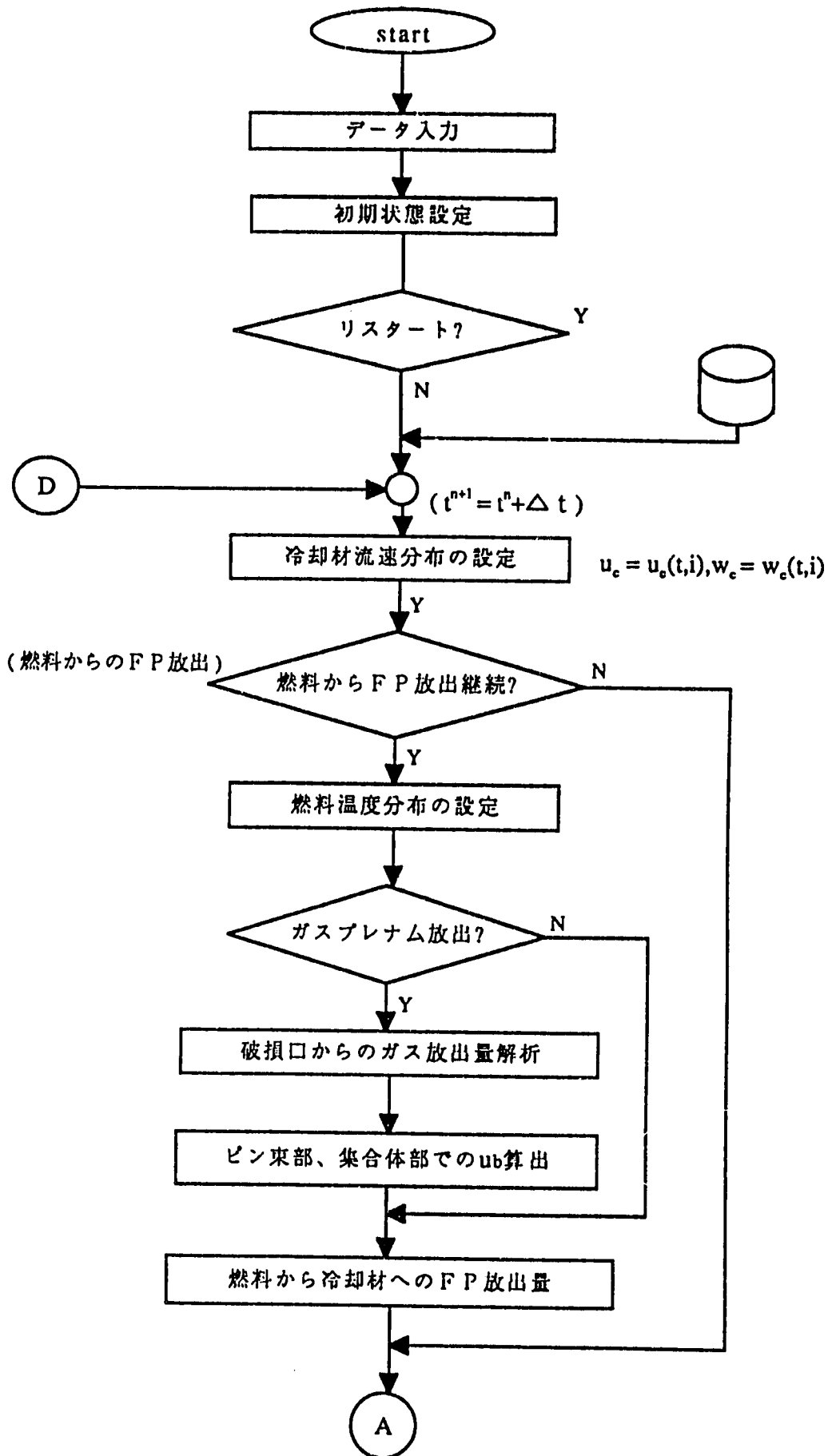


Fig. 5-1 Flow Diagrams of TRACER Code (1/4)

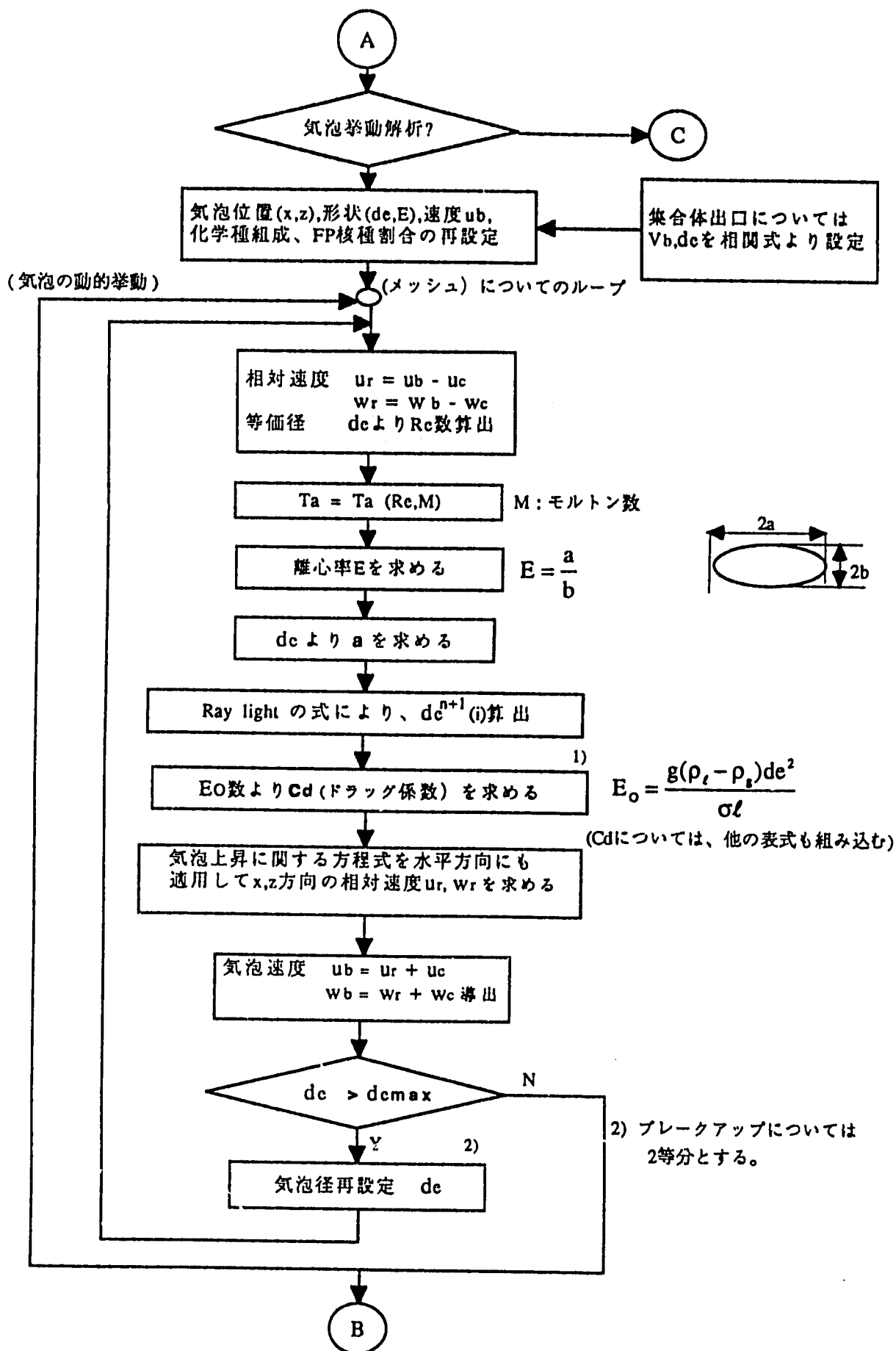


Fig. 5-1 Flow Diagrams of TRACER Code (2/4)

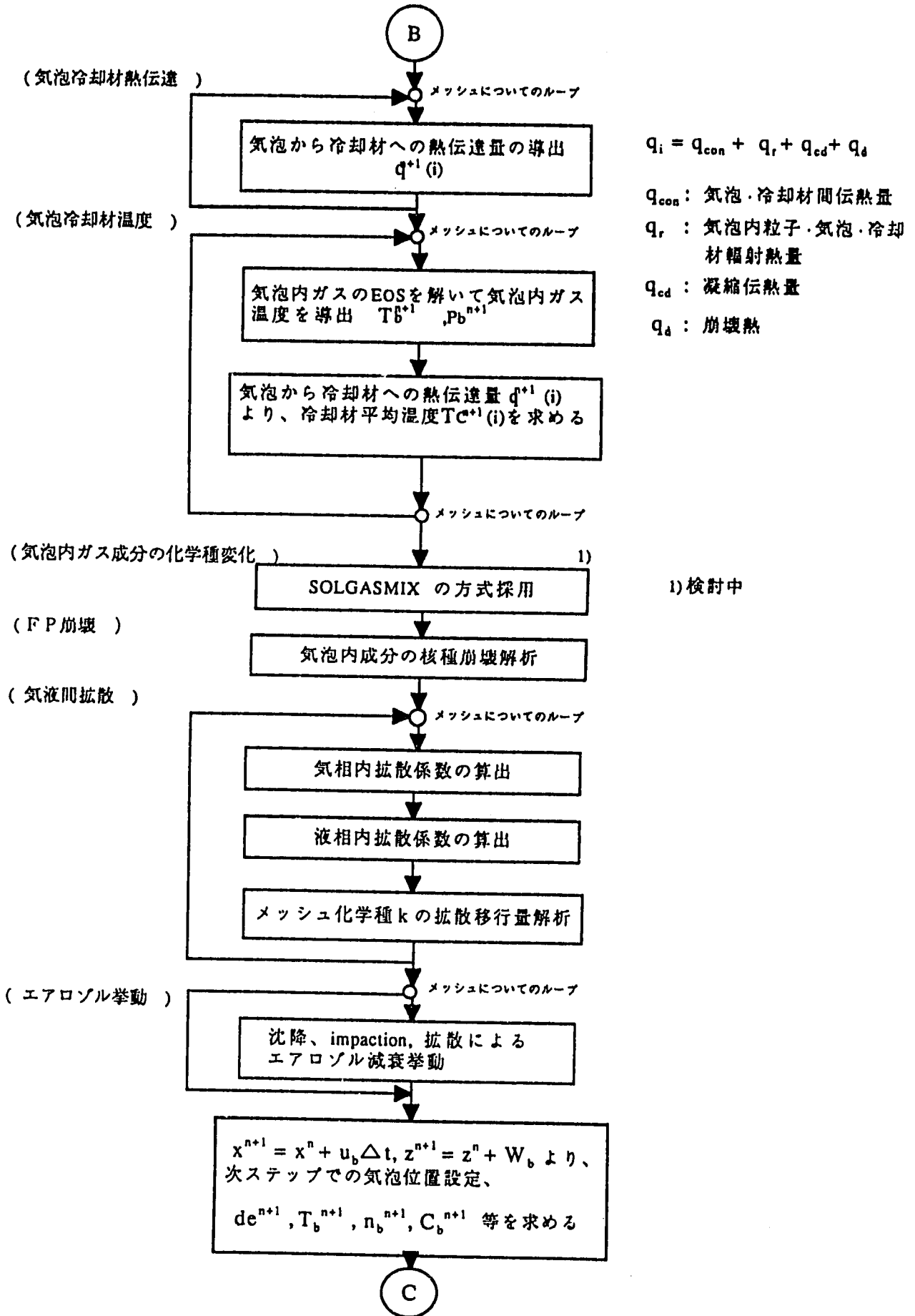


Fig. 5-1 Flow Diagrams of TRACER Code (3/4)

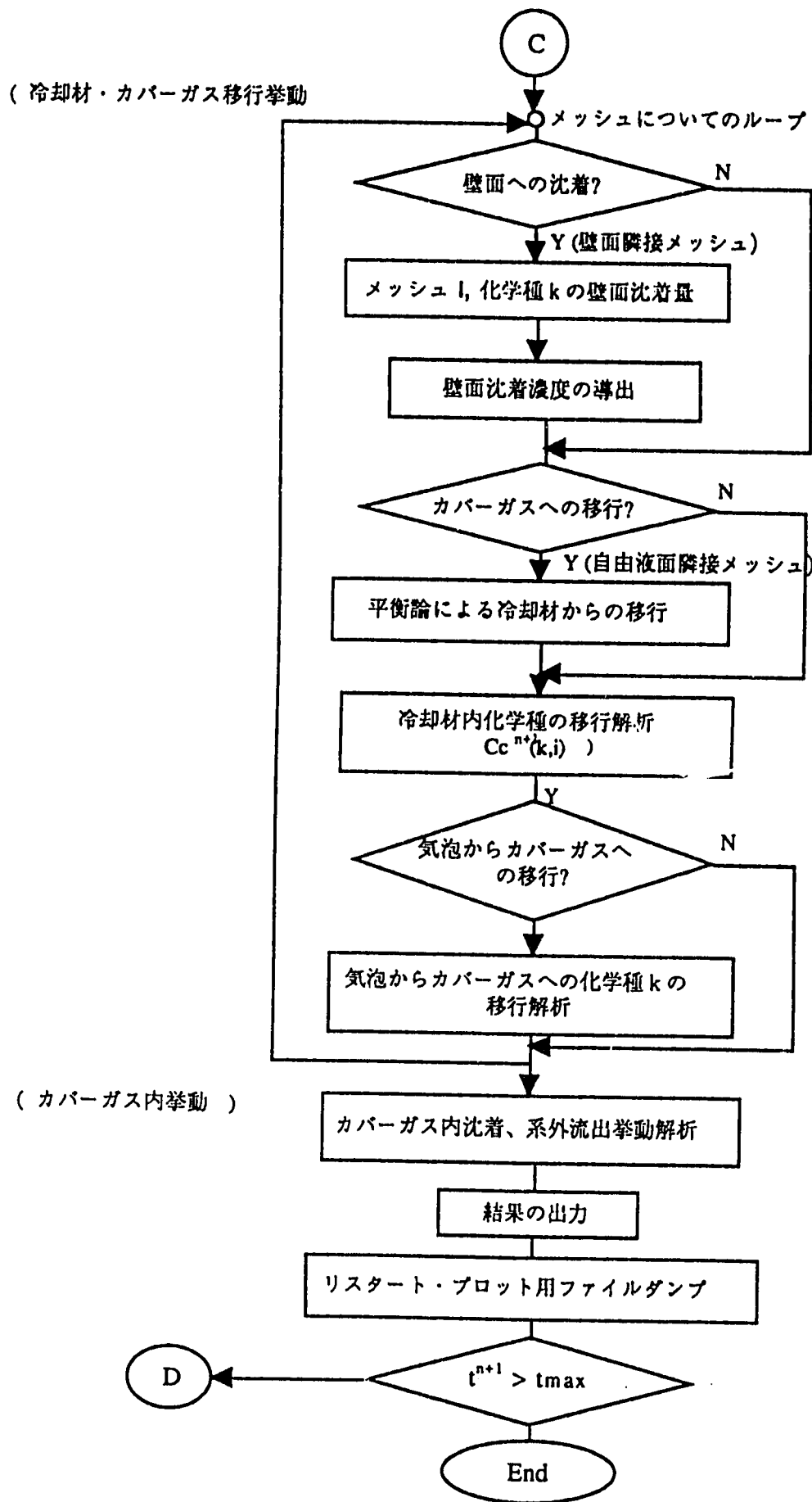


Fig. 5-1 Flow Diagrams of TRACER Code (4/4)

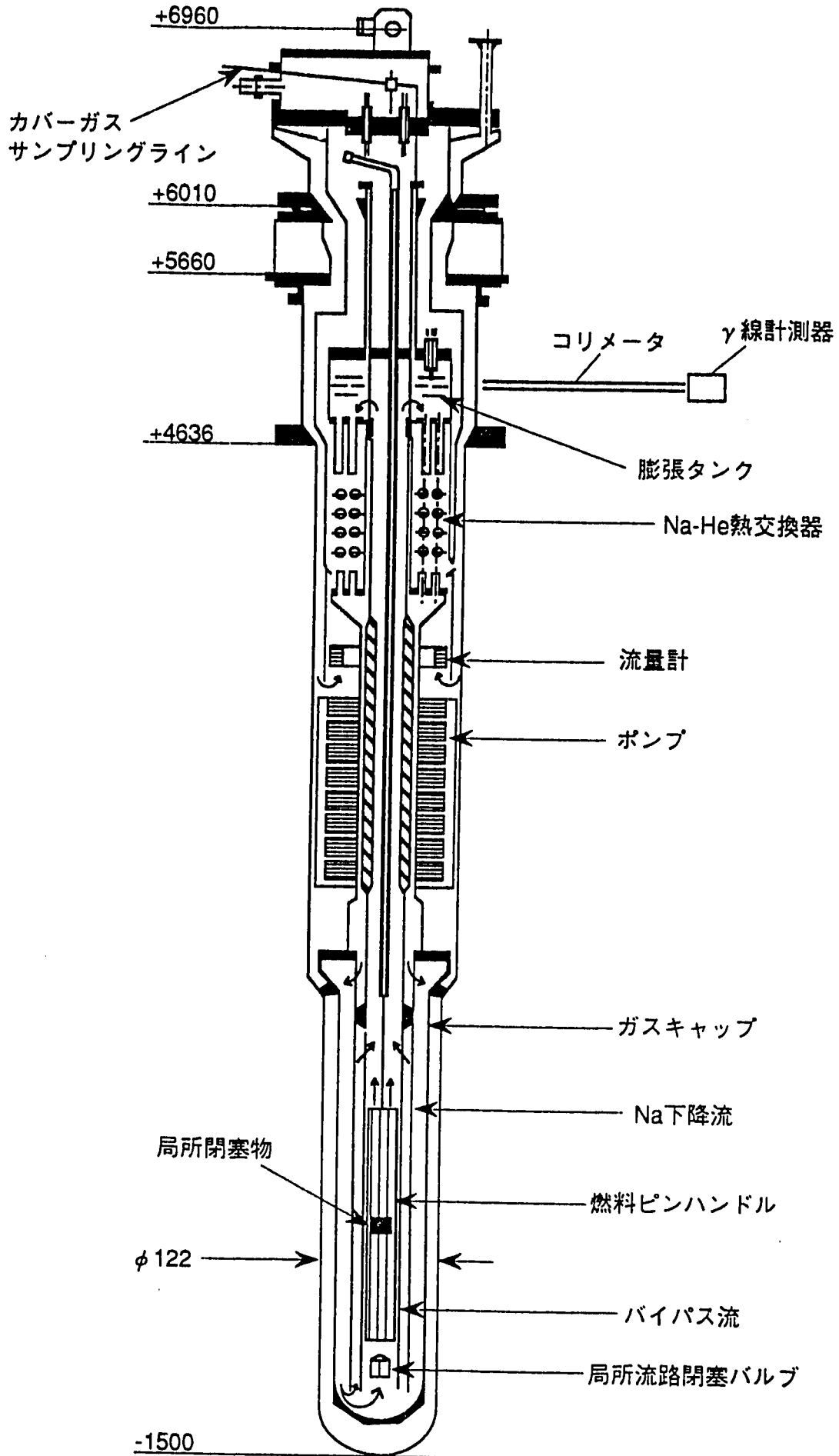


Fig. 6-1 General Arrangement of the MOL7C/6 In-Pile Section

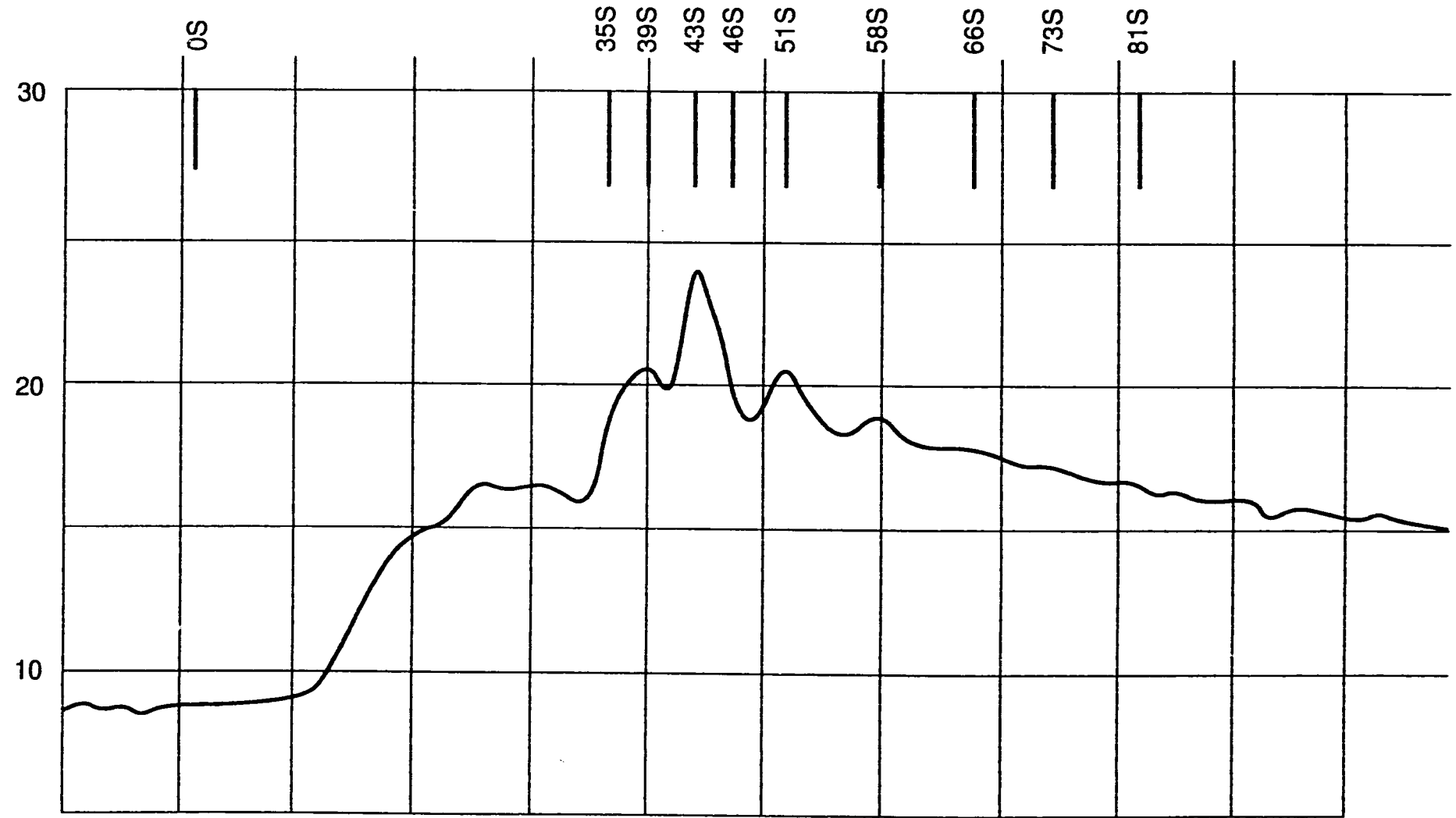


Fig. 6-2 Total Activity Transient in Mol7c/6 Test

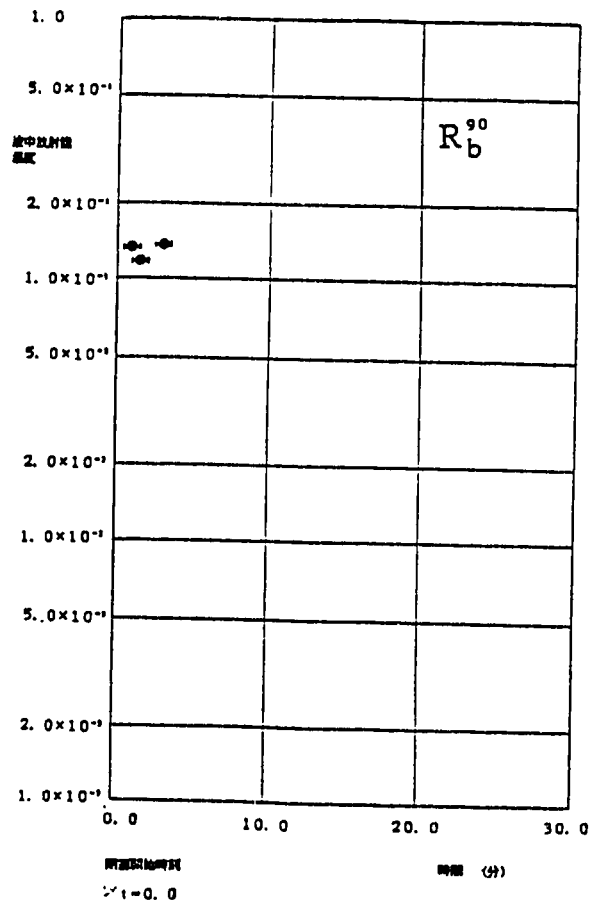
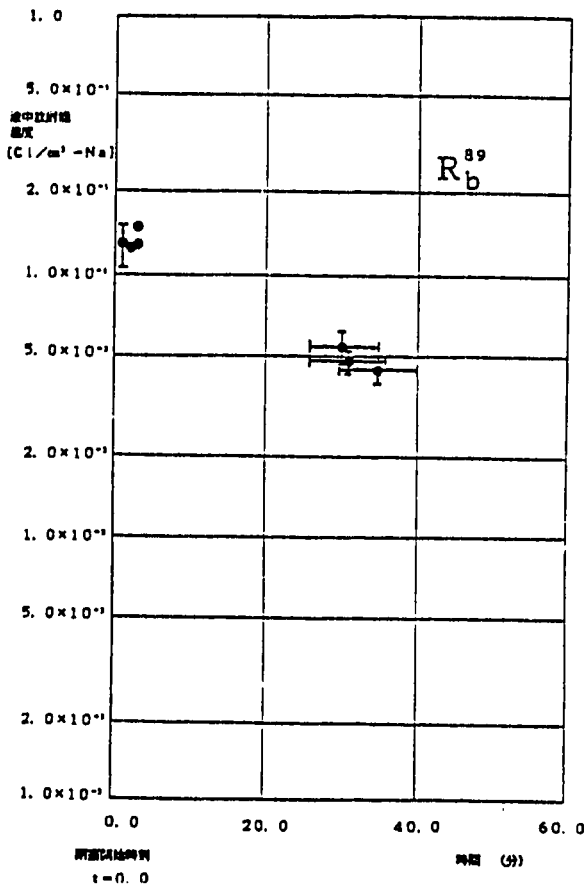
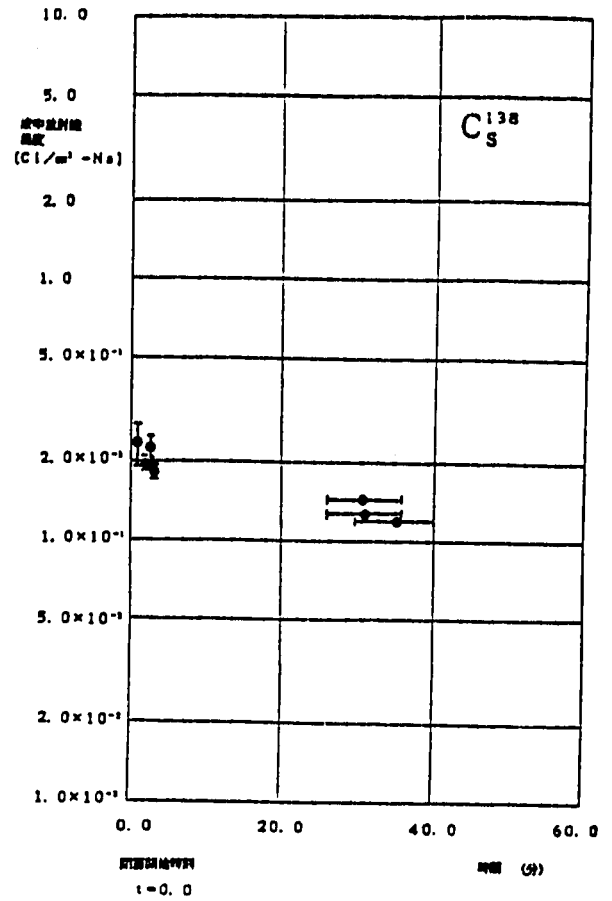
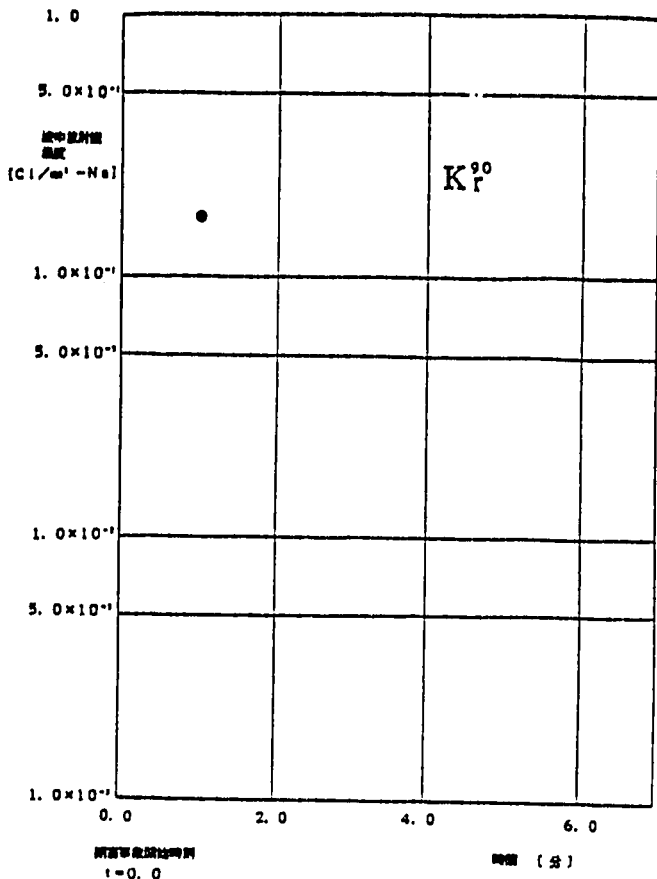


Fig. 6-3 Activity of Kr/Cs/Rb in Coolant at E/T Position

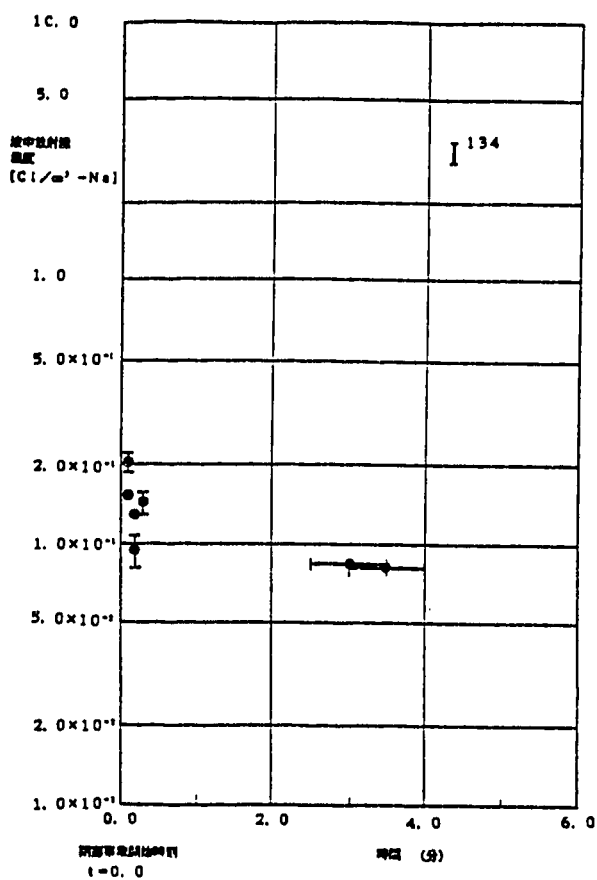
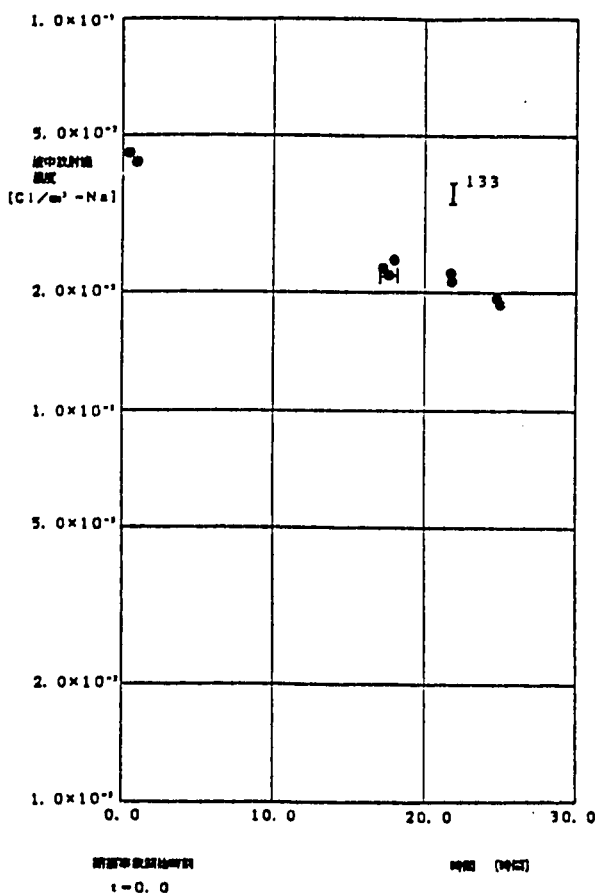
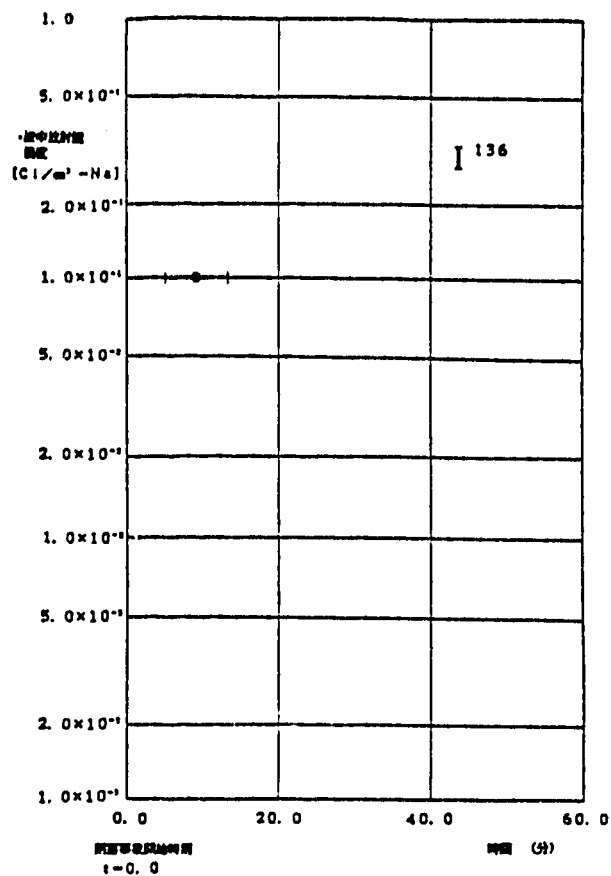
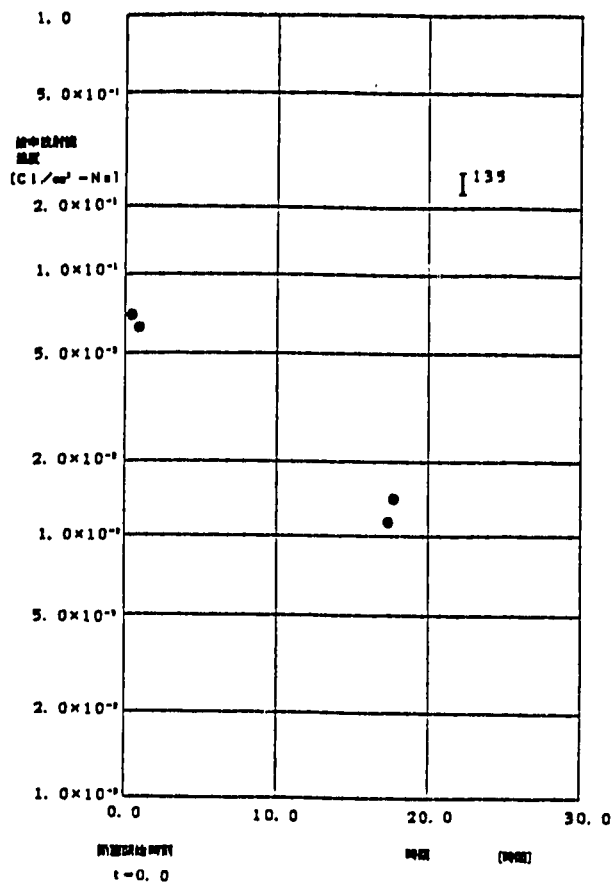


Fig. 6-4 Activity of Iodines in Coolant at E/T Position

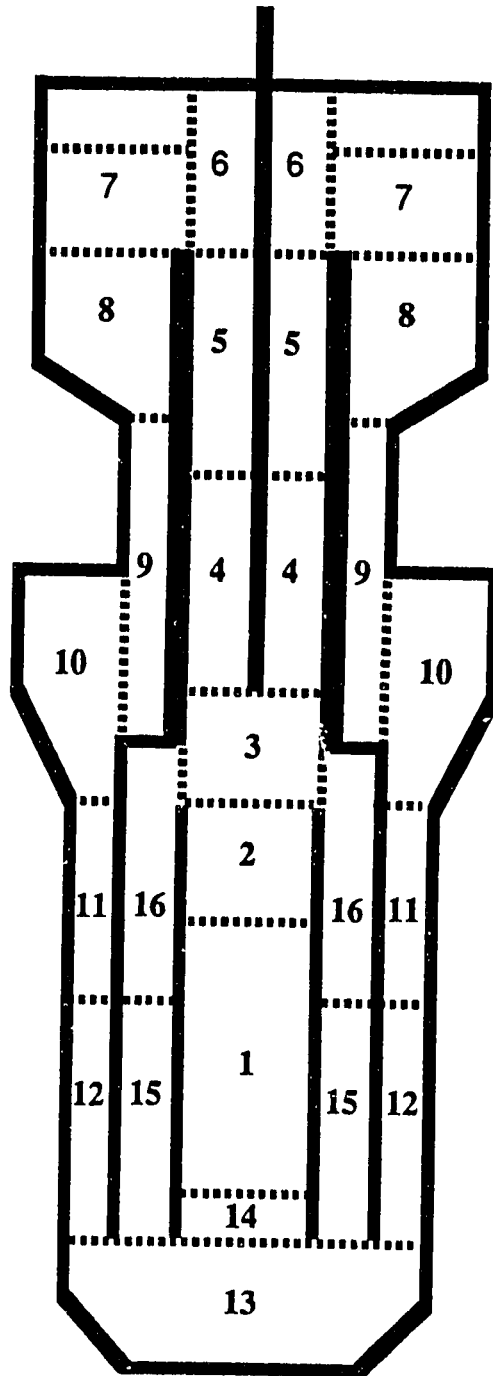


Fig. 6-5 Calculational Geometry for MOL7C/6 Test

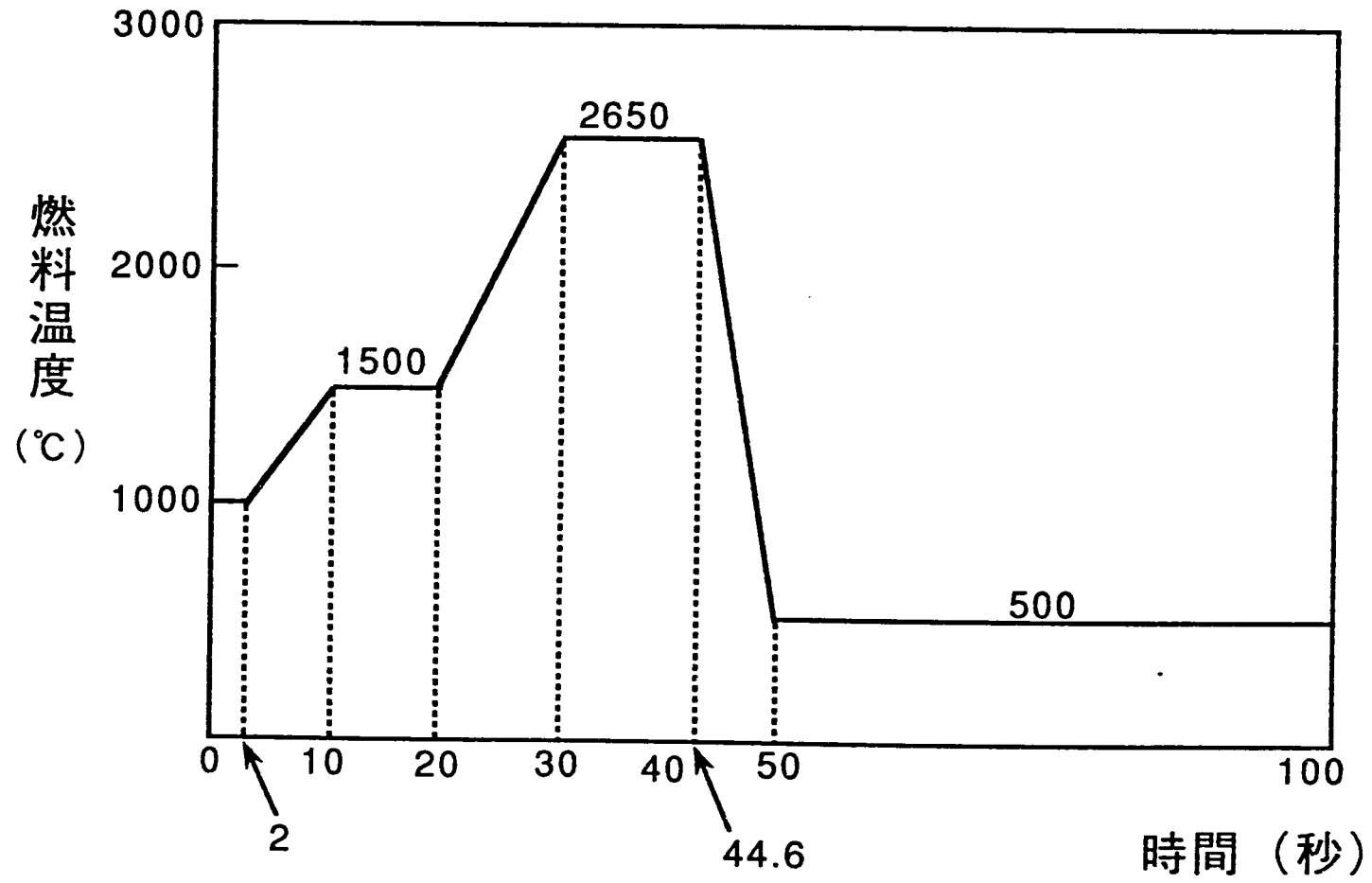


Fig. 6-6 Temperature Profile used in Sample calculation

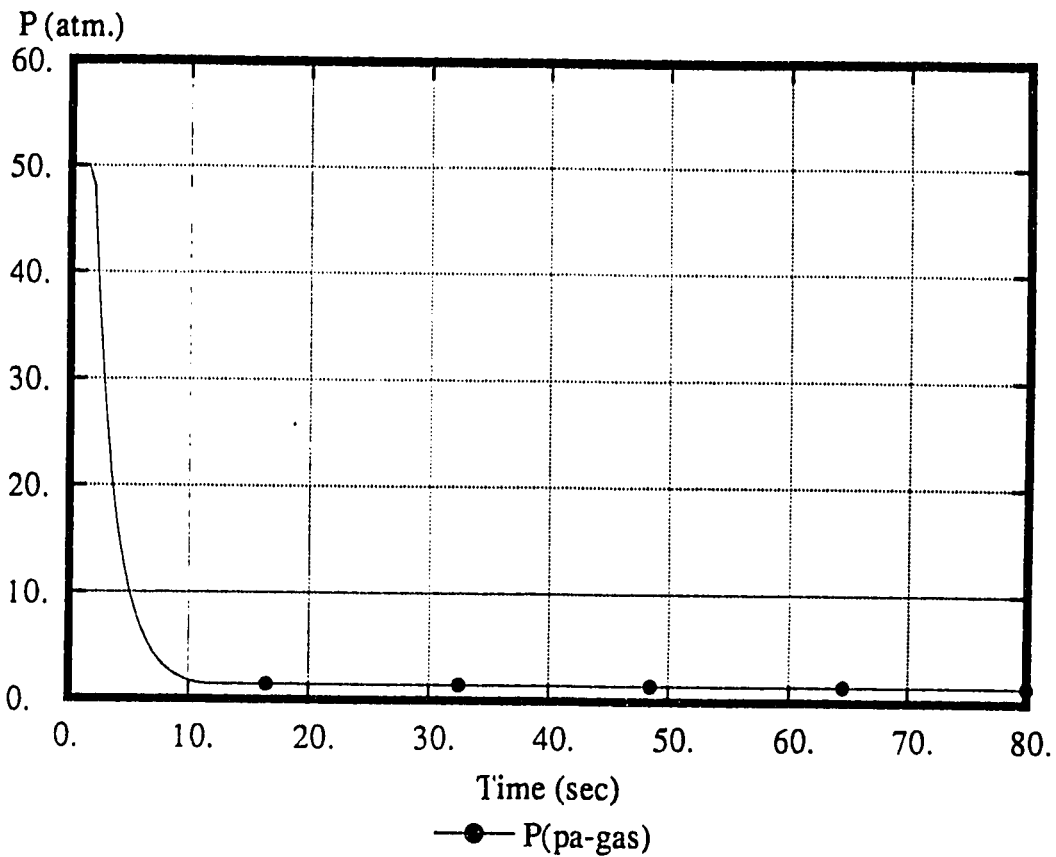


Fig. 6-7 Plenum Gas Pressure Transient of Fuel (Case 1)

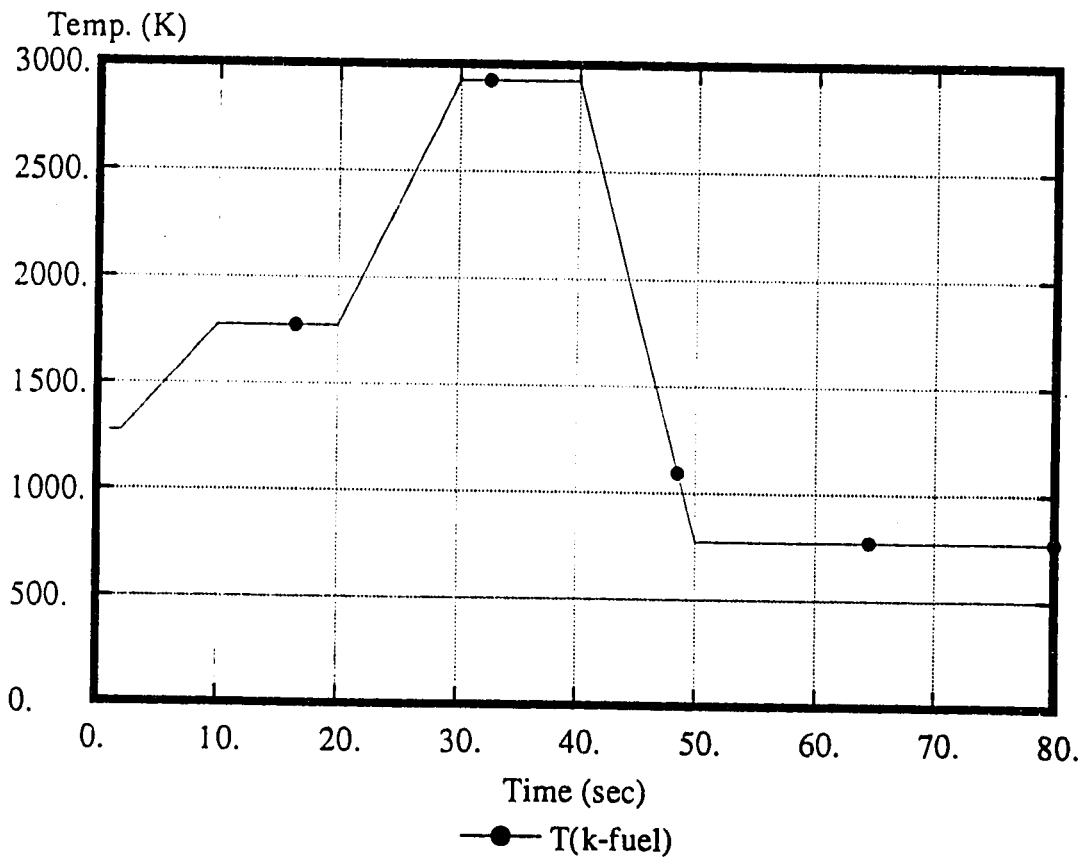


Fig. 6-8 Fuel Temperature assumed for Sample Calculation (Case 1)

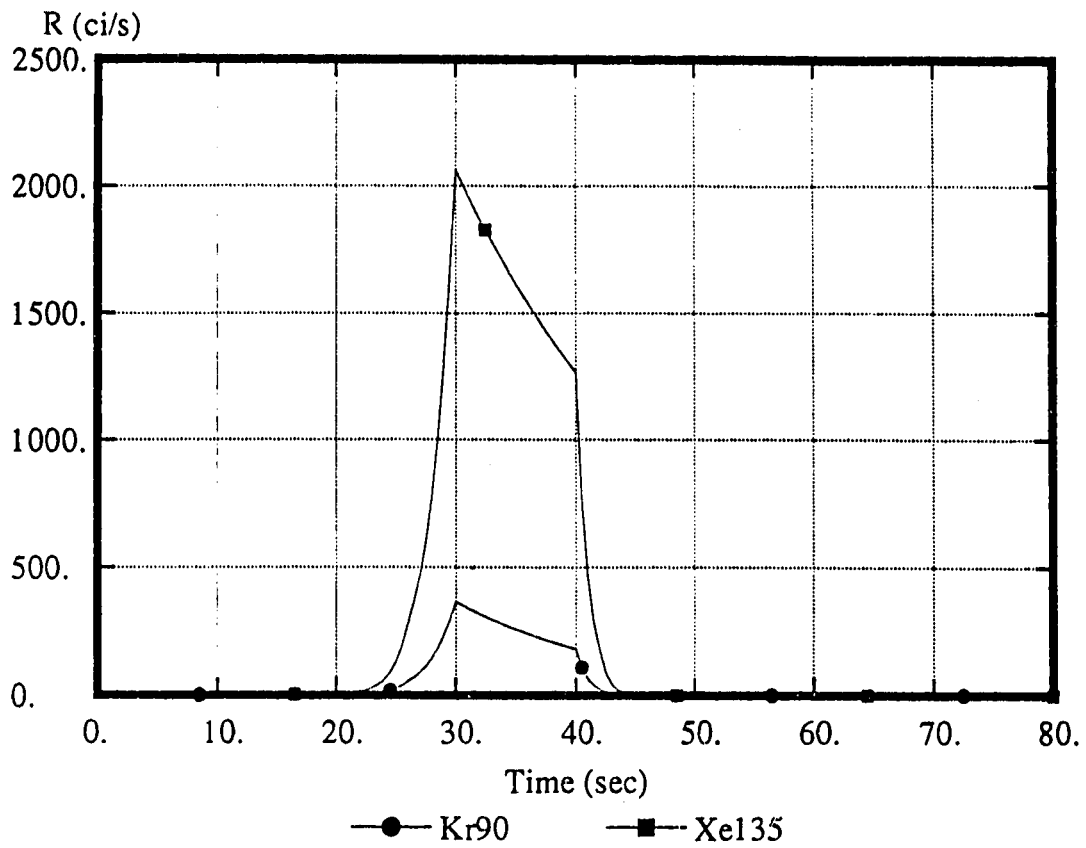


Fig. 6-9 Release Rate of Kr/Xe from Fuel (Case 1)

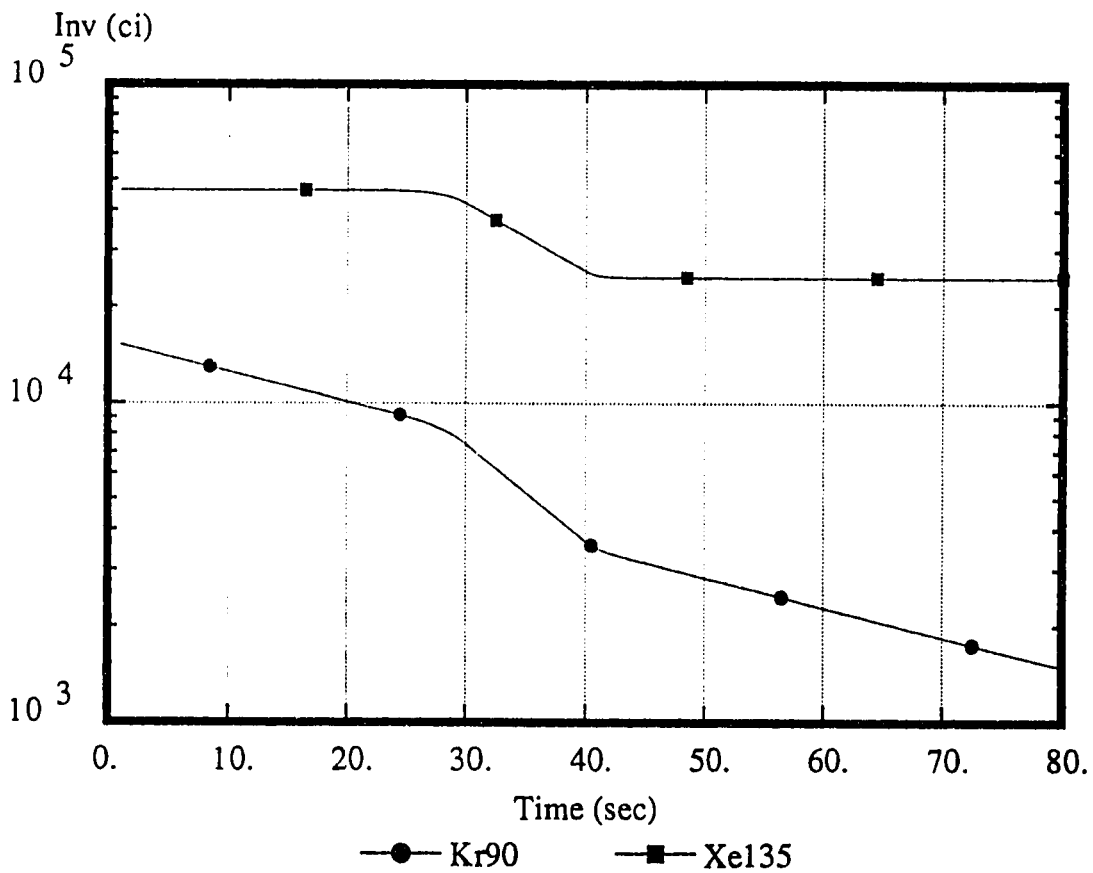


Fig. 6-10 Residual Inventory of Kr/Xe in Fuel (Case 1)

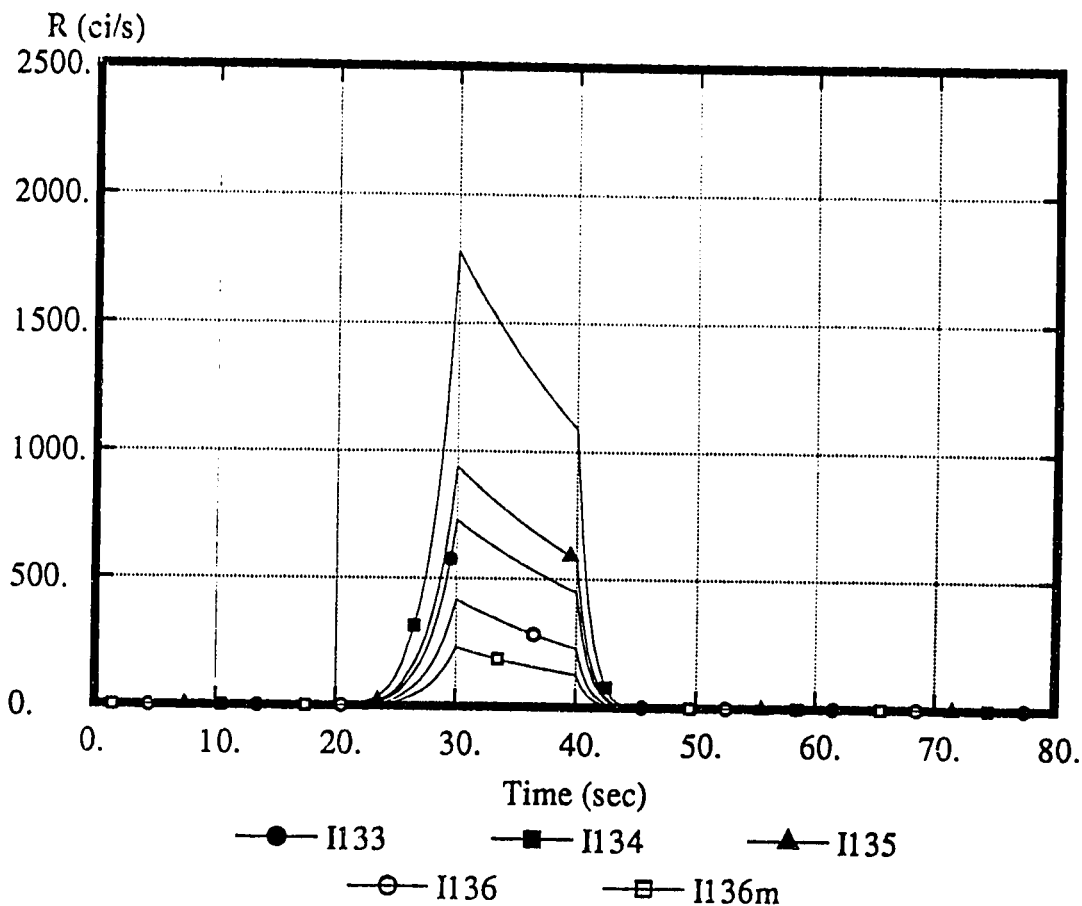


Fig. 6-11 Release Rate of Iodines from Fuel (Case 1)

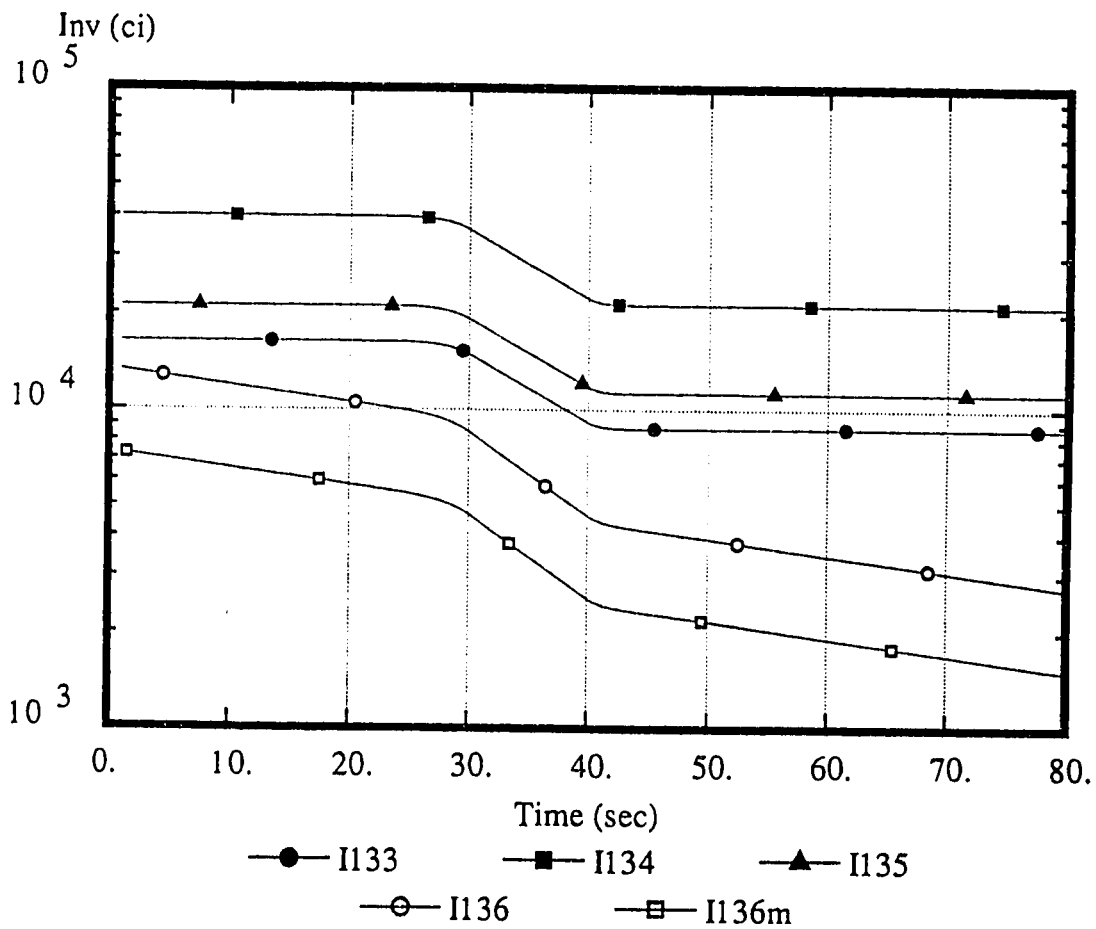


Fig. 6-12 Residual Inventory of Iodines in Fuel (Case 1)

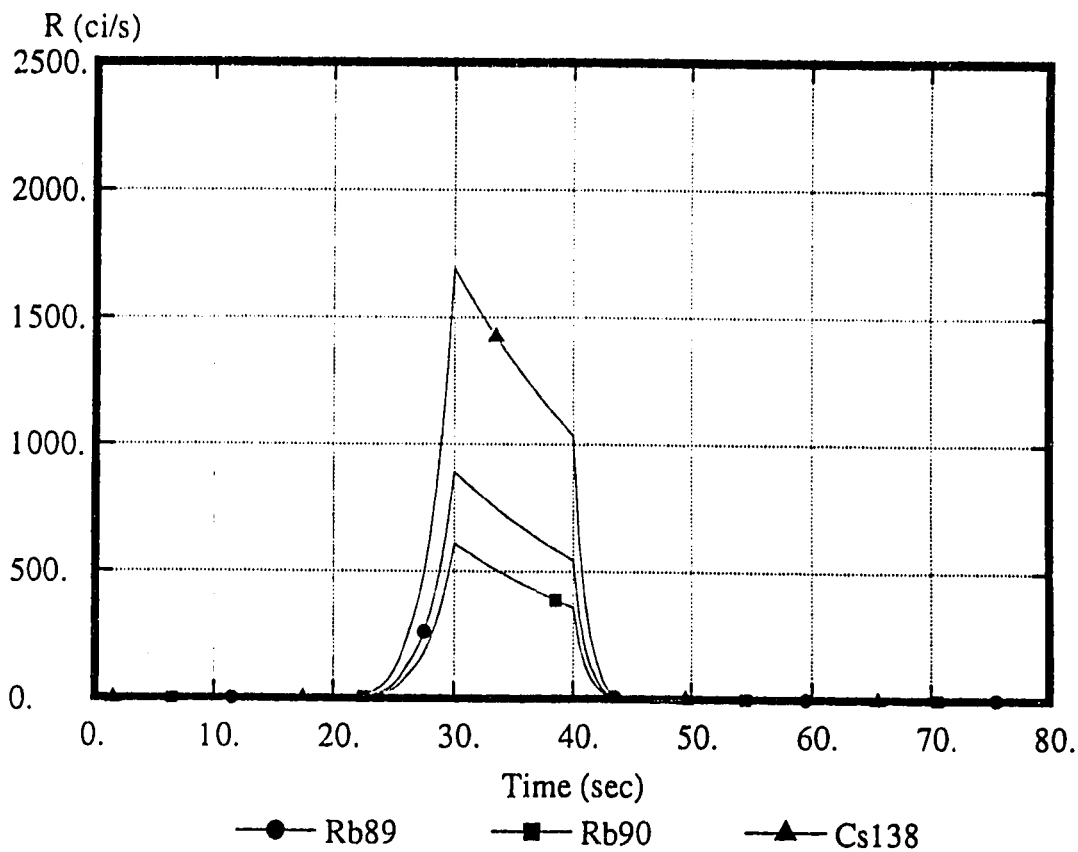


Fig. 6-13 Release Rate of Rb/Cs from Fuel (Case 1)

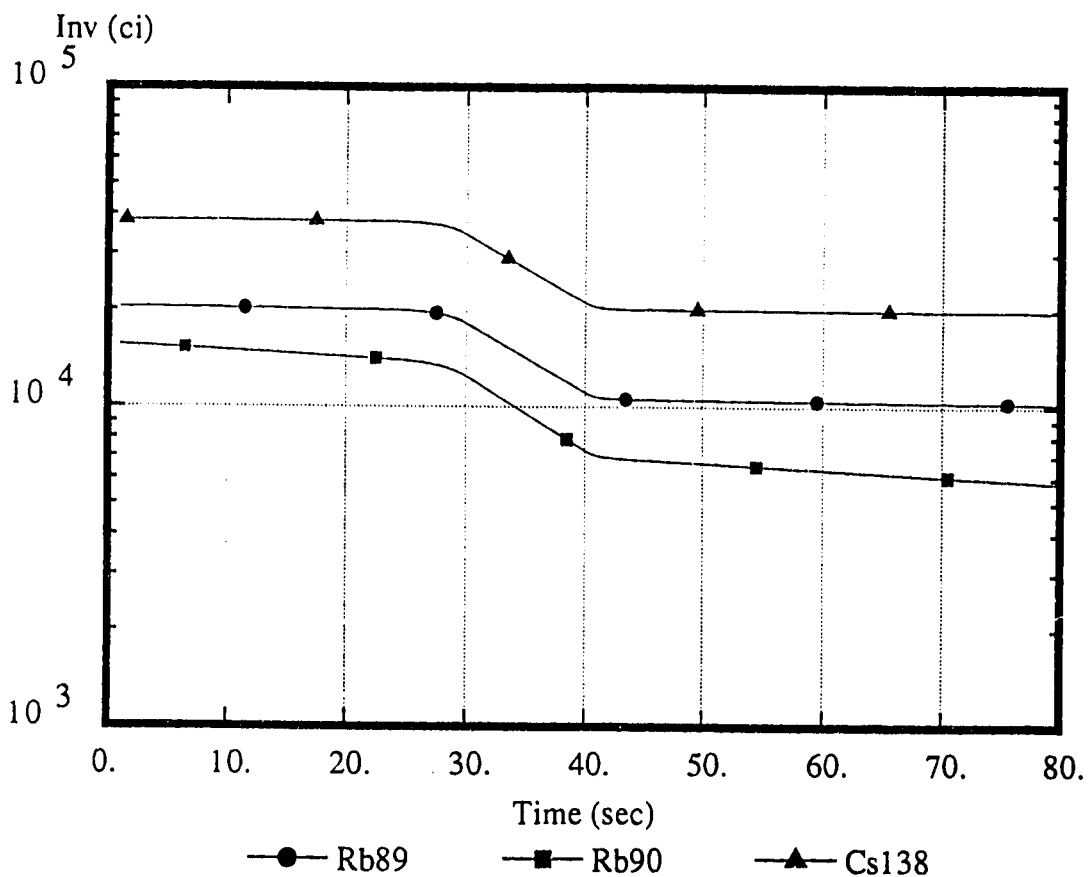


Fig. 6-14 Residual Inventory of Rb/Cs in Fuel (Case 1)

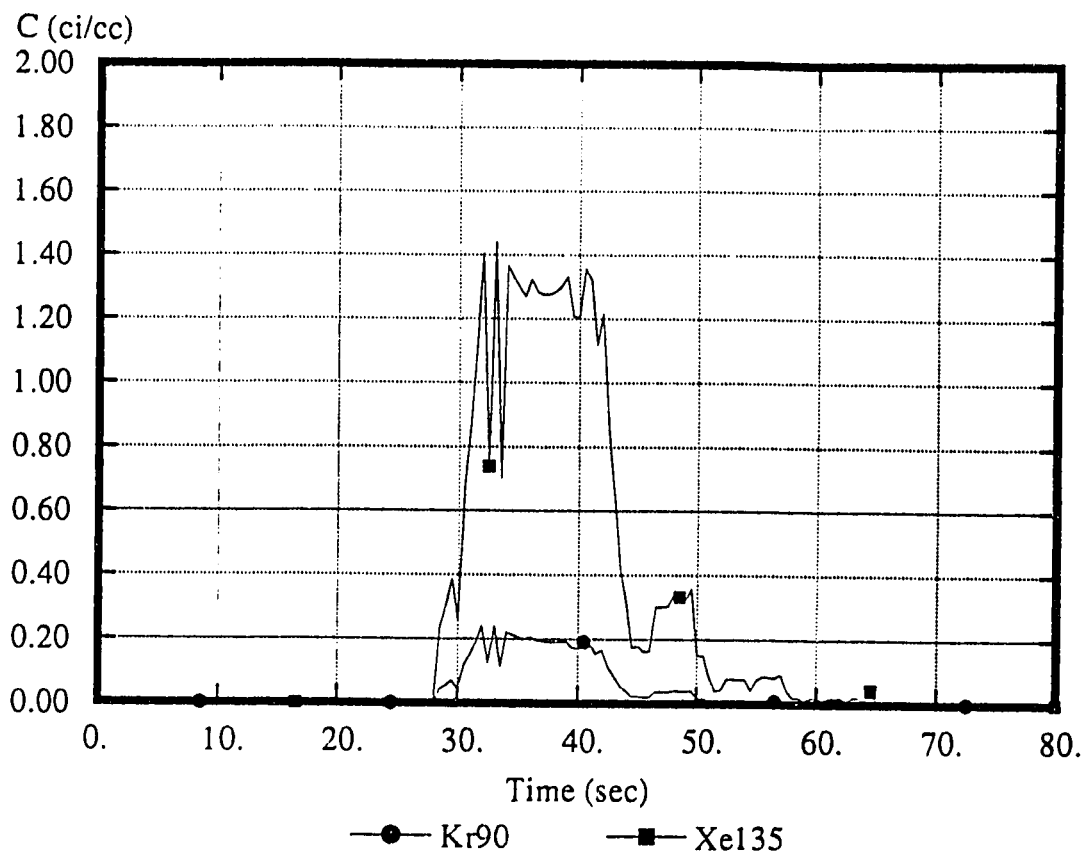


Fig. 6-15 Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 1)

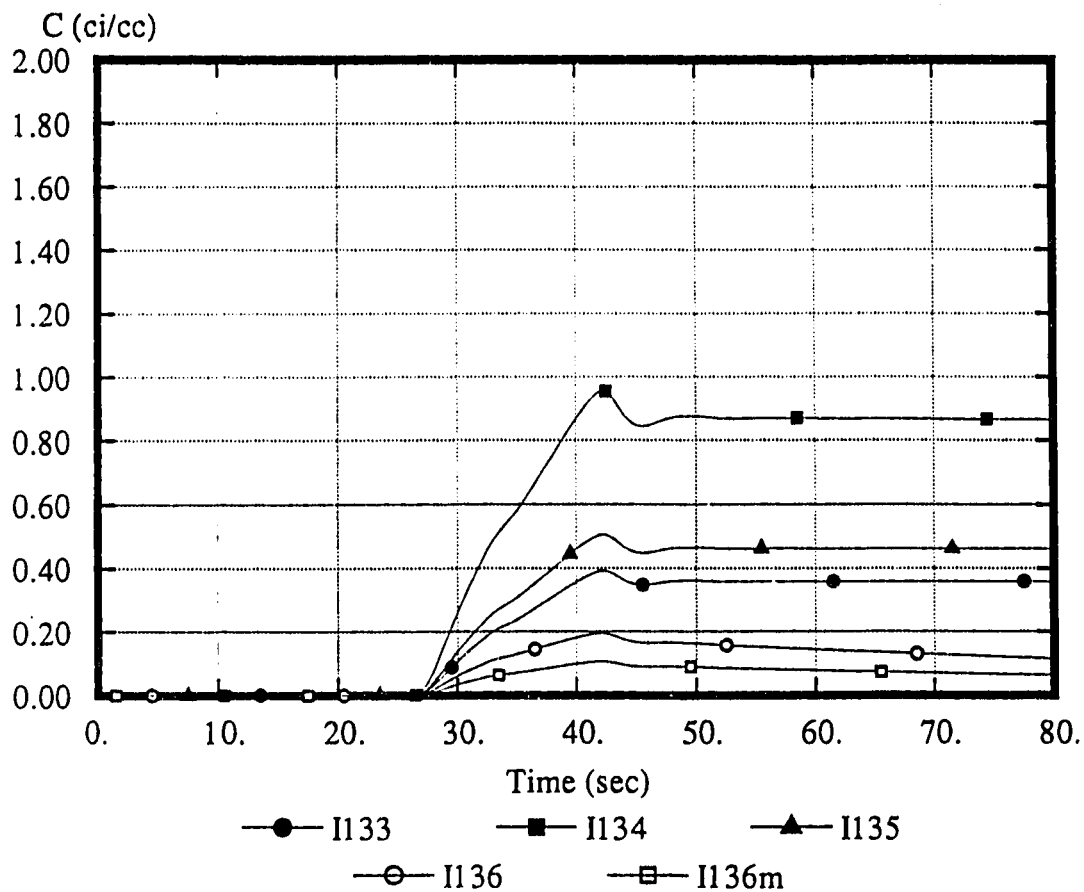


Fig. 6-16 Concentration of Iodines in Coolant (Case 1)

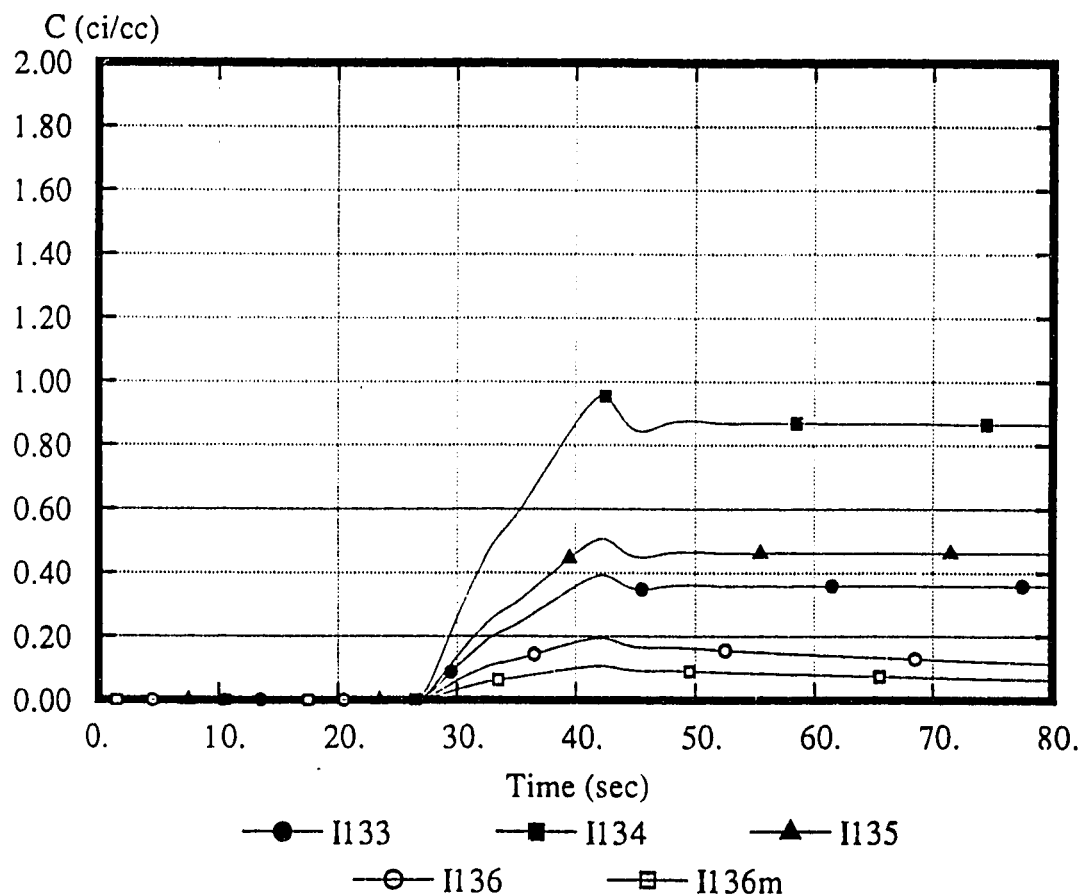


Fig. 6-17 Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 1)

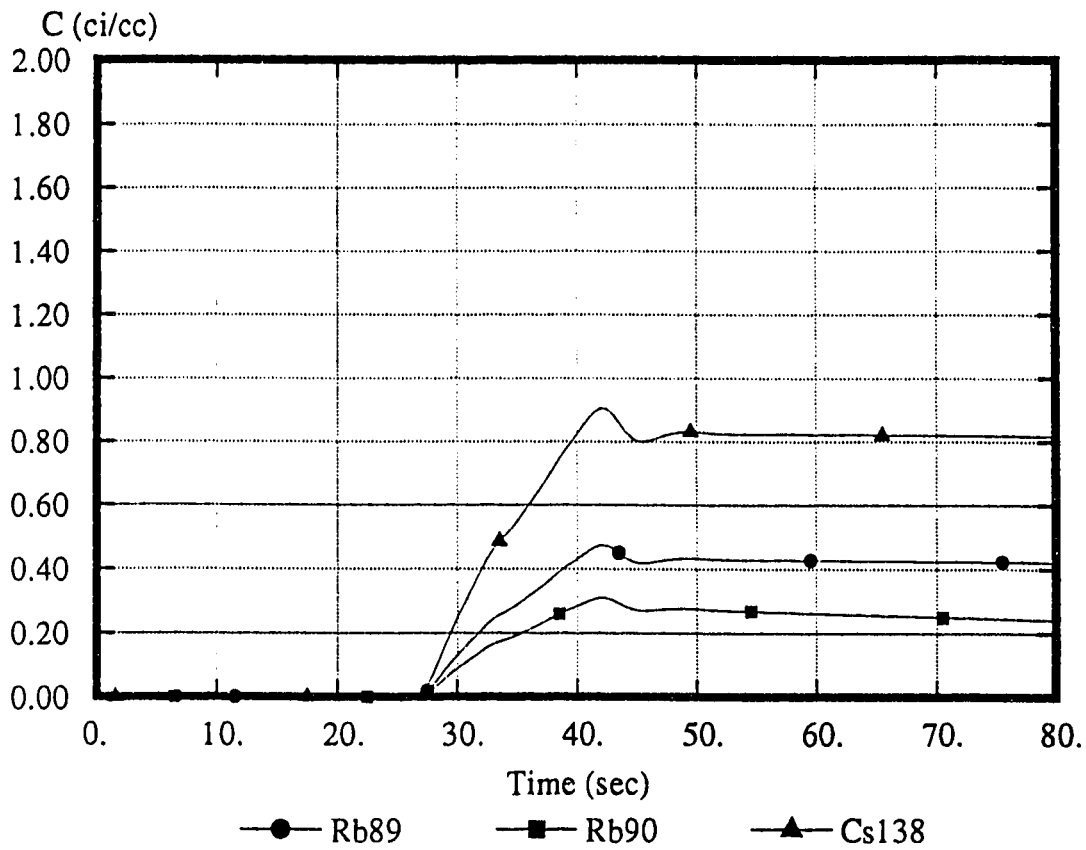


Fig. 6-18 Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 1)

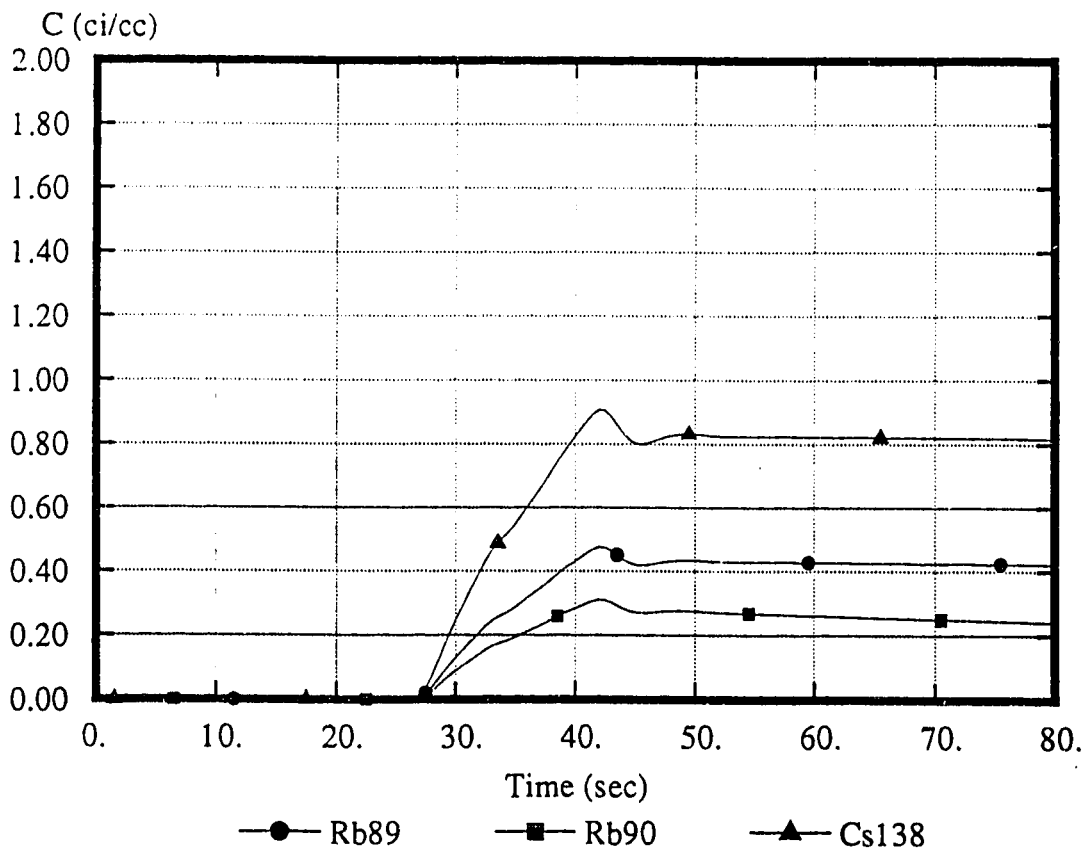


Fig. 6-19 Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 1)

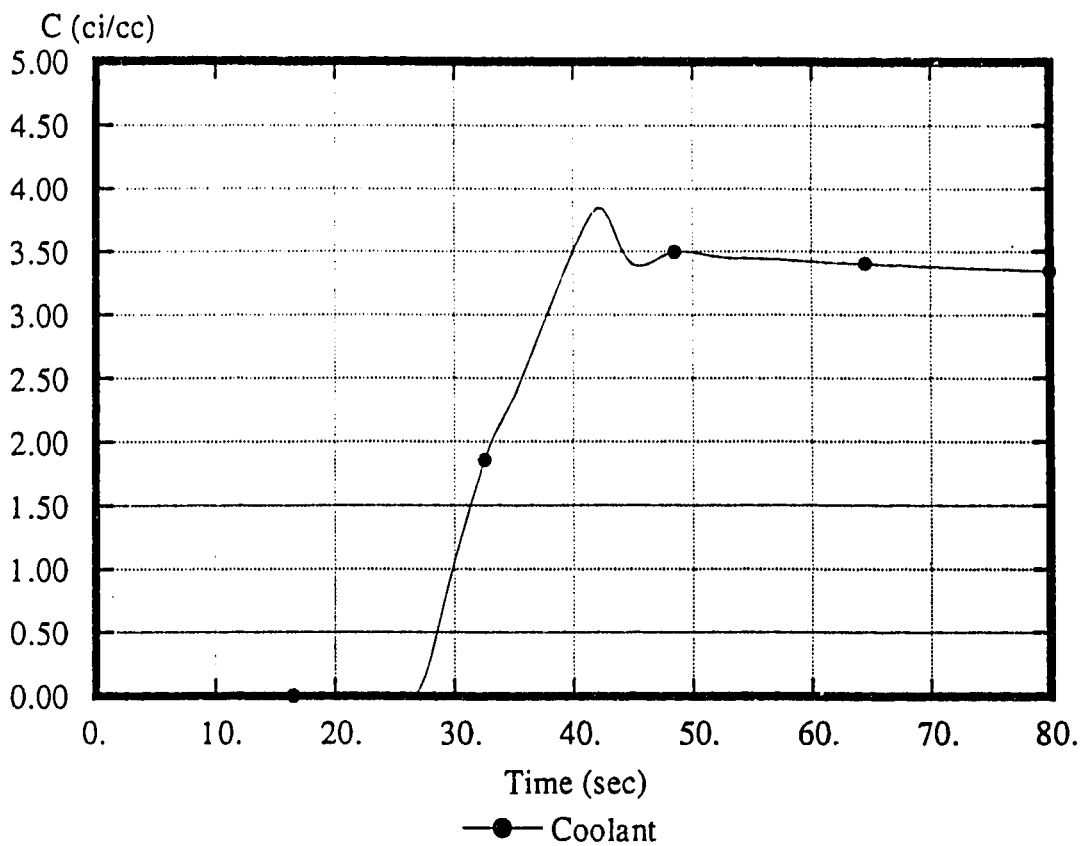


Fig. 6-20 Total Activity of FPs in Coolant (Case 1)

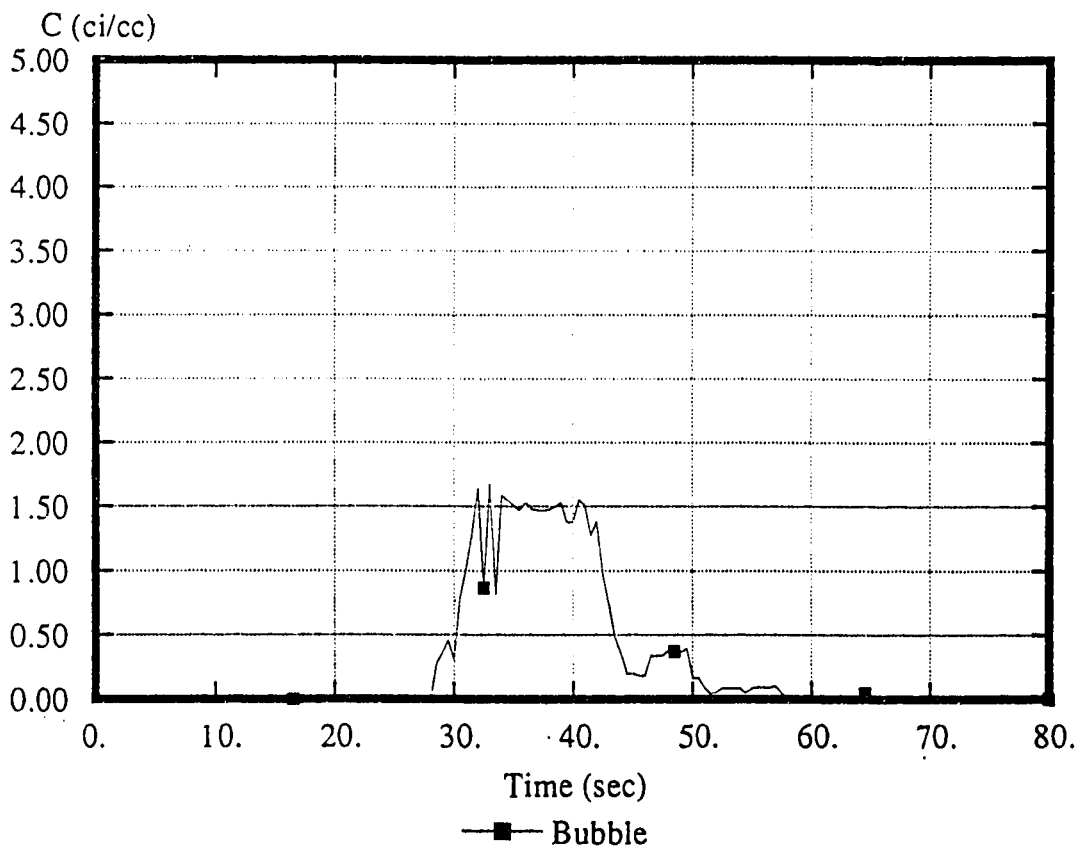


Fig. 6-21 Total Activity of FPs in Bubbles (Case 1)

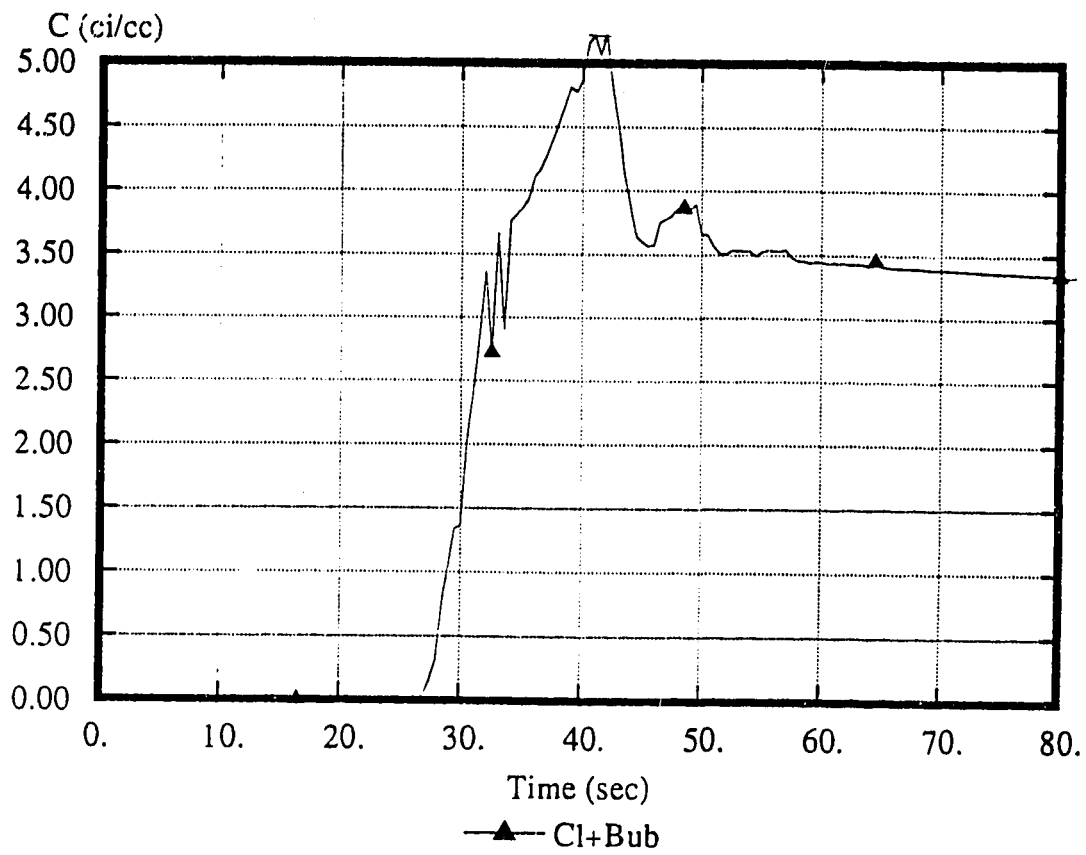


Fig. 6-22 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 1)

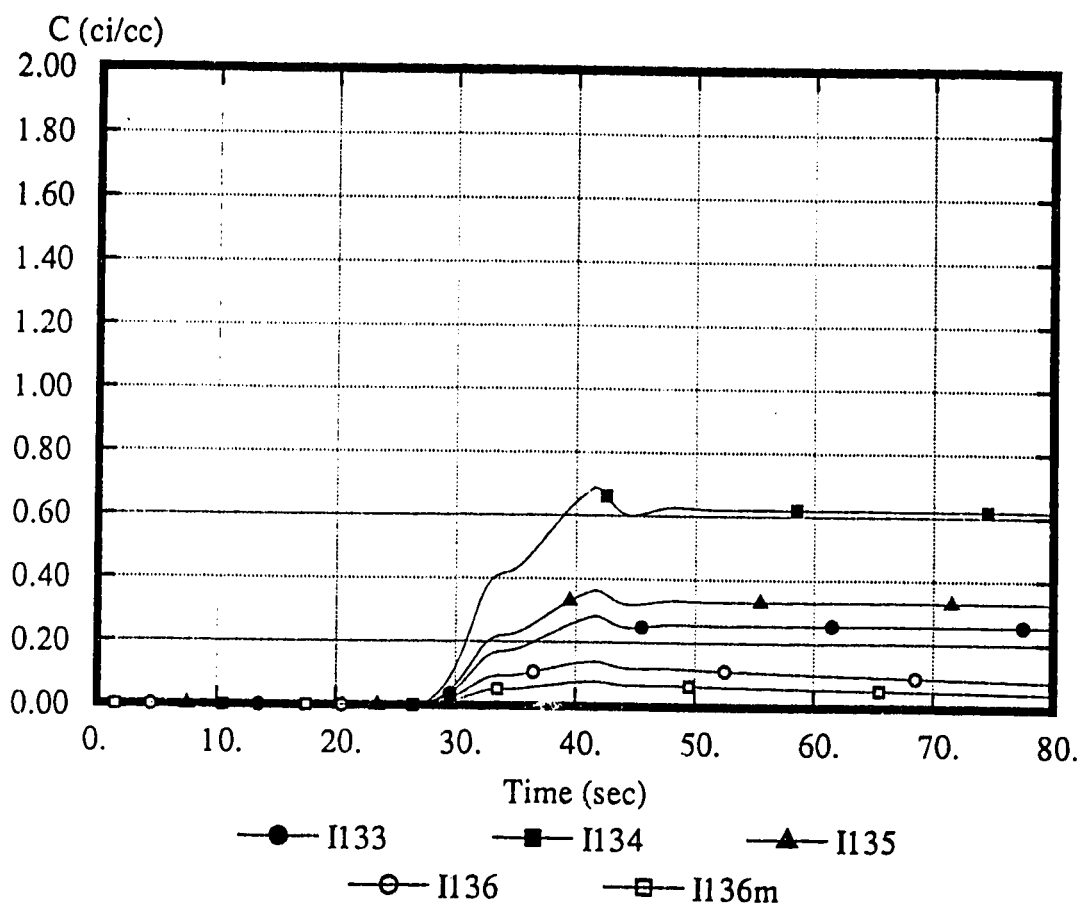


Fig. 6-23 Concentration of Iodines in Coolant (Case 2)

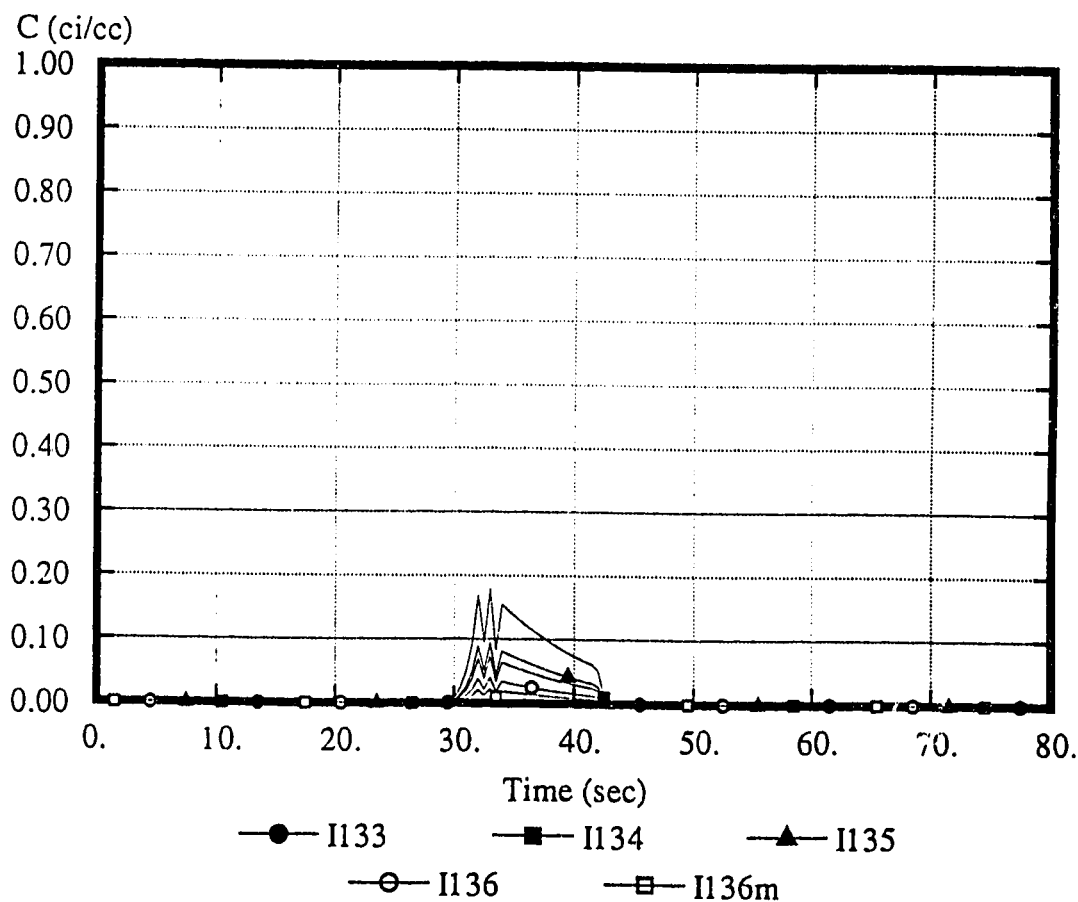


Fig. 6-24 Concentration of Iodines in Bubbles (Case 2)

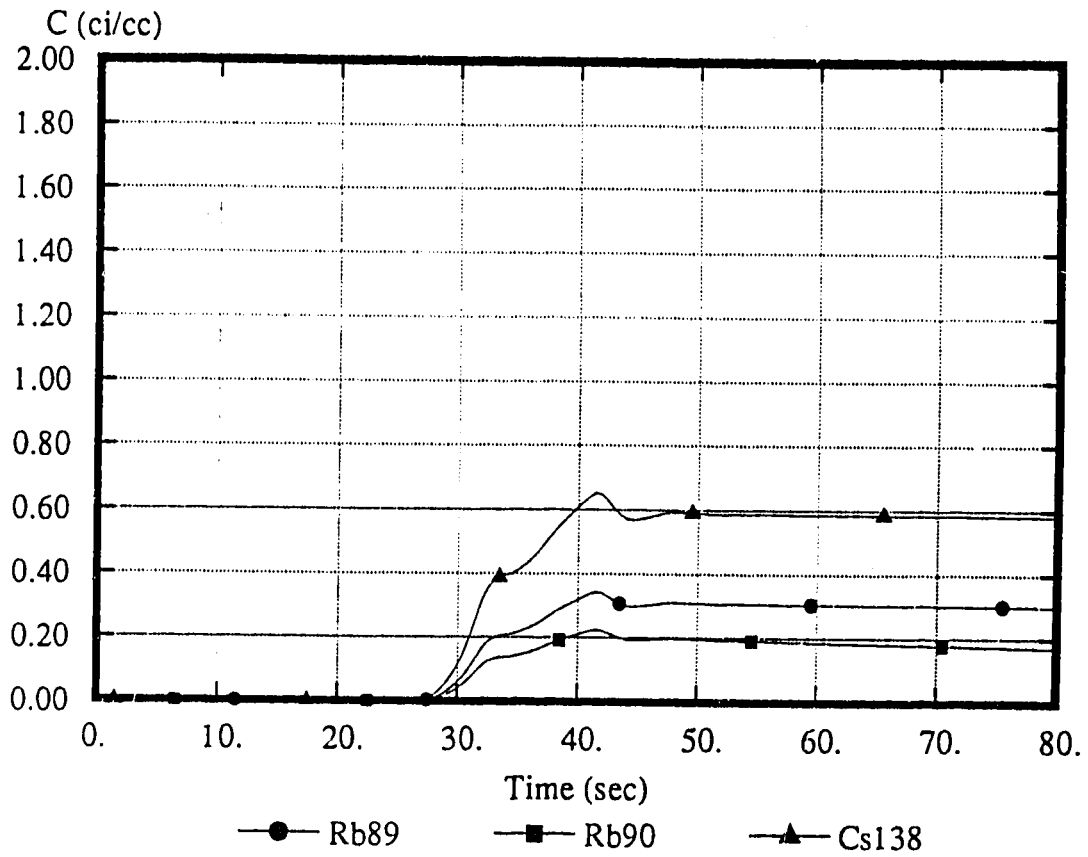


Fig. 6-25 Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 2)

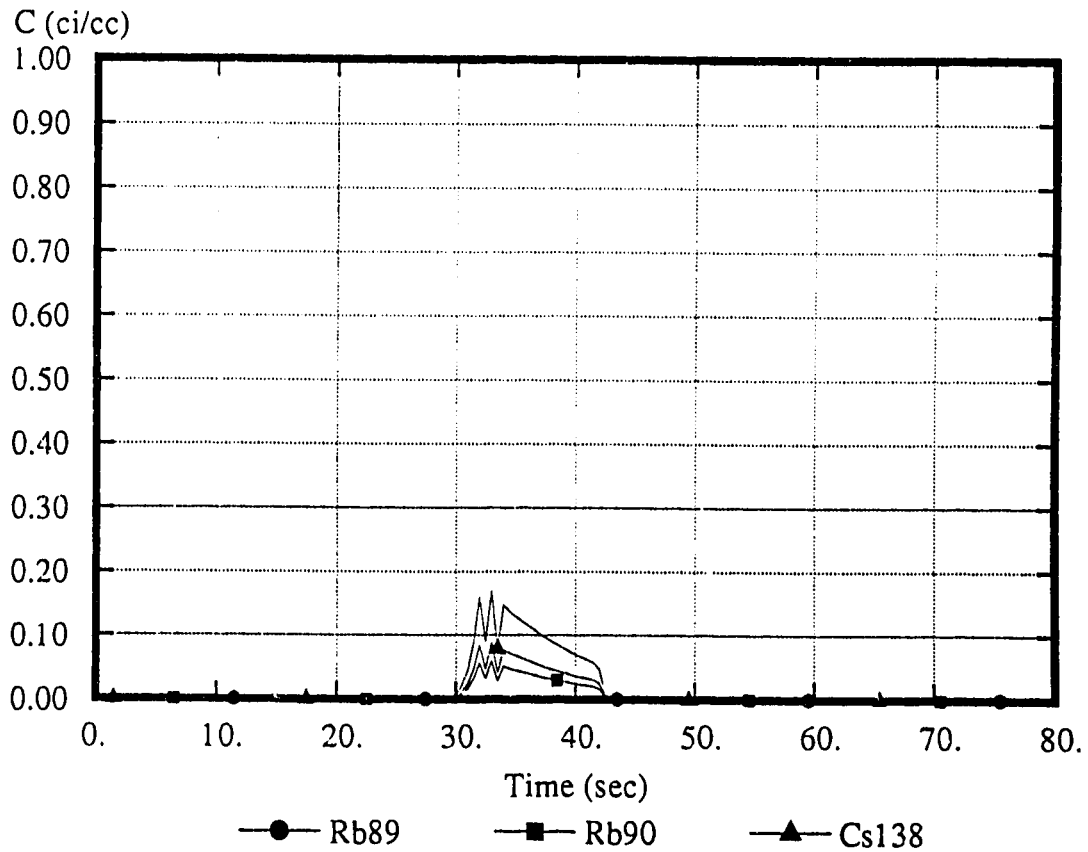


Fig. 6-26 Concentration of Rb/Cs in Bubbles (Case 2)

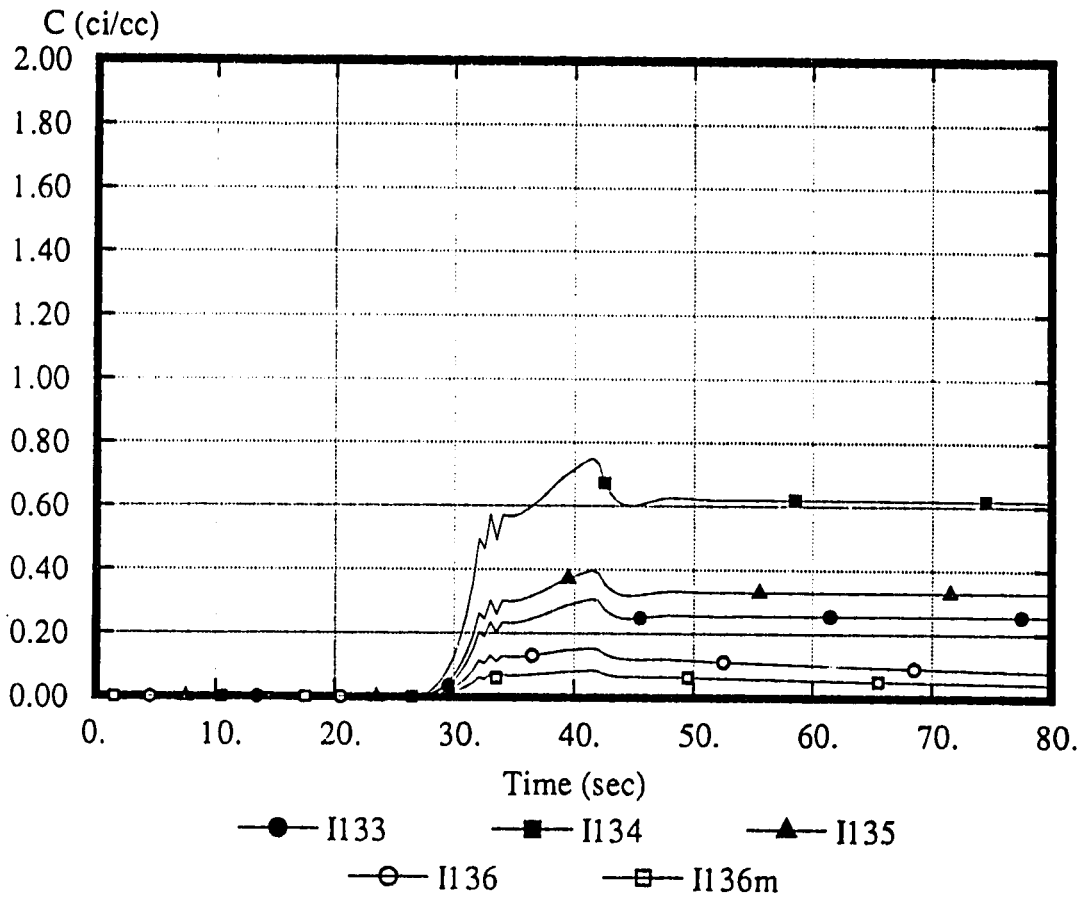


Fig. 6-27 Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 2)

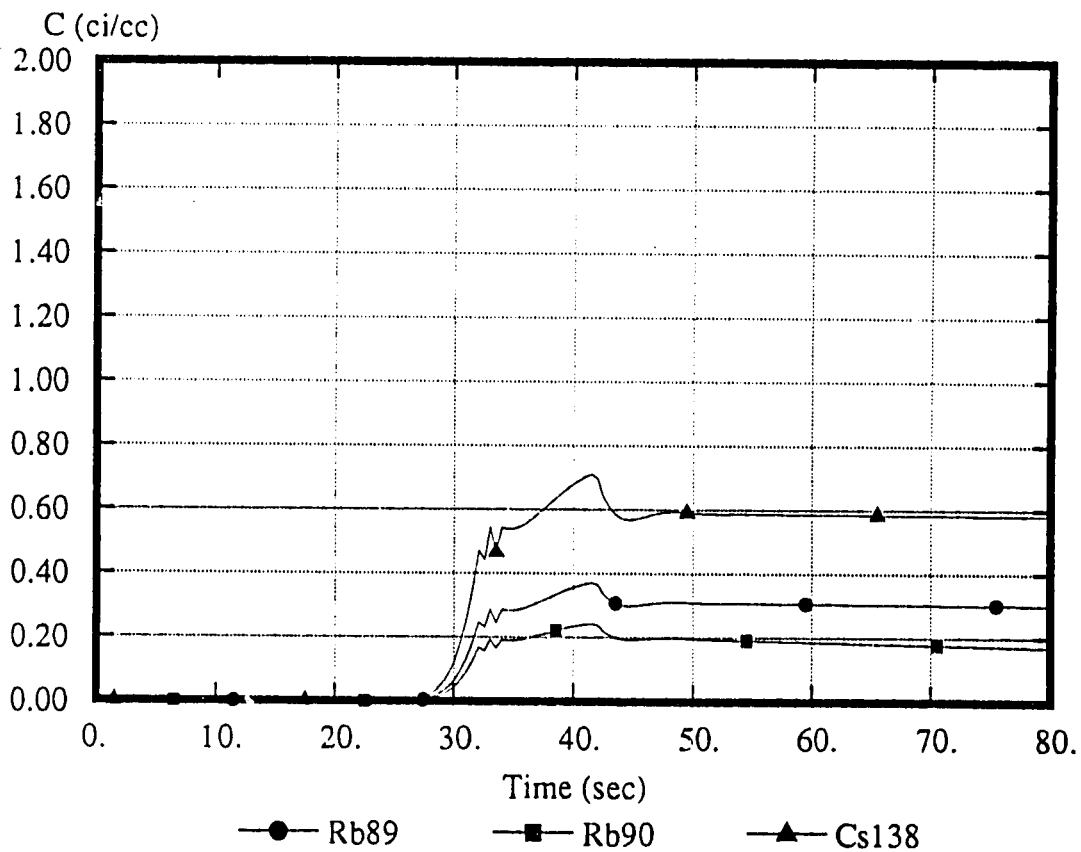


Fig. 6-28 Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 2)

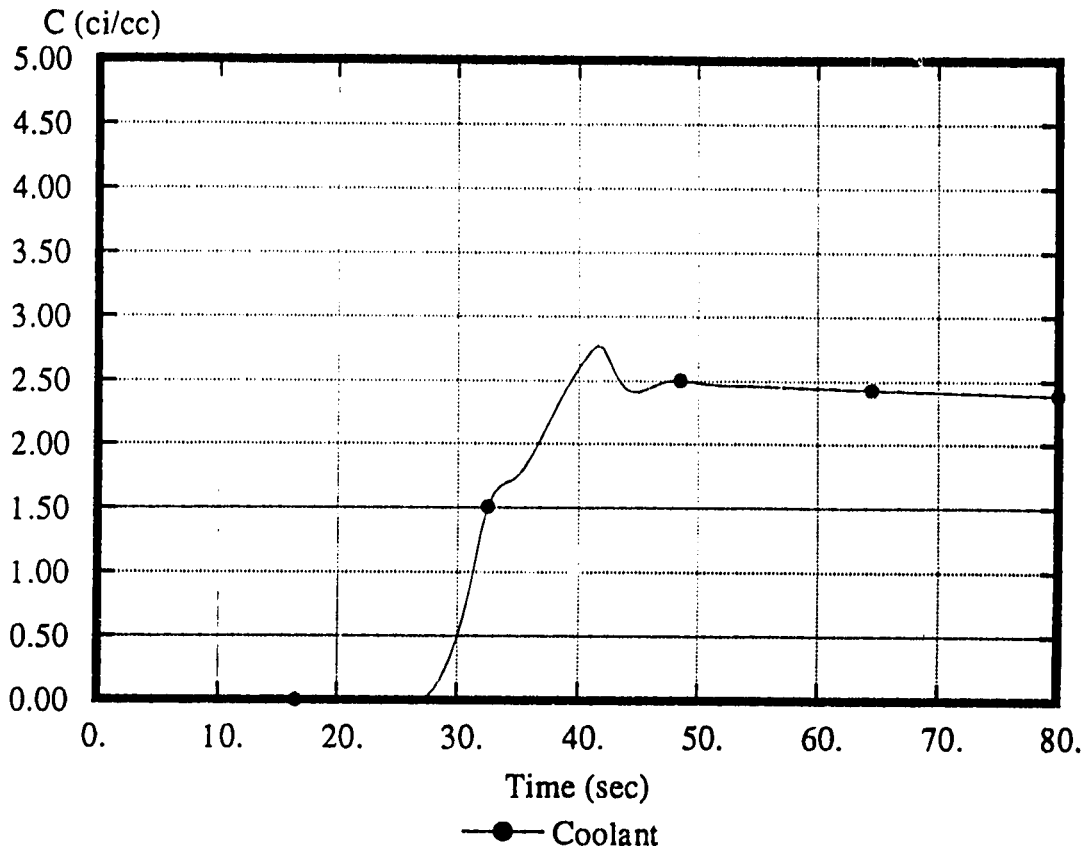


Fig. 6-29 Total Activity of FPs in Coolant (Case 2)

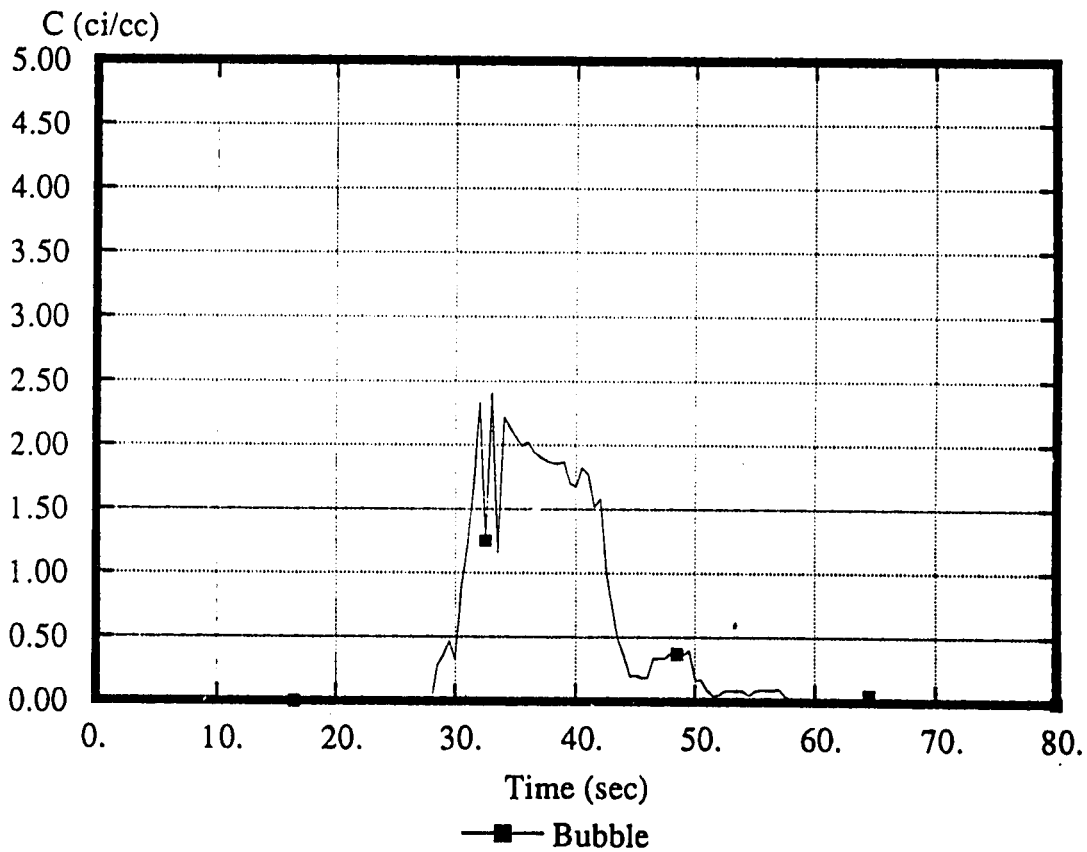


Fig. 6-30 Total Activity of FPs in Bubbles (Case 2)

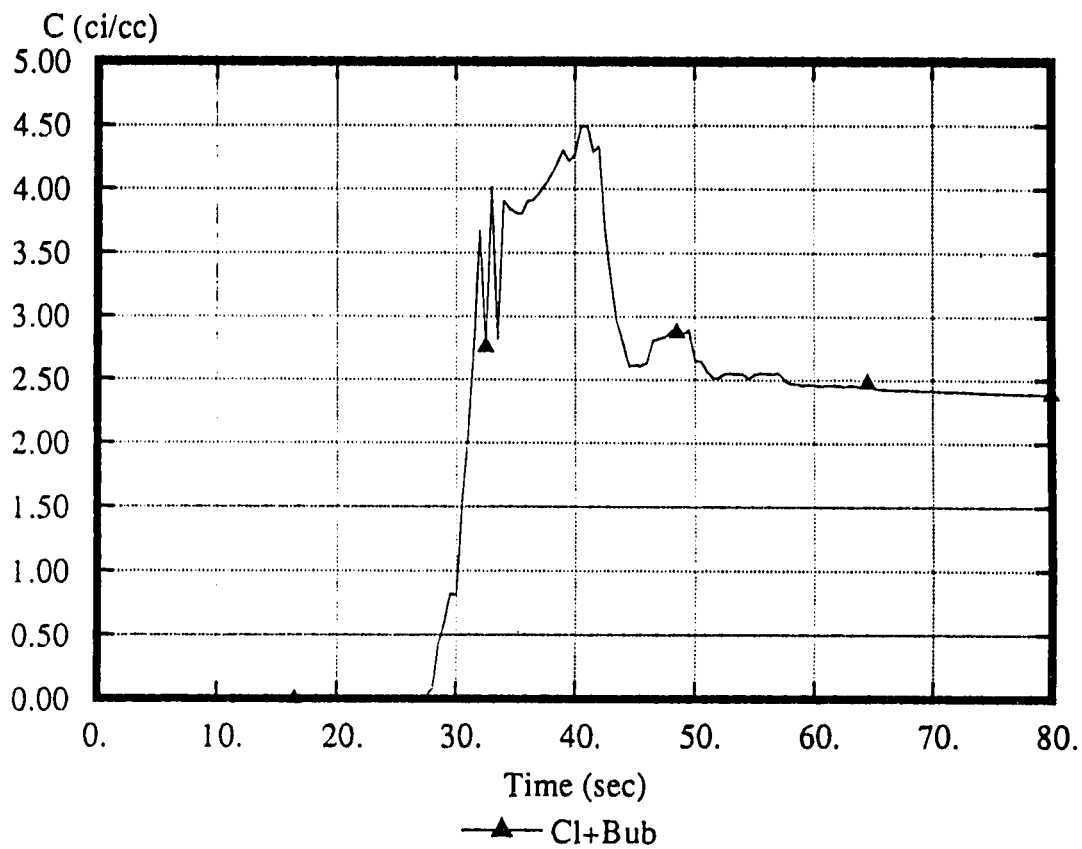


Fig. 6-31 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 2)

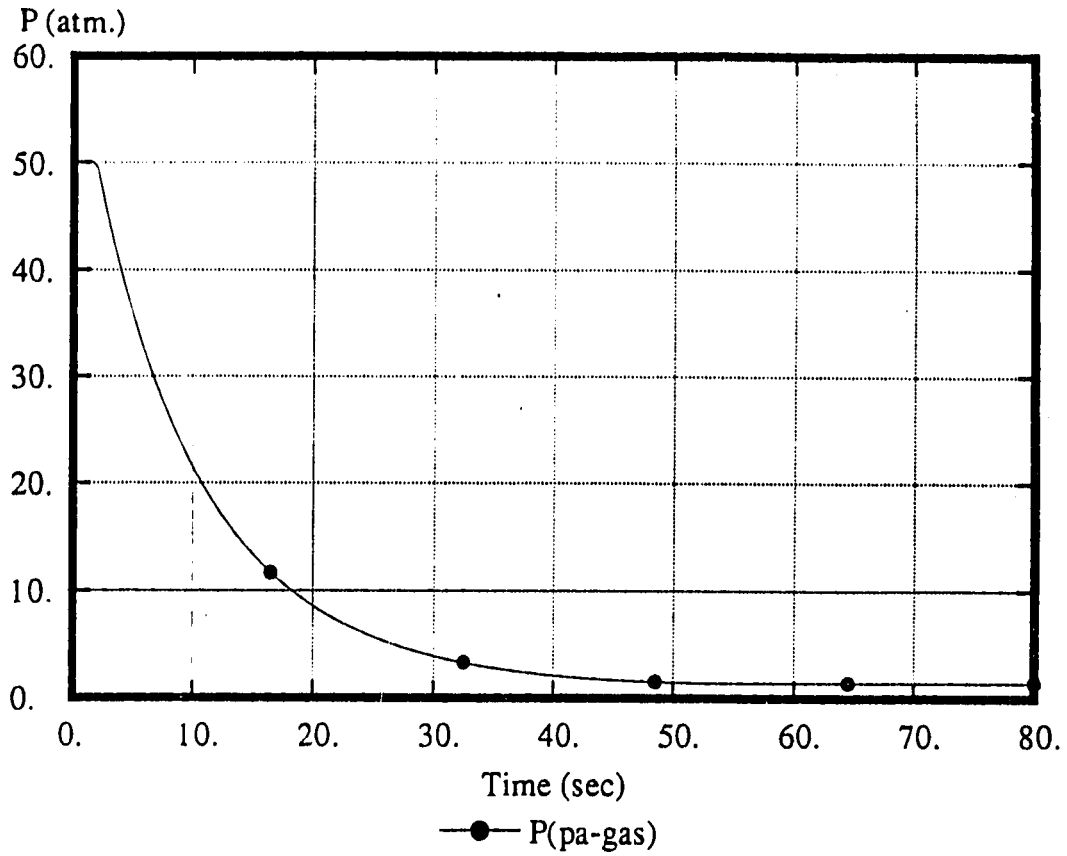


Fig. 6-32 Plenum Gas Pressure Transient of Fuel (Case 3)

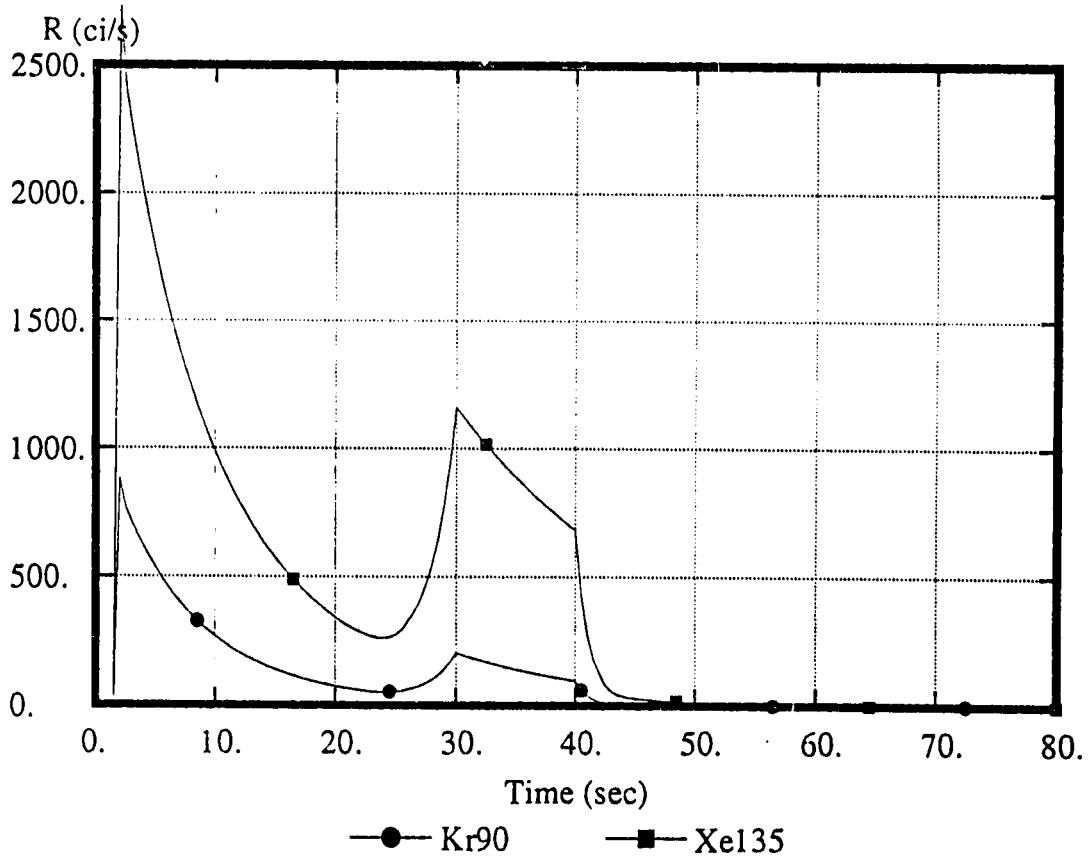


Fig. 6-33 Release Rate of Kr/Xe from Fuel (Case 3)

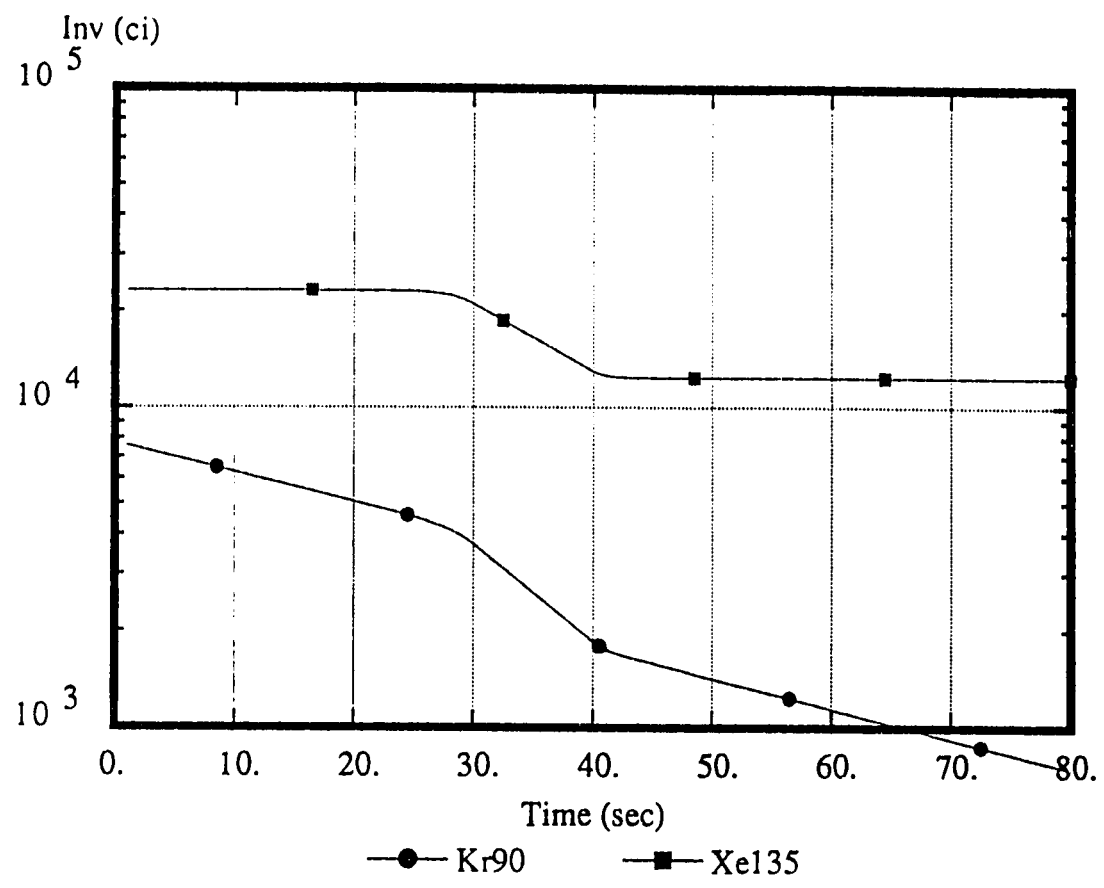


Fig. 6-34 Residual Inventory of Kr/Xe in Fuel (Case 3)

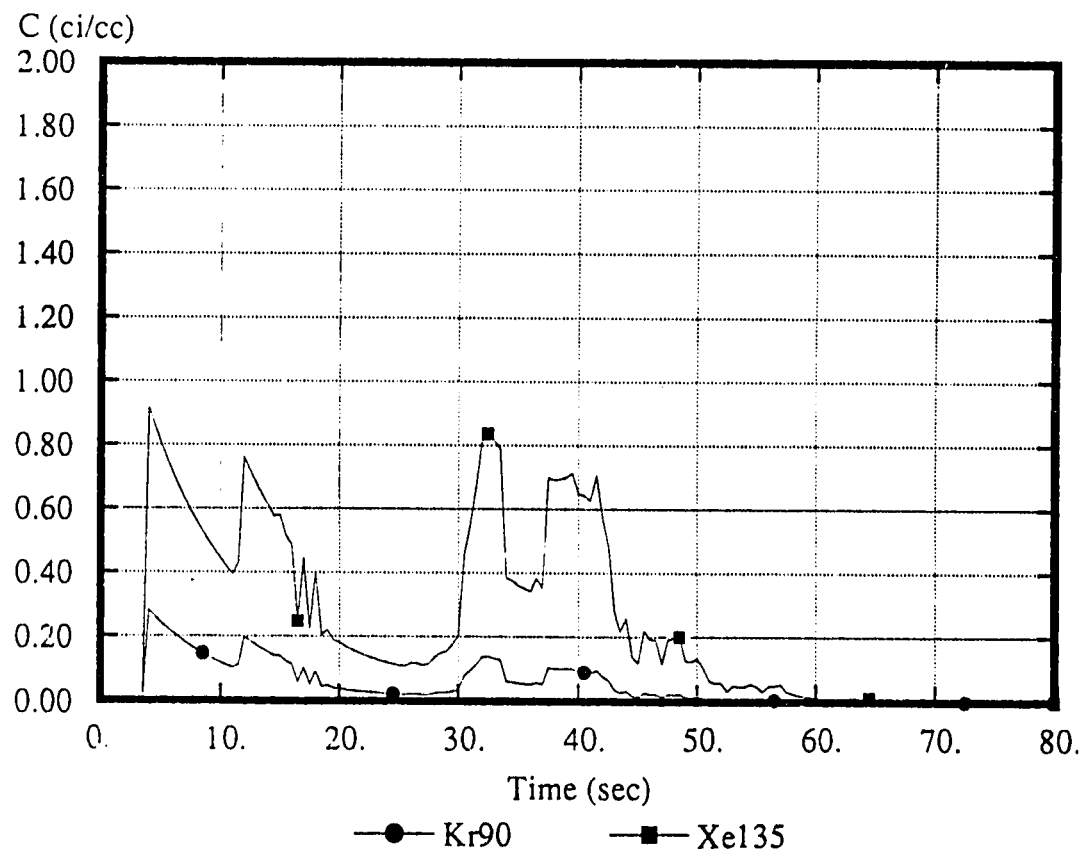


Fig. 6-35 Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 3)

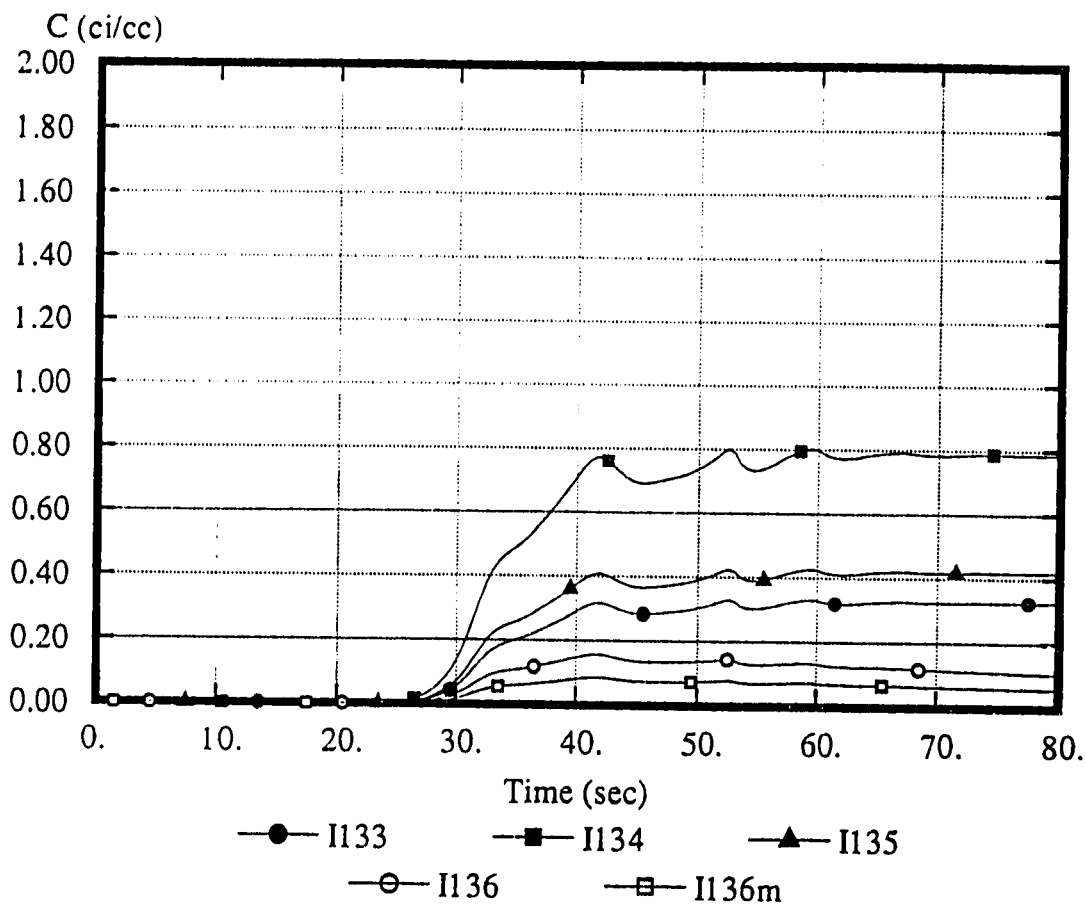


Fig. 6-36 Concentration of Iodines in Coolant (Case 3)

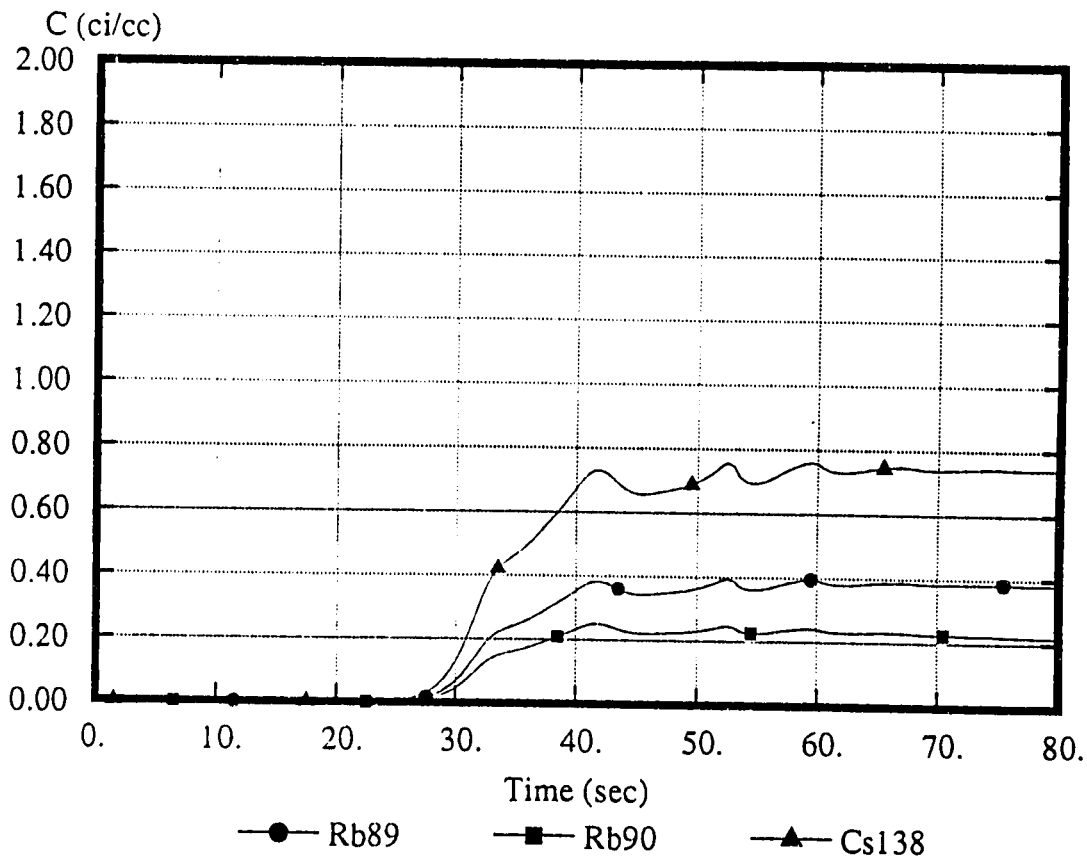


Fig. 6-37 Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 3)

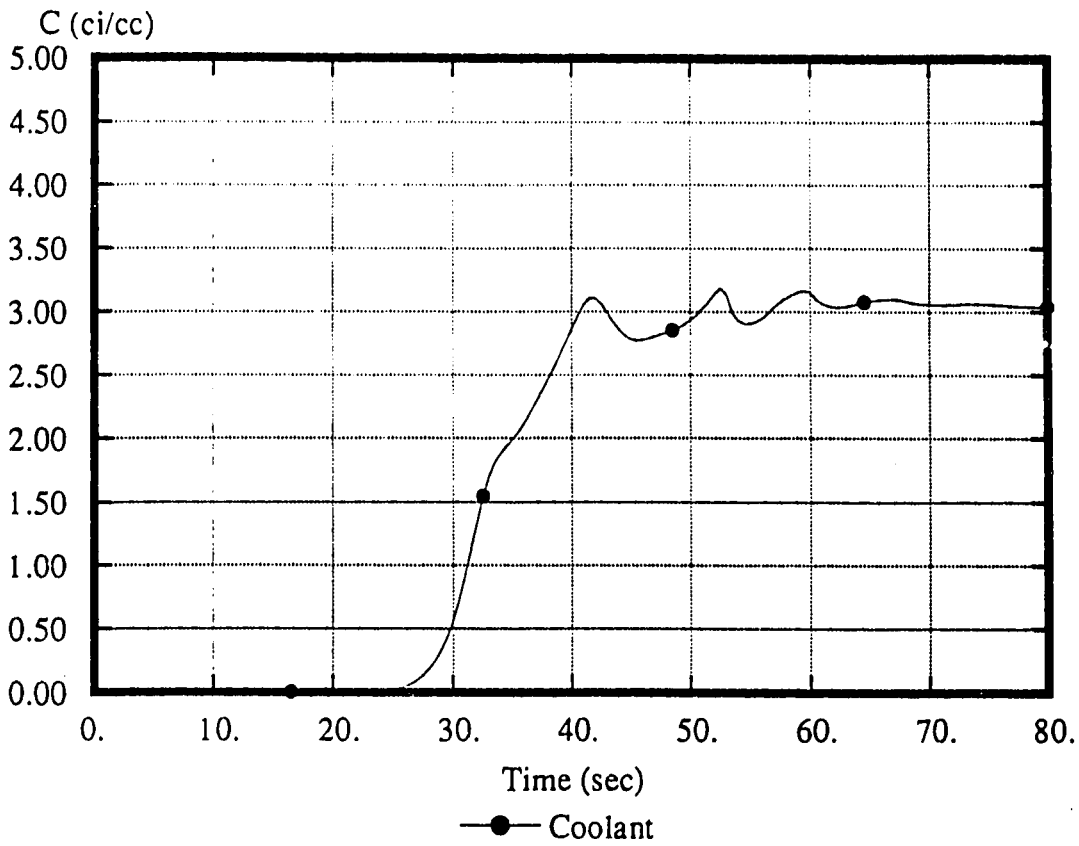


Fig. 6-38 Total Activity of FPs in Coolant (Case 3)

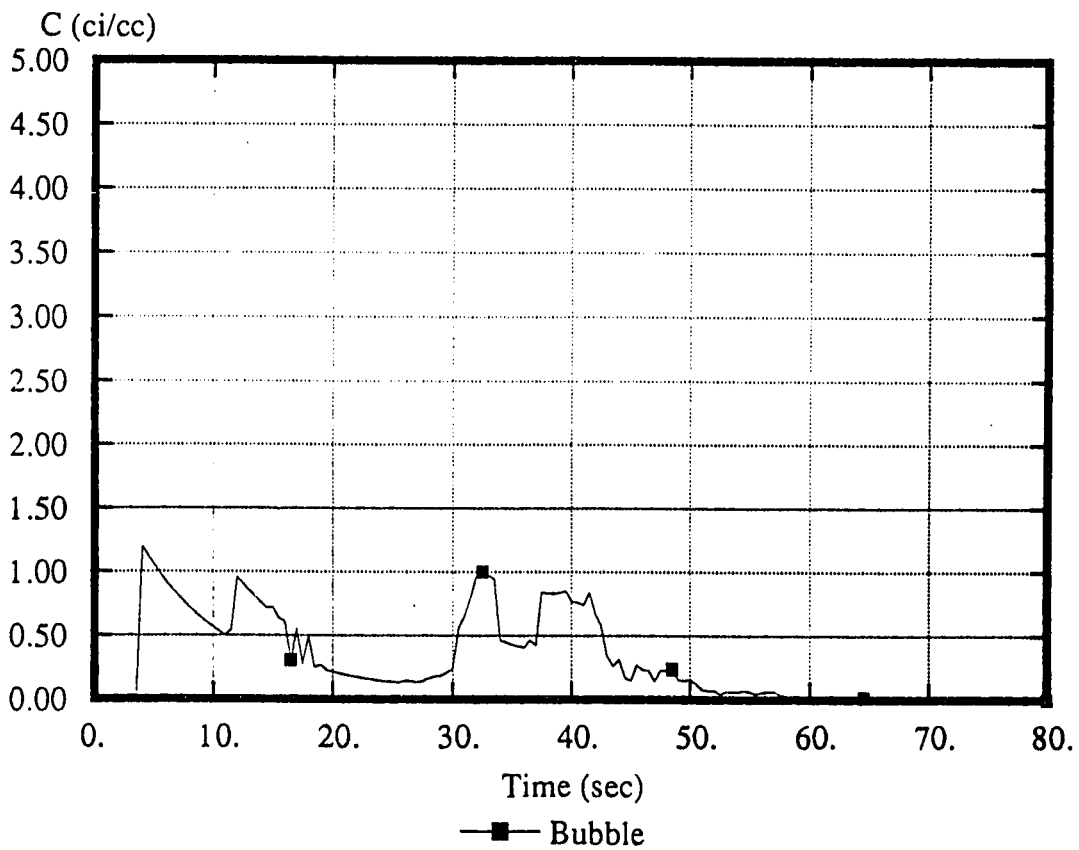


Fig. 6-39 Total Activity of FPs in Bubbles (Case 3)

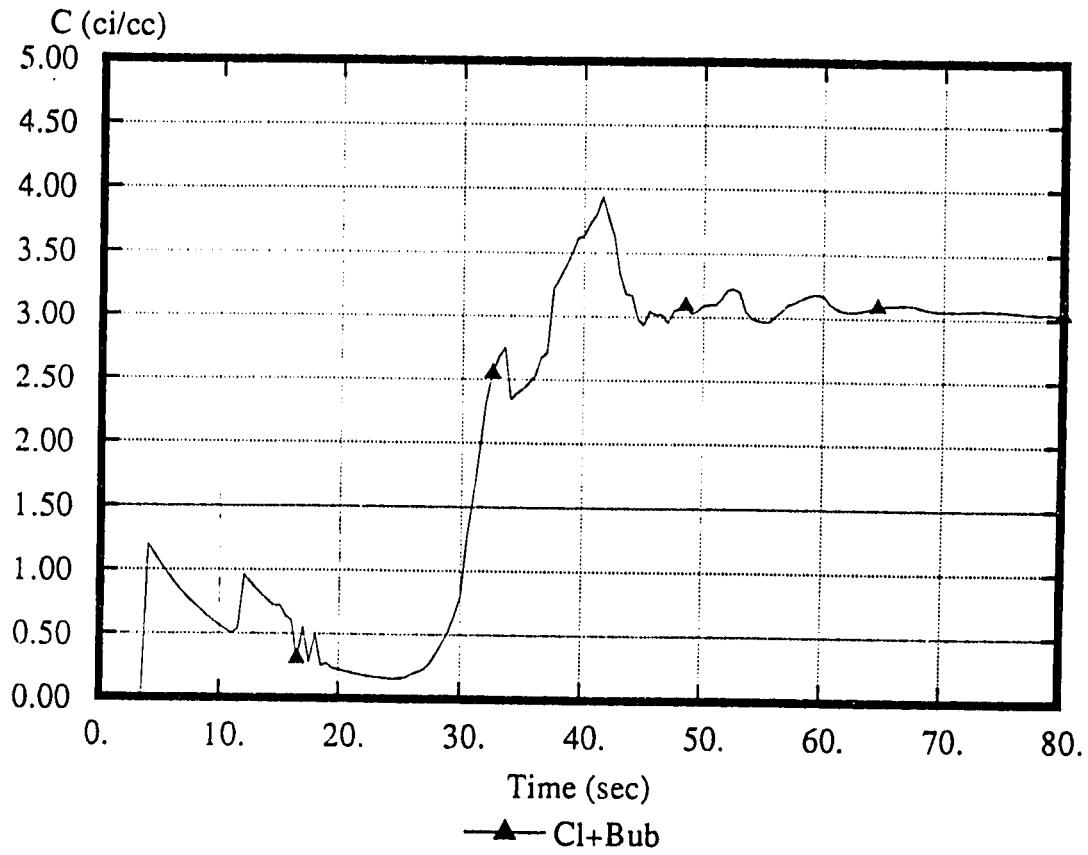


Fig. 6-40 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 3)

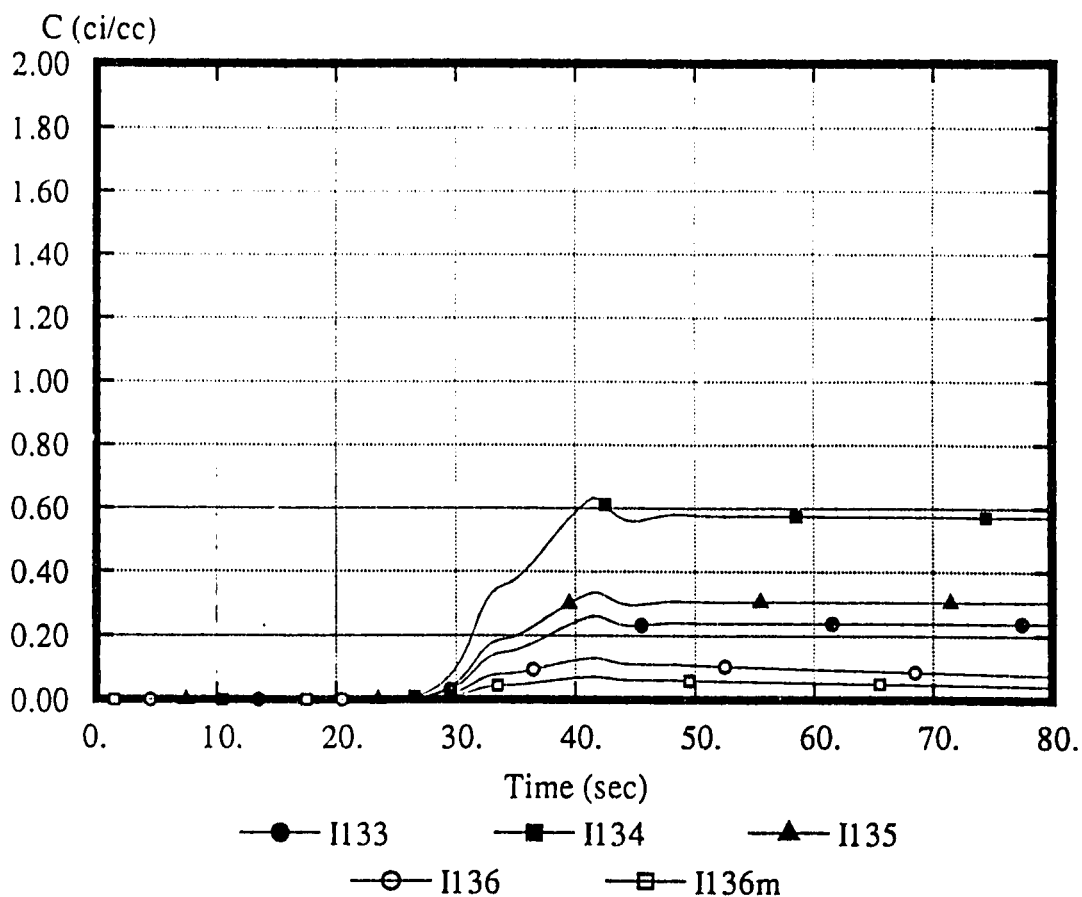


Fig. 6-41 Concentration of Iodines in Coolant (Case 4)

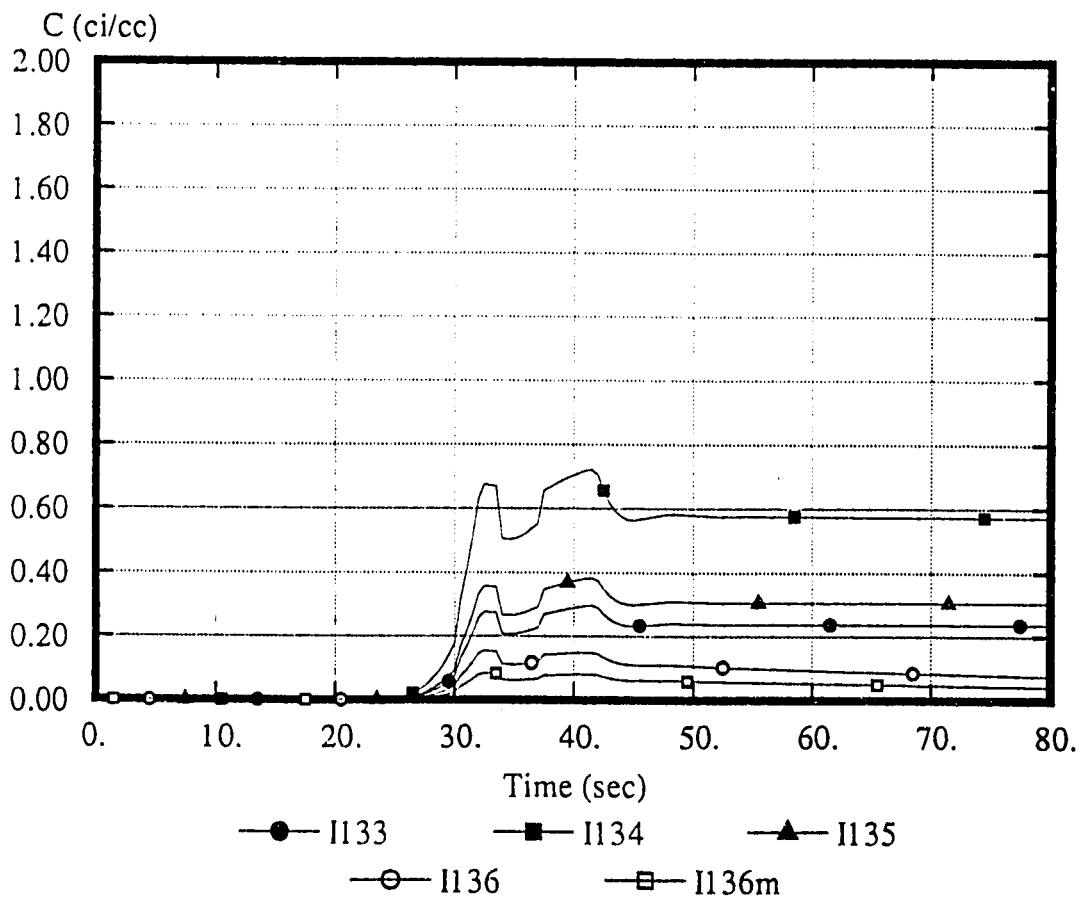


Fig. 6-42 Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 4)

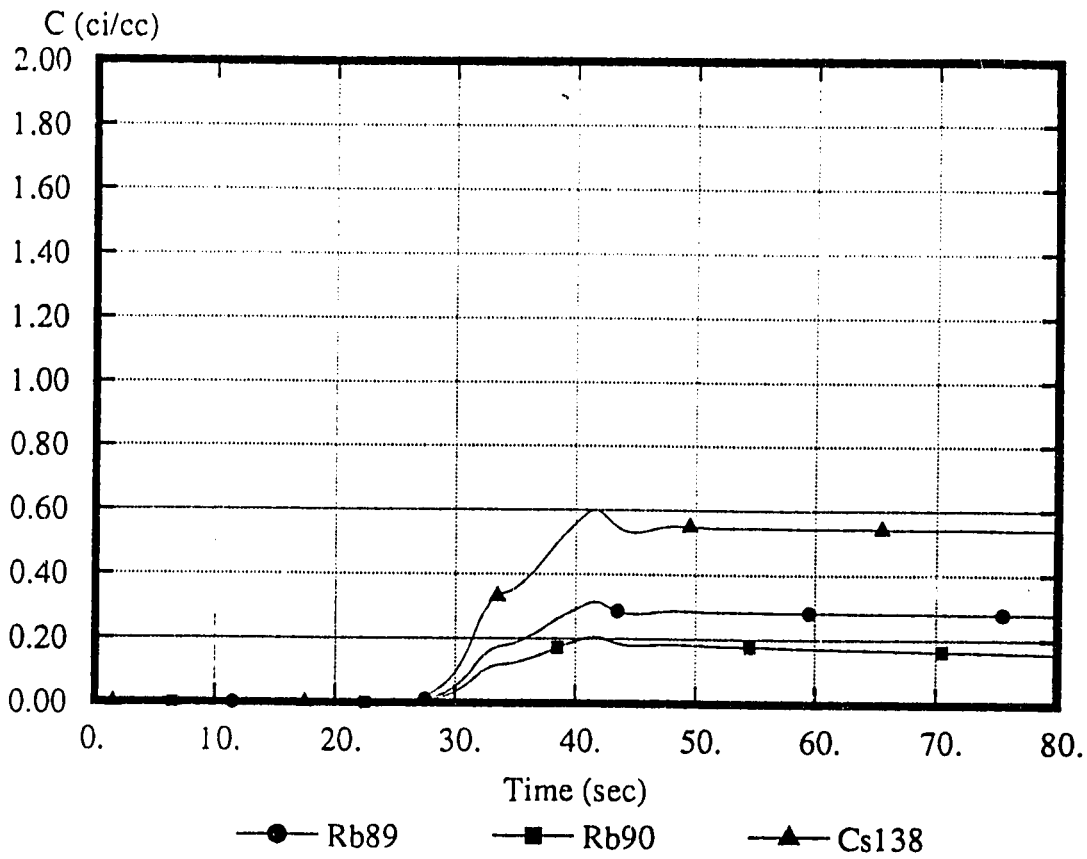


Fig. 6-43 Concentration of Rb/Cs in Coolant (Case 4)

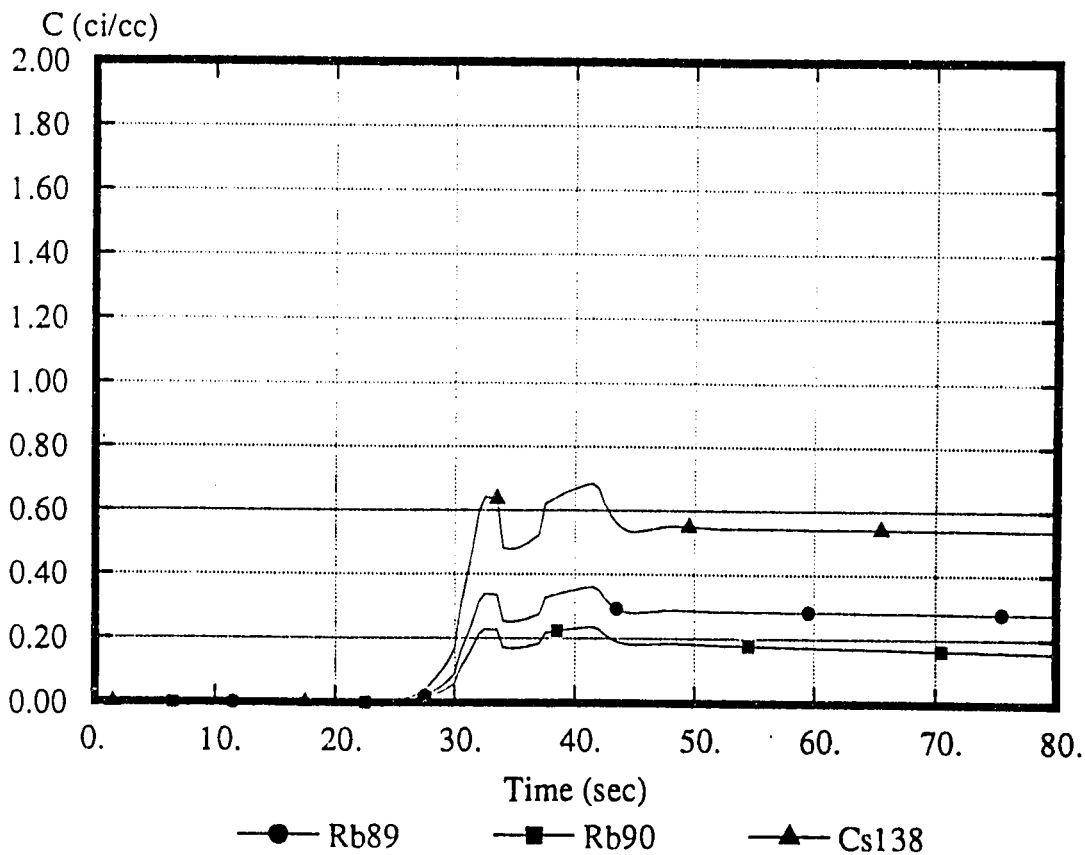


Fig. 6-44 Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 4)

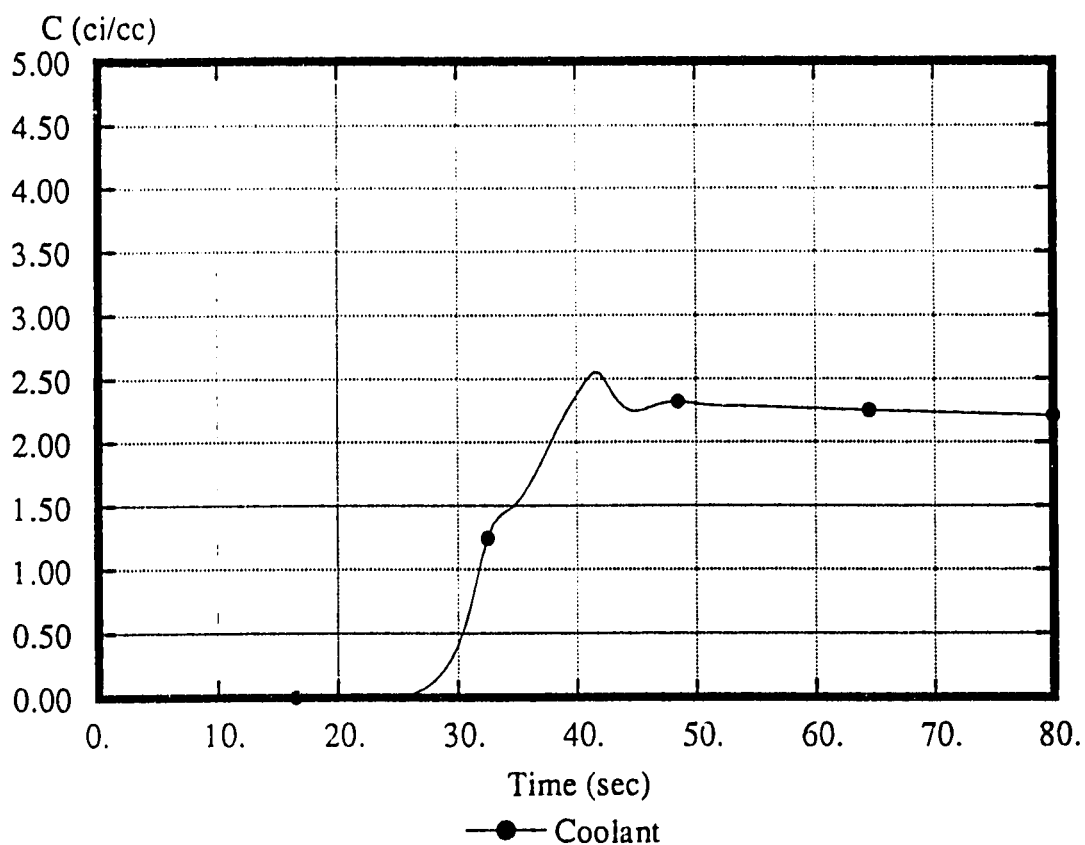


Fig. 6-45 Total Activity of FPs in Coolant (Case 4)

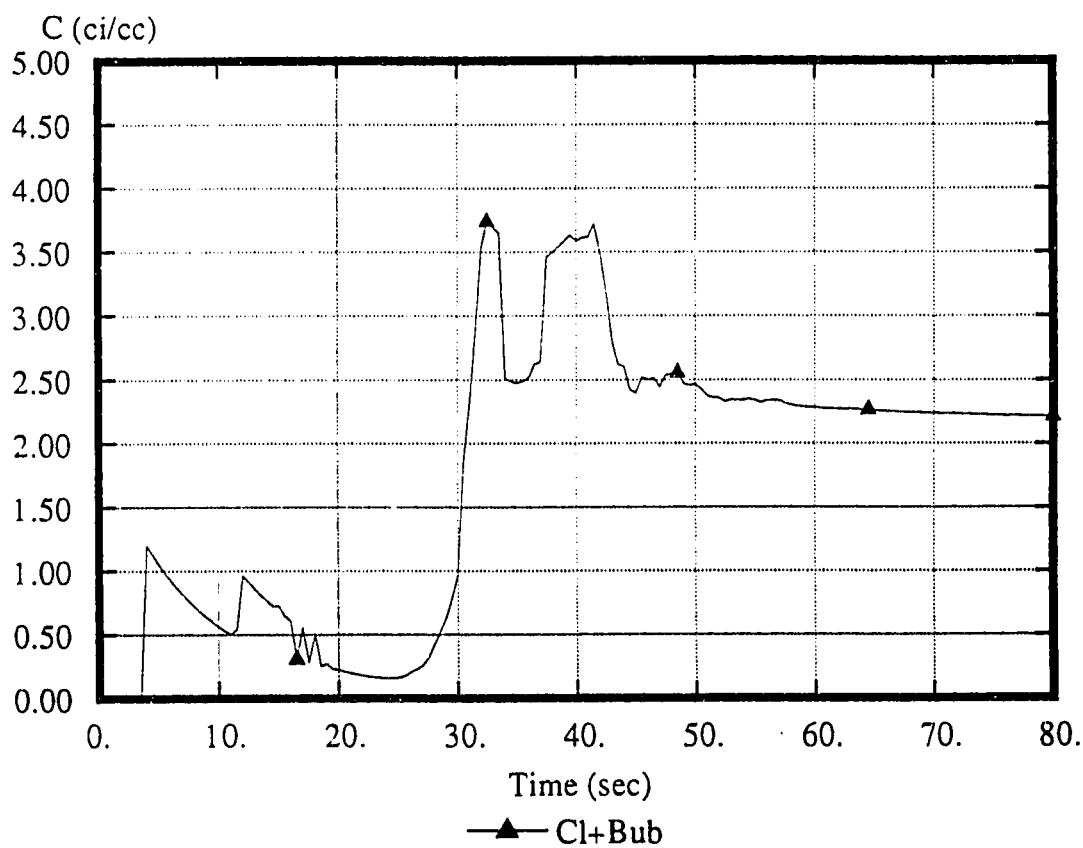


Fig. 6-46 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 4)

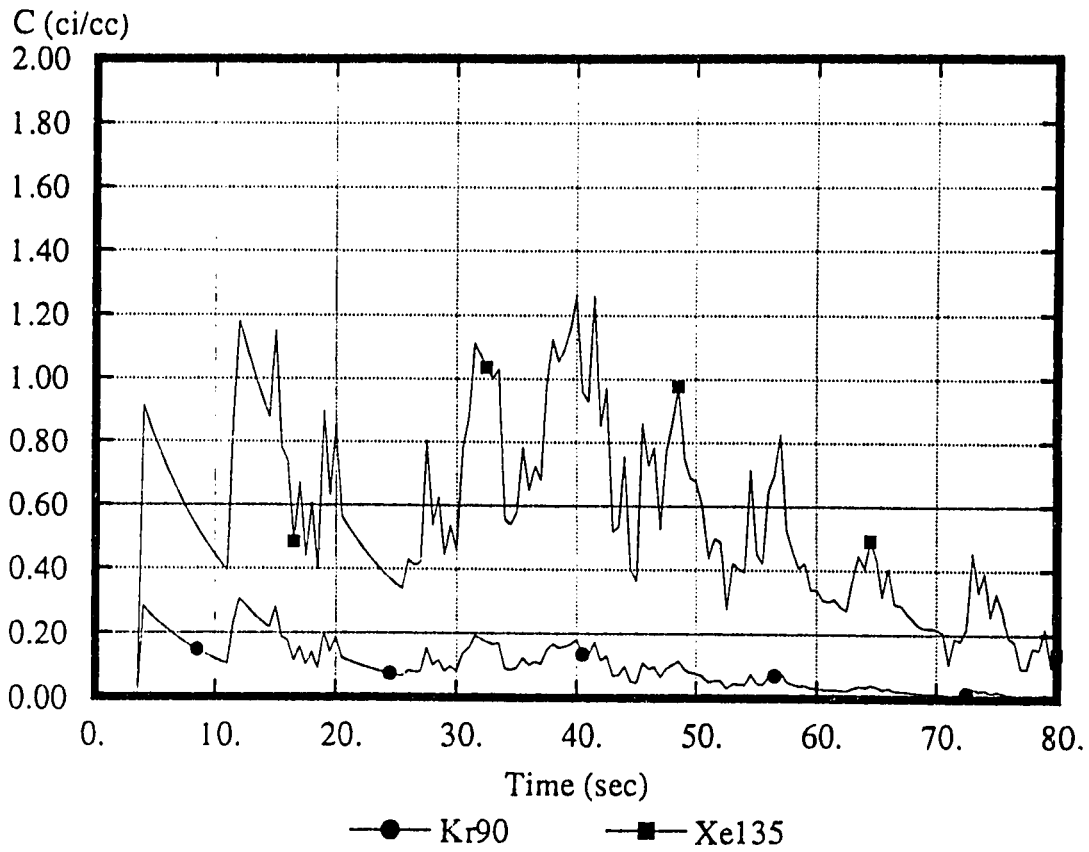


Fig. 6-47 Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 5)

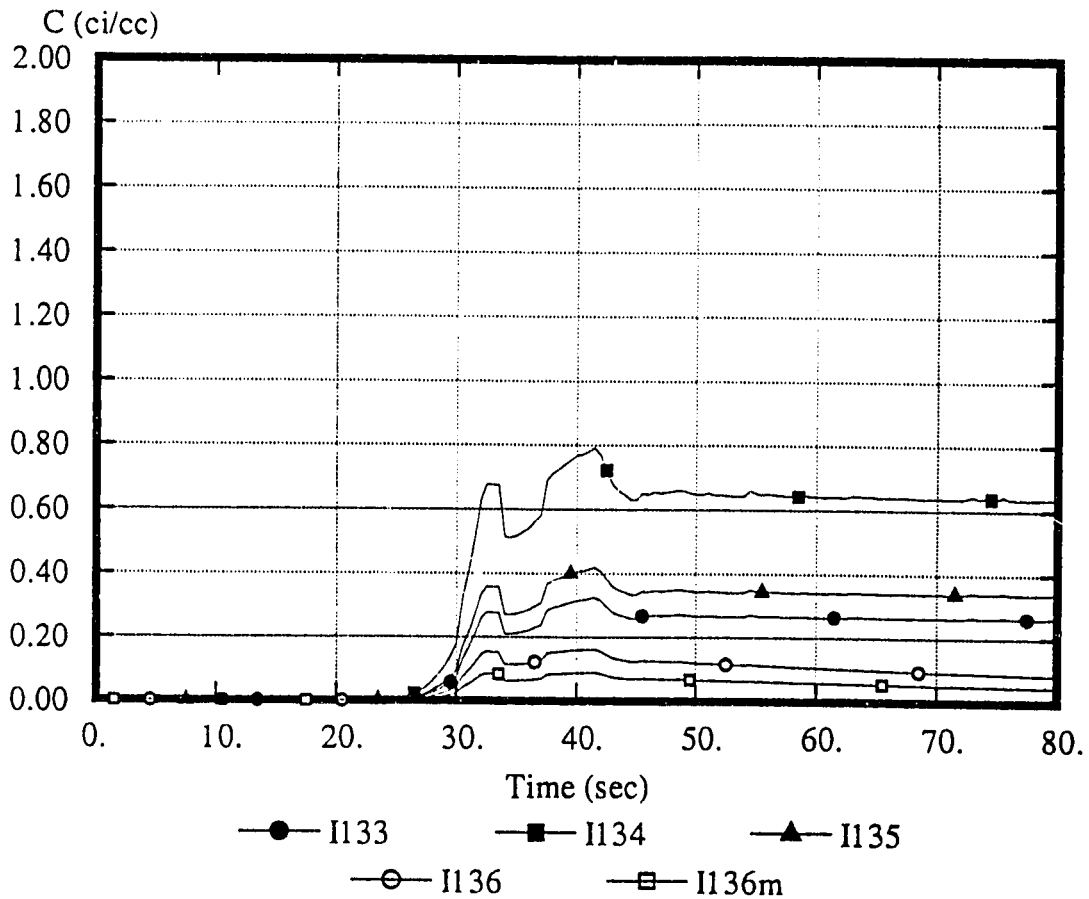


Fig. 6-48 Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 5)

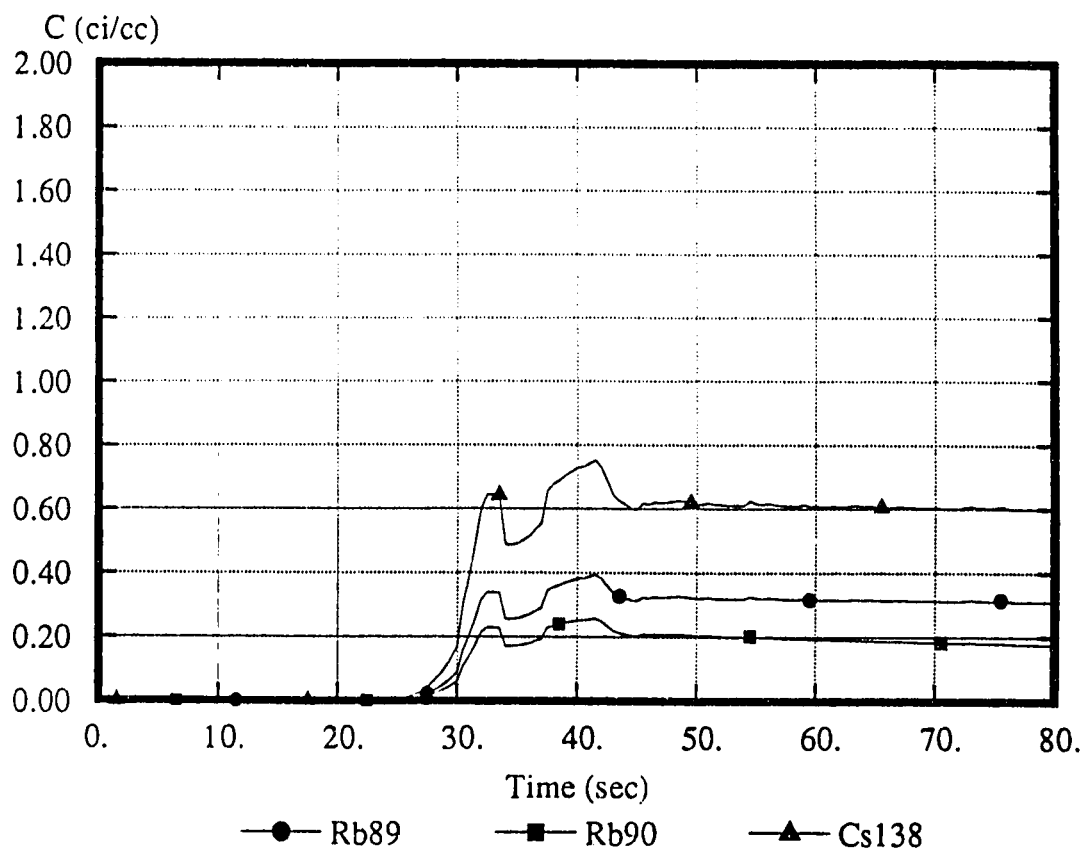


Fig. 6-49 Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 5)

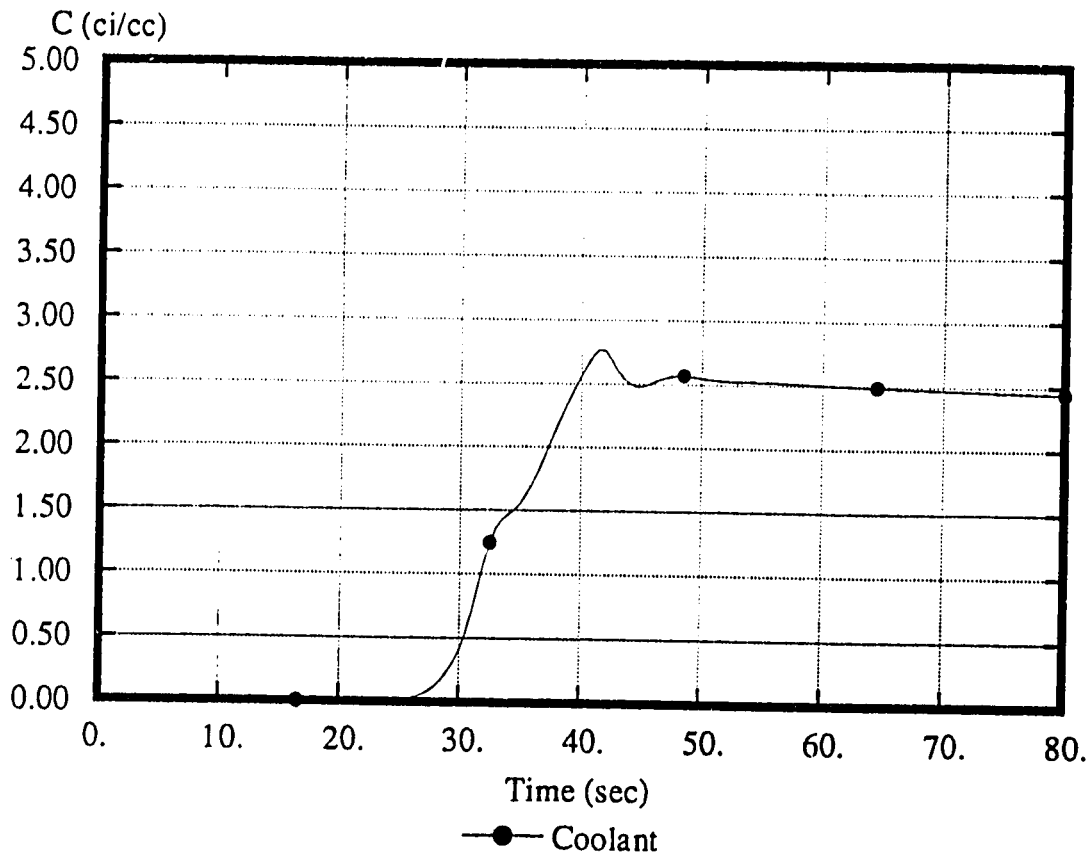


Fig. 6-50 Total Activity of FPs in Coolant (Case 5)

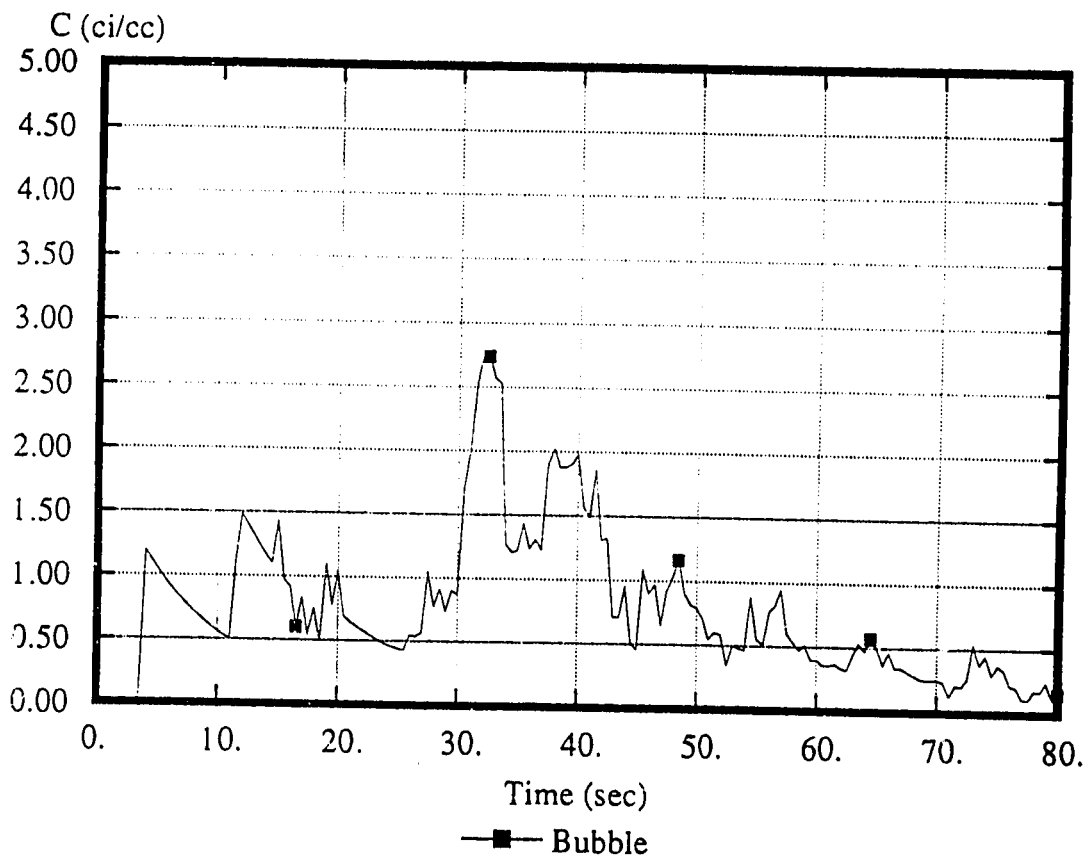


Fig. 6-51 Total Activity of FPs in Bubbles (Case 5)

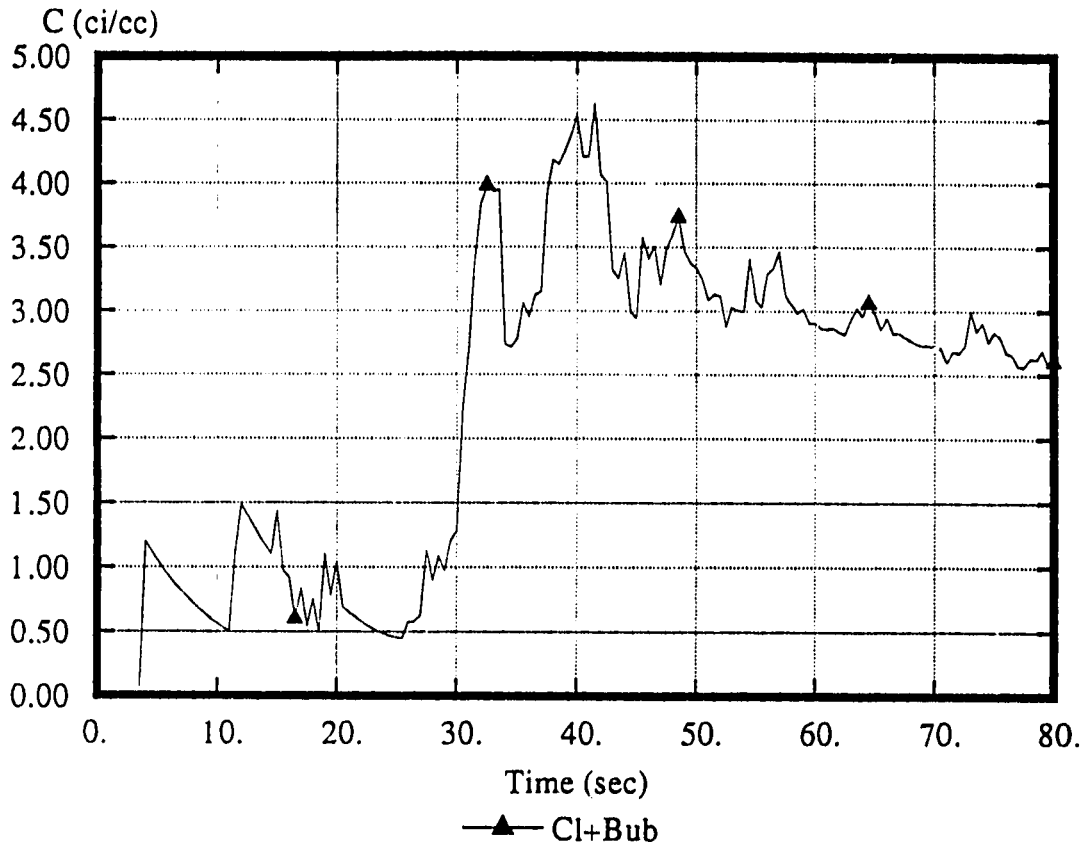


Fig. 6-52 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 5)

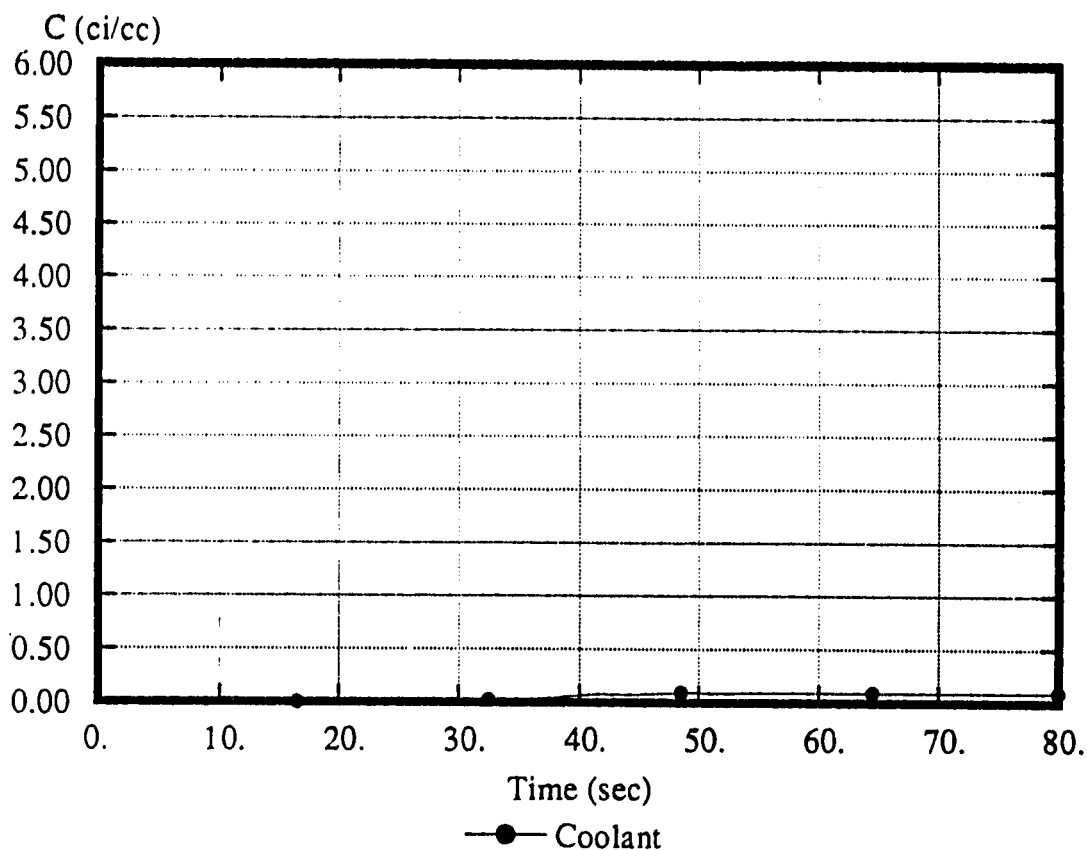


Fig. 6-53 Total Activity of FPs in Coolant (Case 6)

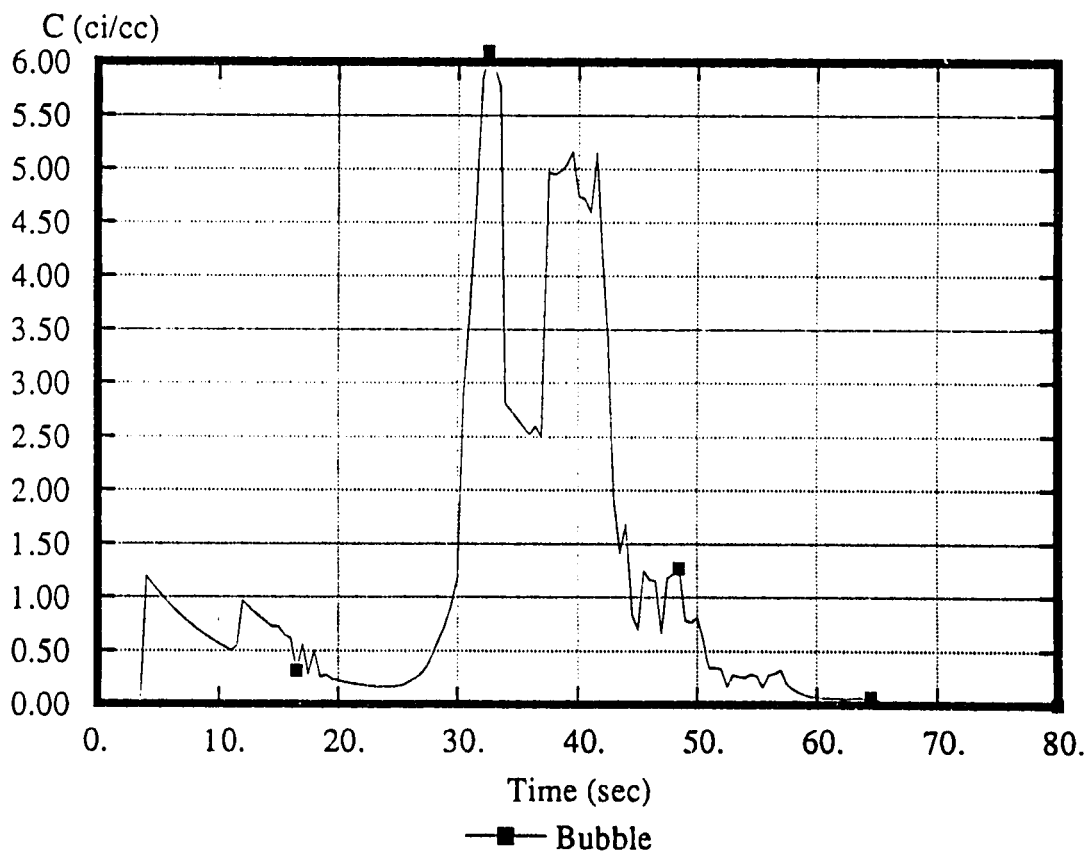


Fig. 6-54 Total Activity of FPs in Bubbles (Case 6)

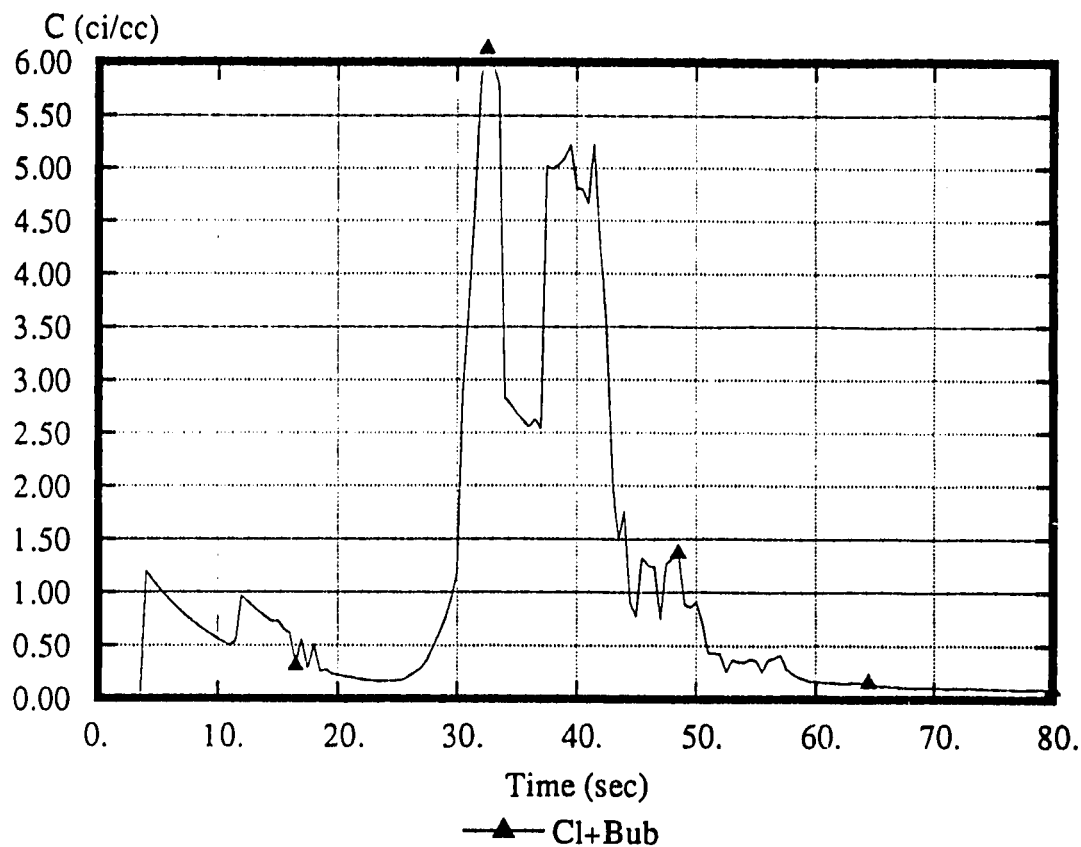


Fig. 6-55 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 6)

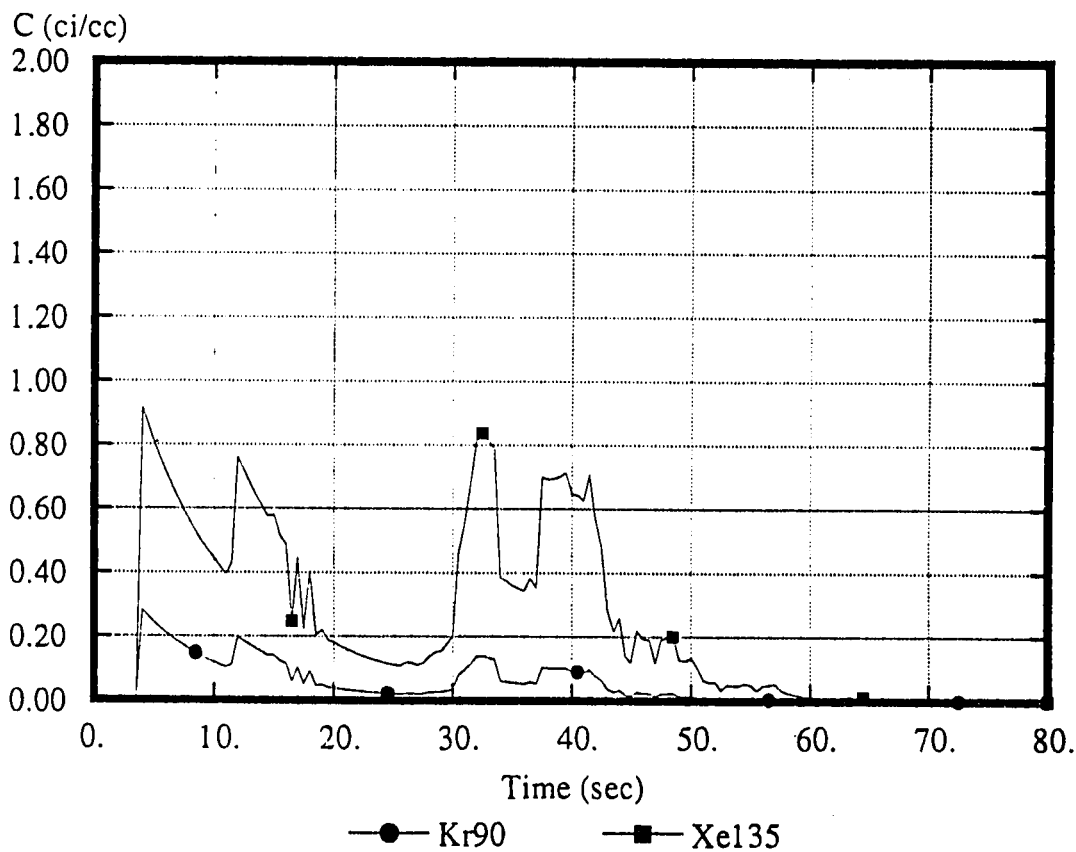


Fig. 6-56 Concentration of Kr/Xe in Bubbles (Case 6)

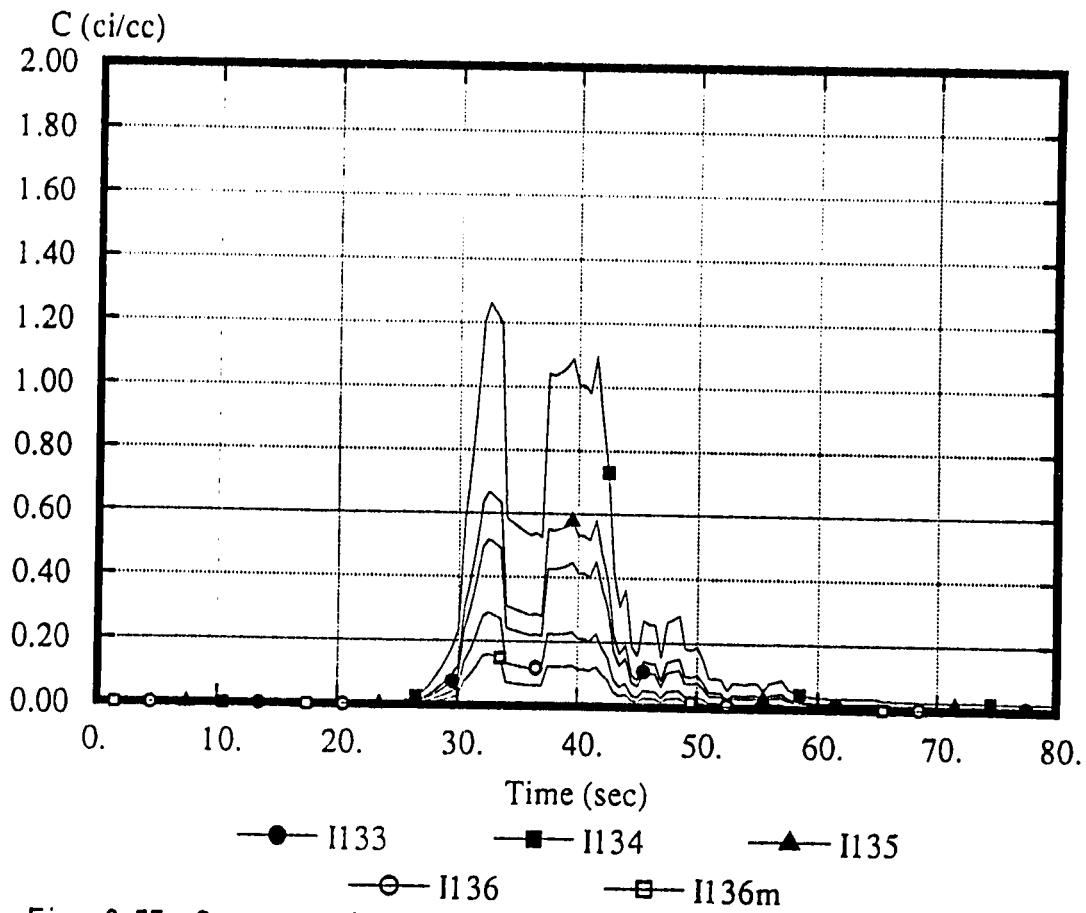


Fig. 6-57 Concentration of Iodines in Coolant and Bubbles (Case 6)

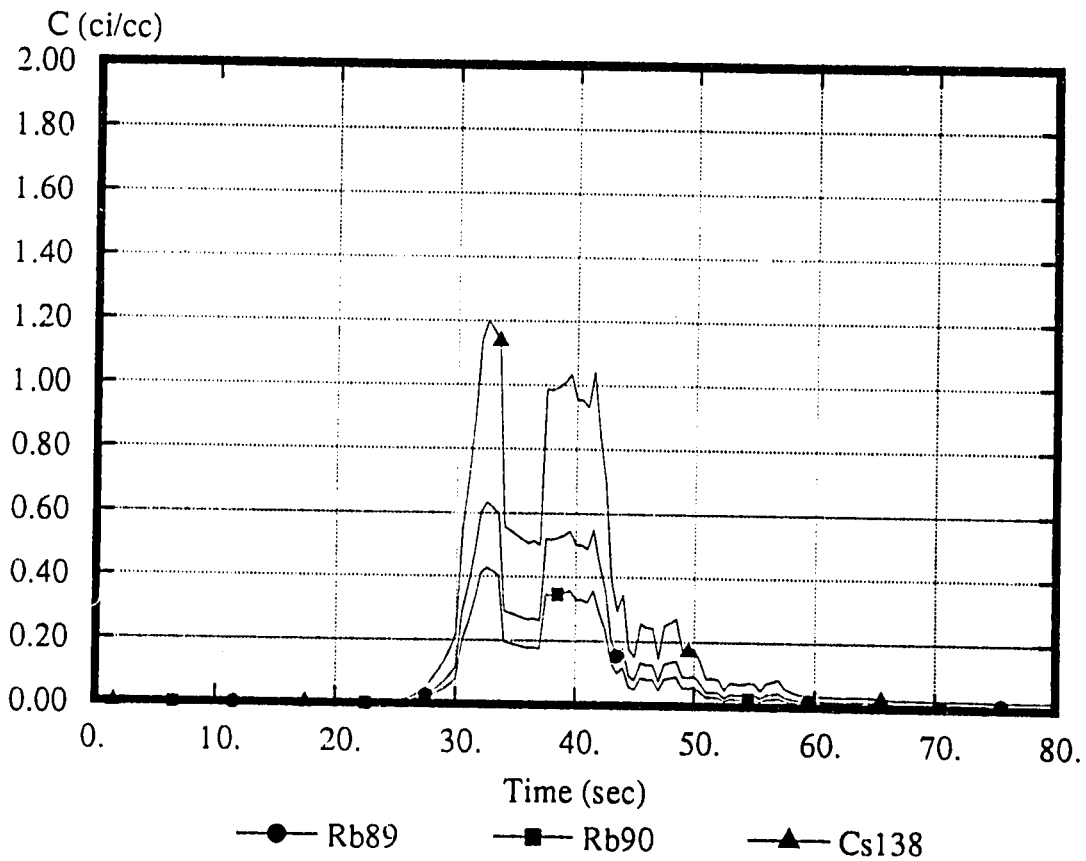


Fig. 6-58 Concentration of Rb/Cs in Coolant and Bubbles (Case 6)

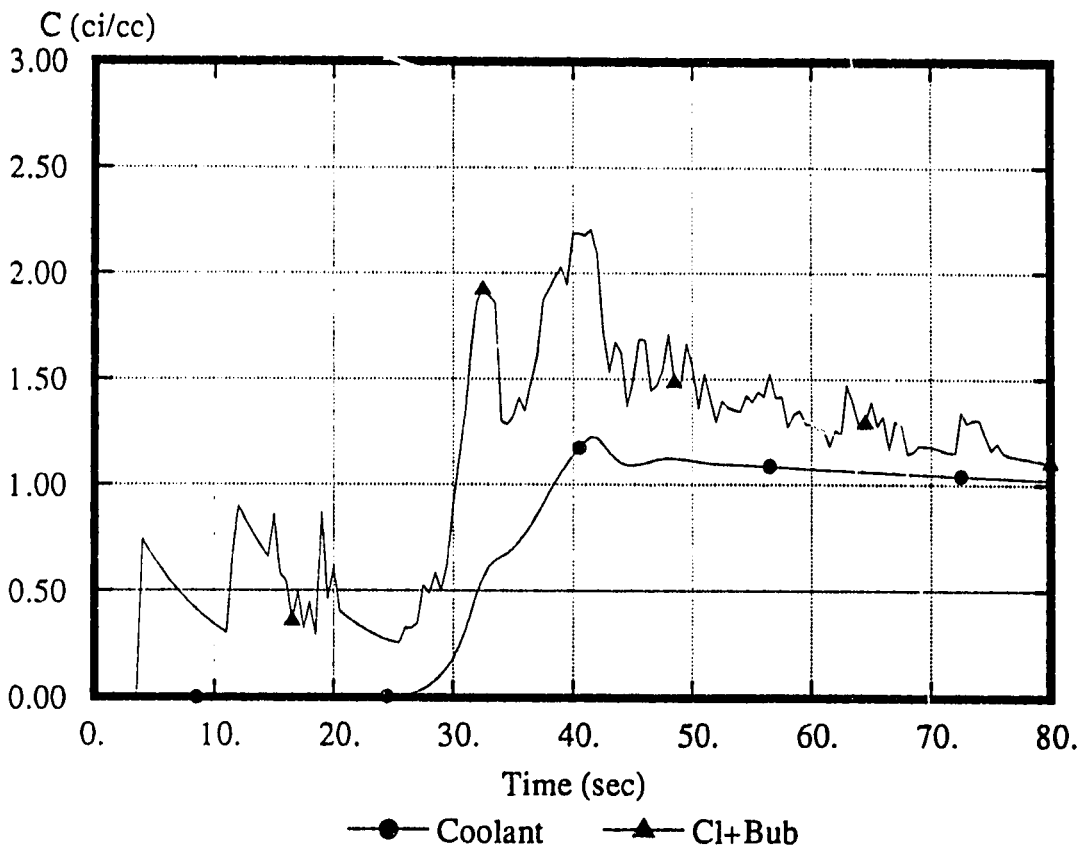


Fig. 6-59 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles (Case 7)

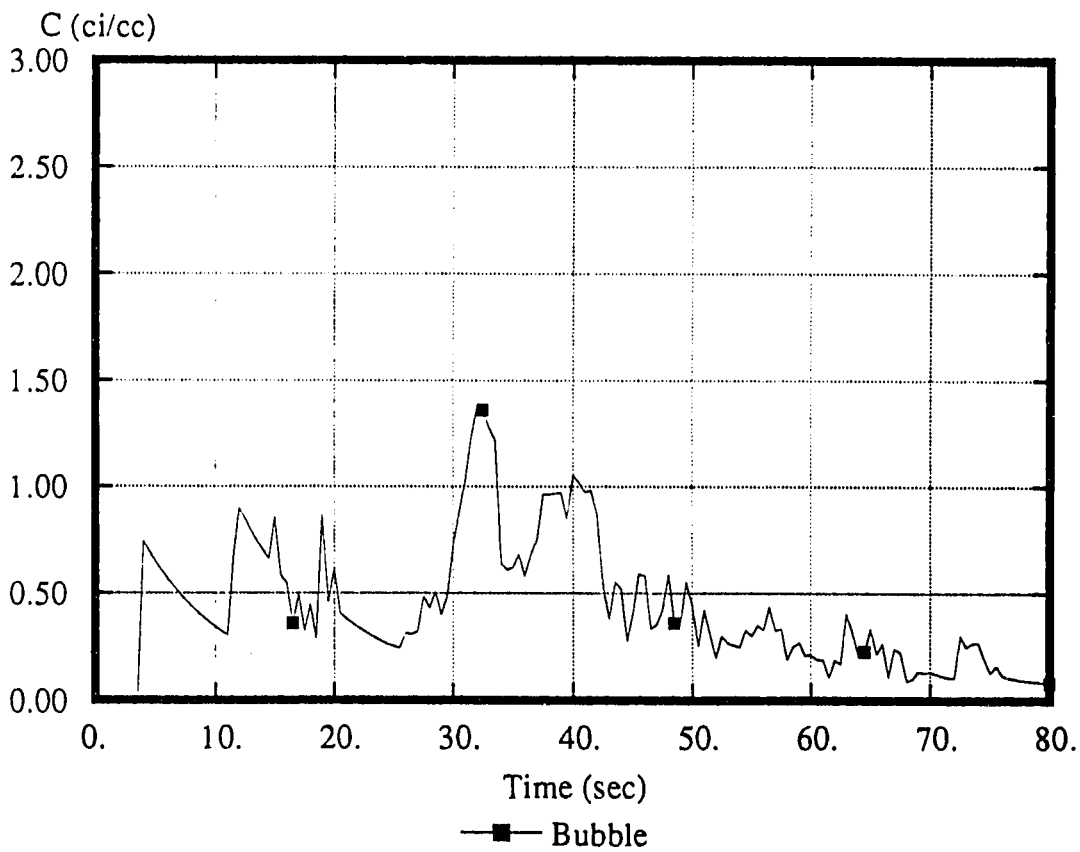


Fig. 6-60 Total Activity of FPs in Bubbles (Case 7)

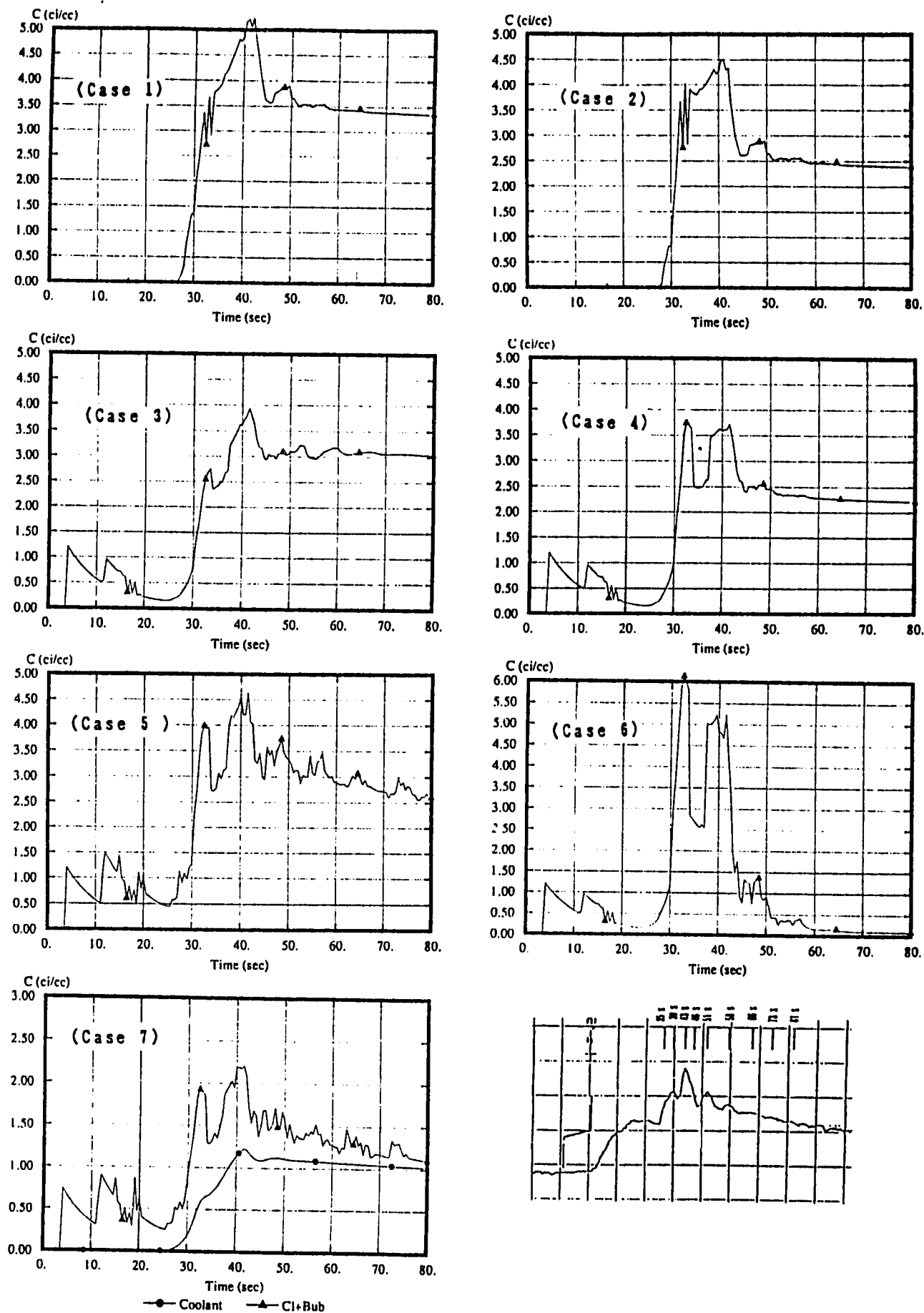


Fig. 6-61 Total Activity of FPs in Coolant and Bubbles

付録 A 改造コード使用説明書

A. 1 概要

1次冷却材中の線源挙動を把握するために

- (1) 燃料から冷却材中のF P放出モデル
- (2) F Pガス気泡放出モデル
- (3) 気泡挙動モデル

を主要な改造項目として、SAFFIREコードの機能追加作業を実施した。
改造コードの概要は以下の通りである。

- (1) 使用言語 FORTRAN-IV
- (2) プログラムサイズ 約800KB (変数領域可変)
- (3) カード枚数 約4000枚
- (4) 使用機種 IBM/FACOM 対応

A. 2 プログラム構造

改造コードのプログラム構造をFig. A-1に示す。

A. 3 サブルーチンの機能

- | | |
|----------------|----------------------------|
| (1) MAIN | SAFFIREのメインドライバー |
| (2) BLOCK DATA | 定数項等の設定ルーチン |
| (3) READIN | カード入力ルーチン |
| (4) INPOUT | 入力データの内、体系設定に係わるデータの出カルーチン |
| (5) RSFIRE | リスタートI/O ルーチン |
| (6) STDRIV | 初期状態設定ルーチン |
| (7) STOUT | 初期状態出力ルーチン |
| (8) TRDRV | 過渡計算のドライバー |
| (9) TRCONT | 過渡計算のコントロールルーチン |
| (10) RESET | 過渡時再設定ルーチン |
| (11) TROUT | 過渡時出力ルーチン |
| (12) TRPLOT | プロットファイルダンプルーチン |

(13) FUTEMP	燃料温度計算ルーチン
(14) FPREL	燃料ピンからのF P放出ルーチン
(15) MOBUB	気泡の動的挙動ルーチン
(16) ETRAN	気泡・冷却材間熱伝達ルーチン
(17) CHEMGS	気泡内ガス成分化学種変化ルーチン
(18) FCHAIN	F P崩壊モジュール
(19) MTRAN	気液間質量移行ルーチン
(20) AEBUB	気泡内エアロゾル挙動ルーチン
(21) WTRAN	壁面沈着挙動ルーチン
(22) CONCAL	冷却材中濃度計算ルーチン
(23) MCOVER	カバーガス内挙動ルーチン
(24) COND	物性値（熱伝達度）
(25) RHO	同（密度）
(26) SURE	同（表面張力）
(27) VISC	同（粘性係数）
(28) ATOM	同（原子量）
(29) DIFFV	同（気相内拡散係数）
(30) DIFFL	同（液相内拡散係数）
(31) VPRES	同（飽和蒸気圧）
(32) SPHT	同（比熱）
(33) DECON	同（崩壊定数）
(34) その他のコーティルーチン（主にI/O関係）	

A. 4 入力データ説明書

Table A-1に改造コードの入力データ説明を示す。

A. 5 入力データ作成時の注意

入力データ作成の場合に特に物質の指定に注意する必要がある。コード内で設定されている物質とその引用番号は以下の通り。

1 = n2 ,	2 = o2 ,	3 = he ,	4 = ar ,	5 = kr ,
6 = xe ,	7 = ,	8 = ,	9 = ,	10 = ,
11 = h2ov ,	12 = nav ,	13 = i2v ,	14 = naiv ,	15 = csiv ,
16 = csv ,	17 = tev ,	18 = uo2v ,	19 = fev ,	20 = ,
21 = h2ol ,	22 = nal ,	23 = i2l ,	24 = nail ,	25 = csil ,
26 = csl ,	27 = tel ,	28 = uo2l ,	29 = fel ,	30 = ,
31 = clzr ,	32 = clsn ,	33 = ru ,	34 = zr ,	35 = ba ,
36 = sb ,	37 = ag ,	38 = ,	39 = ,	40 = ,
41 = na2o ,	42 = na2o2 ,	43 = naoh ,	44 = b4c ,	45 = ,
46 = kr90 ,	47 = i133 ,	48 = i134 ,	49 = i135 ,	50 = i136 ,
51 = xe135 ,	52 = rb89 ,	53 = rb90 ,	54 = cs138 ,	55 = i136m ,

A. 6 リスタートおよびプロット使用上の注意

リスタートおよびプロットに関するデータは入力データ「プロットGDAT1」)を参照のこと。

A. 7 サンプル入出力例

Table A-2にサンプル入力／出力データ例を示す。

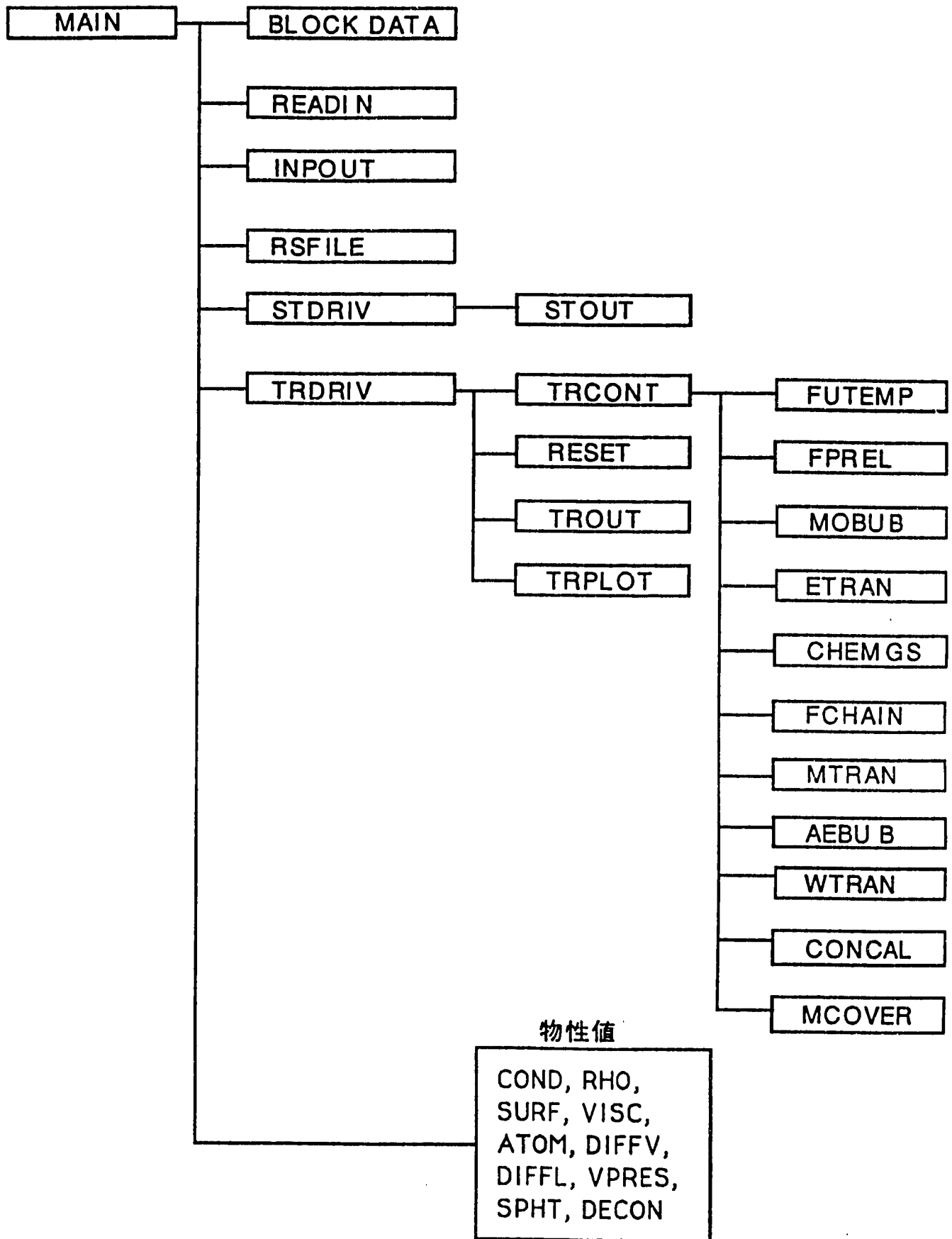


Fig. A-1 Construction of TRACER Code

Table A-1 Description of Input Variables (1/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 0	ITITLE(I) I=1,14 (18A4)	計算ケースタイトル名	—	タイトルカードのみFormat付きデータで入力する。
Block1 「GDAT1」	&GDAT1 IOPT(I), I=1,20	Name list名「GDAT1」 I=1, リスタートオプション =0, 初期ケース =1, リスタートケース I=2, リスタートファイル作成用オプション =0, 作成しない =1, 過渡計算最終ステップのみ =2, 指定ステップ全部 I=3, プロットファイル作成オプション =0, 作成しない =1, 作成する		「GDAT1」はプログラム全体をコントロールする入力データのブロックを示す。 =1, の時、FC11より入力。 =0, の時、FC12にリスタートファイルを作成する。 =0, の時、FC15～にプロットファイルを作成する。

Table A-1 Description of Input Variables (2/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 1 「GDAT1」	IOPT(I), I=1,20	<p>I=6, 燃料ピン計算オプション =0, 考慮しない =1, FP直接放出のみ =2, FPキャップ放出のみ =3, 両者混合放出考慮</p> <p>I=7, 燃料ピンからの気泡放出オプション =0, しない =1, する</p> <p>I=8, Rayleigh 方程式の解法 =0, 解かない =1, exactな解 =2, 準定常解</p> <p>I=9, 気泡分離合体オプション =0, 考慮しない =1, 限界We数(=6)以上で分離 =2, (3.7-11式による) =3, (3.7-12式による) =4, (3.7-13式による)</p> <p>I=10, ドラッグ係数オプション =1, Reの関数 =2, 気泡形状考慮</p> <p>I=11, 初期気泡数</p> <p>I=12, 強制気泡オプション</p> <p>I=13, 気泡物質係数オプション =1, (3.7-19式による) =2, (3.7-20式による)</p> <p>I=14, ガス移行係数オプション =1, 瞬時平衡 =2, 拡散移行</p>		=0, の時、ソース項を指定メッシュに指定する。

Table A-1 Description of Input Variables (3/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 1 「GDAT1」	ILOPT(1) I=1,10	プリントデタージョン =1, FP放出部プリント =2, 気泡挙動プリント =3, 系内FP濃度プリント =4, ガーガス濃度プリント =5, 壁面濃度プリント =0, プリントしない =1, プリントする		

Table A-1 Description of Input Variables (4/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 1 「GDAT1」	IDBUG(I), I=1,20	デバッグプリントオプション I=1,20 まで、各サブルーチン に対応させてデバッグプリント を行う =0, デバッグプリントしない =1, デバッグプリントする (I)= 1, TRDRIV = 2, TRCONT = 3, RESET = 4, FUTEMP = 5, FPREL1 = 6, FPREL2 = 7, FPREL = 8, MOBUB = 9, ETRAN =10, CHEMGS =11, FCHAIN =12, MTRAN =13, AEBUB =14, WTRAN =15, CONCAL =16, MCOVER =17, 未使用 =18, 〃 =19, 〃 =20, 〃		

Table A-1 Description of Input Variables (5/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block1 「GDAT1」	NCMAX	シミュレーション時間ステップの最大値	—	
	TIMAX	シミュレーション最大時刻	S	
	NPN	過渡時入出力コントロール区間数	—	
	PTIME(I) I=1, NPN	区間Iの最終時刻	S	
	DTI(I) I=1, NPN	区間Iの最大グローバル時間ステップ巾	S	
	JPN(I), I=1, NPN	区間Iのプリント間隔	—	ILOPTで内容が指定される。
	JPL(I), I=1, NPN	区間Iのプロット間隔	—	ILOPT(3)≠0の時有効
	JPS(I), I=1, NPN	区間Iのリスタートファイル作成間隔	—	ILOPT(2)=2の時有効
	NTAB	入力するテーブルの種類数 (≤10)	—	プログラムで使用されるテーブルをここで全て入力し、テーブル番号で引用する。
	MXTAB(N), N=1, NTAB	テーブル番号Nのデータ組数 (≤20)	—	
	XTAB(M, N) M=1, MXTAB(N)	テーブル番号NのX軸データ	任意	
	FTAB(M, N) M=1, MXTAB(N)	テーブル番号NのY軸(関数値)データ	任意	
&END	Name list 「GDAT1」の終了フラッグ			

Table A-1 Description of Input Variables (6/11)

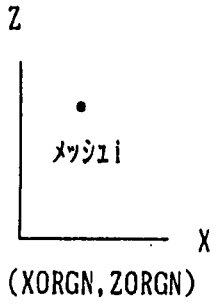
Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考	
Block 2 「CLDAT1」	&CLDAT1	Name list名「CLDAT1」		「CLDAT1」は、計算体系を定義するための入力データリストである。	
	ICMAX	計算体系の全メッシュ数 (≤ 30)			
	XORGN	計算体系の径方向基準座標	m		
	ZORGN	同上の軸方向基準座標	m		
	TCN(I), I=1, ICMAX	メッシュIの初期温度	K		
	VCN(I), I=1, ICMAX	メッシュIの体積	m ³		
	PCN(I), I=1, ICMAX	メッシュIの初期圧力	Pa		
	XC(I), I=1, ICMAX	メッシュIの中心位置の 径方向座標	m		実効的座標は XC(I)-XORGN で与えられる。
	ZC(I), I=1, ICMAX	同上の 軸方向座標	m		実効的座標は ZC(I)-ZORGN で与えられる。
	DXC(I), I=1, ICMAX	メッシュIの径方向座標巾	m		
	DZC(I), I=1, ICMAX	メッシュIの軸方向座標巾	m		
	IWMAX(I), I=1, ICMAX	メッシュIに接する壁面の数 >0, の時有効 (≤ 3)	—		
	ICOVER(I), I=1, ICMAX	メッシュIに接するカーガス 空間の数 (通常 0 or 1)	—		

Table A-1 Description of Input Variables (7/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 2 「CLDAT1」	TCW(K, I), K=1, IWMAX(I)	メッシュ I に接する壁面 K の温度	K	
	ACW(K, I), K=1, IWMAX(I)	メッシュ I に接する壁面 K の表面積	m ²	
	ALENW(K, I), K=1, IWMAX(I)	メッシュ I に接する壁面 K のメッシュに沿った長さ	m	
	AGCV(K, I), I=1, ICMAX(I)	メッシュ I がカバーガスに接する場合の接触面積	m ²	
	JCMAX	計算体系内のメッシュ間連結流路の最大数 (≤30)		
	IJC1(J), J=1, JCMAX	流路 J の上流側メッシュ番号		
	IJC2(J), J=1, JCMAX	流路 J の下流側メッシュ番号		
	VFLW(J), J=1, JCMAX	流路 J の体積流量	m ³ /s	
	ARE(J), J=1, JCMAX	流路 J の流路断面積	m ²	
	ALEN(J), J=1, JCMAX	流路 J の流路長	m	
	GZAI(J), J=1, JCMAX	流路 J の実効流路抵抗	—	現状のオプションでは、考慮されない。
	GDIRE(J), J=1, JCMAX	流路 J の重力方向成分	—	<p style="text-align: center;">-1.0</p> <p style="text-align: center;">↓ g</p> <p style="text-align: center;">θ</p> <p style="text-align: center;">(=cos θ)</p> <p style="text-align: center;">1.0</p>

Table A-1 Description of Input Variables (8/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 2 「CLDAT1」	TCGN	カバーガス温度	K	
	VCGN	カバーガス領域体積	m ³	
	PCGN	カバーガス圧力	Pa	
	HGCN	カバーガス領域高さ	m	
	AGCR	カバーガス天井表面積	m ²	
	TGCR	同上 温度	K	
	AGCW	カバーガス領域壁面表面積	m ²	
	TGCW	同上 温度	K	
	RGLEK	カバーガス領域漏洩率	1/s	
	&END	Name list 「CLDAT1」の終了 フラッグ		

Table A-1 Description of Input Variables (9/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 3 「MADAT1」	&MADAT1	Name list名「MADAT1」		「MADAT1」は、物質指定に関する入力データリストである。
	MADAT	冷却材領域の物質番号 (通常NaL あるいはH2OL の番号を指定する)		
	MXMT	計算上考慮される物質の数		
	MATIN(M), M=1, MXMT	計算上考慮される物質の 番号		
	FCGML(M), M=1, MXMT	冷却材領域に存在する 物質のモル分率	—	
	&END	Name list 「MADAT1」の終了 フラッグ		

Table A-1 Description of Input Variables (10/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 4 「FUDAT1」	&FUDAT1	Name list名「FUDAT1」		「FUDAT1」は、燃料ピン計算に関する入力データリストある。
	IFUEL	燃料からのFP放出考慮する 該当冷却材メッシュ番号 (\leq ICMAX)	—	現状では複数個のメッシュを定義できない。
	IFCH	燃料ピンの最大チャンネル数 (\leq 3)	—	性質の異なる燃料ピンをグループ化して考慮する。
	NFU	燃料ピンの最大軸方向分割数 (\leq 10)	—	
	NPIN(I), I=1, IFCH	チャンネルIに属する燃料ピンの数	—	
	NFTAB(I), I=1, IFCH	チャンネルIに属する燃料ピンの過渡温度変化を考慮する場合のテーブル番号 (\leq NTAB)	—	
	TFUI(N, I), N=1, NF, I=1, IFCH	チャンネルIに属する燃料ピンの基準温度分布	K	通常t=0の値を入力し、時間・温度割合のテーブルから時刻tでの分布を算出する。 TFUN(N, I) = TFUI(N, I) × fx (テーブル値)
	QSOR(N, M, I) N, I, NF, M=1, MXMT I=1, IFCH	同チャンネルの燃料に含まれる物質Mの初期インベントリ	モル	
	TIFAL(I), I=1, IFCH	同チャンネルの燃料ピン破損時刻	S	
PINN(I), I=1, IFCH	チャンネルIの燃料ピンがスプレナム中の圧力	Pa		

Table A-1 Description of Input Variables (11/11)

Block No.	変数名	変数の意味	単位	備考
Block 4 「FUDAT1」	REI(I), I=1, IFCH	チャンネルIの燃料ビンの内半径	m	
	PLEN(I), I=1, IFCH	チャンネルIの燃料ビンのプレート の長さ	m	
	TINN(I), I=1, IFCH	同燃料ビンのプレート温度	K	
	GFRC(M, I), M=1, MXMT, I=1, IFCH	同燃料ビンがプレート中の 物質Mの体積分率	—	
	GAM(I), I=1, IFCH	同燃料ビンがプレート中ガス の比熱比	—	混合ガスにおいては、 詳細に評価する必要があるが 暫定的に入力。
	TOTN(I), I=1, IFCH	燃料破損部の温度	K	
	POTN(I), I=1, IFCH	同 圧力	Pa	
	FRC(I), I=1, IFCH	破損燃料ビンの抵抗係数		
	CLEN(I), I=1, IFCH	破損燃料ビンがプレート・破損 部間距離	m	
	HYD(I), I=1, IFCH	燃料ビンキャップ部等価直径	m	$= 4A / Pe,$ A : 等価断面積 Pe : ぬれぶち長さ
	AOR(I), I=1, IFCH	破損部等価面積	m ²	
&END	Name list 「FUDAT1」の終了 フラッグ			

Table A-2 Sample Input/Output List

```

**** card image. please check your data cards ****
      0      1      2      3      4      5      6      7      8
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
 1 test run for mol7c/6 experiment
 2 &gdat1
 3 lopt( 1)= 20*0,
 4 lopt( 6)= 3,
 5 lopt( 7)= 1, 2, 3, 1,
 6 lopt(11)= 10,
 7 lopt(12)= 3,
 8 lopt(13)= 1,
 9 ipopt( 1)= 10*0,
10 ipopt( 1) = 1, 1, 1, 1,
11 idbug( 1)= 50*0,
12 idbug( 8)= 0,
13 ncmx= 10000,      timax= 2.000e+01,
14 npn = 4,
15 ptime( 1)= 2.000e-00, 3.900e-00, 4.000e+00, 6.000e+01,
16 dti( 1)= 1.000e-02, 1.000e-02, 1.000e-02, 1.000e-02,
17 jpn( 1)= 100, 100, 100, 200,
18 jpl( 1)= 100, 100, 100, 200,
19 jrs( 1)= 100, 100, 100, 200,
20 ntab= 2,
21 mxtab( 1)= 8, 10,
22 xtab( 1, 1)= 0.0, 2.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 100.0,
23 ftab( 1, 1)= 1.0, 1.0, 1.393, 1.393, 2.296, 2.296, 0.607, 0.607,
24 xtab( 1, 2)= 0.0, 10., 20., 30., 40., 50., 60., 70., 80., 100.,
25 ftab( 1, 2)= 10*1.0,
26 tdebug(1) = 4.000, 4.100,
27 &end
28 &cldat1
29 icmax= 16,
30 xorgn= 0.0,      zorgn= 6.613,
31 tcn( 1)= 983.0, 973.0, 961.0, 803.0, 803.0,
32 tcn( 6)= 747.0, 747.0, 666.0, 666.0, 666.0,
33 tcn(11)= 666.0, 666.0, 666.0, 666.0, 673.0,
34 tcn(16)= 673.0,
35 vcn( 1)= 2.881e-03, 6.691e-04, 8.897e-04, 1.716e-03, 1.716e-03,
36 vcn( 6)= 2.736e-04, 5.250e-03, 1.653e-03, 6.325e-04, 5.770e-04,
37 vcn(11)= 2.303e-04, 3.856e-03, 2.174e-04, 6.692e-04, 3.480e-03,
38 vcn(16)= 2.222e-03,
39 pcn( 1)= 1.448e+05, 1.371e+05, 1.341e+05, 1.252e+05, 1.109e+05,
40 pcn( 6)= 1.025e+05, 1.025e+05, 1.084e+05, 1.234e+05, 1.304e+05,
41 pcn(11)= 1.391e+05, 1.479e+05, 1.543e+05, 1.524e+05, 1.480e+05,
42 pcn(16)= 1.382e+05,
43 xc( 1) = 0.000,      0.000,      0.000,      0.000,      0.000,
44 xc( 6) = 0.000,      8.4075e-02, 8.4075e-02, 8.4075e-02, 8.4075e-02,
45 xc(11) = 8.4075e-02, 8.4075e-02, 0.000,      0.000,      4.3225e-02,
46 xc(16) = 4.3225e-02,
47 zc( 1) = 1.2675, 2.2150, 2.5880, 3.6790, 5.4350,
48 zc( 6) = 6.4630, 6.4630, 5.7430, 4.1390, 2.7425,
49 zc(11) = 1.9725, 0.8825, 0.1000, 0.3400, 0.8800,
50 zc(16) = 1.9675,
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0

```


	0	1	2	3	4	5	6	7	8
**** card image. please check your data cards ****									
numb	0	1	2	3	4	5	6	7	8
51	dx(1)= 4.660e-02, 4.660e-02, 1.263e-01, 1.263e-01, 1.263e-01,								
52	dx(6)= 1.263e-01, 4.185e-02, 4.185e-02, 4.185e-02, 4.185e-02,								
53	dx(11)= 4.185e-02, 4.185e-02, 2.100e-01, 4.660e-02, 3.985e-02,								
54	dx(16)= 3.985e-02,								
55	dz(1)= 1.575, 0.320, 0.426, 1.756, 1.756,								
56	dz(6)= 0.300, 0.300, 1.140, 2.068, 0.725,								
57	dz(11)= 0.815, 1.365, 0.200, 0.280, 1.360,								
58	dz(16)= 0.815,								
59	iwmax(1)= 16*0,								
60	iwmax(1)= 1,								
61	tcw(1, 1)= 983.0, acw(1, 1)= 2.552e-01, alenw(1, 1)= 1.575,								
62	iwmax(2)= 1,								
63	tcw(1, 2)= 973.0, acw(1, 2)= 5.182e-02, alenw(1, 2)= 0.320,								
64	iwmax(3)= 1,								
65	tcw(1, 3)= 961.0, acw(1, 3)= 6.898e-02, alenw(1, 3)= 0.426,								
66	iwmax(4)= 2,								
67	tcw(1, 4)= 803.0, acw(1, 4)= 3.862e-02, alenw(1, 4)= 1.756,								
68	tcw(2, 4)= 803.0, acw(2, 4)= 9.930e-02, alenw(2, 4)= 1.756,								
69	iwmax(5)= 2,								
70	tcw(1, 5)= 803.0, acw(1, 5)= 3.862e-02, alenw(1, 5)= 1.756,								
71	tcw(2, 5)= 803.0, acw(2, 5)= 9.930e-02, alenw(2, 5)= 1.756,								
72	iwmax(6)= 1,								
73	tcw(1, 6)= 747.0, acw(1, 6)= 6.158e-03, alenw(1, 6)= 0.300,								
74	iwmax(7)= 1,								
75	tcw(1, 7)= 747.0, acw(1, 7)= 1.390e-01, alenw(1, 7)= 0.300,								
76	iwmax(8)= 2,								
77	tcw(1, 8)= 666.0, acw(1, 8)= 2.407e-01, alenw(1, 8)= 1.140,								
78	tcw(2, 8)= 666.0, acw(1, 8)= 5.281e-01, alenw(1, 8)= 1.140,								
79	iwmax(9)= 2,								
80	tcw(1, 9)= 666.0, acw(1, 9)= 2.002e-01, alenw(1, 9)= 2.668,								
81	tcw(2, 9)= 666.0, acw(2, 9)= 1.613e-01, alenw(2, 9)= 2.668,								
82	iwmax(10)= 2,								
83	tcw(1, 10)= 666.0, acw(1, 10)= 5.655e-02, alenw(1, 10)= 1.326,								
84	tcw(2, 10)= 666.0, acw(1, 10)= 4.072e-02, alenw(1, 10)= 1.326,								
85	iwmax(11)= 2,								
86	tcw(1, 11)= 666.0, acw(1, 11)= 2.559e-01, alenw(1, 11)= 0.815,								
87	tcw(2, 11)= 666.0, acw(1, 11)= 2.047e-01, alenw(1, 11)= 0.815,								
88	iwmax(12)= 2,								
89	tcw(1, 12)= 666.0, acw(1, 12)= 4.285e-01, alenw(1, 12)= 1.364,								
90	tcw(2, 12)= 666.0, acw(1, 12)= 3.428e-01, alenw(1, 12)= 1.364,								
91	iwmax(13)= 1,								
92	tcw(1, 13)= 666.0, acw(1, 13)= 2.776e-02, alenw(1, 13)= 0.200,								
93	iwmax(14)= 1,								
94	tcw(1, 14)= 666.0, acw(1, 14)= 5.187e-02, alenw(1, 14)= 0.280,								
95	iwmax(15)= 2,								
96	tcw(1, 15)= 673.0, acw(1, 15)= 2.314e-01, alenw(1, 15)= 1.364,								
97	tcw(2, 15)= 673.0, acw(2, 15)= 3.385e-01, alenw(2, 15)= 1.364,								
98	iwmax(16)= 2,								
99	tcw(1, 16)= 673.0, acw(1, 16)= 1.382e-01, alenw(1, 16)= 1.030,								
100	tcw(2, 16)= 673.0, acw(2, 16)= 2.021e-01, alenw(2, 16)= 1.030,								

```

numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
      0         1         2         3         4         5         6         7         8

```

**** card image. please check your data cards ****

```

      0         1         2         3         4         5         6         7         8
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
101   icover( 1)= 16*0,
102   icover( 6)= 1,
103   agcv( 6)= 1.703e-03,
104   icover( 7)= 1,
105   agcv( 7)= 1.619e-02,
106   jcmx = 17,
107   ijc1( 1)= 1, ijc2( 1)= 2,
108   vflw( 1)= 1.868e-03, are( 1)= 1.830e-03,
109   alen( 1)= 9.745e-01, gzai( 1)= 1.0, gdire( 1)= 1.0,
110   ijc1( 2)= 2, ijc2( 2)= 3,
111   vflw( 2)= 1.868e-03, are( 2)= 2.091e-03,
112   alen( 2)= 3.730e-01, gzai( 2)= 1.0, gdire( 2)= 1.0,
113   ijc1( 3)= 3, ijc2( 3)= 4,
114   vflw( 3)= 3.735e-03, are( 3)= 9.770e-04,
115   alen( 3)= 1.091e-00, gzai( 3)= 1.0, gdire( 3)= 1.0,
116   ijc1( 4)= 4, ijc2( 4)= 5,
117   vflw( 4)= 3.735e-03, are( 4)= 9.770e-04,
118   alen( 4)= 1.756e-00, gzai( 4)= 1.0, gdire( 4)= 1.0,
119   ijc1( 5)= 5, ijc2( 5)= 6,
120   vflw( 5)= 3.735e-03, are( 5)= 9.770e-04,
121   alen( 5)= 1.028e-00, gzai( 5)= 1.0, gdire( 5)= 1.0,
122   ijc1( 6)= 6, ijc2( 6)= 7,
123   vflw( 6)= 3.735e-03, are( 6)= 3.167e-02,
124   alen( 6)= 5.250e-02, gzai( 6)= 1.0, gdire( 6)= 0.0, rdire( 6)= 1.0,
125   ijc1( 7)= 7, ijc2( 7)= 8,
126   vflw( 7)= 3.735e-03, are( 7)= 1.000e-02,
127   vflw( 7)= 3.735e-03, are( 7)= 5.000e-03,
128   alen( 7)= 7.200e-01, gzai( 7)= 1.0, gdire( 7)= -1.0,
129   ijc1( 8)= 8, ijc2( 8)= 9,
130   vflw( 8)= 3.735e-03, are( 8)= 1.000e-02,
131   vflw( 8)= 3.735e-03, are( 8)= 5.000e-03,
132   alen( 8)= 1.904e-00, gzai( 8)= 1.0, gdire( 8)= -1.0,
133   ijc1( 9)= 9, ijc2( 9)= 10,
134   vflw( 9)= 3.735e-03, are( 9)= 3.574e-04,
135   alen( 9)= 4.085e-02, gzai( 9)= 1.0, gdire( 9)= -1.0,
136   ijc1(10)= 10, ijc2(10)= 11,
137   vflw(10)= 3.735e-03, are(10)= 3.574e-04,
138   alen(10)= 1.071e-00, gzai(10)= 1.0, gdire(10)= -1.0,
139   ijc1(11)= 11, ijc2(11)= 12,
140   vflw(11)= 3.735e-03, are(11)= 3.574e-04,
141   alen(11)= 1.090e-00, gzai(11)= 1.0, gdire(11)= -1.0,
142   ijc1(12)= 12, ijc2(12)= 13,
143   vflw(12)= 3.735e-03, are(12)= 3.574e-04,
144   alen(12)= 7.820e-01, gzai(12)= 1.0, gdire(12)= -1.0,
145   ijc1(13)= 13, ijc2(13)= 14,
146   vflw(13)= 1.868e-03, are(13)= 2.091e-03,
147   alen(13)= 2.400e-01, gzai(13)= 1.0, gdire(13)= 1.0,
148   ijc1(14)= 14, ijc2(14)= 1,
149   vflw(14)= 1.868e-03, are(14)= 1.830e-03,

```

```

150      alen(14)= 7.740e-01, gzai(14)= 1.0, gdire(14)= 1.0,
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
      0         1         2         3         4         5         6         7         8

```

```

**** card image. please check your data cards ****

```

```

      0         1         2         3         4         5         6         7         8
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
151      ijcl(15)= 13, ijc2(15)= 15,
152      vflw(15)= 1.868e-03, are(15)= 6.377e-04,
153      alen(15)= 7.820e-01, gzai(15)= 1.0, gdire(15)= 1.0,
154      ijcl(16)= 15, ijc2(16)= 16,
155      vflw(16)= 1.868e-03, are(16)= 6.377e-04,
156      alen(16)= 1.197e-00, gzai(16)= 1.0, gdire(16)= 1.0,
157      ijcl(17)= 16, ijc2(17)= 3,
158      vflw(17)= 1.868e-03, are(17)= 6.377e-04,
159      alen(17)= 3.208e-02, gzai(17)= 1.0, gdire(17)= 1.0,
160      nctab = 2,
161      tcgn= 747.0,
162      vcgn= 5.370e-03,
163      pcgn= 1.013e+05,
164      hgcn= 0.3,
165      agcr= 1.790e-02,
166      tgcr= 747.0,
167      agcw= 1.979e-01,
168      tgcw= 747.0,
169      rglek= 1.000e-10,
170      pglek= 1.000e-10,
171      isms(1,1) = 6, 7,
172      isms(1,2) = 7, 8,
173      isms(1,3) = 12, 13,
174      xsms(1) = 8.4075e-02, zsms(1) = 6.313,
175      xsms(2) = 8.4075e-02, zsms(2) = 6.313,
176      xsms(3) = 0.000,      zsms(3) = 0.200,
177      &end
178      &madat1
179      mamat= 22,
180      mxmt= 13,
181      matn( 1)= 3, 4, 6,
182      matn( 4)= 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55,
183      fcgml( 1)= 13*0.0,
184      fcgml( 2)= 1.0,
185      &end
186      &fudat1
187      ifuel= 1,
188      ifch= 1,
189      nfu= 1,
190      npin( 1)= 6,
191      nftab( 1)= 1,
192      tfui( 1, 1)= 1273.0,
193      tifa( 1)= 2.0,
194      qsor( 1, 1, 1)= 0.000e-00,
195      qsor( 1, 2, 1)= 0.000e-00,
196      qsor( 1, 3, 1)= 0.000e-00,
197      qsor( 1, 4, 1)= 7.400e-09,
198      qsor( 1, 5, 1)= 1.817e-05,

```

```

199    qsor( 1, 6, 1)= 1.187e-06,
200    qsor( 1, 7, 1)= 4.417e-06,
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
      0         1         2         3         4         5         6         7         8

```

**** card image. please check your data cards ****

```

      0         1         2         3         4         5         6         7         8
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
201    qsor( 1, 8, 1)= 1.145e-08,
202    qsor( 1, 9, 1)= 2.233e-05,
203    qsor( 1,10, 1)= 2.750e-07,
204    qsor( 1,11, 1)= 3.533e-08,
205    qsor( 1,12, 1)= 1.092e-06,
206    qsor( 1,13, 1)= 6.300e-09,
207    pinn( 1)= 5.065e+06,
208    rel( 1)= 2.545e-03,
209    plen( 1)= 0.477,
210    tinn( 1)= 803.0,
211    gfr( 1, 1)= 16*0.0,
212    gfr( 1, 1)= 0.5,
213    gfr( 3, 1)= 0.5,
214    gam( 1)= 1.666,
215    totn( 1)= 803.0,
216    potn( 1)= 1.448e+05,
217    fr( 1)= 0.15,
218    clen( 1)= 0.800,
219    hyd( 1)= 1.000e-04,
220    aor( 1)= 8.0e-07,
221    &end
numb 0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0++++5++++0
      0         1         2         3         4         5         6         7         8

```

test run for mol7c/6 experiment

```

iopt ( 1): restart option      -      0
iopt ( 2):                      -      0
iopt ( 3):                      -      0
iopt ( 4):                      -      0
iopt ( 5):                      -      0
iopt ( 6):                      -      3
iopt ( 7):                      -      1
iopt ( 8):                      -      2
iopt ( 9):                      -      3
iopt (10):                      -      1
ipropt ( 1): long edit option  -      1
ipropt ( 2): short edit option -      1
ipropt ( 3):                   -      1
ipropt ( 4):                   -      1
ipropt ( 5):                   -      0
ipropt ( 6):                   -      0
ipropt ( 7):                   -      0
ipropt ( 8):                   -      0
ipropt ( 9):                   -      0
ipropt (10):                   -      0

```

ncmax : number of time step = 10000
 npn : number of edit intervals = 4
 timax : maximum simulation time(s) = 2.000E+01

ptime (i): final time in i-th time interval(s)
 2.000E+00 3.900E+00 4.000E+00 6.000E+01

dti (i): time increment in i-th time interval(s)
 1.000E-02 1.000E-02 1.000E-02 1.000E-02

jpn (i): print step in i-th time interval
 100 100 100 200

jpl (i): plot step in i-th time interval
 100 100 100 200

jrs (i): file save step in i-th time interval
 100 100 100 200

icmax : number of cells = 16 jcmx : number of cell junctions = 17
 mxmt : number of materials = 13

matn : material type

3 4 6 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55

xorgn : x-original point(m) = 0.000E+00 yorgn : y-original point(m) = 6.613E+00

icl	iwm	icv	tcn(k)	vcn(m*3)	xc(m)	zc(m)	dx(m)	dz(m)
1	1	0	9.830E+02	2.881E-03	0.000E+00	1.268E+00	4.660E-02	1.575E+00
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	9.830E+02	2.552E-01	1.575E+00		
2	1	0	9.730E+02	6.691E-04	0.000E+00	2.215E+00	4.660E-02	3.200E-01
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	9.730E+02	5.182E-02	3.200E-01		
3	1	0	9.610E+02	8.897E-04	0.000E+00	2.588E+00	1.263E-01	4.260E-01
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	9.610E+02	6.898E-02	4.260E-01		
4	2	0	8.030E+02	1.716E-03	0.000E+00	3.679E+00	1.263E-01	1.756E+00
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	8.030E+02	3.862E-02	1.756E+00		
			2	8.030E+02	9.930E-02	1.756E+00		
5	2	0	8.030E+02	1.716E-03	0.000E+00	5.435E+00	1.263E-01	1.756E+00
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	8.030E+02	3.862E-02	1.756E+00		
			2	8.030E+02	9.930E-02	1.756E+00		
6	1	1	7.470E+02	2.736E-04	0.000E+00	6.463E+00	1.263E-01	3.000E-01
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	7.470E+02	6.158E-03	3.000E-01		
			(cover gas adjacent cell) agcv : area (m**2)= 1.703E-03					
7	1	1	7.470E+02	5.250E-03	8.408E-02	6.463E+00	4.185E-02	3.000E-01
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	7.470E+02	1.390E-01	3.000E-01		
			(cover gas adjacent cell) agcv : area (m**2)= 1.619E-02					
8	2	0	6.660E+02	1.653E-03	8.408E-02	5.743E+00	4.185E-02	1.140E+00
			(wall adjacent cell) no. tcw(k) acw(m*2) alenw(m)					
			1	6.660E+02	5.281E-01	1.140E+00		
			2	6.660E+02	0.000E+00	0.000E+00		
9	2	0	6.660E+02	6.325E-04	8.408E-02	4.139E+00	4.185E-02	2.068E+00

```

(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.660E+02 2.002E-01 2.668E+00
                          2 6.660E+02 1.613E-01 2.668E+00
10  2   0 6.660E+02 5.770E-04 8.408E-02 2.742E+00 4.185E-02 7.250E-01
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.660E+02 4.072E-02 1.326E+00
                          2 6.660E+02 0.000E+00 0.000E+00
11  2   0 6.660E+02 2.303E-04 8.408E-02 1.972E+00 4.185E-02 8.150E-01
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.660E+02 2.047E-01 8.150E-01
                          2 6.660E+02 0.000E+00 0.000E+00
12  2   0 6.660E+02 3.856E-03 8.408E-02 8.825E-01 4.185E-02 1.365E+00
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.660E+02 3.428E-01 1.364E+00
                          2 6.660E+02 0.000E+00 0.000E+00
13  1   0 6.660E+02 2.174E-04 0.000E+00 1.000E-01 2.100E-01 2.000E-01
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.660E+02 2.776E-02 2.000E-01
14  1   0 6.660E+02 6.692E-04 0.000E+00 3.400E-01 4.660E-02 2.800E-01
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.660E+02 5.187E-02 2.800E-01
15  2   0 6.730E+02 3.480E-03 4.322E-02 8.800E-01 3.985E-02 1.360E+00
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.730E+02 2.314E-01 1.364E+00
                          2 6.730E+02 3.385E-01 1.364E+00
16  2   0 6.730E+02 2.222E-03 4.322E-02 1.968E+00 3.985E-02 8.150E-01
(wall adjacent cell) no.   tcw(k)   acw(m*2)   alenw(m)
                          1 6.730E+02 1.382E-01 1.030E+00
                          2 6.730E+02 2.021E-01 1.030E+00

```

```

ijc jc1 jc2 vfl(m3/s) are(m*2) alen(m)   gzai   gdire   rdire
  1   1   2 1.868E-03 1.830E-03 9.745E-01 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
  2   2   3 1.868E-03 2.091E-03 3.730E-01 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
  3   3   4 3.735E-03 9.770E-04 1.091E+00 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
  4   4   5 3.735E-03 9.770E-04 1.756E+00 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
  5   5   6 3.735E-03 9.770E-04 1.028E+00 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
  6   6   7 3.735E-03 3.167E-02 5.250E-02 1.000E+00 0.000E+00 1.000E+00
  7   7   8 3.735E-03 5.000E-03 7.200E-01 1.000E+00 -1.000E+00 0.000E+00
  8   8   9 3.735E-03 5.000E-03 1.904E+00 1.000E+00 -1.000E+00 0.000E+00
  9   9  10 3.735E-03 3.574E-04 4.085E-02 1.000E+00 -1.000E+00 0.000E+00
 10  10  11 3.735E-03 3.574E-04 1.071E+00 1.000E+00 -1.000E+00 0.000E+00
 11  11  12 3.735E-03 3.574E-04 1.090E+00 1.000E+00 -1.000E+00 0.000E+00
 12  12  13 3.735E-03 3.574E-04 7.820E-01 1.000E+00 -1.000E+00 0.000E+00
 13  13  14 1.868E-03 2.091E-03 2.400E-01 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
 14  14   1 1.868E-03 1.830E-03 7.740E-01 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
 15  13  15 1.868E-03 6.377E-04 7.820E-01 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
 16  15  16 1.868E-03 6.377E-04 1.197E+00 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00
 17  16   3 1.868E-03 6.377E-04 3.208E-02 1.000E+00 1.000E+00 0.000E+00

```

cover gas groval data information

```

fcgml : mol fraction in cg   = 0.000E+00 1.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
fcgml : mol fraction in cg   = 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
fcgml : mol fraction in cg   = 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
tcgn   : gas temperature(k)   = 7.470E+02   vcgn   : gas volume(m*3)       = 5.370E-03
pcgn   : gas pressure(Pa)     = 1.013E+05   hcgn   : height of cg space(m)  = 3.000E-01
agcr   : roof area of cg(m*2) = 1.790E-02   tgcr   : roof temperature(k)    = 7.470E+02

```

agcw : wall area of cg(m*2) = 1.979E-01 tgcw : wall temperature(k) = 7.470E+02
 rglek : leak rate(1/s) = 1.000E-10

lfch : number of failure group = 1

gr. no.	pin no.	R(j/kgK)	cp/cv	rin(m)	plen(m)	tin(k)	tot(k)
gr. no.	pin(Pa)	Pot(Pa)	f(ini)	clen(m)	hyd(m)	aorf(m*2)	
1	6	0.000E+00	1.666E+00	2.545E-03	4.770E-01	8.030E+02	8.030E+02
1	5.065E+06	1.448E+05	1.500E-01	8.000E-01	1.000E-04	8.000E-07	

vpl(m3) rh(kg/m3) amp(kg)
 9.706E-06 5.130E+01 4.979E-04

*coolant mesh information

mesh no.	i	k	lwcel	wvelc	warec	walen	gdir	kku(i):jc no=	kkw(i):jc no=
1	1	2	-1.021E+00	1.830E-03	9.745E-01	1.000E+00	0	2	
1	2	14	1.021E+00	1.830E-03	7.740E-01	1.000E+00	0	2	
2	1	1	1.021E+00	1.830E-03	9.745E-01	1.000E+00	0	2	
2	2	3	-8.934E-01	2.091E-03	3.730E-01	1.000E+00	0	2	
3	1	2	8.934E-01	2.091E-03	3.730E-01	1.000E+00	0	3	
3	2	4	-3.823E+00	9.770E-04	1.091E+00	1.000E+00	0	3	
3	3	16	2.929E+00	6.377E-04	3.208E-02	1.000E+00	0	3	
4	1	3	3.823E+00	9.770E-04	1.091E+00	1.000E+00	0	2	
4	2	5	-3.823E+00	9.770E-04	1.756E+00	1.000E+00	0	2	
5	1	4	3.823E+00	9.770E-04	1.756E+00	1.000E+00	0	2	
5	2	6	-3.823E+00	9.770E-04	1.028E+00	1.000E+00	0	2	
6	1	7	-1.179E-01	3.167E-02	5.250E-02	1.000E+00	1	1	
6	1	5	3.823E+00	9.770E-04	1.028E+00	1.000E+00	1	1	
7	1	6	1.179E-01	3.167E-02	5.250E-02	1.000E+00	1	1	
7	1	8	-7.470E-01	5.000E-03	7.200E-01	-1.000E+00	0	2	
8	1	7	7.470E-01	5.000E-03	7.200E-01	-1.000E+00	0	2	
8	2	9	-7.470E-01	5.000E-03	1.904E+00	-1.000E+00	0	2	
9	1	8	7.470E-01	5.000E-03	1.904E+00	-1.000E+00	0	2	
9	2	10	-1.045E+01	3.574E-04	4.085E-02	-1.000E+00	0	2	
10	1	9	1.045E+01	3.574E-04	4.085E-02	-1.000E+00	0	2	
10	2	11	-1.045E+01	3.574E-04	1.071E+00	-1.000E+00	0	2	

```

mesh no.   = 11      kku(i):jc no= 0      kkw(i):jc no= 2
  i k iwcel wvelc   warec   walen   gdir
  11 1 10 1.045E+01 3.574E-04 1.071E+00-1.000E+00
  11 2 12-1.045E+01 3.574E-04 1.090E+00-1.000E+00
mesh no.   = 12      kku(i):jc no= 0      kkw(i):jc no= 2
  i k iwcel wvelc   warec   walen   gdir
  12 1 11 1.045E+01 3.574E-04 1.090E+00-1.000E+00
  12 2 13-1.045E+01 3.574E-04 7.820E-01-1.000E+00
mesh no.   = 13      kku(i):jc no= 0      kkw(i):jc no= 3
  i k iwcel wvelc   warec   walen   gdir
  13 1 12 1.045E+01 3.574E-04 7.820E-01-1.000E+00
  13 2 14-8.934E-01 2.091E-03 2.400E-01 1.000E+00
  13 3 15-2.929E+00 6.377E-04 7.820E-01 1.000E+00
mesh no.   = 14      kku(i):jc no= 0      kkw(i):jc no= 2
  i k iwcel wvelc   warec   walen   gdir
  14 1 13 8.934E-01 2.091E-03 2.400E-01 1.000E+00
  14 2 1-1.021E+00 1.830E-03 7.740E-01 1.000E+00
mesh no.   = 15      kku(i):jc no= 0      kkw(i):jc no= 2
  i k iwcel wvelc   warec   walen   gdir
  15 1 13 2.929E+00 6.377E-04 7.820E-01 1.000E+00
  15 2 16-2.929E+00 6.377E-04 1.197E+00 1.000E+00
mesh no.   = 16      kku(i):jc no= 0      kkw(i):jc no= 2
  i k iwcel wvelc   warec   walen   gdir
  16 1 15 2.929E+00 6.377E-04 1.197E+00 1.000E+00
  16 2 3-2.929E+00 6.377E-04 3.208E-02 1.000E+00
mesh xl (m)  xr (m)  ul(m/s)  ur(m/s)  zd (m)  zu (m)  wd(m/s)  wu(m/s)
  1 0.000E+00 2.330E-02 0.000E+00 0.000E+00 4.800E-01 2.055E+00 1.021E+00 1.021E+00
  2 0.000E+00 2.330E-02 0.000E+00 0.000E+00 2.055E+00 2.375E+00 1.021E+00 8.934E-01
  3 0.000E+00 6.315E-02 0.000E+00 0.000E+00 2.375E+00 2.801E+00 1.369E+00 3.823E+00
  4 0.000E+00 6.315E-02 0.000E+00 0.000E+00 2.801E+00 4.557E+00 3.823E+00 3.823E+00
  5 0.000E+00 6.315E-02 0.000E+00 0.000E+00 4.557E+00 6.313E+00 3.823E+00 3.823E+00
  6 0.000E+00 6.315E-02 0.000E+00 1.179E-01 6.313E+00 6.613E+00 3.823E+00 0.000E+00
  7 6.315E-02 1.050E-01 1.179E-01 0.000E+00 6.313E+00 6.613E+00-7.470E-01 0.000E+00
  8 6.315E-02 1.050E-01 0.000E+00 0.000E+00 5.173E+00 6.313E+00-7.470E-01-7.470E-01
  9 6.315E-02 1.050E-01 0.000E+00 0.000E+00 3.105E+00 5.173E+00-1.045E+01-7.470E-01
 10 6.315E-02 1.050E-01 0.000E+00 0.000E+00 2.380E+00 3.105E+00-1.045E+01-1.045E+01
 11 6.315E-02 1.050E-01 0.000E+00 0.000E+00 1.565E+00 2.380E+00-1.045E+01-1.045E+01
 12 6.315E-02 1.050E-01 0.000E+00 0.000E+00 2.000E-01 1.565E+00-1.045E+01-1.045E+01
 13 0.000E+00 1.050E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 2.000E-01 0.000E+00 3.240E-04
 14 0.000E+00 2.330E-02 0.000E+00 0.000E+00 2.000E-01 4.800E-01 8.934E-01 1.021E+00
 15 2.330E-02 6.315E-02 0.000E+00 0.000E+00 2.000E-01 1.560E+00 2.929E+00 2.929E+00
 16 2.330E-02 6.315E-02 0.000E+00 0.000E+00 1.560E+00 2.375E+00 2.929E+00 2.929E+00

```

1

```

*transient results from fpsort calculation*
*nc      = 100      *time(s)= 1.000E+00 *dt (s)= 1.000E-02
*tfu(k)  fuel temperature distribution
i= 1 1.273E+03
pinn(Pa)  tinn(K)  amah1(-)  vgl(m/s)  potn(Pa)  totn(K)  amah2(-)  vg2(m/s)  pbac(Pa)
5.065E+06 8.030E+02 0.000E+00 0.000E+00 1.448E+05 8.030E+02 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
vs(m/s)  gm(kg/m2/s) dmdt(kg/s)  mp(kg)  rh(kg/m3)  mpt(kg)  vpb(m3/s)  vpo(m3/s)  v-lnt(m3)
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 4.979E-04 5.130E+01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
if mm  dtsor1  dtsor2  dtsor  cbsor  cbsfr
- - (ml/s) (ml/s) (ml/s) (ml/m**3) (mlfr)
1 3 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 NaN NaN
1 4 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 NaN NaN

```



```

5  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
4  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
3  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
1  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

```

*cobp(mol/m**3)

(j, i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

(j, i)	11	12	13
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

transient results from fpsort calculation

*nc = 200 *time(s)= 2.000E+00 *dt (s)= 1.000E-02

*tfu(k) fuel temperature distribution

i= 1 1.273E+03

	pinn(Pa)	tinn(K)	amah1(-)	vg1(m/s)	potn(Pa)	totn(K)	amah2(-)	vg2(m/s)	pbac(Pa)
	5.046E+06	8.030E+02	1.117E-02	4.530E+00	1.448E+05	8.030E+02	3.907E-01	1.585E+02	1.448E+05
	vs(m/s)	gm(kg/m2/s)	dmdt(kg/s)	mp(kg)	rh(kg/m3)	mpt(kg)	vpb(m3/s)	vpo(m3/s)	v-int(m3)
	4.056E+02	2.324E+02	-1.859E-04	4.961E-04	5.111E+01	1.856E-06	7.606E-04	7.606E-04	7.606E-06
if	mm	dtsor1	dtsor2	dtsor	cbсор	cbсfr			
		(ml/s)	(ml/s)	(ml/s)	(ml/m**3)	(mlfrc)			
1	3	0.000E+00	5.578E-04	5.578E-04	8.856E+00	5.000E-01			
1	4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00			
1	6	0.000E+00	5.578E-04	5.578E-04	8.856E+00	5.000E-01			
1	46	4.254E-28	0.000E+00	4.254E-28	6.754E-24	3.814E-25			

4 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 3 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 2 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 1 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

1

transient results from fpsort calculation

*nc = 400 *time(s)= 4.000E+00 *dt (s)= 1.000E-02

*tfu(k) fuel temperature distribution

i= 1 1.398E+03

plnn(Pa) tinn(K) amah1(-) vg1(m/s) potn(Pa) totn(K) amah2(-) vg2(m/s) pbac(Pa)
 1.744E+06 8.030E+02 1.472E-02 5.971E+00 1.448E+05 8.030E+02 1.782E-01 7.229E+01 1.448E+05
 vs(m/s) gm(kg/m2/s)dmdt(kg/s) mp(kg) rh(kg/m3) mpt(kg) vpb(m3/s) vpo(m3/s) v-int(m3)
 4.056E+02 1.060E+02-8.482E-05 1.715E-04 1.767E+01 3.265E-04 3.470E-04 3.470E-04 1.339E-03

if	mm	dtsor1 (ml/s)	dtsor2 (ml/s)	dtsor (ml/s)	cbsor (ml/m**3)	cbsfr (mlfrc)
1	3	0.000E+00	2.545E-04	2.545E-04	8.856E+00	5.000E-01
1	4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	6	0.000E+00	2.545E-04	2.545E-04	8.856E+00	5.000E-01
1	46	2.033E-13	0.000E+00	2.033E-13	7.074E-09	3.994E-10
1	47	5.438E-10	0.000E+00	5.438E-10	1.893E-05	1.069E-06
1	48	3.549E-11	0.000E+00	3.549E-11	1.235E-06	6.975E-08
1	49	1.322E-10	0.000E+00	1.322E-10	4.600E-06	2.597E-07
1	50	3.267E-13	0.000E+00	3.267E-13	1.137E-08	6.419E-10
1	51	6.683E-10	0.000E+00	6.683E-10	2.326E-05	1.313E-06
1	52	8.206E-12	0.000E+00	8.206E-12	2.856E-07	1.612E-08
1	53	1.038E-12	0.000E+00	1.038E-12	3.614E-08	2.041E-09
1	54	3.264E-11	0.000E+00	3.264E-11	1.136E-06	6.413E-08
1	55	1.797E-13	0.000E+00	1.797E-13	6.255E-09	3.532E-10

bl vol. (m**3)= 2.873E-07 bl dia. (m) = 8.187E-03

*kbln(bubble no.) = 201 *kblo(bubble no.) = 200

k	mesh	shape	deqb(m)	vdbl(m3)	anob(-)	ecct(b/a)	xbl(m)	zbl(m)	ubv(m/s)	wbv(m/s)
1	8	2	5.496E-03	8.692E-08	1.000E+01	2.347E+00	8.408E-02	6.312E+00	2.979E-02	0.000E+00
2	7	2	6.239E-03	1.272E-07	1.000E+01	1.834E+00	8.790E-02	6.353E+00	2.859E-02	-1.932E-01
3	7	2	6.316E-03	1.319E-07	1.000E+01	1.860E+00	8.788E-02	6.320E+00	2.848E-02	-2.702E-01
4	7	2	6.315E-03	1.319E-07	1.000E+01	1.859E+00	8.759E-02	6.323E+00	2.806E-02	-2.641E-01
5	7	2	6.303E-03	1.311E-07	1.000E+01	1.856E+00	8.732E-02	6.324E+00	2.761E-02	-2.610E-01
6	7	2	6.290E-03	1.303E-07	1.000E+01	1.852E+00	8.705E-02	6.325E+00	2.710E-02	-2.582E-01
7	7	2	6.277E-03	1.295E-07	1.000E+01	1.849E+00	8.678E-02	6.327E+00	2.653E-02	-2.555E-01
8	7	2	6.264E-03	1.287E-07	1.000E+01	1.845E+00	8.652E-02	6.328E+00	2.590E-02	-2.528E-01
9	7	2	6.262E-03	1.285E-07	1.000E+01	1.839E+00	8.602E-02	6.367E+00	2.434E-02	-1.590E-01
10	7	2	6.248E-03	1.277E-07	1.000E+01	1.835E+00	8.578E-02	6.367E+00	2.345E-02	-1.581E-01
11	7	2	6.235E-03	1.269E-07	1.000E+01	1.832E+00	8.556E-02	6.368E+00	2.246E-02	-1.572E-01
12	7	2	6.222E-03	1.261E-07	1.000E+01	1.829E+00	8.534E-02	6.368E+00	2.137E-02	-1.563E-01
13	7	2	6.209E-03	1.253E-07	1.000E+01	1.825E+00	8.513E-02	6.369E+00	2.015E-02	-1.553E-01
14	7	2	6.196E-03	1.245E-07	1.000E+01	1.822E+00	8.494E-02	6.369E+00	1.879E-02	-1.543E-01
15	7	2	6.183E-03	1.238E-07	1.000E+01	1.819E+00	8.476E-02	6.370E+00	1.727E-02	-1.533E-01
16	7	2	6.170E-03	1.230E-07	1.000E+01	1.816E+00	8.460E-02	6.371E+00	1.558E-02	-1.522E-01
17	7	2	6.157E-03	1.222E-07	1.000E+01	1.813E+00	8.445E-02	6.371E+00	1.369E-02	-1.511E-01
18	7	2	6.144E-03	1.214E-07	1.000E+01	1.810E+00	8.433E-02	6.372E+00	1.158E-02	-1.500E-01
19	7	2	6.131E-03	1.207E-07	1.000E+01	1.807E+00	8.422E-02	6.372E+00	9.217E-03	-1.489E-01
20	7	2	6.119E-03	1.199E-07	1.000E+01	1.801E+00	8.414E-02	6.373E+00	6.557E-03	-1.491E-01

*tmlcn(mol)

(j, i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00


```

7  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
6  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
5  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
4  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
3  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
1  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
(j, i)  11      12      13
16  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
15  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
14  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
13  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
12  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
11  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
10  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
9   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
8   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
7   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
6   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
5   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
4   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
3   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
1   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

```

transient results from fpsort calculation

*nc = 600 *time(s)= 6.000E+00 *dt (s)= 1.000E-02

*tfu(k) fuel temperature distribution

i= 1 1.523E+03

```

pinn(Pa)  tinn(K)  amah1(-)  vg1(m/s)  potn(Pa)  totn(K)  amah2(-)  vg2(m/s)  pbac(Pa)
6.991E+05 8.030E+02 1.266E-02 5.134E+00 1.448E+05 8.030E+02 6.137E-02 2.489E+01 1.448E+05
vs(m/s)  gm(kg/m2/s) dmdt(kg/s) mp(kg)  rh(kg/m3) mpt(kg)  vpb(m3/s) vpo(m3/s) v-int(m3)
4.056E+02 3.650E+01 -2.920E-05 6.873E-05 7.081E+00 4.292E-04 1.195E-04 1.195E-04 1.760E-03

```

```

if  mm  dtsor1  dtsor2  dtsor  cbsor  cbsfr
-    -    (ml/s)  (ml/s)  (ml/s)  (ml/m**3) (mlfr)
1    3  0.000E+00 8.761E-05 8.761E-05 8.855E+00 5.000E-01
1    4  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
1    6  0.000E+00 8.761E-05 8.761E-05 8.855E+00 5.000E-01
1   46  4.484E-13 0.000E+00 4.484E-13 4.533E-08 2.559E-09
1   47  1.252E-09 0.000E+00 1.252E-09 1.266E-04 7.147E-06
1   48  8.171E-11 0.000E+00 8.171E-11 8.259E-06 4.663E-07
1   49  3.044E-10 0.000E+00 3.044E-10 3.077E-05 1.737E-06
1   50  7.345E-13 0.000E+00 7.345E-13 7.424E-08 4.192E-09
1   51  1.539E-09 0.000E+00 1.539E-09 1.556E-04 8.783E-06
1   52  1.887E-11 0.000E+00 1.887E-11 1.907E-06 1.077E-07
1   53  2.370E-12 0.000E+00 2.370E-12 2.396E-07 1.353E-08
1   54  7.511E-11 0.000E+00 7.511E-11 7.592E-06 4.286E-07
1   55  4.041E-13 0.000E+00 4.041E-13 4.085E-08 2.306E-09

```

bl vol. (m**3)= 9.893E-08 bl dia. (m) = 5.739E-03

*kbln(bubble no.) = 401 *kblo(bubble no.) = 400

```

k  mesh shape deqb(m)  vbbl(m3)  anob(-)  ecct(b/a)  xbl(m)  zbl(m)  ubv(m/s)  wbv(m/s)
1   8   2  5.404E-03 8.263E-08 1.000E+01 1.577E+00 1.026E-01 5.672E+00 4.003E-03-3.218E-01
2   8   2  6.144E-03 1.215E-07 1.000E+01 1.768E+00 1.034E-01 5.771E+00 4.779E-03-2.970E-01
3   8   2  6.213E-03 1.256E-07 1.000E+01 1.786E+00 1.037E-01 5.734E+00 4.495E-03-2.949E-01
4   8   2  6.213E-03 1.256E-07 1.000E+01 1.786E+00 1.036E-01 5.737E+00 4.514E-03-2.949E-01

```

5	8	2	6.202E-03	1.249E-07	1.000E+01	1.783E+00	1.036E-01	5.738E+00	4.527E-03-2.953E-01
6	8	2	6.189E-03	1.241E-07	1.000E+01	1.780E+00	1.035E-01	5.738E+00	4.515E-03-2.957E-01
7	8	2	6.176E-03	1.233E-07	1.000E+01	1.776E+00	1.034E-01	5.739E+00	4.528E-03-2.961E-01
8	8	2	6.163E-03	1.226E-07	1.000E+01	1.773E+00	1.033E-01	5.740E+00	4.514E-03-2.965E-01
9	8	2	6.172E-03	1.231E-07	1.000E+01	1.776E+00	1.030E-01	5.796E+00	4.976E-03-2.962E-01
10	8	2	6.159E-03	1.223E-07	1.000E+01	1.772E+00	1.030E-01	5.796E+00	4.969E-03-2.966E-01
11	8	2	6.146E-03	1.216E-07	1.000E+01	1.769E+00	1.029E-01	5.797E+00	4.985E-03-2.970E-01
12	8	2	6.133E-03	1.208E-07	1.000E+01	1.765E+00	1.029E-01	5.797E+00	4.978E-03-2.974E-01
13	8	2	6.120E-03	1.200E-07	1.000E+01	1.762E+00	1.029E-01	5.797E+00	4.970E-03-2.978E-01
14	8	2	6.108E-03	1.193E-07	1.000E+01	1.759E+00	1.028E-01	5.797E+00	4.987E-03-2.982E-01
15	8	2	6.095E-03	1.185E-07	1.000E+01	1.755E+00	1.028E-01	5.798E+00	4.979E-03-2.986E-01
16	8	2	6.082E-03	1.178E-07	1.000E+01	1.752E+00	1.028E-01	5.798E+00	4.971E-03-2.990E-01
17	8	2	6.070E-03	1.171E-07	1.000E+01	1.749E+00	1.027E-01	5.798E+00	4.988E-03-2.994E-01
18	8	2	6.057E-03	1.164E-07	1.000E+01	1.745E+00	1.027E-01	5.799E+00	4.980E-03-2.998E-01
19	8	2	6.045E-03	1.156E-07	1.000E+01	1.742E+00	1.027E-01	5.799E+00	4.972E-03-3.002E-01
20	8	2	6.032E-03	1.149E-07	1.000E+01	1.739E+00	1.026E-01	5.800E+00	4.989E-03-3.006E-01

*tmlcn(mol)

(j, i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	4.147E-30	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	1.586E-27	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	2.417E-26	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	4.594E-25	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	8.057E-24	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	1.164E-26	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	2.149E-25	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	1.732E-23	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	8.667E-22	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	1.445E-20	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2.482E-19	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	5.713E-18	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

(j, i)

(j, i)	11	12	13
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	8.340E-32	0.000E+00	0.000E+00
12	3.189E-29	0.000E+00	0.000E+00
11	3.389E-28	0.000E+00	0.000E+00
10	4.969E-27	0.000E+00	0.000E+00
9	1.304E-25	0.000E+00	0.000E+00
8	4.442E-24	0.000E+00	0.000E+00
7	2.528E-28	0.000E+00	0.000E+00
6	5.373E-27	0.000E+00	0.000E+00
5	4.897E-25	0.000E+00	0.000E+00
4	2.572E-23	0.000E+00	0.000E+00
3	3.908E-22	0.000E+00	0.000E+00
2	4.138E-21	0.000E+00	0.000E+00
1	4.070E-19	0.000E+00	0.000E+00

*cocn(mol/m**3)

(j, i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

13	1.907E-26	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	4.113E-25	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	1.050E-22	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	7.961E-22	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	1.274E-20	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	2.217E-24	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	7.854E-22	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	1.009E-20	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	5.051E-19	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	1.624E-17	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3.710E-16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	1.983E-15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

(j, i)	11	12	13
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	3.836E-28	0.000E+00	0.000E+00
12	8.271E-27	0.000E+00	0.000E+00
11	1.471E-24	0.000E+00	0.000E+00
10	8.612E-24	0.000E+00	0.000E+00
9	2.062E-22	0.000E+00	0.000E+00
8	2.687E-21	0.000E+00	0.000E+00
7	4.816E-26	0.000E+00	0.000E+00
6	1.964E-23	0.000E+00	0.000E+00
5	2.854E-22	0.000E+00	0.000E+00
4	1.499E-20	0.000E+00	0.000E+00
3	4.392E-19	0.000E+00	0.000E+00
2	6.185E-18	0.000E+00	0.000E+00
1	1.413E-16	0.000E+00	0.000E+00

*tmlbp(mol)

(j, i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	1.720E-21	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	7.597E-25	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	3.220E-16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

(j, i)	11	12	13
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

```

9  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
8  2.354E-23 0.000E+00 0.000E+00
7  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
6  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
5  1.274E-26 0.000E+00 0.000E+00
4  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
3  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2  0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
1  1.791E-17 0.000E+00 0.000E+00

```

*cobb(mol/m**3)

(j, i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	2.031E-15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	2.731E-18	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	3.210E-09	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

(j, i)	11	12	13
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	2.713E-17	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	4.582E-20	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	1.728E-10	0.000E+00	0.000E+00

1