

JAERI-M
91-144

再処理施設における溶媒火災時の
安全性解析コードFACE
(受託研究)

1991年9月

西尾 軍治・山崎 昇*

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

再処理施設における溶媒火災時の安全性解析コード FACE

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

西尾 軍治・山崎 昇*

(1991年8月14日受理)

原研では、科学技術庁の委託をうけて、再処理施設の抽出工程において想定される溶媒火災の安全性を評価する解析コード FACE を作成・整備した。解析コード FACE は、1次元と2次元の熱流動解析を用いてセルやダクトからなるセル換気系のネットワーク内の温度、圧力、流量および差圧などを計算する機能と溶媒火災時の煤煙と放射性物質の挙動を計算する機能を有している。さらに、セル内溶媒火災の状況、ネットワーク内の放射性物質の移行と沈着、HEPA フィルタの健全性、および放射性物質の環境放出などの解析機能を含んでいる。FACE に組み込まれた溶媒火災解析モデルの検証のため、計算結果を大型の溶媒火災実証試験により得た諸データと比較した。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、科学技術庁からの受託によって行った研究の成果である。

東海研究所：〒319 - 11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2 - 4

*富士総合研究所

Safety Analysis of Solvent Fire Accidents in a Fuel Reprocessing Plant

Gunji NISHIO and Noboru YAMAZAKI*

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 14, 1991)

For analyzing the safety evaluation of solvent fire as DBA in an extraction process of nuclear fuel reprocessing plant, computer code named FACE was developed in JAERI under the auspices of the Science and Technology Agency of Japan. The code FACE can provide not only for calculations of temperature, pressure, flow rate and pressure drop in cells and ducts of the network in air-ventillation system by one- and two-dimensional analyses and smoke containing radioactive materials by burning solvent in the network but also for solvent fire behavior in the cell, transport of radioactive materials and its deposition in the network, integrity of HEPA filters, and release of radioactive materials to the environment. Calculations by FACE were compared with data obtained by large-scale demonstration tests in JAERI simulating solvent fire in the extraction process to verify mathematical modeling of the fire accident in the code.

Keywords: Reprocessing Plant, Safety, Fire, Accident, Solvent, Code
Radioactive Materials, Transport, Deposition, HEPA Filter
Integrity, Thermo-fluid Analysis

The work was performed under the auspices of the Science and Technology Agency of Japan

* Fuji Research Institute Corporation, Super-computing Technology Division

目 次

1. はじめに	1
2. FACE の概要	2
2.1 溶媒火災の解析	2
2.2 熱流動の解析	2
2.3 物質移流の解析	3
2.4 FACE の特徴	3
3. 1次元熱流動解析	6
3.1 基礎式	6
3.2 数値解法	7
3.3 初期定常計算	8
3.4 逆流防止ダンパの開閉	8
3.5 放射性物質の移行	9
3.6 チョーキングモデル	10
4. 2次元熱流動解析	10
4.1 基礎式	10
4.2 数値解法	11
4.3 乱流モデル	12
4.4 放射性物質の移行	13
4.5 FACE-2DとFACE-1Dの接続	13
5. 熱エネルギーの発生と消滅	14
5.1 溶媒の燃焼速度	14
5.2 ボイルオーバー燃焼	15
5.3 熱エネルギーの発生項	16
5.4 溶媒の燃焼熱	16
5.5 熱エネルギーの消滅項	17
5.6 セル壁やダクト壁への熱伝導	17
6. 煤煙と放射性エアロゾルの発生	20
6.1 発生モデル	20
6.2 煤煙と燃焼ガスの発生	20
6.3 煤煙の粒度分布	21
6.4 放射性エアロゾルの発生	22
7. 煤煙と放射性エアロゾルの沈着	24
7.1 沈着モデル	24
7.2 ノード内の沈着速度	24

7.3	ジャンクション内の沈着率	24
7.4	ジャンクション内の沈着速度	25
8.	HEPA フィルタの解析	26
8.1	煤煙によるフィルタの目詰まり	26
8.2	フィルタの捕集率	26
9.	鎮火モデル	27
9.1	溶媒火災の燃焼持続領域	27
9.2	自然鎮火時間	27
10.	溶媒火災試験装置	27
10.1	試験装置の概要	27
10.2	計算の体系	28
11.	検証計算の概要	35
11.1	試験結果と計算の比較	35
11.2	検証計算の結果 (FP-8)	36
11.3	非定常解析と準定常解析の比較 (2次元熱流動)	37
12.	再処理モデルプラントの溶媒火災解析	57
12.1	再処理モデルプラントの計算体系	57
12.2	横型セルの解析 (ミキサセトラ設置セル)	57
12.3	縦型セルの解析 (パルスカラム設置セル)	59
13.	おわりに	77
	謝 辞	77
	参考文献	77
	付録 A 計算に必要な物性値	79
	付録 B 検証計算	81

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of FACE	2
2.1 Analysis of Solvent Burning	2
2.2 Analysis of Thermo-fluid in Cells and Ducts	2
2.3 Analysis of Radioactive Materials Transport	3
2.4 Feature of FACE	3
3. One-dimensional Thermo-fluid Analysis	6
3.1 Basic Equations	6
3.2 Numerical Solutions	7
3.3 Initial Steady-state Calculations	8
3.4 Damper Models for Opening and Shutting	8
3.5 Radioactive Materials Transport Models	9
3.6 Chocking Model	10
4. Two-dimensional Thermo-fluid Analysis	10
4.1 Basic Equations	10
4.2 Numerical Solutions	11
4.3 Turbulent Model	12
4.4 Radioactive Materials Transport Models	13
4.5 Connection Model between FACE-2D and FACE-1D	13
5. Heat Generation and Loss Models during Solvent Fire	14
5.1 Burning Rate of Solvent	14
5.2 Boilover Burning of Solvent Vapor in a Cell	15
5.3 Generation of Heat Energy	16
5.4 Heat Generation	16
5.5 Heat Loss	17
5.6 Heat Transfer to Cells and Ducts Walls	17
6. Generations of Smoke and Radioactive Aerosols	20
6.1 Generation Model	20
6.2 Generations of Smoke and Burning Gases	20
6.3 Size Distribution of Smoke Particles	21
6.4 Generation of Radioactive Aerosols	22
7. Depositions of Smoke and Radioactive Aerosols	24
7.1 Deposition Model	24
7.2 Deposition Rate at a Node in the Network	24
7.3 Fractional Deposition at a Junction in the Network	24

7.4	Deposition Rate at a Junction in the Network	25
8.	Analysis of HEPA Filter	26
8.1	Plugging of Filters by Smoke	26
8.2	Efficiency of HEPA Filter	26
9.	Extinction Model of Solvent Fire	27
9.1	Extinction Region of Burning Solvent	27
9.2	Natural Extinction Times	27
10.	Demonstration Test Facility of Solvent Fire in JAERI	27
10.1	Outline of the Facility	27
10.2	Systematize of Calculation	28
11.	Outline of Code Verification	35
11.1	Comparison between Fire Test Results and Calculations	35
11.2	Verification of FP-8	36
11.3	Comparison between Non-steady State Calculations and Quasi-steady State Calculation for Two-dimensional Thermo-fluid Analysis	37
12.	Analysis of Solvent Fire Accidents in a Model Reprocessing Plant	57
12.1	Systematize of Calculation in the Plant	57
12.2	Calculation of Solvent Fire at Mixer-settlers in a Cell ...	57
12.3	Calculation of Solvent Fire at Pulse-columns in a Cell	59
13.	Conclusion	77
	Acknowledgements	77
	References	77
	Appendix A Physical Values to Calculate the Code	79
	Appendix B Verification of the Code for the Demonstration Tests ..	81

記号の説明

A : 断面積又は表面積 (m^2)	\dot{m}_B : 沸騰による溶媒の質量放出速度 (kg/s)
A : カニンガム定数 (-)	\dot{m}_b : 溶媒の燃焼速度 (kg/s)
A_F : HEPAフィルタの投影面積 (m^2)	\dot{m}_{fu} : 溶媒の蒸発消費速度 (kg/s)
S_f : 火炎の表面積 (m^2)	\dot{m}_s : 煤煙の発生速度 (kg/s)
B : スポルデンゲのB値 (-)	Nu : ヌッセルト数 ($=hd/\lambda$, (-))
C : 質量濃度 (kg/ m^3)	n : 換気回数 (回/h)
C_F : 核種の気相濃度 (kg/ m^3)	P : 圧力 (Pa) 又は規格化圧力 (m^2/s^2)
C_p : 定圧比熱 (J/kgK)	ΔP : 差圧 (Pa)
C_s : 煤煙の気相濃度 (kg/ m^3)	ΔP_F : フィルタの差圧 (Pa)
C_v : 定容比熱 (J/kgK)	Pr : プラントル数 (-)
C_w : 核種の液相濃度 (kg/ m^3)	Q : エネルギー発生・消滅速度 (W/ m^3)
D_B : 拡散係数 ($=kT/f$, m^2/s)	Q_F : フィルタの流量 (m^3/s)
D_b : 代表直径 (m)	q_c : ノード内の放熱速度 (J/s)
$D_{F,i}$: 核種の分配係数 (-)	q_D : ジャンクション内の放熱速度 (J/s)
D_p : 乱流拡散係数 (m^2/s)	q_z : Z方向の放熱速度 (W/ m^3)
DF : フィルタの除染係数 (-)	R : ガス定数 (m^2/s^2K)、沈着速度 (kg/s)
d_g : 幾何学的平均直径 (μm)	Re : レイノルズ数 (-)
d_p : 煤煙の粒径 (μm)	R_L : ダクトの半径 (m)
E_c : 金岡の乱流沈着分率 (-)	S : 質量放出速度 (kg/ m^3s)
E_s : エネルギー放出速度 (J/s)	S_t^* : ストークス数 (-)
E_t : 沈着率 (-)	s : 抽出器相当段数 (段)
E_t : フィルタの捕集率 (-)	T : 温度 ($^{\circ}C$) 又は絶対温度 ($^{\circ}K$)
e_F : 核種の同伴係数 (-)	T_s : 基準温度 ($^{\circ}C$)
F : 流量 (m^3/s) 又は流動抵抗 (Pa)	ΔT : 温度差 ($^{\circ}C$)
F(x) : 分布関数 (-)	t : 時間 (s)
f : 摩擦係数 (kg/s)	t_e : 鎮火時間 (s)
G : ガス成分の発生・消滅率 (-)	u : 流速 (m/s)
G_r : グラスホフ数 (-)	V : 体積 (m^3)
g : 重力加速度 (m/s^2)	V_f : 火炎の体積 (m^3)
ΔH : 溶媒の燃焼熱 (J/kg)	V_T : TBPの体積分率 (-)
h : 熱伝達係数 (J/ $m^2s^{\circ}C$)	v : 流速 (m/s)
K_{eff} : 無次元抵抗係数 (-)	v_c : 粒子の乱流沈着速度 (m/s)
K_L : フィルタの層流流動抵抗係数 (-)	v_d : 粒子の拡散沈着速度 (m/s)
K_T : フィルタの乱流流動抵抗係数 (-)	v_p : 粒子の沈着速度 (m/s)
L : ダクトの長さ (m)	v_s : 粒子の沈降速度 (m/s)
L_f : 溶媒の蒸発潜熱 (J/kg)	v_T : 粒子の熱泳動沈着速度 (m/s)
L_s : フィルタへの煤煙負荷重量 (kg)	W_s : 煤煙の重量分率 (-)
l : ジャンクションの長さ (m)	W_T : 重量分率 (-)
M : マッハ数 (-)	Y_{ox} : 有効酸素重量分率 (-)
\dot{M}_s : 質量放出速度 (kg/s, kg/ m^3s)	Z_T : 熱泳動係数 ($m^2/s^{\circ}C$)
\dot{m} : 質量流量 (kg/s)	ΔZ : Z方向長さ (m)
\dot{m}_{aq} : 水蒸気の質量放出速度 (kg/s)	

ギリシャ文字

α : TBP/n-ドデカンの比揮発度 (-)	λ : 気相の熱伝導率 (W/mk)
α_e : 実効温度伝導率 ($=\lambda/\rho C_p + \epsilon_t$, m^2/s)	λ_g : 気体の熱伝導度 (W/m°C)
β : 体積膨張係数 (k^{-1})	λ_p : 煤煙粒子の熱伝導度 (W/m°C)
γ : 気相輻射率パラメータ (-)	θ : 角度 (-)
γ_0 : 比熱比 (-)	μ : 粘性係数 (Ns/m ²)
δ : 水蒸発率パラメータ (-)	ν : 分子動粘性係数 (m^2/s)
δ_0 : 境界層の厚み (m)	ν_e : 実効動流動粘性係数 ($=\nu + \nu_t$, m^2/s)
ϵ : 溶媒蒸発率パラメータ (-)	ν_t : 渦動粘性係数 (m^2/s)
ϵ_0 : ガス輻射率 (-)	ξ : 燃焼率パラメータ (-)
ϵ_t : 渦温度伝導率 (m^2/s)	π : 円周率 (-)
ρ : 密度 (kg/m^3)	τ_w : 壁面上のせん断応力 (N/m ²)
σ : ステファン・ボルツマン定数 (W/m^2k^4)	ϕ_F : 形態係数 (-)
σ_g : 幾何標準偏差 (-)	ϕ : 気相輻射率パラメータ (-)
κ : 煤煙の発生分率 ($=m_a/m_b$, (-))	ω : 煤煙と核種の発生速度の比 (-)

添字

O : ジャンクションの入口	j : ジャンクション番号
l : ジャンクションの出口	k : k成分の番号
F : フィルタ	L : 熱反射板又はダクト
f : 火炎部	o : 外界
f u : 溶媒	o r g : 溶媒相
g : 気相	s : 煤煙
g a s : 燃焼ガス	w : 壁
i : ノード番号	z : Z方向

1. はじめに

再処理施設の抽出・分離工程では、溶媒（30% TBP/n-dodecane）や硝酸を用いて核燃料と核分裂生成物を分離し、核燃料を精製している。そのため、再処理施設の安全評価ではセル内の溶媒火災が設計基準事象として想定されている。セル内の溶媒火災は化学工業プラントの火災事故と多くの共通点を持っているが、再処理施設では使用済みの核燃料を取り扱うため、放射性物質を閉じ込めるための種々の多重防護施設が設置されていることが特徴になっている。

放射性物質を閉じ込めるための防護施設の1つとして、再処理施設のセルには「セル換気系」と呼ばれる給排気系が設置されている。このセル換気系はセルとセルの間をダクトによりネットワーク状に連結し、平常運転時は勿論、異常事象時においても再処理施設のセル内部を負圧に維持する役目を担っている。さらに、セル換気系の最終段には放射性物質を環境に放出させないための高性能粒子エアークリアフィルタ（HEPA フィルタ）が備えられている。したがって、再処理施設の万一の設計基準事象の場合に、この最終バリアーである HEPA フィルタの健全性が維持できるか否か、放射性物質を閉じ込め得るか否かは安全性を評価する上で重要な課題になっている。

原子力施設の火災事象を1次元の熱流動で解析する安全性解析コードは、ロスアラモス国立研究所(LANL)のFIRAC¹⁾、パシフィック・ノースウエスト研究所(PNL)のFIRIN²⁾、原研(JAERI)のTRANS-ACE³⁾などが公開されている。これらの計算コードの解法は、セルやダクトなどのネットワークをいくつかの体積要素(ノード)と抵抗要素(ジャンクション)に分け、流体の温度、圧力及び密度は体積要素で、流量と質量流量は抵抗要素で集中定数的に解析するノード・ジャンクション法を採用している。ノード・ジャンクション法は汎用性が高く、再処理施設のセル換気系のような複雑なネットワーク内の熱流動解析には極めて有効である。一方、英国火災研究所のCoxは、室内火災を対象にして3次元熱流動解析による室内温度分布の計算を報告している⁴⁾。

再処理施設の抽出・分離工程でセル内溶媒火災を想定した場合には、火災が発生しているセル内の熱流動が溶媒の燃焼や放射性物質の閉じ込めに影響を与える。また、溶媒火災で発生した熱流や煤煙がセル換気系のネットワークを移流し、HEPA フィルタの耐熱性や煤煙による目詰まりなどフィルタの健全性に影響を与えることが考えられる。したがって、溶媒火災時の放射性物質の閉じ込め効果や HEPA フィルタの健全性を評価するためには、セルやダクト内の熱流動現象を精度よく解析することが重要になる。

科学技術庁は、再処理施設の設計基準事象である溶媒火災時のセル換気系の安全性および放射性物質の閉じ込め効果を実証する大型の溶媒火災試験⁵⁾を原研に委託した。この試験の一環として、原研では溶媒火災時の安全性解析コード FACE (Fire Accident in Cell) を作成し、溶媒火災試験の結果を用いて検証した。この報告書は、(1)FACE の概要、(2)熱流動を含む解析モデル、(3)放射性物質閉じ込め解析モデル、(4)試験装置の概要および(5)検証計算の概要について報告する。さらに、(6)再処理モデルプラントを設定し、そのプラントで溶媒火災を想定した場合の安全性解析を行った。本報告書の付録には、(7)計算に用いた物性値と(8)大型溶媒火災試験の検証計算の結果を示した。なお、大型溶媒火災試験結果の詳細は、本報告書の姉妹報告書として発表した JAERI-M 91-145「再処理施設における溶媒火災事象の安全性実証試験」に記載されている。

2. FACE の概要

2.1 溶媒火災の解析

溶媒火災の解析では、溶媒の燃焼モデルと鎮火モデルが必要である。燃焼モデルは、(1)溶媒の燃焼と発熱、(2)煤煙、燃焼ガス、放射性物質の発生、(3)火災時の TBP / ドデカンの組成変化の解析からなっている。①燃焼と発熱の解析では、スポルデンの油滴燃焼理論⁶⁾を溶媒液面燃焼の解析に適用できるように拡張し、溶媒燃焼によるセル内の発熱量を求めた。②煤煙、燃焼ガスおよび放射性物質の発生解析では、煤煙の発生量と粒度分布、燃焼ガスの生成量、酸素の消費量、未燃焼溶媒の放出量、放射性エアロゾルと揮発性核種の放出量について解析を行った。③TBP / ドデカンの組成変化の解析では、燃焼時に TBP が溶媒相に濃縮する過程を解析した。鎮火モデルでは、①燃焼持続領域と鎮火領域、②自然鎮火、③水相の沸騰による鎮火について解析を行った。

2.2 熱流動の解析

熱流動解析では、ネットワークを対象にした 1 次元熱流動解析モデルと火災セル内の 2 次元熱流動解析モデルを作成した。1 次元熱流動解析モデルでは、(1)熱流動現象、(2)ダクトや流体機器の流動抵抗、(3)質量放出速度、(4)エネルギー放出速度および(5)鎮火などの解析式を相互に結び付けて解くことが必要になる。

安全性評価では、溶媒火災時の延焼解析が重要であるため、FACE では 2 次元熱流動解析によるセル内温度分布の計算が可能な機能を持たせた。再処理施設のセル換気状態にあるので、セル内で火災が発生しても流体に大きな密度変化は起こらない。したがって、溶媒火災時の熱流動解析は、非圧縮性流体 ($\rho = \text{一定}$) の 2 次元熱流動基礎式を解けば十分である。FACE の 2 次元熱流動解析モデルは、LANL で開発した 2 次元非定常熱流動解析コード SOLA-2D⁷⁾ にエネルギーの式を組み込んで作成した。しかし、このプログラムを長時間にわたる溶媒火災解析にそのまま適用すると計算時間が極めて大きくなり実用的ではなかった。そこで、このプログラムを改良して 2 次元準定常熱流動解析の機能を持たせた。2 次元準定常熱流動解析とは、非定常状態の火災現象を指定したある時刻において、セル内流体の速度場が定常に達していると仮定して基礎式を解く方法である。具体的には、運動の式の時間微分項を無視してセル内の速度分布に関しては定常状態、セル内の温度分布に関しては非定常状態として熱流動基礎式を解く方法である。熱流動解析に準定常解析を適用した理由は、火災時のセル内の速度分布の形成は温度分布の形成に比較して圧倒的に早いからである。非定常解析法と準定常解析法の解法は基本的には同じであるが、非定常解析では SMAC 法⁷⁾、準定常解析では SIMPLEST 法⁸⁾が適用される。2 次元準定常解析は、非定常解析に比較して著しく計算時間が短縮できる。

2.3 物質移流の解析

物質移流の解析では、1次元と2次元の移流式を用いて(1)煤煙や放射性エアロゾルの移行・沈着、(2)煤煙によるHEPAフィルタの目詰まりと捕集、(3)燃焼ガスや放射性ガスなどの揮発性核種の移行について解析モデルを作成した。煤煙の移行・沈着解析では、粒度分布を持った煤煙粒子が流体の流れと共にネットワーク内を移行し、重力沈降、乱流拡散沈着、熱泳動沈着などにより除去されていく過程を計算した。煤煙による目詰まり・捕集解析では、①HEPAフィルタへの煤煙の負荷量と差圧上昇の関係や②粒度分布を考慮した煤煙のフィルタ捕集除染係数(DF値)を求めた。燃焼ガスの移行解析では、沈着や捕集は考えない。放射性物質の移行解析では、溶媒燃焼時に気相に放出する①放射性エアロゾル移行、②揮発性核種の移行および③放射性物質の環境放出量を計算した。

2.4 FACEの特徴

再処理施設のセル換気系は、セル、ダクト、流体機器、フィルタおよび排気プロアなどが複雑に連結されたネットワークから構成されている。しかも、溶媒火災事象は長時間にわたるので、実用的な計算時間内で安全性解析を行うためには、解法上の工夫が必要になる。そこで、FACEではネットワーク内の熱流動解析を1次元解析コード(FACE-1D)で、火災が発生しているセル内部の熱流動解析を2次元解析コード(FACE-2D)で計算する。2次元解析では、計算時間が大幅に短縮できる2次元準定常解析を採用した。FACEでは、1次元と2次元の解析コードを連結させて溶媒火災の計算を行ったが、両解析コードは独立に計算することも可能である。図1にFACEの機能相関図を、表1にFACE-1DとFACE-2Dの機能一覧を示した。

表1 火災事象解析コード (FACE) の解析機能 (1次元及び2次元)

一 次 元 圧 縮 性 及 び 二 次 元 非 圧 縮 性 熱 流 動 計 算 コ ー ド の 機 能	解析機能	機能の詳細
	(1) 1次元及び2次元の熱流動解析	<ul style="list-style-type: none"> セル内 (2次元非圧縮性) : 連続の式、運動の式 (非定常及び準定常の解析)、エネルギーの式 ダクト内 (1次元圧縮性) : 連続の式、運動の式、エネルギーの式及び状態方程式 浮力 : ブシネスク近似 (2次元) 座標系 : オイラー座標系 数値解法 : 1次元はノード・ジャンクション法 2次元は差分法 時間積分 : 1次元 : 陰解法 2次元 : 半陰解法 (SIMPLEST法)
	(2) 乱流モデル (2次元)	<ul style="list-style-type: none"> 0方程式モデル (渦動粘性係数と渦温度伝導率は大型火災試験より決定)
	(3) 熱伝導・伝達・輻射モデル	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導・伝達 基礎式 : 壁厚み方向1次元熱伝導式 数値解法 : 差分法 時間積分 : 陰解法 輻射 : 火炎部とセル壁の形態係数を計算
	(4) 内部構造物模擬機能 (2次元)	<ul style="list-style-type: none"> 面境界等のモデル化が可能
	(5) 燃焼モデル	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼速度と発熱速度 : Spaldingの1次元B値モデルを液面燃焼に拡張した解析モデル 煤煙の発生解析 放射性物質の放出・移行解析 燃焼ガスの組成解析
	(6) 煤煙と放射性物質の移行	<ul style="list-style-type: none"> セル内 : 2次元移流拡散方程式 (煤煙、燃焼ガス) ダクト内 : 1次元移流方程式 (煤煙) 煤煙の移行・沈着解析 (粒度分布を考慮) 煤煙の熱流動解析
	(7) フィルタの煤煙捕集と目詰まり	<ul style="list-style-type: none"> 煤煙の捕集解析 (放射性物質の捕集を含む) 煤煙によるフィルタの目詰まり解析 放射性物質の環境放出量

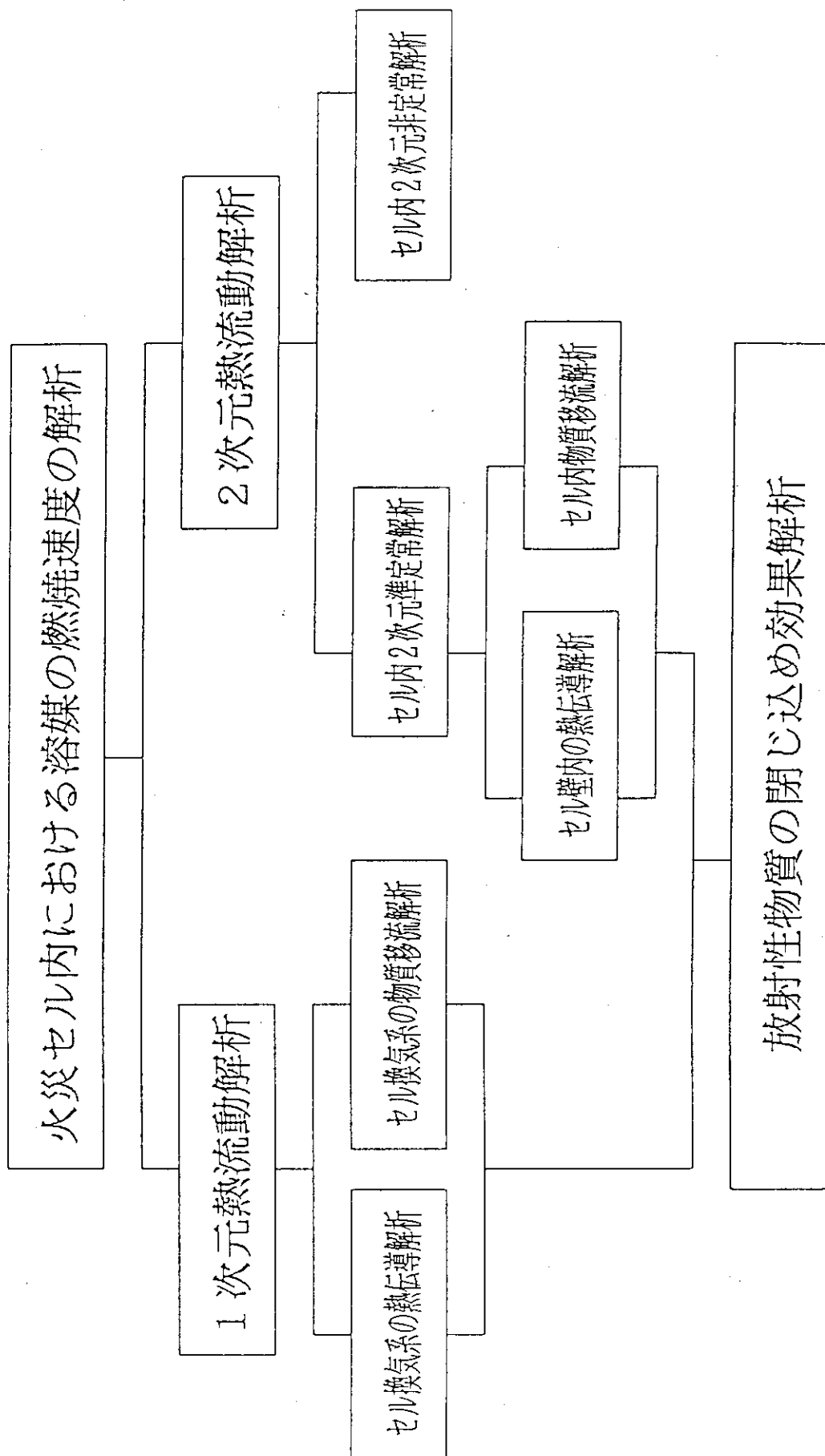


図1 FACEの解析機能

3. 1次元熱流動解析

3.1 基礎式

FACE-1Dは、LANLで開発した1次元熱流動解析コードEVENT(圧縮性)⁹⁾を基にして作成したので、熱流動解析に関わる機能はEVENTと全く同じである。EVENTでは、(1)連続の式、(2)エネルギーの式および(3)状態方程式をセル(ノード)などに適用して流体の圧力、温度および密度の変化を、(4)運動の式をダクト(ジャンクション)に適用して流速や質量流量(\dot{m}_j)の変化を解析している。

(1) 連続の式

$$V_i \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j \dot{m}_j + \dot{M}_s \quad (1)$$

(2) エネルギーの式(状態方程式を用いて変形)

$$\begin{aligned} \frac{dP_i}{dt} = \frac{R}{C_v V_i} \left[\sum_j \left\{ \dot{m}_j \left(C_p T_j + \frac{v_j^2}{2} \right) - \dot{q}_{Dj} \right\} \right. \\ \left. + \dot{M}_s C_p T_s + \dot{E}_s - \dot{q}_{ci} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

(3) 状態方程式

$$P_i = \rho_i R T_i \quad (3)$$

ここで、 V_i はノード*i*の体積、 ρ_i はノード*i*内の流体密度、 \dot{m}_j はジャンクション*j*を通る流体の質量流量、 \dot{M}_s は溶媒の燃焼により発生した燃焼ガスの質量放出速度、 P_i はノード*i*の圧力、 T_i と T_j はノード*i*とジャンクション*j*の流体温度、 v_j はジャンクション*j*を通る流体の速度、 \dot{q}_{Dj} はジャンクション*j*区間の壁面に逃げる放熱速度、 T_s は発生した燃焼ガスの温度、 \dot{E}_s は火災により発生した熱エネルギー放出速度、 \dot{q}_{ci} はノード*i*の壁面に逃げる放熱速度、 C_v と C_p は定容比熱と定圧比熱である。

(4) 運動の式

ノード*i*からジャンクション*j*へと断面積が変化することによって生じる流体の状態量変化は、断熱変化を考慮して決定する。ダクト、ダンパー、バルブ、フィルタおよび排気ブローなど流体機器に対する運動の式は、流体機器が設置されているジャンクション*j*を流れる流量とそのジャンクションをはさむ2つのノードの差圧で表され、流体機器の種類によって式が異なってくる。

(a) 断面積変化(拡大・縮小)の式

$$\frac{P_j}{P_i} = \left(\frac{T_j}{T_i} \right)^{\gamma_0 / (\gamma_0 - 1)} \quad (4)$$

$$\frac{\rho_j}{\rho_i} = \left(\frac{T_j}{T_i} \right)^{1/(\gamma_0 - 1)} \quad (5)$$

$$\rho_i v_i A_i = \rho_j v_j A_j \quad (6)$$

$$T_i + \frac{v_i^2}{2C_p} = T_j + \frac{v_j^2}{2C_p} \quad (7)$$

ここで、 ρ_i と ρ_j はノード i と断面積変化後のジャンクション j の入口における流体の密度、 P_i と P_j は圧力、 T_i と T_j は流体温度、 v_i と v_j は流体の速度、 A_i と A_j は断面積、 γ_0 は比熱比である。

(b) ダクト、逆流防止ダンパおよびバルブの式

ダクト、逆流防止ダンパおよびバルブの運動の式は以下の通りである。

$$\frac{\ell_j}{A_j} \frac{d\dot{m}_j}{dt} = -\Delta P - \frac{(K_{eff})_j}{A_j^2} \frac{\dot{m}_j |\dot{m}_j|}{2\rho_j} \quad (8)$$

ここで、 ℓ_j はジャンクション j の長さを表している。ジャンクションがバルブやダンパの場合には、弁座の断面積 (A_j) を用いて $\ell_j = \pi (4 A_j / \pi)^{1/2} / 4$ で与えられる。 ΔP はジャンクション j をはさむ 2 つのノード間の差圧、 $(K_{eff})_j$ はジャンクション j の流動抵抗から定まる無次元の抵抗係数、 ρ_j はジャンクション j の入口における流体の密度である。

(c) HEPA フィルタの式

HEPA フィルタの運動の式は、煤煙によるフィルタの目詰まり現象を考慮した以下の差圧式により与えられる。

$$\Delta P_f = \frac{K_L \mu \dot{Q}_F}{A_F^{3/2}} + \frac{K_T \rho \dot{Q}_F^2}{2A_F^2} \quad (9)$$

ここで、 \dot{Q}_F は HEPA フィルタを通過する体積流量、 A_F は HEPA フィルタの投影面積 (濾材面積ではない)、 μ は流体の粘性係数である。(9) 式の K_L と K_T は、フィルタを流れる流量と差圧を実測して得た HEPA フィルタの層流および乱流の無次元抵抗係数である。 K_L の値は、新品フィルタ¹⁰⁾あるいは煤煙で目詰まりしたフィルタ¹¹⁾に流量負荷を与えて測定した値を整理して決定した。溶媒火災では急激な流体の流量増大はないので、実用的には $K_T = 0$ としても支障はない。

(d) 排気ブロアの式

排気ブロアに対する運動の式は、ブロアの排気流量と差圧 (ブロアの給気側と排気側の ΔP) の測定から得た流量/差圧特性曲線 (入力テーブル) を利用する。

3.2 数値解法

FACE-1D の解法は EVENT と同様にノード・ジャンクション法を採用しており、基礎式の離散化には差分法を、時間積分は完全陰解法、数値解法は圧力と密度に注目したニュートン法による繰り返し計算によって解を求める。即ち、セルおよびダクトとダクトの接合点をノードで定義して流体の温度、圧力、密度を計算し、ジャンクションでは流体の圧縮効果は考えずにノード

から次のノードへ流れる流速や質量流量を計算する。初期条件は、ネットワークの出入口（境界ノードと呼ぶ）の温度と圧力を設定するほか、各ノードの温度と圧力の初期値および各ジャンクションの流量の初期値が必要になる。

3.3 初期定常計算

FACE-1Dの解析では、セルとダクトからなるネットワーク内の定常状態における初期値を設定しなくてはならない。即ち、ジャンクションの流動抵抗 (K_{eff}) を事象計算の事前に、与えられた初期値を用いて以下の式で決定する。この作業を初期定常計算と呼ぶ。

$$\Delta P_j = (K_{eff})_j \frac{\rho v_j^2}{2} \quad (10)$$

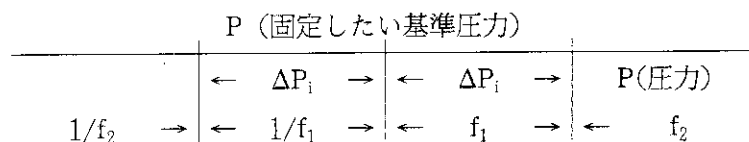
ここで、 ΔP_j はジャンクション j をはさむ2つのノード間の差圧、 ρ は流体の密度、 v_j はジャンクション j の流速であり、これらの値は初期値である。(10)式から決定したジャンクション j の流動抵抗 ($K_{eff})_j$ は過渡計算においても不変であるので、初期値としてのノード内の圧力やジャンクション j の流速の決定には十分に注意を要する必要がある。

ジャンクション j の差圧 (ΔP_j) が実測されている場合にはよいが、それぞれ例外の場合には流動抵抗 ($K_{eff})_j$ を計算により求め、(10)式より (ΔP_j) を決定する必要がある。このような場合には、($K_{eff})_j$ の値はダクトの壁面摩擦や曲がりによる流動抵抗、セルとダクトに結合点における拡大・縮小による流動抵抗などの総和で与えられる。長さ l_j 、管径 $D_{b,j}$ のダクトにおける壁面摩擦抵抗は、ファンニングの摩擦係数(f)を用いて、($K_{eff})_j = 4 f l_j / D_{b,j}$ で与えられる。また、ダクトの曲がりによる流動抵抗は管曲がりの曲率半径から、流路の変化に対する流動抵抗は管路の拡大・縮小率から ($K_{eff})_j$ を求めることができる¹²⁾。

3.4 逆流防止ダンパの開閉

再処理施設のセルの給気口には、流体の漏洩を防ぐ逆流防止ダンパが設けられている。しかし、EVENTにはダンパ開閉の機能はないので、FACE-1Dではネットワーク内の任意の位置に逆流防止ダンパが設置できる機能を備えた。即ち、FACEでは(1)セル内の圧力信号によるダンパの開閉モデルと(2)ダクト内の流量信号によるダンパの開閉モデルがプログラムされている。図2に圧力信号あるいは流量信号による逆流防止ダンパの開閉モデルを示す。

(1) セル内の圧力信号 (ノード i) による逆流防止ダンパの開閉モデル



(2) ダクト内の流量信号 (ジャンクション j) による逆流防止ダンパの開閉モデル

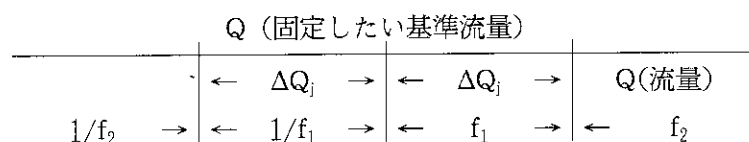


図2 逆流防止ダンパの開閉モデル (f: ダンパの開閉面積比)

セル内の圧力信号によるダンパの開閉モデルでは図2(1)に示すように任意のノード i 位置に信号モニタとして基準圧力(P)および P の正負方向に ΔP を、流量信号によるダンパの開閉モデルでは図(2)に示すように任意のジャンクション j 位置に基準流量(Q)と Q に対して正負方向に ΔQ を設定する。さらに、ダンパの開閉面積比 (f < 1) を以下のように定義する。

$$\text{ダンパの開閉面積比} = \frac{\text{(時刻}t+1\text{におけるダンパの開閉面積)}}{\text{(時刻}t\text{におけるダンパの開閉面積)}}$$

ここで、ダンパの開閉面積比は入力した f₁ と f₂ の値を用いて図2に示すように設定される。圧力や流量の変動が正、即ち変動の幅が基準値を正の方向に超えた場合には、ダンパが閉じて Δt 時間内にダンパを通る流体の流量は Qⁿ⁺¹ = fQⁿ の割合で減少する。一方、変動の幅が負の場合には、ダンパが開いて Δt 時間内にダンパを通る流体の流量は Qⁿ⁺¹ = Qⁿ/f の割合で増加する。このときの f の値は、圧力や流量の変動の幅が ΔP, ΔQ の範囲内では f₁ を、範囲外であれば f₂ を用いる。たとえば、f₁ に 1.0 に近接した値を用い、f₂ に f₁ より小さい値を用いることにより、基準値に近い領域ではダンパは穏やかに作動し、基準値から離れた領域ではダンパが速く作動するようになる。このように2つの変化率 (f₁ と f₂) を採用したことにより、ダンパの応答は滑らかになり解の安定性は向上する。逆流防止ダンパの開閉機能は溶媒火災試験の結果と比較され、モデルの妥当性が確認されている。

3.5 放射性物質の移行

溶媒火災時には、放射性エアロゾルを含む煤煙や放射性ガスなどの揮発性核種がセル内に放出し、燃焼ガスの流れと共にネットワーク内を移流することになる。FACE-1D では、セル内の流体は完全混合であると仮定しているため、ノード内の放射性物質の濃度は一様である。解析では、流体に対する煤煙粒子の抗力を無視したので、ネットワークを流れる煤煙の流速は流体の流速に等しい。したがって、移流物質の質量濃度は、1次元熱流動解析で計算されたジャンクション j の流速に等しい。移流物質の質量濃度は1次元熱流動解析で計算されたジャンクション j の流速 (v_j) を用いて、

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_j C_j (1 - E_t)_j v_j A_j + S_i + R_i \quad (11)$$

となる。ここで、 C_i はジャンクション j の上流に位置するノード i 内の質量濃度、 C_j はジャンクション j の質量濃度である。 \sum_j はノード i と接続しているジャンクション j の総和である。 V_i はセルの体積、 A_j はジャンクション j の断面積、 v_j はジャンクション j を通る流速である。溶媒火災の実証試験結果¹⁴⁾から、放射性エアロゾルは煤煙に均一に付着して移流していることが明らかになっているので、放射性エアロゾルの濃度は粒度分布を考慮した煤煙の質量濃度に置き換えて計算しても支障はない。トリチウム、ヨウ素および4酸化ルテニウム (RuO_4) のような揮発性核種の計算では、核種のエアロゾル化率を入力して濃度を定める。なお、放射性ガスは沈着や捕集はされないで、流体と共にネットワーク内を移流し、環境に放出すると考える。

(11)式中の S_i はノード i で発生した物質の質量発生速度、 R_i はノード i 内の質量沈着速度、 E_t はジャンクション j 内の移流物質の沈着率である。ジャンクション j の位置が HEPA フィルタの場合には、 E_t はフィルタによる煤煙の捕集率となる。なお、燃焼ガスや放射性ガスの移流を計算する場合には、 $R_i = 0$ 、 $E_t = 0$ である。移流解析では、煤煙は粒度分布を、揮発性核種の場合には核種のエアロゾル化率を考慮して(11)式を解く。移流式の解法は差分法を採用し、時間積分は完全陰解法である。

3.6 チョーキングモデル

FACE-1D では、EVENT と同様にダクト、ダンパ、バルブなどジャンクションを通る流体が臨界流になった場合、その位置の臨界質量流量が計算できるチョーキングモデルを備えている。このモデルでは、(10)式から求めた $(K_{\text{eff}})_j$ の値を用いてジャンクション j を通る流体のマッハ数 (M_j) を求める。

$$(K_{\text{eff}})_j = \frac{1 - M_j^2}{\gamma_0 M_j^2} + \frac{\gamma_0 + 1}{2\gamma_0} \ln \left[\frac{(\gamma_0 + 1) M_j^2}{2 + (\gamma_0 - 1) M_j^2} \right] \quad (12)$$

(12)式で計算された M_j から臨界質量流量 (\dot{m}_j) は、

$$\dot{m}_j = \rho_j v_j A_j = A_j M_j (\gamma_0 P_j \rho_j)^{1/2} \quad (13)$$

になる。(8)式から計算した質量流量 (\dot{m}_j) が(13)式から得た \dot{m}_j より大きい場合には、ジャンクション j の流れは臨界流に達しているものと判定し、(13)式の \dot{m}_j が(1)式と(2)式に代入される。

4. 2次元熱流動解析

4.1 基礎式

長時間にわたる火災事象の全過程を2次元非定常熱流動基礎式 (SMAC 法) を用いて解くことは多大な計算時間が必要になる。そこで、FACE ではネットワーク内の熱流動解析を1次元の

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_j C_j (1 - E_t)_j v_j A_j + S_i + R_i \quad (11)$$

となる。ここで、 C_i はジャンクション j の上流に位置するノード i 内の質量濃度、 C_j はジャンクション j の質量濃度である。 \sum_j はノード i と接続しているジャンクション j の総和である。 V_i はセルの体積、 A_j はジャンクション j の断面積、 v_j はジャンクション j を通る流速である。溶媒火災の実証試験結果¹⁴⁾から、放射性エアロゾルは煤煙に均一に付着して移流していることが明らかになっているので、放射性エアロゾルの濃度は粒度分布を考慮した煤煙の質量濃度に置き換えて計算しても支障はない。トリチウム、ヨウ素および4酸化ルテニウム (RuO_4) のような揮発性核種の計算では、核種のエアロゾル化率を入力して濃度を定める。なお、放射性ガスは沈着や捕集はされないので、流体と共にネットワーク内を移流し、環境に放出すると考える。

(11)式中の S_i はノード i で発生した物質の質量発生速度、 R_i はノード i 内の質量沈着速度、 E_t はジャンクション j 内の移流物質の沈着率である。ジャンクション j の位置が HEPA フィルタの場合には、 E_t はフィルタによる煤煙の捕集率となる。なお、燃焼ガスや放射性ガスの移流を計算する場合には、 $R_i = 0$ 、 $E_t = 0$ である。移流解析では、煤煙は粒度分布を、揮発性核種の場合には核種のエアロゾル化率を考慮して(11)式を解く。移流式の解法は差分法を採用し、時間積分は完全陰解法である。

3.6 チョーキングモデル

FACE-1D では、EVENT と同様にダクト、ダンパ、バルブなどジャンクションを通る流体が臨界流になった場合、その位置の臨界質量流量が計算できるチョーキングモデルを備えている。このモデルでは、(10)式から求めた $(K_{\text{eff}})_j$ の値を用いてジャンクション j を通る流体のマッハ数 (M_j) を求める。

$$(K_{\text{eff}})_j = \frac{1 - M_j^2}{\gamma_0 M_j^2} + \frac{\gamma_0 + 1}{2\gamma_0} \ln \left[\frac{(\gamma_0 + 1) M_j^2}{2 + (\gamma_0 - 1) M_j^2} \right] \quad (12)$$

(12)式で計算された M_j から臨界質量流量 (\dot{m}_j) は、

$$\dot{m}_j = \rho_j v_j A_j = A_j M_j (\gamma_0 P_j \rho_j)^{1/2} \quad (13)$$

になる。(8)式から計算した質量流量 (\dot{m}_j) が(13)式から得た \dot{m}_j より大きい場合には、ジャンクション j の流れは臨界流に達しているものと判定し、(13)式の \dot{m}_j が(1)式と(2)式に代入される。

4. 2次元熱流動解析

4.1 基礎式

長時間にわたる火災事象の全過程を2次元非定常熱流動基礎式 (SMAC 法) を用いて解くことは多大な計算時間が必要になる。そこで、FACE ではネットワーク内の熱流動解析を1次元の

FACE-1Dで、火災が発生しているセル内の熱流動解析を2次元準定常基礎式 (SIMPLEST法) を用いたFACE-2Dで解くことは既に述べた。

FACE-2Dでは、FACE-1Dで求めた熱流動の解を火災が発生しているセルの境界条件として使用する。この方法を採用すると、溶媒火災解析の計算時間が著しく短縮できる。以下にFACE-2Dの熱流動基礎式を示す。

(1)連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

(2)運動の式

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu_e \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \beta(T - T_s)g + \nu_e \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (16)$$

(3)エネルギーの式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \alpha_e \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \frac{\dot{Q} + \dot{q}_z}{\rho C_p} \quad (17)$$

(15)式と(16)式は2次元準定常解析を適用しているの、時間微分項はゼロ ($\partial u/\partial t = \partial v/\partial t = 0$) であることに注意されたい。ここで、 u と v は火災が発生しているセル内の x と y 方向の流体速度である。 P は規格化された圧力 ($= P_0/\rho + gy$) を表し、セル内の圧力 (P_0) と重力加速度 (g) の関数である。 T はセル内気相温度、 T_s はブシネスク近似の基準温度、 β はブシネスク近似による体積膨張係数である。 ν_e は実効動粘性係数で分子動粘性係数 (ν) と渦動粘性係数 (ν_t) の和 ($= \nu + \nu_t$)、 α_e は実効温度伝導率で流体の温度伝導率と渦温度伝導率 (α_t) の和 ($= \lambda/\rho C_p + \alpha_t$) で表される。 \dot{Q} は溶媒の燃焼によりセル内で発生した熱エネルギーの発生と消滅の速度、 \dot{q}_z は z 方向の壁に逃げる放熱速度である。

4.2 数値解法

FACE-2Dは、基礎式の時間積分を陰解法し、流れの計算はSIMPLEST法を採用した⁸⁾。SIMPLEST法は、運動の式から仮の流速場を求め、連続の式を満足するように設定した圧力で仮の流速場を補正しようとするものである。この方法は計算のタイムステップが大きくとれるので、応答の遅い溶媒火災の解析に極めて有効である。

(15)式と(16)式より仮の流速場を求めるにあたっては、(15)式と(16)式を物理量 u と v の移流方程式として捉え、これら物理量を移流させる流速 (u , v) と区別して考えれば、運動の式の離散化式は物理量 u と v の線形方程式として表すことができる。FACE-2Dでは、運動の式の移流項に風上差分を、その他の項は中心差分を用いて離散化を行い、離散点ごとの1次方程式が差分格子の中心を含む上下左右の5点差分近似式で表されるようにした。たとえば、 x 方向の運動の式についてみれば、離散点に i と j の添字をつけて、

$$a_0 u_{i,j} = a_1 u_{i-1,j} + a_2 u_{i+1,j} + a_3 u_{i,j-1} + a_4 u_{i,j+1} + b_0 - U \Delta P \quad (18)$$

ここで、 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0$ および U は、それぞれ運動の式を離散化したときに得られる係数である。SIMPLEST 法では、(18)式の右辺の u と P の値が既知であるとして $u_{i,j}$ を計算することになるが、この段階で得た仮の流速 ($u_{i,j}$) は連続の式を満足しない。そのため、以下の補正式によって、補正された流速 $u_{i,j}$ が(18)式を満足するように P' の値を求める。

$$u_{i,j} = \bar{u}_{i,j} - \frac{U}{a_0} \Delta P' \quad (19)$$

この手法を採用すると、連続の式は P' に関する線形連立方程式となり、容易に解くことが可能になる。解かれた P' は差分格子の圧力 P に加算されて次のステップの圧力として使用される。さらに、(19)式の流速の補正值にも用いられる。

エネルギーの式は流速場が与えられれば、(18)式と同様に温度(T)の線形連立方程式になり、容易に解くことができる。(17)式により解かれた温度は、ブシネスク近似による浮力として(18)式に反映される。計算は、SIMPLEST 法による流速場の計算とエネルギーの式による温度の計算をそれぞれ収束するまで繰り返し行う。差分は、温度、圧力については差分格子の中心で、流体の速度については格子の軸上で定義するスタッガードメッシュを用いた。境界条件は、壁面スリップ、壁面ノンスリップ、流入・流出の流速固定、及び自由流出が選択できる。

4.3 乱流モデル

溶媒火災時にはセル内の流体は乱流状態で流動しているので、見かけ上、流体の運動量伝達は粘性が高まった効果を与える。そのため、運動の式には実効動粘性係数 (ν_e) が使用される。渦動粘性係数は分子動粘性係数に比較して圧倒的に大きいので、渦動粘性係数を実効動粘性係数として使用しても支障はない。したがって、(19)式と(18)式を解くにあたっては渦動粘性係数 (ν_t) を定めておく必要がある。FACE-2D では、溶媒の燃焼液面上方の火炎部と火炎部を除くセル内気相部およびセル壁面上の乱流に対して0次方程式モデル¹⁵⁾を採用した。火炎部を除くセル内気相部の渦動粘性係数は、セル空間をいくつかの領域に分割し、計算によって決定できる火炎部とセル壁面上の渦動粘性係数を用いて補間する。

火炎部の渦動粘性係数は、ラジャラトナムの著書に記載されている以下の2次元自由噴流の渦動粘性係数を用いる¹⁶⁾。

$$\nu_t = k_t u_{fu} D_b \quad (20)$$

ここで、 u_{fu} は燃焼液面から上昇する火炎状の燃焼ガスの最大速度、 D_b は火炎領域の直径を表しており、計算では燃焼面の円相当直径をとる。 k_t は2次元自由噴流の実験により決定された係数であり、 $k_t = 1/4 C_2 \sigma_0^2$ で表される。 C_2 と σ_0 は自由噴流の実験により得た係数で、 $C_2 = 0.114$ 、 $\sigma_0 = 7.67$ である。

セル壁面上の渦動粘性係数については、プラントルの混合距離モデルを用いた乱流せん断応力の式とカルマンの乱流境界層速度分布式を組み合わせた以下の式¹⁷⁾を用いて求める。

$$\frac{\nu_t}{\nu} = 0 \quad (0 < y^+ < 5) \quad (21)$$

$$\frac{\nu_t}{\nu} = \frac{y^+}{5} - 1 \quad (5 < y^+ < 30) \quad (22)$$

$$\frac{\nu_t}{\nu} = \frac{y^+}{2.5} - 1 \quad (30 < y^+) \quad (23)$$

ここで、 y^+ は摩擦速度 ($u^* = (\tau_w/\rho)^{1/2}$) と壁面からの距離(y)を含む無次元数であり、 $y^+ = u^*y/\nu$ で与えられる。

渦温度伝導率 (α_t) は温度伝導率 ($\lambda/\rho C_p$) に比較して大きいので、(17)式中の実効温度伝導率 (α_e) は α_t の値で代表できる。 ν_t と α_t の関係は、乱流プラントル数 ($Pr_t = \nu_t/\alpha_t$) によって関連づけられるので、 $Pr_t = 1$ を仮定すれば $\nu_t = \alpha_t$ である。

4.4 放射性物質の移行

FACE-2Dにおいて、セル内の物質移流解析は(14)式~(17)式で計算された x と y 方向の流速 u と v の値を用いて、

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_k}{\partial t} + \frac{\partial u C_k}{\partial x} + \frac{\partial v C_k}{\partial y} = D_{p,k} \left[\frac{\partial^2 C_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \{ (v_{s,k} + v_{d,k}) C_k \} \\ + \frac{\partial}{\partial x} (v_{d,k} C_k) + \frac{\partial}{\partial x} (v_{T,k} C_k)_x + \frac{\partial}{\partial y} (v_{T,k} C_k)_y + S_k \end{aligned} \quad (24)$$

で与えられる。ここで、 C_k は放射性エアロゾルを含む k 煤煙粒子および k 成分の燃焼ガスおよび揮発性の k 核種などの質量濃度である。放射性エアロゾルは煤煙に均一に付着して移流していることから、煤煙の粒度分布を k 分割した粒子の質量濃度を求めれば放射性エアロゾル濃度が決定できることは既に述べた。(24)式中の $D_{p,i}$ は流体中の煤煙の乱流拡散係数であり、粒子や燃焼ガスの種類に係わらず $D_{p,k} = \alpha_p \nu_t$ とした。ここで、 $\alpha_p = 1.4 \sim 2.0$ を用いる¹⁸⁾。(24)式中の $v_{s,k}$ は煤煙粒子 k の重力沈降速度、 $v_{d,k}$ はブラウン運動による拡散沈着速度および $v_{T,k}$ は熱泳動による沈着速度である。 S_k は k 成分の煤煙粒子、燃焼ガスおよび揮発性核種の質量発生速度である。

(24)式の解法は、質量濃度を差分格子の中心で、流量を差分格子の軸上で定義するスタッカードメッシュを用いた完全陰解法とした。差分スキームは移流項に関しては上流差分、拡散項に関しては中心差分を用いる。境界条件は、セル内の Z 方向も含めてセル壁面上に到達した粒子は全て沈着するものとした。壁面やセルの出入口などの境界面では、 $D_p (\partial C/\partial x) = D_p (\partial C/\partial y) = 0$ である。なお、燃焼ガス、酸素ガスおよび未燃焼溶媒ガスなどの質量濃度を計算する場合には、 $(v_s) = (v_d) = (v_T) = 0$ とする。

4.5 FACE-2D と FACE-1D の接続

FACE-2D の解析では、FACE-1D で求めたある時刻の気相温度、壁面温度、放射性エアロゾルを含む煤煙および揮発性核種の質量濃度を初期条件に使用する。

火災セル内の燃焼ガス、酸素および未燃焼の溶媒ガスの初期条件は、

$$V \frac{dC_k}{dt} = F(C_{0,k} - C_k) - \dot{m}_b G_k \quad (25)$$

を解くことにより決定できる。ここで、 V は火炎の体積、 C_k は k ガスの質量濃度、 $C_{0,k}$ は空気中の k ガス成分の質量濃度、 F はセルを通る排気流量、 \dot{m}_b は燃焼速度、 G_k は溶媒が燃焼した場合の k ガス成分の発生率や消滅率である。したがって、初期条件に用いる k ガス成分の質量濃度は、

$$C_k = C_{0,k} - \frac{\dot{m}_b G_k}{F} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Ft}{V}\right) \right\} \quad (26)$$

になる。なお、酸素の質量濃度は $C_0 = 0.3$ (kg/m^3)、燃焼ガスと未燃焼溶媒ガスの質量濃度は $C_0 = 0$ である。

5. 熱エネルギーの発生と消滅

5.1 溶媒の燃焼速度

熱流動解析には、溶媒の燃焼による熱エネルギー発生や放熱による熱エネルギー消滅の計算が必要である。溶媒火災時の熱エネルギー放出速度は、溶媒の燃焼モデルから求めることができる。燃焼モデルは、溶媒火災試験より得た溶媒の燃焼速度と比較され、よく一致することを確認している¹¹⁾。即ち、燃焼速度はスポルディングの B 値モデル⁶⁾を拡張した以下の式から導出できる¹⁹⁾。

$$\dot{m}_b = \xi \dot{m}_{fu} = \frac{\xi \pi D_b^2 h}{4(1+\delta)C_{p, fu}} \ln\{(1+\delta)\varepsilon B + 1\} \quad (27)$$

27式の B はスポルディングの B 値で、

$$B = \frac{C_{p, fu} \Delta T + \Delta H(1-\gamma)Y_{ox}}{L_{fu}(1-\phi)} \quad (28)$$

で定義される。ここで \dot{m}_b は溶媒の燃焼速度、 \dot{m}_{fu} は溶媒の消費速度、 D_b は溶媒燃焼液面の円相当直径、 $C_{p, fu}$ は溶媒の熱容量、 ΔT は燃焼液面とセル給気口の温度差、 ΔH は溶媒の燃焼熱、 L_{fu} は溶媒の蒸発潜熱である。27式と28式中のギリシャ文字および Y_{ox} は溶媒が燃焼した場合の燃焼パラメータである。表2に燃焼パラメータの定義と溶媒火災試験により得た実験式²⁰⁾を示した。27式中の h は火炎から溶媒燃焼液面に流れる熱流に対する熱伝達係数を表しており、ヌッセルト数を用いて、

$$Nu = (hD_b/\lambda) = 3.106 + 0.14(Gr \cdot Pr)^{1/3} \{1 - \exp(-1.72D_b)\} \quad (29)$$

のように置き換えることができる¹¹⁾。ここで、 Gr はグラスホフ数、 Pr はプラントル数である。

27式から決定した \dot{m}_{fu} を用いると、(1)式中の質量放出速度 (\dot{M}_s) は、

$$\dot{M}_s = \dot{m}_{fu} + \dot{m}_{aq} = (1+\delta)\dot{m}_{fu} \quad (30)$$

火災セル内の燃焼ガス、酸素および未燃焼の溶媒ガスの初期条件は、

$$V \frac{dC_k}{dt} = F(C_{0,k} - C_k) - \dot{m}_b G_k \quad (25)$$

を解くことにより決定できる。ここで、 V は火炎の体積、 C_k は k ガスの質量濃度、 $C_{0,k}$ は空気中の k ガス成分の質量濃度、 F はセルを通る排気流量、 \dot{m}_b は燃焼速度、 G_k は溶媒が燃焼した場合の k ガス成分の発生率や消滅率である。したがって、初期条件に用いる k ガス成分の質量濃度は、

$$C_k = C_{0,k} - \frac{\dot{m}_b G_k}{F} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Ft}{V}\right) \right\} \quad (26)$$

になる。なお、酸素の質量濃度は $C_0 = 0.3$ (kg/m^3)、燃焼ガスと未燃焼溶媒ガスの質量濃度は $C_0 = 0$ である。

5. 熱エネルギーの発生と消滅

5.1 溶媒の燃焼速度

熱流動解析には、溶媒の燃焼による熱エネルギー発生や放熱による熱エネルギー消滅の計算が必要である。溶媒火災時の熱エネルギー放出速度は、溶媒の燃焼モデルから求めることができる。燃焼モデルは、溶媒火災試験より得た溶媒の燃焼速度と比較され、よく一致することを確認している¹¹⁾。即ち、燃焼速度はスポルディングの B 値モデル⁶⁾を拡張した以下の式から導出できる¹⁹⁾。

$$\dot{m}_b = \xi \dot{m}_{fu} = \frac{\xi \pi D_b^2 h}{4(1+\delta)C_{p, fu}} \ln \{(1+\delta)\varepsilon B + 1\} \quad (27)$$

27式の B はスポルディングの B 値で、

$$B = \frac{C_{p, fu} \Delta T + \Delta H(1-\gamma)Y_{ox}}{L_{fu}(1-\phi)} \quad (28)$$

で定義される。ここで \dot{m}_b は溶媒の燃焼速度、 \dot{m}_{fu} は溶媒の消費速度、 D_b は溶媒燃焼液面の円相当直径、 $C_{p, fu}$ は溶媒の熱容量、 ΔT は燃焼液面とセル給気口の温度差、 ΔH は溶媒の燃焼熱、 L_{fu} は溶媒の蒸発潜熱である。27式と28式中のギリシャ文字および Y_{ox} は溶媒が燃焼した場合の燃焼パラメータである。表2に燃焼パラメータの定義と溶媒火災試験により得た実験式²⁰⁾を示した。27式中の h は火炎から溶媒燃焼液面に流れる熱流に対する熱伝達係数を表しており、ヌッセルト数を用いて、

$$Nu = (hD_b/\lambda) = 3.106 + 0.14(Gr \cdot Pr)^{1/3} \{1 - \exp(-1.72D_b)\} \quad (29)$$

のように置き換えることができる¹¹⁾。ここで、 Gr はグラスホフ数、 Pr はプラントル数である。

27式から決定した \dot{m}_{fu} を用いると、(1)式中の質量放出速度 (\dot{M}_s) は、

$$\dot{M}_s = \dot{m}_{fu} + \dot{m}_{aq} = (1+\delta)\dot{m}_{fu} \quad (30)$$

となる。ここで、 \dot{m}_{aq} は水相の沸騰により気相に放出した水蒸気の質量放出速度である（表2参照）。FACE では、溶媒の着火から定常燃焼に達するまでの時間は入力とした。

5.2 ボイルオーバー燃焼

溶媒火災が長時間にわたって継続すると、溶媒相の下層に存在する水相が沸騰し、水蒸気に同伴して多量の溶媒ガスがセル内に放出する。この現象は水蒸気蒸留効果として知られている。セル内の空気の給気は火災時においても一定に保たれているので、セル内に充満した溶媒ガスは爆発的に燃焼する。この急激な燃焼をボイルオーバー燃焼と呼ぶ。ボイルオーバー燃焼が起こるとセル内の酸素は消費され、溶媒火災は鎮火する。ボイルオーバー燃焼が発生するとセル内の圧力が一時的に正圧になり、放射性物質の漏洩が問題になる。

FACE の解析では、ボイルオーバー燃焼の発生時刻を水相の沸騰時間に等しいと仮定した。火災時には、溶媒の燃焼速度に従って溶媒液面が降下し、溶媒相の厚みが減少する。溶媒中の温度分布式は、燃焼に伴う溶媒の液面降下速度 (V_{fu}) を考慮した以下の式から決定される²¹⁾。

$$T_L = T_o + (T_b - T_o) \exp \left[- \frac{C_{p, fu} \rho_{fu} V_{fu}}{\lambda_{fu}} (L - v_{fu} t) \right] \quad (31)$$

31式から水相の沸騰時間は、

$$t_e = \frac{L}{V_{fu}} - \frac{\lambda_{fu}}{C_{p, fu} \rho_{fu} V_{fu}^2} \ln \frac{T_b - T_o}{T_L - T_o} \quad (32)$$

で与えられる。ここで、 L は溶媒相の初期厚さ、 T_L は溶媒相と水相の界面温度 ($= 100^\circ\text{C}$)、 T_o は水相の無限遠方の温度 ($= 40^\circ\text{C}$)、 T_b は溶媒 (ドデカン) の沸点 ($= 216^\circ\text{C}$)、 v_{fu} は溶媒の液面降下速度、 λ_{fu} は溶媒の熱伝導度、 $C_{p, fu}$ は溶媒の比熱、 ρ_{fu} は溶媒の密度である。この解析では、火災からの輻射効果や燃焼皿の伝熱の影響を無視したので、32式から計算された沸騰時間は若干遅くなる。そのため、計算されたボイルオーバーの開始時刻は安全評価上では保守的な結果を得ることになる。

ボイルオーバー燃焼時の質量放出速度 (\dot{M}_s) は以下の通りである。

$$\dot{M}_s = \dot{m}_{fu} + \dot{m}_{aq} + \dot{m}_B \quad (33)$$

ここで、 \dot{m}_B はボイルオーバー燃焼に起因して放出した溶媒の消費速度であり、水蒸気蒸留効果の式によって与えられる。

$$\dot{m}_B = \frac{M_B P_B}{18 P_{H_2O}} \dot{m}_{aq} \quad (34)$$

ここで、 M_B は溶媒の分子量、 P_B と P_{H_2O} は溶媒と水の分圧、 \dot{m}_{aq} は水相の沸騰 (ボイルオーバー燃焼) による水蒸気の質量放出速度である。溶媒火災試験の実測値により $\dot{m}_{aq} = 0.16 \pi D_b^2 / 4$ で与えられる。

5.3 熱エネルギーの発生項

1次元基礎式を解くためには、(2)式中のエネルギー放出速度(\dot{E}_s)の値を決定する必要がある。

$$\dot{E}_s = \Delta H \dot{m}_b (1 - \gamma) \quad (65)$$

ここで、 \dot{E}_s はセル内の気相部に与えられた熱エネルギー速度であり、溶媒の燃焼によって発生した熱エネルギー放出速度($\Delta H \dot{m}_b$)から予め火炎部の輝炎放射によってセル壁に放射する熱エネルギー($\gamma \Delta H \dot{m}_b$)を差し引くことによって決定できる。

一方、2次元基礎式を解くためには、(17)式の熱エネルギー発生・消滅速度(\dot{Q})の値を決定する必要がある。溶媒の燃焼によりセル内の気相部に与えられる熱エネルギー速度は、燃焼による熱エネルギー速度から火炎部の輝炎放射と気相中のガス体の放射による熱エネルギー速度を差し引いて決定する。

$$\dot{Q} = \{ \dot{m}_b \Delta H (1 - \gamma) - \varepsilon_o \sigma A (\bar{T}_g^4 - \bar{T}_L^4) \} / V_f \quad (66)$$

ここで、 ε_o はガス放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 A はセル内部の壁表面積、 V_f は火炎部の体積である。 \bar{T}_g と \bar{T}_L はセル内の気相部と壁面の平均温度である。

5.4 溶媒の燃焼熱

溶媒中のn-ドデカンはTBPより燃焼しやすいので、燃焼中にTBPは溶媒相に濃縮される。したがって、 ΔH の値は溶媒火災の経過と共に変化することになる。濃縮されたTBPの体積分率(V_T)は、燃焼前の溶媒初期体積($V_{fu,0}$)と燃焼時の体積(V_{fu})、燃焼前のTBPの体積分率($V_{T,0}$)およびTBPとドデカンの比揮発度(α)を用いた以下の単蒸留の式から計算できる。

$$\ln \frac{V_{fu,0}}{V_{fu}} = \frac{1}{\alpha - 1} \left\{ \ln \frac{1 - V_{T,0}}{1 - V_T} - \alpha \ln \frac{V_{T,0}}{V_T} \right\} \quad (67)$$

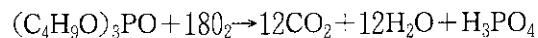
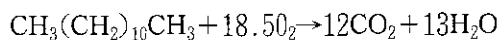
ここで、 t 時間までに燃焼して減少した溶媒の体積は以下の式から決定できる。

$$V_{fu} = V_{fu,0} - \int_0^t \dot{m}_{fu} dt / \rho_{fu} \quad (68)$$

溶媒の燃焼熱は、液体燃料の燃焼熱(ΔH)に関する次式より決定する。

$$\Delta H (\text{J/kg}) = 4180 \{ 8100 M_c + 34200 (M_H - M_o / 8) - 5400 M_H \} \quad (69)$$

ここで、 M_c 、 M_H および M_o は溶媒中の炭素、水素及び酸素の重量比である。これら重量比の値は、n-ドデカンとTBPの完全燃焼の式と燃焼中のTBPの重量分率(W_T)を用いて、



$$M_c = (12 \times 12 / 170.3) (1 - W_T) + (12 \times 12 / 266.3) W_T$$

$$M_H = (26 \times 1 / 170.3) (1 - W_T) + (27 \times 1 / 266.3) W_T$$

$$M_o = (4 \times 16 / 266.3) W_T$$

である。TBPの重量分率 (W_T) は、(37)式より求められた体積分率 (V_T) の値から、

$$W_T = \frac{\rho_{TBP} V_T}{\rho_{TBP} V_T + \rho_{ND} (1 - V_T)} \quad (40)$$

となる。ここで、 ρ_{TBP} ($= 0.97 \text{ g/cm}^3$) と ρ_{ND} ($= 0.75 \text{ g/cm}^3$) は TBP と n-ドデカンの密度である。

5.5 熱エネルギーの消滅項

1次元のエネルギー式を解くためには、ジャンクション j の放熱速度 (\dot{q}_{Dj}) およびノード i 内の放熱速度 (\dot{q}_{ci}) が必要である。ジャンクション j 区間において流体から壁方向に逃げる放熱速度は、

$$\dot{q}_{Dj} = \alpha_{in} A_j (\bar{T}_{g,j} - \bar{T}_{w,j}) + \epsilon_o \sigma A_j (\bar{T}_{g,j}^4 - \bar{T}_{w,j}^4) \quad (41)$$

である。一方、ノード i 内の流体から壁方向に逃げる放熱速度は、

$$\dot{q}_{ci} = \alpha_{in} A_i (\bar{T}_{g,i} - \bar{T}_{w,i}) + \epsilon_o \sigma A_i (\bar{T}_{g,i}^4 - \bar{T}_{w,i}^4) + \dot{\gamma} m_b \Delta H \quad (42)$$

である。(41)式と(42)式中の α_{in} は熱伝達率 ($= \lambda \text{Nu} / D_b$)、 Nu はヌッセルト数、 λ は気相部の熱伝導度、 D_b はセル或いはダクトの代表長さである。なお、火災セル以外のノードにおける放熱速度の計算では、(42)式右辺の第3項は適用されない。

FACE-2Dではセルの内部を2次元で解析しているので、(41)式中の \dot{q}_z にセル内 Z 方向の前後2面の壁から逃げる放熱速度を決定する必要がある。 ΔZ をセルの奥行き (一定値) とすれば、 Z 方向からの放熱速度は、

$$\dot{q}_z = -2h_z (T_g - T_z) / \Delta Z \quad (43)$$

である。ここで、 h_z は Z 方向の有効熱伝達係数、 T_z は Z 位置の壁温度で共に入力値である。

5.6 セル壁やダクト壁への熱伝導

セル壁やダクト壁の熱伝導式は、

$$\rho_w C_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (44)$$

を採用した。ここで、 T_w は壁内の温度、 ρ_w は壁の密度、 $C_{p,w}$ は壁の熱容量、 λ_w は壁の熱伝導度である。再処理施設のセル内壁には金属ライニング板が張られているので、FACEでは熱反射板のモデルを組み込んだ。(44)式を解くためには、気相から熱反射板に入る熱流束と熱反射板から出てセル壁内に入る熱流束が境界条件になる。熱反射板に入る熱流束は、

$$-\lambda_w \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_{n=0} = \left[\frac{\phi_F \Delta H m_b \gamma}{A_f} + \varepsilon_o \sigma (\bar{T}_g^4 - \bar{T}_L^4) + \alpha_{in} (\bar{T}_g - \bar{T}_L) \right] \quad (45)$$

で与えられる。ここで、 $\lambda_w [\partial T / \partial n]_{n=0}$ は火炎部から熱反射板に入る熱流束、 \bar{T}_g と \bar{T}_L は気相と熱反射板の平均温度である。(45)式中の ϕ_F はセル内の輻射形態係数を表し、火炎を取り巻く天井方向と火炎の側面方向の位置によって変わる理論式を用いる¹³⁾。ここで、 A_f は火炎部を円筒状に仮定した場合の火炎の表面積である。(45)式の第1項は火炎が発生しているセルのみに使用され、その他のセルやダクトには適用されない。第2項は高温のガス体から放射するガス輻射、第3項は流体の対流による熱伝達である。熱反射板から出てセル壁へ入る熱流束は、

$$-\lambda_w \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_{n=L} = \varepsilon_o \sigma (\bar{T}_L^4 - \bar{T}_w^4) + \lambda \frac{\bar{T}_L - \bar{T}_w}{\Delta x} \quad (46)$$

である。ここで、 \bar{T}_w は平均化された壁の表面温度、 Δx は熱反射板とセル壁の距離である。

ダクトの壁から外気に逃げる熱流束は、

$$-\lambda_w \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_{n=w} = \alpha_{out} (T_{w0} - T_o) \quad (47)$$

で与えられる。ここで、 α_{out} は外壁の熱伝達率、 T_{w0} と T_o は外壁と外気の温度である。 α_{in} と α_{out} の値は以下の対流熱伝達のヌッセルト数により与えられる。

$$\begin{aligned} \text{内壁: } Nu &= 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (\text{ダクト}) \\ Nu &= 0.037 Re^{0.6} Pr^{1/3} (\text{2次元セル}) & (48) \\ \text{外壁: } Nu &= 0.53 (GrPr)^{1/4} (\text{ダクト}) \\ Nu &= 0.14 (GrPr)^{1/3} (\text{2次元セル}) \\ Nu &= 0.6 (GrPr)^{1/5} (\text{2次元セル}) \\ Nu &= 0.1 (GrPr)^{1/3} (\text{2次元セル}) & (49) \end{aligned}$$

なお、(44)式の時間微分項はオイラーの後退差分で、空間微分は中央で差分化し、完全陰解法で解かれる。

表2 溶媒火災試験で得た各種の燃焼パラメータ

記号	現象	定義式	説明	実験式
ξ	給気量と燃焼率	$\frac{[\text{溶媒の燃焼速度}]}{[\text{溶媒の蒸発速度}]}$	実証試験の結果により決定できる	$= 1.0 \text{ (大気火災)}$ $= \exp [0.889 \ln (F/S) + 1.175], F/S \leq 0.15$ $= \exp [0.128 \ln (F/S) - 0.268], F/S > 0.15$
ϵ	燃焼皿内の熱蓄積	$\frac{[\text{溶媒蒸発の熱量}]}{[\text{溶媒相にはいる熱量}]}$	溶媒相、液相、及び燃焼皿の熱容量と温度上昇から決定できる	$\epsilon = \frac{[\dot{m}/v]_{\lambda} L_{rv}}{[\dot{q}]_{x=0}} = 0.3 \sim 0.4$
ψ	燃焼皿への輻射	$\frac{[\text{輻射効果により溶媒相に入った熱量}]}{[\text{火炎から溶媒にはいる熱量}]}$	実証試験の結果より決定できる	$\psi = \frac{[\dot{q}_r]_{\lambda}}{[\dot{q}]_{x=0}} = 0.85 \sim 0.46 \exp [-4.2d]$
γ	全輻射効果	$\frac{[\text{輻射の熱量}]}{[\text{溶媒の燃焼発熱量}]}$	石油火炎の実験データから決定できる	$\gamma = \frac{[\dot{q}_r]_{\lambda} + [-\dot{q}_r]_{\beta}}{\dot{m}_0 \Delta H} = 0.15$
f	酸素量の効果	$\frac{[\text{溶媒の燃焼量}]}{[\text{燃焼に必要な酸素供給量}]}$	溶媒燃焼の酸素当量より計算できる	$f = \frac{\xi [\dot{m}/v]_{\lambda}}{[\dot{m}_{ox}]_{\beta}} = 0.288 \text{ (n-ドデカン)}$ $= 0.333 \text{ (30\%TBP-n-ドデカン)}$
δ	沸騰の効果	$\frac{[\text{水相の蒸発速度}]}{[\text{溶媒の蒸発速度}]}$	セル内火災では鎮火するので $\delta = 0$ である	$\delta = \frac{[\dot{m}_{aq}]_{\lambda}}{[\dot{m}/v]_{\lambda}} = 0.1 \text{ (大気火災)}$ $= 0 \text{ (セル内火災)}$
$Y_{ox,m}$	酸素の効果	セル無限大位置から火炎までの酸素の濃度差の関数	実証試験の結果より決定できる	$Y_{ox,m} = 0.232 \text{ (大気火災)}$ $= 0.232 \exp [-28.8 (V_r/V_L)] \text{ (セル内火災)}$

6. 煤煙と放射性エアロゾルの発生

6.1 発生モデル

溶媒燃焼時の火炎中の煤煙濃度は非常に高いので、煤煙粒子と放射性エアロゾルの凝集が起こる。しかしながら、セル内は換気されているので、火炎から放出した煤煙はセル内の気相部で希釈されるので、煤煙の凝集は無視できる。ルテニウムは、火炎中で酸化されて一部は揮発性の RuO_4 ガスになる。このような場合には、一定のエアロゾル化率を入力する。煤煙は火炎中で対数正規分布となり、セル換気系内を移流するものとする。

6.2 煤煙と燃焼ガスの発生

(1)式と(4)式を解くためには、煤煙や燃焼ガスなどの質量発生速度 (S_i) が必要になる。溶媒火災時の煤煙の質量発生速度は溶媒の燃焼速度に比例している。

$$\dot{m}_s = \kappa \dot{m}_b \quad (50)$$

ここで、 κ は煤煙の発生係数、 \dot{m}_s は煤煙の質量発生速度である。煤煙発生係数については、KfK と JAERI の溶媒火災試験から $\kappa = 0.05 \sim 0.1$ であることが報告されている¹⁾。煤煙粒子 k の質量発生速度 $(\dot{m}_s)_k$ は、対数正規分布を離散化して得た煤煙の重量分率 ($W_{s,k}$) を用いて、

$$\dot{m}_{s,k} = \dot{m}_s W_{s,k} = \kappa \dot{m}_b W_{s,k} \quad (51)$$

になる。したがって、煤煙粒子 k の質量放出速度 ($S_{s,k}$) は、火炎体積 (V_f) の値を用いて、

$$S_{s,k} = \dot{m}_{s,k} \quad (1次元)$$

$$S_{s,k} = \dot{m}_{s,k} / V_f \quad (2次元) \quad (52)$$

となる。一方、2次元解析における燃焼ガスの質量発生速度、酸素の質量消費速度および未燃焼溶媒ガスの質量発生速度は、溶媒の燃焼速度とガス成分の重量分率の積で表すことができる。燃焼ガス ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) の質量発生速度 (S_{gas}) は、

$$S_{gas} = \dot{m}_b \{44.0(M_C/12) + 18.0(M_H/2)\} / V_f \quad (53)$$

である。酸素の消費速度 (S_{ox}) と未燃焼溶媒ガスの発生速度 (S_{fu}) は以下の式となる。

$$S_{ox} = -\dot{m}_b \{(18.5 \times 32 / 170.3)(1 - W_T) + (18 \times 32 / 266.3)W_T\} / V_f \quad (54)$$

$$S_{fu} = (\dot{m}_{fu} - \dot{m}_b) / V_f = \dot{m}_{fu}(1 - \xi) / V_f \quad (55)$$

6.3 煤煙の粒度分布

FACE では、溶媒火災により発生する煤煙の粒度分布を対数正規分布と仮定した。対数正規分布は自然対数で表した煤煙粒径が正規分布に従うもので、正規分布の分布関数における平均値を μ 、標準偏差を σ 、そして $s = \ln(a)$ とすれば、対数正規分布の分布関数は、

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_{-\infty}^{\ln x} \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \exp\left\{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} ds \\ &= \int_0^x \frac{1}{(2\pi)^{1/2} a \ln \sigma_g} \exp\left\{-\frac{(\ln a - \ln d_g)^2}{2(\ln \sigma_g)^2}\right\} d(a) \end{aligned} \quad (56)$$

となる。ここで、 d_g は幾何平均径、 σ_g は幾何標準偏差であり、 μ と σ の間には、

$$d_g = \exp(\mu)$$

$$\sigma_g = \exp(\sigma)$$

の関係が成立する。煤煙の粒度分布を計算するためには、56式の分布を離散的な分布にする必要がある。そこで、FACE では粒度分布を 11 分割に離散化し、正規分布上で、

$$\mu \pm n\sigma/2 \quad (n=0, 1, 2, 3, 4, 5)$$

に対応する代表径とした。この代表径を対数正規分布で表すと、自然対数の代表径 (d_i) は、

$$d_i = \exp(\mu \pm n\sigma/2) = d_g \sigma_g^{\pm n/2} \quad (57)$$

となる。表 3 に離散化した代表径 (d_i) の粒径範囲とその重量分率 ($W_{s,i}$) を示した。煤煙の重量分率は、代表径の質量濃度 (C_i) が全体の質量濃度 ($\sum_j C_j$) に占める割合である。溶媒火災試験では、発生した煤煙の幾何平均径は $d_g = 0.13 \sim 0.18 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差は $\sigma_g = 1.6 \sim 2.1$ の対数正規分布であることが分かっている¹¹⁾。

煤煙はセル換気系を移流する間に沈着・除去されるので、煤煙の重量分率は変化する。ネットワーク j で変化した煤煙粒子 i の重量分率は、(1)式より計算された煤煙粒子 i の質量濃度から決定できる。したがって、ネットワーク j 位置の煤煙の幾何平均径 $(d_g)_j$ と幾何標準偏差 $(\sigma_g)_j$ は、煤煙の重量分率 $(W_s)_j$ による重み付けにより以下のように決定できる。

$$(\ln d_g)_j = \sum_i \{(W_{s,i})_j \ln d_i\} \quad (58)$$

$$(\ln \sigma_g)_j^2 = \sum_i \{(W_{s,i})_j (\ln d_i - \ln d_g)_j^2\} \quad (59)$$

6.4 放射性エアロゾルの発生

溶媒火災時において、放射性物質は溶媒相の下層にある水相が沸騰しない限り、燃焼液面を
通って気相に放出する。放射性核種の気相放出率は、インベントリー、溶媒中の核種濃度および
燃焼に伴って気相に放出する核種の同伴係数で表される¹⁴⁾。表4に4.5%濃縮ウラン燃料を45
GWd/tUで燃焼させ、4年間冷却した場合の主要な核種のインベントリーを示した。表には、こ
の燃料を硝酸で200 gU/lの濃度に溶解した場合の放射能濃度、溶媒相と水相間の核種の分配係
数及び溶媒火災時の放射性核種の同伴係数が示されている。火炎中に放出された放射性核種は、
揮発性核種を除いてエアロゾルとなり煤煙に均一に付着することは既に述べた。したがって、k
エアロゾル核種の気相放出速度と煤煙の気相放出速度の比 (ω_k) が以下の通り定義できる。

$$\omega_k = \frac{C_{F,K}}{C} = \frac{\dot{m}_{F,k}}{\dot{m}_s} = \frac{e_{F,K} D_{F,K} C_{W,K}}{\kappa \xi \rho_{org}} \quad (60)$$

ここで、 $\dot{m}_{F,k}$ は k 核種エアロゾルの放出速度、 $C_{F,K}$ は浮遊した k 核種エアロゾルの濃度、C は
発生した煤煙の気相濃度及び $C_{w,k}$ は k 核種の水相濃度である。 $D_{F,K}$ は溶媒相と水相間の k 核種
の分配係数、 $e_{F,K}$ は k 核種の同伴係数である。 e_F , D_F , C_W の値が既知であれば、(1)式からノード
i の煤煙質量濃度 (C_i) が算出できるので、k 核種の気相濃度は以下の式から導出できる。

$$C_{F,i,k} = \omega_k C_i \quad (61)$$

表3 煤煙の粒度分布 (代表径と重量分離との関係)

分割番号	離散化した粒径の範囲 (μm)	代表粒径 (μm)	重量分率 (-)
1	$0 \sim d_g \sigma_g^{-9/4}$	$d_g \sigma_g^{-5/2}$	0.0122245
2	$d_g \sigma_g^{-9/4} \sim d_g \sigma_g^{-7/4}$	$d_g \sigma_g^{-2}$	0.0278343
3	$d_g \sigma_g^{-7/4} \sim d_g \sigma_g^{-5/4}$	$d_g \sigma_g^{-3/2}$	0.0655906
4	$d_g \sigma_g^{-5/4} \sim d_g \sigma_g^{-3/4}$	$d_g \sigma_g^{-1}$	0.1209776
5	$d_g \sigma_g^{-3/4} \sim d_g \sigma_g^{-1/4}$	$d_g \sigma_g^{-1/2}$	0.1746663
6	$d_g \sigma_g^{-1/4} \sim d_g \sigma_g^{1/4}$	d_g	0.1974126
7	$d_g \sigma_g^{1/4} \sim d_g \sigma_g^{3/4}$	$d_g \sigma_g^{1/2}$	0.1746663
8	$d_g \sigma_g^{3/4} \sim d_g \sigma_g^{5/4}$	$d_g \sigma_g^1$	0.1209776
9	$d_g \sigma_g^{5/4} \sim d_g \sigma_g^{7/4}$	$d_g \sigma_g^{3/2}$	0.0655906
10	$d_g \sigma_g^{7/4} \sim d_g \sigma_g^{9/4}$	$d_g \sigma_g^2$	0.0278343
11	$d_g \sigma_g^{9/4} \sim \infty$	$d_g \sigma_g^{5/2}$	0.0122245

表4 溶媒火災時の放射性核種の気相放出データ

放射性核種の種類	放射性核種のインベントリ (Ci/gU)	放射性核種の水相中の放射能 (Ci/l)	放射性核種の分配係数 (D _i) (-)	放射性核種の同伴係数 (e _F) (-)
³ H	0.00058	0.12	0.002	1.0
⁹⁰ Sr	0.092	18.3	0.0005	0.003
⁹⁰ Y	0.092	18.3	0.0002	0.003
¹⁰⁶ Ru	0.041	8.1	0.03	0.1
¹⁰⁶ Rh	0.041	8.1	1×10 ⁻⁵	0.01
¹²⁵ Sb	0.0063	1.3	1×10 ⁻⁵	0.01
^{125m} Te	0.0015	0.31	1×10 ⁻⁵	0.01
¹³⁴ Cs	0.063	12.6	8×10 ⁻⁵	0.1
¹³⁷ Cs	0.128	25.6	8×10 ⁻⁵	0.1
^{137m} Ba	0.121	24.2	0.0001	0.003
¹⁴⁴ Ce	0.037	7.5	0.001	0.001
¹⁴⁴ Pr	0.037	7.5	1×10 ⁻⁵	0.001
^{144m} Pr	0.0005	0.09	1×10 ⁻⁵	0.001
¹⁴⁷ Pm	0.051	10.2	0.01	0.001
¹⁵¹ Sm	0.0005	0.09	1×10 ⁻⁵	0.001
¹⁵⁴ Eu	0.0057	1.1	0.01	0.001
Uranium	2×10 ⁻⁶	0.0004	4.0	0.0005
Plutonium	0.138	27.6	1.0	0.0005
Actinium	0.0044	0.88	0.2	0.0005

7. 煤煙と放射性エアロゾルの沈着

7.1 沈着モデル

移流式を解くためには、放射性エアロゾルを含む煤煙の沈着率およびフィルタの捕集率が必要になる。FACEの解析では、煤煙の沈着を重力沈降、拡散沈着、熱泳動沈着とし、凝集効果は無視した。

7.2 ノード内の沈着速度

(1)式を解くためには、ノード*i* (セル) 内の煤煙粒子*k*の沈着速度が必要である。ノード*i*の表面積を A_i とすれば、(1)式中の*k*粒子の沈着速度($R_{i,k}$)は、

$$R_{i,k} = A_i v_{p,k} C_{i,k} = A_i (v_{s,i,k} + v_{d,i,k} + v_{T,i,k}) C_{i,k} \quad (62)$$

である。ここで、 $C_{i,k}$ はノード*i*における*k*煤煙粒子の質量濃度である。 v_s は重力沈降速度、 v_d は拡散沈着速度、 v_T は熱泳動沈着速度を表しており、

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} d_p^2 g (1 + A_c Kn) \quad (63)$$

$$v_d = \frac{D_B}{\delta_0} = \frac{3kT}{2d_p^2 \rho_g (2\pi kT/m)^{1/2} (1 + 0.9\pi/8)} / \delta_0 \quad (64)$$

$$v_T = Z_T \left(-\frac{dT}{dn} \right) \\ = \frac{3\nu (\lambda_g + C_t Kn \lambda_p + \frac{4b}{3} C_m Kn (\lambda_g + C_t Kn \lambda_p - \lambda_p))}{2T (1 + 3C_m Kn) (2\lambda_g + \lambda_p + 2C_t Kn \lambda_p)} \left(-\frac{dT}{dn} \right) \quad (65)$$

で与えられる。ここで、 d_p は煤煙粒子の直径、 ρ_p 粒子の比重、 A_c はカニンガム係数、 Kn はクヌッセン数、 D_B はストークス・アインシュタインの拡散係数、 δ_0 は壁面上の煤煙濃度境界層の厚さ、 Z_T はヤコブセン・ブロックの熱泳動係数である。また、 (dT/dn) は気相と壁面間の温度境界層の温度勾配である。

7.3 ジャンクション内の沈着率

(1)式の解法には、ジャンクション (ダクト) 内の煤煙の沈着率 (E_i) が必要である。ある時刻における長さ l 、直径 D_b のダクト入口のエアロゾル濃度を C_0 とすれば、出口のエアロゾル濃度 (C) は、

$$C = C_0 \exp \left[-\frac{4v_p l}{v D_b} \right] \quad (66)$$

である。したがって、煤煙の沈着率 (E_t) は、

$$E_t = \frac{C_0 - C}{C_0} = 1 - \exp\left[-\frac{4v_p \ell}{vD_b}\right] \quad (67)$$

である。ここで、 v はジャンクシオンを流れる流体の流速、 v_p は煤煙の沈着速度である。なお、ジャンクシオンの位置がフィルタの場合には、 E_t の値はフィルタの捕集率となる。

7.4 ジャンクシオン内の沈着速度

67式中の煤煙粒子の沈着速度 (v_p) は、乱流沈着速度と熱泳動沈着速度の和である。

$$v_p = v_c + v_T \quad (68)$$

ここで、 v_c は煤煙の乱流沈着速度で、重力沈降の効果を含んだ金岡の解析式で決定する²²⁾。

$$v_c = -\frac{vD_b}{4\ell} \ln(1 - E_c) \quad (69)$$

69式中の E_c は、金岡の乱流沈着理論では以下の沈着分率で表される。

$$E_c = 1 - \exp\left[-2 \frac{S_{tav}^*}{v_{av}^+} \frac{2\ell}{D_b}\right] \quad (70)$$

ここで、

$$S_{tav}^* = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi S_t^* d\theta$$

$S^+ = 0.9 \rho_p d_p^2 u^{*2} / (18 \mu \nu)$ と定義すれば、 $S^+ \leq 5$ 、 $\theta \neq 90^\circ$ の場合には、

$$\frac{1}{St^*} = \frac{u^*}{u_t^* \cos\theta} \left[1 - \exp\left\{ \frac{14.5^3}{2} \frac{u_t^*}{u^*} \cos\theta \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{S^{+2}} \right) \right\} \right] + 10.75 + v_{av}^+ + F(0) \quad (71)$$

$S^+ \leq 5$ 、 $\theta = 90^\circ$ の場合には、

$$\frac{1}{St^*} = \frac{14.5^3}{2} \frac{1}{S^{+2}} = 50.22 + v_{av}^+ + F(0) \quad (72)$$

$5 \leq S^+ \leq 30$ の場合には

$$\frac{1}{St^*} = 51 \ln \frac{25.205}{S^+ - 4.795} + v_{av}^+ - 13.25 + F(0) \quad (73)$$

$S^+ \geq 30$ の場合には

$$\frac{1}{St^*} = v_{av}^+ - 3.8 - \frac{1}{0.36} \ln S^+ + F(S^+) \quad (74)$$

ここで、 $F(x)$ は

$$F(x) = \frac{1}{0.36} \ln \left[\frac{R_L^+ - x}{R_L^+ - \exp\{0.36(v_{av}^+ - 3.8)\}} \right] \quad (75)$$

ここで、 R は管の半径 ($=D_b/2$)、 f は管摩擦係数 ($=0.079/Re^{0.25}$)、 Re はレイノルズ ($=D_b v$)

$/\nu$), μ は粘性係数, ν は動粘性係数, ρ_p は煤煙の密度, d_p は煤煙の直径, g は重力加速度, θ は管断面の重力方向からの角度である。さらに, $u^* = (f/2)^{1/2} v$, $v_{av}^+ = v/u^*$, $u_t = \rho_p d_p^2 g / (18\mu)$, $R_L^- = D_o u^* / 2\nu$ とする。

8. HEPA フィルタの解析

8.1 煤煙によるフィルタの目詰まり

溶媒火災の安全性評価では、煤煙による HEPA フィルタの目詰まり解析が重要である。火災事象では、爆発事象のように急激な流量変化は無いので、 $K_T = 0$ であることは既に述べた。フィルタに煤煙が捕集されると、差圧が上昇して HEPA フィルタの健全性に影響を与えることが考えられる。そこで、FACE-1D では、HEPA フィルタへの煤煙重量負荷量 (L_s) とフィルタの層流抵抗係数 (K_L) の関係式を用いた。即ち、 K_L の値は、再処理モデルプラントのフィルタに流れる流体の定格風量を基準にして、

$$K_L = [13920L_s^2 + 2513L_s + 241] A^{3/2} / \mu \dot{Q} \quad (76)$$

とした。(76)式は、溶媒火災試験によって得た煤煙によるフィルタの目詰まりデータを整理して求めた保守的な試験式である¹¹⁾。 L_s (kg) は、フィルタに捕集された煤煙の積算負荷重量であり、以下の式により決定できる。

$$L_s = \int_0^t (\sum_k \dot{Q}_F E_{t,k} C_k) dt \quad (77)$$

ここで、 \dot{Q}_F はフィルタを通過する流量、 $E_{t,k}$ はフィルタによる k 煤煙粒子の捕集率、 C_k は k 煤煙粒子の質量濃度である。

8.2 フィルタの捕集率

FACE-1D では、粒度分布を持つ DOP エアロゾルの DF_k がテーブル化されている。総括除染係数 (DF) は、

$$DF = \frac{\sum_k DF_k d_{p,k}}{\sum_k DF_k} \quad (78)$$

であるので、 E_t の値は以下の式から決定できる。

$$E_t = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = \frac{DF - 1}{DF} \quad (79)$$

$/\nu$), μ は粘性係数, ν は動粘性係数, ρ_p は煤煙の密度, d_p は煤煙の直径, g は重力加速度, θ は管断面の重力方向からの角度である。さらに, $u^* = (f/2)^{1/2} v$, $v_{av} = v/u^*$, $u_t = \rho_p d_p^2 g / (18\mu)$, $R_L^+ = D_b u^* / 2\nu$ とする。

8. HEPA フィルタの解析

8.1 煤煙によるフィルタの目詰まり

溶媒火災の安全性評価では, 煤煙による HEPA フィルタの目詰まり解析が重要である。火災事象では, 爆発事象のように急激な流量変化は無いので, $K_T = 0$ であることは既に述べた。フィルタに煤煙が捕集されると, 差圧が上昇して HEPA フィルタの健全性に影響を与えることが考えられる。そこで, FACE-1D では, HEPA フィルタへの煤煙重量負荷量 (L_s) とフィルタの層流抵抗係数 (K_L) の関係式を用いた。即ち, K_L の値は, 再処理モデルプラントのフィルタに流れる流体の定格風量を基準にして,

$$K_L = [13920L_s^2 + 2513L_s + 241] A^{3/2} / \mu \dot{Q} \quad (76)$$

とした。(76)式は, 溶媒火災試験によって得た煤煙によるフィルタの目詰まりデータを整理して求めた保守的な試験式である¹¹⁾。 L_s (kg) は, フィルタに捕集された煤煙の積算負荷重量であり, 以下の式により決定できる。

$$L_s = \int_0^t (\sum_k \dot{Q}_F E_{t,k} C_k) dt \quad (77)$$

ここで, \dot{Q}_F はフィルタを通過する流量, $E_{t,k}$ はフィルタによる k 煤煙粒子の捕集率, C_k は k 煤煙粒子の質量濃度である。

8.2 フィルタの捕集率

FACE-1D では, 粒度分布を持つ DOP エアロゾルの DF_k がテーブル化されている。総括除染係数 (DF) は,

$$DF = \frac{\sum_k DF_k d_{p,k}}{\sum_k DF_k} \quad (78)$$

であるので, E_t の値は以下の式から決定できる。

$$E_t = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = \frac{DF - 1}{DF} \quad (79)$$

9. 鎮火モデル

9.1 溶媒火災の燃焼持続領域

セル内火災の状況は、給気流量と溶媒の燃焼面積で支配される。給気流量は1時間あたりのセルへの空気の換気回数 ($n=F/V_0$) で、燃焼面積は再処理モデルプラントのセル体積とそのセル内で燃焼している抽出器の段数 ($s=V_0A/VA_0$) で表すことができる。ここで、 F はセルへの給気流量、 V_0 と A_0 はモデルプラントのセル体積と燃焼面積、 V と A は解析の対象としたセル体積と燃焼面積である。溶媒火災試験では、セル内容媒の燃焼持続領域を換気回数 (n) と抽出器相当段 (s) の関係式を用いて決定した¹¹⁾。燃焼持続領域の式は、

$$n-0.309s^{1.6}>0(\text{ドデカン溶媒の火災}) \quad (80)$$

$$n-2.01s^{1.2}>0(\text{30\%TBP-ドデカン溶媒の火災}) \quad (81)$$

n と s の組み合わせが燃焼持続領域外にある場合には、セル内火災は酸素不足により自然鎮火する。

9.2 自然鎮火時間

自然鎮火時間 (t_e) は、給気流量 (F) と燃焼速度 (\dot{m}_b) を考慮した以下の式で決定できる。

$$t_e = -\frac{V}{F} \ln \left[1 - \frac{F(C_0 - C_e)}{3.48\dot{m}_b} \right] \quad (82)$$

82式は、セル内の酸素の物質収支と酸素の燃焼限界モル分率 ($C_e = 0.127$) から求めた式である。ここで、 V はセルの体積、 C_0 は給気口の酸素のモル分率 ($= 0.21$) である。82式中の 3.48 の値は、ドデカンが完全燃焼した場合に消費する酸素のモル数である。なお、ボイルオーバー燃焼に起因した鎮火時間は、既に説明した通り溶媒相の下層にある水相の沸騰時間と同じである。

10. 溶媒火災試験装置

10.1 試験装置の概要

図3に溶媒火災試験装置の鳥瞰図を示した。試験装置は、給気フィルタと逆流防止ダンパを備えた給気ダクト、 20 m^3 の第1モデルセル、 6 m^3 の第2モデルセル、高さ5mの直方体第1ダクト、全長16mの第2ダクト、給気フィルタと逆流防止ダンパを備えた大口径の希釈ダクト、第2ダクトと希釈ダクトの合流点(ミキサー)、ミキサーとフィルタチャンバーを結ぶ大口径の第3ダ

9. 鎮火モデル

9.1 溶媒火災の燃焼持続領域

セル内火災の状況は、給気流量と溶媒の燃焼面積で支配される。給気流量は1時間あたりのセルへの空気の換気回数 ($n=F/V_0$) で、燃焼面積は再処理モデルプラントのセル体積とそのセル内で燃焼している抽出器の段数 ($s=V_0A/VA_0$) で表すことができる。ここで、 F はセルへの給気流量、 V_0 と A_0 はモデルプラントのセル体積と燃焼面積、 V と A は解析の対象としたセル体積と燃焼面積である。溶媒火災試験では、セル内溶媒の燃焼持続領域を換気回数 (n) と抽出器相当段 (s) の関係式を用いて決定した¹¹⁾。燃焼持続領域の式は、

$$n-0.309s^{1.6}>0(\text{ドデカン溶媒の火災}) \quad (80)$$

$$n-2.01s^{1.2}>0(\text{30\%TBP-ドデカン溶媒の火災}) \quad (81)$$

n と s の組み合わせが燃焼持続領域外にある場合には、セル内火災は酸素不足により自然鎮火する。

9.2 自然鎮火時間

自然鎮火時間 (t_c) は、給気流量 (F) と燃焼速度 (\dot{m}_b) を考慮した以下の式で決定できる。

$$t_c = -\frac{V}{F} \ln \left[1 - \frac{F(C_0 - C_e)}{3.48\dot{m}_b} \right] \quad (82)$$

82式は、セル内の酸素の物質収支と酸素の燃焼限界モル分率 ($C_e = 0.127$) から求めた式である。ここで、 V はセルの体積、 C_0 は給気口の酸素のモル分率 ($= 0.21$) である。82式中の3.48の値は、ドデカンが完全燃焼した場合に消費する酸素のモル数である。なお、ボイルオーバー燃焼に起因した鎮火時間は、既に説明した通り溶媒相の下層にある水相の沸騰時間と同じである。

10. 溶媒火災試験装置

10.1 試験装置の概要

図3に溶媒火災試験装置の鳥瞰図を示した。試験装置は、給気フィルタと逆流防止ダンパを備えた給気ダクト、 20 m^3 の第1モデルセル、 6 m^3 の第2モデルセル、高さ5mの直方体第1ダクト、全長16mの第2ダクト、給気フィルタと逆流防止ダンパを備えた大口径の希釈ダクト、第2ダクトと希釈ダクトの合流点(ミキサー)、ミキサーとフィルタチャンバーを結ぶ大口径の第3ダ

クト、実機と同じ寸法のフィルタチャンバー、フィルタチャンバーから排気ブロアまでの大口径排気ダクトおよびスタックからなる。試験で使用した燃焼皿は、再処理モデルプラントのミキサセトラ（抽出器）の1/4を模擬した大きさである。表5に試験装置の諸元、燃焼皿の寸法（抽出器相当段）および排気ブロアの流量/差圧特性の関係を示した。なお、本報告書の付録に計算に必要な物性値などを示した。

10.2 計算の体系

(1) 1次元計算の体系

図4に試験装置のブロックダイヤグラムとノード・ジャンクション分割図を示す。図中のノードは試験装置のセル、ダクトとダクトの接合点および流体の出入口（境界ノードと呼ぶ）などに対応しており、ジャンクションはダクト、逆流防止ダンパー、HEPA フィルタ及び排気ブロアなどに対応している。

図中の境界ノードはセルへの給気口、ノード2と3は逆流防止ダンパーをはさむ2つの接合点、ノード4は溶媒火災が発生している第1モデルセル、ノード5は第2モデルセル、ノード6と7はダクトとダクトの接合点、ノード8は第2ダクトと希釈ダクトの合流点（ミキサー）、ノード9、10および11は第3ダクトに設置したフィルタチャンバー内の上下2段のHEPAフィルタの接合点、ノード12と13は排気ブロアの接合点と境界ノードを表している。さらに、ノード14～16は希釈ダクト内の接合点である。一方、図中のジャンクション(1)はフィルタ、ジャンクション(2)は逆流防止ダンパー、ジャンクション(3)は給気ダクト、ジャンクション(4)は第1ダクト、ジャンクション(5)～(7)は第2ダクト、ジャンクション(8)は第3ダクト、ジャンクション(9)と(10)は2段の試験用HEPAフィルタ、ジャンクション(11)は流量調節弁、ジャンクション(12)は排気ブロア、ジャンクション(13)は希釈ダクト、ジャンクション(14)は逆流防止ダンパー、ジャンクション(15)は希釈ダクト、ジャンクション(16)は希釈ダクトのフィルタを表している。

表6に入力値として使用される試験装置のノードおよびジャンクションに対する体積、断面積、長さ、初期圧力の値を示した。初期圧力の値は、セルへの給気量が400 m³/h（換気回数=20回/h）、希釈ダクトへの給気量が3980 m³/h、排気ブロアを通る排気量が4380 m³/hの場合の値である。

(2) 2次元計算の体系

図5に第1モデルセルのメッシュ分割と渦動粘性係数の分布を示した。図中の渦動粘性係数は、第1モデルセルに燃焼面積0.23 m²の燃焼皿（s=3段）を設置し、給気流量を600 m³/h（n=30回/h）とした場合の溶媒火災条件より求めたものである。火炎部の渦動粘性係数は(20)式から燃焼ガス噴流の最大速度を $u_{fu} = 2$ m/s、噴流の幅（燃焼液面の相当直径）を $D_b = 0.12$ mとして、セル壁面上の渦動粘性係数は(23)から無次元化距離の値を $y^+ = 50$ として決定した²³⁾。火炎部を除くセル内気相部の渦動粘性係数は両者の値を補間して決定した。

第1モデルセル内への給気は、セル内の床に沿って燃焼皿の下部に設置されたダクトから流入し、燃焼ガスはセル天井の右上側の第1ダクトより排出される。3次元の火災現象を2次元で表現するためには、セルの奥行き（Z方向）と燃焼皿の奥行きをどのように設定するかが重要である。2次元準定常解析を実施した結果、セル奥行きを燃焼皿の奥行きと同じにした場合

に比較的よく溶媒火災試験の結果と一致した。

表5 試験装置と燃焼皿の寸法

装置の名称	諸元
給気ダクト	全長15m, 管径200A, 逆流防止ダンパ(逆止弁)
第1モデルセル	体積20m ³ , 高さ2m, 横幅4m, 奥行3m 熱反射板
燃焼皿	抽出器相当段 0.5段 0.16mW x 0.24mL x 0.40mH 1段 0.16mW x 0.48mL x 0.40mH 3段 0.48mW x 0.48mL x 0.40mH 6段 0.48mW x 0.96mL x 0.40mH 9段 0.48mW x 1.44mL x 0.40mH 12段 0.48mW x 1.92mL x 0.40mH
第2モデルセル、	体積6m ³
第1ダクト	全長5m x 0.5m x 1.25mの直方体
第2ダクト	全長16m, 管径150A, 流量測定用のオリフィス付き
希釈ダクト	全長16m, 管径600A, 逆流防止ダンパ付き
第3ダクト	全長10m, 管径600A
試験用フィルタチャンバー	1基(実機相当)
HEPAフィルタ	上下2段、並列6台 寸法: 0.305mH x 0.610Lm x 0.292mT (ハーフサイズ)
排気ブロー	流量: 4380m ³ /h 流量(m ³ /s) / 差圧(Pa): 0.0/6400, 0.75/6370, 1.25/5880 1.67/5292, 2.67/0.0
排気ダクト	全長15m, 管径600A
スタック	15m

表6 実証試験装置のノード・ジャンクションの諸元

(1) ノード

ノード番号	種類	体積 (m ³)	断面積 (m ²)	初期圧力 (Pa-G)
1	境界ノード (給気)	—	—	0.0
2	給気ダクトの接合点	0.18	0.36	-9.8
3	給気ダクトの接合点	0.471	0.0314	-421.0
4	第1モデルセル (火災)	20.0	7.7	-490.0
5	第2モデルセル (火災)	6.0	4.0	-490.3
6	第2ダクトの接合点	0.132	0.0176	-784.0
7	第2ダクトの接合点	0.132	0.0176	-1064.0
8	ダクトの合流点 (ミキサー)	2.82	0.282	-1352.0
9	第3ダクトの接合点	0.54	1.08	-3871.0
10	第3ダクトの接合点	0.54	1.08	-4116.0
11	第3ダクトの接合点	0.54	1.08	-4361.0
12	第3ダクトの接合点	2.82	0.282	-5782.0
13	境界ノード (スタック)	—	—	-98.0
14	希釈ダクトの接合点	2.82	0.282	-1137.0
15	希釈ダクトの接合点	5.64	0.282	-588.0
16	希釈ダクトの接合点	0.35	0.7	-157.0
17	境界ノード (給気)	—	—	0.0

(2) ジャンクション

ジャンクション番号	種類	断面積 (m ²)	長さ (m)
(1)	給気フィルタ	0.36	—
(2)	逆流防止ダンパー	0.0147	—
(3)	給気ダクト	0.0314	15.0
(4)	第1ダクト	0.625	5.0
(5)	第2ダクト	0.0176	5.0
(6)	第2ダクト	0.0176	5.0
(7)	第2ダクト	0.0176	5.0
(8)	第3ダクト	0.282	10.0
(9)	HEPAフィルタ (前段)	1.08	—
(10)	HEPAフィルタ (後段)	1.08	—
(11)	流量調節弁	0.167	—
(12)	排気プロア	0.282	—
(13)	希釈ダクト	0.282	10.0
(14)	逆流防止ダンパー	0.22	—
(15)	希釈ダクト	0.282	20.0
(16)	給気フィルタ	0.7	—

- A 第1モテルセル
- B 第1ダクト
- C 第2モテルセル
- D 純気ダクト
- E 純気フィルタ
- F 希釈フィルタ
- G 希釈ダクト
- H 第2ダクト
- I ハイパスライン
- J 第3ダクト
- K 試験フィルタ
- L 排気ダクト
- M 排気フロア
- N スタック
- O コンプレッサ
- P 圧力 壓 盤
- Q 計 表 盤
- R ガス分析計
- S テーカロガード
- T カスケードインバクワー
- U 水タンク
- V 潤滑タンク
- W トリカンタンク
- X TBPタンク
- Y 水浴タンク
- Z 生産 運 送 機

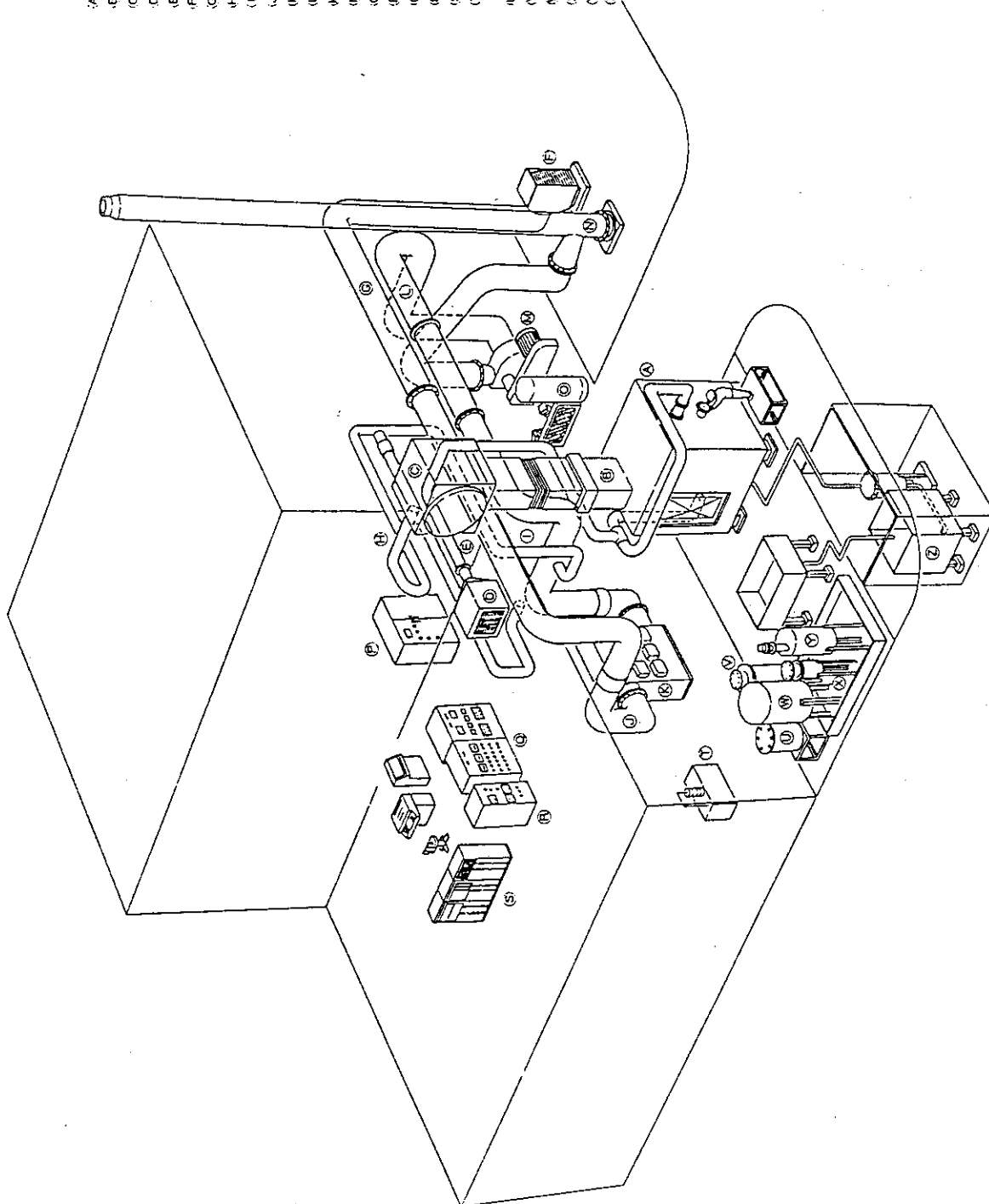
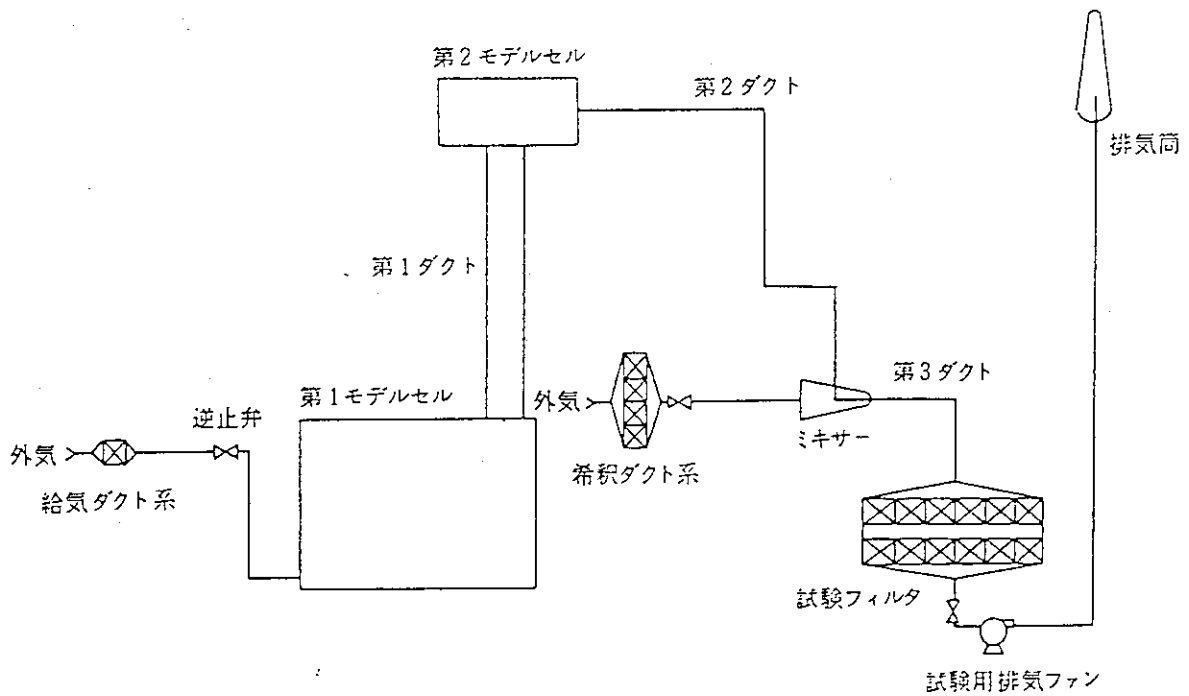


図3 溶媒火災試験装置

(A) 溶媒火災試験装置



(B) 試験装置のネットワーク

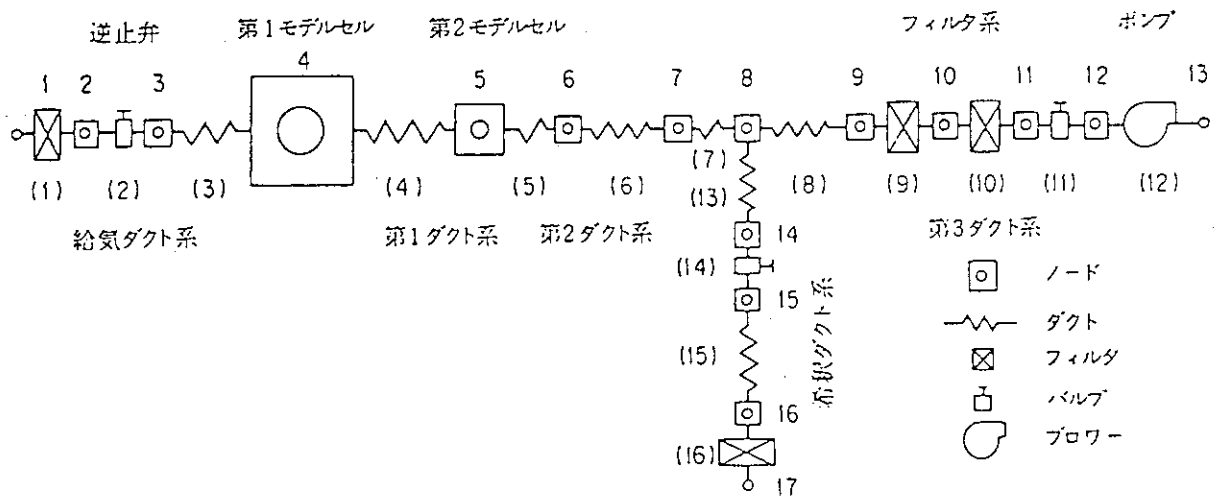


図4 試験装置のブロックタイヤグラムとノードジャンクション分割図

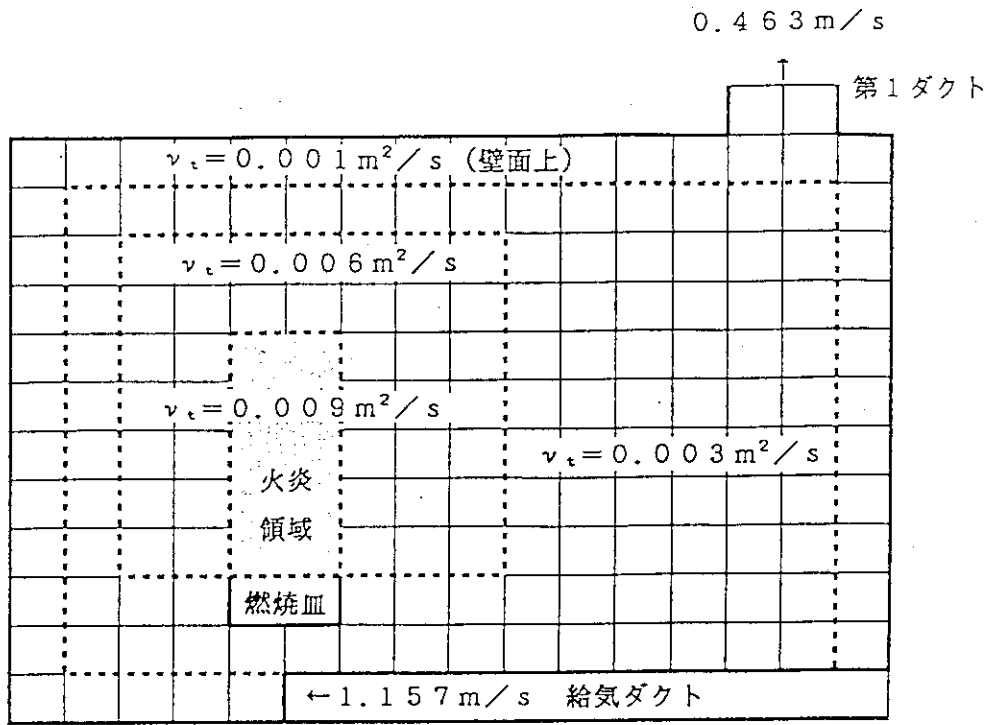


図5 第1モデルセル内のメッシュ分割と渦動粘性係数分布

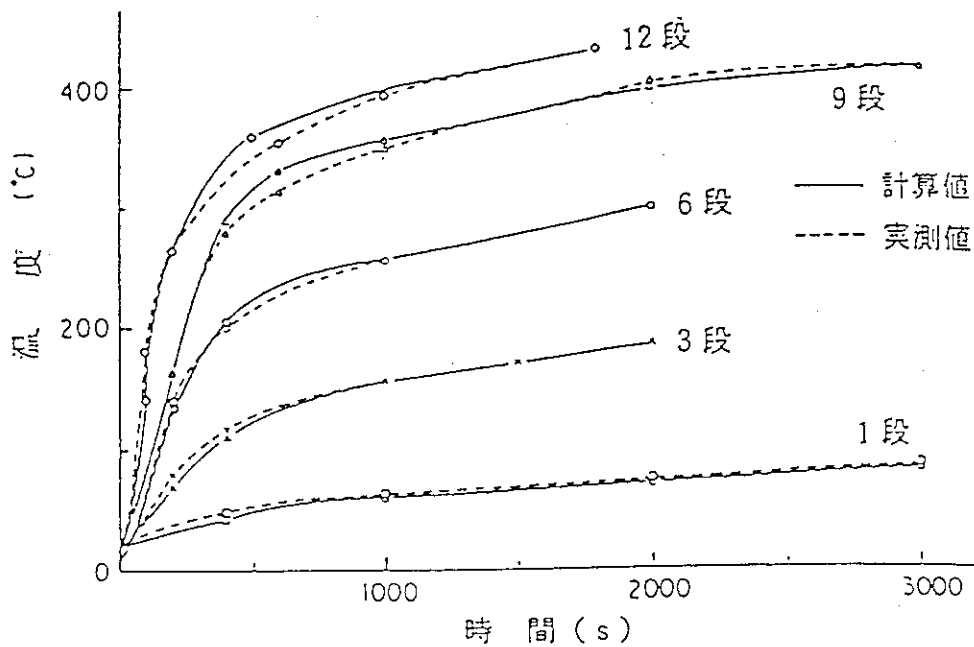


図6 第1ダクト内の流体変化（抽出器相当段の変化）

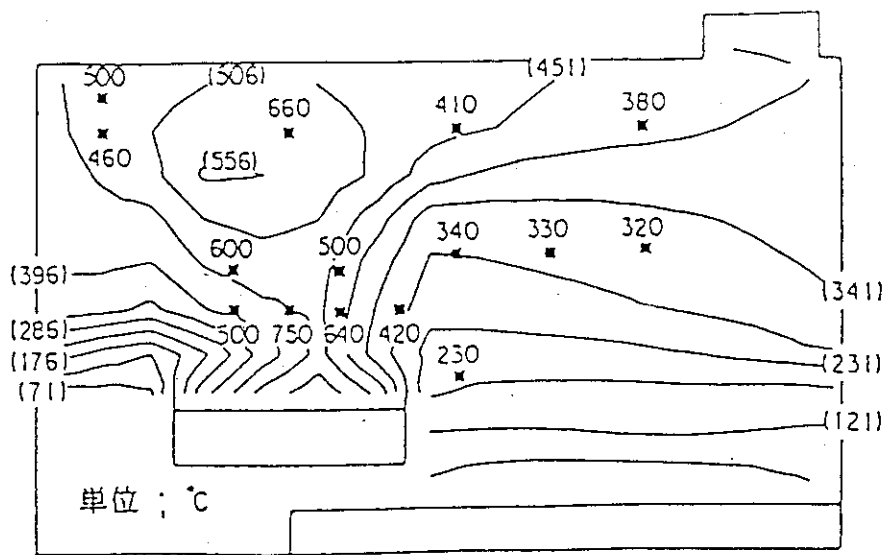


図7 第1モデルセル内の2次元温度分布 (準定常解析)

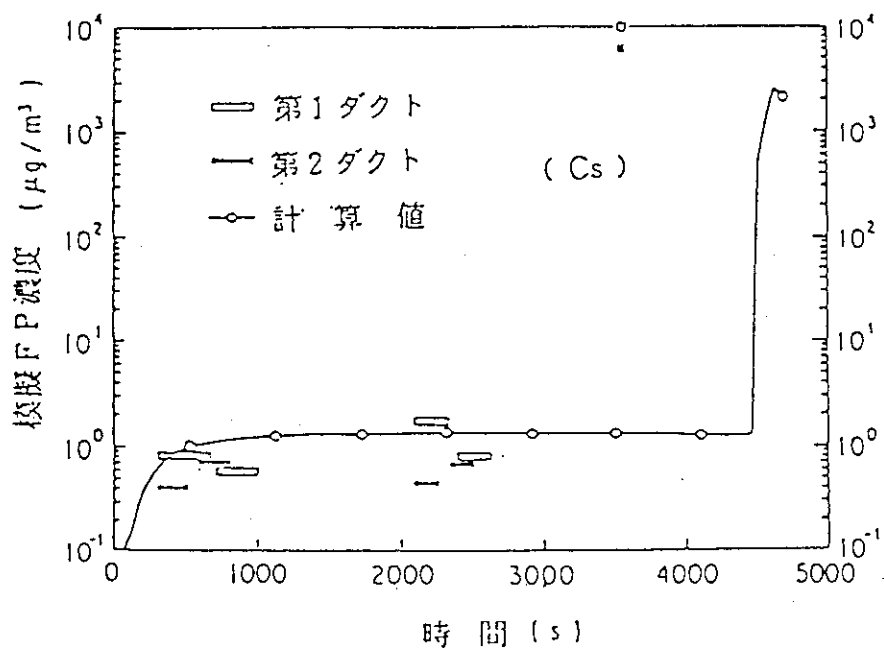


図8 ダクト内に移流したセシウム (Cs) の質量濃度変化

11. 検証計算の概要

11.1 試験結果と計算の比較

図6に第1モデルセルから第1ダクトに流出した燃焼ガスの温度変化を抽出器相当段（燃焼面積）に対して示した。図中の実線はFACE-1Dを用いた計算値，点線は溶媒火災試験で得た実測値を表しており，両者はよく一致している。図7に第1モデルセル内の燃焼面積が 0.46 m^2 ($s = 6$)，セルへの空気流量が $600 \text{ m}^3/\text{h}$ ($n = 30$)の溶媒火災条件下でFACE-2D（準定常解析）を用いて計算した30分経過後のセル内2次元温度分布を示す。図中の等高線で表した温度分布は，FACE-1Dで計算したモデルセル内の温度をFACE-2Dの初期条件にして解析したものである。図中の黒塗り記号（■）は，溶媒火災試験で測定した実測値である。図の結果から，火炎部の計算値は実測値に比べて若干低い，その他の領域では計算値と実測値は比較的良好一致している。

図8は，溶媒相と水相に模擬核種としてセシウム（Cs）を加え，その溶媒を燃焼させた場合に気相中に移行したCsエアロゾルの気相濃度変化を示したものである。図中の実線は計算値，白棒記号は第1ダクト，黒の棒記号は第2ダクトで測定した実測値である。計算値は，ボイルオーバー燃焼発生時間（4500秒）を除いて実測値とよく一致している。ボイルオーバー燃焼の発生時間の違いは，②式の導出において，火炎から燃焼皿への輻射効果を見逃したことによる。しかし，輻射効果を見逃したことは溶媒火災の時間を長めに評価したことになり，放射性物質の閉じ込めの見地からは保守的な結果を与えることになる。

第3ダクトに設置した2段のHEPAフィルタは，前段フィルタのみ煤煙が付着することにより差圧が上昇する。表7に煤煙の付着により上昇したHEPAフィルタの差圧実測値とFACE-1Dの計算値を時間に対して示した。表の結果のうち，30分以降の時間において計算値と実測値の間に相違があるが，多くの溶媒火災試験の実測値は計算値と比較的良好一致を確認している。

表7 煤煙付着によりHEPAフィルタの差圧上昇

時間 (分)	8	15	30	45
実測値 (Pa)	304	393	666	970
計算値 (Pa)	291	320	456	643

溶媒火災試験の結果，HEPAフィルタによる煤煙の捕集率は極めて高く，総括除染係数（DF）として約 10^5 であった。放射性エアロゾルは煤煙に付着して移行するので，フィルタに捕集される模擬核種のDF値（フィルタ前後の核種濃度の比）は煤煙のDFと同じになる。

11.2 検証計算の結果 (FP-8)

(1) 1次元解析

代表的な溶媒火災試験の結果と検証計算結果を本報告書の付録に示した。ここでは、溶媒火災試験のうちFP-8 (試験番号)を取りあげ、検証計算について説明する。表8にFP-8の試験データを示す。試験で使用した模擬核種はセシウム (Cs) とセリウム (Ce) である。表9に溶媒の燃焼速度の計算に必要な燃焼パラメータを、表10に試験装置の諸元と試験条件を用いて作成した入力データのリストを示した。図9に試験装置のノード・ジャンクションと初期値を示した。

表11に計算の結果と実測値について燃焼速度と鎮火時間を示した。燃焼速度の計算値は実測値と比較的よく一致している。FP-8は、水相の沸騰 (ボイルオーバー燃焼) によって鎮火した。計算によって求めた鎮火時間は実測値よりやや長めであるが、両者は比較的よく一致しているとみてよい。この鎮火時間の差は、水相沸騰モデルに輻射効果を考慮しなかったことによると考えている。

図10にFACE-1Dを用いて求めた第1モデルセル内の温度変化を示す。実線は計算値、破線は実測値 (セル出口位置) であるが、計算値は着火後2000秒までは非常によく一致している。2000秒以降では、実測値との間に差が生じるが、これは燃焼モデルが定常燃焼を仮定しているためと考えられる。ボイルオーバー燃焼は、計算値では4500秒を過ぎたところに、実測値では4000秒弱のところに現れている。ボイルオーバー燃焼時の計算値と実測値の温度には200°C近い差が見られるが、これは実測に用いた熱電対が急激な温度上昇に追従できなかったものと考えている (実際には計算値程度の温度上昇が起こっているものと思われる)。図11に第2モデルセル内の温度変化を示した。全体的に計算の温度 (実線) は低い、その差は20°Cに満たない。ボイルオーバー燃焼におけるピーク値の差は、前述した通りである。

図12に第1モデルセル内および第2モデルセル内における煤煙濃度の計算値 (実線) と実測値 (点線) を示した。実測値は、第1ダストに設置したメイパックサンプリングによって得たものである (サンプリング時間=10分)。計算値は、着火直後の値に差が生じているが、全体的にはかなりよい一致を得た。なお、3900秒から4600秒間の実測値はボイルオーバー燃焼後にサンプリングした10分間の平均濃度であるので、実際には計算値と同様に短時間の急激な濃度上昇があったものと思われる。

図13にHEPAフィルタの差圧 (前段と後段) を示した。計算値 (実線) と実測値 (破線) は比較的よく一致している。また、ボイルオーバー燃焼後 (4700秒) の差圧低下はセル内の圧力上昇により希釈ダクトの逆流防止ダンパが閉じて流量が減少したことによる。

(2) 2次元解析

FP-8の計算に用いた第1モデルセルのメッシュ分割 (横16×縦12) は図5と同様である。燃焼皿はセル内左側にあり、幅48cm、奥行き48cmである。空気は燃焼皿下方の給気ダクトより流入し、セルの右上方の第1ダクトへ排出される。セルの奥行きは1mに固定されている。したがって、実際の奥行きとの差異を生じるが、これはZ方向の熱伝達係数を変化させて調節する。計算では、熱伝達係数に $h_z = 50 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{°C}$ を用いた (43式参照)。渦動粘性係数に関しては、火炎部と壁近傍での値を基にしてセル内の渦動粘性係数を計算した。火炎部の渦

動粘性係数は $\nu_t = 0.0089 \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた ($u_{in} = 2 \text{ m/s}$, $D_b = 0.12 \text{ m}$)。壁近傍の渦動粘性係数は一般速度分布より得た速度境界層厚さを $y^+ = 50$ と考え、その渦動粘性係数を $\nu_t = 20 \text{ } \mu\text{m}^2/\text{s}$ とした。また、火炎部を除く気相部の渦動粘性係数は、両者の値から推測した値を用いた。

FACE-2D では、FACE-1D の解析で得た 2000 秒の計算値 (セル内温度 = 181°C , セル内煤煙濃度 = $1.34 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$) を初期値にした。図 14 にセル内の速度分布を示した。渦は燃焼皿を境にして 2箇所にできるが、右側の渦が大きいため火炎下方の流体が左方へ押され、逆に火炎上方の流体は右方へ引っぱられている。したがって、火炎は結果的に右側へ傾くことになる。これは、溶媒火災試験の火炎の観察に一致している。

図 15 にセル内温度分布の計算値と実測値を比較した。両者は比較的良好に一致しているが、計算の火炎部の温度は実測値より低い。この理由は、火炎中の輝炎放射率の入力に問題があると考えている。図 16 に煤煙の粒子径 $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ とした場合のセル内の煤煙濃度分布を示す。煤煙の乱流拡散係数はセル内で分布をつけず、均一に $D_p = 0.0153 \text{ m}^2/\text{s}$ を与えた。計算結果をみると、煤煙が発生する火炎部とセル上方の煤煙濃度にあまり差が見られない。これは、火炎上昇の影響を受けたためである。なお、セル出口の煤煙濃度は計算では $C_s = 1.60 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, 実測では $C_s = 1.05 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ でよく一致している。

表 12 にセシウム (Cs) 核種、表 13 にセリウム (Ce) 核種の分配係数と同伴係数および計算と実測の気相放出濃度を示した。計算に用いた分配係数と同伴係数は、溶媒火災試験より得た試験データを整理したものである。表中の括弧内の Ce 濃度は検出限界値であり、実際の濃度はそれ以下である。表 12 と 13 の結果をみると、第 1ダクト、第 2ダクトとも 65～75 分の値を除いてよく実測値と一致している。65～75 分の時点における Cs 濃度上昇はボイルオーバー燃焼によるものである。

11.3 非定常解析と準定常解析の比較 (2次元熱流動)

図 17 (A) に 2次元準定常解析により得た着火後 1800 秒のセル内の速度ベクトルを、図 17 (B) に温度分布の結果を示した。図 18 (A) と (B) に同じ計算条件を用いた場合の 2次元非定常解析の結果を示した。準定常解析は、FACE-1D で計算した火災セル内の気相温度とセル壁温度を初期条件に使用している。一方、非定常解析は、 $t = 0$ から 1800 秒まで 131327 回の時間ステップで逐次計算を行った。計算時間は準定常解析では 36 分、非定常解析ではその約 5 倍である。両図の温度と流速の分布を比較すると、形状は殆ど相似である。しかし、非定常解析の結果は準定常解析より速度ベクトルで 1.3 倍、温度分布で約 2 倍大きい。この原因は、以下の理由によるものと考えられる。①非定常解析では、セル内流体の圧縮効果は全く考慮されていないので、セル内に給気された質量流量と燃焼ガスの発生量の和は、排気質量流量と同じ値になる。②一方、準定常解析では圧縮性の 1次元基礎式の解を火災セルの初期条件に使用しているため、間接的にセル内の流体に圧縮の効果を与えている。③即ち、過渡事象において非定常解析は常に非圧縮性であり、準定常解析は圧縮性を考慮している。④セル内の熱収支を考えた場合には、圧縮を考慮した方が排気流量が大きくなり、セル内の温度は低くなる。⑤したがって、火災セル内の温度は、非定常解析

の方が大きくなる。⑥さらに、非定常解析では温度が高い分浮力が大きくなり、セル内の流速が大きくなるものと考えられる。FACE-1Dの解析結果は、溶媒火災試験の温度や流速とよく一致しているので、2次元準定常解析の結果は妥当なものであると考えている。

表8 FP-8試験データ

換気流量 (換気回数)	400 m ³ /h (20回/h)
燃焼面積 (抽出器相当段)	0.23 m ² (3段)
燃焼皿円等価直径	54.2 cm
初期溶媒体積	30 l (トデカン=21 l、TBP=9 l)

表9 燃焼パラメータ

ξ (燃焼率)	0.72	$\xi = \exp(0.128 \ln \frac{F}{S} - 0.268)$ $\frac{F}{S}$: 給気重量速度(kg/S) / 燃焼面積(m ²)
ε (抽出器温度上昇率)	0.18	実証試験により決定
ψ (輻射フィードバック率)	0.82	実証試験により決定
γ (輻射分率)	0.15	実証試験により決定
f (燃焼に必要な酸素の化学当量)	0.33	TBPの組成分率により逐時計算
δ (水相/溶媒の蒸発速度比)	0	水相沸騰により鎮火するため
$Y_{Ox, \infty}$ (酸素の推進力)	0.181	$Y_{Ox, \infty} = 0.232 \exp(-28.8 (\frac{V_f}{V_c})^2)$ $\frac{V_f}{V_c}$: 炎炎体積(m ³) / セル体積(m ³)

表11 燃焼速度と鎮火時間の結果

	実 測	計 算
燃焼速度	13.4 kg/h	12.5 kg/h
鎮火状態	水相沸騰による鎮火	水相の沸騰による鎮火
鎮火時間	65分	78.5分

表10 入力リスト (FP-8 試験)

```

00010 *****
00020 *   FACE RUN DATA 1
00030 *
00040 *   === FP-8 ===
00050 *
00060 *
00070 *   REAL PROBLEM
00080 *
00090 *
00100 *
00110 *   NOPT3 = 0 : OUTPUT CYCLE TO THE RESTART FILE
00120 *           WHICH NAME IS 'MMMT11(FT11)'.
00130 *
00140 *   INN = 0 : INPUT CYCLE FROM THE RESTART FILE
00150 *           WHICH NAME IS 'MMMT12(FT12)'.
00160 *
00170 *   NOPT6 = 1 : SOLA-SIMPLEST
00180 *           = 2 : EVENT
00190 *           = 3 : SOLA-SIMPLEST & EVENT.
00200 *
00210 *   IDFLT = 1 : USE RUN DATA 2.
00220 *
00230 *****
00240 *   SIMULATION CONTROL DATA ( INPDF )
00250 *****
00260 *   TITLE *
00270 *   FIRE ACCIDENT IN CELL
00280 *   DATA (2)  IRN  ICON  ISWT
00290 *   0    0    1    1    1
00300 *   NOPT3 INN NOPTS, 6 IDFLT(OPTION OF INPUT DATA)
00310 *   1 0000  0    2    0
00320 *   LPOT    LPOT    LPOT    LPOT    LPOT    LPOT
00330 *****
00340 *   SIMPLEST DATA
00350 *****
00360 *IFLO  PR  RS  PL
00370 *   2    1    1    1
00380 *****
00390 *   SIMULATION CONTROL DATA (2) ( INPDF )
00400 *****
00410 *   CWPRT =  CWPLT =  CWRST =
00420 *   50.00  50.00  50.00
00430 *   TWFIN =  DELCR =  DELCW =  TCHNG=  SIMPDT=
00440 *   50.00  1.0    1.0    50.0    50.0
00450 *****
00460 *   SIMULATION CONDITION DATA ( INPDF )
00470 *****
00480 *   TZ    =  TS    =
00490 *   20.0  20.0
00500 *   WIDTH  HCELL  DEEP  QINL  DZPAN  BAREA
00510 *   3.5    2.2    2.6    400.0  0.48  0.2304
00520 *   SOLV   VT     CPG   MIU   TSS   GZAI
00530 *   30.0   0.00  0.246 0.2570E-3  200.0  0.000
00540 *   TA     M-OX  EPSILON
00550 *   0.0    0.00  0.180
00560 *   I     J
00570 *   15    14
00580 *ITZW JTZW      HEFF  TZWALL      (2-DIRECTION EFFECT)

```

```

00590      14      14      50.0      20.0
00600 *****
00610 *              MESH DATA ( INPDF )
00620 *****
00630 * IMAX JMAX
00640      18      15
00650 * DELX =      DELY =
00660      0.20      0.20
00670 *****
00680 *              VELOCITY DATA ( INPDF2 )
00690 *****
00700 * IPL      THICK      TEMP DELX
00710      2              0.1
00720      8      2      19      2      1
00730      6      4      8      5      1
00740 * UFIX VFIX
00750      3      1      0      0
00760 * IS      JS      IE      JE      U-FIX = 3
00770      5      5      5      5      0.0
00780      7      5      7      5      0.0
00790      6      2      6      2      -1.1574
00800 * IS      JS      IE      JE      V-FIX = 1
00810      15      14      16      14      0.4630
00820 *****
00830 *              TEMPERATURE DATA ( INPDF3 )
00840 *****
00850 * IS      JS      IE      JE      TFIX = 1
00860      7      2      7      2
00870 *****
00880 *              TRANSIENT DATA ( INPDF2 )
00890 *****
00900 * TRANSIENT HEAT SOURCE = 1
00910 * IS      JS      IE      JE
00920      6      5      7      9
00930 *****
00940 *              DIFFUSION DATA ( INPDF4 )
00950 *****
00960 * IBUN      IBN
00970      0      0
00980 *      DI1      DI2
00990 *      WT11      WT12
01000 *****
01010 *              EVENT DATA ( INPROC ) 600 M3/H ,F-7
01020 *****
01030 * RUN CONTROL (1) RUN TYPE = (SS,ST,TP,RS,RP)
01040 * RUN      START      TOTAL      STEP      ITER      CNVRG      RELAX
01050      TP      0.0      5500.0      0.50      1000      0.005      1.0
01060 * RUN CONTROL (2)
01070 * PINP      TINP      CINP      ROOM      CALC      CALT      I      SOUT      SOUT      SOUT      CHK
01080      P      T      4      1      1      3      2000.      5000.      6000.2000.
01090 * IFLG      ISTCK      CUO2      VWTR      RUGAS
01100      2      13      125.0      30.0      0.3
01110 * PLOT CONTROL (1)
01120      2      2      4      1      1      1      1      2      2      1
01130 * PLOT CONTROL (2)
01140      1      1      1      2      1      2      2      2      1      1
01150 * PLOT CONTROL (3)
01160 * IPLOT      ISCAL

```

```

01170      1      1
01180 * PLOT FRAME DESCRIPTIONS
01190 * PRESSURE
01200      4      1      3      4      5
01210      3      1      8      12
01220 * PRESSURE DIFFERENCE
01230      4      3      4      7      8
01240      2      9      10
01250 * TEMPERATURE
01260      4      1      2      3      4
01270      4      1      5      6      7
01280      4      1      8      9      10
01290      4      1      11     12     14
01300 * TEMP. OF NODAL INNER WALL
01310      4      4      5      9      11
01320 * TEMP. OF NODAL OUTER WALL
01330      4      4      5      9      11
01340 * TEMP. OF DUCT INNER WALL
01350      4      3      4      7      8
01360 * TEMP. OF DUCT OUTER WALL
01370      4      3      4      7      8
01380 * VOLUME FLOW
01390      3      2      4      6
01400      3      8      11     14
01410 * MASS FLOW
01420      3      3      4      5
01430      4      8      9      11     15
01440 * HEAT FLOW TO INNER CELL WALL
01450      4      4      5      9      11
01460 * HEAT FLOW FROM CELL WALL TO OUT
01470      4      4      5      9      11
01480 * HEAT FLOW TO INNER DUCT WALL
01490      4      3      4      7      8
01500 * HEAT FLOW FROM DUCT WALL TO OUT
01510      4      3      4      7      8
01520 * SMOKE CONCENTRATION
01530      3      3      4      5
01540      3      8      9      11
01550 * DEPOSITION RATE IN CELL
01560      3      4      5      9
01570 * DEPOSITION RATE IN DUCT
01580      3      4      7      8
01590      2      9      10
01600 * SMOKE DEPOSITION FACTOR
01610      3      4      7      8
01620      2      9      10
01630 * ACCUMULATION OF SMOKE INDUCTS & FILTERS
01640      3      4      7      8
01650      2      9      10
01660 * RELEASE OF RADIOACTIVE MATERIALS TO ATMOSPHERE
01670 * CONCENTRATION
01680      4      4      5      9      13
01690 * RELEASE RATE
01700      1      13
01710 * TIME FUNCTION CONTROL AND AMBIANCE DATA
01720      1      1      1      1      11.013529E5      20.0
01730 * GEOMETRY AND COMPONENT CONTROL
01740      16     3      14     1      4

```

```

01750 * COMMON BRANCH DATA INPUT
01760 *FLOW TEMP ROU CP THCK KAPA
01770 3 1 4 3 4 3
01780 *INITIAL VOLUME FLOW
01790 * IS IE VALUE
01800 1 70.11111111
01810 8 121.21666667
01820 13 161.10555556
01830 *DUCT TEMPERATURE
01840 * IS IE VALUE
01850 3 15 20.0
01860 *DUCT ROU
01870 * IS IE VALUE
01880 3 3 7870.0
01890 4 4 968.0
01900 5 7 7750.0
01910 8 15 7870.0
01920 *DUCT CP
01930 * IS IE VALUE
01940 3 3 460.0
01950 4 4 575.6
01960 5 15 460.0
01970 *DUCT THICKNESS
01980 * IS IE VALUE
01990 3 3 0.005
02000 4 4 0.218
02010 5 7 0.005
02020 8 15 0.01
02030 *DUCT THERMAL CONDUCTIVITY
02040 * IS IE VALUE
02050 3 3 25.5
02060 4 4 4.00
02070 5 15 25.5
02080 * BRANCHES
02090 1 1 2 0.3600 F 1
02100
02110 0 6 2
02120 2 2 3 0.0147 V
02130
02140
02150 3 3 40.03140123 15.0000 D
02160 3 90.0
02170
02180 4 4 5 0.625 5.0000 D
02190 20 90.0
02200
02210 5 5 6 0.0175938 5.0000 D
02220 3 0.0
02230
02240 6 6 7 0.0175938 5.0000 D
02250 3 90.0
02260
02270 7 7 8 0.0175938 5.0000 D
02280 3 0.0
02290
02300 8 8 9 0.2819607 10.0000 D
02310 5 90.0
02320

```


02330	9	9	10	1.0800		F	2		
02340									
02350	0	6	2						
02360	10	10	11	1.0800		F	3		
02370									
02380	0	6	2						
02390	11	11	12	0.1672255		V			
02400									
02410									
02420	12	12	13	0.2819607		B	1		
02430									
02440									
02450	13	14	8	0.2819607	10.0000	D			
02460		5		0.0					
02470									
02480	14	15	14	0.2200000		V			
02490									
02500									
02510	15	16	15	0.2819607	20.0000	D			
02520		5		90.0					
02530									
02540	16	17	16	0.7000000		F	4		
02550									
02560	0	6	2						
02570	* GAS DATA IN DUCT								
02580	2.3E-5		3.0	0.550					
02590	* OPT	NO	IQBRA	QFIX	POPEN	ICNTRM			
02600	1	2		20.11111111	40.0	4			
02610	* NDVAL	FARATE		FAMAX	FAMIN	ISTOP	PSTOP		
02620	2	0.850		0.03140123	1.000	0			
02630	14	1.00000		0.28196070	0.990	14	-490.0		
02640	* BOUNDARY DATA								
02650	1		0		0	0			
02660	13	-98.0	0		0	0			
02670	17		0		0	0			
02680	* COMMON VOLUME DATA INPUT								
02690	* THCK	ROU	CP	KAPA	TEMP				
02700	5	3	3	5	1				
02710	* CELL THICKNESS								
02720	* IS	IE	VALUE						
02730	2	3	0.005						
02740	4	4	0.218						
02750	5	5	0.003						
02760	6	7	0.005						
02770	8	16	0.01						
02780	* CELL DENSITY								
02790	* IS	IE	VALUE						
02800	2	3	7870.0						
02810	4	4	968.0						
02820	5	16	7750.0						
02830	* CELL SPECIFIC HEAT								
02840	* IS	IE	VALUE						
02850	2	3	460.0						
02860	4	4	575.6						
02870	5	16	460.0						
02880	* CELL THERMAL CONDUCTIVITY								
02890	* IS	IE	VALUE						
02900	2	2	25.5						

```

02910      3      3      25.2
02920      4      4      2.0
02930      5      7      25.5
02940      8     16      25.5
02950 *CELL TEMPERATURE
02960 * IS IE VALUE
02970      2     16      20.0
02980 * VOLUME DATA
02990      20.18000000  0.36000
03000
03010          3
03020      30.471000000  0.05140123
03030
03040          2
03050      420.000000  7.70000000  0  0  1  1  1
03060
03070          20
03080      56.000      4.00000000
03090
03100          3
03110      60.1319685  0.0175958
03120
03130          2
03140      70.1319685  0.0175958
03150
03160          2
03170      82.8196070  0.2819607
03180
03190          2
03200      90.5400000  1.0800000
03210
03220          5
03230     100.5400000  1.0800000
03240
03250          5
03260     110.5400000  1.0800000
03270
03280          5
03290     122.8196070  0.2819607
03300
03310          2
03320     142.8196070  0.2819607
03330
03340          2
03350     155.6392140  0.2819607
03360
03370          2
03380     160.3500000  0.7000000
03390
03400          5
03410 * CONCENTRATION TIME FUNCTIONS (S, KG/M3 OR KG/SEC)
03420      1      3      0
03430          0.0      0.0      240.0      0.0      960.0      0.0
03440 * PRESSURE TIME FUNCTIONS (S, PA-G)
03450      1      2
03460          0.0      0.0      60.0      0.0
03470 * TEMPERATURE TIME FUNCTIONS (S, C)
03480      1      2

```

```

03490      0.0      0.0      60.0      0.0
03500 * ENERGY TIME FUNCTIONS (S, J/S)
03510      1      3
03520      0.0      0.0      240.0      0.0      960.0      0.0
03530 * MASS TIME FUNCTION (S, KG/S)
03540      1      3      0
03550      0.0      0.0      240.0      0.0      960.0      0.0
03560 * BLOWER FUNCTIONS (M3/S,PA)
03570      1      5
03580      0.0      6400.0      0.75      6370.0      1.25      5830.0
03590 1.6666667      5292.0 2.6666667      0.0
03600 * FILTER FUNCTIONS
03610      1      0.0      0.0
03620      2      0.0      0.0
03630      3      0.0      0.0
03640      4      0.0      0.0
03650 * PRESSURES (PA-G)
03660      0.0      -9.8000000      -421.4000000      -490.0000000
03670 -490.2940000      -784.0000000      -1064.2800000      -1352.4000000
03680 -3871.0000000      -4116.0000000      -4361.0000000      -5782.0000000
03690      -92.0      -1136.8000000      -588.0000000      -156.8000000
03700      0.0
03710 * TEMPERATURE (C)
03720      20.0      20.0      20.0      20.0
03730      20.0      20.0      20.0      20.0
03740      20.0      20.0      20.0      20.0
03750      20.0      20.0      20.0      20.0
03760      20.0
03770 * CONCENTRATION (KG/M3)
03780 *****
03790 * FACE RUN DATA 1 END
03800 *****
04000 ***** SIMPLEST DATA *****
04010 * NDT IPFX JPFX IFLO PR RS PL LOPNOPT7
04020      0      6      2      2      1      1      110000      0
04030 * ALF= TCUT= ERFACP= ERFACF= EPSVEL= EPSI= ERFACC=
04040      0.5      1.0      1.0E-4      1.0E-5      0.0001      1.0E-2      1.0E-08
04050 *      1      2      3      4      5      6      7
04060      20      40      60      80      100      110      120
04070 * ALFT1 ALFT2 ALFT3 ALFT4 ALFT5 ALFT6 ALFT7
04080      0.50      0.50      0.50      0.50      0.50      0.50      0.50
04090 * CCUT = EPSI = DZRO = OMG = MAXP = NOTMAX = DELCON=
04100      0.1      1.0E-3      1.      1.7      500      10      1.0
04110 * CWPRT = CWPLT = CWRST =
04120      25.00 001000000      25.00      00100      25.00
04130 * TWFN = DELT = DELCR = DELCW = TCHNG= SIMPDT= DELCQ =
04140      050.00 000.05      001.0      001.0      2000.0      2000.0      0.05
04150 * IS JS IE JE JSUM1JSUM2
04160 * NDT NBLK SFAC
04170      1      1      0.5
04180 * IS JS IE JE
04190      2      2      17      13
04200 * HIGH HLT ALOD VLMAX NNN1 NNN2 KCONT
04210      15.0      0.3      3.0      0.0      1      1      10
04220 * TZ = TS =
04230      20.000      20.000
04240 * NU = KAPA = ROU = CP = EPSH = BETA = MU =
04250      9.00E-3      5.08E-2      0.508      1.07E3      9.00E-3      3.66E-3      3.28E-5

```

```

04260 *   ROUWL      CPWL      KAPWL
04270 *   1500.0     688.3      7.11
04280 *   ROURN      CPRN      DRN      RWGAP      REMIT
04290 *   7820.0     494.0      0.003     0.1      1.0
04300 *   AMBBT      AMBCP      AMBKP      AMBRU      AMBMU      AMBTM
04310 *   3.53E-3    1.00E3    2.49E-2    1.208    1.77E-5    20.0
04320 *   WIDTH     HCELL     DEEP     QINL     DZPAN     BAREA
04330 *   3.5        2.2        2.6        400.0    0.48     0.2304
04340 *   VT         CPG       PR       MIU      TSS      GZAI
04350 *   0.30       0.246     0.673    0.257E-3 200.0    0.000
04360 *   TA        M-OK     PSAI     EPSILON  SOLV
04370 *   000.0     0.0000    0.82     0.180    18.51
04380 *   I        J          (AMBIENT TEMPERATURE POSITION)
04390 *   15      14
04400 *ITZW JTZW      HEFF     TZWALL      (Z-DIRECTION EFFECT)
04410 *   14      14      50.0      160.0
04420 *   ALFNU      PK       ROU        RG         DG         FALF      CDELT
04430 *   1.7        83.7     1.00E3    1.7       4.0E-7    0.9       0.005
04440 * IMAX JMAX IFLG
04450 *   18      15      1
04460 * DELX = DELY =
04470 * VARIABLE MESH - X
04480 *   5
04490 *   3          0.0      0.60
04500 *   4          0.60    1.60
04510 *   6          1.60    2.90
04520 *   2          2.90    3.40
04530 *   1          3.40    3.50
04540 * VARIABLE MESH - Y
04550 *   6
04560 *   2          0.00    0.40
04570 *   1          0.40    0.65
04580 *   1          0.65    0.80
04590 *   4          0.80    1.45
04600 *   4          1.45    2.20
04610 *   1          2.20    2.40
04620 *
04630 * VELOCITY DATA ( INPUT2 )
04640 *
04650 * IWL IWR IWT IWB ( WALL TANGENT CONDITION )
04660 *   1   1   1   1
04670 * IPL ( = NUMBER OF PLATES )
04680 *   4
04690 *   7   2  17   2   1
04700 *   6   4   7   4   1
04710 *   2  14  14  14   1
04720 *  17  14  17  14   1
04730 * UFIX VFIX
04740 *   3   1   0   0
04750 * IS JS IE JE U-FIX = 3
04760 *   5   5   5   5   0.0
04770 *   7   5   7   5   0.0
04780 *   6   2   6   2  -1.1574
04790 * IS JS IE JE V-FIX = 1
04800 *  15  14  16  14  0.4630
04810 *
04820 * TEMPERATURE DATA ( INPUT3 )
04830 *

```

```

04840 * TFX DTFX QFX
04850   1   0   0
04860 * IS JS IE JE TFIX = 1
04870   7   2   7   2   20.0
04880 * IS JS IE JE DTFIX = 0
04890 * IS JS IE JE V-FIX = 1
04900 *****
04910 * TRANSIENT DATA ( INPUT4 )
04920 *****
04930 * TIME-TABLE DATA
04940   0   0   0   0
04950 * VELOCITY TIME TABLE = 0
04960 * TEMPERATURE TIME TABLE = 0
04970 * HEAT FLUX TIME TABLE = 0
04980 * HEAT SOURCE TIME TABLE = 0
04990 * TRANSIENT BOUNDARY CONDITION VARIABLE
05000   0   0   0   7   1
05010 * TRANSIENT U-VELOCITY = 0
05020 * TRANSIENT V-VELOCITY = 0
05030 * TRANSIENT TEMPERATURE = 0
05040 * TRANSIENT HEAT FLUX = 5
05050 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05060   1   4   1  13  -5  0.1  20.0
05070 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05080   2  14  11  14  -5  0.1  20.0
05090 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05100  12  14  14  14  -5  0.1  20.0
05110 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05120  18   3  18  13  -5  0.1  20.0
05130 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05140   8   2  17   2  -5  0.1  20.0
05150 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05160   2   1   6   1  -5  0.1  20.0
05170 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05180   1   2   1   3  -5  0.1  20.0
05190 * IS JS IE JE NT DUM DUM2
05200 * TRANSIENT HEAT SOURCE = 1
05210 * IS JS IE JE NT
05220   6   5   7   9   0
05230 *****
05240 * DIFFUSION DATA ( INPUT5 )
05250 *****
05260 *IBUN IBN KCONC
05270   0   0   0
05280 * DI1 DI2
05290 * WT11 WT12
05300 * DIF1 DIF2 DIF3 DIF4
05310  1.0E-2  1.0E-2  1.0E-2  1.0E-2
05320 * ADIF1 ADIF2
05330 * C-O2 C-N2 C-PRO C-FUEL
05340   0.30  0.99  0.0  0.0
05350 * C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7
05360   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
05370 * C8 C9 C10 C11 C12 C13 C14
05380   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
05390 *KDX1 KDX2
05400   1   1
05410 * O2 N2 PRO FUEL

```

05420	1	1	1	1								
05430 *	IS	JS	IE	JE	VALUE	---	O2					
05440	7	2	7	2	0.30							
05450 *	IS	JS	IE	JE	VALUE	---	N2					
05460	7	2	7	2	0.99							
05470	7	2	7	2	0.0							
05480	7	2	7	2	0.0							
05490 *	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	
05500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
05510 *	IS	JS	IE	IE	VALUE							
05520	7	2	7	2	0.0							
05530	7	2	7	2	0.0							
05540	7	2	7	2	0.0							
05550	7	2	7	2	0.0							
05560	7	2	7	2	0.0							
05570	7	2	7	2	0.0							
05580	7	2	7	2	0.0							
05590	7	2	7	2	0.0							
05600	7	2	7	2	0.0							
05610	7	2	7	2	0.0							
05620	7	2	7	2	0.0							

表12 Csの濃度と計算に用いた諸係数

	時間 (分)	分配係数 (-)	同伴係数 (-)	実測による濃度 ($\mu\text{g/L}$)	計算による濃度 ($\mu\text{g/L}$)
第1ダクト	2~12	4.6×10^{-5}	0.0406	0.00314	0.00181
	17~27		0.0198	0.00178	0.00147
	32~42		0.0218	0.00207	0.00162
	47~57		0.0503	0.00478	0.00374
	65~75	9.9×10^{-4}	2.0	1.21	11.25
第2ダクト	2~12	4.6×10^{-5}	0.0742	0.00574	0.00347
	17~25		0.0547	0.00492	0.00428
	32~38		0.0172	0.00164	0.00135
	47~53		0.0334	0.00318	0.00216
	65~75	9.9×10^{-4}	3.61	2.18	22.68

表13 Ceの濃度と計算に用いた諸係数

	時間 (分)	分配係数 (-)	同伴係数 (-)	実測による濃度 ($\mu\text{g/L}$)	計算による濃度 ($\mu\text{g/L}$)
第1ダクト	2~12	1.5×10^{-2}	2.5×10^{-4}	(<0.0072)	0.00081
	17~27			(<0.0048)	0.00135
	32~42			(<0.0018)	0.00135
	47~57			(<0.0027)	0.00135
	65~75	1.43	2.5×10^{-3}	0.336	4.811
第2ダクト	2~12	1.5×10^{-2}	5.0×10^{-4}	(<0.0125)	0.00154
	17~25			(<0.0066)	0.00257
	32~38			(<0.0082)	0.00257
	47~53			(<0.0067)	0.00257
	65~75	1.43	2.5×10^{-3}	0.132	4.308

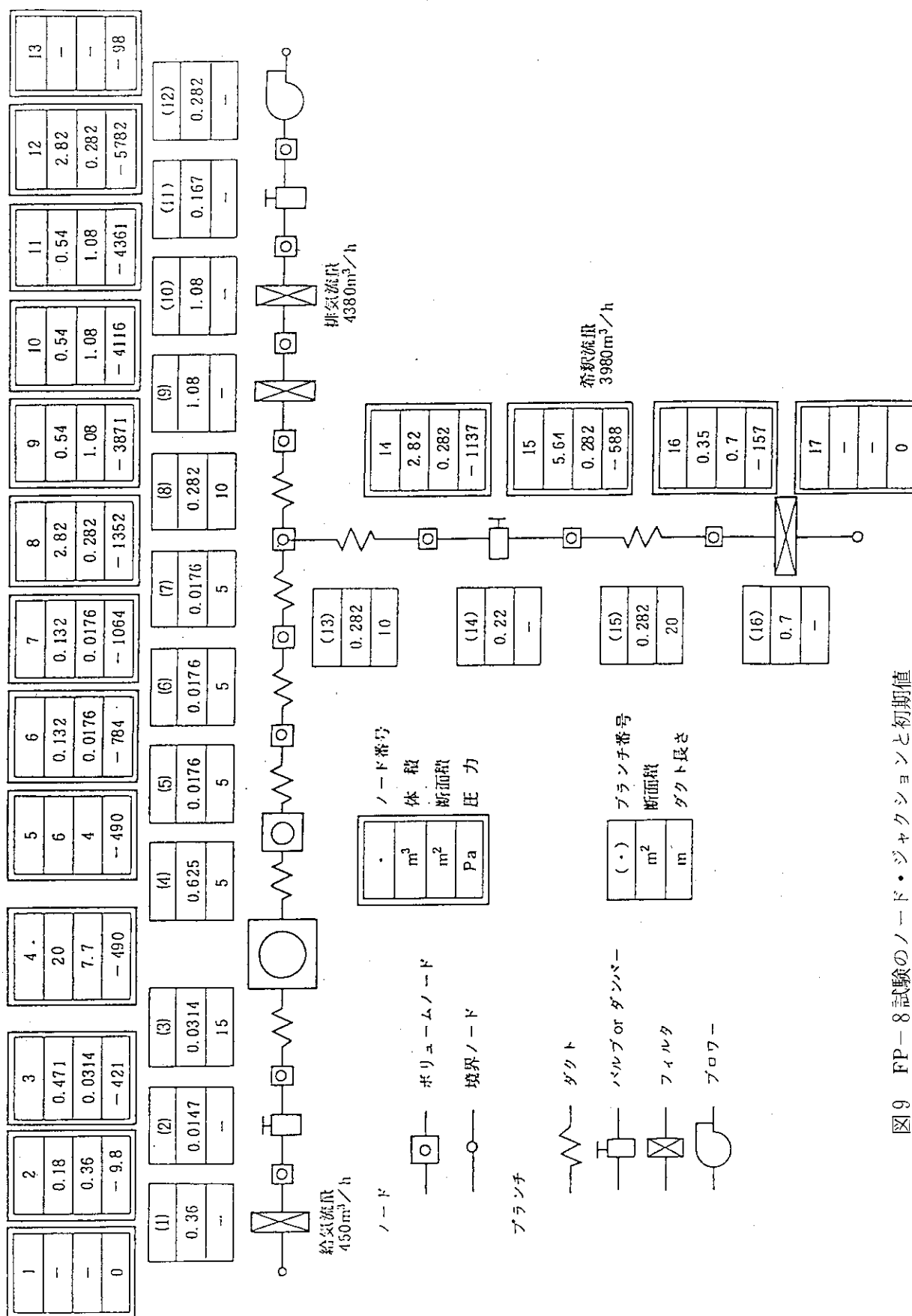


図9 FP-8試験のノード・ジャンクションと初期値

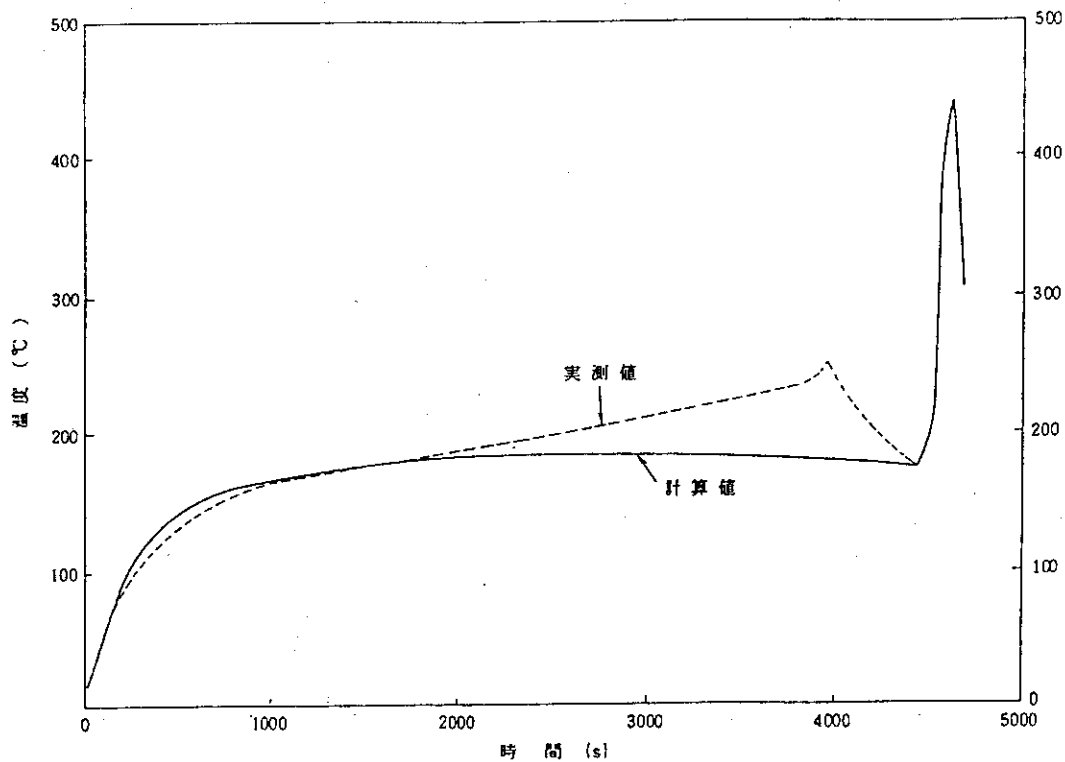


図10 第1モデルセル温度変化

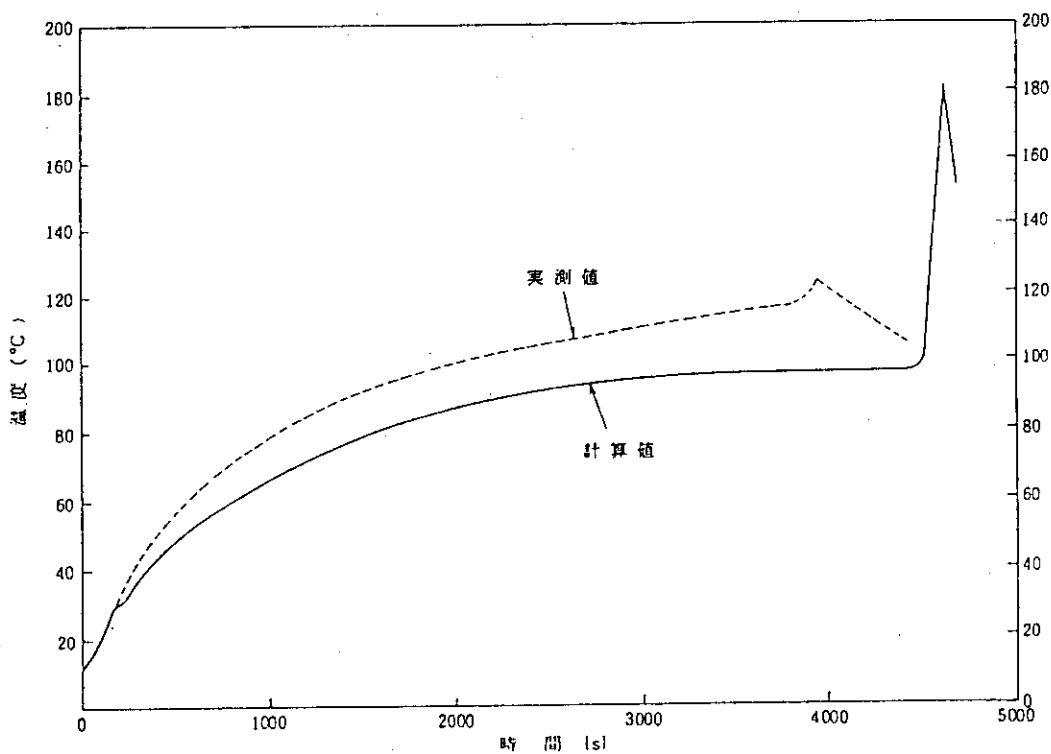


図11 第2モデルセル温度変化

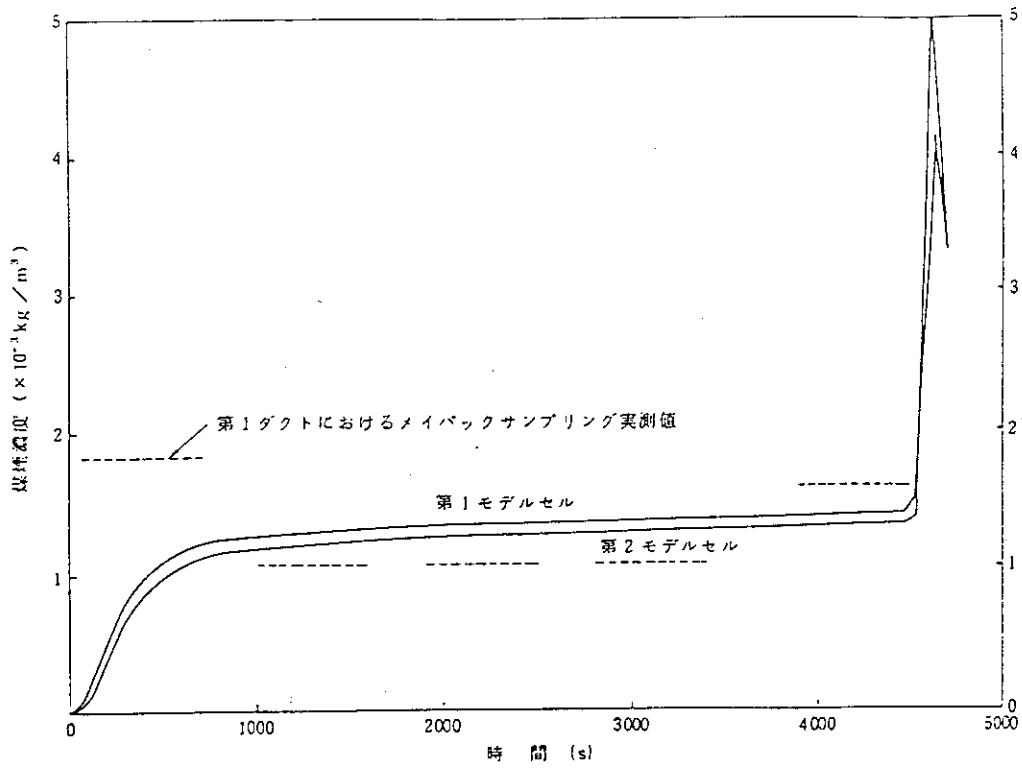


図12 第1モデル及び第2モデルセル煤煙濃度変化

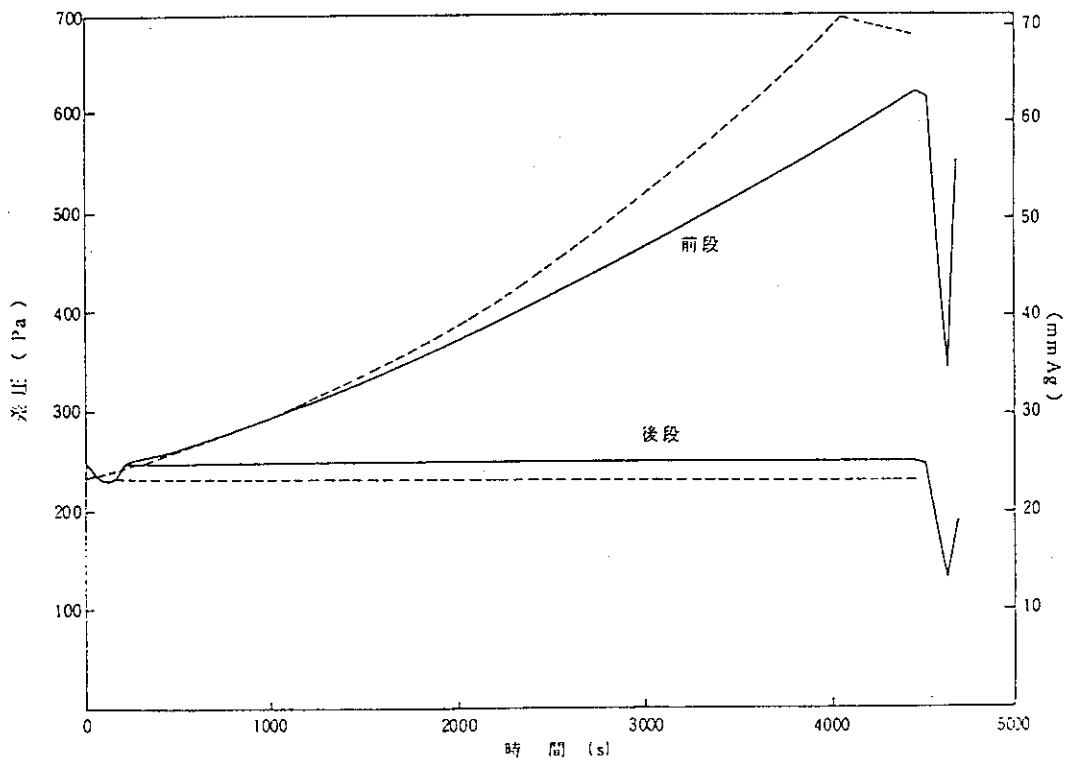


図13 フィルタの差圧

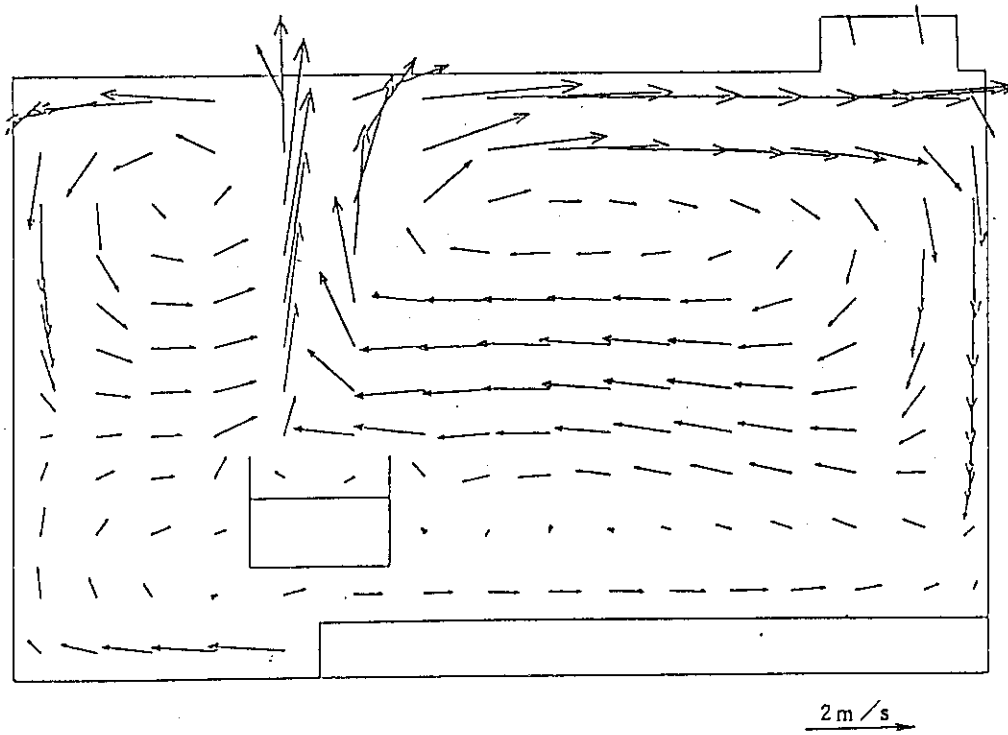


図14 セル内速度分布

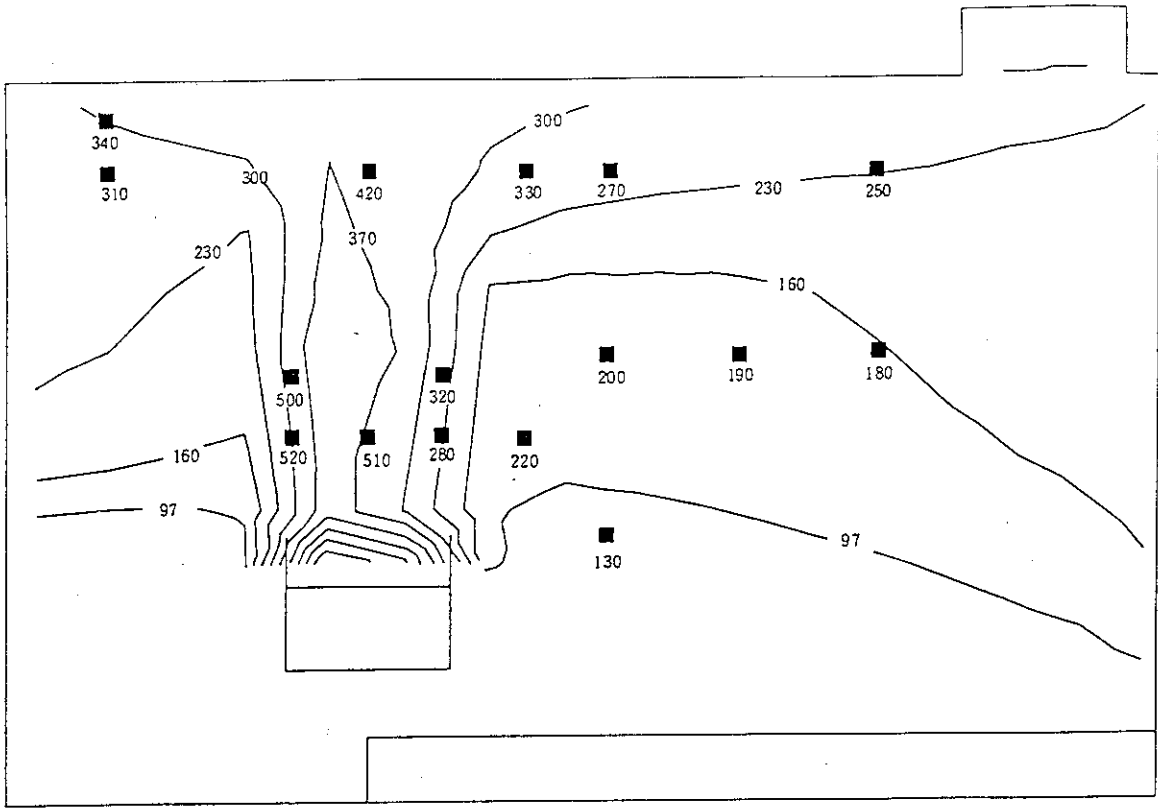


図15 セル内温度分布

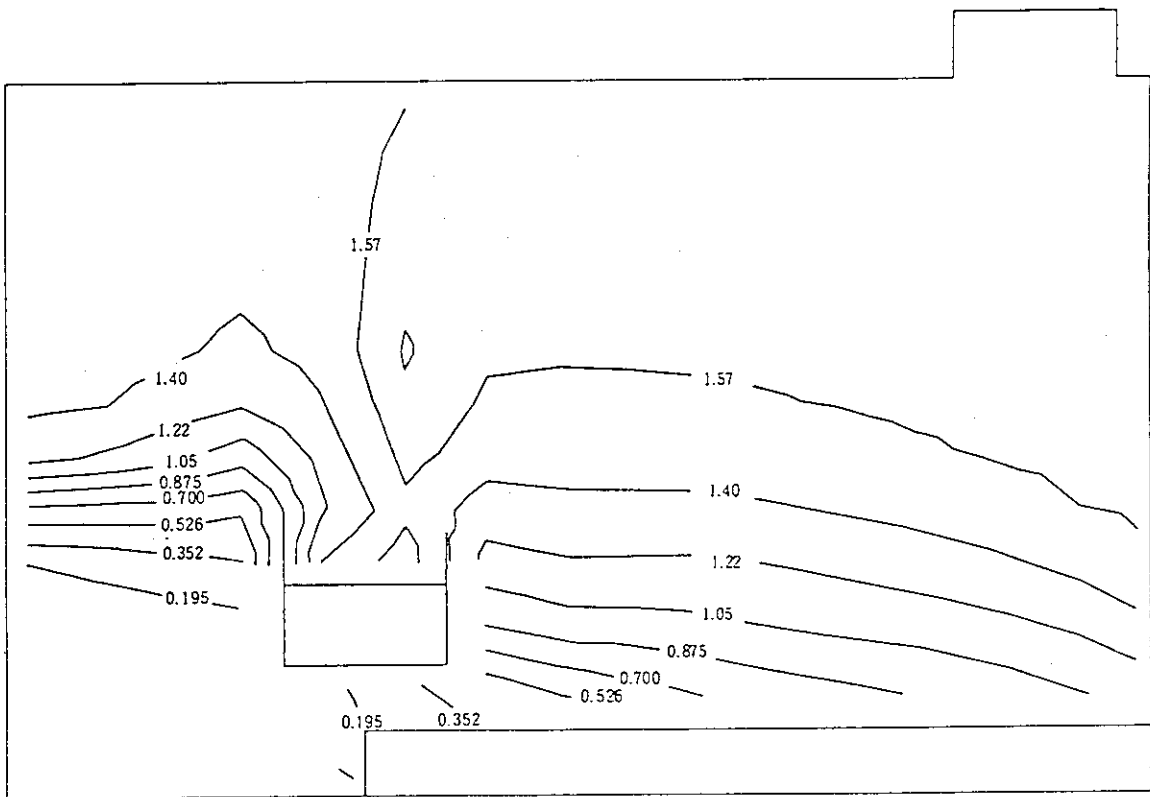
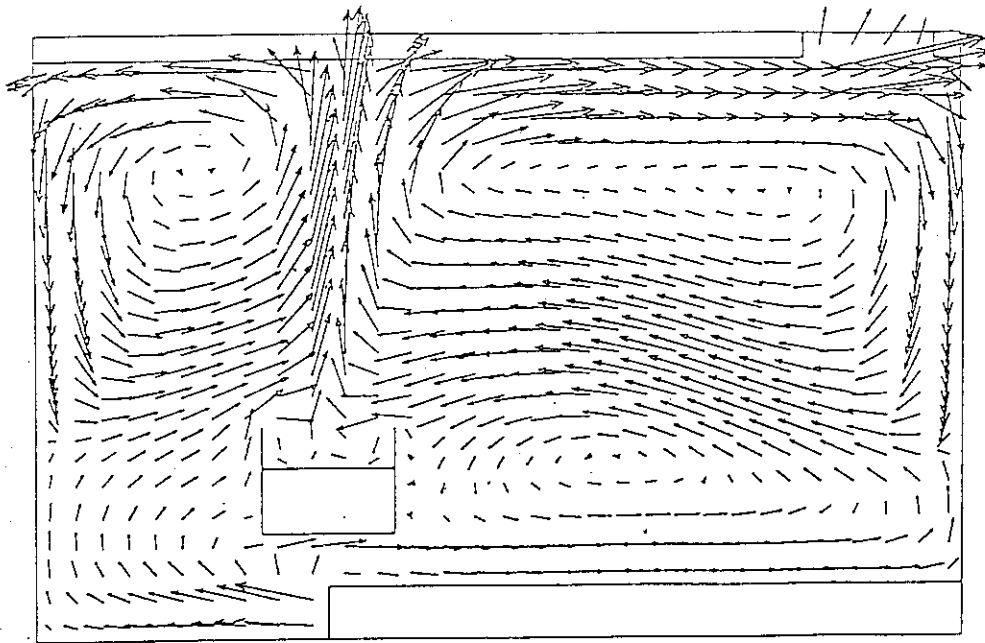
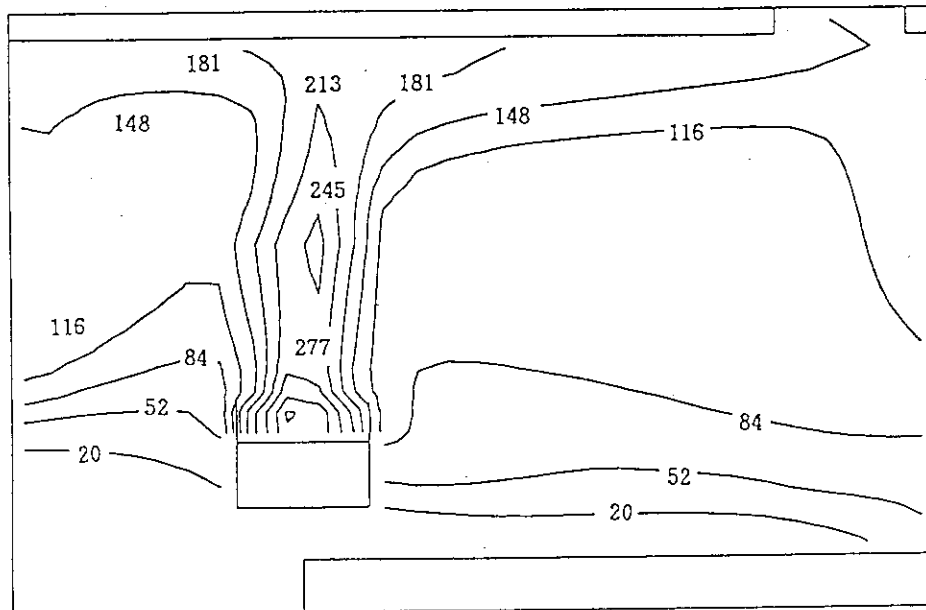


図16 セル内煤煙分布



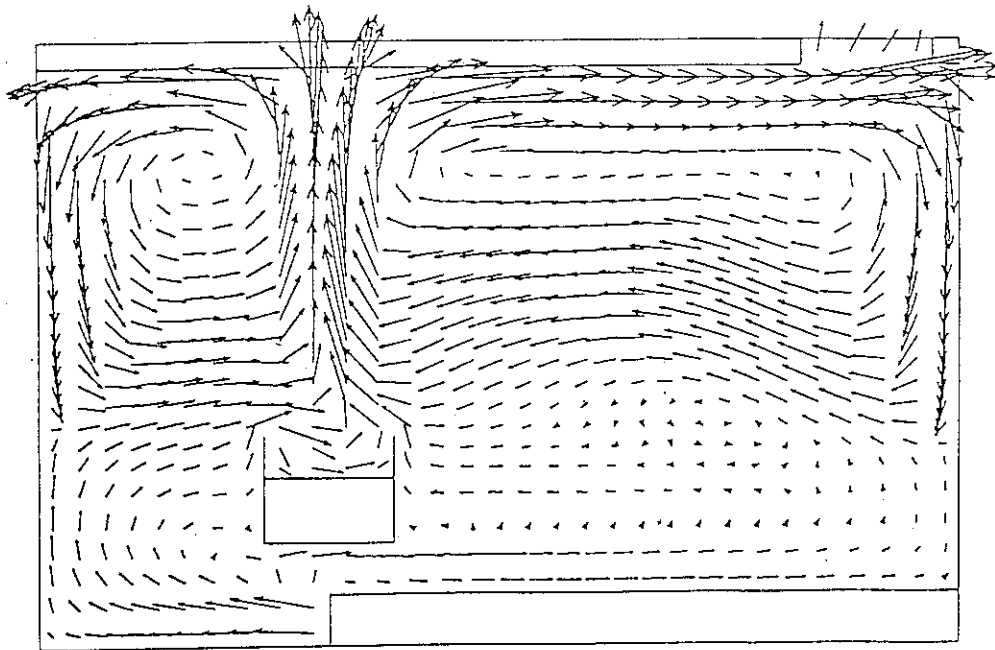
VELOCITY VECTOR MAX = 2.44E0 \longrightarrow
 TIME = 1.80E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図 17(A) 2次元準定常解析によるセル内の速度分布



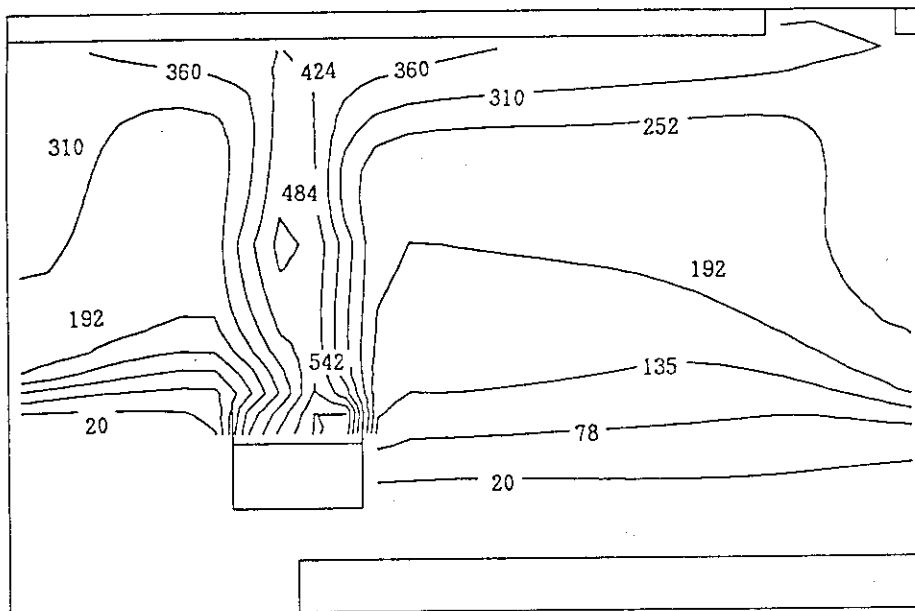
CONTOUR OF TEMPERATURE (C) TO = 2.00E1
 MIN = 2.00E1 MAX = 3.41E2 INTERVAL = 3.21E1
 TIME = 1.80E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図 17(B) 2次元準定常解析によるセル内の温度分布



VELOCITY VECTOR MAX = 3.21E0 →
 TIME = 1.80E3 CYCLE NUMBER = 131327
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図 18(A) 2次元非定常解析によるセル内の速度分布



CONTOUR OF TEMPERATURE (C) TO = 2.00E1
 MIN = 2.00E1 MAX = 6.00E2 INTERVAL = 5.80E1
 TIME = 1.80E3 CYCLE NUMBER = 131327
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図 18(B) 2次元非定常解析によるセル内の温度分布

12. 再処理モデルプラントの溶媒火災解析

12.1 再処理モデルプラントの計算体系

図 19 に再処理モデルプラントのノード・ジャンクション分割図と初期流量を、図 20 にノードとジャンクションに対する体積、断面積、長さおよび初期圧力を示した。溶媒火災を想定したセルはノード 4 とし、形状と体積の異なる横型セルと縦型セルを計算の対象にした。横型セルの寸法は、高さ 2.2 m、横幅 7.5 m、奥行き 5.6 m で、セル体積は 80 m^3 とする。横型セルの内部には、 $0.305 \text{ m}^2/\text{段}$ の面積を持つミキサセトラが 8 台並んでいるとする。1 台のミキサセトラには、放射性物質を含む溶媒相 (30% TBP/n-ドデカン) と水相がそれぞれ 42 l 貯えられているとする。縦型セルの寸法は、高さ 10 m、横幅 5 m、奥行き 3 m で、セル体積は 150 m^3 とする。縦型セルには、パルスカラムから漏洩した放射性物質を含む 100 l の溶媒がセル床ピットに 0.6 m^2 ($1 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$) の面積で溜まっているものとする。表 14 に再処理モデルプラントの溶媒火災条件を、表 15 に燃焼速度の計算に必要な各種の燃焼パラメータを示す。

再処理モデルプラントのネットワークは、5 箇所の給気口 (境界ノード) と 1 箇所の排気口 (境界ノード) を持っている。ジャンクション(2)の弁は逆流防止ダンパである。ジャンクション(11)と(12)はフィルタチャンバーで、流れに対して並列に 15 基並んでいる。1 基のフィルタチャンバーには、2 段のハーフサイズ HEPA フィルタ ($0.305 \text{ m} \times 0.610 \text{ m} \times 0.292 \text{ m}$) が上下 12 台装着されている。ジャンクション(15)は表 16 の流量/差圧特性を持つ排気ブロアが備えられている。放射性物質の放出計算には、表 17 に示したデータテーブルが使用された。表の値は、ORIGEN 2²⁴⁾により燃焼度 28,000 MWD/MTU の燃料を 180 日間冷却したとして計算したものである。煤煙粒子は、幾何平均径 $d_g = 0.4 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g = 2.0$ の対数正規分布で放出するものとした。HEPA フィルタの捕集率は粒度分布を考慮した DOP エアロゾルの DF 値テーブルを利用した。

12.2 横型セルの解析 (ミキサセトラ設置セル)

(1) 横型セルの構造

溶媒火災を想定した横型セル (ノード 4) のメッシュ分割 ($2.2 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$) を図 21 に示した。溶媒火災は、セルの中心に設置した 8 台のミキサセトラのうち 2 段が燃焼したとする。給気ダクトは左の壁からミキサセトラの下部まで延びているが、2 次元熱流動計算の妨げになるので左側のダクトは省略している。給気流は、セルの右側下部に向かって流出し、排気流は左側上部の貫通スリーブ (ジャンクション(4)) より排出する。ノード 4 の天井壁は厚さ 0.2 m のスチール板、それ以外のセル壁と貫通スリーブ壁は厚さ 4 m のコンクリート壁とする。

表 18 に主要な計算結果を 1000 秒ごとに示した。ボイルオーバー燃焼は 3500 秒後に発生し、火災は鎮火する。表 19 に鎮火時に環境に放出した放射能濃度と放出速度を示した。

(2) 1次元解析

図22～図32にFACE-1Dを用いて得た1次元解析の結果を示した。図22に示すように約3500秒後にボイルオーバー燃焼が発生してノード4の圧力が一時的に1600 Paまで上昇した。セル内の圧力が正圧になると、放射性物質の漏洩が問題になる。図23には、煤煙の付着による前後HEPAフィルタ(ジャンクション(11))の差圧上昇を示した。鎮火時のフィルタの差圧は523 Paである。この値は、フィルタの仕様上の耐差圧値(=2500 Pa)を超えてないので、フィルタの健全性は保たれる。

図24に示すようにノード4の温度は、定常燃焼時には170～180℃、ボイルオーバー燃焼時には450℃であり、溶媒火災試験の実測値に近い。図25にノード5、6および7の温度を示したが、希釈系のダクトから流れ込む大量の空気により流体の温度は上昇していない。したがって、再処理モデルプラントの溶媒火災条件では、HEPAフィルタの耐熱温度(=200℃, 1h)を超えることはなく、温度に対する健全性も保たれている。図26にセル壁の温度変化(ノード4)を示したが、温度上昇は～50℃程度である。

図27に示したジャンクション1～3の体積流量は、着火直後とボイルオーバー燃焼時の負の値になっているが、これはセル内の圧力が急激に増加し安全弁が作動して逆流が起こったためである。図28に示すジャンクション4と5の体積流量も、着火直後とボイルオーバー燃焼時に増加している。定常燃焼時の体積流量は、膨張効果により初期流量より大きくなっている。図29のジャンクション6、7および16の体積流量は、希釈系ダクトから流入した空気の希釈効果により殆ど一定である。

図30にノード4と5の煤煙濃度変化を、図31と図32に前段HEPAフィルタ前後(ノード11と12)の煤煙濃度の変化を示した。ボイルオーバー燃焼時の煤煙濃度は、定常燃焼時の2～3倍になっている。フィルタのDF値は、定常燃焼時およびボイルオーバー燃焼時共に～ 10^4 程度である。ノード16(スタック)における放射性物質の濃度と環境放出速度は、ボイルオーバー燃焼時に異常に高くなる(表19参照)。しかし、ボイルオーバー燃焼の時間は短いので、放射性物質の放出量は大きな値にはならない。

(3) 2次元解析

図33～図36にFACE-2Dを用いて得た2次元準定常解析の結果を示した。各図の下部には、計算の時刻、物理量(流速、温度、濃度など)の最大値と最小値および10分割した物理量の幅が示されている。図33と図34には、着火後2000秒後における火災セル(ノード4)内の流速ベクトルと温度分布を示している。図33の速度ベクトルを見ると、火災を中心にセルの上方の左右に2つの渦ができており、これらの渦に引きずられてセル内下部に小さな渦ができています。したがって、熱流動はミキサセトラを境にして上下2層に分かれている。図34の温度分布を見るとセル内の上部が高温になっており、ミキサセトラの下層では温度上昇はそれほど見られない。図35に煤煙の濃度分布を示した。計算では煤煙の粒度分布を粒径0.4 μmの単分散とした。図36にセル内で消費された酸素の濃度分布を示した。

12.3 縦型セルの解析（パルスカラム設置セル）

(1) 縦型セルの構造

縦型セルの体積は 150 m^3 である。そのため、1次元解析の結果は図 22～図 32 の結果と異なっているが、傾向が同じであるので省略する。図 37 に縦型セルの寸法、メッシュ分割及び渦動粘性係数を示した。縦型セルの2次元準定常解析では、給気ダクトと排気ダクトの位置を相互に変えて計算を実施した。即ち、給気ダクトをセルの下部に排気ダクトを上部に設置した場合（ケース1）と給気ダクトをセルの上部に排気ダクトを下部に設置した場合（ケース2）の2ケースである。図中の床ピット内には溶媒相と水相がそれぞれ 100 l 貯まっており、この溶媒が着火して火災になったと考える。ピットの寸法は、横幅 1 m 、奥行き 0.6 m である。計算では、セルの奥行きをピットの奥行き同じ値にした。

(8) 2次元解析

図 38 にケース1における2000秒後の速度ベクトルを、図 39 にケース2の速度ベクトルを示した。ケース1の計算では、セルの中央に大きな渦ができており、この渦を中心に流体は時計の針方向に回転している。一方、給気ダクトをセルの上部に設置したケース2の計算では、流体は火災の上昇方向に立ち上がりセル壁に沿って下降しており、火炎軸を左右対象に2つの渦が形成されている。図 40 と図 41 にケース1と2におけるセル内温度分布を示す。ケース1の温度分布は、給気の影響により火炎が左側に傾いていることが分かる。ケース2では、左右対象の2つの渦の影響により燃焼ガスの流れはまっすぐセルの上方に伸びていることが分かる。図 42 にケース1、図 43 にケース2の煤煙濃度分布を示した。ケース1の計算では、給気位置と煤煙発生位置が近いので、煤煙は上昇せずに下部にかたまっている。ケース2の場合には、煤煙濃度は左側に高く、右側に低くなっている。なお、FACE-2Dの解析では、煤煙粒子に対する抗力を無視したので、煤煙の濃度分布は燃焼ガスの分布と相似である。

表14 再処理モデルプラントの溶媒火災条件

	横型セル (ミキサセトラ)	縦型セル (バルスカラム) ¹⁾
セルの寸法 (m)	2.2mH x 7.5mL x 5.6mW	10mH x 5mL x 3mW
セル体積 (m ³)	80	150
給気流量 (m ³ /h) (回/h)	480 (n = 6)	450 (n = 3)
燃焼面積 (m ²) (-)	0.61 (s = 2)	0.6 (s = 0.53)
溶媒組成 (%)	30%TBO/70%n-ドデカン	30%TBO/70%n-ドデカン
初期溶媒量 (ℓ)	83	100
定常燃焼達成時間 (s)	200	200

表15 燃焼パラメータ (モデルプラント)

ϵ :	$\frac{\text{〔溶媒の燃焼速度〕}}{\text{〔溶媒の蒸発速度〕}}$	0.651	実験式
ϵ :	$\frac{\text{〔溶媒蒸発の熱量〕}}{\text{〔溶媒にはいる熱量〕}}$	0.187	実験式
ψ :	$\frac{\text{〔輻射効果により溶媒にはいった熱量〕}}{\text{〔火炎から溶媒にはいる熱量〕}}$	0.820	実験式
τ :	$\frac{\text{〔輻射の熱量〕}}{\text{〔溶媒の燃焼発熱量〕}}$	0.150	実証試験より決定
f :	$\frac{\text{〔溶媒の燃焼量〕}}{\text{〔燃焼に必要な酸素供給量〕}}$	TBPの組成分率により逐次計算	内部計算
δ :	$\frac{\text{〔水相の蒸発速度〕}}{\text{〔溶媒の蒸発速度〕}}$	0.0	水相沸騰により鎮火するため0.0
$Y_{ex,\infty}$:	ガス相の無限遠方からの酸素の推進力	0.196	実験式

表16 排気プロアの流量/差圧特性 (モデルプラント)

流量 (m ³ /h)	排気プロアの差圧 (Pa)
0	4900
79000	4304
90000	3920
140000	0

表17 放射性物質の放質計算に用いたデータテーブル (ORIGEN 2)

核種	順位	放射能 (Ci/g-u)	放射能濃度 (Ci/ℓ)	分配係数 (溶媒/水相)	同伴係数 (-)	備考
Sr-89	9	0.153	19.1	10^{-3}	3×10^{-3}	ウラン濃度: 125 g/ℓ 溶媒体積: 83.3 ℓ 水相体積: 83.3 ℓ
Sr-90	10	0.102	12.7	10^{-3}	3×10^{-3}	
Cs-137	12	0.096	12.0	10^{-4}	0.1	
Ru-103	13	0.0584	7.3	10^{-2}	0.1	
Ru-106	4	0.418	52.2	10^{-2}	0.1	
Rh-106	5	0.418	52.2	10^{-3}	0.1	
Zr-95	7	0.264	33.0	10^{-1}	0.1	
Nb-95	3	0.557	69.6	10^{-2}	0.1	
Ce-141	14	0.032	4.0	10^{-3}	5×10^{-4}	
Ce-144	1	1.058	132.2	10^{-3}	5×10^{-4}	
Pr-144	2	1.058	132.2	10^{-5}	5×10^{-4}	
H-3	15	2.24×10^{-4}	0.028	2.7×10^{-3}	1.0	
Y-90	11	0.102	12.7	10^{-2}	3×10^{-3}	
Y-91	8	0.222	27.8	10^{-2}	3×10^{-3}	
Ba-140	16	1.12×10^{-4}	0.014	10^{-4}	3×10^{-3}	
La-140	17	1.12×10^{-4}	0.014	10^{-2}	5×10^{-4}	
Pm-147	6	0.362	45.2	10^{-2}	5×10^{-4}	
total		-	608.7	-	-	
ウラン	-	4.1×10^{-7}	5.1×10^{-5}	4	5×10^{-4}	
プルトニウム	-	6.4×10^{-4}	0.08	1	5×10^{-4}	

表 18 横型セル解析の主な計算結果(1)

時刻 (S)	0	1000	2000	3000
燃焼速度 (kg/h)	0.0	43.1	42.4	41.1
溶媒残度 (ℓ)	83.3	64.1	41.7	19.8
TBP分率 (-)	0.3	0.368	0.508	0.815
煤煙発生速度 (kg/h)	0.0	2.25	2.22	2.15
燃焼速度の積算値 (kg)	0.0	10.1	21.9	33.4
煤煙発生速度の積算値 (kg)	0.0	0.528	1.15	1.75
放射性物質の総放出量 (Ci)	0.0	2.8×10^{-8}	8.1×10^{-6}	1.4×10^{-7}

横型セル解析の主な計算結果(2)

出力項目	最大値	ノード, ブランチ番号	時刻(S)	参考
温度 (°C)	450	ノード 4	3500	図 2 4
フィルタ差圧 (Pa)	523.3	ブランチ 11	3600	図 2 3
体積流量 (m ³ /h・台) (フィルタ)	652	ブランチ 11	0	
煤煙濃度 (kg/m ³)	6.7×10^{-3}	ノード 4	3550	図 3 0
煤煙沈着速度 (kg/h) (フィルタ)	2.1	ブランチ 11	3500	
(セル)	5.2	ノード 4	3500	
(ダクト)	0.09	ブランチ 4	3500	
煤煙沈着率 (%) (ダクト)	35	ブランチ 4	3500	
煤煙積算量 (kg) (フィルタ)	0.87	ブランチ 11	3600	
壁温度 (°C) (セル壁内側)	51.7	ノード 4	3600	図 2 6
(ダクト壁内側)	61	ブランチ 5	3600	
熱流束 (W) (ガス相→セル壁)	1.9×10^6	ノード 4	3500	
(ガス相→ダクト壁)	1.1×10^4	ブランチ 4	3500	

表19 ボイルオーバー燃焼時に環境の放出した放射性物質 (横型セル解析)

RELEASE OF RADIOACTIVE MATERIALS TO ATMOSPHERE		
NUCLEI	CONCENTRATION(CI/M**3)	RELEASE RATE(CI/H)
SR-89	0.27446E-16	0.20772E-11
SR-90	0.18250E-16	0.13812E-11
CS-137	0.57479E-16	0.43502E-11
RU-103	0.34967E-14	0.26464E-09
RU-106	0.25004E-13	0.18923E-08
RH-106	0.25004E-14	0.18923E-09
ZR-95	0.15807E-12	0.11963E-07
NB-95	0.33338E-13	0.25231E-08
CE-141	0.95799E-18	0.72503E-13
CE-144	0.31662E-16	0.23962E-11
PR-144	0.31662E-18	0.23962E-13
H-3	0.36212E-16	0.27406E-11
Y-90	0.18250E-15	0.13812E-10
Y-91	0.39948E-15	0.30234E-10
BA-140	0.20118E-20	0.15226E-15
LA-140	0.33530E-19	0.25376E-14
PM-147	0.10825E-15	0.81928E-11
U	0.48857E-19	0.36976E-14
PU	0.19160E-16	0.14501E-11
TOTAL	0.22329E-12	0.16899E-07
DF =	0.69932E+13	

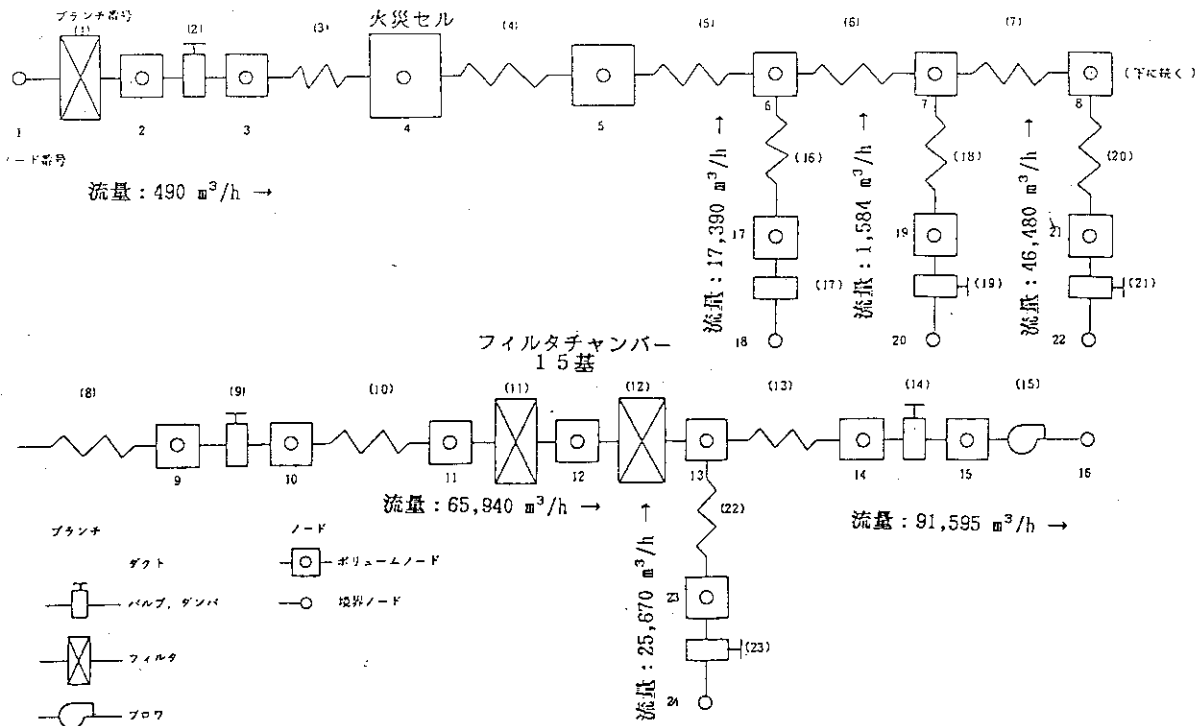


図 19 再処理モデルプラントのノード・ジャンクション

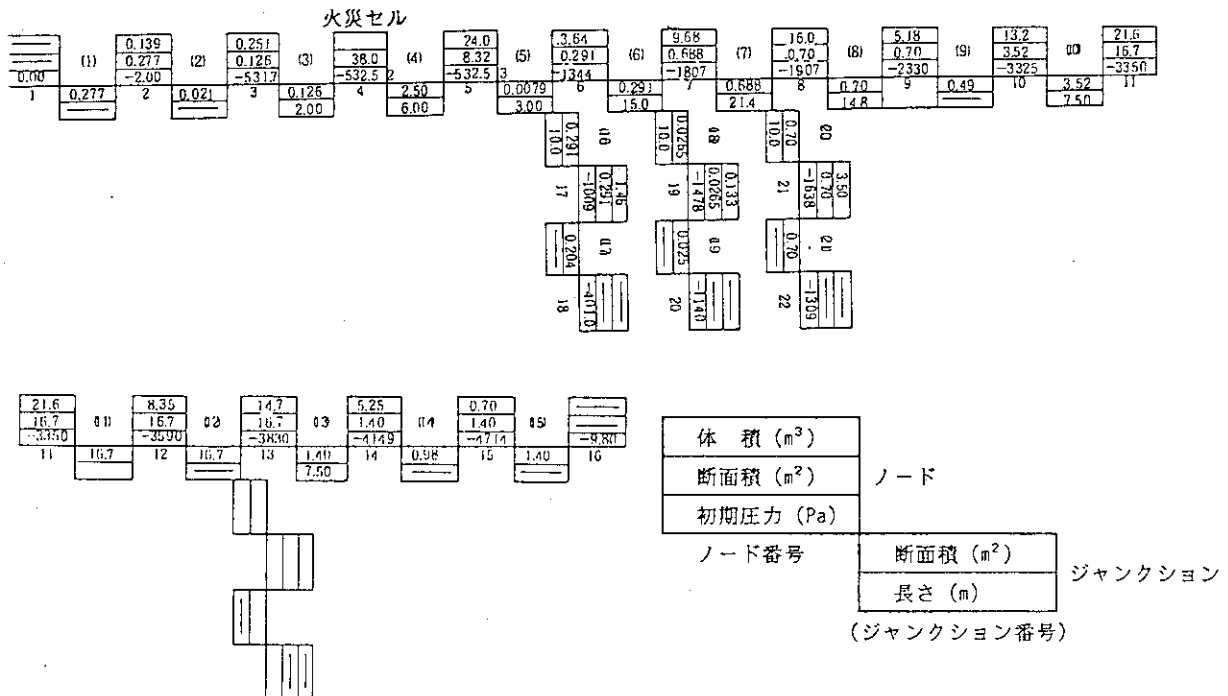


図 20 再処理モデルプラントの体積，断面積，長さおよび初期圧力（初期値）

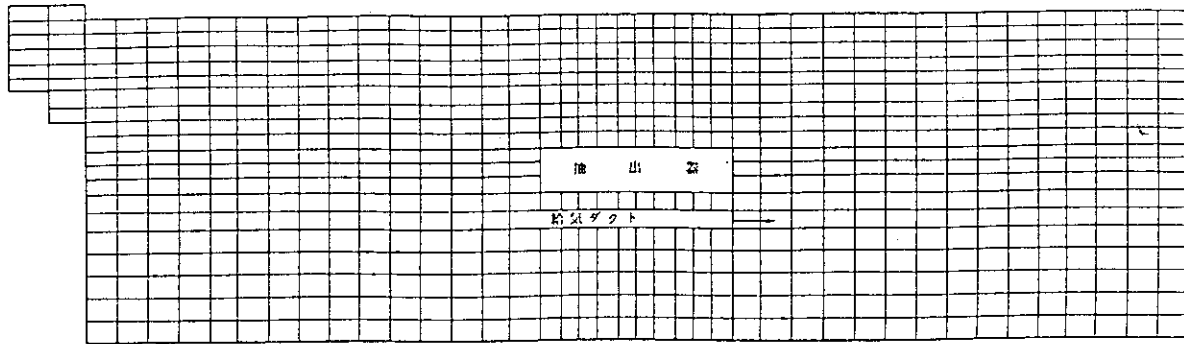


図21 横型セルのメッシュ分割 (ミキサセトラ設置セル)

この計算では、乱流による渦動粘性係数をセル内均一に $\nu_t = 0.012 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。また、Z方向の有効熱伝達係数は $h_2 = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした。

FIRE ACCIDENT IN CELL

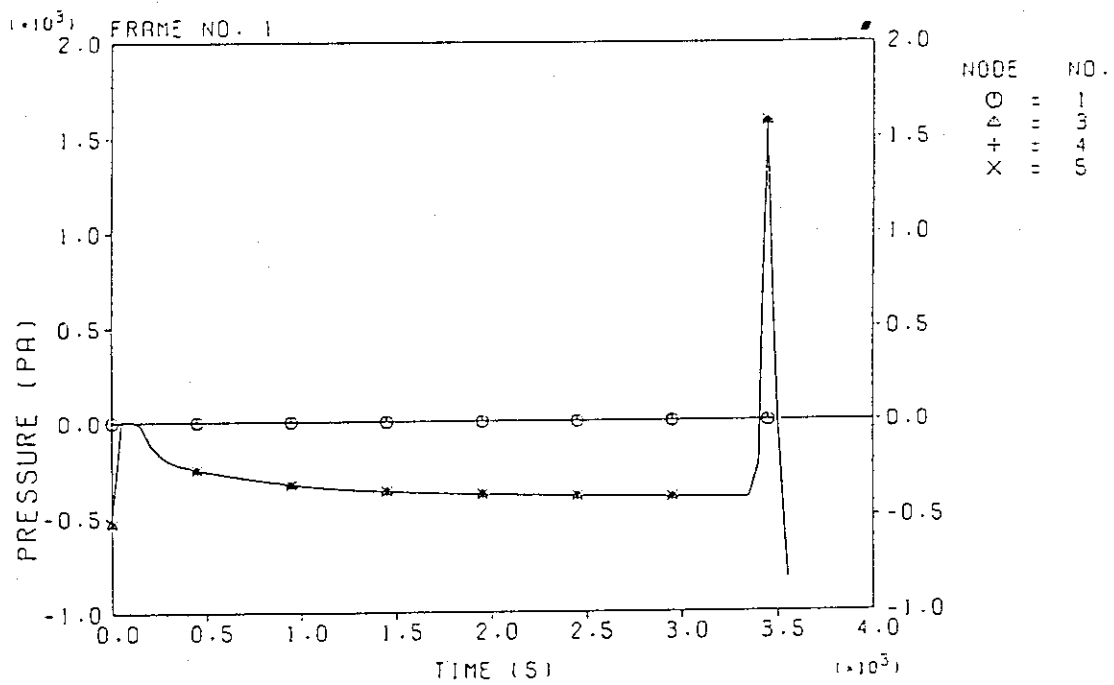


図22 セル内の圧力変化 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

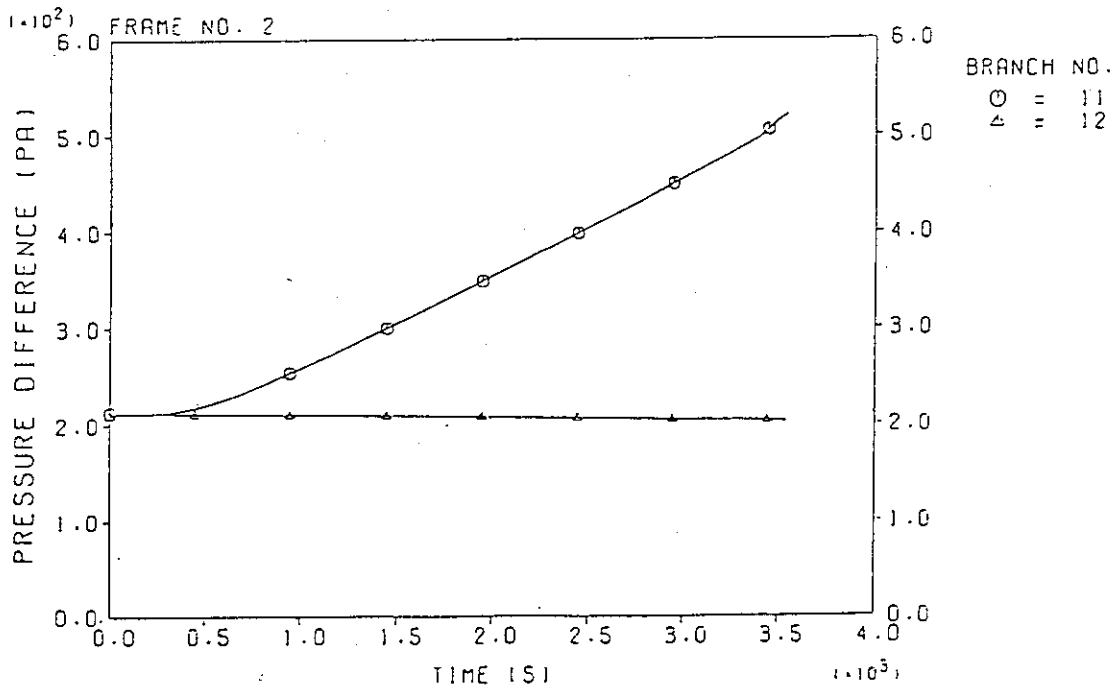


図23 HEPA フィルタの差圧上昇 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

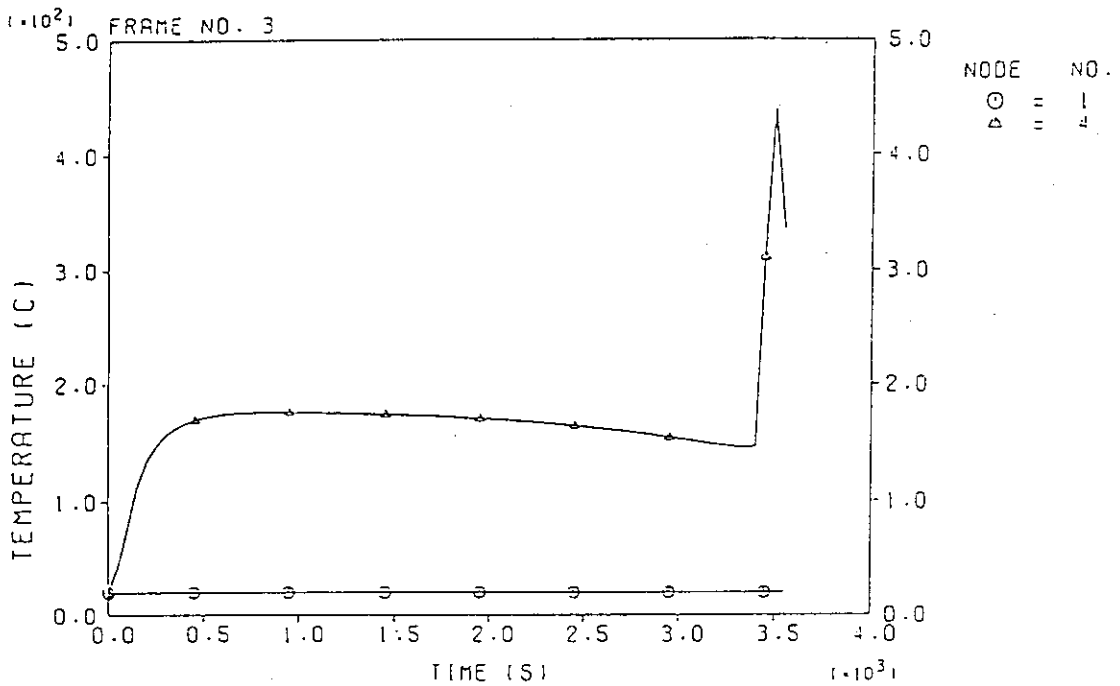


図24 火災セル内の温度変化 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

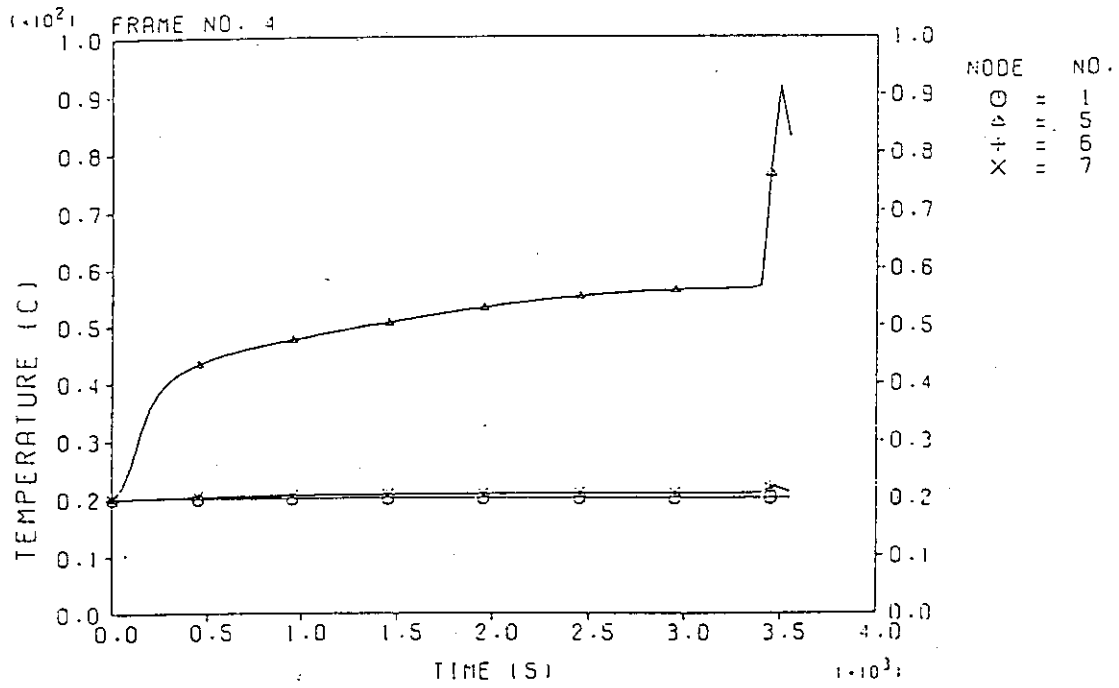


図25 セル内の温度変化 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

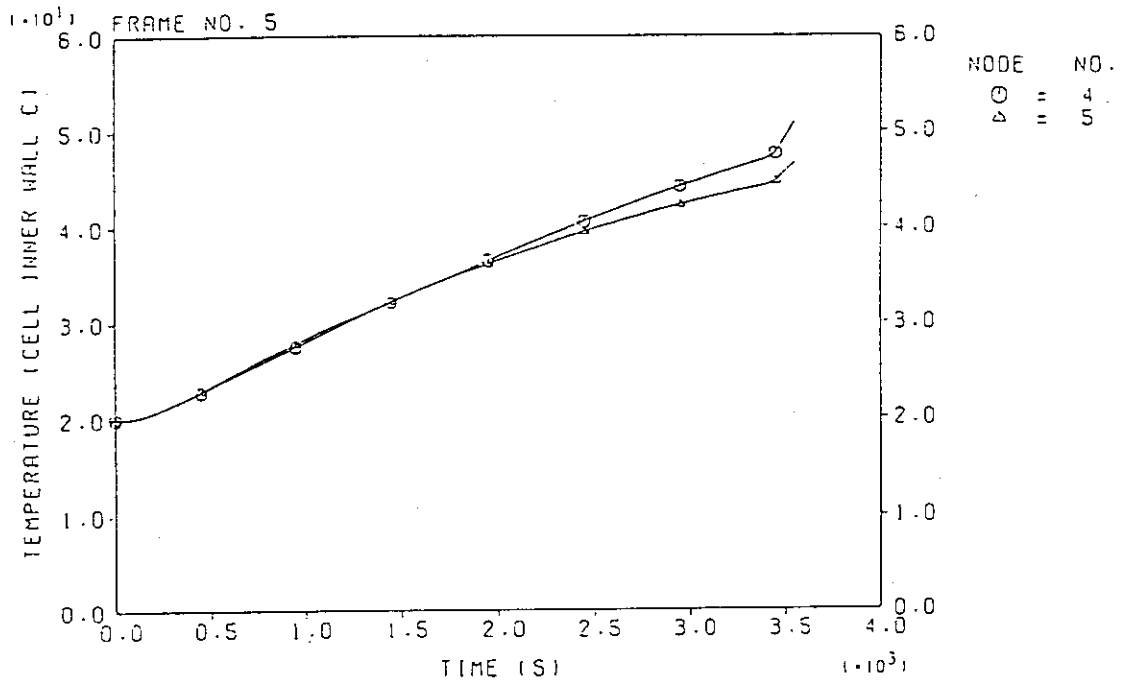


図26 セル壁の温度変化 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

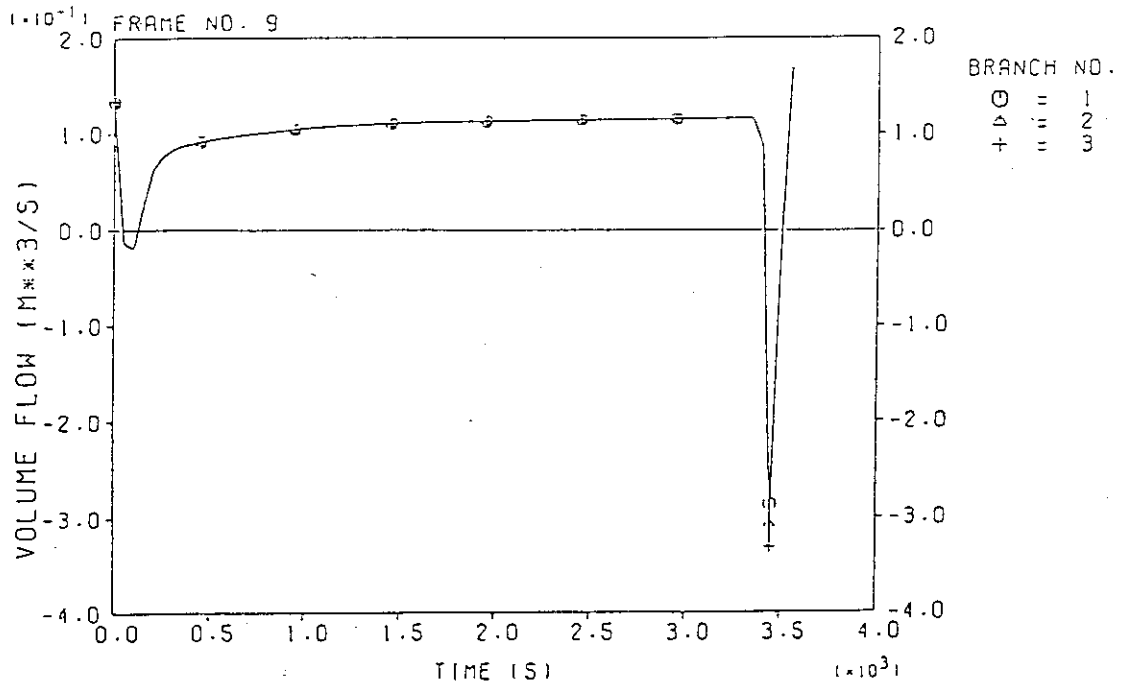


図27 火災セルに給気された体積流量 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

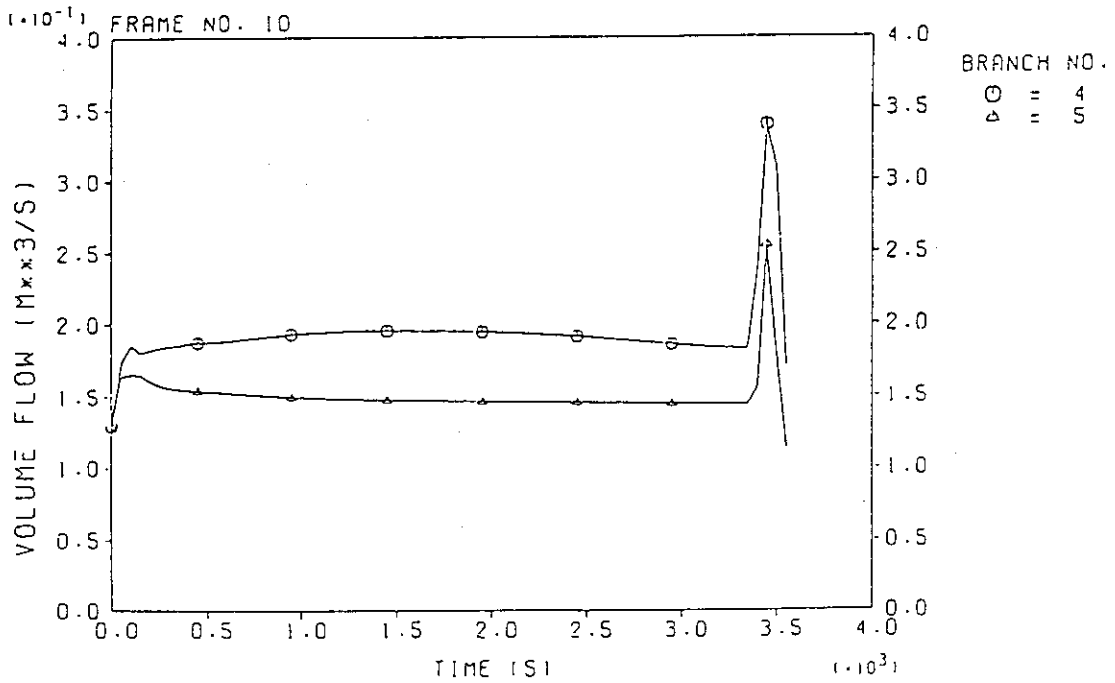


図28 火災セルから排気された体積流量 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

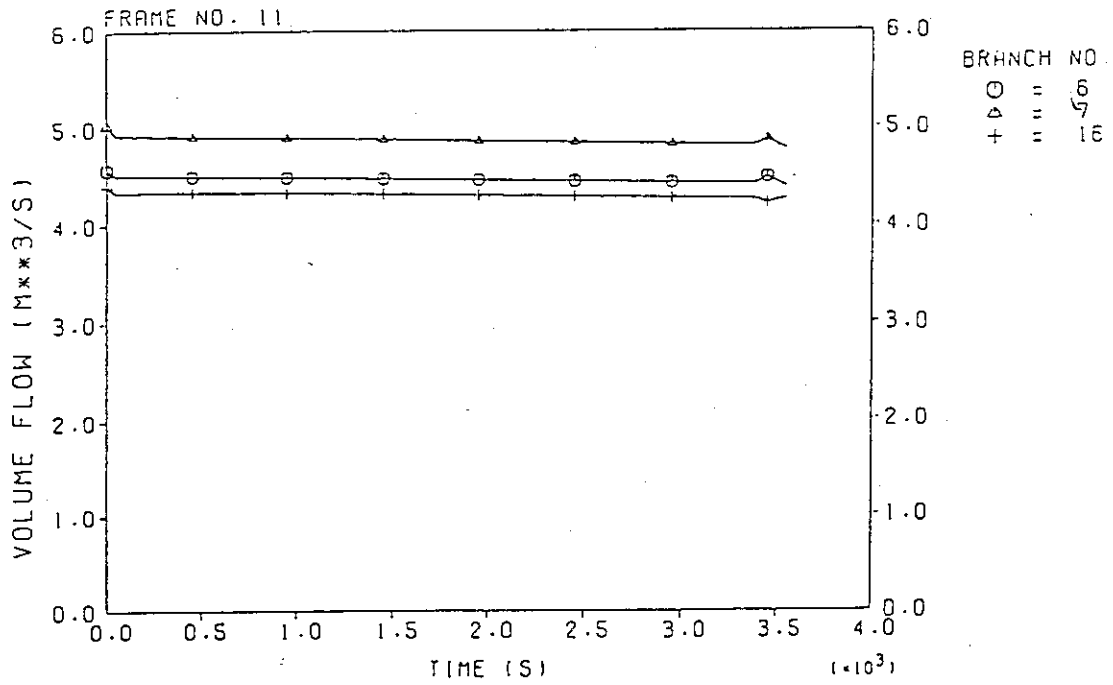


図29 ダクト内の体積流量 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

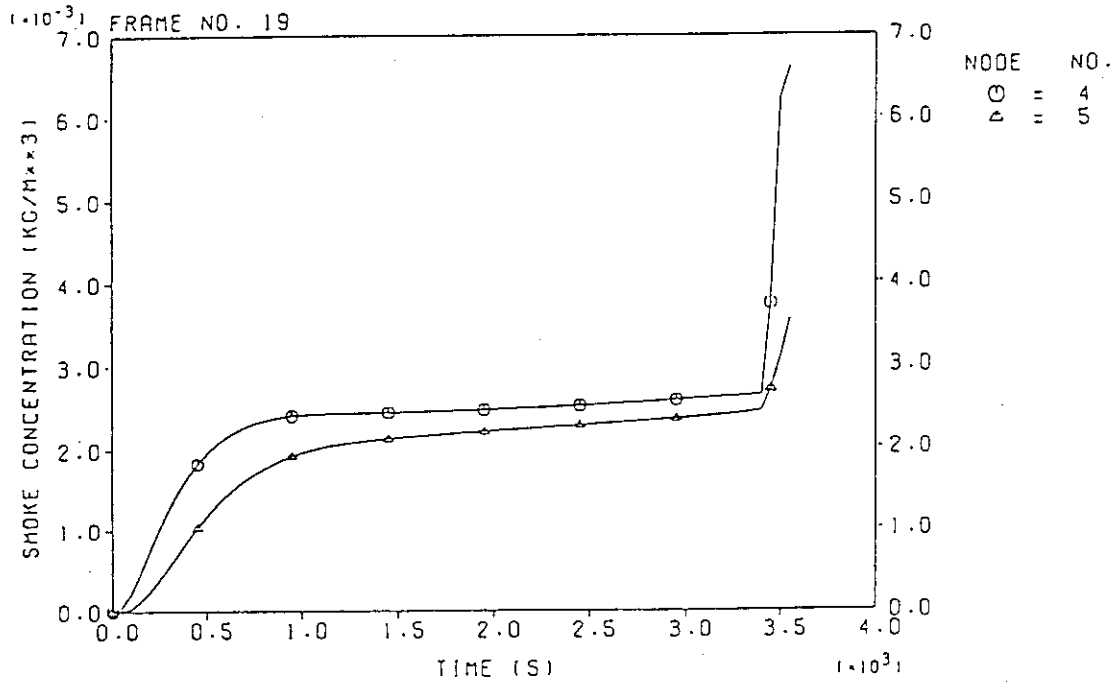


図30 セル内の煤煙濃度 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

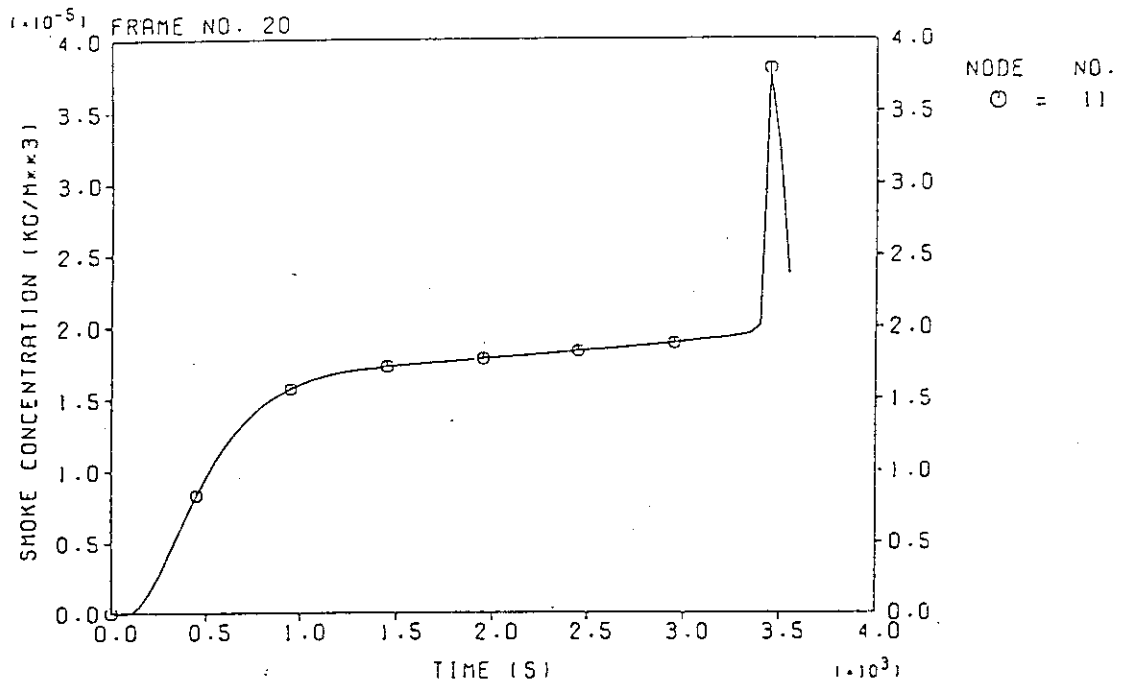


図31 HEPA フィルタ (前段) に入る煤煙濃度 (横型セル)

FIRE ACCIDENT IN CELL

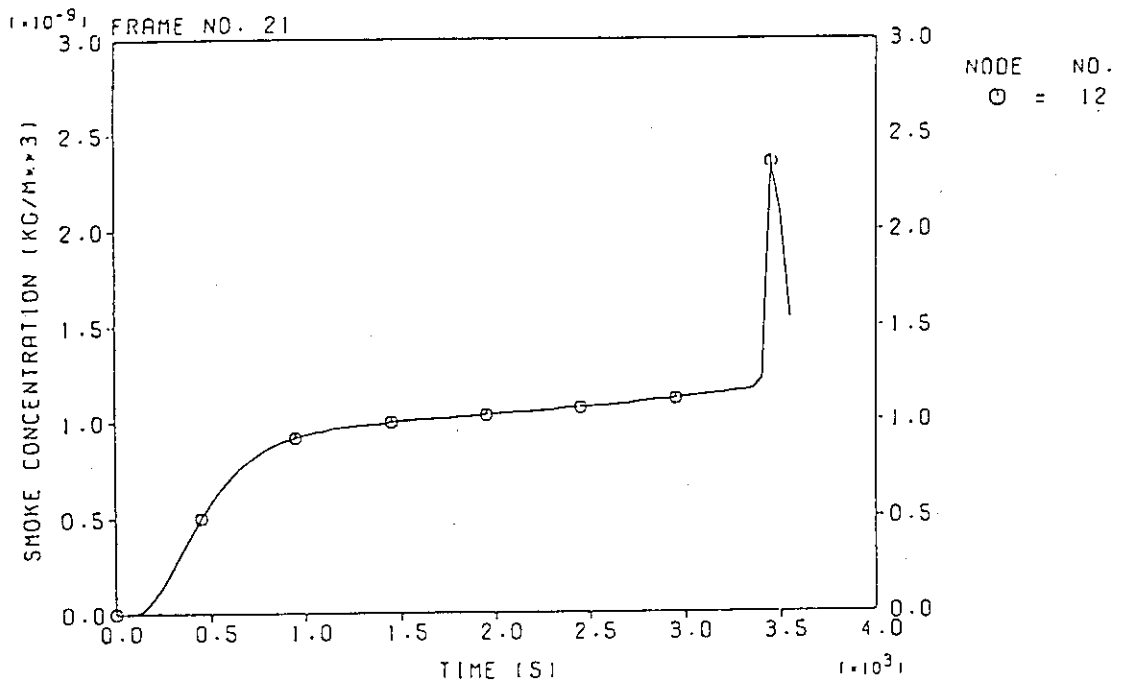
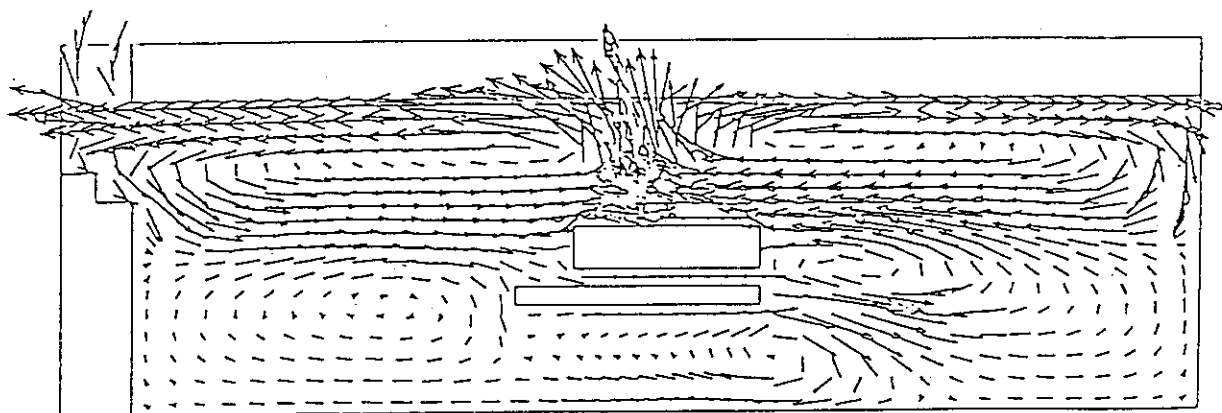
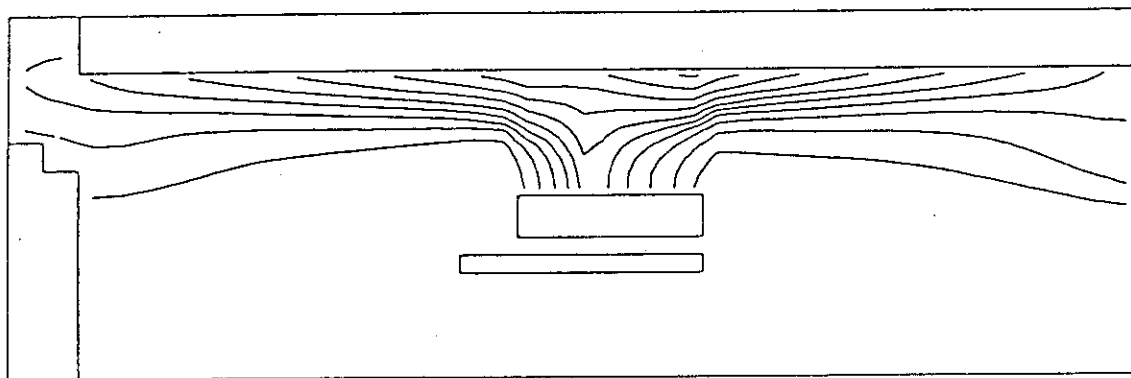


図32 HEPA フィルタ (前段) を出た煤煙濃度 (横型セル)



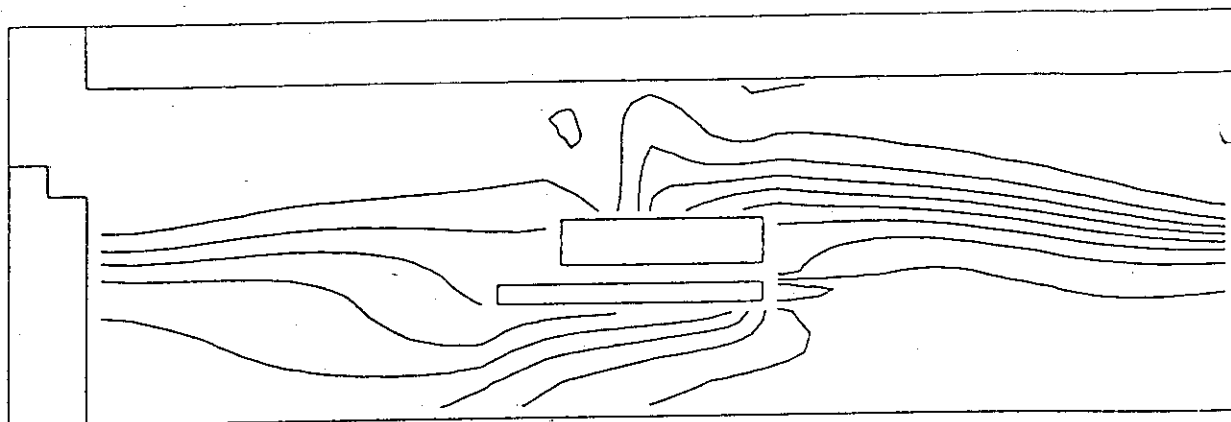
VELOCITY VECTOR MAX = 3.17E0 (m/s) →
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図33 火災セル内の速度ベクトル (横型セル)



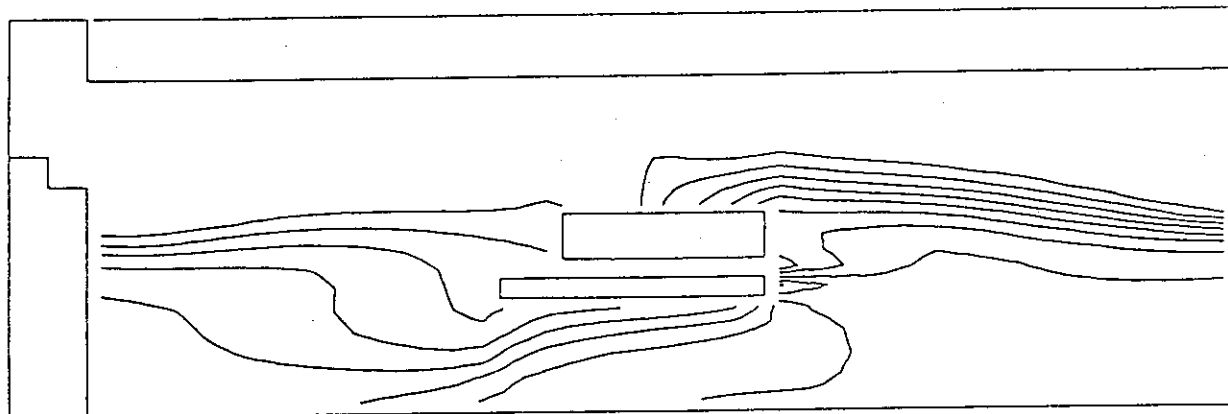
CONTOUR OF TEMPERATURE (C) TO = 2.00E1
 MIN = 1.93E1 MAX = 7.83E2 INTERVAL = 7.64E1
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図34 火災セル内の温度分布 (横型セル)



CONTOUR OF CONCENTRATION --- C1
 MIN = 1.99E-4 MAX = 3.56E-3 INTERVAL = 3.36E-4
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図35 火災セル内の煤媒濃度分布 (横型セル)



CONTOUR OF CONCENTRATION --- O2
 MIN = 5.09E-2 MAX = 2.60E-1 INTERVAL = 2.09E-2
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図36 火災セル内の酸素濃度分布 (横型セル)

2. 5

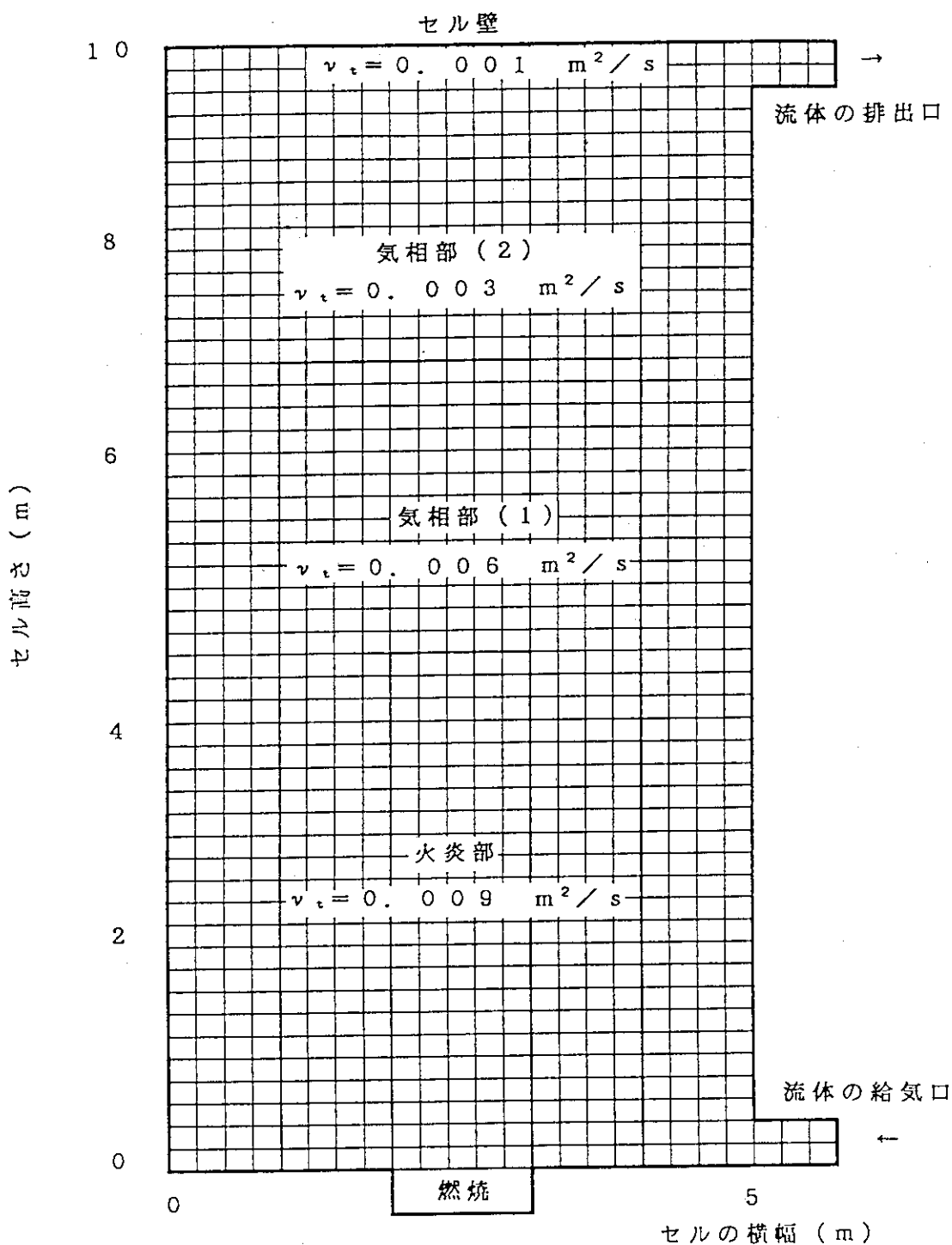
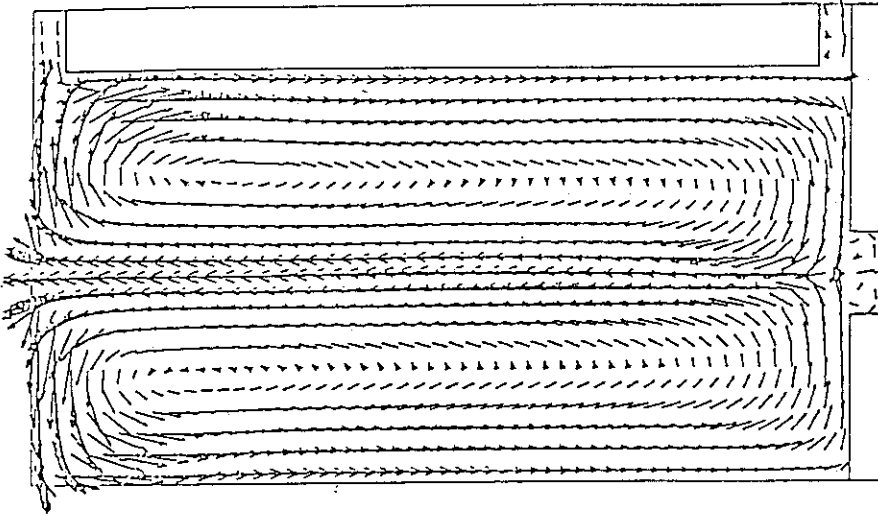


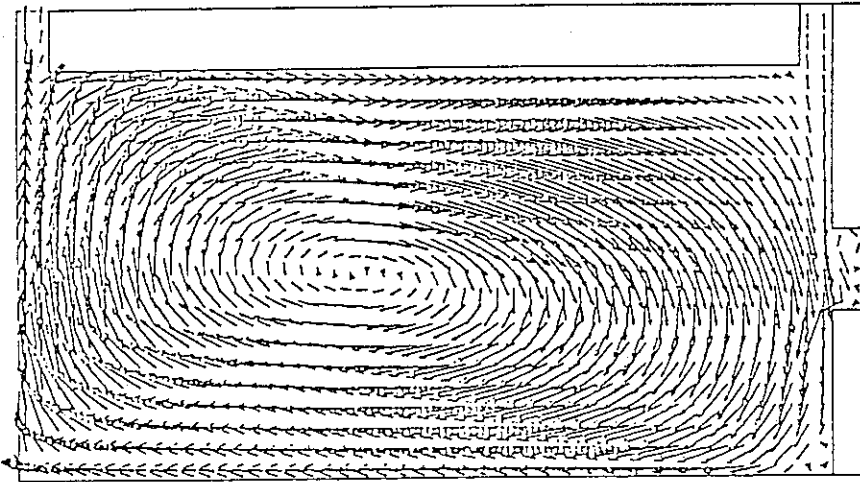
図 37 縦型セルのメッシュ分割と渦動粘性係数 (パルスカラム設置セル)

流体の給気口位置はケース 1 ではセルの床部, ケース 2 では天井部である。流体の流入 (20°C) 速度と流出速度は共に 1 m/s に固定した。



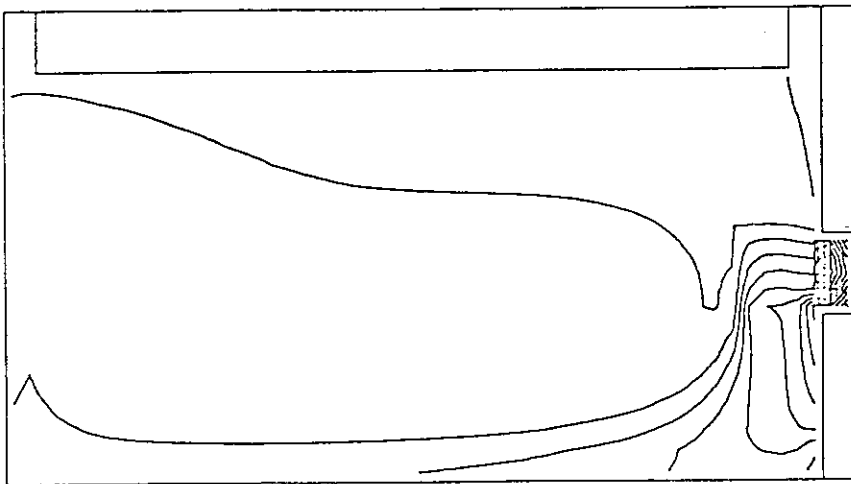
VELOCITY VECTOR MAX = 1.12E1
TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
FIRE ACCIDENT IN CELL

図 39 ケース 2 の速度ベクトル
(上部給気, 下部排気)



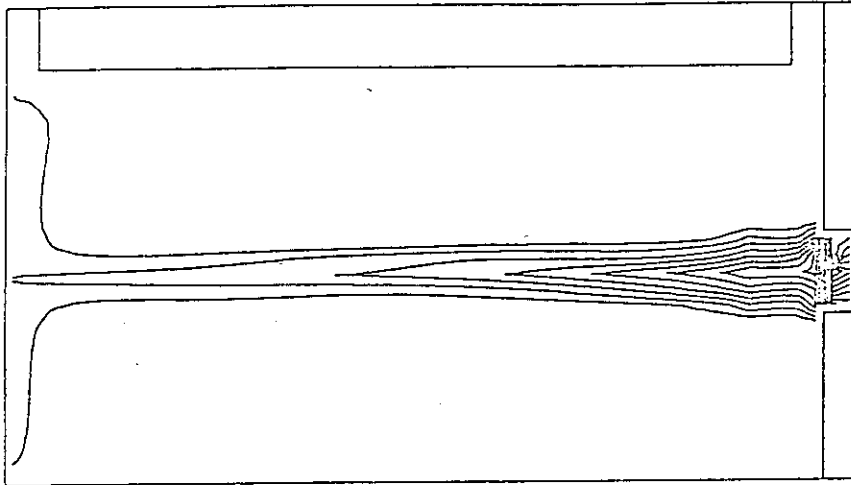
VELOCITY VECTOR MAX = 1.01E1
TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
FIRE ACCIDENT IN CELL

図 38 ケース 1 の速度ベクトル
(下部給気, 上部排気)



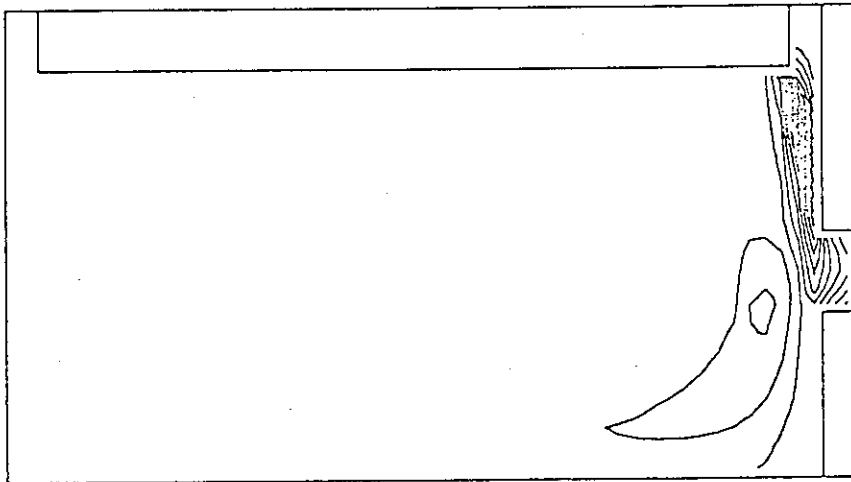
CONTOUR OF TEMPERATURE (C) TO = 2.00E1
 MIN = 1.94E1 MAX = 1.17E3 INTERVAL = 5.70E1
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図40 ケース1の温度分布
 (下部給気, 上部排気)



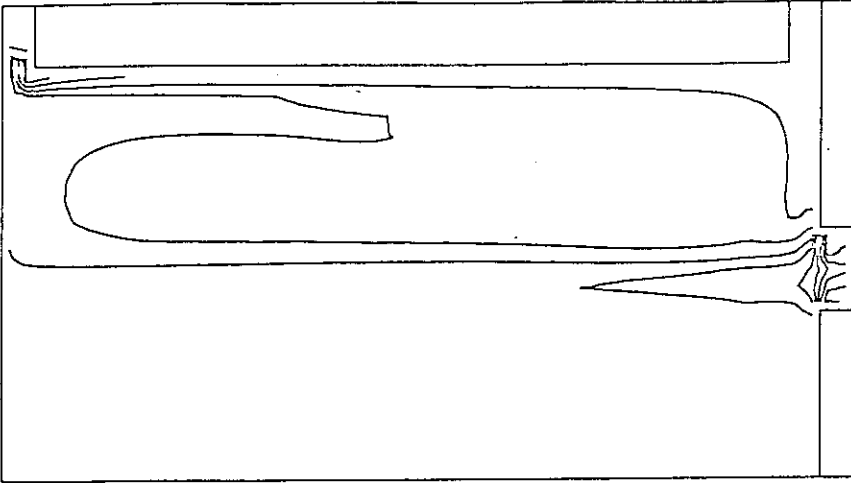
CONTOUR OF TEMPERATURE (C) TO = 2.00E1
 MIN = 1.94E1 MAX = 1.24E3 INTERVAL = 6.19E1
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL 2.

図41 ケース2の温度分布
 (上部給気, 下部排気)



CONTOUR OF CONCENTRATION --- PRO
 MIN = 1.21E-2 MAX = 1.45E-2 INTERVAL = 1.18E-4
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図42 ケース1の煤煙分布
 (下部給気, 上部排気)



CONTOUR OF CONCENTRATION --- PRO
 MIN = 3.21E-2 MAX = 3.62E-2 INTERVAL = 1.56E-4
 TIME = 2.00E3 CYCLE NUMBER = 1
 FIRE ACCIDENT IN CELL

図43 ケース2の煤煤分布
 (上部給気, 下部排気)

13. おわりに

FACE は、昭和 56 年度から 60 年度まで科学技術庁の委託を受けて実施した「再処理施設排気フィルタ事故時安全性実証試験」の一環として作成・整備した溶媒火災安全性解析コードである。FACE の解析に熱流動モデルを取り入れたことにより、現実に即したセル内溶媒火災の計算と放射性物質の閉じ込め計算が可能になった。FACE-1D を用いると、複雑なネットワーク内の熱流動を比較的容易に計算することができる。また、2次元熱流動解析に、準定常解析を採用したことにより、大幅な計算時間の短縮化ができた。FACE のプログラムは、溶媒火災試験の結果を用いて検証されているので、溶媒火災事象時の安全性解析に使用できると考えている。現在、FACE は原子力工学試験センター・原子力安全解析所において改造・整備されており、さらに使いやすい解析コードになっている。

謝 辞

FACE の作成・整備にあたって、「再処理施設排気フィルタ事故時安全実証試験検討委員会」において解析の方針、解析モデルの妥当性および検証計算の結果について御検討を頂いた。また、本解析コードの作成・整備にあたっては、町田悟氏、吉岡逸夫氏、刑部真弘氏および松本英一氏の御協力を頂いた。ここに厚く感謝する。

備考：本報告は、科学技術庁の委託により日本原子力研究所が実施したものである。

参考文献

- 1) B. D. Nichols, W. S. Gregory, "FIRAC User's Manual : A Computer Code to Simulate Fire Accidents in Nuclear Facilities", NUREG/CR-4561, (LA-10678-M), (1986).
- 2) M. K. Chan, M. Y. Ballinger, P. C. Owczarski, S. L. Sutter, "User's Manual for FIRIN : A Computer Code to Estimate Accidental Fire and Radioactive Source Term Release in Nuclear Fuel Cycle Facilities", NUREG/CR-3037, (PNL-4532), (1987).
- 3) 西尾軍治, 阿部仁, 内藤倅孝, "再処理施設における事故時放射性物質移行解析コード TRANS-ACE の開発", JAERI-M 89-014, (1989).
- 4) G. Cox. "A Field Model of Fire and Its Application to Nuclear Containment Problems", Proc. CSNI Specialist Meeting on Interaction of Fire and Explosion with Ventilation Systems in Nucl. Facilities. Los Alamos National Laboratory. April 25-28, Conf. CSNI Report No. 83, LA-9911-C, Vol. I, PP. 199, (1983).
- 5) 西尾軍治, 橋本和一郎, "再処理施設の溶媒火災に関する安全性実証試験", JAERI-M 89-

13. おわりに

FACE は、昭和 56 年度から 60 年度まで科学技術庁の委託を受けて実施した「再処理施設排気フィルタ事故時安全性実証試験」の一環として作成・整備した溶媒火災安全性解析コードである。FACE の解析に熱流動モデルを取り入れたことにより、現実を即したセル内溶媒火災の計算と放射性物質の閉じ込め計算が可能になった。FACE-1D を用いると、複雑なネットワーク内の熱流動を比較的容易に計算することができる。また、2次元熱流動解析に、準定常解析を採用したことにより、大幅な計算時間の短縮化ができた。FACE のプログラムは、溶媒火災試験の結果を用いて検証されているので、溶媒火災事象時の安全性解析に使用できると考えている。現在、FACE は原子力工学試験センター・原子力安全解析所において改造・整備されており、さらに使いやすい解析コードになっている。

謝 辞

FACE の作成・整備にあたって、「再処理施設排気フィルタ事故時安全実証試験検討委員会」において解析の方針、解析モデルの妥当性および検証計算の結果について御検討を頂いた。また、本解析コードの作成・整備にあたっては、町田悟氏、吉岡逸夫氏、刑部真弘氏および松本英一氏の御協力を頂いた。ここに厚く感謝する。

備考：本報告は、科学技術庁の委託により日本原子力研究所が実施したものである。

参考文献

- 1) B. D. Nichols, W. S. Gregory, "FIRAC User's Manual: A Computer Code to Simulate Fire Accidents in Nuclear Facilities", NUREG/CR-4561, (LA-10678-M), (1986).
- 2) M. K. Chan, M. Y. Ballinger, P. C. Owczarski, S. L. Sutter, "User's Manual for FIRIN: A Computer Code to Estimate Accidental Fire and Radioactive Source Term Release in Nuclear Fuel Cycle Facilities", NUREG/CR-3037, (PNL-4532), (1987).
- 3) 西尾軍治, 阿部仁, 内藤俣孝, "再処理施設における事故時放射性物質移行解析コード TRANS-ACE の開発", JAERI-M 89-014, (1989).
- 4) G. Cox. "A Field Model of Fire and Its Application to Nuclear Containment Problems", Proc. CSNI Specialist Meeting on Interaction of Fire and Explosion with Ventilation Systems in Nucl. Facilities. Los Alamos National Laboratory. April 25-28, Conf. CSNI Report No. 83, LA-9911-C, Vol. I, PP. 199, (1983).
- 5) 西尾軍治, 橋本和一郎, "再処理施設の溶媒火災に関する安全性実証試験", JAERI-M 89-

13. おわりに

FACE は、昭和 56 年度から 60 年度まで科学技術庁の委託を受けて実施した「再処理施設排気フィルタ事故時安全性実証試験」の一環として作成・整備した溶媒火災安全性解析コードである。FACE の解析に熱流動モデルを取り入れたことにより、現実に即したセル内溶媒火災の計算と放射性物質の閉じ込め計算が可能になった。FACE-1D を用いると、複雑なネットワーク内の熱流動を比較的容易に計算することができる。また、2次元熱流動解析に、準定常解析を採用したことにより、大幅な計算時間の短縮化ができた。FACE のプログラムは、溶媒火災試験の結果を用いて検証されているので、溶媒火災事象時の安全性解析に使用できると考えている。現在、FACE は原子力工学試験センター・原子力安全解析所において改造・整備されており、さらに使いやすい解析コードになっている。

謝 辞

FACE の作成・整備にあたって、「再処理施設排気フィルタ事故時安全実証試験検討委員会」において解析の方針、解析モデルの妥当性および検証計算の結果について御検討を頂いた。また、本解析コードの作成・整備にあたっては、町田悟氏、吉岡逸夫氏、刑部真弘氏および松本英一氏の御協力を頂いた。ここに厚く感謝する。

備考：本報告は、科学技術庁の委託により日本原子力研究所が実施したものである。

参考文献

- 1) B. D. Nichols, W. S. Gregory, "FIRAC User's Manual: A Computer Code to Simulate Fire Accidents in Nuclear Facilities", NUREG/CR-4561, (LA-10678-M), (1986).
- 2) M. K. Chan, M. Y. Ballinger, P. C. Owczarski, S. L. Sutter, "User's Manual for FIRIN: A Computer Code to Estimate Accidental Fire and Radioactive Source Term Release in Nuclear Fuel Cycle Facilities", NUREG/CR-3037, (PNL-4532), (1987).
- 3) 西尾軍治, 阿部仁, 内藤俣孝, "再処理施設における事故時放射性物質移行解析コード TRANS-ACE の開発", JAERI-M 89-014, (1989).
- 4) G. Cox. "A Field Model of Fire and Its Application to Nuclear Containment Problems", Proc. CSNI Specialist Meeting on Interaction of Fire and Explosion with Ventilation Systems in Nucl. Facilities. Los Alamos National Laboratory. April 25-28, Conf. CSNI Report No. 83, LA-9911-C, Vol. I, PP. 199, (1983).
- 5) 西尾軍治, 橋本和一郎, "再処理施設の溶媒火災に関する安全性実証試験", JAERI-M 89-

- 032, (1989).
- 6) D. B. Spalding, 4th Symposium Int. on Combustion, p. 847, Williams and Wilkins, Baltimore, (1953) ., D. B. Spalding, Fire Res. Abstract Rev. 1, 41 (1989) ., 水谷幸夫, "燃焼工学", 森北出版社, (1981).
 - 7) Hirt, C. W. , et al. "SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flow" , LA- 5852, (1975) .
 - 8) H. M. Domanus, R. C. Schmitt, W. T. Sha, V. L. Shah, "A New Implicit Numerical Solution Scheme the COMMIX- 1 A Computer Program" , NUREG/CR- 3435' (ANL- 83- 64) , (1983) .
 - 9) Tang, P. K. , et al. , "EVENT User' s Manual , A Computer code for Analyzing Explosion Included Gas-Dynamic Transients in Flow Network" , LA- 96242 -M, (1983) .
 - 10) 尾崎誠, 金川明, "高性能エアフィルタ苛酷条件下における性能", 空気清浄, Vol. 25, No. 6, 1-15, (1988).
 - 11) K. Hashimoto, G. Nishio, et. al. , "Aerosols Released in Accidents in Reprocessing Plants" , Nucl. Technol. , Vol. 81, 278 May (1988) .
 - 12) I. E. Idel' chik, "Handbook of Hydranlic Resistance" , the U. S. Atomic Energy Commission and the National Science Fandation, (1966) .
 - 13) 日本機会学編, "伝熱工学資料 (改訂第3版)", (1975).
 - 14) G. Nishio, K. Hashimoto, "Release of Radioactive Materials in Simulation Tests of a Postulated Solvent Fire in a Nuclear Fuel Reprocessing Plant" , Nucl. Technol. Vol. 88, 213, Dec. (1989) .
 - 15) 日本流体力学学会編, "流体力学ハンドブック", 丸善, (1987).
 - 16) N. Rajaratnan, "Turbulent Jets" , Elsewier, (1976) : 野村定正訳, "噴流", 森北出版
 - 17) 植田辰洋, "気液二相流, 流れと熱伝達", p. 123, 養賢堂 (1981).
 - 18) 高橋幹二, "基礎エアロゾル工学", p. 62, 養賢堂 (1972): N. A. Fuchs, "The Mechanics of Aerosols" , Chapt. V, Pergamon Press, (1964) .
 - 19) G.Nishio, S. Machida, "Pool Fires under Atomosphere and Ventilation in Steddy-State Burning (Part I) " , Fire Technol. Vol. 23, No. 2, 146, May (1987) .
 - 20) G. Nishio, S. Machida, "Pool Fires under Atomosphere and Ventilation in Steady-State Burning (Part II, " , Fire Technol. Vol. 23, No. 3, 186, Aug. (1987) .
 - 21) 総合安全工学研究所編, 「火災・爆発危険性の測定法」, 日刊工業新聞社 (昭和 53 年 4 月).
 - 22) 金岡千嘉男, "エアロゾル粒子の挙動と捕集に関する研究", 京都大学博士論文, (1973).
 - 23) 日本原子力学会「原子炉における熱流動数値解析の現状(Ⅳ)」熱流動数値解析特別専門委員会 p. 57-64, (1988).
 - 24) A. G. Croff, "ORIGEN 2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclear Compositions and Characteristic of Nuclear Materials" , Nucl. Techno. Vol. 62, 335 (1983) .

付録 A 計算に必要な物性値

(1) 流体の物性値

空気の定圧比熱	$C_p=0.261$	cal/g・K
空気の粘性係数	$\mu=0.355\times 10^{-3}$	poise(dyn・s/cm ²)
空気の熱伝導率	$\lambda=0.136\times 10^{-3}$	cal/cm・s・K
プラントル数	$Pr=C_p\mu/\lambda=0.681$	(-)
重力加速度	$g=980$	cm/s ²
空気の体膨張率	$\beta=1/273=0.366\times 10^{-2}$	1/K
圧力	$P=1$	atm
空気の分子量	$M=29.0$	g/mol
空気の密度	$\rho_a=1.29$	kg/m ³
ガス定数	$R=82.1$	atm cm ³ /mol・K

(2) TBP と n-ドデカンの物性値

化学式	TBP(リン酸トリブチール) (C ₄ H ₉ O) ₃ PO	n-ドデカン CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃
分子量M(g/mol)	266.32	170.34
比重 ρ 又は σ (g/cm ³)	0.97(20°C)	0.75(20°C)
融点(°C)	< -80	-12
沸点(°C)	289	214~217
引火点(°C)	146	74
溶解度	水	微量(~5.8g/ℓ)
	エタノール	溶
	エーテル	溶
発熱量(重油) ΔH (kcal/kg)	-	9000~11000
蒸発潜熱L(kcal/kg)	55.1	61.1
酸素化学当量f(-)	0.462	0.288
炭素の重量分率M _c (-)	0.541	0.846
水素の重量分率M _H (-)	0.101	0.153
酸素の重量分率M _O (-)	0.240	0
リンの重量分率M _P (-)	0.120	0

(3) TBP と n-ドデカンの蒸気圧

TBP		n-ドデカン	
温度(°C)	蒸気圧(mmHg)	温度(°C)	蒸気圧(mmHg)
150	10	77	10
196	50	110	50
211	100	132	100
227	150	148	150
289	760	216	760
—	—	289	5000

(4) TBP/n-ドデカン混合溶媒の物性値推算式

(a) TBP の重量分率

$$W_T = \frac{0.97V_T}{0.97V_T + 0.75(1-V_T)}$$

ここで、 V_T は TBP の体積分率

(b) TBP 混合溶媒の密度 (g/cm³)

$$\sigma = 0.75(1-V_T) + 0.97V_T$$

(c) 混合溶媒の蒸発潜熱 (cal/g)

$$L = 61.1(1-W_T) + 55.12W_T$$

(d) 燃焼に必要な酸素の化学当量 (—)

$$f = \frac{1}{(1-W_T)/0.288 + W_T/0.462}$$

(e) 溶媒単位重量当りの総発熱量 (kcal/kg)

$$H_g = 8100m_c + 34200(m_H - \frac{m_o}{8})$$

ここで、8100 : 炭素の燃焼熱 (kcal/kg)

34200 : 水素の燃焼熱 (kcal/kg)

m_c : 溶媒中の炭素の重量分率

m_H : 溶媒中の水素の重量分率

m_o : 溶媒中の酸素の重量分率

8 : H₂O 中の水素 1 kg 当りの酸素の重量分率

(f) 溶媒の比熱 (kcal/kg°C)

$$C_{org} = \frac{1}{\sqrt{\sigma}}(0.403 + 0.00081t_b)$$

t_b : 溶媒の温度 (°C)

(g) 溶媒沸点温度 (°C)

$$T_s = 216 \times (1-W_T) + 289 \times W_T$$

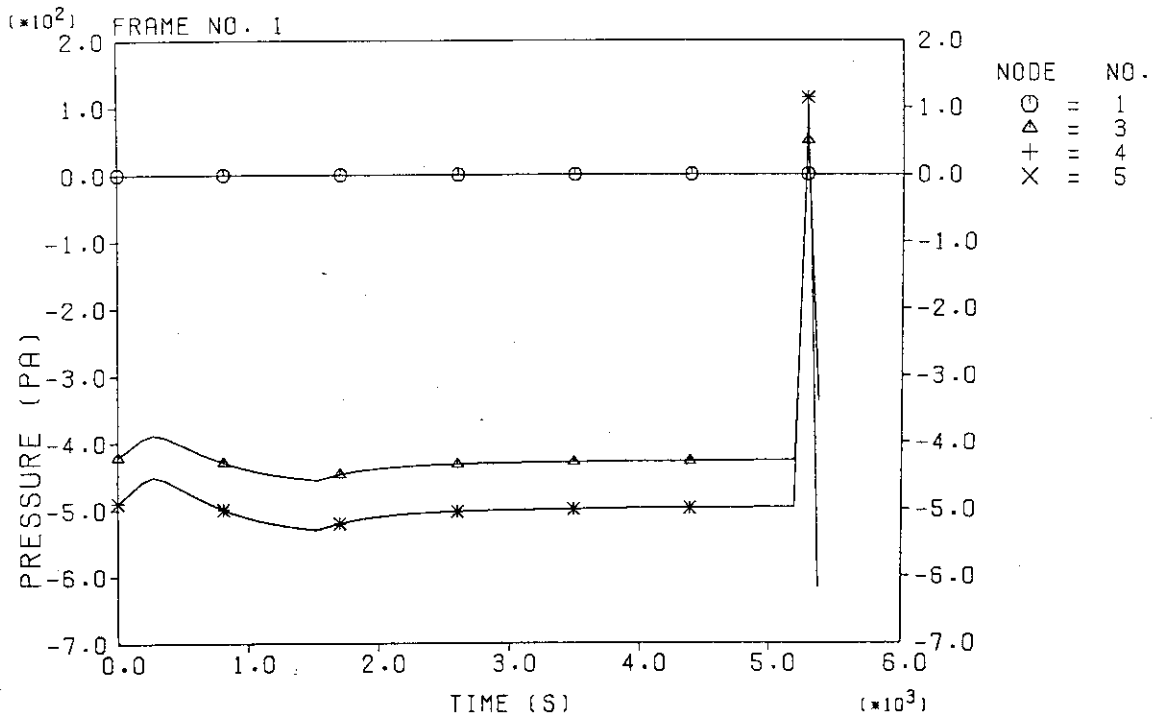
付録 B 検証計算

代表的な溶媒火災試験の結果を用いて、FACEの検証計算結果を図に示す。検証計算に必要な試験条件および燃焼パラメータを下表に示す。試験装置の諸元は、本文中に示した通りである。初期定常計算に必要な試験装置のノード・ジャンクションと初期値は図9の値を使用する。また、模擬核種の放出データテーブルは表17の値を用いた。

表 B1 試験条件と燃焼パラメータ

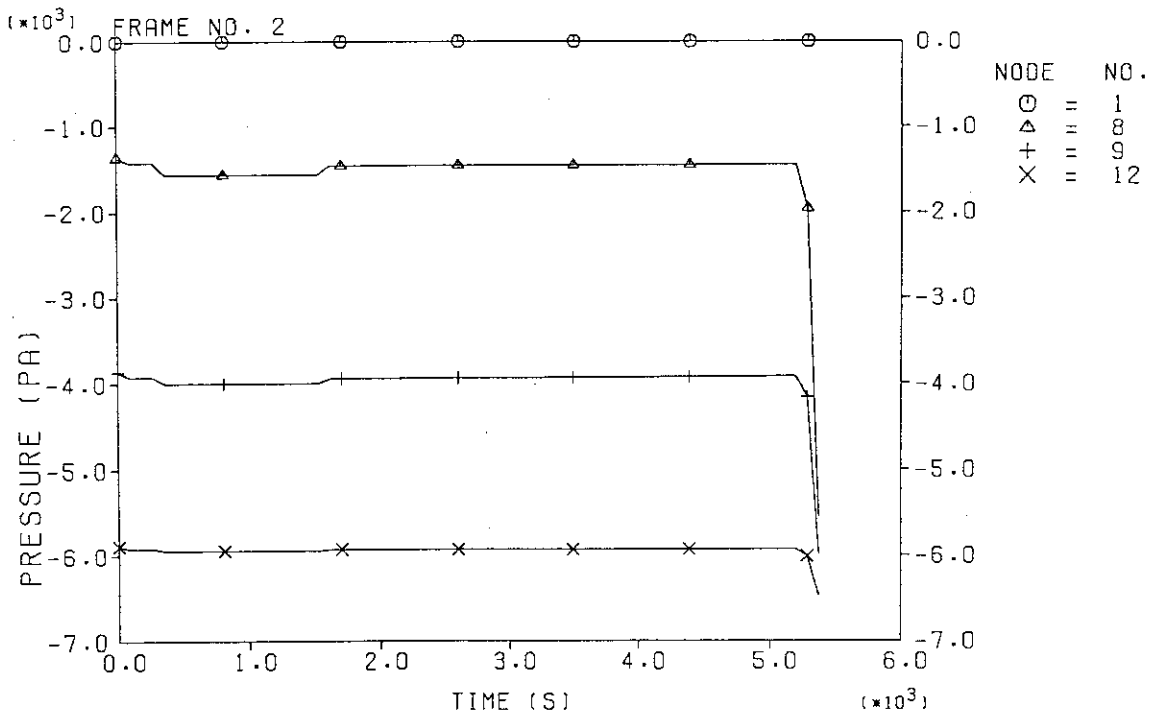
	FP-1	FP-2	FP-10	FP-13	FP-14	FP-16
給気流量(m ³ /h)	120	120	200	600	600	400
換気回数(回/h)	6	6	10	30	30	20
燃焼面積(m ²)	0.0768	0.0768	0.2304	0.6912	0.4608	0.4608
抽出器相当段(段)	1	1	3	9	6	6
TBPの組成(%)	30	30	30	30	30	30
溶媒の体積(ℓ)	10	10	30	90	60	60
水相の体積(ℓ)	10	10	30	90	60	60
模擬核種	Ru	Cs	Sr	Cs+Ce	Ru+Cs+Ce	Ru+Cs+Ce
核種の重量(g)	15.43	500	300	4023+872	927+2659+581	928+2659+581
$\xi(-)$	0.71	0.71	0.450	0.659	0.694	0.659
$\varepsilon(-)$	0.13	0.13	0.223	0.29	0.17	0.17
$\phi(-)$	0.71	0.71	表2の式	0.85	0.82	0.82
$\gamma(-)$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$Y_{ox}(-)$	0.214	0.214	表2の式	0.0577	0.1082	0.1082

FIRE ACCIDENT IN CELL



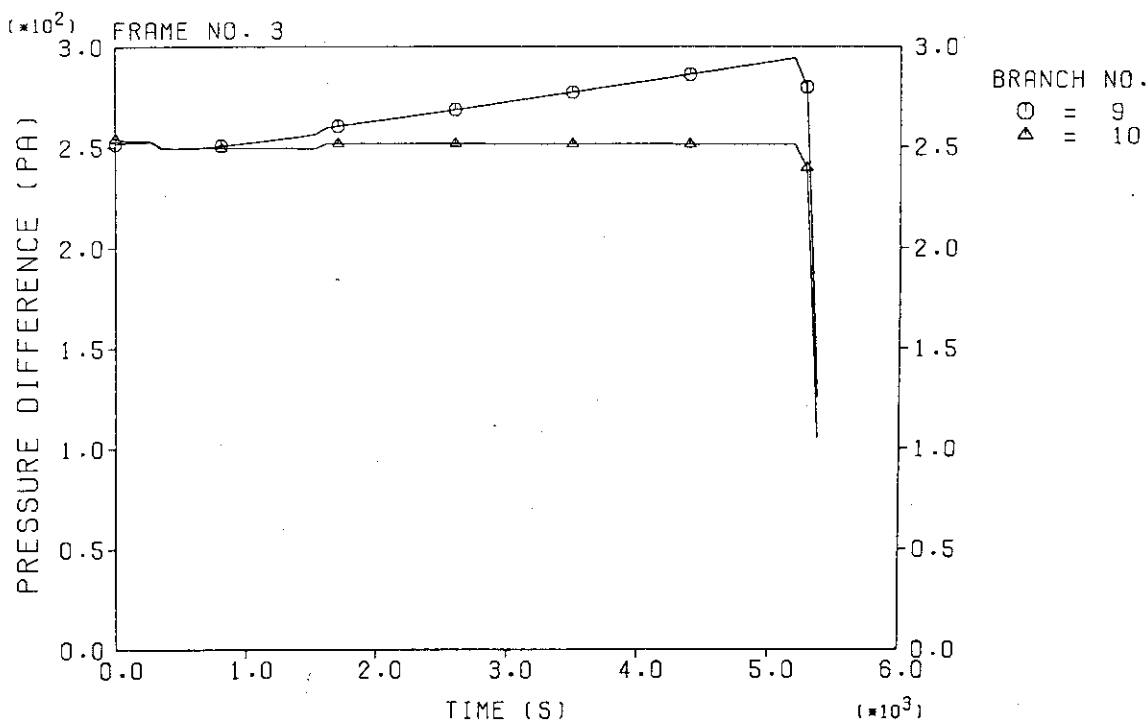
(1) ノード1、3、4、5内の圧力変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



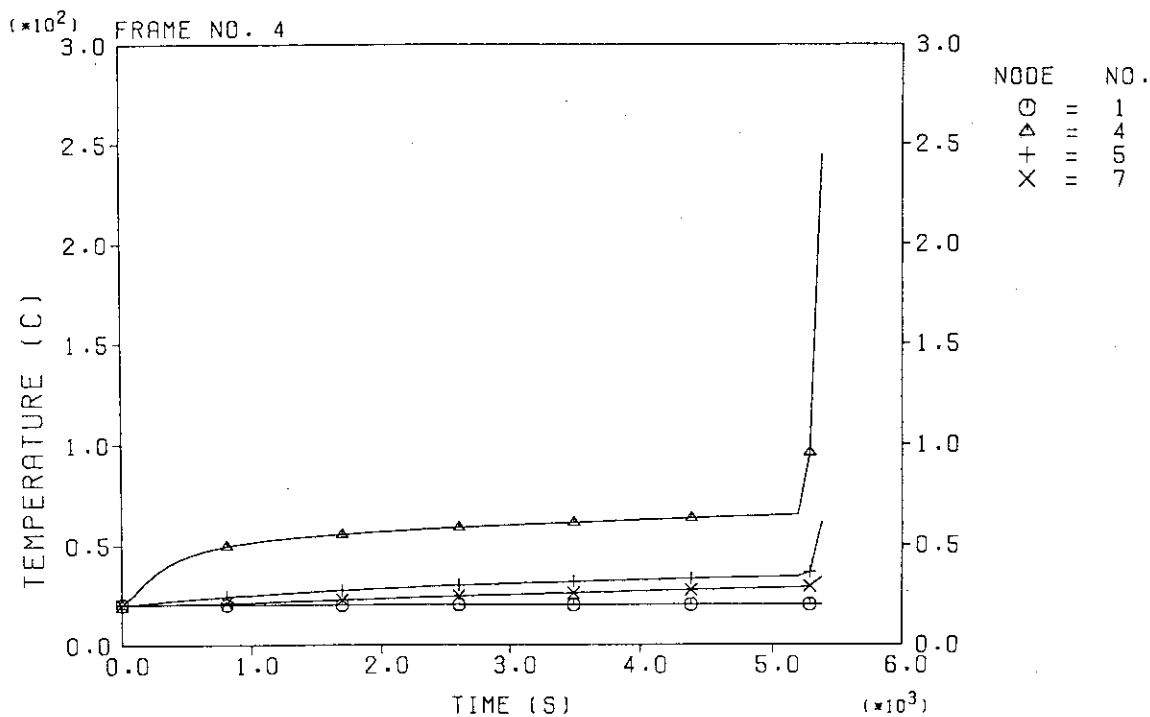
(2) ノード1、8、9、12内の圧力変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



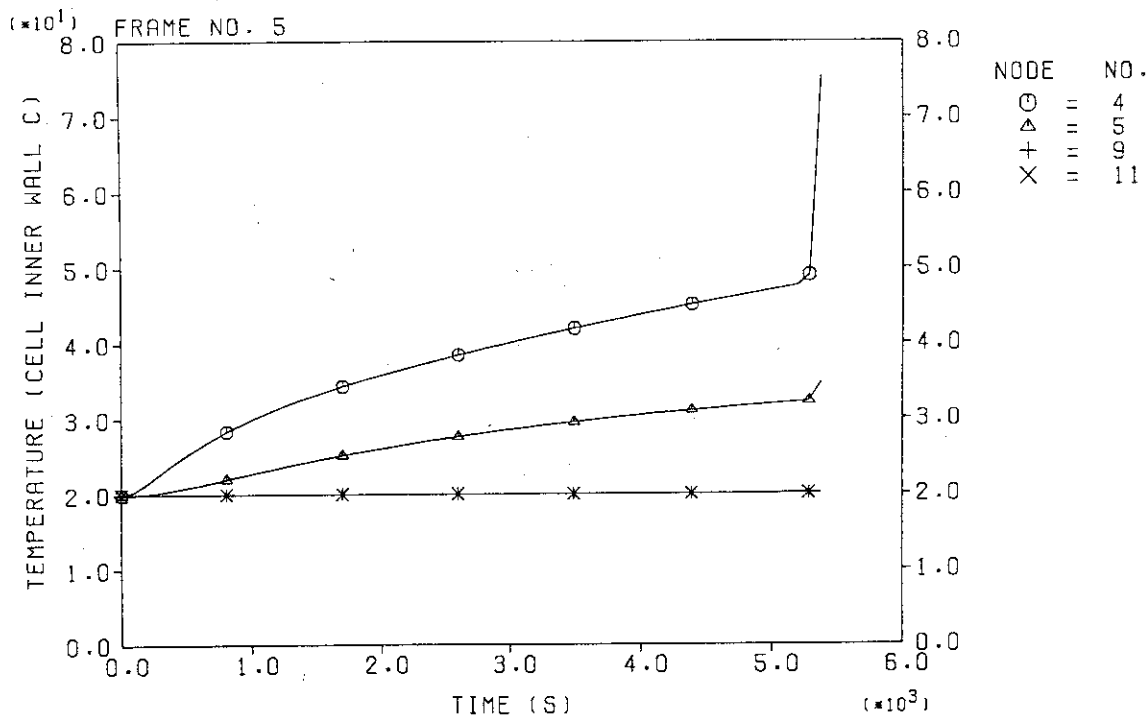
(3) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) 内の差圧変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



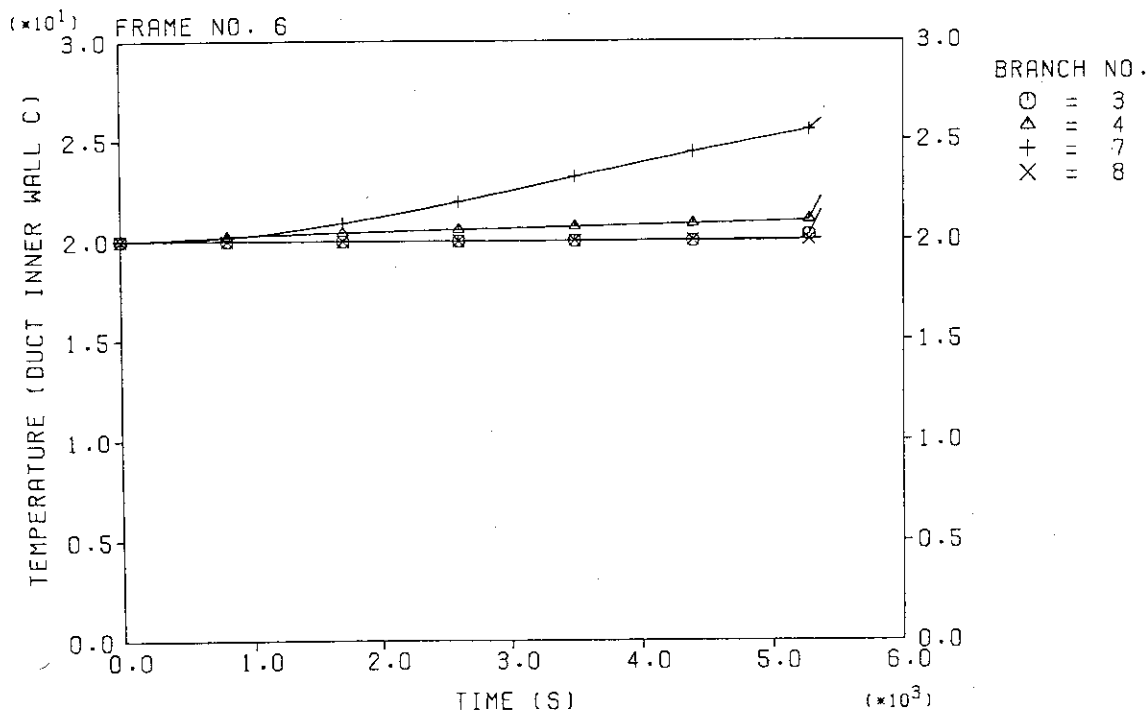
(4) ノード1、4、5、7内の気相温度変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



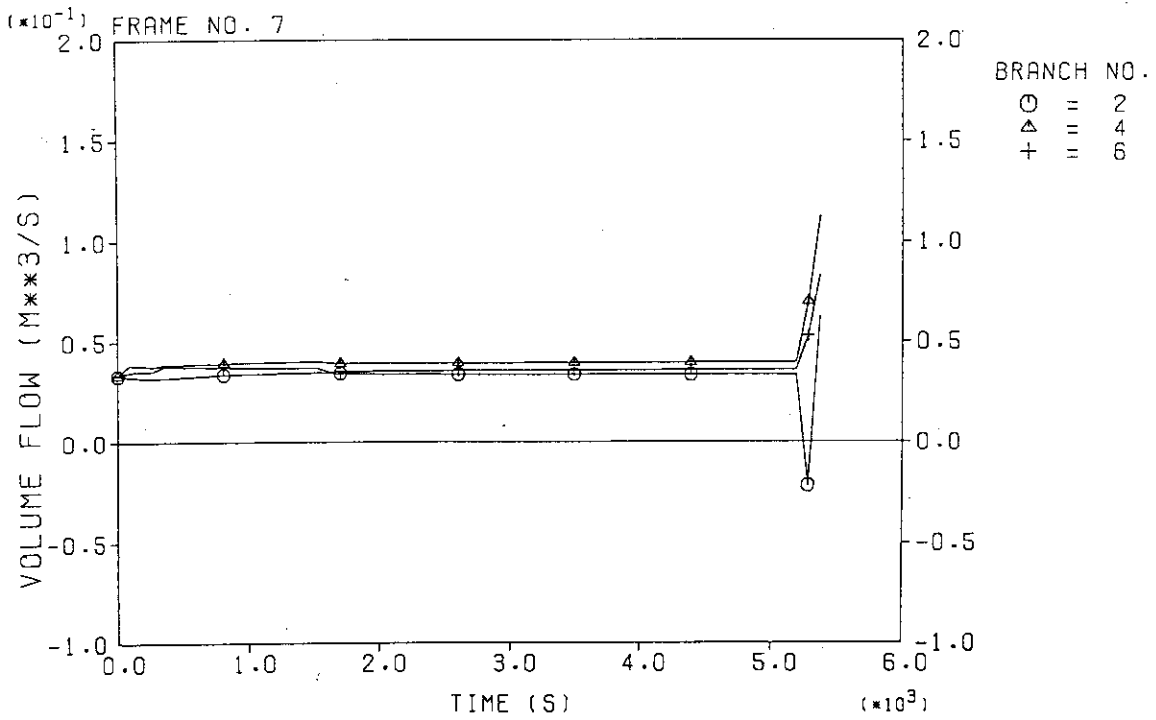
(5) ノード4、5、9、11のセル壁表面の温度変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



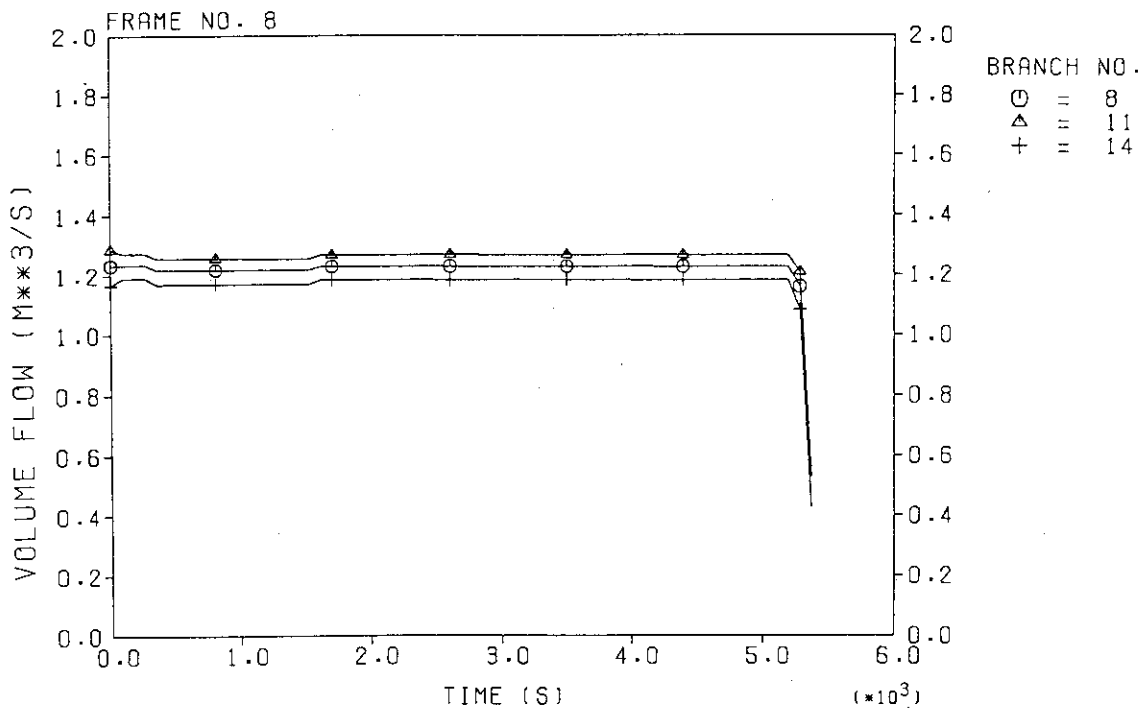
(6) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁表面の温度変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



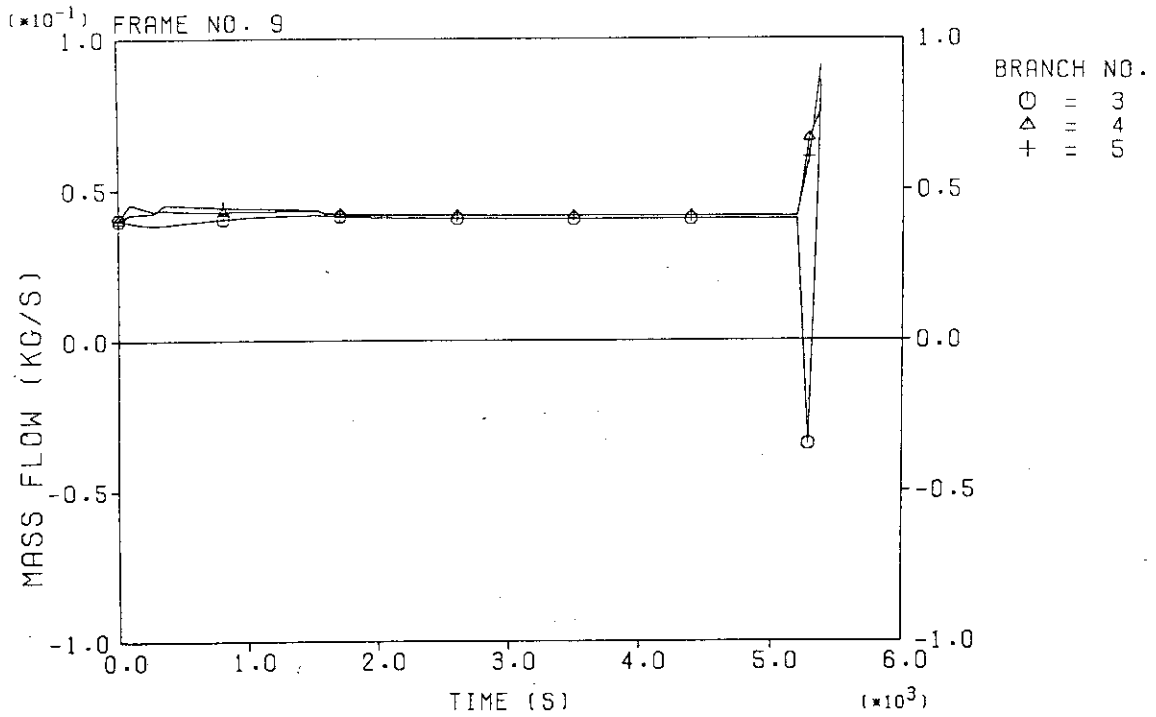
(7) ジャンクション 2、4、6 を通る流体の体積流量変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



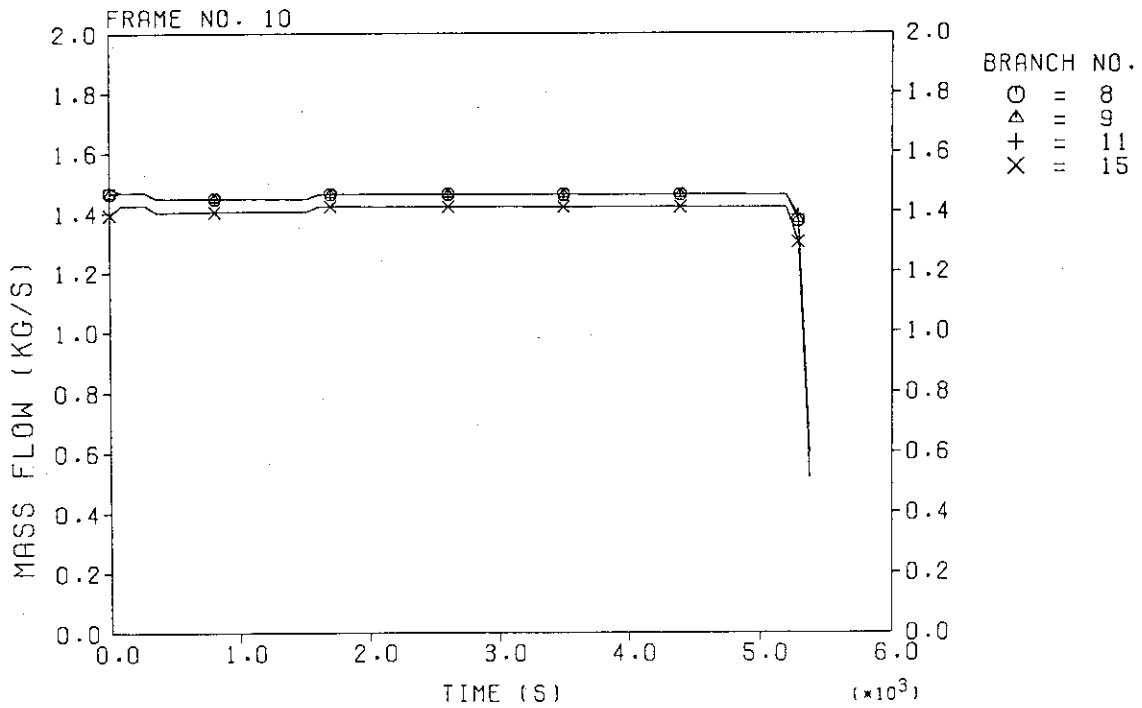
(8) ジャンクション 8、11、14 を通る流体の体積流量変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



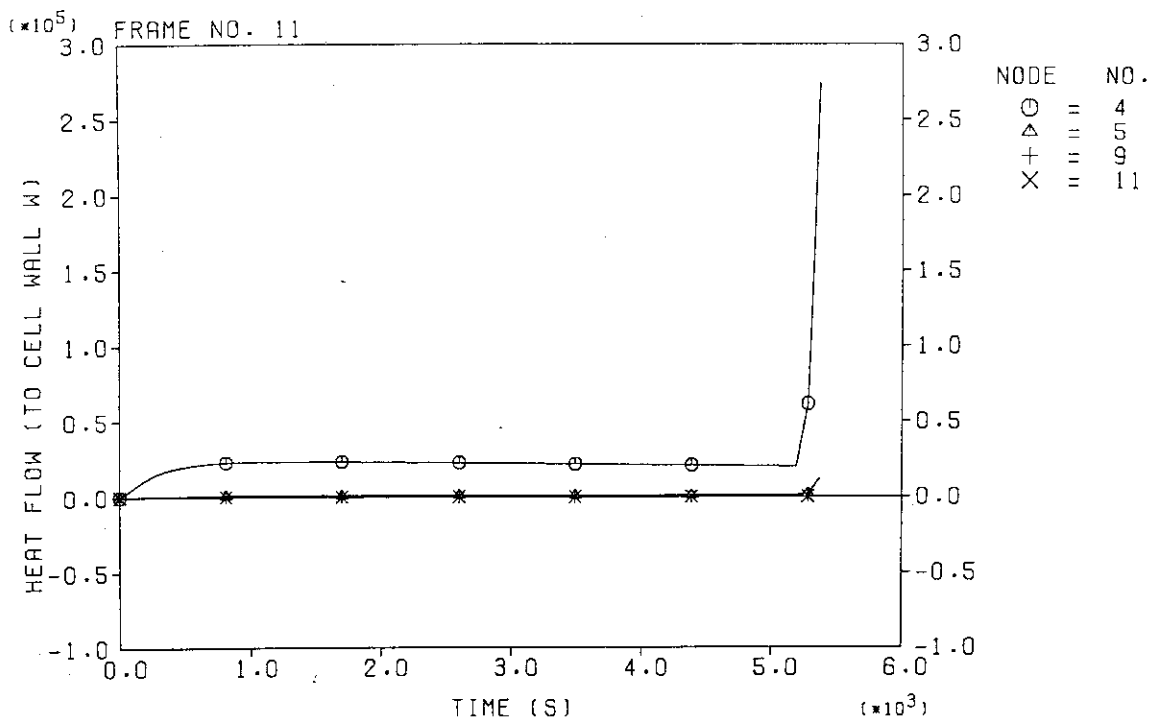
(9) ジャンクション3、4、5を通る流体の質量流量変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



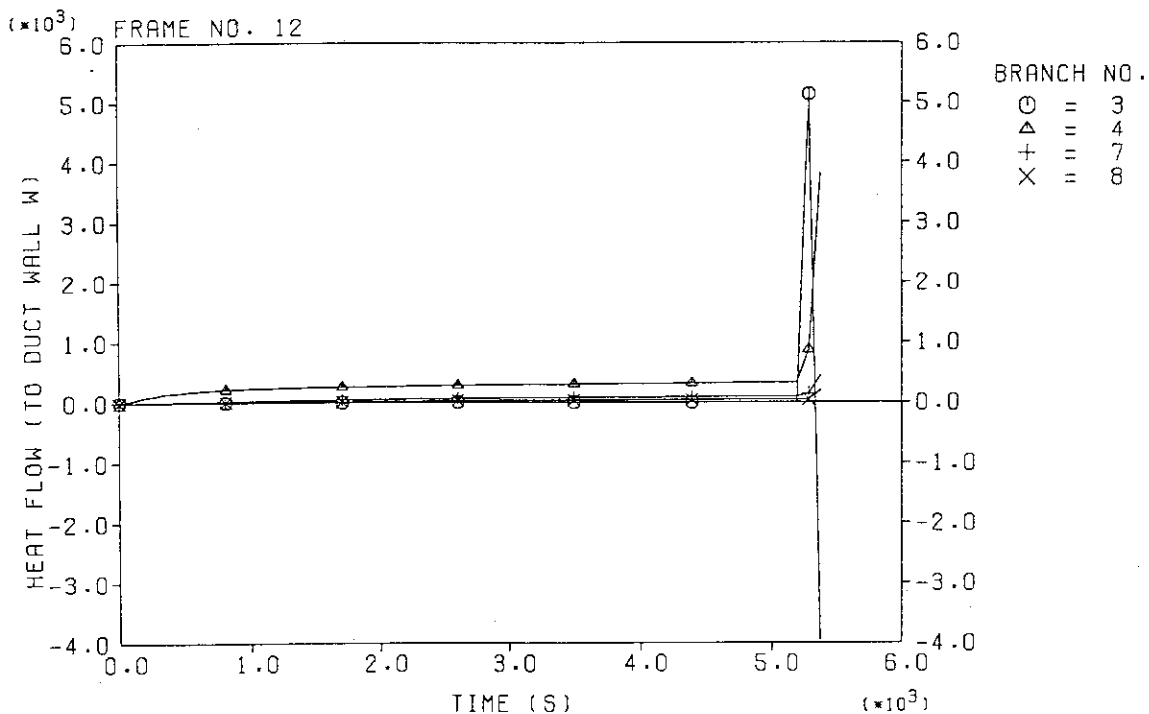
(10) ジャンクション8、9、11、15を通る流体の質量流量変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



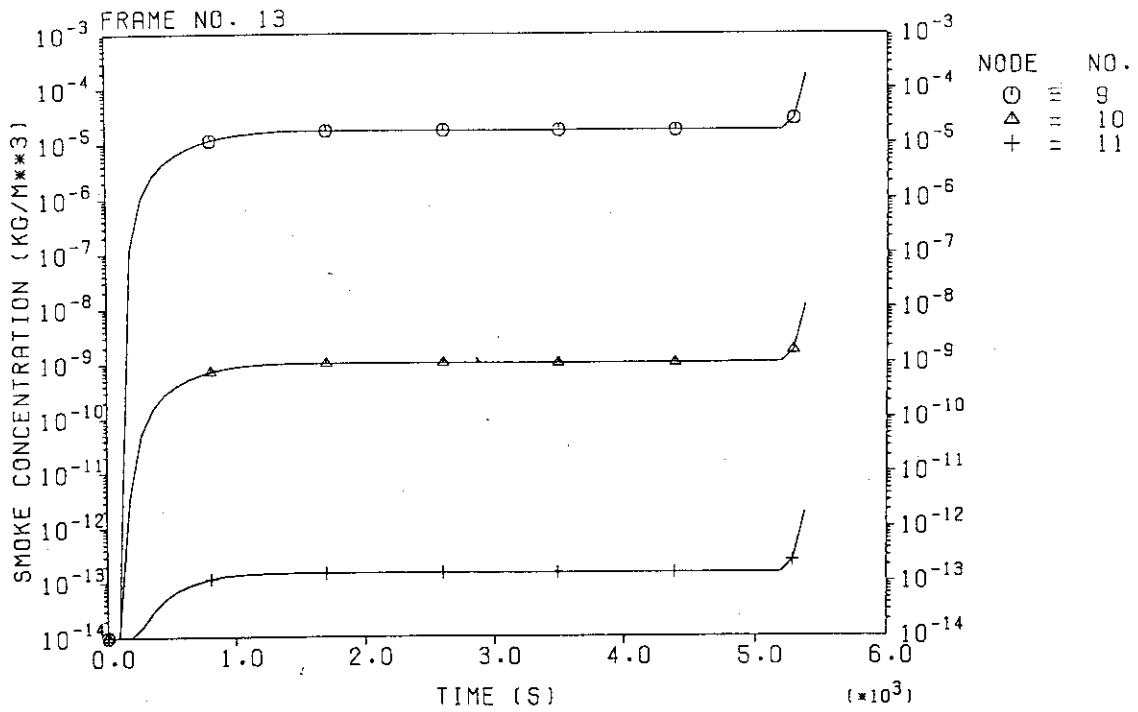
(11) ノード4、5、9、11のセル壁に入る熱流の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



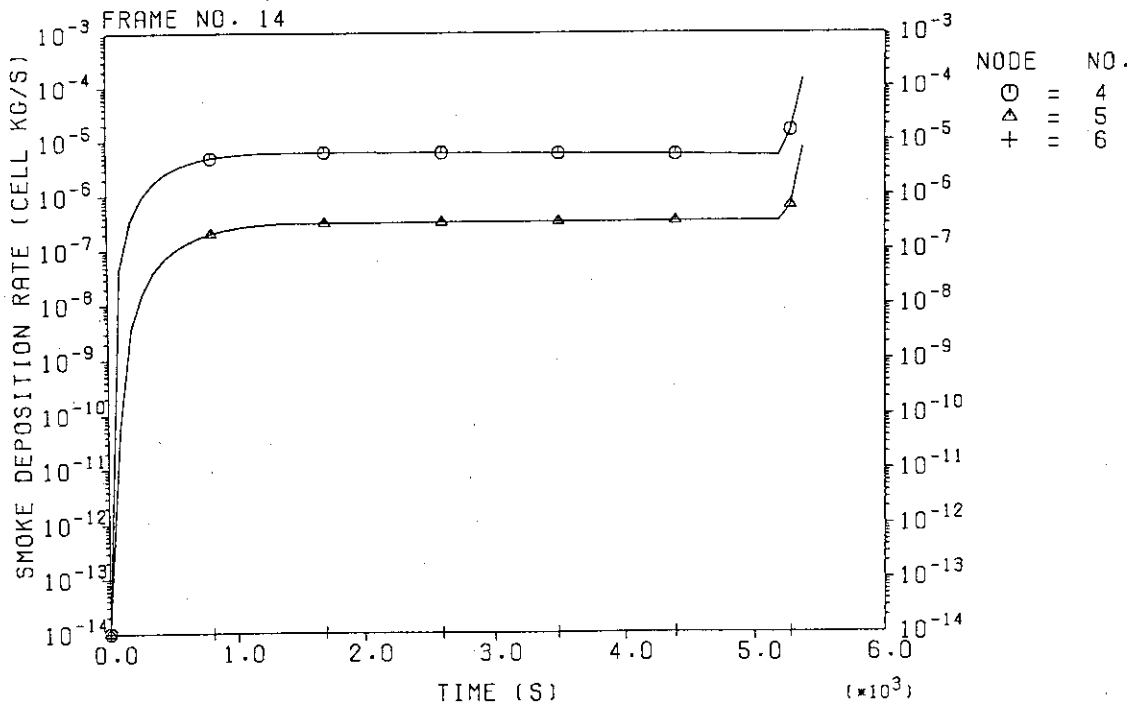
(12) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁に入る熱流の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



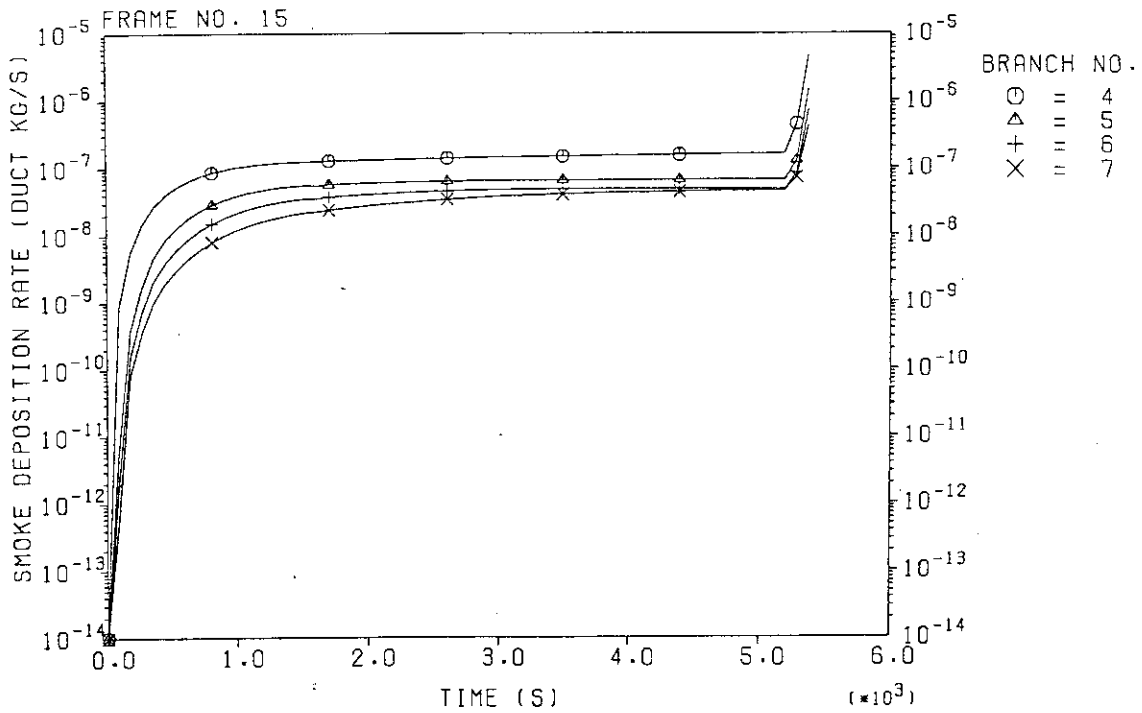
(13) ノード9、10、11 (HEPAフィルタ) の煤煙濃度の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



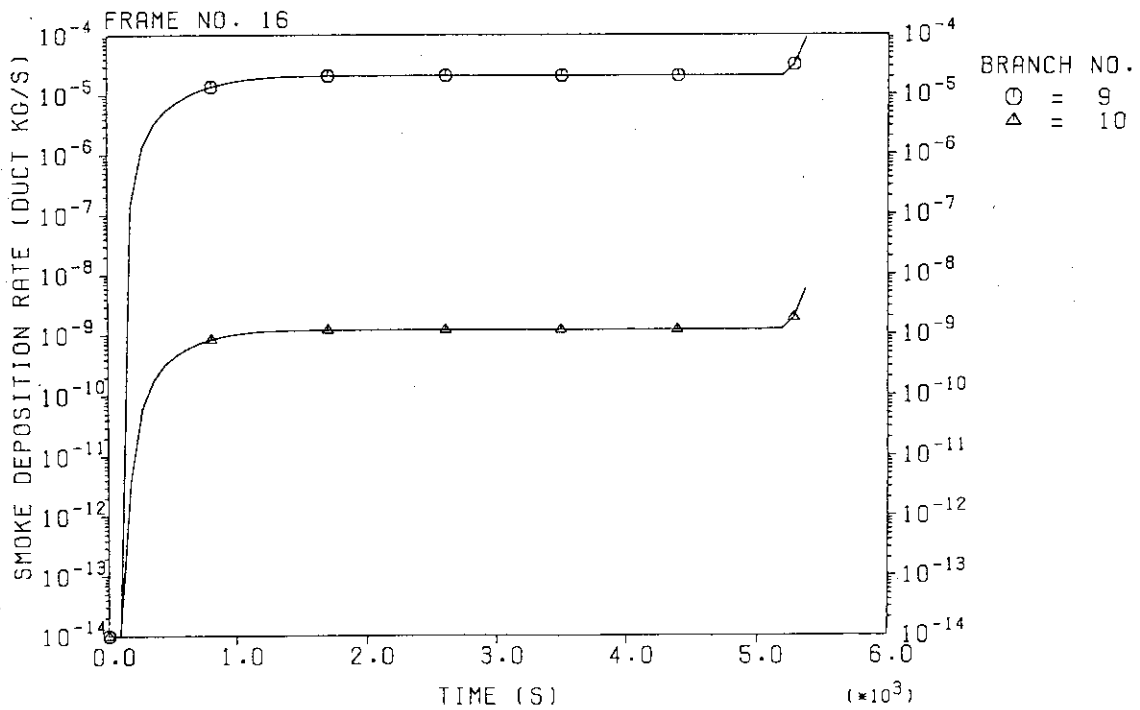
(14) ノード4、5、6内の煤煙の沈着速度の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



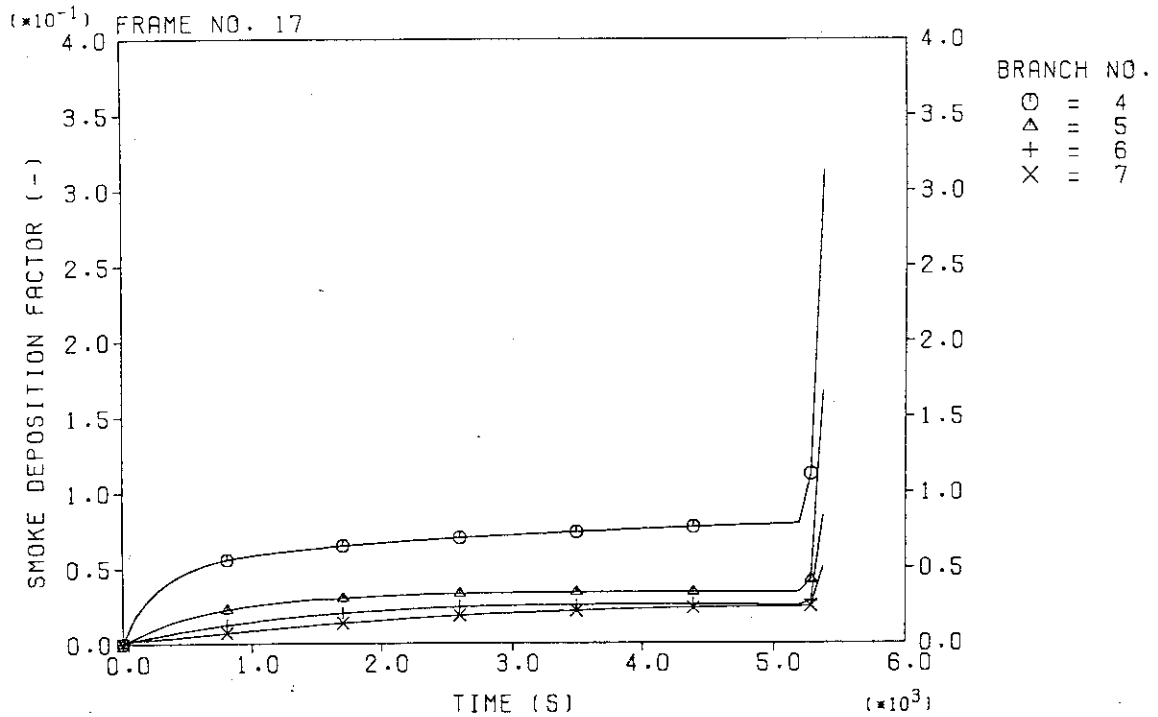
(15) ジャンクション4、5、6、7を通る煤煙の沈着速度の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



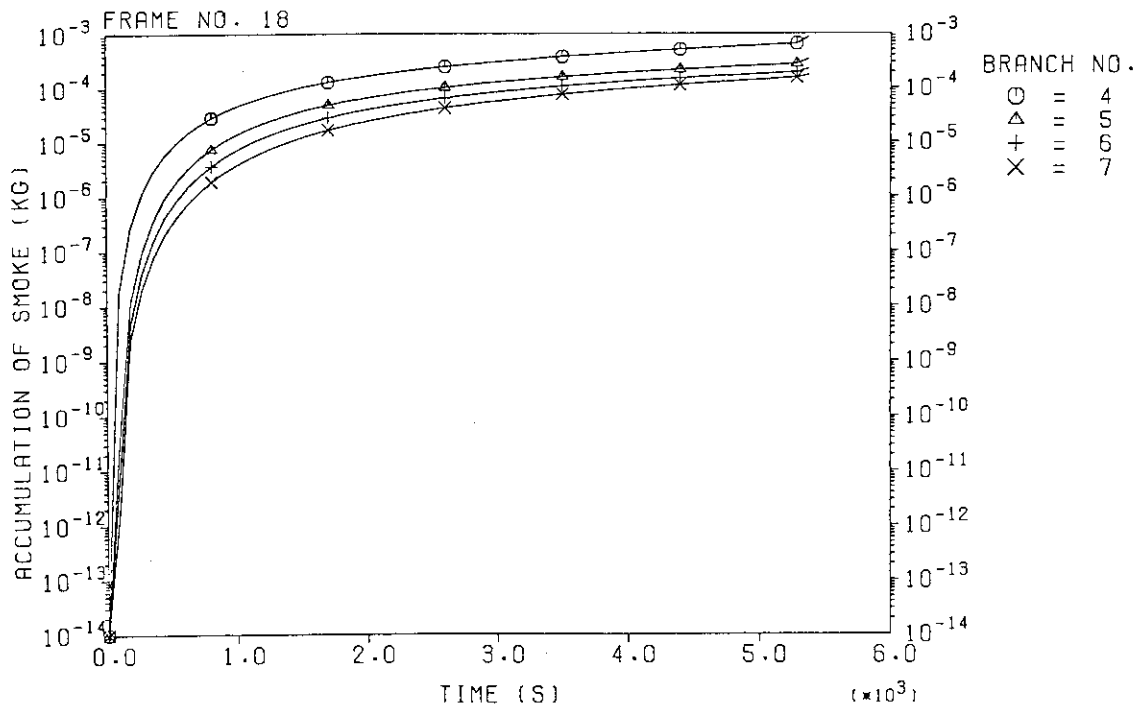
(16) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙捕集速度の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



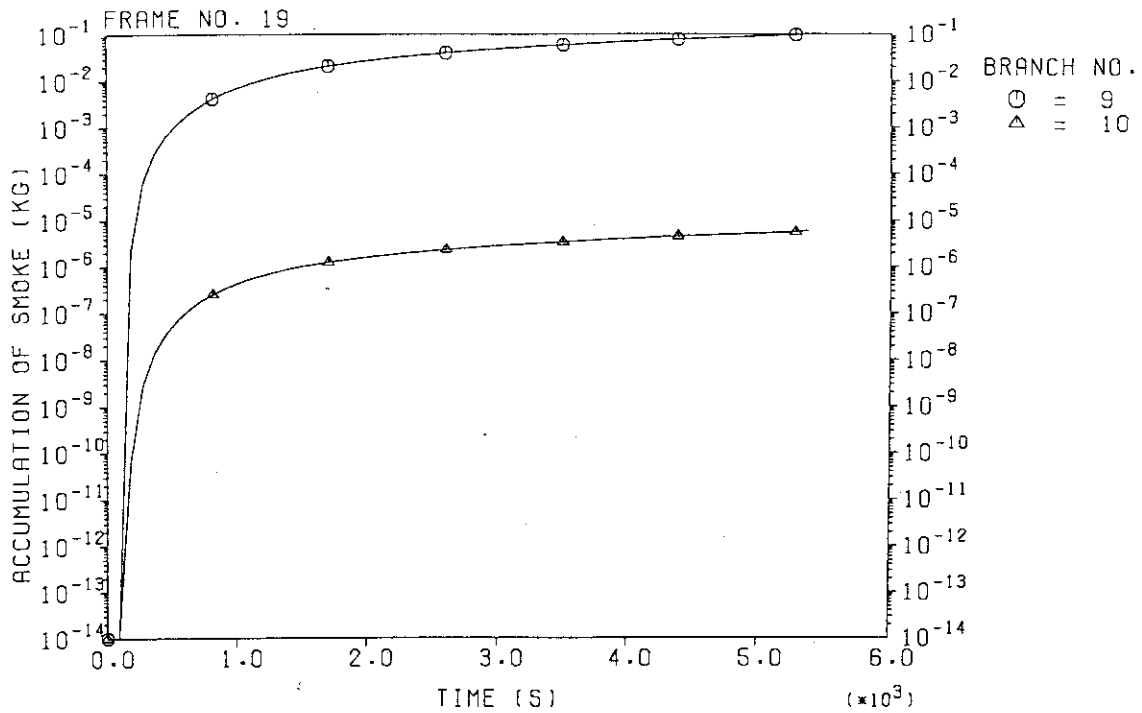
(17) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着分率の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



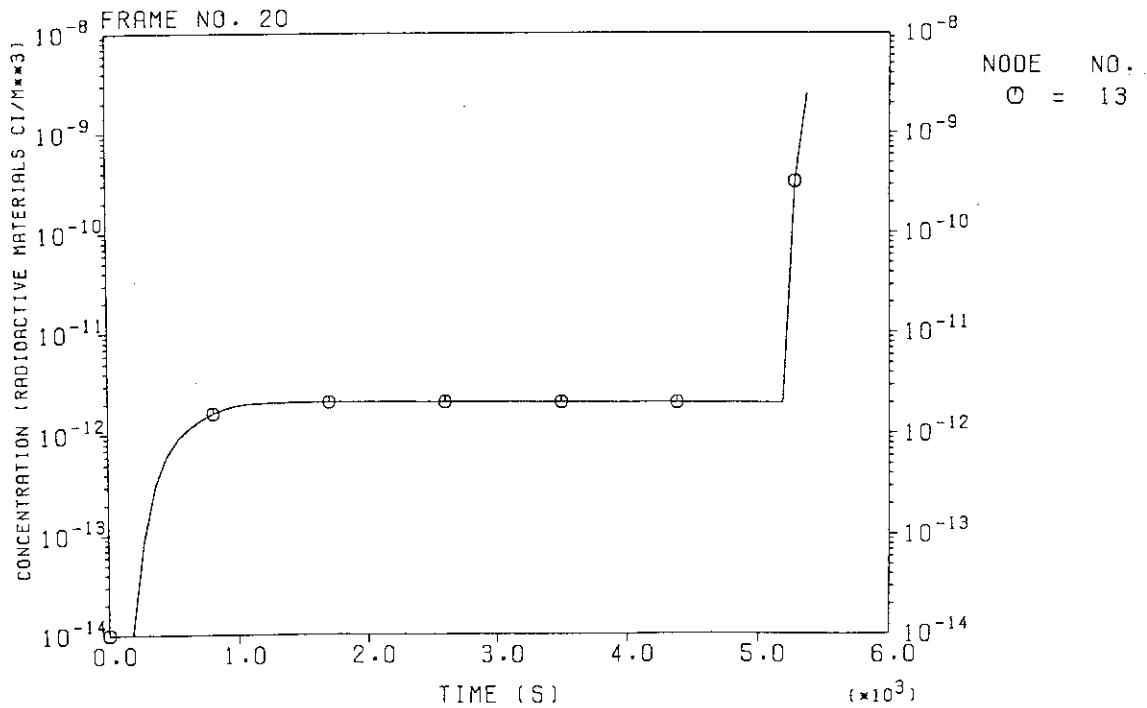
(18) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着量の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



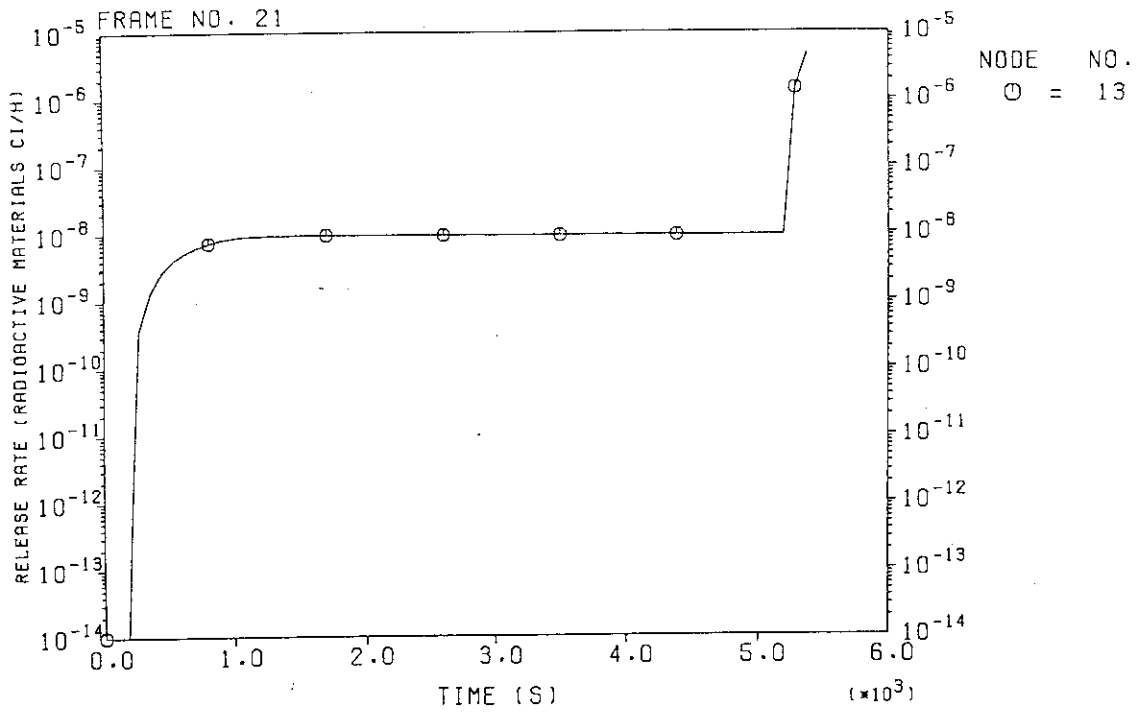
(19) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙沈着量の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



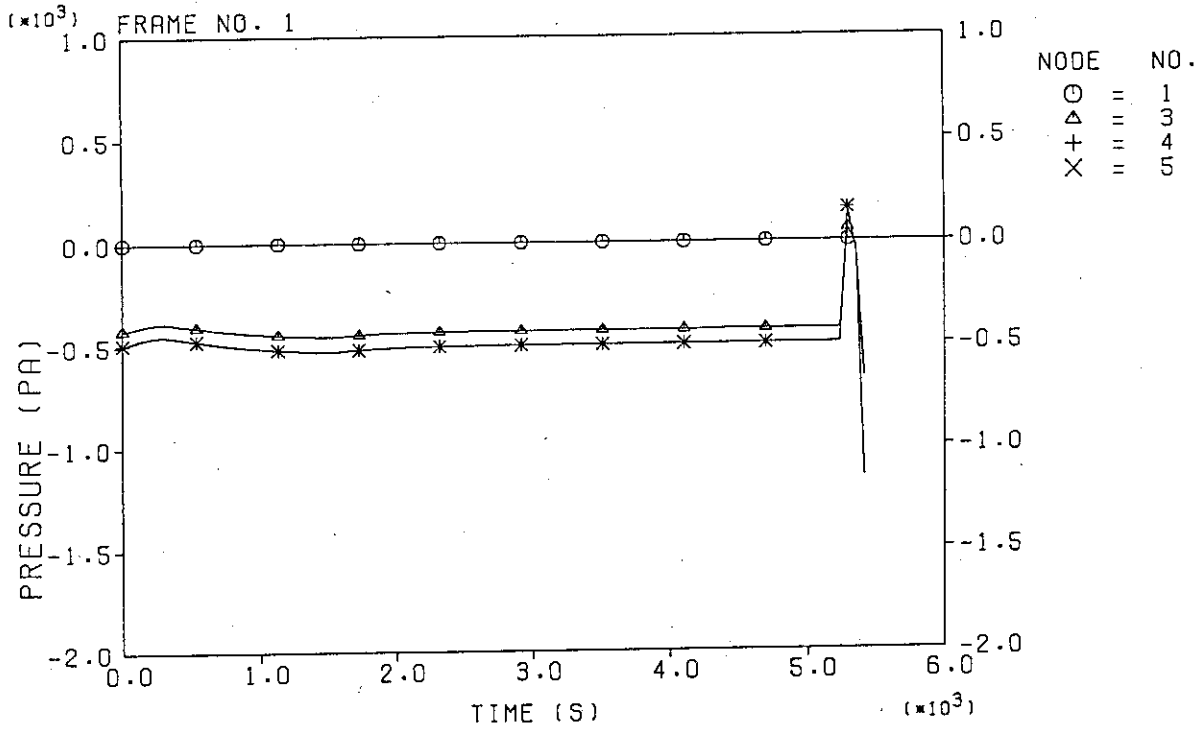
(20) ノード13 (スタック) における放射性物質の濃度変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



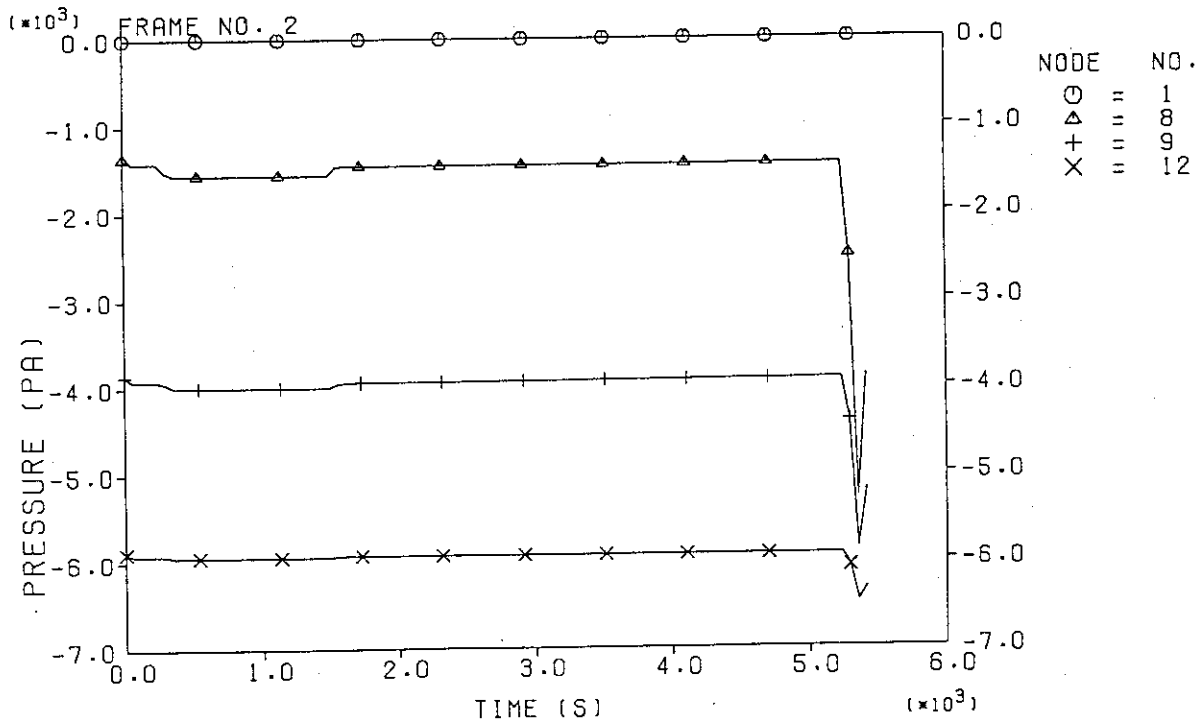
(21) ノード13 (スタック) における放射性物質の放出速度の変化 (FP-1)

FIRE ACCIDENT IN CELL



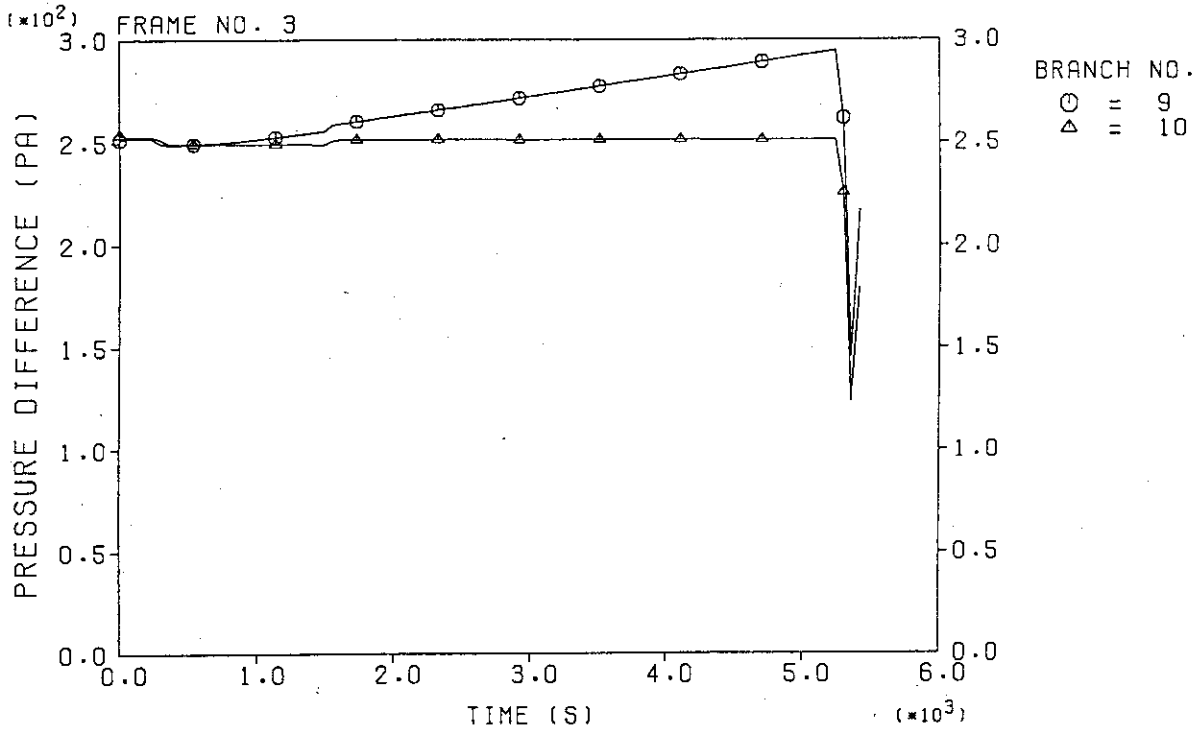
(1) ノード1、3、4、5内の圧力変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



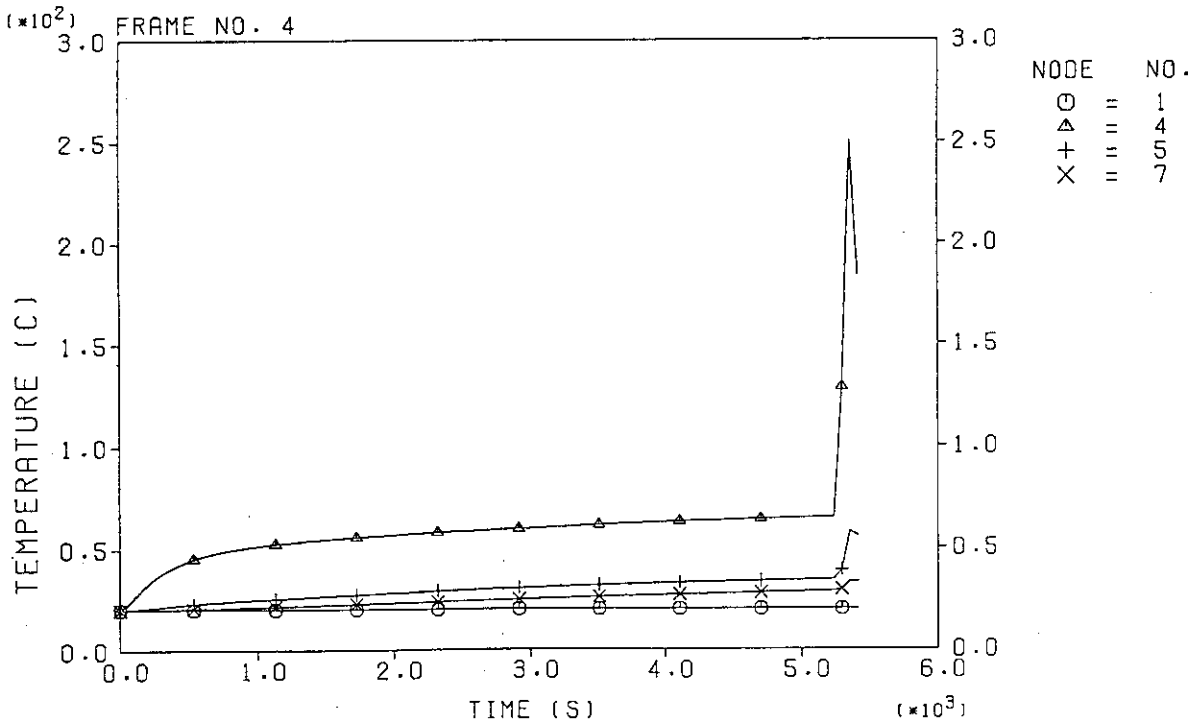
(2) ノード1、8、9、12内の圧力変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



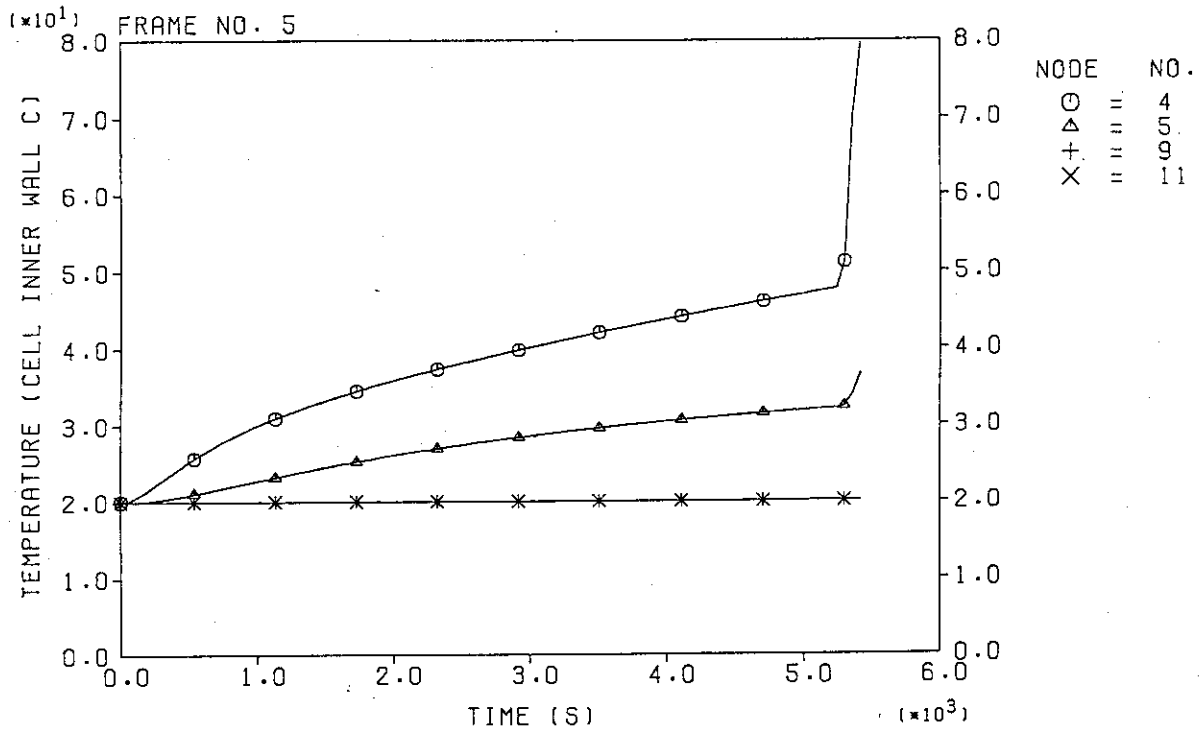
(3) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) 内の差圧変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



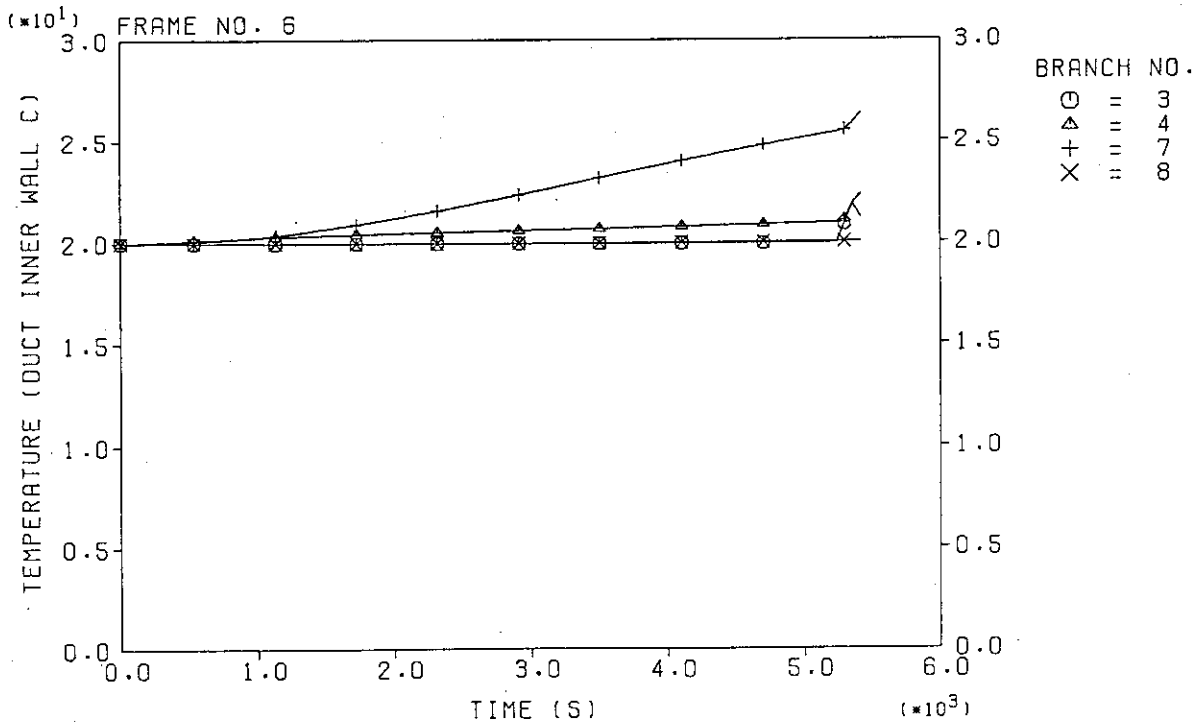
(4) ノード1、4、5、7内の気相温度変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



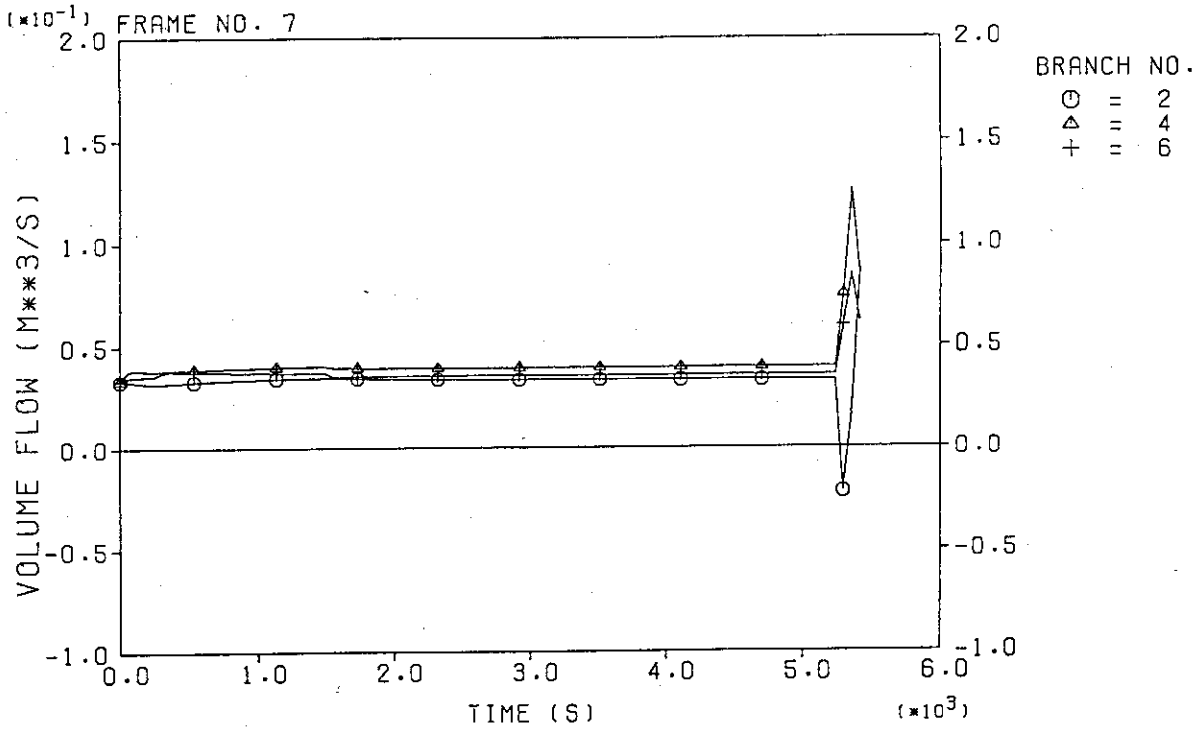
(5) ノード4、5、9、11のセル壁表面の温度変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



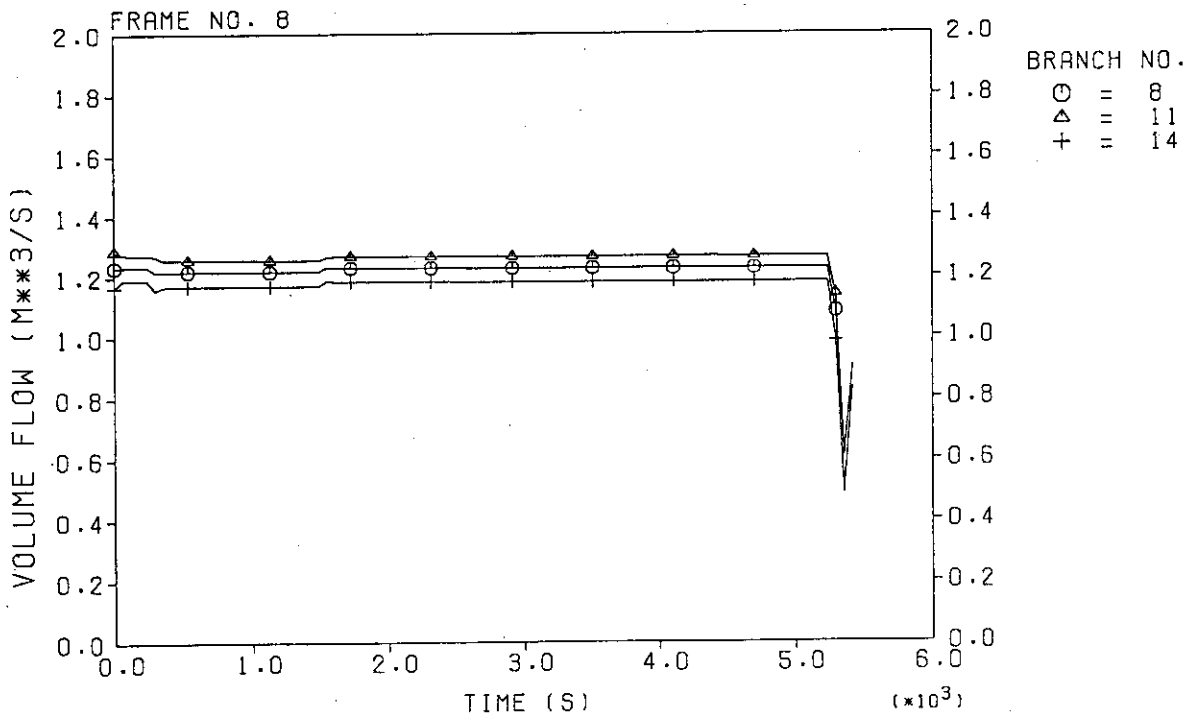
(6) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁表面の温度変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



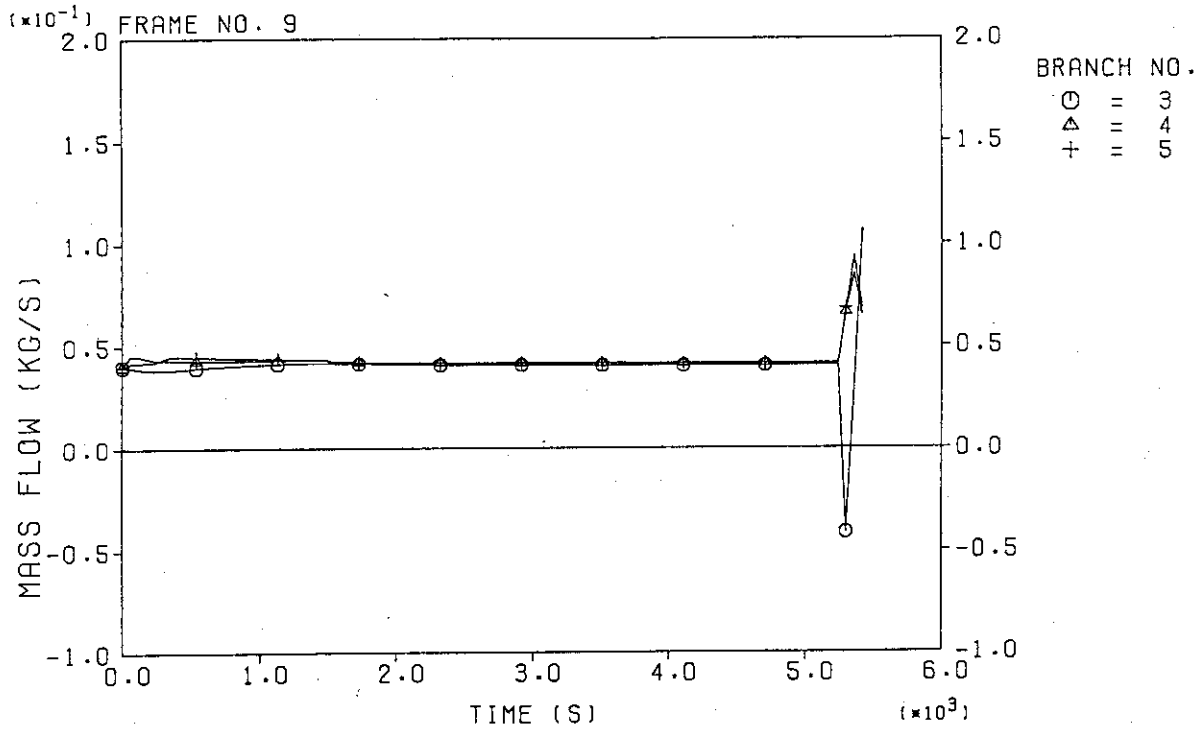
(7) ジャンクション 2、4、6 を通る流体の体積流量変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



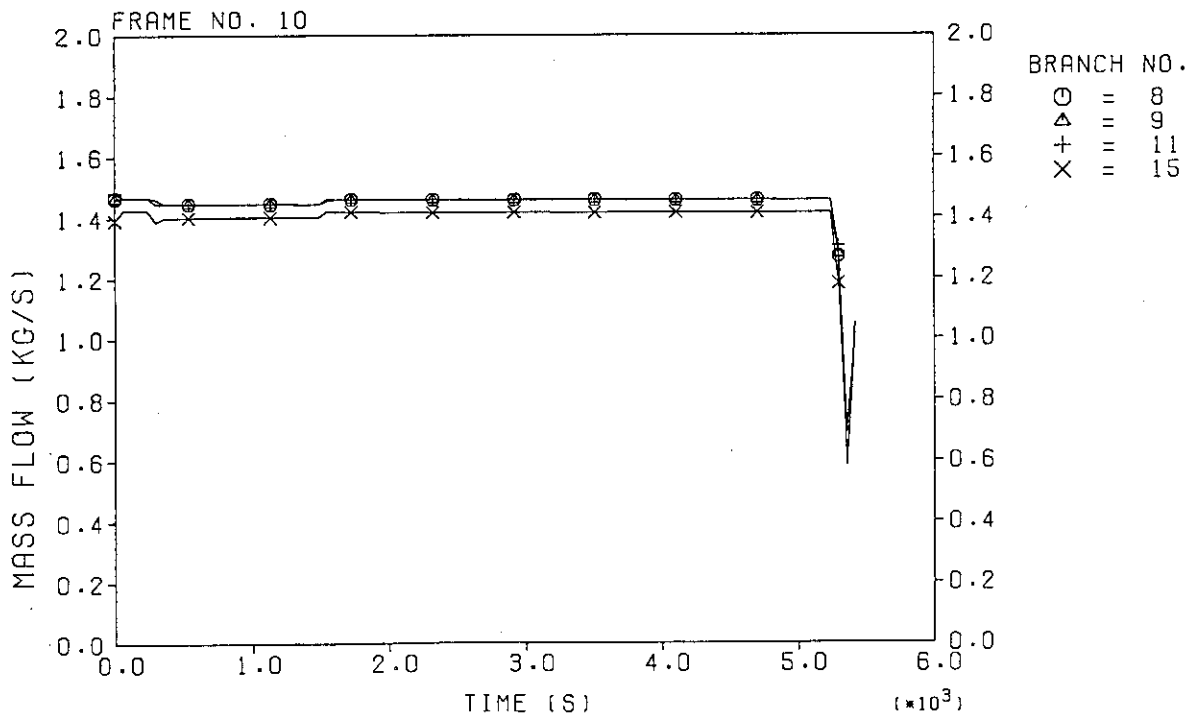
(8) ジャンクション 8、11、14 を通る流体の体積流量変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



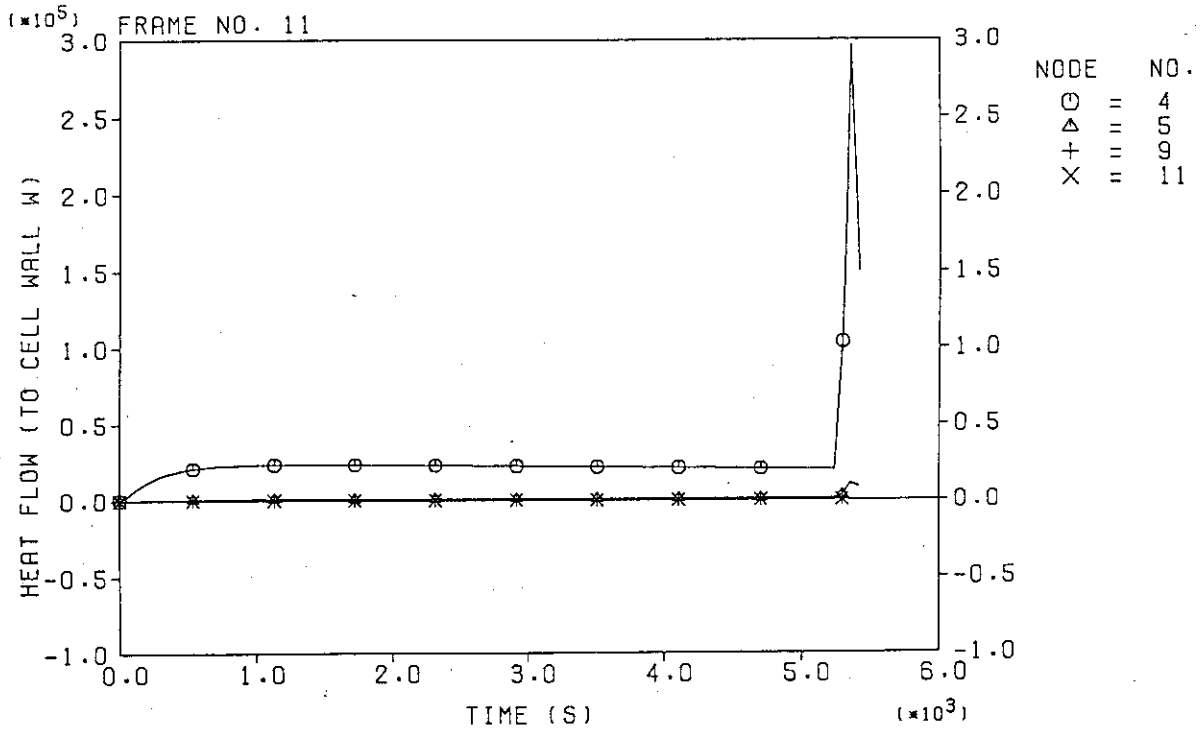
(9) ジャンクション3、4、5を通る流体の質量流量変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



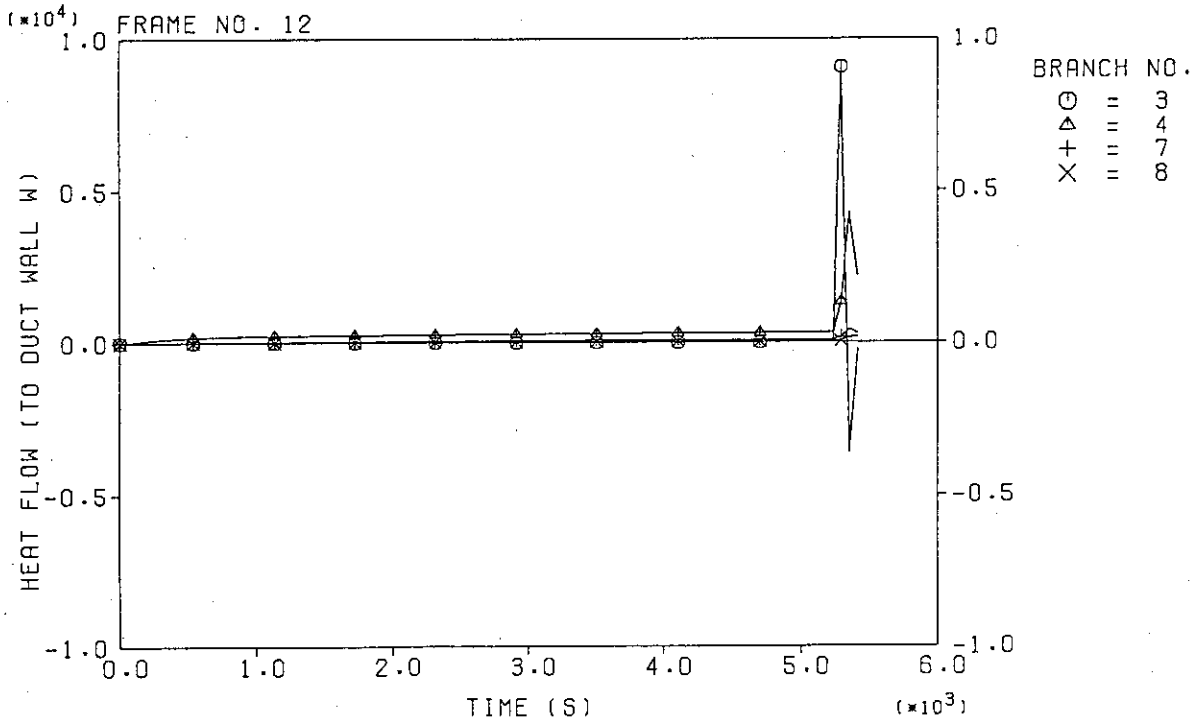
(10) ジャンクション8、9、11、15を通る流体の質量流量変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



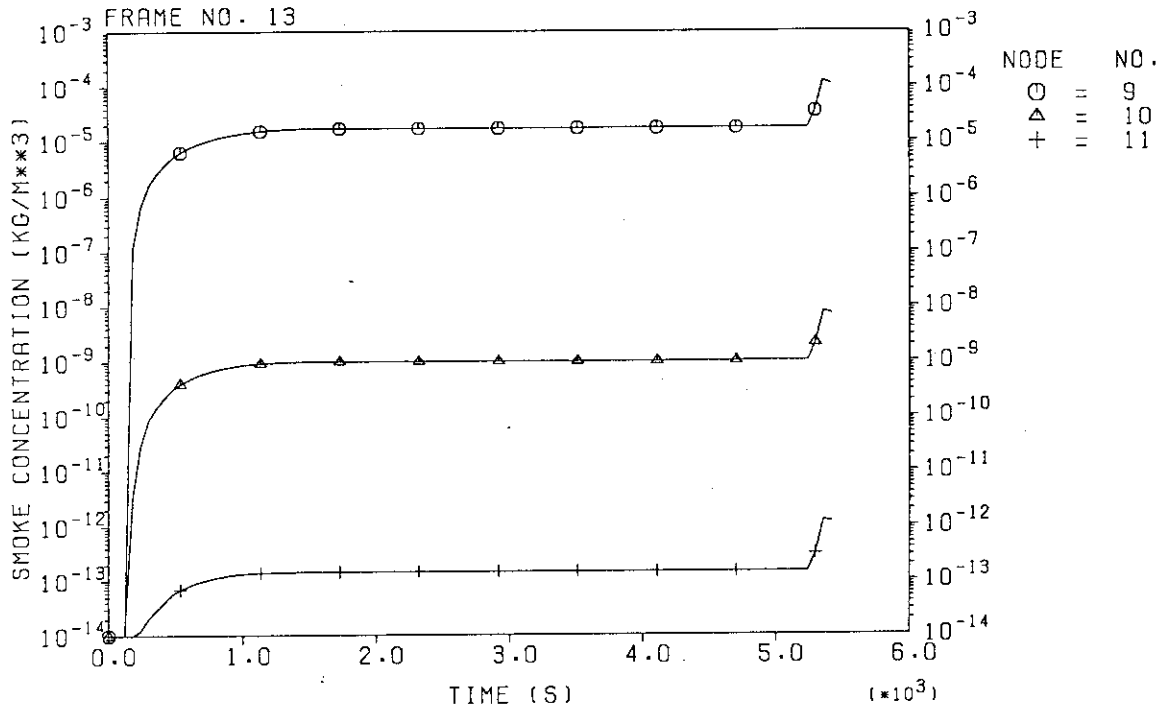
(11) ノード4、5、9、11のセル壁に入る熱流の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



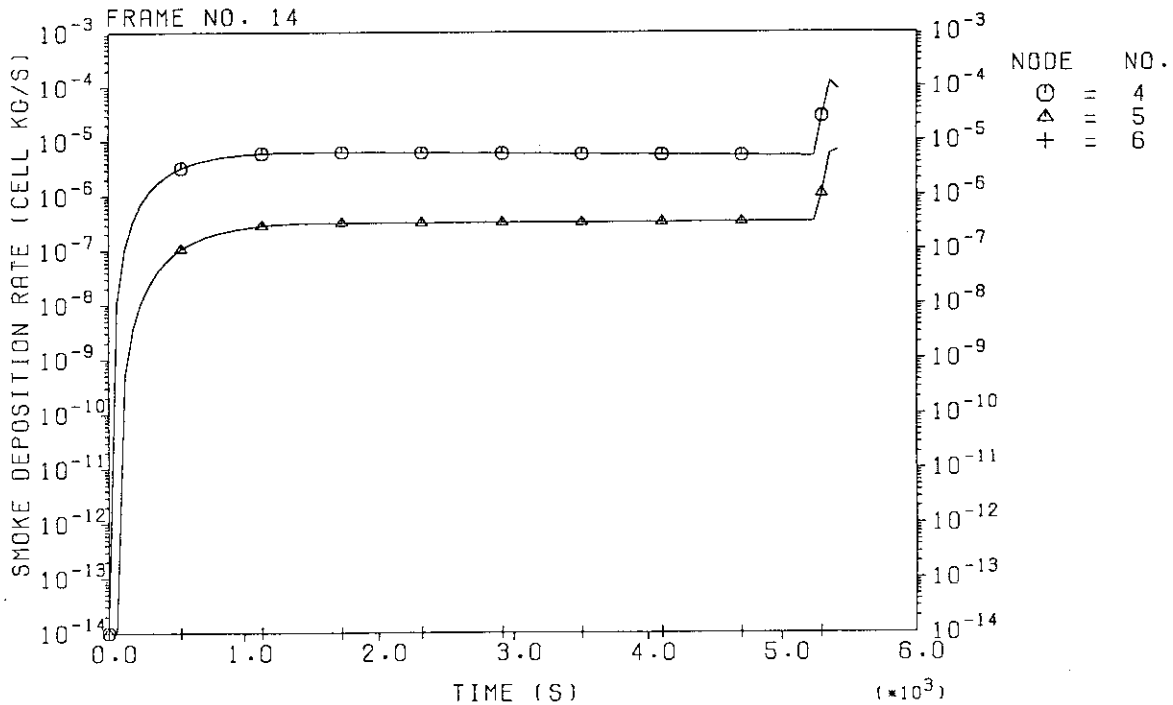
(12) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁に入る熱流の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



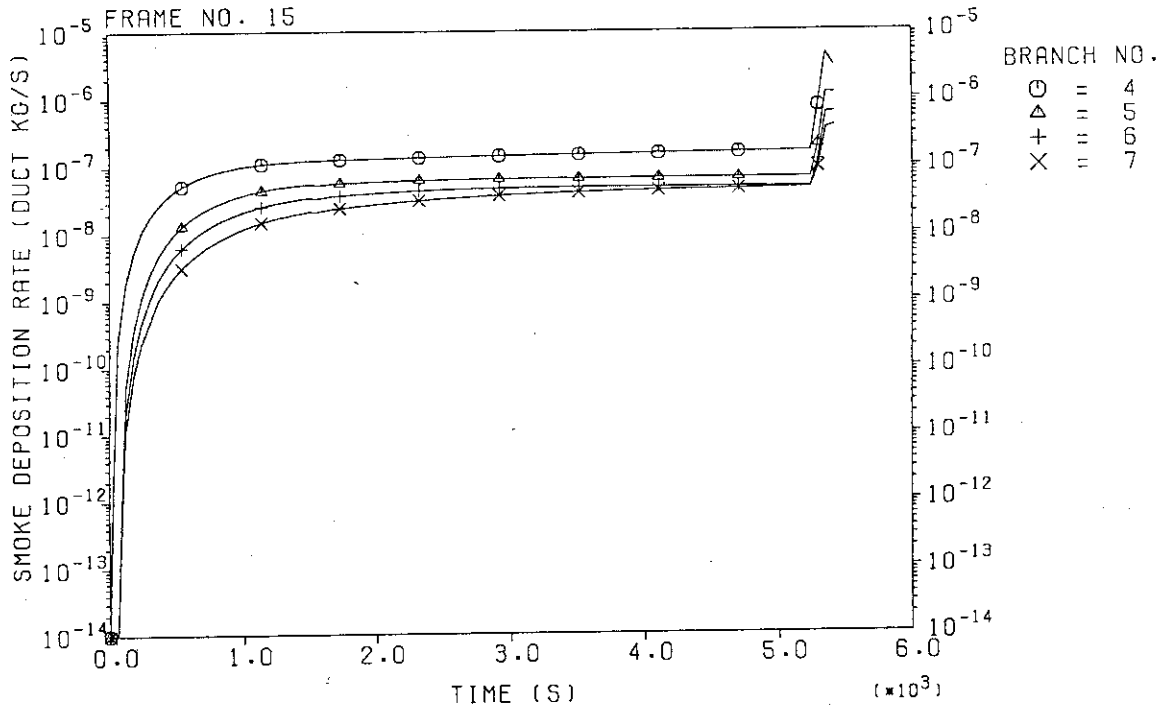
(13) ノード9、10、11 (HEPAフィルタ) の煤煙濃度の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



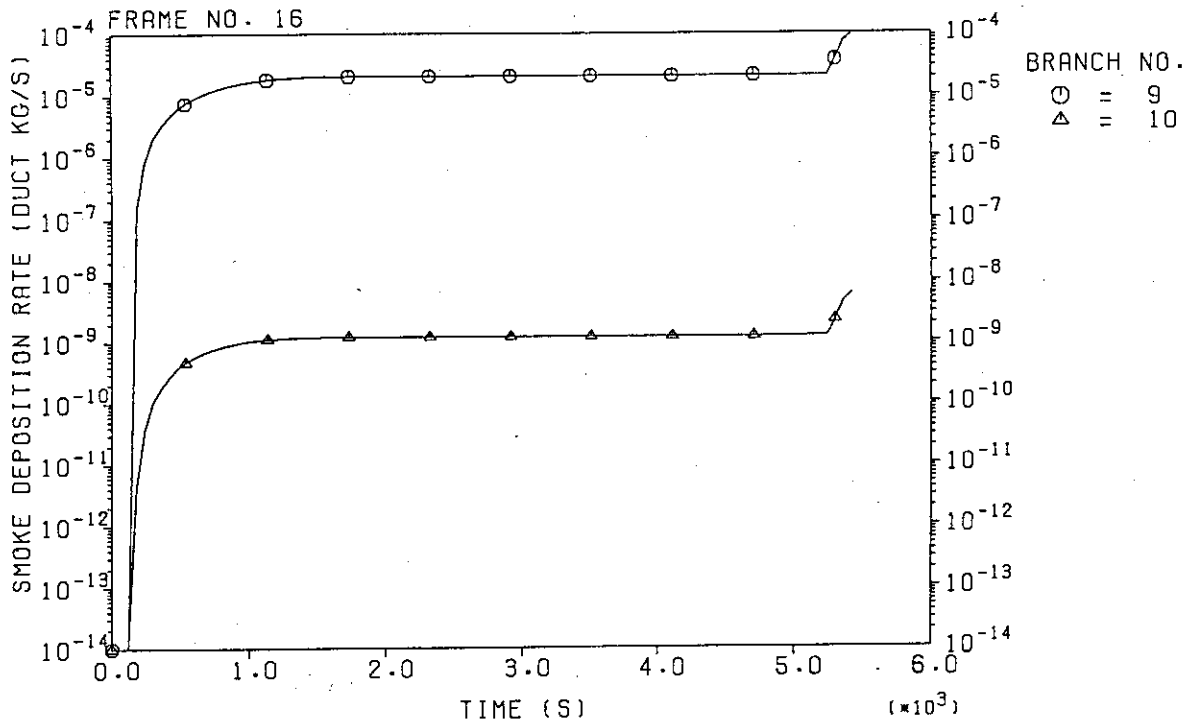
(14) ノード4、5、6内の煤煙の沈着速度の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



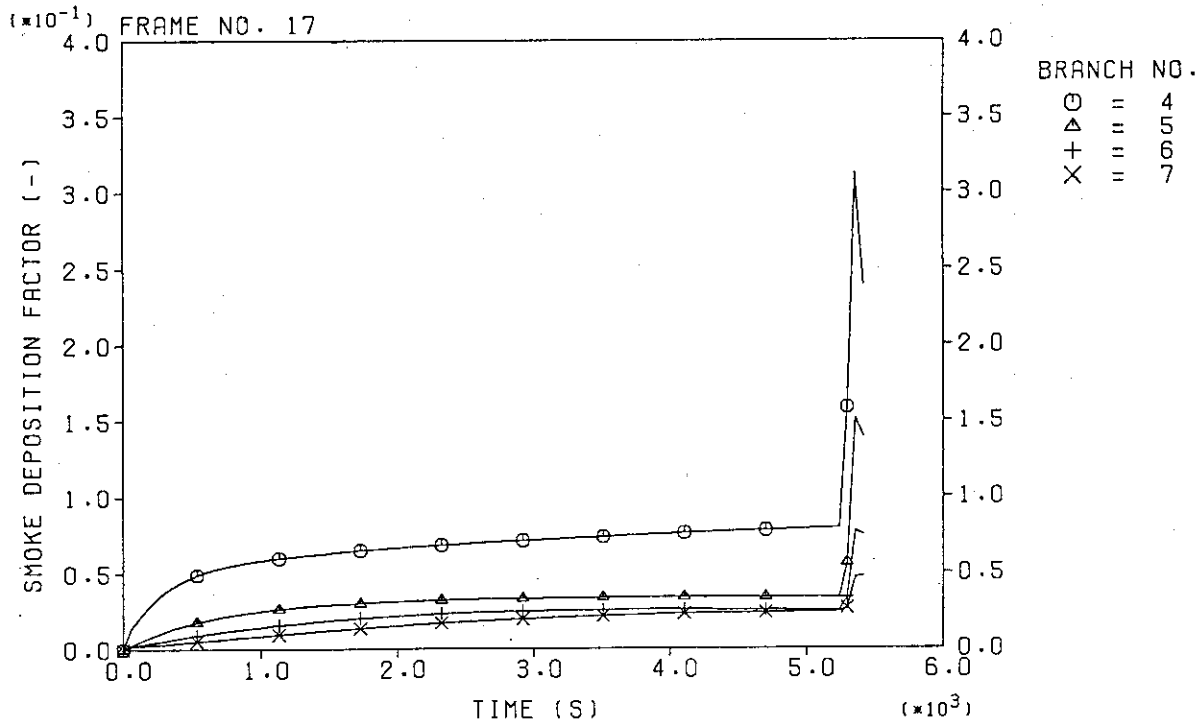
(15) ジャンクション4、5、6、7を通る煤煙の沈着速度の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



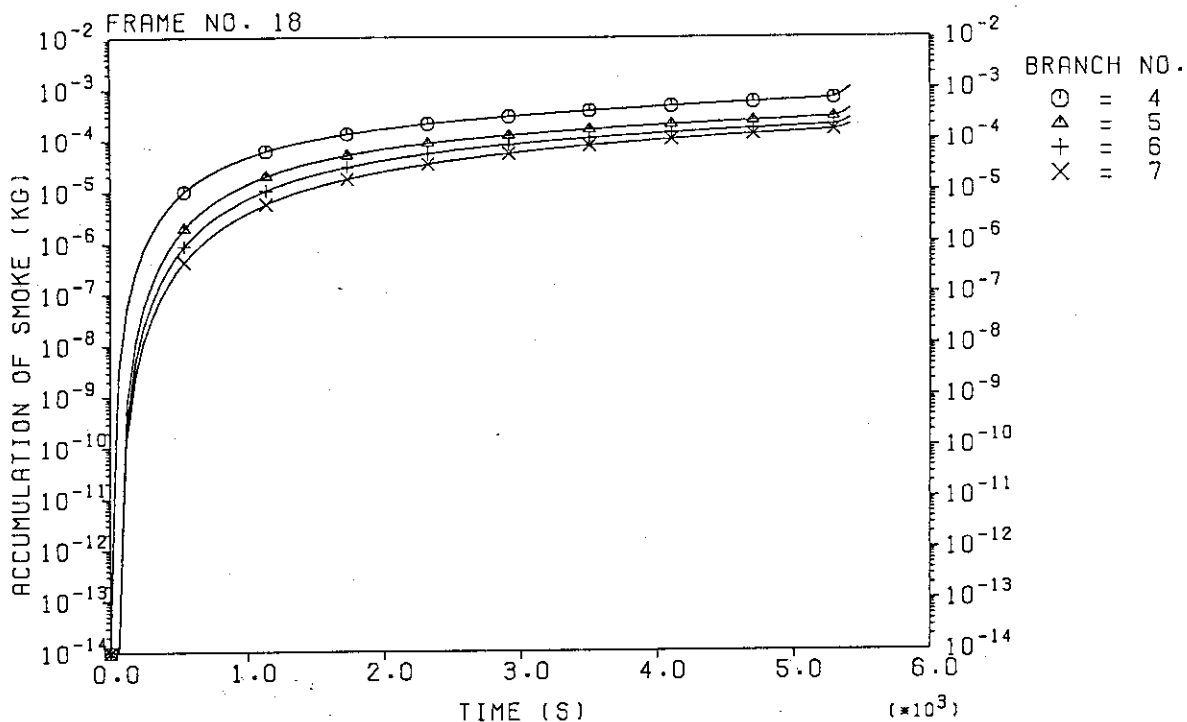
(16) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙捕集速度の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



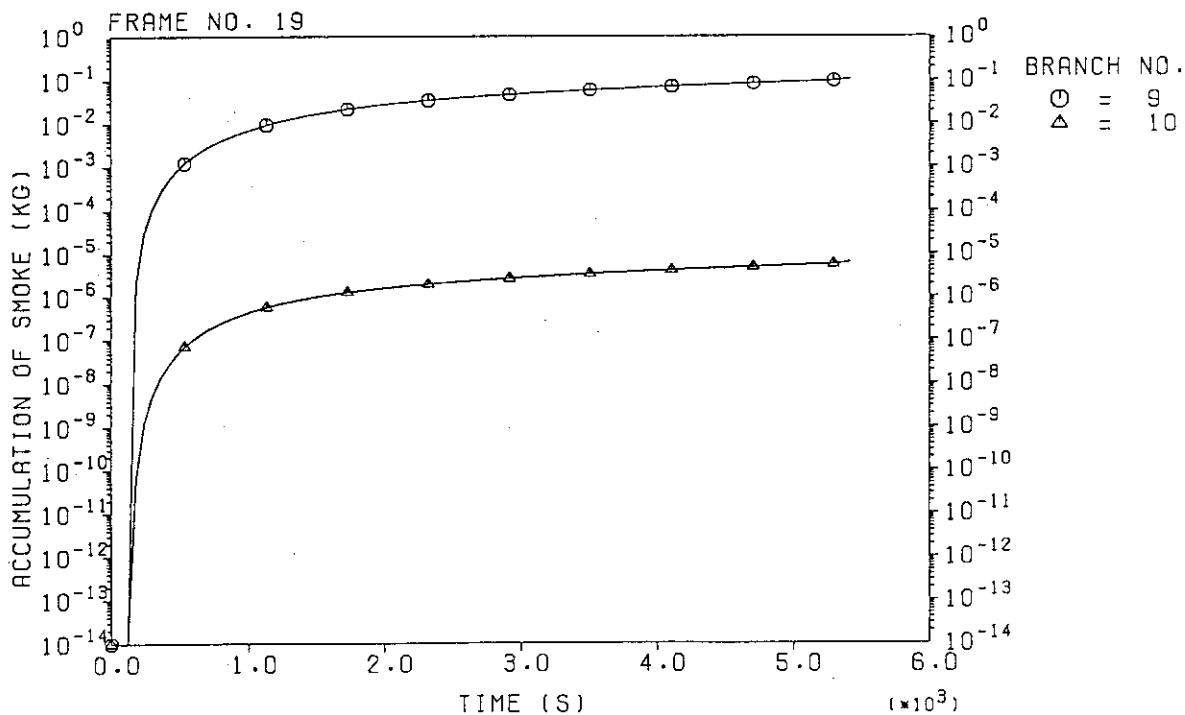
(17) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着分率の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



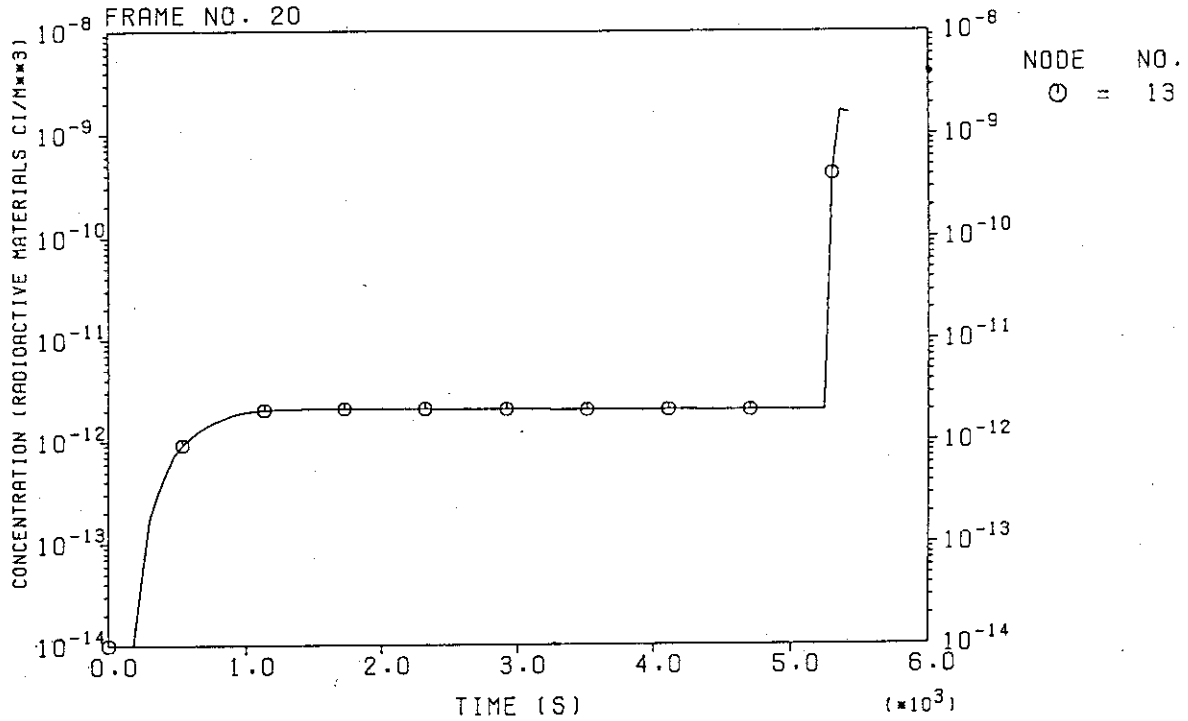
(18) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着量の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



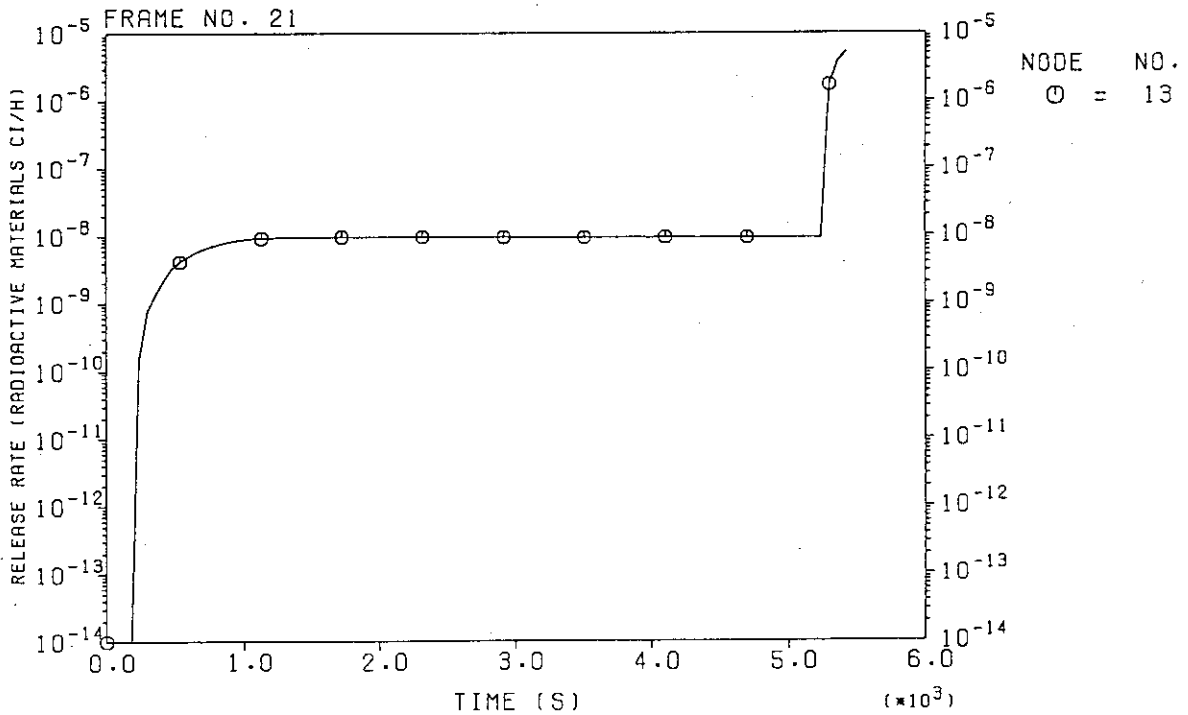
(19) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙沈着量の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



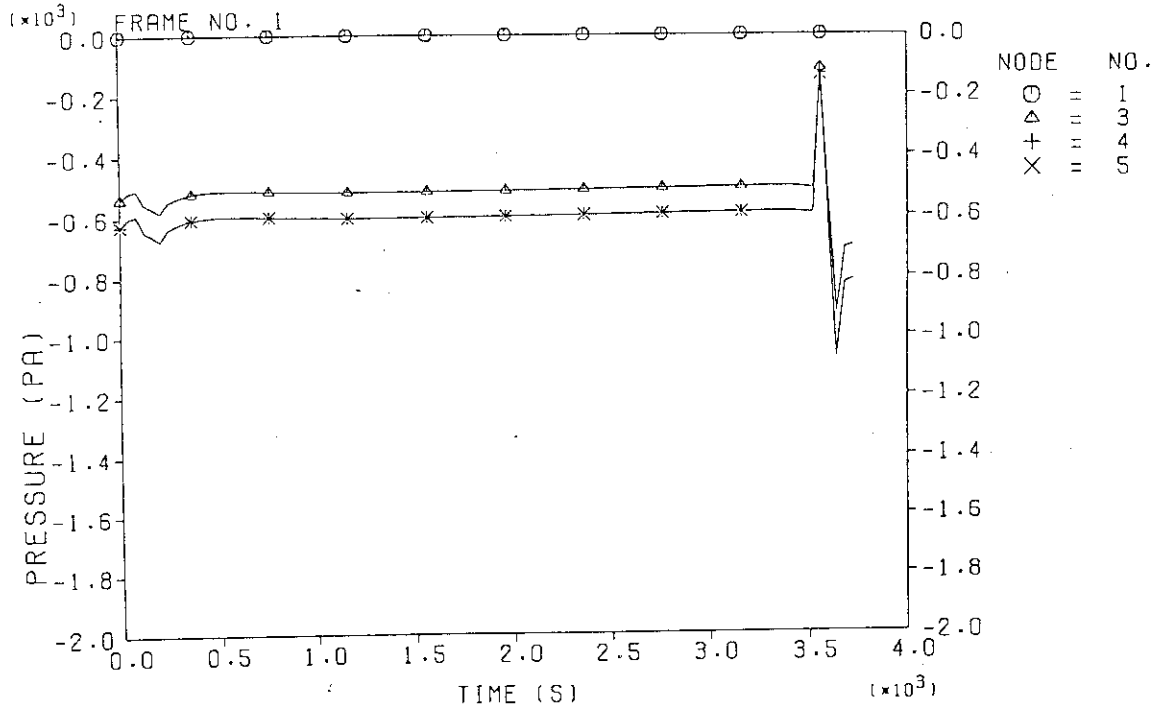
(20) ノード13 (スタック) における放射性物質の濃度変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



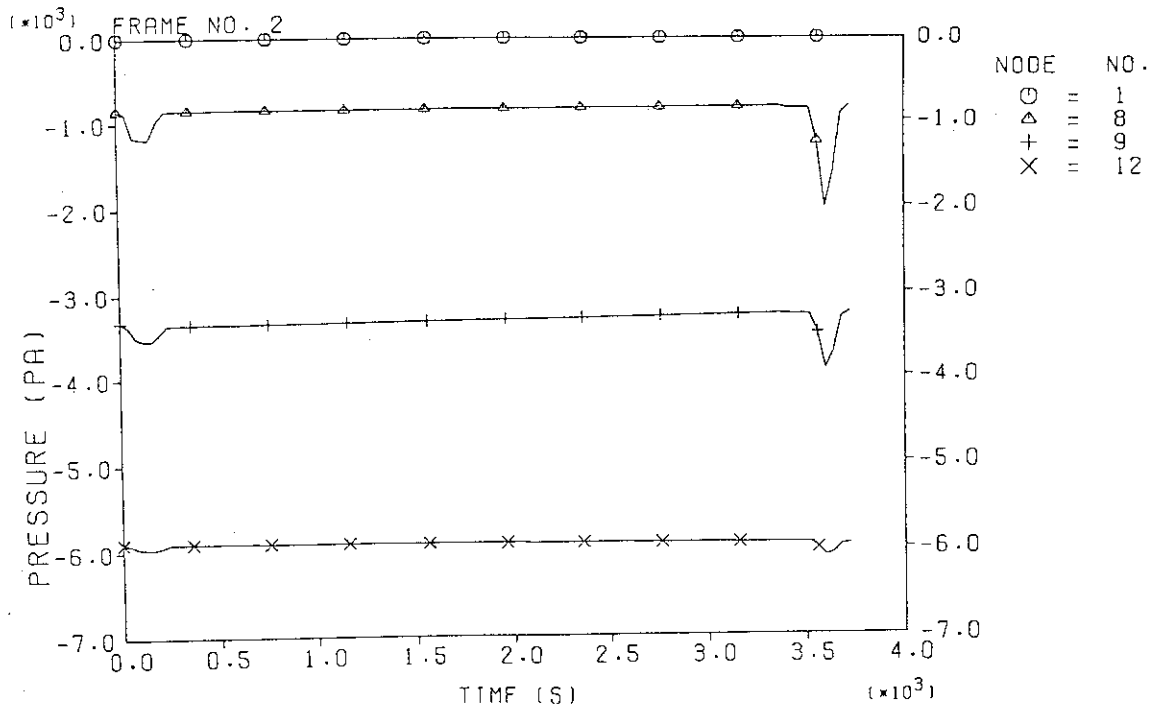
(21) ノード13 (スタック) における放射性物質の放出速度の変化 (FP-2)

FIRE ACCIDENT IN CELL



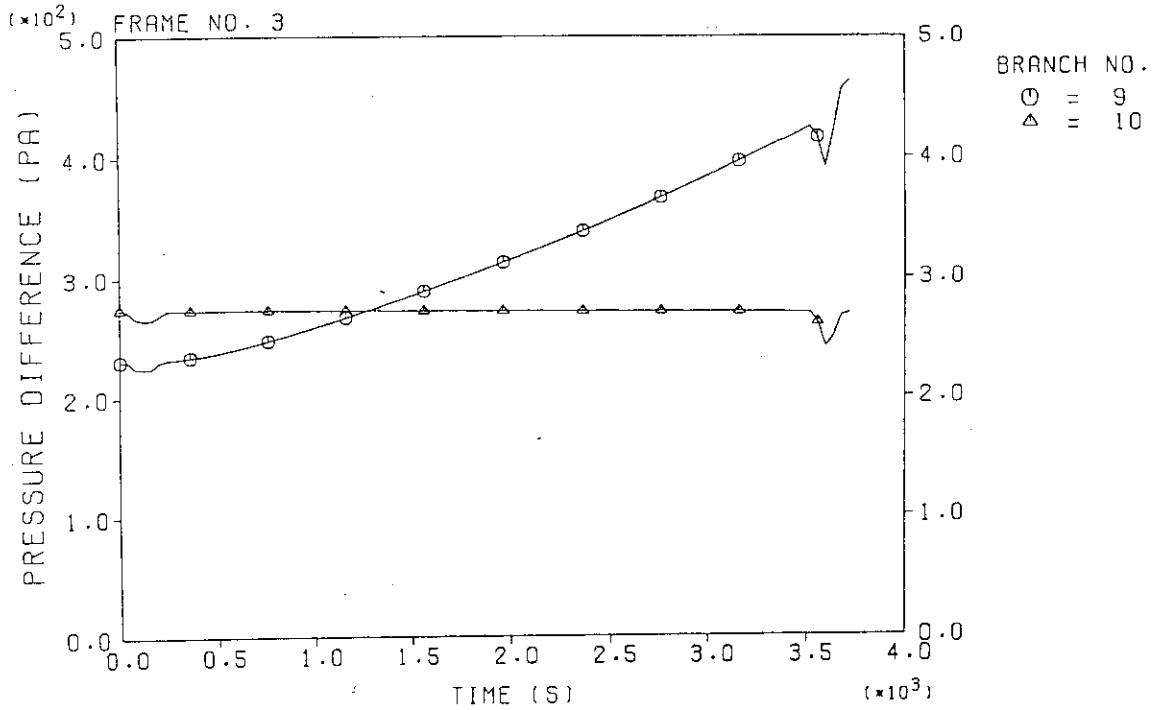
(1) ノード1、3、4、5内の圧力変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



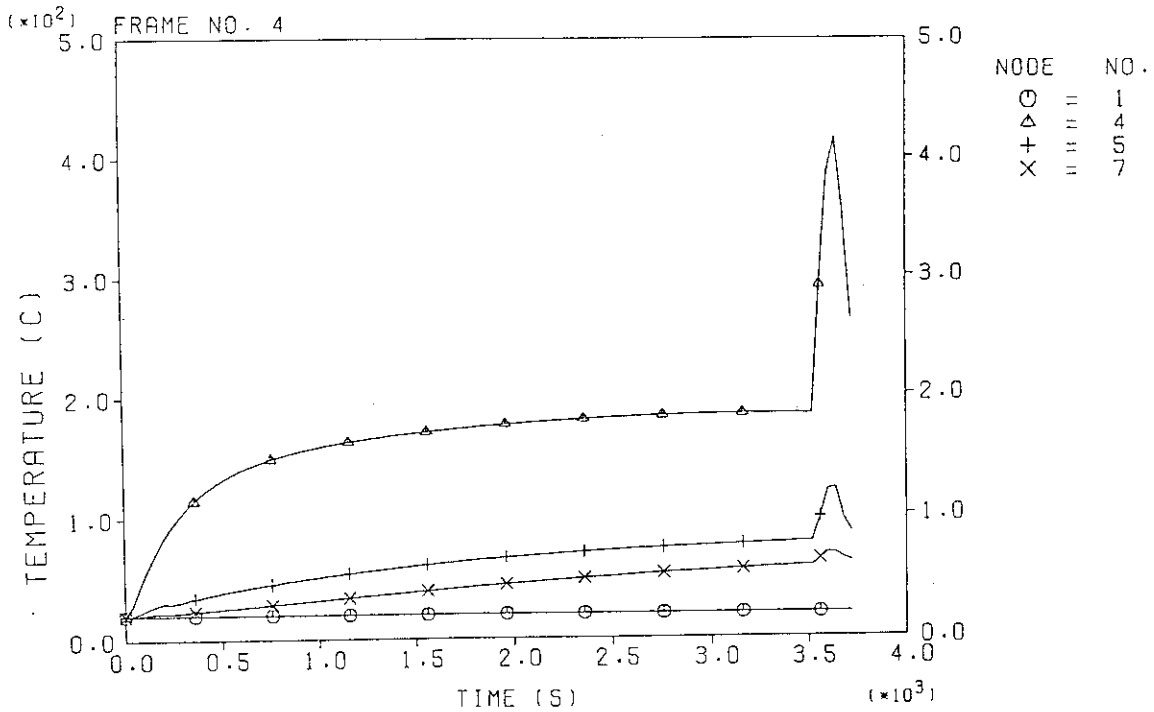
(2) ノード1、8、9、12内の圧力変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



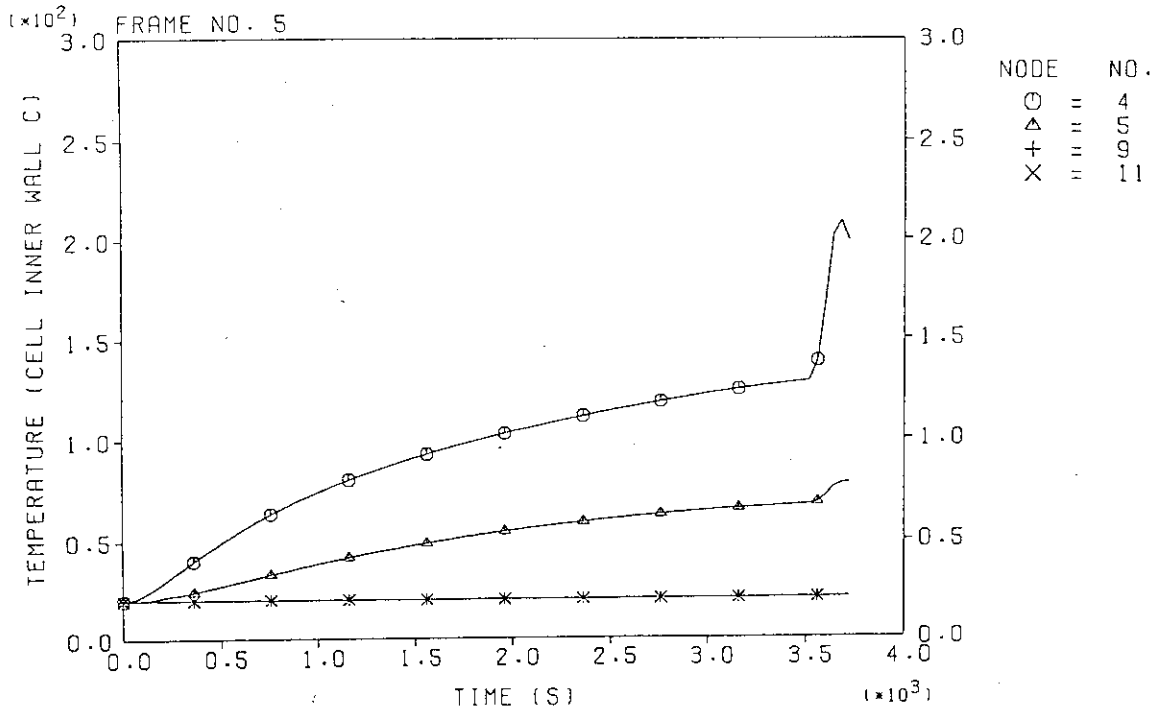
(3) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) 内の差圧変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



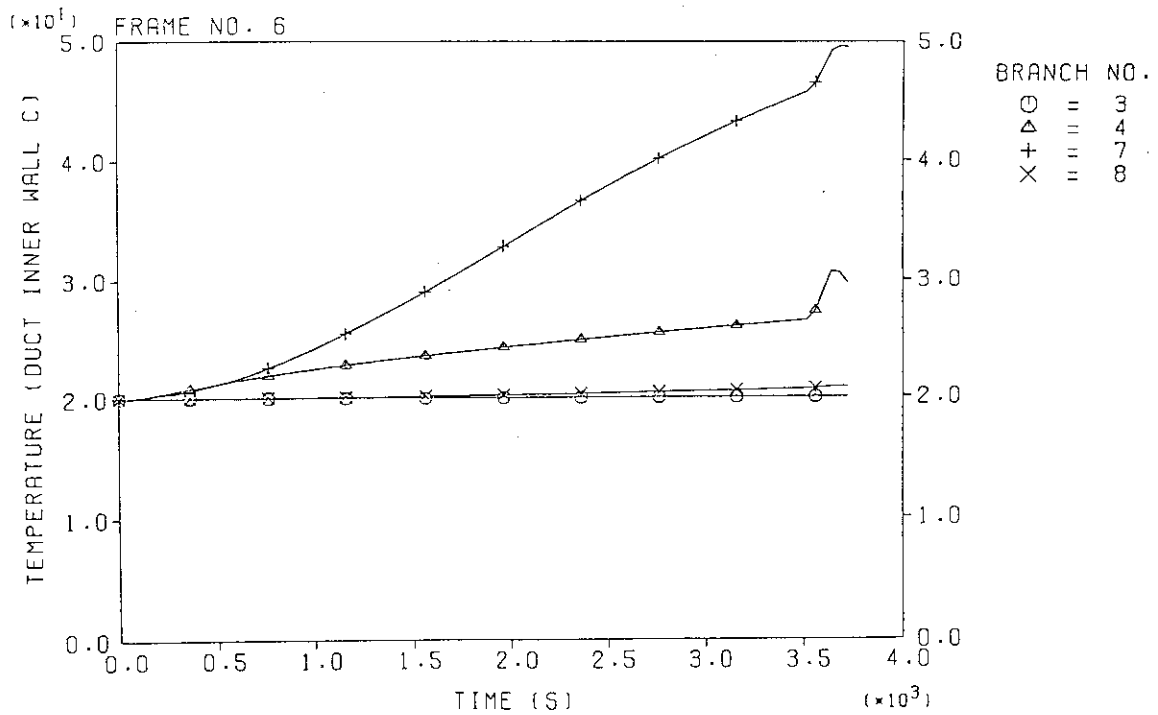
(4) ノード1、4、5、7内の気相温度変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



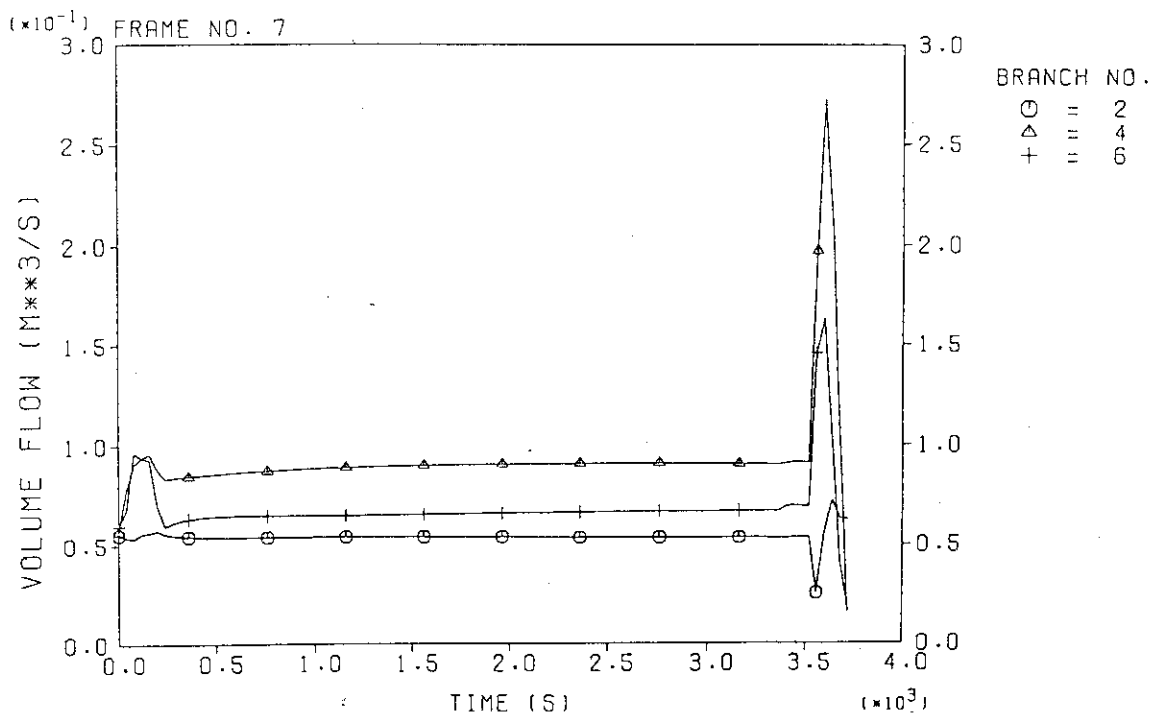
(5) ノード4、5、9、11のセル壁表面の温度変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



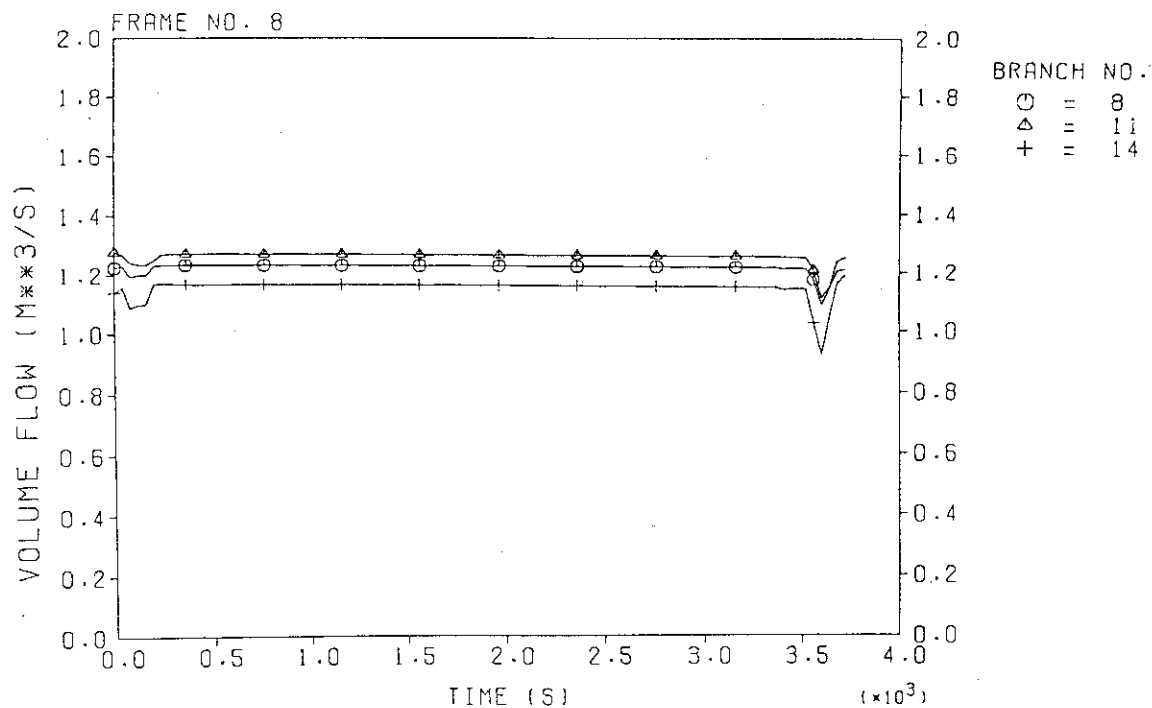
(6) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁表面の温度変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



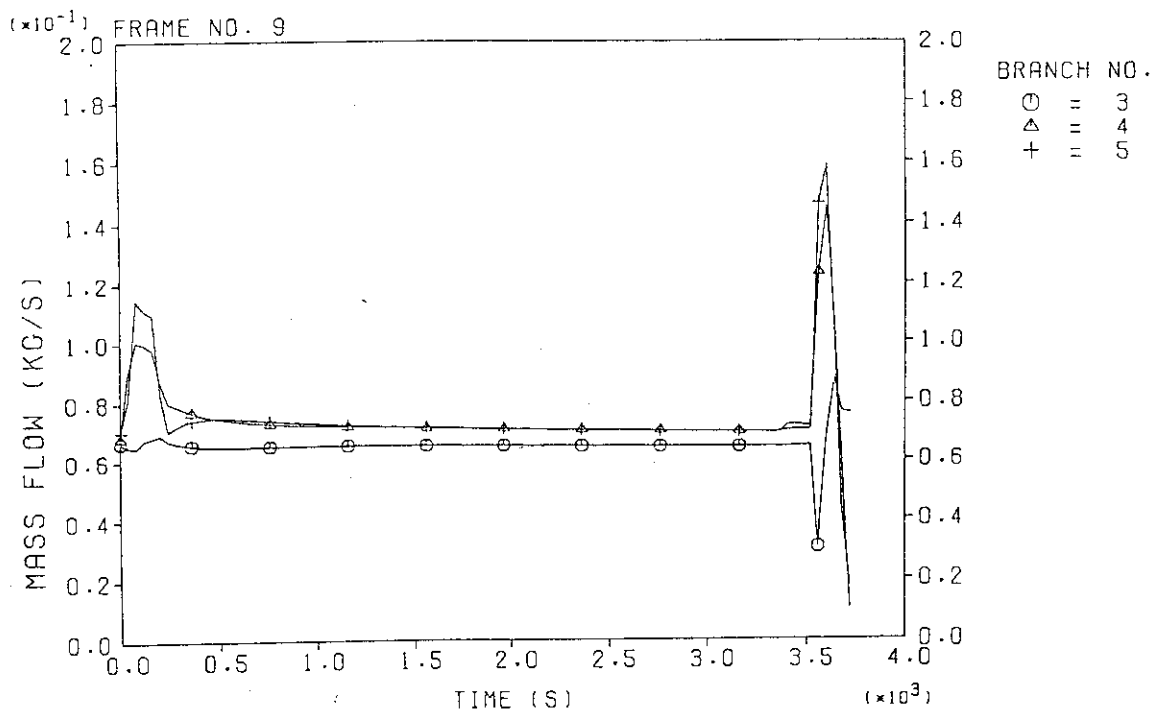
(7) ジャンクション 2、4、6 を通る流体の体積流量変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



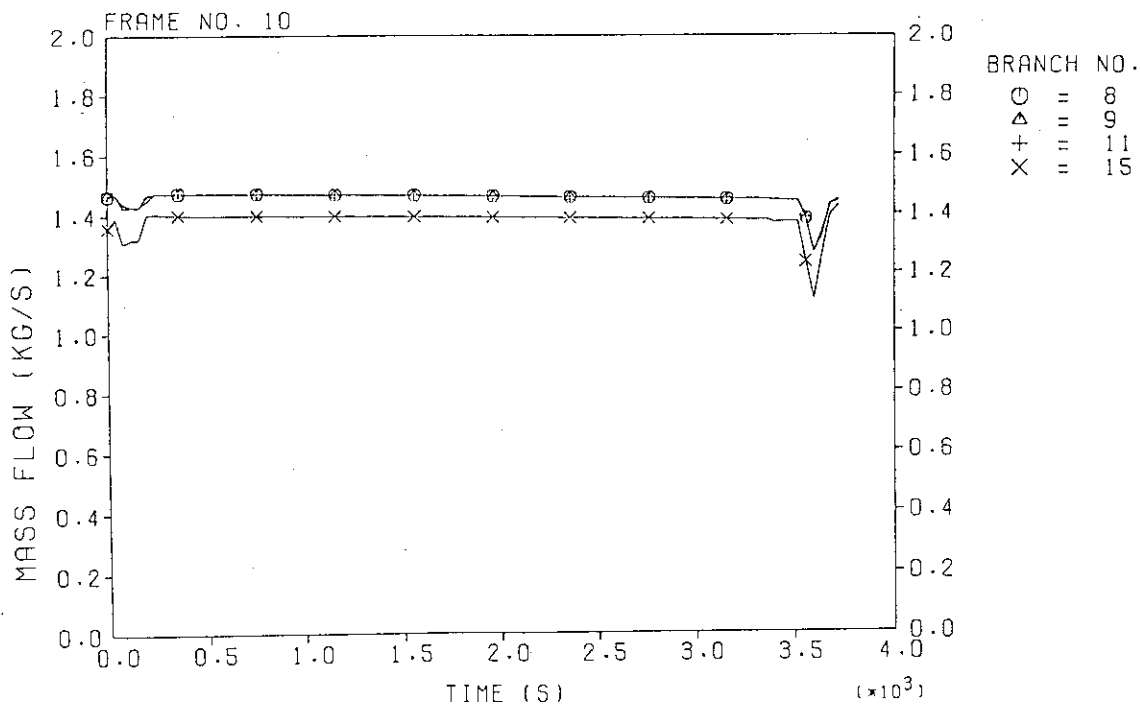
(8) ジャンクション 8、11、14 を通る流体の体積流量変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



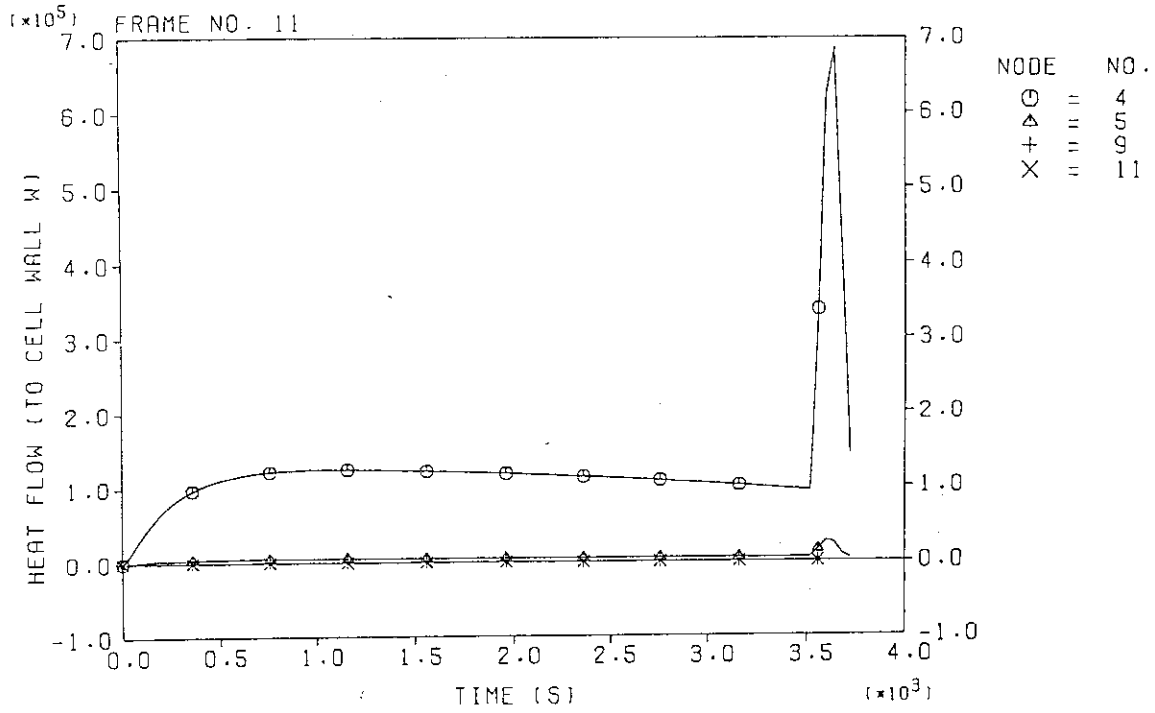
(9) ジャンクション3、4、5を通る流体の質量流量変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



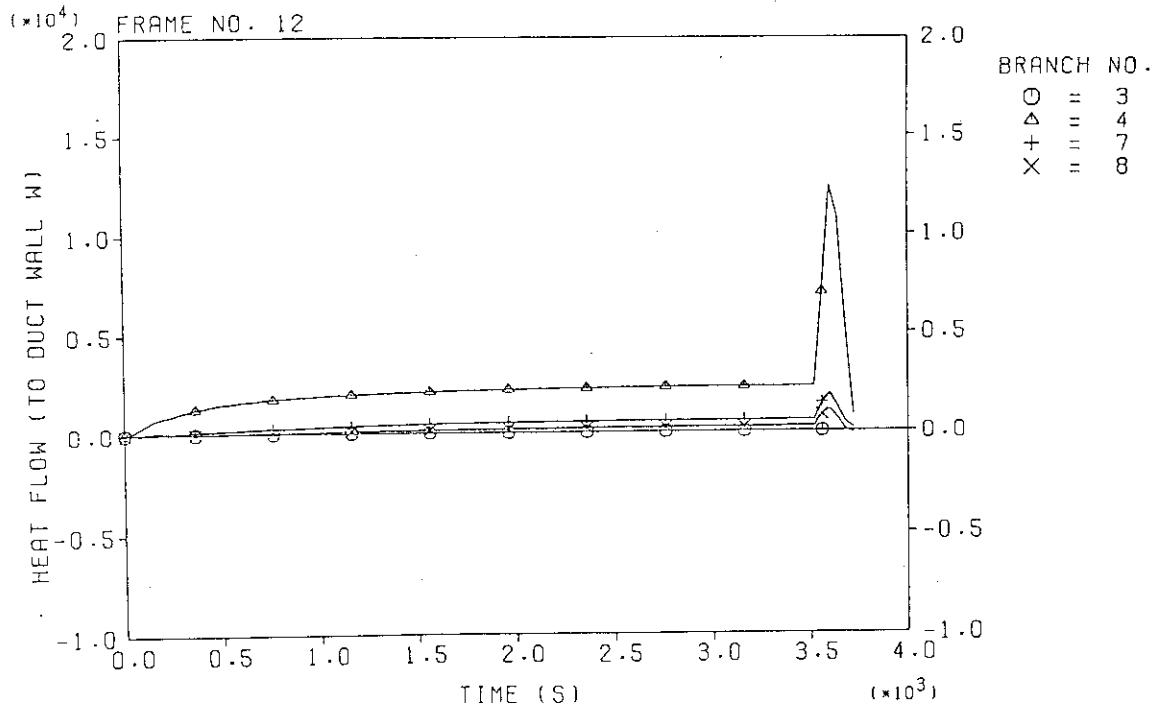
(10) ジャンクション8、9、11、15を通る流体の質量流量変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



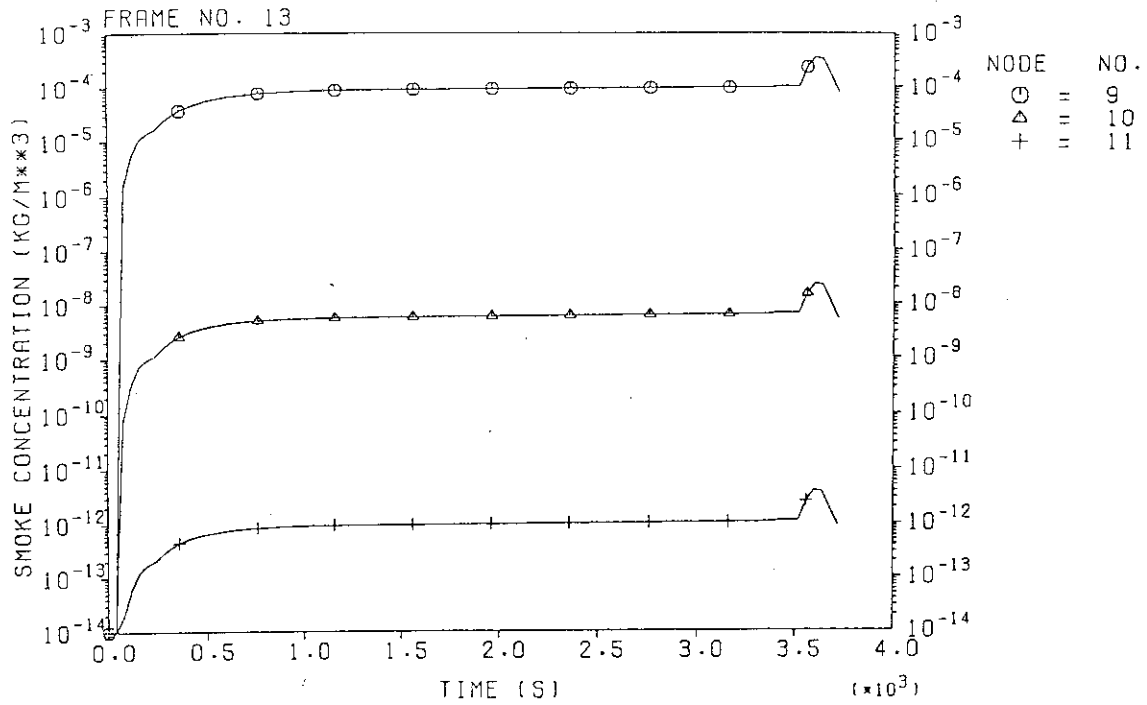
(11) ノード4、5、9、11のセル壁に入る熱流の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



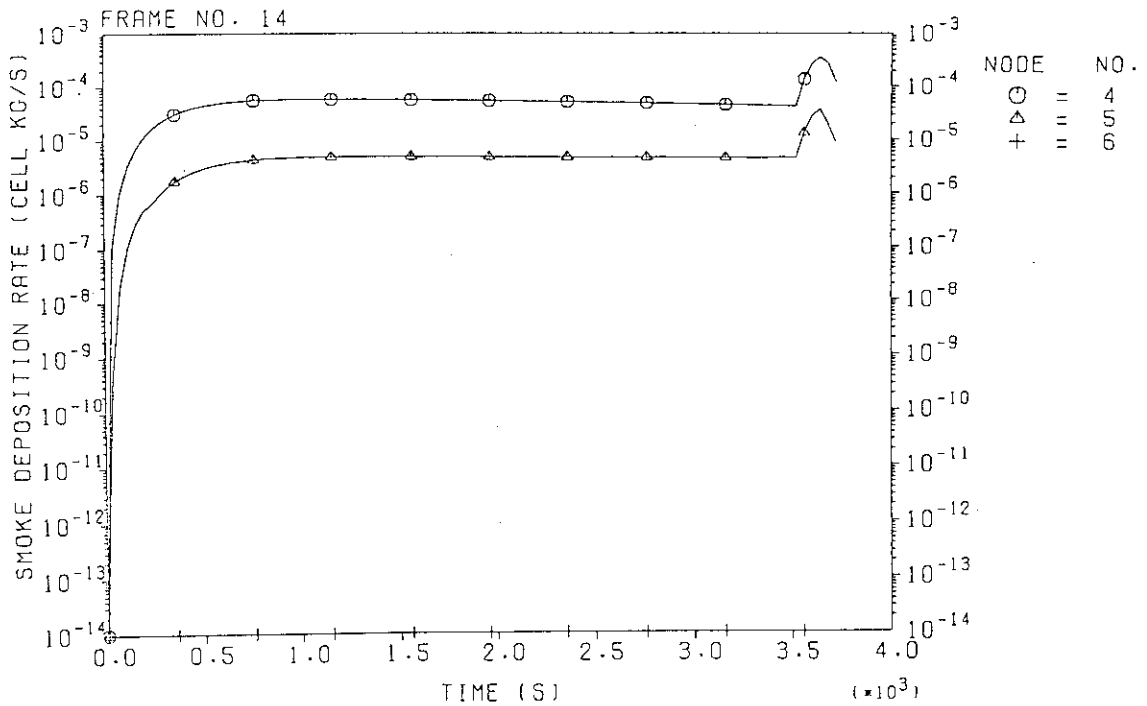
(12) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁に入る熱流の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



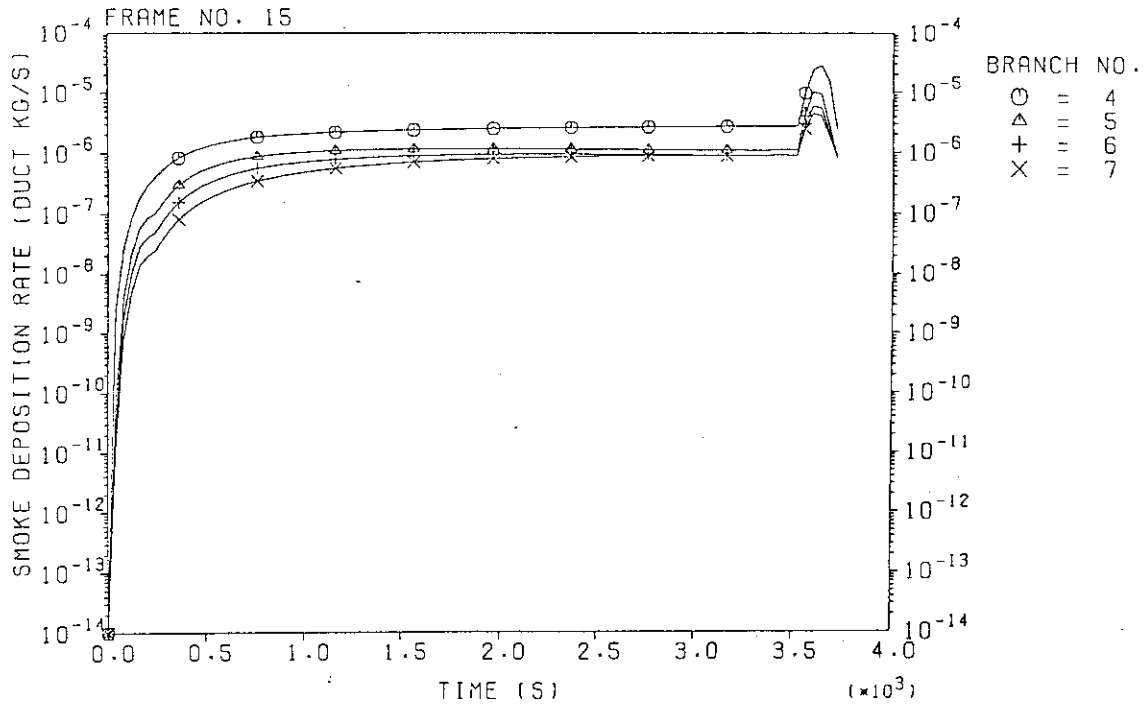
(13) ノード9、10、11 (HEPAフィルタ) の煤煙濃度の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



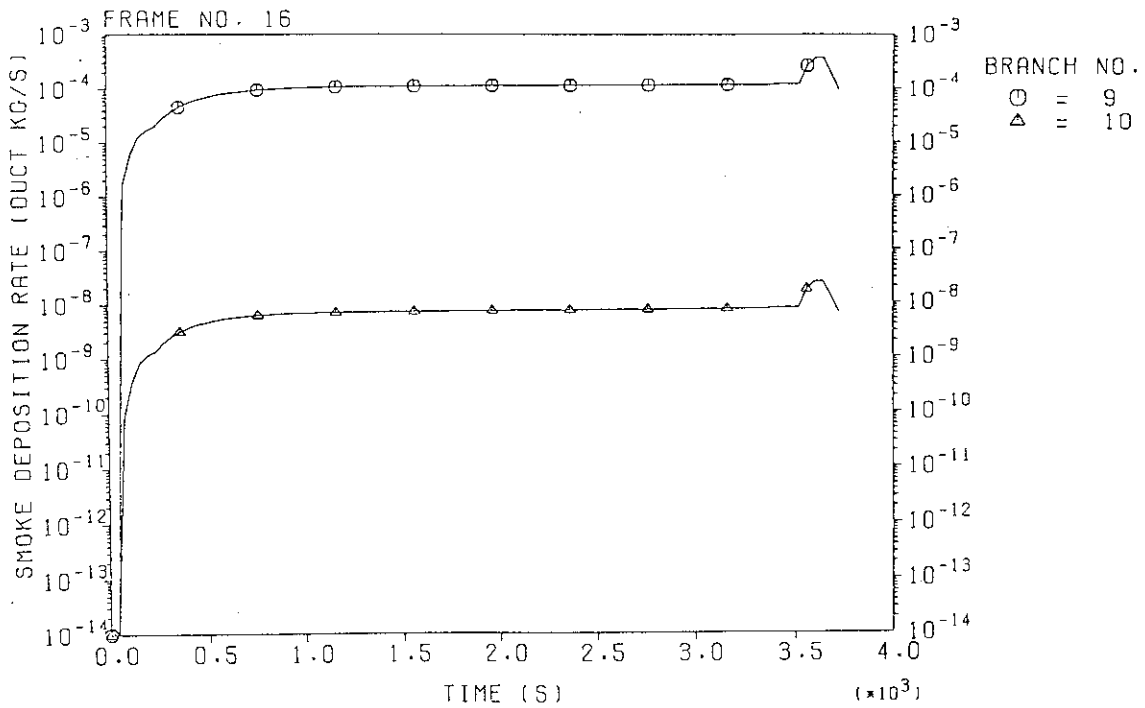
(14) ノード4、5、6内の煤煙の沈着速度の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



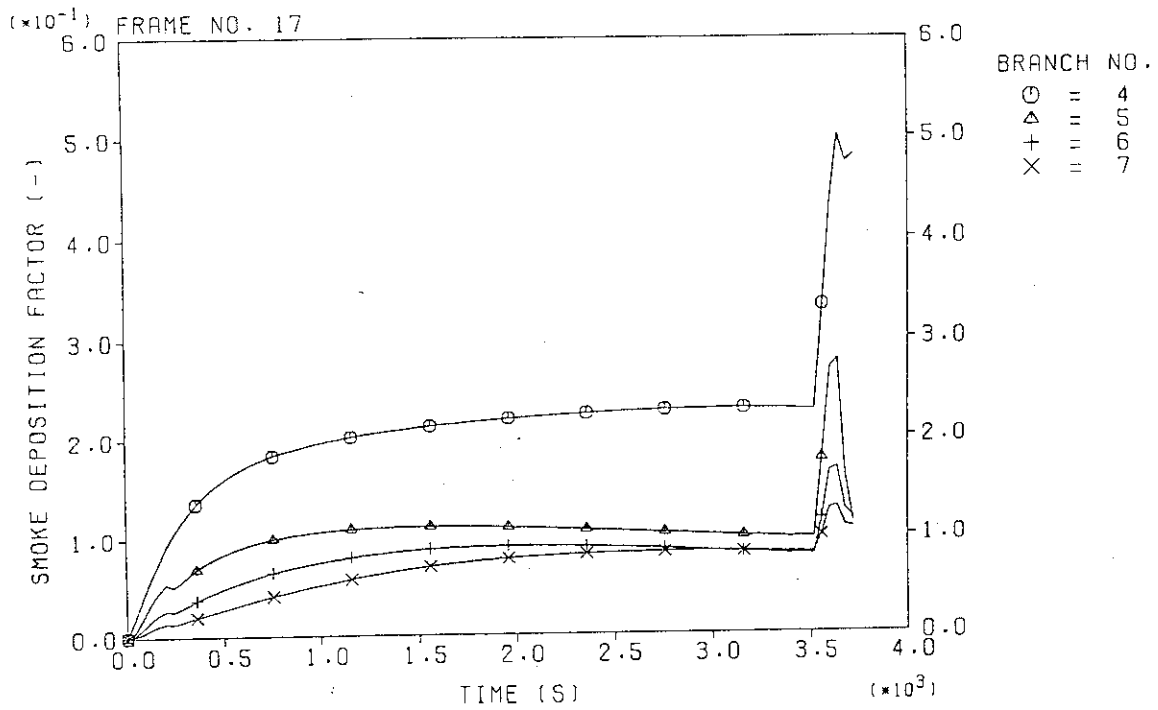
(15) ジャンクション4、5、6、7を通る煤煙の沈着速度の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



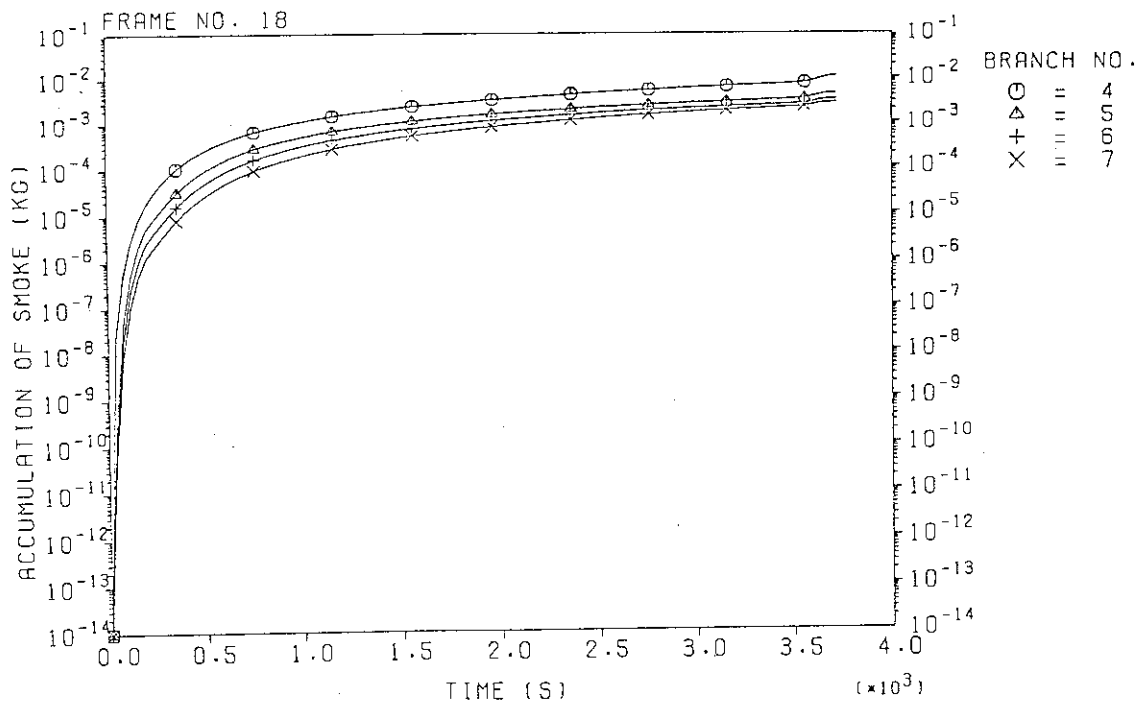
(16) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙捕集速度の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



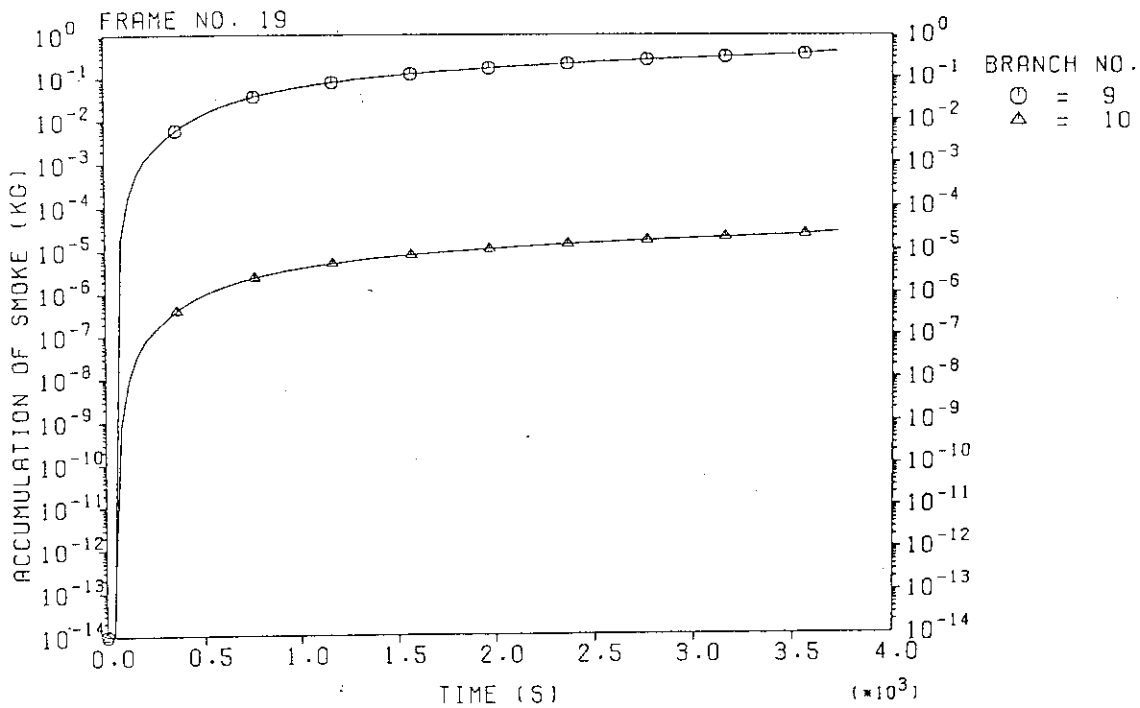
(17) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着分率の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



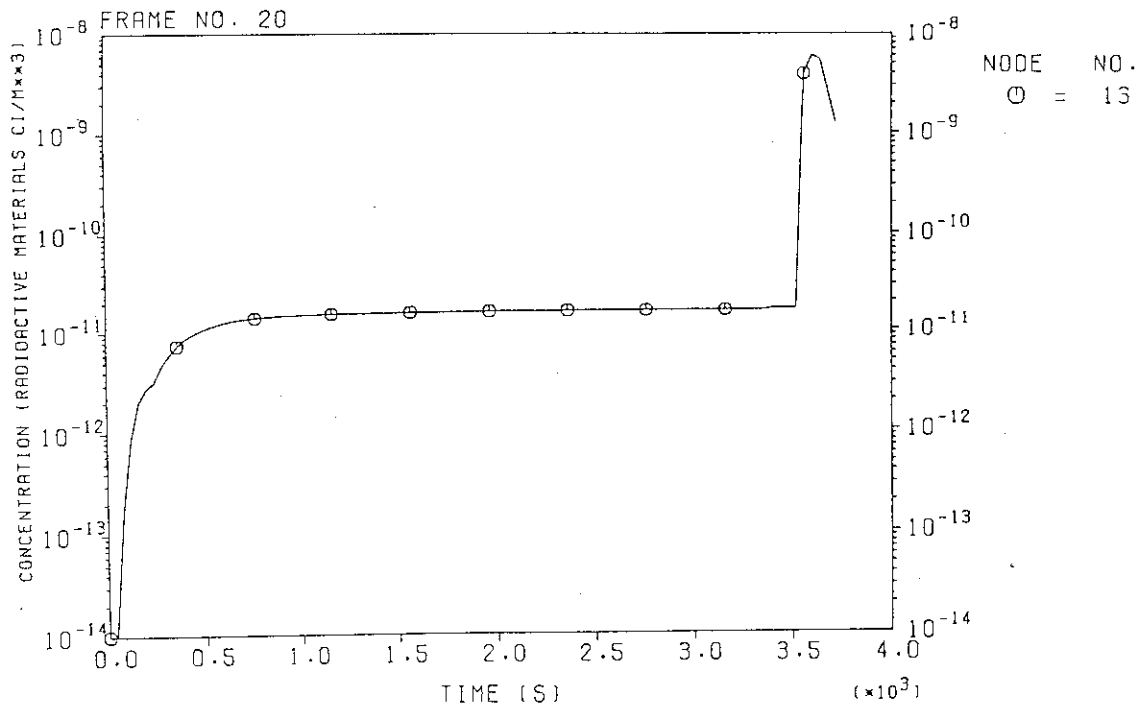
(18) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着量の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



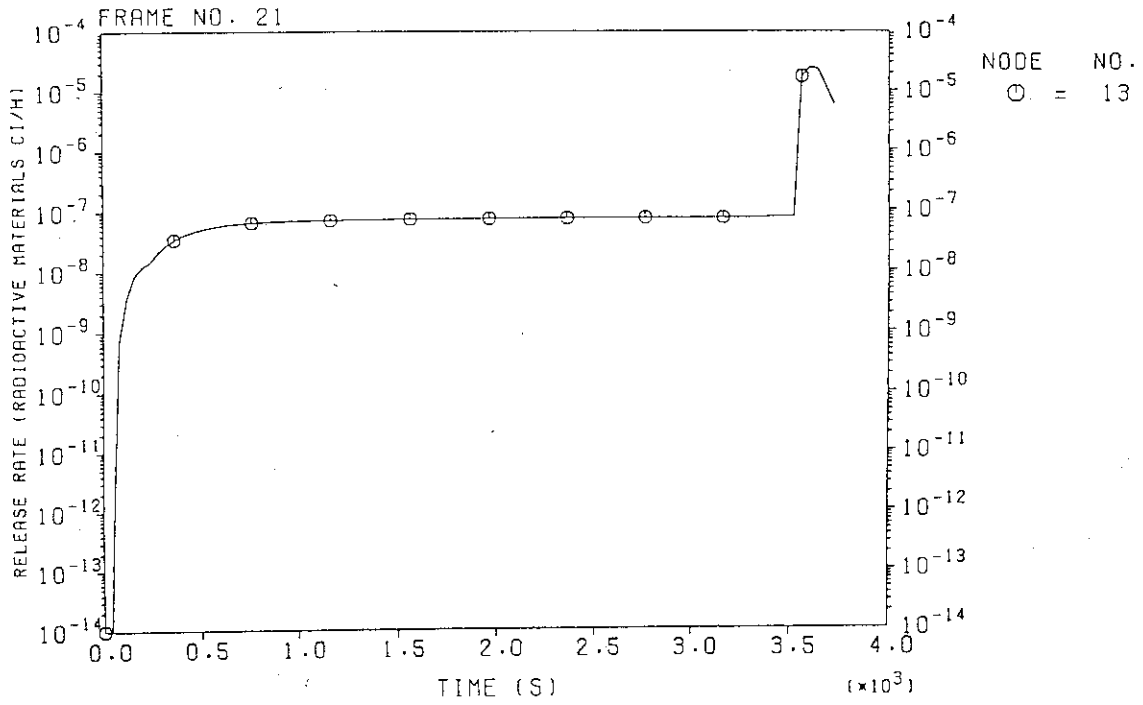
(19) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙沈着量の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



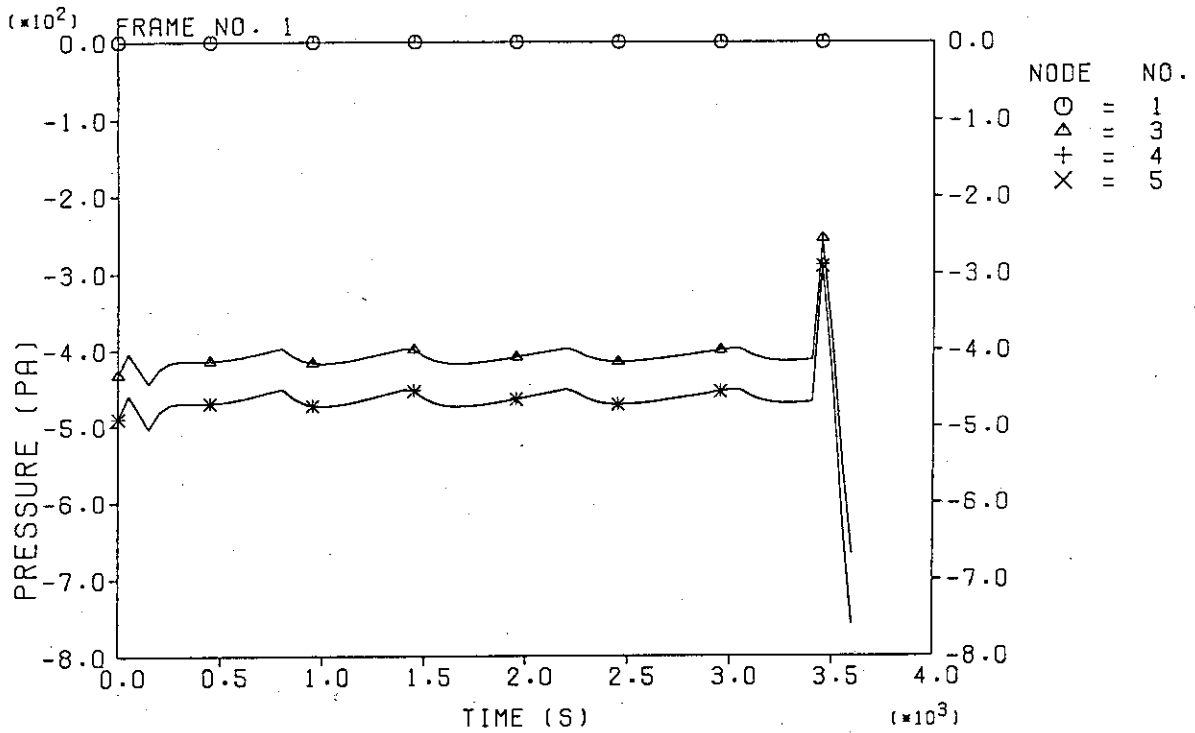
(20) ノード13 (スタック) における放射性物質の濃度変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



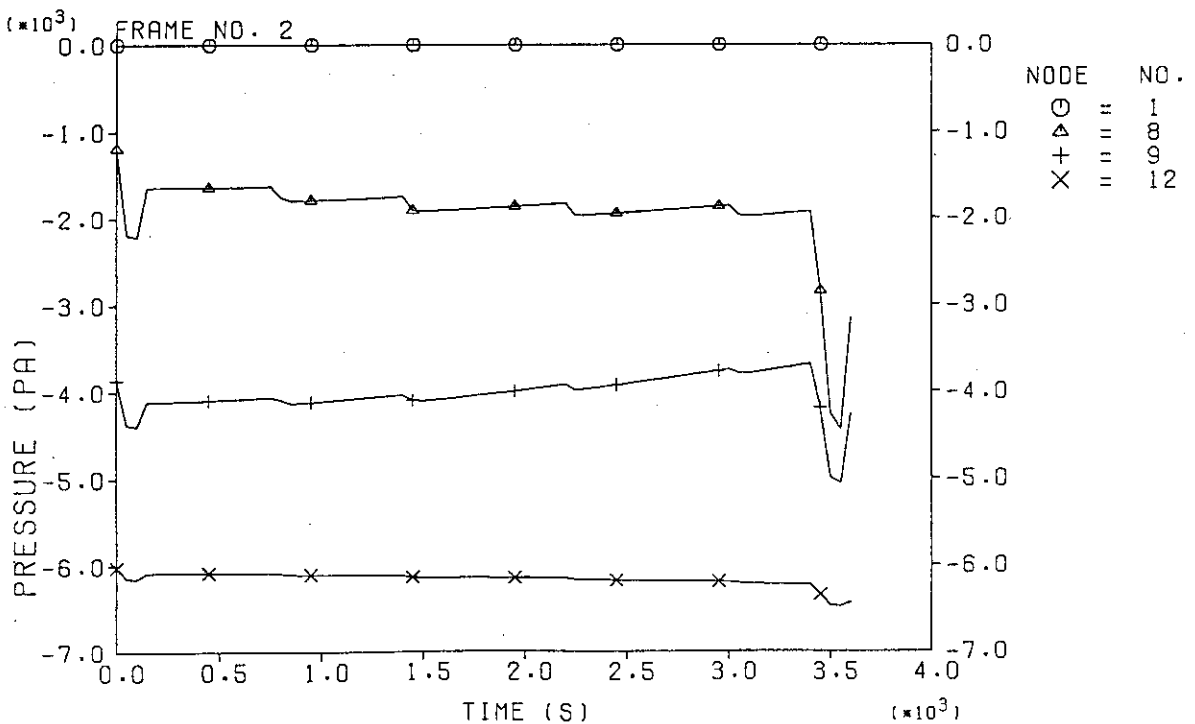
(21) ノード13 (スタック) における放射性物質の放出速度の変化 (FP-10)

FIRE ACCIDENT IN CELL



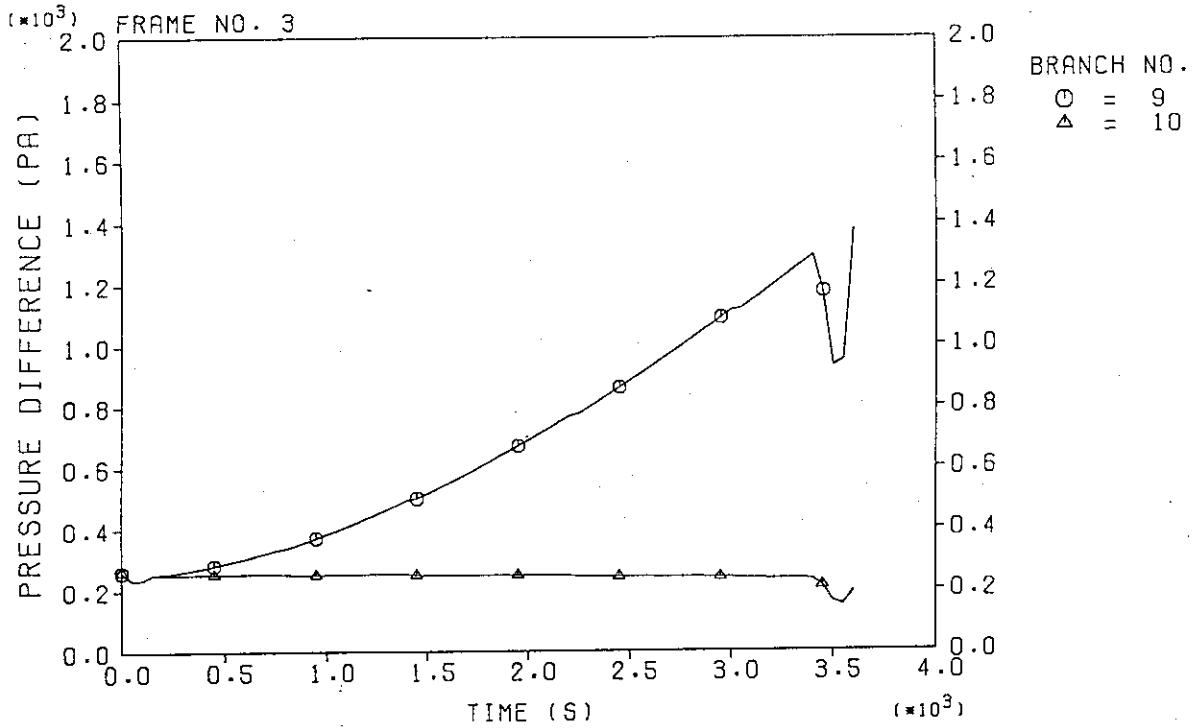
(1) ノード1、3、4、5内の圧力変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



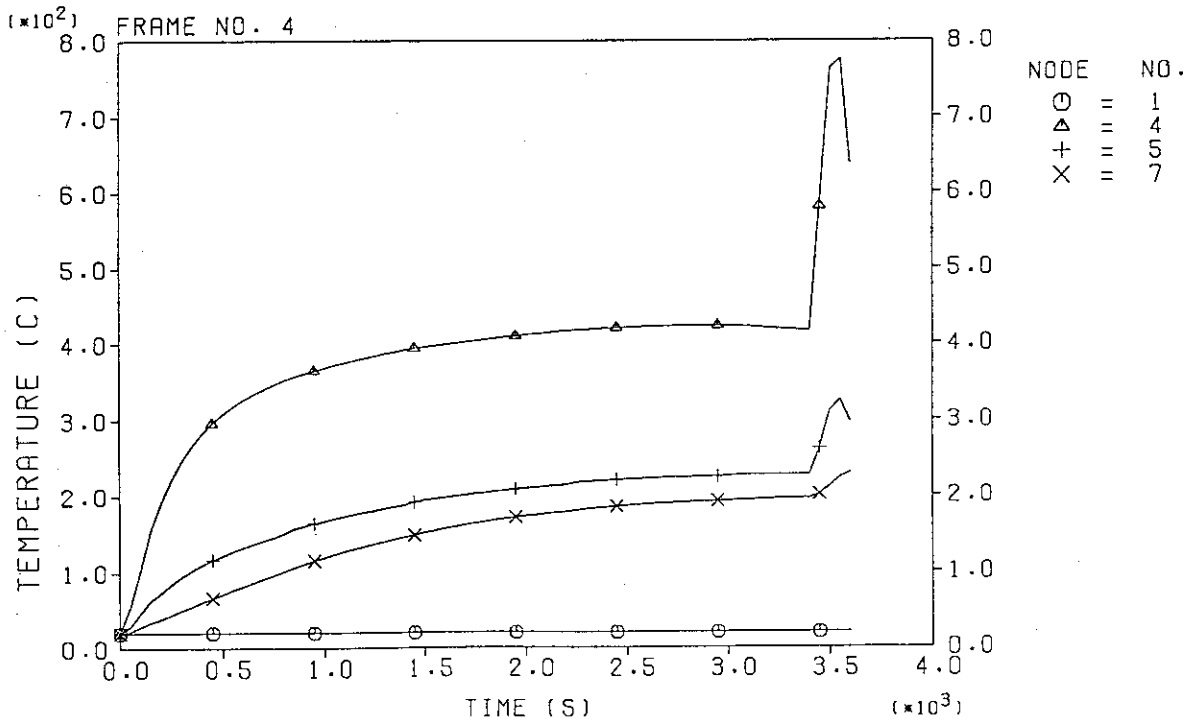
(2) ノード1、8、9、12内の圧力変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



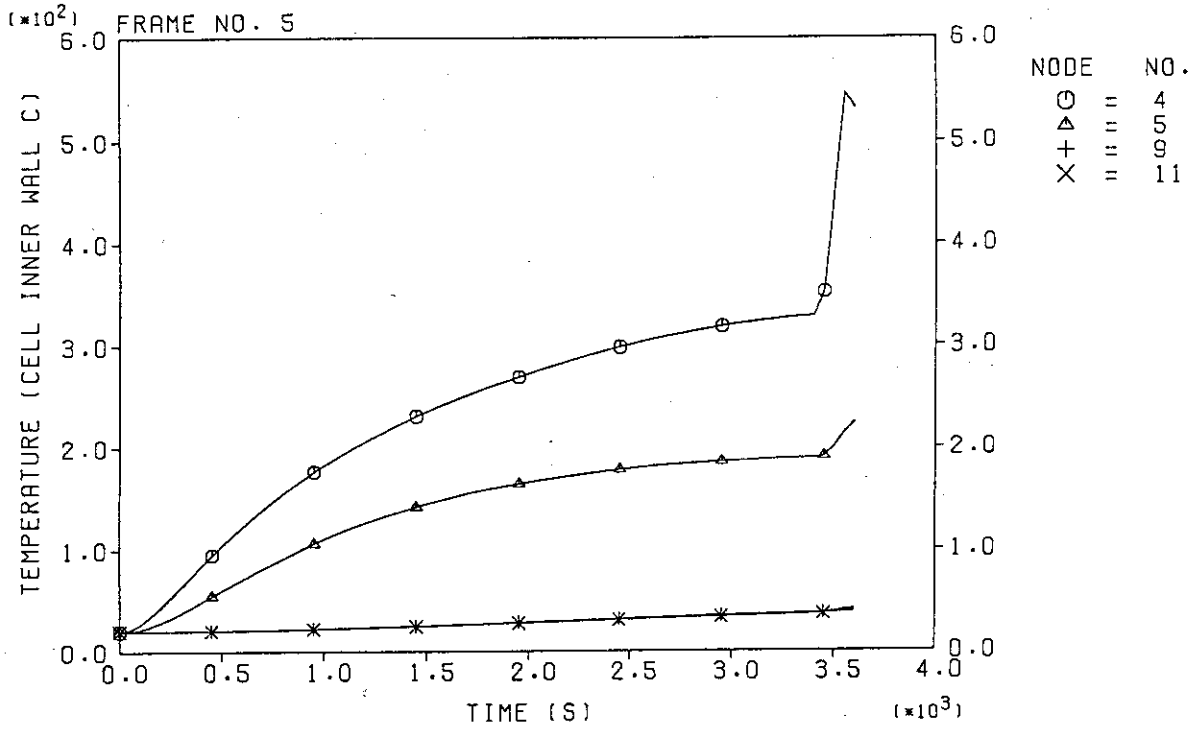
(3) ジャンクション 9、10 (HEPAフィルタ) 内の差圧変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



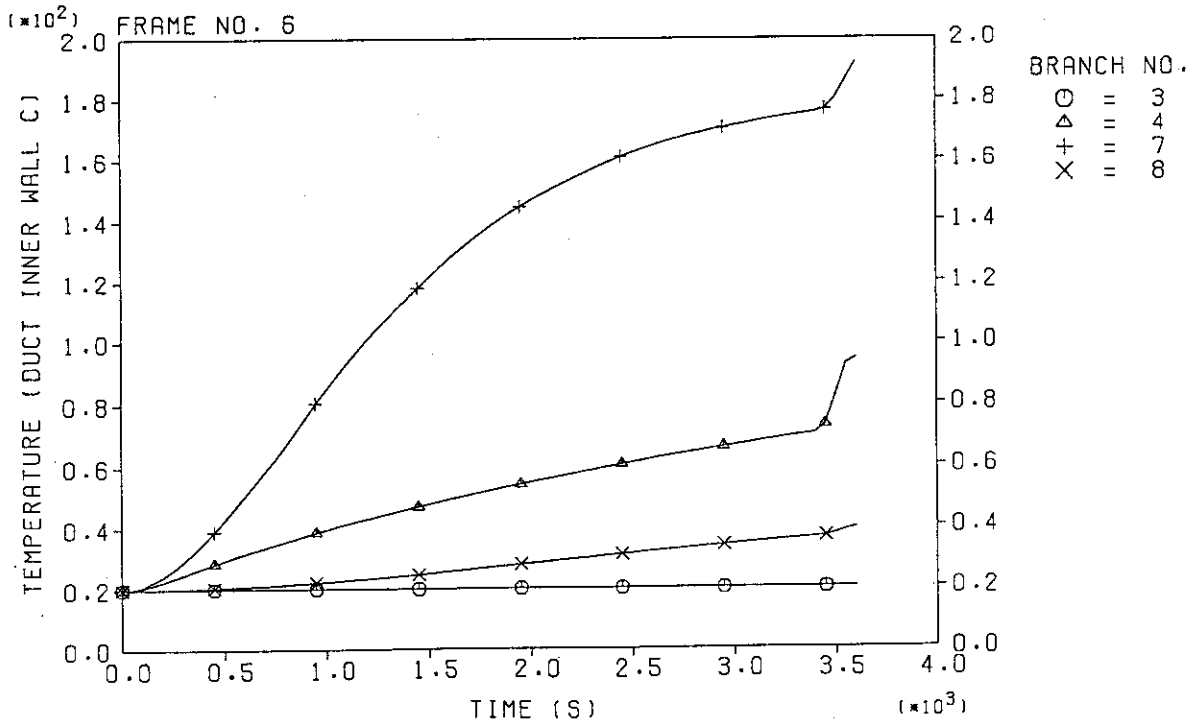
(4) ノード 1、4、5、7 内の気相温度変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



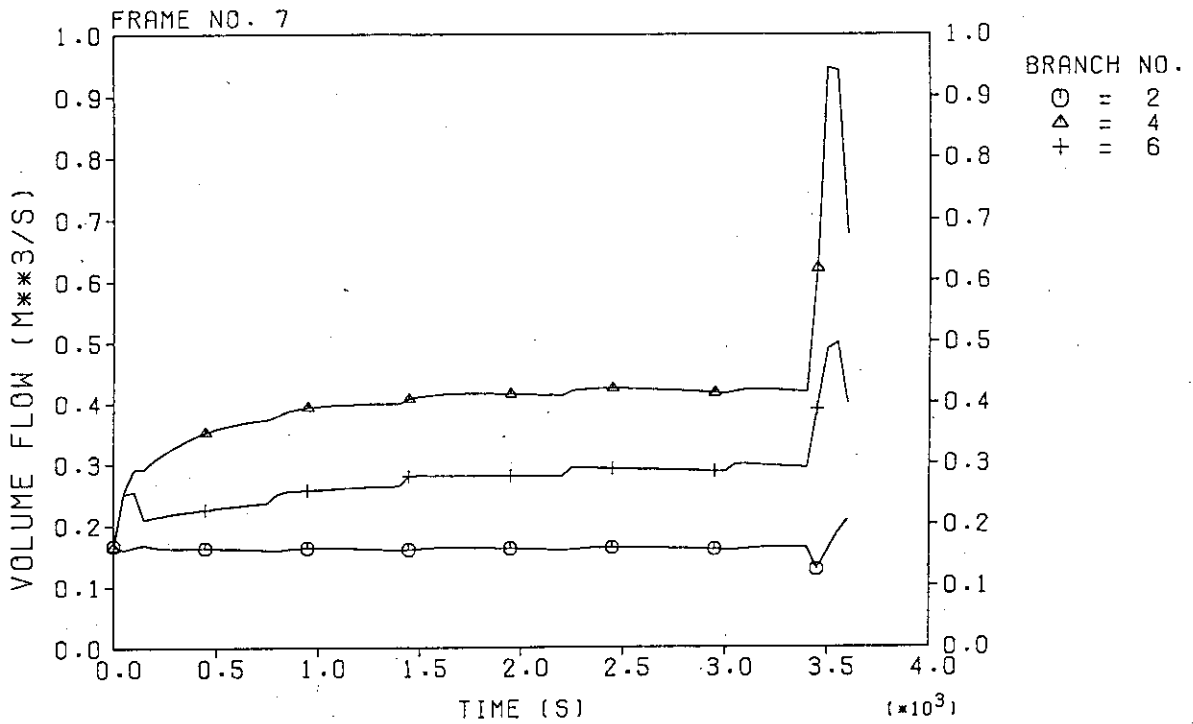
(5) ノード4、5、9、11のセル壁表面の温度変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



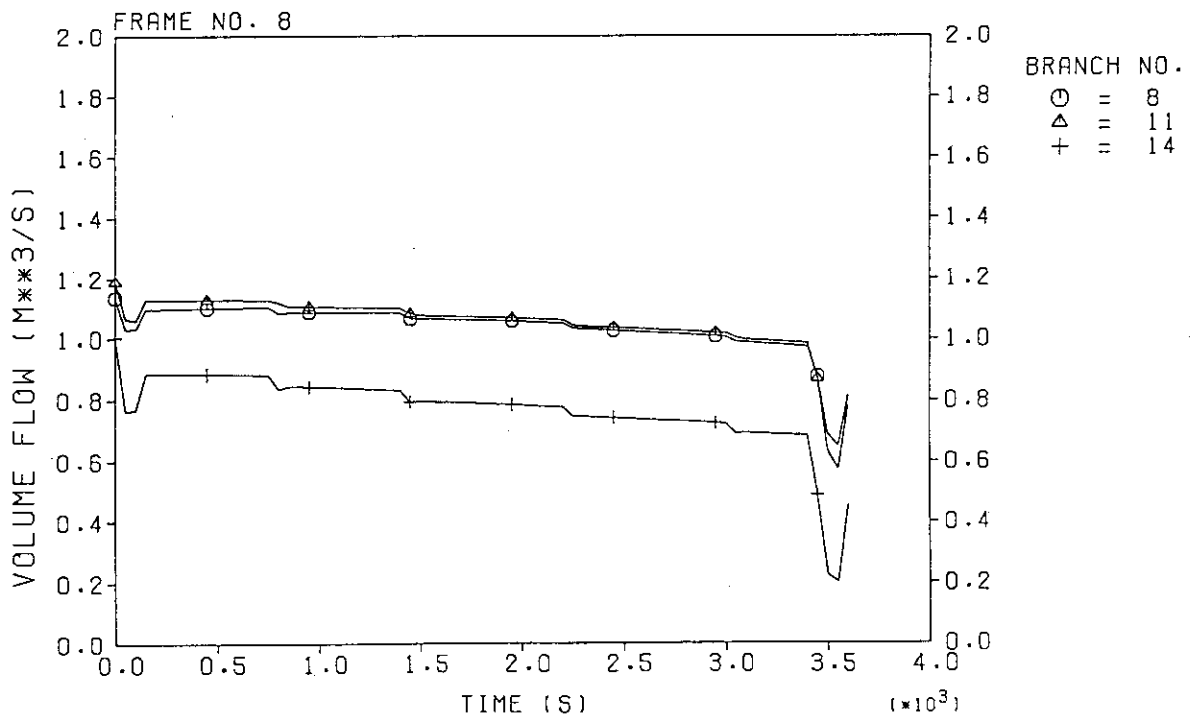
(6) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁表面の温度変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



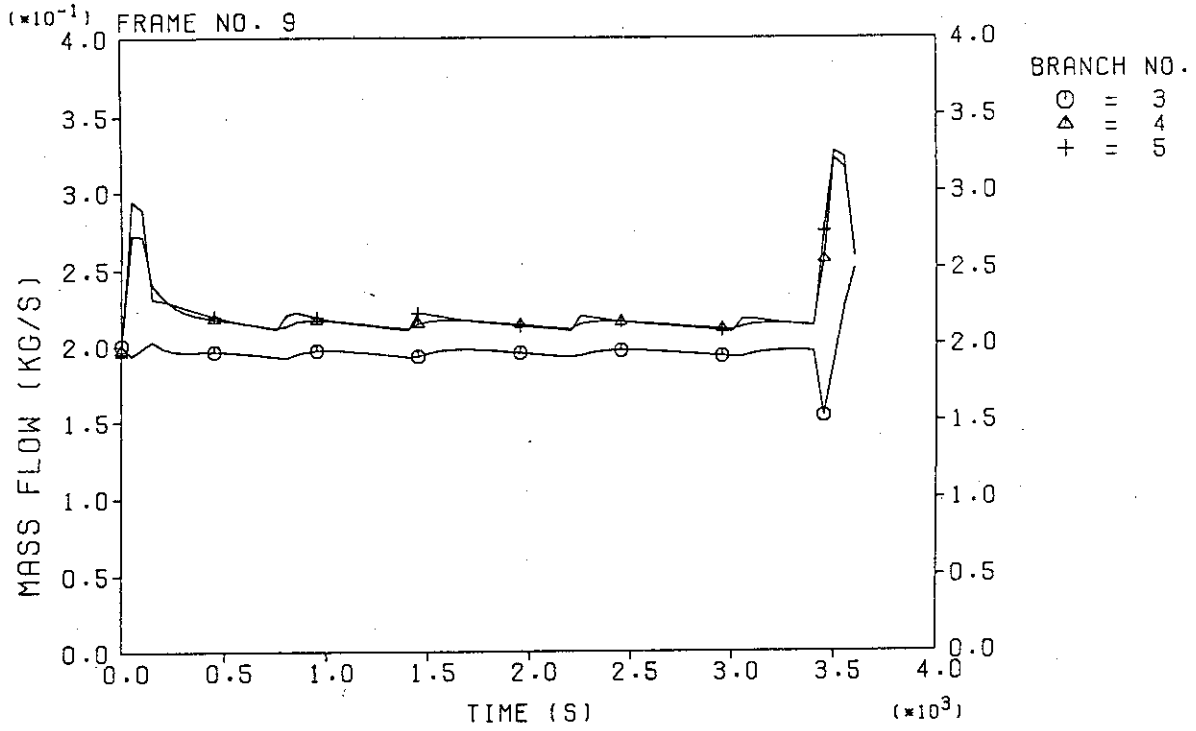
(7) ジャンクション2、4、6を通る流体の体積流量変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



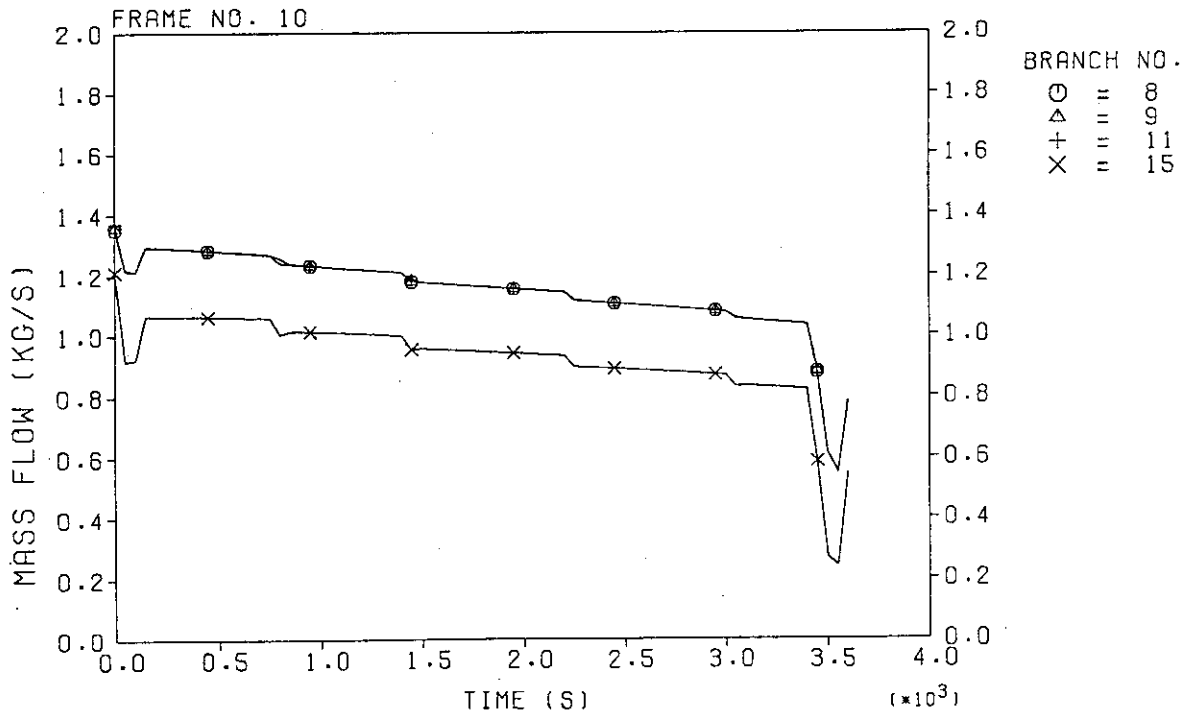
(8) ジャンクション8、11、14を通る流体の体積流量変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



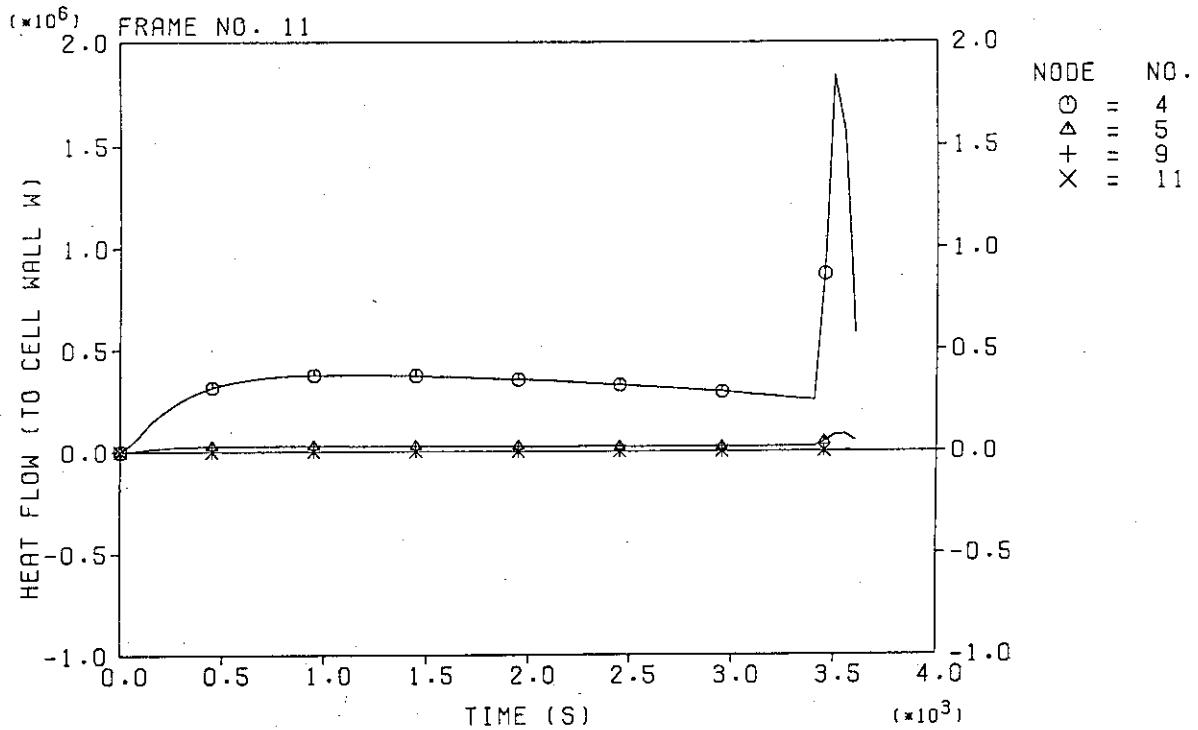
(9) ジャンクション3、4、5を通る流体の質量流量変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



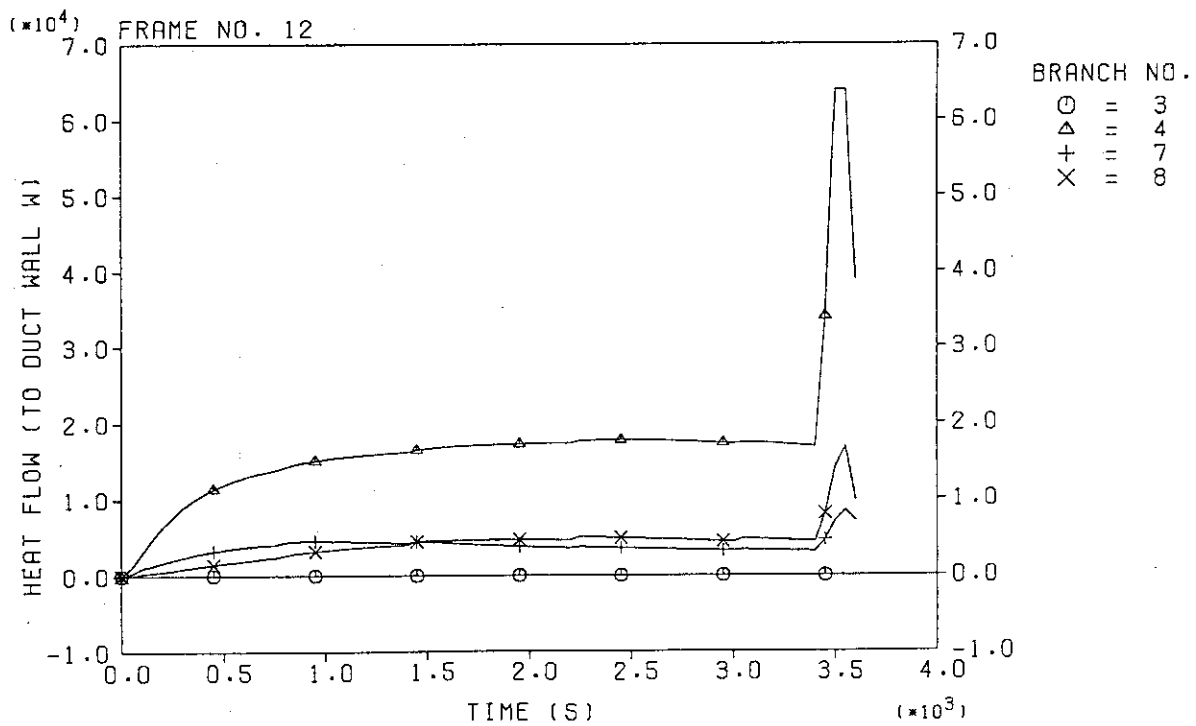
(10) ジャンクション8、9、11、15を通る流体の質量流量変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



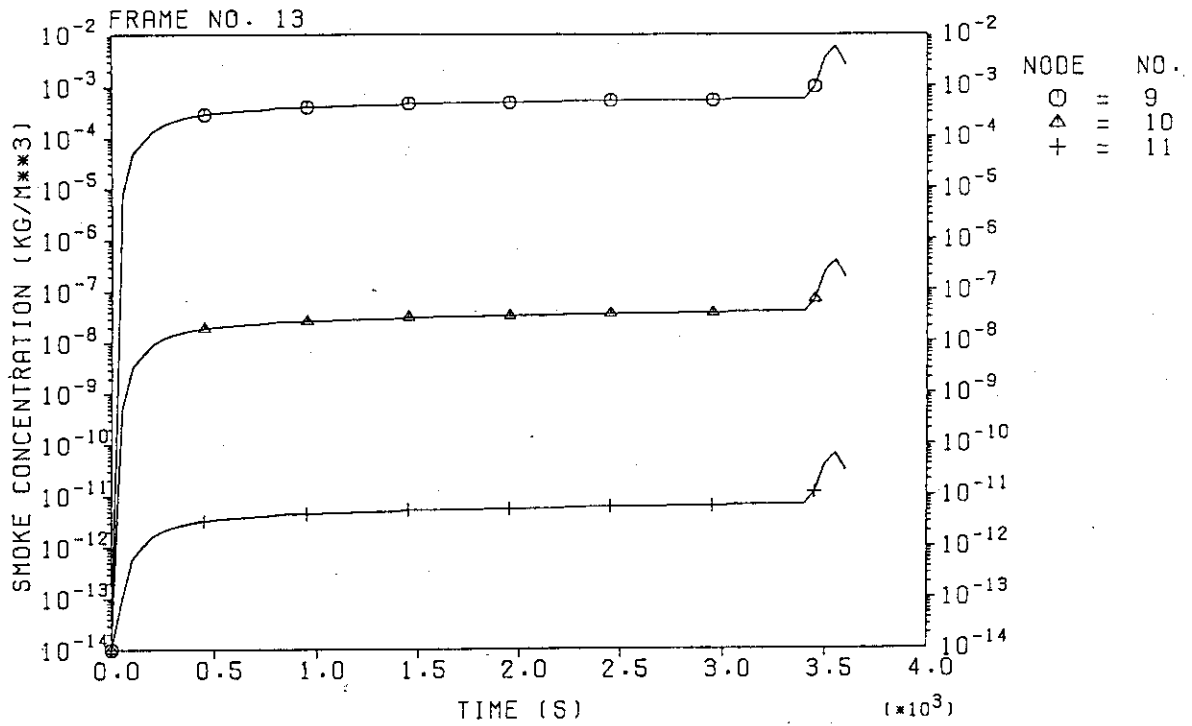
(11) ノード4、5、9、11のセル壁に入る熱流の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



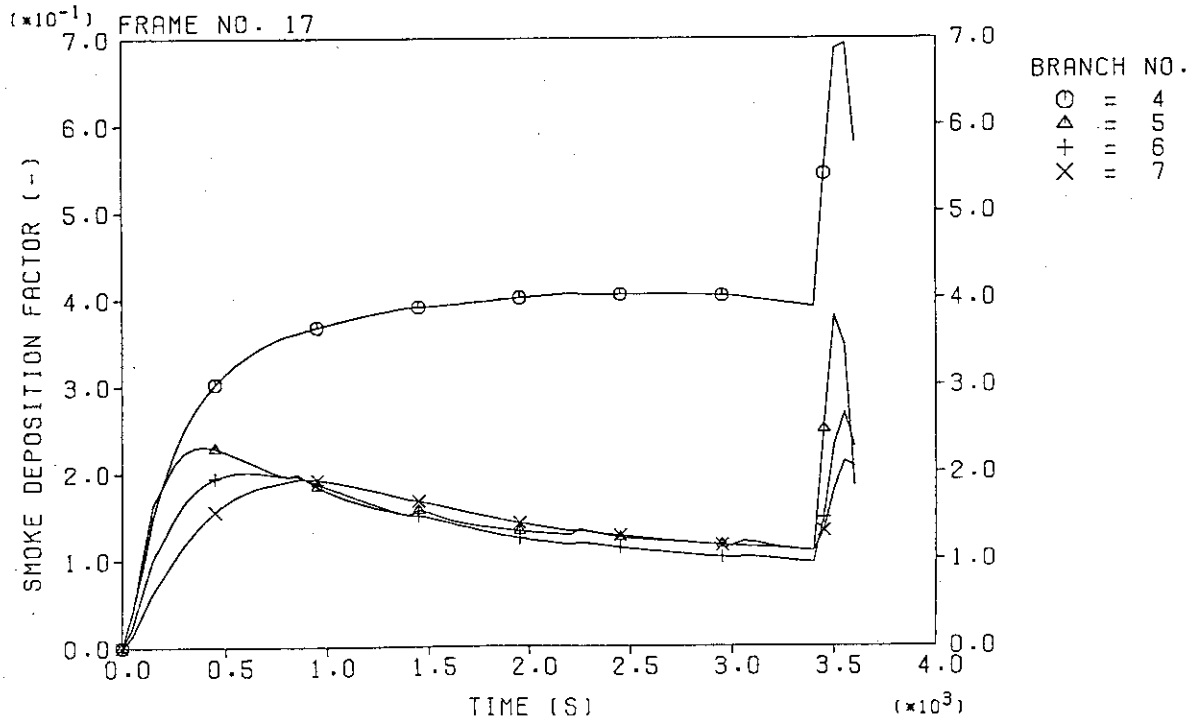
(12) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁に入る熱流の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



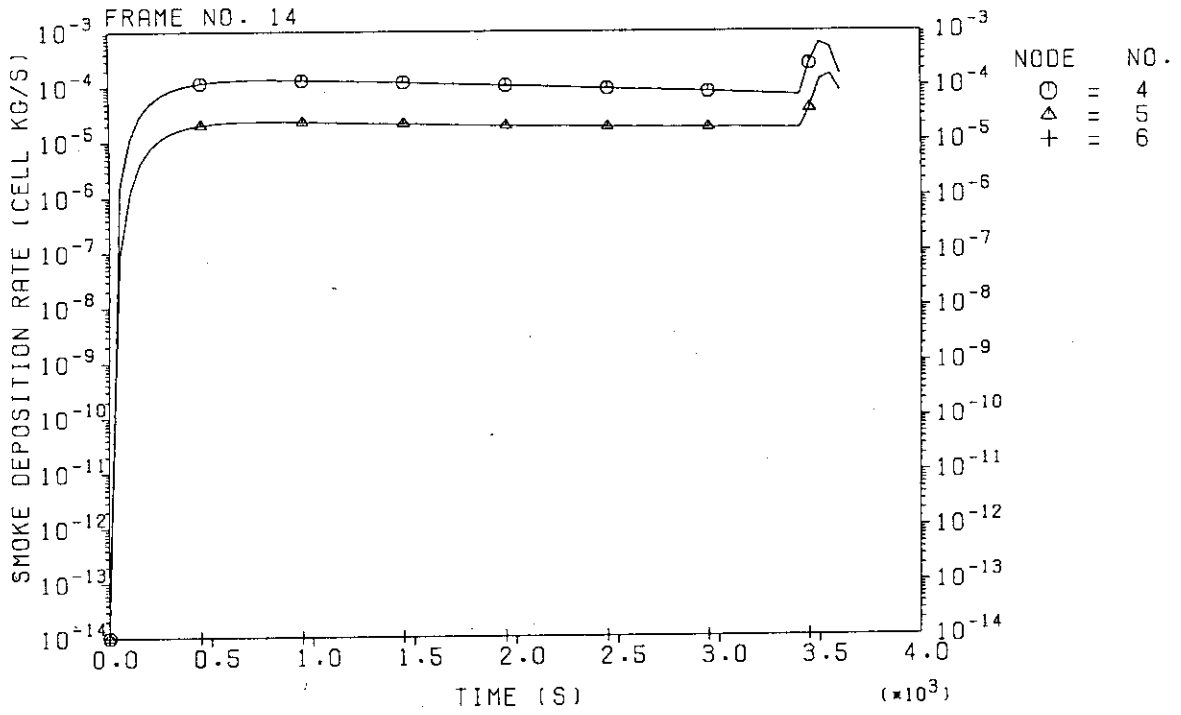
(13) ノード9、10、11 (HEPAフィルタ) の煤煙濃度の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



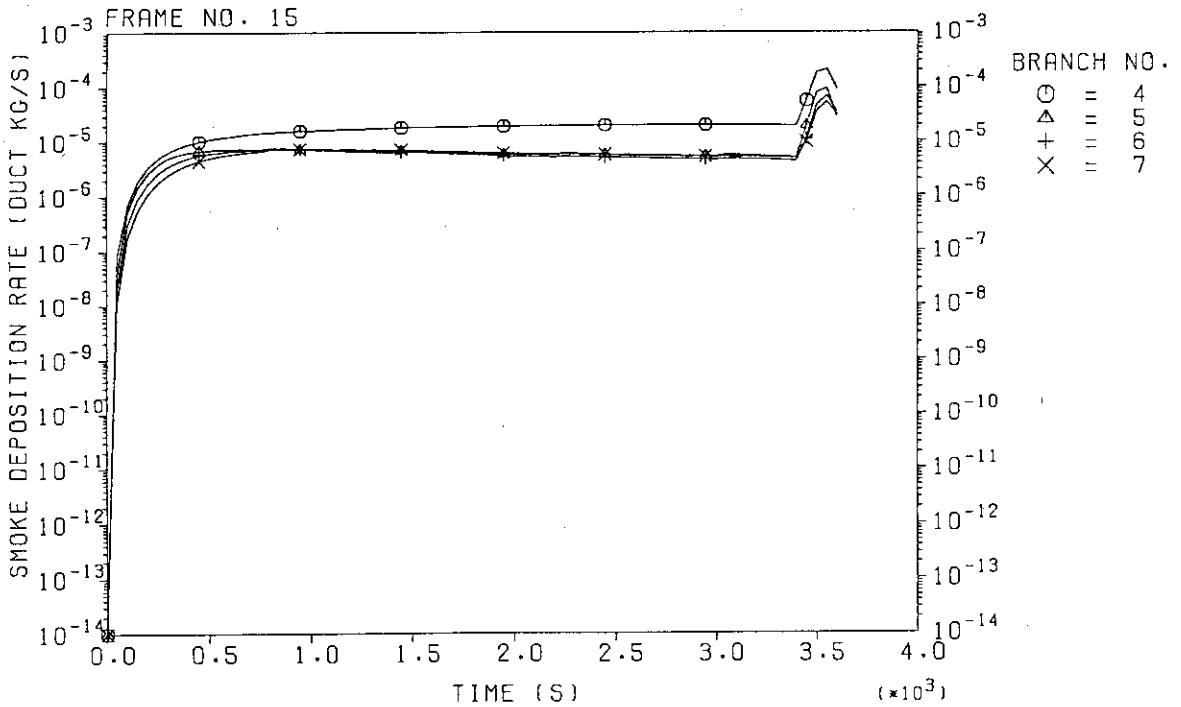
(17) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着分率の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



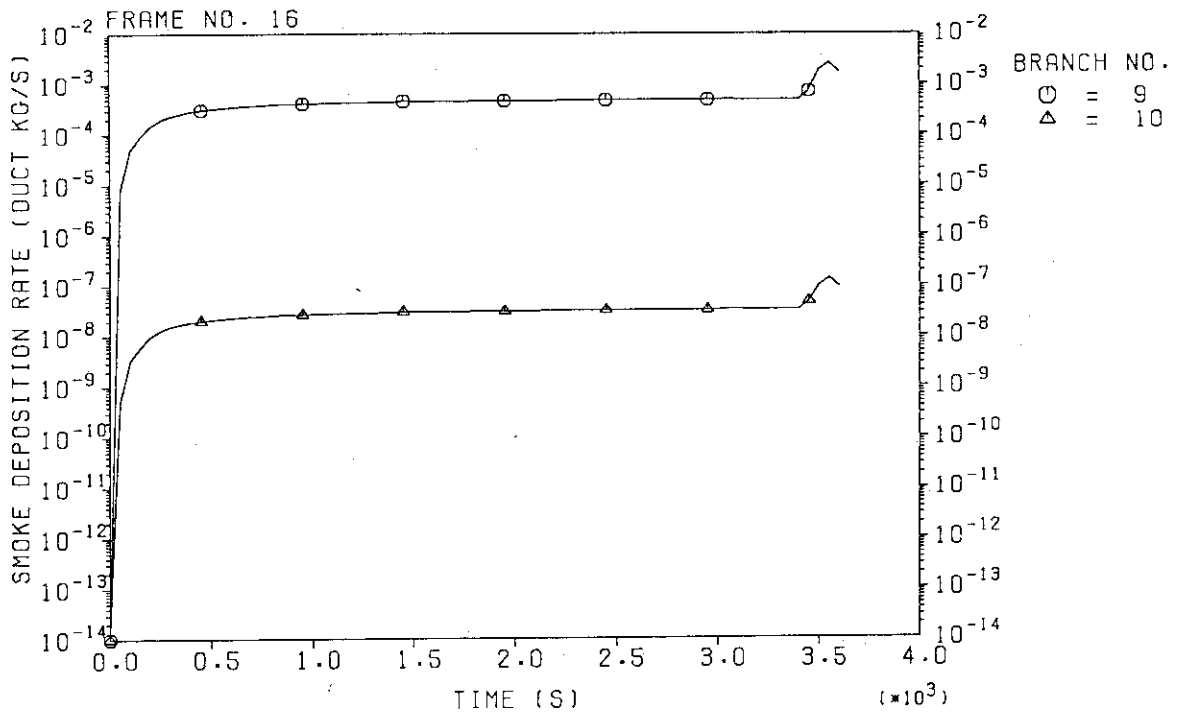
(14) ノード4、5、6内の煤煙の沈着速度の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



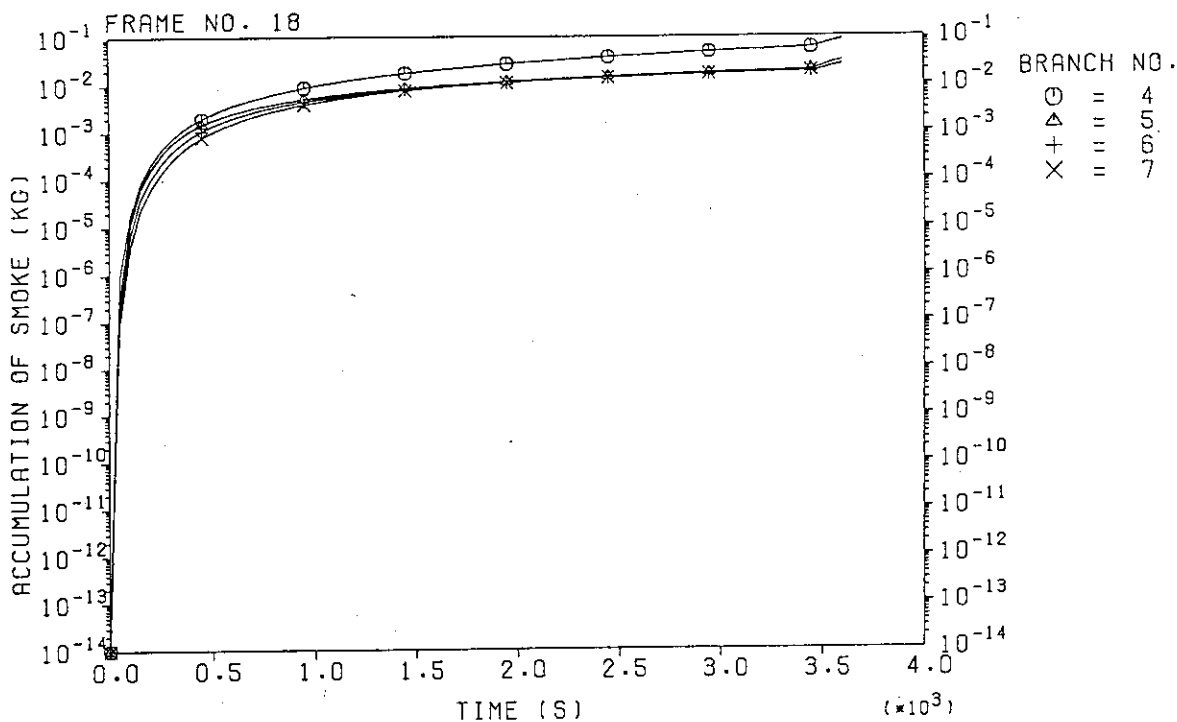
(15) ジャンクション4、5、6、7を通る煤煙の沈着速度の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



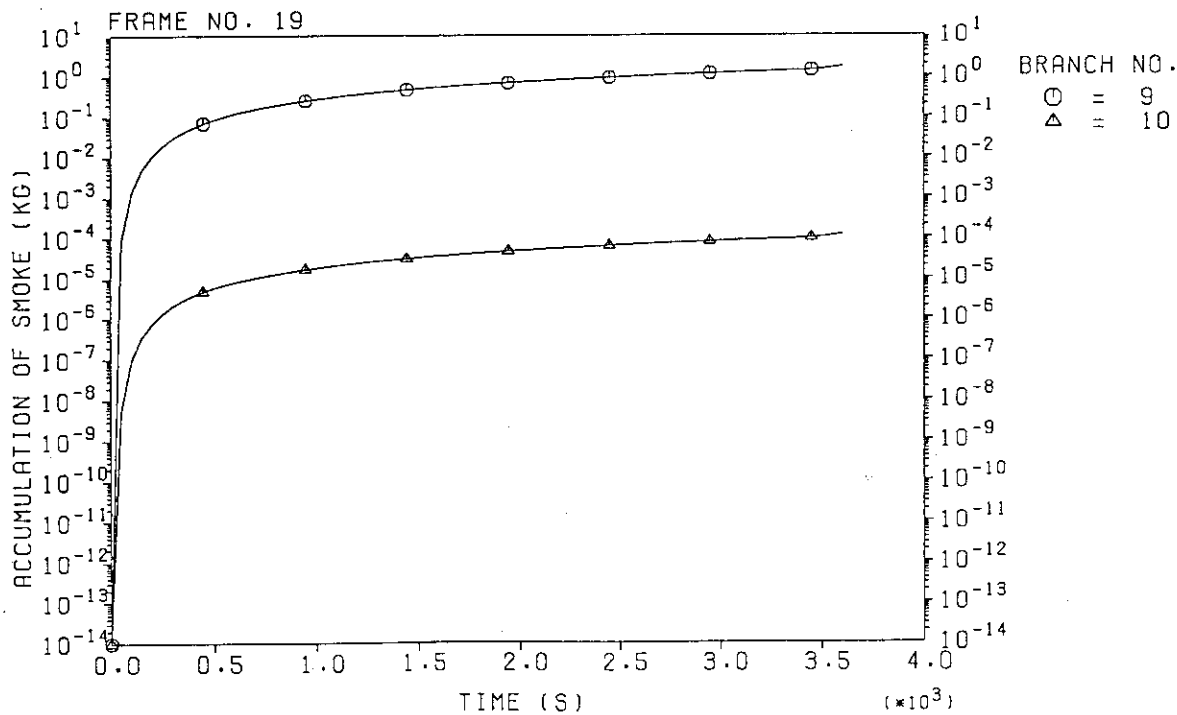
(16) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙捕集速度
 の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



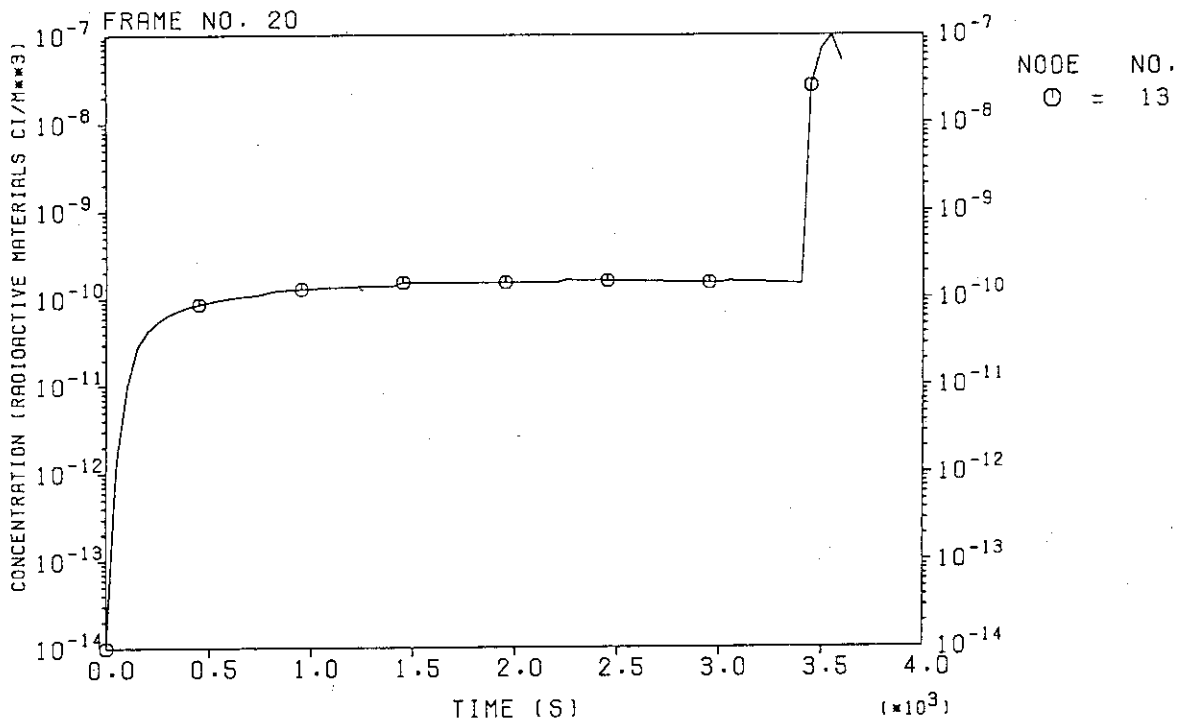
(18) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着量の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



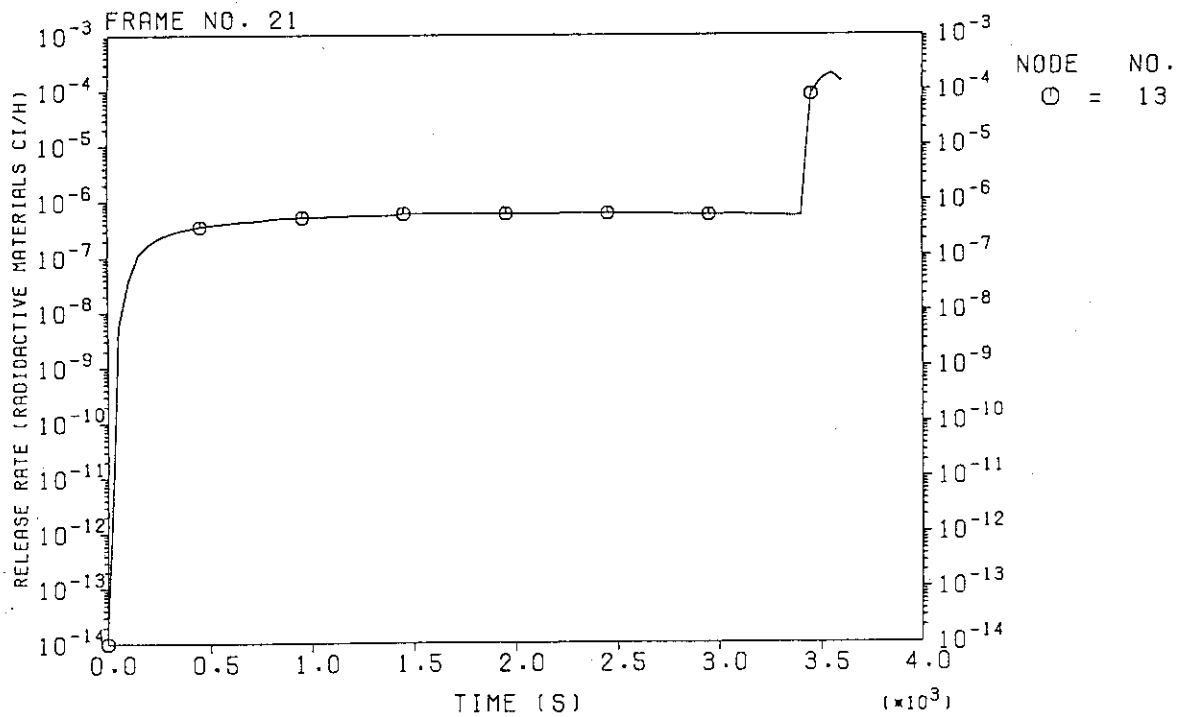
(19) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙沈着量の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



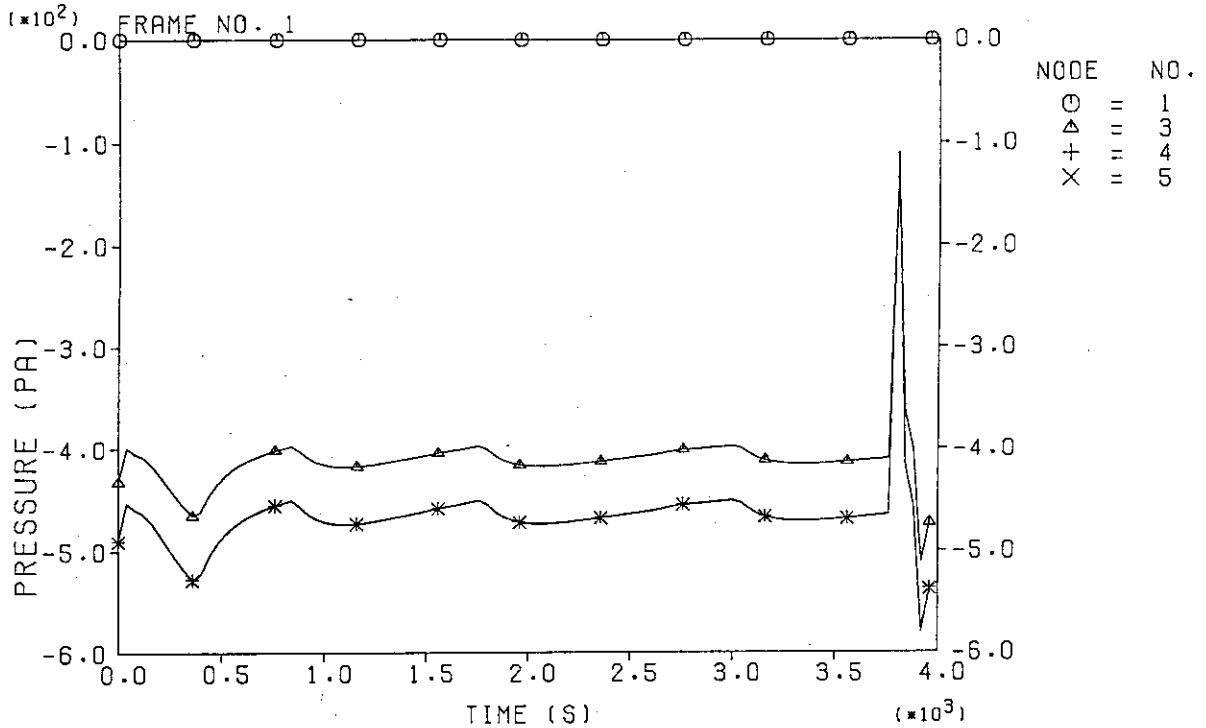
(20) ノード13 (スタック) における放射性物質の濃度変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



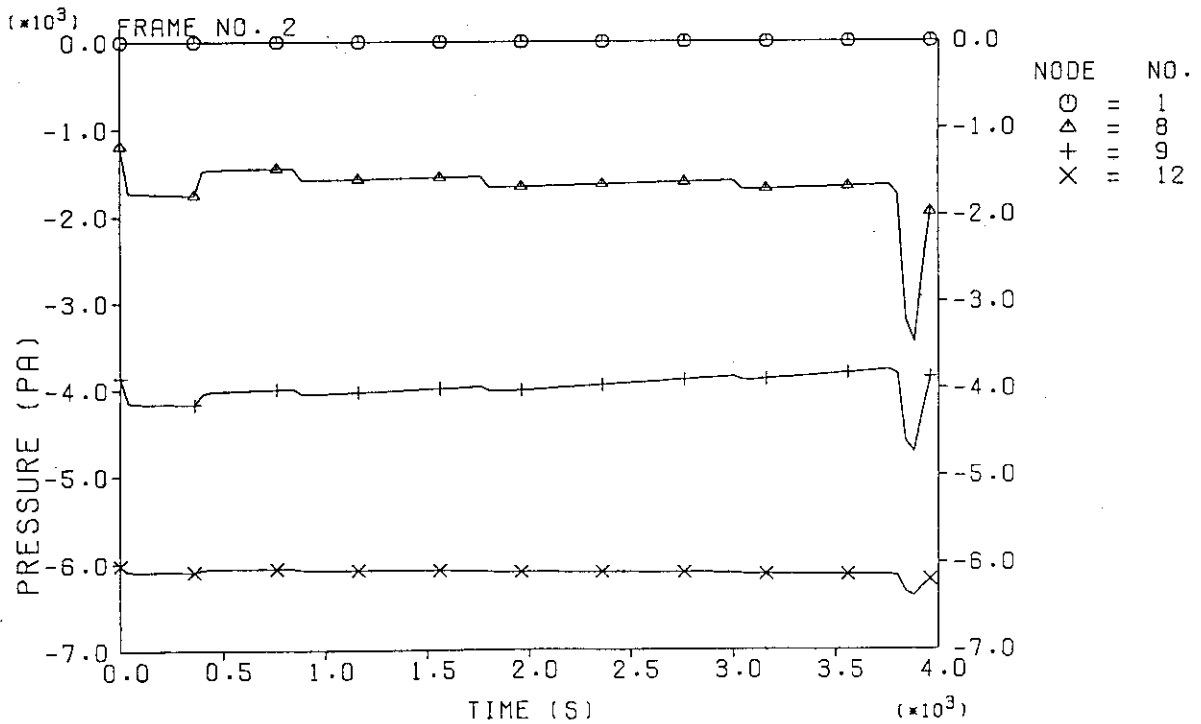
(21) ノード13 (スタック) における放射性物質の放出速度の変化 (FP-13)

FIRE ACCIDENT IN CELL



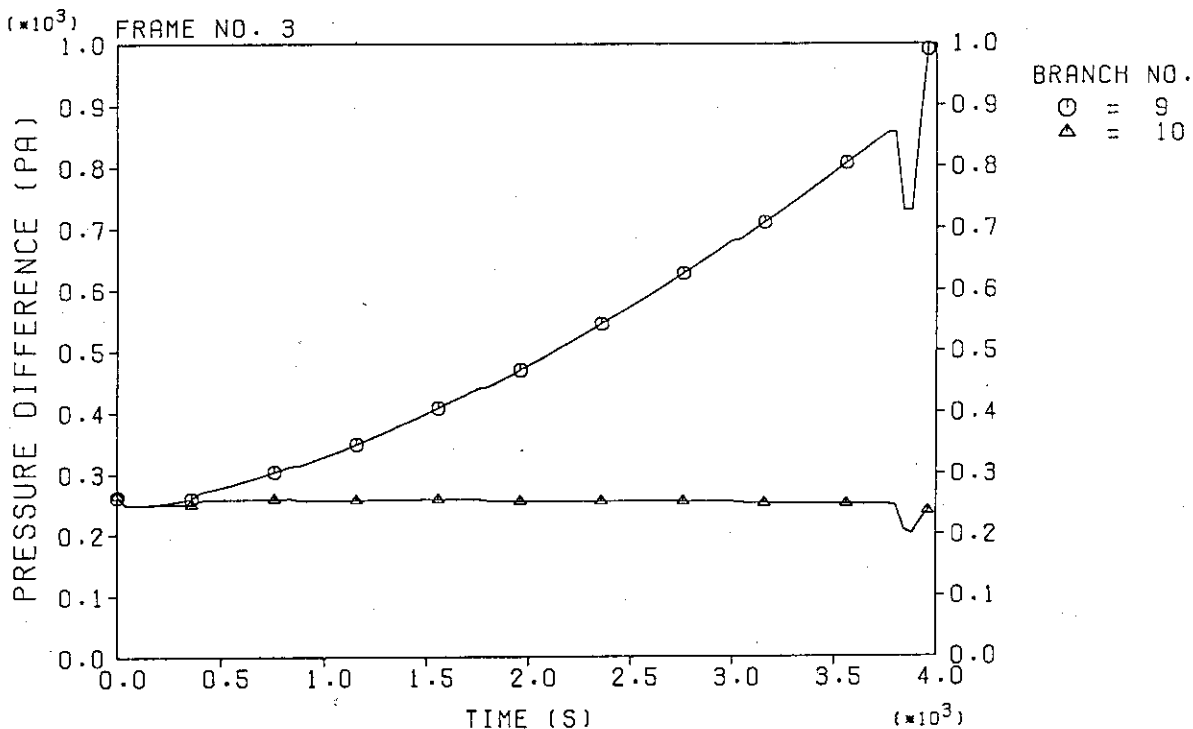
(1) ノード 1、3、4、5 内の圧力変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



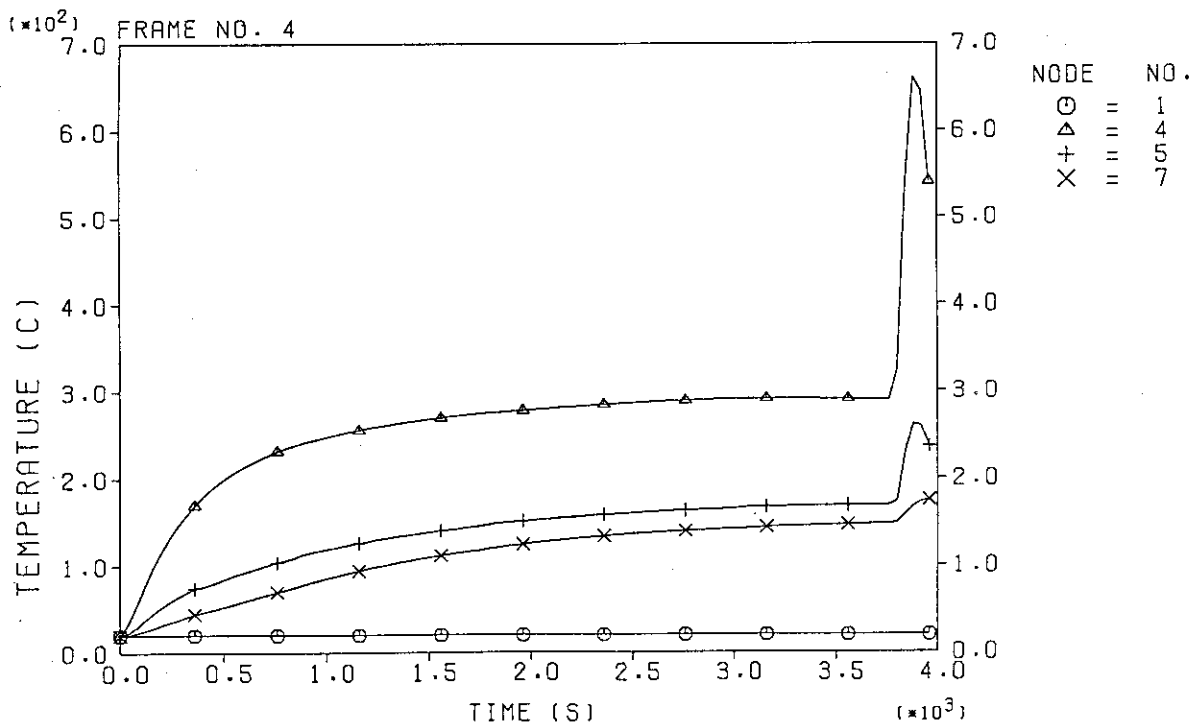
(2) ノード 1、8、9、12 内の圧力変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



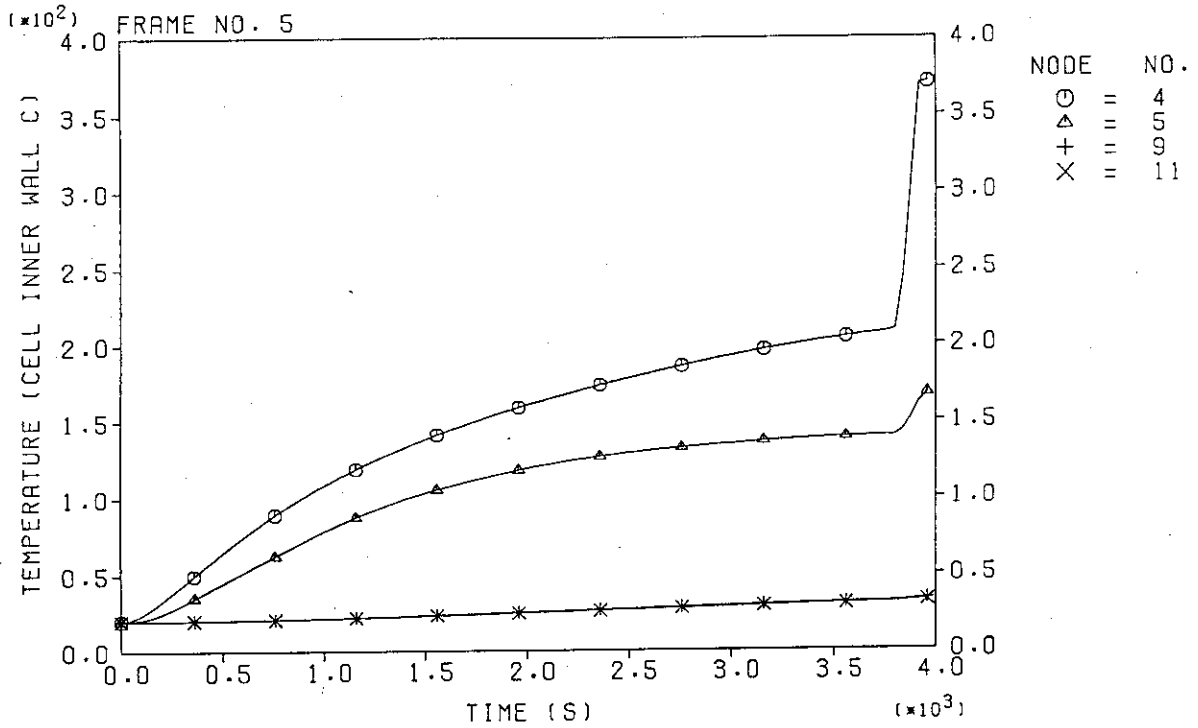
(3) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) 内の差圧変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



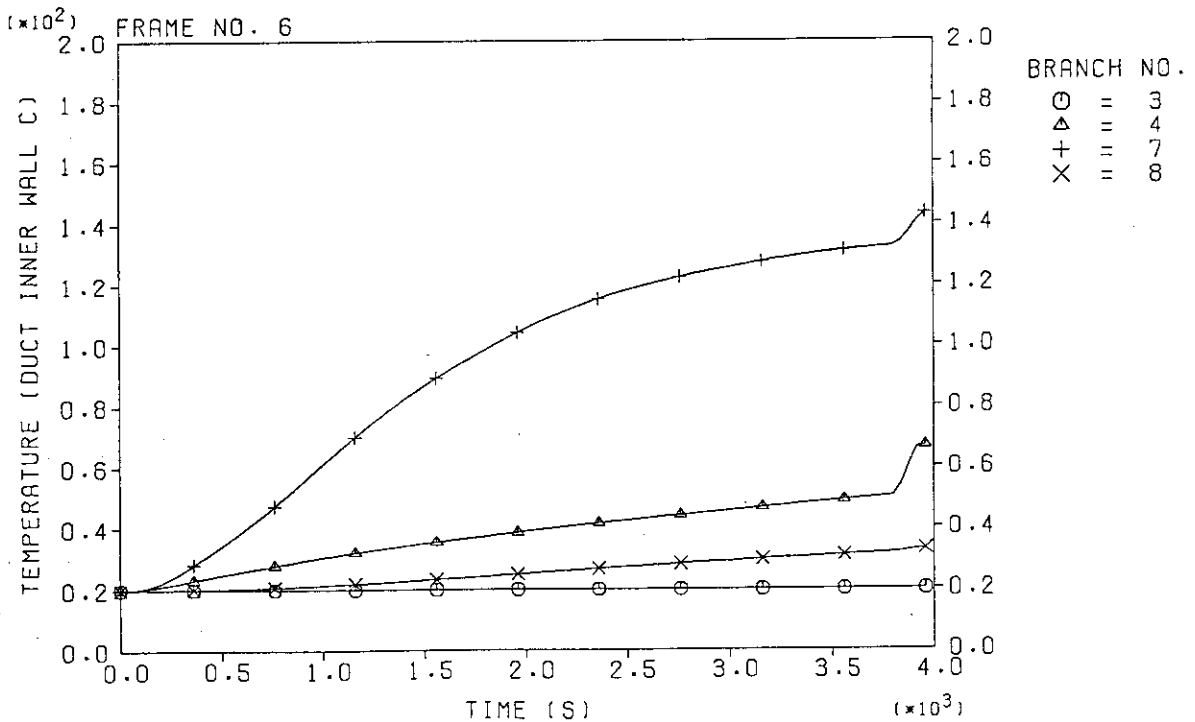
(4) ノード1、4、5、7内の気相温度変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



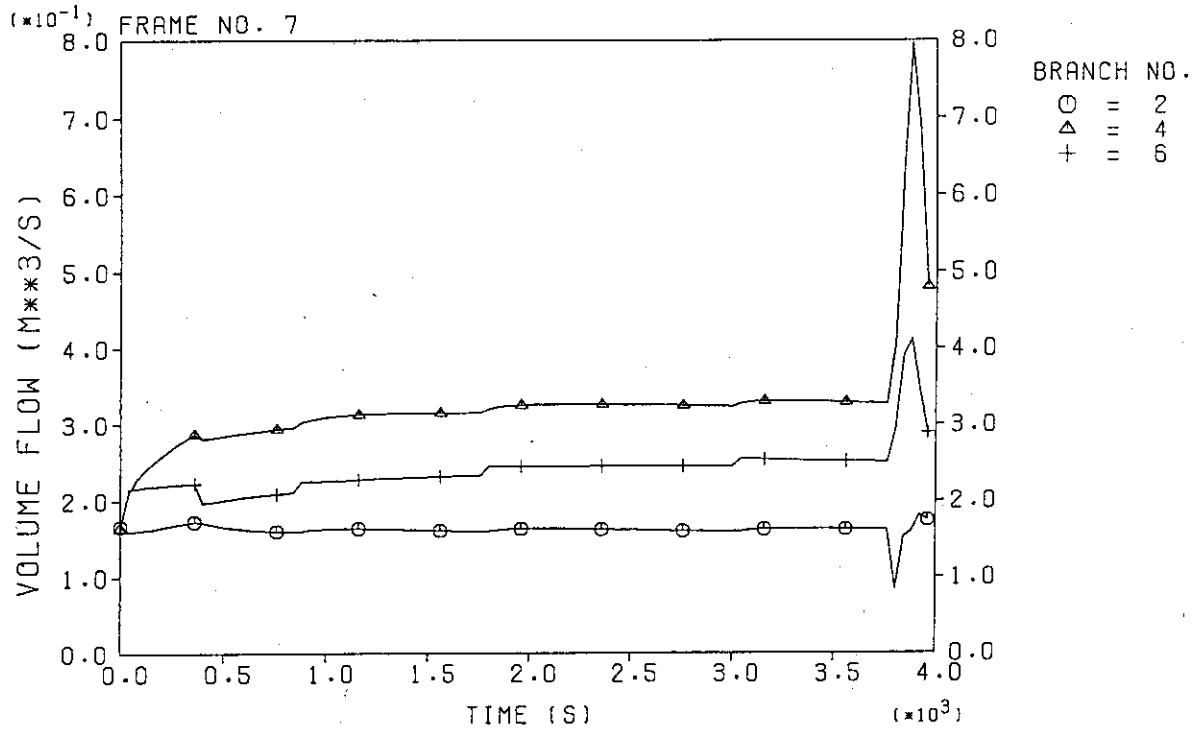
(5) ノード4、5、9、11のセル壁表面の温度変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



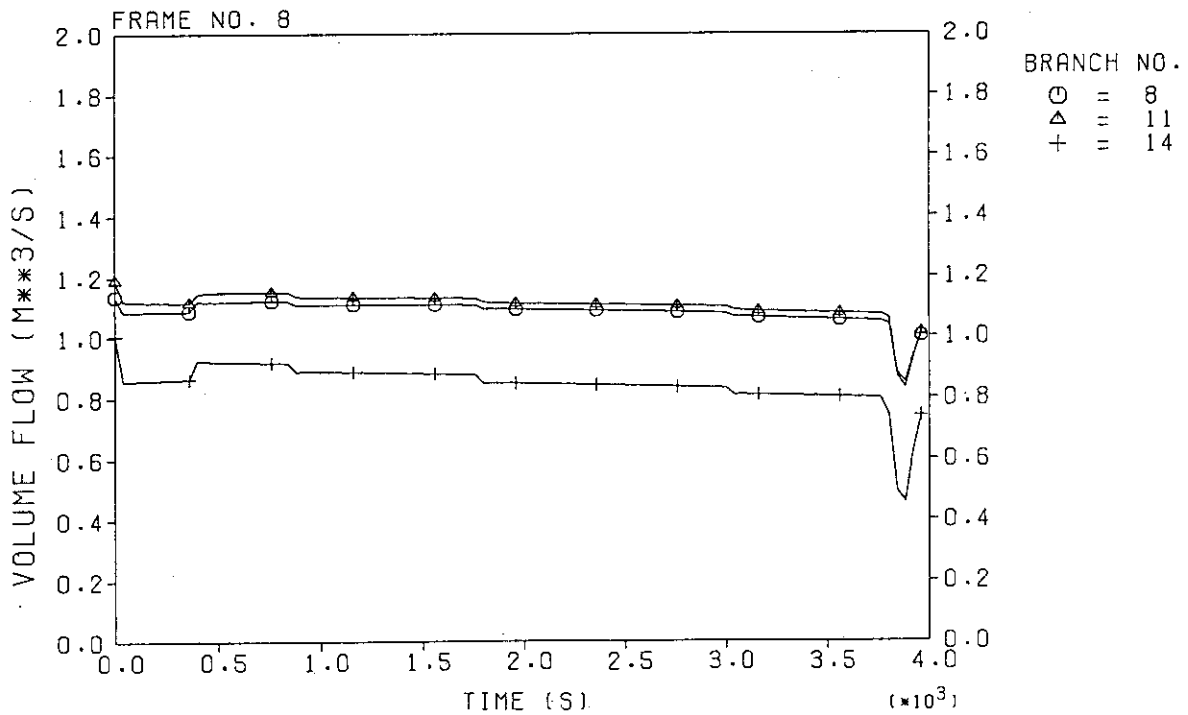
(6) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁表面の温度変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



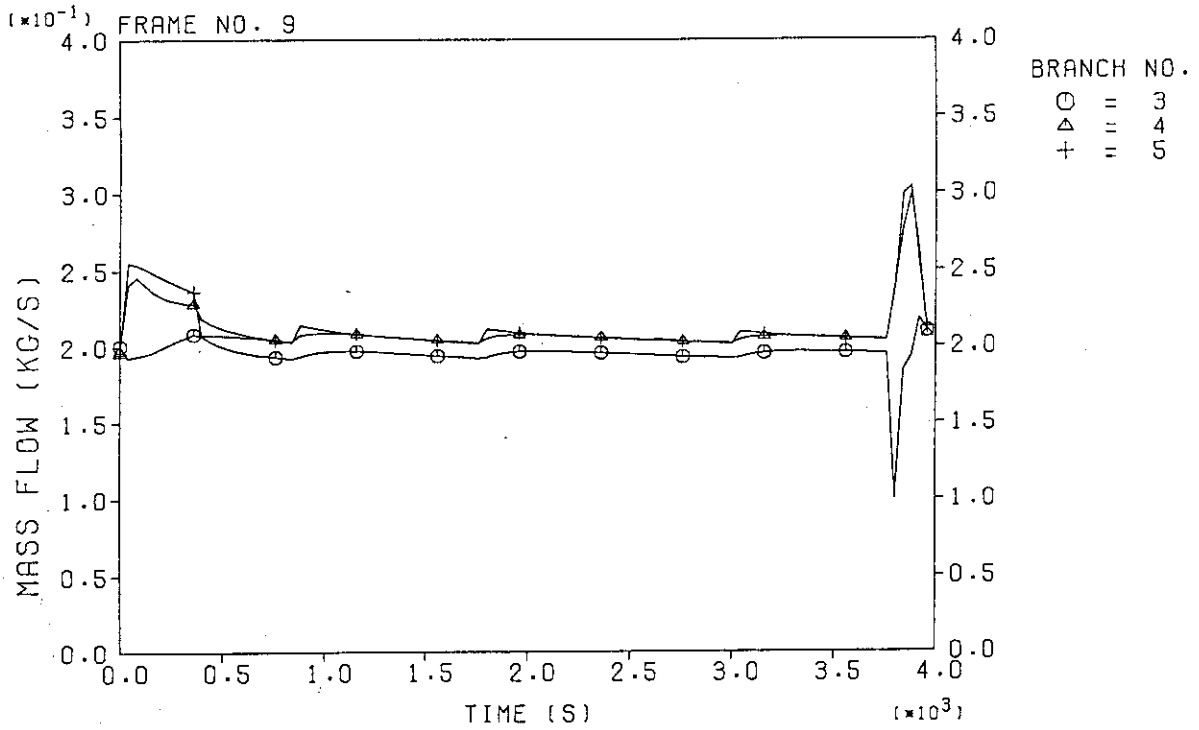
(7) ジャンクション2、4、6を通る流体の体積流量変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



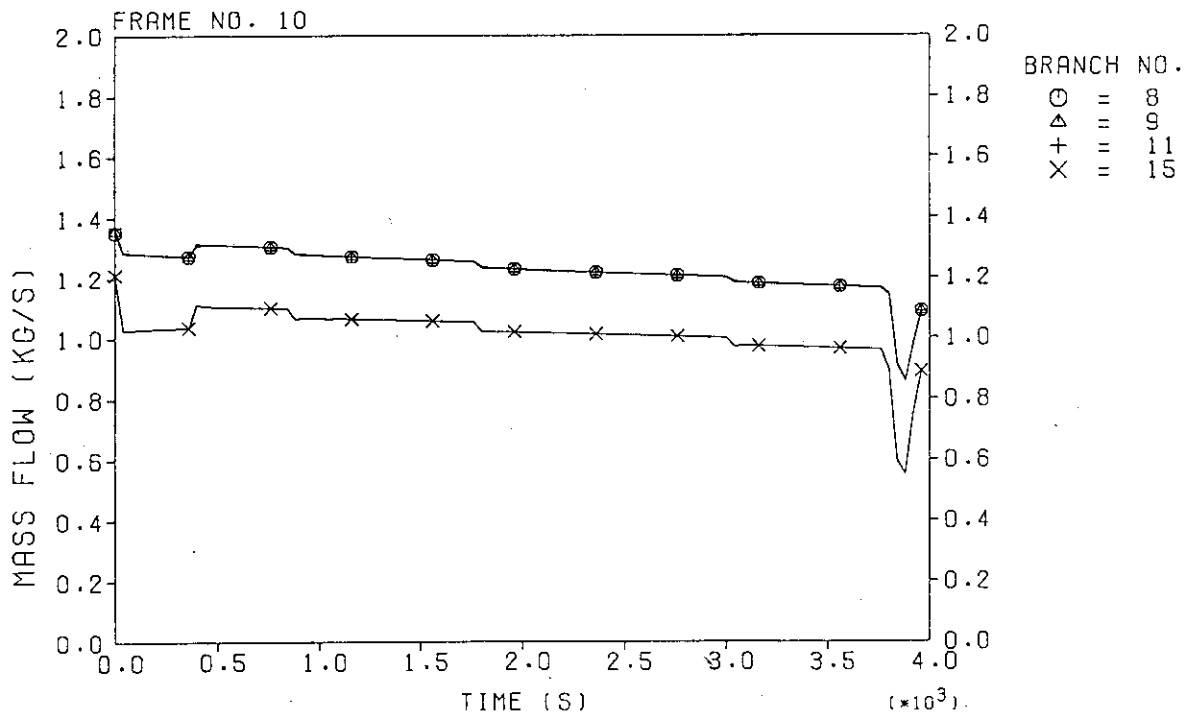
(8) ジャンクション8、11、14を通る流体の体積流量変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



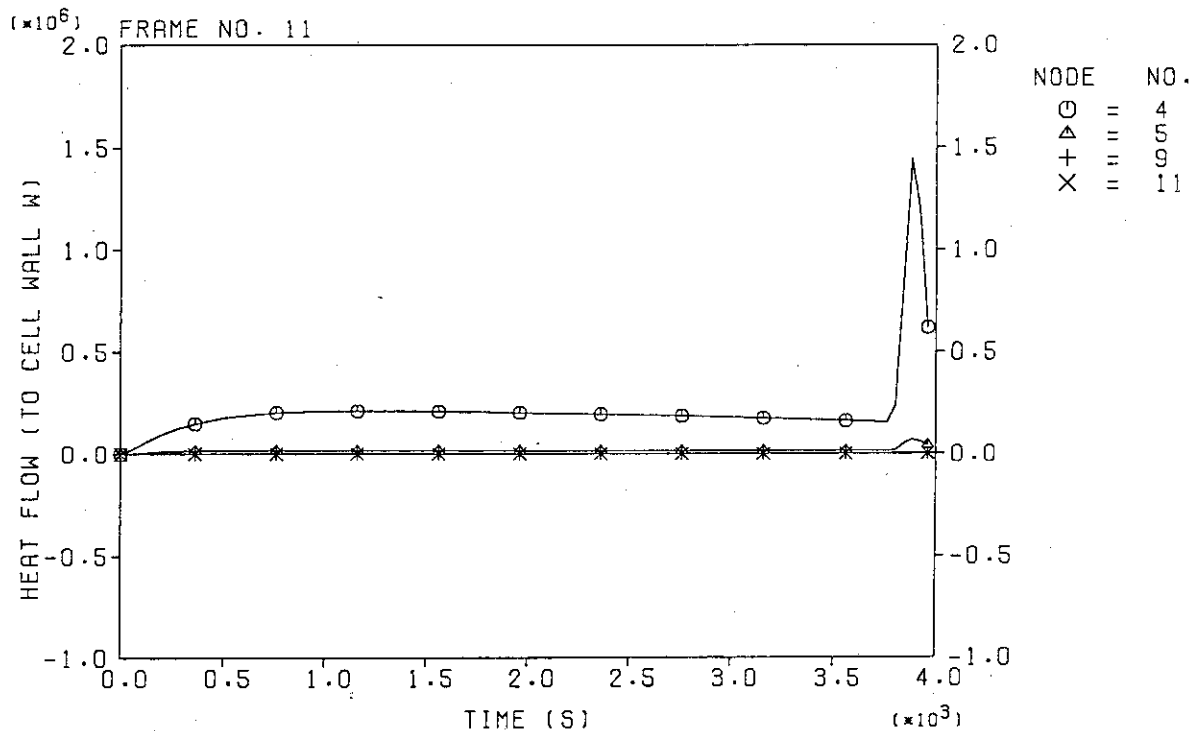
(9) ジャンクション3、4、5を通る流体の質量流量変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



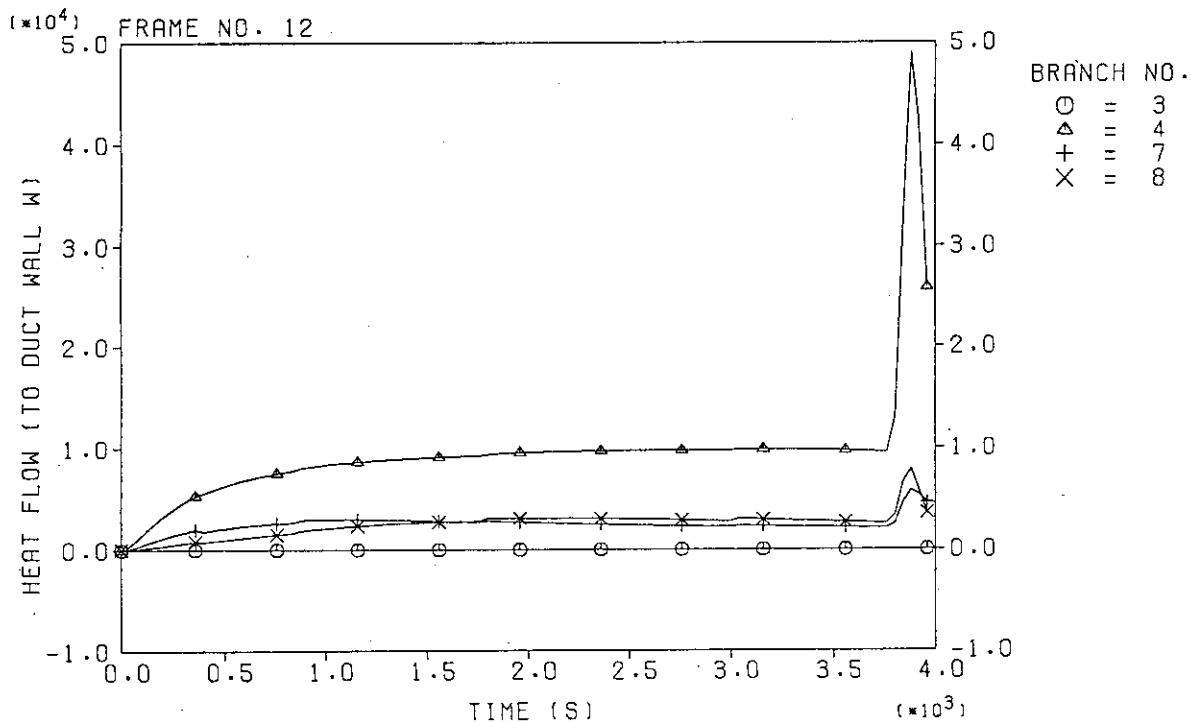
(10) ジャンクション8、9、11、15を通る流体の質量流量変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



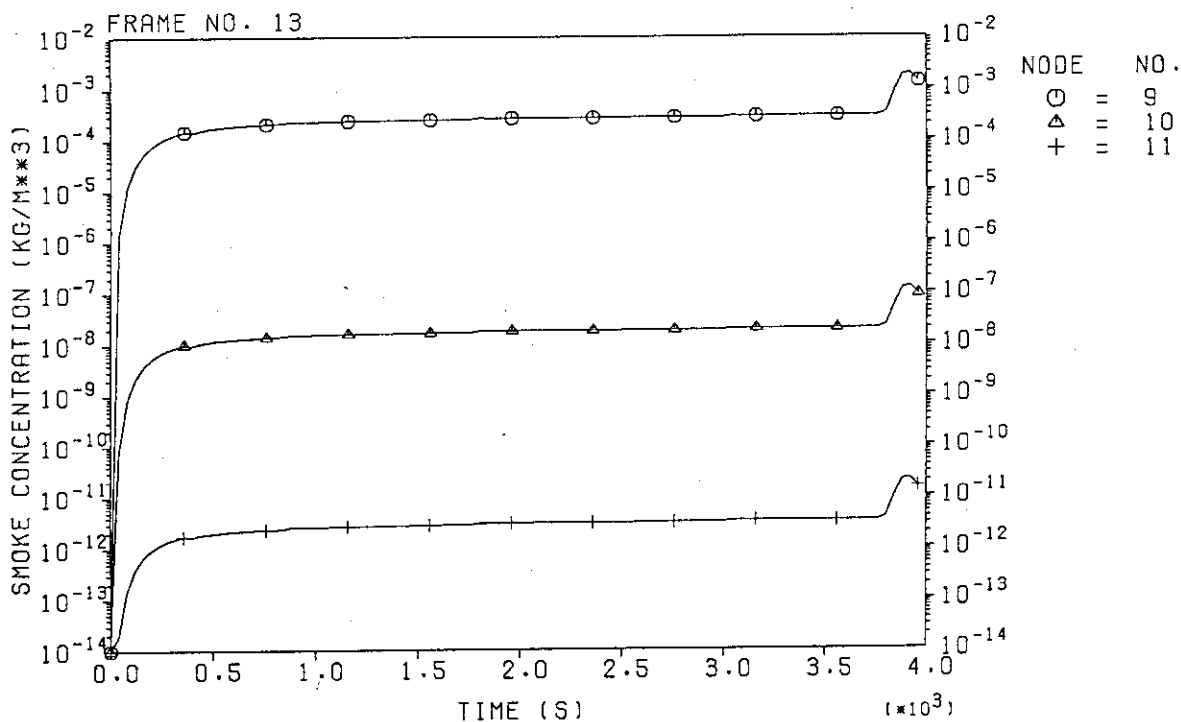
(11) ノード4、5、9、11のセル壁に入る熱流の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



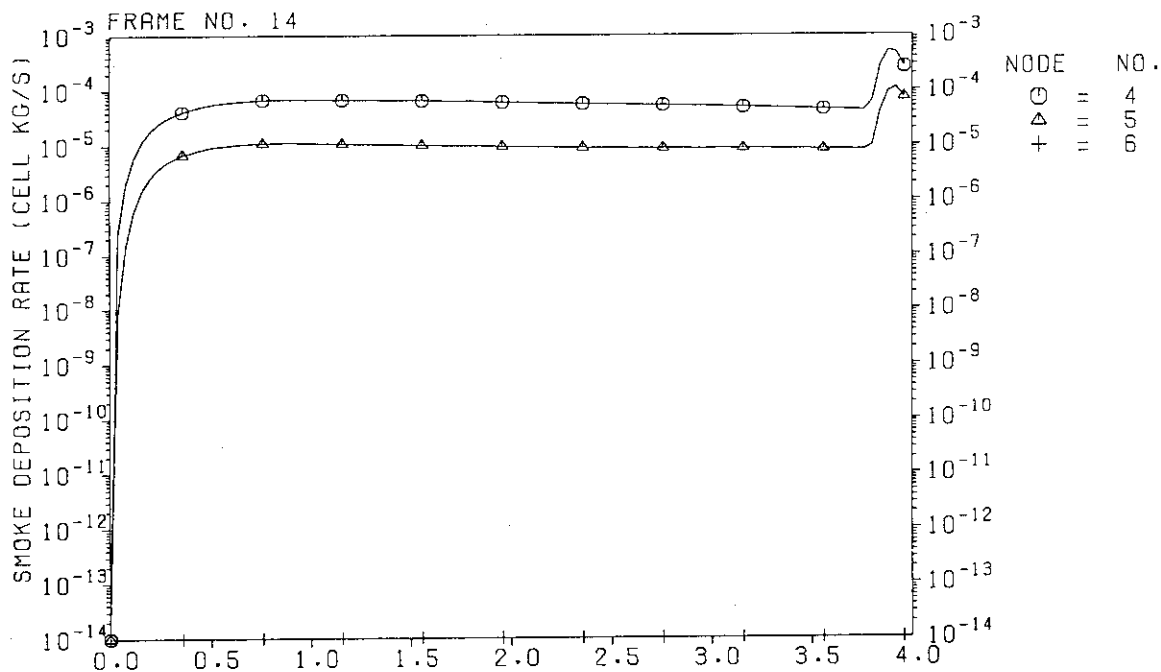
(12) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁に入る熱流の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



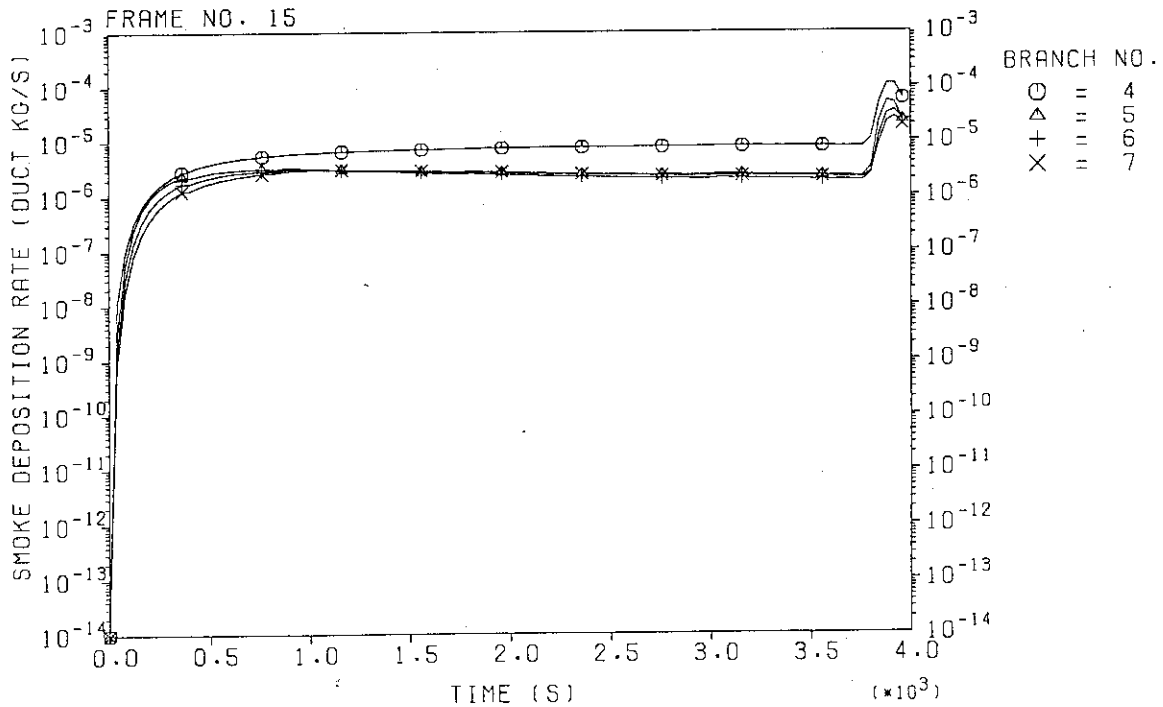
(13) ノード9、10、11 (HEPAフィルタ) の煤煙濃度の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



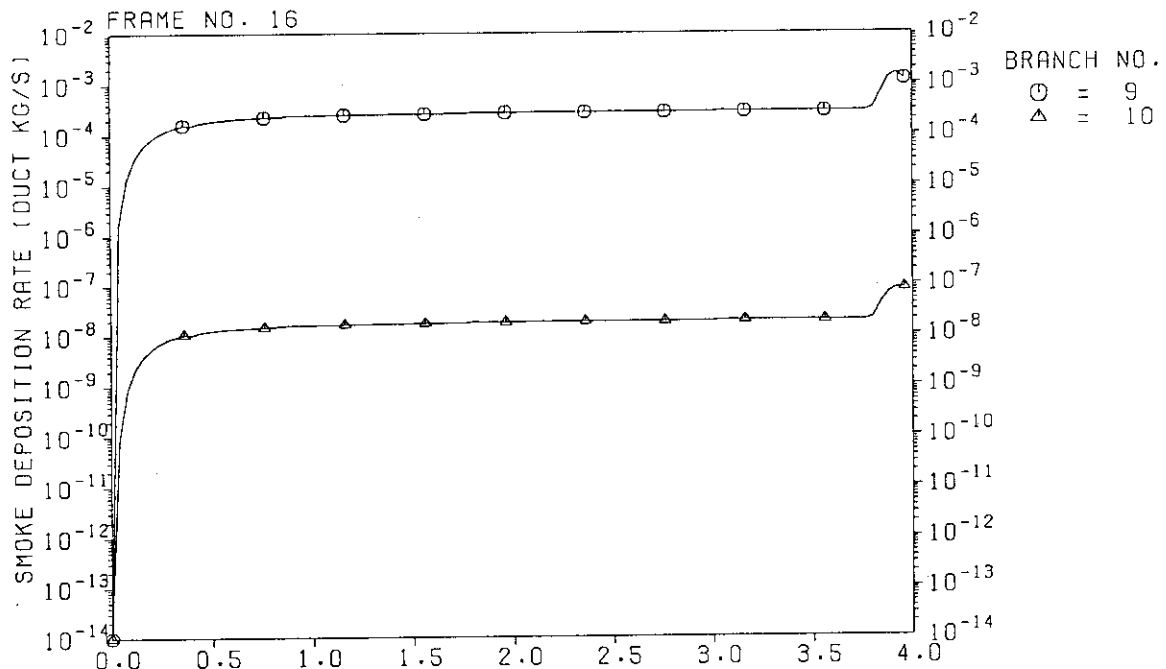
(14) ノード4、5、6内の煤煙の沈着速度の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



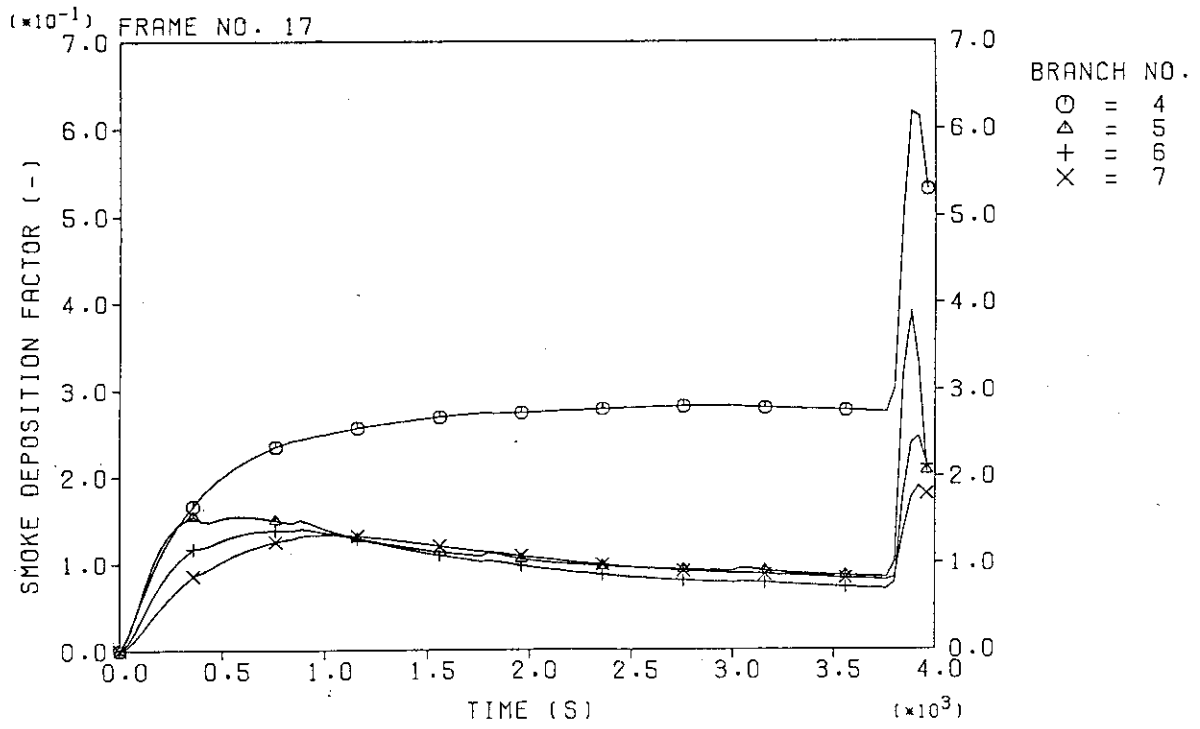
(15) ジャンクション4、5、6、7を通る煤煙の沈着速度の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



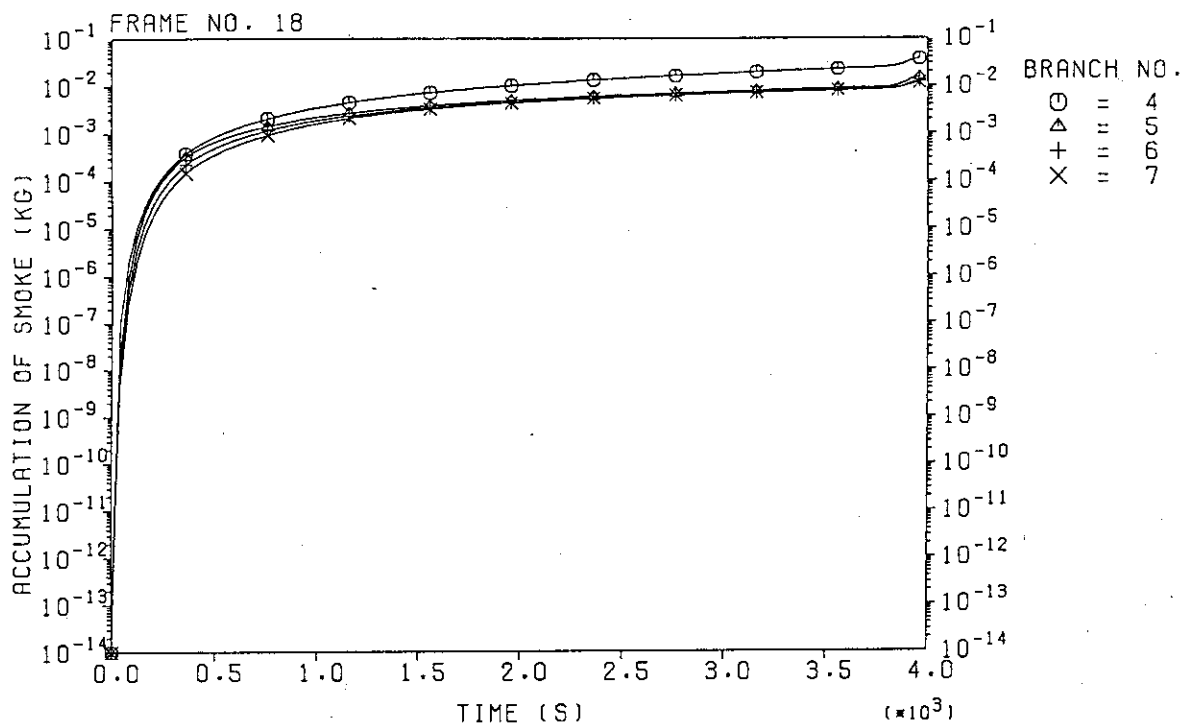
(16) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙捕集速度の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



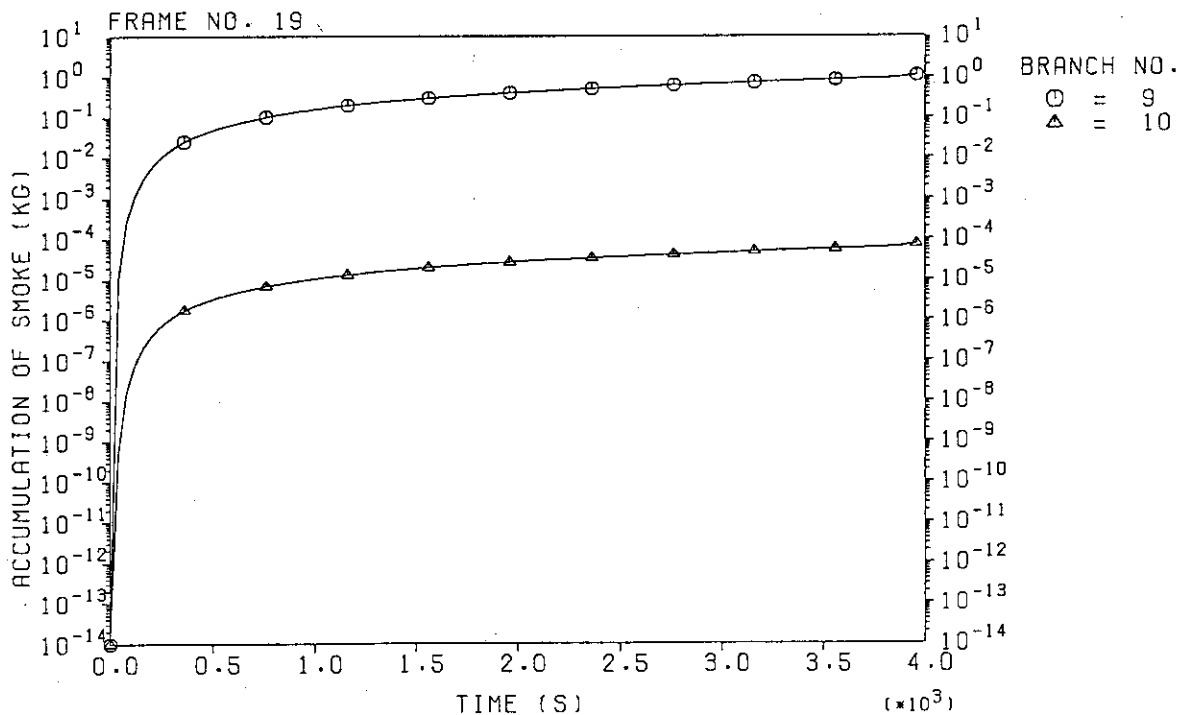
(17) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着分率の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



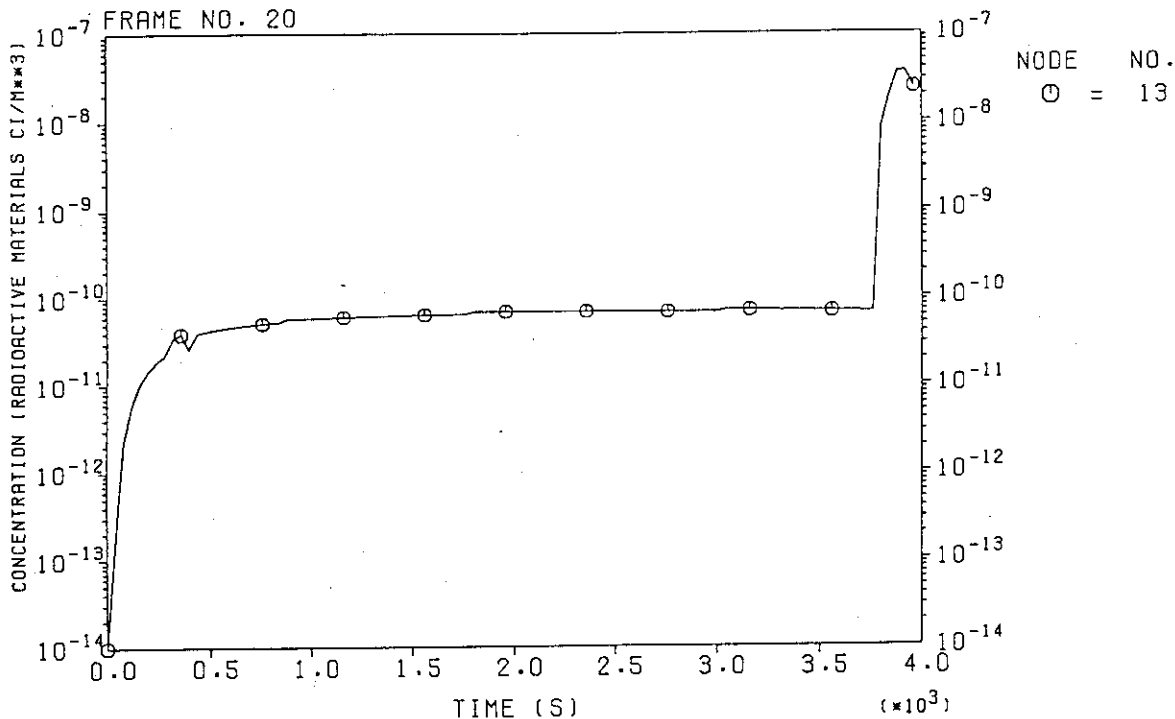
(18) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着量の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



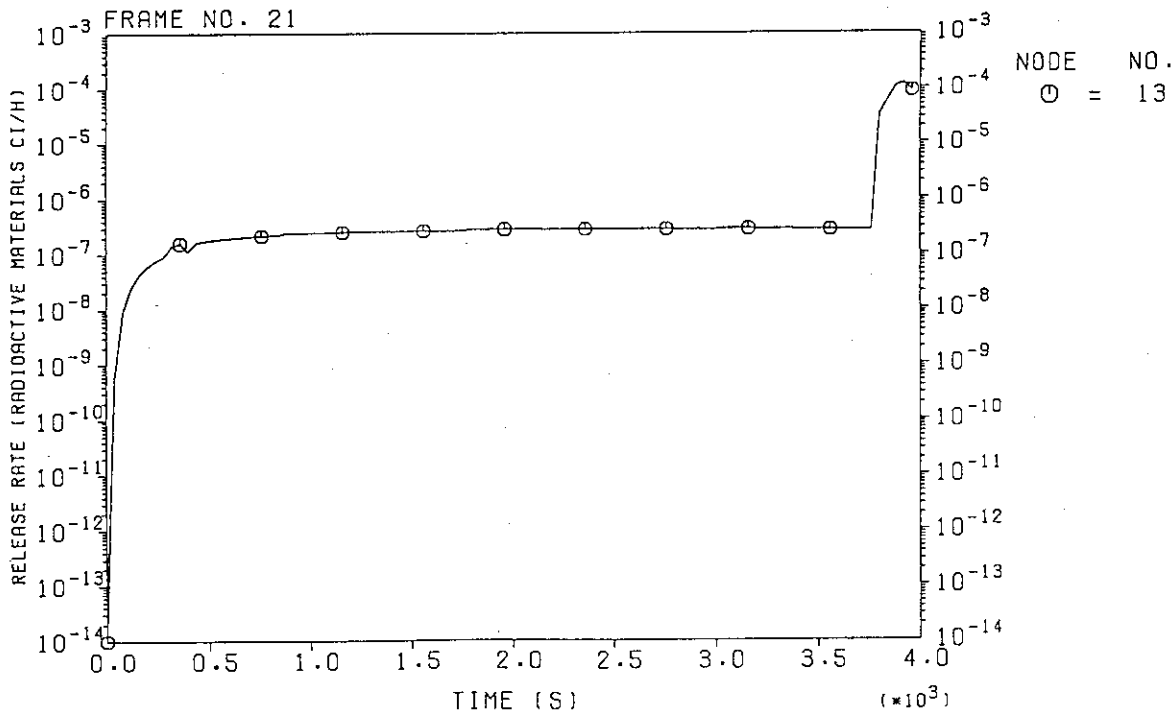
(19) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ)の煤煙沈着量の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



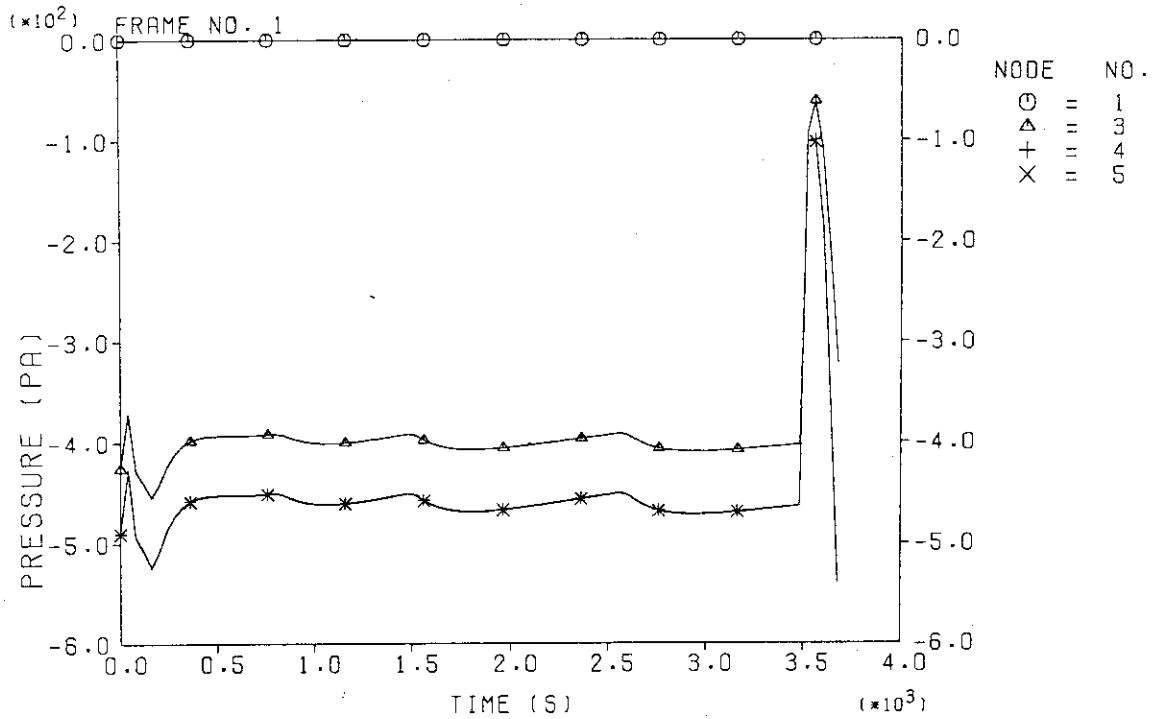
(20) ノード13 (スタック) における放射性物質の濃度変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



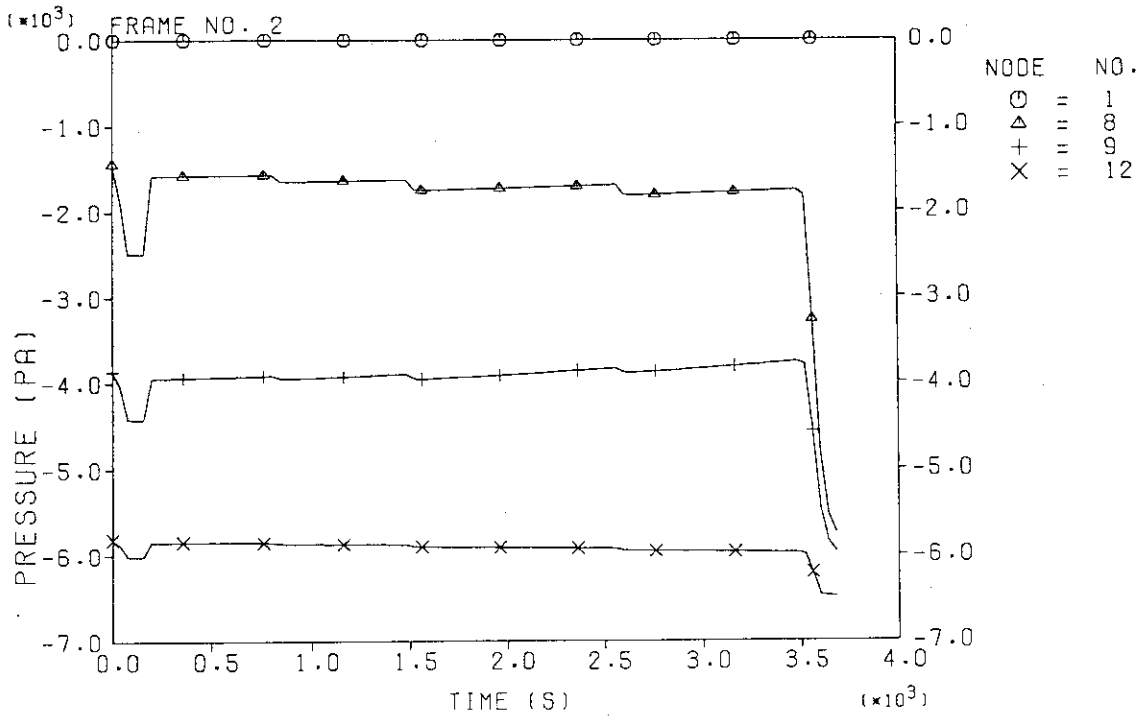
(21) ノード13 (スタック) における放射性物質の放出速度の変化 (FP-14)

FIRE ACCIDENT IN CELL



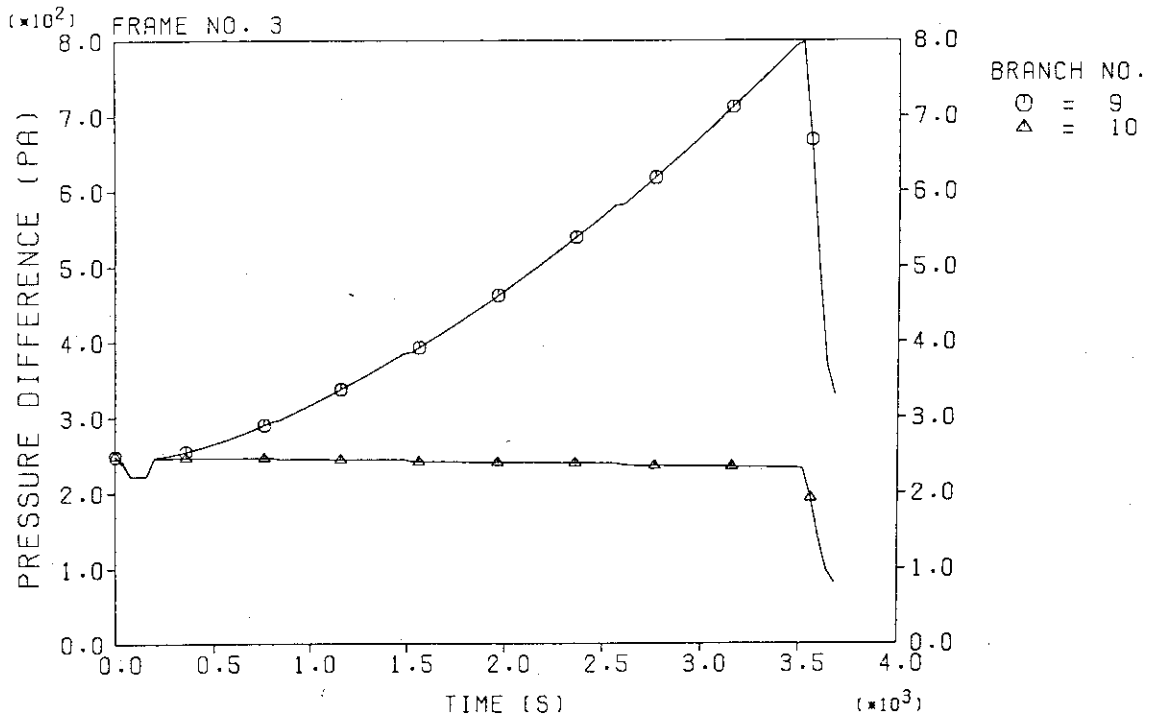
(1) ノード1、3、4、5内の圧力変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



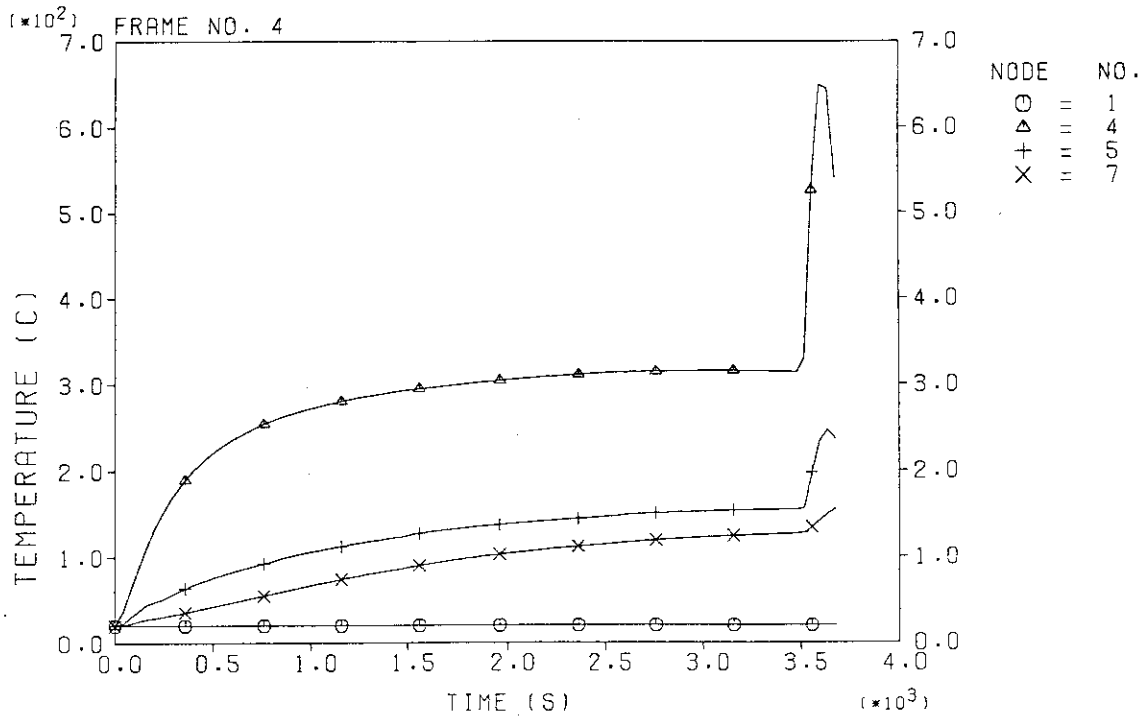
(2) ノード1、8、9、12内の圧力変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



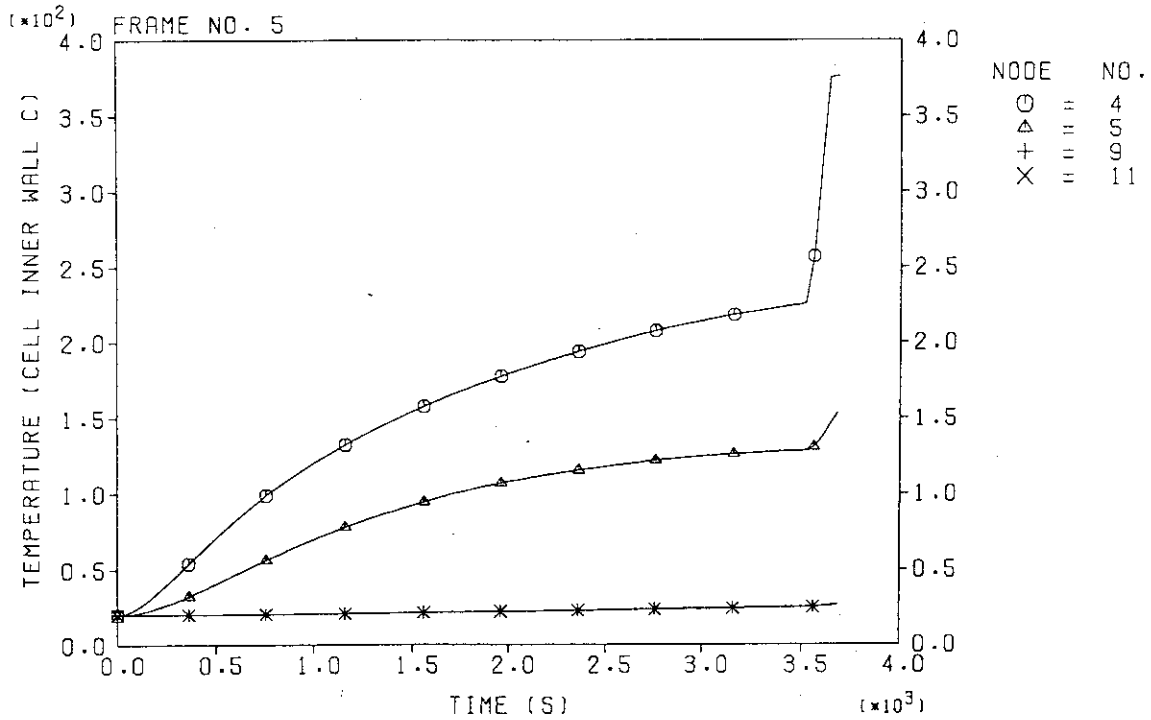
(3) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) 内の差圧変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



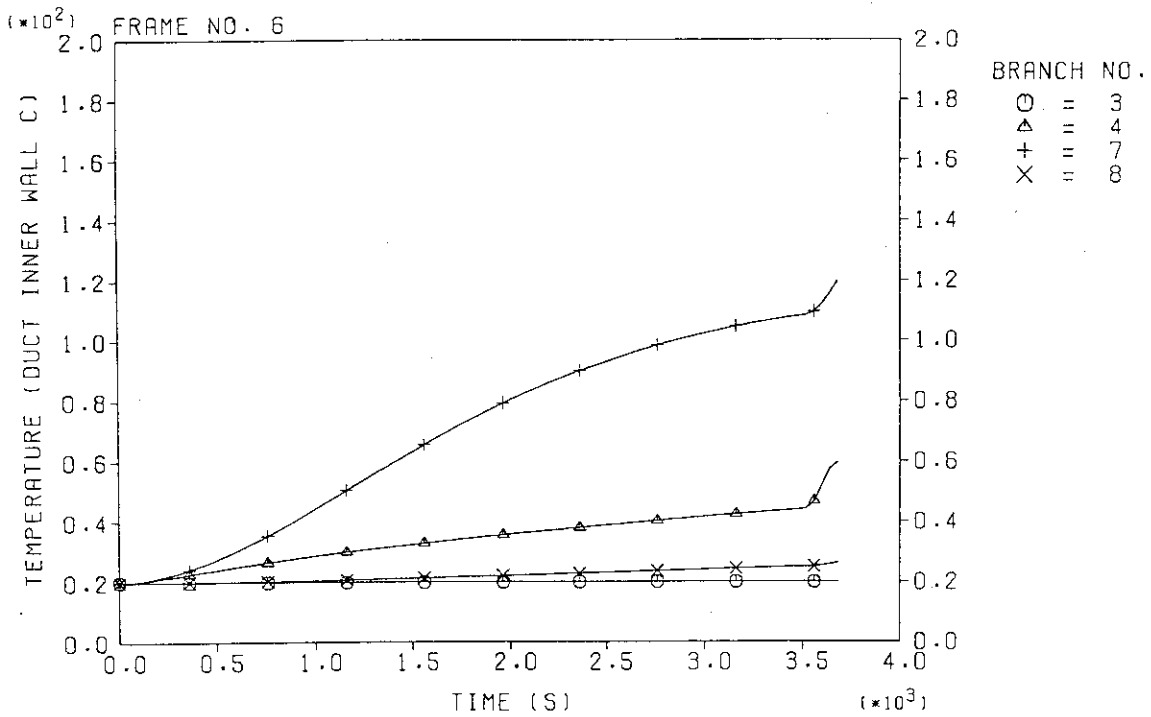
(4) ノード1、4、5、7内の気相温度変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



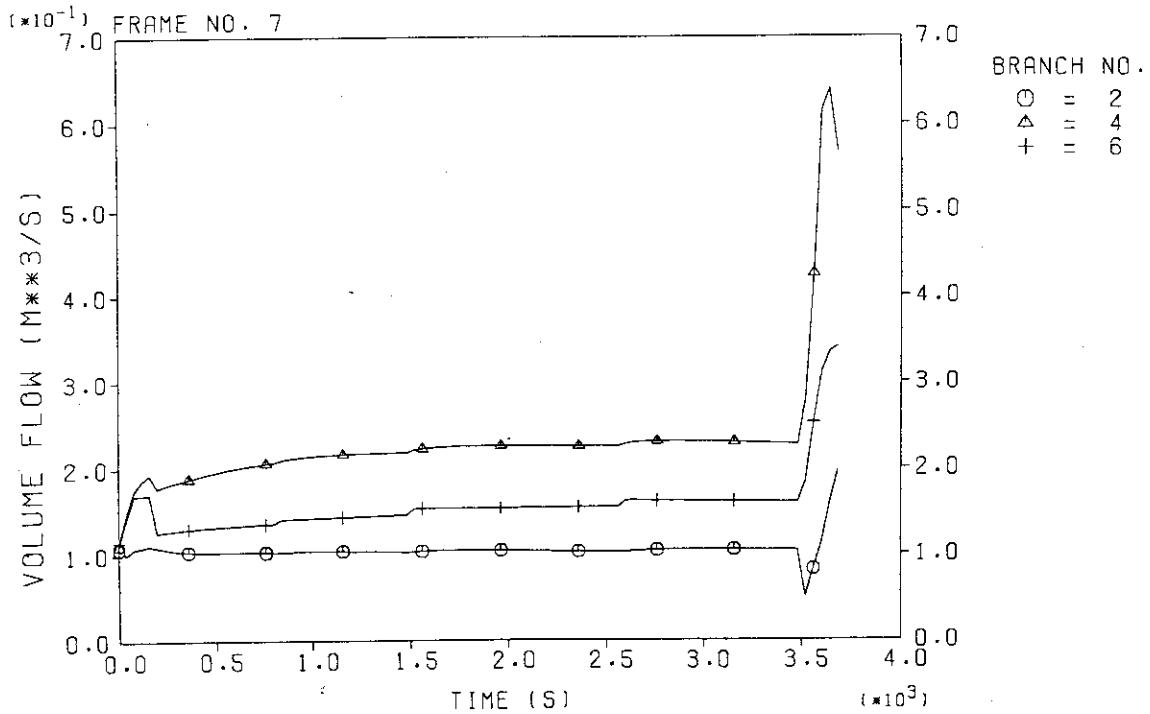
(5) ノード4、5、9、11のセル壁表面の温度変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



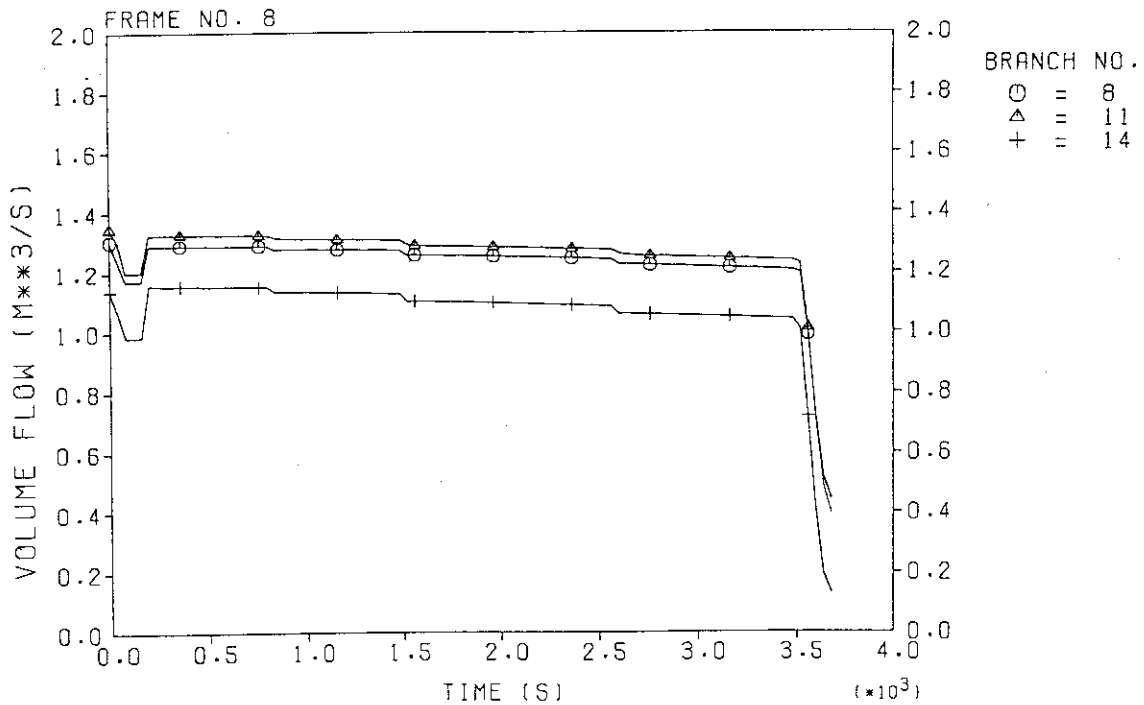
(6) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁表面の温度変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



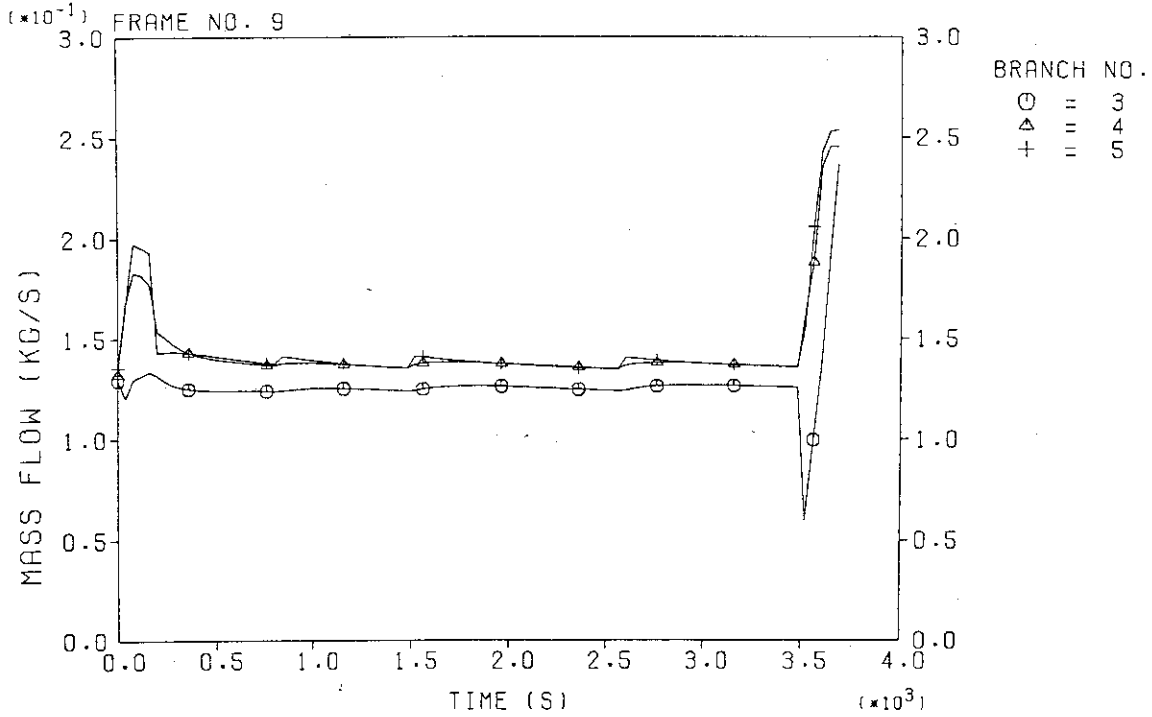
(7) ジャンクション2、4、6を通る流体の体積流量変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



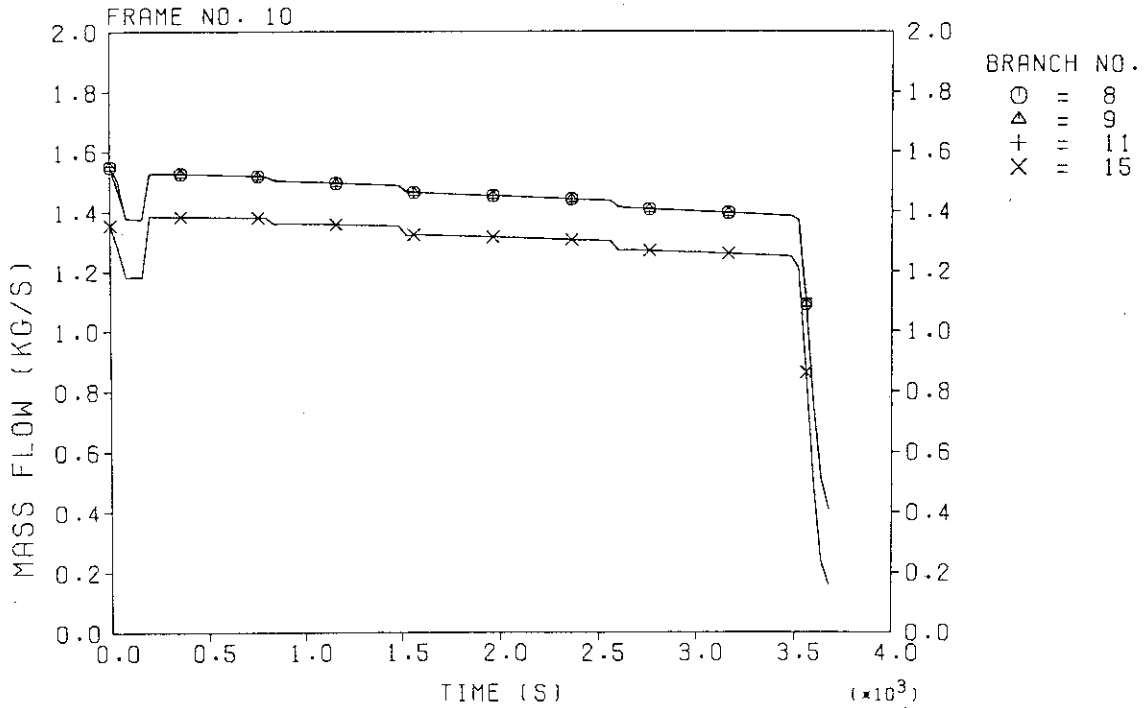
(8) ジャンクション8、11、14を通る流体の体積流量変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



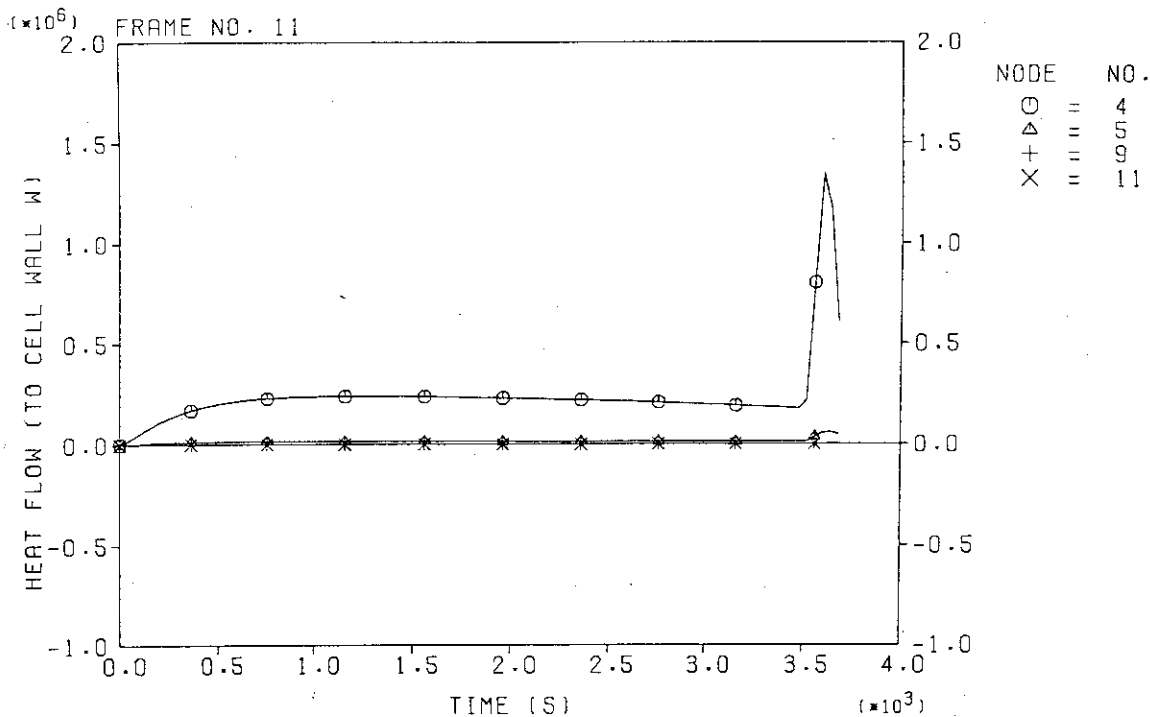
(9) ジャンクション3、4、5を通る流体の質量流量変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



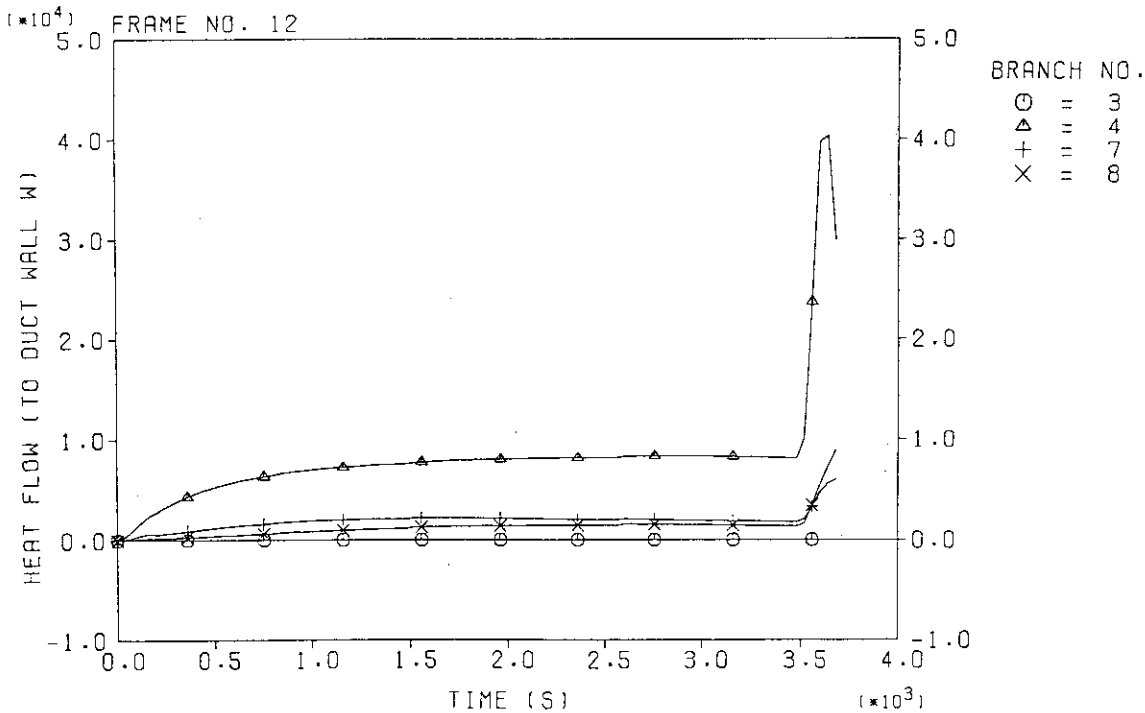
(10) ジャンクション8、9、11、15を通る流体の質量流量変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



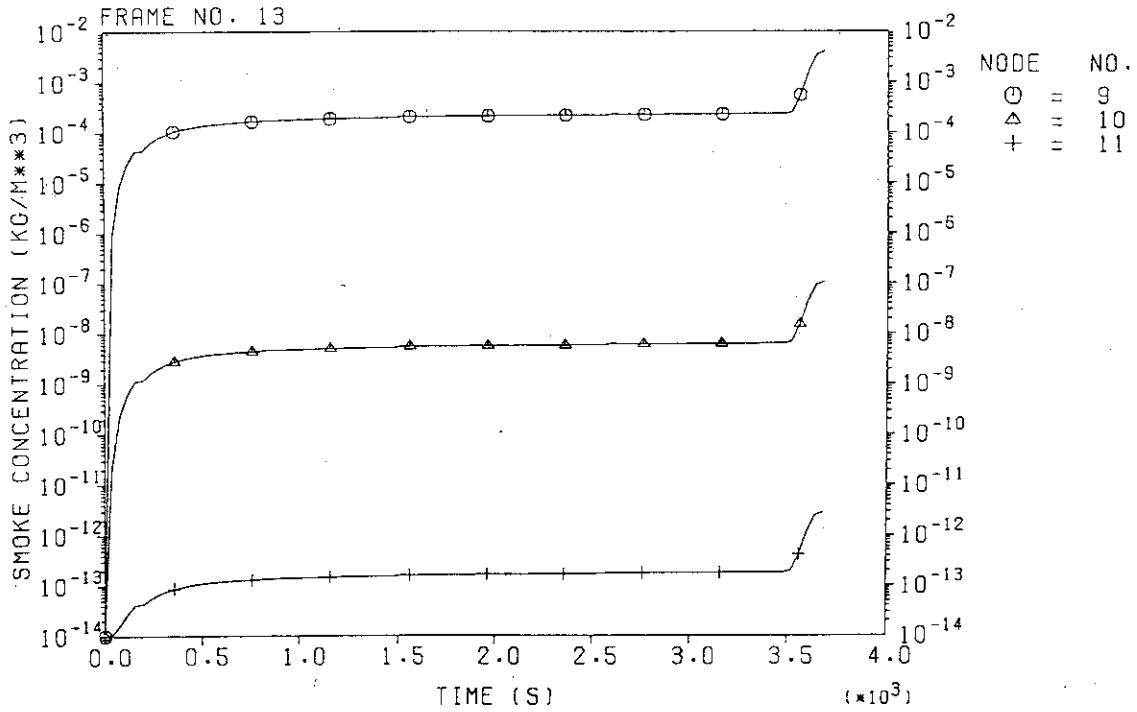
(11) ノード4、5、9、11のセル壁に入る熱流の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



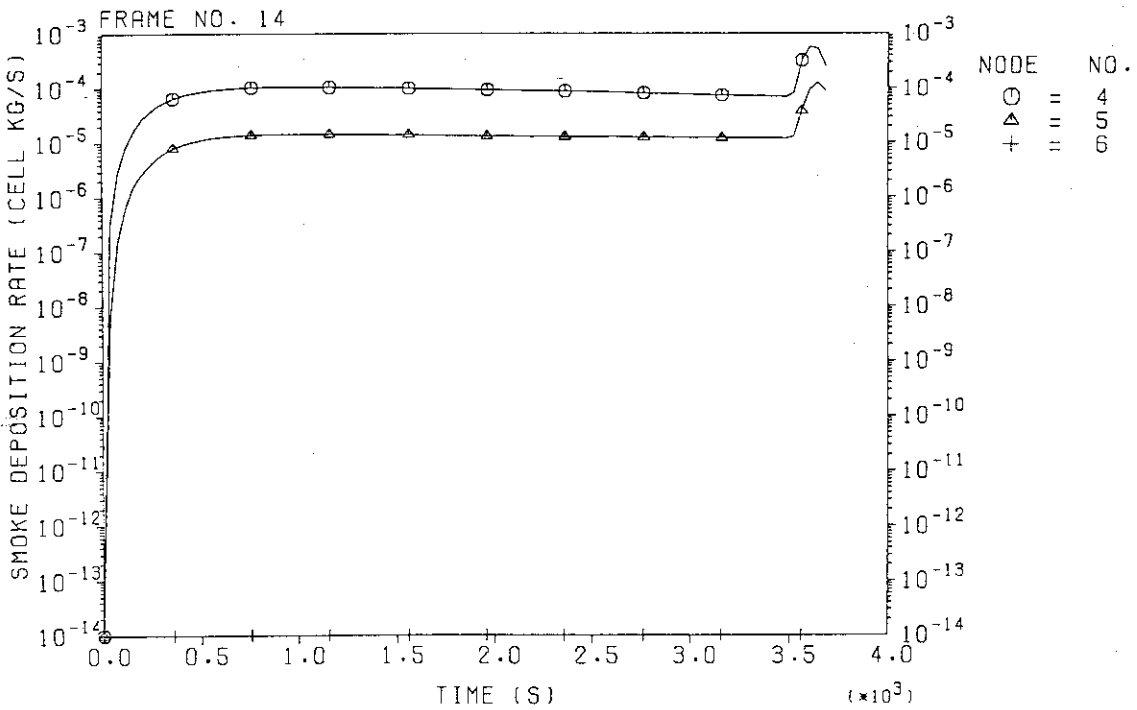
(12) ジャンクション3、4、7、8のダクト壁に入る熱流の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



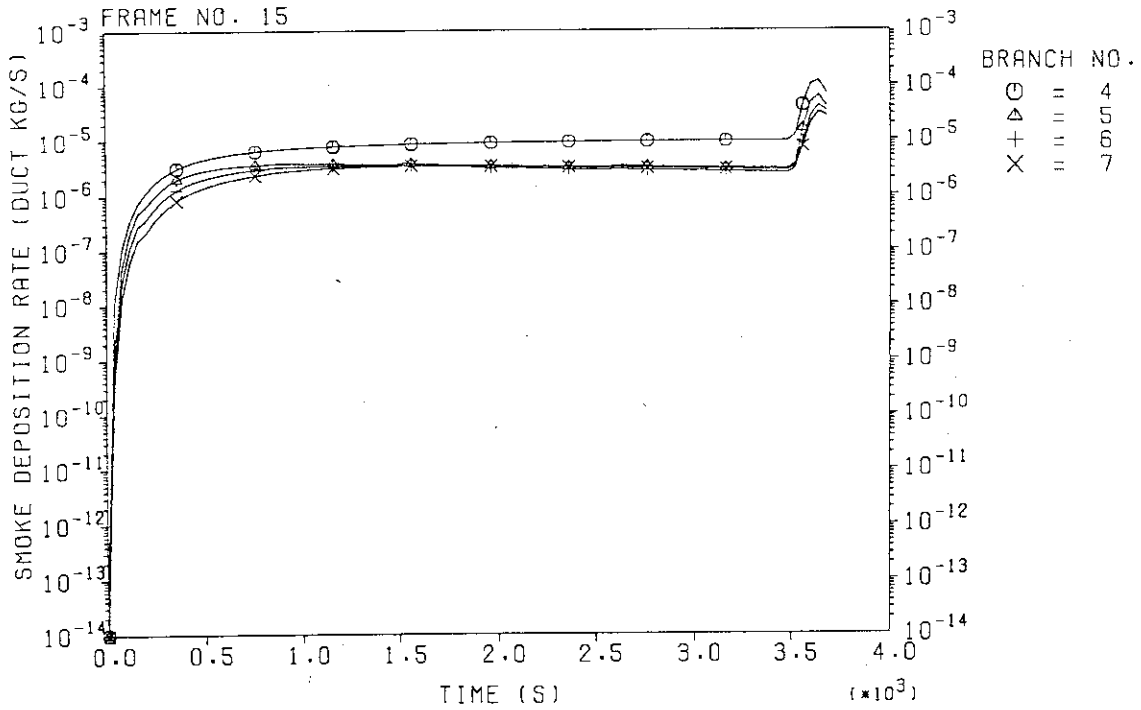
(13) ノード9、10、11 (HEPAフィルタ) の煤煙濃度の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



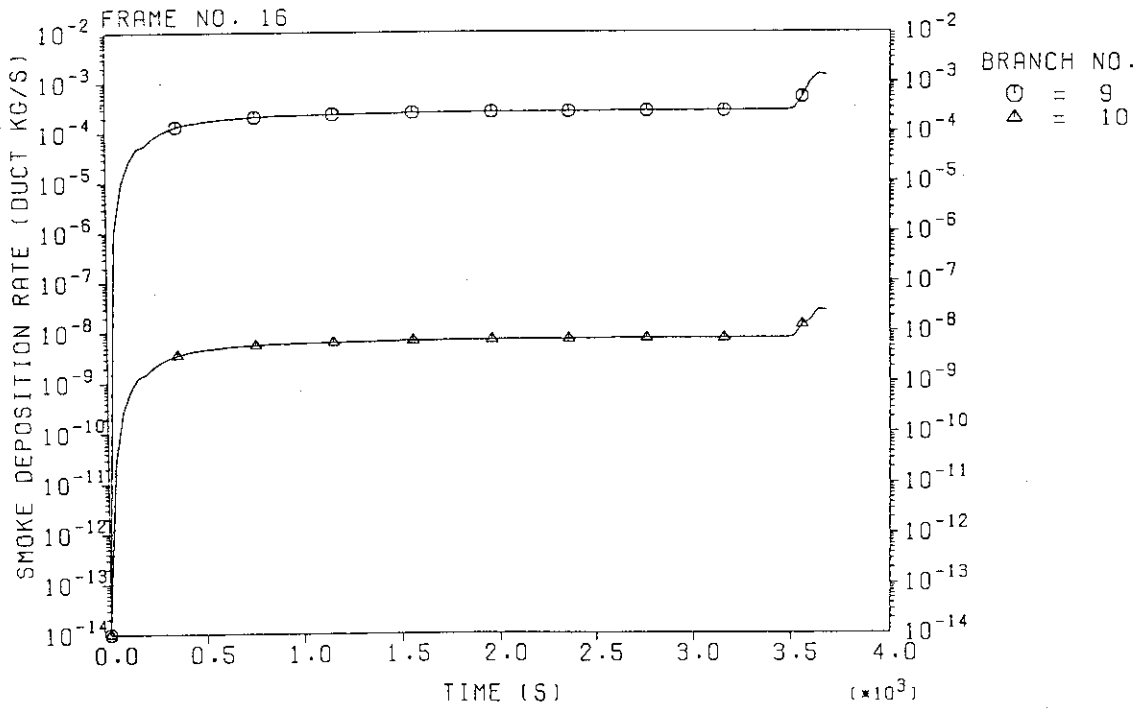
(14) ノード4、5、6内の煤煙の沈着速度の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



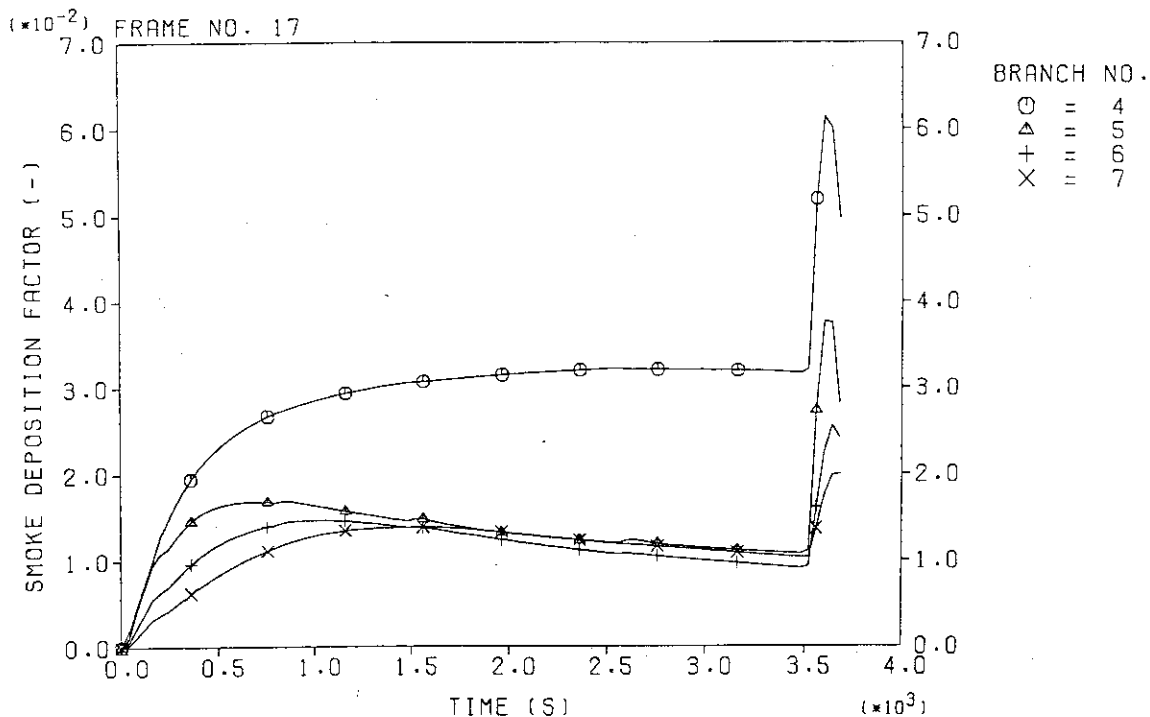
(15) ジャンクション4、5、6、7を通る煤煙の沈着速度の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



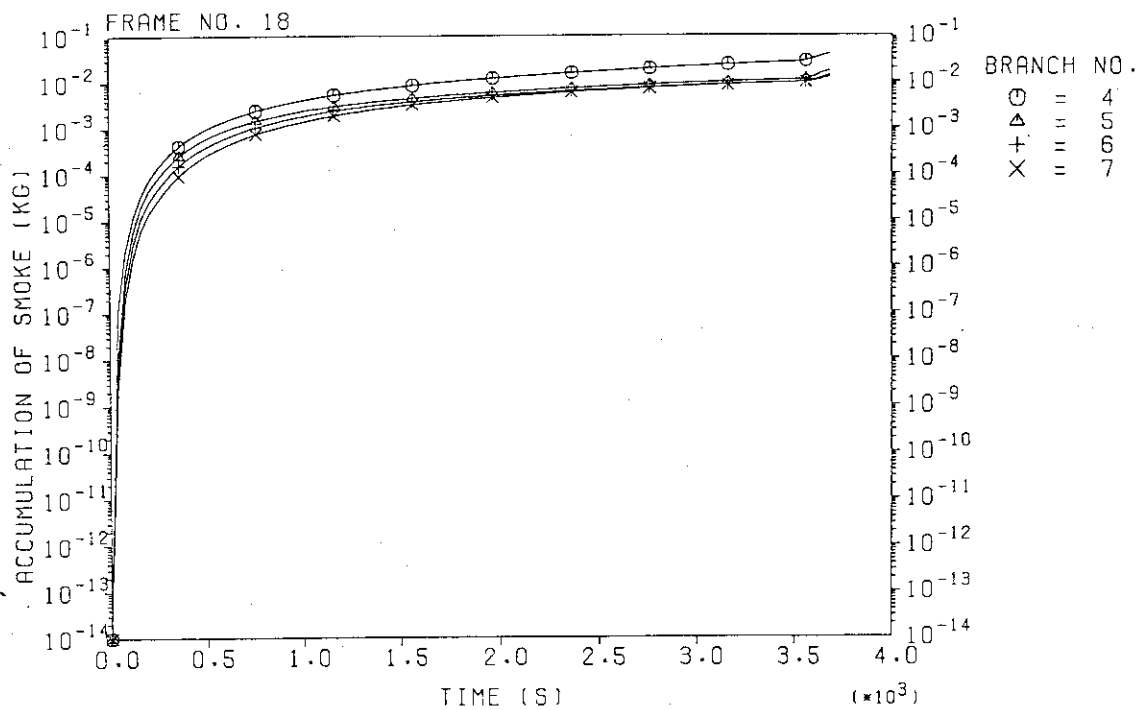
(16) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙捕集速度の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



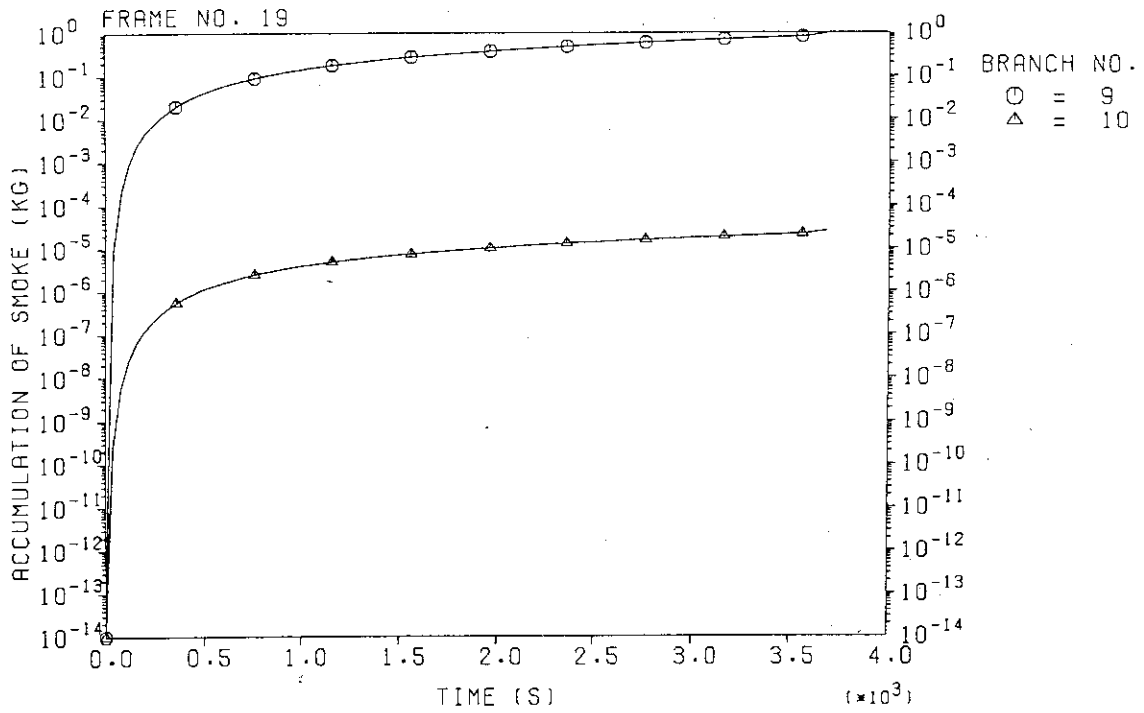
(17) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着分率の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



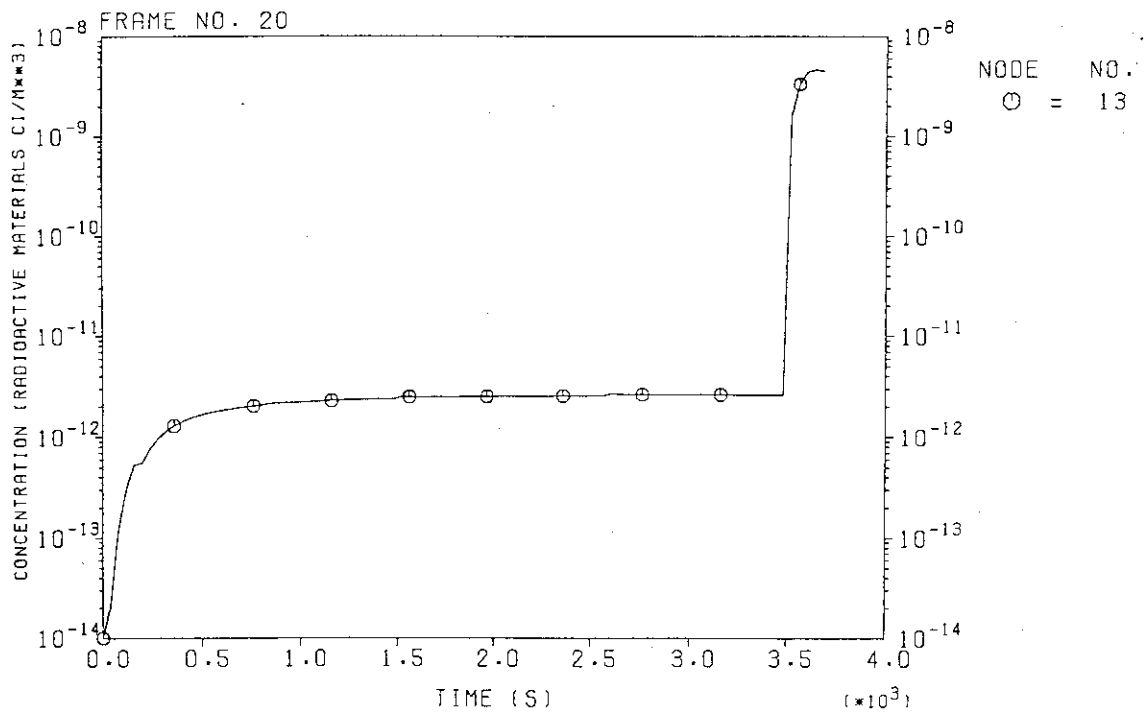
(18) ジャンクション4、5、6、7の煤煙沈着量の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



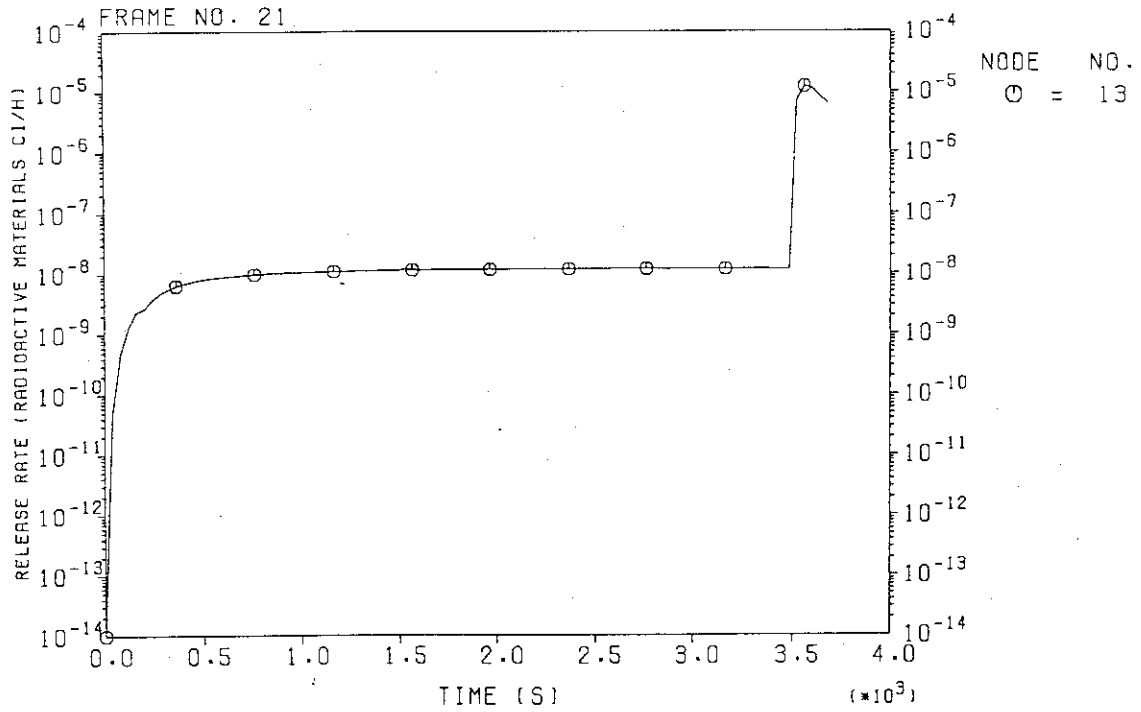
(19) ジャンクション9、10 (HEPAフィルタ) の煤煙沈着量の変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



(20) ノード13 (スタック) における放射性物質の濃度変化 (FP-16)

FIRE ACCIDENT IN CELL



(21) ノード13 (スタック) における放射性物質の放出速度の変化 (FP-16)