

JAERI-Tech
2004-029



JP0450354



CELVA-1Dを用いた火災事故時の煤煙による
換気系フィルタの差圧解析

2004年 3月

渡邊 浩二・田代 信介・阿部 仁・高田 準一*・森田 泰治

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

CELVA-1D を用いた火災事故時の煤煙による換気系フィルタの差圧解析

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部

渡邊 浩二・田代 信介[†]・阿部 仁・高田 準一*・森田 泰治

(2004年1月30日受理)

再処理施設等の核燃料施設の一部の建屋換気系には、換気系フィルタの一種として前置フィルタが用いられている。火災事故時には、この前置フィルタが大量の煤煙によって目詰まりし、差圧が上昇して破損することが考えられる。従って、放射性物質の閉じ込め機能を維持する観点から、前置フィルタの差圧の時間変化を精度良く予測することは重要である。本研究では、粒径 $2\mu\text{m}$ 以上の煤煙粒子に対する前置フィルタの DF にも粒径範囲 $0.7\text{--}2\mu\text{m}$ の煤煙粒子に対する実測 DF から作成した粒径-前置フィルタの DF に関する実験式が適用できると仮定した。この仮定を用いた CELVA-1D による解析結果は、試験結果と良く一致した。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、原研が文部科学省から委託されて実施した「再処理施設セル換気系安全性実証試験」の研究成果を一部使用し取りまとめたものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

† 本報告書に関する問合せ先

* 2003.3.31 退職

Differential Pressure Analysis for Ventilation Filter
by Smoke under Fire Accident with CELVA-1D

Kouji WATANABE, Shinsuke TASHIRO[†], Hitoshi ABE, Junichi TAKADA*,
and Yasuji MORITA

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

(Received January 30, 2004)

In a part of building ventilating installation of a nuclear fuel facility, a reprocessing plant for example, the pre-filters are adopted as one of the ventilation filters. In a fire accident, it is supposed that, because of the pre-filter clogging by large smoke, its differential pressure (Δp) is evolved up to the value at its breakage. Therefore, in regard to maintaining the confinement of radioactive materials, it is important to predict the time course of Δp of the pre-filter accurately.

In the current study, it was assumed that the empirical equation for the DF of the pre-filter as function of smoke particle diameter (SPD), between 0.7-2 μm , could be applied to estimating its DF for SPD above 2 μm . Under this assumption, the time corresponding to its Δp at its breakage, calculated by CELVA-1D, was agreed well with the experimental result.

Keywords: Nuclear Fuel Facility, Reprocessing Plant, Fire Accident, Smoke, Ventilation Filter, Pre-filter, CELVA-1D

This work is included the calculated results using CELVA-1D, which was developed by Japan Atomic Energy Research Institute under the auspices of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

[†] To whom correspondence should be addressed.

* Left JAERI on March 31, 2003.

目 次

1. 緒言	1
2. 本研究で使用した試験データ	2
2.1 試験装置および方法	2
2.2 試験結果	3
3. CELVA-1D の基礎的な解析機能	9
3.1 施設のノードジャンクション化	9
3.2 ソースターム解析機能	9
3.3 熱流動解析機能	11
3.4 放射性物質閉じ込め解析機能	13
3.5 初期定常計算	14
4. 前置フィルタ破損までの差圧の時間変化に関する解析	22
4.1 本研究で検討対象とした課題	22
4.2 換気系フィルタの煤煙粒子の粒径別 DF 値	22
4.3 煤煙粒子の粒径分布	24
4.4 煤煙粒径別の煤煙負荷量と DF 値	24
4.5 計算結果および考察	24
5. 前置フィルタ破損に至るまでの猶予時間の評価	33
5.1 計算条件および仮定	33
5.2 評価計算結果	33
6. 結言	37
謝辞	37
参考文献	38
付録	39

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Data Used in this Study	2
2.1 Experimental Devices and Methods	2
2.2 Experimental Results	3
3. Basic Functions of CELVA-1D	9
3.1 Preparation of Node Junctions	9
3.2 Source Term Analysis Functions.....	9
3.3 Heat Flow Analysis Functions	11
3.4 Confinement Analysis Functions	13
3.5 Calculation of an Initial Steady-state Condition.....	14
4. Analysis of the Breakage Time of the Pre-filters	22
4.1 Points of Mainly Considered in this Study	22
4.2 DF of Ventilation Filters to the Diameter of Smoke Particles	22
4.3 Particle Size Distribution of Smoke.....	24
4.4 Mass Loading to the Pre-filter as Function of DF.....	24
4.5 Results and Discussions	24
5. Evaluation of Margin for the Breakage Time of the Pre-filter	33
5.1 Conditions and Assumptions	33
5.2 Estimated Results	33
6. Conclusions	37
Acknowledgment	37
References	38
Appendix	39

1. 緒 言

再処理施設等の核燃料施設には、万一施設内で火災が発生した場合でも環境に放射性物質が漏洩しないように放射性物質を閉じ込める多重の防護施設が備えられている。多重防護施設のうち一部の建屋換気系には、HEPA フィルタの前に前置フィルタが設置されている。前置フィルタは、比較的大きな粒子を捕集して HEPA フィルタの寿命を長くする役割を担っている。火災が発生した場合には、比較的大きな煤煙を捕集して HEPA フィルタへの煤煙負荷を緩和し、HEPA フィルタの破損を防止する。再処理施設では、大量の可燃性物質を取り扱っているため、万一、施設内で火災が発生した場合には、大量の煤煙が発生して換気系内へ移行することにより前置フィルタに目詰まりが生じ、最悪の場合、圧損の上昇によって前置フィルタが破損することが考えられる。したがって、この前置フィルタの破損に至る現象を検討し、換気系統の切り替えや前置フィルタ交換の時間的猶予を把握することが、火災事故時の放射性物質の施設内閉じ込め性確保に最も重要である。そこで、日本原子力研究所(以下、原研)では大量の煤煙を発生するような火災が起きた場合の換気系への影響を実験と解析の両面から調べるために、文部科学省からの受託事業(セル換気系安全性実証試験⁵⁾(以下、セル換試験))の一環として、煤煙減衰効果実証試験^{1),6)}(以下、煤煙試験)を実施した。まず、本報告の前提となるこの煤煙試験の成果について以下に述べる。

実験では、大型の実験装置を用いた模擬可燃性固体廃棄物(ゴム手袋、綿手袋、充填カートンボックス)等の燃焼試験などにより、燃焼により発生する煤煙粒子の粒径分布などの煤煙特性、および換気系フィルタ(前置フィルタ+HEPA フィルタ)の煤煙負荷量、差圧などによる負荷特性に関するデータを得た¹⁾。

解析では、セル換試験の中で開発してきたセル内での火災および爆発事故時におけるセル換気系内の熱流動および物質の移行を総合的に評価するための一次元圧縮性熱流動解析コード CELVA-1D²⁾³⁾に新たな解析機能を追加して、CELVA-1D の物質移行計算で求められた前置フィルタへの煤煙移行量から目詰まりによって増加する前置フィルタの差圧が計算できるようにした⁶⁾。まず、CELVA-1D を用いることを前提に、燃焼場所におけるソースターム評価および前置フィルタが破損するまでの前置フィルタの差圧上昇に関する解析モデルを検討した。燃焼場所におけるソースターム評価に関するモデルでは、ソースタームデータとして代入する燃焼場所におけるソースターム(質量放出速度、エネルギー放出速度、煤煙放出速度等)の評価手法に、米国 NRC による“核燃料施設における事故解析ハンドブック(AAH)”⁴⁾で推奨されている計算方法を導入した。この計算方法の妥当性は、既に煤煙試験装置とは別の小型装置を用いた燃焼実験⁵⁾により検証されている。一方、前置フィルタの目詰まりによる差圧上昇に関する解析モデルでは、前置フィルタへの煤煙負荷量と前置フィルタの粒径別 DF 値の相関データを入力できるテーブル機能と煤煙試験で得られた燃焼物の組成別に対する前置フィルタへの煤煙負荷量と前置フィルタ差圧の実験相関式を導入した。また、この計算では前置フィルタに移行する煤煙の粒径別の重量は前置フィルタ入口近くにおける質量基準の煤煙粒子の粒径分布に従うものと仮定し、質量中央径と幾何標準偏差を入力で自動計算される対数正規分布データまたは粒径毎に入力して設

定した分布データを利用可能とした。次に、導入した解析モデルを検証するために、ゴム手袋 9kg を燃焼させた試験¹⁾を対象に CELVA-1D を用いて、前置フィルタの差圧上昇を解析した⁶⁾。この解析では、前置フィルタへの煤煙負荷量と前置フィルタの粒径別 DF 値の相関データについて、煤煙試験前後で DOP エアロゾル粒子を用いた前置フィルタの透過率測定で得た粒径範囲 0.1~2 μ m に対する粒径別 DF 値をそれぞれ、無負荷および前置フィルタの破損時間での煤煙負荷量における DF 値とし、同一粒径に対する無負荷および前置フィルタの破損時間における煤煙負荷量の粒径別 DF 値の 2 点を直線近似した結果をテーブル化した。また、テーブル化した前置フィルタの粒径別 DF 値の粒径範囲の制約から、前置フィルタ入口近くの煤煙の重量基準の粒径分布として、燃焼試験で得られた粒径分布における粒径が 2 μ m 以上の煤煙粒子の重量を全て粒径 2 μ m のにおける重量に積算した分布を用いた。さらに、初期差圧には試験前の前置フィルタの差圧実験値の平均値を用いた。その結果、実験結果と比べて定性的には近いものの初期差圧および差圧曲線の形に若干の相違が見られるとともに前置フィルタの差圧の変化に時間遅れが生じた。これらの相違のうち、特に時間遅れに関する相違が生じた解析方法の下で前置フィルタが破損に至るまでの時間的猶予を評価すると、時間遅れの大きさによっては実際の時間的猶予よりも過大評価する可能性があることに注意する必要がある。

本研究では、上記の経緯から次のことを実施した。最初に、2 μ m 以上の煤煙粒子に対する前置フィルタの DF について、試験前後の前置フィルタの DF 測定データから作成した粒径-DF の指数近似式を外挿して求めて CELVA-1D の DF 値テーブルに追加することにより、上記の粒径分布における 2 μ m 以上の煤煙粒子に対する仮定を解消した。次に、既報の試験データに加え、前置フィルタの初期差圧実験値が試験前の前置フィルタの差圧実験値の平均値とほぼ同じ試験データを対象として CELVA-1D を用いた前置フィルタの差圧上昇解析を行い、解析で得られた前置フィルタの差圧変化の時間遅れが解消されるかを検証した。さらに、本研究で検証した手法を用いて、核燃料施設で万一、火災事故が生じた際に放射性物質の施設内閉じ込め性確保に行われると想定される換気系統の切り替え操作や前置フィルタ交換作業の 1 つの目安となり得る、前置フィルタが破損に至るまでの時間的猶予の評価を示した。

2. 本研究で使用した試験データ

本研究における前置フィルタの差圧上昇解析では、煤煙減衰効果実証試験¹⁾で得られた試験データ(SMOK1003 試験および SMOK2002 試験、燃焼物質はいずれもゴム手袋 100%)を用いた。ここでは、解析条件に関する試験装置、方法、試験結果を簡単に示す。

2.1 試験装置および方法

図 2.1 に煤煙試験で用いた試験装置の概略図を、図 2.2 にフィルタチェンバーの概略図

をそれぞれ示す。試験装置は、空気を燃焼セル内に供給する給気ダクト、火災事象を発生させる第 1 モデルセル(体積：約 19m³)、大口径の第 1 ダクト(400A×5m)、第 1 ダクトと連結する第 2 モデルセル(体積：約 7.4m³)と第 2 ダクト(200A×10m)、他のセルからの空気流入を模擬した希釈ダクト(600A)、第 2 ダクトと希釈ダクトとの合流点ミキサー、ミキサーからフィルタチェンバーまでの第 3 ダクト(600A×9m)、フィルタチェンバー、排気ダクト(600A)、排気プロアおよびスタックから構成される。フィルタチェンバーは換気系フィルタが 2 段直列に設置可能な構成となっており、上流側にフルサイズ 3 台の前置フィルタ(610mm×610mm×50mm、初期捕集効率 85%(重量法)、型番 CM-31-KW-R-50Z、日本無機(株)製)、下流側にハーフサイズ 6 台の HEPA フィルタ(610mm×305mm×292mm、初期捕集効率 99.98%(0.3 μm DOP 粒子)、型番 ATM-31H-P-E、日本無機(株)製)が設置されている。ここで用いた前置フィルタは実際の核燃料施設で用いられたことがある形式であり、繊維フィルタの一種である。また、試験装置には点火装置、プロセス計装・制御系、データ収録系、メンブレンフィルタを装着したエアサンプラ、カスケードインパクト(アンダーセン型低圧タイプ、分別粒径範囲 0.05~11 μm、13 段)、燃焼ガス分析計等の付帯設備を有している。

SMOK1003、SMOK2002 試験では、第 1 モデルセル(燃焼セル)の換気回数を約 20 回/h(給気流量:400m³/h)に固定した下で、第 1 モデルセル内の燃焼用トレイに模擬可燃性固体廃棄物としてゴム手袋を充填したカートンボックス 5 個(全重量 9kg、1 個あたりの容量 0.014m³)を設置した。これらに、点火バーナーにより強制的に着火し、着火燃焼が目視で確認できた時点からプロセス計装・制御系で運転状態を監視するとともに、データ収録系を起動して試験装置各所での温度、圧力、差圧、ガス濃度等のデータを収録した。重量基準の煤煙の濃度および粒度分布は、第 1 ダクト、第 3 ダクトおよび前置フィルタ下流に取り付けた複数のエアサンプラとカスケードインパクトを用いて煤煙を間欠的に採取し、秤量により決定した。また、燃焼によりフィルタチェンバーに移行した煤煙は、試験用フィルタ(前置フィルタと HEPA フィルタの直列 2 段)で捕集し、フィルタの差圧(圧力損失)および煤煙負荷量のデータを取得した。フィルタの除染係数(DF)は、試験の前後に、煤煙試験と同一の換気流量条件の下で多分散 DOP エアロゾル粒子を前置フィルタ上流側に導入し、前置フィルタの前後で、レーザーパーティクルカウンタ(測定可能粒径範囲：約 0.1~2 μm)を用いて粒径別の DOP 粒子個数濃度を測定することにより求めた。

2.2 試験結果

表 2.1 に両試験の試験条件と結果を示す。燃焼時間は、燃焼開始から SMOK1003 試験が約 41 分、SMOK2002 試験が約 51 分であった。また、燃焼率は両試験ともに 95%であった。

図 2.3 および図 2.4 に、第 1 モデルセル内気相温度および第 1 ダクト内気相温度の経時変化をそれぞれ示す。第 1 モデルセル内気相温度は、燃焼開始直後から激しい燃焼により両試験ともに燃焼開始後約 5 分まで急激に上昇し、その後緩やかに上昇して燃焼開始後約 20 分でピーク温度(約 360℃)を示し、以降緩やかに低下した。また、第 1 ダクト内気相温

度の経時変化では、両試験ともに第 1 モデルセル内気相温度の経時変化と同様の傾向を示し、燃焼開始後約 20 分で最大値(約 270℃)を示した。

図 2.5 に換気系フィルタ差圧の経時変化を示す。前置フィルタ差圧は、燃焼により発生した煤煙の負荷により、両試験ともに燃焼開始後約 5 分付近から急激に上昇し、SMOK1003 試験では約 30 分で最大差圧(2.22kPa)を、SMOK2002 試験では約 29 分で最大差圧(2.72kPa)をそれぞれ示した。最大差圧後の急激な差圧の低下は、両試験共に前置フィルタ 3 台のうちの 1 台が破損したためである。前置フィルタ破損後の緩やかな差圧の上昇は、3 台のうち 1 台のみの破損であることから、破損直後に差圧が急激に低下するものの、他の 2 台の前置フィルタによる煤煙の捕集により差圧が上昇したためであると考えられる。また、同一の試験条件にもかかわらず前置フィルタの初期差圧(SMOK1003 試験=0.03kPa、SMOK2002 試験=0.13kPa)および最大差圧の値に違いが見られた。これは、前置フィルタは HEPA フィルタと異なり個体差があり、初期での繊維径およびフィルタの充填率に違いがあるためと考えられる。一方、HEPA フィルタの差圧では、燃焼開始後わずかに上昇した後、ほぼ一定の値(約 0.3kPa)を示した。

図 2.6 にエアサンプラによる第 3 ダクト内で捕集された煤煙の重量濃度の経時変化を示す。両試験ともに燃焼の進行に伴って煤煙濃度が上昇し、燃焼開始後約 17 分付近で最大値($3.3 \times 10^{-4} \text{kg/m}^3$)を示した。また、第 3 ダクト内においてカスケードインパクトで捕集された煤煙の粒径分布を重量基準の対数正規分布で仮定すると、質量中央径(MMD)および幾何標準偏差(σ_g)がそれぞれ、SMOK1003 試験で MMD=0.45 μm 、 $\sigma_g=4.03$ 、SMOK2002 試験で MMD=0.48 μm 、 $\sigma_g=3.61$ であった¹⁾。

表2.1 SMOK1003、SMOK2002試験条件および結果¹⁾

		試験番号	SMOK1003	SMOK2002
試験条件	燃焼物	組成	ゴム手袋100% カートンボックス	
		初期重量 (kg)	9.0	
	換気回数 (回/h)	20		
	流量	給気 (m ³ /h)	400	
		希釈 (m ³ /h)	3980	
		排気 (m ³ /h)	4380	
	前置フィルタ	サイズ (m)	0.61	
		台数(フルサイズ) (台/段)	3	
		ろ過面積(3台分) (m ²)	0.94	
	HEPAフィルタ	台数(ハーフサイズ) (台/段)	6	
試験結果	燃焼重量 (kg)	8.58	8.57	
	燃焼率 (%)	96	95	
	燃焼時間 (min)	41	51	
	前置フィルタ	破損時間 (min)	29	29
		煤煙負荷重量(試験後) (kg/3台)	0.36	0.42
		初期差圧 (kPa)	0.03	0.13
		最大差圧(破損差圧) (kPa)	2.22	2.72
	第3ダクト煤煙	質量中央径(MMD)	0.45	0.48
幾何標準偏差(σ)		4.03	3.61	

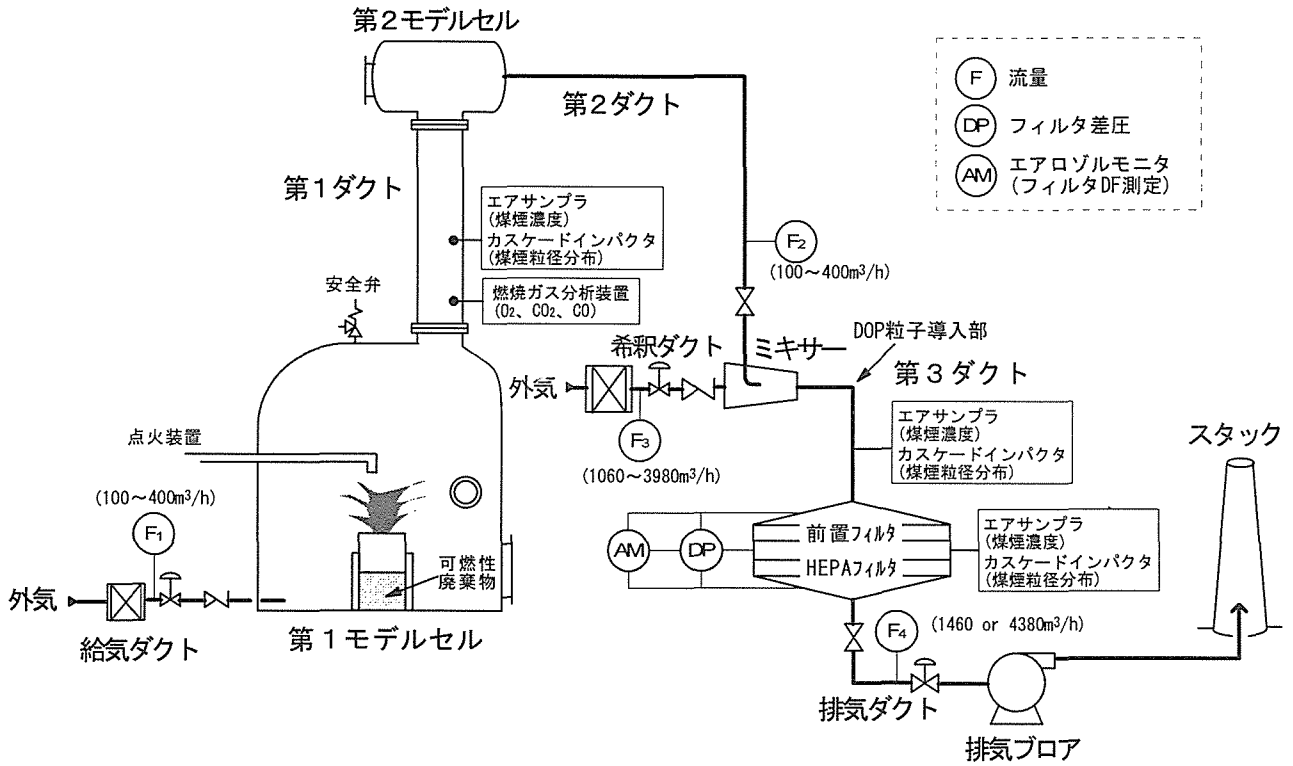


図2.1 煤煙試験装置概略図

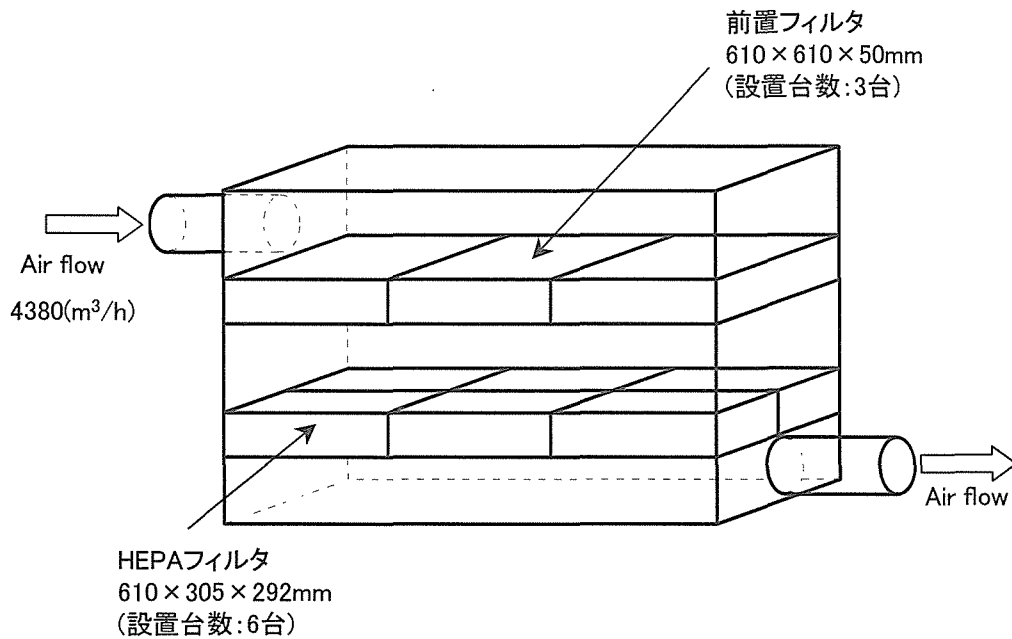


図2.2 フィルタチェンバー概略図

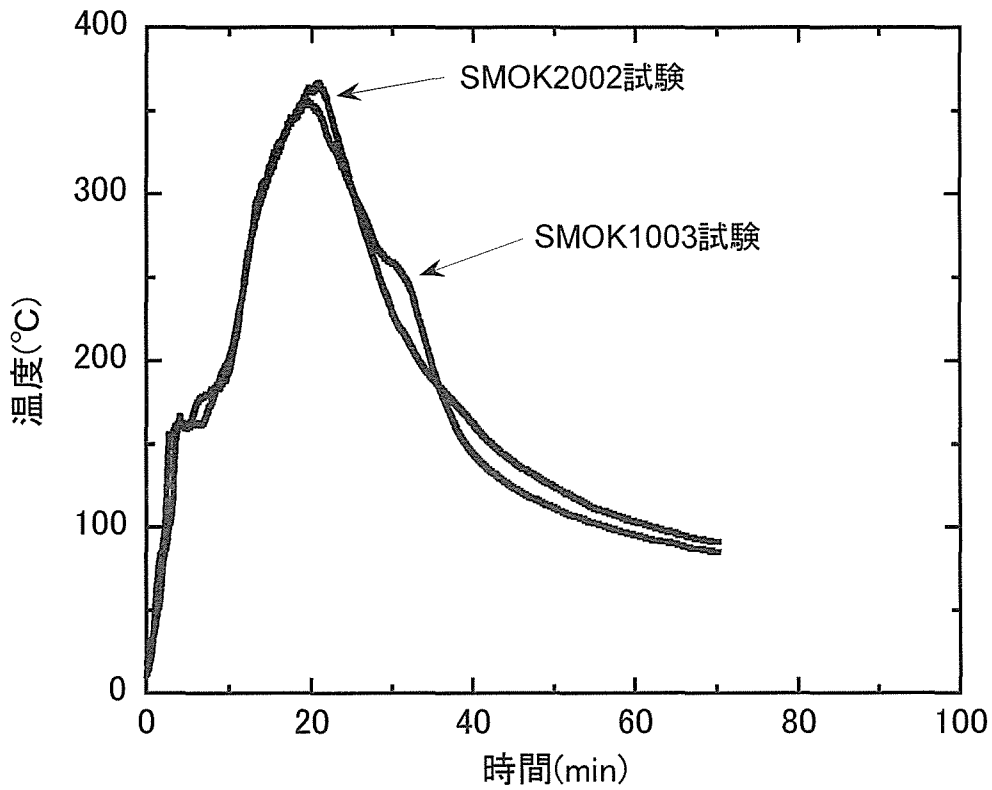


図2.3 第1モデルセル内気相温度の経時変化(実測値)

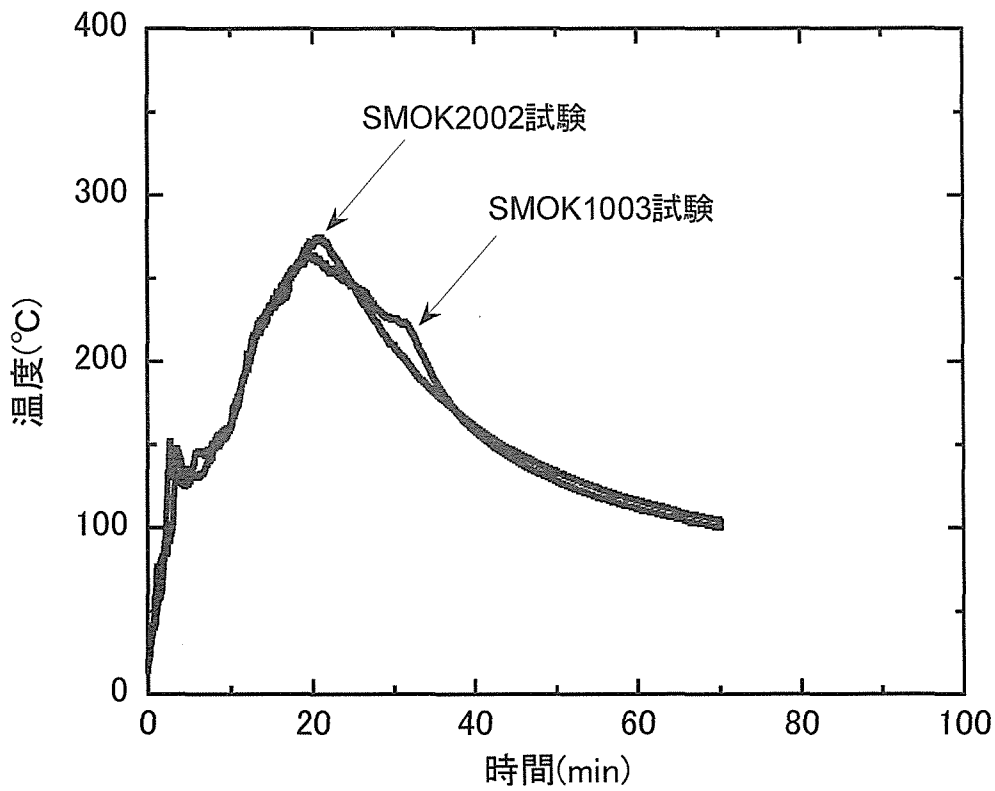


図2.4 第1ダクト内気相温度の経時変化(実測値)

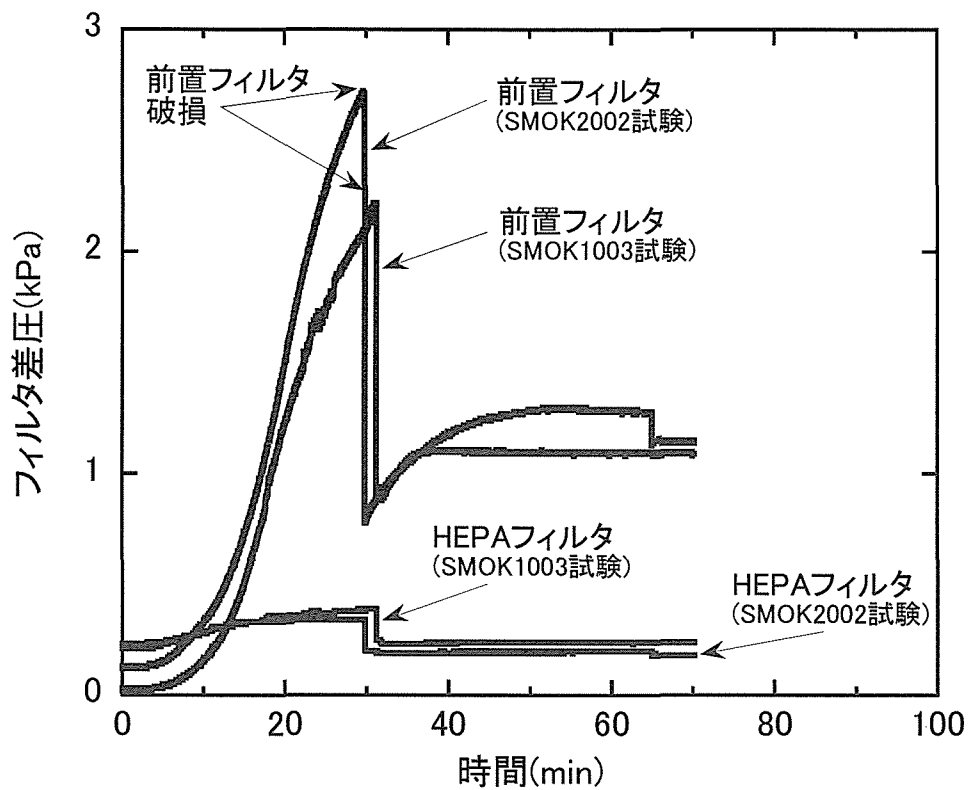


図2.5 換気系フィルタ差圧の経時変化(実測値)

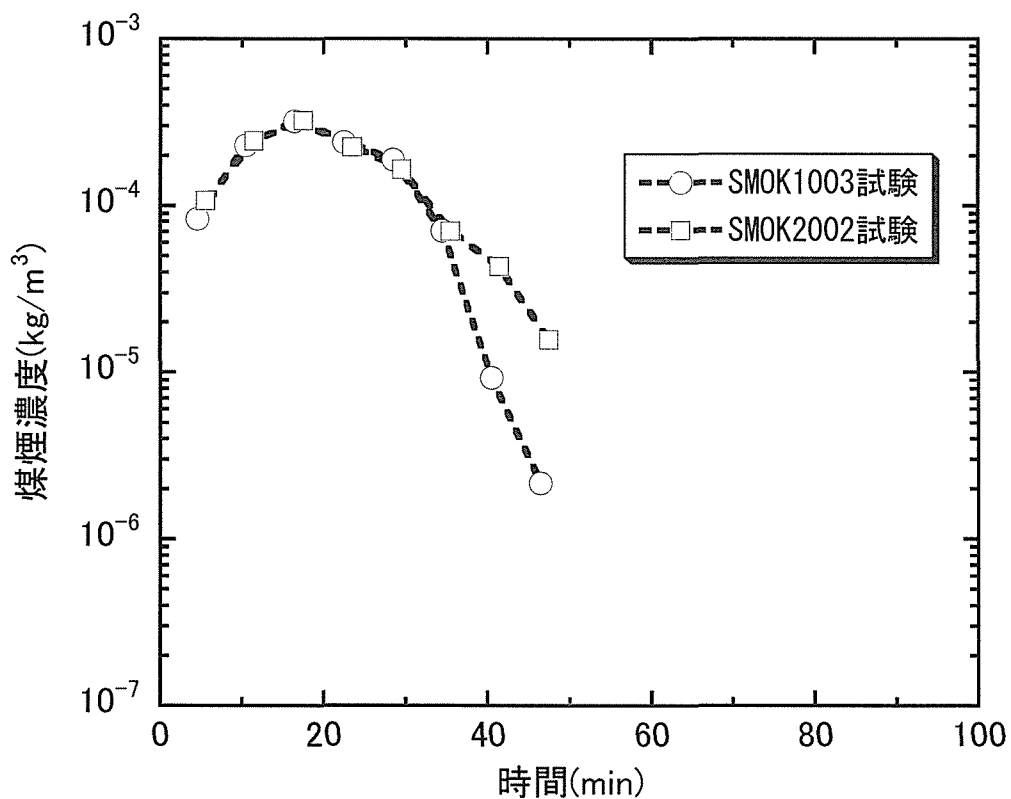


図2.6 第3ダクト内煤煙濃度の経時変化

3. CELVA-1D の基礎的な解析機能

本研究では、計算コード CELVA-1D を用いて前置フィルタの差圧上昇解析を行った。本章では解析に使用した CELVA-1D の基礎的な解析手法を説明する。

CELVA-1D は、燃焼セル内での火災・爆発事象および放射性物質閉じ込め解析のための熱流動と物質の移行を総合的に評価する一次元圧縮性熱流動計算コードであり、これまでにセル換試験⁸⁾の試験データを用いて計算機能の有効性を確認されており、さらに、いくつかの火災事故^{9)~12)}において火災事象の検討を行うための解析に使用されたものである。

図 3.1 に CELVA-1D の解析機能を示す。本コードはソースターム解析、熱流動解析および放射性物質閉じ込め解析機能を有している。エネルギー、質量および放射性物質の放出速度はソースターム項でテーブル入力または自動計算機能により設定される。このソースタームを入力項として、熱流動解析機能によって換気系内部での温度、圧力伝播および流量変化が計算され、さらに放射性物質閉じ込め解析機能により放射性物質の移流と閉じ込め効果が評価される。

図 3.2 に CELVA-1D の計算フローチャートを示す。本コードでは、解析対象施設の形状データを、流体の圧縮性が定義される体積要素であるノードと、流体の流れが定義される流動抵抗要素であるジャンクションに分割してノードジャンクションデータを作成する必要がある。このノードジャンクションデータを使用して、各ノードとジャンクションにおける流量および流動抵抗値(差圧)が、状態方程式と質量、運動量およびエネルギー保存式(後述の(3.5)~(3.8)式)をすべて満足する状態を求める初期定常計算を行う。求められた初期定常状態を基にして、ソースタームデータ(質量放出速度、エネルギー放出速度、煤煙放出速度、エアロゾル特性(幾何平均径、幾何標準偏差)等)およびフィルタの目詰まり係数データを使用して、換気系全体での一次元熱流動を圧縮性を考慮して計算すると共に換気系内でのエアロゾル状物質の移行挙動を解析する。なお、データファイルの入出力を含めた解析手順を付録に示した。

3.1 施設のノードジャンクション化

対象とする試験装置については、2.1 節で概要を示した。本研究では、既報の煤煙試験における解析⁸⁾と同じノード・ジャンクションを使用した。図 3.3 に解析に使用したノード・ジャンクション分割図を示す。ノード・ジャンクション分割では、試験装置の給気ダクト系を 6 分割、第 1 モデルセル、第 1 ダクトおよび第 2 モデルセルをそれぞれ 1 分割、第 2 ダクト系を 12 分割、第 3 ダクト系を 9 分割、希釈ダクト系を 6 分割、フィルタチェンバーを 3 分割、排気ダクト系を 12 分割し、環境を含め全体で 51 分割とした。

3.2 ソースターム解析機能

質量、エネルギーおよび放射性物質の放出速度等のソースタームは、各放出速度の時間

履歴を直接テーブル入力するか、内部自動計算機能を用いて設定される。

本研究では、既報の煤煙試験における解析^④と同じく、次の 1)~3)の方法で燃焼場所における各放出速度を評価し、それらの時間履歴を直接テーブルで入力した。

1) 質量放出速度 \dot{M} の評価

燃焼に伴う質量の放出速度は、煤煙試験結果で得られた第 1 モデルセル内の第 1 ダクト入口付近(温度センサー(TC4A)^④)の気相温度との差に比例すると仮定し、実測値の燃焼重量と第 1 モデルセル内気相温度の経時変化(図 2.3)の時間積分値の比から算出した。図 3.4 に算出した質量放出速度の経時変化を示す。質量放出速度のピーク値は、SMOK1003 試験が $4.1 \times 10^{-3}(\text{kg/s})$ 、SMOK2002 試験が $4.3 \times 10^{-3}(\text{kg/s})$ と算出された。また、燃焼重量(表 2.1 参照)は燃焼物総重量から燃焼残渣量を引いた値である。なお、本解析で用いたソースタームテーブルの入力データ指定方法を付録に示した。

2) エネルギー放出速度 \dot{E} の評価

燃焼に伴うエネルギー放出速度 $\dot{E}(\text{J/s})$ は、アメリカの核燃料サイクル施設事故解析ハンドブック(AAH)^④中では、以下のように \dot{M} に分率と発熱量を乗ずることで求める方法が記載されている。

$$\dot{E} = X_a \times H_t \times \dot{M} \quad (3.1)$$

ここで、 $H_t(\text{J/kg})$ は燃焼物の発熱量、 $X_a(-)$ は H_t に乗ずる分率である。そこで、本解析においても同様に \dot{M} に係数 $K_E(\text{J/kg})$ を乗じる事で \dot{E} を求めた。

$$\dot{E} = \dot{M} \times K_E \quad (3.2)$$

まず、 K_E をパラメータとして 1)で決定した \dot{M} と \dot{E} を計算し、この \dot{E} と \dot{M} を用いて CELVA-1D による第 1 ダクトの気相温度を計算した。第 1 ダクトの気相温度の計算値と実測値の経時変化を時間積分してそれぞれの面積を求めた。そして計算値と実測値の面積の差を求め、面積の差と計算に用いた K_E を線形で表し、面積の差が 0 の点から K_E の値を求めた。図 3.5 および図 3.6 に K_E をパラメータとして計算した第 1 ダクト内気相温度の経時変化(実測値と計算値の比較)を、SMOK1003 と SMOK2002 試験についてそれぞれ示した。 K_E の値を $2.48 \times 10^7(\text{J/kg})$ として計算した場合の第 1 ダクト内気相温度の経時変化は、両試験共に実測値と計算値が良く一致した。 K_E を $2.48 \times 10^7(\text{J/kg})$ とした時の \dot{E} の値を図 3.4 の右側に示した。

3) 煤煙放出速度 \dot{G} の評価

煤煙放出速度 $\dot{G}(\text{kg/s})$ の算出においても、 \dot{E} の算出と同様に AAH での算出方法(\dot{M} に煤煙

化分率 $Y_s(-)$ を乗じて算出(4.4 式))を適用し、(4.5)式のように \dot{M} に係数 $K_G(-)$ を乗じて \dot{G} を算出することとした。

$$\dot{G} = \dot{M} \times Y_s \quad (3.3) \quad \dot{G} = \dot{M} \times K_G \quad (3.4)$$

本解析で用いた係数 $K_G(-)$ は、火災時ソースターム評価試験⁵⁾で燃焼物がゴム手袋 100% の場合に対し得られた値($K_G=0.11$)である。図 3.4 には、 K_G の値を 0.11 とし算出した \dot{G} の経時変化も示した。また、図 3.7 および図 3.8 に、算出した \dot{G} を用いて CELVA-1D で計算した第 3 ダクト内煤煙濃度の経時変化(実測値と計算値の比較)を、SMOK1003 と SMOK2002 試験についてそれぞれ示す。両試験共に今回の解析対象である前置フィルタが破損する時間までは計算値と実測値が良く一致した。

3.3 熱流動解析機能

(1) 一次元圧縮性熱流動解析における基礎式

一次元圧縮性熱流動解析における基礎式として以下の 4 つの式がプログラムされている。

・質量保存式

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A v)}{\partial x} = \dot{M} A \quad (3.5)$$

・運動量保存式

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} = -\frac{\partial(\rho + q)}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial x} \quad (3.6)$$

・エネルギー保存式

$$\frac{\partial\{\rho A(e + \frac{v^2}{2})\}}{\partial t} + \frac{\partial\{\rho A v(e + \frac{v^2}{2})\}}{\partial x} = -\frac{\partial\{A v(P + q)\}}{\partial x} + A \dot{E} - q_w \frac{\partial A_w}{\partial x} \quad (3.7)$$

・状態方程式

$$P = (\gamma - 1)\rho C_v T \quad (3.8)$$

ここで、 $A(\text{m}^2)$ はセルあるいはダクトの断面積、 $A_w(\text{m}^2)$ はセルあるいはダクトの内壁面積、 $C_v(\text{J/kgK})$ は定容熱容量、 $e(\text{J/kg})$ は流体の内部エネルギー、 $F(\text{Pa})$ は外力項(流動抵抗計算

機能から計算される)、 \dot{M} (kg/m³s)は質量放出速度、 P (Pa)は圧力、 \dot{E} (J/m³s)はエネルギー放出速度、 q_w (J/m²s)は放熱項(伝熱解析機能から計算される)、 T (K)は温度、 t (s)時間、 v (m/s)は流速、 x (m)は変位、 γ (-)は比熱比、そして ρ (kg/m³)は流体の密度である。さらに収束計算の安定性のため、人工粘性項 q (Pa)を上式の粘性項に加えた。 \dot{M} と \dot{E} はソースターム解析機能で設定および計算される。そして各ノードにおけるこれらの基礎式を差分法により連立させ、換気系内の圧力、温度の伝播等を計算する。解法としては、解法が平易な陽解法と解法は複雑であるが計算収束性が良い陰解法のいずれかの手法を選択できる。本研究では、既報の解析⁶⁾と同じく計算収束性の良さから陰解法を用いた。

(2) 流動抵抗計算機能

基礎式中の F 項は、換気系内のダクト、バルブ、ブローおよびフィルタ等の流動抵抗 ΔP を意味する。CELVA-1Dは、これら各ジャンクションにおける流動抵抗の計算モデルを有しており、ダクトとバルブにおける ΔP は、それぞれ以下の式から計算される。

$$\Delta P = f \frac{L \rho V^2}{D} \quad (3.9) \quad \Delta P = k \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.10)$$

ここで、 f (-)は摩擦係数、 k (-)は圧損係数である。ダクトにおける ΔP は管内壁と流体間の摩擦による ΔP と管の拡大、縮小に伴う ΔP の和として計算される。直管部における摩擦による ΔP は(3.9)式から、またエルボにおける摩擦による ΔP は(3.10)式から計算される。同様にダクトにおける管の拡大、縮小に伴う ΔP とバルブにおける ΔP は(3.10)式を用いて計算される。ブローにおける ΔP は、プログラムに内蔵されている ΔP と流量の関係テーブルから設定される²⁾。

煤煙が負荷されていない場合の換気系フィルタの流動抵抗(初期差圧 ΔP_0)は、層流抵抗係数 K_L (m⁻¹)と乱流抵抗係数 K_T (-)を与えることにより、次の換気系フィルタへの流量と圧力損失の関係式で計算される。

$$\Delta P_0 = K_L \mu V_F + K_T \rho V_F^2 / 2 \quad (3.11)$$

ここで、 μ (Pa·s)は気体の粘性係数、 ρ (kg/m³)は気体の密度、 V_F (m/s)はフィルタを通過する流速である。前置フィルタはHEPAフィルタと異なり、煤煙試験の各試験において初期差圧(流動抵抗)の測定値に相違が見られた。そこで、抵抗係数を設定する際の初期差圧は、メーカーによる公称値(0.03kPa)とした。また、HEPAフィルタの流動抵抗係数は、セル換試験⁸⁾で測定された流量と差圧の関係から設定した。

フィルタにおける煤煙が負荷した際の ΔP は、目詰まり係数²⁾ α (m²/kg)と β (m⁴/kg²)を用いて、フィルタへの煤煙負荷量 M_a (kg/m²)から次式で計算される。

$$\Delta P = \Delta P_0 (1 + \alpha M_a + \beta M_a^2) \quad (3.12)$$

ここで、 $\Delta P_0(\text{Pa})$ は無負荷状態のフィルタの流動抵抗である。

本研究において解析対象とした SMOK1003 および SMOK2002 試験では、試験前に煤煙が負荷されていない前置フィルタおよび HEPA フィルタを使用したため、後の 3.4 節に示す初期定常計算におけるこれらのフィルタの流動抵抗は(3.11)式を用いた。一方、試験開始以降には換気系フィルタに煤煙が負荷されることにより目詰まりが生じて差圧が上昇するため、試験時に上昇する前置フィルタおよび HEPA フィルタの差圧(流動抵抗)は(3.12)式を用いた。前置フィルタの目詰まり係数 α 、 β の値は、煤煙試験で評価されたゴム手袋 100% の燃焼に関する目詰まり係数¹⁾を適用した。また、HEPA フィルタの目詰まり係数 α 、 β の値は、原研で実施した溶媒火災試験¹³⁾で評価された値を使用した。表 3.1 に計算に使用した換気系フィルタの流動抵抗係数および目詰まり係数を示す。

3.4 放射性物質閉じ込め解析機能

事故発生セル内で放出された放射性エアロゾルは、流体の流れに伴って換気系内を移行し、換気系フィルタによって捕集される。本解析機能では、以下の式から放射性エアロゾルの移行挙動を計算する。

$$V \frac{\partial C}{\partial t} + L \frac{\partial}{\partial x} (CAv) = \frac{\dot{G} - A_d \dot{R}}{L} \quad (3.13)$$

ここで、 $V(\text{m}^3)$ は注目したノードの体積、 $C(\text{kg}/\text{m}^3)$ は、そのノードにおける放射性エアロゾルの濃度、 $L(\text{m})$ はノードの代表長さ、 $A(\text{m}^2)$ はジャンクション J の断面積、 $v(\text{m}/\text{s})$ はジャンクション J を通る流速、 $A_d(\text{m}^2)$ は注目したノードの壁面積、 $\dot{G}(\text{kg}/\text{m}^3\text{s})$ は事故発生ノードにおける放射性エアロゾル放出速度、 $\dot{R}(\text{kg}/\text{m}^3\text{s})$ はノードにおけるエアロゾル沈着速度である。

CELVA-1D では、エアロゾルの沈着速度について、各沈着機構(拡散(層流・乱流)、重力、熱泳動、慣性)²⁾に基づく沈着速度の和として計算される。換気系フィルタによる煤煙捕集量 $L_0(\text{kg})$ は、捕集効率 $\eta(-)$ あるいは DF 値を用いて以下の式から計算される。

$$\frac{dL_0}{dt} = V \sum_i \eta_i C_i = V \sum_i \left(1 - \frac{1}{DF_i}\right) C_i \quad (3.14)$$

ここで $V(\text{m}^3/\text{s})$ はフィルタを通過する流体の体積流量、 $C_i(\text{kg}/\text{m}^3)$ はフィルタ前におけるエアロゾル濃度である。なお、添え字 i は、その値がエアロゾル粒径分布をいくつかの粒径領域に分割した際の i 番目の粒径領域に属するエアロゾル粒子であることを意味する。本コードでは、HEPA フィルタの DF 値がデフォルト値として内蔵されている²⁾ほか、HEPA フィルタ以外の換気系フィルタ(前置フィルタ等)の煤煙負荷による目詰まり現象を評価するために、煤煙の負荷量に対して各粒径毎の DF 値を設定する機能を有している。

本研究では、エアロゾルの沈着速度計算には計算の簡便さのため、対象とした解析データ条件の下では最も支配的な沈着機構である重力沈着機構のみを考慮し、CELVA-1D に内

蔵の重力沈着式を用いた。また、DF 値については既報^⑥と同じく HEPA フィルタに対しては CELVA-1D のデフォルト値を用い、前置フィルタに対しては煤煙の負荷量に対して各粒径毎に設定した。しかし、本研究では、設定した前置フィルタの DF 値が既報^⑥と異なる。本研究で設定した前置フィルタの DF 値の計算方法については次章で説明する。

3.5 初期定常計算

CELVA-1D では過渡事象解析計算に先立って、換気系内における圧力、温度および流量に関する初期定常状態を計算する必要がある。この計算を初期定常計算と呼ぶ。初期定常計算は、まず初期状態の流動抵抗が実測されている弁と体積流量が実測されている弁を指定し、それぞれの指定弁に対して初期開度と流動抵抗ないし体積流量の実測値を設定する。次に換気系内の体積流量(Q_{OLD})と温度(あるいは密度(状態方程式から一意に決定されるためどちらかを入力する))を任意に与え、 Q_{OLD} とジャンクションの形状データから各ジャンクションの流動抵抗(F 項)を上述の流動抵抗計算機能を用いて計算する。この流動抵抗と圧力境界条件を用いて、上述の熱流動基礎方程式((3.5)~(3.8)式)を満足する新たな体積流量(Q_{NEW})、圧力、温度ならびに密度を計算する。そして各指定弁における計算値(流動抵抗ないし体積流量)と実測値を比較し、両者の差が許容範囲外となった場合には、指定弁の開度を調節し、新たに指定弁における流動抵抗(F 項)を設定し直す。この流動抵抗と Q_{NEW} を用いて再度、熱流動基礎式を連立させ新たな状態量を算出する。この計算手順を、指定弁における計算値と実測値との差が許容範囲内に収束するまで繰り返し、換気系内の初期状態を設定する。初期定常計算のフローチャートおよび本解析で用いた主な初期定常計算の入力データ指定方法を付録に示した。

表 3.1 換気系フィルタの特性係数

		前置フィルタ	HEPA フィルタ
ろ過面性 および数量	ろ過面積(m ²)	0.94	66.6
	サイズ及び台数	フルサイズ 3 台 (610mm×610mm×50mm)	ハーフサイズ 6 台 (610mm×305mm×292mm)
流動抵抗係数	層流 : K _L (m ⁻¹)	8.06 × 10 ⁵	6.57 × 10 ⁸
	乱流 : K _T (-)	13.51	1.20 × 10 ⁵
目詰まり係数	α (m ² /kg)	72	138
	β (m ⁴ /kg ²)	586	3690

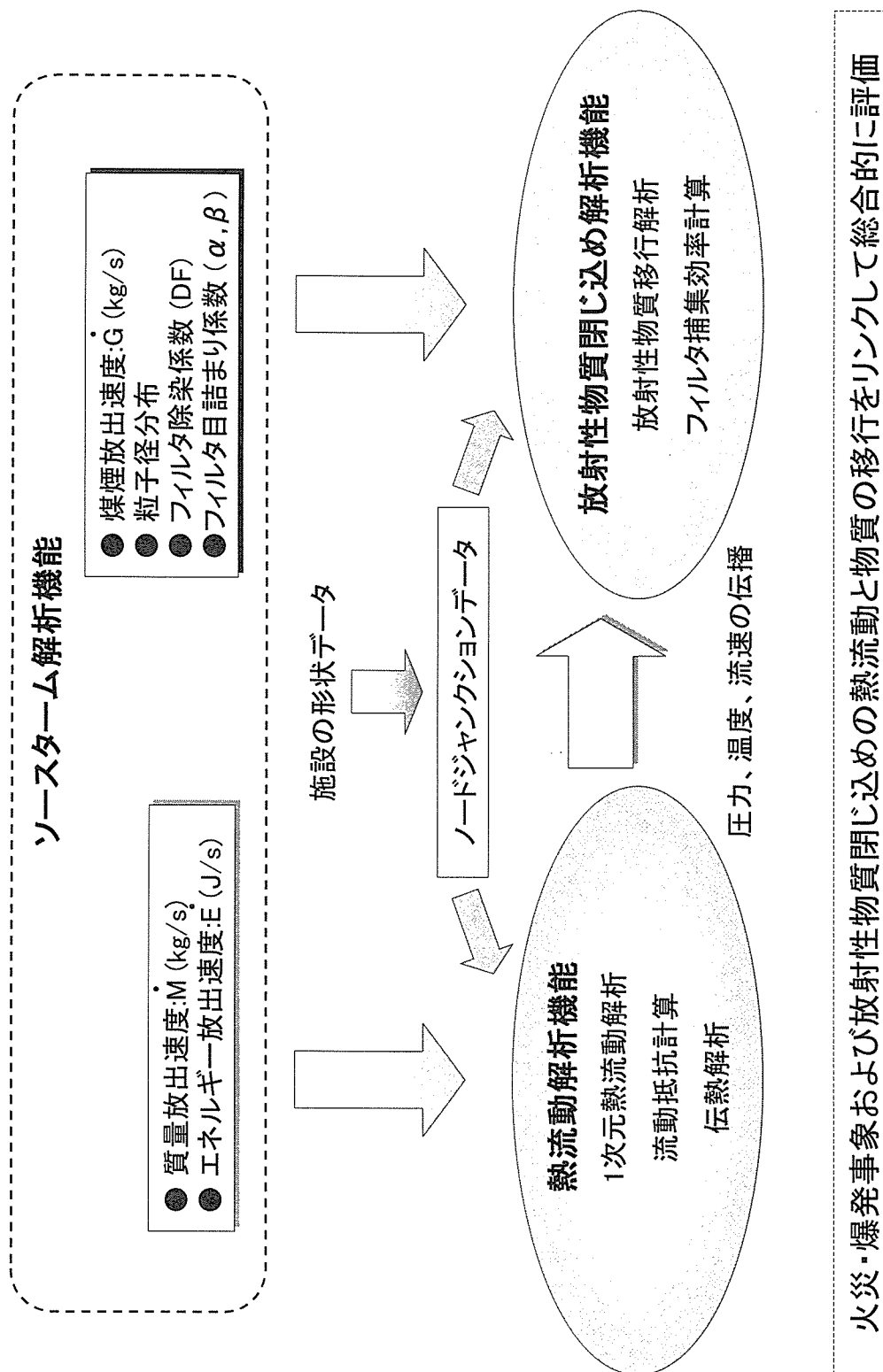


図3.1 CELVA-1Dの解析機能

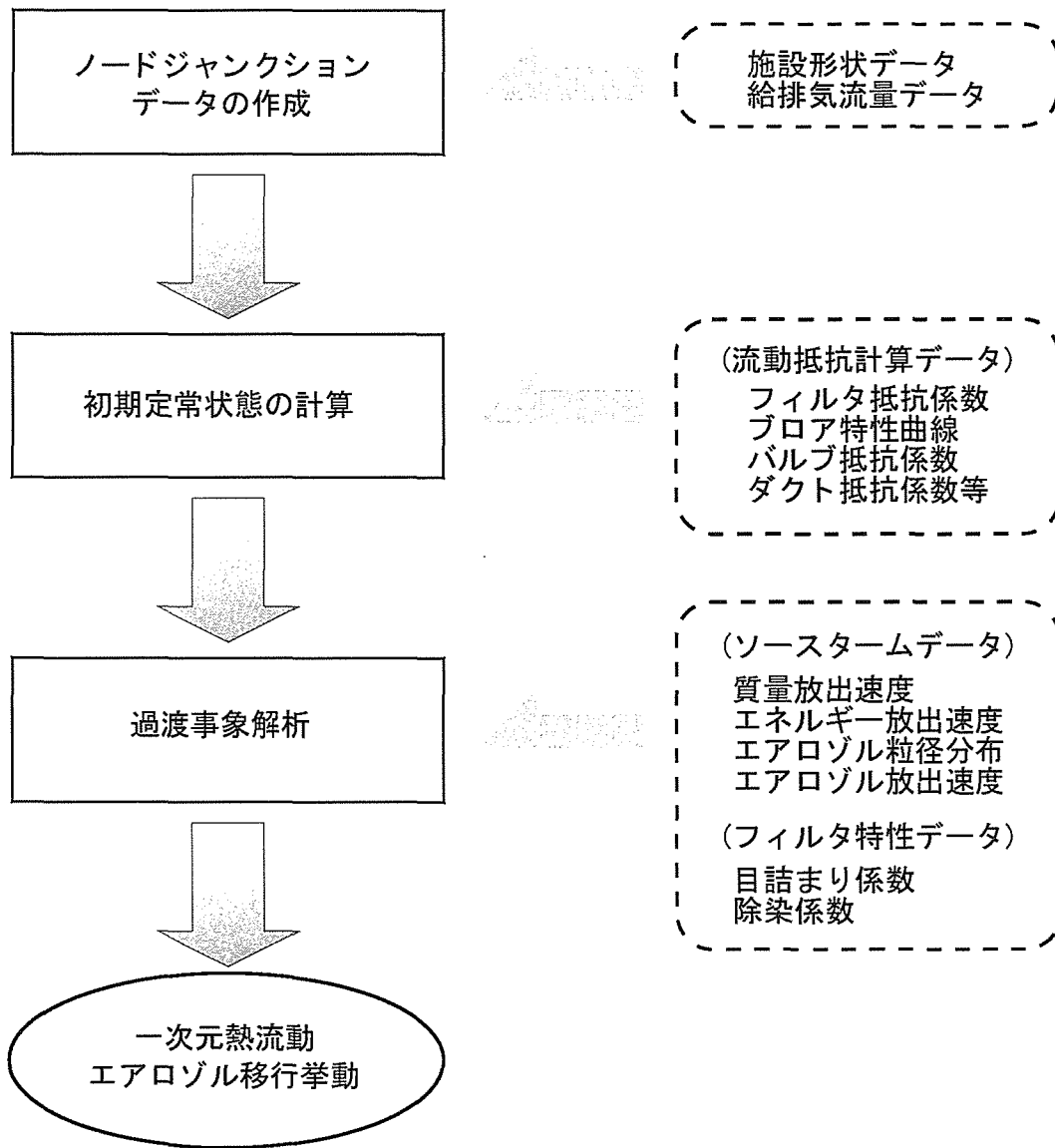


図3.2 CELVA-1Dの計算フローチャート

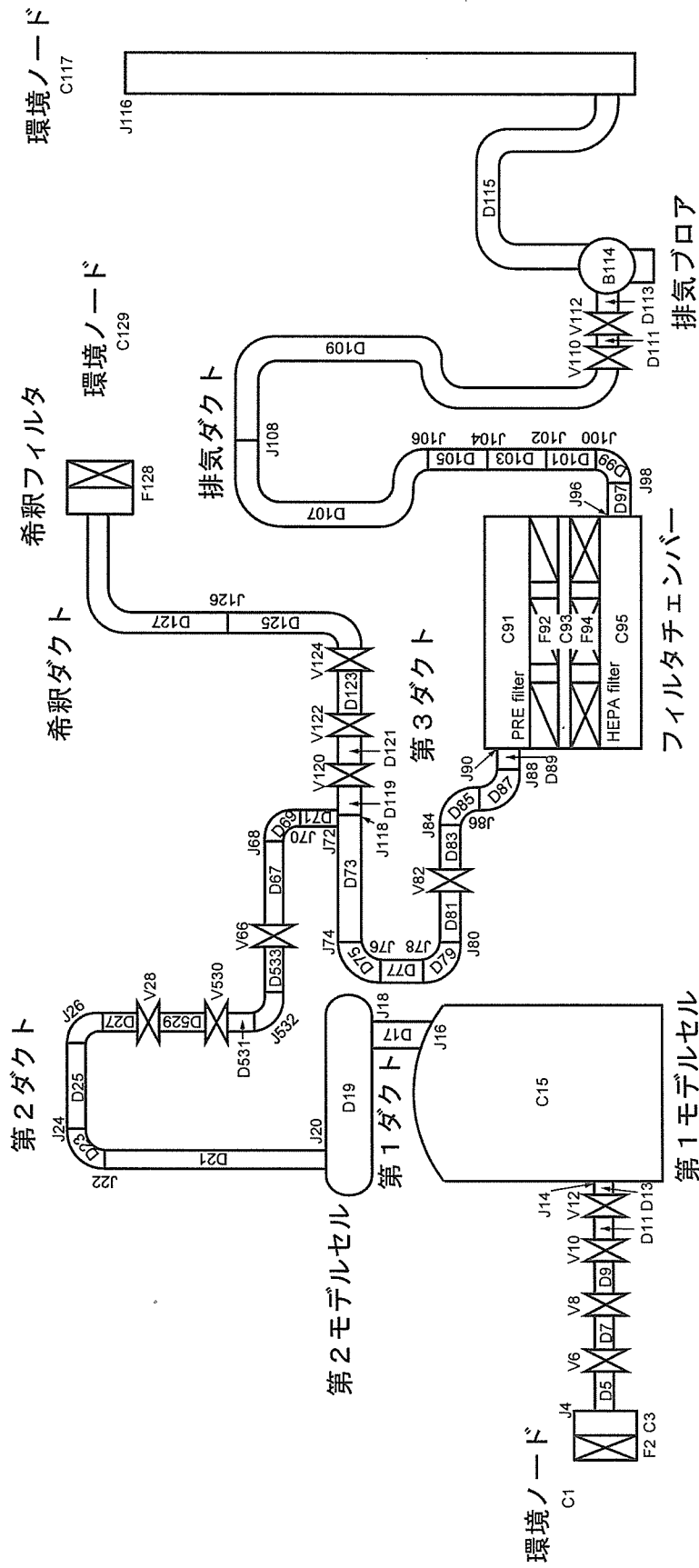


図3.3 計算に用いたノード・ジャンクション分割図

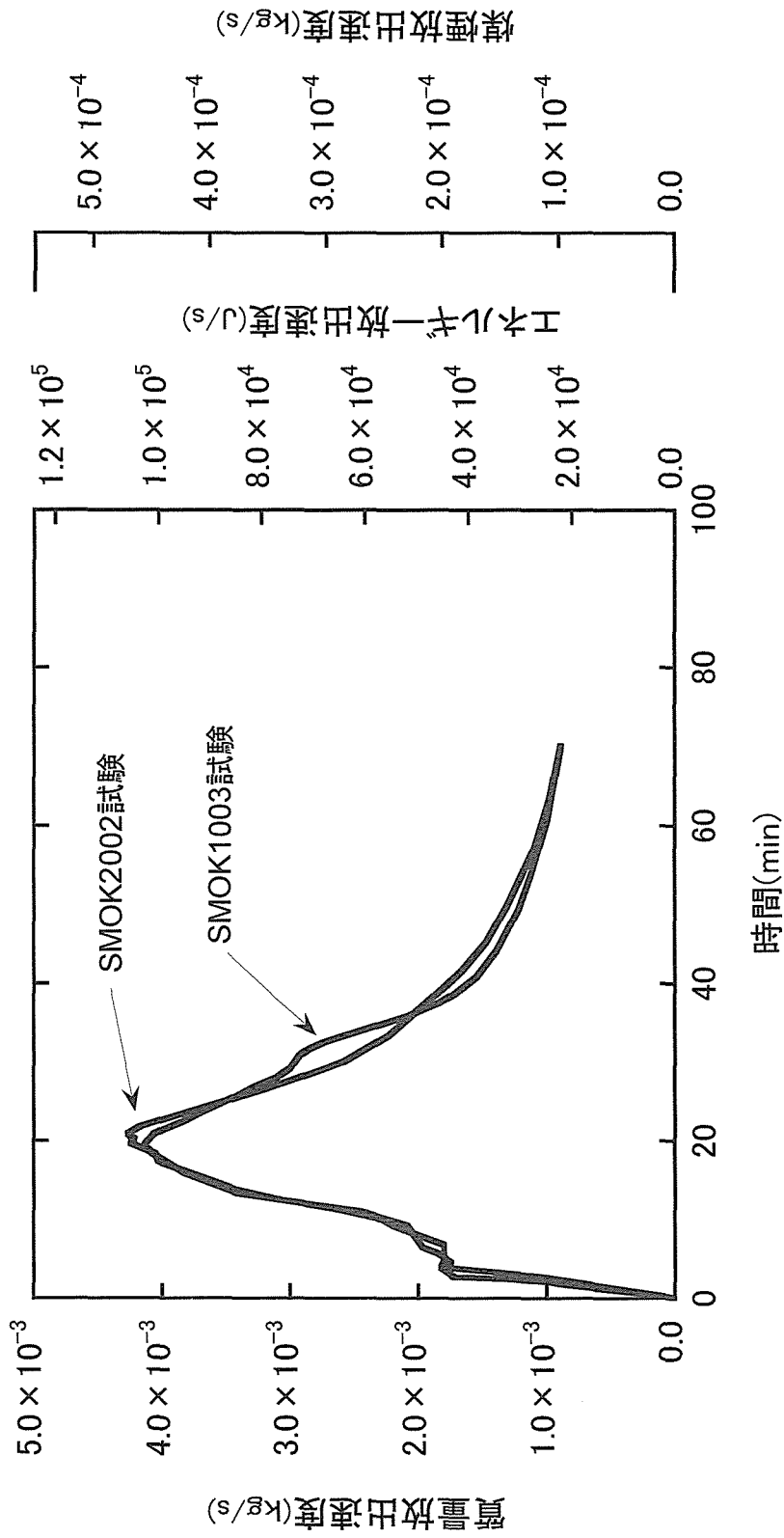


図3.4 計算に使用した質量、エネルギーおよび煤煙放出速度

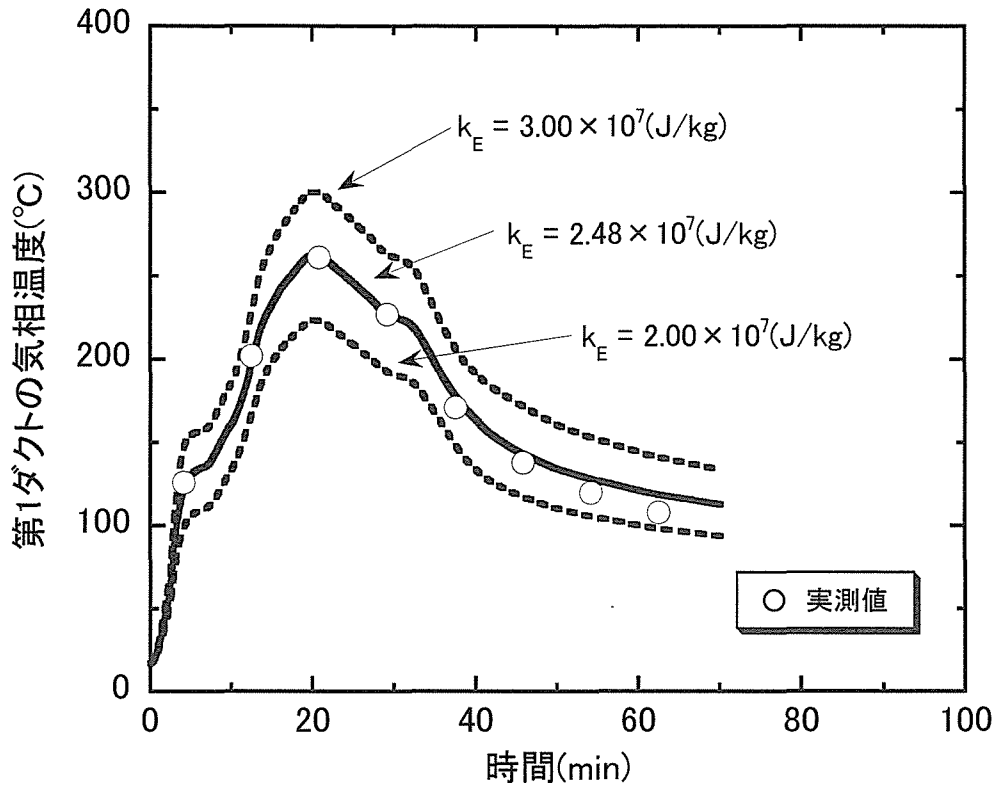


図3.5 エネルギー放出速度係数(k_E)の評価結果(SMOK1003)

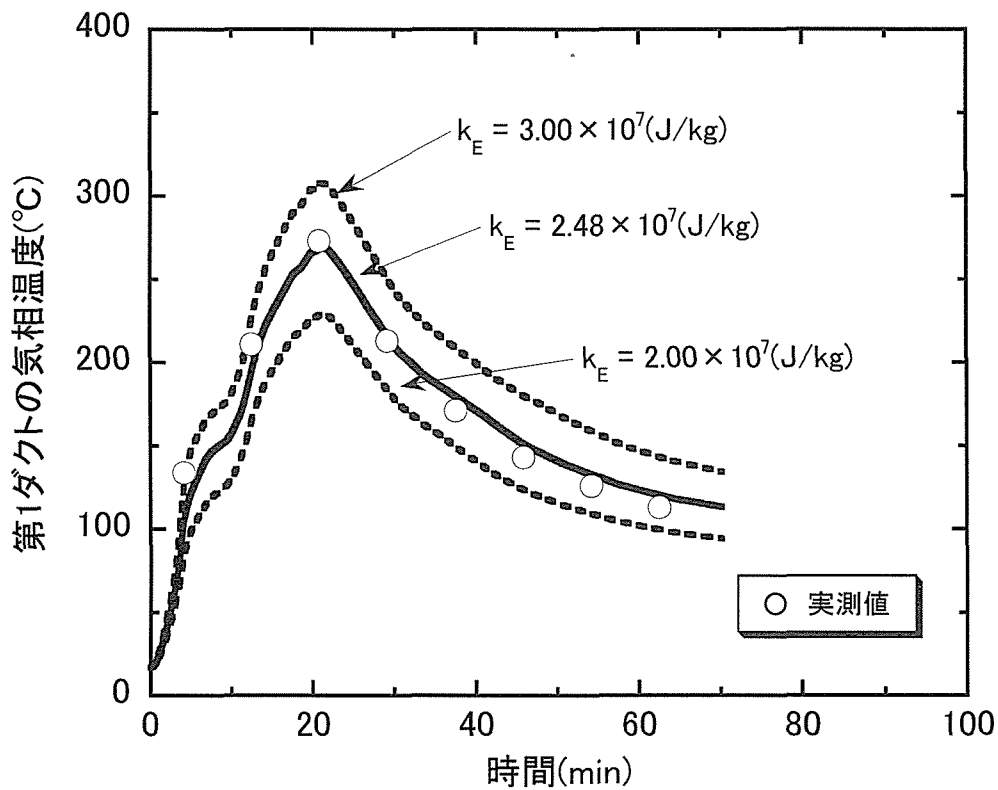


図3.6 エネルギー放出速度係数(k_E)の評価結果(SMOK2002)

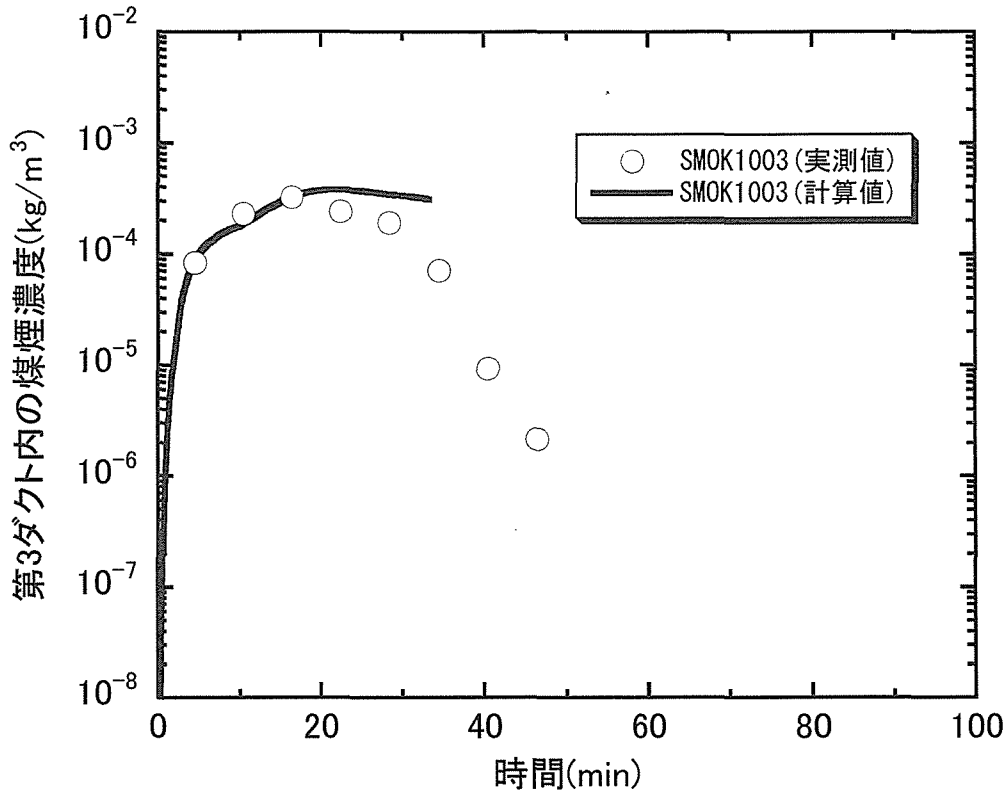


図3.7 煤煙放出速度係数(k_g)の評価結果(SMOK1003)

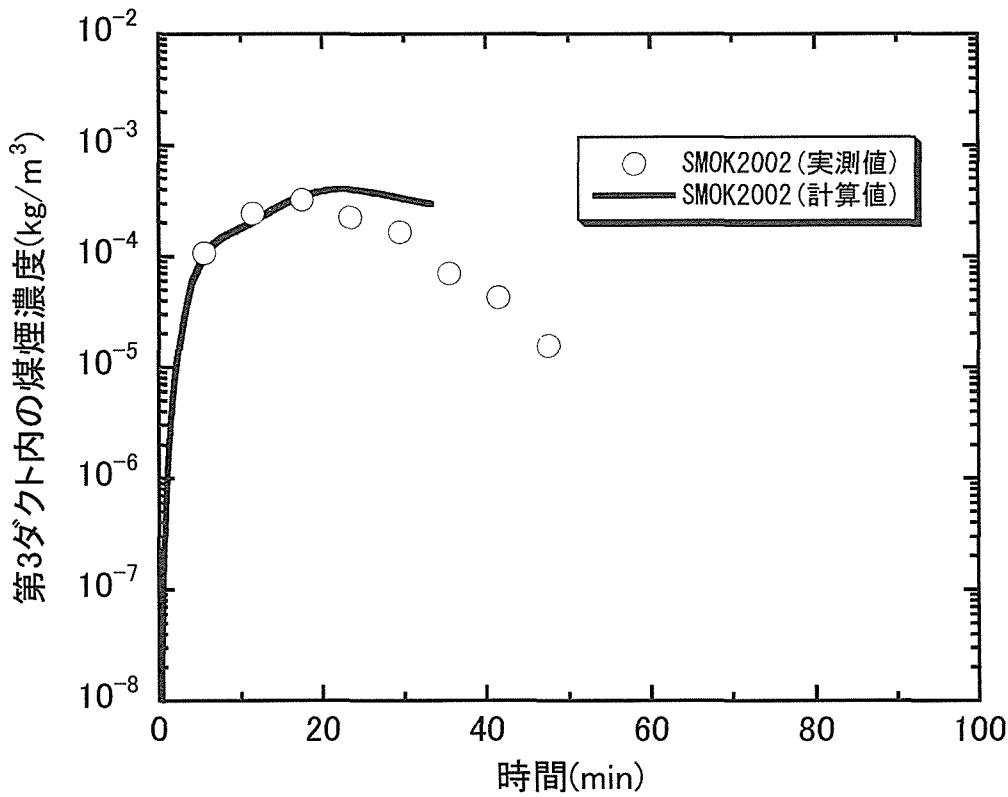


図3.8 煤煙放出速度係数(k_g)の評価結果(SMOK2002)

4. 前置フィルタ破損までの差圧の時間変化に関する解析

4.1 本研究で検討対象とした課題

既報の CELVA-1D を用いた前置フィルタの破損に至るまでの差圧上昇解析⁶⁾では、実験結果と比べて定性的には近いものの初期差圧および差圧曲線の形に若干の相違が見られるとともに前置フィルタの差圧の変化に時間遅れが生じた。実験結果と CELVA-1D による解析結果との相違のうち、前置フィルタの差圧の変化に時間遅れが生じている点は、前置フィルタを建屋換気系に使用した再処理施設を対象として CELVA-1D を用いた火災事故時の閉じ込め効果解析を行って評価した前置フィルタが破損するまでの時間猶予の値が実際の猶予よりも過大評価される可能性があることを意味しており、相違を解消すべき最も重要な課題である。この相違には、解析で採用した次の仮定が影響したことが考えられる。

(1)まず、DOP エアロゾル粒子を用いた試験前後における前置フィルタの透過率測定で得た粒径別 DF 値をそれぞれ、無負荷および前置フィルタの破損時間での煤煙負荷量における DF 値と仮定した。さらに、前置フィルタへの煤煙負荷量と前置フィルタの粒径別 DF 値の相関データについては、同一粒径に対する無負荷および前置フィルタの破損時間における煤煙負荷量の粒径別 DF 値の 2 点で結ばれる直線で表されると仮定し、直線の内挿点を相関データとしてテーブル化した。

(2)テーブル化した前置フィルタの粒径別 DF 値の粒径範囲が $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ しか存在しなかったため、前置フィルタ入口近くの煤煙の重量基準の粒径分布は、燃焼試験で得られた粒径分布における粒径が $2 \mu\text{m}$ 以上の煤煙粒子の重量を全て粒径 $2 \mu\text{m}$ のおける重量に積算した分布で表せると仮定した。

(3)初期差圧は、試験前の前置フィルタの差圧実験値の平均値で表せると仮定した。

この課題を解決するという観点から仮定(1)~(3)を再検討すると、CELVA-1D の前置フィルタの粒径別の DF 値テーブルおよび前置フィルタの煤煙の粒径分布の粒径範囲を制約している仮定(2)を最も先に解消する必要があり、その次に、仮定(3)の初期差圧の相違が影響するかどうかを検討すればよい。仮定(1)は前置フィルタが破損に到るまでの差圧曲線の形の相違に関するものであるであり、既報の解析結果と実験結果の差圧曲線の形には大きな相違は見られない。

4.2 換気系フィルタの煤煙粒子の粒径別 DF 値

図 4.1、4.2 にそれぞれ、本研究で解析対象とした SMOK1003 試験と SMOK2002 試験前後に実施した DOP エアロゾル粒子を用いた前置フィルタの透過率測定から得られた前置フィルタの粒子別 DF⁷⁾を示す。図中の○、□印がそれぞれ、試験前、試験後の粒子別 DF の測定値を示している。また、図 4.3、4.4 にそれぞれ、SMOK1003 試験と SMOK2002 試験において前置フィルタの入口近くの第 3 ダクトで測定された煤煙粒子の重量基準の粒径分布の時間平均値から求めた煤煙粒子の質量分率の分布⁷⁾を示す。図中の■印が実測値

であるが、後の 4.3 節で述べる CELVA-1D で用いる煤煙粒子の粒径分布の設定を考慮して、各点(約 0.05~約 12 μm)を直線近似して同じ図の対数正規分布(●印)と同じ粒径位置に再プロットしている。図 4.3、4.4 の■印の粒径範囲が約 0.014~15 μm であるのに対して、図 4.1、4.2 の○、□印の DF の粒径範囲は約 0.1~2 μm までしか得られていない。この DF の粒径範囲の制約が 4.1 節の仮定(2)を行う必要があった理由である。したがって、適切な仮定の下で、この粒径範囲外における DF 値を求めることが出来れば、仮定(2)は必要でなくなる。

ここで、本研究で使用した前置フィルタの DF 値についての定性的な考察を行う。使用した前置フィルタのろ材上の分類は HEPA フィルタと同じくガラス繊維層フィルタであるため、前置フィルタにおける煤煙粒子の捕集は、主に前置フィルタの繊維層内部が行われる。繊維層フィルタの粒子透過率 P(DF の逆数)は次式で表される¹⁴⁾。

$$\frac{1}{DF} = P = \exp\left(-\frac{4}{\pi} \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{L}{d_f} \eta\right) \quad (4.1)$$

ここで、 α は繊維フィルタの充填率(-)、Lはフィルタの厚み(m)、 d_f は繊維径(m)、 η は単一繊維捕集効率(-)と呼ばれ、繊維表面への粒子の捕集機構(拡散、さえぎり、慣性、重力など)別の捕集効率の和で表され、支配的な捕集機構はフィルタを透過する粒子の粒径と流速で決まる。フィルタ厚みが固定されている前置フィルタの透過率は、(4.1)式を厳密に適用すると α 、 d_f 、煤煙粒子の粒径と前置フィルタ内部を透過する流速で支配的な値が決まる η の関数であるが、煤煙粒子が無負荷時の α と d_f は決まった値であり、前置フィルタが煤煙粒子の負荷によって目詰まりが生じ破損する直前も平均的な α と d_f はある一定値とみなすことができる。その場合、煤煙粒子が無負荷時および前置フィルタが煤煙粒子の負荷によって目詰まりが生じ破損する直前の透過率は、単一捕集効率のみの関数となり、さらに煤煙試験のように換気流量が一定の下では、それぞれの煤煙粒子の負荷条件における前置フィルタを透過する流速も一定とみなすことができ、支配的な捕集機構は煤煙粒子の粒径だけで推定することが可能となる。この場合、最も前置フィルタに対する透過率が高い、すなわち、前置フィルタに対する DF 値が最も小さい値をとる煤煙粒子の粒径よりも小さい粒径範囲では拡散捕集が支配的となり粒径が小さくなるほど拡散捕集効果は大きくなるため、DF 値は(4.1)式から指数関数的に増加する。また、DF 値が最も小さい値をとる煤煙粒子の粒径よりも大きな粒径範囲では慣性、さえぎり、重力捕集機構が支配的となり粒径が大きくなるとこれらの捕集効果は大きくなるため、DF 値は(4.1)式から指数関数的に大きくなると考えることができる。

このような前置フィルタの考察の結果から、図 4.1、4.2 で測定データが存在しない粒径範囲について、0.1 μm より小さくなると煤煙粒子の拡散捕集による前置フィルタの DF 値の増加が予想されるが、使用した前置フィルタのメーカー公称による繊維径は約 30 μm と非常に大きいため、SMOK1003 試験と SMOK2002 試験での換気流量条件では、0.1 μm より小さい煤煙粒子はほとんど前置フィルタで捕集されることはなく、0.1 μm より小さい煤煙粒子に対する前置フィルタの粒径別 DF の値を 0.1 μm と仮定しても問題ない。一

方、 $2\mu\text{m}$ の煤煙粒子に対する前置フィルタの粒径別 DF の値は試験前の値は $0.1\mu\text{m}$ の場合の DF 値より約 1.6 倍程度高い程度であるが、試験後の値は $0.1\mu\text{m}$ の場合の DF 値より約 10^4 倍と非常に大きく、 $2\mu\text{m}$ より大きい煤煙粒子に対する前置フィルタの粒径別 DF は、慣性、さえぎり、重力捕集効果の増加により著しく大きくなることが予想できる。本研究では、図 4.1、4.2 のそれぞれの場合に試験前、試験後の DF 測定データのうち、煤煙粒子の粒径が $0.7\mu\text{m}$ 以上の粒径別 DF 測定データを選択して指数関数近似を行い、その近似式を $2\mu\text{m}$ よりも大きな煤煙粒子に対する前置フィルタの粒径別 DF にも外挿して、各試験ごとの無負荷時および前置フィルタが目詰まりにより破損する煤煙負荷量における粒径別 DF 値を求め、CELVA-1D の DF 値テーブルに追加した。図 4.1、4.2 の●、■印がそれぞれ、試験前、試験後の外挿により追加した粒子別 DF を含む CELVA-1D の前置フィルタの DF テーブルに入力した粒径別の DF である。なお、HEPA フィルタの DF 値については、既報の解析と同じく、CELVA-1D に内蔵されている HEPA フィルタの DF 値¹³⁾を用いた。表 4.1 に CELVA-1D の内蔵されている HEPA フィルタの DF 値を示す。

4.3 煤煙粒子の粒径分布

本研究では、4.1 節により CELVA-1D における前置フィルタに対する粒径別の DF テーブル値を拡張したため、図 4.3、4.4 の■印の分布で示した通り、それぞれ、SMOK1003 試験と SMOK2002 試験において前置フィルタの入口近くの第 3 ダクトで測定された煤煙粒子の重量基準の粒径分布の時間平均値から求めた煤煙粒子の質量分率の分布を用いた。また、この場合とは別に、これらの質量分布から求めた質量中央径(MMD)および幾何標準偏差(σ_g)を CELVA-1D に代入して自動作成される 11 点の粒径データで表される重量基準の対数正規分布を仮定した場合の分布(図 4.3、4.4 中の●印)の場合も解析対象とした。表 4.2 に CELVA-1D に内蔵されている他指数正規分布の質量分率を示す。

4.4 煤煙粒径別の煤煙負荷量と DF 値

図 4.5、4.6 にそれぞれ、SMOK1003 試験と SMOK2002 試験に対する解析で用いた煤煙粒径別の煤煙負荷量と DF 値の関係を示す。図中の●印のデータは図 4.1、4.2 の無負荷時および前置フィルタが目詰まりにより破損する煤煙負荷量における粒径別 DF データ(図中の●、■印)であり、その間の負荷量に対する DF 値は、この 2 点を結んだ直線に従うと仮定した。ここで得られた関係を CELVA-1D の煤煙負荷量と DF のデータテーブルに使用した。なお、本解析で用いたエアロゾルに関する主な設定方法および粒径分布、DF 値テーブルの入力データ指定方法を付録に示した。

4.5 計算結果および考察

(1) 初期定常計算結果

CELVA-1D では過渡事象解析計算に先立って、換気系内における熱流動に関する初期定常状態を計算した。初期定常計算では、指定バルブの開度を自動的に制御して目標(実測値)にした状態量に収束するまで繰り返し計算を行なった。本計算では、4つのバルブ(V6、V82、V110、V124(図 3.3 参照))に対し開度調整を行い、目標値として第1モデルセル圧力、給気および希釈流量を設定して、解析対象施設の初期状態量を算出した。表 4.3 に主な煤煙試験の測定データと初期定常計算結果を示す。第1モデルセル圧力、給気、希釈、排気各流量の計算値は、実測値と良く一致した。

(2) 換気系フィルタの差圧上昇計算結果

図 4.7 に、SMOK2002 試験を対象とした前置フィルタと HEPA フィルタ差圧の経時変化に関する計算値を実測値と共に示す。図中の計算値には、本解析において実施した2つのケース(CASE-1、2)と既報の解析結果(CASE-prev)⁶⁾を示した。粒径分布に関する解析条件は、CASE-1 では、煤煙の粒径分布の代表径を CELVA-1D で設定し、質量分率を第3ダクト内で測定された質量分率時間平均値(範囲 0.1~10 μ m)とし、CASE-2 では、代表径と質量分率を CELVA-1D の対数正規分布設定機能により設定した。

前置フィルタが破損した時間に関する計算結果と実測値の誤差は、CASE-prev が約 20%、CASE-2 では約 30%と若干の相違が見られた。これに対して、質量分率に第3ダクト内で測定された質量分率時間平均値を適用した CASE-1 の計算結果は、前置フィルタ破損時間の誤差が約 4%で、実測値とよく一致した。ここで、CASE-1 に対する CASE-2 の計算結果の相違は、図 4.2 に示した様に粒径分布の相違が理由の一つとして考えられる。つまり、対数正規分布を設定した CASE-2 の質量分率は、実測値を用いた CASE-1 の質量分率と比較して、質量中央径(0.48 μ m)より小さい粒子径の範囲で、大きい値となっている。このため、CASE-2 での計算結果は、燃焼初期での前置フィルタへの煤煙負荷量が緩やかな評価となり、差圧の上昇も緩やかになったものと考えられる。

一方、前置フィルタの破損に至るまでの差圧上昇曲線の形に関して、実測値と計算値に相違が見られた。この原因として、前置フィルタの各粒径毎の DF 設定値を、試験前後に測定された前置フィルタの煤煙負荷量を基に直線近似を仮定したこと、煤煙放出速度の評価が不十分であること等が挙げられる。つまり、実際の燃焼では、前置フィルタの煤煙負荷による DF の変化は曲線的に変化すること、本解析で仮定した燃焼による煤煙の発生(質量放出速度に比例すると仮定)に若干の相違があること等が考えられる。したがって、今後、この点に関する実験的検討が必要であると考えられる。

また、HEPA フィルタ差圧の経時変化に関しては、各ケースの計算結果共に、煤煙試験における HEPA フィルタ差圧の経時変化を良く模擬した。

前置フィルタの初期差圧の違いによる破損時間に関する計算結果への影響を確認するため、燃焼物組成および燃焼重量が SMOK2002 試験と同値で、前置フィルタの初期差圧の実測値が代表差圧(0.03kPa)と等しい SMOK1003 試験を対象に計算を実施した。図 4.8 に、その結果を示す。前置フィルタの破損時間に関する比較では、粒径分布の質量分率に実測

値を用いた CASE-1 の計算結果が、SMOK2002 試験の CASE-1 の計算結果とほぼ同様の誤差範囲で一致した。このことは、SMOK2002 試験の前置フィルタの破損時間に関する計算結果において、初期差圧の違いによる影響は小さいことを意味する。なお、SMOK1003 試験解析における CASE-1、2 の前置フィルタ破損時間の差が小さいのは、CELVA で設定した粒径分布(対数正規分布)と、実測値の粒径分布とが近い分布を示しているためである(図 4.3 参照)。

表 4.1 CELVA-1D に内蔵されている HEPA フィルタの除染係数(DF)

エアロゾル粒子径(m)	除染係数 DF(-)
0.0~ 1.08×10^{-7}	2.9×10^3
1.20×10^{-7}	2.8×10^3
1.34×10^{-7}	2.8×10^3
1.50×10^{-7}	2.9×10^3
1.67×10^{-7}	3.1×10^3
1.86×10^{-7}	4.0×10^3
2.09×10^{-7}	5.0×10^3
2.34×10^{-7}	7.0×10^3
2.61×10^{-7}	1.1×10^4
2.89×10^{-7}	1.8×10^4
$3.26 \times 10^{-11} \sim \infty$	3.7×10^4

表 4.2 CELVA-1D による対数正規分布の質量分率

代表粒径(μm)	質量分率(-)
$D_g \sigma_g^{-2.5}$	0.0122245
$D_g \sigma_g^{-2.0}$	0.0278347
$D_g \sigma_g^{-1.5}$	0.0655906
$D_g \sigma_g^{-1.0}$	0.1209776
$D_g \sigma_g^{-0.5}$	0.1846663
D_g	0.1974126
$D_g \sigma_g^{0.5}$	0.1846663
$D_g \sigma_g^{1.0}$	0.1209776
$D_g \sigma_g^{1.5}$	0.0655906
$D_g \sigma_g^{2.0}$	0.0278347
$D_g \sigma_g^{2.5}$	0.0122245

表 4.3 初期定常計算結果(実測値と計算値)

		実測値		計算値
第 1 モデルセル圧力(kPa)		100.1		100.1
流量(m^3/s)	給気ダクト	0.11		0.11
	希釈ダクト	1.11		1.09
	排気ダクト	1.22		1.20
前置フィルタ差圧(kPa)	(SMOK1003)	0.03		0.03 (設定値)
	(SMOK2002)	0.13		
HEPA フィルタ差圧(kPa)	(SMOK1003)	0.21		0.24 (設定値)
	(SMOK2002)	0.23		

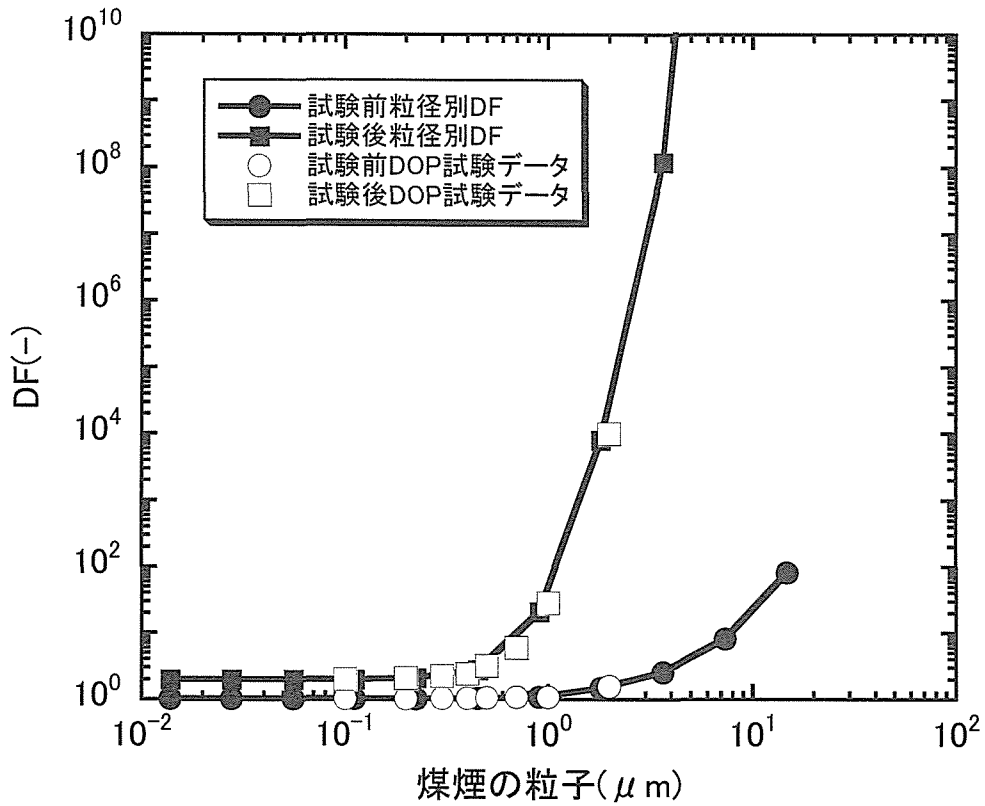


図4.1 前置フィルタの煤煙粒子の粒径別DF(SMOK1003)

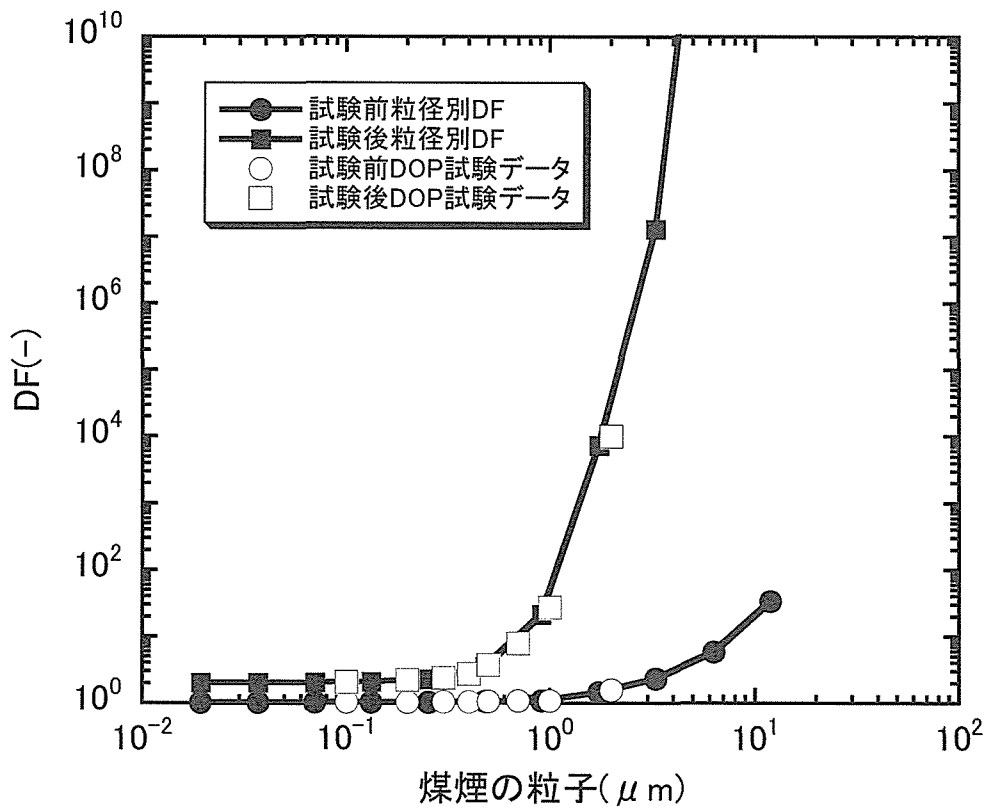


図4.2 前置フィルタの煤煙粒子の粒径別DF(SMOK2002)

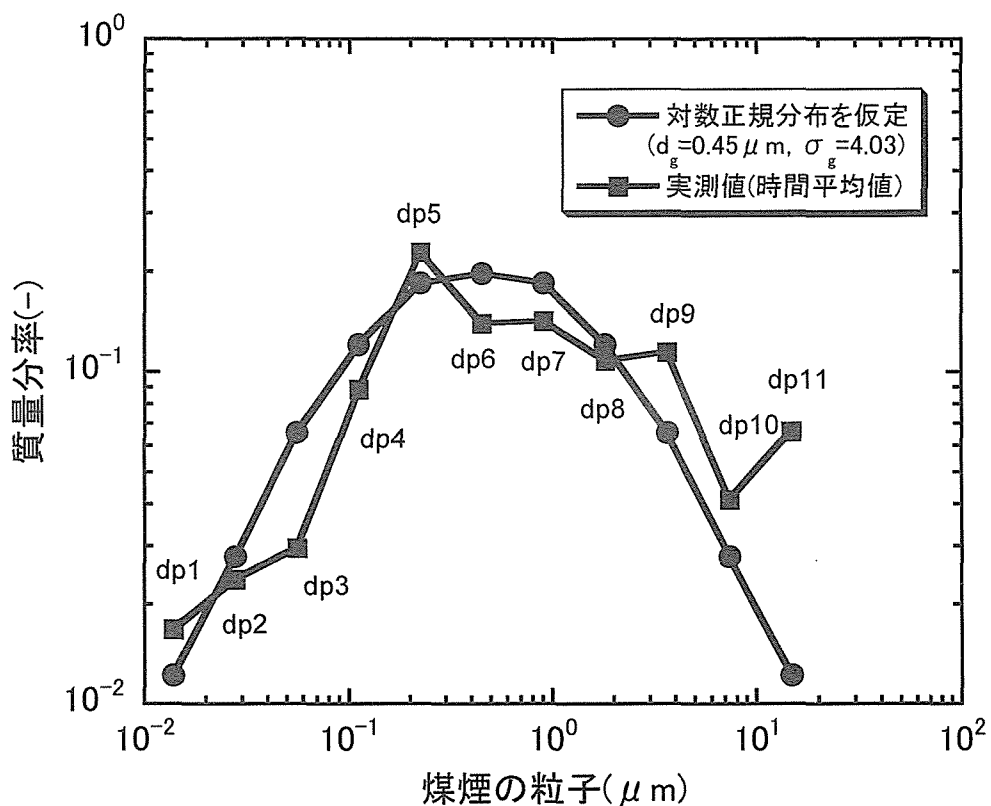


図4.3 煤煙粒子の粒径分布設定(SMOK1003)

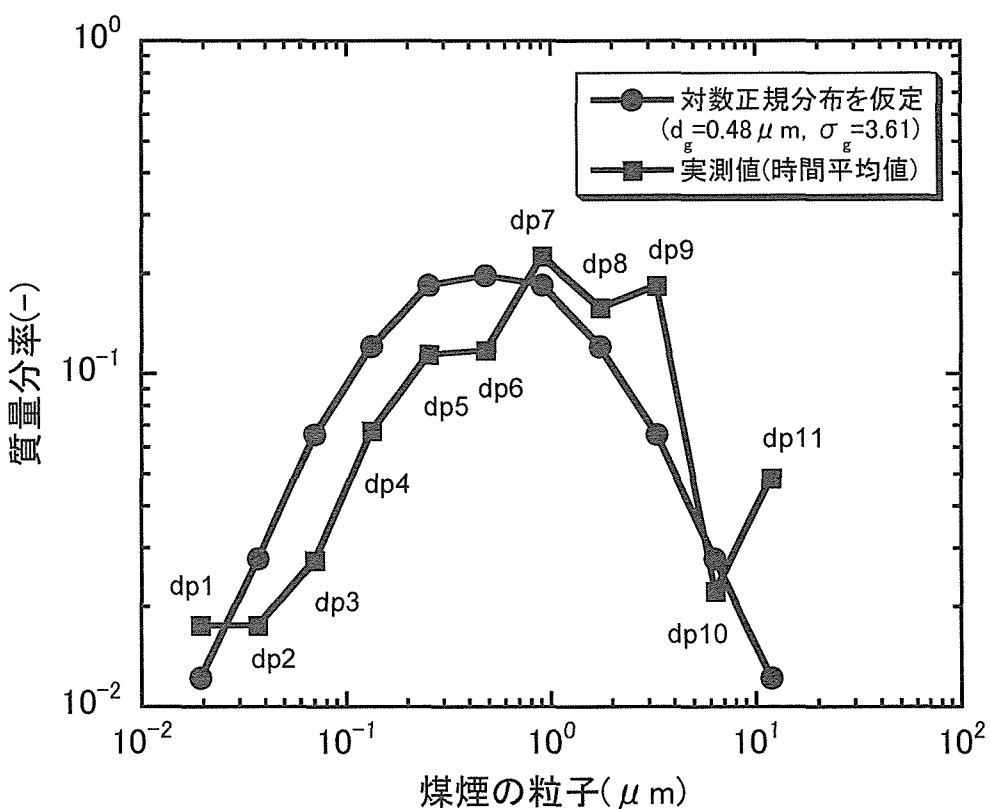


図4.4 煤煙粒子の粒径分布設定(SMOK2002)

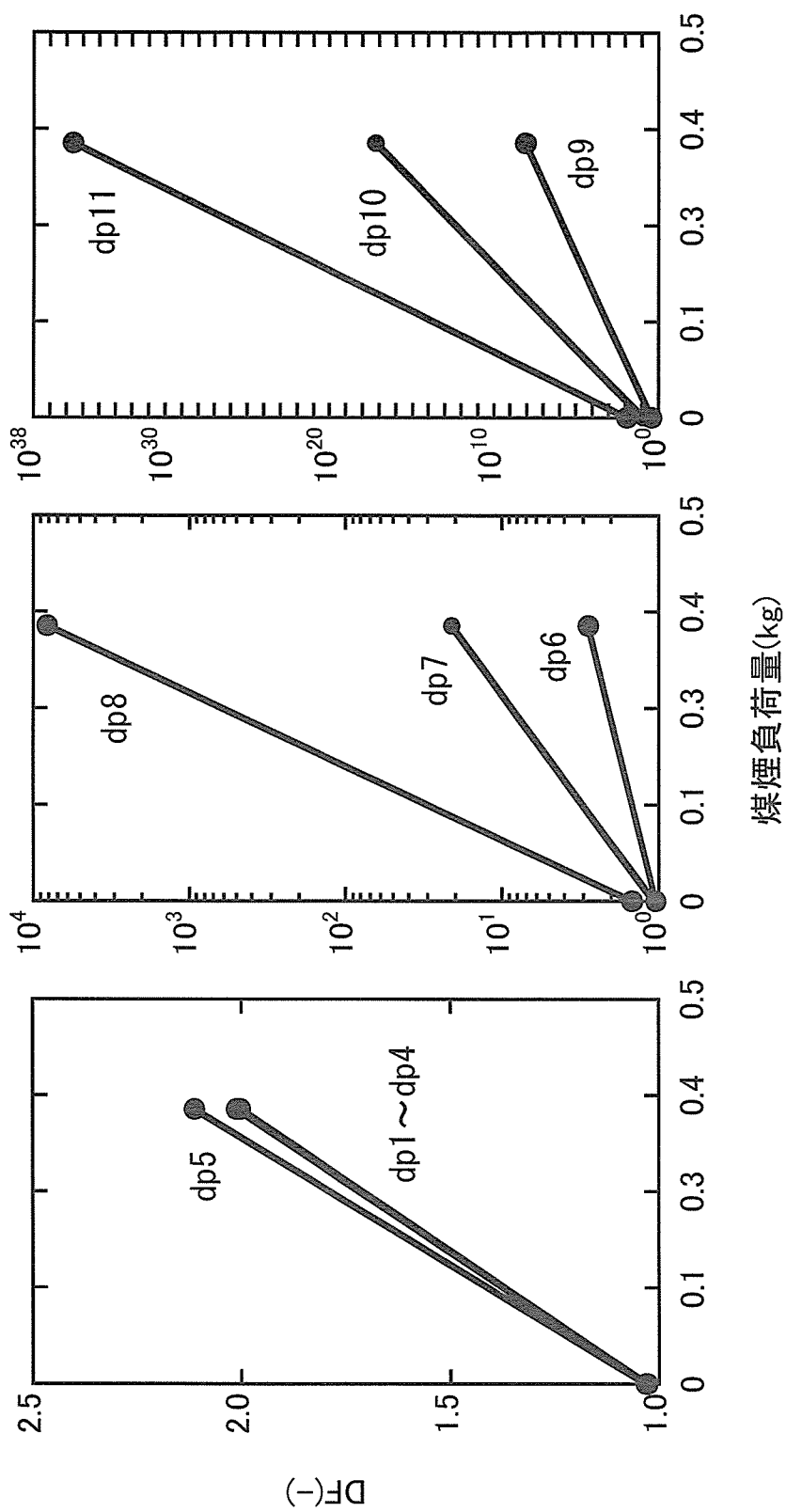


図4.5 煤煙負荷による粒径別DFの変化(SMOK1003)

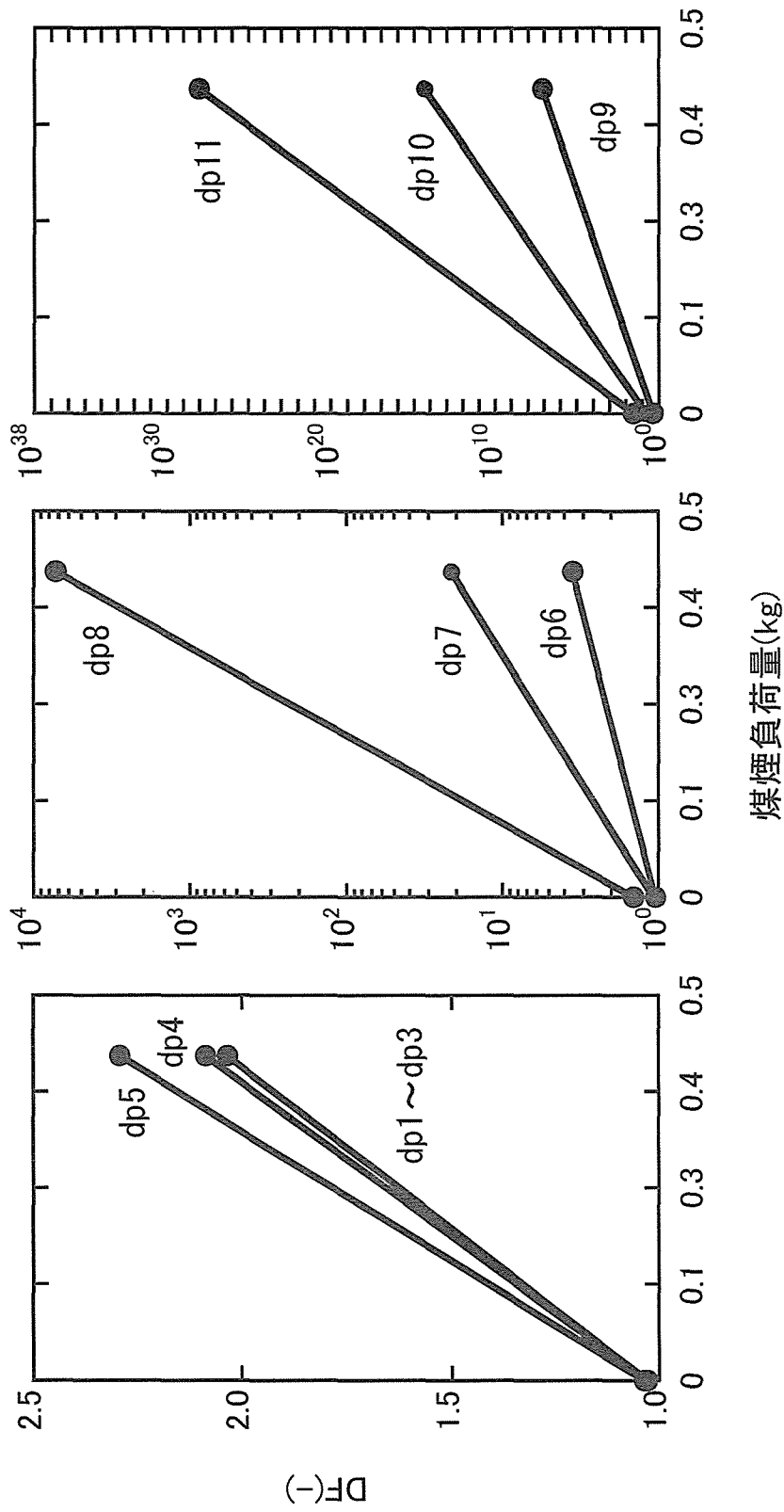


図4.6 煤煙負荷による粒径別DFの変化(SMOK2002)

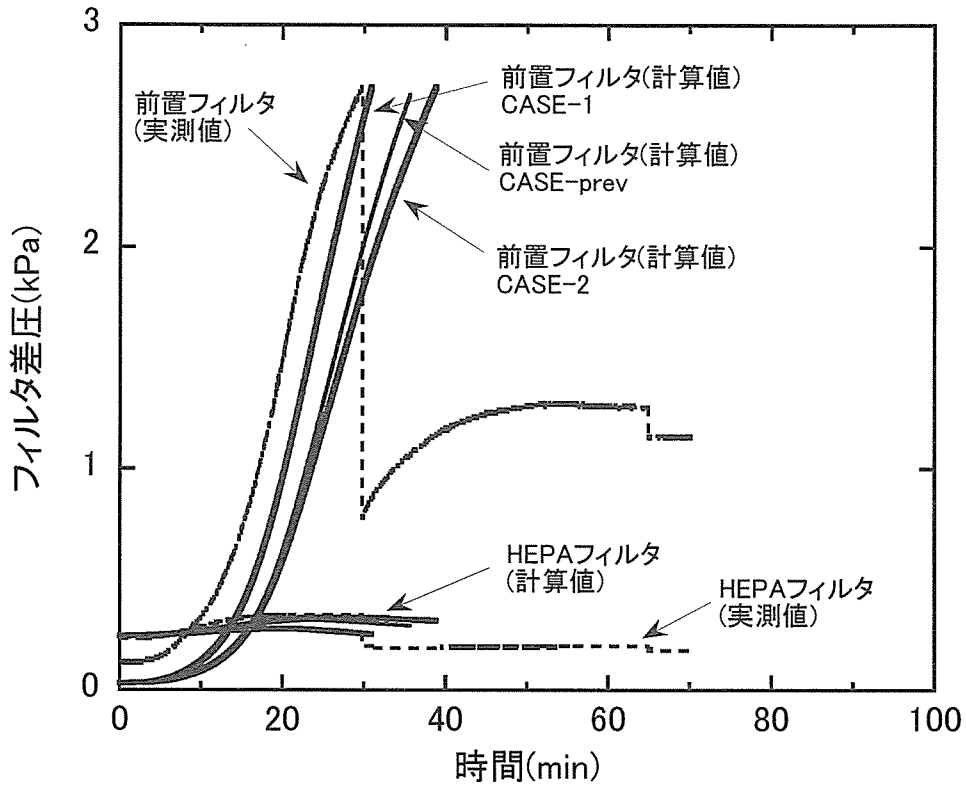


図4.7 換気系フィルタの差圧上昇解析結果
(SMOK2002 前置フィルタ初期差圧:0.13kPa(実測値))

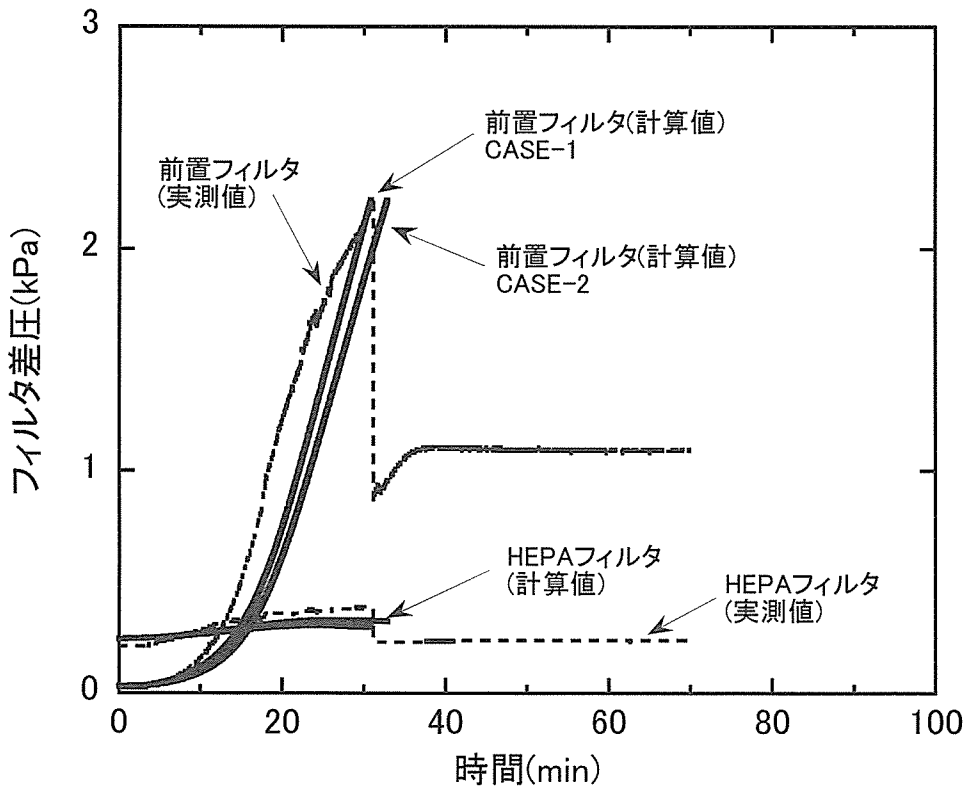


図4.8 換気系フィルタの差圧上昇解析結果
(SMOK1003 前置フィルタ初期差圧:0.03kPa(実測値))

5. 前置フィルタ破損に至るまでの猶予時間の評価

原子力施設内で万一火災事故が発生した場合、適切な換気系フィルタの交換や換気系統の切り替え等の初期対応をとる事は、放射性物質の放出を防止する上で極めて重要である。そこで、燃焼物組成の違いによる、破損に至るまでの時間的猶予の違いについて評価を試みた。燃焼物組成が異なる場合、質量、エネルギー、煤煙の放出速度、燃焼により発生する煤煙の、粒径分布、前置フィルタに対する DF の変化等が異なる事が考えられるが、本評価計算では煤煙放出速度に着目して、これを変化させることで燃焼物組成の違いを仮定した。煤煙放出速度は、煤煙化率 K_G をパラメータとして変化させた。

5.1 計算条件および仮定

本評価計算では、施設のノード・ジャンクションデータ、換気系フィルタに関する流動抵抗(k_L , k_T)および目詰まり係数(α , β)、煤煙粒子の粒径分布(MMD, σ_g)、HEPA フィルタの DF および前置フィルタにおける煤煙負荷による粒径別 DF の変化は、SMOK1003 試験を対象とした差圧上昇計算に用いた計算ケース(CASE-2)の計算条件を適用した。ソースタームに関する計算条件では、質量放出速度 M の設定を SMOK1003 試験での全燃焼重量を燃焼時間で除することで平均の質量放出速度(3.5×10^{-3} (kg/s))を算出し、燃焼は定常で進行するものとした。また、定常燃焼に達するまでの質量放出速度の増加割合は、SMOK1003 試験解析で設定した質量放出速度のピークまでの割合と同一とした。エネルギー放出速度 E は、算出した M にエネルギー放出速度係数 K_E 値(2.48×10^7 (J/kg))を乗ずることで算出した。本評価計算でパラメータとした煤煙化率 $K_G(-)$ は、AAH⁴⁾ 中で燃焼物組成の違いによる煤煙の分率 $Y_s(-)$ の範囲(0.002~0.38)を参考に設定した。 $K_G(-)$ の値は、0.02、0.03、0.05、0.1、0.2、0.3 の 6 種類として、これを M に乗ずることで煤煙放出速度 G (kg/s)を算出した。表 5.1 に AAH に記載されている煤煙の分率を、図 5.1 に計算に用いた質量放出速度を、そして図 5.2 に計算に用いた煤煙放出速度をそれぞれ示した。本解析では、質量放出速度は 20 分まで上昇し、その後一定となる(一定の燃焼)とした。

5.2 評価計算結果

図 5.3 に各煤煙放出速度に対して計算した前置フィルタ差圧の経時変化を示す。煤煙化率 K_G (煤煙放出速度)が大きくなるにしたがって、差圧の上昇率は急速に大きくなる。煤煙試験により、前置フィルタが破損する差圧(ΔP_B)は、0.8kPa から 2.7kPa であるとの測定結果が得られている。そこで、図 5.3 から 0.8kPa および 2.7kPa の差圧に到達するまでの時間を各 K_G の条件について求めた。これを K_G に対してプロットすると図 5.4 となる。 K_G の値が 0.15 付近より大きい場合には、前置フィルタが破損するまでの時間は、 $\Delta P_B=0.8$ の場合約 20 分および $\Delta P_B=2.7$ の場合約 30 分程度で、 $K_G(-)$ の値の影響はあまり受けなかった。これに対して K_G の値が 0.15 付近以下の場合では、煤煙放出速度の減少に伴って前

置フィルタの破損時間が急激に長くなる傾向が見られた。例えば、 K_G の値が0.02の場合、前置フィルタの破損時間は約1時間25分($\Delta P_B=0.8$)および約2時間40分($\Delta P_B=2.7$)程度であった。このような関係を、より具体的な換気条件(給排気停止の有無等)や燃焼物組成・燃焼物量、および施設の形状等を対象として予め評価することによって、大量の煤煙を発生するような火災が起きた場合の適切な初期対応を検討しておくことが可能となると考えられる。

表 5.1 AAH 中に記載されている燃焼物組成に対する煤煙化分率 $Y_s(-)$

燃焼物組成	$Y_s(-)$
塩化ビニル	0.086
ポリスチレン	0.15
セルロース	0.001
ゴム	0.15~0.38
ドデカン	0.002~0.087
木	0.015

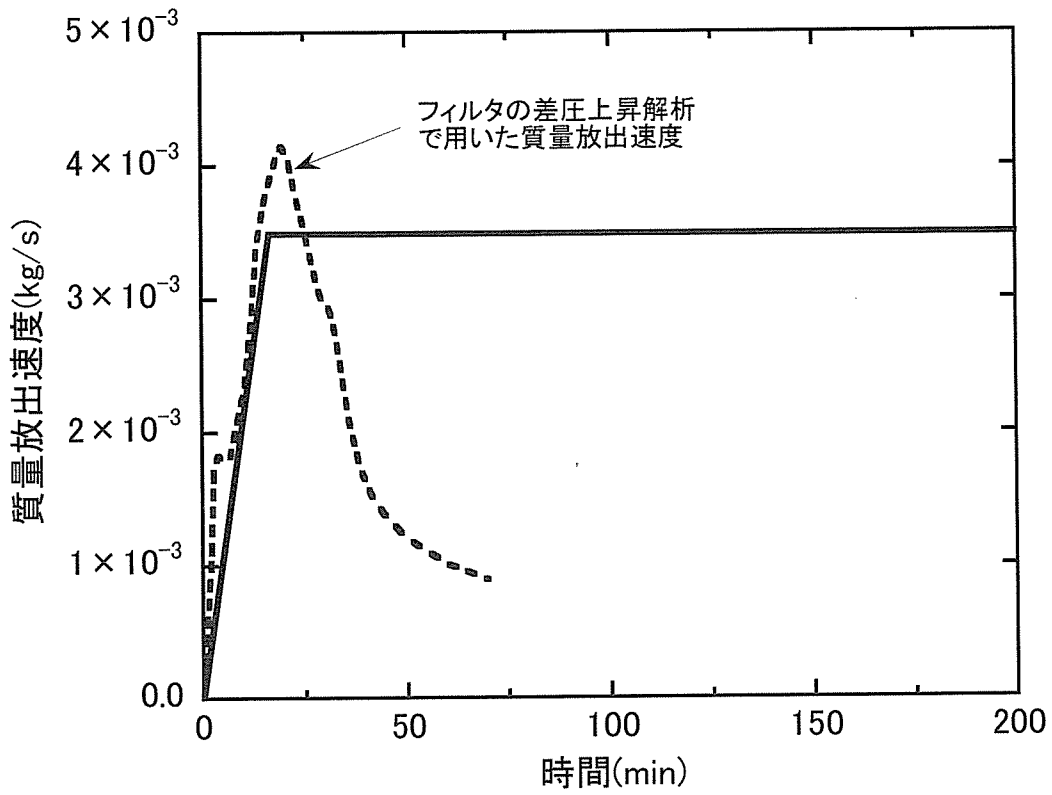


図5.1 猶予時間の計算に用いた質量放出速度

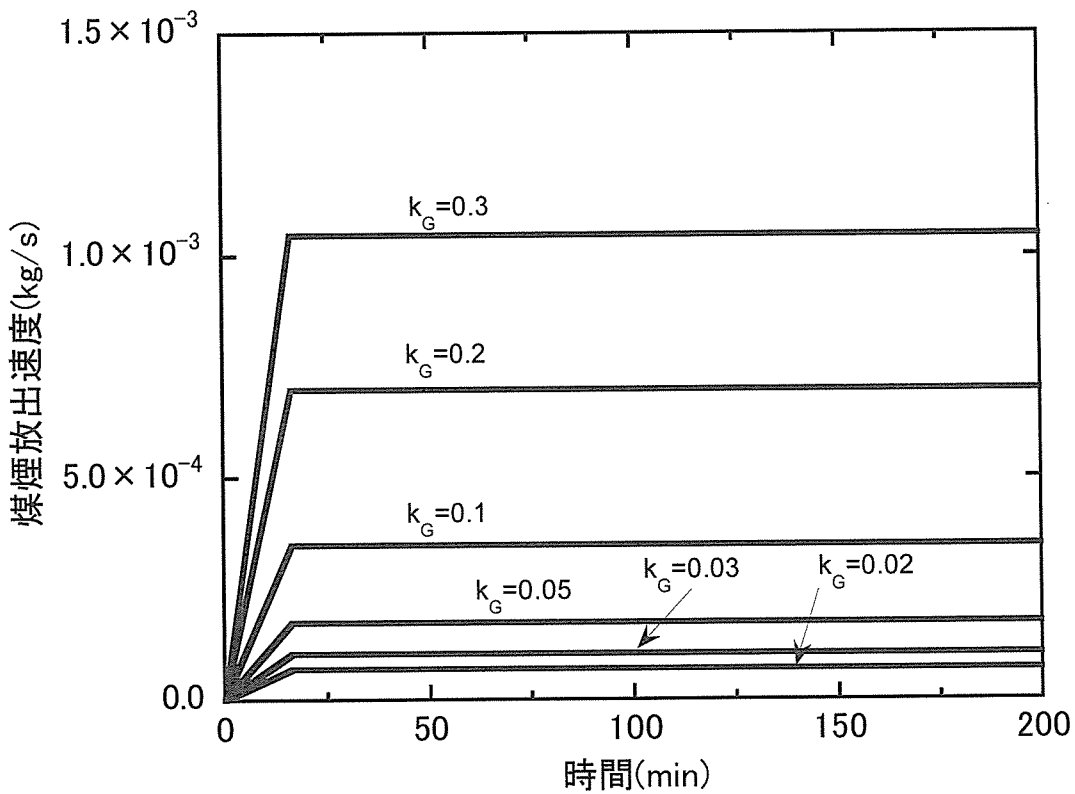


図5.2 猶予時間の計算に用いた煤煙放出速度

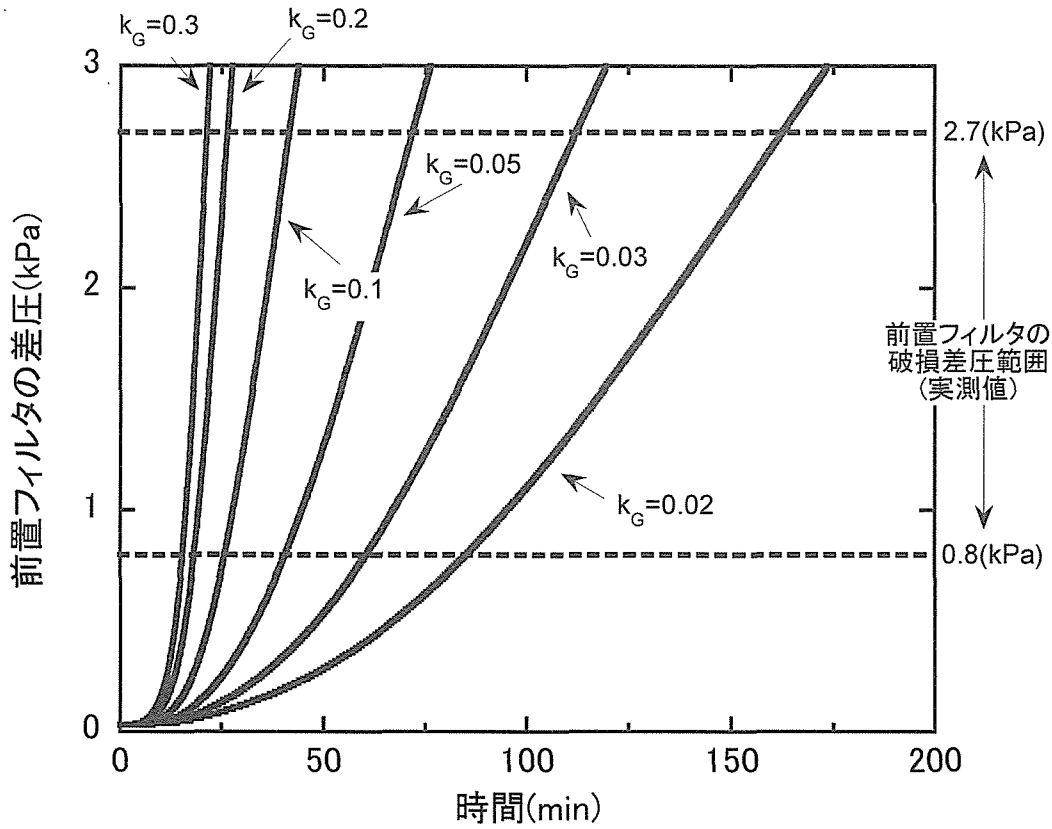


図5.3 煤煙放出速度の違いによる前置フィルタ差圧の経時変化

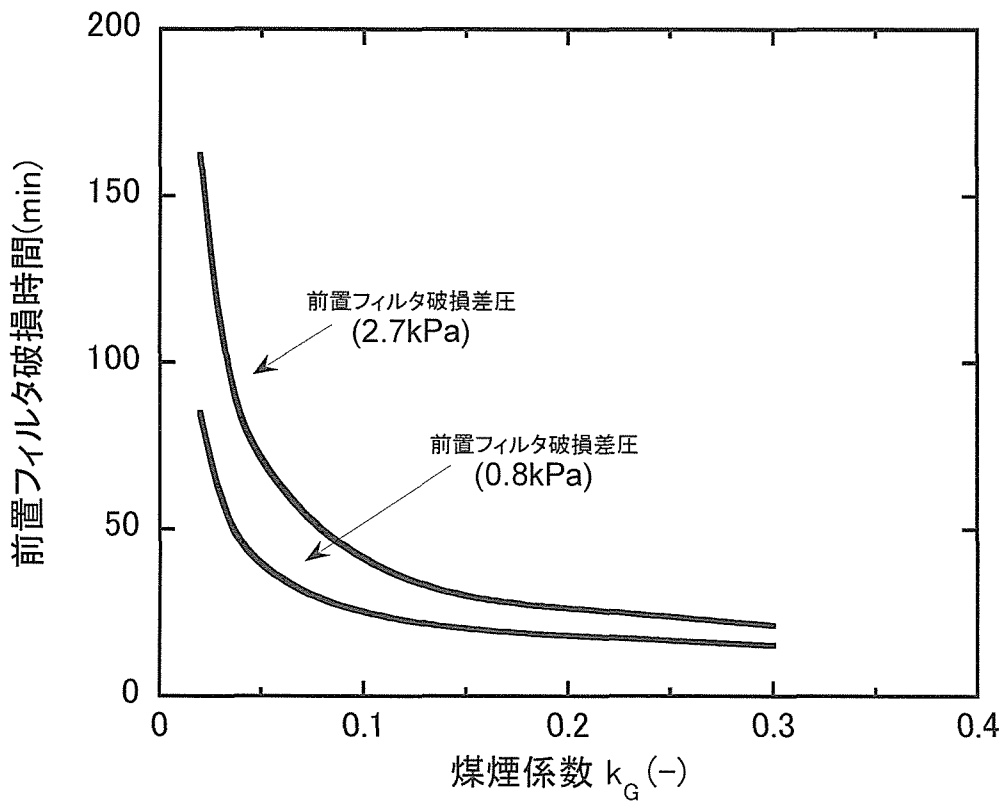


図5.4 煤煙放出速度の違いによる前置フィルタ破損時間の評価結果

6. 結 言

火災事故時における施設内への煤煙閉じ込め効果を定量的に評価するために、煤煙試験で得られた熱流動、煤煙測定結果および前置フィルタの目詰まり係数を CELVA-1D に適用して、煤煙の負荷による換気系フィルタの差圧上昇解析を実施した。

解析では、煤煙試験¹⁾で十分に測定データが得られなかった $2\mu\text{m}$ 以上の煤煙粒子に対する前置フィルタの DF について、試験前後の前置フィルタの DF 測定データから作成した粒径-DF の指数近似式を外挿して求める方法を提案した。この方法により既報の解析⁶⁾で生じた、粒径分布における $2\mu\text{m}$ 以上の煤煙粒子に対する仮定を解消することができた。また、前置フィルタへ負荷する煤煙粒子の粒径分布として実験値および対数正規分布を仮定した 2 つの場合の下で、CELVA-1D を用いた前置フィルタの差圧上昇解析を行なった結果、粒径分布として実験値を用いた場合には前置フィルタ破損差圧に達するまで時間遅れが解消されることを確認した。また同時に、煤煙粒子の粒径分布として対数正規分布を仮定して解析する場合には、実際の粒径分布との形の相違によっては、時間遅れが生じることも分かった。本研究で提案した DF 値の推定方法を用いるためには、DF 値の最小値が確認できる粒径-DF 測定データが存在することが前提であり、外挿して得られる DF 値についてフィルタの捕集機構による考察を行って確認する必要がある。しかしながら、この方法は今回検討した前置フィルタ以外の形式のエアフィルタにも適用可能である実践的な DF 値の推定手法である。例えば、火災事故後のフィルタ差圧上昇解析では、実際の事故時における差圧変化の範囲との違いに注意する必要があるが、解析対象となるフィルタについてのいくつかの差圧条件下での平常時の DF 測定データが存在すれば、この方法を用いて CELVA-1D による解析に必要な DF 値テーブルを作成することも可能になる。

さらに、煤煙放出速度をパラメータとすることで燃焼物の違いを仮定し、前置フィルタの破損に至るまでの時間的猶予の評価を行った。その結果、本解析条件下での煤煙放出速度の違いによる前置フィルタの破損に至るまでの時間的な傾向を把握することができた。

今後、より正確な換気系フィルタの DF や目詰まり係数を、火災時ソースターム試験装置等で取得・評価し、この評価データを本解析手法に適用することで、さらに計算精度が高められ、大量の煤煙が発生するような火災が起きた場合の適切な初期対応(換気系フィルタ交換)等の評価に適用することが期待される。

謝 辞

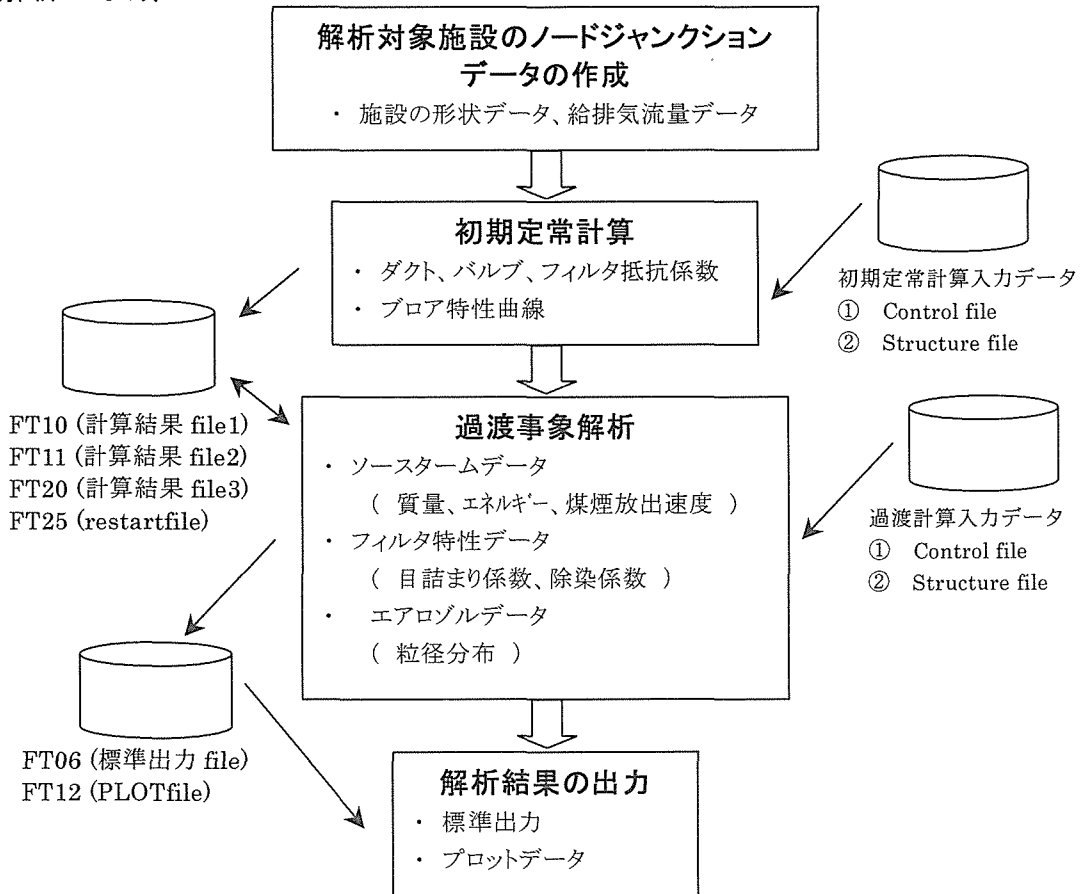
本解析を実施するうえで CELVA コードの実行に関する貴重なコメントを頂いた、(株)富士総合研究所の吉岡逸夫氏、茅畠利宏氏に深く感謝いたします。

参考文献

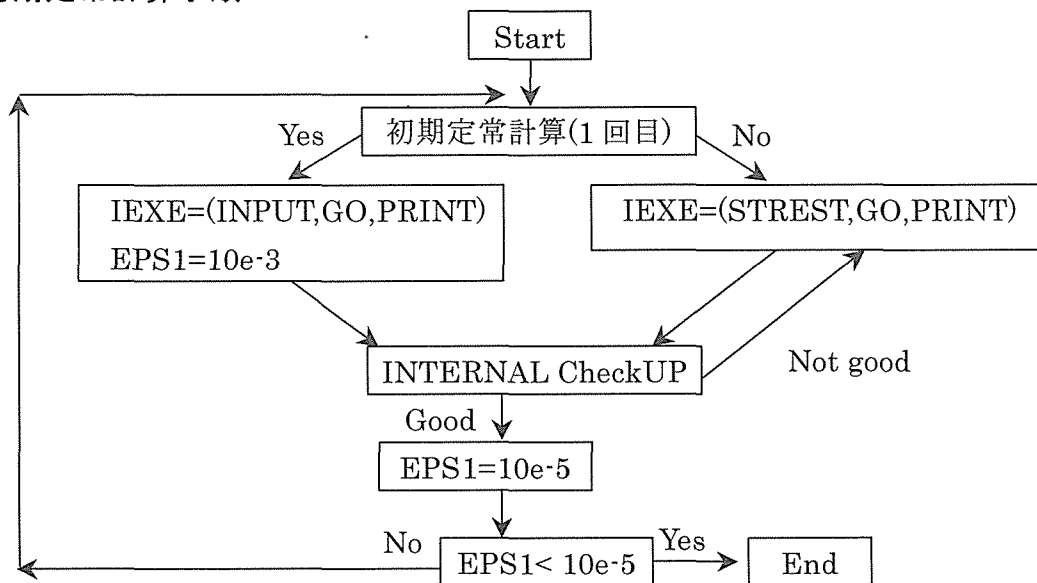
- 1) 高田、林、渡邊、瀧田、塚本、田代、阿部、内山、“火災時における煤煙発生挙動と換気系フィルタ目詰まり特性(受託研究)”, JAERI-Tech 2002-102(2003.1)
- 2) 西尾、渡邊、河野、山崎、向出、吉岡、“再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系の安全性解析コード(CELVA-1D)(受託研究)”, JAERI-Data/Code 98-017 (1998).
- 3) 渡邊、阿部、高田、塚本、林、瀧田、田代、内山、“再処理施設セル換気系安全性実証試験(2)－セル換気系安全性解析コード CELVA-1D の開発－”, 日本原子力学会 2000年秋の大会(I58)(2000.9)
- 4) J.E.Ayer, A.T.Clark, P.Loysen, M.Y.Ballinger, J.Mishima, P.C.Owczarski, W.S.Gregory and B.D.Nichols, “Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook”. NUREG-1320 (1988).
- 5) 阿部、渡邊、田代、高田、内山、“模擬可燃性廃棄物の燃焼に伴う放出ソースターム評価”, JAERI-Research 2001-052 (2001).
- 6) K.Watanabe, H.Abe, J.Takada, S.Tashiro, G.Uchiyama, "Evaluation of Confinement capability for Radioactive materials of Nuclear Fuel Facility under the Fire Accident with CELVA-1D", Proc. 3rd NUCEF Inter. Symp., NUCEF2001, Oct.31-Nov.2 2001, JAERI-Conf 2002-004 (2002).
- 7) 重留、小田、今本、綿引、山内、“アスファルト固化処理施設火災・爆発事故におけるセル排気系フィルタの被害状況－アスファルト固化処理施設火災・爆発事故究明・再発防止に関する調査・検討－”, PNC TN8410 98-088 (1998).
- 8) 高田、渡邊、阿部、塚本、林、瀧田、田代、内山、“再処理施設セル換気系の安全性に関する研究”, 第5回 NUCEF セミナー講演報文集 2001年2月27日 東海研究所 東海村, JAERI-Conf 2001-015 pp.44-45 (2001).
- 9) 藤根他、“アスファルト固化処理施設火災・爆発事故の原因究明試験と環境影響評価”, JAERI-Research 99-056 (1999).
- 10) ウラン濃縮研究棟火災事故調査委員会、“ウラン濃縮研究棟火災事故調査委員会報告書”, JAERI-Review 98-011 (1998.3)
- 11) 阿部、渡邊、“火災事故時の放射性物質閉じ込め効果に対する給気停止の影響の検討”, JAERI-Tech 99-034 (1999).
- 12) グローブ破損調査グループ、“第1 廃棄物処理棟地下灰取出室グローブ破損調査報告書”, JAERI-Review 2002-017 (2002.9).
- 13) 西尾、“再処理施設の事故時における排気フィルタの設備の安全性研究”, 空気清浄, 第25巻、第6号、16(1988).
- 14) W. C. Hinds, "Aerosol Technology Second Edition", John Wiley & Sons, Inc. (1998).

付 録

■ 解析の手順



■ 初期定常計算手順



■ 主な入力データ説明

ここでは、本解析で用いた CELVA-1D コードの入力データを基に、主要な部分について、説明を示す。説明中における詳細の内容については、CELVA-1D コードの入力マニュアル (JAERI-Data/Code 98-017 (1998).)を参照。

初期定常、過渡計算共通項目

・ 計算実行制御 (Control file)

EXECUTION

- IEXE=(INPUT,GO,PRINT) → 初期定常計算(1回目)
- IEXE=(STREST,GO,PRINT) → 初期定常計算及び過渡計算の実行
- IEXE=(REST,GO,PRINT) → リスタート計算の実行

・ 実行結果グラフ出力用データ(時間履歴)の設定 (Control file)

- EDIT MINO → グラフ用出力指定(マイナーエディット)
- TSTA=0.0 → 出力開始時刻(s)
- TINT=1.0 → 出力間隔時間(s)
- MIED=(→ 出力項目の指定
 - (DIFP,F,92), → フィルター92 差圧(Pa)
 - (AERO,D,81), → ダクト 81 エアロゾル濃度(kg/m³)
 - (FILT,F,92), → フィルター92 エアロゾル捕集量(kg)
 - (TEMP,D,17), → ダクト 17 温度(°C)
 - (TEMP,C,15) → セル 15 温度(°C)

A) [出力項目指定方法]

(出力項目、ノードジャンクション形状の種類、ノードジャンクション番号)

[出力項目(NODE)]

密度(DENS)kg/m³、圧力(PRES)Pa : 大気圧との差、温度(TEMP)°C、
壁温(TWAL)°C、流速(VELO)m/s、エアロゾル濃度(AERO)kg/m³

[出力項目(JUNCTION)]

差圧(DIFP)Pa、流速(VELO) m/s、体積流量(VOLF)m³/s、
流路面積(AREA) m²、フィルタエアロゾル捕集量(FILT)kg

・ 形状データにおけるブローアの指定 (Structure file)

BLOW ID=114 → ブローア ID 番号
 UP=113 DOWN=115 → 上流下流接続ノード番号
 AREA=0.2768 → 断面積(m²)
 DELP=1 → テーブル入力モデルの選択(テーブル入力を指定)
 BLTA=31 → ブローアテーブル番号
 VOLF=1.23 → 初期体積流量(m³/s)

・ ブローアテーブル (Control file)

[ブローアテーブル指定内容]

(体積流量(m³/s)、差圧(Pa))

BLTA=31 → ブローアテーブル番号
 VALU=(
 (0.0,6600.0),(0.2,6740.0),(0.3,6860.0),(0.4,6900.0),
 (0.452,6910.0),(0.6,6900.0),(0.8,6820.0),(1.0,6620.0),
 (1.182,6400.0),(1.4,5980.0),(1.6,5540.0),(1.727,5280.0),
 (1.8,5040.0),(2.0,4468.0),(2.2,3860.0), (2.435,3160.0),
 (2.6,2340.0),(2.72,2020.0)
)

・ フィルタの設定 (Structure file)

-- PRE filter -----

FILT ID=92 → フィルタ ID 番号
 UP=91 DOWN=93 → 上流下流接続ノード番号
 AREA=0.9408 → ろ過面積(m²)
 KLMO=INPUT → 流動抵抗の種類(入力を指定)
 KL=8.058E5 → 層流抵抗係数(m⁻¹)
 KT=13.51 → 乱流抵抗係数(-)
 DELP=INPUT → 目詰まり係数の種類(入力を指定)
 ALPHA=72.0 → 目詰まり係数 α (m²/kg)
 BETA=586.0 → 目詰まり係数 β (m⁴/kg²)
 COLLECT=4 → エアロゾル捕集モデルの選択(4:入力)
 CATCH=200 → フィルタ DF テーブル番号
 VOLF=1.23 → 初期体積流量(m³/s)

-- HEPA filter -----

FILT ID=94 → フィルタ ID 番号
 UP=93 DOWN=95 → 上流下流接続ノード番号
 NUMF=3 → フルサイズフィルタの枚数
 DELP=SMOKE → 目詰まり係数の種類(溶媒燃焼を指定)
 KLMO=INPUT
 KL=6.568E8 KT=1.198E5
 VOLF=1.23

[HEPA フィルタの目詰まり係数の種類(DELP)]

入力(INPUT)、溶媒燃焼(SMOK)、乾燥エアロゾル(DRY)、
湿潤エアロゾル(DRY)

初期定常計算に関する項目

- ・ 初期定常計算の選択 (Control file)

EXECUTION

ISTE=YES SSIOP=YES

- ・ 初期定常計算における収束判定値の設定 (Control file)

CONVERGENCE

EPS1=1.0E-5 → この値は、初期定常計算において-3 から開始し
-5 まで初期定常計算を繰り返す。

- ・ 初期定常計算におけるバルブの制御 (Structure file)

VALV ID=6

→ バルブ ID 番号

UP=5 DOWN=7

→ 上流下流接続ノード番号

AREA=1.57E-2

→ 初期流路面積(m²)

MAXA=3.14E-2

→ 最大流路面積(m²)

VOLF=0.107

→ 初期流量(m³/s)

FIXV=0.107

→ 流量目標値

MONI=(NORM,V,6)

→ バルブ 6 の流量をモニター

KIND=GATE

→ バルブの種類

DIRE=MINUS

→ バルブの制御方向

SSIV=0.1 SSIK=0.1

→ バルブの開閉速度

VALV ID=10

UP=9 DOWN=11

MAXA=3.14E-2 AREA=3.14E-2 VOLF=0.107

KIND=BUTT

MONI=(STOP,V,10) → 逆流防止の指定

SPV1=0.667 SPV2=0.667 VWID=0.5

VALV ID=82

UP=81 DOWN=83

MAXA=0.2768 AREA=0.1384 VOLF=1.23

KIND=BUTT FIXV=1.666E+3

MONI=(DELP,V,82) → バルブ 8 の差圧をモニター

SSIV=0.1 SSIK=0.1 DIRE=PLAS

VALV ID=110

UP=109 DOWN=111

MAXA=0.2768 AREA=0.1384 VOLF=1.23

KIND=BUTT FIXV=1.001E+5

MONI=(PRES,C,15) → 第1モデルセルの圧力をモニター

SSIV=0.1 SSIK=0.1 DIRE=PLAS

VALV ID=124

UP=125 DOWN=123

MAXA=0.2768 AREA=0.1384 VOLF=1.09

KIND=BUTT FIXV=1.09

MONI=(NORM,V,124) → バルブ 124 の流量をモニター

SSIV=0.1 SSIK=0.1 DIRE=MINUS

[バルブの種類(KIND)]

バタフライバルブ(BUTT)、逆流防止バルブ(GATE)、
ユーザ設定バルブ(USER)

[バルブ制御の種類]

差圧(DELP)、質量流量(MFLO)、体積流量(VOLF)、
逆流防止(STOP)、手動(MANU)

過渡計算(エアロゾル移行計算)に関する項目

- ・ エアロゾル移行計算の選択 (Control file)

EXECUTION

FPCALC=YES

- ・ 事象発生セルの設定 (Structure file)

CELL ID=15 → セル ID 番号
 DIAM=3.0 → 直径(m)
 LENG=2.62 → 長さ(m)
 FLGF=4 → セル抵抗係数の選択(4: TOPAZ の式)
 GMAS=1 → 質量発生を選択(1: 入力)
 MTABLE=1 → 質量放出速度テーブル番号
 GENE=1 → エネルギー発生を選択(1: 入力)
 ETABLE=1 → エネルギー放出速度テーブル番号
 STERM=YES → エアロゾル発生指定

- ・ ソースタームテーブル (Control file)

質量放出速度テーブル

[質量放出速度テーブル指定内容]

(時間(s)、質量放出速度(kg/s))

MTABLE=1 → 質量放出速度テーブル番号

VALU=(

(0.0, 0.0000E+00), (100.0, 8.4661E-04), (127.0, 9.9071E-04),
 (150.0, 1.3810E-03), (165.0, 1.7232E-03), (234.0, 1.8253E-03),
 (300.0, 1.7953E-03), (350.0, 1.8073E-03), (405.0, 1.8013E-03),
 (550.0, 2.1856E-03), (600.0, 2.2696E-03), (677.0, 2.6299E-03),
 (750.0, 3.0742E-03), (800.0, 3.4104E-03), (879.0, 3.6266E-03),
 (950.0, 3.8247E-03), (1050.0, 3.9808E-03), (1100.0, 4.0769E-03),
 (1168.0, 4.1430E-03), (1250.0, 4.0709E-03), (1285.0, 3.9989E-03),
 (1350.0, 3.8307E-03), (1404.0, 3.7227E-03), (1550.0, 3.3984E-03),
 (1613.0, 3.2783E-03), (1686.0, 3.0982E-03), (1750.0, 3.0021E-03),
 (1850.0, 2.9301E-03), (1900.0, 2.8580E-03), (1950.0, 2.7440E-03),
 (2088.0, 2.2816E-03), (2150.0, 2.0835E-03), (2250.0, 1.8493E-03),
 (2311.0, 1.7292E-03), (2450.0, 1.5491E-03), (2650.0, 1.3930E-03),
 (2950.0, 1.2249E-03), (3250.0, 1.1168E-03), (3650.0, 9.9671E-04),
 (4210.0, 8.8864E-04)

)

エネルギー放出速度テーブル

[エネルギー放出速度テーブル指定内容]

(時間(s)、エネルギー放出速度(J/s))

ETABLE=1 → エネルギー放出速度テーブル番号

VALU=(

(0.0, 0.0000E+00), (100.0, 2.0996E+04), (127.0, 2.4570E+04),
 (150.0, 3.4248E+04), (165.0, 4.2736E+04), (234.0, 4.5268E+04),
 (300.0, 4.4523E+04), (350.0, 4.4821E+04), (405.0, 4.4672E+04),
 (550.0, 5.4202E+04), (600.0, 5.6287E+04), (677.0, 6.5221E+04),
 (750.0, 7.6240E+04), (800.0, 8.4579E+04), (879.0, 8.9939E+04),
 (950.0, 9.4853E+04), (1050.0, 9.8725E+04), (1100.0, 1.0111E+05),
 (1168.0, 1.0275E+05), (1250.0, 1.0096E+05), (1285.0, 9.9172E+04),
 (1350.0, 9.5002E+04), (1404.0, 9.2322E+04), (1550.0, 8.4281E+04),
 (1613.0, 8.1303E+04), (1686.0, 7.6836E+04), (1750.0, 7.4453E+04),
 (1850.0, 7.2666E+04), (1900.0, 7.0879E+04), (1950.0, 6.8050E+04),
 (2088.0, 5.6584E+04), (2150.0, 5.1671E+04), (2250.0, 4.5863E+04),
 (2311.0, 4.2885E+04), (2450.0, 3.8418E+04), (2650.0, 3.4546E+04),
 (2950.0, 3.0377E+04), (3250.0, 2.7697E+04), (3650.0, 2.4718E+04),
 (4210.0, 2.2038E+04)
)

エアロゾル放出速度テーブル

[エアロゾル放出速度テーブル指定内容]

(時間(s)、エアロゾル放出速度(kg/s))

SCTA=400 → エアロゾル放出速度テーブル番号

VALU=(

(0.0, 0.0000E+00), (100.0, 9.3127E-05), (127.0, 1.0898E-04),
 (150.0, 1.5191E-04), (165.0, 1.8956E-04), (234.0, 2.0078E-04),
 (300.0, 1.9748E-04), (350.0, 1.9880E-04), (405.0, 1.9814E-04),
 (550.0, 2.4041E-04), (600.0, 2.4966E-04), (677.0, 2.8929E-04),
 (750.0, 3.3816E-04), (800.0, 3.7515E-04), (879.0, 3.9893E-04),
 (950.0, 4.2072E-04), (1050.0, 4.3789E-04), (1100.0, 4.4846E-04),
 (1168.0, 4.5573E-04), (1250.0, 4.4780E-04), (1285.0, 4.3987E-04),
 (1350.0, 4.2138E-04), (1404.0, 4.0949E-04), (1550.0, 3.7383E-04),
 (1613.0, 3.6062E-04), (1686.0, 3.4080E-04), (1750.0, 3.3024E-04),
 (1850.0, 3.2231E-04), (1900.0, 3.1438E-04), (1950.0, 3.0184E-04),
 (2088.0, 2.5098E-04), (2150.0, 2.2918E-04), (2250.0, 2.0343E-04),
 (2311.0, 1.9022E-04), (2450.0, 1.7040E-04), (2650.0, 1.5323E-04),
 (2950.0, 1.3474E-04), (3250.0, 1.2285E-04), (3650.0, 1.0964E-04),
 (4210.0, 9.7750E-05)
)

- ・ エアロゾルに関する設定 (Control file)

TRACER

SPECIES=((FP01,11))

→ (エアロゾル名(任意)、対数正規分布の分割数)

DEPO=(GRAV)

→ エアロゾル沈着モデル(重力)

[層流拡散(DIFF)、乱流拡散(TURB)、熱泳動(THER)、衝突(IMPA)]

EPS0=1.0E-3 → 収束判定値

ITER=1000 → 最大収束回数

AIRBORNE

VARI=((FP01,100))

→ (エアロゾル名(任意)、粒径分布テーブル番号)

MATE=((FP01,1.00E+3))

→ (エアロゾル名(任意)、密度(kg/m³))

AVER=((FP01,0.45E-6))

→ (エアロゾル名(任意)、質量中央径(m))

SIGMA=((FP01,4.03))

→ (エアロゾル名(任意)、幾何標準偏差)

IDSC=((FP01,1))

→ (エアロゾル名(任意)、エアロゾル放出に関する ID 番号)

SOURCE

IDSC=1 → エアロゾル放出に関する ID 番号

GENE=1 → エアロゾル発生を選択(1: 入力)

SCTA=400 → エアロゾル放出速度テーブル番号

FPREGION

INTA=1 → エアロゾル移行計算初期設定 ID 番号

CONC=((FP01,0.0))

→ (エアロゾル名(任意)、エアロゾル濃度(kg/m³))

・ 粒径分布テーブル (Control file)

[粒径分布テーブル指定内容]

(代表粒径(m)、質量分率(-))

VARI=100 → 粒径分布テーブル番号

VALU=(

(0.0138E-6, 0.0168157),
 (0.0277E-6, 0.0237397),
 (0.0556E-6, 0.0294872),
 (0.1117E-6, 0.0885825),
 (0.2242E-6, 0.2288702),
 (0.4500E-6, 0.1396688),
 (0.9034E-6, 0.1419791),
 (1.8135E-6, 0.1081829),
 (3.6406E-6, 0.1150528),
 (7.3084E-6, 0.0413476),
 (14.6715E-6, 0.0662734)
)

・ フィルタ DF テーブル (Control file)

[フィルタ DF テーブル指定内容]

(フィルタへの煤煙負荷量(kg)、エアロゾル粒径(m)、フィルタ DF(-))

DFTA=200 → フィルタ DF テーブル番号

VALU=(

(0.00000,	0.0138E-6,	1.02759),	(0.00000,	0.0277E-6,	1.02759),
(0.00000,	0.0556E-6,	1.02759),	(0.00000,	0.1117E-6,	1.02759),
(0.00000,	0.2242E-6,	1.03112),	(0.00000,	0.4500E-6,	1.04826),
(0.00000,	0.9034E-6,	1.08513),	(0.00000,	1.8135E-6,	1.48443),
(0.00000,	3.6406E-6,	2.59911),	(0.00000,	7.3084E-6,	8.15635),
(0.00000,	14.6715E-6,	81.0135),			
(0.35700,	0.0138E-6,	2.00274),	(0.35700,	0.0277E-6,	2.00274),
(0.35700,	0.0556E-6,	2.00274),	(0.35700,	0.1117E-6,	2.01119),
(0.35700,	0.2242E-6,	2.11285),	(0.35700,	0.4500E-6,	2.80155),
(0.35700,	0.9034E-6,	21.1439),	(0.35700,	1.8135E-6,	8.1E+03),
(0.35700,	3.6406E-6,	1.2E+08),	(0.35700,	7.3084E-6,	1.7E+17),
(0.35700,	14.6715E-6,	4.1E+35))			

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつ SI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オンGSTローム	Å
バ - ン	b
バ - ル	bar
ガ - ル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ - ド	rad
レ - ム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁶
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

- 1 cal = 4.18605 J(計量法)
 = 4.184 J(熱化学)
 = 4.1855 J(15 °C)
 = 4.1868 J(国際蒸気表)
- 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

CELVAR1Dを用いた火災事故時の煤煙による換気系フィルタの差圧解析

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています