

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

原因究明・再発防止に関する調査・検討—

1998年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 (Tokai Works)

技術開発推進部 技術管理室

(Technology Management Section)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatu Ooaza, Tokai, Naka-gun, Ibaraki,
319-1194, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1998

公開資料
PNC TN8410 98-088
May, 1998

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・爆発事故原因究明・再発防止に関する調査・検討－

アスファルト固化処理施設火災・爆発事故原因究明・再発防止対策班

重留義明、小田好博、今本信雄*

綿引優**、山内孝道

要旨

平成9年3月11日に発生したアスファルト固化処理施設の火災・爆発事故では、火災発生後の早い段階で換気系異常(セル換気系高性能フィルタの閉塞)が起き、また10時間後に発生した爆発においてはセル換気系フィルタの破損が生じた。そこで火災・爆発事故時に使用していたセル換気系フィルタの被害状況調査を行った。調査はフィルタの破損状況、放射性物質による汚染の程度、フィルタメディアへの煤の付着重量について行った。また、SEM写真により煤のフィルタメディアへの付着の様子を観察した。本報において、これら調査を行った結果を示す。

* 建設工務管理室

** 再処理工場処理部化学処理二課

Damage of cell ventilation filters in the fire and explosion incident of Bituminization Demonstration Facility

Investigation Group for Bituminization Demonstration Facility Incident

YOSHIAKI SHIGETOME, YOSHIHIRO ODA,

NOBUO IMAMOTO*, MASARU WATAHIKI**,

TAKAMICHI YAMANOUCHI

Abstract

At the fire and explosion incident of Bituminization Demonstration Facility, the fault of cell ventilation system (plugging of the HEPA filter) occurred in a short time. In addition the breakdown of the filter occurred at the explosion which happened ten hours after the extinguishment of the fire. Investigation of filter damage was conducted in order to know the extent of the breakdown, the contamination by radioactivity and soot mass gain of HEPA filter. Scanning electron micrograph (SEM) was also used to observe the appearance of soot adhesion on the filter media. This report shows the result of the investigation.

* Construction and Maintenance Office

** Tokai Reprocessing Plant 2nd Chemical Processing Division

目 次

1. 概要	1
2. 事故時の概要	2
2. 1. アスファルト固化処理施設の換気系統	2
2. 2. 事故時の状況	2
3. 調査の概要	16
4. 結果	16
4. 1. 外観検査	16
4. 1. 1. プレフィルタ	16
4. 1. 2. HEPA フィルタ	16
4. 2. 放射能測定	31
4. 2. 1. 線量当量率	31
4. 2. 2. ガンマ線スペクトル分析	31
4. 3. 煤の付着重量の推定	36
4. 4. EPMA による分析	39
4. 4. 1. 装置及び試料	39
4. 4. 2. SEM 観察結果	39
5. まとめ	47
参考文献	48

図・表・写真一覧

図 2-1-1 アスファルト固化処理施設平面図(その1)	6
図 2-1-2 アスファルト固化処理施設平面図(その2)	7
図 2-1-3 アスファルト固化処理施設平面図(その3)	8
図 2-1-4 アスファルト固化処理施設平面図(その4)	9
図 2-1-5 アスファルト固化処理施設平面図(その5)	10
図 2-1-6 アスファルト固化処理施設平面図(その6)	11
図 2-2 セル排気系フィルタユニットの配置	12
図 2-3 フィルタユニットの概念図	13
図 4-1 フィルタ各部位の呼称	19
図 4-2 ケーシング中での各フィルタの呼称	19
図 4-3 HEPA フィルタの線量当量率及び表面汚染密度	34
図 4-4 HEPA フィルタの線量当量率と表面汚染密度の相関	35
図 4-5 高さ方向の表面汚染密度分布	35
図 4-6 EPMA 試料の作成方法	40
 表 2-1 アスファルト固化処理施設で事故時に使用されていたプレフィルタの仕様	4
表 2-2 アスファルト固化処理施設で事故時に使用されていた HEPA フィルタの仕様	5
表 3-1 外観検査及びサンプリング実施日	15
表 4-1 各フィルタでの被害状況	18
表 4-2 ガンマ線スペクトル分析による HEPA フィルタに付着した放射性核種の組成比(%)	32
表 4-3 ガンマ線スペクトル分析によるプレフィルタに付着した放射能(Bq/g) (プレフィルタメディア重量当たりの付着量)	33
表 4-4 採取対象とした煤のガンマ線スペクトル分析結果	37
表 4-5 HEPA フィルタへ付着した煤の重量(g)	38
表 4-6 これまで報告されている、HEPA フィルタの目詰まり発生に必要な付着物重量	38
 写真 4-1-1 プレフィルタ(アルミ板枠)	20
写真 4-1-2 プレフィルタ(合板枠)	20
写真 4-2-1 HEPA フィルタの損傷(枠の変形)	21
写真 4-2-2 HEPA フィルタの損傷(メディア全体の抜け落ち)	21
写真 4-2-3 HEPA フィルタの損傷(メディア配列のゆがみ)	21

写真 4-2-4 HEPA フィルタの損傷(リークの発生)	21
写真 4-2-5 HEPA フィルタの損傷(メディア全前面におけるつぶれ)	21
写真 4-2-6 HEPA フィルタの損傷(外的力によるメディアのつぶれ)	21
写真 4-3-1 HEPA フィルタの外観写真(F-19 ケーシング)	22
写真 4-3-2 HEPA フィルタの外観写真(F-20 ケーシング)	23
写真 4-3-3 HEPA フィルタの外観写真(F-21 ケーシング)	24
写真 4-3-4 HEPA フィルタの外観写真(F-22 ケーシング)	25
写真 4-3-5 HEPA フィルタの外観写真(F-23 ケーシング)	26
写真 4-3-6 HEPA フィルタの外観写真(F-24 ケーシング)	27
写真 4-3-7 HEPA フィルタの外観写真(F-25 ケーシング)	28
写真 4-3-8 HEPA フィルタの外観写真(F-26 ケーシング)	29
写真 4-3-9 HEPA フィルタの外観写真(F-27 ケーシング)	30
写真 4-4-1 HEPA フィルタの二次電子像(試料 F-27-2;表層)	41
写真 4-4-2 HEPA フィルタの二次電子像(試料 F-27-2;中間層)	42
写真 4-4-3 HEPA フィルタの二次電子像(試料 F-27-2;裏層)	43
写真 4-5 定常交換された HEPA フィルタの二次電子像(試料 H-BLK-A)	44
写真 4-6 未使用 HEPA フィルタの二次電子像(試料 BEF-H-1)	45
写真 4-7 HEPA フィルタ組成像(試料 F-27-2;表層;1000 倍)	46

1. 概要

平成9年3月11日に動力炉・核燃料開発事業団の東海事業所再処理工場内にあるアスファルト固化処理施設において、午前10時6分頃火災が発生し、この消火を行ったのち、さらに約10時間後の20時4分頃爆発が発生した。これら一連の事故において、火災発生後の早い段階で換気系異常(セル換気系高性能フィルタの閉塞)が発生した。そのため、火災が発生したアスファルト充てん室(R152)を含むレッド区域の負圧維持が行えなくなり、放射性物質のセル外への放出が発生し、作業員の被ばくを引き起こす結果となった。また R152 内の換気が行えなくなったため、鎮火後に可燃性ガスが室内に蓄積され、約10時間後の爆発を引き起こす結果となった。

通常、原子力施設においては施設内の負圧を維持することで、外部への放射性物質の放出を防いでいる。換気方式は、外気を取り入れ、取り入れられた空気は施設内で再循環するすることなく、内部の各種装置より発生する空気と共に、高性能エアフィルタ(以下、HEPA フィルタという)を通して大気へ放出する全外気方式が一般に用いられている⁽¹⁾。そのため排気処理設備は、施設内と一般環境との境界を形成する上で非常に重要な役割を果たしており、この中でも特に HEPA フィルタは、排気処理設備での最終段階で使用されることから最も重要な位置を占めている。そのため、HEPA フィルタは通常時はもとより、種々の苛酷な条件下でも所定の性能を維持することが要求される。事実、HEPA フィルタの苛酷時の安全性に関する研究は、日本を含め、数多く実施されている^{(2)~(13)}。

アスファルト固化処理施設においても、放射性物質の閉じ込めのための負圧維持、アスファルト固化体や装置の放冷、施設内の快適な作業環境の維持を目的として、同様な換気方式が採用されていた。そこで今後、同様の施設における換気設備の安全性向上に資することを目的とし、事故発生時に使用されていたセル換気系フィルタの被害状況の調査を行った。

本報においては、これらの調査の詳細及び結果について報告する。

2. 事故時の概要

2. 1. アスファルト固化処理施設の換気系統

以下に、アスファルト固化処理施設におけるセル換気系統について簡単に示す⁽¹⁴⁾。なお、本施設の建家平面図は図 2-1-1～2-1-6 のとおりである。

アスファルト固化処理施設では他の放射性物質取扱施設と同様に、施設内の負圧維持及びセル内排気のろ過により、放射性物質の拡散及び施設外への放出を防ぐようになっていた。セル内の負圧維持の目標値は-15mmAq 以下であった。4 階の入気室(G416)に設置されている送風機により外気を取り込み、セル系とグリーン／アンバー系とに分かれて循環した後、それぞれの系統ごとのフィルタによりろ過され、アスファルト固化処理施設付属排気筒から排出される。このうちセル系排気は排気フィルタ室(A336)におかれている10台(F-19～F-28)のフィルタユニット(図 2-2)によりろ過される。なお、通常は10台中9台のフィルタユニットが使用されて、事故時には F-28(予備)以外の9台が使用されていた。排風機は3台(K-22～K-24)あり、通常はこのうちの2台が使用されている。送排風気の運転は、通常時は風量 31m³/分で自動運転により連続に行われており、故障時は予備機を起動または制限運転を行うことになっている。

フィルタユニットはプレフィルタと2段の HEPA フィルタから構成されており、プレフィルタ+HEPA フィルタ2段が、3列並列に1つのケーシングに配置されている。つまり1台のフィルタユニットはプレフィルタ3枚、HEPA フィルタ2段×3列の6枚、計9枚から構成されている(図 2-3 参照)。フィルタケーシングは奇数番号と偶数番号で背中合わせに設置されており、ケーシング前面から見ると奇数番号はケーシング上部左側から入気、右下側から排気となり、偶数番号では上部右側から入気、左下部から排気するようになっている。プレフィルタは太い(数十ミクロン～数百ミクロン)合成纖維またはガラス纖維からなっており、空気中の粗大な粒子を除去し、下流にある HEPA フィルタの保護延命、塵埃の堆積による目詰まりの緩和のため使用される。HEPA フィルタは信頼性の向上と高い捕集効率のため2段で使用されている。なお、本施設で使用されていたフィルタの仕様を表 2-1,2 に示す。

通常運転時において本施設ではフィルタに多量の粒子が捕集されることではなく、圧力損失はフィルタ交換時から次の交換までの間、ほとんど一定であり、常に 20mmAq 程度であった。そのため、これまでフィルタ交換は圧力損失が上昇したら行うことではなく、ある程度の期間(5, 6年程度)の経過を目途に行っていた。なお、前回の交換は平成4年7月に行っている。

2. 2. 事故時の状況

アスファルト固化処理施設で発生した火災・爆発事故時の状況について、以下に特に換気系統に関わることを中心に示す⁽¹⁵⁾。

10 時 6 分頃 アスファルト充填室(R152)横の操作区域(G115)にいた作業員が、窓(M311)から R152 内が光ったのを見た。また別の窓(M312)から1本のドラム缶からの火柱を見た。さらにインターホンで制御室(G218)を呼び出そうとインターフォンに向かう途中、M312 から見えるドラム缶すべてから火柱を見た。インターフォンで呼び出し中、セル換気系温度警報(FDT152; 152 は室番号を示す)が吹鳴したのを聞いた。また G218 にいた全員が

FDT の吹鳴を聞いた。G218 にいた作業員が FDT152 をリセットした。

- 10時8分頃 FDT151 が吹鳴し、FDT152 が再度吹鳴。G218 の作業員がリセットした。G218 で火災の連絡を受けた班長代理は G115 へ移動し、全部の窓からセル内の様子の確認を行った。M312 から見えるすべてのドラム缶からの火柱を確認した。M313 からは明るいものの火柱は見えなかった。
- 10時10分頃 火災発生の旨を現場から環境施設部処理1課(LCS)の担当主査に電話で連絡し、水噴霧で消火するよう、指示を受けた。
- 10時12分頃 水噴霧開始のための弁を開いた。
- 10時13分
～10時15分頃 約1分後、M312 より中を見るとセル内は煙で真っ白の状態であった。火は見えなくなっていたので弁を閉じた。「換気系異常」のランプが点滅し警報が吹鳴した。G218 で警報をリセットした。この時別の作業員がエクストルーダを緊急停止した。さらに別の作業員が制御盤上で FDT152 点灯と差圧モニタ(FDS07)点灯を見た直後、NOx 濃度注意報が吹鳴、リセットした。その後差圧低下警報が吹鳴、リセット。G414 内グローブボックスの負圧が 0 になった。また、10:13～10:18 にかけて、βダストモニタが吹鳴した。
- 10時15分
～10時18分頃 「換気系異常」の点灯とレッド系排気プロワ(K22,K23,K24)のオレンジランプ点灯(プロワ運転、ダンパ閉の状態)を G218 にいた作業員が見た。また同じ作業員が給気プロワ1台(K15)及びグリーン・アンバー系排気プロワ1台(K20)が制限運転となっているのを見た。
- 10時22分
～10時24分頃 G218 の作業員が、建家内負圧バランスの乱れによる汚染拡大があることを認識し、自動運転から手動運転に切り替えた。これにより給気プロワ及び排気プロワ停止。その後、レッド系換気系を再起動させるため、レッド系排気プロワ(K22,K23,K24)の起動操作を手動で順番に試みたが、3台ともオレンジランプ点灯(プロワ運転、ダンパ閉の状態)の状態であったため、プロワを停止した。別の作業員が排風機起動操作による現場状況確認のため、排風機室(A436)に向かったが、通廊(A231)が煙で視界が悪かつたため G218 に戻った。

10時30分

～10時37分頃 アスファルト固化処理施設から退避するよう指示があり、火災発生後屋上に退避していた2人の作業員を除く全員が退避した。なお、屋上の2人は16時57分～17時20分に救出された。

16時57分

～17時20分頃 換気系再起動のため作業員4人が入域。セル系排気プロワ(K22,K23,K24)の再起動を手動で順次試みたが、オレンジランプ点灯のため、再起動は困難と判断し、プロワを停止した。1人の酸素ボンベの警報が鳴ったので退域。

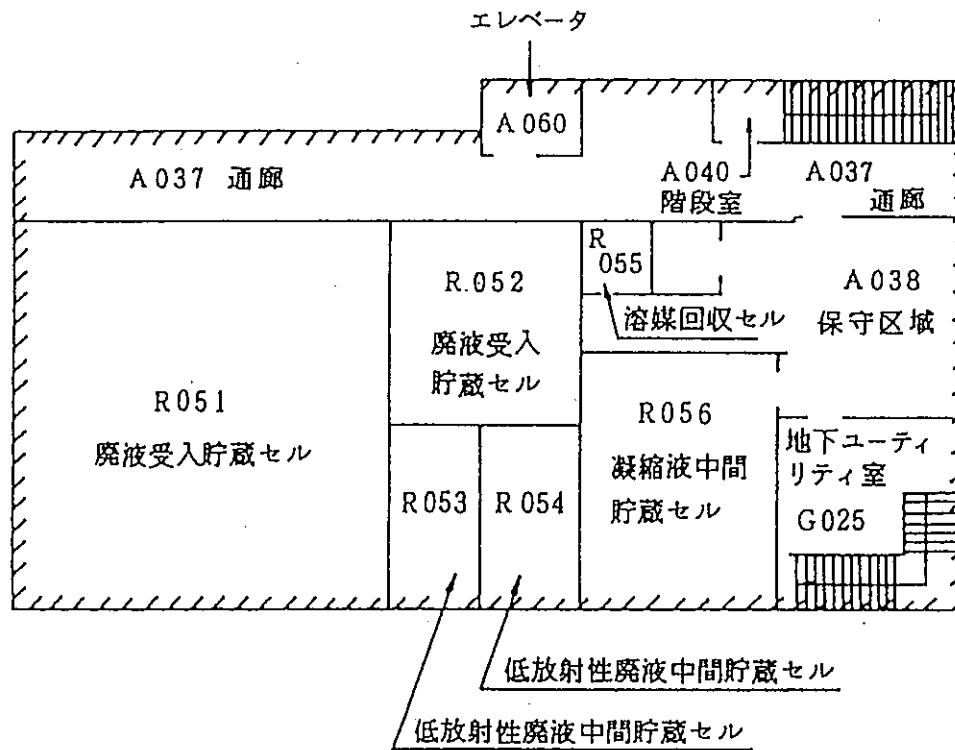
20時4分頃 爆発

表 2-1 アスファルト固化処理施設で事故時に使用されていたプレフィルタの仕様

	A社	B社
外形寸法(高さ×幅×高さ) (mm)	610×610×50	610×610×50
外枠	アルミ板	合板(難燃性)
濾材	ガラス繊維	ガラス繊維
ガスケット	クロロプレン	ネオプレン
定格風量(m ³ /min)	50	50
捕集効率(%) (重量法)	85以上	90以上
初期圧力損失(mmAq)	8以下	18以下

表 2-2 アスファルト固化処理施設で事故時に使用されていたHEPAフィルタの仕様

	B 社	C 社
外形寸法(高さ×幅×高さ)	610×610×292	610×610×292
外枠	亜鉛鉄板	亜鉛鉄板
濾材	ガラス繊維	ガラス繊維
ガスケット	ネオプレン	ネオプレン
セパレータ	Al	SUS304
接着剤	エポキシ樹脂(難燃)	シリコン系特殊接着剤(自己消火性)
定格風量(m ³ /min)	28.3	33
捕集効率(%) (0.3μm Hot DOP)	99.97 以上	99.97 以上
初期圧力損失(mmAq)	25.4 以下	30 以下
最高使用温度(°C)	121	200
最高使用湿度(%)	100	100
耐圧(mmAq)	254	250



地下 2 階平面図

図 2-1-1 アスファルト固化処理施設平面図（その1）

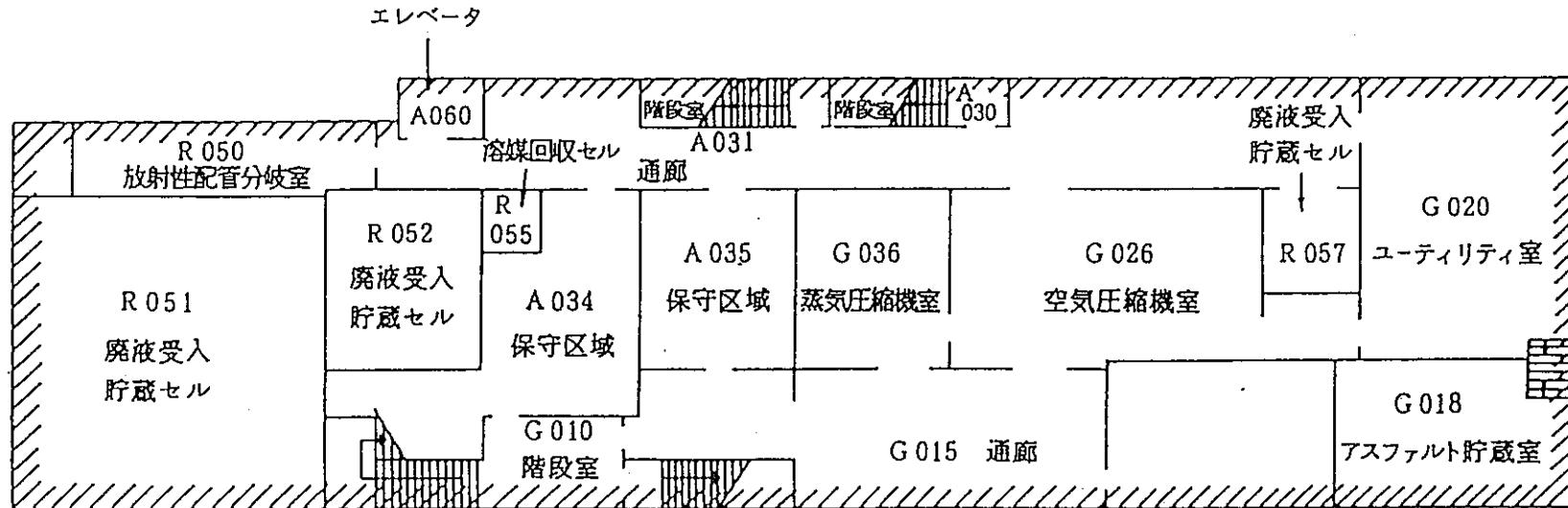


図 2-1-2 アスファルト固化処理施設平面図（その2）

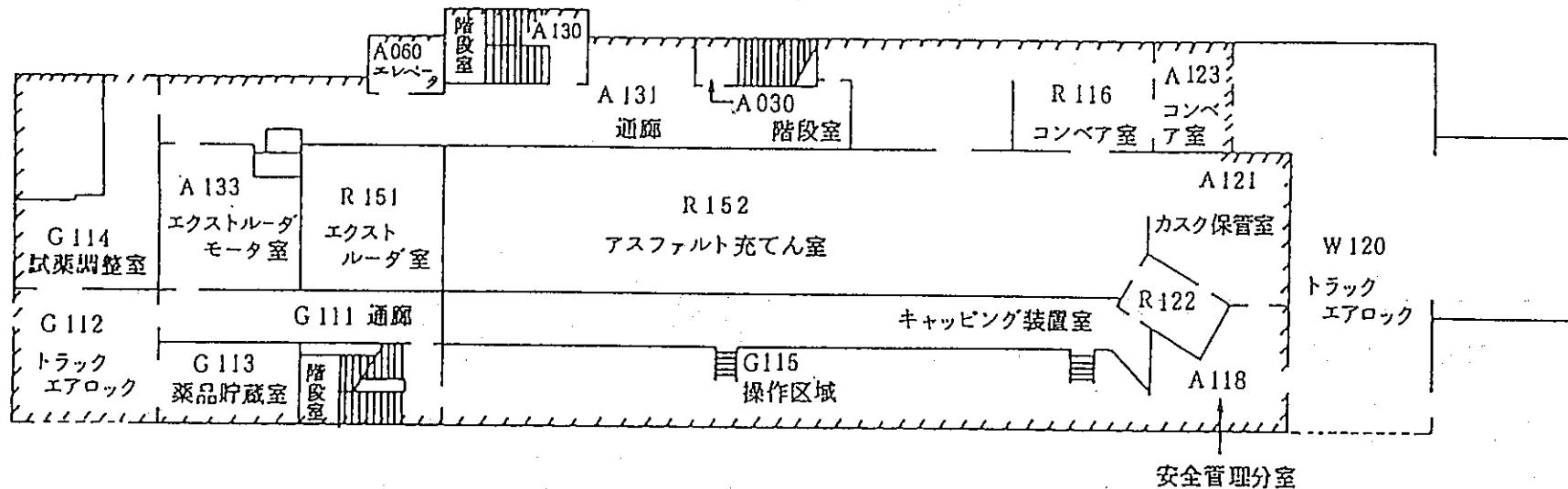
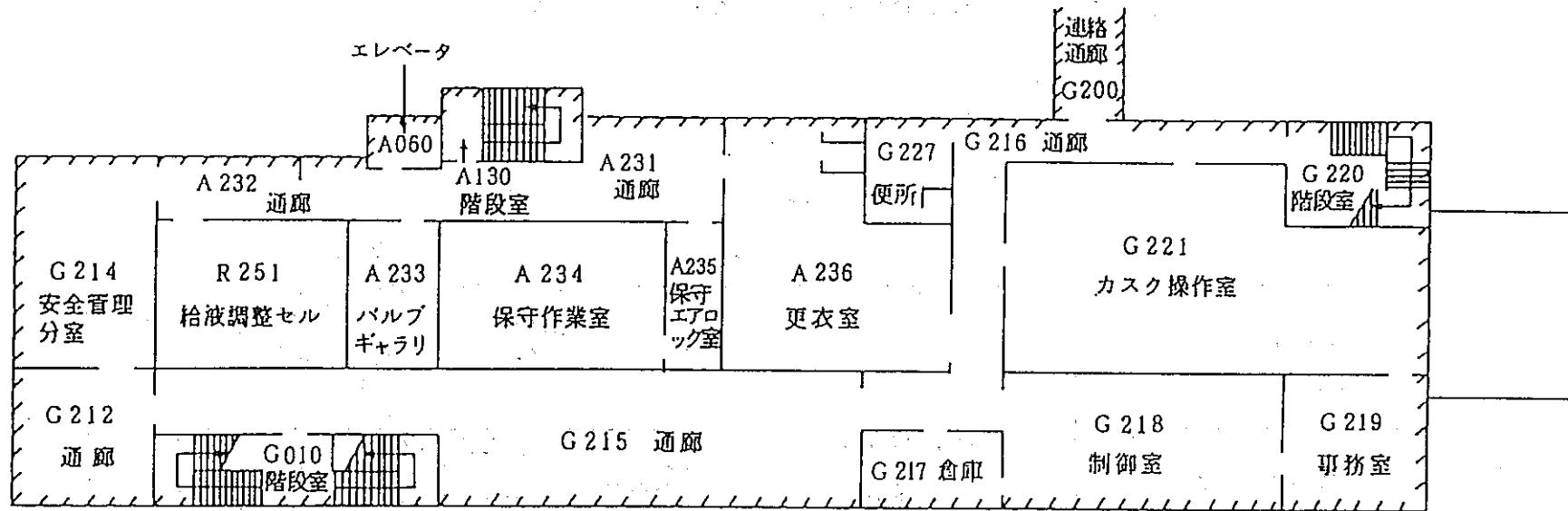
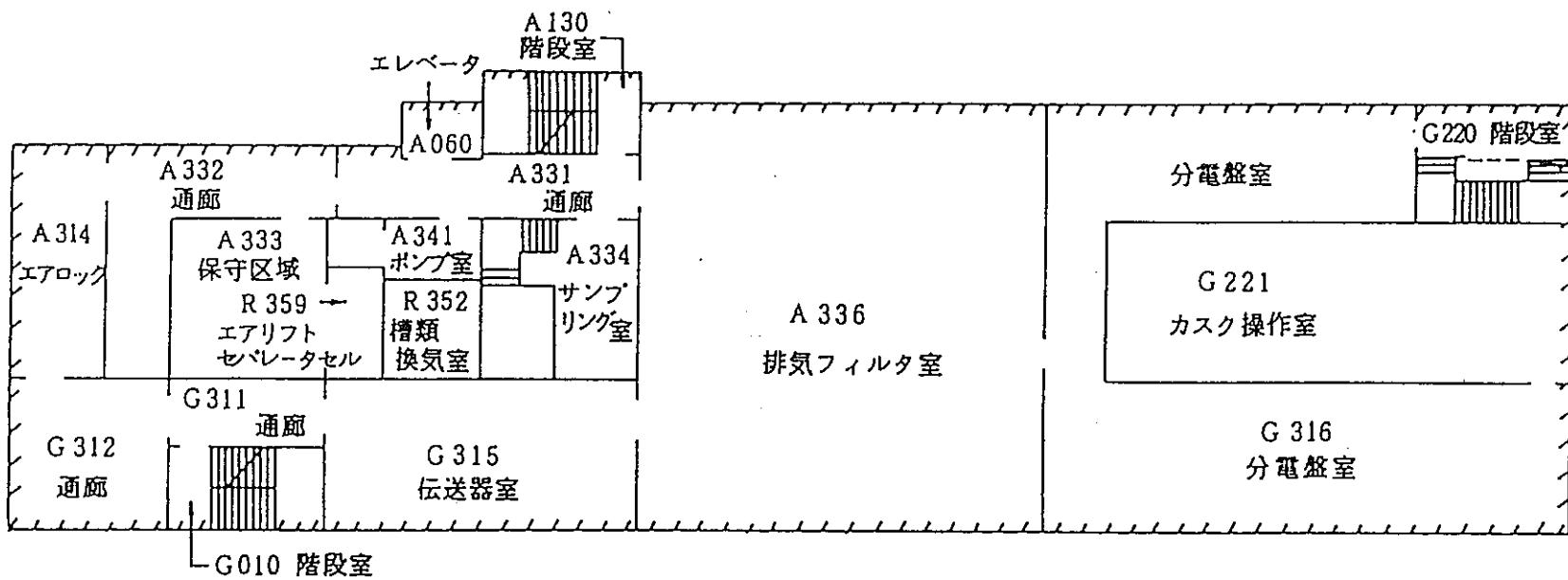


図 2-1-3 アスファルト固化処理施設平面図（その3）



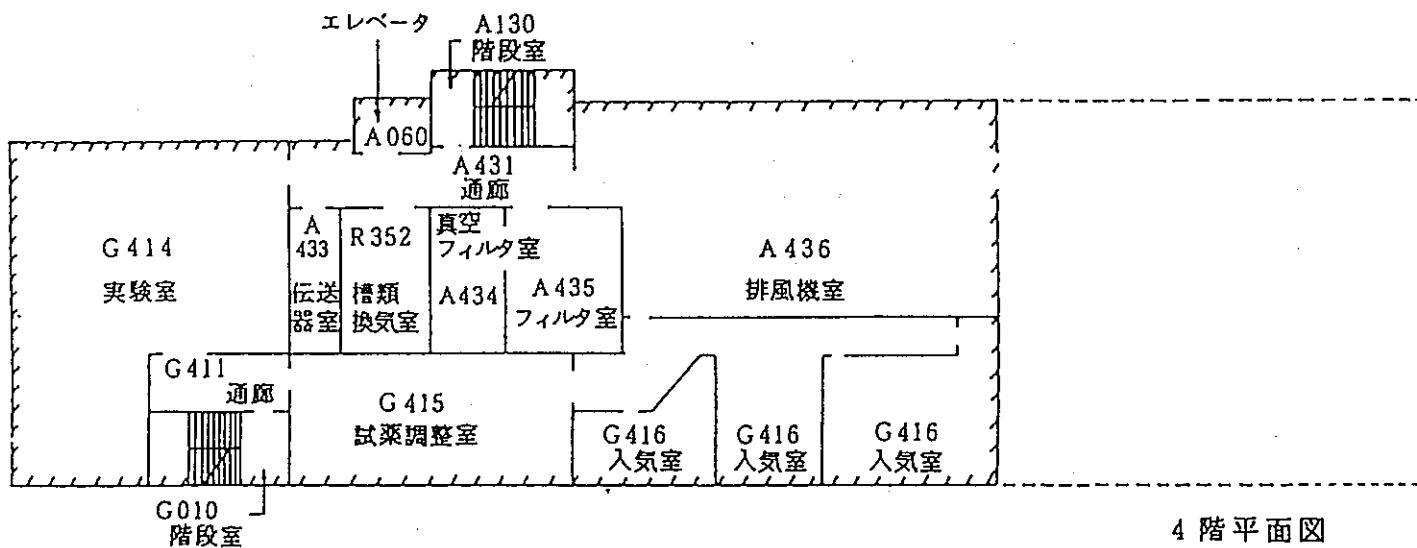
2階平面図

図 2-1-4 アスファルト固化処理施設平面図（その4）

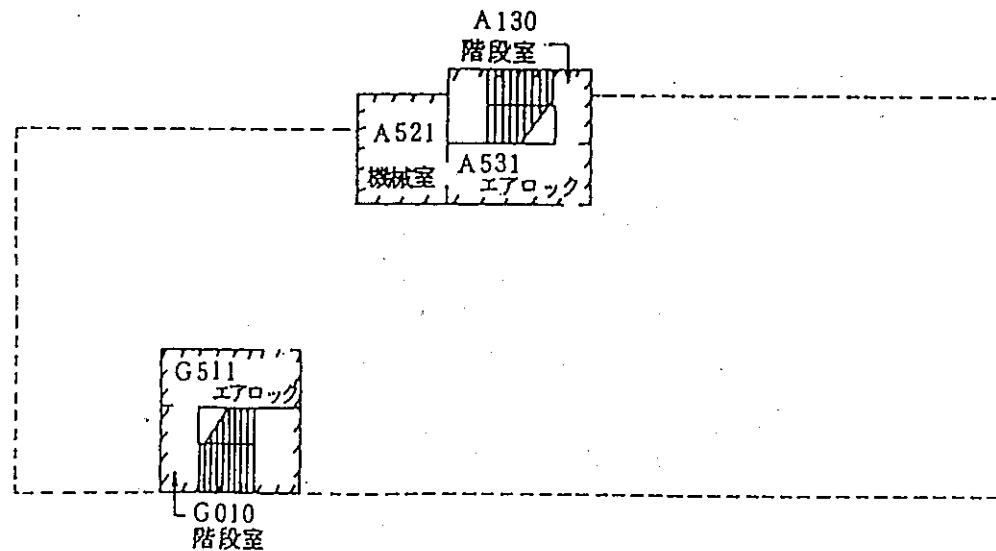


3階平面図

図 2-1-5 アスファルト固化処理施設平面図（その5）

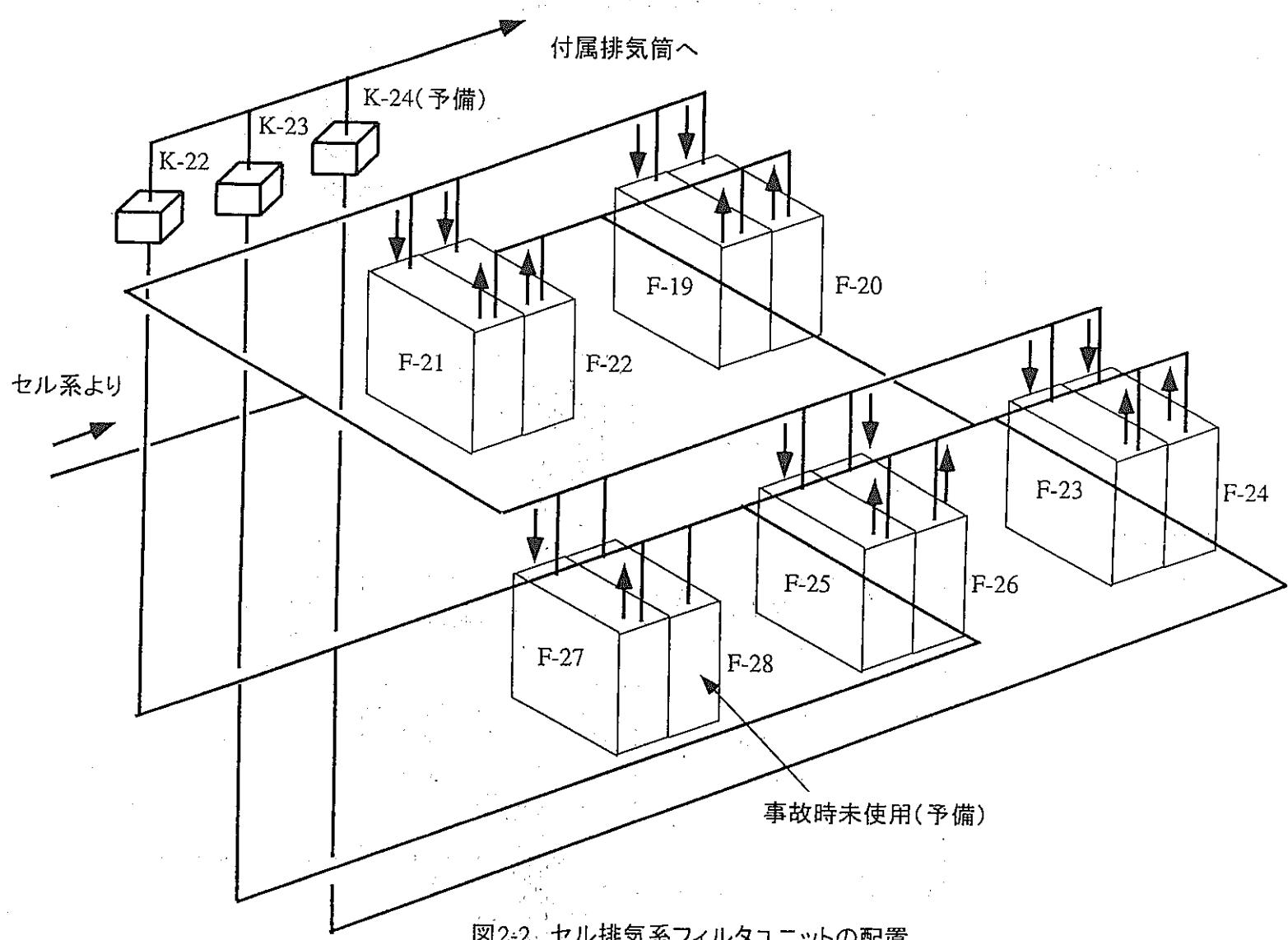


4階平面図



屋上平面図

図 2-1-6 アスファルト固化処理施設平面図 (その 6)



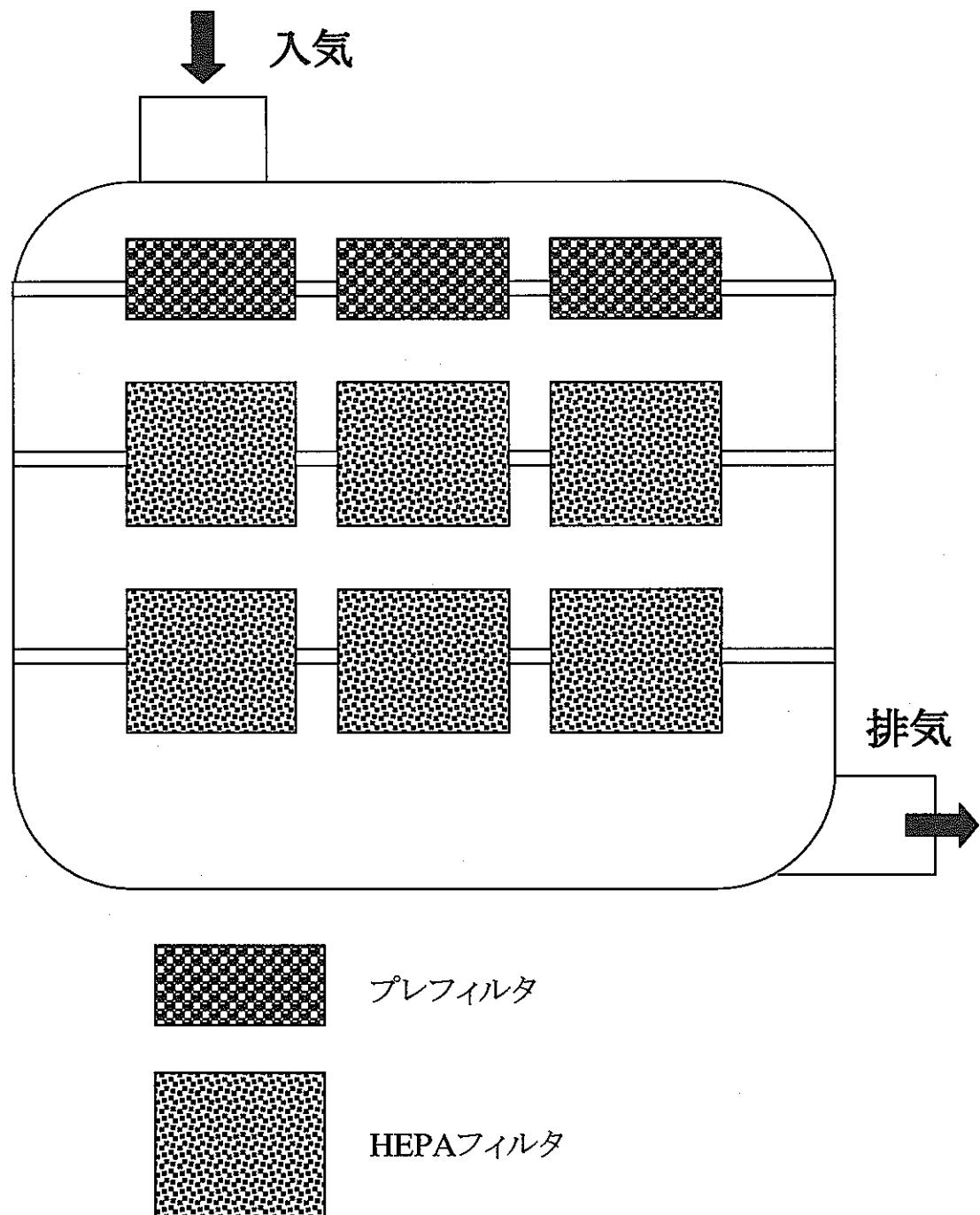


図 2-3 フィルタユニットの概念図。

これは奇数番号のフィルタユニットでの配置であり、偶数番号では入気と排気が左右反転した配置となる。

3. 調査の概要

セル換気系フィルタの被害状況調査として、以下に示すような調査を行った。

(1) 外観検査

フィルタの枠やメディアの破損状況を調べ、爆発時の影響の確認を行った。

(2) 放射能測定

フィルタ全体の線量当量率を電離箱型サーベイメータを用いて測定し、汚染状況を把握した。またフィルタからメディアを採取してGe検出器によりガンマ線スペクトル測定を行い、付着粒子の核種組成を調べた。さらに煤の単位重量あたりの放射能比をもとに付着粒子量を推定した。

(3) SEM 写真による EPMA 分析

HEPAフィルタのメディアの一部を採取し、EPMAによる2次電子像(SEM)観察を行った。

SEM観察は付着粒子の粒径を調査することを目的としている。

事故時に使用していたフィルタは、3月12日から14日にかけて交換作業が行われた。このときは、目視による被害が確認されたフィルタについてのみ交換を行ったため、全数交換は行っていない。交換の対象となったフィルタは、プレフィルタ及び1段目のHEPAフィルタすべて(各27個)と、2段目HEPAフィルタのうち、入気口側の列にあったもの(計9個)で、計63個であった。交換されたフィルタはビニルバッグに梱包され、アスファルト固化処理施設3階の排気フィルタ室(A336)に仮置きされていた。そのため調査はA336の隣の部屋(分電盤室:G316)にて行った。

調査は2回にわけて行った。これは計画当初においてフィルタの状況等、実際に現場を見てみないと様子がつかめないという点が多く、調査の計画及び要領がたてづらかったため、はじめに最も被害が大きいと報告されていたF-27ケーシングについて調査を行い、最大でどの程度の被害があったかについての情報を得た。1回目の調査で概況をつかんだ上で、2回目の調査を計画した。2回目の調査では、残った8つのケーシングのうち、半数のケーシング(偶数番号 F-20,22,24,26)について(1)～(3)の調査・測定を行った。また切り出したサンプルのうちの一部を用いてSEM写真によるEPMA分析を行った。残りのケーシング(奇数番号 F-19,21,23,25)については外観の調査のみ行った。

なお、1回目の調査を行った際には、重量計による直接重量測定を行い、新品重量と比較することで付着粒子量を求めるることも検討したが、後述するようにメディアの破損が大きく、メディアが行方不明となっているか、または一つの袋内に複数のメディアが梱包されているなど、付着重量が推定出来るような状況ではなかったため、2回目の調査では実施しなかった。

以下表3-1に、外観検査及びサンプリングを行った日を示す。

表 3-1 外観検査及びサンプリング実施日

日	調査対象
5月12日	F-27 ケーシング(プレフィルタ2個、HEPA フィルタ2個)
5月13日	F-27 ケーシング(プレフィルタ1個、HEPA フィルタ2個)
6月19日	F-20 及び F-22 ケーシング
6月20日	F-24 ケーシング
6月23日	F-26 ケーシング
6月24日	F-19,F-21,F-23,F-25 ケーシング

4. 結果

4. 1. 外観検査

セル系フィルタの被害状況を述べるにあたり、はじめにフィルタの各部位の呼称を以下に定めておく。フィルタはケーシングにいれると、フィルタ枠下部の左右方向が SUS 製枠に固定されるようになる。フィルタを入れる際には通常、製品のラベル面を手前にして入れる。そこで、ケーシングを手前から見て、それぞれフィルタの左、右、上、下及び奥、手前側と呼ぶこととする(図 4-1)。この場合、HEPA フィルタのメディアの折り目がケーシングの左右方向に並ぶようになる。また各フィルタについては入気口側から順に1列目、2列目、3列目また上から1段目、2段目と呼ぶこととする(図 4-2)。

4. 1. 1. プレフィルタ

プレフィルタはA社製とB社製が用いられており、内訳はA社製が8個、B社製が 19 個であった。フィルタ外枠はA社製がアルミ板、B社製が難燃性合板である。事故時に使用されていたもののうち、代表的な写真を写真 4-1-1,2 に示す。メディア及び上下流にある脱落防止用の金網は完全に脱落しており、メディアは煤によって上下流が分からぬほどに真っ黒になっていた(未使用品は白)。切り取ったサンプルを見ると、煤はメディアの内部まで一様に付着していることが分かる。枠については、表面に煤の付着が見られる程度であり、事故による破損はなかった。ただし、一部交換時に人為的に破損したものがある。なお、ガスケットがはがれた跡があるが、これは平成4年のフィルタ交換時にうまくフィルタ枠がケーシングに入らなかつたため、意図的に剥がしたものである。

4. 1. 2. HEPA フィルタ

HEPA フィルタはB社製とC社製が用いられており、内訳はB社製が 24 個、C社製が 12 個であった。被害状況は以下に示すように多岐にわたっていた。

① 煤の付着

煤がメディア全体に付着し、メディアの表側全体が黒くなっている。メディアの裏側には付着は見られない。これは調査を行ったフィルタ全数(36 個)において観察された。

② 枠の変形

フィルタの外枠が外側に膨らんで変形している(写真 4-2-1)。これは 21 個のフィルタで発生した。

③ メディア全体の抜け落ち

爆風による力でメディア全体が枠から抜けて落ちている(写真 4-2-2)。これは 6 個のフィルタで発生した。

④ メディア配列のゆがみ

直線上のメディア配列がくずれてゆがんでいる。さらに、均等間隔のメディアの配列がくずれ、プリーツの間隔が一部広がっている(写真 4-2-3)。これは 26 個のフィルタで発生した。

⑤ リークの発生

フィルタのメディアの下部が破け、下流側の破けた部位から表側メディアの黒くなっているのが見える(写真 4-2-4)。これは 21 個のフィルタで発生した。

⑥ メディア全前面におけるつぶれ

メディアの前面が均一な力で上から押されたように全体につぶれている(写真 4-2-5)。これは F-24 の1段目1列目のみで発生している。

⑦ 外的力によるメディアのつぶれ

1段目の HEPA フィルタの脱落により2段目のフィルタに落下することで上側がつぶれてしまっている(写真 4-2-6)。これは F-27 の2段目1列目のみで発生している。

これらのうち、「①媒の付着」のみが火災による影響であり、火災により発生した媒が直接運ばれてきてフィルタメディアに付着したものである。メディアの表面のみ黒くなっていて、裏面は白い状態であることから、ほとんどの媒はメディアの表面に付着していると推測される。なおこのことは、4-3節の SEM 写真による観察により確認された。

②～⑦の損傷は、すべて爆発による影響である。「②枠の変形」はほとんどすべての場合において、フィルタの上側の左右方向が外側に膨らむ結果となっている。F-20 の1段目1列目においてのみ、下部の奥側が変形し外側に膨らんでいる。「③メディア全体の抜け落ち」は、メディア及びセパレータが枠の左右から完全にはがれ、また枠の手前・奥側ではちぎれしており、枠に残置されたメディア及びセパレータが洗濯板状になって残っている。この損傷様式は特にB社製で多く発生している。これはB社製のセパレータがアルミであるのに対して、C社製は SUS304 であるため、セパレータを含むメディア全体の強度が異なったことによると考えられる。「④メディア配列のゆがみ」は事故前にはきれいに配列されていたメディア及びセパレータが、爆発の影響で大きく湾曲し、その際所々に大きく開いた隙間が発生したものと考えられる。「⑤リークの発生」はこれまでの報告⁽⁶⁾にも記されているように、爆風により下部側のプリーツが引っ張られて膨らみ、フィルタ上・下流の差圧による力でメディアが切れることで発生する。「⑥メディア全前面におけるつぶれ」は F-24 の1段目1列目のみで見られる現象で、上から強く押しつけられたようになっており、奥・手前方向でメディア及びセパレータが上部で一部ちぎれている。1段目1列目では、他のケーシングにおいて、全体が抜け落ちているものが多いことより、これは「③メディア全体の抜け落ち」になる寸前の状態であると思われる。「⑦外的力によるメディアのつぶれ」は F-27 の2段目1列目において観察されるもので、1段目のメディア全体が抜け落ちたことにより、上からの物理的な力により、損傷が起きたものである。

以上、これらの被害状況を表 4-1 にまとめて示す。なお、写真 4-3-1～4-3-9 に事故時に使用していたフィルタの、事故後の外観写真を示す。

表 4-1 各フィルタでの被害状況

		メーカー	枠の変形	全体の抜け落ち	配列のゆがみ	リーク
F-19	1段1列	B		○		
	1段2列	B			○	
	1段3列	B	左右		○	
	2段1列	B			○	○
F-20	1段1列	B	左右奥	○		
	1段2列	B	左		○	○
	1段3列	B	左右		○	○
	2段1列	B			○	
F-21	1段1列	B	左右		○	○
	1段2列	C	左右		○	○
	1段3列	B			○	
	2段1列	B				
F-22	1段1列	B	左右		○	○
	1段2列	B	左右		○	
	1段3列	B	左右	※		
	2段1列	B		※		
F-23	1段1列	B	左右	○		
	1段2列	B	左右		○	○
	1段3列	B	左右		○	○
	2段1列	B	左右	○		
F-24	1段1列	B	左		○	○
	1段2列	C			○	○
	1段3列	C	左右		○	○
	2段1列	B	左右		○	○
F-25	1段1列	C			○	○
	1段2列	C	左右		○	○
	1段3列	C			○	○
	2段1列	C	左右		○	○
F-26	1段1列	C	左右	○		
	1段2列	C	左右		○	○
	1段3列	B	左		○	○
	2段1列	C		※		
F-27	1段1列	B	左右	○		
	1段2列	C			○	○
	1段3列	C	左右		○	○
	2段1列	B			○	○

※ 交換の際に人為的にメディア全体が破損した

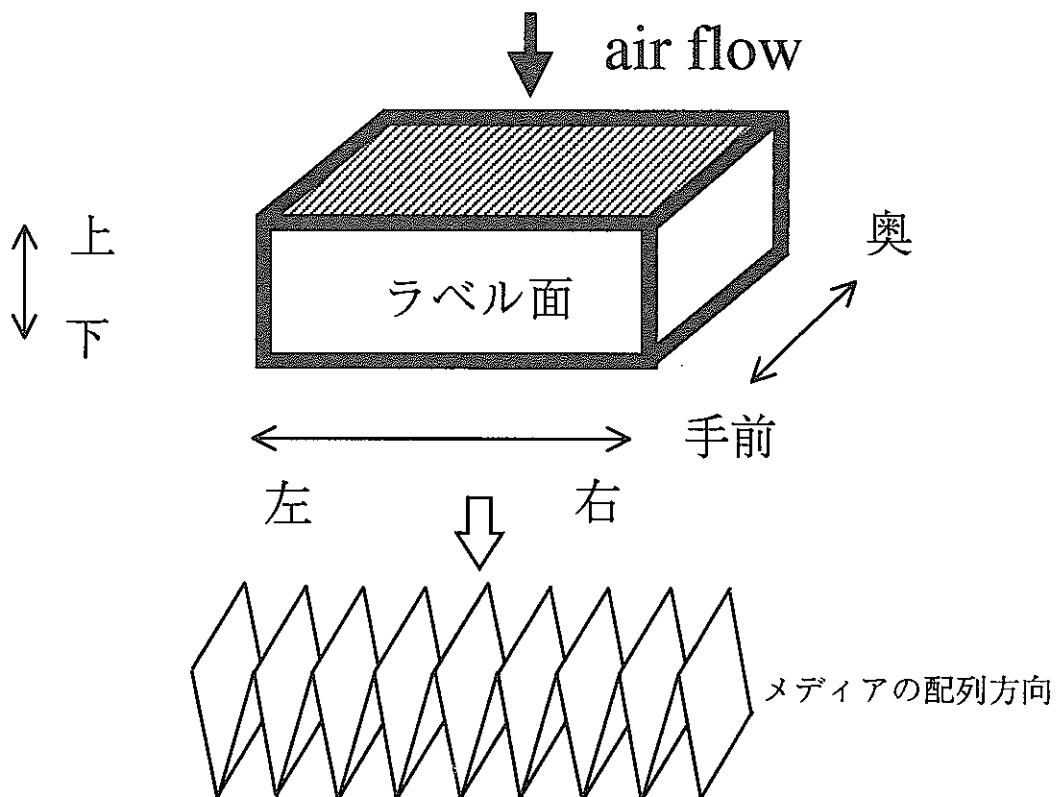


図 4-1 フィルタ各部位の呼称

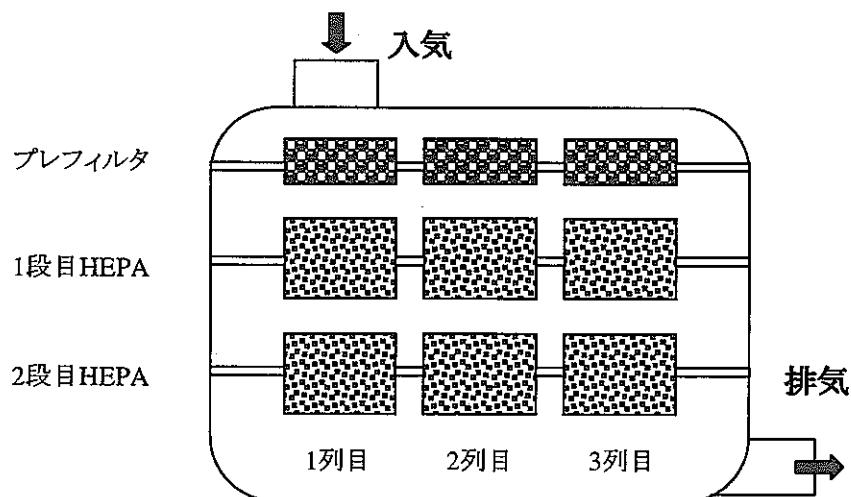


図 4-2 ケーシング中の各フィルタの呼称

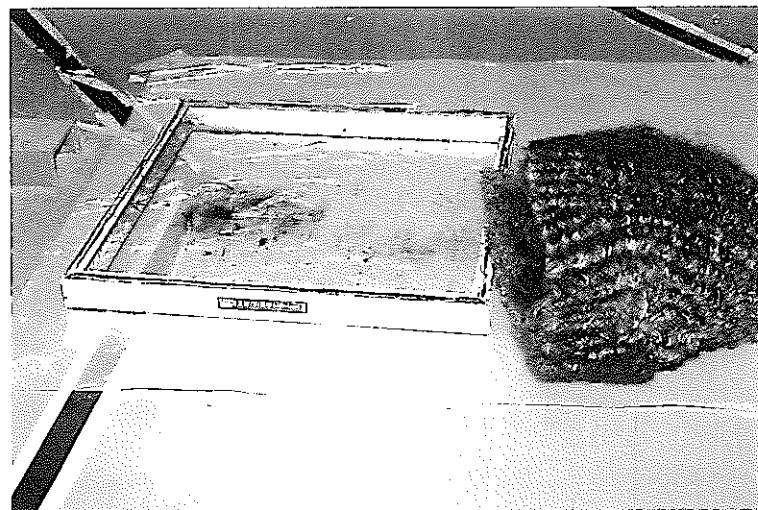


写真4-1-1 プレフィルタ（アルミ板枠）

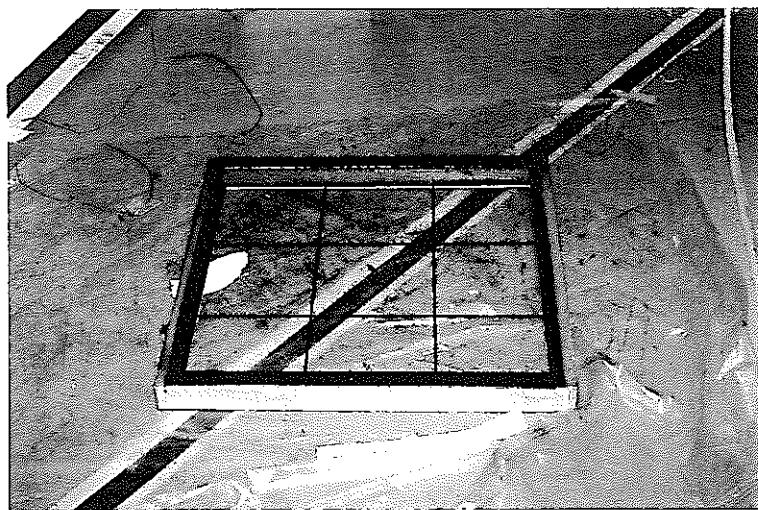


写真4-1-2 プレフィルタ（合板枠）

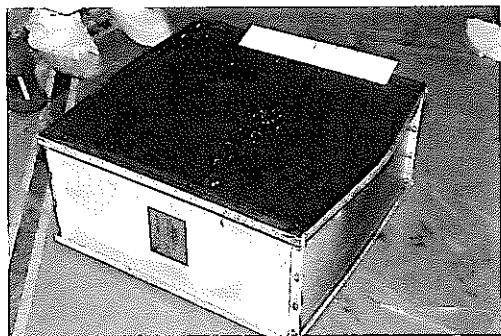


写真4-2-1 HEPAフィルタの損傷
(枠の変形)

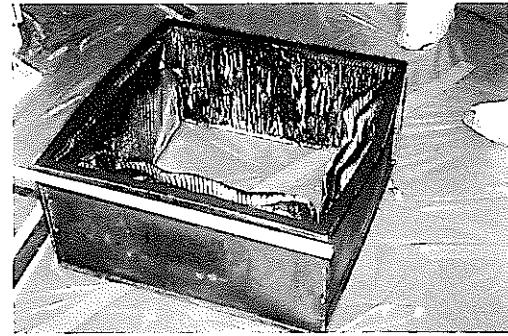


写真4-2-2 HEPAフィルタの損傷
(メディア全体の抜け落ち)

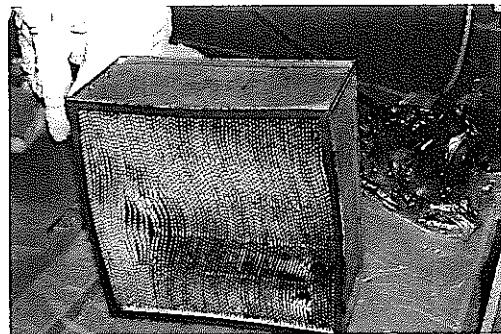


写真4-2-3 HEPAフィルタの損傷
(メディア配列のゆがみ)

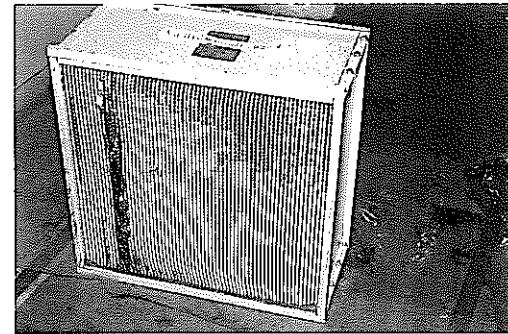


写真4-2-4 HEPAフィルタの損傷
(リークの発生)

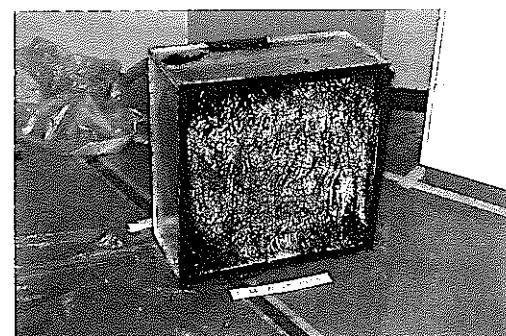


写真4-2-5 HEPAフィルタの損傷
(メディア全前面におけるつぶれ)

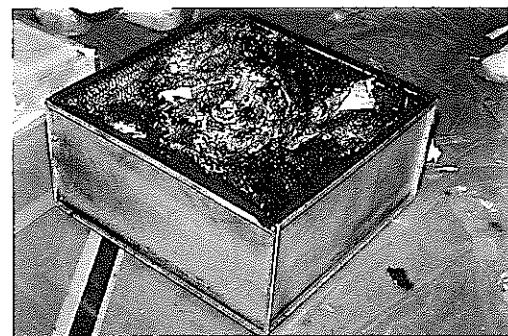


写真4-2-6 HEPAフィルタの損傷
(外的力によるメディアのつぶれ)

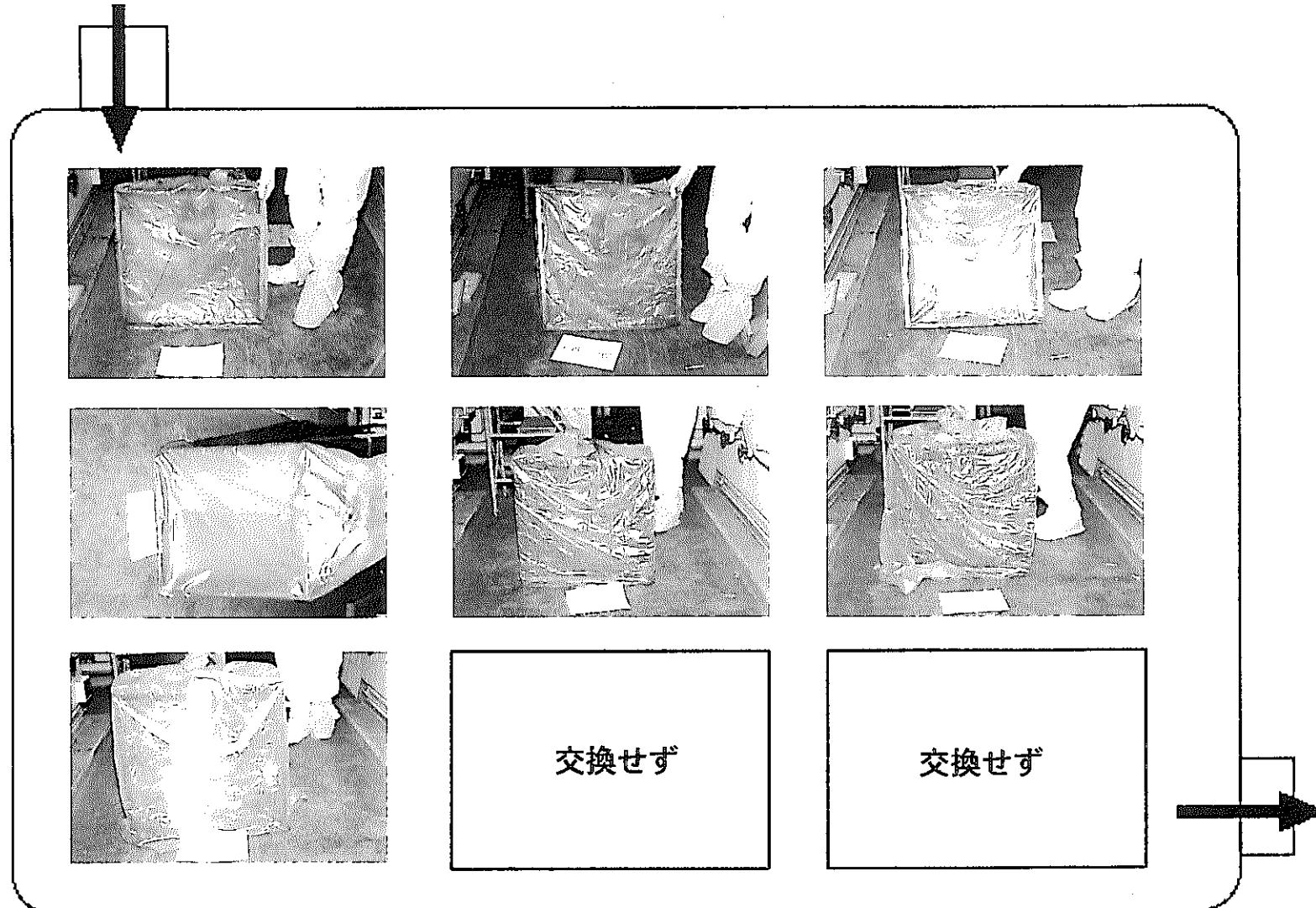


写真4-3-1 フィルタの外観写真
(F-19ケーシング)

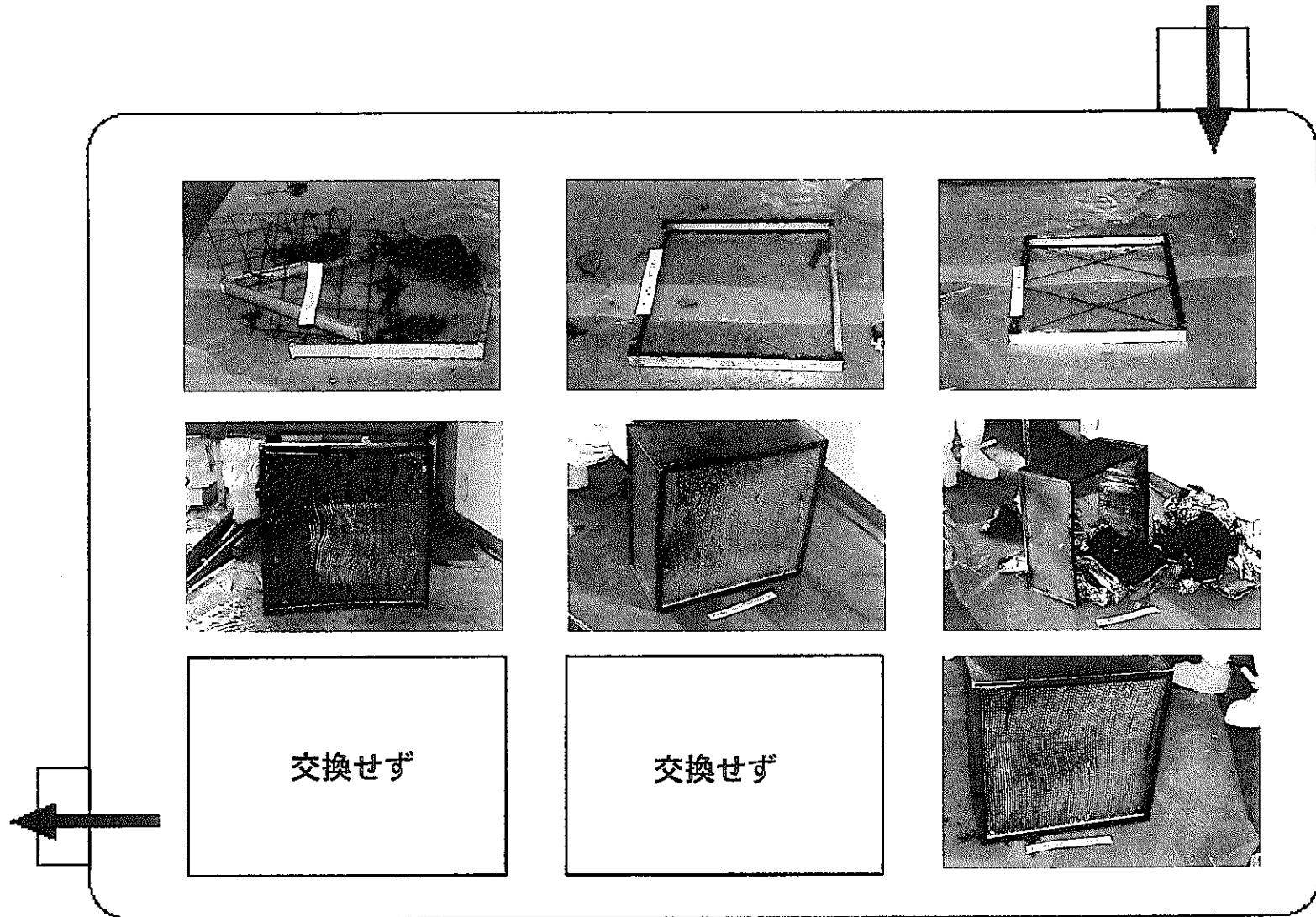




写真4-3-3 フィルタの外観写真
(F-21ケーシング)

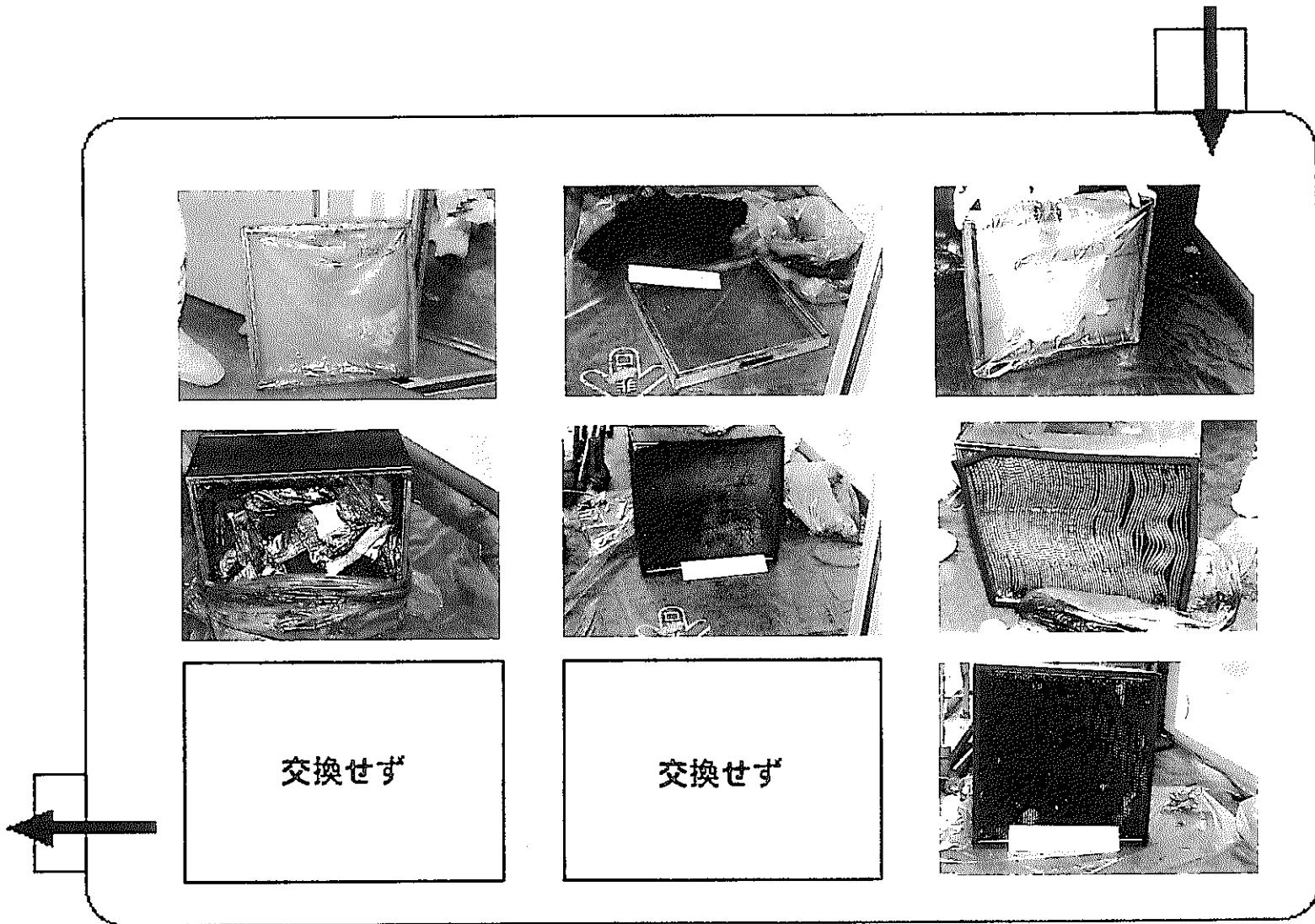


写真4-3-4 フィルタの外観写真
(F-22ケーシング)



写真4-3-5 フィルタの外観写真
(F-23ケーシング)

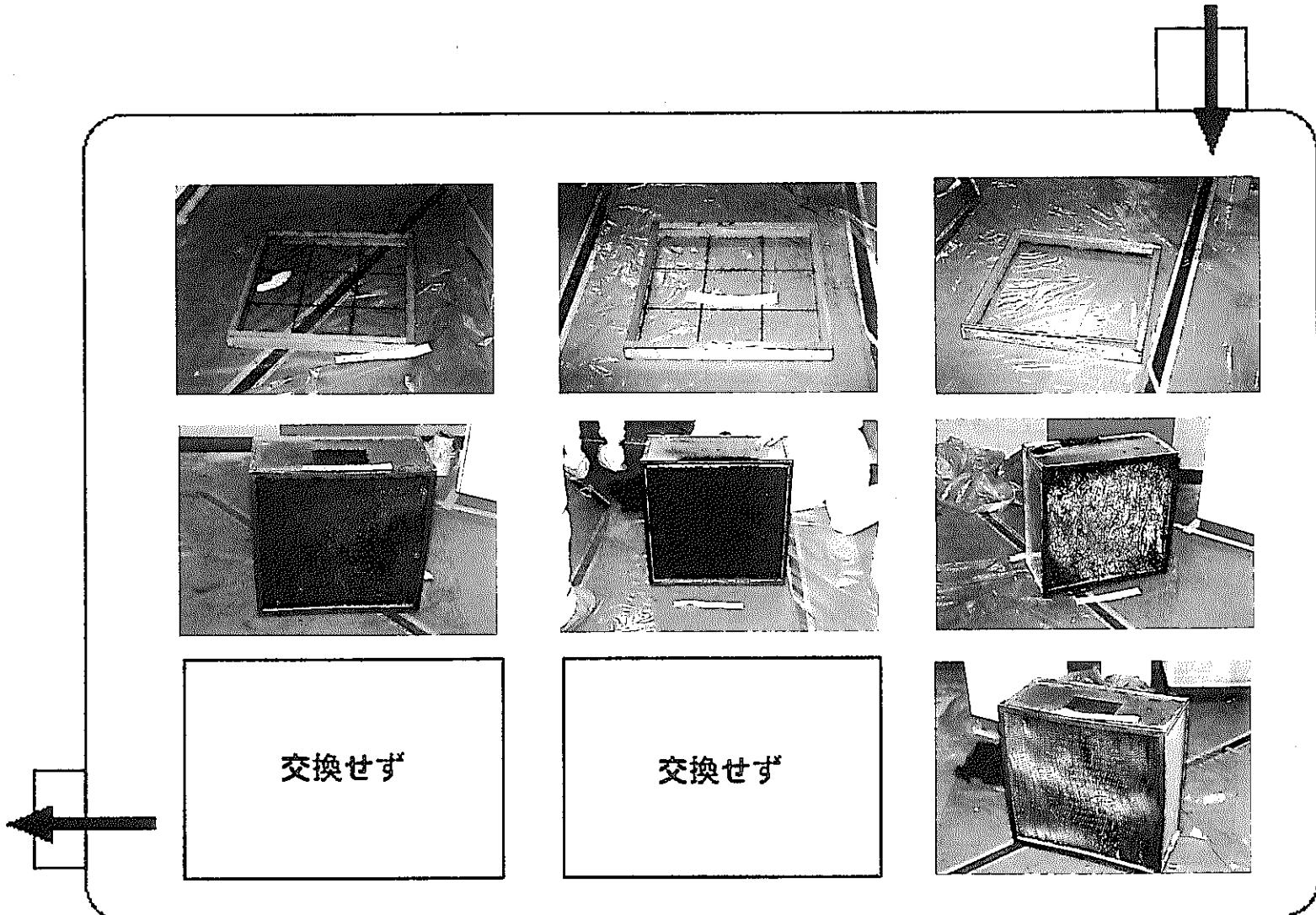


写真4-3-6 フィルタの外観写真
(F-24ケーシング)

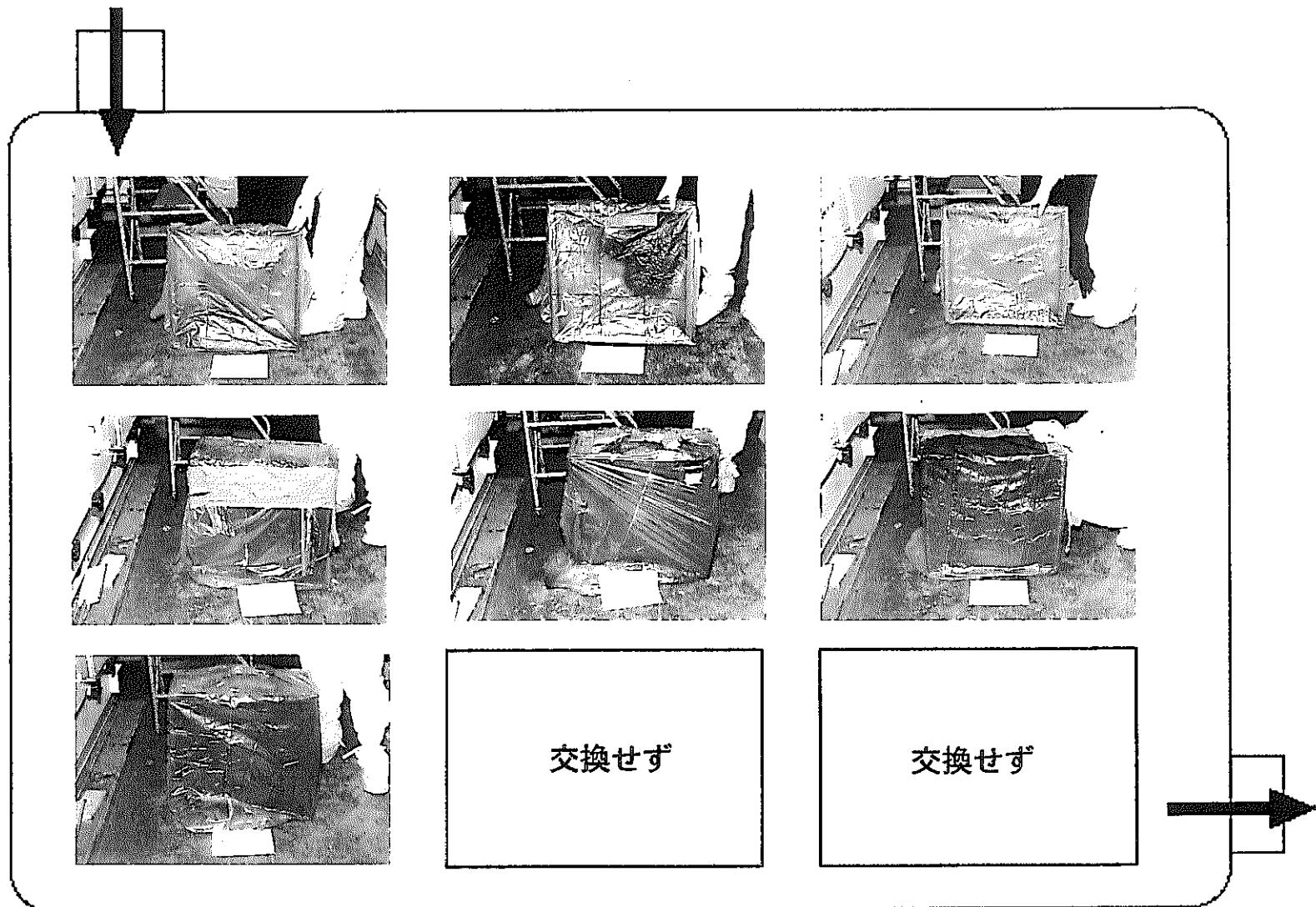


写真4-3-7 フィルタの外観写真
(F-25ケーシング)

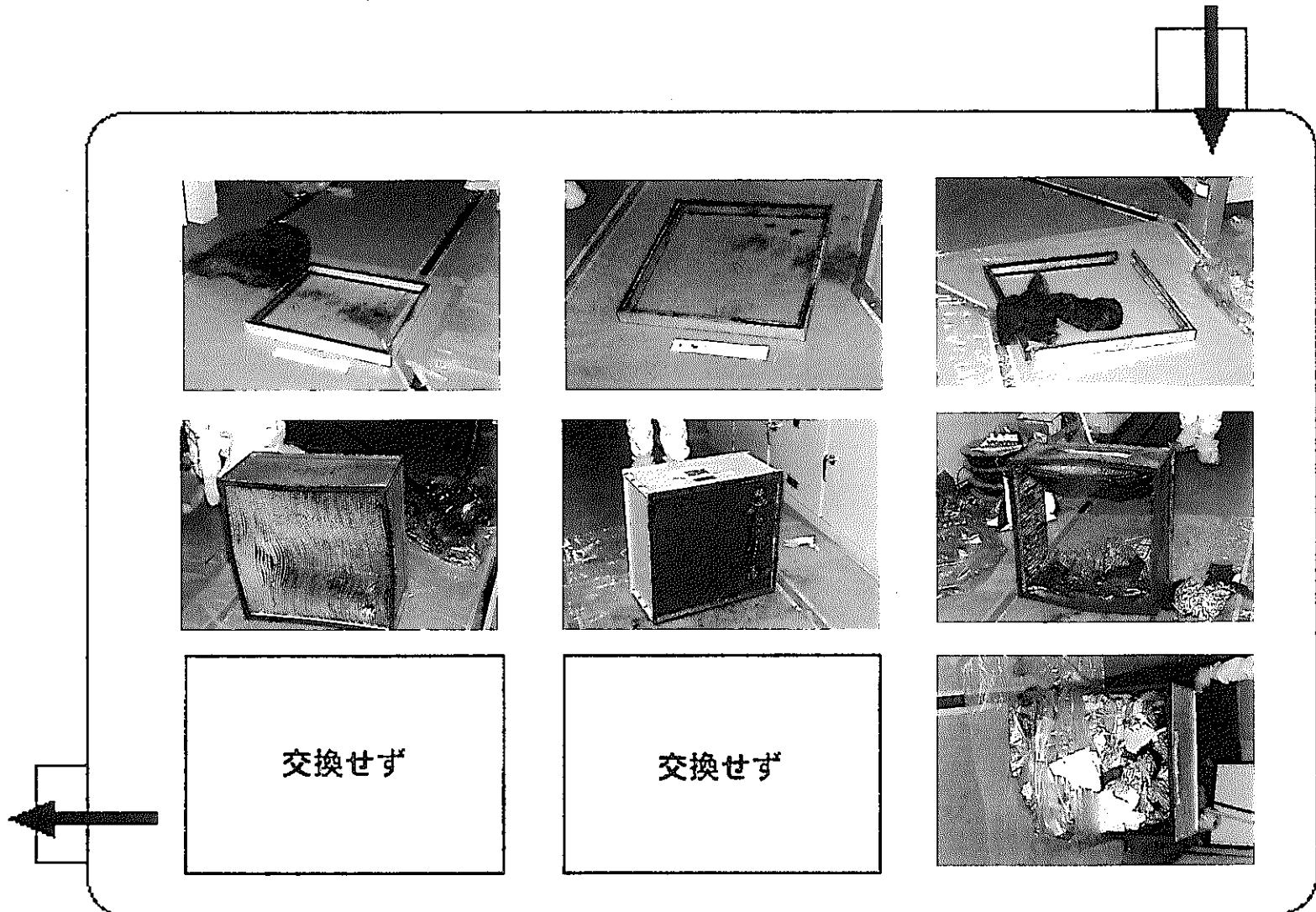
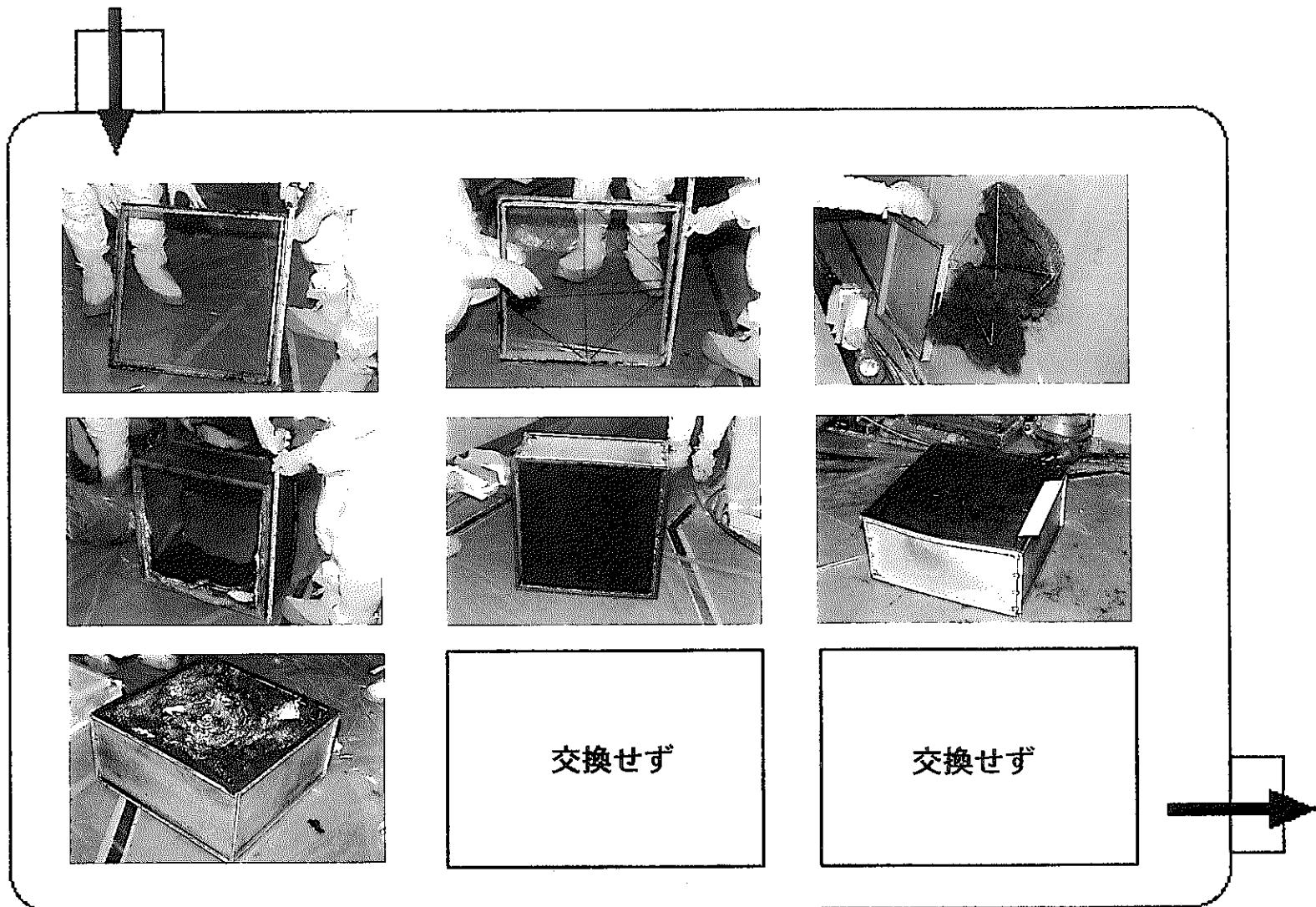


写真4-3-8 フィルタの外観写真
(F-26ケーシング)



4.2. 放射能測定

今回の火災により発生した煤は、アスファルト固化体の燃焼により発生したものであるため、相当量の放射性物質が同伴しているものと予想される。そこで、交換後のフィルタの放射能測定を行った。測定は、汚染状況を把握するための、電離箱式サーベイメータによる線量当量率測定と、付着した煤中に含まれる放射性核種組成を調べるために、Ge 検出器によるガンマ線スペクトル分析の2つを行った。なおプレフィルタについては、メディアが枠から抜け落ちているものばかりであったため、一部のフィルタからメディアを採取して、ガンマ線スペクトル測定のみ行った。

4.2.1. 線量当量率

フィルタの汚染状況を把握するため、電離箱式のサーベイメータを用いて線量当量率測定を行った。まず測定手順を示す。はじめに測定場所(分電盤室;G316)のバックグラウンド線量を測定する。次に、対象とするフィルタを G316 に運びこみ、フィルタを保護しているビニルバッグをはずし、フィルタ面の中心にサーベイメータを近づけ測定する。これを上流側と下流側両方について行う。なお、フィルタ面の中心以外にも局所的に高線量となっている箇所がないか、サーベイメータを走査させて調べる。この測定を各測定対象フィルタについて行い、最後に測定場所のバックグラウンド線量を再度測定する。なお、メディアが完全に枠から抜けている、または引きちぎられているフィルタに関しての測定は行わなかった。

図 4-3 に測定結果を示す。この時、 $2\sim3\mu\text{Sv}/\text{h}$ 程度のバックグラウンドを考慮すると、平均で約 $70\mu\text{Sv}/\text{h}$ 程度の線量当量率となる。また上流側は下流側に比べて平均 7%程度高い傾向があった。なお、局所的に高線量となっている箇所は発見できなかった。

4.2.2. ガンマ線スペクトル分析

付着した煤中に含まれる放射性核種組成を調べるために、フィルタメディアを一部採取し、Ge 検出器を用いてガンマ線スペクトル分析を行った。図 4-3 に HEPA フィルタの表面汚染密度を、線量当量率とあわせて示す。また表 4-2 に組成比を示す。プレフィルタについては、メディアの重量当たりの付着放射能として表 4-3 に示す。これよりフィルタ付着核種は Cs-137 が大半で 90%を占め、以下 Cs-134, Ru-106, Co-60 の順で検出されている。また、線量当量率と表面汚染密度の相関を図 4-4 に示す。これより線量当量率と表面汚染密度はほぼ直線関係であることがわかる。

図 4-3 の結果より、1段目についてはほぼ均等な線量率及び表面汚染密度となっている。ダクトの系列による顕著な違いも認められず、F-27 に始まる系列及び F-21 に始まる系列で、表面汚染密度はそれぞれ $198\pm41, 197\pm26(\text{Bq}/\text{cm}^2)$ 、線量当量率は $75\pm15, 60\pm18(\mu\text{Sv}/\text{h})$ となっており、両者は誤差の範囲で一致する。2段目についてはばらつきが大きく、1段目と変わらない線量当量率、表面汚染密度を示すものと、1段目に比べて一桁小さい値を示すものがある。

次にフィルタの深さ方向への放射性核種の付着分布を示す。通常の使用状態において、粒子は深さ方向に均一に吸着されるが、今回のように粒子密度が非常に高い条件では、局所的にメディアに吸着していることも考えられる。そこで、10台のケーシングのうちほぼ中心に配置されている F-26 ケーシングのフィルタメディアについて、高さ方向の表面汚染密度分布を調べた。この結果を図 4-5 に示す。これより、全体に下流

側が低くなっている傾向はあるが、顕著に認められるような局所的な付着は認められなかった。この結果、煤はフィルタメディアの深さ方向に、ほぼ均一に付着していたものと考えられる。

表 4-2 ガンマ線スペクトル分析による HEPA フィルタに付着した放射性核種の組成比(%)

ケーシング	フィルタ	Cs-137	Cs-134	Ru-106	Co-60
F-20	1段目1列目	91.0	8.03	0.91	0.06
	1段目2列目	91.5	7.49	0.96	0.07
	1段目3列目	91.3	7.60	1.06	0.07
	2段目1列目	91.4	7.77	0.78	N.D.
F-22	1段目1列目	91.5	7.71	0.68	0.07
	1段目2列目	91.7	7.55	0.70	0.06
	1段目3列目	91.3	7.90	0.73	0.08
	2段目1列目	89.9	7.06	3.02	N.D.
F-24	1段目1列目	91.2	8.04	0.70	0.09
	1段目2列目	91.2	7.90	0.85	0.08
	1段目3列目	91.3	7.99	0.57	0.09
	2段目1列目	92.3	7.69	N.D.	N.D.
F-26	1段目1列目	90.2	7.81	1.92	0.10
	1段目2列目	92.5	7.49	N.D.	N.D.
	1段目3列目	91.0	7.74	1.18	0.06
	2段目1列目	92.1	7.86	N.D.	N.D.
F-27	1段目1列目	90.4	8.32	1.16	0.09
	1段目2列目	90.7	8.37	0.98	N.D.
	1段目3列目	90.9	8.00	1.00	0.10
	2段目1列目	90.2	7.55	0.21	0.11

N.D.は検出されず

表 4-3 ガンマ線スペクトル分析によるプレフィルタに付着した放射能(Bq/g)
(プレフィルタメディア重量当たりの付着量)

ケーシング	フィルタ	Cs-137	Cs-134	Ru-106	Co-60
F-27	2列目	4.7×10^3	3.5×10^2	1.9×10^1	1.1×10^0
	3列目	5.9×10^3	5.0×10^2	1.3×10^1	1.1×10^0

	*	60 50 143.4	90 75 220	表側線量率 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) 裏側線量率 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) total- γ (Bq/cm^2)		
F-27	*					
	*					
	276.5					
	8 4 47.7					
F-28						
F-25	68 62	78 62	65 54	 		
	78 70			 		
F-21	 	 	 			
F-26	*	110 100 227	80 74 219.7	*	50 45 185.4	40 45 164.3
	*	 	 	*	 	
F-22	*	36.9	 	*	207.5	15.57
F-23	 	 	 	 	 	
F-19	 	 	 	 	 	
F-24	70 62 186.5	62 61 164.5	67 64 175.2	*	80 80 240.5	70 70 197.2
	4 4 32.5	 	 	60 55 218.9	 	
F-20						

図4-3 HEPAフィルタの線量当量率及び表面汚染密度

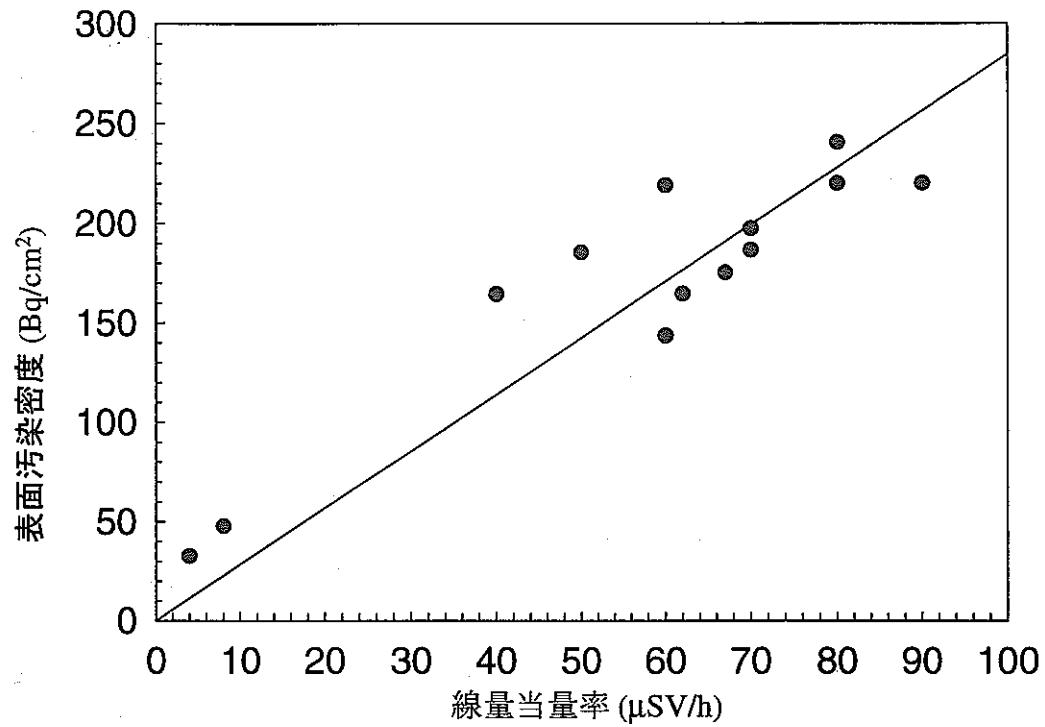


図 4-4 HEPAフィルタの線量当量率と表面汚染密度の相関

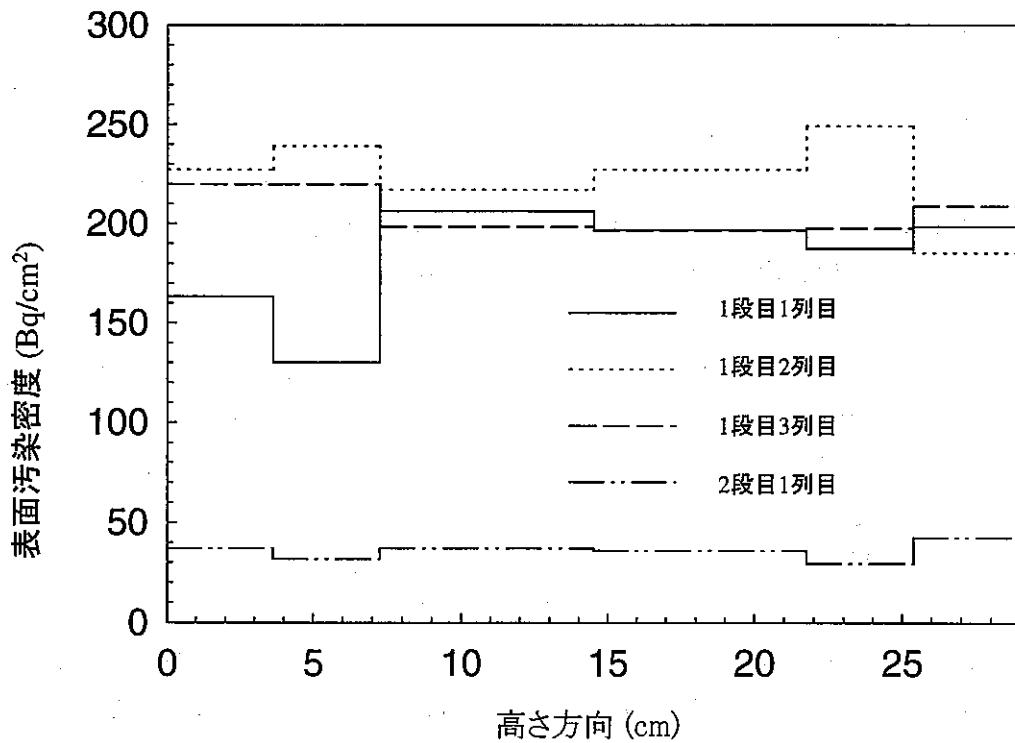


図 4-5 高さ方向の表面汚染密度分布

4. 3. 煤の付着重量の推定

前節で示したフィルタメディアの表面汚染密度より、フィルタメディアに付着した煤の重量を推定する。ガンマ線スペクトル分析により得られるフィルタメディアの表面汚染密度 D (Bq/cm^2)と、アスファルト固化処理施設内より採取した煤の重量当たりの放射能 A (Bq/g)を用い、フィルタメディアの単位面積あたりの煤付着重量を算出し、これに1個のフィルタにおけるメディア面積 S (cm^2)を乗じることで、フィルタ1個あたりの煤付着重量 W (g)を求める。

$$W = \frac{D}{A} \cdot S \cdots (1)$$

リファレンスとする煤のデータとしては、(1)アスファルト固化処理施設内で大量の煤の付着が見られた部屋で採取したもの、(2)ドラム缶より採取した灰状物質、(3)R152 と A336 の間のダクトより採取した煤、の3種類が考えられる。表 4-4 にこれらの測定結果を示す。この表より、採取場所によって値のばらつきが大きいことがわかる。そこで、どの値をリファレンスデータとして採用するのが最も適当であるか検討する。

(1)の施設内の煤は平成 9 年 5 月中旬に採取を行った。これらのうち A118, A121 に付着していた煤は、事故時に設置してあったグリーンハウスが燃焼したものであり、アスファルトの燃焼により発生した煤とは別物である。そのため、他の部屋の煤と比較して、はるかに低い値となっている。A234 は R152 の真上にある部屋であり、煤は部屋全体に付着しており、また今回採取した部屋の中で最も厚く付着していた。ここより採取した煤は R152 の火災で発生した煤が直接付着したものと思われる。A235 は A234 の隣の部屋であり、ほぼ同じ由来の煤であると考えられるが、A234 に比べて放射能濃度が低くなっている。これは付着厚さが A234 に比べて薄かったため、採取の際に不純物が混入したためと推測される。A333 及び G311 で採取した煤は、火災時にダクトを通じて部屋上部の空気吹き出し口より室内に流入し、堆積したものである。A234, A235 では煤が湿った状態で付着していたのに対して、A333 及び G311 では乾いた状態で堆積しており、明らかに性状が異なっていた。また上部から降り積もったものを採取したため、それ以前から堆積していた埃等を不純物として混入してしまっているものと思われ、A234 に比べて低い放射能濃度となっている。ドラム缶より採取した煤の組成は、ドラム缶により異なる値となっている。フィルタに付着した煤は火災時に燃焼したドラム缶すべての平均となるため、単一のドラム缶より採取した灰状物質の放射能濃度を代表とするのは適当でないと考えられる。ダクトより採取した煤は、他の箇所で採取した煤に比べて、極端に放射能濃度が低い。採取したときの状況が不明であるため、採取したサンプルに問題があったものと思われる。以上より、A234 より採取した煤が、最もフィルタに付着した煤に近いものであると考えられる。そこで A234 より採取した煤のデータをリファレンスデータとして使用する。

以上の結果、求めた煤の付着重量を表 4-5 に示す。なお、これまで報告されているフィルタ閉塞についての試験で得られた付着重量を、表 4-6 に示す^{(12), (13)}。なお閉塞の定義は、Alvares ら⁽¹²⁾は風量が定格風量の 50% になった時点を、Fenton ら⁽¹³⁾はフィルタ差圧が初期値の 12 倍になった時点を、それぞれフィルタ閉塞の発生と定義している。表 4-5 より、HEPA フィルタ1段目における付着重量の平均は $(2.8 \pm 0.5) \times 10^2$ (g) であり、燃焼した物質や燃焼状態が異なるものの、これまで行われた試験の結果とおおよそ一致する結果となっている。

表 4-4 採取対象とした煤のガンマ線スペクトル分析結果

		放射能濃度(Bq/g)					
		Cs-137	Cs-134	Ru-106	Co-60	Am-241	Sb-125
ASP施設 内の煤	A118	1.7×10^3	1.5×10^2	2.5×10^1	N.D.	N.D.	N.D.
	A121	2.1×10^3	2.0×10^2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	A234	1.4×10^5	1.3×10^4	4.2×10^3	2.4×10^2	3.5×10^2	4.4×10^2
	A235	6.2×10^4	5.5×10^3	2.3×10^3	1.2×10^2	2.1×10^2	2.0×10^2
	A333	2.5×10^4	2.3×10^3	2.0×10^2	1.9×10^1	N.D.	N.D.
	G311	1.8×10^4	1.6×10^3	1.8×10^2	1.8×10^1	N.D.	N.D.
ドラム内 灰状物質	A8	1.7×10^5	1.5×10^4	1.6×10^3	5.7×10^2	1.3×10^2	1.7×10^2
	A9	2.1×10^5	1.8×10^4	4.9×10^3	1.3×10^2	2.6×10^2	3.6×10^2
ダクト内堆積煤		3.0×10^2	2.2×10^1	8.0×10^0	5.8×10^{-1}	N.D.	N.D.

N.D.は検出されず

表 4-5 HEPA フィルタへ付着した煤の重量(g)

	1段目1列目	1段目2列目	1段目3列目	2段目1列目
F-20	2.6×10^2	3.4×10^2	2.8×10^2	3.1×10^2
F-22	2.9×10^2	2.6×10^2	2.3×10^2	2.2×10^1
F-24	2.6×10^2	2.3×10^2	2.5×10^2	4.6×10^1
F-26	2.3×10^2	3.2×10^2	3.1×10^2	5.3×10^1
F-27	3.9×10^2	2.0×10^2	3.1×10^2	6.6×10^1

表 4-6 これまで報告されている、HEPA フィルタの目詰まり発生に必要な付着物重量

実施場所	付着重量 (g)	燃焼物
N. J. Alvares, et al.(Lawrence Livermore National Laboratory) ⁽¹²⁾	$4.7 \sim 5.7 \times 10^2$	混合燃料(:もみの木 40%, 補強ポリエステル 29%, 塩化ポリビニル 14%, 耐火ポリメチルメタクリレート 9%, ポリカーボネイト 8%)
D. L. Fenton, et al. (Los Alamos National Laboratory) ⁽¹³⁾	$1.2 \sim 1.3 \times 10^3$	ポリスチレン(低燃焼率)
	$3.9 \sim 5.3 \times 10^2$	ポリスチレン(高燃焼率)
	$2.6 \sim 3.1 \times 10^2$	ポリメチルメタクリレート(低燃焼率)
	$1.9 \sim 2.3 \times 10^2$	ポリメチルメタクリレート(高燃焼率)

4. 4. EPMAによる分析

4. 4. 1. 装置及び試料

HEPAフィルタに付着した粒子径を調査するため、EPMA（日本電子（株）製）を用いて分析を行った。フィルタの試料として、F-27の1段目1列目（試料名：F-27-2）を用いた。このフィルタはB社製のものであった。対照試料として、平成4年7月に定常交換されたHEPAフィルタ（使用時の位置、フィルタの型式等不明、試料名：H-BLK-A）、及び未使用HEPAフィルタメディア（試料名：BEF-H-1）を用意した。観察用試料は、試料作成時に3層に分けることが出来たので、それぞれ表層、中間層、裏層とした。剥がした試料を、SEM観察用カーボンテープで試料台に固定して観察した（図4-6）。また、試料の前処理として金蒸着を2～4分行っている。

4. 4. 2. SEM観察結果

試料F-27-2の表・中間・裏層（写真4-4-1～3）、H-BLK-A（写真4-5）及びBEF-H-1（写真4-6）についてそれぞれ1,000倍、3,000倍で観察を行った。試料F-27-2表層のSEM写真から、フィルタ纖維間の隙間が見えないほど、非常に多数の粒子が均一に付着している様子が観察される。付着物は粒子状のものが多く、フィルタ纖維を付着物中に取り込んでいる物は少ない。付着量を比較すると、表層で最も多く、ついで裏層に多い。中間層ではわずかに見られる程度である。中間層に粒子が非常に少ないとから、粒子はほとんどフィルタ表面で捕獲されたと考えられる。裏層の付着物は、表層に比べて特に粒子状のものが多いことから、メディアが破損した後に再付着したと考えられる。試料H-BLK-Aでは付着物は全く見られない。試料BEF-H-1では付着物が比較的多く見られるが、試料F-27-2に比較すると非常に少ない。その上、付着物が纖維を取り込んでいるものも多い。

試料F-27-2の付着粒子は直径数 μm ～数十 μm の大きさを持ち、ほぼ球形である。一つの粒子の中に多数の小さい粒子が見られることから、粒子がフィルタ上ではなく空气中を移動する間に成長したと考えられる。試料BEF-H-1の粒子もほぼ球形で、その直径は数 μm 程度である。試料BEF-H-1では付着物が纖維を取り込んでいることから、纖維上で成長したと見られる。一方、試料F-27-2の付着物が粒子状で纖維を取り込んでいないこと、試料BEF-H-1に比べて非常に大きいことから、事故時のレッド系排気ダクト内の粒子濃度は、非常に大きかったと考えられる。

噴霧された水による目詰まりの可能性についても調査を行った。事故後、フィルタの交換までに24時間以上経過しているため、フィルタ及び収納した袋にも、濡れを示すものは見られなかった。このため、水滴による目詰まりは目視では確認できなかった。SEM観察及び組成像（写真4-7）でもフィルタに水滴の付着した痕跡、つまり粒子が水滴を避けて付着したと考えられるような、片寄りは見られなかったことから、水噴霧によって目詰まりが起きた可能性は低いと言える。

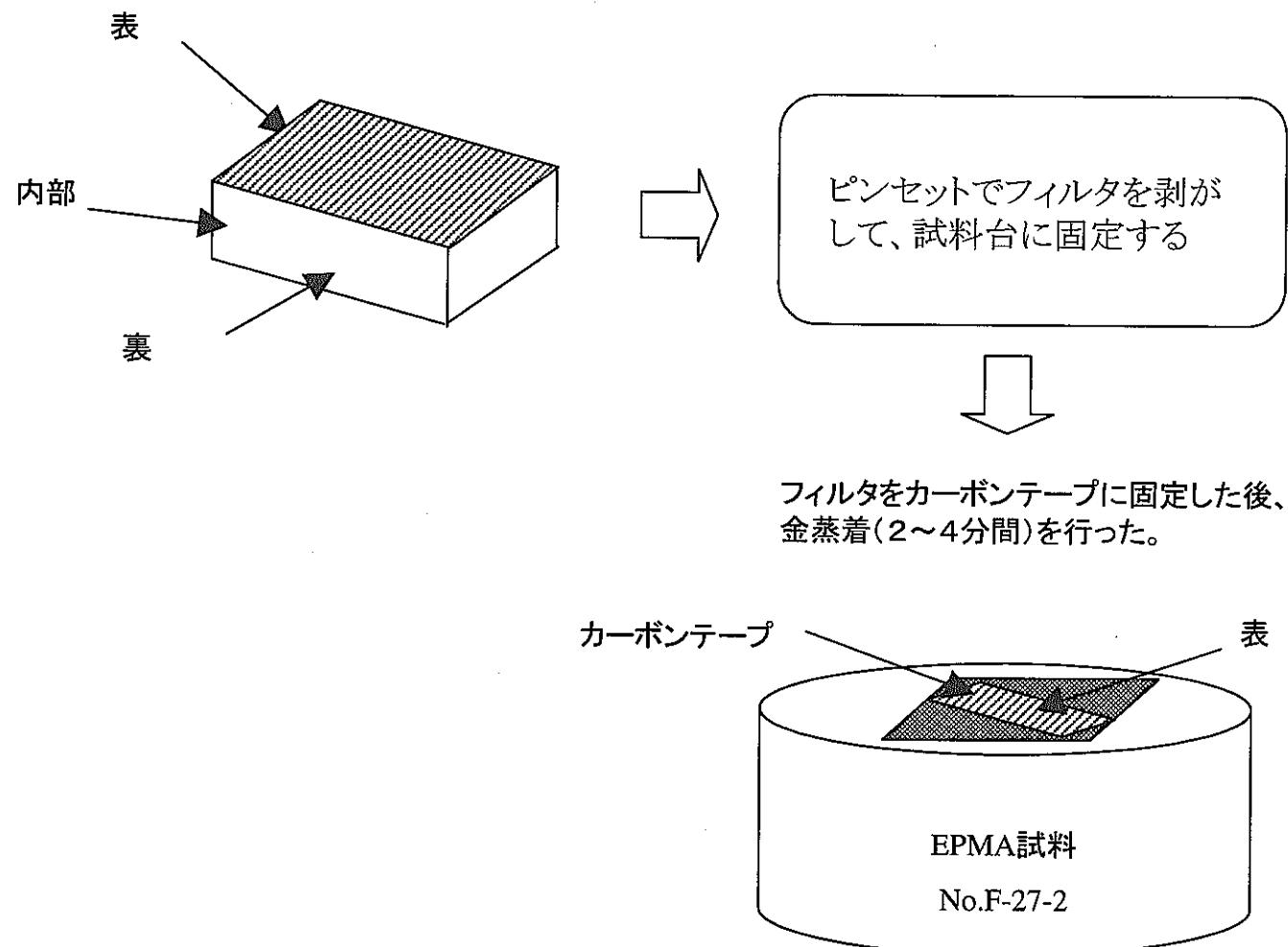
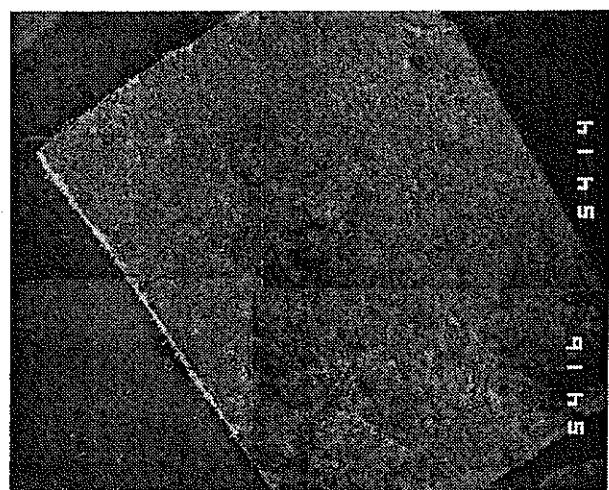
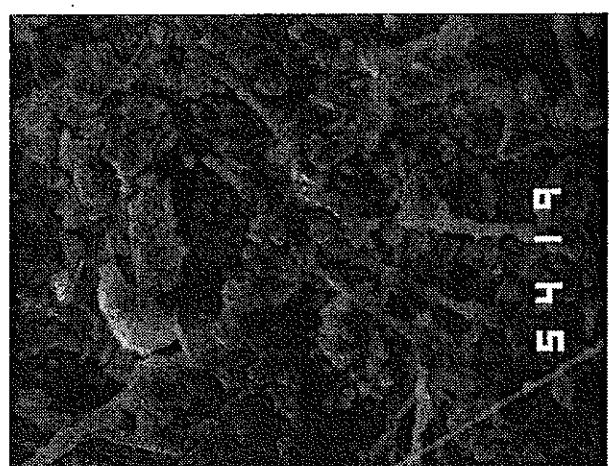


図 4-6 EPMA試料の作成方法



(a) 50倍

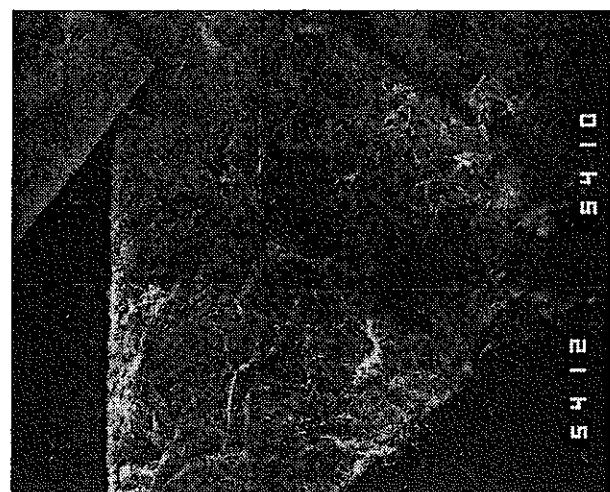


(b) 1000倍

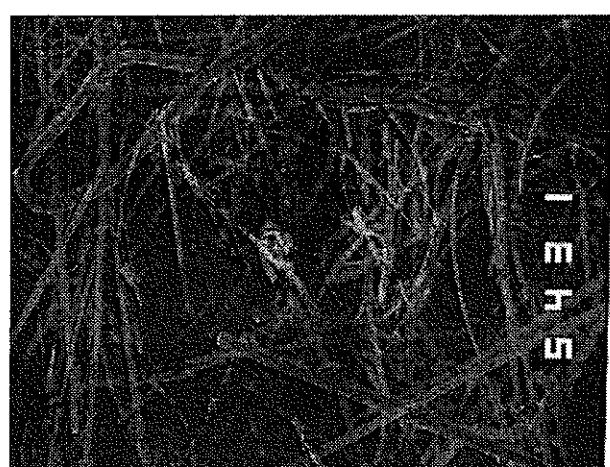


(c) 5000倍

写真4-4-1 HEPAフィルタの二次電子像（試料F-27-2;表層）



(a) 50倍

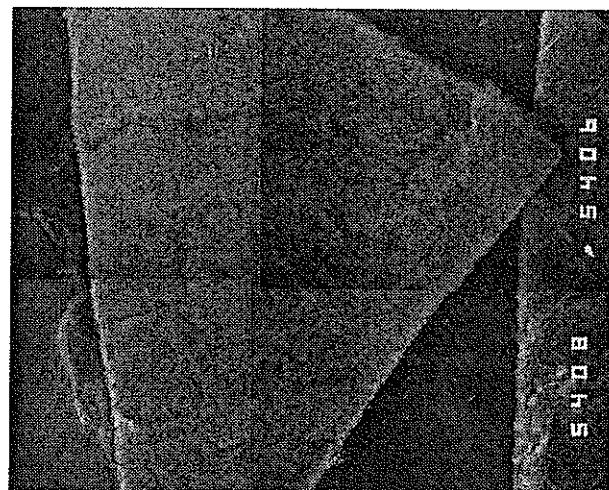


(b) 1000倍

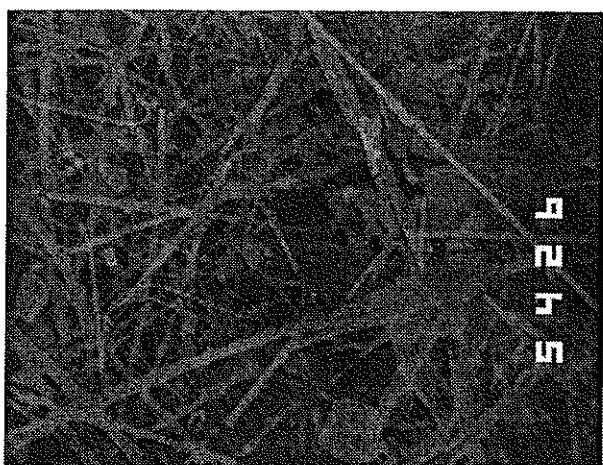


(c) 5000倍

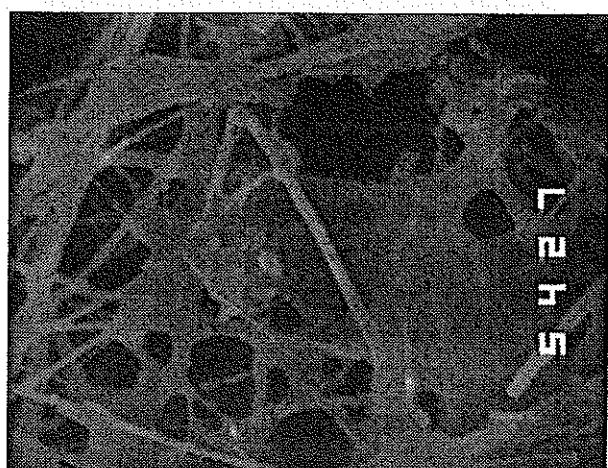
写真4-4-2 HEPAフィルタの二次電子像（試料F-27-2;中間層）



(a) 50倍

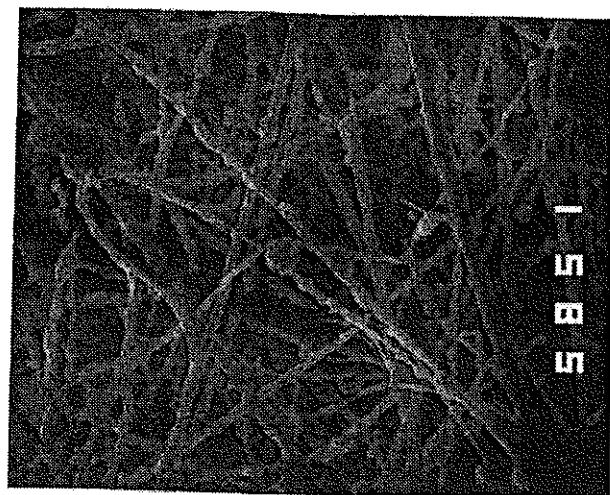


(b) 1000倍

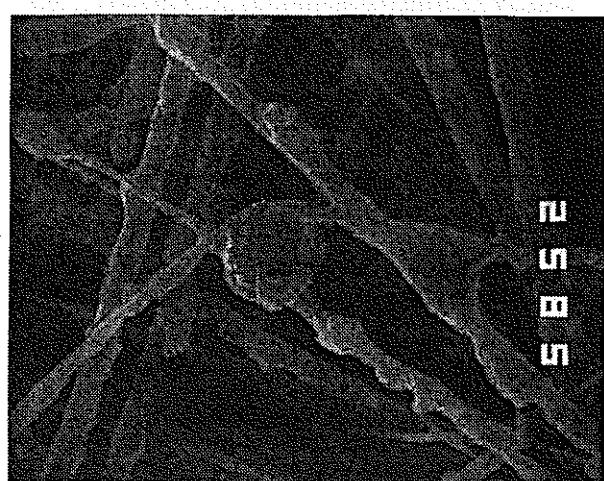


(c) 5000倍

写真4-4-3 HEPAフィルタの二次電子像（試料F-27-2;裏層）

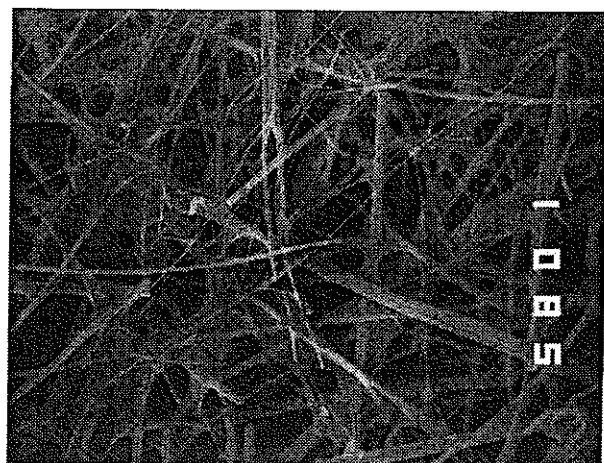


(a) 1000倍

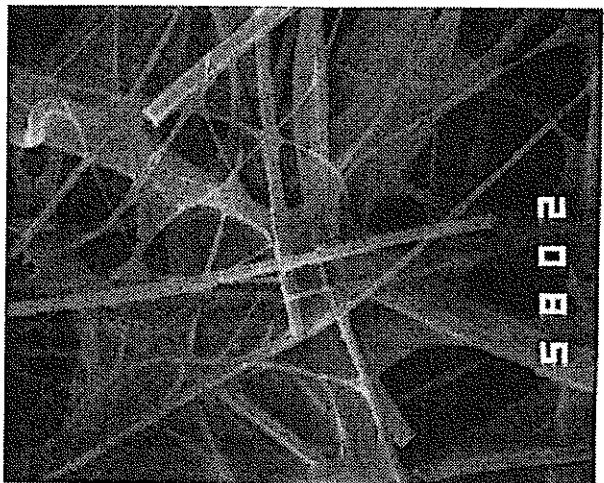


(b) 5000倍

写真4-5 定常交換されたHEPAフィルタの二次電子像（試料H-BLK-A）



(a) 1000倍



(b) 5000倍

写真4-6 未使用HEPAフィルタの二次電子像（試料BEF-H-1）

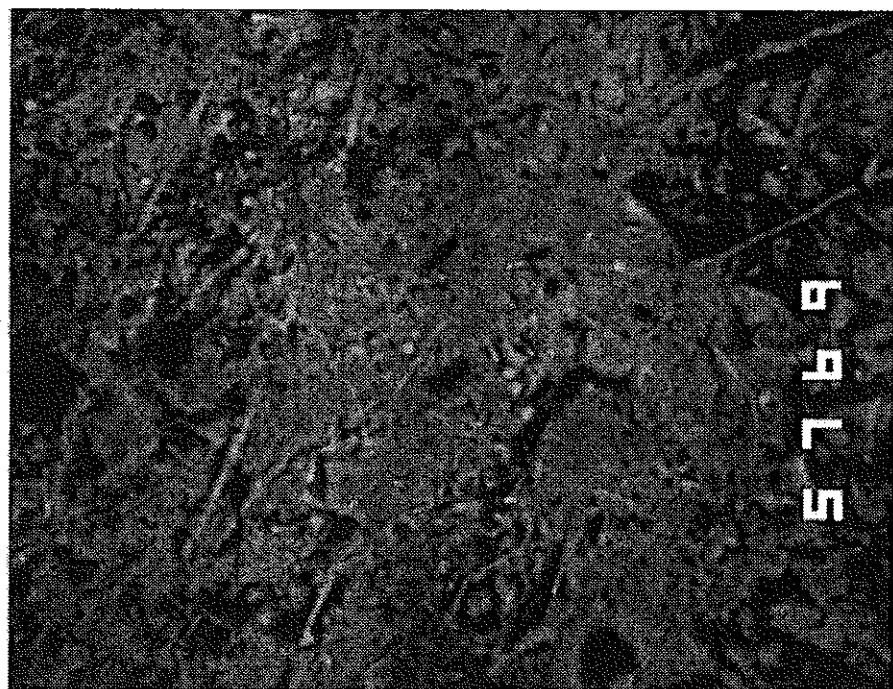


写真4-7 HEPAフィルタ組成像（試料F-27-2;表層;1000倍）

5. まとめ

東海事業所アスファルト固化処理施設において、発生した火災・爆発事故における、セル換気系フィルタの被害状況調査を行った。調査は事故時に使用されていたもののうち、損傷あったとして交換されたプレフィルタ 27 枚、HEPA フィルタ 36 枚の計 63 枚について実施し、外観検査、放射能測定、煤の付着重量の推定及び SEM 観察を行った。これらの結果を以下にまとめる。

(1) 外観検査

プレフィルタはメディア及び脱落防止用金網が完全に脱落しており、メディアは煤によって真っ黒になっていた。外枠は煤の付着があるだけで、事故時に発生した破損はなかった。HEPA フィルタは火災時に煤が付着した以外に、爆発時に大きな損傷を受けており、枠の変形、メディア全体の抜け落ち、メディア配列のゆがみ等が発生していた。

(2) 放射能測定

HEPA フィルタの線量当量率及び、メディアの表面汚染密度の測定を行った。1段目の HEPA フィルタについては線量当量率及び表面汚染密度はそれぞれ約 $70\mu\text{Sv}/\text{h}$ 、約 $200\text{Bq}/\text{cm}^2$ であった。また2段目はサンプルによりばらつきが大きく、1段目と同程度のものと、1桁低い値を示すものとがあった。フィルタの深さ方向への放射性核種の付着分布を調べた結果、ほぼ均等に付着しており、局所的な付着は認められなかった。

(3) 煤の付着重量

HEPA フィルタに付着した煤の重量を、HEPA フィルタのメディアの表面汚染密度と、アスファルト固化処理施設内で採取された煤の単位重量当たりの放射能を用いて推定した。その結果1段目の HEPA フィルタで 200~400g 程度の付着量であると求まった。この結果は、フィルタ閉塞が発生するまでに要する煤煙付着量の、これまでに報告されている値と一致する結果であった。

(4) SEM 観察結果

HEPA フィルタのメディアを採取して SEM 観察を行った。付着物は粒子状のものが多く、フィルタ纖維を付着物中に取り込んでいる物は少ない。付着量を比較すると、表層で最も多く、ついで裏層に多い。中間層ではわずかに見られる程度である。中間層に粒子が非常に少ないとから、粒子はほとんどフィルタ表面で捕獲されたと考えられる。また、SEM 観察及び組成像でもフィルタに水滴の付着した痕跡、つまり粒子が水滴を避けて付着したと考えられるような片寄りは見られなかったことから、水噴霧によって目詰まりが起きた可能性は低いと言える。

参考文献

- (1) 原子力工業編集部編：原子力施設における空調設備、原子力工業、33(2), 13 (1987).
- (2) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (I), DOP エアロゾル捕集性能, 原子力学会誌, 27(7), 626(1985).
- (3) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (II), ダスト負荷試験, 原子力学会誌, 27(12), 1156(1985).
- (4) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (III), 高温負荷, 原子力学会誌, 28(1), 90 (1986).
- (5) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (IV), 多湿試験, 原子力学会誌, 28(6), 551 (1986).
- (6) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (V), 衝撃波試験, 原子力学会誌, 29(3), 244 (1987).
- (7) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (VI), 振動試験, 原子力学会誌, 30(3), 257 (1988).
- (8) 尾崎誠, 金川昭 : 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (VII), 圧力変化試験, 原子力学会誌, 30(4), 365 (1988).
- (9) (社)日本空気清浄協会 核燃料施設フィルタ専門委員会 : 核燃料施設用高性能エアフィルタの安全性に関する研究, 空気清浄, 18(3,4), 1(1979).
- (10) G. Nishio, et al., : Safety demonstration tests of hypothetical explosive burning in the cell and air ventilation system in a nuclear fuel reprocessing plant, 95,325(1991).
- (11) A. R. Briand, et al., : Analysis and consequences of fire inside the ventilation ducts of a nuclear facility, 1989 ASHRHE annual meeting, 878(1989).
- (12) N. J. Alvares, et al., : Fire protection countermeasures for containment ventilation system, proc. 16th DOE Nuclear air cleaning conference 1213(1981).
- (13) D. L. Fenton, et al., : Investigation of high-efficiency particulate air filter plugging by combustion aerosols, Los Alamos National Laboratory NEREG/CR-4264(LA-10436-MS), (1985).
- (14) 東海再処理施設アスファルト固化処理施設における火災爆発事故調査委員会第5回会合資料 [事業団作成] PNC TN8410 97-182 (1997).
- (15) 東海再処理施設アスファルト固化処理施設における火災爆発事故調査委員会第7回会合資料 [事業団作成] PNC TN8410 97-184 (1997).