



2. 作業環境の監視に係わる技術小論

(6) 高性能エアフィルタ性能評価技術の開発

小林 博英 吉田 健一 藤田 元一
東海事業所安全管理部

資料番号：81-15

2. Development of Technology on Radiation Monitoring
of Working Environment
(6) Development of Evaluation Techniques for HEPA
Filters Performance

Hirohide Kobayashi Kenichi Yoshida Motokazu Fujita
(Health and Safety Division, Tokai Works)

排気設備の健全性を解析・評価するため、高性能エアフィルタのサブミクロン粒子を対象とした粒径別捕集特性試験が実施される。フィルタ製造時には液滴粒子であるDOP (Diocetyl Phthalate)による試験が実施されるが、固体粒子のNaClおよび液滴粒子のDOS (Diocetyl Sebacate)の基礎特性を調査し、これら粒子によっても性能試験が可能であることを確認した。また、高性能エアフィルタの包装時において、フィルタのピンホールやフィルタ取り付け不良等による漏れの有無を調査するための現場試験装置を開発した。

1. はじめに

核燃料物質使用施設等における排気設備は、施設内放射性物質の閉じ込めにおいて重要な役割を果たしている。動燃事業団においても、プルトニウム等の放射性物質取扱量の増加とともに排気設備の健全性を維持管理していくことがますます要求されるようになってきた。

排気設備は、施設内においてグローブボックス排気系、フード排気系、工程系等の系統ごとに設けられており、主要排気設備のフィルタユニットシステムには、高性能エアフィルタが使用されている。

高性能エアフィルタは、製造時においてJIS Z 4812に基づき、粒径 $0.3\mu\text{m}$ DOP(Diocetyl Phthalate)粒子等を用いて性能評価が行われ、捕集効率99.97%以上を保证している。

さらに、排気設備の健全性について、総合的に解析・評価を行うためには、粒径別の捕集特性についても把握しておくことが必要となる。

また、高性能エアフィルタの包装時においてフィルタのピンホールやフィルタの取り付け不良等による漏れの有無について現場試験を行い規定の総合捕集効率が維持されていることを確認することは、安

全性および信頼性を高めていく上で重要である。このような状況において、平成2年に日本空気清浄協会よりわが国における現場試験の精度向上と統一を目的とした現場試験法に関する指針¹⁾が出された。

動燃事業団においても、高性能エアフィルタ現場試験の適用を図るため、技術開発を進めてきたところであり、本稿ではこれらの概要を示す。

2. 開発試験工程

フィルタ性能評価技術の開発は、昭和63年度～平成4年度にわたって実施していくこととしており、フィルタ性能試験と現場試験法の確立の2項目に大別し進めている。

フィルタ性能試験については、昭和62年度～平成2年度までにフィルタ性能試験装置、粒子測定装置、粒子発生装置を整備し、平成元年度～平成3年度に高性能エアフィルタの性能試験および解析・評価を実施してきた。

現場試験法の確立では、平成元年度～平成3年度に排気設備基礎試験装置、現場試験装置の整備を進めており、平成4年度に排気設備基礎試験、現場模擬試験を実施し、解析・評価していくことを予定し

ている。

3. 実施内容

3.1 フィルタ性能試験に係わる装置の整備

3.1.1 粒子発生装置

粒子発生装置には、発生するエアロゾルの種類、発生量および粒径分布等、用途に応じた各種のものが、装置の選定上の留意点としては、粒径変動、濃度変動が少なく安定性が良いことである。

一般的には、単分散エアロゾルを発生するものとしてSinclair-Lamer型発生装置、多分散エアロゾルを発生するものとしてラスキンノズルを使用した噴霧式粒子発生器等が知られている。本フィルタ性能試験では、DOPおよびDOS (Dioctyl Sebacate)等の液滴粒子、NaCl等の固体粒子を用いて試験を行うことから、噴霧式粒子発生器および蒸発凝縮式粒子発生装置を整備した。噴霧式粒子発生器は、ラスキンノズル1本を有しており、エアロゾル発生量の調整は、任意作動圧力の設定とラスキンノズルの種類(孔径および孔数)を換えることによって行える。孔径: 1.0mmφ、孔数: 1個のラスキンノズルを使用した場合、作動圧力1.4kg/cm² (20psi)において発生量は、 1.2×10^{12} 個/min、粒径分布は、個数中央径(CMD) 0.28μm、幾何標準偏差(σ_g) 1.6が得られている。一方、蒸発凝縮発生装置は、電気炉(キャリアガス: N₂)を用い、NaCl試料を溶解して蒸発させ、冷却器を通して凝縮させることによりエアロゾルを発生させるものである。

本装置では、発生量 3×10^{11} 個/min、粒径分布は、幾何平均径(dg) 0.074μm、 σ_g 2.1という結果が得られた。

3.1.2 粒子測定装置

フィルタ性能試験に一般的に用いられている粒子濃度測定器としては、粒径測定は行えないが機器の安定性、操作性が良いDOP測定用フォトメータ、0.1μm以上の粒径別濃度が測定でき検出感度の高いレーザーパーティクルカウンタ(Laser Particle Counter 以下LPCという)、サブミクロン領域の粒子を感度良く計数する凝縮核測定器等が知られている。

フィルタ性能評価技術の開発では、高性能エアフィルタの0.1μm前後の粒径を評価対象としていることから、粒子測定装置の整備は粒径0.01~0.5μmの測定範囲について実施した。

粒径0.1~0.5μmの粒子測定においては、LPCと波高分析器(以下PHAという)を組み合わせたことにより0.01μmステップで粒子濃度が測定できる

LPC・PHAのシステムを開発し整備した。

粒径0.1μm以下の粒子測定は、静電式エアロゾル分級器(Differential Mobility Analyzer 以下DMAという)、凝縮核測定器(Condensation Nuclei Counter 以下CNCという)を組合せ、DMAの流量設定条件をクリーンエア流量20ℓ/min、排気流量20ℓ/min、エアロゾル流量3ℓ/min、サンプル流量3ℓ/minの時、最大測定濃度 1.24×10^5 個/ℓ、粒径0.01~0.19μmを0.01μmステップで測定できるDMA・CNCシステムを整備した。さらに、LPC・PHAおよびDMA・CNCによる測定の自動化を図るとともに測定データの処理を行うデータ処理装置を整備した。

3.1.3 フィルタ性能試験装置

フィルタ性能試験装置は、一般的に使用されている試験装置の調査・検討を行い、以下の装置を設計製作した。

フィルタ性能試験装置は、フィルタ寸法203W×203H×150Dmmの試験用エアフィルタの圧力損失および捕集性能を測定するための装置であり、空気前処理部、エアロゾル採取部、微差圧計、風量測定・調整部、操作盤等から構成されている。図-1に外観図を示す。本装置は、風量0.3~3.0ℓ/minの範囲において任意の試験風量に設定でき、エアロゾルに対する捕集特性、試験体にエアロゾルが負荷された時の負荷特性、さらに2段エアフィルタの総合捕集特性等の試験を行うことができる。

装置の試験ダクトは、試験ダクト(I)、試験ダクト(II)の2系統からなり、試験粒子が異なる場合等に対応できるようになっている。本装置は、空気前処理部にULPAフィルタを使用しており、試験用空気をきわめて清浄度の高い状態に保つことができる。

風量測定・調整部は、超音波流量計、排風機、インバータにより構成され、超音波流量計の測定信号をインバータにフィードバックし、排風機の回転を制御するようにし、任意の風量設定を自動的に行うことができる。このため、エアフィルタの負荷試験の際に試験体の差圧が上昇しても、試験風量は一定になる。

3.2 現場試験装置に係わる装置の整備

3.2.1 排気設備基礎試験装置

(1) 密封交換型試験用ユニット

排気設備の総合捕集性能は、高性能エアフィルタの捕集性能だけでなく、フィルタ装着時のガスケットの締付け圧力、フィルタハウジング内のバイパスリーク等によっても大きく左右される。このことか

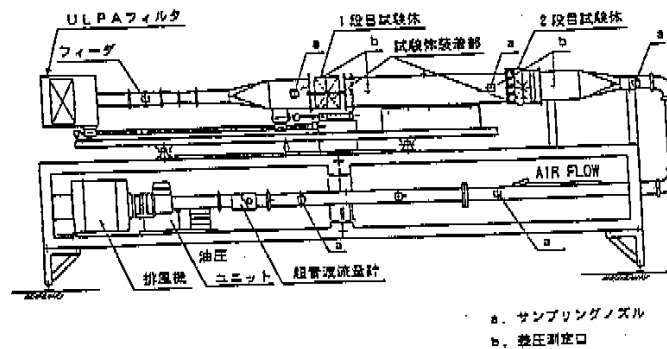


図-1 フィルタ性能試験装置

らガスケットの締付け圧力とリークの関係についての基礎試験やハウジングのバイパスリークモデルによる基礎試験を行うため密封交換型試験用ユニットを設計・製作した。

本装置は、フィルタ性能試験装置の風量測定・調整部と組合せて使用するため、フィルタ性能試験装置の架台上に設置し、ハウジングの側面にはサンプリングノズル、フィルタ圧力損失測定口、リークモデル取付け口が設けられている。高性能エアフィルタのフランジへの固定は、空気圧シリンダで行い、締付け圧力を $0 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で任意に設定が行える。

3.2.2 現場試験装置の整備

排気設備の現場試験に関する規格はわが国にはな

く、代表的なものとしては、アメリカのANSI-N510があげられる。本規格では、多分散エアロゾルを使用し、フォトメータ等により測定評価を行っている。しかし、フォトメータは高性能エアフィルタ1段の性能評価については問題ないが、2段の総合捕集性能を評価する場合には検出感度が低く、評価が困難であった。

事業団の施設内排気設備には、2段高性能エアフィルタシステムが多く採用されており、検出感度の高いLPC等の開発状況を勧奨し、これらの装置を取り入れた現場試験装置を開発・整備した。現場試験装置の系統図を図-2に示す。

現場試験装置は、噴霧式大容量エアロゾル発生器およびエアロゾル測定器により構成されている。本発生器の設計にあたっては、DOP粒子だけでなく

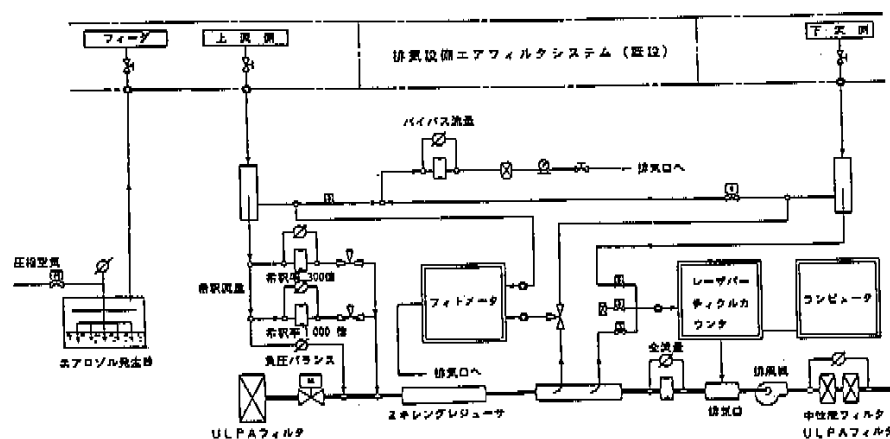


図-2 排気設備現場試験装置系統図

DOS粒子の発生についても考慮した。

最大発生量は 5×10^{13} 個/min、粒径分布は、CMD $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_g 1.5 \sim 2.0$ が得られている。

エアロゾル測定装置は、フォトメータ、LPC、希釈装置、パソコンにより構成されている。フォトメータ（前方散乱式）は、フィルタシステムの上流・下流における相対濃度を測定し、排気設備の捕集性能を評価する際に使用する。LPC（側方散乱式）は、上流・下流における粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 以上の5段階のエアロゾル個数濃度を測定し、排気設備の粒径別捕集性能を評価する際に使用する。希釈装置は、バルブ切り換えによって希釈倍率300倍、1000倍の設定ができ、LPCによる上流側（高濃度側）の測定に使用する。パソコンは、配管経路に設けられたスイッチングバルブの切り換え、LPC自動測定およびデータ処理を行い、現場での測定・評価が迅速に行える。

3.3 フィルタ性能試験

フィルタ性能試験は、高性能エアフィルタの健全性について解析・評価するための基礎データを得ることを目的とし、フィルタ圧力損失と粒径別捕集特性について実施した。

フィルタ圧力損失の測定は、試験体（フィルタ寸法：203W×203H×150Dmm、定格風量：1.5 m^3/min ）をフィルタ性能試験装置に固定し、定格風量において約30分のプリフローを行った後、風量0.3～3.0 m^3/min の範囲の圧力損失を微差圧計により測定した。

得られたデータから次式に示す圧力損失と風量の関係式を最小2乗法により求めた。

$$\Delta P = aQ^b$$

ここで、

ΔP ：フィルタ圧力損失(mmH₂O)

Q ：風量 (m^3/min)

a, b ：定数

圧力損失と風量の関係式において、定数 $a=14.38$ 、定数 $b=1.05$ が得られ、圧力損失は風量に対し直線的に増加することが示されている。測定結果の1例を図-3に示す。

捕集特性試験は、定格風量1.5 m^3/min の高性能エアフィルタに対し、試験風量を定格の50%、100%、150%、200%に設定し、各風量に対する性能試験を実施した。試験粒子には、液滴粒子としてDOPおよびDOS、固体粒子としてNaClを用いた。

試験は、噴霧式粒子発生器（発生粒子：DOP、DOS）および蒸発凝縮式粒子発生装置（発生粒子：NaCl）により粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 付近の多分散エア

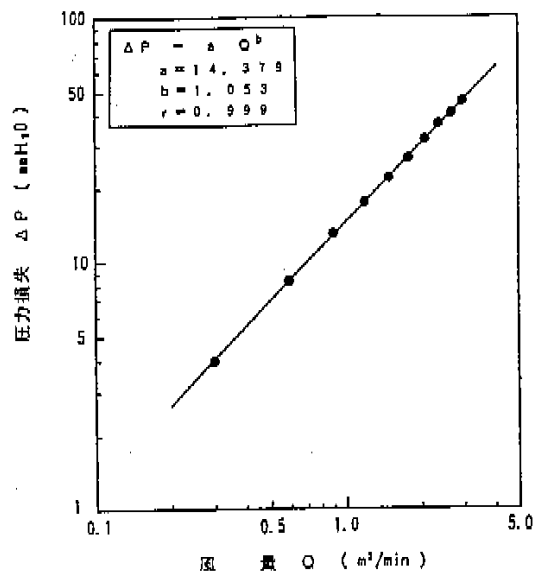


図-3 HEPAフィルタの圧力損失

ロゾルを発生させ、上流側を試験濃度に調整し、濃度が安定した後、試験体の上流・下流側の粒径別個数濃度をDMA・CNCおよびLPC・PHAで測定することにより行った。なお、DMA・CNCでは、 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の粒子、LPC・PHAでは、 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ の粒子を測定し、また、上流側は高濃度になることから300倍の希釈を行って測定した。

評価は、次式に示す除染係数DF (Decontamination Factor)を用いた。

$$DF = C1/C2$$

$$C1 = D \times C1'$$

$$D = Q/q$$

ここで、

DF：除染係数(—)

$C1$ ：上流側濃度(個/ℓ)

$C1'$ ： $C1$ 希釈後の上流側濃度(個/ℓ)

$C2$ ：下流側濃度(個/ℓ)

D ：希釈率(—)

Q ：希釈装置全流量(ℓ/min)

q ：希釈装置サンプリング流量(ℓ/min)

試験結果の1例を図-4および図-5に示す。図-4は、液滴粒子としてDOS粒子を用いた場合の結果であり、図-5は固体粒子としてNaCl粒子を用いた場合の結果である。いずれの粒子に対してもHEPAフィルタの粒径別捕集特性は、DFの最小値が存在する曲線となり、風量が低下するとDFは上昇し、DFの最小となる粒径は大きい方に移行している。

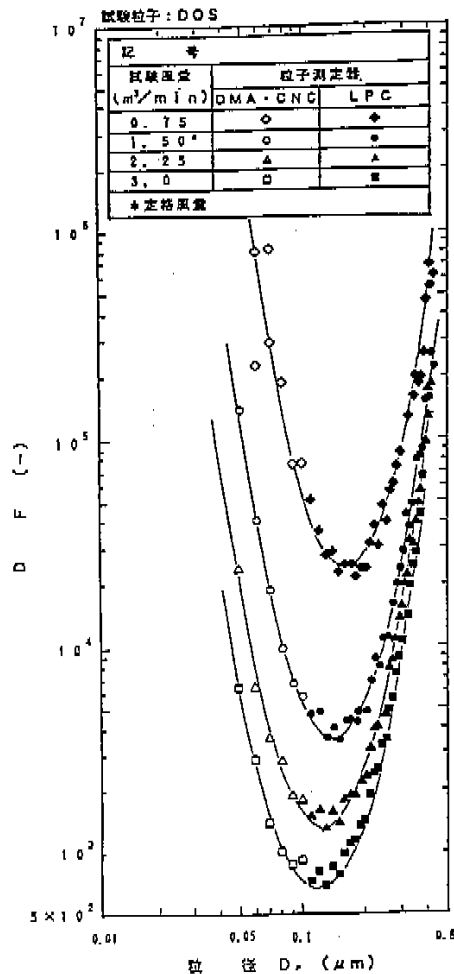


図-4 HEPAフィルタの粒径別捕集特性

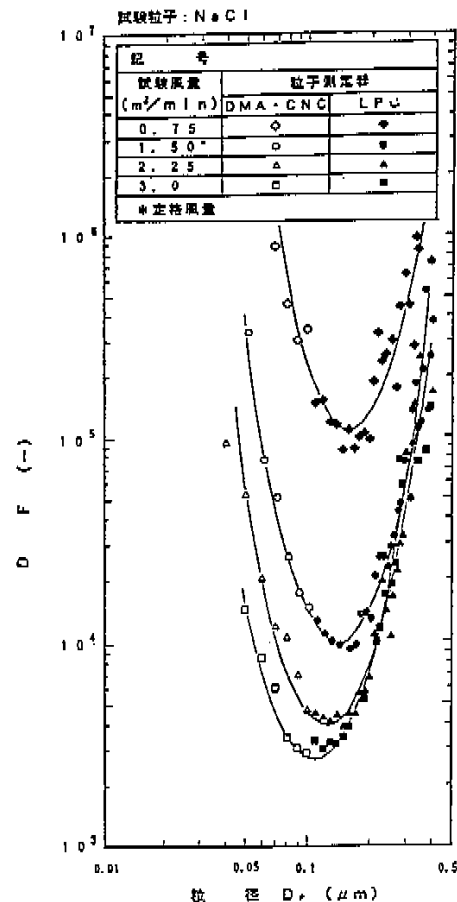


図-5 HEPAフィルタの粒径別捕集特性

最近のエアフィルタ捕集理論では、DFの最小となる粒径は $0.15\mu\text{m}$ との報告もみられ、本試験結果もほぼ同様となっている。捕集理論におけるDFは、粒径が $0.15\mu\text{m}$ より小さい範囲では、粒子の拡散効果により上昇し、 $0.15\mu\text{m}$ より大きい範囲では、粒子の慣性・さえぎり効果により上昇することが示されており、これらを確認することができた。

さらに、DFと粒径の関係について以下の近似式を求めた。

$$DF = \frac{1}{\text{EXP}[-a(\ln D_p + b)^2 - c]}$$

ここで、

DF : 除染係数(-)

D_p : 粒径 (μm)

a, b, c : 定数

各定数を求めた結果を表-1に示す。風量と定数

表-1 HEPAフィルタの捕集特性

試験風量 (m^3/min)	試験粒子		
	DOP	DOS	NaCl
0.75	a = 3.285 b = 1.909 c = 10.509 r = 0.9554	a = 3.640 b = 1.834 c = 10.116 r = 0.9523	a = 3.537 b = 1.905 c = 11.686 r = 0.9536
1.50 (定格風量)	a = 2.929 b = 2.037 c = 8.618 r = 0.9657	a = 3.599 b = 1.978 c = 8.177 r = 0.9957	a = 3.000 b = 2.047 c = 9.547 r = 0.9868
2.25	a = 3.250 b = 2.083 c = 7.503 r = 0.9930	a = 3.329 b = 2.078 c = 7.191 r = 0.9978	a = 2.955 b = 2.047 c = 8.773 r = 0.9852
3.00	a = 3.087 b = 2.152 c = 6.764 r = 0.9966	a = 3.244 b = 2.140 c = 6.493 r = 0.9981	a = 2.852 b = 2.209 c = 8.089 r = 0.9670

粒径別DFの近似式

$$DF = \frac{1}{\text{EXP}[-a(\ln D_p + b)^2 - c]}$$

DF: 除染係数(-), D_p : 粒径 (μm), a, b, c: 定数, r: 相関係数

の関係は、風量の増加とともに定数aは漸減するのに対し、定数bは漸増し、また、定数cは大きく低下する傾向がみられる。

試験粒子の違いによる変化をみた場合、定数a、bには大きな差異がみられないものの、定数cについては、DOPとDOSはほぼ同様であるのに対し、NaClは、DOPより11～20%高くなることを示している。

4. 今後の実施計画

フィルタ性能試験では、粒子発生装置の整備において蒸発凝縮式粒子発生装置によるNaCl発生試験を行ってきた。本試験結果を踏まえ、発生試料にレーザーを照射して溶融することにより、1500℃付近の高融点金属粒子についても発生が行えるレーザー微小粒子発生装置を設計・製作している。今

後、本発生装置の粒子発生条件、粒子発生量および粒径分布等に関する基礎データを得るためのエアロゾル発生試験を予定している。さらに、フィルタ性能試験への適用についても検討を行っていく。

また、排気設備基礎試験装置による代表性の良いサンプリング方法、エアフィルタ装着時のガスケット締付け圧力とリークの関係等について把握するための基礎試験や現場試験装置による排気設備現場模擬試験を実施し、試験結果の総合的な解析・評価を行っていくことを予定している。

参考文献

- 1) 社団法人日本空気清浄協会高性能エアフィルタ現場試験法専門委員会：
「核燃料施設における高性能エアフィルタの現場試験法に関する指
針JACA No.23」(1989)