研究論文

HEPA フィルタの捕集効率と除染係数

山田裕司^{*1}, 宮本勝宏^{*1}, 小泉 彰^{*1}

(1986 年 7 月 2 日受理)

(1986 年 8 月 16 日再受理)

Collection Efficiency and Decontamination Factor of HEPA Filter

Yuji YAMADA,^{*1} Katsuhiko MIYAMOTO^{*1} and Akira Koizumi^{*1}

It is very important in a nuclear air cleaning system that HEPA (High Efficiency Particulate Air) filter is for reduction of releasing amounts of airborne radioactive particles. HEPA filter, by definition, has a minimum collection efficiency of 99.97% for $0.3\ \mu\text{m}$ particles. However, *DF* (Decontamination Factor), which is necessary for safety management, can not be directly derived from the efficiency. And the current standard defined for $0.3\ \mu\text{m}$ particles has no scientific justification, because it has been found that the most penetrating particle size through HEPA filter is not always $0.3\ \mu\text{m}$.

In the present paper, a numerical experiment was made in order to estimate a relationship between *DF* and the efficiency. And new standard, in which the minimum *DF* is able to be easily obtained, was proposed. In the multistage filtration system, it was found that lower values of *DF* was possible to be experimentally indicated in the second and the third stages, even if the collection performance of the each filter is the same.

KEY WORD: decontamination factor, collection efficiency, HEPA filter, *DF*, the most penetrating particle size, numerical experiment, multistage filtration

I はじめに

原子力発電所をはじめとして、放射性物質を扱う施設においては、放射線安全管理のため、その排気・排水には数々の放射性物質排出防止策が採られている。そのなかで、排気エアフィルタは排気処理設備の一部としてきわめて重要な役割を果たしている。それに関わらず、その排気エアフィルタの性能の評価については十分に検討されていない。ただしここでいうフィルタの性能とはエアロゾル粒子に対する捕集性能を指す。原子力分野においては、HEPA(High Efficiency Particulate Air)フィル

タと呼ばれる高性能エアフィルタが数多く使用されている。この HEPA フィルタの粒子捕集性能基準は、 $0.3\ \mu\text{m}$ サイズのエアロゾル粒子に対して 99.97% 以上の捕集効率を有することである^{1,2)}。この基準数値自身の是非はともかく、少なくとも粒子捕集性能に関してはこれだけの評価基準でもって成立している HEPA フィルタから、放射線安全管理上必要な除染係数 *DF* に関する情報が得られるであろうか。捕集効率が 99.97% 以上であるから、フィルタを通過する割合は 0.03% 以下、したがって、*DF* は $1/(0.03 \times 10^{-2}) = 3.3 \times 10^3$ 以上と短絡的に考えてはいないか。実は、このような考え方には明らかな誤りがある。

なぜなら、まず第 1 に、HEPA フィルタの捕集効率が 99.97% 以上というのは、 $0.3\ \mu\text{m}$ サイズの粒子に対する効率であって、その他のサイズの粒子に対する効率は

^{*1} 放射線医学総合研究所内部被ばく研究部; 千葉市六川 4-9-1 (〒260)

Division of Comparative Radiotoxicology, National Institute of Radiological Sciences; 9-1, Anagawa 4-chome, Chiba 260, Japan.

不明である。もし、仮に効率が最小となる粒子サイズが $0.3 \mu\text{m}$ であるならば、まだいくらか救われるのであるが。この点については、この数年来の研究により、捕集効率が最小となる粒子径（以下、最透過粒子径と呼ぶ）は、 $0.3 \mu\text{m}$ ではなく、これより小さい $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 付近にあることがわかってきた³⁻⁶⁾。しかも、そのときの効率は、 $0.3 \mu\text{m}$ サイズ時に比べ数倍から 10 倍も低下することもわかってきた⁴⁻⁶⁾。第 2 に、このとき、何を基準に粒度分布を考えるのか問題である。通常、フィルタの捕集効率は相対濃度、あるいは、個数基準で評価されるのに対し、原子力分野における除染係数 DF は、あくまで放射能基準であるということである。最後に、決定的な誤りとして、フィルタの捕集効率は基本的にはフィルタ固有に決まるが、除染係数 DF は、捕集対象であるエアロゾル粒子の性状に大きく依存し、フィルタの捕集効率とは 1 対 1 には対応しないことである。

本論文では、この様に複雑な関係にあるフィルタの捕集効率と除染係数 DF とを統一的に解釈し、フィルタの性能を保健物理的に評価する。また、フィルタを 2 段、あるいは、3 段に接続した、いわゆる多段フィルタシステムの性能についてもあわせて考える。

II 評価方法

フィルタの除染係数 DF の評価は、以下に示すような数値計算によるシミュレーションで行う。

1. シミュレーションの考え方

フィルタの透過率関数が $P(d_p)$ で与えられるようなフィルタを考える。ただし、 d_p はエアロゾル粒子径を示す。このフィルタを用いて、粒度分布関数が $f(d_p)$ で与えられるエアロゾル粒子を濾過処理したとき、エアロゾル粒度分布関数が変化し $g(d_p)$ になったとする。このときの 3 者の関係を式で表すと、

$$g(d_p) = f(d_p) \cdot P(d_p) \quad (1)$$

となる。

ところで、フィルタの除染係数 DF とは、フィルタで処理される前後の放射性エアロゾルの放射エネルギーの除去比で定義される。

つまり、

$$DF = \frac{\int_0^\infty F(d_p) \cdot d(d_p)}{\int_0^\infty G(d_p) \cdot d(d_p)} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 $F(d_p)$ はフィルタ上流側における放射性エアロゾルの放射能基準粒度分布関数、 $G(d_p)$ はフィルタ下流側における分布関数である。

ところが、粒度分布関数を放射能基準で求めることは

容易ではない。しかも、そのときの粒子径分解能は、他の基準、たとえば、個数基準の場合に比べきわめて劣る。しかし、それよりも重要なことは、エアロゾル粒子のフィルタ透過現象は放射能ではなく、エアロゾル粒子としての性状、とくに、個々の粒子の幾何学的な大きさに依存することである。つまり、フィルタの透過率を扱うときには、まず、個数基準で考えなければならない。そして、その後、放射能基準に換算し直す必要がある。

たとえば、個数基準から放射能基準への粒度分布関数を $C(d_p)$ とすると、

$$F(d_p) = C(d_p) \cdot f(d_p) \quad (3)$$

$$G(d_p) = C(d_p) \cdot g(d_p) \quad (4)$$

の換算式で両者は関係づけられる。(2) 式に、(3)、(4) 式を代入すると、

$$\begin{aligned} DF &= \frac{\int_0^\infty C(d_p) \cdot f(d_p) \cdot d(d_p)}{\int_0^\infty C(d_p) \cdot g(d_p) \cdot d(d_p)} \\ &= \frac{\int_0^\infty C(d_p) \cdot f(d_p) \cdot d(d_p)}{\int_0^\infty C(d_p) \cdot P(d_p) \cdot f(d_p) \cdot d(d_p)} \quad (5) \end{aligned}$$

ところで、これらの積分は、解析的に解くことができないので、数値積分を行った。具体的には、必要な精度が得られるまでキザミ幅を自動的に半分にしていく機能をもったシンプソン法による数値積分をマイクロコンピュータ (NEC, PC-9801) 上で行った。このときの計算実行上の積分範囲は $0.001 \sim 10 \mu\text{m}$ であり、この間を対数目盛で 80 等分 (粒子径 1 桁当たり 20 等分) に分割した。そして、おのおのの積分区間において、数値積分誤差が 0.01% 以下、あるいは、キザミ幅変更回数が 100 回以上に達するまで数値積分を繰り返した。

2. 被捕集エアロゾル粒子の粒子性状

捕集の対象となるエアロゾル粒子については、形状は球形、粒子密度は 1 g/cm^3 、また、粒度分布については対数正規分布を仮定した。

したがって、個数基準・表面積基準・体積基準 (質量基準) のいずれかにおける中央径と幾何標準偏差が与えられれば、各基準における分布は一義的に決まり、基準間で相互に粒度分布交換ができる。ただし、われわれが興味をもっている放射能基準に変換するためには、通常、ある仮定をおかなければならない。これは放射性エアロゾルの生成機構に起因することである。

放射性基準の粒度分布には、Fig. 1 に示すように大きく分けて三つのタイプが考えられる。まず、もっとも自然に考えられるのが第 1 のタイプである。これは、エア

Fig. 1 Three types of radioactive aerosol particles. ● : radioactive part, ○ : non-radioactive part.

ロゾル粒子自身がすべて、あるいは、一定の割合で放射性物質から成り立っている場合であり、このとき放射能基準の粒度分布は、質量（体積）基準の分布に等しい。第2のタイプとして、エアロゾル粒子の大きさに関わらず、必ず一定量の放射性物質を含んでいる場合がある。このとき放射能基準の粒度分布は、個数基準の分布に等しい。第3のタイプとして、放射性物質量がエアロゾル粒子の表面積に比例する場合がある。このときには、表面積基準の分布に等しくなる。これら三つのタイプに属さない放射性エアロゾルについては、粒度分布換算関数 $C(d_p)$ が与えられない限り、本評価方法では評価できない。

3. エアフィルタのエアロゾル粒子捕集性能

エアフィルタのエアロゾル粒子捕集性能の粒子径依存性は古くから実験的および理論的に研究されている。

レーザーエアロゾルスpektロメータ、あるいは、凝縮核測定器 (CNC) を用いて測定された最近の実験データ（粒子径別の透過率データ）を両対数グラフ上にプロットしてみると、その透過率対粒子径の曲線の形状がかなり放物線に近いことがわかる⁴⁻⁶⁾。また、理論的に推測した透過率曲線も、同様に放物線上であった⁶⁻⁹⁾。このようなことから、本論文では、数値計算を簡便にするため実験データを両対数グラフ上で放物線近似した。数値計算の基礎となった実験データは、核燃料施設フィルタ専門委員会（日本空気清浄協会(社)内設置委員会）によって測定された HEPA フィルタ (610×610×290 mm サイズ, 31 m³/min 処理風量用) のデータである⁴⁾。

III 結果および考察

最初に、この除染係数評価の基礎となった HEPA フィルタの特性を示す。実験データから求めた HEPA フィルタのエアロゾル粒子透過率近似曲線の方程式は、次式で与えられた。

$$Y = -8.00 \cdot (X + 0.872)^2 - 3.77 \quad (6)$$

$$X = \log(d_p) \quad (7)$$

$$Y = \log(P) \quad (8)$$

ただし、ここでエアロゾル粒子径 d_p は μm 単位、粒子透過率 P は無次元である。

Fig. 2 に透過率測定の実験データとその近似曲線を示す。この透過率近似曲線から最大透過率 $P_{\max}$ とそのときの粒子径、すなわち、最透過粒子径 MPPS (Maximum Penetrating Particle Size) とを求めると、それぞれ 1.68×10^{-4} , $0.134 \mu\text{m}$ であった。また、粒子径 $0.3 \mu\text{m}$ における粒子透過率は 1.78×10^{-5} , つまり捕集効率が 99.99822% であった。この値は、99.97% 以上という HEPA フィルタの性能基準値に比べ、10 倍以上、性能に余裕がある値である。通常、HEPA フィルタの捕集

Fig. 2 Penetration of aerosol particles through HEPA filter. ○ : experiment, — : fitted parabolic curve.

Fig. 3 DF values of HEPA filter for aerosol particles with different size distributions.

性能は、基準値よりも 10 倍程度性能に余裕をもって製作されていることが多いが、なかには、基準値ギリギリの性能しかないフィルタもあるので注意を払う必要がある。

次に、これだけの性能を有する HEPA フィルタに対して、各種粒度分布をもつ放射性エアロゾル粒子を想定し、そのときのフィルタの除染係数 DF を数値計算でシミュレートした。その結果を Fig. 3 に示す。グラフの横軸は任意基準の中央径 MD (Median Diameter) であるので、模擬する放射性エアロゾル粒子の性状に応じて読み換える必要がある。たとえば、質量比例タイプの放射性エアロゾルであるならば、 MD を質量基準中央径 MMD (Mass Median Diameter) と、個数比例タイプであるならば、個数基準中央径 CMD (Count Median Diameter) と読み換える。

フィルタの除染係数 DF は、捕集対象であるエアロゾル粒子の性状によって大きく変化することが Fig. 3 からわかる。これはきわめて当然な結果であるが、このことが意味することは保健物理的にも非常に重要なことである。つまり、フィルタの捕集性能が一定であったとしても、そこで期待できる除染係数 DF は一律に決まらないということである。ただし、唯一明確にいえることが

ある。それは、除染係数 DF の最小値だけはフィルタに固有であることである。除染係数 DF の最小値は、フィルタの透過率に最大値があるが故に存在し、その値はちょうど最大透過率 P_{max} の逆数に等しい。また、除染係数 DF が最小となる粒子径は、最透過粒子径 $MPPS$ に等しい。本 HEPA フィルタの場合、最大透過率 P_{max} は 1.68×10^{-4} であるので、除染係数 DF の最小値 DF_{min} は、 $1/(1.68 \times 10^{-4}) = 5.95 \times 10^3$ となった。

さらに、Fig. 3 からは次のことがわかる。捕集対象エアロゾル粒子の中央径 MD が最透過粒子径 $MPPS$ から離れるほど DF は大きくなる。また、幾何標準偏差 σ_g が大きいほど DF の中央径依存性は弱くなる。

通常、原子力施設の排気処理設備で捕集対象となるエアロゾル粒子は、大きさが不揃いな多分散粒子である。山本らの文献調査⁹⁾によれば、核燃料施設におけるブルトニウムエアロゾル粒子の幾何標準偏差 σ_g は、1.5~3 の範囲にほとんど入っている。このようなエアロゾル粒子に対して、本 HEPA フィルタでは 10^4 以上の DF が期待できることがこの Fig. 3 から読み取れる。

ところで、HEPA フィルタは製品出荷時に工場検査を行い、 $0.3 \mu m$ サイズのエアロゾル粒子に対して 99.97% 以上の捕集効率が必要されるが、本論文で基礎データとして採用した HEPA フィルタ（核燃料施設委員会によって調べられた HEPA フィルタ）の場合にはいかなる値が得られるであろうか。この性能検査をシミュレーションする。性能検査に使用する試験エアロゾル粒子は $0.3 \mu m$ サイズの単分散粒子 ($\sigma_g=1$) でなければならないが、実際には、単分散エアロゾル粒子発生上の困難さから、 $\sigma_g=1.2 \sim 1.5$ の多分散粒子（以下、この範囲の多分散粒子を準単分散粒子と呼ぶ）が使用されている。SALZMAN らによれば、単分散エアロゾルといわれるホット DOP (Diocetyl Phthalate) で、 $\sigma_g=1.35 \sim 1.45$ と報告されている¹⁰⁾。また、さらにエアロゾル粒子測定側も粒子径測定チャンネル幅が無限小ではなく、かなり大きい。しかも、測定器の種類によりその幅が異なる。ここでは、代表的な 4 種の測定器の各測定チャンネルについてシミュレーションした結果を Table 1, 2 に示す。

測定器の粒子径チャンネルに幅があるため、測定値はおおのこの粒子径範囲内で平均化されてしまい、値は一定にならない。試験エアロゾル粒子の幾何標準偏差 σ_g が 1.2 のときには、透過率 P の差が最大 2 倍にもなる。 $\sigma_g=1.5$ になると、その差は、さらに拡がり約 3 倍に達する。しかも、ほとんどの場合、フィルタの性能は過大に評価される方向にある。これをフィルタの性能が最低に

Table 1 Effects of size range of aerosol particle counter on penetration through HEPA filter for aerosol particles with CMD=0.3 μm and $\sigma_g=1.2$.

Counter	Size (μm)	E (%)	P ($=1-E/100$)	$1/P$	$1/P$ ratio
	MPPS	99.9832	1.68×10^{-4}	5.95×10^3	1
	0.3	99.99822	1.78×10^{-5}	5.62×10^4	9.45
A	0.27-0.42	99.99862	1.38×10^{-5}	7.20×10^4	12.1
B	0.28-0.32	99.99817	1.83×10^{-5}	5.45×10^4	9.16
C	0.3-0.4	99.999029	9.71×10^{-6}	1.03×10^5	17.3
D	0.3-0.5	99.999115	8.85×10^{-6}	1.13×10^5	19.0

MPPS : Maximum Penetrating Particle Size.

Table 2 Effects of size range of aerosol particle counter on penetration through HEPA filter for aerosol particles with CMD=0.3 μm and $\sigma_g=1.5$.

Counter	Size (μm)	E (%)	P ($=1-E/100$)	$1/P$	$1/P$ ratio
	MPPS	99.9832	1.68×10^{-4}	5.95×10^3	1
	0.3	99.99822	1.78×10^{-5}	5.62×10^4	9.45
A	0.27-0.42	99.99881	1.19×10^{-5}	8.35×10^4	14.0
B	0.28-0.32	99.99817	1.83×10^{-5}	5.45×10^4	9.16
C	0.3-0.4	99.999138	8.62×10^{-6}	1.16×10^5	19.5
D	0.3-0.5	99.999383	6.17×10^{-6}	1.62×10^5	27.2

なる最大透過率値と比較 (Table 1, 2 第6列欄) すると 19~27 倍も過大に評価されることになる。この最大透過率値は、フィルタの除染係数 DF の最小値の逆数であり、きわめて重要な値である。もし仮に、試験エアロゾル粒子として、0.3 μm 粒子を使用する現行の HEPA フィルタの性能検査の方法を、一部手直しできるならば、保健物理学上大変有用な除染係数 DF に関する情報を得ることができる。具体的には、試験エアロゾル粒子の基準粒子径が 0.3 μm であったのを、最透過粒子径に置き換えることである。最透過粒子径はフィルタにより変動する値であり、基準値として不適切であるならば、たとえば、0.15 μm と決めることも有効である。この 0.15 μm という値の根拠は、HEPA フィルタの最透過粒子径として現時点では最も確からしいからである。事実、本論文で採用した実験データでは 0.134 μm であり、この 0.15 μm にかかなり近い。また、エアロゾル測定器の最小限界は、汎用タイプでも 0.1 μm 近辺まで測定可能であり、この点でも問題ない。

では、次に、この 0.15 μm を試験エアロゾル粒子の基準粒子径に選んだ場合の、性能検査結果と除染係数 DF との関係を論じる。Table 3, 4 に、そのシミュレーション計算結果をまとめる。Table 3, 4 の第6列欄にある

ように、いずれの測定器を使用しても、 $1/P$ 比は1にきわめて近く、最も差が大きい場合でも1割程度の差しかない。また、試験エアロゾル粒子の幾何標準偏差 σ_g がほぼ単分散といえる1.2であっても、分散がやや大きい1.5であっても、その結果はほとんど変わらない。つまり、0.15 μm サイズのエアロゾル粒子で性能検査を行うならば、その時の捕集効率値から、ただだか1割程度の誤差でもって、そのフィルタの除染係数 DF の最小値を知ることができる。

次に、多段フィルタシステムの場合を考える。フィルタを直列に2段、あるいは、3段接続したとき、後段のフィルタほどその捕集性能が低下するという意見が多数ある¹¹⁻¹⁵⁾。しかしながら、HEPA フィルタの主要捕集機構が拡散・さえぎり・慣性であるとする現在のフィルタ濾過理論から考えると、そのような低下現象はまったく説明できない。ただし、見掛け上、後段のフィルタほどその捕集性能が低下するような実験データが得られる可能性があることは、以前にも示した¹⁶⁾。本論文では、HEPA フィルタ粒子透過率の実験データを基に、より現実に近いシミュレーションで再評価した。ただし、フィルタの捕集性能 (粒子径別捕集効率) は各段とも同一であるとして計算した。多段フィルタシステムの各段を

Table 3 Effects of size range of aerosol particle counter on penetration through HEPA filter for aerosol particles with CMD=0.15 μm and $\sigma_g=1.2$.

Counter	Size (μm)	E (%)	P ($=1-E/100$)	$1/P$	$1/P$ ratio
A	MPPS	99.9832	1.68×10^{-4}	5.95×10^3	1
	0.15	99.99839	1.61×10^{-4}	6.21×10^3	1.04
	0.12-0.17	99.99840	1.60×10^{-4}	6.24×10^3	1.05
	0.146-0.153	99.99838	1.62×10^{-4}	6.19×10^3	1.04
B					
C	0.1-0.2	99.99849	1.51×10^{-4}	6.61×10^3	1.11
D	0.11-0.15	99.99836	1.64×10^{-4}	6.09×10^3	1.02

Table 4 Effects of size range of aerosol particle counter on penetration through HEPA filter for aerosol particles with CMD=0.15 μm and $\sigma_g=1.5$.

Counter	Size (μm)	E (%)	P ($=1-E/100$)	$1/P$	$1/P$ ratio
A	MPPS	99.9832	1.68×10^{-4}	5.95×10^3	1
	0.15	99.99839	1.61×10^{-4}	6.21×10^3	1.04
	0.12-0.17	99.99839	1.61×10^{-4}	6.23×10^3	1.05
	0.146-0.153	99.99838	1.62×10^{-4}	6.19×10^3	1.04
B					
C	0.1-0.2	99.99853	1.47×10^{-4}	6.78×10^3	1.14
D	0.11-0.15	99.99837	1.63×10^{-4}	6.13×10^3	1.03

通過する前後のエアロゾル粒子の粒度分布の変化の様子の1例を Fig. 4 に示す。フィルタを通過するごとに、粒度分布のピークは最透過粒子径 MPPS に近づき、分布の広がり小さくなる事がわかる。このときの各段の除染係数 DF をまとめる。結果は Fig. 5 に示すように、フィルタの捕集効率は各段でまったく変わらないという前提条件でシミュレーションしても、各段の除染係数 DF は変化してしまう。

しかも、後段のフィルタほど DF が低下する傾向がある。また、この傾向は実験に使用するエアロゾル粒子の中央径 MD, 幾何標準偏差 σ_g に大きく依存する。つまり、そのフィルタの最透過粒子径 MPPS に近い中央径 MD をもち、しかも、比較的幾何標準偏差 σ_g が大きいエアロゾル粒子を実験に使用した場合には、後段のフィルタであっても DF はほとんど低下しないという結果が得られる。しかし、その逆に、MPPS から遠く離れた MD で、 σ_g も小さい場合には、後段のフィルタほど DF は低下するという結果が得られてしまう。これらは、実験に使用するエアロゾル粒子の MD および σ_g だけの影響を調べた結果であるが、実際には、エアロゾル粒子を測定する測定器側にも問題がある。つまり、測定器の粒子径チャンネルに幅があるためで、これにより DF の変化の仕方がよりいっそう複雑になっている。

多段フィルタシステムの除染係数 DF の評価において、きわめて重要なことがある。多段フィルタシステムになると、後段のフィルタほどその DF が低下すると上で述べてきた。たとえば、具体的な数値で示すと、MD = 0.3 μm , $\sigma_g=1.5$ のとき、1 段目フィルタの $DF=2.48 \times 10^4$, 2 段目フィルタの $DF=1.01 \times 10^4$, 3 段目フィルタの $DF=8.06 \times 10^3$ (Fig. 5 参照) となるが、これは1 段目フィルタの DF に対して相対的に低下するのであって、フィルタ自身の性能が低下するのではない。最後段のフィルタといえども、フィルタ固有の値である DF の最小値 5.95×10^3 を決して下回らない。つまり、 DF の最小値が、 5.95×10^3 であるフィルタを2 段直列に接続すれば、2 段フィルタの DF の最小値は、 $(5.95 \times 10^3) \times (5.95 \times 10^3) = 3.54 \times 10^7$, 3 段直列に接続すれば、 $(5.95 \times 10^3)^3 = 2.11 \times 10^{11}$ となる。フィルタが健全である限り、いかなる粒度分布をもつエアロゾル粒子に対しても、少なくともこれだけの DF が期待できる。

IV ま と め

フィルタの捕集効率と除染係数 DF との関係を数値シミュレーションにより調べた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) HEPA フィルタに課せられている性能基準 (0.3

Fig. 4 Size distributions of aerosol particles in the upstream and the downstream of the successive HEPA filters.

μm 粒子に対して、99.97% 以上の捕集効率) に対して、現行の性能検査方法では、多くの場合、フィルタの性能が過大に評価されている。

2) 現行の性能検査方法では、保健物理学上、有用な放射能除染係数 DF に関する情報を直接得ることが困難である。

3) 上記 2 点の問題点は、試験エアロゾル粒子として、 $0.3 \mu\text{m}$ 粒子を使用する現行の性能検査方法の一部を手直しすることにより解決できる。

4) フィルタの除染係数 DF は、捕集対象であるエアロゾル粒子の性状により変化するが、 DF の最小値はフィルタ固有であり一定である。

5) 多段フィルタシステムにおいては、各段のフィルタの捕集性能 (粒子径別捕集効率) がまったく変わらなかったとしても、後段のフィルタほどその除染係数 DF が相対的に低下する。ただし、フィルタ固有の値である DF の最小値より小さくなることはない。

Fig. 5 DF values of HEPA filter in multistage filtration system for aerosol particles with $\sigma_g = 1.5$.

参 考 文 献

- 1) 放射性エアロゾル用高性能エアフィルタ, JIS Z 4812-1975 (1975).
- 2) C.A. BURCHSTED, A.B. FULLER and J.E. KAHN; Nuclear Air Cleaning Handbook, ERDA 76-21 (1976).
- 3) 山田裕司, 宮本勝宏, 森 貞次, 小泉 彰; $0.3 \mu\text{m}$ 以下の粒子に対するエアフィルタの粒子捕集性能, 保健物理, 17, 461 (1982).
- 4) 核燃料施設専門フィルタ委員会; 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試験研究, 空気清浄, 21, 1 (1983).
- 5) Y. YAMADA, K. MIYAMOTO, T. MORI and A. KOIZUMI; Penetration of submicron aerosols through high-efficiency air filters, Health Phys., 46, 543 (1984).
- 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 (I), DOP エアロゾルの捕集性能, 原子力誌, 27, 626 (1985).
- 7) A.A. KIRSH, I.B. STECHKINA and N.A. FUCHS; Efficiency of aerosol filters made of ultrafine polydisperse fibers, Aerosol Sci., 6, 119 (1975).

- 8) 山田裕司, 宮本勝宏, 森 貞次, 小泉 彰; 高性能エアフィルタのろ過理論について, 空気清浄, **21**, 37 (1984).
- 9) 山本英明, 浅野芳裕, 松井 浩; 核燃料施設におけるプルトニウムエアロゾルの粒径分布 (文献調査), 保健物理, **19**, 25 (1984).
- 10) G.C. SALZMAN, H.J. ETTINGER, M.I. TILLERY, L.D. WHEAT and W.K. GRACE; Potential application of a single particle aerosol spectrometer for monitoring aerosol size at the DOE filter test facilities, Proc. the 17th DOE Nuclear Air Cleaning Conference, p. 801 (1982).
- 11) B.C. FINNEY, R.E. BLANCO, R.C. DAHNMANN, F.G. KITTS and J.P. WITHERSPOON; Correlation of radioactive waste treatment costs and the environmental impact of waste effluents in the nuclear fuel cycle for use in establishing "as low as practicable" guides, Nuclear Fuel Reprocessing; ORNL-TM-4901 (1975).
- 12) M. GONZALES, J.C. ELDER, M.I. TILLERY and H.J. ETTINGER; Performance of multiple HEPA filters against plutonium aerosols, LA-6546 (1976).
- 13) 中村治人, 立川克浩; 核燃料使用施設の安全評価について, JAERI-memo 7087 (1977).
- 14) B.G. SCHUSTER and D.J. OSETEK; Tandem HEPA filter tests, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **39**, 144 (1978).
- 15) 核燃料施設専門フィルタ委員会; 核燃料施設用高性能エアフィルタの安全性に関する試験研究: 2段設置時の性能試験, 空気清浄, **19**, 1 (1982).
- 16) Y. YAMADA, K. MIYAMOTO, T. MORI and A. KOIZUMI; On the error due to the window width of particle size analyzer in the measurement of particle penetration through an air filter, *Hoken Butsuri*, **18**, 145 (1983).