819. 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (Ⅲ)

高温負荷

尾崎 誠*, 残間 徳吾*, 金川 昭**

(1985年 1月4日 受理)

Performance of HEPA Filters under Severe Conditions, (Ⅲ)

High Temperature Test

By Makoto OSAKI, Tokugo ZANMA and Akira KANAGAWA

Performance of high efficiency particulate air (HEPA) filters at temperatures from ambient to 240°C was measured to prove that HEPA filters kept up their regulated decontamination factor (DF) at elevated temperatures. The DF for NaCl aerosol was measured by using a laser particle spectrometer. Pressure drop of HEPA filters at elevated temperatures was also measured.

The DF increased at elevated temperatures. The DF at 200°C was an order of magnitude higher than that at ambient. The change of DF at elevated temperatures of various HEPA filters was effectively evaluated by using the ratio of single fiber collection efficiencies at ambient to those at elevated temperatures. Pressure drop of HEPA filters also increased at elevated temperatures. The pressure drop at 200°C was 1.3 times larger than that at ambient. The change of DF and pressure drop at elevated temperatures was explained by applying Kirsh's theory to elevated temperatures.

KEYWORDS: air filters, high temperature, decontamination factor, DOP aerosol, NaCl aerosol, pressure drop, Kirsh's theory, temperature dependence, performance, efficiency

I. 緒 言

原子力産業施設における放射性物質の閉じ込め設備として、最も重要な排気処理設備の中心をなす高性能エアフィルタは、平常時はもとより、その運転中に想定される各種の苛酷条件下においても所定の性能を確実に維持できるものでなければならない。本報は、各種苛酷条件の1つである高温負荷条件下の高性能エアフィルタの健全性実証に関するものである。

高性能エアフィルタの平常時の使用温度は常温であるが、これを高温にさらした場合、フィルタ構成要素の熱変形、性状変化等、高性能エアフィルタ自体の変化および高温下での空気の物性の変化による粒子捕集機構の変化から、粒子捕集性能はかなり変化するものと考えられる。

First⁽¹⁾ は、高温下においてNaCl エアロゾルに対するグロスの捕集性能を炎光法により測定し、熱変形に

よりフィルタにリークが発生することを報告している。Kornberg⁽²⁾は、繊維径 4~12 μm の繊維層を用いた実験により、高温下における拡散捕集機構の評価を行い、単一繊維捕集効率にはペクレ数により決まるという結果を得ている。現在行われている高性能エアフィルタの性能試験としての耐熱試験⁽³⁾⁽⁴⁾は、高温にさらしたフィルタが、冷却後においても一定の捕集性能を示すことを実証するものであり、高温下での捕集性能については触れていない。

本報では、実規模フィルタを用いて、これまでにほとんど得られていない高温下における捕集性能の粒径依存性、温度によるフィルタ差圧の変化を測定し、フィルタ捕集理論との対比を行い、さらに高温負荷前後の捕集性能を測定して高温下での捕集性能と合わせて、高性能エアフィルタの高温負荷に対する実験的検討を

* 大同特殊鋼(株) (Daido Steel Co., Ltd.)

** 名古屋大学工学部 (Fac. of Eng., Nagoya Univ.)

行なったので報告する。

II. 実験方法

1. 高温試験装置

Fig. 1に、高性能エアフィルタに高温試験空気を負荷して高温下での捕集性能を測定するための高温試験装置フローシートを示す。試験空気の加熱は電気ヒータにより行い、熱負荷を節約するため試験空気は循環して使用した。ただし、試験空気の劣化を防ぐため一部外気をHEPAフィルタを通して導入し、これに見合う循環空気を廃棄した。また、装置全体の温度を均一化するため保温をほどこした。高性能エアフィルタに高温空気を速やかに負荷できるよう、フィルタハウジング部にバイパスを設け、試験空気が所定の温度にな

るまでバイパス部を通して循環し、ダンパの切換えにより高性能エアフィルタに高温試験空気を負荷した。高温負荷前後の粒子除染係数(DF)を測定するために多分散DOPエアロゾルを、高温下における DF を測定するためにNaClエアロゾルを、混合室を介して試験空气中に導入した。

フィルタハウジングは縦型1列2段であり、実際の排気処理設備と同じ寸法、形状、幾何配置となるように製作した。試験フィルタの大きさは $610 \times 610 \times 292$ mmであり、ガスケットがあたる部分にはガスケット回りのリーク量が測定できるようテストグループを設けた。エアロゾルサンプリングポートは、試験フィルタ上流側はフィルタハウジング直前、下流側はフィルタハウジングからダクト径の10倍以上の下流に設けた。

Fig. 1 Flowsheet of test apparatus

2. NaCl エアロゾル発生装置

高温下における高性能エアフィルタの DF を測定するため、高温下において安定に存在できるエアロゾルとしてNaClエアロゾルを使用した。NaClエアロゾルの発生はNaCl水溶液をラスキンノズルによりアトマイズし、これを O_2 - C_2H_2 炎で加熱した空気にて乾燥させることで行なった。NaClエアロゾルの個数中位径は $0.1 \mu m$ 付近にあり、レーザスペクトロメータの1~7 Ch. (粒径 $0.1 \sim 0.2 \mu m$)におけるチャンネルごとの粒子濃度は、 $5,000$ 個/ cm^3 前後であった。質量濃度は $1.4 mg/m^3$ 程度であった。

3. エアロゾルの測定

DOPエアロゾルに対する DF を高温負荷前後に、NaClエアロゾルに対する DF を高温下においてレーザスペクトロメータ(米国PMS社製)により測定した。レーザスペクトロメータは、レーザ光を光源としたパーティクルカウンタであり、 $0.09 \sim 3 \mu m$ の粒径を32チャンネルに分けて測定できる。詳細は第I報⁽⁵⁾に述べ

た。高温下での DF を測定するには、レーザスペクトロメータの仕様上サンプルエアを $40^\circ C$ 以下に冷却する必要がある。サンプルエアの冷却は、高温のサンプルエアを内径8 mm、長さ1,200 mmの銅管を通し、銅管を介して自然放冷することにより行なった。系内に温度差がある場合、低温側へのエアロゾルの熱沈着が問題となるが、銅管中でのNaClエアロゾルの沈着量は、実測の結果サンプルエアが $200^\circ C$ の場合10%程度であり、粒子径、濃度によらなかった。 DF は、フィルタ上、下流エアロゾル濃度の比として表わすことから、熱沈着のデータへの影響は消去できることになる。

4. 試験フィルタ

試験に供した高性能エアフィルタは、動燃事業団の再処理仕様のものとし、Table 1にその仕様を示す。また、表には、一般のHEPAフィルタ⁽⁶⁾の仕様も合わせて示す。動燃再処理仕様のものは耐熱性、耐食性に重点が置かれている。動燃再処理仕様のフィルタは定

Table 1 Specifications of tested filters and JIS Z 4812 HEPA filters

	Tested filter (PNC)	HEPA filter (JIS Z 4812)
Size (mm)	610×610×292	610×610×292
Frame material	Steel	Plywood
Filter medium	Glass fiber paper	Glass fiber paper
Separators	Stainless steel	Al
Sealants	Silicon rubber	Polyurethane
Gasket material	Neoprene	Neoprene
Capacity (m³/h)	2,000	1,860
Resistance to air flow (mmAq)	≤30	≤25
DOP smoke penetration (%)	≤0.02	≤0.03
Resistance to heated air (°C)	200	~100
Resistance to pressure (mmAq)	250	250

格風量が2,000 m³/hであり、このことから試験風量は2,000 m³/hを標準とした。試験フィルタは3社から購入した。データには、メーカー別にA, B, Cと記した。Fig. 2に、各社フィルタのDOPエアロゾルに対する

Fig. 2 *DF* of HEPA filters for DOP aerosol at 25°C measured by laser particle spectrometer

平常使用条件時の*DF*測定例を示す。各粒径における*DF*はメーカーにより1桁前後の差があるが、フィルタを最も透過しやすい粒径、*DF*の粒径依存性については同じ傾向を示した。

5. 試験条件

高温試験条件は、標準として次のようにした。

試験風量 2,000 m³/h (体積流量一定)

試験温度 100~240°C

試験時間 2~12 h

試験風量は、動燃再処理仕様フィルタの定格風量であり、試験温度は最高使用温度前後とした。試験時間の最後の1 h目から高温下での*DF*測定を開始した。

Ⅲ. 試験結果

1. フィルタ差圧

フィルタ差圧(*PD*)は温度とともに変化し、温度一定条件下では加熱時間による差圧の変化はなかった。Fig. 3に、温度によるフィルタ差圧の変化を示す。差圧の変化は、25°Cにおける差圧との比として示してある。差圧は温度の上昇にはほぼ比例して上昇しており、直線近似で以下のように表わせた。

$$PD_T = PD_{25^\circ\text{C}}(1 + 0.0015(T - 25)) \quad (1)$$

ここで、 PD_T : $T^\circ\text{C}$ における差圧

$PD_{25^\circ\text{C}}$: 25°Cにおける差圧

Fig. 3 *PD* of HEPA filters due to temperatures

また、加熱冷却後においてもフィルタ差圧の測定を行なったが、高温負荷前の差圧からの変化は認められなかった。

2. 濾紙の性状

フィルタの*DF*は、第1に濾紙の特性により決まることから、高温負荷したフィルタの濾紙の特性の変化

として、坪量、厚さ、引張強度の変化を求めた。Table 2に坪量、厚さの、Fig. 4に引張強度の高温負荷による変化の測定例を示す。坪量、厚さ、引張強度とも高温負荷による影響は認められなかった。また、電顕による沱紙の観察においても、沱紙微細構造の変化は認められなかった。Table 2, Fig. 4はA社フィルタについて示したが、B, C社フィルタにおいても同様の結果が得られた。第II-1節の結果も合わせて、以上のことから、高温負荷によるフィルタの物理的な変化は十分に小さいものであることが示された。

Table 2 Change of basis weight and thickness of filter media due to heating

Filter No.	Test condition			Basis weight (g/m ²)	Thickness (mm)
	Temp. (°C)	Time (h)	Flow rate (m ³ /h)		
A2		Not heated		90.3	0.57
A3	150	4	2,000	84.1	0.56
A4	200	6	2,000	90.4	0.59
A5	200	12	2,000	89.2	0.58
A6	240	6	2,000	86.6	0.57

Fig. 4 Change of tensile strength of filter media due to heating

3. 高温下の DF

面速を一定として試験空気温度を上げ、NaCl エアロゾルに対する高性能エアフィルタの DF を測定した。Fig. 5 に、常温における DF が同一のフィルタについて測定した各温度での DF を示す。DF は温度の上昇とともに高くなり、200°C では常温に比して約 1 桁高くなった。また、高性能エアフィルタを最も透過しやすい粒径が大粒径側に移動した。

Fig. 5 DF of HEPA filters as function of temperatures

フィルタの DF は、メーカーの製法、沱紙のロット、ロール等の違いにより異なっており、温度による DF の変化をそのまま比較することは適当でない。データの適切な比較を行うため、次のような考え方を導入した。フィルタの捕集効率是对数透過式により次のように表わされる。

$$1-E=\exp(-2\eta\alpha H/\pi\bar{a}(1+\sigma)) \quad (2)$$

ここで、 E : 捕集効率 ($DF=1/(1-E)$)

η : 単一繊維捕集効率

α : 充填率

H : 沱紙厚さ

$\bar{a}$: 繊維半径

σ : 繊維半径の分散

上記定数の中で、 $\alpha, H, \bar{a}, \sigma$ は第II-2節の結果から考えると、温度によらず一定であると思われるが、一方、単一繊維捕集効率 η は、温度による空気物性値の変化などにより変化する。(2)式対数の対数、すなわち DF の対数を常温および高温について求め、これらの比を求めれば $\alpha, H, \bar{a}, \sigma$ は消え、常温および高温での単一繊維捕集効率の比が求められる。Fig. 6 に、このようにして求めた 0.15 μm の粒子に対する温度と単一繊維捕集効率との関係を示す。常温(25°C)での DF は

DOPエアロゾル、高温での DF は NaCl エアロゾルにより求めた。25°Cにおける1からのズレは、 NaCl エアロゾルの帯電によるものと考えられる。エアロゾル中和装置により求めた NaCl エアロゾルの帯電中和前後の単一繊維捕集効率の比は1.016であった。Fig. 6より求めたそれは1.024であり、エアロゾル中和装置により求めた値とはほぼ一致した。単一繊維捕集効率の比として、温度による DF の変化を評価すれば、各データは1本の直線に乗り、温度に比例していることがわかる。

Fig. 6 Change of single fiber collection efficiencies due to temperatures

Fig. 6の測定結果から、 NaCl エアロゾルの帯電による影響を差し引けば、0.125, 0.15, 0.2, 0.3 μm における高温下での DF は次のように表わされる。

$$0.125 \mu\text{m} \quad DF_{T^{\circ}\text{C}} = DF_{25^{\circ}\text{C}}^{(0.00172T+0.957)} \quad (3)$$

$$0.15 \mu\text{m} \quad DF_{T^{\circ}\text{C}} = DF_{25^{\circ}\text{C}}^{(0.00155T+0.961)} \quad (4)$$

$$0.2 \mu\text{m} \quad DF_{T^{\circ}\text{C}} = DF_{25^{\circ}\text{C}}^{(0.00138T+0.965)} \quad (5)$$

$$0.3 \mu\text{m} \quad DF_{T^{\circ}\text{C}} = DF_{25^{\circ}\text{C}}^{(0.00112T+0.972)} \quad (6)$$

上式からわかるように、温度の DF への影響は粒径が小さいほど大きい。

4. 冷却後の DF

高性能エアフィルタに高温負荷した後、常温での DF を DOP エアロゾルにより求めた。Fig. 7に0.15 μm の DOP エアロゾルに対する高温負荷前後の DF の対比を示す。図中1点鎖線は1対1の対応をした場合である。高温負荷後の DF は、負荷前に比して20~30%高い値となった。その原因としては、第Ⅲ-2節

の結果から、沍紙の形状変化は考えにくい。フィルタ加熱初期において固体粒子の発生が確認されており、自身の分解生成物による目詰りが高温負荷後の DF の変化の原因と考えられる。

Fig. 7 Comparison of DF of HEPA filters before and after heating

5. 捕集理論と実験値との対比

高性能エアフィルタの捕集性能の推定は拡散、さえぎり等の基本捕集機構をベースに計算されている。これまでの実験結果と、捕集理論による計算値とを対比させることにより、常温から高温への DF の変化の説明を試みた。

高温下での捕集性能、差圧の計算は、第Ⅰ報に述べた Kirsh ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾の方法を高温まで広げて適用して行なった。詳細については第Ⅰ報を参照されたいが、計算に使用した各変数の値は以下の通りである。

充填率:	0.063
沍紙厚さ:	0.057 cm
繊維半径:	0.27×10^{-4} cm
繊維半径の分散:	1.44
不均一性による補正係数:	1.48
面速:	2.8 cm/s
空気の粘性係数 ⁽⁹⁾ :	25°C 183×10^{-6} g/cm·s
	100°C 218 × "
	150°C 234 × "
	200°C 254 × "
	250°C 270 × "

以上に示した値を用いて温度による DF の変化を計算した。Fig. 8に25~200°Cの計算結果を示す。 DF は温度の上昇とともに高くなり、200°Cでの DF は25°Cでのそれに比して1桁以上高くなっている。また、フィ

ルタを最も透過しやすい粒径は大粒径側に移動しており、共に実験結果と一致している。主な捕集機構である拡散、さえぎりとも温度上昇により大きくなるが、小粒径の粒子に有効である拡散機構がより大きくなるため、フィルタを透過しやすい粒径が大粒径側に移動する。

Fig. 8 Calculated DF of HEPA filter as function of temperatures

Fig. 9 Change of calculated single fiber collection efficiency due to temperatures

Fig. 9に単一繊維捕集効率の温度変化を示す。単一繊維捕集効率は温度にほぼ比例して上昇し、小粒径ほど影響が大きい。

試験に供した3種のフィルタは、坪量、厚さともほぼ同一であり、Fig. 1に示した DF の差は繊維径の違いによると考えられる。Fig. 10に、繊維半径を変化させた場合の25および200°Cにおける単一繊維捕集効率およびそれらの比を示す。単一繊維捕集効率の比は繊維径によらず一定であり、Fig. 6に示したデータ処理が正しかったことが確認できる。Fig. 11に、25と200°Cとの単一繊維捕集効率の比の計算値と測定値との比較を示す。計算値は測定値の1.3倍であるが、粒径に対する単一繊維捕集効率の変化は同じ傾向を示している。

捕集効率と同様フィルタ差圧についても計算を行な

Fig. 10 Ratio of calculated single fiber collection efficiency at 25 and 200°C

Fig. 11 Comparison between calculated single fiber collection efficiency and measured one

った。Fig. 12に温度によるフィルタ差圧の変化を、計算値および測定値について示す。計算値と測定値はよい一致を示している。

Fig. 12 Comparison between calculated pressure drop and measured one as function of temperatures

以上、高温下での高性能エアフィルタの DF , PD について計算値と測定値との比較を行なったが、計算値は温度による DF , PD の変化をよく説明している。計算値の中で温度により変わるものは、空気粘性係数および平均自由行程であり、このことから、温度による DF の変化は、温度による空気の物性の変化によるものと説明できる。

高性能エアフィルタは高温下、高温負荷後とも所定の性能を維持しており、理論的にもこれが裏付けられた。

6. 加熱によるリークの発生

高性能エアフィルタへの高温負荷温度を上げていった場合、フィルタの個々の構成要素の耐熱性、各要素間の両立性等が限度を越えた時にはフィルタにリークが発生する。150°Cまでの高温負荷に対してはリークの発生は認められなかったが、200°Cの負荷においては26試験体中4体に微小なリークがフィルタ辺部において冷却時に発生した。リークの大きさは、 DF への効果において $10^4 \sim 10^5$ の大きさであり、1段目フィルタに要求される $DF 10^3$ に比して1桁以上小さいリークであった。フィルタの最高使用温度200°Cを越える高温負荷に対しては、240°C、6 h 負荷において、3社中2社のフィルタが高温負荷後に $DF 10^3$ を維持できなかった。リークは、密封材のシリコン樹脂に亀裂が生じ、これに引張られて濾紙が裂けて発生した。

7. ビンホールの影響

第I報⁹⁾、第II報¹⁰⁾にも述べたように、ビンホール

は、高性能エアフィルタの性能を左右する一要因である。ビンホールからの透過空気中の粒子量が DF に対して支配的となっているフィルタの DF の温度による影響を求めるため、人為的にビンホールを設けたフィルタにより、常温および高温下で DF を測定して温度による変化を求めた。

ビンホール部からの粒子透過量が DF に対して支配的なフィルタにおいて、25°Cにおける DF が 3.7×10^3 、200°Cにおける DF が 2.8×10^3 であった。温度の上昇により約3/4に低下した。

ビンホールからの空気の透過量は次式で表わされる。

$$V = \alpha A \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (7)$$

ここで、 V : ビンホールからの空気の透過量

A : ビンホールの面積

ΔP : フィルタ差圧

ρ : 空気の密度

α : 流量係数

流量係数はレイノルズ数により決まるが、レイノルズ数の変化に対して流量係数の変化は小さい。このことから、流量係数は温度に対して一定とみることができる。空気が理想気体であるとし、また、フィルタ差圧が温度に対して(1)式で決まることから、ビンホール効果の支配的なフィルタの25°Cおよび T °Cにおける DF の比は次のようになる。

$$\frac{DF_{25^\circ\text{C}}}{DF_{T^\circ\text{C}}} = \frac{298}{\{(T+273) \cdot (1+0.0015(T-25))\}^{-1/2}} \quad (8)$$

(8)式により、25°Cにおける DF が 3.7×10^3 のフィルタの200°Cにおける DF を求めると 2.6×10^3 となり、先に述べた実験結果に一致する。

IV. 結 言

高性能エアフィルタに高温空気を負荷し、その性能の変化を測定することにより、以下の結論を得た。

- (1) 高性能エアフィルタの差圧は温度の上昇とともに増大した。25°Cを基準とした時の温度による差圧の上昇率は0.15%/°Cであった。
- (2) 高温負荷による濾紙の坪量、厚さ、引張強度、微細構造の変化は認められなかった。
- (3) 高性能エアフィルタの DF は温度とともに上昇し、フィルタを最も透過しやすい粒径に対して、200°Cでは25°Cでのそれに比して1桁以上上昇した。
- (4) 温度変化による DF の変化は、常温および高

温での DF の対数の比をとることにより、常温での DF の異なる高性能エアフィルタを同等に評価できた。 DF の対数の比は温度に比例し、小粒径エアロゾルに対する DF ほどその変化が大きかった。

- (5) 温度による DF 、差圧の変化について、理論による計算値と測定値の対比を行い、理論が実験結果の説明となることを確認した。
- (6) 高温負荷による高性能エアフィルタのリークの発生は冷却時に生じ、フィルタの最高使用温度である200°Cまでの負荷においては、リークの発生確率は低く、発生したリーク自体の大きさも十分に小さいものであった。
- (7) ビンホールからの透過量が支配的なフィルタの DF は温度の上昇とともに低下し、その低下はフィルタ差圧と空気密度の変化により説明できた。

本研究に対して有益な討論を頂いた実証試験検討委員会(委員長 天野 恕)、専門部会(主査 金川 昭)の各位に感謝の意を表する。

なお、本報は、電源開発促進対策特別会計施行令に

基づく科学技術庁からの委託研究である「再処理施設排気フィルタ苛酷時安全性実証試験」の成果の一部をまとめたものである。

— 参 考 文 献 —

- (1) FIRST, M.W.: Performance of absolute filters at temperatures from ambient to 1,000°F, 12th AEC Air Cleaning Conf., 677 (1973).
- (2) KORNBERG, J.P., FIRST, M.W.: High temperature aerosol filtration by diffusion, 13th AEC Air Cleaning Conf., 466 (1975).
- (3) MIL-F-51068: Filter, particulate, high-efficiency, fire resistant, U.S. Military Specification, (1974).
- (4) UL-586: High efficiency, particulate, air filter units, Underwriter's Laboratories, (1971).
- (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, (I), 原子力誌, 27(7), 626 (1985).
- (6) JIS Z 4812: 放射性エアロゾル用高性能エアフィルタ, (1975).
- (7) KIRSH, A.A., et al.: Efficiency of aerosol filters made of ultrafine polydisperse fibres, Aerosol Sci., 6, 119 (1975).
- (8) KIRSH, A.A., et al.: Gas flow in aerosol filters made of polydisperse ultrafine fibres, 同上, 5, 39 (1974).
- (9) 化学工学便覧 (改訂 4 版), (1978), 丸善.
- (10) 尾崎 誠, 横井信司, 金川 昭: 高性能エアフィルタの苛酷時健全性試験, (II), 原子力誌, 27(12), 1156 (1985).

☆高放射性物質取扱施設設計マニュアル☆

「遠隔操作技術」研究専門委員会成果報告書

1985年11月30日発行(限定出版)。好評発売中

B 5 判タイプオフ印刷, 364頁, 定価 8,000円(会員特価 5,000円)(〒350円)

◎ご希望の方は学会事務局へ。(10部以上まとまれば, 送費無料です)

当委員会は1980年10月に発足し84年9月に終了した。前期2年間の成果として先に「高放射性物質取扱い施設とロボット」(1983年11月)を発行した。

後期2年間はその終了時点で標記報告書をまとめることを目標に、下記目次に示すテーマについて最初から計画を立て講演および討論を行なった。本書はこれらをもとにして新たに書下ろしたものである。現在までの豊富な経験や今後の技術動向も盛り込んである。現在、商用の大型高放射性物質取扱い施設の建設計画や原子力発電所の自動化などが進んでおり、これらに対し参考になろう。

目 次 (概 要)

序	Ⅶ. 閉じ込め機構	Ⅺ. 保守および除染
Ⅰ. 序 論	Ⅷ. 遮蔽と臨界	Ⅻ. 耐放射線性材料
Ⅱ. 遠隔操作機器	Ⅸ. 建 屋	【付録】 1. 関連機器の使用経験例
Ⅲ. ロボット	Ⅹ. 廃棄物処理設備	2. 耐硝酸材料
Ⅳ. 観察機器と照明設備	Ⅺ. 非常用設備	3. 新方式テレビジョン, 他
Ⅴ. 移送機構と移送機器	Ⅻ. 放射線管理設備	あとがき