

0.1 μ mHEPAフィルタに対する 展望について



日本エアーテック株式会社
Airtech Japan, Ltd.

本社 〒106 東京都港区六本木3-7-17(六本木産業ビル)
TEL 03-403-1731
大阪営業所 〒536 大阪市淀川区中津1-11-8(旭ビル)
TEL 06-373-0473
06-373-0513
九州営業所 〒812 福岡市博多区山王1-8-35(山王岩瀬ビル)
TEL 092-472-0408
工場 〒340 埼玉県草加市青柳町1117-3
TEL 0489-36-3033
0489-36-3350

目 次

1. はじめに	1
2. H E P Aフィルタの歴史と構造	2
3. H E P Aフィルタの集じん機構	4
4. 超無じん空間	6
5. 測定方法と機器	6
6. 0.1 μ m用H E P Aフィルタの構造と特長	7
7. レザークウンタによる測定結果	8
8. 問題点と今後の展望	9

1. はじめに

クリーンルームは、無じん無菌環境として半導体産業を始め、各種分野に利用されており、その性能、使用法は多岐に渡っている。米国連邦規格¹⁾は、クリーンルームの清浄度を $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子で規制している。一方、クリーンルームの主な除じん要素であるHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタは $0.3\mu\text{m}$ のD.O.P(Dioctyl Phthlate)粒子でその透過効率を表わしている。

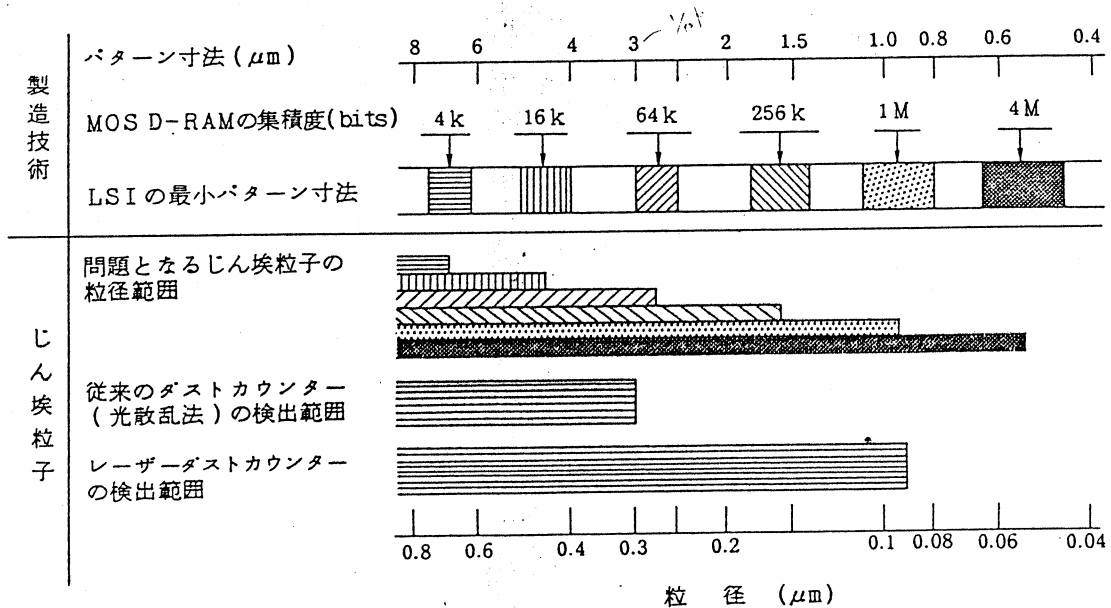
表1 米国連邦規格(209b)の要旨

クリーンルーム クラス	粒 子		圧 力 mmAq	温 度			湿 度			気 流 m/S 換気回数	照 度 Lux
	粒 径 μ	粒 子 数 個/ft ³		範 囲 ℃	推 奨 値 ℃	偏 差 ℃	最 高 %	最 低 %	偏 差 %		
100	≥ 0.5	≤ 100	1.25 以上	19.4 } 25	22.2	± 2.8 特別に は ± 0.14	45	30	± 10 特別 には ± 5	層流方式 0.35m/s } 0.55m/s 乱流方式 ≥ 20 回/時	1,080 } 1,620
	≥ 5.0	$\leq 10^*$									
1,000	≥ 0.5	$\leq 1,000$									
	≥ 5.0	$\leq 10^*$									
10,000	≥ 0.5	$\leq 10,000$									
	≥ 5.0	≤ 65									
100,000	≥ 0.5	$\leq 100,000$									
	≥ 5.0	≤ 700									

* 10個/ft³以下の粒子濃度は、サンプルを多数とった場合以外は、信頼性が低い。

従来、半導体製造用クリーンルーム、 $0.3\mu\text{m}$ 又は $0.5\mu\text{m}$ の粒子制御を目的とし、それで充分であった。しかし、微細化技術の進歩により、半導体の集積密度は著るしく高まり、 $0.1\mu\text{m}$ の粒子制御に対する要求が出てきた。²⁾1Mbit時代に入れば、 $0.3\mu\text{m}$ の粒子制御では不十分であると云われている(表2)。

表2 LSIの進歩と問題となる粒径範囲



2. H E P Aフィルタの歴史と構造

H E P Aフィルタは、エアフィルタの中で最も高性能である。米国規格はAACC CS-1T³⁾では、H E P Aフィルタを以下の如く定義している。「剛なフレームに濾材を折り曲げて取り付け、使い捨て型乾式フィルタで、熱発生型ジオクテルフタレート (D.O.P) の 0.3 μ m 粒子に対して 99.97% 以上の捕集効率を有し、定格風量で試験して清浄時圧力低下が水柱 1.0 インチ以下であること」。以下に、その歴史、構造等について述べる。

表3 H E R Aフィルタの歴史

年	項 目	特 長
1914	英国でマスク用	効率が低い
1914	コットンパッド形	
1916	フィルターの開発始まる (Chemical Defence or Atomic Energy industries)	
1916	マスク用	効率中程度
1916	セルローズファイバーマットの研究が行なわれた	
1918	1918	
1938	マスク用ウール アスベストろ材完 羊毛+アスベスト	最初にマスク用外として空調用に利用されたパッド形
1939	ウールレジソろ材完	マスクおよび空調用パッド形
1945	羊毛+フェノールホルムアルデヒド (重量比20%含)	高効率 99% 低空気抵抗 静電効果大
1955	コットンアスベストろ材完 コットン+アスベスト (50%) (50%)	詰込式 高効率 99.9% 高空気抵抗 容積大
1951	セルローズアスベスト ろ材完	初めてのペーパーろ材 現在のH E P Aフィルター 形状完 (U. S. Atomic Energy)
1955	Asparto+ブルーアスベスト+コットン	1954年米国ケンブリッジ社設立 効率99% 温度170°C折込方式始まる
1958		日本に初輸入
1960	グラスファイバー	ペーパーで1 μ -10 μ 径のグラス
1965	グラス+接着剤	ウール使用 99.99%が可能となる
1965	グラスファイバー紙	効率99.99%可
1970	グラスのみで作る	温度500°C可 高湿 耐薬品性にすぐれている
1969		国産フィルター完成
1970年代	サラミックペーパー シリカウールの研究がされている	

2-1 歴史

表3にH E P Aフィルタの歴史⁴⁾を示す。H E P Aフィルタは、米国にて、原子力施設からの排気処理用として開発され、その後、航空宇宙産業、半導体産業に利用されてきた。

表 4 H E P A フィルタの材質

モデル		A 型	D 型	E 型	F 型		G 型	H 型	J 型
材質, 使用条件									
フィルターメディア		ウォータープルーフ グラスファイバー	ウォータープルーフ グラスファイバー	ウォータープルーフ グラスファイバー	ウォータープルーフ グラスファイバー		ウォータープルーフ グラスファイバー	ウォータープルーフ グラスファイバー	ウォータープルーフ グラスファイバー
セパレーター		紙	アルミニウム	アルミニウム	アルミニウム		アスベスト	アルミニウム	プラスチック
密封材		自己消火性 接着剤	自己消火性 接着剤	自己消火性 接着剤	セラミック		自己消火性 接着剤	自己消火性 接着剤	自己消火性 接着剤
外枠		プライウッド	プライウッド	鋼板	SUS	鋼板	不燃性 プライウッド	不燃性 プライウッド	プライウッド
外枠仕上		ナシ	ナシ	ユニクロ鍍金	ナシ	ユニクロ	ナシ	ナシ	ナシ
使用できる最高温度		104℃	121.0℃	121.0℃	350℃	150℃	121.0℃	121.0℃	65℃
使用できる最高湿度		85%	100%	100%	100%	100%	80%	100%	100%
圧力 損失	新しい時 (水柱)	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm
	交換すべき時 (水柱)	50.8mm	50.8mm	50.8mm	50.8mm	50.8mm	50.8mm	50.8mm	50.8mm

(ケンブリッジカタログより)

国産化は、1957⁵⁾年頃始まり1965年に発売されている。現在は、半導体工業、電子工業から、光学、医薬品、食品等広い分野で利用されているが、その約60%は半導体及び電子工業である。

2-2 構造

HEPAフィルタの構造を図1に示す。濾材はガラス繊維をペーパー状にしたものである。フレーム、セパレーター等の材質を表4に示す。フィルタフレームは、通常木製が用いられ、高温、高湿度の雰囲気では鋼板製、ステンレススチール製が用いられる。図2は、HEPAフィルタからのリーク（粒子の洩れ）の種類を示している。①はフィルタ濾材のピンホールからのリークである。リークの補修は、どの補修も1平方インチを越えないか、全補修面積がフィルタの前面面積の1%を越えないとき、行える。②は、フィルタ濾材とフレームの接着剤からのリークである。この両者は、フィルタメーカーにより検査される。③は、フィルタの締め付けが不十分なときに発生する。④は、フィルタ受け（一般には溶接部）からのもので、コーキングにより対処される。③と④は、クリーンベンチ、クリーン

表5 HEPAフィルタに関する規格

米国	AACC GS-1T TENTATIVE STANDARD OF HEPA FILTER
	MIL-F-51068C
	MIL-F-51079A. FILTER MEDIUM, FIRE-RESISTANT HIGH-EFFICIENCY
	TID-7023 HIGH EFFICIENCY PARTICULATE AIR FILTER UNITS
	AACC GS-2T TENTATIVE STANDARD FOR LAMINAR FLOW CLEAN AIR DEVICES
英国	BS 3928 METHOD FOR SODIUM FLAME TEST FOR AIR FILTERS
日本	JIS Z 4812 放射性セーロン用高効率フィルタ
	JIS Z 9920 クリーンベンチ

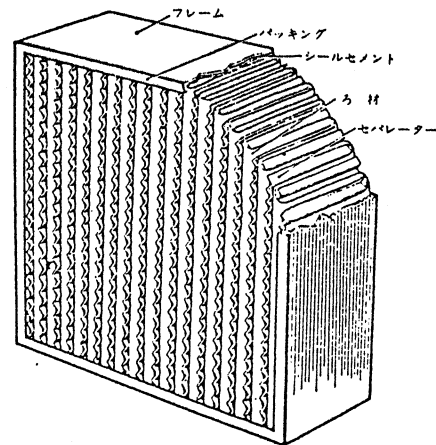


図1 HEPAフィルタの構造

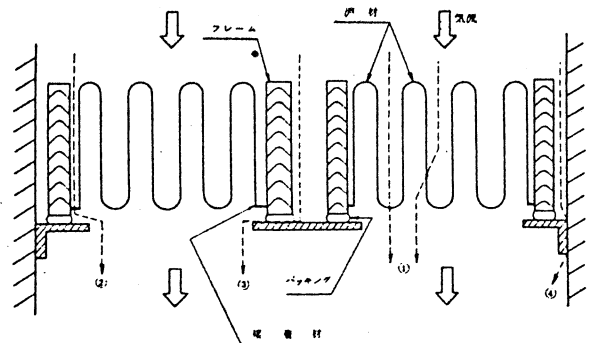


図2 フィルタのリーク

ルールの組立又は製作不良によるもので、製品完成時に検査される。①は、取扱い中に汚材を破損し、発生することもある。③、④は、製品の輸送等により発生することもある。従って、製品の納入後に、①から④すべてに渡り検査することが必要となる。

2-3 規格

HEPAフィルタに関する規格は表5の如くである。米国では、試験粒子として、D.O.P粒子を用いている。英国では、塩化ナトリウム粒子(0.01~1.7 μm 平均0.6 μm)が用いられている。

3. HEPAフィルタの捕集機構

HEPAフィルタの捕集原理を図3に示す。主要要素は①慣性力、②拡散力、③衝突である。この関係を図4に示す。慣性力は、粒径が大きくなると増加し、拡散力(熱拡散運動-ブラウン運動による)は微粒子ほど大きい。衝突は、粒径に影響されない。慣性力と拡散力は、粒径により相反した作用をするため、透過率はある粒径でピーク値を持つ。従来は、図5に示す如く、0.3 μm がピーク値であるとされてきた。0.3 μm 以下では、ブラウン運動により透過率は減少すると考えられ、0.3 μm 粒子は最も捕集しにくい粒子とされてきた。しかし、昨今、透過率のピーク値は0.3 μm 以下にあるという報告もある。図6は孤塚らによる測定値で、ピーク値は0.1 μm 以下にあるとしている。現在では、透過率のピーク値は0.3 μm 以下にあり、0.3 μm は最も捕集しにくい粒子ではない、というのが通説のようである。

図7に通過風速、粒子濃度が透過率に及ぼす影響を示す。通過風速の上昇は、慣性力を増加させ、拡散力を減少させる。粒子濃度の増加は、慣性力を低下させ、拡散力を増加させる。

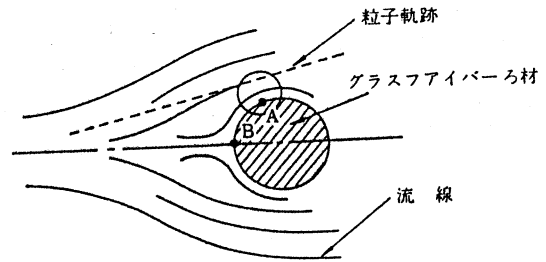


図3 HEPAフィルタの捕集原理

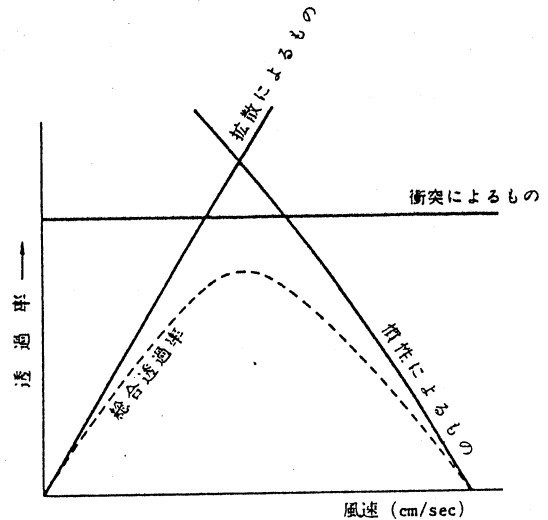


図4 HEPAフィルタの捕集要素の関係

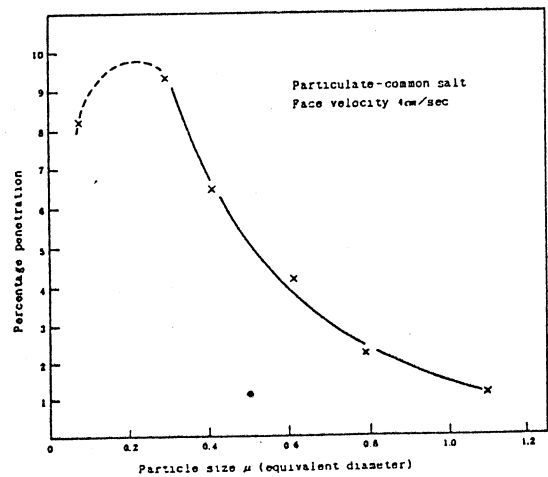
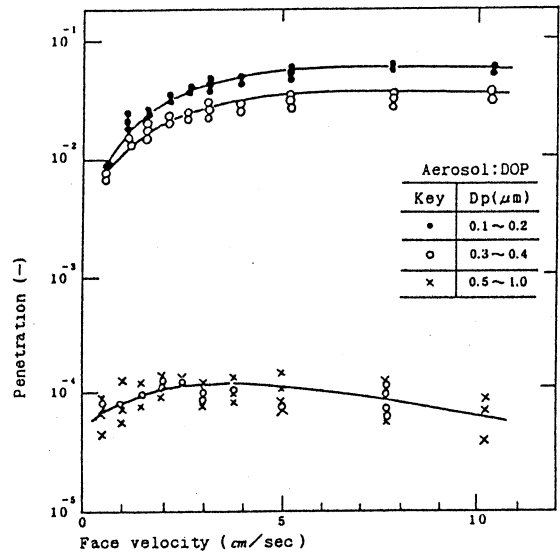
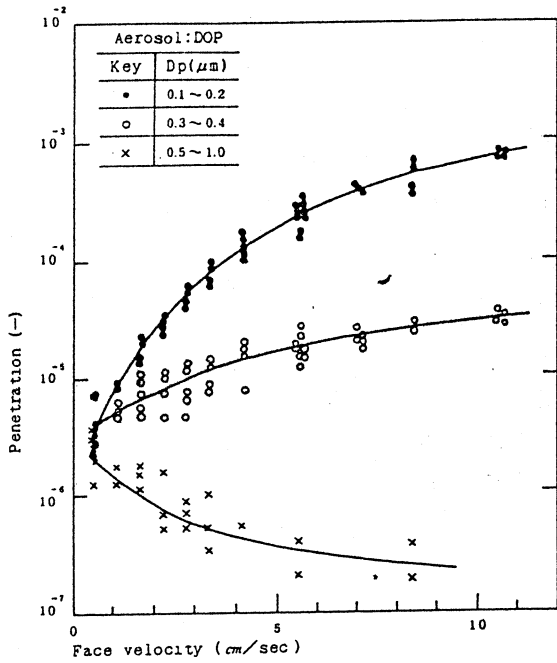


図5 R.G.Dormanによるフィルタの透過率



7) 図6 狐塚らによるHEPAフィルタの透過率

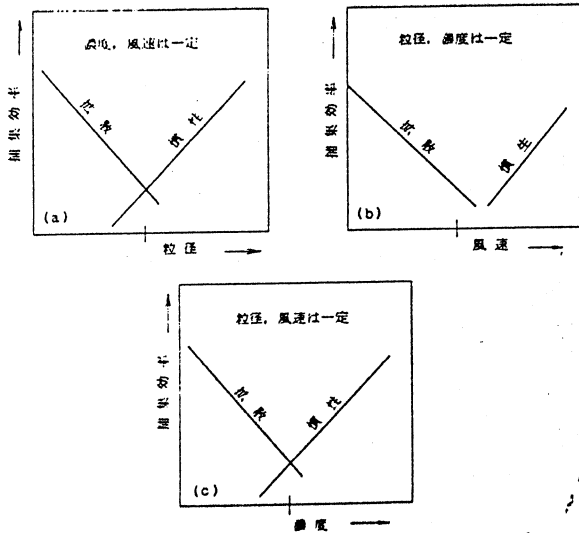


図7 風速, 濃度, 粒径とHEPAフィルタの透過率の関係

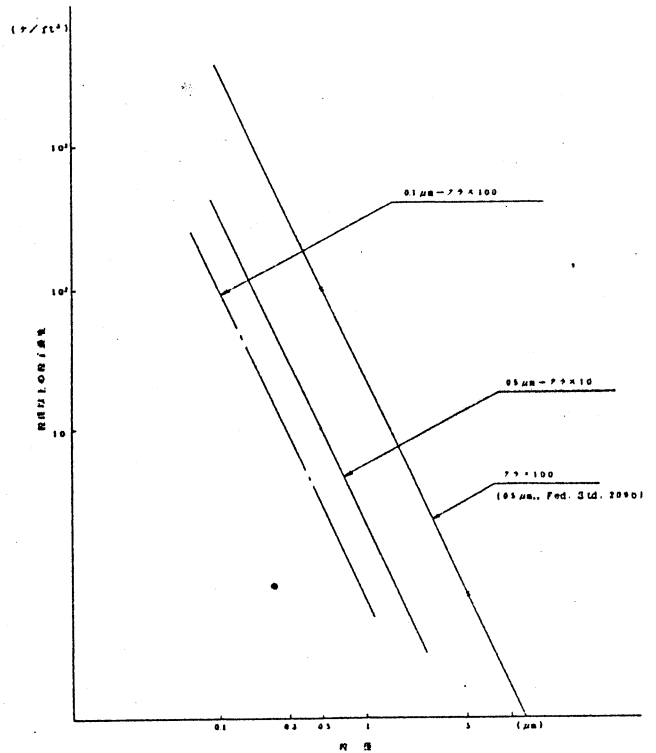


図8 清浄度クラス

4. 超無じん空間

超無じん空間に対する要求はあるが、その程度については明確ではない。0.1 μm の粒子規制及びクラス100より高い清浄度についての規格はまだなく、現状より、高性能なフィルタを用い、クリーンルーム、クリーンベンチ内をより清浄にしたい、ということである。

超無じん空間に対して、以下の2つの表現が考えられるだろう。① 0.1 μm 以上の粒子に対してクラス10、クラス1（立方フィート当り0.5 μ以上の粒子が10ヶ、1ヶ以下である空間）とする方法。② 0.1 μm 以上の粒子に対してクラス100（立方フィート当り0.1 μ以上の粒子が100ヶ以下である空間）とする方法である。図8に、0.5 μ-クラス100（以後、粒径と立方フィート当りの個数を上記の如く表わす）を示す。これに、0.5 μ-クラス10と0.1 μ-クラス100の粒径分布を加える。0.1 μ-クラス100は0.5 μ-クラス10より清浄度はわずかに良いが、この両者の意味は大きく異なる。0.5 μ-クラス10では、対象粒径は0.5 μm 以上であり、それ以下の粒子に対しては言及しない。0.1 μ-クラス100では、あくまで0.1 μm 以上が対象である。

ここで、0.5 μ-クラス10と、0.1 μ-クラス100の分布直線を引くときに、0.5 μ-クラス100と平行に引いたが、これはJunge, Friedlander^{8) 9)}により、空気中の0.1 μm 以上の粒子は、粒径の1.5～3.8乗に逆比例するとされているからである。米国連邦規格は2.18乗を用いている。

ここでは、0.1 μ-クラス100を必要粒子濃度として話を進める。クリーンルーム内のじんあい負荷は、外気によるもののみと考え、内部発じんは考慮しないものとする。外気濃度に比べ、内部発じんのフィルタに対する負荷は、局部を除き全体的に考えるならば大勢に影響はない。特に、粒子濃度が低下するほど顕著である。外気粒子濃度の分布例を図9に示す。0.1 μm 以上の粒子濃度は、 $10^7 \sim 10^8$ ヶ/ft³に分布している。 10^8 ヶ/ft³の濃度の空気を0.1 μ-クラス100にするには

$$1 - 10^2 / 10^8 = 0.999999$$

となり、フィルタの捕集効率は99.9999%となる。実際には、外気は全処理風量の1/10程度である。従って、フィルタの集じん効率は99.999%で十分である。

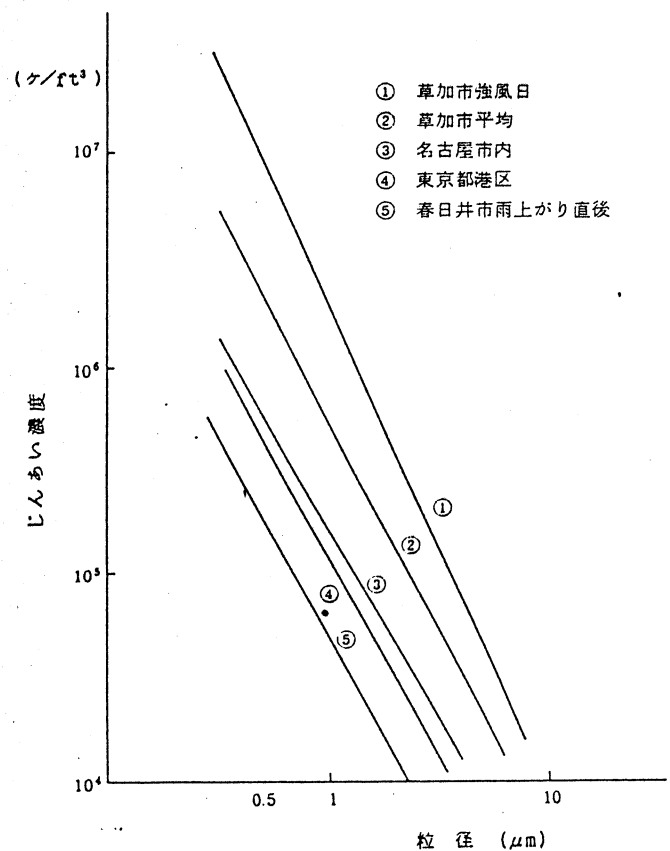


図9 外気じんあい濃度

5. 測定方法と測定器

空気中のじんあい濃度は、①光散乱式粒子カウンタ、②顕微鏡法による測定等があり、①は0.3～10 μmの粒子を、②は5 μ～50 μの粒子を測定できる。②の方法は、微小粒子

の測定ができない、即時に計数できない、連続して行なえないことより用いられる頻度は少ない。0.1 μm の粒子を測定するには、レーザー光線を用いた粒子カウンタを用いる。表6に、現在市販されているレーザー光を用いた粒子カウンタを示す。いずれの測定器も、吸引量が少ないため、超清浄空間の如き粒子濃度の低い場所を測定する場合は、測定時間を長く吸引量を増やし測定誤差を減少させる必要がある。

表6 市販されているレーザー形粒子カウンタ

メーカー	機種	測定範囲	流量
HIAC/ROYCO (三菱重工)	226	0.12 μm 以上	300CC/min
PMSI (新山ベクト)	ASAS-X	0.09~3.0 μm	120CC/min
	ASAS-300	0.15~3.0 μm	78CC/min
日立電子 エンジニアリング	TSI-400	0.1~1.0 μm	300CC/min
	TSI-500	0.1~0.5 μm	3CC/min
		0.3~1.00 μm	300CC/min
	TSI-600	0.075~0.25 μm	0.07CC/min
0.2~0.8 μm		1.1CC/min	

6. 0.1 μm 粒子用HEPAフィルタ

0.1 μm 粒子用HEPAフィルタは、数社が発売及び開発中である。その構造、特長を以下に示す。

6-1 沓材の2重折り形

2枚の沓材を重ねて折り込んだ構造で、図10に示す。沓材の組合せは、HEPAフィルタ用2枚、HEPAフィルタ用と準HEPAフィルタ用、HEPAフィルタ用と中性能フィルタ用とがある。最も高い捕集効率を得られる構造で、沓材表面効率の均一化が計れる。しかし、2枚重ねのため空気抵抗は著しく増加し(50~100%増加)、従来の送風能力では風量は大幅に減少する。風量を確保しようとするならば、送風機が大型化し、あるいは高回転となり、振動、騒音の問題が発生する。高価であり、2枚重ねで折ることが困難である等の問題もある。

6-2 高効率沓材形

効率の高い沓材を用いた方法で、構造は標準形と変わらない(図11)。圧力損失は上昇するが沓材の折り込み数を増加させ、標準形と同程度することができる。捕集効率は沓材2重折りよりは若干落ちる。高価となるが、最も実用化しやすい。

6-3 荷電式フィルタシステム(特許出願中)

本システムは、当社で開発したフィルタシ

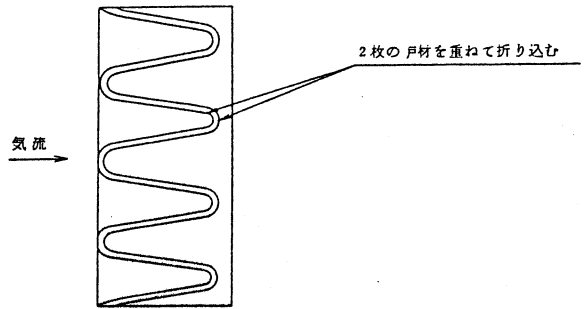


図10 沓材を2重折り込んだHEPAフィルタ構造

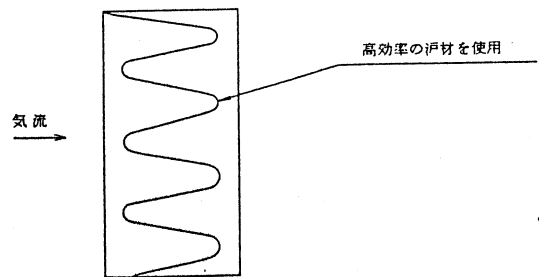


図11 高効率沓材を使用したHEPAフィルタ構造

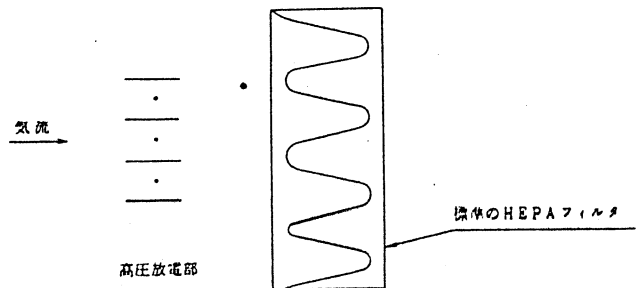


図12 EP式HEPAフィルタ構造

システムで、構造を図12に示す。本システムは、標準H E P Aフィルタの一次側に電離部を設け、高圧放電現象を利用し、通過粒子を帯電させ、フィルタ材の誘電効果により捕集効率を高める方式である。これにより、標準のH E P Aフィルタの透過率を1/10~1/100とすることができる。電離部を取付ければ、既存のフィルタシステムにも用いることができる利点を有する。また、電離部の通過風速を高めても、効果は低下しないため、1台の電離ユニットで多数のH E P Aフィルタに用いられる。

電源のない場合は配線を要する。若干のイオンは発生するが、微量であり問題ではない。

6-4 効率表示

各メーカーでは、0.1 μ m粒子用H E P Aフィルタ効率は以下の如く表示している。

フィルタの0.1 μ m粒子に対する透過効率測定にて、問題となっているのは、適切な試験粒子がないことである。0.3 μ m粒子は、D.O.Pを熱式で発生させ、比較的均一な単分散粒子を得ることができるが、0.1 μ m単分散粒子の発生法は確立されていない。現在、0.1 μ m粒子は大気じんあいを用いているのが多い。従って、0.1 μ m粒子用H E P Aフィルタの効率は、0.3 μ mの場合ほど精度は高くない。

7. 測定データ

当社で0.1 μ m粒子について測定した結果を以下に示す。粒子計数は、HIAC/ROYCO-226レーザカウンタを用いた。仕様は表8に示す。粒子は大気じんあいを用いた。

7-1 標準H E P Aフィルタ

標準H E P Aフィルタ(0.3 μ m D.O.P粒子で99.97%以上)をクリーンベンチに組込み(図13)、吸込口とクリーンベンチの作業台上(吹出口)でじんあい濃度を測定した。0.12 μ m以上粒子の捕集効率は99.989~99.997

	対象粒径	粒子	捕集効率
1	0.12 μ m以上	大気じんあい	99.99%以上
2	0.1 μ m以上	大気じんあい	99.97%以上
3	0.1 μ m以上	大気じんあい	99.99%以上
4	0.3 μ m	D.O.P	99.999%以上
5	0.12 μ m以上	大気じんあい	使用フィルタより2倍上昇

表8 HIAC/ROYCO-226の主な仕様

レーザ光	He-Ne形	
吸入流量	300CC/min	
最小測定粒径	0.12 μ m	
チャンネル数	16チャンネル	
	1. 0.12~0.17	9. 1.92~2.37
	2. 0.17~0.27	10. 2.37~2.87
	3. 0.27~0.42	11. 2.87~3.42
	4. 0.42~0.62	12. 3.42~4.02
	5. 0.62~0.87	13. 4.02~4.67
	6. 0.87~1.17	14. 4.67~5.37
	7. 1.17~1.52	15. 5.37~6.12
	8. 1.52~1.92	16. 6.12以上
その他	プリンター付	

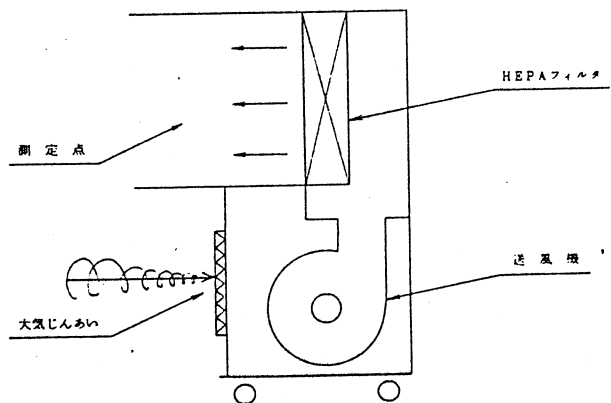


図13 HEPAフィルタの性能試験

表9 標準H E P Aフィルタの性能

粒径 μ m	外気	クリーンベンチ内	効率%
0.12~0.17	236×10^5	13.1 (8~25)	99.99 (99.989~99.997)
0.17~0.27	1.4×10^5	4.9 (2~20)	99.997 (99.992~99.998)
0.27~0.42	332×10^4	0.08	-

単位: $\times 100\mu\text{g}/\text{ft}^3$

%となった。本測定法では、従来形 H E P A フィルタは 0.12 μm 以上の粒子に対して高い捕集効率を示した。

7-2 2重折り形と循環気流方式

標準 H E P A フィルタと 2重折り H E P A フィルタ、及び標準 H E P A フィルタを全循環方式で用いた場合、吹出し空気の濃度は表 10 の如くであった。

2重折り H E P A フィルタ及び標準 H E P A フィルタを全循環させた場合、標準 H E P A フィルタ全排気に比べ、約 1 桁じんあい濃度は減少した。2重折り H E P A フィルタと全循環式の差は、いずれも 1 桁表示のため、測定誤差範囲内と考えられる。1 桁表示の場合、30~100% の統計的誤差を含む。

2重折り H E P A フィルタは、高い効率を示しているが、標準 H E P A フィルタを全循環させた場合と同程度であった。循環気流方式は、0.1 μm 粒子に対して高い捕集効率を有することが明らかとなった。従って、循環形クリーンベンチ又はクラス 100 やクラス 1000 のクリーンルーム内で用いられているクリーンベンチでは、極めて高い清浄度であるといえる。

7-3 荷電式フィルタシステム

クリーンベンチの吸込部に電圧放電装置を設け、荷電式フィルタシステムとしたときの測定結果を表 11 に示す。

荷電式 (E シリーズ) フィルタシステムを用いることにより、透過率を $\frac{1}{50}$ 程度に減少させることができる。

8. 問題点と今後の展望

0.1 μm の粒子制御に対する要求は、今後増々多くなり、測定器、フィルタも改良されるであろう。しかし、0.1 μm 粒子の測定法が確立し、清浄度が規格化されるには、まだかなりの年月が必要である。空気清浄に関し、H E P A フィルタから層流技術まで、率先してきた米国では、日本ほど 0.1 μm 粒子に対する関心は高くない。

現時点では、以下の点がいえる。

- (1) 0.1 μm H E P A フィルタは、現在の H E P A フィルタより捕集効率は高い。
- (2) 粒子を帯電させることにより捕集効率を高めることができる。
- (3) 現在の H E P A フィルタを循環気流方式で用いるか、又は清浄空間で用いることにより、0.1 μm 粒子を大巾に減少させることができる。
- (4) 0.1 μm 粒子の測定法は確立されておらず、現在の 0.1 μm 粒子に対する測定精度は低いと考えるべきである。

表10 2重折り H E P A フィルタと全循環形

粒 径 μm	標準 H E P A を全排気形とした時	2重折り H E P A フィルタ	標準 H E P A を全循環とした時
0.12 ~ 0.17	35	1.1	2.3
0.17 ~ 0.27	9	0.4	0.3
0.27 ~ 0.42	0.5	0	0

単位: × 100ヶ / ft³

表11 荷電式フィルタシステムの効率

粒 径 μm	標準 H E P A	荷電式フィルタシステム
0.12 ~ 0.17	23	1.7
0.17 ~ 0.27	13	0.7
0.27 ~ 0.42	1.7	0

単位: × 100ヶ / ft³

現在のクラス100クリーンルーム内でも、1 μ m以上の粒子が存在することに注意すべきである。当然、HEPAフィルタから吹出される空気は、クラス100であり、0.5 μ m以上の粒子は極少と考えてよい。これらの粒子はクリーンルーム外から持ち込まれる以外に、振動により天井、壁からの発じん、作業員からの発じんによるものである。これらの粒子は、半導体の不良に対し、0.1 μ m粒子よりはるかに大きな影響を与える。また、10 μ m以上の粒子は、粒子カウンタでは測定できない。今後、微小粒子に注目すると同様に、これら比較的大きな粒子にも注意が必要であろう。

今後、0.1 μ m HEPAフィルタの技術革新及び測定法の確立を期待すると共に、本資料が、クリーンルームの動向をつかむ上で参考となれば幸である。

参考文献

- 1) Federal Standard №209B. Clean Room and Work Station Requirements, Controlled Environment 1973
- 2) 小宮他；超LSI用クリーンルームをめぐる諸問題，空気清浄技術講習シリーズ 第19回，1979
- 3) AACC CS-1T HEPAフィルタの暫定基準，空気清浄 第11巻 訳吉沢普
- 4) 日本エアテック技術資料 №1
- 5) K.HIRASAWA.The history and present situation of Contamination Free Air System in Japan, 5th ISCC VDI-Berichte 386 1980
- 6) R.G.Dorman; HIGH EFFICIENCY FILTRATION 1964
- 7) M.Kozuka, S.Mikami, Y.Ikezawa
Penetration of high efficiency air filters for submicron DOP aerosol using a lazer particle spectrometer. 5th ISCC, VDI-Berichte 386 1980
- 8) C.Junge; the size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data. J.Meteorology 12 (1955)
- 9) 諫早典夫；じん埃管理における浮遊じん埃。濃度と降下じん埃量との関連についての考慮
空気清浄 Vol 5, 6. 1968

【注意】

連絡先は発行当時の情報が記載されています。
最新の連絡先はホームページ等でご確認をお願いします。