クリーンルームシステムの現状と展望

横幕　博行(よこまく　ひろゆき)　　諏訪　延行(すわ　のぶゆき)

1　まえがき

近代建築の進歩は「鉄，ガラス，コンクリート」の組合せにより始まり，現在の超高層建築や長大トンネル，橋りょうの出現を見るに至った。「クリーンルーム」も鉄やガラスなどの建築資材で構成される建築物の一種であるが，きわめて清浄な空間を構築することに特長がある。そしてこの空間でLSI（Large Scale Integrated circuit）や医薬品などが作られ，私たちの日常生活に大きな恩恵をもたらす製品が次々に出現している。

このクリーンルームと呼ばれる技術の根源は，第二次世界大戦中の原爆製造にある。原爆製造では放射能を含んだ空気中のじんあいを除去し作業者の健康を保持する必要があり，じんあい処理用として除じんフィルタの開発が行われた。放射性物質を扱う空間では浮遊じんあいを外部に漏らさないことが主な目的であるが，放射線を含んだちりを除去することは結果として清浄な空間の維持となる。ここで生まれたフィルタが空間を清浄に保つために使用され，「清浄空間」すなわち「クリーンルーム」の考え方に至った。

現在，クリーンルームという言葉が常識的に理解されるようになったのは，半導体産業において大規模かつ高精度のクリーンルームが建設され多くの人々の目に触れるようになったことが一番の理由であろう。しかしながら，目に触れるといってもクリーンルームの一番の大敵は発じんの源である人間であるため，クリーンルームの中に入ることは厳しく制限されている。このためクリーンルーム内に入ったことのある人は少なく，また，中に入ったとしても，空気中のサブミクロンの粒子など人間の目には見えないので「清浄度」は直感できないと思う。

この特集号では身近な所で使われているクリーンルームを紹介するとともに，本稿では富士電機が取り組んでいる分野の現状と展望を述べる。

以下に，富士電機の取扱品目とその用途を記す。

(1)　クリーンルームエンジニアリング

クリーンルームを用途に応じ，基本設計から現地工事まで一貫して対応する。範囲は，建築躯体（くたい），内装，電気，空調である。

(2)　エアシャワー

入室に際して付着しているじんあいを高速エアにて吹き飛ばして除じんする。

(3)　パスボックス

外部から部品・機材を持ち込む場合に一時的に保管する。

(4)　クリーンベンチ

クリーン（清浄）なベンチ（作業台）として局部的に高清浄度が必要な場合（主に検査など）に用いる。**図1**は昭和40年代のクリーンベンチ内でのトランジスタの組立風景である。

(5)　クリーンブース

装置などの上部に設置して装置周辺の清浄度を確保する。

(6)　サーマルクリーンブース

クリーンブースに温度・湿度の調節機能を付加したものである。精度は23±0.1℃，50±5％である。

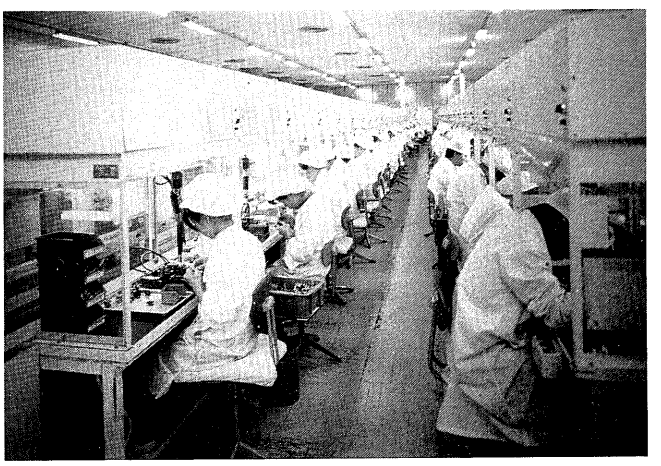
(7)　ファンフィルタユニット（FFU）

高性能フィルタとファンを一体とし天井面に敷き詰めて，約0.4 m/sの風を吹き出す。

(8)　ルフトールフィルタ

外気を導入する空気調和機に取り付けて大気中の比較的

図1　昭和40年代のトランジスタ組立風景



横幕　博行

道路，クリーンルーム，建築付帯設備関連のエンジニアリング業務に従事。現在，システム事業本部社会システム事業部技術第二部長。

諏訪　延行

電機システム，クリーンルームシステムの設計に従事。現在，システム事業本部社会システム事業部企画設計部課長。

大きなじんあいを除去する。

2 クリーンルームの定義と用途

クリーンルームが適用される分野は**表1**に示すように半導体製造から放射線管理施設まで多岐にわたり，この区分は「工業用」と「バイオ用」の二つに大きく分けられる。工業用の精度は空気中の浮遊じんあい量について規定するが，バイオ用は浮遊微生物と付着微生物をも対象としている。

表1　主なクリーンルームの用途

分　類	用　途
工　業　用 （じんあい）	◦半導体製造 ◦液晶表示装置 ◦ハードディスク加工 ◦高純度シリコン製造 ◦プリント基板製造 ◦光学機器（レンズ）加工 ◦ベアリング加工
バ イ オ 用 （細　　菌）	◦手術室 ◦注射液封入 ◦未熟児室 ◦無菌動物飼育 ◦食肉加工 ◦乳製品加工 ◦炊飯，弁当 ◦バイオハザード対策
そ　の　他	◦放射線管理施設

表2　JISと米国連邦規格の浮遊粒子上限濃度

規　格	クラスと浮遊粒子数の関係					
JIS B 9220	クラス1	クラス2	クラス3	クラス4	…	クラス8
浮遊粒子数 (0.1μm)	10^1	10^2	10^3	10^4	…	10^8
FED209E	—	—	クラス1	クラス10	…	クラス10^5
浮遊粒子数 (0.1μm)	—	—	1,240	12,400	…	—

表3　WHOで定めた無菌製造のための空気清浄度

クラス	1 m^3 あたりの最大許容微粒子数（個）		1 m^3 あたりの最大生菌数（個）
	0.5～5μm	＞5μm	
A	3,500	0	1
B	3,500	0	5
C	350,000	2,000	100
D	3,500,000	20,000	500

表4　作業服発じん量

動　作		個/分（0.3μm）以上
正座または起立（静止）		100,000
着　席	頭・腕・手先を軽く動かす程度	500,000
	体・足先を軽く動かす程度	1,000,000
起立（通常状態から起立したとき）		2,500,000
歩　行	1 m/s 程度	5,000,000
	1.5 m/s 程度	7,500,000
	速く歩く	10,000,000

る。

2.1 クリーンルームとは

日本工業規格（JIS Z 8122－1994）では，クリーンルームは次のように定義されている。

「コンタミネーションコントロールが行われている限られた空間。空気中における浮遊微粒子が限定された清浄度レベル以下に管理され，また，その空間に供給される材料，薬品，水などについても要求される清浄度が保持され，必要に応じて温度，湿度，圧力などの環境条件についても管理が行われている空間。」

表2は日本と米国のクリーンルームの規格を比較したものである。日本の場合には半導体工場にて必要な清浄度領域までの規格を定めているが，実際の運用の現場において，例えばクラス1と表現する場合にどの規格であるか確認する必要があるくらい運用はまちまちの状態となっている。

表3はバイオロジカル（バイオ）クリーンルームにおけるWHO（世界保健機関）（1992年）の無菌製造のための空気清浄度クラス分けである。工業用と比較した場合，生菌数を規定しているところに差がある。

表4は一般作業服での各動作による発じん量の違いを示しているが，0.3μmレベルでの発じん量は数百万個/分にもなり，**図1**で示したような発じんの少ない服装での作業が必要な理由でもある。**図2**に最近の防じん服を示す。頭から足の先まで包み込んだ服装が要求されている。**図3**には空気中に浮遊する粒子の種類と大きさを示す。大気中にも大量のじんあいが浮遊しているが，クリーンルームにとって最も大敵なのは人間である。バイオクリーンルームにて嫌われる微生物も人間の持ち込むじんあいに付着して浮遊している。

2.2 電子部品関連クリーンルーム

半導体を中心とするこの分野は要求精度が最も厳しく，かつ年を追うごとに高精度化を続けている。**表2**のJIS基準でも最高のクラス1を要求され，さらにこの基準以上の対象粒径である0.05μmまでも制御対象としている。クリーンルームの技術競争に参加している会社の大半は半導

図2　最近の防じん服

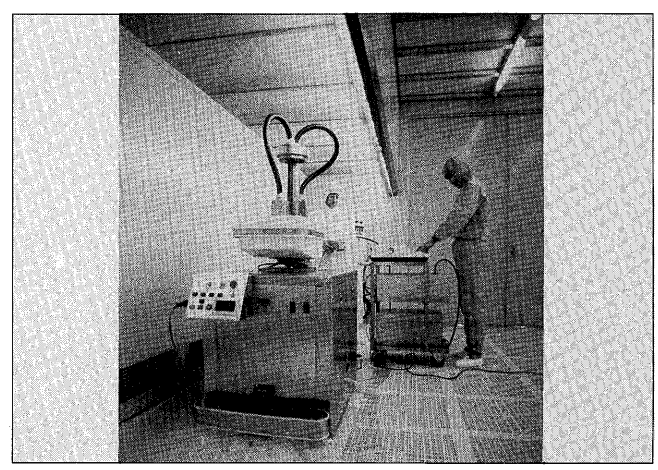


図3　浮遊微粒子の大きさ

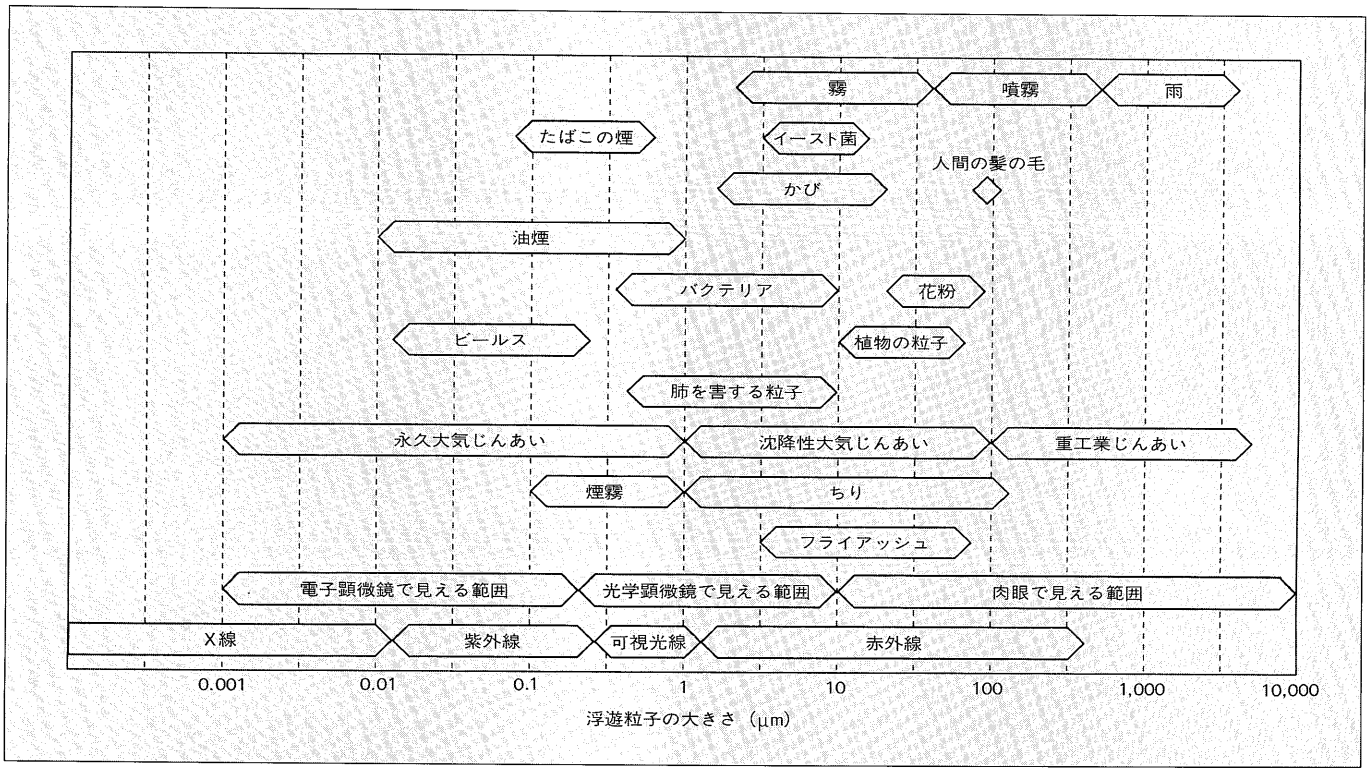
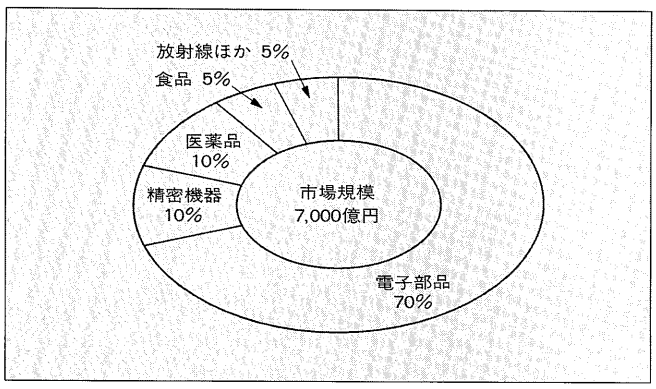


図4　クリーンルームの市場規模



体分野での実績と技術開発で優位に立つべく努力をしている。1997年度の主要メーカーの設備投資計画が約1兆円，半導体生産額では6兆円，さらに液晶表示装置が1兆円見込まれる。

このような状況下でのクリーンルームの市場規模はおおよそ7,000億円と想定され，電子部品関連の市場の比率は70％程度と推定される。ただ，このなかには建築工事費用も含まれるため，躯体工事を除外した場合2,000億円程度が市場規模と推定される。**図4**は分野別の市場規模を想定したものである。

2.2.1　LSI分野

半導体分野のなかでもDRAM（Dynamic Random Access Memory）の進歩が著しく，年を追うごとに加工精度が向上してきており，現在の加工寸法（配線間の寸法）は0.25～0.35μmにまで微細化している。

微細化とともに半導体の製造工程はシリコン基盤の上にケイ素化合物やアルミニウム，タングステン配線などの工程が200以上も繰り返し行われるため，どこかの工程でサブミクロンレベルの粒子が混入しても不良品が作られることになり，このことが清浄度向上の要因であった。

半導体のクリーンルームが現在のように天井面全面にHEPA（High Efficiency Particulate Air）フィルタを敷き詰めるようになったのは256kビットDRAMの生産を開始したここ15年ほどのことである。ここで使用されているフィルタは0.05～0.3μmのじんあいを99.9％以上除去する能力があり，浮遊じんあいを対象とした技術は現在の形で推移すると予想されるが，清浄度の維持だけでは次世代の製造環境に耐えうるかとの疑問もある。

以下に半導体を中心とした電子部品関連のクリーンルームの課題と見通しをあげる。

(1)　加工の微細化が進み，HEPAフィルタでは補修できないガス状成分や金属分子の制御方法の確立。

(2)　クリーンルームを構成する建材から発生するガス状成分の解析と発生量の定量化。

(3)　0.1μm以下の粒子の挙動を支配するといわれている静電気の表面帯電防止技術の確立。

(4)　巨大化するクリーンルーム面積を縮小化しイニシャルコスト，ランニングコストの低減。以下に16MDRAM製造におけるクリーンルーム面積が，10,000 m^2 での清浄度の維持のみに必要な電力量の例をあげる。

〔例〕

(a)　ファンユニット［600×1,200（mm）］を使用する。100W/台

(b)　FFU設置台数：5,000台

(c)　電気料金：12円/kWh

〔計算〕

ユニット台数5,000台×100 W/台×24 h/日×30日/月
＝360,000 kWh/月

年間料金：
360,000 kWh/月×12か月×12円/kWh＝51,840,000円

このほかにファンモータからの発熱を冷却するための動力が必要となるため，約1億円が清浄度維持のために消えることになる。

2.2.2 医薬品工業

医薬品用のクリーンルームは，工業用のそれとは異なり，空気中の微生物（Biological）をも含めて清浄に保つ要求があることからバイオクリーンルームと呼ばれている。このバイオクリーンルームの規格は空気中の浮遊微粒子と生菌数を規定している。**表3**のWHOで定めた規格で生菌数は規定されているが，測定法は明示されておらず医薬品製造における実際の清浄度維持はバリデーションによる必要がある。

バリデーションとは1996年に厚生省令に定められた医薬品の製造にかかわる規格で，趣旨は次のとおりである。

「バリデーション（Validation）とは製造所の構造設備ならびに手順，工程その他の製造管理および品質管理の方法が期待される結果を与えることを検証し，これを文書とすることをいう。」

これを実際のクリーンルームの運用に置き換えて説明すると，フィルタや空調機器の測定・検査に科学的根拠付けを行い品質（清浄度）管理を行う。さらにバリデーション確立の資料は時系列に記録保存し，製造物責任への根拠とする。

空気中の微生物（ウイルス，リケッチア，マイコプラズマ，細菌，真菌など）の大半は有機性，無機性浮遊じんあいや水分微粒子と付着結合して存在していると考えられている。そして人体，動物，建物に付着して増殖をする。このことからバイオクリーンルームでもやはり空気中の浮遊じんあいの制御をすることが結果として浮遊微生物を抑制することにつながる。

2.2.3 食品工業

病原性大腸菌O-157に象徴されるように食品の製造環境は細菌，かび，酵母などのように防ぐかが最重要課題である。細菌類が及ぼす影響には腐敗，アレルギー，食中毒があり，この源となるのは大半が水と作業者の着衣や皮膚に付着するものである。医薬品工業の項でも述べたように微生物は水分やじんあいに付着して存在しており，食品用のクリーンルームでも浮遊じんあいのコントロールが最も重要となる。ただ，食品加工は人手によるものが大多数であることから清浄度を高めれば大丈夫とはいえず，細菌類の付着確率を低減し日持ちが良くなるという程度の効用と認識すべきかも知れない。

食品衛生の基準として弁当や総菜，漬物，生洋菓子，生めん類について厚生省環境衛生局通達が出されている。コンビニエンスストアで売られている弁当なども，この通達に基づいてクリーンルーム内で作られていることはあまり知られていない。最近になり新たな基準であるHACCP（Hazard Analysis Cirtical Control Point）（ハセップと呼ぶ）方式が導入されている。

HACCPは事前に人の健康にどのような危害が及ぶかについて調査し，その危害を防止するために何をどの時点で管理したらよいかを具体的に管理する方式である。

食品工業にて使用されるクリーンルームのレベルは浮遊じんあい量が10,000個/m^3程度のものが中心であるが，外食産業やコンビニエンスストアの増大に比例して需要が伸びる。

2.2.4 医療施設

病院におけるクリーンルームは敗血症（細菌感染において生体が細菌に侵され，血液中に細菌が検出される状態）を防止する目的として設置される。

病院内には感染に対して抵抗力の低下した患者が多数いることに加え，来院する側も各種各様の細菌類を持ち込む。健全な状態であれば影響しないような細菌類でも入院患者にとっては感染の原因となる。これを防ぐための指針として「病院空調設備の設計・管理指針」（HEAS-02）があり，清浄度のレベルはⅠからⅦまで規定されている。最も厳しい清浄度Ⅰは，空中細菌数を10個/m^3以下と規定している。

病院でのクリーンルームは手術室，未熟児室などに利用されていて通常，無菌病室と呼ばれている。ここでは患者の家族といえどもガラス越しのインタホンでの面会しか許されない。

3 最近のクリーンルーム機器

クリーン機器を構成する部材はHEPAフィルタと送風機の組合せであり，昭和40年代からほとんど変化はない。ただ，フィルタの補集対象粒径が0.3 μmから0.05 μmに微小化している。しかし補集理論やシステムが変わったのではなく，計測技術が発達して対象領域が拡大してきたことが一番の要因である。

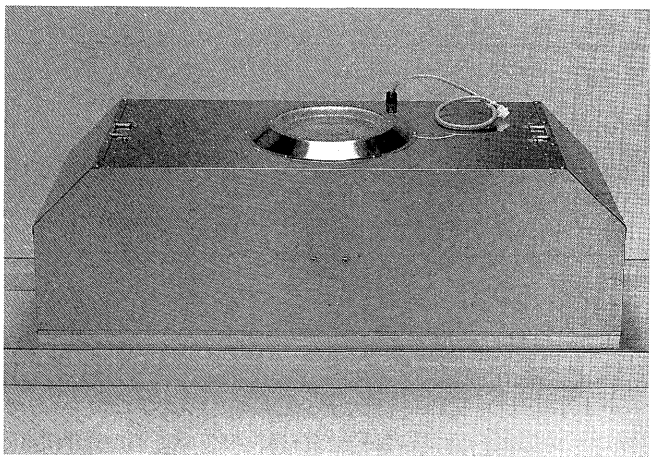
この状況のなかで最近めざましい性能向上と普及をみせているのがFFUである。FFUは外形寸法約600×1,200×400（mm）の送風機と高性能フィルタを組み合わせたもので，主として清浄度の高いクリーンルームで使用される。半導体工場では1フロアに3,000～4,000台が一度に使用される。（**図5**，**図6**はケミカルフィルタ搭載形FFUを示す。）

1987年の発売当初は1台あたりの消費電力が200 W程度であったものが現在は100 W以下まで低減してきている。ファンモータ効率は40％まで向上してきており，今後2～3年で50％程度まで改善できると考える。

表5は**図5**に示すFFUの基本特性を示している。特徴は，ガス吸着フィルタをユニット内に内蔵し，上面からの交換が可能となっていることである。これにより電動機のワニスから発生するガスも制御することが可能になるとともに，FFUを外すことなくフィルタ交換が容易となった。

ガス吸着フィルタの組合せにより，一つのクリーンルー

図5　ケミカルフィルタ搭載形 FFU の外観



N89-6619-15

図6　ケミカルフィルタ搭載形 FFU の断面図

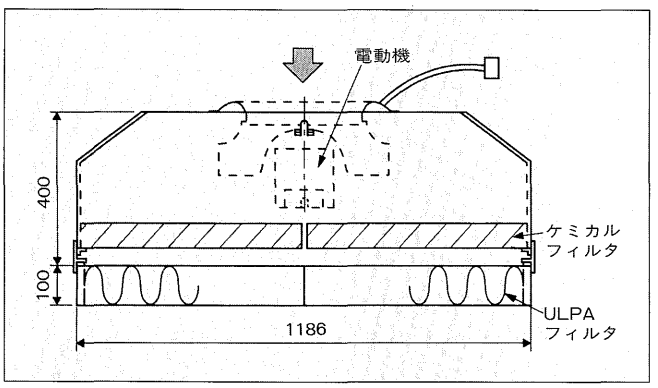


表5　ケミカルフィルタ搭載形 FFU の特性

項　目	仕　様
寸　法	581×1,186×500（mm）
質　量	約35 kg
フィルタ効率	0.1 μm，99.9997 %
電　源	三相，200 V，50 Hz，95 W
吹出し風速	0.4 m/s
騒音値	47 dB（A）
機外圧損	5 mmAq
ケミカルフィルタ圧損	5 mmAq
材　質	SUS430，鏡面仕上げ
シール材	一切使用せず

ム内でも異なった特性を持たせることも可能である。

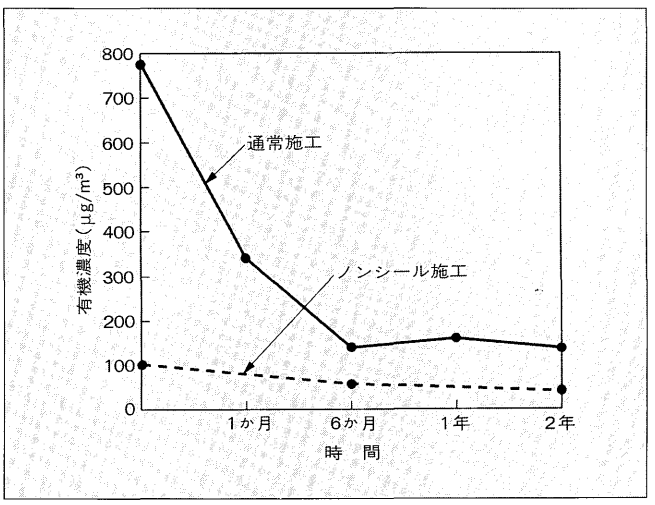
4　今後のクリーンルームシステム

半導体製造環境の高精度化が進むにつれ，従来は浮遊微粒子を制御できれば問題なかったものが，ガス状成分の濃度まで問題となりつつある。ガス状の成分がシリコン基板の上に付着して表面性状の変質が発生する。最近になりガス状成分が発生する材料や原因の定量化が進み，クリーンルームの建設時点での濃度予測も可能となってきた。**表6** は対象となるガス状成分の種類を表したものである。

表6　ガス汚染対象成分

有機成分	イオン成分	金属成分
ヘキサメチルジシロキサン（M2）	F^-	Na
ヘキサメチルシクロトリシロキサン（D3）	Cl^-	K
ジメチルヘキサン	SO_4^{2-}	B
n－デカン	NO_3	Fe
フタル酸ジ－n－ブチル（DBP）	PO_4^{3-}	Cr
フタル酸ジ－2－エチルヘキシル（DBP）	NH_4	Ni
アルコール，ケトンなど	ギ酸	Cu
脂肪酸エステル		Co
トルエン		Pt
酢酸エステル		Ta
エチルベンゼン		
キシレン		
脂肪族炭化水素		
高級脂肪酸エステル		

図7　クリーンルーム内の有機濃度変化



4.1　ガス状成分の発生原因把握と対策

ガス状成分を分析する場合，その特性から大きく有機成分，イオン成分，金属成分の三つに区分される。

有機成分の主な発生原因は壁のすきまに充てんするシリコンシーラントと床などに塗布する防じん塗料によるものである。**図7** はガス成分の発生対策を行わないで一般的なクリーンルームの工事を行った場合と，シール材をほとんど使用しないで工事を行った場合の総有機成分量のトルエン換算値である。一度シリコンシーラントを使用して工事を行ったクリーンルームは長い年月にわたってガスの発生がみられる。一方，シール材を使用しない場合には建設当初から有機濃度の値は低い。初期の濃度が高い原因としては，床や鉄骨に塗布した塗料や壁材に施工されたシール材から有機成分が発生していることが原因と考えられる。

一例として，コンクリート床 1,000 m^2 に防じん塗装を施した場合の塗料と溶剤の使用量は次のとおりである。

(1)　塗料：600 kg

(2) 溶剤：240 kg

溶剤として使用した 240 kg が気中に発散することとなり，これがガス汚染の原因となる。ただ，塗装材の場合，シーラントとは異なり早期に減衰するようである。

金属成分のうちボロンは高性能フィルタのガラス沪材から発生することが早くから知られている。沪材の改良や高純度化で対応する動きもあるが，コスト・品質面で問題も多い。この対策として**図 6** に示したような FFU にケミカルフィルタを装着した場合にフィルタ下流側のボロン濃度が低減することが判明しつつある。

4.2 クリーンルーム面積の縮小

半導体の 16 MDRAM の製造を行う場合のクリーンルーム面積は約 5,000 m^2 必要となり，ここで使用されるウェーハサイズは 200 mm ϕ である。今後 300 mm ϕ のウェーハが投入されることを想定するとさらに面積の増大は約 2 倍となることが予想される。このことは建設費の増大とランニングコストの増大を招き，投資コストの回収が難しい状況になりつつある。さらに前項で述べたようにクリーンルームの環境条件が厳しくなり建設費用は増大の一方である。

この状況を打開するにはクリーンルーム面積の縮小化が必要である。半導体工場のクリーンルームを見ると高度な清浄度を必要とするのは全体の 30 % 程度である。さらにこの中で実際に製品（ウェーハ）が加工されたり滞留するのは 20 % 程度となっている。すなわち 5,000 m^2 のうち 300 m^2 の面積を高清浄度に保つことができれば理屈のうえでは生産が可能となる。クリーンルームの大半は自動搬送機と点検のための通路として使用している。

今後は高精度なクリーンルーム面積の縮小のためにウェーハを密封容器に収納し，装置間を搬送してじんあい付着を防止するシステムの導入が進められると考える。

4.3 クリーン施工の徹底

通常のクリーンルームの建設風景を見ると一般の工事現場と何ら変わるところはない。ただ異なる点は工事の最終段階で純水により徹底的にふき掃除をしてじんあいを除去していることである。従来の要求レベルであればこれで十分であったが，最近の要求レベルの向上，さらにクリーンルームを建設して直ちに生産を開始する「垂直立上げ」の要求により施工段階からクリーンルーム内にて工事管理する思想が広まってきた。**表 7** は各工事段階における管理レベルを表したものである。

クリーン施工においては**表 7** に示したステップのほかに，搬入部材もふき取り清掃して持ち込む。このような管理を行い施工されたシステムは立上り当初からきわめて高い精度が確保できるだけでなく，装置稼動後においてじんあいによるトラブルの原因追求も容易となる。

表 7　クリーン施工ステップ

項　目	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4
作業内容	防じん塗装	天井内 ダクト配管	内装パネル アルミニウムフレーム	フィルタ装着 器具付け
清浄度 (0.5 μm)	−	$10^6/m^3$	$10^5/m^3$	$10^4/m^3$
服　装	一般服	一般服 上履き	簡易 防じん服	防じん服

4.4 ノンシールシステム

富士電機ではこれからのシステムとしてノンシール（揮発成分がない）システムを提案している。従来の方式は教科書に書かれているとおりに壁のすきまにはシール材で充てんして気密度を保っていた。また，天井のフィルタ装着部にもシール材を大量に使用していた。この方式は浮遊じんあいを除去するには十分であるが，半導体や記録媒体の製造にかかわるクリーンルームでは問題となりつつある。

取組みと対策は次のとおりである。

(1) メタルタッチシステム天井

従来使用していたガスケット，シール材をまったく使用せず，アルミニウムフレーム上にフィルタのアルミニウム枠を設置する。システム天井を構成するのはメタル（金属）のみである。

(2) ノンシール FFU

図 5 に代表されるような FFU にも一切のガスケット，シール材を使用していない。洗浄，組立もすべてクリーン環境で対応できる。

(3) 内装工事

壁材の接合部にはブチル系ガスケットを使用することで，従来のシリコンシーラントはまったく使用しない。

(4) 使用部材の分析

使用する建材からも無機系，有機系さまざまなガス成分が発生している。電線類や配管，塗料まで使用するすべての材料分析を富士電機内にて対応できる。

5 あとがき

クリーンルームの要素技術はフィルタと送風機であると述べたが，今後もこのことに大きな変化は生まれないと考える。ただし，バイオクリーンルームでは現在，空気中の細菌類の定量化に培養を用いて評価に長い時間を必要としているが，浮遊じんあいと同等にリアルタイムで計測が可能になるかも知れない。一方，半導体分野においても微量ガスの濃度測定が瞬時に行えるセンサが開発されて一層の精度向上の道が開ける可能性がある。そのような技術も近い将来実現するものと確信している。

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。