最近のクリーンルームシステム

横幕 博行(よこまく ひろゆき)　藤田 喜和(ふじた よしかず)　諏訪 延行(すわ のぶゆき)

1 まえがき

クリーンルームは，半導体・電子部品・精密機器などの産業分野および医薬品・食品などのバイオロジカル分野の製造プロセス，あるいは企業・大学などの研究用として幅広く利用され，年間4,000～5,000億円の大きな市場となっている。

この市場の主体となるのが半導体製造分野であり，1994年の国内における大手半導体メーカーの半導体生産額は4.6兆円，また液晶素子の生産額は4,000億円であり，これらの分野の設備投資額は，同年で7,500億円と見込まれている。クリーンルームの先端を行く半導体製造分野では，超LSIの高集積化・高密度化が進み，ケミカル汚染対策とともに粒径0.05 μmの粒子が1 ft^3の空間に1個しか存在しないスーパークリーンルームの実用化が要求され始めている。また，医薬品・食品分野では，空気浄化以外に滅菌・殺菌機能が要求され，このためにオゾンが利用されつつある。

富士電機は，これらの分野において数多くのクリーンルームの納入実績を有している。本稿では半導体および液晶製造用クリーンルームシステムおよびクリーンルーム機器に関する最近の技術動向について紹介する。

2 最近の半導体製造用クリーンルーム

クリーンルームに要求される精度は，半導体プロセスの目ざましい発展とともに年々厳しくなっている。今日までのクリーンルームは外気からのじんあいの除去と室内での生産装置や人体からの発じんを速やかに除去することで高清浄度の実現を図ってきた。気密性の確保や，じんあいの除去率の高いフィルタの開発により確保できた条件でもある。

現在の要求最小パターン寸法は0.3 μm，酸化膜の厚さは8 nm程度である。この加工条件の実現には，0.05 μm，99.9999％の補集効率を有するULPA（Ultra Low Particulate Air）フィルタにて対応している。しかしながらULPAフィルタでは粒子状の物質には対応できるが，ガス状の汚染物質の除去は不可能である。今後のクリーンルーム技術は，従来のじんあい除去技術にガス状のケミカル汚染物質除去技術を加味しながら進むものと考えられる。

一方，清浄領域を確保するためのファン動力はクリーン面積の増大に比例して増加の傾向にあり，クリーン度維持のために空調コスト全体の約60％を占める空調動力費の削減についても大きな課題である。

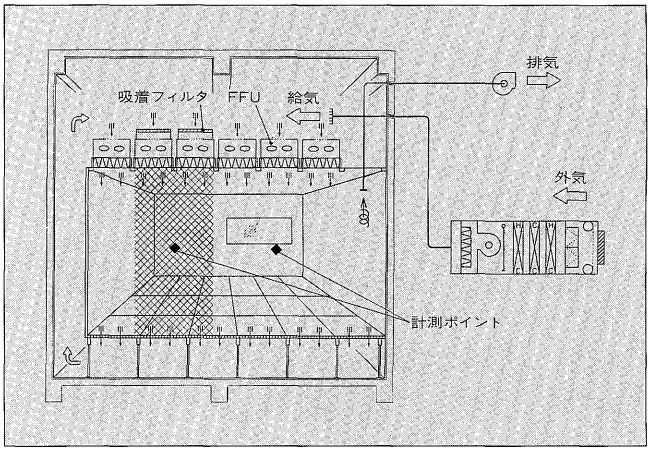
本章では，新たな技術課題として注目を集めている分子汚染対策に焦点を絞り，ケミカル汚染の定量化に向けて測定したクリーンルームの建設当初からの経時変化の状況を紹介する。

2.1 ケミカル汚染

クリーンルームが設置される外気環境には HCl，SO_2，NO_2 などの化合物があり，これらの物質は人為的には制御できないことから取入れ口にて吸着フィルタにて対応している。一方，クリーンルーム内で発生する成分については，内装仕上げ材料の選定や施工方法の改良により低減させることが可能である。

しかしながら，シリコンシーラントや塗装材などから発生する有機ガスの存在は従来から知られているが，時間変

図1 クリーンルームのイメージ図

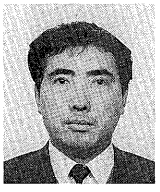


横幕 博行

昭和48年入社。クリーンルーム，ビル管理システム，コージェネレーションシステムを含む建築設備の技術企画に従事。現在，電機事業本部電機システム事業部設備技術部課長。

藤田 喜和

昭和46年入社。蒸気タービンの設計を経て，クリーンルームシステムの企画設計に従事。現在，電機事業本部電機システム事業部設備技術部主査。



諏訪 延行

昭和56年入社。クリーンルームおよびユーティリティ設備の企画設計，クリーンルーム用機器開発に従事。現在，電機事業本部電機システム事業部設備技術部課長補佐。

表1　クリーンルーム内外各種成分

成　分		竣工直後		1か月後	
		ULPA フィルタ直下	外　気	ULPA フィルタ直下	ガス吸着フィルタ直下
トリメチルシラノール	($\mu g/m^3$)	2	−	<1	<1
ドデカメチルシクロヘキサシロキサン	($\mu g/m^3$)	13	−	1.8	<0.1
有機成分合計	($\mu g/m^3$)	765	109	284	6
トルエン	($\mu g/m^3$)	126	48	89	6
1，3−ジメチルベンゼン	($\mu g/m^3$)	169	5	36	<1
Al	(ng/m^3)	<1	190	<1	<1
B	(ng/m^3)	58	17	140	110
Ca	(ng/m^3)	<1	450	2	<1

化による減衰の程度やフィルタからのボロン飛散の実態についての資料は少ない。今回はクリーン面積60 m^2 の全面層流の実際に使用される実験室での建設当初からの測定データを紹介する。システムは**図1**のファンフィルタユニット（FFU）によるダウンフロー 0.1 μm，10個/ft^3 をモデルとした。

このモデルではシリコンシーラント以外の塗装材，フィルタ，間仕切りなどについて特別な配慮をせずきわめて一般的な材料にて施工し，時間変化とともに内部性状がどのように変わるかについて計測を続けている。また，一部に吸着フィルタを設置し，部分的な対応で局所の高清浄化が可能であるかについても検証を行った。

2.2　成分の測定結果

表1は竣工（しゅんこう）直後の外気とフィルタ直下の測定結果である。シリコンシーラントからの発生は竣工直後と1か月後の数値を比較すると約1/7に減少している。また，有機成分は約1/2に減少しているが，初期の値が高いのは床の防じん塗装による影響である。

クリーンルーム内での有機成分の影響はガス吸着フィルタを装着した下面ではきわめて小さい値を示している。

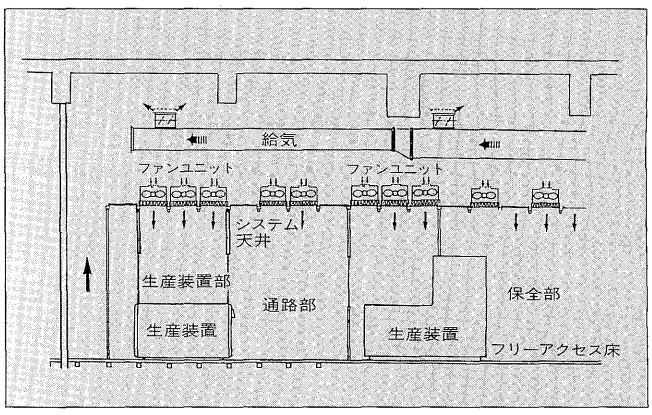
フィルタからのボロン飛散は竣工直後と1か月後の差異は認められない。フッ化水素（HF）による影響で飛散が加速されるという見方が一般的であるが，ここでは建設当初からボロンの飛散が見られる。

3　最近の液晶製造用クリーンルーム

CRT に対抗し代替するにはパネル単価を低減することが不可欠で，10インチ級で5万円台の実現に向け，パネルの多面取り化や歩留り向上などによる生産性の向上，良品率の向上などの努力がなされている。また，設備コストはパネルの大形化や生産ラインの自動化などにより高騰しつつある。このような状況のなか，クリーンルームに対してもなお一層の低コスト化，省エネルギー化の要請が強い。

一方，クリーンルームの清浄度は半導体のように高い必要はなく，クラス100（0.3 μm）程度といわれているが，実際の運用ではパネル基板が大きく，一つの欠陥も許されないためクラス10または1に近い値が要求されるのが現状である。したがって，液晶製造用クリーンルームでは，自動搬送車走行時などの運用面で生じる問題がじんあい・気流制御に与える影響を考慮してプロセスごとの必要な清浄度の見極めを行い，低コスト，省エネルギー化を達成したクリーンルームをいかに構築するかがポイントである。

図2　システム天井方式の液晶用クリーンルーム



クリーンルームの方式には，FFU をアルミ枠上に敷きつめるシステム天井方式と，クリーンブースをライン状に構成するクリーンブース方式があるが，それぞれにメリットがあり，そのどちらを採用するかは，ユーザーの液晶生産に対するコンセプトにより決定されることが多い。

富士電機では液晶製造用クリーンルームとして，この2方式とも製作している。以下にそれぞれの特徴を述べる。

3.1　システム天井方式のクリーンルーム

システム天井とフリーアクセス床で構成され，生産装置部，通路部（操作部），保全部を間仕切りなどで区分けし，それぞれの必要清浄度に応じ，FFU を敷きつめたクリーンルームである。

この方式の最大の特徴は，将来のパネルの大形化や高精度化に対する生産装置の入替えやレイアウト変更に容易に対応でき，フレキシビリティが高いことである。

また，FFU を全面敷きつめとすることができるため，将来の高清浄度化への対応が可能である。さらに，施工性が良い，工期が短いなどのメリットがある。

図3　クリーンブース方式の液晶用クリーンルーム

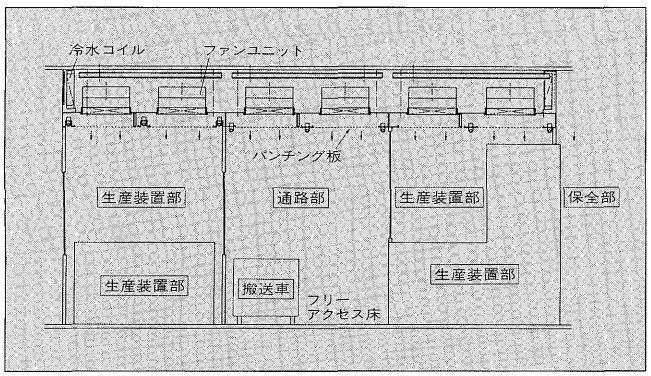


図2にシステム天井方式の実施例を示す。

3.2　クリーンブース方式のクリーンルーム

システム天井方式に対し，さらに低コスト化，省エネルギー化を図ったシステムで，装置寸法に合わせてクリーンブースを配置できるので無駄のないクリーンルームが構成できる。

従来，清浄度クラス100の場合，気流状態を全面層流とするが，このクリーンルームでは生産装置部をクローズ化することにより，均一な風速ではないがブース全面に気流を確保できる準層流形を採用した。これによりフィルタの占積率（フィルタの専有率）が低下でき，低コスト化，省エネルギー化に大きく寄与している。その構造は**図3**の実施例に示すようにブース吹出し部に拡散板（パンチング板）を設け準層流状態を形成している。低コスト化，省エネルギー化の代表的アイテムを以下に挙げる。

(1)　FFU の削減
(2)　標準高性能 FFU の採用
(3)　FFU サイズの統一化
(4)　局所形温度調整システムの導入
(5)　枠構造形クリーンブースの採用による軽量化

なお，この方式では将来の生産ラインの変更に対し追随しにくいとか，新設時に装置レイアウトの決定が遅延した場合，工事の進行が停滞する可能性があるなどの短所もある。

4　最近のクリーンルーム機器

富士電機ではエアシャワー，クリーンベンチ，クリーンブースなどの機器を製作し各種クリーンルームを構成している。本章では，その代表的な機器とクリーンルーム構成上の付帯技術について紹介する。

4.1　FFU 利用システム

前章で述べた各種クリーンルームのキーコンポーネントは，FFU である。これは高性能フィルタとファンを内蔵したユニットで構成したもので，**図4**にその構造原理を示す。特徴は，フィルタとファンが一体となっているためクリーンルーム内（フィルタ吹出し側）に対し，天井内

図4　ファンフィルタユニットの構造原理図

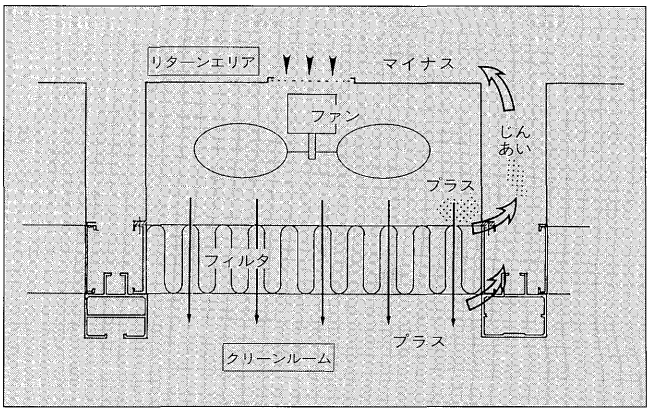


図5　ファンフィルタユニットの外形図

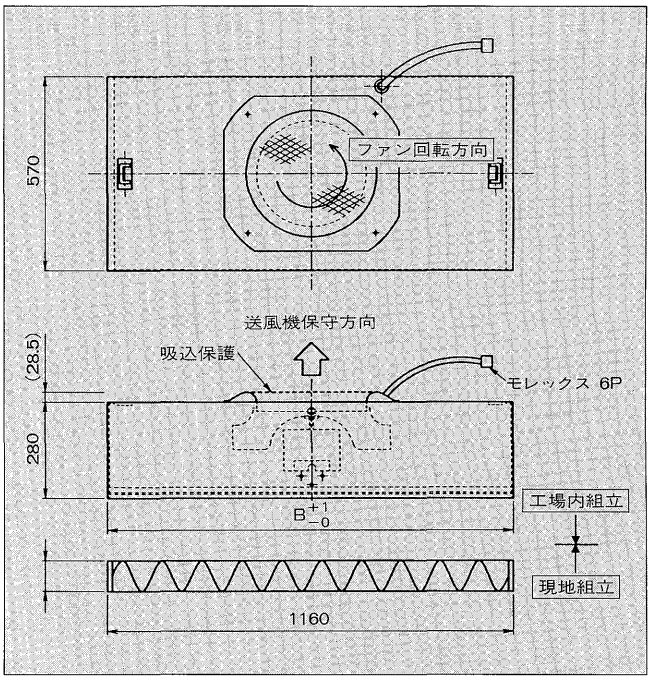


表2　ファンフィルタユニットの仕様

項　目	仕　様
吹出し風速	0.35～0.42 m/s
機外静圧	7～0 mmAq
集じん率	0.1 μm　99.9999 %
質　量	約 30 kg
電　源	三相，200 V，50/60 Hz
騒　音	46 dB(A)　床上 1,500 mm
消費電力	100 W 以下

（ファン吸込側）がマイナス圧であり，フィルタ支え枠部から汚染空気がクリーンルーム内に漏れることはない。したがって，この FFU を採用すれば，下記の利点がある。

(1)　フィルタ支え枠部のコーキングが不要である。
(2)　フィルタ支え枠部のリークテストが不要である。
(3)　施工が簡単で工期が短い。
(4)　生産装置レイアウトに合わせ自由に組合せが可能であ

る。

(5) ファン能力最大でフィルタサイズを選べるのでクリーンルーム全体のファン台数が低減し，低コスト，省エネルギーとなる。

今回開発した低騒音・低消費電力形FFUの外形図を**図5**に，仕様を**表2**に示す。このFFUには従来使用されていた消音材やシール材を一切使用せず，ケーシング材をステンレス鋼材，ファンをアルマイト処理のアルミ材で構成している。また，性能面でもファン形状の見直しなどにより消費電力100W以下，単体での騒音値46dB(A)を実現した。

4.2 クリーンルームの系統単位の局所温度調整システム

図3に示すように，クリーンブース方式のクリーンルームのリターンエアの戻り部に冷却コイルを設置し，生産装置およびクリーンブースが発生する顕熱負荷を取得し，温度制御を行うシステムである。これにより，各生産エリアの熱負荷に応じて局所的に温度制御ができるので，より効率的で高精度の温度制御が可能である。

一般空調のように空調機による熱負荷の処理に対し，下記の利点がある。また，冷却コイルはドライコイルのため湿度制御に影響はない。

(1) 温度調整精度の向上（±0.2℃），温度分布の安定化

(2) 空調機負荷の低減による低コスト，省エネルギー
- ○空調機の送風動力，冷暖房熱源の低減
- ○循環空気の過冷却，再加熱量の低減
- ○機械室の省スペース化

(3) 空調ダクトの低減と小口径化により，天井スペースの有効利用が可能

4.3 気流シミュレーション技術

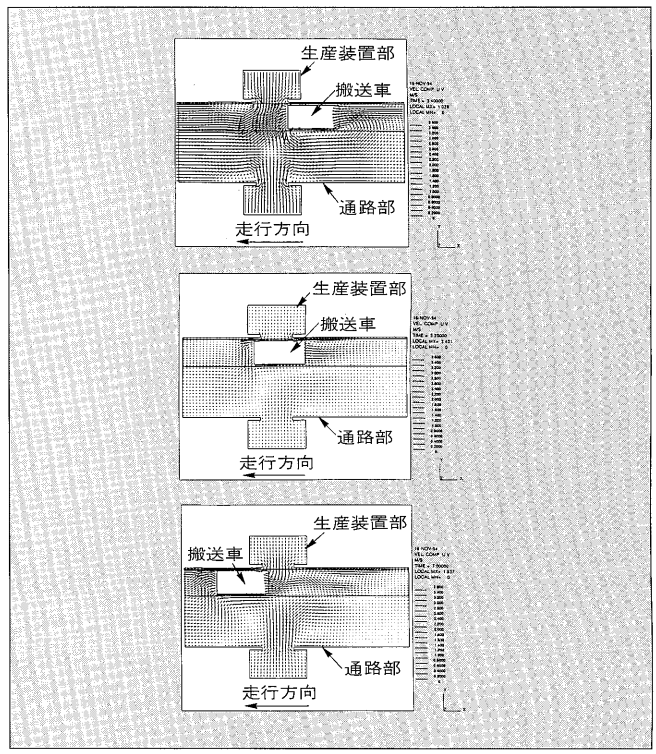
半導体，液晶の製造工場の建設コストは年々高騰しており，クリーンルームに対しても低コスト化，省エネルギー化が強く要請されている。最も有効な省エネルギーは，フィルタの吹出し風速を低風速化し，クリーンブースのファン動力を低減することである。現在，クリーンルームの風速は製造工程の自動化の進歩により，無人化傾向にあり，0.25～0.35m/s程度が一般的である。

この際，重要な問題点は低風速のため作業員や自動搬送車により，清浄空間の気流が乱され，清浄度が低下することである。したがって，低風速時の気流の状態，特に自動搬送車が走るなどの非定常時の状態を的確に把握し，気流制御する必要がある。

富士電機では特に気流解析用として開発した三次元解析プログラム（有限要素法）を用いて各種パターンの気流解析を行い，実機の気流実験と合わせて評価し，ゾーン別の風速の設定など，クリーンルームの計画時に役立てている。

図6は，その解析結果の一例である。クローズ化された生産装置部のパネルに，自動搬送車とのインタフェース用の開口があり，その横を自動搬送車が走行したときの自動搬送車前後の気流の状態および生産装置部内へ及ぼす影響を時間ごとに解析したものである。

図6　気流シミュレーションの実施例



5 あとがき

最近の半導体製造用クリーンルームにおける課題の一つであるケミカル汚染対策，液晶製造用クリーンルームの特徴およびクリーンルームの構成機器およびその付帯技術の特徴について紹介した。

今後さらに，半導体は高集積化，液晶は大形基板化および高精度化し，クリーンルームに対する要求精度も微粒子対策とともに分子汚染対策が不可欠となってきている。それに伴い以下に挙げる技術課題がクローズアップされている。

(1) ケミカル分子汚染対策技術
- ○プロセスゾーン別のケミカルフィルタの選定

(2) 静電気対策技術
- ○最適なイオナイザの選定

(3) クリーンルーム内の使用部材の再検討
- ○分子汚染対策に伴い，揮発性物質のない部材の選定
- ○静電気対策部材の選定（間仕切り材，塗料など）

(4) 品質評価技術
- ○ケミカル分子の分析技術
- ○静電気測定技術
- ○ナノメーターレベルの評価技術

富士電機では，これらの課題を従来に引き続き積極的に研究開発テーマとしてとりあげ，ノウハウの蓄積を図る予定である。また，ユーザーおよび関連各メーカーとより密着した共同研究を実施し，次世代クリーンルームシステムの構築に努める所存である。

＊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。