

IC工場のクリーンルーム設備

Clean Room System for Semiconductor Manufacturing

中島 登* Noboru Nakajima

半導体工場のクリーンルームは、製品の高集積化や高性能化に伴ってクリーン化が進み、トータルシステム的な検討が要請されている。そこで本稿は、VLSIの製造環境に関して、問題となる塵埃最小粒子径、清浄度、温湿度、振動及び経済性の5項目を挙げた。特に、超清浄空間の縮小化を中心に、最近の新しい考え方や技術を各目的に対応させた。具体例としては、最近、注目されている超清浄環境を指向したクリーントンネルプロセスモジュールの特長や性能について述べる。

1 緒言

半導体産業では、製品の歩どまり、品質及び信頼性向上のために、空気だけでなく純水、ガス、薬品など、すべてのユーティリティを対象にした製造環境のクリーン化が進められている。更に、LSIを超えて、VLSIを生産する現在では、製造技術だけでなく清浄環境に関しても、極限に近い要求が出されており、その実現には多大な費用を要する。したがって、クリーンルームのコストの低減化への技術的要請が強い。

ここでは、極限的な技術を必要とするVLSIの製造環境を実現するための問題点と、最近のクリーンルームでの空調除塵システムの技術動向について探ってみた。

2 VLSIとクリーンルームへの要求

2.1 問題となる塵埃粒子径と清浄度

半導体製造プロセスで、問題となる塵埃最小粒子径は、微細加工寸法の $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$ と言われており¹⁾、対象製品と並べて書くと図1のようになる。そのため、VLSIと言われるMOSランダムアクセスメモリの256kビットや1Mビット製品の時代では、

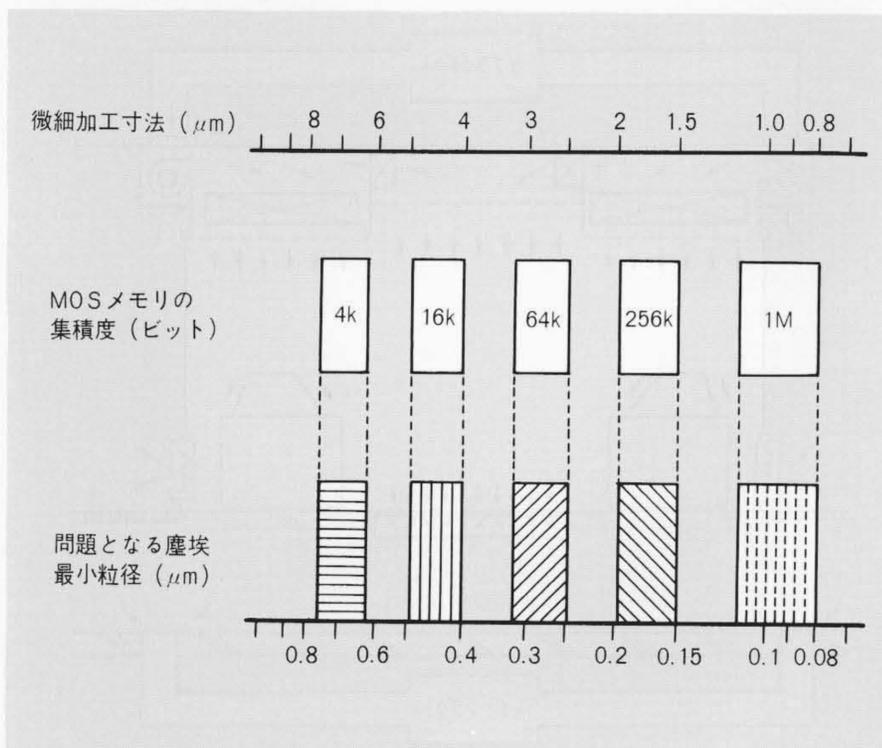


図1 微細加工寸法と問題となる塵埃最小粒子径¹⁾ 問題となる塵埃最小粒子径は、製品の微細加工寸法の約 $\frac{1}{5}$ の粒子径であり、1Mビットの製品では0.1μm以上の粒子径が除塵の対象となることが分かる。

製品の歩どまり、品質、信頼性の向上を図るには、同図からも明らかのように、従来の0.5μmの塵埃粒子径に代わって、0.1μmを対象にしたクリーン度の評価が必要となってきた。

製品の集積度の向上につれ微細加工寸法が使われ、工程数が増えるに伴い、付着異物の汚染に起因する製品欠陥率が急激に増加し、全製品欠陥の約80%に達している。汚染の要因は、製造プロセスの段階によって、作業員や製造装置によるもの、薬品・ガス類、ハンドリング時などが考えられる。製造プロセスの中では、付着異物によるパターン欠陥が発生するホットプロセスとホットマスク製造が、最も厳しい超清浄空間を要求している。

2.2 温度・湿度・振動

温度環境の厳しい製造プロセスは、清浄環境と同様にホットマスク製造とホットプロセスである。特に、1μm前後の寸法を対象とする電子線描画装置や縮小投影露光装置などの温度環境が最も厳しく、ウェーハが大口径になるとともに、シリコンウェーハとガラスマスクの熱膨張係数の差を考慮すると、作業環境の温度変動は±0.1℃以内に制御する必要がある²⁾。

また、微細パターンを形成するためには、レジスト塗布時で、ウェーハとレジストの密着性をよくすることが重要となり、湿度環境の影響が大きい²⁾。それに付着異物などの影響を考えると、できるだけ低い湿度環境でウェーハを取り扱うことが望ましく、相対湿度30~40%程度に制御する必要がある。製造プロセス室別の温湿度及び清浄度の環境条件を、表1に示す。

表1 製造プロセス室の温湿度及び清浄度の環境条件²⁾ ホットプロセス室の環境条件を中心とした任意の値を選んで、条件設定をしている。

室名	温度 (DB)℃	湿度 (RH)%	清浄度 (クラス)	備考
ホットプロセス室	20~23±0.1~1	30~40±2~5	1~100	日立サーマルクリーン併用
エッチング室	20~23±1~2	40±5~10	10~1,000	—
拡散室	20~23±1~2	40±5~10	10~1,000	—
炉室	20~30	60以下	10,000	—
更衣室・前室	23±3	30~60	100~10,000	—

* 日立プラント建設株式会社

電子線描画装置及び縮小投影露光装置などは、振動に関する仕様も厳しくなっている。その設置床面の振動許容値は、振動周波数20Hz以下の帯域で、垂直方向で0.75~1.5 μ mという要求がある。このため、防振台などの上に装置を固定し、床振動をしゃ断しなければならない。また、超清浄空間を必要とするこれらの装置のための空調除塵機器は、除塵空気量が多いために、大きな振動源要素となる。そのため、十分な防振対策が必要である。

2.3 経済性

清浄度が高くなるに伴って、クリーンルームの気流方式は乱流方式から層流方式へと進み、空調除塵システムも、除塵空気量の大容量化と大規模化から、大きな据付面積が必要となってきた。したがって、システムを収容する建屋及び空調除塵システムの建設費、運転管理費は、大幅に増加してきている。

製品の進歩が早く、製造環境の変更が頻繁に行なわれる昨今では、従来のトータルコスト(建設費+運転管理費)での経済性評価から、将来に予想される製造プロセス環境のグレードアップ化の改造などの費用をも含めた、クリーンルームのライフサイクルコストとしての経済性評価を考えるようになってきた。

3 超清浄環境への基本的な考え方

3.1 超清浄空間の縮小化

クリーンルーム全体を超清浄空間にする従来の方式に代わって、製品を処理するために必要な最小限の空間だけを、作業内容に合った清浄度に保つ経済的な方式として、クリーンモジュールシステムが開発され、最近設置されるクリーンルームに採用されている。

このシステムの基本的な考え方は、まずクリーンルーム内を、ウェーハ処理領域、作業領域、搬送領域、保全領域などの用途別にゾーニングする。そして、クリーン化しなければならない領域のグレード分けを行なうことによって超清浄空間の縮小化を図り、これによって、除塵に必要な空気を取扱い量も少なくなるとともに、3.5で述べる端末バイパス処理方式を導入することによって、空調環境もプロセス側の要求に十分応ずることも可能となってきた。

また、取扱い空気量の縮小化によって問題点の一つである建設費、運転管理費の低減が可能になるとともに、除塵装置、空調装置スペースの縮小化も可能となる。

3.2 HEPAフィルタ

前述したように、塵埃粒子径0.3 μ mを除去対象とした従来品のHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタでは、256kビット製品用としては十分でなく、製品の歩どまりや信頼性の向上を求めることは難しい。また、外気の塵埃濃度の分布から推定すると、0.5 μ m粒子径の塵埃濃度に対して、0.1 μ m粒子径の外気塵埃濃度は約100倍となる。したがって、0.1 μ m粒子径を除去対象とした要求清浄度を確保するには、従来品のHEPAフィルタで除塵空気量を増加させる方法と、フィルタ効率の向上の2方法が考えられる。後者の方法である新しく開発された0.1 μ m粒子径を除去対象にしたHEPAフィルタの採用は、除塵空気量の増加を抑制でき、より経済的なシステムとすることができる。

3.3 気流

全面垂直層流方式でも大規模になると、室内の気流を均一化することが難しい。特に、室内に設置された製造装置の形状、高さ、据付面積などの違いによって、ウェーハ処理面高さに巻き込み、巻き上げ、停滞域などの気流の変化が起こりやす

い。これは、吸込空気流の偏流と製造装置の形状や配置などに起因している場合が多い。したがって、ウェーハ処理領域で、装置の形状、配置などを考慮した最適な室内気流に制御するには、超清浄空間を縮小し、吹出し側を均一気流とし、吸込み側に風量調整機能をもたせることが重要となる。

また、他に比べて最も高い清浄度のウェーハ処理領域は、最上流側にして、清浄度順に除塵空気を合理的に流すことで、汚染空気の逆流が防止できる。それに、最下流側となる保全領域は、他の領域の除塵用空気を使っても十分にクリーン化することができる。クリーンモジュール内の基本的なエアフローを図2に示す。また、応用例を図3に示す。

3.4 温度・湿度・振動

ウェーハ処理領域を中心にした室内温湿度精度は、温度が $\pm 0.1 \sim 2^\circ\text{C}$ 以内、湿度が $\pm 2 \sim 10\%$ 以内としている。特に、温度が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内、湿度が $\pm 2\%$ 以内を要求するマスク製造装置や露光装置などは、単独で運転制御ができる超精密恒温恒湿ユニットで対応できる。表2に日立サーマルクリーンの性能を示す。

温湿度制御点数についても、室全体を代表する一点での制御方法から、製造プロセスや製造装置ごとに細分化したエリアでの制御方法に変わってきた。そこで、多数の制御点で最適な温湿度を確保するには、空調器から除塵用ユニットへ給気する空調空気の温湿度を安定させることが重要である。

空調器で最適な供給温湿度に調整された空調空気を、除塵用ユニットで、除塵空気量の一部として取り入れて、クリーンルーム内に最適な温湿度環境を確保する端末バイパス処理方式の制御フローの一例を、図4に示す。

システム機器からの振動をしゃ断するために、大きな振動源となる大形の空調除塵システム機器などは、クリーンルーム建屋から分離して設置したり、空調給気ダクトなどの配管類にも防振継手や防振支持金具を用いた取付方法を採用し、

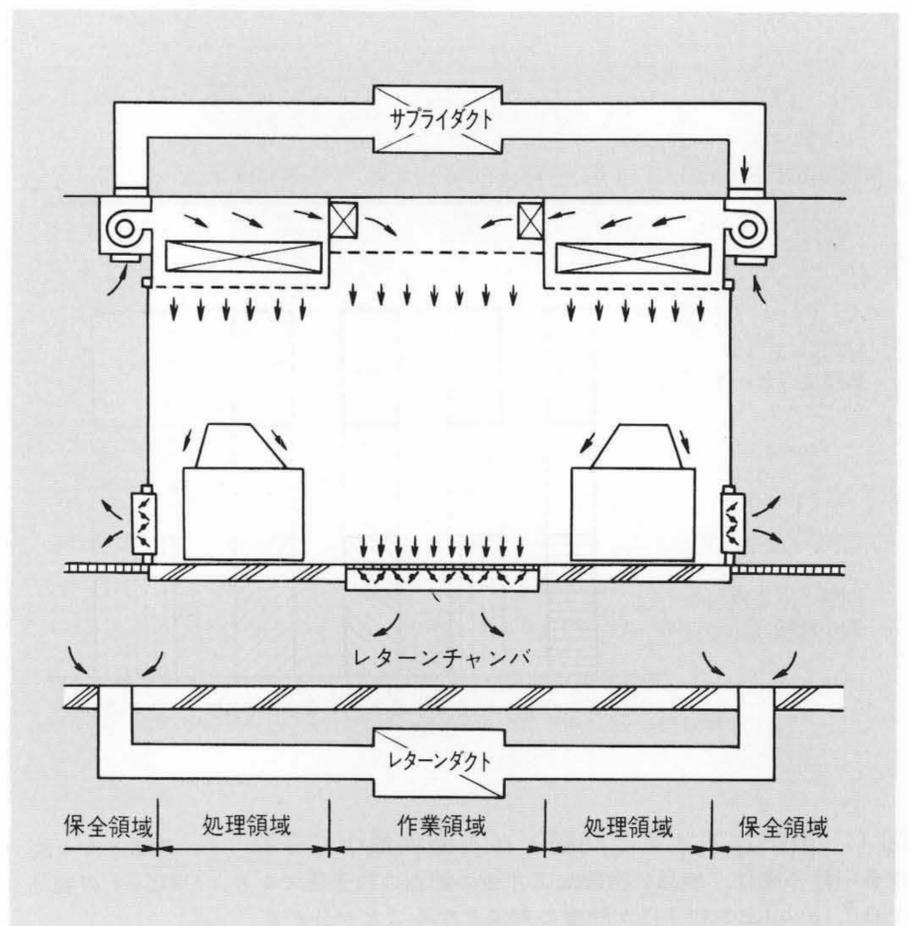


図2 クリーンモジュール内の基本的なエアフロー ウェーハ処理領域の上部吹出面から作業領域の床と保全領域に向けて、清浄空気が流れる。これによってウェーハ処理領域を最上流にできる。

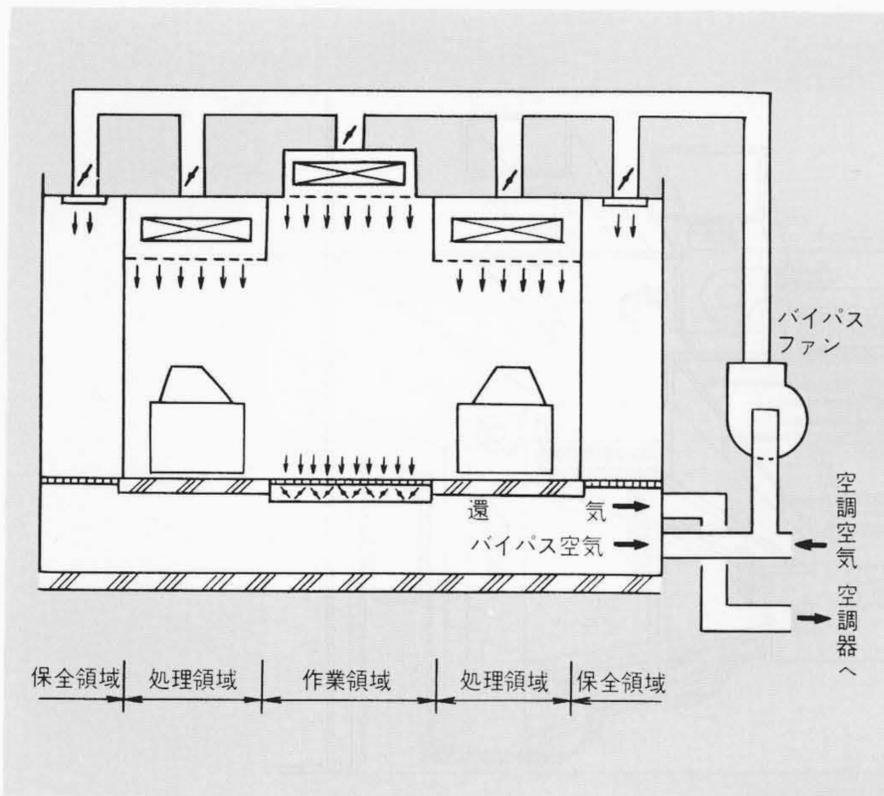


図3 既存建屋利用での応用例 バイパス処理方式を既存設備に応用した中間バイパス処理方式の例を示す。

表2 日立サーマルクリーンの温湿度条件及び塵埃条件 (a) 超精密恒温恒湿の要求に対応できることが分かる。(b) 超清浄空間を要求する場所に適用できる。

(a) サーマルクリーンの温湿度条件

	チャンバ内					設置場所		
	温度 (DB)	精度 (DB)	立上り安定時間	湿度 (RH)	精度 (RH)	温度 (DB)	精度 (DB)	湿度 (RH)
循環式	20~25℃	±0.1℃	30分	50~60%	±2%	20~25℃	±3℃	55%以下
開放式	20~25℃	±0.1℃	30分	50~60%	±2%	20~25℃	±1℃	55%以下

注：1. 温度保証は、条件により設定空間全体を対象とするが、一般には検出端保証となる。

2. DB(乾球温度) RH(相対湿度)

(b) サーマルクリーンの塵埃条件

チャンバ内		設置場所
粒径	個数	
0.5μm	1個/ft ³	クラス100,000程度
0.1μm	100個/ft ³	

十分な防振対策を施す必要がある。

3.5 空調除塵方式と省エネルギー

最近の省エネルギー形空調除塵システムとして、採用されている末端バイパス処理方式がある。この方式のキーポイントは、空調空気と除塵空気とを均一に混合させる技術にある。しかし、空調空気量は、除塵機能と空調機能を分離処理するために、除塵空気量の約1/3以下になるケースが多く、末端バイパス処理方式は従来の全量循環の中央処理方式と比較して、送風機容量、冷凍機容量などの空調システム容量が大きく縮小化され、更に空調環境もプロセス側の要求どおりきめ細かな制御を行なっても還気による再熱が可能となるために、再熱用の温熱源もほとんど不要になるので建設費の低減となり、また運転管理費も大幅に低減させることも可能となる。

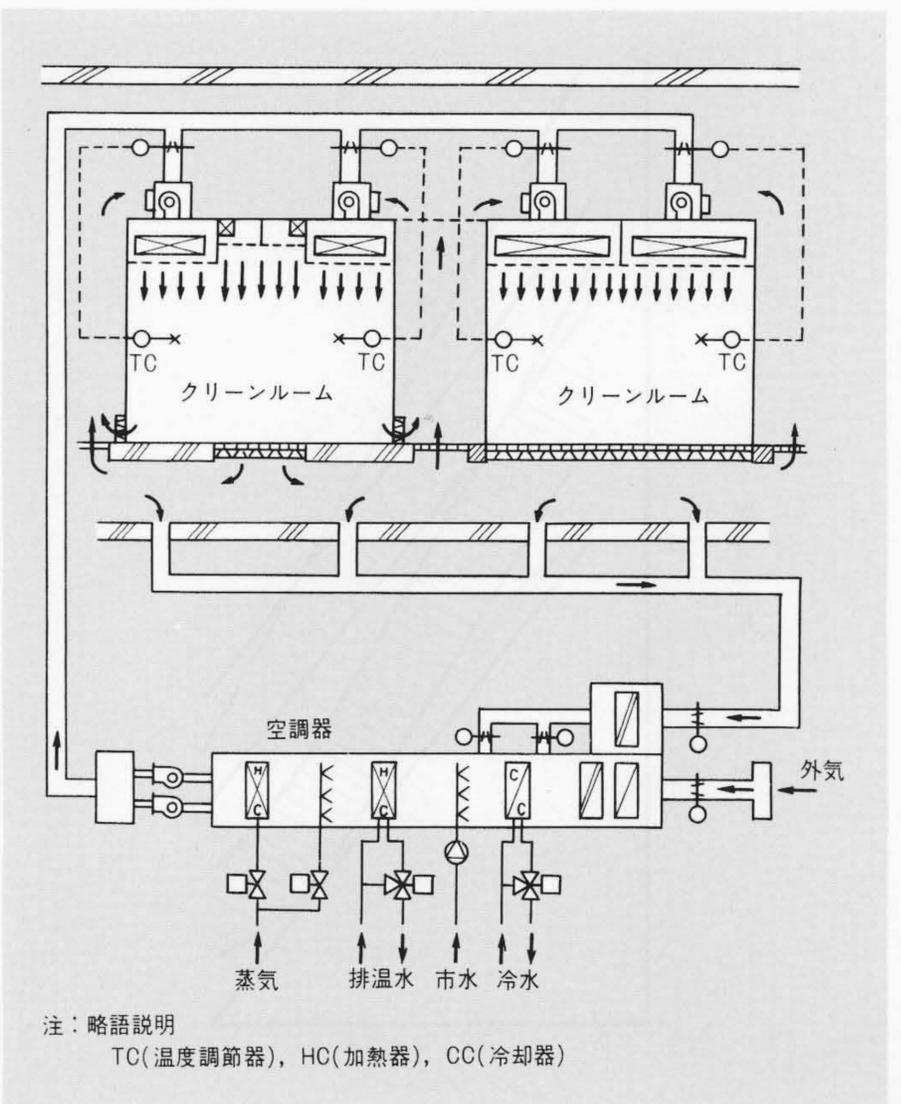
4 クリーントネルモジュールシステム

4.1 システム構成と特長

クリーントネルモジュールシステムは、省エネルギー的な考え方を基本に、トータルシステムとして製品を処理するために必要な最小限の空間を、超高精度にクリーンルーム化したものである。この新システムは、製造プロセスラインの最小必要エリアを1ユニットにし、各処理工程ごとに製造装置とクリーンルーム用内装パネル、HEPAフィルタ、送風機、照明器具などから構成されるクリーンユニットと制御装置から成るシステムプロセスモジュールとをユニット化し、高度な環境条件を作り出すようにしたものである。

システムプロセスモジュールを、各製造プロセスラインに応じて必要数配列し、これをクリーントネルで接続する。このユニット内部は、高精度のクリーンゾーンであり、外部は準クリーンゾーンとなって、製造装置のメンテナンスエリアとなる。このため、高精度のクリーンゾーンに入る人及び物だけが厳密な塵埃管理を受けることになる。また、製造プロセスの大幅な変更の対応に難があるが、このシステムの特長としては、

- (1) 取扱い風量が少なく、装置全体が比較的小さくなる。
- (2) 建設費、運転管理費が全面垂直層流方式より大幅に低い。
- (3) 建物の内装は、クラス1,000程度で良い。
- (4) ユニットは、増産計画に応じて増設でき、効率的な投資が可能となる。
- (5) フィルタの枚数も少なく、メンテナンスエリアが明確に分かれており、保守が容易である。



注：略語説明
TC(温度調節器), HC(加熱器), CC(冷却器)

図4 省エネルギー形空調除塵システムの制御フロー 要求温湿度環境は、細分化された多数の末端バイパス式除塵用ユニットごとに、安定した空調空気の取入量を制御することで確保している。

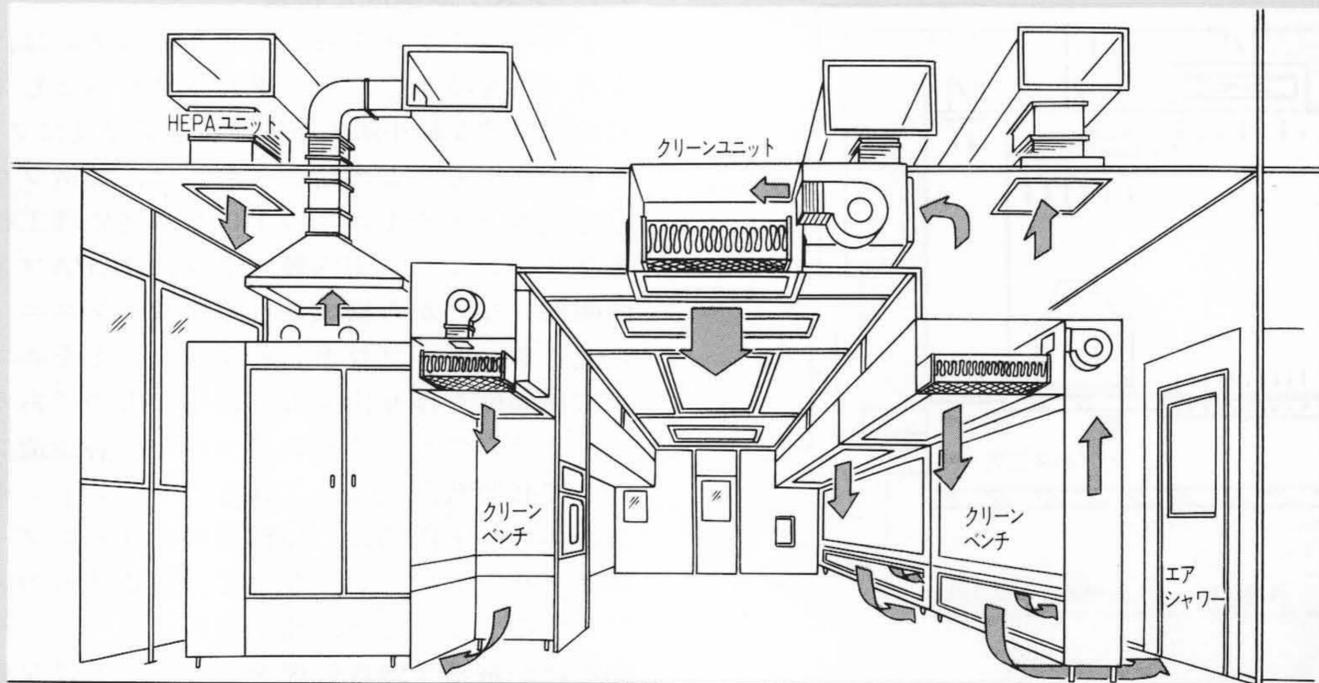


図5 システムプロセスモジュール概念図 使用する目的により最適な構造及び気流方式が選定される。クリーンベンチを利用した幅木吸込方式の一例を示す。

(6) 天井の内外にダクトや配管が施工でき、装置へのユーティリティ配管も比較的容易にできる。などが挙げられ、これらは全面垂直層流方式の欠点をカバーしている。また、図5に幅木吸込式のシステムプロセスモジュールの一例を示す。

4.2 清浄度性能

クリーントンネルモジュールシステムの基本的な空調除塵方式は末端バイパス処理方式であるが、吸込気流には、全面床吸込と幅木吸込及び両者併用の3種類があって、各プロセスモジュール内を最適環境にしている。

モジュール内のウェーハ処理領域の清浄度は、 $0.3\mu\text{m}$ の粒子径でクラス10相当の清浄環境になっている。作業領域は、ウェーハ処理領域よりも1ランク低い清浄度で運転管理されており、図6に示すような清浄環境になっている。

$0.1\mu\text{m}$ 粒子径で100個/cf以下という超清浄環境は、 $0.1\mu\text{m}$ 粒子径を除去対象にしたHEPAフィルタの採用と、室内気流の制御技術、リーク防止技術、使用材料の選定などの実績技術とによって、クリーンモジュール内で実現している。

5 結 言

微細加工寸法 $1\mu\text{m}$ 程度の製品までのクリーンルームは、既に述べたような最新のクリーン化技術で、それほど困難もなく対応できると考えられる。しかし、製品の歩どまり、品質及び信頼性の向上は常に求められなければならない。したがって、クリーンルームばかりでなく、供給ガス・薬品類及び製造装置のクリーン化も併せて推し進めることが必要である。また、超清浄空間のよりいっそうの縮小化によって、クリーンルームのライフサイクルコストの低減も可能と考えられる。

更に、将来の $0.5\mu\text{m}$ 製品の製造環境としてのクリーンルームにはまだ不明点が多いが、 $0.05\mu\text{m}$ 程度の粒子径を対象にした超高性能フィルタの開発と、製造方法にマッチングした新しい空調除塵システムの開発が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 小宮, 外: 超LSI用クリーンルームをめぐる諸問題, 空調清浄技術講習シリーズ第19回, コンタミネーションコントロールをめぐる最近の問題点, 社団法人日本空気清浄協会, 3(1979)
- 2) 草柳, 外: 最適IC・LSI製造システムの実例と関連設備技術の最新動向, 日本技術経済センター, II・36(1981)

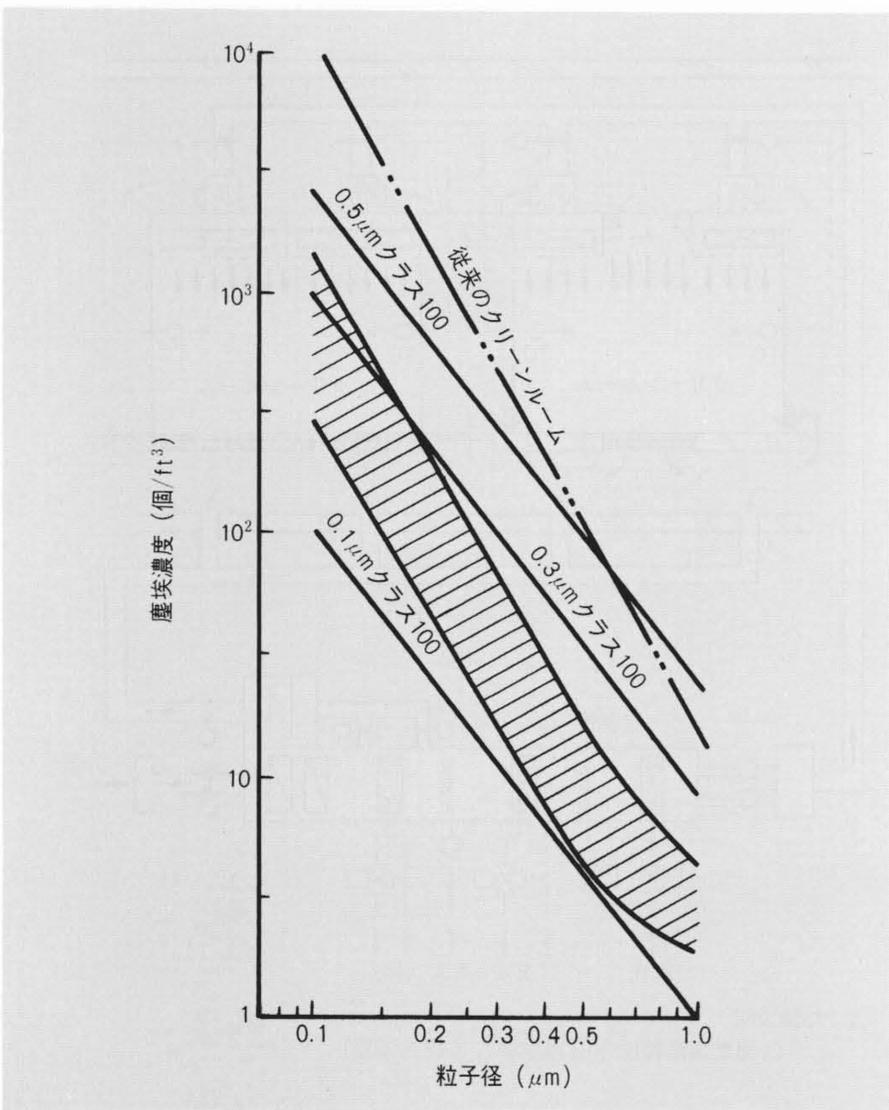


図6 プロセスモジュール作業領域の塵埃粒子径分布 稼動中の作業領域の清浄環境を//////を示した。各プロセスモジュール作業領域の清浄度は $0.3\mu\text{m}$ 粒子径で100個/cf以下に管理されていることが分かる。