

スーパー クリーン ルーム技術

Super Clean Room and Contamination Control Technology

エレクトロニクス工業で製造プロセスでのクリーン化技術の要求は、製品の微細化・高密度化とともに高まっている。従来、クリーン化技術はクリーンルームに先導されて進歩してきたが、半導体プロセスがサブミクロンプロセスへと高度化した現在では、製造プロセスに関するすべてを網羅したトータルシステムのクリーン化が必須(す)となってきた。

サブミクロン時代のクリーン化技術は、環境、装置、材料、人、作業などすべてを計測に基づいて、製品の技術レベルに適合するようにクリーン化する総合技術である。

井上 滉* *Hiroshi Inoue*
 土肥隆志** *Takashi Doi*
 牧 道義*** *Michiyoshi Maki*
 福渡一郎**** *Ichirō Fukuwatari*
 須田 匡***** *Kyō Suda*

1 緒 言

エレクトロニクス工業は、高度情報化社会へ向けてますます発展の一途をたどっている。エレクトロニクス工業の高度化の中心は、半導体工業での微細化と高密度化であろう。高度化に伴って、もっとも重要な基本技術の一つに位置づけられるようになったクリーン化技術は、半導体工業でもっとも

進展した。とりわけスーパー クリーン ルーム技術を中心として発展し、これはエレクトロニクス工業全般の技術として波及している。

シリコン基板 1 cm^2 の上に1,000万個の素子が加工されるといふLSIの高集積化時代にあつて、図1に示すダイナミックメ

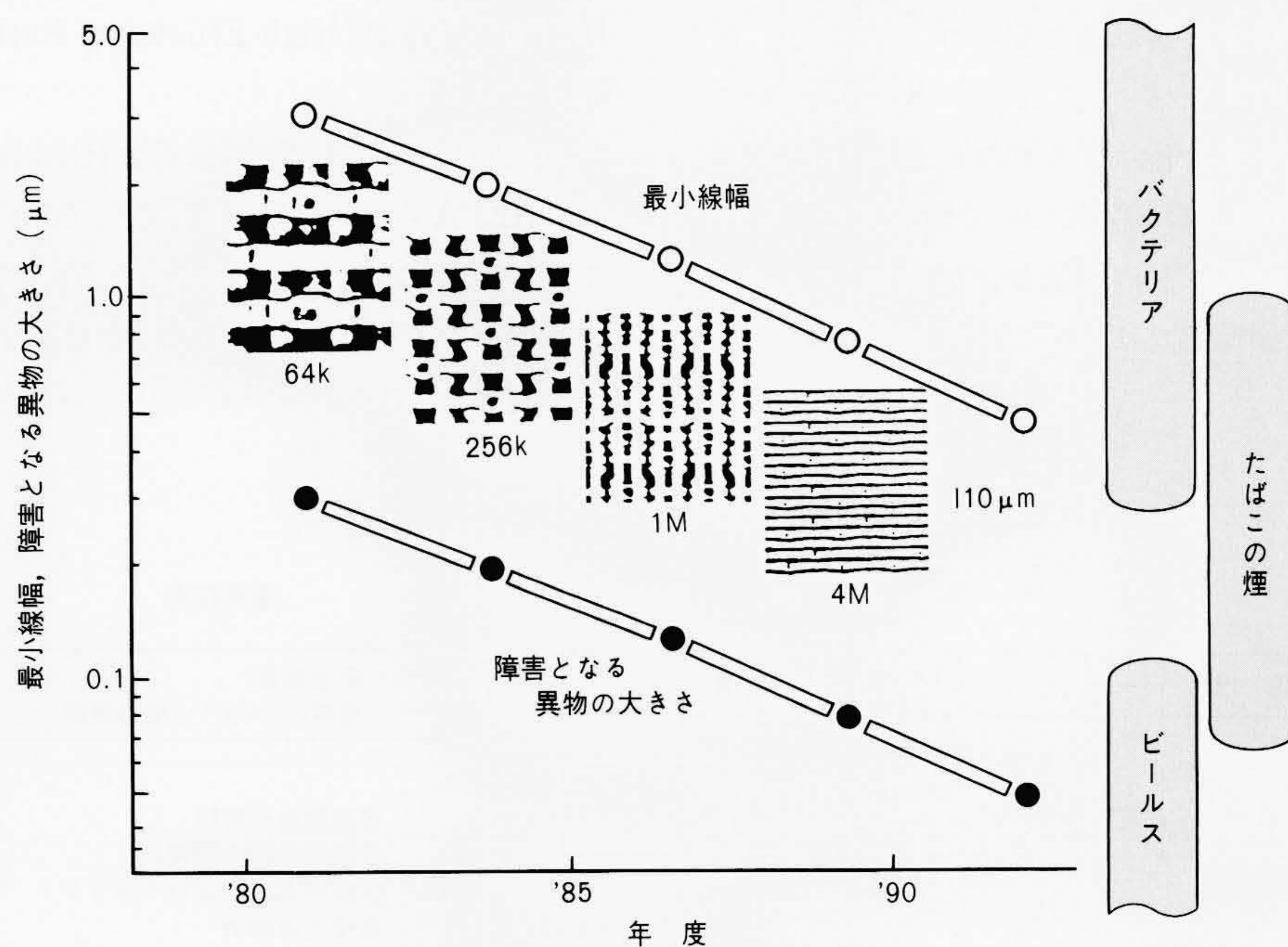


図1 ダイナミックメモリの最小線幅と障害となる異物の大きさ 障害となる異物の大きさは、線幅の $\frac{1}{10}$ である。4 MDRAMからサブミクロンプロセス($0.8\mu\text{m}$)になる。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所システム事業部 *** 日立プラント建設株式会社 **** 日立機電工業株式会社佐野工場
 ***** 日立電子エンジニアリング株式会社技術本部 理学博士

モリの例にみられるように、微細加工はサブミクロンの精度が要求されるに至った。現在主流となっている1MDRAMの線幅は $1.3\sim 1\mu\text{m}$ である。このとき障害となる異物の大きさは線幅の $\frac{1}{10}$ と言われる。つまり、直径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の異物は障害となる。製造不良の内訳を分析しても、製造プロセス上でのパターン欠陥が不良の70%以上を占めている。この欠陥はプロセス途上でのシリコンウェーハやマスク上への異物付着汚染によるものである。1Mビット、4Mビット、16MビットとLSIの集積度が高まるにつれ、不良が異物付着によるという傾向はますます強くなる。

このように、LSIの歩留まりと信頼度を左右するものがパターンの欠陥であることは明白であり、ますます微細化するパターンの欠陥を低減し、LSIの歩留まりと信頼度を向上させるためには、プロセスのクリーン化技術が必要である。

顧みると、そもそもトランジスタの誕生はゲルマニウムやシリコンの純度を9ナイン以上に純化したことによる点を考えると、半導体工業は材料の純化というクリーン化技術がもたらしたもの、とすることができる。

今やクリーン化技術は、半導体工業での結晶成長、微細加工、ドーピング、薄膜形成などの技術と並ぶもっとも重要な基本技術となっている。この技術内容を分類すると図2のようになろう。環境のクリーン化、装置やプロセスのクリーン化、材料のクリーン化、そして何がクリーンかといった計測評価技術の発展が、これからの半導体工業およびエレクトロニクス工業の一つの重要な技術基盤となろう。

本稿では環境としてのスーパー クリーン ルーム、スーパー クリーン ユーティリティとサブミクロン異物計測評価、および工程内クリーン搬送と自動化について概説する。なお、本誌の別論文にクリーンルーム内気流および塵埃(じんあい)挙動解析、高性能異物分析装置についての詳細が掲載されているので参照されたい。

2 スーパー クリーン ルーム

2.1 微小粒子の挙動

粒径 $0.1\mu\text{m}$ の浮遊塵埃の身近なものに、たばこの煙がある。一般的なイメージで、非常に小さいものと考えられているバクテリアなどの微生物は、 $0.3\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ もあり、ここで議論している大きさからいえば、粗大ごみとすることができる。図1に示したように、今後対象となるのはインフルエンザウイルス($0.05\mu\text{m}$)などのような微小粒子である。

通常、大気中には $0.1\mu\text{m}$ 以上の大きさの粒子は 10^5 個/l以上存在している。これらは岩石の細粉、ばい煙、海塩、 NO_x 、 SO_x などを核として生成された粒子、微粒子など、いろいろなものから成り立っている。

図3に示すように、粒子は小さくなるに従って浮遊しやすく、大きくなるとどんどん沈降する性質がある。すなわち、小さな粒子は空気分子と次々に衝突して、大気中をフラフラ浮遊する、いわゆるブラウン運動をする^{1),2)}。粒径 $0.3\mu\text{m}$ くらいの大きさで、ブラウン運動による拡散速度と自由沈降による速度が同じになる。つまり、 $0.3\mu\text{m}$ より小さな粒子は沈降しないでいつまでも大気中をフラフラしている。

2.2 $0.05\mu\text{m}$ HEPAフィルタ

クリーンルームなどに使われるエアフィルタのうちで、 $0.3\mu\text{m}$ の粒子に対して99.97%以上の集塵効率を持ち、初期圧力損失が 245 Pa ($25\text{ mmAq}\div 25\times 10^{-4}\text{ kgf/cm}^2$)以下のものをHEPAフィルタ(High Efficiency Particulate Air Filter)と呼んでいる。

日立製作所、日本無機株式会社は以前、他社に先駆けて $0.1\mu\text{m}$ HEPAフィルタを開発した³⁾。次いで $0.05\mu\text{m}$ HEPAフィルタも実用化した^{4),5)}。 $0.05\mu\text{m}$ HEPAフィルタの集塵効率は従来のものより1桁(けた)以上も高くなっており、 $0.05\mu\text{m}$ 粒子を対象としたスーパー クリーン ルームを造るのに障害は

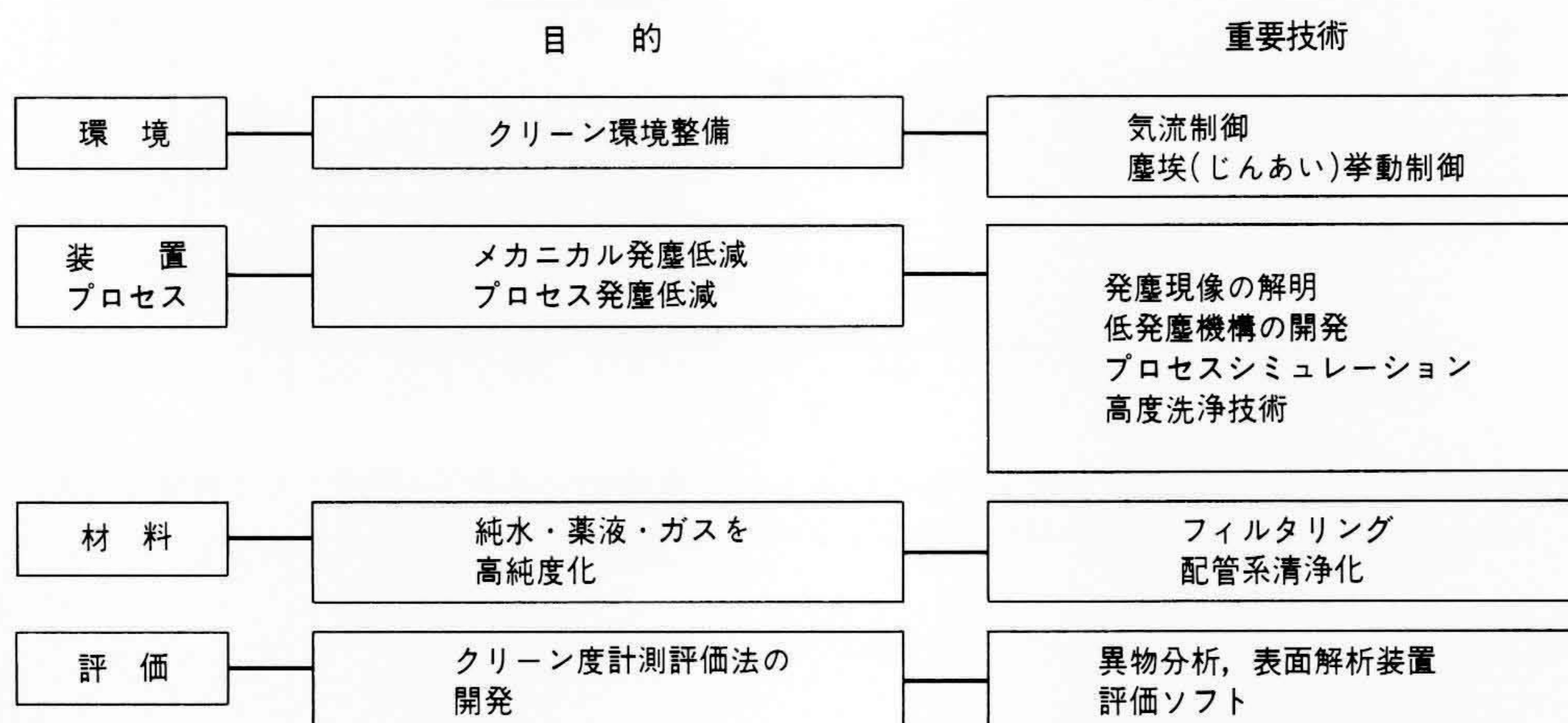


図2 半導体前工程のクリーン化技術 クリーン化技術は、技術分野が多岐にわたっている総合学問分野である。

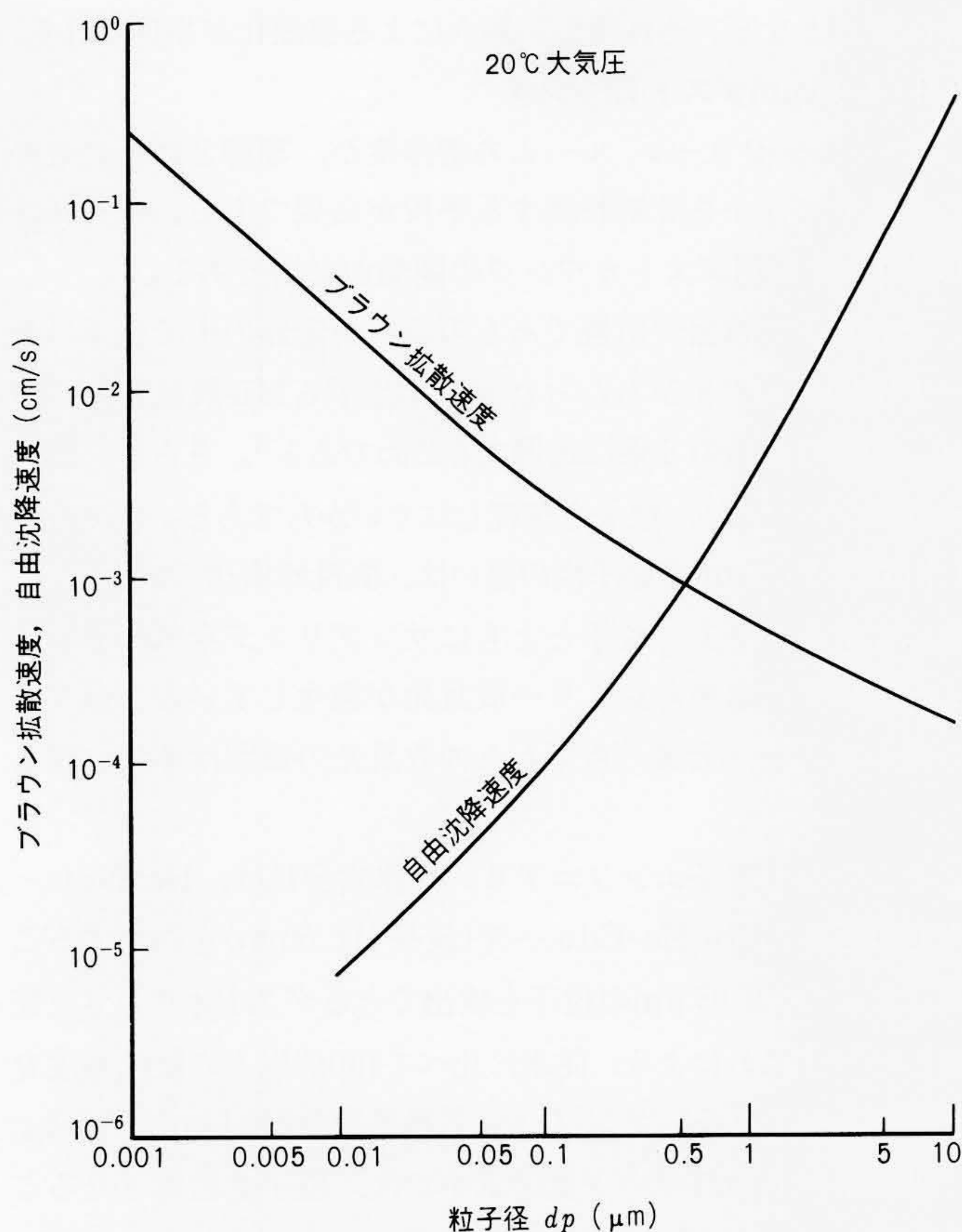


図3 塵埃の粒径とブラウン運動速度 粒径が小さくなると自由沈降速度は小さくなり、ブラウン運動速度は逆に大きくなる。粒径0.5 μm で交差する。

ない。一方、フィルタの圧力損失はほぼ従来のものである。
汙材であるガラス繊維の品質管理を高レベルに改良することによって集塵効率を高めることができ、また空気の汙過面積を増すようにフィルタ構造を改良することによって圧力損失の増加を抑えることができた。

集塵効率は粒子径が0.1 μm までは、粒子径が小さくなるほど悪くなるが、0.1 μm より小さくなると、逆に再び良くなる。これは粒子がフィルタを通過する際に、ブラウン運動によって汙材のガラス繊維に付着するためと考えられる。

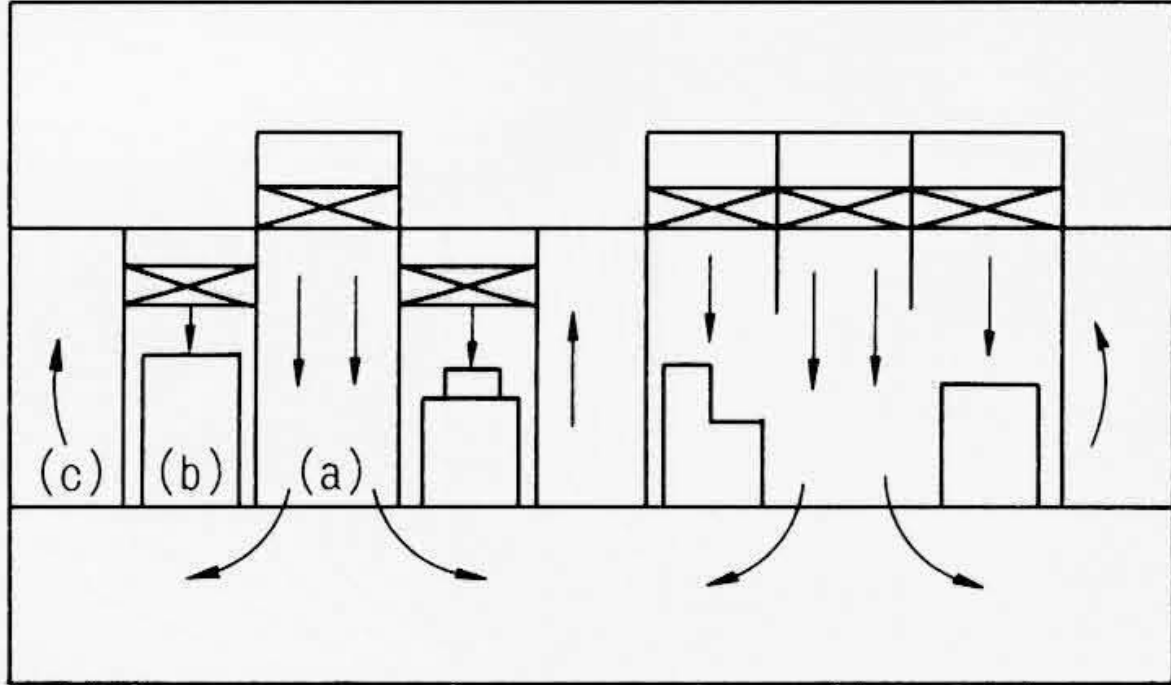
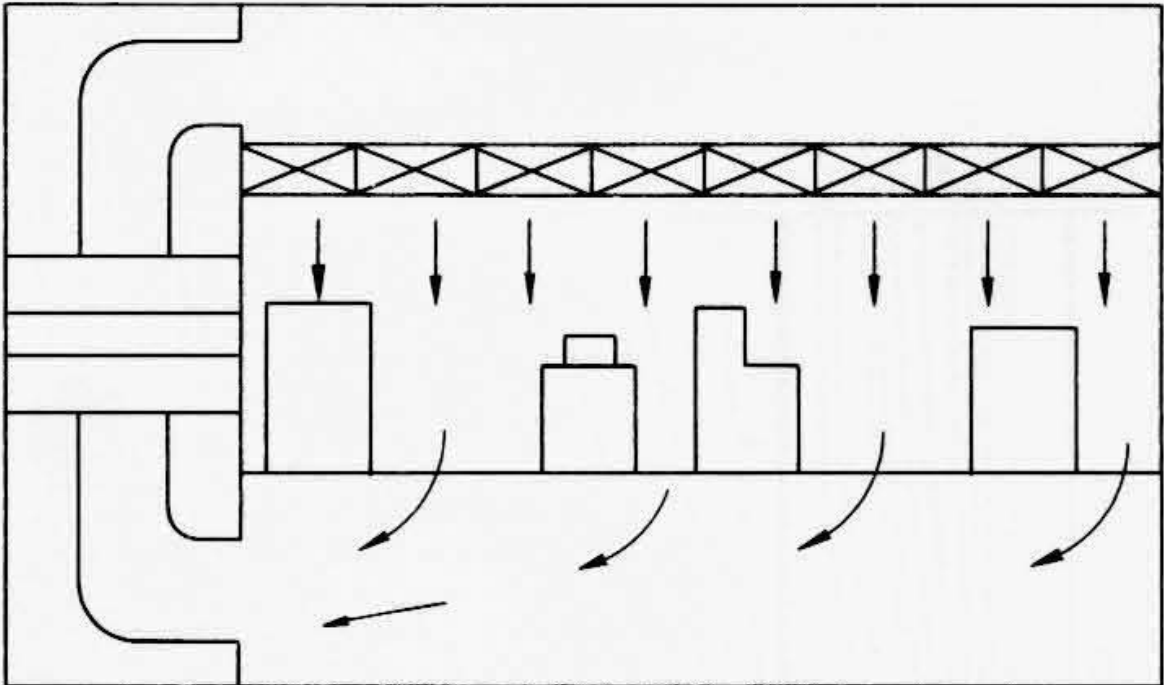
したがって、0.05 μm HEPAフィルタとは、0.05 μm の微小粒子を捕捉(そく)できるフィルタというよりも、0.05 μm の粒子に対して集塵効率を規定しているフィルタであると考えるのが妥当である。

2.3 スーパー クリーン ルーム

スーパー クリーン ルームの方式を大別すると、表1に示すように、トンネル構造と全面垂直層流(全面ダウンフロー)構造となる。それぞれの方式について、各項目ごとの特徴も併せて示した。

清浄度はいずれの方式でもHEPAフィルタ直下では、最上の清浄度が得られる。トンネル方式の保守域では、作業域や装置域から循環する空気が床下を通過して下方から上方へ流れ、得られる清浄度は作業域や装置域での発塵量に比例した成り行き値になる。しかし、経験から清浄度は300個/ft³{10,000個/m³(0.5 μm)}程度を達成できる。

表1 スーパー クリーン ルームの気流構成と特徴 トンネル構造と全面垂直層流(全面ダウンフロー)構造とに大別される。前者はトンネル相互間の汚染は避けられる。後者はコスト高である。

方 式	ト ン ネル	全 面 垂 直 層 流
構 造 断 面 図	 (a) 作業域 (b) 装置域 (c) 保守域	
清 浄 度	フィルタ部では最高清浄度	全域が最高清浄度
気 流 分 布	区域を分割し、部分的に風量を制約して層流を得やすい。	理想的には全面垂直層流が得られるが、床下抵抗によって偏流が発生し、影響が広範囲に現れる。
フレキシビリティ	トンネルの寸法の装置寸法の差によって、レイアウトに制約がでる。	良 好
作 業 性	間仕切りによる制約を受ける。ただし、作業領域が明確になっているので作業しやすい。	間仕切りがなく作業しやすい。レイアウトが雑然としていると作業しにくい。事故の影響が広範囲に伝搬
ランニングコスト	送風動力費が安い。	送風動力費が高い。
イニシャルコスト	建築コストが安い。内装費とファンフィルタユニット費が高い。	建築コストが高い。内装費が安い。

全面垂直層流方式は、天井全面にHEPAフィルタを配置し、開口床を介して室内全面に垂直下降流を形成することに特徴がある。しかし、最近の半導体工場は数千平方メートルの大空間でできているため、そこを流れる空気量は膨大な量になる。そのため、床下の戻り空気口に向かう空気循環路の抵抗が大きくなり、その影響で室内にまで偏流が発生する。

生産装置をクリーンルーム内に設置する際のレイアウトフレキシビリティは、大空間を前提とする全面垂直層流方式が優れているが、ガス漏れ、騒音などの一時的なトラブルの影響が室全体に広範囲に伝搬しやすいという不便さがある。

作業性はトンネル方式では、間仕切りを使って各エリアを区分しているため、作業者の動きが制約され不便な場合もあるが、ガス漏れなどの他個所との干渉が避けられる。

トンネル方式であれ、全面垂直層流方式であれ、装置や作業者の配置によって空気の流れは大幅に変わる。装置や作業者が発塵源であることを考えると、これらの配置と空気の流れの熟知および管理は重要である。すなわち、浮遊塵埃シミュレーションによって、最良配置を知ることができる⁶⁾。0.1 μm の粒子が作業者の頭部から発生したとして、モンテカルロシミュレーションによって解析した例を図4に示す。クリーンルーム内のパーティションの長さによって、浮遊塵埃の動きが著しく異なっていることがわかる。従来、クリーンルームの構造を単なる空気の流れだけで決めていたが、この例から、それでは正確さに欠けると言える。0.1 μm 以下の大きさの粒子を議論する今後のスーパークリーンルームでは、このように塵埃挙動解析が重要である。詳細は本誌の別論文に掲載されているので、そちらを参照していただきたい。

気流が一定にならない作業者の動きは、超清浄度維持の点

から障害となる。それゆえ、無人による無塵化が指向される。

2.4 0.05 μm ダストカウンタ

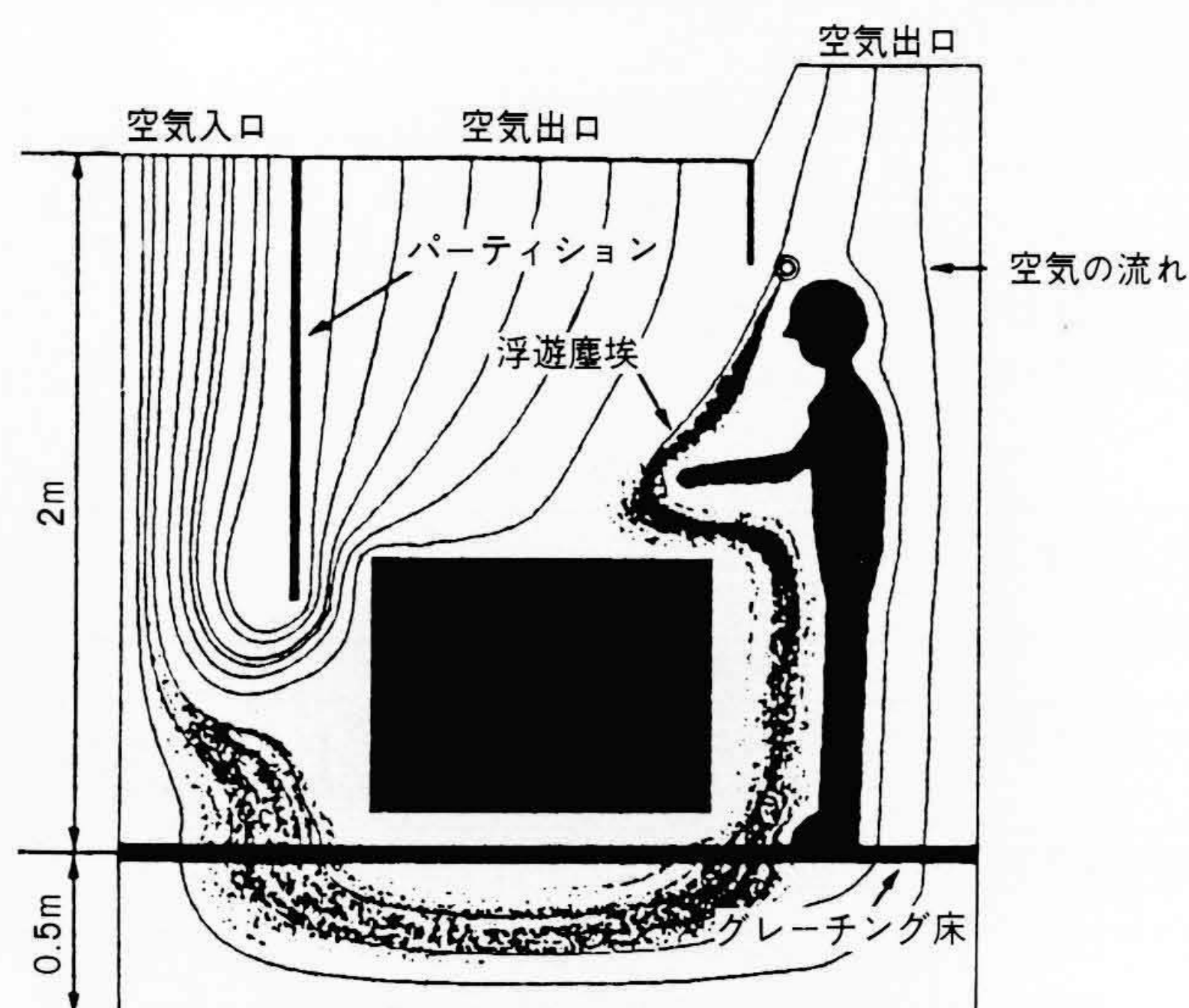
スーパークリーンルームの清浄度が、期待どおりのものであるかどうかを計測評価する手段が必要である。つまり、0.05 μm 計測用ダストカウンタの開発が必要である。

微小粒子の検出が困難であるのは、測定器の中で粒子にレーザ光源からの光が当たったときに生ずるMie散乱光の強さが、粒子の直径の6乗に比例するためである²⁾。さらに、粒子数が少ないために、粒子を捕捉しにくいからである。例えば、0.1 μm と0.05 μm の粒子径の違いは、散乱断面積で約100倍の差にもなる。一方、粒子とともにサンプリング空気の分子からも、わずかながらレイリー散乱光が発生している。わずかの微小粒子と、大量の空気からの散乱光の識別は非常に難しい。

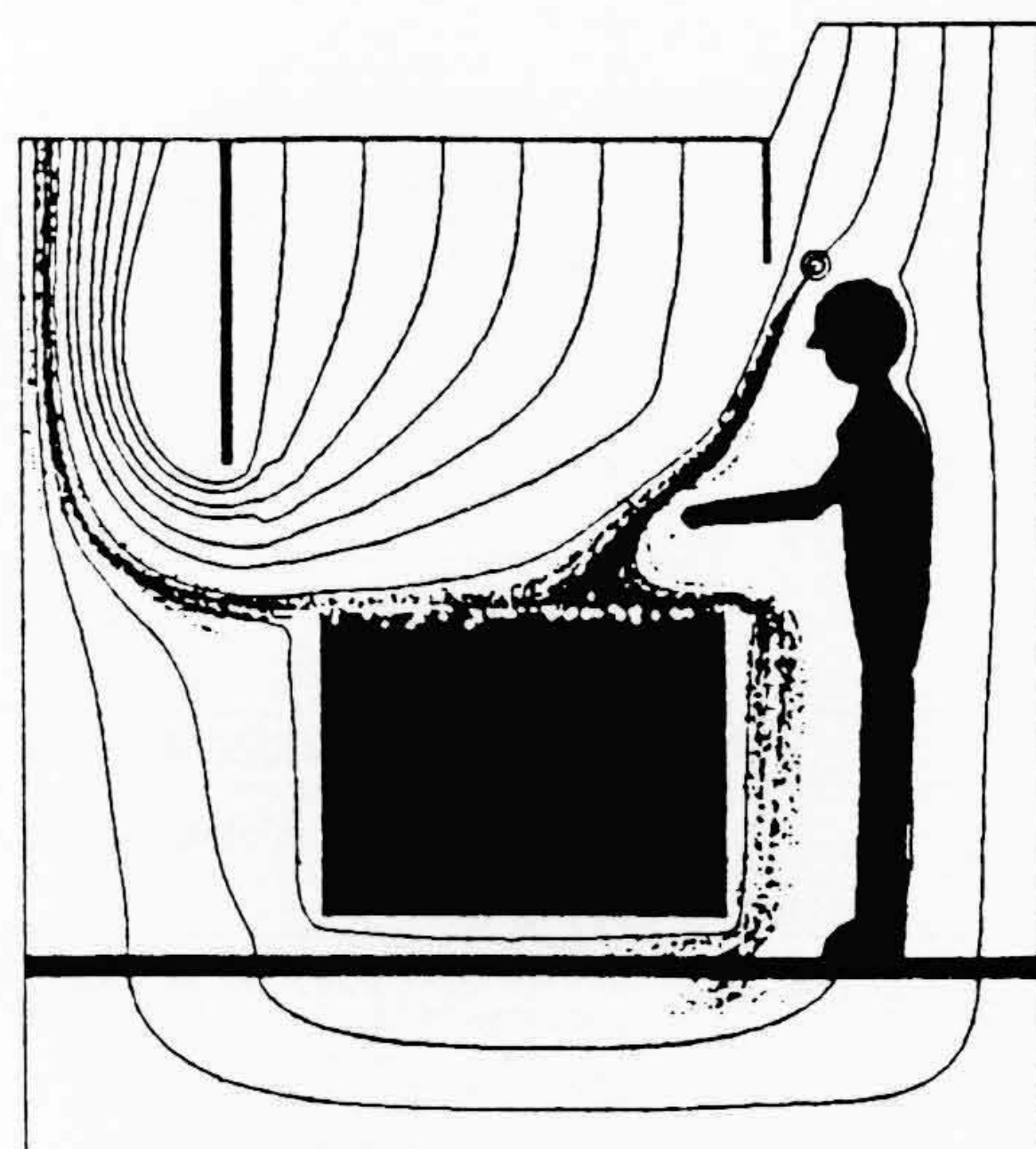
そこで日立電子エンジニアリング株式会社は、He-Neレーザより波長の短いHe-Cdレーザ(波長441.6 nm)を採用することによって、0.05 μm の粒子を検出できるダストカウンタを完成した^{7),8)}。これにより、従来に比べて100倍以上の散乱強度を得ることができる。サンプリング空気量は0.4 l/minである。

非常に粒子数の多い一般大気中では、粒子を荷電させることによって0.01 μm 以下の微小粒子まで測定できる、DMA (Differential Mobility Analyzer: 微分形電気移動度分級器)がある⁹⁾が、スーパークリーンルームのような粒子数の少ない場合には、荷電粒子が減るために測定が困難となる。

0.05 μm ダストカウンタとこのDMAとを使って、一般室の清浄度を同時に測定した例を図5に示す^{2),7)}。両者は良い一致がみられる。このカウンタにより、スーパークリーンルームの塵埃挙動がより明らかになってきた。

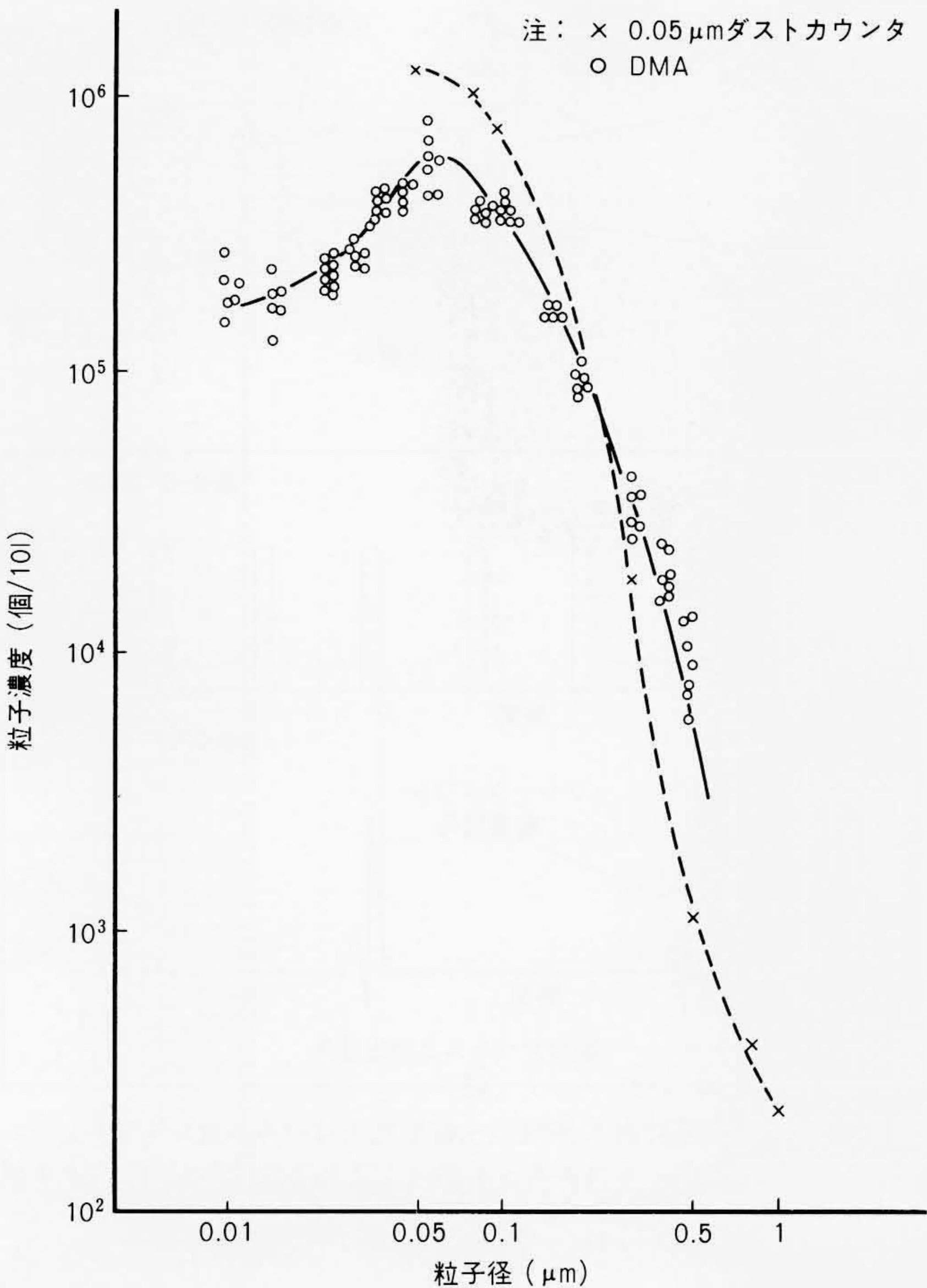


(a) 直立した作業者頭部から発生した塵埃の挙動
(仕切板が長い場合)



(b) 直立した作業者頭部から発生した塵埃の挙動
(仕切板が短い場合)

図4 クリーンルーム内の塵埃拡散の解析例 粒径0.1 μm 、密度1 g/cm³、塵埃個数500個の乱流拡散数値解析例を示す。
パーティションが短いと塵埃は装置上面へ動く。



注：略語説明 DMA (Differential Mobility Analyzer)

図5 0.05 μmダストカウンタによる室内ダスト粒径分布 0.05 μmダストカウンタとDMA(微分形電気移動度分級器)とを使った一般室内(非クリーンルーム)のダスト測定を示す。0.05 μmにピークがある。

3 ユーティリティと異物計測

純水やガスの清浄度、高純度化は今後ますます要求が高くなる。これに関しては100 Mビットを目指す東北大学電気通信研究所のクリーンルームで詳細な研究が行われ、数多くの知見が公表されている¹⁰⁾。ユーティリティ材料の純度は、今やppt (Parts Per Trillion)の時代である。超純水に対しての純度の要求が年々いかに厳しくなってきたかを図6に示す¹¹⁾。

ユーティリティの高純度化を促進させるのは不純物の計測技術である。計測評価できなければ高純度化はあり得ない。不純物計測手法も多数開発されているが¹²⁾、本章では日立製作所で開発した極微量不純物計測手法の二つの例について概説する。

3.1 大気圧イオン化質量分析

APIMS (Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometry：大気圧イオン化質量分析法)は、ガスクロマトグラフィー質量分析(検出限界 5 ppb)のような従来の分析法に比べて約 3 桁も高感度で、pptの微量分析をインラインで長時間連続使用できる¹³⁾。装置の概要を図7に示す。被測定試料はキャリアガスとともに、大気圧で作動するイオン化部に導入される。ここでのイオン化率は0.1～1%であるが、キャリアガスのイオンが試料と衝突して試料のイオン化を加速する。イオン化された試料は差動排気部を経て分析部に導入され、四重極質量分析計で質量分離される。このイオンは二次電子倍增管で捕獲され、ここで増幅され、さらに増幅器で増幅されることによってpptオーダのカウントが可能となった。このような高感度ガス分析装置は初めてのものである。

3.2 液中超微粒子計測・レーザブレイクダウン音響法

液中微粒子の除去と計測は気中以上に困難とされる。ここでは、液中0.04 μmの粒子を計測可能とする、画期的なレーザ

年 代		1975		1980		1985		1987	1990		1995		2000	
L S I	最小パターン寸法(μm)	6	4	2					0.8	0.6	0.4	0.2		0.1
	集積度(bit)	16k	64k	256k	1M				4M	16M	64M			
	要求される微粒子制御粒径(μm)	0.6	0.4	0.2		0.1		0.08	0.06	0.04	0.02		0.01	
超 純 水 質	電気比抵抗(MΩ-cm, 125℃)	16	17	18										
	0.2μm以上の微粒子(個/ml)	50		40	30	20								
	0.1μm以上の微粒子(個/ml)			50	40	30	20	10						
	微生物生菌(個/100ml)	20	10		1		0.5							
	TOC(μgC/l)	200	100		50									
	シリカ(μgSiO ₂ /l)	20	10		5									

図6 LSI集積度の高密度化と超純水質の進歩 液中異物は除去しにくい。技術のブレイクスルーが必要とされる。

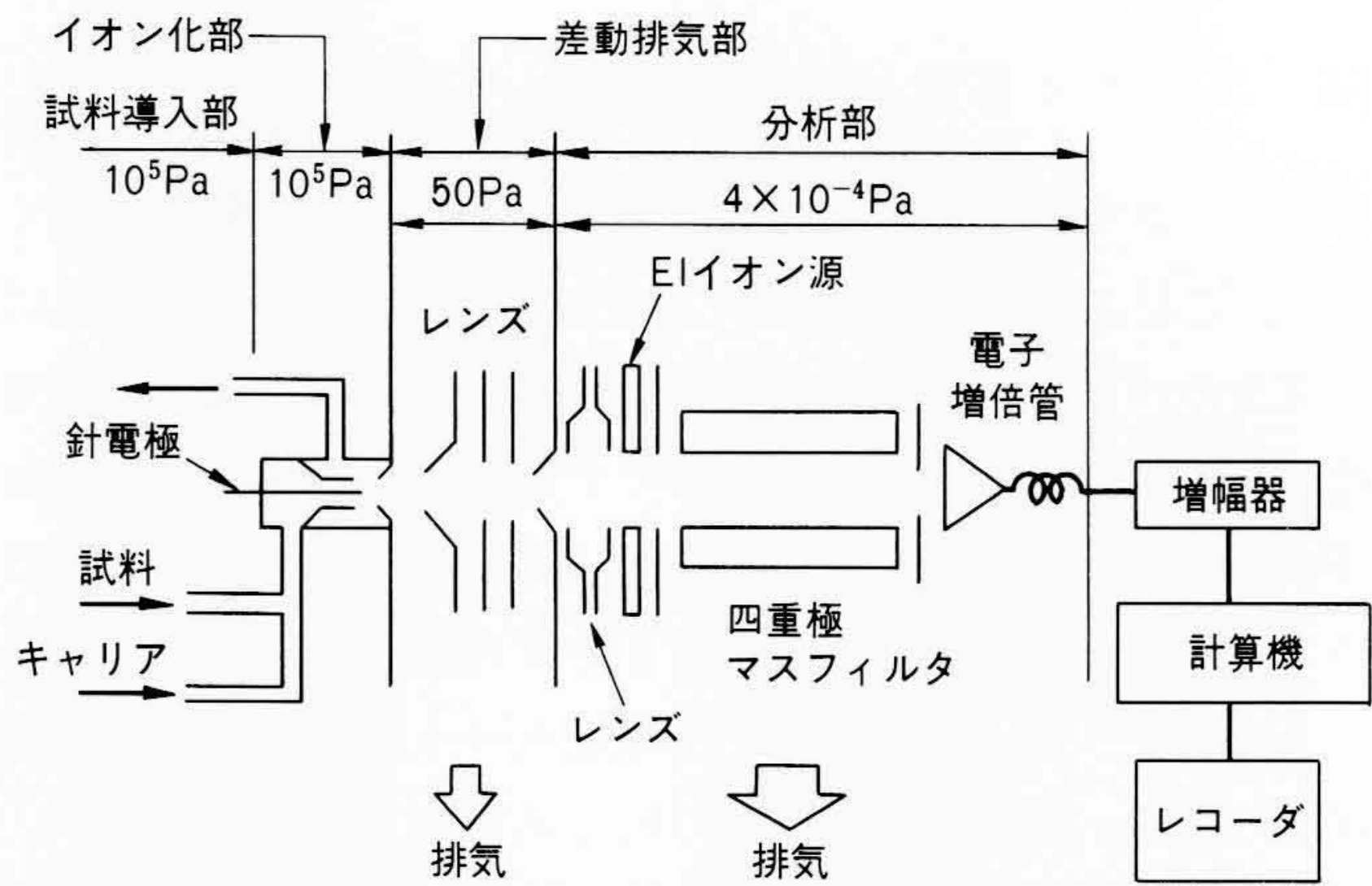


図7 大気圧イオン化質量分析装置の概要 ユースポントで吸い込まれた試料(気体)はキャリアとともにイオン化部でイオン化される。連続使用可能で10 pptの感度がある。

ブレイクダウン音響法¹⁴⁾について概説する。

液中では外乱としての散乱光は空気分子より強くなるのに加え、液中で多数存在する気泡からも生じ、粒子散乱光を分離計測することがいよいよ困難となる。そこで、媒質や気泡に対しては励起されず、粒子だけに起こる現象を利用することとして考え出されたのが、レーザブレイクダウン音響法である。

計数原理を図8に示す。パルスレーザの焦点部(ビームウエスト)を液中粒子が通過すると、レーザ光の強烈な電気的および熱的作用によって粒子はプラズマ化(レーザブレイクダウン現象)する。これに伴い、爆発的な体積膨張とプラズマによる激しい光エネルギーの吸収によって強い音響波、すなわちブレイクダウン音響波が発生する。この音波を圧電素子で検出して計数する。固体のブレイクダウンエネルギーのしきい値は気体や液体より低いため、レーザ光強度を設定することによって感度よく計数できる。現在、入手可能な最小標準粒子0.04 μmを高感度で検出できている。

本方法は、今まででできなかった液中超微粒子の計測に新しい局面を開き、サブミクロンユーティリティのクリーン化の強力な武器となることが期待される。

4 クリーン搬送機構と自動化

発塵源である人による作業を極力避けるだけでなく、加工の微細化、多品種少量生産への対応、ウェーハ径の増大に伴う搬送重量の増大、歩留まり向上と安定化のためのそれぞれの装置の自動化の推進とレベルの向上、および工場全体の自動搬送システムの導入が始まっている。

全自動搬送システムを採用するには、次の問題が残されていた。

- (1) 防塵と高い効率(高速搬送)の双方を満足すること。

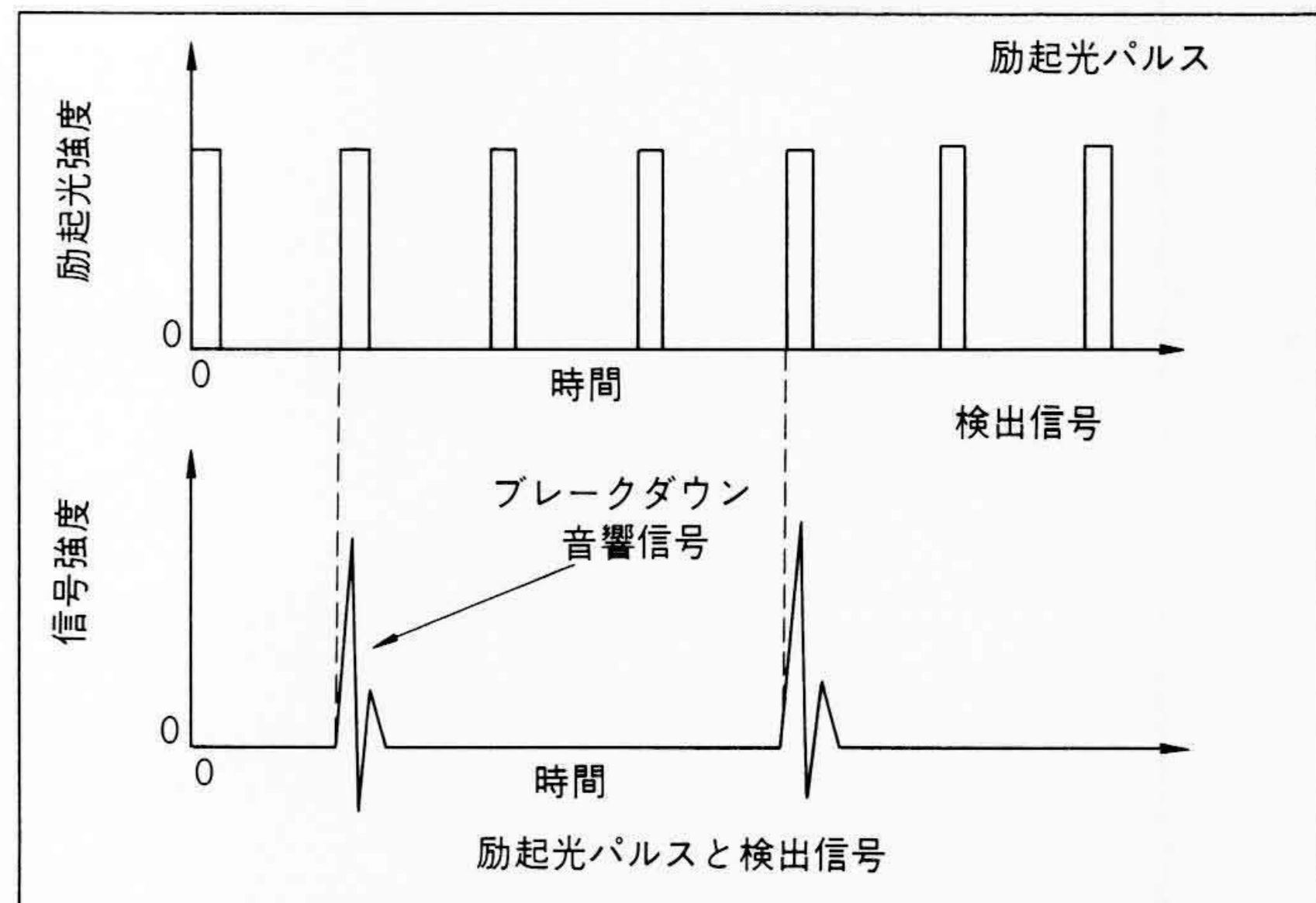
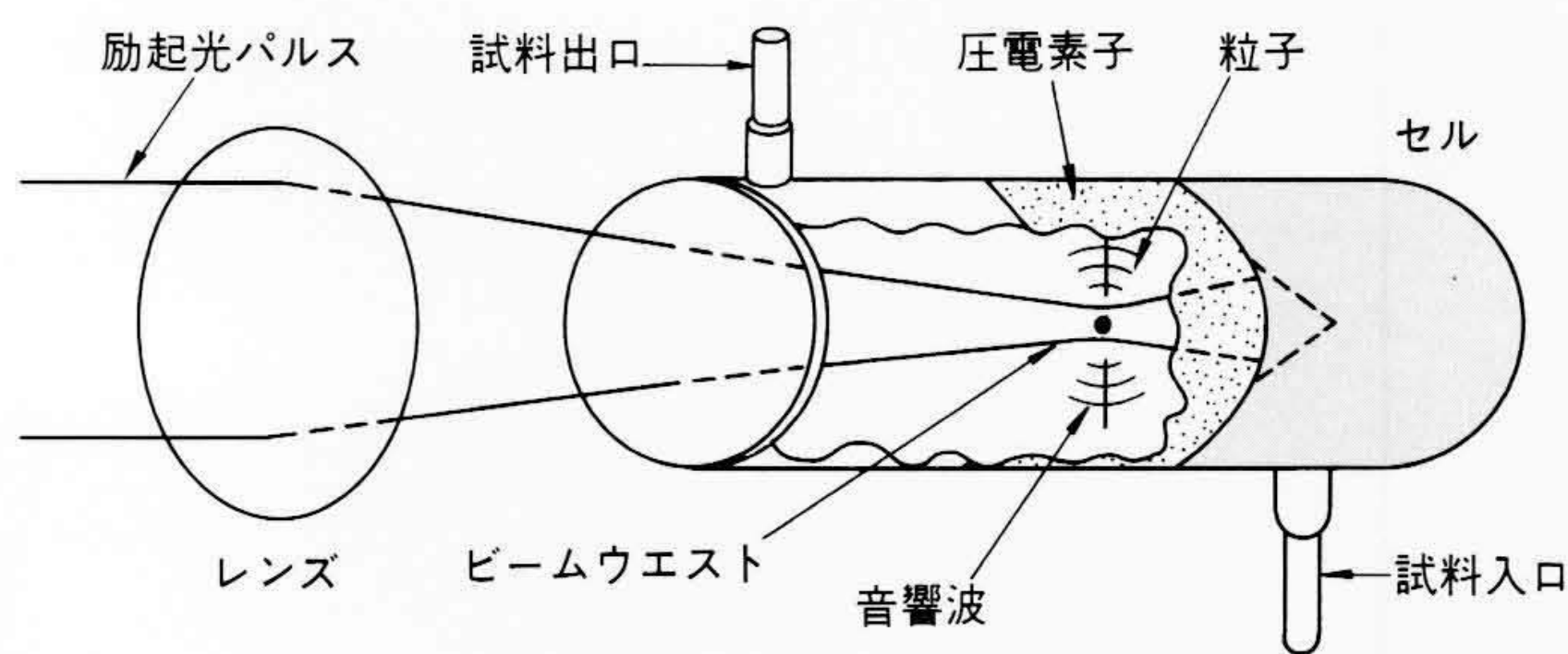


図8 液中微粒子計数の原理 固形粒子はパルス状レーザのビームウエストに達すると、エネルギーを受けてプラズマ化し、爆発的な体積膨張によって音響(レーザブレイクダウン音響)を発する。

- (2) 多種多様の装置に対する経済的な積み降ろし装置の開発
- (3) 製造装置の能力の差に対応した搬送スケジュール方式
- (4) 将来のレイアウトや装置の変更に対応できること。
- (5) 工程やレイアウト、品種などの変更にあやすく対応できる搬送と高速コンピュータ、システムの構築

搬送の形態としては、枚葉搬送(装置内搬送)、カートリッジ搬送(装置～ストック間、工程間)、ボックス搬送(工程間)がある。搬送はカートリッジまたはボックスを搬送するので、システムとしてはカートリッジの標準化(寸法)、カートリッジの受け渡しの標準化(高さ・方向・奥行き)、SECS(通信の標準化)、およびウェーハのロットとの照合が必要となる。

日立機電工業株式会社はクリーン ライナ システムとして、これらのニーズを満足させる自動搬送設備を開発し、クリーン度0.1 μmクラス10以下の搬送装置が可能となった。以下、これについて概説する。

クリーンライナは図9に示すように、自動倉庫機能を持つストック間の長距離搬送を高速で行う装置で、天井に設置されるため、リニアモータ駆動とエア浮上により、小形で無摺(しゅう)動性、ショックレス、高速性、高い信頼性を持っている。また、工場レイアウトによってT形ルートやループ構造、分岐・追い越しも可能である。

自動ストックはクリーンな特殊構造とし、またストック内

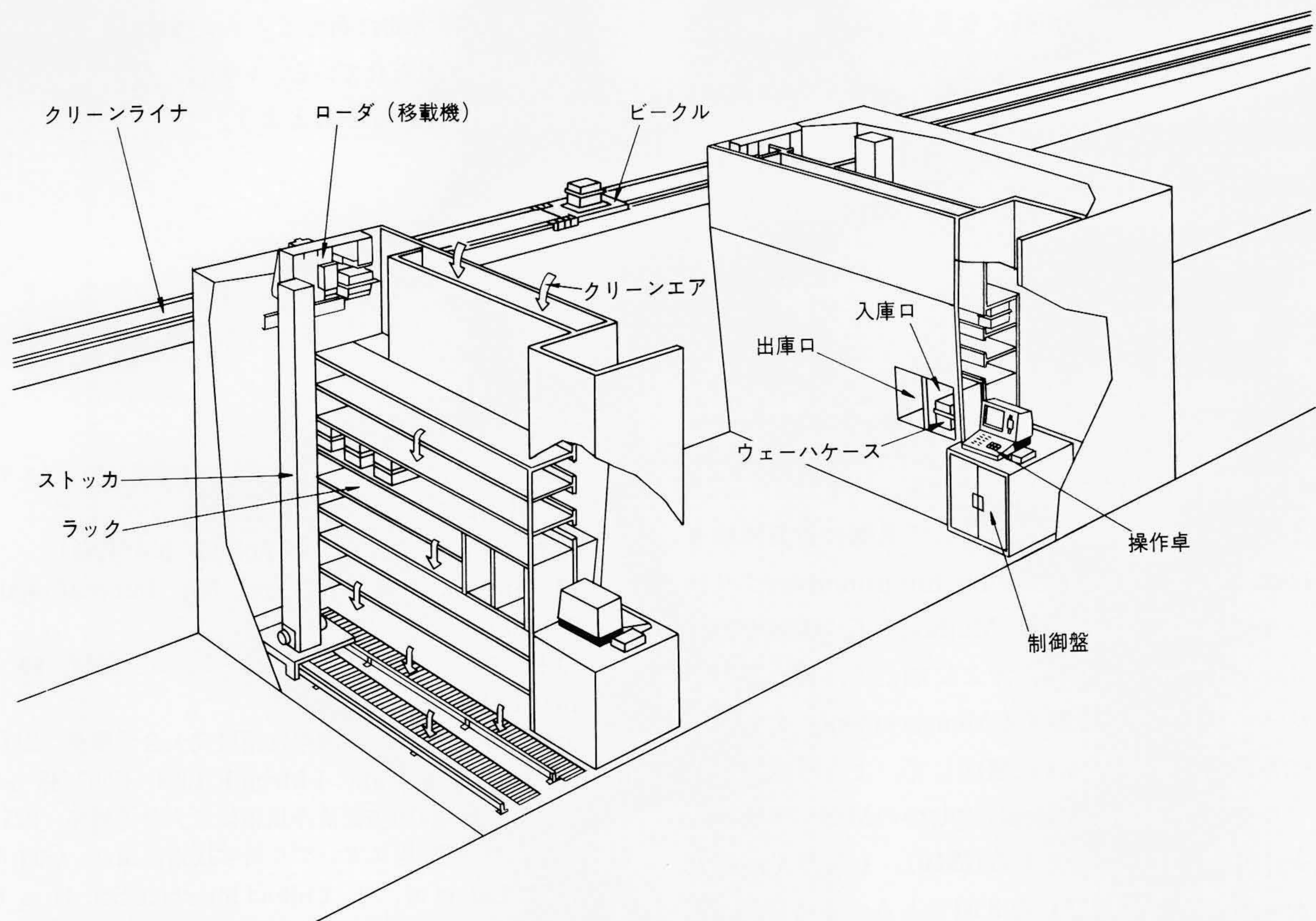


図9 日立リニアモータ式搬送システムクリーンライナ(部分) ウェーハはビークルに載って移動し、リニアモータとエア浮上によってクリーン度は0.1 μ mクラス10、システムはストック数個～数十個、クリーンライナ数十～数百メートルで構成される。

の在庫状況や入出庫時刻によって、プロセスのマクロ状況がわかるようになっている。

工程内自動搬送装置は、特に小形化と無発塵性、ショックレスを考慮したもので、ストックと製造装置間のウェーハの

自動搬送を行う。装置の形態は、固定レール上を走行するものと、自走式台車にロボットを搭載して自由に走行するものに大別される。

このうち、自走台車式は必要面積が大きく、建屋面積、空

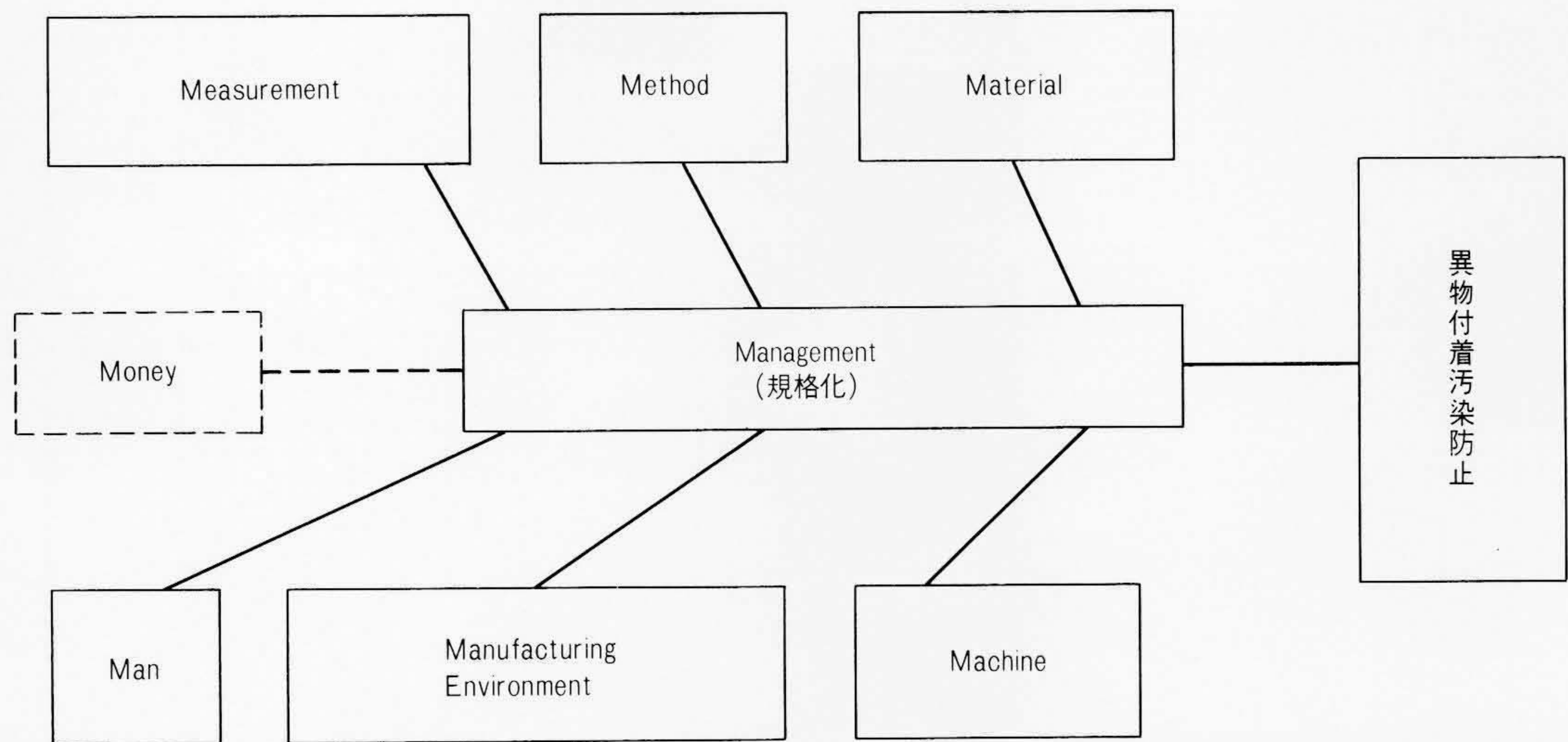


図10 コンタミネーションコントロールのための7Mの概念 7Mが有機的に作用し、Managementが的確ならばクリーン化技術はバランスよく加速し、高特性、高歩留まりの製造プロセスが可能である。

調面積が大きくなり、設備費が高くなるうえに、微振動によりウェーハへ異物が付着しやすい、などの欠点がある。製造装置に、カートリッジの受け渡しのタイミングずれに対するバッファ機能が十分ないと、特に多種少量生産のとき、搬送が生産のスループットの障害となる。これには経済的なレベル走行形がよい。

5 結 言

クリーン化技術は総合的な技術である。図2に示したように、本論文では触れることのできなかった発塵現象や低発塵機構、洗浄技術など広範な技術分野もある。

コンタミネーションをコントロールして異物の付着汚染を防止するには、Man, Manufacturing-Environment(クリーンルーム), Machine, Material, Methodの五つのMがどのようにクリーン化されているか、そこに加えて、どこがどのようにクリーンであるかを評価するMeasurement, そして生産されるべき製品の技術レベルに適応して、よく吟味されたリーズナブルな規格(Management)の七つのMがバランスした総合的なクリーン化が必要である(図10)。もちろん、投資効率の面からMoneyが追加された8Mであるべきであろう。

計測をおろそかにするために、クリーン化の指針を見失っている例は少なくない。人・環境・装置・材料・作業方法・計測・規格の7Mのうち、なかでもクリーン化技術の基本は計測である。

終わりに、超LSIに代表されるエレクトロニクス工業でのクリーン化技術を以上のような立場でみると、今までとは異なった立場、すなわち清浄化に関するすべての技術分野を総合

し、システム科学的に新しくとらえ直した新しい科学的アプローチの必要に迫られている。いわば、Rypology¹⁵⁾(クリーン化科学)の時代であると言えよう。

参考文献

- 1) 向阪：エアロゾル測定技術の現状と課題，第2回エアロゾル科学・技術研究討論会，1-4(昭59)
- 2) 鈴木：日立プラント技報，Vol.10，p.4(1988)
- 3) M. Suzuki, et al.: Proc. 6th International Symp. Contami. Control 239(1986)
- 4) 鈴木，外：スーパークリーンルーム，日立評論，68，9，737～742(昭61-9)
- 5) 大竹，外：第5回空気清浄技術研究大会予稿集，217(1986)
- 6) K. Tsuzuki, et al.: I Mech E 1988, C507/88 p.61
- 7) 鈴木，外：第4回空気清浄技術研究大会予稿集，221(1985)
- 8) 須田，外：第3回エアロゾル科学技術討論会，G03(昭60)
- 9) B.Y. Liu, et al.: J. Colloid Interface Sci, 47, p.155(1974)
- 10) 例えば，日経マイクロデバイス別冊No.2，日経BP社
- 11) 佐分利：日立プラント技報，10，p.35(1988)
- 12) 斉木，外：月刊Semiconductor World，11月号，p.150(1988)
- 13) 三井，外：第47回秋季応用物理学会学術講演予稿集，p.515(1986)
- 14) 北森，外：日本分光学会秋季講演会講演要旨集，20，p.64(1987)
- 15) M. Tsutsumi: Rypology (Science of dirt) = rypos = $\rho\upsilon\pi\sigma$ (first used in *Oδύσσεα* by Homer) = dirt