

微細プロセス(ハーフミクロン)対応LSIクリーンルーム

Clean Room Technology for Halfmicron LSI

ハーフ ミクロン プロセスのクリーンルーム環境は、クラス0.1を超える清浄度が要求されている。このような超清浄環境を構築する上で重要なことは、発生した塵埃(じんあい)を拡散させず、速やかに清浄域外に排除するための気流制御技術であり、コンピュータによる三次元気流解析はこの目的のために有効なツールとなっている。

一方、デバイスの微細化に伴い表面や界面の原子レベルでの制御が重要となり、塵埃粒子に加え環境中の微量ガスの除去が必要となってきた。そこで、特に影響が大きいと予想される酸性ガス除去用フィルタ(ケミカルフィルタ)を新たに開発し、これらをppt(part per trillion)のレベルで抑えられるクリーン化技術を確立した。また、LSI製造工程の複雑化に伴う安全性の確保はますます重要となり、作業者の健康と安全を第一に考えた安全監視システムの充実によって、新しいクリーン ルーム システムを確立した。

斉木 篤* *Atsushi Saiki*
豊田武二** *Takeji Toyoda*
早田文隆*** *Fumitaka Sôda*
前島 央**** *Hajime Maejima*

1 はじめに

LSIの加工寸法レベルが $0.5\mu\text{m}$ (ハーフミクロン)、集積規模が16 Mビット以上になると、環境からの汚染がより厳しく歩留りや信頼性に影響を与える。ハーフミクロンLSIに必要な塵埃レベルでの清浄度はクラス0.1以下が要求される¹⁾。循環気流中の塵埃はHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタによって除去できるが、クリーンルーム内で発生した塵埃は、広範囲に拡散させずに直ちに排除するなどが大切であり、気流の制御が重要な技術となる。

またLSIの微細化は、これまであまり重視されていなかった空气中に混入する微量な汚染化学成分を、重要な汚染要因として顕在化させつつある。クリーンルームの中の化学汚染物質やガスのデバイスへの影響は、メガビット時代に入りかなり深刻な問題となっており、ppt(part per trillion)レベルの制御が不可欠の技術となってきた。一方、プロセスの複雑化はクリーンルーム内で使用する危険度の高いガス、薬品類の錯そうを余儀なくし、これらの安全な運転制御および監視は、今後のクリーンルームにあって最重要課題としてクローズアップされてきている。本稿では、これらを総合的に計画しデバイス精度の要求に整合した、コストパフォーマンスの高い

クリーンルームを提供する最新の日立半導体用クリーンルーム技術について述べる。

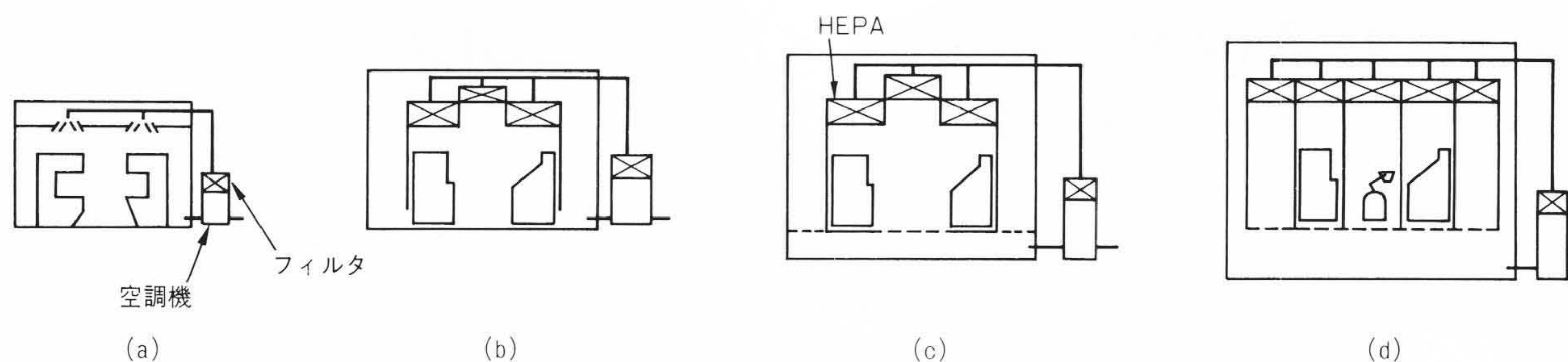
2 高清浄度に伴う空気循環方式の改善

半導体産業が集積回路の時代を迎える1960年代の終わりごろは、塵埃が歩留りに影響することがすでに認識され、除塵空気を製造ラインに送るクリーンルームの概念が確立された。初期のクリーンルームの概念を図1(a)に示す。クリーンルームの空気を一部調和機に戻し、外気と混合して温度や湿度を調整したのち、塵埃フィルタを通してダクトによって再びクリーンルームに送気する。1立方フィート当たりの $0.5\mu\text{m}$ 以上の塵埃数で表現される清浄度は、クラス1,000から10,000である。

集積度が高まるにつれて清浄度への要求も強まり、クリーンルームの構造も図1(b)のように発展した。この構造はトンネルモジュールと呼び、天井に部分的に吹き出し面を設けると同時にリターンを隣接して設け、調和機に戻す一部の空気以外をその場で循環させる。吹き出し面には、フィルタと送風機が一体になったFFU(Fan Filter Unit)を用い、除

* 日立プラント建設株式会社 空調プラント事業本部 工学博士 ** 日立プラント建設株式会社 空調プラント事業本部

*** 日立プラント建設株式会社 松戸研究所 **** 日立製作所 武蔵工場



注：略語説明 HEPA (High Efficiency Particulate Air)

図1 クリーンルームの推移 本図は、初期の(a)から最近の(d)まで代表的なクリーンルームの推移を示す。

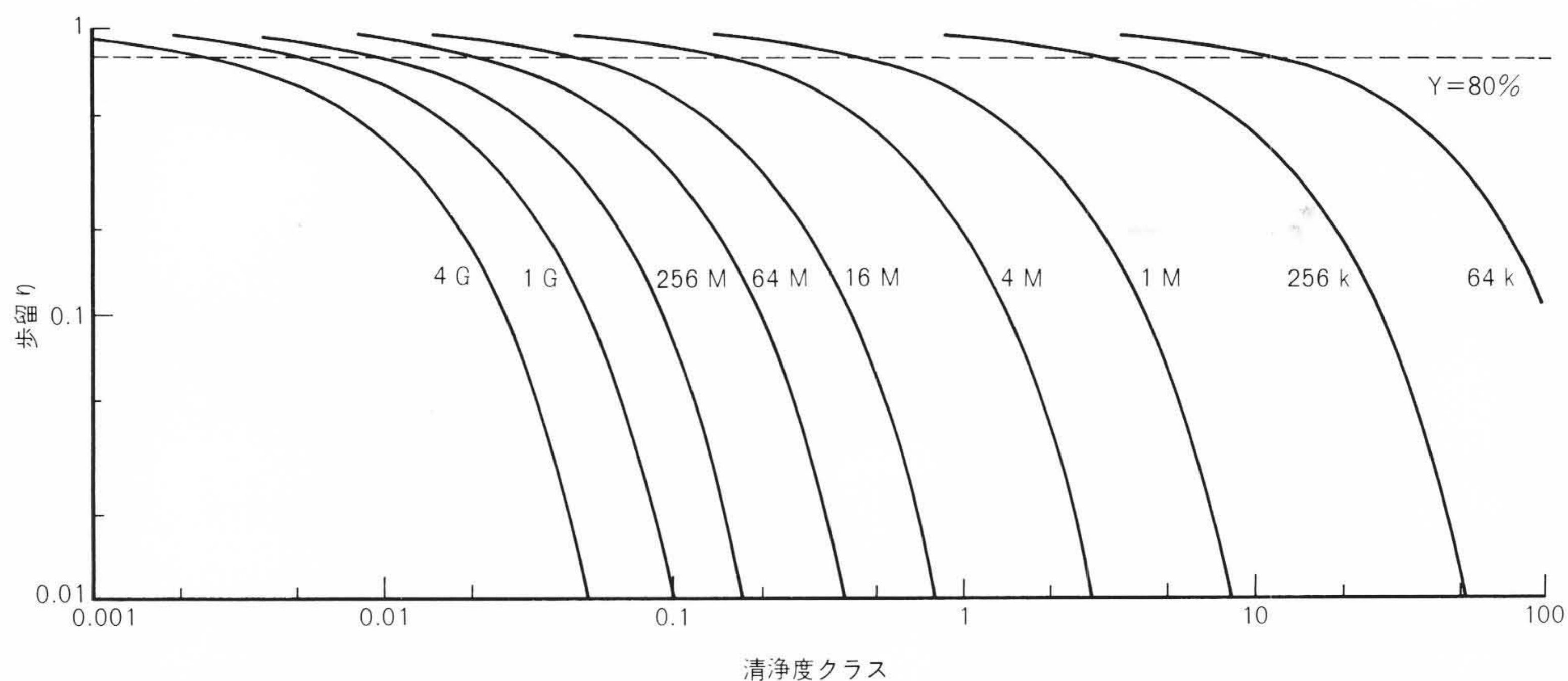


図2 ウェーハ環境清浄度とLSI歩留り 横軸の清浄度クラスは、1立方フィート当たりの $0.5\mu\text{m}$ 以上塵埃(じんあい)の濃度を示す。

塵空気量を増やした。この構造で得られた清浄度はクラス10～100である。

さらに集積度が增大すると、図1(c)に示すような床下に空間を設けた構造となり、FFUの数を増し、空気循環回数をさらに増大させ、一様な下降気流(ダウンフロー)を作ることによって塵埃の拡散を防ぐことに主眼が置かれる。

トンネルモジュール構造は、ウェーハ処理域を集中的に清浄化でき、スペースの利用もむだがなく、きわめて合理的な方式であると言える。フィルタの面積と空気の循環回数を増せば、クラス1相当の清浄空間が得られる。

ハーフミクロン(16 Mビット以降)用半導体クリーンルームは、さらに徹底した清浄化を進めている。空気循環系のシステムコンセプトは図1(d)に示すように、FFUは天井全面に設置するとともに、従来メンテナンス域に利用していた循環気流のリターン部分をもダウンフロー方式によって制御を行う。

生産域・作業域・メンテナンス域ごとに全面を区分してダウンフロー化することにより、発生塵埃の速やかな除去が全域で可能となることから、吹出し気流速度の低減、床下部分

からの塵埃、ガス等の巻き込みの防止など、クリーンルームの運転管理上も多くのメリットが期待できる方式である。なお、運転費軽減の面から超清浄域をより局所化したり、ウェーハ搬送の自動化によって発塵源を減らすなど、さらに改善の余地があり今後の重要な課題である。

次にハーフミクロンLSIの製造に必要な清浄度の決定方法と設計時点での評価手法、およびデバイスのコンタミネーション要因として顕在化してきた化学汚染対応方法について述べる。

3 ハーフ ミクロン プロセス用クリーン化技術

3.1 塵埃清浄度の決定方法

クリーンルームはIC、LSI、超LSIと集積度の増加とともに進化をとげてきたが、清浄度がどこまで必要であるかについては、図2に示すように予測されている¹⁾。各集積規模ごとの管理すべき塵埃粒子の粒径、チップサイズ、工程数と塵埃の付着率などを基に導き出された清浄度と歩留りの関係である。同図によると、ハーフミクロンLSI(16 Mビット)を歩留り80%

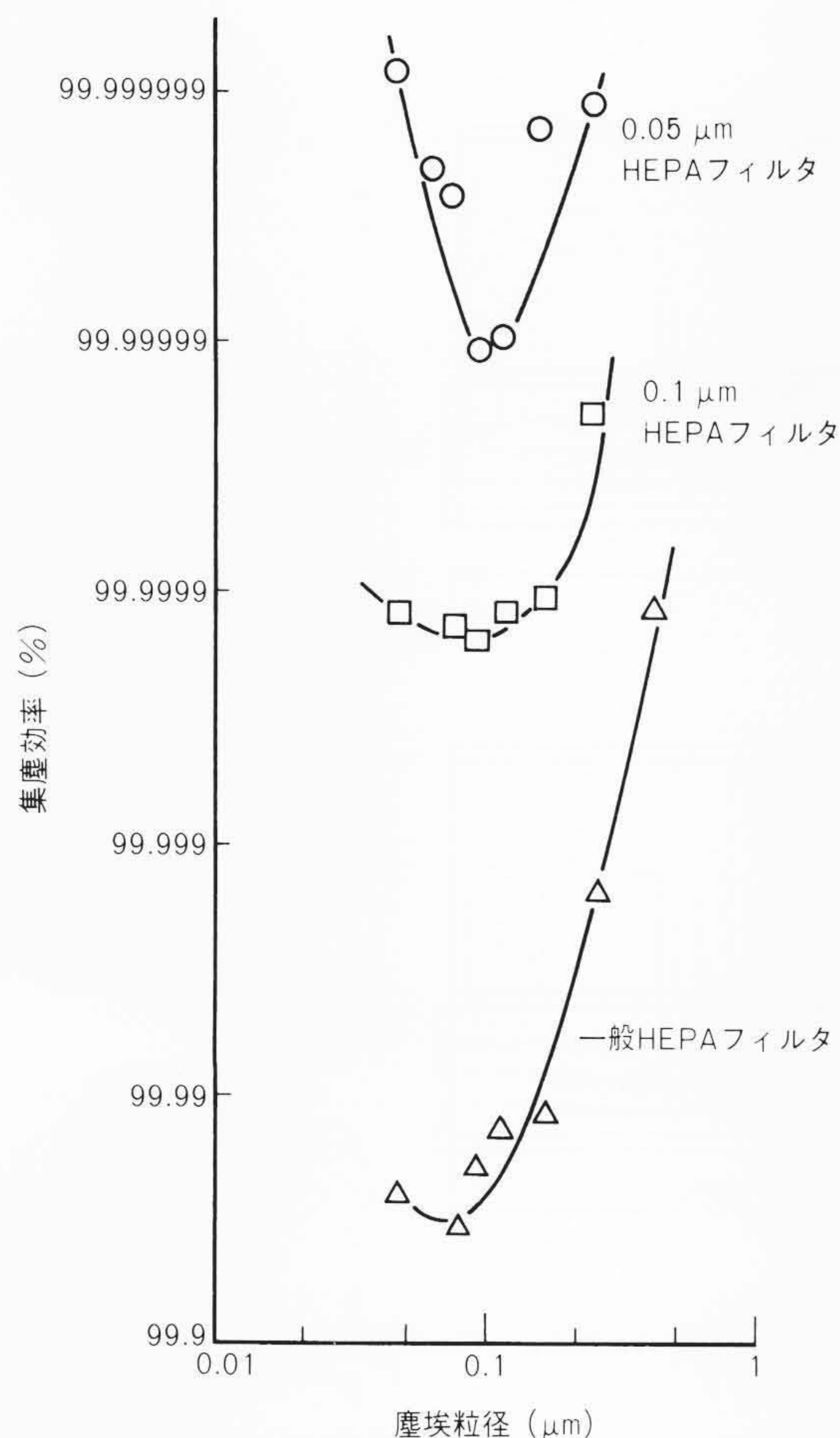


図3 各種HEPAフィルタの集塵性能 0.05 μm HEPAフィルタは、0.1 μm HEPAフィルタよりも一桁(けた)、一般HEPAフィルタよりも約3桁集塵効率が高い。各フィルタとも集塵効率は0.1 μm 付近で最も悪い。

で生産するには、清浄度がクラス0.1よりも清浄な空間が必要である。

クリーンルームの除塵に用いるフィルタは、HEPAフィルタと呼ばれ、必要な清浄度に対応してグレードの異なる幾つかの種類がある。代表的なHEPAフィルタの集塵効率を表すデータを図3に示す²⁾。一般HEPAは清浄度クラス100よりもグレードの劣るクリーンルームに、0.1 μm HEPAはクラス1～10に、粒径0.05 μm 付近の塵埃の除去効率を高めた0.05 μm HEPAはクラス1よりも清浄度の高いクリーンルームに用いる。

全面に0.05 μm 用HEPAを用いたクリーンルームの清浄度の設計値と実測値比較結果の一例を図4に示す。製造装置は稼動中であり、在室者は15 m^2 当たり1人程度である。清浄度クラス0.1に相当する位置を同図中に示したが、これよりも清浄な環境にあることがわかる。すなわち、清浄度クラス0.1よりも清浄な超清浄環境が、0.05 μm HEPAフィルタの使用によって実現できる。

したがって、先に示した図1(d)の構造に上記のフィルタを搭載することによって、16 M量産対応の清浄環境は実現できる。

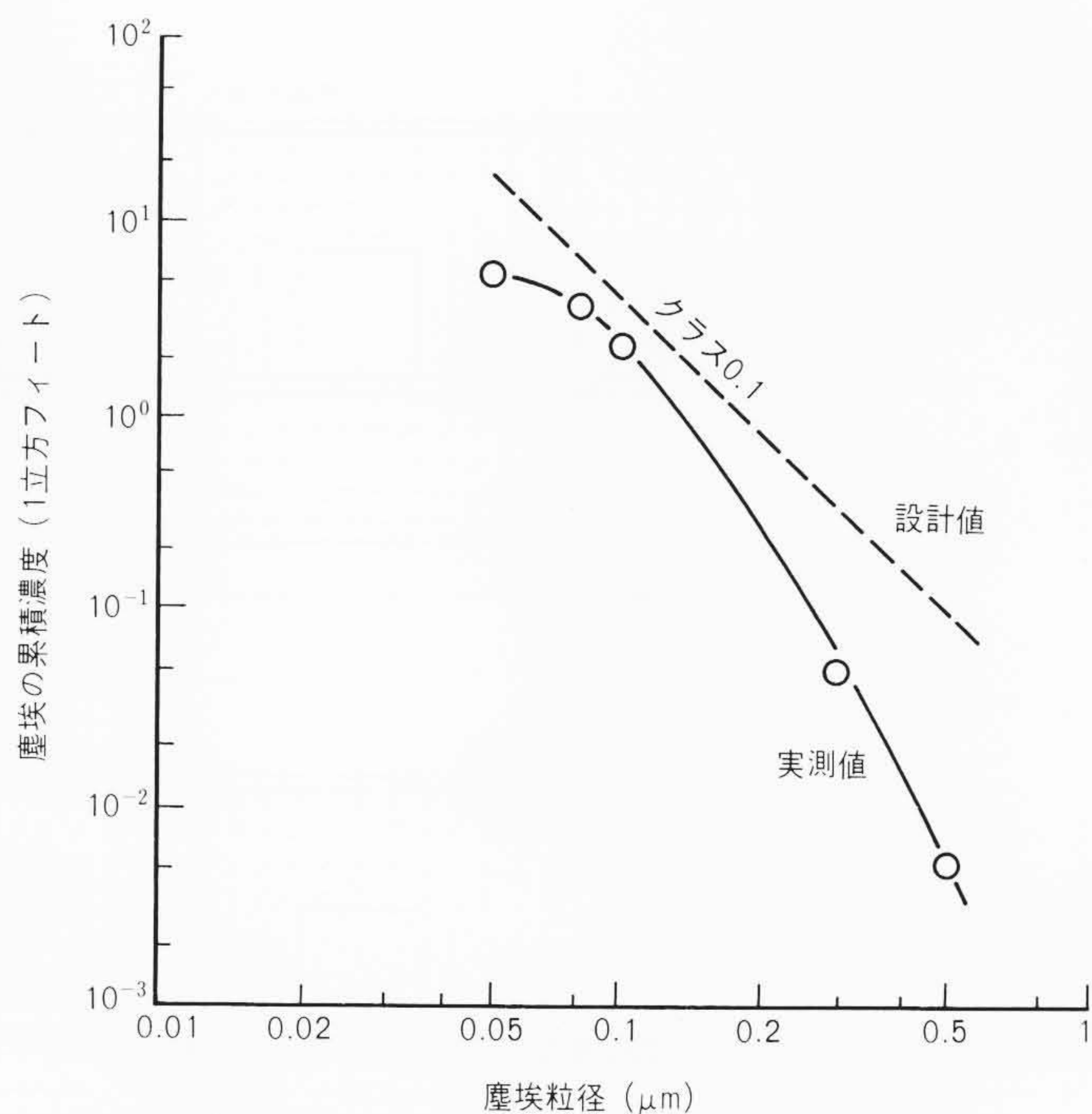


図4 塵埃の粒径と濃度の関係 清浄度クラス0.1($>0.5 \mu\text{m}$)に設計されたクリーンルームでの塵埃の粒径と濃度の関係を示す。塵埃の実測値は設計値を下回っている。

3.2 クリーンルーム用気流シミュレーションシステム

日立プラント建設株式会社では、日立製作所の各研究所の協力のもとにクリーンルーム専用のシミュレータを開発し、設計と事前評価などに多くの実績を積み上げてきた。シミュレータは空間の対象によって二次元、三次元での計算が可能であり、さらにこれらの出力をビジュアル表示するコンピュータグラフィックに接続することができ、顧客の計画時点での完成予想や評価に役立てるなど有用なツールとして適用機会が多い。

3.2.1 二次元シミュレーションの計算例

全面吹出しのクリーンルームで、気流がどのようなかを二次元シミュレーションすると、図5(a)のようになる⁴⁾。同図の断面の間口は16 m、床上3 m、床下2 mとし、プロセス装置も配置した。床は空気を循環させるために開口床となっているが、開口率を一様に50%に選ぶと、装置上方などに、空気戻り口に向かうほとんど水平に近い流れが生じており、また装置と装置の間では乱流が見られる。塵埃が発生した場合には、広範囲に拡散しかつ排除しにくい。

床開口率を適切に選択して配置すると、図5(b)のように水平流や乱流が少なくなり、良好な気流が得られることがわかる。

3.2.2 三次元気流解析シミュレーションの計算例

三次元シミュレーションは⁵⁾、二次元のシミュレーション技術を発展させたもので、結果をコンピュータグラフィックスで三次元的に評価できるようにソフト開発を行った。三次元

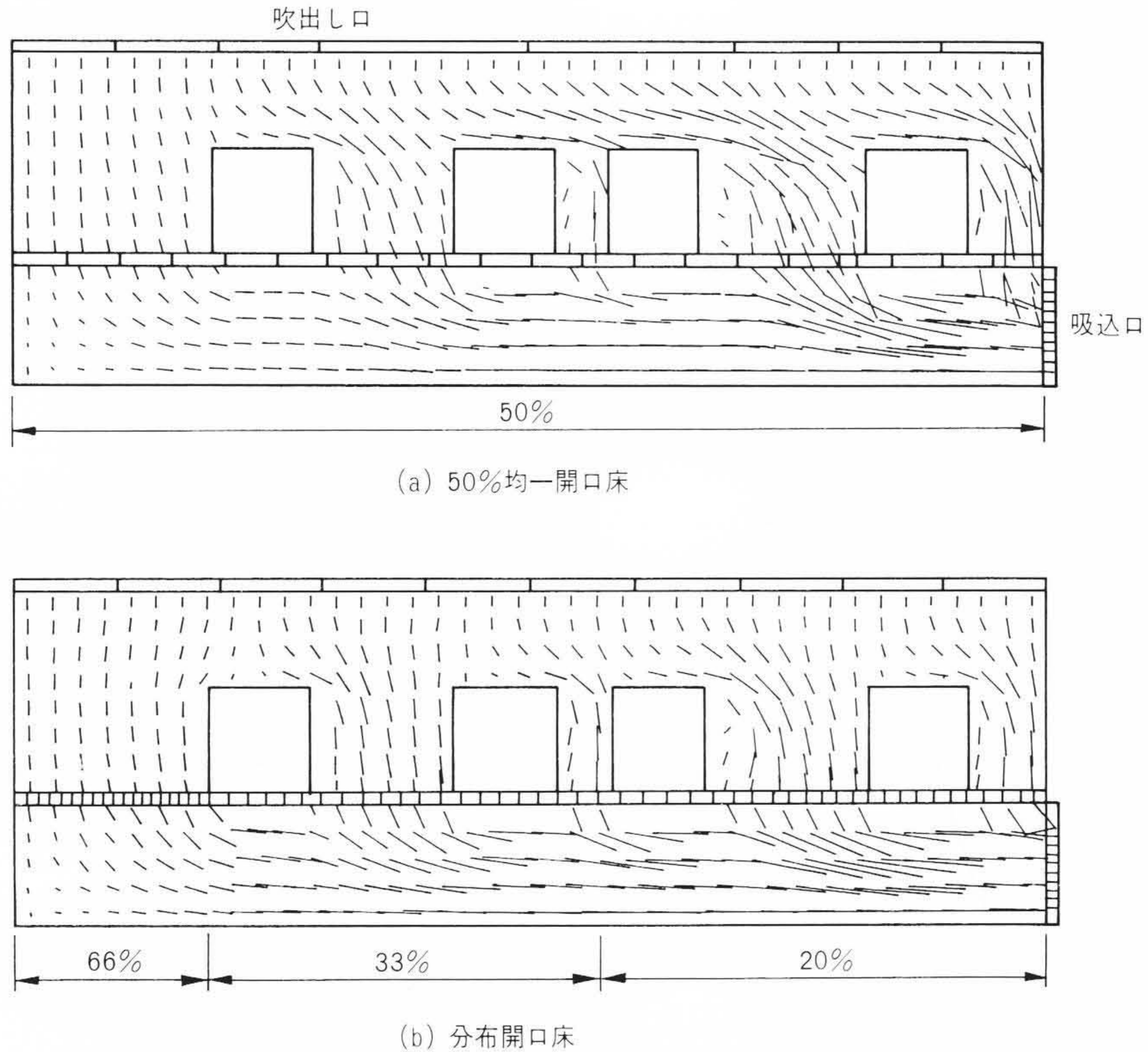


図5 二次元気流解析の例 グレーティング床の開口率を適切に選ぶことによって、気流をダウンフローに制御できる。

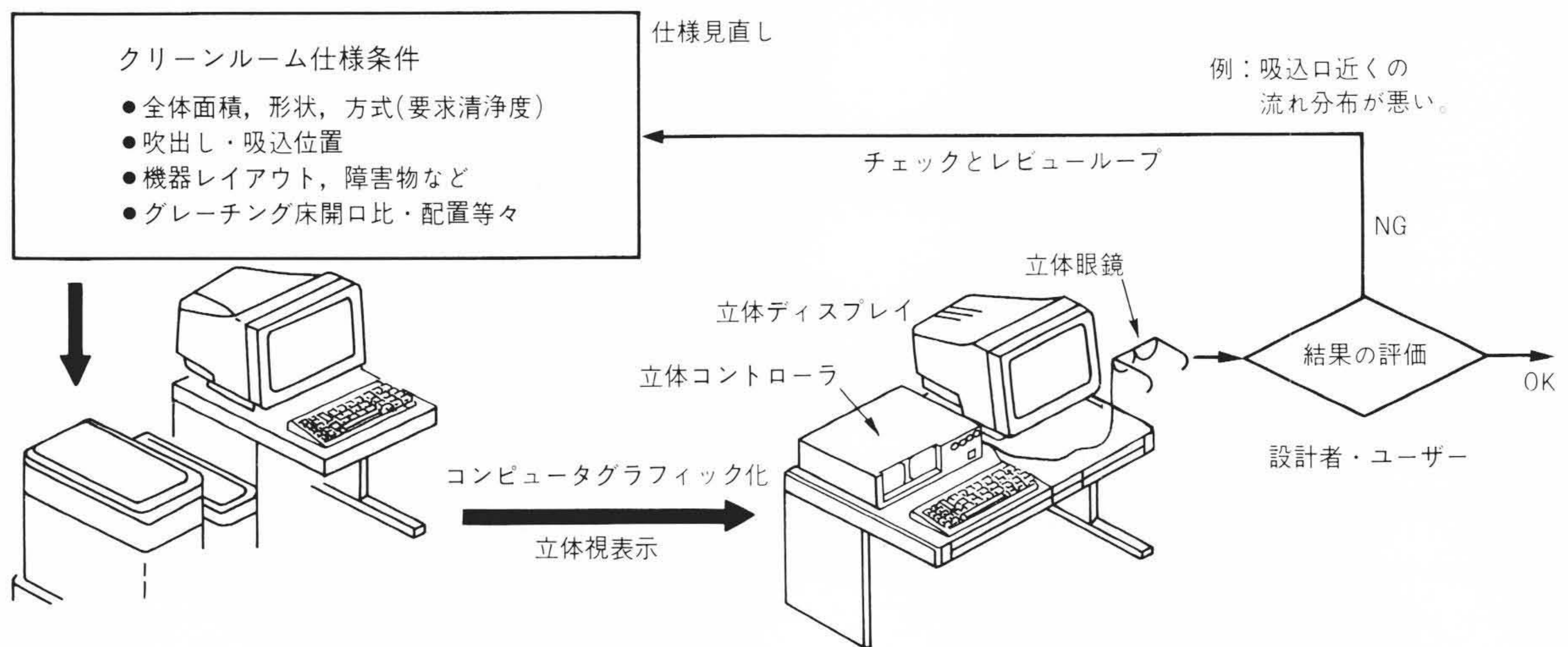


図6 コンピュータグラフィックシステムを用いたクリーンルーム設計手順の概要 仕様条件(クリーンルーム形状、吹出し・吸込口の位置、機器や各種開口度のグレーティングの配置など)をインプットし、解析結果をコンピュータグラフィック立体視で評価できる。

シミュレーションシステムを用いたクリーンルームの設計手順の概要を図6に示す。結果は画面にディスプレイされ、これを立体眼鏡を用いて立体映像として見る。したがって、設計者およびユーザーは、立体映像のクリーンルームの中に実際に立ち入りチェックする感覚で設計レビューができる。シミュレーション可能な解析項目は、気流速度と方向、温度・

圧力分布、塵埃拡散の経時変化などである。

評価事例を図7に示す。本事例では、大空間を幾つかの区域に分けて、そのうち高洁净に維持すべき領域を歩行域(画面の左側にある。)などの発塵の多い領域から保護する方策について評価している。しかも、高洁净域を低洁净域に開放した状態、すなわちパーティションを設けずに高洁净を確保し

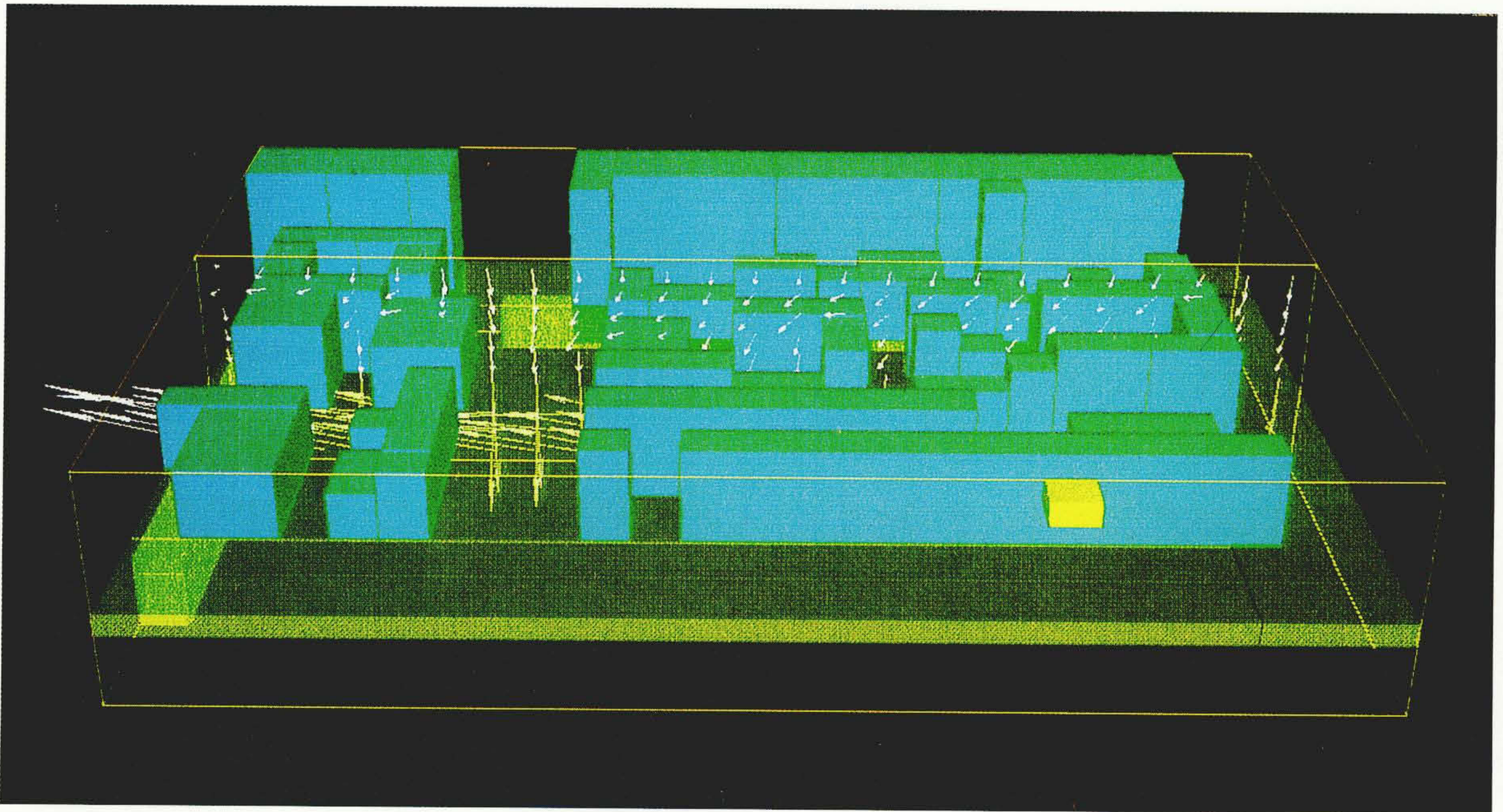


図7 三次元気流シミュレーションによる評価事例 クリーンルームの吹出し、吸込みおよび機器配置の与えられた条件に対して、最適なダウンフロー条件を見いだす。

ようとしているために、清浄度の低い空間からの気流の流れ込みが生じないような流れの制御が必要である。同図の事例では、両領域の境界近傍にあるFFUの吹出し風速を制御することによって目的を達成している。

3.3 化学汚染防止用ケミカルフィルタ

ハーフミクロンLSIでは、シリコンの表面や界面の原子オーダーの制御が必要になる。プロセス環境中には塵埃だけでなく、 SO_2 、 HCl 、 HF などの化学物質の存在も許されない。しかし、これらはHEPAフィルタを通り抜け、あるいはクリーンルーム内の薬液洗浄装置のハンドリング時などにプロセス環境中に微量の漏出をきたし、シリコン表面に付着する。

このたび開発したケミカルフィルタ⁷⁾は、上記の化学物質の除去にきわめて有効である。ケミカルフィルタは図8の設置例に示すように、FFUの空気取り入れ部に直接取り付け使用する。FFUのファンモータに負担を与えないように、きわめて低圧損になるようくふうするとともに、軽量化を図り、FFUに50 Pa{約5 mmAq}程度の余裕があれば既設のユニットにも装着できるようにした。これによって、製造プロセス変更で上位デバイス生産ラインへの盛り替えを行うようなクリーンルームの改修にも適用性が高い点も、特徴の一つとしてあげられる。

心臓部となる吸着材は通気性、吸着能力、低発塵性などからハニカム状の活性炭を用い、除去効率を高めるためにアルカリ化合物を担持させた。

環境中の化学汚染物質の濃度を分析した例を表1に示す。外気およびクリーンルーム中では数ppb(part per billion)の

濃度で存在するが、ケミカルフィルタを使用すると20 ppt以下となって超清浄環境を実現できる。寿命は、使用環境にもよるが、数ppbの入口濃度に対して2年程度を保証している。

4 より安全なクリーンルームへ

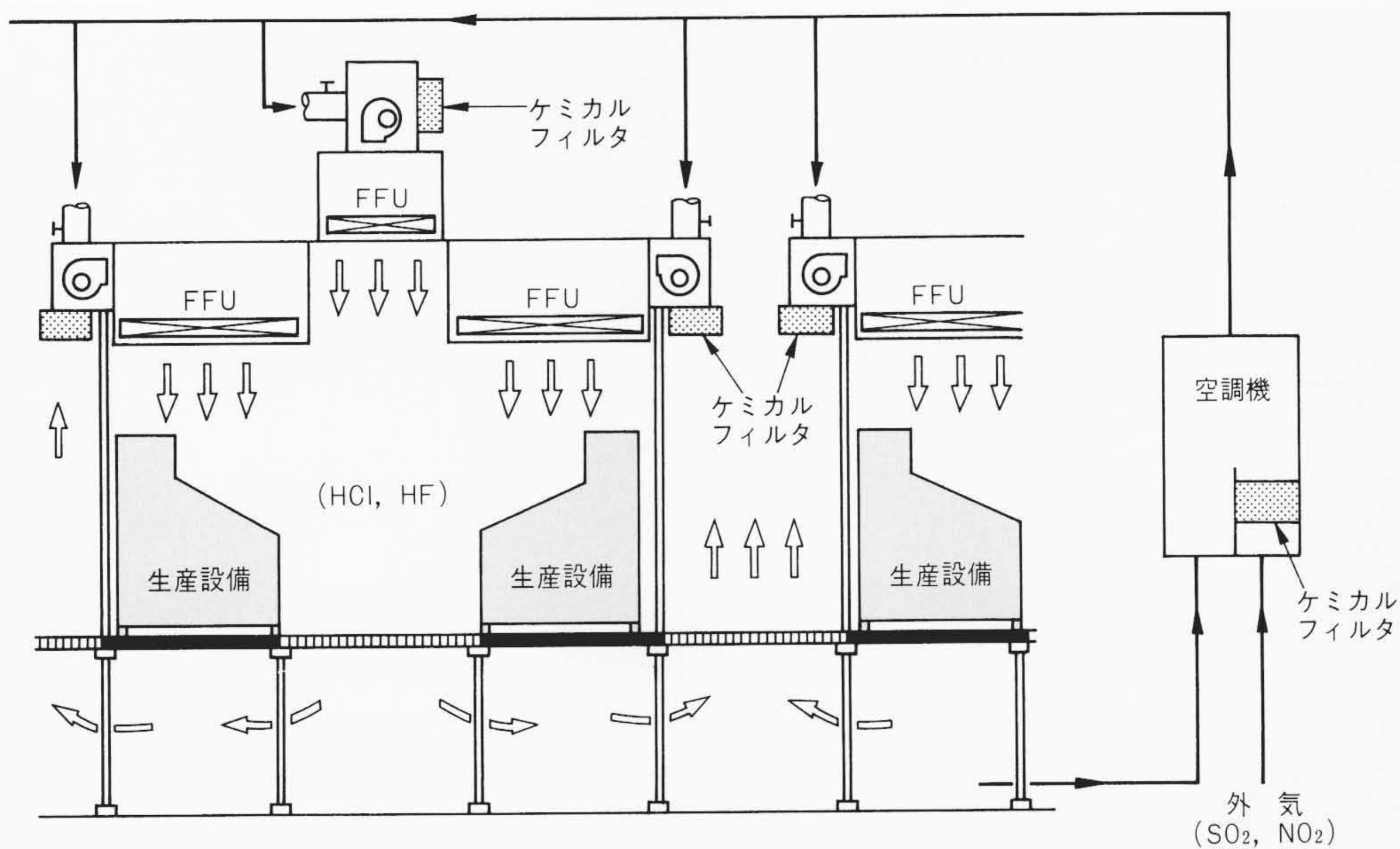
4.1 防災管理

クリーンルームは清浄を保つために密閉構造となっており、さらに建築構造物として無窓構造でもある。また製造プロセスでは特殊材料ガスや薬品が多く使用されている。プロセスの複雑さが増して、さらに種類や量が増える傾向にある。これらのガスの中には、表2に示すように可燃性や毒性の強いものが多くある。薬品には強酸性や強アルカリ性のほかに引火性の高いアルコール類も多量にある。

一方クリーンルーム内では、多くの作業員や技術者が24時間体制で仕事をしているので、万一火災や毒性ガスの漏れなどが発生すると、物的災害だけでなく人的災害に発展することもありうる。したがって、このようないわば密閉建築物に対しては、建築基準法、消防法、高圧ガス取締法、労働安全衛生法などの法規制だけでなく、高圧保安協会制定の「特殊材料ガス災害防止自主基準」、および自治体などの指導にも従う必要があり、このためにも災害ポテンシャルを抑え、安全性を高める防災管理設備は特に重要である。

4.2 防災監視システムの構成

防災管理設備は図9のように、各種の設備によって構成される。クリーンルームでは、特に危険なガスや薬液に関する防災監視が重要である。最近ではプロセスを行う建屋からガス



注：略語説明 FFU (Fan Filter Unit)
図 8 ケミカルフィルタの設置例 保全域および天井ダクト部に設置したFFUの空気吸込口に取り付ける。軽量，低圧損に設計されている。

表 1 分析結果例 クリーンルーム内の化学汚染濃度は，空気循環系にケミカルフィルタを使用することによって著しく減少する。

汚染物質	外 気	クリーンルーム	ケミカルフィルタ 使用クリーンルーム
SO ₂	600～3,000	20～5,000	<20
HCl	200～1,000	60～2,000	<30
HF	200～2,000	200～5,000	<60

注：単位 ppt

シリンダ貯蔵庫や薬液貯蔵庫は隔離されており，必要なガスや薬品を，クリーンルーム内のプロセス装置に集中配管設備を通じて自動供給している。したがって，防災監視の範囲はクリーンルーム内だけでなく，これらの貯蔵庫，さらには廃液回収設備，除害設備などの付帯設備をも対象とする必要がある。

防災監視システムの基本構成を図10に示す。同図に示すように，管理事務室に設置される総合監視盤，製造現場としての各プロセスショップに配置され，警報関係信号の受信と伝送機能を持つショップ監視盤，貯蔵庫に設置される監視盤，およびこれらに加えて，クリーンルーム内や貯蔵庫および製造設備に設けられるガスや薬液に対する漏れセンサ，各種の緊急遮断弁などから構成される。

防災監視システムとは接点によって接続されて，非常事態の発生個所や作業者の状況を映像で確認するCCTVや，該当個所とその周辺または全館に状況を伝え，避難を指示する放送設備も関連設備として重要である。

表 2 使用ガスの分類 クリーンルームの半導体製造に使用されるガスと性質を示す。

ガスグレード	ガス 名 称	化学式	性 質				
			可燃性	支燃性	毒性	腐食性	におい
I a	モノシラン	SiH ₄	○	—	○	—	○
	ジシラン	Si ₂ H ₆	○	—	○	—	○
	アンモニア	NH ₃	○	—	○	○	○
	水素	H ₂	○	—	—	—	—
I b	アルシン	AsH ₃	○	—	○	—	○
	ホスフィン	PH ₃	○	—	○	—	○
	ジボラン	B ₂ H ₆	○	—	○	○	○
	ジクロールシラン	SiH ₂ Cl ₂	○	—	○	—	○
	三フッ化ホウ素	BF ₃	—	—	○	○	○
	三塩化化ホウ素	BCl ₃	—	—	○	○	○
	三フッ化窒素	NF ₃	—	—	○	○	○
	塩素	Cl ₂	—	○	○	○	○
	塩化水素	HCl	—	—	○	○	○
	六フッ化タングステン	WF ₆	—	—	○	○	○
	オキシ塩化リン	POCl ₃	—	—	○	○	—
	四塩化炭素	CCl ₄	—	—	○	—	○
II	四フッ化メタン	CF ₄	—	—	—	—	—
	三フッ化メタン	CHF ₃	—	—	—	—	—
	八フッ化プロパン	C ₃ F ₈	—	—	—	—	—
	六フッ化硫黄	SF ₆	—	—	—	—	—
	一酸化二窒素	N ₂ O	—	○	—	—	—
	酸素	O ₂	—	○	—	—	—
III	窒素	N ₂	—	—	—	—	—
	ヘリウム	He	—	—	—	—	—
	アルゴン	Ar	—	—	—	—	—



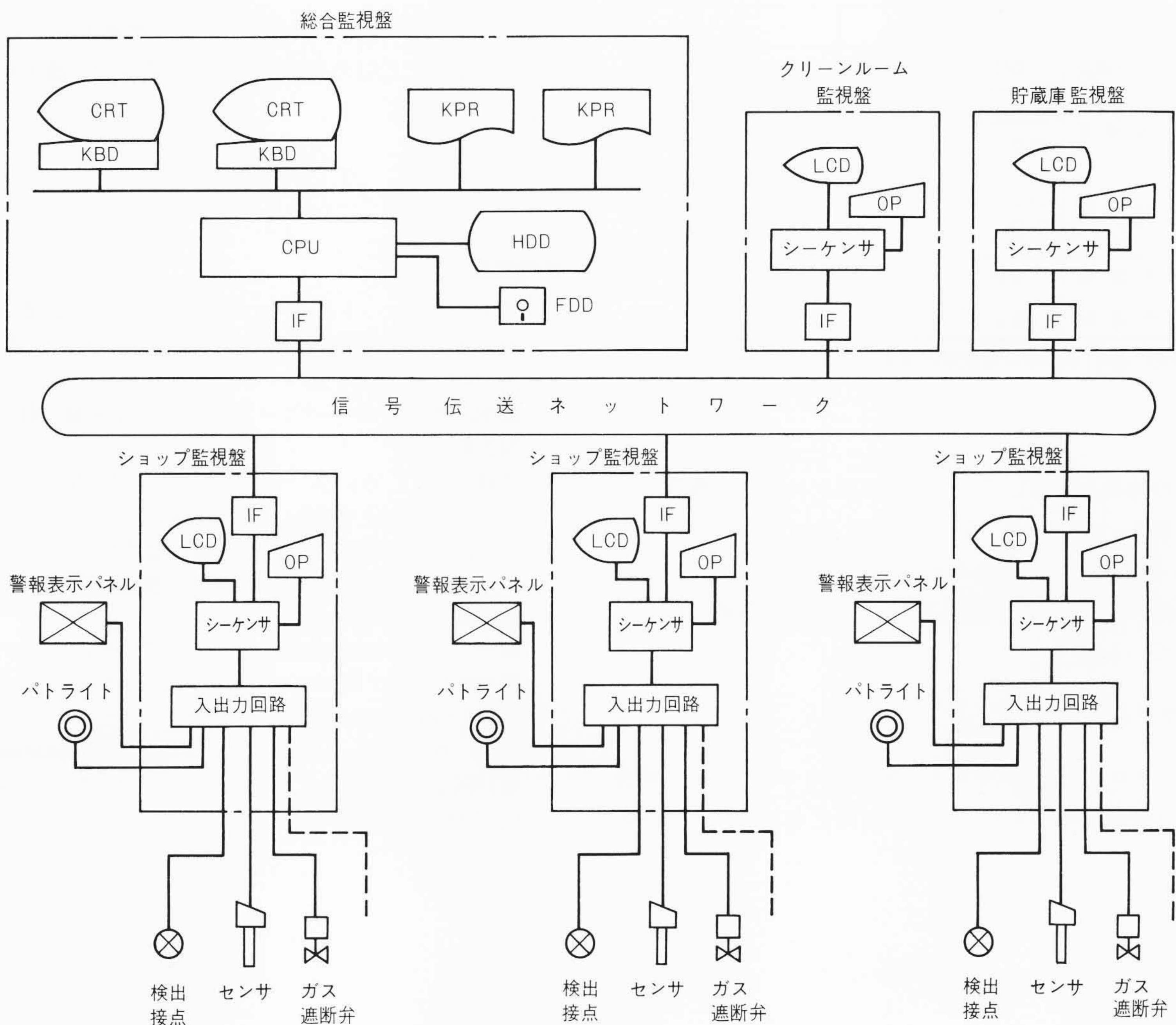
注：略語説明
CCTV (Closed Circuit Television Equipment)

図9 防災管理設備 クリーンルームの防災管理設備を構成する防災関連設備を示す。

4.3 システムの特長と機能

防災監視システムは、先の図10にも示したように、制御用コンピュータシステムとCRTを主体とした各監視盤と、ショップ監視盤を効率的にリンケージするネットワークシステムによって構成しており、その結果次のような特長を備えている。

- (1) 高い信頼性とフレキシビリティの確保
- (2) 確実にリアルタイムの監視と効率的なCRTによるマンマシンシステムの確立と省力性の向上
- (3) 制御の分散、管理の集中を基本とする階層別機能分散システムとしているので、万一システムにトラブルが発生しても健全なショップ監視盤などによって非常制御の実行とバックアップ監視ができる。
- (4) 安全管理とメンテナンスに必要なデータの収集とデータ処理を行う。



注：略語説明 CRT (ブラウン管式表示装置), KBD (キーボード), KPR (漢字プリンタ), HDD (ハードディスク補助記憶装置), FDD (フレキシブルディスク補助記憶装置), LCD (液晶表示装置), OP (操作部), IF (ネットワークインタフェース)

図10 防災監視システムの構成例 コンピュータシステムとネットワークによる防災監視システムの構成例を示す。

表 3 防災監視システムの機能 監視システムの機能と各監視盤の
分担を示す。

監視盤 項 目	総合監視盤	クリーンル ーム監視盤	貯蔵庫監視 盤	ショップ監 視盤
状 態 ・ 警 報 表 示	CRT	CRT	CRT	LCD
計 測 表 示	CRT	CRT	CRT	LCD
非 常 警 報	—	—	—	パトライト 表示パネル
警 報 記 録	漢字プリ ンタ	—	—	—
日 報 ・ 月 報	漢字プリ ンタ	—	—	—
メンテナン ス 記 録	漢字プリ ンタ	—	—	—
計 測 ト レ ン ド	CRT	—	—	—
緊 急 遮 断	—	—	—	ローカル 制御
緊 急 操 作	直接操作	直接操作	直接操作	直接操作
オペレーションガイド	CRT	—	—	—
エンジニアリング機能	CRT	—	—	—
長 期 デ ー タ 保 存	補助記憶 装置	—	—	—
上 位 通 信	シリアル 通信	—	—	—
C C T V 連 動	接点	—	—	—
非 常 放 送 連 動	接点	—	—	—

注：略語説明 CRT(ブラウン管式表示装置), LCD(液晶表示器)

これらの特長を実現している防災監視システムの機能と監視内容を表 3, 4 に示す。なお最終的なバックアップとして、CPUやネットワークを経由せずに直接マニュアルによって行う緊急遮断、緊急散水の機能も備えており、緊急時の信頼性を確保している。

5 おわりに

ハーフミクロンLSI時代を迎え、製造プロセスは精度と規模の両面から変容しつつある。これにこたえるため、クリーン

表 4 監視内容 防災監視システムで監視する内容を示す。

項番	監 視 内 容
1	特殊材料ガス，不活性ガス供給設備の状態および漏れ
2	薬液供給設備の状態および漏液
3	調合装置の状態および漏液
4	有機廃液回収設備の状態および漏液
5	室内の酸素濃度
6	室内の温湿度，差圧
7	床下漏水
8	不活性ガス，純水，冷却水の流量
9	比 抵 抗
10	地 震
11	純化器の露点
12	除害装置

ルーム技術も従来の延長技術に加えて新たな技術開発が急がれる。本稿では、このうちクリーンルーム循環系システム、気流評価、化学汚染、安全監視を取り上げた。このほかにも、コストパフォーマンスを考えた新しい提案や精度向上に貢献しうるファシリティ支援技術の充実など、クリーンルームのトータルエンジニアリングを効率良く推進するための技術を確立しており、LSIの高集積度化への責任の一端を担っていき

参考文献

1) 齊木：ギガビットLSIプロセス環境における必要清浄度の予測，電子情報通信学会論文誌C-II，Vol.J73-C-II，No.5，pp.344～347(1990-5)

2) 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)

3) 齊藤，外：0.05μmレーザダストカウンタ，第32回応用物理学関係連合講演会予稿集，p.221(1983-3)

4) 田中，外：等価流動抵抗を考慮したダウンフロー型クリーンルーム内の気流解析，空気調和・衛生工学会学術論文集，pp.741～744(1985-9)

5) 田中，外：等価流動抵抗を考慮したクリーンルーム内の三次元乱流解析，第7回コンタミネーションコントロール研究大会，pp.81～84(1988-4)

6) 小塩，外：クリーンルームにおける化学物質汚染制御について，第10回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会，pp.309～310(1991-4)