特集・スーパークリーンルーム

スーパークリーンルームとは

Super Clean Rooms

——特集にあたって——

早 川 一 也*・岡 崎 俊 春**

1. はじめに

近代産業においては、組成が一定した材料、精密で再現性のある加工を加能にする製造設備、これらを支え長時間にわたり同一環境条件に保つ空気調和設備が備わっていることが必須の条件である。ここでいう環境条件は、温度、湿度、気流とともに、空気清浄度が重要な要素となる。清浄作業環境を必要とする産業は、今やほとんどすべての産業分野に及んでいる。このように、清浄環境が普遍的に用いられるようになり、超LSI製造環境に直径 $0.1\mu\text{m}$ の粒子の制御が実用化されるまでになった現在、清浄環境をつくり出す技術の流れと、その時々にか案された設備の代表例をふり返り、空気清浄が将来進むべき方向を考察することが必要である。

現在、産業分野で実用化されている最も高い清浄度は、超LSI製造でのフォトファブリケーションプロセスに対するもので、直径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の粒子が 1ft^3 中に10個以下程度のものといわれている。特に、半導体素子製造プロセスに好例として見ることができる。

ここで注意を要することは、このような微小な領域を考える場合、ストークスの法則で扱う微粒子と同じ考えでブラウン運動の法則で挙動する微粒子を従来の法則の延長線上に乗せて扱うことは無理な点がある。 $0.5\mu\text{m}$ と $0.1\mu\text{m}$ 微粒子を比較した場合、粒径が小さいほど粒子数が多くなり、その清浄対策も面倒になる。

幸いなことに、フィルターメーカーが $0.1\mu\text{m}$ に対し、従来のHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルターよりも1けたの効率の高いULPA(Ultra Low Penetration)フィルターが製造販売されるようになった。

しかしながら、さまざまな条件下においてどう扱うべきかのデータも不足しており、かつ測定方法などに問題なしとはいえない。このような意味から、 $0.1\mu\text{m}$ 領

域の測定問題を含めて取り組んでいかなければならない重点テーマとなっている。

外気塵埃の粒度分布を測定した結果、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の粒子個数は最大 1×10^8 個/ ft^3 程度である。 $0.1\mu\text{m}$ クラス10の空間は粒子数が10個/ ft^3 であり、外気塵埃濃度に対して $1/10^7$ 倍も粒子濃度の低い超清浄の状態である。

さらに生物粒子の無菌化を目的とするバイオロジカルクリーンルーム(BCR)があり、インダストリアルクリーンルーム(ICR)の技術が応用されている。しかし、BCRの具体的取扱い、ICRとはかなり違った点もある。

クリーンルーム開発後30年を経て、米国連邦規格209Bの改訂が進められ、次の20グループで審議されている。

- RP 1 - Hepa Filters
- RP 2 - Laminar Flow Clean Air Devices
- RP 3 - Garments Required in Clean Rooms and Controlled Environment Areas
- RP 4 - Clean Room Wipers
- RP 5 - Clean Room Gloves
- RP 6 - Methods of Testing and for the Certification of Clean Rooms
- RP 7 - Ultra Low Penetration (ULPA) Filtration
- RP 8 - Gas-Phase Adsorber Cells
- RP 9 - Compendium of Standards, Practices, and Methods Relating to CC
- RP 10 - Revision of Federal Standard 209B
- RP 11 - Glossary of Definitions Used in IES' CC Recommended. Practices
- RP 12 - Guidelines for Clean Room Design
- RP 13 - Equipment Calibration Procedures
- RP 14 - Particle Counter Use and Correlation
- RP 15 - Clean Room Production Equipment

* 東京工業大学工学部建築学科教授 Ichiya HAYAKAWA

** 三建設備工業機技術本部長 Toshiharu OKAZAKI

and Installation

RP16—Chemical Air Purity and Vapor Deposition

RP17—Process Liquids, Cleanliness and Control

RP18—Operation Maintenance and Personnel of Clean Rooms

RP19—Certification Procedures and Qualifications

RP20—Documentation and Forms in Clean Rooms

このような状況のもとで $0.1\mu\text{m}$ クラス10(さらにクラス1)が実用化されつつある事実は、クリーンルームに対する考え方、理論の再検討の契機となった。クリーンルームの機能・効果の再評価を進め、浮遊微粒子の二相流理論による挙動の解析や、発生機構・増減の様子・汚染メカニズムの解明・捕集の効率化を通じての新しいスーパークリーンルームに対する理論の確立が求められている。

2. スーパークリーンルームシステムの概要

クリーンルーム関連分野における最近の技術的進展の中でも、最も目をみはらせるものは半導体製造業における超LSI生産を対象とするスーパークリーンルームの出現であろう。スーパークリーンルームという呼称は、現状のクリーンルーム規格(たとえば、米国連邦規格 Fed. Std. 209B など)で規定されている室内

図-1 従来のクリーンルーム規格とスーパークリーンルーム

空気清浄度のレベルが、粒径 $0.5\mu\text{m}$ 以上の浮遊微粒子濃度を基準としているのに対し、図-1に示すように、粒径 $0.3\mu\text{m}$ あるいは $0.1\mu\text{m}$ といったさらに微小な粒子までも問題としたり、濃度についても10あるいは1個/ ft^3 など、従来の規格を超える高清浄度を要求しているためについた通称である。したがって、現在スーパークリーンルームのレベルに明確な定着はなされていないが、従来のクリーンルームクラス分類の手法を拡張適用して、 $0.3\mu\text{m}$ クラス10とか、 $0.1\mu\text{m}$ クラス10などのように呼んで区別している。

スーパークリーンルームの需要がよって来たところの半導体製造ラインにおいて、歩留りに最も大きな影響力を持っているウェハープロセスは、概略、図-2に示すように進行するが、中でも、拡散→露光・現像→エッチング→拡散→……の繰返しプロセスは、製品

図-2 ウェハープロセスラインの概要(注)

注) 嶋津和雄: 半導体自動化ラインにおけるクリーンルームのトータルエンジニアリング, 富士時報, Vol.56, No.5, 1983.5, p.351.

の信頼性向上のために最も重要な工程となっている。微細線幅や回路をシリコンウェハー上につくり上げるには、フォトリソグラフィ(photolithography)と呼ばれる写真製版の応用技術を適用するが、露光の際に線幅に対応する粒径の微粒子に光をさえぎられたり、フォトレジスト中に異物粒子を含んでいたることにより、配線の断線や短絡、あるいはトランジスタ等の特性不良といった欠陥(defect)を生じることは容易に想像できるところである。このほか、CVD(Chemical Vapor Deposition)、蒸着、エピタキシャルなど膜をつくる工程では、粒子による膜の抜けや、逆に粒子を核として結晶の異常成長を起こしたり、イオン注入時には粒子にさえぎられた部分に不純物イオン濃度の不均一を生ずるなど¹⁾、線幅より小粒径の微粒子であっても、特性不良という観点からすると無視できないものであることがわかる。さらに、食塩粒子や金属の微粉末が付着すると、熱処理などを通じて期待されざる不純物イオンとして内部拡散し、半導体特性不良の発生がきわめて広い範囲に及ぶ可能性があり、粒子の化学的性質によっては、さらに小さな粒子までも問題にしなければならないということが知られている。

ICチップ上の回路を構成する最小の線幅は、IC

の集積度の高まりにつれて年々微細パターン化する一方であり、最近量産体制に入ったばかりの最新の256Kビット/チップn-MOS DRAMでは1.5 μ m程度、1984年2月に国際固体回路会議において発表された国内3社の1Mビットメモリの試作品では、表1に示すように1 μ m前後の回路線幅を用いて製作されている。また、同年2月25日付の日経新聞には、100Mビット/チップという超高集積度の超々LSIの開発を目標とするプロジェクト構想が報じられている。そのようなチップ上の回路線幅は0.25 μ m以下と考えられており、したがって、制御すべき微粒子の最小粒径は将来0.02 $\sim$ 0.05 μ mの範囲にも及ぶ可能性がある。

クリーンルーム技術は、半導体産業におけるこのような超微細加工の信頼性向上という需要に合わせ、より微小な粒子を対象とし、より低濃度にコントロールする技術へ向けて進展しつつあるのである。

3. スーパークリーンルームシステムの構成

(1) 超高清浄度空気の製造と供給

クリーンルームのために高清算浄度空気をつくり出す従来のやり方は、HEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルター(粒径0.3 μ m単分散DOP試験による捕集率99.97%以上)を用いる空気ろ過である。粉

表1 1Mビットメモリチップの例

メーカー	チップサイズ (mm)	メモリ種類	マスク製作	回路製作	最小回路線幅 (μ m)	備 考
電 々		—	EB露光 ⁴⁾	EB露光 ⁴⁾	0.8	ECC ⁵⁾ 内蔵 コンデンサ埋込方式
日 立		n-MOS ¹⁾ DRAM ²⁾	EB露光 ⁴⁾	光 露 光	1.3	コンデンサ埋込方式 二重アルミ配線
日 電		EPROM ³⁾	EB露光 ⁴⁾	光 露 光	1.2	二重アルミ配線

1) n-MOS : n(egative) channel MOS (Metal Oxide Semiconductor)

2) DRAM : Dynamic RAM (Random Access Memory)

3) EPROM : Erasable Programmable ROM (Read Only Memory)

4) EB露光 : Electron Beam (電子線) 露光

5) ECC : Error Check and Correct

塵通過率 $P \approx 10^{-4}$ 程度の HEPA フィルターに、中間フィルターを併用して全体で $P \approx 10^{-5}$ 程度とし、粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の浮遊微粒子濃度が 10^6 個/ ft^3 の外気を 10 個/ ft^3 程度に清浄化でき、実際的には、再循環率に応じて数個/ ft^3 程度の高 cleanliness 空気をクリーンルームに供給する技術が、ほぼ確立されたものとなっている。

従来、技術の延長線上にある ULPA (Ultra Low Penetration Air) フィルター (粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 単分散 DO P 試験による捕集率 99.999% 以上) を用いると、粉塵通過率は $P \approx 10^{-5} \sim 10^{-6}$ 、中間フィルターを併用することにより、全体で $P \approx 10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度となり、粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 以上の浮遊粒子を対象とするにしても、その濃度が 10^7 個/ ft^3 の外気を $10 \sim 1$ 個/ ft^3 程度に清浄化でき、再循環率に応じ、数～数/10 個/ ft^3 程度の超高 cleanliness 空気を供給することが可能と考えられている。

つまり、HEPA フィルターまたは ULPA フィルターを用いることにより、サプライエアの高 cleanliness を確保することには、ほぼ問題がないように見える (残されている問題は、超高性能フィルターの粉塵捕集率を $0.1 \mu\text{m}$ よりも小さい粒径に対して計測し、高い信頼度で確認する方法にこそある)。

(2) 超高 cleanliness 空気環境の維持

高 cleanliness 空気環境の維持のために利用される室内気流方式は、従来のクリーンルームでは、表 2 に示すように層流方式 (垂直・水平) と乱流方式があり、実際にはそれらの併用方式も多く存在する。

スーパークリーンルームにおいては、乱流方式のみでその超高 cleanliness 空気環境が維持できないことは自明であるが、では、層流方式ならば可能なのだろうか。ちなみに、全面垂直層流方式をとっている現状のクラス 100CR をクラス 10 あるいはクラス 1 にグレードアップするにはどのようにすればよいであろうか。容易に想像がつくように、それは平均気流速度を上げ、すなわち、換気回数を増すことによって解決できる問題ではない。うまくすると、発塵源からの粒子拡散範囲が狭くなるというメリットは得られるが、吹出し空気の cleanliness いかんでは逆効果となる場合すらある。正しい答は、おそらく、

- ① 吹出し空気の浮遊微粒子濃度を、制限したい室内濃度の値に比べ十分低く保ち (好ましくは、数十分の 1 程度以下)
- ② 発塵源から発生した微粒子が、問題となる対象

表 2 クリーンルームの室内気流方式別比較^{注)}

気流方式	清浄度	風速 (m/s)	換気 回数 (回/h)	側面略図	吹出口、 吸込口	長所	短所	価格 比 ¹⁾
垂直層流 方式 (ダウンス ロー方式)	クラス 100	0.25～ 0.30	200～ 600		吹出：天井の 80%以上 吸込：床の40% 以上 腰板か らも可	<ul style="list-style-type: none"> 効果が完全 作業人員、作業状態に左右されることが少ない。 運転開始後直ちに定常状態となる。 粉塵の堆積、再浮遊極小 管理容易 	<ul style="list-style-type: none"> 天井部のデッドスペース (照明等) に注意を要す。(乱流防止のため) フィルター交換が面倒 設備費が極めて高い 室の拡張が困難 	100
水平層流 方式 (クロスフ ロー方式)	クラス 100	0.45～ 0.50	200～ 600		吹出：壁の80% 以上 吸込：壁の40% 以上 天井か らも可	<ul style="list-style-type: none"> 運転開始後直ちに定常状態となる。 構造が簡単 	<ul style="list-style-type: none"> 上流の影響が下流に出る 人、機器類のレイアウト、管理に注意 設備費はかなり高い 室の拡張が困難 	50～ 80
	クラス 1,000	—	100～ 200					30～ 50
非層流 方式 (コンベン ショナル 方式)	クラス 10,000	—	30～60		吹出：フィル ター吹 出口が よい 吸込：床面近 くから	<ul style="list-style-type: none"> 構造が簡単 設備費が安い 室の拡張比較的容易 クリーンベンチを用いると高 cleanliness が確保できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 気流の乱れのため汚染粒子が室内で循環する恐れがある。 定常状態になるまで時間がかかる。 人、機器類のレイアウト、管理に注意 	10～ 40
	クラス 100,000	—	20～30					

1) 垂直層流方式の価格を100とした場合の概ねの価格比を示す。

注) 小山文夫：日立バイオクリーンシステム機器について、空気調和と冷凍、Vol.18, No. 3, 1978. 3, p.100, 他より作成

物表面(対象物表面近傍の小空間)へ誘引されていくような気流経路を断ち、あるいはそのような危険な位置から発塵源を遠避ける。

- ③ やむをえぬ発塵源については、その発生量をできる限り低減させ、あるいは局所的に捕集、排出する。

といった方法を組み合わせることである。つまり、スーパークリーンルームシステムにおける根本的な問題は、どこでどれだけの清浄度を必要としているか、またその清浄度をいかにして計測し、評価するかという問題であり、さらにその清浄度を確保・維持するための問題は、発塵量の多寡の問題であるばかりでなく、発塵源と対象物表面(近傍の小空間)および気流方向の関係の問題であり、また、対象物表面への粒子付着機構の問題なのである。

発塵量については、近年、各種のクリーンルーム用衣服やワイパ、手袋、あるいは壁材などからの発塵特性についての研究が進められ²⁾³⁾、およその発塵総量が粒径を考慮に入れて推定できるようになってきた。特に着衣からの発塵については、衣料素材や縫製の影響もさることながら、人の動作との関係が顕著であり、10倍程度の差異はすぐ生じる。したがって、クリーンルーム内における作業者の動作(操作)に対する配慮により発塵量そのものを低減することが可能であることはよく知られており、しかも、きわめて効率的である。

気流と浮遊微粒子の運動についての研究は必ずしも十分とはいえないが、熱心に推進されつつある。しかし、スーパークリーンルームで問題とされるサブミク

ロン粒子においては、ブラウン運動が活発化し、これを考慮に入れる必要があるが、マクロ的には気流と一致して移動すると考えられるので気流解析が特に重要である。

さらに、粒子の物体表面への付着現象については、重力、慣性力、ブラウン拡散による力、静電気力などを考慮しなければならないが、まだ基礎研究のレベルにあるといえる⁴⁾。

現在、より信頼度の高い半導体生産のために、生産に関与する人からの隔離と省エネルギーとを目的とした生産ライン自動化への試み、特に、トンネルユニットからクリーンチューブ方式とも呼ばれる局所的超高清浄化への道が模索されているが、そのためには、生産機器からの発塵についての研究、ならびに対象物表面への粒子付着機構の解明が必須条件といえよう。

文 献

- 1) 小野貞正編：半導体工場環境清浄化、(株)サイエンスフォーラム、pp.16—18, 1980. 12.
- 2) 早川一也ほか：浮遊微粒子濃度の評価に関する基礎的研究(その15)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.373—374, 1983. 9.
- 3) 藤井修二ほか：クリーンルーム用壁材の発じん性について、日本空気清浄協会第3回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術研究大会予稿集、pp.81—82, 1984. 3.
- 4) 岩瀬和夫ほか：レーザー計測技術による浮遊微粒子挙動の測定、日本空気清浄協会第3回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術研究大会予稿集、pp.123—124, 1984.3.