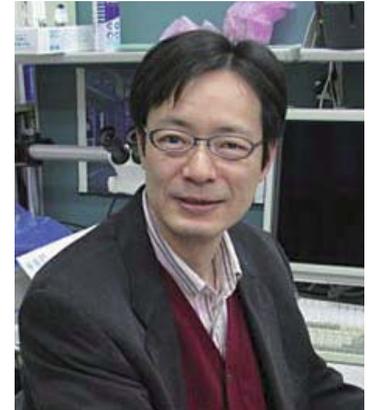


グリーンナノ企画特集<第7回>

21世紀型生産システム「ミニマルマニュファクチャリング」の創出

ー微細加工ファブシステムの改革へー

産業技術総合研究所 原史朗 主任研究員に聞く



1. はじめに

ローチとボトムアップアプローチが語られて久しい。トップダウンアプローチは、大面積を光露光を使って加工するリソグラフィーで代表されている。ボトムアップアプローチは、原子分子を人為的に操るかまたは自己組織化的に合成させる化学反応環境を用意することである。問題は、その両者が全く異なるアプローチであって、プロダクションテクノロジーとして一体化していないことである。実際、ボトムアップは、原子分子の人為操作では、大量生産に不向きであり、自己組織化的化学反応では、生産物が人工物の体をなさない原料の段階にとどまる。結局、最終消費者である人が使う商品からは非常に遠いところでの反応場制御の段階にとどまっている。一方、トップダウンのリソグラフィーでは、大量生産施設のさらなる巨大化が進み、工場の設備投資が5,000億円にも達してしまった。このことで、益々トップダウンとボトムアップの乖離が激しくなっている。それが、多くの研究者を抱えるボトムアップ的研究フィールドの成果が、社会の生産活動を担うトップダウン的ファクトリー技術へ転用されることを益々困難なものにしつつある [1]。

この基本課題に応える対処策として、数年前に「ミニマルマニュファクチャリング」の考え方が提案されている [2]。最近になって、それは、トップダウン的微細加工技術と、ナノテクノロジーの要素技術を融合し、かつプロダクトを生産するためのシステムティックな具体論として熟成されつつある。

この新概念を生み出した独立行政法人産業技術総合研究所（以下、産総研と略称）において、ミニマルマニュファクチャリングテクノロジーを生産ファクトリー技術として実際に機能させてゆく微細加工ファブシステムの革新～ミニマルファブ構想～ [3][4] について、意欲的に取り組んでいる産総研の原史朗主任研究員を訪ね、その取り

組み状況を伺った。

2. ミニマルマニュファクチャリングと局所クリーン化

ミニマルマニュファクチャリングという考えは、2005年ごろから産総研のナノテク材料製造分野における研究開発の方向を指し示す理念として掲げられている [1][2]。「ミニマルはミニマムの形容詞であって最小を意味するが、必要最小限で済ませるといふ、日本人の「もったいない」を大切にする心に通ずる含蓄のある意味を内包している」と原氏は言う。シンプル化を極めることで、省資源、省エネルギー、高フレキシビリティが実現され、結果としてムダが大いに省かれる [2]。

これまで、時代進化の象徴であった半導体産業においてその中核となるLSI製造ラインでは、微細化の進展と共に高いクリーン度が要求され、一方ウェハは300mm径と大型化し、プロセスの高精度化・複雑化と相俟ってクリーンルームが大規模化する傾向を辿ってきた。製造ラインの新設には数千億円以上が必要と言われるように、その設備投資や運用費用は膨大なものになっている。

このトップダウンテクノロジーの投資額の巨大化問題は、常識的には、マネーゲームの問題であり、テクノロジーそのものと無関係だと見られがちである。しかし、「巨大化した製造設備で均一にものづくりをするには、高度で複雑な製造技術と生産技術が必要であり、不良品の排除や製品性能のばらつきを押さえ込むために、製造設備全体の徹底的なクリーン化が必要となった。逆に言えば、製造物近傍の環境だけを管理し、ナノレベルで完全に均一なものを製造できる技術が確立されれば、マクロレベルの高コストなクリーン化はいらなくなる」と原氏は指摘する。その論理的な手法が、図1に示すように人のいる空間と半導体ウェハなどの製造物が存在する製造物空

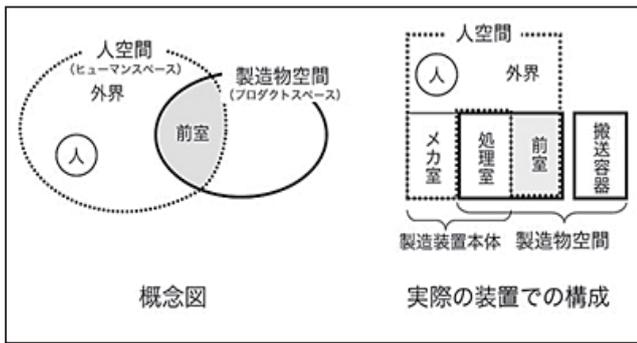


図1 製造物空間と人間空間の分離 (出典：参考資料 [5])

間(処理室、搬送容器)を完全分離し、クリーン化空間を局所に限定する局所クリーン化生産方式である。一般には、大きなクリーンルームの中に製造装置を並べてラインを構築し、作業者は防護服を着て衣服等の塵が室内のクリーン度に影響しないようにするのが常識である。局所クリーン化生産方式では、製造物を出し入れする前室を境として両空間を完全分離し、図2に示すように製造物にとっても作業者にとってもよりよい環境の実現を図るものである [5]。「コストのかかるクリーン環境を、必要な時に、必要な所だけに」が、局所クリーン化概念の要諦である。

「2004年に、「ジーンズでLSI製造」と喩える表現を用い始めたところ [6]、局所クリーン化という概念が、実際に図1と同様の構成を導入している半導体の先端工場のプロの皆さんに理解されるようになってきた」とのこと。業界では、ウェハの高速搬送を目的とした自動搬送化のために、図1の仕組みを導入したので、人と製造物を分離する本質的なテクノロジーであるという認識が実はほとんどなかったのである。「業界動向とは全く別に、半導体デバイスの歩留まり問題を追及する過程で、業界の微粒子遮断タイプではなく、ガス分子さえも遮断可能な局所クリーン化リサーチシステムを構築した。環境物質を制御できる完全な意味でのこの局所クリーン化システムを用いると、デバイスの特性ばらつきが消滅する」画期

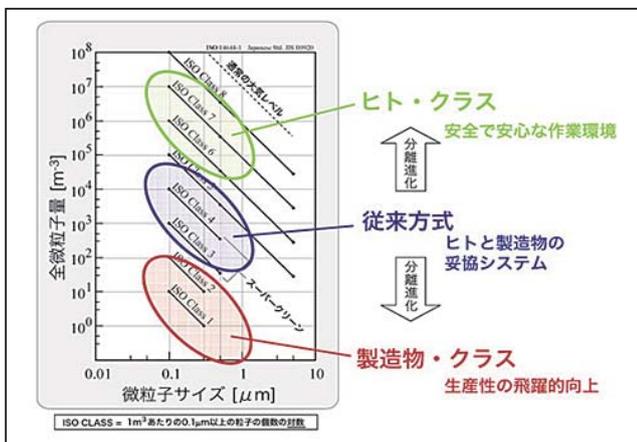


図2 人と製造物にそれぞれ最適な環境を作る (提供：原史朗氏)

的な成果が得られたという [7][8]。それが、物理的効果をもつものとして局所クリーン化の意義が認識されるきっかけになった。また「大きなクリーンルームが不要ということは、空調機メーカーの仕事がなくなるということではない。局所クリーン化には小さい空間の管理技術という新たな技術が必要となる。例えば、計測技術一つをとってみても、狭い空間では空気を大量に吸い込む普通のパーティクルカウンターは使えず、また、狭い空間での気圧変動の制御が必要であり、新たな技術開発が必要となる。」と原氏は説明する。

その後、局所クリーン化の本質的重要性の認識が広がり始めたのを受けて、より広い産業への普及の一助とすべく、2006年、単行本「局所クリーン化の世界」が出版されている [5]。

さて、ガス分子の遮断機能を持つ、完全な局所クリーン化が生産工場において実現されても、それだけでは、ボトムアップ的な技術成果を巨大工場へ転用することが容易になるわけでもなければ、巨大工場の投資額を大きく削減することにもつながらない。「もう一つのイノベーションが必要です。それは、ウェハサイズをミニマル化することです。」と原氏は指摘する。大口径ウェハでは、おおよそ1,000～10,000個もの集積回路チップをトップダウン的なリソグラフィーで同時に生産している。大量チップをすべてウェハ内で均一に作るために、高度な技術と巨大な装置、巨大な工場が必要となった。1チップ自体は高々1cm²程度であるから、それが納まるハーフインチサイズのウェハなら、その1cm²の小さな範囲だけの均一生産技術があればよい。この面積サイズは基礎研究者が使っているカケラウェハの大きさのスケールであり、研究者自身が得意とするサイズである。このサイズのまま生産段階へ移行すれば、研究から開発、生産への発展は大変スムーズになる。1チップの1個流しであるから、生産スループットは、大口径ウェハの1,000分の1であるが、設備投資も1,000分の1になる。トップダウン手法とボトムアップ手法は、これで初めて接近

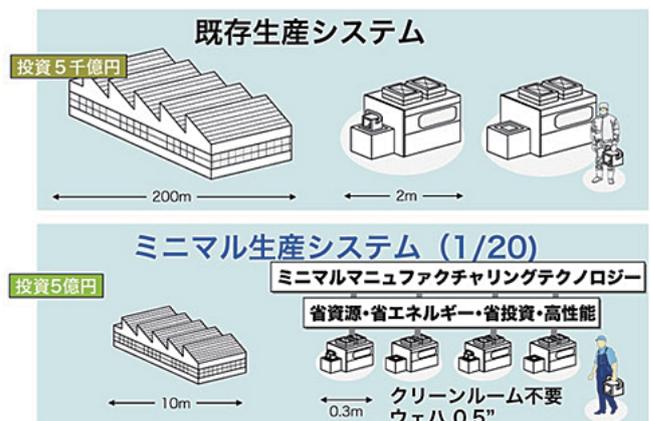


図3 半導体製造工場へミニマルマニュファクチャリングの概念の適用イメージ (提供：原史朗氏)

させることができ、融合可能な状態に入ってゆくのである(図3)。

しかし、新手法とはいえ、それ自体は概念である。実現へ向けて、乗り越えなくてはならない課題がいくつもあるはずである。「それには3つの課題があります。一つは、トップダウンアプローチと融合可能なボトムアップテクノロジー、これは言い換えればミニマルマニファクチャリングテクノロジーということになりますが、それらが何なのかを抽出すること。そして2つ目に、最終的に理想とされる新しい製造システムの姿を、理想が空論に終わらないよう現実に生産に関わっている人々と議論しながら、その理想像であるファクトリーモデルを創造すること。そして、最後にそのモデルシステムを実際に開発し具現化することです。」と述べている。以下では、その3つの課題への取り組みの実際を紹介する。

3. ミニマルマニファクチャリング追求の突破口を求めて ～半導体システムイノベーション検討会とファブシステム研究会～

(1) 半導体システムイノベーション検討会 --- 産総研内イノベティブ要素研究のシステム化

産総研では、2007年6月にミニマルマニファクチャリングコンセプトに基づく技術とは何なのかを議論し、それらをシステムティックに製造段階へと発展させるためのインキュベーションの場として、半導体システムイノベーション検討会をスタートさせた。マイクロプラズマ、インクジェット、小さな箱に収めた100kVの電子加速器などの個性的研究者が多数集まったとのこと。

検討会で見いだされた重要な知見は、ミニマルウェハにおいては、プロービング技術は一般論として実用性が非常に高くなるということである。たとえば、電子ビーム露光技術やインクジェット技術は、局所的に対象物に作用させる技術であり、大面積量産性とは全く整合しない"遅い"技術であった。ミニマルウェハでは照射領域は1/1000であるから、これら技術の実用性は飛躍的に高まる。表面分析技術も大抵はプロービング技術であり、生産段階での実用性は現実的な話になってくる。

プロービング技術は、「必要な作用を、必要な時に、必要な所だけ」に施す技術であるから、本質的に、高効率で、ムダがない。これらのプロービング技術だけでなく、局所クリーン化などを含め、低コストでありながら、省資源、省エネルギーを実現する技術に共通することは、「必要なプロセスを、必要な時に、必要なだけ」という「もったいない」的思想を具現化していることである。「必要なものを、必要な時に、必要なだけ」とは、日本の製造業が高い生産性を達成するために実行してきた、トヨタ生産方式に代表される現場的生産革新の基本姿勢である。それを、生産革新の段階から、ひとつ基礎のテクノロジー

の世界へと適応発展させた考え方がミニマルマニファクチャリングであり、その具現化技術がそのテクノロジーと見なされる。トヨタ生産方式では、突き詰めると、人の労働生産性を向上させることに収斂されがちであり、人の働き方を厳しくする側面を持っているが、テクノロジーにはこの問題が原理的に発生しない。

検討会では、こうした優れた要素技術と局所クリーン化とを組み合わせ[9]、システムとしてミニマルファブを追求し、企業がこれを活用して新しい市場創出に結びつけてゆく、そのための実行プランが練られた。このプランを強化するのが、次に紹介する産業界とのコラボレーションである。

(2) ファブシステム研究会 --- 産業界の知恵を集める

ファブシステム研究会は企業16社、2大学および産総研の委員で構成され、特に企業メンバーは生産工場などで現場に係わる人達である。「生産現場の方々は、個人の思惑ではなく、現実でものをおっしゃる。議論していて気持ちがいいですね。」と原氏はにこやかに話す。ここで、ファブとは、主にFABrication(微細加工)を行う半導体集積回路工場のことを指す。隔週で行った生産に関する課題抽出の討論のなかで、異なる業種間でも同じ問題を抱えていたことも、企業人同士で相互に認識されるようになり、共通課題の一般的事項と企業秘密的個別事項を明確に識別できるようになった。第8回に初めて行ったオープンディスカッションによって、次の提言を創出し、それを議論の詳細とともに総合レポートとして纏めることができた[3]。

半導体産業を持続可能産業として成立させるために、ファブタイプを次の4タイプに多様化分類する。メーカはこの多様化分類の必然性を認識し、それぞれのタイプの特徴を発揮させるよう体制強化を図っていくべきである。

- 1) 生産単位の大形化(450mmファブ)
- 2) 先端ファブの進化(NGF*)
- 3) 既存ファブの進化(レトロフィットファブ)
- 4) 最小単位の生産システム(ミニマルファブ)

* : NGF : Next Generation Factory Vision from 300mm to 450mm

このなかで1) 2) はファブの伝統的な発展形態である。これに対して、3) の「既存ファブの進化」は、従来一般に行われているファブのヴァージョンアップとは異なり、古いファブのなかで、すなわち4, 5, 6インチウェハの上に最先端、例えば45nmプロセスを実現するという新しいファブの形態である。古いファブに付加価値を付けて新しく生まれ変わらせるには、技術と腕前が必要である。これは日本メーカが展開するのに適しており、これから注力すべき形態と言える。4) は産総研が提唱している革新的なファブ形態である[3]。

4. 最小単位の生産システム(ミニマルファブ)の生産性について ～時間積算による量産性とオンデマンド性～

「ミニマルファブは最低限の単位でもものを作る。ところで、一般常識では大量生産は同時に大量のものを作ることと考えられている。時間積算による大量生産性の存在に皆気づいていなかった。」と原氏は言う。ミニマルファブでは従来のメガファブと同様に1分1プロセスの処理速度が想定されている。すると、60分で60チップ(=60ウェハ)、24時間で1,400チップ、30日で43,200チップ、年間で約50万チップが生産できてしまう。これは、多品種少量の商品には十分な生産量である。大量生産性を従来は主に同時生産性の向上(大口径化)で実現していたが、ミニマルファブでは、時間積算生産で十分な生産量が得られる。これはナノテクノロジーを実用技術として応用しようとするときに、比較的一般的に通じる考え方も見て取れる。

次に、生産にかかる日数である。LSIの製造工程は約600工程あり、約300台の装置が使われている。先に述べたように、ファーンエス等の特定プロセスを除けば1プロセスの所要時間は1分であり、600工程なら10時間でLSIが出来る勘定になる。しかし、現実には出来るまでに2ヶ月を要している。即ち、LSI生産に要する時間がプロセスに要する時間の100倍にもなっている。その主要因は待機時間であり、さらに搬送時間(装置間、装置内)等がこれに加わっている。工場においては、装置稼働率を落すことを避けて少しでも生産量が高めるために、過剰なウェハ投入を行うためである。これに対して、ミニマルファブでは、過剰なウェハ投入の必然性はないので、待機時間が激減し、プロセス時間の合計そのものが、納

期に近づいてゆく。すなわち、おおよそ1日でLSIが生産できるようになる。ミニマルファブではゆっくり作るような錯覚に陥るが、実際には巨大工場よりも遥かに高速なのである。

汎用マイクロプロセッサやDRAM、フラッシュメモリのような同一品種を大量に消費するLSIについては従来型の大量生産システムが今後とも継続するであろう。一方、それほど大量でない多くのLSIには一品料理システムを適用するという、二つの生産システム形態の並存が考えられる。一品料理システムでは、一時には一品種しかつくらない単純さを持っているが、一品種の製造が終われば、他の製品を製造するように装置を並べ替えればよい。製造ラインを増設して並列生産すればその分だけ量産ができる。いわゆるスケラブルなライン構成が可能である。また、ラインごとに別の品種を作る多品種生産を自然に行える。原氏は並列生産の具体例としてファブシステム研究会に提出された日立GSTにおけるHDD組立生産の例を挙げた。小さな製造ラインを50ライン並列にならべ、例えば量産品に80%、最先端製品に数%、やや旧式で少ない需要に10数%振り向けるといった使い方ができている。市況の変化に応じての切り替えもきめ細かく行うことができているという。

5. ミニマルファブ具現へのステップ-その1

ミニマルファブを実現するには、先ず製造プロセスの各工程に対応して装置を新たに開発することから始めなければならない。現在の常識を覆すような技術や装置の開発は、個々のメーカ単独では困難であり、ミニマルファブ構想の元に多くの企業が力を合わせて開拓を進める必要がある。そこで、装置作りのプロジェクトを開始した。

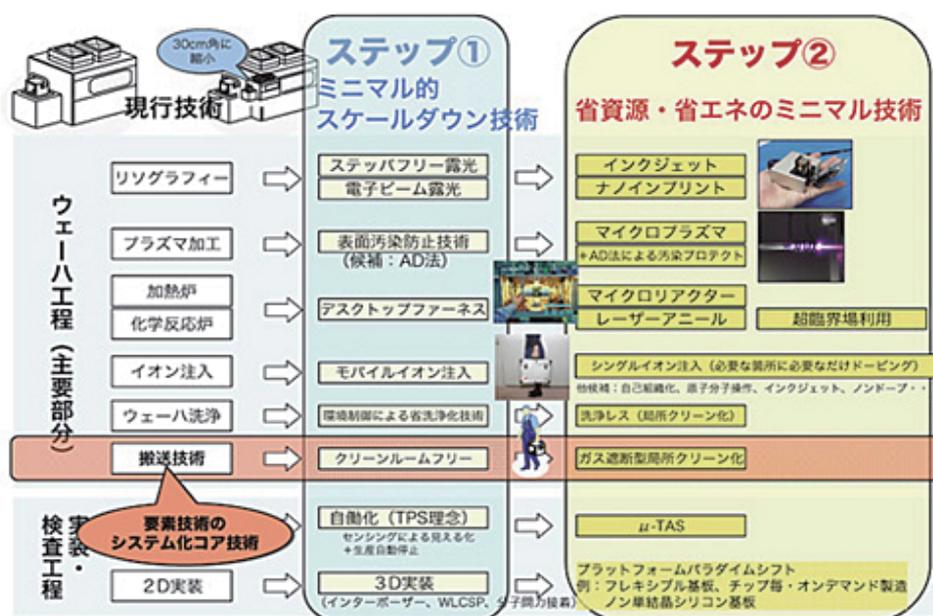


図4 ミニマルファブ具現へのステップ (提供: 原史朗氏)

現時点での産総研の予算は限られたものであるが、10社近い企業の賛同を得て進めている。

図4はミニマルファブ実現へのステップを説明するものである。ウェハはハーフィンチ径で、各装置は30cm角と定義されている。ステップ①では各工程に対応する装置のスケールダウンを追求する。以下では、要素技術のいくつかを取り上げ、ミニマル化で装置がどのようなスタイルになるかを例示する。

(1) リソグラフィー

まず、リソグラフィー工程について見ると、ウェハが小さいので、現在先端装置で数十億円はかかるステッパーのステッピング機能は不要となり、昔ながらのマスクアライナーという光をワンショット照射するだけの露光機に戻る。また、小さい描画面積であるので、マスク不要の電子線直接描画方式を用いてパターンを作ることも容易になる。配線幅の太い、後ろの方の配線工程では、先端装置で1ミクロンの線幅を描けるインクジェットが、リソグラフィーそのものが不要であることから有利になる。また、ナノインプリントでは、大口径化は技術的に困難さを増すが、ハーフィンチであれば面積の点では実用域に入っている。

(2) ファーネス

拡散・アニールなどのファーネス（加熱炉）については、赤外線集中加熱方式を用いれば、必要な加熱を、必要な時に、必要なだけ行えるので、高効率で高速なプロセスが実現できる。図5に示すようにハロゲンランプを発光源とする赤外線を加熱したいところだけに当てる。半導体工場ではファーネスに工場全体のエネルギーの20%を使うというが、この方式によれば1000分の1のエネルギーで済むことになる。従来は炉全体の温度を上げていたが、この方式はウェハだけを加熱するからである。その結果として昇温、降温のための時間もほとんど不要となる利点も生まれる。実は、この赤外線集中加熱炉は、サファイアの研究者が実験の必要性に迫られて開発した



図5 デスクトップファーネス 赤外線集中加熱炉
(提供：原史朗氏，開発者：池田伸一氏)

とのこと。たとえば、1分で2000℃に昇温してアルミナからサファイア単結晶を作ることができる。すでに数十台も販売実績のある実用技術である。

(3) イオン注入装置

イオン注入装置はイオン発生部、質量分析部、イオン加速部等で構成され、普通に考えると小型化の困難な装置である。しかしイオン発生部については、研究者（産総研・鈴木良一氏）が作製したアタッチケースに納まる電子加速電圧100kVのX線発生技術を使うことで小型化が可能であろうと原氏は言う。他の部分についても、新しい技術の適用で小型化が進展することを期待している。LSIの微細化に伴い、イオン注入も浅くて済むようになりイオン加速電圧が低くて済む場合が多いのも好都合である。

(4) 局所クリーン化技術の具現化

完全に塵とガスを遮断できる局所クリーン化技術を具現化して各装置への適用を図るなど、ミニマル的スケールダウンをシステムとして実現できるように、共通的基本盤技術としての局所クリーン化搬送システム開発が進行中である。

6. ミニマルファブ具現へのステップ-その2

ミニマルファブ具現の第2ステップを図4のステップ②に示す。第1ステップが装置の小型化であるのに対し、第2ステップは、エネルギーと資源の本格的なミニマル化である。既存ファブシステムにおいて小さくしにくいものとして、純水装置や排ガス処理設備など生産ラインのユーティリティ設備がある。対策のひとつは、ユーティリティが処理すべき物質量自体を大幅に削減するプロセス技術を研究開発することである。現行のリソグラフィー技術では、投入資源が最終的な製品であるチップ上に生かされて組み込まれる資源利用効率は、高々0.1～1%であるが、リソを前提とする限り、その改善は容易ではない。ミニマルマニファクチャリングテクノロジーでは、必要なプロセスを必要な時に必要なだけ作用させるので、この低い利用効率を原理的に向上させることができる。その例としてはインクジェットプリントやナノインプリントの活用がある。

(1) 極微液滴インクジェットの活用

現在市販の高性能インクジェットプリンタと比較して液滴の体積を1,000分の1にするインクジェット技術が開発されている（図6）。まだ1μmの配線に使える程度ではあるが、原料の利用効率は理想の100%に限りなく近づく。現在の電極工程はウェハ全面に蒸着した金属を配線を残してエッチングして取り除くとか、レジストも使用して捨てるなど、材料利用効率は先に述べたように

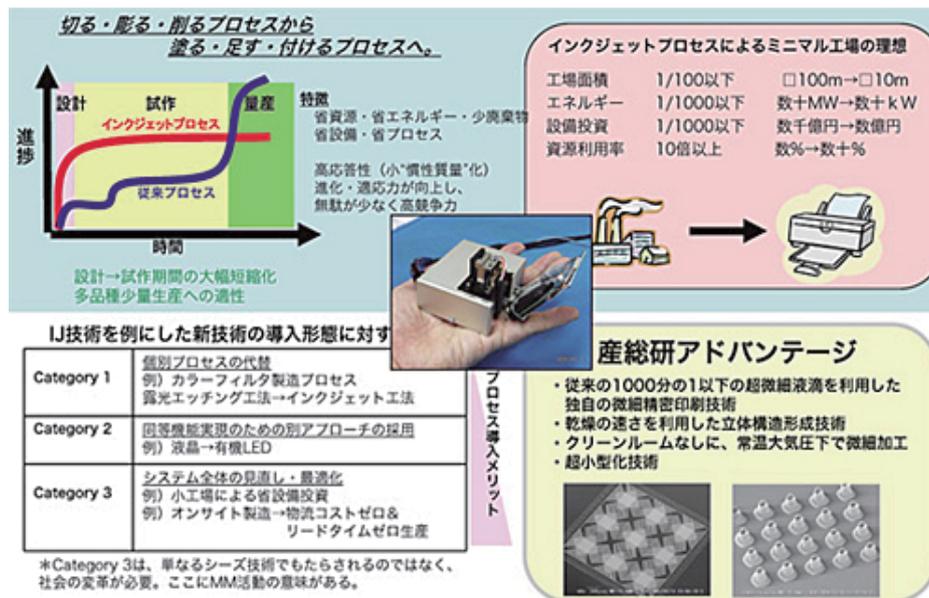


図6 スーパーインクジェット（オンデマンドマニュファクチャリング技術）
（提供：原史朗氏，開発者：村田和広氏）

大変低い値となっている。インクジェット方式にすれば材料，エネルギー共に 1/100 ~ 1/1,000 に減らすことができる。転写のスピードが遅いのが欠点で，大量生産向きではないが，設計から試作までの時間を大幅に短縮できる技術なので，多品種少量生産に適している。図6に示すように手のひらサイズのインクジェット装置が開発されている [10]。

(2) 種々のユニークな高効率化技術の活用

活用が考えられる種々のユニークな技術のなかにライターの火の様な形のプラズマを形成する小型低温の大気圧マイクロプラズマ技術がある (図7)。そこから噴出す

るプラズマは手をかざしても熱くない。しかるに，プラズマ発生部に金の棒を差し込むと金の微粒子が噴出してきて，紙の上にも堆積させることができている。このような局所的プラズマを走査することで，無駄が少なく所望の領域に PVD (Physical Vapor Deposition) や CVD (Chemical Vapor Deposition) を実現できる [2][3]。

この他にも，マイクロリアクターやレーザーアニールなどの高効率化技術の例がある。「ステップ1は，大口径均一化の複雑な技術を省いて小さくするだけであって，リソースを掛けて取り組めば必ず実現する。しかしステップ2である高効率を追求する真の21世紀型システム実現のためには，発想の転換を含むナノテクノロジーを中心

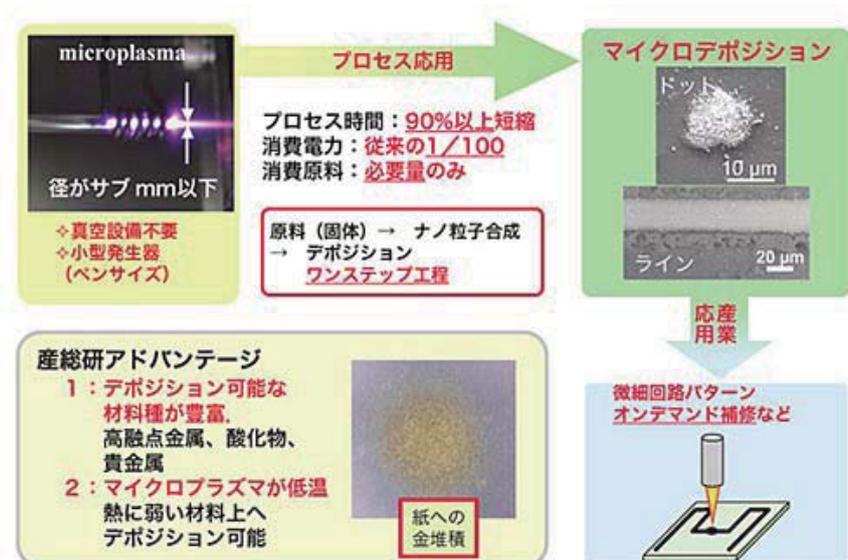


図7 開発されたマイクロプラズマ技術とその応用例（提供：原史朗氏，開発者：清水禎樹氏他）

とした新しい技術の採用により、現在の工程を順次置き換えていく必要があり、これによりライン全体のミニマル化が加速される。」と原氏は語る。

7. 搬送技術からスタート ---- 塵とガスの完全遮断を追求

上述のように、ステップ①と②で約 20 の要素技術を開発する必要がある。何からはじめるべきであろうか。産総研では、先ず搬送技術開発の小プロジェクトをスタートさせた。「搬送技術は機械技術である。どうして機械技術からやるのか。研究者が開発する技術が種々あってもそれだけではミニマルファブの生産システムと結びつかない。突き詰めると、研究者の開発装置になくて生産現場には必ずあるクリーン化と搬送技術の必要性に突き当たった。」ファブシステム全体を方向付ける判断である。

ジーンズをはいて装置を操作できるようにするために、製造物を処理する局所クリーン化空間に図 8 に示したように前室を付ける。前室の外側と中側の二つの扉はインターロックでどちらかは必ず閉まっているようにし、ウェハを出し入れするとき、クリーン空間と外界とがつながることはない。ここで重要なことは粒子（塵）とガスの両方を遮断することである。

「この前室システムは、2号機、3号機と量産可能な構造として改良してゆく。これを色々な現状装置、例えば SEM（走査型電子顕微鏡）などに適用すればそれだけで装置の付加価値は高まることになる。汎用製品として普及させれば、資金が回り、ミニマルファブ開発に弾みがつくことになる。まずは、環境雰囲気を制御できる新システムとして、大学の先生やナノテク研究者に使ってほしいですね。」と原氏は期待している。

8. ミニマルファブ実現に向けて これからの課題

先に挙げた 3 つの課題のうち 2 つは、半導体システムイノベーション検討会とファブシステム研究会の立ち上げにより、その課題を克服する活動が進んでいる。残る課題は、ミニマルモデルシステムを構築することである。ミニマルマニュファクチャリングの要素技術のなかで、小型化が難しいのは例えばイオン注入装置である。その他では、搬送ロボット、プラズマ装置、ウェハ加熱装置などの要素技術もミニマル装置として具体化する必要がある。

9. むすび

今回の取材により、ミニマルマニュファクチャリングの概念にもとづく半導体のミニマルファブが、単なる夢ではなく、その実現へ向けたプロジェクトとして具体的なステップを踏み始めていることを知ることが出来た。

LSI 製造の大量生産方式は、半世紀にわたって材料、装置製造、デバイス製造ライン等全ての体制が確立され固定概念となっている。そこにミニマルファブという革新的概念に基づく生産方式を持ち込むことの困難性は想像に余りある。

材料メーカー、製造装置メーカー、デバイスメーカーは、革新技術についてはその周りの環境が整い、自分の製品に適用して大きな効果の見通しがないと動き難い。現在まだ姿を見せていないミニマルファブに関して各メーカーに共通の認識と理解を持ってもらうことが必要であろう。これに対してモデルシステムの構築が意味を持つと思われる。原氏は、その実現のためのプロジェクトに出来るだ



図 8 開発中の局所クリーン化ミニマル搬送システム PLAD 1 号機
(図提供：原史朗氏，開発者：原史朗氏，前川仁氏，ウェハ：信越化学工業（株）提供)

け多くの企業に、一緒に汗をかくパートナーとして参画してもらいたいと述べている。

ミニマルファブは、製造ラインのコストとともに使用エネルギーを桁違いに削減し、また、廃液等の有害物質の廃棄・放出量をも最小化する。地球環境、エネルギー問題を重視する21世紀に望まれるシステムと言える。

また、局所クリーン化により、製造物空間の塵の除去や雰囲気ガスの制御を理想的に行えれば、ナノテク時代に要求される質の高い研究環境や生産環境が実現することになる。更に、ミニマルファブは研究・開発試作システムが生産現場の製造システムに近いことで、研究・開発とその実用化が効率的に行われ、ナノ領域でますます困難になると思われる研究・開発から生産への技術移行が容易になる。時代のニーズへの素早い対応が可能な体制を提供するシステムでもある。ミニマルファブ創出の活動が大きく展開していくことを期待したい。

参考文献

- [1] NEDO「ナノテクノロジーによる生産技術革新に関する調査研究」成果報告書（2006.3）
- [2] 独立行政法人 産業技術総合研究所「ミニマルマニュファクチャリング--考え方とテクノロジー」ミニマルマニュファクチャリング技術課題タスクフォース（2007.4.15）

[3] 独立行政法人 産業技術総合研究所、「21世紀型生産システムに関する提言」ファブシステム研究会 総合レポート 2008

[4] 原史朗、「持続可能な21世紀型産業構築のための本格研究 ミニマル生産システムを創造する」産総研 TODAY, Vol.9, No.2, pp.10-11（2009.02.01）

[5] 原史朗、「局所クリーン化の世界」Kブックスシリーズ 194, 工業調査会（2006.12）

[6] 原史朗、「変貌するクリーン化技術ニーズと技術革新の潮流」クリーンテクノロジー, Vol.15, No.2, pp.55-60（2005.02.01）

[7] 原史朗、「界面制御による電子構造制御--デバイス特性をどこまで制御できるのか」薄膜・表面物理セミナー, Vol.33rd, pp.71-79（2005.07.14）

[8] 原史朗、「局所クリーン化リサーチシステムと半導体表面・界面への応用」表面科学, Vol.29, No.6, pp.375-381（2008.06.10）

[9] 原史朗、「ミニマルマニュファクチャリングとクリーン化技術」クリーンテクノロジー, Vol.17, No.8, pp.54-58（2007.08.01）

[10] 独立行政法人 産業技術総合研究所、「手のひらサイズのスーパーインクジェット装置を開発」ニュースリリース（2008.10.14）

(向井久和)