

第 10 章 WG8 ファクトリ・インテグレーション

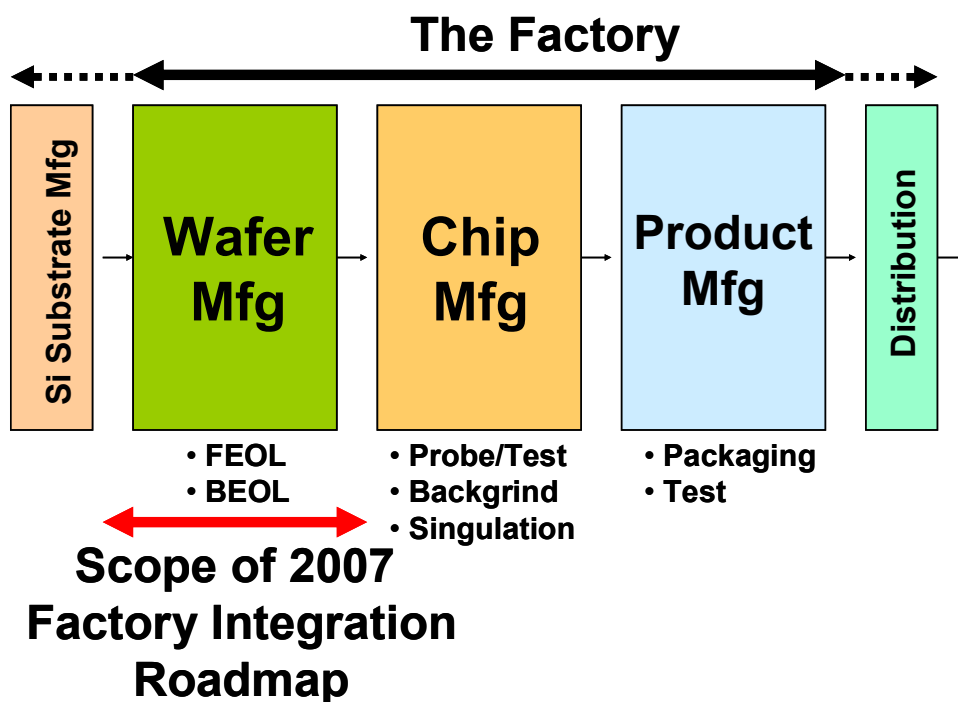
10-1 はじめに

10-1-1 活動範囲

国内デバイスメーカーは 90 年代後半に、それまでの DRAM 主体の生産体系から SoC に製品の軸を移行してきたが、それまでの生産の仕組みが SoC 特有の生産形態の複雑さに追い付かない状況に追い込まれた。

基本的に DRAM は世代当りの製品寿命が 2~3 年ある事から、仮にマスクの改版やシュリンクなどが行われたとしても、これらに対する改善活動を長期にわたって分散して行なう事ができた。

しかし SoC は一般的に製品寿命が短く、過去のデータ蓄積が少ないために十分なチューニングや統計手法の適用ができない事から歩留り解析やラインシミュレータなどは精度悪化を生じてしまっている。これらの事から SoC 生産に適した仕組みの構築が国内メーカーより強く求められている。



図表 10-1 ファクトリ・インテグレーション WG の活動範囲

ファクトリ・インテグレーション WG の活動範囲を図表 10-1 に示す。本 WG では、これら SoC 生産における工場の生産性向上(コスト、納期、品質、省エネを含む総合的生産性向上)について検討を進めており、「Si Substrate」マニユファクチャリングから「Wafer」、「Chip」、「Product」、「Distribution」へつながる一連の製造工程において FEOL、BEOL に代表される「Wafer」マニユファクチャリングのエリアにフォーカスして活動を行なっている。

10-1-2 FI スコープ

本 WG は工場をいかに有効活用するかの技術検討を実施しており、そのスコープを図表 10-2 に示す。SoC 生産において製造工程の複雑化や、微細化に伴うプロセスマージンの減少によるばらつき問題に加えて、仕様が多様で製品寿命が短く、仕様や需要が短期間で変動する事から多種の製品が少数枚ロットで流れる高混流小ロット生産が求められる事から、装置の有効稼働率(OEE)の向上による生産性向上を初め、装置の基本性能自身の向上により多品種生産の効率化において大きな課題となるロット流動の乱れを最小限にする事が求められる。加えて段取り替え頻度の増加により装置固有のオーバーヘッド時間が顕在化して行く中でのサイクルタイム悪化を防ぐ策の検討を装置メーカーの協力の下、取り組んでゆく必要がある。

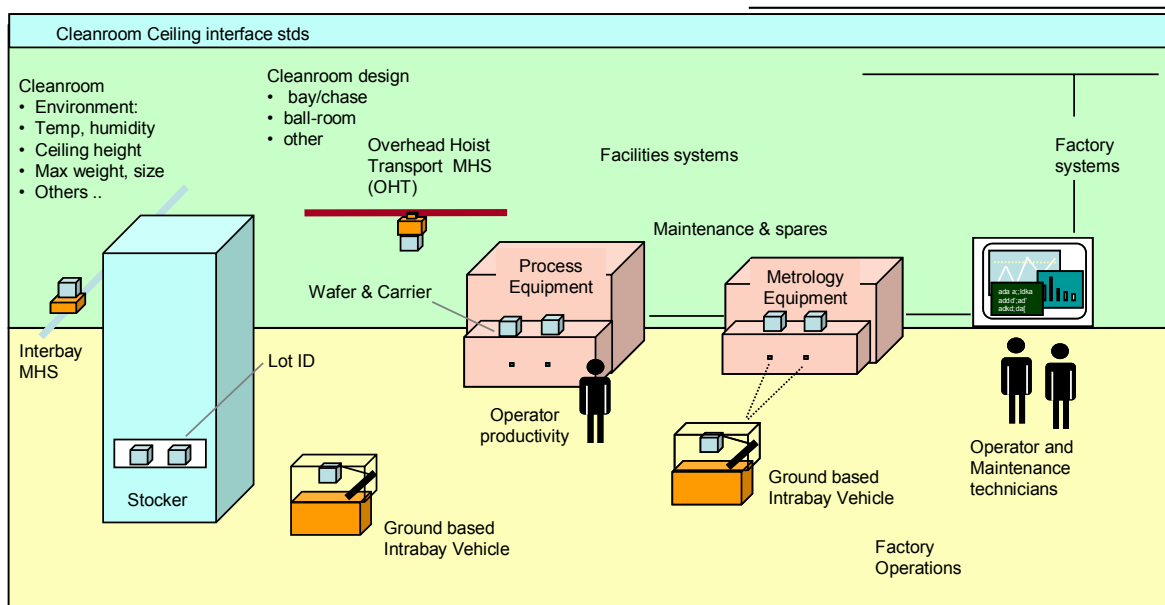
また測定においては小ロット化による、測定頻度の増加に対し、いかに設備投資を抑制しながら品質保障してゆくかの課題に取り組む必要がある。

ウェーハ流動を制御する搬送器とストックにおいて、キャリア内に装填されるウェーハ数量の低下による搬送頻度の増大に対し、搬送能力を確保する施策を検討すると共にウェーハ搬送における予測制御への取り組みも求められてきている。

SoC 生産における課題として装置の空き・オペレータ待ちの発生や、定義されたサイクルタイム通りの作業、ロット優先度の遵守、導線影響の軽減、流動調整などが挙げられ、不要な待ち時間の発生と指示通りに生産することの困難さが浮き彫りとなる。加えて、今後更に増加するものと予測されるロット優先度の変動、複雑さに対しても、十分に能力を発揮できるフレキシブルな生産方式による製造体制を構築することが求められる。

生産システムにおいては装置の詳細データを活用する事によるプロセス制御の効率化、段取り替えの短縮に取り組む、ウェーハの待ちを最小限にするためのスケジューリングを実現してゆくことが求められる。加えて装置の監視能力の向上によりプロセスマージンの拡大、エネルギー消費の削減のための制御技術を併設することが可能となる。

これら工場内の多義に渡る技術課題に対し、「工場運営」「製造装置」「ファシリティ」「搬送」「生産システム」のサブワークを構成し活動を行なっている。



工場運営(FO) 製造装置(PE) ファシリティ

搬送 生産システム

図表 10-2 FI 製造技術のスコープ

10-2 半導体製造の課題と製造技術のパラダイムシフト

日本の半導体メーカーの多くが進めている SoC 事業拡大にとって、設計から生産を如何に効率よく統合するかが主要課題になっている。その背景には、微細化・高集積化による LSI 開発負担の増大、マスクコストや製造コストの増大、信頼性・歩留保障の負荷増大といった技術的背景がある。さらに、顧客からマスクメーカー、装置メーカーなどを含めた業務分担の多様化が重要な要素になっている。

また、このような状況下で、問題点としては、微細化が進むにつれて、製品の立ち上げにおいて、性能(品質・歩留)がなかなかでない、品質確認によるロスが多い、稼動が安定しないなど時間がかかるようになってきていることが挙げられる。この品質管理の局面での設計/製造間の連携が重要になっている。また、微細化の進展により、バ

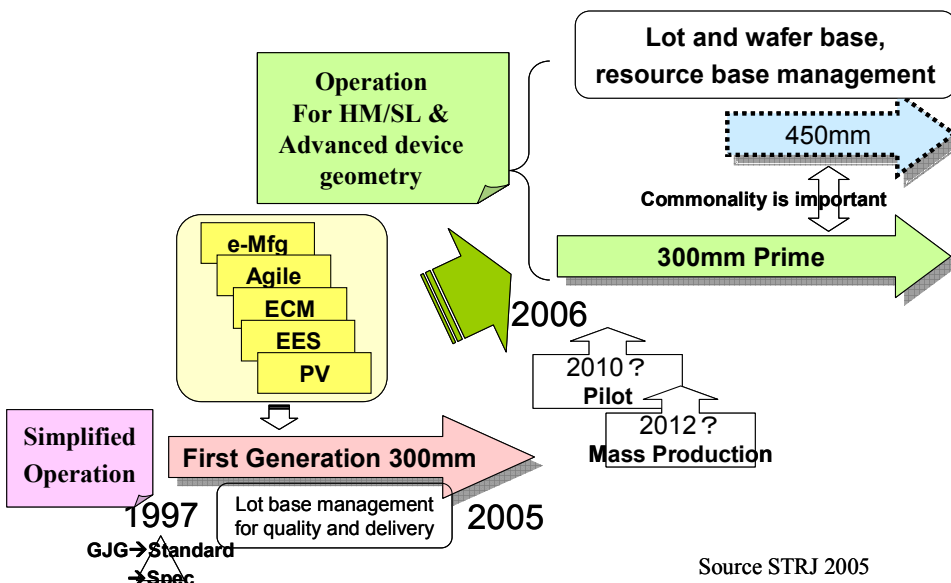
ラツキの低減が主要課題になってきている。そのためには、これまでのロット単位の品質管理からウェーハ単位での品質管理と制御が必要である。さらに、そのためには装置制御をより詳細なデータに基づいて行う必要があり、構造化された装置情報、装置モデルに基づいた装置管理が重要になる。

一方で、SoC 事業は、顧客の多様な要求に応じていかななければならない。それは、同時に、対応すべき品種が多彩となるが故に、一つの品種の絶対数量が限定的なものならざるをえないため、SoC 製品は多品種、小ロットサイズとなる。さらに、個々の半導体の製品寿命も短くなること、平均売価も低下していることにより、1 品種当たりの生涯売り上げが減少していることになることがある。このことは、SoC 製品として、製品の変化(プロセス・品種・量)への対応が必要であり、同時に、ラインの製造能力バランスへのインパクトが大きくなり、ラインの変更・維持工数の増大を、そして段取りロスの増大を招く要因ともなる。

生産ラインとしては、このような状況にあっても、生産コストを減少させ、販売・設計との連携を強化して、商売になる製品の量を増やさなければならない。それには、生産から設計の総合効率を向上させることが益々望まれている。以上をまとめると下記のようになる。

- 微細化によるプロセスマージンの縮小
 - 設計/製造間での品質管理の連携
 - ウェーハ単位での品質管理と制御
 - 構造化されたモデルによる装置管理
- 多品種化による生産効率の低下
 - 販売・設計と生産連携の強化
 - 高混流生産における生産制御
 - 製品ライフサイクル短縮

このような状況下で半導体製造技術に対するパラダイムシフトの動きが起きつつある。図表 10-3 には、STRJ から ITRS の場に過去に示した工場コンセプトとパラダイムシフトイメージが示してある。e-Mfg (e-Manufacturing)、Agile-Mfg (Agile-Manufacturing)、ECM (Engineering Chain Management)、EES (Equipment Engineering System)、PV (proactive visualization) などの多くの工場コンセプトを発表してきた。その集大成として次世代の工場に対する大きなパラダイムシフトを表す象徴として、300mm プライムが言われている。しかし、300mm プライムでは主に装置や搬送などの標準化を扱う象徴になっており、次世代の工場を貫く新しい概念が必要になっている。STRJ の内部では「こまめ生産」(小ロットを連続して生産する)という概念も生まれ、枚葉管理と制御、階層的品質管理概念などと連携して次世代のラインイメージがまとまりつつある。



図表 10-3 次世代工場へのパラダイムシフト

10-3 2006 年度から 2007 年度への主な取り組み

小ロット連続生産にともなう課題とバラツキの階層的な管理と制御を実現するために、工場運営の改革と装置自身の小ロット対応の検討が必要である。装置メーカーをはじめとする半導体業界に、上記問題を認識してもらい、対応をとってもらう活動を STRJ では行っている。その一貫として、2006 年度から 2007 年度にかけて下記項目を ITRS に反映させる活動を行っている。

1) 工場運営 (FO)

12 枚/ロットの ITRS への指標の立案と ITRS ロードマップへの盛り込み

2) 製造装置 (PE)

装置の信頼性および効率化向上に対応した詳細データの取得必要性の盛り込み

下記 ITRS の今年度の重要アイテムにも、下線部分に実施する重要項目として示してある。

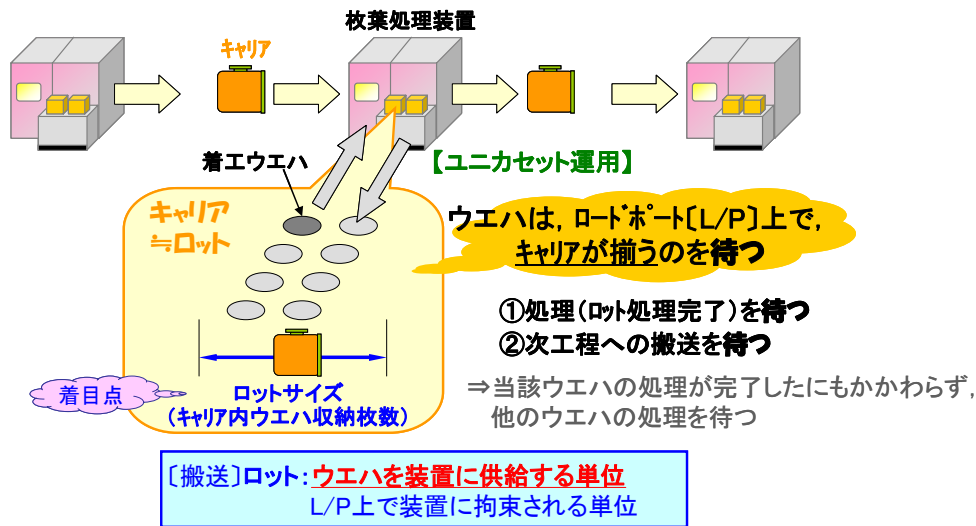
- ・ Business strategies, market demands, and process technology changes continue to make factories difficult to integrate
- ・ Minor updates made to technology requirements tables and focus areas
- ・ Review and update technology requirements/potential solutions tables
 - Operations, Equipment, AMHS, FICS and Facilities
- ・ Add small lot size metrics to the Factory Integration Technology Requirements table
 - Cycle time per mask layer in Factory Operations
- ・ Focus on converting energy conservation to requirements/metrics
 - Equipment sleep mode metrics for pumps, chillers, etc.
 - Evaluate Fab MES and facility systems integration
- ・ Work on the identified key focus areas and cross-cut issues
 - Need for 2nd data port for driving down equipment losses and better visibility
 - Technology requirement drivers for 300Prime/450mm
 - With FEP, Litho, Metrology, Yield Enhancement and ESH
 - EUVL, single wafer processing, IM, energy conservation, etc.
- ・ Address technology requirements as applicable to 300Prime/450mm
- ・ Work with other forums/WG to ensure synergy

10-4 サブチーム活動

10-4-1 工場運営(FO)

半導体デバイスを使った最終製品では、製品寿命が短く、売れ筋製品が頻繁に変わるような状況が益々強まっている。その中であって、半導体デバイスの顧客は、品質、コストの視点だけではなく、小オーダーサイズでかつ短いサイクルタイムで納品できるかの視点でも、デバイスメーカーやデバイスを選択しようとしている。

半導体製造ラインのウェーハキャリアは、25 枚のウェーハを収納できるものが標準的に使われており、ウェーハを 1 枚ずつ処理する枚葉装置で処理の様子をウェーハ視点で見ると、キャリア内の 1 枚目のウェーハは自身の処理が終わった後、同一キャリア内の残りのウェーハ処理が終わるまでロードポート[L/P]上で装置に拘束され待たされている。このようにキャリアに依存した現行の生産方式では、個々のウェーハが他のウェーハ処理を待つ時間の問題がある。時間を短縮するひとつの方法として、ウェーハキャリアに収納されるウェーハ枚数を減らす(小ロットサイズ化)事により、他のウェーハ処理を待つ時間の短縮が可能となる。



図表 10-4 ウェーハ供給における問題点

小ロットサイズ化により、半導体製造ライン内の製造サイクルタイム短縮とWIP(Work In Process)の削減が期待できるが、小ロットサイズ時に 25 枚ウェーハ時と同じスループットを維持するためには、工程間の搬送量が増える事や、処理装置の枚数に関係なく必要となるオーバーヘッド時間に起因するロスなどの問題を解決する必要がある。つまり、少ロットサイズ化はスループットとのトレードオフの関係にあり、単純には小ロットサイズ化する事は難しい。

顧客の多様な要求に応える為には、製造ロットサイズは今後も小さくなっていくトレンドにある。このような状況から、製造ロットサイズが小さくなることによる装置ロスの増大、搬送量の増加問題を解決するための技術開発が強く望まれている。

Objective Lot Size \ Nominal Lot Size	25	12	6	2
25	Current R/M (Non Hot Lot)		Current R/M (Super Hot Lot)	
12		Next R/M		
6			Next R/M	
2				Next R/M

	2005	2018
Cycle time per mask layer (days)	Short cycle time will be driven by smaller lot size and more single wafer processing	
Setup time reduction	Short cycle time will be driven by smaller lot size and more single wafer processing	

図表 10-5 製造ロットサイズ要求トレンド

これらの事を踏まえ、これまで ITRS ロードマップではロット当たり 25 枚ウェーハにて運用される事を前提に全ての指標を決めてきたが、今後求められるロット当たり 12 枚ウェーハでの運用に対応した各々の指標を追加し 25 枚ウェーハと 12 枚ウェーハの 2 種類の指標を掲載していく事で、小ロットサイズ化の問題解決を業界に促していく必要があると考える。また、このような 2 種類の指標を持つメトリクス候補は以下を想定している。

- ・サイクルタイム
- ・レチクル当りの処理枚数
- ・NPW(非生産ウェーハ)比率 他

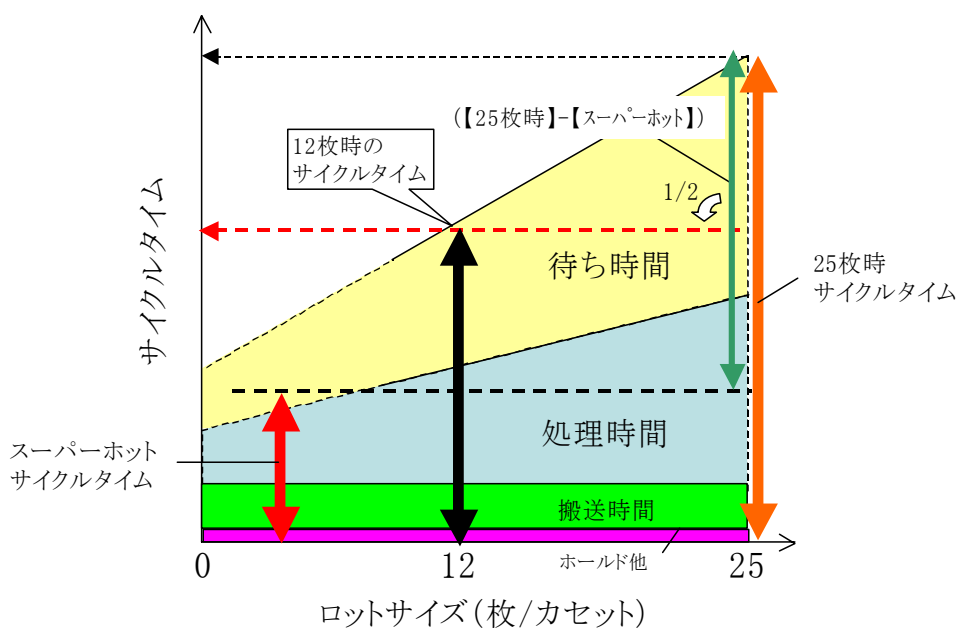
10-4-1-1 12 枚ウェーハ量産時におけるサイクルタイムの提案

ロットサイズとサイクルタイムの関係を、図表 10-6 に示す。サイクルタイムは生産装置の処理時間(1 キャリアの処理に要する時間)と、処理時間に対してある割合(待ち行列理論で説明される)で発生する処理待ち時間、キャリア搬送に要する時間などで構成されている。生産装置の処理時間はロットサイズが小さくなるに従って短くなるが、洗浄工程や熱処理工程で存在するバッチ処理装置の影響や、小ロットサイズで顕在化する段取り時間などに代表される B 値ロス、AMHS の供給速度の問題等により、ある一定の値(図表 10-6 の Y 切片の値)以上は短くならない事がわかっている。

12 枚ウェーハ量産時におけるサイクルタイムは、1 枚ウェーハでの運用時のサイクルタイム(サイクルタイムのミニマム値)と 25 枚ウェーハ量産時のサイクルタイムから概算する事ができる。また、サイクルタイムのミニマム値は、ほぼ「処理時間のミニマム値+待ち時間のミニマム値+搬送時間」となるが、これは ITRS でのスーパーホットロット(5 枚/キャリア、待ち時間≒ゼロ)のサイクルタイムとほぼ同等であると考える事によって、25 枚ウェーハ量産時のサイクルタイム(25 量産)とスーパーホットロットのサイクルタイム(SHot)から 12 枚ウェーハ量産時におけるサイクルタイム(12 量産)を概算する事ができる。具体的には以下の式により算出する。

$$\text{「12 量産」} = \text{「25 量産」} - (\text{「25 量産」} - \text{「SHot」}) \div 2$$

図表 10-7 にこの方法で算出した、12 枚/ロット量産時のマスクレイア当りのサイクルタイムの提案を示す。



図表 10-6 ロットサイズとサイクルタイムの関係のイメージ

		06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Technology Node		70	65	55	50	45		40	35		32	28	25			
Wafer Diameter		300	300	300	300	300		300	450		450	450	450	450	450	450
Proposal	12 Wafer Bulk -Cycle time per mask layer(days) -X-Factor	0.9	0.9	0.9	0.85	0.85		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.65	0.65	0.65
		STRJ提案														
'06	Non Hot -Cycle time per mask layer(days) -X-Factor	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4		1.2	1.2		1.13	1.13		1.05	1.05	1.05
		3.2	3.1	3.1	3.1	3.05		3.05	3.05		3.05	3.05		3.0	3.0	3.0
	Hot Lot -Cycle time per mask layer(days) -X-Factor	0.55	0.55	0.55	0.51	0.51		0.47	0.47		0.44	0.44		0.39	0.39	0.39
		1.4	1.3	1.3	1.3	1.3		1.2	1.2		1.2	1.2		1.1	1.1	1.1
	Super Hot Lot -Cycle time per mask layer(days)	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31		0.3	0.3		0.3	0.3		0.3	0.3	0.3

図表 10-7 12 枚/ロット量産時のマスクレイア当りのサイクルタイム

10-4-2 生産装置(PE)

生産資源としてもっと重要な装置の生産への関わり方を能動的可視化することは、従来からも極めて重要な、生産性向上の活動である。STRJ ファクトリ・インテグレーション WG では、今後より要求が強まる、多品種短寿命製品生産への対応として、サイクルタイム短縮と生産性両立の要求と、生産活動の省エネルギー化の必要性が高まり、生産資源有効利用の観点からの能動的な可視化に加えて、ウェーハ観点での生産活動の能動的な可視化が重要となりつつあることを認識し、本章を起こした。

また、サイクルタイム短縮への対応として製造設備が俊敏性を増すことも要求される。この観点から製造装置の多品種生産における俊敏性についての基本的要件と、加工対象であるウェーハ(あるいは同キャリア)の搬送装置の俊敏性についての基本的な要件についても本章にて記述をした。

10-4-2-1 生産装置に関する能動的可視化

10-4-2-1-1 ウェーハ視点での能動的可視化

2005 年の報告では、能動的可視化について、製品の情報、装置の情報、人の情報などを、階層化・構造化してモデル化することが重要となるとしたが、2006 年ではこの階層化・構造化をさらに深耕した。

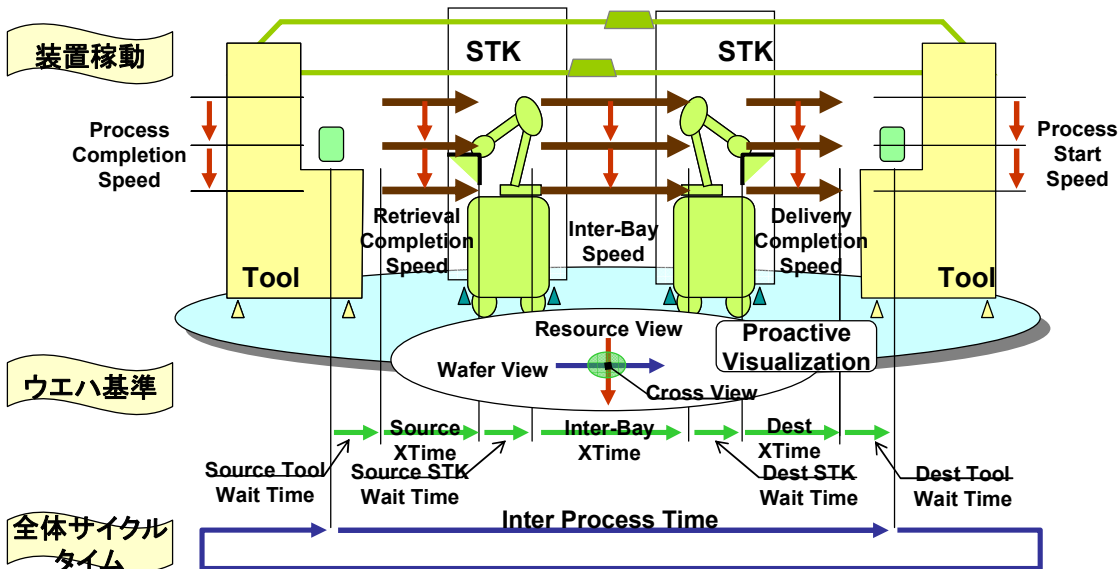
生産資源の利用観点からの、評価指標化は、現在でもその意味を失っていないが、従来とは異なる納期、多品種といった顧客要求への対応には十分に応じられないことが、近年顕在化してきた。

従来からは生産装置の生産性はマクロ的な評価指標であるスループット(例えば月毎の処理枚数)であるが、この指標を最大化するためには、装置の前で処理を待つウェーハを十分多数確保することで、装置に手空きが発生しないようにラインの操業を行うことが行われて来た。この観点の効率の最大化には、OEE(Overall Equipment Efficiency)の観点、すなわち装置にとってウェーハあるいはロットが仕掛かっているかどうか、空いているかどうかといった状態推移状態を表す装置データを用いて、稼働率の向上という観点、或いは生産資源の利用率の観点で議論することが通常だった。

装置のプロセスタイムの能動的可視化の例を以下に挙げる。実際に加工されるウェーハに視点を持ってくると、装置としては仕掛かっているのに、ウェーハから見ると何もされず待っている時間がある。図表 10-8 は、サイクルタイムを決定付ける評価指標の関係を図式したものであり、製造資源の利用観点、新たなウェーハ観点によるウェーハが経験するサイクルタイム、製品としての、あるいはオーダー観点でのサイクルタイム、つまりは納期を並行して示したものである。

ウェーハへ視点を変えて、工場の操業方法を見直すと、ウェーハは非常に長い時間、工程で処理を待ち、また次の工程への搬送を待つことが顕在化される。この待ち時間は、そのウェーハからするとサイクルタイムロスであり、ここの削減ができるということは、ライン全体の仕掛り(WIP)を低減する余地があるということになる。

ウェーハ観点の生産性評価指標は、現在十分に整備された状況ではない。これが整備されれば、ウェーハの観点からの待ち時間を長くしない工場操業方法が新たに開発される状況を生み出す筈である。STRJ ファクトリ・インテグレーションWGではこの点を鑑みて、早期にこの評価指標が発案され常識化し、日本のデバイスメーカーに利用されるべきであると考えている。



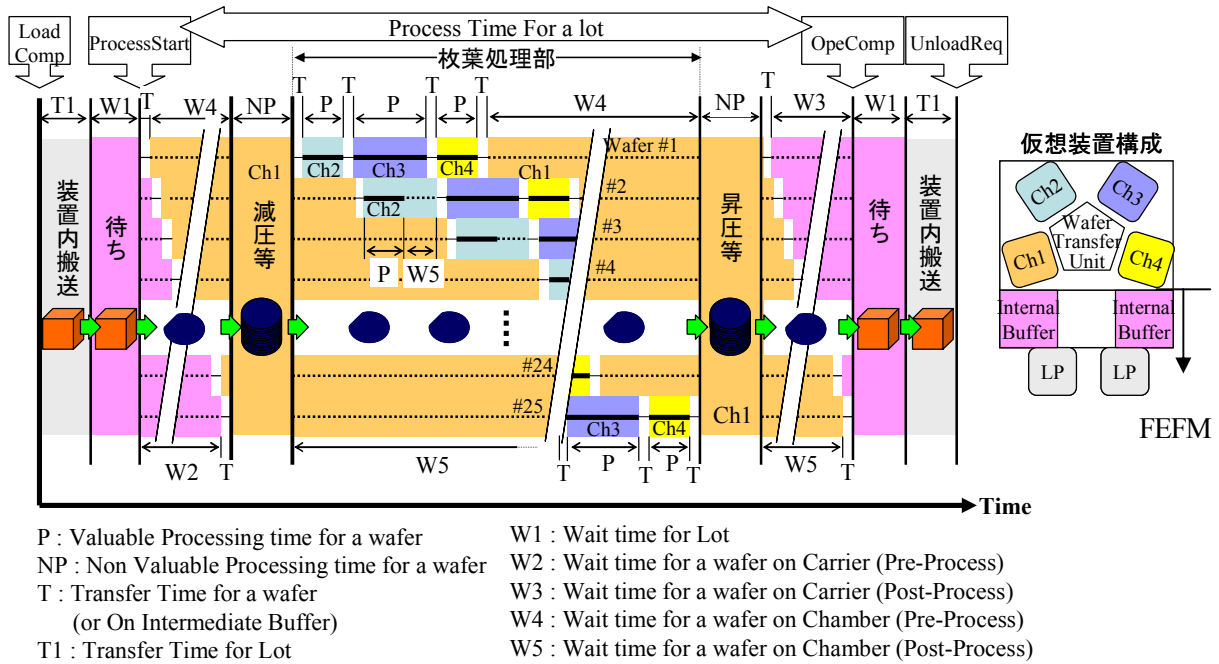
図表 10-8 ウェーハ観点によるサイクルタイム

10-4-2-1-2 プロセス装置でのウェーハサイクルタイムの監視

先に述べたウェーハ視点での能動的可視化は、生産装置にウェーハから見たイベント毎の時間情報を細かく報告させる機能が必要となる。これができるはじめて装置をウェーハが通過している間のサイクルタイムの分析が可能になる。これらの情報は、装置内のサイクル無駄時間の削減検討につながる他、ラインシミュレーションの基礎あるいは実績情報としても有用である。図表 10-9 は、4つのチャンバーをもつ仮想の枚葉処理装置でのウェーハサイクルタイムの例を示したものである。

動作概略:

- 1、LP→Internal Buffer 間搬送(T1)は、FOUP (Front Opening Unified Pod) カセットを LP から Internal Buffer に移動する動作
- 2、Internal Buffer→Ch1 (Load/UnLoad Lock 室)間は、大気搬送ロボットにより枚葉搬送動作
- 3、Ch1→Ch2→Ch3→Ch4→Ch1 (枚葉処理部)は、Wafer Transfer Unit 内真空搬送用のシングルピック式のロボットでウェーハを搬送する動作
- 4、Ch1 (Load/UnLoad lock 室)→Internal Buffer 間は、大気搬送ロボットにより枚葉搬送動作
- 5、Internal Buffer→LP 間搬送(T1)は、FOUP カセットを Internal Buffer から LP に移動する動作



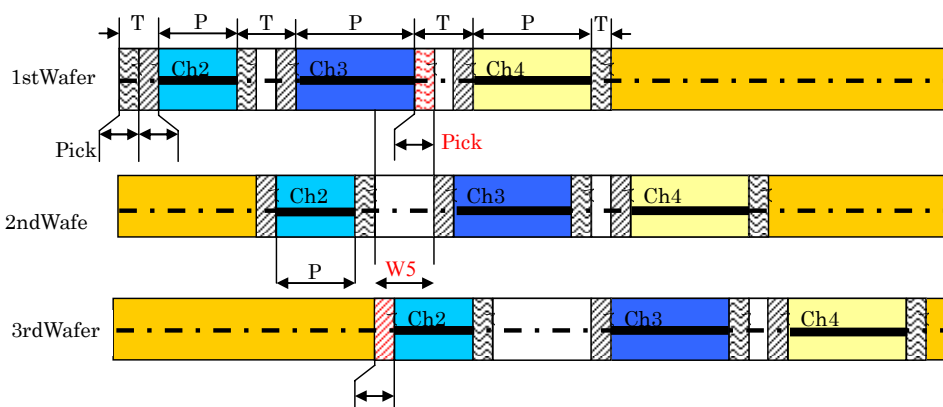
出展：SEMICON Japan 2006 Workshop
「ウエハから見た生産性」

図表 10-9 枚葉処理装置でのウェーハサイクルタイムの例

図表 10-10 に、ダブルピック(ウェーハ保持部を独立して 2 台持つロボットハンド部構造)の真空搬送ロボットの“枚葉搬送部”を記載した。

図表 10-9 と比較すると、ウェーハ視点での可視化により、ハードウェアの違いによる各待ち時間の解析が可能となる。例えば、図表中 W5 は、シングルピックの場合プロセスチャンバー内で、ダブルピックの場合ピック上で待つことになるが、図表 10-10 のとおりプロセス時間が $Ch2 < Ch3$ であることから、W5 が生じていることが図表上読み取れる。更に、W5 を最小限にするためには、Ch3 のプロセス時間を $W5 - (Pick + Place)$ の時間、短縮することで実現可能なことが視覚的にも明確にすることが出来る。

スループットの向上等、装置の基本性能に関わる性能設計とその検証、調整にはここに述べたような、詳細な装置内活動の可視化無くしては不可能である。またこの例でもロボット動きだけをフィーチャしたが、ウェーハを受け取るあるいは吐き出す側のプロセスチャンバー側の状態分析など 多岐に渡る分析を必要とする。設計知識と、観察に基づく知識の集積を可能にするためには、用途に対して設計されたデータとその使用方法の設計が為される必要がある。すなわち装置の能動的な可視化は、使い方を明確に設計したもので行う必要があることが、今までの装置データの利用とは際立った違いである。



図表 10-10 ダブルピックの真空搬送ロボットの“枚葉搬送部”

10-4-2-1-3 装置の基本機能性能の能動時可視化

従来から行われている装置活動の可視化には、プロセス装置がプロセス加工中になんらかの不具合を起こさないかという監視活動がある。装置が醸成するプロセス条件(多くは 熱力学的パラメータ)を、「いつもと何か異なることが発生していないか」という観点から監視することが行われてきている。この監視コンテンツはデバイスメーカーの重要な競争技術として扱われてきた経緯である。ほとんど装置不具合は、装置の基本的な機能、特にプロセス条件を醸成する機能の何らかの不具合に起因する。

これらの機能は、圧力を作る、反応にエネルギーを供給する、ウェーハの温度を制御する等の有名な機能である。これらの機能は正常時の挙動が良く理解されており、設計されて装置を構成しているにも拘わらず、それらの監視コンテンツが秘密とするべき情報であったのは、如何に十分でない情報と 装置機能に関する不足した知識の上で 如何に監視するかということのコンテンツであるが故であると考えられる。

プロセス装置が製品の製造業務内で果たすべき品質面での責任を、プロセス加工実施業務の品質責任であると考え、この品質をより良く管理制御するためには、装置メーカーの参画と分担が必須である。このような装置エンジニアリング情報の利用は、装置の高信頼化や、生産性の改善に必要な知識の集積に繋がる必要がある。この装置活動情報の利用が、装置メーカー側でも行われる、装置の設計に根拠を求めた装置機能の確認という観点を持つ可視化であると、装置不具合の同定と改善、そして装置設計を改善し信頼性の向上の活動に装置メーカーが直接的に参加することになる。

装置メーカーの意味のある参加を実現するために一番重要な条件は、装置メーカーが作りこむ装置機能の直接的な可視化ができる装置エンジニアリングデータが、装置から得られるかという点である。従来からの醸成されたプロセスパラメータの監視データでは、当然であるが装置メーカーの有意な参画は難しい。装置メーカーも装置データを使用して装置の調整・確認、信頼性データの収集等を行うことを前提とし、装置を製造する立場の観点を加えた装置データの内容定義をすることが求められる。

上記のためには、装置は単に多量にデータを装置外に発信するのではなく、装置の制御構造を意識した設計が行われる必要がある。装置の制御構造は、大まかに;

- 一番上 ホスト視点からの装置活動
- 二番目 装置内の制御活動
- 三番目 プロセスアクチュエータ等の活動

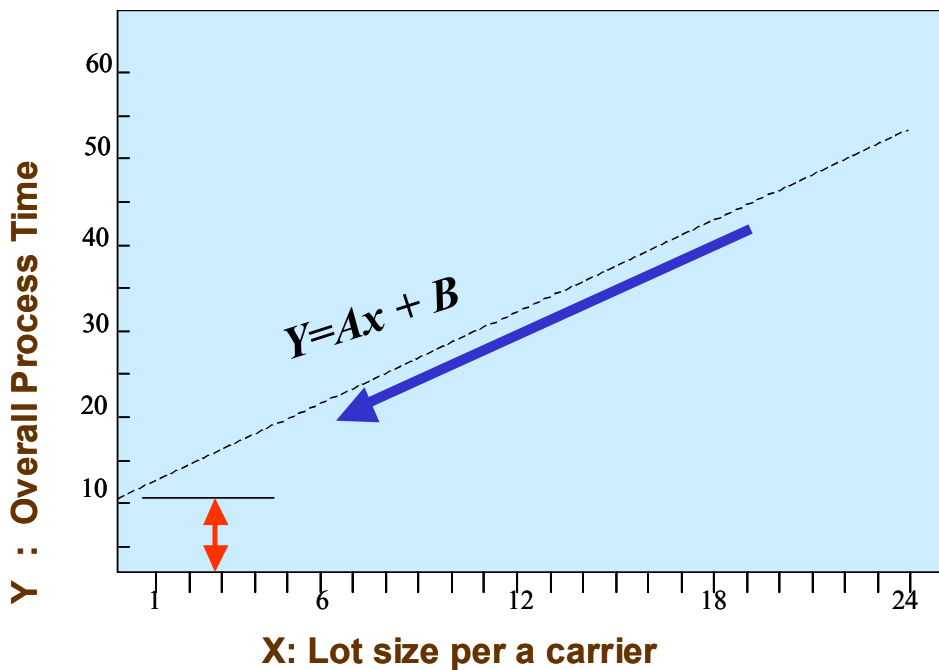
に分類できる。この 3 層での機能の性能保障が連鎖できるように、装置メーカーは品質の設計をし、また製造工程を設計し、必要な装置エンジニアリングデータも併せて設計定義することが必要である。

従来から装置データはデバイスメーカーのみが使用するという慣習があり、装置の信頼性改善に一番重要な装置メーカーの参画を阻害してきた。この反省に立ち、装置メーカーの装置引渡し時までの装置エンジニアリングデータを積極的に利用して、装置機能性能の確認作業を行う EEQA (Enhanced Equipment Quality Assurance: 装置機能の高度品質保証)という概念が Selete (半導体先端テクノロジーズ)により提案され、常識化してきている。これによって装置の機能を直接的に表現するための十分なデータ、装置機能観点のデータ、そしてこれらのデータ利用を行うための補助的なデータが得られる状況が出現し始めている。

10-4-2-2 生産装置での俊敏さの向上

10-4-2-2-1 プロセス装置の B 値特性、段取り作業

図表 10-11 は、装置に供給されるロット内にあるウェーハの枚数を横軸にとり、プロセスが開始してから終了するまでの時間を縦軸に示したものである。装置の種類は、枚葉処理装置の場合には、一般に、 $Y=Ax+B$ の直線状の特性を呈する。バッチ処理装置では、B 値が大きく、A 値はほぼゼロになる。



図表 10-11 キャリア内ロットサイズによるプロセス時間依存性

B 値は、狭義にはファーストウェーハディレイと呼ばれることがあるが、最初のウェーハが処理を受け初めてから、出てくるまで時間である。多品種の生産を行うと、製品毎にレシピの内容が異なることが多発する。レシピの内容が異なる場合には、通常ロット間をまたいで連続した処理を装置は行わず、前のロットのウェーハの処理が終了してから、次のロットのためのレシピ内容を装置内にて準備をすることになる。このために B 値と装置の新しいレシピに対応するための準備時間の分だけその装置の生産は中断されることになり、大きく生産性が低下することになる。同一品種を生産している場合には、レシピの切り替わりを意識する必要が無いため、多品種の生産の不利な点である。

現在 STRJ ファクトリ・インテグレーション WG では B 値の分析を進めている。また、レシピの切り替わりに伴う準備的な作業、あるいは、ロット処理終了時の付加的な作業、一般に段取り作業の存在が、多品種生産の大きな生産性ロスの原因であることを業界に知らしめ、且つ、その軽減あるいは撤廃努力を業界にメッセージとして発信する必要があると考えている。B 値 および段取りは奥が深く、関係機関、コンソーシアムと連携して取り組む所存である。

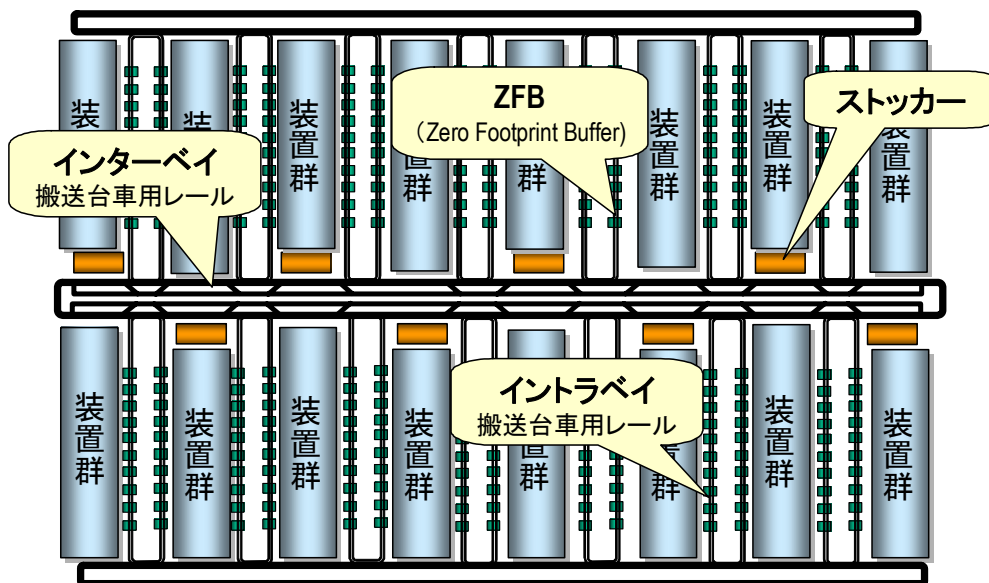
10-4-2-2-2 AMHS での俊敏性向上への課題

AMHS (Automated Material Handling System) はファクトリオートメーションの主要なシステム要素である。近年半導体製造のビジネスモデルが多様化していることに対応して、夫々のビジネスモデル、工場規模、工場操業特色に適合するシステムを提供することが要求されている。特に日本のデバイスメーカーの小ロットサイズに依拠した生産では、単純に言えば搬送能力を単位面積あたり現状の数倍に向上させること、不要な待ち時間を縮減する観点から、MPU あるいは DRAM の生産よりもより高い到着時刻精度が要求される等、大きなチャレンジとなることが予想される。

AMHS は分岐合流ができる OHT (Overhead Hoisting Transfer) 台車システムが導入されて以来、Fab 内 FOUP 搬送の中心は OHT システムになっている。一般に搬送システムは工場全体をカバーした能力を求められ、ITRS 2005 年版にあるように搬送システムは Fab 全体で 4,740 搬送/時以上は達成できないとなっている。しかし、この予見は従来型の搬送レイアウト、搬送機器(ストッカーをバッファーとして経由して搬送するシステム)を前提にしたも

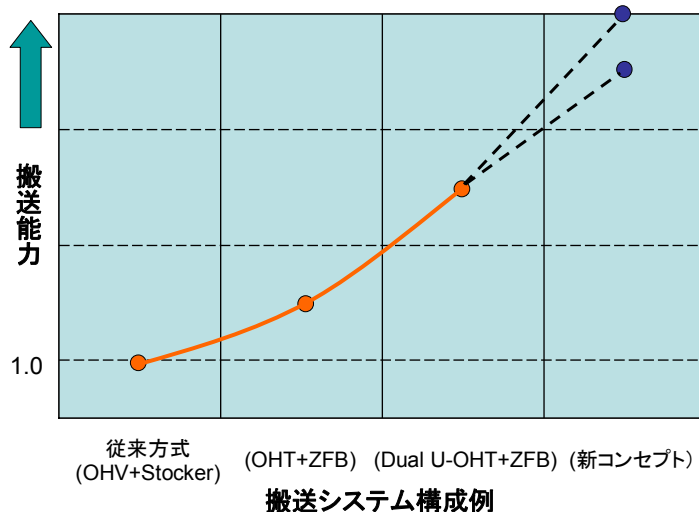
のである。図表 10-12 で示すシステムでは、ZFB (Zero Footprint Buffer) をバッファとして活用することで、従来型搬送システムより大きく搬送能力が向上し、その限界を凌駕することが可能である。

また複数の台車系搬送システムを組み合わせる方式が提案されている(図表 10-12)。この Dual Unified Track System を使うと従来の搬送システムの能力と比べて 2 倍以上になるとしている。



図表 10-12 最近の Fab 搬送レイアウト例

以上のように複数の搬送システムを効率的に組み合わせることにより搬送要求に対し、様々なビジネスモデルからの搬送要求に対して最適な搬送システムを供給することができるようになる。さらに新しい搬送システムの組み合わせで搬送能力を向上させることができるコンセプトの出現が期待される。この状況を視覚的に表すと図表 10-13 のようになる。



図表 10-13 AMHS システム構成と搬送能力傾向

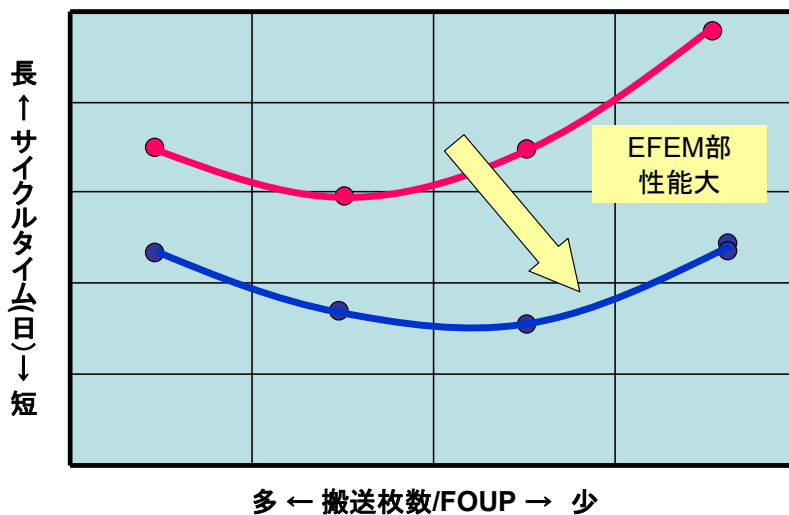
SoC 等を生産している Fab では顧客の要望に応えるため、短 TAT での生産が必須であるために、小枚数でのロット搬送を使った生産が行われている。第二世代 300mm Fab では小ロット生産に適した視野で搬送システムを見る必要があるが、上述したように、FOUP 搬送においては SoC 生産に必要な搬送能力を実現する解決策が見出されている。

従来の Fab では搬送関連の機器を含む全ての機器が 25 枚入り FOUP での生産を前提にしていて、少枚数搬送

システムがどのように影響するは検証されていない。第二世代の SoC を生産する Fab では少数枚搬送で生産されることになり、その影響を事前に検証することは有用である。

これまで搬送システム(AMHS) は Fab が要求する搬送量を規定時間内に FOUP を運ぶことが目標であり、指示を受けてロードポートから FOUP を運ぶことから仕事が始まり、装置前ロードポートに FOUP を置いた時点で仕事は完了していた。

一方第二世代 300mm Fab で必要なウェーハの観点からすると、ロードポートに FOUP が到着後、FOUP のドアが開きインデキシング、ID 読み取り等が行われてから、最初に処理されるウェーハが処理部に入る。処理部に入るまでの時間のサイクルタイムへの影響は、処理(搬送)単位が少数になるほど大きくなる。今後少数枚搬送で生産する Fab においては生産性を上げるために EFEM (Equipment Front End Module) の働きにも注目する必要がある。図表 10-14 に EFEM の性能をパラメータとした場合のサイクルタイムへの影響のイメージを示す。搬送枚数を削減するとある枚数まではサイクルタイムが減少するが、それ以上減少させると逆に WIP が増大し、サイクルタイムは逆に長くなる。また EFEM の能力が高くなると、サイクルタイムの短縮に貢献、より少数枚数までサイクルタイムの短縮につながる。サイクルタイムを縮減するためには、単に AMHS の俊敏性を高めることだけでなく、その制御ロジックの判断の俊敏さの向上、当たり前であるが判断の正しさ、制御の精緻さが、一層高いレベルで要求される。工場システム側との連携した開発コンセプトの立案が必須であり、上記したように搬送単位、搬送能力、EFEM 能力、装置の俊敏さとの適合性を含めてトータルに Fab の生産性を検証することが求められる。この点において STRJ・ファクトリ・インテグレーション WG より発信される工場制御技術の方向性は非常に重要である。



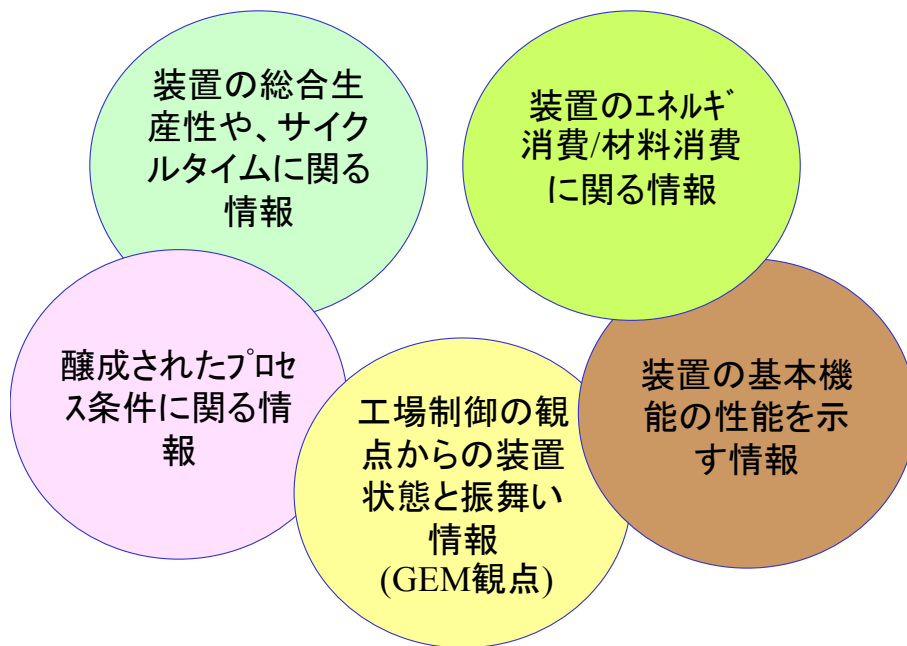
図表 10-14 EFEM の性能とサイクルタイム

10-4-2-3 装置エンジニアリングデータの用途

前述された、1)ウェーハ視点での装置の能動的可視化、2)装置機能観点からの装置機能と活動の能動的可視化は、共に新しい観点であり、重要である。その他には環境負荷の低減という社会的な要請にも工場は対応する必要がある。STRJ ファクトリ・インテグレーション WG の生産装置(PE)サブチームでは、今後の装置と装置をめぐる装置エンジニアリング業務のあるべき姿について議論を行い、以下の図表 10-15 の 5 つの装置からのデータを利用する領域について提案する。

- ①加工プロセスの進行に必要な、プロセス条件が醸成されていることを監視、管理、検定するための情報を得るためのデータ。しばしば FDC や APC 等の制御に用いることがある。
- ②装置の機能とその活動を表現し、監視、管理する情報を得るためのデータ
- ③装置のエネルギー消費、材料消費などに関する情報を得るためのデータ
- ④装置の生産性、あるいはサイクルタイム等に関する情報を得るためのデータ

⑤装置の工場側からの制御を行うための情報を得るためのデータに大別される。



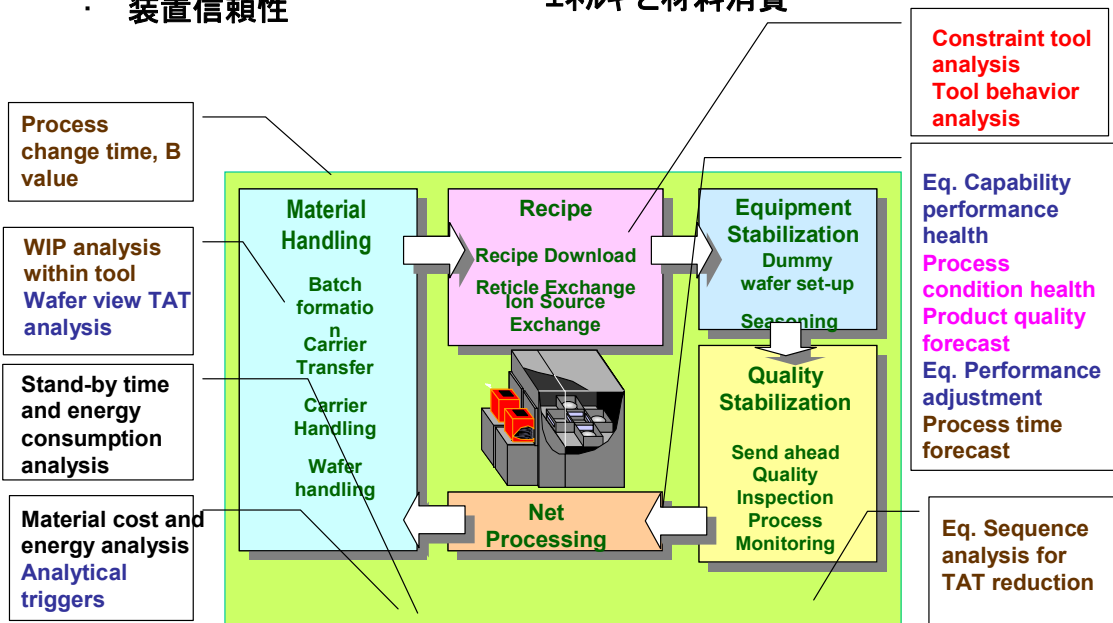
図表 10-15 5つの装置からのデータ

これらの装置エンジニアリング業務の資するデータを、体系化して、一元的に収集する事が重要である。収集したデータ、あるいは抽出した情報は、後に述べる業務の責任仕分けに従った用途に供されることが必要である。更に、責任分担の相互から、お互いに分担した業務内容が追跡できるものである。図表 10-16 は、①～④のデータ利用観点での装置振る舞いを図説したものである。

しかしながら、上記したデータについて十分に標準化されたデータが定義されておらず、且つまだ有効なデータが装置のデータとして十分に得られていないのが現状である。

2002 年から Selete で提唱を始めた生産技術のシステム化である EES の中間的な結実として、多くの装置に 2nd データ ポートが実装されるこの機会に、STRJ・ITRS で上述した利用目的に資するデータの要求を総合的に示すことが、業界にとって極めて有益であり、重要であると STRJ ファクトリ・インテグレーション WG では考えている。

- ・ ウェーハ視点による装置の振る舞い監視
- ・ OEE / Agility
- ・ 装置信頼性
- ・ プロセス状態
- ・ エネルギーと材料消費



図表10-16 ウェーハ利用観点での装置の振る舞い

10-4-2-4 装置の基本性能の高信頼性化(階層的品質管理)

一般EESの推進によって、装置より装置に内蔵されたそれぞれの機能の活動状況を直接的に表現することのできるデータが得られる状況が出現し始めている。プロセス装置が果たすべき加工品質面での責任を、プロセス加工実施が所定の通り行われることを確認することで証明すると定義する。装置から得られるデータが上記がしたように、装置に内蔵された機能の活動状況を直接的に表現することのできるものであると、逐次装置データを分析し、診断することで、加工点でのプロセス加工実施の品質確認を行うことができると考えられる。但し、装置データは単に装置から出てくるだけでなく、装置データがシステムで使用できるように構造的な名前を与えられていること、データの解釈に必要なコンテキスト情報が与えられていることが必要である。

装置機能のプロセス加工実施業務の品質責任範囲でない場合であっても加工品質の不具合は当然発生する。例えばウェーハの表面汚れ持ち込みによる、プロセス結果の不具合発生はしばしば起こることが知られている。このような不具合は、その不具合発生にメカニズムに従って、別途監視される必要がある点は、旧来との違いが無い。

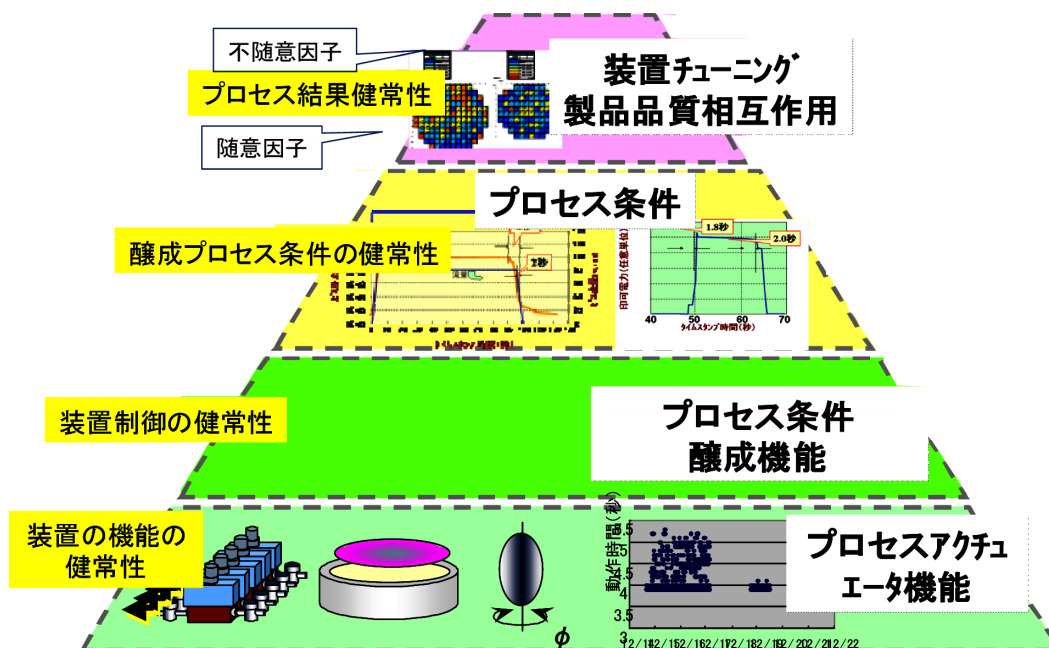
しかしながら装置の機能の直接的な監視が行えることで、装置の設計あるいは調整時の管理限界値による不具合判定モデル、あるいは装置不具合についての知識を元にした経験モデル等が、知識の集積として創造される点が、今までの装置不具合の監視方法と根本的に異なる点である。知識が集約されることで、プロセス加工実施業務の品質責任の追跡性が大きく向上すると考えられ、従来とは際立った違いである。

図表10-17は、プロセス加工実施業務の品質責任分担を階層的に図解したものである。最上層には、製品品質の装置起因の部分品質確認的にリンクされえることを示しているものである。装置データに直接的に製品品質が関連付けられる例では、露光機の転写作業の品質が代表的なものとして上げられる。

一方装置の機能に関わる不具合の監視コンテンツは、このように階層的な業務定義が為され、それを支持する装置エンジニアリングデータが供給されるようになることで、標準化が進み、「買うもの」に変化すると考えられる。旧来からの装置機能の科学モデルからはスタートしにくい、微妙な変化を感度高く評価する監視コンテンツは、より製品品質とリンクさせた監視コンテンツへと高度化すると考えられる。

このような品質追跡が可能な業務の分担の実現には、先述したEEQA(装置の高度化品質保証)がスタート点であ

り、極めて重要である。EEQAによって作られる装置エンジニアリングデータの基本手な活用手法を基点として、装置の品質の安定化と向上が為され、また、異常が発生した際の原因究明も迅速化し、恒久対策も科学的になる。この結果、生産資源として最も重要なプロセス装置の有意な可視化が進むことで、工場における装置に関わる品質保証業務も大いに効率の向上がなされ、業務分担の階層化、効率化、高品質化が始まることが期待される。



図表 10-17 階層的品質分担

10-4-2-5 半導体製造のエンジニアリングデータ体系化の必要性

半導体製造の効率、生産性を向上するためには、生産性の重要な資源要素(製造装置等)が如何に活用されているかを能動的に可視化することが重要である。製造のもっとも重要な資源である生産装置の能動的可視化には以下に示すように QCD+E の観点が含まれるべきである。

<Q: 品質の観点>

- ・製造装置を使って行う、プロセス加工実施業務の品質の可視化

<C, D: コストと納期>

- ・製造装置の製造資源としての健全な生産への寄与を維持するための、装置活動の生産性、やプロセス処理の俊敏さを定量的に見せる、可視化

<E: 環境負荷>

- ・工場が与える環境負荷についての可視化の中心的情報として、装置のエネルギーや材料消費の可化

上記の可視化が合理的な体系を以て為されることで、工場の生産性へ向かっての全体最適化が初めて可能となる。上記の可視化のためには以下の情報が必要である。

- (1)装置の生産活動を示す情報
- (2)装置の機能の活動を示す情報
- (3)装置にどのような生産指示を出したかの、生産コンテキスト
- (4)装置の管理情報、あるいは装置の管理活動のコンテキスト

上記の(1)と(2)の情報を得るには、主に装置から発せられるデータから、情報を抽出する術が必要であるが、そのためには、装置からのデータを読み解くための、データの読み方を示すデータが必要であり;

- (5)装置メタデータ

更に、メタデータを成立させるためには、

(6)データの名前、構造化されたデータ名前の命名規則、データの構造が定められている必要がある。

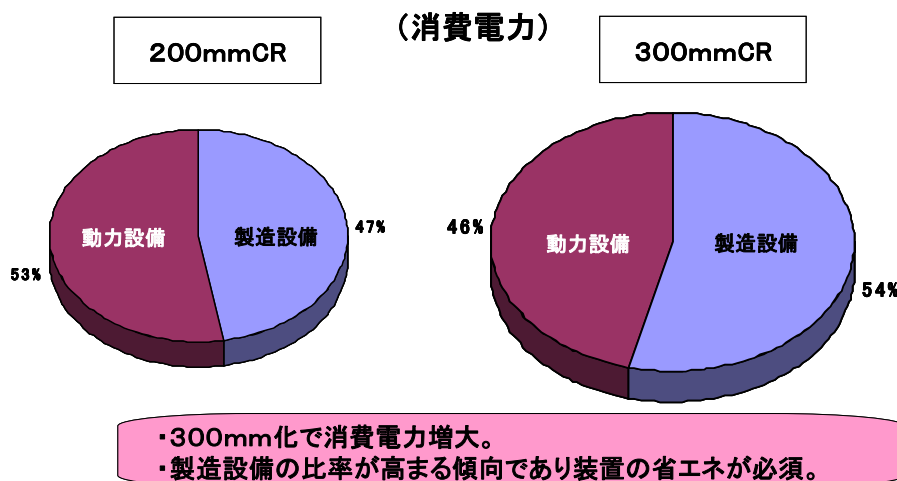
これらのデータ、メタデータ、装置エンジニアリングのデータ構造、データ命名法が揃う時に、工場の生産性を向上させる任の業務では、システム化された業務の定義が可能となり、抜けなどの無い業務分担、効率の高い業務分担を計画し、実施後にフォローすることが大いに容易になる。

上記に述べたように製造装置についての総合的で、能動的である可視化については十分体系的な議論が業界でされている経緯がない。唯一 Selete の 2002 年度から 2004 年度まで行われた装置エンジニアリングシステムのシステム概念構築がこれを業界で初めて体系的に整理した活動である。

STRJ ファクトリ・インテグレーション WG は今後も STRJ の場、ITRS の場を利用して、上記した能動的可視化技術とその基盤となるデータの体系構造化を、半導体製造、特に日本にとって重要な少量多品種の生産での生産技術の高度化に必須の要件として取り上げ、共通技術としてドライブすることを継続しておこなう考えである。

10-4-3 ファシリティ

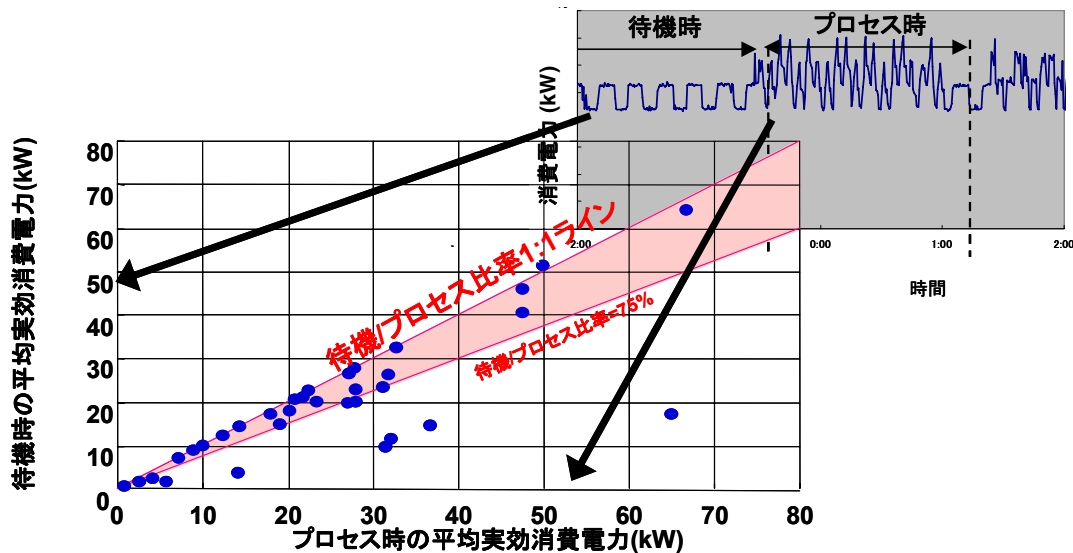
工場ファシリティにおける近年の課題は、地球温暖化対策が唱えられるに従い、省エネが重要な事項であり続けている。日本国内において、ファシリティはコジェネレーションや季節運転などの採用により、省エネ対策が既に進んでいる。工場の直接的な消費エネルギーは、直接大口径化が進むにつれて、装置における消費エネルギーが増大している(図表 10-18 STRJ 2004 報告より)。ファシリティは、工場の空調、排気や窒素、水などの装置へのユーティリティ供給に当たっている。よって、今後の省エネ策は、製造装置に大きく依存している。



図表 10-18 消費エネルギーにおける製造装置の重要性

10-4-3-1 待機におけるエネルギー消費

製造装置は、常時電源を入れる状態がほとんどであり、このときには、ウェーハを処理すなわち付加価値を生むプロセス時と処理するウェーハ待機している付加価値を生まない待機時間が生ずる。様々なタイプの装置のプロセス時及び待機時それぞれの消費電力平均実効値を図表 10-19 にプロットした。ここでは、各装置のプロセス時と待機時の消費エネルギー比率(待機時/プロセス時)が 100%~75%でほぼ変わらないことがわかった。この待機時エネルギーの削減施策が重要である。

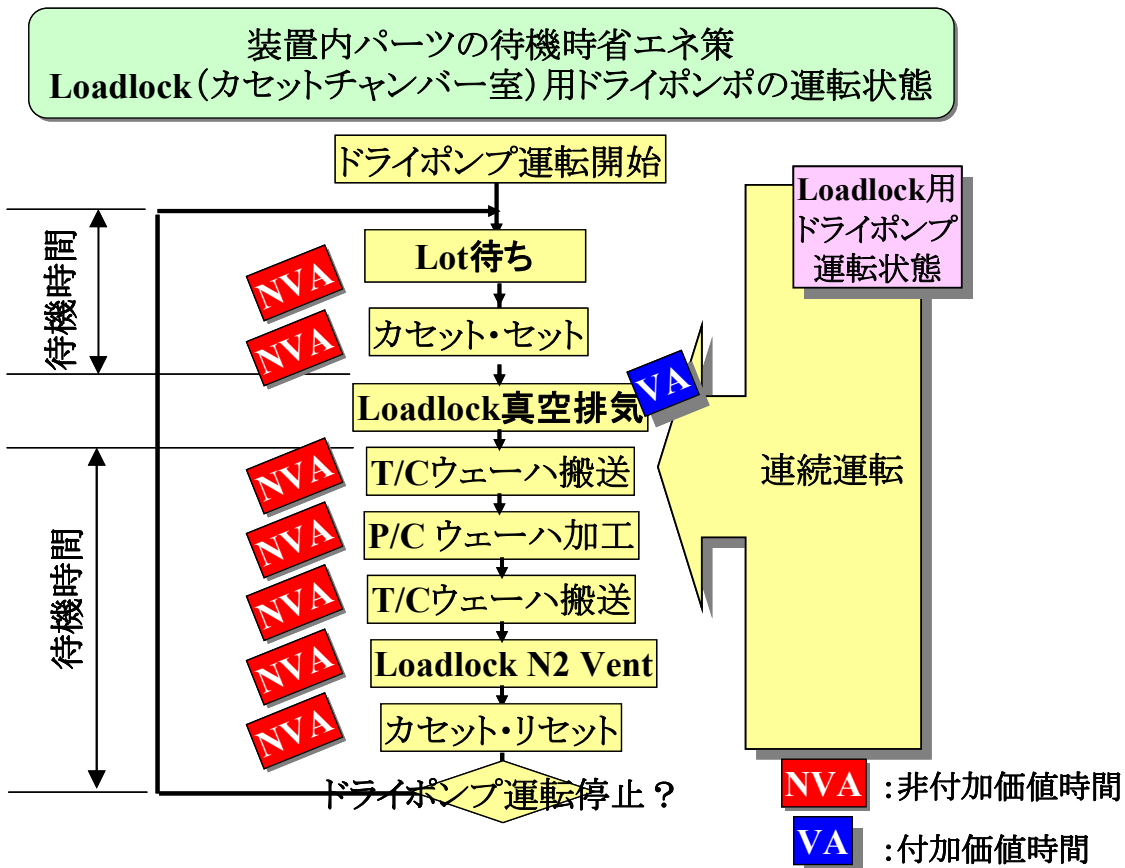


多種類の装置において、待機時の消費エネルギーは大きく、プロセス時と大きな差異は見られない(75%~100%)。この待機時の消費エネルギー低減が重要である。
 ⇒待機時の消費エネルギーに対する技術的指標の設定が重要である。

図表 10-19 プロセス時と待機時の装置消費エネルギー比較

10-4-3-2 ドライポンプの間欠運転

工場における装置内のエネルギー消費の 1、2 位を争うのが、ドライポンプである。一例として、クラスタ装置のカセット(もしくはウェーハ)が出入りする Loadlock 室(カセットチャンバー)のドライポンプは、図 10-20 に示す様に、現状では、Loadlock 室にカセット(もしくはウェーハ)があるなしに関わらず、連続運転されている。実際にドライポンプが付加価値を生むのは、Loadlock 室内にカセット(もしくはウェーハ)が入り、Loadlock 室が大気圧状態から真空なる様にポンプが運転される時のみである。待機時のポンプ停止を図表 10-20 にあるようなシーケンスで実施すると、実に、装置の Loadlock 室に休みなく連続的にカセット(25 枚ウェーハ)が投入される時においても、ポンプ運転に関する消費エネルギーは、1/25 に低減され、さらに間欠的にカセットが投入される場合は、ポンプ停止による省エネ効果も上がる。また、最近の 300mm 装置にあるような、枚葉の Loadlock においても連続装置運転時においてもポンプ消費電力は半減する。以上のように、装置内におけるエネルギー消費把握と詳細動作把握、すなわち、付加価値時間と非付加価値時間の判別し、非付加価値時間でのロス抑制の一つが消費エネルギー低減策である。また、非付加価値時間の短縮が、生産性改善への努力となる。



図表 10-20 Loadlock 室真空排気ドライポンプの運転シーケンス

10-5 まとめ

国内デバイスメーカーの SoC への製造シフトに伴い、新材料・新構造・新プロセスの導入による製造工程の複雑化や、プロセスマージンの減少によるばらつきといった問題を抱えるようになってきていることから、多品種化に対し制御性を向上しロット内、ウェーハ内、チップ内のばらつき低減に向けた検討が必要となってきている。

加えて SoC は、仕様が多様で、製品寿命が短く、仕様や需要が短期間で変動する事から、開発・試作品を含む多種の製品が少数枚ロットで流される高混流小ロット生産を余儀なくされている。

高混流小ロット生産に対応する上で、従来の少品種大量生産型の制御システムでは効率的な製造は望めない状況にあり、将来的にウェーハ単位での生産が必要となる可能性も視野に入れると、バラツキ問題の対策に有効なウェーハ単位の制御方式は、NPW (Non Productive Wafer) に依存しない柔軟なプロセス制御が必要となる。

以上の事から、顧客要求の多様化に対応した「フレキシブルな生産」に向け工場運営の改革と装置自身の小ロット対応の検討を進める上においても 12 枚/ロットの ITRS への指標の立案が求められており、この実現に向け生産の制御単位を替える事で生まれるフレキシブルな生産方式のメリットを業界全体で共有し、デバイスメーカー、装置サプライヤ、搬送メーカーの総力を上げた改革につなげる事で、小ロットに対する目標値をこれまでの ITRS ロードマップで利用されている 25 枚ウェーハを前提とした指標の定義と並列で ITRS に掲載すべく業界総意による合意形成してゆく。

加えて、高混流小ロット化が進むと、装置のわずかな停止が与えるサイクルタイム悪化の影響が大きくなり、装置自身が高い安定性を保つ事がより強く求められてくる。サイクルタイムの短縮や省エネの必要性が高まる中でウェーハ視点での装置の振る舞いを認識するといった体系化された装置の詳細データを活用する事が重要となる。

これらの実現により装置の生産性や俊敏さに連携する見える化、エネルギーや材料消費の見える化を行う上で、装置の 2nd ポートより体系立てられた装置の詳細データを取得できるプラットフォームを備える事の必要性について検討し定義を明らかにしてゆく。

以上