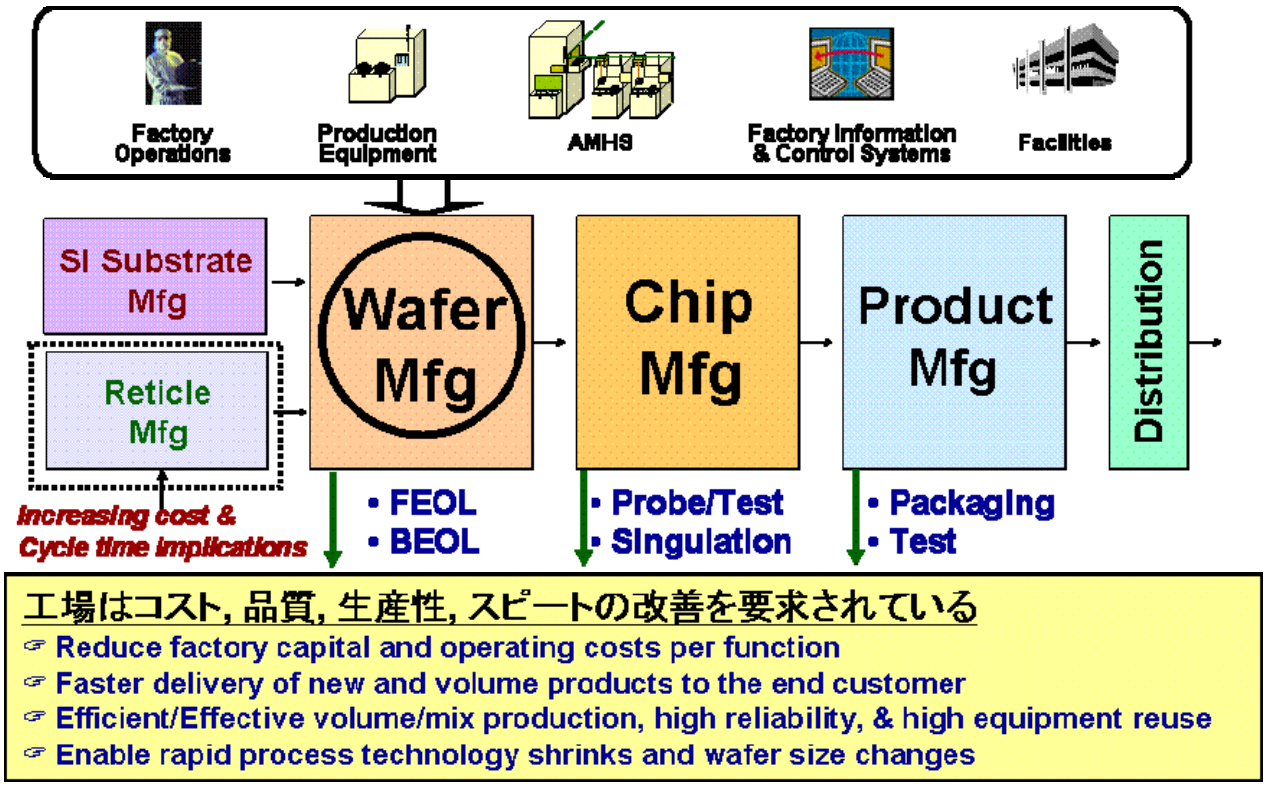
第 9 章 WG8 ファクトリ・インテグレーション

9-1 はじめに

9-1-1 活動範囲

映像や音声といった信号をデジタルな状態で処理するデジタル家電や携帯電話が台頭し、それらの信号処理を担う SoC(System on a Chip)が商品力を飛躍的に向上する存在となりつつある事から、いつしか最終製品が半導体市場を牽引する時代を迎えようとしている。

SoC はパソコンと異なり同じ様な製品を作る上においても多義にわたるアーキテクチャが使われ、しかも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招いている。これらの事から SoC に製品の主軸を移行してきた日本のデバイスメーカでは SoC 生産に適した仕組みの構築によるコスト、品質、生産性、スピードの改善が強く求められている。



図表 9-1 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 9-1 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」マニュ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(Front End Of the Line)、BEOL(Back End Of the Line)に代表される「Wafer」マニュ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。

9-1-2 ファクトリインテグレーションスコープ

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 9-2 に示す。SoC 生産においては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、製品寿命が短く、仕様や需要が短期間で変動するため、多種の製品を少数枚ロットで流す高混流小ロット生産となり、装置

の有効稼働率 OEE(Overall Equipment Effectiveness)の向上による生産性向上を初め、装置の基本性能の向上により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ヘッド時間が顕在化してくる中でのサイクルタイム悪化を防ぐ対策の検討を装置メーカの協力のもと取り組んでゆく必要がある。

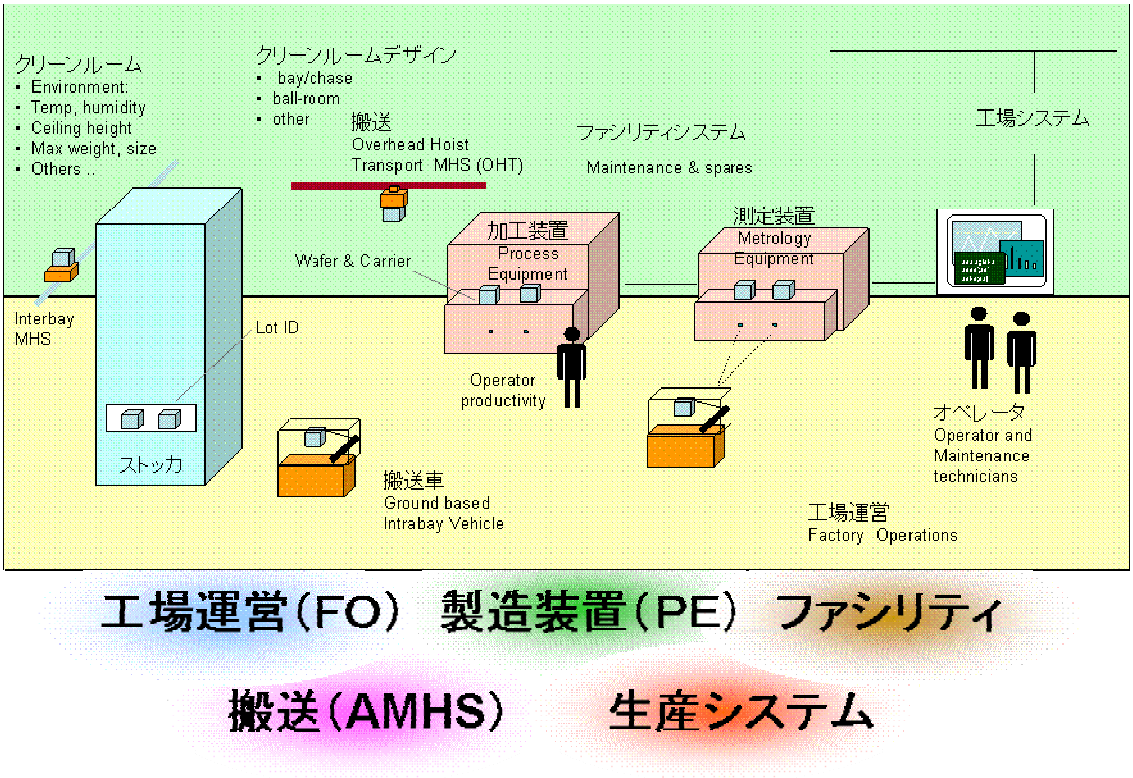
また測定においては小ロット化による測定頻度の増加に対し、いかに設備投資を抑制しながら品質保障してゆくかの課題に取り組む必要がある。

ウェーハ流動を制御する搬送器とストッカにおいては、キャリア内に装填されるウェーハ数量の減少低下に伴う搬送頻度増大に対し、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が求められる。

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み、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 FO: Factory Operation」「製造装置 PE: Production Equipment」「ファシリティ」「搬送 AMHS: Automated Material Handling System」「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。



図表 9-2 ファクトリインテグレーション製造技術のスコープ

9-2 ファクトリインテグレーション WG スキーム

9-2-1 工場デザインへのインパクト

今後のキーテクノロジーとして EUVL(EUV Litho)や 450mm ウェーハ、新しいデバイス構造などが図表 9-3 に載せられている。しかし、それらの工場へのインパクトは限定的なものになると考えている。たとえば、450mm のパイロットラインは現在2012年と考えられている。この影響も限定的で、当面は微細化とビジネスの多様性がもたらす工場の生産形態の多様化の工場デザインへのインパクトが大きいと考えられる。微細化や多品種化は、工場運営の工数、特にエンジニリング工数の増大を招いている。如何にエンジニリング効率を改善し、品質・コスト・納期の改善スピードを革新することがファクトリインテグレーションの主課題である。また、品質・コスト・納期の改善が工場デザインを考える上で重要因子となる。

	Near Term Years			
Year	2007	2008	2009	2010
Technology trend (nm)	65	55	50	45
Wafer Size (mm)	300	300	300	300

Planning for 300Prime/450mm

	Long Term Years									
Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Technology trend (nm)	40	35	32	28	25	22	20	18	16	14
Wafer Size (mm)	300	450	450	450	450	450	450	450	450	450

New Device Structures?

EUVL in Production?

450mm in Production?

図表 9-3 キーテクノロジーと工場デザインへのインパクト

9-2-2 製造技術のパラダイムシフト

日本の半導体メーカ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、装置メーカ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の問題点としては以下のようなものが上げられる。1)微細化が進む中での製品の立ち上げにおいて所望の性能(品質・歩留)を短期間で達成できない、2)品質確認によるロスが多い、3)稼動が安定しないなどエンジニアリング工数が掛かる問題が多くなっている。ますます、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。その上で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。これらのエンジニアリング課題を統合し、業界を挙げて解決していくことが求められている。

一方で、SoC 事業は、顧客の多様な要求に応えていかなければならない。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にならざるをえない。このため、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が短くなり、平均売価も低下してくることから、1 品種当たりの生涯売り上げは減少することとなる。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・維持工数の増加と段取りロス

の増大を招く要因ともなる。

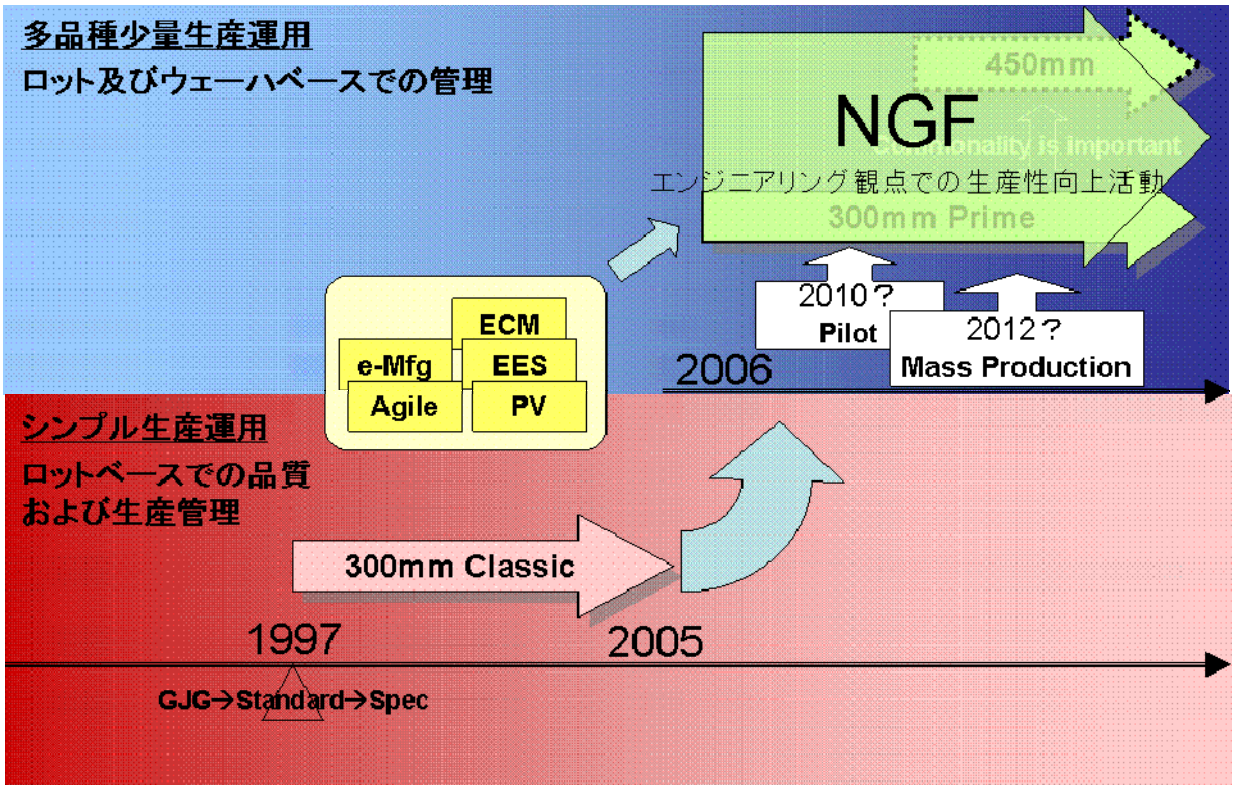
生産ラインとしては、このような状況にあっても、生産コストを減少させ、販売・設計との連携を強化して、商売になる製品の量を増やさなければならない。それには、生産から設計の総合効率を向上させることが益々望まれている。以上をまとめると下記のようになる。

- 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
  - 変動対応力の強化

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 9-4 には、STRJ から ITRS の場に過去に示した工場のコンセプトとパラダイムシフトイメージを示している。

これまで 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が、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、NGF(Next Generation Factory)を考えている。この NGF においては次世代の工場を貫く新しい概念として、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共に次世代のラインイメージがまとまりつつある。

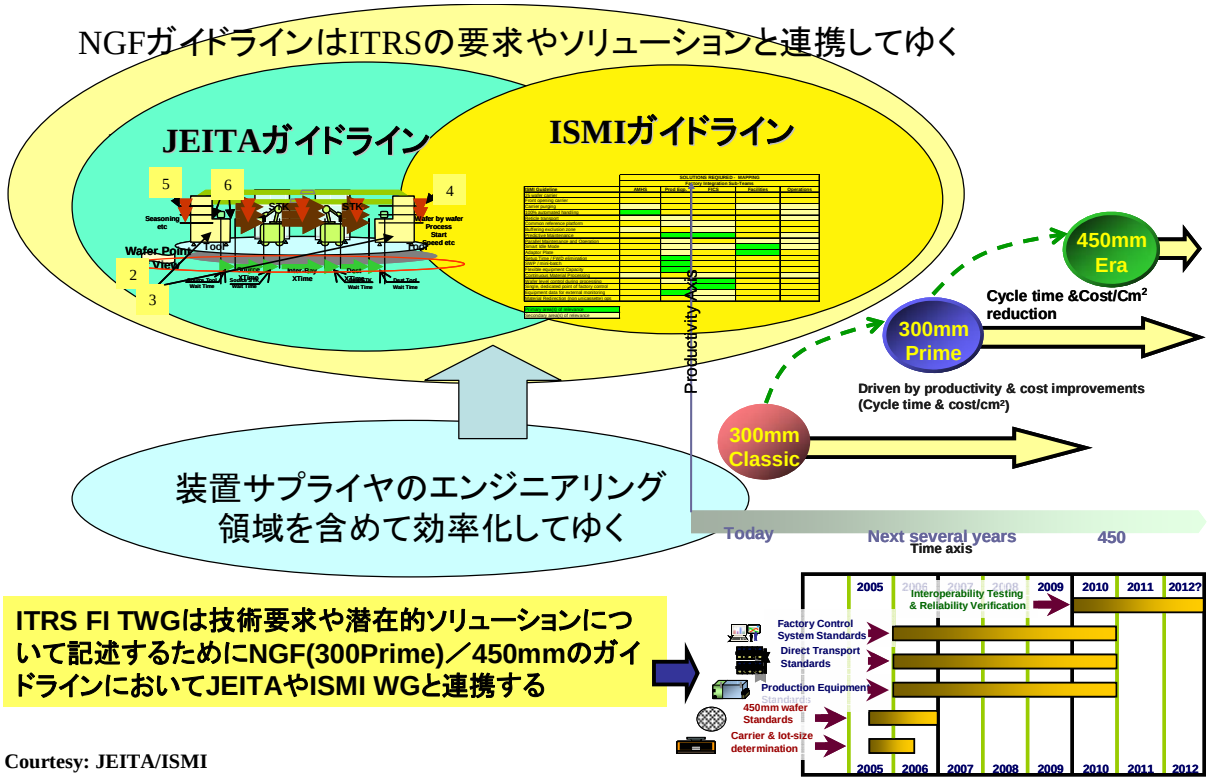
NGF 活動は、「エンジニアリング業務において IT 技術を駆使し、システム化・自動化によって生産性向上活動を革新する」ことを目的としている。



図表 9-4 次世代工場へのパラダイムシフト

9-2-3　NGF　ガイドライン

NGF を進める上で、装置機能の向上は重要であり、そのため JEITA 技術委員会下に 300mm プライムタスクフォース(2008 年度からは、JNGF に名称を変更予定)が結成され、ガイドラインを作成している。一方、米国の製造関係のコンソーシアムである ISMI(International Semiconductor Manufacturing Initiative)もガイドラインを出している。これら 2 つのガイドラインには、共通する内容や関連する内容も多い。図表 9-5 には、今後の NGF ガイドラインの業界での検討の方向性を示している。

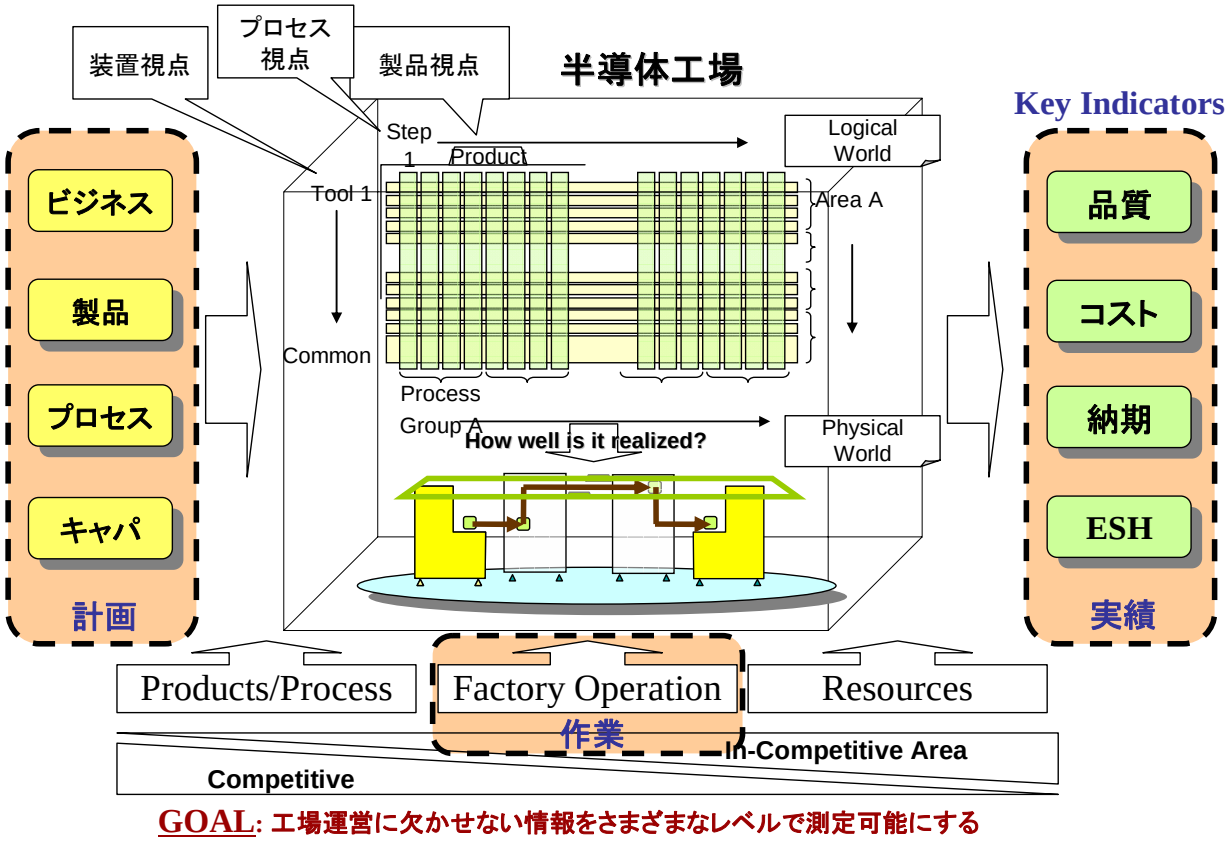


図表 9-5　NGF ガイドラインの方向性

JEITA と ISMI のガイドラインを ITRS の場で再度分析し、技術要求や対応策を抽出し、重要なものについてはロードマップ作成の検討を2008 年度に進めることとし、そのためにはデバイスメーカだけでなく、装置メーカのインプットも受ける。また、ガイドラインの研究においてはムダの低減という観点が重要になるという認識で、コンセンサスがとれている。

9-2-4　工場のムダの評価

ムダの低減のためには、ムダの分類定義が必要になる。ムダは、大きく見ると品質・コスト・納期と環境それぞれに分類される。工場のムダの評価を行うにあたっては、図表 9-6 に示すようにリソース(装置、材料、人、ファシリティ)や作業(製品作業、メンテナンス作業、品質確認作業など)、製品／プロセスなどのいろいろな観点からムダを評価することが重要であり、ビジネスからくる要求も含めて種々の評価する必要がある。この中で、2008 年度のSTRJ活動ではプロセス処理(装置まわり活動)に伴うムダの評価を研究した。



図表 9-6 工場ムダの評価のイメージ

9-3 各技術分野(thrust)の課題検討

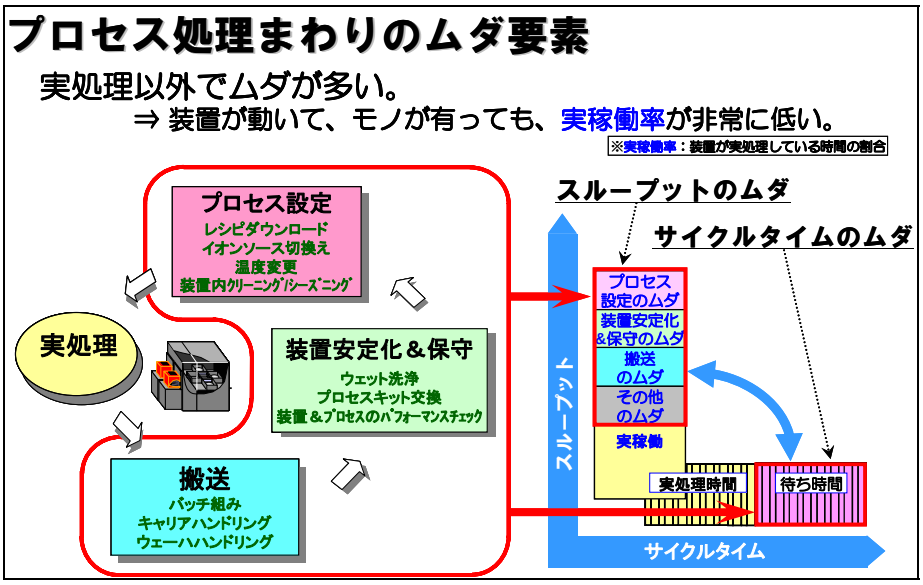
9-3-1 工場運営(FO)

9-3-1-1 SoCにおける課題

前述の通り SoC 事業では顧客の多様な要求に応える為、品種が多彩、かつ製品寿命が短いため『多品種、小ロットサイズ』が求められている。また、顧客の要求である『短いサイクルタイム』実現の1つの手段としても、『小ロットサイズ』化が求められている。一方、小ロットサイズ化に伴うロット切り替えや品種切り替えによる装置の処理時間ロスも大きな課題になっている。サイクルタイムを削減しながら、装置生産性を落とさない生産方式の確立が SoC 生産における課題となっている。また、微細化や多品種化により、改善の主体であるエンジニアの工数が不足してきている。これを改善するためには、まずプロセス処理に伴うムダの可視化を実現し、かつ、その情報を自動的に処理あるいは人が処理するのを支援する仕組みを半導体業界あげて作り上げる必要がある。これによりエンジニアリング工数をムダ削減に効率よく使い、SoC 生産ラインのサイクルタイム短縮と装置生産性向上の課題を解決することが NGF(次世代の工場)の目的にもなっている。これは、SoC だけに特化した目的ではなく、半導体製造ライン全般に関した目的になっている。

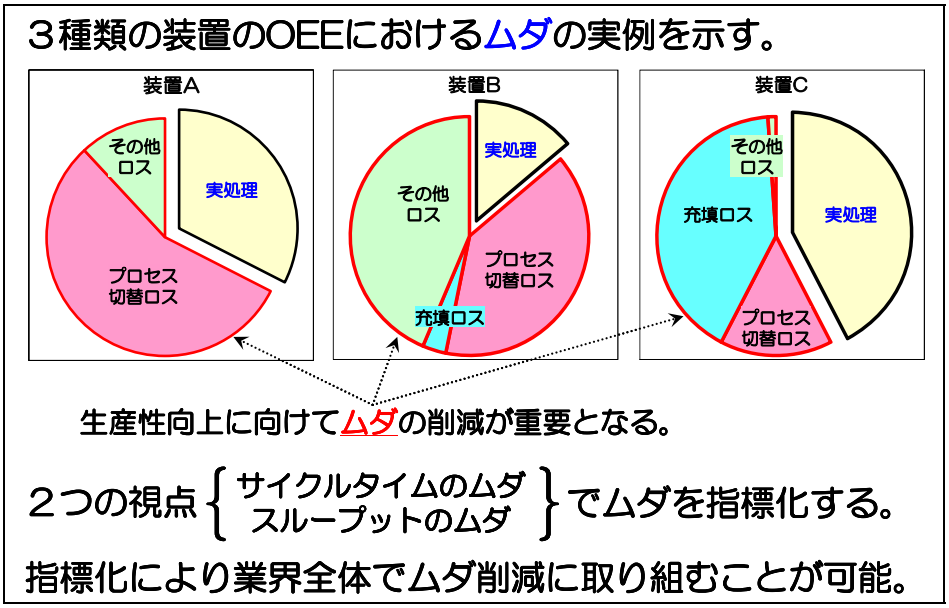
この目的のために、STRJ では業界をあげて取り組みを促すムダ削減の全体的な効果を計れる指標を定義した。また、このムダ削減指標をロードマップ化することにより、業界の改善活動のベクトルを揃えることを目指している。

9-3-1-2 ムダの指標化



図表9-7 プロセス処理に伴う作業とムダの分析

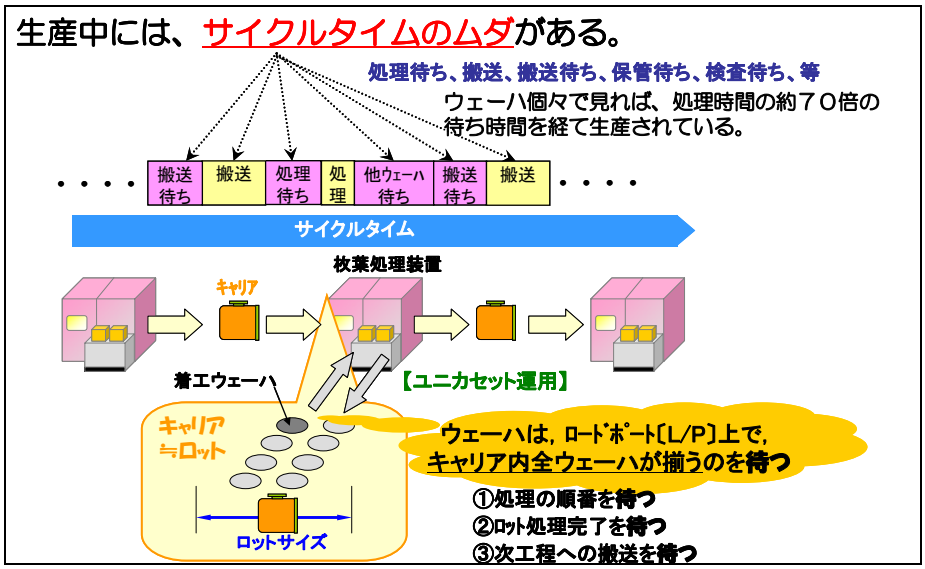
前工程の製造は、製造装置での「プロセス処理」を中心に考える必要がある。図表9-7に「プロセス処理に伴う作業とムダの分析」を示す。この「プロセス処理」は欠かすことのできない活動という意味で「実処理」と表現している。この「実処理」以外にも重要な作業がある。「プロセス設定」は、「実処理」のレシピを切り替えるために必要な作業、イオンソース切り替え、チャンバ内クリーニングやシーズニングなどがある。「装置安定化&保守」は、装置の品質を維持するために「実処理」を止めて行う作業である。 ウェット洗浄、プロセスキット交換などがある。「搬送」は、異なる装置での「実処理」をつなぐための作業で、 ロット(キャリア)の搬送だけでなく、キャリアの移し替え、ウェーハの移載を含む。「実処理」以外の活動に、無駄が潜んでいるという考えのもとに検討を進めた。 ムダ削減の視点として、スループットとサイクルタイムを軸で分析した。これらそれぞれのムダを、「スループットのムダ」および「サイクルタイムのムダ」と表現することにした。



図表9-8 各種プロセス装置でのムダの事例

実際のプロセス処理にどのくらいのムダが潜んでいるのか、3種類の装置で実例を図表9-8に示す。 装置Aは、ロットやレシピ切り替えの多い装置(リソ装置)である。 装置Bは、装置確認作業の多い立ち上げ時期の装置、 装置Cは、マルチチャンバ装置のレシピ制限などによりチャンバ利用率が低い装置である。 このように、装置における実処理の割合は非常に低いことがわかる。 実処理以外をムダと定義すれば、非常にムダが多いことになる。 しかし、実処理以外の作業にも、ある目的のためには必要な作業もある。 STRJでは、これらのムダを分類し、その中で削減できるものはなにか、その対策の方向性はどうかも検討した。 その中で2007年度以降のいろいろな検討結果を踏まえ、「ムーアの法則に追従するためには、装置メーカ、搬送メーカ、デバイスメーカが協同でムダ削減に取り組む必要がある」という結論を確認した。 そのためには、業界内で統一のとれた新たな「ムダ削減コンセプト」の導入が必要であり、 今年度は、サイクルタイムおよびスループットという2つの視点でムダの定義と指標化を行った。

9-3-1-3 サイクルタイムのムダ



図表9-9 サイクルタイムのムダ

まず、サイクルタイムのムダの検討について述べる。 図表9-9は、ロットが製造装置を渡り歩いて処理されていくイメージを示している。 横軸が時間軸である。 個々のウェーハにとっては、製造装置で処理している時間が最低限必要な時間であるが、 実際は、ロードポートで処理の順番を待ち、 処理完了後まち、同一ロットの他のウェーハの処理完了を待ち、 次工程への搬送を待ちなどそれぞれの作業に伴う待ちが種々ある。 通常、処理時間の約70倍の時間が待ちとして費やされている。 この中に、「サイクルタイムのムダ」が潜んでいる。 この「サイクルタイムのムダ」を表す指標について検討した。

サイクルタイムのムダの指標化（WTW）

WTW：Wait Time Waste

従来から、マスクレイヤ当たりのサイクルタイム指標がある。
DPML：Day per Mask-layer
DPML$_{SHL}$：スーパーホットロット（SHL）のDPML ※SHL:装置を空けて待つ特急ロット
DPML$_{25W}$：製品ロット（1キャリア25枚）のDPML
DPML$_{12W}$：製品ロット（1キャリア12枚）のDPML
サイクルタイムのムダをスーパーホットロットを基準として指標化した。

$WTW = CT - CT_{SHL}$

CT ：製品ロットのサイクルタイム
CT_{SHL} ：スーパーホットロットのサイクルタイム

FOのTR表に「WTW_{25W}」と「WTW_{12W}」を追加予定。

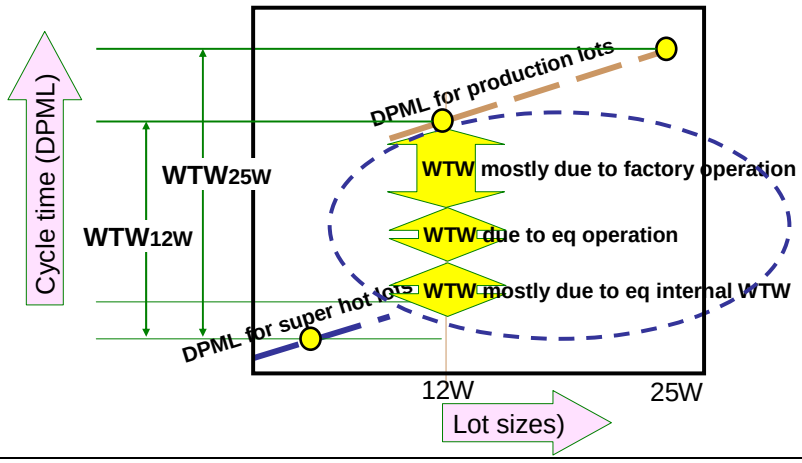
Year			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Technology Node			57	50	45	40	35	32	28	25
Wafer Diameter			300	300	300	300	300	450	450	450
$DPML_{SHL}$	Super Hot-Lot		0.32	0.31	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$DPML_{25W}$	Normal production	25W	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.13	1.13
$DPML_{12W}$		12W	1.0	0.84	0.84	0.72	0.72	0.72	0.68	0.68
WTW_{25W}	25W Normal WTW		1.18	1.09	1.1	0.9	0.9	0.9	0.83	0.83
WTW_{12W}	12W Normal WTW		0.68	0.53	0.54	0.42	0.42	0.42	0.38	0.38

図表9-10　サイクルタイムのムダの指標化

サイクルタイムのムダを表す指標をWTW(Wait Time Waste)と呼ぶことにした。 サイクルタイムのムダを通常製品ロットのサイクルタイムとスーパーホットロットのサイクルタイムの差で指標化することにした。 つまり、WTWは、通常製品のサイクルタイムCTからスーパーホットロットのサイクルタイムCT_{SHL}を引いたものと定義する。 この目標値は、1ロット25枚の場合のWTWと1ロット12枚の場合のWTWをFOのTR表に追加する予定である(図表9-10参照)。CTおよびCT_{SHL}は、すでに2007年度のロードマップのTR表に導入されているため、WTWの要求値は、この表に追加することになる。

ロットサイズ依存の考慮について

・ ロットサイズの影響を見ながらWTWを考える必要がある
⇒ 25枚と12枚の指標化が必要。



図表9-11　サイクルタイムのロットサイズ依存

実際のサイクルタイムは、ロットサイズの影響を受ける。従って、WTW削減に向けた解析もロットサイズの影響を見ながら行う必要がある。 そういう意味で、指標すなわち要求値は、12枚と25枚の2点を押さえることにした。図表

9-11はサイクルタイムのロットサイズ依存のイメージである。

ＷＴＷ削減に向けて

WTWの削減を進めるために、装置の段取作業を階層的に分類した。さらに掘り下げる必要がある。

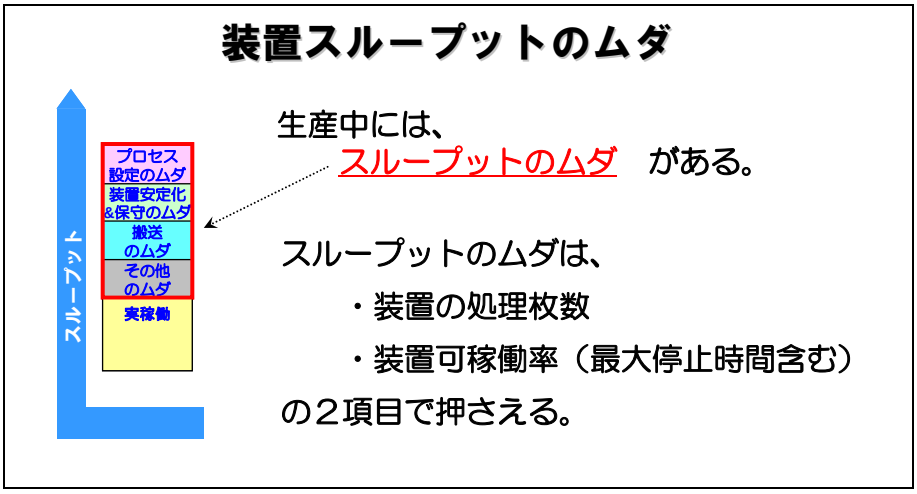
クラス	通常作業例	段取り作業例	WTW低減の課題
Class 1 主に装置内部のムダに関する	● 処理部へウェーハを入れる ● 高真空を作り出す ● プロセスチャンバ内でウェーハをハンドルする	● シーズニング and/or クリーニング ● WIP 識別 ● プロセス指示	階層的な無駄分類の議論が必要
Class 2 主に装置作業が引き起こす無駄に関する	● キャリア受付 ● キャリアとウェーハの認識 ● キャリア取り出し	● WIP 識別 ● キャリア識別 ● NPW 準備	この領域にWTWは無い
Class 3 主に工場オペレーションが引き起こす無駄に関する	● レシピのような指示のダウンロード ● 工場ホストとの通信	● キャリアディスパッチ ● 装置プロセス能力安定化 ● 製品品質確認	頻繁なレシピ変更と関係した無駄を可視化し減らすべき

図表9-12　装置段取作業の階層的分類とWTW削減

WTWを指標化した目的は、WTWの削減にある。 装置の段取り作業に着目してWTW削減の議論を行った。装置の段取り作業を、3階層に分類した。 まず、クラス1は装置内部の段取り作業である。 シーズニング、クリーニングなどがクラス1に分類される。 この階層に潜在するムダの削減は、装置メーカとデバイスメーカが協働で取り組む必要がある。 そのために、さらに階層的なムダ分類の議論が必要となる。 クラス2は、装置を使用するために必要となる段取り作業である。 この領域に現在簡単に削減できるWTWは存在しない。 クラス3は、ファクトリオペレーションが引き起こす段取り作業である。この領域では、小ロットサイズ生産によるムダを可視化し、種々の対策をしながら削減していく必要がある。

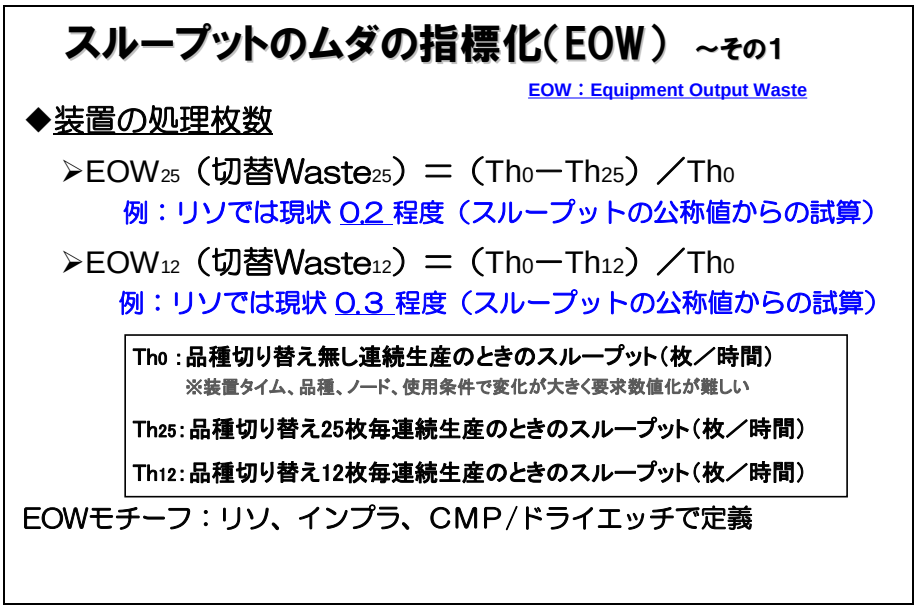
9-3-1-4 装置スループットのムダ

装置スループットのムダについて検討した。 最終的な目的は工場のスループットを改善のため、ネック装置の装置スループットに着目した。 装置スループットは、装置の可稼働率と、可稼働時間に何枚のウェーハを処理できるかで決まる。 従って、装置スループットのムダは、可稼働率と処理枚数の両方で押さえる必要がある。 また、ネック装置のスループットを維持するためには、ネック装置に安定的にロットを供給する必要があり、それを維持する為には、ネック装置以外の装置の最大停止時間も押さえる必要があると考えた。



図表9-13　装置スループットのムダ

装置スループットのムダを表す指標をEOW(Equipment Output Waste)と呼ぶことにした。 品種切り替えなしの連続生産時のスループットをTh_0、25枚毎にプロセス処理切り替えを行ったときのスループットをTh_{25}、として、Th_0とTh_{25}の差をTh_0で割ったものをEOW_{25}と定義した。 同様に、12枚毎にプロセス処理を切り替えた場合をEOW_{12}と定義した。

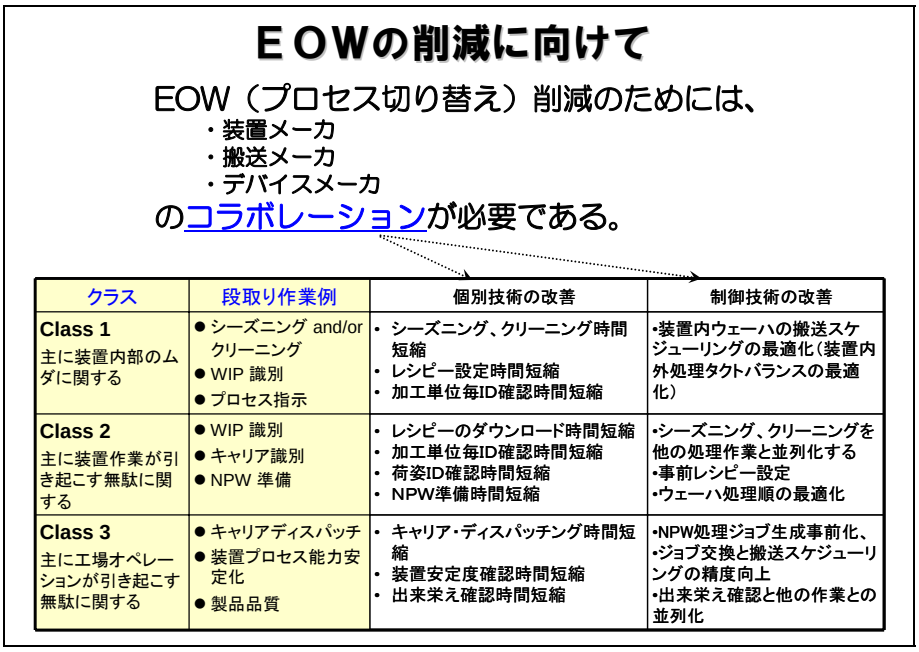


図表9-14 スループットのムダの指標化

EOW_{12}とEOW_{25}の要求値は、ネック装置になりえる装置種類に対して決める必要がある。 リソ、インフラ、CMP／ドライエッチがその対象装置と考えている。 スループットのムダは、装置可稼働率でも押さえる必要がある。 装置可稼働率は既に指標として導入されており、この定義は従来と同じとしたが、前述のように、ネック装置へのロットの安定供給に影響を与えるため、最大停止時間も新たな指標として考えた。 最大停止時間については、定常作業での指標として捉えて、日常点検、NPW処理、薬液交換、クリーニングなどの時間は対象としたが、オーバーホール時間、プロセス立ち上げ時間は対象から除いた。 最大停止時間の要求値は、スループット要求とサイクルタイム要求の両方から決まる。

9-3-1-5 ムダの削減に向けて

WTW と同様に、EOW(プロセス切り替え)削減に向けて装置の段取り作業に着目した。 段取り作業とは、装置の律速業務を補完する作業を指す。 加工前準備、加工後処理や材料、間接材料の搬送作業やウェーハ認識作業、加工補足作業なども含み、装置加工作業に直列的に入ってくるものや、装置の律速業務の影に隠れるものなどもある。 プロセス切り替えに際しては、装置の段取りが必要な場合があり、生産性を下げる要因となる。 工場側、装置側双方で相互に段取り作業の低減施策を検討するには、可視化情報と段取りの制御情報が必要となる。 段取り実施において装置イベントがデータとして収集される必要があり、そのためのトリガー定義が必要となる。 段取り制御に関わるデータは、工場側、装置側で共有されるように整備される必要があり、段取りについての情報定義整備されることで、段取り時間の低減や段取り作業の並列化が、より積極的に検討されるようになり、装置のサイクルタイムや OEE 改善が進むことが期待できる。



図表 9-15 装置段取作業の階層的分類と削減 EOW 削減

段取り作業の改善には、装置メーカ、搬送メーカとデバイスメーカが協働で取り組む必要があるが、まだ十分な議論ができておらず、2009 年度も継続して取り組みを行う。

9-3-2 生産装置(PE)

製造装置については、半導体製造の変化の早い事業要求に的確に応えるために、サイクルタイム短縮と生産性の改善の両立を目的とした技術開発を促進するメッセージを発信することが重要であると考えている。生産資源として最も重要なプロセス加工装置及び検査装置の生産への関わり方を可視化することは、従来からも極めて重要な生産性向上の活動の1つである。また装置の生産活動への関わりには省エネルギ化の観点も当然含まれるべきである。

従来からの生産資源観点からの生産資源有効利用の可視化に加えて、生産の対象であるウェーハの観点から生産活動を可視化することが重要であり、本部会ではこれをここ数年間の活動の機軸としている。2006 年、2007 年は、ウェーハ観点からサイクルタイムの計測を行い、サイクルタイム改善の方向性を見出すことが、有効であるとのメッセージを業界に発信してきた。

サイクルタイム短縮への対応としては、多品種生産であれば、装置そのものがプロセス切替えに際して、余分な時間を消費しないものであることが要求されるが、多品種生産ならずとも、装置故障、装置のメンテナンスによる切替えなど、無駄を発生させる機会は十分に多くあり、装置と装置業務の俊敏性を増すことが要求される。

STRJ ファクトリインテグレーション WG8 は従来から無駄を可視化することが重要との主張を続けているが、2007 年後半より、450mm 移行の代替として、300mm 技術工場での徹底的な無駄排除が業界要求として台頭してきた。ITRS ロードマップに予約された形となっていた 300mm ウェーハから 450mm ウェーハへの移行に際しては、現 300mm 世代技術の生産性の再検討と改善後とする考え(300 プライム) は、業界では広く期待された考えであった。2006 年から 2007 年の間、300 プライムについてデバイスメーカからの具体的な提案が無い状態が続いた結果、STRJ の主張する半導体製造活動に内蔵される無駄の可視化による、生産性改善に期待が移ったと考えられる。最重要な工場リソースである装置とその運用について無駄を可視化し、改善ポテンシャルを見出すことは極めて重要である。無駄の合理的で、効率的な可視化と排除には、標準化による、タスクの分担が必須であり、ITRS としては無駄の可視化方法とデータの標準化について重要なメッセージを発信することが責務である。

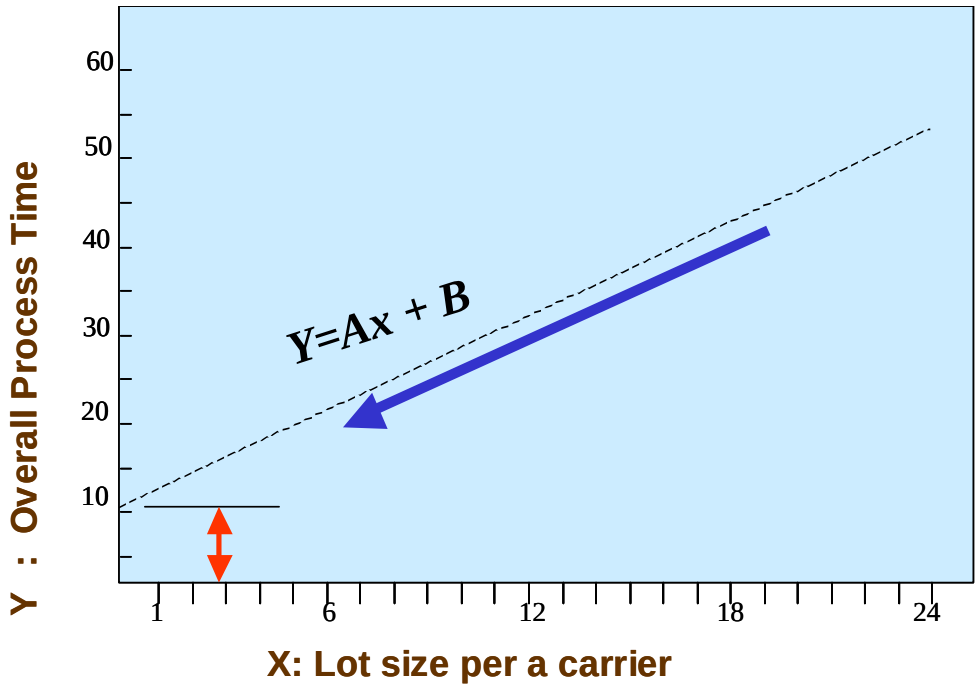
9-3-2-1 ウェーハ視点での装置の見える化

＜装置の生産性と俊敏さの見える化＞

2006 年度までは装置の生産性を知るためには、装置内のプロセスのシーケンスを可視化することが重要であることを詳細に論じた。2007 年では更に、枚葉(ウェーハ 1 枚 1 枚)でのサイクルタイムについて可視化された例を取り上げ、枚葉のサイクルタイム可視化の要求事項を深耕した。

図表 9-16 は 1 台の装置について、ロットサイズ(横軸)を変えた時の、そのロットの処理に要する時間(縦軸)を示したものである。この図は現在主流な枚葉処理装置の場合であり、大略、Y=Ax+B の形の特性となることが知られている。この A 値や B 値は装置種類等によって大きく変わるのが一般である。ある製品について、全工程でこの特性を調査し、全てを足しこみ、更に搬送時間等を順番待ち時間を除いて合算したものが、その製品の Raw Process Time と呼ぶべきものである。この概念は前出している図表 9-11 にも使われている。

またスーパーホットロットのサイクルタイムは、この Raw Process Time の概念に基づくものであるが、実際に運用される時のロットの構成枚数がかなり少数である場合で、ITRS では 3 枚と既定している。



図表 9-16 製造装置(1)

図表 9-16 では、当該装置での処理プロセスの条件切り替えに伴う段取り作業が、サイクルタイム、あるいは B 値に与える影響、ロットサイズへの応答が種々の理由から非線形性となること等、を表現することはできない。 図表 9-17 は、あるクラスター装置のウェーハ毎の処理合計時間の実例を調査した結果を単純化し模式的に示したものである。縦軸は、処理時間合計、横軸はウェーハのインデックスである。この図では、6 枚から 12 枚/キャリアで連続的に、装置へのキャリアの供給が行われた場合の個々のウェーハ毎のサイクルタイムを示している。

図表 9-17 にあるようにウェーハ毎にサイクルタイムは大きく変動しており、その変動は周期性を持っている。このことから以下の問題点が考えられる。

(1) 処理するべきウェーハの枚数が異なる連続着工を実施したときのサイクルタイムは複雑な挙動を示す。

(2) 上記より正確なロット処理の終了時刻予測が難しく、小ロット生産では装置に途切れることが無いようにウェーハを供給する制御が難しいものとなる。

(3) 工程間のタクトの違いから、夫々の工程の装置に存在されるべき WIP 量を適正に制御することは、ロットサイズが常に変動する場合には、非常に難しいものとなる。

更に以下の改善ポテンシャルが考えられる。

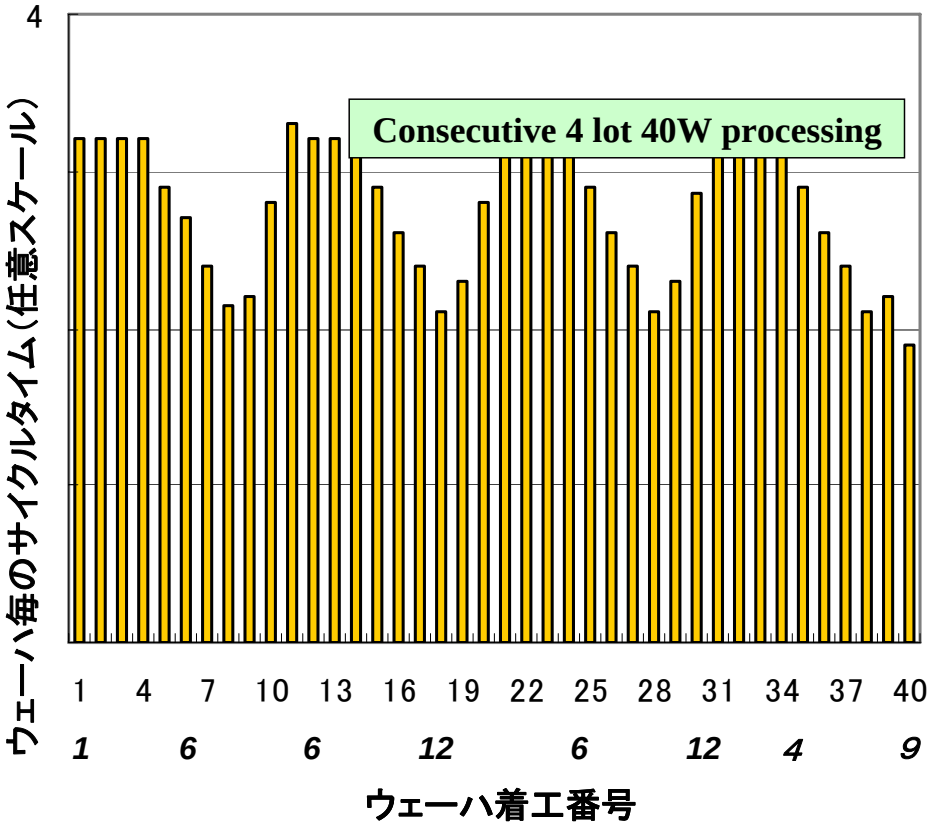
(1) 装置の中のウェーハハンドリング あるいは 着工制御が整流化されていないためのシーケンス上の無駄の削減。

(2) 工場側の制御として、WIP を必要最小限に制御することによるサイクルタイムの無駄削減。

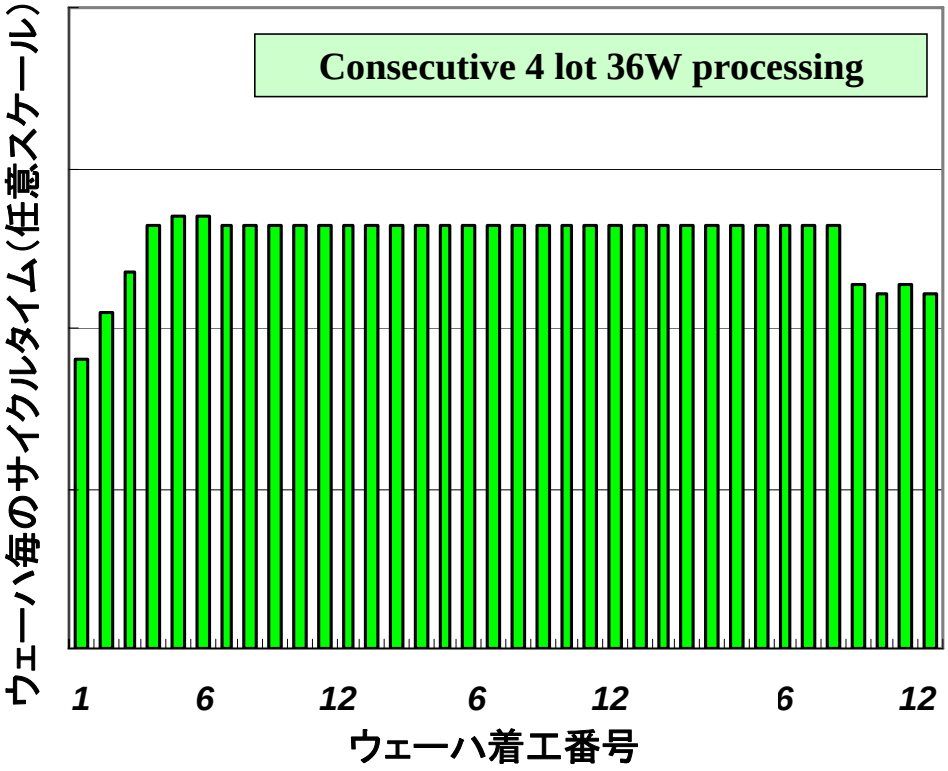
上記の例では、工場レベルで一般に対象とされるウェーハ観点の可視化に加えて、装置と工場側が協業的に制御を行うことの必要性を示唆しているが、このために従来より一段深い領域でのウェーハ観点の可視化が重要であることを示している。

工場レベルの製造計画を実施する階層と、上記したロットサイズや、当該装置の特性によって、生産を維持しながら、同時に WIP を過剰としないことを実現するための制御とは階層が異なる。また装置内での無駄のポテンシャルを可視化し、その無駄が顕在化しないように装置の外部あるいは装置の内部から制御することも、異なる階層である。このように異なる制御階層での制御事項と責任分担の良好な設計、それに対応した可視化が工場の生産性向上活動には極めて重要である。

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。現在 300mm 次世代工場のビジョン、そして 450mm 工場のビジョンが議論されているが、遅滞なく生産性可視化指標が整備され、ウェーハの観点のサイクルタイムを節約し、且つ、生産性を高く維持した工場操業方法が新たに開発される状況が生み出されるべきである。STRJ ファクトリインテグイレーション WG ではこの点を鑑みて、枚葉のダイナミックな挙動も視野に入れた評価指標が発案され、開発され、常識化し、日本のデバイスメーカに利用されるべきであると考えている。



図表 9-17 製造装置(2)



図表 9-18 製造装置(3)

＜詳細な装置内部の可視化と装置生産性の改善＞

先に述べたウェーハ視点での可視化は、製造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。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、あるいは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。

動作の分析や、設計の改善には、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装置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データ設計が前提となるのであり、今までのデバイスメーカが専ら利用すると考えられていた装置データ設計との際立った違いである。

図表 9-18 は、図表 9-17 と同系の装置で、運転方法が改善された場合の模式図である。装置メーカは自ら利用できる装置データの設計を行い、実際にウェーハ毎のサイクルタイムが、ロットサイズによらないで安定に動くことできる装置を提供することができることを示す例である。装置メーカによる装置データの高度利用こそは、装置生産性の向上の大前提である。STRJ ファクトリインテグレーション WG では、装置生産性の改善のために装置業界と装置ユーザが能動的可視化に適したデータとその収集結果を必要に応じて共有することによって、装置生産性向上に資することができるとの結論を得た。これは 300mm 第二世代技術に対して極めて重要な結論である。

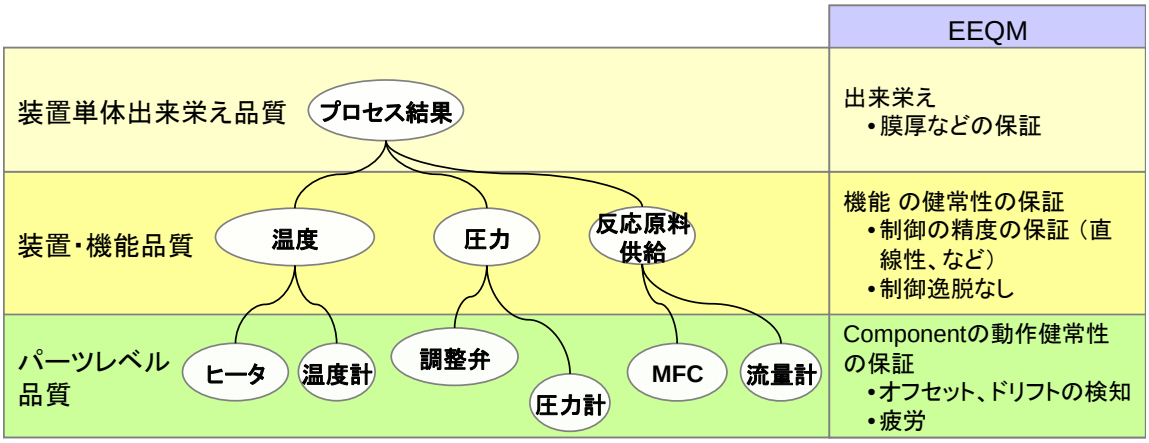
9-3-2-2 階層的品質管理

前章で、制御の階層構造について言及したが、多品種短寿命半導体製品製造に好適な製造工程での加工実施行為の品質保証適合性の改善を検討する際にも階層的なアプローチを念頭に置くことは重要である。

プロセス加工業務の実施品質をより良く管理制御するためには、装置の機能としての健全性確認作業と、醸成されたプロセス条件の健全性の確認作業とを分離することで、合理化を実現する必要がある。図表 9-19 は、階層的な工程品質保証を模式的に描いたものである。

図表 9-19 の最下層は、装置の機能毎の健全性を確認する階層であり、2 番目は、装置全体で醸成したプロセス条件(とそのシーケンス等も含んで)の健全性を確認する階層である。最上層は、その工程で実施した加工処理の結果であるか加工実施の品質、と、加工品質そのものを確認する階層である。

- **最下層～第二層：階層的な装置加工性能の保障**
  - **工場システムと装置システムで使用される製造管理情報と制御情報は、ともに高度なウェーハ観点で利用できるように設計されなければならない**
  - **工場システム、装置システムは、ともにウェーハ観点の管理と制御ができるために、それぞれの情報を定義し共有化しなければならない**



EEQM: Enhanced Equipment Quality Management (量産中の装置性能維持管理)

図表 9-19 製造装置(4)

＜装置層の加工実施の品質管理＞

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の不具合発生の監視活動がある。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。この技術は FDC(Fault Detection & Classification)と呼ばれて、多くのデバイスメーカが実施している。この監視コンテンツとモデルはデバイスメーカの重要な差別化技術として扱われてきた経緯を持つ。この伝統的な装置監視で対象となるのは、非常に多くの場合装置不具合あるいは人間のレシピ間違えである。 このため FDC の監視事項は、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不具合の監視が主となるが、醸成されたプロセス条件パラメータも併せて監視するなど、複合した目的を持っているのが通例である。

プロセス条件を醸成する機能は、圧力を作る、反応にエネルギを供給する、ウェーハの温度を制御する等の機能である。これらの機能の殆どは当然のことであるが、設計され装置に組み入れられているので、正常時の挙動が良く理解されている。それにも拘わらず、上述したように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、十分でない装置情報と 装置機能に関する知識の提供を受けない状況での装置監視活動を余儀なくされていたためである。

STRJ の立場は、能動的な可視化を実現するために設計された装置データでは、十分な項目、カバー範囲、詳細度が検討されているので、装置の機能の1つ1つは、その動作健全性について監視が可能となるべきというもの

である。この際、健常性を監視するために依拠する装置機能の振る舞いモデル、同モデルを利用した不具合判定機能について、共通性が高いものなどは、オープンな提供が実現されることを想定している。ただし健全性境界値(健常性判定のコンテンツ)については、装置設計の際に決定されたものを用いる必要があると考える。

重要なのは各階層で健全性を確認するモデルと そのモデルが用いる境界値が必要となる点である。例えば自動圧力調整機構(APC: Automatic Pressure Control と呼ばれている)が、その構成機能部品である、一番下の階層にある圧力計、サーボ機構、弁などの健常性の上に、二番目の階層で APC としての健常性を確認する振る舞いのモデルを使った確認を組み合わせることで、健常性の判定が可能となる。

一番上の階層では、その下までの階層の健全性が確認されているものの、更にプロセスの結果がどれだけずれ込む可能性があるかを確認する。最下層と第二層で計測されたプロセス条件から、加工品質の中央力の外れの予想を行い、品質の測定結果を待たずに品質は何らかの確度で良否判定とする、あるいは後に得られる品質測定結果とつき合わせ、良否判定を実施する。

この場合に必要となるが、工程品質判定のモデルである。最下層、第二層は対象がハードウェアで設計の対象となるものであったので、モデルがあるのが当然であったが、最上層は、プロセス条件を検討して、プロセス加工スペックにあった条件を合理的なモデルにする必要がある。また、外乱として、当該ウェーハが持つ、その前の加工プロセス結果の変動等があるので、非常に複雑である。

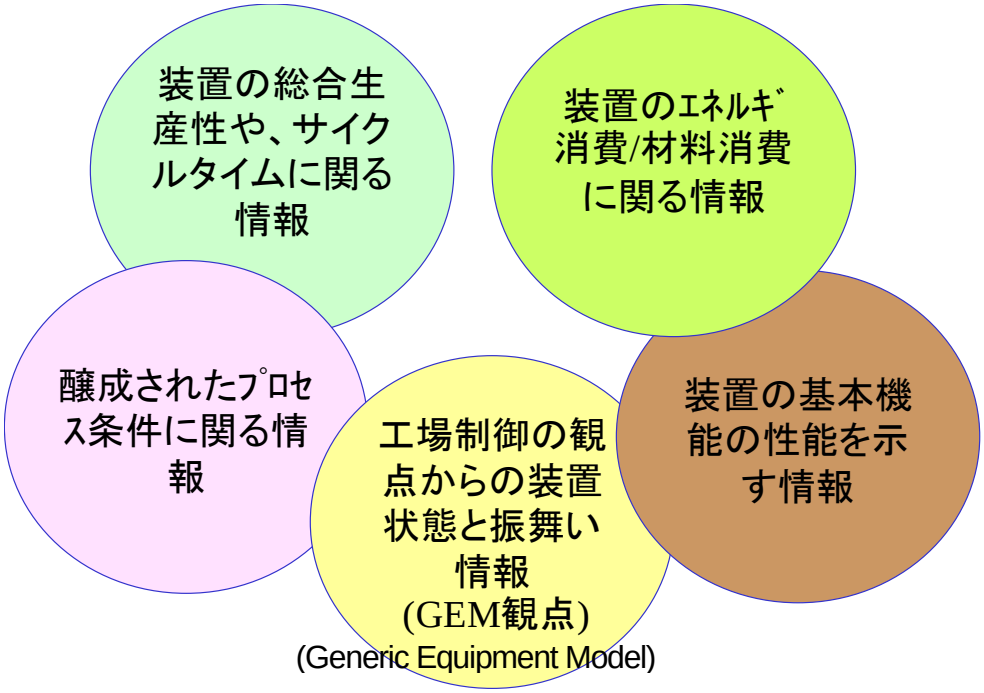
この階層では、何らかの変動が起きたから、不具合があるのかもしれない、という非健全性モデルだけでは十分な業務を果たしえない。プロセスの物理化学に依拠したモデルが必須となる。このようなモデルを併せ利用できる品質保証の仕組みが必須である。上記した STRJ での検討の結果、階層的加工品質の管理技術は従来からの、FDC の延長線上には存在しないことが明らかになった。

最下層、第二層は言うまでも無く、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)を基礎とする物理的な装置の可視化が前提であり、STRJ ITRS としてはこの可視化のために必要な装置データの実装要求を掲示する。また可能な装置機能表現の標準化を要求する。 最上層は、前述した意味においてデバイスメーカの真の競争領域であり、パブリックドメインの STRJ/ITRS としてアドレスするべきは、この領域の業務が最大限に効率化されるための必須の要件として、必要なデータインフラストラクチャの整備の進展であるとの結論を得た。

＜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対策判断に有効な可視化、2)装置機能観点からの装置機能と活動の統合的な可視化は、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対応した可視化技術の確立が必須である。STRJ ファクイトリインテグレーション WG の製造装置(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、以下のデータを利用する領域を提案し、国際的な理解を得て、4 年目にしてようやく 2007 年版 ITRS ロードマップへ掲載するに至った。(図表 9-20)

(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(Advanced Process Control)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



図表 9-20 製造装置(5)

＜枚葉データのインフラ整備＞

上記の 5 項目には EEQA などの新しい観点が含まれており、ロードマップとしてアドレスするべき重要な内容である。しかしながら、装置からデータが出てくるだけでは十分でない。収集したデータは業務の分担に従って直ちに利用されることが必要である。更に、責任分担の境界においては、境界を介する両パーティでお互いに分担した業務内容が追跡できる必要もある。

ここまでは装置の活動を表すデータについて中心に述べたが、装置で処理されるウェーハ観点から必要となるデータについては十分には述べていない。前述した階層的品質管理の最上層業務の効率化には、このウェーハ観点の情報も併せて用いられることが必須であり、そのためのデータインフラ整備が必須である。

装置データが利用されるためには、装置制御のコンテキストが理解され、その装置制御の結果部分のデータ部分が、抜き出され、何らかの判定にかけられる必要がある。この装置制御のコンテキストを利用した装置データの抽出作業が、能率よく、すなわち標準化された自動化作業として実施できるようにすることが、装置データのインフラストラクチュアの大きな役割である。しかしながら、このような装置データインフラストラクチュアへの重要な要求についての理解はまだまだ低いのが現状である。

300mm の第一世代では、ファクトリーオートメーションの単純化のために、スロットインテグリティとキャリアインテグリティを工場と装置間の制御の大原則とした経緯であるが、今後更なる効率化のためには、これからの縛りを排除することが検討されている。すなわち、従来ウェーハの処理順番は、キャリア毎にキャリア内のスロット順番(スロットインテグリティ)を保って実施されていた(キャリアインテグリティ)。生産性向上のために、ウェーハレベルでの処理順番の変更、あるいは、出力キャリアと入力キャリアが異なる、またはオリジナルスロットと出力スロットが異なる等運用が必要になる場合もある。このような運用下では、当然の帰結としてウェーハ毎に履歴をトレースできることが必須となるが、今までの装置データ構造や、装置制御データ構造と必ずしも相性の良いデータの扱いとはならないこともあり得る。

ウェーハ毎葉の情報を効率よく交換するためには、装置活動のデータとウェーハ追跡のためのデータの両方を抱合した全体的データ構造、構造化されたデータ名前規則などの整備が不可欠である。上記に述べたように製造装置とその上位業務階層についての、総合的で、能動的な可視化を想定した体系的な議論は、業界でまだ十分

になされていない。唯一 Selete(Semiconductor Leading Edge Technologies)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する考えである。

＜生産性の無駄排除のビジネスモデル＞

STRJ、ITRS の場を利用しての生産性無駄排除のビジネスモデルは、今までのデバイスメーカ主体の枠組みでの活動とは異なる。階層的なプロセス実施業務の品質保証という考えが導入されることによって、装置機能の発揮とそこに内包されるであろう無駄を可視化し、低減あるいは排除することには、装置無駄の可視化技術の常識化、同技術コンテンツの流通化が起こり、無駄の排除が業界全体に支持される活動となる必要がある。このためには標準化に支えられた装置データ利用のインフラストラクチュアが必要となる。この標準化は、装置購入の仕様が、装置ユーザ毎に大きく異なることに依拠する不経済性を回避することを主たる動機とする標準化ニーズとは異なる。業界全体で生産性の工場のための共通言語を持つための、相互的な目的を持つ点を、業界内で良く認識する必要がある。

9-3-3 搬送(AMHS)

小ロットサイズ化が進んでいるが、これに伴う搬送量の増大と搬送時間の短縮が課題となっている。 これは搬送待ち時間が製造装置の待ち時間となり、WTW に直結するためである。

ここでの検討は AMHS に対しホストから適正なタイミングで搬送指令が出されていることが前提になっている。

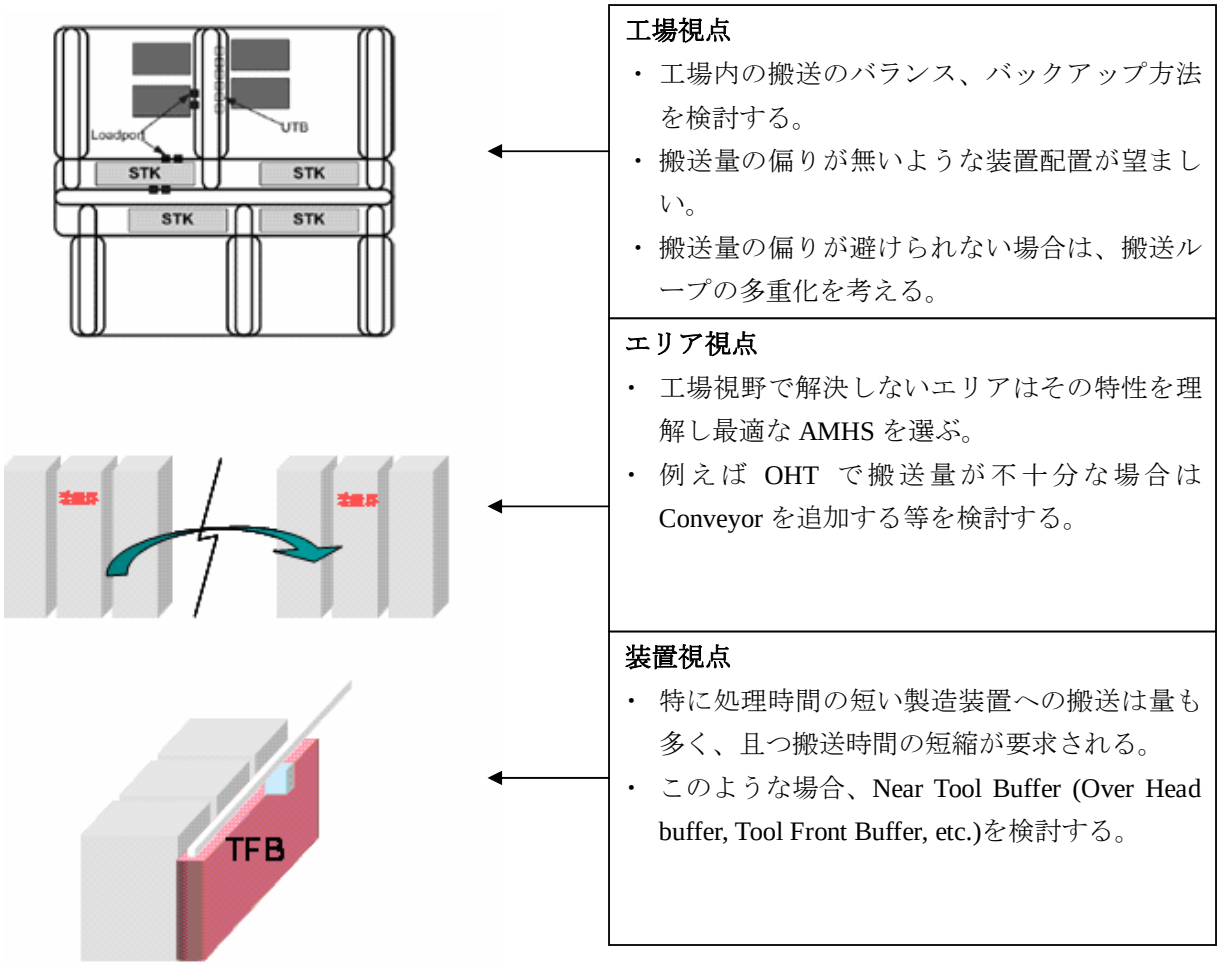
9-3-3-1 搬送能力に対する検討

従来の OHS(Over-Head Shuttle)工程間搬送と OHT(Over-Head Transport)工程内搬送の組み合わせ或いは OHT のみでの工程間内搬送では搬送量の増大と搬送時間の短縮には限界が見えて来た。 このため各種の AMHS を組み合わせて解決を図ることが行われている。 各種 AMHS 装置の組み合わせは対象となる工場の要求搬送量、搬送時間、スペース等の条件により決められる。

AMHS の組み合わせ例としては下記のようなものがある。

- ・複数の OHT の組み合わせ(複数軌道化)
- ・OHT＋Near Tool Buffer(Over Head Buffer, Tool Front Buffer, etc)
- ・OHT＋Conveyor
- ・その他の AMHS の組み合わせ

このような組み合わせを選ぶ場合、搬送を図表 9-21 のような階層的(工場視点、エリア視点、製造装置視点)に捉え、各階層での最適な搬送、AMHS の組み合わせを活用することが重要である。



工場視点

- 工場内の搬送のバランス、バックアップ方法を検討する。
- 搬送量の偏りが無いような装置配置が望ましい。
- 搬送量の偏りが避けられない場合は、搬送ループの多重化を考える。

エリア視点

- 工場視野で解決しないエリアはその特性を理解し最適な AMHS を選ぶ。
- 例えば OHT で搬送量が不十分な場合は Conveyor を追加する等を検討する。

装置視点

- 特に処理時間の短い製造装置への搬送は量も多く、且つ搬送時間の短縮が要求される。
- このような場合、Near Tool Buffer (Over Head buffer, Tool Front Buffer, etc.)を検討する。

図表 9-21 搬送装置の階層化

9-3-3-2 搬送による WTW に対する検討

搬送による WTW を削減するには工場レイアウト検討時から搬送量の予測、搬送時間の要求等を考慮しておく必要がある。

図表 9-21 に沿って説明する。 工場視点では全搬送量予測し、それに合ったシステムを採用することが重要である(単一搬送システム、複数搬送システム等)エリア視点では、エリアでの最大搬送量を予測し、搬送システムが必要とするスペースを予め確保しておく。 装置視点では、各装置からの搬送要求/時を予測し必要な搬送システム(Near Tool Buffering)を近傍に置く。

このように予め搬送システムを配置し、的確なタイミングで搬送指令を搬送システムに与えることにより、搬送による WTW を最小にすることで、ウェーハレベルでの連続供給が出来るようになる。

9-4 まとめ

STRJ の FITWG では、今年度指標化してきたムダの指標を 2009 年のロードマップに盛り込む予定である。微細化や大口径化と同様に重要なアイテムとしてのムダの削減を顕在化させ、業界をあげて取る込むことを提言していく。ムダの削減は、新規工場ばかりでなく、既存の工場でも有効に効果をあげられる施策である。ムダの削減を効率よく統合的に実施する施策が、NGF(JEITA や ISMI で検討されている)である。2009 年度はこのムダの削減を効率よく実施する施策をより深く検討し、施策の構造化・ロードマップ化も進めていく。

以上