

## 2 - 8 ファクトリインテグレーション

(要旨)

### (1) 検討範囲、課題

基本ニーズは工場生産性、すなわちコスト低減、変化への柔軟な対応、信頼性と有用性の改善、工期の短縮等の追求である。今回は、半導体製造工程の内の、ウェハプロセスラインに焦点を絞り、ロードマップ検討の視点として、製造技術を包括する意味で対象を量産工場とし、製品構成については少品種、多品種のライン対応についてそれぞれ検討を行った。

検討すべき課題として、「複雑さへの対応」がある。異なる工場、多くの新製品や新技術の導入、新規プロセスなどの要素とこれらの関係のマネージメントである。これらの要素はその数が急速に増大し続けるために工場のマネージメントの重要性と困難さが増大してきている。この前提のうえに、限定された資源のもとで、コスト低減と工期短縮を図るための「工場の最適化」と、多世代の製品や多様な品種展開や、生産規模の拡大などに対する「汎用性/拡張性」を課題として検討した。

技術的要求を検討することは前述した課題の達成に必要である。工場を互いに関連し合う機能から、工場運営：工場内の生産を制御する運用方針と手順、製造装置：検査/プロセス装置と工場における他の構成要素と装置のインタフェース、搬送システム：工場内における材料の移送、保管、認識、トラッキング、工場システム：コンピュータのハードウェア、ソフトウェア及び、製造関連の支援システム、スケジューラ、装置/材料管理、プロセス制御など、ファシリティ：建家のインフラストラクチャ、用力、モニタリングシステム、の5つの技術項目に分類し、課題への解決策を検討した。

検討に当たっては「工場運営」を工場全体を統括する概念と位置づけし、製品工期、ライン稼働率などの要求をまとめた。次に「工場システム」、「製造装置」、「搬送システム」、「ファシリティ」などの具体的な技術分野への要求事項へ展開した。

年度 Technology Node ウェハ径	1999 180 nm 200 mm	2002 130 nm 300 mm	2005 100 nm 300 mm	2008 70 nm 300 mm	2011 50 nm 300 mm	2014 35 nm 450 mm
少品種量産ライン						
通常ロットのマスクレイヤ 当たりの工期	1.75 days	1.5 days	1.4 days	1.3 days	1.2 days	1.1 days
ホットロットのマスクレイヤ 当たりの工期	1.2 days	1.0 day	1.0 day	1.0 day	1.0 day	1.0 day
キャリア内ロット数	One lot	One lot	One lot	One lot	One lot	One lot
他品種量産ライン						
通常ロットのマスクレイヤ 当たりの工期	1.8 days	1.6 days	1.4 days	1.3 days	1.2 days	1.1 days
ホットロットのマスクレイヤ 当たりの工期	0.9 days	0.85 days	0.8 days	0.75 days	0.7 days	0.65 days
キャリア内ロット数	Single lot [4]	Multiple lots	Multiple lots	Multiple lots	Multiple lots	Multiple lots
共通要求事項						
工場建設、立ち上げ工期	< 18 months	< 16 months	< 14 months	< 12 months	< 11 months	< 10 months
工場オペレータ総数	N	0.9・N	0.8・N	0.7・N	0.6・N	0.5・N
製品/プロセス変更工期	12 weeks	10 weeks	8 weeks	6 weeks	5 weeks	4 weeks

Solutions Exist ☐

Solutions Being Pursued ☐

No Known Solutions ☐

工場運営の要求項目

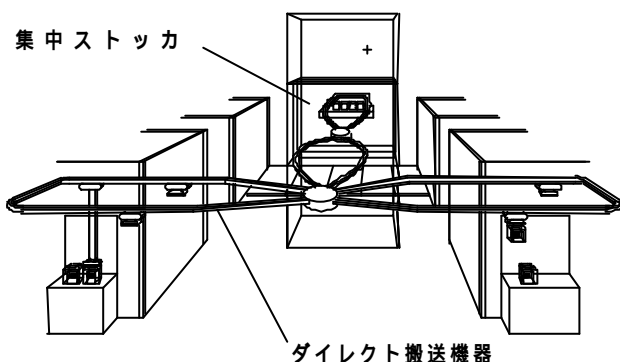
## (2) 解決策

解決策も要求項目に合わせ、工場運営、製造装置、搬送システム、工場システム、及びファシリティで区分される。この中で今年度は、特に、搬送システムについての検討を主体として行った。以下に搬送システムについての検討概要を示す。

拡張性/汎用性/スケラビリティの観点から、搬送システムにもクリーンルームへのフレキシブルな対応がより小さなインパクトで実現されることが要求される。これは据付/立ち上げ/拡張を簡単に行える事であり、コンポーネント化・モジュール化により固定方法に関する制約を減らし、調整を極力無くす方式が必要とされる。また、導入前に事前テストがモジュール毎に実現できることも、調整時間短縮には有用である。さらに、簡単に拡張できる機構も重要である。そのためには、ハード構成によらないソフト構造が求められる。ハードによって変わる必要のある項目はパラメータ化しておく必要があり、自動調整ができる技術も開発しなければならない。そしてソフトのアップグレード等のためにシステム稼働を止めないですむシステム構築も望まれる。その他トラブルの自動モニタリングや解析が出来、自動予防保全、自動復旧ができるよう技術開発も必要である。

搬送システムのもう一つの課題は製造装置の稼働に時間的ロスが発生しない様にロットを供給することやロットの搬送・保管時間を最短にすることを最小のコストで実現することである。これには工程間と工程内あるいはストッカを含めて、標準化されたインタフェースをもってダイレクト搬送ができる装置構成とその次に搬送車が直接装置から装置へ搬送する完全ダイレクト搬送が要求される。そのためにも、工程間と工程内を統合して制御できるシステムがまず必要である。実際の状況に合わせてスケジューリングできたり、予測配膳ができたりするシステムが必要となる。仕掛かりを考えて搬送能力を予測し、ロットの移動を最適化するシステムも望まれる。

### ダイレクト搬送システム



## (3) 提言

今回、ファクトリインテグレーションWGでは生産性に関わる技術各分野に渡って、可能解まで提案したが、多くはまだ、技術要求のレベルである。半導体産業を今後、継続するためには、これら各要件に対し、具体的なアクションプランにまでブレイクダウンし、解決策を用意しなければならない。米国を中心とした諸外国と競合していくためには、個別の要素技術だけでなく、これらを組み合わせる技術についても研究・開発を進めていかなければならない。ファクトリインテグレーション技術、その中でもプロセスインテグレーション、装置インテグレーション等の技術を積極的に研究・開発していく必要がある。

従来、日本ではこの分野の具体的施策の検討は個別企業(デバイスメーカー、サプライヤ)の範囲内に限られていた。これらの研究開発を促進するためには、産業界の協力関係の構築が重要であるばかりでなく、官公庁、大学等の研究機関の協力も必要である。

## 2 - 8 - 1 背景、ロードマップの意義、期待する効果

これまでの半導体産業は工場コストの増加にも関わらず、安定した生産性の向上が達成されてきた。これらはデバイスの微細化の進展、ウェーハの大口径化、歩留まりの向上と工場の生産性の改善によりもたらされてきた。しかしながら歩留まり向上とウェーハの大口径化による収益の改善は年々縮小しており、装置コスト/材料費の増大、デバイスコストの下落などが、その傾向に拍車をかけている。単純な従来改善の延長では収益体制が維持できなくなっており、ファウンドリ企業/ファブレス企業の台頭、品種を絞り込んだ専門化など生産構造の変化も現れてきている。今後も半導体事業が健全な事業体質を維持していくためには、工場の生産性向上を追及するファクトリインテグレーション技術の向かうべき方向を明確に示す必要がある。

工場の生産性向上に対して、ファシリティ、MHS(material handling systems)、システム、装置、など多岐にわたる技術分野での改善が進められ、成果を上げてきている。これらの技術を融合させ更に発展させるためにも、工場の総合的なモデルをベースとして必要な技術を予測することにより、技術開発のベクトルを整合していく必要があり、いち早く成果を取り込む必要がある。

技術ロードマップを構築していく事は、構築過程における幅広い分野での活発な情報交換、議論を展開することにより、今後の技術開発の進むべき方向を示し無駄のない実用技術の開発を促進することを目的とする。また、データの共用、標準化の深耕による無駄な開発の抑制することにより、併せて半導体生産のコスト抑制が期待できる。

## 2 - 8 - 2 検討範囲と項目

半導体生産コストが過去のトレンドと同等に推移すると仮定すると、歩留まり向上や大口径化の向上による効果の減少する中で、これに対応するためには、ウェーハ加工工程を主体に工場の生産性の大幅な向上を実現する必要がある。

今日まで半導体産業は、微細化、100%近くへの歩留り改善、ウェーハサイズの拡大や生産性の改善などの施策によりムーアの法則にしたがった高度成長が維持されてきた。製造ラインでは一定の面積当りの工場コストを維持し、プロセス技術の開発により単位面積当りの集積度を常に増加させてきた。しかしながら、今や半導体産業の成長を遅らせるいくつかの課題に直面している。リソグラフィのスケーリングデザインの限界が見えてきており、製造ラインでは生産性トレンドの減少、ウェーハサイズ転換の生産効率向上率の低下、コストターゲットへの不適合などの問題が見えてきている。

これらの生産リスクに対応するため、単位面積当り一定のコスト保守管理、大量生産に至るまでの立ち上がり時間の短縮、新しいビジネスモデルに適合した汎用性の増大など、半導体製造の根本的な特質の追求が要求されている。

### (1) 単位面積当りの一定コスト保守管理

単位面積当りの製造コストは生産性の一つの指標である。近年、工場のコストは著しく増大してきている。にもかかわらず、大口径ウェーハ化と装置性能の大幅改善により単位面積当りの製造コストを一定にしてきた。最大歩留まりの追及、ウェーハ世代交代などの技術革新に対しても、単位面積当りの製造コストの維持管理を継続して取り組まなければならない。

## (2) 立ち上がり時間の短縮

工場のランプアップ時間の短縮が定常的な運用コストの削減と共に経済的効果の有ることがわかってきた。新規の工場はより急速に生産へ向かって立上らなければならない。同様に、既存の工場は現状の生産に最小のインパクトでより早くアップグレードされなければならない。

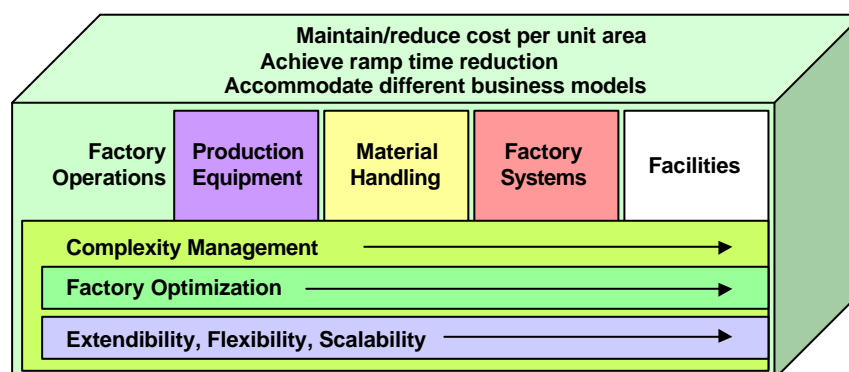
## (3) ビジネスニーズへの汎用性の拡大

多様な市場要求によるビジネス機会の増大やコスト低減への努力は半導体製造業をグローバルなものにして来ている。デバイスコストの低下と共に、新規市場が開拓され、この市場の多様性に対応した新規ビジネスモデルが形成されてきている。

これらの考察から工場に対する挑戦課題(difficult challenges)として、複雑さへのマネージメント(complexity management)、そして常に変化する要求の中での工場の最適化(factory optimization)、汎用性/拡張性/スケーラビリティ(extendibility, flexibility, scalability)の向上、が上げられる。

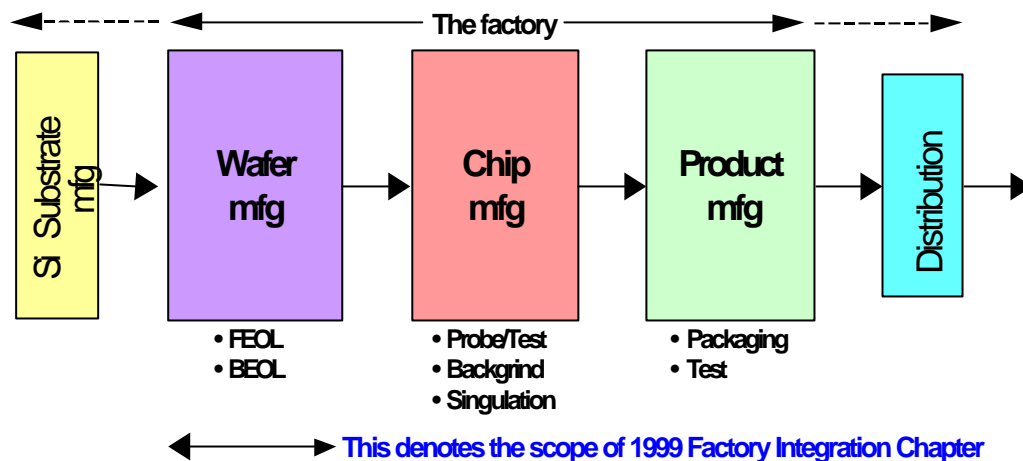
これらの挑戦課題を検討し、解決策(potential solution)と対応付けるために、半導体工場の機能に整合した、技術項目(thrust)として、工場運用(factory operations)、製造装置(production equipment)、搬送システム(material handling systems)、工場システム(factory systems)、ファシリティ(facilities)、に分別した。

工場運用は、個々の課題の背景や他の技術項目の結果として位置づけ、複雑なマネージメントは、工場の最適化や汎用性/拡張性/スケーラビリティの背景として位置づけた。図表2 - 8 - 1は、これらの技術項目の領域と挑戦課題との関係を示している。



図表2 - 8 - 1 Schematic Showing the Factory Integration Thrusts and Difficult Challenges

ロードマップ検討の視点として、製造技術を包括する意味で対象を量産工場とし、製品構成については少品種/多品種の対応についてそれぞれ検討を行った。また、半導体工場は様々な生産範囲に渡っているが、今年度のロードマップについては、ウェーハレベルの集積回路の製造に焦点を絞った。



図表 2 - 8 - 2 Factory Integration Scope

### 2 - 8 - 3 挑戦課題( difficult challenges)

ファクトリインテグレーションにおける挑戦課題を以下の 3 つのカテゴリーに集約し、5 つの技術項目に分割した。

- ・ 複雑さへのマネージメント

複雑さへのマネージメントは異なる工場、プロセス、製品などの要素とこれらの関係のマネージメントである。これらの要素の数は急速に増大し続けるため、工場の複雑さへのマネージメントは重要性和困難さが増大してきている。

- ・ 工場要素の最適化

工場の最適化は、限定された資源の下で進められる調査とタイムリーなビジネス意志決定を可能にするプロセスによる。この環境は急速な変化や不確実なビジネス及び技術上の条件に影響される。

- ・ 工場の汎用性、拡張性、スケーラビリティ

これらは投資生産性や工場の長寿命化に関係している。工場の拡張性( 多世代に渡り利用可能な工場 )、工場の汎用性( 多様な品種への対応と、品種の変化に対し機敏であること)、工場のスケーラビリティ( 指定された生産能力からの拡張性 )に分類される大きな運用の変化に対して、工場を止めることなく対応することが要求されている。

図表 2 - 8 - 3 にこれら 3 つの挑戦課題に対する項目の概要を付加した詳細な検討項目と共に示す。

挑戦課題	課題内容
複雑なマネージメント	<p>ビジネスニーズとグローバルなトレンドの急速な変化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 新製品及び新技術導入比率の増大</li> <li>・ バーチャルファクトリ</li> <li>・ 異なる地域における規制の整合の必要性</li> </ul> <p>プロセスと製品の複雑さの増大</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ データ集積/解析要求の急増</li> <li>・ プロセスステップの増加</li> <li>・ 混載ロットへの対応</li> </ul> <p>大口径ウェーハ及びキャリア運用への人間工学的な解決策</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 自動搬送システムへの期待の増大</li> </ul> <p>工場システムへの依存度の増大</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 多様なシステムの相互依存性</li> <li>・ 既存システムと新規工場システムの共存</li> </ul>
工場の最適化	<p>顧客への納期確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工期とスループットのバランス</li> <li>・ 工場、製品、プロセスの立上げ時間短縮</li> </ul> <p>工場全体の有用性(OFE)の改善</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全ての工場に組み込まれる技術項目の改善</li> </ul> <p>工場歩留りの改善</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 変動要素削減の為に製造装置と工場システムの制御</li> <li>・ 多様化する材料に適合したクロスコンタミの管理</li> </ul> <p>製造及び運用コストの削減</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄物とスクラップの最小化及び非生産ウェーハ(NPW)数量の削減</li> </ul> <p>全ての地域的基準への準拠</p>
拡張性、汎用性、スケーラビリティ	<p>建家、製造/付帯装置及び工場システムの再利用</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 多世代の技術ノードにまたがる再利用</li> <li>・ ウェーハ径の変化にまたがる再利用</li> </ul> <p>急速なプロセス及び技術変化に対応した工場デザイン</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 汎用性、拡張性に結びつく先行投資への考え方</li> <li>・ 汎用性、拡張性の対する可否判断</li> <li>・ 生産ラインの中断時間の最小限化</li> </ul> <p>より厳しくなるESHへの要求</p> <p>プロセス及び材料に対する精度要求の拡大</p>

図表2 - 8 - 3 ファクトリインテグレーション挑戦課題

#### (1) 複雑さへのマネージメント

これからの半導体工場では、グローバル化、ビジネス上の要求やビジネスモデルの変化、新技術の導入、不確実な半導体市場の増大等の他、自動化の進展、プロセスの多様化、等により、管理レベルの細分化、事業間、工場間含めた統合化など、今まで以上に複雑な管理を要求される。これらの要求を効率よく実現、運用していくため、半導体工場に対する効果的なマネージメントが要求されている。

## 1) 自動化への対応

半導体工場の自動化は、80年代 256kb から 1Mb への DRAM(dynamic random access memory) 移行時を境に急激に発展してきた。工程間の搬送の自動化が進み、ある工程の装置群(ベイ)から次の工程の装置群にストッカを介して製品物流が行われるようになった。90年代では情報の自動化について積極的に構築が進められており、個々の製造装置の情報、製品の物流情報、工程管理等のシステム化が進められてきた。工程内の自動化も始まり、AGV(automatic guided vehicle,無軌道自動搬送車)等でストッカから装置へ自動で搬送するラインも構築され始めた。

これら自動化への流れは、大口径化、設備の稼働率向上、ラインの効率向上のために、今後さらに急激になって行くと考えられている。また、自動化に対応するための課題は多く、様々な分野において、その課題を解決しなければならない。

例えば、製品ラインの自動化には以下の命題が求められている。

- ・ 装置の稼働に時間的ロスが発生しないようにロットを供給する(装置の稼働率を高め、工場のアウトプットを最大にする)。
- ・ ロットの搬送・保管の時間を最短とする(TAT(turn-around time)を最短にする)。
- ・ 製品の歩留まり・品質確保に必要な清浄空間をウェーハに提供する。
- ・ 以上を最小のコストで実現する。

これらの命題を実現するためには単に搬送車・レール・ストッカ等の搬送機器のみならず、工場レイアウト、キャリア、CIM(computer integrated manufacturing) 装置のそれぞれに、及びその組み合わせに様々な工夫が必要である。また、次世代 300mm 時代の搬送自動化においては、装置から装置へ工程間から工程内にも自動搬送が要求され、その最適ラインの設計、ストッカの大きさ・重量・構造など、建屋構造からコンセプトを考える必要もある。工程内装置から装置へのダイレクト搬送、省スペース化のための集中・多層階ストッカ、短 TAT 化のために装置の終了時間を予測した搬送スケジューリングなどが考えられている。さらにその先の世代においては、プロセス及び製品の短 TAT への要求から枚葉搬送、管理、制御が必要となり、装置管理や検査も含めた自動化、無人化が進むであろう。製品 ID のトラッキング・管理はロット単位からウェーハ毎に、さらにその次の世代ではチップ毎の管理が予想される。これら枚葉の処理を効率よく、短 TAT で実現するために、搬送システムや製造装置もこれらの枚葉処理に対応した形態となり、共通のウェーハ枚葉搬送ラインにプロセスチャンバが取り付け、装置はプロセスチャンバ単位となり、プロセスチャンバの変更も容易に可能といった枚葉ラインも検討されている。製造装置は自動化及び枚葉化に対応するため、故障予知や自己診断機能を持ち、CIMと連携した最適なメンテナンスシステムを提供しなければならない。

これらを統合する CIM システムは、その装置の故障予知、自己診断機能の対応に加え、単に進捗管理、装置状態管理等の情報を統合した受動的な生産管理システムから、検査結果から装置処理条件制御へのフィードバック、さらに欠陥管理、ウェーハイールド(ライン内でのウェーハの欠損)を反映させた生産制御、それを含めたリアルタイムな製品のスケジューリングを行なう必要がある。これにより、製品 INPUT から、品質保証までウェーハ毎あるいはチップ毎に製造スケジュールを管理し、工場を運営する多機能で能動的なシステムとなる。しかしながら、これらの自動化対応工場の設計・構築には多大な時間と、大規模な投資が必要となる。自動化対応費用及びその設計工数は工場建設において世代毎に増加しており、これらの低減を図るため各要素(ファシリティ、キャリア、AMHS(automatic material handling system)、装置インターフェース、CIM 等の製造ライン構成要素)

素)において、グローバルな標準化を進めなければならない。

## 2) プロセスの多様化

プロセスステップの増加及び製品品種の多様化、微細化対応の加工技術の変化はファクトリインテグレーションに大きな変革をもたらしてきた。プロセスステップの増加及び品種の多様化は装置機種数の増加、処理条件の多様化となり、選定のための評価・検討期間、工程経路、装置レイアウト等のライン設計等工場設計期間や投資検討を、また TP(テストピース)や検査、装置条件変更等工程管理やスケジューリングの検討・運用を複雑にしてきた。プロセスステップは今後も世代毎に増加する傾向(世代毎に 10～20%増加)にあり、また品種もその用途がさらに多様化するため、ファクトリインテグレーションには、これらの多様化・複雑化するプロセスフローに柔軟に対処するライン設計技術が求められる。工程経路の複雑化は、人手による搬送作業を困難にし、前述した製品搬送の自動化が必須となってくる。このような複雑な工程・ラインの構築には高度なシミュレーション技術が必要になっている。例えば、効率よく製品を流すために、装置選定、バッファ数、装置レイアウト、処理条件等を製品プロセスフローに応じて即座に決定できるシミュレーションツールが必要である。また、これらのツールは工場の設計・運営に不可欠なものとなり、CIMと連携あるいはその機能の一部として活用されるであろう。

装置はその物理的な、またソフトウェアのインターフェースが標準化され、プロセスの変更、増減に柔軟に対応できるようにしなければならない。さらに、装置台数の増加を抑えるために、装置には品種の変更に対応するため、各種プロセス条件を瞬時に変更しその性能を保証するために、各種 in-situ(インシチュ:その場)のプロセスモニタを完備するようになる。これらの情報は CIM で監視され、歩留り管理がリアルタイムに行われるようになる。

微細化対応技術の変化は、例えば CMP のような汚染対策が必要な装置に対するクリーンルーム設計や、露光装置の振動要求スペック等からの対策等、建屋の構造設計に大きな影響を与えてきた。世代交替の度に、前述のプロセスステップ増加と合わせて、装置価格、クリーンルーム面積が増大し、清浄度・温湿度・分子汚染等スペックが厳しくなり、工場建設投資額は大きく膨らんできた。多世代にわたりクリーンルームを利用し、世代毎に建屋・クリーンルームに投資しなくてもよくするために、建屋・クリーンルーム構造や空調方式を考えるべきである。そのために、ミニエンバイロメント(mini-environment)方式は有力な手段として考えられる。現在はパーティクルのみ、いわゆる清浄空間ボックスであるが、次世代では分子汚染、さらにその次の世代では温湿度等もミニエンバイロメント方式で実現し、ウェーハ搬送経路がこの空間で構成され、プロセスチャンバ内部もこの環境をコントロールすることにより、クリーンルームの環境は一般環境にかなり近づけることが考えられている。装置もこの環境に対応した構造にする必要があり、処理中のウェーハ環境のみならず、メンテナンス等のためのミニエンバイロメント、あるいは自動部品交換のような自己診断・保全システムが必要である。

## 3) 世界規模での工場展開

昨今の厳しい経営環境下においては、カスタマに近いところで製品を作った方がコストダウンはもとより、製品開発の工期も早くなるということで、労働力の確保というモチベーションもさることながら、グローバルな工場展開をする半導体メーカーが増えてきた。

そのために解決しなければならない課題も増えてきたことは事実である。製品の品質、性能を本社機能で管理するとすれば、製造装置、プロセスは可能なかぎり、統一したほうが良いのであるが、場合



合によっては、当該現地では入手できない装置があったり、入手は出来ても、サービス体制が不完全のため、導入を諦めるといったケースもある。プロセスも現地間の安全基準や環境基準の違いから、統一できないケースも多い。また、生産システムも製造装置と同じようなことが考えられる。このように同じ半導体メーカーが同じ製品を作っても、その製造装置、プロセス、生産システムはそれぞれの現地で異なっており、その品質、性能をどう管理するかという複雑さの問題を克服する必要がある。これは何も日本と外国といった場合だけでなく、同じ日本国内に複数の半導体工場を持つことでも起こりうることである。これは技術ロードマップに落とし込むには必ずしも技術の問題だけで片付けられないことも多く、議論を要する課題であるが、技術ロードマップに落とし込むには生産システムの性能向上の切り口で見ると見やすくなると思われる。

#### 4) 組み合わせの多様化

ここでの組み合わせは製造装置、そのメーカーの組み合わせの事と定義しておく。なぜ、このようなことが起こるかは前述のとおりである。ただ、同じ工場でもラインの拡張に伴い、同じ製品の同じプロセスに異なる装置、異なるタイプを不可抗力で使用することはある。また、別の視点から見ると、半導体デバイスの微細化、高集積化に伴い、その製造プロセスや製造装置の種類や品種も、プロセス数も多くなっている。従って、同じラインでも生産システムで管理すべき、装置やプロセスの組み合わせが増加の一途を辿ることになる。従って、このテーマも生産システムの性能向上の切り口で見ると考えやすくなると思われる。

#### 5) 分業化

これはやはり昨今の厳しい経営環境下にあって、大手半導体メーカー(とりわけ、我が国の場合は総合電気、総合家電メーカーなどが半導体メーカーであることが多い。)は従来の商品企画から製造までという垂直統合型のビジネスモデルからの脱皮を迫られている。

そこで、製品がカスタマにわたる状態になるまでの各機能をそれぞれを得意とするメーカーが行うという水平分散型に変わりつつあるのが昨今の傾向である。役割分担がはっきりすれば、今まで割と曖昧だった(言葉を替えれば、日本の半導体メーカーは大手総合電気メーカー、大手総合家電メーカーの傘のもとに半導体ビジネスのポリシーが不明だった。)半導体メーカーとしてのアイデンティティが明確になり、ビジネス戦略を立て易いとも言える。技術的なロードマップの切り口で見れば、多様な製品を多様なプロセスで如何に効率的に作るかが議論の材料となろう。従って、当 WG で扱うモデルとしては、ファウンドリ企業に近い形態が検討範囲となる。

#### (2) 工場の最適化

工場を最適化するためには、顧客納期確保、製品の品質及び信頼性、工場の効率、が最大限に実施され、種々の変動要因、生産コスト、廃棄コストを最少限にする必要がある。これに加えて、安全への対応、地域基準への準拠と継続的な改善が要求されている。しばしば、これらの要求はトレードオフの関係となる。

種々の変動要因は、工場の最適化の障害となる。例えば、それが歩留り、製品品質、計画、工期、納期、全般的な工場能率、やウェーハコストなどに影響する意味で、装置パフォーマンスの変動を押さえることは重要な課題となる。もし、装置パフォーマンスが不十分なものであるとするならば、その結果として納期の変動やスケジュールのずれの増加となる。このように、変動要因についての検討が工

場最適化改善のために重要となる。

### 1) 生産コスト

半導体産業が安定に成長するための前提は、継続的なコスト低減である。ファクトリインテグレーションが扱うべきコストに関わる技術分野の中で大きな位置を占めるのが、製造装置、ファシリティ及びヒューマンリソースである。これらの各分野について、コスト低減からの切り口で最適化を進める技術開発が課題となる。

#### (a) 製造装置のコスト低減

製造装置のイニシャルコストは減価償却費の形で半導体デバイス原価の中で最も大きなウェイトを占めている。今後の生産ラインの投資を考えると、ウェーハの大口径化に伴う装置コストの上昇、及びウェーハやレチクル等の自動搬送費用が増大することから、「1枚生産あたりの投資」を効率化するのに必要なウェーハ生産能力を旧来と同等とすると投資金額が膨大となってしまう。これでは投資リスクが大きくなりすぎ、1社だけでは負担しきれなくなる。反対に投資リスクを抑えると効率の良い生産規模を得られなくなりコスト競争力を失うという問題に突き当たってしまう。半導体装置のコストを圧縮するには旧来から行われている「装置稼働率/処理能力の向上による装置台数削減」や標準化による開発コストの低減も重要となるが、こうした問題を解決するためには装置能力、価格を個々に最適化するだけでなく、ラインや工場単位でコストを最適化できるような装置に対する新しいコンセプトが必要となる。ラインにおける生産性の最適化には、数百工程ある半導体処理工程の内、ボトルネックとなる部分の把握と早急な対応が必要となる。ロットフローに対する詳細なシミュレーションなどによりこのボトルネックの把握とボトルネックとなる原因究明のための詳細な調査から装置に要求されるコンセプトが明確になる。

#### (b) ファシリティへの要求

半導体デバイスの微細化に伴い材料ガス、薬品の高純度化が必要となったり、最小加工寸法に合わせたクリーンルームのグレードアップが必要となってくる。また、クリーンルームの制御対象も微粒子だけでなく、界面制御からの要求やエキシマレジストの変質を避けるためなどにより化学物質を制御する必要が出てくるなどコスト増に繋がる要因は多い。これらの夫々に対してコストを低減していく必要があるが、クリーンルームではスーパークリンエリアの限定や、ガス・薬品については用途に応じた高純度化など、「限定化」を徹底していく必要がある。「限定化」を進めるにはクリーンルームエリア毎の役割・装置や工程毎の要件を明確にしていく必要がある。

#### (c) ヒューマンリソース

従来の生産工場での主な仕事であったウェーハやレチクルの移動が搬送システムに取って替わられると、人材への要件が大きく変化する。オペレータ業務から技術補佐的業務への変化が必要となるだろう。また、開発期間短縮、工場建設から量産開始までの期間短縮、生産期間短縮の必要性からも必要な人材の要件が変化してくる。これらの質的变化を支えるための再教育システムも必要となってくるであろう。こうした変化をコスト増にさせないためには、複雑化する業務の支援・決定のためのツール・システムが必要となる。あるいは、開発協業、開発/生産分業、不足分野のアウトソーシングなどを必要に応じて採用していかなければならない。

## 2) 顧客納期確保

半導体工場ではタイムリーな製品の市場への導入が初期投資回収への鍵を握っている。工期は、製品の投入から出荷迄の製造工期と、新規ラインあるいは製品のランプアップタイムの 2 つに大きく分類される。生産能力を維持しながらこれら工期の短縮を図ることが課題となる。

### (a) 製造工期の短縮( QTAT Quick TAT )

今後の半導体工場の経営基盤を支える生産技術上の課題として製造工期( TAT)の短縮がある。これには、サンプル出荷までの工期短縮と、多品種生産を行う製造ラインにおける全製品の製品工期短縮の 2 つの要求がある。

サンプル製品、いわゆる特急ロットの工期短縮には、待ち時間を最小化する手だてが必要となる。装置への処理割り付けを優先して行うだけでなく、製造装置が連続的に稼動することを目的として持っている処理前ロットバッファ内でのロットの処理順序を変更することにより該当ロットの処理優先順位をあげる手段を持つことも必要とされる。また、ロット処理を割り付けられた装置が故障等で処理対応が不可となった場合に他の装置への該当ロット処理割付の変更がリアルタイムで実施されなければならない。この場合には工程作業全体のスケジューリングの見直しが必要となる。これらは従来人手に頼ることが多く、高度のスキルと時間を必要とするため、特急性が失われるおそれがあった。これらをリアルタイムで実行するためには装置状態あるいはロットの在庫状況をモニタリングするツールや人的スキルをシステム化するためのアルゴリズムの開発等が必要となる。

工場全体の製品工期短縮のためにはライン内の仕掛かりロットの量を圧縮することが重要となる。ロット投入量を減らすことは、生産量やライン内でのロット進捗のばらつきなどにより装置でのロット待ちが発生する場合があり、ラインの生産能力を低下させることにも繋がる。仕掛かり量の調整はロット投入のタイミングをライン在庫量を監視しながら行わなければならないが、このラインの製品工期と生産能力のバランスを得るためにはロットフローに対する詳細なシミュレーションとリアルタイムでの在庫量監視からのロット投入あるいは作業指示コントロールが必要となる。

ボトルネック工程におけるロットの停滞が製品工期を律速することもあげられる。半導体工場の生産能力や工期はボトルネックとなる工程の装置利用率( OEE ) に大きく左右される。装置利用率は保守、コンディショニング、故障、検査ウェーハ処理、検査結果待ち、搬送待ちなど要素や、個々の装置の処理時間のばらつきにより製品の個々工程での在庫量に変動が起きる事による待ち時間の増加など非生産要素によってボトルネックとなる工程も逐次変化してくる。装置状態の逐次状況把握のために、装置モニタリング技術などの開発が重要となってくる。該当装置の装置稼動状態の把握やプロセス処理作業に付帯した検査工程、検査装置の状態の把握など、これらの装置状態からのスケジューリングへのフィードバックが重要である。

### (b) ランプアップタイム

量産へのランプアップタイムは生産準備時間と量産立上げ時間からなる。生産準備時間は工場の計画、設計、建設、導入装置の性能検証を含めた装置選択期間、装置の工場運営仕様への合わせ込み、装置ハードの立ち上げ、プロセス条件出しなどの量産 1st ロットをスタートするまでに要する期間、量産立上げ時間は 1st ロットリリース後の生産能力と歩留り立ち上りのための時間と定義する。

生産準備時間については個々の作業時間を短縮するための一つの施策として標準化が上げられ

る。標準化を実施することによって、無駄な開発、調整時間の発生を防ぐことができる。今後大幅な導入がなされる自動化において、装置との自動化インターフェースの標準化の効果は大きい。また、個々の作業間での取り扱い仕様を標準化する事により、各作業を並行して実施でき、全体的な短縮化を図る事も可能となる。競合しない分野における標準化を推し進めていくことが重要である。

量産立ち上げ時間の内、歩留り向上についてはテストウェーハの処理条件を変化させて限定した工程で流し、パターンチップの工程歩留りを測定し、その結果を分析する事により改善を図ってきた。しかしながら、改善にフィードバックされるために要する時間が長くなることで、歩留り改善の速さは必ずしも期待通りにはなっていない。また、生産には直接寄与しないテストウェーハを量産工程において流すことのロスが生じたりするなどの問題もある。欠陥解析/分析技術のシステム化による歩留り改善のためのフィードバック速度向上や、設計レベルでの歩留り予測シミュレーション開発による初期歩留りの向上などにより、量産開始や歩留り立ち上がりのスピードアップを図ることが重要である。

一方、量産初期からで生産能力をどこまで高いレベルでスタートできるかが早期立ち上げの鍵を握る。装置が立ち上げ当初より安定した生産能力を発揮するためには、装置性能の安定化と保守、故障等の非生産時間の短縮が重要となる。併せて、ボトルネック工程を把握し、適切なスケジューリングによって生産ロスを防ぐことも重要な作業である。装置に対する標準的な利用率の評価指標化と、これをデータとして用いて装置を配置した際のボトルネック工程を把握できるためのシミュレーション技術などが必要とされる。

### （３） 工場の拡張性、汎用性、スケーラビリティ

ビジネス環境が広範に変化する中でファシリティ、装置、工場システムの寿命を延長させる必要性から工場の汎用性、拡張性、スケーラビリティが要求されている。

#### ・ 拡張性

拡張性は多世代に渡る工場の有効寿命を延長することを意味している。これは、新規の技術やビジネスモデルの既存の工場に導入を、大規模な改造/再工事やその間の工場の混乱を抑え、最小限の新規設備投資と教育/訓練により実現する能力である。

#### ・ 汎用性

汎用性は工場の変化に適応する能力である。汎用性は多用途と機敏さの２つの要素からなる。多用途は工場の適応性をどれくらいに伸ばすことができるか、例えば、コスト効果範囲内で DRAM の工場を Logic の工場へ変更もしくはその逆が可能か、ということであり、機敏さはいかに早く一つの運用モデルから他のモデルへの変換、例えば、多量/少品種生産から多量/多品種生産への変換ができるか、といったことである。

#### ・ スケーラビリティ

スケーラビリティはシステム固有の能力であり、基本システムの広がりがどれくらいまで可能かと言うことを意味している。例えば、5,000 枚の処理能力である工場ソフトウェアシステムを 7,000 または 8,000 の能力に拡張することができるか、である。

これらの能力は独立なものではなく、その要求レベルは供給分野、製品、需要の変化、リスクに対する経営基盤などのビジネスドライバに依存し決定されている。

### 1) 拡張性

近年の設備投資額の増大、世代/製品サイクル、市場の変化の中で、従来のように、市場の大幅拡大を基盤とした、新規技術の新規工場展開では投資生産性の確保が困難となってきた。既存のラインに対して最小限の投資、生産に対する最小限のインパクトで新規技術、新製品導入が出来る仕組みを構築する必要がある。新規技術に対応できる装置性能、構造が重要な要素となるが、合わせてこの変化に対応できる工場モデル、システム、自動化などの技術開発が必要となる。

### 2) 汎用性

今後の半導体工場では、大口径化の流れの中で、汎用 LSI とカスタム LSI が混流されて生産され则认为しているメーカーが多い。また、カスタム LSI に関しては投入の小ロット化が進むことが予想されるため、結果として生産ラインでのキャリア数が増加し、工程間・工程内搬送に多大な負荷を掛けることになる。同時に、真空引き等の製造装置での処理準備時間の増加、段取り頻度の増加によるスループット(throughput:単位処理能力)低下を発生させることが考えられる。一方、半導体製品のライフサイクルが短くなり量産ラインの中での開発や、それに伴う新製品の試作を QTAT で流したいという要望が益々増えるものと思われる。このように、多品種生産工場においては、スループットを確保すると同時にカスタム生産をサポートすることが求められている。

#### (a) 材料管理

ロットサイズが小さい製品を流す場合の効率化と柔軟性に対する解決策として、例えば、同一キャリアに多ロットを混載させ、それを分割せずに装置で条件を変えて作業する方法などが考えられる。ロットとキャリア及びウェーハとスロット位置の関係を工場システム側に管理させると共に、製造装置に対しても処理効率や、或いはプロセスを精密制御するための枚葉制御が必要となる。さらに将来的には、ウェーハ上のチップ単位での管理が必要となる可能性も視野に入れて検討する。

#### (b) QTAT

特急ロットを速く流すことに関しては、前述のように、装置バッファ上での特急ロットの追い抜きや着工順番の変更など、特急ロットの処理待ち時間を最小限とする仕組みを、装置やホストシステムで対応していくことが必要である。各装置での処理順番が決定した後に、ロットの処理を割り振られた装置がダウンした場合などの再スケジューリングの自動化、リアルタイム化も進めて行かなくてはならない。将来的には、プロセス処理の枚葉化率の向上と仕掛けりの削減により、ラインの平均工期を短くすることも検討していく必要がある。

### 3) スケーラビリティ

90 年代は、効率的で収益性の高い工場としてより大きな工場(20,000 ~ 40,000 枚/月)に移行した時代であった。しかし、今後、大口径化と微細化の加速による設備投資の巨額化に対し、最小の投資での生産開始とその後の段階的な拡張展開が予想され、その過程においてロスを低減させる工場、製造装置、インフラ、システムのあり方が求められる。

#### (a) AMHS

このような段階的な立ち上げが前提となるため、AMHS 機器にも拡張性が要求される。同じ工場

も、フェーズに分けた立ち上げが進み、前のフェーズと異なったベンダまたは世代の機器が統合されていく可能性がある。工程内搬送、工程間搬送、ストッカに関してインターフェースの標準化が必要である。また、ホストシステムに於いても、工場により搬送メーカが変わってもシステムも変更せずに済むような、ホストシステムから互換性を持った AMHS を統合するシステムの標準化も必要である。

#### (b) 製造装置

過大な装置能力は、新工場における展開初期では余剰のコストであり、より小さいか、または、よりモジュール化された工場にとってはコストペナルティとなる。能力の標準的な増加量に基づいて装置を開発/設計することが求められる。また、プロセスの標準化を進めるとともに多様なプロセス処理が可能により融通のきく装置を供給して最適化されたコストと生産能力のモジュールを与えることが重要となる。

#### (c) 工場モデル

半導体事業のビジネスモデルの変化、製造装置のスケラビリティの進展などは生産規模に大きな影響を与える。どのビジネスモデルにどの工場規模が最適化は定かではないがコスト、生産性などについての評価からメガファブとモジュールファブ(工程群や装置群をモジュールとして考え、それを最適化して組み合わせることによって作られた工場)のあるべき姿を検討する必要がある。ファシリティに関しては、要求された段階的な立ち上げ規模に対応するだけでなく、今後、更に厳しくなると予想される ESH の要求、法的規制の強化に対する適応力も確保しなくてはならない。また、プロセス変更に起因した新材料に対応も要求される。生産ラインを止めずにこれらの変化に対応した拡張性を持つことが課題である。

### 2 - 8 - 4 解決策の候補技術

#### (1) 技術的要求(technology requirements)

技術的要求を検討することは前述した挑戦課題の達成に必要である。その結果として、工場を互いに関連し合う機能から以下の5つの技術項目に分類し、挑戦課題への解決策を検討した。

- ・工場運用：工場内の生産を制御する運用方針と手順の組み合わせ
- ・製造装置：検査/プロセス装置と工場における他の構成要素と装置のインターフェース
- ・材料搬送システム：工場内における材料の移送、保管、認識、トラッキング及び直接的、間接的な材料の制御
- ・工場システム：コンピュータのハードウェア、ソフトウェア及び、製造関連の支援システム、スケジューラ、装置/材料管理、プロセス制御など
- ・ファシリティ：建家のインフラストラクチャ、用力、モニタリングシステム

注) ファシリティについては日本側としての検討は時間、メンバー制約より今年度は見送り、来年度以降に整合を実施する。

### 1) 工場運用(図表2 - 8 - 4)

工場の運用方針は、各企業での色々な要素に合わせて決定される。これら要素には、その会社の事業戦略、工場の規模、品種の数、混流生産の度合い、技術の成熟度、製品デザイン、構築済みの自動化のタイプ、情報システムのレベルなどがある。これらに従って、各企業に応じた工場の運用方針が検討されているが、一方で、一般的な工場の運用方針を理論的に検討することも必要となる。これらの運用方針や関連するモデル検討には装置構成、製品構成、プロセスフロー、需要、生産制御などの種々の組合せを考える事が必要である。

これらのモデルは、事業としての工場パフォーマンスの検証およびベンチマーキングのツールとなる。すなわち、多品種か少品種か、大規模か拡張前提のミニファブか、工場と装置の延命か新設か、などの検討に活用される。

主要な技術要求項目には、サイクルタイムの低減、1キャリアへの複数ロット混載、ロット割付の自由度の増加、新工場及びプロセス、製品切替えの早期立ち上げや人員の低減が盛り込まれている。

### 2) 製造装置(図表2 - 8 - 5)

技術分野としての製造装置とは装置ユニット、装置コンセプト、リアルタイムプロセス制御などすべての関連物、工場とのインターフェースを対象としている。製造装置としてはプロセス装置と測定(インライン、オフライン両方)機器を含んでいる。

製造装置の設計と制御は、単位面積当たりのプロセスコストの維持と削減の重要な要素である。加えて、工場コストの上昇は継続して押さえないといけない。そうでなければ、産業は増加する投資コストを支えられなくなる、と同時に今までの様な成長率を維持できなくなる。製造装置はコストを維持厳しながら厳しくなるプロセス性能を満足し、更にスループットの向上を図らねばならない。主な技術要求項目を以下に示す。

- ・「相対的もしくは正規化された装置コスト」の低減(プロセス能力に対する装置コスト増の比率)
- ・装置の信頼性向上、可働率と利用率、装置全体の利用効率
- ・装置間ばらつきの低減、チャンバマッチングの達成
- ・データインターフェースの標準化による装置間での互換性の改善
- ・多世代をサポートする装置寿命の延長
- ・環境への影響を削減しながらのユーティリティと消費材料(非生産ウェーハを含む)の有効利用の達成
- ・クラス 100 ~ 1000(ISO 規格ではクラス 3-5)の工場環境においては高歩留まりで操作できる製造装置のミニエンパイロメント化

### 3) 材料搬送システム(図表2 - 8 - 6)

効率的で迅速な材料搬送への要求と組み合わされた人間工学と安全からの課題は、300mm以降のウェーハ径時代の材料搬送システムを明確にするための主要な原動力となる。25枚のウェーハを含むキャリアの正味重量から、材料搬送システムは完全自動化されることが要求される。しかしながら、これらシステムは全ての製造装置に対して直接的なインターフェースを持ちながら、十分な投資効果を上げなければならない。オペレータの安全性について考えると、材料搬送システムに対するオペレーターインターフェースは非常に重要な検討領域である。

図表 2 - 8 - 6 は、材料搬送システムに対する需要が増加するにつれ、ベイ間とベイ内に分かれた搬送システムが、それらが統合されたもの（装置間のダイレクト搬送システム）にまとめられていく必要があるという前提に立って作られている。この表が示すように故障を半分に減らし、その故障に対する修理時間も同様に減らさなければならない。スループットの向上も搬送時間の短縮とともに十分に達成されなければならない。一方、材料搬送システムは、工場における拡張性やフレキシビリティに対する要求に答えられるように設計される必要があり、マニュアル搬送のバックアップ（例えば PGV(personal guided vehicle)) や迅速なエラー復旧などの機能も備えなければならない。

#### 4) 工場システム(図表 2 - 8 - 7)

工場システムの開発は、キーとなる幾つかのビジネスドライバーと呼応している。300mm ウェーハ製造の到来に伴い、工場システムは工場生産性向上ため、今までよりはるかに多量のデータを自動収集し処理しなければならなくなる。このような製造技術の転換により、装置制御と自動スケジューリング、ディスパッチそして自動ファウンドリングシステムとの高度な統合が必要となってくる。工場システムはデータ収集を行い、先端プロセス制御システム(advanced process control system)と協調することで、プロセス変動の抑制、歩留まり改善、やり直しによる工期の削減、装置の校正やメンテナンスの削減を実現する必要がある。更に、多品種少量生産の工場では、同一キャリア内での複数製品・ロットの混載が要求され、そのサポートのためにウェーハレベルの材料トラッキングと制御が必要となる。

図表 2 - 8 - 7 に示すように、工場制御システムへの依存が高まることで、システムの信頼性が非常に重要になっている。工場に不可欠な機能に対する平均故障間隔時間(MTBF)は、6ヶ月から2年に延ばされている。故障が発生したときの復旧時間をゼロにするために、バックアップシステムも必要とされる。

工場でプロセスや技術がアップグレードされたときに、これらのシステムが非常に高い割合で再利用できるように、システムの柔軟性が要求される。更に、工場に不可欠なシステムやデータベースのインストールやアップグレードの時間は、工場運用への影響を最小限に押さえるレベルでなければならない。

これらのゴールを実現するためには、業界のインターフェース標準への厳格な準拠が要求される。特定の装置のみに通用するような標準或いはメーカーが独自に定義した標準を受け入れることは出来ない。



Year Technology Node Wafer Diameter	1999 180 nm 200 mm	2002 130 nm 300 mm	2005 100 nm 300 mm	2008 70 nm 300 mm	2011 50 nm 300 mm	2014 35 nm 450 mm
High Volume/Low Mix Factory requirements						
Factory cycle time per mask layer (non-hot lot) [1]	1.75 days	1.5 days	1.4 days	1.3 days	1.2 days	1.1 days
Factory cycle time per mask layer (hot lot)	1.2 days	1.0 day	1.0 day	1.0 day	1.0 day	1.0 day
Number of lots per carrier	One lot	One lot	One lot	One lot	One lot	One lot
High Volume/High Mix Factory requirements						
Factory cycle time per mask layer (non-hot lot) [2,3]	1.8 days	1.6 days	1.4 days	1.3 days	1.2 days	1.1 days
Factory cycle time per mask layer (hot lot) [2,3]	0.9 days	0.85 days	0.8 days	0.75 days	0.7 days	0.65 days
Number of lots per carrier	Single lot [4]	Multiple lots	Multiple lots	Multiple lots	Multiple lots	Multiple lots
Common Requirements across both factory types						
Groundbreaking to first full loop wafer out	< 18 months	< 16 months	< 14 months	< 12 months	< 11 months	< 10 months
Total number of operators and technicians in the factory	N	0.9 *N	0.8 *N	0.7 *N	0.6 *N	0.5 *N
Product/ process change-over time	12 weeks	10 weeks	8 weeks	6 weeks	5 weeks	4 weeks

Solutions Exist  Solutions Being Pursued  No Known Solutions

図表 2 - 8 - 4 Factory Operations Technology Requirements

#### 図表 2 - 8 - 4 の注

- [1] 工場の特急ロットの数は総ロットの 3%以下と仮定。  
 [2] 特急ロットあたりの平均ウェーハ数は 5～10 枚とする。  
 [3] 工場の特急ロットの数は総ロットの 10%以下と仮定。  
 [4] ロットあたりのウェーハ数は可変とする。


#### 図表 2 - 8 - 4 の説明


- Factory cycle time per mask layer : マスク当たりのサイクルタイム  
 時間とコストのキーマトリクス。例えば、あるプロセスが 20 枚マスクとしてマスク当たりのサイクルタイムが 1.5 日とすれば、トータルサイクルタイム（加工、搬送）は  $20 \times 1.5 = 30$  日。
- Number of lots per carrier : カセットキャリア内の品種数  
 各製造装置で、追跡、モニタ、プロセスする各キャリアあたりのロットの数。言い換えると同じロットと次のロットの間で同じ製造装置で連続モード（ノンストップ）で加工可能にする分流レシピの総数でもある。
- Groundbreaking to first full loop wafer out : 立ち上がり時間  
 新工場立ち上げのキーマトリクス。起工式から初のフルプロセスロットが出るまでの月数で表わす。
- Total number of operators and technicians in the factory : オペレータ、テクニシャン人員  
 工場のオペレーター総数は常に相対ベースでは減少を期待。

- ・ Process/product changeover time : プロセス/品種変更完了の必要時間

新製品、新プロセスが実際に製造装置が搬入されて、第一ロットが出るまでの時間を週で表わす。  
約 80%の装置が流用、約 20%の装置が入替え。炉、洗浄装置は入替え無し。

Year Technology Node Wafer Diameter	1999 180 nm 200 mm	2002 130 nm 300 mm	2005 100 nm 300 mm	2008 70 nm 300 mm	2011 50 nm 300 mm	2014 35 nm 450 mm
Relative capital cost [1]		< 1.3 * 200 mm [2]	< 98% of previous node	<98% of previous node	<98% of previous node	< 1.3 * 300 mm
Relative consumables, exhaust, emissions, and utilities		< 1.0 * 200 mm	10% less than previous node	10% less than previous node	10% less than previous node	10% less than previous node
Bottleneck production equipment OEE [3] (SEMI E79)	75%	87%	89%	91%	92%	92%
Average production equipment OEE [3] (SEMI E79)	55%	65%	71%	78%	80%	82%
Relative equipment footprint		<1.0 * 200 mm	<98% of previous node	<98% of previous node	<98% of previous node	<1.0 * 300 mm
Relative maintenance and spares cost		< 1.0 * 200 mm	<98% of previous node	<98% of previous node	<98% of previous node	< 120% of previous node
Overall factory non-product wafer usage (per wafer start)		< 16% of production	< 12% of production	< 11% of production	< 10% of production	< 9% of production
% Capital equipment reused from one process node to next	> 70%	> 0%	> 80%	> 80%	> 80%	>20%
Wafer edge exclusion [4]	3 mm	2 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
Production equipment lead time (months from order to full throughput capability) [5]	< 9 months	< 8 months	< 7 months	< 6 months	< 5 months	<5 months
Production equipment installation, including hook-up and qualification cost as a % of capital cost	< 6%	< 0.95 * of cost of previous node	< 0.95 * of cost of previous node	< 0.95 * of cost of previous node	< 0.95 * of cost of previous node	< 0.95 * of cost of previous node
Process equipment availability [6] (SEMI E10)	> 85%	> 90%	> 93%	> 95%	> 95%	> 95%
Metrology equipment availability [6] (SEMI E10)	> 90%	>95%	>95%	>98%	>98%	>98%
Number of process recipes per carrier	Single	Multiple	Multiple	Multiple	Multiple	Multiple

Solutions Exist 

Solutions Being Pursued 

No Known Solutions 

図表2 - 8 - 5 Production Equipment Technology Requirements

図表2 - 8 - 5の注

- [1] ムーアの法則では毎年機能あたりのコストを 29%低減することが必要とされている。リソグラフィーの改善により年 15 ~ 20%コスト低減が可能となる。残りはオペレーションの効率、コスト低減、サイクルタイム低減などの工場の生産性改善により達成しなければならない。工場コストの大きな部分を占める製造装置にとっては重要な課題である。
- [2] I300I 工場ガイドライン参照:1.3 の比率は V4.0 参照 Daniel Seligson の論文 “300mm プロセスの経済学、
- [3] 1998 ロードマップから再利用
- [4] 装置の基本的性能に関連する
- [5] このラインはサプライチェーンマネジメントのためのより良い知見を得ることを意味する。
- [6] 装置の可働率はすべての要素を含む。例えば、プロセスチャンバ、ロードポート、ウェーハ搬送システム、コントローラ、ミニアンパイロメントなどである。

図表 2 - 8 - 5 の説明

- Relative capital cost : 相対的投資コスト

130nm ノードに対して、(300mm 装置の投資コスト/300mm ウェーハのスループットの値)と(200mm 装置の投資コスト/200mm ウェーハのスループットの値)の比率である。100nm ノードとそれ以降に対しては、投資コストはスループットを同じとして前のノードの 98%である。

- Relative consumables, exhaust, emissions, and utilities : 相対的な消費材料、排気、廃棄物、ユーティリティ費用

130nm ノードに対して、(300mm 装置の消費材費/300mm ウェーハのスループットの値)と(200mm 装置の消費材費/200mm ウェーハのスループットの値)の比率である。排気、廃棄物、ユーティリティ要求に対しても同じ方法を適用している。100nm ノードとそれ以降に対しては、消費材費はスループットを同じとして前のノードの 90%である。地球的な警告と ESH の主導により付加的に厳しくなる項目もでるだろう。

- Bottleneck production equipment OEE : ボトルネック装置の OEE

能力的にボトルネックとなる装置の総合的な装置効率のこと。典型的には、ボトルネック装置は工場内で最も高価な装置である。[OEE の定義については SEMI E79 参照.]

- Average production equipment OEE : 能力的に平均的な装置の OEE

能力的に平均的な装置の総合的な装置効率のこと。典型的には、ボトルネック装置は工場内で最も高価な装置である。[OEE の定義については SEMI E79 参照.]

- Relative equipment footprint : 相対的装置のフットプリント

130nm ノードに対して、(300mm 装置のフットプリント/300mm ウェーハのスループットの値)と(200mm 装置のフットプリント/200mm ウェーハのスループットの値)の比率である。100nm ノードとそれ以降に対しては、フットプリントはスループットを同じとして前のノードの 98%である。[ SEMI E72 参照 ここで用いるフットプリントは SEMI スタンダードでのコストフットプリントを意味する。]

- Relative maintenance and spares cost : 相対的メンテナンス、スペアのコスト

130nm ノードに対して、(300mm 装置のメンテナンス、スペアコスト/300mm ウェーハのスループットの値)と(200mm 装置のメンテナンス、スペアコスト/200mm ウェーハのスループットの値)の比率である。100nm ノードとそれ以降に対しては、メンテナンス、スペアコストはスループットを同じとして前のノードの 98%である。

- Overall factory non-product wafer usage (per wafer start) : すべての非生産ウェーハ使用量(投入枚数あたり)

非生産ウェーハの合計を同じ期間の投入された製造ウェーハで割ったもの。典型的な非生産ウェーハはテストウェーハ、モニタウェーハ、校正用ウェーハ、ダミーウェーハである。

- % Capital equipment reused from one process node to next : あるノードから次のノードへ再利用される主要装置の数量比(%)

ノードNからノード N+1 へ再利用される主要装置の数量比(%)。

例 : ノード N の X 台がノード N+1 で再利用されるとする。ノード N+1 の合計台数が Y とすると再利用率は X/Y と定義される。

- Wafer edge exclusion : ウェーハエッジの除去率

売れるチップを形成できないウェーハエッジからの領域(mm)

- Production equipment lead time (months from order to full throughput in factory) : 製造装

置のリードタイム (注文からフル稼働までの月数)

ある装置に対して購入の注文が出てから、工場内にインストールされ見積もった能力でウェーハが処理できるよう品質確認できるまでの期間

- Production equipment installation, hookup and qualification cost as a % of capital cost : 製造装置のインストール、フックアップ、品質確認のコスト。  
(インストールコスト+フックアップコスト+品質確認コスト)を装置コストで割った比率。%で表示
- Process equipment availability : プロセス装置の可働率  
可働率とは 100%から (スケジュールダウンタイム%+スケジューリングでないダウンタイム%) を引いた値。これらのダウンタイムは SEMI E10 で定義されている。
- Metrology Equipment Availability : 測定装置の可働率  
測定装置の可働率は SEMI E10 で定義されている。それは 100%から (スケジュールダウンタイム%+スケジューリングでないダウンタイム%) を引いた値。
- Number of process recipes per carrier : 1 キャリア内のプロセスレシピ数

Year Technology Node Wafer Diameter	1999 180 nm 200 mm	2002 130 nm 300 mm	2005 100 nm 300 mm	2008 70 nm 300 mm	2011 50 nm 300 mm	2014 35 nm 450 mm
Material handling total capital cost as a % of total capital cost	< 5%	< 3% [1]	< 2% [2]	< 2%	< 2%	< 3%
Transport system types within a factory	Interbay and intrabay	Interbay and intrabay	Some inter/intrabay and some direct (one integrated system)	One integrated system	One integrated system	One integrated system
MTTR (minutes) (SEMI E10)	30	20	15	15	12	10
Failures per 24 hour day over total system (SEMI E10)	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
System throughput						
Interbay transport (moves/hour)	1000	1200	1500	2000	2200	2500
Intrabay transport (moves/hour)	150	170	200	n/a	n/a	n/a
Stocker (moves/hour)	200	240	300	360	360	360
Stocker cycle time (seconds)	18	15	12	10	10	10
Factory wide carrier delivery time (in minutes)	Average=10 Maximum=20	Average=10 Maximum=20	Average=8 Maximum=15	Average=5 Maximum=15	Average=5 Maximum=15	Average=5 Maximum=10

Solutions Exist  Solutions Being Pursued  No Known Solution

図表 2 - 8 - 6 Material Handling Systems Technology Requirements

図表 2 - 8 - 6 の注

[1] 西暦 2 0 0 2 年 - 高スループット搬送

[2] 西暦 2 0 0 5 年 - ダイレクト搬送及びストッカの削減

図表 2 - 8 - 6 の説明

- Material handling total capital cost as a % of total capital cost : 総投資額における搬送機器への投資額比率 (%)

製造装置や建屋の総投資額中の搬送(ウェーハやレチクル、ベイ内外)ハードウェアの総投資の比率で%で表す。例えば、搬送機器の投資コストが 30M\$で、工場(装置や建屋コスト)投資が 1,000M\$であれば、この比率は 30/1,000 で 3% となる。

- Transport system types within a factory : 工場内の移送システムタイプ

ウェーハキャリア搬送のために工場内で使用される移送システムタイプ。典型的にはこれらは今日のベイ内及びベイ外移送システムをである。将来、ベイ内外の移送機能双方を果たす一つのシステムが必要となる。但し、これは一つのシステムを一つのサプライヤーから受ける意味ではない。このシステムは複数のサプライヤー(品種によりベストなもの)からの相互利用可能なサブシステムから構成されるものとなるであろう。

- MTTR : 平均修理時間

フルにインテグレートされたシステムに対する分単位での平均修理時間である。これは何らかのシステムコンポーネントが修理を受けている間の非計画ダウンタイム(SEMI E10にて定義)である。

- Failures per 24 hour day (over total system) : 24 時間当たりの故障(全システムに対し)

24 時間内でシステムを通してシステムコンポーネントの見込み故障数。[更に詳細な故障に関する定義はSEMI E10を参照のこと]

- System throughput : システムスループット

サブシステムによる時間当りの搬送移動回数である。一回の移動は一つのキャリアの一つのストッカから製造装置のロードポートもしくは一つのキャリアの一つの製造装置からの一つのストッカへの移動または、一つのキャリアのXストッカからYストッカへの移動もしくは一つのキャリアの同一ストッカの一つの蓄積場所からの他の蓄積場所への移動と定義される。




- Stocker cycle time : ストッカサイクルタイム

ストッカ内のロボットが蓄積場所またはポートのキャリア位置まで移動し、キャリアをピックアップして、同一ストッカ内のもう一つの蓄積場所またはポートに引き渡すまでの秒単位の要求される時間である。

- Factory-wide carrier delivery time : 工場規模のキャリア引渡し時間

工場内で一つのキャリアが一つの製造装置から他の製造装置に移送される分単位の時間。キャリア移動の要求開始から受け取る側の装置のロードポートにキャリアが移動を完了するまでの時間を示す。最大の引渡し時間は平均値 + 2 標準偏差として定義されるピーク能力を考慮される。

Year Technology Node Wafer Diameter	1999 180 nm 200 mm	2002 130 nm 300 mm	2005 100 nm 300 mm	2008 70 nm 300 mm	2011 50 nm 300 mm	2014 15 nm 450 mm
Factory systems cost including integration (% of capital)	< 3%	< 3%	< 2%	< 2%	< 2%	< 3%
MTBF for mission critical applications (months)	> 6	> 6	> 9	> 9	> 12	> 24
Mean Time to Recover for mission critical applications (minutes)	90	45	30	15	5	0
Factory system reuse	> 80%	> 80% of previous node	> 80% of previous node	> 80% of previous node	> 80% of previous node	> 80% of previous node
% of equipment to factory systems interface standards defined [2]	75% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	80% 450 mm	100% 450 mm
% conformance: equipment to factory systems interface standards [2]	100% 200 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 450 mm
% of factory systems to factory systems interface standards defined [2]	15% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	80% 450 mm	100% 450 mm
% Conformance: factory systems to factory systems interface standards [2]	0%	75% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 300 mm	100% 450 mm
Time to install/upgrade a mission critical application in a working factory (minutes)	< 60	< 30	< 15	0	0	0
Time to install/upgrade a mission critical database in a working factory (hours)	6-24	6-24	2	2	< 1	< 1
Number of process recipes per carrier	Single	Multiple	Multiple	Multiple	Multiple	Multiple

Solutions Exist  Solutions Being Pursued  No Known Solution 

図表2 - 8 - 7 Factory Systems Technology Requirements [1]

#### 図表2 - 8 - 7の注

[1] サプライチェーンマネジメントの標準化と準拠は、将来検討される必要がある。

[2] 450mm に対する標準化は、量産が始まる 5 年前に開始されなければならない(グローバルジョイントガイダンス(GJG) に一年、標準の開発に二年、開発と検証に二年)

#### 図表2 - 8 - 7の説明

- Factory systems cost including integration : インテグレーション含めた工場システムコスト

工場コスト全体の中で工場システムに使われた割合。初期投資に限定。ソフトウェアの保守と年間の運転コストは含まない。コンピュータハードウェア、アプリケーションソフト開発費、ソフトウェアライセンス費、ネットワーク及びインテグレーション費用を含む。

- MTBF for mission critical applications: 不可欠なアプリケーションの MTBF

不可欠なアプリケーションの[計画外]ダウンタイムに対する平均故障間隔時間(MTBF)。工場システム内の不可欠なアプリケーションとは、ウェーハ工場全体を稼働させ続けるのに必要なアプリケーションをいう(バックアップに記載)。MTBF は、月単位で実装アプリケーション毎に測定される。

- Mean time to recover for mission critical applications : 不可欠なアプリケーションの平均復帰時間

不可欠なアプリケーションの計画外ダウンタイムに引き続く平均復帰時間[上記の MTBF での故



障 毎]。工場システム内の不可欠なアプリケーションとは、ウェーハ工場全体を稼働させ続けるのに必要なアプリケーションをいう。平均復帰時間は、分単位で発生毎に測定される。

- Factory system reuse : 工場システムの再利用

工場システム(コンピュータハードウェアとソフトウェアの両方)がプロセス技術から次のプロセス技術に移るときに再利用される割合で、コストで測定される。

- % of equipment to factory systems interface standards defined : 装置と工場システム間インターフェース標準の定義率

技術ノード毎にロードマップで要求される装置コントローラと工場システム間のインターフェースで、業界標準が定義されたものの比率

- % conformance: equipment to factory systems interface standards : 装置と工場システム間インターフェース標準の準拠率

技術ノード毎にロードマップで要求される工場システムとのインターフェースの業界標準に対し、準拠している装置の比率

- % of factory systems to factory systems interface standards defined : 工場システムと工場システム間のインターフェース標準の定義率

技術ノード毎にロードマップで要求される工場システムと工場システムの間のインターフェースで、業界標準が定義されたものの比率

- % conformance: factory systems to factory systems interface standards : 工場システムと工場システム間のインターフェース標準の準拠率

技術ノード毎にロードマップで要求される工場システム間インターフェースの業界標準に対し、準拠している工場システムの比率

- Time to install/upgrade a mission critical application in a working factory (minutes) : 不可欠なアプリケーションを稼働中の工場にインストール/アップグレードする時間(分単位)

生産中の工場で、不可欠なアプリケーションをインストール或いはアップグレードするときの分単位のダウンタイム。ハードウェア、ソフトウェア、工場アプリケーション全体のデータベース部分のアップグレードの時間を含む。データベースのアップグレードでは、データベース方式の変更及びデータベースの中身自体のアップデートがされないことを前提としている。これらに対するシナリオは、次の指標 ” 不可欠なデータベースを稼働中の工場にインストール/アップグレードする時間(時間単位)”でカバーされる。

必要とされるアップグレードの頻度は、一年に一回以下であるべきである。それ以上の頻度でのアップグレードはユーザ要求による。

- Time to install/upgrade a mission critical database in a working factory (hours) : 不可欠なデータベースを稼働中の工場にインストール/アップグレードする時間(時間単位)

生産中の工場で、不可欠なデータベースをインストール或いはアップグレードするときの時間(Hour)単位のダウンタイム。工場アプリケーション全体のデータベース部分のアップグレードと再構成の時間を含む。

必要とされるアップグレードの頻度は、一年に一回以下であるべきである。それ以上の頻度でのアップグレードはユーザ要求による。

- Number of process recipes per carrier : キャリア内のプロセスレシピ数

製造装置に於いて、キャリア内のどの二枚のウェーハ間でも自動的にレシピとプロセスパラメータ

を切り替える機能を実現し、またそれを中断或いはマニュアル操作無しに連続的に行うという工場システムへの要求を示している。また、キャリア内の複数ロットのトラッキングとコントロールも含んでいる。

## (2) 解決策(potential solutions)

ファクトリインテグレーションの基本的到達目標は、単位面積当たりの一定コストの維持、ランプアップ時間の削減、新規ビジネスモデルへの汎用性の拡大である。三つの挑戦課題 - 複雑さへのマネジメント、工場最適化、そして汎用性/拡張性/スケーラビリティはこれらの目標に達成するためである。解決策は工場運営、製造装置、搬送システム、工場システム、及びファシリティで区分される。(図表2 - 8 - 8 ~ 11) この中で今年度は特に搬送システムについての検討を主体として行った。

### 1) 工場運営(図表2 - 8 - 8)

#### (a) サイクルタイム短縮と工場利用効率改善を実現する決定サポートツール

- ・ サイクルタイムと装置利用効率と特急ロットのトレードオフ解析ツール
- ・ ボトルネックモニタリングに基づくウェーハ投入支援ツール
- ・ 需要予測ツール
- ・ ロットのオンタイムデリバリー予測の精度向上ツール
- ・ オペレータ、テクニシャンのレベル、教育の最適化ツール
- ・ SCM(SUPPLY CHAIN MANAGEMENT) & 制御に向けた統合最適化手法(加工、搬送、組み立て、テスト、配送)
- ・ その他リソース、レティクル、スペアパーツの在庫量最適化ツール
- ・ テストウェーハの最適化ツール

#### (b) オペレーションコスト削減を実現ツール

- ・ リアルタイムスケジューラ、ディスパッチャーアルゴリズムとMHSの統合
  - 外部リソース、労働力、工場の状態を考慮 -
- ・ オペレータ、テクニシャンのリアルタイム最適配置
- ・ テストウェーハのトラッキング、制御
- ・ スペアパーツ有効利用トラッキング、制御
- ・ リアルタイム SCM & 制御

### 2) 製造装置(図表2 - 8 - 9)

- ・ 「相対的もしくは正規化された装置コスト」の低減(プロセス能力に対する装置コスト増の比率)
- ・ 装置の信頼性向上、可働率と利用率、装置全体の効率
- ・ 装置間ばらつきの低減、チャンバーマッチングの達成
- ・ データインターフェースの標準化により装置間で易しい操作性を改善
- ・ 多世代をサポートする装置ライフタイムの延長
- ・ 環境インパクトを減じながらのユーティリティと消費材料(非生産ウェーハを含む)の効果的利用の達成
- ・ クラス 100 ~ 1000(ISO 規格ではクラス 3-5)の工場環境において高歩留まりで操作できる製造装置のミニエンバイロメント能力(ファシリティ技術要求表参照)

### 3) 搬送装置(図表2 - 8 - 10)

#### ・簡単に立ち上げできるための項目

クリンルームへの据え付けに関する項目がまず考えられる。コンポーネント化・モジュール化した構成で、クリンルームへの固定方法に関する制約を減らし、調整を極力無くす方式が必要とされる。また、簡単に拡張できる機構も重要である。

立ち上げスピードを上げるための項目としては、ハード構成によらないソフト構造が求められる。ハードによって変わる必要のある項目はパラメータ化しておく必要がある。また、クリンルームに導入前に事前テストがモジュール毎に実現できることも、調整時間を短くするためには重要である。能力計算も仕掛かりを加味してできる必要がある。

保守を簡単にできるようにするための項目としては、まず、コントローラが無停止型であることが重要である。自動調整や自動予防保全ができる技術も開発しなければならない。バイパスができる構造や、トラブルの自動モニタリングや解析が出来、自動復旧ができるよう技術開発も必要である。ソフトのアップグレード等のためにシステム稼働を止めないですむシステム構築も望まれる。

#### ・搬送機器構成に関する項目

工程間と工程内あるいはストッカを含めて、標準化されたインターフェースをもってダイレクト搬送ができる装置構成が必要とされる。搬送車が直接装置から装置へ搬送する完全ダイレクト搬送が次に要求される。ホトリソ工程では、製品のキャリア搬送とレティクル搬送の同期ができなければならない。集中ストッカからの直接搬送も実現する必要がある。大規模なコンベヤシステムの開発も必要になってくる可能性がある。

#### ・保管に関する項目

クリンルーム外の大規模な集中ストッカが必要になる。また、モジュール化したブロックを継ぎ足して大きな容量のストッカを作ること考えねばならない。

#### ・搬送物の識別に関する項目

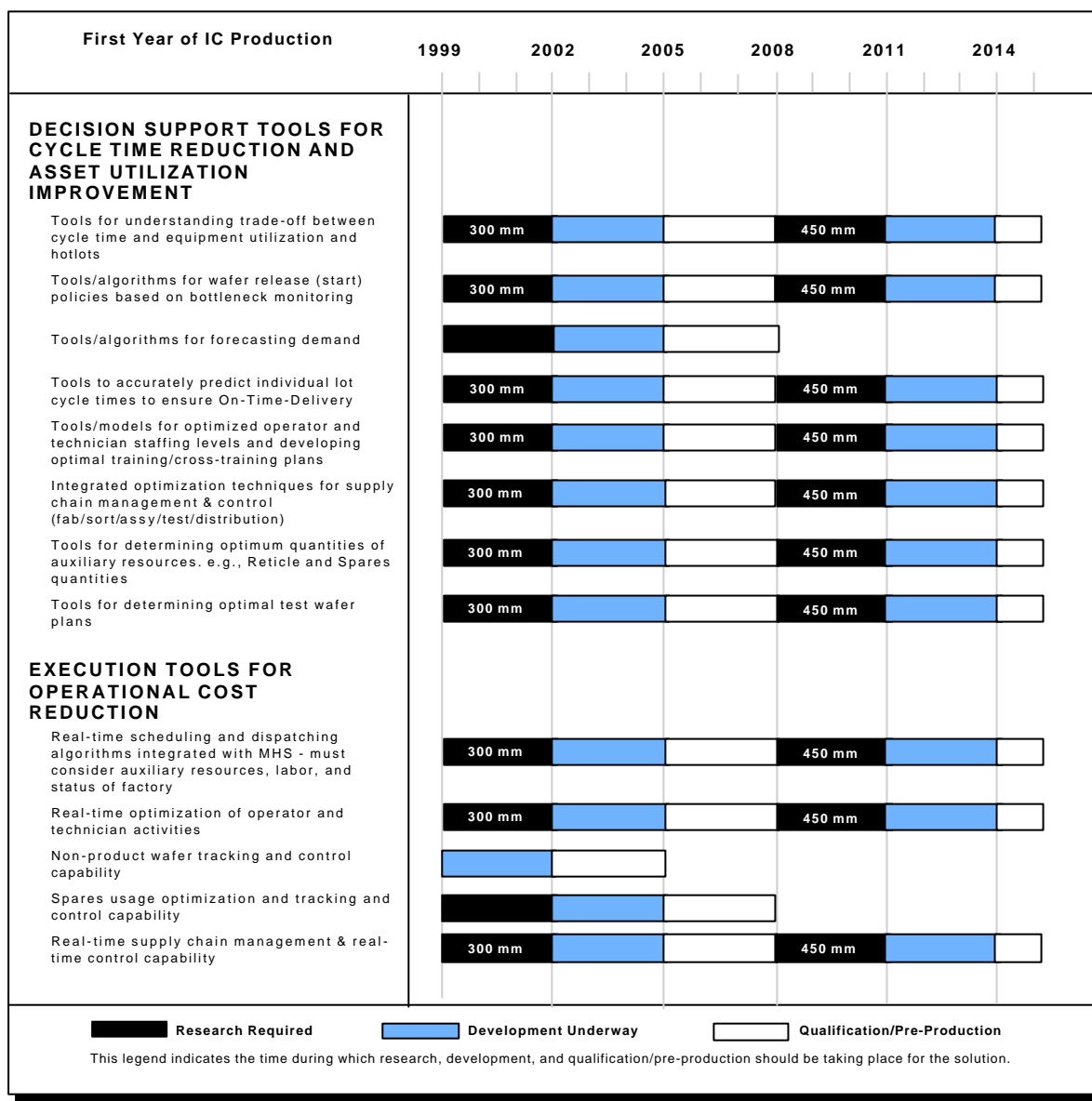
キャリアの識別はロットの統合・分割に使われるため、確実にできるシステムが必要である。ウェーハの自動識別は 450mm 時代には必ず必要である。300mm 時代のウェーハ識別は、限られた工程で使用されるであろう。

#### ・搬送制御に関する項目

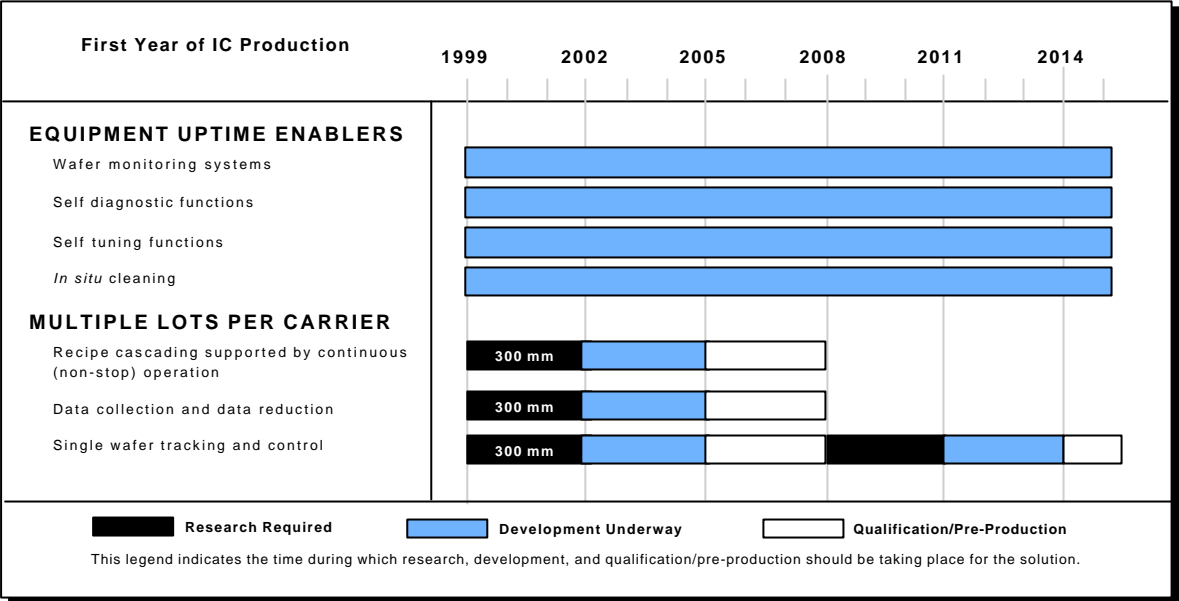
工程間と工程内を統合して制御できるシステムがまず必要である。実際の状況に合わせてスケジューリングできたり、予測配膳ができたりするシステムが必要である。仕掛かりを考えて搬送能力を予測し、ロットの移動を最適化するシステムも望まれる。また、仕掛かりを考えたレティクルの最適搬送やロット分割・統合対応の搬送システムも考えておかなければならない。

#### ・インターフェースの標準化に関する項目

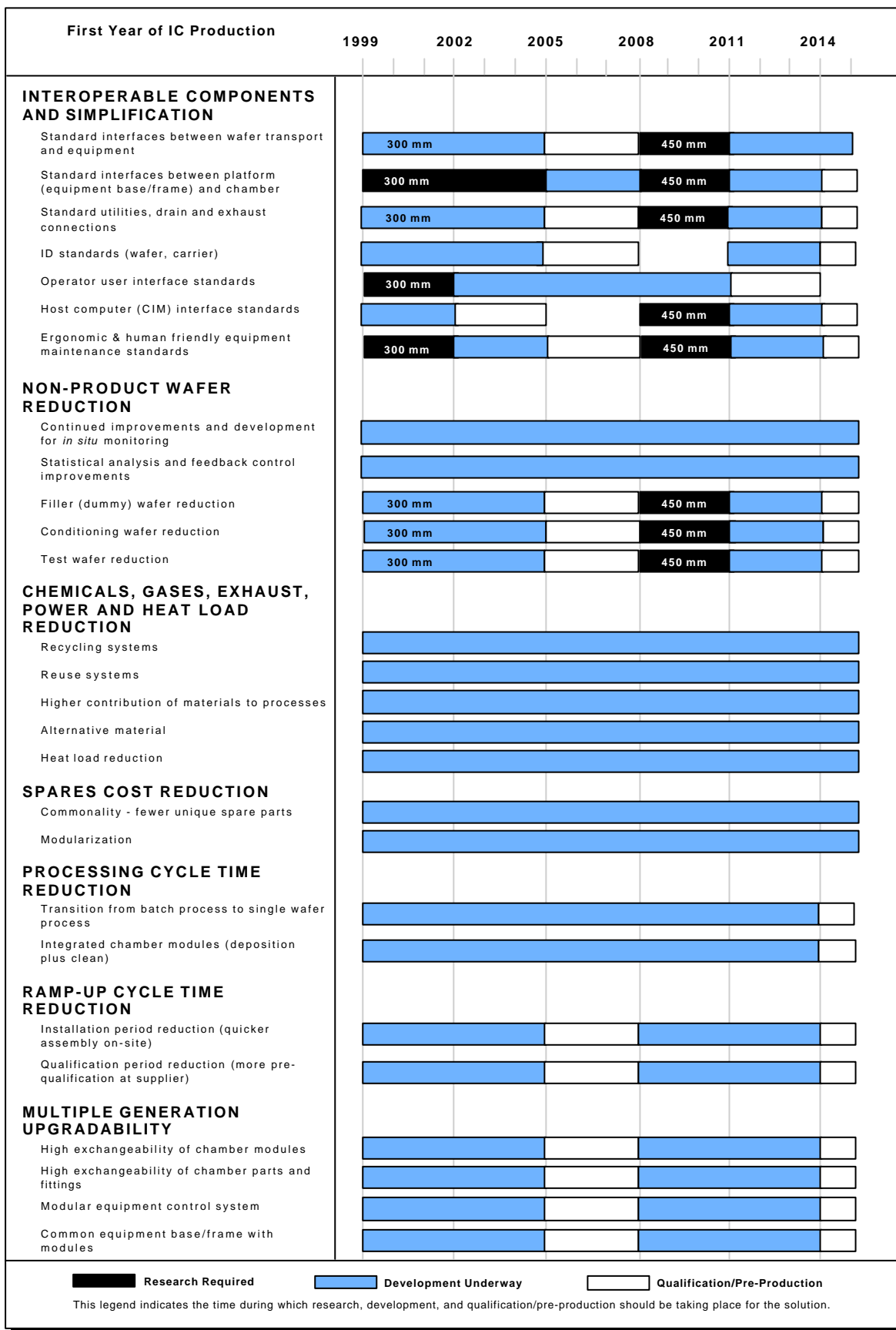
インターフェースのスタンダード化はフレキシビリティを上げ、コストを下げるために是非必要である。まず、製造装置と搬送装置間やストッカと工程間・工程内搬送とのキャリア受け渡しの標準化がある。また、ホストと搬送コントローラ間の標準化も必要である。次に、レティクルの受け渡しの標準化や工程間と工程内の直接のキャリア受け渡しの標準化も必要である。かなり先になるが、枚葉搬送と装置のインターフェースの標準化も必要になる。



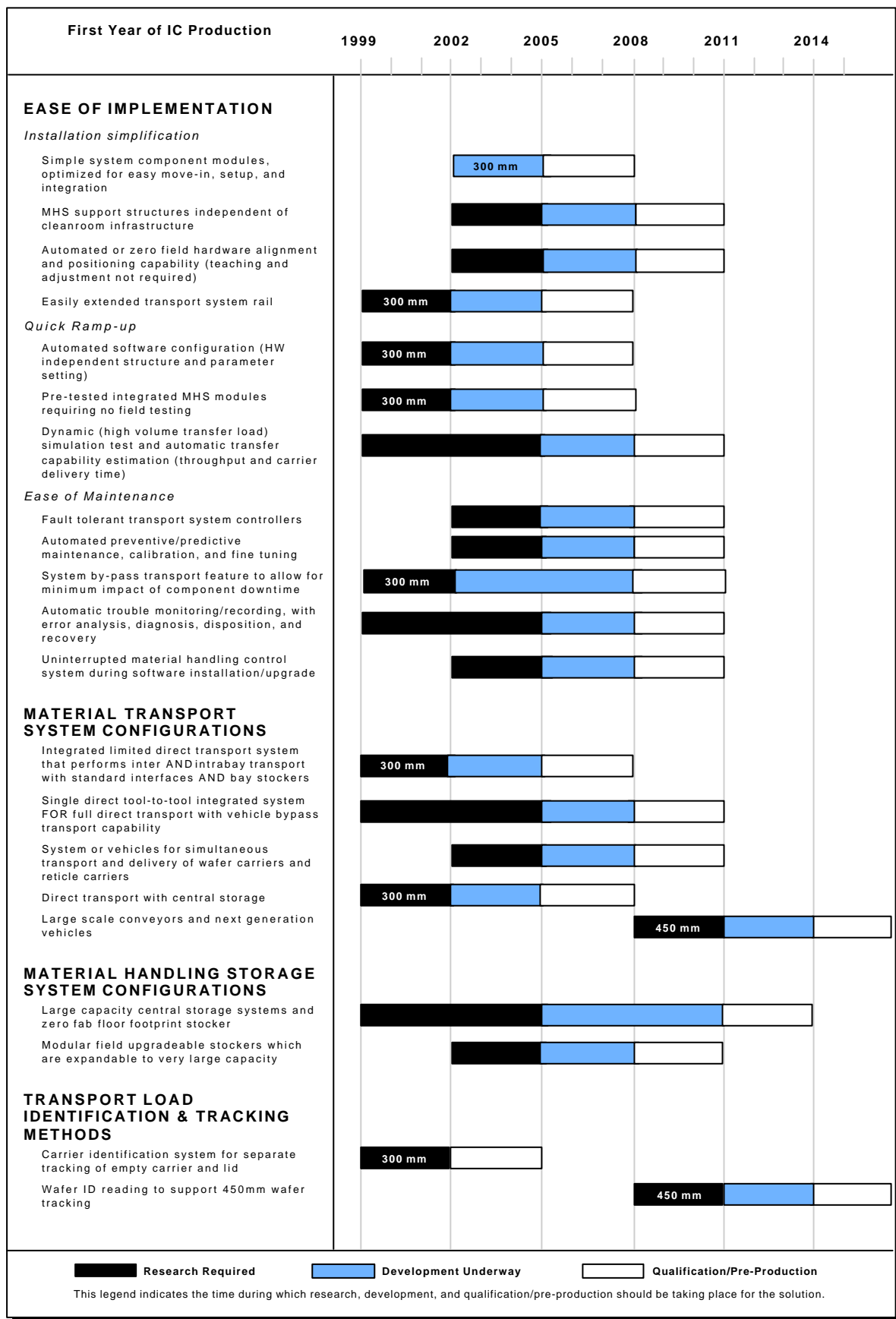
图表2 - 8 - 8 Factory Operations Potential Solutions



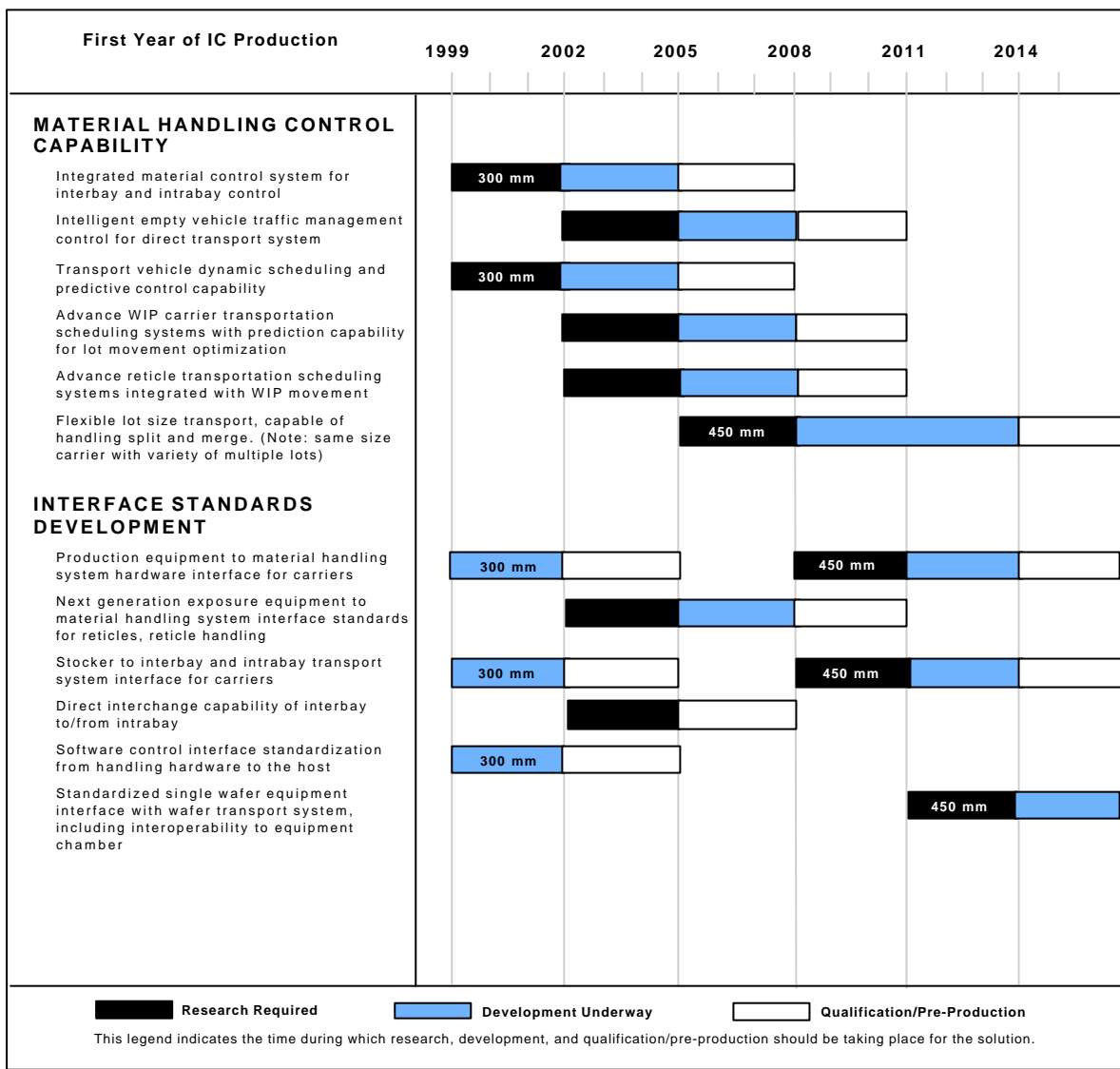
图表 2 - 8 - 9 - 1    Production Equipment Potential Solutions



图表 2 - 8 - 9 - 2 Production Equipment Potential Solutions (continued)

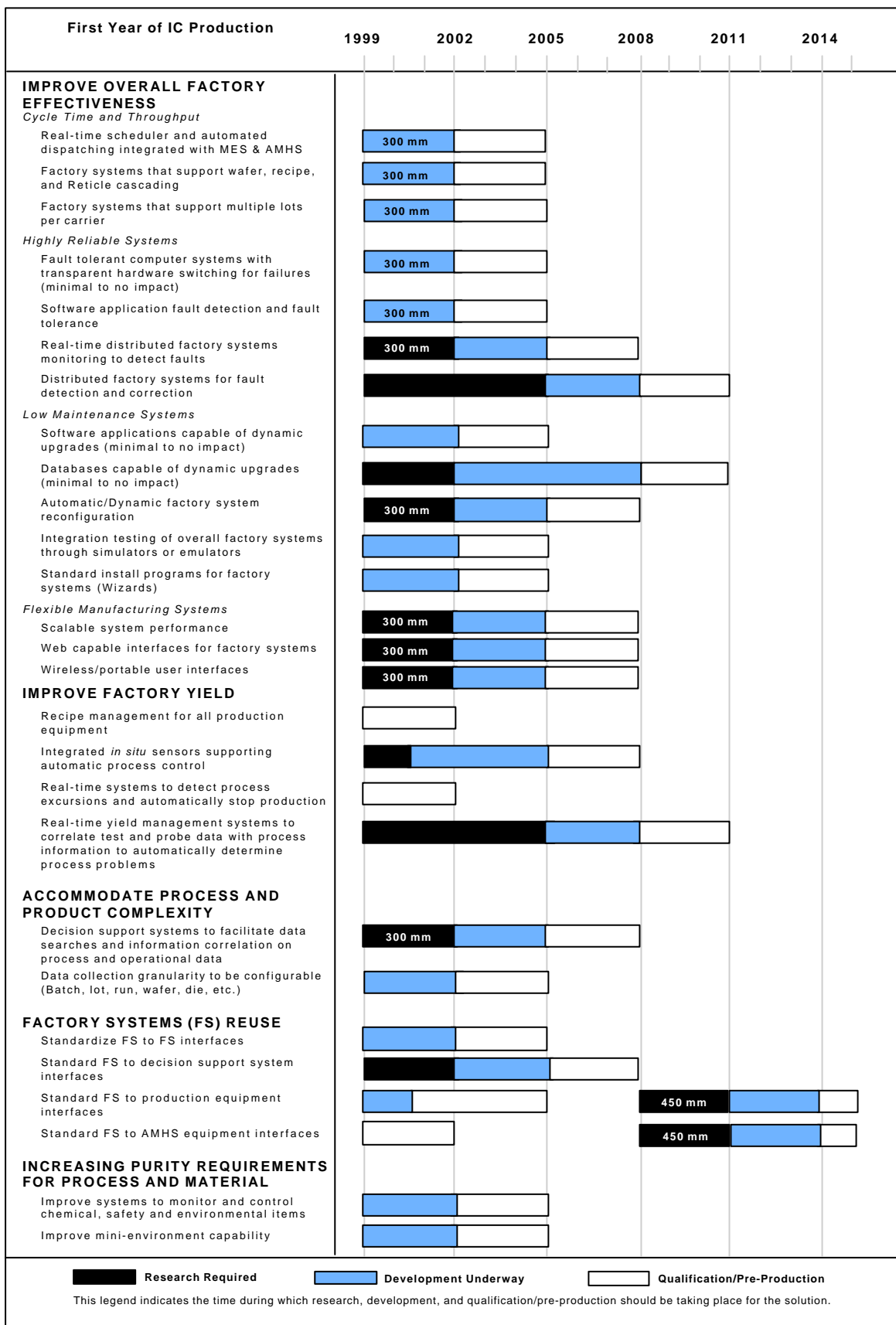


图表2 - 8 - 10 - 1 Material Handling Systems Potential Solutions



图表 2 - 8 - 10 - 2 Material Handling Systems Potential Solutions (continued)





图表 2 - 8 - 1 1 Factory Systems Potential Solutions

## 2 - 8 - 5 提言

### ( 1 ) 全体に関して

今回、FITWG( Factory Integration) では生産性に関わる技術各分野( thrust) に渡って、可能解まで提案したが、多くはまだ、technical requirement のレベルである。従って、半導体産業を今後、継続するためにも、これらを具体的なアクションプランにまでブレイクダウンし、各要件に対する具体的な解決策を用意しなければならない。

これらの個別の要素技術だけでなく、日本として半導体産業で米国を中心とした諸外国と競合していくためには、要素技術をインテグレーションする技術についても研究・開発も進めていかなければならない。ファクトリインテグレーション( FI) 技術、その中でもプロセスインテグレーション( PI)、装置インテグレーション( EI) 等の技術を積極的に研究・開発していく必要がある。

従来、日本ではこの分野での具体的施策の検討は個別企業( デバイスメーカ、サプライヤ) の範囲内に限られていた。これらの研究開発を急速に進めるためには、産業界の協力関係の構築が重要であるばかりでなく、官公庁、大学等の研究機関の協力も重要である。

### ( 2 ) 工場運用に関して

サイクルタイムやコストを低減するためのツールを開発するのが、この分野でのテーマになるが、各社の事情に合わせて、行われているのが現状である。従って、これらを包括化して扱えるようなモデルを共同で開発することが重要と思える。このようなツール、モデル開発にこそ、特に大学等の研究機関からの積極的な参加を促し、産業界としてそれに協力する体制の整備を急ぐべきと考える。

### ( 3 ) 製造装置に関して

半導体製造装置は、従来からの微細化対応加工能力やスループットの向上に注力され開発されてきた。今後は要素技術のみならず、本論にて述べたような工場運用と深くかかわる中での、効率的な装置開発が必要とされる。E I の技術研究に合わせ工場としての効率を踏まえた装置開発を進める必要がある。

### ( 4 ) 材料搬送システムに関して

材料搬送システムでは、装置から装置へのダイレクト搬送と幾つかの装置間を結ぶ枚葉搬送の開発が課題である。この開発は単に搬送システムの開発としてでなく、PI や EI の中で開発が進められる必要がある。

## 参照

ITRS'99 ファクトリインテグレーションに関して、IRC と共同で作成整合を進め、下記図表に関しては、ITRS'99 と同一のものを引用した。

### 図表の参照

図表 2 - 8 - 1 : ITRS'99 Figure 3 6 を引用

図表 2 - 8 - 2 : ITRS'99 Figure 3 7 を引用

図表 2 - 8 - 3 : ITRS'99 Table 51 を元に一部 STRJ にて改訂

図表 2 - 8 - 4 : ITRS'99 Table 52 を引用

図表 2 - 8 - 5 : ITRS'99 Table 53 を引用

図表 2 - 8 - 6 : ITRS'99 Table 54 を引用

図表 2 - 8 - 7 : ITRS'99 Table 55 を引用

図表 2 - 8 - 8 : ITRS'99 Figure 3 8 を引用

図表 2 - 8 - 9 : ITRS'99 Figure 3 9 を引用

図表 2 - 8 - 1 0 : ITRS'99 Figure 4 0 を引用

図表 2 - 8 - 1 1 : ITRS'99 Figure 4 1 を引用