

INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS

2009 EDITION
FACTORY INTEGRATION

THE ITRS IS DEvised AND INTENDED FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT ONLY AND IS WITHOUT REGARD TO
ANY COMMERCIAL CONSIDERATIONS PERTAINING TO INDIVIDUAL PRODUCTS OR EQUIPMENT.

訳者まえがき

この文書は International Technology Roadmap for Semiconductors 2009 Edition(国際半導体技術ロードマップ 2009 年版)本文の全訳である。

国際半導体技術ロードマップ(以下 ITRS と表記)は、米国、日本、欧州、韓国、台湾の世界5極の専門家によって編集・作成されている。日本では、半導体技術ロードマップ専門委員会(STRJ)が電子情報技術産業協会(JEITA)内に組織され、日本国内で半導体技術ロードマップについての調査活動を行うとともに、ITRS の編集・作成に貢献している。STRJ 内には 14 のワーキンググループ(WG: Working Group)が組織され、半導体集積回路メーカ、半導体製造装置メーカ、材料メーカ、大学、独立行政法人、コンソーシアなどから専門家が集まり、それぞれの専門分野の調査活動を行っている。

ITRS は改版を重ねるごとにページ数が増え、2009 年版は英文で約 1000 ページの文書となった。このような大部の文書を原文で読み通すことは専門家でも多大な労力を要するし、専門家であっても技術分野が少し異なると ITRS を理解することは必ずしも容易でない。STRJ の専門委員がその専門分野に応じて ITRS を訳出することで、ITRS をより親しみやすいものにすることができるのではないかと考えている。

なお、ITRS 2005 年版(英語の原書)までは、ウェブ公開とともに、印刷された本としても出版していたが、ITRS 2007 年版以降、は印刷コストが大きくなってきたこと、ウェブ上で無料公開されている文書の出版版を本の形で有償頒布しても需要に限られることなどのため、印刷物の形での出版を断念し、ウェブ公開のみとなった。ITRS の読者の皆様にはご不便をおかけするが、ご理解願いたい。ITRS 2009 年版の作成にあたっては、当初から電子媒体で ITRS を公開することを前提に編集を進めた。ITRS の表は原則として、Microsoft Excel のファイルとして作成し、そのまま公開することにした。

ITRS は英語で書かれている。日本語訳の作成は、STRJ 委員が分担してこれにあたり、JEITA の STRJ 担当事務局が全体の取りまとめを行った。訳語については、できる限り統一するように努めたが、なお、統一が取れていないところもある。また、訳者によって、文体が異なるところもある。ITRS の原文自体も多くは専門家による分担執筆であり、そもそも原文の文体も一定していないことも、ご理解いただきたい。誤訳、誤字、脱字などが無いよう、細心の注意をしているが、短期間のうちに訳文を作成しているため、なお間違いが含まれていると思う。また、翻訳の過程で原文のニュアンスが変化してしまうこともある。訳文についてお気づきの点や、ITRS についてのご批判、ご意見などを事務局まで連絡いただけますよう、お願い申し上げます。

今回の訳出にあたっては、ITRS の本文の部分のみとし、ITRS 内の図や表の内部の英文は訳さないでそのまま掲載することとした。Executive Summary の冒頭の謝辞(Acknowledgments)に、ITRS の編集にかかわった方々の氏名が書かれているが、こども訳出せず、原文のままの表記とした。原文中の略語については、できるかぎり、初出の際に、「ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように()内に原義を示すようにした。英文の略号をそのまま使わないで技術用語を訳出する際、原語を引用したほうが適切と考えられる場合には、「国際半導体技術ロードマップ(ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors、以下 ITRS と表記)」「国際半導体技術ロードマップ(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように和訳の後に()内に原語やそれに対応する略語を表示した。Executive Summary の用語集(Glossary)も参照されたい。原文の括弧()があつてそれを訳するために括弧を使った場合もあるが、前後の文脈の関係で判別できると思う。また訳注は「【訳者注:この部分は訳者の注釈であることを示す】」のように【】内に表記した。また[]内の部分は、訳者が原文にない言葉をおぎなつた部分であることを示している。訳文は厳密な逐語訳ではなく、日本語として読んで意味が通りやすいように意識している。ITRS のウェブ版ではハイパーリンクが埋め込まれているが、今回の日本語版ではハイパーリンクは原則として削除した。読者の皆様には不便をおかけするが、ご理解いただければ幸いである。

今回の日本語訳全体の編集は全体のページ数が膨大であるため、大変な作業となってしまいました。編集作業を担当いただいた、JEITA 内 STRJ 事務局の古川昇さん、関口美奈さんに大変お世話になりました。厚くお礼申し上げます。

より多くの方に ITRS をご活用いただきたいとの思いから、今回の翻訳作業を進めました。今後とも ITRS と STRJ へのご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

2010年5月

訳者一同を代表して

電子情報技術産業協会 (JEITA) 半導体部会 半導体技術ロードマップ専門委員会 (STRJ) 委員長
石内 秀美 (株式会社 東芝)

版權について

ORIGINAL (ENGLISH VERSION) COPYRIGHT © 2009 SEMICONDUCTOR INDUSTRY ASSOCIATION

All rights reserved

ITRS • 2706 Montopolis Drive • Austin, Texas 78741 • 512.356.7687 • <http://public.itrs.net>
Japanese translation by the JEITA, Japan Electronics and Information Technology Industries
Association under the license of the Semiconductor Industry Association

ー引用する場合の注意ー

原文(英語版)から引用する場合： ITRS 2009 Edition page XX, Figure(Table) YY
この日本語訳から引用する場合： ITRS 2009 Edition (JEITA 訳) XX 頁,図(表)YY
と明記してください。

問合せ先：

社団法人 電子情報技術産業協会
半導体技術ロードマップ専門委員会 事務局
Tel: 03-5218-1068 mailto: roadmap@jeita.or.jp

Table of Contents

ファクトリー・インテグレーション.....	1
はじめに	1
適用範囲	1
困難な技術課題.....	2
技術要求	3
ファクトリー・オペレーション.....	4
ファクトリー・オペレーションのチャレンジ事項	4
2009 年の新規な事項	5
製造装置.....	12
適用範囲	12
双方向可視化	12
無駄の削減	12
NGF要求	12
解決策候補.....	13
省エネと工場環境.....	13
材料搬送システム	14
材料搬送システム.....	14
450mm.....	15
工場情報制御システム	17
適用範囲	17
工場有効性の改善	17
工場歩留の改善.....	17
データ利用性.....	18
高度な信頼性と性能を有するシステム	18
ファシリティ	20
範囲と役割.....	20
歩留まりへの配慮	20
業界とファシリティの協働.....	21
解決策候補	24
クロスカット課題	32
リソグラフィ.....	33
環境、安全、健康(ESH : Environmental, Safety and Health)	33
歩留管理(Yield Management).....	34
気中分子汚染(AMC: Airborne Molecular Contamination).....	34
計測(Metrology)	34
静電気と電磁妨害の制御(Static Charge and Electromagnetic Interference Control).....	35
ファクトリーインテグレーションフォーカスエリア	35
無駄削減と能動的可視化	35

NGFと450mm移行の挑戦	36
省エネルギー	36
まとめ	37

List of Figures

Figure FAC1	Factory Integration Scope.....	2
Figure FAC2a	Factory Operations Potential Solutions	25
Figure FAC3	Production Equipment Potential Solutions.....	27
Figure FAC4	Material Handling Potential Solutions	28
Figure FAC5a	Factory Information and Control Systems Potential Solutions.....	29
Figure FAC5b	Factory Information and Control Systems Potential Solutions.....	30
Figure FAC6a	Facilities Potential Solutions	31
Figure FAC6b	Facilities Potential Solutions	32

List of Tables

表FAC 1	ファクトリー・インテグレーションの困難な技術課題.....	3
表FAC 2	2009 年以降のFI機能項目にたいする重要要素と課題	4
表FAC 3	ファクトリー・オペレーションの技術要求	1
表FAC 4	良好な装置可視化のためのコンテキストデータ	13
表FAC 5	製造装置技術要求	1
表FAC 6	材料搬送システムの技術要求	1
表FAC 7	工場情報制御システムの技術要求	1
表FAC 8	ファシリティの技術要求	1
表FAC 9	クロスカット課題.....	33

ファクトリー・インテグレーション

はじめに

ITRS のファクトリー・インテグレーション章は、要求された製品を適正量でスケジュール通りに目標コストで効率的に生産するために、必要な工場の構成要素全てを統合することに焦点を当てている。ムーアの法則(Moore's Law)を実現するためには、微細化、新材料、100%に近づく歩留り改善、ウェーハの大口径化、その他の生産性改善を最大限に活用しなければならない。言い換えると、全ての工場構成要素を完全に統合できる工場が必要となる。また、何十年間ものあいだ機能当たりコストを毎年 30%削減し続けるためには、あらゆるコスト削減の機会を活かす必要もある。

半導体の成功と市場成長は、主として機能単位の継続的なコスト改善によるところが大きい。これまで多くの要素(すなわちプロセステクノロジーの微細化、ウェーハサイズ大型化、歩留り向上、製造効率向上およびムダの削減)によってこれらの生産性向上が達成されてきた。積み重ねでない革新的な技術(すなわち high-k ゲート膜、メタルゲート、銅配線/low-k 膜など)を導入する時代になり、高集積で複雑な設計(すなわち SoC や SIP)により、生産性改善を従来の速度で維持することが困難になってきている。また、規模の経済性を追求した大規模工場建設だけでなく、テクノロジーのコストによって工場投資額は増え続けている。

ファクトリー・インテグレーション全体のスコープは、この業界の成長を遅くする恐れのある以下数個の挑戦課題に取り組むことである：

1. 複雑な工場と複雑なビジネスモデルの統合——半導体の急激な技術革新、ビジネス要件、および早い製品供給、多品種、市況変動への対応が、工場立上目標や歩留目標を達成するための効果的でタイムリーなファクトリー・インテグレーションをより難しいものにしている。工場は、複雑な市場への対応と顧客の要求を満たすために、多くの新機種装置とソフトウェアアプリケーションを統合しなければならない。平均売値 (ASPs: Average Selling Prices) が下降する市場における多品種少量生産はマスク費、製造、および工場統合を極端に難しくする課題がある。
2. 工場全体運用とリソースは、大きなムダを常に発生している。このため、より高度なムダの可視化と成長目標を達成するための継続的工場生産性改善の課題がある。
3. 製造装置の信頼性、利用性、そして多世代活用性において、製造装置の有用性や利用性が目標に追従できていない、そしてそれが投資と経費に対して非常に大きなインパクトを与えている。
4. 300mm 工場の課題を継続——これまで 300mm の課題に取り組んできたが、今後も以下のような効率目標の維持と改善に焦点を当てて継続する必要がある。1) サイクルタイム改善、2) 歩留まり改善、3) 生産性のムダの削減、4) プロセス制御能力の改善、5) ユーティリティ、電力消費、排出物の削減
5. 装置メーカーとデバイスメーカーは、次世代のウェーハ口径時代(450mm のコンソーシアムによるパイロットが 2012 年、量産ラインが 2014-2016 年)の準備をする課題がある。
6. ポスト Bulk CMOS——新規デバイスへの転換への移行は半導体産業における重要な変曲点を表している。Bulk CMOS を超えた新規デバイスがどのようなもので、それらが装置や製造にどのような影響を与えるかは、明確ではないが、重要であると予想される。
7. 次世代の大口径化と 300mm ラインの技術改善は、ともに重要な生産性の改善の要素である。すなわち、大口径化に先立って 300mm ラインの生産性ロスの改善を図ることは、大口径化への移行をよりスムーズなものにする。

適用範囲

半導体製造は、いくつかの製造領域にまたがる。現在ファクトリー・インテグレーションで取り扱っている範囲は、FEOL と BEOL を含むウェーハ製造である(図表 FAC1)。

統合された工場の要件を明確に理解し、同時に、測定および利用可能な測定基準を定義するために、ファクトリー・インテグレーションは半導体製造を実行するのに必要である 5 つの技術推進領域、または機能領域、に分割される。それらは、工場運用 (Factory Operations)、製造装置 (Production Equipment)、搬送

(Material Handling)、工場情報制御システム(Factory Information and Control System)、ファシリティ(Facilities)である。

5つの技術推進領域は困難な技術課題(Difficult Challenges)から技術的要求事項と解決策候補を抽出するために使われている。ファクトリー・インテグレーション章は、この5つの技術推進領域だけでなく、横断的問題、および5つの技術推進領域全てにまたがる重点注目分野にも取り組む。

- FO は、工場のビジネスに関して、その他の4つの領域のための技術課題と活動を導く重要項目である。FO は、ビジネスニーズにより要求される工場サービスの観点での技術課題の原要求を、示していることが多い。
- PE は、プロセス装置と計測装置を範囲としている。また、それら装置と工場の他の要素とのインターフェースも扱っている。装置起因の生産性ロスにも注目している。
- MHS は、搬送と保管、位置認識、ダイレクト搬送、非ダイレクト搬送を扱っている。MHS は自動搬送のハード、ソフトのシステムへの要求も扱っている。
- FICS は、工場のハード、ソフトのコンピュータシステムを取り扱っている。その中には、工場生産計画をサポートするスケジューリングシステム、装置制御・搬送制御を扱うシステム、プロセス制御を扱うシステムが含まれる。また、工場の生産性ロスを可視化し低減するための判断を支援するシステムも含まれる。
- ファシリティは、ビルディング、ユーティリティ、監視システムなどのインフラ関係を扱っている。

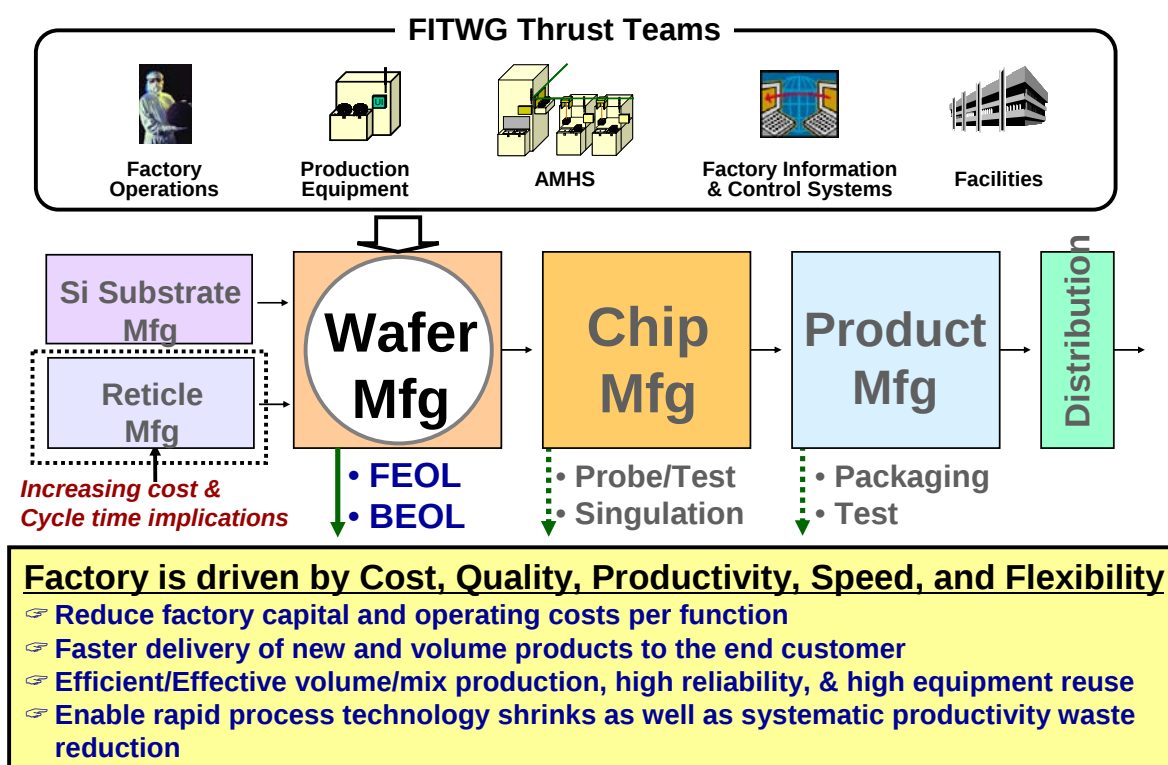


図 FAC1 ファクトリー・インテグレーションの適用範囲

困難な技術課題

ファクトリー・インテグレーションの困難な技術課題を、多世代の技術と5つの技術推進領域に関連させてまとめた。工場に対する短期の課題はビジネスや技術、必要最低限の生産性課題を含んでいる。

表 FAC 1 ファクトリー・インテグレーションの困難な技術課題

<i>Difficult Challenges through 2017</i>	<i>Summary Of Issues</i>
1. Responding to rapidly changing, complex business requirements	- Increased expectations by customers for faster delivery of new and volume products (design → prototype and pilot → volume production) - Rapid and frequent factory plan changes driven by changing business needs - Ability to load the fab within manageable range under changeable market demand - Enhancement in customer visibility for quality assurance of high reliability products
2. Managing ever increasing factory complexity	- Quickly and effectively integrating rapid changes in process technologies - Increased requirements for high mix factories. Examples are (1) significantly short life cycle time of products that calls frequent product changes, (2) the complex process control as frequent recipe creations and changes for process tools and frequent quality control criteria due to small lot sizes - Manufacturing knowledge and control information need to be shared as required among factory operation steps and disparate factories - Need to concurrently manage new and legacy FICS software and systems with increasingly high interdependencies - Ability to model factory performance to optimize output and improve cycle time for high mix factories - Need to manage clean room environment for more environment susceptible processes, materials, and, process and metrology tools - Comprehending increased purity requirements for process and materials
3. Achieving growth targets while margins are declining	- Ability to visualize cost and cycle time for systematic waste reduction from all aspects. - Reducing complexity and waste across the supply chain - Minimize the cost of new product ramp up against the high cost of mask sets and product piloting
4. Meeting factory and equipment reliability, capability and productivity requirements per the Roadmap	- Increased impacts that single points of failure have on a highly integrated and complex factory - More equipment reliability, capability and productivity visualization that can be used bidirectionally between equipment suppliers and users for more efficient task sharing - Design-in of equipment capability visualization in production equipment - Equipment supplier roadmap for equipment quality visualization and improvement, and reduction of Equipment Output Waste. - Reduction of equipment driven non-product wafers (NPW) operations that compete for resources with production wafers and Dandori operations¹
5. Emerging factory paradigm and next wafer size change	- Uncertainty about 450 mm conversion timing and ability of 300 mm wafer factories to meet historic 30% cost effectiveness. - Uncertainty concerning how to reuse buildings, equipment, and systems to enable 450 mm wafer size conversion at an affordable cost
<i>Difficult Challenges Beyond 2017</i>	<i>Summary of Issues</i>
1. Meeting the flexibility, extendibility, and scalability needs of a cost-effective, leading-edge factory	- Ability to utilize task sharing opportunities to keep the manufacturing profitable such as manufacturing outsourcing - Enhanced customer visibility for quality assurance of high reliability products including manufacturing outsourcing business models - Scalability implications to meet large 300 mm factory needs [40K–50K WSPM] - Cost and task sharing scheme on industry standardization activity for industry infrastructure development
2. Managing ever increasing factory complexity	- Higher resolution and more complications in process control due to smaller process windows and tighter process targets in many modules - Complexity of integrating next generation lithography equipment into the factory - More comprehensive traceability of individual wafers to identify problems to specific process areas - Comprehensive management that allows sharing and re-usages of complex engineering knowledge and contents such as process recipes, APC algorithms, FD and C criteria, equipment engineering best known methods
3. Increasing global restrictions on environmental issues	- Need to meet regulations in different geographical areas - Need to meet technology restrictions in some countries while still meeting business needs - Comprehending tighter ESH/Code requirements - Lead free and other chemical and materials restrictions - New material introduction
4. Post-conventional CMOS manufacturing uncertainty	- Uncertainty of novel device types replacing conventional CMOS and the impact of their manufacturing requirements on factory design - Timing uncertainty to identify new devices, create process technologies, and design factories in time for a low risk industry transition - Potential difficulty in maintaining an equivalent 0.7× transistor shrink per year for given die size and cost efficiency

技術要求

技術要求と解決策候補を真に理解するには、5つの統合的・補完的機能領域において各章の関係を分解しながら理解する必要がある。

¹ Dandori operations: Peripheral equipment related operations that are in parallel or in-line and prior to or following to the main thread PE operations. So-called in-situ chamber cleaning is another good example than NPW operations.

図表 FAC2 は、2009 年以降のファクトリー・インテグレーション機能項目に対する重要要素と課題の要約である。

表 FAC 2 2009 年以降の FI 機能項目にたいする重要要素と課題

Functional Area	Key technology focus and issues
Factory Operations (FO)	1) Systematic productivity improvement methodology of the current “lot-based” manufacturing method prior to 450mm insertion 2) Interdisciplinary factory productivity improvement method such as systematic factory waste visualization of manufacturing cycle times and factory output opportunity losses 3) Extendable and reconfigurable factory service structure
Production Equipment (PE)	1) 450mm production tool development 2) Hierarchical service structure for functional process execution and process control 3) Realization approach to reliable and predictable equipment availability and process performance variability loss reduction by EEQA (enhanced equipment quality assurance) and subsequent systematic and comprehensive equipment health monitoring endorsed by bidirectional equipment functional visibility 3) Run rate (throughput) improvement and reduction of equipment output waste that comes from NPW and other Dandori operations
Automated Material Handling Systems (AMHS)	1) Reduction in average delivery times, 2) More interactive control with FICS and PE for accurate scheduled delivery, 3) Less wait time waste realization by such as near-tool buffering
Factory Information and Control Systems (FICS)	1) Increased reliability, 2) Increased FICS performance for more complex factory control 3) Enhanced system extendibility
Facilities	1) Enhanced extendibility 2) AMC management, electric static control on masks, wafers, and, facility surfaces 3) Facility cost reduction 4) 450mm unknown requirements

ファクトリー・オペレーション

ファクトリー・オペレーションのチャレンジ事項

体系立てた工場生産性の向上

ファクトリー・インテグレーション技術の重要な目的に、工場生産性向上活動を支援することが挙げられる。この支援は、それぞれの業務階層の生産性に責任ある者に、生産性に関する関連する情報を渡すことと、改善施策の前後での生産性の違いを評価する手段を提供することである。既存設備についての日常的な生産性改善活動(CIP)に依拠して生産性を改善する余地を同定し、それを戦略的な生産性改善に一般化し拡大する方法論があるべきである。このような方法論が効率良く行われるためには、工場の活動情報が十分に合理的なデータ構造を持つように設計することが重要である。よく共通的に利用される生産性の評価指標が標準化され、種々の生産性改善活動が関連する担当者間で容易に、且つ、効果的に共有できるようにする必要がある。ファクトリー・インテグレーション技術委員会は、このような評価指標としては生産性の無駄を示すものが適当であると結論した。より詳しい記述についてはフォーカス・エリアの章を参照されたい。

工場役務提供の俊敏性と柔軟性

工場業務実施のための役務提供には多くの種類があるが、事業の要求に即応して変更できる必要がある。例えばプロセス制御方法は新しい世代のプロセス技術が導入されることで更新されるべきである。また、プロセス・レシピは新しい製品を導入する際に、変更する必要がある。工場の生産能力を決定付けるような管理業務や変更ための判断は常に俊敏に行なわれる必要がある。このような意思決定を支える機能には、

例えば能動的な生産性の可視化機能が挙げられるが、これらの機能は今後ますます重要性を高めるであろう。

高粒度の工場役務提供

より細かいタイミングを考慮したマテリアルハンドリング制御技術が、サイクルタイムの削減のために必須となっている。製造装置(PE)のよりリアルタイム性が高く、また時間粒度の細かい制御から、ウェーハ-to-ウェーハ制御のような、より高度な制御を要求している。スクラップウェーハを未然に防止するために、製造装置機能の健全性を従来より頻度高く、確認することが求められている。ウェーハの製造品質について、一段と粒度の細かいトレーサビリティが求められている。

階層的な業務構造

半導体製造に当たっては、近年益々複雑な判断を行う必要がある。この複雑化への対応と、制御判断の迅速化のために、製造制御が階層的な構造を持つように設計することが要求されている。階層的な構造はファクトリー・オペレーションの総合的な最適化を実現するために要求されている。この良い例が階層的品質管理である。この中では加工実施制御の品質と、ウェーハ上の加工の結果である品質とを別の階層として扱うように設計されている。このような業務構造の設計には、役務提供内容、業務間インターフェース、業務間の可視化性が重要なチャレンジ点となる。

2009 年の新規な事項

ファクトリー・オペレーション表

ファクトリー・オペレーション表(以下 FO TR 表)は高いレベルの要求事項と、競争力を維持するための改善要求の目標が、年毎の表現で記載されている。これらの情報は研究開発がより良い研究のフォーカスを保ち必要なイノベーションを実現することを支援するために提供されている。ここで言うイノベーションとは新しい製造概念、制御ポリシーあるいはモデル、あるいはアルゴリズムなどを含む。

TR 表の再構築

ファクトリー・インテグレーション技術委員会が FO TR 表を精査した結果、全部で 19 あった項目のうち 16 を抹消あるいは他の TR 表へ移動、6 つの新しい項目を追加することになった。FO TR 表の一番大きな変更点は 450mm 量産工場の挿入時期が、2008 年版の 2012 年から、今回 2014 年以降に変更されたことである。これは 2008 年夏の IRC(国際ロードマップ委員会)の決定に基づくものである。

大幅な生産性の改善

他の FO TR 表の主たる変更は 450mm の導入以前に現行の 300mm 技術を前提とした生産性の大幅な改善活動を意図的に挿入したことである。2009 年の改定に対してファクトリー・インテグレーション技術委員会は、先行する 5 年間で費やし、この生産性の大幅な改善活動の主たる内容は、現行の 300mm 技術に対して体系立てた生産性無駄の排除を業界を挙げて実施することであると結論付けた。

この生産性の無駄排除技術によって 300mm 製品ウェーハのコストを 30%低下させ、且つ、サイクルタイムを半減することで Moore's Law に追従することを目指す。この新しい技術の実装は今回の世界経済のダウンターンによって 2012 年から遅れ、2014 年までに実現されるだろう。この生産性改善活動は本ファクトリー・インテグレーション章の中では NGF(次世代工場)と統一して呼んでいる。

NGF スキーム

大きな生産性改善の具体的なスキームに付いては、300mmプライム或いは、NGFという呼称で少なくとも 4 年間業界で議論されてきた経緯である。ファクトリー・インテグレーション技術委員会はITRS活動のパートナーからの生産性改善スキームについてのインプットを咀嚼して取り込むことを行った。これらは、ファクトリー・オペレーションの役務提供の分析からガイドライン項目を抽出したJEITAのNGFガイドライン²とISMIの 19 点の生産性阻害項目リスト³である。

² http://www.jeita-smtj.com/pdf/300P_GLv2.pdf

³ <http://www.sematech.org/meetings/archives/ismi/8798/NGFBriefing.pdf>

ファクトリー・インテグレーション技術委員会による NGF の定義は、階層的な業務構造を持ち、業務間の可視化が設計された生産活動を実施できる NGF インフラストラクチャを用いた組織的体系的な生産性無駄の削減活動による大幅な生産性改善である。

NGF 活動に対して業界は 300mm と 450mm の両方に必要な技術の開発にフォーカスをすることができる。450mm 工場は 300mm で確認された技術によって利益を得ることができる。2009 年の FO TR 表は、NGF の要求事項と他の TR 表内容とを咀嚼して作られている。FO TR 表にある要求項目は NGF の要求を反映させるように変更されている。業界は FO TR 表の内容の意味するところを、他の TR 表を参照しながら理解する必要がある。

生産性無駄の指標

ファクトリー・インテグレーション技術委員会は、2009 年版に 2 つの新しい生産性無駄指標を導入することを決定した。それらは、ウェーハの待ち時間無駄 (WTW) と装置出力無駄 (EOW) であり、2014 迄に前述した大幅な生産性向上を実現することを意図している。ロードマップに多くの種類の生産性無駄を記載することは、ファクトリー・インテグレーション技術委員会のスコープを超える仕事となる。非常に複雑に絡み合った半導体製造工場内の生産性改善の方向をアドレスするためには、より総合的に生産性無駄を扱える指標を導入することが肝要である。この指標は総合的であり、工場レベルの生産性無駄が実際に測定できるものである必要がある。このような指標を使うことによって、新しい製造方法概念、製造制御モデルあるいはアルゴリズム開発が誘導されることが期待できる。

サイクルタイムの指標

工場にとって一番意味がある指標は組となった 2 つのサイクルタイムの指標である。これは最近特に製品のサイクルタイムが高混流ラインだけでなく低混流ラインでも重要性を増してきたからだけではなく、工場の合理的な運用の指標であると認識されているからである。指標の 1 つは、25 枚のロットサイズで生産される時のサイクルタイムであり、他は 12 枚のロットサイズで生産される時のサイクルタイムの要求値である。これらペアとなった要求値によって、高混流ラインと低混流線で要求される特性を表現するのが目的である。

異なった二つのロットサイズで表記された工場特性の要求表現に照らして、種々のロットサイズで運用されている製造ラインあるいは更に小さなロットで生産されている製造ラインであっても自身のサイクルタイムが如何に劣化しているかの評価を行うことができるだろう。これによって動的な工場生産性の改善を奨励することができるだろうし、対応する個別の業務、装置の稼働率あるいは装置の俊敏性の改善に繋ぐことができるだろう。このような動的である工場のサイクルタイムについての可視化は、低混流ラインであっても有用な分析として応用することができる。

サイクルタイムの無駄指標

工場レベルのサイクルタイム無駄指標 (以降 WTW: Wait Time Waste) は 1 つのウェーハが工場内で経験した全ての待ち時間の和をその製品のマスク層枚数で除した値として定義されている。スーパーホットロット (以下 SHL) の工場レベルのサイクルタイムは、そのラインとして可能な最小の WTW の結果として考えることができる。サイクルタイムの無駄の定義を、サイクルタイム指標の要求値 (今回は 25 枚) から、この SHL のサイクルタイムの値を減じたものがサイクルタイムの無駄を表していると考えられる。読者は FO TR 表の説明文を参照されたい。WTW は日々の工場操業データから実際に測定可能な値であるということは重要である。

装置出力無駄の指標

装置出力無駄の指標 (以降 EOW: Equipment Output Waste) は瞬時的な装置処理能力と装置メンテナンス等を含む、1 週間から 1 ヶ月といった十分に長い期間で平均化された装置処理能力との差として定義されている。瞬時的な装置処理能力とは、プロセスの変更なしに連続的に装置が処理を続けているときの処理能力を指す。工場レベルの装置出力無駄の指標は、ある製品の製造に使われた全部の装置の持つ EOW を足し合わせて同装置の台数で除し正規化した値として定義されている [%]。

ファクトリー・インテグレーション技術委員会では装置の一部分について概要的なサーベイを行い、今回の要求値を得たが、より多くのデータが収集されることで、掲載値が更新される必要がある。

装置のデータ利用と双方向可視化

工場操業に関わるエンジニアリングからの強い要求として、より多くの製造データを使い、より正確な判断をすることが要求され、これが所謂「データ爆発」をドライブしている。このエンジニアリングの要求を満たすために必須なことは、単に必要なデータを収集することではなく、複雑性の高い判断に資するアルゴリズムを開発し、必要な情報を持つ信号を使ったデータに基づいた適正な判断をすることであり、更にこの知性の所産をモデル化してその後の業務で再利用する事である。かくして工場で利用するデータは、このようなモデルと効率の高い使われ方に即して設計させる必要がある。

2009 年版の FO TR 表は新しい要求として「装置の双方向可視化性」を掲載している。SECS プロトコルを利用したデータ利用の歴史は、装置のユーザであるデバイスメーカーが専ら利用するというものであり、装置データはプロセス状態を表すパラメータをモニタするように設計されていた。更に装置データの利用方法は、特に APC や FDC の利用が盛んになった時期には、デバイスメーカーが競争のために秘密にする技術と考えられていた。この傾向はまだ依然として継続しており、装置サプライヤーによる装置データ利用を阻害している。

EEQA(強化された装置の品質保証:Enhanced Equipment Quality Assurance)⁴ は装置サプライヤーが装置の機能性能を調整し確認することを装置データを大いに利用して行い、更に半導体製造においてデバイスメーカーが同一の装置データを使って、また同様の手法で装置機能性能の健全性確認を行うことを引き継ぐというスキームである。

上述した装置サプライヤーと装置ユーザの双方への可視化のための装置データの設計には、無駄削減のために使用する情報を含むべきである。段取り作業(直接的な製品ウェーハへの加工作業以外の装置のプロセス換え準備作業等を指す)も可視化し、より無駄削減の機会を与えるように設計されるべきである。ITRS のファクトリー・インテグレーション技術委員会が装置の双方向可視化を取り上げる理由は、装置データの適正な設計がまだ初期の段階にあるからである。

450mm 移行に関連する指標

FO TR 表に掲載すべき 450mm に固有の要求事項について議論を行なった。2009 年度版に収録すべき 450mm 固有の役務提供についての要求事項は無かったが、300mm 工場での役務提供は 450mm 工場に適用できると考えられるし、また対応する 300mm の FO 要求事項は 450mm に共通であると考えられる。

300mm の FO 要求事項とは明らかに異なる 450mm の要求事項が存在する。一番明確な差異はサイクルタイムへの要求事項である。ビームを走査する装置(露光機、面欠陥検査装置など)では面積に比例して長い処理時間が不可避免的に必要なため、製品のサイクルタイムは 300mm に比較して長くなり、目標とする要求値も長い値となるべきである。

読者はこのようなウェーハ径への依存性を考慮しながら FO TR 表を読み解くべきであるが、300mm と同じ工場運転指標値を仮定するべきではない。生産性無駄の削減観点からは、450mm と 300mm との間に強い類似性が存在すると考えられるが、前述したように WTW については、より詳細な検討が必要である。450mm に固有の要求事項や、物理的な要求事項についての情報が明らかになれば、関連する TR 表に今後捕捉していく予定である。

枚葉生産システム

ファクトリー・インテグレーション技術委員会は、枚葉生産システムの実装は 2019 年からであると決定した。この究極の生産方式をロードマップ上に設定することは、より明確な分類学を以って NGF の属性を持つ要求事項をロードマップ化することに有効である。

枚葉生産方式は、ロット生産方式に起因する生産性の無駄、長い処理待ち時間、ロット切り替えに伴う装置出力機会の無駄等の全てを減ずることを狙ったものである。枚葉生産システムは生産装置、装置工場イ

⁴ “Requirement on Enhanced Equipment Quality Assurance upon Equipment Installation” <http://www.jeita-smtj.com/pdf/Request%20on%20EEQA%20English%20Translation%20V1.0.pdf>

ンタフェース、装置制御工場システム、自動搬送システムなどの制御システムの高度な制御機能要求に対応する必要がある。搬送制御はよい例であり、1枚1枚のウェーハについて、プロセスフローに沿ったプロセスの実行スケジューリングが極めて正確に立案されている必要がある。ウェーハ毎に装置への到着・出発時間が制御され、WTWとEOWについて最小化されるように制御される必要がある。予定されないプロセス装置の稼働停止があった場合などには、ただちにプロセス実行と搬送のスケジュールは、影響を受ける他のウェーハを含めて再計算されなければならない。プロセス制御はウェーハ単位での制御をできなければならないし、APCは極めて短時間に調整されなければならない。ウェーハレベルのAPCを実施するために、工場レベルの時間同期制御は必須の要件となる。

解決策候補

ファクトリー・オペレーションのポテンシャルソリューションは、製造制御方針についての戦略レベル判断支援のツールと、工場制御のための戦術レベルの制御のための判断支援ツールに分類できる。この2つのレベルのソリューションの構成機能は大きく異なるが、共に高混流製造ラインの効率的な運用には必須である。戦術レベルのツールは、工場内の状態遷移を知るデータに俊敏にアクセスできる必要がある。一方戦略レベルの判断支援ツールは、工場のより広い範囲からのデータに基づいた分析あるいはレポートの機能を持つ必要がある。正確に何処に、何時、どの製品を、どれだけ配送すればよいのかを決定することは良好な生産性維持には必須のことである。

製造装置への投資額は膨張を続け、現在では工場建設コストの75%を占めると言われており、製造装置の減価償却がウェーハコストの固定費として大きな部分を占める。ウェーハコストを改善するには、装置の稼働率、可稼働率、装置の段取り、セットアップ、あるいは、装置のプロセス限定による能力低下等を改善することが重要である。効率的な工場運用スケジューリングは、装置の稼働率を改善するに当たってキーとなる役割を担い、オンタイムの搬送によって、サイクルタイムの改善にも貢献することができる。

リアルタイムスケジューリングとディスパッチング、製造装置と自動搬送システムの統合制御、予防保全(PM)、予知保全、そして、関連するリソースのスケジューリング等の統合が、WIPの低減、オンタイムのデリバリー、最終的には工場能力の改善に必要である。

表 FAC 3 ファクトリー・オペレーションの技術要求

Year of Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	52	45	40	36	32	28	25	22.5
Wafer Diameter (mm)	300	300	300	300	300	450	450	450
Factory Cycle Time (days/ mask layer) of product lots								
for 25 wafer lots	1.50	1.50	1.50	1.40	1.40	1.20	1.20	1.20
for 12 wafer lots	1.00	1.00	1.00	0.84	0.84	0.72	0.72	0.72
Super hot-lot (average top 1% of lots)	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30
Factory Wait Time Waste (WTW) (days /mask layer)								
WTW for 25 wafer lots	1.18	1.18	1.18	1.09	1.09	0.90	0.90	0.90
WTW for 12 wafer lots	0.68	0.68	0.68	0.53	0.53	0.42	0.42	0.42
X factor	3.10	3.10	3.10	3.00	3.00	2.90	2.90	2.90
Factory Equipment Output Waste (EOW)	45%	45%	45%	35%	35%	25%	25%	25%
Bottle neck equipment								
Utilization	92%	92%	92%	93%	93%	94%	94%	94%
Availability	94%	94%	94%	95%	95%	96%	96%	96%
Average delivery time (minutes)	5	5	5	4.5	4.5	4	4	4
Overall NPW activities versus production wafers activities (wafer move count ratio)	7%	7%	<7%	<6%	<6%	<5%	<5%	<5%
Bidirectional equipment functional visualization	partial	partial	partial	yes	yes	yes	yes	yes
Single Wafer Manufacturing System								

Year of Production	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9
Wafer Diameter (mm)	450	450	450	450	450	450	450	450
Factory Cycle Time (days/ mask layer) of product lots								
for 25 wafer lots	1.20	1.20	0.50	0.50	0.40	0.40	0.30	0.30
for 12 wafer lots	0.72	0.72	0.50	0.50	0.40	0.40	0.30	0.30
Super hot-lot (average top 1% of lots)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Factory Wait Time Waste (WTW) (days /mask layer)								
WTW for 25 wafer lots	0.90	0.90	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
WTW for 12 wafer lots	0.42	0.42	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
X factor	2.90	2.90	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Factory Equipment Output Waste (EOW)	25%	25%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Bottle neck equipment								
Utilization	94%	94%	95%	95%	95%	95%	94%	94%
Availability	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%
Average delivery time (minutes)	4	4	3	3	3	3	4	4
Overall NPW activities versus production wafers activities (wafer move count ratio)	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%
Bidirectional equipment functional visualization	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Single Wafer Manufacturing System			yes	yes	yes	yes	yes	yes

Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known



ファクトリー。オペレーション要求項目の説明

Item	Explanation
Wafer diameter	All the values are for 300mm wafer. Values beyond 2014 will be amended as more 450mm requirements become available. Factory cycle time, for an example, is thought to become considerably longer than 300mm due to longer process time of beam equipment (litho, ion implantation, inspection, etc.) for 450mm
Factory cycle time per mask layer (days) 25 wafer lot	A key metric of time to money and measure of total time to process is a lot cycle time per mask layer. For example, if a process has 30 masking layers, and cycle time per mask layer is 1.5, then total factory (fabrication) cycle time based on 25 wafers per lot is: $30 \times 1.5 = 45$ days. Cycle time for a 12 wafer lot would be calculated accordingly.
Factory cycle time per mask layer (days) 12 wafer lot	
Super hot-lot (average top 1% of lots) factory cycle time per mask layer	Assume ~ 5 wafers per lot. Factories typically prioritize these lots over any other lots; tools downstream are reserved for the super hot lot. As a result, the cycle time for super hot lots is considered as the fastest speed of that fab line and for that product.
Wait Time Waste (days): 25 wafers in a carrier	Factory Wait Time Waste can be expressed as follows; $\text{WTW (average)} = \Sigma (\text{wait time}) / N [\text{day/mask layer}],$ Where N: # of total masks. Since the factory cycle time for SHL can represent the least Wait Time Waste cycle time, the equation can be rewritten with using cycle time values in the FO TR Table as the difference between the factory cycle time of production lots (of 25 wafers) and the super hot lot cycle time. $= \Sigma (\text{CT}_{25} - \text{CT}_{\text{SHL}}) [\text{days/mask layer}]$ where; CT : Cycle Time for production lots [days/mask layer] CT_{SHL} : Cycle Time for super hot lots/mask [days/mask layer] The subtraction needs to be compensated with the number of wafers between production lots and super hot lots. Waite Time Waste indicator is adapted for more direct visualization of waste or room to improvement in terms of factory cycle time.

Item	Explanation
Wait Time Waste (days): 12 wafers in a carrier	Waite Time Waste for 12 wafer lot would be calculated accordingly as description above.
X factor	X-factor is the total cycle time (queue time + hold time + raw process time + travel time) divided by the Raw Process Time (RPT). Raw process time for a lot at a tool is the time it takes to process a lot on the tool. Generally this time will be from when the tool starts to process the lot (and thus cannot be moved to another tool for processing) until the lot is finished and can be moved to the next operation. X-factor is shown for continuous improvement. Actual X-Factor values will depend heavily on WIP and raw process time for a given process technology or generation. X factor deteriorates if raw process time is shorten. X factor improves with lower WIP.
Equipment Output waste (%): 25 wafers in a carrier, high mix production	Equipment Output Waste is defined as normalized difference between instantaneous throughput and throughput averaged over a period that contains a usual production equipment usage cycle that includes maintenance procedure (such as 1 week to 1 month period). The instantaneous throughput (TH₀) is such that observed during continuous runs of wafers without process changes before and after. EOW for a single equipment can be defined as; $EOW = (TH_{25} - TH_0) / TH_0 \times 100 [\%]$ Where TH₂₅ is averaged throughput in a 25 wafers per a carrier manufacturing environment. Factory EOW is defined as a total sum over all the production tools used for that product divided by N the # of total tools [%]. $Factory\ EOW = \Sigma((TH_{25} - TH_0) / TH_0) / N \times 100 [\%]$ FI ITWG conducted a preliminary survey on limited production tools. Factory EOW may be refined as more EOW data become available. The values are for 25 wafers in a carrier, high mix production.
High mix operation	High mix is defined as the followings: • Running more than three technology generations concurrently in the same Fab • Running more than ten process flows within the same technology generation • Running more than 50 products concurrently through the Fab • Many of small lots of 1–10 wafers in size • Running an average of less than 50 wafers between reticle changes for each lithography expose equipment • Lot starts are based on customer orders. There is a daily variation in the number of lots you start with different products and process flows • At least five large volume products (product flows) with no one product having >50% of production volume
Bottle neck equipment utilization and availability	A bottleneck tool usually refers to a lithography tool. Availability is defined in SEMI E10 as “the probability that the equipment will be in a condition to perform its intended function when required.” Utilization is defined in SEMI E10 as “the percentage of time the equipment is performing its intended function during a specified time period.” Availability includes setup, idle and processing time, utilization is considered as time directly adding value of constraint equipment (usually lithography tools) measured in % without sacrificing cycle time. Constraint equipment utilization (normally lithography) is the pulse of the Fab and usually determines the output capacity.
Average delivery time (minutes)	The time begins at the request for carrier movement from the factory system and ends when the carrier arrives at the load port of the receiving equipment.
Overall NPW activities versus production wafers activities	Total equipment-driven non-production wafers processed on equipment divided by total production wafers processed on equipment, for the same time period, assuming that equipment is running at designed availability and planned utilization rates. Typical non-production wafers include test wafers, monitor wafers, calibration wafers. The requirement as shown is for all production (non-metrology) equipment.
Bidirectional equipment functional visualization	Equipment functional performance should be bi-directionally visible to validate equipment capability performance at the time of equipment delivery to both the equipment supplier and the user, and it should be visible to the user during that equipment is being used for production. Bidirectional visibility ensures equipment performance quality traceability and efficient technical information exchange between relevant equipment users and suppliers. Such bi-directionality is assured by standardized equipment data models and quality. Partial implementation means such as the equipment data available through SECS where equipment capability behaviors are usually not intended to be visualized. So-called second equipment data port is expected to provide such visibility.
Single wafer manufacturing system	Wafer manufacturing system that utilizes carriers with extremely small wafer capacities, or, in some cases, handles individual wafers is thought to be an enabler for the least WIP manufacturing method. 2009 Factory Integration roadmap captures such manufacturing method to become feasible due to the strong demand on very short product cycle time for 2009 implementation. The factory cycle time is expected to be reduced significantly although more future study is needed to represent appropriate cycle time requirements that meet the cost criteria.

製造装置

適用範囲

製造装置の章で扱うオリジナルの範囲は、プロセスと計測装置に関連する全てのファクトリー・インテグレーション要求を含む。また装置内蔵コントローラ、装置フロントエンドモジュール (EFEM: Equipment Front-End Module)、ロードポート、キャリア、ウェーハ搬送系、ホストシステムとのインターフェースのファームウェアやソフトウェア、装置への用力インターフェースも含む。ほとんどの製造装置と工場インターフェースは、300mm 移行時の標準化により規格化されている。さらに工場運用由来の指標は、明確にするために FO の TR 表に移動された。その結果 PE (Production Equipment) TR 表は、プロセスと計測装置の稼動安定性と静電界に関する要求のみに絞られた。

双方向可視化

高度な装置有用性のためには、優れた技術を結集した装置設計、EEQA で取り組んでいる様な装置機能の高度品質保証手順、フィールドサービスや装置ユーザーからのフィードバックに基づく一連の装置設計改良サイクルが必要である。これらの要求の全てが FO の評価指標で取り組んでいる製造装置の双方向可視化によってのみ保証される。製造装置は工場の最も重要な資産であり、製品品質は製造装置にかかっている。プロセス実行品質が、適切に策定された階層的品質保証と呼ばれるタスク共有スキームによって保証されることは重要である。階層的品質保証では、装置能力の健全さを確認するために装置機能振舞が EEQA を継承した機能性の健全さモデルでモニターされ、プロセスパラメータはプロセス健全さモデルに従ってモニターされる。装置内部活動の意味ある可視性のためには、装置内部制御が制御イベント発行によってなされているため、装置内部のコンテキストイベントデータの可用性が解析のために重要な意味を持つ。装置活動とファクトリレベル活動間のホストレベルのイベント相互関係解析を行うためには、高い粒度と精度が装置の外部へのイベント発生に必要である。

無駄の削減

もし生産性の顕著な向上が無く資本コストの増加が続いていけば、業界の成長率は将来持続できないであろう。製造装置の TR 表は、450mm に先行し目的とする顕著な生産性の向上に対応する。EOW 要求は 2009 年版では FO の TR 表にあるが、2010 年以降無駄の削減に取り組む中で、製造装置の章に EOW をブレイクダウンされるかもしれない。段取り運用や頻繁なレシピ変更による無駄は多品種運用においては、特に EOW が有効となるかもしれない。段取り運用の情報は可視化する必要がある。時間カウンターや消費カウンターを含むこれらの情報は、双方向可視化を通じて利用可能にする必要がある。段取りロスは焦点領域のセクションでさらなる議論する。

NGF 要求

高度のウェーハトレーサビリティ実装の要求が存在する。これには、プロセス経路、プロセスパラメータ、前述の段取りを含む。これらの要求に取り組むため更なる議論が必要かもしれない。ウェハレベル制御については長い間議論されてきた。そして FI ITWG は、ロットベースのウェハレベル制御が NGF のウェハレベル制御を実現する上で主たる技術であると結論を出した。

装置のプロセス制御はイベント駆動型手法で制御されている。こうした情報は装置内部コンテキストデータとして参照される。タイムスタンプは、製造装置内で発生している状況の読み解きに役立つもう一つのコンテキストデータである。装置活動データは、装置内部制御が、装置内部で発生している状況を示すこうした駆動イベントと共になされているため、こうした駆動イベントや”Task ID”と呼ばれる情報と一緒に提供されるべきである。ファクトリシステムデータの利用のために、製造装置自身のハートビート要求ではないが、タイムスタンプは高精度が要求される。ファクトリシステム管理下で追加のセンサーは正確なタイムスタンプのデータが収集されなければならない。ファクトリーによる更に精密で高速な制御管理が枚葉生産のために実装されなければならない。これは非常に高度な制御同期が真に必要な 2019 年に起こるだろう。

表 FAC 4 良好な装置可視化のためのコンテキストデータ

Data Usages	Data Usage “Key” Information	
	Equipment activity context	Time stamp for host observation
APC, FDC, FICS data usages	■ Tool name ■ Chamber index / STS ■ Processing index	Inter factory-level (Factory wide)
Tool-to-facility combination activity	■ Tool name ■ Chamber index / STS ■ Eq status ■ Processing index ■ Mutual control events	Inter-Tool-level External sensors need their own time stamps
Additional sensor data utilization		
Within-tool activity data utilization	■ Task ID ■ Processing index / Wafer locations ■ Internal control events	Intra-Tool-level +/- equipment heart beat frequency

解決策候補

ファクトリーとの製造装置インターフェースにより工場運用が促進するはずである。例えばシームレスに処理を行うためのキャリアの Just-In-Time (JIT) や Deliver-On-Time (DOT) 運用、プロセス性能の段階的な変化を安定させるための装置性能調整、ホットロット処理のためのウェーハやロット処理キュー操作などである。

同じプロセスリソースがほとんど同プロセス条件で使用される場合に、同タイプのレシピについてシームレスな処理を維持するために同一プロセスレシピの元で製造装置は同じようにウェーハを処理しなければならない。この要求は、製造装置がレシピの中身を理解する能力を保有する、或いはファクトリシステムが製造装置に段取り運用を伴わず如何なるレシピも受け入れるようにフラグを送るという意味を含む。このような制御や実装方法の要求を理解するためには更なる議論が必要となる。多くの運用制御はスケジュールに依存し、WIP を低減し、製造装置の相応な定期保守を容易にし、工場内で予想外のイベントに備えた柔軟性を得られることは特筆すべきである。またプロセス制御は高度再利用性のためのモデルベースになり、作業負荷や時間消費を削減する必要があることを強調していることも特筆すべきである。これらの目的達成に要求される革新に向けてさらに集中した研究が必要である。

省エネと工場環境

よりエネルギー効率の高い装置設計は、より高効率のパワー供給システム、加熱と放熱の方法、水の回収と再利用の最適化により実現される。新たな優先分野として、適時装置ユーティリティ消費削減のため、「smart idle」や「sleep mode」といった考えを装置運用上のモデルとして取り入れること、さらに新たな解決策を必要としている領域に、気中分子汚染(AMC)防止制御がある。最後に、高効率低コストの装置開発は、次世代ウェーハサイズへの移行に当たって不可欠なマイルストーンとなっている。

表 FAC 5 製造装置技術要求

Year of Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	52	45	40	36	32	28	25	22.5
Wafer Diameter (mm)	300	300	300	300	300	450	450	450
Process equipment availability (A80)	>92%	>92%	>92%	>94%	>94%	>95%	>95%	>95%
Metrology equipment availability (A80)	>96%	>96%	>96%	>97%	>97%	>98%	>98%	>98%
Maximum allowed electrostatic field on wafer and mask surfaces (V/m) for ESD	5,500	5,000	4,400	3,800	3,500	3,100	2,800	2,500

Year of Production	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9
Wafer Diameter (mm)	450	450	450	450	450	450	450	450
Process equipment availability (A80)	>95%	>95%	>96%	>96%	>96%	>96%	>96%	>96%
Metrology equipment availability (A80)	>98%	>98%	>98%	>98%	>98%	>98%	>98%	>98%
Maximum allowed electrostatic field on wafer and mask surfaces (V/m) for ESD	2,200	2,000	1,800	1,500	1,300	1,000	1,000	1,000

Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known



製造装置に求められる指標の説明

Item	Explanation
Process equipment availability (A80)	Availability is defined as 100% minus (scheduled downtime% + unscheduled downtime %). The metric in the table is the requirement for an 80% confidence (i.e., equipment is at or above this value 80% of the time) for each individual process (non-metrology) equipment, over a period of one week of 7 × 24 operations. Scheduled and unscheduled downtimes are defined in SEMI E10. Note: The value shown in the process equipment table is the minimum A80 value for all equipment - please refer to the Factory Operations requirements table for availability requirements specific to factory bottleneck equipment.
Metrology availability (A80)	Availability is defined as 100% minus (scheduled downtime% + unscheduled downtime%). The metric in the table is the requirement for an 80% confidence (i.e., equipment is at or above this value 80% of the time) for each individual metrology equipment, over a period of one week of 7 × 24 operations. Scheduled and unscheduled downtimes are defined in SEMI E10
Maximum allowed electrostatic field on wafer and mask surfaces (V/m) for Electric static discharge (ESD) prevention	Refer SEMI standards E78 and E43 for measurement methods. This guidance may not apply to EFM prevention. See Crosscut Issues section. (SEMI E78: Electrostatic Compatibility – Guide to Assess and Control Electrostatic Discharge (ESD) and Electrostatic Attraction (ESA) for Equipment. SEMI E43: Recommended Practice for Electrostatic Measurements on Objects and surface

材料搬送システム

材料搬送システム

効率的で迅速な材料搬送と組み合わせられた人間工学と安全からの課題が、300 mm ウェーハ以降の世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。自動搬送システム(AMHS)は、通常のプロセスフローで使われる全ての製造装置に対して直接的なインタフェースを持ちながら、十分な投資効果(ROI; Return on Investment)を上げなければならない。搬送スループットを大きく増加させ、搬送時間は短縮しなければならない。さらに、材料搬送システムは工場への拡張性、柔軟性、および規模拡大の要求に対応できるように設計される必要がある。

材料搬送システムへの技術要求テーブルは、材料搬送システムに対する需要が増加するにつれ、工程間と工程内に分かれた搬送システムが、統合されたサービスまたはダイレクト搬送サービス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。しかし全体が一つのシステムであるとか、一つのサプライヤ

一から供給されることを意味しているわけではない。システムは互換性のある複数サプライヤーからのサブシステム(最善の種類の組み合わせ)から構成されるかもしれない。

工場での最適化された装置レイアウト、処理装置と検査装置他の最適な統合により、より高い床面積活用をもたらす解決案が開発されなければならない。さらに、複数の建物、複数の階を結合し搬送することを AMHS に要求する、ますます大きな工場の影響について検討する必要がある。

効率的な生産のためには、WTW と EOW を削減する保管と搬送システムを考慮した WIP のスケジューリング、ディスパッチングシステムを検討する必要がある。

多品種小ロット生産の影響は検討されなければならないし、ロットサイズが小さくなるにつれて大きくなる搬送要求とのトレードオフについても評価される必要がある。IC メーカーによるレチクル自動搬送システムの採用をするか否かは工場のビジネスモデルによる。レチクル搬送システムはリソグラフ装置の床面積、スループット、容易な実装、容易な取り外しに悪影響を与えてはいけない。

450mm

450mm の物理的なインタフェースとキャリア (PIC) の検討と評価活動は既に始まっている。AMHS のデザインは装置近くでのウェーハ搬送/保管(EFEM、共有 EFEM、装置内保管庫等)の能力検討結果によっては変更されなければならないかもしれない。AMHS デザインに影響を与える他の項目は、450mm の工場のサイズ、工場レイアウト、AMC の必要性、工場が要求するスループットとサイクルタイムである。

無駄の少ない製造のため、効率化が可能な特定ツール間、プロセスの特定範囲における枚葉ウェーハス

表 FAC 6 材料搬送システムの技術要求

Year of Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	52	45	40	36	32	28	25	22.5
Wafer Diameter (mm)	300	300	300	300	300	450	450	450
Transport E-MTTR (minutes) per SEMI E10	10	10	10	10	10	5	5	5
Storage E-MTTR (minutes) per SEMI E10	20	20	20	20	20	15	15	15
Transport MMBF (mean moves)	25k	25k	25k	35k	35k	50k	50k	50k
Storage MCBF (mean cycles)	100k	100k	100k	150k	150k	200k	200k	200k
Stocker cycle time (seconds) (100 bin capacity)	12	12	12	12	12	10	10	10
Peak delivery time (minutes)	12	12	12	12	12	10	10	10
Downtime to extend system capacity when previously planned (minutes)	15	15	15	10	10	5	5	5
Time required to integrate process tools to AMHS (minutes per LP)	15	15	15	12	12	5	5	5

輸送もしくは非常に小さいロットサイズ輸送が長期的な要求として検討される必要がある。

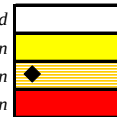
Year of Production	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9
Wafer Diameter (mm)	450	450	450	450	450	450	450	450
Transport E-MTTR (minutes) per SEMI E10	5	5	5	5	5	5	5	5
Storage E-MTTR (minutes) per SEMI E10	15	10	10	10	10	10	10	10
Transport MMBF (mean moves)	50k	50k	65k	65k	65k	65k	65k	65k
Storage MCBF (mean cycles)	200k	200k	300k	300k	300k	300k	300k	300k
Stocker cycle time (seconds) (100 bin capacity)	10	10	10	10	10	10	10	10
Peak delivery time (minutes)	10	10	10	10	10	10	10	10
Downtime to extend system capacity when previously planned (minutes)	5	5	5	5	0	0	0	0
Time required to integrate process tools to AMHS (minutes per LP)	5	5	5	5	5	5	5	5

Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known



材料搬送システムの要求項目の説明

Item	Explanation
Transport E-MTTR (min per SEMI E10)	Mean time to repair equipment-related failures (AMHS Transport); the average time to correct an equipment-related failure and return the equipment to a condition where it can perform its intended function; the sum of all equipment-related failure time (elapsed time, not necessarily total man hours) incurred during a specified time period (including equipment and process test time, but not maintenance delay downtime), divided by the number of equipment-related failures during that period. Notes: Refers to unscheduled, supplier dependent failures. Includes interbay and intrabay transport systems. Offline repair of components is not included in this time. Includes embedded software control systems (transport controllers). Does not include storage AMHS equipment or errors induced by the storage equipment. Does not include load port, FOUP carrier, or MES level software issues. Does not include reticle system.
Storage E-MTTR (min per SEMI E10)	Mean time to repair equipment-related failures (AMHS Storage); the average time to correct an equipment-related failure and return the equipment to a condition where it can perform its intended function; the sum of all equipment-related failure time (elapsed time, not necessarily total man hours) incurred during a specified time period (including equipment and process test time, but not maintenance delay downtime), divided by the number of equipment-related failures during that period. Notes: Refers to unscheduled, supplier dependent failures. Includes storage equipment load ports and embedded software. Does not include interbay or intrabay transport or incidents induced by these errors. Does not include FOUP carrier or MES level software issues. Does not include reticle system.
Transport MMBF (mean moves between failure)	Average number cycles (delivery from point A to point B) made by AMHS interbay or intrabay transport equipment before a person has to intervene to fix a failure. Number of transport moves / Number of supplier dependent unscheduled failures. Reference transport MPH definition for details on move.
Storage MCBF (mean cycles between failure)	Average number cycles (delivery from point A to point B) made by AMHS storage equipment before a person has to intervene to fix a failure. Number of storage cycles / Number of supplier dependent unscheduled failures per quarter. Reference cycle time definition for details on stocker cycle.
Stocker cycle time (seconds) (100 bin capacity)	Stocker cycle time is defined as the time (in seconds) from when the Host(MCS) issues the move command to the time the stocker signals completion with the move complete command to the host. The physical motion is the stocker internal robot moving to a carrier at a port or storage bin, picking up the carrier, and delivering it to another port or storage bin within the same stocker. Stocker cycle time shall be determined as the average of several different types of moves over a period of time. The moves should include all ports and all shelf locations. Each move needs to alternate between different carriers. The maximum MCS communication time is assumed to be 1 second.
Peak delivery time (minutes)	Peak delivery time is considered the peak performance capability defined as the average delivery time plus two standard deviations.
Downtime to extend system capacity when previously planned (minutes)	Impact to material handling system in terms of downtime, in minutes, of the material handling system, required for making connections to system track extensions or a new storage when provisions for this expansion were incorporated in the original design.
Time required to integrate process tools to AMHS (minutes per LP)	The downtime to the transport system when a process tool is integrated to the AMHS. Addition of tool occurs on a track with existing vehicle traffic (no bypass units around tools). Assume tool is placed correctly and physical tool move in does not impact the AMHS. System not stopped for PIO install (tool side). Time includes: hardware install on track, teaching LP, software updates, and delivery testing. Scope ends when all vehicles have capability to deliver to new LP.

工場情報制御システム

適用範囲

工場情報制御システム(FICS; Factory Information and Control System)の範囲は、コンピュータハードウェアとソフトウェア、製造実行と決定支援システム、工場スケジューリング、装置と搬送システムの制御およびプロセス制御を含んでいる。FICS は、歩留、工場運用、製造装置と搬送システムを含む ITRS によって扱われるいくつかの重要機能分野において、重大なインフラストラクチャと技術的な可能性を提供する。

工場有効性の改善

工場は速く生産性を最大限にし、かつ生産ロットと同様に優先度の高い(特急)ロットの目標生産率および生産時間を保全するために、予期しない装置停止あるいは製品スクラップに素早く対応するために、計画とディスパッチングスキームを急速に調整することができなければならない。これは、他のFICSアプリケーションへの構成変更や運用上のインパクトを包含している最適化モデルを要求している。計画目標は、単一の装置やクラスター装置の境界線を越えて、何を処理するべきか、最良の選択を行うことである。工場活動の広範囲の視野におけるスケジューリング要素は、工場における小さなエリア以上の決定をすることが可能である。効果はより大きな工場利用、より高いスループット、そしてサイクルタイム変動の削減となる。ビジネスレベルソフトウェアシステムでFICSアプリケーションの統合化は、供給管理のための正確な工場現場データおよび製品トラッキングの改善を提供する。解決策候補は、統合化のこのレベルを可能にする技術(例えばSOAP⁵/XML⁶)の標準化を必要とする。

工場歩留の改善

歩留改善は、FICS 解決策に強く依存している。Run-to-Run(R2R)制御、故障検知(FD: Fault Detection)、故障区分(FC: Fault Classification)、故障予測(FP: Fault Prediction)、統計的プロセス制御(SPC: Statistical Process Control)などを含む高度プロセス制御システム APC(Advanced Process Control)を利用するプロセス制御システム(PCS: Process Control Systems)は、広範に行き渡り、FICS 解決策の集約体となって行く。高度に統合された PCS 解決策は、サイクルタイム、条件出し立上時間、計画、計画外ダウンタイムなどの短縮や非製品ウェーハ、スクラップとリワークレベルの削減と同時に、歩留とプロセス能力の改善を可能にしている。ウェーハレベルやさらにサブウェーハレベルにおける R2R 制御はバーチャルメトロロジ(virtual metrology)を利用し、製品変動や保守イベントそしてデータ欠落に効率良く対応して行く。露光-エッチング-CD コントロールなどのモジュールやクロスモジュール制御解決策はより重要となり、R2R 制御能力は歩留、スループット、電気特性のような工場レベルのパラメータ目標値に関連してくる。

故障検知(FD)システムは利用性を拡大すると見られる逐次警報を増す装置データサンプリングのみならず、R2R 制御に繋げるバーチャルメトロロジシステムに入力するレシピステップの境目で始動を継続する。故障区分(FC)と故障予測(FP)は、技術と標準化のハードルにより、利用の拡大展開が遅くなっているプロセス逸脱の影響や問題解決の時間を削減することができる。SPC は現行の利用率や継続される専門領域によって成熟化する技術である。

FICS は、APC、生産実行システム(MES)、装置性能トラッキング(EPT: Equipment Performance Tracking)、工場スケジューラ/ディスパッチャおよび自動搬送システム(AMHS)の間の協力的な統合化を提供する。システムインテグレーションのこのレベルは、装置有用性を最大限にするために、適切な材料、ロット、ウェーハを適切な場所に適切な時期をもって配送することを確かにするために要求され、そして、ファブにわたって、インタフェース'B'およびアプリケーション集積化のための関連する標準の採用、制御診断用ネットワークの増殖および安全信号に、イベントドリブンと FICS、共通のデータウェアハウスおよびデータモデルの中心の再構成可能な監視制御能力によって可能になる。

⁵ SOAP: Simple Object Access Protocol, Service Oriented Architecture Protocol

⁶ XML: Extensible Markup Language

データ利用性

重要 FICS システム構成要素、より小さなロットサイズおよびよりタイトなプロセスウィンドの間のデータの交換と統合レベルの増加は、FICS によって管理されなければならない増大したメッセージ量とデータ負荷を誘引する。製造装置は、故障検知に必要なセンサデータ、高度プロセス制御(APC)データおよび装置性能データ(マスフロー、圧力および温度調節計のような重大な装置アクチュエータを含んだ)などのデータ量を増加させる。FICS は、増えるデータ転送率や、増加した情報収集、保管および修正の管理に適用するために拡張性を有していなければならない。分散型システムは新規ではないが、FICS 構造は工場レベル下のデータ/アプリケーションを次第に分散して行く。分散型データ/アプリケーションは、工場内の通信帯域の競合を減少させて、工場運用およびビジネスレベルの意思決定に対して必要な情報の明確なセットを特定するために大量のデータをフィルタリングするための FICS 能力を強化する。

これらの FICS 要件の達成は、データ収集、データ交換およびレシピ管理などの業界標準への整合を必要とする。特殊なツール、サプライヤあるいは製造上定義された独自仕様のインタフェースは、IC メーカー、および FICS サプライヤの両方に実装時間およびコストの増大をもたらす。これらの新しい標準を開発する時間は、IC メーカー、装置サプライヤおよび FICS サプライヤの間の協力によって短縮しなければならない。最終的に、標準準拠したアプリケーションは、IC メーカーおよびサプライヤが統合化のカスタマイズよりも、改善に集中することを可能にし、統合化のための時間およびコストを低減する。これは、新しいアプリケーションを既存工場に導入するリスクを減少させる。

高度な信頼性と性能を有するシステム

FICS インフラストラクチャに対する工場の依存増大は、工場システムの複雑さを増し続ける。それは、全面的な工場システム有用性の増進維持、そして基幹アプリケーションの単一の故障によって引き起こされる完全なファブダウン事故の発生を減少させることを推進することへの配慮拡大である、FICS 技術要求表を参照。基幹の FICS 構成要素(ソフトウェアおよびハードウェアの両方)は、インストールするかアップグレードするために計画されたダウンタイムと同様に計画外の工場システム故障も排除するための対故障解決策を提供しなければならない。解決策候補は、ダイナミックなアップグレード、工場システムの健全状態を監視することが可能であり、ロードバランシングを引き起こすことが可能であるソフトウェアアプリケーション、および障害迂回のためのトランスペアレントなハードウェアスイッチングでフォールト=トレラント=コンピュータシステムができるソフトウェアアプリケーションおよびデータベースを包括している。

サイバーセキュリティは、引続き工場運用観点から優先度が高い。2005 年 3 月に ISMI によって、最初にサイバーセキュリティのための利用可能な手法を文書化したサイバーセキュリティガイドラインが発表された。サイバーセキュリティによって、半導体製造に対する脅威の少なさをもたらしめていることにより、その焦点は、装置内の知的財産(IP: Intellectual Property)を保護することに変ってきている。半導体製造装置は、現在、エンジニアとテクニシャンによって、FICS インフラストラクチャとして統合されている。IP 保護の確保は、運用レベルで重要な価値がある環境において全面的な財務達成に重大である。

表 FAC 7 工場情報制御システムの技術要求

Year of Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	52	45	40	36	32	28	25	22.5
Wafer Diameter (mm)	300	300	300	300	300	300	450	450
Downtime of a mission critical application (minutes per year)	<55 min	<55 min	<35 min	<35 min	<25 min	<25 min	<25 min	<25 min
Unscheduled downtime of a mission critical application (minutes per year)	<15 min	<15 min	<15 min	<15 min	<10 min	<10 min	<10 min	<10 min
Scheduled downtime of a mission critical application (minutes per year)	<40 min	<40 min	<20 min	<20 min	<15 min	<15 min	<15 min	<15 min
Wafer-level (within-lot) recipe / parameter adjustment	Partial	Partial	Partial	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Within-wafer recipe / parameter adjustment	Partial (Litho)	Partial (Litho)	Partial (Litho)	Partial (Litho+)	Partial (Litho+)	Partial (Litho+)	Partial (Litho+)	Partial (Litho+)
Relative accuracy of mission critical FICS clocks to fab-level time authority	50ms	5ms	5ms	5ms	1ms	1ms	1ms	1ms
FICS design to support peak equipment data transfer rates (Hz)	10Hz	10Hz	10Hz	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
FICS design to support peak factory data transfer rates (Hz)	150KHz	150 kHz	150 kHz	>500 kHz	>500 kHz	>500 kHz	>500 kHz	>500 kHz

Year of Production	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9
Wafer Diameter (mm)	450	450	450	450	450	450	450	450
Downtime of a mission critical application (minutes per year)	<25 min	<25 min	?5 min	?5 min	?5 min	?5 min	?5 min	?5 min
Unscheduled downtime of a mission critical application (minutes per year)	<10 min	<10 min	?5 min	?5 min	?5 min	?5 min	?5 min	?5 min
Scheduled downtime of a mission critical application (minutes per year)	<15 min	<15 min	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min
Wafer-level (within-lot) recipe / parameter adjustment	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Within-wafer recipe / parameter adjustment	Partial (Litho+)	Partial (Litho+)	Yes (All)	Yes (All)	Yes (All)	Yes (All)	Yes (All)	Yes (All)
Relative accuracy of mission critical FICS clocks to fab-level time authority	1ms	1ms	1ms	1ms	1ms	1ms	1ms	1ms
FICS design to support peak equipment data transfer rates (Hz)	100Hz	100Hz	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz
FICS design to support peak factory data transfer rates (Hz)	>500 kHz	>500 kHz	>1 MHz	>1 MHz	>1 MHz	>1 MHz	>1 MHz	>1 MHz

Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known



工場情報制御システム要求項目の説明

Item	Explanation
Downtime of mission critical applications (minutes per year)	The time when mission critical applications is not in a condition, or is not available, to perform its intended function. Mission critical applications are those required to keep the entire wafer factory operational. Depending on factory configuration, these include: MES, scheduler / dispatcher, MCS, PCS, recipe download, reticle system, and facilities control systems. Hardware, system, and software upgrades are part of non-scheduled time as defined in SEMI E10-0304E, Section 5.10.1, and are not included in downtime.
Unscheduled downtime of mission critical applications (minutes per year)	The time when the equipment is not available to perform its intended function due to planned down time events as defined in SEMI E10-0304E. Scheduled down time includes maintenance delay, production test, preventive maintenance, change of consumables, setup, and facilities related events.
Scheduled downtime of mission critical applications (minutes per year)	The time when the equipment is not available to perform its intended function due to unplanned down time events as defined in SEMI E10-0304E. Scheduled down time includes maintenance delay, repair, change of consumables, out-of-spec inputs, and facilities related events.
Wafer-level recipe / parameter adjustment Within-wafer recipe / parameter adjustment	Ability for factory information and control systems to run a different recipe and/or parameters for each wafer within a carrier. Adjustments for later wafers can be made as earlier wafers complete processing (i.e., wafer-to-wafer). This facilitates wafer-to-wafer recipe and parameter adjustment and supports the ability to have multiple lots per carrier.
Within-wafer recipe / parameter adjustment	The granularity to which the factory information and control systems are kept synchronized to a central reliable source. This enables time-critical process control to take place in a distributed architecture. This requirement does not necessarily require the increase in production tool's control "heart beat" frequency.
FICS design to support peak equipment data transfer rates (Hz)	The peak rate of variable production that the factory information and control systems shall be required to support in collecting information from a single piece of processing equipment and transport to central storage.
FICS design to support peak factory data transfer rates (Hz)	The peak rate of data (in variables / second) that the factory information and control systems shall collect from all processing equipment and transport to central storage, where the average variable size is four bytes or less; if variable size averages are higher, the FICS peak rate requirements are adjusted so that the byte/sec rate requirement remains constant.

ファシリティ

範囲と役割

ファシリティには建屋、クリンルーム、そして半導体製造運用に直結した製造装置やその周辺のインフラシステムまで含まれる。(隣接した統括部門スペースや管理部門エリアは含まない。)プロセス技術の要求、製造装置、生産のゴール、経営哲学、環境・安全・健康(ESH)の要求、建築の法規や標準、欠陥低減およびウェーハコスト低減目標は、ファシリティやインフラシステムの要求、複雑さやコストに影響を及ぼす。この産業はファシリティに、より柔軟性、多世代活用性、信頼性、俊敏性、投資効率性を要求し続けている。しかしながら、製造装置からの要求、ESH 遵守、工場運用の柔軟性は、ファシリティの投資と運用コストを増大させている。製造装置及びその補機は複雑さを増し、大きくまた重くなり工場規模を増し続けている。従来と異なる新プロセスが製造能力の増加以上にクリンルームの大きさを拡大させている。その結果、工場、製造装置、材料搬送システムの規模と複雑さの増大から、また同様に市場への建設期間短縮やファシリティコスト抑制の圧力が、挑戦課題のように、現状の多くの工場技術要求を求めている。製造装置の操作、保守、環境要求とファシリティインフラシステムの設計、導入されたユーティリティ能力、そしてファシリティスペース(体積)の間のより良い調和は、システムや空間利用の改善、ファシリティ投資と運用コストの改善、これらの目標達成に不可欠である。

ファシリティの複雑さとコストは、ガス／薬品の種類増加、より厳しい ESH 規制、より厳しい静電気放電(ESD: Electrostatic Discharge)対策、電磁妨害(EMI: Electromagnetic Interference)対策などによっても増大している。ユースポイントで製造装置要求(振動、純度)を満たすやり方は、ファシリティコストの増大やフレキシビリティの犠牲無く将来の要求を満たすコスト効率的なアプローチとなる。例えば、ファシリティへの振動要求を抑制し、装置メーカーと共同で装置の適正な振動制御を確保することによって、装置位置でのファシリティ振動を調節し、柔軟性を犠牲にせずにファシリティコストを低減できる。ガス・薬品純度や集中供給システムの配管仕様を緩和し、特定装置や特定エリアの超高純度要求に特化することは、コスト抑制、柔軟性向上、運用信頼性に有用である。

歩留まりへの配慮

気中分子汚染(AMC: SEMI スタンダード F21 参照)の発生は、新たな方法や材料を用いた汚染制御を改めて要求しているし、建築中の建物の材料の選定にさえ影響を及ぼしている。ファシリティ運用では、適切な AMC 対策のために、装置メーカーとの調整も必要となる。

製造装置の立上げコストと時間は、ガス、薬品、ユーティリティ接続の増大、ESH 遵守要求によって、上昇し続けている。装置アダプタプレートの開発と導入は、製造装置導入手法の一貫性の確保と装置設計変更の要求を減じ、確実な導入のための文書提供を援助している。新製造装置の設計に早期の段階から配慮し、製造装置接続や構成材を標準化することおよび標準化されたデータベースの中でユーティリティの流量測定を可能とすることは、「ファシリティ配慮設計」に注力した適切な基礎を構築するであろう。

業界とファシリティの協働

製造装置の複雑さが増加する中で運用がより柔軟であることが求められ、また世界的基準、標準、規制の多様化に対応し、起工から最初の試作ウェーハ完成までの期間を短縮する要求のため、ファシリティを提供する上でパラダイムシフトが必要になっている。このパラダイムシフトは、IC 製造メーカ、IC 工場の設計/建設業者、製造装置メーカ間で完全に一体となってプロジェクトを構築することを必要としている。そのプロジェクトチームは、小さくとも早期に結成され、プロセスエンジニア、製造エンジニア、ファシリティエンジニア、設計コンサルタント、建設業者、販売/供給者、プロセス装置製造者を包括しなければならない。建築期間を短縮し、コスト削減のゴールに合致させるために、標準化設計概念、標準工場モデル、オフサイト製造などの手法開発が必要になる。装置メーカと工場設計が標準化されたユーティリティインフラを開発かつそれに順守して行く意欲は、投資コスト抑制とファシリティ構築期間短縮に有用である。

工場建設および操業のための持続可能な概念の開発は資源利用を改善し、環境負荷を軽減することである。例えば:

- 建設費は、製造装置に対して、排気/空調量要求の低減、クリティカルでない製造装置のプロセス装置冷却水入り口温度を冷凍機が必要ないレベルまで上げることおよび可能な限り高電圧電力を使用することによって大幅に削減できる。
- 運転コストは、超純水の再循環や再利用コンセプト、装置のアイドル状態での「sleep」モード導入、生産冷却水温度を上げること、ミニエンバイロメントや隔離技術(FOUP)の利用によるクリーンルーム清浄度要求の緩和、そしてユーティリティ利用に対する逐次監視と制御を介した運用可視化の導入などの革新的な再使用やリサイクル概念によって、縮小することができる。

しかしながら、ファシリティや製造装置の運用上の要求が妥協無く発揮されなければならない。例えば、クリーンルームの浮遊パーティクル清浄度および関連する気流の低下は、温度、湿度、清浄度および製造装置メンテナンスに影響を及ぼすことがある。一般的な工場清浄度が ISO のクラス 6 のとき、製造装置のメンテナンス要件として、ポータブルのダウンフロー式局所排気などのツールの使用を通じて、装置に組み込まれるべきである。他の解決されるべき問題として、ファブの循環風量を減らした場合にクリーンルーム内に熱が拡散することである。現在ではおもに発熱除去のため循環空気量が決まり、クリーンルームのエネルギー消費もこれに従う。製造装置設計者にとっての挑戦は全体のエネルギー削減だけでなく生産冷却水への熱移動を最大化することである。

ファシリティインフラシステムの信頼性は現在、製造をサポートするには十分であるが、この過剰な信頼性は高価な冗長性(余剰能力)によって達成されている。改善はなお、個々の電気、機械、制御コンポーネントおよび製造障害抑制システムの設計と運用のために必要である。ファシリティ設備メーカとの協力は冗長性の N+1 原理を改造して導入できる。これはハードウェアまたはシステムを冗長的に設置し、クリティカルな機能に影響する不具合が発生した場合に信頼性を犠牲にすることなくコストに良い影響を与える。

最後に、製造装置セット(新しい化学物資や窒素、真空雰囲気、枚葉処理などのウェーハ取り扱い環境要求など)あるいはポストCMOS、次世代大口径ウェーハのような重大な変化は、工場の要求、スケジュール、コストにインパクトを発生する。

表 FAC 8 ファシリティの技術要求

<i>Year of Production</i>	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<i>DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)</i>	52	45	40	36	32	28	25	22.5
<i>Wafer Diameter (mm)</i>	300	300	300	300	300	450	450	450
<i># Mask Levels—DRAM</i>	24	26	26	26	26	26	26	26
Manufacturing (clean room) area/wafer starts per month/number of mask layers	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.019	0.019	0.021
SubFab to Fab ratio (see definition)	1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Facility service life (in three-year nodes)	3	3	3	3	3	3	3	3
Facility cleanliness level (ISO 14644)	Class 6 at rest	Class 6 at rest	Class 6 at rest	Class 6 at rest	Class 6 at rest	Class 7 at rest	Class 7 at rest	Class 7 at rest
<i>Facility cleanliness level (Airborne molecular contamination AMC)</i>	Discussed in Yield Enhancement Chapter							
Facility critical vibration areas (lithography, metrology, other) (µm/sec)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)
Facility non-critical vibration areas (µm/sec)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)
<i>Temperature and Humidity Specifications</i>	Discussed in Yield Enhancement Chapter							
Maximum allowable electrostatic field on facility surfaces (V/m) for ESD prevention	5,500	5,000	4,400	3,800	3,500	3,100	2,800	2,500
<i>Gas, water, chemical purity</i>	Discussed in Yield Enhancement Chapter							
<i>Facility power, water, and chemical consumption</i>	Discussed in ESH Chapter							
<i>Energy Consumption Total Fab Support System (kWh/cm² per wafer out)</i>	Discussed in ESH Chapter							
Ratio of Tool Idle vs. Processing Energy Consumption (kW/kW)	0.75	0.75	0.75	0.60	0.60	0.5	0.5	0.5

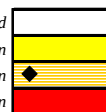
Year of Production	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9
Wafer Diameter (mm)	450	450	450	450	450	450	450	450
# Mask Levels—DRAM	26	26	26	26	26	26	26	26
Manufacturing (clean room) area/wafer starts per month/number of mask layers	0.021	0.021	0.023	0.023	0.023	0.026	0.026	0.026
SubFab to Fab ratio (see definition)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Facility service life (in three-year nodes)	3	3	3	3	3	3	3	3
Facility cleanliness level (ISO 14644)	Class 7 at rest	Class 7 at rest	Class 8 at rest	Class 8 at rest	Class 8 at rest	Class 8 at rest	Class 8 at rest	Class 8 at rest
Facility cleanliness level (Airborne molecular contamination AMC)	Discussed in Yield Enhancement Chapter							
Facility critical vibration areas (lithography, metrology, other) (µm/sec)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)	6.25 (VC D)
Facility non-critical vibration areas (µm/sec)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)	50 (VC A)
Temperature and Humidity Specifications	Discussed in Yield Enhancement Chapter							
Maximum allowable electrostatic field on facility surfaces (V/m) for ESD prevention	2,200	2,000	1,800	1,500	1,300	1,000	1,000	1,000
Gas, water, chemical purity	Discussed in Yield Enhancement Chapter							
Facility power, water, and chemical consumption	Discussed in ESH Chapter							
Energy Consumption Total Fab Support System (kWh/cm ² per wafer out)	Discussed in ESH Chapter							
Ratio of Tool Idle vs. Processing Energy Consumption (kW/kW)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known



ファシリティ要求項目の説明:

Item	Explanation
Manufacturing (cleanroom) area (m ²)	Manufacturing (cleanroom) area is defined as the gross space in square meters containing the process and metrology equipment used for direct manufacturing processes such as photolithograph, diffusion, etch, thin films, CMP, excluding subfab spaces containing support equipment and facility infrastructure systems. Special back-end process areas such as C4 technology are excluded from this value. Foreseeable technologies that will impact cleanroom size are factors such as additional metal layers, single wafer processing and double exposure for litho.
Wafer starts per month (WSPM)	Wafer starts per month is defined as the number of new 300 mm wafers introduced into production for processing during a given 30 day period.
# of mask layers (low mix only)	This refers to number of mask layers of DRAM.
Sub-Fab to Fab ratio	Sub-Fab to Fab ratio is defined as the footprint of the production equipment support plan area to the manufacturing area above. The 25% reduction in floor space allows for columns and safety equipment in the subfab that is required by the facility. Relates to and extends factory operations “floor space effectiveness.”
Facility service life (in three-year nodes)	Facility service (system) life is the number of nodes (process changes) that the system is available before major renovation is required to meet process requirements.
Facility cleanliness class (ISO 14644)	Cleanliness classification of wafer factory manufacturing (cleanroom) area as defined by ISO 14644-1 ⁷ .
Facility critical vibration areas (litho, metro, other) (micrometers per second)	“Vibration critical” is defined as area of the primary manufacturing floor in which a significant portion of the equipment is highly sensitive to floor vibration, the mitigation was not provided at the tool itself, and excessive vibrations can have serious deleterious effects on product. Extensive measures may be required in the facility’s structural and mechanical equipment design based upon the needs of this space category. Vibration criteria are limits on vibration amplitudes at the floor or other support of a tool, given as VC-x, where x is a letter designation from A through E, each corresponding to a specific vibration amplitude spectrum. Refer to IEST-RP-CC0012.2 ⁸
Facility non-critical vibration areas (micrometers per second)	“Vibration non-critical” is defined as area of the primary manufacturing floor in which all or some of the equipment is only moderately vibration sensitive, and the structural system performance can be reduced. Vibration criteria are limits on vibration amplitudes at the floor or other support of a tool, given as VC-x, where x is a letter designation from A through E, each corresponding to a specific vibration amplitude spectrum. Refer to IEST-RP-CC0012.2.

脚注 7

脚注 8

⁷ ISO 14644-1.: Cleanrooms and controlled environments, Part 1: Classification of air cleanliness

Maximum allowable electrostatic field on facility surfaces (V/m) for ESD prevention.	Facility surface electric field limits apply to all factory materials-construction materials, furniture, people, equipment, and carriers Refer to SEMI standards E129 ⁹ , E78, ¹⁰ and E43 ¹¹ for measurement methods. This guidance may not apply to EFM prevention. See Crosscut Issues section.
Ratio of tool idle versus processing energy consumption (kW/kW)	Ratio of energy consumption of process tool and support equipment when not processing wafers over energy consumption while tool is processing wafers per SEMI S23 application guide.

解決策候補

ファクトリー・インテグレーションの基本的到達目標は、シリコン単位面積あたりの一定コストの維持、工場立上げ期間短縮、技術やビジネスモデルの変化に対する工場柔軟性の拡大である。困難な技術課題であるところの 1)複雑なビジネス要求への対応、 2)工場運営における潜在的な無駄、工場の複雑さに対するリソース、3)工場複雑さの管理、4)工場と装置信頼性、5)工場の柔軟性、多世代活用性、および拡張性ニーズへの合致、 6)先端デバイスの量産稼動における高度なプロセス要求への合致、 7)環境問題に対する世界的な制約の拡大の理解、 8)新たな工場のパラダイムシフトと次のウェーハサイズの出現に向けた準備 以上の目標を達成することである。解決策候補は工場運用、製造装置、材料搬送システム、工場情報制御システムおよびファシリティで区分される。ウェーハ口径を含む棒グラフにおいて、特定のウェーハサイズが解決策候補であることに留意されたい。

解決策候補は、研究段階、開発段階、試作段階で示される。その目的は、研究者、サプライヤ、IC メーカーに対して工場内に向けた解決策の必要な時期の指針を提供することにある。

-  **Research Required**
-  **Development Underway**
-  **Qualification/Pre-Production**
-  **Continuous Improvement**

⁸ IEST-RP-CC012.2: Considerations in Cleanroom Design.

⁹ SEMI E129: Guide to Assess and Control Electrostatic Charge in A Semiconductor Manufacturing Facility.

¹⁰ SEMI E78: Electrostatic Compatibility – Guide to Assess and Control Electrostatic Discharge (ESD) and Electrostatic Attraction (ESA) for Equipment.

¹¹ SEMI E43: Guide for Measuring Static Charge on Objects and Surfaces.

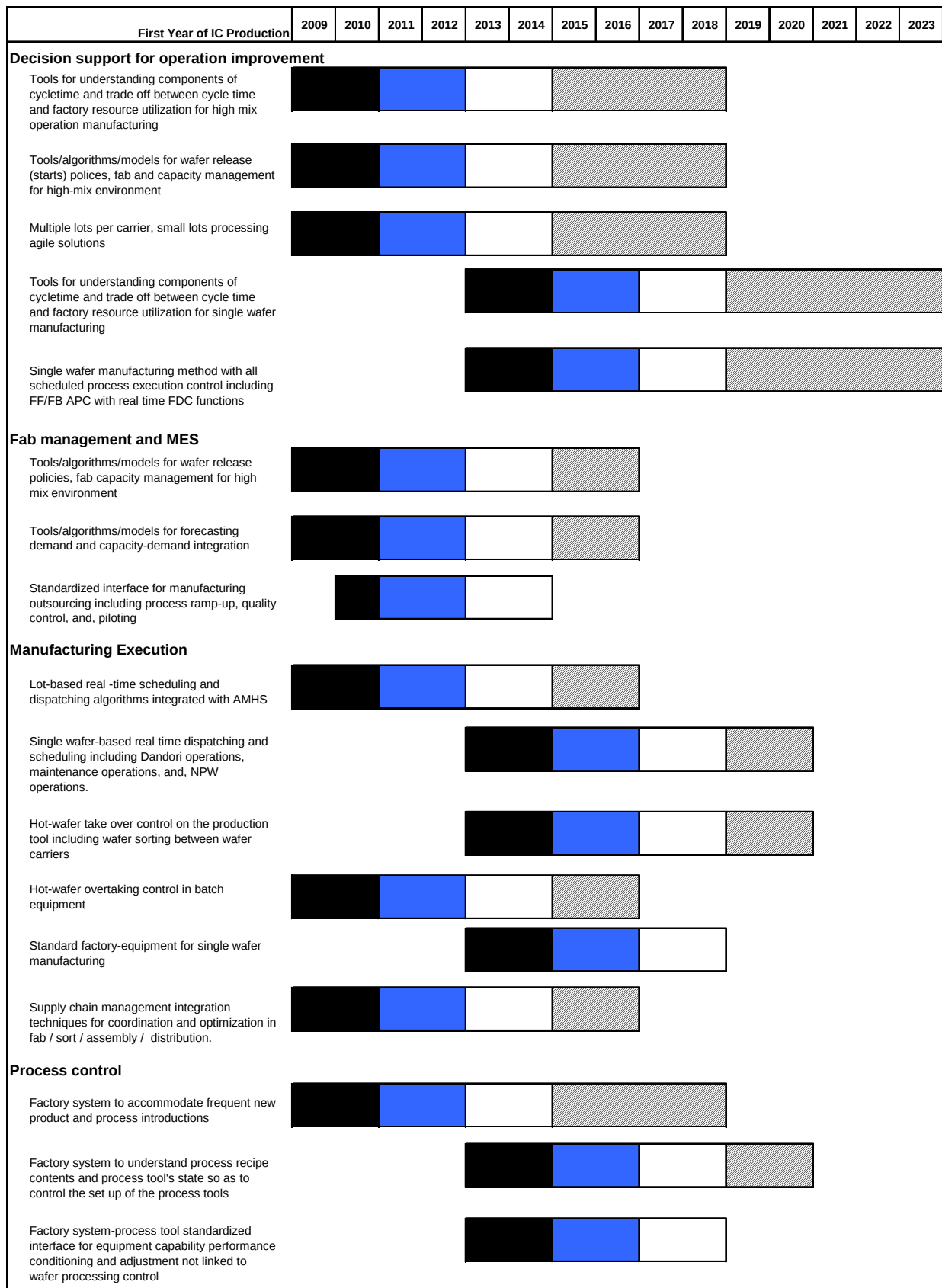


図 FAC2a ファクトリー・オペレーション解決策候補

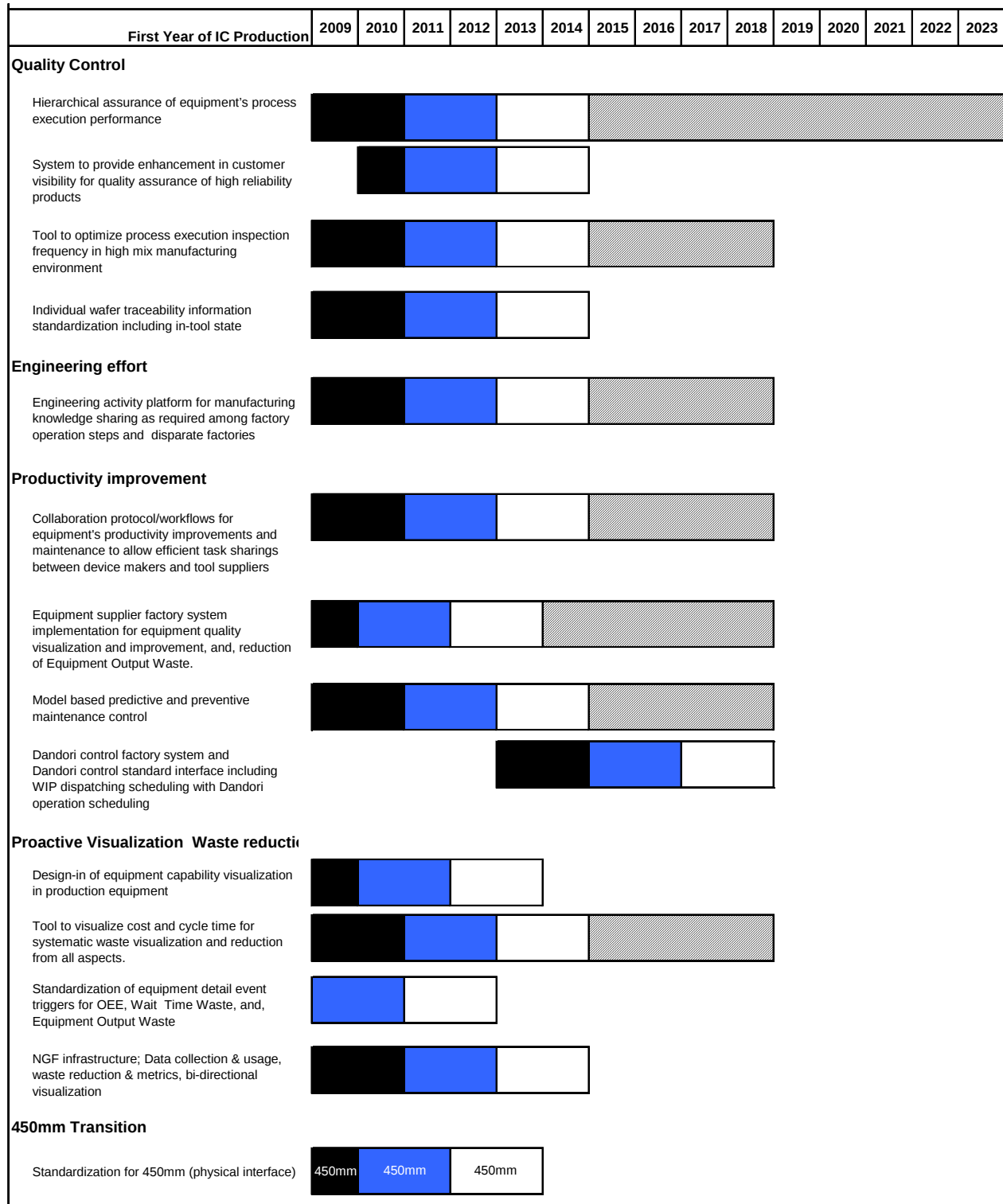


図 FAC2b ファクトリー・オペレーション解決策候補

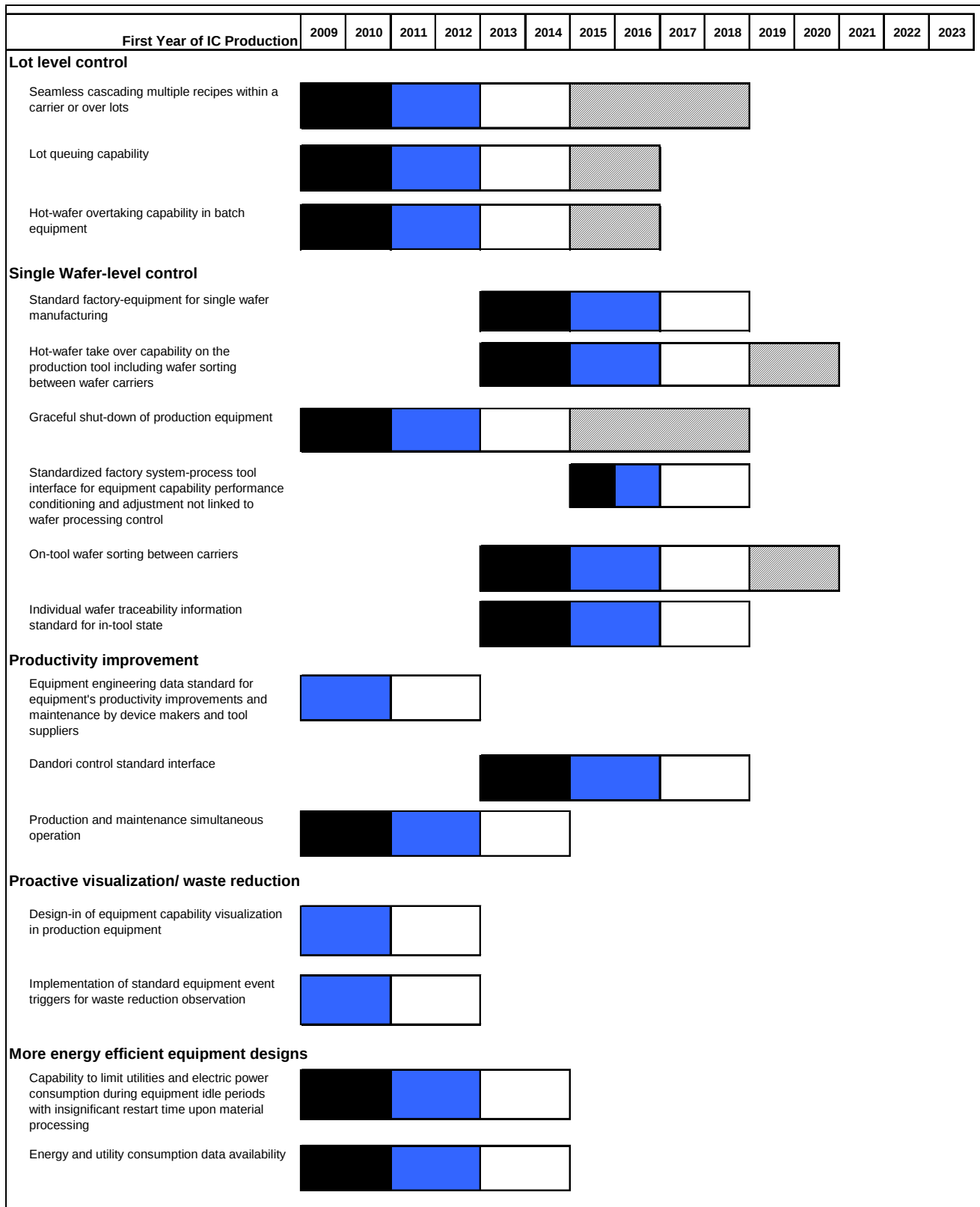


図 FAC3 製造装置解決策候補

First Year of IC Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
450mm AMHS															
450mm interface standards development		300mm	450mm	450mm											
450mm automated material handling system configurations		300mm	450mm	450mm		450mm						450mm			
Single Wafer AMHS															
Single Wafer interface standards development				450mm	450mm	450mm									
Single Wafer automated material handling system configurations						450mm	450mm			450mm				450mm	
Easily extendible transport system															
Automated or zero field hardware alignment and positioning		300mm	450mm	450mm		450mm									
Automated software configuration (HW independent structure and parameter setting)		300mm	450mm	450mm		450mm									
Uninterrupted extended transport system rail		300mm	450mm	450mm		450mm									
Uninterrupted software upgrade		300mm	450mm	450mm		450mm									
High reliability															
Automated preventive/predictive maintenance, and e-Diagnostics		300mm	450mm	450mm		450mm									
Visualization of AMHS information.		300mm	450mm	450mm		450mm									
High performance															
Integrate the transport/storage of near tool (Near tool buffer, shared EFEM, on-tool storage etc).		300mm	450mm	450mm		450mm									
Integrate WIP scheduling and dispatching systems with storage and transport systems		300mm	450mm	450mm		450mm						450mm			
Traffic-jam prediction and control capability		300mm	450mm	450mm		450mm									
The prediction allocation of the vehicle. (A processing completion prediction)		300mm	450mm	450mm		450mm						450mm			

図 FAC4 材料搬送解決策候補

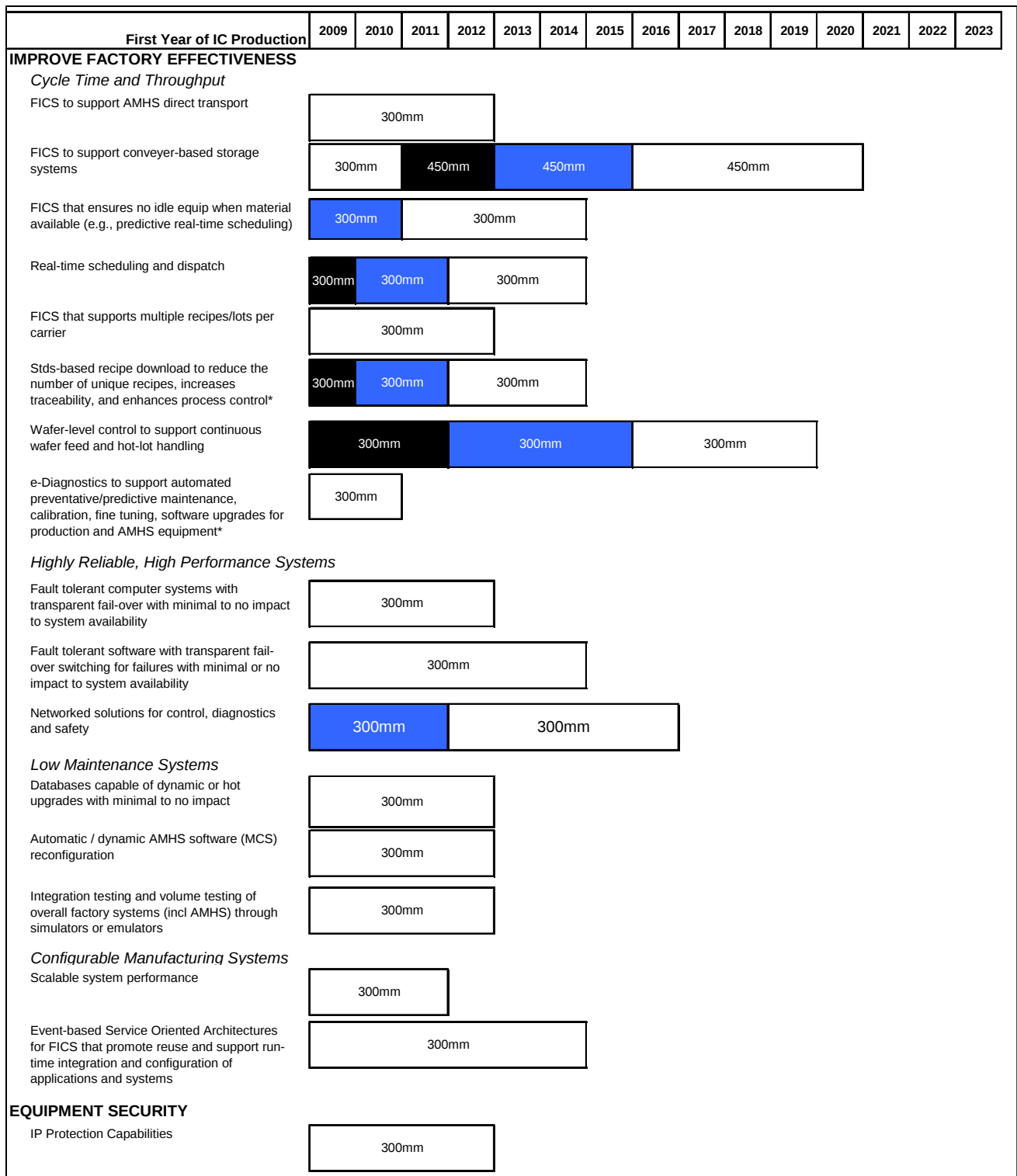


図 FAC5a 工場情報制御システムの解決策候補

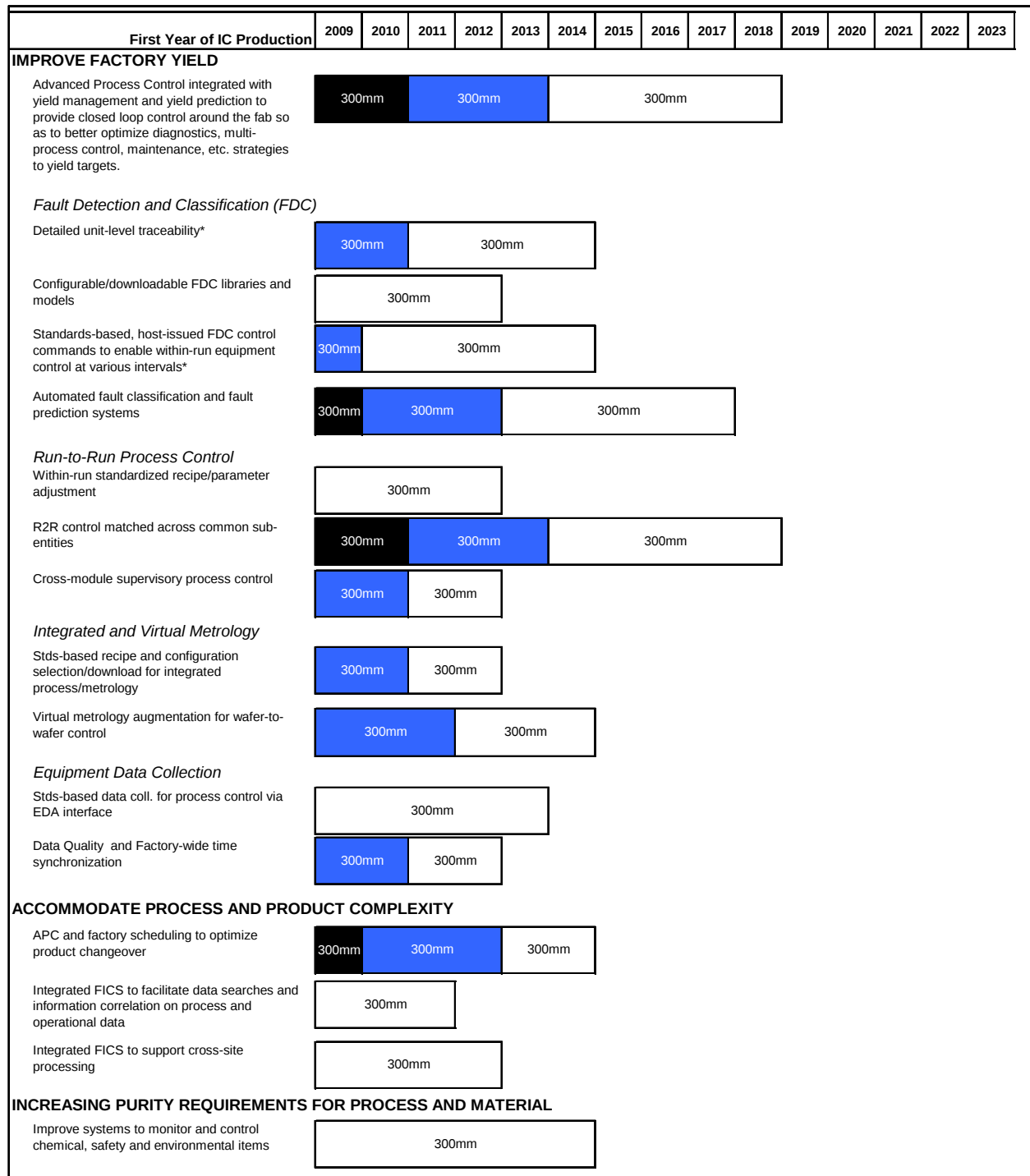


図 FAC5b 工場情報制御システムの解決策候補

First Year of IC Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Improve Integration															
Develop a Design for Facility guideline document and factory model (standardized utility infrastructure) to improve integration for facility design and construction from basebuild thru tool installation	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Address factory tool density and subfab space arrangements to improve layout for fab and subfab production equipment	300mm	450mm	450mm							450mm					
Develop Protocol for tool installation by generic types of tools and emphasize the information needs and impact of changes to the facility constructed and the actual installation schedule and cost.	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Improve Cost Control															
Reporting of standardized utility consumption for production equipment resulting in higher quality data (SEMI E-6)	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Develop standard definitions and performance metrics for best practices for facility construction, operation, reliability and equipment installation	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Develop Standard facility designs and specifications that reduce unique custom factory designs allowing earlier design packages for construction	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Improve Facility and Production Equipment Interfacing															
Develop Adapter Plate installation guidelines using Predictable/Consistent tool connection for utilities, drains, exhaust and interconnects	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Optimize cleanroom air and exhaust system requirements in relation to temperature, humidity and AMC requirements of production equipment	300mm	450mm	450mm							450mm					
Design Production Equipment to operate within facility infrastructure systems capabilities. Design support equipment to fit production equipment footprint determined by prime manufacturing area (Design for Facilities and SEMI E-51)	300mm	450mm	450mm							450mm					
Design production equipment heat transfer systems to accommodate higher cooling fluid supply temperatures. (e.g. 30° C)	300mm	450mm	450mm							450mm					
Design tools for clean maintenance to ensure isolation is maintained during routine maintenance operations (Design for Facilities)	300mm	300mm	450mm	450mm	450mm					450mm					
Optimize single wafer processing with respect to total facility impact (all equipment utilities and production equipment footprint)	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Improve production equipment documentation and change management	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					

図 FAC6a ファシリティの解決策候補

First Year of IC Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Improve Schedule Efficiency															
Develop Flexible tool and factory interface designs that allow installation, removal, and reconfiguration of production equipment over the life of the factory	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Ensure early and accurate identification of production equipment installation demand requirements for basebuild construction (eg. pressure, loads, flows, connection size)	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Improve Response to Changes in ESH Requirements															
Develop power and water reduction/recycle/reuse protocols in conjunction with production equipment manufacturers along with energy conservation, and Fab Sustainability Concepts (Green Fab and SEMI S-23)	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Develop Risk Assessment tools for understanding economic impact to EHS design and measurement incentives	300mm		450mm	450mm						450mm					
Develop transition plan to higher efficiency power distribution based on economic threshold for different voltage.	300mm		450mm	450mm						450mm					
Transition from air to more efficient liquid cooling systems in cooperation with production equipment manufactures	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Develop tool capability to reduce energy/utility consumption when not producing wafers (e.g. tool sleep mode)	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Provide cost effective point of use and/or factory wide abatement technologies	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					
Investigate ROI and incentives for alternative power solutions (Green Fab)	300mm	300mm	450mm	450mm						450mm					

図 FAC6b ファシリティの解決策候補

クロスカット課題

ファクトリー・インテグレーションの技術要求は、デバイス、プロセス、歩留、計測、ESH、リソグラフィ、他の技術委員会の要求によって、左右される。クロスカット課題を十分理解するために、他の技術委員会と歩調を合わせて取り組んだ重要なクロスカット挑戦課題と要求を以下の表 FAC8 にリストした。ファクトリー・インテグレーションは、これらの主要クロスカットの挑戦課題と要求に対応し続ける

表 FAC 9 クロスカット課題

Crosscut Area	Factory integration related key challenges
Front end Process (FEP)	Factory and FEP teams will continue to work on AMC requirements. FEP and Factory Integration will work on 450 mm challenges. Energy conservation effort: such as equipment sleep mode for energy conservation and the 1.5 mm wafer edge exclusion for long term challenge to starting material and SOI.
Lithography	Continuing to understand EUVL (power, consumables) requirements from the FI perspective; completely different factory design is expected. Fast reticle change; reticle storage issues and reticle buffering due to small lots; AMC relative to the reticle and tighter process control needs. Lithography DFM needs. EFM may be added as it is confirmed as mask quality detractor.
ESH	Primary focus on energy and resource conservation; Production tools to be designed for LCA from ESH viewpoints; AMC and particulate levels to be maintained; Advance resource management programs needed;
Metrology	Comprehensive metrology roadmap to be jointly defined. AMC, temperature, and humidity control remain crosscut issues
Yield Enhancement	Maintain temperature control at the lithography and metrology areas. Surface electric fields requirement on mask and wafer to be separated; FI ITWG to work with the Yield ITWG on specifying particle and AMC targets for equipment, AMHS, and FOUP. Yield changes with the 450mm and change in wafer handling.

リソグラフィ

リソグラフィは、パターンニングの物理限界に対する光学的手法の拡張にかかわる困難性を扱っている。また、まったく新しいポスト光学技術を実装するための開発要件を検討している。ファクトリー・インテグレーション分野に関する重要な挑戦課題は、EUVL のために必要になる電力や水のインフラの確保である。また、リソグラフィ装置にたいする APC 技術の改良も大きな課題である（例えば、オーバーレイやエッジラフネスに対するより厳しい制御が必要である）。その他の課題としては、DFM(Design for Manufacturing)や装置内の温度変動、レチクルに対する AMC 汚染がある。詳細については、リソグラフィの章を参照されたい。

環境、安全、健康(ESH : ENVIRONMENTAL, SAFETY AND HEALTH)

ESH は半導体工場の設計および運用において非常に重要な役割を担っている。工場計画当初の段階における意志決定は、厳密な安全および環境に対する要求に経済的に合致する工場を造る上で大変重要なインパクトとなる。

将来の工場における継続的な安全性向上計画を確立しなければならない。自動化された装置に対して起こる危険リスクへの綿密な検討が、作業者および製品のための安全な作業条件を保証する標準の形成を導く。この標準は、自動化システムとインタフェースをとる装置、およびそのインタフェースにおいても適用される。

半導体業界は、ますます増大している環境上の制限に直面している。十分な水を確保することは、既に工場規模や場所に制約を課している。資源消費を最小にし、再利用を最大にする工場の建設が目標である。環境上有害な材料の流出物をゼロに近いレベルに引き下げる必要がある。

省エネルギーは必須である。省エネルギー化を妨げる要因は工場規模の大型化であり、これによってエネルギー供給側とウェーハ製造工場側双方が解決策候補の策定を迫られている。

ESH プログラムに対する多くの責任を装置メーカーが負う一方で、高度のリソースマネジメントシステムの適用が重要な影響となる。業界のために、業界によって確立された訓練計画により、ESH の国際的標準化および設計に関する各プログラムの大幅な改善を可能とすることができる。装置設計、メンテナンス、最終廃出処理における ESH 標準の検討が、ESH 性能ならびにコストに関して多大な改善効果をもたらす。より広範囲に亘る情報は、ESH: Environmental, Safety and Health の章を参照されたい。

歩留管理(YIELD MANAGEMENT)

優れた歩留り管理戦略を構築することにより諸コストおよび投資リスクを低減することができる。工場歩留りモデルは標準的な運用性能を明確にし、性能・歩留りの悪化要因についてのパレート図を得ることができる。実験的なプロセスパラメータのマッピングおよびプロセス制御戦略に基づいた工場モデルにより、増加しがちであった計測装置およびモニタウェアの必要性を低減できる。生産ラインでの最終検査への依存度を減らすためには、プロセスパラメータのバラツキの許容範囲およびプロセス間の相互干渉度を割り出すことも非常に重要である。また、短時間での工場建設、急速な歩留り立上、高い装置利用率および将来の技術世代に対する多世代活用性を達成するための効率的な工場デザインが問題なくできるように、工場モデルは欠陥低減に関する情報入力に対応できなければならない。温度と湿度の指標化は AMC の技術要求と合わせてファクトリー・インテグレーションと歩留り技術委員会とが共に進めて行く。

歩留り管理システム(YMS; Yield Management System)は多様なデータソースからの情報にアクセスし、その情報の相関を明らかにできるように開発されなければならない。YMS は非競合な標準に基づいたデータモデル、構造を用いた複数のサプライヤからの計測装置の環境下で稼動しなくてはならない。YMS のより総合的な議論については Yield Enhancement の章を参照されたい。

気中分子汚染(AMC: AIRBORNE MOLECULAR CONTAMINATION)

AMC の制御は工場全体だけでなく、影響の大きいプロセスに対しては、それに依拠したレベルで局所的にも実施されるべきである。フィルター、パーティション、電線等の全てのクリーンルーム構成部品は、それらの持つ脱ガス特性を考慮して選択し設計されなければならない。また、FOUP 内の相互汚染も考慮されるべきである。AMC 制御に最も効果的なソリューションを評価し決定するためには、可視化ツールやモデリングとシミュレーションツールが必要であり、これらのツールを使うことでソリューションのコスト効果を正しく見積もることができる。

歩留り向上の章に掲載されているウェーハ汚染環境レベル制御に関する表には以下に示す環境汚染管理のレベルが推奨されている;

- ・クリーンルーム環境、あるいはパージガス環境の AMC
- ・監視用ウェーハ表面の表面分子汚染(SMC: Surface Molecular Contamination)

これらの表にある値は、クリーンルーム中の脱ガスを低濃度に保つだけでなくウェーハ周囲雰囲気中の AMC を削減する必要性を反映している。

注目すべきことに、管理されるべき AMC には二つ目の汚染経路がある。残留物が付いた状態でプロセスを終えたウェーハはガスを放出し、時間が経つと FOUP は汚染される。FOUP 壁面に吸着したこれらの汚染が清浄なウェーハを再汚染し、高価な計測器などの装置も汚染することが明らかになって来た。この相互汚染メカニズムは主にドライエッチングプロセスの後の気化しやすい酸で確認されたが、他の装置でも無視できないし、腐食性物質、有機物やドーパントなどの汚染物質でも無視できない。その結果、この相互汚染は多くの要因に依存している。従って、装置とウェーハキャリアとの境界だけではなく FOUP の汚染レベルをモニターする必要がある。

FOUP をパージすることは、ガス流量の制限とウェーハ間の隙間の行き止まり構造により、極めて難しいことが確認されている。真空引きと窒素パージの繰り返しというような新しい方法はクリーニングを早くして無駄な時間を費やさないので役立つ。それでも、FOUP の状態やパージ効果の適切な管理レベルをオンラインやオフラインで決めるには、いっそうの開発が必要である。より詳細な情報については Yield Enhancement の章を参照されたい。

計測(Metrology)

計測システムは、処理単位ごとのプロセス制御、歩留り解析、生産中の物流追跡やその他のオフライン解析を容易にするため、工場情報制御システムと完全に統合されなければならない。測定データ源は、主要サプライヤ(マスクやシリコンウェーハ)からウェーハ工程、プローブテスト、組立て、最終テストの範囲におよび、事業レベルの情報まで連携される。総データ量とデータ転送スピードは大口径化とプロセス微細化に

より飛躍的に増加しつづけていく。300 mm 工場では、高効率な工場インタフェースを実現するために、欠陥をレビューし分類する計測装置がクラスタ装置あるいは統合クラスタ装置の中に組み込まれて登場してくるだろう。300 mm のプロセス装置の中には、サイクルタイムやウェーハ間の製造バラツキを低減するために、IM(Integrated Measurement)機能を有するものも出てくるであろう。ファクトリー・インテグレーション技術委員会と計測技術委員会は引き続き VM(Virtual Metrology)と IM の要求検討に取り組む。計測についての総合的な記述については、Metrology の章を参照されたい。

静電気と電磁妨害の制御(STATIC CHARGE AND ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CONTROL)

静電気の帯電は半導体生産のあらゆる局面で悪影響を与え、大別して 3 つの問題を引き起こす：

1. 静電気引力(ESA: electrostatic attracted)起因汚染は異物サイズが小さくなるに伴い増大する。現在マスクの焦点面に異物を存在させないようにするために用いられているペリクルを将来使用しないようになると、この静電気引力によるマスクへの異物付着は、一層深刻な問題となる。
2. 静電気放電(ESD: electrostatic discharge)はデバイスやホトマスクにダメージを及ぼす。デバイス寸法の微細化はより小さいエネルギーでデバイスやマスクが破損することを意味している。デバイスの動作速度の増加はチップ上の ESD 保護構造の有効性を制限している。

最近の研究では、進行性のレチクルパターンの劣化が報告されており、それは PE 表で推奨されている ESD 抑止電圧より低い値で誘起される電解で発生する。この現象は電界誘起マイグレーション (EFM: Electric Field Induced Migration)と呼ばれている。

電磁妨害(EMI)(定義に関しては SEMI E33 標準を参照)¹²は装置の停止や不調、センサの誤検知、測定エラー他などの半導体製造の色々な問題の原因となり、特に測定器で顕著に発生しやすい。現在のところ、電磁妨害は装置ユーザーに良く理解されておらず、電磁妨害の軽減や修理についての間違った判断や対策に繋がっている。

ファクトリーインテグレーションフォーカスエリア

5 つのサブチームに跨った検討と他の技術委員会とのクロスカット活動による技術検討に加えて、ファクトリー・インテグレーション技術委員会は中長期的に本技術分野に影響が出る重要な技術事項についての検討を実施した。本章では以下の3つのより重要な技術事項についてその詳細を述べるものである。その技術事項は；(1) 無駄削減と能動的可視化、(2)NGFと 450mm 移行への挑戦、(3) 省エネルギー、である。

無駄削減と能動的可視化

製造コストの上昇に伴い、Si スケーリングと平行してコスト削減の他の領域に焦点を合わせるのが必然となってきた。ファクトリー・インテグレーション技術委員会ではこれまでの 5 年間にコストに関連する指標が何であるかの検討を行い、無駄の削減がムーアの法則のコストトレンドに従う重要なコンセプトであると結論付けた。

無駄は生産性ロスにおける最も一般的な認識であり、高い生産性とコスト削減を実現するために各 ITWG が包括的な取り組みを行なう上で無駄が指標になりうるものであった。無駄削減のための究極の目標は ITRS ロードマップのあらゆる TR テーブルに無駄削減の計画を適用させる事であり、Si スケールリングによるコスト削減に加えて新たな推進軸とすべきである。

2009 年バージョンの ITRS では無駄削減の計画を始めて導入する。無駄削減はファクトリー・インテグレーション章のしかも FO TR テーブルだけに取り入れられており、他のサブチームの TR テーブルには無い。ファクトリー・インテグレーション章の無駄削減のガイダンスは ITRS ロードマップの個々の技術領域にまだ関連付けされてはいません。

¹²SEMI E33-94 - Specification for Semiconductor Manufacturing Facility Electromagnetic Compatibility.

ITRS は、第一にムーアの法則に対する無駄削減の目標、第二に各々の ITWG がこの新しいテーマをいかにその活動に組み入れるか、最後に TR テーブルに無駄削減の要求を表現する事ができるか議論する必要がある。この議論はロードマップで必要となるメトリクスを包括的に含むべきである。エネルギーとリソースの無駄削減は明らかに Si スケーリングに加えて別の軸になる。

最も効果的な無駄削減の一つは生産設備の段取り作業(主たる生産作業に対する周辺や準備作業)削減である。段取り作業は下記 3 つの領域に分類できる。(1)生産設備内に存在するもの (2)生産設備と工場とのインターフェースに存在するもの (3)工場操業に存在するもの。最初の領域は装置サプライヤーとデバイスメーカが協力して対処するものである。「チャンバクリーニング」「チャンバシーズニング」はこの領域に存在する良く知られた例である。キャリア、ロット交換は 2 番目の領域で知られる無駄である。頻繁なプロセス・レシピの変更は装置操作においてかなりの無駄を引き起こしている事が知られており、これは 3 番目の領域に属している。

一般的な無駄削減アプローチの準備にはより多くの研究が必要である。この様なアプローチはシステムティックな無駄の測定や可視化によるべきである。無駄に関する系統的な知見は従来の日常的な生産性改善活動(CIP)の取り組みに加えて生産設備設計やオペレーション訓練の有効性と信頼性のために使用されている。

WTW(Wait Time Waste)と EOW(Equipment Output Waste)の可視化や削減においてその様なアプローチは有効である。製造現場は段取り操作の測定方法、データモデル及び構造の標準化を必要としている。オンラインデータ収集の歴史は処理中のパラメトリックデータに主眼がおかれてきており、データの収集と利用への範囲拡大が非常に重要で、適切に設計される必要があると強調されるべきである。段取り作業は主作業に対して並行作業か非拘束作業となる様設計される事が期待される。

1 ウェーハの WTW は単にそのウェーハの全ての待ち時間を合算する事で求める事ができる。こういった測定データは必ずしも改善計画に使用されるわけではない。そこには生産設備における着工待ち時間や他のウェーハの待ち時間といった多数の相互作用が存在する。待ちの原因の可視化は主要な相互作用に対するより多くの研究を求める。

1 台の装置における EOW は比較的単純に定義する事ができる。工場レベルの EOW も同じ様に測定できるが、EOQ 改善計画のための EOW の能動的可視化は装置と WIP(Work in Progress)の状態によりかなり難しい。工場シミュレーターは改善実施後の計画と評価において可視化ツールを取り入れる必要がある。

業界は工場リソースと製品の状態変化をトリガとして規格化する事が求められる。特に生産設備は設備の無駄削減を容易にするために適切な粒度で出力すべきである。

NGFと 450mm移行の挑戦

ムーアの法則を維持する際に半導体業界は一つの実行可能なオプションとして面積当りのコストの 30%改善と 50%のサイクルタイム短縮のための装置改善に加えてウェーハサイズの拡大を検討する。最後に行なわれた 200mm から 300mm へのウェーハサイズの移行は 10 年前に実施し、30%コスト改善の明確な指標を示した。300mm によるウェーハ生産が 4 番目の主テクノロジー世代(45nm)に入る際に、産業界は現在の 300mm テクノロジーからシームレスでの 450mm への移行を図った。NGF(Next Generation Fab)活動が 300mm のかなりの改善と 450mm に利用可能なシームレスな改善に取り組むと期待される。ファクトリー・インテグレーション技術委員会と他の技術委員会の 450mm ウェーハ移行についての議論はビジネスチャレンジ同等の幾つかの技術を明らかにした。2010 年以降のロードマップにおいて 450mm に特化したより多くの工場サービスが系統的に検討されてゆく事が期待される。

省エネルギー

省エネルギーの主たるゴールは、その基本的な機能が記述された要求ベースのファシリティ利用モデルによる、ファシリティの運用コスト削減である。2007 年にファクトリー・インテグレーションチームは、いくつかのファシリティや製造装置のサブチームと省エネルギーの定義について共同作業を行った。この活動の挑戦課題と出力は、ファシリティの技術要求テーブルに掲載されている、装置の稼働時と待機時の使用電力の比較の指標に関するものである。装置のスリーピングモードとは、例えばウェーハの加工をしていない時(す

なわちアイドル時)にポンプを止める機能をもつことである。ファクトリー・インテグレーション技術委員会での活動は 2010 年から先もより強力に進めてゆく必要が有る。

まとめ

ITRS のファクトリー・インテグレーション章は、要求された製品を適正量でスケジュール通りに目標コストで効率的に生産するために、必要な工場の構成要素全てを統合することに焦点を当てている。ファクトリー・インテグレーションの章では、5 つのサブグループによる技術的要求と解決策をまとめた。他グループとのクロスカットからのファクトリー・インテグレーションに関する課題および重点注目分野についてもまとめた。それらは、技術的世代交代への追従、生産性改善、それと同時に、機能当たりのコストが年率 30 パーセント低下する傾向を数十年に渡って維持させる目的もある。

2009 年のファクトリー・インテグレーション章は 2 つの注目点がある。

- 1) Next Generation Factory (NGF) の技術要求事項は 450mm の序論に引き継がれる
- 2) 無駄削減の指標をシリコンスケーリング軸に対して初めて掲載した

ITRS は無駄削減をシリコンスケーリングロードマップの中で新たな共通課題としていかに幅広く取り扱うかについて検討してゆく必要がある。

ファクトリー・インテグレーション技術委員会は、ユニット当りのコスト要件や変化する技術やビジネスニーズのために工場の柔軟性を増加させるという目標をめざして努力し続けるべきであり、そして FI ITWG は 2010 以降に必要な工場のサービスと技術に対応する潜在的解決策を特定するべきである。

Technology RequirementsとPotential Solutionsに関する詳しい情報と詳細に関しては、本章やオンライン <http://www.itrs.net> でリンクされた Factory Integration ハイライトのための電子章リンクにアクセスしてください。