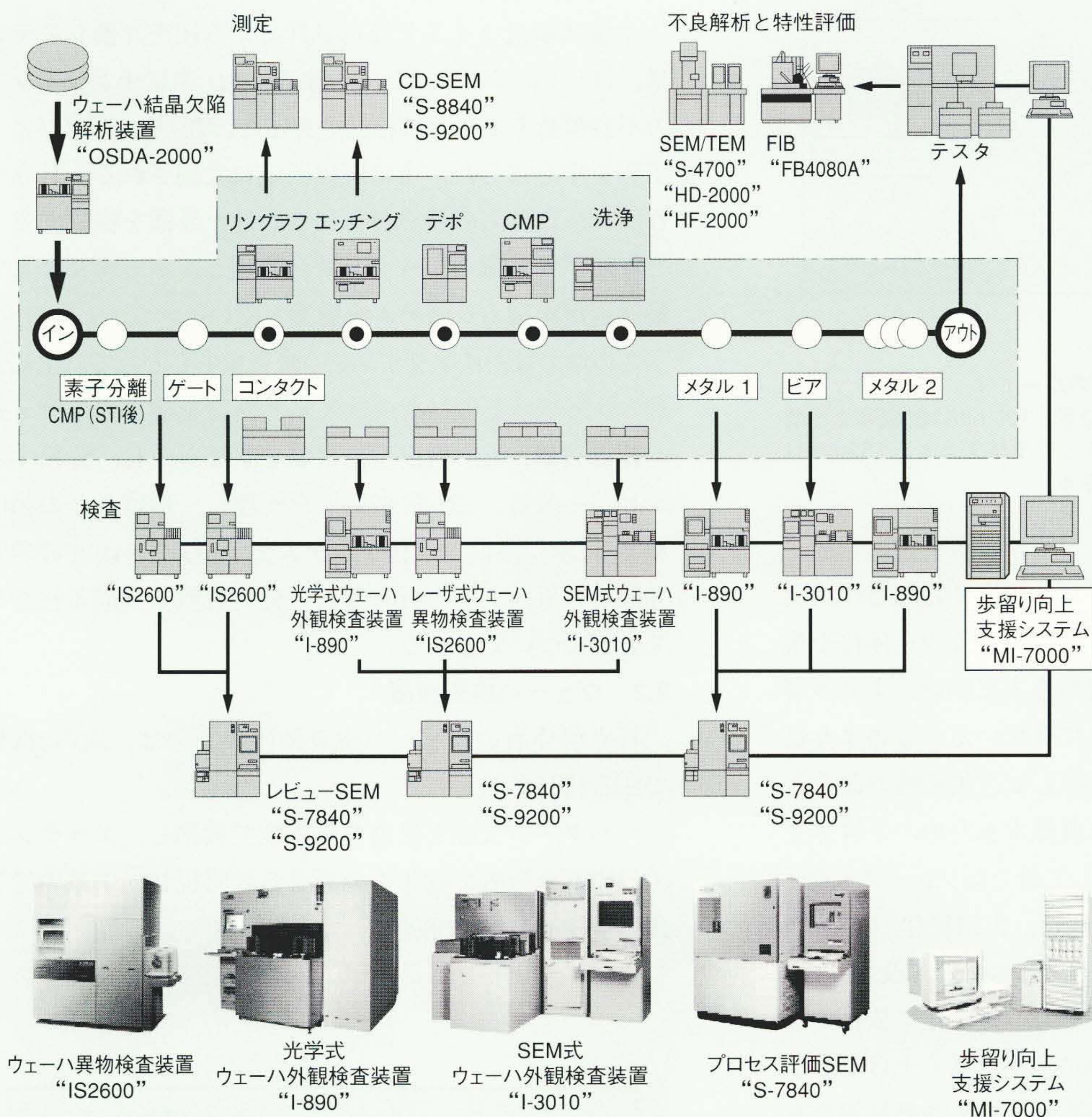


半導体歩留り向上を支援する検査システム

Semiconductor Inspection Systems for Yield Enhancement

宇佐見康継 Yasutsugu Usami
杉本有俊 Aritoshi Sugimoto
渡辺健二 Kenji Watanabe

磯貝 静二 Seiji Isogai
渡邊 哲也 Tetsuya Watanabe



注：略語説明
CD-SEM (Critical Dimension Scanning Electron Microscope)
TEM (Transmission Electron Microscope)
FIB (Focused Ion Beam)
CMP (Chemical-Mechanical Polishing)
STI (Shallow Trench Isolation)

日立製作所の半導体検査システムー半導体製造ラインでの歩留り向上を支援ー

半導体製造ラインで運用されている検査評価システムは、(1)主にインラインでの検査、(2)主にオンラインでの不良解析やプロセス特性の評価と、(3)リソグラフィ工程を中心にした、主に線幅測定に大別できる。

日立製作所は、それらの検査評価に応じた個々の装置に加え、各装置のデータを統合管理する「トータルシステム」を提案している。

半導体の微細化は、米国SIA(半導体協会)の技術ロードマップに見られるように、年々加速化の傾向を示している。一方、半導体の検査装置・システムでは、高性能化に伴う市場価格の高騰化が問題になってきている。

日立製作所は、このような背景を踏まえ、高感度・高スループットの検査装置群と、歩留り低下要因を効率よく解析する解析システム群による、適切な設備投資で効率よく運用できる「トータル検査システム」を提案している。

1 はじめに

近年、半導体デバイスの高集積化と微細化は、米国SIA(半導体協会)の技術ロードマップに見られるように、年々加速化の傾向を示している(図1参照)。1994年には「130 nmへの技術ノードは2004年」と予想されていたが、

現在すでに180 nmから130 nmの開発技術ノードに向けて開発が進んでいる。過去のSIAのロードマップ変化を見ると、100 nm以下への可能性は、同図の破線で示すように2003年ころとも予想され、微細加工への飽くなき開発が予測される。

微細加工技術の中心となる光学式パターニング技術

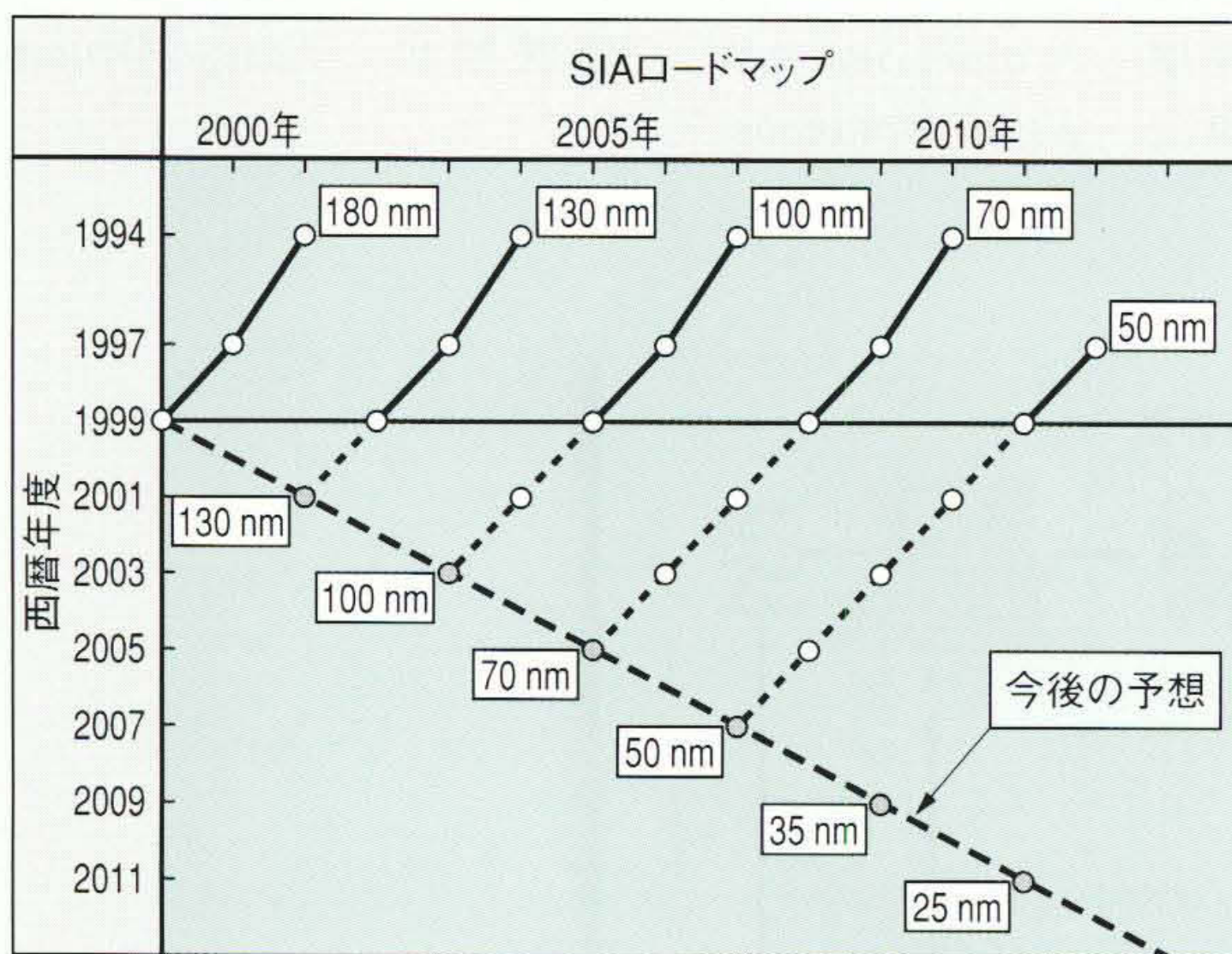


図1 米国SIAの技術ロードマップ

各年度ごとに予想した技術ノードのロードマップをプロットしたものである。現在、130 nmは2002年、100 nmは2005年と予想しているが、年々の加速傾向を加味して予想すると、130 nmは2001年、100 nmは2003年と類推できる。

(露光装置)は、すでに光学の極限を追究することが開発課題ともなっている。また、デバイスの立体化や複雑化も進み、平坦(たん)化技術の導入に伴い、より多層の配線技術の導入も実現化されてきている。このようなプロセス技術の改良や開発と並行して、生産性の改善と迅速な歩留り改善は収益確保に直結するため、半導体生産ビジネスの重要な検討課題として新たなブレークスルーが求められている。前者については、大口径化(300 mm径)を中心に検討が進んでいる。一方、歩留り改善では、半導体デバイスの微細化やプロセスの複雑化に依存することなく量産時の歩留りをいかに早く、高く上げるかが求められており、このため、半導体検査・評価装置を有機的に統合、運用するトータルシステムとしての活用が新たに求められている。さらに、半導体検査・評価装置のトータルシステムとしての運用では、設備投資額との関係も重要視されてきている。

例えば、各検査装置は、デバイスの微細化に伴い、それぞれの特徴を生かしながら、さらに高性能の装置やまったく新しい概念の装置へと発展してきており、装置も年々高価なものになってきている。これに対して、従来培った検査技術をベースとして、新たなアイデアを基に性能向上を図ることによって装置価格を抑制することが、重要なユーザーのニーズとなってきた。同様に、異なった特徴の装置をそれぞれ最適な検査条件で使用するにより、投資効率の良いトータル検査システムを提案していくことも、重要な課題となってきた。

ここでは、半導体製造上の歩留り向上を支援する日立製作所の検査システムについて述べる。

2 検査システムの概要

2.1 トータル検査・歩留り向上支援システム

半導体製造ラインで運用されている検査評価システムは、(1)主にインラインでの検査、(2)主にオンラインでの不良解析やプロセス特性の評価と、(3)リソグラフィ工程を中心にした、主に線幅測定に大別される。日立製作所は、これらの検査評価に合わせた装置を提供するとともに、各装置のデータを統合管理し、トータルとして最適運用を図るシステムを提案している。

この章では、インラインでの検査を中心として、主に、(1)ウェーハ上のパターン欠陥と異物を検出するウェーハ検査装置、(2)検出した欠陥をレビューし、分類するレビュー装置、(3)検査結果を管理し、歩留りとの相関をとる「歩留り向上支援システム」、さらに(4)その歩留り低下の原因究明を行う解析・分析装置から成る検査システムについて述べる。

2.2 ウェーハ検査装置

日立製作所のウェーハ検査装置の主力は、次の3機種である(図2参照)。

(1)パターン欠陥と異物を高感度で検出し、エッチング工程や不良分析で効果を発揮する、明視野光学系の光学式外観検査装置“I-890”

プロセス 検査装置	成膜工程	CMP工程	エッチング 工程	プラグ 工程	プロセス 解析
暗視野検査装置 レーザ式異物検査装置 “IS2600”					
明視野検査装置 光学式外観検査装置 “I-890”					
SEM式外観検査装置 “I-3010”					

注：略語説明 CMP(Chemical-Mechanical Polishing)

図2 日立製作所のウェーハ検査装置の種類と機能

各検査装置の特徴を生かし、各工程や検出したい欠陥に合わせて効率的に使用することにより、投資効率の良い検査システムを構築することができる。

(2) 段差の小さいウェーハ上の異物を高感度、高スループットで検出する、暗視野光学系を用いたレーザ式異物検査装置“IS2600”

(3) 光学式検査装置ではできない極微細な欠陥検出やビア・プラグ工程での導通不良を、電位コントラストによって高感度で検出する、SEM(走査電子顕微鏡)式外観検査装置“I-3010”

各ウェーハ検査装置について以下に述べる。

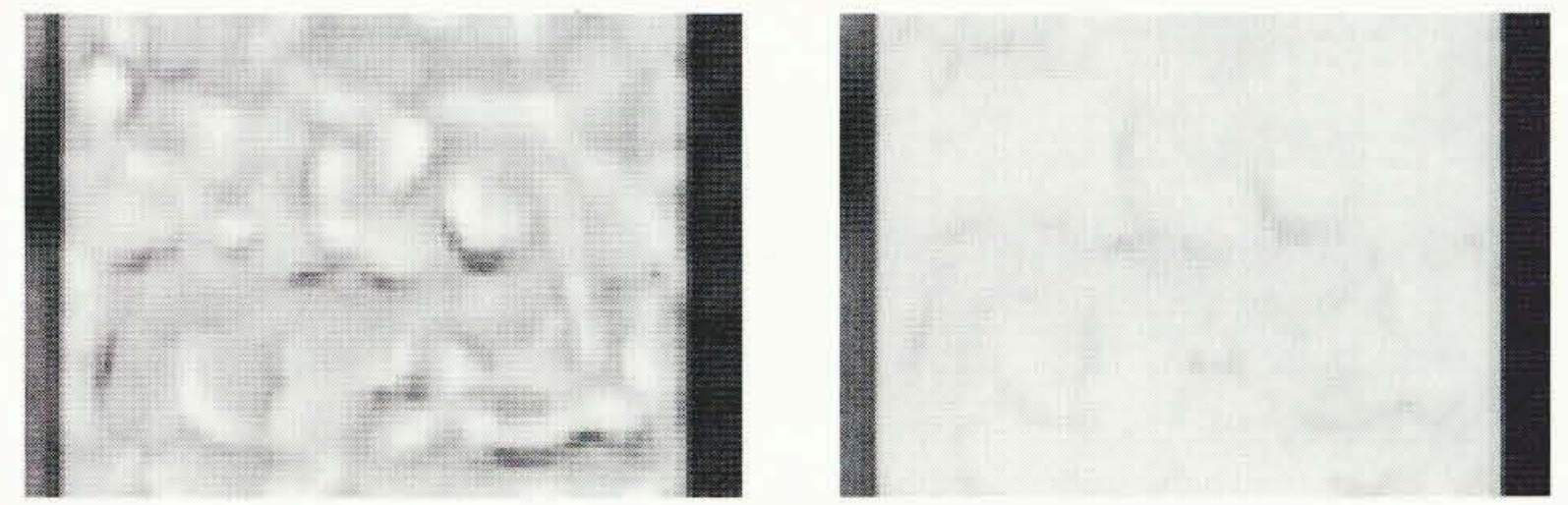
2.3 光学式ウェーハ外観検査装置“I-890”

新しいデバイスの開発に伴い、光学式ウェーハ外観検査装置には、今までにない以下のような課題に対する新たな対応技術が求められるようになっている(図3参照)。

2.3.1 新材料や新プロセスによって新たに生じる課題

一例として、今後のCu配線技術(Cuダマシン工程)やCMP技術による平坦化処理と、多層配線技術などの多用が予想される。それに伴って、配線技術ではメタルグレインの影響、平坦化処理では色むらによる影響など、検査を阻害する要素がこれまで以上に大きな問題となってくる。検査装置では、これらの検査阻害要因から発生する擬似欠陥を除去し、欠陥だけを選択的に検出することが必須となってくる。

光学式ウェーハ外観検査装置“I-890”では、検査取得画像にこれらの検査阻害要因が含まれないように光学的な改良を行っており、ソフトウェア的な後処理を行わず、ハードウェア的に検査阻害要因を検出画像から除去し、



(a) 通常検出画像

(b) グレイン対応検出画像

図4 通常検出画像とグレイン対応検出画像

“I-890”では、画像検出技術により、ハードウェア的にグレインのコントラストを小さくし、高感度で実欠陥を選択的に検出する。

欠陥だけを検出する技術を提供してきている。ハードウェア的に処理するメリットは、ソフトウェア処理で必要とされる複雑な条件設定が不要なことから、簡単なレシピ設定で運用できる点と、ソフトウェア処理に要する時間による検査速度の低下を回避できる点にある。

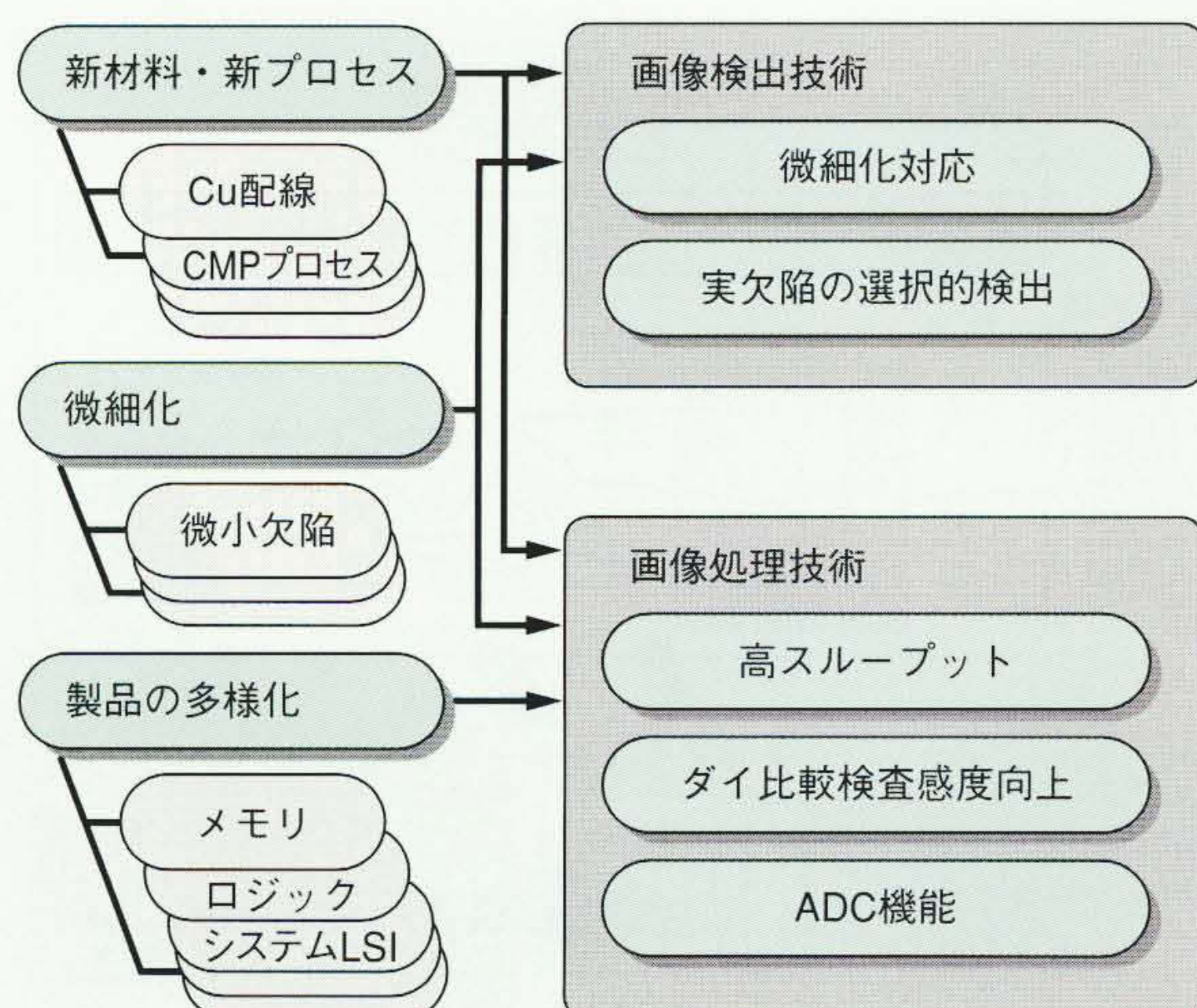
“I-890”では、配線工程で、グレイン対応モードを使用した検出画像技術により、通常の検出画像と比べてグレインの検出コントラストを $\frac{1}{4}$ に減少させ、欠陥だけを高感度で検出することができる(図4参照)。

2.3.2 微細化に伴う課題

パターンの微細化に伴い、検査装置には、高分解能や微小欠陥の高感度検出などが要求されてくる。高分解能、高感度検出の技術として、短波長化と画像検出サイズ(画像サイズ)の微細化の手法が一般的に検討されている。しかし、短波長化については、使用波長を変更するだけの単純な問題ではなく、上述した、絶縁膜などの色むらによる影響を考慮する必要がある。この点では、感度を低下させている阻害要因除去のほうに現在では支配的であるため、“I-890”では、独自技術の広帯域照明を採用している。

一方、画像検出サイズ(画像サイズ)の微細化は重要な開発課題であるが、単純に画素サイズを小さくするだけでは高分解能、高感度検出を実現することはできない。画像の揺らぎなどを含む取得画像のノイズ成分を除去できるハードウェア構成でなければ、こうしたノイズ成分から発生する擬似欠陥を増大させるだけに終わる。“I-890”では、高分解能、高感度検出を実現するために、こうした取得画像に含まれているノイズ成分を除去できる構造としている。また、高感度化に伴い、検出される欠陥が膨大な数となる。その欠陥を効率よくレビューし、分類していくためには、ADC機能の効果的な運用が必須となってくる。

“I-890”では日立製作所独自のセル・ダイ並列処理比



注：略語説明 ADC (Automatic Defect Classification)

図3 ウェーハ検査装置のコンセプト

新材料・新プロセス、微細化、製品の多様化という課題に対して、画像検出技術や画像処理技術の効果的な組合せで対応する。

較機能を搭載しており、システムLSIを高感度で検査することができる。

2.3.3 製品の多様化に伴う課題

メモリ製品では、セルの比較検査により、高感度化を図ることができた。しかし、今後の成長分野として期待されているシステムLSIでは、セル部以外を高感度で検査するためには、ダイ比較検査の高感度化が重要な技術となってくる。

2.4 レーザ式ウェーハ異物検査装置“IS2600”

レーザ式のウェーハ異物検査装置での主な課題は、(1) 高感度、高スループットの実現、(2) 繰り返しパターン上と鏡面上の異物検出感度の向上、および(3) 酸化膜上の異物検出感度の向上である。

高感度と高スループットは、相反するものである。この装置では、多チャンネルセンサを用いた並列検出系の採用により、高感度と高スループットの両立を実現している。レーザ式のウェーハ異物検査装置では、鏡面ウェーハ上での異物検出感度に比べて、パターン付きウェーハでの異物検出感度が低いことが課題である。この二つの検出感度を向上させる技術は、時として互いに相反するものである。“IS2600”では、特殊な光学系の開発により、繰り返しパターン上での異物検出感度の向上を図った。

また、酸化膜上では、膜厚のむらによる干渉などによって下地パターンからの検出信号レベルがばらつくことがあり、これを擬似欠陥として検出してしまうという問題がある。擬似欠陥を検出しないようにするためには検出感度を下げる必要があり、実欠陥の検出感度が結果的に下がってしまう。この装置では、酸化膜厚の変動に対応する検出アルゴリズムを開発し、感度を向上させている。

2.5 SEM式ウェーハ外観検査装置“I-3010”

パターンの微細化やデバイス構造の三次元化が進み、光で検出できない微細な致命欠陥が増加している。これに対応する装置として、電子線式(SEM式)外観検査装置の必要性が高まっている。

SEM式外観検査装置“I-3010”の特徴は、(1) 電位コントラストによるビア・プラグ工程などの非導通およびショート欠陥検出、(2) 0.1 μm 以下の高感度欠陥検出、(3) 200 s/cm²の高速検査などがある。特に、電位コントラスト法による欠陥検出は、新プロセス立ち上げ時にきわめて有効である。

2.6 レビューSEM“S-7840”、“S-9200”

以上述べたように、検査装置の性能向上により、検査装置からは、欠陥検査データが大量に出力される。従来

の光学式レビュー装置で運用してきたレビュー作業に代わり、微細化に伴い、SEMによるレビューの比率が増加している。レビューSEM“S-7840”には、このレビュー作業の効率化を図るため、(1) ADR(Automatic Defect Review)とADC機能、(2) 各種検査装置とのデータインタフェース、(3) 欠陥SEM画像を含むレビュー結果を上位データ解析システムに出力するインタフェース、および(4) レビュー対象欠陥を選択する欠陥サンプリング機能を搭載している。“S-9200”は、CD-SEM(Critical Dimension SEM)で定評のある高速XYステージを搭載した、高スループット・量産対応の平面レビュー用の装置である。“S-7840”は、傾斜レビュー用のSEMとして5軸ステージを搭載しており、X線分析装置を搭載することにより、欠陥(異物)の組成分析も可能である。

2.7 データ解析システム“MI-7000”

量産時での歩留り改善には、開発・試作でのデータ蓄積を基に検査工程を効果的に配置し、統計手法を活用するのが有効である。必要以上に検査工程を増やすと、生産性が低下し、労力の浪費とコスト増加につながるため、適切な検査頻度(サンプリング)と検査感度の設定が、量産時での重要課題になる。

“MI-7000”の最大の特徴の一つは、そうした検査装置からの膨大な検査データを自動的に解析処理し、その結果を自動表示し、レポートを自動的に作成する「トレースレポート機能」により、ユーザーに適切な検査システムを手軽に提供できることである(図5参照)。

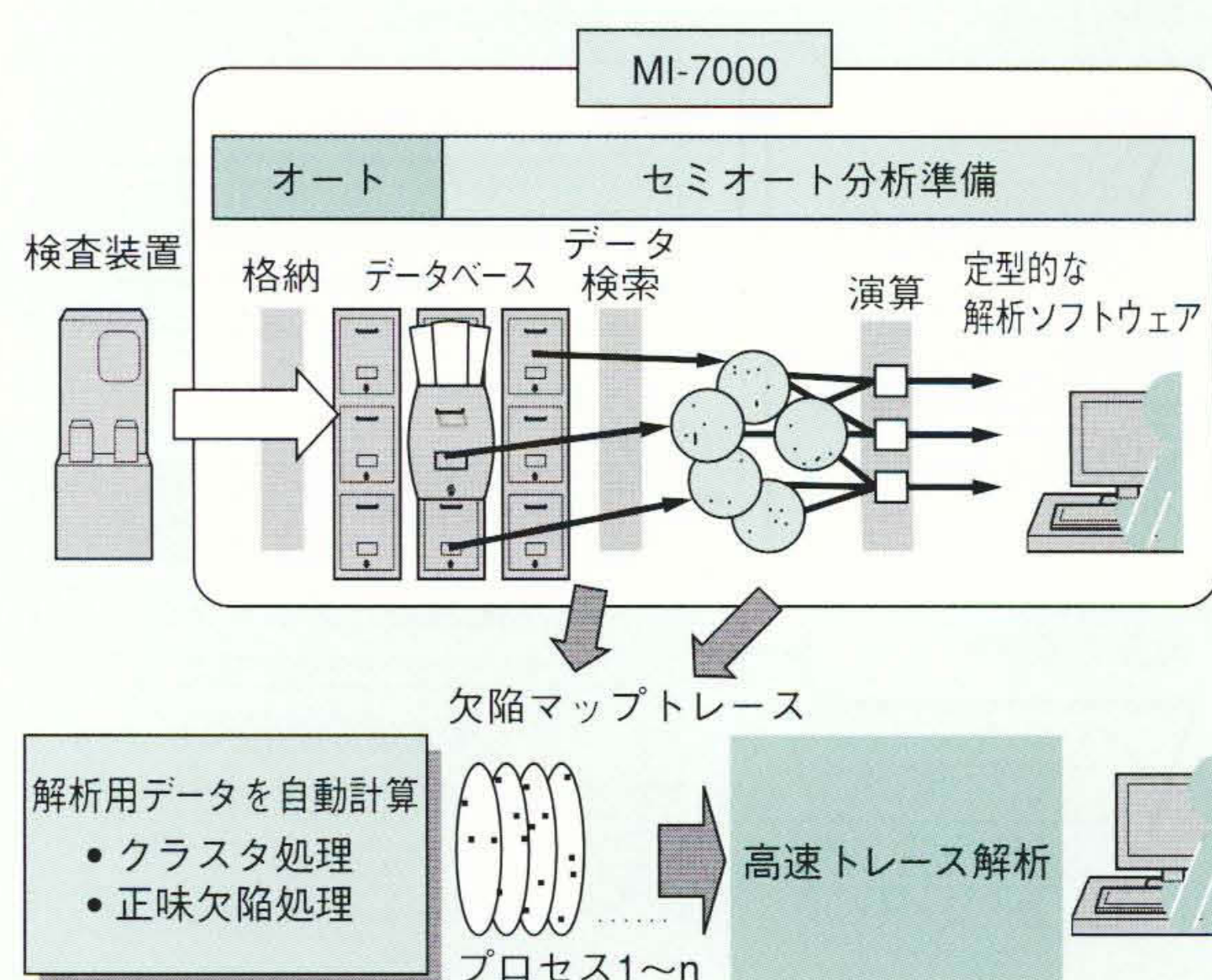


図5 データ解析システムの改善の仕組み

解析に必要なデータ前処理を自動的に行うことにより、解析結果を迅速に提供する。

従来の解析システムでは、解析担当者が、半導体製造ラインの各検査工程での膨大な検査データを、歩留りとの関係でいかに抽出表示するかという単純作業に多大な時間を費やしていた。このシステムでは、解析担当者からそうした負担を取り除き、歩留り低下の原因を究明することに集中できるように自動化を図った。トレースレポート機能によるレポートの表示例を図6に示す。同図では、横軸に工程の流れを、縦軸に投入ロットをそれぞれ示しており、現在流れているロットの各工程での検査マップを一覧で表示している。ウェーハマップ表示では、ラジオボタンにより、装置からの生データや前工程での欠陥を削除した正味のデータなどを簡単に切替表示できる。この画面を確認することにより、現在どこに問題があるかを直感的に目視認識することができる。さらに、画面上の詳細ボタンを押すだけで、そのロットのどこに問題があるかがテストとの相関関係で表示でき、各工程の歩留りインパクトを自動計算し、表示する。

以上述べたように、“MI-7000”形半導体歩留り向上支援システムを活用することにより、簡単にラインの現状を把握することが可能となり、歩留りを下げている要因分析についても、多くの統計データから問題点を指摘できる効果がある。

2.8 分析・解析システム

半導体製品を開発、試作する段階では、短期間に開発が終了するように、高感度な検査・分析技術が要求され

る。量産時の歩留り改善を見据えて、開発・試作段階で不良モードを十分に解析し、この結果をデータベースに蓄積していくことが有効である。

日立製作所は、こうした分析・解析用ツールとして、集束イオンビーム加工装置“FB-2000A”や超薄膜評価装置“HD-2000”，FE(電界放出型)SEMを用意している。

デバイスの不良解析の手法として重要な、断面構造解析を容易にするため、日立製作所のFIB(Focused Ion Beam)/HDシステムでは、試料ホルダの共通化を図っている。これにより、0.1 μm 以下の精度で解析部分を薄膜化し、サブナノメートルレベルでの評価が可能となる。また、FE・SEM“S-4700”との共通試料ホルダにより、FIB加工後のX線分析による欠陥(異物)の組成分析を容易に行うことができる。

3 0.1 μm プロセスに向けての展開

以上、現状の課題と各検査装置について述べた。今後は、これからの0.1 μm プロセスに向けたいっそうの微細化に伴い、(1) 光学式外観検査装置の、光の解像限界を超えた性能への改善、(2) 電子線式検査装置の高速化、さらに(3) 各検査装置の特徴を生かし、各工程で検出する欠陥を検査システムとして統計的に処理することによってシステムを効率的に運用し、投資効率の良い検査システムを構築していくことが重要である。いずれにしても、各検査装置では、性能の「限界」に向けて技術的な可能性を追求するとともに、「歩留り」との関連でこれら検査装置の出力をいかに効率よく取り扱っていくかがかぎとなる。

例えば、歩留りを向上させるために、欠陥と歩留りの相関を調べて対策を図っていく必要があり、より正確に相関を調べるためには、歩留りに及ぼす影響を考慮して、検査装置で検出された欠陥を正確に分類する必要がある。

プロセスの微細化に伴い、検査装置の性能が向上し、検出される欠陥数が増加していく傾向の中で、欠陥を単純にレビューし、分類することは不可能になってくる。そのため、欠陥のレビューと分類を、いかに効率よく、速く、正確に行うかで、歩留りの向上につながるデータとなるか否かが決まってしまうと言っても過言ではない。

そのためには、検査装置からデータ解析システムまでつながる検査システムの流れの中で、データ量を効率よく小さくしていくことが必要である。すなわち、各装置でさまざまな技術を駆使し、欠陥を正確に分類し、正確

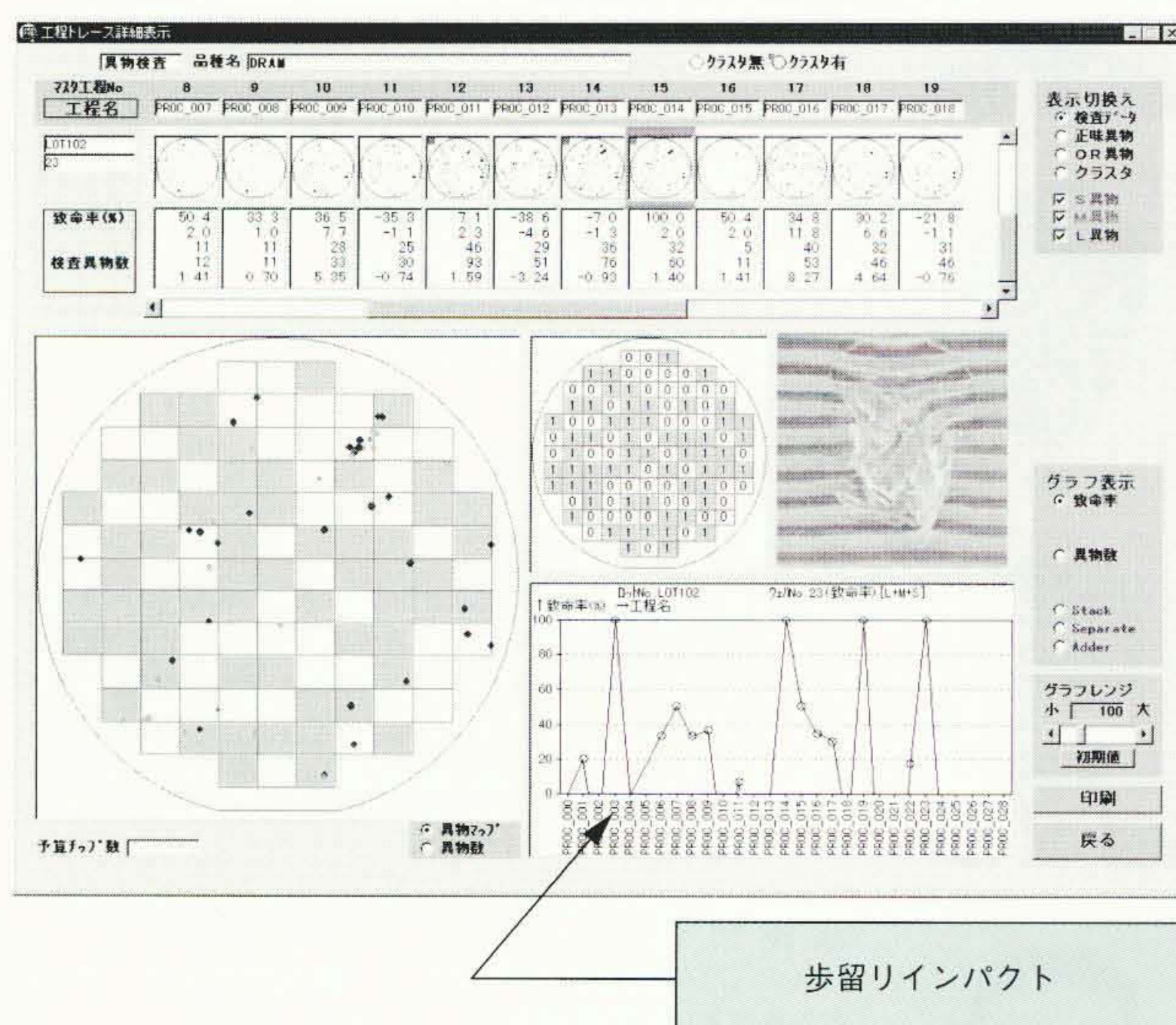


図6 MI-7000のトレースレポート機能によるレポート例

各検査工程での検査結果をマップ一覧表示するとともに、歩留りインパクトデータをグラフ表示する。歩留り低下要因の工程絞り込みが容易になる。

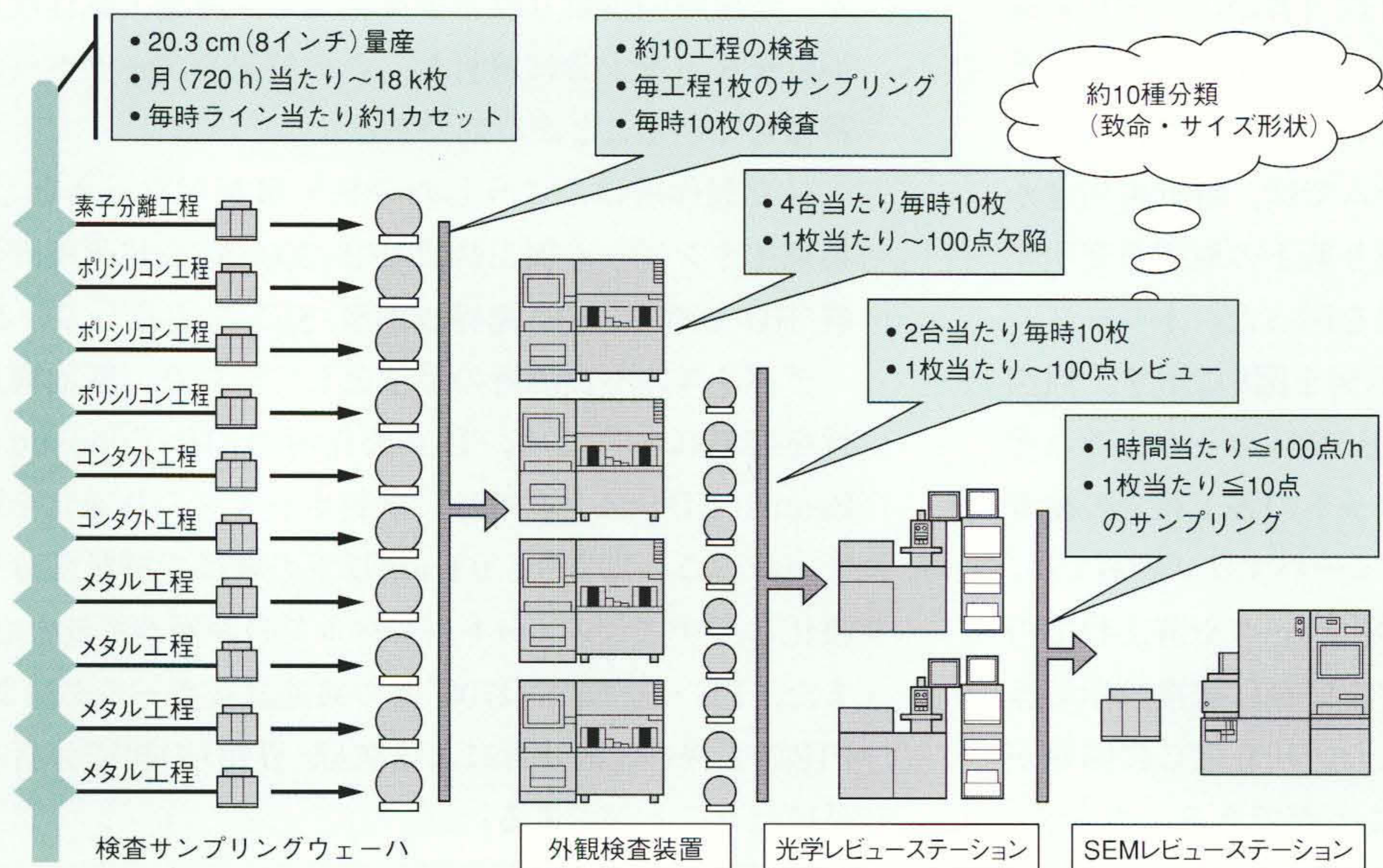


図7 大量生産工場での外観検査システムの運用方法
検査装置、光学レビュー装置、SEMレビュー装置の各段階で、データのサンプリングを行い、効率よく、かつ効果の大きい分類情報を得る。

に統計的に処理することが今後の最重要な課題の一つであると考え(図7参照)。

プロセスの微細化対応と比較して、検査システムの対応が必ずしも十分ではないと指摘されている状況の下で、これらの技術的な可能性を地道に追求していくことが、非常に重要なアプローチであると考え。また、検査そのものが半導体プロセスの一部として位置づけられる状況になった現在、これを制することが0.1 μm プロセスを制するものと考え。

4 おわりに

ここでは、半導体製造で歩留り向上を図るための日立製作所の検査装置・検査システムについて述べた。

今後も、新たな課題に挑戦し、0.18 μm から0.13 μm と続く0.1 μm デバイス時代を切り開くために技術開発を進め、顧客のニーズにこたえる検査システムをタイムリーに提案していく考えである。

参考文献

- 1) 浜田, 外: 高歩留り生産を支える半導体検査システム, 日立評論, **79**, 10, 803~808(平9-10)
- 2) 芝, 外: 半導体ウェーハ外観不良検査の効果的運用, 日立評論, **79**, 10, 809~814(平9-10)
- 3) 宇佐見: 半導体製造ラインにおける歩留り解析システム, クリーンテクノロジー(1999-9)
- 4) Semiconductor Industrial Association (SIA): The National Technology Roadmap for Semiconductors (NTRS) (1999)

執筆者紹介



宇佐見康継

1984年日立製作所入社, 計測器グループ エレクトロニクスシステム本部 所属
現在, 半導体検査システムのマーケティング業務に従事
日本真空協会会員, 日本電子顕微鏡学会会員
E-mail: usami@cm.head.hitachi.co.jp



杉本有俊

1978年日立製作所入社, 情報・通信グループ デバイス開発センタ プロセス開発部 所属
現在, LSIの工程内検査, 不良解析, 分析技術の開発業務に従事
応用物理学会会員, IEEE会員
E-mail: a-sugimo@ddc.hitachi.co.jp



渡辺健二

1978年日立製作所入社, 半導体グループ 生産統括本部 生産技術開発センタ 生産技術部 所属
現在, ウェーハ検査技術の開発に従事
E-mail: watanake@cm.musashi.hitachi.co.jp



磯貝静二

1981年日立製作所入社, 計測器グループ エレクトロニクスシステム本部 半導体検査システムプロジェクト 所属
現在, 半導体検査, 歩留り向上支援システムの開発に従事
応用物理学会会員, 電子情報通信学会会員
E-mail: isogai@cm.naka.hitachi.co.jp



渡邊哲也

1980年日立電子エンジニアリング株式会社入社, 電子装置事業部 第1装置部 所属
現在, ウェーハ異物検査装置の開発に従事
E-mail: t-watanabe@cm.hitachi-deco.co.jp