

# イノベーションを支える電子顕微鏡の進化

## 先端科学分析機器から工業用計測器へのパラダイムシフト

株式会社日立ハイテクノロジーズ  
代表執行役 執行役社長 兼 取締役

大林 秀仁

### 1 はじめに

株式会社日立ハイテクノロジーズは、2001年10月に事業統合により発足し、ナノテクノロジーやライフサイエンスなどの最先端分野におけるグローバルトップ企業をめざして事業活動を行っている。主要事業は、独自技術に基づきグローバルな競争力を備えたハイテクノロジー製品群であり、特に世界トップクラスの性能を持つ電子顕微鏡は、先端デバイス・材料から、バイオ・医療に至る広い分野で利用されている。

その中でも、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）を用いて半導体デバイスの寸法測定を行う「測長SEM」は、時代を先読みし、世界に先駆けて、長い蓄積を重ねてきた独自技術を画期的な製品の開発にまでつなげた成果であった。科学分析機器である電子顕微鏡を半導体量産ラインのインライン計測に適用するという、当時としては常識外のチャレンジを通じて実現した製品と言えるであろう。

筆者は、測長SEMの開発でユーザーの一人としてプロジェクトリーダーを引き受ける幸運に巡り合わせ、その誕生の瞬間に当事者として立ち会い、その後、設計部長という立場で第二の飛躍の一端を担うこととなった。日立グループの中には、世界最先端の技術だけでなく、世界最先端のユーザーがいる。両者が出会ったときに、世界最高峰の製品が生まれることを肌で感じた。

本稿では、SEMの高分解能化を実現したFE（Field

Emission：電界放出型）-SEMと、半導体デバイスの微細化を支えた測長SEMの技術開発について、「人と人との出会い」を通して、われわれの『開拓者たちの系譜』として辿ってみたい。なお、誌面の都合上、諸先輩・関係者のお名前は敬称を略して記述させていただくことをお断りしておきたい。

### 2 電子顕微鏡の始まり

電子顕微鏡（Electron Microscope）は、光の代わりに電子を用いることで光学顕微鏡の限界をはるかに超えた高い空間分解能が得られる顕微鏡であり、透過型（TEM：Transmission Electron Microscope）と走査型（SEM：Scanning Electron Microscope）の2種に大別される。

TEMは、1931年にドイツの物理学者 Ernst Ruska と Max Knoll によって考案され、1939年にドイツの Siemens AG が商用の第1号機を開発した。日本では、日立製作所中央研究所の只野文哉と笠井完が中心になり、日本学術振興会第37委員会（現 日本顕微鏡学会）の支援の下に1942年、国産の商用TEM第1号機「HU-2形」を開発した<sup>[1]</sup>。この装置はすべて日本での自主技術で開発した。そのような先駆的な功績が広く認められ、2009年度の電気学会「でんきの礎（いしづえ）」として顕彰される榮譽を受けた。

その後もTEMの開発は続き、1958年にブリュッセル万国博覧会で「HS-6形」、「HM-3形」がグランプリを受賞



[1] 透過型電子顕微鏡（TEM）国産商用1号機「HU-2形」（1942年）

大林 秀仁（おおばやし ひでひと）

1944年生まれ。1969年早稲田大学大学院修了。日立製作所入社、中央研究所配属。1988年第4部部长。1991年計測器事業部科学機器システム本部第一設計部部长。1995年科学システム本部長。2001年那珂事業所長、株式会社日立ハイテクノロジーズ取締役、2003年執行役常務、2004年ナノテクノロジー製品事業本部長兼CTO、2006年代表執行役執行役専務兼取締役、ライフサイエンス営業統括本部長兼CSR推進本部長兼CRO兼CPO。2007年より現職。工学博士。



した。戦後復興を通じて急速な勢いで発展を続けた日本の技術力が世界水準に達したことを象徴する快挙であった。

一方、TEMの考案から4年を経た1935年、Max Knollによって電子線を走査して像を形成するというSEMの原形がつけられた。しかし、SEMの考案から実用化にはその後、数十年もの歳月を要し、1965年に英国Cambridge Instruments Co. PLCが商用SEMの第1号機を開発した。これを受けて、日立でもSEMの開発に着手し、早くも1969年には最初の商用機（「HSM-2形」、分解能15 nm）の製品化を実現している。

## 3 FE（電界放出型）-SEM

### 3.1 FE（電界放出型）電子源の始まり

SEMの分解能は、試料上で走査されるビームスポット径に依存する。スポット径を決めるSEMの心臓部は電子源と対物レンズである。SEMが製品化された当初の分解能は加速電圧30 kVで15 nmであったが、この分解能を制限する最大の要因は電子源の輝度であった。

その後、シカゴ大学のAlbert V. Creweが、当時の電子源（熱電子型）に対して、約1,000倍の輝度を有し、波長分散が小さいFE（電界放出型）電子源を開発し、これがSEMの高分解能化を実現するブレークスルーになった<sup>[2]</sup>。しかし、FE電子源の製品化には険しい道りが待っていたのである。

### 3.2 FE技術の導入

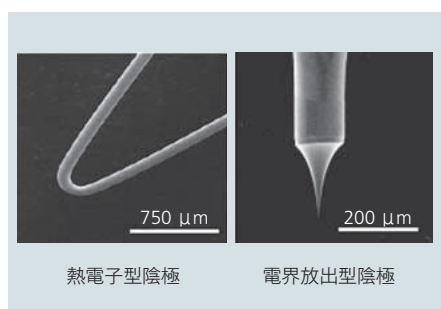
日立の中央研究所では、菰田孜、岡野寛、外村彰などによってFE-SEMの研究がすでに着手されていた。しかし、超高真空技術が皆無であった当時は試行錯誤の連続であり、FE電子ビームの安定化に苦戦していた。1968年の夏、只野文哉と牧野勇夫（当時の計測器事業部長）は、FE-SEMの研究を先駆的に推進し成果を上げていたシカゴ大学のAlbert V. CreweからFE技術の指導を受けることを決断し、Creweとコンサルティング契約を結んだ。FE-SEM開発プロジェクトはCreweを招聘（へい）し、具体的な開発設計に着手する段階に入った。これで生まれた試作1号機「HFS-1形」は当時の熱電子型SEMに対して約3倍もの高分解能（5 nm）化を達成した。

### 3.3 FE-SEMの製品化

試作1号機「HFS-1形」は、超高真空に対する不安から過度の安全設計となっていたため、商用機となる「HFS-2形」の開発では小型化を図った<sup>[3]</sup>。

電子銃の小型化によってSEMの耐振性能が改良され、「HFS-2形」の分解能は3 nmに向上した。この装置は、当時としては世界最高の分解能を保証できたため、国内外の先端研究機関に納入されて活躍し、その結果、大河内記念賞を受賞する榮譽に浴した。

しかしFE電子銃の安定化への道りは依然として険しく、一度安定化すれば、2～3年は保たれるというFEの特



[2] FE（Field Emission：電界放出型）電子源



[3] 世界初の商用FE-SEM「HFS-2形」（1972年）

微を發揮できたとは言え、しばしばチップ破損のトラブルが発生し、その立ち上げには多大の労力を要したものである。

当時の那珂工場（現 株式会社日立ハイテクノロジーズ那珂事業所）と中央研究所では、FE電子源の安定化と操作性の向上という課題に挑戦し続けた。

「HFS-2S形」, 「S-700形」と改良を重ねた結果、苦節10年の努力が実り、信頼性、操作性を大幅に向上した「S-800形」を完成した<sup>[4]</sup>。1981年のことである。この装置では超高真空用新処理技術、FEチップ表面を清浄化する新フラッシング技術などの新規技術を導入した。さらには引出し電圧のマイコン制御によるFE操作性の大幅向上など、中央研究所における地道な研究と那珂工場における技術の積み上げによる成果を結集し、世界最高の分解能2 nmを実現している。

「見えないものが見える」をキャッチフレーズにして発売したこの装置は好評を博し、信頼性と操作性で世界中のユーザーに愛用され、「FE-SEMの代名詞」と評されるまでの名声を得るに至った。この装置によって高分解能を特徴とするFE-SEMは急速に普及し、本格的なFE-SEMの時代を築いたのである。

現在、株式会社日立ハイテクノロジーズのFE-SEMは、世界市場で40%以上ものシェアを獲得している。

## 4 測長SEM

### 4.1 半導体デバイスの動向

電子顕微鏡の黎明（れいめい）期から少し経た、1948年6月30日、米国AT&T Inc.のBell Telephone Laboratoryで、William B. Shockleyらによって、トランジスタの発明が報告された。

このトランジスタは、1958年、米国Texas Instruments Inc.のJack Kilbyらの発明によって集積回路（IC：Integrated Circuit）となり、やがてトランジスタの中でも集積が比較的容易なMOS（Metal Oxide Semiconductor）型トランジスタによる集積回路がLSI（Large-scale Integra-

tion：大規模集積回路）の中心を占めるようになった。

MOS型トランジスタは、微細化することで高集積化とともに、高速化、低消費電力化、低コスト化を図ることができる。LSIは、米国Intel Corp.のGordon Mooreが提唱した「ムーアの法則」<sup>[5]</sup>にしたがって、3年で70%の微細化と高集積化が進められることになり、さらに集積度向上をめぐる企業間競争によってLSI、VLSI（Very LSI）、ULSI（Ultra LSI）へと発展した。

日立は、伊藤清男らによる、集積化に有利なDRAM（Dynamic Random Access Memory）回路の発明により、VLSIの入り口と言われた64 kDRAM（1979年）、256 kDRAM（1982年）の2世代で、製品技術、プロセス技術ともに世界を一步リードした。

当時、筆者は、世界最先端の微細化をリードしていた中央研究所のリソグラフィ（Lithography：転写技術）研究ユニットのリーダーであった。

最小線幅が1 μm程度になる1 MDRAMは、リソグラフィを含めたほぼすべての要素技術で技術的に大きな飛躍が必要と考えられていた。開発拠点であった中央研究所では、MOSトランジスタの特性ばらつきが大きな問題となった。そこでトランジスタのゲート寸法の管理をどのように行うかが焦点として浮かび上がってきた。その際、従来の寸法計測は光学顕微鏡のビデオ信号やレーザ散乱光を処理した計測技術であったが、われわれは1 μm程度の線幅の寸法測定には計測信頼性が決定的に不足していることが隘（あい）路の一因であることを見いだした。

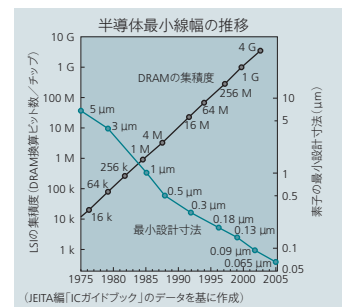
### 4.2 測長SEM開発プロジェクト

われわれの研究ユニットでは、光学式顕微鏡の代わりに走査型電子顕微鏡を利用しようと考えた。測長SEM開発の端緒である。

早速、測長SEMの設備試作を行うことにした。開発費の認可を得るまでに1年以上も要し、最終的に認可が下ったのは1982年であった。時を同じくして、デバイス開発センタ（現 マイクロデバイス事業部）と半導体事業部（現



[4] FE-SEMの時代をひらいた「S-800形」（1981年）



[5] ムーアの法則（半導体最小線幅の推移）

株式会社ルネサス テクノロジー)でも1.0  $\mu\text{m}$ -1.3  $\mu\text{m}$ の1 MDRAMの量産計画を視野に入れた1.3  $\mu\text{m}$ プロセス特別研究がスタートし、そこでも新たな計測技術として測長SEMの設備試作が提案された。

このように中央研究所の研究用測長SEMの提案とデバイス開発センタの現場用測長SEMの提案が同時並行で進行することとなり、筆者が両方のプロジェクト推進を一任された。中央研究所からは市橋幹雄、岡崎信次、中山義則ら、デバイス開発センタからは石川勝彦、半導体事業部からは杉本有俊ら若手をプロジェクト員として召集した。

デバイス開発センタの設備試作では、那珂工場に設計・製造を依頼した。中央研究所から設計部長として異動したばかりの岡野寛は、これを電子顕微鏡の一大ターニングポイントと考え、那珂工場でも測長SEMの開発を決意し、筆者のプロジェクトに加わった。

半導体を開発・製造するユーザーである中央研究所、デバイス開発センタ、半導体事業部のプロジェクトに、電子顕微鏡を提供する装置メーカーである那珂工場が加わる形でプロジェクトが結成されたのである。当時は、通商産業省(現 経済産業省)指導の超LSI技術研究組合が終了しており、今日のようなコンソーシアムといった共同研究の場が普及しておらず、ユーザーと装置メーカーが共同して開発を行うことは少なかった。その意味では、競合他社では実現が困難な、日立特有の独自プロジェクトであった。測長SEMが誕生した背景にはこの社内プロジェクトが存在し、大きな役割を果たしたのである。

### 4.3 工業用計測器としての測長SEM

当時の電子顕微鏡を半導体の計測に使用するには二つの大きな問題があった。

第一の問題は、帯電(チャージアップ)によるSEM像の劣化である<sup>[6]</sup>。それまで通常、電子顕微鏡で試料を観察する場合、試料に導電膜の蒸着を行い、電子線の照射によって発生する試料表面のチャージアップを防止していた。しかし、半導体製造工程のインラインで利用しようとすると、

この蒸着は半導体を壊してしまうために使用できない。

第二の問題は、電子線によるMOS型トランジスタへのダメージが懸念された。チャージアップとダメージを避けるためにはウェーハに与える電流とエネルギーを下げる必要があるが、入射電流、加速電圧をこのレベルまで下げると画像の解像度が劣化してしまい、計測を目的とする用途には耐えないといった問題が生じた。

岡野から那珂工場の測長SEMプロジェクトを任された斉藤尚武は、この問題を解決する方法として、戸所秀男や市橋ら中央研究所の電子顕微鏡グループの指導を受けて、「S-800形」で確立したFE技術を採用することにした。高輝度のFEならば、入射電流を下げるだけでなく、低加速で問題となる色収差も解決できる可能性があった。

測長SEMは、先人達が築き上げたFE-SEMの基盤技術に革新的な技術を新たに導入することで誕生した。ここで具体的な事例を紹介しておきたい。

#### (1) 製造ライン設置

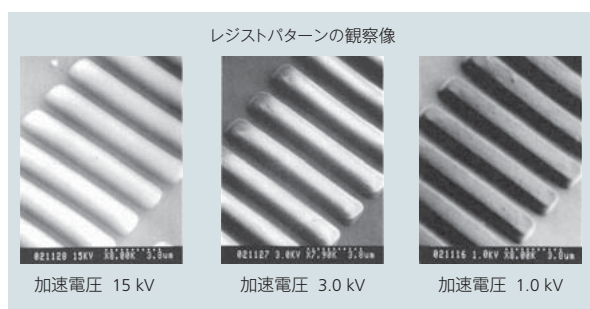
高輝度FE電子銃を採用したので、光学式寸法測定装置と同様のテレビスキャンを実現した。その結果、SEM用暗室といった特殊な設置場所を不要にし、半導体製造ラインに設置することが可能となった。

#### (2) 電子顕微鏡の動作をPCで制御化

半導体パターンのインライン計測は、測定箇所、測定条件などが図面で規定されていたので、これらを自動計測可能とした。初期の自動測定プログラムは、デバイス開発センタの高本健治が那珂事業所に長期滞在して、図面指示を自動計測するプログラムのみならず、ユーザーが使いやすいGUI(Graphical User Interface)を作成した。

#### (3) 傾斜ステージからの脱却

開発段階では、当時、電子顕微鏡で一般的に採用されていた5軸傾斜ステージ(XYZ軸と $\theta$ 回転軸、および傾斜軸の5軸を持つステージ)を採用するべきであるといった意見が、特に従来からSEM開発に参画していたベテラン技術者を中心に主張されたが、プロジェクトチームで協議した結果、測長SEMには傾斜機能のないステージ(XY軸の



[6] SEMによる半導体計測の課題(チャージアップと分解能の両立が困難)

みが移動するステージ)を採用した。傾斜ステージに関しては、二次電子信号の発生効率で損失が生じる点などが懸念されたが、「寸法を測る」という一点に集中して精度を求めれば、真上からの測定が断然に有利であり、筆者自身も傾斜なしステージの選択を決断した。当時、傾斜ステージを採用した競合他社に対して、われわれが処理速度(スループット)や信頼性で圧倒し、結果として顧客に受け入れられたことを考えると、適切な判断であった。それは、SEMの分野で「測長SEM」という一分野を築く原点にもなったのである。

#### (4)寸法標準の準備

測長SEMプロジェクトは、電子顕微鏡を工業計測に使用するためには、計測値のトレーサビリティが保証される必要があると判断し、中山らが電子顕微鏡用寸法標準を開発した。この寸法標準も、財団法人日本品質保証機構の校正証明書が添付された「マイクロスケール」として製品化された<sup>[7]</sup>。これにより、測長SEMは計測器としての必要要件を満たすことができた。

こうして、1984年、世界初の測長SEMである「S-6000形」が誕生した<sup>[8]</sup>。

科学分析の「観(み)る」世界から工業用の「測る」世界へと変貌(ぼう)を遂げることで、新たな市場を開拓した。これらは革新的な技術の投入という以上に、ニーズ主導による先端科学分析機器としての電子顕微鏡から工業用計測器へのパラダイムシフトであった。

販売を担当した日製産業株式会社(現株式会社日立ハイテクノロジーズ)の中野和助は、試作機を見て、「これはすごい装置だ」と直感したという。しかし、発売当初の「S-6000形」の売れ行きは決して芳しいものではなかった。日立がデバイスメーカーでもあったため、半導体各社のユーザーは、その日立から測長SEMを購入することには強い抵抗感を示したのである。中野らの粘り強い、また、計画的な販売作戦が功を奏して、1年後の1985年には、冷ややかな対応であった顧客からも引き合いが出始め、国内市場に納入が始まった。続いて、米国、韓国、台湾のデ

バイスメーカーにも受け入れられるようになり、その後、全世界でトップシェアの座を得るまでに成長した。

#### 4.4 ユーザーとともに

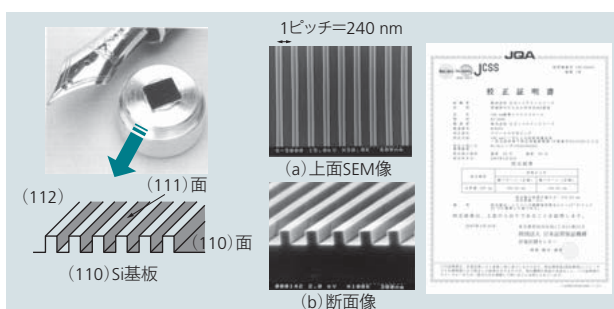
1990年代に入り、時代は16 MDRAM、半導体プロセスは0.35  $\mu\text{m}$ の量産時期を迎えようとしていた。市場では競合メーカーが6社も登場し、また半導体のシリコンサイクルと言われる景気動向もあり、市場競争は厳しさを増して出荷台数は最大期の60%近くまで落ち込んだ。さらに、競合メーカーから、日立を上回る処理速度(スループット)や、自動化や操作性に優れた装置が発表され、次第にシェアを伸ばしていた。

この時期には半導体ユーザーの測長SEMの使い方も大きく進歩し、24時間365日という使い方が当たり前になってきたため、安定して稼働率が高く、自動化が進んだ装置が要求されるようになっていた。

S-6000シリーズでは、FE電子源を使用していたが、FE電子源は使用しているうちに電子源の周りを浮遊する気体分子が電子源の先端に付着して、放出電子線を妨げるという現象が生じる。そのため1日のうちに2、3時間、電子線を安定化するリフレッシュ作業(フラッシング)が必要であった。当初は顧客に受け入れられた技術が、いつしか顧客のニーズに合わないものになっていたのである。

筆者は、1991年に中央研究所から那珂工場に転勤して設計部長を拝命した。このとき、すでに他社との競合が激化していて、設計部門は必死の努力を重ねていたものの注文は競合他社に流れる事態が続いていた。そんな中、筆者は、「24時間365日で安定して使用できる電子源でなければ勝てない」と確信していた。

実は1980年代にL. W. Swanson博士らによって提案された新しいFE電子源、SE (Schottky Emission) 型電子源の技術がすでに確立されており、従来のFE (Cold FE)と比較してその放出電流の安定性がきわめて優れている特徴を備えていた。ただ、実績がないために当時の工場幹部からは「Cold FEで何とかならないのか」と再三にわたって



[7] 寸法標準マイクロスケールと校正証明書の例



[8] 世界初の測長SEM「S-6000形」(1984年)

詰め寄られたが、筆者は「SE型電子源でなければ勝てない。認めていただければ設計部長を辞任させていただく」と渾（こん）身の説得に努めた。その努力が報われて、結果的には事業部長の決断でSE型電子源を用いた測長SEM開発の認可が下った。

乱立する競合他社を上回り、微細化、高スループット化、自動化など、多様化する顧客要求を満足させるためにはSE型電子源の採用とともに、全面的なモデルチェンジが必須であった。このとき、設計部門のリーダーを任せたま高正は、競合他社を凌駕（りょうが）する製品のコンセプトを練り上げた。米国を皮切りに、欧州、韓国、国内の顧客を一社一社訪問して製品コンセプトを説明し、直接、顧客との意見交換を行う中で、徐々に最終的な製品のイメージが固まっていった。こうして、1994年に販売開始した「S-8800形」測長SEMは再び市場を席巻することとなった。

その後、これら顧客とも積極的な技術交流を図り、信頼関係を築くとともに、常に顧客要求を先取りする技術開発を重ね、「S-9300形」、「CG4000形」と新製品を投入して顧客の微細化に先行して対応してきた<sup>[9]</sup>、<sup>[10]</sup>。そして、2008年には測長SEMの世界市場で再び、80%超のシェアを獲得するまでに成長を続けたのである。

株式会社日立ハイテクノロジーズは、2008年、日立製作所、株式会社日立ハイテックフィールドイングとともに、電子顕微鏡を科学機器から工業用計測器として測長SEM開発し、長年にわたりLSIの微細化に貢献したことが認められ、大河内記念生産賞を受賞することができた。

## 5 おわりに

岡野は、日本顕微鏡学会での指定講演、「生産管理装置としてのCD-SEMに関する考察」（2008年）で、測長SEMの成功のポイントを、電子顕微鏡を生産装置として安定性・稼働率・信頼性が得られるように改良してきたことを挙げ、今後、電子顕微鏡がより広範な市場を獲得するためには、安定性・稼働率・信頼性の確立が必須となると

まとめた。





われわれは、測長SEMで培った電子顕微鏡の安定性・信頼性をベースに、半導体ウェーハ上の微小な欠陥を観察する「欠陥レビューSEM」、微小な欠陥の有無を検査する「電子線検査装置」、きわめて小さいマニピレータをSEMの真空室内に装着し、LSIの電氣的不良を解析する「ナノプローバ」など、顧客の求める半導体用電子線応用評価装置を開発し、半導体デバイスの発展に寄与している。

株式会社日立ハイテクノロジーズの電子顕微鏡、特にFE-SEMの発展は、第一にはFE電子源の独自技術の確立による高分解能化と高信頼性の実現と、第二にFE-SEM普及による新材料、デバイスのみならず、バイオや医療などの研究開発用途への貢献であり、そして第三には、時代を先読みしてユーザーと連携して用途を広げ、工業用途に新たな市場を開拓した成果である。

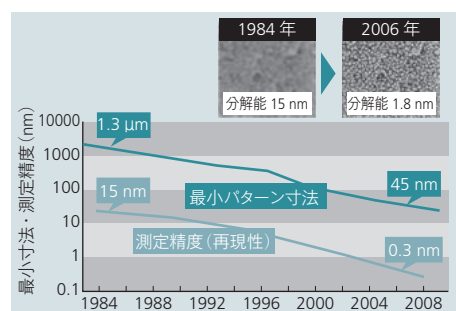
われわれは、諸先輩が築き上げた独自技術と、何よりも世界をめざす熱き「開拓者精神」を引き継いでいる。今後もこの戦略を継承して、さらに発展が期待されるナノテクノロジー分野、或いはエネルギー分野にも先端ユーザーと連携して市場を広げ、「観る・知る・測る」電子顕微鏡による社会貢献を通して、グローバルトップ企業をめざしていきたい。

### 参考文献

- 財団法人電気学会編：第2回 でんきの礎—振り返れば未来が見える—, p.10~11 (2009.7)
- 独立行政法人国立科学博物館：産業技術史データベース, 資料番号 103510401095
- Y. Nakayama et al.: Proposal for a new submicron dimension reference for an electron beam metrology system, pp.1930-1933, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.6, No.6, Nov/Dec (1988)
- JEITA 半導体部会ICガイドブック編集委員会編：ICガイドブック, 2009年
- 財団法人大河内記念会編：第43回大河内記念賞受賞論文集 (2008.3)
- 岡野, 外：生産管理装置としてのCD-SEMに関する考察, 日本顕微鏡学会第64回学術講演会予講集, p.38 MG03-01 (2008.5)

形式	S-6000形	S-8800形	S-9300形	CG4000形
外観				
発売時期	1984年	1994年	1997年	2006年
分解能	15 nm	5 nm	3 nm	1.8 nm
再現性	15 nm	5 nm	3 nm	0.3 nm
スループット	8枚/時, マニュアル操作 (6インチウェーハ, 5点測定)	20枚/時 (6インチウェーハ, 5点測定)	13枚/時 (12インチウェーハ, 20点測定)	36枚/時 (12インチウェーハ, 20点測定)
ウェーハサイズ	4, 5, 6インチ	5, 6, 8インチ	8, 12インチ	8, 12インチ

[9] 測長SEMの進化



[10] デバイス微細化に先行する分解能・測定精度向上