

6. 電子ビーム直接描画技術の研究

6.1 はじめに

ホトマスク製作の歴史には、LSI時代に入って以降、二つの大きな技術転換点がある。一つは、パターン微細化の推進力となったEB直接描画技術の導入であり、他の一つは、ホトマスクパターン多層化の端緒となった位相シフトレチクルの実用化である。

2 μ mプロセス用ホトマスクの製作に於いて、初めてEB直接描画技術が導入・実用化された。微細パターンの加工と、ホトマスク製作時間の短縮を目的として、適用されたものである。電子ビームは、光ビームに比べると、より細く絞ることができ、高精度に制御できることから、微細パターンの高精度加工に適している。また、従来の光方式に於ける露光2工程を、EB直接描画1工程に削減できることから、製作時間の短縮が可能になる。本研究では、EB直接描画技術の導入・実用化を図る過程で、高精度な電子線レジストプロセスおよび検査技術の開発を行った。

0.3 μ m光露光技術では、従来技術の限界が明確になり、より高解像な露光技術の導入が必要になった。新しい高解像露光技術は、超解像露光技術と呼称されている。超解像露光技術の中でも、パターン解像性能・実用性から見て、位相シフト露光法が最も優れている。³³⁻³⁴ 位相シフト露光法とは、従来の露光法が「光の振幅変化だけを利用して」のに対し、「振幅変化に加えて、位相変化を活用する」方法である。露光光に位相変化を生じさせるために、シフトを用いる。原理を図6.1に示す。シフト有り・無しのパターンが、交互に繰り返される。隣り合うパターンを透過した光の位相が反転していることに拠り、ウェハ上の光強度プロファイルを急峻化、すなわちレジストパターンの形状を改善できる。光強度プロファイルのシミュレーション例を図6.2に示す。図中、NAは縮小投影レンズの開口数であり、 σ は露光光のコヒーレンシである。

位相の反転方法には、図6.3に示すような各種の方式がある。各種方式の解像性能をシミュレーションした結果が、図6.4である。水銀ランプのi線(波長:365nm)とKrFエキシマレーザー光(波長:250nm)について、光強度プロファイルのコントラストを示してある。レベンソン型³⁴の解像性能が最も優れており、レベンソン型位相シフト露光法が今後の光露光技術の主流になると考え、i線対応レベンソン型位相シフト露光法の実用化を図った。i線用位相シフト露光法を適用するためには、位相シフトレチクル製作技術の新規開発が必要となった。

位相シフトレチクル製作では、“従来のCrレチクル上に位相シフトパターンを形成する技術”の開発に加えて、“Crパターンの大幅な微細化”が必須である。図6.5に、Crパターン最小加

工寸法の推移を示す。0.5 μ mプロセスでの2.5 μ mから、0.3 μ mプロセスでは、一足飛びにサブミクロンの加工を行わなければならない。穴パターン加工には、遮光効果強調型の補助パターン方式が最も実用的であり、補助パターンでは、約0.6 μ m~0.7 μ mのパターン加工が必要となるからである。このような背景から、サブミクロンCrパターン加工の技術開発を含め、0.3 μ mプロセス対応の位相シフトレチクル技術を開発した。

ウェハへのEB直接描画技術適用は、光露光技術の限界を乗り越えようとする試みから始まった。LSIの目覚ましい発達には、パターン微細加工技術の進歩に負うところが大きい。パターン加工には、光露光技術が用いられてきた。マスクパターンをウェハ上に光転写する方法である。しかし、光露光に用いる露光光の波長は数百nmと長く、1.0 μ m以下（サブミクロン）の微細パターンを加工することが、極めて困難と予測されていた。1970年代末のことである。このような背景から、光露光技術に代わるサブミクロンパターンの加工方法として、ウェハ直接描画技術やX線露光技術の研究が進められていた。光よりも波長の短い電子ビームやX線を、露光光として利用する方法である。中でも、ウェハ直接描画技術は実用化の最短距離にあり、次世代のパターン加工法として、最も有力視されていた。³⁵⁻⁴³

このような状況の中で、サブミクロン・パターンの加工を実現することと、ホトマスク費用削減やLSI開発期間短縮などの経済的効果を狙いとして、ウェハ直接描画技術の研究・開発を行った。経済的効果の大きい適用対象は、少量多品種のカスタムLSIである。ロットサイズに対するスループットと、ウェハ延べ生産枚数（生涯ウェハ枚数）に対するウェハコストの試算例を、光露光技術との比較で、図6.6に示す。極少量品に対しては、EB直接描画が光露光技術よりも経済性に優れている。

実用化できたとは云うものの、ウェハ直接描画技術の適用は、先端LSIの開発・極少量カスタムLSIの生産に限られていた。ウェハ直接描画技術を発展させるためには、適用拡大を図ることが必須である。適用拡大の要点は、経済性の向上、すなわち高スループット化に帰着する。このような観点から、0.3 μ mプロセス用高スループット・ウェハ直接描画技術の研究・開発を行った。サブミクロン対応の加工精度向上と並行して、高スループット化を図ったものである。

6.2 ホトマスク製作技術

6.2.1 2 μ mホトマスク製作技術

(1) ホトマスク製作フローと研究・開発内容

EB直接描画技術は、微細Crパターンの加工を目的として、2 μ mホトマスクに於いて初めて導入・実用化された。開発した2 μ mホトマスクの製作フローを図6.7に示す。最初に、電子線レジストを塗布したマスク基板と、描画データに変換されたLSIのパターンデータが、EB描画装置に搭載される。マスク基板は、5インチ角・厚さ2.3mmの透明なガラス板上に、70nm~80nm厚さのCr遮光膜（以下、Cr膜と略記）をスパッタ形成したものである。このマスク基板上に電子ビームを照射・パターン描画し、レジストを感光してゆく。パターン描画には、点ビーム・ラスタ走査・ステージ連続移動方式を用いた。X方向のステージ移動とY方向の電子ビーム偏向を組合せ、マスク基板上全面を電子ビーム走査（ラスタ走査）することに依って、パターンを描画する。走査電子ビームが描画データに依って制御され、照射が間欠的に行われるため、LSIパターンに対応する領域のレジストのみが感光される。用いた電子線レジストはネガ型のPGMA（ポリグリシジル・メタアクリレート）であり、400nmの厚さに塗布されている。感光されたPGMAは現像処理され、レジストパターンがマスク基板上に形成される。現像液は、メチルエチルケトンとエチルアルコールの混合水溶液を用いた。

形成したレジストパターンをエッチングマスクとして、Cr膜をスプレイ式装置でウェットエッチングし、マスク基板上にCrパターンを形成する。用いたエッチング液は、硝酸第2セリウム・アンモニウム $Ce(NO_3)_4 \cdot 2(NH_4NO_3)$ を主剤とし、過塩素酸 $HClO_4$ を補剤とするものである。エッチング後、不要となったレジストパターンを110℃のオゾン硫酸液に浸漬・除去し、Crパターン加工が終了する。次いで、Crパターンのパターン寸法、パターン位置精度、およびパターン欠陥の有無を検査する。パターン欠陥は、除去あるいは修正され、ホトマスクが完成する。

上記EB直接描画式ホトマスク製作技術を実用化する上での主要課題は、パターン微細化に合わせて、高精度な電子線レジストプロセス、および検査技術を開発することであった。レジストプロセス技術の開発、特に、微細Crパターンの高精度エッチングを実現する過程で、

- (i) 現像後、Crエッチング前のプラズマアッシング工程に於いて、Cr膜が存在することに起因したローディング効果のあることを見出すとともに、その発生機構を解析した。
- (ii) Crスプレイエッチングに用いるための、新しいエッチング終点検出機構を開発した。

検査技術の開発では、検査結果から得られた知見および問題を、製作プロセスに短時間で効果的にフィードバックするという視点から、

(iii) 検査データのオンライン収集・解析システムを開発した。

(2) Cr膜上レジストのアッシングレートに見られるローディング効果

現像後のレジスト残渣除去と、ウェットエッチング時の濡れ性改善を目的として、O₂プラズマアッシングを行う。Crパターンを精度良くエッチングするための一課題が、このアッシング処理の精密化である。不用意なアッシング処理はレジストを削り過ぎ、レジストパターンの寸法ばらつきを増大させるからである。

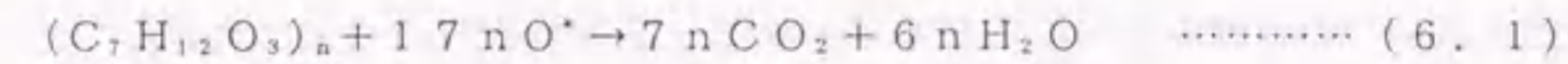
アッシング処理を精密化する過程で、「ガラス基板上的Cr膜が、アッシング処理時の負荷として働く」という「新しいローディング効果」を見出した。アッシング処理は、平行平板型反応炉を用いて行った。反応炉は、200mm径の水冷・ステンレススティール製電極を有し、13.56MHz・40WのRF電力で動作する。アッシングガスとして、O₂を67Paの圧力で導入し、2分間のアッシングを行った。その結果、図6.8に示すようなアッシングレート特性が得られた。マスク基板上的レジストパターン占有面積率が大きくなるとともに、アッシングレートが増大する。この特性は、従来知られていたSi基板上的アッシングレート特性とは、異なる傾向を示している。同様の傾向は、RF電力、アッシングガス圧力、アッシングガス種などの処理条件や、反応炉を円筒型に変えても観測された。なお、アッシングレートは、アッシング処理前後のレジスト膜厚変化を測定して求めた。膜厚測定には、光干渉方式の膜厚計(NANOSPEC社製AFT)を用いた。

この現象を解析するために、次のような実験を行った。まず、Cr膜とガラス基板での特性の違いを調べた。図6.9はガラス基板上的アッシングレート特性を示す。図6.8と同一処理条件で測定した。レジストパターンの占有面積率が増大するとともに、アッシングレートは減少する。また、アッシングレートが全体として高い。この傾向は、従来知られていたプラズマエッチング特性と類似しており、「酸素ラジカルはレジストのみと反応し、酸素ラジカルの供給量が反応速度を律する」というモデルで説明される。⁴⁴ この結果から、「Cr膜上では、酸素ラジカルとレジストの反応に加えて、Crと酸素ラジカルとの反応が同時に発生している」と考えられる。

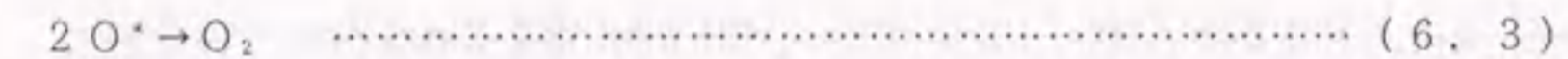
このモデルの妥当性を検証するために、オージェ電子分光分析を行った。図6.10は、アッシング処理前後での、CrとOの深さ方向分布である。深さ分析時のスパッタエッチングには、Arイオンを用いた。アッシング処理前後のO濃度に、顕著な違いが認められる。アッシング処理後に、

Cr膜表面のO濃度が急増していることから、酸素ラジカルとCrの反応が生起していること、すなわち上記モデルの正しいことを確認できた。

この結果は次のように解釈できる。ガラス基板では、PGMA、すなわち(C₇H₁₂O₃)_nが酸素ラジカルO*と次式のように反応している。



上式から、レジストパターン占有面積率が高い場合には、酸素ラジカルの消費量が増大するため、酸素ラジカルが供給律速となって、アッシングレートの低下することが分かる。Cr膜上では、レジスト膜における(6.1)式の反応に加えて、次式の強い反応が起こっている。



レジストパターンの面積が小さく、露出したCr部分の面積が大きい領域では、(6.2)および(6.3)式の反応が支配的となり、酸素ラジカルが消費される。従って、レジストパターンの占有面積率が小さいほど、アッシングレートは低下する。

レジスト残渣を除去するためのアッシング工程に於いては、従来とは異なるローディング効果が観測されることを見出した。「Cr膜が負荷として働く、すなわち、レジスト・酸素ラジカルの反応と競合して、Crと酸素ラジカルの強い反応が起こっている」と考えられる。

(3) Crスプレイエッチングのためのエッチング終点検出機構

マスク基板の周辺部に光を照射すると、Crエッチングが進行するにつれて、入射光のマスク基板透過率(透過光強度)は増大し、エッチング終了時点で飽和する。すなわち、透過光強度の飽和点を検出することによって、エッチング終点を判定できる。この原理を利用して、新規なスプレイエッチング用のエッチング終点検出機構を開発した。

エッチング終点検出機構の構成を図6.11に示す。検出機構は、① 入射光を発生し、マスク基板に照射するための光源、② マスク基板透過光を反射させるためのコーナ・キューブ、③ コーナ・キューブからの反射光を検出し、電気信号に変換するための光検出器、④ 反射光と同期したタイミングパルスを発生するためのスリット付き円盤とホトセンサ、⑤ 光検出器から出力された電気信号を処理し、終点を判定するための制御回路とから成る。

光源と光検出器はマスク基板上方に配置される。コーナ・キューブは、マスク基板下方のマスクホルダに装着されており、マスク基板透過光を光検出器に向けて反射する。スリット付き円盤

もマスクホルダの回転軸に固定されている。円盤上に刻まれたスリットは、コーナ・キューブが丁度光源の真下に回転してきた時に、ホトセンサの位置を通過するように調整されている。ホトセンサは、スリットを通過した透過光を検出して、制御回路を同期動作させるためのタイミングパルスを発生する。コーナ・キューブからの反射光は、光検出器で受光され、タイミングパルスに同期した電気信号が得られる。この電気信号は、制御回路に伝送・演算処理され、終点検出に用いられる。

図6.12は制御回路のブロック図である。光検出器から制御回路に入力した電気信号は、増幅された後、タイミングパルスに同期して、マスクホルダ一回転に一度の割合でサンプリングされ、AD変換器に伝送される。AD変換器ではデジタル信号への変換が行われ、デジタル信号は8ビットのマイクロコンピュータに入力される。マイクロコンピュータでは、信号を処理し、エッチングの終点を判定した後、エッチングを停止させるための制御信号をスプレイエッチング装置に送信する。

エッチング終了時のAD変換器出力が、ノイズ起因で10%程度変動することを考慮し、より正確に終点を検出するため、マイクロコンピュータでの信号処理は、図6.13に示すアルゴリズムを用いている。最初に、ノイズに因る影響を小さくするため、電気信号を平滑化し、移動平均処理を行う。処理後の出力データ $T N_n$ は、次式で表される。

$$T N_n = (\sum V_n) / i \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

ここで、 V_n は移動平均処理前のn番目のサンプリング信号である。iは平均するサンプリング信号の数であり、通常16程度を選んでいる。次に、判定精度を上げるための差分処理を行う。エッチング終点は、反射光強度の飽和する点、すなわち移動平均処理後のデータが飽和し差分処理データが0になる点に相当する。差分処理されたn番目のデータ T_n は、次式のように表される。

$$T_n = (T N_n - T N_{n-j}) / \Delta t \cdot j \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

ここで、 $T N_n$ および $T N_{n-j}$ は、移動平均処理後のn番目と(n-j)番目のデータである。jは処理に用いるサンプリング数であり、予め決められた定数である。 Δt はタイミングパルス、すなわちサンプリング信号の間隔であり、マスクホルダの回転数に逆比例している。図6.14にデータ処理の例を示す。図6.14(a)は光検出器の出力電気信号である。図6.14(b)は移動平均処理後の平滑化されたデータである。図6.14(c)は差分処理後のデータであり、終点判定に用いられる。差分処理後のデータ T_n が0に落ち着いた時点で、エッチングを停止させるための信号が、スプレイエッチング装置に向けて送信される。

Crパターンのスプレイエッチング加工を高精度に行うため、「マスク基板の透過光がコーナ・キューブで反射した光を検出し、移動平均処理・差分処理した後に、エッチング終点を検出する」という新しい方法を開発した。エッチングを精密に行えるようになった結果、Cr寸法ばらつきを、従来の $\pm 0.2\mu\text{m}$ から、 $\pm 0.1\mu\text{m}$ に低減することができた。

(4) 検査データのオンライン収集・解析システム

ホトマスク製作プロセスの診断・評価を迅速かつ効果的に行い、精密なプロセス制御を実現するため、検査データのオンライン収集・解析システムを開発した。ホトマスク検査データをオンラインで取得・保管・検索でき、各種ホトマスク品質管理用帳票の自動作成や、欠陥修正装置への所要データ転送などが可能である。

システムのハードウェア構成を図6.15に示す。パターン寸法検査装置、パターン位置検査装置、パターン欠陥検査装置、パターン欠陥修正装置、およびホストコンピュータ、制御コンピュータから成る。制御コンピュータに付属したディスクメモリは、検査装置制御やデータ転送の他、システムダウン時はデータを一時記憶し、システムの早期回復を図るために用いられる。

ソフトウェアは図6.16に示すような階層構成になっており、寸法検査部、欠陥検査部、およびデータ管理部から構成される。寸法検査部は、寸法検査装置制御の他、検査装置からの寸法データ取り込み・データ管理部への出力に用いられる。欠陥検査部は、検査装置からの欠陥データ取り込み、データ管理部への出力、欠陥関連データの欠陥修正装置への転送、ホトマスク規格パラメータの管理に用いられる。データ管理部は、パターン寸法、欠陥等のホトマスク品質に係わるデータ、EB描画装置の描画精度に関するQCデータ等を一括管理する。検査データは項目別に管理されており、製作日などのキーワードによる分類や検索、各種帳票の自動作成が可能である。

帳票作成ソフトウェアの構成を図6.17に示す。マスク検査表は、ホトマスク一枚毎の欠陥マップに合わせて、欠陥密度、パターン寸法、EB描画装置QCデータ等を出力できる。PQC表は、パターン寸法、欠陥密度、EB描画装置描画精度などの推移を出力できる。マスク重ねマップは、複数のホトマスクの欠陥やパターン寸法位置座標を重ね合わせて、表示・出力する。

検査データをオンラインで取得・保管・検索できるシステムを開発した。現在のCIMの考え方を10年以上先取りし、実用化したシステムである。本システムの適用に拠り、製作プロセスの早期診断・評価が可能となり、ホトマスク加工の高精度化・低欠陥化を促進した。また、従来1枚当たり1時間以上要していた帳票作成が、5分間程度に短縮された。

6. 2. 2 サブミクロン・ホトマスク製作技術

(1) 位相シフトレチクル製作フローと開発技術

0.3 μ m光露光技術には、始めて、位相シフト露光法が用いられた。位相シフト露光用のレチクルには、シフター層/シフタ二層のシフタ構造の違いに対応して、図6.18に示すような各種方式が有り、方式によって所要の製作技術が異なる。これら方式の中から、実用性や経済性を考慮して、Crパターン上に一層のシフタパターンを配置する“シフタ上置き構造”を選択した。シフタには、表6.1に示す項目を比較検討した結果、早期実現が可能なことから、SOG (Spin on Glass) 塗布膜を採用した。

SOGシフタ上置き構造の位相シフトレチクル製作フローを図6.19に示す。前述の2 μ mホトマスク製作方法に準じてCrパターンを加工した後、シフタパターンを形成する。シフタパターン形成工程では、Crパターン上にSOG膜を塗布した後、シフタパターン描画、現像、SOGエッチング、シフタパターン検査、およびシフタ欠陥の修正を行う。

本製作技術の実用化に必要な研究・開発課題を、図6.19に示している。これに基づいて開発した主な技術内容は、次の通りである。

Crパターンを主対象とするサブミクロン加工については、

- (i) 高精度EB描画装置 EB-MXの開発。
- (ii) 高解像度化学増幅系ポジ型電子線レジスト・プロセスの開発。

位相シフタ加工については、

- (i) 光学的特性を満足した上、化学的・機械的に耐性の強いSOG材の開発。
- (ii) SOGシフタパターン加工技術の開発。
- (iii) FIB GAE (Focused Ion Beam Gas Assist Etching) を用いた位相シフタ欠陥修正技術の開発、である。

また、異物検査については、シフタ上異物の検出感度が大幅に低下し、異物検出感度向上が今後の課題であることを明らかにした。以下、各開発技術の内容を述べる。

(2) 高精度EB描画装置

描画精度を向上し、サブミクロンパターンの加工を実現するため、EB-MX (日立製作所製 HL-700M) として市販) を開発した。描画方式は、実用的なスルーブットを得るため、可変矩形ビーム・ベクタ走査・ステップ&リピート方式を用いている。描画精度解析の結果、最大の精度劣化

要因は、床振動に起因する電子光学鏡筒の振動であることが分かった。光学鏡筒部と試料室の一体性を高め、剛体化することに拠り、描画精度向上を図った。0.05 μ mの寸法精度、0.06 μ mのパターン位置精度で、0.3 μ mパターンを描画できる。汎用的な従来装置、日立製作所製 HL-700M、と比較して、2倍の描画精度向上である。また、従来のホトマスク用EB描画装置と異なる点は、下地のCrパターンに位置合わせをしてシフタパターンを描画するために、高精度なアライメント機能を有していることである。0.06 μ mのアライメント精度が得られている。装置仕様を纏めて表6.2に示す。

(3) 高解像度化学増幅系ポジ型電子線レジスト・プロセス

レベンソン型位相シフトレチクルの場合、Crパターンは、シフタパターン配置上の制約から、ネガ型となる。ネガ型パターンを描画するためには、描画時間を短縮できることから、ポジ型電子線レジストを用いることが望ましい。しかし、従来のポジ型電子線レジストは、解像性能が悪く、高精度なサブミクロンCrパターンの加工が困難であった。そこで、後述するウェハ直接描画用に開発した高解像度ポジ型電子線レジスト、PSR、のホトマスク適用を図った。

新しくホトマスク用に開発したポジ型電子線レジスト (日立化成からRE-5100Pとして市販) は、化学増幅系であり、1.5 μ C/cm² (20keV) の高い感度で、0.5 μ m以下のパターンを解像できる。RE-5100Pの解像性能測定例を、従来レジストRE-5000P (日立化成製) との比較で、図6.20に示す。RE-5100Pのプロセス条件は、塗布膜厚360nmで、90 $^{\circ}$ C・5分間の露光後ベークを行っている。現像には、2.38%のTMAH (テトラメチル・アンモニウムヒドロキシド) 溶液を用いた。

なお、化学増幅系レジストを使用する際には、プロセス処理後の寸法変動に注意の要ることが知られている。加熱や電子ビーム照射に因って発生した酸が、刺激停止後も生き残り、触媒作用を続けることが寸法変動の原因と考えられる。特に、「プリベークから描画までの時間と、描画から露光後ベークまでの放置時間を制御することが重要である」ことが分かった。レジスト寸法の処理後放置時間依存性を図6.21に示す。

(4) SOG材

シフタとしては、表6.1に示す項目を満たしていなければならない。まず、塗布特性に優れていることから、有機SOGを選択した。波長365nmのi線露光に於いて、屈折率が約1.45のSOGシフタを用い、180 $^{\circ}$ の位相差を生じさせるためには、約400nmのSOG膜厚が必要となる。無機SOGの場

合は、膜焼成時の収縮応力が大きく、クラックが発生するため、400nmの厚さに塗膜することが困難であった。一方、有機SOGは、数 μm 厚さの膜形成が可能であり、塗布膜の平坦性も優れている。本有機SOGは、シラノール化合物、触媒、および溶剤から構成されている。i線に対する光透過率は、90%以上である。

次に、オゾン硫酸洗浄に対する耐洗浄性を検討し、有機SOGの組成を決定した。組成と化学構造を図6.22に示す。耐洗浄性に関しては、洗浄時のシフト剥がれが最大の問題となった。シフト剥がれについて検討した結果、シラノール化合物中の $-\text{OH}$ と $-\text{CH}_3$ の割合、および触媒（アルコキシ）中のメトキシとエトキシの量が、剥がれ程度に大きく影響していることを見出した。

シフト形成に用いた焼成温度200 $^{\circ}\text{C}$ の場合、シラノール化合物中の $-\text{OH}$ と $-\text{CH}_3$ の割合が1:1の時に、最も剥がれ難いことが分かった。シラノール化合物中の $-\text{CH}_3$ が多い場合には、オゾン硫酸で分解し、 $-\text{OH}$ が多い場合には、発生した微小クラックを経由して硫酸が浸透して行くため、剥がれ易くなるものと考えられる。なお、焼成温度は、内部応力を小さくするとともに、ボイドの発生を抑えるため、必要最低限の値に設定している。

$-\text{OH}$ と $-\text{CH}_3$ の比率が1:1のシラノール化合物を用い、アルコキシ中のメトキシ量、およびエトキシ量に対するシフトとしての特性を調べた。その結果、以下のことが判明した。①メトキシの量は少ない方がよい。②エトキシの量には最適値が有る。エトキシの量が少な過ぎると、剥がれ易い上、マスク基板上での濡れ性が悪く、塗布ムラを生じる。

上記のような検討に基づいて、SOG材の組成を決定した。得られたSOG材（東京応化から Type 7T80として市販）は、110 $^{\circ}\text{C}$ ・60分間のオゾン硫酸洗浄を行っても、シフト剥がれが発生しない。

上記検討に拠る最適組成のSOG材について、耐光性を評価した。20 kJ/cm^2 のi線を照射した後も、SOG構造、および屈折率の変化は見られなかった。SOG構造の観測には、FT-IRスペクトルを用いた。i線照射前後のFT-IRスペクトルと屈折率の測定結果を、図6.23に示す。

(5) SOGシフトパターン加工技術

シフトパターン加工のプロセスフローと主な仕様を、図6.24に示す。以下、特徴となる点について述べる。

(i) SOG塗布

塗布工程に於ける最大の課題は、塗布膜厚の均一化である。透過光の位相ばらつきで $\pm 5^{\circ}$ 以下、SOG膜厚ばらつきに換算して $\pm 10\text{nm}$ 以下が要求される。従来のマスク基板だけが回転する方式では、

20数nmの面内膜厚ばらつきがある。ばらつき状態を観ると、塗布膜がマスク基板の角部で盛り上がり、膜厚の厚くなっていることが、最大のばらつき要因であった。これは、ウェハなど円形基板の塗布と違い、角形基板の角部は空気を切りながら回転し、中央部よりも早く乾燥するためと考えられる。

上記問題の対策として、液晶デバイス製作に用いられている回転カップ方式のレジスト塗布装置を、レチクル製作に転用することとし、装置を製作した。装置構成を図6.25に示す。ローダ部、回転カップ部、減圧乾燥部、ベーク部、およびアンローダ部から構成されている。回転カップ部では、マスク基板とカップが一体になって回転し、膜形成される。周囲の空気がマスク基板と一緒に廻るため、SOGの乾燥速度が遅く、乾燥の面内ばらつきも小さくなる。その結果、角部での塗布膜盛り上がりを抑え、膜厚ばらつきを低減できる。回転カップ方式で塗布したSOG膜の厚さ測定結果を、従来方式との比較で、図6.26に示す。膜厚ばらつきが2~3nmと、従来の1/10程度に低減できた。

塗布後の減圧乾燥は、洗浄時のシフト剥がれを軽減するために導入した。従来の常圧ベーク乾燥では、洗浄時のシフト剥がれが多い。剥がれ原因の推定モデルを図6.27に示す。ベーク初期のSOG表面に、ガス抜けの悪い緻密な表層が形成される。この表層が障壁となり、SOG膜中の溶剤や水分が気化・脱出し難くなる。脱出できず膜内に蓄積されたガスは、内部応力を生じる。膜内応力はガスを膨張させる方向、すなわちSOG/基板界面の接着性を弱くする方向に働く。緻密な表層が形成され難いことから、ベーク前乾燥を減圧雰囲気中で行うこととした。

(ii) SOG上シフトパターン描画

EB直接描画は、微細加工の面で優れているが、絶縁性のSOG膜上でチャージアップし、描画パターンの位置ずれを生じる。Crパターン加工の場合は、Cr膜に導電性が有り、電荷がリークされるため、チャージアップに因る影響が小さい。しかし、SOG膜の場合は導電性が悪いので、照射電子の一部が石英ガラス基板、SOG膜、およびレジスト膜内に蓄積され、負に帯電する。負の帯電電荷は、斜め方向から入射した電子ビームの軌道を弾く方向に曲げ、描画位置精度を劣化させる。チャージアップに因る位置ずれの説明図と測定結果を、図6.28に示す。位置ずれ量 dR は、帯電電圧 dV と電子ビーム偏向距離 R に比例し、次の経験式で表される。

$$dR/R = k(dV/V) \dots\dots\dots (6.6)$$

ここで、 V は電子ビームの加速電圧、 k は定数である。帯電による影響を軽減するためには、レ

レジスト表面を導電性の薄膜で覆う方法が、最も効果的である。レジスト上に塗布形成が可能な導電性高分子膜を、

① 導電率が高く、薄い膜で十分な効果が有ること。

② 工程数の増加が少ないこと。

を目標として開発した。開発された導電性膜（昭和電工製 エスベイサー100）は、ポリ（チエニル—アルカンスルホン酸）化合物を主成分とするもので、レジスト上での濡れ性を善くするため、界面活性材が添加されている。① 成膜性に優れ、容易に塗布形成できる。② 水溶性であり、特別な塗布前処理や膜除去工程を必要としない。③ 高い面導電率（0.01~0.5S/cm）を有し、薄膜使用が可能である。④ 高い安定性を有し、長期保存が可能である、といった特徴を持っている。

プロセス上は、この導電性膜をレジスト上に直接回転塗布する工程を加えるだけでよい。結果として、Cr膜上と同等の描画位置精度が得られている。安定性については、抵抗値の塗布後放置時間依存性を調べた。測定結果を図6.29に示す。塗布後100時間までは問題無く使用でき、ホトマスク製作への支障はない。

(iii) 洗浄

マスク基板に付着した異物を除去するため、洗浄には、スピンプラシ式スクラブ洗浄と循環濾過式オゾン硫酸洗浄を組み合わせ使用した。乾燥にはIPAベーパー乾燥を用いている。この洗浄プロセスを開発する過程で、洗浄後の残留硫酸イオンがシフト剥がれの要因となっていることを見出した。Cr加工での洗浄時に残留した硫酸イオンが、Crパターンや石英ガラス基板表面を親水化し、シフト加工での洗浄時に硫酸液の界面侵入を容易にするためと考えられる。このモデルの説明図を図6.30に示す。

上記モデルの妥当性を確認した結果が図6.31である。洗浄後のリンスを、25℃純水から60℃の温純水に換えることに依り、残留硫酸イオンを約1/4に低減できる。その結果、耐洗浄性の大幅な改善が実現されている。なお、耐洗浄性の評価には洗浄サイクル数を観測した。残留イオンの測定にはイオンクロマト法を用いた。

(6) 位相シフト欠陥修正技術

従来のCrパターン欠陥修正には、例えば、次のような手法が採られている。

(i) Cr残存欠陥の除去：残存欠陥部分にレーザー光を照射し、残存部分のCrを蒸散・除去する。

(ii) Cr欠損欠陥の補修：欠損欠陥部分にカーボン雰囲気中でFIBを照射し、カーボンの遮光

膜を堆積させる。

しかし、シフト欠陥修正には、次のような理由で、上記技術を流用できない。

(i) レーザ光照射に依る欠陥除去は、SiO₂シフトと石英ガラス基板との選択性が取れず、基板を損傷させる。また、加工端の制御精度が悪く、今後の高精度修正の要求には応えられない。

(ii) FIBによるシフト膜形成は、堆積に要する時間が長く、実用性に欠ける。

上述のような状況から、「高精度な修正を最優先とし、FIBを加工ビームとして用いる」を基本として、新たにシフト欠陥修正技術の開発を行った。開発技術の内容は、

(i) シフト残存欠陥除去：石英ガラス基板に損傷を与えることが無いFIB GAE技術。

(ii) シフト欠損欠陥補修：FIBスパッタリングに依る基板掘込み技術。

FIB GAEは、エッチング部分にエッチングガス雰囲気中でFIB照射を行う方式であり、物理的エッチングに化学的エッチングが加わるため、より高いエッチング速度と選択比が得られる。基板掘込みは、基板上にシフトを重ねて180°の位相遅れを生じさせる代わりに、基板を半波長分割り取り、180°の位相進みを生じさせる方法である。

上記技術に準じた修正のフローを、図6.32に示す。GAE用エッチングガスとしては、各種エッチングガスを比較検討した結果、高エッチング速度が得られることから、XeF₂ガスを選択した。XeF₂ GAEは、FIBスパッタリングに比較して、約10倍のエッチング速度であり、石英ガラス基板に対するエッチング選択比は3程度の値が得られている。エッチング速度、選択比の測定結果を図6.33に示す。GAEのエッチング速度、選択比はFIB照射条件に大きく依存している。図6.33の場合には、エッチングガス供給律速の領域にあるため、FIBの走査線間隔が大きいほど、走査速度が大きいほど、相対的に大きなエッチング速度と選択比が得られる。

また、FIB照射時には、チャージアップによる位置ずれを防ぐため、約100eVの電子ビームでシャワーしている。その結果、±0.05μmの加工位置精度が得られている。また、GAEを用いた場合には、FIBスパッタリングの時に見られる光透過率低下の問題を解消できることが分かった。照射部分に残留する注入Gaイオンを少なくできることの効果と考えられる。

なお、装置面では、XeF₂ガス導入に起因する試料室内の材料腐食や部品劣化を防止するため、耐腐食性材料を使用するとともに、二次電子/イオン検出器MCP (Micro-channel Plate) 保護用のシャッター機構を設けている。主な装置仕様と性能を表6.3に示す。

(7) 異物検査技術

レジスト上に付着した異物は転写欠陥となるため、付着異物を検査・除去しなければならない。レチクル上の異物検査には、図6.34に示すような方法を用いる。レチクルの斜め上方からレーザー光を照射し、異物から散乱された光を集光・検知する。この時、Crやシフトパターンエッジから散乱された光は、雑音として働き、異物検出感度を低下させる。上記手法を用いて、位相シフトレチクルの異物検出特性を評価した。測定結果を図6.35に示す。位相シフトレチクル上異物の検出感度は、従来のCrレチクル上異物の検出感度に比べて、大幅に低下することが分かった。シフトパターンエッジの雑音散乱光強度が大きいためである。シフトパターンエッジの散乱光が強くなる理由は、シフトパターンエッジの段差が、Crパターンエッジに比べて、数段高いことに因るものと考えられる。結果として、従来のCrレチクルで得られていた $0.5\mu\text{m}$ の異物検出感度は、位相シフトレチクルの場合、Cr膜上で $1\mu\text{m}$ 、シフト/石英ガラス基板上で $2\mu\text{m}$ にまで低下する。今後、異物検出感度向上の必須であることが明らかとなった。

(8) 位相シフトレチクルとウェハへの転写例

上記技術を用いて製作した位相シフトレチクルを64M-DRAMの主要工程に適用し、試作を行った。その結果、解像マージンの大きい、良好な加工結果が得られている。位相シフトレチクルの製作例として、ラインパターンと穴(ホール)パターンの写真を図6.36に示す。ラインパターンにはレベンソン型、ホールパターンには補助パターン方式を用いている。なお、レベンソン型だけではシフトパターンを設計できない場合がある。そのようなLSIパターンに対しては、“細かいシフトパターンで遮光部を形成する方法”を採り、効果的手法であることを確認した。

ウェハ上へのラインパターン転写例を図6.37に示す。レベンソン型位相シフト露光法を用いることに拠り、従来露光法では解像できなかった $0.35\mu\text{m}$ パターンを転写できている。なお、ラインパターン転写には新しく開発したネガ型i線レジスト、穴パターン転写には従来のポジ型i線レジストを用いた。

6.3 ウェハ直接描画技術

6.3.1 サブミクロン・ウェハ直接描画技術

(1) ウェハ直接描画の原理と開発技術

ウェハ直接描画の原理と研究・開発した技術を図6.38に示す。電子ビームを筆として、電子線レジストを塗布したウェハ上に、下地パターン(アライメントマーク)に位置を合わせながら、パターンを一筆書きしてゆく方法である。電子ビームの動きは、偏向器を介して、描画データに依って制御されている。一方、ステージの移動は配列データに依って制御されている。電子ビームとステージの動きを組み合わせ、ウェハ全面のパターン描画を行う。EB描画装置を制御するためのデータの流れを図6.39に示す。なお、描画データとは、図6.40に示すように、LSIパターンの図形データから重なりを除去し、矩形・台形などの基本図形に分解したものである。

ウェハ直接描画技術を実用化する上での要点は生産性、すなわち描画のスループットであった。高スループット化のための主な研究・開発課題は、次の3項目である。

- (i) 高速EB描画装置：EB描画装置を高スループットにするための技術開発方向は、図6.41に示すように、電子ビームの大サイズ化、偏向フィールドの拡大、および走査の高速化であることが知られている。この考え方に沿って、従来の点ビーム・ラスタ走査方式に代わり、可変整形(可変矩形)ビーム・ベクタ走査方式を採る装置を開発した。目標スループットは4インチウェハを対象として、10枚/時である。この値は、従来スループットの数倍である。
- (ii) 描画データ管理・転送オンラインシステム：「必要に応じ、必要とする描画データを、即時にEB描画装置に入力できる」ことが必須である。このため、従来の磁気テープを媒体とする入力方法に代わり、データベースを構築した。データベースから描画データを読み出し、高速・オンラインでEB描画装置に転送できる。
- (iii) 高感度電子線レジスト・プロセス：当時、高解像で耐エッチング性が有り、目標とする感度 $2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ を満足する電子線レジストが無かった。解像度 $0.5\mu\text{m}$ 以上(レジスト厚さ $1\mu\text{m}$)、感度 $2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下(電子ビームエネルギー 30keV)を目標として、レジスト材料、プロセスの開発を行った。 $2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の感度は、従来レジストに比べて、一桁以上高い値である。

(2) 高速EB描画装置

開発したEB描画装置(日立製作所製 HL-600Dとして市販)の主な仕様と高スループット化技

術を図6.42に示す。1 μm パターンに対する精度保証値を表しているが、0.5 μm パターンの描画も可能である。アライメント精度は $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以下であるが、実用的な重ね合わせ精度は、この数値よりも悪い値となった。解析した結果、電子ビームの偏向変動が劣化要因となっており、実用的な重ね合わせ精度Rは、次の経験式で近似できることを明らかにした。

$$R = \sqrt{(A^2 + 2 \cdot \Delta D^2)} \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

ここで、Aはアライメント精度であり、 ΔD は電子ビームの偏向変動量である。「最大の偏向変動要因は、ウェハや電子ビーム通路周辺の汚れに起因したチャージアップである」ことが分かった。ウェハのチャージアップを軽減するため、後述の導電性膜を開発した。

開発上の最大課題は、高い描画精度を確保した上で、高スループットを達成することであった。開発の過程で、次の2点が高精度と高スループットを両立させる上での問題となり、現象の解析と改善策の検討を行った。

(i) 可変矩形ビームのビームサイズに依存して、描画パターンの寸法が変わる。

例えば、3 μm 幅のパターンを2 $\times 6\mu\text{m}^2$ のビームサイズで描画する場合と、0.5 $\times 6\mu\text{m}^2$ のビームサイズで描画する場合とでは、描画パターンに0.05 μm 程度の寸法差が生じた。現象を解析した結果、ビームサイズに依存して焦点位置が変化し、寸法をばらつかせていることが分かった。ビームサイズが大きくなるとともに、焦点距離が長くなる方向に変化する。この現象は、電子間のクーロン斥力に因るものと考えられる。電子ビームサイズ、すなわちビーム電流が大きくなると、電子が受けるクーロン斥力も増大する。クーロン斥力の増大はビームのぼけ量を大きくし、焦点距離を長くする方向に働く。ビームサイズに依存したビームぼけ量、および焦点位置変化の測定結果を、図6.43に示す。

上記検討から、寸法ばらつきを低減するためには、「最も多用されるビームサイズで、描画時の焦点合わせを行うことが重要である」ことが明らかとなった。

(ii) ベクタ走査の場合、パターン密度が低い描画領域では、描画パターンの位置が大きくずれる。

パターンが殆ど存在しない、パターン密度の極めて低い領域では、最大で0.2 μm 程度の位置ずれが発生した。この現象を解析した結果、渦電流に起因した電子ビームの偏向遅れに因ることが分かった。図6.44に説明図を示す。偏向器に偏向電流を流すと、電流の大きさに比例して、電子ビームが位置を変える。この時、コイルインダクタンスや渦電流に起因して、偏向電流の立上りが鈍るため、電子ビームの偏向が遅れる。偏向の遅れは、電子ビーム(描画パターン)の位置ずれをもたらす。したがって、パターンは、偏向遅れを待つための整定時

間を置いて描画される。本装置の整定時間は、高速化のために、必要最小限の値50 μs に設定されている。50 μs の整定時間は、通常のパターン描画に於いては、0.01 μm 以下の無視可能な位置ずれを生じるだけである。しかし、描画パターン数の少ない描画領域が幾つも続く特殊な場合には、偏向電流変化が大きくなるため、大きな渦電流を派生する。大きな渦電流は偏向遅れを増大させる上に、この偏向遅れが重畳されて行き、大きな位置ずれとなる。

上記検討の結果、高スループットと高い描画精度を両立させるためには、「電子ビーム偏向量に応じて整定時間を変更する等の工夫が必要である」ことが明らかとなった。

(3) 描画データ管理・転送オンラインシステム

開発したオンラインシステムの構成を、図6.45に示す。システム工場(カスタマ)から通信回線を通して伝送されたパターンデータは、大型コンピュータに依って描画データに変換される。描画データは、光ケーブルを経由して、データベースに転送・格納される。データベースに保管された描画データは、EB描画装置からの要求に応じて、随時EB描画装置に読み込まれ、使用される。なお、大型コンピュータからデータベースへの転送速度は100kB/s、データベースの格納容量は20GB、データベースからEB描画装置への転送速度は20kB/sである。

課題は、データ転送に要する時間が、描画作業遂行上の隘路にならないようにすることである。そのためには、近接効果補正に伴う描画データ量の増加を最小限に抑えることが重要となる。技術的には、近接効果補正を可能な限り簡略化することが要点である。

近接効果とは、電子ビームがレジスト内で散乱され広がることに起因して、描画パターンの忠実性が劣化する現象である。近接効果による忠実性の劣化を補正するためには、図6.46の(a)、(b)、および(c)に示す方法がある。中でも、パターン幅に応じて露光量を変える(a)の方法が、最も簡便である。簡便な近接効果補正で済ませるため、近接効果の程度を小さくすることが基本であると考え、後述の3層レジスト法を開発・実用化した。その結果、図6.46(a)の手法で対応することが可能となった。CMOSロジックに用いた近接効果補正の例を図6.47に示す。パターン幅2.3 μm 以上の露光量2 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ に対し、パターン幅2.3 μm 以下の露光量を2.5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ と大きくすることに拠り、補正無しの場合に0.3 μm 有った寸法シフト量が、0.2 μm 以下に低減できた。

(4) 電子線レジスト・プロセス

高感度・高解像度で耐エッチング性の有るポジ型電子線レジスト(日立化成から RE-5000Pと

して市販)を新規に開発した。溶解阻止型のレジストである。ノボラック樹脂をベースレジントし、PMPS(ポリ[2-メチルペンテン-1-スルホン])を溶解阻止剤に用いている。RE-5000Pの組成と化学構造を、表6.4に示す。従来のレジストは、現像時に膨潤するため、十分な解像度が得られなかった。一方、RE-5000Pは非膨潤型であるため、高い解像性能を持っている。 $2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の感度で、 $0.5\mu\text{m}$ パターンを解像することができる。

RE-5000Pを用いたカスタムLSI用のレジストプロセスを、図6.48に示す。穴パターン(ビアホール)加工には単層レジストプロセス、ラインパターン(AI配線)加工には3層レジストプロセスを用いた。3層レジストの要となる中間層(ML)としては、 $0.1\mu\text{m}$ 厚さのSOG塗布膜を採用した。3層レジストプロセスを採用した目的は、レジストに及ぼす散乱電子の影響を軽減し、近接効果やバルク効果を小さくすることに拠って、 $3\mu\text{m}$ という厚いレジストでも所要解像性能を達成できるようにするためである。また、前述のように、描画データ量を削減できる効果も大きい。なお、チャージアップによる描画パターンの位置ずれを防止するため、レジスト表面には導電性薄膜PVCZ(ポリビニル・カルバゾル)を塗布している。

実用化上の最大課題は、プロセスマージンが大きく、安定したレジストプロセスを構築することであった。安定なレジストプロセスを開発する過程で、RE-5000Pレジストに関する以下の知見が得られた。

(i)ベースレジンの分子量分布が製造ロット間の感度ばらつきを決める。

従来のレジスト製造に於いては、平均分子量を評価項目として原材料樹脂を選別し、合成していた。しかし、「使用樹脂の平均分子量が同じでも、分子量分散が大きい場合には、レジスト感度はばらつく」ことが分かった。感度ばらつきを小さくし、安定してレジストを製造するためには、分子量分散の小さい樹脂を使用することが重要であることを明らかにした。

(ii)溶解阻止剤と溶媒との相溶性が悪い場合には、穴パターンの解像不良を引き起こす。

不良の特徴は、発生部分がウェハ面内でストリーション状に分布し、径が数 $10\mu\text{m}$ 程度の微小領域に集中していることであった。ストリーション状に発生していることから、原因は塗布性に関連しているものと推定し、組成材料と溶媒の相溶性に着目・解析した。その結果、PMPS成分として多量体が多く含まれている場合には、相溶性が悪く、不良発生頻度の高いことが分かった。PMPSの成分を制御し、一量体と二量体のみで合成すると、解像不良が起こらないことを確認した。

(5) 適用結果

24kゲートCMOSカスタムLSIへのEB直描適用例を図6.49に示す。“カスタマ別に異なったパターンが加工される配線層”に適用した結果である。MOSデバイスに適用した場合には、電子線照射損傷が問題となる。照射損傷の説明図を図6.50に示す。デバイス中に入射した電子ビームは、デバイス構成物質と相互作用の結果、酸化膜中に正の固定電荷、酸化膜/Si界面に界面準位を形成する。創られた固定電荷・界面準位が、デバイス特性の変動原因となる。MOSデバイスは、酸化膜/Si界面の導電現象を利用するデバイスであり、Si内部の導電現象を用いるバイポーラデバイスに比べると、損傷を受け易い。損傷の軽減策として、

(i)ゲート酸化膜中に吸収される露光エネルギー量を低減する。

(ii)損傷に強いデバイス構造、およびゲート酸化膜質とする。

(iii)照射後、アニールにより損傷を回復する。

ことが考えられる。RE-5000Pの $2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ という高感度は、吸収エネルギー量を極めて少なくできることから、最も効果的な損傷軽減策でもあった。

損傷による影響は、描画後短時間で現われる初期的特性変動と、長時間の使用後に現われる経時的変動とに分けられる。経時的変動はLSIの信頼度を低下させる。

(i)初期的特性変動

特性変動の例として、しきい値電圧変動の露光量依存性を図6.51に示す。電子ビームがゲートを直射するかどうかで程度の違いはあるが、高感度化することに依り、しきい値電圧変動を小さくできていることが分かる。また、ここで現われた数mV程度の変動は、 $450^\circ\text{C}\cdot 30$ 分間の H_2 アニールを行うことによって、光露光で製作したデバイス並に回復できることを確認した。

(ii)経時的特性変動

アニール処理後のデバイスを加速寿命試験した結果が図6.52である。図6.52(a)にn-MOS、(b)にp-MOSの測定結果を示す。n-MOSは、 450°C のアニール後も、損傷の影響が幾分残っている。 450°C のアニールで回復しきれない界面準位に因るものと考えられる。しかし、光露光で製作されたデバイスと同等の、10年間以上の使用に耐える信頼性を持つことが分かった。

6.3.2 サブハーフミクロン・ウェハ直接描画技術

(1) 高スループット化の課題と開発技術

ウェハ直接描画に於ける高スループット化の課題と技術開発の方向を、図6.53に示す。第一の課題は、レジスト処理工程に於けるプロセス時間の短縮であり、単層レジストプロセスの実用化が技術開発の方向となる。単層レジストのプロセス時間を、ウェハ直接描画で一般的に用いられてきた3層レジストプロセスとの比較で、図6.54に示す。単層レジストプロセスの実用化に依り、プロセス時間を約1/4に短縮することが可能となる。図中、BLは平坦化のための最下層、MLはBLドライ現像（ドライエッチング）用マスクとしての中間層、TLは最上層の電子線レジストである。第二の課題は、パターン描画工程に於ける描画時間の短縮である。ショットサイクル時間の短縮とステージ移動時間の低減が、研究・開発の方向である。また、描画データの転送時間が、描画作業遂行上の隘路とならないようにしなければならない。

“ウェハをロードし、アライメントを行った後、ステージ移動、ショット”という描画作業のシーケンスに応じて、描画時間 T_s は次式のように表される。

$$T_s = T_l + T_{a1} + T_{s1} + T_s \dots \dots \dots (6.8)$$

ただし、

$$T_s = N_s \times t_s \dots \dots \dots (6.9)$$

$$t_s = t_{s1} + t_{exp} \\ = t_{s1} + (S/j) \dots \dots \dots (6.10)$$

ここで、 T_l はウェハのロード/アンロード時間、 T_{a1} はアライメント時間、 T_{s1} はステージ移動時間、 T_s はショット時間である。 T_s は、ショット数 N_s とショットサイクル時間 t_s の積として近似できる。 t_s は、電子ビーム整定時間 t_{s1} と露光時間 t_{exp} の和である。 t_{exp} は、レジスト感度 S (C/cm^2)と電子ビーム電流密度 j (A/cm^2)の比、 S/j 、として求められる。これら要素時間の内訳を、従来技術のEB描画装置 HL-700D (30keV: 日立製作所製)、ポジ型電子線レジスト RE-5000P ($2\mu C/cm^2$: 日立化成製)を例として、図6.55に示す。ショット数は、数十kゲートのロジックLSIを想定して、 1×10^9 としている。ショット時間が最大の割合を占める。ショット時間低減のために、ショットサイクル時間、すなわち電子ビーム整定時間と露光時間の短縮が、EB描画装置開発上の最重要課題となる。

また、描画対象が高集積度のLSIであり描画データ量が多い場合には、ディスクからバッファメモリ (BM) へのデータ転送時間が、スループットを律速する。スループットがデータ転送

律速となる例を、図6.56に示す。ウェハ当たり3品種を搭載し、ロットサイズが2ウェハの描画作業を行う場合である。描画データはディスクに格納されている。描画作業の都度、描画データをディスクからBMに読み込み、電子ビーム制御に用いる。HL-700Dは、64MB×2面のBMを持っており、第1面のBMに読み込んだ描画データを描画作業に使用している間に、第2面のBMに次ロットの描画データを読み込む。このようにして、総描画データ量が64MB以下で数十kゲートのロジックLSIを描画する場合には、データ転送が描画と並列して処理されるため、データ転送時間は描画作業を律速しない。一方、描画データ量が100MB/品種に近い数十kゲートのロジックLSIを描画する場合には、描画データがBMに入りきらず、データ転送と描画が逐次処理となる。このため、データ転送が描画作業の隘路となり、データ転送時間が描画時間を決める。

上記課題を解決し、高スループットを達成するために、以下の技術を開発した。なお、技術開発に際しては、EB描画装置と電子線レジストプロセスの整合性に留意して目標設定を行った。

(i) プロセス時間短縮のための単層レジストプロセス技術

単層レジストプロセスを実用化するためには、ばけ量の小さいシャープな電子ビームを形成するとともに、レジスト内での電子ビーム散乱を小さく抑えることが要点となる。電子ビームの高エネルギー化が一つの解である。また、それに見合った高解像度・高感度の電子線レジストを開発することが必須となる。高感度化は、電子ビームの高エネルギー化に伴う感光反応確率の低下を補うための課題である。さらに、電子ビームを用いることから派生する帯電の問題に対して、プロセスを複雑化しない、簡便なチャージアップ低減技術が必要となる。⁴⁹ 上記考え方に基いて開発した技術を図6.57に示す。50keVの電子ビーム、0.3 μm 解像 (レジスト厚さ 1.4 μm) の電子線レジスト、および水溶性導電膜が主な開発技術である。下線部を実線で示した項目がEB描画装置、波線で表した項目がレジストプロセスに係わる内容である。

(ii) 描画時間短縮のための高速描画技術

描画時間短縮のために開発した技術を図6.58に示す。主な技術内容は次の通りである。ショットサイクル時間200ns、露光時間100nsを目標とした高速3段の電子ビーム偏向技術、10A/cm²の高電流密度電子ビーム、および1 $\mu C/cm^2$ (50keV) の高感度電子線レジストを開発・実用化した。また、ショット数を削減するために、EB描画装置内での近接効果補正、ネガ型電子線レジスト・プロセスおよびポジ型電子線レジスト・プロセスの開発を行った。さらに、ステージ移動時間低減を狙いとして、ステージ連続移動描画を採用・実用化した。また、データ転送ネックを回避するために、ディスクを2GB、およびBMを512MB×2面に大容量化した。開発した技術をEB描画装

置（日立製作所製 HL-800Dとして市販）と電子線レジスト・プロセスに分けて、以下に述べる。

(1) 高速EB描画装置

開発したEB描画装置 HL-800Dの主な装置仕様を表6.5に示す。高速性と高い描画精度を両立させるため、次のような新規開発技術を使用している。

- (i) 高電流密度の可変矩形ビーム：10A/cm²（ビームサイズ：最大5μm角）。
- (ii) 高速・高精度の3段電子ビーム偏向：ビーム整定時間100ns（電子ビーム偏向幅：最大5mm）。
- (iii) ステージ連続移動描画：ステージを移動させながらパターン描画を行う。

これらの技術と組合せて、1μC/cm²の電子線レジストを用いれば、最小200nsのショットサイクルが可能である。また、0.3μmパターンを±0.07μmの精度で描画できる。これらの値は、従来技術と比較して、ショットサイクルが1/3、描画精度が2/3に改善されている。

“EB描画装置内での近接効果補正（パターン密度に応じた露光量制御機能）”については、露光量制御の処理フローを図6.59、配線パターンに適用した効果例を図6.60に示す。描画データ作成時に近接効果補正をソフトウェアで行う従来手法（図6.61）に比べて、データ変換時間が約1/30、描画データ量が約1/6、そしてショット数を約1/4に低減できている。

(2) 高感度・高解像度の電子線レジストと単層レジストプロセス

単層レジストのプロセスフローと主な仕様を図6.62に示す。ショット数を低減するため、配線加工にはネガ型レジストプロセス、穴パターン加工にはポジ型レジストプロセスを用いた。ネガ型レジストとポジ型レジストとを、対象パターンに応じて使い分けることに依り、ショット数を単一プロセス使用の数分の一に削減できる。単層レジストプロセス用として新しく開発した電子線レジストを表6.6に示す。ネガ型レジストは架橋型化学増幅系のRE-4200N（日立化成製）、ポジ型レジストは溶解阻止型化学増幅系のPSRである。化学増幅系レジストを開発した理由は、1μC/cm²の高感度を達成するためである。また、RE-4200N・PSRともに、表面難溶化作用を利用して、厚さ1.4μmのレジストでも0.3μmの解像度が得られた。

レジスト膜塗布後・パターン描画前に、導電膜のエスベイス（昭和電工製）を重ね塗りする。RE-4200Nにはエスベイス-300、PSRにはエスベイス-100を塗布する。エスベイス-300は中性に近いが、エスベイス-100は酸性度が強い。PSRは表面難溶化作用が強く、強固な表面難溶層が形成される。この強固な表面難溶層を除去し易くするために、酸性度の強いエスベイス-100を用いている。エスベイスの除去は、露光後・現像前の水洗を行うだけで良く、特別な処理は必要

としない。なお、エスベイスの塗布は、レジストの実効感度を上げることが分かった。エスベイスを塗布したレジストの感度は、塗布しない場合に比べて、数十%程度増感される。エスベイスの主成分が酸（チエニルアルカンスルホン酸）であることの効果と考えられる。

化学増幅系レジストは、従来のレジストに比べて高感度である代わりに、下記の不安定な現象があり、使用上の配慮を要することが知られている。不安定となる理由は、発生した酸が動くことに起因すると考えられる。

(i) 処理後放置時間・雰囲気依存したレジスト感度・寸法の変動：特に、プリベークから描画までと、描画から露光後ベークまでの処理待ち時間に大きく影響される。処理、および処理待ち時のアルカリ性雰囲気は避けねばならない。エスベイスの塗布は、レジストのチャージアップを防止するだけでなく、処理後のレジスト寸法変化を抑制する働きのあることが分かった。エスベイスが介在し、レジストと雰囲気との直接接触が避けられるためと考えられる。

(ii) 下地材質に依存したレジスト断面形状の変化：レジストを塗布する下地の材質に依っては、界面部分のレジスト断面形状が悪くなる。ネガ型レジストでは侵食された形状、ポジ型レジストでは裾引き形状となる。界面近傍では、発生した酸の一部が下地材に食われてしまうためと推定される。開発したレジストプロセスでは、上記問題を最小とするため、レジスト材料とプロセス条件の最適化を行った。

(3) 適用結果

HL-800DとRE-4200N/PSRの単層レジストプロセスを用いて、従来と比較し、4倍から20倍の高スループットが得られた。ロットサイズを5ウェハとした時の描画時間実測結果を図6.63に示す。ショット数に対するEB描画装置のスループットを、従来技術 HL-700D/RE-5000Pとの比較で、表したものである。ウェハ当たりのショット数が2×10⁸よりも少ない場合には、ウェハのロード/アンロード時間でスループットが決まり、15ウェハ/時のスループットが得られる。2×10⁸以上のショット数に対しては、スループットが露光時間で律速され、ショット数の増大とともに、スループットが低下する。

RE-4200N・単層レジストプロセスの配線パターン加工例を図6.64に示す。W膜上のレジストパターン断面である。PSR・単層レジストプロセスの穴パターン加工例を図6.65に示す。SiO₂膜上のレジストパターン断面である。

6.4 まとめ

(1) ホトマスク製作にEB直接描画技術を適用するための研究・開発を行った。

・1980年代初め、EB直接描画技術が初めて導入された2 μ mホトマスク製作技術の開発に於いて、

(i) 現像後・Crエッチング前のプラズマアッシング工程に於いて、新しいローディング効果のあることを見出し、その発生が「Crと酸素ラジカルの強い反応に拠る」ことを明らかにした。

(ii) Crを高い精度でスプレイエッチングするため、マスク基板の透過光を終点判定に用いる新規エッチング終点検出機構を開発した。

(iii) ホトマスク製作プロセスの早期診断・評価を可能とするため、CIMの考え方を10年以上先取りしたプロセス管理システム、検査データオンライン収集・解析システム、を開発した。

・1990年代、0.3 μ mパターンの加工を目的とした位相シフトレチクル製作技術の開発に係り、

Crパターンを主対象とするサブミクロン加工に関連して、

(i) 新規に可変矩形ビーム・ベクタ走査・ステップ&リピート方式の高精度EB描画装置EB-MXを開発した。これに依り、従来に比べて、2倍の描画精度を達成した。

(ii) 新規に化学増幅系の高解像度ポジ型電子線レジスト RE-5100Pと、そのプロセスを開発した。これに依り、解像性能は、従来の2 μ mから0.5 μ m (1.5 μ C/cm²:20keV)に向上した。

また、位相シフト加工に関連して、

(iii) i線用シフト材として、光学的、化学的、そして機械的に耐性の強い有機SOG材を開発した。開発の過程で、シフト材剥がれが実用上最大の問題であり、SOG組成、すなわちシラノール化合物中の-OHと-CH₃の割合、およびアルコキシ中のメトキシ/エトキシの量が剥がれ程度に大きく影響していることを明らかにした。

(iv) SOGシフトパターンの加工技術を開発した。開発の過程で、レチクル基板角部に於けるSOGの乾燥速度が塗布膜厚ばらつきに影響していることを明らかにし、この問題を解決するためのカップ回転式SOG塗布装置を新規に開発した。

また、塗布前の残留硫酸イオン、および塗布後のベーク方法がシフト材剥がれの主要因であることを見出し、そのメカニズムを明らかにした。

(v) 新規にFIB GAEを用いた位相シフト欠陥修正技術を開発した。これに依り、シフト材残存欠陥の除去・欠損欠陥の補修を、石英基板に対し3以上の選択比を持ち、 $\pm 0.05\mu$ mの位置

精度で行なうことが可能となった。

そして、これら先行技術を開発した結果、i線用位相シフト露光技術を世界に先駆けて実用化した。

(2) 電子ビームを用いたウェハ直接描画技術の研究・開発を行った。

・1980年代半ば、カスタムLSIへの適用を目的としたサブミクロン・ウェハ直接描画技術の開発に於いて、

(i) 新規に可変矩形ビーム・ベクタ走査・ステップ&リピート方式の高速EB描画装置HL-600Dを開発した。開発過程で、可変矩形ビームのサイズに依存して描画パターンの寸法が変わること、およびパターン密度が低い領域では描画パターンの位置がずれることを見出し、そのメカニズムを明らかにした。

(ii) 新規に高感度な非膨潤型電子線レジスト RE-5000Pと、そのプロセスを開発した。開発の過程で、ベースレジンの分子量分布がレジストの感度ばらつきに影響すること、および溶解阻止剤と溶媒の相溶性が解像不良の要因であることを見出した。

(iii) 新規に描画データ管理・転送オンラインシステムを開発した。開発の過程で、高速化の要点となるデータ量削減のために、簡便な近接効果補正技術および3層レジストプロセス技術を実用化した。

また、これら先行技術を開発した結果、ウェハ直接描画技術を国内では最初に実用化した。

・1980年代後半から1990年代、ウェハ直接描画技術の適用拡大を狙いとしたサブハーフミクロン・ウェハ直接描画技術の開発に於いて、

(i) 新規にステージ連続移動描画を特徴とした高速・高精度のEB描画装置 HL-800Dを開発した。これに依り、描画工程のスループットが、従来に比べて、4~20倍に向上した。

(ii) 新規に高感度・高解像度の化学増幅系ネガ型電子線レジスト RE-4200N/化学増幅系ポジ型電子線レジスト PSRと、それらの単層レジストプロセスを開発した。その結果、プロセス時間を、従来に比べて、約1/4に短縮した。

また、これら先行技術を開発した結果、世界的にも最高水準の性能と実用結果が得られ、ウェハ直接描画技術の適用拡大に寄与した。

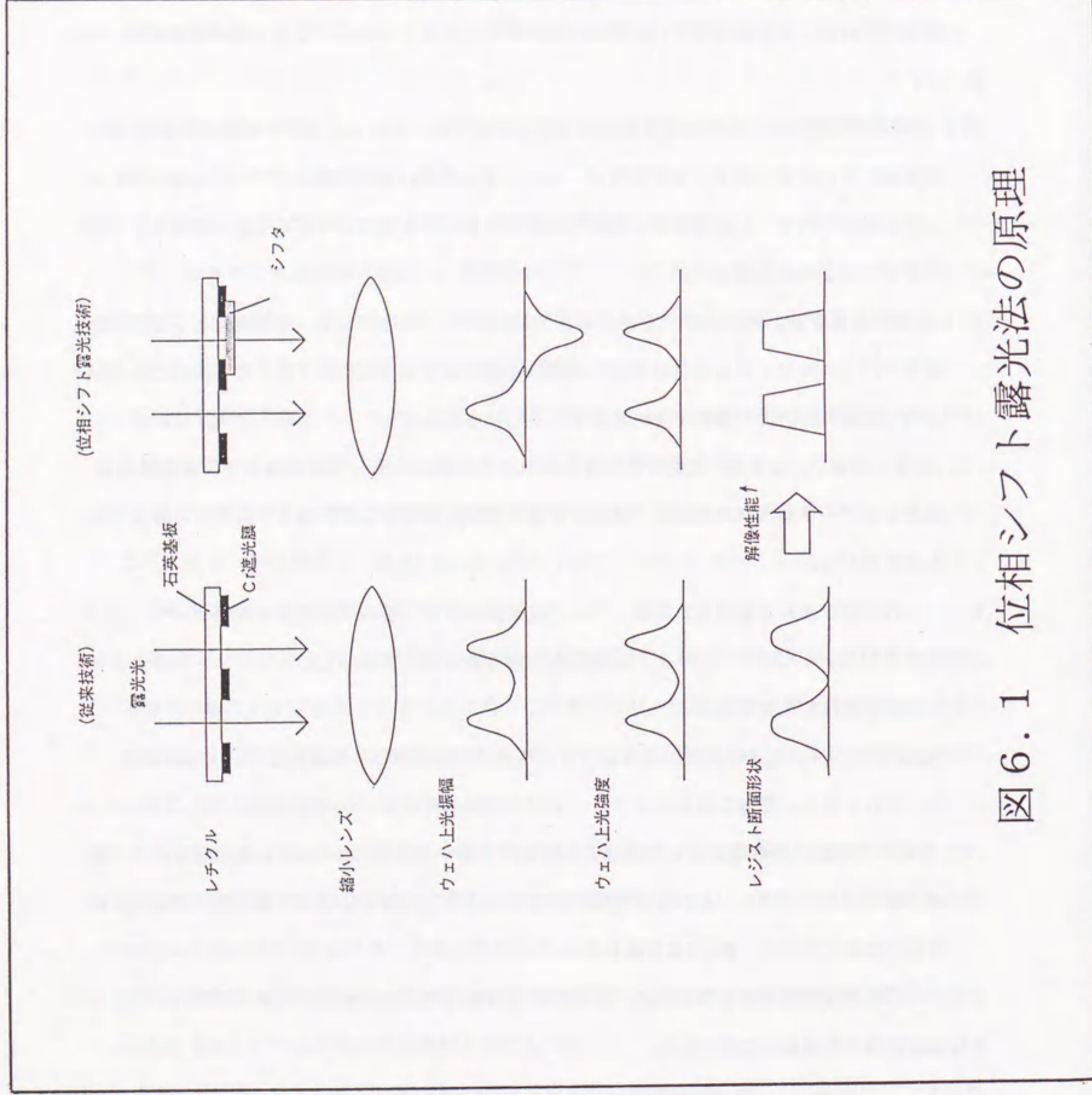


図6.1 位相シフト露光法の原理

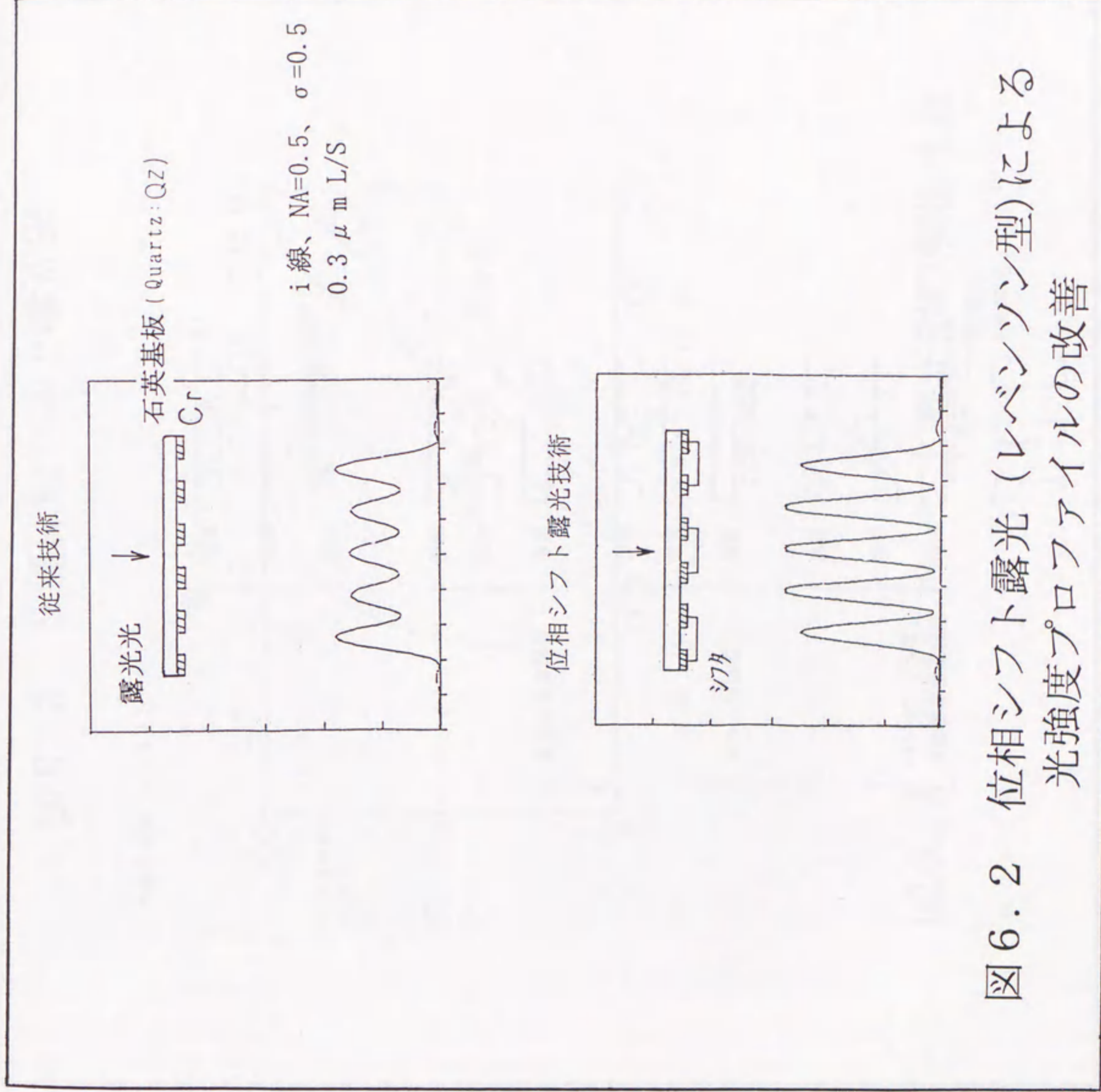


図6.2 位相シフト露光 (レベニンソン型)による
光強度プロファイルの改善

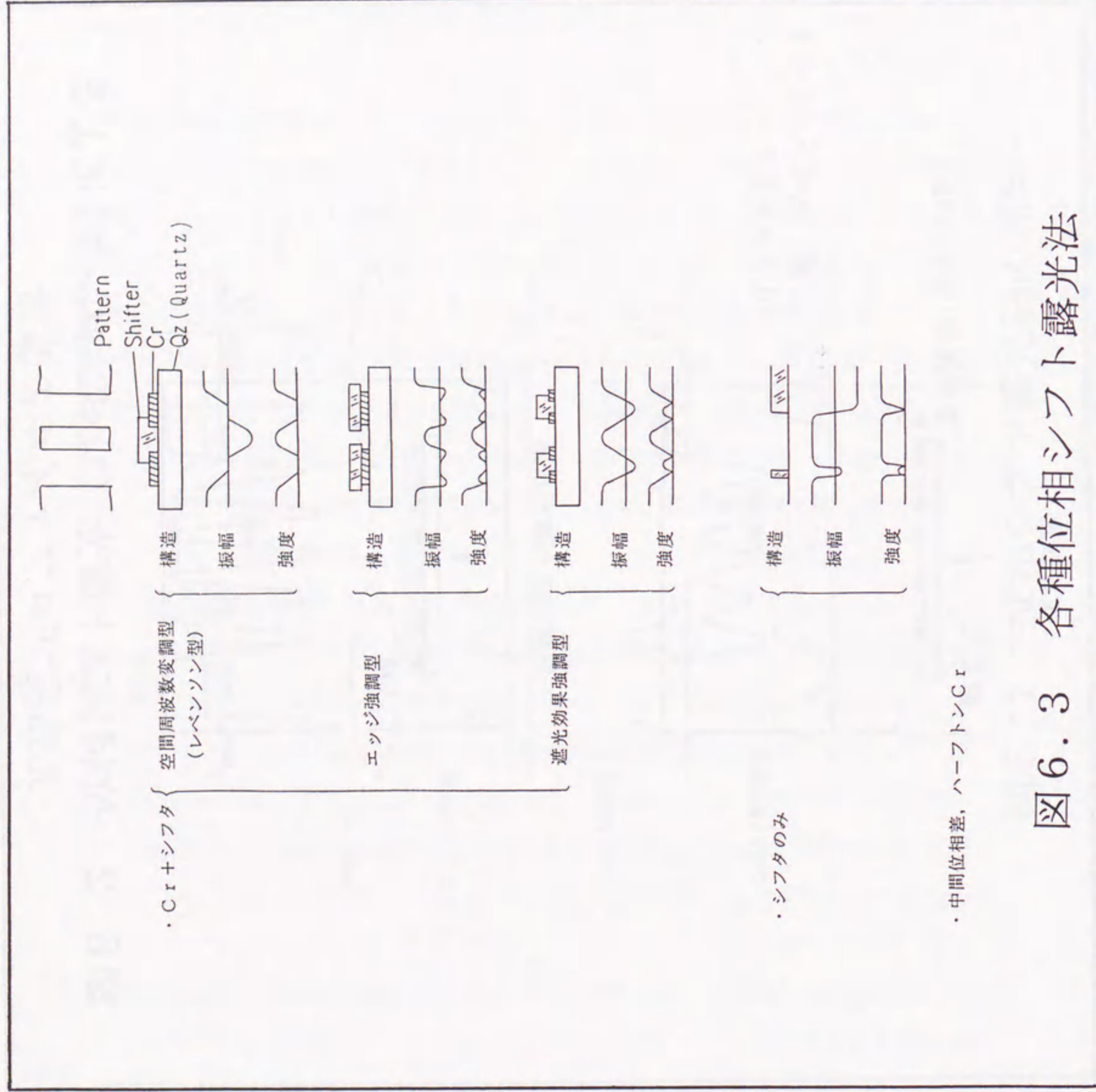


図6.3 各種位相シフト露光法

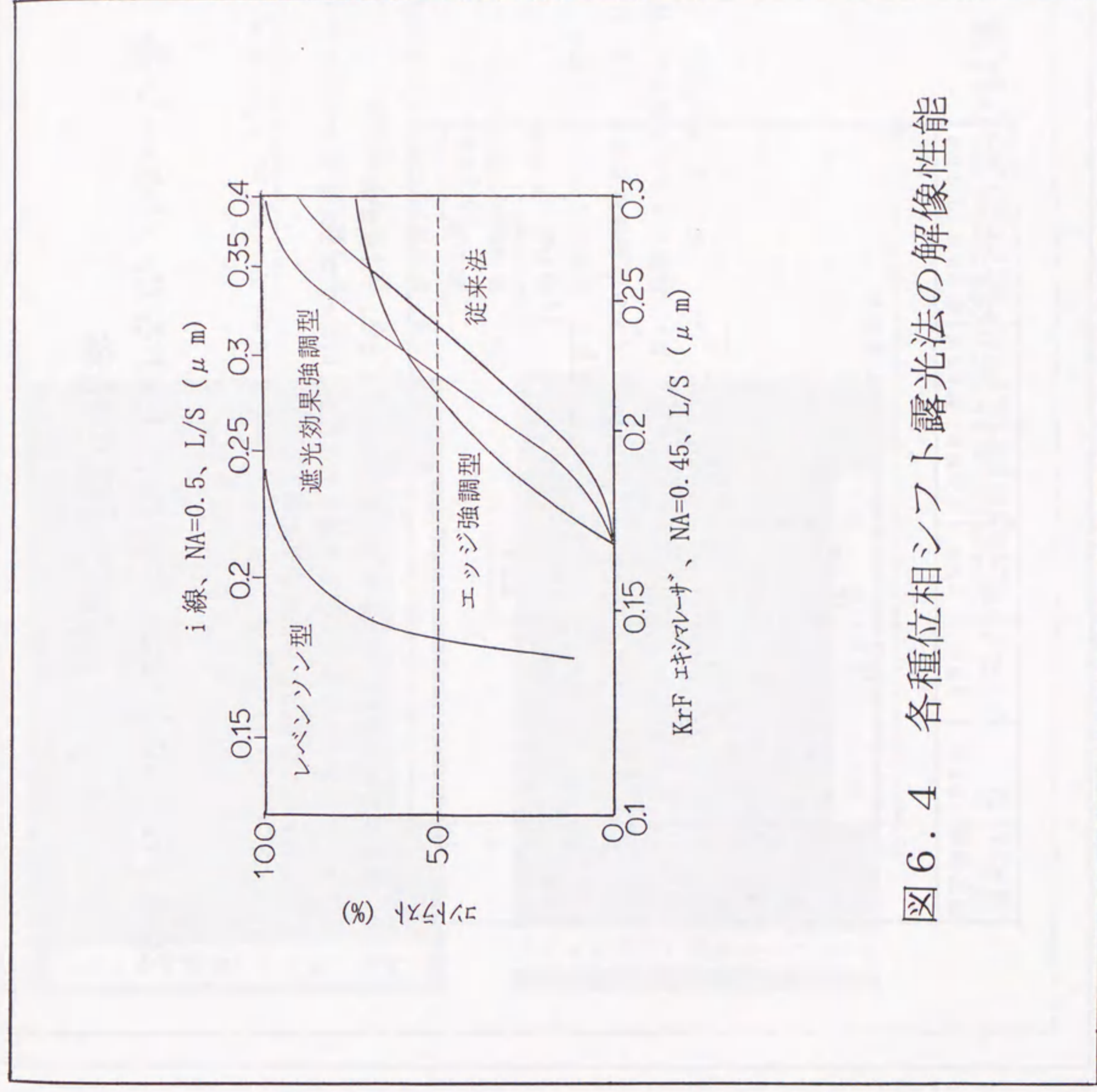
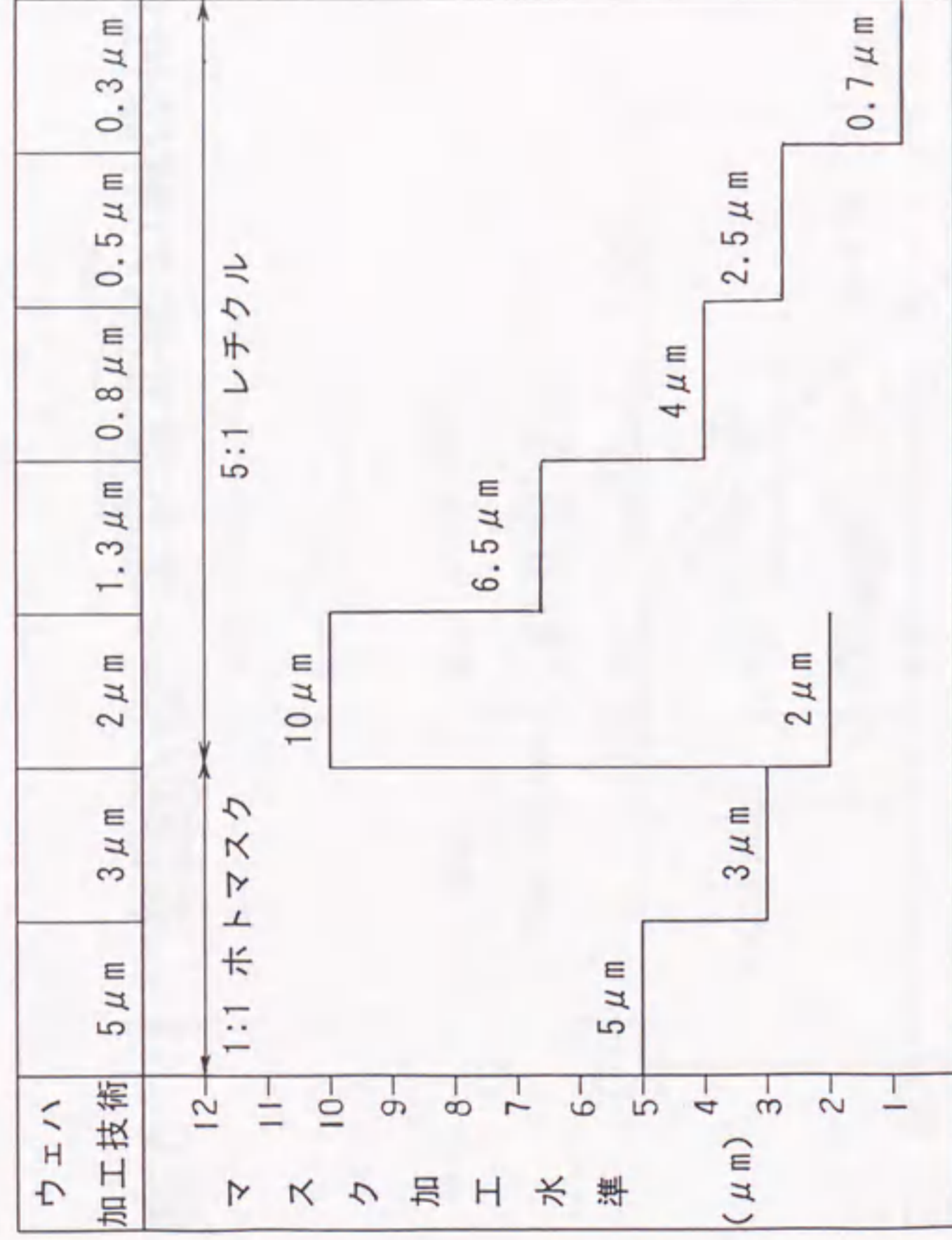
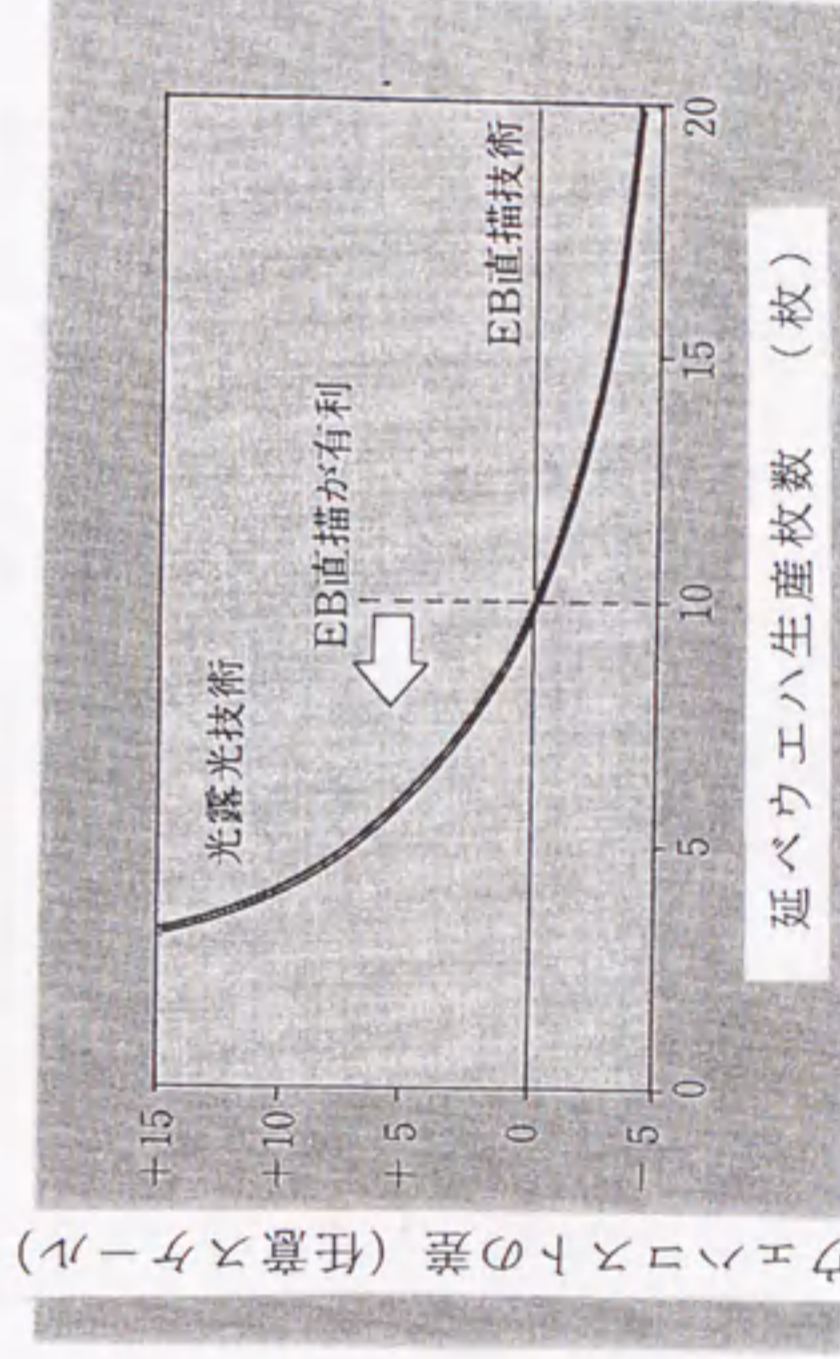
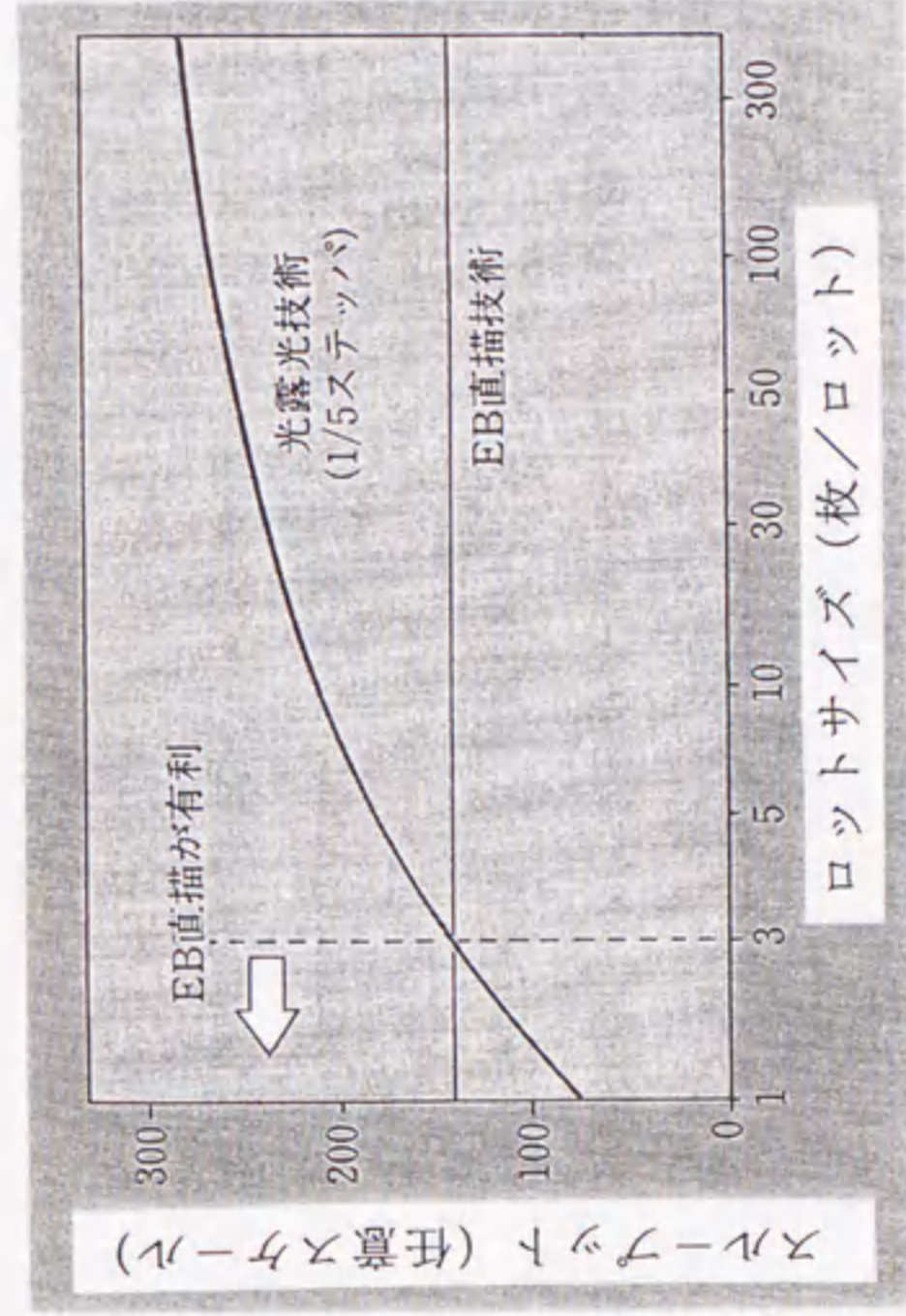


図6.4 各種位相シフト露光法の解像性能



縮小投影のための0.5μmプロセス用レチクルまでは、1:1投影用ホトマスクの技術蓄積で対応可能であったが、0.3μmプロセス用レチクルでは新規の技術開発が必要。

図6.5 ホトマスク製作におけるCrパターン最小加工寸法の推移



$$C_w = (C_e + C_p) / N_t + C_m / N_w$$

- C_w: 該露光工程でのウエハコスト
- C_e: 露光装置の償却費
- C_p: 該露光工程における材料費・加工費

- N_t: 該露光工程における
払出ウエハ枚数
- C_m: 品種あたりのマスク費用
(EB直描技術の場合: C_m=0)
- N_w: 品種あたりの生涯ウエハ枚数
(延べウエハ生産枚数)

図6.6 ウエハ直接描画技術の経済効果の試算

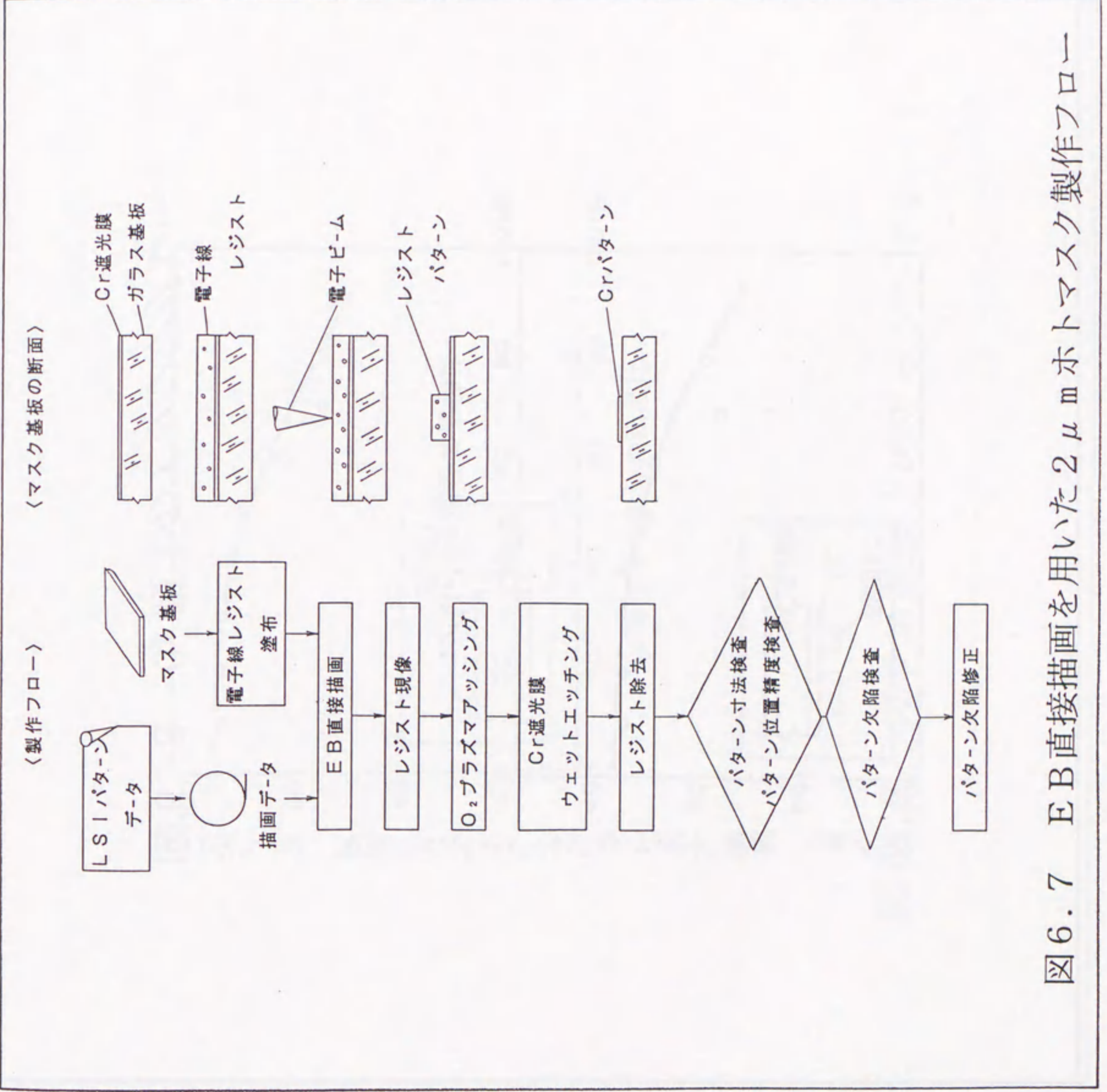


図6.7 EB直接描画を用いた2 μm ホトマスク製作フロー

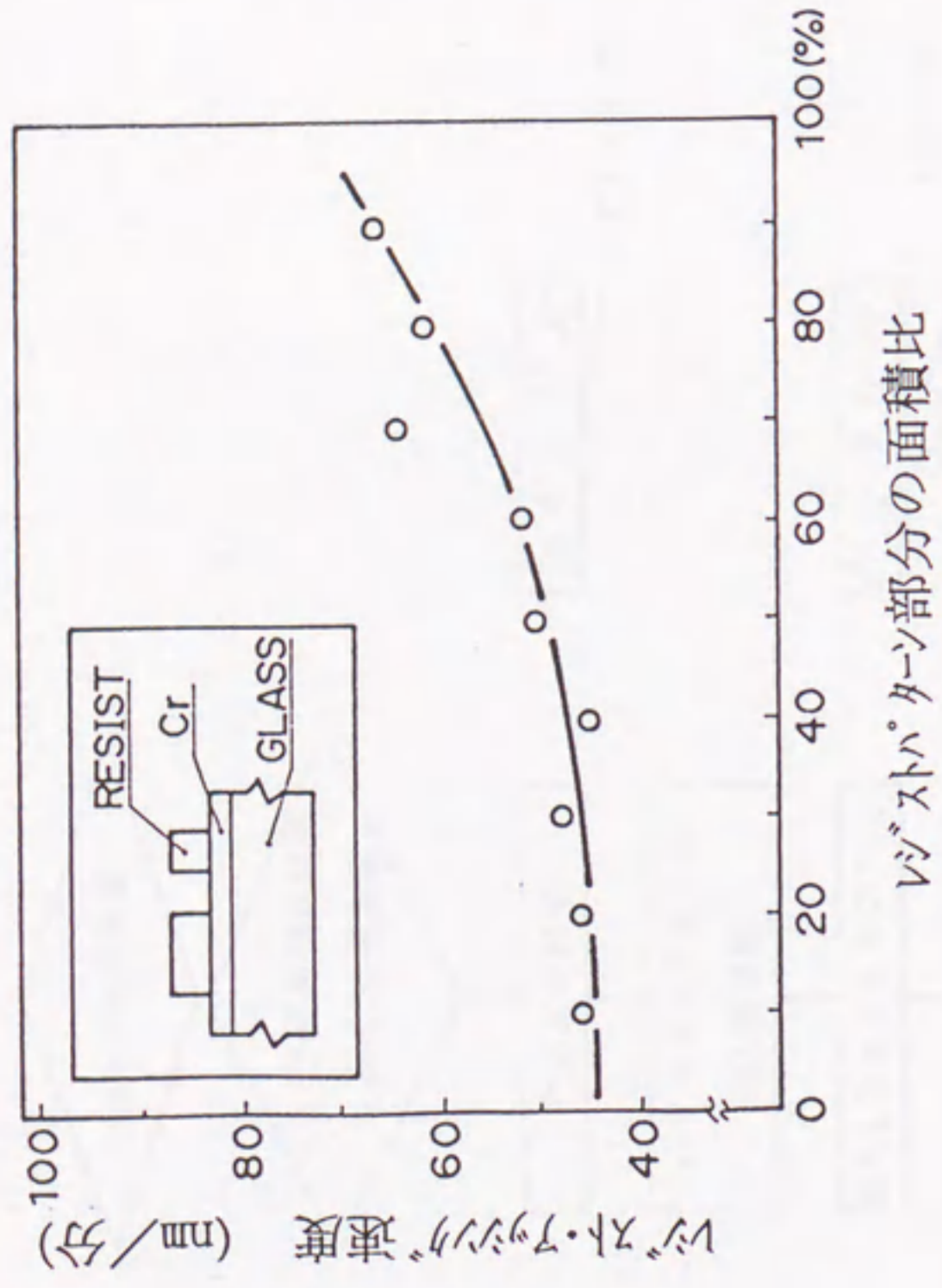


図6.8 Cr膜上のアッシングレート

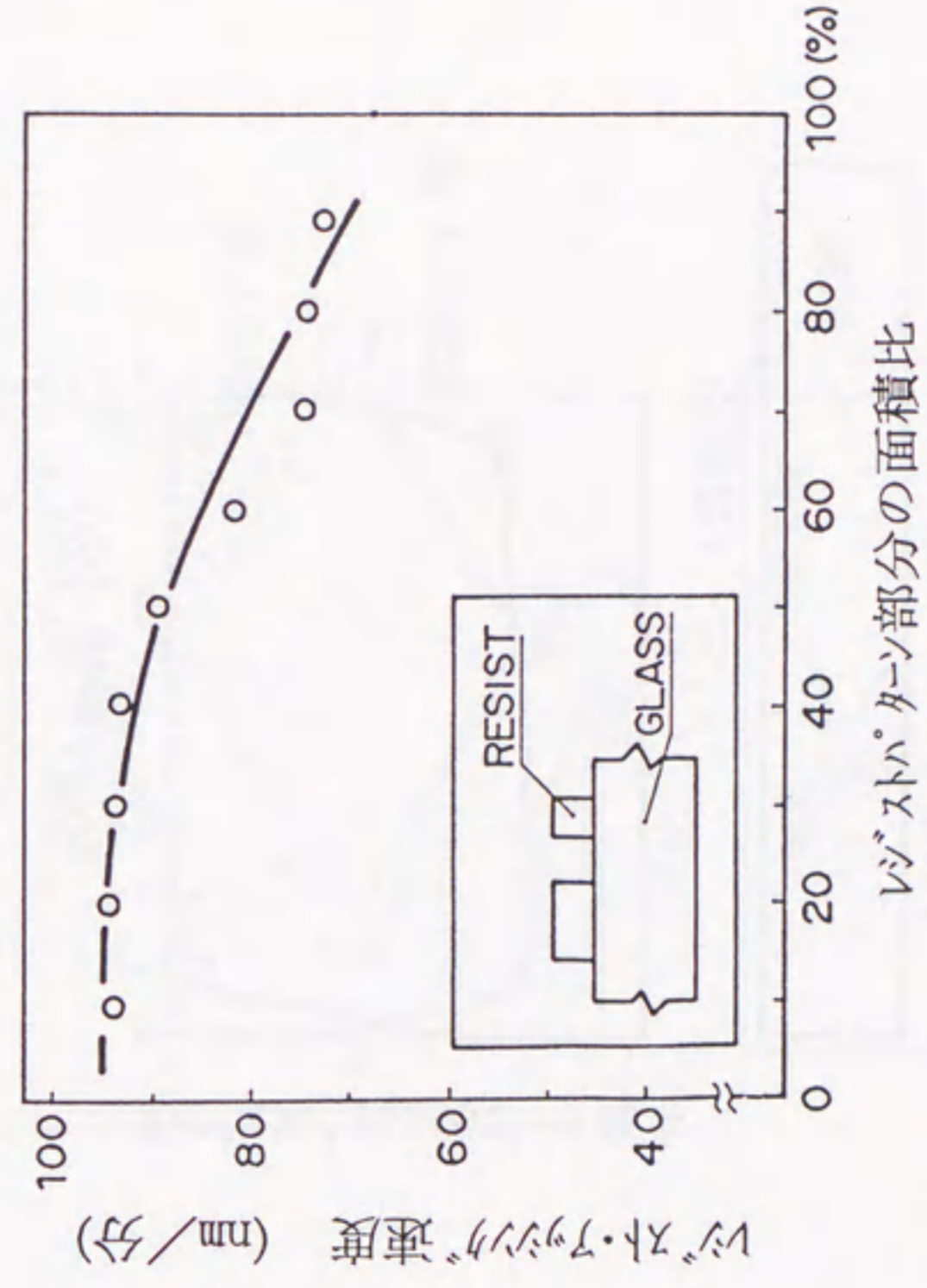


図6.9 ガラス基板上のアッシングレート

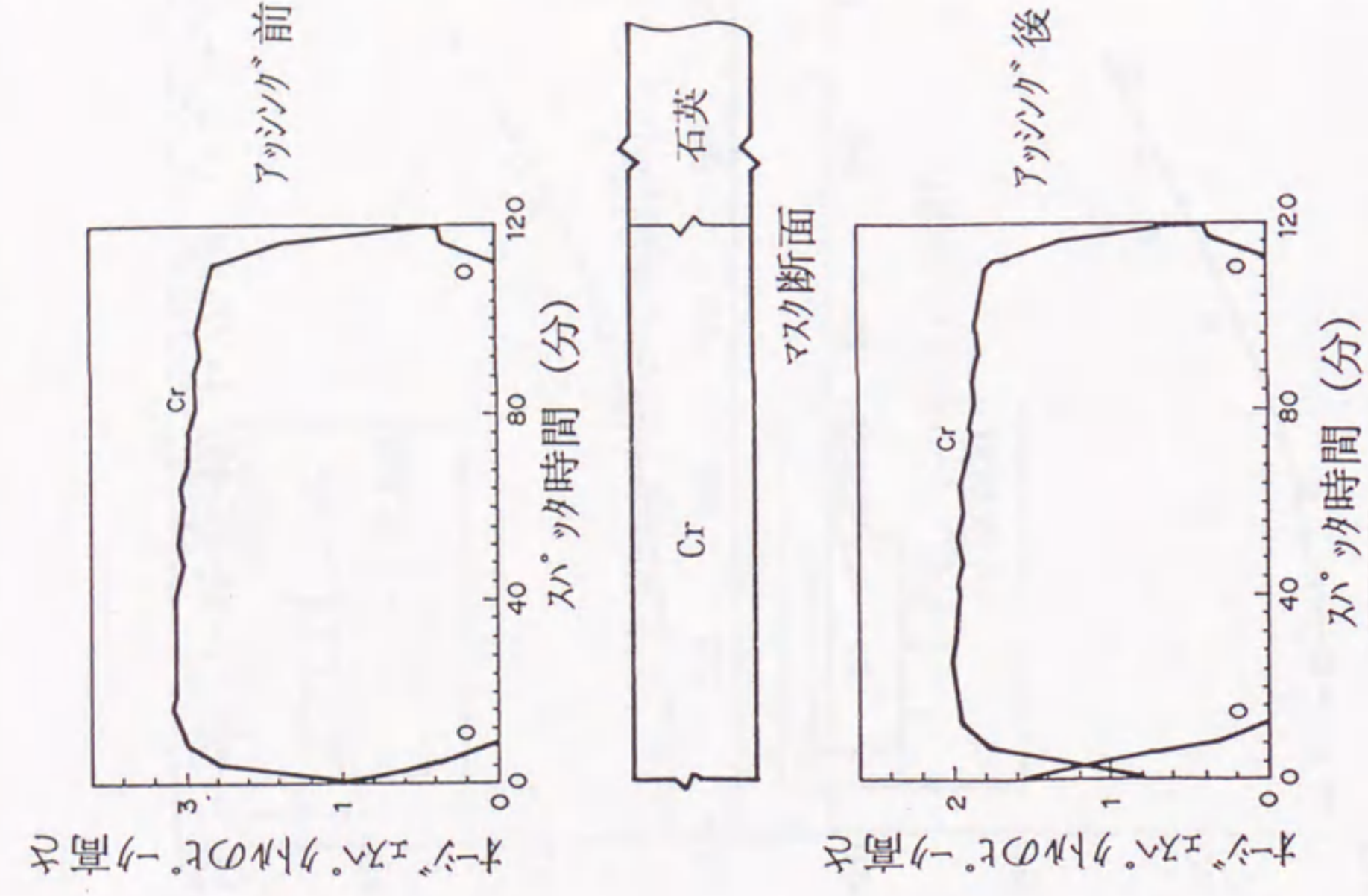


図6.10 アッシング処理前後でのCr膜表面“0”濃度分布
(オージェ電子分光スペクトル)

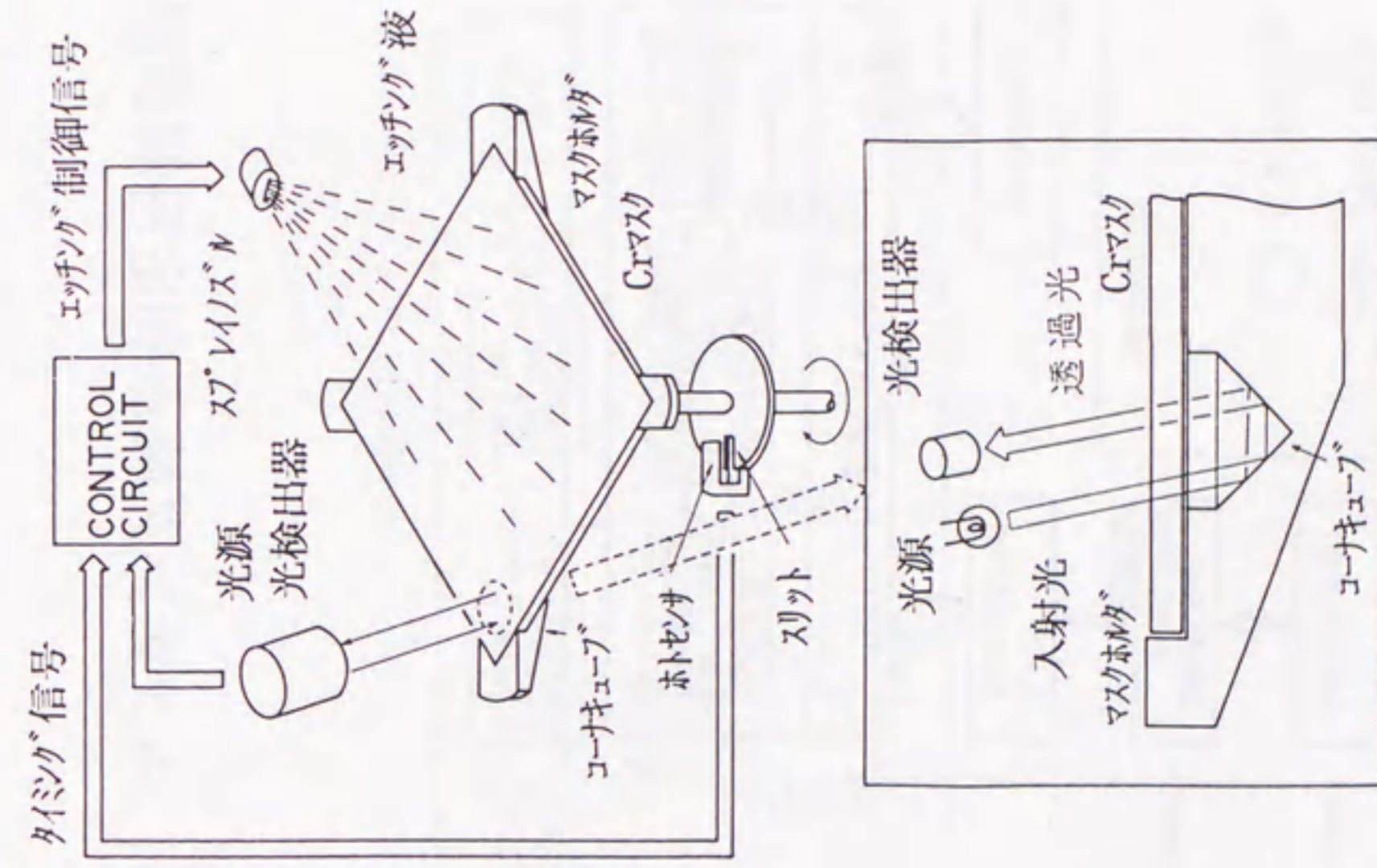


図6.11 エッチング終点検出機構の構成

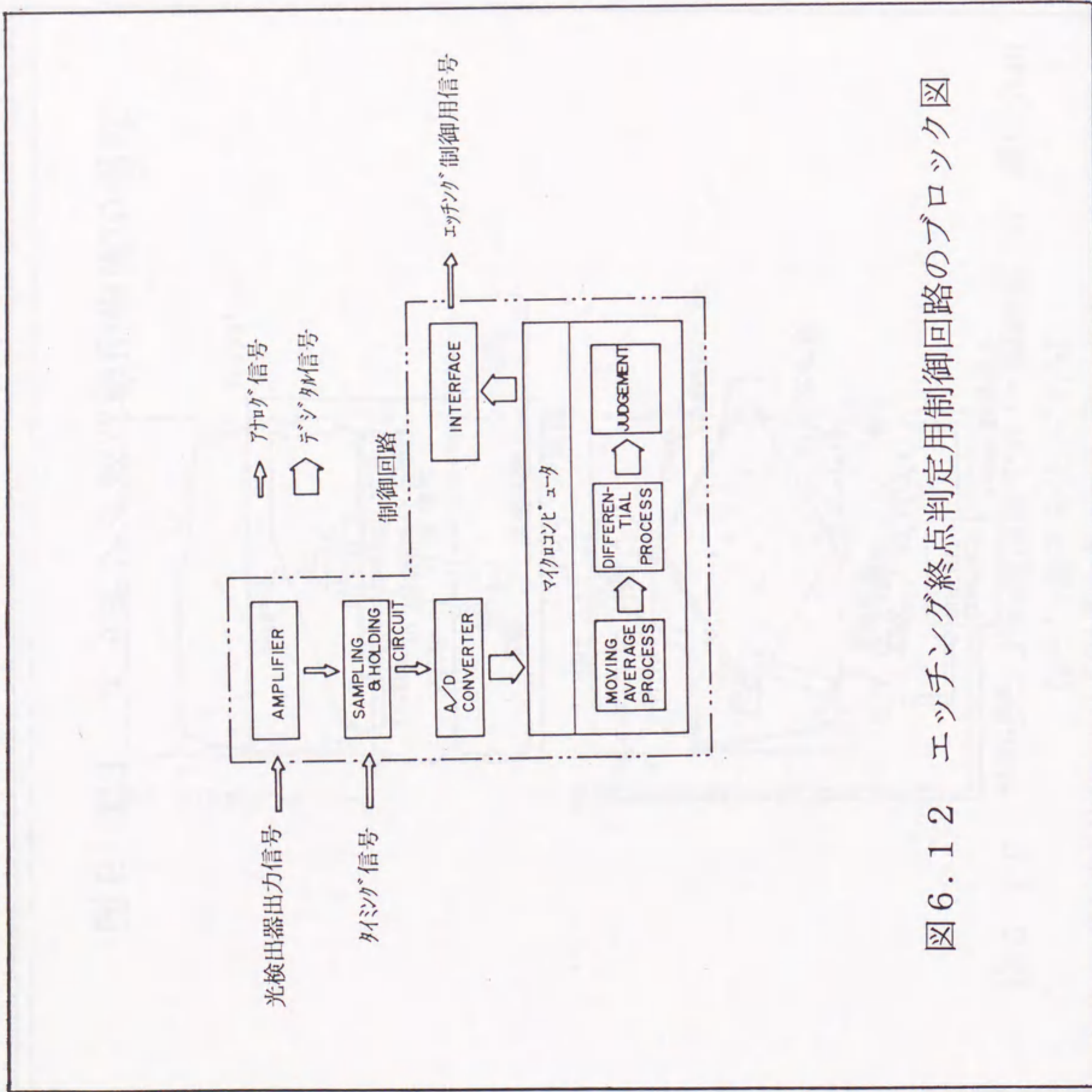


図6.12 エッチング終点判定用制御回路のブロック図



図6.13 エッチング終点判定用データ処理のアルゴリズム

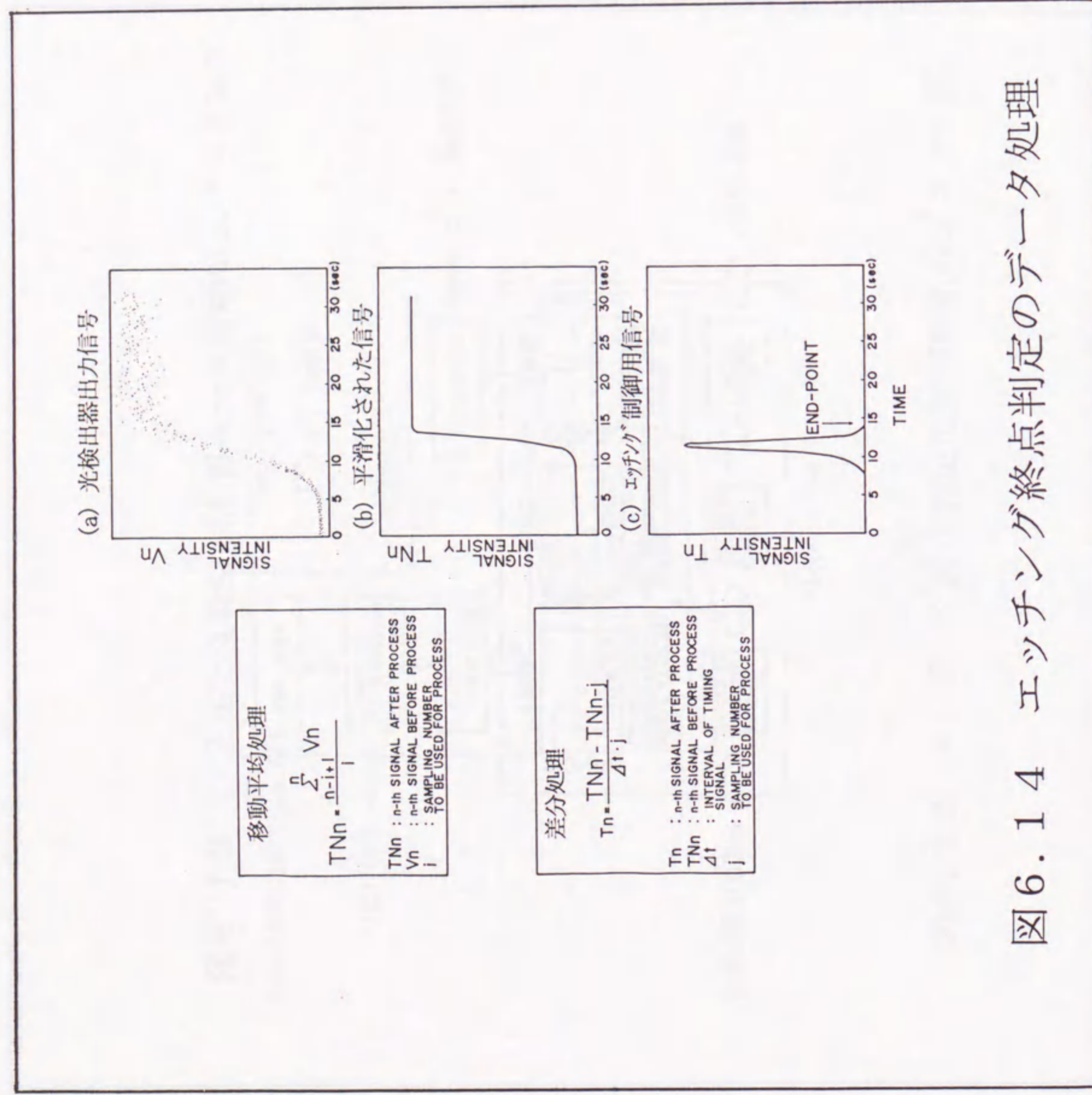


図6.14 エッチング終点判定のデータ処理

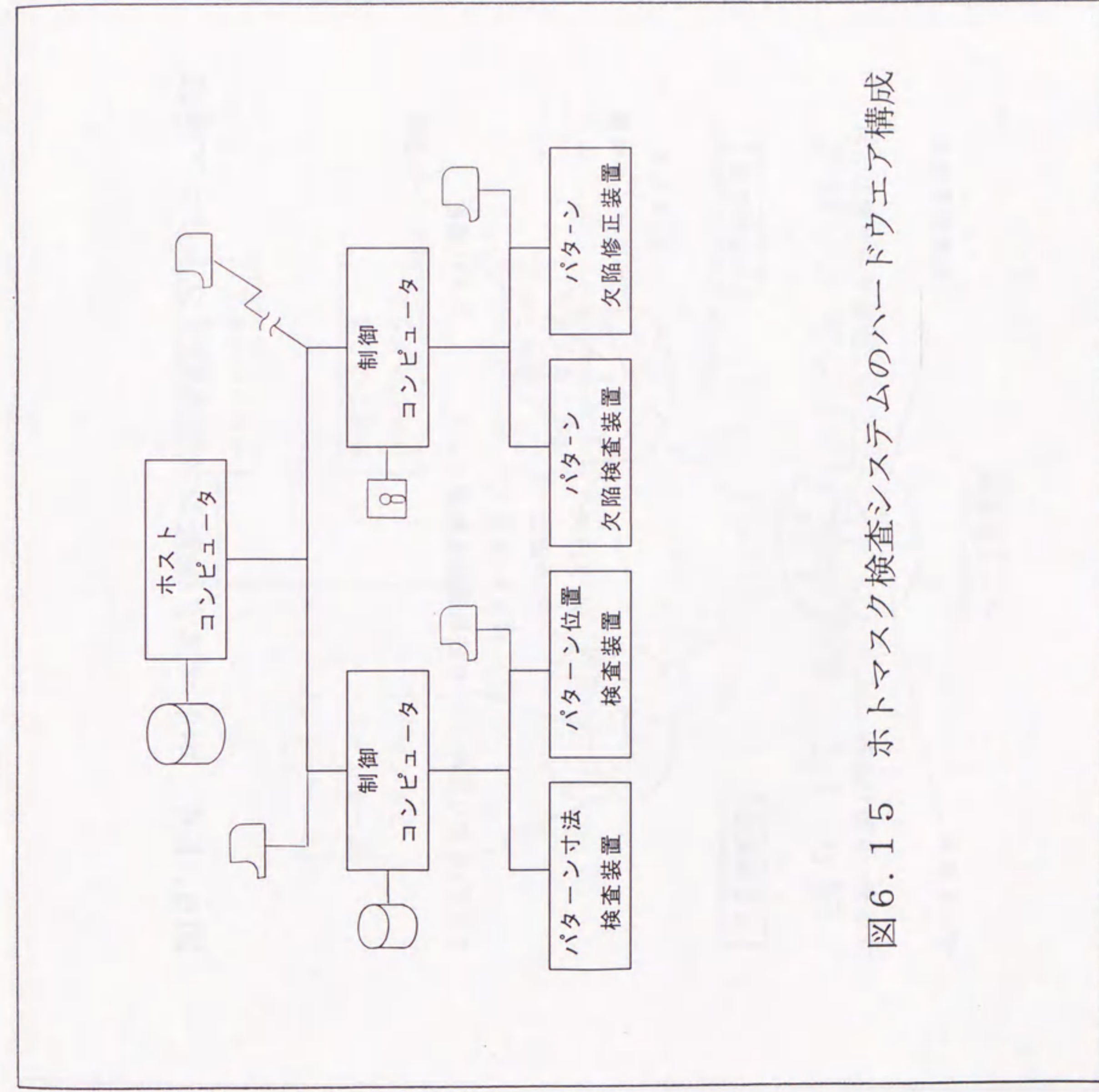


図6.15 ホトマスク検査システムのハードウェア構成

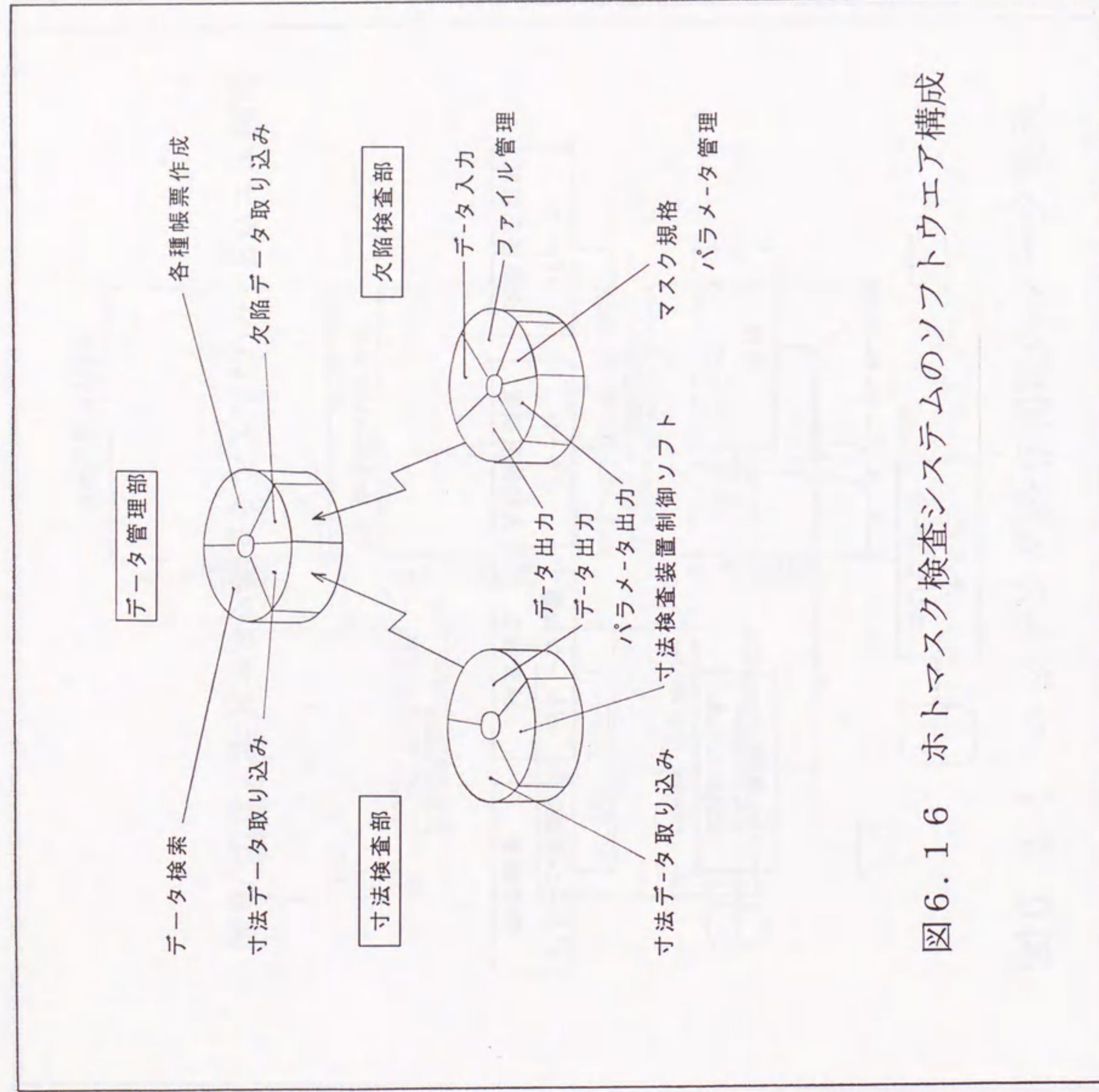


図6.16 ホトマスク検査システムのソフトウェア構成

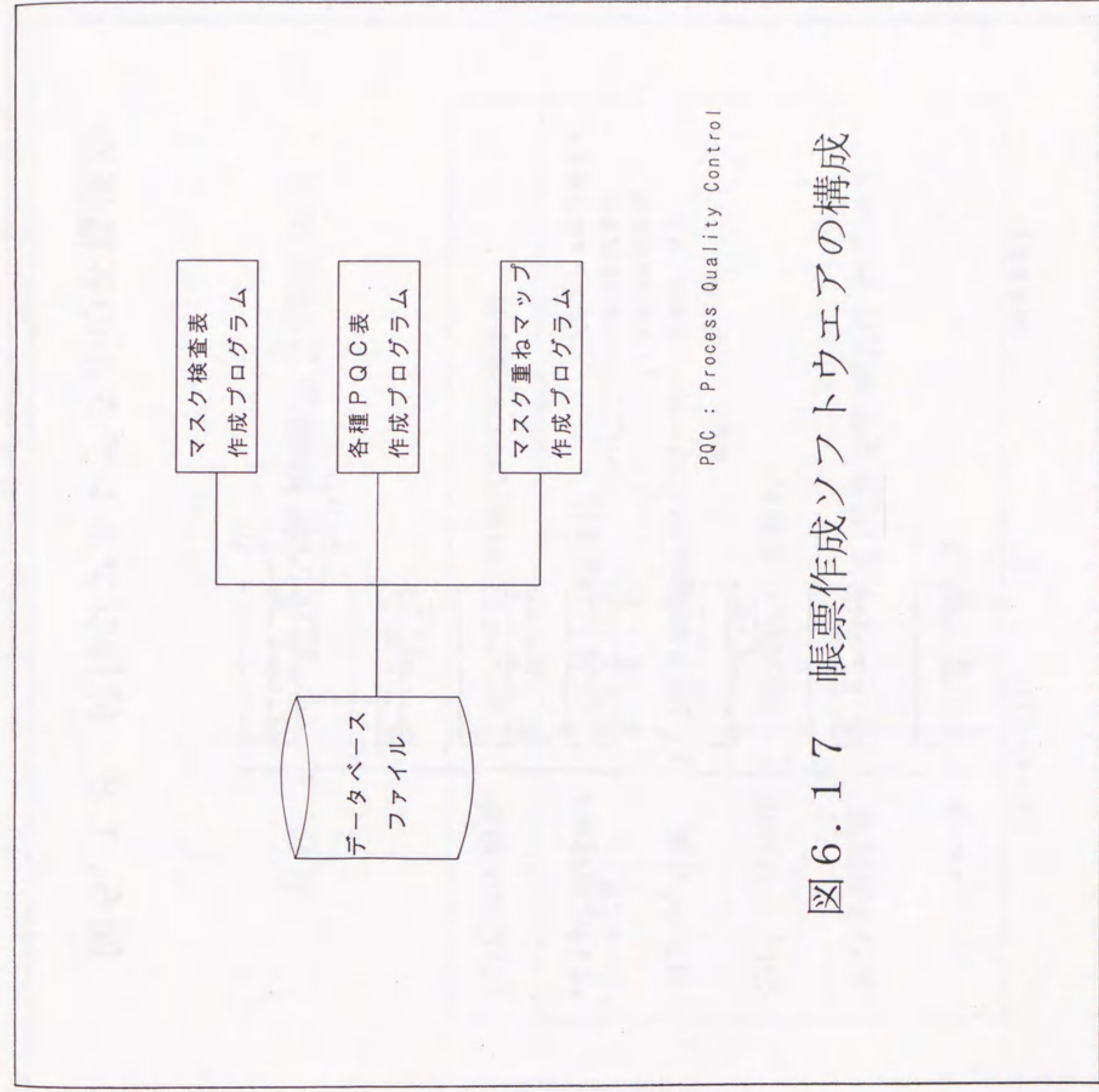


図6.17 帳票作成ソフトウェアの構成

(シフタの構成)

(要考慮項目)

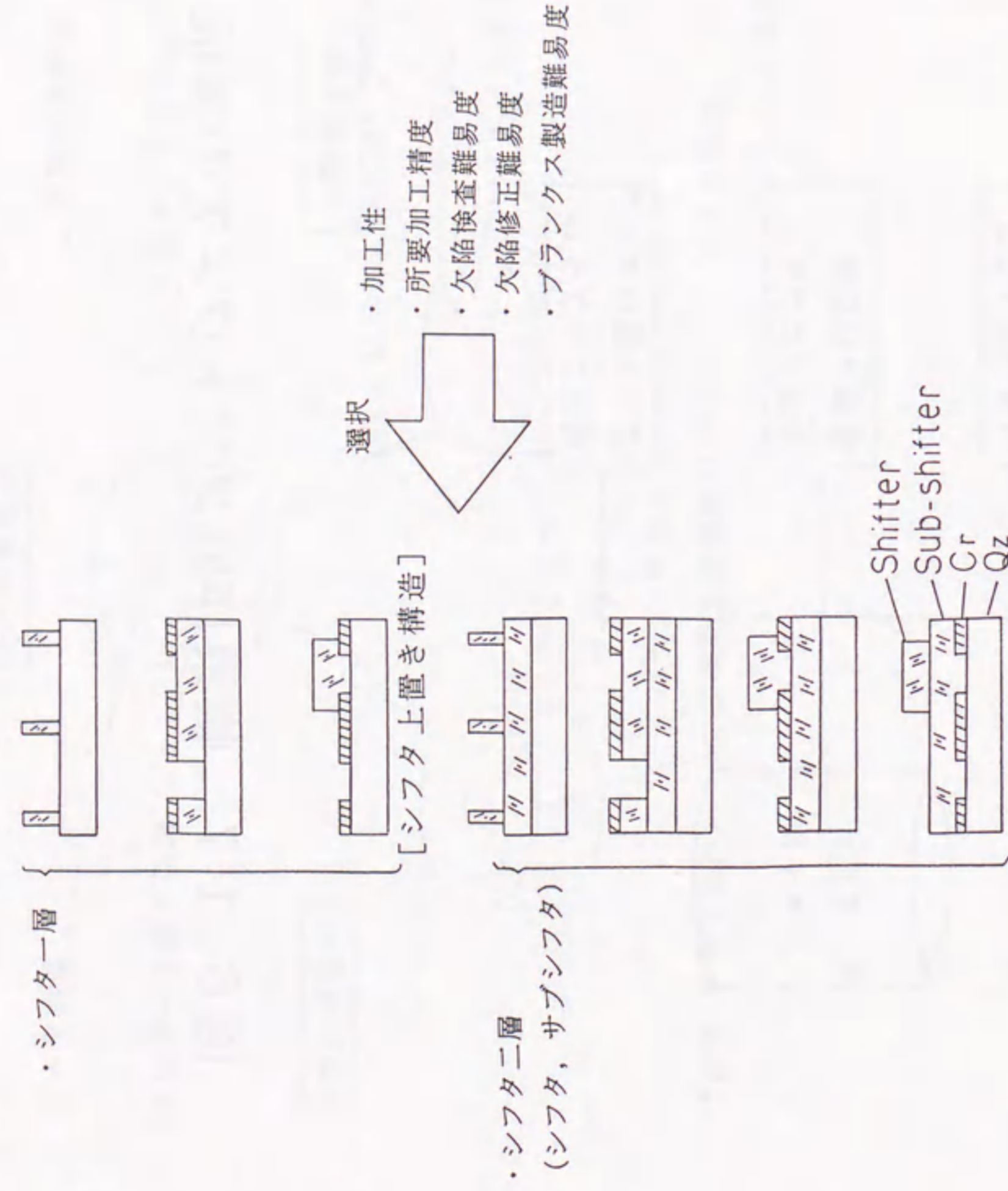


図6.18 位相シフトレチクルの各種構造

表6.1 シフタの材料種類と評価項目

シフタ材料の候補	材料選定時の評価項目
・SOG塗布膜	・下地との接着性
・SiO ₂ スパッタ膜	・膜厚制御性、膜厚均一性
・SiO ₂ CVD膜	・膜欠陥、付着異物
・高分子樹脂膜	・シフタ特性 (光透過率、耐光性、耐洗浄性)
	・パターン加工性

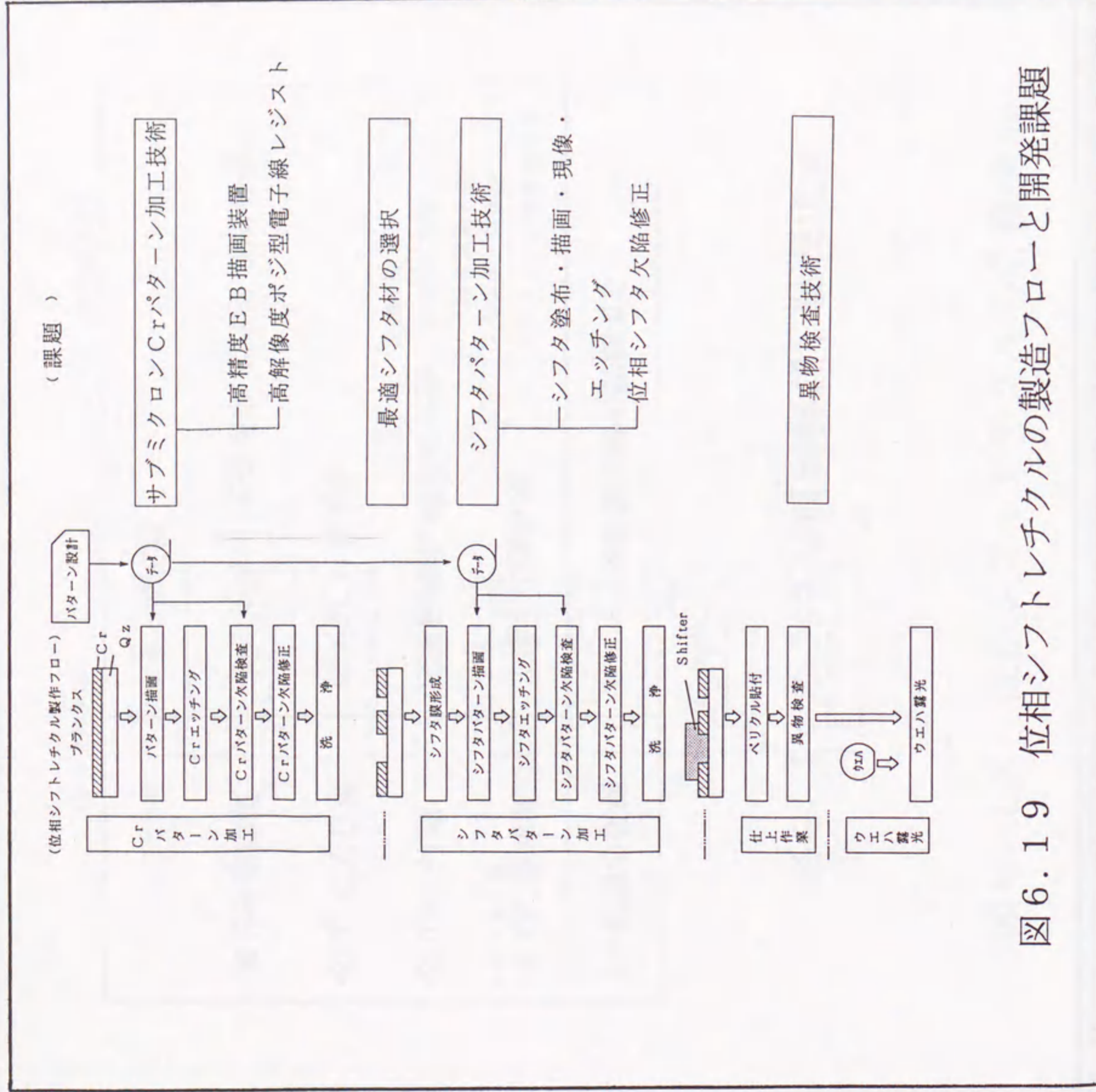
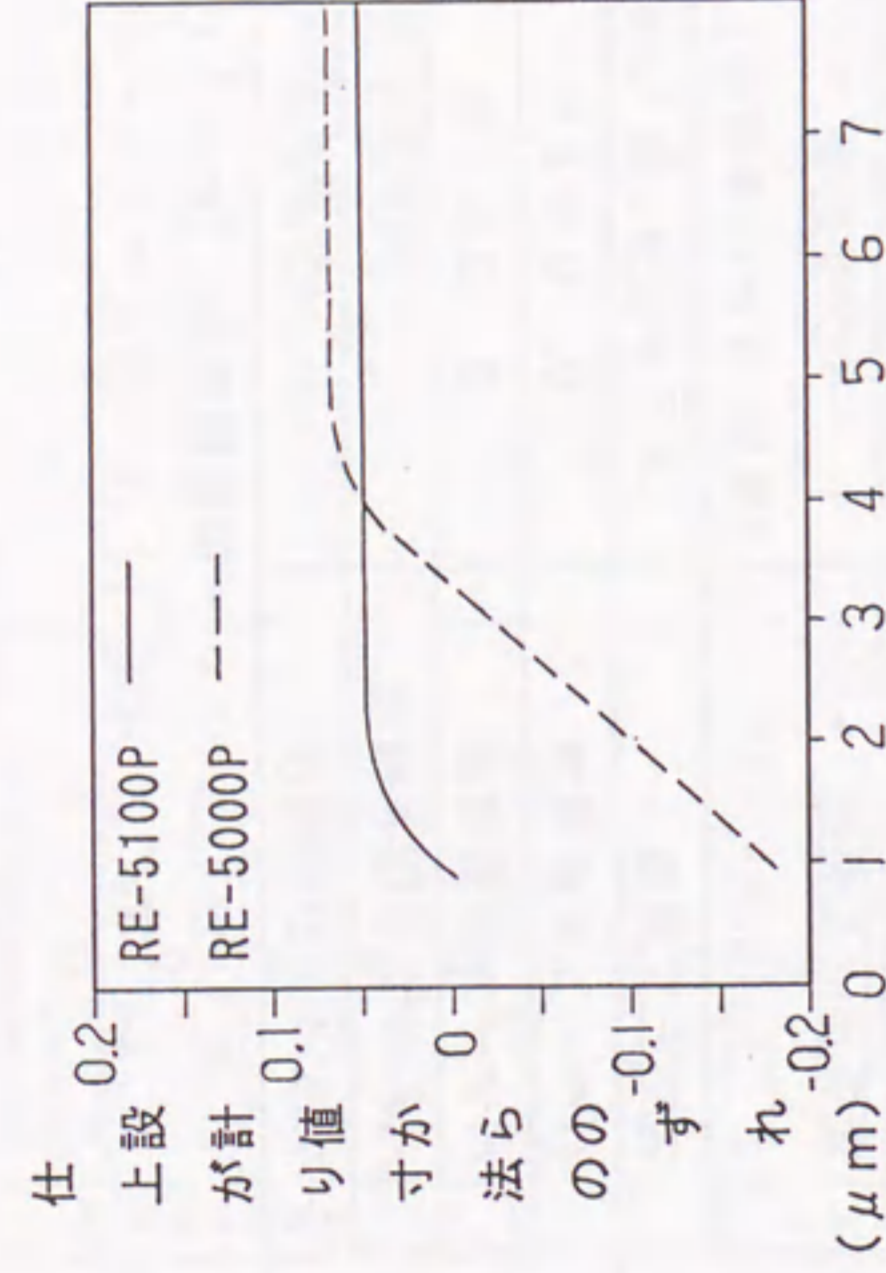


図6.19 位相シフトレチクルの製造フローと開発課題

表6.2 EB描画装置EB-MXの装置仕様

項目	仕様
電子ビーム形状	可変矩形ビーム (20 keV, 最大 2 μm角)
電子ビーム走査	ベクタ走査 (最大 3mm角偏向)
ステージ移動	ステップ & リピート
パターン寸法精度	0.05 μm
パターン位置精度	0.05 μm
パターンつなぎ精度	0.06 μm
アライメント精度	0.06 μm

・描画精度は (m+3σ) 表示



パターン設計寸法(μm)

図6.20 化学増幅系ポジ型電子線レジストRE-5100Pの解像性能

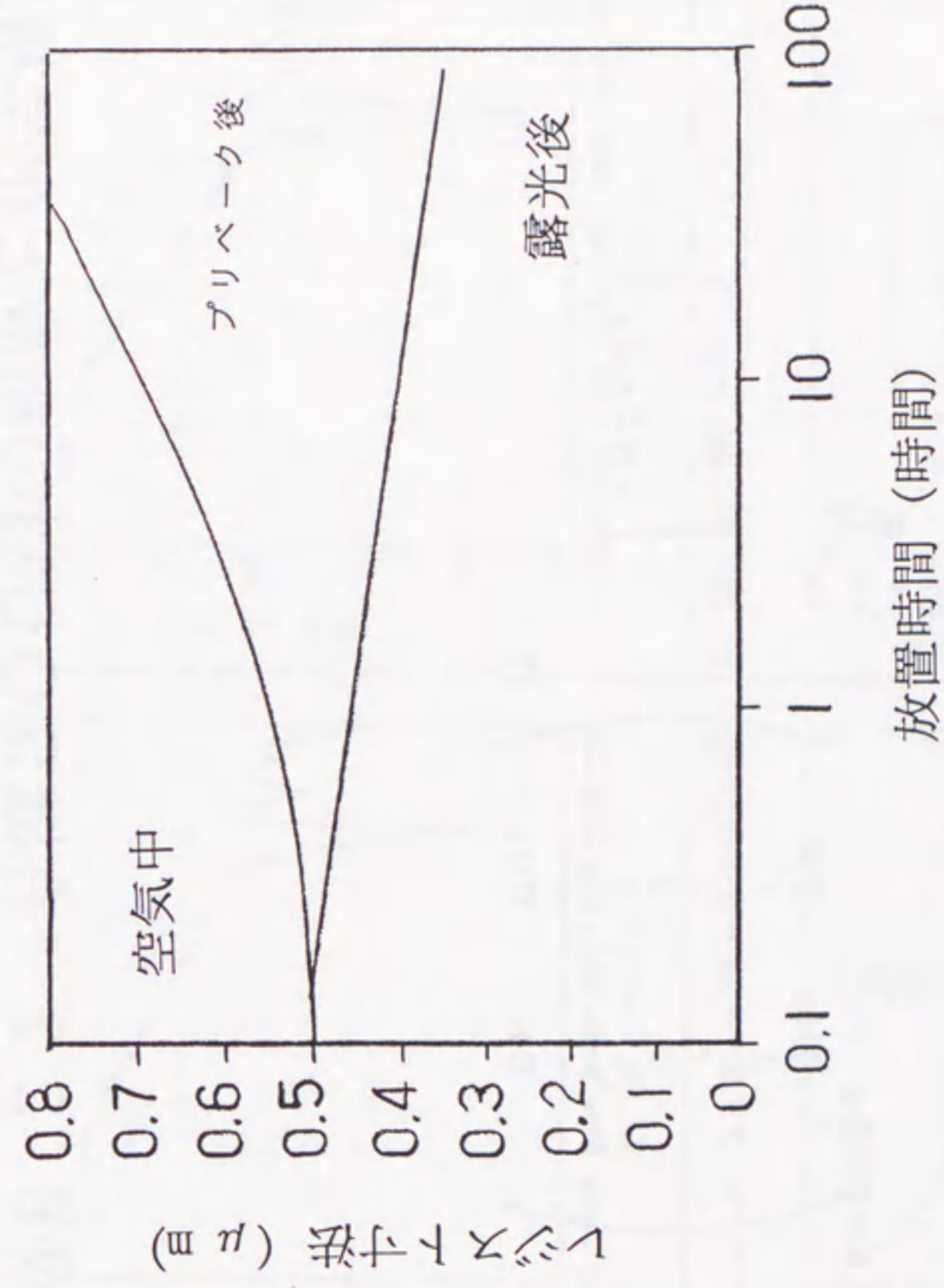


図6.21 化学増幅系レジストにおけるレジスト寸法の処理後放置時間依存性

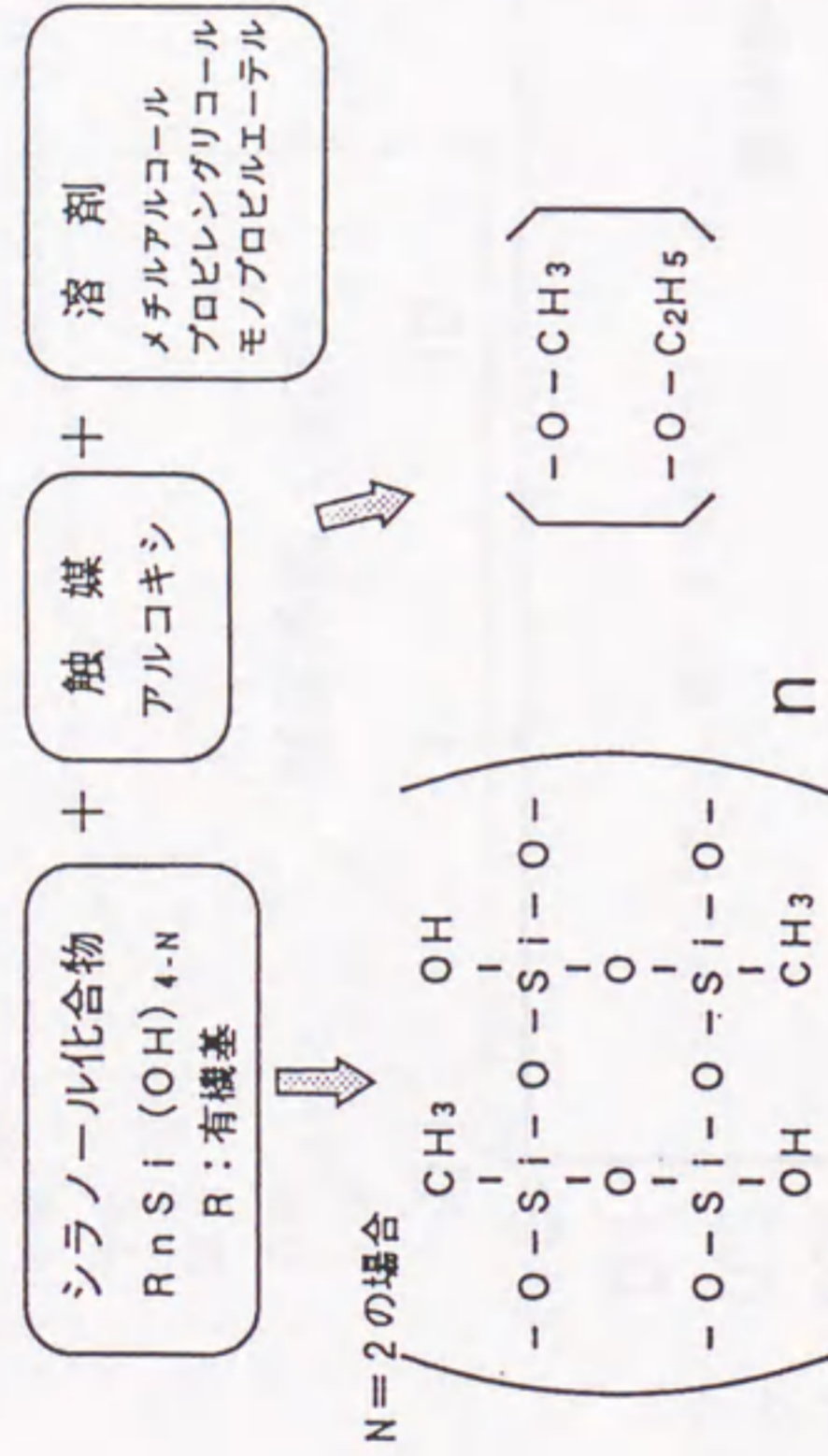


図6.2.2 有機SOG材の組成と化学構造

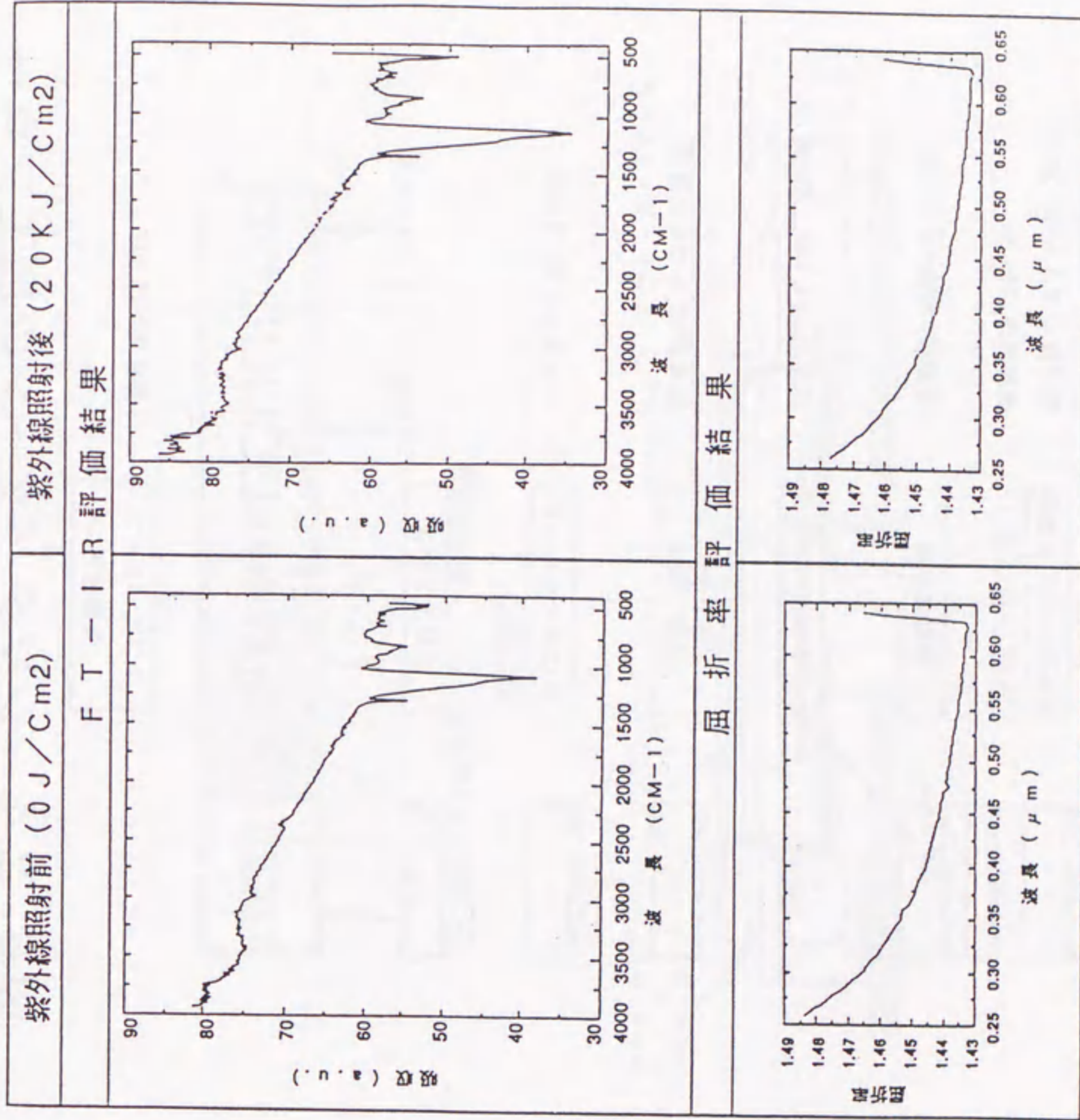


図6.2.3 i線照射前後におけるSOGシフタのFT-IRスペクトルと屈折率

〈レチクル断面〉 〈シフトパターン加工フロー〉 〈主なプロセス仕様〉

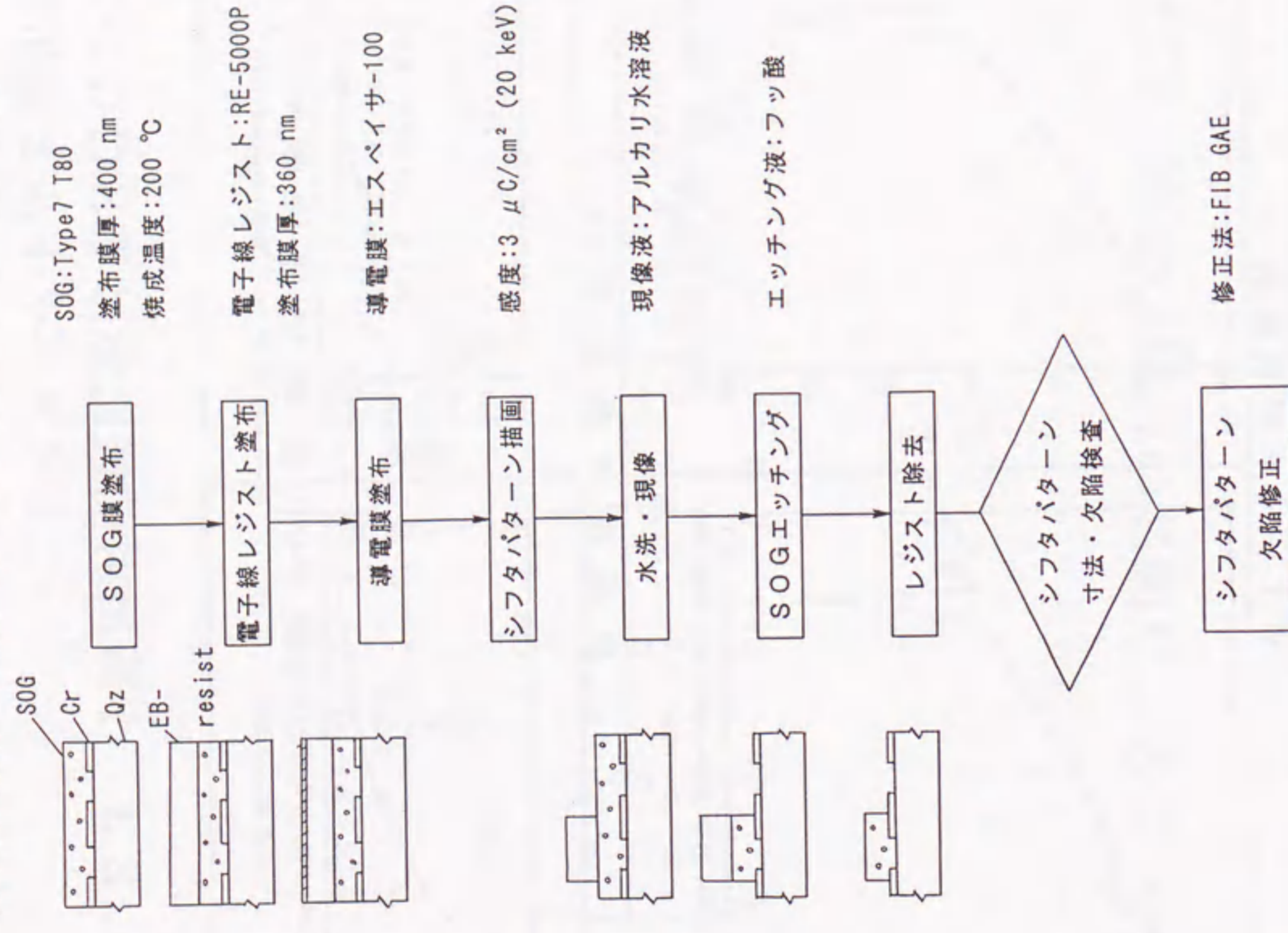


図6.24 シフトパターンの加工フロー

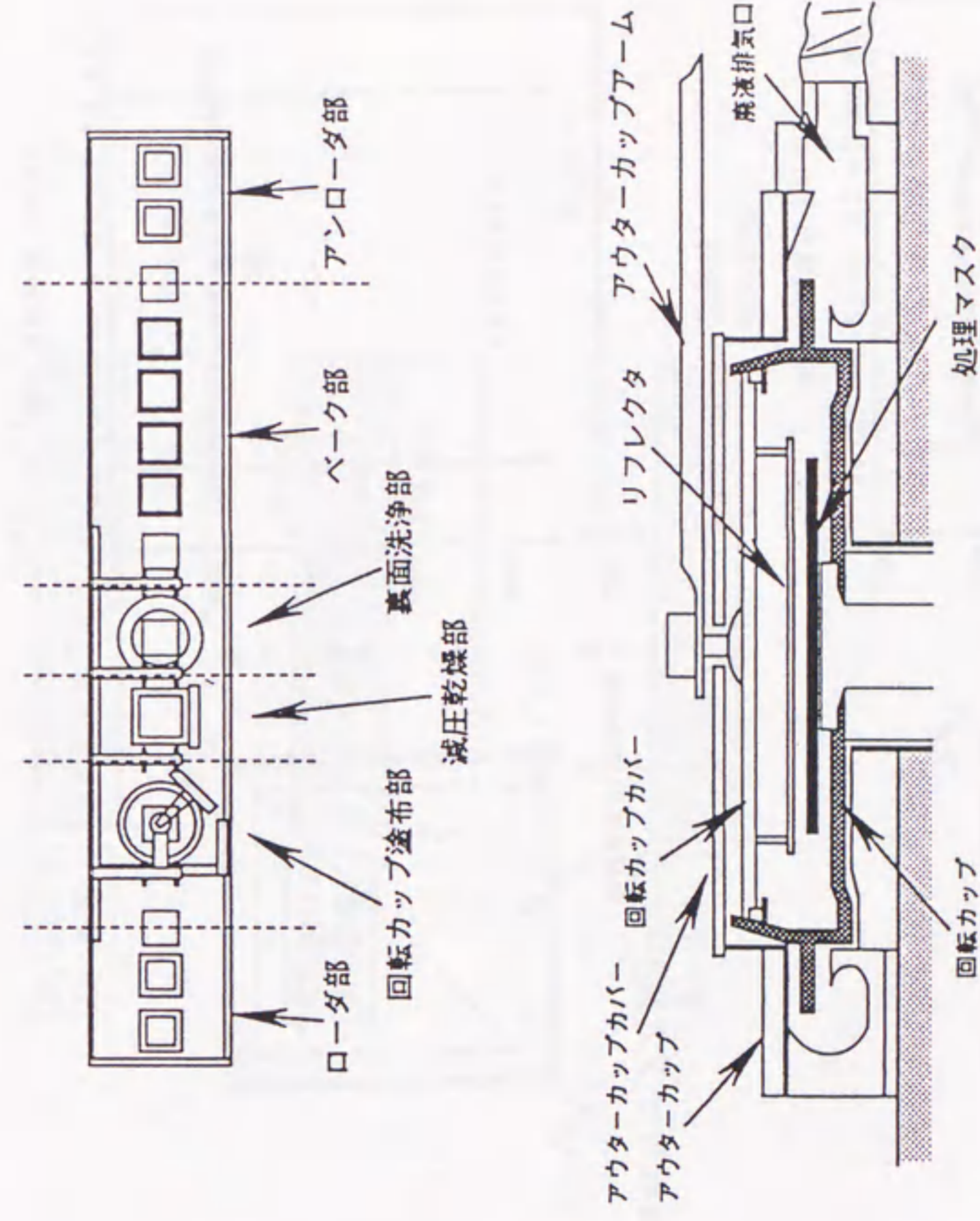


図6.25 回転カッパ式SOG塗布装置の構成

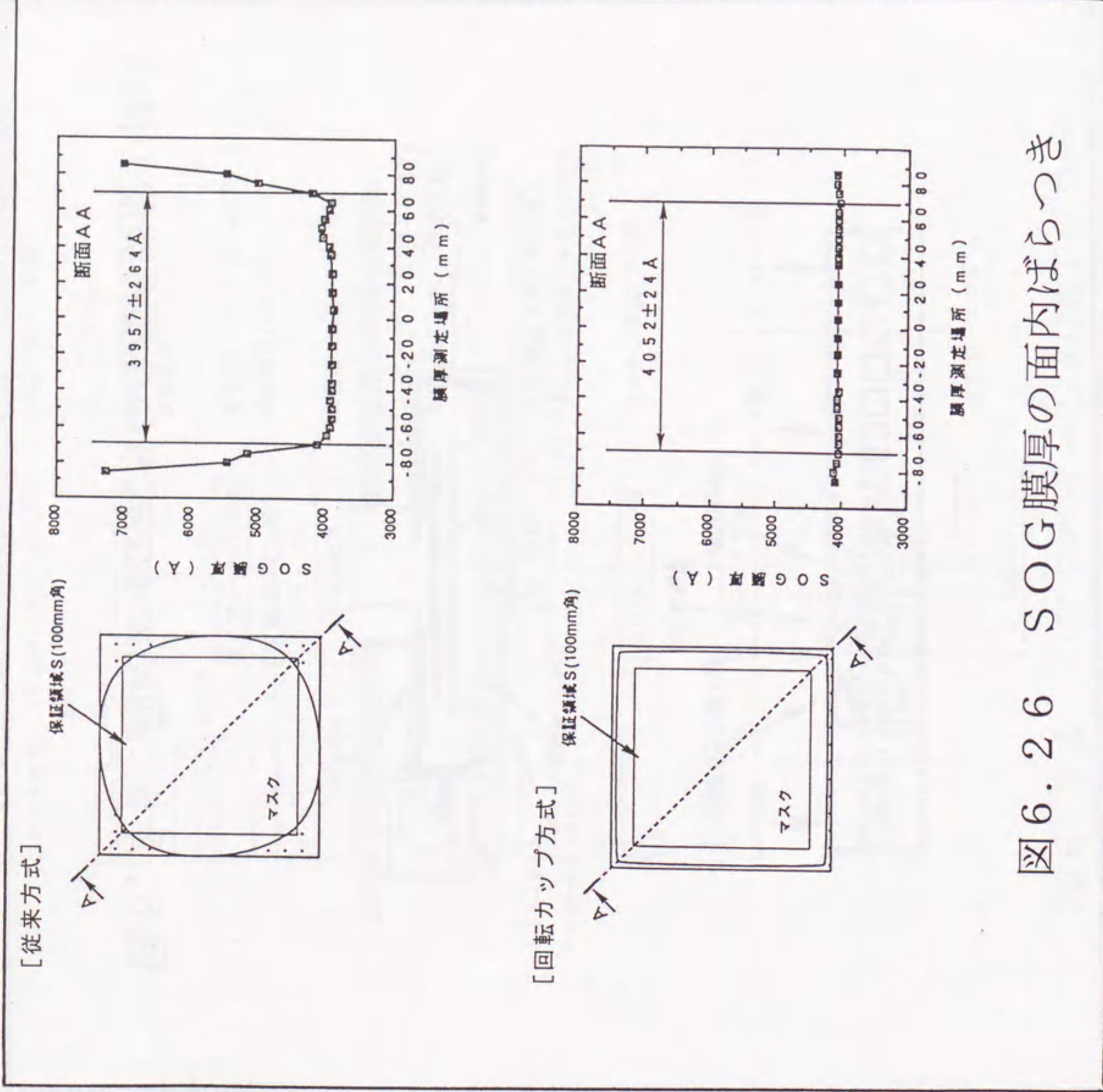


図6.26 SOG膜厚の面内ばらつき

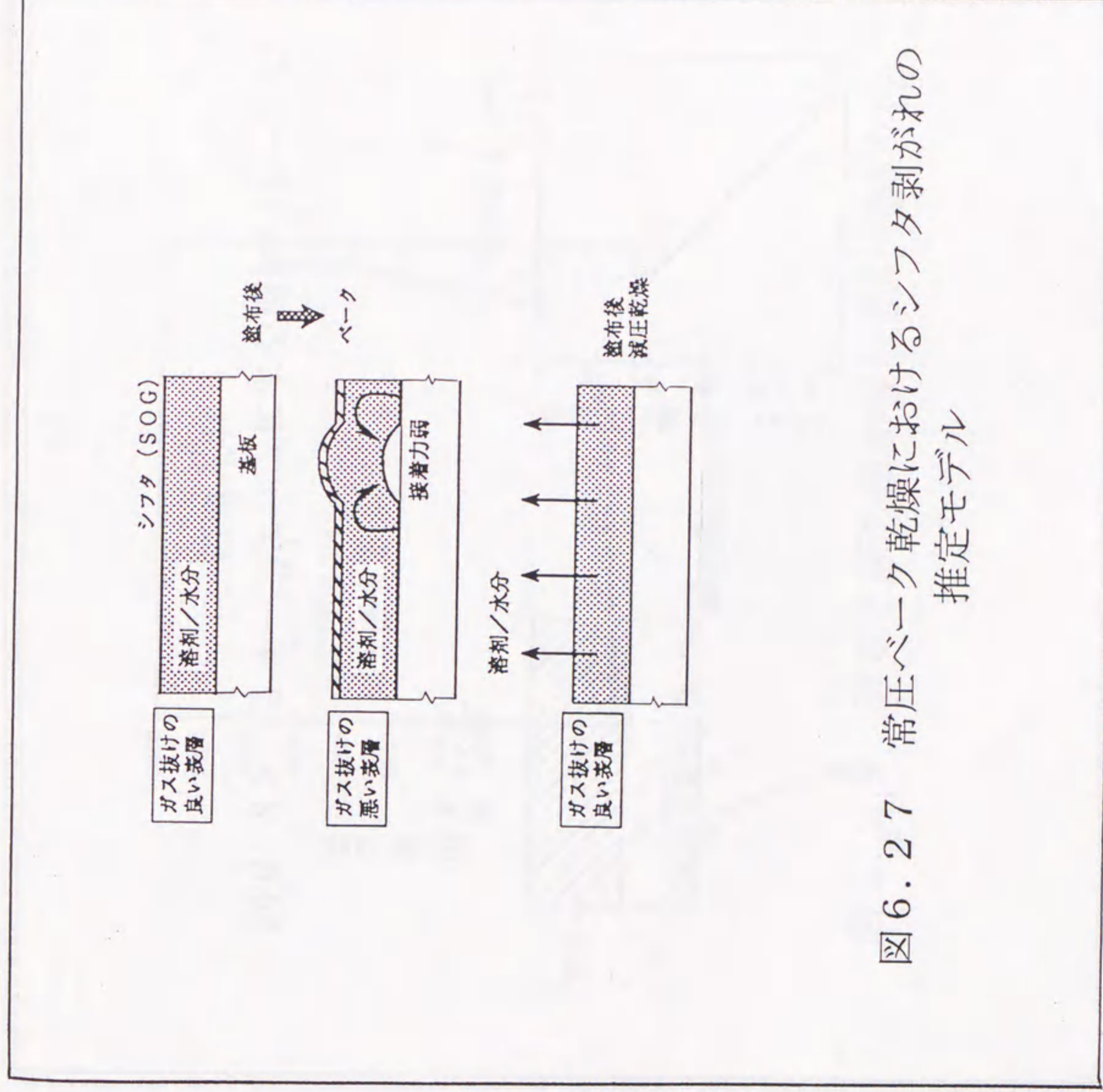


図6.27 常圧ベーク乾燥におけるシフタ剥がれの推定モデル

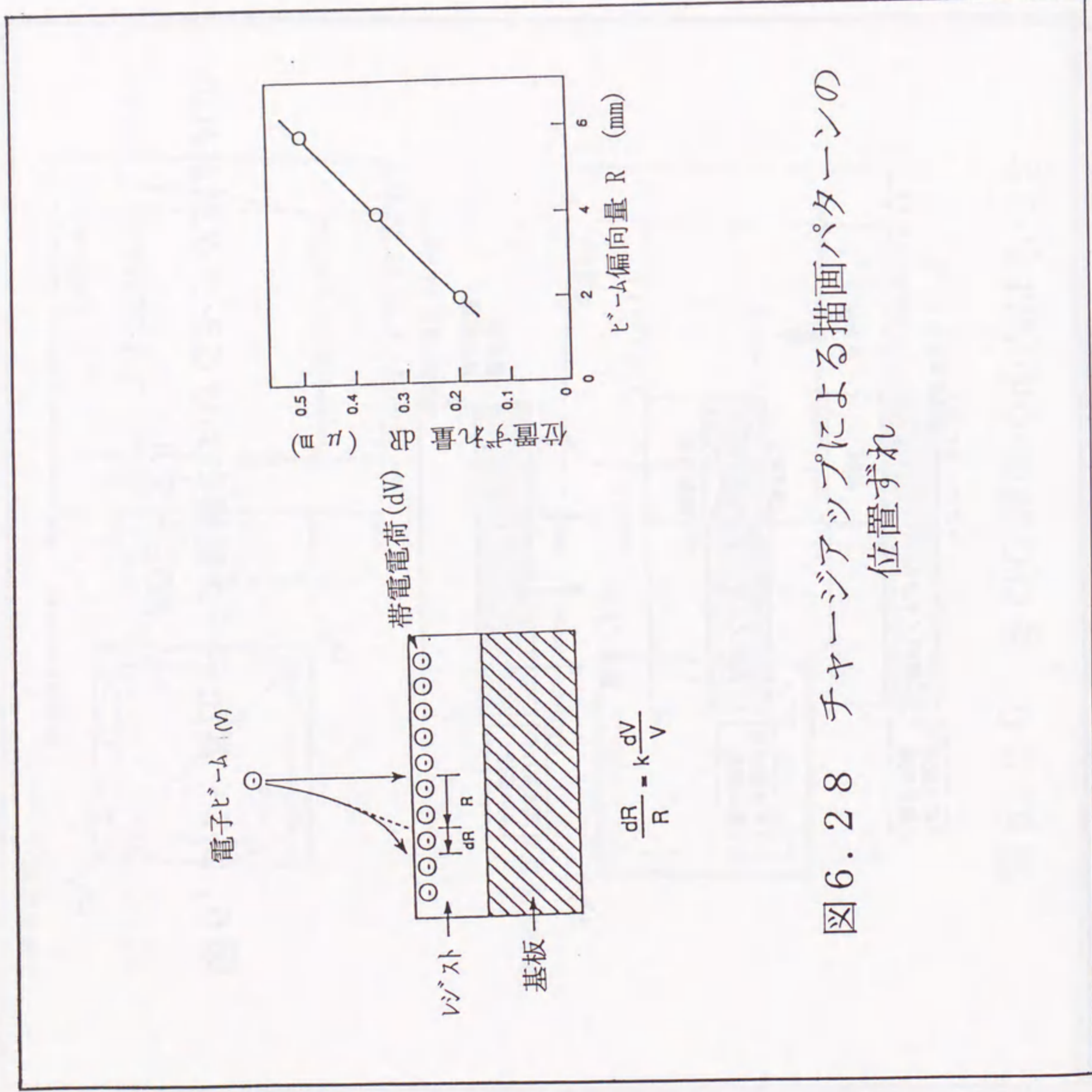


図6.28 チャージアツプによる描画パターンの位置ずれ

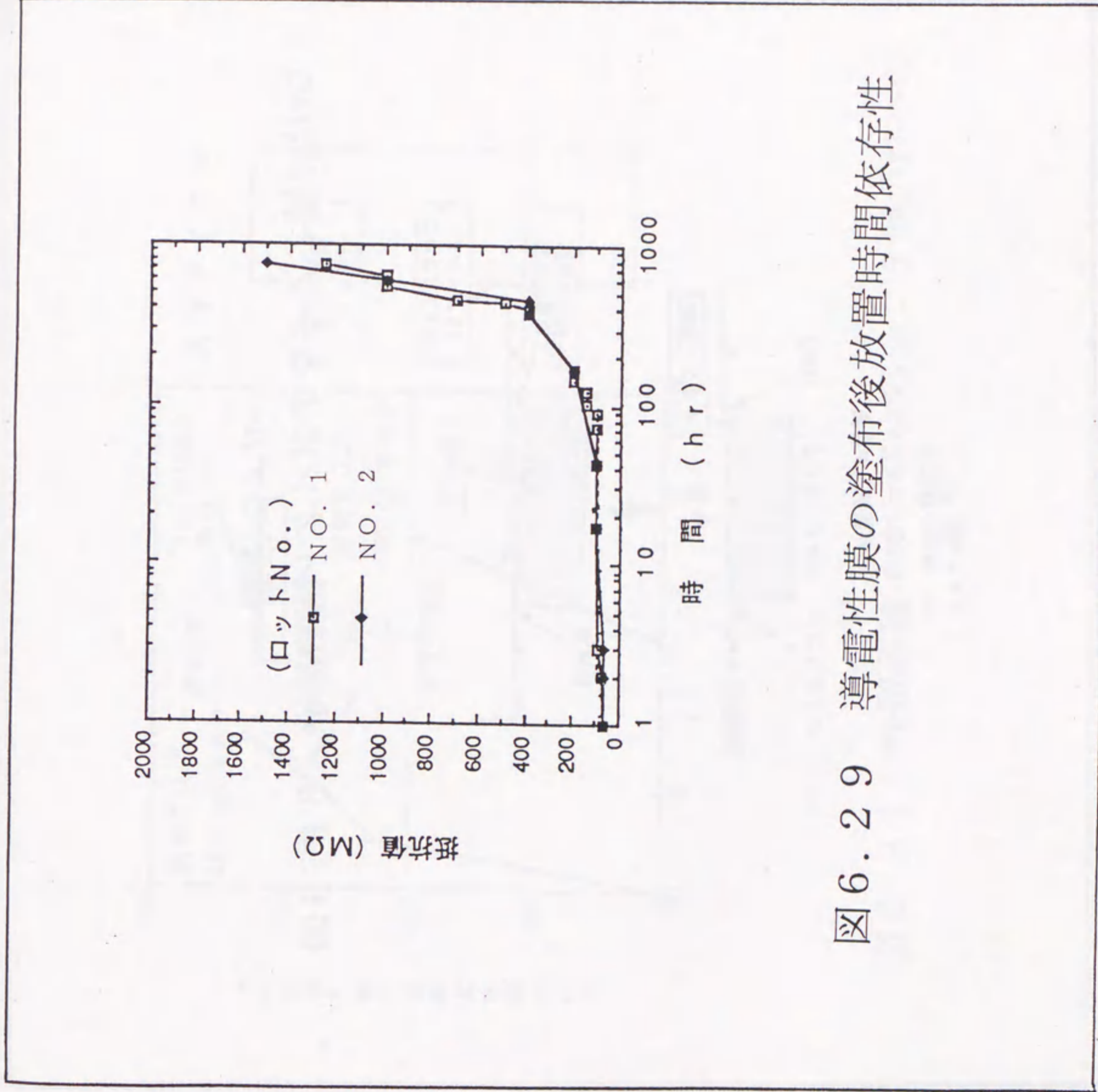


図6.29 導電性膜の塗布後放置時間依存性

イオン残留
⇒ 表面が親水性
⇒ H₂O/エッチャント
の界面侵入が容易

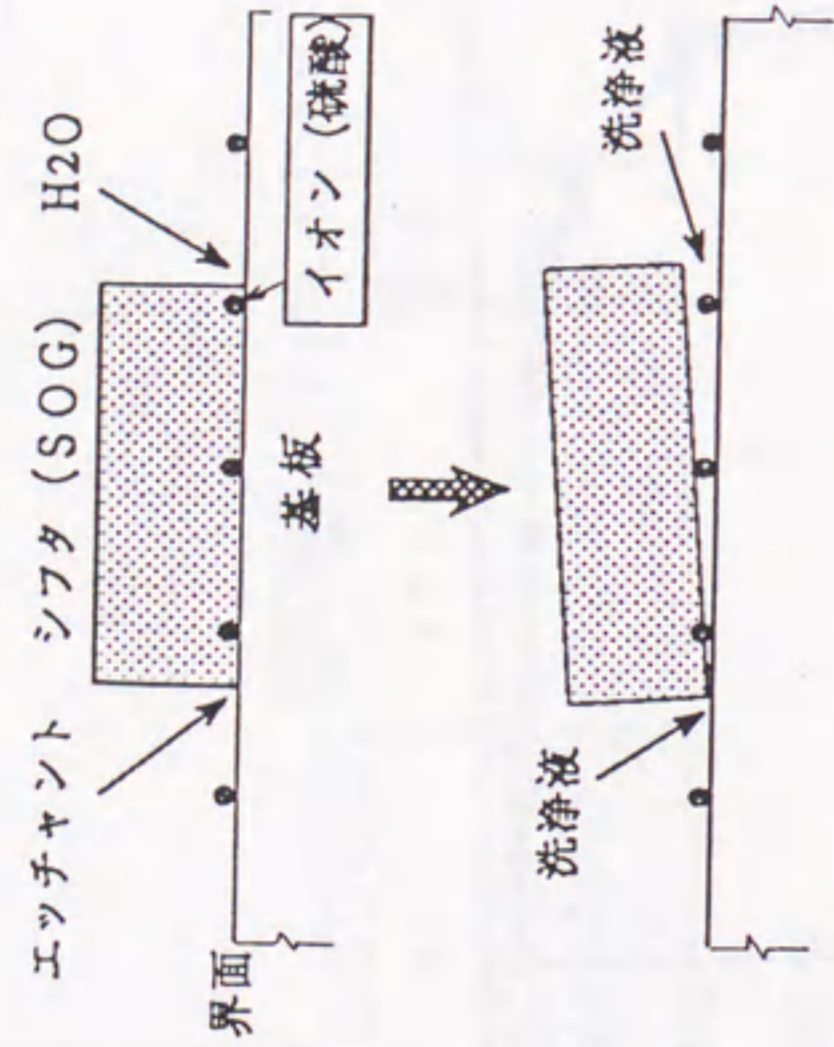


図6.30 残留硫酸イオンによるシフト剥がれの推定モデル

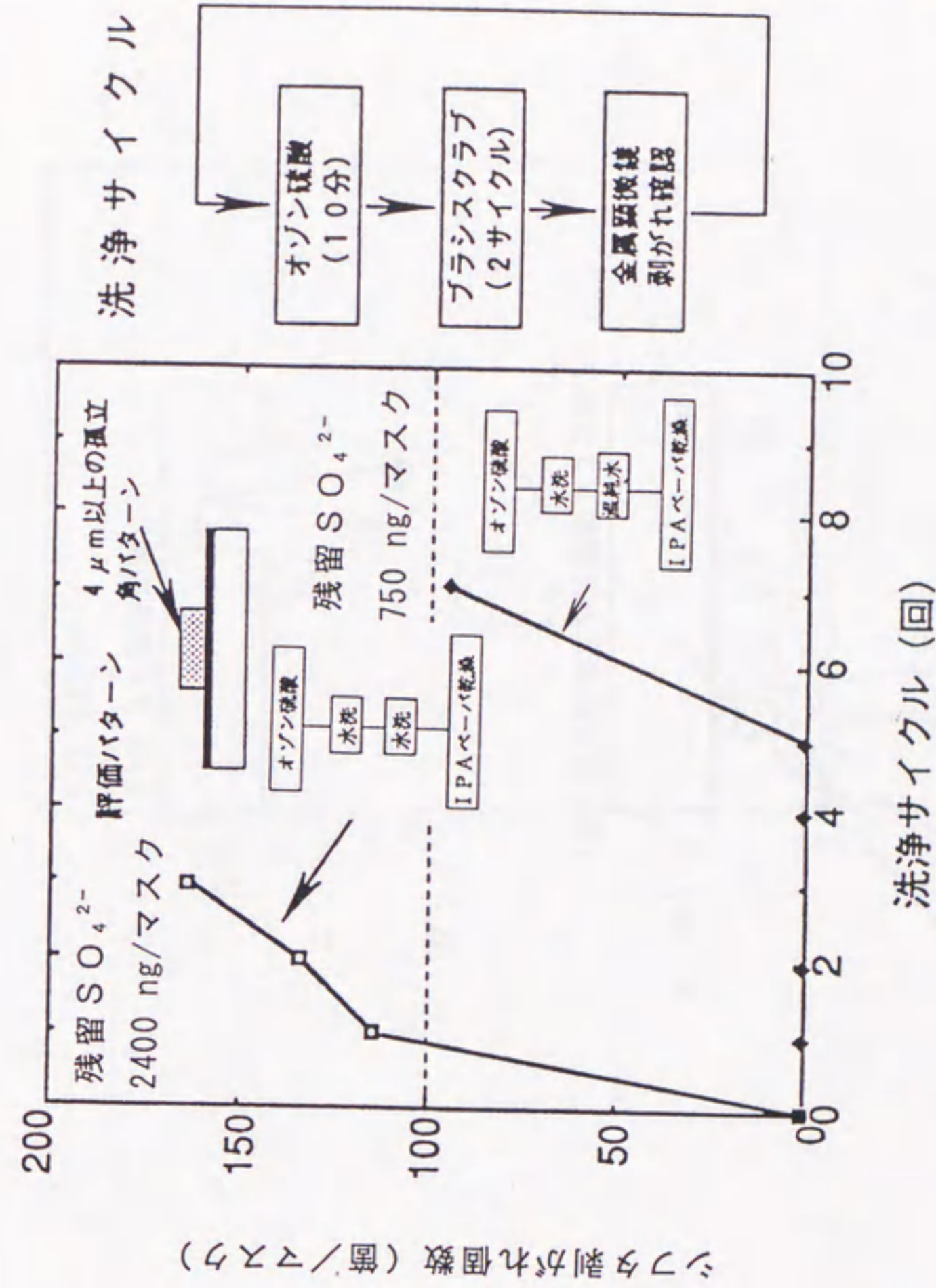


図6.31 残留硫酸イオンによるシフト剥がれへの影響

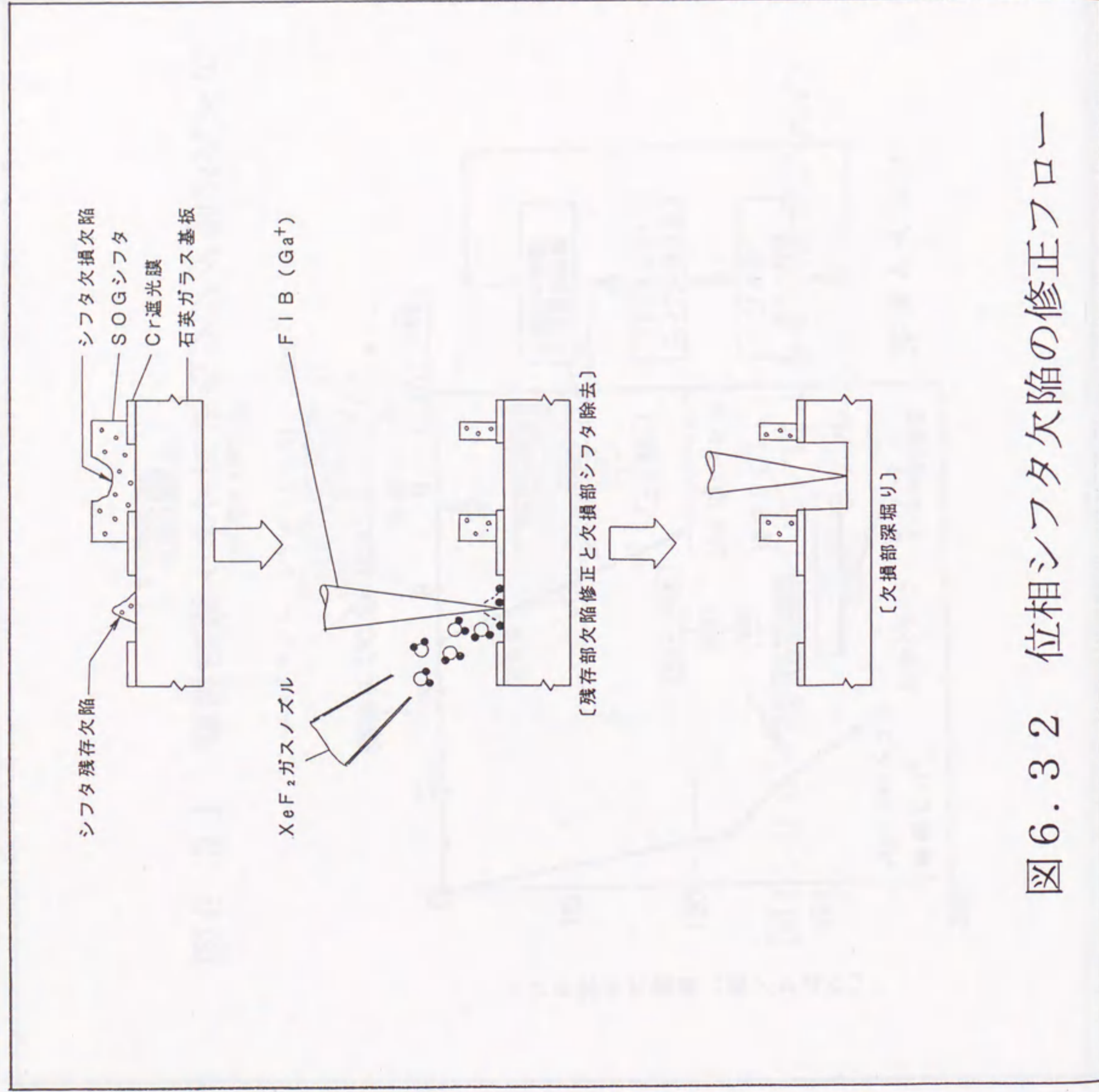


図6.32 位相シフト欠陥の修正フロー

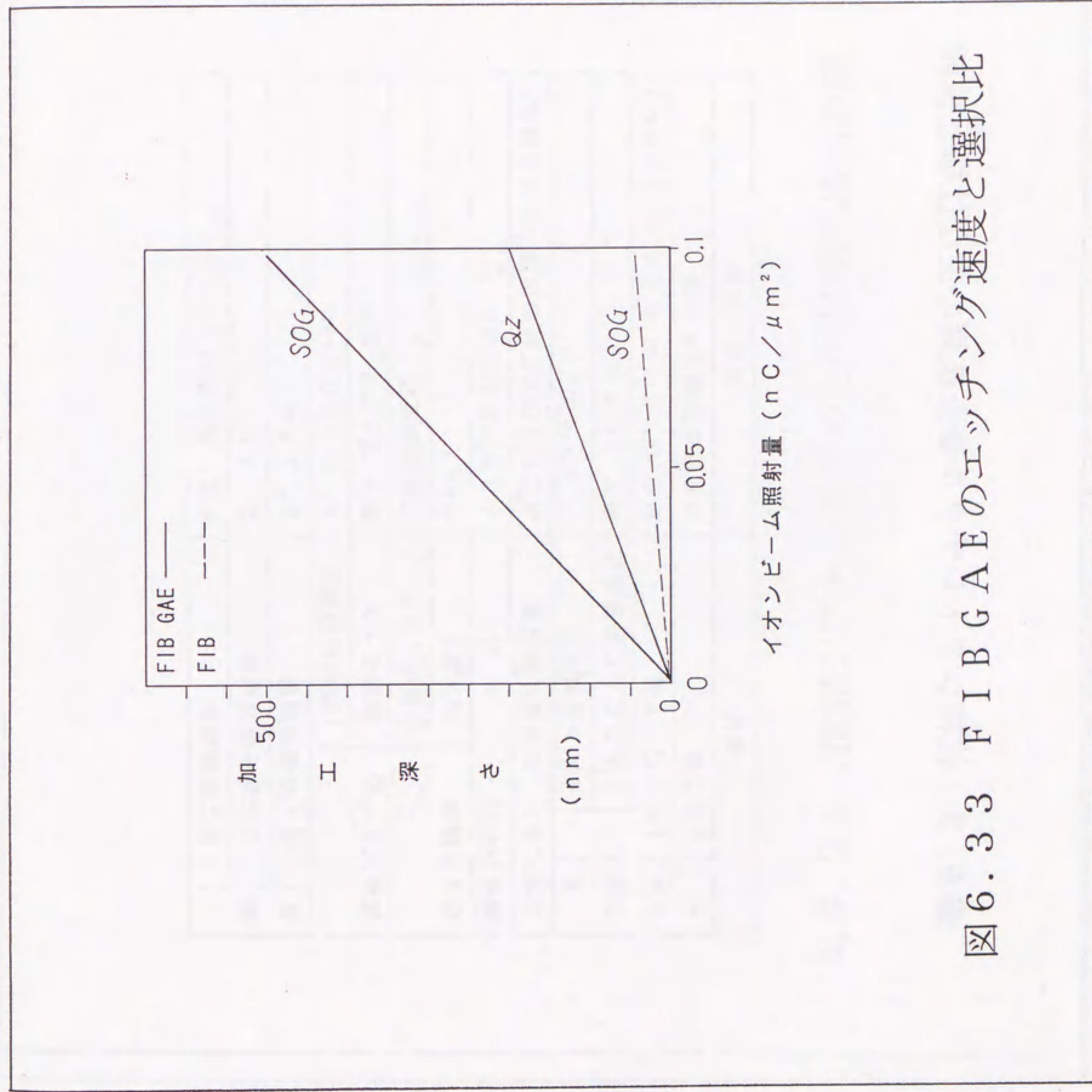


図6.33 FIB GAEのエッチング速度と選択比

表6.3 位相シフトレチクル修正技術の主な仕様と性能

項目		仕様・性能
イオ光学系	イオン源	Ga 液体金属イオン源
	イオンビーム径	最小 0.1 μm φ (WD: 50mm)
	イオンビーム加速電圧	最大 30kV
二次イオン, 二次電子検出器	イオン電流密度	1 A/cm ²
	電子シャワー	MCP (GAE時の保護シャッタ付き)
GAE機能	ガス種	100 nA / 2mm φ
	ガスノズル	XeF ₂
試料ステージ	試料サイズ	位置調整可能
	試料移動範囲	最大 7インチ 基板
性能	SIM像分解能	X, Y: 200nm
	二次電子像分解能	0.1 μm
	加工位置精度	0.1 μm
		±0.05 μm

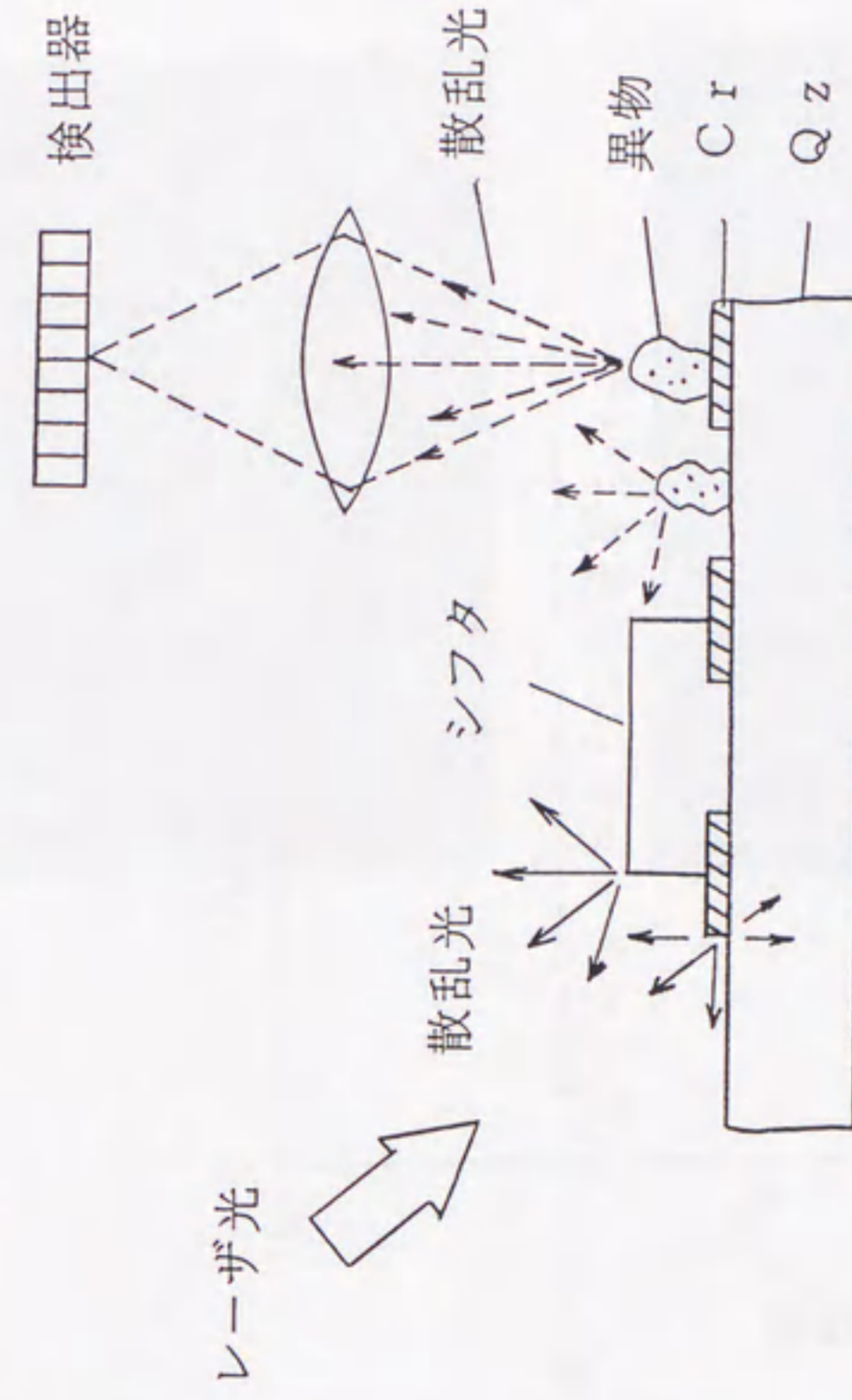


図6.34 位相シフトレチクル上の異物の検出原理

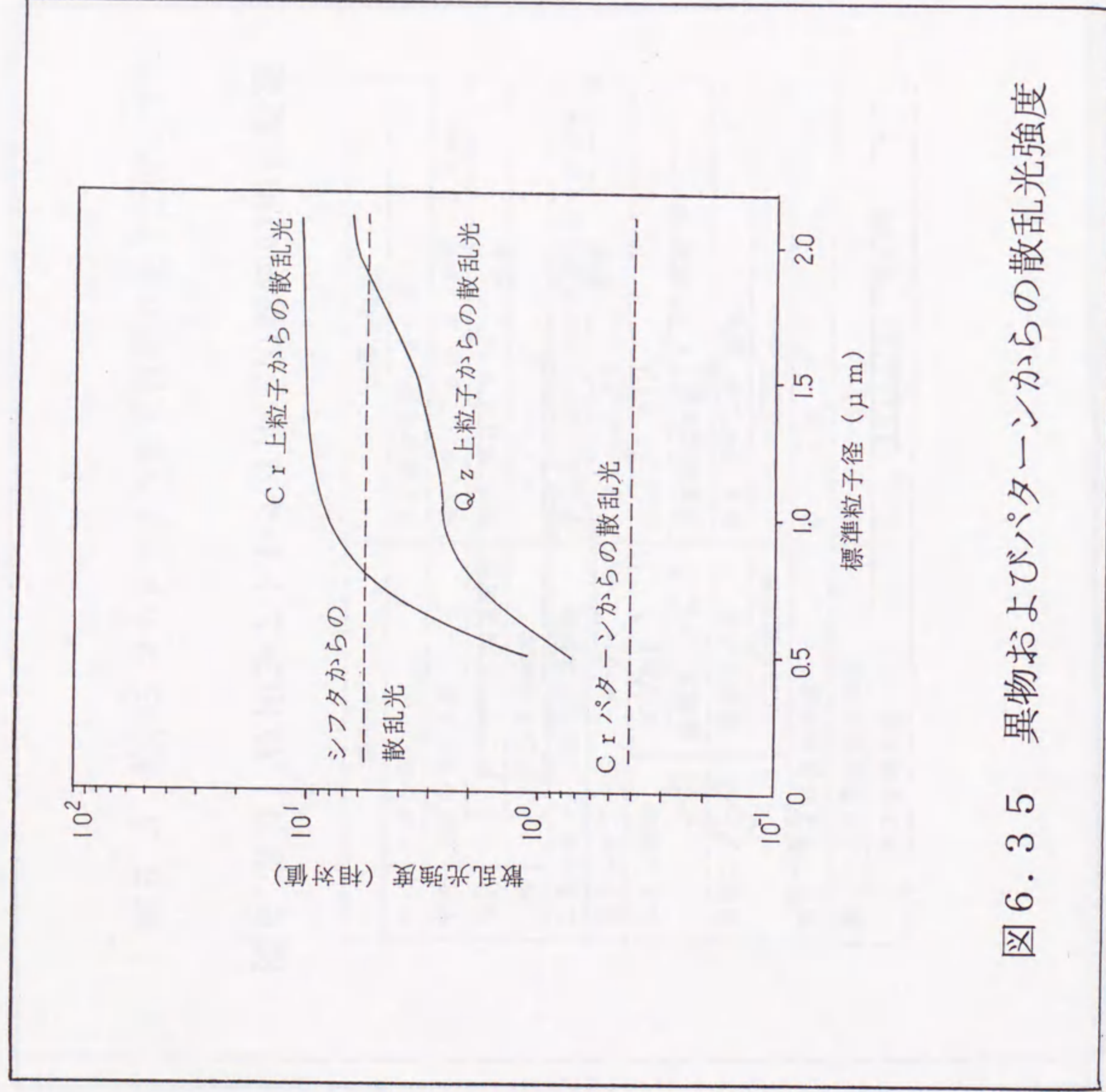
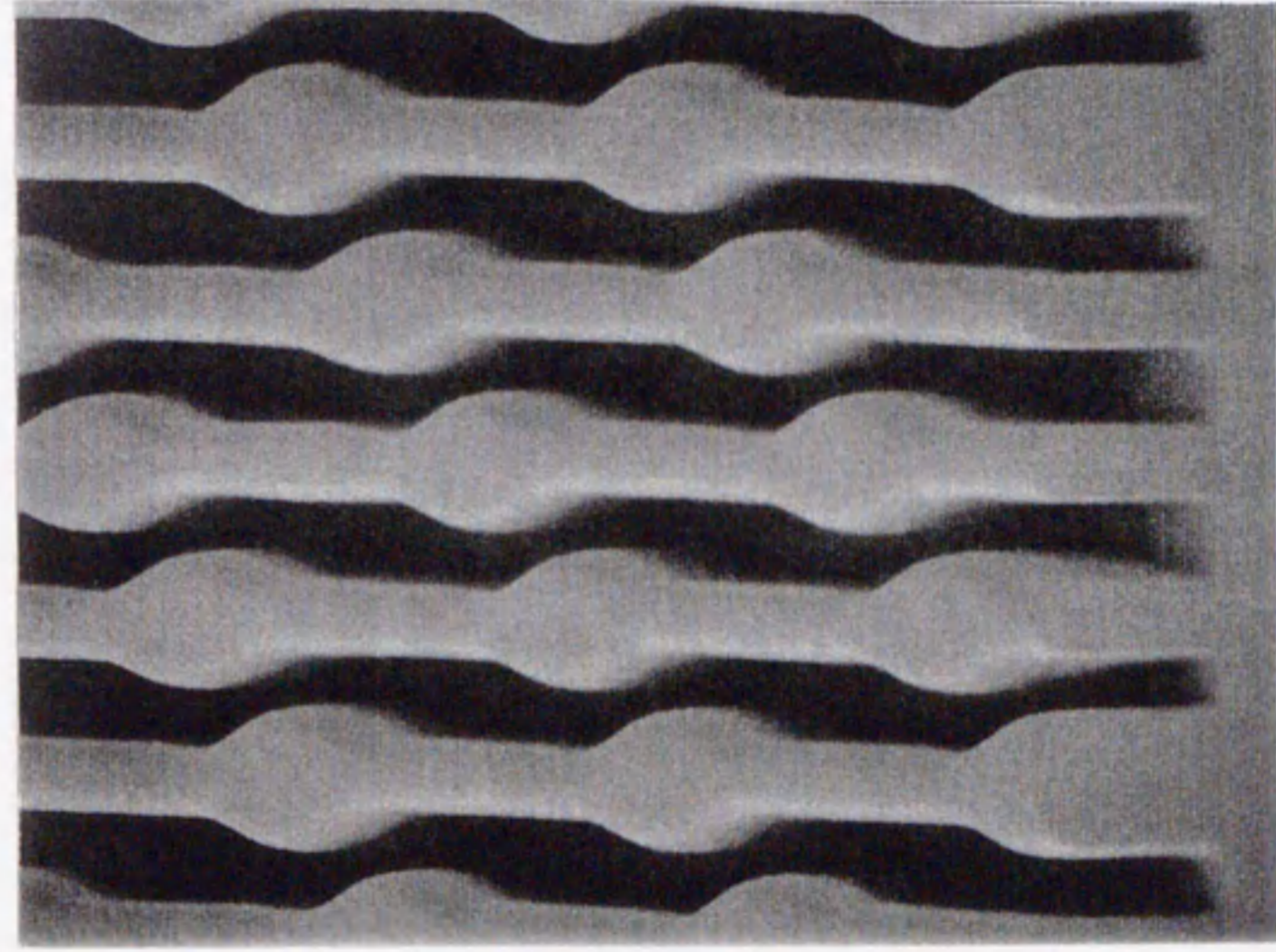


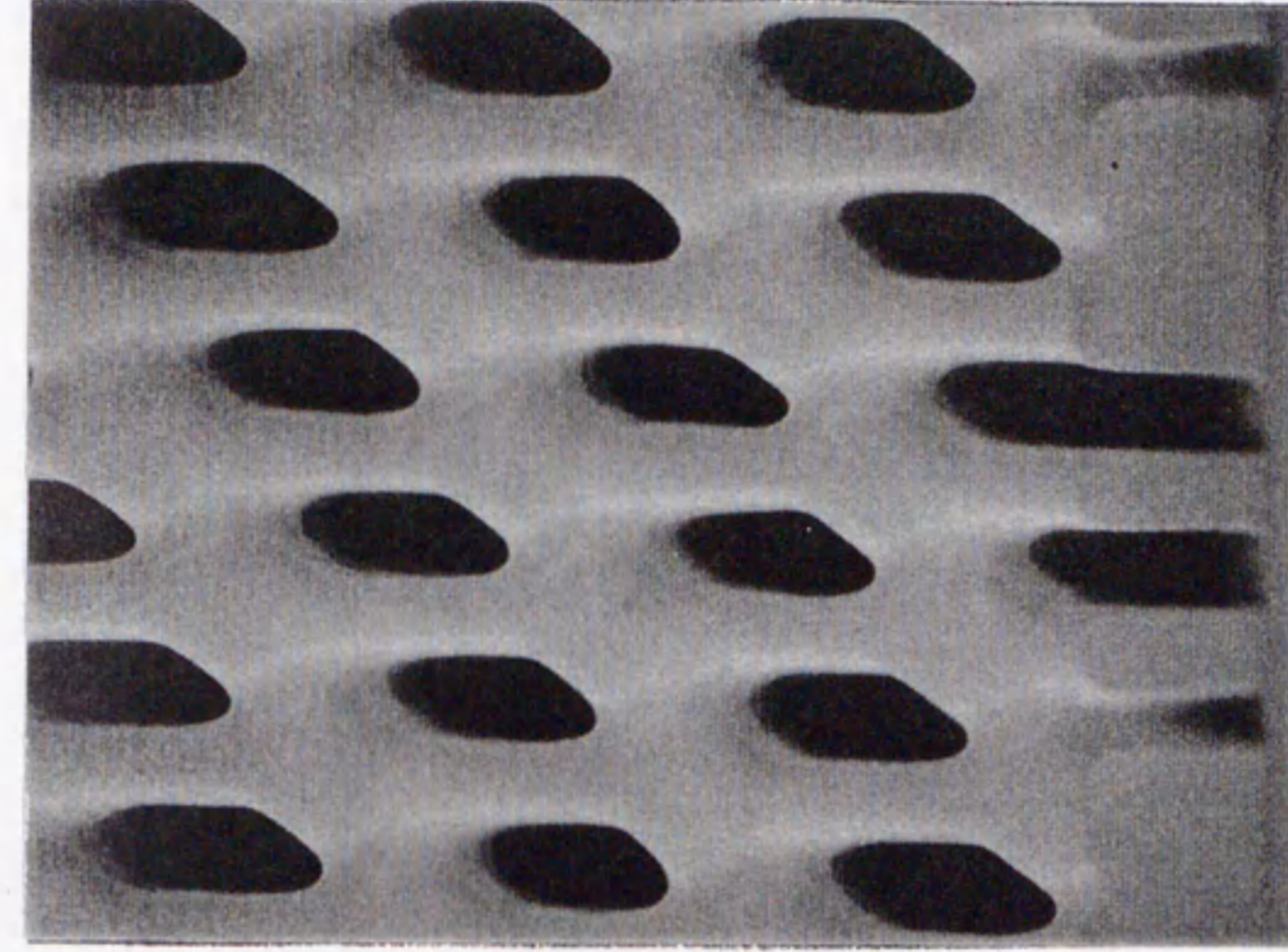
図6.35 異物およびパターンからの散乱光強度



図6.36 位相シフトレチクルの例



位相シフト露光



従来の光露光 (スペース非解像)

図6.37 位相シフト露光によるパターン転写例

〈開発技術〉

- ・ ・ ・ 描画速度向上
- ・ 高速電子線描画装置
- ・ EB描画装置
- ・ 描画装置
- ・ 装置
- ・ 転送
- ・ オン
- ・ プログラム
- ・ セン
- ・ シ
- ・ ス
- ・ テ
- ・ ム

〈EB直描システム〉

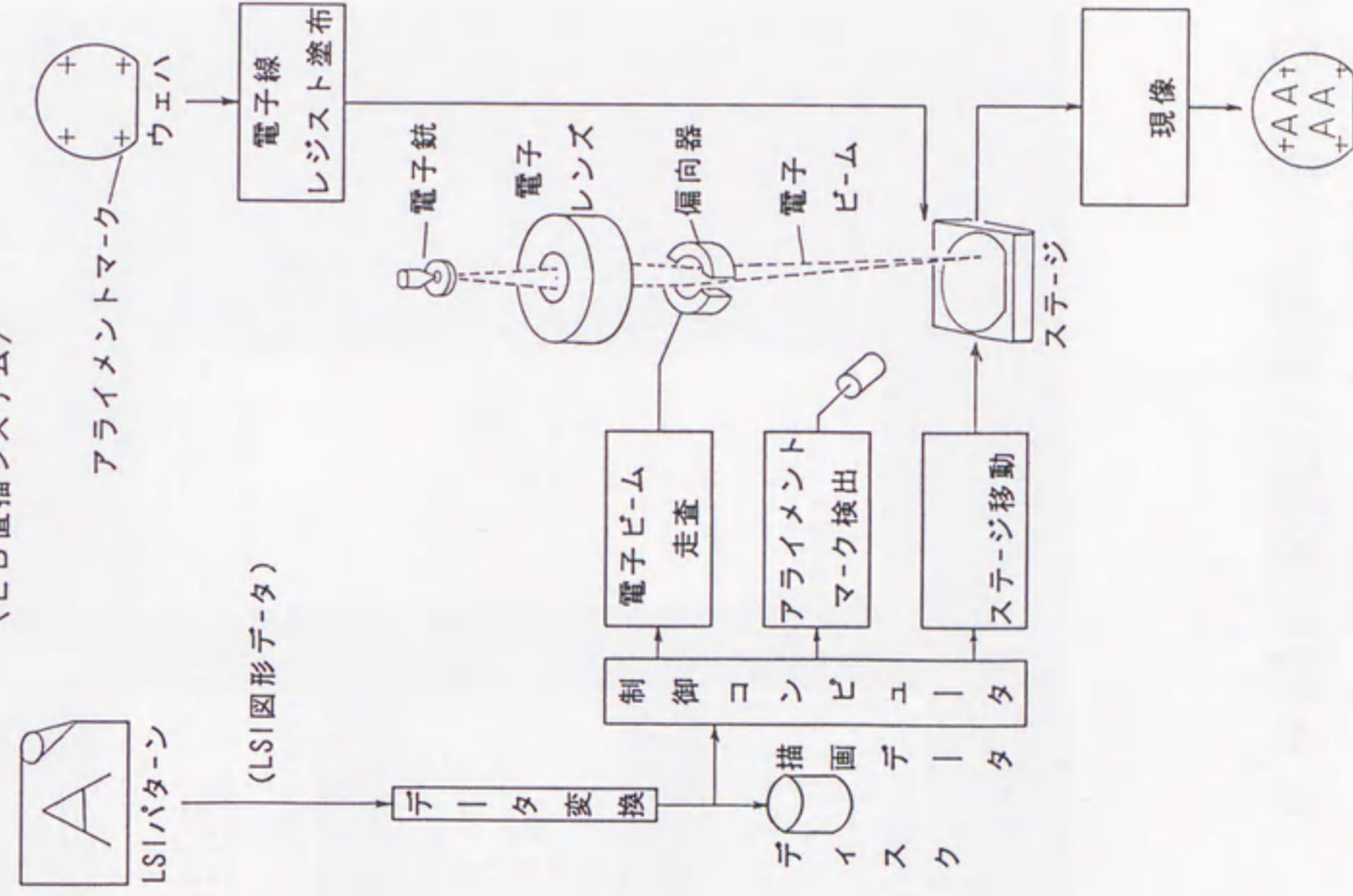


図6.38 ウェハ直接描画の原理と開発技術

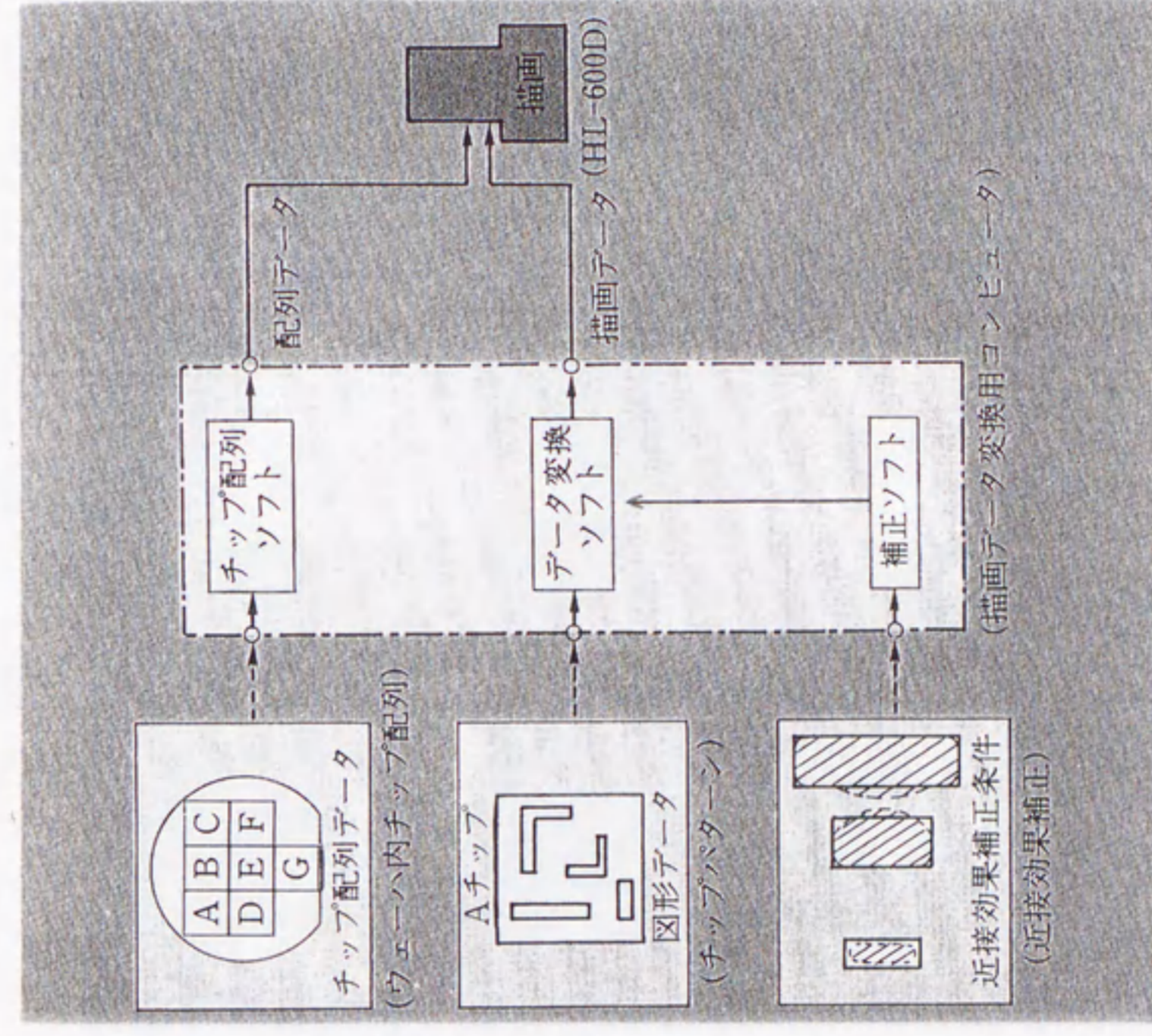


図6.39 EB描画装置の制御に用いる描画データと配列データの流れ

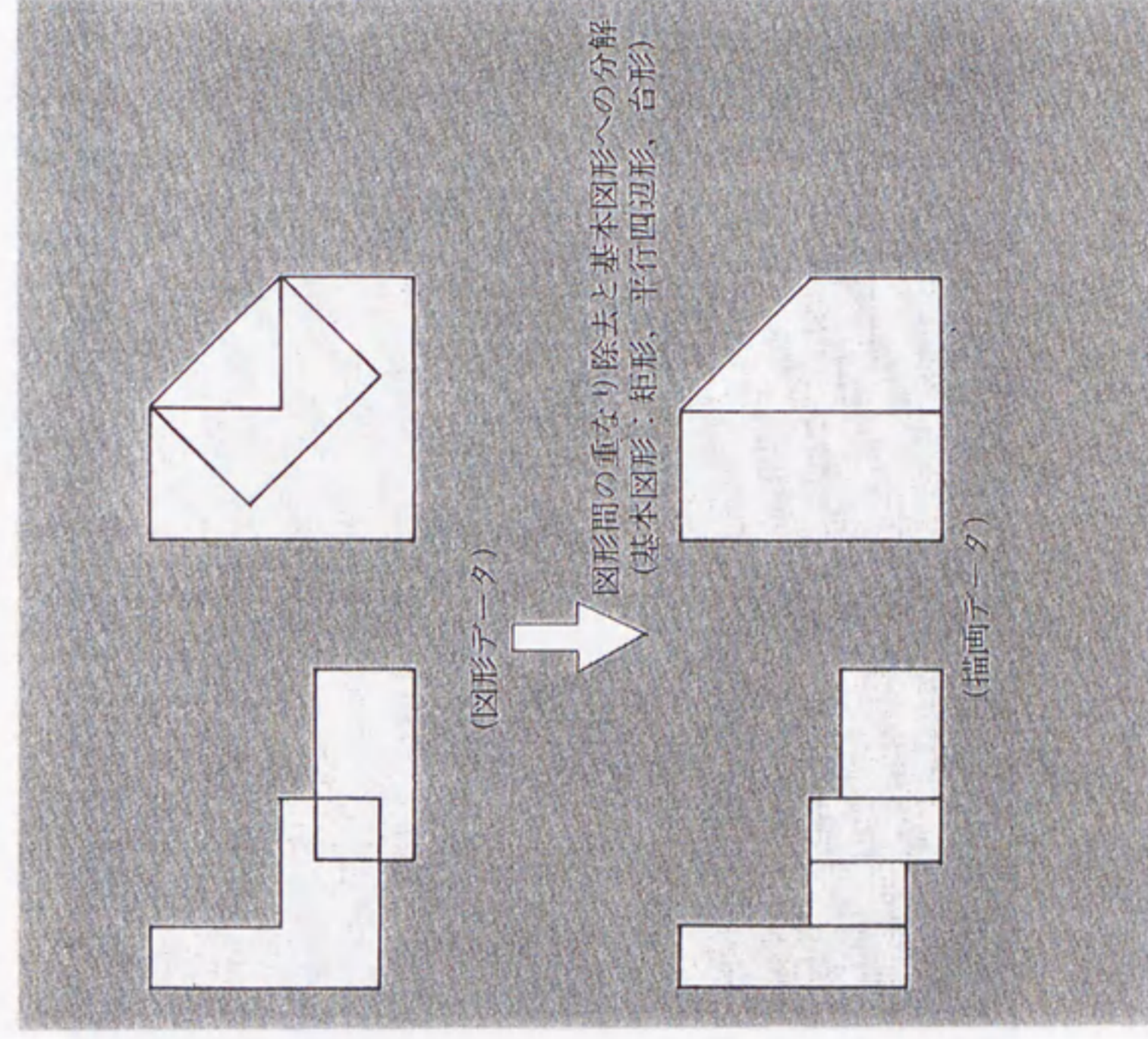


図6.40 LSIパターンの図形データと
描画データとの関係

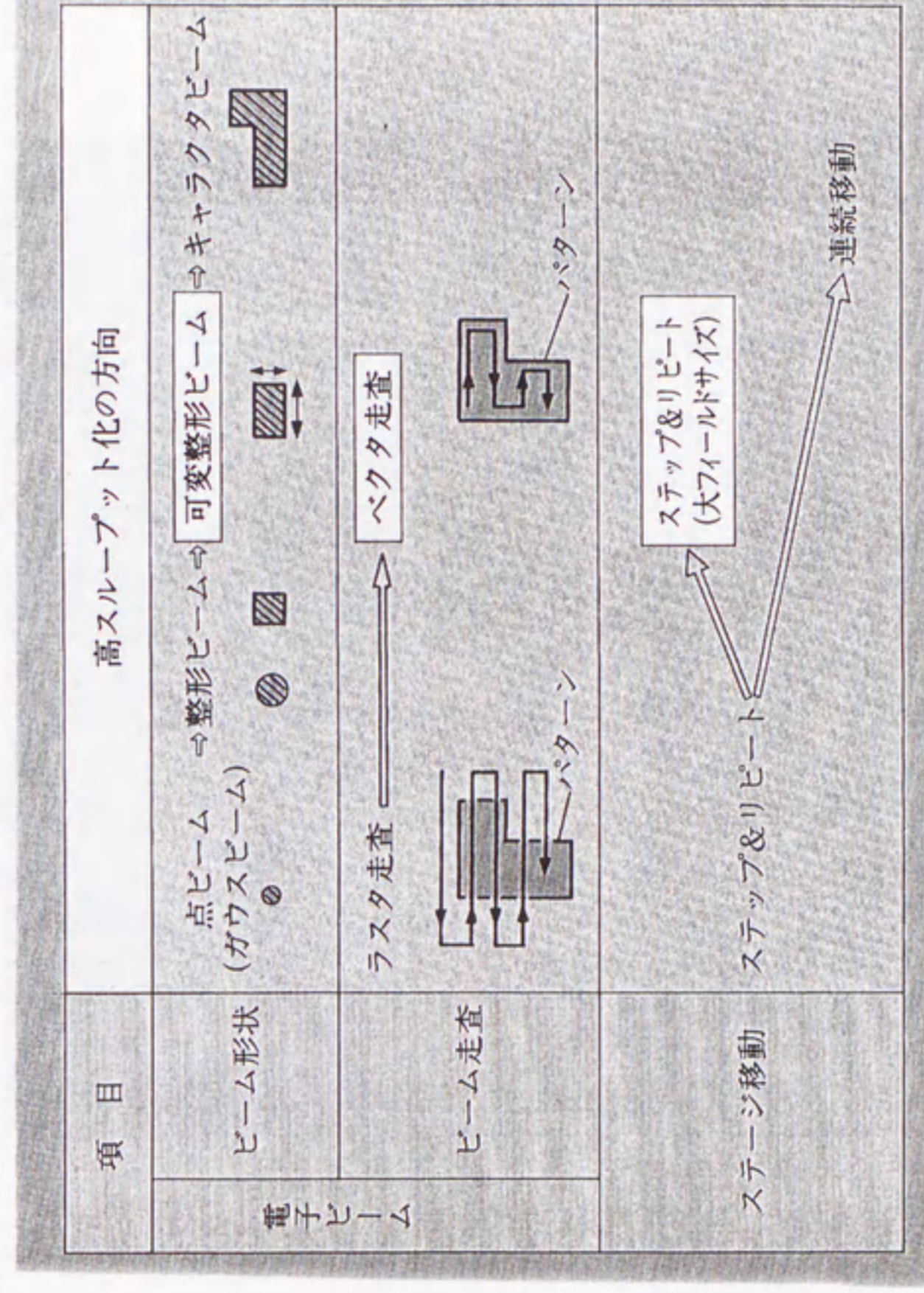


図6.41 EB描画装置高スループット化のための技術開発方向

項目	仕様	
最小加工寸法	1.0 μ m	
描画精度	アライメント精度	$\pm 0.2\mu$ m (3 σ)
	パターンつなぎ精度	0.2 μ m
スループット	平均10枚/時(4インチウェーハ)	

HL-600Dにおける主要高スループット化技術

- 大フィールドサイズ (最大6 mm角)
- 高速ステージ
- 高速アライメント
- 大面積電子ビーム (最大6 μ m角)
- 高速電子ビーム制御

図6.42 EB描画装置HL-600Dの主な仕様と高スループット化技術

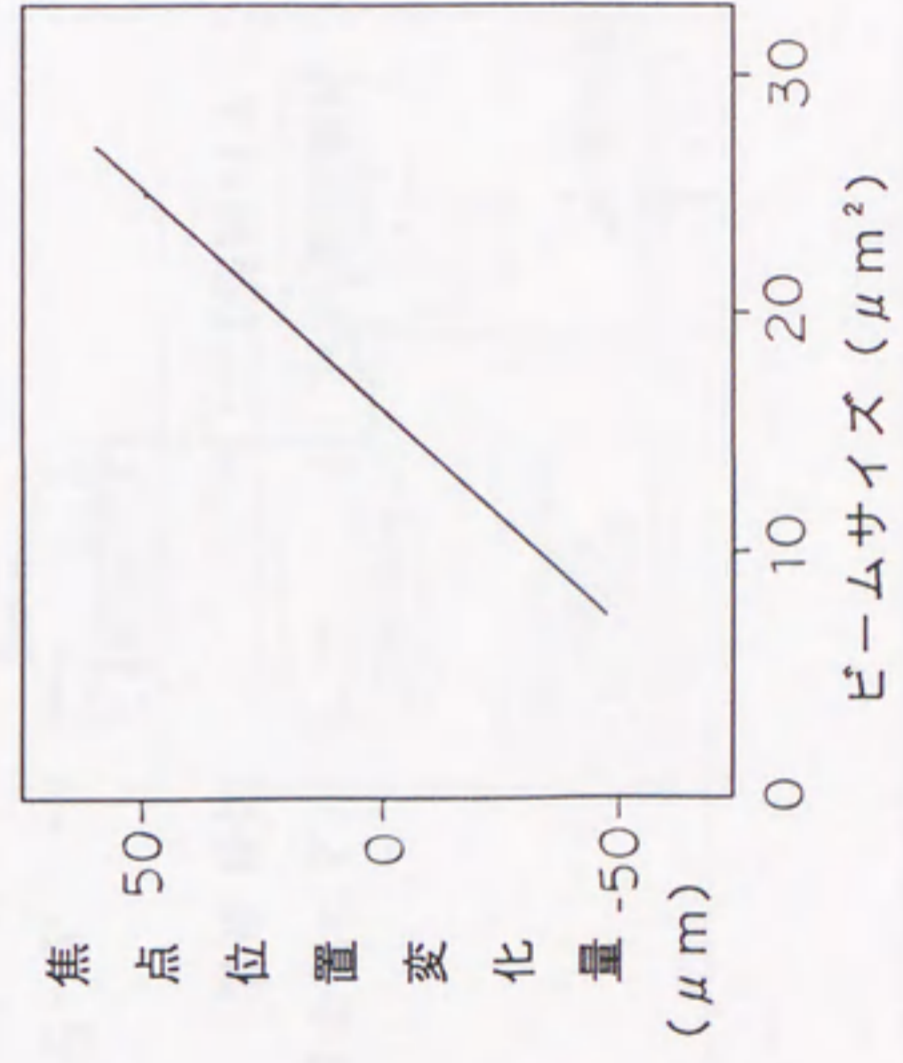
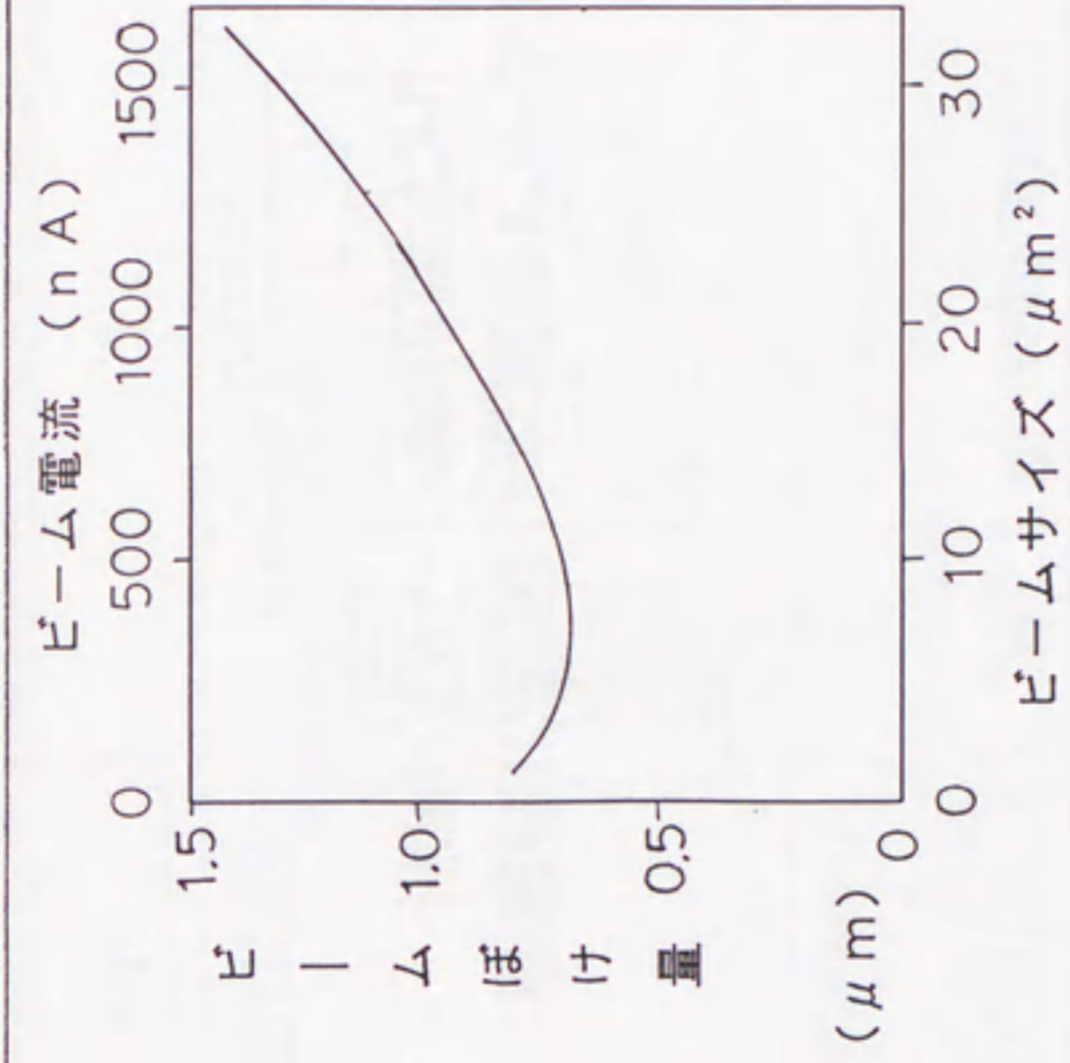


図6.43 ビームぼけ量と焦点位置のビームサイズ依存性

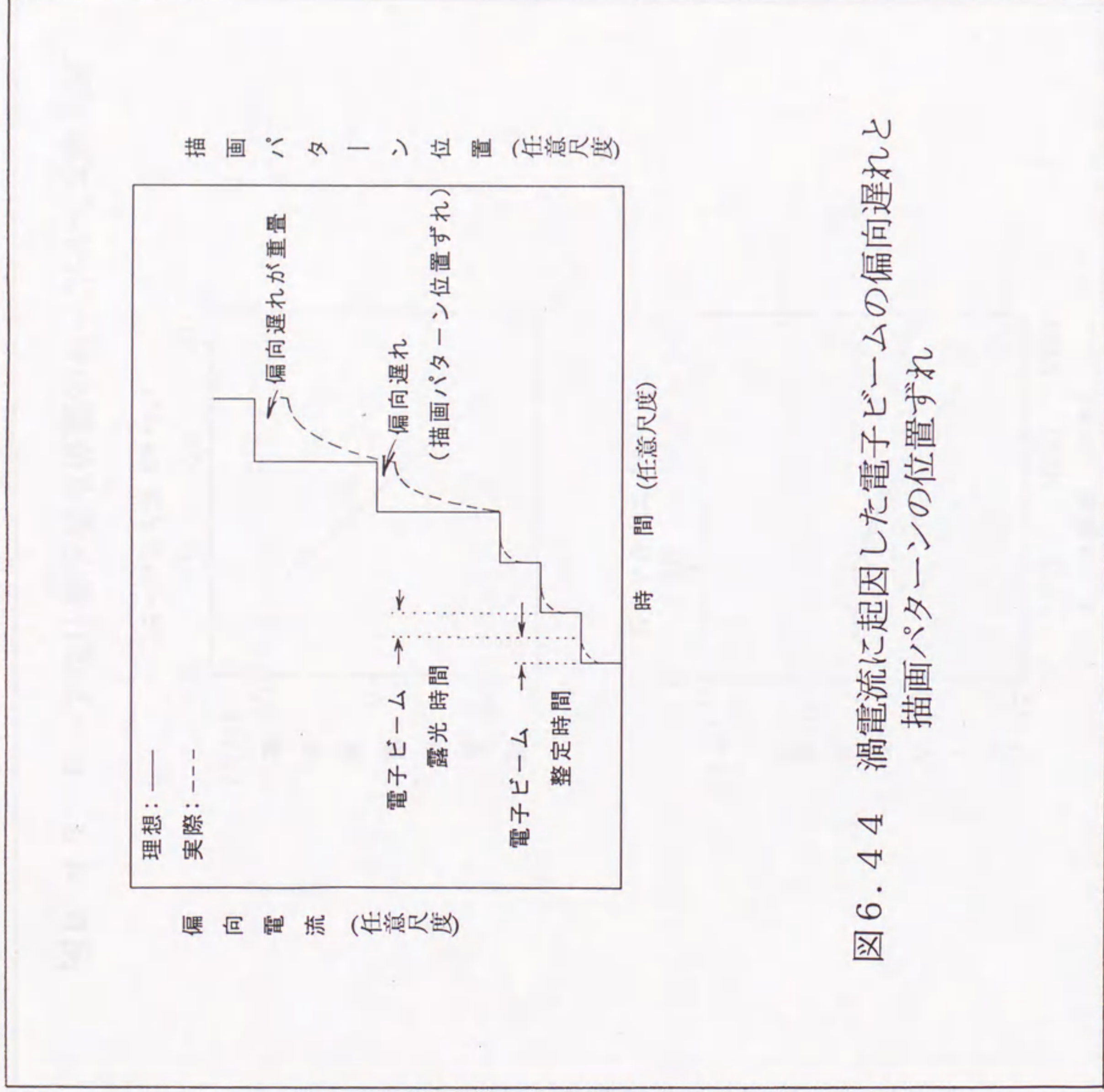


図6.4.4 渦電流に起因した電子ビームの偏向遅れと描画パターンの位置ずれ

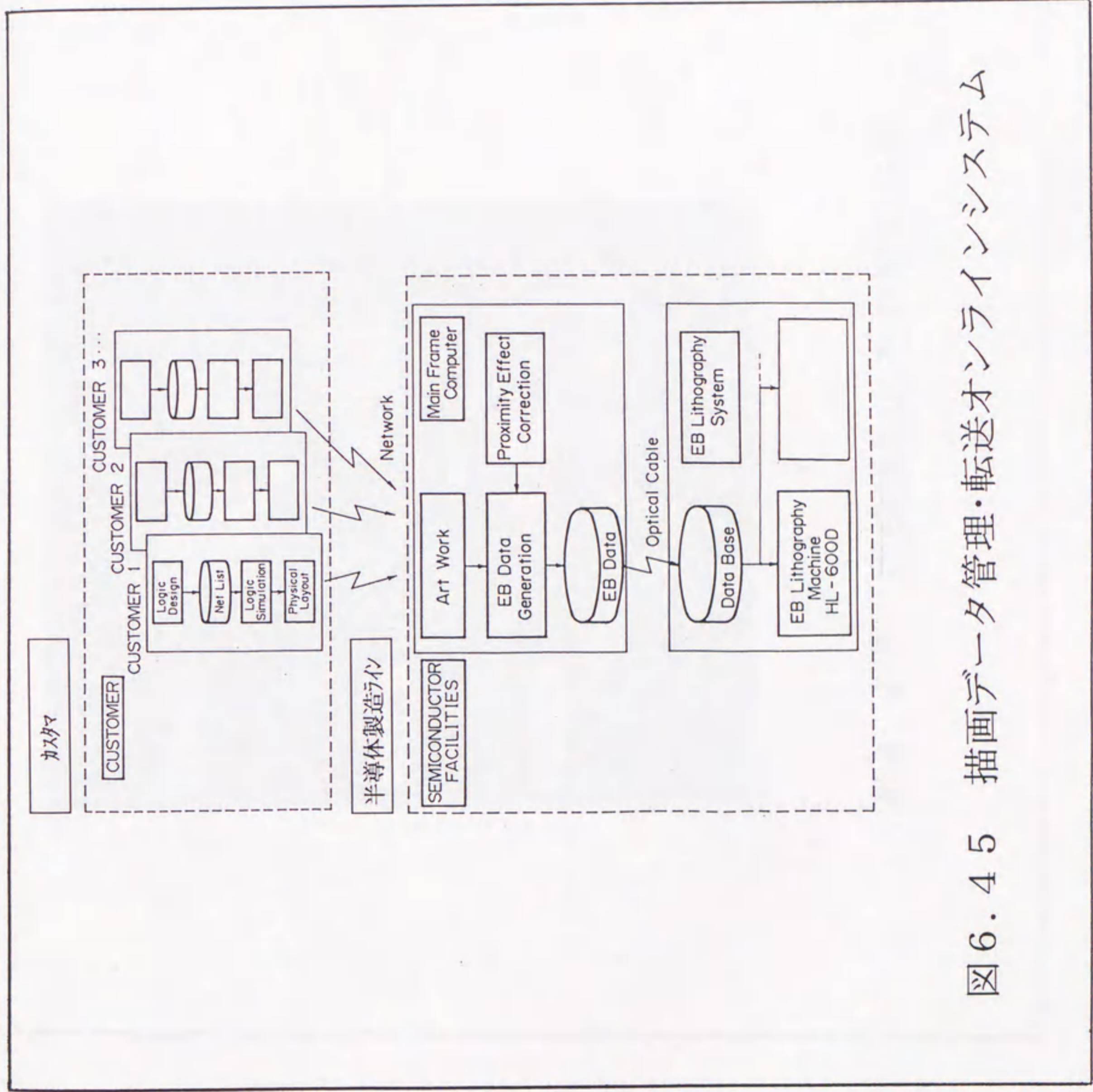


図6.4.5 描画データ管理・転送オンラインシステム

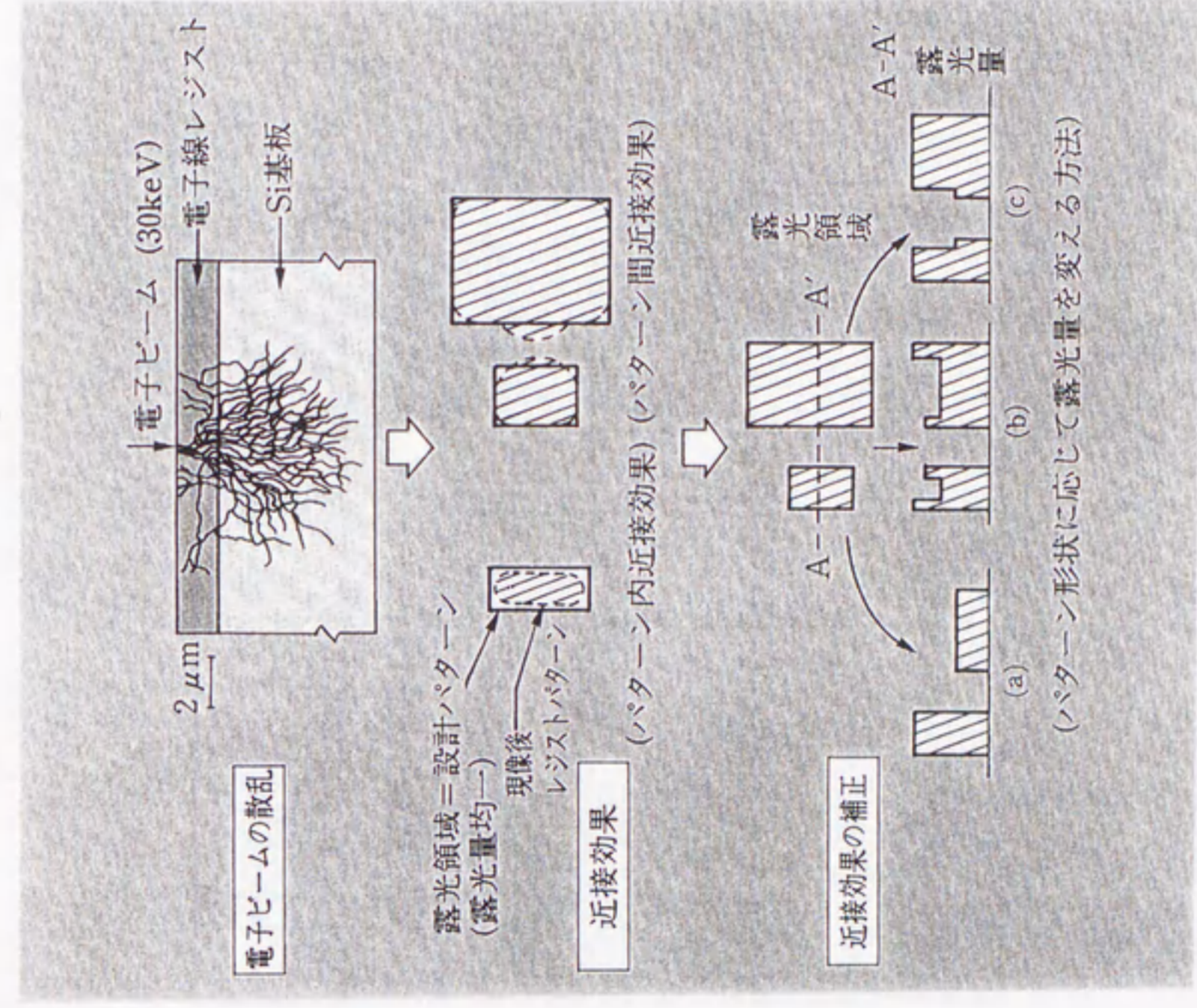


図6.46 近接効果とその補正方法

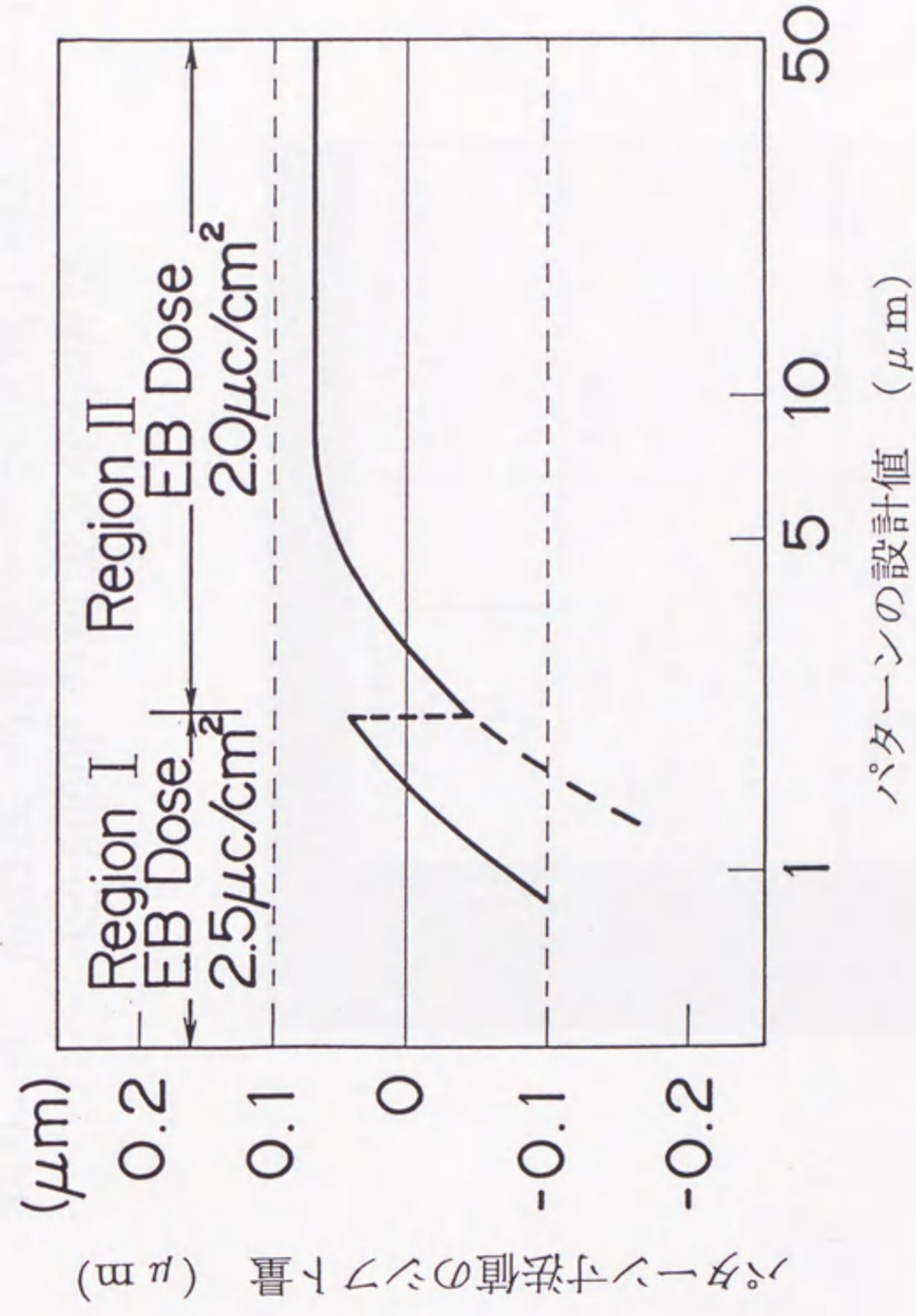


図6.47 CMOSロジックに用いた近接効果補正

表 6. 4 高感度・高解像度ポジ型電子線レジスト
RE-5000P の組成と化学構造

組 成	物質名 (構造式)	特 徴
ベースレジジン	ノボラック樹脂 $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_3 \\ \\ \text{OH} \\ \\ \text{CH}_2 \end{array} \right]_n$	アルカリ可溶性 高トライエッチング耐性
感電子溶解 阻止剤	PMPS (ポリ(2-メチル ペンテン1-スルホン)) $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{SO}_2 \\ \\ \text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3 \end{array} \right]_m$	高感度
溶 媒	酢酸イソアミル	相溶性

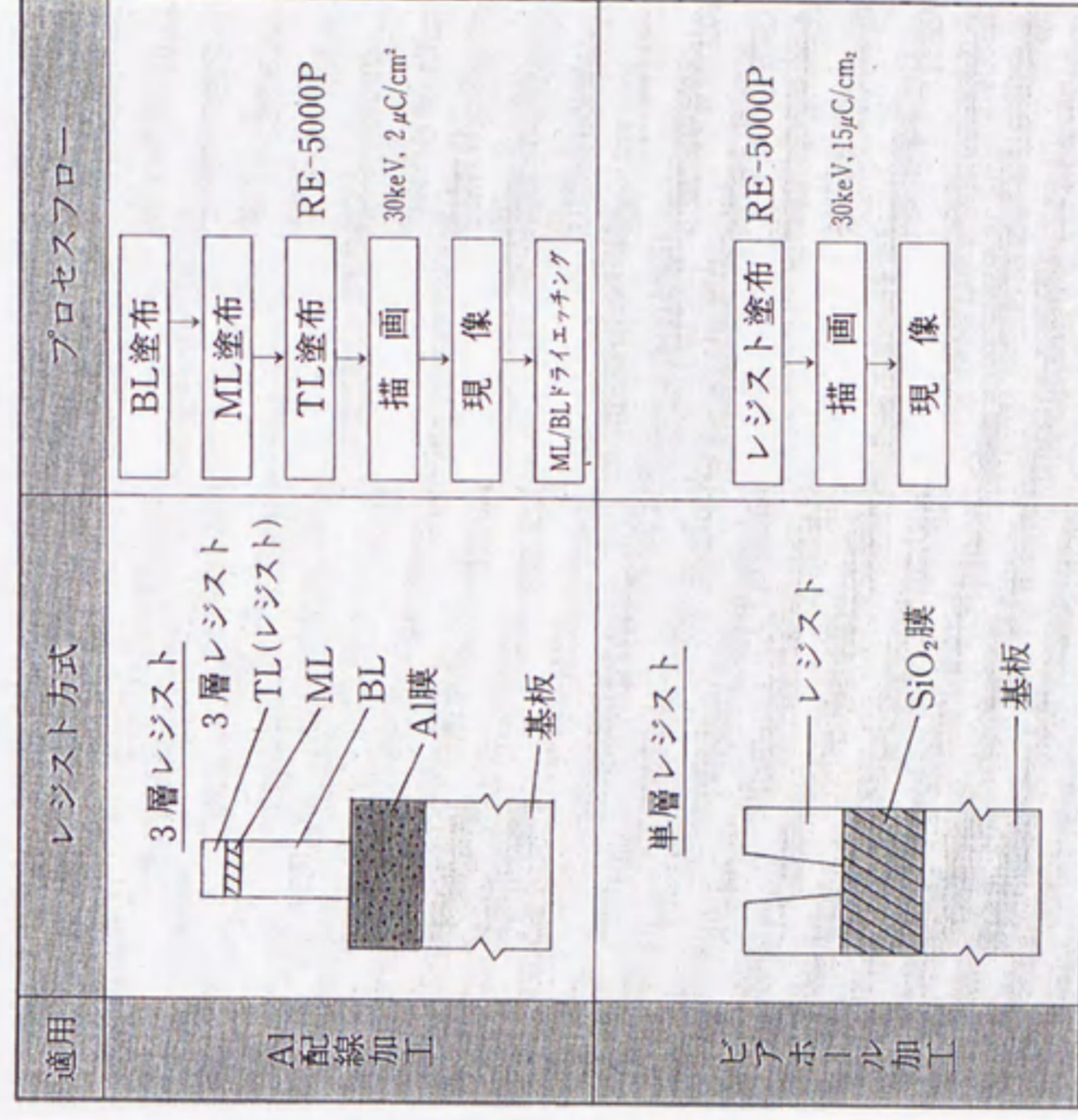


図6.48 カスタムLSI用のレジストプロセス

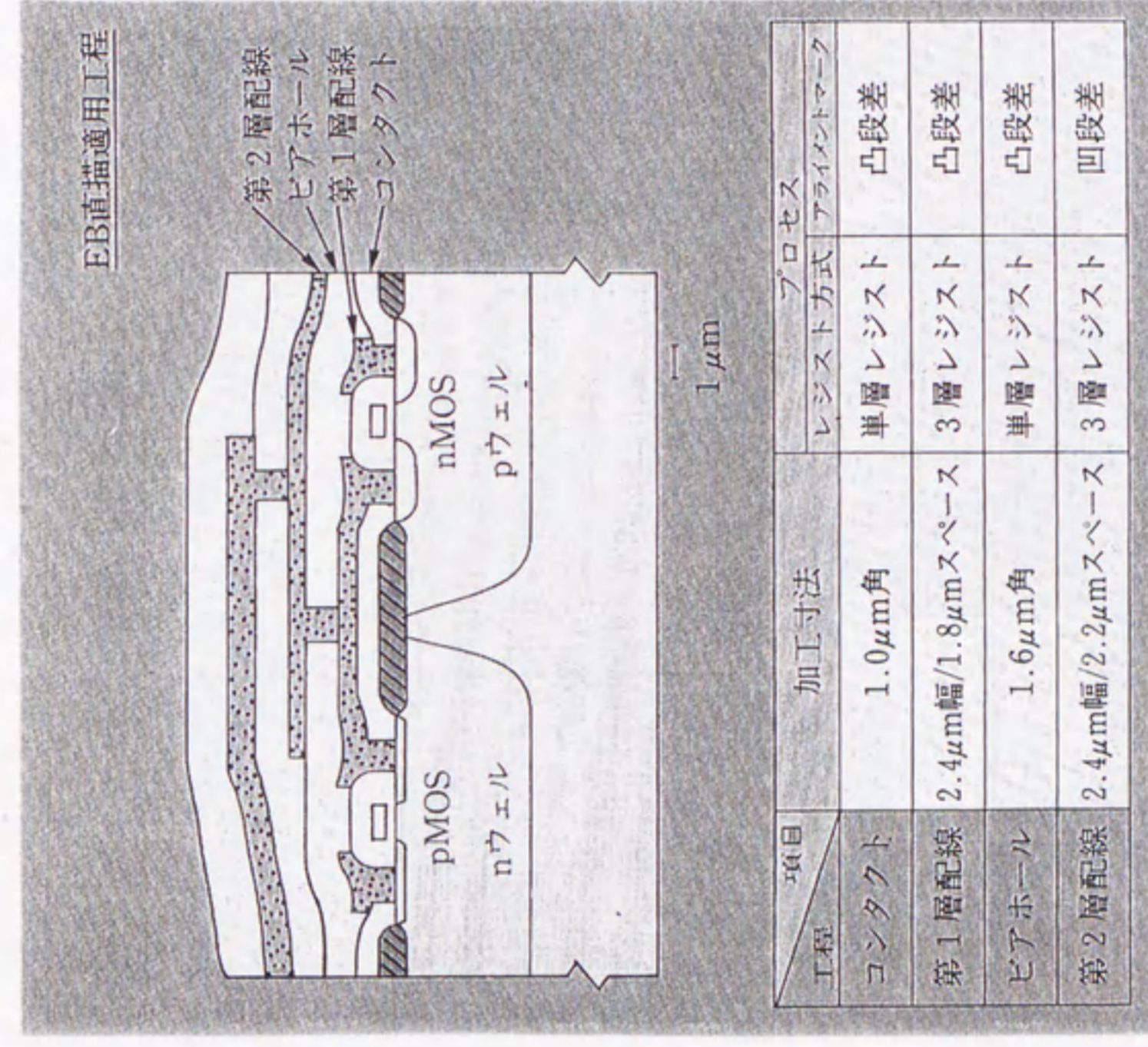


図6.49 24kゲートCMOSカスタムLSIへのEB直接描画適用例

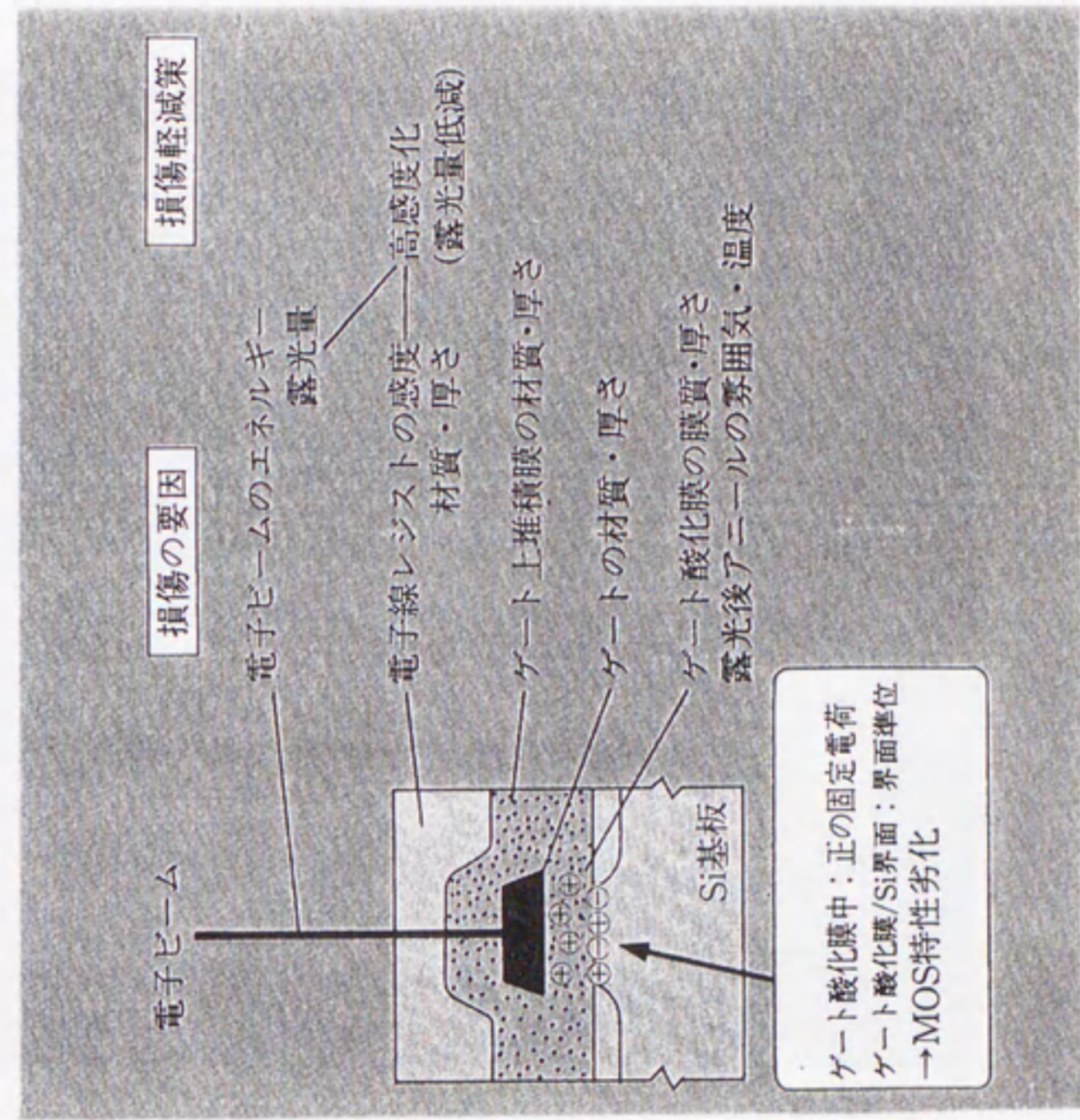


図6.50 MOSデバイスにおける照射損傷の説明図

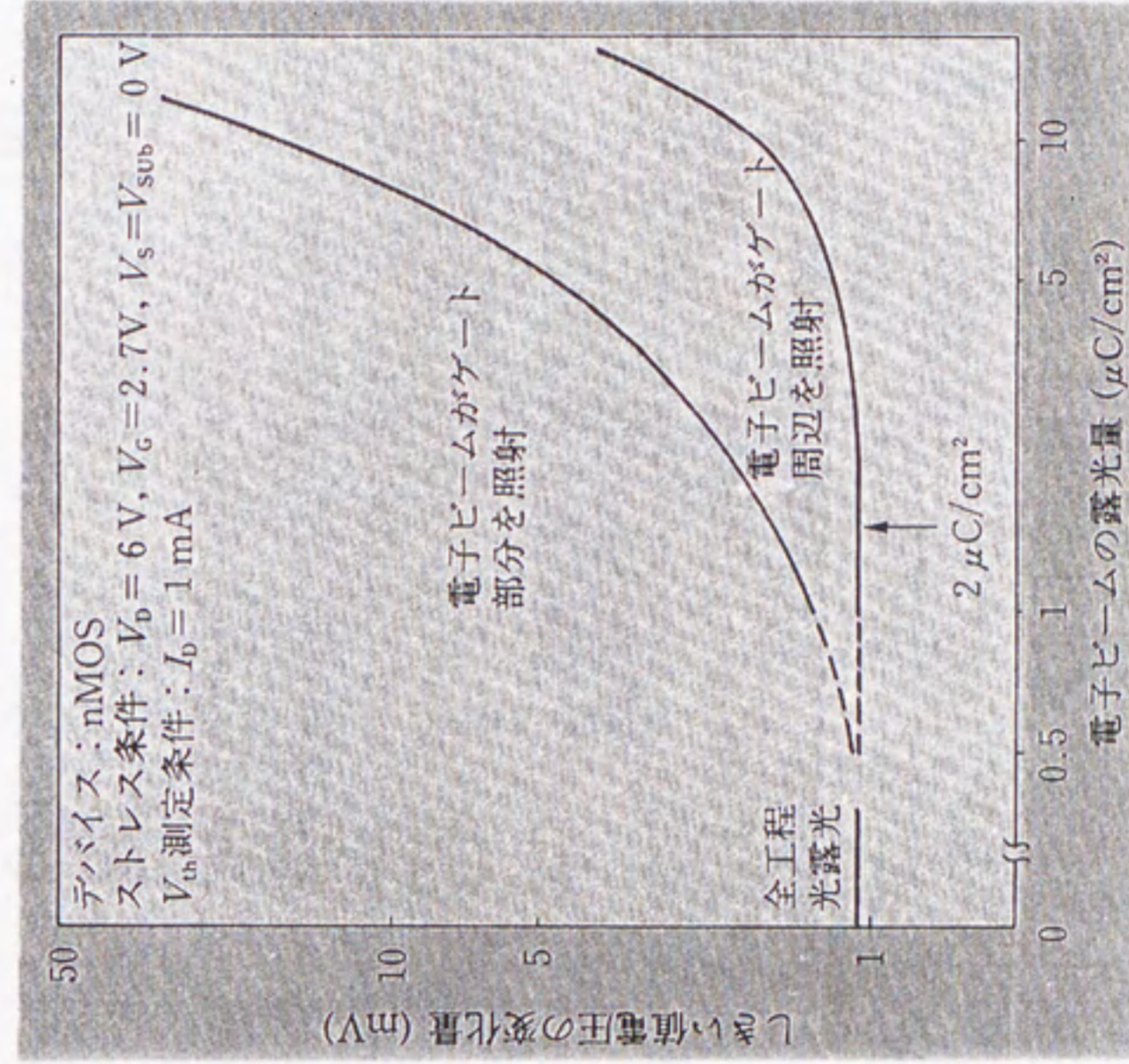


図6.51 しきい値電圧変動の露光量依存性

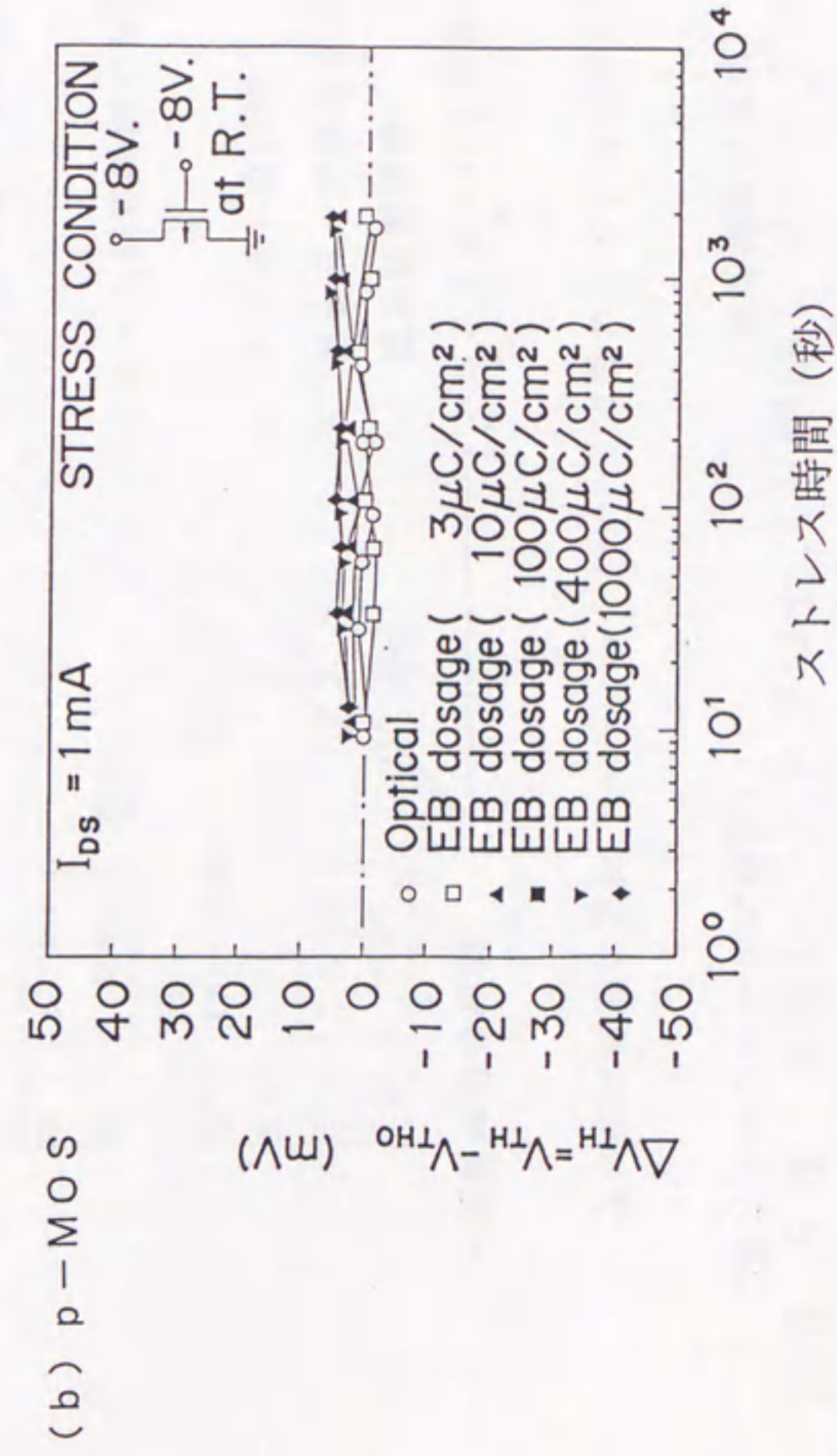
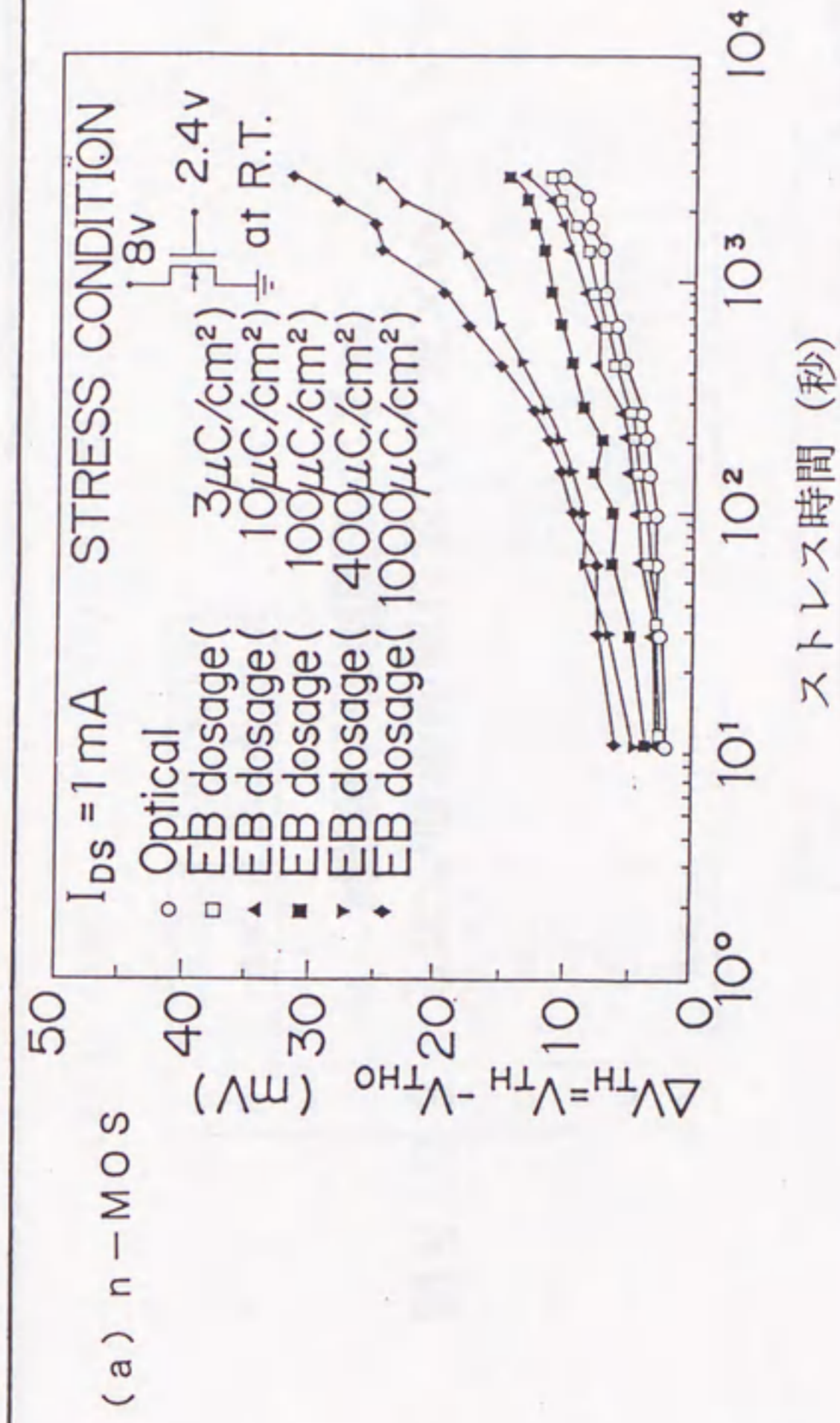


図6.52 加速寿命試験によるMOSデバイスしきい値電圧の変動

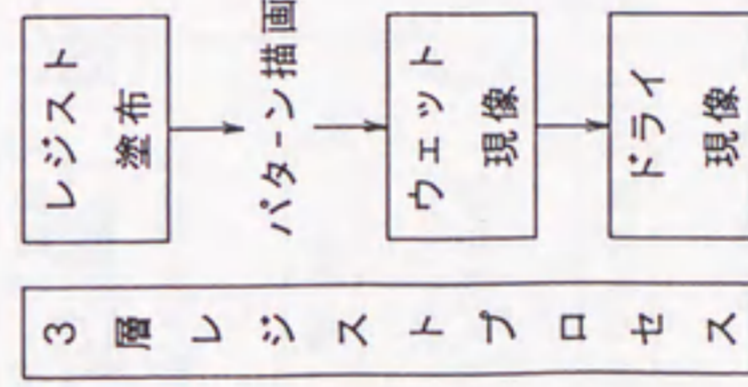
〈高スループット化の課題〉

〈技術開発の方向〉

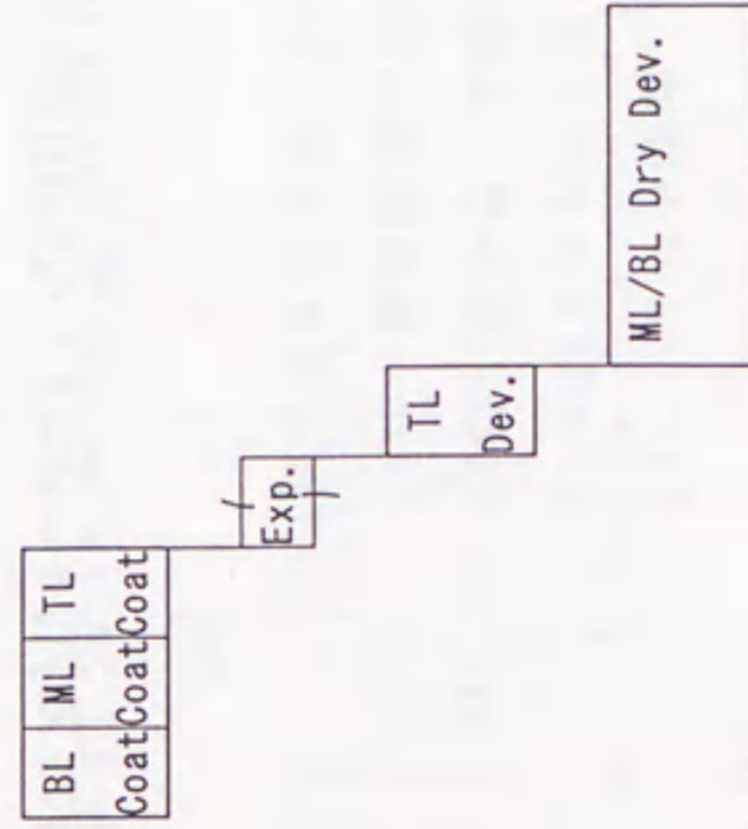
- ・プロセス時間の短縮
 - ・描画時間の短縮
- 単層レジストプロセス実用化
- ・ショットサイクル時間の短縮
 1. 露光時間短縮
 2. 電子ビーム整定時間短縮
 3. ショット数削減
 - ・ステージ移動時間の低減
 - ・データ転送ネックの回避

図6.53 ウエハ直接描画における高スループット化の課題と技術開発の方向

〈方式〉 〈工程〉

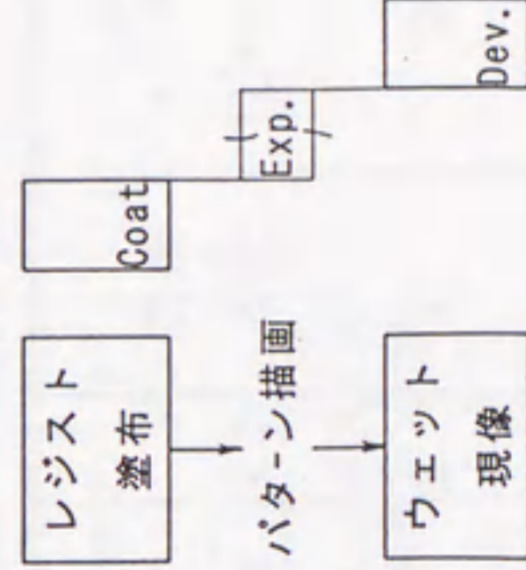


〈プロセス時間〉



時間 (hr) 0 1 2 3 4 5

単層レジストプロセス



ロットサイズ：5ウエハ/ロット

図6.54 3層レジストプロセスと単層レジストプロセスのプロセス時間の比較

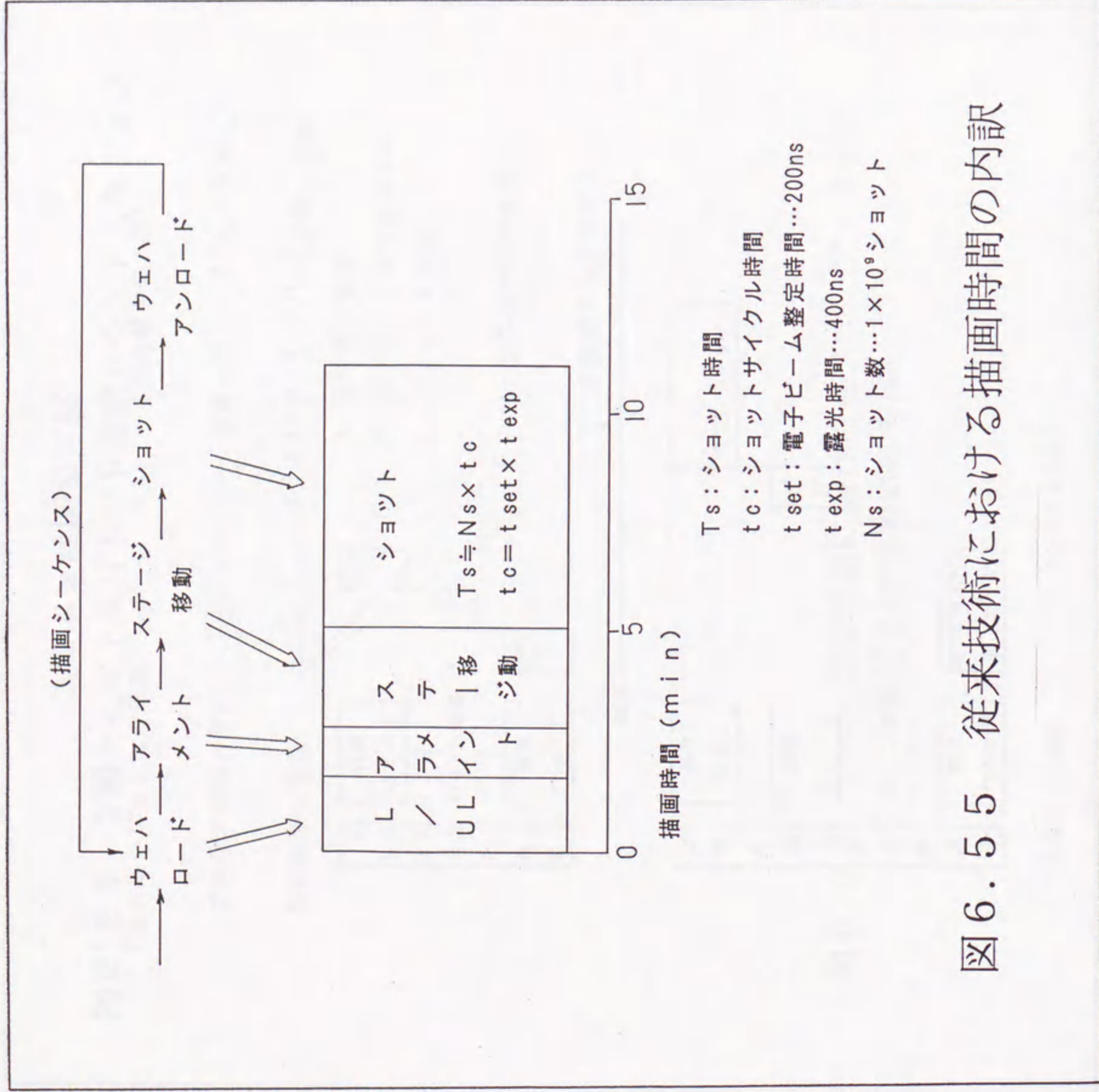


図6.55 従来技術における描写時間の内訳

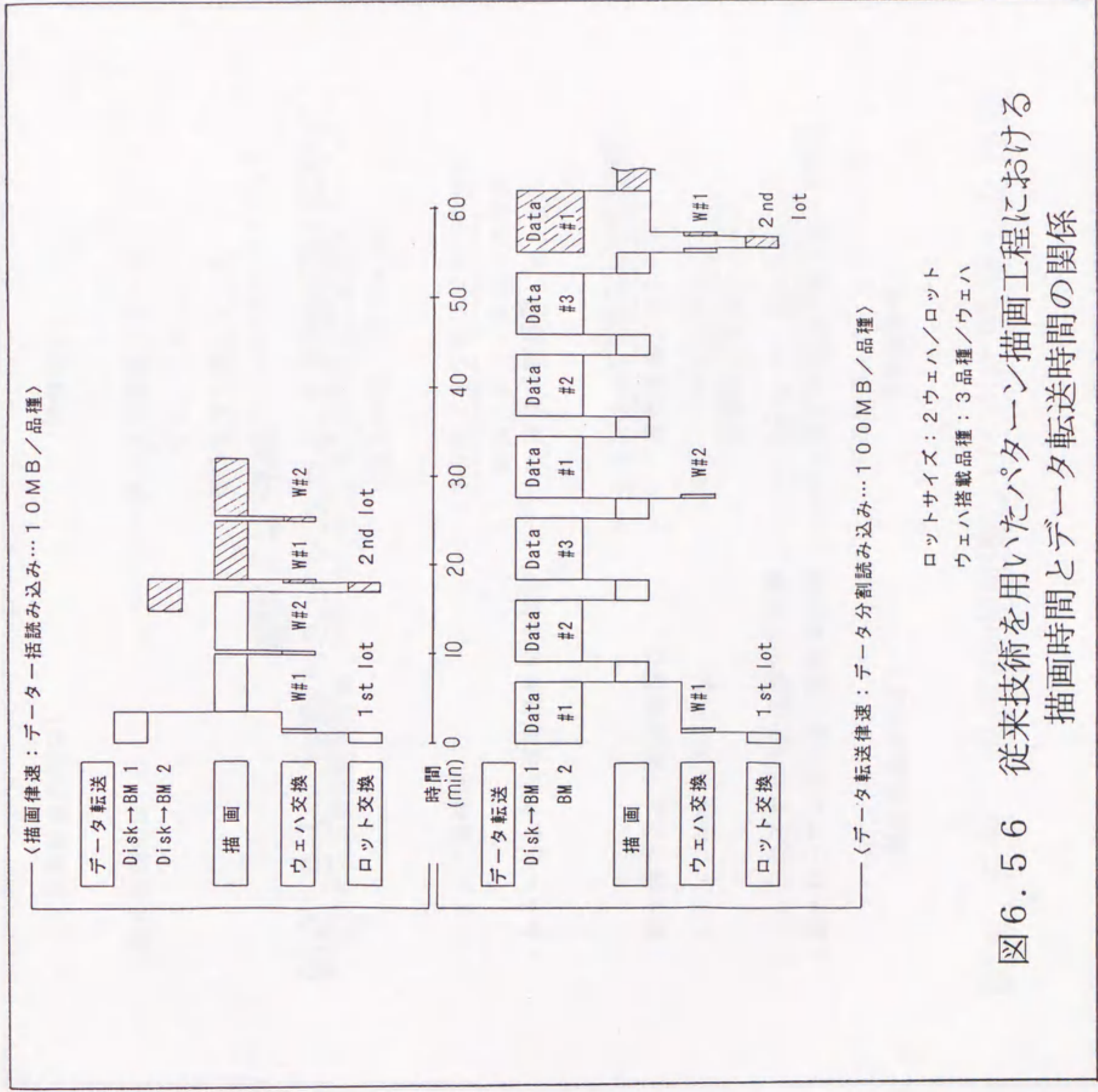


図6.56 従来技術を用いたパターン描写工程における描写時間とデータ転送時間の関係

〈技術開発の方向〉

- ・電子ビームのぼけ量と散乱起因のレジスト内ビーム拡がり低減
- ・電子線レジストの高解像化
- ・チャージャップ低減技術の簡便化

〈開発技術〉

- 高エネルギー電子ビーム露光 (50 keV)
高感度電子線レジスト
- 高解像電子線レジスト (0.3 μm: 1.4 μm厚)
- 水溶性導電膜

図6.57 単層レジストプロセス実用化のために開発した技術

〈技術開発の方向〉

- ・露光時間短縮
- ・電子ビーム整定時間短縮
- ・ショット数削減
- ・ステージ移動時間の低減
- ・データ転送ネックの回避

〈開発技術〉

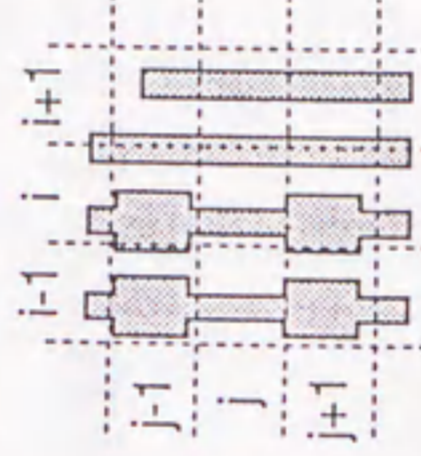
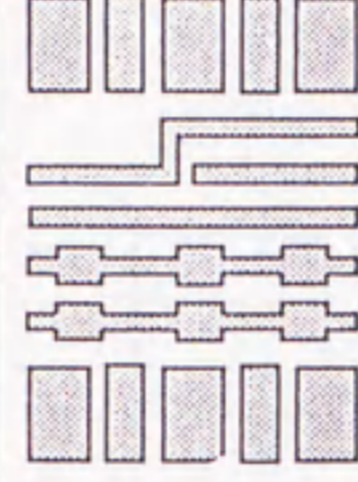
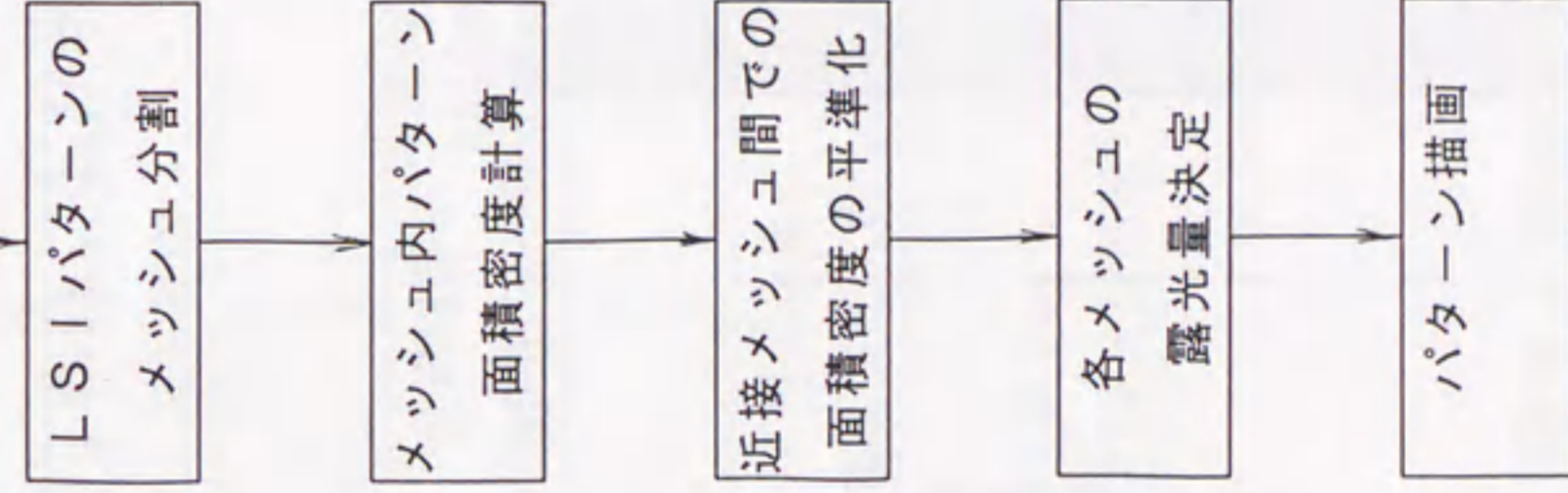
- 高電流密度電子ビーム (10 A/cm²)
高感度電子線レジスト (1 μC/cm²: 50 keV)
- 高速3段電子ビーム偏向 (整定時間 100 ns)
- ネガ型とポジ型レジストの併用
配線パターン描画: ネガ型
穴パターン描画: ポジ型
- 近接効果補正用露光量制御回路
- ステージ連続移動描画
- ディスク, BMの大容量化
ディスク容量: 2 GB
BM容量: 0.5 GB × 2面

図6.58 描画時間短縮のために開発した技術

表6.5 EB描画装置HL-800Dの仕様

項目	仕様	
電子ビーム制御	形状(寸法)	可変矩形ビーム(最大 5 μm角)
	エネルギー	50 keV
	電流密度	10 A/cm ²
	走査(方式, 幅)	ベクタ走査(3段偏向, 最大偏向幅 5 mm)
描画方式	シヨット	
	サイクル時間	最小 200 ns
電子ビーム制御	電子ビーム	
	整定時間	100 ns
ステージ制御	連続移動方式	
データ制御	ディスク容量	2 GB以上
	バッファメモリ容量	512 MB×2面
描画精度	近接効果補正	パターン密度に応じた露光量制御が可能
	最小加工寸法	0.3 μm
	パターン寸法精度	±0.07 μm
	パターンつなぎ精度	±0.07 μm
アライメント精度	±0.07 μm	

LSIパターン



$\alpha(i,j)$

$\alpha'(i,j)$



面積密度 α (%)

図6.59 EB描画装置HL-800Dでの近接効果補正

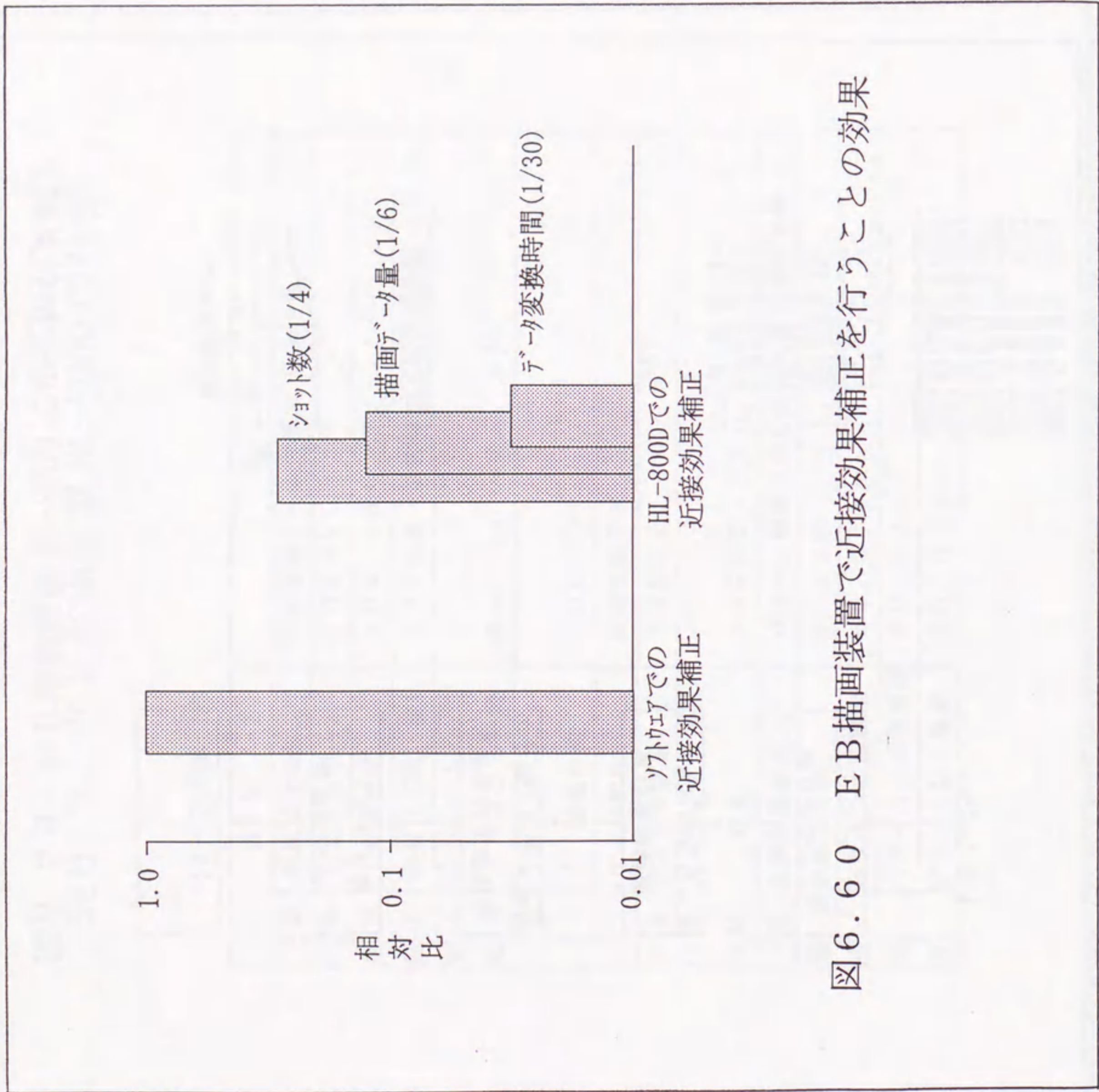


図6.60 EB描画装置で近接効果補正を行うことの効果

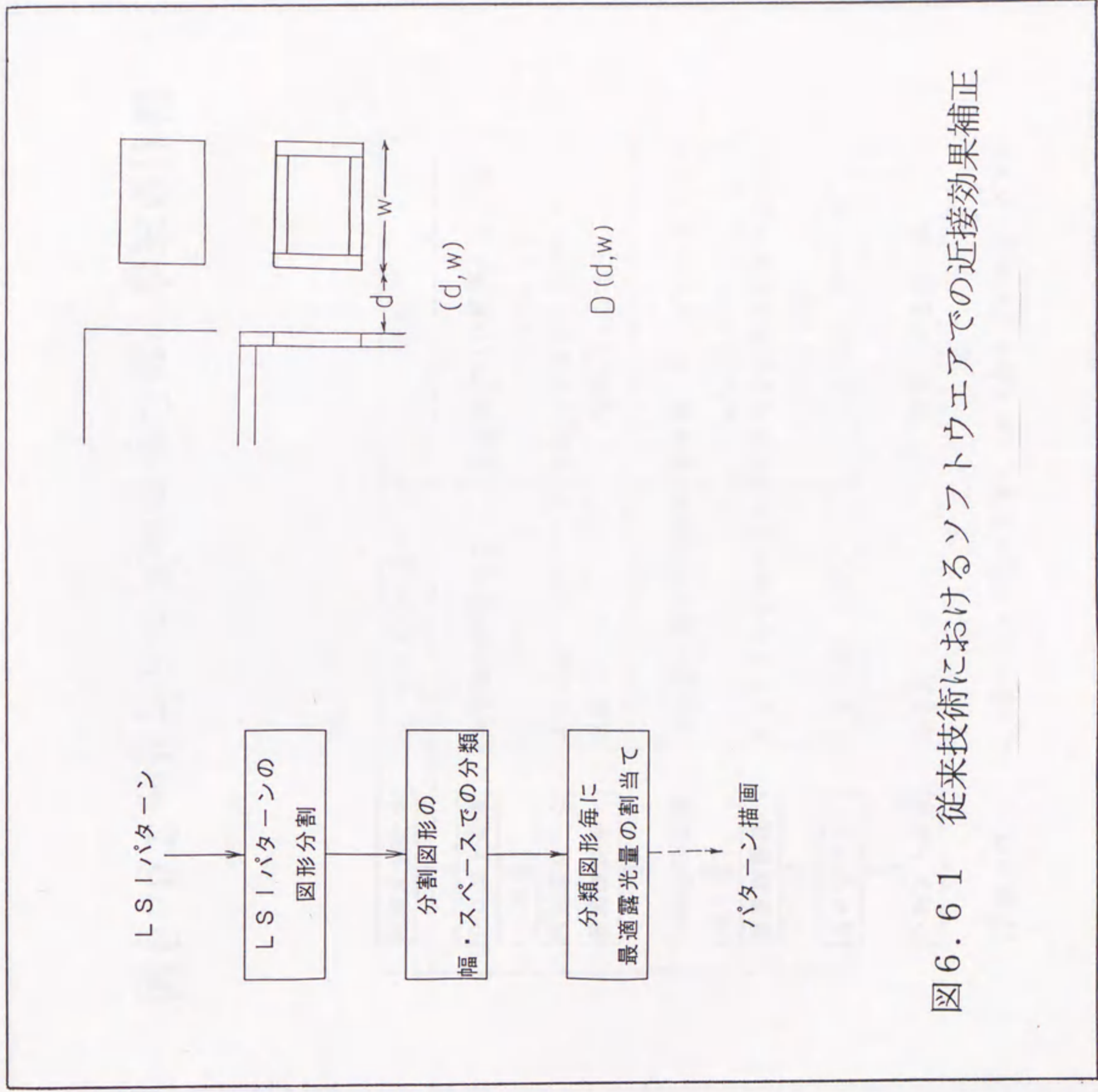


図6.61 従来技術におけるソフトウェアでの近接効果補正

〈工程フロー〉 〈ポジ型レジストプロセス〉 〈ネガ型レジストプロセス〉

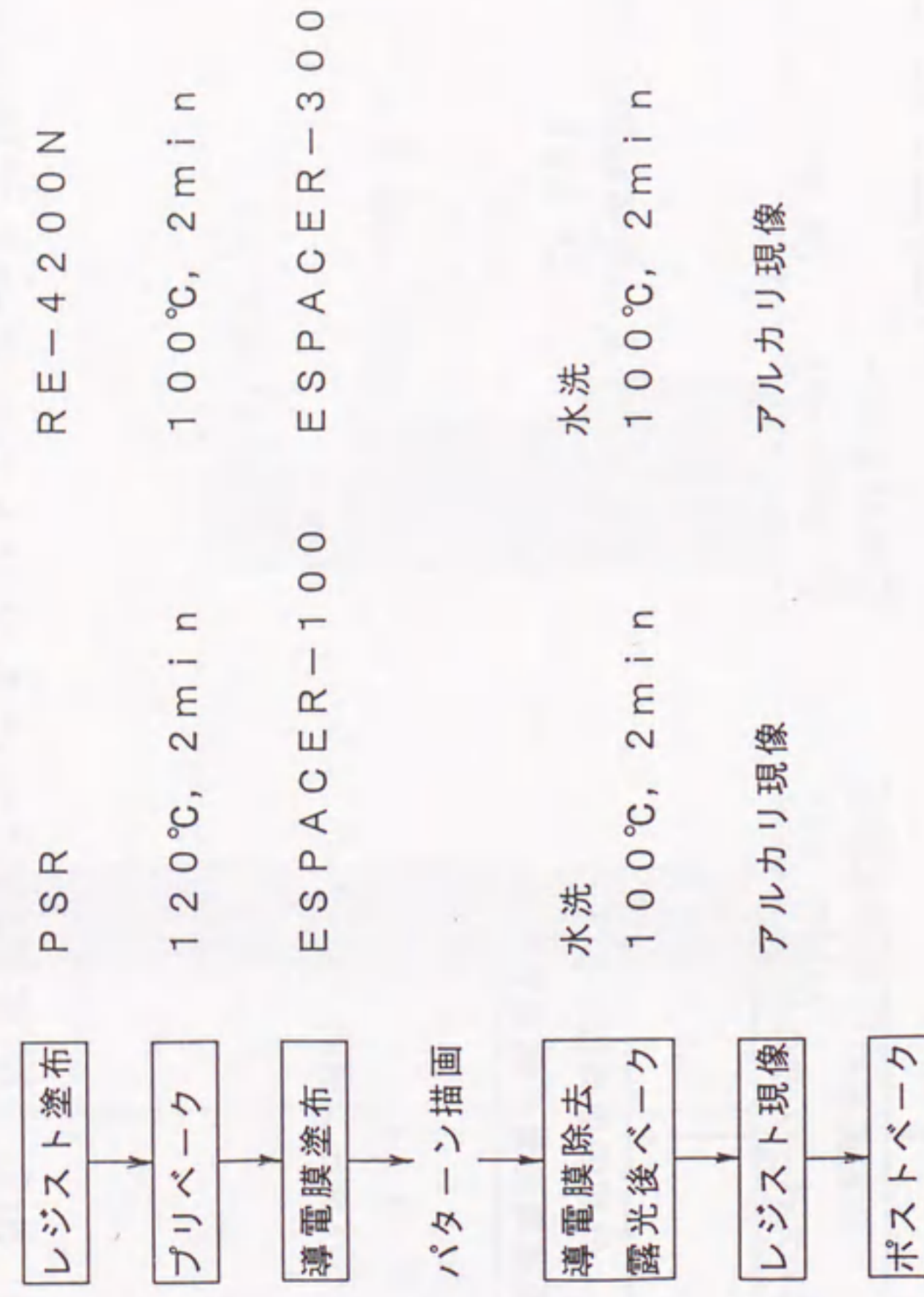


図6.62 レジストプロセスフローと主な仕様

表6.6 開発した化学増幅系の電子線レジスト

レジスト名	感光反応の機構	性能
RE-4200N (ネガ型)	架橋型化学増幅系	解像度: 0.3 μm L/S (1.4 μm t) 感度: 1 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ (50 keV)
PSR (ポジ型)	溶解阻止型化学増幅系	解像度: 0.3 μm Hole (1.4 μm t) 感度: 2 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ (50 keV)

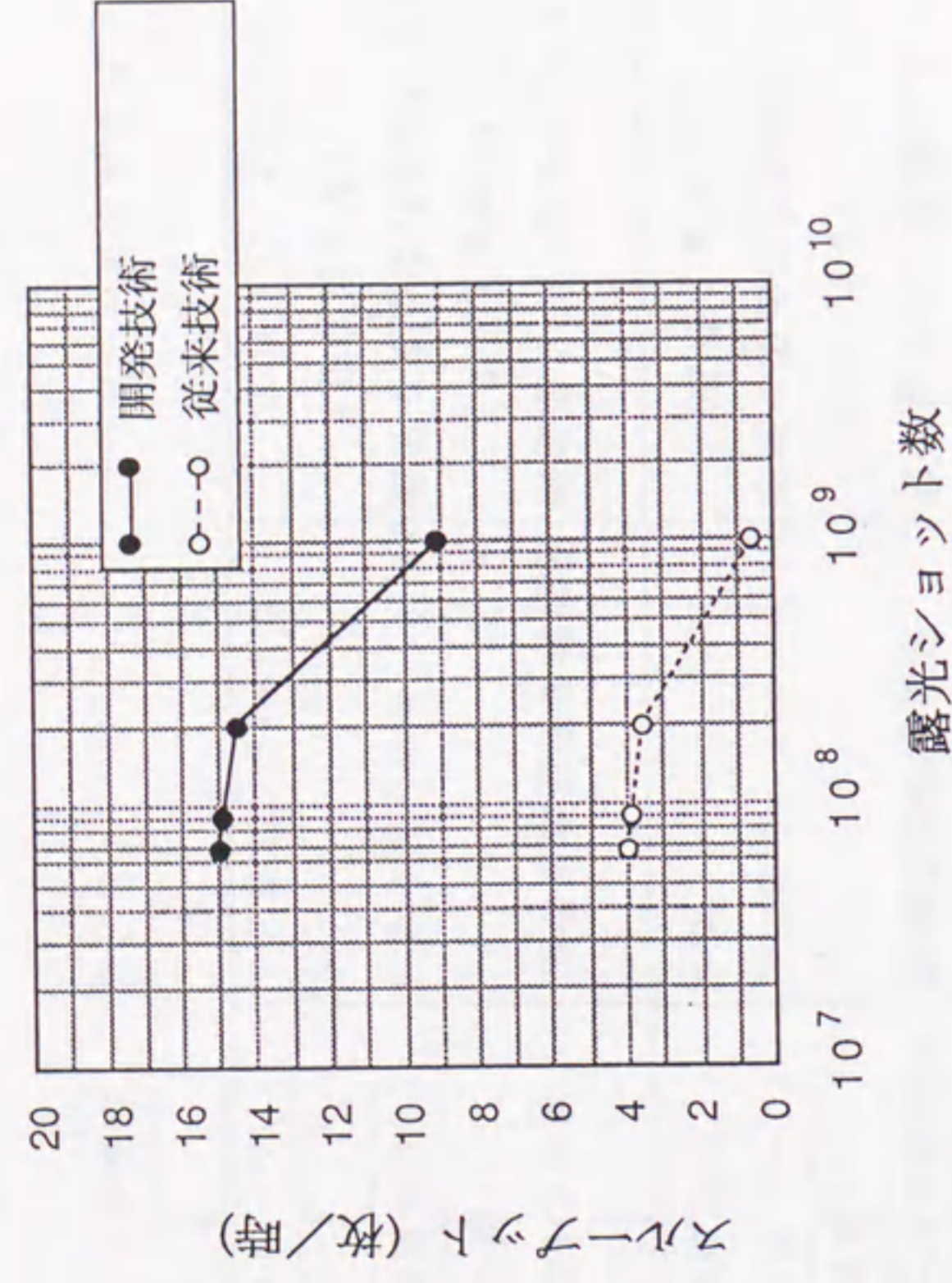


図6.63 ショット数と描画時間の関係

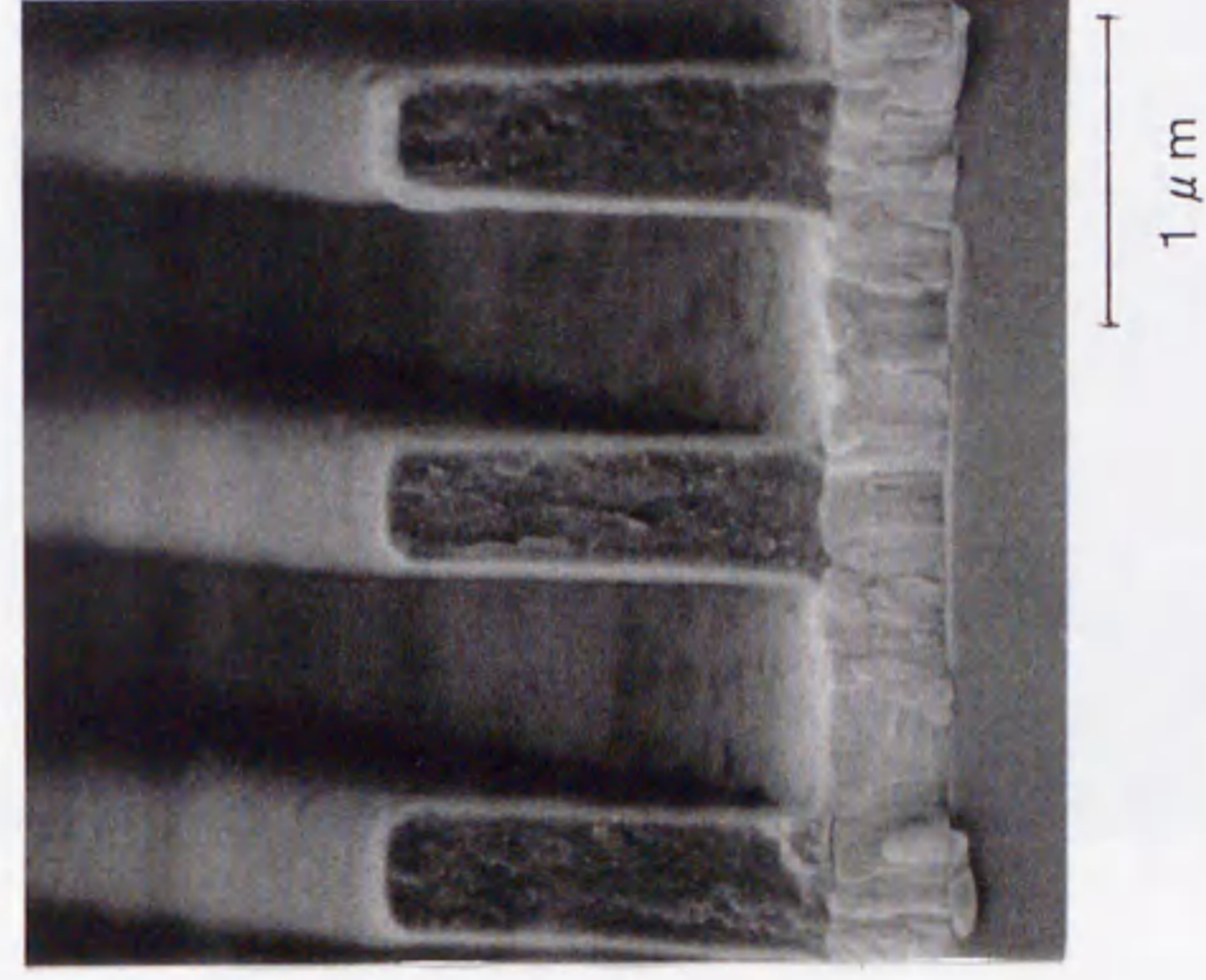
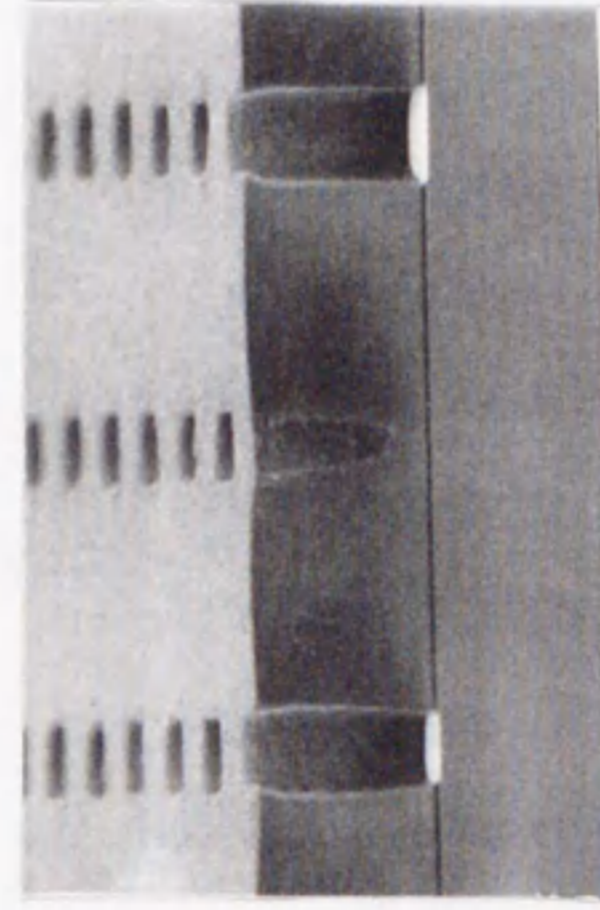


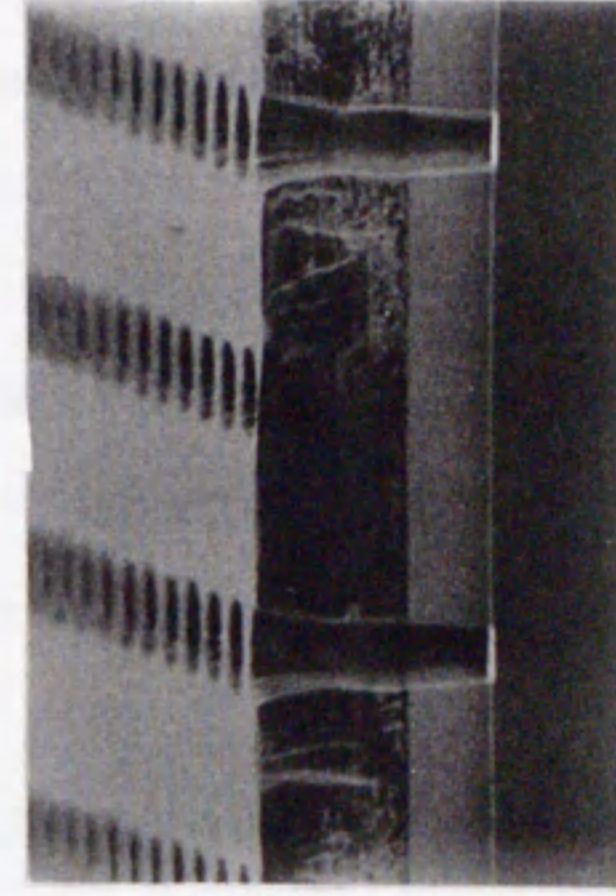
図6.64 RE-4200N 単層レジストプロセスで加工したレジストの断面

(電子ビーム:50keV, $1\mu\text{C}/\text{cm}^2$ レジスト厚さ:1.6 μm 下地:W)



(a) レジストパターン

1 μm



(b) ドライエッチ後のレジストおよびSiO₂パターンの断面

図6.65 PSR 単層レジストプロセスで加工した
レジストの断面

(電子ビーム:50keV, 1μC/cm² レジスト厚さ:1.6μm 下地:SiO₂)

7. 結言

電子ビームは、光ビームやイオンビームに比べて、より細く絞れる上に、高速・高精度での制御が可能である。このため、電子ビーム利用技術は半導体製造に不可欠の技術となっており、広く用いられている。本研究では、先端的電子ビーム利用技術を半導体製造に実用化するための研究・開発を行なった。

7. 1 本研究の成果

第2章から第5章までの電子ビーム計測技術では、「見えないものを見えるようにする」ことを基本として、研究・開発を行った。

(1) 研究・開発内容

(i) 第2章の電位観測用走査電子顕微鏡の研究では、従来のメカニカル・プローブ法では困難となった微細配線の電位観測を可能とするために、加速電圧0.5kV~2kVの低加速・電位観測用SEMを開発した。

(ii) 第3章の測長用走査電子顕微鏡の研究では、低エネルギー電界放出電子ビームを用いた測長技術に於いて、パターンの微細化に合わせて測長精度を向上させるため、当時の汎用装置であった日立製作所製EB測長装置S7000を対象として、測定誤差要因の解析と誤差低減手法の研究を行った。

(iii) 第4章のウエハ外観観察用走査電子顕微鏡の研究では、パターン微細化・立体化の進歩に対応できる高解像なウエハ外観検査を目的として、5nmの分解能を実現するため、“対物レンズ=試料室”という、新しい設計思想のインレンズSEMを開発した。

(iv) 第5章の深穴観察用走査電子顕微鏡の研究では、LSI製造上の大きな課題である穴パターンの安定・確実な加工を目的として、従来不可能であった“深い穴の底”の観察を可能にするため、数十kV以上の高エネルギー電子ビームを用いた“新しい観察原理”に基づく深穴観察装置を開発した。

(2) 研究・開発の成果

(i) 第2章の低加速・電位観測用SEMの開発では、装置開発の過程で、「二次電子を高電位感度で検出するためのエネルギーフィルタ付き輪帯型MCPに於いて、フィルタリング用グリッド電極に印加する減速電圧を、観測部電位が正の時には正電圧、負の時には0または負

電圧に設定すると良い」こと等を明らかにした。また、本装置の応用技術を研究する過程で、「基板バイアス電圧やチャージアップがデバイス損傷に影響を及ぼしていることを見出し、そのメカニズムを明らかにした」などの研究成果が得られた。

なお、本装置は空間分解能 $0.1\mu\text{m}$ 、電圧分解能 0.2V の性能を持ち、LSI内部に加工された微細な配線を非破壊で観測できることから、従来不可能であった不良箇所の検出に大きな効果を発揮した。

- (ii) 第3章の測長精度向上の研究では、「測長精度向上のためには、直線性の問題は小さく、再現精度を改善することが重要である」こと等を明らかにした。また、「再現精度 R_1 は、繰返し測定精度 r_1 、像コントラストの違いやその経時変動に因る誤差 M_s 、および操作条件の変更・装置状態の経時変動に起因する測定値のばらつき M_t を用いて、

$$R_1^2 = r_1^2 + M_s^2 + M_t^2$$

のように表すことができる」こと等を見出した。

なお、本研究の結果、分解能を従来の 15nm から 12nm に、測長再現精度 R_1 を $\pm 0.03\mu\text{m}$ から $\pm 0.02\mu\text{m}$ に向上した。いずれも、当時の世界最高水準の値であった。

- (iii) 第4章のインレンズSEMの開発では、高分解能を実現するために、「対物レンズ=試料室」という新しい設計思想に基づき、非磁性・中空型の4軸試料ステージや耐真空・非磁性の超音波モータなどを新規に開発した。本装置の開発に拠り、分解能 5nm 、測長再現精度 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 以下と、従来比2倍程度の性能を達成した。いずれも、当時の世界最高水準の値であった。

- (iv) 第5章の深穴観察装置の開発では、新しく見出した「穴底や内部構造から後方散乱された高エネルギーの反射電子が創る二次電子を検出し、像信号として用いることに拠り、穴底や内部構造を観察できる」という観察原理を、 50keV ~ 200keV の高エネルギー走査電子顕微鏡として実現した。また、本装置の応用技術を研究する過程で、「高エネルギービームを用いているにも拘らず、低損傷・低チャージアップで観測できるメカニズム」などを明らかにした。なお、本装置の開発に拠り、従来不可能であった「高アスペクト比を有する深い穴の底の観察、内部構造や陰になった部分の非破壊・高速での観測」を可能とし、走査電子顕微鏡の新しい応用分野を切り開いた。

第6章の電子線直接描画技術の研究では、先端的EB直接描画技術をホトマスク製作およびウェハ直接描画に適用するための研究・開発を行った。

(1) 研究・開発内容

- (i) 6.1節の $2\mu\text{m}$ ホトマスク製作技術の研究では、光方式の限界を超えてホトマスクパターンの微細化を図るため、EB直接描画技術を開発し、初めてホトマスク製作に導入した。
- (ii) 6.2節のサブミクロン・ホトマスク製作技術の研究では、 $0.3\mu\text{m}$ パターンの加工を目的とし、i線用位相シフト露光技術を実用化するため、位相シフトレチクル製作技術を開発した。
- (iii) 6.3節のサブミクロン・ウェハ直接描画技術の研究では、少量多品種カスタムLSIの効率的開発・生産を可能とするため、EB直接描画技術を開発し、初めてウェハプロセスに実用化した。
- (iv) 6.4節のサブハーフミクロン・ウェハ直接描画技術の研究では、EB直接描画技術の適用範囲拡大を目的として、高スループットなEB直接描画技術を開発した。

(2) 研究・開発の成果

- (i) 6.1節の $2\mu\text{m}$ ホトマスク製作技術の開発では、装置技術に関連して、「Crを高い精度でエッチングするためのスプレイエッチング用エッチング終点検出機構」などを新規に開発した。また、プロセス技術に関連して、「現像後・Crエッチング前のプラズマアッシング工程に於いて、従来とは異なるローディング効果のあることを見出し、この現象がCrと酸素ラジカルの強い反応に起因することを明らかにした」などの研究成果が得られた。
- (ii) 6.2節のi線用位相シフトレチクル製作技術の開発では、装置技術に関連して、「従来に比べて2倍の描画精度を有するEB描画装置 EB-MXやGAE技術を用いたシフト欠陥修正用FIB装置」などを新規に開発した。また、プロセス技術に関連して、「高解像度化学増幅系ポジ型電子線レジスト RE-5100Pとそのプロセス技術、SOGシフトとその加工技術」などを新規に開発するとともに、「SOGシフト形成時の残留硫酸イオンや熱処理がシフト剥がれの原因であることを見出し、そのメカニズムを明らかにした」などの研究成果が得られた。なお、本研究に拠り、i線用位相シフト露光技術を世界に先駆けて実用化した。
- (iii) 6.3節のサブミクロン・ウェハ直接描画技術の開発では、装置技術に関連して、「可変矩形ビーム方式の高速EB描画装置 HL-600Dや描画データ管理・転送オンラインシステム」などを新規に開発するとともに、「ビームサイズに依存して描画パターンの寸法が変わることやパターン密度が低い領域では描画パターンの位置がずれることを見出し、そのメカニズム

を明らかにした」などの研究成果が得られた。また、プロセス技術に関連して、高感度な非膨潤型の電子線レジスト RE-5000Pとそのプロセスを開発するとともに、「ベースレジンの分子量分布がレジストの感度ばらつきに影響することや、溶解阻止剤と溶媒の相溶性の悪さが解像不良の原因となること」などを見出した。

なお、本研究の結果、国内では最初にウエハ直接描画を実用化した。

(iv) 6.4節のサブハーフミクロン・ウエハ直接描画技術の開発では、装置技術に関連して、従来に比べて4倍～20倍のスループットを持つ、ステージ連続移動方式の高速・高精度EB描画装置 HL-800Dを新規に開発した。プロセス技術に関連して、「高感度・高解像度な化学増幅系のネガ型電子線レジスト RE-4200N/ポジ型電子線レジスト PSRと それらの単層レジストプロセス技術」などを開発するとともに、プロセス時間を従来に比べて約1/4に短縮した。なお、本研究の結果、世界最高水準のスループットを達成し、ウエハ直接描画技術の適用拡大に寄与した。

7.2 今後の課題と展望

電子ビーム計測技術に於ける課題と技術開発の方向を纏めて、図7.1に示す。一般的には、高解像度化の推進、新しい観察限界打破技術の開発に加えて、画像処理技術の導入が積極的に進められることになろう。特に、得られた情報を有効に活用するために、高精細画像情報の装置間、事務所間、および工場間高速伝送は、今後重要な技術となる。個別的には、低加速・電位観測用SEMでは、電位観測の高感度化を促進することと、定量的な電位観測を可能とすることが今後の課題となる。測長SEMでは、高分解能の維持手法・装置パラメータの精密制御化を研究し、装置性能を常時最高の状態に保持できるようにすることが重要と考えられる。インレンズSEMでは、高スループット化と高信頼化の推進が大きな研究・開発の課題である。深穴観察装置では、デバイス損傷の軽減と使用限界の明確化が研究課題となる。

EB直接描画技術に於ける最大の課題は、ホトマスク製作では高精度化の推進であり、ウエハ加工では量産型汎用LSIへの適用である。特に、汎用LSIに適用するためには、スループットの向上が前提となる。スループット向上のためには、EB描画装置の高速化は勿論のこと、レジスト・プロセスの技術力向上が鍵となる。電子線レジストの性能・品質を、現在のi線レジスト並に向上することが重要な研究・開発の課題と考えられる。

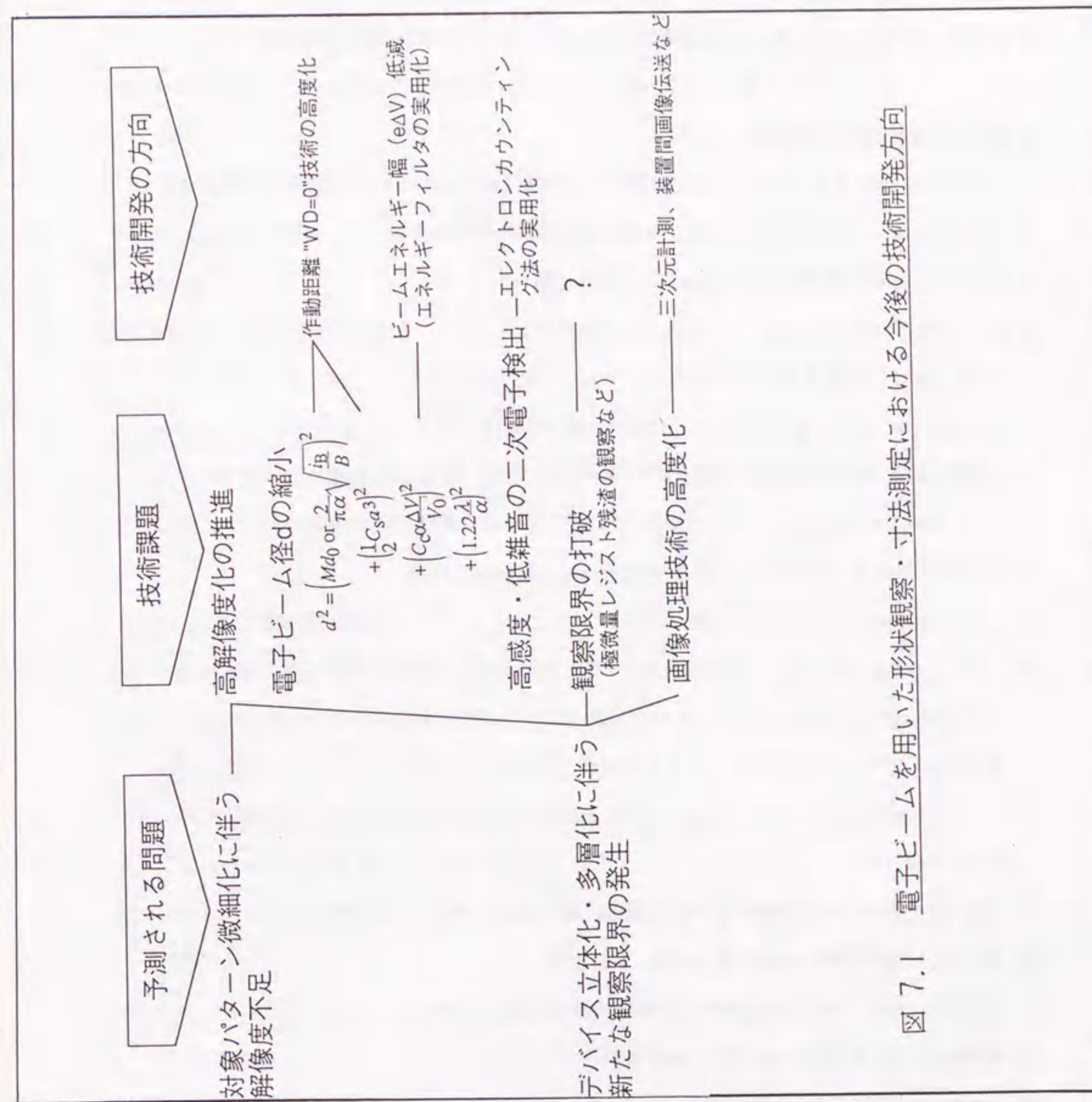


図 7.1 電子ビームを用いた形状観察・寸法測定における今後の技術開発方向

8. 参考文献

- 1) e.g. W.D. Grobman, H.E. Luhn, T.P. Donahue, A.J. Septh, A. Wilson, M. Hatzakis, and T.H.P. Chang; IEEE J. Solid State Circuits, SC-14, p282, 1979
- 2) 例えば、古屋、大高、山田、森、山田、渡部、石川; 学術第132委員会 第99回研究会資料, p1, 1985
- 3) e.g. N. Sugiyama, S. Ikeda, and Y. Uchikawa; J. Electron Microscop., 35, p9, 1986

電位観測用走査電子顕微鏡関連

- 4) C.W. Oatley and T.E. Everhart; J. Electron., 2, P568, 1957
- 5) J.R. Banburg and W.C. Nixon; J. Sci. Instrum., 44, P889, 1967
- 6) O.C. Wells and C.G. Bremer; J. Phys. E., 1, p902, 1968
- 7) P.J. Fentem and A. Gopinath; J. Phys. E., 7, p930, 1974
- 8) A. Gopinath; J. Phys. E., 10, p911, 1977
- 9) W.J. Tee and A. Gopinath; Rev. Sci. Instrum., 48, p350, 1977
- 10) A. Gopinath and K.G. Gopinathan; IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, p431, 1978
- 11) A.G. Gonzales, M.W. Powell; J. Vac. Sci. Technol., 15, p837, 1978
- 12) A.G. Gonzales, M.W. Powell; J. Vac. Sci. Technol., 15, p1043, 1978
- 13) H.P. Feuerbaum; SEM/1, p285, 1979
- 14) Y. Furukawa, Y. Goto and T. Inagaki; J. Vac. Sci. Technol., B3, p874, 1979
- 15) Y.C. Lin and T.E. Everhart; J. Vac. Sci. Technol., 16, p1856, 1979
- 16) A. Gopinath, K.G. Gopinathan, and P.R. Thomas; SEM/1, p375, 1979
- 17) E. Wolfgang, R. Lindner, P. Fazekas, H.P. Feuerbaum; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p549, 1979
- 18) 例えば、“ブライス放射線計測”, 西野治監修, 関口晃訳, 1968年, コロナ社
- 19) 例えば、“電子光学”, 裏克己著, 1979年, 共立出版
- 20) J.W. Butler; 6th Int. Cong. Electron Microscopy, 1, p191, 1966
- 21) E. Menzel and E. Kubalek; SEM/1, p305, 1981
- 22) D.M. Taylor; J. Phys. D., 11, p2433, 1978
- 23) 内川, 大江, 後藤; 電気学会誌, 101-A, p263, 1981

- 24) Y. Uchikawa and S. Ikeda; Japan J. Appl. Phys., 22, p L645, 1983
- 25) 杉山, 工藤, 内川, 池田; EBTS' 85, p147, 1985
- 26) N. Sugiyama, S. Ikeda, and Y. Uchikawa; 11th ICEM, Kyoto, p647, 1986

測長用走査電子顕微鏡関連

- 27) e.g. T. Ohtaka, S. Saitoh, T. Furuya; Proceedings of SPIE, 565, p205, 1985
- 28) Y. Nakayama, S. Okazaki, A. Sugimoto; J. Vac. Sci. Technol., B6, p1930, 1988

ウエハ外観観察用走査電子顕微鏡関連

- 29) T. Nagatani, S. Saitoh, M. Sato, M. Yamada; Scanning Microsc., 1, p901, 1987

深穴観察用走査電子顕微鏡関連

- 30) e.g. A.S. Grove; Physics and Technology of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967
- 31) J.T. Fourier; Scanning Electron Microscopy/1976 (Part I), IITR1, Chicago, p53, 1976
- 32) L. Reimer, Tollkamp; Scanning 3, p35, 1980

電子ビーム直接描画技術関連

- 33) C.G. Mogab; J. Electrochem. Soc., 124, p1262, 1977
- 34) M.D. Levenson, N.S. Viswanasan, R.A. Simpton; IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, p1828, 1982
- 35) T. Terasawa, N. Hasegawa, T. Kurosaki, T. Tanaka; Proceedings of SPIE, 1088, p25, 1989
- 36) H.C. Pfeiffer; J. Vac. Sci. Technol., 5, p887, 1978
- 37) H.N. Yu, A. Reisman, C.M. Osburn, D.L. Critchlow; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p318, 1979
- 38) R.H. Dennard, F.H. Gaensslen, E.J. Walker, P.W. Cook; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p325, 1979
- 39) P.W. Cook, S.E. Schuster, J.T. Parrish, V. DiLorenzo, D.R. Freedman; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p333, 1979

- 40) T. H. Ning, P. W. Cook, R. H. Dennard, C. M. Osburn, S. E. Schuster, H. N. Yu; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p346, 1979
- 41) W. R. Hunter, L. Ephrath, W. D. Grobman, C. M. Osburn, B. L. Crowder, A. Cramer, H. E. Luhn; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p353, 1979
- 42) W. D. Grobman, H. E. Luhn, T. P. Donahue, A. J. Speth, A. D. Wilson, M. Hatzakis, T. H. P. Chang; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p360, 1979
- 43) B. L. Crowder, S. Zirinsky; IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p369, 1979
- 44) J. M. Aitken; IEEE J. Solid-State Circuits, SC-14, p372, 1979
- 45) M. Angelopoulos, J. M. Shaw; J. Vac. Sci. Technol., B7, p1519, 1989

9 . 謝 辞

本論文の作成に当たり、終始、懇切なるご指導・ご援助を頂きました名古屋大学内川嘉樹教授、および詳しくご検討頂き、有益なご教示を賜りました名古屋大学日比野倫夫教授、安田幸夫教授には、心より厚くお礼申し上げます。

また、本研究の遂行に際しましては、第2章、第4章の共同研究者である(株)日立製作所の戸所英男博士、第2章の共同研究者である(株)日立製作所の佐藤和善氏、神田公夫氏、および(株)日立超LSIエンジニアリングの森重喜氏、第3章、第4章、第5章の共同研究者である(株)日立製作所の山田悟博士、第3章、第4章の共同研究者である(株)日立製作所の大高正氏、第3章、第5章の共同研究者である(株)日立製作所の三浦秋博氏、第3章の共同研究者である松下電気産業(株)の高本建治氏、第4章の共同研究者である(株)日立製作所の妻木伸夫氏および小池敏文氏、第6章の共同研究者である(株)HOYAの竹花洋一氏、日本大学の菅原活郎教授、(株)日立製作所の藤田実氏、塩沢建治氏、早川肇氏、佐藤一彦氏、岡本好彦氏、村井二三夫氏、岡崎信次博士、銚谷義雄氏、法元盛久氏、斎藤徳郎博士、白石洋博士、内野正市博士、森内昇氏、須賀治氏、および伊藤文丈氏、日立DEサービス(株)の神山和美氏、その他日立グループ各社の多くの方々のご支援・ご協力を頂きました。厚くお礼申し上げます。また、共同研究者であり故人となられた元(株)日立製作所の加藤誠氏、元日立DEサービス(株)の中畝英彦氏には、感謝の気持ちをもって哀悼の意を表させていただきます。

