第 215 号（2023016）

2023 年 10 月 10 日
みずほ銀行 産業調査部

Mizuho Short Industry Focus

革新的技術シリーズ[1] 最先端フォトレジストの動向～日本が強くあり続けるための戦略方向性～

村重 新

【要約】

◆ 半導体産業の技術進歩はとどまることを知らず、次世代技術開発競争は激化の様相を呈している。技術開発テーマの一つである微細化において鍵を握るフォトレジストについては、日系メーカーが高いシェアを有している。

◆ フォトレジストは、半導体製造のフォトリソグラフィ工程において使用される回路形成材料である。日系フォトレジストメーカーは後発であったものの、優れた技術力を武器に競争を勝ち抜いてきた。前工程の微細化は、露光光源をより短い波長のものへと進化させていくことで達成してきた歴史であり、2019 年から 13.5nm という非常に短い波長の光を用いる EUV リソグラフィが実用化されている。フォトレジストは露光光源の進化に応じて、開発と改良がなされてきた。

◆ フォトレジストの性能の評価軸として、主に感度・解像度・ラフネスが挙げられるが、これらはトレードオフの関係にある。トレードオフの改善が極めて困難とされる中、今後 2nm や 1.Xnm へと進化していく微細化へ対応可能なフォトレジストとして、PAG bound - CAR や Wet / Dry - MOR といった様々なタイプの最先端フォトレジストの開発が進められている。PAG bound - CAR は半導体メーカーにとって使い慣れたタイプで引き合いが強い一方、PAG ポリマーの分散不均一性は未解消である。Wet / Dry - MOR は解像度等の観点で CAR の性能を上回るとされるものの、周辺素材や装置の開発が必要不可欠等の課題が存在する。各タイプには一長一短があり、どのタイプがデファクトとなるかは現時点では不透明である。

◆ 日系フォトレジストメーカーが今後も高い技術力と競争力を維持し、業界をけん引していくために、注力すべき領域を見極め、適切な戦略を立てる必要がある。Middle 領域で稼いだ収益を、各社の強みが活かせる High end 領域に充当することが一つの方向性だろう。具体的な戦略として、①市場としての中国の見極め、②国内におけるすり合わせ、③合従連衡、④サプライチェーン多元化の 4 つが挙げられる。業界を取り巻く環境が変化する中で、政策支援が必要不可欠になる局面が生じる可能性もある。各社の不断の R&D の継続と適切な政策支援により、日系フォトレジストメーカーが今後も強くあり続けることを願ってやまない。

1. はじめに

半導体産業の重要性が増しており、国内外で投資が活発化

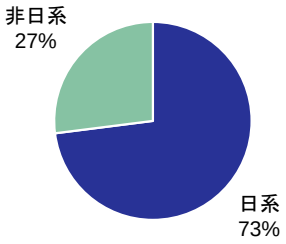
社会のデジタル化等に伴い、半導体の重要性が増している。半導体の技術進歩はとどまることを知らず、次世代技術開発競争は激化の様相を呈している。また、経済安全保障の観点も相まって、主要各国は数兆円規模の政策支援を講じて半導体産業を育てようとしている。こうした動向に呼応する形で、台 TSMC をはじめとする大手半導体メーカーは、大規模な設備・研究開発投資計画を発表し、存在感を高めている。

[1] 日本産業の競争力強化や社会課題の解決に寄与しうる技術・イノベーション領域をとり上げるレポート。

前工程技術開発で鍵を握るフォトレジストの概要や、戦略方向性等を考察

半導体の次世代技術開発には、前工程[2]における微細化[3]や、後工程[4]における 3D パッケージ[5]等が挙げられる。前者の実現において技術的な鍵を握るフォトレジストについては、日系メーカーが高いシェアを持つことで知られている(【図表 1】)。本稿では、フォトレジストが直面する技術的課題や最先端品の R&D 動向を俯瞰した上で、今後も日系フォトレジストメーカーが強くあり続けるための戦略方向性や、半導体素材メーカーを支援する政策のあるべき姿を考察する。

【図表 1】フォトレジスト(数量)の世界シェア(2022 年)



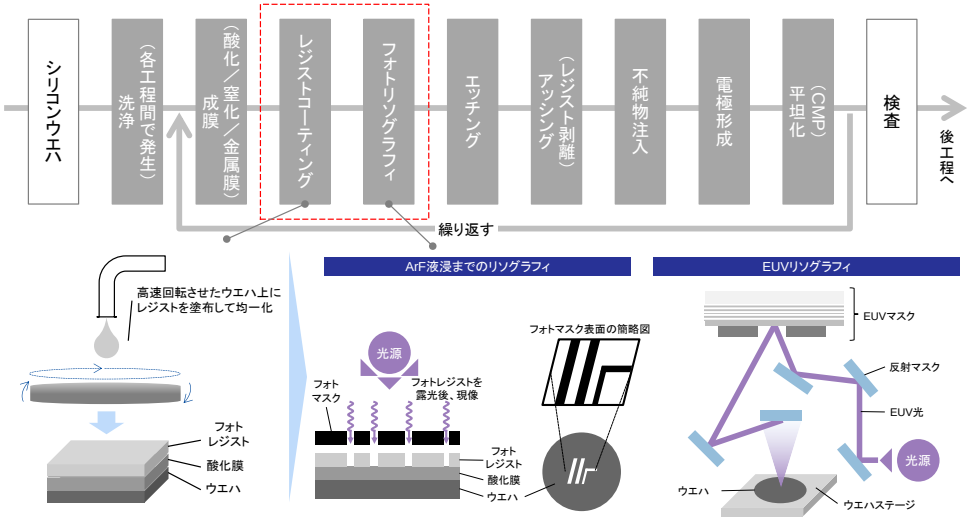
(出所)みずほ銀行産業調査部推計

2. フォトレジストの概要

フォトレジストは、半導体製造工程におけるリソグラフィ工程にて用いられる

半導体は、フォトマスクと呼ばれるガラス基板上に微細な半導体素子の回路パターンを描画し、露光によってシリコンウエハ表面に塗布されたフォトレジストに転写して回路パターンの像を形成する工程を繰り返して製造される(【図表 2】)[6]。この工程をフォトリソグラフィと呼んでおり、フォトレジストはウエハ上の必要部分を保護[7]して回路形成する役割を担っている。フォトレジストは 1950 年代に米 Kodak により開発され、日系メーカーとしては 1962 年に東京応化工業が開発を開始し、その後に JSR や住友化学、富士フイルム、信越化学工業が参入した。日系フォトレジストメーカーは後発であったものの、優れた技術力を武器に競争を勝ち抜いてきた。

【図表 2】半導体製造工程の概観



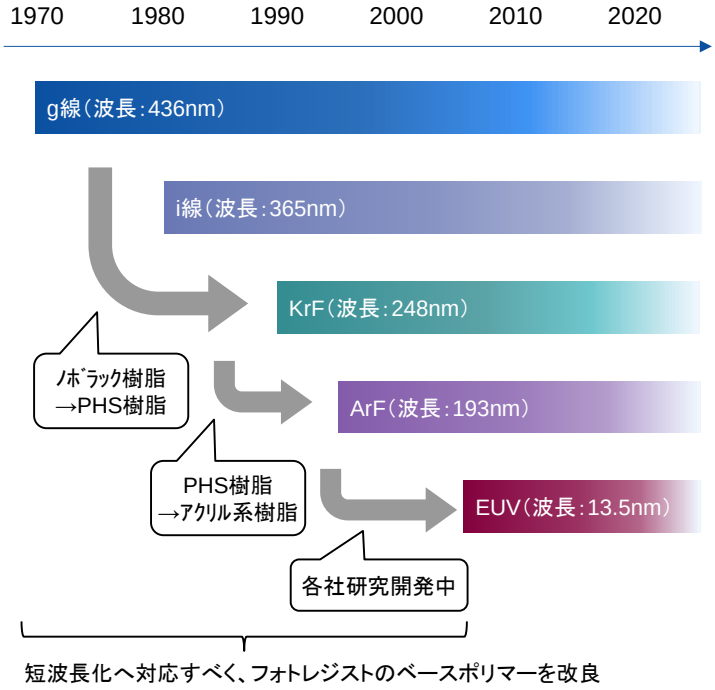
(出所)レーザーテック HP 等より、みずほ銀行産業調査部作成

[2] シリコンウエハの上に電子回路及び電極を加工形成する工程。
[3] パターン形成のプロセスで作られる二次元パターンを小さくすること。そのメリットとして、(1)トランジスタ 1 個当たりの製造コスト削減、(2)消費電力低減、(3)動作速度向上、(4)高機能化が挙げられる。特に、横方向に配置するトランジスタ数増加により面積当たりの計算処理性能が上がる効用が大きい。
[4] ウエハ上にできた数百のチップを一つ一つ切り出し、最終製品へと仕上げていく工程。
[5] 電子部品の 2 つ以上の層を積み重ね、垂直・水平方向に相互接続して単一デバイスとして機能させる、半導体チップの高度なパッケージング技術。
[6] EUV 露光とそれ以前では、回路パターンの形成方法が異なることに留意されたい。
[7] 露光に対する反応によってポジ型とネガ型に区別される。ポジ型は露光によって溶解性が増して現像後に露光部分が除去されるのに対して、ネガ型は露光によって露光部分が硬化して現像後に露光部分以外が除去される。フォトレジスト開発当初はネガ型が主流であったが、ネガ型は現像後の膨張により解像度低下を引き起こしやすい問題点があるため、パターン形成後に光を照射することで化学洗浄なしで除去できるポジ型が主に採用されている。

半導体の技術進歩に伴って、フォトレジストの開発と改良が進められてきた

半導体の技術的進化を予測する指標として、ムーアの法則（Moore's law）と呼ばれる技術進歩の経験則が存在する。1965 年に米 Intel の共同創業者である Gordon Moore が「半導体回路の集積度は 1 年半～2 年で 2 倍となる」と提唱した将来予測[8]である。提唱から半世紀以上経過した今も、半導体製造に関わる企業にとって半導体産業の技術進歩の指標として認知されている。ここで、前工程の微細化は、露光光源をより短い波長のものへと進化させていくことで達成してきた歴史があり、2019 年から 13.5nm という非常に短い波長の光を用いる EUV リソグラフィが実用化されている。フォトレジストも露光光源の進化に応じて開発と改良がなされてきた（【図表 3】）。

【図表 3】露光光源とフォトレジストのロードマップ



（注）EUV は研究開発が活発化した 2000 年代前半を始点として記載
（出所）東京応化工業 HP 等より、みずほ銀行産業調査部作成

3. 最先端フォトレジスト動向

（1）微細化にあたっての具体的手法

今後の微細化は、Rayleigh の式におけるk_1の低下、NAの向上によって実現される

半導体の微細化は、Rayleigh の式（$R = k_1 \times \lambda / NA$; R: 分解能、$k_1$:プロセス係数、λ: 波長、NA: レンズの開口数）で表される分解能[9]の向上（＝解像可能な寸法を短くすることであり、Rを小さくすること）で実現される。今後、EUV マルチパターニング[10]（k_1の低下）やレンズ開口数NAの増加などによって、更なる微細化が期待されている（【図表 4】）。しかし、それに伴ってトランジスタ構造が複雑化し、半導体製造の難易度が増すことが想定されている（【図表 5】）。nm 単位で形成される複雑な構造を実現するために、フォトレジストや露光装置、作り手となる半導体メーカーが乗り越えるべき課題は数多く存在するが、リソグラフィ工程においてはフォトレジストの課題が最も困難であると認識されている（【図表 6】）。

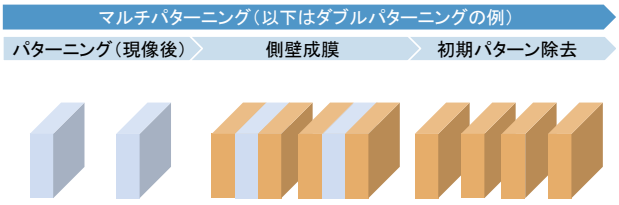
[8] 提案された当初は、集積度を集積回路に搭載された抵抗なども含むすべての電子部品で部品点数を定義していたが、集積度が上がるにつれてトランジスタが電子部品のほとんどを占めるようになったため、足下では集積回路に搭載されたトランジスタ数で定義されるようになっている。
[9] 分解できる 2 点間の距離のことで、解像度とも捉えられる。
[10] 従来 1 回である露光を複数のパターンに分割し、あとでそのパターンを重ね合わせる技術。

【図表 4】微細化進展のポイント

Rayleighの式 $R = k_1 \times \frac{\lambda}{NA}$

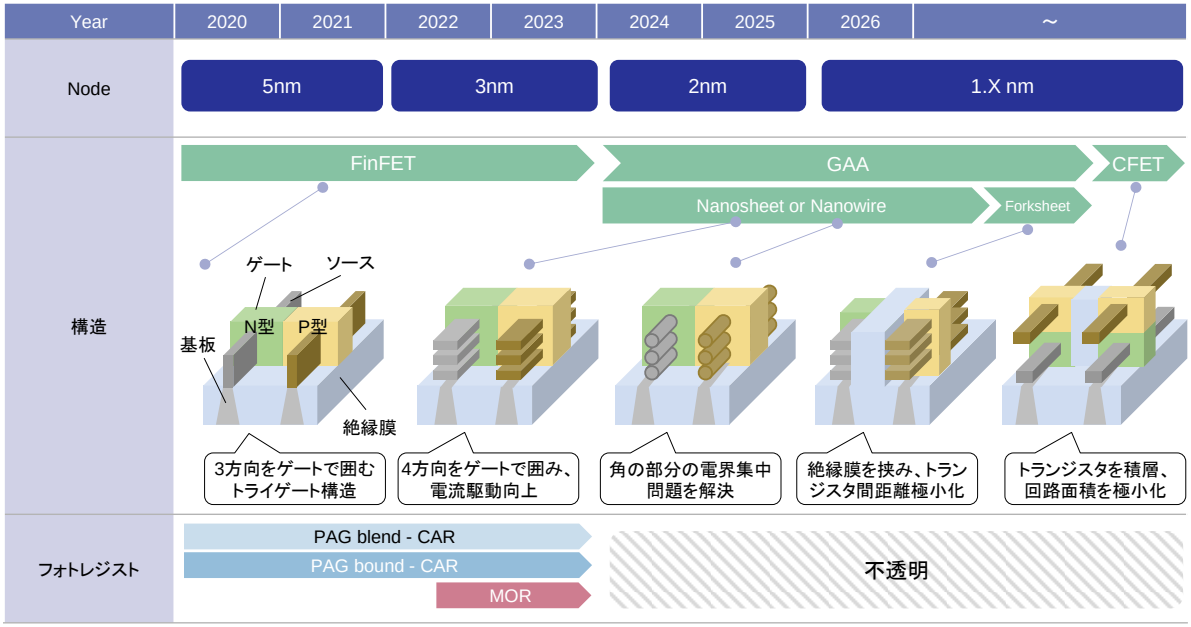
記号	R	k_1	λ	NA
意味	分解能	プロセス係数	波長（固定値）	レンズの開口数
目標	小さくする（＝解像度↑）	↓	-	↑

記号	具体的な方法
k_1	EUVスキャナの照明光学系を改良する
	フォトレジストを改良する
	マルチパターニングを導入する
	EUVスキャナにおける移動ステージを改良する（重ね合わせ誤差を低減する）
NA	開口数を上げる（長時間露光が困難なEUVでは有効な手段）



（出所）ASML、東京応化工業 HP 等より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 5】短中期的な技術ロードマップ



（出所）ASML IR 資料等より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 6】リソグラフィ工程における課題解決難易度ランキング（2019 年時点）

フォトレジスト　EUVペリクル　フォトマスク　露光機

Rank	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
1	Reliable source operation with > 85% availability	Reliable source operation with > 85% availability	Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously
2	Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	Reliable source > 250W operation with > 90% availability	Keeping mask defect free	Keeping mask defect free
3	Mask yield & defect inspection / review infrastructure	Keeping mask defect free	Keeping mask defect free	Reliable source > 250W operation with > 90% availability	Extension of EUV mask infrastructure for high NA requirements
4	Keeping mask defect free	Mask yield & defect inspection / review infrastructure	Mask yield & defect inspection / review infrastructure	Continue actinic PMI and new mask material development	System and power efficiency improvements for next generation tooling

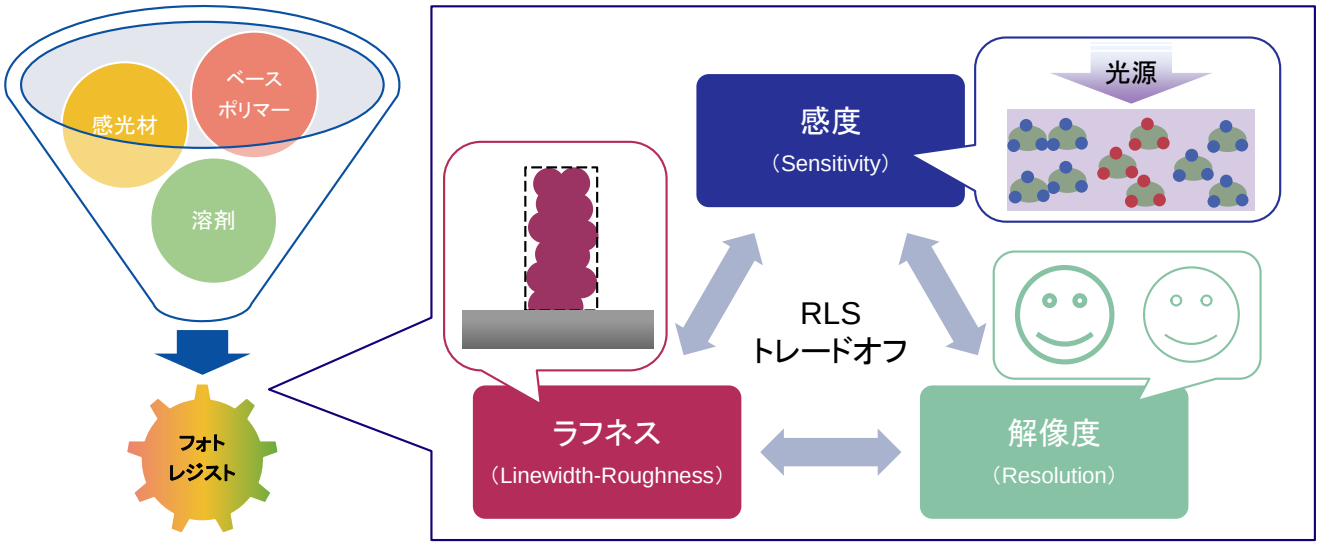
（出所）一般社団法人日本半導体製造装置協会公表資料、SPIE HP より、みずほ銀行産業調査部作成

(2)フォトレジストが向き合う課題　～RLS トレードオフ

フォトレジストメーカーにとって、RLS トレードオフの改善が課題

フォトレジストはベースポリマー・感光材（以下、Photo Acid Generator（光酸発生剤）の頭文字を取って PAG）・溶剤・増感剤を主な原料として構成され、露光光源が照射された箇所の溶解度合いを制御することで、nm 単位の回路描画の微細化に貢献してきた。フォトレジストの性能の評価軸として、主に感度・解像度・ラフネス[11]が挙げられるが、これらはトレードオフの関係（RLS トレードオフ）にあることが知られている（【図表 7】）。

【図表 7】フォトレジストの構成とトレードオフの概観



（出所）みずほ銀行産業調査部作成

現在主流である CAR は、解像度低下や原材料の分散不均一性などが課題として挙げられる

現在主流となっている PAG blend[12] - ポジ型 CAR[13]の反応機構は、まず高いエネルギー（$h\nu$）を持った EUV の Photon がフォトレジストに入射することで、ベースポリマーがイオン化（$+I_e$）されて二次電子を放出する。エネルギー保存の法則から、この時に発生する二次電子のエネルギーは、Photon のエネルギーからポリマーがイオン化することに要したエネルギーの分だけ減少したものとなる（$h\nu - I_e$）。これらの運動による衝突を繰り返し、二次電子のエネルギーが一定の閾値以下にまで減少した時に PAG と衝突すると、酸が発生し、ベースポリマーの結合を切断する（【図表 8】）。

光源の進化に伴って生じた感度不足に対して、増感剤多添加等で対応

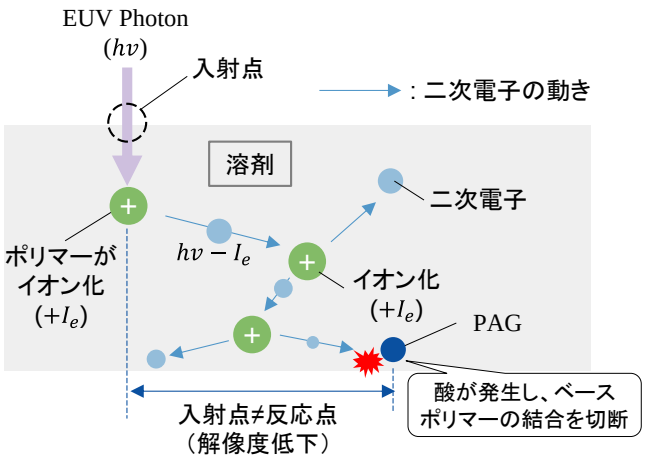
g/i 線→KrF→ArF→EUV へと光源が進化していくにつれて光の強度が弱くなり、リソグラフィにおける感度不足が深刻化する中、フォトレジストに増感剤を多く添加することによって感度不足を補ってきた。露光に加熱処理を加えることで十分な光で露光したことと同じ処理結果となることも、CAR が好まれる理由である。

PAG blend - ポジ型 CAR は、光の入射点と酸発生点が異なるため、解像度が低下

RLS トレードオフの関係から、感度を高めればラフネスが悪化してしまうが、これについては最小限に抑えるよう各社が工夫を凝らして解決を図ってきた。しかし、PAG blend - ポジ型 CAR は、光の入射点と酸が発生する点が異なるため、解像度が下がってしまう点が問題点として挙げられる。また、局所的にはフォトレジスト内でベースポリマーと PAG が均一に分散しているわけではないことも解像度低下をもたらす要因となっており、係る中でフォトレジストメーカーが一定期間における品質を統計的に許される誤差の範囲内に抑えることも容易ではない（【図表 9】）。

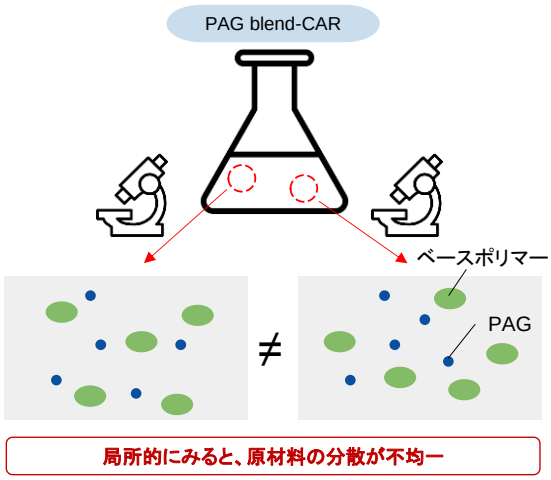
[11] レジストのエッジが直線から凸凹にずれたり（Line Edge Roughness）、レジストの線幅が凸凹にずれたりする（Line Width Roughness）現象。
[12] PAG が他の原材料と混ぜ合わせられており（blend）、便宜的に PAG blend と呼称している。
[13] Chemically Amplified Resist の頭文字を取って CAR と呼称している。

【図表 8】PAG blend - ポジ型 CAR の反応機構



（出所）みずほ銀行産業調査部作成

【図表 9】PAG blend - ポジ型 CAR の原材料分布



（出所）みずほ銀行産業調査部作成

(3)各種最先端フォトレジストの概観

更なる微細化へ対応可能と考えられるフォトレジストには、それぞれ一長一短ある

これまで微細化をけん引してきた PAG blend - ポジ型 CAR では、更に RLS トレードオフを改善することが極めて困難とされる中、今後 2nm や 1.Xnm へと進化していく微細化へ対応可能なフォトレジストとして、様々なタイプの最先端フォトレジストの開発が進められている（【図表 10】）。各タイプには一長一短があり、どのタイプがデファクトとなるかは現時点では不透明である。以下ではそれぞれのタイプについて、その概要を述べる。

【図表 10】各種最先端フォトレジストの概略

タイプ	主要企業	説明	メリット/デメリット
PAG bound - CAR（ポジ型）	日系フォトレジストメーカー各社	• ベースポリマーの主骨格にPAGを結び付けることで、ベースポリマーとPAGの分散不均一性を解消	• PAG - blend CARの改良版であり、半導体メーカーにとって使い慣れている • PAGポリマーの分散不均一性は解消されていない
Wet / Dry MOR（ネガ型）	Wet: 米Inpria（JSR子会社）	• 金属酸化物の反応を利用して、露光部、未露光部の溶解性を変化させパターンを形成	• 入射点＝反応点となるネガ型であり、高い解像度を実現 • 除去には化学洗浄を用いる必要あり、ポジ型対比で手間がかかる • 保存・プロセス安定性、水分に対する過敏性等の観点で、品質管理が難しい
	Dry: 米Lam Research・米Entegris・米Gelest	• スピンコート方式を用いるWetタイプと異なり、CVDによりDry MORを堆積	• EUV光吸収率や使用量において、Wetタイプよりも優位 • 現像のドライ化により、現像液やリンス液によるパターン倒壊を抑制 • 周辺素材や装置の開発が必要不可欠
主鎖切断型	日本ゼオン	• 電子線の照射により、ポリマーの主鎖がモノマー単位まで分解するようにポリマーを設計	• どの箇所でも必ず存在するポリマーが化学反応のトリガーとなるため、高解像度の微細パターンを形成しやすい • 周辺素材や装置の開発が必要不可欠
自己組織型（DSA）	JSR、東京応化工業、独Merck	• 熱化学的な観点から分子の自発的な集合を促し、パターニングに応用	• 同じ分子長の共重合高分子材料を使うので、自己集合により立体的な構造を形成した際、原理的には幅のばらつきがなく、ラフネスが理論上発生しない • 周辺素材や装置の開発が必要不可欠

（出所）各社 IR 資料等より、みずほ銀行産業調査部作成

（ⅰ）PAG bound - CAR

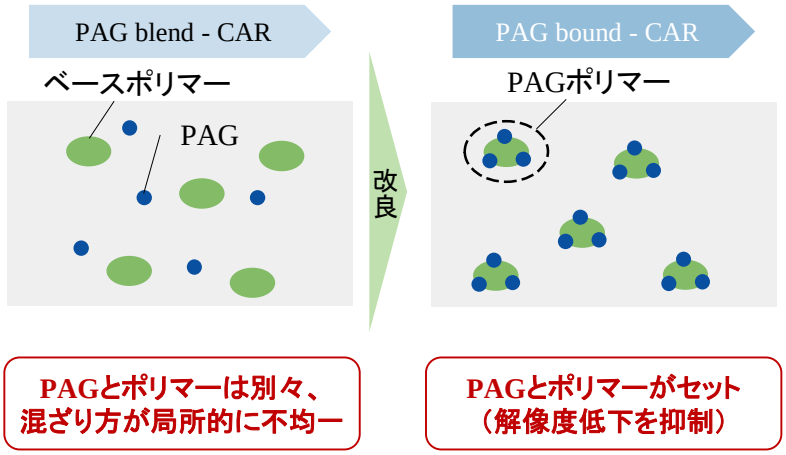
PAG bound - CAR は、PAG blend - CAR の課題に対応

PAG blend - CAR の課題である解像度低下や原材料の分散不均一性を極小化することを狙い、ベースポリマーの主骨格に PAG を結び付けた（以下 PAG ポリマー）PAG bound[14] - CAR が開発されている（【図表 11】）。使い慣れた CAR を引き続き採用したいと考える半導体メーカーが、2nm 世代の半導体製造レシピにおいて PAG bound - CAR を採用する可能性は高い。

PAG bound - CAR は、開発・製造段階で高い技術力やノウハウを必要とする

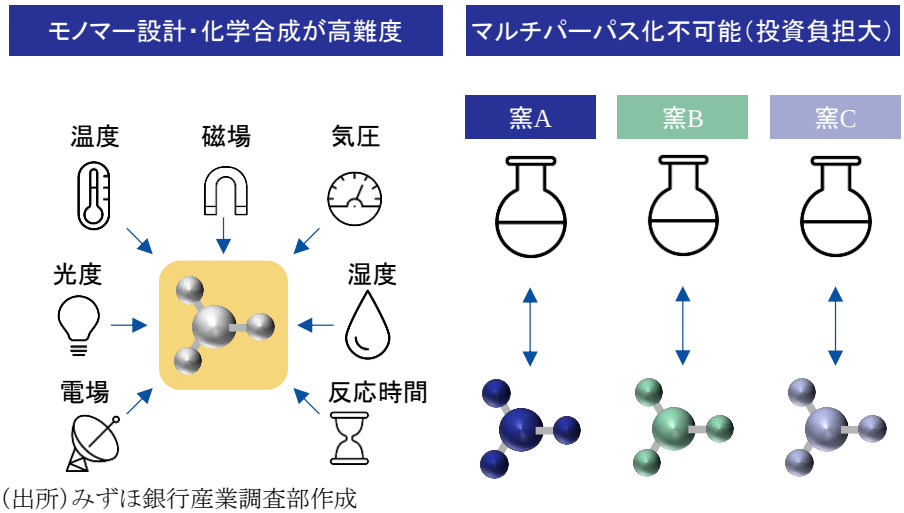
PAG bound - CAR は、PAG ポリマーの前段階である PAG モノマーの開発段階において、半導体メーカーの要求性能を落とし込むことに一層高い技術力が要求される。また、製造段階においても、原材料メーカーによる PAG モノマーの化学合成は、従来以上に厳密な環境・反応条件のもとで行う必要がある。不純物の混入リスクを極小化するために、製造するモノマー・ポリマー1 種類につき専用の化学合成の窯が必要（マルチパーパス化不可能）であることは、PAG bound - CAR に限った話ではないが、より少量多品種のモノマー・ポリマーや溶剤をよりシビアな条件で製造することを要求されることから、原材料メーカーの投資負担や品質保証上のリスクも大きくなっている（【図表 12】）。日系フォトレジスト業界においては、レジストメーカーと原材料メーカーがこれまでの連携を通じて構築した信頼関係により、化学合成に関する課題やリスクを極小化できていることが、今後も競争力の源泉になるだろう。

【図表 11】PAG blend - CAR と PAG bound - CAR の比較



（出所）みずほ銀行産業調査部作成

【図表 12】フォトレジストメーカー・原材料メーカーが対処する課題や責任（競争力の源泉）



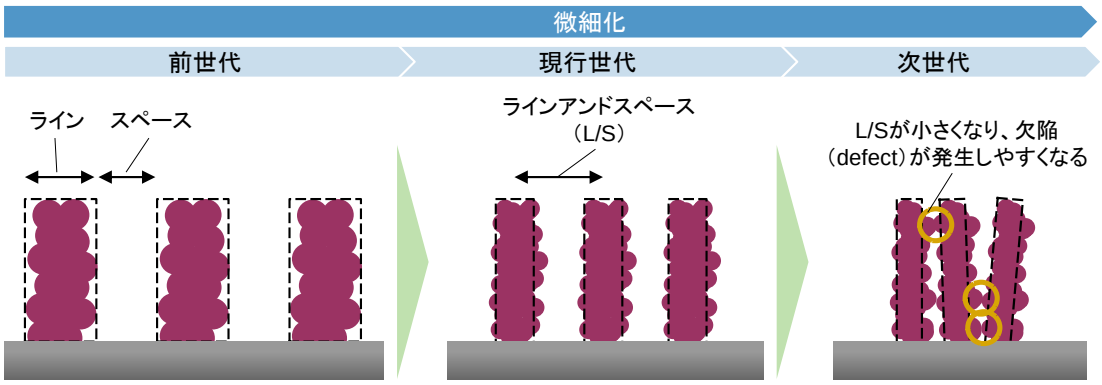
（出所）みずほ銀行産業調査部作成

[14] PAG がベースポリマーに結び付けられており（Bind）、便宜的に PAG bound と呼称している。

PAG - bound CAR は、PAG ポリマーの不均一性は未解消。更なる微細化が可能か未知数

PAG bound - CAR は PAG ポリマーの導入によってベースポリマーと PAG の不均一性を極小化した。しかし、フォトレジストにおける PAG ポリマーの分散不均一性は依然解消されておらず、足下の 3nm で許容されているラフネスが 2nm では欠陥（パターン同士の接触や倒壊など）の発生要因として無視できなくなる可能性がある（【図表 13】）。CAR の対応限界は 2nm という声もあり、PAG bound - CAR が今後の微細化に伴う L/S[15]縮小にどこまで対応できるかは未知数である。

【図表 13】微細化に伴う欠陥発生のイメージ図



（出所）みずほ銀行産業調査部作成

（ⅱ）Wet / Dry - MOR

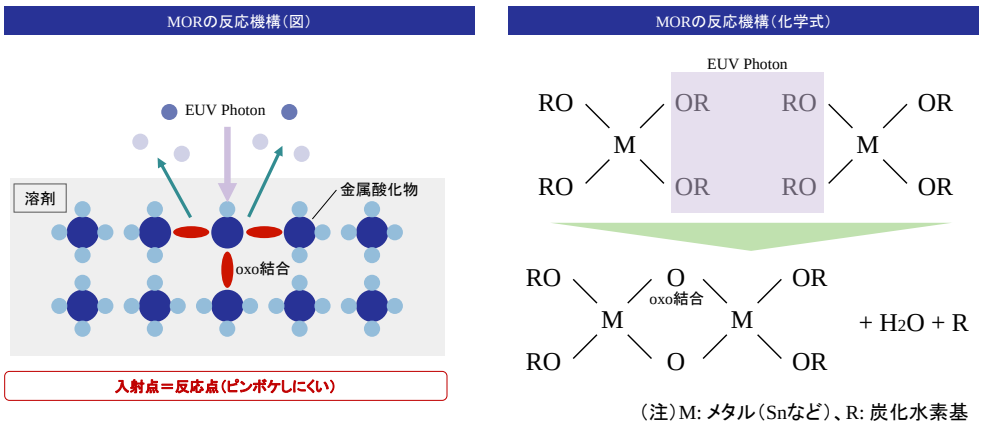
MOR は、金属酸化物を含んだネガ型フォトレジスト

MOR（Metal Oxide Resist）は、その名の通り金属酸化物を含有させたフォトレジストである。EUV 光が照射された部分が硬化するネガ型フォトレジストであり、Wet と Dry タイプが存在する。

Wet - MOR は、EUV 光の吸収率が高いことから、高解像度などが特徴

まず、Wet - MOR の反応機構としては、EUV 光が照射された部分において oxo（オキソ）結合が起こって硬化する（【図表 14】）。特に、Sn（スズ）や Hf（ハフニウム）を用いる Wet - MOR は、EUV 光の吸収率が高いことから、解像度が高いという特徴がある。最終的には硬化部分を化学洗浄により除去する必要があるが、PAG blend - ポジ型 CAR の課題であった入射点と反応点が異なることによる解像度低下が起こりにくいメリットがある。また、ドライエッチング耐性[16]が高いことも、今後の微細化に貢献すると期待される一因である。Wet - MOR においては、2007 年の設立以降 R&D を進めてきた米 Inpria の技術力が高く評価されている。なお、同社は 2021 年 9 月に JSR によって買収された。

【図表 14】Wet - MOR の反応機構



（出所）SPIE HP 等より、みずほ銀行産業調査部作成

[15] ライン（Line）はパターン幅、スペース（Space）はパターンの間隙、ラインアンドスペース（L/S）はラインの中心同士の距離を意味する。
[16] エッチングガスを用いて、薄膜を一部または全部除去する工程をドライエッチングと呼称する。フォトレジストのエッチング耐性は、エッチング時の膜減り速度で評価され、膜減り速度が小さいほどエッチング耐性に優れているとされる。

Dry - MOR は、CVD によって薬剤堆積

次に、Dry - MOR について解説する。従来のフォトレジストは液体（以下、液体のフォトレジストを Wet - Resist と記載）であり、ウエハの中心に滴下された後、ウエハを高速回転させるスピンコートによって、ウエハ全面に均一に広げるが、Dry - MOR は化学気相成長（以下 CVD[17]）によって薬剤を堆積させることが、Wet - Resist と大きく異なる点である（【図表 15】）。

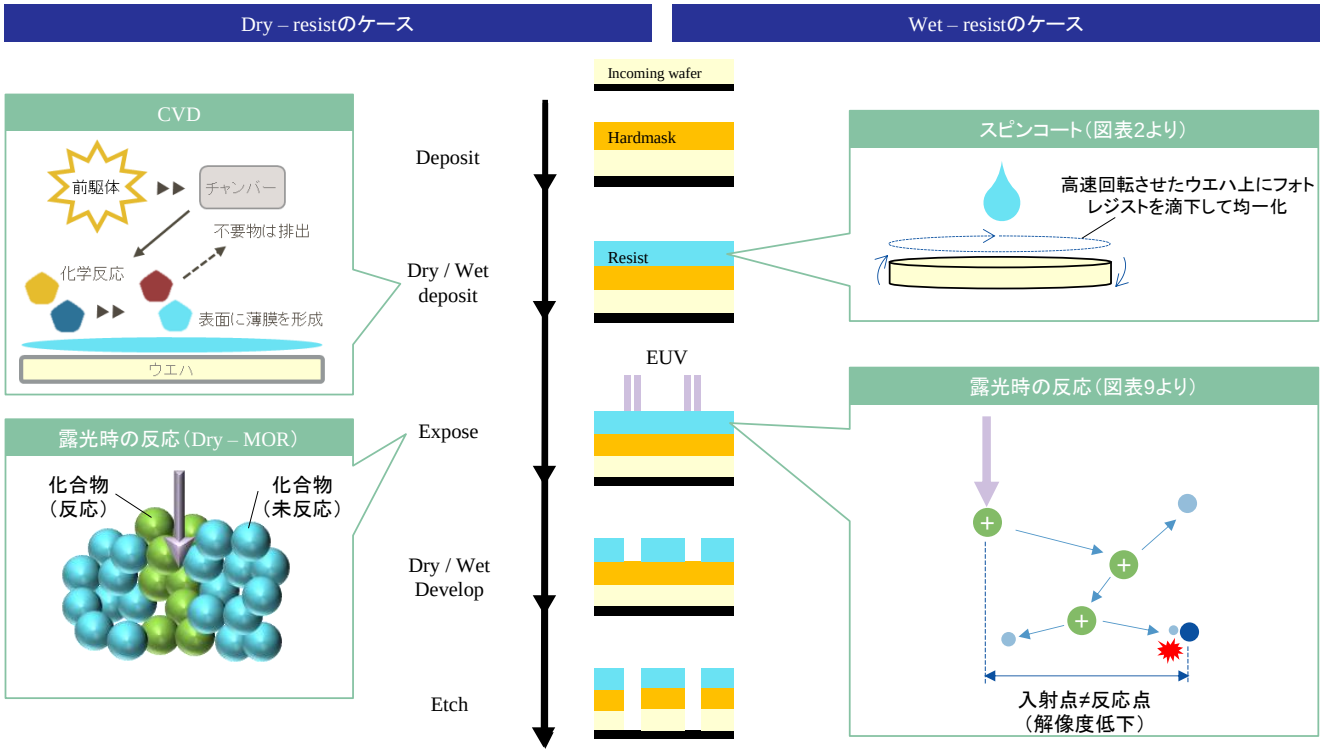
Dry - MOR は、RLS トレードオフを改善しやすく、効率よく工程を進めることが可能

米 Lam Research によれば、Dry - MOR は Wet - Resist 対比で RLS トレードオフを改善しやすく、解像度・純度・プロセスウィンドウ[18]の広さで優れるとされる。そのほか、必要量以上の量を滴下してウエハ全面に行き渡らせる Wet - Resist よりも、使用するフォトレジストの量を減らすことができる点や、ドライ現像（Dry develop）[19]工程に用いる薬剤使用量がウェット現像（Wet develop）[20]工程よりも少ない点、全体を通じて効率よくリソグラフィ工程を行うことによって電力使用量を削減できる点がメリットとして挙げられている（【図表 16】）。

Dry - MOR は、Lam Research らが開発で先手

Dry - MOR は、2020 年に Lam Research が蘭 ASML や白 IMEC[21]と共同で開発した。装置メーカーである Lam Research は、Dry - MOR の製造パートナーとして、原材料となる金属系プリカーサーを供給する素材メーカーである米 Entegris と米 Gelest（三菱ケミカルグループ子会社）の 2 社と連携することを発表している。

【図表 15】Wet / Dry フォトレジストのコーティング・フォトリソグラフィ手法の比較



（出所）Lam Research IR 資料より、みずほ銀行産業調査部作成

[17] Chemical Vapor Deposition の略。一般的に半導体製造工程の成膜工程において用いられる技術であり、成膜速度が速い、処理面積が大きい、原材料の利用効率が高いなどといったメリットが挙げられる。ウエハ上に薄膜や配線を形成する際に用いる原材料となる化合物のことをプリカーサー（前駆体）と呼び、Dry - MOR においては金属系のプリカーサーが重要となる。

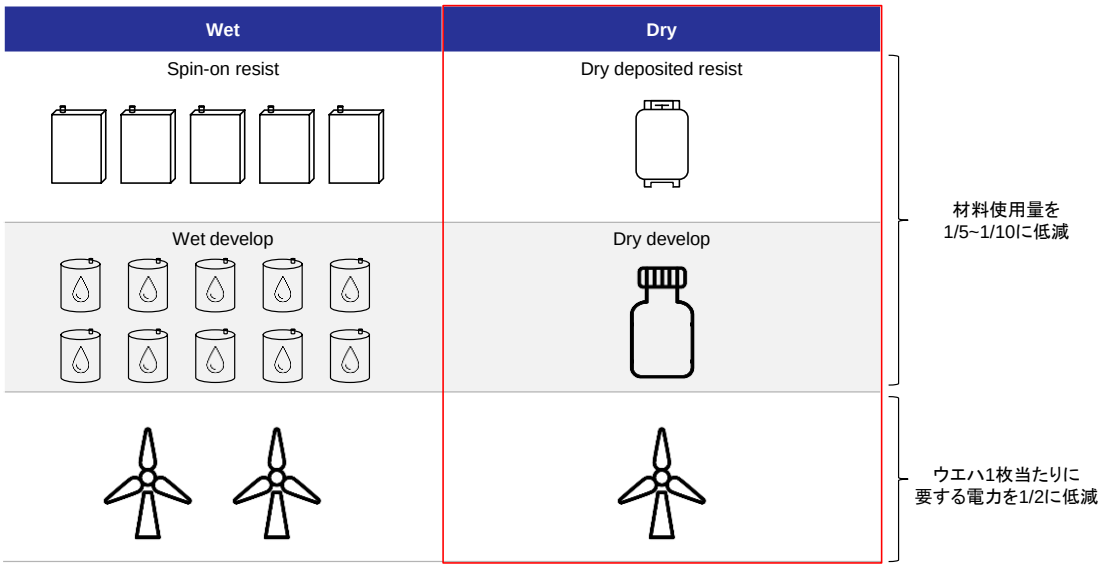
[18] ある工程の目的を達成する上で許される処理条件の範囲のこと。

[19] フォトレジストのパターンをドライエッチングを用いて形成する方法。ウェット現像に比べて、下地反射等の問題が回避できる、現像液を用いないためパターン倒壊が起きる確率を減らすことができるといったメリットがある。

[20] アルカリ現像液や有機現像液を薬液として用いる現像方法。

[21] Interuniversity Micro-Electronics Centre の略で、1984 年にベルギー（白）・フランダース政府により NPO として設立された独立研究機関。約 70 人の研究者で始まった IMEC は現在、世界 95 カ国以上から集う約 5,500 人体制で次世代半導体の技術開発を先導する。最新の装置やクリーンルームなど最新設備をそろえ、米 Intel や韓 Samsung など世界の半導体メーカーが研究者を派遣する。

【図表 16】Dry - MOR の優位性



（出所）Lam Research IR 資料より、みずほ銀行産業調査部作成

MOR は、従前の課題解決への寄与が期待される

Wet / Dry MOR は、これまでフォトレジストのデファクトであり続けてきた CAR が対峙してきた RLS トレードオフなどの課題解決に大きく寄与することが期待されている一方で、MOR 固有の課題が存在することには留意が必要である。

MOR は確実な残渣除去が必要

Wet / Dry MOR 共通の技術課題として、残渣が欠陥原因となるメタルを含むフォトレジストであることから、その残渣を確実に除去する必要があることが挙げられる。

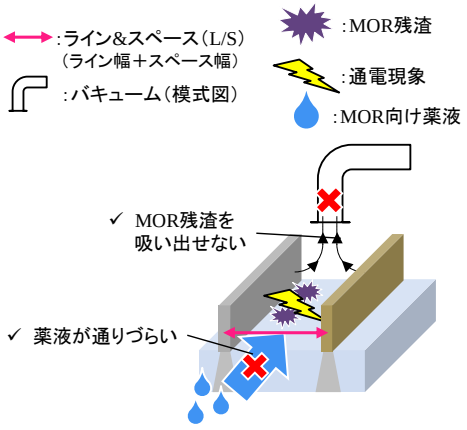
Wet / Dry MOR それぞれにも特有の課題が存在

Wet - MOR 特有の課題として、薬液を用いるウェット現像や洗浄を行う都合上、小さい L/S に薬液が流れ込むことによるパターン倒壊も問題点として挙げられる（【図表 17】）。Dry - MOR 特有の課題としては、CVD によって Dry - MOR を堆積させる新しい工程を経るため、周辺材料や装置の開発が必要になることや、半導体メーカーが使いこなして高い歩留まりを達成するまでにはより長い時間を要することが挙げられる（【図表 18】）。

Wet / Dry MOR は、高いサンプル評価獲得が必要

Wet / Dry MOR はいずれも、照射部分が溶解する使い慣れたポジ型 CAR を使い続けたいと考える半導体メーカーの心理的ハードルを乗り越えるだけの高いサンプル評価を獲得することが重要となる。

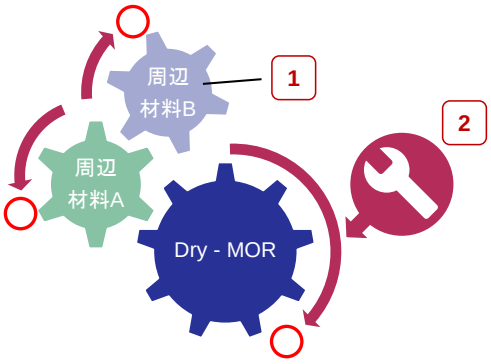
【図表 17】Wet - MOR の課題



通電やパターン倒壊などの欠陥（Defect）が発生しやすい

（出所）みずほ銀行産業調査部作成

【図表 18】Dry - MOR の課題



1	**Dry – MORと相性の良い周辺材料を開発する必要**
2	**半導体メーカーが使いこなすまでには長い時間を要する**

（出所）みずほ銀行産業調査部作成

（iii）その他（主鎖切断型、自己組織型（DSA））

主鎖切断型は、高解像度の微細パターンが形成しやすいことが強み

その他、最先端フォトレジストとして主鎖切断型、自己組織型（Directed Self-Assembly; 以下頭文字を取って DSA）も提唱されている。主鎖切断型は、電子線の照射によって、ポリマーの主鎖がモノマー単位まで分解するようにポリマーを設計したフォトレジストである。その強みとして、どの箇所でも必ず存在するポリマーが化学反応のトリガーとなるため、高解像度の微細パターンを形成しやすいことが挙げられる。主鎖切断型においては、日本ゼオンが開発を進めている。

DSA は、ラフネスが理論上発生しないことが強み

DSA は、熱化学的な観点から分子の自発的な集合を促し、パターニングに応用したフォトレジストである。その強みとして、同じ分子長の共重合高分子材料を使うので、自己集合により立体的な構造を形成した際、原理的には幅のばらつきがなく、ラフネスが理論上発生しないということが挙げられる。

主鎖切断型、DSA 共に、MOR 同様の課題を抱えている

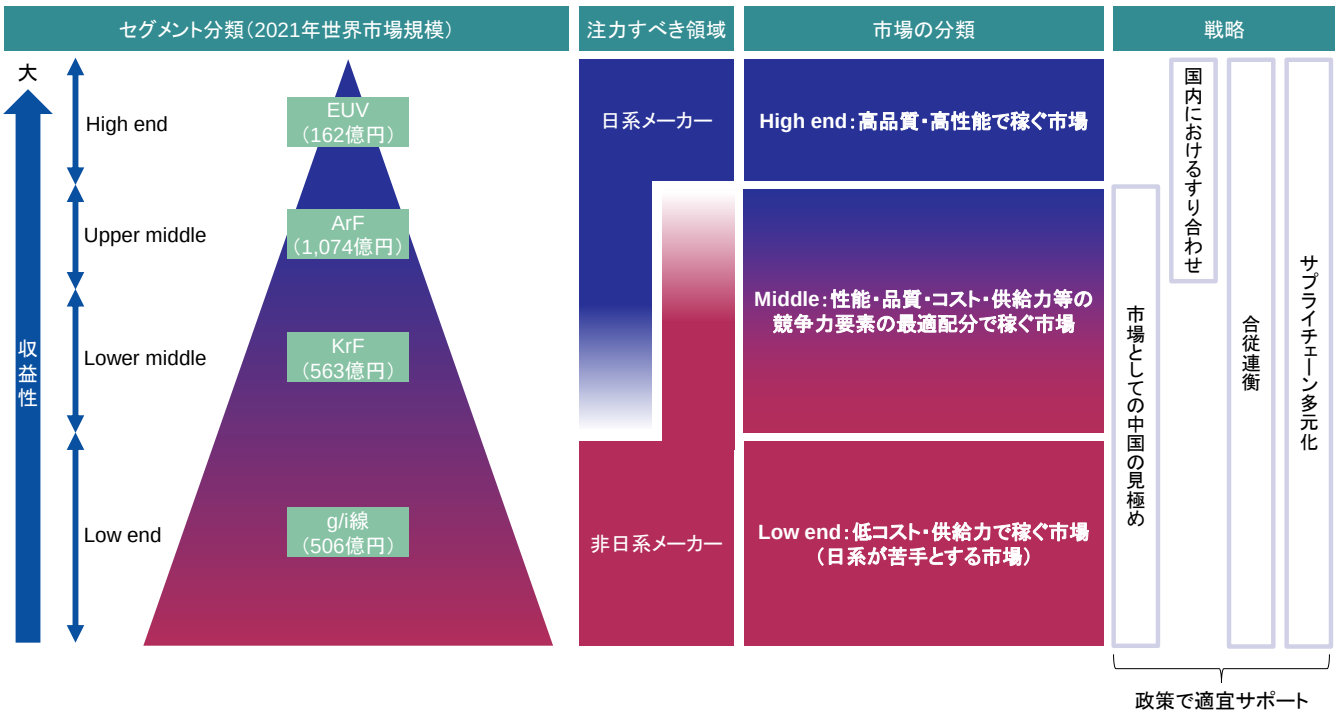
双方ともに CAR が対峙してきた課題解決に寄与することが期待されているが、MOR と同様に、使い慣れた CAR を使い続けたいと考える半導体メーカーの心理的ハードルのクリアや、新しい工程が必要となる以上、周辺材料や装置の開発が欠かせないこと、半導体メーカーが使いこなして高い歩留まりを達成するまでには長い時間を要すると想定されるといった課題を抱えていると言える。

4. 最先端（High end）領域において日系フォトレジストメーカーが今後も強くあり続けるために

日系フォトレジストメーカーが強くあり続けるために、注力領域を見極めて適切な戦略を立てる必要がある

現在まで日系フォトレジストメーカーは高い技術力と競争力を維持し、業界を牽引してきた。今後もそうあり続けるために、日系フォトレジストメーカーは注力すべき領域を見極め、適切な戦略を立てる必要がある。先に述べた通り、どのタイプの最先端フォトレジストがデファクトとなるかは現時点で不透明であるものの、Middle 領域で稼いだ収益を各社の強みが活かせる High end 領域に充当することが一つの方向性だろう。具体的な戦略として、①市場としての中国の見極め、②国内におけるすり合わせ、③合従連衡、④サプライチェーン多元化の 4 つを挙げ、戦略遂行にあたって求められる政策のあり方についても例示する（【図表 19、20】）。

【図表 19】日系フォトレジストメーカーの注力すべき領域と戦略方向性



（注）2021 年世界市場規模は、富士キメラ総研「2023 先端/注目半導体関連市場の現状と将来展望」より引用
（出所）みずほ銀行産業調査部作成

【図表 20】戦略方向性の考え方と、求められる政策のあり方

	メーカーの戦略方向性	考え方	求められる政策のあり方
技術を守る・競争力を維持する	1 市場としての中国の見極め	• EUV露光機を入手できないため、EUVフォトレジスト需要は創出されない • 中国フォトレジストメーカーは、有力中国半導体メーカーとのすり合わせにより技術力を向上 • ArFフォトレジスト等の輸出量を増やせば、技術流出リスクが増大。一方で輸出をためらえば、巨大市場を取りこぼす • 先端技術を守りながらも、Upper / Lower Middleセグメントでしっかりと稼ぐことが重要	• 安易な輸出抑制は、中国フォトレジストメーカーが独自に革新的な製品を生み出し、サプライチェーンを構築し、日系フォトレジストメーカーのシェアが奪われる可能性を高める • 日本政府としても中国が巨大市場として機能している実態を認識し、日系フォトレジスト関連メーカーとしっかりと対話して適切な政策を実行
	2 国内におけるすり合わせ	• トップクラスの半導体メーカーとのすり合わせを行っていくために、最新設備・装置が必要。ただし、日系メーカー単独での投資には限界あり • 人的リソースが豊富な日本ですり合わせを行うことが望ましいが、足下では台湾・韓国・米国・欧州ですり合わせを行っているのが実態	• トップクラスの半導体メーカーの工場や研究所の国内誘致による、日本ですり合わせを行う環境の構築支援
技術力・競争力を高める	3 合従連衡	• 技術的融合や人材・技術等のリソース面の拡充により、競争優位性の向上に繋がる可能性	• 独禁法の柔軟な運用を含めた、規模拡大による売手交渉力・R&D強化と業界内競争による切磋琢磨の両立
	4 サプライチェーン多元化	• 半導体素材の原材料調達において、経済合理性の観点から特定国・地域に依存しているケースが存在	• 政策・補助金拠出による短中期的な事業化支援により、日系メーカーのサプライチェーン多元化を促進

（出所）みずほ銀行産業調査部作成

①市場としての中国の見極め：事業拡大により技術流出リスクが増大、しっかりと見極めて対応する必要あり

はじめに、①市場としての中国の見極めについて取り上げる。電池材料・ディスプレイ材料をはじめとする多くの機能性材料において中国メーカーのシェアが拡大する中、半導体素材とりわけフォトレジストは日系素材メーカーがシェアを維持し続けているのは前述の通りである。ただし、中国が国を挙げて半導体自給率の向上に取り組んでいることには留意すべきである。米国は 2022 年 10 月に先端半導体や関連技術の対中規制を大幅に強化し、主要生産国である日本やオランダに対しても対中輸出規制への同調を求め、両国は同意している。それにより、中国は EUV 露光機を入手できないため、最先端半導体の内製化は困難と言える。しかし、歩留まりやスループット[22]を度外視すれば ArF 露光機を駆使したマルチパターニングによって微細化は可能であり、高性能の半導体を国産化することも理論上可能である。実際に、中 SMIC が先端半導体と位置付けられる 7nm 世代の半導体を出荷しているとする報道や、微細化が ArF で打ち止めとなった後は積層化に舵を切った 3D NAND において中 YMTC の競争力が高まっているとの報道がある。

中国需要は今後も拡大見込であるが、輸出量増加は技術流出リスク増加に繋がる可能性

中国国内の旺盛なフォトレジスト需要に対して、中国フォトレジストメーカーが品質・生産能力の観点で対応しきれていないこともあり、日系フォトレジストメーカーは過去 10 年にわたって 16,000 トン／年を輸出してきた（【図表 21、22、23】）。引き続き大きな需要が想定されるが、日系フォトレジストメーカーが Middle セグメントに位置付けられる ArF フォトレジスト等の中国向け輸出を増やせば、技術流出リスクが増大することは否定できない。また、上述のような有力中国半導体メーカーとすり合わせを行う中国フォトレジストメーカーの技術力も日進月歩で高まっていると見るべきであり、それらのキャッチアップは日系フォトレジストメーカーのシェア縮小に繋がる可能性がある。

[22] 単位時間当たりに処理可能なウエハの枚数のこと

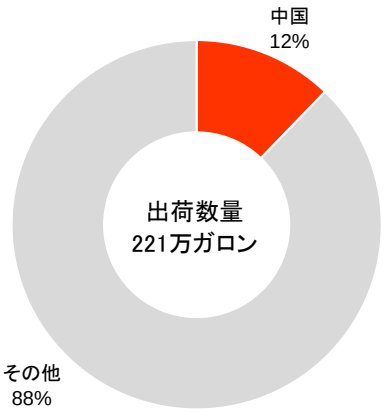
自社技術を守りながら、中国市場でしっかりと稼ぐことが重要

しかしながら、自社の技術を守るために輸出をためらえば、それはフォトレジストの巨大市場を取りこぼすことを意味する。輸入によってフォトレジストやその原材料を入手できなくなった中国メーカーが、独自に革新的な製品を生み出し、独自のサプライチェーンを構築することにより日系メーカーがシェアを奪われる可能性もあるだろう。したがって、日系フォトレジストメーカーは先端技術を守りながらも、Upper / Lower Middle セグメントの市場を取り込みしっかりと稼ぐことが重要であると考える。

フォトレジスト関連メーカーとの対話を通じた適切な政策が必要

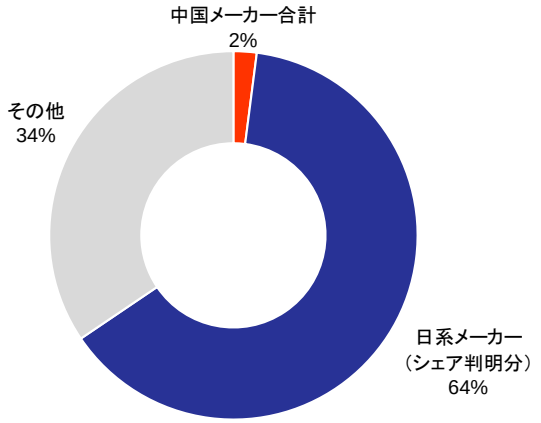
軍事転用されるリスクのある製品については各国で足並みを揃えた規制を講じる必要はあるが、日本政府としても中国が巨大市場として機能している実態を認識し、日系フォトレジスト関連メーカーとしっかりと対話して適切な政策を打ち出していくべきだろう。一方、最先端技術に関しては、メーカーと国が技術漏洩の防止に真剣に取り組む必要性が高まっている。取り組みの一例として、日系フォトレジストメーカーが成果を上げた技術者にしっかりと報いる報酬体系整備等により、技術者の国外流出防止に真剣に取り組むことはもちろんのこと、国はメーカーやその従業員に対して厳格な情報漏洩防止措置を講じていくことも必要になるだろう。

【図表 21】フォトレジストの世界出荷量内訳（2020 年実績）



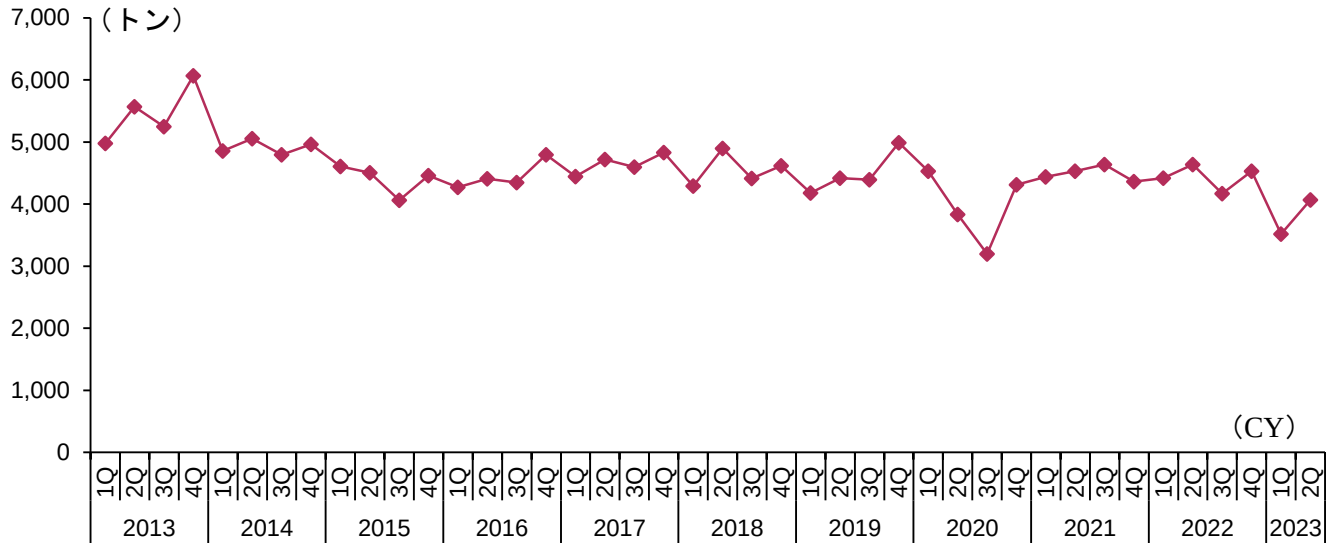
（出所）富士キメラ総研「中国半導体メーカーの最新動向調査 2021」より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 22】フォトレジストの世界シェア（2020 年実績）



（出所）富士キメラ総研「中国半導体メーカーの最新動向調査 2021」より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 23】日本から中国へのフォトレジスト輸出量推移



（注）HS コードは 370790：写真用の化学調製品-その他のもの
（出所）Global Trade Atlas より、みずほ銀行産業調査部作成

②国内におけるすり合わせ：日本国内で、トップクラスの半導体メーカーとすり合わせを実施

次に、②国内におけるすり合わせについて取り上げる。今後の微細化への貢献が期待されるフォトレジストのタイプは出揃っている可能性が高く、それらの学術的研究成果も相応に積み上がってきている。次世代半導体製造レシピへの採用に向けては、フォトレジストそのものの R&D に加えて、その性能を最大限引き出すための各種評価や、フォトレジストと相性の良い周辺装置・素材の開発状況など、半導体メーカーや装置メーカーとのすり合わせが引き続き重要となることは言うまでもない。自社をはるかに上回る企業規模で設備一式を取り揃えるトップクラスの半導体メーカーに対してすり合わせを行っていくために、日系フォトレジストメーカーも各種装置を自社で取り揃え、最新のものに更新し続けることが理想である。

EUV 露光機の導入を予定する半導体メーカーとの緊密な連携が重要に

しかし、1 台数百億円する EUV 露光機をはじめ、一素材メーカーが各種装置を揃えることは現実的には不可能であり、それら装置を取り扱うノウハウにも乏しいケースもある。現在は、EUV 露光機とそれを使いこなせるノウハウがある台湾や韓国、米国、欧州（IMEC）にやむを得ず最先端フォトレジストを空輸して性能を確認しているが、これは日系レジストメーカーの開発状況や技術力といった手の内の一端を日本国内に留め切れていないことを意味している。そこで、日本政府の支援を受けて、日本国内で EUV 露光機の導入を予定している Rapidus や米 Micron と緊密に連携していくことが一つの対策となるだろう。

日本を最先端半導体の研究開発を行う場として育てていく政策に期待

非日系半導体メーカーに対して巨額の補助金を拠出することには賛否両論あるが、日本国内に EUV 露光機が存在することで日系フォトレジストメーカーをはじめとする各種半導体素材メーカーの競争力・技術力の維持・向上に寄与する可能性がある点は、大きなメリットと考える。日本を半導体メーカー・装置メーカー・素材メーカーが三位一体で最先端半導体の研究開発を行う場として育てていく政策が今後も期待される。

支援を必要とする日系メーカーに応える政策支援へと改善する余地がある可能性も

ちなみに、半導体部素材に対する補助としては、経済産業省が所管する「半導体の安定供給の確保に係る取組の認定」があり、半導体部素材の補助金認定となる基準として「設備投資規模が著しく大きいこと（原則として事業規模が 300 億円以上）」が示されている。【図表 19】にて示したように、High end 領域は消費量が限定的であるため事業規模が小さくなる傾向があり、足下 2,300 億円程度の市場の中で各社が競争をしていることを勘案すれば、基準に満たないため申請を断念しているフォトレジストメーカーが存在する可能性がある。半導体素材の中でも比較的市場規模が大きく、日系メーカーのシェアが高いフォトレジストでさえも申請の敷居が高いとするならば、その他の半導体素材を手掛けるメーカーにとっては更にハードルが高いはずである。支援を必要とする日系メーカーに応える政策へと改善する余地があるだろう。

③合従連衡：事業環境の変化等を勘案すれば、日系半導体素材産業再編の効用は存在

次に、③合従連衡について取り上げる。半導体メーカー・装置メーカー・素材メーカーは三位一体で半導体の技術開発を行ってきた。次世代技術開発競争が激化する中で、作り手である半導体メーカーの寡占化が進み、買手交渉力向上が進んでいる。こうした動きに対抗し、非日系素材メーカーが合併・買収を通して競争力強化を図っており、日系素材メーカーの交渉力が相対的に弱くなっている。例えば、2019 年の独 Merck による米 Versum Materials の買収、2021 年の米 Entegris による米 CMC Materials の買収が挙げられる。日系半導体素材業界は、各社の規模は小さいながらも、優れた技術力を武器に高収益モデルを確立していること等が要因となり、買収・合併の必要性が乏しかった。しかし、三位一体のパワーバランス変化や、半導体素材メーカーが競争優位性を維持・向上するための研究開発・設備投資負担が益々重くなることが予想されることなどを踏まえれば、フォトレジスト業界をはじめとする日系半導体素材業界再編の効用は認められる。

JSR は、非公開化により日系半導体素材業界再編の旗振り役となることを標榜

係る中、2023 年 6 月 26 日、JSR は政府系ファンドの産業革新投資機構（JIC）による買収を受け入れることを発表した。JSR は政府系ファンドの後ろ盾を得た上で、日系半導体素材業界の再編を主導し、幅広い半導体素材のラインナップでの高い市場シェア獲得や他社との技術的融合、新たな人材・技術の獲得が可能となるリソース面の充実により、国際競争力を高めていく考えだ。JIC は、JSR が非公開化によって経営資源を半導体素材事業に集中させられる環境を提供し、引き続き半導体素材の最先端品開発を支

援することで、日本政府が推進する半導体産業の国際競争力強化を後押ししたいとしている。ただし、JSR はフォトレジスト業界でトップクラスのシェアを有するため、公正取引委員会の基本的な考え方に沿って業界再編の可能性を検証すると、その難易度が相応に高いことには留意が必要である。

規模拡大による売手交渉力・R&D 強化と業界内競争による切磋琢磨の両立が重要

一方、逆説的であるが、フォトレジスト業界においては、激しい競争環境の中で各社が技術力を磨き込み、切磋琢磨が促されてきたことにより、結果として日系メーカーが勝ち続けてきたことも事実と言えよう。業界再編によってフォトレジストメーカー間の競争が鎮静化し、顧客対応や既存製品の改善に傾斜した結果、革新的技術の開発で出遅れるイノベーションのジレンマに陥れば、その隙を非日系メーカーに突かれる可能性も否定できない。規模拡大による売手交渉力・R&D 強化と業界内競争による切磋琢磨の両立が、フォトレジストをはじめとする日系メーカーが技術優位性を維持するために重要だと考えられる。

④サプライチェーン多元化：経済合理性の観点から、特定国・地域に依存している原材料の調達網を多元化

最後に、④サプライチェーン多元化について考察する。フォトレジストに限った話ではないが、ロシアによるウクライナ侵攻や米中摩擦などに代表される地政学リスク・経済安全保障に対する関心の高まりにより、サプライチェーン多元化の重要度合いが増している。原材料が特定国・地域に偏在しているケース[23]はやむを得ないにしても、経済合理性の観点から依存しているケース[24]においては、政策支援による改善の余地はある。原材料調達網の多元化による安定供給能力向上は、売手交渉力向上にも寄与するはずである。川下の半導体産業に対してだけではなく、川上の半導体素材産業に対しても、競争力維持・向上を企図した適時適切な政策支援が必要だろう。

各社の不断の R&D と適切な政策支援により、日本が強くあり続けることを期待

冒頭に述べたように、各国が自国半導体産業の育成に走る中、今後も日系フォトレジストメーカーが技術力や競争力を維持・向上していくためには、最先端品の開発等において政策支援が必要不可欠になる局面が生じても不思議ではない。各社の不断の R&D の継続と適切な政策支援により、日系フォトレジストメーカーが今後も強くあり続けることを願ってやまない。

みずほ銀行産業調査部
素材チーム　村重　新
arata.murashige@mizuho-bk.co.jp

[23] 例えば、一部の配線層に採用されているコバルトは、世界産出量の 50%をコンゴ民主共和国に依存している。
[24] 例えば、フッ素系材料の原材料となる蛍石は、メキシコや南アフリカの埋蔵量が比較的大きいものの、品質やコストの観点から中国に依存している。

【参考文献】

1. 新聞雑誌
   - ○ 化学工業日報社「金属レジスト 事業化へ前進」(2022 年 8 月 25 日・8 月 26 日)
   - ○ 株式会社産業タイムズ社「EUV リソグラフィー、マスクのインフラ整備着々」(https://www.sangyo-times.jp/scn/headindex.aspx?ID=2051)(2019 年 9 月 5 日)
   - ○ 株式会社産業タイムズ社「米国が考える対中半導体規制の次の一手」(https://www.sangyo-times.jp/article.aspx?ID=7809)(2022 年 8 月 12 日)
   - ○ 株式会社日本経済新聞社「中国への半導体輸出規制、米国が拡大 先端技術を広範に」(https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGN07DZ90X01C22A0000000/)(2022 年 10 月 8 日)

2. 学術論文
   - ○ Sang-Kon Kim, Line-Edge Roughness from Extreme Ultraviolet Lithography to Fin-Field-Effect-Transistor: Computational Study, 2021 (https://www.mdpi.com/2072-666X/12/12/1493)

3. 書籍
   - ○ 「2023 先端/注目半導体関連市場の現状と将来展望」(2023) 株式会社富士キメラ総研
   - ○ 「中国半導体メーカーの最新動向調査 2021」(2021) 株式会社富士キメラ総研

4. ホームページ(国内)
   - ○ 経済産業省「半導体の安定供給の確保に係る取組の認定について」(https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/semicon/index.html)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 株式会社産業革新投資機構「JSR 株式会社に対する公開買付けの開始予定に関するお知らせ」(https://www.j-ic.co.jp/jp/news/pdf/20230626_JIC_PressRelease.pdf)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ JSR 株式会社「JICC-02 株式会社による当社株式等に対する公開買付けの開始予定に係る賛同の意見表明及び応募推奨に関するお知らせ」(https://ssl4.eir-parts.net/doc/4185/tdnet/2303298/00.pdf)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ JSR 株式会社「Inpria Corporation 全株式取得に関するお知らせ」(https://ssl4.eir-parts.net/doc/4185/ir_material_for_fiscal_ym1/106507/00.pdf)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 株式会社 SCREEN セミコンダクターソリューションズ「初心者のための半導体入門」(https://www.screen.co.jp/spe/technical/guide/exposure)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ SEMI-NET「半導体用語集」(https://semi-net.com/word)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 東京エレクトロン株式会社「パターニング技術による微細化への取り組み」(https://www.tel.co.jp/rd/highlights/20171208_001.html)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 東京応化工業株式会社 HP(https://www.tok-pr.com/)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 日経クロステック「まだ続く半導体微細化、最終到達点は「究極のトランジスタ」CFET」(https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/07897/)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 日清紡マイクロデバイス株式会社「第 2 回 半導体の微細化と半導体プロセス」(https://blog.nisshinbo-microdevices.co.jp/ja/process_2)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 一般社団法人日本半導体製造装置協会「2019 年度報告 ウェーハプロセス専門委員会」(https://www.seaj.or.jp/activity/tech/file/2019wafer.pdf)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ 公益社団法人発明協会「フォトレジスト」(http://koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00061&age=stable-growth&page=keii)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ Bloomberg「中国最大の半導体メーカー、7nm製造技術確立かー米制裁対象」(https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2022-07-22/RFE9OQDWLU6801)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ レーザーテック株式会社「EUV マスク関連検査装置について」(https://www.lasertec.co.jp/ir/individuals/euv.html)(2023 年 9 月 22 日)

5. ホームページ(海外)
   - ○ ASML「Investor Day 2022」(https://www.asml.com/en/investors/investor-days/2022)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ Entegris「Entegris to Acquire CMC Materials to Create a Leader in Electronic Materials」(https://investor.entegris.com/news-releases/news-release-details/entegris-acquire-cmc-materials-create-leader-electronic)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ Lam Research「2020 Investor Day」(https://investor.lamresearch.com/events?item=37)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ Merck「Merck Completes Acquisition of Versum Materials」(https://www.merckgroup.com/press-releases/2019/oct/en/Versum-Closing-Press-Release-EN.pdf)(2023 年 9 月 22 日)
   - ○ SPIE「Novel metal-oxide photoresist materials for extreme UV lithography」(https://spie.org/news/6534-novel-metal-oxide-photoresist-materials-for-extreme-uv-lithography?SSO=1)(2023 年 9 月 22 日)

アンケートに
ご協力お願いします

Mizuho Short Industry Focus／215　2023　No.16　　2023 年 10 月 10 日発行

© 2023　株式会社みずほ銀行

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引の勧誘を目的としたものではありません。本資料は、弊行が信頼に足り且つ正確であると判断した情報に基づき作成されておりますが、弊行はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際しては、貴社ご自身の判断にてなされますよう、また必要な場合は、弁護士、会計士、税理士等にご相談のうえお取扱い下さいますようお願い申し上げます。
本資料の一部または全部を、①複写、写真複写、あるいはその他如何なる手段において複製すること、②弊行の書面による許可なくして再配布することを禁じます。

編集／発行　みずほ銀行産業調査部　　東京都千代田区丸の内 1-3-3　ird.info@mizuho-bk.co.jp