SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-1

# 洗浄
# — 原子の世界の「汚れ」と戦う、いちばん多い工程

第3部「工程別」の最初は、洗浄です。地味に見えますが、半導体の工場で**最も多く繰り返される工程**です。先端工程では、**3 nm級**の粒子まで管理が求められる例があります。その汚れを、電気の反発で浮かせ、薬液で溶かし、そして最後に、水の表面張力で細い柱を倒さないように乾かす。その化学と物理、装置と薬液と水を作る会社、そして日本が世界の約6割を握る「高純度の洗浄液」まで見ていきます。最初に、第3部全体の地図として、装置と素材の地域別シェアと、あなたの専門がどの工程で生きるかを整理します。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-1／難易度 ★★☆（概論1-4、2-2を読んでいると理解しやすくなります）／最終更新 2026年11月6日

## この記事の構成


1. この回を3行でつかむ
2. 第3部の入口 — 工程別の地図
3. 技術編① — なぜ洗浄が「最も多い工程」なのか
4. 技術編② — 化学で落とす
5. 技術編③ — 物理の力で落とす
6. 技術編④ — まとめて洗うか、1枚ずつ洗うか
7. 技術編⑤ — 最後の難関は「乾かす」
8. 技術編⑥ — 水と薬液の純度
9. 産業編① — 洗浄装置で勝っているのは誰か
10. 産業編② — 薬液と水を支える日本企業
11. これから求められること
12. まとめと次回予告
13. 確認クイズ
14. 用語集
15. 参考資料（一次情報）
16. 主張と出典の対応表（監査）


## 本記事の表記ルール

事実 ＝公的機関・学術資料・企業の公式発表に記載のある内容（出典番号つき）
本稿の計算 ＝明示した前提から本記事が計算した値
推測 ＝出典から読み取れる範囲を超えた、本記事の見立て
未確定／将来 ＝計画・ロードマップであり、実績が確認できていない事項
物理の一般原理（教科書で確立している内容）の説明は、とくにタグを付けずに書いています。

**この回の学習目標**

- 半導体の装置と素材を、「作る側（メーカーの国）」と「買う側（工場がある地域）」の両方から説明できる
- 洗浄で落とす4種類の汚れと、SC-1・SC-2・希フッ酸などの薬液がそれぞれ何をしているのかを説明できる
- 乾燥でパターンが倒れるしくみを表面張力で説明し、洗浄の装置・薬液・水の分野でどの会社が強いのかを挙げられる

## 1. この回を3行でつかむ

- 洗浄は、半導体の製造で**最も多く繰り返される工程**です。落とす相手は、**粒子・金属・有機物・自然酸化膜**の4種類。先端工程では**3 nm級**の粒子まで管理が求められる例があります。
- 汚れは、**薬液で溶かし**、**電気の反発で浮かせ**、**音波で揺すって**落とします。最大の難関は**乾燥**で、水の表面張力が、細く高い構造を**数十気圧に相当する圧力差で引き倒そう**とします。
- 洗浄装置では日本のSCREENが、自ら世界シェアNo.1を掲げ、**高純度の洗浄液では日本企業が世界の約6割**を占めます（経済産業省の資料）。いま求められているのは、**削らずに落とす**、**倒さずに乾かす**、そして**水と薬液を減らす**技術です。

## 2. 第3部の入口 — 工程別の地図

### いつもの断面図に戻る

概論1-4で見たように、前工程は「成膜 → リソグラフィ → エッチング → 洗浄 …」を、層の数だけ何十回も繰り返します。経済産業省は、半導体の製造には**合計1,000以上の工程**が必要だとしています [4] 事実 。第3部では、この繰り返しの一つひとつを、1回ずつ取り上げます。

各回は、次の2部構成で進めます。

- **技術編**：その工程は何をするのか、なぜそれで作れるのか（高校の物理・化学から）、何が難しいのか
- **産業編**：どんな装置と素材が使われ、どの会社が強く、その強さはどこから来るのか。そして、これから何が求められるのか

第3部に入る前に、装置と素材の産業を、地域と専門の2つの軸で整理しておきます。

### 作る側と、買う側 — 地域別シェア

「地域別のシェア」には、2つの見方があります。**作る側**（装置や素材のメーカーが、どの国の会社か）と、**買う側**（それを使う工場が、どの地域にあるか）です。統計は対象年・製品範囲・地域区分が異なります。丸めにより、下表の材料は合計99%、洗浄液は101%になります。

**作る側（メーカーの本社の国）**

| 分野 | 日本 | 米国 | 欧州など | 中国 | その他 | 出典 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 半導体製造装置（2021年度） | 31% | 35% | 22% | 9% | 韓国2%、台湾1% | 経済産業省2023年 [4] |
| 半導体製造装置（2023年） | 28% | 36% | 27% | 5% | 4% | 経済産業省2025年 [3] |
| 主要な部素材（2021年度） | 48% | 9% | 10% | 3% | 台湾16%、韓国13% | 経済産業省2023年 [4] |
| 高純度の洗浄液（2023年） | **59%** | — | 7% | 5% | 30% | 経済産業省2025年 [3] |

（2つの資料は、もとにしている調査会社と年が違うため、数字は単純に比べられません。経済産業省2025年の資料の値は、同資料のグラフから読み取ったもので、「—」はグラフに区分がないことを示します。） 事実

**買う側（工場がある地域）**

| 地域 | 製造装置の販売額 2025年 | 前年比 | 材料の売上 2025年 |
|---|---|---|---|
| 中国 | 493億ドル | 0% | 156億ドル |
| 台湾 | 315億ドル | +90% | 217億ドル |
| 韓国 | 258億ドル | +26% | 112億ドル |
| 北米 | 109億ドル | −20% | 62億ドル |
| 日本 | 95億ドル | +22% | 68億ドル |
| 欧州 | 29億ドル | −41% | 42億ドル |
| その他 | 52億ドル | +25% | 75億ドル |
| 合計 | **1,351億ドル** | +15% | **732億ドル** |

（製造装置はSEAJ・SEMIの共同集計 [1]、材料はSEMIの発表 [2] による。材料の地域別の前年比は省略） 事実

2025年の製造装置の販売額は世界で1,351億ドル（前年比15%増）で、中国が6年連続で最大の市場でした。台湾は先端ロジックへの投資で90%増え、3年ぶりに韓国を抜いて2位になりました [1] 事実 。材料では、台湾が16年連続で最大の消費地です [2] 事実 。

2つの表を並べると、構図がはっきりします。**日本は、装置で約3割、素材で約半分を作る「作る側」の大国**です。一方、**それを買う工場の多くは、中国・台湾・韓国**にあります。日本で使われる装置は、世界の販売額の約7%にすぎません 本稿の計算 （95 ÷ 1,351 ≒ 0.070）。日本の装置と素材の会社は、海外の工場を主な顧客にしているのです 解説 。

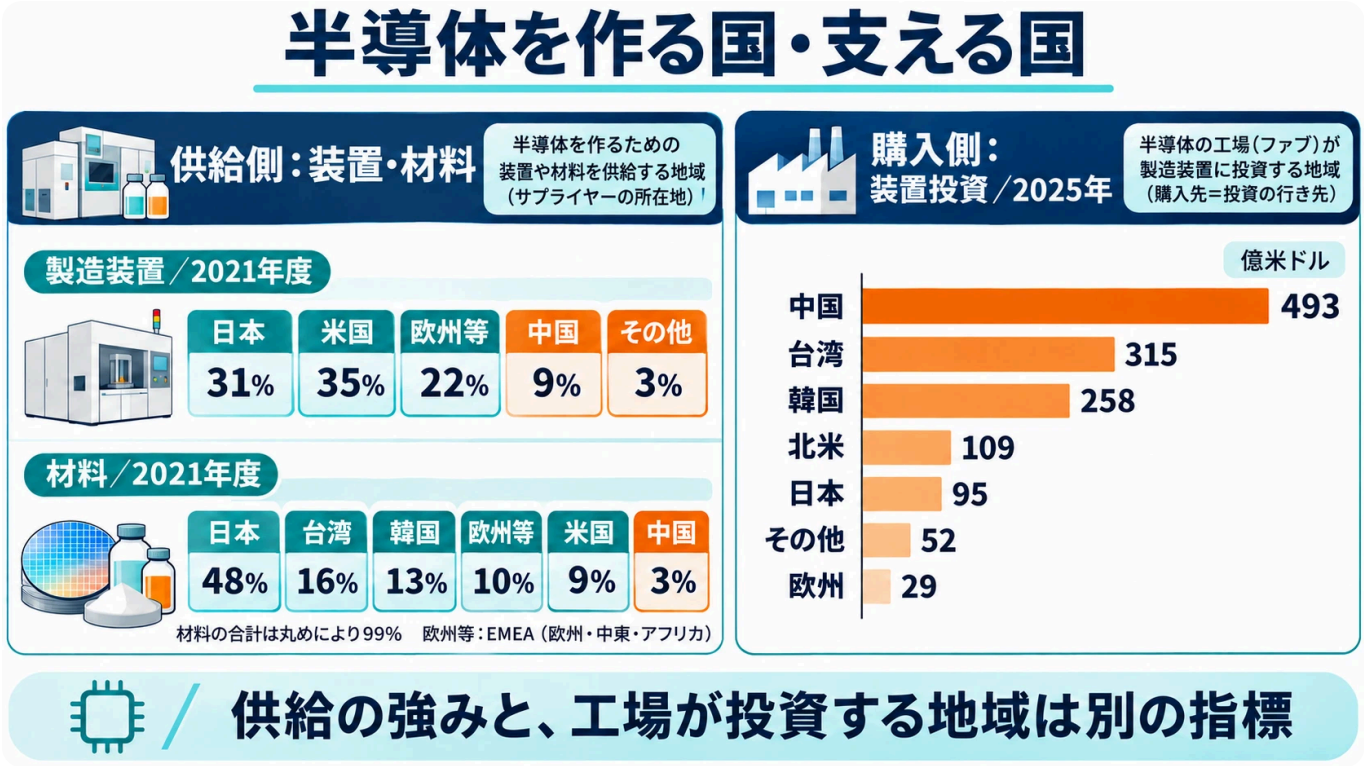


**図1　作る側と買う側を分けて読む**（概念図）

### 図の読み方

供給側の統計は2021年度、購入側は2025年で、年と指標が異なります。供給側の「欧州等」は、EMEA（欧州・中東・アフリカ）を含む区分です。端数処理で合計が100%にならない場合があります。

## あなたの専門は、どこで効くか

半導体の前工程は、電気や物理の専門家だけのものではありません。装置と素材の中身は、ほとんどの材料の分野とつながっています。代表的な例を、各社の公式の説明から挙げます。

| 専門 | 半導体での出番（例） | 会社の説明（例） |
|---|---|---|
| 高分子・有機 | フォトレジスト（露光で模様を写す感光材） | 東京応化工業は「感光性材料（フォトレジスト）のトップメーカー」としています [5] |
| 高分子 | CMPの研磨パッド | 富士紡のパッドは、CMPやシリコンウェハの研磨に使われます [7] |
| 化学（配合・界面） | CMPスラリー、洗浄剤 | JSRの洗浄剤は「残留粒子や金属不純物を効果的に除去」するとしています [6] |
| セラミックス | 静電チャック（ウェハを電気の力で吸着する台）、プラズマに強い部品 | 日本ガイシは静電チャックに窒化アルミニウムやアルミナを使い [8]、京セラはイットリアを「耐プラズマ性に優れた材料」としています [9] |

| 専門 | 半導体での出番（例） | 会社の説明（例） |
|---|---|---|
| 金属 | スパッタリングターゲット（配線などの膜の原料） | JX金属は、銅配線の下地（シード層）用などのターゲットを作っています [10] |
| 無機化学 | 高純度の薬液（洗浄・エッチング） | ステラケミファの超高純度フッ酸は、ウェハのウェットエッチングとウェット洗浄に使われます [11] |
| 有機金属・合成化学 | 成膜の原料（ALD・CVD材料） | ADEKAは、新しいALD/CVD材料の開発に業界に先駆けて着手したとしています [12] |
| ガラス・石英 | フォトマスクの基板、炉の部品 | 信越化学のマスクブランクスは合成石英の基板を使い [13]、東ソーの石英ガラスは半導体製造用の炉芯管などに使われます [14] |
| 分析・計測・光学 | 欠陥の検査装置 | レーザーテックは、EUVマスクの欠陥検査装置を作っています [15] |

（表の例は各社の公式ページの記述による 事実 。どの分野にどの会社が強いかは、各回の産業編で詳しく扱います。）




**図2　専門・材料・工程のつながり**（概念図）

### 図の読み方

専門から工程につながる一例です。実際の開発では複数の専門が協力し、洗浄は工程の合間に繰り返し登場します。

## 3. 技術編① — なぜ洗浄が「最も多い工程」なのか

### 洗浄は、すべての工程の合間にある

ベルギーの研究機関imecの研究者たちは、1999年の論文の冒頭で「**洗浄は、集積回路の製造で最も頻繁に繰り返される工程である**」と書いています [16] 事実 。米国Lam Researchの特許も、洗浄は最も頻繁に繰り返される工程で、**工程のおよそ20%が洗浄**という例を挙げています [17] 事実 。これは特許に記された説明で、2026年の全工場に共通する比率を示すものではありません。

なぜ、それほど多いのでしょうか。成膜すれば膜の上に粒子が乗り、エッチングすれば反応の残りかすが残り、レジストをはがせば有機物が残ります。**次の工程に、前の工程の汚れを持ち込まない**ために、ほぼすべての工程の前後で洗うのです 解説 。

### 落とす相手は4種類

SCREENは、洗浄で取り除く汚れとして、**超微細な粒子（パーティクル）**、製造工程で生じる微量の**有機物**や**金属**の汚染、油脂、そして大気に触れることでできる**自然酸化膜**を挙げています。ウェハに少しでも汚れがあると、回路に欠陥が生じてしまうためです [18] 事実 。

| 汚れ | どこから来るか（例） | 何が困るか |
|---|---|---|
| 粒子 | 装置の部品、空気、薬液、前の工程の残りかす | 配線をショートさせる・切る、膜に穴をあける |
| 金属 | 装置の部品、薬液、人 | 漏れ電流、ゲート酸化膜の劣化 |
| 有機物 | レジストの残り、空気中の有機ガス、容器 | 膜がはがれる、薬液がはじかれて洗えない |
| 自然酸化膜 | 空気中の酸素と水分 | 接点の抵抗が増える、次の膜がきちんと育たない |

（「何が困るか」は一般的な説明です 解説 ）




**図3　洗浄で取り除く4種類の汚れ**（概念図）

### 図の読み方

汚れの種類で、困る現象と落とし方が変わります。自然酸化膜は常に不要なのではなく、次に行う工程に応じて扱いを決めます。

金属の中でも、nanoHUBで公開されている大学の講義資料は、**銅・鉄・ニッケル・クロム・コバルト・モリブデンなどの重金属を最も重大**、ナトリウム・カリウム・リチウムなどのアルカリ金属や、カルシウムなどのアルカリ土類金属も問題にしています [19] 事実 。

## 3 nm級の粒子まで気にする理由

国際デバイス・システム・ロードマップ（IRDS）の2024年版は、デバイスを壊す粒子（キラー粒子）の大きさを、ロジックのハーフピッチの半分を基準に定め、最も重大な電気的に活性な粒子では**3.0 nm**としています。半導体の製造で問題になる粒子の大きさは、すでに**5 nmを下回った**とも書いています [20] 事実 。

この数値はロードマップ上の条件に対応する目安です。すべての製品が3 nmの粒子で必ず壊れるわけではなく、粒子の材質・電気的な活性・付く位置によって影響が変わります 解説 。

3 nmは、シリコンの原子がおよそ10個並んだほどの長さです 本稿の計算 （シリコンの原子の間隔を約0.24 nmとした概算）。この大きさの「ごみ」は、もはや普通の意味での粒子というより、**液体の中の大きな分子と区別がつかない**世界です。IRDSも、液体の中では粒子と、粒子の前身、分子の領域が重なり始めたと述べています [20] 事実 。

## 4. 技術編② — 化学で落とす

### RCA洗浄：半世紀以上前の液が、いまも基本

2-2で見たように、ウェハ洗浄の基本は、米国RCA社のヴェルナー・カーンらが開発した**RCA洗浄**です。カーンの回想によると、研究は1961年に始まり、論文は1970年に発表されました [21] 事実 。前述のimecの論文は「1965年に開発されたRCA洗浄が、いまも前工程のウェット洗浄のほとんどの基礎になっている」と書いています [16] 事実 （開発の年は資料によって書き方が違います）。

RCA洗浄の中心は、2種類の液です。

| 液 | 中身 | 何を落とすか | しくみ |
|---|---|---|---|
| SC-1 | アンモニア水＋過酸化水素水＋水（アルカリ性） | 粒子、有機物 | 表面をわずかに削って粒子を浮かせ、電気の反発で再付着を減らす [19] |
| SC-2 | 塩酸＋過酸化水素水＋水（酸性） | 金属 | 溶けた金属イオンを錯体にして、ウェハに戻らないようにする。通常の条件ではシリコン・酸化膜へのエッチング作用が小さい [19] |

事実

#### 物理のツボ①：粒子を「浮かせて、戻りにくくする」 — SC-1と電気の反発

SC-1が粒子を落とすしくみは、2段構えです [19] 事実 。

1. **下を溶かして浮かせる**：過酸化水素がシリコンの表面を酸化してごく薄い酸化膜を作り、アンモニアがそれを少しずつ溶かします。酸化と微量の溶解が並行して起こり、表面が**ごくわずかずつ削られ**ます。反応の釣り合いは、濃度・温度・表面の状態で変わります。粒子の足元が溶けるので、粒子は表面から浮き上がります。
2. **電気で押し返す**：アルカリ性の液の中では、**$SiO_2$粒子などと酸化膜表面が、どちらもマイナスに帯電する**例があります。同じ符号の電荷は反発するため、粒子の再付着を減らせます。液の流れで粒子を外へ運び去ることも必要です。電気的な挙動の目安になる**ゼータ電位**は、液中の「すべり面」での電位です。表面電荷そのものと同じではなく、粒子の材質や薬液の条件で値や符号が変わります。

imecの1999年の論文で紹介された条件では、シリコンと酸化シリコンの表面の電気がプラスとマイナスの境目になるのは、pHが**2〜2.5**のときです。それよりpHが高い液の中ではウェハの表面はマイナスに帯電し、同じく負に帯電した粒子との間に**電気的な反発の壁**ができます [16] 事実 。

静電気で、下敷きにくっついた髪の毛を想像してください。図の例は、髪の毛と下敷きの両方が同じ符号の電気を帯び、互いを押し返すようなイメージです 解説 。サムスン電子と漢陽大学などの研究者も、ウェット洗浄の2つの主な要因は「表面のエッチング」と「粒子と基板の間に働く力」だとしています [22] 事実 。

- **そのほかの薬液**
  - **希フッ酸（DHF）**：フッ酸を水で50〜100倍に薄めた液で、厚さ**1.0〜1.5 nmの自然酸化膜**を取り除きます。処理後のシリコンの表面は水素で覆われ、**水になじむ（親水性）表面から、水をはじく（疎水性）表面**に変わります [19] 事実 。
  - **SPM（硫酸過水、ピラニア）**：濃硫酸と過酸化水素水を2:1〜4:1で混ぜ、**100〜130 ℃**で使います。有機物を酸化して分解するので、レジストの残りなどを落とします [19] 事実 。
  - **オゾン水**：オゾンを溶かした純水です。オゾンが分解するときにできる**OHラジカル**が、有機物を分解するうえで重要な役割を果たすと考えられています。ただし、オゾンは室温で水に**約20 ppm**しか溶けません [16] 事実 。硫酸を使わずに済むので、その後の洗い流しが楽になるという利点もあります [16] 事実 。

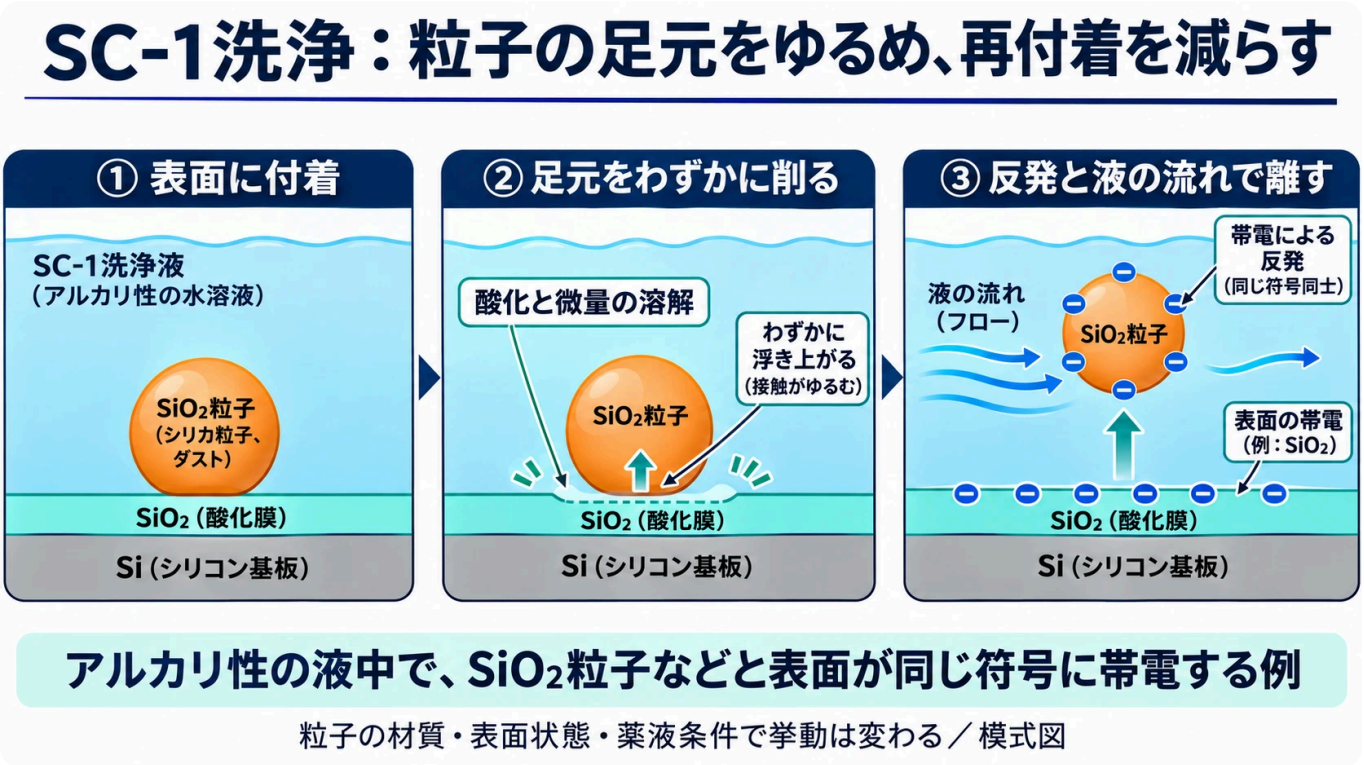


図4　SC-1が粒子を落とすしくみ（概念図）

### 図の読み方

足元をゆるめる反応、同符号の電荷による反発、液の流れによる搬出を分けて見てください。図はSiO₂粒子などの例で、すべての粒子が同じ挙動をするわけではありません。

### 薬液の組成は「条件例」として読む

混合比や温度は、引用資料に記された説明用の条件例です。実際の処理では、材料・膜厚・汚れ・装置に合わせて組成や時間を調整します。

## 5. 技術編③ — 物理の力で落とす

薬液だけでは落ちにくい粒子には、**物理的な力**も使います。

- **メガソニック**：周波数が**約1 MHz**の音波を、洗浄液に伝えます。音波は、表面近くの液の流れのよどみ（境界層）を薄くし、液の流れ（音響流）と小さな泡の発生と崩壊（キャビテーション）を起こして、粒子を引きはがします [19] 事実 。ただし、洗浄力を上げると、細い構造を壊してしまうという**ジレンマ**があります [19] 事実 。
- **ブラシ洗浄（スクラブ）**：回転するブラシと純水で、ウェハの表面や裏面をこすります。SCREENは、成膜後に付いた微細な粒子を、ブラシや純水などの物理洗浄で除去すると説明しています [18] 事実 。

ところが、構造が細かくなると、物理の力は使いにくくなります。2013年の研究報告では、メガソニックやスプレーなどの物理洗浄について、**30 nmより小さな構造の損傷が課題になった例**が示され、薬液による除去の重要性が述べられています [22] 事実 。

この2013年の報告の寸法を、現在のすべての洗浄装置の限界と読むことはできません。必要な除去力と構造が耐えられる力の間で、条件を調整する問題です 解説 。

## 6. 技術編④ — まとめて洗うか、1枚ずつ洗うか

洗浄装置には、大きく2つの方式があります。

- **バッチ式**：ウェハを何十枚もまとめて、薬液の槽に浸けて洗います。ACM Researchの特許によると、条件例として1時間に約400枚を洗え、薬液を循環して使い回せるので効率が高く、**90 ℃を超える高温のSPM**も使えます。ただし、ウェハを縦に並べて槽に入れるので、ウェハどうしの汚れの移し合い（**クロスコンタミネーション**）が起きやすいのが弱点です [24] 事実 。
- **枚葉式**：ウェハを1枚ずつ回転させながら、薬液をかけて洗います。Applied Materialsの特許は、浸して洗う方式は本質的にウェハどうしの汚れの移し合いと薬液の槽自体の汚れを招き、そのため**枚葉式が代替手段として使われるようになった**と説明しています [23] 事実 。

枚葉式では、1枚ごとに薬液・温度・流れを制御しやすくなります。装置全体では複数の処理室（チャンバー）を並列運転できるため、「1枚ずつだから必ず遅い」とは限りません。処理能力や薬液使用量は、処理時間、チャンバー数、薬液を再利用する設計などで変わります。バッチ式と枚葉式は、工程に応じて使い分けられています 解説 。

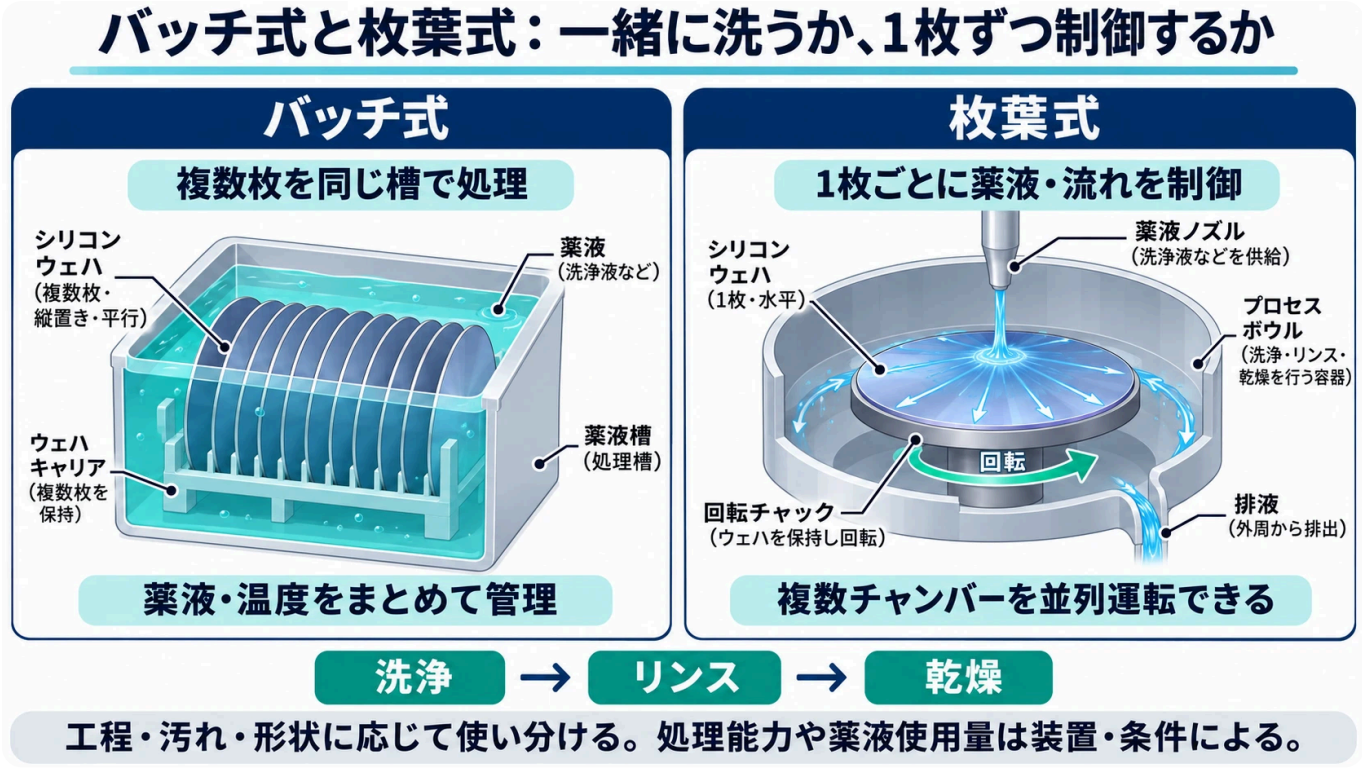


**図5　バッチ式と枚葉式の違い**（概念図）

### 図の読み方

バッチ式は同じ槽で複数枚を処理し、枚葉式は1枚ごとの条件を制御します。枚葉式でも複数室の並列運転があり、速さや薬液使用量は装置と条件で変わります。

## 7. 技術編⑤ — 最後の難関は「乾かす」

洗った後は、純水で洗い流し、乾かします。この最後の一歩が、いまの洗浄で最も難しい部分の一つです。

### ウォーターマーク

水滴がそのまま蒸発すると、溶けていたシリコンの化合物などが**しみ（ウォーターマーク）**となって残り、集積回路の欠陥の大きな原因になります [28] 事実 。

これを防ぐのが、**マランゴニ乾燥**です。ウェハを純水から引き上げるとき、水面にイソプロピルアルコール（IPA）の蒸気を当てると、IPAは**水の表面近くに特に多く溶け込みます** [28] 事実 。IPAが溶けた部分は表面張力が小さくなるので、表面張力の差によって、ウェハの表面の水が本体の水のほうへ引き戻されます。imecの論文は、この**マランゴニ効果**で、水を蒸発させることも、IPAを結露させることもなく、ウェハを完全に乾かせると説明しています [16] 事実 。ワインの表面にできる「ワインの涙」も、同じ表面張力の差による現象です 解説 。

### パターン倒壊：水が柱を引き倒す

もっと深刻なのが、**パターン倒壊**です。細く高い構造（パターン）の間に残った液が乾くとき、液の表面張力が、両側の構造を引き寄せて倒してしまうのです。

### 物理のツボ②：すき間の水は、数十気圧で引っぱる

細いストローを水に差すと、水がストローの中を上がってきます（毛細管現象）。水の表面張力が、狭いすき間ほど強く働くためです。

東京エレクトロンの研究者は、パターン倒壊の主な原因は、構造の間の液が生む力（**ラプラス力**）だとして、次の簡単なモデルを示しています [25] 事実 。

$$\text{圧力の差 } \Delta P = 2\gamma \cos\theta \,／\, S$$

$$\text{構造にかかる力 } F = \Delta P \times H \times D$$

$\gamma$ は液の表面張力、$\theta$ は液と構造の接触角、Sは構造のすき間の幅、Hは構造の高さ、Dは奥行きです。

数字を入れてみます。すき間の幅Sを**20 nm**、液を水（表面張力 73 mN/m [25]）、接触角 $\theta$ を0°（水がよくぬれる場合）とすると、

$$\Delta P = 2 \times 0.073 \div (20 \times 10^{-9})$$

$$\fallingdotseq 7.3 \times 10^{6}\ \text{Pa}$$

で、約**7.3 MPa（約72気圧）**です 本稿の計算 。これは狭いすき間の液面に生じる**局所的な圧力差**で、ウェハ全体を72気圧で押す意味ではありません。構造の左右で液の残り方が異なると、力がつり合わず、柱を横に曲げる向きに働きます。倒れるかどうかは、柱の幅・高さ・材質の硬さにも左右されます。しかも、力は**すき間が狭いほど大きく**、**構造が高いほど大きく**なります。

対策は、式の中の $\gamma$ と $\theta$ を変えることです。

- **表面張力 $\gamma$ の小さい液に置き換える**：IPAの表面張力は**22 mN/m**で、水の約3分の1です [25] 事実 。同じ条件なら、圧力の差も約3分の1（約2.2 MPa）になります 本稿の計算 。
- **接触角 $\theta$ を90°に近づける**：cos 90° = 0 なので、この単純モデルでは接触角が90°に近いほど毛細管圧の項が小さくなります。すべての力が消える、必ず倒壊しないという意味ではありません。表面を化学的に処理して水をはじくようにする方法では、IPAで乾かす場合に比べ、倒れずに済む構造の高さと幅の比（アスペクト比）の限界が**1.7倍**高くなるとの結果が示されています [25] 事実 。

別のアプローチとして、**乾燥の最後に気液界面を作らない**技術も開発されています。

- **昇華乾燥**：SCREENの特許は、昇華性の材料を含む乾燥用の液を供給して固化し、**固体から直接気体に変える（昇華）**方法を示しています。最後の除去段階で気液界面を避け、倒壊を抑える考え方です [26] 事実 。
- **超臨界乾燥**：東京エレクトロンは2020年、表面張力の小さいアルコールを使っても、微細化と多層化でパターン倒壊が大きな問題になったとして、**超臨界流体**（液体と気体の区別がない状態の物質）を使う、倒壊のない乾燥方法を搭載した装置を発表しました [27] 事実 。液体と気体の境界を作らない適切な温度・圧力の経路で乾燥させると、毛細管力の原因となる気液界面を避けられます 解説 。

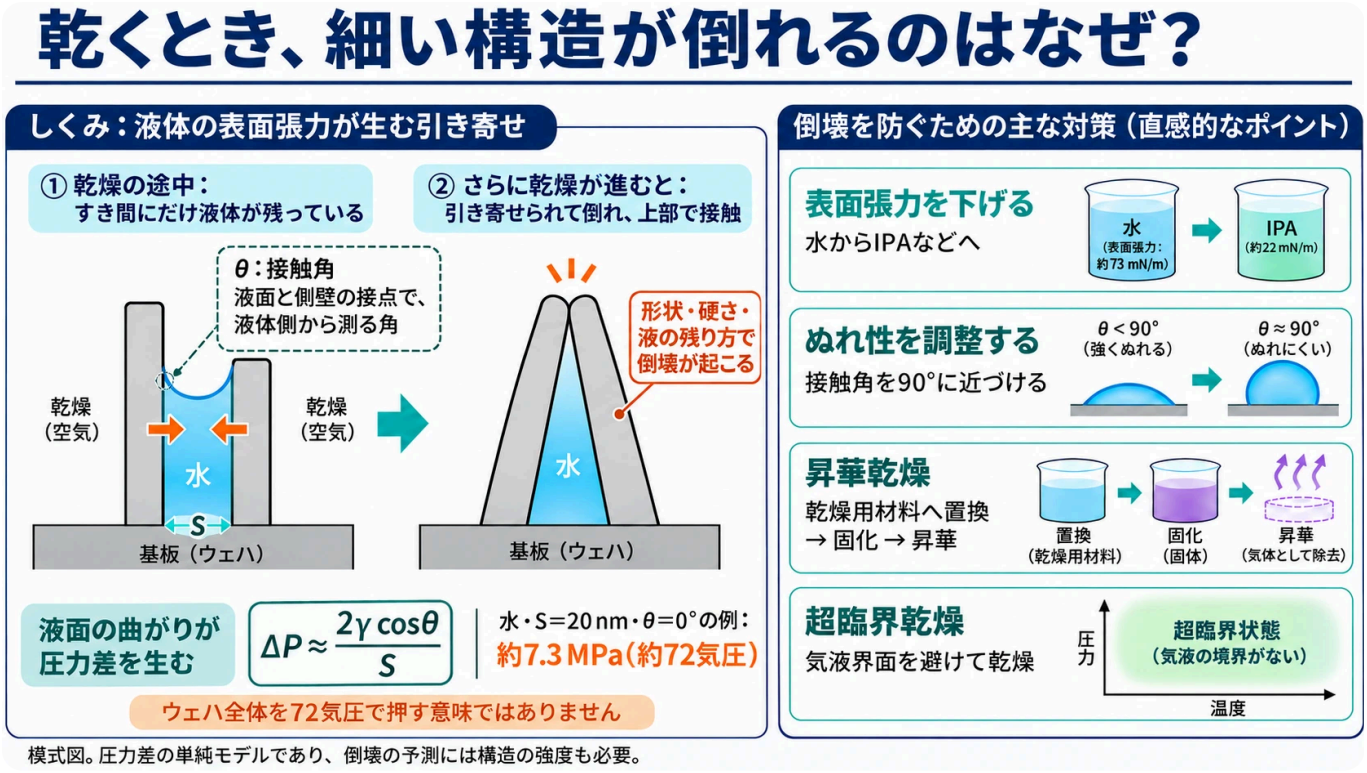


図6　パターン倒壊と、気液界面を避ける工夫（概念図）

### 図の読み方

左は1つのすき間だけに液が残った模式図です。72気圧は指定条件での局所的な圧力差で、倒壊するかどうかは構造の強度にも左右されます。右は毛細管圧を減らす、または乾燥時の気液界面を避ける方法です。

## 8. 技術編⑥ — 水と薬液の純度

### ● 超純水：測れる限界まできれいな水

洗浄の最後には、必ず大量の水で洗い流します。この水が汚れていては、すべてが台無しです。そのため、工場では**超純水**を作って使います。

ITRSの2013年版は、超純水を「品質の項目のほとんどが、最先端の計測の検出限界以下か、その近くまで精製された水」と定義し、重要な金属の濃度を**1 ppt**（1兆分の1）、それ以外の金属を10 pptとする定義を見直していると書いています [29] 事実 。IRDSの2024年版は、500 ppt未満の有機物が、ナノサイズの有機の粒子として、最も細かいフィルターさえすり抜けている可能性を指摘しています [20] 事実 。

栗田工業の資料によると、超純水は、凝集沈殿・ろ過・逆浸透（RO）膜・脱気・紫外線による酸化・イオン交換・限外ろ過（UF）膜など、何段もの処理を経て作られ、「理論上の純水に極めて近い」水になります [30] 事実 。

- **薬液：12Nのフッ酸**

薬液も同じです。ステラケミファは、半導体用の高純度フッ酸について、純度**9N（不純物1 ppb以下）**から、**12N（99.9999999999%、不純物1 ppt以下）**までのグレードを示しています [31] 事実 。ここでのN値は、製品で指定された不純物の管理水準を読むための表示です。フッ酸水溶液中のHF濃度とは別で、残りがすべてHFという意味ではありません。固体シリコンの11Nとは、測定する不純物の範囲も含めて確認する必要があり、Nの桁だけで単純比較はできません 解説 。

1 pptは、1兆分の1です。重さで言えば、**100万トンの水に、1グラムの不純物**が混じった濃さです 本稿の計算 （$1\ \mathrm{g} \div 10^{12}\ \mathrm{g} = 10^{-12}$）。

## 9. 産業編① — 洗浄装置で勝っているのは誰か

- **主なメーカー**

| 会社 | 国 | 主な洗浄装置 | 各社の公表している位置づけ |
|---|---|---|---|
| **SCREENホールディングス** | 日本 | 枚葉式（SUシリーズ）、バッチ式（FC-3100）、スクラバー | 枚葉洗浄・バッチ洗浄・スピンスクラバーで「世界シェアNo.1」（2025年、同社調べ） [32] |
| **東京エレクトロン** | 日本 | 枚葉式（CELLESTA）、バッチ式（EXPEDIUS） | 洗浄で世界3位（同社推定） [34] |
| **Lam Research** | 米国 | 枚葉式（EOS、DV-Primeなど）、縁のプラズマ洗浄（Coronus） | 洗浄の売上やシェアは公表していない [36] |
| **SEMES** | 韓国 | 枚葉式（BLUEICE PRIMEなど） | 韓国最大の装置メーカー（全製品で年3兆ウォン規模） [37] |
| **ACM Research** | 米国（主な事業は中国） | 枚葉式、バッチ式 | 洗浄装置の売上は6.26億ドル（2025年） [38] |

事実

### SCREEN — 枚葉式洗浄の先駆け

SCREENは、枚葉洗浄装置・バッチ洗浄装置・スピンスクラバーの3つで「**世界シェアNo.1**」を掲げています（2025年の同社調べ。割合は公表していません） [32] 事実 。2026年3月期の半導体製造装置事業の売上は**4,859億円**でした [35] 事実 。

同社は、**1983年に枚葉式洗浄装置を開発**して以来、ウェハ上の「気体と液体の境目」の処理を追求してきたとしています。最新の枚葉式装置SU-3400は、6段×4列の塔の形に**最大24の洗浄室（チャンバー）**を積み、**1時間に1,200枚**を処理できます。同社は、これを枚葉式で世界最高水準の処理能力とし、バッチ式に迫る生産性だとしています [33] 事実 。バッチ式のFC-3100には、高濃度のIPAを供給する減圧乾燥のしくみを載せ、ウォーターマークを抑え、パターン倒壊を防ぐとしています [39] 事実 。

6章で見たように、枚葉式の弱点は「1枚ずつで遅いこと」でした。洗浄室をビルのように積み上げ、ロボットで素早く運ぶことで、その弱点を埋めたことが、同社の強さの一つと考えられます 推測 。

### 東京エレクトロン — 4つの主要工程をそろえる総合力

東京エレクトロンは、自社の推定で、洗浄装置で世界**3位**としています。同社は拡散炉、塗布・現像などで1位としており、洗浄はその製品群の一つです [34] 事実 。2026年3月期の新しい装置の売上のうち、洗浄装置は**9%**でした [34] 事実 （新装置の売上1兆7,754億円の9%は約1,600億円 本稿の計算 ）。

同社の枚葉式装置CELLESTAは、最大20の洗浄室を載せ、床面積あたりの生産性で世界最高水準をうたっています。後継のCELLESTA-i MDは、独自のIPAの吐出技術で、ごく微細なパターンでも倒壊を抑えた乾燥ができるとしています [40] 事実 。同社は、成膜・塗布現像・エッチング・洗浄の4つの主要工程の装置をそろえています [34] 事実 。洗浄だけでなく、その前後の工程の装置も手がけていることは、工程をまたいだ改善を提案するうえで有利に働くと考えられます 推測 。

### 中国 — 自国の工場とともに育つ

**ACM Research**は米国に上場していますが、2025年の売上9.01億ドルのうち**8.98億ドル（約99.6%）が中国本土**向けです。洗浄装置の売上は**6.26億ドル**で、全売上の69.5%を占めます [38] 事実 。同社は、洗浄装置の世界市場を約73億ドルと見積もり、主な競合としてLam Research、NAURA、SCREEN、SEMES、東京エレクトロンなどを挙げています [38] 事実 。一方、2024年12月には、同社の上海と韓国の子会社が米国の輸出規制の対象リスト（エンティティリスト）に加えられました [38] 事実 。

2章で見たように、製造装置の最大の市場は中国です。中国の工場の拡大とともに、中国の装置メーカーが育っていく構図があります 推測 。

## 10. 産業編② — 薬液と水を支える日本企業

### 高純度の洗浄液：日本が約6割

経済産業省の2025年の資料では、**高純度の洗浄液の世界市場の約59%**を、日本に本社がある会社が占めています（2023年） [3] 事実 。

- **フッ酸**：ステラケミファは、北九州・大阪（三宝）・シンガポールに合計**年10.5万t**の高純度フッ酸の生産能力を持ち、2025年度の出荷量は7.38万tでした [31] 事実 。森田化学工業は1918年に国内で初めてフッ酸の生産に成功した会社で、中小企業庁の資料は、毒性が強く取り扱いに高い技術を要するため参入障壁が非常に高く、**日本の化学メーカー3社による寡占市場**になっていると説明しています [41] 事実 。
- **過酸化水素水**：三菱ガス化学は、**超純過酸化水素で世界シェア1位**としています。メタノールは「原料立地」、超純過酸化水素は顧客の近くで作る「**消費立地**」の戦略をとってきたとしています [42] 事実 。

フッ酸の重要さが表面化した出来事があります。2019年7月、経済産業省は、フッ化ポリイミド、レジスト、**フッ化水素**の3品目の韓国向けの輸出を、包括的な許可の対象から外し、個別の許可を求める運用に切り替えました [43] 事実 。この措置は2023年3月に見直され、3品目は再び包括的な許可の対象に戻りました [44] 事実 。洗浄やエッチングに使う薬液が、国と国の関係を左右するほどの戦略物資になっていることを示す例です 推測 。

### 超純水：工場の「血液」を作る会社

- **栗田工業**：2026年3月期の電子市場向けの売上は**1,718億円**でした [45] 事実 。
- **オルガノ**：2026年3月期の電子産業向けの売上は**1,080億円**で、国内初の電子産業向け超純水装置を納入した会社です。国内の最先端ロジック（2nm）工場向けの案件も手がけています [46] 事実 。

薬液も水も、純度を作るだけでなく、**測れること、汚さずに運べること、安定して届け続けられること**が求められます。日本の会社の強みは、純度そのものに加えて、分析・容器・物流を含めた「品質を保証し続ける仕組み」にあると考えられます 推測 。

## 11. これから求められること

前工程は成熟した技術に見えますが、洗浄の課題は、むしろ増えています。

- **削らずに落とす**：GAA（ゲート・オール・アラウンド）のトランジスタでは、むき出しになった複数の材料のうち、狙ったものだけを全方向から溶かす、**選択性の高い等方性のエッチング**が、極めて重要な課題とされています [47] 事実 。SC-1のように「少し削って浮かせる」方法は、削ってよい量がほとんどない構造では使いにくくなります 解説 。
- **倒さずに乾かす**：アスペクト比の高い構造ほど倒れやすく、昇華乾燥や超臨界乾燥のような新しい方法が必要になっています [26] [27] 事実 。
- **縁と裏面もきれいに**：IRDSの2024年版は、近い将来の課題として、**ウェハの縁・裏面・ベベル（面取り部）**の監視と汚染の管理を挙げています [20] 事実 。
- **貼り合わせの前の洗浄**：2-2で見た貼り合わせ（ハイブリッド接合）では、imecは「両方のウェハの表面が極めて平らで、きれいでなければならない」としています [48] 事実 。
- **測れない汚れ**：IRDSは、粒子の計測技術が、キラー粒子の大きさに追いついていないことを指摘しています [20] 事実 。
- **水と薬液を減らす**：IRDSは、超純水のリサイクル・再生・再利用が避けられないとしています [20] 事実 。SCREENは、パターン倒壊を防ぐために使用量が増えてしまうIPAを含む有機廃液を減らすため、IPAと水を分離する技術を開発中です [49] 事実 。

### 素材の技術者の出番

洗浄の課題の多くは、**材料の開発**で解かれようとしています 解説 。

- 表面張力の小さい液、表面を水をはじくように変える処理剤、固化してから昇華させる乾燥用材料（乾燥）
- 狙った材料だけを溶かす、選択性の高い薬液（GAA）
- 1 pptの純度を保つための容器・配管・フィルターの材料
- IPAと水を分ける膜（環境）
- プラズマや薬液にさらされても粒子を出さない、装置の部品の材料（セラミックス、コーティング）

「洗う」という一見単純な工程の裏で、化学・高分子・セラミックス・膜の技術者が活躍しています。

## 12. まとめと次回予告

| 視点 | ポイント |
| --- | --- |
| 地域 | 作る側では日本が装置で約3割、素材で約半分。買う側（工場）は中国・台湾・韓国で約8割 |
| 汚れ | 粒子・金属・有機物・自然酸化膜。先端工程で3 nm級まで問題にする例がある |
| 化学 | SC-1（浮かせて反発）、SC-2（金属を錯体に）、希フッ酸（自然酸化膜）、SPM・オゾン水（有機物） |
| 物理 | メガソニック、ブラシ。微細な構造では損傷との両立が課題 |
| 乾燥 | ウォーターマークとパターン倒壊。$\Delta P = 2\gamma\cos\theta / S$。IPA、表面処理、昇華、超臨界 |
| 純度 | 超純水は検出限界以下、フッ酸の指定不純物は12N級（1 ppt以下） |
| 産業 | 装置はSCREEN（No.1を公表）・東京エレクトロン・Lam・SEMES・ACM。洗浄液は日本が約6割 |
| これから | 削らずに落とす、倒さずに乾かす、縁と裏面、貼り合わせ前の洗浄、水と薬液の削減 |

次回は**3-2「酸化と熱処理」**です。洗ってきれいにしたシリコンの表面に、酸素を反応させて、トランジスタの土台となる酸化膜を作ります。1,000 ℃の炉の中で、酸素はどうやってシリコンの中に入り込んでいくのか。「熱」でウェハを作り変える工程を見ていきます。

## 13. 確認クイズ

1. 半導体の装置と素材の「地域別シェア」には、2つの見方があります。それぞれ何を見ていて、日本はどちらで強いですか。

   **▼ 答えを見る**

   「作る側（メーカーの本社の国）」と「買う側（工場がある地域）」です。日本は作る側で強く、装置で約3割、主要な部素材で約半分を占めます。買う側では、中国・台湾・韓国の工場が中心です。

2. 洗浄で取り除く4種類の汚れを挙げてください。

   **▼ 答えを見る**

   粒子（パーティクル）、金属、有機物、自然酸化膜です。

3. SC-1で、はがれた粒子の再付着を減らせるのはなぜですか。

   **▼ 答えを見る**

   $SiO_2$粒子と酸化膜表面などが同じ符号に帯電する条件では、反発して再付着が減るからです。粒子の材質や薬液条件によって挙動は変わり、液の流れで運び去ることも必要です。

4. 希フッ酸で処理した後のシリコンの表面は、どう変わりますか。

   **▼ 答えを見る**

   自然酸化膜が除かれ、表面が水素で覆われて、水になじむ表面から水をはじく表面に変わります。

5. 枚葉式の洗浄装置が広く使われるようになった理由と、その弱点を補う工夫を説明してください。

   **▼ 答えを見る**

   枚葉式は1枚ごとに薬液や流れを制御しやすく、汚れの持ち込みを管理できる利点があります。装置全体では複数チャンバーを並列運転して処理能力を確保します。バッチ式も工程に応じて使われ、どちらが速いかは装置と条件によります。

6. 接触角0°・すき間20 nmの単純モデルで、水が残っているとき、表面張力による圧力の差はおよそどれくらいですか。IPAに置き換えると、どうなりますか。

   **▼ 答えを見る**

   $\Delta P = 2\gamma\cos\theta / S$に、$\gamma = 0.073$ N/m、$\theta = 0°$、$S = 20$ nmを入れると、約7.3 MPa（約72気圧）です。IPA（22 mN/m）なら約3分の1の約2.2 MPaになります。

7. 昇華乾燥と超臨界乾燥が、パターン倒壊を防げるのはなぜですか。

   **▼ 答えを見る**

   どちらも、乾かすときに液体の面（メニスカス）を作らないからです。昇華乾燥は固体から直接気体にし、超臨界流体にはもともと液面がないので、表面張力が構造に働きません。

8. 高純度の洗浄液の分野で、日本の会社の存在感を示す数字を挙げてください。

   **▼ 答えを見る**

   経済産業省の資料では、高純度の洗浄液の世界市場の約59%（2023年）を日本に本社がある会社が占めています。

# 14. 用語集

**作る側のシェア**
装置や素材のメーカーの本社がある国で分けた市場シェア。

**買う側のシェア**
装置や素材を買って使う工場がある地域で分けた市場の大きさ。

**パーティクル**
ウェハに付く微細な粒子。

**キラー粒子**
デバイスの不良を引き起こす大きさの粒子。IRDSでは最も重大なもので3.0 nm。

**自然酸化膜**
シリコンが空気に触れて自然にできる、厚さ1〜1.5 nmほどの酸化膜。

**RCA洗浄**
1960年代に米国RCA社で開発された、SC-1とSC-2の2種類の液で順に洗う洗浄。

**SC-1**
アンモニア水と過酸化水素水の混合液。粒子と有機物を落とす。

**SC-2**
塩酸と過酸化水素水の混合液。金属を落とす。

**希フッ酸（DHF）**
水で薄めたフッ酸。自然酸化膜を取り除く。

**SPM**
硫酸と過酸化水素水の混合液。ピラニアとも呼ばれ、有機物を落とす。

**オゾン水**
オゾンを溶かした純水。有機物の分解に使う。

**ゼータ電位**
液中のすべり面での電位。粒子や表面の電気的な挙動の目安で、表面電荷そのものとは異なる。

**等電点**
表面の電気がプラスとマイナスの境目になるpH。シリコンと酸化シリコンでは2〜2.5。

**錯体**
金属イオンに分子やイオンが結びついたもの。SC-2では金属を錯体にして液に溶かしておく。

**親水性・疎水性**
水になじむ性質と、水をはじく性質。

**メガソニック**
約1 MHzの音波で洗浄液を揺らし、粒子を引きはがす洗浄。

**キャビテーション**
液体の中で小さな泡ができて崩れる現象。

**スクラブ**
ブラシでこする洗浄。

**バッチ式**
多数のウェハをまとめて薬液の槽に浸ける方式。

**枚葉式**
ウェハを1枚ずつ処理する方式。

**クロスコンタミネーション**
ウェハどうしの間で汚れが移ること。

**チャンバー**
装置の中で、ウェハを1枚ずつ処理する部屋。

**ウォーターマーク**
水滴が乾いた後に残る、しみ状の汚れ。

**マランゴニ乾燥**
IPAの蒸気で表面張力の差を作り、水を引き戻して乾かす方法。

**パターン倒壊**
乾燥のとき、液の表面張力で細く高い構造が倒れること。

**表面張力**
液体の表面が縮まろうとする力。水は73 mN/m、IPAは22 mN/m（20 ℃）。

**接触角**
固体・液体・気体が接する場所で、液体側から測る角度。本文のモデルでは90°に近いほど毛細管圧の項が小さくなる。

**アスペクト比**
構造の高さと幅の比。

**昇華乾燥**
昇華性材料を固化してから、液体を経ずに気体にして除去する乾燥方法。

**超臨界乾燥**
液体と気体の区別がない超臨界流体を使って、液面を作らずに乾かす方法。

**超純水**
不純物を計測の検出限界近くまで取り除いた水。

**ppt**
1兆分の1を表す単位（parts per trillion）。

**逆浸透（RO）膜**
圧力をかけて水だけを通し、不純物を取り除く膜。

**等方性エッチング**
すべての方向に同じように進むエッチング。

**ベベル**
ウェハの縁の、面取りされた部分。

**ハイブリッド接合**
金属の電極と絶縁膜を同時に貼り合わせる接合。

**エンティティリスト**
米国政府が輸出を規制する対象として指定した企業などのリスト。

**消費立地**
製品を使う顧客の近くに工場を置く立地の考え方。

## 15. 参考資料（一次情報）


1. **SEAJ（日本半導体製造装置協会）**「2025年の世界の半導体製造装置販売額（地域別、SEAJ・SEMIの共同集計、2026年4月8日）」 — 資料を開く
2. **SEMI（PR Newswire配信、2026年5月12日）**「Global semiconductor materials market revenue 2025」 — 資料を開く
3. **経済産業省**「半導体・デジタル産業戦略の今後の方向性（Executive Summary、2025年12月23日）p.3」 — 資料を開く
4. **経済産業省 商務情報政策局**「半導体・デジタル産業戦略について（2023年7月、九州経済産業局 掲載）p.6」 — 資料を開く
5. **東京応化工業**「フォトレジスト」 — 資料を開く
6. **JSR**「エレクトロニクス材料（CMP材料・洗浄剤）」 — 資料を開く
7. **富士紡ホールディングス**「研磨材（POLYPAS）」 — 資料を開く
8. **日本ガイシ**「静電チャック」 — 資料を開く
9. **京セラ**「イットリア（$Y_2O_3$）」 — 資料を開く
10. **JX金属**「半導体用スパッタリングターゲット」 — 資料を開く
11. **ステラケミファ**「半導体関連製品」 — 資料を開く
12. **ADEKA**「半導体材料（ALD/CVD材料）」 — 資料を開く
13. **信越化学工業**「マスクブランクス」 — 資料を開く
14. **東ソー**「石英ガラス」 — 資料を開く
15. **レーザーテック**「半導体関連製品」 — 資料を開く
16. **M. M. Heyns ほか（imec）**「Advanced wet and dry cleaning coming together for next generation, IBM J. Res. Develop. 43(3), 339（1999年）」 — 資料を開く
17. **Lam Research（米国特許 US9117870B2）**「洗浄工程の割合に関する記述」 — 資料を開く
18. **SCREENセミコンダクターソリューションズ**「半導体製造プロセス」 — 資料を開く
19. **nanoHUB**「ECE 695 Nanometer Scale Patterning and Processing, Lecture 4（2016年、洗浄の講義資料）」 — 資料を開く
20. **IRDS（国際デバイス・システム・ロードマップ）**「2024 Edition, Yield Enhancement」 — 資料を開く
21. **W. Kern**「Citation Classic（1983年）：Kern & Puotinen, RCA Review 31, 187（1970）の回想」 — 資料を開く
22. **S. Lee ほか（サムスン電子・漢陽大学ほか）**「ECS 第224回大会 講演要旨 E8-2097（2013年）」 — 資料を開く
23. **Applied Materials（米国特許 US7163018B2）**「バッチ式の汚れの移し合いと枚葉式に関する記述」 — 資料を開く
24. **ACM Research（米国特許 US11462423B2）**「バッチ式と枚葉式の比較」 — 資料を開く
25. **K. Watanabe ほか（東京エレクトロン九州）**「ECS 第224回大会 講演要旨 E8-2117（2013年）：パターン倒壊とラプラス力」 — 資料を開く
26. **SCREEN Holdings（米国特許 US11158523）**「昇華による乾燥」 — 資料を開く
27. **東京エレクトロン（2020年12月8日）**「CELLESTA SCD（超臨界乾燥）の発表」 — 資料を開く
28. **Siemens・IBM（米国特許 US5807439）**「ウォーターマークとマランゴニ乾燥に関する記述」 — 資料を開く
29. **ITRS**「2013 Edition, Yield Enhancement（超純水）」 — 資料を開く
30. **栗田工業**「Kurita Global Technology Center（超純水の製造工程）」 — 資料を開く
31. **ステラケミファ**「事業紹介スライド 2026（p.2 純度、p.5 製造能力）」 — 資料を開く
32. **SCREENホールディングス**「会社概要（Global Market Share）」 — 資料を開く
33. **SCREENセミコンダクターソリューションズ**「枚葉式洗浄装置 SU-3400」 — 資料を開く
34. **東京エレクトロン**「統合報告書2026（p.15 当社の強み、p.82 製品別売上構成比）」 — 資料を開く
35. **SCREENホールディングス**「2026年3月期 決算短信（2026年5月13日）p.4」 — 資料を開く
36. **Lam Research（米国SEC提出 Form 10-K、2026年6月期）**「製品の一覧」 — 資料を開く
37. **SEMES**「Corporate overview」 — 資料を開く
38. **ACM Research（米国SEC提出 Form 10-K、2025年12月期）**「売上・地域別売上・競合・エンティティリスト」 — 資料を開く
39. **SCREENセミコンダクターソリューションズ**「ウェットステーション FC-3100」 — 資料を開く
40. **東京エレクトロン**「CELLESTA-i（枚葉洗浄装置）」 — 資料を開く
41. **中小企業庁**「はばたく中小企業・小規模事業者300社（2018年）：森田化学工業」 — 資料を開く
42. **三菱ガス化学**「MGCレポート2025」 — 資料を開く
43. **経済産業省（2019年7月1日）**「大韓民国向け輸出管理の運用の見直しについて（Web Archive保存版）」 — 資料を開く
44. **経済産業省（2023年3月）**「大韓民国向け輸出管理の運用の見直し（通達改正の概要）」 — 資料を開く
45. **栗田工業**「2026年3月期 決算短信（2026年5月14日）p.3」 — 資料を開く
46. **オルガノ**「2026年3月期 株主説明会資料（2026年6月26日）」 — 資料を開く
47. **Y. Oniki, F. Holsteyns（imec）**「ECS 第236回大会 講演要旨（2019年）：GAAでのウェット・ドライエッチング」 — 資料を開く
48. **imec（2024年2月19日）**「Wafer-to-wafer hybrid bonding: pushing the boundaries to 400nm interconnect pitch」 — 資料を開く
49. **SCREENセミコンダクターソリューションズ**「技術開発ハイライト（IPAと水の分離技術）」 — 資料を開く

## 16. 主張と出典の対応表（監査）

| 本文の主張 | 根拠 | 区分 |
|---|---|---|
| 2025年の製造装置販売額（地域別・合計1,351億ドル・前年比）、中国は6年連続最大、台湾は90%増で3年ぶり2位 | SEAJ [1] | 事実 |
| 2025年の材料市場732億ドル、地域別（台湾217・中国156・韓国112億ドルほか）、台湾は16年連続最大 | SEMI [2] | 事実 |
| 装置（2023年）日本28・米国36・欧州27・中国5・その他4%、高純度洗浄液 日本59%・欧州7・中国5・その他30%（本社所在地で分類） | 経済産業省 2025 [3]（p.3、グラフから読み取り） | 事実 |
| 1,000以上の工程、装置（2021年度）米国35・日本31・EMEA22・中国9・韓国2・台湾1%、部素材 日本48・台湾16・韓国13・EMEA10・米国9・中国3% | 経済産業省 2023 [4]（p.6） | 事実 |
| 専門と工程の対応表の各社の説明 | 各社の公式ページ [5]〜[15] | 事実 |
| 洗浄は最も頻繁に繰り返される工程、1965年に開発されたRCA洗浄が今も基礎、等電点pH 2〜2.5と反発の壁、オゾンは室温で約20 ppm・OHラジカル・硫酸後のリンスが不要、マランゴニ効果で蒸発も結露もなく乾く | Heyns ほか [16] | 事実 |
| 洗浄は最も頻繁、特許に工程の約20%という例 | Lam特許 [17] | 事実 |
| 取り除く汚れ（粒子・有機・金属・油脂・自然酸化膜）、少しの汚れで回路に欠陥、成膜後はブラシや純水で物理洗浄 | SCREEN [18] | 事実 |
| 重金属（Cu・Fe・Ni・Cr・Co・Mo）が最も重大、アルカリ金属が重大、SC-1のマイクロエッチングとゼータ電位、SC-2の錯体化・通常条件でSiや$SiO_2$へのエッチング作用が小さい、希フッ酸の比率・1.0〜1.5 nm・親水→疎水・水素終端、SPMの比率と温度、メガソニック約1 MHz・境界層・音響流・キャビテーション・ジレンマ | nanoHUB 講義資料 [19] | 事実 |
| キラー粒子3.0 nm（ハーフピッチの半分が基準）、5 nm未満、粒子と分子の領域の重なり、TOC 500 ppt未満のナノ有機粒子、縁・裏面・ベベルの管理、計測の遅れ、超純水のリサイクル | IRDS 2024 [20] | 事実 |
| RCA洗浄の研究は1961年開始、1970年発表 | Kern [21] | 事実 |
| ウェット洗浄の2つの要因、2013年の報告で30 nm未満の構造への損傷が課題とされた例 | Lee ほか [22] | 事実 |
| 浸漬洗浄は汚れの移し合いを招き、枚葉式が代替に | Applied Materials特許 [23] | 事実 |
| バッチ式は約400枚/時、薬液を循環、90 ℃超のSPM、縦置きで汚れが移りやすい | ACM特許 [24] | 事実 |

| 本文の主張 | 根拠 | 区分 |
|---|---|---|
| ラプラス力が倒壊の主因、ΔP＝2γcosθ/S、F＝ΔP·H·D、表面張力（IPA 22・水 73 mN/m）、IPAは水の約3分の1、単純モデルで接触角90°なら毛細管圧の項がゼロ、表面疎水化で限界アスペクト比1.7倍 | 東京エレクトロン九州 [25] | 事実 |
| 昇華性材料を含む液の固化・昇華で気液界面を避ける | SCREEN特許 [26] | 事実 |
| 低表面張力アルコールでも倒壊が問題に、超臨界流体による倒壊のない乾燥 | 東京エレクトロン [27] | 事実 |
| ウォーターマークは欠陥の主因、IPAは水の表面近くに多く溶け込む | Siemens・IBM特許 [28] | 事実 |
| 超純水は検出限界以下・近くまで精製、重要金属1 ppt・その他10 pptの定義の見直し | ITRS 2013 [29] | 事実 |
| 超純水の製造工程、理論上の純水に極めて近い | 栗田工業 [30] | 事実 |
| フッ酸のグレード（9N・1 ppb以下〜12N・1 ppt以下）、生産能力合計10.5万t/年、2025年度出荷7.38万t | ステラケミファ [31] | 事実 |
| 枚葉・バッチ・スピンスクラバーで世界シェアNo.1（2025年、同社調べ） | SCREEN [32] | 事実 |
| 1983年に枚葉式洗浄装置を開発、最大24チャンバ・6段×4、1,200枚/時、バッチ式に迫る処理能力 | SCREEN [33] | 事実 |
| 洗浄で3位（同社推定）、拡散炉・塗布現像などで1位、新装置売上に占める洗浄9%（2026年3月期）、4つの主要工程 | 東京エレクトロン [34] | 事実 |
| 半導体製造装置事業の売上4,859億円（2026年3月期） | SCREEN [35] | 事実 |
| 洗浄の製品群（EOS、DV-Prime、Coronusなど） | Lam Research [36] | 事実 |
| 韓国最大の装置メーカー、年3兆ウォン規模、洗浄装置（BLUEICE PRIMEなど） | SEMES [37] | 事実 |
| 売上9.01億ドル・中国本土8.98億ドル、洗浄6.26億ドル（69.5%）、洗浄市場約73億ドル、競合、2024年12月エンティティリスト | ACM Research [38] | 事実 |
| 高濃度IPAの減圧乾燥でウォーターマークを抑えパターン倒壊を防止 | SCREEN [39] | 事実 |
| 最大20の洗浄チャンバー、床面積あたり生産性、IPA吐出技術で倒壊を抑制 | 東京エレクトロン [40] | 事実 |
| 森田化学は1918年に国内初のフッ酸生産、参入障壁が高く日本の化学メーカー3社の寡占 | 中小企業庁 [41] | 事実 |
| 超純過酸化水素で世界シェア1位、消費立地の戦略 | 三菱ガス化学 [42] | 事実 |
| 2019年7月、フッ化水素など3品目の韓国向けを個別許可に | 経済産業省 [43] | 事実 |
| 2023年3月、3品目を再び包括許可の対象に | 経済産業省 [44] | 事実 |

| 本文の主張 | 根拠 | 区分 |
|---|---|---|
| 栗田工業の電子市場向け売上1,718億円 | 栗田工業 [45] | 事実 |
| オルガノの電子産業向け売上1,080億円、国内初の電子産業向け超純水装置、2nm工場向け案件 | オルガノ [46] | 事実 |
| GAAでは選択性の高い等方性エッチングが重要課題 | imec [47] | 事実 |
| ハイブリッド接合には極めて平らできれいな表面が必要 | imec [48] | 事実 |
| IPAを含む有機廃液を減らすため、IPAと水の分離技術を開発中 | SCREEN [49] | 事実 |
| 日本の装置販売額は世界の約7%、3 nmは原子約10個分、ΔP約7.3 MPa（約72気圧）・IPAで約2.2 MPa、1 pptは100万トンの水に1グラム、洗浄の新装置売上約1,600億円 | 上記の出典値と、本文に明記した前提・式による計算 | 本稿の計算 |
| SCREENの強さはチャンバーの積層と搬送、前後工程の装置をそろえる東京エレクトロンの有利さ、フッ酸の輸出管理は戦略物資化の表れ、中国の工場とともに装置メーカーが育つ、日本の薬液・水の強みは品質を保証し続ける仕組み | 本稿の推測 | 推測 |
| 各工程の合間に洗う理由、汚れの害の一般的な説明、静電気のたとえ、枚葉式の処理能力を補う工夫、ワインの涙、超臨界流体に液面がないこと、N値の比較で確認すべき範囲、SC-1型の洗浄がGAAで使いにくい理由、素材技術者の出番 | 一般的な原理と業界の一般的な説明 | 解説 |

最終更新：2026年11月6日／地域別の数字はSEAJ・SEMI・経済産業省、技術は原論文・大学の講義資料・ITRS/IRDS（国際半導体技術ロードマップ）・各社の特許と公式情報、企業の情報は各社の決算資料・統合報告書・製品ページ・米国SEC提出書類を出典としています。「世界シェアNo.1」などの表現は各社自身の発表で、本文中にそのことを明記しています。物理の一般原理の説明と、本稿の計算・推測は、本文中のタグで区別しています。図の空き枠は作図予定の場所です。

© 2026 Troy Technical
当サイトの文章・図版・動画のうち、著作権法で保護される部分の無断転載・再配布・再アップロードを禁じます。ただし、法令上認められる引用等を除きます。
引用資料・商標等の権利は各権利者に帰属します。記事へのリンクによるご紹介は歓迎します。転載・二次利用についてはお問い合わせください。