

公開講座「水と環境」第5回

半導体製造における水利用

= 環境課題と効率の探求 =

2024年6月15日

中村 裕司

【アブストラクト】

半導体製造には1工場で20万トン以上の多量の水、しかも超純水を必要としている。また、ウェーハの洗浄、エッチングなどでは超純水にフッ素などの洗浄剤を微量混ぜた機能水が使用される。ここでは半導体製造工程、超純水の製造工程を簡単に説明し、今後の検討課題として半導体製造全体が環境に及ぼす影響について紹介する。

1. 自己紹介と概要

2. 半導体市場の動向

世界の半導体市場と主要なプレイヤー
世界の地域別、応用分野別シェア
半導体の主要ドライバーの予測
電気自動車需要の推移(IEA見通し)
世界の国別携帯電話普及率(%)

3. 半導体製造工程概要

準備工程

- 1 シリコンウェハ製造工程
- 2 フォトマスク作成工程

前工程

- 1 洗浄工程
- 2 成膜工程
- 3 フォトリソグラフィ工程
レジストとは
露光用光線の波長
- 4 エッチング工程

3. 半導体製造工程概要

5 イオン注入工程

6 平坦化工程

7 検査工程

その1【ウェハ検査工程】

その2【ウェハ電気特性検査工程】

後工程

1 ダイシング工程

2 組立・検査工程

4. 半導体製造における水の役割

半導体製造と水需要

半導体製造に使用される水(超純水と機能水)

半導体洗浄プロセス

半導体工程におけるフッ化水素の役割

おわりにかえて

1. 自己紹介

1974年3月 東京大学工学部資源開発工学科卒業(地震探査)

1974年4月～2004年3月 三菱重工業株式会社勤務

～1984年3月 技術本部開発部(深海底資源開発、中国石炭利用、他)

～2000年4月 社長室国際部
(ODA案件開発、市場戦略(東南アジア、中国、
欧州・アフリカ・中東・西アジア))

～2004年3月 欧州三菱重工業株式会社
取締役ミュンヘン支店長兼プラハ事務所長

2004年5月～2011年3月 ワルタージャパン(株)社長(工具研削盤販売)

2011年4月～2012年4月 Walter Maschinenbau GmbH顧問

2013年10月～2016年3月 PMG日本代表(焼結自動車部品販売)

2015年4月～ トランザーフィルター日本株式会社代表取締役社長
(不水溶性切削油、放電加工油精密ろ過装置販売)

1. 自己紹介と概要

2. 半導体市場の動向

世界の半導体市場と主要なプレイヤー
世界の地域別、応用分野別シェア
半導体の主要ドライバーの予測
電気自動車需要の推移(IEA見通し)
世界の国別携帯電話普及率(%)

3. 半導体製造工程概要

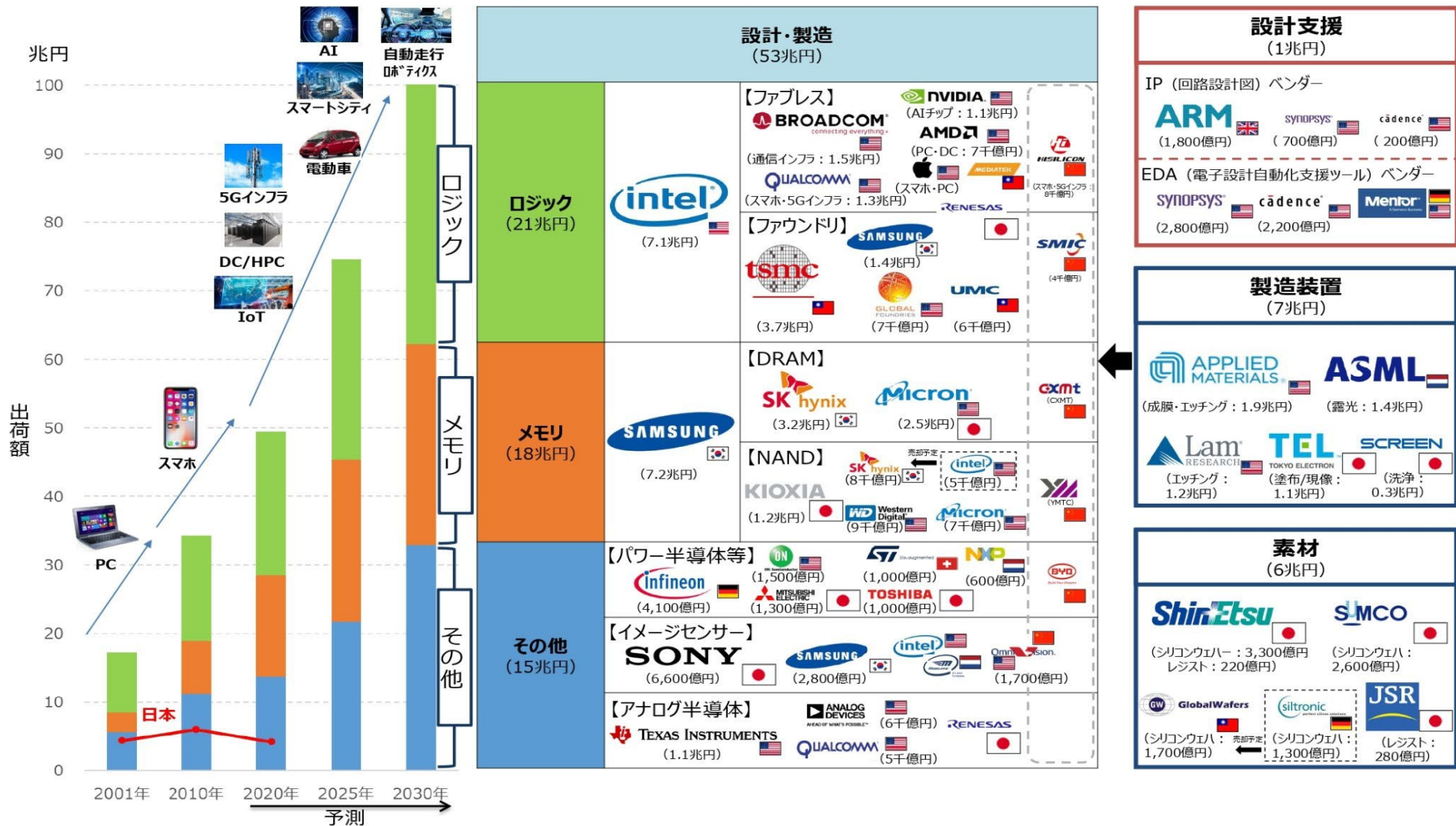
準備工程

- 1 シリコンウェハ製造工程
- 2 フォトマスク作成工程

前工程

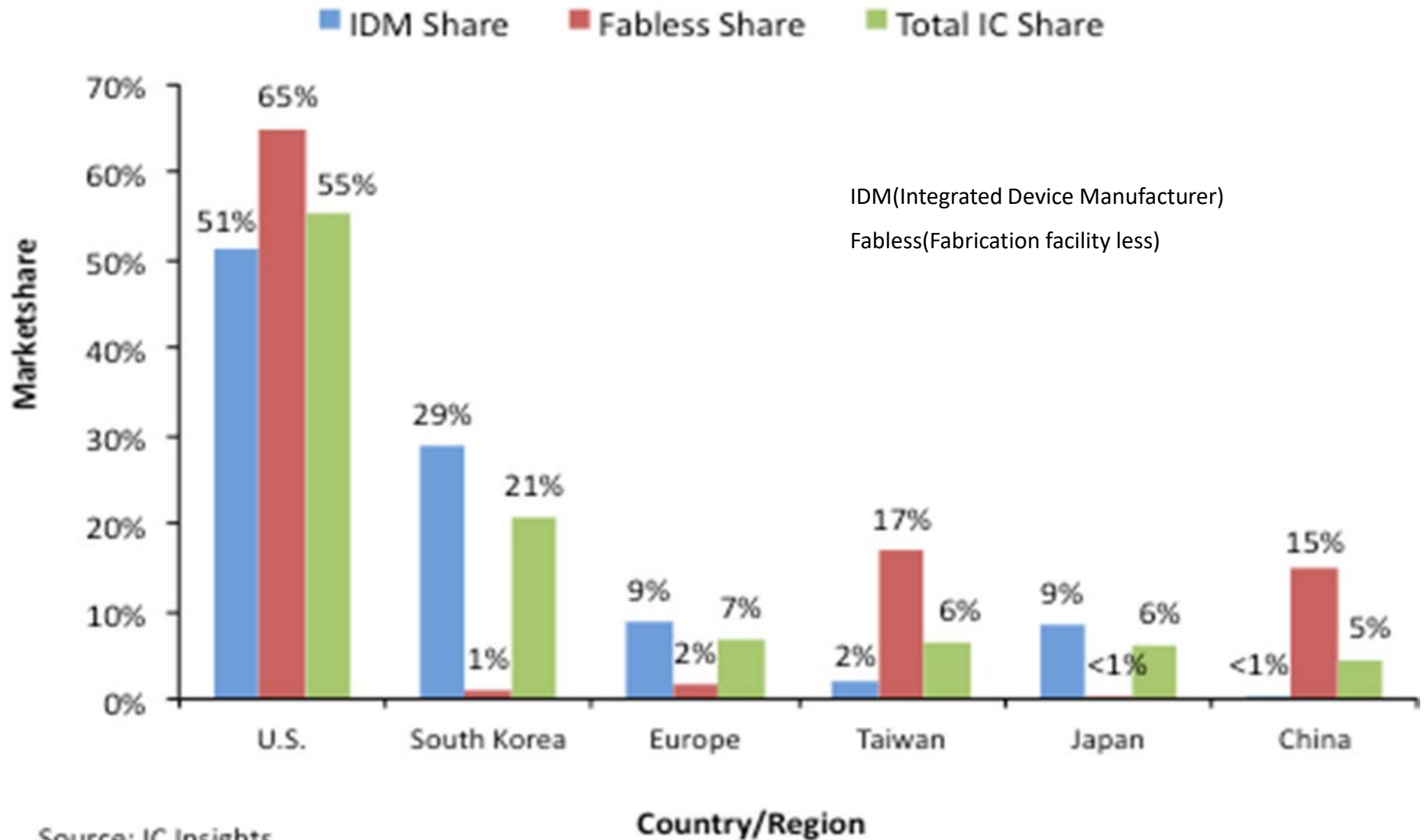
- 1 洗浄工程
- 2 成膜工程
- 3 フォトリソグラフィ工程
レジストとは
露光用光線の波長
- 4 エッチング工程

世界の半導体市場と主要なプレイヤー



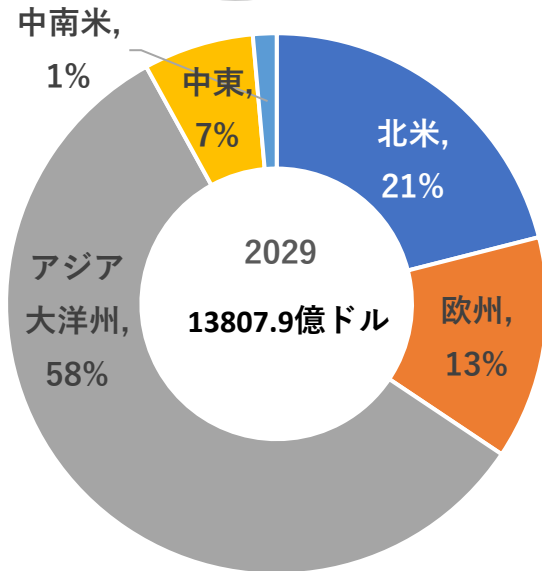
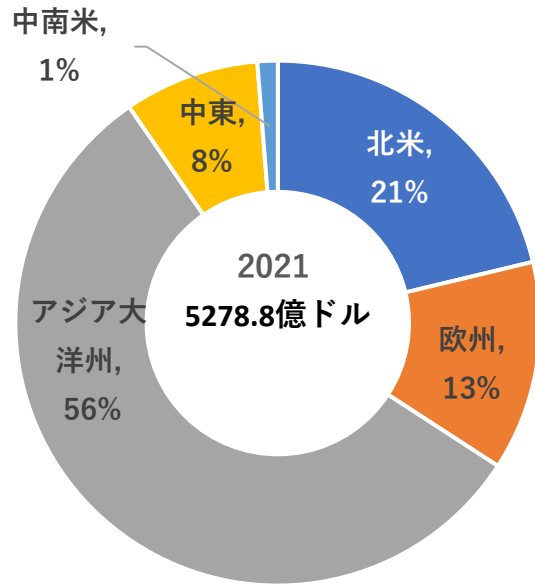
(出典) Omdia, SEMI, TrendForce, (株)富士経済, グローバルネット(株), 各社決算資料のデータをもとに経済産業省作成 (※数字: 2018年、為替レート: 1USD=110円, 1ユーロ=125円)

2019 Worldwide IC Company Marketshare by Headquarters Location

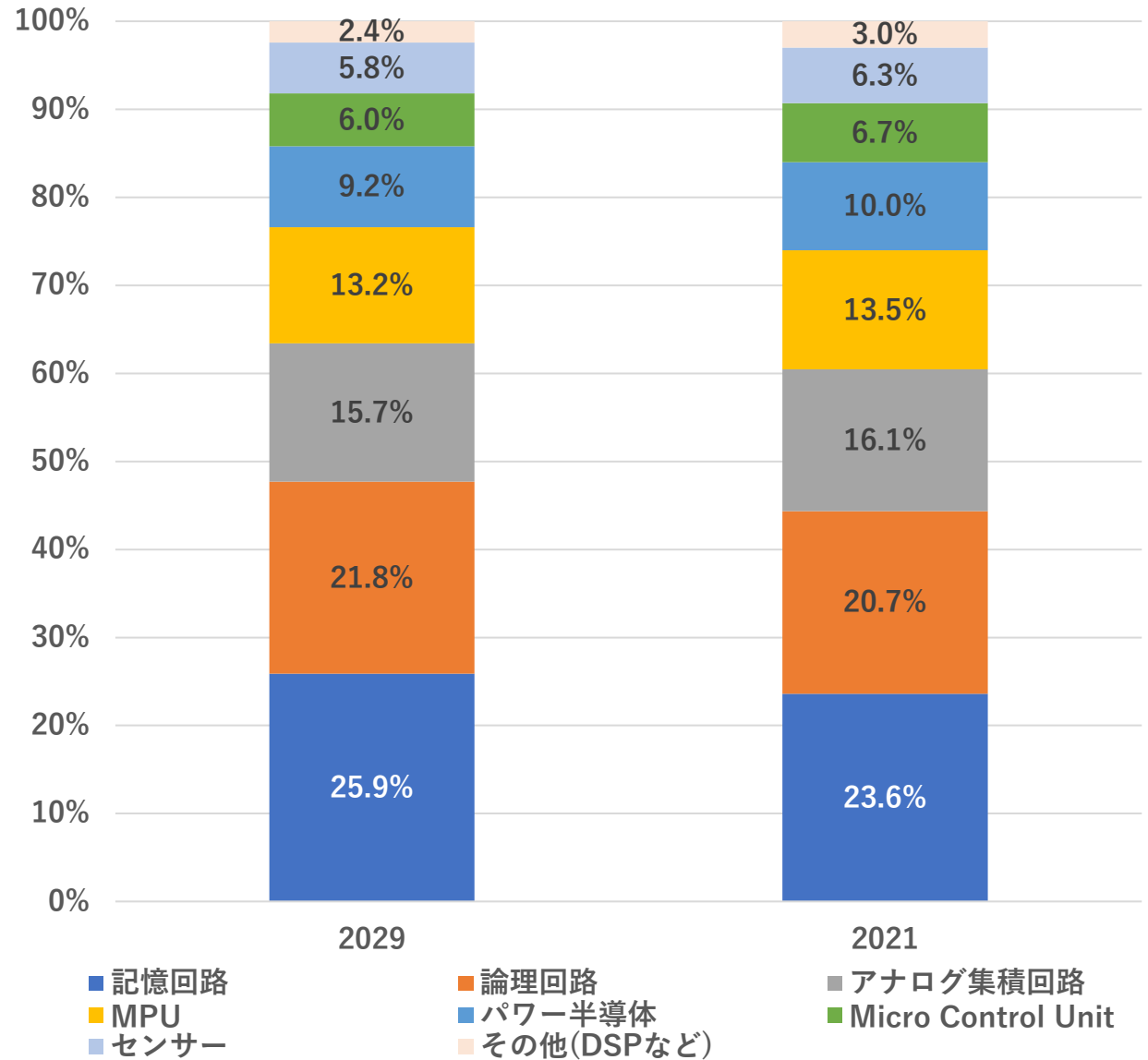


Source: IC Insights

地域別売上シェア



応用分野別市場シェア

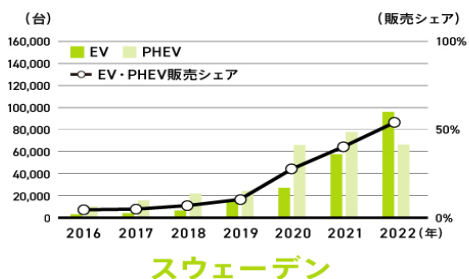
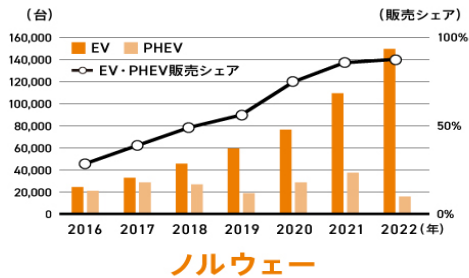
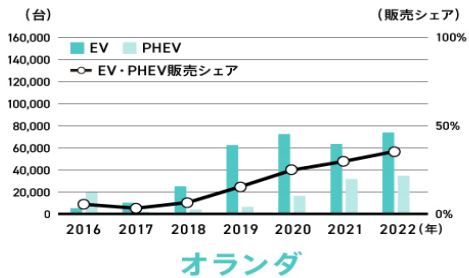


半導体の主要ドライバーの予測

Key Semiconductor Drivers Forecasts

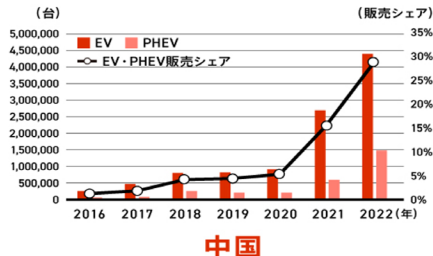
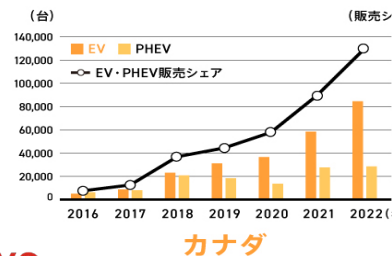
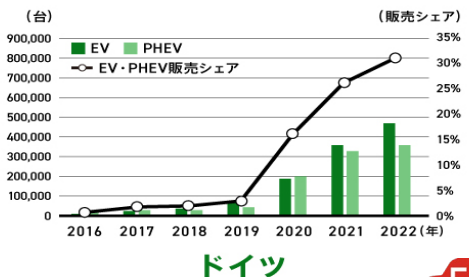
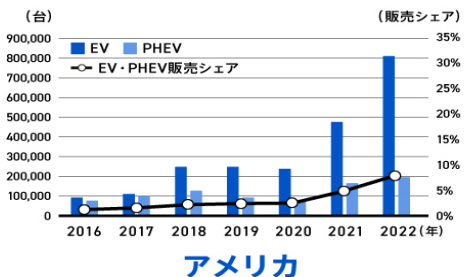
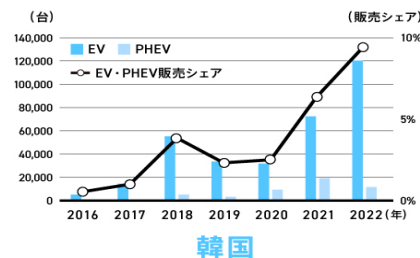
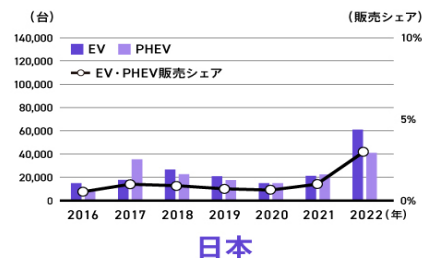
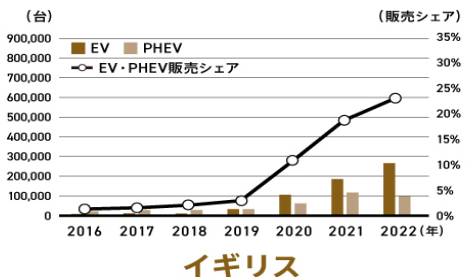
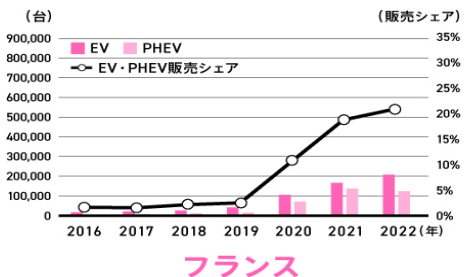
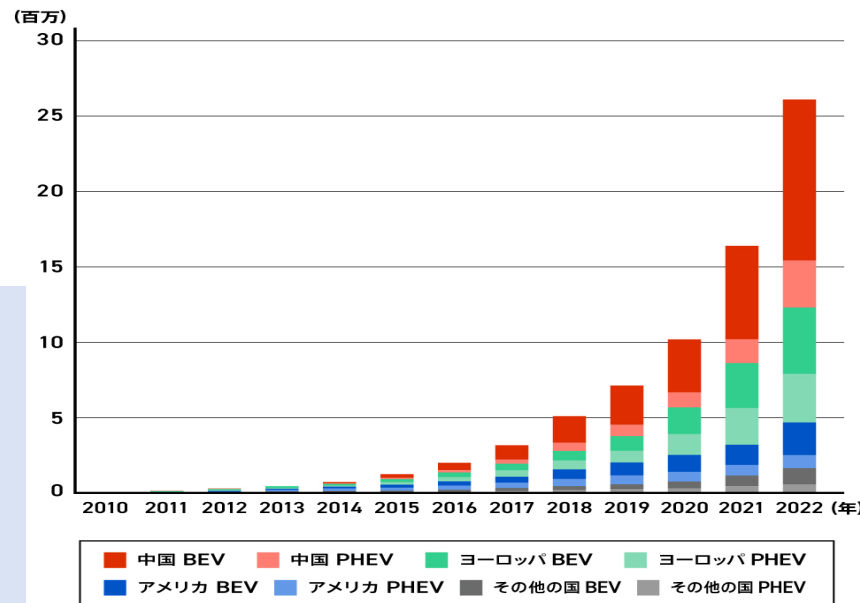
		<u>2019</u>	<u>2020</u>	<u>2021</u>	<u>2022</u>	<u>2022</u>	
Global GDP	Change	2.8%	-3.3%	6.0%	4.4%	3.6%	Original Forecast April 2021 Revised Forecast April 2022
Smartphones	M units	1,373	1,280	1,350	1,400	1,400+	
	Change	-2.3%	-6.7%	5.5%	3.7%	3.7%	
PCs	M units	268	302	357	340	340	
	Change	3%	13%	18%	-5%	-5%	
Light vehicles	M Units	89	76	81	86	86	
	Change	-4%	-15%	5%	6%	6%	

International Roadmap for Devices and Systems 2022 Edition Executive Summaryより



電気自動車需要の推移(IEA見通し)

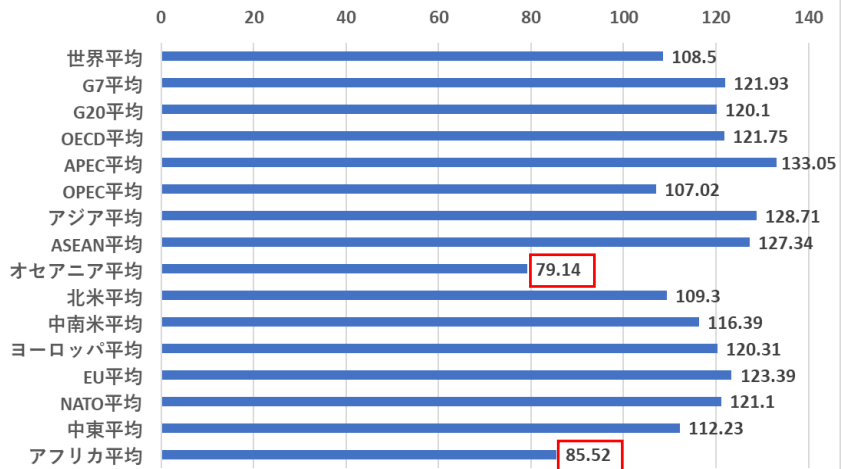
- 世界の電気自動車総台数2030年
2億3000万台~2億4000万台
車の7台に1台が電気自動車
- 販売台数 4000万台~4500万台
普及率は35%~40%
(Global EV Outlook 2023より)



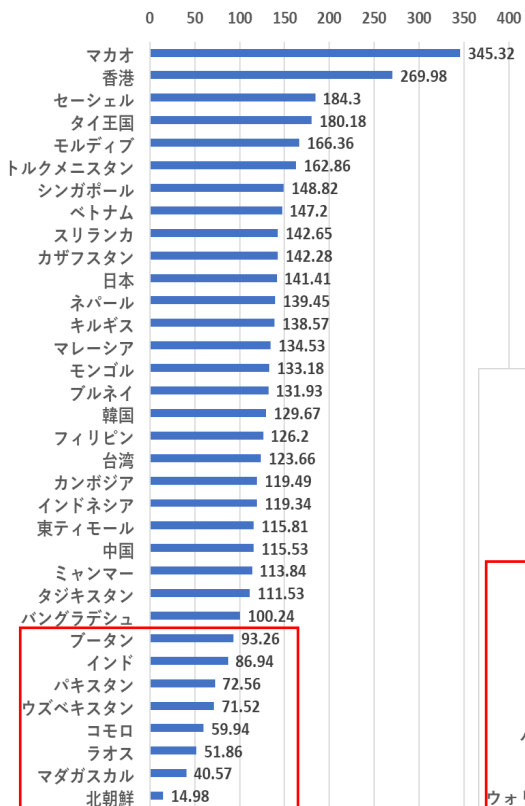
世界の国別携帯電話普及率(%)

(出典：世界事典 2018年)

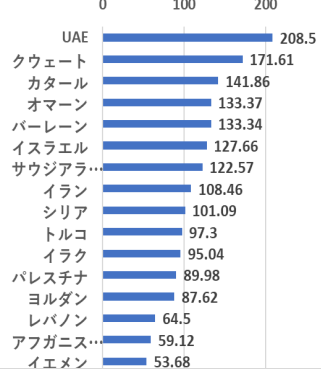
世界



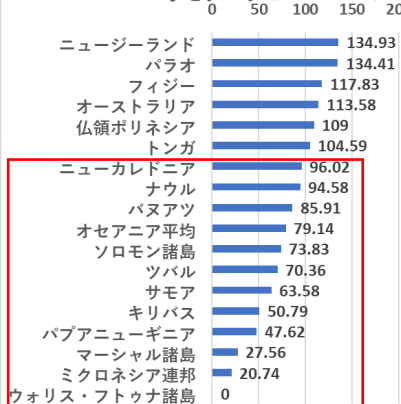
アジア (4,315百万人)



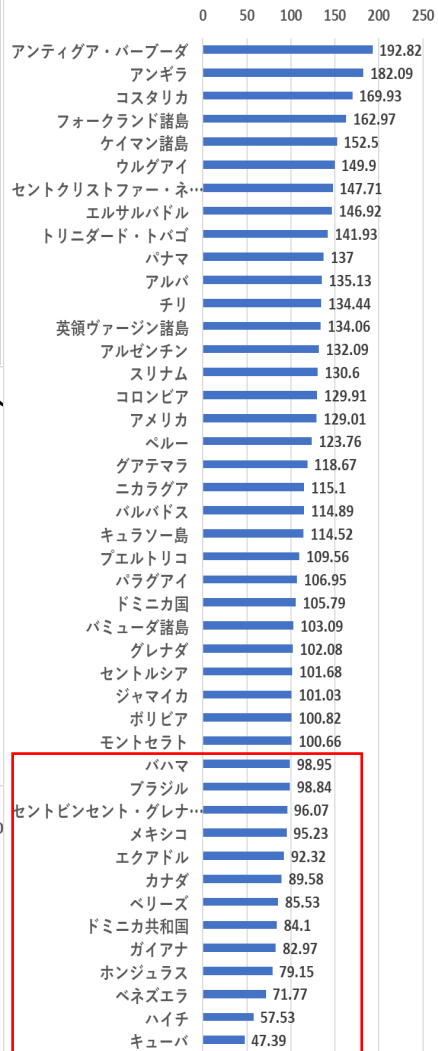
中東 (395百万人)



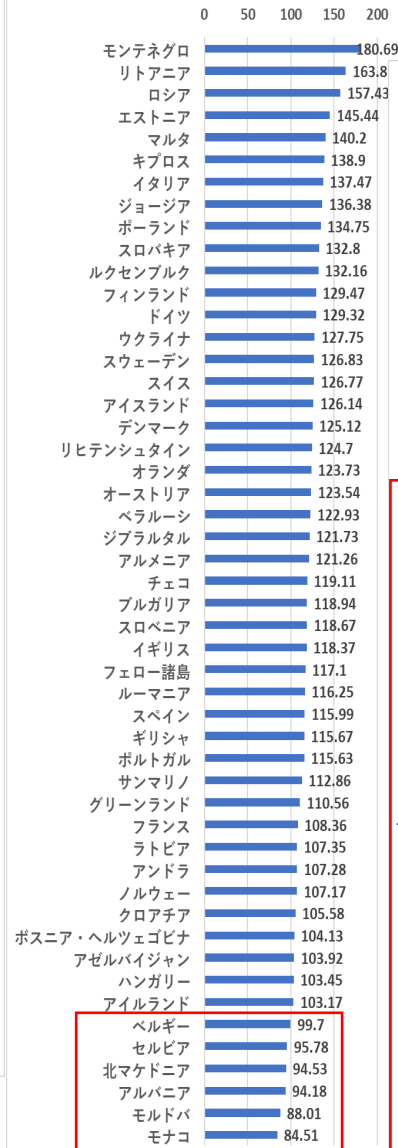
オセアニア (43百万人)



北中南米 (1,006百万人)

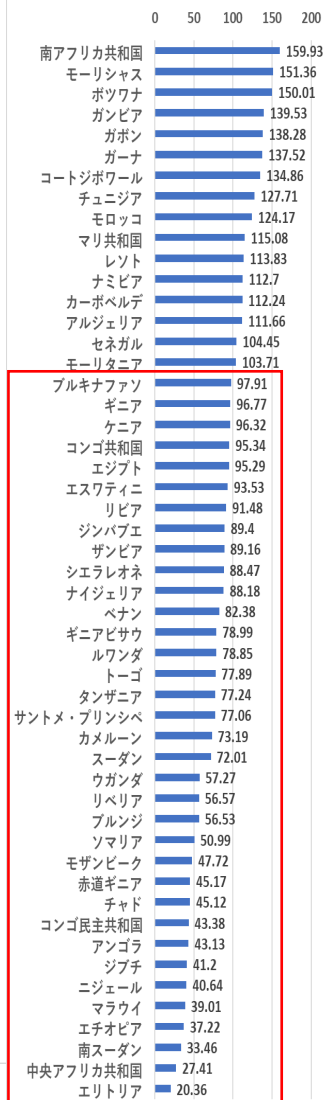


欧州 (779百万人)



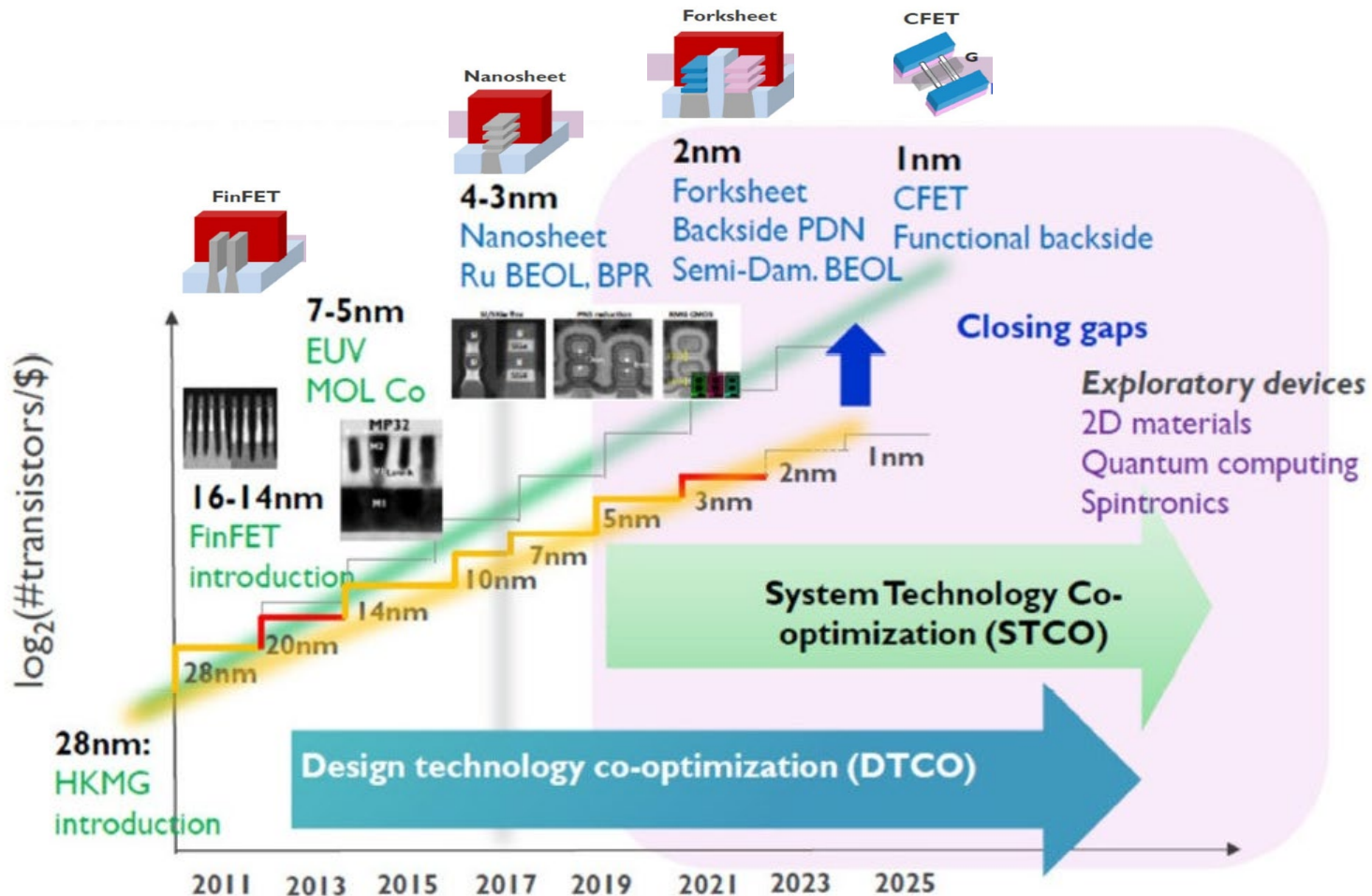
(1,272百万人)

アフリカ



半導体微細化ロードマップ

ベルギーの独立系半導体ナノテク半導体研究機関のimecはチップの積層から始まった3D実装の究極は、トランジスタ自体の3次元積層に行きつくと予測。



(出典) imec Technology Forum Japan 2019(ITF Japan 2019)

1. 自己紹介と概要

2. 半導体市場の動向

世界の半導体市場と主要なプレイヤー
世界の地域別、応用分野別シェア
半導体の主要ドライバーの予測
電気自動車需要の推移(IEA見通し)
世界の国別携帯電話普及率(%)

3. 半導体製造工程概要

準備工程

- 1 シリコンウェハ製造工程
- 2 フォトマスク作成工程

前工程

- 1 洗浄工程
- 2 成膜工程
- 3 フォトリソグラフィ工程
レジストとは
露光用光線の波長
- 4 エッチング工程

準備工程 1 シリコンウェーハ製造工程



準備工程 2 フォトマスク作成工程



半導体製造工程概要

伝統的な熱酸化法の場合

<https://markethink.co.jp/contents/category/semicon-tech>

前工程 1 洗浄工程



前工程 2 熱酸化工程



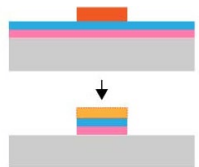
前工程 3 薄膜形成工程



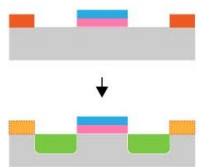
前工程 4 リソグラフィ工程



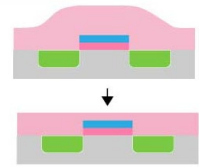
前工程 5 エッチング工程



前工程 6 イオン注入工程



前工程 7 平坦化工程

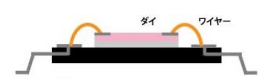


前工程 8 検査工程

後工程 1 ダイシング工程



後工程 2 ワイヤボンディング工程



後工程 3 モールディング工程



後工程 4 最終検査工程

1. 自己紹介と概要

2. 半導体市場の動向

世界の半導体市場と主要なプレイヤー
世界の地域別、応用分野別シェア
半導体の主要ドライバーの予測
電気自動車需要の推移(IEA見通し)
世界の国別携帯電話普及率(%)

3. 半導体製造工程概要

準備工程

- 1 シリコンウェハ製造工程
- 2 フォトマスク作成工程

前工程

- 1 洗浄工程
- 2 成膜工程
- 3 フォトリソグラフィ工程
レジストとは
露光用光線の波長
- 4 エッチング工程

半導体製造「準備工程」

1 シリコンウェハ製造工程(<https://www.semiconductor-industry.com/process>より)

シリコンウェハができるまで

①珪石

↓還元・分解反応

②金属シリコン

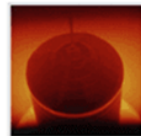
↓シーメンズ法等

③多結晶シリコン



↓CZ法等

④単結晶シリコン



↓ウェハ加工

⑤シリコンウェハ

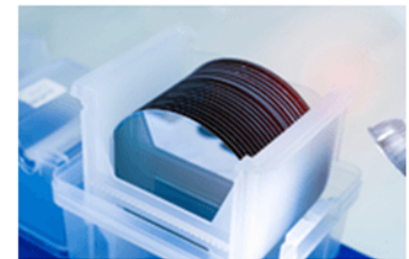
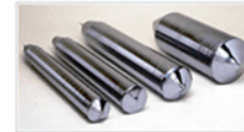
出荷



半導体製造メーカーにて前工程に投入される

ウェハ加工工程

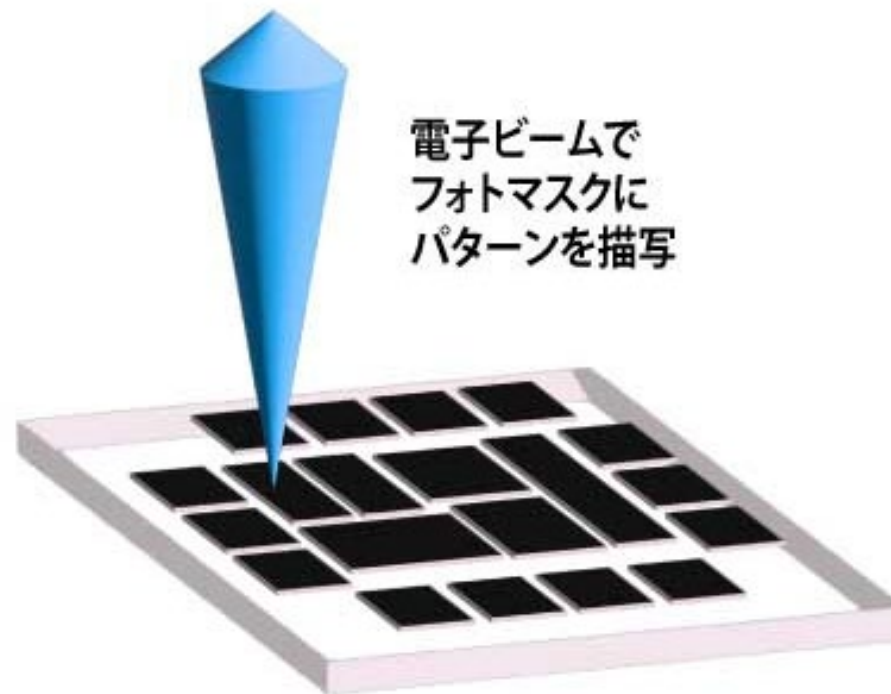
- ・単結晶インゴット
- ・外周研削加工
- ・スライス
- ・ベベル加工（外周面取り）
- ・ラップ加工（両面機械研磨）
- ・エッチング（両面化学研磨）
- ・ポリッシング（表面鏡面研磨）
- ・洗浄
- ・検査
- ・梱包



半導体製造「準備工程」

2 フォトマスク作成工程 (<https://markethink.co.jp/contents/category/semicon-tech>)

- 薄いクロムで被膜された石英ガラス上にレジストを塗りマスクライターで回路パターンを描く
- クロム(Cr)のエッチングにより、電子線が当たった箇所（または当たらなかった箇所）のみにクロム(Cr)を残し、パターンが形成されたフォトマスクを生成



= 目 次 =

1. 自己紹介
2. 半導体市場の動向
3. 半導体製造工程概要

準備工程

- 1 シリコンウェハ製造工程
- 2 フォトマスク作成工程

前工程

- 1 洗淨工程
- 2 成膜工程
- 3 フォトリソグラフィ工程
レジストとは
露光用光線の波長
- 4 エッチング工程
- 5 イオン注入工程
- 6 平坦化工程
- 7 検査工程
 - その1 【ウェハ検査工程】
 - その2 【ウェハ電気特性検査工程】

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

1 洗浄工程

- ▶ パターンの欠陥や電気的特性の低下を防ぎ、半導体製品の歩留まりと信頼性を向上させるための極めて重要な工程
- ▶ 各工程の間に必ず洗浄工程が入る ⇒実施回数が他の工程に比べて2倍ほど多い
洗浄レベルが低いと逆にパーティクルなどを付着させてしまう。
- ▶ 洗浄で取り除く汚れ
μm、nmオーダーのパーティクルや有機成分、金属成分の汚れ
- ▶ 洗浄方法

浸漬式(Dip)法

洗浄工程で広く使われている方法。化学物質(Chemical)または超純水蒸留水 (Deionized water)にを浸して行う。一度に多くのを処理可能。

スプレー(Spray)法

回転するに液体や気体の化学物質を噴射し、不純物を取り除く方法。

微細プロセスの高度化や使用物質の変化により、を1枚ずつ処理するスプレー法の割合が高まっている

ドライ洗浄

半導体製造前工程の後半で、溶液を使用できない場合、プラズマ化したガスによるプラズマクリーナー、UVやオゾン(O₃)を用いたUVオゾンクリーナーなどにより洗浄

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

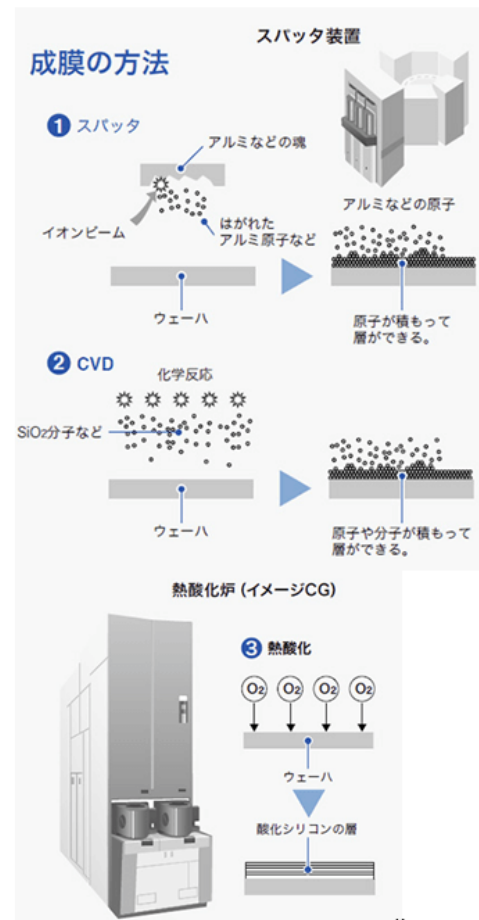
2 成膜工程

前工程：成膜工程とは

酸化膜、電極、層間膜、配線などのさまざまな膜の形成が必要

【成膜方法】	【成膜できる薄膜の種類】
①スパッタ	Al (アルミニウム) Ti (チタン) TiN (窒化チタン) TaN (窒化タンタル)
②CVD	減圧CVD (LP-CVD) 常圧CVD (AP-CVD) プラズマCVD (P-CVD)
③熱酸化	④めっき

Al (アルミニウム)
Ti (チタン)
TiN (窒化チタン)
TaN (窒化タンタル)
SiO₂ (シリコン酸化膜)
Si₃N₄ (シリコン窒化膜)
BPSG (ボロン・リン添加シリケートガラス)
Poly-Si (多結晶シリコン)
SiO₂ (シリコン酸化膜)
BPSG (ボロン・リン添加シリケートガラス)
SiO₂ (シリコン酸化膜)
SiON (シリコン酸窒化膜)
SiO₂ (シリコン酸化膜)
Cu (銅)



出典：SCREEN

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

3 フトリソグラフィ工程

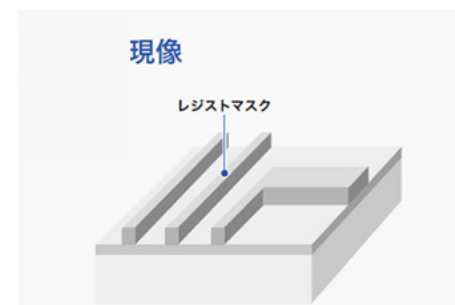
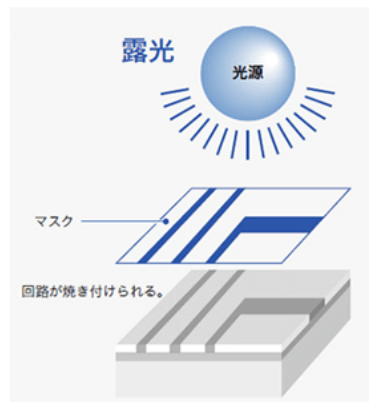
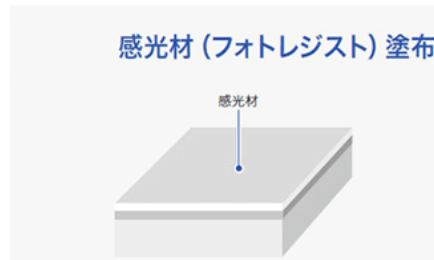
に、光感応性のあるフォトレジストをスピコートによって塗布し、ソフトベイクで水分を飛ばす。スピコートでは、高速回転させたウェハ上に液滴を垂らして均一な膜を形成させる方法。レジストの粘度や一の回転速度で、レジストの膜厚を調整します。その後、短波長の光をフォトマスク越しに照射後、現像液に浸し、マスクのパターンを上転写

前工程：フトリソグラフィ工程とは

フォトマスクの回路パターンを紫外線などで照射、露光させてシリコン基板に転写させる工程

【フトリソグラフィ工程の流れ】

- ①フォトレジスト塗布
スピコートでウェハ上にレジストを滴下し、ウェハを高速回転させて均一なレジスト薄膜を形成する工程
- ②プリベーク
レジストを塗布したウェハを加熱してレジスト内に残存する有機溶剤を揮発させて除去する工程
- ③露光
レジストにマスクのパターンを転写する工程
ステッパと呼ばれる露光装置を使う
最先端のEUV露光装置は1台数百億円！
- ④現像
レジストの露光された部分を薬液で溶かす工程



出典：SCREEN

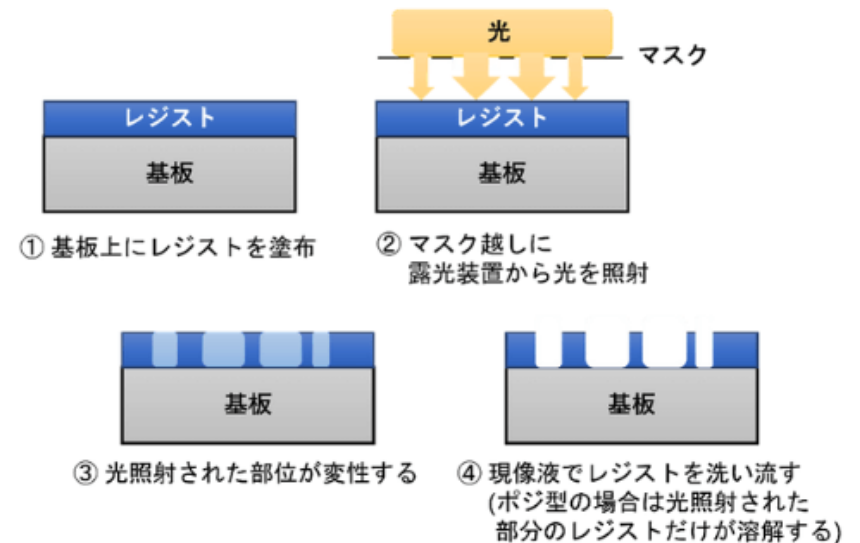
レジストとは

エッチングやはんだ付けなどの工程において特定の場所を保護する材料。
半導体製造における感光剤である「フォトリソグ」のことを単に「レジスト」と呼ぶ。

レジストは光の照射により化学構造が変化、耐薬品性を発現したり、現像液に溶解したりする性質がある。
この性質を利用し、シリコン上に塗布されたレジストに対して所定のパターンを描いたマスク越しに光を照射、最後に現像液で洗浄し、レジストが無い加工部分とレジストに保護された非加工部分を基板上に作り出す。

【レジストの種類】

- **ポジティブレジスト:**
露光された部分が溶解しやすくなるレジスト。露光後、
開発液で露光された部分を除去。
微細なパターン製造に適す。
- **ネガティブレジスト:**
露光部分が硬化し、露光されない部分が溶解し易く
なるレジスト。
太いパターンや高い側壁の特徴を持つデバイスに適す。
- **ケミカルアンプリファイドレジスト:**
露光されると化学増幅反応が起こり、非常に微細な
パターンの製造が可能。
極端紫外線（EUV）リソグラフィーなどの先進的な
リソグラフィー技術に使用。

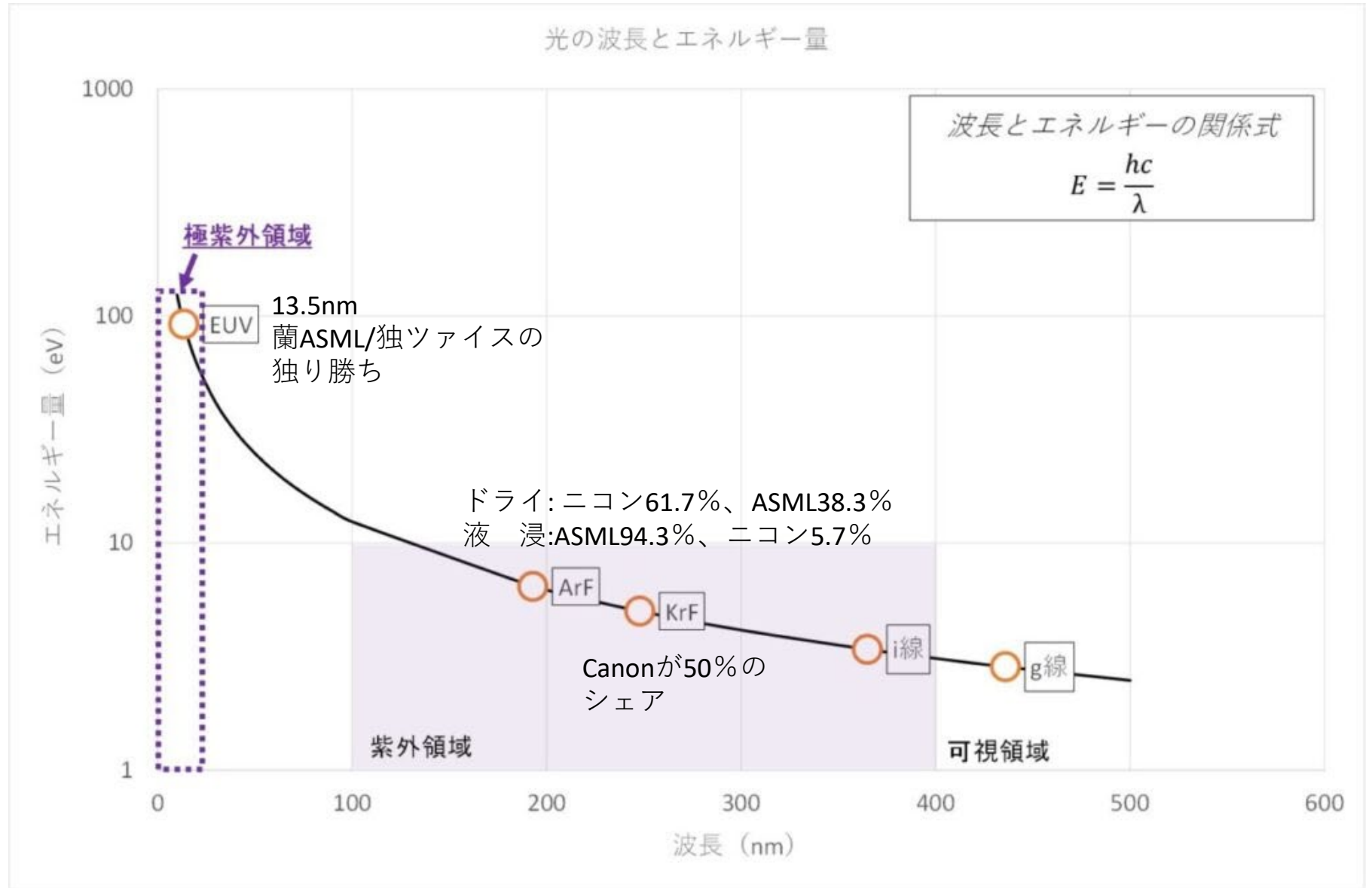


■半導体用フォトリソグ [感光性樹脂]

出典：富士経済

2020年	2019年比	2026年予測	2020年比
1,630百万ドル	110.0%	2,493百万ドル	152.9%

露光用光線の波長



半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

4 エッチング工程

ウェットエッチング：深さ方向と横方向に同じだけエッチングされる等方性エッチング

ドライエッチング：横方向に対して深さ方向の方を選択的に多くエッチングすることができる異方性エッチング。

微細加工が必要な工程ではドライエッチングを使用。

前工程：エッチング工程とは

薬品やイオンの化学反応を利用して、シリコン基板や各材料薄膜に加工を施す工程

⇒フォトリソグラフィの現像工程でレジストが溶けた部分の下の層を加工する

【エッチング方法の種類】

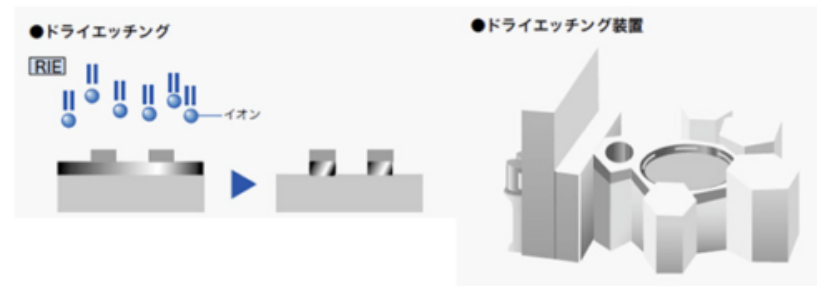
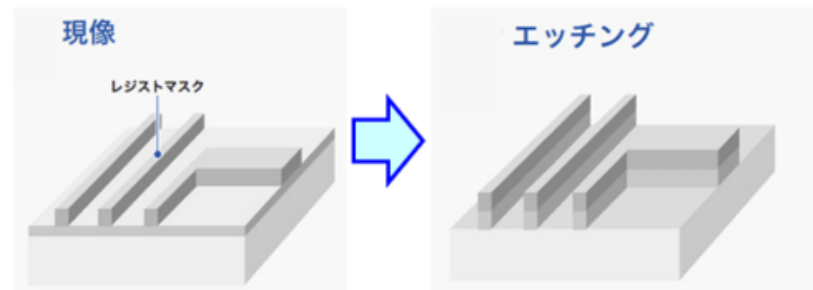
①ドライエッチング

エッチングする材料層に応じたガスをプラズマ化し、発生したイオン、電子、ラジカルと材料層を反応させ揮発性の生成物を作り除去させる

②ウェットエッチング

エッチングする材料層に応じた薬液を使って、材料層を溶かす

	ドライエッチング	ウェットエッチング
使用する材料	反応性ガス	薬液
加工精度	高い	低い
コスト	高い	低い



出典：SCREEN

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

5 イオン注入工程

半導体材料（主にSi）に不純物をドーピングして、電気特性を変更するための工程。

ドーピングする不純物は、周期表で4族のSiに対して、1つ価電子の少ない3族のボロンや1つ1つ価電子の多い5族のリンなど。

前工程：イオン注入工程とは

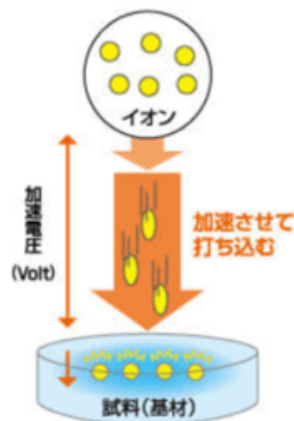
シリコンウェハ（イレブンナイン以上の超高純度の材料）に不純物を注入する

⇒電気的な性質を変えることが目的

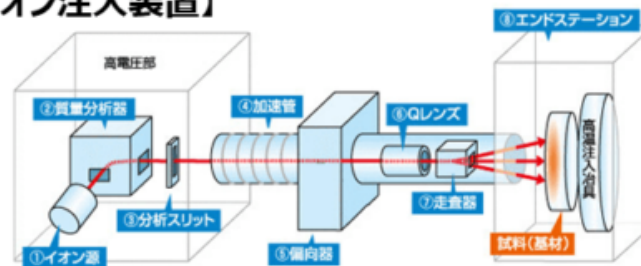
この不純物も超高純度のPやB

【イオン注入法】

イオン化させた不純物を電界加速して
ウェハ表面から打ち込む方法



【イオン注入装置】



- ①イオン源：目的とする元素のイオン発生源
- ②質量分析器：イオンを質量と電荷の違いにより分離
- ③分析スリット：必要なイオンのみを選択
- ④加速管：イオンを必要なエネルギーに加速させる
- ⑤偏向器：ビームを偏向
- ⑥Qレンズ：ビームを整形
- ⑦走査器：ビームをX,Y方向に走査
- ⑧エンドステーション：ウェハへ注入

出典：イオンテクノセンター

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

5 イオン注入工程 その2 「熱処理工程」

イオン注入で注入したイオンを拡散させる目的と、イオン注入で損傷したSiの結晶を修復するために、高温でアニーリングを行う。

ドーピングする深さやドーピングの量は、イオンの加速量や注入後の高温でのアニーリングの温度・時間で制御することが可能。

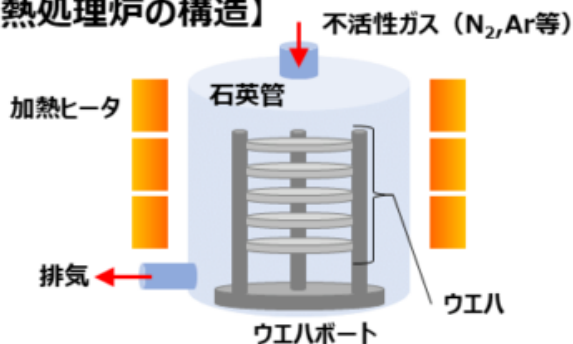
前工程：熱処理工程とは

注) Boron Phosphorus Silicon Glass (ボロンリンケイ酸ガラス)の略、層間の絶縁膜

さまざまな目的の下、ウェハに熱エネルギーを与えて処理する工程

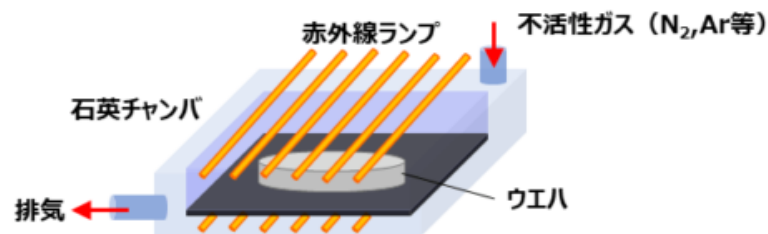
プロセス	目的	熱処理温度	装置
イオン注入後アニール (活性化)	・結晶性の回復 ・イオン注入した不純物の活性化	600～1000℃	・熱処理炉 ・ランプアニール
リフロー	・BPSGを熱で流動化させ平坦化	950～1100℃	
シリサイド化	・Siと他の金属との反応によるコンタクト形成	400～600℃	
シンタリング (アロイ)	・Siと配線金属との反応によるオーミック性向上	450～500℃	

【熱処理炉の構造】



ウエハポートにウエハを複数枚のせ、加熱された石英管内に挿入する

【ランプアニールの構造】



石英チャンバ内のウエハに1枚ずつ赤外線ランプで高速加熱する

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

6 平坦化工程

トランジスタの間を電氣的に分離するためのLOCOSでできた段差の平坦化や、多層配線工程で各配線層を形成した際に凹凸を発生させないため表面を削り表面を平坦にするための工程。微細化が進み、リソグラフィ工程で焦点深度が浅くなっているため、平坦度の要求がきつくなっている。

LOCOS：Local Oxidation of Silicon。代表的素子分離法。窒化膜で酸化防止マスクされた部分以外のシリコン基板を酸化し、この酸化膜の層により周囲から電氣的に絶縁された領域（活性領域）を作る方法。

前工程：平坦化工程とは

微細化、高集積化のためにウエハ表面の凹凸を平坦化する工程

⇒CMPによって実現される

【CMPとは】

Chemical Mechanical Polishingの略称

化学機械研磨のことで、化学的な反応と機械的な力を合わせてウエハ表面を研磨すること

・スラリー

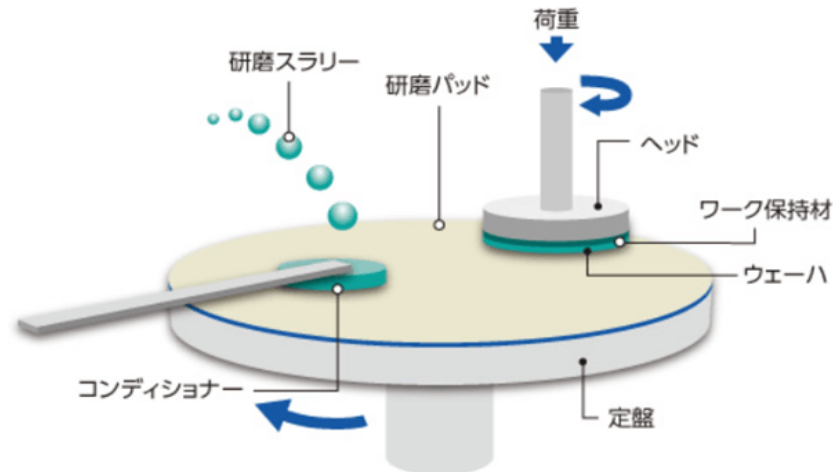
研磨材（アルミナやシリカ等）に界面活性剤、アルカリ成分等が含まれた薬品
研磨する材質によって使い分けられている

・パッド

ウエハ表面が押し当てられる研磨布
樹脂、不織布、ウレタンフォーム等が使われる

・コンディショナー

パッド性能を維持するために行うコンディショニング（ドレッシング）用の工具



半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

7 検査工程 その1【ウェハ検査工程】

前工程で作成したデバイスの特性に問題がないか、回路が正常に動作するかなどを確認する工程。

【ウェハ検査】

膜厚測定、アライメント精度測定(マスクパターンの合わせ精度を測定)、異物・欠陥検査、外観検査、特性検査からなる。

前工程：ウエハ検査工程とは

各加工工程の中で実施されるさまざまな検査工程

検査工程	目的	装置
膜厚測定	成膜した薄膜や、エッチングした後の残膜が狙い通りの厚さになっているかを測定する	・膜厚測定器 (エリブソメーター)
寸法測定	素子や配線が狙い通りの寸法になっているかを測定する	・測長SEM (走査電子顕微鏡)
アライメント精度測定	フォトリソグラフィ工程におけるマスクパターンの合わせ精度を測定する	・重ね合わせ測定装置
異物・欠陥検出	パーティクルやパターン欠陥等を検出する	・パターン付きウエハ検査装置 ・パターン無しウエハ検査装置
外観検査	キズや汚れ、異物等の有無を検出する 機械で自動検査をする場合と人による官能検査の場合がある	・自動外観検査装置 ・金属顕微鏡 ・実体顕微鏡
特性検査 (PCM)	Process Control Monitorの略称 ICを構成している素子、回路を単体レベルに分離させた評価用素子を測定することで回路性能、製造プロセス評価に用いられる TEG (Test Element Group) と呼ばれる	・PCM用テスタ

ロット単位やウエハ単位で測定される

⇒測定データは一元管理され、歩留りや信頼性に関するバックデータとして工程改善等に利用される

半導体製造「前工程」＝シリコンウェハ上に回路を形成する工程＝

7 検査工程 その2【ウェハ電気特性検査工程】

【ウェハ電気特性検査】

ウェハ上に作り込まれたICを1チップずつ電気特性試験を行う工程。

専用のテスト装置に、上のパッドに針を落とすためのプローブカードをセットし、プローブカードを通して、上の回路の特性を測定。

前工程：ウェハ電気特性検査工程とは

ウェハ上に作り込まれたICを1チップずつ
電気特性の試験を行う工程

・テスト

ICに一定の信号を入力し、ICが出力する信号をあらかじめプログラムされた正しい信号と比較して良否判定を実施

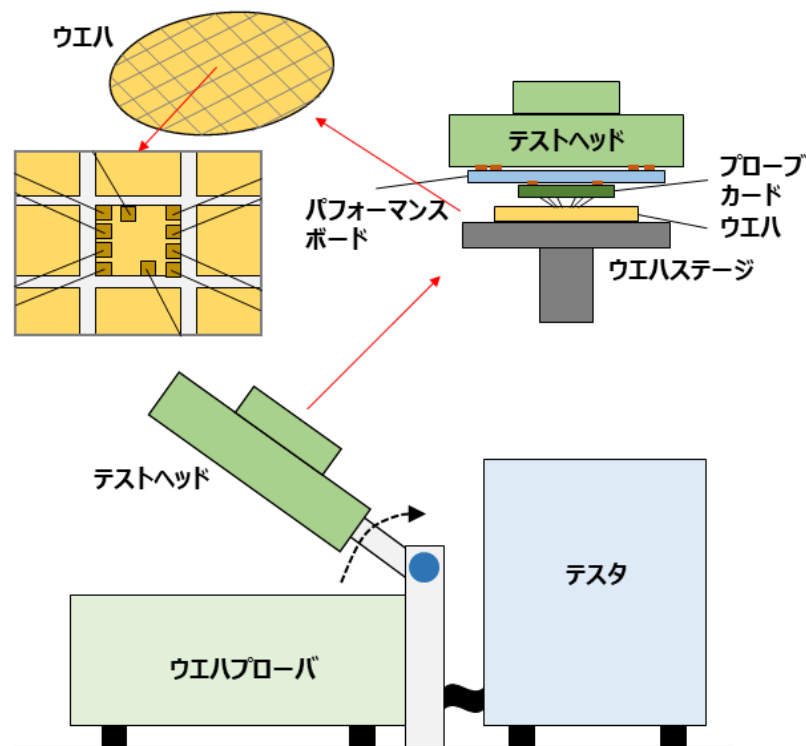
・ウェハプローバ

測定するウェハをステージ上に運び、テストヘッドに取り付けられたプローブカード経由してテストからの信号を伝える

・プローブカード

ICの全電極に合わせてプローブと呼ばれる針を配置したカード

⇒不良判定されたチップはインクが打点され、
外観上で不良と認識できるようになる



= 目 次 2/2 =

3. 半導体製造工程概要

5 イオン注入工程

6 平坦化工程

7 検査工程

その1 【ウェハ検査工程】

その2 【ウェハ電気特性検査工程】

後工程

1 ダイシング工程

2 組立・検査工程

4. 半導体製造における水の役割

半導体製造と水需要

半導体製造に使用される水(超純水と機能水)

半導体洗浄プロセス

半導体工程におけるフッ化水素の役割

おわりにかえて

半導体製造「後工程」＝ウェハ上のチップをパッケージに収める工程＝

1 ダイシング工程

ウェハを切断して1つ1つのチップに分ける工程。

1つ1つのチップのことを「ダイ」と呼ぶ。ウェハからダイを切り出す工程ゆえ、「ダイシング」と呼ぶ。

後工程：ダイシング工程とは

ウェハ上に作り込まれたICを1チップずつに切り分ける工程

【ダイシング工程の流れ】

①テープ貼り付け

紫外線を照射すると粘着力が弱くなるUVテープを貼り付ける
テープとウェハをフレームに固定する

②ダイシング

・ブレードダイシング

ダイシングブレード（ダイヤモンド砥粒が付いた円形刃）を使ってチップ間（スクライブライン）に沿ってカットする

・レーザーダイシング

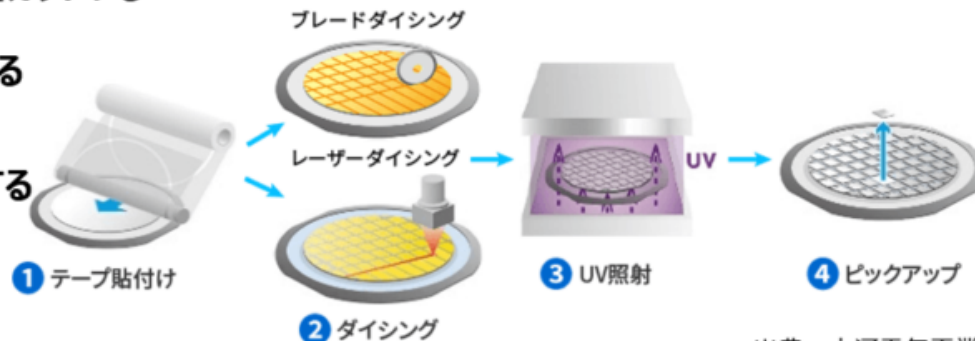
ブレードの代わりにレーザーを使ってカットする

③UV照射

ウェハの裏面から紫外線（UV光）を照射する
⇒UVテープの粘着力が落ちる

④ピックアップ

テープを引き延ばし（エキスパンド）、隣接するチップ間の距離を取ってから良品チップのみをピックアップする



出典：古河電気工業

半導体製造「後工程」＝ウェハ上のチップをパッケージに収める工程＝

2 組立・検査工程

組立工程はダイボンディング工程、ワイヤボンディング工程、モールド工程で構成される。

ダイボンディング工程：リードフレームの中心にICチップを銀ペーストで接着。

ワイヤボンディング工程：リードフレームのリードとICの電極を金ワイヤで接続。

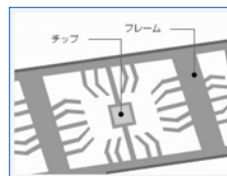
モールド工程：外部からの物理的な接触や汚染等を避けるために樹脂でチップ全体を封止。

最終検査工程：DCテスト、ACテスト、機能テスト、寿命テスト、機械的ストレステストを実施。

後工程：組立・検査工程とは

ダイボンディング工程とは

1チップずつに切り分けられたICをパッケージの基板となるリードフレームに載せて貼り付ける工程



リードフレームのICチップを載せる位置（アイランド）上に銀ペースト樹脂を載せ、その上にICを接着する

ワイヤボンディング工程とは

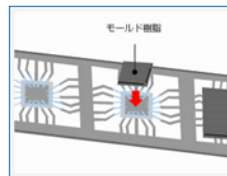
ICの電極パッドとリードフレームの電極を1つずつ金細線で接続する工程



リードフレームのリードとICの電極をワイヤで接続する

モールド工程とは

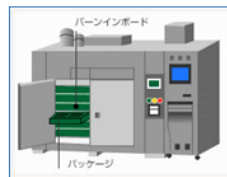
外部からの物理的な接触や汚染等を避けるために樹脂で封止する工程



ICとリードフレームを樹脂で囲って保護

最終検査工程とは

パッケージ化された状態での最終的な電気特性検査をする工程



バーンイン（温度と電圧をかけた試験）によってチップ良否を判定

= 目 次 2/2 =

3. 半導体製造工程概要

5 イオン注入工程

6 平坦化工程

7 検査工程

その1 【ウェハ検査工程】

その2 【ウェハ電気特性検査工程】

後工程

1 ダイシング工程

2 組立・検査工程

4. 半導体製造における水の役割

半導体製造と水需要

半導体製造に使用される水(超純水と機能水)

半導体洗浄プロセス

半導体工程におけるフッ化水素の役割

おわりにかえて

半導体製造と水需要

- 1工場でも最低でも200メガリットル/日(水道水なら約67万人の給水規模)
- 全世界で毎年推定120万メガリットルの水を使用。(東京都平均使用量約4,060メガリットル/日)

主要各社の水資源利用状況

- TSMC (TSMC Annual Report 2023ほかより)
台湾での水の消費量は113,610メガリットル、内1,263メガリットルが再利用水。
2030年までに全世界における水の再利用率を2010年比30%以上増加させることを目標。
2025年運開予定のアリゾナ州新工場で65%の水リサイクル施設を建設予定。

TSMC Water Usage in Recent Two Years

Year	Total Water Usage (m ³) (Note 1)	Unit Product Water Usage (L/12-inch wafer-e-layer)
2023	113,610,463	176.4
2022	104,681,272	137.3

TSMC Water Usage Reduction Target and Achievement Status

Strategy	2030 Goal	2023 Target and Achievement	Achievement Status
Enforce climate change mitigation policies, implement water conservation and water shortage adaptation measures	Reduce unit water consumption (liter/12-inch equivalent wafer mask layer) by 30% (Base year: 2010)	Increased unit water consumption by 25.24% (Target: -2.7%)	Unachieved (Note 2)

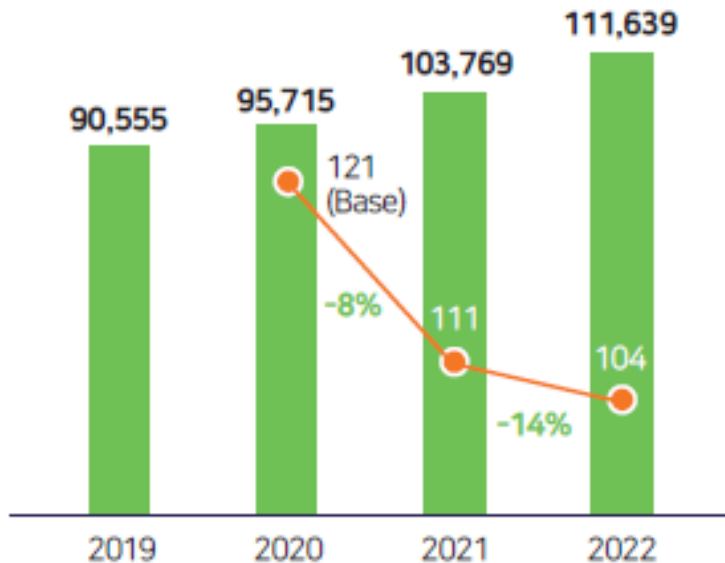
Note 1: Includes TSMC fabs in Taiwan and subsidiaries total use of city water and reclaimed water.

Note 2: Due to the impact of the global economic cycle, the overall production capacity of TSMC in 2023 did not meet expectations, resulting in an increase in unit product water consumption and failure to achieve the annual target. Therefore, TSMC will continue to implement process water saving and the use of reclaimed water.

- 韓国半導体メーカーSKハイニックス (SK Hynix Sustainability Report 2023より)
 - 水消費量：(2019) 90,555メガリットル ⇒ (2022) 111,639メガリットル
 - 再利用：(2019) 32,622メガリットル(36%) ⇒ (2022) 47,877メガリットル(43%)
 - 2030年までに2019年比3倍以上の量の水の再利用を目標
 - 消費量削減：(2020) 121メガリットル/1億Gb ⇒ (2022) 104メガリットル/1億Gb (14%)
 - 2026年までに35%削減を目標

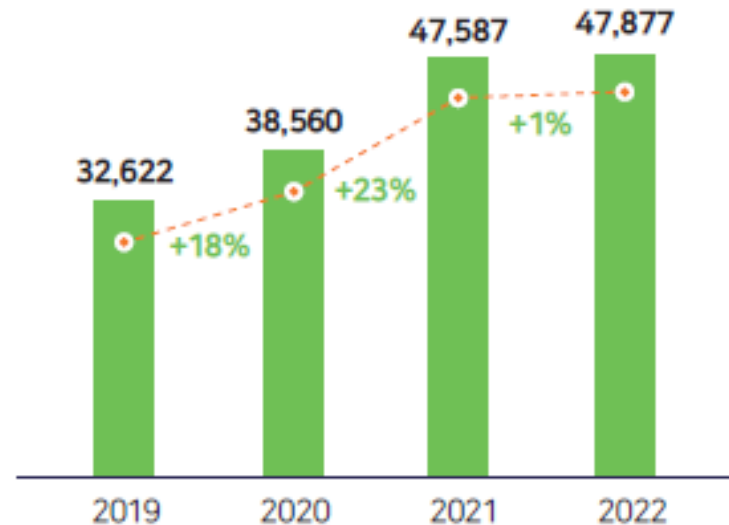
Water Withdrawals and Intensity

■ Withdrawals (Unit: 1,000 tons)
● Water Intensity
 (Unit: 1,000 tons/100 million Gb eq)



Water Reused

(Unit: 1,000 tons)



半導体製造に使用される水

超純水:

半導体製造における洗浄工程、エッチング工程で超純水を使用

超純水の不純物の割合(50mプール一杯の水に含まれる不純物の量)

水道水：ドラム缶2～3本分の不純物

純水：角砂糖1個分の不純物

超純水：耳かき一杯分の不純物

水質指標：

比抵抗(@25°C)が一般的に用いられる。

(純水) **1 MΩ·cm**以上 vs (超純水) **10 MΩ·cm**以上

半導体工場では18MΩ·cm以上の厳守を要求

理論純水の比抵抗 18.24MΩ·cm

国際半導体技術ロードマップが発行した要求水質を次ページに示す

機能水:

超純水をベースに洗浄力を高めた水。

半導体製造において、薬品使用量の低減や電子材料の多様化に対応。

超純水に対してさらなる高純度化や特定の機能を持たせることで、製造プロセスの要件に合わせて調整。

半導体製造における超純水の要求水質

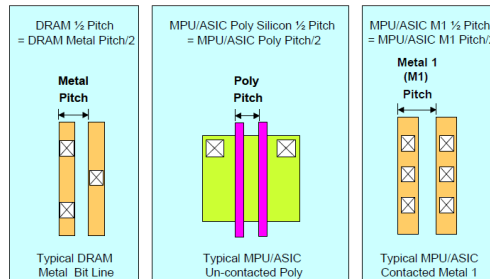
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DRAM 1/2 pitch (nm)	24	22.0	20.0	18.0	17.0	15.0	14.0	13.0
MPU/ASIC Metal 1(M1) 1/2 p (nm)	32	28.3	25.3	22.5	20.0	17.9	15.9	14.2
MPU 物理ゲート長 (nm)	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9
臨界粒子サイズ (nm)	12	11	10	9	8.5	7.5	7.0	6.5
TOC(全有機炭素) $\mu\text{g/L}$	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
総シリカ (SiO ₂) $\mu\text{g/L}$	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
微粒子数 ¹ #/L	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000
溶存酸素 $\mu\text{g/L}$	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
溶存窒素 $\mu\text{g/L}$	8-18	8-18	8-18	8-18	8-18	8-18	8-18	8-18
過酸化水素 $\mu\text{g/L}$	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
金属 ² ng/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
重要金属 ³ ng/L	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
他の重要イオン ng/L	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
リン酸(HPO ₄) ng/L	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
ボロン ng/L	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50

¹: 臨界粒子径 ²: As, Ba, Mn, Pb, Sn, Sb, V

³: Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Na, Ni, Ti, Zn

ピッチ：

周期的に並んだ一つの配線幅と配線間隔を合計したもの



MPU (Micro Processing Unit) 物理ゲート長：

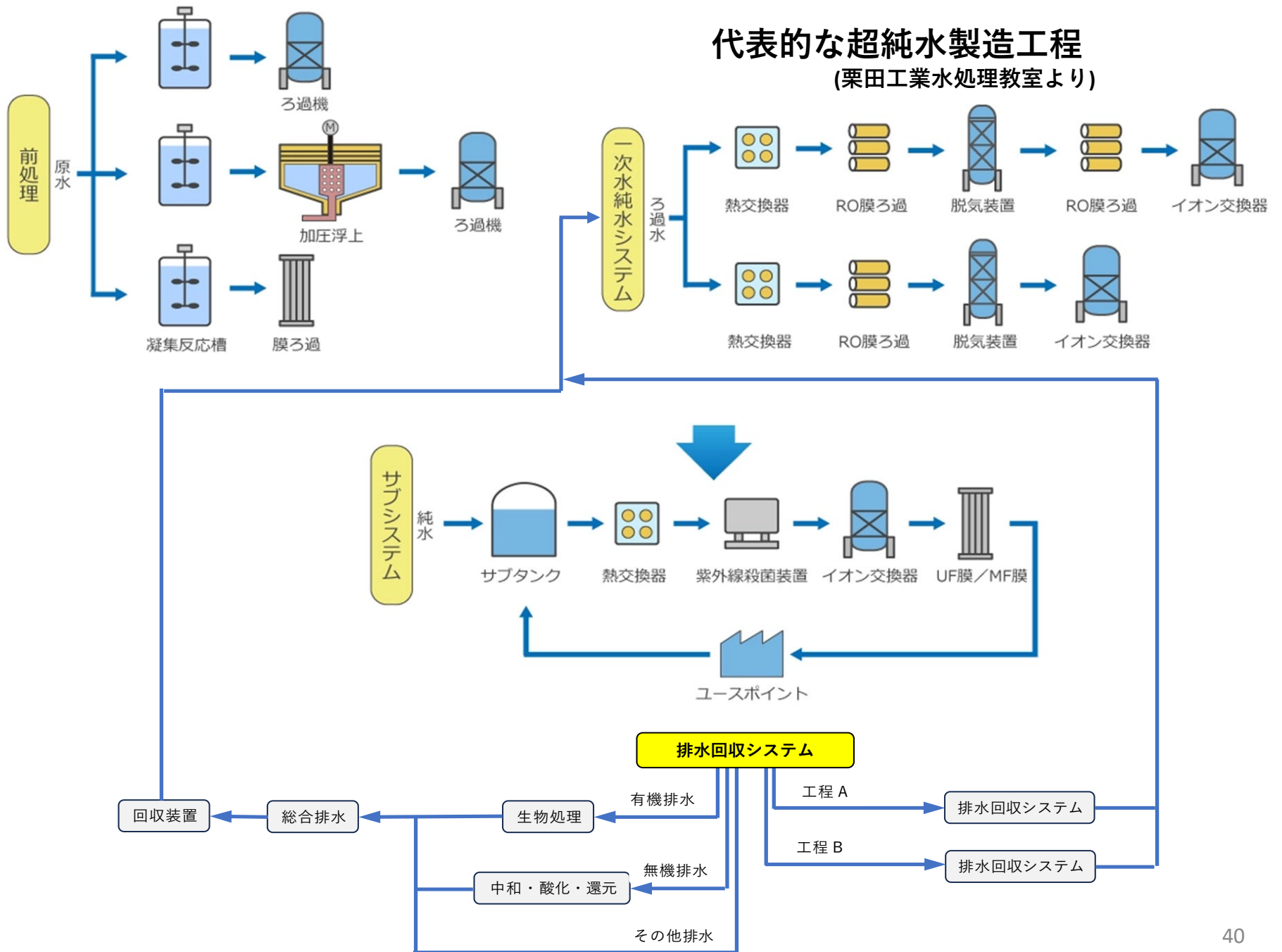
トランジスタのゲート(On/Offスイッチ)の長さ。
小さくなるほど高い集積度と高性能を実現。

半導体製造の主要工程と利用技術

除去 対象項目	工程	一次純水システム			サブシステム(ポリシングシステム)			
	前処理 システム	RO	イオン交換	脱気	UV殺菌	UV酸化	デミネー	UF
イオン	凝集+ろ過	×	◎	◎	×	×	◎	×
TOC		△	◎	△	×	◎	◎	×
微粒子		◎	○	△	×	×	×	◎
溶存酸素		×	×	◎	×	×	×	×
シリカ		△	○	◎	×	×	○	×
生菌		×	△	×	◎	×	×	◎
炭酸ガス		×	△	○	×	×	△	×

- RO : 逆浸透膜(Reverse osmosis membrane)。孔径は2nm以下。(水分子約0.38nm)
- UV : 紫外線(Ultraviolet)
- デミネー : イオン交換樹脂を概ね数百リットル以下の容器に入れたもの。純水器。
- UF : 限界ろ過膜(UltraFiltration membrane membrane)。孔径は概ね0.01~0.001 μ m。
RO < UF < MF (精密ろ過膜、50nm~10 μ m)

代表的な超純水製造工程 (栗田工業水処理教室より)



半導体洗浄プロセス

500以上の半導体の製造工程数の内30%~40%が洗浄工程

「RCA洗浄」半導体製造に用いられる代表的な洗浄プロセス。米国RCA社が開発

「RCA洗浄」の種類と役割

第1段階：**SPM** (Sulfuric acid(硫酸)とhydrogen peroxide(過酸化水素)の混合液)

SPMを使い、**有機物**を除去。別称「ピラニア洗浄」とも呼ばれる。

第2段階：**APM** (Ammonia(アンモニア)と過酸化水素を混合液)

APMにより、**パーティクルと有機物**を除去。

APM溶液はウエハー表面にパーティクルが付着する力を弱め、剥がれるのを促進。超音波による振動をかけ、パーティクルの除去を促進。

第3段階：**DHF** (Dolute Hydrogen Fluoride(フッ酸と純水の混合液))

DHFにより、**金属や酸化物(酸化膜)**を除去。フッ酸そのままではシリコンも溶かしてしまうので、純水にフッ酸を少量、ウエハー表面のみに作用するように調製。

第4段階：**HPM** (Hydrochloric acid(塩酸)と過酸化水素の混合液)

HPMにより、残った**金属や酸化物**を除去。同時にウエハー表面に不働態化層(酸化膜)を再形成しパーティクルや金属が再付着するのを抑制。

第5段階：乾燥

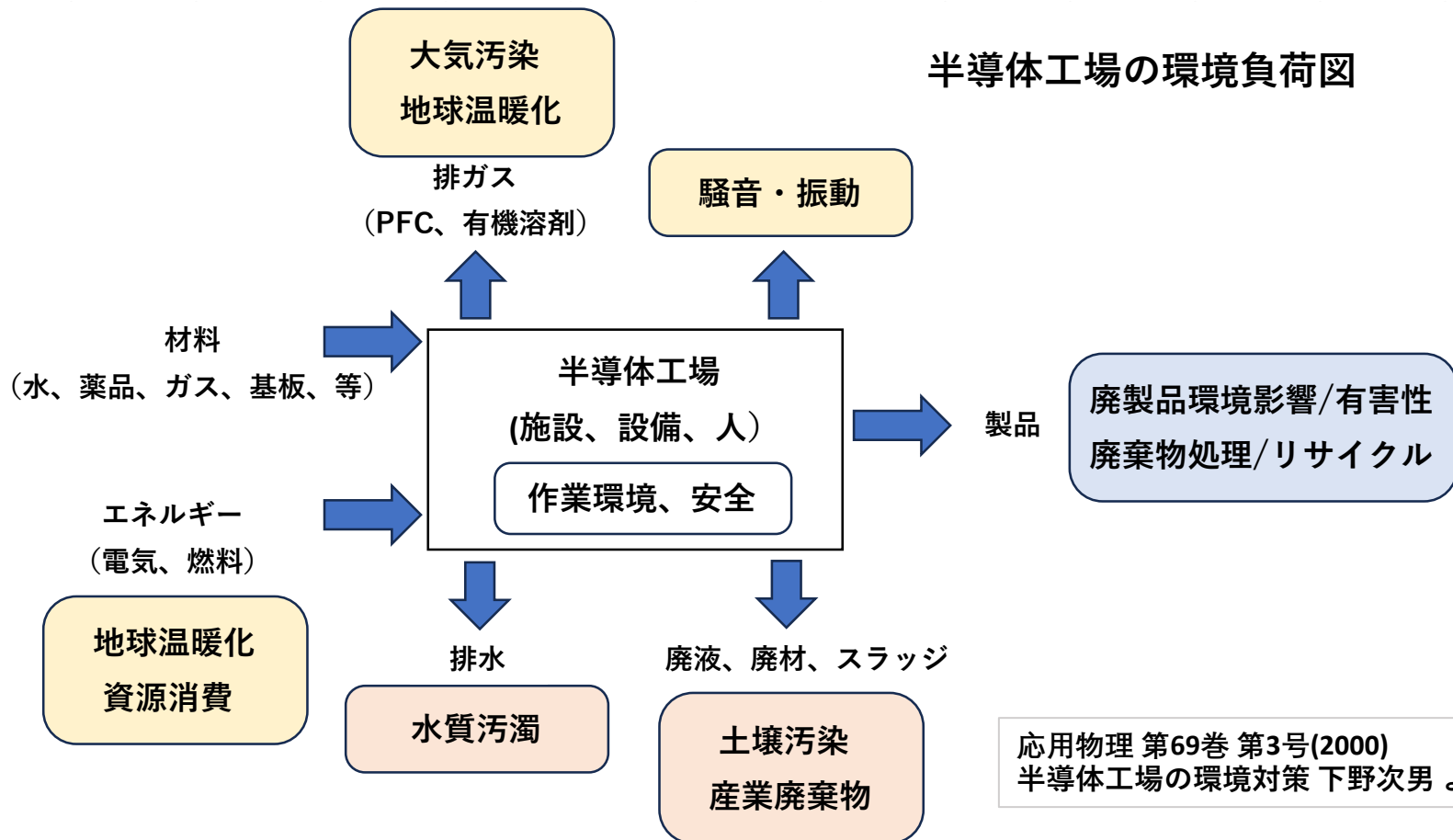
最後にウエハーを純水により洗い流した(リンス工程)後、乾燥工程を実施。

半導体工程におけるフッ化水素の役割

- 反応性がよく、プラスチックやガラスを溶かす。
- フッ化水素の沸点は19.5°Cのため、常温(25°C)では気体。
- 温度が非常に低かったり、高い圧力をかけると、簡単に液化できる。
- フッ化水素は水に溶けやすい特徴があり、半導体製造において、各工程の前後に実施される「洗浄工程」「エッチング工程」で使用される。
- 「エッチング工程」では回路以外の不要な部分を除去する際に使用。
BHF、濃フッ酸、フッ硝酸、など
- 「洗浄工程」では回路に損傷を防ぐために極微細な残留物を除去するために使用。
日増しに高まる集積度(結線幅の微細化)に対応するためには、不良率を最小限に抑えるには、超高純度のフッ化水素が必要。

おわりにかえて

- 半導体製造では多大なエネルギーと大量の純水/ガス/薬品などの材料を使用する。
- デバイスの高集積化・高機能化とシリコン基板の大口径化に伴い、環境負荷は増大する方向にある。
- 地球温暖化防止に向けて省エネルギー対策と温暖化ガスであるPFC(パーフルオロカーボン)の削減対策には目を向けられているが、水質汚染に関する取り組みは緒に就いたばかりといえる。



ご清聴ありがとうございました