

# 世界の半導体製造の未来図： PFAS フリー戦略と次世代代替技術の最前線

Semiconductor Manufacturing's Sustainable Future: PFAS-Free Roadmaps and Cutting-Edge Alternative Technologies

- PFAS フリー時代の設計図！ArF 液浸から CMP、洗浄まで、工程別の代替物質とプロセス最適化を徹底解説！
- 規制リスクを機会に変える！欧州、米国、アジアの PFAS 規制動向と、半導体サプライチェーン再編の道筋を提示！
- 装置性能の維持が鍵！静電チャック、シール材、潤滑油... 装置部品における PFAS フリー材料の実用性を評価！
- 化学者の武器！POE、APG など、次世代洗浄・剥離用界面活性剤の性能と導入メリットを深掘り解説！
- 「PFAS フリー戦略における失敗課題の類型と事例」から学ぶ、致命的な歩留まり低下を防ぐ教訓を解説！
- 配管、温調、クリーンルーム・ユーティリティまで、PFAS フリー化の全体像と具体的な実装計画を網羅！
- 短鎖／部分フッ素誘導体のリスクと、シリコン系 (PDMS) などの完全代替候補の特性を比較分析！
- 技術者のための実践戦略！PFAS 依存度低減に向けた「プロセス条件最適化」の具体的手法と事例を解説！

## = 刊行にあたって =

現代社会を支える中核技術である半導体は、スマートフォンから AI、自動運転に至るまで、あらゆるイノベーションの基盤である。その製造プロセスは極めて精密かつ複雑であり、ナノレベルの精度を実現するため、長年にわたり高度に機能する特殊な化学物質が不可欠とされてきた。その中でも、PFAS（パーフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物）は、水や油を弾く撥水性、高い熱安定性、優れた耐薬品性といった独自の特性により、半導体製造の多岐にわたる工程で利用されてきた。具体的には、フォトレジストの高性能添加剤、CMP（化学機械研磨）のスラリー添加剤、高機能な界面活性剤、そしてフッ素樹脂として装置内部のシール材やパッキン、静電チャックの誘電材料などに幅広く使用されている。これらの PFAS は、半導体製造における高精度化、高集積化を支える「縁の下の力持ち」として、産業の発展に欠かせない存在であった。

しかし、近年、この便利な化学物質が環境および人体にもたらすリスクが国際的な課題として大きくクローズアップされている。PFAS は「永遠の化学物質 (Forever Chemicals)」とも呼ばれ、自然界でほとんど分解されず、生態系や人体に蓄積されることが懸念されている。この環境リスクの高まりを受け、欧州をはじめとする先進国を中心に、PFAS の製造および使用を段階的に制限または禁止する強力な規制の動きが加速している。米国では州レベルでの規制が進み、日本や中国でも環境モニタリングや排出規制の検討が進められており、半導体産業にとって PFAS の使用継続はもはや許容されない未来が迫っている。

この国際的な規制強化は、半導体産業全体にサプライチェーンの根幹を揺るがすほどの巨大なパラダイムシフトを迫っている。PFAS フリーへの転換は、単なる化学物質の置き換えに留まらず、これまで PFAS の特性に依存してきたプロセスの再設計、装置部品の再開発、そしてそれに伴う製造コストや歩留まりへの影響という、極めて複雑で困難な課題を含んでいる。特に、ナノスケールでの精度が求められる半導体製造において、代替物質が同等の性能、特に高い信頼性や寿命、化学的安定性を提供できるかは大きな論点である。

本レポートの目的は、こうした喫緊の課題に対し、実務レベルで理解し、戦略を立てるための具体的な羅針盤を提供することにある。以下の主要なテーマに焦点を当てて、現状と未来を詳細に分析する。

まず、半導体製造の主要工程、すなわちフォトリソグラフィ（フォトレジスト高機能添加剤、ArF 浸漬用代替技術）、洗浄・剥離（アルキルポリグルコシドやポリオキシエチレン系界面活性剤など）、平坦化 (CMP)、ドライプロセス後処理において、どのような PFAS フリー代替候補物質が検討され、導入が進められているのかを工程別の PFAS 代替候補物質として整理する。

次に、製造を支えるインフラと装置部品に焦点を当てる。装置部品（シール材・パッキン）、静電チャックの誘電材料、そして潤滑油・作動油、クリーンルーム・ユーティリティ、温調システム、配管といったあらゆる要素において、PFAS フリー化を達成するための具体的な技術的アプローチ（例：シリコン系 (PDMS) の活用）を探索する。

さらに重要なのが、代替物質への依存度を低減するための戦略である。PFAS 依存性低減に向けたプロセス条件最適化の具体例や、代替化学物質として暫定的に使われる可能性のある短鎖／部分フッ素誘導体のリスクと評価、そして最も重要な教訓として、半導体分野における PFAS フリー戦略における失敗課題の類型と一般的な事例を共有し、今後の成功戦略への道筋を示す。

PFAS フリーへの挑戦は、環境負荷を低減し、持続可能な半導体産業を構築するために避けられない道である。本レポートが、未来の半導体製造を担う技術者にとって、この困難かつ重要な変革期を乗り越えるための一助となることを心から願う。

CMC リサーチ調査部

## 【本書の構成】

- 第Ⅰ編 半導体分野における PFAS フリー戦略と代替技術
- 第Ⅱ編 半導体分野における PFAS フリー戦略の失敗と課題
- 第Ⅲ編 半導体製造プロセスにおける PFAS 代替
- 第Ⅳ編 製造装置・インフラにおける PFAS 代替
- 第Ⅴ編 代替候補物質と今後の展望

## <発行要項>

- 発行：2025 年 12 月 26 日
- 定価：本体(冊子版) 330,000 円(税込)  
本体+CD(PDF 版) 440,000 円(税込)
- 体裁：A4 判・並製・383 頁
- 編集・発行：(株)シーエムシー・リサーチ
- ISBN 978-4-910581-74-3

| 注文書 |   | メルマガ<br>会員の<br>登録 | 登録済み / 登録希望   | お申込み・お問合せ   |
|-----|---|-------------------|---|---|
| 品名  | 世界の半導体製造の未来図：<br>PFAS フリー戦略と次世代代替技術の最前線 | 価格                | 本体(冊子版) : 300,000 円(税込 330,000 円)<br>本体+CD(PDF) : 400,000 円(税込 440,000 円)<br>※メルマガ会員は定価の 10%OFF | 編集発行：<br><b>(株)シーエムシー・リサーチ</b><br>101-0054<br>東京都千代田区神田錦町<br>2-7 東和錦町ビル 3F<br><br><b>FAX : 03 (3291) 5789</b><br><b>TEL : 03 (3293) 7053</b><br>URL: <a href="https://cmcre.com">https://cmcre.com</a><br>E-mail : <a href="mailto:order_7053@cmcre.com">order_7053@cmcre.com</a><br><br> ← 二次元コードを読み込むと<br>メール作成テンプレートが<br>開きます |
| 会社名 |   | TEL               |   |   |
| 部課名 |   | FAX               |   |   |
| お名前 |   | E-mail            |   |   |
| 住所  | 〒                                       |                   |   |   |

\*書籍はご注文を受けた翌営業日以降順次発送いたします。請求書は別途送付いたします。\*お支払いは請求書指定口座に納品日の翌月末日までに振り込みをお願いします。

## 構成および内容 I

### 第Ⅰ編 半導体分野におけるPFASフリー戦略と代替技術

#### 第1章 欧州

1. 概要
2. 欧州のPFAS規制の概観
3. 欧州のPFAS代替戦略
4. 環境規制への対応（REACH規則）の役割
5. PFAS規制「猶予」戦略の概要と問題点
6. 欧州における半導体PFAS代替プロジェクト
  - 6.1 概要
  - 6.2 GENESISプロジェクト
  - 6.3 Imec PFASフリーCAR開発
  - 6.4 HATE-FLUORプロジェクト
  - 6.5 SEMI Europe / ESIA PFAS代替推進

#### 第2章 米国

1. 概要
2. フォトリソグラフィ材料（低分子PFAS代替）
3. エッチングプロセス（PFCs削減技術）
4. 装置構成部品（高分子PFASの代替検討）
5. 廃水処理・除去技術（環境排出の削減）
6. 米国における半導体PFAS代替プロジェクト
  - 6.1 概要
  - 6.2 SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International)
  - 6.3 半導体PFASコンソーシアム
  - 6.4 IDE TechnologiesのPFAS除去技術
  - 6.5 ECT2の半導体向けPFAS除去ソリューション
  - 6.6 Intel PFAS代替ロードマップ

#### 第3章 中国

1. 概要
2. POPs条約に基づく特定PFASの厳格な規制
3. 中国のPFAS規制における戦略的な「例外」と「短鎖PFAS」の扱い
  - 3.1 規制の「例外」措置の詳細と戦略的意図
  - 3.2 短鎖PFASの扱いの詳細
4. 半導体製造におけるPFAS代替技術開発の動向

#### 第4章 日本

1. 概要
2. PFAS規制の国際動向と日本の対応
  - 2.1 国際的な規制強化の潮流
  - 2.2 日本の半導体産業におけるPFAS代替戦略
  - 2.3 材料分野における技術的優位性の確立

### 第Ⅱ編 半導体分野におけるPFASフリー戦略の失敗と課題

#### 第1章 性能・機能の維持に関する課題（技術的失敗）

1. 概要
2. 半導体製造におけるPFASフリー代替材の「耐熱性の不足」とその影響
3. PFASフリー代替材の「耐薬品性の欠如」とウェットプロセスの破綻
4. PFASフリー戦略における「表面エネルギーの不一致」とリソグラフィの失敗
5. PFASフリー代替材の「絶縁性能の低下」とチップ性能の破綻
6. PFASフリー化による「摩擦・摩耗の増大」とパーティクル汚染
7. PFASフリー化による「ライフサイクルの短縮」と運用コストの増大
8. PFASフリー化による「残留汚染の発生」とプロセス再構築の必要性

#### 第2章 プロセス・システムに関する課題（導入失敗）

1. 概要
2. PFASフリー化による「既存設備との非互換性」とプロセスの不安定化
3. PFASフリー化による「プロセスの再最適化失敗」と歩留まりの不安定化
4. PFASフリー化による「廃液処理システムへの負荷」とコスト的失敗
5. PFASフリーラインにおける「クロスコンタミネーション」と代替失敗
6. PFASフリー化による「サプライチェーンの多角化失敗」と製造計画の停滞
7. PFASフリー代替材の「適格性評価の長期化」と生産停止リスク
  - 7.1 PFASフリー代替品の「高コスト問題」と市場競争力の喪失
  - 7.2 PFASフリー材料における「スケールアップの失敗」と量産への影響
  - 7.3 知的財産（IP）の障壁
  - 7.4 PFASフリー代替材料による「リサイクル・廃棄コストの増加」

#### 第3章 規制対応・戦略に関する課題（マネジメント失敗）

1. 概要
2. PFAS規制における「定義の誤解」と初期投資の無駄
3. LVEへの過度な依存による代替品の開発遅延とリスク
4. PFASフリー代替材による「消費者の信頼喪失」とブランド毀損

### 第Ⅲ編 半導体製造プロセスにおけるPFAS代替

#### 第1章 フォトレジスト（ArF浸漬用）代替技術

1. 概要
2. PFAS代替技術の二大潮流と詳細
3. ネガ型現像プロセスとPFASフリー化戦略
4. IDM・ファウンドリのPFAS代替戦略
5. PFAS代替技術における材料メーカーへの要求と対応
6. 企業動向
  - ①富士フイルム②セントラル硝子③imec④東京応化工業⑤JSR

#### 第2章 フォトレジスト高機能添加剤

1. 概要
2. 主要な添加剤の種類とその機能
3. 次世代リソグラフィ（EUV）における課題と添加剤
4. フォトレジスト高機能添加剤とPFASの関係
5. フォトレジスト高機能添加剤のPFASフリー化技術の動向

#### 第3章 ドライブプロセス後処理（アッシング残渣除去）

1. 概要
2. アッシング残渣の種類と組成
3. アッシング残渣の除去技術（ドライブプロセス後処理）
4. アッシング残渣除去とPFASとの関係
5. 5PFAS代替候補物質・技術

#### 6. 企業動向

- ①KOKUSAI ELECTRIC②EMD Electronics③東京エレクトロン④SCREENホールディングス⑤日立ハイテク⑥東京応化工業⑦富士フイルム⑧JSR⑨Lam Research⑩DuPont⑪Merck⑫EKC Technology⑬ASML

#### 第4章 CMP工程

1. 概要
2. 業界分析
3. 事業モデルの転換と市場戦略
4. AI/MLによるカスタムCMPレシピ開発

#### 第5章 剥離・洗浄

1. 概要
2. 主要な代替候補
3. 非フッ素系レジスト剥離液
  - 3.1 概要
  - 3.2 剥離作用のメカニズム
  - 3.3 業界分析
4. 超臨界流体剥離技術
  - 4.1 概要
  - 4.2 超臨界CO<sub>2</sub>（scCO<sub>2</sub>）の利用
  - 4.3 非フッ素系共溶媒の添加
  - 4.4 業界分析
5. 代替高分子型界面活性剤
  - 5.1 概要
  - 5.2 PEG誘導体を選択する要因
  - 5.3 PEG誘導体技術の詳細
  - 5.4 製造技術
  - 5.5 業界分析
6. 特殊洗浄・乾燥プロセス（高純度溶媒）
  - 6.1 概要
  - 6.2 特殊洗浄プロセスとPFAS
  - 6.3 PFAS代替候補物質・技術の動向

#### 第6章 洗浄・リンス（界面活性剤）

1. 概要
2. 半導体分野に求められる「PFASフリー界面活性剤」の要件
3. 企業動向
  - ①DIC②Syensqo③Innospec④Evonik / Wilmar⑤Croda⑥AkzoNobel⑦Huntsman⑧Actnano⑨Transene⑩住友化学⑪SCREENホールディングス⑫KOKUSAI ELECTRIC⑬中興化成工業⑭弘前大学⑮名古屋工業大学

#### 第7章 ポリオキシエチレン（POE）系界面活性剤

1. 概要
2. 半導体分野におけるPOE系界面活性剤の用途
3. 非PFAS POE系界面活性剤が注目される背景と要因
4. 業界分析
5. 企業動向
  - ①花王②三洋化成工業③ADEKA④富士フイルム⑤Dow⑥KLK OLEO⑦ライオン・スペシヤリティ・ケミカルズ⑧Croda⑨Evonik⑩日本触媒

#### 第8章 アルキルポリグルコシド（APG）

1. 概要
2. 半導体分野におけるAPG
3. APGの代替としての可能性



4. 半導体分野における APG 注目の背景と要因
5. APG による PFAS 代替アプローチ
6. 技術的課題
7. サプライチェーンとベンダー対応動向
8. 企業動向
  - ①BASF②Dow③Croda④Clariant⑤SEPPI⑥Solvay
  - ⑦Ecover⑧Galaxy Surfactants⑨Transene Company⑩Pilot Chemical / Brenntag

## 第9章 PFAS 依存性低減にむけたプロセス条件最適化

1. 概要
2. プロセス条件最適化による PFAS 使用量の最小化
3. PFAS 依存性低減に向けた技術動向
4. 液浸液管理による PFAS 依存低減
  - 4.1 概要
  - 4.2 課題
5. レジスト膜厚・塗布条件最適化：界面活性剤依存の削減
  - 5.1 概要
  - 5.2 課題
6. PFAS 依存低減戦略の構造と位置づけ
7. 液浸液管理型とレジスト最適化型の比較と統合戦略
8. コストインパクトと収益トレードオフ
9. 企業動向
  - ①ASML②Lam Research③Samsung Electronics④Intel⑤TSMC

## 第IV編 製造装置・インフラにおける PFAS 代替

### 第1章 装置部品（シール材・パッキン）における PFAS 代替

1. 概要
2. 必須とされる PFAS の特性
3. 半導体製造装置用シール材・パッキンの主要素材
4. 半導体製造におけるシール材・パッキンの代替戦略
5. 国際的な PFAS 規制強化の動向
6. 特定 PFAS フリーFKM への移行
7. 企業動向
  - ①Greene Tweed②Freudenberg Sealing Technologies (FST) ③Syensqo④Omniseal Solutions⑤Precision Polymer Engineering (PPE)

### 第2章 静電チャックの誘電材料

1. 概要
2. ESC 誘電材料の主流と PFAS 利用の背景
3. PFAS 利用の背景
4. 窒化アルミニウム (AlN) セラミックスの進化と極限追求
5. PFAS フリーポリマーとハイブリッド材料の探索
6. 企業動向
  - ①NTK セラテック②Entegris③Momentum Technologies④TOTO

## 第3章 表面処理（撥水コート）材料

1. 概要
2. PFAS 撥水コート材料の世代別技術分析と規制の変遷
  - 2.1 第1世代：長鎖PFAS (C8系)の技術的覇権と構造的欠陥
  - 2.2 第2世代：短鎖PFAS (C6系)への移行と技術的妥協
  - 2.3 第2.5世代：C4系PFAS (PFBA・PFSBA等)
  - 2.4 第3世代：PFAS フリー材料（シロキサン系・ポリマー系）
3. シロキサン系コーティング
4. デンドリマー系コーティング
5. ワックス系／アルキル系／炭化水素系撥水コート材料
6. 複合ナノ材料（無機／有機ハイブリッド）
7. 液体状界面（リキッドライク界面）
8. ハイブリッド／極短鎖フッ素混合型
9. 企業動向
  - ①Dow Chemical②Wacker Chemie③信越化学工業④日本化学産業⑤日本パーカライジング⑥ナガセケムテックス⑦ミリオン化学⑧奥野製薬工業⑨トクヤマ⑩三井化学⑪三菱ケミカル

## 第4章 シリコン系（シロキサン、ポリジメチルシロキサン：PDMS）

1. 概要
2. 課題・成長要因
3. 参入障壁と差別化要素
4. 企業動向
  - ①Imec②Fraunhofer ISC③KAIST／Agency for Defense Development (ADD) ④Actnano⑤信越化学工業⑥Dow⑦ADEKA⑧東京応化工業⑨日油

## 第5章 潤滑剤・作動油（真空ポンプ・精密駆動部）

1. 概要
2. 潤滑剤・作動油の種類と特性
3. 代替候補物質・技術
4. 技術動向

## 第6章 配管のPFAS フリー

1. 概要
2. 配管のPFAS フリー化：先端産業を支えるクリーン化技術の動向
3. PFAS フリー配管材の主要な技術動向
4. 企業動向
  - ①栗田工業②積水化学工業③SilcoTek④Saint-Gobain⑤Parker Hannifin⑥Swagelok⑦Ionbond

## 第7章クリーンルーム・ユーティリティ（表面処理）

1. 概要
2. 半導体分野におけるクリーンルーム・ユーティリティとPFAS 対策
3. PFAS と半導体表面処理への影響

4. 半導体分野における利用の背景と技術動向
5. 高性能フィルター・分離膜（ユーティリティ・コンタミネーション制御）
  - 5.1 概要
  - 5.2 半導体分野におけるPFAS 規制とフィルター・分離膜の関係
6. 企業動向
  - ①SilcoTek

## 第8章 温調（熱媒体・冷媒）

1. 概要
2. 温調技術の技術トレンド
3. PFAS 規制への対応と動向
4. PFAS 規制が温調技術に与える影響と技術革新

## 第V編 代替候補物質と今後の展望

### 第1章 代替化学系

1. 概要
2. アルキルポリグルコシド (APG)
3. ポリオキシエチレン (POE) 系界面活性剤
4. シロキサン／シリコン誘導体
5. 非フッ素高分子撥水材料
6. フッ素系短鎖／部分フッ素化合物
7. 新規設計化合物

### 第2章 工程別のPFAS 代替候補物質

1. 概要
2. フォトリソ（ArF 浸漬用）における界面制御技術の代替
3. 表面処理（撥水コート）におけるフッ素樹脂の代替
4. 洗浄・リンス（界面活性剤）における代替と超高純度化
5. プロセス条件最適化によるPFAS 依存の抜本的低減
6. 工程別PFAS 代替候補と導入ロードマップ

### 第3章 短鎖／部分フッ素誘導体

1. 概要
2. 短鎖PFAS
3. 部分フッ素誘導体
4. 技術動向の背景と要因

