

[論文]

半導体産業の環境問題

—半導体企業の環境会計に向けた前梯的考察—

長 田 芙 悠 子

〈目 次〉

1. はじめに
2. 半導体産業の今日的「狂騒」
3. 半導体産業の環境負荷及び環境汚染の先行研究
4. 半導体製造工程における環境関連の概観
5. 半導体産業の環境問題への今日的アプローチ
6. おわりに

1. はじめに

半導体が、鉄に替わり、「産業のコメ」と言われるようになって久しい。近年では、米中の覇権争いとの関連で、経済安全保障上の「戦略物資」と看做されるようになってきている。しかし、政治的な性格付けが関与し得る範囲は限られているが、半導体はもっと広汎に、各産業の製品並びに製造装置、あるいは生活に浸透している。

そうであるにも関わらず、わが国の半導体産業は1980年代の隆盛から一転して凋落傾向に陥り、21世紀に入っても低迷状態が続いている。そのため再生・復活が悲願となっており、世界トップの半導体ファウンドリ（製造専門企業）であるTSMC（台湾積体回路製造）の工場誘致なども、その一環と言える。

一方で、脱炭素等の環境問題への取組みは、待ったなしの国際的責務となっている。従って、それらの両立が不可欠であり、適切な対応をしていかなければならない。半導体製造は、集積度の間断ない増大と精緻を極める製品のために、大量の超純水と多種多様な化学物質を多量に使用しており、環境に多大な負荷を掛け、汚染の危険性を内包している。それ故に、環境に十分に配慮した上で、再生・復活を図っていくことが求められている。半導体企業にとって、環境への配慮は第一義的には技術的、工学的な方策を実施していくことであるが、それを包含した企業ガバナンスを組織的に遂行していかなければ、構造的な機制として定着し得ない。そのために、技術的観点に留まらず、ESG（Environment, Social, Governance）の観点で環境を総合的に捉える環境会計のフレームワークとこれまで蓄積してきた実践的な手法が、半導体企業の環境負荷の軽減及び環境汚染の防止に如何に貢献できるか。これを追求することが本研究の目的である。本稿はその前梯的な考察であり、次稿の後梯的な考察と合わせて、総合的に追求していくことを企図している。

半導体並びに半導体産業に関しては、膨大な研究が集

積されているが、それに関する環境問題の研究は吉田文和の研究を除けば、非常に少ない。一方、環境会計の研究も、半導体産業・企業に関するものは管見の限り見当たらない。従って、半導体産業の再生・復活と共に、半導体製造の環境問題を環境会計の観点で取組み、それによって環境負荷の軽減及び環境汚染の防止に貢献することを目指す研究は、重要な意義があると言える。

本稿の構成は、次の通りである。2（章）では、再生・復活を専ら希求する半導体産業の今日的「狂騒」の様子を2023年刊行の文献並びに経済週刊誌の特集記事によって概観する。3（章）では、半導体産業の環境負荷及び環境汚染の先行研究として、吉田文和の研究をフォローし、視座を定位する。4（章）では、半導体製造工程における環境関連の概観を行ない、どのように問題が伏在しているかを明確にする。5（章）では、半導体産業の環境問題への今日的アプローチとして、TSMC（JASM）の工場を建設中である熊本県が、「環境への影響を懸念する」「県民の不安解消を図るため」に行なった台湾のサイエンスパークの調査を取上げ、一定の評価をすると共に、更に如何なる取組みが必要かを考察する。6（章）のおわりにでは、纏めを行ない、更に後梯的考察へと継承していく課題や展望を提示する。

2. 半導体産業の今日的「狂騒」

（1）2023年刊行の半導体に関する文献

半導体に関する文献は続々と刊行されているが、2023年においても、技術的な文献以外に、少なくない文献が刊行されたが¹⁾、そのうち久保田龍之介の『半導体立国ニッポンの逆襲 2030復活シナリオ』を取上げる。各文献が内容的に大差ないことと、久保田の文献は表題（逆襲、復活）とは裏腹に、21世紀に入っの「復活」の動向に関しても、比較的冷静に問題点を検証しているからである。目次構成順にトレースするのではなく、筆者の問題意識に則って、再構成的に検討する。

1) 湯之上隆の『半導体有事』（湯之上（2023））、黒田忠広の『半導体超進化論 世界を制する技術の未来』（黒田（2023））、片岡利文の『Rapidus（ラピダス） ニッポン製造業復活へ最後の勝負』（片岡（2023））、王百禄の『半導体ビジネスの覇者 TSMC はなぜ世界一になれたのか？』（王（2023））、宮崎正弘の『半導体戦争！ 中国敗北後の日本と世界』（宮崎（2023））。タイトル並びに内容は概ね「煽情的」と言えるが、「煽情的」なのは必ずしもわが国に限ったことではなく、クリス・ミラー（Chris Miller）の浩瀚と言える文献も“Chip War The Fight for The World's Most Critical Technology”と言ったタイトルを付けている（邦訳書名は『半導体戦争 世界最重要テクノロジーをめぐる国家間の攻防』となっているが、原題と左程隔たっていない）。

図表1 微細化により淘汰されていく半導体企業

プレーヤー(半導体メーカー)：①TSMC(台湾)、②サムスン電子(韓国)、③インテル(米国)、④グローバルファウンドリーズ(米国)、⑤SMIC(中国)、⑥UMC(台湾)、⑦STマイクロ(多国籍)、⑧IBM(米国)、⑨ルネサス(日本)、⑩東芝(日本)、⑪富士通(日本)、⑫ソニー(日本)、⑬TI(米国)、⑭インフィニオン(ドイツ)、⑮セイコーエプソン(日本)、⑯GSMC(中国)、⑰DBハイテック(韓国)、⑱フリースケール(米国)、欄外ラピダス(日本)

微細化	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	欄外	計
90nm																				18社
65nm																				14社
45/40nm																				11社
32/38nm																				7社
22/20nm																				5+1社
7nm																				3+1社

(注) 縦横網掛け：UMCは2024年からの見込み、ラピダスは2027年からの見込み
(出典：久保田(2023) p.121)

半導体産業の実勢の1つの指標である微細化への対応で見ると、微細化が90nmレベルであれば、世界の上位18社のうち、わが国の半導体メーカー5社が対応し得ているが、65nmになるとセイコーエプソンが淘汰され、45/40nmになるとソニーが淘汰され、32/38nmになると残り3社(ルネサス、東芝、富士通)も淘汰されてしまうことを、図表1は示している。もう1つの指標として、半導体メーカーの形態が、垂直統合型から水平分業型であるファブレスとファウンドリの優位へとシフトしたことが挙げられるが、2022年時点のファウンドリの上位5社はTSMC(47%)、サムスン電子(19%)、UMC(14%)、グローバルファウンドリーズ(9%)、SMIC(10%)であり、台湾のTSMCとUMCの2社が60%強を占めており、わが国の企業は1社も入っていない(カッコ内は占有率)²⁾。

それらに対し、「日本にはまだ、半導体装置や材料という強みがある」³⁾という擁護がなされているが、生産(製造)のメインではないので、如何にも弱い。それ故、

久保田は「3つのラストチャンス」ということで、「技術変革」と「人材」と「国内の危機」を挙げている⁴⁾。人材に関しては、集積回路製造業と半導体製造装置製造業と半導体素子製造業の合計(半導体設計や半導体材料メーカーは含まれない)で、1998年の約23万人から2019年の約17万人に減少しており、好転は見られないとのことであるが⁵⁾、従業員の数だけではなく、技術水準等も問題であろう。

経済産業省が主導した21世紀に入ってからの半導体戦略の失敗という「黒歴史」がある。失敗プロジェクトの連鎖——「みらい(MIRAI)」(2001～2010年度)、「あすか」(2001～2005年度)、「はるか(HALCA)」(2001～2004年度)、「DIIN」(2002～2007年度)、「あすかII」(2006～2010年度)、「つくば半導体コンソーシアム(TSC)」(2006～2011年度)である⁶⁾。更に、エルピーダメモリは、1999年に設立したが、2012年に経営破綻した⁷⁾。アスプラ(ASPLA)は、設立からわずか3年後、2005年に解散した⁸⁾。それに対し、現在進行形の下記の動

2) 久保田(2023) p.122

3) 同上 pp.86, 171

4) 同上 p.55

5) 同上 pp.99-100

6) 同上 pp.182-186

7) 同上 p.189

8) 同上 p.192

向があるが、上記の失敗とは異なるものとなるかは、まだ不明である。

ASM (TSMCの子会社) が、熊本県菊陽町に半導体工場を建設中である⁹⁾。ラピダスが、2022年8月、8社 (トヨタ自動車、デンソー、ソニーグループ、NTT、NEC、ソフトバンク、キオクシア、三菱UFJ銀行) の共同出資で設立され、北海道千歳に工場を建設中である¹⁰⁾。これらが、「技術変革」並びに「国内の危機」のラストチャンスを活かせるのかは、今のところ未知数と言わなければならない。久保田の文献名にある「逆襲」や「2030復活」は、願望といった掛け声でしかないだろう。

(2) 2023年刊行の経済週刊誌における半導体特集記事

経済週刊誌では、2023年においても半導体に関する特集記事が組まれている——①『週刊ダイヤモンド』2023/2/25号の「半導体 最後の賭け」、②同誌2023/5/27号の「半導体・EV&電池 国家ぐるみの覇権戦争」、③『週刊エコノミスト』2023/7/18・25合併

号の「半導体黄金時代 チャットGPTで需要爆発」、④『週刊東洋経済』2023/10/7号の「半導体 止まらぬ熱狂」¹¹⁾。何故取上げるかと言えば、半導体産業に関する今日的な「関心事」が如何なるものかを探るためである。しかも、再生・復活の見通しは相当に危ういことを浮き彫りにする。そして、環境への配慮は「関心事」として皆無に等しいことを明らかにする。

①は、凡そ網羅的に取上げてはいるが、失敗の深掘りはせず、それらと今日のラピダス等の差別化 (克服の手立てを講じているか) を明確にしていない。その他として、「半導体・電子部品142社「生き残り力」ランキング」(年平均売上高成長率、営業利益率、研究開発費、売上高研究開発費率、設備投資額、売上高設備投資率、フリー・キャッシュ・フローにより総合得点付け) を掲載している¹²⁾。

②は、EV (電気自動車) & 電池に重点を置いているので、①のように網羅的ではない。その他として、前述したクリス・ミラーに対するインタビュー記事を併載し

図表2 経済週刊誌における半導体特集項目一覧

No.	項目	①	②	③	④
1	1990年代までの凋落傾向	△	×	△	×
2	21世紀に入ってから失敗の「黒歴史」	△	×	△	×
3	今日の客観的な情勢	○	×	×	△
4	今後の再生・復活の見通し	○	×	△	△
5	ラピダス	○	×	○	○
6	TSMC (JASM) の工場誘致・建設	○	○	○	○
7	海外の動向(わが国の攻守を含む)	○	○	○	○
8	経産省の半導体政策	○	×	○	○
9	材料・製造装置分野の動向	○	×	○	○
10	関連業界の動向	○	○	○	×
11	半導体産業の環境問題	×	×	×	×
12	その他	○	○	×	○

(注) ○：1つ(以上)の記事で主題的に言及、△：主題的ではないが、言及あり、×：言及なし
(出典：ダイヤモンド社編 (2023a)、ダイヤモンド社編 (2023b)、毎日新聞出版編 (2023)、東洋経済新報社編 (2023) より筆者作成)

9) 同上 p.70

10) 同上 pp.32, 92

11) ダイヤモンド社編 (2023a)、ダイヤモンド社編 (2023b)、毎日新聞出版編 (2023)、東洋経済新報社編 (2023)

12) ダイヤモンド社編 (2023a) pp.24-59

ており、また「半導体・電子部品&自動車・自動車部品「存亡」ランキング153社」(①の項目にPBRを加えて総合得点付け)を掲載している¹³⁾。

③は、AI用半導体を取上げているのが特徴的であり、またNTTの「光電融合」をも取上げているが、経産省の「国策」に対しては疑問視しており、タイトルの「半導体黄金時代 チャットGPTで需要爆発」とは裏腹に、再生・復活に肯定的とは言えない基調となっている¹⁴⁾。

④は、過去は振り返らず、また関連業界のことは殆ど取上げていないが、半導体産業に関しては材料・製造装置、更には「次世代半導体」の動向(AI特化プロセッサ、SiC(炭化ケイ素)やGaN(窒化ガリウム)を使うパワー半導体(シリコンに替わる素材)、酸化ガリウムパワー半導体(これもシリコンに替わる素材))をも取上げている。特集のタイトル「半導体 止まらぬ熱狂」にも関わらず、世界的な動向に比して、「日本の勝ち筋」を一応は取上げているが、掛け声に留まっている。その他として、四季報最新号から「7つのテーマで発掘 今からでも勝てる半導体銘柄」(一覧)を掲載しており、想定している読者が察せられる¹⁵⁾。

総じて、失敗を延々と繰り返してきた経産省の政策(巨額の補助金投入を含む)が今回は成功する見込みかどうかは大いに疑問であるし、そもそも国策に依存しあるいは他業界の巨大資本に依存して自力での勢力伸長の努力の弱い業界が活性化し得るのか甚だ心許ないし、ラピダス並びにJASM(TSMCの合弁会社)の工場建設ぐらいが目立った動きであるが、所詮個別の散発的な動向に過ぎない。

(1)(2)で取上げた動向以降における直近の重要な事象を補足的に取上げる。キオクシアとWD(ウエスタンデジタル)が統合交渉を進め、大詰めに迎えていたはずだったが、急遽韓国のSKハイニックス(キオクシアの大株主である)の反対により、白紙となってしまった¹⁶⁾。両社の統合は、SKハイニックスにとっては地盤沈下を招来することであり、同社の意向等を斟酌したの

かは不分明であるが、周到な準備や根回しを怠り、潰えてしまったわけである。キオクシアは、半期決算で多額の損失を計上しており、わが国半導体メーカーの二番手がこのような体たらくな状態であるのは低迷状態を脱し得ていないことを証示していると言わざるを得ない。

なお、半導体産業の環境問題への言及は皆無とも言える。ビジネスの成否や産業の復活が主たる関心事であっても、環境問題への配慮は欠かせないはずであるが、その欠落は今日のビジネスや産業の取上げ方としては重大な不備と言わなければならない。

3. 半導体産業の環境負荷及び環境汚染の先行研究

吉田文和が最も精力的に半導体産業の環境問題に取り組んでいるので、先行研究として取上げる。なお、吉田の2つの文献は、刊行年(1989年と2001年)並びにカバー範囲や取上げ方が異なるので、各々を別に取上げることとする。

(1) 吉田文和『ハイテク汚染』

アメリカのフェアチャイルド社の半導体工場からの有機溶剤の漏出による近隣住民の健康被害が、1977年頃から発生したのが、半導体産業における環境汚染が顕在化した最初の事例(事件)と言える。住民側は1982年4月に訴訟にふみきり(IBM、グレートオクス水会社を合わせた3社に対し)、1986年7月に和解し、補償金が支払われたが、金額は双方とも公表せず、会社側は責任を認めないという不明朗な「落着」であった。吉田は、フェアチャイルド事件を、「①クリーンであると思われたハイテク産業による汚染である点、②地下貯蔵タンクからの漏れなどに起因する地下水汚染を経由した被害である点、③これまで職場内で安全性が問題となってきた有機溶剤のトリクロロエチレンやトリクロロエタンが環境汚染の原因物質と推定されている点、まさに「新しい汚染」の発生である」とする¹⁷⁾。

わが国の半導体による環境汚染の嚆矢は、1984年に発

13) ダイヤモンド社編(2023b) pp.26-63

14) 毎日新聞出版編(2023) pp.14-39

15) 東洋経済新報社編(2023) pp.34-81

16) 朝日新聞(2023) 3・9面

17) 吉田(1989) pp.2-9。「後日談」として、フェアチャイルドのサンノゼ工場は「取り壊され、スーパーマーケットに姿を変えたが、

生じた、東芝の兵庫県太子町^{た い ち ょう}の半導体工場からのトリクロロエチレン漏出による地下水汚染である。東芝は、「正式には汚染の責任をみとめず、あくまで「寄付金」として、水道切り替え費などを支払っており、いまだに有機塩素系溶剤の使用をつづけている」。兵庫県も、原因調査で「原因不明」とし、「住民の健康調査も必要なしとした」。吉田は、「東芝と兵庫県の責任は重い」、とする。同じ東芝の東芝コンポーネンツ君津工場^{きんづ}で1988年にトリクロロエチレンによる汚染が発覚した。この度は、不十分ながらも、原因調査並びに住民の健康調査が行われ、東芝側も責任を認めた¹⁸⁾。

「熊本といえば、豊富な水とそのうまさで全国に名が知られているが」、いまや「地下水汚染の危機に立つ熊本」となっている。その豊富な地下水が「半導体産業進出の理由の一つ」になっているからである（1980年代のことであるが、その後も工場誘致からすると状況は変わっていない¹⁹⁾。

岩手県北上市と岩手東芝エレクトロニクスは、「使用物質すべての提示を明記した公害防止協定」を、1985年9月に締結した²⁰⁾。千葉県館山市とNMBセミコンダクター社は、「排水クロード・有毒ガス規制の公害防止協定」を、1985年1月に締結した²¹⁾。なお、1988年現在では「全国で、半導体工場・研究施設と各自治体との間に、約220の公害防止協定が結ばれている」が、「現行法で未規制の有害化学物質についても規制や情報公開の対象に組み入れている協定は、まだ一割にも達していないとみられる」、とのことである²²⁾。

(2) 吉田文和『IT汚染』

吉田は、半導体製造（工程）の環境問題を、次の四つに整理している——①使用される化学物質の安全性の問題であるが、「大気汚染防止法で特定物質として規制さ

れているのは28物質にすぎない。それに対して、実際に急性毒性があり、事故例があったものは約40物質にのぼる。そのため、業界では39物質を特殊材料ガスとして「災害防止自主基準」を定めている（当時）とし、「使用ガスの危険性による分類」（可燃性6、爆発性6、支燃性3、窒息性3、毒性13、腐食性9、悪臭6、複数可）を掲示している。②洗浄に使われる有機溶剤やフロンなどの問題、③大量の水利用の問題、④半導体産業の廃棄物の問題である²³⁾。

「アジアに広がるIT汚染」や「日本のIT汚染」（主に前著以降の事象）を、各々事例を通して取上げている。もう1つ、注目すべきこととして、これまで主として生産段階の環境問題に関説してきたが、「あふれる使用済みコンピュータ」ということで、消費ないし廃棄段階にも環境問題があることを取上げている²⁴⁾。

最後に、「IT汚染をなくすために」は、第1に、「土壌・地下水汚染の実態を明らかにすること」、特に「企業の自主的な情報公開」が重要である、とする。第2に、環境法制の制定を挙げている（土壌汚染対策法は2003年施行）。第3に、「IT機器のリサイクルを進める」とするが²⁵⁾、技術革新が頻繁に発生し短期間に既存製品が陳腐化する当該分野では困難ではないか。第1の点は近年の具体的な動向をフォローする必要がある、第2の点は2000年代以降に陸続と制定された環境法制の有効性を別途検証する必要があるが、今後の課題としたい。

4. 半導体製造工程における環境関連の概観

(1) 半導体製造工程の概要

半導体製造工程は、大別すれば、前工程と後工程に分けられる。前工程の流れは、主要には、(1)成膜（ウエ

いまでも浄化のために汚染地下水の汲み上げを続けている。たんに汚染地下水を汲み上げるのは、資源の浪費であるという批判もあるようだが、活性炭吸着などの方法で汚染の拡大を防ぎ、バクテリアを使った生物学的浄化を続けることに意義はあるだろう（2001年時点の事態、IBMもほぼ同様）、とのことである（吉田（2001）pp.5-6）。

18) 吉田（1989）pp.122-129

19) 同上 pp.142-149

20) 同上 pp.173-177

21) 同上 pp.178-183

22) 同上 p.179

23) 吉田（2001）pp.25-36

24) 同上 pp.47-100, 101-132, 133-164

25) 同上 pp.165-193

ーハ上に薄膜形成) → (2) リソグラフィ (ウェーハ上に回路転写) → (3) エッチング (回路パターン形成) → (4) 不純物添加 (リンやホウ素、半導体化) → (5) 平坦処理 (酸化膜や層間絶縁膜を平坦化) である。しかも、各小工程の間で、洗浄 (バッチ方式か枚葉式、ウェット処理 (薬液や純水) かドライ処理 (酸素ガスやオゾンガス)) と乾燥を行なう。後工程の流れは、主要には、(1) ダイシング (チップに切り出し) → (2) (ダイ) ボンディング (リードフレームに固定) → (3) ワイヤーボンディング (配線を繋ぐ) → (4) モールディング (樹脂で固め、パッケージ形成) → (5) 選別・検査 (前工程でのウェーハ電気特性検査、不具合や欠陥の有無の検査、ボンディング接続強度検査、信頼性試験) である²⁶⁾。

菊地正典は、工程をより細分化して捉えている。前工程を大きく F E O L (front end of line: シリコンウェーハ上に各種の素子を作り込む) と B E O L (Back end of line: 素子間を金属配線で接続する) に分け、F E O L は①シリコンウェーハ (準備) → ②成膜 (二酸化シリコン膜 (SiO_2) を成長、シリコン窒化膜 (Si_3N_4) を成長) → ③露光 → ④現像処理 → ⑤エッチング → ⑥成膜 (厚い二酸化シリコン膜を堆積) → ⑦CMP (化学機械研磨) → ⑧リソグラフィ・不純物添加 → ⑨ゲート酸化 → ⑩多結晶シリコン成長 → ⑪多結晶シリコンパターニングイオン注入 → ⑫異方性エッチング → ⑬イオン注入 (n^+ 型、 p^+ 型) → ⑭酸処理、ニッケルシリサイド (NiSi_2) 形成 → ⑮Niエッチング → ⑯全面 SiO_2 膜成長、CMP、とする。B E O L は⑰コンタクトホール開孔 → ⑱タングステン膜 (W) 成長、タングステンCMP → ⑲二酸化シリコン膜成長、溝エッチング、銅 (Cu) 膜メッキ → ⑳銅CMP (シングルダマシ配線) → ㉑スルーホール (開口)、配線溝エッチング → ㉒膜CMP (デュアルダマシ配線) → ㉓保護膜 (パベーション) 成長、とする。そして、「実際の IC 製造では、全体で数百ものステップを積み重ね」るとのことで、これでも「主要プロセス」の紹介だ

とする。後工程は、簡略に、組立工程と検査・選別工程、とする²⁷⁾。

(2) 半導体工場のクリーンルーム

佐藤淳一によれば、微細加工による高密度化、高集積化を行なう前工程は、微粒子 (パーティクル) が大敵となるので、気中パーティクルを極端に減らしたクリーンルームで作業を行なうが、一方でクリーン度を向上させるには空調の換気回数を多くするため、電力を消耗する。クリーンルームのランニングコストに占める電力の割合は50%強であり、その電力のうち、空調は約45%で、生産設備の約35%を上回るくらい、とのことである²⁸⁾。

菊地正典によれば、拡散ライン (前工程製造) は最も高い清浄度を必要とするのに対し、ウェーハ検査や組立・検査のラインのクリーン度は拡散ラインほどの厳密性は要求されておらず、その分、クリーン度も低く設定されており、それぞれの工程で必要とする清浄度に応じて変えていくのは、工場としてのコスト意識から考えて当然のことである、とする²⁹⁾。

クリーンルームの清浄度 (クリーン度) は、クリーンルームの単位体積中に浮遊している微粒子数で表示され「クラス」と呼ばれる。J I S 規格 (日本工業規格) は、 1 m^3 中の粒径が $0.1\mu\text{m}$ 以上の微粒子数を10の冪乗で表した時の指数で、クラス1~9に分類されている。U S A 規格 (米国連邦規格) は、英国単位 (ft (フィート)) : $1\text{ ft} \approx 30\text{ センチ}$ に基づく場合は $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子を基準とし、 1 ft^3 中の粒径が $0.5\mu\text{m}$ 以上の微粒子数で表示する。メートル法による場合は $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子を基準とし、 1 m^3 中の微粒子数を10の冪乗で表した時の指数で表す。I S O 規格 (国際標準化機構) は、基準粒子の粒径 $0.1\mu\text{m}$ で基準体積は 1 m^3 と J I S 方式が取り入れられている³⁰⁾。

クリーンルームは、清浄な空気の層流 (ラミナーフロー) が導電性の床面に向けてダウンフローで流れ続け、天井面に設置された F F U (Fan Filter Unit) というフ

26) エレクトロニクス市場研究会 (2022) pp.47, 48-57, 58-61, 109。

27) 菊地 (2012) pp.34-41。なお、菊地の記述は「です・ます」調であるが、文体統一のために「である」調に改めている。そのため、ほぼ原文のままの引用でも直接引用の形を取っていない。以降の引用に関しても、同様である。

28) 佐藤 (2019) p.45

29) 菊地 (2012) p.18

30) 同上 pp.156-157

ファン付きフィルターを通して清浄化される。温度は 23 ± 3 ℃、湿度は $45 \pm 15\%$ 程度に制御される。利用法としては、大部屋方式とベイ方式（プロセス装置群ごとの各作業エリアを中央通路に対しコの字形に配置）がある。コスト抑制のための「局所クリーン化」として、密閉型カセット、ミニエンバイロメント（基板移載室設置）が採用される場合もある³¹⁾。

クリーンルーム内の環境実態の把握と健康との関連調査は、現在でも殆ど行なわれていないが、クリーンルームでの労働と疾病の関係、あるいは法的に問題となるのは、クリーンルームで使われる化学物質（有機溶剤、有害ガスなど）や放射線などの影響だろうが、ガンや呼吸器系、内臓系、生殖系、神経系の健康障害との関連が疑われ、特に装置の保守などに携わる作業ではその傾向が強くなる可能性がある。これについても、明確な定量的因果関係が明らかになっているわけではないが、クリーンルームの構造や維持運転に関して、十分な注意を払わなければならない、と菊地は指摘している³²⁾。半導体の品質保証や歩留まりに専ら注力し、労働者の健康に関しては何ら省みないクリーンルームの在り様を如実に示していることである。なお、菊地の指摘は2012年刊行の文献におけるものであるが、それ以降に健康調査が適切に行なわれているのかどうかは、未確認である。

韓国のサムスン電子において、熊谷・毛利によれば、半導体製造労働者に関しリンパ造血系がんが発生している。2014年8月、ソウル行政法院第二審で、提訴者5人のうち、急性骨髄性白血病の2人（死亡）に関しては「業務と死亡との間に相当因果関係がある」との判決が下され、相手側（勤労福祉公団、遺族給付の不支給が直接の争点）が上告しなかったため、判決が確定した。他の3人（急性骨髄性白血病1人、急性リンパ性白血病1人、非ホジキンリンパ腫1人）に関しては「証拠不十分」として請求が棄却されたため、「原告が上告し、現在係争中とのことである」（2015年時点）。熊谷・毛利は、「結語」において、「我が国の半導体産業で働く労働者にも同様

の事態が発生しているとの情報はないが、製造工程は類似していると思われるので、これらの労働者における有害物質曝露と健康影響にも目を向ける必要がある」と結んでいる³³⁾。

（3）洗浄工程の問題性

半導体製造の各工程は、環境負荷並びに環境汚染の可能性があるが、各工程を網羅的に取上げるのではなく、半導体製造工程と使用する化学物質（図表3）の掲示に留め、最も顕在化し得る洗浄工程を集中的に取上げることとする。

多少の補足をする、と、原材料の保証期限はバラつきがあり、ガス類は短いもので6ヶ月、通常は1年、薬液類は短いもので3ヶ月、長いもので1年、通常は6ヶ月である（ガス・薬液は「電子グレード」と呼ばれる高純度を要す）。薬液類は、製造ラインと類似の温湿度の環境下で保存・保管しなければならない。もう1つ、超純水（Ultra Pure Water: U P W、純水より更に不純物が少ない）に言及すると、原水（工場の立地等によって工業用水や河川水や地下水）から精製し、送水において流れが滞ると汚染が発生するので、絶えず毎秒1.5m以上の流速で流し続けなければならない、再利用もされるが、送水量が工場規模で異なるが、大まかに1日数千トンが必要とするようである³⁴⁾。

洗浄工程を装置の観点から俯瞰すると、洗浄装置の要素は、処理系（薬液槽、水洗（リンス）、乾燥ステージ、廃液処理が必要）、供給系（薬液・純水供給装置、ドライエア供給装置等、多数の薬液供給）、制御系（薬液濃度、温度、パーティクル管理等）、搬送系（ウェーハ、ウェーハキャリア、キャリアレス搬送等）、その他（空調系・排気系、排液系）である。バッチ式（ウェーハ複数枚をまとめてプロセスを行なう）と枚葉式（ウェーハ1枚ずつプロセスを行なう）とがあり、装置は異なる。また、「ドライライン・ドライアウトの原則で、洗浄後は必ず、ウェーハを乾燥してから」次の工程に移るので、「洗浄装置

31) 同上 pp.160-161。但し、熊谷信二・毛利一平によれば、クリーンルームの「内部の空気は、クリーンルームから排気した空気の大部分（ウェーハ加工工程では80%以上）を循環して外気と混合し、高性能のフィルターを通して供給されるが、製造工程で使用したガス・蒸気状の化学物質はフィルターでは除去できないため、それらが作業環境中に放出されると、クリーンルーム内に蓄積していくことになる」とのことである（熊谷・毛利（2015）p.246）。

32) 菊地（2012）p.212

33) 熊谷・毛利（2015）pp.244, 246, 248, 251, 252

34) 菊地（2012）pp.96-97, 100-101, 104-105

図表3 半導体製造工程と使用する化学物質

工程		化学物質	物理因子
ウエーハ加工	拡散	洗浄 酸化	水酸化アンモニウム、過酸化水素、フッ化水素、硫酸、イソプロピルアルコール アンモニア、三フッ化ホウ素、ジクロロシラン、酸素、窒素、オキシ塩化リン、シラン
	フォトグラフィ	フォトレジスト塗布	フェノール樹脂、ホルムアルデヒド樹脂 感光剤：ジアゾナフトキノン 溶剤：エチルベンゼン、2-ペプタノン、ブタノール、キシレン
		接着促進剤	ヘキサメチルジシラザン
		現像	脂肪族炭化水素、テトラメチル水酸化アンモニウム
		洗浄除去	キシレン、ブタノール、ジメチルアセトアミド、3-エトキシプロピオン酸エチル、PGME、PGMEA
	エッチング	湿式 乾式	酢酸、フッ化アンモニウム、水酸化アンモニウム、フッ化水素、過酸化水素、硝酸、リン酸、硫酸、ポリエチレングリコール、オクチルフェノキシポリエチレンエタノール 窒素ヘリウム、酸素、四フッ化炭素、塩素、三フッ化メタン、六フッ化イオウ、三塩化ホウ素
	ドーピング	イオン注入	アルゴン、アルシン、三フッ化ホウ素、ホスフィン、フッ化水素、水酸化カリウム
製品組立	蒸着	化学蒸着 金属配線	三フッ化窒素、亜酸化窒素、テトラエチルオルソ珪酸、フッ化水素、八フッ化プロパン、ホスフィン、アンモニア、シラン、六水素化二ホウ素 アルゴン、窒素、フッ化水素、水酸化アンモニウム、過酸化水素、タングステン
	平滑化	化学的・物理的処理	フッ化水素、塩化水素、硝酸、酸化セレン、水酸化アンモニウム、水酸化カリウム
	切断分離 マウンティング ワイヤーボンディング モールド メッキ トリム・フォーム 検査	接着剤 金 樹脂 鉛、錫、ビスマス トリクロロエチレン HCF C-141b、ビスマス、鉛、銀、銅、錫、イソプロピルアルコール	X線

(注) PGME：プロピレングリコールモノメチルエーテル、PGMEA：プロピレングリコールモノメチルエーテルアセテート、HCF C-141b：1,1-ジクロロ-1-フルオロエタン
(出典：熊谷・毛利 (2015) p.245、なお図表の形式を若干改変)

と乾燥装置は一体のもの」になる。省エネや省薬液の課題から、比較的近年のドライ洗浄の方法として、HFペーパー洗浄（以前から行なわれてきた方法で、無水フッ化水素（Anhydrous HF）ガスとH₂Oガスを導入し、自然酸化膜が希フッ酸でエッチングされるのと同じ作用で除去される）、UV/オゾン洗浄装置（UV（紫外）光をオゾン（O₃）雰囲気下でウェーハに照射）、極低温エアロゾル洗浄装置（アルゴン氷粒子（極低温状態）をノズルからウェーハに吹き付けて、物理的な作用で洗浄）等がある³⁵⁾。

佐藤は、近年の時点（2019年）でのこととして、「歴史的にも半導体の黎明期には、完全なマニュアル作業」、次いで「半導体メーカーで洗浄装置を内製してきた時代」、そして「専門の製造装置メーカーが製造するように」になった、と振り返っている³⁶⁾。

平塚豊は、「環境問題への対応」ということで、次のように述べている。「環境への配慮なくしては産業の持続的発展はないという認識が社会的に広く浸透してきている。今まで半導体産業は機能優先で何事も処してきたが、最近では有害な物質を材料に使わない、工場からの排出物の量を削減する、省資源、省エネルギーに徹するなど努力している」。「RCA洗浄を使わざるをえなかった洗浄工程からは有害な化学薬品を多量に消費し、最終的に廃棄物として工場から排出することになる。また多量の純水を必要としているため排水量も多い。こうした問題の解決策として、洗浄液濃度の希釈、リンス効率の向上、水のリサイクル、廃液処理法の改善などの取り組みがなされてきた。一方で洗浄法を変えなければ対策に限界があるとして、有害な薬品を極力使わない環境に優しい洗浄技術の研究開発が活発に行われた」、としている³⁷⁾。

もう少し近年の動向として、服部毅は次のように問題を提起している。「デバイス構造の微細化、回路パター

ンの高密度化・高集積化、配線の多層化が進むにつれて、製造プロセスも複雑にあり、工程数も増え続けている」。「一方では、更なる微細化を回避するため、集積回路を垂直積層する3次元化の検討も行われ、すでに、64層3次元NANDフラッシュメモリが市販され、100層を超える構造も開発されている。一方、微細化による製造コスト高騰を吸収するため、Si基板を従来の300nmから450nmへと大口径化する検討も行われてきたが、先進企業は、現在、300nmでの超微細化を優先させている」。「今までは、汚染の可能性のある材料を製造ラインへ導入することは極力避けて来られた。しかし、デバイスの微細化・高性能化を継続させるために、周期律表中のすべての元素を検討対象とし、かつては重大な汚染源として忌み嫌われていた重金属（Cu、Co、Ni、Ptなど）や、余りなじみのない元素（Hf、Ru、La、Zrなど）も今や使わざるを得なくなっている」。「このため、異種の新金属材料やそれを用いたプロセス自体が重大な汚染発生源となっている。半導体製造現場では、パーティクル（異物微粒子）や金属不純物、有機物などの微小（微量）な汚染物質が、半導体製品の歩留まりや信頼性にますます大きな影響を及ぼすようになってきている³⁸⁾。また、「ウェット洗浄の代わりに、薬液や水を使わないドライ洗浄（ドライクリーニング）を用いれば、パターン倒壊は発生しない。それなら、すぐにでもウェット洗浄がドライ洗浄に置き替わるか」というと、そう簡単ではない」。「ドライエッチング工程が増えれば増える、発生する反応副生成物や残渣除去のためにウェット洗浄工程が増えるという皮肉な結果となっている」。ドライ洗浄には、「長所と問題点」があり、真空技術を利用する機会が多いので、真空技術者の協力を得て、問題点を克服することが将来の課題のようである³⁹⁾。要するに、新たな動向（高機能化、高集積化等）が製品自体並びに製造工程に環境汚染の可能性を招来し、市場競争のために見切り発車や歩留まり

35) 佐藤（2019）pp.62-63, 73

36) 佐藤（2019）pp.64, 65

37) 平塚（2004）p.900。なお、主流とも言えるRCA法とは、「米国RCA社が1970年に発表したSiウエハ洗浄法で、APM液、次いでHPM液で加熱（80℃）浸漬処理（10分）する」方法である（同p.898、Siはケイ素、APM液（Ammonia-Hydrogen Peroxide Mixture）はアンモニア：過酸化水素：水の容積配合比＝1：1～2：5～7の洗浄液）。HPM液（Hydrofluoric acid-Hydrogen Peroxide Mixture）は塩酸：過酸化水素：水の容積配合比＝1：1～2：5～7の洗浄液）。また、同論文は若干年次が古いので、技術動向に立ち入って取上げることは割愛する。

38) 服部（2018）pp.56, 57。なお、掲示の元素の日本語名と原子番号は、Cu（銅, 29）、Co（一酸化炭素）、Ni（ニッケル, 28）、Pt（白金, 78）、Hf（ハフニウム, 72）、Ru（ルテニウム, 44）、La（ランタン, 57）、Zr（ジルコニウム, 40）である。

39) 同上 pp.59, 60

の向上並びにコスト削減を優先させれば、環境汚染をリアルライズしてしまう危険性を有している。

最後に、半導体工場を鳥瞰すると、大きく3つの部分に分けられ、①事務棟、②工場棟、③外回りがあるが、③外回りには付帯設備として、配電所（変電所）、自家発電所、ガスプラント（窒素ガスプラント等）、薬液プラント、超純水供給設備、廃液貯蔵タンク、排水処理施設、排ガス処理施設等がある。薬液とガスの廃棄システムは、IC製造ラインから、ガスに関しては、ベンチュリ・スクラパー（ SiO_2 ）、水スクラパー（酸・アルカリ、 SiO_2 ）、吸着器（活性炭素吸着、有機系）を通して大気へ放出、薬液に関しては、排水→中和処理（酸性、アルカリ性の中和）→微生物処理（有機COD（化学的酸素要求量）の除去）→スラッジ（汚泥）沈殿／河川等へ放流、となっている⁴⁰⁾。これらのいずれかでも、故障や不備等があれば、近隣への環境汚染の拡散を齎すことは言うまでもない。

5. 半導体産業の環境問題への今日的アプローチ

経済産業省は、2003年6月、「半導体・デジタル産業戦略」という「総合的な」半導体政策等を提言したが、半導体産業の環境問題への関与は全く言及していない。SDGsといった世界的な潮流から孤立した提言と言わざるを得ない。

それに対し、熊本県は半導体関連企業が集積しており、TSMC（JASM）が新たに工場を建設中であることから、台湾の半導体工場に関する調査を行ない、その結果を2023年10月に公表している。地方自治体の取組みとしては、「画期的」なものと言える。「訪問調査の目的」は、「県内への半導体関連企業の集積に伴い、大きな経済効果が期待される一方、一部の県民等から、環境への影響を懸念する声も寄せられている。／こうした意見に応え、県民の不安解消を図るため、多くの半導体関連企業が集積している台湾のサイエンスパークを訪問し、地元行政機関等に環境（水質、大気等）の状況について調査を実施した」、とのことである。「訪問の概要」

であるが、訪問時期は2023年8月28日～同月31日であり、訪問先は新竹サイエンスパーク及び同パークを管轄する行政機関と中部サイエンスパーク及び同パークを管轄する行政機関であり、訪問者は熊本県の環境保全・排水・大気・工業用水担当、有識者（県内有識者、台湾地元有識者）である⁴¹⁾。

「訪問調査の結果」として、「サイエンスパークの概要」を示した上で、本題を第1に「サイエンスパーク周辺の環境状況」、第2に「下水処理場における排水処理の状況」、第3に「工業用水の状況」、第4に「TSMCの環境に関する取組状況」と順次報告し、最後に「まとめ」を行なっている。

第1の「サイエンスパーク周辺の環境状況」としては、TSMCのFab15（JASMの建設工場のモデルとなる工場）が立地する中部サイエンスパーク周辺のモニタリング結果を報告している。1 水質の状況では、①下水処理場放流水は、「ほとんどの調査項目が日本の排水基準内であり、重金属の多くが検出限界未満であった」、「一部の項目（ヒ素（As）、フッ素（F）及び化学的酸素要求量（COD））は、日本の排水基準を満たしていないが、本県に立地する企業は、日本の基準を遵守することとなる」。②地下水（環境基準適用）の状況は、「ほとんどの調査項目が日本の環境基準内であり、重金属の多くが検出限界未満であった」、「一部の項目（ヒ素（As）及びマンガン（Mn））は、日本の環境基準を満たしていないが、サイエンスパークに起因するものではないことを確認した」。③河川水（環境基準適用）の状況は、「ほとんどの調査項目が日本の環境基準内であり、重金属の多くが検出限界未満であった」、「一部の項目（浮遊物質（SS）及び溶存酸素量（DO））は、日本の環境基準を満たしていないが、サイエンスパークに起因するものではないことを確認した」。2 大気（環境基準適用）の状況では、「多くの調査項目が、日本の環境基準内であった」が、「一部の項目（微小粒子状物質（PM2.5）、光化学オキシダント（ O_3 ）及び非メタン炭化水素（NMHC））は、日本の環境基準等を満たしていないが、サイエンスパークに起因するものではないことを確認した」。3 環境汚染事例や苦情等の発生状況では、「台湾においてTSMCが

40) 同上 pp.12-17, 28-29

41) 熊本県（2023）p.1（なお、重要な文言に下線や赤字表記等を行なっているが、通常の引用とする、以下同様）。

原因で深刻な環境問題（重金属汚染）が発生している事実はない」、「TSMCが立地するサイエンスパーク周辺において、水質・大気等の苦情はない」、「20年以上前に重金属の環境問題が発生したことがあるが」、「新竹サイエンスパークが放流している河川ではなく、別の流域にある工場とのことであった」。「以上のとおり」、「環境法令に基づく規制基準は遵守され、適切に処理されており、水質・大気上の環境上の問題は特に見られない」。「なお、環境基準等を満たさない項目が一部あるが、その要因はサイエンスパークではなく、自然由来等によるものとのことであった」。「台湾において、TSMCが原因で深刻な環境問題（重金属汚染）が発生している事実はないとのことであった」⁴²⁾。

第2に「下水処理場における排水処理の状況」としては、「サイエンスパーク内の下水処理方法は基本的に日本と同様」、「運転及び水質管理も基本的に日本と同様であり、適正かつ確実に実施されていた」。「下水処理水の一部は、場内の清掃や洗浄、景観池等に再利用」、「下水処理場内は、臭気もなく、清潔に保たれていた」、「処理水放流口の水域は、目立った汚れや色、臭気もなく、魚が生息していた。また、良好な水質環境が確保されていることを確認した」⁴³⁾。

第3に「工業用水の状況」としては、「新竹及び中部サイエンスパークでは、地下水のくみ上げが禁止されており、パーク内企業は河川水を水源とした水道水を使用」、「日本の上水道と変わらない水質の水道水が生活用水にも工業用水にも供給され、その料金水準は日本の上水道料金に比べて安価」、「新竹サイエンスパークで使用される水の約8割が、企業数にして約3割の半導体関連企業によって使用されている状況」、とのことである⁴⁴⁾。

第4に「TSMCの環境に関する取組状況」としては、「台湾の環境法令を遵守され、環境への負荷ゼロを目指した取組みが行われていた」、「資源の循環利用や廃棄物及び排水の削減を推進」、「排水・排ガスの状況を24時間常駐し監視」、排ガス処理は「高度な処理により、揮発性有機化合物の98%以上を除去」、とのことである⁴⁵⁾。

取組みとしては「画期的」と言えるが、ヒアリング調査なので信頼性は限定的である。加えて、熊本県のサイト等を閲覧する限りでは、調査結果を現在建設中の工場への関与にどう連携し、「県民の不安解消」を如何に図っていくのか、その道筋を示していないことが問題である。

もっと広く見渡せば、わが国における半導体工場は相当数に上る。『半導体工場ハンドブック2023』によれば、北海道5、北東北10（青森県2、岩手県5、秋田県3）、南東北18（宮城県2、山形県9、福島県7）、北関東7（茨城県5、栃木県1、群馬県1）、南関東8（千葉県1、埼玉県3、神奈川県4）、北陸13（新潟県3、富山県4、石川県4、福井県2）、中部24（山梨県7、長野県4、静岡県8、愛知県5）、近畿15（三重県2、滋賀県2、京都府5、兵庫県6）、中国10（岡山県5、広島県4、島根県1）、四国5（香川県1、徳島県3、愛媛県1）、九州34（大分県6、福岡県8、佐賀県1、長崎県3、宮崎県3、熊本県9、鹿児島県4）であり、計149工場である（計画中を含む）⁴⁶⁾。

これらに対し、地方自治体等はどうのように関与しているのか。「環境汚染防止協定」は締結しているのか、具体的内容は如何なるものか、あるいは締結していないのか（前掲した吉田が把握している1988年時点から、どれほど前進しているのかどうか）。更に、半導体工場（企業）は、環境に係る監視をどのように行ない、問題が発生した場合の対処方はどのように定めているのか、そして情報開示をどのように行なっているのか、これらに関し環境会計の採用を行なっているのかどうか、こうしたことの点検が次なる課題である。

6. おわりに

これまでの考察を簡潔に纏める。2（章）では、再生・復活を専ら希求する半導体産業の今日的「狂騒」を2023年刊行の文献並びに経済週刊誌の特集記事によって概観したが、ラビダス設立とTSMC（JASM）の工場建

42) 熊本県（2023）pp.4-14

43) 同上 pp.15-16

44) 同上 p.17

45) 同上 pp.18-21

46) 産業タイムズ編（2022）pp.143-153

設ぐらいが目ぼしい動向で、半導体産業の構造的な変革からは程遠い。しかも、ラピダスは経産省の補助金投入を含めたテコ入れと有力企業の「共同出資」によるもので、自力での立ち上げではない。希求とは裏腹に、先行きの見通しは不透明で危ういものである。世界的な目覚ましい動向に伍していけるかどうか定かではない。更に、驚くべきことに、「狂騒」には環境問題への配慮・関心は皆無である。3(章)では、半導体産業の環境負荷及び環境汚染の先行研究として、吉田文和の研究をフォローし、視座を定位した。特に、「企業の自主的な情報公開」の重要性を確認した。4(章)では、半導体製造工程における環境関連の概観を行ない、洗浄工程の問題性を確認した。半導体工場のクリーンルームは、半導体(製造)にとってはクリーンであっても、労働環境としては決してクリーンとは言えず、健康被害の危険性を孕んでいる。洗浄工程(乾燥を含む)は、半導体の高機能化・高集積化の間断ない動向に伴い、新たな原材料・製造装置による製品並びに製造工程が環境汚染をリアルイズしてしまう危険性を有しており、それへの間断ない対応が欠かせないのである。5(章)では、半導体産業の環境問題への今日的アプローチとして、TSMC(JASM)が工場を建設中の熊本県が行なった台湾のサイエンスパークの調査を取上げ、一応問題ないとの調査結果を得たようであるが、「県民の不安解消」に向けた次なる道筋を示していないことを指摘した。加えて、更に如何なる取組みが必要かを考察した。

自治体と工場を設営する企業との実質的に機能する環境負荷軽減及び環境汚染防止の協定の締結、両関係機関の監視体制の運営、企業のガバナンスに構造的に組み込まれた環境への取組み並びにその積極的な情報開示が不可欠なのである。これらに関して、環境会計のフレームワークに基づき具体化することが、次稿の後梯的考察の課題である。それを遂行することで、総合的な構想が達成される。

参考文献

- ・朝日新聞(2023),「キオクシア 交渉白紙」キオクシアにSK横やり」『朝日新聞』2023/10/28、3・9面、朝日新聞社
- ・エレクトロニクス市場研究会(2022),『図解即戦力 半導体業界の製造工程とビジネスがこれ1冊でしっかりわかる教科書』技術評論社
- ・片岡利文(2023),『Rapidus(ラピダス) ニッポン製造業復活へ最後の勝負』ビジネス社
- ・菊地正典(2012),『半導体工場のすべて 設備・材料・プロセスから復活の処方箋まで』ダイヤモンド社
- ・久保田龍之介(2023),『半導体立国ニッポンの逆襲 2030復活シナリオ』日経BP社
- ・熊谷信二・毛利一平(2015),「韓国の半導体製造労働者におけるリンパ造血系がんの発生」『産業衛生学雑誌』第57巻第5号、pp.244-252、日本産業衛生学会
- ・熊本県(2023),「半導体関連企業集積に伴う環境への影響に関する台湾訪問調査の結果について」熊本県環境政策課・環境立県推進課・環境保全課・下水環境課・企業局総務経営課(<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/120/186028.html>,2023/11/17,16:05検索)
- ・黒田忠広(2023),『半導体超進化論 世界を制する技術の未来』日経BP社・日本経済新聞出版
- ・経済産業省(2023),「半導体・デジタル産業戦略」経済産業省商務情報政策局
- ・佐藤淳一(2019),『図解入門 よくわかる最新半導体製造装置の基本と仕組み[第3版]』秀和システム
- ・産業タイムズ編(2022),『半導体工場ハンドブック 2023 戦略物資化する世界半導体の行方は! ?』産業タイムズ社
- ・ダイヤモンド社編集部(2023a),『週刊ダイヤモンド』「半導体 最後の賭け」第111巻第7号、2023/2/25号、ダイヤモンド社
- ・ダイヤモンド社編集部(2023b),『週刊ダイヤモンド』「半導体・EV&電池 国家ぐるみの覇権戦争」第111巻第18号、2023/5/27号、ダイヤモンド社
- ・東洋経済新報社編集部(2023),『週刊東洋経済』「半導体 止まらぬ熱狂」第7137号、2023/10/7号、東洋経済新報社
- ・服部毅(2008),「先端半導体洗浄技術の課題と展望」『表面技術』第59巻第8号、pp.526-533、表面技術協会
- ・服部毅(2018),「最先端半導体表面洗浄の課題と展望」『表面と真空』第61巻第2号、pp.56-63、日本表面真空学会
- ・平塚豊(2004),「半導体洗浄の動向」『精密工学会誌』第70巻第7号、pp.898-901、精密工学会

- ・堀池靖浩・小川洋輝（2002），『はじめての半導体洗浄技術』工業調査会
- ・毎日新聞出版編集部（2023），『週刊エコノミスト』「半導体黄金時代」第101巻第26号（通巻4801号）、2023/7/18・25合併号、毎日新聞出版
- ・宮崎正弘（2023），『半導体戦争！ 中国敗北後の日本と世界』宝島社
- ・湯之上隆（2023），『半導体有事』文藝春秋
- ・吉田文和（1989），『ハイテク汚染』岩波書店
- ・吉田文和（2001），『I T汚染』岩波書店
- ・王百禄（2023），『半導体ビジネスの覇者 T S M C はなぜ世界一になれたのか？』日経B P社