

論 説

半導体製造における環境統合型システムの意義と限界

上 田 智 久

目 次

はじめに

Ⅰ．半導体製造における環境問題の史的考察

1. 半導体製造がもたらす環境汚染
2. アメリカにおける半導体製造と環境汚染
3. 日本における半導体製造と環境汚染

Ⅱ．環境統合型システムの確立に向けた半導体企業と製造装置企業の取り組み

1. 半導体企業における環境統合型システムの取り組み
2. 半導体製造における製造装置企業の役割
3. 製造装置企業における環境統合型システムの取り組み

おわりに

は じ め に

半導体は、「産業の米」と言われ、現代の豊かな暮らしを支える基幹産業である。半導体が与える影響は、家電製品や携帯電話端末はもちろんのこと、20世紀最大の発明と言える自動車にも及んでいる。昨今では、ガソリン自動車からハイブリッド自動車、そして電気自動車へと移行するに伴って、全コストに占める電子部品の割合が急速に増大し始めている。自動車の電子化が今後も進展していくのであれば、2020年頃には原価に占める電子部品と機械部品のコストが逆転し、電子部品が7割を占め、機械部品が3割になるとの予測もある¹⁾。さらに半導体に対する需要は、自動車だけでなく、バイオや医療などの他産業においても今後より一層高まるものと思われる。このように、半導体は現代社会において不可欠な存在になっている。

その一方、これまでの半導体製造における歴史の中で、半導体製造工場から漏洩した有害な化学物質に汚染された井戸水を、飲料水として近隣の住民が利用した結果、甚大な健康問題が起きるなどしている。半導体が、社会環境に与える負荷は非常に大きい。半導体製造がもたらす負の側面は、これまでの歴史において深刻な問題として捉えられてきたのである。したがって、環境や人体に対する安全性を追求する環境統合型システムの確立が、今後の半導体製造においてより一層のこと重要になる。

しかしながら、これまで半導体産業に関する研究は多く蓄積されてきているものの、環境という側面から捉えた研究は少ない²⁾。そこで本稿では、半導体製造における環境統合型システム

1) 高乗正行 (2011)『グローバル時代の半導体産業論』日経BP社、39頁。

2) 研究の多くは、経営戦略論、アーキテクチャ論、生産システム論、技術経営論など、多くの専門領域にお

の現段階までを考察する中で、その意義と限界について論究していく。

I 半導体製造における環境問題の史的考察

1. 半導体製造がもたらす環境汚染

これまでの半導体生産の歴史を紐解いていくと、1947年に開発された点接触型トランジスタが端を発している。その後、今日に至るまでドッグ・イヤーと例えられるように、短期間で高集積化が進み、他産業の発展速度を大きく上回り、成長してきたのである。こうした半導体生産（前工程）は、次のような工程で行われてきた。最初の工程として、円形状の単結晶シリコンをダイヤモンド・カッタによって薄く切断し、表面を磨く作業が行われる。その後、高温の酸化炉の中にウェハを入れ、表面に酸化シリコンマク膜を形成させる。さらに感光膜を薄く形成し、フォトレジスト工程が完了するのである。

その次の工程としては、デバイスに求められる機能が発揮できるように、設計された回路をウェハに焼き付ける（転写）。そして、ウェハに廃食液や多種多様な化学ガスを噴きつけることで、感光膜を削り取る（エッチング工程）。この工程は何度も繰り返し行われ、また、チップが正常に作動するようウェハ上にある不純物を全て洗浄するために大量の水が使用される。こうしてようやく、1枚のウェハが完成するのである³⁾。そして後工程へと移動し、完成品として様々な産業において利用されていくことになる。現代においては、半導体無しに我々の豊かな社会的基盤は成立しえないのである。

しかしながら、その一方で半導体を製造する際に、人体に悪影響を及ぼす多種多様な化学物質が使用されているのも事実である。中には製造装置内部にて化学物質が混合することで、有害物質へと変化する場合も少なくない。このような環境下において、ウェハに付着した化学物質を洗浄しなければならないため、大量の水が使用されるのである。もし何の対策もとられないままウェハを洗浄した污水が、工場内部から外部へと排出されると、必然的に甚大な環境汚染を引き起こすことは容易に想像できよう。それにもかかわらず、現実には環境を軽視したハイテク汚染が後を絶たない。

こうしたハイテク汚染が起きる要因として、吉田（1989）は半導体企業の主な目的はデバイスの性能品質の向上であるとし、その裏には激しい企業間競争が関係していることを指摘している。本来ならば、実験室段階で行う必要がある化学物質の反応について、十分な検証がなされないまま新たな化学物質が使用されるだけでなく、新工程が導入されていることを言及して

いて行われてきた。例えば、徐（1995）、谷光（2002, 2003）、吉岡（2004, 2010）、藤本（2004, 2009）、鈴木・湯之上（2008）上田（2007, 2012）などをあげることが出来る。

3) 詳細については電子情報技術産業協会（2003）『ICガイドブック』日経 BP 企画 14 頁～15 頁、および 58 頁～69 頁を参照されたい。

いる。半導体は現在の豊かな暮らしに不可欠なものであるが、その一方で深刻な環境汚染をもたらす脅威な存在でもある。それでは次に、半導体製造における具体的な環境汚染の事例として、アメリカと日本のケースを考察していく。

2. アメリカにおける半導体製造と環境汚染

「はじめに」で示したように、1947年に点接触型トランジスタがベル研究所・WE（ウエスタン・エレクトリック社）によって開発・市場投入されて以降、1980年代初頭にかけて世界の半導体産業を牽引してきたのはアメリカである。そのアメリカの様々な地域で半導体の生産活動が行われてきたが、とりわけシリコンバレーは半導体産業において圧倒的な存在感を持つ地域である。シリコンバレーには、半導体関連企業が多数集めき合っている。半導体関連企業は対全米比で見ても約30%をも占めている⁴⁾ことから、アメリカの発展にとってシリコンバレーは、極めて重要な役割を果たしている。そしてシリコンバレーでは多くのイノベーションが起き、その結果としてアメリカが半導体技術を独占してきたのである（図表1を参照）。

図表1 米国における生産技術の開発

年度	開発プロセス	開発国, 開発メーカー
1949	シリコン単結晶法	(米)
50	ゾーン精製法	Western Electric (米), AT&T (米)
52	アロイプロセス	GE (米), RCA (米)
54	ジェットエッチング技術	フィルコ (米)
56	酸化マスキング, 拡散	TI (米)
57	フォトリソグラフィ	(米)
59	プレーナー技術	フェアチャイルド (米)
60	エピタキシャル技術	ベル研究所 (米)
61	ボロン拡散	(米)
63	SOS技術 (シリコンオンサファイア)	オートネティックス (米), その他
71	イオン注入法	ベル研究所, モステック (米)
74	電子ビーム露光システム	(米)

出所 伊丹敬之/伊丹研究室(1995)『なぜ「三つの逆転」は起こったか:日本の半導体産業』NTT出版, 112頁

たしかに、シリコンバレーは急速な発展を遂げ、アメリカ経済にとって、重要な役割を果たしてきたものの、その一方で環境汚染が深刻な問題になっている。もとは、カリフォルニア州で起きたフェアチャイルド社の環境汚染が契機となり、その後シリコンバレーでも顕在化している。1980年代後半に、フェアチャイルド社の半導体工場の貯蔵用地下タンクから使用済み有機溶剤が漏洩し、住民の水道用井戸にまで流れ込み汚染していた。それによって、近隣の住民に甚大な健康問題が起きていたのであった。生まれて間もない子供の心臓に穴が開くなど、大きな病気を抱える子や、その他にも先天異常を持つ子供が多く存在するといった実態が次々

4) 吉田文和(1989)『ハイテク汚染』岩波新書, 13頁。

と明らかになったのである。また子供だけでなく、その影響は大人にも及び、ガンや流産などによって死亡したとみられる多くの被害が報告されている⁵⁾。

こうしたカリフォルニアの深刻な地下水汚染を受け、シリコンバレーでも汚染状況が徹底的に調査されることになった。そして、恐るべき汚染の状況が明らかにされた。極めて危険な使用済み有機溶剤が、地下埋設タンクの約 80% から漏れていたのである。そして地下水からは、約 100 種類もの化学物質が発見された⁶⁾。同地域の飲料水は、使用量の約半分が地下水であり、そのため地下水の汚染は極めて深刻な問題として浮き彫りになった。

シリコンバレーにおいて、最初に人体に影響を及ぼす危険度の高い有機溶剤（トリクロロエタンなど）が IBM サンノゼ工場の地下タンクから発見された⁷⁾。同社では、磁気ディスク駆動部品の洗浄に有機溶剤が使用されていた。次に、同地域にあるフェアチャイルド社でトリクロロエタンの漏れが発見されている。従業員が地下貯蔵タンク近くの土壌が濡れていることを発見し、タンクの破損が発覚・報告された。それにより、60 メートル離れた水会社の井戸も汚染されていることが明らかになったのである。この汚染の度合いは、州が定めた基準値を遥かに超えた（約 30 倍）、汚染状況となっていた。その後も調査は 10 年以上続けられ、結果的には 71 の地点でタンクから漏洩している事実が判明したのであった⁸⁾。

そこで貯蔵タンクの代替案として、有機溶剤による洗浄からフロンガスを用いた洗浄へと移行されるようになった。しかしながら、このフロンガスも周知のように大気汚染の温床であり、オゾン層を破壊してしまった⁹⁾。現在、フロンガスは規制されているものの、これまでの環境汚染において、半導体産業が及ぼした影響はかなり大きいと推測できる。それでは次に、日本での環境汚染について考察していく。

3. 日本における半導体製造と環境汚染

日本における半導体汚染としていくつかの代表的な事例を見ると、東芝の兵庫県太子町の半導体工場をまずは挙げることができる。同工場では、1984 年にトリクロロエチレンによる地下水汚染が起きている。汚染が発覚したのは、1983 年 8 月に厚生省から通達された水道水源の調査によって明らかになった¹⁰⁾。その後の調査で太子町において、128 か所にも及ぶ町営水道水の汚染が報告されている。汚染の度合いは、人体に影響を及ぼす基準値を明らかに超えたものであった¹¹⁾。

5) 同上書、2 頁～4 頁。

6) 同上書、17 頁。

7) 発覚したのは、1980 年 10 月のことである。しかしながら、この重大な問題が軽視されたため、汚染が拡大していくことになった。

8) タンクを埋没する理由は、消防条例と建築基準条件のためである。同上書、19 頁～21 頁。

9) 同上書、33 頁。

10) 同上書、134 頁。

11) 同上書、135 頁。

後の汚染源の調査が太子町と県によって行われ、その結果、東芝太子工場 407 号付近であることが判明したのである。ここでの汚染の原因は、配管のひび割れや作業ミスなど、様々な点が指摘されている。当時、徹底的に原因を究明すべく堀削調査が行われたものの、深さ 7 メートル付近から地下水が湧出したため、中止を余儀なくされた¹²⁾。汚染の主要因としては、やはり埋没されたトリクロロエチレンの「貯蔵タンクの配管」からの漏れとの見方が強い¹³⁾。しかしながら、堀削調査が途中で断念されたため、確たる証拠の発見にまでは至らなかった。したがって汚染問題について東芝側は、自社工場内にて使用していた有機溶剤と地下水汚染の関係性を完全には認めず、汚染源を不明確にしたのであった¹⁴⁾。

その後、汚染地域では汚染除去が行われたことにより、1984 年 5 月の段階で汚染レベルは減少したが、1989 年の段階でも汚染の基準値を遥かに上回る井戸が存在している¹⁵⁾。こうした汚染は深刻であるため、国・県による厳しい規制や改善通知書などが必要となる。しかしながら、1989 年の段階では、太子町と東芝との間で明確な半導体工場における汚染除去に関する協定が結ばれていない。その結果、後に使用化学物質の届け出を町民課に行うことが義務づけられるようになったものの、住民に対する情報の開示が義務づけされることはなかった¹⁶⁾。本来ならば、住民への開示こそが企業における社会との調和であり、持続可能な企業経営のあるべき姿である。この点は、企業側のみの問題として捉えるのではなく、国・市・町といった全てのレベルにおいて、改善策についての要求を続けなければならない。安心・安全な社会を目指すためには、常に住民への情報開示を迅速かつ適切に行う必要がある。

この他の事例として、千葉県君津市で起きた東芝の地下水汚染を挙げることができる。唐津工場もアメリカと同様に、障害を持った子供の例が報告されている。それ以外にも、流産や心臓病など多くの深刻な病状が明らかにされてきた¹⁷⁾。君津市において、半導体工場からの地下水汚染と断定されたのは、1987 年である。しかしながら、実際に公表されたのは 1988 年 9 月であり、約 1 年半も遅れ公表されたのであった。43 本の井戸を調査した結果、その内 10 本から WHO・厚生省の暫定基準値を上回るトリクロロエチレンが検出されている。この中には、飲用水としての井戸や市営水道の水源も汚染されていた。中にはトリクロロエチレンの暫定基準値の 330 倍にあたる数値を示した箇所が報告されている。ここで注視すべき点として、地下水汚染の元凶は、またもや「東芝」であったことである¹⁸⁾。

12) 同上書、137 頁。

13) 同上書、138 頁。

14) 同上書、129 頁および 141 ～ 142 頁を参照されたい。

15) 同上書、138 頁。

16) 同上書、141 頁。

17) 同上書、128 頁。

18) 同上書、122 頁。

こうした現状を受け、東芝唐津工場は間接的ではあるが、配管の腐食によって、トリクロロエチレンが漏れたことを認めている¹⁹⁾。東芝唐津工場の貯蔵タンクと廃液口があった地点の地下 54 メートルの粘土層からもトリクロロエチレンが検出されていることから、汚染がかなりの規模で進んでいることが明らかになった²⁰⁾。この調査で、さらに明らかになったことは、かつて使用していた焼却場から、トリクロロエチレンの廃液が人為的に土の中に流されていたことである。その他にも、トリクロロエチレンで汚れた作業服を洗濯し、その廃液を流すなど、従業員のあるまじき行為が調査によって明らかになった²¹⁾。

この時点での東芝の行動を見る限りでは、太子町工場での地下水汚染における環境問題の反省・改善がなされていない。本来ならば、太子町工場での汚染を速やかに認め、他工場でも同様の汚染を繰り返さないよう努めるべきであるが、東芝はまたも隠ぺい工作ともいえる行動をとったのであった。また、東芝と同様に行政も隠ぺい工作に加担するような形をとったことにより、汚染の公表が遅れることになり、結果的に被害を拡大させている。このような問題を防ぐためには、地域の住民が積極的に情報公開を求め、さらに企業側も安全性を市民に認知してもらうよう開示する義務を自主的に行わなければならない。地域住民には、近隣の半導体工場で「いかに安全が確保され、製造されているのか」を知る権利がある。したがって、この権利を半導体企業は軽視してはならない。

以上のような半導体製造をめぐる環境汚染については、何も太子町や唐津市だけでなく、日本全国で起きている深刻な問題である。半導体産業（前工程）が立地する市町村にて地下水汚染を調査した結果、山形県東根市や福島県会津若松市の他、静岡県豊岡村など全ての井戸でトリクロロエチレンが検出されている。さらに千葉県松戸市や京都市、そして滋賀県八日市でも調査対象となった井戸の半数から、トリクロロエチレンが検出されている²²⁾。これらの地域以外でも、多くの環境汚染が報告されているため、本稿で取り上げた事例は氷山の一角にすぎない²³⁾。それでは最後に、現在でも半導体製造が盛んに行われている九州シリコンクラスターの事例を取りあげる。

周知のように、熊本は豊富な地下水に恵まれた県である。既に上述したように、半導体生産には大量の水が必要であることから、多くの半導体企業が進出している。しかしながら、熊本においてもこれまでの事例と同様に、深刻な地下水汚染が起きてきた。中には、有機溶剤によ

19) その後、唐津工場では、トリクロロエチレンのタンクをコンクリートの防液堤で囲う等の改善策を行っている。同上書、124 頁。

20) 同上書、126 頁。

21) 同上書、127 頁。

22) 同上書、132 頁。

23) 宮崎県においても、県の責任ととれる同様の事例がある。宮崎市が半導体工場の排水口より下流に水道水取水口を建設しており、汚染水が地域住民への健康被害が起きている。同上書、149 頁～161 頁。

る汚染が国の暫定基準値の 500 倍にもなる井戸が発見された事例も報告されている。こうした環境汚染は、1982 年の環境庁による調査によって発覚したのであった。その後、事態を重く見た県側は、1983 年から有機溶剤の調査を開始し、市内にある 47 の井戸から高濃度の汚染を確認している。汚染状況としては、地下 100 メートルの井戸にまで及ぶことから、甚大な問題である²⁴⁾。

このような問題を引き起こした半導体工場の一つとして、日本電気の 100% 出資子会社である九州日本電気を挙げることができる。1970 年に操業が開始して以降、九州日本電気の工場排水に、有機溶剤の濃度が基準値を上回っていることが明らかとなった。この結果を受け、当時の熊本市議会が取り上げたのである。しかしながら、十分な説明責任を果たすことなく「企業秘密」として真相が明らかにされることはなかった。その後、1986 年 1 月に熊本市と九州日本電気が公害防止協定を結び、ようやくトリクロロエチレンなどの有機溶剤を国の暫定基準の 10 分の 1 以下に抑制する取り決めがなされた²⁵⁾。

たしかに、汚染に対する規制に進展があったものの、全ての有毒化学物質が規制されたわけではない。いくつかの有毒物質の使用状況については、これまでと同様に報告義務が無く「企業秘密」として取り扱われたのであった²⁶⁾。さらにここでの深刻な問題は、極めて汚染の危険性が高い九州日本電気の半導体工場付近に、民家や幼稚園が隣接されていたことである²⁷⁾。既に有機溶剤が人体に与える影響について報告がなされていることからすると、県の対応としては杜撰である。県側は、地下水汚染の根源である有害物質が、人体に与える影響に関して計り知れないとの認識があったにもかかわらず、汚染原因の徹底的な追求と早急な対応をとることはなかった。

しかしながら、このような点を明確にしない限り、日本におけるハイテク汚染は改善されないものと思われる。また吉田（1989）は、法という視点から日本の問題点についても指摘している。日本においては、人の健康に関わる有害廃棄物質は 9 つだけであるのに対し、アメリカでは 450 もの物質が明示されている。アメリカは日本よりも、遥かに厳しい基準を設けている²⁸⁾。この点については、現在においても日本社会の重要な課題であるといえよう。

24) 熊本県の汚染問題は、100% 半導体工場によるものではない。ドライクリーニング工場からの汚染も、大きな割合を占めている。同上書、143 頁～144 頁。

25) 同上書、147 頁。

26) 同上書、147 頁。

27) 同上書、147 頁。

28) 同上書、185 頁～186 頁。

Ⅱ 環境統合型システムの確立に向けた半導体企業と製造装置企業の取り組み

1. 半導体企業における環境統合型システムの取り組み

現在の技術では、有害物質を使用しなければ半導体を製造することはできない。その中で、半導体企業が「いかに環境負荷を軽減し、半導体を製造しているのか」について考察していく。これまで環境汚染の事例を取り上げた中で、東芝は過去に大きな環境汚染を引き起こしてきた。しかしながら、現在では排水処理施設や薬品使用施設などについて独自の基準を定め、公共用水域等への流出を防止する取り組みを積極的に行っている。

図表 2 有害物質の漏洩防止策



出所 <http://www.semicon.toshiba.co.jp/environment/manufacture/chemical/index.html>
(2013 年 3 月 5 日アクセス)

図表 2 は、東芝四日市工場の製造施設である。左の図は地上架空化配管であり、これまで水汚染の主要因であった埋没式の貯蔵タンクを通じた有害物質の配管を地上架空化配管にすることで土壌汚染・水汚染に対する防止策をとっている。右の図も同様に化学物質の漏洩を防止するために、配管の継ぎ目を二重化し、さらに液漏れを確認できるような改善がなされている。また、岩手東芝では、薬品倉庫などでの薬品受入れ時の漏洩策として、薬液タンクのあふれを見張る警報器を設置するなどの策をとっている。この他にも、環境汚染を抑止する活動として水資源有効利用にも注力している²⁹⁾。

もちろん、過去の反省から環境負荷軽減のために活動を遂行しているのは東芝だけでない。企業の社会的責任の立場にて、多くの半導体企業が環境汚染に関する積極的な改善活動を行っている。その中でもエルピーダメモリは、とりわけ改善活動を積極的に取り組んでいるように見られる。エルピーダメモリでは、環境報告書を 2005 年より発行し、その当初から誰でも把握できる情報公開のツールとして、年度ごとに成果を公開している。この報告書の中で特に注

29) <http://www.semicon.toshiba.co.jp/environment/manufacture/chemical/index.html> (2013 年 3 月 5 日アクセス)

目すべきは、「地域との共生」を掲げ、それを実現させている点である³⁰⁾。

広島工場では、隣接する地区を対象に 2007 年度から「環境交流会」を実施している。環境交流会は、近隣の住民から信頼を得ることで、地域との共生を図るために行われているものである。2009 年度には、さらに交流する対象領域を広げ、地域住民を招き環境への取り組みを紹介している（図表 3 を参照）。その際、地域住民からの質問・意見・要望を聞き入れ、製造現場に反映させることで信頼を得ようとする努力の後が見受けられる³¹⁾。

具体的には、「工場の近くを流れる古河川で魚を釣って食べたりしているが、汚染の問題は大丈夫か。地元大学に著名な水博士がいるが、意見を伺いたい」といった声が近隣の住民からあると、エルピーダは環境データを専門家（大学教員）に公開し、第 3 者の視点から客観的判断を仰ぎ、安全であることを地域住民に認識してもらえるよう注力している³²⁾。地域住民の安全・安心を獲得している点に限定すると、エルピーダにおける生産環境の開示は優れていると言えよう。

さらにエルピーダでは、環境理念を掲げ、従業員が理念を共有したうえで、日々のビジネスが持続的に行われるよう環境理念を体系化している。それを示したものが、図表 4 である。この中で、とりわけ重要な項目が「エルピーダ環境ビジョン」と「環境行動指針」である。日々の業務を通じて環境理念を全従業員に浸透させるには、必要不可欠な項目と言える。言うならば「エルピーダ環境ビジョン」は、社会環境と融和し、持続的な成長を行うという自社の「立ち位置」を示したものである。そして、それを全社員が実際に行動するために「環境行動指針」

図表 3 エルピーダにおける環境理念

私たちの目指すべき姿	従業員のとるべき行動
<p>環境理念</p> <p>エルピーダメモリグループは環境と調和するテクノロジーと環境に配慮した生産の追求を通して、自然の恵みを尊重し世界の人々が人間性を十分に発揮できる豊かな社会と環境の実現に貢献します。</p>	<p>環境行動指針</p> <p>エルピーダメモリグループは環境との調和を経営の最優先課題の一つとして企業活動の全域で一ひとりが環境への優しさを優先して行動します。</p>
<p>理念到達への道しるべ</p> <p>エルピーダ環境ビジョン</p> <p>エルピーダメモリは高度な省エネ半導体製品開発・製造を通じ、社会全体の省エネ、地球温暖化防止に積極的に貢献します。</p> <p>●半導体プロセス微細化・高集積化と低消費電力化によるエコプロダクツを提供し製品ライフサイクルでの環境負荷大幅低減</p> <p>●生産効率、資源/エネルギー利用効率の改善等により世界最高レベルのエコファクトリを追求</p>	<p>環境に配慮した製品の提供</p> <p>開発・設計の段階で製品のライフサイクルに渡る環境・安全を考慮した評価を行い、環境保全に適合し、情報社会のニーズを先取りした省資源、省エネルギーの製品を提供する。</p> <p>生産への取り組み</p> <p>廃棄物を削減し汚染を防止する環境技術によって、資源再利用化を促進し効率的で安全な工法を目指す。その環境技術によって設計、製造、物流、廃棄などの全ての段階において省資源・省エネルギーを実現し、持続的地球環境保全・生物多様性保全に貢献する。</p> <p>環境規制遵守、情報公開</p> <p>国・地方自治体などの環境規制を遵守することはもとより、自主管理基準を設定し、環境管理レベルの向上に努める。顧客及び地域社会をはじめとして社内外の全ての関係者に対して環境活動の公開につとめる。</p> <p>環境マネジメントシステム、継続的改善</p> <p>ISO 14001 システムに適合する環境マネジメントシステムを構築し、さらに継続的改善活動を全員参加で推進することにより持続的地球環境・社会の実現に貢献する。</p>

出所 エルピーダメモリ（2011）『環境報告書』、4 頁

30) エルピーダメモリ（2011）『環境報告書』

31) 同上報告書、15 頁。

32) 同上報告書、15 頁。

が掲げられている。ここでは、具体的に従業員が環境理念を実行するための方策が示され、「環境行動指針」に従って日々の経営活動が行われているのである。

これまでの環境汚染の中で、有害物質を土壌にこぼした結果、それが引き金となって水汚染が起きた事例もあった。有毒物質がどれだけ環境に負荷をもたらすのかを自覚することは、半導体製造にかかわる全ての従業員にとって基本的な知識である。環境理念のうえに、経営理念を踏まえ持続的成長を図ることが、これからからの半導体企業にとって重要な課題であると言える。

2. 半導体製造における製造装置企業の役割³³⁾

半導体を製造する際、熟練・未熟練の労働者も然る事ながら、製造装置も極めて重要な役割を担っている。半導体産業が誕生した初期、製造装置の大部分は半導体企業内部で製造されてきた。しかしながら、日々技術が進歩する中、製造装置に対する研究開発費は膨大な額となり、現在では半導体企業にとって代わり、製造装置企業がその役割を果たしている。

このような環境下において、半導体企業が新規に製造装置を購入する場合、単純に買い入れているわけではない。顧客（半導体企業）が新規で購入する場合は、約1年～2年の月日を要する。具体的な製造装置の納入プロセスとしては、顧客に標準化された製造装置を貸し出し、実際にそれを顧客が使用することで、製造装置の評価が行われる。その際に製造装置企業は、顧客の要件定義に合わせ、製造装置の開発・製造を行う。

そして厳しい要件定義をクリアした段階で、初めて見積もりを提出することが出来るのである。逆に、評価の段階で顧客を満足させるだけの機能を提供することが出来なければ、受注・生産には至らない。特に顧客を新規で獲得する際、顧客は複数の装置企業に発注依頼を行っていることが多いため、競争し合う中で基準を満たした製造装置企業にのみ発注が限定されるからである。

また、既に納入実績のある製造装置を同様の顧客に追加で納入する場合を見ても、製造装置企業の役割が日々高まっていることを窺い知ることができる。製造装置企業は、製造装置を納入し、その際に受けた要望については、「改善通知書」を通じて開発・設計の担当者に伝え、常に情報を共有化するようにしている。製造装置を納入する際に顧客から聞いた情報は、全て自社内部にフィード・バックするような体制がとられている。フィード・バックする中で、他の顧客にも通じ、直ぐにでも改善すべき点については、納入を受けた顧客にその情報を伝える。そして、「改善通知書」を基に次世代の製造装置の開発・設計が、エンジニアの判断によって行われていく。

その結果、新たな基本プロセスを組み込んだ製造装置が開発されることによって、基本プロ

33) 上田智久・夏目啓二 (2012) 「半導体製造装置企業 A 社の受注・納入業務と人材育成」『龍谷大学経営学論集』龍谷大学経営学会を基に記述している。

セスが最適プロセスへと近いものに進化していくことが可能になる。最適プロセスに近づくとすることは、要件定義が異なる各企業への「納入業務の短縮」と、「即座の稼働」が可能になりつつあることを意味する。ただし、現段階では半導体企業に製造装置を納入すれば、歩留まり率の高い半導体が出来上がるわけではない。製造装置企業は、製造装置を単に納入するだけでなく、納入した後に工程の前後にある製造装置と複雑な調整が数週間～1か月に渡り行われる。製造装置企業が各半導体企業に同様の装置を納入したとしても、先にも述べたように各社によって要件定義が異なる。そのため、各企業に応じた形で調整が行われる。

具体的には、スタートアップ・エンジニア³⁴⁾が実際に顧客の工場に出向き、製造装置を納入する。その際、工場で完成した製造装置を一度分解し、それを顧客の工場に運び再度組み立てる。顧客の工場内で単に製造装置を組み立てるだけでなく、他社との擦り合わせも行う。製造装置を起動させるためには、電気やガス、そして水などが必要になるからである。しかしながら、設置完了したとしても、直ぐに顧客が高い稼働率・歩留率にて半導体を製造出来るわけではない。

特に最先端の半導体を製造する場合、設置完了を終えた段階での歩留率は数10%程度であり、それをいかにして迅速に、100%近くまで歩留率を高めていくのかが、半導体製造において重要な課題となる。この課題を解決する際、基本的には顧客が独自に製造装置のプロセスをチューニングし、歩留率を改善していくことが前提となる。しかしながら、中には装置性能に依存するケースもあり、半導体企業と装置企業の技術者が協力して改善することによって、歩留率の高い製造装置へと調整していく。したがって、歩留まり率の向上は、半導体企業だけでなく、製造装置企業にとっても重要な課題である。

1980年代半ば頃までは、装置を納入した後、半導体企業側からハード的な要望のみが装置企業側へと知らされるだけであった。それが昨今では、顧客がどのような意図で製造装置への要望を行うのかについても、当初から伝えられるケースが多くなっている。また、納入業務が終了した後も、納入した装置に不具合が発生すれば即座に対応できるよう、24時間体制でエンジニアを各支店に常駐させている。製造装置企業は、装置の受注・納入業務を行うだけでなく、実際に使用される中でも常に納入を受けた半導体企業と密接な関わりを持っている。

このように、半導体製造を行うためには、製造装置企業の存在は不可欠と言える。製造装置企業は、顧客である半導体企業との間の装置に関する情報共有が重要であり、完成品の単なる受注と納入では完結しない特殊な業界構造をもっている。

3. 製造装置企業における環境統合型システムの取り組み

前節では、半導体産業における環境統合型システムの確立において、製造装置企業が重要で

34) スタートアップ・エンジニアとは、製造装置を顧客に納入する技術者である。1台の製造装置を納入する際、3人～8人程度で業務が遂行される。

あることを考察した。半導体を製造する際、半導体企業による工程改善だけでは限界があり、製造装置自体が環境汚染を軽減するものでなければならない。この点から見ると、多くの製造装置企業の中でも、特に東京エレクトロンでは、環境問題に対し積極的な活動を行っている。

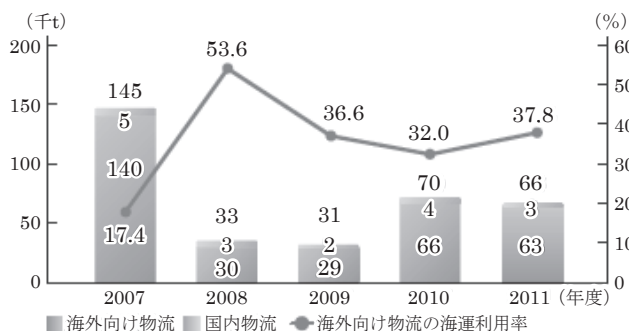
環境問題について、東京エレクトロンは「当社グループ製品が顧客の事業運営に於いて少なからず環境負荷を与えていることを率直に認識し、顧客と一体となって当社グループ製品の環境負荷を低減させる為に、積極的かつ継続的に努力する」ことを明示している³⁵⁾。半導体製造における環境汚染を真摯に受け止め、そのうえで持続的発展に向け、グローバルにビジネスを推進しているものと考えられる。

では実際に、東京エレクトロンの環境ビジョン (TEL ビジョン³⁶⁾) について見てみると、大きく 3 つに分けられている。1 つ目は、「地球環境負荷の軽減」である。ここでの目標は、温暖化・気候変動の防止、資源の安全、化学物質の適正管理・削減などである。2 つ目は、顧客の工場における「環境総合負荷半減」である。顧客と共に地球環境を考えた取り組みである。最後の 3 つ目は、「透明性ある環境経営」である³⁷⁾。以下では、それぞれの内容について考察していく。

① 地球環境負荷の軽減

地球環境負荷の軽減としての取り組みの中で、東京エレクトロンが扱う主要な製造装置で重要な改善がなされている。例えばエッチング装置では、電力の 25% を削減することに成功している³⁸⁾。中には、300 mm ウェハを原単位として CO₂ 排出量が 50% も削減できる見込みがつかれたものもある³⁹⁾。そして、製造装置の開発時に使用する化学物質については、出来る限り環境

図表 4 物流における CO₂ 排出量と海運利用率の推移



出所 東京エレクトロン (2012) 『環境・社会報告書』, 19 頁

35) <http://www.tel.co.jp/environment/enviro/basic/index.htm>. (2013 年 3 月 5 日アクセス)

36) TEL は、Technology for Eco Life の略である。

37) 東京エレクトロン (2012) 『環境・社会報告書』, 10 頁。

38) この他にもテストシステムや熱処理成膜装置そして枚葉成膜装置などでも成果を上げている。詳細は環境・社会報告書 16 頁～17 頁を参照されたい。

39) 東京エレクトロン (2012), 15 頁。

負荷が可能なものへと変更するよう改善が進められている。その際、事前に安全衛生上のリスクを確認し、もし何らかの対策が必要であれば、対象方法を確立してから使用するようになっている。さらに、製造時に使用する化学物質についても、危険性や有害性が少ない物質への切り替えを進めることで、環境負荷を軽減するような改善を行っている⁴⁰⁾。この他にも図表4のように、温暖化・気候変動の防止のため、国内・海外向け輸送のモーダルシフト⁴¹⁾を行うことによって、物流に伴うCO₂排出量の削減に対する取り組みを推進している⁴²⁾。

② 環境総合負荷半減

環境負荷を軽減するためには、有害含有物質の削減が極めて重要になる。東京エレクトロンでは、製造装置の開発において、有害規制化学物質対策として周知されている欧州 RoHS 指令にて規制している6物質（鉛、水銀、カドミウム、6価クロム、PBB、PBDE）の削減を自主的

図表5 EHS マネジメントの結果と今後の環境ビジョン

	活動項目	中期達成目標	2011 年度実績	評価	2011 年度以降の計画、目標
EHS マネジメント	EHS 相互監査の実施	サプライチェーンを含めた事業所間での EHS 相互監査を実施	安全について製造系事業所で監査を実施		環境においても監査を行っていく
製品における環境への取り組み	製品の環境負荷低減	2015 年環境負荷半減 (2007 年度比) 原単位：300mm ウェーハあたりの CO ₂ 排出量	代表装置において 30-50%削減策を反映するとともに、お客さまへ提案実施		各ビジネスユニット代表機種で 50%エネルギー低減 (2014 年度)
	装置に含まれる規制化学物質対策	欧州 RoHS 対比 98.5% を満たす装置の出荷	2008 年 10 月より含有化学物質削減装置を継続して出荷		各ビジネスユニット代表機種で欧州 RoHS 適合部品率 98.5% 以上を継続
物流における環境への取り組み	物流における環境負荷低減	2015 年環境負荷半減 (2007 年度比) 原単位：トンキロあたりの CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出量総量 54% 削減 トンキロ原単位 22% 削減		モーダルシフトを推進 モニタリングの継続
事業所における環境への取り組み	事業所の環境負荷低減	2015 年環境負荷半減 (2007 年度比) 原単位：売上あたりの CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出総量：60% 以上削減 売上高原単位：52% 削減		前年度比原単位 1% 削減 各事業所ごとの原単位を総合評価
	廃棄物リサイクルの向上	リサイクル率 97% 以上 製造系事業所でのゼロエミッション継続	グループ全体のリサイクル率：97.4% 製造系事業所においてゼロエミッションを達成		リサイクル率 97% 以上を維持 ゼロエミッション継続
健康・安全	人身災害事故の削減	人身事故の未然防止ができる体制を確立し、重度の人身傷害になりうる事故撲滅を目指す	2011 年度の重度の人身傷害になりうる事故は 2010 年度比半減を達成		2012 年度は、人身事故のうち重度の人身傷害になりうる事故を 2011 年度比 20% 以上削減する



目標達成



目標の 80% を達成



目標の 80% 未満を達成

出所 東京エレクトロン（2012）『環境・社会報告書』，15 頁

40) 東京エレクトロン（2012），23 頁。

41) モーダルシフトとは、自動車や航空機による輸送手段から、環境負荷の低い鉄道や船舶による輸送に転換することである。

42) 東京エレクトロン（2012），19 頁。

に進めている。さらに、欧州 RoHS 指令に適合した代替品への変更を顧客に促している⁴³⁾。

また、顧客の工場における「環境総合負荷半減」の基本的な考え方として、EHS マネジメントが重要な指針となっている。EHS を経営上の重要課題の 1 つとして位置づけている。この EHS マネジメントは、2007 年度を基準に 2015 年の年度末までに電力や CO₂ の排出など、様々な環境問題に関わる数値の半減を目標に取り組まれているものである。これは長期的な環境ビジョンであるものの、東京エレクトロンは、2011 年度の段階で既に 2015 年末までに掲げた目標をほぼ達成することに成功している(図表 5 参照)。そして、現在ではさらなる新環境ビジョンを設定している。

この他にも、顧客が新工場を立ち上げる計画段階から、環境負荷低減を意識した建設に携わることで、省エネルギーや省資源といった形での環境を配慮したビジネス活動を行っている。施設の廃熱を空調へと再利用することによって、省エネルギー化を可能にしている。さらに、半導体製造において、不可欠な純水製造時に発生する余剰水を洗浄水として再利用する工場の設計をも提案している。そして、化学物質を含む廃液の処理は、その発生量を抑えることはもちろんのこと、適正な排水処理を行い排水中の化学物質の濃度の厳重な管理が行えるシステムも顧客に提供している(図表 6 参照)。半導体製造の歴史の中で、有害物質が環境汚染の根源と

図表 6 環境負荷軽減における使用水の再利用と汚水漏洩管理



出所 東京エレクトロン (2012)『環境・社会報告書』, 9 頁

43) 欧州 RoHS 指令で規定された基準を満たした製品については「有害規制化学物質削減装置」として、2008 年度下期から順次出荷を開始し、主要装置での「有害規制化学物質削減装置」の割合は、2012 年 3 月時点で 50% を超えている。東京エレクトロン (2012), 18 頁。

なり、人体に深刻な影響を及ぼしてきた。有害含有物質の規制・低減は、半導体製造における環境問題の中でもとくに重要になる。

③ 透明性ある環境経営

透明性ある環境経営を遂行するため、法令や企業倫理に反する疑いのある行為について、従業員が直接情報提供を行う手段として、「内部通報制度」を設けている。通報窓口としては、法令と倫理の2つに分け、窓口を設置している。また、国内だけでなく国外においても透明性を図る手段として、海外拠点でも拠点ごとに通報窓口を設置している。その際、通報者の匿名性を保証することで、より透明性のある環境経営の実現に向けた取り組みを推進している⁴⁴⁾。

以上のように、これからの環境統合型システムの確立に向けては、「貨幣としての利益」を単に追求するのではなく、利益の中に「環境」を含めることが求められている。エネルギーの削減や汚染の軽減を可能にする半導体製品の開発・製造活動を通じ、環境負荷を軽減することで、それが自社の利益となり、社会との調和を可能にする環境経営を意識し続けなければならない。

お わ り に

本稿では、半導体産業における環境統合型システムの意義と限界について考案した。環境統合型システムを考察するにあたって、これまで日本で過去に大きな環境汚染をもたらしてきた東芝を事例に取りあげた。そして現在、東芝が環境統合型システムの確立に向け、「どのような取り組み」を行っているのかを明らかにしてきた。東芝は、独自の排水処理施設や薬品使用施設などについて厳しい基準を定め、汚染水の漏洩を未然に防ぐ取り組みなど、積極的な環境汚染に関する改善活動が行われていた。「地域との共生」を掲げ、近隣住民からの信頼を得ることで、環境統合型システムを意識した環境経営が実践されていた。

しかしながら半導体産業において、環境統合型システムを確立していくためには、製造装置企業の積極的な環境経営が必要になる。そこで製造装置企業が環境統合型システムに貢献している事例として、東京エレクトロンを取り上げ、その役割を分析した。ここでは、環境負荷を軽減する製造装置の研究開発が行われているのはもちろんのこと、顧客に自社の環境負荷型の装置の導入を促すことで、積極的な半導体産業における環境統合型システムの確立に向けた取り組みが推進されていた。

このように、半導体企業と製造装置企業が環境負荷の低減に向けた改善活動を推進することで、環境統合型システムが確立していくのである。しかしながら、半導体製造において現在で

44) 東京エレクトロン（2012），13 頁。

も有害物質を使用していることは事実である。今後も両産業が環境負荷の低減を積極的に行い、協調し合うことによって、有害物質の使用をゼロにまで近づける一層の努力が必要になる。

参考文献・資料

1. 藤本隆宏（2004）『日本のもの造り哲学』日本経済新聞社
2. 藤本隆宏・桑嶋健一編（2009）『日本型プロセス産業—ものづくり経営学による競争力分析—』有斐閣
3. 林弘子（1985）「半導体産業における公害・労災・職業病」『季刊・労働法』
4. 人見達雄（1985）「地下水の危機」押田勇雄編『都市のゴミ循環』日本放送出版協会
5. 伊丹敬之 / 伊丹研究室（1995）『なぜ「三つの逆転」は起こったか：日本の半導体産業』NTT 出版
6. 泉邦彦（1987）『恐るべきフロンガス汚染』合同出版
7. 徐正解（1995）『企業戦略と産業発展—韓国半導体産業のキャッチアップ・プロセス』白桃書房
8. 剣持一巳（1986）『ハイテク災害』日本評論社
9. 栗原稔他（1988）「半導体作業者の毛髪を分析する」『労働の化学』第 43 巻第 7 号
10. 古賀輝彦（1985）「トリクロロエチレン等の汚染経路と深井戸改修工事」『水道協会雑誌』第 54 巻 1 号
11. 中杉修身（1984）「有機塩素化合物による地下水汚染の実態」『季刊・環境研究』No.52
12. S.c.Dapson et al., (1984) “Effect of methyl chloroform on cardiovascular development in rats”, Teratology, Vol.29, No.2, April.
13. S.W.Lagakos et al., (1988) “An Analysis of Contaminated Well Water and Health Effects in Policy”, JAMA, Vol.260, No.7, Aug.
14. 鈴木良始・湯之上隆（2008）「半導体製造プロセス開発と工程アーキテクチャ論—装置を購入すれば半導体は製造できるのか—」『同志社商学』第 60 巻第 3・4 号
15. 鈴木茂（1988）「熊本市における地下水汚染の現状」『産業経営研究』第 6 号
16. ———（1988）「ハイテク型地域開発と地方財政」『現代経済学の諸問題Ⅱ』
17. 谷光太郎（2002）『日米韓台半導体産業比較』白桃書房
18. 谷光太郎（2003）「90 年代日本半導体産業後退の一考察」『山口経済学雑誌』第 51 巻第 2 号 3 月
19. 上田智久（2007）「日本半導体産業における成熟と脱成熟化のプロセス—アバナシー=アターバック・モデルと脱成熟化の論理に着目して—」『立命館経営学』第 45 巻第 6 号
20. 上田智久・夏目啓二（2012）「半導体製造装置企業 A 社の受注・納入業務と人材育成」『龍谷大学経営学論集』第 52 巻第 2・3 号
21. 山口裕（1985）「半導体用ガスの人体有害性と安全対策」『労働の化学』第 40 巻第 9 号
22. 山田國廣（1985）「地下水からの警告」『技術と人間』3, 4, 6, 8 月号
23. 吉岡英美（2004）「韓国半導体産業の国際競争力形成の要因—デバイス部門と製造装置部門の企業間関係の変化に即して—」『アジア経済』第 45 巻 2 号
24. ———（2010）『韓国の工業化と半導体産業』有斐閣
25. 吉田文和（1989）『ハイテク汚染』岩波新書
26. ———（2001）『IT 汚染』岩波新書
27. エルピーダメモリ（2011）『環境報告書』
28. 東京エレクトロン（2012）『環境・社会報告書』