

MMRC-J-114

半導体業界における
製造工程の標準化と競争構造
—「ロードポート」のケース—

東京大学大学院経済学研究科 博士課程
貴志 奈央子

2007年3月



東京大学21世紀COE [製造]
ものづくり経営研究センター

半導体業界における 製造工程の標準化と競争構造 —「ロードポート」のケース—

東京大学大学院経済学研究科 博士課程

貴志 奈央子

2007年3月

要約：半導体業界の製造工程における標準化について、ウェハ格納容器と製造装置のインタフェースでウェハを外気にさらすことなく搬送するロードポートに焦点をあて、次の二点を明らかにする。①ロードポートが一つの市場を形成するに至った経緯。②標準化された製品でありながら市場シェアトップを達成したロードポートメーカーの戦略。

キーワード：半導体・標準化・顧客志向

1. はじめに¹

半導体業界では、ウェハの大口径化にともなって製造工程の自動化が進められてきた。ウェハのサイズが 200mm の時期までは半導体の製造工程にオペレーターが入り、製造装置間のウェハの移動を人によってまかなうことも多く、部分的に AGV(Automatic Guided Vehicle) を使用するなどで対応していた。しかし、ウェハサイズが 300mm に達する頃には、微細化

¹ 本事例は 2005 年 12 月 7 日に行われた T 社担当者 2 名を対象に行われたインタビュー調査・公開資料・業界関係者との非公式な議論に基づいて構成されている。

によって要求されるクリーン度が高まったためフープ(FOUP : Front Opening Unified Pod)と呼ばれる密閉型のウェハ格納用ポッドが使用されるようになった (図 1 参照)。これによって運搬時の負荷が増し人による搬送が困難となったことから製造工程の全自動化が検討されるようになった。

図 1. ウェハをパーティクルから保護するフープ



出所) 信越ポリマー株式会社 HP より

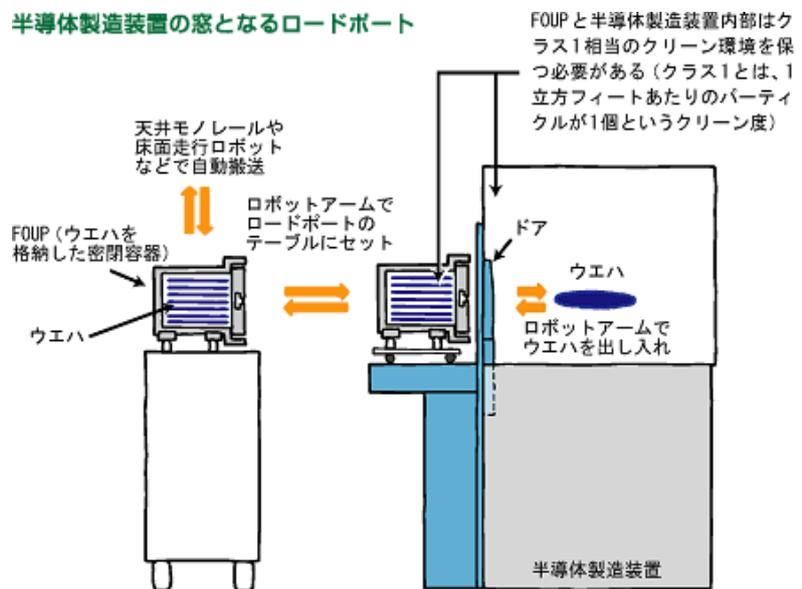
ロードポートは、半導体製造工程においてポッドと製造装置のインタフェースでウェハを外気にさらすことなく移動させる機械であり、製造工程の自動化とともに市場が形成された。そして、200mm ウェハの時代から本格的な構想が検討されてきた製造工程の自動化が300mmの時代に実現化されると、ロードポートの市場が急拡大することとなった。T社がロードポート市場に参入したのは、形状や特性がウェハとよく似たCDを製造していたことでデバイスメーカーからロードポート製作の依頼を受けたことに始まる。CDもパーティクルを嫌う特性があるため、T社自身も一足早く搬送用格納容器から製造装置へ製品を自動でハンドリングする機械に着目しており、半導体業界の需要に応じてロードポート市場に参入を果たすこととなった。ロードポートは一つの装置につき平均 2.5~2.7 台使用されるため、1つの工場で見ると 400~500 台作動していることになるが、市場参入後、徹底した顧客志向を展開したT社のロードポートは 2000 年に発売以来、既に 1 万台以上の導入実績を築き世界シェアNo.1 を達成している²。

² T 社の HP より引用。

2. ロードポートとは

上述のようにロードポートとは、ポッドと半導体製造装置のインタフェースでウェハを搬入出する機械である。図2に示されているのは、ロードポートが搬送機からポッドを受け取って製造装置にウェハを搬入するまでの模式図である。ウェハはパーティクルの付着を避けるため局所的にクリーン度を高めた蓋付きのポッドに入れて搬送される。ウェハを格納したポッドは製造工程において、天井に設置された軌道レールを走行する OHT(Overhead Hoist Transport)や床を走行する AGV などによって搬送され、製造装置の前までくるとロードポートのテーブル上に移される。次に、ポッドが前進して製造装置の開口部とドッキングし、製造装置のドアが開かれてウェハを搬入する。

図2. ロードポートの機能



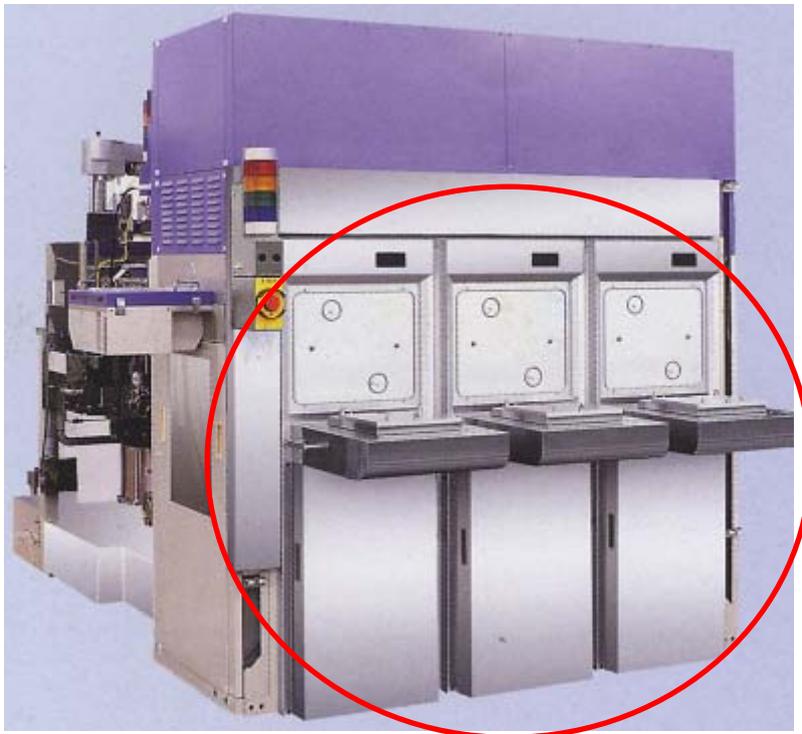
出所) T社のHPより。

図 3. ロードポート



出所) T社の製品カタログより。

図 4. ロードポート使用例：プラズマエッチング装置に装備されたロードポート



出所) 東京エレクトロン株式会社の製品カタログより。

3. ロードポート市場について

3-1. ロードポートの取引パターン

ロードポートと製造装置の間には、表1に示されているように3つの取引パターンがある。1つめは、ロードポートメーカーが製造装置メーカーに納入するパターン。この場合、デバイスメーカーはロードポート設置済みの装置を製造装置メーカーから購入することになる。また、ロードポートメーカーがロードポートをEFEM(Equipment Front End Module)と呼ばれるモジュールに組み込んで製造装置メーカーに納入することもある。EFEMはロードポート・ウェハ搬送機構・ウェハ搬送室から構成され、ロードポートから搬入されるウェハを製造装置に供給するまでを担うモジュールである³。2つめのパターンは、製造装置を手がけているロードポートメーカーが自社製品に装備する場合である。そして3つめは、製造装置メーカーが内製するパターンである。ロードポートメーカーが関与できるのは1~2の取引パターンであり、製造装置を手掛けていないT社の販売機会は1のパターンということになる。

一方、製造工程の全自動化においてロードポートの使用を開始するにあたり、デバイスメーカーはその信頼性を最も危惧していた。製造装置についてはこれまでに購入経験があるためパフォーマンスを判断することができる。また、ウェハを格納するポッドについても搬送に人が介在していた頃から使用していたため評価能力を有していた。しかし、製造工程の全自動化によって初めて導入されることになるロードポートについては情報をほとんど入手できず、信頼性の判断材料がまったくない状態であった。また、市場が形成された当時は複数のロードポートメーカーが参入してきたことから、標準化された製品の中からすぐれたパフォーマンスを達成してくれるメーカーを選択することが困難でもあった。さらに、ロードポートは規模の経済を享受できる製品であったことから、デバイスメーカーは供給先を特定のロードポートメーカーに絞り、信頼性の高い製品を安く供給してもらうことを期待していた。

³ 株式会社安川電機 HP より。

表 1. ロードポートの取引パターン

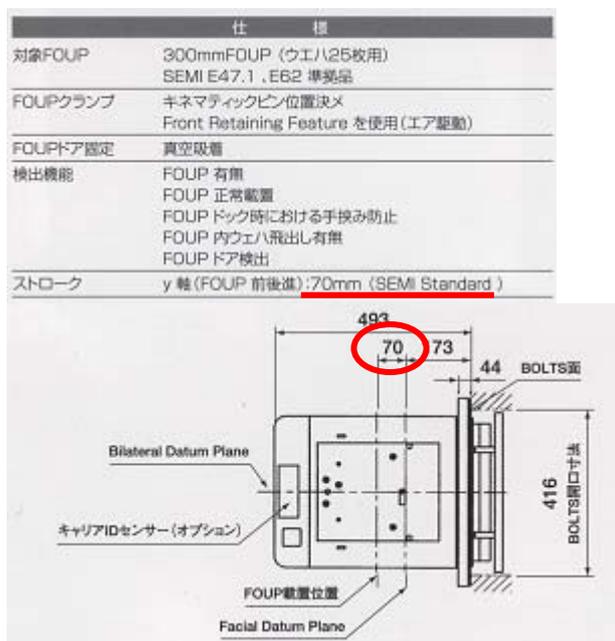
1	ロードポートメーカー ⇒ 製造装置メーカー ⇒ デバイスメーカー
2	ロードポートメーカーが自社製品に装備
3	製造装置メーカーによる内製

3-2. 半導体製造工程の自動化と標準化

ロードポートの需要が拡大したのは、半導体業界において製造装置と搬送機器のインタフェースが標準化され製造工程の自動化が達成されたこと、および製品の微細化に伴いクリーン度の向上が不可避となったことに起因している。一つ目の要因である製造工程の自動化は、生産性の向上を目的としてウェハのサイズが大口径化したため人による搬送が困難となったことから検討が始まり、ウェハのサイズが 200mm から 300mm へと拡大する転機に達成された。全自動化の達成には装置間の通信仕様の標準化と、製造装置と搬送機器のインタフェースに関する標準化が不可欠であり、特にロードポートの市場拡大に寄与したのは製造装置の開口部と搬送機器のインタフェースに関する規格の標準化であった。標準化において決定された製造装置とロードポートのインタフェースの規格は間口の寸法、蓋を開閉するさいの鍵となるラッチの位置、吸着パッドの位置、開閉する蓋の大きさ、ロードポートの製造装置側の寸法すべて、OHT から下降してくるポッドを置くテーブルの高さ・位置、製造装置とポッドの距離、ポッドを固定するキネマティックピン⁴の位置である。図 5 に示されているのは、製造装置とポッドの距離に関する標準化規格の例である。標準化では、ポッドが製造装置の間口とドッキングするさいに前進する距離を 70mm と規定しており、デバイスメーカーは納入のさいに 100 分の 1 ミリ単位でこれらの標準化についてパフォーマンスを評価している。

⁴ ポッドの位置を正確に固定するためにキネマティックカップリングという方法が用いられている。キネマティックカップリングは 100 年以上前から使用されていた古典的な技術で、三角形を描くように配された 3 つのボールとそれに対応した平面に設けられた「みぞ」とのカップリングによって精緻な位置合わせを行う方法であり（林 2003）、キネマティックピンとは上記の 3 つのボールの代わりに使用される突起である。

図 5. ロードポートの標準化規格例



出所) T社の製品カタログより。

3-3. 市場の形成

ロードポートに対する需要は、製造工程の自動化によって生じた。しかし、取引パターンの一つとして上述したように製造装置メーカーが内製することも可能な製品であるため、なぜ装置の一部を構成するロードポートが切り出されて市場を形成したのかについて疑問が残る。ロードポートメーカーに製造を委託し、業界として規模の経済性を享受するまでにはある程度の時間がかかる。その前段階で、製造装置メーカーはなぜ外部委託の意思決定をしたのか。その要因として、次の二点を挙げる事ができる。第一の要因は、T社のロードポートが信頼性とパーティクル混入の回避について Selete(Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc.)⁵からNo.1 の評価を獲得し、市場において製品の信頼性を認知されたこと

⁵ 1996年に300mmウエハ装置を用いる生産技術の開発を目的として設立されたコンソーシアム。半

である。Seleteの評価によってロードポートの信頼性に対する装置メーカーおよびデバイスメーカーの懸念が緩和され、規模の経済性が達成されることの見通しが立つこととなった。その結果、T社のロードポートに対する需要が伸び、装置メーカーおよびデバイスメーカーがコストや品質におけるベネフィットを享受できるという好循環が生まれた。そして第二の要因は、ウェハを装置に搬入することがデバイスメーカーにとって付加価値を生むプロセスではないことである。表2に示されているように、製造工程ではフープによって保護されたウェハがAGV・OHT・RGV(Rail Guided Vehicle)によって搬送され、目的の製造装置の前に到着するとロードポートを通じて搬入され、装置内で処理が施される。デバイスメーカーが付加価値を提供できるのは、製造装置を使用してウェハに処理を施すステップのみである。そして、フープおよび搬送機器についても製造装置とは独立した市場が形成されていることから、製造装置メーカーはデバイスメーカーの付加価値に直接的には貢献しないステップで使用されるロードポートの外部委託を選択肢の一つとして掲げることになったと考えられる。また、製品アーキテクチャの観点からもロードポートの外部委託は支持を得る。Ulrich and Eppinger (1995)によると、他の製品に使用可能な要素を一つの塊(chunk)としてまとめることで、大量生産が可能となる。複数の製品に装備されるロードポートおよびEFEMが規模の経済性を達成するメカニズムは、Ulrich and Eppingerの指摘する切り離された塊を集約した成果であり、切り離すべき塊の境界はデバイスメーカーの提供可能な付加価値の有無に依存していることになる。

表 2. 製造工程におけるウェハの処置と必要機器の関係

ウェハに対する処置	使用される機器
保護 ⇔	FOUP
搬送 ⇔	AGV・OHT・RGV
製造装置から搬送機器への出入 ⇔	ロードポート
処理 ⇔	各種製造装置

3-4. ミニエンバイロメント方式の必要性

一方、全自動化以前について見ると 1990 年代に入っても製造現場ではウェハをオープン

導体の製造装置および材料の評価を行う。

半導体業界における製造工程の標準化と競争構造

な状態で搬送していたため、歩留まりを上げるため製造エリアにおいてクリーンルームのクラス（クリーンレベル）を引き上げなければいけない状態が続いていた。しかし、微細化が進むにつれてきわめて高いクリーンレベルを達成する必要が生じ、製造エリア全体のレベルを引き上げていたのではコストが嵩みすぎる事態に陥った。そこで、ウェハサイズが 200mm に拡大されると必要な部分だけクリーンレベルを高めることができるように、当初から T 社も提唱していたミニエンバイロメント（局所クリーン環境）方式が採用されることとなった。ミニエンバイロメント方式では搬送されるウェハをポッドに格納し、ポッドの内部だけクリーン度を必要なレベルまで引き上げることになる。箱に入ったウェハが人によって搬送されていた時期もあったが、人を原因とする汚染が問題となりポッドの自動搬送が検討されることとなった。

こうした動きをうけてポッドの自動搬送を可能するロードポートの市場が出現し、米国の A 社がロードポートを使用した自動化ラインを発案した。さらに、米国では B 社もロードポート市場に参入していた。しかし、当時は製造装置によってフェースが異なる状況にあったため、ロードポートと製造装置の位置関係を規定することが不可能であった。各装置のインタフェースに合わせてロードポートの調整を行えばそれぞれに改造費や設計費がかかるため、ミニエンバイロメント方式を採用することで達成したコスト削減の効果が相殺されてしまう。また、ロードポートの自動化が検討されるようになった時点では、既に 200mm 向けの製造装置が完成しており、製造装置のインタフェースを変更することは不可能であった。こうして人が介在すれば汚染が生じ、自動化を進めれば多額の投資が必要になるというジレンマを抱えたまま 200mm ウェハの時代に全自動化は達成されず、300mm 世代に向けて行われる新規の設備投資時期に期待をつなぐこととなった。微細化が進めばウェハ一枚当たりの製造コストが上昇するため、必然的に大口径のウェハを使用して製造量を増やし単価を引き下げなければならない。したがって、300mm 世代に突入すること、およびウェハの大口径化に伴う新たな設備投資が行われることは明白であった。さらに、300mm ウェハを処理する装置は新たに設計・製造されるため、ロードポートの自動化を加味してウェハの搬入を行う装置のインタフェースを統一することが可能となる。

4. T 社におけるロードポート市場への参入

4-1. 参入の動機とタイミング

T 社が半導体業界に参入するきっかけとなったのは、主力製品がテープからウェハによく

似たディスクへと移行したことである。テープと異なりゴミによって歩留まりが低下するディスクの生産には高いレベルのクリーンルームが必要となる。しかし、T社は半導体デバイスメーカーのように製造装置の購入に多額の新規投資を行う余裕はなかったため、投資を最小限に抑えたいという動機からミニエンバイロメント方式を考案していた。

T社が市場に参入した当時、ロードポートは米国のA社とB社の2社によって独占的に供給されていた。しかし、200mm ウェハの製造では装置のフェースが標準化されていなかったため、A社とB社は自動化を重視していた台湾の半導体メーカーにのみカスタマイズした製品を供給しており、半導体業界全体において強力な独占力を持つというわけではなかった。T社がロードポート市場に参入したのは、300mmの製造ラインに投資が開始された時点からであった。標準化された製品ではあっても信頼性の点からロードポートのスイッチングコストは高く、全自動化への新規投資時点で製造装置メーカーやデバイスメーカーとの関係を構築できたことは、T社の売上の伸びを説明する要因の一つであったと考えられる。さらに、日本企業による300mm製造ラインへの投資が拡大した時点で、T社がロードポートを供給できる国内メーカーとして既に認知されていたことも顧客獲得の好機を得る要因となった。

4-2. デバイスメーカーのロイヤルティ構築

T社のロードポートは製造装置メーカーに納入されている。しかし、T社は製造装置のフェースに関する標準化活動を通じてエンドユーザーであるデバイスメーカーとも情報交換が可能な関係を構築しており、製造装置メーカーとほぼ同じタイミングでデバイスメーカーの情報を入手できることがある。製造装置メーカーがT社とネットワークのあるデバイスメーカーに装置を販売する場合、デバイスメーカーから仕様について個別の要求が提示されても、エンドユーザーのニーズを既に把握しているT社は装置メーカーとそうした個別の要求について詳細を詰めることなく製品を供給することができる。

また、T社が最初に市場へ導入したモデルは、何らかの変更の必要が生じると新しく製造し直さなければならなかった。しかし、エンドユーザーであるデバイスメーカーは標準化された部分以外の外観について異なるニーズを有していることが明らかになると、T社では既存のユニットを組み合わせることで変更にも柔軟に対応できる方法を考案した。こうしたユニットの採用は、リードタイムの短縮と販売価格の引き下げを可能にした。さらに、T社は在庫を確保した上で受注に対応することにし、業界では当初3ヶ月と見られていた一リード

半導体業界における製造工程の標準化と競争構造

タイムを1ヶ月に短縮した。

ユニット方式の発案や適切な在庫保有のシステムを実現するにはエンドユーザーと頻繁なコミュニケーションをはかり、いち早く市場の情報を入手できることが鍵となる。

SEMI(Semiconductor Equipment and Material International)によって製造装置のフェースに関する標準化が達成されたといっても、エンドユーザーが標準化の内容を理解しているとは限らない。そこでT社自身がまず標準化の内容を熟知し、エンドユーザーとの交渉の中で標準化に対する疑問を即座に解消していくことで、T社の製品を使用するインセンティブを訴求していく方法をとった。さらに、エンドユーザーの製造現場に出向くサービスマンにも標準化の内容をきちんと教育することで、現場で生じた問題に対して適切な対処を行えるようになり、継続的な取引の実現が可能となった。

業界の標準を遵守することにとどまらずエンドユーザーの声に耳を傾けることはT社のポリシーとなっているが、組織として特別な意識改革を行っているわけではない。T社が事業を展開してきた電子部品業界は半導体のような装置産業と異なり、製造装置は内製でしか入手できない。コンデンサを製造する装置は、コンデンサがどういう製品かをすべて理解した上で造り手の立場を考慮して内製される。そのため、T社ではエンドユーザーの立場にたつという意識が自然と形成されてきたといえる。

初めてロードポートを導入するにあたってエンドユーザーが強く懸念したのは、付加価値を生まないロードポートの不具合によって製造ラインが停止してしまうこと、ロードポート自体から製品を汚染するパーティクルが発生すること、そしてロードポートからウェハを搬出入するさいに製造装置へパーティクルが混入することの3点である。また、ミニエンバイロメント方式の導入にあたって、エンドユーザーの購買担当者は自社においてロードポート購買の妥当性を説明する責任があった。巨額の新規投資を行うエンドユーザーのこうした緊張感を理解し、信頼に応えることで初めて顧客志向に立脚したビジネス・モデルが成立することとなった。

また、製品を販売した後もエンドユーザーとは常にコミュニケーションをはかっており、現在ではさらなる微細化が進む中でパーティクルに加えて酸化物・有機物・無機物の排除に対するニーズが顕在化している。こうしたニーズに対し、T社はエンジニアをエンドユーザーの組織に派遣し次世代製品の共同開発に取り組んでいる。エンドユーザーと共同で新製品開発に挑むことにより、「T社と同じ仕様です」と売り込みをかけてくる競合企業の追従に対しスイッチングコストを引き上げることが可能となる。

4-3. 製造装置メーカーのロイヤルティ構築

ロードポートの製造にあたって T 社が注力しているのは、信頼性・標準化への対応・価格の3点である。第一の信頼性については上述の通りロードポートを停止させないこと、および製造装置とポッドへのパーティクルの混入を防ぐことが焦点となる。第二に、製造装置とロードポートの調整コストを削減するには必ず標準化を達成しなければならない。そして、第三にロードポートの低価格化を実現しなければならない。

標準化された製品については、3点の中でも特に信頼性の獲得がカスタマー・ロイヤルティの形成につながり競争優位性の確立に大きく寄与すると考えられる。ロードポートの上に見えるポッドは樹脂で形成されているため金属ほどの精度を期待できず、メーカーによっては大きな誤差が生じライン停止の原因となる場合がある。たとえば、現在ウェハの中心からポッドの先端までの距離は標準において 166.5mm と規定されており、70mm ポッドを前進させて製造装置とドッキングすることになっている。距離が短いとラッチに到達しないため蓋を開けることができず、距離が長すぎると蓋にぶつかってしまいラッチとかみあわない。モーター駆動を使用してロードポート上のポッドを正確に 70mm 前進させる方法をとっている企業は、ポッドの精度に起因した距離の誤差から生じる問題を回避することができない。これに対し T 社はエア駆動と呼ばれる方法をとっている。エア駆動とは空気圧を利用してポッドをあえて蓋にぶつけラッチとポッドの適切な距離を創出する方法であり、距離に誤差が生じても問題とならない。またパーティクルについては、クリーンルームと同様の方法で混入を回避している。まず製造装置内の圧力を最適な高さに設定し、さらに意図的に蓋の周囲に隙間をつくと圧力の低い外部に空気が流れ、これによって内から外に向かって風が吹くためパーティクルの流入を回避できる。

T 社の実際の顧客は製造装置メーカーだがエンドユーザーから評価の高い製品であると認識され、推薦してもらえるようになれば製造装置メーカーは T 社の製品に注目するようになる。また標準化された製品といっても、製造装置メーカーからデバイスメーカーの個別仕様に対応した調整や外観の統一に関する要求があり、最初に購入してもらえればそうした要求の対処策に関するノウハウが蓄積され移動障壁を構築できる。T 社では、製造装置メーカーに対しボタンを押せばゴロンと出てくるイメージで製品を供給しようという意味で「自動販売機作戦」と呼ばれる方法を追求し、仕様変更が提示されても効率的に対応する姿勢を示している。たとえば、エンドユーザーであるデバイスメーカーが製造の仕組みづくりにおい

半導体業界における製造工程の標準化と競争構造

て必要な仕様として電気を赤から黄色に変更したい、あるいはスイッチをピカピカ点滅させたいと言った場合、既述のユニットを用いて対処することができる。製造装置メーカーにしてみればこうしたエンドユーザーの細かな要求に対応していくために、一つ一つ部材の異なるものについて余裕を見て発注していくことは難しい。T社におけるユニットの採用は、デバイスメーカーだけでなく、製造装置メーカーのロイヤルティ構築にも貢献していることになる。

5. 考察

そもそもT社は、自社の生産技術開発センターにおいて主力製品であるディスクを製造する装置を開発していた。つまり、製造装置ありきではなくT社自身が装置のエンドユーザーでもあった。また、ディスク生産のために自社でもロードポートを使用し、製造工程の停止につながる製品の信頼性やパーティクルへの懸念について、エンドユーザーであるデバイスメーカーと同じ問題に直面する機会があった。さらに、製造工程の全自動化については、社内のディスク生産についても投資額が歩留向上によって相殺されるのかどうかを疑問視する声があり、自動化のコスト引き下げに大きく寄与する標準化の達成が不可欠であるとの認識を有していた。そして、T社は標準化活動への協力を通じてデバイスメーカーとのネットワークを構築し、ロードポートの生産においてエンドユーザーの情報を直接入手できるルートを確立していた。こうしてT社の組織において顧客志向が根付くとともに、そうした風土を機能させるエンドユーザーからの情報ルートが開拓されたことによって、装置メーカーとデバイスメーカー双方の顧客ロイヤルティを構築できたと考えられる。

標準化された製品の場合、製品性能によって競争優位性を築くことは困難となる。しかし、T社は培ったネットワークを生かしてエンドユーザーであるデバイスメーカーのニーズに応えることで、自らの顧客である製造装置メーカーのビジネスを後押しするシステムを開発したことで標準化された製品の価値を向上させることができた。T社の取り組みは標準化の進む他の業界においても、顧客志向に基づく製品パフォーマンスの向上、およびビジネスシステムの最適化によって競争優位性を構築しうる可能性を示唆している。

また、半導体業界ではウェハのさらなる大口径化の議論が進められており、新規投資および標準化再考の機会が再び到来すると考えられる。200mmから300mmへの拡大に伴う新規投資で達成された標準化では、T社を始めとする複数の国内メーカーが標準化決定のプロセスに尽力して得た知識やノウハウを組織能力の向上にリンクさせる結果となった。一方、同

貴志 奈央子

様に標準化活動に参加しながらも、組織としての意思決定がその活用に至らなかったケースも見受けられた。半導体は短期のライフサイクル、不確実性の高い技術進化、高額な製造設備といった特徴を持つ製品であるため、新規設備投資の時期・規模・内容が業績を大きく左右する。したがって、“Learning before doing”によって問題解決の前倒しをはかり(Pisano, 1997)、投資を効率化させる効果が大きい業界と考えられる。しかし、標準化の効果を的確に理解し事業機会を見極める能力をなくしては、事前に蓄積された知識が組織能力の向上に貢献する機会を逸してしまう。300mm で達成された標準化の影響を製造装置・デバイス・搬送機器などのそれぞれの視点から客観的に整理することで、次に迫る新規投資に向けて目指すべきフレームワークの構築に関する示唆を得る必要があると考えられる。

<参考文献>

- 林義宣 (2003) 「第 4 章 SEAJ の活動」小宮啓義監修『グローバルスタンダードへの挑戦—300mm 半導体工場へ向けた標準化の歴史—』SEMI ジャパン 67~79 ページ。
- Pisano, G. P. (1997), *The Development Factory: Unlocking the Potential of Process Innovation*, Harvard Business School Press.
- Ulrich, K. T. and S. Eppinger (2004), *Product Design and Development 3rd edition*, McGraw-Hill/Irwin.