

第23回 半導体の生産現場を訪ねて④ —コストとデリバリーと信頼性—

厚木エレクトロニクス 代表
サクセス インターナショナル 取締役
加藤俊夫

これまで3か月にわたってクリーンルームの構造、ダスト対策、洗浄、歩留りについて勉強してきました。これらは結局コストを下げるための手段です。では、コストとは何でしょうか。かかった費用を生産数で割り算すれば良い、といってしまうは簡単ですが、ICの生産ではそんな単純に考えるわけにはいきません。

製造コスト

半導体は装置産業といわれています。現在の最先端の半導体といえば、45nmパターンルール CMOS LSIですが、この工場の建設には3000億円とか5000億円とかの巨額な費用がかかります。ロジック系の小規模な工場では、そこまではいきませんが。仮にウェーハ工場に1000億円の投資をした場合、その投資の減価償却費が大きな金額になります。減価償却には定率法と定額法がありますが、なるべく早期に償却してしまつて後々の経営を楽にする50%/年の定率法で行う場合だと、表1の①欄のようになります。初年度に半分の500億円も原価に載せると、大部分の製造費用は減価償却費となり、設備産業といわれることが実感されます。表1の②直接材料費と

表1 LSIのコスト計算の一例（定率減価償却の場合）

（単位：億円）

作業開始後の年数	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
①減価償却費（50%定率）	500	250	125	63	31
②直接材料費（1万5000円×1万枚）	15	15	15	15	15
③間接材料費	36	36	36	36	36
④人件費（400万円、400名）	16	16	16	16	16
⑤その他の経費	40	40	40	40	40
年間総製造費	607	357	232	170	138
年間処理ウェーハ（枚数/年）	12万	12万	12万	12万	12万
製造コスト/ウェーハ（1000円）	506	298	193	142	115

減価償却費は、初年度50%、2年目25%、3年目12.5%と減少するとした

はSiのウェーハ代、③間接材料費とはフォトレジスト、フォトマスク、薬品、ガス、スラリーなどの費用。④人件費は全体の経費の中では比較的割合が低いと思われます。従って、人件費が高い日本国内で生産しても海外生産に対して競争力が保てるわけです。⑤その他経費には色々な項目が含まれますが、中でも電力費が馬鹿になりません。ちょっとしたクリーンルームでも、年間の電力費が10億円を軽く超え、大きな工場では数十億円も支払っており、省電力化は極めて重要です。この表の完成ウェーハの1枚当たりのコストをみると、初年度は50万円以上だったのが、5年目には11万5000円と1/4になっています。こんなに安く生産できると大きな利益が得られるかというところではなく、5年も経つと最先端LSIではなくなりますから、高い値段で売ることができませんので、コストが安くなっても利益が出るとは限りません。

以上は、工場で発生する費用ですが、企業活動は工場以外の業務も多くありますから、これらの費用を原価に組み入れなければなりません。特に、半導体ビジネスでは研究開発費が売り上げの10%以上になることも珍しくなく、大きな負担になりますが、研究開発に手を抜くと次の世代でビジネスができなくなります。

損益分岐点

図1は製造原価と売り上げの関係を示すグラフです。縦軸は、製造費と売上金額です。製造費は、生産数がゼロでも固定費が発生し生産数が増えるにつれ変動費の割合が増えていきます。一方、売り上げは数量に比例した金額となります。製造費と売り上げの線が交わったところを損益分岐点（Break even point）といつて、これより売り上げが多い

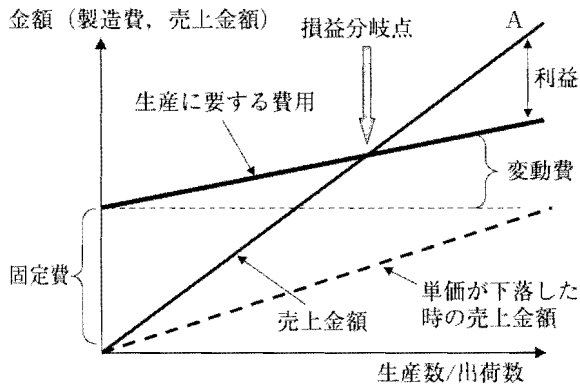


図1 LSIの製造費、売上金額、利益の関係図

と利益が発生し、少ないと赤字になります。例えば1個100円の製品を100万個生産すると売り上げは1億円となり、これが損益分岐点だとすると、150万個生産してすべて売れば売り上げは1億5000万円となります。この状態はグラフのA点になったわけで、利益は4000万円近くになります。すなわち、1億5000万円の売り上げで利益が4000万円だと利益率27%となって、超優良会社となります。損益分岐点より多い売り上げになると途端に大きな利益が発生することがおわかりいただけたでしょう。

シリコンサイクル

損益分岐点を超えて増産し、それがすべて売れば大きな利益が得られますから、どの会社もそれを狙います。例えば携帯電話が急に売れ出すと、それに必要な半導体素子が不足して時には生産能力を超えた需要があります。すると各社が一斉に工場建設など設備投資を行います。実際に稼働するのは1年以上先ですから、その時には需給バランスが取れており、新工場で増産すると作り過ぎという状況になります。この状況を図2に表しました。製品が市場にだぶつくと、単価が下がり、図1のグラフ単価が下がった時の売上高の線になり、損益分岐点が右側へ移動してしまい、1億円売り上げれば損益分岐点だったのが、1億5000万円売り上げても損益分岐点にならないという事態になります。そこで、各社ともコストダウンに努力します。これまで1枚から1000個の合格チップが取れていたのを、歩留りを上げ、時には設計変更してチップサイズを小さくして1500個取れるようにすればコストは下がります。ところがこれは増産するこ

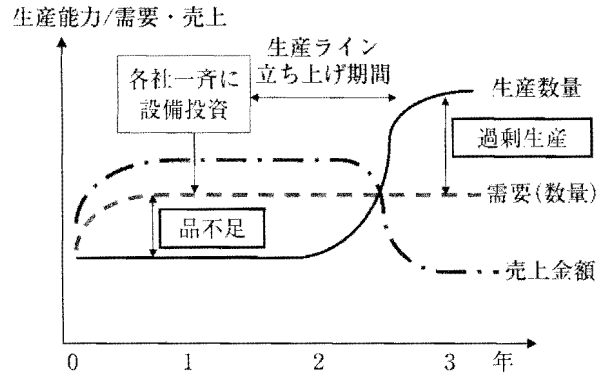


図2 シリコン・サイクルは何故起こるか

とになり逆効果です。コストは下がっても増産したのでは製品が市場にますますだぶついて、市場価格がさらに下がります。市場価格が下がればコストを下げるため取率アップに努めます。このような状態を「地獄のスパイラル」というそうで、そうなっては解決方法がありません。このような困った事態が繰り返し発生しており、これをシリコンサイクルと呼んでいます。

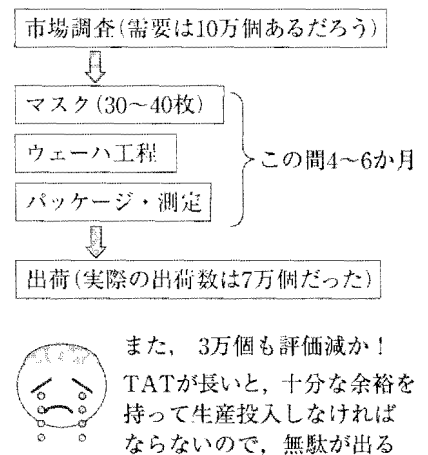


図3 TATが長いと需要変動に対応できない

TAT (Turn Around Time) の重要性

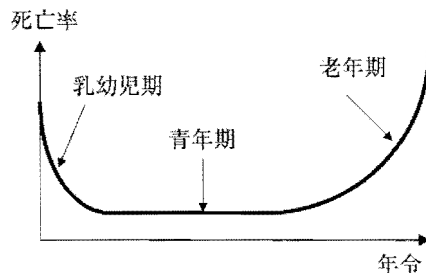
QCDという言葉も良く使われ、QはQuality (品質)、CはCost (価格)、DはDelivery (出荷または納期) の意味です。品質が悪い商品はいくら値段が安くてもお客様に迷惑がかかりますから、品質は第一です。次いで価格が安いことが重要と考えられる傾向にあります。私は納期遵守の方が重要だと思っています。例えば、携帯電話を生産しているお客様が、生産がほぼ終了したのに、肝心のLSIが入荷しないため製品が出荷できないと、大きな損害を与えてしまいます。金銭的な損だけでなく、会社の信用もなくなってしまいます。そこで筆者はQCDよ

＜ちょっと脱線1＞限界利益

製造原価の内、固定費分が100円で変動費分が80円なら、製造原価は180円となります。そこで販売価格が200円なら粗利20円というわけです。ところが市場価格が下がって150円になってしまうと、30円の赤字となります。それでも、100円の固定費で固定資産分を4年で償却する予定が、30円なら12年もかかってしまいますが、とにかく少しずつとはいえ償却はできるから我慢できます。ところが、市場価格が50円になったらどうなるでしょう。変動費より安く売らなければなりません。材料を70円で買って、50円で売るなどという馬鹿げたことになってしまいます。このような状態を「限界利益を割っている」といいます。経営上あってはならない事態ですが、余剰品が倉庫にたまって少しでもお金の代えが必要が生じると、元々の製造原価を無視してこのようなことが起こります。限界利益とは、単なる企業会計用語ですが、半導体ビジネスで良く使われるのは悲しいことですね。行きがかり上止むを得ずそんな状態に置かれるのがシリコンサイクルの恐ろしさです。

＜ちょっと脱線2＞バスタブ・カーブ

半導体に限らずほとんどの製品は、図のような故障率になるといわれています。西洋式風呂の形に似ていますので、バスタブ・カーブと呼ばれています。人の死亡率も似たようなカーブになり、乳幼児期（初期不良と呼ばれる）の死亡率はかなり高いが、小学生以上になると極めて少なくなり、シニアになると高くなり、これを老衰期とか磨耗期とかいっています。筆者もそろそろ磨耗期に入ったようで、身体のあちこちが磨り減ってきました。



▲寿命に関するバスタブ・カーブ

りQDCにすべきだろうと思っています。ところで、半導体の生産では、Deliveryに支障をきたすことが珍しくありません。特に、歩留りの変動が問題になります。歩留りが80%を超えるとほぼ安定した生産になりますから、計画通りの出荷が可能になりますが、50%ぐらいだと実際は30～70%に振れており平均で50%というわけです。従って、確実に出荷数量を確保するためには、最悪値の30%と仮定してウェーハの投入をしなければなりません。ところが実際に生産は70%の歩留りだったとすると、完成したICは沢山余ってしまいます。そこで図3のような事態になってしまいます。

このようなことになる原因の一つは、TAT（投入から出荷までの期間）が長いことです。最近のLSIではプロセスのステップが300回を超えており、ウェーハ投入から完成までに3か月以上かかっています。さらにパッケージ工程もあって順調でも4か月となり、少しもたつくと半年になり「半導体は二毛作」などといわれます。実際に作業している時間を足すと、1か月にもなりません

んから改善の余地があるはずですが。仮に1か月に短縮できれば、出荷数量が間に合わない事態になっても、直ぐに挽回できるわけです。このように、TAT短縮は、歩留り向上と同じぐらい重要なのです。TAT短縮のため、通常は25枚ウェーハを1ロットとして生産すると25枚の作業が終わるまで次の工程に送れないのを、5枚ロットにするなどして工夫されています。

信頼性

QCDでもQDCでも、第一にはQ（品質）です。より高性能なデバイスを作ることは重要ですが、デバイスの特性は仕様書に明記され、お客様も納得して使っているわけです。ところが使っているうちに故障するのは困り物です。単に数百円のICが壊れたというわけにはいきません。数万円のセットが不良になってしまいます。

半導体デバイスでは、初期不良をなくすのに色々手をつくします。最も一般的なのは、バーンイン（Burn in）でしょう。高温で一定時間通電します。これにより壊れ

表2 LSIの故障原因

かけの製品を壊してしまうわけでは、あまり厳しい条件で行うと、却って半殺しにしてしまいますから要注意です。一般には100℃で数時間です。この他に、高温、高湿、高圧、低温、振動など壊すテストも抜き取りで行い製品のレベルをチェックします。

トランジスタ部 (FEP)	結晶欠陥
	ゲート酸化膜の欠陥
	ホットキャリア注入
	NBTI
	ソフトエラー
配線部 (BEP)	エレクトロマイグレーション
	ストレスマイグレーション
	配線の腐食
	傷、段差部での断線
	TDDDB
パッケージ	チップ・クラック
	ワイヤボン断線
	パッケージ・クラック
	異物混入
	実装でのポップコーン現象

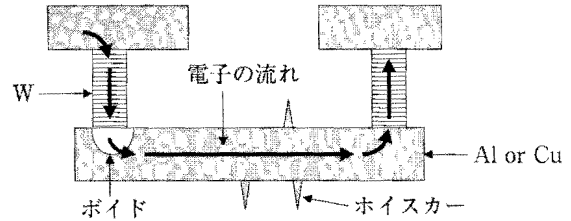
FEP: Front End Process
 BEP: Back End Process
 NBTI: Negative Bias Temperature Instability

故障の原因

考えられるICの故障の原因を表2に挙げてみました。これらの原因の詳細は専門書に譲ることにし、ここでは代表的な例として、エレクトロマイグレーションとパッケージ関係を取り上げます。

図4はエレクトロマイグレーションのメカニズムを表したものです。Al配線などに電流が流れると、通常はAlには何の変化も起こりません。ところが、電子の数が非常に多くなると、とんでもないことが起こります。象にネズミがぶつかっても象はびくともしません、ネズミが100万匹一度にぶつくと流石の象も動くでしょう。原子に比べて電子は質量が数万分の一でネズミのようなものですが、非常に多くの電子が一度にぶつくと原子が動いてしまいます。これがエレクトロマイグレーションと呼ばれる現象で、Al配線に空洞ができてしまい、動いたAl原子はどこかに析出します。配線の寸法が微細化されると、相対的に電流密度が増えますから、このような現象が起こります。これを防ぐため、Alに1%程度のCuを入れると、純粋なAlより強くなります。Al(Cu)と表現されています。Cu配線はAl配線より強いといわれていますが、それでも十分な配慮が必要です。

パッケージクラックも信頼性に影響します。一般に使われているパッケージは、図5のようにエポキシ樹脂で



図のようにWからAl (またはCu) に電子が入り、Al原子が電子により動かされボイド (空孔) ができる。動いたAl原子はホイスカーとなる

図4 エレクトロマイグレーション

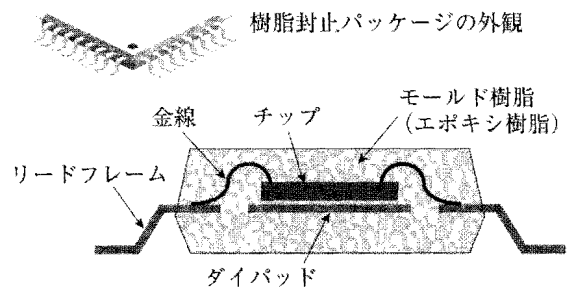


図5 パッケージ断面図

固めています。ところがエポキシ樹脂はわずかとはいえ水分を含んでおり、プリント基板へのはんだ付けの際の高温で水分が破裂してクラックを発生させてしまいます。特に最近環境対策で鉛の使用が禁止され、鉛フリーの高温はんだ(230℃以上)が用いられるため、余計にこの問題が顕著になりました。パッケージクラックが起こっても、チップが正常ならば動作しますから、直ぐには不良にならない場合があります。ただし、クラックから水分などがチップに達すると徐々に電気特性が変化して、お客様のところで使用中に不良が発生するわけで最も困った状態となります。この不良を防ぐため、パッケージ工程が終わるとAlのラミネートした耐湿性の包装を行い、乾燥剤や湿度インジケータを入れて真空パックし、プリント基板に付ける時は、梱包を解いてから間をおかず作業するとか、再度100℃以上でベーキングしてからはんだ付けする、あるいはパッケージに耐湿性の強い樹脂を用いるなどの工夫が行われています。

以上、今月は生産現場の締めくくりとしてコスト、デリバリー、信頼性について勉強しました。