



## 【特集2】エレクトロニクス分野の環境対応技術

# Siウェハリサイクル技術

湯之上 隆\*

最小限のSi研磨で使用済みSiウェハを再生し同一ウェハを数十回～100回以上リサイクルする技術が普及すれば、LSIメーカーはウェハコストを大幅に削減できる。またウェハ再生メーカーにとっては、再生市場が拡大し売り上げが増大する。さらにCO<sub>2</sub>削減や省エネルギーなど地球環境の向上に貢献できる。上記技術が普及するためには、LSIメーカーが分別回収を行い、技術に応じた価格を設定し、ウェハ再生メーカーと共存共栄する意識改革が必要である。

21世紀に入って太陽電池産業が急拡大し始めた。太陽電池も半導体集積回路（LSI）も、ともにSiウェハを基板に用いる。当初は、太陽電池専用に製造されるSiウェハが少なかったため、LSI用に製造されたSiウェハのうちの規格外品を太陽電池用の不足分に充てていた。ところが、2005年から2006年にかけて、予想以上に太陽電池が急成長したことにより、Siウェハが逼迫した。その結果、太陽電池産業とLSI産業との間で、Siウェハの争奪戦が起きた。LSIメーカーは、Siウェハの確保に四苦八苦せざるを得ない状況におかれた。

これまで、LSIメーカーは、Siウェハを湯水のように“使い捨て”にしてきた（というのは言い過ぎかもしれないが、少なくともプロセス技術者の意識は間違いなく“使い捨て”であった）。しかし、Siウェハの確保が困難になったことから、LSIメーカーは、製品にならない使用済みウェハ（Non Product Wafer, NPW）を、真剣に、リサイクルしなくてはならなくなった。

このような背景の下、2007年当時、長岡技術科学大学の客員教授だった筆者は、Siウェハのリサイクル技術の委託研究を受けた。その後、紆余曲折を経たのち、現在は、当社において、最小限

のSi研磨でウェハを再生することにより同一Siウェハを数十回～100回以上リサイクルする技術を開発すること、および、それを事業化することを目指している。

本技術が普及すれば、LSIメーカーはNPWコストを大幅に削減できる。またSiウェハ再生メーカーにとっては、リサイクル市場が飛躍的に拡大し売り上げが増大する。さらにCO<sub>2</sub>削減や省エネルギーなど地球環境の向上に貢献できるだろう。

しかし、上記技術を普及させるためには、現実的にさまざまな問題が存在する。本稿では、まず、LSIメーカーからどのくらいのNPWが発生しているかについて論じる。次に、これらNPWがウェハ再生メーカーによってどのように処理されているかその現状を述べる。さらに、SEMIのデータを基にしてSiウェハ再生市場の状況を紹介する。最後に、Siウェハのリサイクルを普及させるためには、LSIメーカーが分別回収するなどの意識改革を行い、LSIメーカーとSiウェハ再生メーカーが協力し合う必要があることを論じる。

## LSIメーカーからどのくらいNPWが発生するか

### 1. LSI産業は無駄だらけ

改めて、LSIの製造工程を眺めてみると、無駄

\*Yunogami Takashi

(株) エフエーサービス 半導体事業部 技術主幹 工博

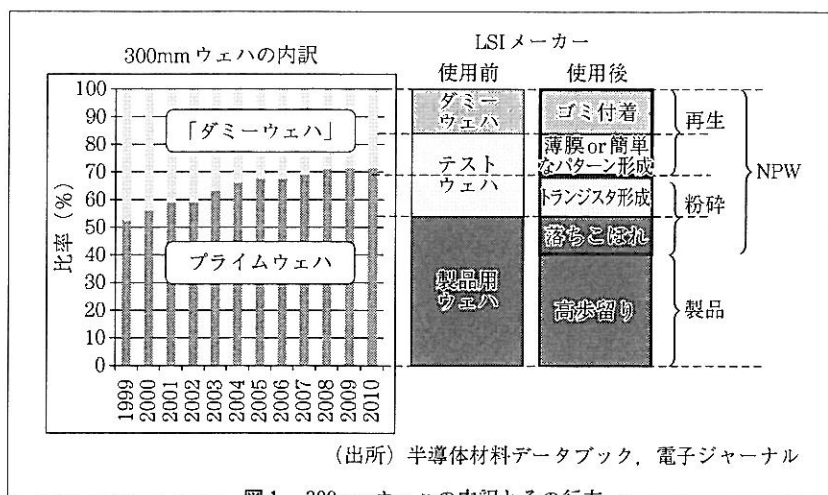


図1 300mm ウェハの内訳とその行方

の集積であることが分かる。Si ウェハに塗布されたレジストのうち、99%以上は捨てられている。成膜やドライエッチングに使われるプラズマの原料ガスも、99%以上が捨てられている。各種薬液もちょっと汚ればすべて廃棄される。LSIが形成されたウェハは、バックグラウンドにより、96%が削られてゴミになる。しかし、製品になるSi ウェハならまだしも、製品にならないNPWが山のように排出される。

ナノレベルの微細パターンを形成し、微小パーティクルを徹底的に排除して、歩留りを向上させるためとは言っても、何と地球に優しくない産業であることだろう。このようなことからしても、LSI産業は、業界を挙げて、エコ技術の推進に取り組む責務があると言えるだろう。

## 2. Si ウェハの用途とその行方

Si ウェハにはどのような種類があり、それがLSIメーカーにてどのように使われているかを、300mm ウェハを例にとり、図1を用いて説明する。

Si ウェハメーカーからは、300mm 製品用のプライムウェハとダミーウェハが販売されている。プライムウェハの比率が少しずつ向上している。ここ数年で、プライムウェハの割合が約70%に飽和していると言える。この数字は、LSIメーカーが購入するSi ウェハの平均的な比率を示している。すなわち、LSIメーカーは、平均して、プライムウェハを7割、ダミーウェハを3割の割合で購入している。これらのウェハを、LSIメーカーは、次のように使用する。

まず、装置のダミーランに使われてゴミだらけになったNPW、および、成膜装置のダミーとし

て使われ薄膜が形成されたNPWは、ゴミや薄膜を除去して、再びダミーウェハとして使用されている。この再生は、LSIメーカーが工場内で行う場合もあるが、多くは、専門のウェハ再生メーカーに委託して処理している。

次に、試作に使われてテストパターンが形成されているNPWの一部は、上記再生メーカーが、研削や研磨などによりパターンを除去して、ダミーウェハに再生している。しかし、ほとんどは粉碎・廃棄されている。その理由は、パターンの除去が難しいこと、および、LSIメーカーが機密漏洩を懸念して再生に出さないことによる。

さらに、製品ウェハのうち、低歩留りのウェハがNPWとして排出される。これについては、上記パターン付きウェハと同様の理由で、ほとんどが粉碎廃棄されている。

## 3. NPWの割合

あるLSIメーカーで、「貴工場では、どのくらいの割合がNPWになりますか?」と質問してみた。ある事業部長は、「数%だ」と答えた。「もし、それ以上だったら、大変なことになる」とも述べた。ある部長は、「10~20%くらいだろう」と答えた。ところが、あるプロセス担当者は、「製品よりNPWの方が多い」と答えた。同じLSIメーカーであるにもかかわらず、答えが異なる。一体、誰が言っていることが正しいのだろうか?

筆者の(古い)経験では、製品1枚に対して、NPWを1枚にする努力がなされていた(努力していたということは、それより多かったということである。ちなみにこの努力は成功しなかった)。また、最近耳にした話では、微細化の最先端を行

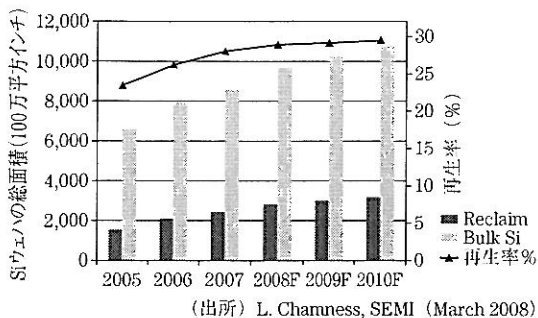


図2 Siウェハ総面積、再生Siウェハ総面積および再生比率の年次推移

く大手半導体メーカーでは、投入ウェハの66%がNPWになっているケースがあるという。

このようなことから、NPWが「数%」ということはありません。恐らく、上記事業部長は、歩留りが飽和した時の製品にならない低歩留りウェハの割合を答えたものと思われる。また、部長の「10～20%」というのは、粉碎・廃棄されているパターン付きウェハの割合を答えたのではないだろうか。したがって、このLSIメーカーの実態を正しく表現しているのは、プロセス担当者の「製品よりNPWの方が多い」という回答であろう。

#### 4. SEMIデータから推定されるNPWの割合

上記の例から分かるように、NPWの割合を正しく把握するのは難しい。メモリかロジックか、最先端か枯れた技術か、自主再生しているか否か、リサイクルの意識が高いか否かなど、LSIメーカーごとに事情が異なる。その上、職位によって把握している数字が違うからである。

一つの指標として、図2に示したSEMIの統計が参考になる。このデータによれば、世界全体で製造されたSiウェハの総面積と、再生されたSiウェハの総面積の比率が、約30%となっている<sup>1)</sup>。したがって、世界平均で、LSI工場に投入されたSiウェハの約30%が再生されていることになる。しかし、この再生率には、トランジスタなどが形成されたテストウェハおよび低歩留りの製品ウェ

ハが含まれていない。これら粉碎・廃棄されるパターン付きウェハが10～20%と仮定すれば、NPWは、世界平均で、40～50%と推定できる。厳密な値を出すことは難しいが、「40～50%」がNPWの目安になるのではないだろうか。

## ウェハ再生メーカーの現状

LSIメーカーから排出されるNPWのうち、薄膜や簡単なパターンが着いたウェハは、専門のウェハ再生メーカーに委託されて、ダミーウェハに再生され、再び、LSIメーカーに戻される。しかし、同一ウェハの再生回数は、2～3回程度であることが多い。それは何故なのか？ もっと飛躍的に再生回数を増やすことはできないのか？ この状況を明らかにするために、ウェハ再生技術の一例を、図3を用いて説明する。

### 1. 受け入れ検査

一つのウェハ再生メーカーは、複数のLSIメーカーから再生を委託されている。また、一つのLSIメーカーからもさまざまな膜や構造が形成されたウェハが再生委託される。しかし、多くのLSIメーカーは分別回収などをしない。当然、ウェハ上にどのような膜や構造が形成されているかなどの情報は、ウェハ再生メーカーに伝えられない。そこで、ウェハ再生メーカーは、上記のさまざまなウェハに、目視で、どんな膜がどのくらいの膜厚でついているかなどを判断する。また、ウェハの膜厚を測定する。このような検査は非常に重要である。ここで膜種の判断などを誤ると、その後の工程に苦勞することになるからである。

### 2. ウエットエッチング

受け入れ検査の結果を基に、ウェハ上の絶縁膜やメタル膜をウエットエッチングで除去する。その際、目視検査が外れたり、多層構造になっていたり、難溶性の膜であったりするため、人手によるトライ&エラーが繰り返される。ゴム手袋やマスクをしているとは言え、毒性の強い各種薬液に、次々とジャブ漬けする様子を見ると、きわめて危険な作業であると言わざるを得ない。

### 3. ラッピング

ウェハ上の膜が完全に落ちない場合もあるため、砥石などを用い

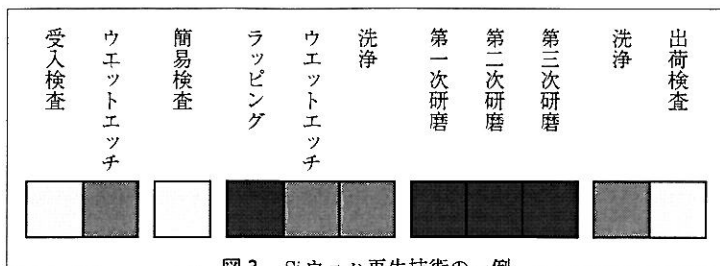


図3 Siウェハ再生技術の一例

たラッピングが行われる。10～15 $\mu\text{m}$ 程度、Siウェハを削る。その際、砥石により、Siウェハ表面に10 $\mu\text{m}$ 程度のダメージ層が形成される。このダメージ層は、次の研磨工程で除去しなくてはならない。

#### 4. 第1次～第3次研磨

ラッピングしたウェハをウエットエッチングして洗浄した後、合計3回の研磨を行う。研磨には、通常、数枚～数十枚を一度に研磨するバッチ式のCMPが使われる。この3回の研磨により、ラッピングによるダメージ層を除去し、ウェハ表面の平坦性を向上させ、ウェハの反りを補正し、パーティクルを除去する。3回合計の研磨で、Siウェハは15～20 $\mu\text{m}$ 程度削られる。ただし、複数枚を一度に研磨するバッチ式であるため、厚みが揃っていない場合は、最も厚みの薄いウェハに照準が合うように研磨せざるを得ない。その結果、ウェハの研磨量はさらに増大することになる。

#### 5. 出荷検査

最後に出荷検査が行われる。LSIメーカーが要求する仕様に達しているか否かが検査される。検査結果によっては、再び、上流工程に戻ってウェハ再生をやり直すこともある。筆者の感触では、LSIメーカーが主張する要求は、過剰スペックではないかと思われる。LSIメーカーの中には、新品のプライムウェハよりも厳しい仕様を要求している所もある。

以上、再生技術の一例を概観した。ラッピングで10～15 $\mu\text{m}$ 程度Siウェハを研削し、その後の3回に渡る研磨でさらに15～20 $\mu\text{m}$ 程度研磨する。したがって、一度の再生で、30 $\mu\text{m}$ 程度Siウェハは薄くなる。現在、300mmウェハの厚みは775 $\mu\text{m}$ であるが、100 $\mu\text{m}$ 以上薄くなると、各種LSI製造装置の搬送が困難になる。そのため、一度の再生で30 $\mu\text{m}$ 程度Siウェハを研磨する技術では、同一ウェハの再生回数は2～3回程度にならざるを得ない。単に薄膜が形成されているウェハであれば、原理的に1 $\mu\text{m}$ も研磨すれば再生できるはずであるが、そう簡単にはいかない事情が存在するのである。

## Siウェハ再生市場

LSIメーカーからは投入ウェハの40～50%程度のNPWが排出される。そのうち、トランジス

2010年9月

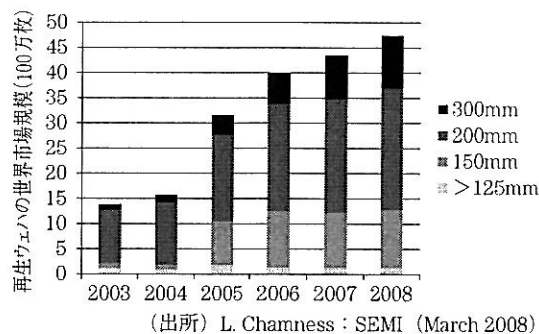


図4 世界のウェハ再生市場規模の年次推移

タが形成されているテストウェハおよび低歩留りの製品ウェハは粉碎・廃棄される。残りの30%程度が再生される。そのSiウェハ再生市場についてSEMIのデータを基に概観してみよう<sup>1)</sup>。

#### 1. Siウェハ再生市場規模

10～20%世界のSiウェハ再生市場(枚数)の年次推移を図4に示す。再生市場で最も枚数が多いのは、200mmウェハである。2005年以降は、300mmウェハの再生枚数の増加が顕著となっている。いずれ、300mmウェハの再生枚数が、200mmを上回るであろう。また、2005年以降、150mmウェハの再生枚数が、突然増大している。これは、太陽電池産業が急成長し、ウェハが逼迫したことに原因があると思われる。つまり、LSIメーカーが、これまでのようにSiウェハを入手することが困難になってきたため、再生せざるを得なくなったのではないかと推定できる。

図5に、世界のSiウェハ再生市場規模(売上高)を示す。売上高は、300mm、200mm、150mmの順となっている。再生枚数が最も多い200mmウェハの売上高が、300mmの再生規模に及ばない。これは、300mmウェハ1枚当たりの再生単価が、200mmより高いことによる。したがって、今後、再生市場の主戦場は、300mmになって行くだろう。

#### 2. Siウェハ再生市場分布とシェア

図6にSiウェハ再生市場(売上高)の国籍別シェアを、図7にSiウェハ再生枚数の国籍別シェアを示す。Siウェハ再生市場の大きい順に、日本(41%)、台湾、米国、欧州、韓国、中国となっている。また、Siウェハ再生枚数シェアは、日本が67%と圧倒的に高い。この結果から、世界の中で、日本が、Siウェハ再生の拠点になっていることが分かる。

しかし、日本のSiウェハ再生市場(売上高)

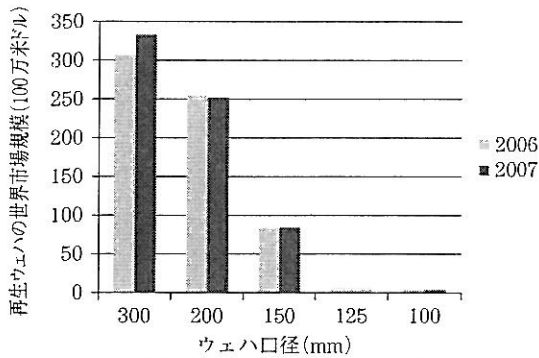
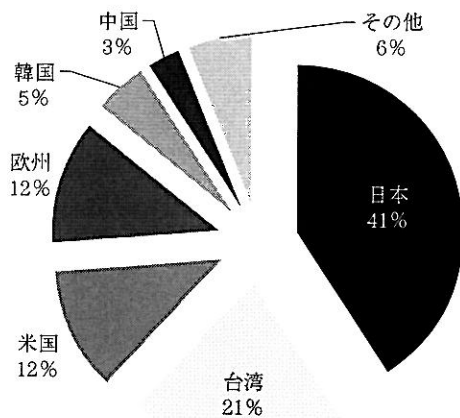


図5 世界のウェハ再生市場規模 (売上高)

シェア41%は、Siウェハ再生枚数のシェア67%に比較して、小さい値である。これは、日本のSiウェハ再生価格が、他国よりも安いことを意味している。安価なのは良いことばかりではない。現在、日本国内では、ウェハ再生メーカー同士が、かなり不健全な価格競争を行っているからである。2008年秋の世界金融恐慌を切っ掛けに、財務状況が悪化しているウェハ再生メーカーも多々あると聞く。したがって、度を越した価格競争には、歯止めをかける必要がある。

## LSI産業の未来のために

地球規模で環境問題に取り組まなくてはならない時代になった。資源を食いつぶし、エネルギーを使いまくる産業は、非難を浴び衰退することになるだろう。そのため、鉄鋼産業やクルマ産業だけでなく、LSI産業も率先して、地球環境に優し



(出所) L. Chamness : SEMI (March 2008)

図6 ウェハ再生市場の国籍別シェア

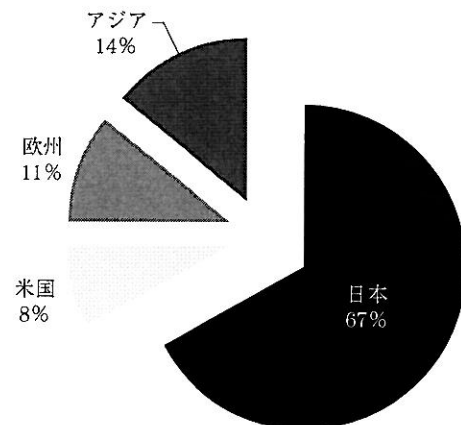
い技術を追求しなくてはならない。

NPWについて言えば、粉碎・廃棄するウェハをゼロにする。最小限のSi研磨量で再生することにより同一ウェハを数十～100回以上リサイクルするようにする。このようにすれば、LSIメーカーはNPWコストを劇的に低減できる。ウェハ再生メーカーにとっては、ウェハ再生市場規模が増大しビジネスが拡大する。その結果として、CO<sub>2</sub>の削減や省エネルギーが実現できる。決して不可能なことではない。では、どうしたら、それは実現できるのか？

### 1. LSIメーカーの意識改革の必要性

まず第一に、LSIメーカーにSiウェハを再生して大事に使う意識を持って頂く必要がある。何しろ、LSIメーカーごとに、Siウェハ再生に対する意識がバラバラなのである。省資源、省エネルギー、さらには、NPWコストの削減を意識して、Siウェハ再生に真面目に取り組んでいるLSIメーカーもある。しかし、多くのLSIメーカーは、NPWを産業廃棄物(ゴミ)扱っている。ゴミであっても分別回収すれば、再び、生まれ変わるのである。LSIメーカーは、せめてキズをつけないように丁寧にSiウェハを扱い、分別回収して、ウェハ再生メーカーに再生処理を委託するべきである。そうすることによって、後述する通りLSIメーカー自身もコストダウンが図れるうえに、地球環境の向上に貢献できるのである。

また、粉碎・廃棄するSiウェハをゼロにすべきである。LSIメーカーにとって、パターンは機密情報であり、機密漏洩を懸念するという気持ち



(出所) L. Chamness : SEMI (March 2008)

図7 ウェハ再生枚数の国籍別シェア

は分からないでもない。しかし、地球規模で環境対策を講じる時代となったのである。運用方法の改善で解決すべき問題である。たとえば、ウェハ再生メーカーと秘密保持契約を結ぶ。また、大手LSIメーカーであるなら、工場敷地内にウェハ再生ラインを設けることも可能だろう。投資額は、最先端リソグラフィ装置の半分もあれば足りると思われる。

## 2. ウェハ再生技術と価格の問題

ウェハ再生メーカーによって、技術の優劣がある。ウェハを再生する際、どのくらいSiウェハを研磨するかが再生メーカーによって異なる。最小限のSi研磨量で再生するような技術を開発しているウェハ再生メーカーもあれば、そうでないウェハ再生メーカーもある。

しかし、LSIメーカーは、技術の優劣でウェハ再生メーカーを選択していない。近視眼的に、安価な再生価格を提示したウェハ再生メーカーを選んでいる。その結果、優秀な技術を持った再生メーカーがそれに見合う利益を得ることができていない。それどころか、ウェハ再生メーカー同士が、不健全な価格競争を行うような状態になっている。

Siウェハの研磨量が少ないほど、同一ウェハを再生できる回数が増える。つまり、LSIメーカーにとってコストメリットが大きい。ウェハ再生回数が増大する程、新品ウェハを買う必要がなくなるからである。しかし、この効果は、長期的な視点に立たなければ見えてこない。

たとえば、毎月3万枚のウェハを再生に出しているLSIメーカーのケースをシミュレーションしてみよう（図8）。新品ウェハ1枚を25,000円、再生価格を4,000円と仮定する。従来技術では同一ウェハの再生回数は2回である。1月は新品ウェハを3万枚購入する。2月および3月は、ウェハ再生メーカーに3万枚を再生委託する。1月に購入したウェハはここまでしか使えないため、4月には新品ウェハを再び3万枚購入する。このように3ヵ月に一度、新品ウェハを購入するというサイクルを続けると、1年間でウェハコスト総費用は38億9,000万円になる。

2010年9月

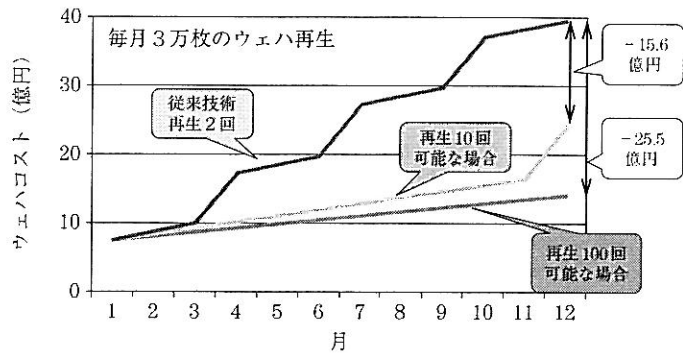


図8 ウェハ再生回数とウェハコストの関係（1年間）

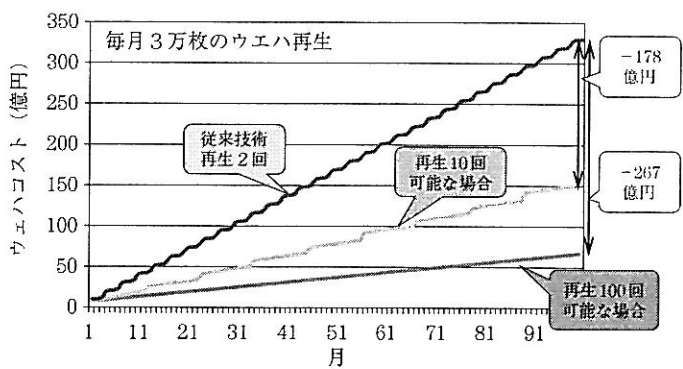


図9 ウェハ再生回数とウェハコストの関係（100ヵ月＝8年3ヵ月）

一方、同一ウェハ10回再生できる技術を用いた場合はどうか。最初の1月目は、従来技術と同様に、新品ウェハを3万枚購入する。しかし、その後10ヵ月は、新品ウェハを買う必要はない。再生ウェハを使い続ければ良いからだ。10回再生するとそれ以上は再生しても使えなくなるため、12月には再び新品ウェハを3万枚購入する。このような結果、1年間でウェハコストは23億3,000万円となり、15億6,000万円をコストダウンすることができる。

もし、同一ウェハを100回再生できる技術が開発できたら、どうなるか。最初の1月に新品ウェハを3万枚購入した後は、100回、同一ウェハを再生し続けて使うことになる。その結果、1年間で25億5,000万円のコストダウンが可能になる。100ヵ月（8年3ヵ月）では、実に267億円のコストダウンができる計算になる（図9）。

Si研磨量の少ない技術がどれ程のコストダウンを実現するか、ご理解いただけたであろうか？真面目に技術開発をして、最小限のSi研磨量でSiウェハを再生し、LSIメーカーのコスト削減に貢献しているにもかかわらず、それがウェハ再生メ

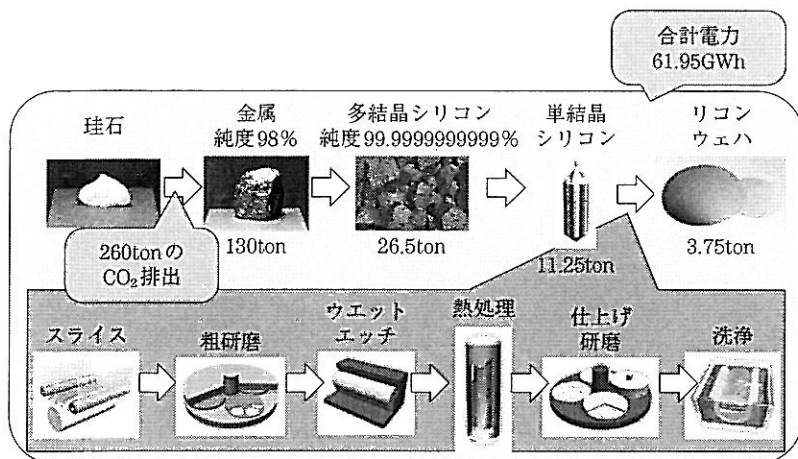


図10 3万枚のSiウェハ製造で排出されるCO<sub>2</sub>と必要電力

メーカーの利益に反映されない。それどころか、技術開発に投資した分が、そのウェハ再生メーカーの経営を圧迫している。例えて言うなら、他社に先駆けて、圧倒的に燃費の良いクルマを開発したにもかかわらず、価格は他社の燃費の悪いクルマと同じ、ということではないか。これでは、ウェハ再生メーカーは、真面目に技術開発をする気など、なくなってしまうだろう。

### 3. CO<sub>2</sub>排出と電力の問題

最小限のSi研磨量でSiウェハを再生し、再生回数を向上させる技術は、NPWのコストだけでなく、CO<sub>2</sub>排出量と電力消費量をも削減する。

Siウェハは、SiO<sub>2</sub>を主成分とする珪石→金属シリコン→高純度多結晶シリコン→単結晶シリコンを経て、この単結晶シリコンインゴットをスライス→粗研磨→ウエットエッチング→熱処理→仕上げ研磨→洗浄し製造される<sup>2)</sup>。筆者は、すべての工程におけるCO<sub>2</sub>排出量を見積もることは、現在の所できていない。しかし、珪石(SiO<sub>2</sub>)を還元してSiにする過程で、大量のCO<sub>2</sub>が排出されることは間違いない<sup>3)</sup>。1tonの金属シリコンをつくる際に、2tonのCO<sub>2</sub>が発生する。3万枚のSiウェハを製造する場合は、金属シリコンが130ton必要である。したがって、この工程だけで260tonものCO<sub>2</sub>が排出される。また、3万枚のSiウェハを製造するために必要な全電力量は61.95GWhになる(図10)<sup>3)</sup>。

もし、新品ウェハを購入しないで再生で済ませることができれば、少なくとも上記260tonのCO<sub>2</sub>は排出されない。また、3万枚のウェハ再生に必要な電力は3GWhであり、新品ウェハを製造する

場合のわずか1/20になる。

### 4. Siウェハ再生への提言

最小限のSi研磨でウェハを再生する技術は、LSIメーカーのコストダウンだけでなく、CO<sub>2</sub>排出量と必要電力量を大幅に削減する地球環境に優しいECO技術である。しかし、日本国内では、ウェハ再生メーカー同士が不健全な価格競争を続けており、業界全体が疲弊しているように見える。このまま行くと、良い技術

を持っている日本のウェハ再生メーカーが、次々と姿を消していくことになりかねない。

日本のウェハ再生メーカーを生かすも殺すも、LSIメーカーの意識改革如何にかかっている。ウェハ再生メーカーに良い技術を開発してもらい、その技術を活用して同一ウェハを数十～100回以上再生し、それに見合う対価を払えば、LSIメーカーとウェハ再生メーカーは共存共栄できるはずである。LSIメーカーは、ウェハコストを大幅に削減できる。ウェハ再生メーカーは、それに貢献することによって売り上げ拡大と利益向上を実現し、さらに良い技術を開発することができる。そして、この循環は、省資源、省エネルギー、CO<sub>2</sub>削減に、大きく貢献できるのである。

そのためには、Siウェハを大切に取り扱い、分別回収をし、粉碎・廃棄ゼロを目指し、ウェハ再生メーカーの技術レベルに応じて適正な再生価格を決定するよう、LSIメーカーへの意識改革を切望したい。

最後に、経済産業省、ITRSのロードマップ委員会、SEMI、ISMT、SEAJなど関係する機関でも取り上げて頂けるよう、協力を要請する次第である。

### 【参考文献】

- 1) Lara Chamness: 2007 Silicon Reclaim Wafer Characterization Summary, SEMI (March 2008)
- 2) 高田, 小松崎: 21世紀の半導体シリコン産業, 工業調査会
- 3) 竹腰: 半導体シリコンビジネスのすべて, 工業調査会