

高純度シリコン原料技術の開発動向 —太陽電池用シリコンの革新的製造プロセスへの期待—

太陽電池セルを材料で分類すると、シリコン系、化合物半導体系、有機系に大別されるが、現在の太陽電池生産量の約 95% はシリコン系であり、そのうち約 60% は多結晶シリコンを用いている。シリコン系太陽電池が主流であることは、今後 10 年間は引き続き継続すると予測されている。

全世界の太陽電池システムの年間生産量は、前年比 30 ～ 35% を超える勢いで増加している。これに伴い、主原料である高純度シリコンの需要が急激に伸びており、シリコン原料の不足が顕在化している。今後、原料供給不足が太陽電池の普及を律速する懸念もある。

シリコン原料の高純度化の製造プロセス技術には化学的方法と冶金学的方法があるが、現状の主流は化学的方法であり、トリクロロシランの精製繰り返しプロセス技術が採られている。太陽電池用の高純度シリコン不足に対する対応策としては、シリコン使用量を減量する新構造のセルシステムを開発する長期的方向も提案されているが、当面の方向としては従来のセルシステムが踏襲されたまま太陽電池の生産量が増大していくため、シリコンの精製設備の増強とともに、新たな製造プロセス技術も開発および導入して生産量を増大していく努力が精力的に行われる必要がある。

高純度シリコンは、これまでは半導体が主用途であったが、今後は半導体用グレードが特殊品になり、太陽電池用が量的な意味での主用途になっていく。このような状況にあって、太陽電池の高効率発電、低コスト製造、革新的な精製技術などの分野で、ナノテクノロジーおよび材料科学研究者の果たす役割は、これまで以上に大きいと言える。特に、従来の原料製造プロセス技術にとらわれない革新的なシリコン製造プロセス技術開発など、従来技術の延長にはない技術の実用化は、大学あるいは公的研究機関における技術シーズに基づいて、新たなベンチャー型組織によって推進することも考慮に入れるべきと考えられる。

高純度シリコン原料技術の開発動向

—太陽電池用シリコンの革新的製造プロセスへの期待—

河本 洋 奥和田 久美
ナノテクノロジー・材料ユニット

1 はじめに

太陽光エネルギーは、世界の一次エネルギーの多くの部分を賄う可能性を有しており、化石燃料代替としてのクリーンエネルギーのひとつとして期待されてきたが、これまではシステムの経済性が普及拡大の大きな障害となっていた。しかし、化石燃料の可採掘年数が有限で高価格化傾向にあることや世界的に環境負荷を低減するシステムの導入が推進されている背景¹⁾から、太陽光発電の重要性は年毎に増している。過去10年間、全世界の太陽電池システムの年間生産量は30～35%を超える勢いで増加し、2005年には発電容量で約1.7GWに達した²⁾。その結果、現在、高純度シリコン原料の供給不足が生じている。今後はこれまで以上に高い伸び率で、太陽電池システムの導入拡大が予想されている³⁾。

現時点での太陽光発電エネルギーは化石燃料によるエネルギーと比較して、数倍も高価である。設置費用のうちで太陽電池セル価格の占める割合は年々増加し⁴⁾、費用の50%以上を占める太陽電池セルの低コスト化は太陽光エネルギーの利用拡大に不可欠と言われてきた。セルに占めるシリコン原料のコストは約20%と言われており、原料不足に起因するセル価格の上昇を防止することは大きな課題である。

「第3期科学技術基本計画」におけるナノテクノロジー・材料分野の研究開発課題でも、太陽電池などにおいて革新的材料を開発して飛躍的に発電効率を上げることによるエネルギー利用の大幅な高効率化を目指すとされている。材料の実用化プロセス技術を開発するために、ナノスケールにおいて

材料の組織、構造、界面を制御する技術を確立することも掲げられている⁵⁾。また、ナノエレクトロニクス領域では、10年後までの半導体などのデバイス技術は、シリコンを中心とした技術のさらなる高機能化を実現することが、急速な情報化社会の進展の鍵であるとされている。

本稿では、太陽電池用シリコンの背景と開発動向を紹介し、高純度シリコンの供給状況や、高純度化プロセス技術の現状について述べる。また、シリコン原料不足に対する対応策としての原料製造プロセス技術の開発状況を紹介し、今後期待される材料科学的解明あるいは革新的なプロセス技術開発の可能性とその推進組織について提言したい。

2 多結晶シリコン系太陽電池が注目される理由

2 - 1

太陽光発電の急速な拡大

環境問題を重要視する欧州をはじめ、世界的に太陽光発電の普及が急速に進んでいる^{1, 6, 7)}。米国においてはエネルギー安全保障などの観点からも太陽光発電を重視する傾向が見られる。2004年度に

は世界の太陽電池システムの発電量が1.2GWに達し、さらに2005年には1.7GWに達したと予想されており、普及率では現在はドイツが世界のトップになっている。ドイツでは「再生可能エネルギー法」と「10万軒の屋根計画」に基づき、従来の3～4倍のコストで買電する補助金制度によって太陽光発電ブームが喚起されたため

ある^{1, 8)}。

2004年の世界の太陽電池システムの総生産量は前年比伸び率で約60%と大幅に伸長した。システムの国別生産量は日本では0.6GW、欧州では0.3GW、米国では0.14GWであり、日本と欧州の伸びが顕著になっている⁹⁾。欧州再生可能エネルギー委員会による Renewable Energy Scenario to

2040 では、世界の総発電量に占める太陽光発電の割合は、2010 年に 0.1%、2020 年に 1.1%、2030 年に 8.3%に拡大すると予測されている³⁾。

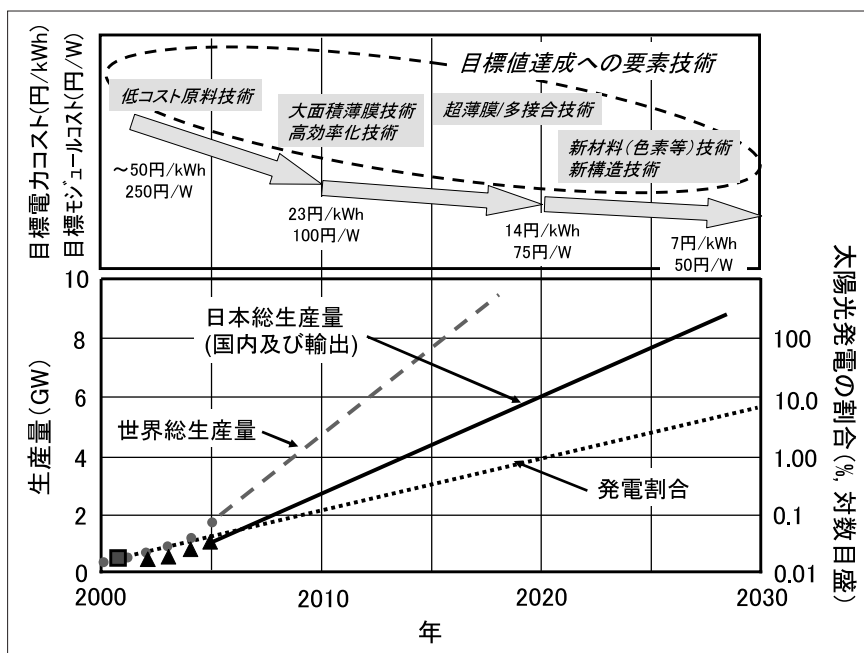
図表 1 に、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が作成した、世界の太陽電池モジュールの生産実績および予測と発電コストの視点からの太陽光発電ロードマップを示す^{2、10、11)}。ここで

は、2030 年までに累積導入量を 100GW、全電力に占める太陽光発電量を 10%と想定している。

現在の太陽電池モジュール市場の約 95%はシリコンを原料とする太陽電池で占められており、そのうち、約 60%はバルク結晶シリコンとされる多結晶シリコン、約 30%は単結晶シリコンを用いた太陽電池である^{9、12)}。ここ 3 年間はほぼ同程度のシェアで市場は

推移しており、当分の間はこの傾向が続くと予想されている。太陽光発電システムの普及拡大のためには、太陽光発電システムのコストの約 60%を占める太陽電池モジュールのコストを低減する必要があり、そのためには、モジュールのコストの約 20%を占めるシリコン原料のコストを低減することが課題となっている。モジュール製造コストを大幅に低減する技術開発が重要課題になっており、シリコン原料の安定供給も重要である。しかし、今の状況の延長では、シリコン原料のコスト低減どころか、シリコンの供給不足が太陽電池の普及を制限することになると推測される。

図表 1 世界の太陽電池モジュールの生産実績及び今後の予測と発電コストの視点からの太陽光発電ロードマップ



(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による

参考文献^{2、10、11)}を基に科学技術動向研究センターで再構成

2 - 2

各種太陽電池の材料別の発電効率と課題

太陽電池を材料で分類すると、シリコン系、化合物半導体系、有機系に大別できる。図表 2 に各種太陽電池モジュールの変換効率と主な特徴または課題を一覧し、それぞれの技術の現状を以下に要約する^{9、10、13)}。

図表 2 各種太陽電池モジュールの変換効率と特徴または課題

代表的種類			生産量 (2003 年)	発電効率 (モジュール、%)		主な特徴または課題
				現状	2030 年目標 (NEDO)	
シリコン系	バルク型	多結晶	61	13 ~ 17	22	● 大量生産向きの豊富な使用実績
		単結晶	27	16 ~ 18	—	● 高い変換効率
		リボン	1	16	—	● スライス工程不要
	薄膜型 (アモルファス、結晶)		4	7 ~ 12	—	● 低温、大面積、多層製膜が可能 ● 低コスト化の可能性保持
化合物半導体系	単結晶型 (GaAs 系)		—	30 ~ 40	—	● 高い変換効率を有するが高コスト ● 環境負荷物質を含む
	多結晶型 (CIGS、CdTe)		1	13	18	● In 資源の確保と消費量削減または In の代替元素探索が必要 ● システムの信頼性の向上が必要
有機系	色素増感型		—	6	15	● 真空および高温プロセスが不要
	有機薄膜型		—	4	—	● 低コスト化の可能性保持 ● 研究開発段階

※リボンとは、シリコン融液から表面張力を利用して直接シリコン薄板を製造したものを指す (ストリングリボン法)。厚さは 100nm から数百 μm 程度。
参考文献^{9、10、13)}を基に科学技術動向研究センターで再構成

(1)バルク型シリコン系

シリコン系太陽電池は、シリコン (Si) の結晶の状態やデバイス構造によって、バルク型、薄膜型、単結晶型、多結晶型などに分類される。これらの中で現在の生産量の大部分を占めているのはバルク型シリコン系太陽電池であり、当面、この状況が続くと予想されている。単結晶型では16～18%、多結晶型では13～17%の発電効率が得られている。

太陽電池用のシリコンは、高純度とは言っても半導体グレードに比べれば数桁低い純度の材料で形成されているため、従来は半導体用のオフグレード品などが使われてきた。しかし、太陽電池には半導体チップに比べて大量のシリコンが必要であり、最近の急激な需要増加に対応するため、当初から太陽電池グレードを目指したシリコンの生産が増加しつつある。また、シリコン需要の拡大に対応するため、低コスト原料製造プロセスの開発も注目されている。特に量を必要とするバルク型太陽電池では、モジュールコストに占める材料費の割合が高く、原料を少しでも節約するために、結晶を薄型にすること(100 μ mから50 μ mへ)やスライス加工時の切削屑低減を目指した技術開発も進められている。

(2)薄膜型シリコン系

薄膜型の太陽電池は、基板上に薄膜のシリコンを体積させたものである。原料消費量が少なくてすむため、将来的には大量生産向きの低コスト太陽電池と位置づけられている。しかし、結晶質のシリコンの薄膜を形成した場合でも、現状技術では発電効率がバルク型シリコンに比べてかなり低い。薄膜がアモルファス(非晶質)の場合には、低温で形成でき基板の選択が広がるが、発電効率はさらに

低く7～10%である。したがって、これらの太陽電池で発電コストを低減するには、発電効率の向上が重要な鍵となっている。発電効率が向上していけば、原料消費量のメリットから、薄膜系も主流になっていく可能性はある。

(3)化合物半導体系および有機系

化合物半導体系および有機系太陽電池は、次世代の太陽電池として期待されて、研究開発が進められ、一部、実用化もされている。しかし、これらがシリコン系に代わって主流になることは当面考えられない。

化合物半導体は理論上ではシリコンより高効率発電が可能であると考えられて、研究開発が進められている。例えば、CIGS (Cu-In-Ga-Se)化合物薄膜系太陽電池では、多結晶薄膜材料で13%を超える効率が達成されていること、バンドギャップを組成によって変化させることができることなどの利点を有する。しかし、インジウム (In) は希少であるなど原材料供給とコストの課題が、基本的には解決できない。GaAs化合物薄膜系太陽電池も開発されているが、原材料の供給とともに、砒素 (As) の大量使用は、将来、環境面で問題を抱える懸念がある。現在は、これらの化合物半導体系太陽電池も増産されている状況ではあるが、いずれは特殊用途を目指すことになると思われる。

原材料コストが圧倒的に低い有機系は、高効率発電は狙えないが、低コストの太陽電池として、あるいはウェアラブルなどの応用が期待されている。有機色素増感型太陽電池では10%を超える発電効率が報告されており、将来の低コスト太陽電池としての期待が高い。しかし、今のところは、屋外でのモジュール効率、安定性、寿命、信頼性などが課題となって実用化

は進んでいない。

また、量子ドットによるシングル接合を基本としない太陽電池は、理論上では60%もの圧倒的に高効率の発電を目指せると考えられ、ナノテクノロジーの分野では注目研究のひとつである。しかし、研究が始まったばかりの段階である。

2 - 3

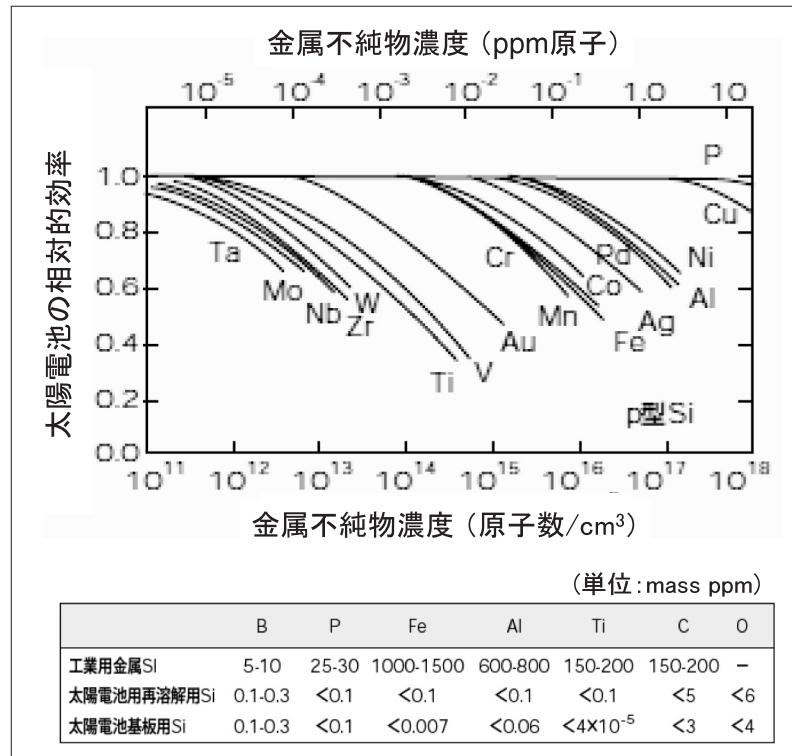
シリコン系太陽電池の 発電性能と不純物濃度の関係

太陽電池用シリコン(純度99.99999%)は半導体グレード(純度99.999999999%)に比べれば純度が低いが、太陽電池の発電効率はシリコン原料に含まれる不純物量により大きく影響する。むしろ太陽電池用シリコンでは、効率とコストの兼ね合いで、どこまで不純物量を許容できるかを見極める必要がある。シリコン原料の不純物量の許容指針は、セルおよびモジュール作製プロセスとの関連性から、原料メーカーごとに異なっているのが現状である。

図表3に単結晶シリコン系太陽電池の性能に及ぼす各種不純物の影響と各種シリコン原材料中の不純物濃度を示す^{14～16)}。鉄、アルミニウム、チタンなど多くの金属不純物量がppmオーダー以下で発電性能に敏感に影響を及ぼすため、それらの量の限界値を把握することが重要である。不純物は結晶粒界や結晶欠陥と複雑に絡み合っ

て電気的特性を決めていると考えられている。しかし、結晶粒界や結晶内に存在する不純物の挙動が電池特性へ及ぼす影響については、必ずしも十分に解明されているとは言えない¹⁷⁾。高効率で低コストのシリコン系太陽電池を実現するためには、これらを明らかにすることが必要である。

図表3 単結晶シリコン系太陽電池の性能に及ぼす各種不純物の影響と各種シリコン原材料中の不純物濃度

参考文献^{14~16)}より転載

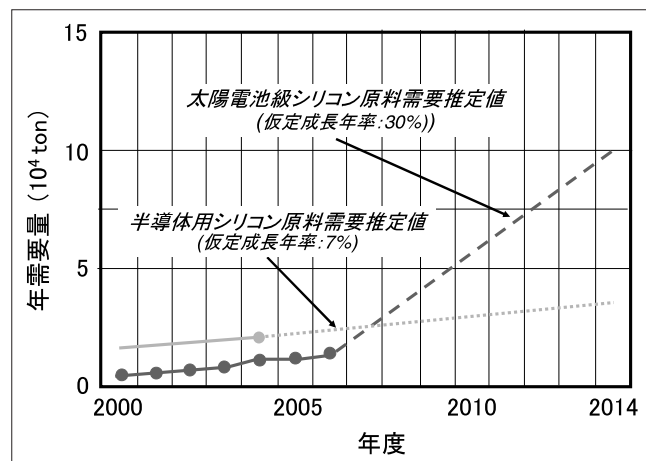
3 高純度シリコンの需要予測

最近の太陽電池生産量の大幅な増加に伴い、主原料である高純度シリコンの需要が急激に伸びており、現在は高純度シリコンの不足が顕在化している。これには、かつて半導体用の高純度シリコンの不足に直面した際に、各原料メーカーが製造設備を増設して過剰な設備を抱えたという経緯があったため、現在も各メーカーは設備増強に対して慎重であることが影響している。シリコン系太陽電池の事業は、シリコン原料、インゴットおよびウェハ、セル、モジュール、システムの5業種から構成されているが、後工程になるほど生産能力規模が大きいという生産能力のアンバランスがある。また、後工程と比較して前工程のほうが同一の生産能力に対する設備投資が高額になること、設備の建設から稼働までに長期間を要することなども、現在のシリコン原料不足の要因になっていると考えられる¹⁸⁾。

高純度シリコンの世界総供給量の試算を図表4に示す^{2, 18, 19)}。この図では2005年までの年生産量は実績（または実績予想値）であり、一方、2006年以降の年生産量は太陽電池用および半導体用シリコン需要の伸びを仮定して算出している。当面、半導体用シリコンの需要の伸びは平均年率7%、太

陽電池用シリコンの需要の伸びは年率30~35%になると予測されている。この図によれば、2007年には太陽電池用シリコンの生産量が半導体用を上回ることになる。太陽電池用シリコンの原料供給メーカーは、現在、世界で10社（日本、米国、ドイツ）があり、上位4社は半導体ウェハのメーカーで

図表4 高純度シリコン原料の世界総需要予測

参考文献^{2, 18, 19)}の資料を再構成し、成長率を仮定して年生産量を算出した

もある。今後2年程度は、これら10社合計でも原料供給は確実に不足する。さらに今後数年間は、半導体用と太陽電池用の総需要が全世界の高純度シリコンの生産能力を上回り続ける可能性が強く、シリコン不足が太陽電池普及の足か

せになることが懸念されている。数年後には世界の需給バランスは安定する方向に向かうと思われるが、その時には業界の状況は一変している可能性がある。日本はこれまで半導体用シリコンで優位を占めてきたが、今後、高純度シ

リコンの総需要から考えれば、半導体用は特殊品となっていく。太陽電池用が主な用途となっていくなかで、太陽電池用シリコンでも日本が優位に立てるかどうかわからない。

4 太陽電池用シリコンの高純度化プロセス技術

4 - 1

シリコン原料製造プロセス技術の開発状況

図表5に太陽電池用シリコンの高純度化プロセス技術を、開発途上の製造プロセス技術も含めて示す^{19, 20)}。この図には各プロセス技術に関する国内の特許出願状況も合わせて示している。

シリコン原料の高純度化プロセス技術を大別すると化学的方法と冶金学的方法があり、現状の原料製造プロセスの主流は化学的方法で、トリクロロシラン (SiCl_3) の精製繰り返しプロセス（シーメンス法）である。これは、珪砂（シリカ： SiO_2 ）を還元して低純度シリコンを作ることから始まり、シ

リコンを塩酸と反応させてトリクロロシランと呼ばれる液体を得て、蒸留と精製により不純物を除去して高純度に精製したトリクロロシランと水素とを高温下で反応させて高純度シリコンを析出させる方法である。この精製過程では多量の電力エネルギーを必要とする。

4 - 2

シリコン原料不足に対する対応策の方向性

太陽電池用の高純度シリコンの不足に対する対応策としては、図表6に示すように、当面の方向としては従来のセル技術が踏襲されることが前提になっているため、設備の増強とともに、新たな製造プロセス技術を開発および導入し

て生産量を増大する努力が精力的に行われていく。長期的には、新構造のセル技術によって高効率を目指す開発も同時に進められる。大きな方針としては、使用量の削減対策と原料の増産対策の2つの方向性がある。

(1)シリコンの使用量低減

材料技術の見直しによる発電効率の向上と新構造のセル技術によって、発電量当たりのシリコン使用量を少しでも低減しようとする方法に対して、今後は従来以上の注力がなされていくようになる。前述したように、シリコン使用量低減の面からは単結晶や薄膜状でシリコンを用いることが望ましいが、コストは高くなる。そのほかには、例えば、熔融シリコン

図表5 太陽電池用シリコン原料の高純度化プロセス技術と特許出願状況

基本アプローチ	特徴（2次原料媒体）	製造プロセス	特許出願件数 (1996/1～2006/3)	代表的企業	開発状況
冶金学的 アプローチ	●単純な工程 ●安価	熔融シリコン精製法	25	JFE スチール 新日鉄 Elkem Solar Crystal Systems Dow Corning	●基礎技術確立 ●大型技術実証段階
化学的 アプローチ	●複雑な工程 ●高純度	SiHCl_3 改良シーメンス法	1	Hemlock	
			—	Wacker	
		VLD 法	—	トクヤマ	
		流動床法	—	Wacker	—
		SiH_4 流動床法	—	REC	
		シリコンチューブ内法	—	Joint Solar	
		SiCl_4 亜鉛還元法	10	チッソ	

※ VLD（Vapor to Liquid Deposition）法：シリコン融液析出方法

国内特許検索は特許庁の検索システムで行い、「シリコン」、「高純度」、「太陽電池」のキーワードで1996年からの出願総計65件を抽出し、冶金学的および化学的アプローチによる高純度化プロセス技術に関するものを36件選択した。なお、特許出願人と代表的企業名は必ずしも一致しない。
参考文献^{19, 20)}を基にして科学技術動向研究センターで作成

から球状シリコンを作製し、この球状シリコンと反射鏡兼電極とを組み合わせた新構造セルを採用してシリコン使用量を大幅に低減するセル技術の開発が進められている^{21, 22)}。さらに、単結晶を用いた両面受光型セルを用いて発電出力を増大させる開発例もある²³⁾。

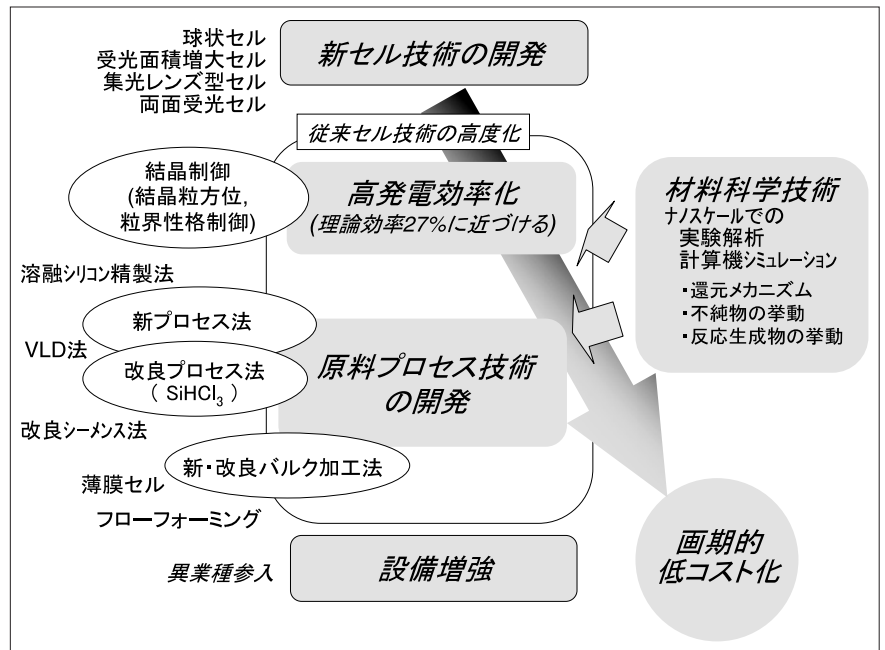
また、新しい加工方法の開発により、加工プロセスの工程での原料の無駄を減らすことでの使用量削減も試みられている¹⁸⁾。シリコン・インゴットの加工の際、細いワイヤの使用によってウェハを薄型化して、シリコン原料の使用量を少なくする製法、シリコン融液の表面張力を利用して、原料から直接的にシリコンのリボン状ウェハにする製法などの開発がなされている。その他に、フィルム・フローミングという方法でウェハ化する方法も開発されている。

(2)原料製造プロセスの改良および新開発によるシリコン原料の増産

現在用いられている製造プロセスの主流であるシーメンス法の改良としては、トリクロロシランの精製効率を上げて精製の繰り返し数を少なくする方法で時間当たりの生産量を増やす試みや、最終的な高純度シリコンの析出効率を向上させる努力がなされている。しかし、シーメンス法は過去約30年用いられてきた方法で、その間にも多くの改良は行なわれてきており、今後、この方法において画期的に精製効率上がることは期待しにくい。

新たな製造プロセスの候補と

図表6 多結晶シリコン原料の不足に対する対応策



しては、VLD（Vapor to Liquid Deposition）法や溶融シリコン精製法がある。VLD法は、トリクロロシランを水素と共に1,500℃に過熱したグラファイト筒に注入し、析出したシリコンの融液を連続的に得る方法であり、従来のシーメンス法に比べてシリコンの析出速度が速く、高効率でのシリコン原料製造が可能となると考えられている^{17, 19)}。

一方、溶融シリコン精製法は、冶金学的アプローチを応用してシリコンの不純物濃度を低くするという金属精錬技術を用いる方法である。半導体用には用いられない技術であるが、太陽電池グレードであれば適用の可能性がある。従来とは違った分野でのアプローチであるため異業種の参入も考えられるだけでなく、化学的アプ

ローチに比べると小規模の設備（100ton程度）でも作製できるという利点を有する。NEDOプロジェクトで開発された技術として、純度99%の金属シリコンを出発原料として、原料に含有される不純物元素を除去して太陽電池用の高純度シリコンを製造する冶金学的製造プロセスがある。この方法では、凝固精製を2回行い、第1工程では高真空中で黒鉛容器を用いてリンを除去した後、鉄、アルミニウム、チタンなどの1回目の凝固精製を行う。得られたインゴットの不純物濃縮部を切断除去後、破碎および洗浄を行い、第2工程ではプラズマ溶解炉でホウ素、リンを水蒸気添加で酸化除去して、鉄、アルミニウム、チタンなどの第2回目の凝固仕上げ精製を行う^{17, 20, 21)}。

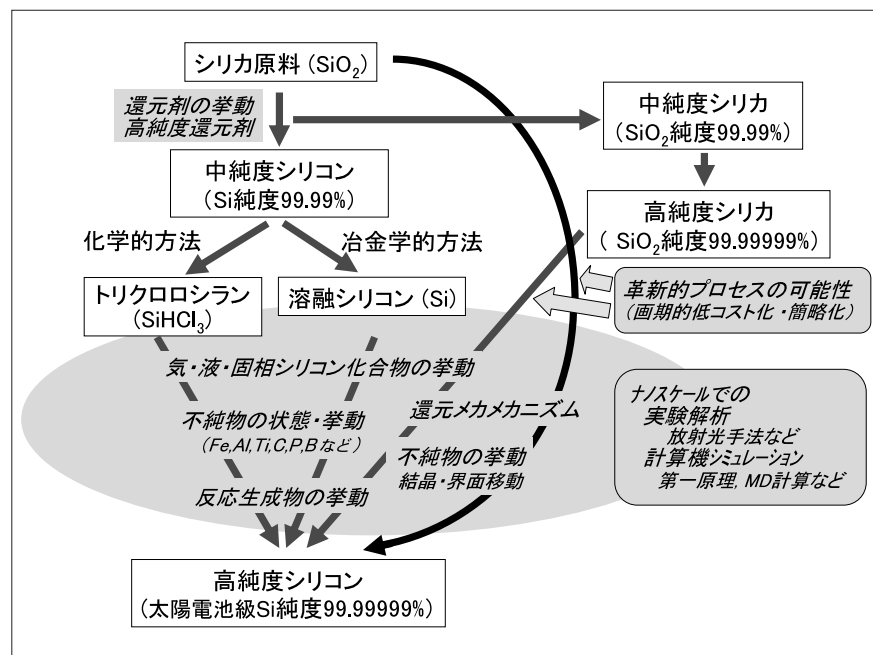
5 シリコン原料の高純度化に関して今後期待される材料科学技術

図表7に、シリコンに含有される不純物の挙動解明へ向けたナノスケールでのアプローチに関して、今後の可能性を示す。原料であるシリカから太陽電池用のシ

リコン（純度99.99999%）に至る過程を途中の生成物を通して示した。以下に示すように、太陽電池用として不純物の結晶や粒界における挙動を解析するという目的か

ら、ナノスケールでの実験解析や計算機シミュレーションに対して従来以上に注力する必要があると考えられる。しかし日本では、従来の太陽電池の研究開発はデバ

図表7 シリコンに含有される不純物の挙動解明へ向けてのナノスケールのアプローチ



ス開発中心で、材料研究は半導体用のシリコン産業に頼ってきた経緯があるため、大学や公的機関において、この分野に注目している材料研究者は数少ない。

5 - 1

原料高純度化プロセスでの不純物挙動の解明の必要性

究極的な目標である低コスト化、すなわち、太陽光発電エネルギーを化石燃料からのエネルギーと比較して同等程度まで低コスト化することを目指すためには、セルに占める原料のコストを飛躍的に下げて、かつ、原料を安定的に供給しなければならない。そのためには、2 - 3 節で述べたように、太陽電池の発電性能を維持または向上しつつ、シリコン原料中の各種不純物をどの程度まで許容できるかを明らかにすることが不可欠である。しかし、インゴットおよびウェハ、セル、モジュール工程における不純物許容量がまちまちであることもあって、各種不純物が電池特性に与える影響が現在までに十分に解明されていない。太陽電池用としてのシリコンの高純

度化プロセスにおいて、各種不純物の挙動をナノスケールにおいて明らかにすることが重要である。このような研究は産官学の研究機関の連携において取り組まれることが期待されるが、特に、材料科学の技術基盤を有する大学や国立研究機関の果たす役割は大きいと言える。海外の産官学研究機関によるシリコン系太陽電池の研究開発を推進するプロジェクトの例としては、欧州委員会の Crystal Clear が挙げられる。そのなかでもシリコン原料技術は注目されており、低コストで十分な発電性能を発揮できる原料プロセス技術の研究開発が実施されている^{24, 25)}。

(1)シリコン結晶内および結晶間における不純物挙動の解明

従来の製造プロセスにおいて、最初にシリカ原料 (SiO₂) からシリコン (Si) を得る段階には、木材チップやコークスなどを用いてシリカを還元する方法が用いられている。しかし、還元剤としての木材チップやコークスなどに不純物が含まれているため、結果的にシリコンの純度が元原料のシリカより低下してしまう場合が多い。

さらに還元剤としてのカーボンがシリコンの結晶内や結晶間にどのような状態で残留するかも追及する必要がある。

前述した冶金学的プロセスにおける金属不純物の除去方法の研究では、シリコンの固相と液相間での偏析係数が小さい金属元素 (例えば、鉄、アルミニウム、チタンなど) を一方向凝固法で液相側に排出除去する原理を応用している。これらの偏析係数が小さい金属元素は、2 - 3 節で示したように特に取り除きたい金属不純物である。また、リンの除去では、電子ビーム真空溶解法で行い、シリコン溶融表面を局所加熱してリンを優先的に蒸発させる。ホウ素および炭素の除去は、水蒸気添加プラズマ溶解法によって、水蒸気の酸素とボロンおよび炭素を酸化反応させて除去する。

特に、多結晶シリコンには粒界 (結晶と結晶の境界) があるため、単結晶の場合より、不純物が関与する粒界での結晶欠陥や複数の不純物元素が絡んだ複雑なミクロ構造を形成しやすく、このことが不純物の性能への限界量を単純に決めることを困難にしている。また、単結晶の場合でも、不純物がひとつの結晶中でどのように分布し、どのような化学状態で存在しているかを明らかにすることが必要である。今後の高効率化を図るためには、粒界・欠陥・不純物からなる複合的な欠陥構造の生成機構の理解ならびに抑制に関する研究がさらに必要である²⁵⁾。

(2)ナノスケールでの実験解析および計算機シミュレーションによる不純物挙動の解明

例えば、シリコン結晶中の鉄の分布とその電子状態を SPring - 8 の放射光により検証した例では、結晶内の特定の場所に鉄が存在していることがわかっている¹⁷⁾。今後は、不純物が精製過程において

どのようにシリコン中に拡散し、不純物とどのようなシリサイド（金属とシリコンより成る化合物）を析出するかといった研究、あるいは、これらが多結晶体中の欠陥とどのような構造形態を成すのかといった研究において、ナノスケールでメカニズムを明らかにしていくことが望まれる。

このような研究を行なっていく上で、「第3期科学技術基本計画」におけるナノテクノロジー・材料分野の研究開発課題としての「文部科学省として取り組むべき元素戦略」にあるように²⁶⁾、計算機マテリアルデザインまたはシミュレーションは革新的な高純度化プロセス技術を開発するツールとなり得る。これまでの材料研究で蓄積した材料データベースを用いて、不純物の結晶内や粒界における挙動の解析を第一原理計算や分子動力学計算などを実施し²⁷⁾、簡易で低コストとなる高純度化プロセス技術の方向を探索することも可能であると考えられる。

5 - 2

革新的原料高純度化製造プロセス技術開発の必要性

図表1に示したようなロードマップにしたがって発電コストを低減していくためには、シリコンの量的安定供給とともに、原料の大幅なコスト低減も要求されるであろう。電力コストとモジュールコストを大幅に低減し続けていくためには、原料コストも大幅に低減しなければいけない。シリコン系太陽電池が主流であることが継続すると仮定した場合、現状の原料不足を解消するための製造プロセス技術の開発のみでは、原料コストの値上がり分の低減あるいは以前のコストの維持程度であれば可能かもしれないが、ロードマップに示されたような発電コスト目標を達成することは困難であろう。

これを達成するためには、図表7に示したように、画期的な低コスト化技術を目指した革新的製造プロセス技術の開発の可能性も追求すべきである。そのためには、シリカの還元メカニズムの解明や特性発現メカニズムのさらなる研究が必要と考えられる。このような研究の例としては、太陽電池グレードの純度のシリカを安価に製造し、シリカの純度を保ったまま、シリコンへと還元を行おうというコンセプトのもとに、シリカの電気化学的還元に着目した研究がある。本来、シリカは絶縁体であるため、電気化学的なアプローチは難しいが、外部からの電子供給を考案し、電気化学的にシリコンへと還元させる方法が見出されている^{28~30)}。

5 - 3

製造プロセス技術開発のベンチャー型組織による推進

従来のシリコン産業は、シリコン製造プロセスも含めて大型設備が必要であり、大きな初期資本が必要とされたため、規模の大きな半導体関連企業のみが対象であった。しかし近年の世界の太陽電池関連企業を見渡してみると、多くのベンチャー型組織の台頭が目立つ。その理由のひとつとしては、太陽電池産業の発展が世界的に大きな注目を集めているために、ベンチャー型組織に対しても投資が活発であるという背景がある。しかし、もうひとつの理由として、シリコン産業を含めて太陽電池産業全体において、各段階ごとに分業化が進んでいることが挙げられる。この結果、すでに数百という単位の太陽電池関連企業が生まれ、その中には多くのベンチャー型組織や国際的な協力企業などが含まれており、戦国時代といった様相を呈している。この状況はしばらく続くと思われるが、い

ずれこの中から世界的規模に発展する新興企業が出てくるものと考えられる。例えば、中国では、太陽電池産業で大学発ベンチャーが大成功し、海外株式市場への上場まで果たした例も出ている。

しかし残念ながら、日本国内では従来からのシリコン産業以外の新規参入組はわずかである。ナノテクノロジーなどの先端技術の事業化に関しては、個々の企業が自社の保有する技術・人材などの経営資源や産学連携効果を最大限活用できたとしても、必ずしも自社の事業戦略に整合しないがために事業化には至らないというケースが多い。このような技術開発の成果を世に出すためには、技術や人材をベンチャー型起業といった形で積極的に市場価値として創出していくことも考慮すべきである³¹⁾。また、従来の原料製造プロセス技術にとらわれない発想、原料側と後工程側のシーズとニーズのマッチング、小規模製造技術から進められる開発リスクの軽減などの観点からも、革新的なシリコン製造プロセス技術開発などを、大学あるいは公的研究機関における技術シーズに基づく新たなベンチャー型組織によって推進することを考慮に入れるべきと考えられる。国内の数少ない例として、東京大学生産技術研究所の研究開発成果を事業化したベンチャー企業において、半導体製造工程で発生するシリコン廃材に低圧下の熔融装置中で電子ビームを照射して熔融して不純物を蒸発させる原理を用いて、太陽電池用シリコンを製造しはじめたという例が挙げられる³²⁾。

原子あるいは分子といったナノスケールレベルでの研究から、新しいシリコン原料技術を創成するという、従来技術の延長ではない技術の実用化では、技術から市場までを見通すことは難しく、大企業の事業化としてはリスクが大き

い。特に後工程の企業では、ニーズはあるものの、技術経験が少ないため、原料などの基盤的な技術に対する投資は抑制的になりがちである。出口となる製品市場までの製造プロセス工程が複雑な

め、基盤的な原料技術のようなサイズ性が高いものについては、取り組みは不足しがちである。これらの基盤となる技術を研究する人材自体の養成や確保も、従来からの単独の企業の範囲内では困難で

あると考えられる。これらの点から、シリコン原料技術を含めてこれからの日本の太陽電池産業は、大学あるいは公的研究機関からの技術シーズに期待するところが大きい。

6 おわりに

世界的に地球保全意識が高まり、太陽光発電市場は欧州、米国を中心に、今後とも急拡大していくことが予想される。太陽光発電システムの普及拡大は、太陽光発電コストを大幅低減させることにかかっており、太陽光発電システムの低コスト化に関する技術開発がキーテクノロジーである。太陽電池用材料として、当面はシリコン系太陽光発電システムが主力であり、今後、原料供給不足が普及を律速する懸念がある。太陽電池用の高純度シリコン不足に対する対応策としては、シリコン使用量を減量する新構造のセルシステムを開発する長期的方向も提案されているが、当面の方向としては従来のセルシステムが踏襲されたまま太陽電池の生産量が増大していくため、シリコンの精製設備の増強とともに新たな製造プロセス技術も開発および導入して生産量を増大していく努力が精力的に行われる必要がある。材料的にみて、シリコンの安定供給を図り、シリコン原料コストを低減していくことが、最も注目していくべき課題であると考えられる。

また、高純度シリコンは、これまでは半導体用が主用途であったが、今後は半導体用グレードが特殊品になり、太陽電池用が量的な意味での主用途になっていく。このような状況にあって、太陽電池の高効率発電、低コスト製造、革新的な精製技術などの分野で、ナノテクノロジーおよび材料科学研究者の果たす役割は、これま

で以上に大きいと言える。特に、従来の原料製造プロセス技術にとらわれない革新的なシリコン製造プロセス技術開発など、従来技術の延長にはない技術の実用化は、大学あるいは公的研究機関における技術シーズに基づいて、新たなベンチャー型組織によって推進することも考慮に入れるべきと考えられる。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、東京大学生産技術研究所所長の前田正史教授にシリコン高純度プロセス技術における冶金学的アプローチについて、東京大学工学系総合研究機構助手の溝口照康博士にシリコン不純物の計算機シミュレーションについて有益な知見をいただいた。京セラ株式会社の前田辰巳執行役員常務には、シリコン原料技術やセルおよびモジュール技術について有用な現状と今後に関する情報をいただいた。さらに、三菱商事株式会社非鉄金属本部小澤浩一プロジェクトマネージャーおよび加茂大輔氏にはシリコン原料の需給状況にて有益なコメントを、株式会社アドマテックス安部賛常務取締役にはシリカの還元技術に関する先端的な知見を提供いただいた。皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大平竜也、「再生可能エネルギーの普及促進策と技術課題」、科学技術動向、2005年8月号

- 2) 「太陽光発電産業自立に向けたビジョン (2006年度改訂版)」、太陽光発電協会
- 3) “Renewable Energy Scenario to 2040 by European Renewable Energy Council (May, 2004)” : <http://www.erec-renewables.org/>
- 4) 基本計画の達成効果の評価のための調査—科学技術振興による経済・社会・国民生活への寄与の定性的評価・分析—、NISTEP REPORT No.89 (2005)
- 5) 「第3期科学技術基本計画・分野別推進戦略—ナノテクノロジー・材料分野—」、総合科学技術会議: http://www.Mext.go.jp/a_menu/kagaku/kihon/06032816/001/001.pdf
- 6) 科学技術動向、2005年9月号トピックス
- 7) 科学技術動向、2006年12月号トピックス
- 8) “Environmental Policy, Renewable energy sources in figures - national and international development, Status: May 2006”, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) Public Relation Division -D-11055 Berlin
- 9) 清水正文、沢井啓安、「太陽光発電技術の現状と今後の展開」、シャープ技報第93号p. 5～10 (2005)
- 10) 「NEDO2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (2004)」: http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005_1/gaiyou_j.pdf
- 11) 「2030年に向けた新エネルギー政策の展望」、資源エネルギー庁、

- (2004) :
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g40317b50j.pdf>
- 12) 「太陽光発電情報」、(株)資源総合システム、(2005)
- 13) 近藤道夫、「太陽電池の可能性」、日本機械学会誌、Vol.109, No.109, 15 ~ 17 (2006)
- 14) M. G. Mauk, "Silicon Solar Cells : Physical Metallurgy Principles," JOM, vol.5, May, p.38 ~ 42 (2003)
- 15) J.R. Davis et al., "Characterization of the Effects of Metallic Impurities on Silicon Solar Cell Performance", Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaics Specialists Conference (New York: IEEE, 1978), p.490
- 16) 加藤嘉英外、「工業用金属シリコンを用いた太陽電池用高純度シリコンの量産化製造技術の開発」、まてりあ、41 巻、1 号、p. 54 ~ 56 (2002)
- 17) 木下祥雄、「太陽電池の研究開発の方向性(結晶系)」、第 23 回太陽光発電システムシンポジウム資料、太陽光発電協会、p.5 - 37 ~ 5 - 46 (2006)
- 18) 高橋均、「多結晶 Si 材料の不足はまだ続く」、NIKKEI ELECTRONICS 2006.9.25、p.195
- ~ 203
- 19) 小田開行、「原材料の新たな展開」、第 23 回太陽光発電システムシンポジウム資料、太陽光発電協会、p.8 - 23 ~ 8 - 28 (2006)
- 20) NMC ニュース、「結晶系シリコン(Si)太陽電池材料の現状と将来」、第 6 号(7) :
http://www.ostec.or.jp/nmc/TOP/nmc_news.htm
- 21) NEDONEWS-Vol. 18-166 号 — 特集 1 - 5 :
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/nedonews/166/1-5.html>
- 22) 「集光型球状シリコン太陽電池とは—製法と特徴—」(2005) :
http://www.fujipream.co.jp/top/img/20051208_syukosiryo.pdf
- 23) 「両面受光太陽電池」:
<http://www.pi.hitachi.co.jp/solazure/index.html>
- 24) "Crystal Clear" :
<http://www.ipcrystalclear.info/default.aspx>
- 25) 中嶋一雄ほか、「結晶 Si 太陽電池の高効率化における材料学的アプローチ」:
<http://www.imr.tohoku.ac.jp/Jpn/event/report/kenkyubu/pdf17/01handoutai.pdf>
- 26) 「文部科学省として取り組むべき元素戦略(議論のたたき台)」、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会・ナノテクノロジー・材料委員会(第 5 回)(2006) :
<http://www.nanonet.go.jp/japanese/policy/files/20060719-00.pdf>
- 27) I. Tanaka, T. Mizoguchi, et al., "Identification of ultradilute dopants in ceramics", Nature Materials, Vol.2, August, p.541 ~ 545 (2003)
- 28) T. Nohira, K. Yasuda and Y. Ito, Nature Materials, 2, p.397-401 (2003)
- 29) K. Yasuda, T. Nohira and Y. Ito, Abs. 33, 204th Meeting, 2003 The Electrochemical Society, Inc.
- 30) K. Yasuda, T. Nohira and Y. Ito, Journal of Physics and Chemistry of solids, submitted
- 31) 「ナノテクノロジー政策研究会 中間報告・ナノテクノロジーによる価値創造実現のための処方箋」、経済産業省・ナノテクノロジー・材料戦略室(2005)
- 32) 「東大発ベンチャーが太陽電池用 Si を増産へ」:
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20061113/123456/>

執筆者



ナノテクノロジー・材料ユニット リーダー
河本 洋
 科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士、日本機械学会フェロー。トヨタ自動車(株)にて自動車部材の開発段階における強度設計・評価を担当し、その後公益法人にて経済産業省関連プロジェクト(ファインセラミックスの研究開発など)に従事。専門は構造部材の強度設計と信頼性評価技術。



ナノテクノロジー・材料ユニット
奥和田 久美
 科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

民間企業のエンジニアを経て 2002 年から現職。ナノテク・材料分野を担当。「科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査」「基本計画の達成効果の評価のための調査」にも注力。工学博士。