

■ シリーズ特集 ■ 明日を支える資源 (76)

<連載：新機能材料を支える工業鉱物資源①>

エネルギー資源としてのシリコン

Silicon as Energy Resources

一 木 修*

Osamu Ikki

1. はじめに

これまでエネルギー資源というと石炭、石油、天然ガス、ウラン等を指し、これらの資源を大量に燃焼することにより、あるいは核分裂による発熱作用を利用することにより、電力を生み出している。これに対し、半導体のもつ光電変換効果を利用した太陽光を直接電気に変換する太陽電池の登場により、新しい発電方式が可能となり、太陽電池を利用した太陽光発電システムが新エネルギーの1つとして期待されている。

太陽光発電システムは、①クリーンな発電方式、②無保守で長期的自動運転が可能、③非枯渇エネルギー、④必要に応じて小規模なものから大規模なものまで設計が自由、⑤オンサイト発電が可能など、多くのメリットがある。一方で発電量が日射量で左右されたり、在来型の電力に比べてコスト高であるなどのデメリットもある。

しかし、長年にわたる先進各国政府による太陽光発電システム実用化のための研究開発と普及支援策、さらには太陽光発電システム関係企業によるコストダウン努力の結果、今日では世界的な導入と普及の時代を迎えている。1997年12月に開催された地球温暖化防止京都会議（COP3）において、先進各国は温室効果ガスの排出量を1990年比で削減する義務を負うことになった。その結果、CO₂排出を削減する手段の1つとして太陽光発電システムの重要性がますます高まり、太陽光発電システムを導入する動きが世界的に広がっている。

太陽光発電システムの心臓部となる太陽電池は主にシリコンを原料としているので、シリコンはエレクトロニクス用を初めとする基礎原料資源としての評価だけでなく、太陽光発電システムの普及拡大に伴って、

石油や石炭のように消費してなくなることはない新タイプのエネルギー資源として新たな評価が加わろうとしている。

太陽電池の1Wは、日本のような日射条件のもとでは年間1,000Whの電力を発生する。結晶シリコン型太陽電池の寿命は20年は持つと言われており、1Wの太陽電池は20kWhの電力を生み出すことになる。1Wの結晶シリコン型太陽電池を生産するのに必要なシリコン消費量は15g~20gと言われており、太陽電池用シリコンを製造する際に必要となるエネルギー量を考慮しないならば、現在の技術レベルでは1gのシリコンのもつ潜在的エネルギーは約1kWhに相当する。

2. わが国における太陽光発電導入拡大の見通し

1998年6月にわが国のエネルギー長期需給見通しが策定され、その中で太陽光発電を含めた新エネルギーの2010年度における導入量見通しが示されている。

今回のエネルギー長期需給見通しは、1997年12月のCOP3の場で決定したCO₂削減目標の達成と最近の世界的なエネルギー情勢を勘案して改定されたもので、環境調和型エネルギー需給構造への転換を目指している。新エネルギーに対する基本的考え方は「既存エネルギーに即座に代替できるようなものではないものの、将来的には一定程度の依存を見込まねばならぬエネルギーであり、過渡的には幾らかの負担をしてでも本格的な導入推進が必要である。このため積極的な技術開発を含め、更なる政策的支援措置により目標の達成を可能とするための努力を続けていくべきである」としている。さらに、エネルギー供給対策のあり方としての新エネルギーの位置付けとしては「環境負荷の小さい国産エネルギーとして、その導入拡大に最大限取り組むべきである」としている。こうしたことを背景に、改定された「長期エネルギー需給見通し」の中での新エネルギー供給の展望は、「既存のエネルギーに比し

* ㈱資源総合システム 代表取締役

〒104-0033 東京都中央区新川2-3-11

表1 長期エネルギー需給見通しにおける2010年度の新エネルギー供給の見通し

	1996年度までの導入実績値	2010年度の供給見通し (平成10年6月策定)
太陽光発電	5.7万kW (1.4万kl)	500万kW (122万kl)
太陽熱利用	104万kl	450万kl
風力発電	1.4万kW (0.6万kl)	30万kW (12万kl)
廃棄物発電	89万kW (82万kl)	500万kW (662万kl)
廃棄物熱利用	4.4万kl	14万kl
温度差エネルギー等	3.3万kl	58万kl
黒液・廃材等	490万kl	592万kl
計 (一次エネルギー総供給に占める割合)	685万kl	1,910万kl (3.1%)

出典：通商産業省・資源エネルギー庁編「21世紀、地球環境時代のエネルギー戦略」

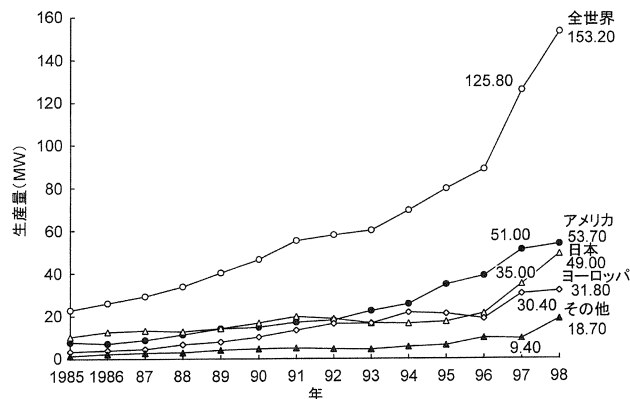
て経済性等の厳しい競争条件下にある新エネルギーは、このまま何ら追加的支援措置を講じずに推移した場合には、2010年度の導入量は940万kl程度にとどまってしまう見通しであるが、1997年9月に施行された『新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法』に基づく各種支援措置等を講じつつコスト面その他の導入制約要因を克服し、市場の自立化を加速的に進めることとし、2010年度における新エネルギーの供給量としては『石油代替エネルギーの供給目標（平成6年9月）』に掲げられた1910万klを見込む」としている。この結果、太陽光発電の2010年の供給目標量は表1に示すように、1997年度末の太陽光発電システムの導入量5.7万kWに対して約90倍に相当する500万kWを見込んでいる。

3. 太陽電池の世界生産量及び太陽電池用シリコン消費量の拡大

1998年における太陽電池世界生産量はPV News

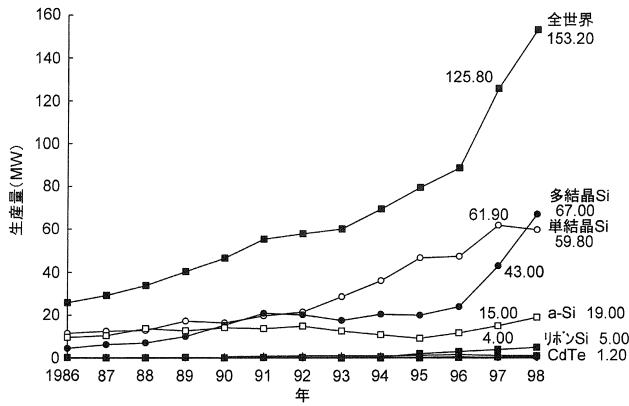
(アメリカで発行されている太陽光発電専門の情報誌)によると図-1に示すように153.2MW、対前年比21.8%増という大きな伸びとなった。この背景には日米欧における太陽光発電システムの系統連系型市場の拡大、途上国における村落電化用独立型市場の拡大があり、これまでの日米欧各国による太陽光発電普及策と途上国への太陽光発電支援策に対する継続的な努力の結果である。特に、日本政府による住宅用太陽光発電システム導入施策が太陽電池需要の拡大に大きく寄与している。太陽電池の生産量の拡大は、1985年以来一貫して続いており、1990年に入ってからこのこれまで9年間の平均成長率は16.0%という驚異的な伸びを記録している。

生産量を地域別に見ると、アメリカ53.7MW、日本49.0MW、ヨーロッパ31.8MW、その他の地域18.7MWとなり、全地域で生産が増大している。しかし、その伸びは地域により大きく異なっている。アメリカは対前年比5.3%の伸びにとどまり、1993年から続いて



出典：PV News Vol.18. No.2 (1999)

図-1 世界の太陽電池生産量

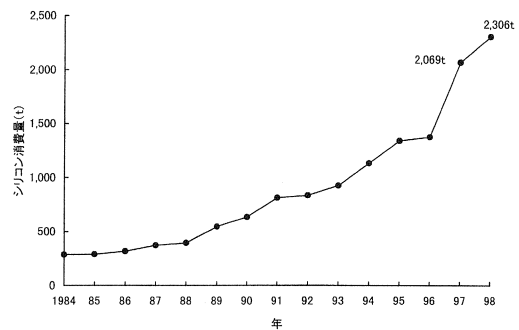


出典：PV News Vol.18, No.2 (1999)

図-2 種類別太陽電池生産量

いた好調な伸びから一転し、成長は鈍化している。日本は政府主導による住宅用を柱とする太陽光発電システム普及施策を背景に、2年連続の爆発的な伸びを記録し、アメリカに次いで年産50MW時代を迎えようとしている。ヨーロッパはヨーロッパ太陽電池メーカーの牽引役を果たしてきたBPソーラーがインド及びオーストラリアでの生産分をその他の地域での生産に振り分けたことにより、対前年比4.6%増にとどまった。その半面その他の地域での生産量は対前年比98.9%増の伸びとなった。その結果、生産量でアメリカの1人勝ち的な兆候は消え去り、生産拠点は世界分散化が始まろうとしている。アメリカの生産シェアは1997年より拡大基調から縮小基調に転じ、35.4%となった。一方、日本の生産シェアは32.4%となり、再び拡大基調を取り戻し、1992年以来的30%台を回復した。

材料別の太陽電池生産量は大きな変化がみられた。これまで太陽電池の中心的材料は単結晶シリコンであったが、1997年以来多結晶シリコン太陽電池の生産が急速に拡大し、1998年は多結晶シリコン型が単結晶シリコン型を追い抜き逆転した。その結果図-2に示すように、多結晶シリコン型は67.0MW、単結晶シリコン型は59.8MWとなり中心的材料は単結晶シリコンと多結晶シリコンが競合している。さらにアモルファスシリコン型は19.0MW、リボンシリコン型5.0MW、CdTe型1.2MW、多結晶シリコン薄膜型1.0MW、集光型0.2MWであった。従って、単結晶シリコン型、多結晶シリコン型、リボンシリコン型の合計は131.8MWとなり、結晶シリコン型太陽電池の生産量は全体の86%を占めている。アモルファスシリコン型は量的な伸びは小さいものの、伸び率では1996年以來着実に伸びてお



- * 1. PV Newsによる結晶型シリコン太陽電池生産量を基に、太陽電池用シリコン消費量を推定
- * 2. シリコン消費量は、結晶型シリコン太陽電池生産量に対する原単位を、1984～1994年：20g/W、1995年：19.5g/W、1996年：18.5g/W、1997年：19g/W、1998年：17.5g/Wとした

図-3 太陽電池用シリコン消費量 (推定)

り、年産20MW時代を迎えようとしている。CdTe型およびリボンシリコン型は横ばいで大きな変化はなかった。多結晶シリコン薄膜型は低コストセラミック基板ベースのものでようやく年産1MWのレベルを達成した。

一方、結晶シリコン型太陽電池用のシリコン消費量は図-3に示すように、結晶シリコン型太陽電池の世界的な伸びとともに大幅な増大を続けている。一般的な太陽電池用の厚さ350μm、10cm角のシリコン基板の重量は8.2gで、この基板による変換効率を13%とするとWあたりの重量は6.3gとなる。(最近では10cm角から12.5cm角、15cm角と基板の大型化が進んでいる)しかし、シリコン基板を製造する際の結晶化工程やウエハー化工程でロスが発生するので、シリコン消費量原

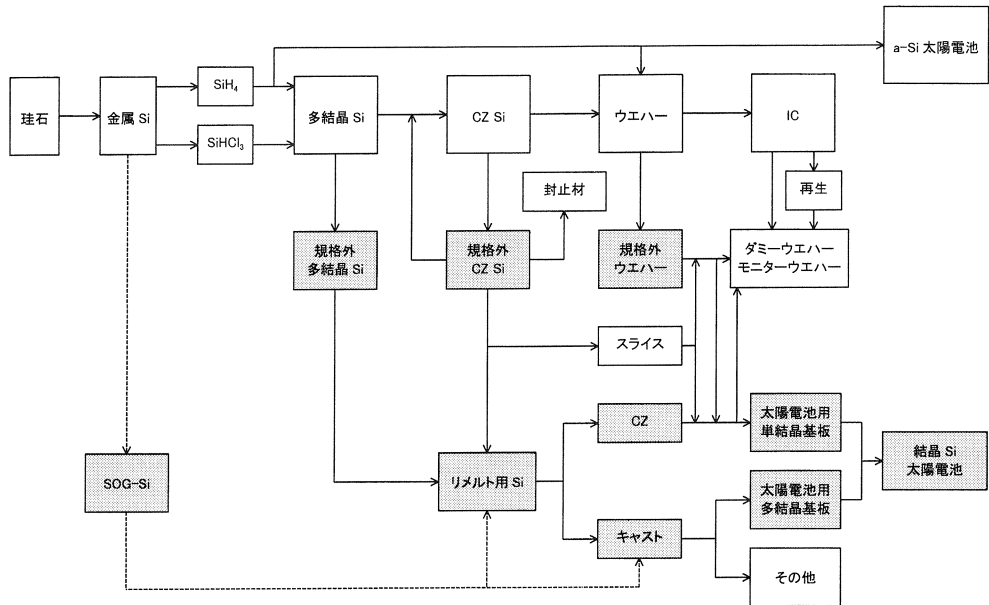


図-4 太陽電池用シリコンフロー

単位は6.3gより大きな値となる。単結晶シリコン基板、多結晶シリコン基板、リボンシリコン基板は製造工程の違いによりシリコン消費量原単位はそれぞれ異なるが、結晶シリコン型太陽電池全体としてW当たり17.5gと推定すると、1998年の結晶シリコン型太陽電池の生産量は131.8MWだったので、太陽電池用シリコン消費量は2,306tとなる。シリコン消費量原単位は、1995年以前はW当たり20gと推定されていたが、太陽電池メーカーが各製造工程での歩留まりの向上、太陽電池変換効率の向上、基板厚の薄型化、カーフロスの減少、基板の大面积化等に努めた結果、シリコン消費量原単位は年々改善されている。

4. 太陽電池用シリコンの供給の現状

太陽電池用シリコンの供給源は図-4に示すように、半導体用シリコンの製造過程で発生する規格外品が対象となっている。原料資源から半導体用シリコンまでは、珪石→金属シリコン→多結晶シリコン→単結晶シリコン→シリコンウエハーという製造工程で生産されており、それぞれの分野が独立した産業として成り立っている。半導体用シリコン産業は金属シリコンを出発原料としており、単結晶シリコンメーカーが単結晶シリコンウエハーも生産している。太陽電池用には多結晶シリコン製造工程、単結晶シリコン製造工程、ウエハー製造工程の各工程で

発生する規格外のシリコン（スクラップ品）が利用されている。つまり、太陽電池用のシリコンは

- ①多結晶シリコン規格外品
- ②単結晶シリコン規格外品
- ③単結晶シリコンウエハー規格外品

の3種類の規格外品によってまかなわれている。

多結晶シリコン規格外品は、ロッド状の多結晶シリコンを単結晶シリコン原料用に粉砕する際に発生するものが多い。多結晶シリコン生産量の3%前後が規格外品として発生すると言われているが、この中には太陽電池用には適さない粒度の細かいもの（粉っぽいもの）も含まれている。太陽電池用にはこれらを洗浄除去したものが使用されている。従って、多結晶シリコン製造工程からの規格外シリコンは量的な期待はできない。

単結晶シリコン規格外品には、単結晶シリコンを引き上げた際に残るつばに残る“るつば残”と単結晶シリコンインゴットの“トップ（頭部）”と“テール（尾部）”及び抵抗値の違いによって半導体用には使用できない“円筒部”があるが、太陽電池用には主にトップ、テール、るつば残が利用されている。

単結晶シリコンウエハー規格外品は、ウエハーに傷、欠け、反り、あるいは割れたものでこれらが太陽電池用に使われる場合もある。

規格外のシリコンは、主にリメルト用シリコンとして再び溶解され、CZ法により単結晶シリコンインゴッ

表2 規格外シリコン発生状況と太陽電池用シリコン供給源の変化

種類	発生工程	発生状況	供給先	
			1994年以前	現状
規格外多結晶Si	多結晶Si製造工程	粉碎工程で発生する規格外サイズの粒状シリコン	<ul style="list-style-type: none"> ・ダミー／モニターリメルト用 ・太陽電池用 ・Al合金用 	<ul style="list-style-type: none"> ・ダミー／モニターリメルト用 ・太陽電池用
規格外単結晶Si	単結晶Si製造工程	<トップ> 単結晶シリコン引き上げ工程で発生するシリコンインゴットの頭部	<ul style="list-style-type: none"> ・封止材用 ・ダミー／モニターリメルト用 ・太陽電池用 	<ul style="list-style-type: none"> ・単結晶Siリサイクル ・ダミー／モニターリメルト用
		<テール> 単結晶シリコン引き上げ工程で発生するシリコンインゴットの尾部	<ul style="list-style-type: none"> ・封止材用 ・ダミー／モニターリメルト用 ・太陽電池用 	<ul style="list-style-type: none"> ・封止材用 ・ダミー／モニターリメルト用
		<るつば残> 単結晶シリコン引き上げ工程で発生する石英るつば内部に残る残留シリコン	<ul style="list-style-type: none"> ・Al合金用 ・封止材用 	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽電池用 ・Al合金用 ・封止材用
規格外Siウエハー	Siウエハー製造工程	そり、かけ、傷、割れによる不良品ウエハー	<ul style="list-style-type: none"> ・Al合金用 	<ul style="list-style-type: none"> ・Al合金用 ・(太陽電池用)

トとなるか、キャスト法により多結晶シリコンインゴットとなる。これらのインゴットはその後の工程でスライスされ太陽電池用基板となる。

以上のような規格外シリコンはまた太陽電池用以外に半導体用単結晶シリコン用（再び原料としてリサイクル）、半導体封止材用（高純度SiO₂製造用）、ダミー・モニターウエハー用（単結晶シリコン再引き上げ用）、アルミ合金の原料としても再利用されている。これらの分野は規格外シリコンの品質的、形状的状况により使い分けられている。しかしながら、1993年から始まった半導体需要の拡大により1994年に表面化した多結晶シリコンの供給不足懸念とその後の深刻な供給不足の結果、規格外シリコンの供給に大きな構造的変化が起きている。

これまでの太陽電池用シリコンの主要供給源は単結晶シリコン規格外品のトップとテールであった。ところが単結晶シリコンメーカーは原料の多結晶シリコンの十分な確保が供給能力不足により困難になってきたため、トップとテールを自社内で可能な限り原料化し、リサイクルするようになった。そこで単結晶シリコンを引き上げる際にトップとテールは再原料化されることを前提として、トップとテール中に含まれるドーパントの種類や抵抗値が管理されるようになった。これらのトップとテールは現在は品質的状况に応じて、主に半導体用単結晶シリコンとダミー・モニター用単結晶シリコンの原料となっている。

単結晶シリコンメーカーはさらに多結晶シリコン供給不足を補うために単結晶シリコンを引き上げる際の製品化率の向上を図ったので、トップ、テール、るつ

ば残の発生率は以前に比べて大幅に減少した。

こうして太陽電池メーカーや、太陽電池用基板メーカーが入手可能な太陽電池用としての品質の優れた単結晶シリコンのトップとテールは激減し、現在の中心的太陽電池用シリコンは“るつば残”に移っている。表2には規格外シリコンの発生状況と太陽電池用シリコン供給源の急速な変化を示す。

5. 太陽電池用シリコン供給の将来

太陽電池用シリコン原料開発は、将来予測される太陽電池の普及拡大に対応するために、1980年代にすでに、日米欧において活発に開発が進められていた。太陽電池用シリコン（Solar Grade Silicon, 略してSOG-Si）は、半導体用シリコンほど超高純度である必要はないということから、シリコン純度として7～8ナイン程度のもを安価に、かつ大量生産できるプロセスの開発が実施された。開発された方法は以下の5つの方法に分類することができる。

①ガス精製法

従来の半導体用シリコン製造法をベースにさらに低コスト化する方法で、金属シリコンをガス状化合物としてから還元する方法

②金属シリコンの精製法

金属シリコンをガスブロー、リーチング、スラグ処理、一方凝固等の冶金学的プロセスにより高純度化していく方法

③純化原料還元法

珪砂、珪石を出発原料として高純度のSiO₂を製造し、それを還元する方法

表3 NEDO溶融精製法の各工程での精錬原理

工程	精製方法	精錬原理
リン除去	電子ビーム真空溶解法	・浴表面を局所高温としてリンを蒸発させる
凝固粗精製	一方向凝固法	・固液間の偏析係数が小さい金属不純物 (Fe, Al, Ti, Ca) を液側に排出する
ボロン除去	水蒸気添加プラズマ溶解法	・水蒸気の酸素でボロンを酸化除去する
凝固仕上げ精製	一方向凝固法	・金属不純物は粗精製のみで目標濃度まで低下しない ・精製原理は粗精製と同様

出典：荒谷復夫，NEDO第16回事業報告会太陽技術分科会（1996年9月）

④電解法

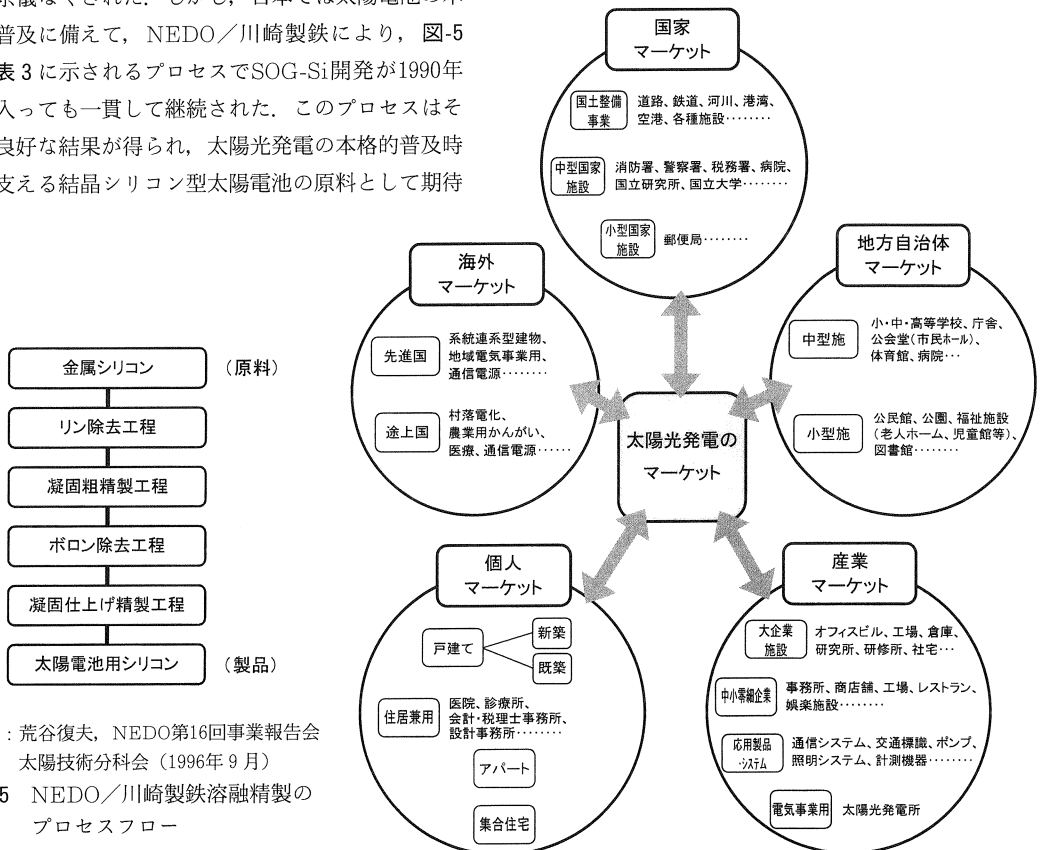
シリコンを含む溶融塩を電気分解し，高純度のシリコンを製造する方法

⑤その他の還元法

以上のプロセスは，どれもSOG-Siとして純度的問題，コストの問題，量産性のある程度はクリアできるが，すべて解決できるプロセスではなく，工業化できるレベルには至らなかった。また，当時の太陽電池のマーケットの拡大が予想より進まなかったことから，1990年までにはほとんどのプロセスが中断や撤退を余儀なくされた。しかし，日本では太陽電池の本格的普及に備えて，NEDO/川崎製鉄により，図-5及び表3に示されるプロセスでSOG-Si開発が1990年代に入っても一貫して継続された。このプロセスはその後良好な結果が得られ，太陽光発電の本格的普及時代を支える結晶シリコン型太陽電池の原料として期待

され，後述する太陽電池用原料技術研究組合へと研究開発が発展的に引き継がれている。

太陽電池メーカーや太陽電池用基板メーカーは供給限界のある不安定な規格外シリコンを有効に使うために，太陽電池W当たりの消費量原単位の減少に努めているが，太陽電池用シリコンの安定的供給に対する根本的な解決策とはならないことから，太陽電池メーカー関連7社が太陽電池用シリコン原料量産技術開発のための「太陽電池用原料技術研究組合」を設立した。この研究組合はNEDOが開発したNEDO/川崎製鉄金



属シリコン溶融精製法をベースに、2000年に向けて太陽電池用シリコン原料の大量供給につなげるためのパイロットプラント開発を進めている。さらに、この研究組合の中心的企業の1つである川崎製鉄は同研究組合の開発成果をベースにした太陽電池用シリコン製造工場建設を決定し、すでに工場建設に入っている。この新工場が稼働を始めれば、太陽光発電産業は初めてシリコン産業の動向に依存しない独自の原料部門を持つことになり、太陽電池用シリコンの安定的供給が図れることになる。

太陽電池用シリコン原料は、世界の太陽電池生産が年産50MW～100MW時代は、シリコン産業からのスクラップシリコンで十分充足できるレベルであったが、年産100MW～200MWの時代となると、これを結晶シリコン型太陽電池を中心に対応するならばシリコン産業の景況により、スクラップシリコンは不足する事態が発生する。さらに年産200MWを越える時代となると、これに対応するスクラップシリコンの調達は不可能となり、シリコン産業からのスクラップシリコンに頼らない太陽電池用シリコンの安定供給体制の確立が急務となろう。

6. おわりに

太陽光発電システムは政府による太陽光発電システムの普及環境整備や住宅用太陽光発電システムの普及

拡大施策の強化を背景に、公共施設や民間施設への導入も始まり、2010年度の500万kW導入に向けての取り組みが進展している。将来的に図-6に示されるようなマーケットに体系的に入っていくことが予想されている。従って、結晶シリコン型太陽電池のコストダウンが進み太陽光発電システムの需要拡大が本格化していくなれば、シリコンのエネルギー資源としての評価は高まっていくと思われる。

引用文献

- 1) Paul. D. Maycock ; PV News Vol.18. No.2 (1999)
- 2) 通商産業省・資源エネルギー庁編, 21世紀, 地球環境時代のエネルギー戦略, (1998), 通商産業調査会
- 3) 一木; 太陽光発電用シリコン原料の現状と展望, 第12回太陽光発電システムシンポジウム, (1995年), 太陽光発電懇話会
- 4) 荒谷; 太陽電池用シリコン製造技術の現状と課題, 第16回新エネルギー・産業技術総合開発機構事業報告会 (太陽技術分科会), (1996年9月), 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 5) 一木, 荒谷; 太陽電池用シリコン原料の供給環境の変化と影響, 光発電, No.20, (1997), 太陽光発電懇話会
- 6) 一木; 1998年における世界の太陽電池生産動向, 光発電, No.22, (1999), 太陽光発電懇話会
- 7) 一木, 大東; 太陽光発電システムの現状と展望, 資源環境対策, Vol.34. No.3, (1999), 公害対策技術同友会
- 8) 一木; 100MW時代を迎えた太陽光発電市場の動向と課題, エネルギーフォーラム, No.533, (1999年5月), 電力新報社

他団体ニュース

「第3回太陽光発電システム」講習会について

〔主催〕日本太陽エネルギー学会

* 23日(金) 実践編

〔日時〕平成11年7月22日(木)～23日(金)

・太陽光発電システム設計, 太陽光発電システムの技術及び法規上の留意点 等

〔場所〕大阪科学技術センター

〔問合せ先〕日本太陽エネルギー学会

(大阪市西区靱本町, Tel 06-6443-5316)

〔プログラム〕

事務局 山田徳雄

* 22日(木) 基礎編

TEL03-3376-6015 FAX03-3376-6720

・太陽光発電システムの概要, 設計施工, 導入・普及促進 等

E-mail : jses@tky.3web.ne.jp