

# 太陽電池の廃棄・リサイクルに関する研究

## Study on Waste and Recycling of Photovoltaic Module

リスク工学グループ演習 2 班  
鬼塚英城, 金井里雨, 鎌田智之

アドバイザー教員：内山洋司、岡島敬一

**Key Words :** Recycling, Photovoltaic module, Life cycle assessment, Net energy analysis

### 1. はじめに

太陽光発電システムは、技術進歩によるコストの大幅な低減と導入普及政策によって、着実に導入量が増え続けている<sup>1)</sup>(図 1)。2004 年度末の日本における累積導入量は 113 万 kW で世界の 43.6%を占めている。これは世界第一位の導入量であり、日本は太陽光発電システムにおいて世界を牽引しているといえる。

太陽電池の寿命は 20~30 年と言われており<sup>2)</sup>、1990 年代中ごろから導入が増え始めた太陽電池は早ければあと 10 年ほどで寿命末期に達し廃棄量が増え始める事が予想される。しかし、今日までの太陽電池市場は普及・拡大に主眼がおかれていたため、寿命を過ぎた太陽電池をいかにして処理するかや制度やシステムは確立されてこなかった。一方、リサイクル技術については実用化には至っていないが、各国において様々な方法が開発途上である。初期の太陽電池が寿命を迎えるまでの、いかにして実社会に導入するかを検討する段階にあると言える。

他方、太陽電池はガラスやシリコンから構成されているが、多結晶シリコンを製造する際に相当量のエネルギーを要することがこれまで明らかになっている。しかし 2007 年には年間 1 万トンもの多結晶シリコンが不足するとの見方がある<sup>3)</sup>(図 3)、環境負荷軽減のみならずシリコンの不足を補う観点からも太陽電池の廃棄やリサイクルは重要な問題であると言える。

これらの背景を踏まえ、本研究ではリサイクル技術動向を踏まえた太陽電池のリサイクルシステムのエネルギー・コスト評価を行い、今後の太陽電池のリサイクルのあり方について考察し、指針を示すことを目的とする。

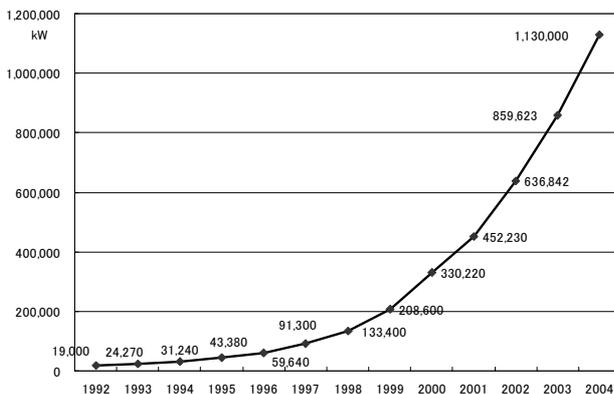


図 1 太陽電池の累積導入量推移<sup>1)</sup>

### 2. 太陽電池の種類、構造および製造工程

#### (1)太陽電池について

シリコン系太陽電池は、結晶系(多結晶・単結晶)、アモルファス系と区分することができる。結晶系シリコン太陽電池は発電効率が優れており大規模施設などにまで幅広く用いられている。表 1 にシリコン系太陽電池についてまとめたものを示す。なお、本研究では多結晶シリコン太陽電池について取り上げる。以下、太陽電池と表記されているものは多結晶シリコン太陽電池を指すものとする。

また、図 2 に太陽電池の構造を示した模式図を示す。太陽電池には、セルを風雨等による劣化から守るための封止材として、EVA (ethylene vinyl acetate, エチレン酢酸ビニル) が主として用いられている。

表 1 シリコン系太陽電池の変換効率<sup>4)</sup>

太陽電池の種類	セル	モジュール
結晶系	単結晶	17.0%
	多結晶	14.5%
アモルファス系		9~10%

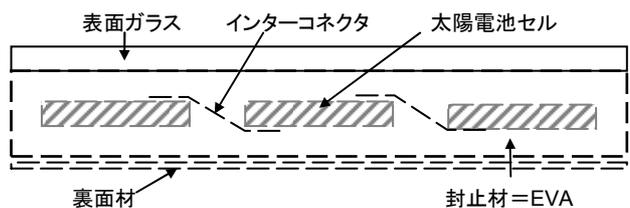


図 2 太陽電池構造模式図

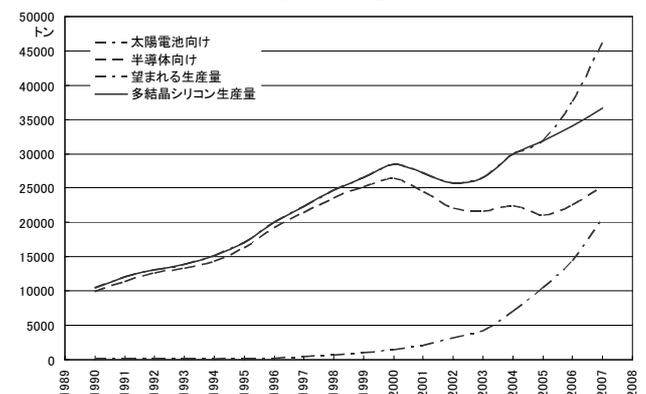


図 3 多結晶シリコン需要と供給<sup>3)</sup>

(2)太陽電池の製造工程<sup>4)</sup>

a)原料製造工程

原料となる珪砂をソーダ灰とともに熔融路により融解、水ガラス化し、鉍酸を加えて脱水融合によりシリカを析出させ、これを洗浄、脱水して高純度シリカを製造する。これをカーボンペレットを用いてアーク熱還元し、さらに脱炭素化したあと、一方向凝固させ、粒状の SOG（ソーラージェイドシリコン）を製造する。

b)基盤化工程

SOG をスライスしてシリコン基盤を製造する。光電変換効率の高い電池にする為にはこの工程が重要であり、高純度、大結晶の Si の結晶を作ることを目指している。

c)セル化工程

電磁キャスト法によりセル形状の断面を持つインゴットに casting し、マルチワイヤーソーで切断してセル基盤を製作する。そして基盤を表面処理した後、気相拡散法により pn 構造を形成し、印刷法により電極形成を行い、セルを制作する。

d)モジュール化工程

太陽電池を実際に使用する為に複数個の太陽電池素子を直列、あるいは並列に組み合わせる。設定した電圧電流特性を得ると同時に、風雨や温度変化等の環境変化に耐えられるように、充填剤などを用いてセルを保護する。

3. 太陽電池のリサイクル技術

現在開発段階であるリサイクル技術のうち、本研究で取り扱うリサイクル技術は以下の2種類である。現在使用されている太陽電池モジュールは、接着力が強固な封止材としてEVAが使用されているが、このEVAを除去しセルを取り出すことが、太陽電池のリサイクルに重要なことである。

(1)従来型モジュールからのセル回収技術

a)硝酸法

Bruton(BP Solar,UK)によって提案された技術で、PVモジュールを60℃の硝酸溶液中で25時間処理し、EVAを分解除去する方法。PVセルの表面電極、表面反射防止膜も溶解、ウェハの状態で開催される。硝酸廃液の処理や再セル化工程の必要性がある。

b)熱分解法（空気雰囲気）

Wambach(Deutsch Solar AG,Germany)の提案した技術で、空気雰囲気で行うためEVA等の燃焼が起こり、窒素雰囲気で行うよりも若干低い温度で処理が可能。生成される炭化物を飛ばすために3時間と長い処理時間がかかるが、各社の廃棄モジュールに対応可能である。

(2)ヒアリング調査による知見

太陽電池のリサイクルについて現状と課題を明らかにするために産業総合技術研究所太陽光発電研究センター土井氏、加藤氏にヒアリング調査を行った（2006年7月27日）。その結果、以下の2点が明らかになった。

- ・セル自体は無限に利用可能だが、EVA（封止材）の黄変による発電効率低下が問題
- ・セルからEVAをはがすことが難しく、リサイクルを困難にしている要因である

ヒアリング結果を踏まえた上で次に、各リサイクル技術についてのエネルギー評価とコスト評価を行っていく。

4. リサイクルを考慮したエネルギー・コスト分析

ここでは、多結晶シリコン太陽電池をリサイクルせずに廃棄し新たに太陽電池を製造する場合（以下、通常工程）と前述の硝酸法と熱分解法（空気雰囲気）（以下、熱分解法）にてリサイクルを行った際の3パターンについて、発電容量1GWとなるセルを1年間に製造するケースを想定して、エネルギー比較分析およびコスト比較分析を行う。図4に太陽電池製造プロセスのフローを示す。硝酸法、熱分解法を用いたリサイクルではそれぞれ"セル化工程：裏面エッチング"、"原料製造工程：一方向性凝固"からセルを再利用することができることとし、エネルギー分析ではそれ以降のエネルギーを加算するものとして分析する。

本研究では主として『太陽光発電技術の評価Ⅱ』（化学工学会第1種研究会「CO<sub>2</sub>と地球環境問題研究会」：平成7年5月）<sup>4)</sup>の設定・数値等を用いている。この報告書では各工程ごとに電気と化石燃料のエネルギーが算出されている。なお、本研究では電力換算和<sup>(1)</sup>の値を用いて分析を行うこととした。

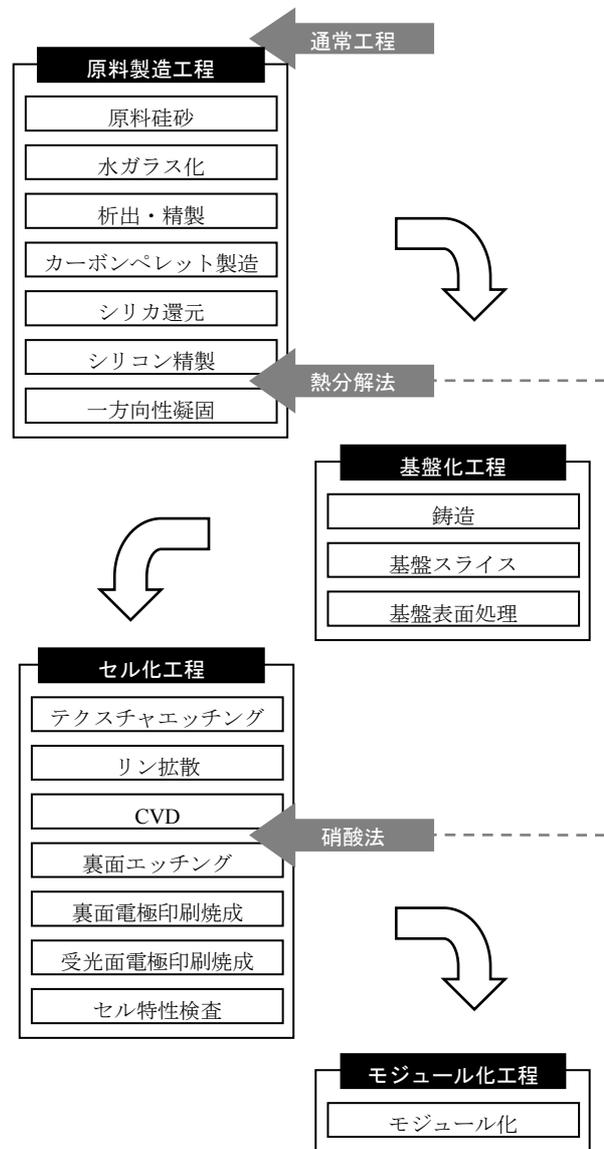


図4 太陽電池製造工程フロー

なお、輸送にかかるエネルギー・コストに関しては、リサイクルせずに廃棄する場合とリサイクルする場合とで共に等しくなるものと考えられるため、本研究では考慮しないものとした。

また、ここでは太陽電池をリサイクルの際の再生率<sup>(2)</sup>については考慮せずに分析を行っている。

(1)エネルギー比較分析

a)通常工程のエネルギー算定

前提条件として発電容量1GWとなるセルを1年間に製造するケースを想定している。各値を表2に示す。また、各工程でかかるエネルギーを表3に示す。以後、全てこの前提条件を満たすものとする。

表2 太陽電池生産前提条件

年間生産規模	1GW/y
年間発電電力量	864,000,000kWh/y
生産面積	7,120,000m <sup>2</sup> /y
モジュール面積	0.82m <sup>2</sup>

表3 太陽電池製造プロセス別エネルギー

製造工程		投入エネルギー量(kWh/W)
原料製造	原料硅砂	3.02E+06
	水ガラス化	7.78E+07
	析出・精製	4.85E+07
	カーボンペレット製造	2.29E+08
	シリカ還元	1.55E+08
	シリコン精製	2.17E+07
	一方向性凝固	3.71E+07
	小計	5.72E+08
基盤化		2.45E+08
セル化	テクスチャエッチング	1.77E+05
	リン拡散	4.42E+05
	CVD	4.42E+05
	裏面エッチング	1.77E+05
	裏面電極印刷焼成	8.41E+05
	受光面電極印刷焼成	8.41E+05
	セル特性検査	2.21E+05
	小計	3.14E+06
モジュール化		3.46E+08
合計		1.17E+09

b)硝酸法を用いたリサイクル工程のエネルギー算定

リサイクルに必要な60%濃硝酸（比重1.41）の生産に必要なエネルギーを算出する。1枚あたりの面積0.82m<sup>2</sup>、生産総面積7,120,000m<sup>2</sup>からリサイクルする枚数が8,682,927枚と求められる。濃硝酸に浸すために、1枚あたりの厚さを0.05mとし1回の工程で処理する枚数を180枚とすると、濃硝酸でのリサイクルに必要なバット（容器）の容量は7.38m<sup>3</sup>となる。濃硝酸は繰り返し5回使用可能なものとし、バットの半分の容量でセルを浸すことができるとすると、全てのセルを濃硝酸で処理するためには35,600m<sup>3</sup>必要となる。濃硝酸の製造原単位としてNaOHを参考に1,200kWh/tとすると、濃硝酸の生産に必要なエネルギーは60,235kWh/yと求められる。なお、本研究ではバット（容器）製造に関わるエネルギーは考慮していない。これにセル化工程：裏面エッチング以降のエネルギーを加算したものを硝酸法を用いたリサイクル工程のエネルギーとして算出する。

c)熱分解法を用いたリサイクル工程のエネルギー算定

上記の硝酸法と同様、一度に180枚投入可能な規模の電気炉を用いることとする。炉の消費電力は110kWであり<sup>6)</sup>、3時間加熱するには330kWhのエネルギーが必要となる。従って総工程に必要なエネルギーは15,918,540kWh/yと求めることができる。なお、本研究では電気炉製造に関わるエネルギーは考慮していない。これに原料製造工程：一方向性凝固以降のエネルギーを加算し、熱分解法を用いたリサイクル工程のエネルギーを算出する。

d)各パターンでのエネルギー比較

通常工程ならびに硝酸法・熱分解法にてリサイクルを行った場合の3パターンについてのエネルギー比較の結果を図5、図6に示す。リサイクルに必要なエネルギーを加算しても通常工程に比べてエネルギーがかからない結果となった。これは原料製造の工程に関して多くのエネルギーが割かれていることを示す結果として妥当であると同時に、リサイクルによって原料製造工程を省くことが消費エネルギーの削減につながることを示している。

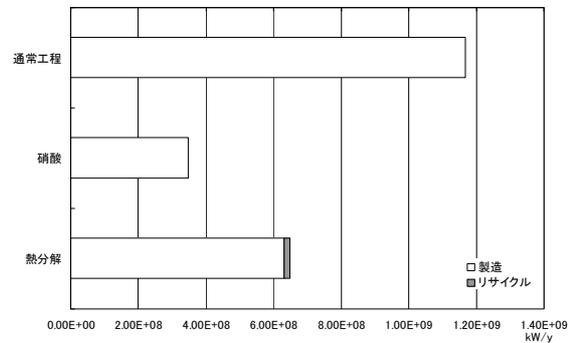


図5 リサイクル手法別エネルギー量

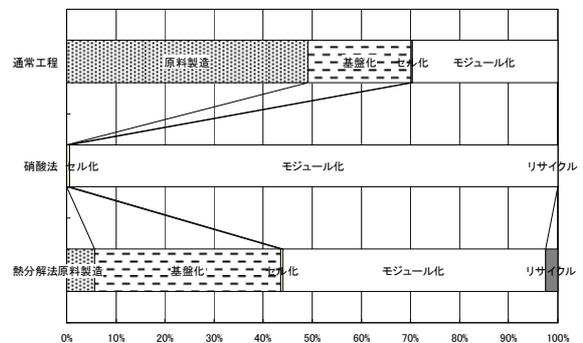


図6 リサイクル手法別エネルギー構成比

次に20年間のエネルギー収支比<sup>7)</sup>を求めたものを表4に示す。エネルギー収支比は、発電システムへの投入エネルギーと産出エネルギーの比を求めたものである。

表4 エネルギー収支比

	エネルギー収支比
通常工程	53.3
熱分解法リサイクル	96.1
硝酸法リサイクル	178.7

(2)CO<sub>2</sub>排出量比較分析

原単位 0.405kg-CO<sub>2</sub>/kWh<sup>8)</sup>を用いて各工程およびリサイクルについて太陽電池製造の際のCO<sub>2</sub>排出量を算出したところ、エネルギー量の分析と同等の結果が得られた。

(3)通常工程のコスト算定

エネルギー比較分析と同様にして通常工程および各リサイクル工程にかかるコストを算定し、その評価を行う。

a)通常工程のコスト算定

参考文献<sup>4)</sup>より通常工程でかかるコストを表5に示す。

表5 太陽電池製造プロセス別コスト

製造工程		製造コスト(¥/W)
原料製造	原料硅砂	4.30E-01
	水ガラス化	1.72E+00
	析出・精製	2.61E+00
	カーボンペレット製造	1.18E+01
	シリカ還元	3.29E+00
	シリコン精製	8.90E-01
	一方向性凝固	1.11E+00
	小計	2.18E+01
基盤化	3.65E+01	
セル化	2.80E+01	
モジュール化	6.90E+01	
<b>合計</b>	<b>1.55E+02</b>	

b)硝酸法を用いたリサイクル工程のコスト算定

必要な濃硝酸は50,196t、濃硝酸の価格を32.6円/kg<sup>9)</sup>とすると、0.0016円/Wと求められる。バット(容器)製造に関わるコストは考慮しないこととした。

c)熱分解法を用いたリサイクル工程のコスト算定

必要な電力エネルギー15,918,540kWh/y、電気代を8円/kWhとし、また電気炉の費用も加算<sup>10)</sup>し、1.82円/Wと求められる。

d)各パターンのコスト比較

(1)(2)を加算したコストの結果を図7、図8に示す。

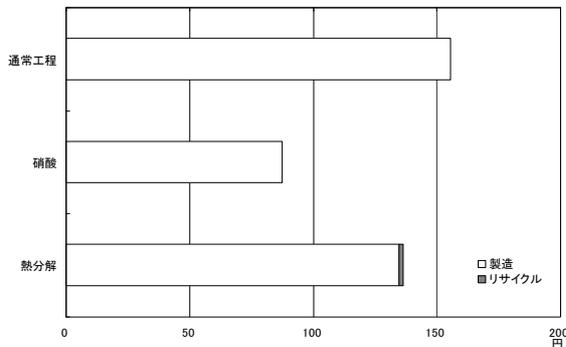


図7 リサイクル手法別コスト

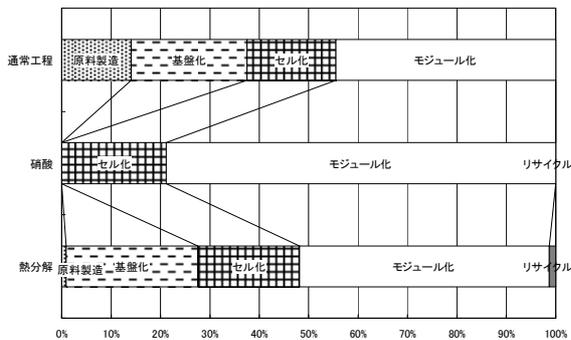


図8 リサイクル手法別コスト構成比

5. 太陽電池のリサイクルに関する将来予測

ここでは太陽電池のリサイクルに関する将来予測を行う。まずはじめに、過去の太陽電池生産量のデータを基に2030年までの太陽電池生産量をロジスティック曲線を描くことで予測する。次に、生産量の予測結果からリサイクルプラントの建設時期を設定する。

そして将来、リサイクル(硝酸法・熱分解法)を行った場合とリサイクルを行わなかった場合(通常工程)とで、太陽電池のワットあたりの投入コスト<sup>3)</sup>(以下、太陽電池コスト)の推移にどのような違いが見られるのかについて、スケール効果を考慮した上で比較を行い、考察を進めていく。なお、2種類のリサイクル方法を複合して利用する場合については考慮しないものとした。

(1)太陽電池生産量の将来予測

まず2001年~2004年までの生産量データ及び2010年、2030年の目標累積生産量のデータ<sup>1)</sup>を用いることで太陽電池の累積生産量に関してロジスティック曲線を描き、2030年までの累積生産量を求める。(下式・図9参照)また太陽電池の寿命を20年と設定し、累積廃棄量の推移についても図9に記す。次に、累積生産量から2030年までの各年の単年生産量を算出する。算出結果は以下の表6の通りである。

$$y = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(-cx)}$$

a=22264000, b=46.14, c=0.21

決定係数: 0.9887

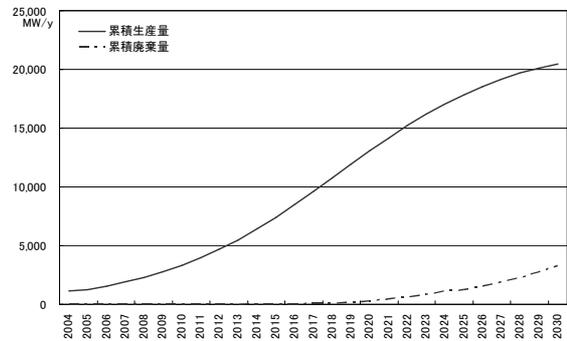


図9 太陽電池の累積生産量及び累積廃棄量推移

表6 太陽電池の単年生産量推移

年	単年生産量(MW)	年	単年生産量(MW)
2005	163.80	2018	1155.21
2006	279.83	2019	1163.11
2007	334.85	2020	1145.84
2008	398.16	2021	1104.85
2009	469.89	2022	1043.49
2010	549.66	2023	966.45
2011	636.35	2024	879.02
2012	727.94	2025	786.40
2013	821.40	2026	693.23
2014	912.65	2027	603.17
2015	996.82	2028	518.89
2016	1068.59	2029	442.04
2017	1122.80	2030	373.45

## (2) リサイクルプラント導入時期の設定

次にリサイクルプラントの導入時期の設定をする。1991年以前の太陽電池の生産量のデータが存在しないため1992年以降のデータを用いることとし、2012年に初めて太陽電池の廃棄が始まることとする。そして、まず2012年に10MWの容量のリサイクルプラントを新設する。なお、廃棄される太陽電池の全てをリサイクルすることとする。そして毎年リサイクルプラントを稼働させ、リサイクルプラントで処理しきれない太陽電池の量がその時点でのリサイクルプラントの容量を超えないように、リサイクルプラントの容量を図10のように上げていくものとした。

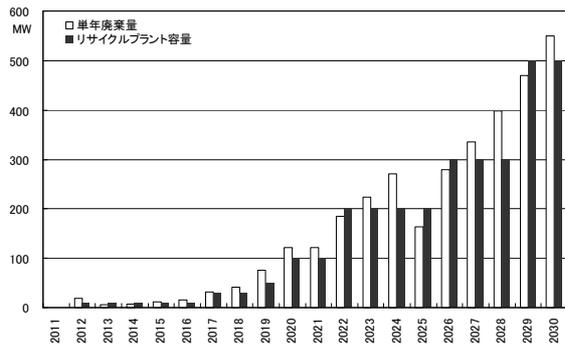


図10 リサイクルプラントの導入時期

## (3) 太陽電池のコスト推移の比較

次にスケール効果について考えていく。スケール効果とは、プラントの容量が大きくなればなるほど太陽電池コストが安くなることをいい、次式で表すことができる。

$$c(p_2) = c(p_1)(p_2/p_1)^{-\alpha}$$

$p_1$ : プラント1の容量

$c(p_1)$ : 容量  $p_1$  の太陽電池コスト

$\alpha$ : スケール係数

前節において10MWと1GW(=1000MW)の容量の製造プラント及びリサイクルプラントにおける太陽電池コストは求めているので、それらからスケール係数を算出する。すると、それぞれのスケール係数は以下の表7の通りになる。

表7 スケール係数

製造方法	$C(P_1)$	$\alpha$
通常工程	337.24	0.17
硝酸法	159.62	0.13
熱分解法	284.14	0.16

そして、リサイクル(硝酸法及び熱分解法)を行った場合と通常工程の場合の3パターンについて、2030年までの各年における太陽電池コストを、上記のスケール係数を用いることで算出する。なお、リサイクルプラントで処理した太陽電池の再生率については、土井らのリサイクル技術の研究報告から<sup>5)</sup>硝酸法・熱分解法ともに75%とした。太陽電池コストの計算結果は次の図11と表8の通りである。

2011年までは廃棄される太陽電池がなく、また生産規模が年々増加していくのに伴い生産効率が上がるため、

太陽電池コストが下がっていくことが分かる。

2012年から太陽電池の廃棄が始まるため、それ以降はリサイクルを行った場合と行わなかった場合とで太陽電池コストに差が出てくる。熱分解法のみを用いた場合は、通常工程の場合に比べて太陽電池コストが上昇してしまうことが図11から見てとれる。これは、熱分解法のリサイクルが経済性の面ではあまり効率的ではないことや再生率の影響によるものと考えられる。また、硝酸法のみを用いた場合では2024年までは通常工程の場合の方がコストは安くすむが、2025年以降ではリサイクルを行った場合の方が安くなるという結果になった。この結果から硝酸法のリサイクルについては経済性の面でも有効なリサイクル手法であるということがいえる。

これらのことから、前節では考慮しなかった生産量と廃棄量及びリサイクル量を考慮してみると、硝酸法リサイクルについてはリサイクルを行わない通常工程と比べてもコスト面で遜色なく、十分実用性があるといえる。

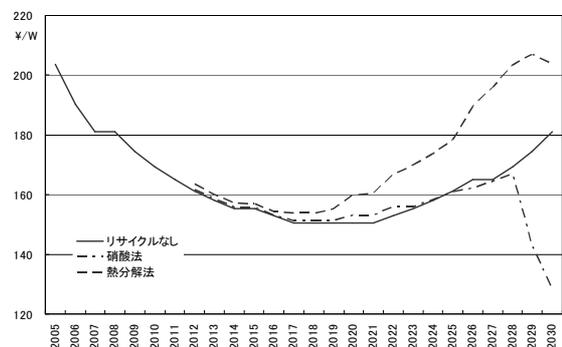


図11 太陽電池コストの推移

表8 太陽電池コストの推移

年	通常工程	硝酸法	熱分解法
2005	203.7		
2006	190.2		
2007	181.2		
2008	181.2		
2009	174.5		
2010	169.3		
2011	164.9		
2012	161.3	161.8	163.5
2013	158.1	158.6	160.1
2014	155.3	155.8	157.2
2015	155.3	155.8	157.0
2016	152.8	153.3	154.4
2017	150.6	151.3	154.0
2018	150.6	151.3	153.9
2019	150.6	151.3	155.2
2020	150.6	153.2	160.0
2021	150.6	153.2	160.3
2022	152.8	156.1	166.8
2023	155.3	155.9	170.0
2024	158.1	158.3	173.9
2025	161.3	160.9	178.3
2026	164.9	162.2	189.4
2027	164.9	164.6	195.8
2028	169.3	167.0	203.3
2029	174.5	143.1	207.0
2030	181.2	128.3	204.0

## 6. まとめ

これまで、太陽電池製造の各プロセスに必要なエネルギー・コストの数値を用い、リサイクル工程を含めた際のエネルギー・CO<sub>2</sub>排出分析、およびコスト分析を行った。エネルギーについてはリサイクルを行うことで相当量を抑制することができることが得られた。また、コストについてもリサイクルをすることでコストを抑えることができるという結果が得られた。

そしてこれらの結果を踏まえ、太陽電池のリサイクルに関する将来予測として2030年までの時期について、生産量の予測を行い、またリサイクルプラントの導入時期と規模について考察を行った上で、将来の太陽電池のコストの推移について見ていった。その結果、硝酸法リサイクルを採用することで、将来的に（2025年以降とかなり先の話になってしまうが）通常工程よりもコストを低減させることができるという結果が得られた。

以上のことから本研究では、各リサイクル技術間の比較、LCA分析、太陽電池コストの将来予測の3つの観点からの分析により、太陽電池のリサイクルシステムのエネルギー・コスト評価ができ、また今後の太陽電池のリサイクルのあり方についての指針を示すことができたといえる。

## 7. 今後の課題

### (1)リサイクルによるシリコン製造量抑制に関する分析

太陽電池をリサイクルすることによってシリコンの製造量を減らすことができる。エネルギー評価や需要予測を考慮した上でシリコン製造量をどの程度抑制できるか分析する必要があると考える。

### (2)実際のな設定での分析

本研究では、太陽電池製造プラントとリサイクルプラントは同一なものとして分析を行った。実際のな結果を求めるためには複数個所のプラントを用意し、輸送コストを加算した分析を行う必要があると考える。

### (3)太陽電池のリサイクル制度についての考察

現在、太陽電池のリサイクルに関する法制度・リサイクルシステムは確立されていない。特定の家電について施行されている家電リサイクル法（特定家庭用機器再商品化法）のような法制度が、今後太陽電池に関しても必要になってくるだろう。今回の分析結果を踏まえ、太陽電池のリサイクル制度のあり方についても考察する必要があると考える。

## 補注

### (1)電力換算和、単純和：

参考文献<sup>4)</sup>ではエネルギー投入量を電気と化石燃料に分けて算出している。化石燃料のエネルギーは換算係数(1Mcal=1.164kWh)を用いて電気のエネルギーに換算している。この係数をかけた化石燃料のエネルギーと電気エネルギーの和を単純和と呼ぶ。一方、化石燃料を使用して発電することと仮定し、化石燃料による発電効率(本研究では0.37)を用いて電気エネルギーに換算し足し合わせたものを電力換算和と呼ぶこととしている。

### (2)再生率：

太陽電池のリサイクル処理後に利用可能な割合を表す。再生率が高いリサイクル技術ほど効率的なリサイクル技術だといえる。

### (3)ワットあたりの投入コスト：

1W製造するのに必要なコストのことをいう。単位は¥/Wで表す。ワットあたりの投入コストが低いほど、経済性に優れていると言える。

### (4)累積生産量、単年生産量（累積廃棄量、単年廃棄量）：

累積生産量とは、その年までの太陽電池の生産量の合計を表す。単年生産量とは、その年単独での太陽電池の生産量を表す。なお、廃棄量に関しても同様である。

## 参考文献

- 1) 太陽光発電協会 (<http://www.jppea.gr.jp/index.html>)
- 2) 山田興一・小宮山宏：太陽光発電工学, 日経BP, 2002
- 3) nikkeibp.jp (<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20060512/117026/>)
- 4) 化学工学会第1種研究会「CO<sub>2</sub>と地球環境問題研究会」：太陽光発電技術の評価Ⅱ, 1999
- 5) 土井卓也ら：結晶系太陽電池リサイクル技術の動向：マテリアルライフ学会, 2005
- 6) モトヤマホームページ (<http://www.motoyama.co.jp/index.htm>)
- 7) 内山洋司：エネルギー工学と社会, 放送大学教育振興会, 2003
- 8) 環境省：温室効果ガス排出量算定に関する検討結果, 2002
- 9) 経済産業調査会：平成17年化学工業統計年報, 2006
- 10) 経済産業調査会：平成17年機械統計年報, 2006