

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

廃棄する前に太陽光パネルは回収リサイクルへ

中條哲夫

1、今回の内容 要約

太陽光パネルはカーボンニュートラルへ向けて増え続けている。種類も第一世代から第三世代まである。寿命は 20-30 年と言われているが廃棄に関してガイドラインはあるだけで再利用が明確ではない。廃棄物処理は出来るが再利用までの工業規模の回収プラントがない。実験室レベルの回収技術は日々進歩している。回収再利用の仕組みが組み込まれて初めて環境に優しい発電設備と言える。

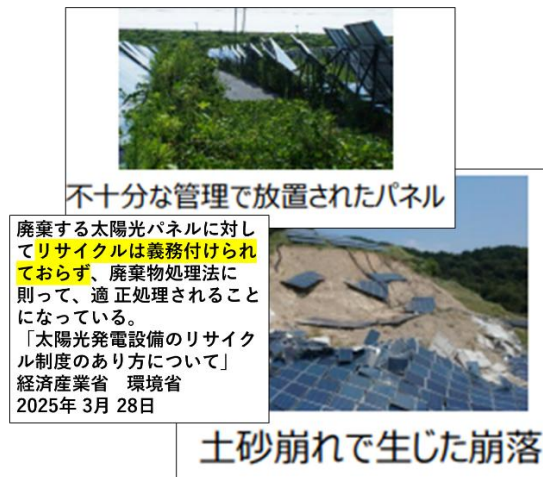


図1 リサイクルは義務付けてない

- (1) 太陽光発電の全体を考える
- (2) ポリシリコンソーラーとして考える
- (3) 回収再利用
- (4) まとめ

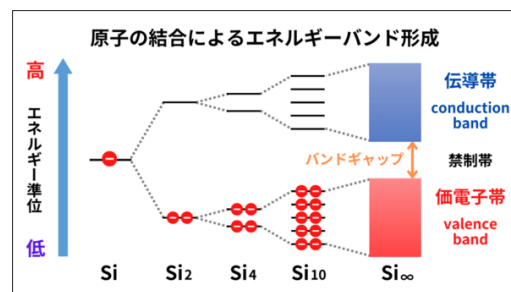
2、詳細

2-1、太陽光発電全体を考える

(1) 太陽光ソーラー

シリコン(Si)を用いたパネルが大部分だが、それ以外にも薄型フィルムの第二世代、ペロブスカイトを含む第三世代がある。

シリコン原子は単独よりも集合してバンド形成した方が安定化する。半導体である。光エネルギーを吸収し電子が伝導帯へ励起しホールと再結合する際に電流が流れる。



<https://semi-journal.jp/basics/beginner/band.html>

図2 シリコン半導体

(2) LCA(ゆりかごから墓場まで)

Life cycle Assessment

LCAの完全な形

製造段階 資源発掘原料 本体製造	使用段階 メンテナンス 運転維持	最終段階 回収再利用 焼却埋立
------------------------	------------------------	-----------------------

図3 LCAの完全な形

図3にはLCAを示した。製造段階は原料となる資源の発掘から始まる。単なる本体製造だけではない。エネルギー視点で表記する場合、発掘時や精錬時のエネルギーも含まれる。海外から調達なら運搬のエネルギーもカウントされる。

(3) 太陽光発電の全体

太陽光発電と言うとソーラーセルやモジュールをイメージする。ところが、モジュールを制御するインバータ(パワーコンディショナー)が必要である。そこで、インバータも含めてLCAを考える事になる。

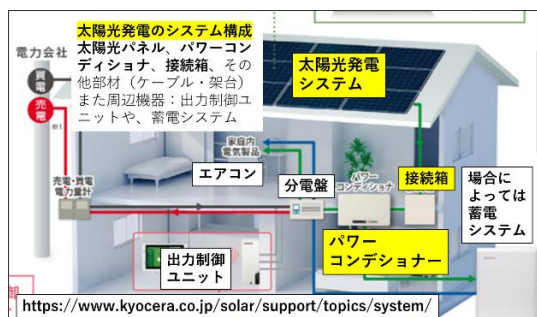


図4 太陽光発電のシステム構成

(4) 太陽光発電全体のLCA

Energies 2023, 16, 8098

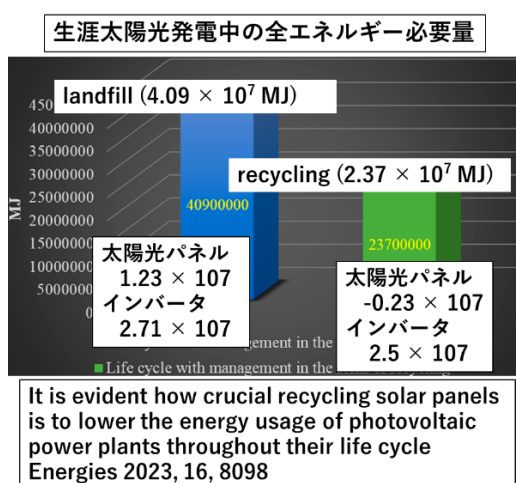


図5 太陽光発電システム全体でのLCA

図5は太陽光発電システム全体LCAを示している。「埋め立て」は、回収再利用しない場合である。それに比べ「Recycle」は廃棄物にせず回収再利用した場合であり、両者を比較している。システム全体をLCAで考えると「インバータ」と「太陽光パネル」の項目が大きな比重を占める。「太陽光パネル」のエネルギー必要量に大きな差があるが「インバータ」には大差ない。

論文では「明らかにリサイクルは、しない場合(埋め立て)よりもエネルギーが少なくてすむ」と主張している。

システム全体をLCA(エネルギー視点)で見るとエネルギーを生み出してはいるが、それを越えるエネルギー履歴を背負っている(インバータ構成の資源発掘とか)。

ここで太陽光セル、モジュール基準で表記と区別したい。次の章で紹介する。

2-2 ポリシリコンソーラー

(1) 製造工程、構成

次にポリシリコンを製造する。インゴットまで成長させる。更にウエハーまで含めると、相当のエネルギーを必要とする。

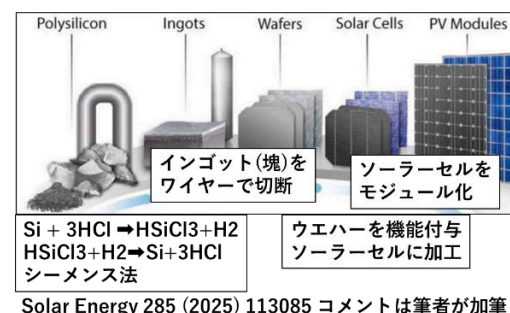


図6 ポリシリコンからモジュール

図6は、純度7N(99.99999%)ポリシリコンからインゴットを作り、細い金属ワイヤーで回転冷却しながら薄いウエハーを何枚も

切り出すプロセスである。ソーラーセルにするには、ウェハーの反り（結晶並びの乱れ、不純物）を取ったり表面粗さを滑らかする様に磨いたり、と多くの工程がある。これは素子としての機能に直結するため、品質管理上極めて重要である。ソーラーパネルは以下の構成である。

(Renewable and Sustainable Energy Reviews 210 (2025) 115205)

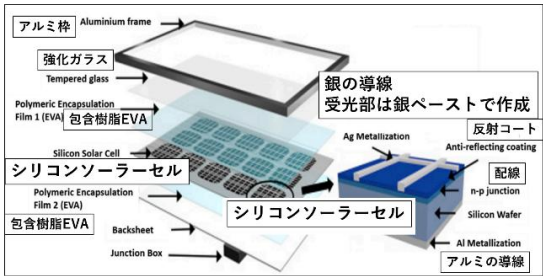


図 7 シリコンソーラーモジュール

(2)LCA で考える為の指標「EPBT」「CED」

(Renewable and Sustainable Energy Reviews 186 (2023) 113652)

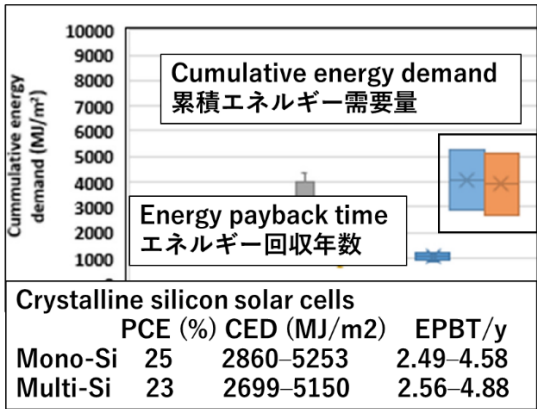


図 8 シリコンソーラーセル LCA 指標

この総説は第 2 世代薄型フィルムに関するものである。比較として汎用シリコンソーラーセルを並べている。結論は、薄型フィルム型では平均 CED で 1069MJ/m2、平均 EPBT1.34y で大幅な優位性を主張している。更に回収再利用も軽減される。

寿命 20-30 年を迎えるシリコンソーラー

パネルを廃棄物から回収資源として再利用技術は日夜進展している。

その前にエネルギーをつくり出す装置として妥当か(原料発掘製造時の消費したエネルギーも含めて、それ以上に新たにエネルギーを生み出している)を見る。EPBT がセル基準ではあるが厳しく見積もっても 5 年であり設備としての妥当性がある。CED は薄型フィルムの 4-5 倍である。セルの厚み、シリコン形態や使用量、作成方法の差と思うが、アモルファスシリコン(a-Si)で成膜したセルは 1054MJ/m² である。粒子の電着で製作するので、ウェハー経由しないことも関係しているのだろう。

2-3、回収再利用の重要さ

寿命を迎えたソーラーパネルが日本だけでなく世界的に増加が予想されている。不法投棄も見られ、環境破壊になるだけでなく貴重な資源のロスである。工業規模プロセスになると経済性も出て来るようだ。インターネット情報では認可された業者が廃棄物回収再利用に関わっているようである。J. Cleaner Production 448 (2024) 141661

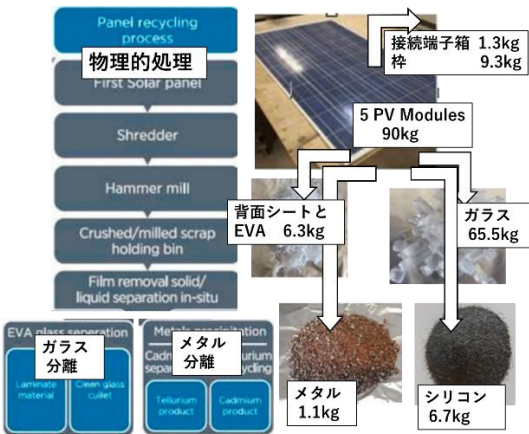


図 9 廃棄パネルから出る資源

1) シリコンや銀など価値が高い回収物が得られる。熱と機械的処理—湿式精錬の方法(ReSiELP)ではなく、図9にあるようなエネルギー、経済性、回収効率重視のプロセスが主流である。物理的処理であるハンマリングなどを使う。

Full Recovery End-of Life PV (FREL P)

2) プロセスはトップの解体(アルミ枠等)、中間の処理(ガラス、メタル、EVA)、底部(バックシート)の処理からなる。半導体物質で95%、ガラスで90%の回収率である。

3) 回収資源を使えば新品を使うより材料費としては安価である。(図10)

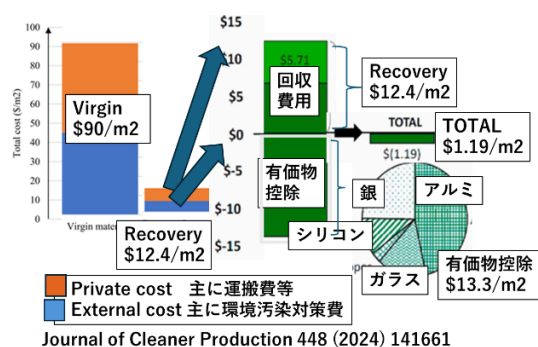


図10 材料費コスト比較/内訳

バージン材料より回収材料でパネルを製作すると1/7の材料費で出来る。これは回収により有価物^①が得られた事による。勿論、分別精製技術により、純度を保って回収率が達成され環境汚染などの対策が実施されている事が前提である。規模が小さいと難しい。

4) 銀の回収はほぼ完全に出来る方法もある。文献では図10の有価物控除(\$13.3/m²)が、銀の回収率向上する事で総額\$16.2/m²と評価している。銀の高い回収率は、Renewable & Sustainable Energy Reviews 210 (2025) 115205 に色々紹介されている。

「解体したパネルを強アルカリ (NaOH, pH13, 0.8h, 90℃) 浸漬し銀グリッドを得る。綺麗にして熱分解(1.5h, 550℃)し、冷却すると金属の銀(純度99.0%)になる。」(一例)。

ここでパネルにある銀はペーストで印刷され(200℃で処理し有機溶媒、ポリマーも活かせる)性能を発揮する。

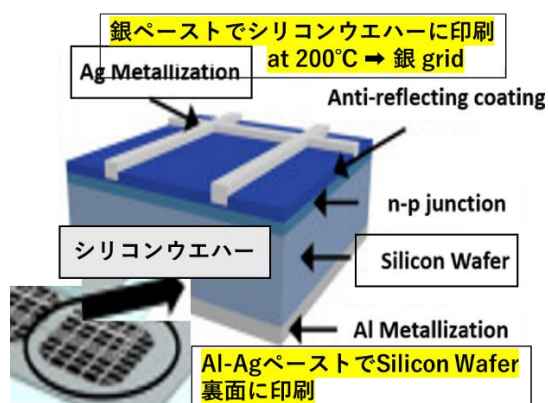


図11 シリコンウェハー上の銀グリッド

上記の補足として銀の役割を二つ示す。ひとつは、受光部として太陽光から電子を受け取ること(細線で効率化)、もう一つは伝導部のシリコンウェハーへ電子を渡すことである。

5) 近年ますます銀の役割が増し需要が多くなっている。パネルに占める存在は小さいが有価物としての占める割合は大きい。

2-5 まとめ

1) 「ソーラーパネルの廃棄は産業物廃棄法に則り行われる。リサイクルは義務付けられていない。」懸念されるのは、有価物になる廃棄物であっても初期投資や市場の不安定性から法律に抵触しない処理を選択してしまうことである。

2) 図10にソーラーセルでの有価物の評価額が市場状況で変わるが、回収費用を上回

るケースがある。銀の回収率はその効果を大きくする。再利用よりも有価物回収に注目されることで廃棄量が増える懸念がある。

3) システム全体で考えると、エネルギー最小化にはリサイクルが必要である。

4) セルだけの発電 LCA なら EPBT で示される通り問題はないが、システム全体で考えると発電する為にエネルギーを消費(インバータのエネルギー履歴が大きい)し発電だけではエネルギーが回収できていない。

り返す必要がある。現在は燃料ではなく環境対策用で一事業所当たりの生産量も数百トン程度である。緊急時には大量に大気放出する。放出前に無害化处理する必要がある。それを考えると近隣には人が住めない。最悪のケースを想定して設備化すると巨額な投資になる。実証実験をしても安全を保障しない。

(日付) 2025 年 8 月 28 日

補足

「太陽光発電は日本には適さない」

何度も取り上げたが、日本では適さない。エネルギー多消費型産業用や大都市用主電源に適さない。家庭用でバックアップ電源も兼ねるなら別である。里村、離島にも有効。

1) 日照時間、日射量は赤道近隣に劣る。

2) 天候依存性である。補完する火力発電が必要で負荷変動運転は設備劣化につながる。

3) 台風、地震の頻度が高く強靱性が求められる。これはコストアップ要因になる。

4) 平地が少なく山間地を選択し多くの問題が発生。土砂崩れや森林機能の損失。

5) 産業立地場所と山間地間の送電ロス。

6) 電力の品質向上(取引価格に反映)には安定供給保障が必須であり、容易ではない。

海外立地も話題になるがエネルギーを何に変換するかの問題がある。(1)水素の場合、液化水素運搬船の実証の例がある。(2)メタノールに変換するには炭素源が必要である。(3)アンモニアは運びやすいが元々燃えにくい。熱量も低い。最大の欠点は毒性で、受入大型タンクの大惨事対処はほぼ不可能。強調すると、燃料液体アンモニアの1000t 級のタンクに運搬船から荷揚げを繰