廃棄太陽光パネルの資源循環

2022/12
アドバンストコース
今村　将基

背景：国の政策の後押しもあり、普及が広がった太陽光発電であるが、一方では電力買取期間の満了、破損等の理由により太陽光パネルの大量廃棄が始まろうとしている。

廃棄ではなく、資源として回収したり、再び市場に流通させることによってこの分野の循環型社会を創りたいと思い、テーマとした。

１．現状の把握（課題認識）

太陽光パネルは２００９年からの余剰電力買取制度、２０１２年の「再生可能エネルギーの固定買取制度（FIT 法)」によって急速に普及が広がった。

固定買取制度の期間も終了し始めたり、自然災害によって使用できなくなったりして廃棄される太陽光パネルが発生してきている。

太陽光パネルの製品寿命は２５～３０年程度とされていて２０４０年頃に使用済み太陽光パネルの大量廃棄が見込まれている。この大量廃棄に伴って、使用済みパネルの放置・不法投棄、有害物質の流出・拡散、そして最終処分場のひっ迫の懸念が高まってきている。

いろいろな組織、団体が排出量の予測をしているが、廃棄の実態調査ならびにいくつかのシナリオ予測の事例を記す。

中部大学 細田教授

「2018 年の時点で日本の太陽光パネルの排出量は 4400 トン。
国の推計ではこのうち 3400 トンがリユース、1000 トンがリサイクルまたは埋め立て処分されているといわれていますが、実態はよく分かっていません。
国の新たな制度では、リサイクルするか埋め立て処分するか事業者が自由に選べるので、多くの業者がリサイクルより費用がかからない埋め立て処分を選ぶ可能性があります。
ただ、**埋め立て処分場の容量には限界があるので、リサイクルが広がらなければ、結局、不法投棄や不正な輸出につながってしまうことが懸念されているのです**」
参照元＊https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220114/k10013430051000.html

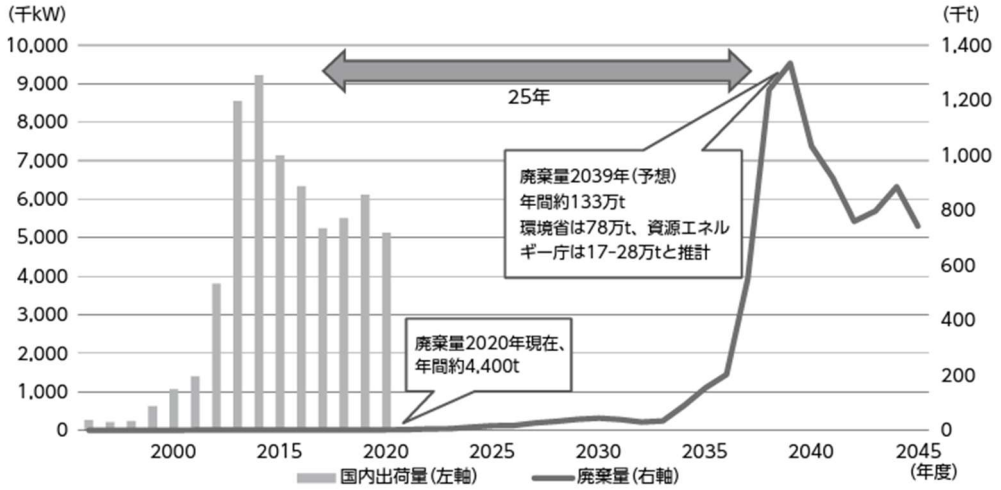
太陽電池モジュールの基礎的動向を把握することを目的として、排出状況調査、地域ごとの処理能力に関する調査、最終処分場の受入れ状況調査、マテリアルフローの作成を行った。

表-1　太陽電池モジュールの排出要因別回収量推移（リユース・リサイクル合算）

排出要因		単位※	合計			
			2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度
①新古品		千枚	62.6	47.4	42.5	1.9
		t	1,251.4	941.9	833.5	38.0
②故障・廃棄品	-1 不良品	千枚	2.1	3.6	8.8	33.6
		t	41.6	70.1	164.2	671.3
	-2 災害等によるもの	千枚	168.5	226.6	217.6	248.3
		t	3,362.0	4,523.7	4,323.0	5,039.8
	-3 目的を終了したもの	千枚	9.9	37.7	51.2	8.1
		t	191.5	738.6	978.6	162.9
	-4 その他・不明	千枚	3.3	38.6	10.0	20.0
		t	66.4	772.1	199.7	395.6
合計　（①＋②）		千枚	246.4	353.9	330.0	311.9
		t	4,912.8	7,046.4	6,499.1	6,307.6

※枚数または重量のみの回答であった場合、太陽電池モジュール１枚あたり 20kg で換算した。

（図表）太陽光パネルの国内出荷量および廃棄量（予想）

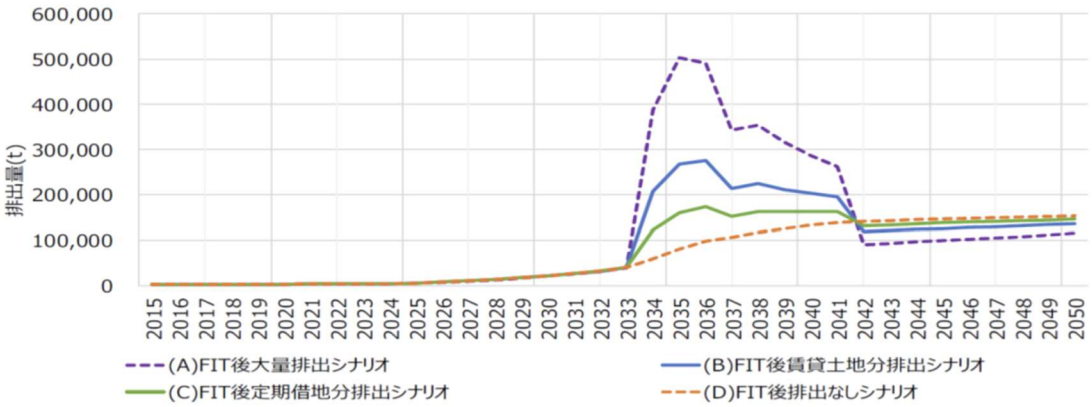


（資料）一般社団法人太陽光発電協会データより筆者作成。
2020年度までの国内出荷量は公表データによる。国内出荷量は出力量（kW）で公表されているため、廃棄量（t）への換算は以下により計算。製品寿命を25年とし、最も多く普及している「多結晶シリコンモジュール」（出力4kW、578.93kg）[3]で換算して算出した。（各年度の廃棄量＝（25年前の）年間国内生産量÷4kW×578.93kg）。2020年現在の廃棄量4,400tは環境省資料[4]を参照。
2039年（予想）環境省78万t、資源エネルギー庁17-28万tは、資源エネルギー庁資料[5]を参照。いずれも各製品をそれぞれの製品寿命より長く継続使用する可能性を加味した前提で計算することで、廃棄量を翌年度以降にずらし、ピークを低くしている。

＊商工中金　2021 年 9 月号　「太陽光発電の推進と太陽光パネル廃棄の課題」p70

NEDO による予測

	排出見込量 (B)、(C)	2015年度の産業廃棄物の最終処分量に占める割合
2020	約0.3万トン	0.03%
2025	約0.6万トン	0.06%
2030	約2.2トン	0.2%
2036	約17~28万トン	1.7~2.7%



太陽光パネルのシナリオ別排出量推計（出所：NEDO）

再度、太陽光パネルの大量廃棄が始まるとどのような問題が起こってくるのか、について確認する。

① 不法投棄、放置の問題
② 有害物質の適正処理に関する問題　（鉛、カドニウム、ヒ素、セレン等）
③ 管理型最終処分場の枯渇を早めてしまう
④ 資源の再利用の観点からの問題

2. 20 年後に向けた提案の概要

リユース、リサイクルの推進を積極的に行い、

① 資源の有効活用
② エネルギーの抑制
③ 有害物質の管理
④ 最終処分量の削減　を行う。

具体的には、リユース：環境省のガイドラインに準じたリユース市場の形成

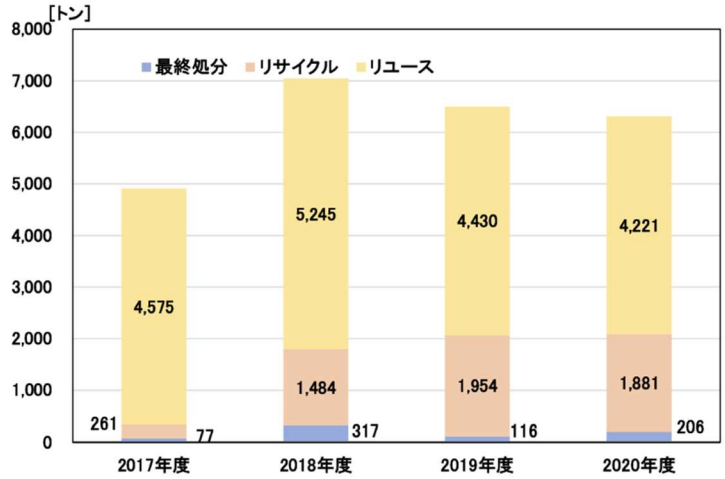
と　　リサイクル：　金属、ガラス、そしてシリコンのリサイクル

これらの問題の解決のために２つの提案を挙げたい。

・リサイクルについて　（Si も含めたマテリアルリサイクル）

・リユースについて

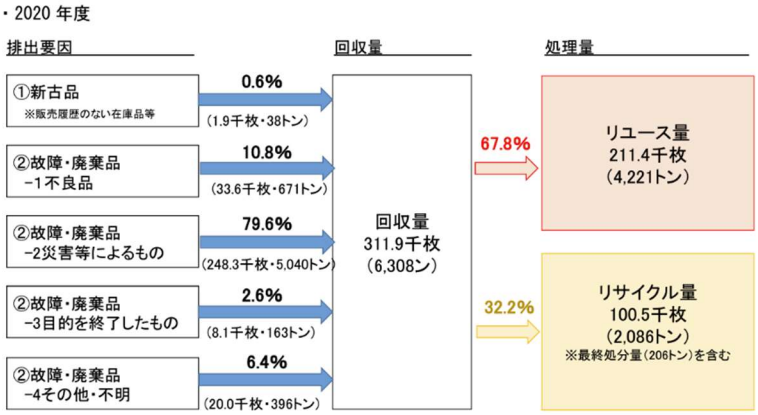
まず、太陽光パネルのリユース・リサイクル量推移は以下の通りである。



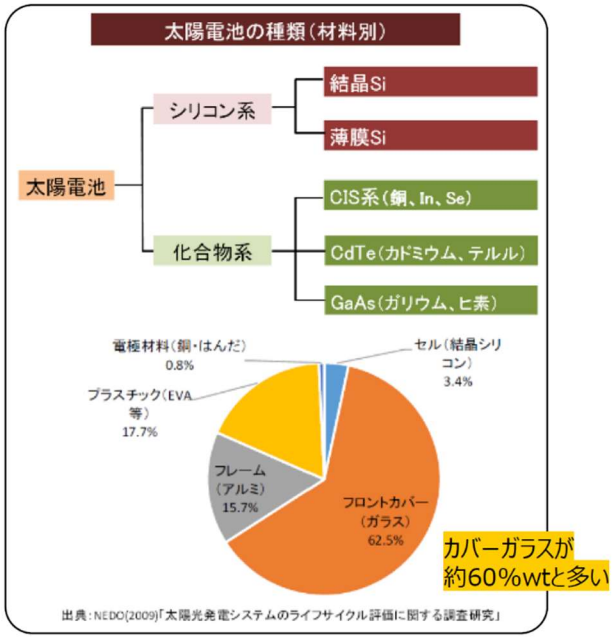
処理方法	単位（※）	2017 年度 数量	2018 年度 数量	2019 年度 数量	2020 年度 数量
リユース	千枚	229.1	263.5	225.9	211.4
	t	4,575.1	5,244.9	4,429.7	4,221.3
リサイクル	千枚	17.3	90.5	104.1	100.5
	t	337.7	1,801.4	2,069.4	2,086.3
うち最終処分	t	76.7	317.4	115.5	205.7
合計	千枚	246.4	353.9	330.0	311.9
	t	4,912.8	7,046.4	6,499.1	6,307.6

※数量、重量のみの場合、太陽電池モジュール１枚の重量を 20kg として換算

そして、2020 年度の太陽光パネルの処理実態は以下のとおりである。



そして、材料別の構成比は下図のとおりである。



上記のデータをふまえて
提案１　として　リサイクル　の推進を金属、ガラス、ケイ素（シリコン）についてさらに進めたい。

３．提案１　Si も含めたマテリアルリサイクル

太陽光パネルの重量構成をみると、ガラスが約６０％、アルミが約１６％、プラスチック（EVA 含む）　が約１８％、銅、はんだ等の電極材料が１％未満、結晶シリコンが約３．５％となっている。

ガラス

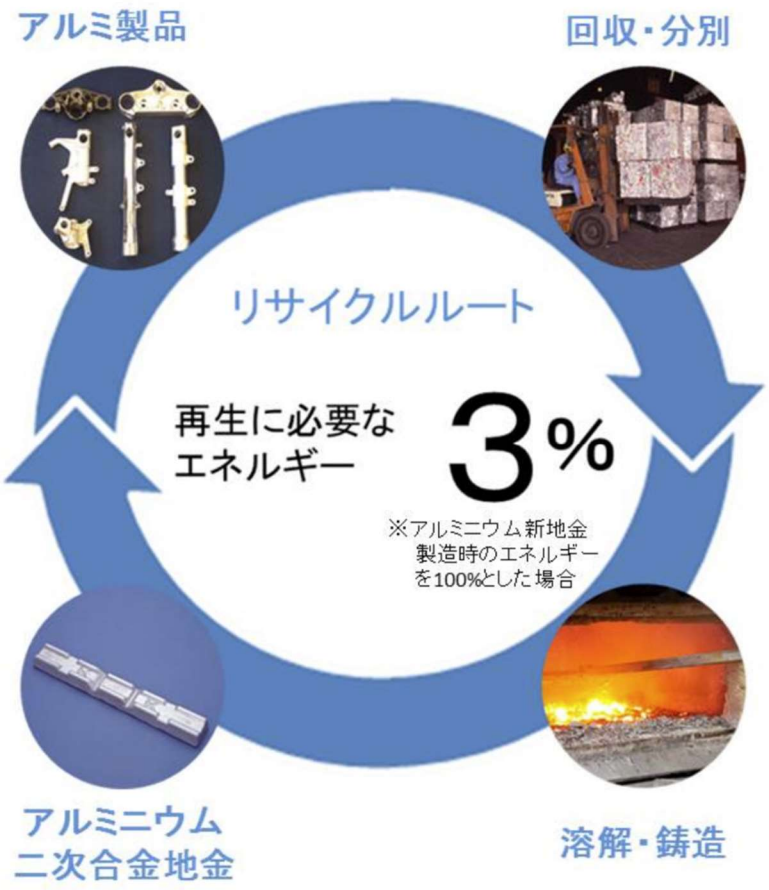
現在、ガラス部分をパネルから切り離し回収したり、小さな鉄の玉を吹き当ててガラスを剥離したりする技術が確立されてきた。このガラスを原料として断熱材としてのグラスウールの製造に使うことが出来るものと思われる。また、建設・農業機械などエンジンの吸音材、断熱材としてリサイクルも可能であるだろう。ガラス繊維の特性、燃えない、吸音性、熱に強い、を活かしたモノの原料としてマテリアルリサイクルが推進されると思慮する。

具体的な利用方法：グラスウールの原料、発泡ガラスの原料として

アルミニウム

アルミニウムなどの軽金属は「リサイクルの優等生」と言われるほどリサイクルの流れが確立している。アルミニウム新地金製造時に必要なエネルギーを１００とするとリサイクルによって出来る二次合金地金は３％ほどのエネルギーが必要となる。

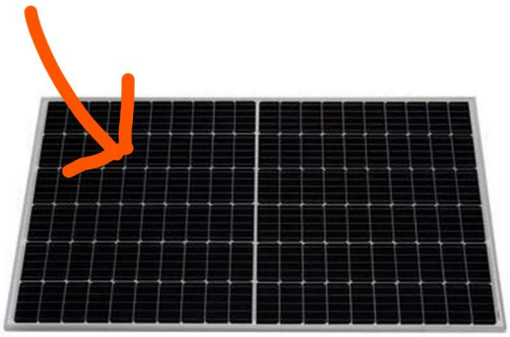
このリサイクルによってエネルギーの節約と資源の有効活用が出来、サーキュラーエコノミーに繋がる。



シリコン

シリコンについては現在２０２２年の時点では、リサイクルは行われていない。

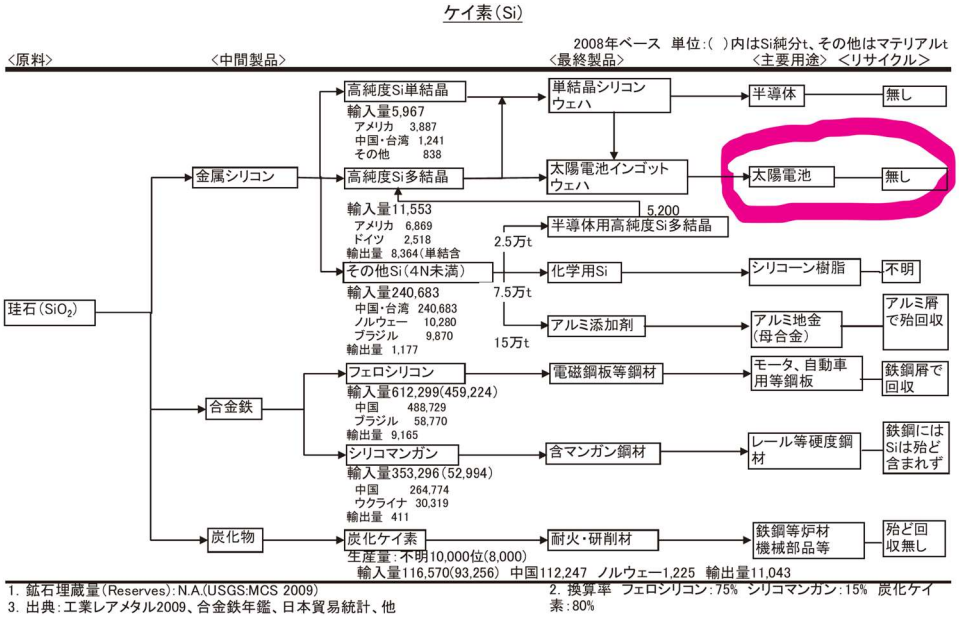
下図に示すように、太陽光パネルの黒色部分がシリコンである。

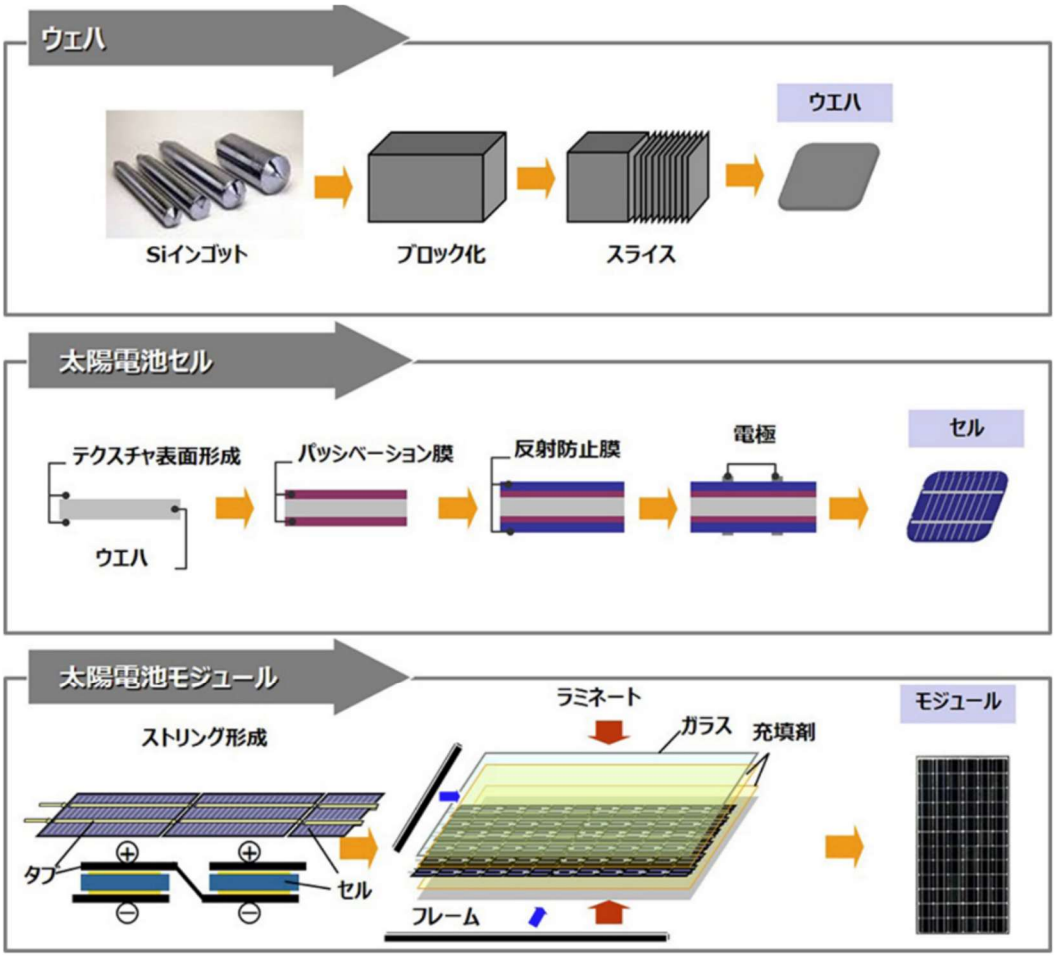


シリコンの原材料は珪石（SiO2）であり、地球表層部に最も多く存在する酸素についで２番目に多いとされる。しかし、工業用金属シリコンの原料になる良質の珪石は限定された地域でのみ採掘されている。金属シリコンの製造工程は珪石を電気炉で精錬して行われる。中国では主に、石炭火力からの発電によって多結晶シリコン、インゴット、ウェハーの製造を行っている。特に新疆と江蘇省では政府関税の優遇策もあり、製造が盛んである。日本では珪石からの精錬は行われておらず中間製品は全て輸入に頼っている。

世界的に見ると、２０２５年まで太陽光パネルの製造については、ほぼすべてを中国頼みになる模様である。多結晶シリコン、インゴット、ウェハーの製造の約９５パーセントが中国一国の生産で賄われている。

The IEA, “Special Report on Solar PV Global Supply Chains” p.8





<図２>太陽電池モジュールの製造プロセス　（提供：パナソニック株式会社）

このような状況から、太陽光パネルからのシリコンのリサイクルを行い、ソーラーグレードシリコンの製造が出来れば、輸入に頼るばかりでなく、資源の有効活用という面からも意義のあるものとなる。

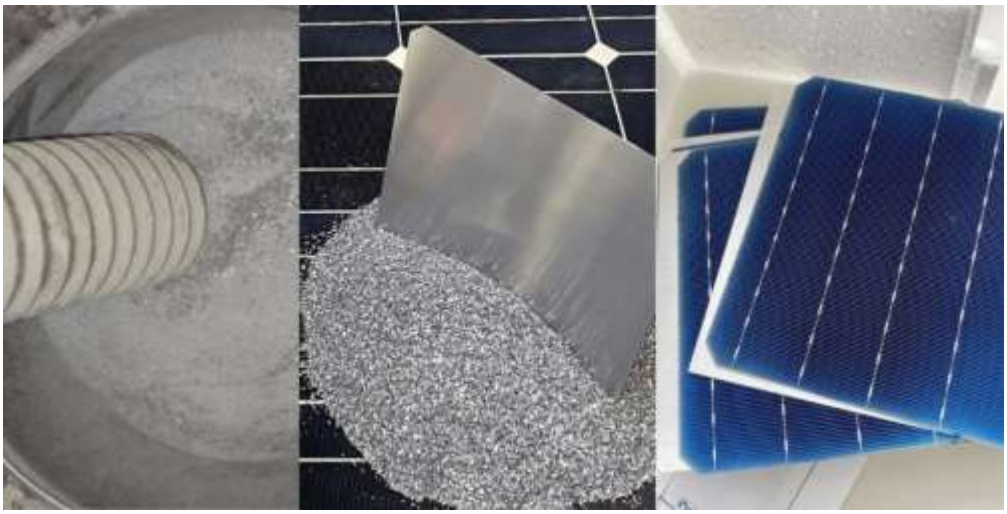
ドイツの研究所 Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics（CSP）と同 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems（ISE） は 2022 年 2 月、共同でシリコン（Si）系太陽光パネルの Si をリサイクルし、それを基に最新の PERC（Passivated Emitter and Rear Cell）型太陽電池セルを作製したと発表した。これまで難しいと考えられていた Si のリサイクルが軌道に乗れば、太陽光パネルを構成するほとんどの材料の再資源化が実現する。

これまで太陽光パネルのリサイクルは、ガラスやアルミニウム（Al）フレームを再資源化するぐらいで、Si の再資源化は技術的に難しかった。太陽電池セルには、集電用の配線や電極、保護用の樹脂シートなどが密着しており、それらを分離することが容易でなかったからだ。さらにセルは、p 型の Si 基板と「エミッター」と呼ばれる n 型の Si 薄膜から成る。これを分離しなければ、Si を n 型半導体にするリン（P）と p 型半導体にするホウ

素（B）が混ざりあってしまい、そこから新たな太陽電池を造ることは難しい。

今回、CSP と ISE、そして主にガラスのリサイクル事業の老舗で、太陽光パネルのリサイクルも始めているドイツ Reiling は、ドイツ連邦経済気候保護省（BMWK）の支援を受けて、太陽光パネルの Si のリサイクル技術を開発したとする。

（日経　XTECH、2022/2/28）



今回のプロセス中の 3 状態

左から、セルを破砕した後の状態、不純物を除去した Si の細粒とそれで作製した Si 基板、その基板で作製した変換効率 19.7%の PERC 型セル

結晶シリコンを製造するために全くの原材料から製造した場合と太陽光パネルのリサイクルから製造した場合の投入エネルギーの比較については下図に示す。

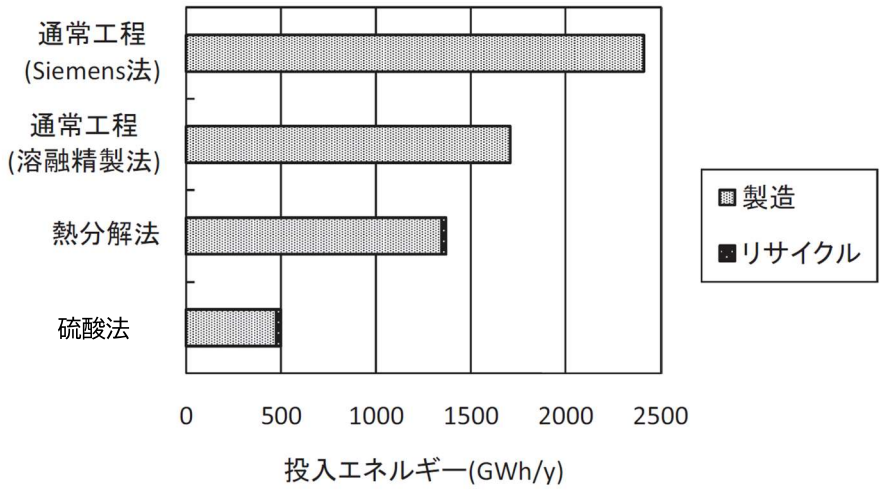


図4　再処理方法別投入エネルギー比較

熱分解法と硫酸法がリサイクルを用いた製造方法である。このことから通常の製造方法と

比較して投入エネルギーが 1/２、あるいは１/５ほどであると理解できる。
　同様に製造過程における CO2 の排出量については下図が示すように、通常工程よりもリサイクルを取り入れた製造方法の排出量は少ない。

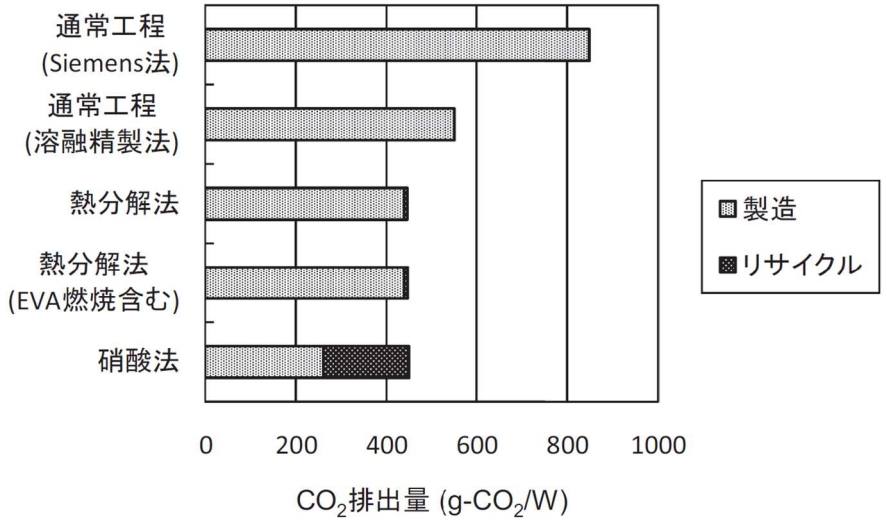


図６　再処理方法別CO_2排出量比較

出典：Journal of Life Cycle Assessment, Japan, Vol.5 No.4 October,2009
　　「リサイクル技術を考慮した太陽電池ライフサイクル評価」岡島敬一、内山洋司

リユースについて

太陽光パネルのリユースについては環境省が令和３年５月に公開した「太陽光電池モジュールの適切なリユース促進ガイドライン」を基本として中古市場をつくる事をめざす。そのためにはリユース製品の信頼度を担保し、透明性の高いセカンドマーケットが醸成されるように業界団体、あるいは第三者機関を設けて中古製品の性能規格（ランク分け）をつくる。見えないものは見える化して、消費者が信頼できるようにする。
そして、発電性能に係るテスト、I-V（電流電圧）曲線測定や EL（エレクトロルミナンス）検査、付け加えて漏電検査を行い、その結果を踏まえてランク付けを行う。

　波及効果として
マテリアルリサイクルやリユースを推進する事によって以下の波及効果が起こると想像される。

1. 資源を鉱山から採掘し、精錬するのではなく既に国内にある都市鉱山を活用する事が環境負荷、エネルギー使用量の削減、ひいては CO2 排出量の削減につながる。

2. 天然資源のない日本においては「廃棄」ではなく「資源化」のテクノロジーの開発がより大きな意味を持つ。そして、この技術の発展は国力の向上に寄与する。

まとめとして

- CO2 を排出しない「再生可能エネルギー」太陽光発電であるが、時間の経過に伴ってその太陽光パネル自体が大量廃棄される事になってしまう、という課題が生じている。
- しかし、廃棄物への対処の基本であるリユース、リサイクルを技術の進歩とともに進めていく事で課題の解決につながる可能性が増えていく。
- その技術は社会において大きな意味をもたらす。

以上