

令和3年度環境省委託業務

令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期
社会実装化に向けた実証事業
(太陽光パネルの高度選別技術開発とリサイクル・
システム構築による早期事業化)
委託業務

成果報告書

令和4年3月

株式会社新菱

要旨

本事業では、使用済み太陽光パネルのリサイクルを促進することを目的に、廃棄された太陽光パネルを処理し、素材毎に回収する高度選別技術の開発を行った。高度選別により得られた素材は、ガラスはグラスウールメーカーでの実窯試作評価を行い、銅線やシリコンセル（銀線付）は精錬会社で含有量分析を行い素材原料として購入可否を含め価値評価を行った。なお、本事業は令和2年度から令和3年度の2か年実施した。

カバーガラスが割れた状態の使用済み太陽光パネルを対象に、平成29年度環境省委託事業において当社で実施した「平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」の報告書に記載の炉を用いてEVA等有機物を熱分解し、残存成分であるガラス、銅線及びシリコンセルの混合物を、素材毎に高度に選別する技術開発を行った。令和2年度の事業では、選別ガラスを重量比99.999%の品位で得ることが可能になり、グラスウールメーカーでの実窯試作で運転管理上及び製品の品質面においても既存品と同等で良好なサンプルを得ることが出来た。一方で、ガラスカレット中に少量含まれる微細なシリコンセルやんだボール等は、長期的な視点での運転面や品質面への影響を否定することが出来ず、グラスウールメーカーからは更なる異物混入量の低減を求められた。また、型板ガラスや板ガラスメーカーはグラスウールメーカーに比べ更に異物混入量の少ないガラス品位を求められていることから、本年度の事業では、更なるガラスの高度選別技術開発を行った。その結果、令和2年度に比べ更に異物量が少ない選別ガラスカレットを得ることができ、板ガラスメーカーでの評価が出来る品質目標を達成することが出来た。

ガラスの評価を行うにあたり、令和2年度に引き続きカバーガラスの組成のばらつきを、令和2年度と別の型番の太陽光パネルを28種類入手し、蛍光X線分析装置を用い測定を行った。令和2年度と同様に、SiO₂、Na₂O及びCaOが主な主要成分であり、その他成分としてガラスの透過性向上の目的で添加されている消泡剤Sb₂O₃は平均0.19%含有しており、令和2年度の結果（平均0.21%）と比べ大きな差は無かった。

高度選別で得られたガラスカレットは、ガラス繊維協会の会員企業である旭ファイバーグラス株式会社で、今回得られた高度選別ガラスカレットを全原料に対し10%添加した条件で実機試作を行った。試作試験の結果、生産及び品質に問題なく製造することが出来た。

銅線及びシリコンセルに含まれる銅及び銀濃度については精錬会社で測定を行った。その結果、銅線に含まれる銅濃度は85～89%、銀濃度は4,700～11,000mg/kgで、シリコンセルに含まれる銀濃度は、5,480～11,800mg/kgであり、銀濃度には太陽光パネルによって約2倍の差があることが確認できた。

本年度はガラスへの異物混入量の低減を目的に選別条件を設定したため、選別で得られた銅及び銀の品位は令和2年度に比べ低下する結果となった。この解決手法としては、再選別工程の運用及び運転条件の最適化により対応可能と考えている。

環境改善効果の評価は、CO₂削減量で評価した。評価の結果、現在行われている路盤材への利用と比較し、パネル1枚当たり 21.81kg-CO₂ の削減効果があることが確認できた。更に、本システムでは選別したガラスをガラス原料として使用することができ、水平リサイクルが可能であることも、マテリアルリサイクルの観点では大変重要である。

廃棄された太陽光パネルは産業廃棄物としての処理にはなるが、本システムでは選別回収物が有価物となる可能性が確認でき、産業廃棄物処理費のコスト低減にも繋がるシステムであると考えられる。

Summary

In this program, Shinryo developed advanced sorting technology for processing discarded solar panels and recovering their constituent materials in order to promote recycling of used solar panels. The glass yielded by this advanced sorting process was evaluated by a glass wool manufacturer, while the copper wire and silicon cells (with silver wire) were evaluated by a refining company. The program was implemented over the course of two years, from FY2020 to FY2021.

In FY2017, we carried out a program under contract to the Ministry of the Environment that involved processing used solar panels whose cover glass was cracked. Using the furnace described in the “Report on Early Commercialization through Combined Use of Carbon Fiber and Solar Cell Recycling Equipment” generated as part of the 2017 3R Structure Development Support Program for the Adoption of Low-carbon Products, which the Ministry of the Environment commissioned Shinryo to carry out in FY2017, we developed technologies to break down EVA and other organic materials using heat and sort the material that remains—a mixture of glass, copper wire, and silicon cells—into its constituent substances in an advanced manner. In the FY2020 program, sorted glass reached 99.999% quality, and we succeeded in obtaining samples whose quality was on par with existing products from the perspective of both operational management and product quality during a trial using an actual furnace operated by a glass wool manufacturer. Reflecting the fact that the long-term impact on operations and quality of trace amounts of silicon cells, solder balls, and other materials in glass cullet cannot be denied, the glass wool manufacturer sought quality improvements. In addition, the program developed sorting technologies for glass at even higher levels of purity since figured glass and plate glass manufacturers require glass of higher purity than glass wool manufacturers. As a result, we achieved our goal by successfully obtaining sorted glass cullet with fewer impurities than in FY2020.

To evaluate glass quality, we then built on the FY2020 program by obtaining 28 types of solar panels of different models that were used in FY2020 and measuring variations in cover glass composition using an X-ray fluorescence spectrometer. As in FY2020, the principal components were SiO₂, Na₂O, and CaO, while other components included average content of 0.19% Sb₂O₃ as an antifoaming agent, which is added to improve the transmissivity of the glass. This result did not differ substantially from our findings in FY2020 (average of 0.21%).

Asahi Fiber Glass Co., Ltd., a member corporation of the Glass Fiber Association, conducted a trial using actual production equipment in which advanced sorted glass cullet from the program was added as 10% of total raw materials. Trial testing found no issues with either production or quality.

The concentrations of copper and silver contained in copper wire and silicon cells were measured by a refining company, with the following results: concentrations of copper and silver in copper wire were 85% to 89% and 4,700 to 11,000 mg/kg, respectively, while the concentration of silver in silicon cells was 5,480 to 11,800 mg/kg. Silver concentration exhibited a difference of about 200%.

Reflecting adoption of sorting conditions conceived to increase glass quality, the quality of copper and silver obtained this year from the sorting process decreased compared to FY2020. We're planning to resolve this issue by implementing an additional sorting process and optimizing operating conditions.

Environmental improvement benefits were evaluated in terms of the technologies' contribution to CO2 reductions. Compared to the current use of these materials as a roadbed material, the evaluation found a reduction of 21.81 kg-CO2 per panel. Furthermore, the fact that the system facilitates horizontal recycling by allowing sorted glass to be used as a raw material for glass is extremely important from a material recycling standpoint.

Where discarded solar panels would otherwise be processed as industrial waste, this system has the potential to help reduce waste processing costs by allowing materials to be sorted, recovered, and sold as a valuable resource.

目次

1. 背景及び目的.....	- 1 -
2. 令和2年度の実証事業の概要.....	- 9 -
2.1. 使用済み太陽光パネルの前処理.....	- 9 -
2.1.1. 熱分解炉運転条件検討.....	- 9 -
2.2. 選別処理試験結果.....	- 11 -
2.2.1. 選別フロー.....	- 11 -
2.2.2. 選別回収物のマスバランス及び組成.....	- 14 -
2.2.3. PVガラスカレット濃縮物中の異物.....	- 15 -
2.3. 令和2年度事業のまとめ.....	- 16 -
3. 令和3年度事業の概要.....	- 18 -
3.1. 実施項目.....	- 18 -
4. 実証事業の結果.....	- 20 -
4.1. 割れた使用済み太陽光パネルからの高純度ガラス製造に関する研究.....	- 20 -
4.1.1. 本章の目的.....	- 20 -
4.1.2. 装置・操作.....	- 20 -
4.1.3. 実験結果.....	- 34 -
4.1.4. 風力選別におけるガラス・シリコンセル選別挙動.....	- 43 -
4.1.5. エアテーブル選別におけるガラス粒子充填層中のシリコンセル粒子の浮上機構 - 47 -	
4.1.6. まとめ.....	- 59 -
4.2. 選別処理の連続試験.....	- 61 -
4.2.1. 選別処理フロー.....	- 61 -
4.2.2. 振動篩選別の改良.....	- 64 -
4.2.3. エアテーブルの改良によるガラス品位向上の検討.....	- 64 -
4.2.4. 選別回収物のマスバランス及び組成.....	- 67 -
4.2.5. 課題と改良の提案.....	- 68 -
4.3. カバーガラスの組成調査.....	- 69 -
4.3.1. 入手した太陽光パネルの情報.....	- 69 -
4.3.2. 分析試料の調整.....	- 69 -
4.3.3. 分析方法.....	- 69 -
4.3.4. 分析結果.....	- 69 -
4.4. グラスウール試作検討.....	- 76 -
4.4.1. 実炉でのガラスサンプル評価に関する検討.....	- 76 -
4.4.2. 型板ガラス及び板ガラスへの使用検討.....	- 85 -

4.5.	金属リサイクルの検討.....	- 86 -
4.5.1.	銅線及びシリコンセルの組成分析.....	- 86 -
4.5.2.	まとめ.....	- 90 -
4.5.3.	今後の課題.....	- 90 -
4.6.	環境改善効果の評価.....	- 91 -
4.6.1.	目的.....	- 91 -
4.6.2.	評価前提.....	- 91 -
4.6.3.	評価項目.....	- 93 -
4.6.4.	データソース.....	- 93 -
4.6.5.	LCA 結果.....	- 98 -
4.6.6.	まとめ.....	- 100 -
5.	出口戦略の検討.....	- 101 -
6.	令和3年度事業のまとめ.....	- 102 -

1. 背景及び目的

太陽光パネルは、2009年の太陽光発電余剰電力の固定価格買取制度開始を契機とした導入拡大に伴い、将来的な廃棄量の増加が見込まれている。太陽光パネルの製品寿命は20～30年とされており、廃棄量は2030年頃から増加し、ピーク時の2035～37年には、年間17～28万トン排出され、産業廃棄物の最終処分量の1.7～2.7%に相当すると見込まれている。また、2050年のカーボンニュートラルに向けた取り組みとして、今後太陽光パネルの設置が拡大することが予想され、使用済み太陽光パネルのリサイクルはこれまで以上に重要になる。

(図1.1 出典：環境省「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン（第一版）」平成28年3月、<https://www.env.go.jp/press/files/jp/102441.pdf>、)

(図1.2 出典：資源エネルギー庁「太陽光発電設備の廃棄対策について」2018年11月21日、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/010_03_00.pdf)

(図1.3 出典：環境省 脱炭素ポータル 「カーボンニュートラルとは」
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/)

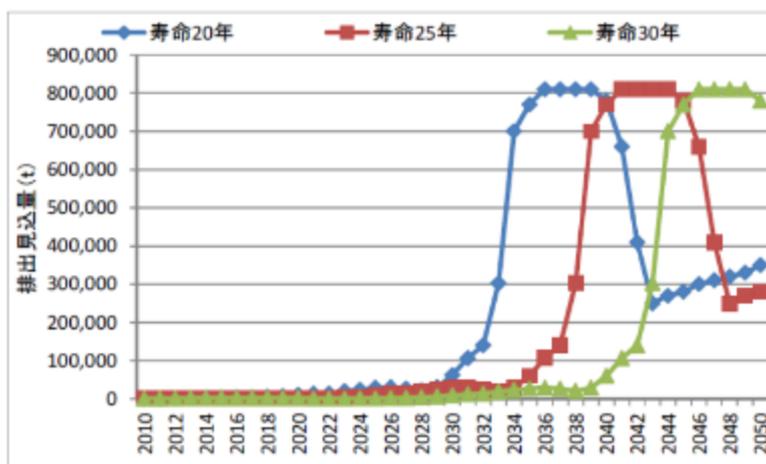


図1.1 廃棄太陽光パネルの発生量見込み

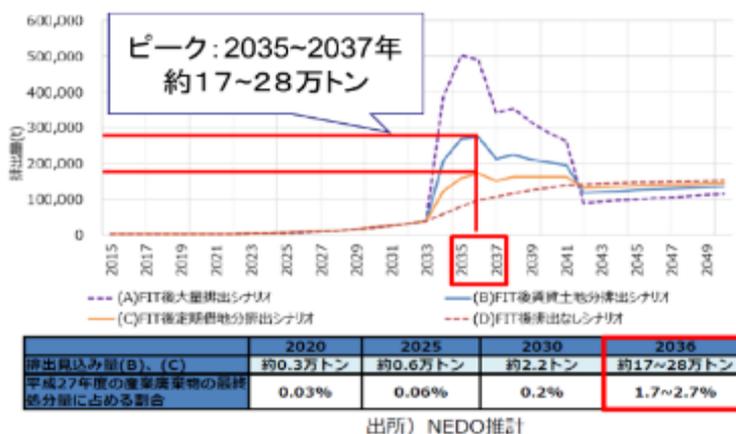


図 1.2 使用済み太陽光パネルの発生量見込み

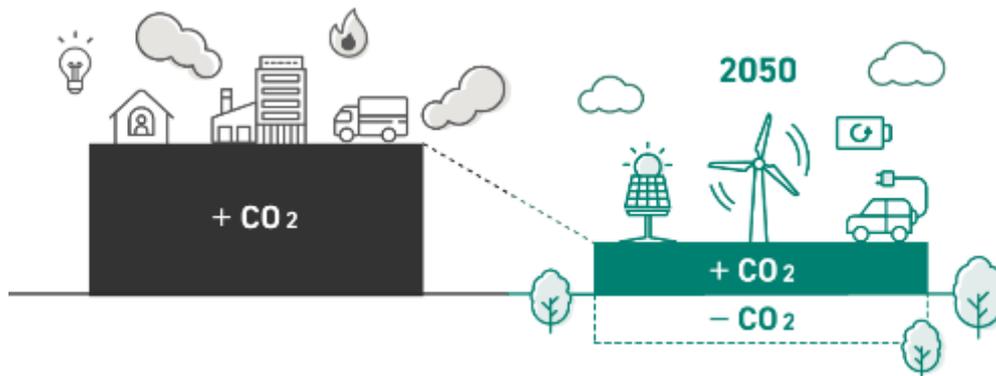


図1.3 カーボンニュートラルイメージ

当社はこれまでに、大量廃棄が見込まれる太陽光パネルのリサイクル技術開発を、NEDO事業及び環境省事業で実施してきている。

NEDO事業では、2010～2014年（「太陽エネルギー技術研究開発／太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」／事業名：広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発）と、2015～2017年（「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト／低コスト分解処理技術実証」／事業名：PVシステム低コスト汎用リサイクル処理手法に関する研究開発）において、太陽光パネルを構成しているアルミ枠を取り外した後、カバーガラス、シリコンセル（またはセルと言う）、バックシート等を接着固定しているエチレンビニルアセテート樹脂（以下、EVA樹脂）を熱分解除去することを特徴とするリサイクル技術を開発している。

この技術は、太陽光パネルのカバーガラスが割れていない板状ガラスにしか対応できないが、板状ガラスは、熱処理後手選別により、金属とガラスとを効率よく分別回収することができ、特に、ガラスは高純度リサイクルガラスとして回収することができる。更に、2017年に、環境省平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業（事業名：炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化）において、太陽光パネルとカーボンファイバーのリサイクルができる共用炉を開発している。この事業において、これまでは処理できなかったカバーガラスが割れた太陽光パネルのEVA樹脂熱分解除去技術を開発している。しかし、熱処理後それぞれの構成材が細かく割れ混合した残渣状となり、従来の選別方法では有価物（銅線、シリコンセル（銀）及びガラス）を成分ごとに回収することができず、これに対応する高度破碎・選別技術開発が課題となっている。

本事業の目的は、カバーガラスが割れた太陽光パネルの熱処理後、それぞれの構成材の選別技術を確立すること、また選別回収物の金属とガラスがそれぞれリサイクル可能かを検討し、リサイクル事業を早期実現することである。

1) -1 太陽光パネルの種類と構成

太陽光発電設備は、太陽電池モジュール・アレイ、接続箱、パワーコンディショナー等から構成される。太陽電池の最小単位である太陽電池シリコンセルを複数接続し、所定の出力が得られるようなしたものを太陽電池モジュールと呼ぶ。さらに、電圧を高めるために太陽電池モジュールを複数枚直列に接続したものを太陽電池ストリング、さらに並列に接続したものを太陽電池アレイと呼ぶ。また、太陽電池モジュールからアルミフレームを外したものを太陽光パネルという。

太陽光を受光し、電力に変換する素子は「シリコンセル」と呼ばれ、単結晶 Si、多結晶 Si、アモルファス Si、化合物系、色素系に大別できる。最も汎用的なのは結晶 Si 系の太陽光パネルであり、多結晶 Si シリコンセルの受光面を図 1.4 に、結晶 Si 系の太陽光パネルの主要部分の構成例を図 1.5、図 1.6 に示した。シリコンセルで発電された電流は「グリッド線」と呼ばれる表面に張り巡らされた細い線を通る。この細い金属線は熱分解型の銀ペーストの他に低融点ガラスを含んでいる。また、シリコンセル表面の太い縦線を介した後に「タブ線」と呼ばれる金属線により隣のシリコンセルと直列に接続される。タブ線は銀ペースト熱分解後はんだ付けされ、一般的には鉛系はんだがよく用いられるが環境維持のため鉛フリーはんだが用いられることもある。

ガラスは一般的に 3.2 mm 厚の熱強化白板ガラスが用いられるが、近年では化学強化ガラスにより軽量化しているものもある。ガラスの裏側は反射防止のための凹凸が形成されている。

封入シートとして多く用いられているのは透明樹脂の EVA (Ethylene Vinyl Acetate Copolymer) であり、太陽光パネル用は VA 比 (アセチルユニットの含有比) が 26~32% のものが用いられる。融点は 60℃ 程度であるが、過酸化物を添加することでアセチル基同士が架橋し、耐熱軟化性が向上する。EVA+過酸化物だけではガラスやバックシートとの接着は不十分となるため、カップリング剤を添加することや、黄変防止剤や紫外線吸収剤などが添加されていることもある。

バックシートは耐候性の高さからフッ素系 (PVF 等) が古くから用いられていたが、供給量と価格の懸念からエステル系 (PET 等) が増加している。

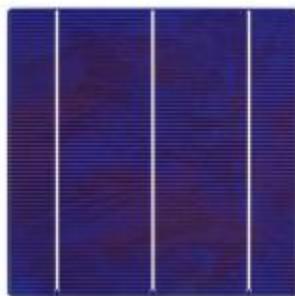


図 1.4 太陽電池シリコンセル

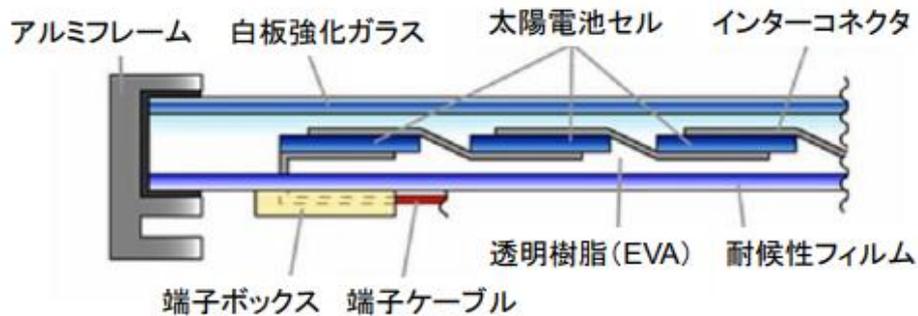


図 1.5 太陽光パネルの構造

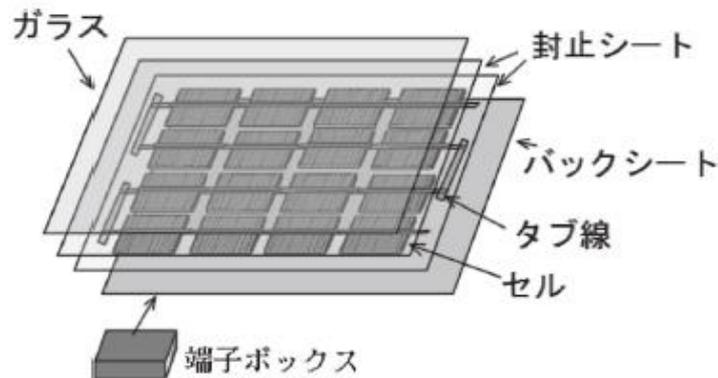


図 1.6 太陽光パネルの構成

1) -2 太陽光パネルの寿命

太陽光パネルの劣化の原因は、シリコンセルそのものの劣化よりも、紫外光による EVA の着色や反射紫外光によるバックシートへの着色が透過率を減少させてしまうこと、熱応力によりシリコンセルとシリコンセルとの間の銅線が断線してしまうことなどがあげられる。他にも、温度や風圧、積雪など外環境によるインターコネクタの破断・剥離、バックシートからの微量水分侵入による EVA から酸発生、酸による電極の腐食に伴う電極シリコンセル界面でのコンタクト抵抗の上昇、高システム電圧に起因するガラスからのナトリウム拡散による電圧誘起劣化など要因は様々ある。

1) -3 使用済み太陽光パネルの処理方法

従来の使用済み太陽光パネルの処理技術の特徴を以下の図 1.7 に示す。横軸は処理能力を、縦軸は得られるガラスの質を示している。太陽光パネルの処理において、多様な型、種類に適用可能であることや、ガラスリサイクルにおいて不純物の混入ができるだけ少なくすることが必要であることから、より図の右側・上側にいくほどその技術の質が高いことを示す。

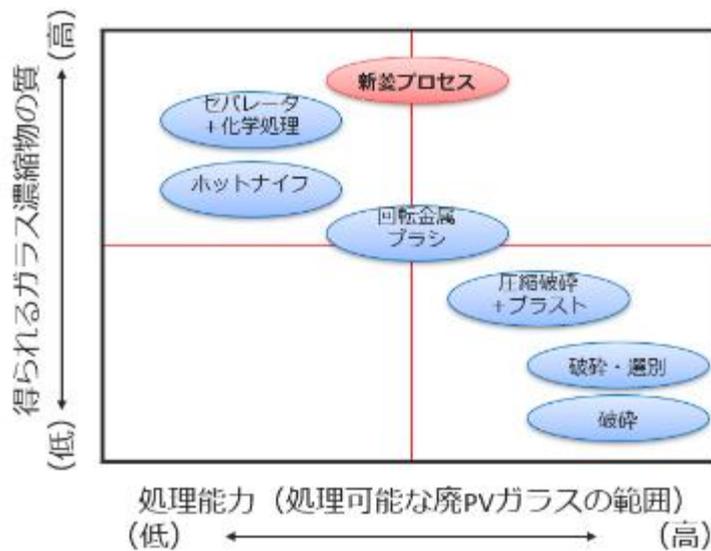


図 1.7 太陽光パネル処理技術

以下に従来の処理技術の概要をまとめる。

・セパレータ・化学処理法

セパレータと呼ばれる鈍角の構造物を、加熱したガラス EVA 境界面に挿入して両者の分離を行う方法である。CIS 系の使用済み太陽光パネルの処理法として開発された方法であるが、セパレータについては他の太陽光パネルにも適用可能である。カバーガラスのエンボス内の EVA まで剥離可能であるが、現状では小サイズの太陽光パネルに限られており、汎用的な実サイズ太陽光パネルに対応するには課題が残っている。

・ホットナイフ法

アルミ枠を取り外した使用済み太陽光パネルを上下両方からローラーによりプレスした状態でカバーガラスと EVA の間にホットナイフと呼ばれる加熱したナイフ状の刃を挿入することにより、ガラスと EVA の分離を行う方法である。剥ぎ取られたガラスは比較的純度の高いものが得られ、EVA 付きのシリコンセル等は破碎されて非鉄製錬により主として銀が回収される。しかし、ガラス EVA 境界面をホットナイフで切断するので通常エンボス加工されているカバーガラスの同加工部分に入り込んだ EVA までは除去できない、加熱するホットナイフのさらなる長寿命化が必要である、等の課題が残る。また、様々な形式の太陽光パネルに適用するためにはホットナイフの位置の制御の工夫や、割れた使用済み太陽光パネルには、上下からのプレスを強化する工夫をする必要がある。

・回転金属ブラシ法 (PV スクラッチャー法)

アルミ枠・電流線・接合箱等を取り外した使用済み太陽光パネルのカバーガラスの裏側から、高速回転する複数の金属ブラシにて EVA・シリコンセル・電極等を破碎し、粉状にしてカバーガラスから分離する方法である。金属ブラシの位置の制御により多くのタイプの太

陽光パネルに適用可能であり、ブラシでの削り方を工夫すれば、EVAの残らない高純度ガラスの回収も可能である。削られて粉粒状となったものはシリコンセル・EVA等の混合物だが、これらに何らかの物理選別を施して金属リッチな産物とすれば、非鉄製錬への売却においても付加価値が高まると考えられる。

- ・硝酸処理法

硝酸溶液中で約60℃で加熱し、EVAを分解除去する方法で、硝酸によって電極や酸化膜が溶けるため、シリコンセルがウェハの形で回収できる。一方で、硝酸廃液の処理やNO_x発生の可能性や再シリコンセル化の作業、再生シリコンセルの効率低下などの欠点がある。

- ・熱分解法（窒素雰囲気）

不活性ガスである窒素ガス中で約520℃で加熱し、EVAを除去する方法で、リサイクルコストが安く、太陽電池シリコンセルがそのままの形で回収できる。一方で、NO_xの発生の可能性や高温にすることで太陽電池特性の劣化が欠点としてあげられる。

- ・燃焼法（流動床）

約450℃の流動床によりEVAと裏面シートを燃やして除去する方法で、石英が太陽電池表面を削り取るためウェハの状態でも回収できる。一方で、鉛が混ざった砂の処理が欠点としてあげられる。

- ・熱分解法（空気雰囲気）

空気雰囲気でEVAの燃焼を行う方法で、窒素雰囲気と比較して若干低い温度で処理可能であるが、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。

- ・有機溶媒法

トリクロロエチレンを用いてシリコンセルを回収する方法であるが、EVAの膨潤によりシリコンセルの割れが生じる。トリクロロエチレンは使用禁止の化学物質ではないが、化審法や化管法等の指定物質であるため、取り扱いには注意が必要である。

- ・リモネン法

天然オレンジの皮を原料として得られるd-リモネンを主成分とする溶液が太陽光パネルから分離する方法であり、シリコンセルの割れが生じるものの、ガラスの分離が可能であるためガラスのリサイクルの有用である。

2) 新菱プロセス（全体加熱法）

本研究で用いたのは全体加熱法である。アルミ枠を除去した使用済み太陽光パネル全体を炉内に投入し、EVAを加熱・分解して除去して、純度の高いカバーガラスを非破壊で回収する方法である。得られるガラスの純度は比較的高く、板ガラス原料としての利用も検討されている。ガラス以外の部分は破碎されて非鉄金属の回収に回される。EVAの分解ガスを炉内にフィードバックすることにより、エネルギー回収しており、本工程の加熱・分解に必要な熱量の80~90%をこれによりカバーしている。構造の異なる結晶・非結晶Si系および化

化合物系半導体シリコンセルのいずれにも対応可能である。

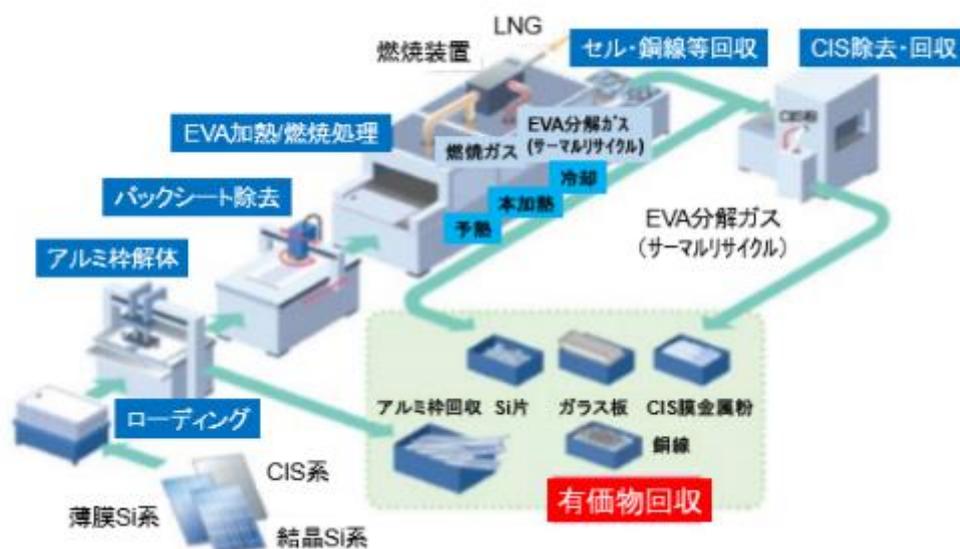


図 1.8 全体加熱法の処理フロー

3) 風力選別

風力選別とは、一般的に乾式比重選別の一つとして広く利用されている選別法である。分離回収対象の比重が他の物質と異なる場合、有効的な選別法であるが、比重差だけでなく、形状の違いによって分離が可能である。

本研究で用いた縦型風力選別機では、装置の下部から上向きの空気流を供給し、風量を調整することにより、低比重物を上部に、高比重物を下部から回収する。風力選別機の概要を図 1.9 に示す。

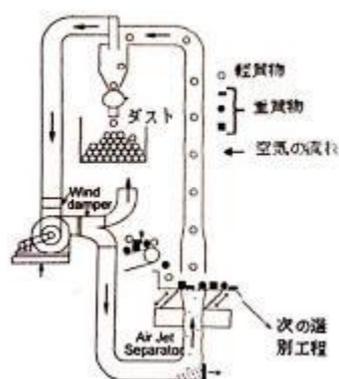


図 1.9 風力選別機の原理

4) エアテーブル選別

エアテーブル選別とは、一般的に比重選別の一つとして広く利用されている選別法であ

る。本研究では、エアテーブル選別機は(デッキ横から見たときに直角三角形となるような)山のあるデッキを用いた。デッキに充填した試料中の重粒子は揺動により、粉体層中で下方に成層し、盤面の揺動の影響を強く受けて傾斜上部に運ばれる。一方で、軽粒子は揺動により、粉体層中で上方に成層し、盤面の揺動の影響あまり受けずに、傾斜に沿って傾斜下部に運ばれる。エアテーブルのデッキ下部から与えられる上昇空気流は、重軽粒子の成層をより促進するとともに試料粒子の盤面への抗力を調整する。

本研究で用いた試料中のガラス粒子は球状に近い形状、シリコンセル粒子は扁平形状であり、比重差は近いが、シリコンセル粒子が上昇空気流に従ってガラス粒子層の空隙を縫って譲歩に移動し、軽産物側に回収されるため、形状選別の役割を果たすこととなる。エアテーブル選別機の概要を図 1.10 に示す。

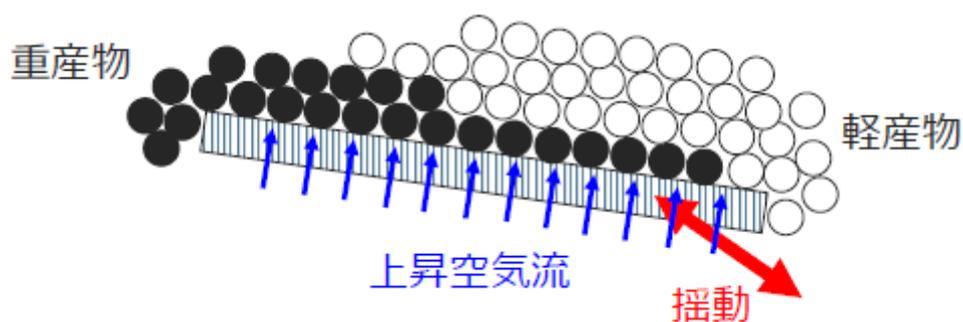


図 1.10 エアテーブル選別機の原理

2. 令和2年度の実証事業の概要

2.1. 使用済み太陽光パネルの前処理

使用済み太陽光パネルは、平成29年度環境省委託事業において当社で実施した、「平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化報告書」に記載の炉を用いて、EVA等有機物の分解を行った。図2.1.1に、炉の模式図を示す。



図 2.1.1 共用炉の模式図

2.1.1. 熱分解炉運転条件検討

令和2年度事業で実施した運転条件検討の結果、運転条件は表2.1.1に示す通り、1次熱分解では、窒素雰囲気下で30分間500℃の条件で処理を行い、2次熱分解では空気雰囲気下で20分間500℃の条件で処理を行った。なお、令和3年度の事業でも同条件で熱分解処理を行った。

表 2.1.1 熱分解条件

	熱分解速度	熱分解時間	熱分解温度	酸素濃度
1次熱分解	8m/hr	30min/枚	500℃	1%以下
2次熱分解	12m/hr	20min/枚	500℃	20.9%

熱分解後回収物の状態について、写真2.1.1に熱分解処理のパネル写真を示す。写真を見て分かる通り、熱分解後はEVA等有機物が分解され、ガラス、銅線及びシリコンセルのみの状態になっている。

写真2.1.1～2.1.4は、割れていない状態で熱分解処理を行ったものと、カバーガラスが割れた状態で熱分解処理を行ったもののガラスの状態を示している。

カバーガラスが割れていない状態で、熱分解処理を行ったガラスの状態を写真2.1.4に示す。カバーガラスが割れていない場合は、熱分解処理後もガラスは板状の状態ですべて炉から搬出されるため、板状ガラスのままリサイクル原料として使用することが出来る。しかしカバーガラスが割れた状態で廃棄されたパネルを処理すると、ガラス部分を拡大した写真2.1.3の通り、ガラス全体にひびが入っており、銅線やシリコンセルと割れたガラスが混合された状態になる。そのため、この状態では素材毎に回収が出来ず、リサイクル原料としての利用

が難しい。ここで、本実証事業では、混合物の選別技術の開発及び選別回収物のリサイクルについて検討を行った。



写真 2.1.1 熱分解後のパネル外観①



写真 2.1.2 熱分解後のパネル外観②



写真 2.1.3 熱分解後のパネル外観②
拡大



写真 2.1.4 熱分解後のパネル外観③
(カバーガラスが割れていない状態)

2.2. 選別処理試験結果

2.2.1. 選別フロー

処理フローは、図 2.2.1 に示す。選別は3つの工程で行った。この処理工程は、本事業のポイントであるガラスへの異物混入量の低減することを目的に設定した。

まず選別①で篩選別を用い銅線を回収した。その後、選別②は風力選別機を用いてガラスとシリコンセルの選別を行った。選別③ではエアテーブルを用いて、ガラス中に含まれる微量の銅線やシリコンセルの除去を行った。

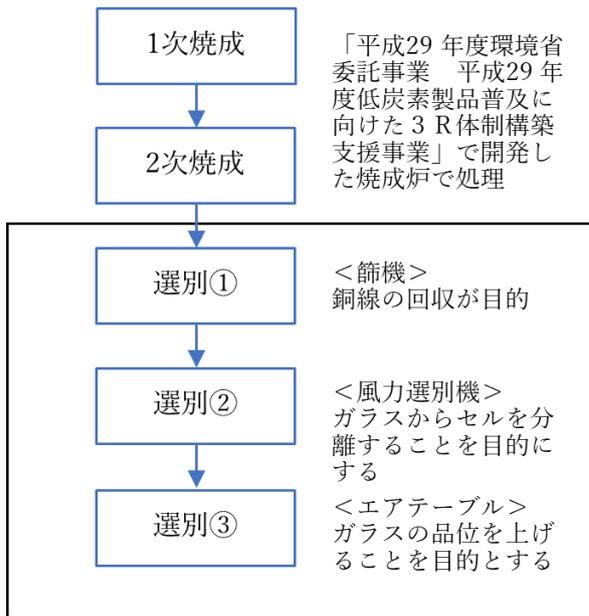


図 2.2.1 処理フロー

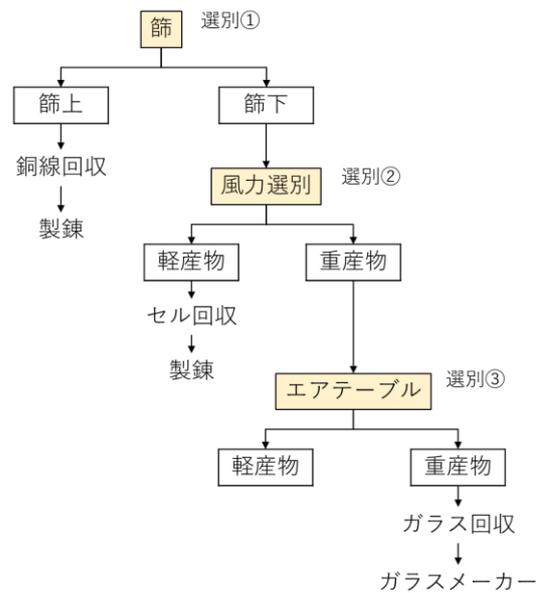


図 2.2.2 選別フローと回収物

選別①：篩選別機

選別①は篩機を用いて、主に銅線（長尺品）の回収を行った。今回は、Φ20 mmのメッシュサイズで処理を実施した。篩機及び選別前後の写真を写真 2.2.1 に示す。

選別②：風力選別機

篩選別後のサンプル（篩下部）を風力選別機にかけ、シリコンセルの回収を行った。風力選別機及び回収物の写真を写真 2.2.2 に示す。

選別③：エアテーブル

風力選別でシリコンセルを回収後、重産物側の回収物をエアテーブル選別機で処理を行った。ここでは、重産物側でガラスを回収することを目的としている。回収物及び機器の写真を写真 2.2.3 に示す。

なお、各選別機の運転条件については、前項で記載した選別技術の開発で得られた結果をもとに決定した。

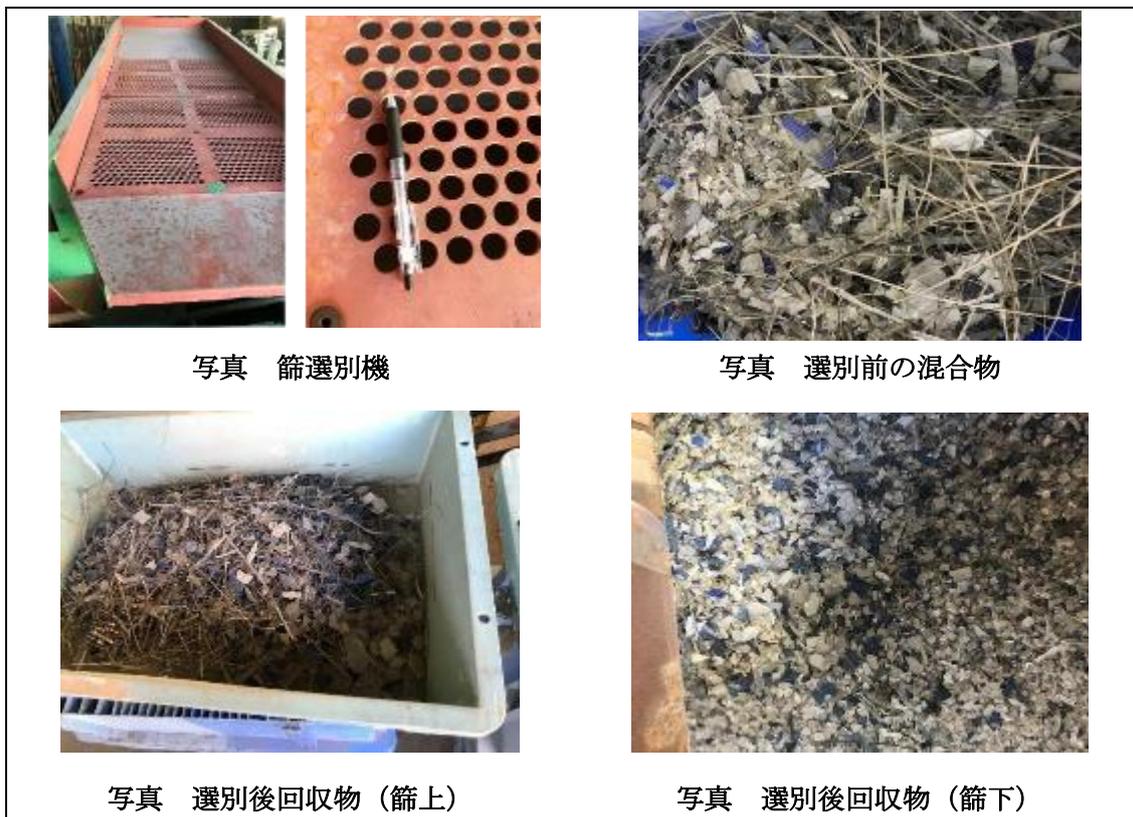


写真 篩選別機

写真 選別前の混合物

写真 選別後回収物（篩上）

写真 選別後回収物（篩下）

写真 2.2.1 選別① 篩選別



写真 風力選別機



写真 選別前の混合物



写真 選別後回収物（軽産物）



写真 選別後回収物（重産物）

写真 2.2.2 選別② 風力選別



写真 エアテーブル



写真 選別前の混合物



写真 選別後回収物（軽産物）



写真 選別後回収物（重産物）

写真 2.2.3 選別③ エアテーブル

2.2.2. 選別回収物のマスバランス及び組成

選別時のマスバランス及び回収物の組成を図 2.2.3 及び表 2.2.1 に示す。金属回収には全体の約 11%、ガラス回収には全体の約 89%が移行した。

表 2.2.1 に選別回収物の品位及び組成を示す。篩選別上部は、銅がリッチに回収され、風力選別軽産物はシリコンセルがリッチに回収され、少量スケールと同様の結果を得ることが出来た。また、エアテーブル重産物のガラス回収においても、重量比 99.999%を回収することが出来た。

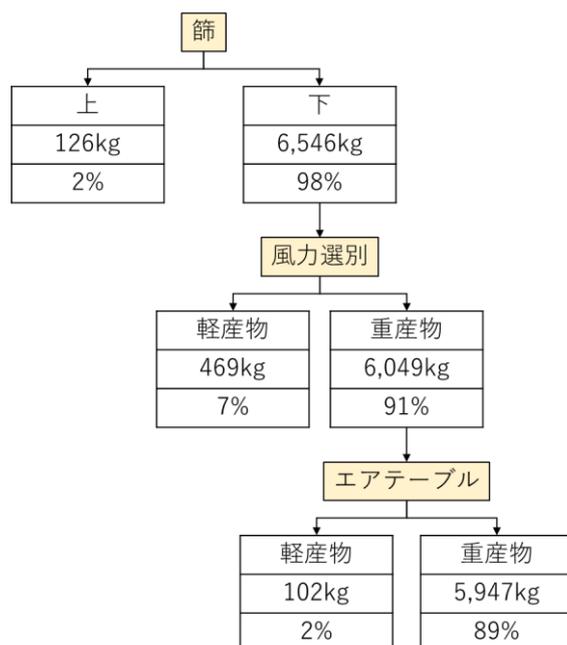


図 2.2.3 選別マスバランス

表 2.2.1 選別回収物の品位及び組成

	品位			組成	
	ガラス	銅線	セル	Cu (%)	Ag (mg/kg)
篩選別 (上)	33%	64%	3%	55	8,539
風力選別 (軽産物)	0%	2%	98%	2	5,683
エアテーブル (軽産物)	60%	17%	23%	15	3,291
エアテーブル (重産物)	99.999%	0.001%	0.0002%	-	-

2.2.3. PV ガラスカレット濃縮物中の異物

エアテーブル選別後の重産物（以下、PV ガラスカレット）中の異物を手選別目視検査で確認した。異物として確認されたのは、銅線、シリコンセル及びはんだボールであった。異物の確認は、573kg の PV ガラスカレットを用いた。異物確認の結果、573kg 中に銅線が 6g、シリコンセルが 1g そしてはんだボールが 17g 発見された。これは、銅：10mg/kg、シリコンセル：2mg/kg、はんだボール：30mg/kg に相当する。

はんだボールは、 $\Phi 0.6 \sim 2.5\text{mm}$ のサイズで、形状は球形であった。組成分析を行った結果、錫と鉛が主成分であったことから、はんだボールと判断した。回収したはんだボールの写真及び分析結果は、写真 2.2.5 及び図 2.2.4 に示す。



写真 銅線



写真 シリコンセル

写真 2.2.4 ガラス中に確認された異物（銅線・シリコンセル）



写真 2.2.5 はんだボール

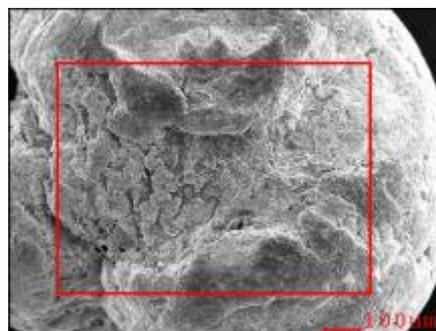
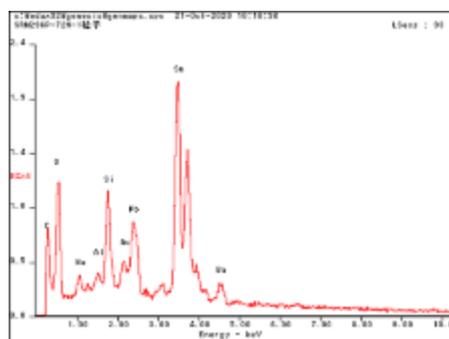


写真 2.2.6 SEM 画像（はんだボール）



Element	Wt%	At%
CK	10.86	39.87
OK	11.69	32.24
NaK	0.94	1.80
AlK	0.45	0.74
SiK	2.68	4.20
AuM	3.06	0.69
SnL	31.34	11.65
BaL	4.68	1.50
PbL	34.31	7.31
Matrix	Correction	ZAF

図 2.2.4 分析結果

2.3. 令和2年度事業のまとめ

令和2年度事業で取り組んだ各課題に対する達成状況について、表2.8.1に示す。また、残っている課題を表2.3.2に示す。

表 2.3.1 令和2年度事業の達成状況まとめ

	項目	課題	達成状況
①	太陽光パネルリサイクル高度破碎・選別技術開発	・カバーガラスが割れた状態でEVA樹脂熱分解を行うと、それぞれの構成材が細かく割れ混合した状態になり、従来の選別方法では、有価物を成分ごとに回収することが出来ない。	・効果的な選別フロー及び条件を設定し、高純度で素材を回収することが出来た。特に得られたガラスカレットは、異物混入が殆どない重量比99.999%を達成した。
②	太陽光パネルのリサイクルシステム構築の実証事業	・素材が混合された状態のため、金属及びガラスが有効利用できていない	・①の選別で得られた選別回収物が、有価物として有効利用できる見込みが立った。
③	事業における環境影響改善効果、CO2排出量削減効果の評価	・使用済み太陽光パネルのリサイクルによるCO2低減効果の確認	・使用済み太陽光パネルのリサイクルによるCO2低減効果を試算した。CO2削減効果は、比較対照埋立：17.0kg-CO2/枚（1,065kg-CO2/t）、比較対照路盤材：29.6 kg-CO2/枚、（1,852 kg-CO2/t）と試算。
④	事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討	・太陽光パネル由来のガラス再生において、出口要件（品質）が明確になっていない。	・太陽光パネルのカバーガラス組成を調査し、業界内での共有化を行った。現在、業界としての品質規格化に取り組み中。ただし、PVガラスの有効利用については、長期的な視点での影響の確認も必要である。

表 2.3.2 令和2年度事業の課題

	項目	課題
①	太陽光パネルリサイクル高度選別技術開発	カバーガラスが割れた太陽光パネルの選別で回収するガラスへの異物混入量の更なる低減。はんだボール及び微細なシリコンセル等、コンタミ成分の更なる除去効率の向上。
②	太陽光パネルリサイクルシステム構築	選別で得られるガラス及び金属品位について、品位と市場価値の観点で最適な設備条件の確立。
③	事業における環境影響改善効果の評価	改良した選別工程での環境影響改善効果の検証。
④	事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討	パネル種類（メーカー他）による銅線及びシリコンセルの銅と銀の濃度が把握できていない。

3. 令和3年度事業の概要

3.1. 実施項目

使用済み太陽光パネルのリサイクルを持続可能な事業として早期に実現させるため、令和2年度に引き続き、選別技術の開発と実証を実施した。実施に当たり、表3.1.1に示す実施項目を設定した。

表 3.1.1 令和3年度事業の目標と実施項目

	項目	最終目標	実施項目
①	1. (実証事業1) 太陽光パネルリサイクル高度破碎・選別技術開発の実証事業 ①高度破碎・選別技術に関する検討 ②最適処理フローに関する検討	①カバーガラスが割れた太陽光パネルの選別の最適条件を決定する。 ②カバーガラスが割れた太陽光パネルの選別の最適条件を決定し、最適処理フローを決定する。	①機器条件の設定及び機器の改良などの実施。 ・風力選別の前処理工程の改善（銅線回収の最適化の検討） ・風力選別機の選定を含めた、最適化の検討 ・エアテーブル機器条件の最適化の検討 ②①で実施した結果を基に、最適フローの検討
②	2. (実証事業2) 太陽光パネルのリサイクルシステム構築の実証事業 ①回収有価物（銅、銀等）の分離性向上による市場価値の向上効果の検証 ②営業炉でのガラスサンプル評価に関する検討	①分離後の回収物の品位と回収率、市場価値の観点から最適な設備条件を確立する。 ②カバーガラスが割れた太陽光パネルから回収したガラスと既存カレットを用い、グラスウール原料として、添加割合と受入基準を明確にし、安定的、継続的に使用可能かを判断する。	1で実施した選別で得られた回収物について、金属を精錬会社で、ガラスを硝子繊維協会のメーカーで評価を行う。 ・金属は、パネル種類（メーカー他）による銅線及びシリコンセルの銅と銀の濃度を調査する。また、1で実施する選別品の評価を精錬会社で実施する。 ・ガラスの評価は、令和2年度実施よりも1回当たりの数量を増加させ、試作検討を行い、運転面への影響や品質への影響について、確認を行う。

③	3. 事業における環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果の評価	改良した選別工程での LCA の見直しを行い、令和3年度事業におけるCO2削減効果を検証する。また、最終処分量削減効果についても評価を行う。	令和2年度と同様、3-① 1.2. で得られた選別技術検討結果及び選別品をリサイクルした場合の CO2 原単位を調査し、CO2 排出量削減効果を算出する。
④	4. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討	品位向上した有価物で、事業の将来的な展開可能性を経済的・技術的側面から評価する	2で実施する精錬会社及びガラスメーカーでの評価結果を踏まえ、経済的・技術的側面から最適条件を検討する。

4. 実証事業の結果

令和3年度事業で使用した太陽光パネルは、当社子会社で太陽光パネルのリサイクルを行っている株式会社リサイクルテックから調達した。太陽光パネルの前処理は、令和2年度の事業と同様（第2章参照）に、EVA等樹脂成分を加熱分解したものを使用した。

4.1. 割れた使用済み太陽光パネルからの高純度ガラス製造に関する研究

4.1.1. 本章の目的

令和2年度の実験において、全体加熱法、風力選別、エアテーブル選別を用いて高純度ガラスの回収を試み、重量比99.999 wt%のガラスカレット回収を実現することに成功したが、一方でシリコンセルやはんだ混入が課題としてあげられた。したがって、本年度の研究においては、更なるガラスの異物混入量低減による品位向上を目指して処理フローおよび実験条件の検討を行うことが目的である。これに伴い、風力選別では風速条件を増加させた実験を行い、風速を変化させた際の選別挙動の変化をより詳細な把握を目指す。また、同様にエアテーブル選別において、振動条件および風速条件を変化させたときの選別挙動の変化を把握し、選別挙動について考察を行う。

4.1.2. 装置・操作

1) 処理フロー

令和2年度の割れ太陽光パネルの処理フローを本研究での処理フローを以下の図4.1.1に、本年度の割れ太陽光パネルの処理フローを本研究での処理フローを以下の図4.1.2に示した。令和2年度の処理フローでは、全体加熱を行った後、搬送後に50 mmでのふるい分けを施し、網上の銅線を回収した。しかし、サンプルの搬送に伴い、シリコンセルが微細化してしまうこと、銅線が互いに絡まること課題として挙げられた。そこで、本年度は割れ太陽光パネルに加熱処理を行った直後に20 mmでのふるい分けを行うことで、上記の課題を解決することとした。

その後は令和2年度と同様、ふるい分けの網下産物に対し、風力選別を施し、軽産物にシリコンセルを濃縮する。さらに、風力選別重産物（ガラス濃縮物）に対し、エアテーブル選別を施し、わずかに残ったシリコンセルや銅線を軽産物に除去することで、重産物を異物混入の殆どないガラスとして回収する。

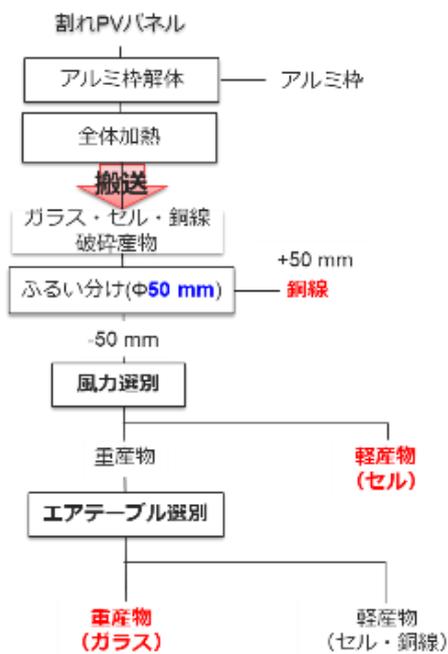


図 4. 1. 1 令和 2 年度の処理フロー

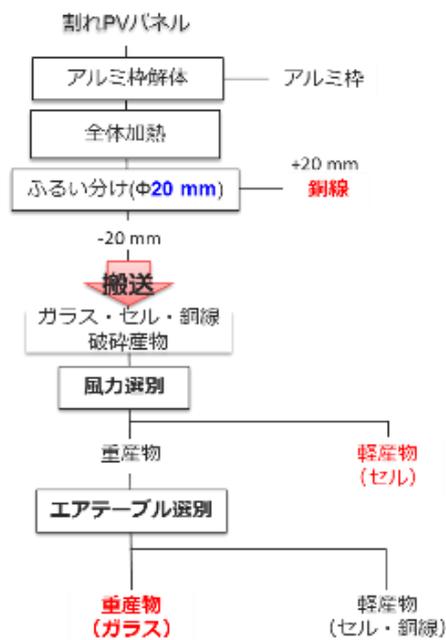


図 4. 1. 2 令和 3 年度の処理フロー

2) 実験装置・操作

(1) 加熱処理

廃棄された割れ太陽光パネルは、新菱の設備により、図 4. 1. 3 に示す加熱処理装置で 2 段階の加熱処理を行った。その加熱条件を表 4. 1. 1 に示す。1 次燃焼では、窒素雰囲気にて EVA を燃料ガス化し、2 次燃焼では、酸素雰囲気にてその燃料ガスをエネルギー源として利用している。この 2 段階加熱処理によって、1 枚の大きな割れ太陽光パネルのガラスやシリコンセルには大きな亀裂が入る。

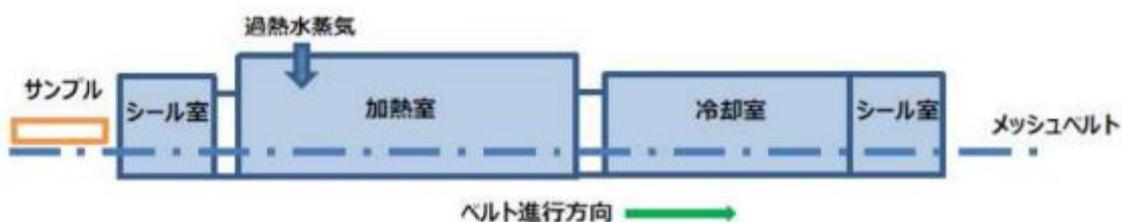


図 4. 1. 3 加熱処理の模式図

表 4. 1. 1 加熱条件

	試料ベルト 速度, m/h	加熱時間 min/枚	加熱温度, °C	酸素濃度, %
1 次熱分解	8	30	500	~1
2 次熱分解	12	20	500	20.9

(2) ふるい分け(20 mm)

加熱後、亀裂の入った太陽光パネルは写真 4.1.1 に示した振動ふるい機を使用して、20 mm にてふるい分けを行った。また、この時の振動ふるい機へのフィードイメージを図 4.1.3 に示した。

亀裂の入った太陽光パネルがこの振動ふるい機に投入されることで、その落下による衝撃でガラスやシリコンセルに破碎が生じる。一方で、直線状の銅線はふるい振動機の上部の抑えシートによってふるいに平行に配置され、網上として回収され、ガラスやシリコンセルは網下として回収される。



写真 4.1.1 振動ふるい機

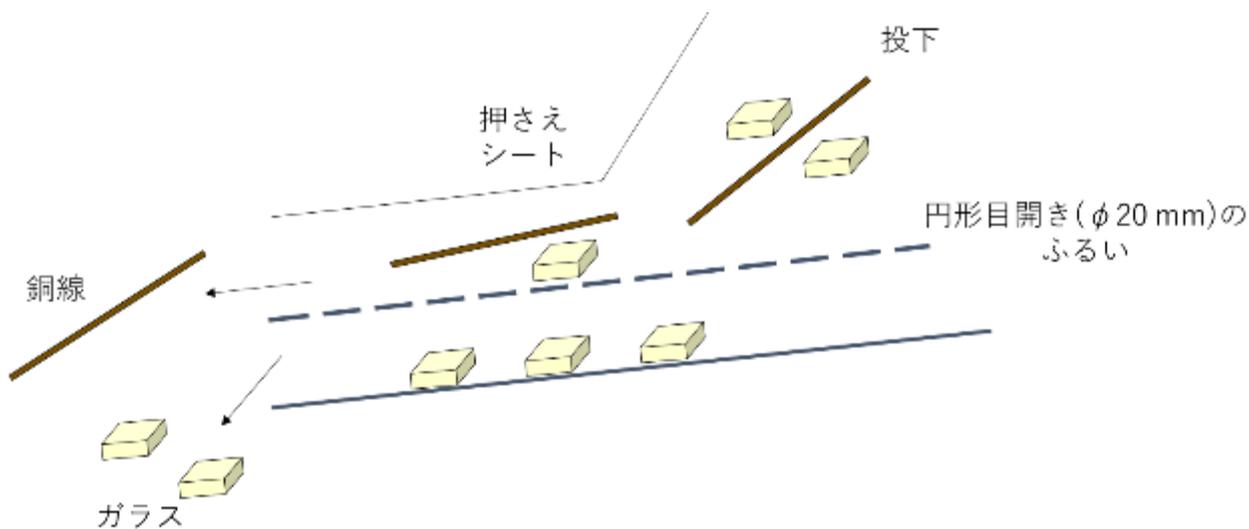


図 4.1.3 振動ふるい機でのフィードイメージ

(3) 縮分

複数枚の太陽光パネル試料を用いているため、振動ふるい後の試料に対して JISZ8816 に従って円錐四分法による縮分を行った。円錐四分法のイメージを以下の図 4.1.4 に示した。試料を平面で円錐状に堆積させた後、円錐を平らに押しひろげ、扇形に四分割し、相對する一対の扇形試料をそれぞれ合わせて二分割にする。この操作を繰り返して所定の縮分試料とした。

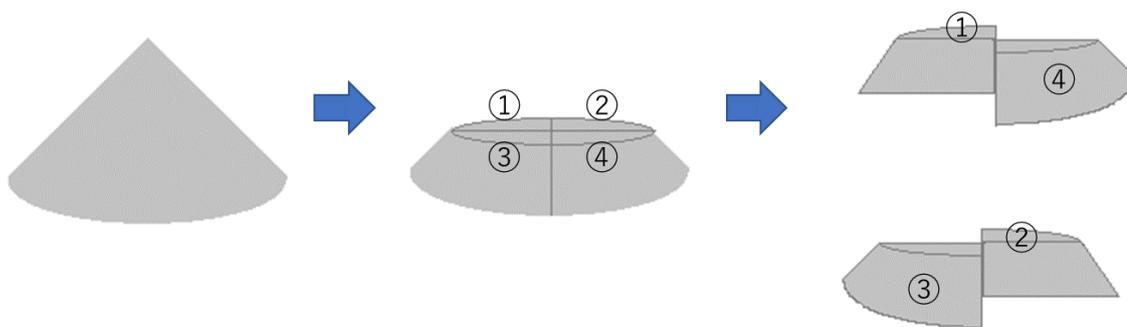


図 4.1.4 円錐四分法のイメージ

(4) 風力選別

振動ふるい後の網下産物に対して、風力選別を行った。使用したのは原田産業製風力選別機 L750SRM 型であり、その外観を以下の写真 4.1.2 に示した。また、風力選別機の機構図を

図 4.1.5 に示した。風力選別機の投入された試料は送風ファンから与えられる空気流を下から受け、軽い粒子は流れに沿って上部に流れ、装置内の路に従って、後方の軽産物側に、重い粒子は重力に従って、そのまま下部に落ち、前方の重産物側に回収される。

風力選別では、送風ファン振動数を 20, 30, 40, 50, 60 Hz に変化させた実験を実施した。送風ファン振動数を変化させたときの風力選別装置内の風速は以下の写真 4.1.2 に示すようなフィード直後の①、フィード後十分に空気流が当たる②、装置内最上部の③について、それぞれ壁から 50 mm 地点、375 mm 地点で測定を行った。風力選別における実験条件を以下の表 4.1.2 に示す。

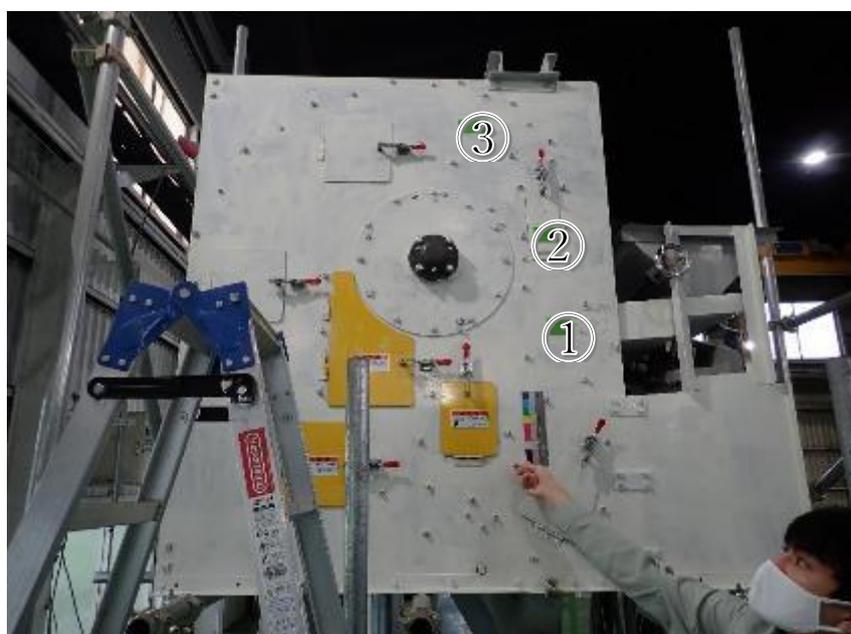


写真 4.1.2 風力選別機の外観と風速測定箇所

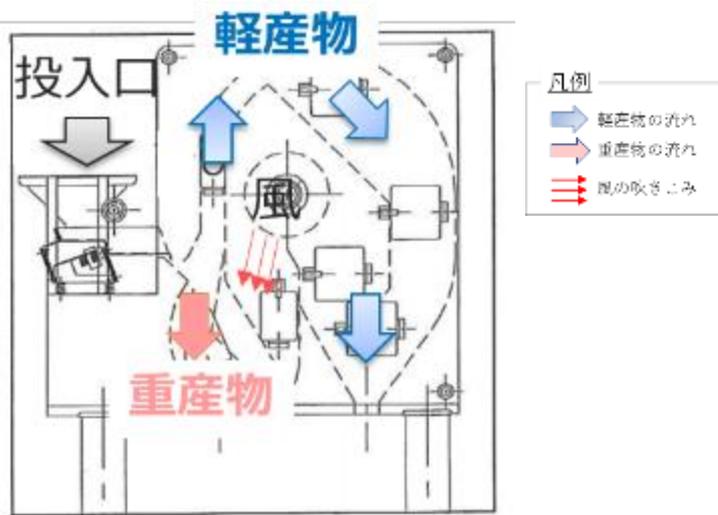


図 4.1.5 風力選別機の機構図

表 4.1.2 風力選別における実験条件

	風速 m/s						①, ②の 平均風速 m/s
	壁から 50 mm 地点			壁から 375 mm 地点			
送風ファン振動数 Hz	①	②	③	①	②	③	
20	4.0	5.0	0.55	5.0	5.0	0.60	4.8
30	7.5	7.5	0.85	8.0	8.0	1.10	7.8
40	10.5	10.5	1.20	11.0	11.0	2.5	10.8
50	13.0	13.0	1.50	13.0	13.5	1.5	13.1
60	15.0	16.0	1.95	15.0	16.5	1.7	15.6

(5) エアテーブル選別

風力選別の重産物（ガラス濃縮物）に対して、エアテーブル選別を行った。使用したのは原田産業製エアテーブル DS-2 型であり、その外観を写真 4.1.3 に示した。また、エアテーブル選別機の機構図を図 4.1.6 に示した。エアテーブル選別のデッキは 11.5 度の傾斜を持ち、デッキ上には粒子層を保つための山（山高は 10 mm、山ピッチは 15 mm）と軽産物の排出口には高さ 50 mm の壁（滞留時間を確保するためのゲート）が存在する。振動は（デッキに対し垂直方向に 13 度の角度を持ち、振幅 13 mm）と穴（φ1 mm）の開いたデッキの下部からは上昇空気流が与えられる。高比重粒子は層の下部に堆積しやすいため、振動の影響をより大きく受けてデッキ上部に、軽比重粒子は上昇空気流で重い粒子層を抜けて粒子層の上部に昇りやすく、デッキの傾斜に従って選別機下部に回収される。



写真 4.1.3 エアテーブル選別機の外観

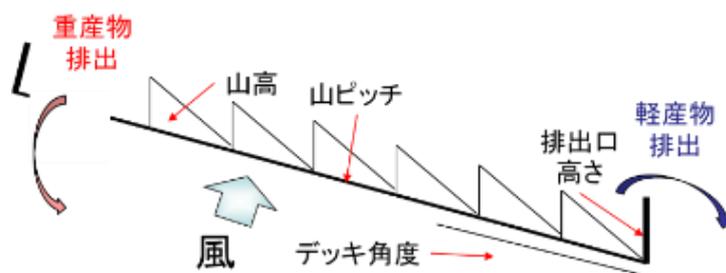


図 4.1.6 エアテーブル選別機の機構図

本実験では風速条件について、送風ファン振動数を 32, 35, 38, 41, 44 Hz に変化させた実験を行ったが、この時エアテーブル上での各 8 か所における風速を事前に測定した。風速測定箇所は写真 4.1.4 に示した。エアテーブル選別における風速条件を表 4.1.3 に示した。



写真 4.1.4 エアテーブル選別における風速測定箇所

表 4.1.3 エアテーブル選別における風速条件

送風ファン振動数 Hz	風速 m/s								8か所の平均風速 m/s	風量 m ³ /min
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧		
32	5.5	5.0	5.0	5.5	5.0	3.5	4.7	3.7	4.7	25.6
35	6.5	6.5	6.0	6.0	6.5	3.7	4.8	4.0	5.5	28.0
38	7.0	7.0	7.0	7.0	6.5	4.0	5.0	4.5	6.0	30.4
41	7.5	7.3	7.2	8.0	7.5	4.8	5.5	5.5	6.7	32.8
44	8.0	7.2	7.7	8.7	8.0	5.0	6.5	4.8	7.0	35.2

表 4.1.3 より、中心部および重産物側の風速が強く、軽産物側の風速が弱くなっているが、解析上の風速としては各風速条件での 8 か所の平均風速を用いることとした。

また、エアテーブル選別における振動条件はデッキインバータ振動数を 46, 49, 52, 55, 58 Hz と変化させた実験を行ったが、各デッキインバータ振動条件におけるデッキ振動数を測定し、その対応関係と振幅を表 4.1.4 に示した。

振動条件変化の実験では風速を 6.0 m/s に固定し、風速条件変化の実験ではデッキ振動数を 7.9 Hz に固定した。

表 4.1.4 エアテーブル選別における振動条件

デッキインバータ振動数 Hz	デッキ振動数 Hz	振動角度 °	振幅 mm	水平方向振幅 mm	垂直方向振幅 mm
46	6.6	24.5	13	12	5
49	7.0				
52	7.4				
55	7.9				
58	8.3				

3) 分析器具・装置・操作

(1) 縮分

選別産物に対して、分析操作の前処理として写真 4.1.5 に示した二分割器で縮分を行った。使用したのは東京筒井理化学器械株式会社上野製 JIS 規格試料縮分器である。この時、図 4.1.7 に示した左右相殺法にしたがって、1 個の試料を 4 個の試料に分けた後に左右の試料を合わせるという操作を 1 回の縮分操作としてこれを繰り返した。



写真 4.1.5 縮分器 (二分分割器)

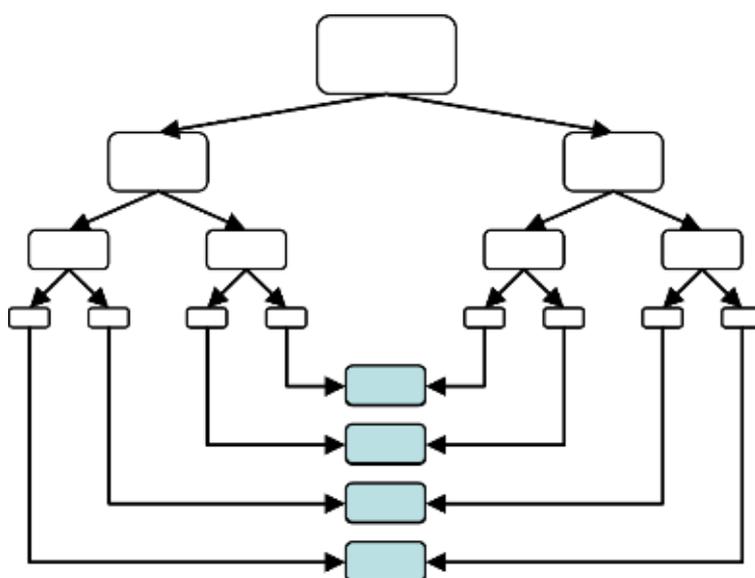


図 4.1.7 Carpenter の左右相殺法

(2) ふるい分け

選別産物の粒度分布を得ることを目的としてふるい分けを行った。(株)東京スクリーンの試験用ふるい(JIS Z 8801)を(株)吉田製作所のロータップ式標準篩振盪機 1038-A(JIS M 8811 準拠)にかけて使用した。使用した上記装置を以下の写真 4.1.6、写真 4.1.7 にそれぞれ示す。



写真 4.1.6 試験用ふるい



写真 4.1.7 篩振とう器

(3) 手選

粒群ごとに分けた選別産物に対し成分割合を得るため、1.0 mm 以上の試料については手選を行った。選別産物に含まれるのは主にガラス、シリコンセル、はんだボール、銅線であり、これらを目視で選り分け粒群ごとに各成分の重量を測定し、成分割合を得た。

(4) 振動ミル

1.0 mm 以下の試料の成分分析には XRF 分析を用いたため、この前処理として代表的な試料のサンプリングを行うことを目的として、微粉碎を行った。使用したのは、株式会社シーエムティー科学製の TI-100 型化学分析試料作製用振動ミルであり、写真 4.1.8 に示した。振幅は 7 mm、振動回転速度は 1440 rpm/50 Hz である。また、使用したサンプルチャンパーはアルミナ製の内径 6 cm、標準ロッド直径 4 cm の B200225 であり、写真 4.1.9 に示した。



写真 4.1.9 振動ミル



写真 4.1.9 振動ミルの粉碎用シリコンセル

(5) 加圧成型

XRF 分析の錠剤試料作製のため、加圧成型を行った。使用したのは島津製作所製のハンドプレス SSP-10A であり、内径 10 mm、外径 13 mm、高さ 5 mm のアルミリング内に試料を固めた。装置の外観を写真 4.1.10 に示す。



写真 4.1.10 ハンドプレス

(6) XRF 分析

1.0 mm 以下の試料については XRF 分析を用いて成分分析を行った。使用したのは、理学電機工業株式会社製 ZSX Primus II No. AE55-1012 CR06060 であり、写真 4.1.11 に示した。分析モードは EZ スキャンで B~U の範囲の元素分析を行った。



写真 4.1.11 XRF 分析装置

(7) 風速測定装置

風力選別機の風速の測定を佐藤計量器製作所の携帯型電子風速計 SK-27V を用いて行った。
装置の外観を以下の写真 4.1.12 に示した。



写真 4.1.12 電子風速計

4.1.3. 実験結果

1) 加熱処理後試料の分析

令和2年度用いた実験試料はカバーガラスが割れた使用済み太陽光パネルを加熱処理したのに対し、ふるい分けを50 mmで実施したが、本年度本研究で用いた試料はカバーガラスが割れた使用済み太陽光パネルを加熱処理したのに対し、20 mmのふるい分けで得られた網上産物を銅線濃縮物、網下を風力選別のフィードとしたものである。

アルミ枠解体・全体加熱・20 mmでのふるい分け後の網上産物（銅線濃縮物）および網下産物（風力選別フィード）の試料写真を以下の写真4.1.13に示した。実験試料に含まれる主な素材は銅線、シリコンセル、ガラスの3種類である。

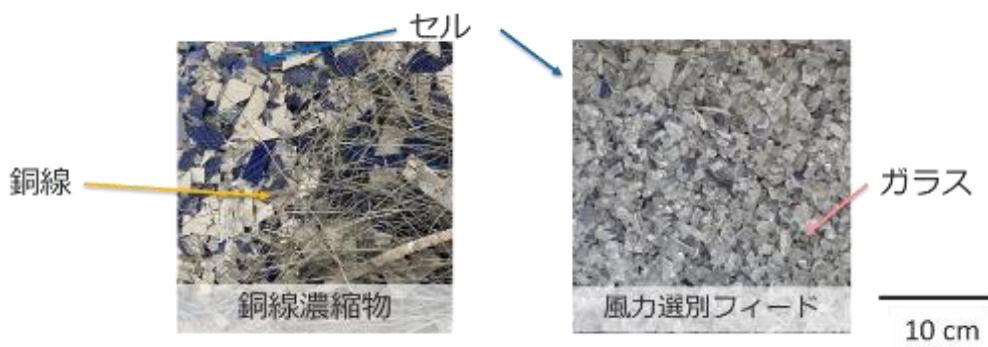


写真 4.1.13 実験試料（左は銅線濃縮物、右は風力選別フィード）

また、網上産物である銅線濃縮物の素材構成を図4.1.8に、網下産物である風力選別フィードの素材構成を図4.1.9に示す。

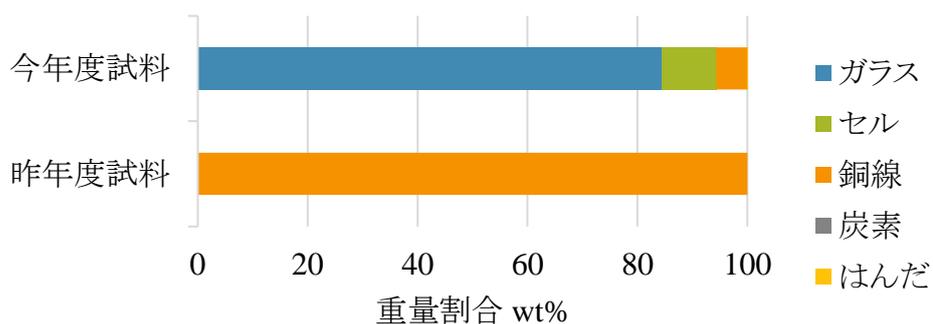


図 4.1.8 銅線濃縮物（網上産物）の素材構成

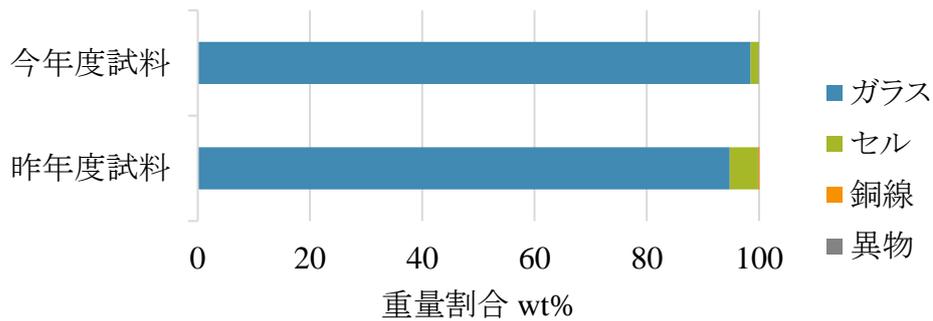


図 4.1.9 風力選別フィード（網下産物）の素材構成

また、風力選別フィード（網下）の各成分の令和 2 年度試料に対する本年度試料の素材含有率比を示す。

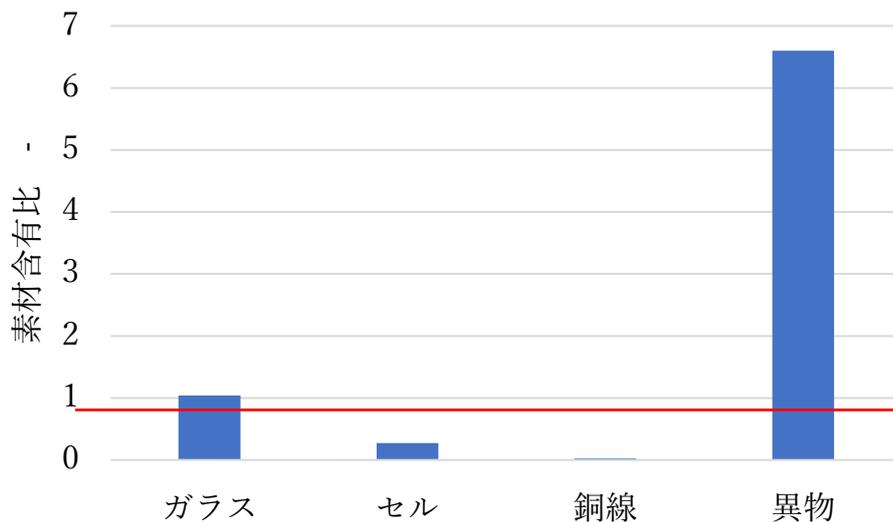


図 4.1.10 風力選別フィード（網下産物）の各成分の令和 2 年度試料に対する本年度試料の素材含有率比

図 4.1.8 より、本年度試料は銅線濃縮物（網上産物）中に大きなガラスやシリコンセルが巻き込まれていたことが分かる。図 4.1.19 より、風力選別フィード（網下産物）中のシリコンセル・銅線の含有率が令和 2 年度試料より減少し、異物（焼却残渣）の混入率が増加した。また、図 4.1.10 より、風力選別フィード（網下産物）の素材含有率比をみると、網下には小サイズの細くて短い銅線がほとんどなく、これらがふるい分けで網上に分離された可能性がある。これらは、本年度試料が、令和 2 年度試料と比較して、ふるい目開きを 50 mm から 20 mm にしたことによって起きたと考えられる。

2) 風力選別実験

風力選別で風速を 4.8, 7.8, 10.8, 13.1, 15.6 m/s に変化させたときに得られた産物の+1.0 mm について、手選で成分分析を行った。風力選別の軽産物（シリコンセル濃縮産物）のシリコンセル品位を図 4.1.11 に、シリコンセル回収率を図 4.1.12 に、シリコンセルの他成分に対する分離効率を図 4.1.13 に示した。それぞれ令和 2 年度試料での実験結果と合わせて本年度試料での実験結果と比較をした。

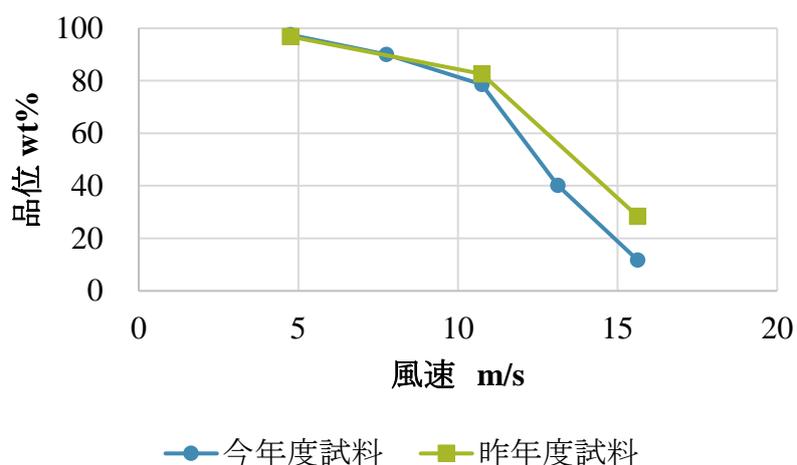


図 4.1.11 風力選別軽産物中のシリコンセル品位

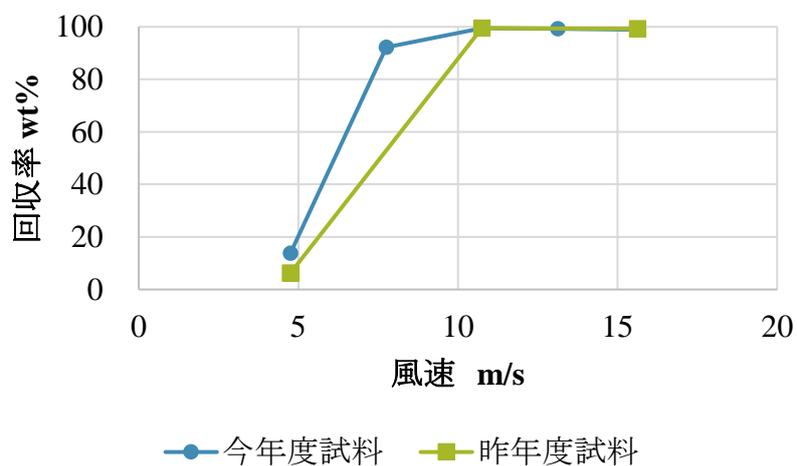


図 4.1.12 風力選別軽産物中のシリコンセル回収率

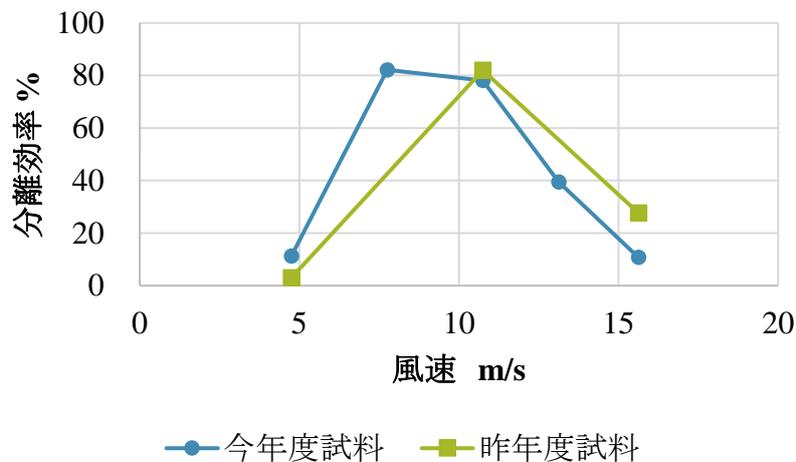


図 4. 1. 13 風力選別におけるシリコンセルの他成分に対する分離効率

上記の結果より、風速を増大させシリコンセルと、シリコンセル品位は低下するがシリコンセル回収率は増加した。また、令和 2 年度の結果と比較すると、風速 10.8 m/s での成績は、シリコンセル品位が 82.5 wt% から 78.6 wt% に低下、シリコンセル回収率は変わらず 99.5 wt%、シリコンセルの他成分に対する分離効率は 82.0 から 78.0 % に低下し、最大分離効率条件同士（令和 2 年度は 10.8 m/s、本年度は 7.8 m/s の条件での比較）では、シリコンセル品位は 82.5 wt% から 90.0 wt% に増加、シリコンセル回収率は 99.5 wt% から 92.2 wt% に低下、シリコンセルの他成分に対する分離効率は 82.0 % から 82.2 % に増加した。

これは、フィードのシリコンセル品位が令和 2 年度の 5.01 wt% と比較して 1.43 wt% に低下しているため、風速 10.8 m/s の条件比較では、軽産物中のシリコンセル品位は若干低下した。本年度の最適条件（7.8 m/s）では、シリコンセル品位は向上したが回収率が低下し、他成分に対する分離効率はほぼ同様であった。

令和 2 年度より風速条件を 3 条件から 5 条件に変化させた実験を行ったことで、本年度試料における軽産物中のシリコンセルに対するほか成分に対する分離効率最大となる条件は風速条件 7.8 m/s であることが明らかとなり、このとき風力選別軽産物のシリコンセル品位 90.0 wt%、シリコンセル回収率 92.2 wt% を達成した。

3) エアテーブル選別実験

(1) 振動条件変化

まず、風速を 6.0 m/s に固定し、デッキ振動数を 6.6, 7.0, 7.4, 7.9, 8.3 Hz に変化させた実験について、選別で得られた産物の +1.0 mm を手選で成分分析を行った。このときのエアテーブル選別の重産物（ガラス濃縮産物）のガラス品位を図 4. 1. 214 に、ガラス回収率を図 4. 1. 15 に、ガラスの他成分に対する分離効率を図 4. 1. 16 に示した。

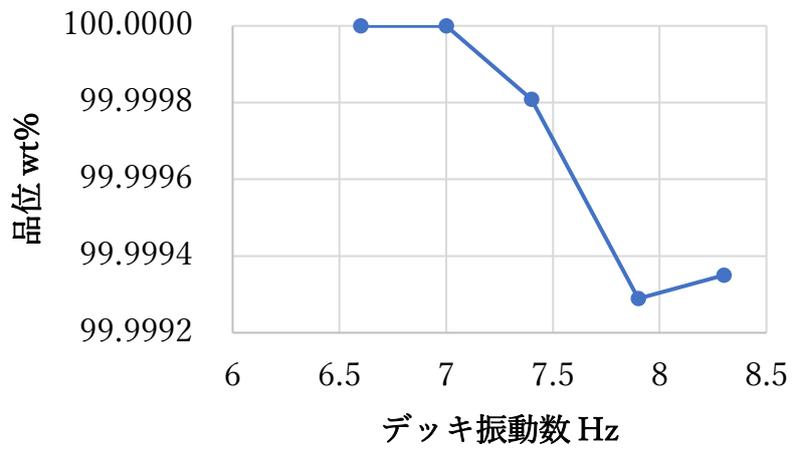


図 4. 1. 14 エアテーブル選別重産物中のガラス品位

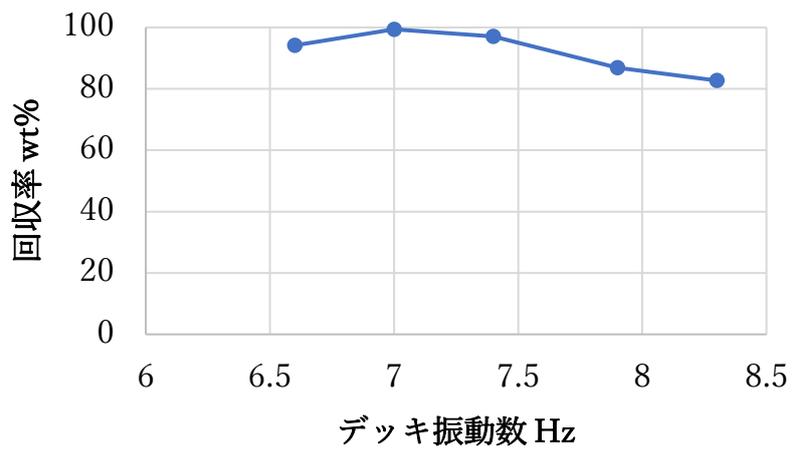


図 4. 1. 15 エアテーブル選別重産物中のガラス回収率

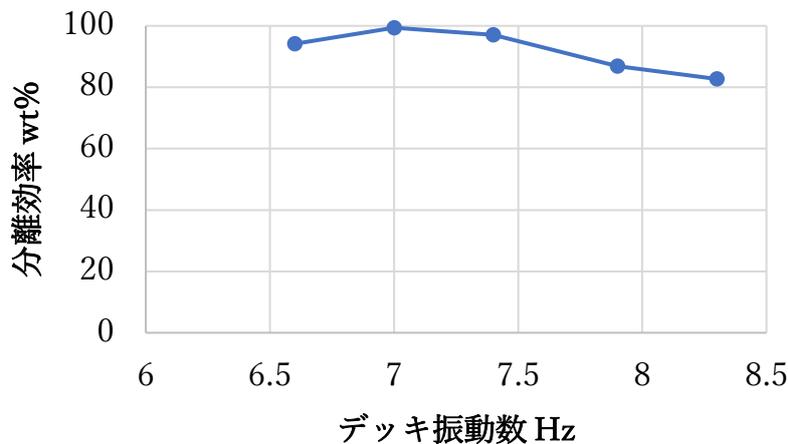


図 4. 1. 16 エアテーブル選別におけるガラスの他成分に対する分離効率

デッキ振動数を増大させシリコンセルと、ガラス品位は低下、ガラス回収率は若干低下した。理論上は、デッキ振動を増大させシリコンセルと重産物へのガラス回収率は増加するが、今回のバッチ実験では連続実験の平衡状態を正確に実現できなかったものと思われる。連続実験の場合は、デッキ振動数のより大きい条件でも、重産物へのガラス回収率および分離効率はともに向上すると推定される。

分離効率最大値（99.4 %）は、デッキ振動数 7.0 Hz で得られ、その際の重産物中のガラス品位は 100 wt%（異物含有率 0 ppmw）、回収率は 99.4 %であった。

(2) 風速条件変化

続いて、デッキ振動数を 7.9 Hz に固定し、風速を 4.7, 5.5, 6.0, 6.7, 7.0 m/s に変化させた実験の結果について、選別で得られた産物の+1.0 mm を手選で成分分析を行った。エアテーブル選別の重産物（ガラス濃縮産物）のガラス品位を図 4. 1. 17 に、ガラス回収率を図 4. 1. 18 に、ガラスの他成分に対する分離効率を図 4. 1. 19 に示した。

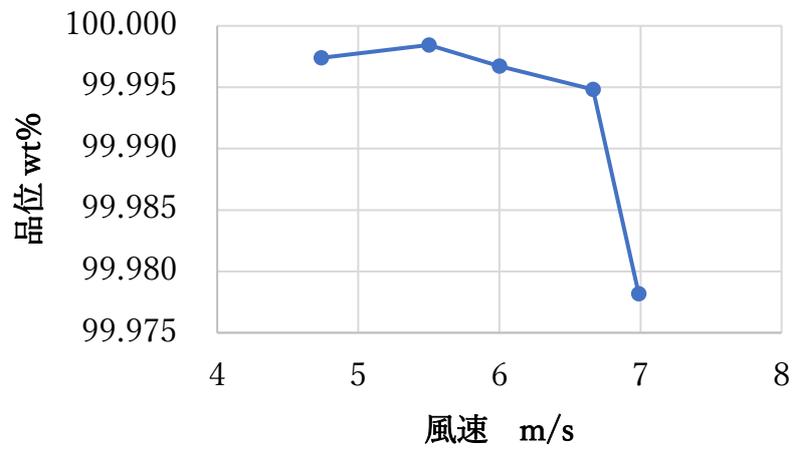


図 4.1.17 エアテーブル選別重産物中のガラス品位

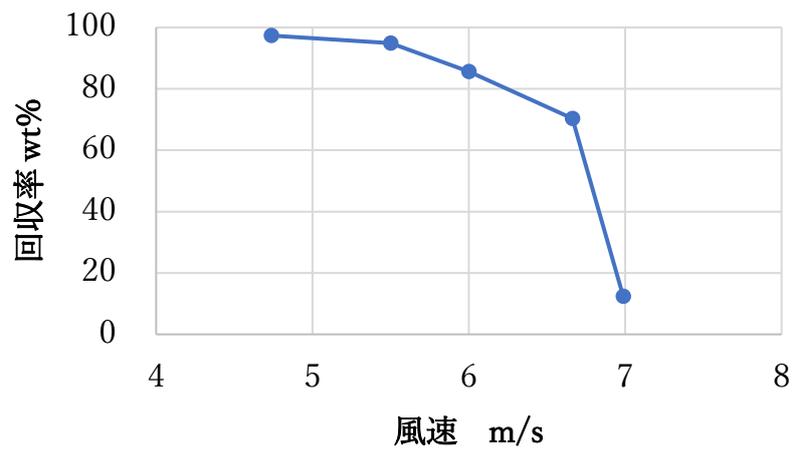


図 4.1.18 エアテーブル選別重産物中のガラス回収率

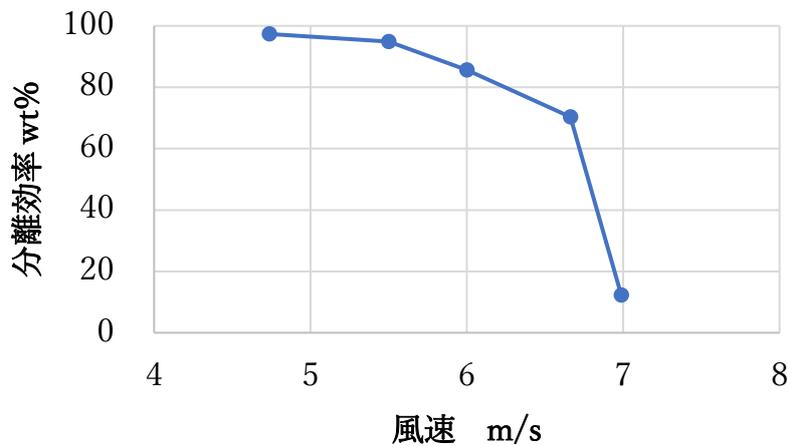


図 4. 1. 19 エアテーブル選別におけるガラスの他成分に対する分離効率

風量を増大させシリコンセルと、重産物中のガラス品位・回収率・分離効率ともに低下した。本実験の実験条件においては、デッキ上の風量が大きすぎると、振動による前進力よりも風力によって上に持ち上げる力が大きく働き、デッキに対する抗力が低下するため、ガラス粒子も軽産物側に排出されてしまうと推測された。

したがって、風速条件変化の実験における分離効率最大値 (97.4%) は、風速 4.7 m/s で得られ、その際の重産物中のガラス品位は 99.997 wt% (異物含有率 26 ppmw)、回収率は 97.4%であった。

4) 各成分のマテリアルバランス

風力選別軽産物中でシリコンセルの他成分に対する分離効率最大を示したのは風速 7.8 m/s の条件であり、エアテーブル選別重産物中でガラスの他成分に対する分離効率最大を示したのは、デッキ振動数 7.0 Hz、風速 6.0 m/s であった。風力選別 7.8 m/s の条件で得られた重産物をエアテーブル選別に施した場合に同様の分配が行われると仮定して、ガラス、シリコンセル、銅線のマテリアルバランスを計算し、以下の図 4. 1. 20 に示した。また、黒字は各産物の歩留りを、青字は各単位操作後の各成分の品位を、緑字は本フローのフィードを 100%とした際の各産物への分配率を、それぞれ示している。

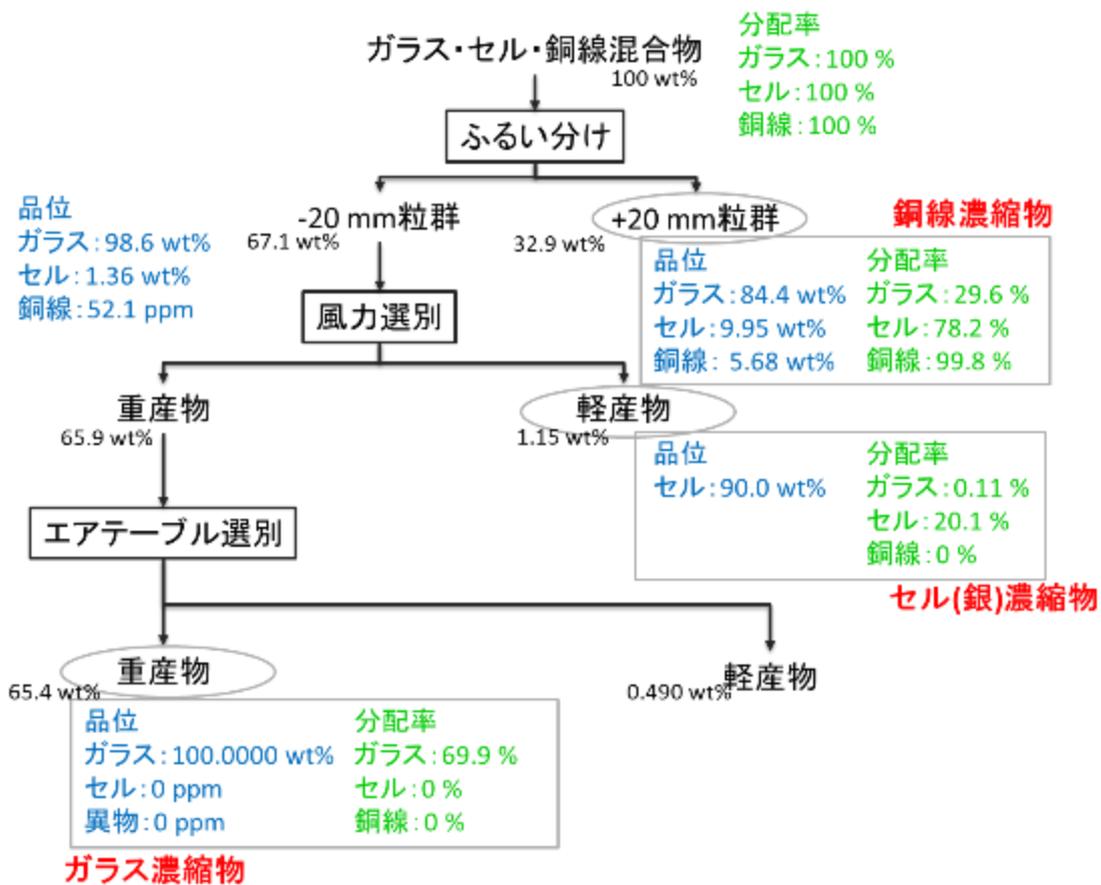


図 4.1.20 最適条件でのマテリアルバランス

加熱処理後割れ太陽光パネルに対し、令和2年度のフローからふるい分けを 50 mm から 20 mm に変更し、風力選別およびエアテーブル選別でそれぞれ最適条件を再検討した結果、エアテーブル選別重産物を品位 100 wt%ガラス濃縮産物として、回収率 69.9 wt%で回収することができた。令和2年度最適条件では、ガラス品位 99.997 wt%であったことを考えると、より高純度ガラスの回収を行うことを達成できた。また、銀を含むシリコンセルは風力選別軽産物として、品位 90.0 wt%、回収率 20.1 wt%で、銅線はふるい分け+20 mm 産物として、品位 5.68 wt%、回収率 99.8 wt%で回収が可能であり、シリコンセルと銅線の両者を銅製錬にフィードされることを考えると、ふるい分けの網上産物と風力選別軽産物を併せて総合産物とすることも可能である。

4.1.4. 風力選別におけるガラス・シリコンセル選別挙動

令和2年度から考案した風力選別におけるガラス・シリコンセル選別挙動の概念について述べる。乾式比重選別の一種である風力選別において、密度差の非常に小さいシリコンセル(2.44 g/cm³)とガラス(2.55 g/cm³)がそれぞれ軽産物と重産物に分離した理由として、推測される分離機構は以下である。等方性のガラス粒子は一般的に考えられるように大粒子ほど抵抗を受けやすく、小粒子ほど軽産物側へより多く回収される。また、扁平な(厚み一定の)シリコンセル粒子では、空気流に垂直な断面積の大きい大粒子ほど、風に対する抵抗形状係数が大きく、軽産物側へ回収されやすい。この概念図を以下の図4.1.21に示す。

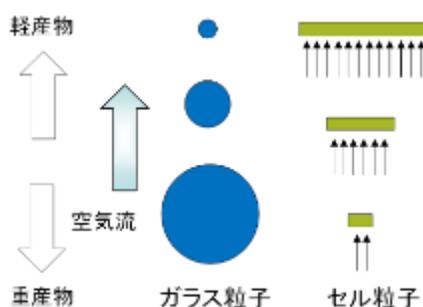


図 4.1.21 風力選別におけるガラスとシリコンセルの分離機構説明図

そして、風力選別において粒子が浮上・沈降するかの決定には、その粒子が持つ沈降速度と与えられる風速との大小関係が影響していると考えられることができる。したがって、理論的に算出可能な球形粒子運動の終末沈降速度と風速との関係、および、選別結果から推定される実際の挙動とを比較することで、球形粒子と比較してどの程度の抵抗を実際に受けているかを定量化していく。

1) 流体中における球形粒子運動から想定される臨界粒径

まず、流体中の球形粒子の運動方程式は、 ρ_p を粒子密度、 ρ_f を流体の密度、 d を粒子径、 v を粒子速度、 g を重力加速度、 R を抗力として、以下の式(4.1)のように表すことができる。

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) g - R \quad (4.1)$$

また、このとき、Newtonの抵抗法則により、 C_D を抗力係数、 A を投影断面積として、抗力 R は以下の式(4.2)のように表すことができる。

$$R = C_D \cdot \frac{\rho_f v^2}{2} \cdot A \quad (4.2)$$

次に、抗力係数 C_D がレイノルズ数 Re_p によって変化するため、本実験条件におけるレイノルズ数 Re_p を算出する必要がある。 μ を流体の粘度として、以下の式(4.3)で算出した。

$$Re_p = \frac{\rho_0 d v}{\mu} \quad (4.3)$$

対象粒径において、基本的にはNewton域(乱流域)の範囲に存在するが、風速が小さくかつ粒径の小さいものについてはAllen域(中間域)の範囲に存在した。抗力係数 C_D はNewton域、Allen域において以下の値(4.4)に近似することができる。

$$\begin{aligned} \text{Newton域} : C_D &= 0.44 \\ \text{Allen域} : C_D &= \frac{10}{(Re_p)^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

そして、与えられた風速よりも粒子速度が小さいとき、粒子は軽産物側に回収され、同様にして、与えられた風速よりも粒子速度が大きいとき、粒子は重産物側に回収される、と考えたとき、風速と粒子速度が一致する条件が球形粒子の分離条件であると示すことができる。運動方程式において、終末沈降速度つまり $\frac{dv}{dt} = 0$ のとき、以下の式(4.5)のように粒子の終末沈降速度 v_g を解くことができる。ここで、風速=終末沈降速度となる粒子径を球形粒子の臨界粒径 d_{SG} として定義した。

$$v_g = \frac{4gd(\rho_p - \rho_f)}{3C_D\rho_f}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

2) 実際の選別実験から得られる臨界粒径

次に、実験結果から得られる実際の臨界粒径について考える。風力選別実験で得られた軽産物及び重産物の粒度分布から、実際の実験においてどの粒度において軽産物と重産物に分かれるかの算出を試算した。

ガラスは、粒度の小さいものが軽産物として、粒度の大きいものが重産物として回収された。したがって、ガラス軽産物のうち、最大粒径から全体の5 wt%となる粒径を風力軽産物95 wt%粒径 d_{RG1} 、ガラス重産物のうち、最小粒径から全体の5 wt%となる粒径を風力重産物5 wt%粒径 d_{RG2} とし、その平均値を実際のガラス粒子の臨界粒径 d_{RG} と定義した。

同様にしてシリコンセルは、粒度の小さいものが重産物として、粒度の大きいものが軽産物として回収された。したがって、シリコンセル軽産物のうち、最大粒径から全体の5 wt%となる粒径を風力軽産物95 wt%粒径 d_{RC1} 、ガラス重産物のうち、最小粒径から全体の5 wt%となる粒径を風力重産物5 wt%粒径 d_{RC2} とし、その平均値を実際のシリコンセル粒子の臨界

粒径 d_{RC} と定義した。

+1.0 mm については、手選による成分分析で得られた粒度分布を-1.0 mm については XRF 分析で得られた粒度分布を用いて、ガラス、シリコンセルそれぞれの実際の臨界粒径を求めた。

3) 粒径に伴う抵抗力形状係数の変化

以上より求めた球形粒子の臨界粒径 d_S と実際の粒子の臨界粒径 d_R を比較して、抵抗形状係数 $\kappa = d_R/d_S$ として定義した。この抵抗力形状係数を各風速条件で求め、横軸を実際の粒子の臨界粒径、縦軸を抵抗力形状係数にとり、以下の図 4.1.22 に示した。

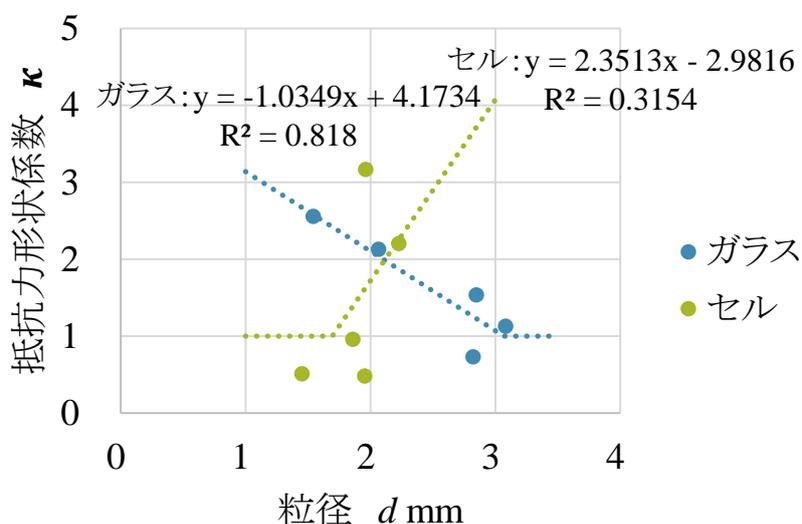


図 4.1.22 粒径と抵抗力形状係数の関係

図 4.1.22 よりガラス粒子は粒径の増大により抵抗力形状係数は減少し、一方で、シリコンセル粒子は、粒子径の増大により抵抗形状係数が増大することが示された。これは、シリコンセル粒子が厚み一定の扁平粒子であり、空気流に垂直な断面積の大きい大粒子ほど、風に対する抵抗の形状係数が大きく、重産物に回収されやすくなったと推測した。また、抵抗力形状係数は球形粒子よりも小さい 1 以下にはならないと想定し、近似直線が 1 に達した時点で 1 に収束するとしてガラス粒子、シリコンセル粒子の粒径と抵抗力形状係数の関係をそれぞれ以下の式(4.6)、(4.7)のように表した。

$$\begin{aligned} \text{ガラス} : \kappa_g &= -1.0439d + 4.1734 & (d < 3.07) \\ \kappa_g &= 1 & (d > 3.07) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \text{シリコンセル} : \kappa_c &= 2.3513d - 0.3154 & (d > 1.69) \\ \kappa_c &= 1 & (d < 1.69) \end{aligned} \quad (4.7)$$

4) 最適な風速条件と臨界粒径の推測

球形粒子の終末沈降速度の式(4.5)に、4.3 で得られたガラス、シリコンセルそれぞれの抵抗形状係数を代入することで、実際の粒子の終末沈降速度を推測することが可能となる。抵抗形状係数 $\kappa = d_R/d_S$ であるため、 $d_S = \mu/d_R$ として考えると、実際の終末沈降速度は以下の式のように表すことができる。

$$v_g = \left(\frac{4gd(\rho_p - \rho_f)}{3\kappa\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

したがって、式(4.6)(4.7)を代入して、粒径と終末沈降速度の式をグラフにまとめると、以下の図 4.1.23 のように表すことができる。ここで、実際の臨界粒径と風速との関係をプロットで示し、実際の実験において用いた風速を点線で示した。

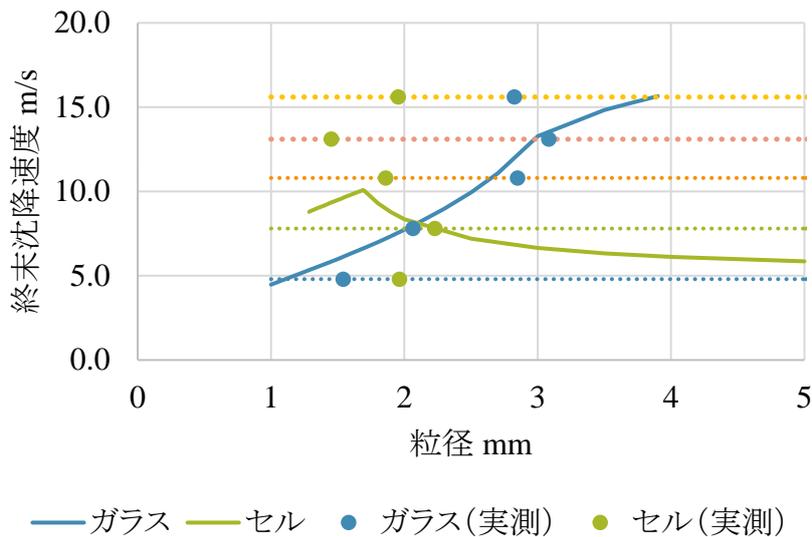


図 4.1.23 粒径と終末沈降速度の関係

図 4.1.22 より、与えた風速条件との大小関係をみることにより、各成分が粒径ごとに重産物側に排出されるか、軽産物側に排出されるかを推測することが可能である。つまり、ガラスは粒径が増大すると終末沈降速度も増大するため重産物側に排出されやすくなるが、シリコンセルは $d < 1.69$ の範囲においては粒径の増大とともに終末沈降速度は減少するため、軽産物側に排出されやすくなることが明らかとなった。

さらに、ガラスの粒径と終末沈降速度の関係式、および、シリコンセルの粒径と終末沈降速度の関係式の交点は同じ風速条件を与えた時に、ガラス、シリコンセルそれぞれがある粒径で同じ終末沈降速度を持つことを示す。したがって、ガラスの抵抗形状係数を $\mu_g = a_g d_g + b_g$ 、シリコンセルの抵抗形状係数を $\mu_c = a_c d_c + b_c$ とおくと、その交点の粒径は以

下の式(4.9)のように算出が可能である。

$$d = \frac{(\rho_g - \rho_f)b_c - (\rho_c - \rho_f)b_g}{(\rho_c - \rho_f)a_g - (\rho_g - \rho_f)a_c} \quad (4.9)$$

式(4.9)を解くと、限界粒径は2.09 mm、風速条件は8.1 m/sと求められた。つまり、風速8.1 m/sを与えたとき、2.09 mm以上のガラスが重産物側に、2.09 mm以下のガラスは軽産物側に、一方で2.09 mm以上のシリコンセルは軽産物側に、2.09 mm以下のシリコンセルは重産物側に排出されることとなり、選別前後にふるい分けを実施することにより、理想的な分離が達成されることが推測できた。実際に、風力選別における風速条件変化の実験においては、風速7.8 m/sで分離効率最大の最適条件となったことから、実験において精度の高い選別を行うことができたと示された。

4.1.5. エアテーブル選別におけるガラス粒子充填層中のシリコンセル粒子の浮上機構

令和2年度構築したエアテーブル選別におけるシリコンセル分離機構では、ガラス粒子充填層の空隙率の変化に伴うシリコンセルに働く上昇力を考えることによって、エアテーブル選別実験においてシリコンセル粒子が粒径に関わらず、すべて浮上し、エアテーブル軽産物として回収されることを示した。また、シリコンセル粒子の上昇力を空隙率およびガラス粒子とシリコンセル粒子両者のサイズの関係として示して、一般化できることを示した。

本年度は令和2年度構築したモデルをさらに発展させ、常に変化するエアテーブルデッキ上のガラス粒子充填層中の空隙率を考慮し、さらにシリコンセル粒子とガラス粒子空隙中との面積割合によってシリコンセル粒子がガラス粒子に疎外されてしまうような場合も含めて考えることにより、より現象に近づけたモデルを構築した。

以下の図4.1.24にガラス粒子充填層中のシリコンセル粒子の浮上機構モデルのフローを示す。

まず、エアテーブル選別のフィードは約90 wt%以上をガラス粒子が占めており、風力選別で選別しきることのできなかつたシリコンセル粒子がわずかに残っているという状態にある。したがって、ガラス粒子が充填している層の中にシリコンセル粒子が存在すると仮定したうえで、エアテーブルに与えられている振動によってガラス粒子層が膨張・収縮を繰り返すことで、ガラス粒子層の空隙率が変化すると考える。

そして、ガラス粒子層中の空隙率の増加に応じて、シリコンセルが粒子層中の空隙を抜けて通過可能なシリコンセル粒子とガラス粒子の上昇を疎外されてしまうシリコンセル粒子が存在し、これをシリコンセル粒子とガラス粒子中の空隙との面積割合で決まると考える。

続いて、粒子層中を通過可能なシリコンセル粒子に働く上昇力を運動方程式から考えることで、ガラス粒子層を通過して完全に上昇するまでの挙動を王ことができる。

このようにして、それぞれ段階を追って、エアテーブル選別におけるガラス粒子層充填層中のシリコンセル粒子の浮上機構を考えていく。

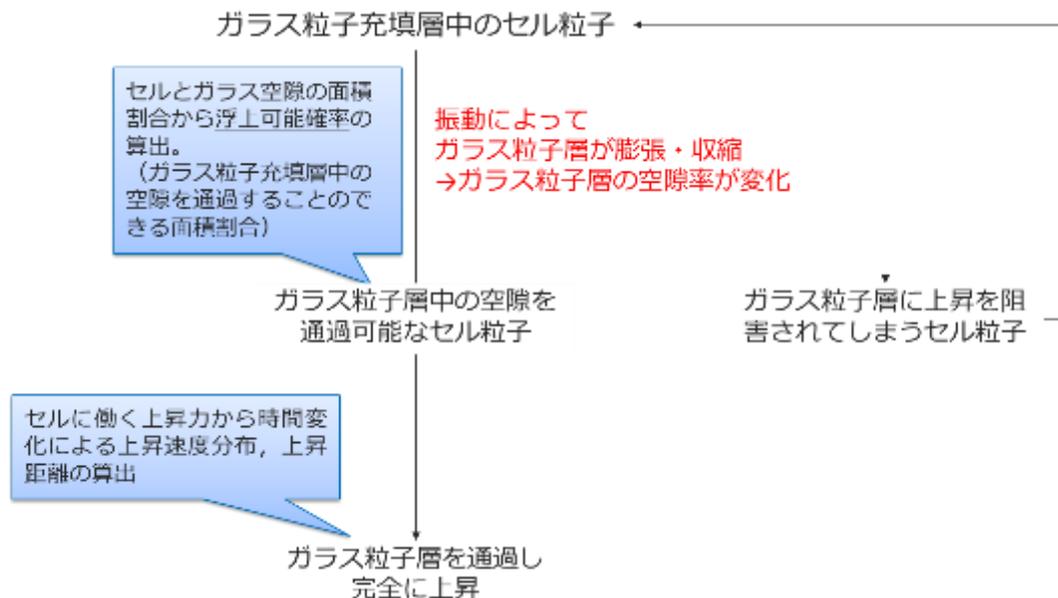


図 4. 1. 24 ガラス粒子充填層中のシリコンセル粒子の浮上機構モデル

1) 時間変化に伴う空隙率の変化の定義

エアテーブル上のガラス粒子層は振動のエアテーブルに与えられえる振動の影響を受けて常にその厚さを変化さシリコンセル。したがって、振動の周期に伴いガラス粒子層が膨張・収縮し、空隙率を変化さシリコンセルと考え、時間変化に伴うガラス粒子層の空隙率の変化を定義することにした。算出方法の流れは以下である。

①各地点の最密充填時と最大膨張時のガラス粒子層厚さを測定

まず、エアテーブルのデッキ上に試料を実験時と同様程度の量、条件にて投入し、図 4. 1. 25 のように、A~H の 8 か所でガラス粒子層の厚さの変化を測定した。

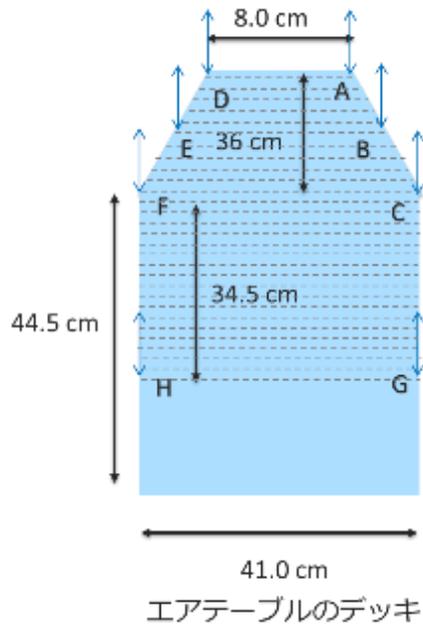


図 4.1.25 デッキ上のガラス粒子層厚さ測定箇所

②デッキ上での試料層の体積を算出し、実試料体積と比較を行う

デッキ上での試料層体積は5つの箇所に分けて、算出を行った。

(1) 台形 DACF 内の山

デッキにはピッチ 15 mm、高さ 10 mm の山があるため、この間の体積を以下の式で算出した。

$$(8 + 41) * 36/2 * 0.1/2 = 44.1 \text{ cm}^3 \quad (4.10)$$

(2) 地点 CF の粒子層平面を底面とするオベリスク

オベリスク形状とは図 4.1.26 のような図形であり、体積 $V = h/6(Ab + aB + 2(ab + AB))$ で求めることができる。したがって、地点 CF の粒子層平面を底面として以下の式で算出した。

$$36/6(\text{CF 平均} * 8 + \text{AD 平均} * 41 + 2(\text{AD 平均} * 8 + \text{CF 平均} * 41)) \quad (4.11)$$

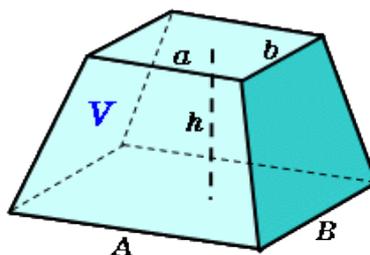


図 4.1.26 オベリスク形状

(3) 長方形 FCGH 内の山

(1) と同様、長方形内にあるピッチ 15 mm、高さ 10 mm の山間の体積を以下の式で算出した。

$$41 * 34.5 * 0.1/2 = 70.725 \text{ cm}^3 \quad (4.12)$$

(4) 地点 HG の粒子層平面を底面とする四角柱

地点 HG の粒子層平面を台形として、長さ FH を厚さとして、以下の式で算出した。

$$(H + G) * 41/2 * 34.5 \quad (4.13)$$

(5) 地点 HG より下部は山のないフラット部分

地点 HG より下部は山がないため、山高 10 mm を加算して、以下の式で算出した。

$$(H + G + 1) * 41/2 * 10 \quad (4.14)$$

③ 空隙率を算出する（最密充填時 ε_1 、最大膨張時 ε_2 ）

最密充填時の空隙率を ε_1 、最大膨張時の空隙率を ε_2 としてそれぞれ以下の式で算出した。またこの時、最密充填時の粒子層体積を V_1 、最大膨張時の粒子層体積を V_2 、実試料体積を V とおいた。

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{V}{V_1} \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{V}{V_2} \quad (4.16)$$

④ 補正空隙率を算出する（最密充填時 ε_1' 、最大膨張時 ε_2' ）

ここで、ガラス粒子を同じ粒径の球形粒子の集合と仮定すると、最密充填時の空隙率は面心立方格子のような配置となる。最密充填時の空隙率を算出すると、球形粒子の最密充填構造での空隙率 0.26 よりも小さい値となったが、これは粒径の小さい粒子が隙間に入り込んでいるためであると考えられる。そこで、最密充填時に隙間に入り込んでしまうような粒子は最密充填時、最大膨張時に同様にないものと考え、隙間に入り込んだ粒子の体積を除いて最密充填時の補正空隙率 ε_1' 、最大膨張時の補正空隙率 ε_2' を以下のように算出した。

$$V = (1 - \varepsilon_1)V_1 = (1 - \varepsilon_2)V_2 \quad (4.17)$$

より

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(1 - \varepsilon_1)}{(1 - \varepsilon_2)} \quad (4.18)$$

最密充填時、隙間に入り込む粒子がないものと仮定して、すべてが面心立方格子の配置となる時最密充填時の補正空隙率は

$$\varepsilon_1' = 0.26 \quad (4.19)$$

最密充填時の補正時に除いた隙間に入り込んでしまったと考えられる粒子体積は

$$(\varepsilon_1' - \varepsilon_1)V_1 \quad (4.20)$$

したがって、最大膨張時の補正空隙率は

$$\begin{aligned} \varepsilon_2' &= 1 - \frac{(1 - \varepsilon_2)V_2 - (\varepsilon_1' - \varepsilon_1)V_1}{V_2} \\ &= \varepsilon_2 + \frac{(\varepsilon_1' - \varepsilon_1)V_1}{V_2} \\ &= \varepsilon_2 + \frac{(\varepsilon_1' - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)}{1 - \varepsilon_1} \end{aligned} \quad (4.21)$$

と示される。

上記の方法で、各振動条件における最密充填時、最大膨張時の補正空隙率を算出し、以下の図 4.1.27 に示した。

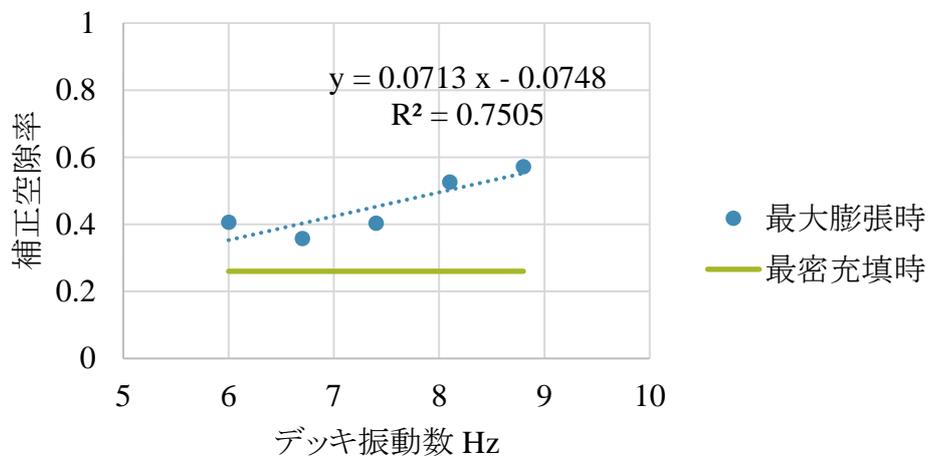


図 4.1.27 振動条件ごとの補正空隙率

⑤時間変化による空隙率の変化の定義

エアテーブルの振動中、ガラス粒子層の空隙率は時間によって変化する。偏心軸によって振動を作っていることから、空隙率は最小空隙率（最密充填時の補正空隙率 ϵ'_1 ）から最大空隙率（最大膨張時の補正空隙率 ϵ'_2 ）まで sin 関数的に変化すると仮定すると、以下のような式を立てることができ、図 4.1.28 のような空隙率の変化のイメージとなる。この時、 X はデッキ振動数[Hz]、 t は時間[s]である。

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\epsilon'_2 - \epsilon'_1) \sin\left(2\pi X\left(t - \frac{1}{4X}\right)\right) + \left(\epsilon'_2 - \frac{1}{2}(\epsilon'_2 - \epsilon'_1)\right) \quad (4.22)$$

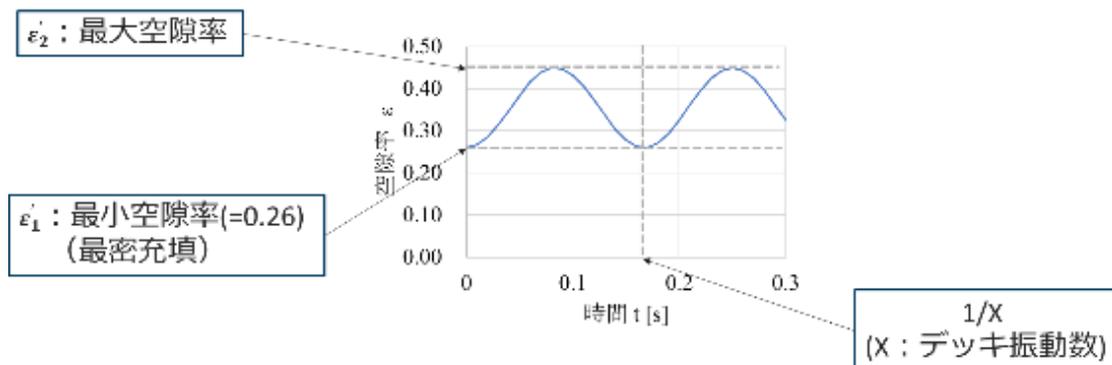


図 4.1.28 時間変化による空隙率の変化

2) 振動に伴う浮上可能空隙率の検討

エアテーブルデッキ上のガラス粒子は球形粒子であり、球形粒子での最密充填構造である面心立方格子の形に配置され、デッキの振動によって層が膨張・収縮する際もこの配置が保たれると仮定する。そして、この配置の中に扁平で円形のシリコンセル粒子が存在すると考える。この配置のイメージを図 4.1.29 に示す。

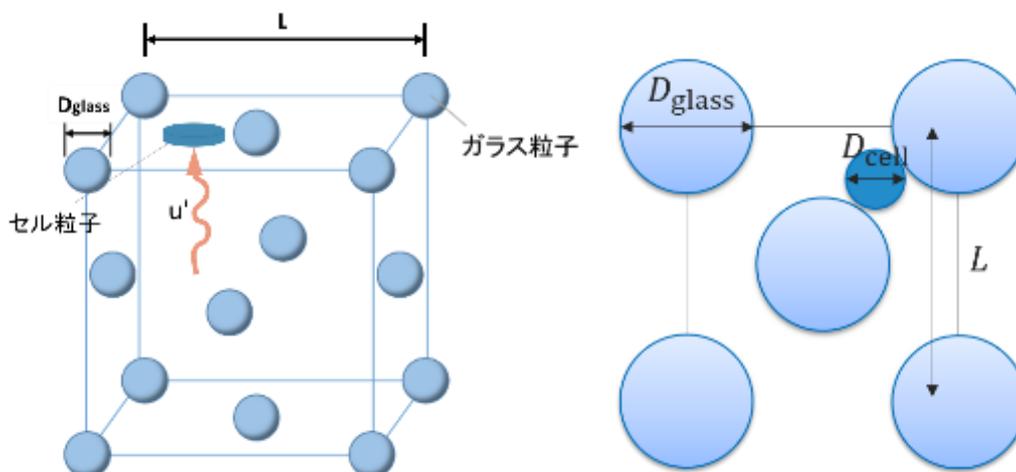


図 4.1.29 ガラス粒子充填層中のシリコンセル粒子
(左は面心立方格子の配置図、右は上からみた図)

このとき、面心立方格子の一边の長さを L 、ガラス粒子の直径 D_{glass} とし、 $L = a \times D_{\text{glass}}/2$ (ガラス粒子の半径の a 倍が一边と等しくなる) とする。このときガラス粒子層の空隙率 ε は式によって表される。

$$\varepsilon = 1 - \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_{\text{glass}}}{2}\right)^3}{L^3} = 1 - \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi}{a^3} \quad (4.23)$$

そして、シリコンセル粒子の直径を D_{cell} として、面心立方格子を上からみた右図のようにガラス粒子にシリコンセル粒子が重ならない位置に存在すれば、シリコンセル粒子はガラス粒子に疎外されることなく通過可能であると考えられる。したがって、格子内で、シリコンセル粒子の中心がガラス粒子表面からシリコンセルの半径分離れた位置までに存在することができれば、通過可能な位置となるため、格子内におけるその面積割合を浮上可能空隙率 P として考えると、以下の式で示すことができる。

$$P = \frac{L^2 - \pi \left(\frac{1}{2}(D_{\text{cell}} + D_{\text{glass}})\right)^2 \times \left(\frac{1}{4} \times 4 + 1\right)}{L^2} = \frac{L^2 - \frac{\pi}{2}(D_{\text{cell}} + D_{\text{glass}})^2}{L^2} \quad (4.24)$$

3) ガラス粒子層中のシリコンセル粒子にかかる上昇力の検討

まず、ガラス粒子層の間隙を通過する風速 u' を算出する。式(4.25)は固形粒子充填層を流れる流体の圧力損失を示す式である Ergun の式^{エラー! 参照元が見つかりません。}である。

$$\Delta P = \left\{ \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{150\mu_f u_0}{D_p^2} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1.75\rho_f u_0^2}{D_p} \right\} L \quad (4.25)$$

ただし ΔP は圧力損失、 L は粒子層の厚さ、 μ_f は流体の粘性係数、 D_p は粒子の直径、 ρ_f は流体密度、 ε は粒子層の空隙率、 u_0 は空塔速度である。

ここで、粒子層の圧力損失はガラス粒子ひとつひとつが流体から受ける抵抗の総和とみなしリコンセルため、式(4.26)のように仮定できる、

$$\Delta PA = \sum_{i=1}^N Ri \quad (4.26)$$

ただし A は粒子層面積、 N は層中の粒子の総数、 R_i は i 番目の単一粒子が受ける抵抗である。 N と R はそれぞれ式(4.27)および式(4.28)(4.27)のように求まる。

$$R = C_D \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot \frac{\rho_f u'^2}{2} \quad (4.27)$$

$$N = \frac{6AL(1-\varepsilon)}{\pi D_p^3} \quad (4.28)$$

ただし C_D は単一粒子の抵抗係数、 u' は粒子層間隙中の風速である。

ゆえに粒子層間隙中風速 u' は式(4.25)の左辺に式(4.26)を、右辺に式(4.27)および式(4.28)を代入した式(4.29)から求まる。

$$\left\{ \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{k_1\mu_f u_0}{D_p^2} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{k_2\rho_f u_0^2}{D_p} \right\} AL = \frac{6AL(1-\varepsilon)}{\pi D_p^3} \cdot C_D \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot \frac{\rho_f u'^2}{2} \quad (4.29)$$

ここでは、粒子の直径 D_p をガラス粒子の直径 D_{glass} 、単一粒子の抵抗係数 C_D をガラス粒子の抵抗係数 $C_{D_{\text{glass}}}$ として考えることで、粒子層間隙中の風速 u' を求める。

続いて、シリコンセルを disk 型と仮定ガラス粒子層中のシリコンセルに働く力を運動方程式で考える。シリコンセルに働く力は空気抵抗 R と重力 mg であり、以下の式(4.30)のように表すことができる。この時、シリコンセルの上昇速度 v 、およびシリコンセルの上昇距離 y をそれぞれ式(4.31)、式(4.32)考えることが可能となる。

$$m \frac{dv}{dt} = R - mg$$

$$m \frac{dv}{dt} = C_D \frac{\pi D_{\text{cell}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_f u'^2}{2} - \rho_{\text{cell}} \cdot \frac{\pi D_{\text{cell}}^2}{4} \cdot c \cdot g \quad (4.30)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{C_{D_{\text{cell}}}}{c} \frac{\rho_f (v - u')^2}{2\rho_{\text{cell}}} - g \quad (4.31)$$

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (4.32)$$

ただし、 ρ_{cell} はシリコンセル密度、 c はシリコンセルの厚さで本研究では0.03 mmであった。

4) 浮上可能空隙率を考慮したシリコンセル粒子の上昇速度、上昇距離算出モデル

1) ~3) で検討した定義やモデルをすべて組み合わせて、浮上可能空隙率を考慮したシリコンセル粒子の時間変化による上昇速度および上昇距離を算出していく。

まず、微小時間 dt を考え、 $t = n \times dt$ (n は正の整数)として、微小時間ごとの浮上可能確率を P_n 、上昇速度を v_n とすると、その微小時間で浮上する粒子は P_n 個であり、それらの上昇速度は v_n 、浮上しない粒子は $1 - P_n$ 個であり、それらの上昇速度は0と考えることができる。ここで、その微小時間におけるシリコンセル粒子の平均浮上速度 $\bar{v}_n = P_n \times v_n + (1 - P_n) \times 0 = P_n \times v_n$ と示すことができる。これらを仮に $n = 1, 2$ についてまとめると、表 4.1.5 のように整理することができる。

表 4.1.5 微小時間ごとの浮上可能空隙率と平均浮上速度

浮上可能空隙率	$n = 1$		$n = 2$	
	P_1		P_2	
	個数	速度	個数	速度
浮上する粒子	P_1 個	v_1	P_2 個	v_2
浮上しない粒子	$(1 - P_1)$ 個	0	$(1 - P_2)$ 個	0
平均上昇速度	$\bar{v}_1 = P_1 v_1$		$\bar{v}_2 = P_2 v_2$	

組み合わせモデルでは、ガラス粒子充填層中のすべてのシリコンセル粒子が平均浮上速度を初速度として持ち、次の微小時間でさらに力を受けて浮上していくと考えることとしていくことで、上昇速度を算出する。

5) シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間の比較

4) で示した浮上可能空隙率を考慮したシリコンセル粒子の浮上挙動モデルを用いて、様々な条件を変化させた場合に、シリコンセル粒子がガラス粒子層上面に到達するまでの時間を比較した。ここでは、MATLAB を用いて計算を行ったが、ソフトウェアで計算が可能な最小時間刻みとなった微小時間 $dt = 0.0001$ とした。

5) -1 ガラス粒径変化

ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 2, 4, 6, 8 \text{ mm}$ 、シリコンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$ 、デッキ振動数 $X = 7.4 \text{ Hz}$ 、デッキ上風速 $u_0 = 4.7 \text{ m/s}$ のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4.1.30 に示した。また、ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 2, 4, 6, 8 \text{ mm}$ 、シリコ

ンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0$ mm、デッキ振動数 $X = 8.3$ Hz、デッキ上風速 $u_0 = 6.0$ m/s のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4. 1. 31 に示した。

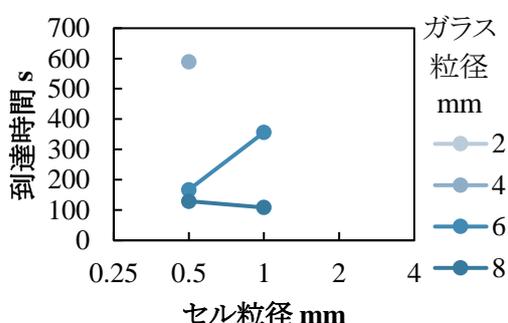


図 4. 1. 30 ガラス粒径を変化させたときの到達時間の変化
(デッキ振動数 $X = 7.4$ Hz,
デッキ上風速 $u_0 = 4.7$ m/s)

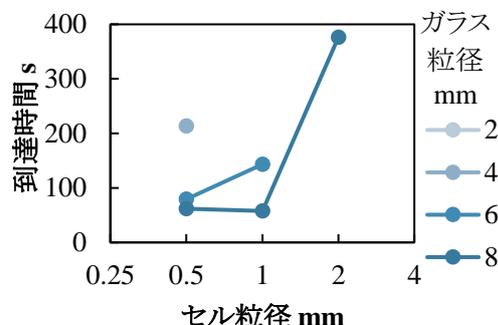


図 4. 1. 31 ガラス粒径を変化させたときの到達時間の変化
(デッキ振動数 $X = 8.3$ Hz,
デッキ上風速 $u_0 = 6.0$ m/s)

図 4. 1. 30、図 4. 1. 31 よりガラス粒径を大きくすると、到達時間は短くなることが示された。同じ空隙率の変化の仕方であり、かつ、同じ粒径のシリコンセル粒子で考えた場合、本モデルにおいてはガラス粒径が大きくなると、ガラス粒子の面心立方格子の一辺が大きくなるため、浮上可能空隙率が大きくなり、浮上のしやすさがより効果的に表れたと考えられる。一方で、ガラス粒径が 8 mm の場合、シリコンセル粒径 1 mm と比べて 0.5 mm の方が到達時間は長くなることが示された。このようにガラス粒子とシリコンセル粒子の大きさの比が大きいとき、両者の浮上可能空隙率の差は影響しにくく、シリコンセルにかかる上昇力が大きいシリコンセル粒径 1 mm の方が到達時間は短くなると示されたと考えられる。

5) -2 振動変化

ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 4$ mm、シリコンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0$ mm、デッキ振動数 $X = 6.6, 7.0, 7.4, 7.9, 8.3$ Hz、デッキ上風速 $u_0 = 4.7$ m/s のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4. 1. 32 に示した。また、ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 8$ mm、シリコンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0$ mm、デッキ振動数 $X = 6.6, 7.0, 7.4, 7.9, 8.3$ Hz、デッキ上風速 $u_0 = 6.0$ m/s のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4. 1. 33 に示した。

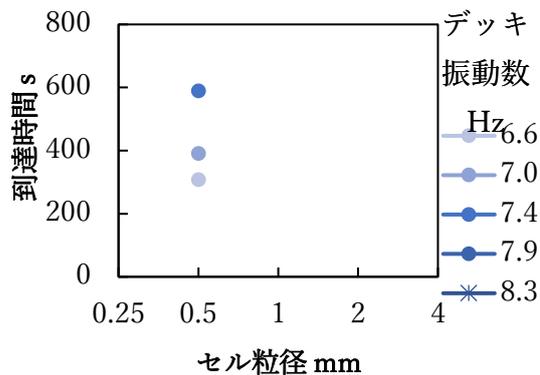


図 4.1.32 デッキ振動数を変化させたときの到達時間の変化
(ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 4 \text{ mm}$,
デッキ上風速 $u_0 = 4.7 \text{ m/s}$)

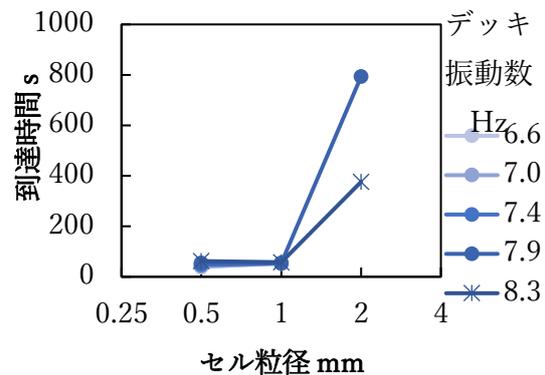


図 4.1.43 デッキ振動数を変化させたときの到達時間の変化
(ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 8 \text{ mm}$,
デッキ上風速 $u_0 = 6.0 \text{ m/s}$)

図 4.1.32、図 4.1.33 よりデッキ振動を大きくすると、到達時間は長くなることが示された。デッキ振動を大きくすると、ガラス粒子層の空隙率の変化が大きくなる。本モデルにおいて、空隙率が大きくなると、ガラス粒子層間隙中の風速が小さくなるため、シリコンセルが上昇しにくくなることがより効果的に表れていると考えられる。一方で、図 4.1.33 より、ガラス粒径が 8 mm の場合、シリコンセル粒径の大きさの応じてその大小関係が変わることがある。これは 5) -1 でも述べたように、ガラス粒径とシリコンセル粒径の大きさの比が小さい場合には、浮上可能空隙率の影響の方が効果的に表れるため、シリコンセル粒径 2 mm では、デッキ振動が小さいほうが到達時間が長く表れたと考えられる。

5) -3 風速変化

ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 4 \text{ mm}$ 、シリコンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$ 、デッキ振動数 $X = 7.4 \text{ Hz}$ 、デッキ上風速 $u_0 = 4.7, 5.5, 6.0, 6.7, 7.0 \text{ m/s}$ のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4.1.34 に示した。また、ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 4 \text{ mm}$ 、シリコンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$ 、デッキ振動数 $X = 8.3 \text{ Hz}$ 、デッキ上風速 $u_0 = 4.7, 5.5, 6.0, 6.7, 7.0 \text{ m/s}$ のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4.1.35 に示した。そして、ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 8 \text{ mm}$ 、シリコンセル粒径 $D_{\text{cell}} = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$ 、デッキ振動数 $X = 8.3 \text{ Hz}$ 、デッキ上風速 $u_0 = 4.7, 5.5, 6.0, 6.7, 7.0 \text{ m/s}$ のとき、シリコンセル粒子のガラス粒子層上面への到達時間を以下の図 4.1.36 に示した。

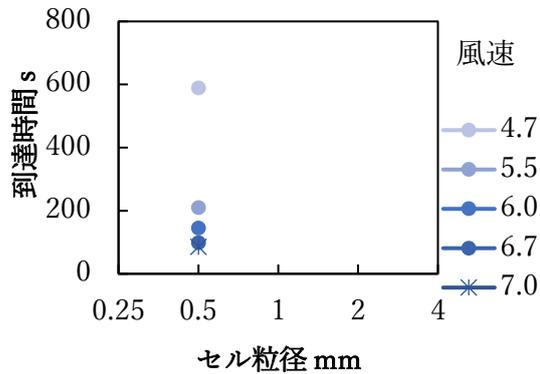


図 4.1.34 デッキ上風速を変化させたときの到達時間の変化
(ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 4 \text{ mm}$,
デッキ振動数 $X = 7.4 \text{ Hz}$)

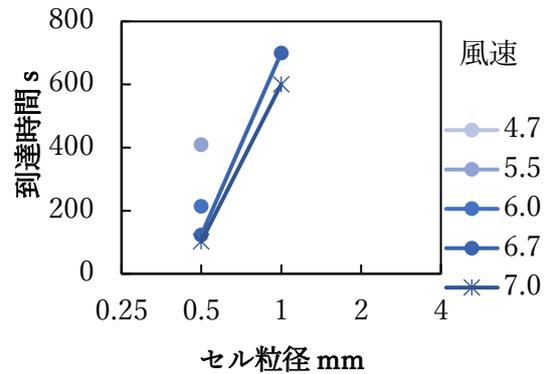


図 4.1.35 デッキ上風速を変化させたときの到達時間の変化
(ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 4 \text{ mm}$,
デッキ振動数 $X = 8.3 \text{ Hz}$)

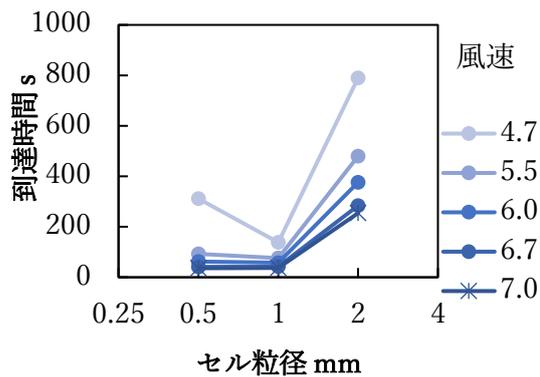


図 4.1.36 デッキ上風速を変化させたときの到達時間の変化
(ガラス粒径 $D_{\text{glass}} = 8 \text{ mm}$,
デッキ振動数 $X = 8.3 \text{ Hz}$)

図 4.1.34、図 4.1.35、図 4.1.36 より風速を大きくすると、到達時間は短くなることが示された。これは、デッキ下から与えられる風速が大きくなるとシリコンセルはより上昇しやすくなることが表れていると考えられる。また、図 4.1.36 より、ガラス粒径が 8 mm で風速が 4.7 m/s の場合、シリコンセル粒径 1 mm の時に最も到達時間は短いと示された。これは、5)-1、5)-2 でも述べたようにガラス粒径とシリコンセル粒径の比が大きい場合に、浮上可能空隙率の差が影響しにくくシリコンセルにかかる上昇力の影響が大きく表れているためであると考えられる。

4.1.6. まとめ

1) カバーガラスが割れた使用済み太陽光パネルの処理フローの検討

カバーガラスが割れた使用済み太陽光パネルを加熱処理した後にふるい分け、風力選別エアテーブル選別を施すことで、異物混入の殆どない高純度ガラス回収およびその他有価金属成分を回収するフローの検討を行った。令和2年度からふるい分けの網目を50 mmから20 mmにすること、風力選別の風速の検討条件を増加すること、エアテーブル選別の振動および風速の検討条件を増加することで、令和2年度よりも異物混入量が少ない高品位なガラスを回収することを目的として、実験を行った結果以下のことを達成した。

20 mmのふるい分けを加熱処理直後に実施することにより、令和2年度は後の選別に悪影響を及ぼした絡まった銅線を網上産物に濃縮することに成功した。また、これにより、風力選別およびエアテーブル選別では細くて小さい銅線が大幅に減少し、ガラスと同じ重産物側に分配されることを防止することができた。

風力選別では、風速条件を4.8, 7.8, 10.8, 13.1, 15.6 m/sに変化させたところ、風速7.8 m/sで軽産物中におけるシリコンセルの他成分に対する分離効率が最大となり、シリコンセル品位90.0 wt%、シリコンセル回収率92.2 wt%を達成した。

エアテーブル選別では、風速10.8 m/sで実施した本年度試料における風力選別重産物をフィードとして、実験を行った。風速を6.0 m/sに固定し、デッキ振動数を6.6, 7.0, 7.4, 7.9, 8.3 Hzに変化させたところ、デッキ振動数7.0 Hzで重産物中におけるガラスの他成分に対する分離効率が最大となり、ガラス品位は100 wt% (異物含有率0 ppmw)、回収率は99.4 %を達成した。デッキ振動数を7.9 Hzに固定し、風速を4.7, 5.5, 6.0, 6.7, 7.0 m/sに変化させたところ、風速4.7 m/sで分離効率最大となり、ガラス品位は99.997 wt% (異物含有率26 ppmw)、回収率は97.4 %を達成した。

2) 風力選別における選別挙動解析

風力選別において、令和2年度検討したガラスとシリコンセルの選別機構に基づいて、本年度の実験結果を適用し、より詳細に考察を行った。

流体中の球形粒子運動と比較して、ガラス粒子とシリコンセル粒子それぞれの抵抗力形状係数を算出し、ガラス粒子は粒径の増大により抵抗力形状係数は減少し、シリコンセル粒子は粒径の増大により抵抗形状係数が増大することを定量化した。また、粒径と抵抗力形状係数の関係をもとに、ガラス粒子とシリコンセル粒子それぞれの実際の沈降速度を推測し風速条件は8.1 m/sにおいて、両者ともに同じ沈降速度となり、その粒径は2.09 mmであることを試算した。

3) エアテーブル選別における選別挙動解析

エアテーブル選別において、令和2年度検討したシリコンセル粒子のガラス粒子層中における運動に、時間変化による空隙率の変化を考慮し、さらに新しく定義したシリコンセ

ル粒子の空間的な浮上のしやすさをガラス粒子間の空隙内でシリコンセル粒子が通過することのできる面積割合で浮上可能空隙率として定義し、シリコンセル粒子の浮上挙動を考察した。

微小時間ごとに浮上可能空隙率から求めた浮上する粒子の個数を考え、浮上するシリコンセル粒子にかかる上昇力から求められるガラス粒子層上面まで到達時間を条件ごとに比較した。

ガラス粒径を大きくすると、本モデルにおいてはガラス粒子の面心立方格子の一辺が大きくなるため、浮上可能空隙率が大きくなり、浮上のしやすさがより効果的に表れることで、到達時間は短くなることが示された。

デッキ振動を大きくすると、本モデルにおいて、ガラス粒子層の空隙率の変化が大きくなり、ガラス粒子層間隙中の風速が小さくなるため、シリコンセルが上昇しにくくなることがより効果的に表れ、到達時間は長くなることが示された。

風速を大きくすると、デッキ下から与えられる空気流に押し出され、シリコンセルはより上昇しやすくなることが表れ、到達時間は短くなることが示された。

4.2. 選別処理の連続試験

令和2年度の実証事業及び前項までの検討で得られた結果をもとに、実機相当の機器で選別処理を実施した。ここで得られた選別サンプルは、ガラスリサイクル及び金属リサイクルの評価用サンプルとして活用した。

4.2.1. 選別処理フロー

選別処理フローは、令和2年度と同様、加熱分解で得られた産物を3段階の選別を行うこととし、本事業のポイントであるガラスへの異物混入量を低減することを目的に処理フローを設定している。

まず、選別①では振動篩機を用い、銅線及びサイズの大きいシリコンセルを回収した。その後、選別①の篩下を、風力選別（選別②）を用いガラスとシリコンセルの選別を行った。風力選別の重産物は、エアテーブル選別機（選別③）を用い、ガラス中に含まれる微量の銅線やシリコンセルの除去を行った。また、本年度の事業では、エアテーブル選別の改良を行い、ガラス品位のさらなる向上（ガラスへの異物混入量の低減）の検討を行った。

また、ここで得られた選別回収サンプルは、図4.2.2で示す通り、製錬会社及びガラスメーカーでの評価用サンプルとして使用した。

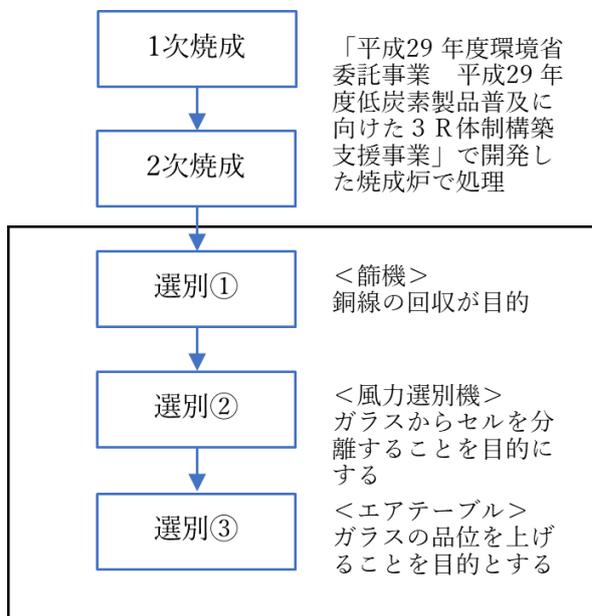


図 4.2.1 処理フロー

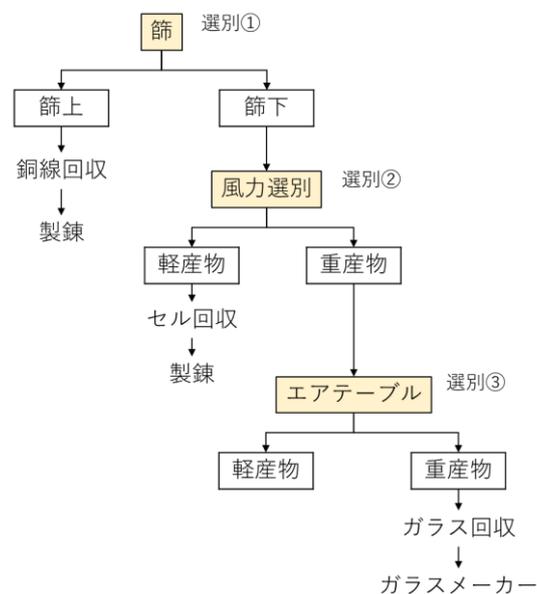


図 4.2.2 選別フローと回収物

選別①：篩選別機

選別①は篩機を用いて、主に銅線（長尺品）とサイズの大きいシリコンセルの回収を行った。今回は、 $\Phi 20$ mmのメッシュサイズで処理を実施した。篩機及び選別前後の写真を写真4.2.1に示す。

選別②：風力選別機

篩選別後のサンプル（篩下部）を風力選別機にかけ、シリコンセルの回収を行った。風力選別機及び回収物の写真を写真4.2.2に示す。

選別③：エアテーブル

風力選別でシリコンセルを回収後、重産物側の回収物をエアテーブル選別機で処理を行った。ここでは、重産物側でガラスを回収することを目的としている。回収物及び機器の写真を写真4.2.3に示す。エアテーブルの運転条件の検討については、事項で記載する。



写真 篩選別機



写真 選別前の混合物



写真 選別後回収物（篩上）



写真 選別後回収物（篩下）

写真4.2.1 篩選別機の外観と選別対象物及び選別回収物の外観



写真 風力選別機



写真 選別前の混合物



写真 選別後回収物（軽産物）



写真 選別後回収物（重産物）

写真 4.2.2 風力選別機の外観と選別対象物及び選別回収物の外観



写真 エアテーブル



写真 選別前の混合物



写真 選別後回収物（軽産物）



写真 選別後回収物（重産物）

写真 4.2.3 エアテーブル選別機の外観と選別対象物及び選別回収物の外観

4.2.2. 振動篩選別の改良

令和2年度の事業では、加熱分解後の太陽光パネルをフレコンに投入し、福岡県北九州市から埼玉県上尾市の選別機器メーカーへ輸送した原料サンプルを用いて選別工程の検討を行った。その際、加熱分解後の細長い棒状のままであった銅線が、絡まった団子状になるものもあり、以後の選別工程での引っ掛かりや、ガラスやシリコンセルを抱え込んだ状態になっていた。また、シリコンセルは微細化され、以後の選別工程での選別時のネックとなり、微量ガラス側に移行することが確認できた。そこで、本年度の事業では、加熱分解後の太陽光パネルは加熱分解炉から出た状態のまま、すぐに振動篩を実施することに変更し、原料サンプル移送時の影響をなくし、実際のリサイクル工程と同様にすることとした。

加熱分解後の太陽光パネルを直ぐに振動篩工程に移行させることで、銅線は細長い棒状のまま、又シリコンセルは細かく割れることなく、篩工程に移行することが出来た。一方で、ガラスはひびが入っているが細かく割れていないものも散見され、振動篩工程で篩上部にガラスが多く残る結果となった。

4.2.3. エアテーブルの改良によるガラス品位向上の検討

令和2年度の事業では、選別回収したガラスには銅線、シリコンセル及びはんだボールが微量含まれており、その濃度は、銅線：10mg/kg、シリコンセル：2mg/kg、はんだボール：30mg/kgに相当した。本年度の事業では、ガラス品位の向上のため、エアテーブルの改良を行い、これら異物の低減を検討した。エアテーブルを写真4.2.4、網を写真4.2.5、構造を図4.2.3に示す。



図 4.2.4 エアテーブル写真

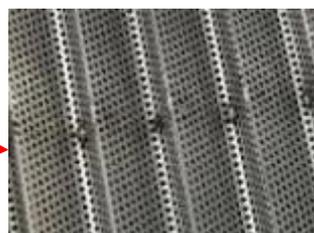


図 4.2.5 エアテーブル網



図 4.2.3 エアテーブル選別機の構造図

エアテーブル選別機の改良項目は、堰の高さ、テーブルの設置角度、網の目開きのサイズ、試料投入位置の変更、試料投入箇所からの跳ね返り防止対策の5点とした。条件変更箇所は、表4.2.1に示す。また、条件検討時においては、日本の太陽光パネルメーカー製で、同一型番のものをを用い評価を行った。

今回の試作においては、堰の高さについては変更後の変化があまりなく、効果は確認できなかった。目開きのサイズ及びテーブル設置傾斜角の変更については、条件変更による効果が確認できた。跳ね返り防止及び試料投入位置の変更も合わせて効果が確認出来、回収ガラス中のはんだボール及びシリコンセルの混入量は極めて少量にすることが可能となった。

表 4.2.1 エアテーブル条件変更箇所

	改良項目				
	堰高さ	テーブル設置角度	目開きサイズ	跳ね返り防止	試料投入位置
ケース①	令和2年度条件				
ケース②	変更	-	-	-	-
ケース③	-	-	-	変更	-
ケース④	-	変更	変更	変更	-
ケース⑤	-	-	-	変更	変更

表 4.2.2 各条件における異物回収個数

	重産物重量	はんだボール	セル
	kg	個数	個数
ケース①	403	2	16
ケース②	482	2	25
ケース③	375	0	6
ケース④	411	0	5
ケース⑤	429	0	2

ここで、国内産メーカーで実施した検討結果をもとに、ガラス品位が最も高かったケース⑤において、中国メーカー、韓国メーカーそれぞれ1社のパネルで検証を行った。検証の結果、国内メーカーでは少なかったはんだボールが、表4.2.3に記載の通りそれぞれ23個/425kg、53個/506kgと、回収ガラス中のはんだボールの量が多いことが確認できた。そこで、はんだボール等微細成分の回収を目的に改良したエアテーブルの目開きのサイズを変更したケース④の条件での試作を行った。表4.2.4に改良後の結果を示す。改良後のエアテーブルで選別を行った結果、はんだボール及びシリコンセルの混入量を削減することが出来た。また、エアテーブルの篩下には、写真4.2.6の通り、はんだボールが多数回収された。

表 4.2.3 他メーカー製品における検討結果

	重産物重量	はんだボール	セル
	kg	個数	個数
中国メーカー	425	23	0
韓国メーカー	506	53	5

表 4.2.4 設備改良後の不純物検出数

	重産物重量	はんだボール	セル
	kg	個数	個数
中国メーカー	425	10	0
韓国メーカー	506	1	0



写真 4.2.6 エアテーブル下に回収されたはんだボール他

4.2.4. 選別回収物のマスバランス及び組成

選別時のマスバランス及び回収物の組成を図 4.2.4 及び表 4.2.5 に示す。また、ここでは令和 2 年度に実施した結果と比較を記載している。

本年度の事業では、回収するガラスへの異物混入量の低減を目的に条件検討を行っている。回収できたガラスは、令和 2 年度の重量比 99.999% から 99.9998% へと異物混入量を低減することが出来た。一方で、回収する銅や銀の品位については、選別時にガラスの移行があったことが要因となり、金属品位が低下する結果となった。振動篩では篩上にガラスの一部が残存しており、令和 2 年度の事業時の 2% に対し、令和 3 年度の 28% と、篩上に移行する割合が大きくなった。また、風力選別及びエアテーブル単体での移行率については、大きな差は確認できなかった。選別回収品のガラス、銅線及びシリコンセルのマスバ

ランスを見ると、振動篩上のガラスが 73%あり、その結果、銅及び銀の含有量が低い結果となった。

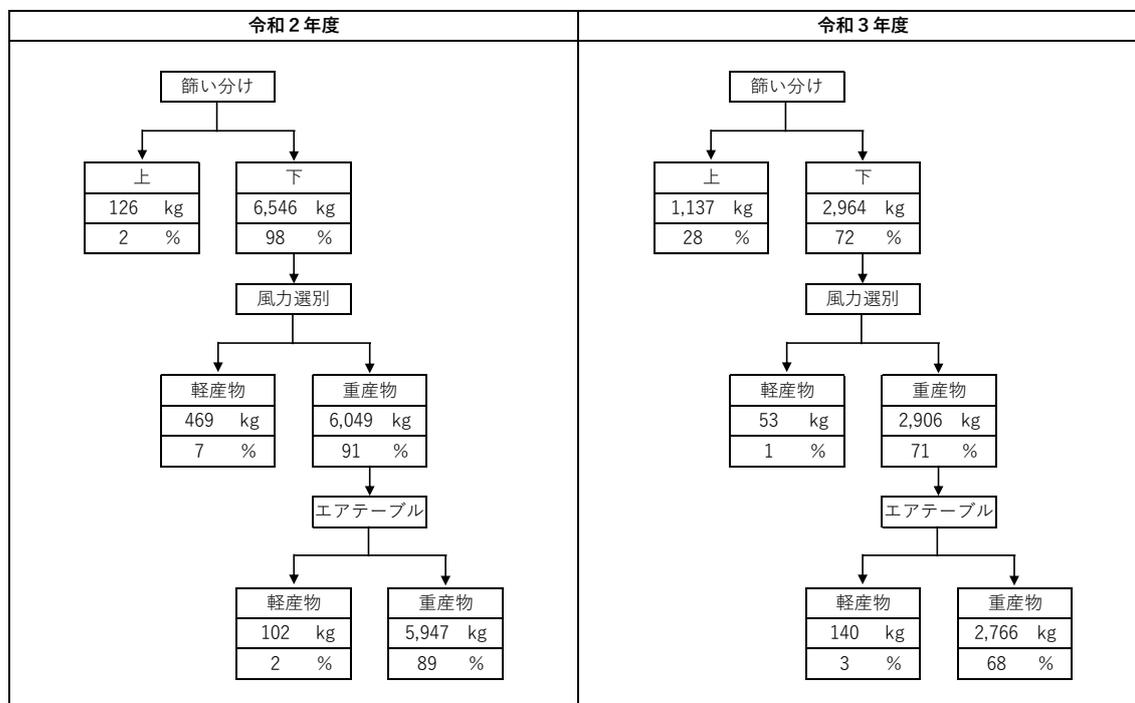


図 4.2.4 選別時のマスバランス

表 4.2.5 選別回収物の組成

	令和 2 年度			令和 3 年度		
	品位			品位		
	ガラス	銅線	セル	ガラス	銅線	セル
篩選別 (上)	33 %	64 %	3 %	73 %	7 %	20 %
風力選別 (軽産物)	0 %	2 %	98 %	%	%	%
エアテーブル (軽産物)	60 %	17 %	23 %	%	%	%
エアテーブル (重産物)	99.999 %	0.001 %	0.0002 %	99.9998 %	0 %	0.0002 %

4.2.5. 課題と改良の提案

本年度の事業では上述の通り、ガラスへの異物混入量は令和 2 年度に比べ更に低減が可能となり目標を達成した。

一方で振動篩等の工程で金属側へガラスが移行し、金属品位を低下させる結果となった。ここで、今後の改良として、振動篩工程で得られた篩上の産物については、再度振動篩を掛けることで、ガラスを次工程に移行させシリコンセルなど、金属分の品位向上とガラスの歩留まり向上は可能であると考えます。

4.3. カバーガラスの組成調査

使用済み太陽光パネルは、当社子会社で太陽光パネルのリサイクルを行っている株式会社リサイクルテックから調達した。また、分岐項目については、グラスウールメーカーとの協議を行い、令和2年度の分析項目に B203 及び CeO₂ を追加した。

4.3.1. 入手した太陽光パネルの情報

今回入手した太陽光パネルは、下記の通り国内外のメーカー製で、製造メーカー数は 17 社、製造メーカー国数は 4 か国（中国、日本、韓国、その他）、型番数は 28 種類となる。

4.3.2. 分析試料の調整

入手した太陽光パネルは、新菱が保有する熱分解炉で処理後、ガラスのみを選別し、分析サンプルとした。サンプリングは、型番毎に行い、合計 28 種を分析対象とした。また、3.1 で行った選別により得られたガラスサンプルについても、同様に分析を実施した。

4.3.3. 分析方法

組成分析は、令和2年度と同様リガク社製の蛍光 X 線装置 ZSX PrimusIV を用い、FP 法で実施した。FP 法（ファンダメンタル・パラメーター法）とは、理論強度が測定強度に一致する組成を求める定量演算法である。この測定を行う前処理として、タングステンカーバイド製粉碎容器にサンプリングしたガラスを約 30g 入れ、粉碎機にセットし 3 分間粉碎する。その後、加圧成形（約 150kg/cm²×1 分間）でディスクを作製した。

4.3.4. 分析結果

合計 28 種類の分析結果について、平均値、最大値、最小値を表 4.3.1 に示す。また、各パネルの分析値については、表 4.3.2 から表 4.3.6 に記載した。なお、分析結果の平均値、最大値及び最小値の算出については、検出下限値以下及び不検出分については 0 として、計算を行った。

今回分析項目として追加した B203 は、28 検体中 6 検体で検出され平均 0.12%（不検出から 0.94%）、CeO₂ は 28 検体中 2 検体で検出され、平均 0.009%（検出下限値以下から 0.12%）という結果であった。その他の分析項目としては、SiO₂ が 70.0 から 71.8%含有されおり、平均値は 70.9%であった。また、CaO は 9.06 から 12.0%、Na₂O は 13.4 から 15.2%含有されおり、平均値は CaO が 10.1%、Na₂O が 14.1%であった。その他成分として、ガラスの透過性向上の目的で添加され Sb₂O₃ も 28 検体中 26 検体で検出されており、平均値は 0.19%、最大値で 0.3%の検出であった。廃棄物処理法に関連する項目として、As₂O₃ は 28 検体中 7 検体で検出されており、最大値では 0.008%含有されているものも存在した。その他に PbO は 28 検体中 7 検体で検出されており、最大値では 0.004%含有されているものも存在した。この結果は、令和2年度の事業で測定した 36 検体の組成範囲と大きな差は確認できなかった。

た。

表 4.3.1 PV カバーガラスの組成分析結果まとめ

単位：mass%

	成分	定量下限	平均値	最大値	最小値
定角 測定	SiO ₂	0.03	70.9	71.8	70.0
	Al ₂ O ₃	0.01	1.13	1.75	0.13
	MgO	0.02	3.02	4.18	0.04
	CaO	0.01	10.11	12.00	9.06
	Na ₂ O	0.04	14.11	15.2	13.4
	K ₂ O	0.01	0.02	0.05	ND
	SO ₃	0.01	0.26	0.49	0.18
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.02	0.02	0.01
	TiO ₂	0.01	0.04	0.23	ND
	ZrO ₂	0.001	0.009	0.03	0.002
	SrO	0.001	0.015	0.22	0.002
	BaO	0.1	ND	ND	ND
	As ₂ O ₃	0.002	0.001	0.008	ND
	Sb ₂ O ₃	0.01	0.19	0.3	ND
	Bi ₂ O ₃	0.01	ND	ND	ND
	PbO	0.002	0.001	0.004	ND
	B ₂ O ₃	—	0.12	0.94	ND
	CeO ₂	0.02	0.009	0.12	ND
定性 分析	F	0.2	ND	ND	ND
	P ₂ O ₅	0.01	0.0004	0.01	ND
	Cl	0.02	0.03	0.05	0.02
	V ₂ O ₅	0.05	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	0.05	ND	ND	ND
	NiO	0.01	ND	ND	ND
	ZnO	0.01	0.002	0.03	ND
	SnO ₂	0.05	ND	ND	ND

表 4.3.2 PV カバーガラスの組成分析 (No.1~6)

単位 : mass%

	成分	定量下限	No,1	No,2	No,3	No,4	No,5	No,6
			中国	中国	中国	中国	中国	中国
定角 測定	SiO ₂	0.03	70.9	70.9	70.8	70.5	70.2	71.1
	Al ₂ O ₃	0.01	1.20	1.10	1.31	1.11	0.96	1.05
	MgO	0.02	3.89	3.98	3.91	3.56	3.31	2.72
	CaO	0.01	9.29	9.73	9.28	9.92	10.30	10.30
	Na ₂ O	0.04	14.2	13.8	14.1	14.3	14.6	14.0
	K ₂ O	0.01	0.01	0	0.03	0.04	0.04	0.03
	SO ₃	0.01	0.19	0.18	0.21	0.29	0.32	0.24
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
	TiO ₂	0.01	0.03	0.02	ND	0.02	0.04	0.02
	ZrO ₂	0.001	0.010	0.006	0.006	0.007	0.004	0.004
	SrO	0.001	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
	BaO	0.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	As ₂ O ₃	0.002	ND	ND	ND	0.002	0.003	ND
	Sb ₂ O ₃	0.01	0.18	0.19	0.20	0.20	0.14	0.22
	Bi ₂ O ₃	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	PbO	0.003	ND	ND	ND	ND	0.002	0.002
B ₂ O ₃	-	ND	ND	ND	ND	ND	0.20	
CeO ₂	0.02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
定性 分析	F	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	P ₂ O ₅	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cl	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	0.03
	V ₂ O ₅	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	NiO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ZnO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	SnO ₂	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND

表 4.3.3 PV カバーガラスの組成分析 (No.7~12)

単位 : mass%

	成分	定量下限	No,7	No,8	No,9	No,10	No,11	No,12
			中国	中国	日本	日本	日本	日本
定角 測定	SiO ₂	0.03	70.3	70.6	71.3	70.4	70.7	71.0
	Al ₂ O ₃	0.01	0.82	1.07	0.94	1.18	1.18	1.67
	MgO	0.02	4.03	4.00	4.11	3.88	3.87	0.07
	CaO	0.01	9.35	9.70	9.45	9.52	9.71	11.80
	Na ₂ O	0.04	14.0	14.1	13.7	13.7	13.8	14.6
	K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.04	0.04	0.05	0.03
	SO ₃	0.01	0.21	0.18	0.20	0.20	0.20	0.34
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
	TiO ₂	0.01	0.04	0.03	ND	0.02	0.01	0.23
	ZrO ₂	0.001	0.009	0.010	0.004	0.005	0.007	0.008
	SrO	0.001	0.002	0.020	0.003	0.007	0.006	0.004
	BaO	0.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	As ₂ O ₃	0.002	ND	ND	ND	0.001	ND	ND
	Sb ₂ O ₃	0.01	0.17	0.14	0.17	0.28	0.28	0.19
	Bi ₂ O ₃	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	PbO	0.003	ND	ND	ND	0.001	0.002	ND
	B ₂ O ₃	-	0.94	ND	ND	0.54	ND	ND
CeO ₂	0.02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
定性 分析	F	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	P ₂ O ₅	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cl	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
	V ₂ O ₅	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	NiO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ZnO	0.01	ND	ND	ND	0.02	0.03	ND
	SnO ₂	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND

表 4.3.4 PV カバーガラスの組成分析 (No.13~18)

単位 : mass%

	成分	定量下限	No,13	No,14	No,15	No,16	No,17	No,18
			日本	日本	日本	日本	日本	日本
定角 測定	SiO ₂	0.03	70.9	70.7	71.7	71.8	71.1	71.0
	Al ₂ O ₃	0.01	1.18	1.75	0.86	0.89	1.44	0.98
	MgO	0.02	3.62	0.08	0.05	0.04	0.30	4.18
	CaO	0.01	10.10	12.00	11.70	11.50	11.10	9.54
	Na ₂ O	0.04	13.6	14.5	14.9	14.9	15.2	13.7
	K ₂ O	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03
	SO ₃	0.01	0.26	0.41	0.47	0.49	0.27	0.20
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
	TiO ₂	0.01	ND	0.23	0.01	0.01	0.04	0.04
	ZrO ₂	0.001	0.006	0.008	0.010	0.020	0.030	0.002
	SrO	0.001	0.003	0.005	0.006	0.006	0.220	0.003
	BaO	0.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	As ₂ O ₃	0.002	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Sb ₂ O ₃	0.01	0.22	0.21	0.20	0.20	ND	0.19
	Bi ₂ O ₃	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	PbO	0.003	ND	ND	ND	0.002	ND	ND
B ₂ O ₃	—	ND	0.03	ND	ND	ND	ND	
CeO ₂	0.02	ND	ND	ND	ND	0.12	ND	
定性 分析	F	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	P ₂ O ₅	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cl	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03
	V ₂ O ₅	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	NiO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ZnO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	SnO ₂	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND

表 4.3.5 PV カバーガラスの組成分析 (No.19~24)

単位 : mass%

	成分	定量下限	No,19	No,20	No,21	No,22	No,23	No,24
			日本	日本	日本	日本	日本	日本
定角 測定	SiO ₂	0.03	71.5	71.1	70.4	70.7	70.0	71.3
	Al ₂ O ₃	0.01	0.13	1.22	1.13	0.95	1.30	1.06
	MgO	0.02	3.90	3.59	2.91	3.94	2.96	3.04
	CaO	0.01	9.56	9.99	10.20	9.49	10.90	10.40
	Na ₂ O	0.04	14.4	13.6	13.9	14.3	14.2	13.7
	K ₂ O	0.01	0.01	0	0.02	0.03	0.01	0.01
	SO ₃	0.01	0.19	0.20	0.30	0.20	0.36	0.20
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
	TiO ₂	0.01	0.04	0.06	0.02	0.04	0.05	0.01
	ZrO ₂	0.001	0.030	0.003	0.007	0.008	0.009	0.005
	SrO	0.001	0.080	0.005	0.004	0.003	0.003	0.004
	BaO	0.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	As ₂ O ₃	0.002	ND	0.006	0.001	ND	ND	ND
	Sb ₂ O ₃	0.01	ND	0.21	0.30	0.22	0.22	0.15
	Bi ₂ O ₃	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	PbO	0.003	ND	0.004	ND	ND	0.001	ND
	B ₂ O ₃	-	ND	ND	0.71	ND	ND	ND
CeO ₂	0.02	0.12	ND	ND	ND	ND	ND	
定性 分析	F	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	P ₂ O ₅	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cl	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04
	V ₂ O ₅	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	NiO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ZnO	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	SnO ₂	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND

表 4.3.6 PV カバーガラスの組成分析 (No.25~28) 単位: mass%

	成分	定量下限	No,25	No,26	No,27	No,28
			カナダ	カナダ	台湾	韓国
定角 測定	SiO ₂	0.03	70.8	70.3	71.1	71.3
	Al ₂ O ₃	0.01	1.35	1.30	1.26	1.16
	MgO	0.02	3.86	3.83	3.59	3.34
	CaO	0.01	9.28	9.06	10.20	9.78
	Na ₂ O	0.04	14.1	14.1	13.4	13.8
	K ₂ O	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04
	SO ₃	0.01	0.22	0.22	0.19	0.22
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
	TiO ₂	0.01	ND	0.01	0.02	0.03
	ZrO ₂	0.001	0.003	0.008	0.010	0.008
	SrO	0.001	0.003	0.010	0.004	0.004
	BaO	0.1	ND	ND	ND	ND
	As ₂ O ₃	0.002	ND	0.008	ND	0.002
	Sb ₂ O ₃	0.01	0.21	0.20	0.18	0.19
	Bi ₂ O ₃	0.01	ND	ND	ND	ND
	PbO	0.003	ND	ND	ND	ND
	B ₂ O ₃	-	ND	0.83	ND	ND
CeO ₂	0.02	ND	ND	ND	ND	
定性 分析	F	0.2	ND	ND	ND	ND
	P ₂ O ₅	0.01	ND	ND	ND	0.01
	Cl	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02
	V ₂ O ₅	0.05	ND	ND	ND	ND
	Cr ₂ O ₃	0.05	ND	ND	ND	ND
	NiO	0.01	ND	ND	ND	ND
	ZnO	0.01	ND	ND	ND	ND
	SnO ₂	0.01	ND	ND	ND	ND

4.4. グラスウール試作検討

連続処理で選別した使用済み太陽光パネルリサイクルガラスカレット(PV カレット)を使用し、旭ファイバーグラス株式会社にてグラスウールの試作検討を行った。ここでは、グラスウール原料に対し令和2年度より選別精度を高めた選別ガラスカレットを10%置換したケースで実炉試作を行った。

4.4.1. 実炉でのガラスサンプル評価に関する検討

旭ファイバーグラス株式会社では、ラボテストによる事前評価と1回の実炉試作を実施した。試作評価は、カバーガラスが割れたパネルを当社で熱分解処理後、4.2章で得られた選別ガラスを、西日本ガラスリサイクルセンターで原料の10%相当量になるように、その他ガラスカレットと混合したものをを用いて試作を行った。

1) テスト概要

1) -1 背景、目的

PV カレットはグラスウール用カレット代替として非常に有望であるが、PV カレットに含まれるアンチモン(Sb)やヒ素(As)は製造設備の腐食への影響が懸念される。本テストは、PV カレットの使用可否を旭ファイバーグラス株式会社九州工場の実炉にて検討する。

1) -2 今回使用する PV カレットの事前評価

入手量：2.7t（国内メーカー製：1.8t、中国メーカー製：0.4t、韓国メーカー製：0.5t）
ガラスの外観写真を写真 4.4.1 から 4.4.3 に示す。



写真 4.4.1 ガラスカレットの外観 (国内メーカー製)



写真 4.4.2 ガラスカレットの外観 (中国メーカー製)



写真 4.4.3 ガラスカレットの外観（韓国メーカー製）

①粒度分布

粒度分布測定結果を図 4.4.1 に示す。粒度分布は、令和 2 年度事業と同様、2～8mm に多く存在する結果となった。

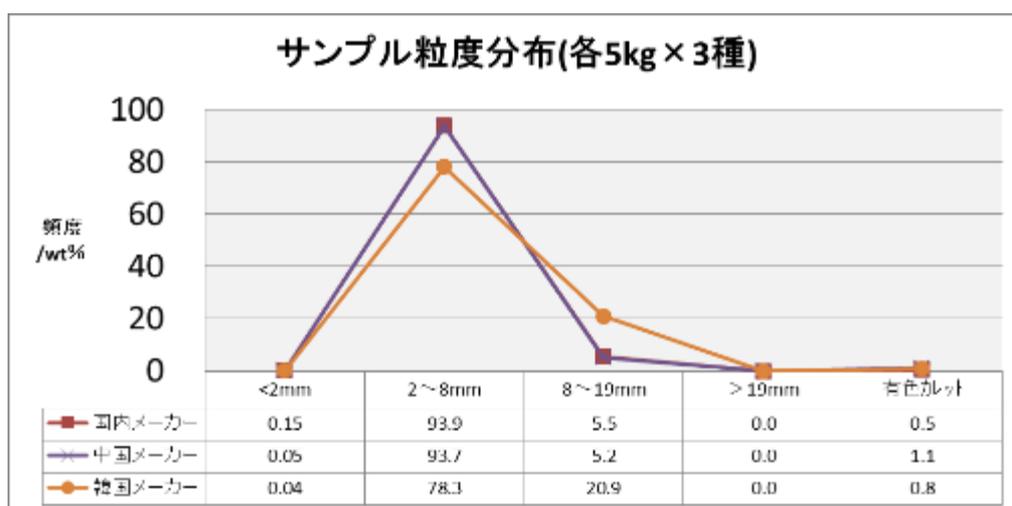


図 4.4.1 ガラスカレットの粒度分布

②水分、イグロス、異物

一部ガラスカレットに黒色の有色部が見られたため、PVカレット3種(計15kg)を無色部と有色部に各々分別し、各サンプルに対して n=1 で水分とイグロスを測定した。測定方法は下記の通りとなる。

- ・水分：120℃×1h
- ・イグロス：625℃×1h

表 4.4.1 に示す結果の通り、水分量、イグロス、異物量について問題ないレベルであることが確認できた。特に異物量に関して、5kg×3種類計15kgの評価で異物は無かった。令和2年度の「ほぼ無し (<0.1ppm)」に比べ、選別精度が向上していることを確認できた。

表 4.4.1 重量比、水分、イグロス及び異物量の評価結果

	重量比	水分	イグロス	異物
無色部	99%	0.35%(n=3)	0.01%(n=3)	0g/15kg中
有色部	1%	0.05%(n=3)	0.40%(n=3)	

有色サンプルについて、イグロスの測定前後でサンプルを確認すると、処理前はカレットに着色が見られたが、処理焼成後は写真 4.4.4 の様に無色になったことから、太陽光パネルの加熱処理時に一部有機物成分が残存していたと想定される。



写真 4.4.4 イグロス測定前後の外観 (左：測定前、右：測定後)

③組成分析

今回実窯テストに用いるガラスカレットの組成分析を行った。結果を表 4.4.2 に示す。なお、測定は、蛍光 X 線装置を使用して定性分析を実施した。分析の結果、一般的な太陽光パネルのガラスの組成であり、ヒ素濃度は 14ppm 以下、アンチモン濃度は 0.1~0.2%程度であった。

表 4.4.2 ガラスカレットの組成分析結果

単位：mass%		国内メーカー製	中国メーカー製	韓国メーカー製
XRF (定角 測定)	SiO ₂	71.8	71.2	72.0
	Al ₂ O ₃	1.2	1.3	1.3
	MgO	2.8	3.7	3.1
	CaO	10.0	9.2	9.2
	Na ₂ O	13.5	14.1	13.7
	K ₂ O	0.01	0.03	0.03
	SO ₃	0.20	0.19	0.21
	Fe ₂ O ₃	0.02	0.02	0.01
	As ₂ O ₃	5ppm	14ppm	7ppm
	Sb ₂ O ₃	1,530ppm	1,140ppm	1,830ppm

実機テストの事前分析の結果、今回使用するガラスカレットは、

- ・ 3社とも大きな違いはない
- ・ 粒度分布は、2~19mm に 99%以上である
- ・ 水分量、有機物の少ないカレットである
- ・ 組成は一般的な PV カレットである

ことが確認できた。

1) -3 実窯でのテストスケジュール

事前テストの結果、実窯でのテストが可能と判断され、表 4.4.3 に示すスケジュールで実窯での評価テストを行った。

表 4.4.3 実窯でのテストスケジュール

令和3年	1/16	1/17	1/18	1/19
	日	月	火	水
窯内へ投入		●PVカレット+その他カレット=16.8t		
PVカレットの推測所在地 (●サイロ、◆窯、★繊維化)		●◆★	◆★	◆★
ガラス・ウール・製品回収 (●PV含まず、★PV含む)	●	★	★	★

2) テスト詳細

2) -1 ガラスカレットの事前混合

ガラスカレットは、PV カレットを原料の 10%相当になるように設定し、株式会社西日本ガラスリサイクルセンターで事前混合した。これは、アンチモン濃度を約 300ppm に相当することを目的としている。混合状況は、写真 4.4.5 から 4.4.9 に示す。



写真 4.4.5 カレット混合前 (PV カレットは手前)



写真 4.4.6 一次混錬作業



写真 4.4.7 一次混錬後



写真 4.4.8 二次混錬作業（調合ライン投入）



写真 4.4.9 二次混錬後（フレコン納入）

2) -2 実窯テスト条件

実窯でのテスト条件を表 4.4.4 に示す。

表 4.4.4 実窯テスト条件

テスト条件	令和2年度	令和3年度
PVカレットサンプル	割れたパネルを新菱で焼成処理後選別処理	同左
粒度分布(5/15kg)	<2mm : 0%、2~19mm : 100%	
色	無色、黒っぽいものが混在	99%無色、1%有色
付着水分、異物(5kg)	なし/ほぼなし(<0.1ppm)	なし
PVカレット使用量	原料の10%相当(3.0t)	原料の10%相当(2.7t)

*サンプル使用量は調合組成が大きく変わらないようカレット原料の一部を置換。

2) -3 繊維径、製品復元

PVカレット投入前後での繊維径及びグラスウール復元性に差はなく、下記の通りであった。

- ・繊維手触り(柔らかさ、滑らかさ)はPVカレット投入前後で変わらず、繊維径も基準値内であった(生産中、生産条件の大きな変更なし)。
- ・製造テスト中及びテスト後に窯や製品への影響は見られなかった。

2) -4 ガラス組成

実窯でのテスト前及びテスト期間中のガラス組成分析を行った。結果は、表 4.4.5 に示す。測定の結果を下記に示す。

・PV カレットを投入後、1月17日午後から1月19日午後に回収されたガラス中のアンチモン濃度は、約200～250ppmと事前予測ピーク(約300ppm)に近い値となった。

・その他組成に関して、PV カレット投入前後で大きな変化はなかった(鉄量はPV カレットに由来し、減少した)。

表 4.4.5 テスト前及びテスト期間中のガラス分析結果

日付	テスト前		テスト期間中		
	1/16	1/17	1/17	1/18	1/19
採取時刻	7:00	9:00	16:00	16:30	5:30
経過時間/h	0	26	33	57.5	70.5
Sb2O3(ppm)	147	126	255	199	208
As2O3(ppm)	14	16	11	12	15

2) -5 ガラス粘度

粘度計を用い、ガラスの粘度測定を行った。測定の結果を図 4.4.2 に示す。PV カレットの投入前後で、差は確認できなかった。

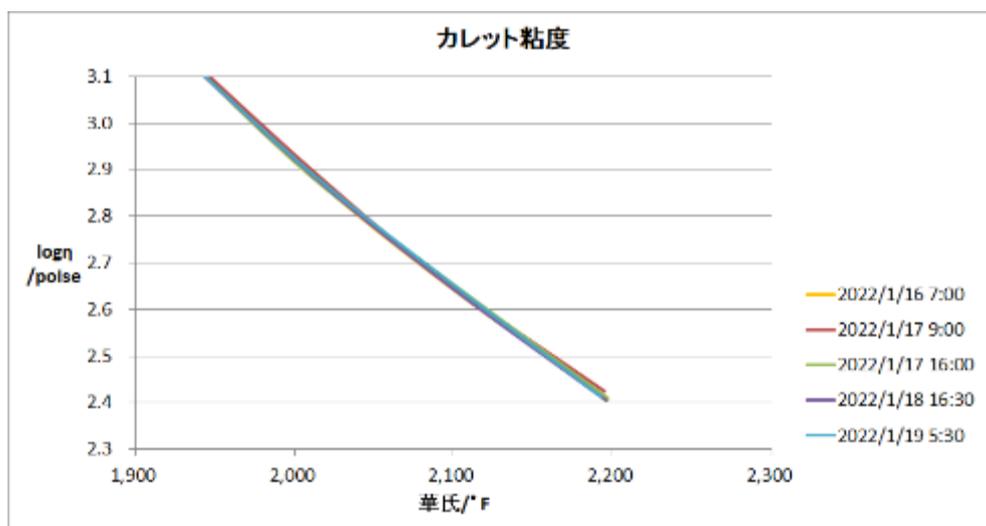


図 4.4.2 カレットの粘度測定結果

3) テスト結果まとめ

本年度の実窯の評価結果を表 4.4.6 に示す。表に示す通り、生産及び品質に問題なく製造することが出来た。

表 4.4.6 テスト結果まとめ（令和 2 年度との比較）

テスト結果	令和 2 年度	令和 3 年度
生産状況	生産条件の変更なし、テスト前後で大きな変化なし	
繊維質、繊維径	テスト前後で大きな変化なし、繊維径は全て合格	
ガラス組成	アンチモン量が計算値より増加	アンチモン量は事前予測相当
ガラス粘度	僅かに低下	変化なし

4) 今後の課題

PV カレットの評価を令和 2 年度に引き続き実施した。今後も継続的に PV カレットをガラスウール原料として使用することで、長期的な視点でのガラスウールの品質、設備及び環境への影響を評価する必要があると考えている。

4.4.2. 型板ガラス及び板ガラスへの使用検討

今後発生する廃棄太陽光パネル量を考えると、ガラスウール原料としての活用のみでは、PV カレットの供給量が需要量を上回ることが想定される。そこで、型板ガラス又は板ガラスとしての使用検討に着手した。

本年度事業で選別回収した少量の PV カレットを（120～150g 程度）ラボテストし、実窯での検討可否を検討した。試験方法は溶解試験とし、炉内温度を 1,450℃、時間を 15 分間（空気雰囲気）とした。



写真 溶解試験後の外観

（左：中国メーカー製、中：韓国メーカー製、右：国内メーカー製）

ラボ検討結果では、本サンプルと同等の処理が施された PV カレットの場合、良好な溶解性を示した。

4.5. 金属リサイクルの検討

2.2 章で示した通り、令和2年度事業では、選別回収物の銅及び銀の分析評価を行った。本年度は、ガラスへの異物混入率を低減する条件で選別試作を行ったことによる、金属リサイクルへの影響を把握することを目的に、令和2年度と同様、製錬会社で分析評価を行った。また、令和2年度には実施しなかった太陽光パネルメーカー毎の銅及び銀含有量分析を行った。

現在の使用済み太陽光パネルの処理フローと本事業の処理フローは、図 4.5.1 及び図 4.5.2 に示す。現在の使用済み太陽光パネルは、資源を有効活用しているとは言えず、本事業で選別回収した選別品を精錬会社で回収することによる経済合理性の評価を行った。

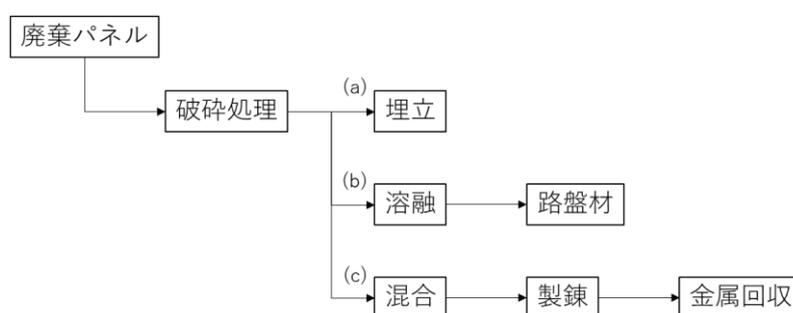


図 4.5.1 現在の使用済み太陽光パネル処理フロー

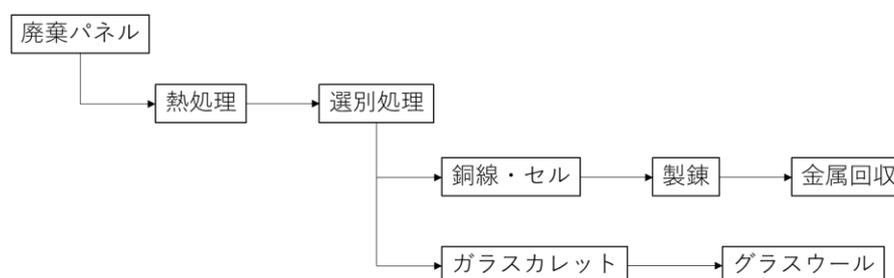


図 4.5.2 本実証事業で検討した処理フロー

4.5.1. 銅線及びシリコンセルの組成分析

分析用試料は、熱分解後の太陽光パネルから銅線及びシリコンセルをサンプリングし、下記分析方法に準じて測定した。本年度は、選別して回収して得られた産物の他に、メーカー3社（各型番1種）について、銅線及びシリコンセル中の銅及び銀濃度を測定した。

1) サンプル調整方法及び分析方法

分析に要するサンプルは、マット融解法（JIS M 8082）で調整を行った。分析は、銀は鉍石中の金及び銀の定量方法（JIS M 8111）に準拠、銅は ICP により測定した。

2) 分析結果（メーカー毎の分析結果）

メーカー毎（型番毎）の分析結果を表 4.5.1 に示す。国内メーカー、中国メーカー、韓国メーカーのそれぞれ 1 社（各社 1 型番）の分析を行った。銅線及びシリコンセルの外観は、写真 4.5.1 に示す。

表 4.5.1 メーカーによるメタル含有量の相違例

メーカー 組成	中国メーカー		韓国メーカー		日本メーカー	
	Cu (%)	Ag (mg/kg)	Cu (%)	Ag (mg/kg)	Cu (%)	Ag (mg/kg)
銅線	89	6,210	89	4,700	85	11,000
セル	0	5,480	0	11,800	0	5,940



写真 4.5.1 銅線及びシリコンセルの外観

銅線中に含まれる銅濃度は、85.1～88.9%、銀濃度は 4,700～11,000mg/kg であり、特に銀濃度に 2 倍以上の差が確認できた。シリコンセル中の銀濃度は、5,480～11,800mg/kg であり、こちらも銅線に含まれる銀濃度と同様に 2 倍以上の差が確認できた。なお、韓国メーカーの太陽光パネルは、両面タイプのもので、シリコンセルの両面に銀配線があり銀濃度が約 2 倍のものと推定される。

今回得られたサンプルは、3 メーカーのみであり型番も 1 種類ずつであった。太陽光パネルのマテリアルリサイクルを行う上で、銅及び銀の濃度は重要なファクターであるため、引き続きメーカー及び型番毎の濃度調査を継続していく必要がある。

3) 分析結果（選別品の分析結果）

選別回収した産物の評価結果を表 4.5.2 に示す。また、選別回収物の写真を写真 4.5.2 に示す。

表 4.5.2 選別回収物の組成

	令和 2 年度		令和 3 年度	
	組成		組成	
	Cu (%)	Ag (mg/kg)	Cu (%)	Ag (mg/kg)
篩選別（上）	55	8,539	6.4	2,241
風力選別（軽産物）	2	5,683	0.064	4,020
エアテーブル（軽産物）	15	3,291	0.171	2,161
エアテーブル（重産物）	—	—	—	—

本年度の事業では、4.1 章でも示した通り、ガラスへの異物混入量の低減を目的に選別条件の選定を行った。その結果、選別回収物中の銅濃度は、振動篩：6.4%、風力選別軽産物：64mg/kg、エアテーブル軽産物：171mg/kg となり、銀濃度は、振動篩：,241mg/kg、風力選別軽産物：4,020mg/kg、エアテーブル軽産物：2,161mg/kg という結果になった。この結果の通り、各選別過程でガラスの混入が増えたことにより、銅及び銀の品位が低下する結果となった。令和 2 年度の結果と比較すると、選別回収物の金属濃度は低下しており、太陽光パネルの材料リサイクル実現には、ガラス品位と金属品位の調整が必要であることが分かった。特に振動篩では、ガラスの混入が多かったため、銅濃度が 55% から 6.4% に大幅に低下している。これは、金属回収物として得られた産物を再度選別工程に投入することで、金属品位の向上が可能であると考えており、金属を含めた資源循環は可能である。

令和2年度	令和3年度
	
篩い選別後回収物（篩上）	篩い選別後回収物（篩上）
	
風力選別後回収物（軽産物）	風力選別後回収物（軽産物）
	
エアテーブル後回収物（軽産物）	エアテーブル後回収物（軽産物）

写真 4.5.2 選別回収物の外観

4.5.2. まとめ

選別回収した選別品の製錬会社での評価の結果、以下のことが分かった。

- ・ メーカー毎及び型番毎に銅線及びシリコンセル中の銅及び銀濃度には差があることが確認できた。
- ・ 本年度の事業では、回収するガラスへの異物混入量の低減を目的に選別を実施したため、令和2年度に比べ回収する金属分の品位は低下した。
- ・ 金属品位が低下した結果、令和2年度は有価物として評価が出来たが、本年度は有価物としての品位が得られなかったが、金属品位の向上は再選別工程の運用及び運転条件の最適化により対応可能と考えられる。
- ・ 銅や銀のリサイクルは、既に事業スキームが出来ており、そのスキームの中で今回の選別品はリサイクルが可能であること。
- ・ ガラスやEVA等が混在した状態（太陽光パネルの単純な破砕品等）では、銅及び銀の品位が低く、有価物としての評価は難しいこと。

4.5.3. 今後の課題

今後の課題は、下記の2点である。

- ・ 回収するガラスと銅及び銀の品位について、最適バランスになるよう、選別を更に改良し、銅及び銀の品位を上げる検討を継続すること。
- ・ 太陽光パネルに使用される銅線及びシリコンセルの銅及び銀濃度を引き続き調査すること。

4.6. 環境改善効果の評価

4.6.1. 目的

現在弊社では、将来的に大量廃棄される太陽光パネルのマテリアルリサイクルによる環境改善を目指している。令和3年度事業で検討したマテリアルリサイクルによる環境負荷の低減効果を本章で算出した。比較対照としては、現在太陽光パネルの処理は、最終処分場が受け入れを拒むケースも出ていることから、現状に即した使用済み太陽光パネルが破碎後溶融処理され、スラグを路盤材として活用するケースとした。なお、埋立を比較対照とし算出した結果も参考値として記載した。また、回収した選別ガラスカレットは、ガラスウール原料として活用するが、国内のガラスカレット量が減少している昨今、国内のガラスカレットのみでは将来的にガラスカレットを海外から輸入せざるを得ない状況であることから、輸入と国内の太陽光パネルから得られた選別ガラスカレットを国内輸送するケースで比較を行った。

評価範囲及び比較対照は、令和2年度事業と同様とし、令和3年度事業のプロセスは、EVA等の加熱分解後、各選別工程にて得られた選別品（ガラスカレット、銅線及びシリコンセル）をマテリアルリサイクルすることとした。

4.6.2. 評価前提

CO2削減貢献量の算出は、環境省が発行している「循環資源のリサイクル及び低炭素化に関する効果算出ガイドライン」に従い算出した。

1) ベースラインのシステム境界

現在太陽光パネルは主に、破碎後に溶融処理し路盤材として活用されている。よって、ベースラインのシステムは、路盤材としての活用のケースとした。評価範囲は、図4.6.1に記載した。

システム境界としては、太陽光パネルの使用後からとし、破碎処理～破碎処理物の運搬～溶融～溶融スラグの運搬～路盤材の製造を対象とした。使用済み太陽光パネルの撤去～撤去後パネルの運搬～アルミ枠の取り外し及びアルミのリサイクルについては、事業実施後のプロセスに共通しているため、評価プロセスから除外した。

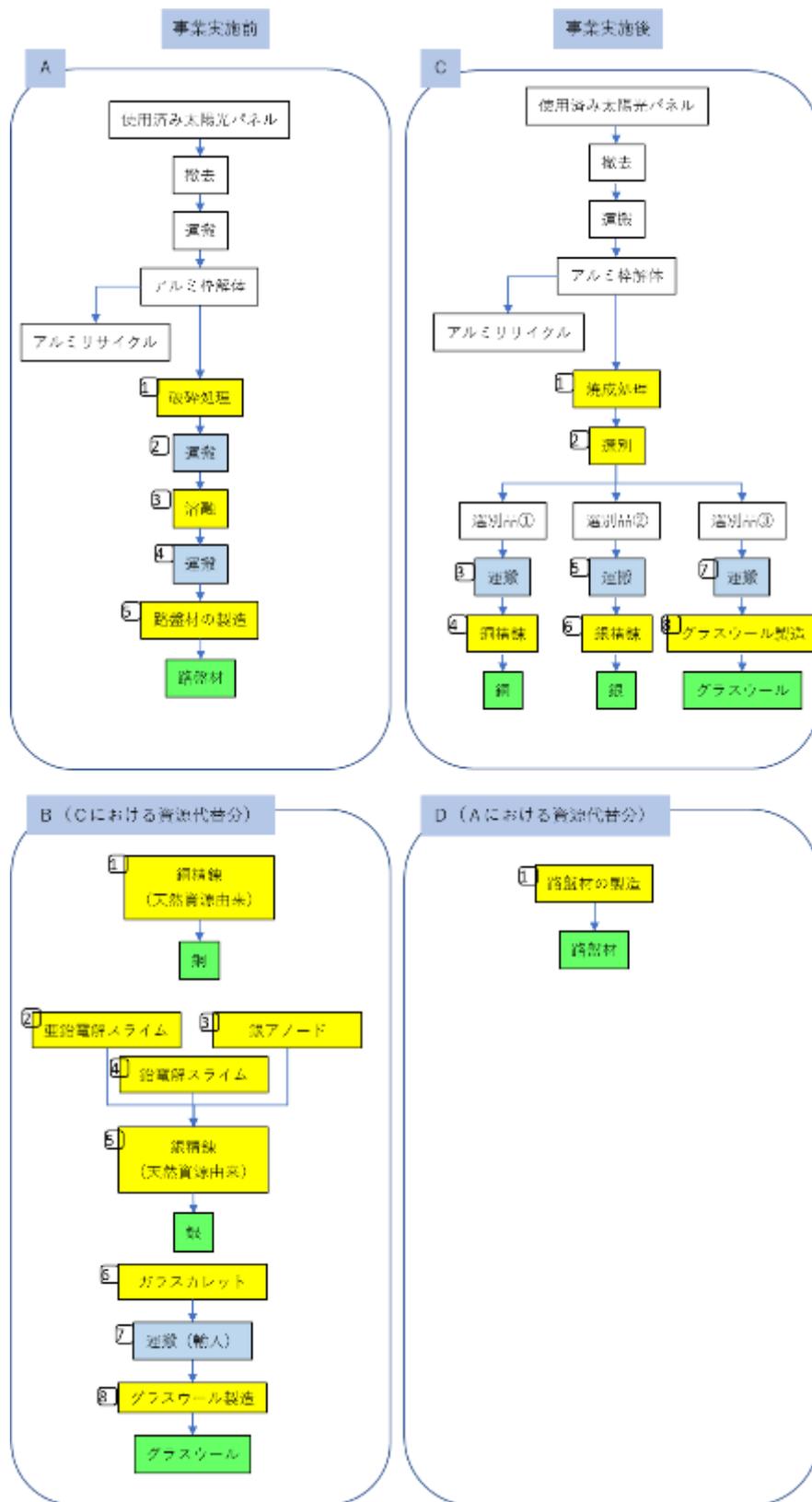


図 4.6.1 計算式と各事業のフローの構造

2) 令和3年度事業の評価のシステム境界

システム境界としては、ベースラインと同様、太陽光パネルの使用後からとし、熱分解処理～選別～選別品の運搬～選別品のリサイクル（製錬及びガラスウール製造）とした。使用済み太陽光パネルの撤去～撤去後パネルの運搬～アルミ枠の取り外し及びアルミのリサイクルについては、ベースラインと同様、評価プロセスから除外した。

使用済み太陽光パネルの処理は、EVA 等有機物の分解を、平成 29 年度低炭素製品普及に向けた 3R 体制構築支援事業の「炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化」で実施したパイロット炉を用いて行っており、本報告書のデータを参照し LCA 評価を行った。EVA 分解及び選別は、弊社工場で行うと仮定し試算した。EVA 等有機物の分解後のパネルは、本実証事業で実施した選別工程で、各素材に選別を行う。選別サンプルは、銅線とシリコンセルは精錬会社で銅と銀の回収を行い、ガラスはガラスウールを製造することとした。

令和2年度事業との相違点は、選別品の品位及び歩留まりを本年度結果に変更したこと、及びガラスウールリサイクルの評価を精緻化した。ガラスウールリサイクルの LCA については、令和2年度使用したデータベースでは、リサイクルカレットの使用率が現状よりも低いものであったため、本年度はデータベースの原材料使用率を現状の使用率に変更し CO2 排出係数を算出し、LCA を行った。

4.6.3. 評価項目

評価項目は、下記の2項目である。

- ・ CO2 削減効果 (kg/枚、t/year)
- ・ 最終処分量削減効果 (m3/year)

4.6.4. データソース

インベントリーデータ収集における参考文献一覧を表 4.6.1 に示す。

表 4.6.1 インベントリーデータ収集における参考文献一覧（比較対照：路盤材）

カテゴリー	プロセス	出典
A	使用済み家電の高度中間処理サービス（破碎・選別）	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
		LCI データベース IDEA version 3.1

	トラック輸送サービス, 10トン車, 積載率 75%	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
	焼却処理・灰溶融サービス, 一般廃棄物, 流動床電気式	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
	再生骨材 (路盤材用)	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
B	粗銅	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
	亜鉛電解スライム (Ag 含有量)	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
	鉛電解スライム中銀 (Ag) 含有量	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
	銀アノード (銅スライム処理)	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用

トラック輸送サービス, 10トン車, 積載率 75%	<p>LCI データベース IDEA version 3.1</p> <p>国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と</p> <p>LCA 研究グループ</p> <p>一般社団法人 産業環境管理協会</p> <p>値を引用</p>
銀地金	<p>LCI データベース IDEA version 3.1</p> <p>国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と</p> <p>LCA 研究グループ</p> <p>一般社団法人 産業環境管理協会</p> <p>値を引用</p>
再生ガラスカレット	<p>LCI データベース IDEA version 3.1</p> <p>国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と</p> <p>LCA 研究グループ</p> <p>一般社団法人 産業環境管理協会</p> <p>値を引用</p>
コンテナ船輸送サービス, <4000TEU	<p>LCI データベース IDEA version 3.1</p> <p>国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と</p> <p>LCA 研究グループ</p> <p>一般社団法人 産業環境管理協会</p> <p>値を引用</p>
グラスウール製造	<p>LCI データベース IDEA version 3.1</p> <p>国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と</p> <p>LCA 研究グループ</p> <p>一般社団法人 産業環境管理協会</p> <p>醤油、牛乳、ビール容器のライフサイクル分析</p> <p>～ライフサイクルでみるリユース、リサイクルの環境影響～</p> <p>1998年3月 日本生活協同組合連合会、株式会社野村総合研究所 報告書を参考に新菱で算出</p>
C	<p>平成29年度環境省委託事業</p> <p>熱分解処理 (電力使用量)</p> <p>平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業</p> <p>炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化報告書</p> <p>平成30年2月28日 株式会社新菱 より引用</p>
	平成29年度環境省委託事業

熱分解処理 (液化石油ガス 使用量)	平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化報告書 平成30年2月28日 株式会社新菱 より引用
熱分解処理 (窒素使用 量)	平成29年度環境省委託事業 平成29年度低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業 炭素繊維及び太陽電池リサイクルの設備共用による早期事業化報告書 平成30年2月28日 株式会社新菱 より引用
液化石油ガス (LPG)	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
窒素	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
乾式振動篩	電力使用量及び処理能力はメーカーカタログ値及びメーカーヒアリング結果
風力選別	電力使用量及び処理能力はメーカーカタログ値及びメーカーヒアリング結果
エアテーブル	電力使用量及び処理能力はメーカーカタログ値及びメーカーヒアリング結果
トラック輸送 サービス, 10 トン車, 積載 率 75%	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
銅再生地金	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会

	値を引用
銀再生地金	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
埋立処理サー ビス, 産業廃 棄物	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用
グラスウール 製造	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 醤油、牛乳、ビール容器のライフサイクル分析 ～ライフサイクルでみるリユース、リサイクルの環境影響～ 1998年3月 日本生活協同組合連合会、株式会社野村総合研究所 報告書を参考に新菱で算出
D 山砂, 骨材用	LCI データベース IDEA version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ 一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用

4.6.5. LCA 結果

LCA 評価は、パネル 1 枚当たりの CO2 排出量で行った。評価結果を表 4.6.2 に示す。ベースラインの排出量 (A) は 30.80kg-CO2/枚、事業実施時の代替分 (B) は 31.36kg-CO2/枚、事業実施時の排出量 (C) は 40.34kg-CO2/枚、ベースラインの代替分 (D) は 0.001kg-CO2/枚であり、CO2 の削減効果は、21.81kg-CO2/枚であった。いずれも、回収した銅、銀、ガラスのリサイクルによる効果により、CO2 が削減できる結果になった。なお、比較対照を埋立としたケースでも、CO2 発生量は削減される結果となった。

また、パネルの重量 1 トン当たりの CO2 削減効果を表 4.6.3 に示す。

表 4.6.2 パネル 1 枚当たりの CO2 削減量

単位：kg-CO2/枚

	項目	比較対照：路盤材	比較対照：埋立
A	ベースラインの排出量	30.80	10.38
B	事業実施時の代替分	31.36	31.24
C	事業実施時の排出量	40.34	40.34
D	ベースラインの代替分	0.001	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	21.81	1.28

表 4.6.3 パネル 1 トン当たりの CO2 削減量

単位：kg-CO2/t

	項目	比較対照：路盤材	比較対照：埋立
A	ベースラインの排出量	1,925	649
B	事業実施時の代替分	1,960	1,952
C	事業実施時の排出量	2,521	2,521
D	ベースラインの代替分	0.036	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	1,363	80

<当社での事業化効果>

当社では、年間 1,440 トンの処理量を計画し、建設を行っている。この事業規模での、年間の CO2 削減効果は表 4.6.4 に示す通り、路盤材の製造に比べ 1,963 トンの削減効果となった。

表 4.6.4 1年間のCO2削減量

単位：t-CO2/年

	項目	比較対照：路盤材	比較対照：埋立
	年間処理量（新菱想定）	1,440	
A	ベースラインの排出量	2,772	934
B	事業実施時の代替分	2,822	2,811
C	事業実施時の排出量	3,631	3,630
D	ベースラインの代替分	0.052	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	1,963	115

<循環社会への貢献度>

当社が計画している事業を全国展開した場合における、1年間のCO2削減効果を表 4.6.5 に示す。年間の太陽光パネルの廃棄量は、NEDOの報告による年間28万トンとして算出を行った。CO2削減効果としては、比較対照を路盤材とした場合は約55万トンの削減効果を見込むことが出来る。

表 4.6.5 1年間のCO2削減量（全国）

単位：千t-CO2/年

	項目	比較対照：路盤材	比較対照：埋立
	年間処理量（新菱想定）	280千t/年	
A	ベースラインの排出量	776	261
B	事業実施時の代替分	790	787
C	事業実施時の排出量	1,017	1,016
D	ベースラインの代替分	0.015	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	550	32

<最終処分量（埋立量）の削減効果>

CO2削減効果以外の環境影響効果として、最終処分量（埋立量）の削減効果を算出した。算出結果を表 4.6.6 に示す。ここで、年間の太陽光パネル廃棄量は当社が事業を計画している数量で評価を行った。1年間に1,215トン（1,215m³）の最終処分量の削減効果が見込まれる。また、CO2削減効果と同様に、全国展開した場合の評価を行った結果を表 4.6.7 に示す。1年間の最終処分量削減効果は、約23万トン（23万m³）となり、CO2削減と同様、最終処分量の削減においても大きな効果が見込まれる。

表 4.6.6 最終処分量の削減効果の見込み（当社処理予定規模）

廃PVパネル量（t/Y）	1,440
廃PVパネル量（枚/Y）	90,000
最終処分量削減効果（t/Y）	1,215
最終処分量削減効果（m ³ /Y）	1,215

最終処分時の嵩比重を 1.0 t/m³とした

表 4.6.7 最終処分量の削減効果の見込み（全国）

廃PVパネル量（千t/Y）	280
廃PVパネル量（千枚/Y）	17,500
最終処分量削減効果（千t/Y）	236
最終処分量削減効果（千m ³ /Y）	236

最終処分時の嵩比重を 1.0 t/m³とした

4.6.6. まとめ

太陽光パネルのリサイクルの促進による環境改善効果として、下記のことが確認できた。

- 太陽光パネルのリサイクルを推進することにより、CO₂ 及び最終処分量が削減することが確認できた。
- パネル1枚当たりのCO₂削減効果は、路盤材としての活用と比較した場合 21.81kg-CO₂/枚であった。パネル1トン当たりに換算すると、1,363kg-CO₂/tであった。
- CO₂の削減効果以外にも、本システムでは回収したガラスを路盤材等の多用途での利用ではなく、ガラス原料として活用することが出来、ガラス本来の機能を有した状態で水平サイクルすることが出来ることも資源循環の観点では非常に有益であると考えられる。

5. 出口戦略の検討

これまでの検討で、選別回収された選別ガラスカレットは、グラスウールの原料としての有効利用について評価を行い、有価物としての取引が可能であることが確認でき、選別ガラスカレットの出口に目途が付いた。また、銅線とシリコンセルは、製錬会社での銅及び銀の回収について評価を行い、令和2年度の結果と合わせ有価物としての取引が可能なレベルで選別可能であることが確認できた。また、ガラスカレット、銅及び銀の回収については、既存の循環システムが確立されており、その循環システムで太陽光パネル選別回収物も運用可能である。

現在、株式会社新菱では、「R3脱炭素社会構築のための資源循環高度化設備導入促進事業」に採択され、本事業で開発した技術を用いた「PVリサイクル工場」をエコタウン北九州に建設中で、2022年秋頃に稼働を予定している。

本事業で開発したガラスカレット及び銅及び銀の回収を営業生産で実証し、EVA熱分解処理と高度選別技術の組み合わせによる太陽光パネルリサイクル方式が、デファクトスタンダードとなるよう普及に取り組む。

本事業で構築した太陽光パネルリサイクルシステムを、行政、メーカー、関連協会と連携し、北九州エコタウンモデルとして全国展開に取り組む。

6. 令和3年度事業のまとめ

令和3年度事業で取り組んだ各課題に対する達成状況について、表6.1に示す。

表 6.1 令和3年度事業の目標と実施項目

	項目	課題	達成状況
①	太陽光パネルリサイクル高度選別技術開発	カバーガラスが割れた太陽光パネルの選別で回収するガラス品位の更なる向上。はんだボール及び微細なシリコンセル等、コンタミ成分の更なる除去効率の向上。	選別したガラスカレット中の異物混入を低減でき、ガラス重量比が令和2年度の99.999%から99.9998%へと向上することが出来た。これにより、板ガラスメーカーでの評価が可能なレベルの品質となった。
②	太陽光パネルリサイクルシステム構築	選別で得られるガラス及び金属品位について、品位と市場価値の観点で最適な設備条件の確立。	ガラス品質が重量比99.9998%と向上したことで、グラスファイバーメーカーに加え、板ガラスメーカーの少量溶解テストまで実施することができ合格の結果。板ガラスメーカーでの採用に向け、数十トンレベルでの実窯炉評価に繋げることができた。 金属品位は、ガラス品質の向上を目的に条件設定を行った結果、低下する結果となったが、令和2年度の成果の設備条件の知見から再選別工程の運用等で金属品位の維持は可能である。 これらより、市場価値の観点から最適設備条件を確立することができた。

③	事業における環境影響改善効果の評価	改良した選別工程での環境影響改善効果の検証。	使用済み太陽光パネルのリサイクルによる環境影響改善効果について、CO2削減効果で試算した。路盤材を比較対照にした場合、21.81kg-CO2/枚の低減効果があることが検証できた。
④	事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討	パネル種類（メーカー他）による銅線及びシリコンセルの銅と銀の濃度が把握できていない。	本年度は3メーカーの銅及び銀濃度を測定した。測定の結果、銅線中の銅は85～89%、銀が4,700～11,000mg/kg、シリコンセル中の銀濃度が5,400～11,800mgと、バラツキがあることが判明した。 この範囲であれば、回収した金属は、製錬メーカーが素材原料として購入できる価値であることが確認できた。

引用文献【1章】

- [1] 株式会社三菱総合研究所：平成24年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務報告書，2012
- [2] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版—再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋—，第2章 太陽光発電，2014
- [3] 材料技術委員会：太陽電池モジュール用材料の動向，エレクトロニクス実装学会誌 Vol.17, No.1, 2014
- [4] 大和田秀二：大量廃棄時代に向けた太陽光発電パネルリサイクルの最新動向，クリーンテクノロジー，2020
- [5] Bruton, T.M. et al: "Re cycling of High Value, High Energy Content Components of Silicon PV Modules", Proceedings of the 12th EC-PVSEC, pp.303-304, 1994
- [6] Bohland, J. R. et al.: "Possibility of Recycling of Silicon PV Modules", 26th IEEE PV Specialist Conference, pp.1173-1175, 1997
- [7] Frisson, L. et al.: "Recent Improvements in Industrial PV Module Recycling", 16th EU-PVSEC, Glasgow, UK, 2000
- [8] Wambach, K.: "Recycling of Solar Cells and Photovoltaic Modules", 19th EU-PVSEC, 2004
- [9] Doi, T. et al: "Experimental study on PV module recycling with organic solvent method", Solar Energy Materials & Solar Cells, 67, pp.397-403, 2001
- [10] 土井卓也ら：太陽電池モジュール構成部材の分別方法，特願2004-001408，2004
- [11] 加藤聡・猪子兼行：廃太陽光パネルの最先端リサイクル技術について，持続可能な社会を目指して 生活と環境，10月号，pp.10-15，2016
- [12] <https://www.env.go.jp/recycle/R2kinzokuzissyoushinryo.pdf>
- [13] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部：「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」事業原簿【公開】，pp.141-217，2019
<https://www.nedo.go.jp/content/100901846.pdf>
- [14] 環境資源工学会：粉体精製と湿式処理—基礎と応用—，pp.47-50，2013

引用文献【2章】

- [1] 坂本弘志、森谷優、有江幹男：乱流境界層内に埋没する有限幅平板周辺の流れ（第1報、平板に作用する圧力および抗力）、日本機械学会論文集(B編)、48巻433号、(1982)、pp.1674-1682
- [2] 岡本史紀、小林正人、門野司、加賀谷春幸、島根淳：平面壁上の有限幅直立平板まわりの流れ、日本機械学会論文集(B編)、71巻711号、(2005)、pp.2663-2670

- [3] Li Li, Ping Wu, Rehman Abdul, Li Wang, Shiping Zhang, Zi-Ang Xie: Energy-dissipation correlated size separation of granular matter under coupling vibration and airflow, Powder Technology, vol.307, (2017), pp.84-89

引用文献【4章】

- [1] https://www.env.go.jp/recycle/R2kinzokuzisseyou_shinryo.pdf

【学会発表】

【1】第18回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会（web開催），風力選別およびエアテーブル選別による割れPVパネルからの高純度ガラス回収プロセスの提案—両選別挙動のモデル化—，早大理工 ○梅津えみ・阿部優香里・大和田秀二，新菱 守谷大輔・村山彰宏

【2】資源・素材学会2022年春季大会，使用済み割れPVパネルからの高純度ガラス回収プロセスの最適化およびその選別機構の解明，早大理工 ○梅津えみ・大和田秀二，新菱 守谷大輔・村山彰宏

【特許出願】

【1】出願番号：特願2021-203943，太陽光電池パネルの構成材料を回収する方法およびシステム，株式会社新菱 守谷大輔、村山彰宏，早稲田大学 大和田修二

リサイクル適性の表示:印刷用の紙にリサイクルできます。

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料[Aランク]のみを用いて作製しています。