

令和2年度環境省委託業務

令和2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3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評価を行い、銅線やシリコンセル(銀線付)については精錬会社での評価を行った。

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 3 R 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。特に本事業では、マテリアルリサイクルの促進のために、熱分解焼成後の混合物中の約 9 割を占めるガラスの品位を上げることを目的に技術開発を行った。

高度選別は、混合物から篩選別で銅線など径の大きなものを選別し、その後風力選別機やエアテーブル等比重選別機の組み合わせによる選別を行った。今回得られた選別品の品位としては、篩選別では、銅濃度が 50%以上、銀濃度が 8,500mg/kg 以上と高濃度で金属成分を回収できた。風力選別では、シリコンセルを高品位で回収することにより、銀濃度を 5,600mg/kg 以上と高濃度で回収することが出来た。また、エアテーブルでは、ガラスカレットを高品位で選別回収でき、得られたガラスカレットの品位は 99.999%を達成した。ここで得られた選別品は、製錬会社及びグラスウールメーカーで評価を行った。今回得られた選別品の品位としては、ガラス 99.999%以上を達成することが出来た。ここで得られた選別品をグラスウールの試作用サンプルとした。

ガラスの評価試作を行うにあたり、これまでにあまり把握できていなかった、カバーガラスの組成のばらつきを、入手した 36 種類の太陽光パネルからガラスのサンプリングを行い、蛍光 X 線分析装置を用い、測定を行った。今回入手した 36 種類のパネルのガラス組成分析を行った。その結果太陽光パネルカバーガラスの主要成分は、SiO<sub>2</sub> が 70.20~72.40% (平均値 : 71.13%)、CaO は 9.19~11.86% (平均値 : 10.08%)、Na<sub>2</sub>O は 12.83~15.00% (平均値 : 13.93%) 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ている消泡剤 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は 36 検体中 34 検体で検出されており、平均値は 0.21%、最大値で 0.32%検出された。廃棄物処理法に関連する項目として、As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は 36 検体中 5 検体で検出されており、最大値では 0.013%含有されているものがあつた。

ガラス評価のグラスウールの試作は、硝子繊維協会の会員企業 2 社 (旭ファイバーグラス株式会社及び株式会社ワンワールド) で行った。旭ファイバーグラス株式会社では、今回得られた高度選別後のガラスカレットを全原料に対し 5%及び 10%添加した条件で実機試作を行った。また、株式会社ワンワールドでは約 2 トンのバッチで 100%高度選別後のガラス

カレットを原料にした試作を行った。どちらの試作においても、運転管理上及び製品の品質への影響は確認できず、既製品と同等の良好な品質であることが確認できた。ただし、太陽光パネルのカバーガラスに含まれる  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  や  $\text{As}_2\text{O}_3$  による設備への影響については、長期的な視点で影響を確認していく必要がある。

選別回収された銅線及びシリコンセルは精錬会社で評価を行った。その結果、現在の相場で有価物としての価値があることが確認できた。また、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も確認できた。

選別回収された銅線及びセルは精錬会社で評価を行った。その結果、銅及び銀の品位が高く（銅リッチの選別品：銅濃度約 55%、銀リッチの選別品：銀濃度約 5,000~8,000mg/kg）、リサイクルが可能であることが確認できた。

リサイクルによる CO<sub>2</sub> 削減効果は、比較対照を埋立処理と路盤材の 2 件で行った。本事業は焼成処理及び選別処理を行い、回収された素材をガラスはグラスウールに、銅線及びセルは精錬による銀と銅の回収とした。埋立と路盤材それぞれとの比較の結果、CO<sub>2</sub> 削減効果は、比較対照埋立：17.0kg-CO<sub>2</sub>/枚、比較対照路盤材：29.6kg-CO<sub>2</sub>/枚の算出結果となった。

前処理に係る処理費用及び運搬費を除くと、選別後のものについては有価物となる可能性があることが確認できた。特に PV パネルの約 6 割の重量を占めるガラスを有価物としてリサイクルできる目途が立ったことは、廃 PV パネルのリサイクルを促進させる上で、大変有効である。

## Summary

In this program, whose goal is to promote recycling of used solar panels, Shinryo developed advanced sorting technology for processing discarded solar panels and recovering their constituent materials. Glass recovered by advanced sorting was evaluated by two glass wool manufacturers, while copper wire and silicon cells (including silver wire) were evaluated by a refining company.

The technology we developed for use with used solar panels whose cover glass has been broken breaks down EVA and other organics with heat from 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 2017, and then sorts the glass, copper wire, and silicon cell mixture that remains into separate materials in an advanced manner. A key goal of the program was to develop technology for increasing the quality of glass, which accounts for about 90% of the mixture remaining after thermal decomposition, in order to promote material recycling.

The advanced sorting process involves sorting large-diameter materials such as copper wire out of the mixture using a sieve and then continuing sorting with a combination of pneumatic sorters and gravity sorters such as air tables. As an indication of the level of sort quality we’ve achieved, the sieve process was able to recover metal components at high concentrations—greater than 50% for copper and greater than 8,500 mg/kg for silver. The pneumatic sorter was able to recover silver at a concentration of 5,600 mg/kg by recovering silicon cells at a high level of quality, while the air table was able to recover glass cullet at a high level of quality, reaching 99.999%. The quality of the recovered materials was evaluated by a refining company and two glass wool manufacturers.

To prepare for trial production of glass for evaluation purposes, we assessed variations in the composition of cover glass by sampling and analyzing glass from 36 types of solar panels using an X-ray fluorescence spectrometer, providing insight that has been largely lacking in the past. As a result, we found that the principal components of solar panel cover glass are SiO<sub>2</sub> (70.20% to 72.40% [average: 71.13%]), CaO (9.19% to 11.86% [average: 10.08%]), and Na<sub>2</sub>O (12.83% to 15.00% [average: 13.93%]). The antifoaming agent Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, which is added in order to improve the transmissivity of the glass, was detected in 34 of 36 samples at an average of 0.21% and a maximum of 0.32%. As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, which has implications related to the Waste Management and Public Cleansing Act, was detected in 5 of 36 samples at a maximum of 0.013%.

Glass wool was produced by two members of the Glass Fiber Association (Asahi Fiber Glass Co., Ltd., and ONE WORLD CO., LTD.) to facilitate the evaluation of recovered glass.

Asahi Fiber Glass added glass cullet yielded by the advanced sorting process at the rate of 5% and 10% of total materials in its trial run, while One World used 100% glass cullet from the advanced sorting process to produce a batch of about 2 tons. In both cases, the trial materials were found to exhibit quality on par with that of conventionally produced equivalent materials, with no impact on operational management or product quality. However, it will be necessary to check the effects of  $Sb_2O_3$  and  $As_2O_3$  contained in solar panel cover glass on equipment from a long-term perspective.

A refining company evaluated copper wire and silicon cells recovered by the sorting process and found that the materials have value at current market rates. It also verified that the recovered materials can be recycled in existing business schemes for copper and silver recycling.

The  $CO_2$  reduction benefits of recycling were calculated and compared with both landfill disposal and use as a roadbed material. The program carried out firing and sorting processing, which yielded materials that were recovered as glass wool (in the case of glass) and copper and silver (in the case of copper wire and silicon cells) by refining. The comparison with landfill disposal and roadbed material use indicated  $CO_2$  reduction benefits of 17.0 kg- $CO_2$  per panel in the case of the former and of 29.6 kg- $CO_2$  per panel in the case of the latter.

Our findings indicate that all materials yielded by this sorting process have value at current market rates. The outlook for recycling glass, which accounts for about 60% of solar panels by weight, as a valuable resource has significant implications for promoting recycling of waste solar panels.

# 目次

1. 背景及び目的 .....	- 1 -
2. 本事業の概要 .....	- 3 -
2.1. 実施項目 .....	- 3 -
3. 実証事業の結果 .....	- 4 -
3.1. 焼成条件の検討.....	- 4 -
3.1.1. 受け入れた廃棄パネルの状態.....	- 4 -
3.1.2. 廃太陽光パネルの前処理.....	- 4 -
3.1.3. 焼成炉運転条件検討.....	- 5 -
3.1.4. カバーガラスの割れたパネルの焼成検討.....	- 7 -
3.1.5. 次焼成前の前処理の必要性検討.....	- 8 -
3.1.6. 確立した最適運転条件での焼成処理実証.....	- 9 -
3.1.7. 焼成炉運転条件.....	- 10 -
3.1.8. 焼成後回収物の状態.....	- 10 -
3.2. 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.....	- 12 -
3.2.1. 研究背景.....	- 12 -
3.2.2. 本研究で提案する処理フロー.....	- 17 -
3.2.3. 実験装置・方法.....	- 18 -
3.2.4. 実験結果.....	- 24 -
3.2.5. 風力選別におけるガラス・セル選別挙動.....	- 41 -
3.2.6. エアテーブル選別におけるセル分離機構.....	- 46 -
3.2.7. 結言 .....	- 50 -
3.3. 選別処理の連続試験.....	- 53 -
3.3.1. 選別フロー.....	- 53 -
3.3.2. 選別回収物のマスバランス及び組成.....	- 56 -
3.3.3. PV ガラスカレット濃縮物中の異物 .....	- 57 -
3.3.4. PV ガラスカレットの組成分析結果 .....	- 58 -
3.3.5. 選別後ガラスの表面付着物の分析.....	- 59 -
3.3.6. まとめ .....	- 61 -
3.4. カバーガラスの組成調査.....	- 62 -
3.4.1. 入手した太陽光パネルの情報.....	- 62 -
3.4.2. 分析試料の調整.....	- 62 -
3.4.3. 分析方法.....	- 62 -
3.4.4. 分析結果.....	- 68 -
3.5. PV パネルのリサイクルシステム構築の実証事業 .....	- 76 -

3.5.1.	グラスウール試作検討.....	- 76 -
3.5.2.	実炉でのガラスサンプル評価に関する検討.....	- 76 -
3.5.3.	ガラス受入基準の作成に向けた取り組み.....	- 114 -
3.6.	金属リサイクルの検討.....	- 115 -
3.6.1.	銅線及びセルの組成分析.....	- 116 -
3.6.2.	選別回収物の評価.....	- 116 -
3.6.3.	まとめ .....	- 119 -
3.6.4.	今後の課題.....	- 119 -
3.7.	環境改善効果の評価.....	- 120 -
3.7.1.	目的 .....	- 120 -
3.7.2.	評価前提.....	- 120 -
3.7.3.	評価項目.....	- 123 -
3.7.4.	データソース.....	- 123 -
3.7.5.	LCA 評価結果.....	- 131 -
3.7.6.	まとめ .....	- 133 -
4.	出口戦略の検討 .....	- 134 -
5.	本事業のまとめ .....	- 135 -

## 1. 背景及び目的

PV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。PVパネルの製品寿命は20から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。

(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て」2018年11月21日、[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/saisei\\_kano/pdf/010\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/010_03_00.pdf))

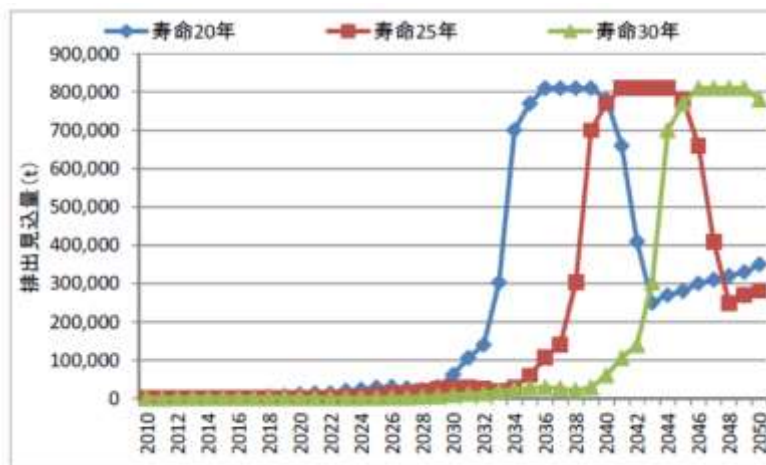


図1.1 廃棄PVパネルの発生量見込み



図 1.2 廃棄 PV パネルの発生量見込み

当社はこれまでに、大量廃棄が見込まれるPV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た。

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、PV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、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、PVパネルのカバーガラスが割れて無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、PV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破損してカバーガラスが割れたPV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、破損してカバーガラスが割れたPV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にある。

## 2. 本事業の概要

### 2.1. 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、選別技術の開発と実証を実施した。実施に当たり、表 2.1.1 に示す実施項目を設定した。

表 2.1.1 本事業の課題

	項目	目的	課題
①	PV パネルリサイクル高度破碎・選別技術開発	・破碎・選別の基礎検討を行い、最適条件の検討を行う。また、機構解明の詳細試験を行う。	・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。
②	PV パネルのリサイクルシステム構築の実証事業	・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。 ・カバーガラスが割れた PV パネルから回収したガラスが、ガラスウール原料として使用可能かを判断する。	・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。
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	・本事業による CO2 削減効果を定量評価する。また、最終処分量の削減効果も評価する。	・廃 PV パネルのリサイクルによる CO2 低減効果の確認。
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	・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。	・PV 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。

### 3. 実証事業の結果

#### 3.1. 焼成条件の検討

##### 3.1.1. 受け入れた廃棄パネルの状態

写真 3.1.1～3.1.2 に、受入時のパネルの状態、パネルの外観を示す。また、写真 3.1.3 及び 3.1.4 は、カバーガラスの表面状態（割れの有無）を示している。写真 3.1.4 の通り、カバーガラスが割れたパネルは、割れの起点になる箇所から、ひびがパネル全体に広がった状態になっている。



写真 3.1.1 受入時の状態



写真 3.1.2 パネル外観



写真 3.1.3 カバーガラスの状態  
(割れ無し)



写真 3.1.4 カバーガラスの状態  
(割れ有り)

##### 3.1.2. 廃太陽光パネルの前処理

廃太陽光パネルは、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 3 R 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 3.1.1 に、炉の模式図を示す。

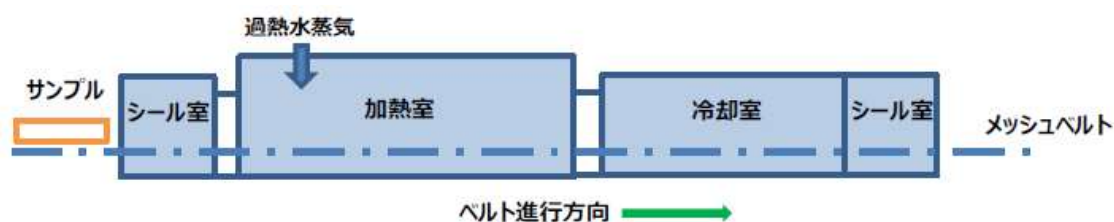


図 3.1.1 共用炉の模式図

### 3.1.3. 焼成炉運転条件検討

#### 1) 焼成速度（搬送速度）検討

焼成速度が早すぎると EVA 等の有機物の分解残の増加、割れていないカバーガラスの割れ発生、排ガス中の CO 濃度の増加が懸念される。一方、焼成速度が遅すぎると生産効率の低下が懸念される。そこでパネルの最適な焼成速度（焼成時間）を確認する為、パネルの温度パターン計測、及び焼成テストを実施した。

#### 1)-1 焼成時のパネルの温度パターン計測結果

過去の他事業での研究成果から、有機物を除去する為には、1次焼成では 450℃以上で 10 分間程度、2次焼成では 450℃以上で 5 分間程度の滞留時間が必要であることが判っている。表面に熱電対を取り付けたパネルを焼成炉に投入し、温度パターンを計測した。表 3.1.1 及び図 3.1.2～3.1.4 に示すとおり、1次焼成では搬送速度 8m/hr 以下で、2次焼成では搬送速度 12m/hr 以下で必要な滞留時間が確保されることを確認した。

表 3.1.1 各温度領域の滞留時間

搬送速度 (m/hr)	滞留時間 (min)					
	1次焼成			2次焼成		
	450℃以上	500℃以上	評価	450℃以上	500℃以上	評価
8	12.5	7.5	○	15.0	12.5	○
10	9.0	4.5	△	12.0	9.0	○
12	8.0	4.5	×	8.0	4.5	○

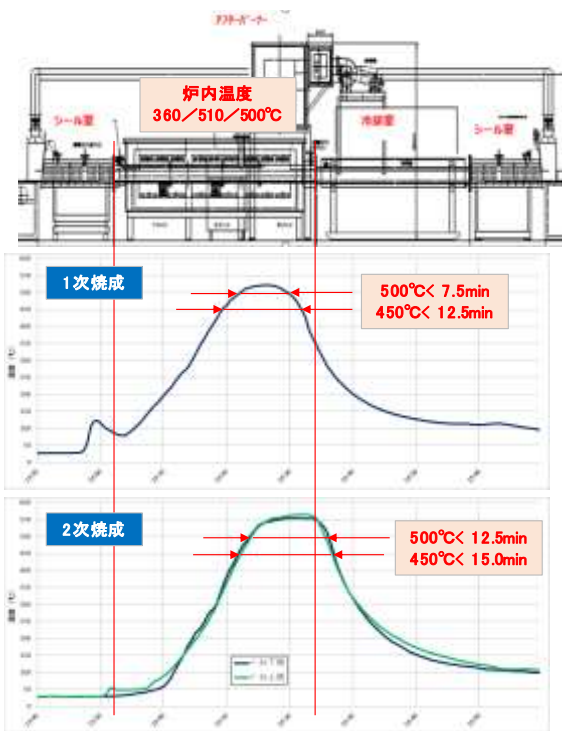


図 3.1.2 搬送速度 8m/hr 時の温度パターン

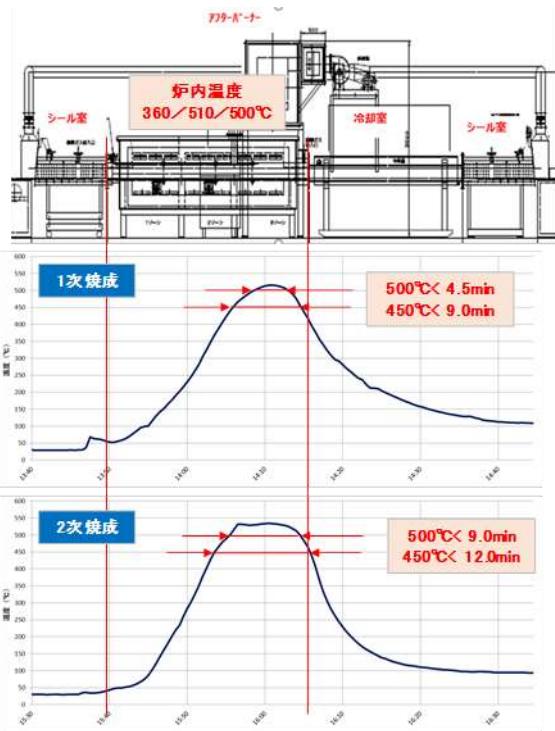


図 3.1.3 搬送速度 10m/hr 時の温度パターン

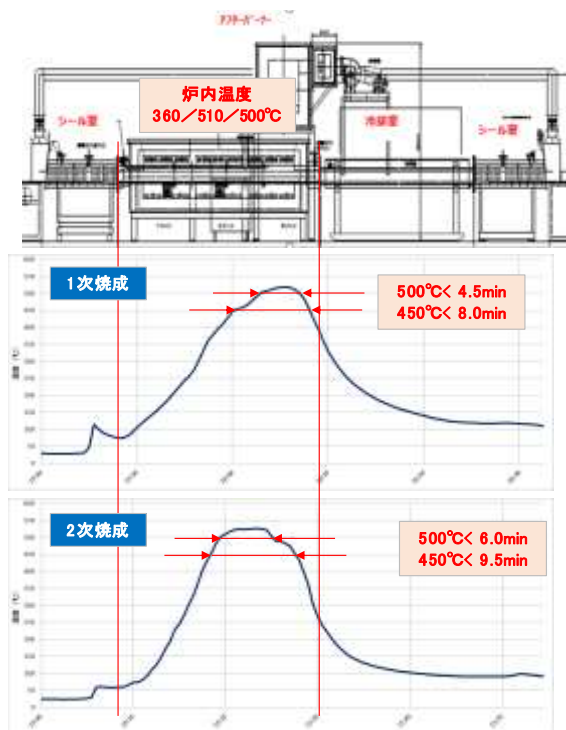


図 3.1.4 搬送速度 12m/hr 時の温度パターン

### 1)-2 焼成テスト結果

表 3.1.2 に示すとおり、搬送速度 12m/hr 以上では 1 次焼成で有機物の分解残が増加、また搬送速度 10m/hr 以上では排ガス中の CO 濃度が増加することを確認した。

表 3.1.2 搬送速度検討の焼成テスト結果

搬送速度 (m/hr)	有機物の分解残			排ガスの CO 濃度		
	1 次焼成	2 次焼成	評価	1 次焼成	2 次焼成	評価
8	少量	微量	○	低	低	○
10	少量	微量	○	高	低	×
12	多量	微量	×	高	低	×

以上の結果より、最適な焼成速度（搬送速度）を以下のとおりとした。なお 2 次焼成は更に搬送速度を速く出来る可能性はあるが、焼成炉の最大搬送能力が 12m/hr であり、検証が出来ない為、最適条件を 12m/hr とした。

◇1 次焼成： 搬送速度 8m/hr

◇2 次焼成： 搬送速度 12m/hr


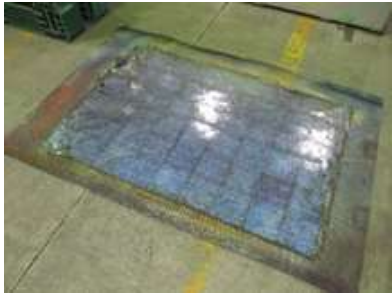


### 3.1.4. カバーガラスの割れたパネルの焼成検討

過去の他事業での研究では、カバーガラスの割れていないパネルを主に取り扱っていた為、カバーガラスの割れているパネルの焼成テストを行った。表 3.1.3 に示すとおり、カバーガラスの割れ有無にかかわらず、焼成後のガラスの清澄度合に差異が見られないことから、カバーガラスの割れていないパネルと同様の運転条件で処理が可能であることを確認した。

表 3.1.3 カバーガラスの割れたパネルの焼成テスト結果

	カバーガラスの割れ	
	無し	有り
ガラス目視	○ ほぼ清澄	○ ほぼ清澄
焼成前		





1次焼成後		
2次焼成後		

### 3.1.5. 1次焼成前の前処理の必要性検討

過去の他事業での研究では、1次焼成前にアルミ枠及び端子箱を除去していたが、この前処理の省略による生産効率向上を目的として、アルミ枠及び端子箱が付いたままパネルの焼成テストを実施した。

表 3.1.4 に示すとおり、ゴム系接着剤が焼成されたことと、熱膨張によるカシメの緩みの効果によって、焼成後のアルミ枠は人力で容易に解体出来る状態となった。また端子箱も一部の金属部品及びシリコンゴム部を除いては、焼成されていた。

表 3.1.4 アルミ枠及び端子箱が付いたパネルの焼成テスト結果

	カバーガラスの割れ	
	無し	有り
アルミ枠	○ 容易に解体可能	○ 容易に解体可能
端子箱	○ 焼成可能	○ 焼成可能
焼成前		



以上の結果より、アルミ枠及び端子箱が付いたままの状態での焼成処理が可能であり、1次焼成前の前処理が省略可能であることを確認した。

### 3.1.6. 確立した最適運転条件での焼成処理実証

運転条件検討で確立した表 3.1.5 に示す最適運転条件で、多数枚の焼成処理を行い、処理可能であることを実証した。

表 3.1.5 確立した最適運転条件

◆焼成速度	搬送速度 (m/hr)	焼成時間 (min/枚)		
1次焼成	8	30		
2次焼成	12	20		
◆炉内雰囲気	酸素濃度 (vol%)	窒素または大気シール (Nm <sup>3</sup> /hr)		
		入口	炉出口	出口
1次焼成	1以下	25 (300℃)	10 (500℃)	25 (150℃)
2次焼成	20.9	25 (300℃)	10 (500℃)	25 (150℃)
◆炉内温度	ヒーター温度 (℃)			
	1ゾーン	2ゾーン	3ゾーン	
1次焼成	350	550	550	
2次焼成	350	550	550	



### 1)-1 カバーガラスの割れていないパネルの焼成処理

表 3.1.6 に示す仕様のパネル 200 枚の焼成処理を実施した結果、98%の高回収率で、清澄な割れていないカバーガラスが回収出来ることを実証した。

表 3.1.6 パネルの仕様及び焼成実績

メーカー	種類	焼成枚数 (枚)	カバーガラスの割れ (枚)	
			1 次焼成	2 次焼成
A 社	多結晶 Si	130	0	1
B 社	単結晶 Si	28	0	0
A 社	単結晶 Si	15	0	2
C 社	単結晶 Si	15	0	0
A 社	多結晶 Si	12	0	1
合計		200	0	4

### 2)-2 カバーガラスの割れているパネルの焼成処理

パネル 400 枚の焼成処理を実施した結果、清澄なガラス、Si セル及び銅配線が混合した状態で回収出来ることを実証した。

#### 3.1.7. 焼成炉運転条件

運転条件検討で実施した最適条件から、焼成処理は表 3.1.7 に示す条件で焼成処理を行った。1 次焼成では、窒素雰囲気下で 30 分間 500℃の条件で処理を行い、2 次焼成では空気雰囲気下で 20 分間 500℃の条件で処理を行った。

表 3.1.7 焼成条件

	焼成速度	焼成時間	焼成温度	酸素濃度
1 次焼成	8m/hr	30min/枚	500℃	1%以下
2 次焼成	12m/hr	20min/枚	500℃	20.9%

#### 3.1.8. 焼成後回収物の状態

写真 3.1.5 に焼成処理のパネル写真を示す。写真を見て分かる通り、焼成後は EVA 等有機物が分解され、ガラス、銅線及びセルのみの状態になっている。

写真 3.1.6～3.1.8 は、割れていない状態で焼成処理を行ったものと、カバーガラスが割れた状態で焼成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、焼成処理を行ったガラスの状態を写真 3.1.8 に示す。カバーガラスが割れていない場合は、焼成処理後もガラスは板状の状態ですぐに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 3.1.7 の

通り、ガラス全体にひびが入っており、銅線や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 3.1.5 焼成後のパネル外観①



写真 3.1.6 焼成後のパネル外観②



写真 3.1.7 焼成後のパネル外観② 拡大



写真 3.1.8 焼成後のパネル外観③  
(カバーガラスが割れていない状態)

## 3.2. 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

### 3.2.1. 研究背景

#### 1) 廃太陽光パネルリサイクルの背景

##### 1)-1 太陽光発電

我が国では 2030 年度の電源構成に占める再生可能エネルギーの割合を 22~24%にすることを目標としており、この実現に向け、太陽光発電は近年その需要が高まっている。再生可能エネルギーで生産した電力を企業が一定価格で一定期間買い取る制度である固定価格買取制度(FIT 法)が 2012 年 7 月から開始したことにより、太陽光発電の導入量は急増した。その一方で、FIT 法の終了に伴う大量廃棄が懸念されている[1]。

##### 1)-2 廃棄される太陽光パネル

図 3. 2. 1 に廃太陽光パネルの排出量予測を[3]示す。

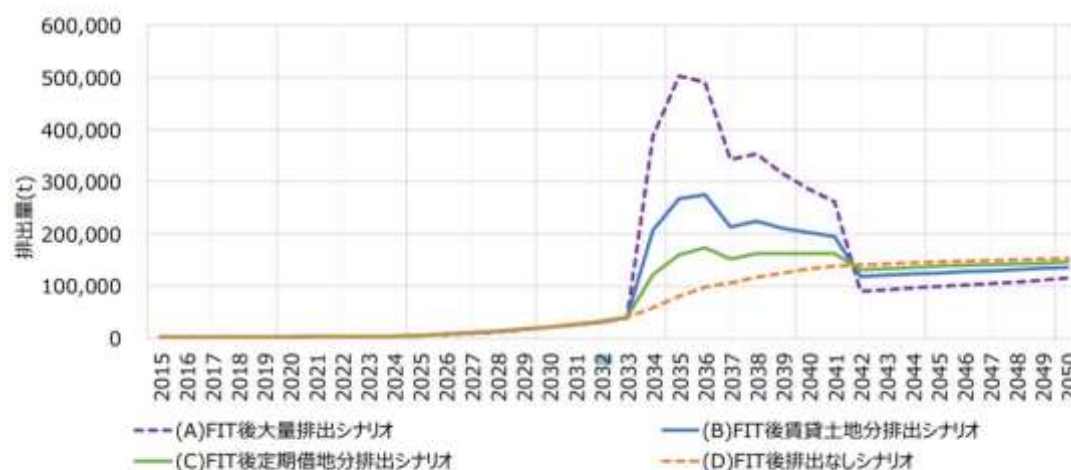


図 3. 2. 1 太陽光パネルの排出量予測[2]

排出量の予測は、FIT 買取期間終了後にどのように排出されるかによって左右されるため、土地の所有形態に基づき 4 つのシナリオを設定している。(A) は FIT 後大量排出シナリオ、(B) は FIT 後賃貸土地分排出シナリオ、(C) は FIT 後定期借地分排出シナリオ、(D) は FIT 後排出なしシナリオである。FIT 買取期間終了後にビジネスを継続することが難しい場合には (A) や (B) のシナリオに近づき、期間終了後もビジネスが継続する可能性がある場合には (C) や (D) のシナリオに近づくと推測されている。特に、2034~2036 年頃に排出量がピークを迎えると予測されており、廃太陽光パネルの経済合理性の高い処理方法の確立が急務である。

### 1)-3 太陽光パネルの構造

図 3.2.1 に太陽電池モジュールの断面図を示す。

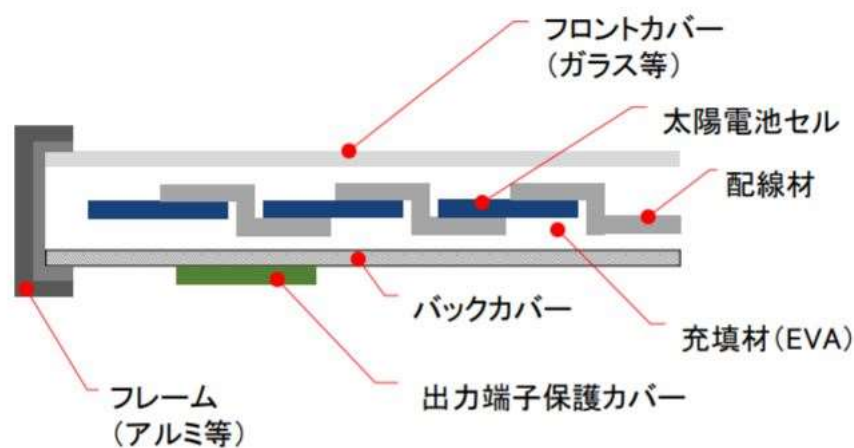


図 3.2.1 太陽電池モジュールの断面図[1]

太陽電池モジュールには様々な種類が存在するが、現在市場に多く出回っているものは単結晶シリコン系および多結晶シリコン系のモジュールである。太陽電池セルには銅などで構成される配線材が通っており、その周囲を充填剤が覆っている。充填剤には EVA (Ethylene-vinyl acetate、エチレン酢酸ビニル) が使用されている。外側にはフロントカバーガラスやアルミフレームが取り付けられている。太陽電池モジュール中のガラスは主にソーダ石灰とアルミノケイ酸によって構成されている。

また、図 3.2.3 に太陽電池モジュールの重要構成比を示す。フロントカバーに使用されるガラスが約 6 割を占め、次いでフレームに使用されるアルミニウム、EVA 等のプラスチックとなっている。

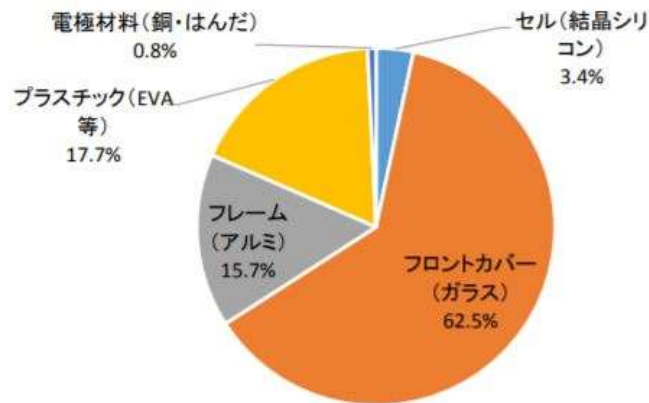


図 3.2.3 太陽電池モジュールの重要構成比[1]

#### 1)-4 ガラスリサイクル技術

図 3.2.4 に、廃太陽光パネル中のガラスリサイクル技術を処理能力（パネルの種類・状態を含む）と回収ガラスの質の関係として分類した。

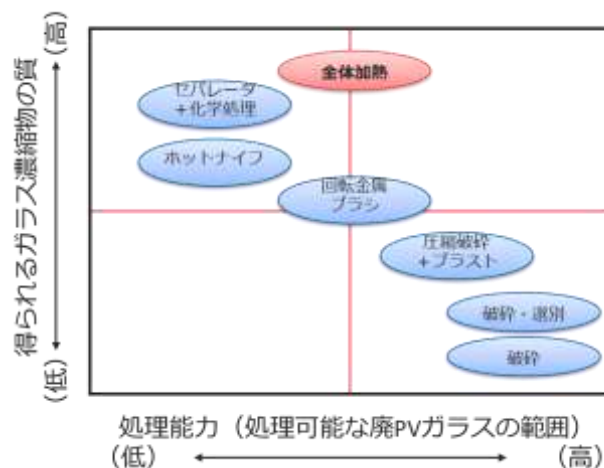


図 3.2.4 廃太陽光パネルのガラスリサイクル技術比較[2]

図 3.2.4 において、第一象限は多様な種類のパネルに対応可能でありかつガラスを板状で回収可能な技術を示すが、現状ではこうした技術開発は実現されていない。第二象限は、得られるガラスの質は高いが処理能力が劣る技術であり、セパレータ+化学処理、ホットナイフなどが挙げられる。第四象限は、処理能力は高いが得られるガラスの質は低くその用途が限られる技術であり、主として破砕+選別が挙げられる。これらの中で、本研究で採用する全体加熱法は、得られるガラスの質が高くかつある程度の処理能力を有する方法と思われる。

### 1)-5 全体加熱に関する類似研究

Bohlandら[4]は、シリコンPVモジュールの窒素雰囲気下での加熱処理を行った。モジュールはガラス、シリコンセル、EVA、バックシートから構成され、はじめにバックシートを徐々に加熱することで手作業によって剥離する。次に窒素雰囲気下で520℃に加熱してEVAを分解させる。EVAの分解には1h、ガラス・EVA・シリコンセルの剥離には90minを要した。なお、シリコン上にはEVAの炭化物は確認されなかった。

### 2) 全体加熱処理

本研究ではEVAを加熱処理によって分解、燃料ガス化している。500℃の窒素雰囲気下でEVAを分解し（一次加熱）、その後大気雰囲気下で分解したEVAを燃料ガスとして加熱（二次加熱）する。加熱処理装置の構成を5に示す。

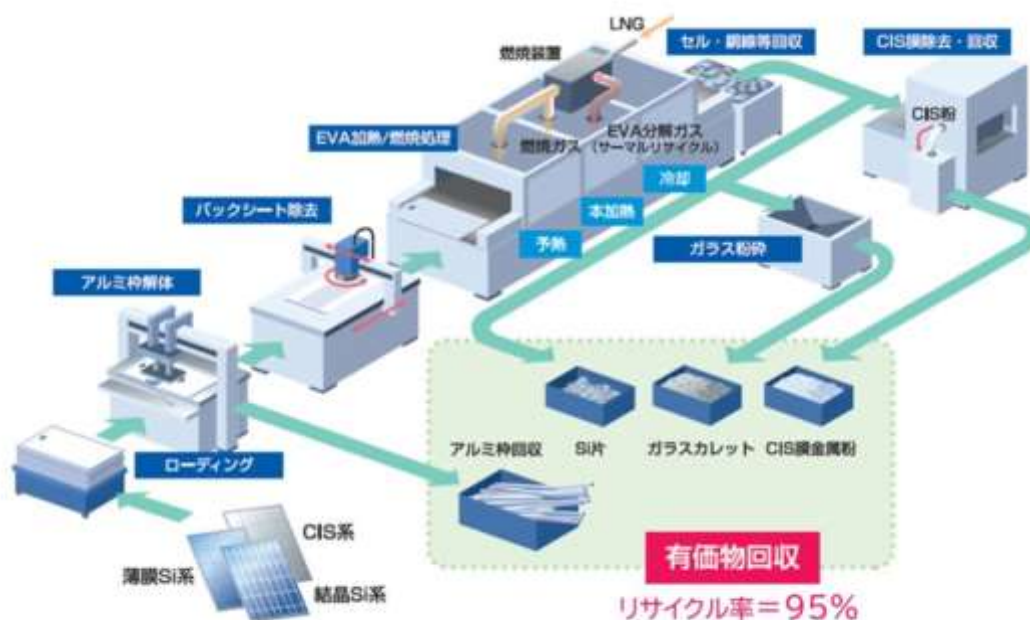


図 3.2.5 PV パネルの加熱処理装置の構成[5]

### 3) 風力選別

風力選別は比重選別技術のひとつに分類される。比重選別とは、目的の物質が他の物質と比重が異なる場合にその差を利用して分離する選別技術である[6]。風力選別装置には縦型風力選別機やジグザグ選別機などが存在する。本研究で使用したのは縦型風力選別機である。

縦型風力選別機では、縦長のカラムに上昇流を下から送風することで、沈降速度の小さい低比重の粒子を上方に移動させて軽産物として、沈降速度の大きい高比重の粒子を下方に移動させて重産物として回収する。図 3.2.6 に装置の概要を示す。



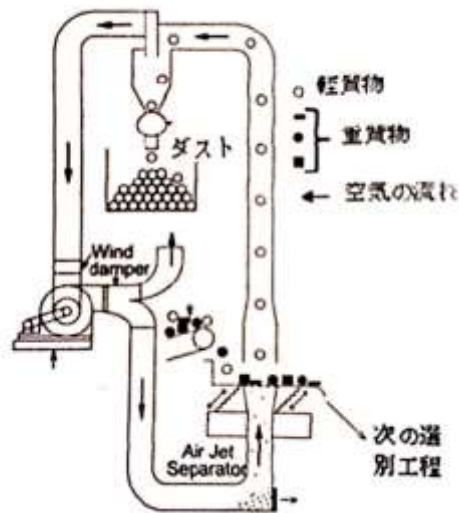


図 3.2.6 縦型風力選別機の概要[7]

#### 4) エアテーブル選別

エアテーブル選別も風力選別と同様に比重選別のひとつである。装置の概要を図 3.2.7 に示す。

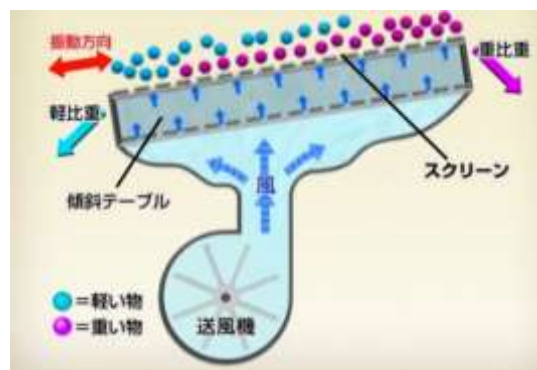


図 3.2.7 エアテーブル選別機の概要[8]

水平方向から少し角度のついたデッキに振動を与え、さらにデッキに下方からデッキと垂直方向に送風すると、高比重の粒子は風の影響をあまり受けて粉体層の下方に移動しデッキの振動によってデッキの上方に移動して重産物として回収される。一方で低比重の粒子は風の影響を受けて粉体層上方に移動しデッキの傾きに沿って下方に移動し軽産物として回収される。

#### 5) 本研究の目的

本研究では、割れた PV パネルに既述の全体加熱処理を施した試料について、高純度ガラ

スを回収するための処理フローを検討する。具体的には、加熱処理後のガラス・シリコンセル（以下セル）・銅線の混合物に対して、50 mm 篩によるふるい分け、風力選別、エアテーブル選別を適用し、高純度のガラス濃縮物および銅・銀等の濃縮物を回収する。

また本処理フローの主要選別法である風力選別およびエアテーブル選別において、比重に大きな差のない等方性のガラス粒子（比重約 2.55 g/cm<sup>3</sup>）と扁平なセル粒子（比重約 2.44 g/cm<sup>3</sup>）の分離する機構について考察する。

### 3.2.2. 本研究で提案する処理フロー

図 3.2.8 に本研究で提案する処理フローを示す。全体加熱処理された割れ廃 PV パネルは、基本的にガラス・セル・銅線の 3 種類で構成される。これを①まず目開き+ 50mm のふるいにて絡み合った銅線を網下産物として回収する。②網下産物に風力選別を適用し、扁平なセルおよび細粒のガラス粒子を軽産物として回収する。③粗粒のガラス粒子とわずかに残ったセルおよび銅線にエアテーブル選別を適用し、高純度ガラスを重産物として回収し、扁平なセルおよび銅線を軽産物に回収する。

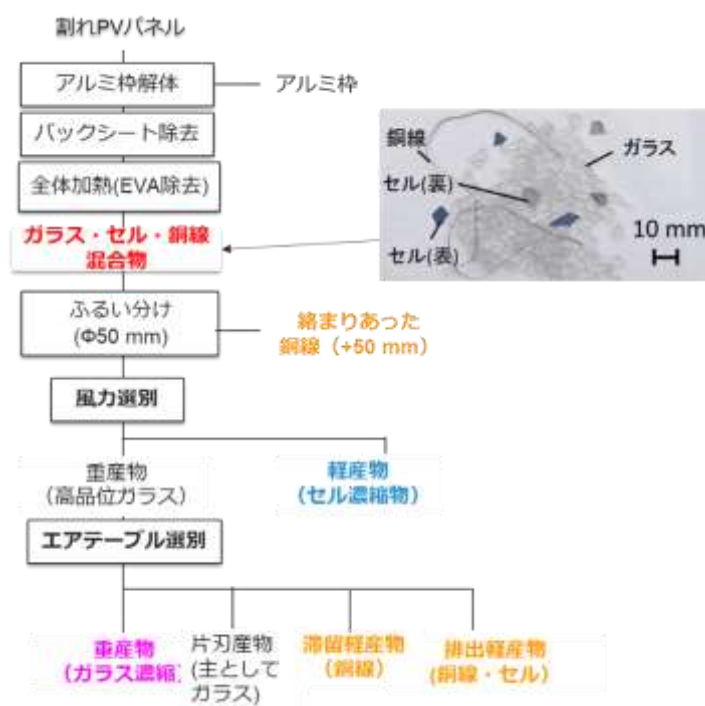


図 3.2.8 本研究で提案する処理フロー



### 3.2.3. 実験装置・方法

#### 1) 実験装置、方法

##### 1)-1 円錐四分法

加熱処理後の割れた PV パネル試料約 80 kg を円錐四分法により縮分した。円錐四分法は次の手順により行った。①試料を円錐の形になるように上方からスコップ等で堆積させる。②堆積した試料を円錐の頂点から押し潰して円錐台状にし、その後扇形に四等分する。③対角線上に位置する A と A、B と B 同士を合わせる(図 3. 2. 9 参照)。④本実験では試料を八分の一に縮分するため、①～③の操作を三回繰り返す。



図 3. 2. 9 円錐四分法[9]

##### 1)-2 ふるい分け

円錐四分法により縮分したフィード産物 10 kg を、写真 3. 2. 1 のような目開き  $\phi 50$  mm のふるいにてふるい分けを行った。絡み合って塊状となった大きなサイズの銅線が網上産物として回収される。



写真 3. 2. 1  $\phi 50$  mm ふるいの外観

### 1)-3 風力選別

ふるい分け網下産物に風力選別を施して、軽産物側に扁平状のセル粒子と細粒のガラス粒子を回収する。装置はH産業製風力選別機 L750SRM型を使用した。写真3.2.2に装置の外観を、図3.2.10に装置の機構図を示す。



写真 3.2.2 風力選別機の外観

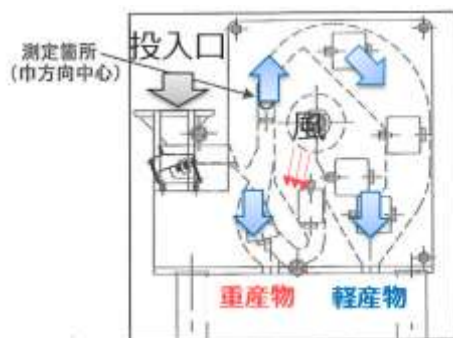


図 3.2.10 風力選別機の機構図

また試料に送風する風量を、装置周波数を 20、40、60 Hz の 3 種類として実施した。この各条件下での選別部の風速等を表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 風力選別機の装置条件

周波数(Hz)	選別部の風速(m/s)	電圧(V)	電流(A)	回転数(rpm)	風量(L/min)
20	4.47	73	3.0	287	20.73
40	8.84	147	3.9	572	40.78
60	13.5	194	6.5	826	60.91

#### 1)-4 エアテーブル選別

上記の風力選別を実施後、3種類の風量の中で最も選別成績が良かった40 Hzで得られた重産物（ガラスと微量のセル・銅線を含む）にエアテーブル選別を実施した。目的はガラス粒子を重産物に、セル・銅線を軽産物側に回収することである。装置はH産業製エアテーブル SRM 296P-72N型を使用した。装置の外観を写真3.2.3に、装置盤面の断面図を図3.2.11に示す。

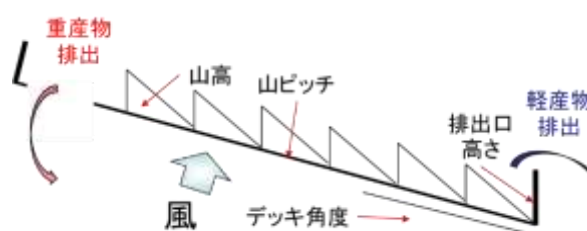


写真 3.2.3 エアテーブル選別機の外観 図 3.2.11 エアテーブル選別機の機構の概要

エアテーブル選別ではまず風量の装置条件を 38 Hz に固定しデッキの振動数を 47、52、57 Hz の 3 種類に変化させた。次にデッキ振動の振動数を 52 Hz に固定し、風量の装置条件を 35、38、41 Hz の種類に変化させた。ただし本実験の装置でのデッキ振動の振動数は 57 Hz $\div$ 425 rpm であり、風量の装置条件は 50 Hz $\div$ 40 m<sup>3</sup>/min である。装置条件の詳細を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.2 エアテーブル選別機の装置条件

盤面の網			デッキ 角度 (°)	排出口 高さ (mm)	風速 (Hz)	デッキ 振動数 (Hz)
網目 (mm)	山高 (mm)	山ピッチ (mm)				
15	11.5	15	1	10	38 (固定)	47、 52、 57
					35、 38、 41	52 (固定)

#### 1)-5 二分割機による縮分

各種実験により得られた産物を種々の分析用に二分割器を用いて縮分した。装置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)であり、その外観を写真 3.2.4 に示す。



写真 3.2.4 二分割器の外観

縮分操作では Carpenter の左右相殺法を採用した。図 3.2.12 には試料を 4 等分する例を示す。まず試料を二分割器にかけて左右に分割し (2 分割)、次に左側試料、右側試料それぞれを左右に分割し (4 分割)、更に 4 分割後の左側・右側試料も左右に分割する (8 分割)。このようにして得られた 1~8 の試料を 1 と 8、2 と 7、3 と 6、4 と 5 の各 2 試料を混合することで、目的の 4 等分の試料が得られる。これは二分割器の左右に分かれる偏差を補正するものである。

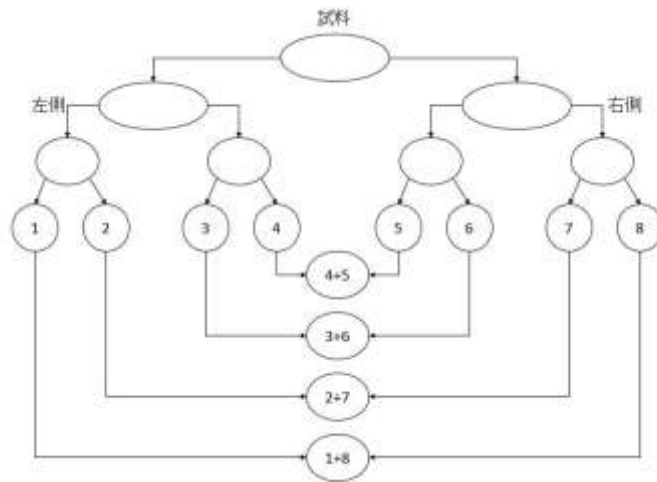


図 3.2.12 左右相殺法

### 1)-6 ふるい分け

試料の粒度分布を得るためにふるい分けを実施する。本研究で使用したふるいは JIS 標準ふるいであり、外観を写真 3.2.5 示す。また、ふるい分けに使用した振とう機は吉田製作所製ロータップ篩振盪機 1038-A であり、外観を写真 3.2.6 に示す。



写真 3.2.5 JIS 標準ふるい



写真 3.2.6 ロータップ振とう器の外観

#### 1)-7 手選

ふるい分けによって試料を粒度ごとに分けたのちに、1.0 mm 以上のすべての粒群に関して手選を行い、各粒群におけるガラス、セル、銅線、その他異物の4種類の分離を行った。

#### 1)-8 化学分析用粉砕

フィード試料および各種産物の化学組成を把握するために、必要に応じてふるい分けした各粒群に対して、構成元素を把握するために XRF 分析を実施したが、その前処理として使用した微粉砕機シーエムティー科学製高速振動試料粉砕機 TI-100 である。使用した振動ミルおよびその際に使用した粉砕セルを、それぞれ写真 3.2.7 及び写真 3.2.8 に外観を示す。



写真 3.2.7 振動ミルの外観



写真 3.2.8 粉砕セルの外観

#### 1)-9 XRF 分析

使用した XRF 分析装置の外観を写真 3.2.9 に示す。使用した装置は理学電機工業製 ZSX Primus II No. AE55-1012 CR06060 である。





写真 3.2.9 XRF 分析装置

### 3.2.4. 実験結果

#### 1) フィード産物の分析

本実験で使用した試料（フィード産物）を写真 3.2.10 に示す。またフィードの粒度分布を図 3.2.13 に、8.0 mm 以下の XRF 分析結果を図 3.2.14 に示す。

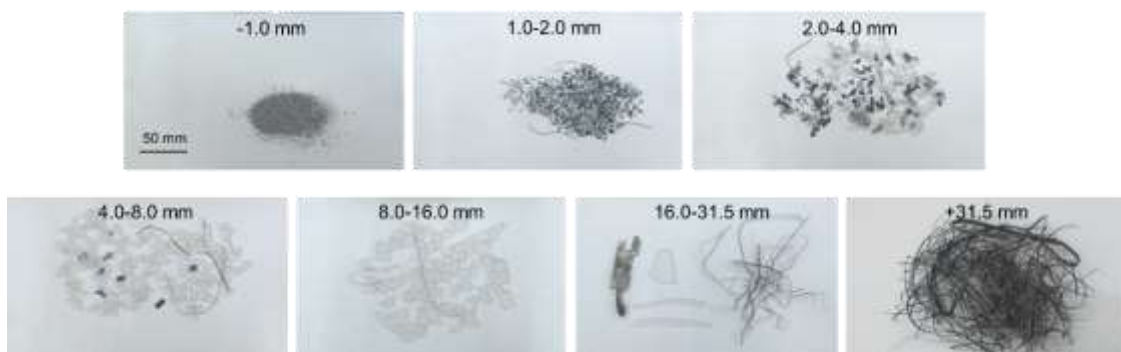


写真 3.2.10 フィード産物の外観

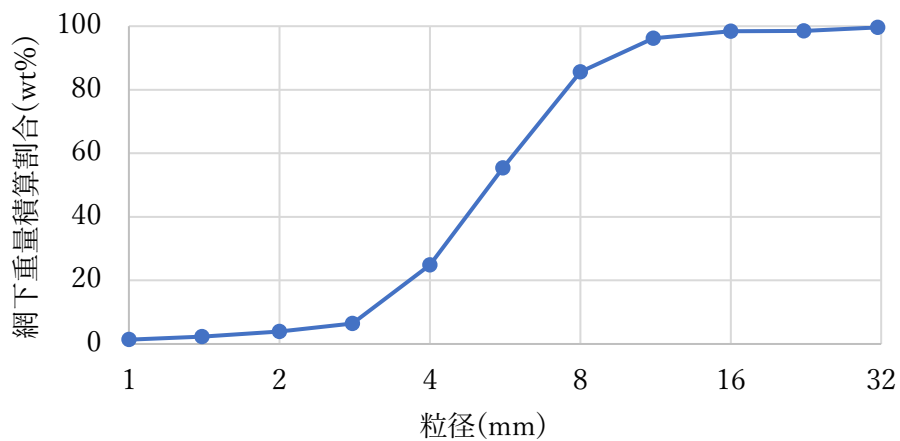


図 3.2.13 フィード産物の粒度分布

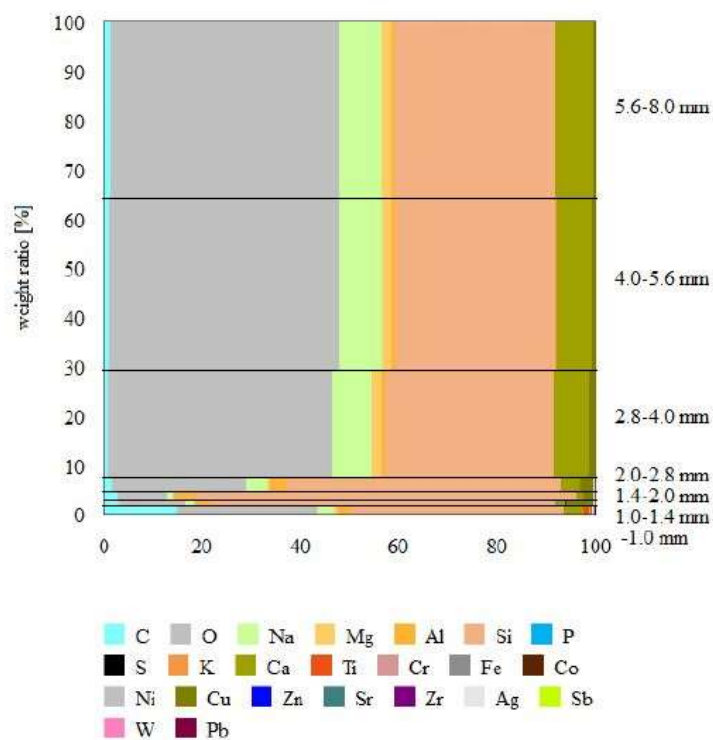


図 3.2.14 フィード産物の XRF 分析結果 (8.0 mm 以下)

構成物質はおもにガラス、PV セル、銅線である。ガラス、セル単体の XRF 分析結果をそれぞれ図 3.2.15 及び図 3.2.16 に示す。



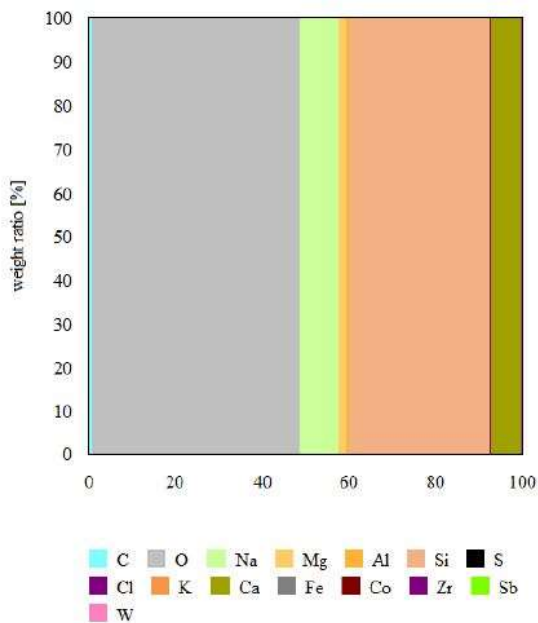


図 3.2.15 ガラス単体の XRF 分析結果

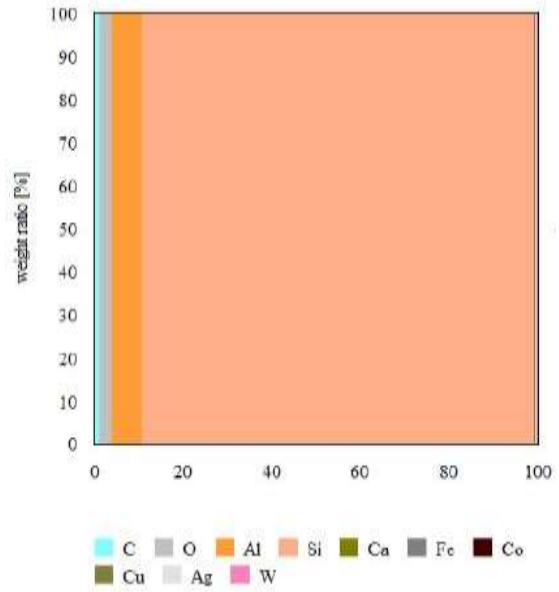


図 3.2.16 セル単体の XRF 分析結果

またフィード試料の手選の結果を図 3.2.17 に示す。ただし-1.0 mm の試料については手選が不可能であったため、ガラス、セル単体の XRF 分析結果をもとに近似計算を実施した。具体的には下記のように算出した。

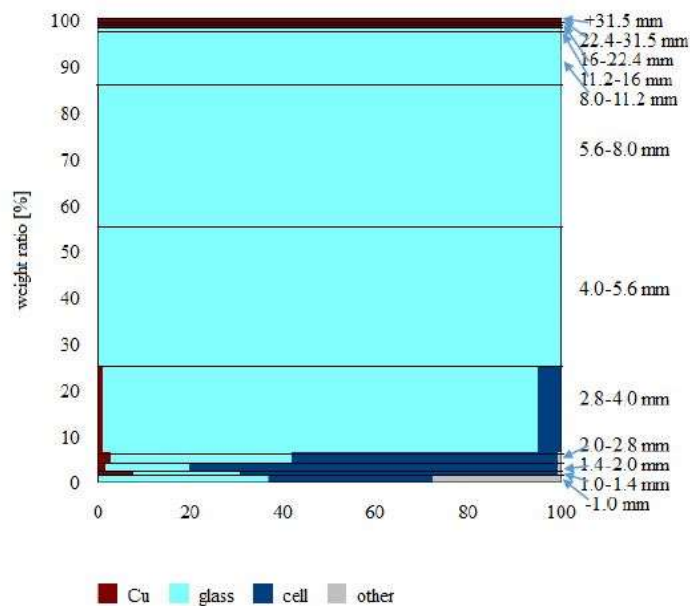


図 3.2.17 フィード産物の手選結果（ただし-1.0 mm は計算結果）

ガラス、セル単体の XRF 分析結果から Si はガラスとセルに多量に含まれており、Na、Mg、

Al, Ca はガラス・セル以外の構成物質には含有されていないと仮定した。そこで①Si と Na、②Si と Mg、③Si と Al、④Si と Ca について、それぞれ 1.0-1.4 mm、1.4-2.0 mm、2.0-2.8 mm、2.8-4.0 mm、4.0-5.6 mm、5.6-8.0 mm の 6 粒群において二元連立方程式を立て、ガラスとセルの重量を算出し、手選により得られた含有量と比較する。

例：5.6 8.0 mm の Na と Si について方程式を解く場合

(1) フィード産物 5.6-8.0 mm の XRF 結果から、Na が 18.04 g、Si が 68.21 g であることが分かっている。

(2) ガラス・セル単体の XRF 結果から、セルの Na 重量割合が 0 % Si が 88.63 %、ガラスの Na 重量割合が 8.972 % Si が 32.48 %が分かっている。

(3) 二元連立方程式はセル x g ガラス y g とすると

Na については

$$0 + 0.08972y = 18.04$$

Si について

$$0.8863x + 0.3248y = 68.21 \text{ (有効数字 4 桁)}$$

$$\therefore x=3.275 \quad y=201.1$$

(4) 手選結果と計算結果を照らし合わせ、相対誤差の絶対値を算出する。

$$\text{相対誤差} = \frac{(\text{計算結果}) - (\text{手選結果})}{\text{手選結果}}$$

手選結果、算出した重量、相対誤差の絶対値を表 3.2.3 に記載する。

表 3.2.3 セルとガラスの算出重量および相対誤差 (ただし相対誤差は絶対値)

	手選結果(g)	①Na と Si		②Mg と Si		③Al と Si		④Ca と Si		
		算出重量(g)	相対誤差	算出重量(g)	相対誤差	算出重量(g)	相対誤差	算出重量(g)	相対誤差	
5.6-8.0 mm	セル	0	3.275	-	-6.484	-	0.7943	-	-5.799	-
	ガラス	208.6	201.1	0.03609	227.7	0.0914	207.8	0.00398	225.8	0.0823
4.0-5.6 mm	セル	0.7253	2.459	2.39	-0.8808	2.214	3.866	4.33	-3.276	5.517
	ガラス	209.2	206	0.01514	215.09	0.02831	202.1	0.03379	221.6	0.05958
2.8-4.0 mm	セル	6.313	6.195	0.0188	3.158	0.4998	8.18	0.2957	2.395	0.6206
	ガラス	119.7	118.3	0.01163	126.5	0.05757	112.8	0.05693	128.6	0.07496
2.0-2.8 mm	セル	9.677	7.95	0.1785	7.67	0.2074	8.474	0.1243	7.392	0.2362
	ガラス	6.615	7.959	0.2031	8.722	0.3185	6.53	0.01289	9.481	0.4332
1.4-2.0 mm	セル	8.814	9.193	0.04298	9.213	0.04525	7.393	0.1612	8.874	0.006784507
	ガラス	2.001	1.63	0.1854	1.575	0.2129	6.542	2.269	2.5	0.2494
1.0-1.4 mm	セル	3.164	3.5	0.1062	3.453	0.09137	2.74	0.134	3.33	0.0525
	ガラス	1.06	0.9082	0.1434	1.037	0.02188	2.981	1.812	1.373	0.295

表 3.2.3 より、すべての粒群の相対誤差の絶対値の和を取ると、①の Na と Si により二元連立方程式が最も誤差が小さくなる。ゆえに①の算出方法を用いて-1.0 mm 粒群のガラス、セルの重量を算出し、図 3.2.17 の量率図に反映した。

## 2) 風力選別

φ50 mm 篩でのふるい分け後の、風力選別へのフィード産物の粒度分布と各粒群へのガラスおよびセルの分配率分布をそれぞれ図 3.2.18 及び図 3.2.19 に示す。両図より、9 割以上を占めるガラスの各粒群への分配率分布は全体の粒度分布とほぼ同様だ（若干粗粒側にシフトしている）おり、セルそのそれは細粒側に分布することが分かる。

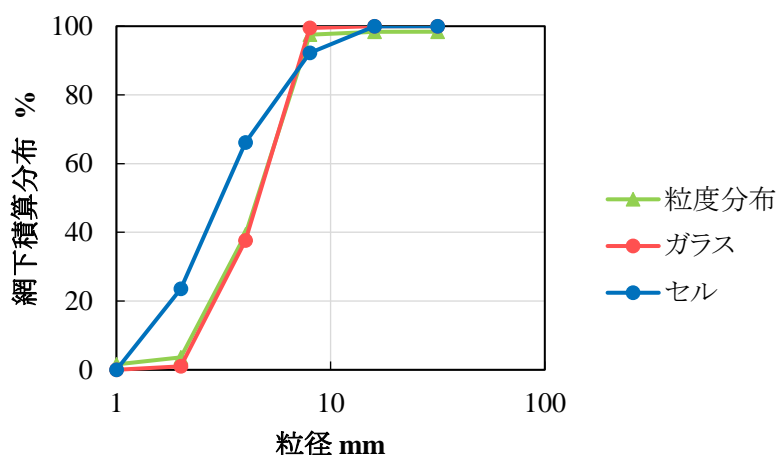


図 3.2.18 風力選別へのフィード産物の粒度分布

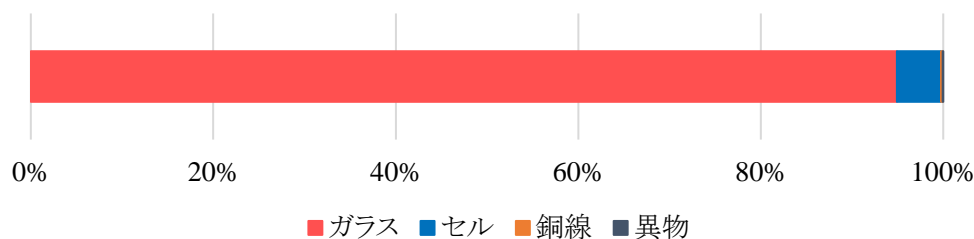


図 3.2.19 風力選別へのフィード産物における各成分の含有率（ガラス：92.0 wt%、セル：4.71 wt%、銅線：0.15 wt%、異物：0.0739 wt%）

風力選別で得られた軽産物のセルの品位、回収率、分離効率をそれぞれ図 3.2.20、図 3.2.21 及び図 3.2.22 に示す。分離効率の定義は式 (3.2.1) のようである。

セルの（他成分に対する）分離効率 = 軽産物へのセル回収率 - 軽産物への他成分混入率(3.2.1)

図 3.2.20 より、軽産物中のセル品位は、風量が小さいほど高く、風量が大きくなるに従って低下した。しかし、図 3.2.20 に示すように、風量の小さい 20 Hz ではセルの回収率が非常に低く、続いて 60 Hz そして 40 Hz の場合が最も高くなった。風量の最も大きい 60 Hz でセル回収率が低下した原因としては、風量が大き過ぎて選別部分で乱流が発生したためと考えられた。以上より、図 3.2.22 に示すように、セルの分離効率は、40 Hz で最も高かった。図 3.2.23 には軽産物中の各粒群別への各成分の分配率を示したが、風量の小さい 20

Hz では若干の細粒のガラスが混入し、40 Hz ではより粗粒のガラスも混入するようになることが分かる。また、同図より、ガラス粒子は細粒ほど軽産物中に分配されるが、セル粒子は粗粒ほど軽産物中に分配されることが明らかである。表 3.2.4 には、風力選別軽産物のセル品位、回収率、分離効率の値を記載した。

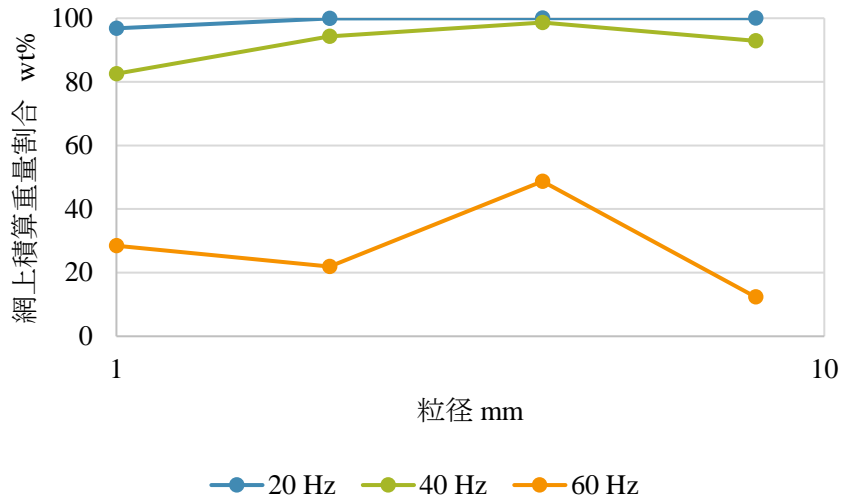


図 3.2.20 風力選別軽産物中のセル品位（風量変化）

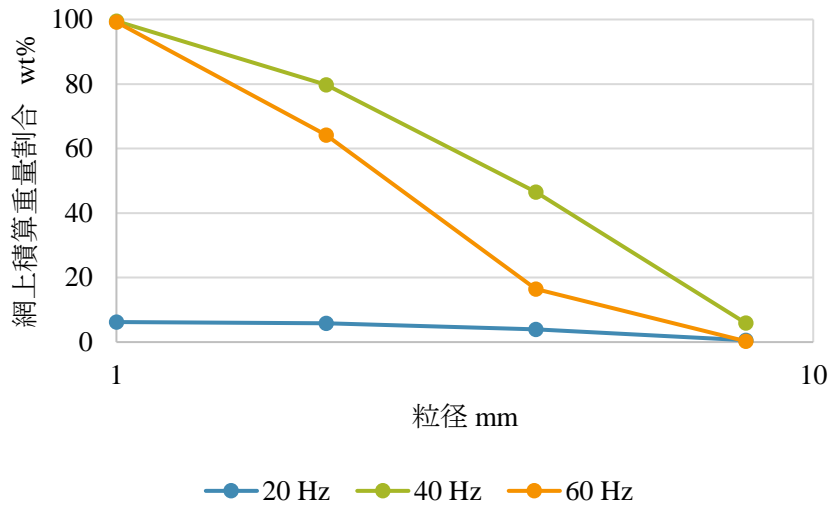


図 3.2.21 風力選別軽産物へのセル回収率（風量変化）

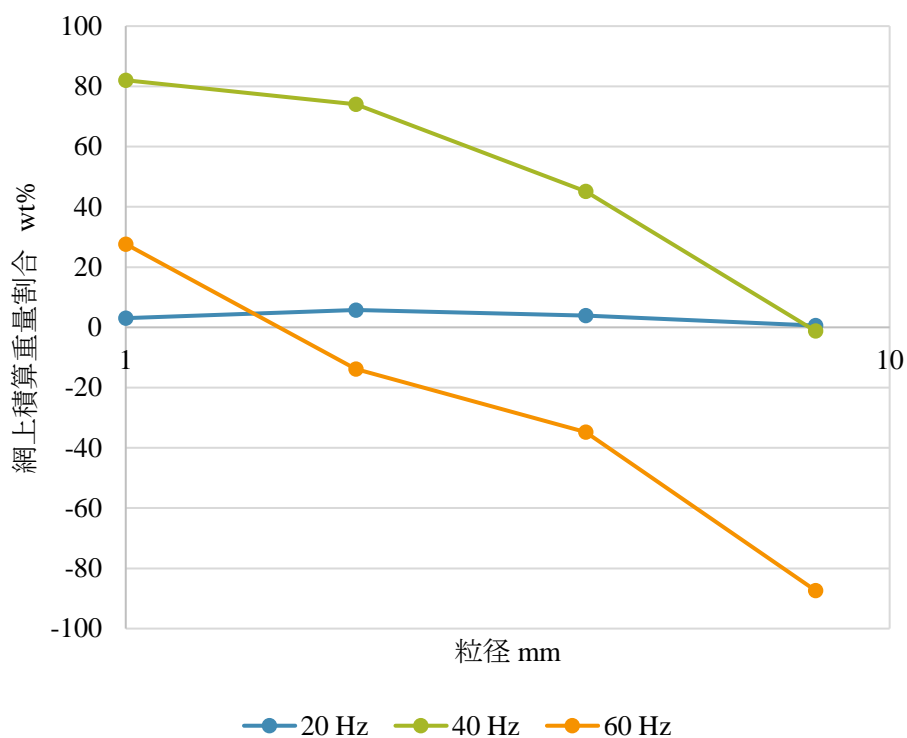


図 3.2.22 風力選別軽産物のセル分離効率（風量変化）

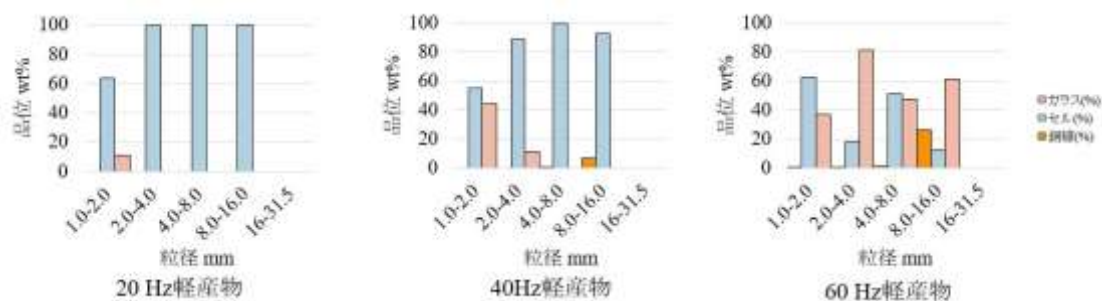


図 3.2.23 風力選別軽産物各粒群への各成分の分配率

表 3.2.4 風力選別軽産物(1.0-31.5 mm)中のセル品位、回収率、分離効率

風速 (Hz)	セル品位 (wt%)	セル回収率 (wt%)	セルの他成分に対する分離効率 (wt%)
20	96.8	6.21	3.03
40	82.5	99.5	82.0
60	28.4	99.2	27.7

次に風力選別で得られた重産物のガラスの品位、回収率、分離効率をそれぞれ図 3.2.24、図 3.2.25 及び図 3.2.26 に示す。分離効率は式 (3.2.2) で算出される。

ガラスの（他成分に対する）分離効率 = 重産物へのガラス回収率 - 重産物への他成分混入率(3.2.2)

図3.2.24より、重産物のガラス品位は風量を変化させてもあまり変化がないが、図3.2.25及び図3.2.26より、風量を増大させると重産物のガラス回収率は低下する傾向にあり、それによってガラスの分離効率も低下することが分かる。

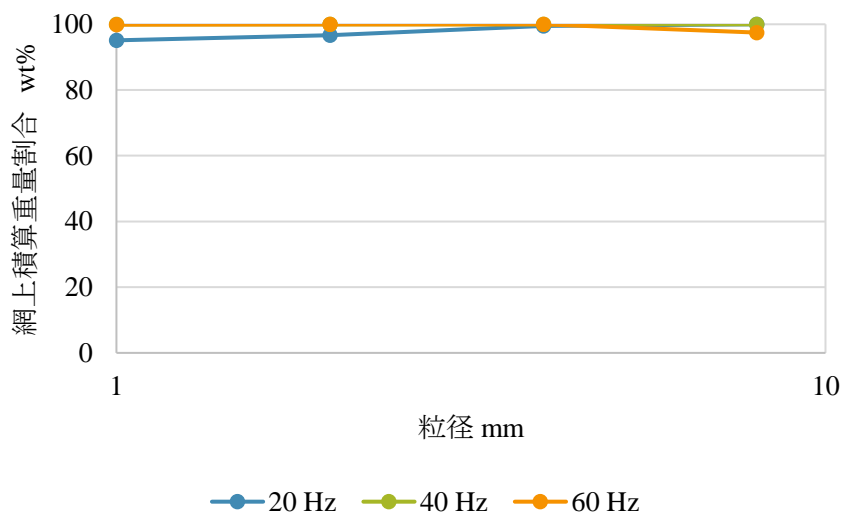


図 3.2.24 風力選別重産物中のガラス品位（風量変化）

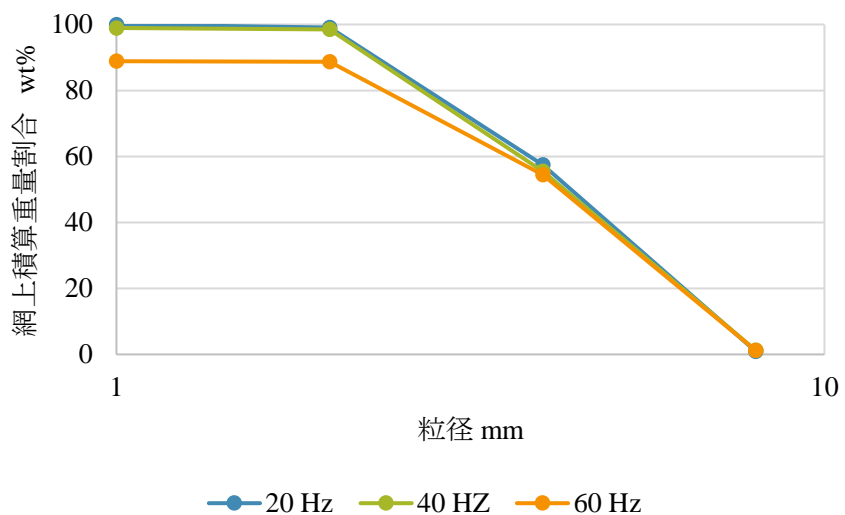


図 3.2.25 風力選別重産物へのガラス回収率（風量変化）

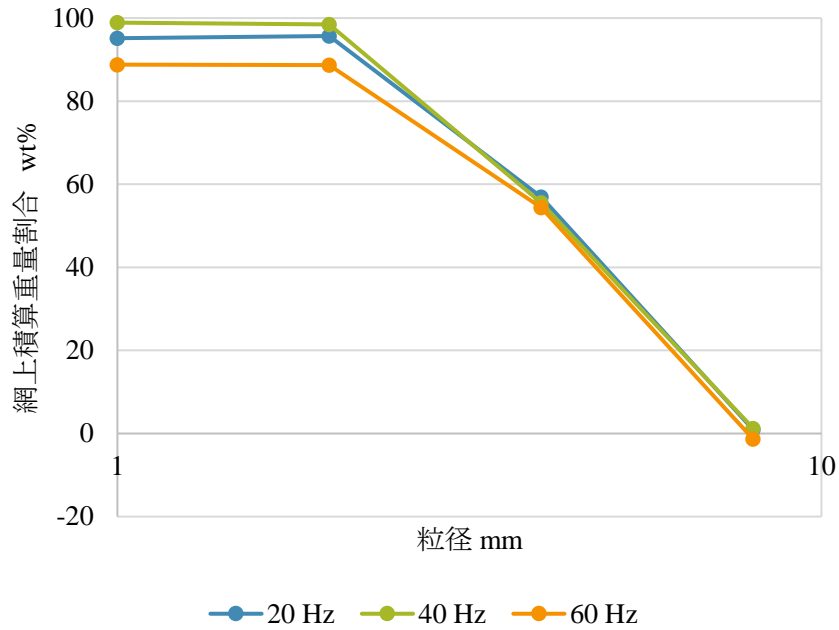


図 3.2.26 風力選別重産物へのガラスの分離効率（風量変化）

### 3) エアテーブル選別

エアテーブル選別へのフィード（つまり風力選別での重産物）の粒度分布と各成分の各粒群への分配率分布を、それぞれ図 3.2.27 及び図 3.2.28 に示す。風力選別重産物中のガラス品位は 99.8 wt%であるが、エアテーブル選別では、この純度をさらに向上させることが目的である。ガラスの粒群別分配率分布は船体の粒度分布をほぼ同様であるが、セルは細粒のものが多く、ここからも、風力選別において細粒のセル粒子が重産物に分配することが分かる。

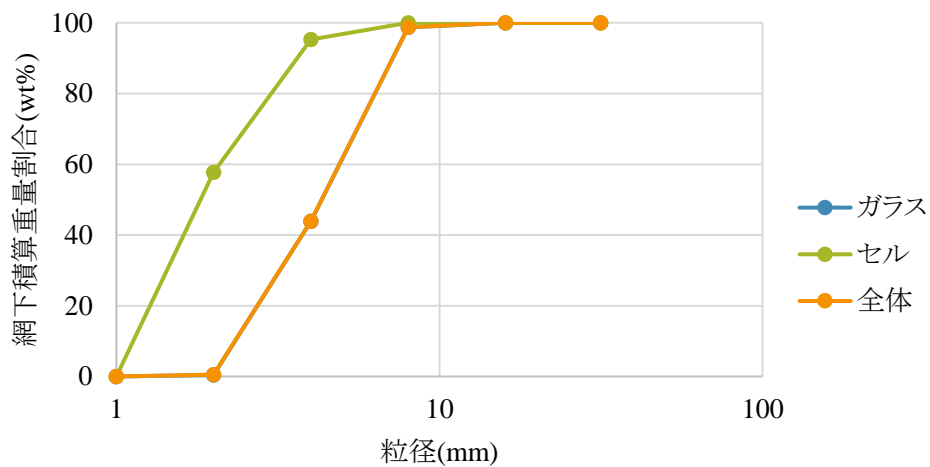


図 3.2.27 エアテーブル選別へのフィード産物の粒度分布

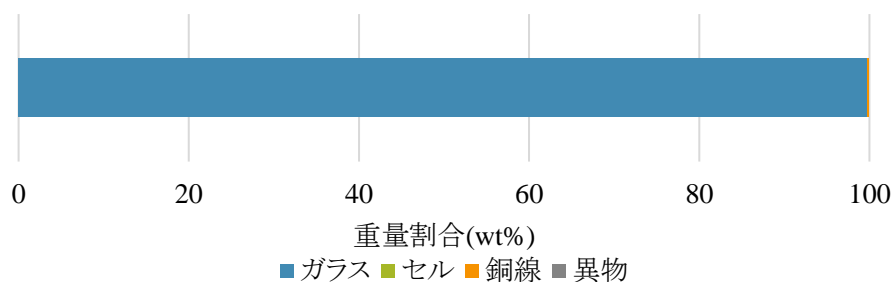


図 3.2.28 エアテーブル選別へのフィード産物の各成分分布(ガラス：99.8 wt%、セル：0.03 wt%、銅線：0.19 wt%、異物：0 wt%)

風量を 38 Hz に固定し、振動数を 47、52、57 Hz に変化させた際のエアテーブル選別重産物のガラスの品位、回収率、分離効率を、それぞれ図 3.2.29、図 3.2.30 及び図 3.2.31 に示す。また、エアテーブル選別重産物のガラスの品位、回収率、分離効率の値を表 3.2.5 に示した。

通常、振動数が大きくなれば、多くの粒子が重産物側に分配されやすくなるので、重産物のガラスの品位は低下、回収率は向上、分離効率は両者の増減によって変化すると予想されたが、上記図表より、ガラスの品位、回収率、分離効率いずれも、振動数 52 Hz の場合に最大値を示した。図 3.2.32 には各振動数における重産物中の各成分の分配率を粒群別に示したが、分離効率最大を示した 52 Hz では細粒のセル粒子およびやはり細粒の銅線が不純物として混入した。風力選別でも述べたが、扁平なセル粒子はサイズの大きいものほど上昇流の影響を受けて粉体層上方に移動して軽産物として回収されるが、サイズの小さいものは上昇流の影響を受けにくく粉砕層下方に移動して重産物に混入することが明らかとなった。なお、細長い銅線も、通常は、セル粒子と同様にその形状によって軽産物に回収されるが、サイズの小さい粒子の一部は重産物に混入することとなった。



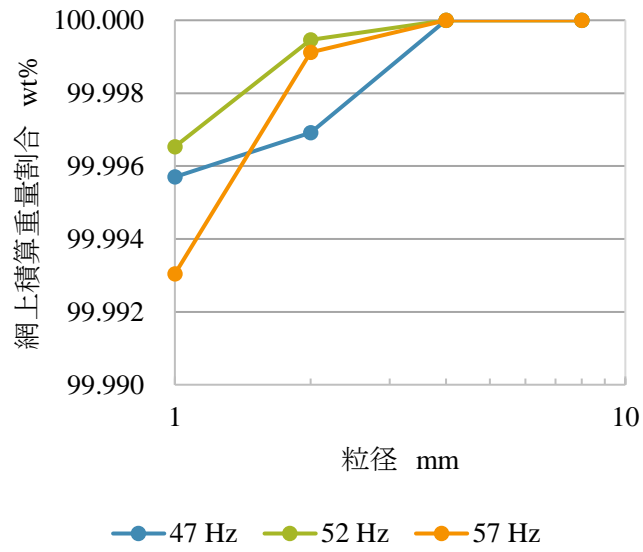


図 3.2.29 エアテーブル選別重産物中のガラス品位（風量 38 Hz、振動数変化）

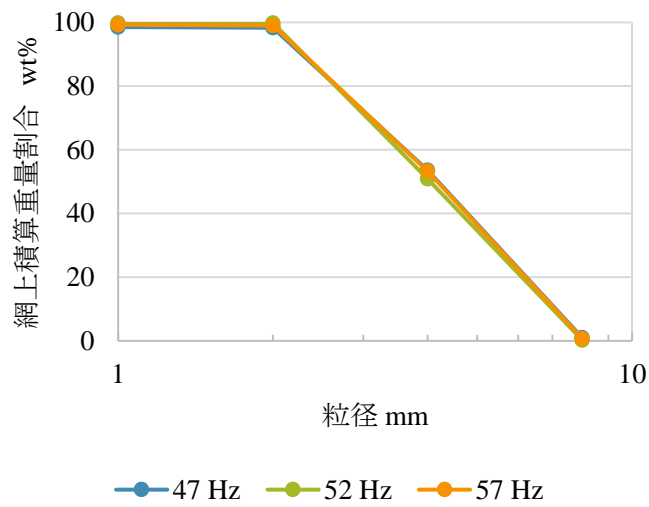


図 3.2.30 エアテーブル選別重産物のガラス回収率（風量 38 Hz、振動数変化）

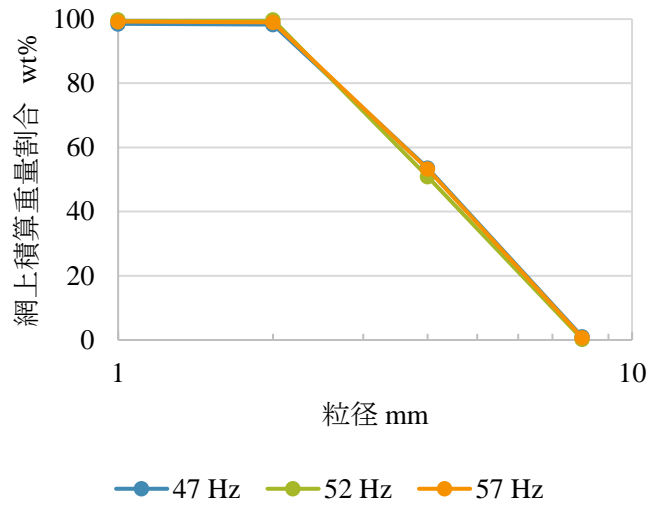


図 3.2.31 エアテーブル選別重産物のガラス分離効率（風量 38 Hz、振動数変化）

表 3.2.5 エアテーブル選別重産物のガラスの品位、回収率、分離効率  
（風量 38 Hz、振動数変化）

粒群 (mm)	積算ガラス品位 (wt%)			積算ガラス回収率 (wt%)			ガラスの他成分に対する分離効率 (wt%)		
	47 Hz	52 Hz	57 Hz	47 Hz	52 Hz	57 Hz	47 Hz	52 Hz	57 Hz
8.0-31.5	100	100	100	0.996	0.254	0.727	0.995	0.254	0.727
4.0-31.5	100	100	100	53.6	50.9	53.3	53.6	50.9	53.3
2.0-31.5	100 (99.996)	100 (99.999)	100 (99.999)	98.3	99.8	99.0	98.3	99.8	99.0
1.0-31.5	100 (99.995)	100 (99.996)	100 (99.993)	98.5	99.9	99.2	98.5	99.8	99.2

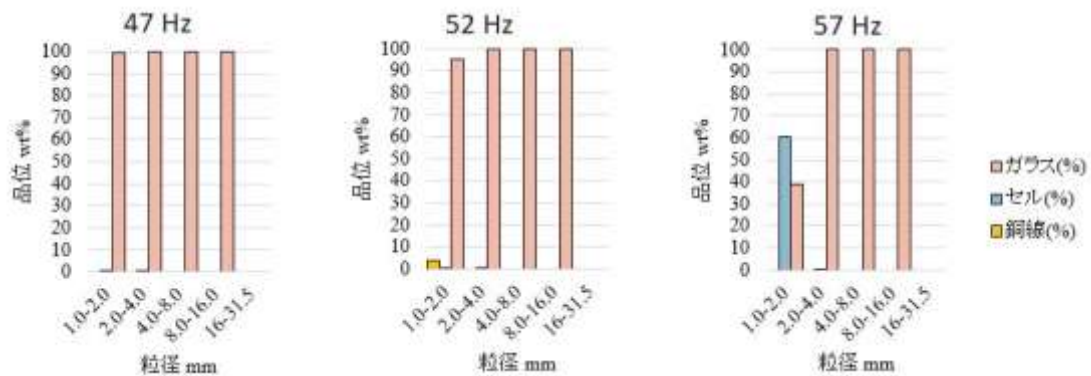


図 3.2.32 エアテーブル選別重産物の各成分の分配率（風量 38 Hz、振動数変化）

次に、振動を 52 Hz に固定し、風量を 35、38、41 Hz に変化させた際のエアテーブル選別重産物のガラスの品位、回収率、分離効率をそれぞれ図 3.2.33、図 3.2.34 及び図 3.2.35 に示す。また、それぞれのガラス品位、回収率、分離効率の値を表 3.2.6 に示した。

通常のエアテーブル選別では、風量が多い場合、軽粒子が選択的に粉体層上方に移動するため盤面の振動の影響を受けにくくなり軽産物に濃縮されやすくなる一方で、サイズの小さい重粒子も上昇流によって粉砕層上方に移動して重産物への回収率が低下する。つまり、風量の大きい方がガラス（重粒子）の重産物の品位が向上し回収率が低下すると推測された。上記図表からは、風量の小さい 35 Hz の場合で品位が最も低かったが、回収率はおおむね風量の大きい 38、41 Hz の場合の方が高くなった。したがって、分離効率は 38、41 Hz の場合で最も高い値を示した。図 3.2.36 には各風量における重産物中の各成分の分配率を粒群別に示したが、分離効率最大を示した 38、41 Hz では細粒のセル粒子およびやはり細粒の銅線が不純物として混入することが分かった。

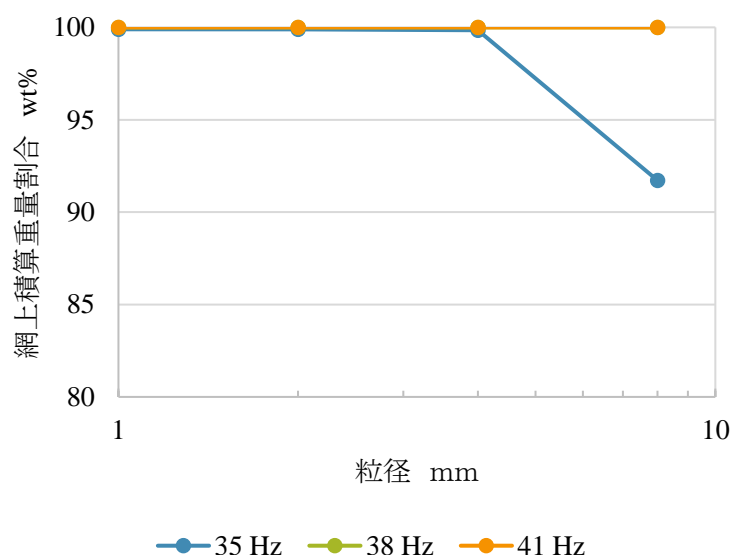


図 3.2.33 エアテーブル選別重産物中のガラス品位（振動：52 Hz、風量変化）

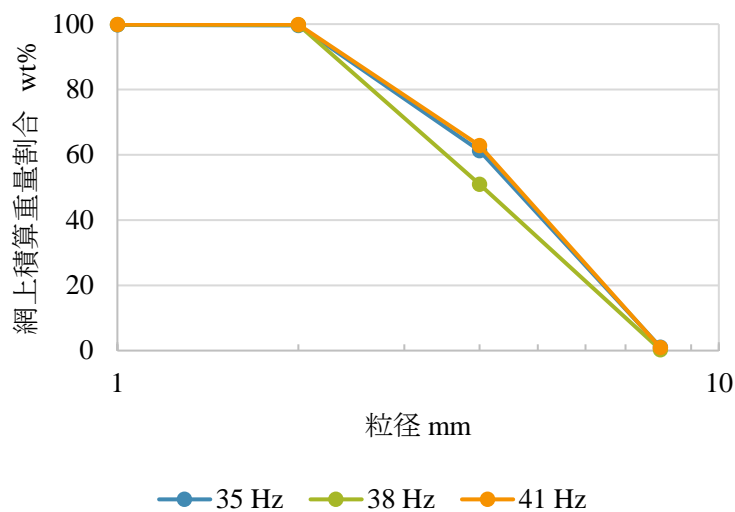


図 3.2.34 エアテーブル選別重産物へのガラス回収率（振動：52 Hz、風量変化）

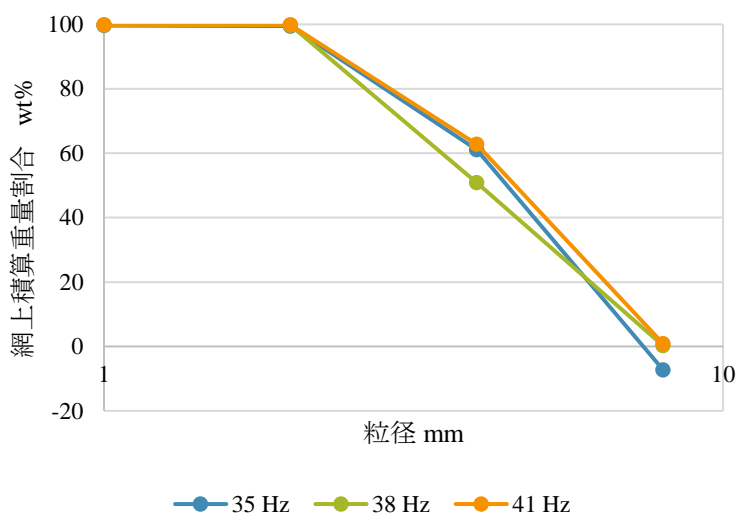


図 3.2.35 エアテーブル選別重産物へのガラスの分離効率（振動：52 Hz、風量変化）

表 3.2.6 エアテーブル選別重産物のガラス品位、回収率、分離効率  
(振動：52 Hz、風量変化)

粒群 (mm)	積算ガラス品位 (wt%)			積算ガラス回収率 (wt%)			ガラスの他成分に対する分離効率 (wt%)		
	35 Hz	38 Hz	41 Hz	35 Hz	38 Hz	41 Hz	35 Hz	38 Hz	41 Hz
8.0-31.5	91.7	100	100	1.04	0.254	0.893	-7.24	0.254	0.893
4.0-31.5	99.8	100	100	61.2	50.9	62.8	61.1	50.9	62.8
2.0-31.5	99.9	100 (99.999)	100	99.6	99.8	99.8	99.5	99.8	99.8
1.0-31.5	99.9	100 (99.996)	100 (99.997)	99.7	99.9	99.9	99.6	99.8	99.9

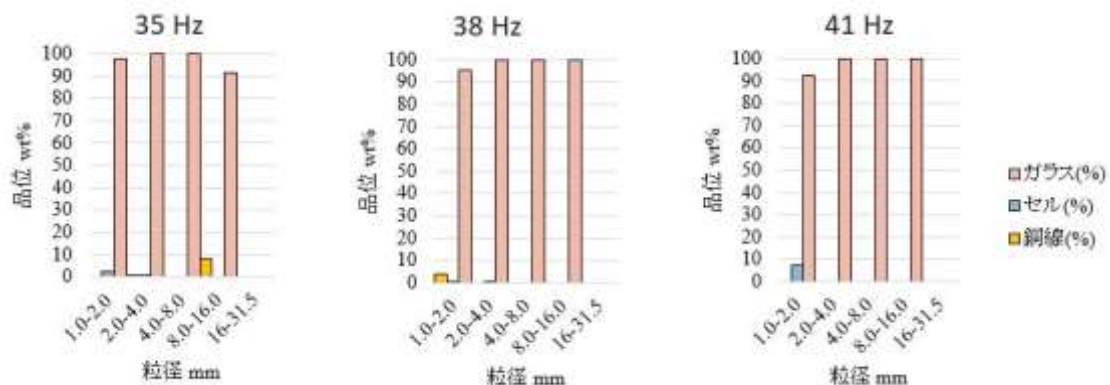


図 3. 2. 36 エアテーブル選別重産物への各成分の分配率（振動：52 Hz、風量変化）

以下は、エアテーブル選別軽産物中の各成分の含有率を粒群ごとに量率図にまとめたものである。図 3. 2. 37 は風量を 38 Hz に固定し振動を 47 Hz～57 Hz に変化させた場合、図 3. 2. 38 は振動を 52 Hz に固定し風量を 35 Hz～41 Hz に変化させた場合を示している。ただし-1.0 mm 粒群に関しては手選を実施していないため不明としている。また図中の Cu は銅線を表している。この銅線は厳密には軽産物の回収箱に回収された試料ではなく、デッキ上に滞留して軽産物となるものであるため、滞留軽産物と表現した。

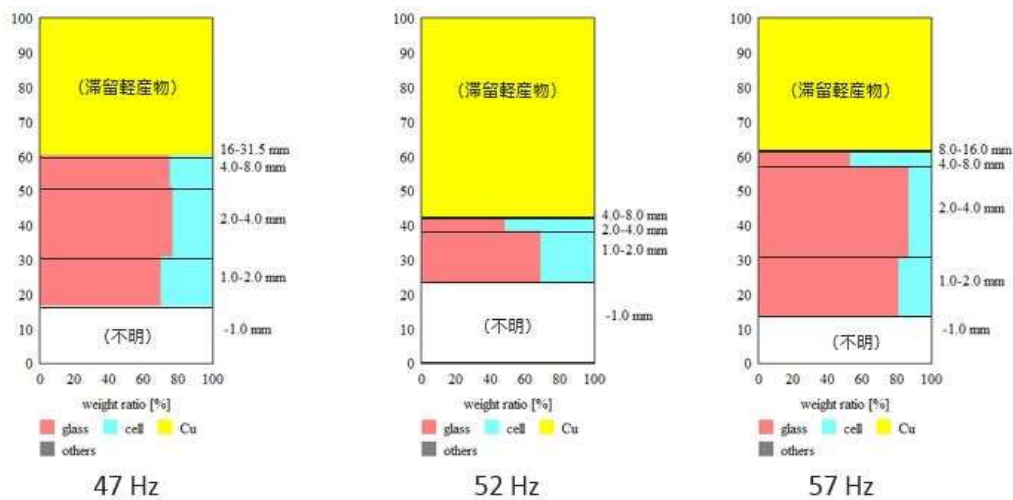


図 3. 2. 37 エアテーブル選別軽産物中の各成分割合（風量 38 Hz、振動数変化）

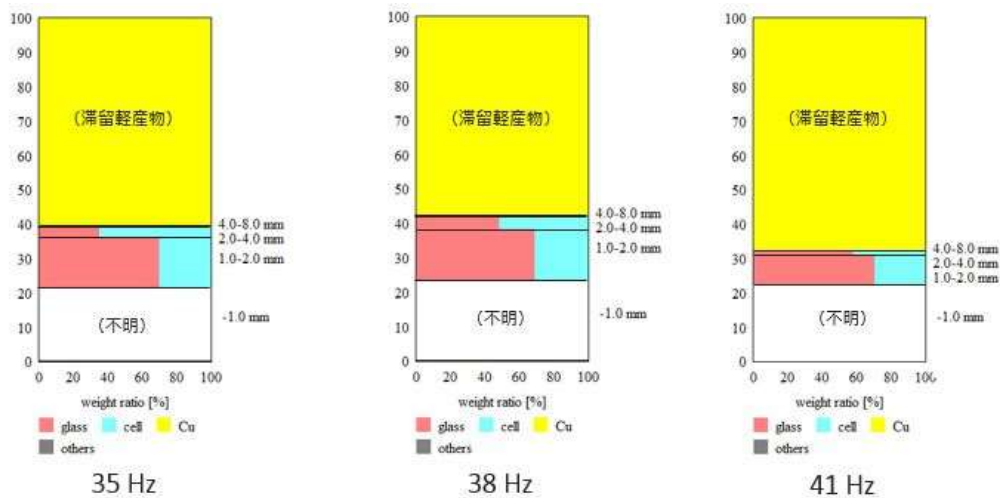


図 3.2.38 エアテーブル選別軽産物中の各成分割合（振動：52 Hz、風量変化）

#### 4) フロー全体としての評価

##### 4)-1 各成分のマテリアルバランス

図 3.2.39 に、本フロー全体のガラス、セル、銅線に関するマテリアルバランスを示す。ただし操作条件は、風力選別は 40 Hz、エアテーブル選別は風量 38 Hz、振動 52 Hz で実施した。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。

最終的に、エアテーブル選別重産物として 99.997 wt%品位（セル+異物で 38 ppmw）の高純度ガラス産物を回収率 98.1 %で得ることができた。なお、銀を含むセルは風力選別軽産物として品位 82.5wt%、回収率 99.5 %で、銅線はふるい分け+50 mm 産物として品位 100 wt%、回収率 88.9 %で、それぞれ濃縮された。なお、銀を含むセルと銅線はその後銅製錬にフィードされることを考えると、両者の濃縮産物（ふるい分け+50 mm 産物+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。

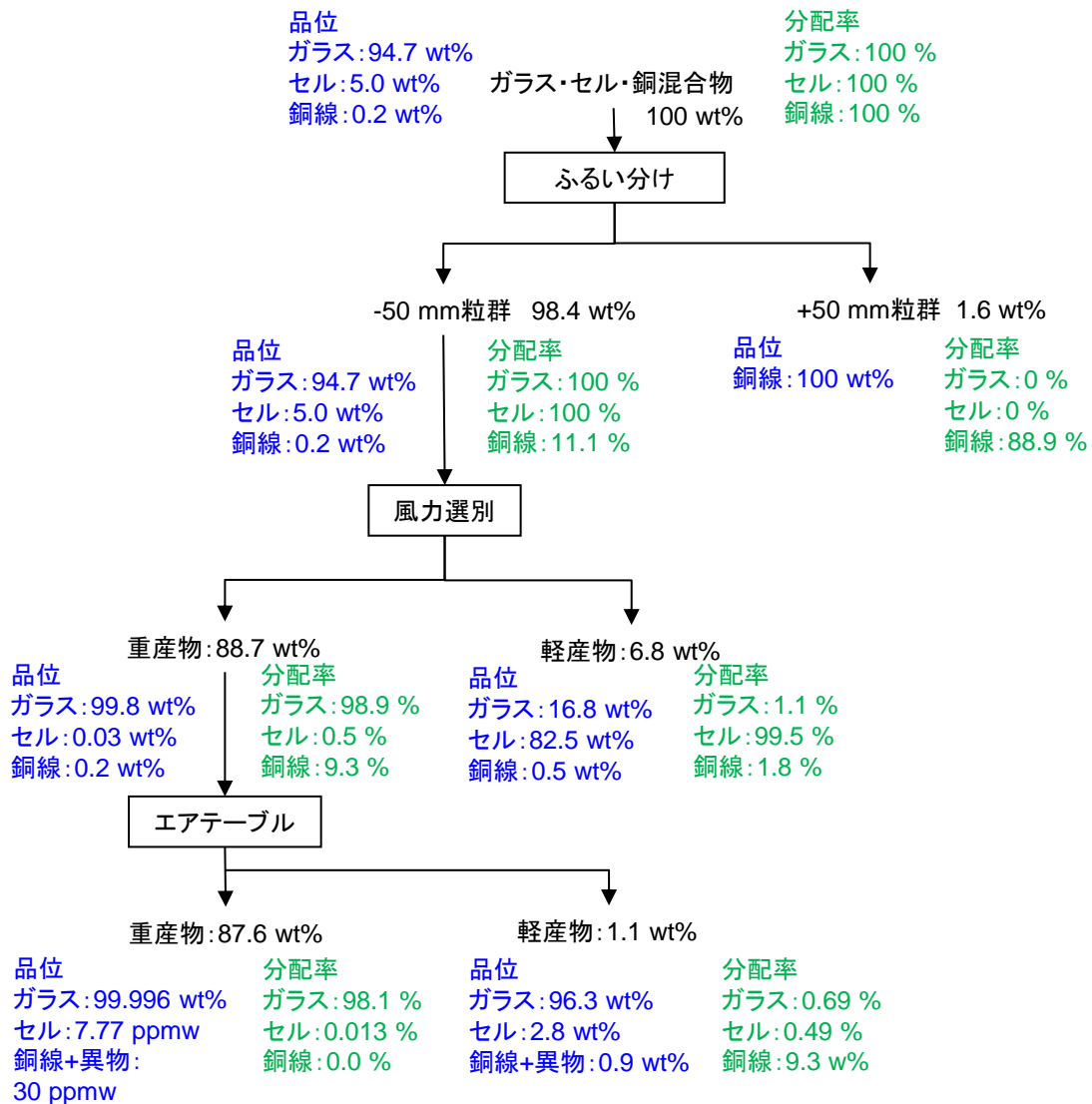


図 3. 2. 39 本フローで得られた各成分のマテリアルバランス

5) 4 t 連続操業試験の結果

小規模実験にて、風力選別・エアテーブル選別試験の最適条件検討後、4 t の割れ廃 PV パネルを用いた連続操業試験を実施した。その分離状況について、図 3. 2. 40 にマテリアルバランスを示した。ここでは、産物の分析は最終産物であるエアテーブル選別重産物および軽産物中のガラス、セルおよび異物として行った。この連続試験においても、小規模試験とほぼ同様、ガラス・セルの選別が効率的に行われることが確認された。





### 1) 流体中における球形粒子運動と仮定したガラス・セルの分離挙動

まず、流体中の球形粒子と比較して、ガラスの抵抗形状係数が粒子径に依存しないこと、セルの抵抗形状係数が大粒子ほど大きくなることを明らかにする。流体中の球形粒子の運動方程式は、 $\rho_p$ を粒子密度、 $\rho_f$ 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(3.2.3)のように表すことができる。

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) g - R \quad (3.2.3)$$

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(3.2.4)のように表すことができる。

$$R = C_D \cdot \frac{\rho_f v^2}{2} \cdot A \quad (3.2.4)$$

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。 $\mu$ を流体の粘度として、以下の式(3.2.5)で算出し、粒径の変化によるレイノルズ数の変化を図3.2.42に示した。

$$Re_p = \frac{\rho_0 dv}{\mu} \quad (3.2.5)$$

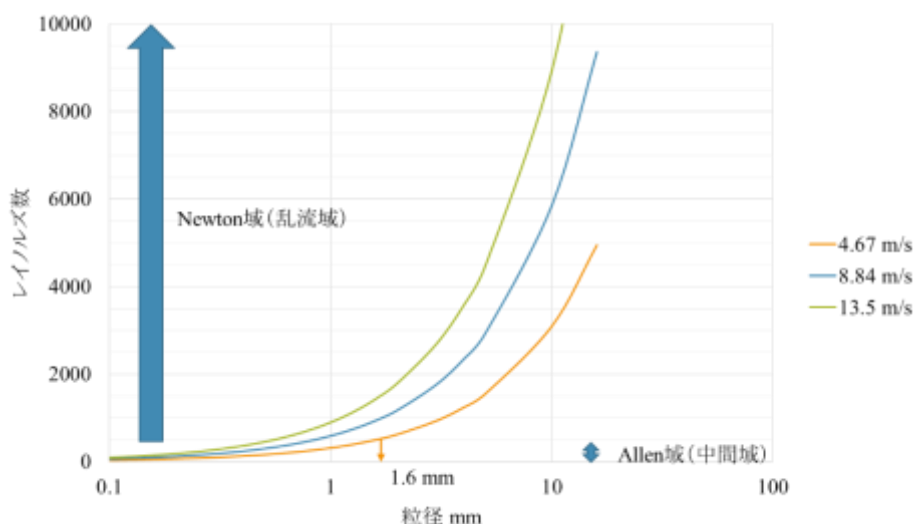


図 3.2.42 レイノルズ数

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）の範囲に存在することが示された。抗力係数 $C_D$ はNewton域、Allen域において以下の値に近似することができる。

$$\text{Newton域} : C_D = 0.44$$

$$\text{Allen域} : C_D = \frac{10}{(Re_p)^{\frac{1}{2}}}$$

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(3.2.6)のように粒子の終末沈降速度 $v_g$ を解くことができる。

$$v_g = \frac{4gd(\rho_p - \rho_f)}{3C_D\rho_f}^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.6)$$

したがって、風速=終末沈降速度となるには、これを粒径について解くことで、球形粒子の臨界粒径 $d_{SG}$ として定義し、以下の表3.2.7に示した。

表 3.2.7 各風速条件による球形粒子の臨界粒径

風速 m/s	4.67	8.84	13.5
ガラス球形粒子の臨界粒径 mm	0.586	1.24	2.90
セル球形粒子の臨界粒径 mm	0.603	1.30	3.03

次に、実験条件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、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セル粒子の臨界粒径 $d_{RC}$ と定義した。

各風速条件において算出した、実際のガラス粒子の臨界粒径 $d_{RG}$ および実際のセル粒子の臨界粒径 $d_{RC}$ を以下の表 3.2.8 に示す。

表 3.2.8 実際の粒子の臨界粒径

風速 m/s	4.67	8.84	13.5
実際のガラス粒子の臨界粒径 mm	1.59	2.78	3.60
実際のセル粒子の臨界粒径 mm	2.18	2.33	1.70

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 $\mu = d_R/d_S$ として定義した。この抵抗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、縦軸を実験的形状係数にとり、以下の図 3.2.43 に示した。

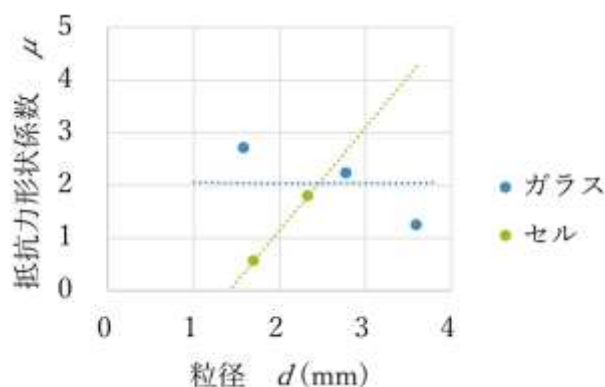


図 3.2.43 粒径と抵抗形状係数の関係

図 3.2.43 よりガラス粒子の抵抗形状係数はほとんど粒子径に依存しなかったと示された。一方で、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、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。

## 2) セル形状が風力選別機構に与える影響

次に、セル粒子の選別挙動について、セル粒子の粒子形状を定量的に評価するために、一般的に用いられている形状記述子の中でも長短度を用いた。セル粒子は厚さ一定であるため、平板の形の違いが大きな影響を及ぼしていると考え、平板を長方形に近似し、長方形との異方性を与える係数として一般的に用いられている長短度を定義した。長短度とは、「対象物の外接四角形（対象物を囲う四角形）の短辺と長辺の比」である。各風速条件にお

いて、断面積ごとに測定を行い、横軸に長短度を取り、軽産物側への回収率を縦軸にとったものを以下の図 3. 2. 45 及び図 3. 2. 46 に示す。

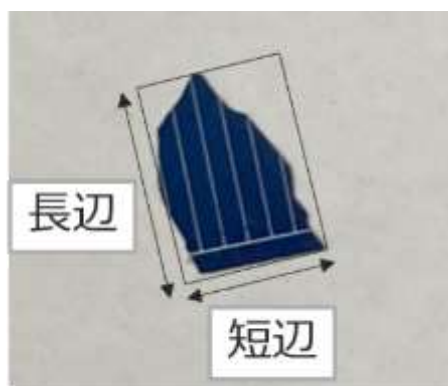


図 3. 2. 44 長短度の説明図

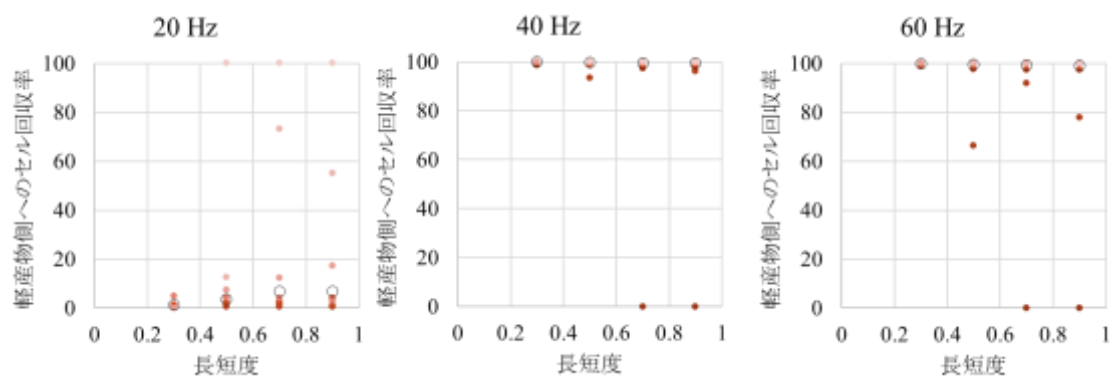


図 3. 2. 45 長短度と軽産物側へのセルの回収率の関係

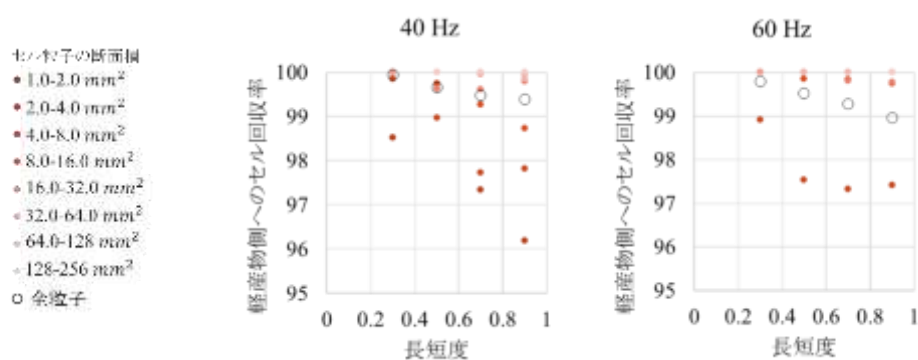


図 3. 2. 46 長短度と軽産物側へのセルの回収率の関係 (一部拡大図)

以上から、断面積が大きいものは軽産物側への回収率が高いことがわかる。また、断面積の大小の関わらず、長短度が1に近づくと、軽産物側への回収率が下がる傾向を示した。特に断面積が小さいものに関して傾向が大きく表れている。つまり、長短度が小さい細長い形

ほど沈降速度が大きく、抵抗が大きいと推測できる。流体中の平板の長短度と流体中の抵抗との関係については、長短度が減少すると、抗力係数が増加することがこれまで実験的に示されている[10][11]。これは、通常平板の後方に形成される渦の影響を大きく受けるが、長短度が減少すると、平板に沿って流れが剥離しやすくより多く抗力を受けるためである。

### 3.2.6. エアテーブル選別におけるセル分離機構

エアテーブルの選別において、等方形状のガラスは小粒子が大粒子に比べて重産物（ガラス粉体層の下層）に分配され、扁平形状のセルは大粒子が小粒子に比べて軽産物（ガラス粉体層の上層）に分配される現象が観察された。このような密度差の非常に小さい太陽電池セル(2.44 g/cm<sup>3</sup>)とガラス(2.55 g/cm<sup>3</sup>)がそれぞれ軽産物と重産物に分離する挙動について推測される分離機構を以下に記載する。

通常、等方性粒子粉体層に垂直な振動を加えると大粒子が下方へ小粒子が上方へと移動するが、これにブラジルナッツ効果[12]（小粒子が大粒子の間隙を下方に移動する偏析作用）が加わるため粒子径に関わらずガラス粒子は下方へと移動して重産物として回収されたと推測される。

またセル粒子に関しては、振動を与えられたガラス粒子層は最密充填構造から膨張して広がり、扁平なセルはガラス粒子層間隙を流れる上昇気流によって間隙中を上方に移動したと考えられる。この際、風力選別と同様に、セルの大粒子は小粒子に比べてより上方へ移動し軽産物として回収されやすいが、小粒子の一部は重産物中に残存しやすいと推測される。

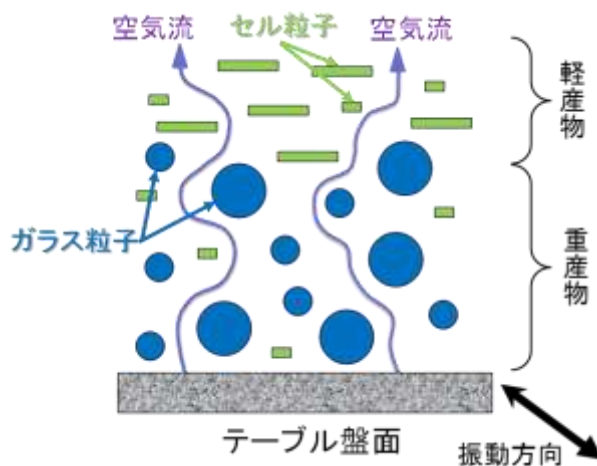


図 3.2.47 エアテーブル選別機構

そこで本研究においてはガラス粒子層間隙中の風速によるセルの浮上機構に関する計算モデルを提案する。なお粒子の衝突によって発生するエネルギー散逸に関してはここでは考慮しないものとする。

### 1) ガラス粒子層を移動可能なセルの粒径 $d_{cellmax}$ の算出

ガラス粒子が面心立方格子の形に配置し、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。このとき、ガラス粒子層の空隙率が最大値 $\varepsilon$ を取る際にガラス粒子の間隙を自由に移動できるセルの粒径 $d_{cellmax}$ を算出する。

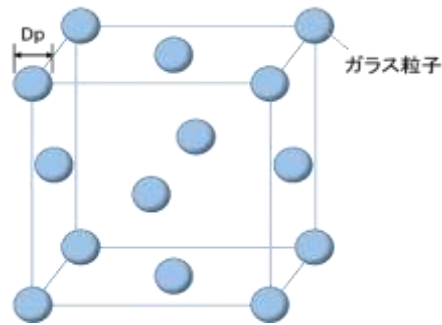


図 3. 2. 48 面心立方格子と見立てたガラス粒子層

面心立方格子の一辺の長さを $L$ 、ガラス粒子の直径 $D_p$ とし、 $L = a \times D_p/2$ （ガラス粒子の半径の $a$ 倍が一辺と等しくなる）とする。このときガラス粒子層の空隙率 $\varepsilon$ は式(3. 2. 7)によって表される。

$$\varepsilon = 1 - \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3}{L^3} = 1 - \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi}{a^3} \quad (3.2.7)$$

またこの時のガラス粒子間平均距離を移動可能なセル粒子の直径 $d_{cellmax}$ とすると $d_{cellmax}$ は式(3. 2. 8)で示される。

$$d_{cellmax} = \frac{(1 + \sqrt{2})L - 2D_p}{2} = \frac{\frac{aD_p}{2}(1 + \sqrt{2}) - 2D_p}{2} \quad (3.2.8)$$

式(1)と(2)より $a$ を消去すると $d_{cellmax}$ は式(3. 2. 9)により算出される。

$$d_{cellmax} = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{16\pi}{3(1-\varepsilon)}} D_p (1 + \sqrt{2}) - \frac{3}{2} D_p \quad (3.2.9)$$

図 3. 2. 49 に $d_{cellmax}$ の算出結果を示す。

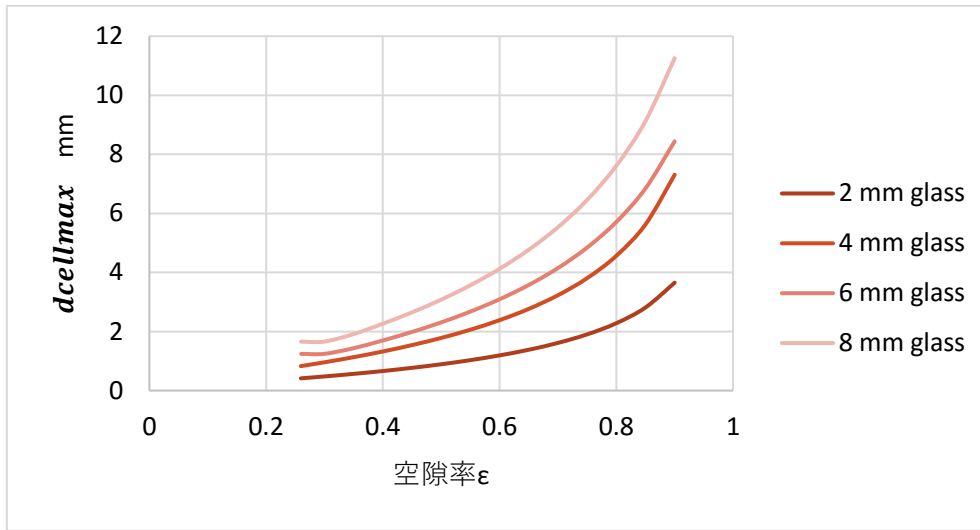


図 3.2.49  $d_{cellmax}$  と空隙率の関係 (ガラス層粒径  $D_p = 2, 4, 6, 8$  mm)

## 2) ガラス粒子層間隙中風速 $u'$ の算出

続いて、ガラス粒子層の間隙を通過する風速  $u'$  を算出する。式(3.2.10)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<sup>4)</sup>である。

$$\Delta P = \left\{ \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{150\mu_f u_0}{D_p^2} + \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \cdot \frac{1.75\rho_f u_0^2}{D_p} \right\} L \quad (3.2.10)$$

ただし  $\Delta P$  は圧力損失、 $L$  は粒子層の厚さ、 $\mu$  は流体の粘性係数、 $D_p$  は粒子の直径、 $\rho_f$  は流体密度、 $\epsilon$  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せるため、式(3.2.11)のように仮定できる。

$$\Delta PA = \sum_{i=1}^N Ri \quad (3.2.11)$$

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(3.2.12)および式(3.2.13)のように求まる。

$$R = CD \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot \frac{\rho_f u'^2}{2} \quad (3.2.12)$$

$$N = \frac{6AL(1 - \epsilon)}{\pi D_p^3} \quad (3.2.13)$$

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(3.2.11)の左辺に式(3.2.10)を、右辺に式(3.2.12)および式(3.2.13)を代入した式(3.2.14)から求まる。

$$\left\{ \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{k_1 \mu_f u_0}{D_p^2} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{k_2 \rho_f u_0^2}{D_p} \right\} AL = \frac{6AL(1-\varepsilon)}{\pi D_p^3} \cdot CD \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot \frac{\rho_f u'^2}{2} \quad (3.2.14)$$

図 3.2.50 に $u'$ の算出結果を示す。ガラス粒子層の空隙率が減少すると間隙中風速 $u'$ は増大することが分かる。

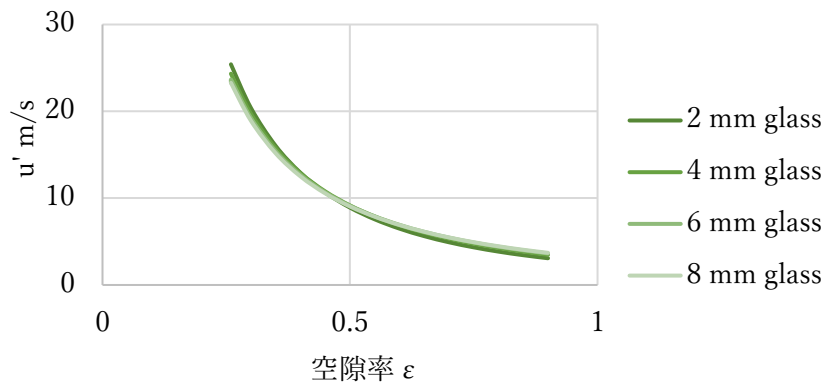


図 3.2.50 粒子層間隙中の風速  $u'$  の算出結果 (ガラス層粒径 $D_p = 2, 4, 6, 8$  mm)

### 3) $d_{cellmax}$ 以下の粒径のセルの抗力差 $R - mg$ の算出結果

$d_{cellmax}$ 以下の粒径のセルに関して、セルを disk 型と仮定し式(3.2.15)により求まる空気抵抗  $R$  と式(3.2.16)により求まる重力 $mg$ について $R - mg$ を算出した結果を図 3.2.51 に示す。

$$R = CD \frac{\pi d_{cell}^2}{4} \cdot \frac{\rho_f u'^2}{2} \quad (3.2.15)$$

$$mg = \rho_{cell} \cdot \frac{\pi d_{cell}^2}{4} \cdot c \cdot g \quad (3.2.16)$$

ただし $\rho_{cell}$ はセル密度、 $c$ はセルの厚さで本研究では0.03 mmであった。



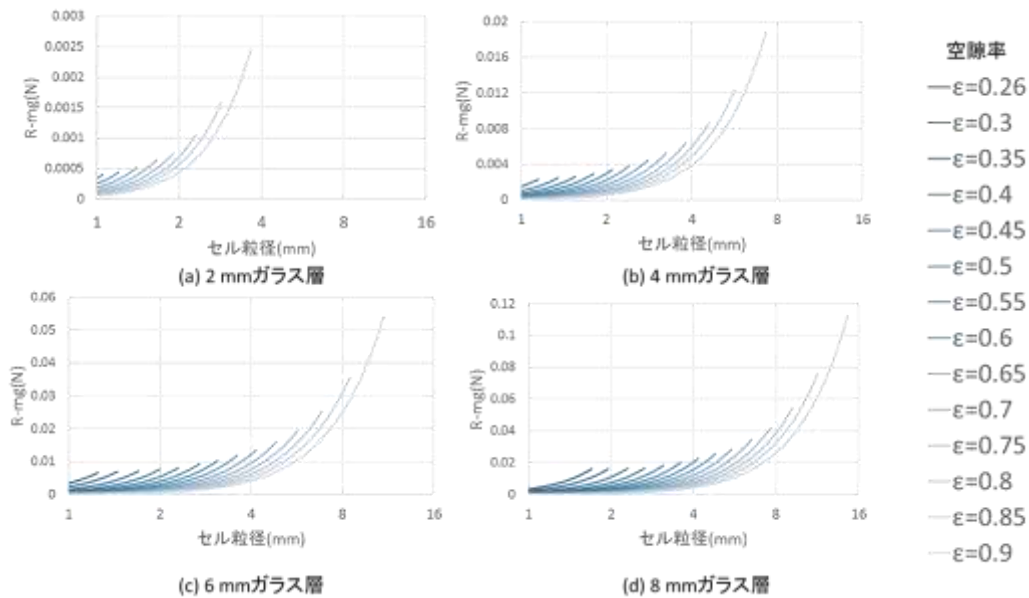


図 3.2.51  $d_{cellmax}$ 以下のセルの抗力差  $R-mg$  の算出結果  
(ガラス層粒径  $D_p = 2, 4, 6, 8$  mm)

図 3.2.51 より、 $d_{cellmax}$ 以下のセルの抗力差  $R-mg$  は全て正になることが示された。ゆえにエアテーブル選別においてガラス粒子層中のセルはその粒径の大小に関わらず浮上して軽産物として回収されることが説明できる。

### 3.2.7. 結言

#### 1) 廃 PV パネルの処理フローの検討

割れた廃 PV パネル全体を炉で加熱することで EVA を除去したのちに残るガラス・セル・銅線の混合物 10 kg を、ふるい分け、風力選別、エアテーブル選別を施すことで、高純度ガラス回収およびその他成分の濃縮産物を回収するフローを提案した。このフローにの各単位操作および全フローで得られた結果の概要を以下に記す。

ふるい分け： 目開き 50mm にてふるい分けることにより、絡み合った銅線を品位 100 wt% で回収することができた。

風力選別： 風量の装置条件を 20、40、60 Hz と変化させたところ、40 Hz の場合に軽産物中へのセルの他成分に対する分離効率が最大となり、セル回収率 99.5 wt%、セル品位 82.5 wt% を達成した。

エアテーブル選別： 風量 40 Hz の装置条件で実施した風力選別の重産物をフィードし、風量を固定しデッキ振動を変化させた場合とデッキ振動を固定して風量を変化させた場合について二種類の実験を実施した。前者ではエアテーブル風量の装置条件を 38 Hz に固定し、デッキ振動数の装置条件を 47、52、57 Hz と変化させたところ、52 Hz のときガラス品位最大を示し、ガラス品位 99.996 wt% の産物を回収率 98.1 % で回収することができた。

また、同フローに従って4 t連続操業試験を行ったところ、10 kg バッチ試験とほぼ同様の結果を得ることを確認した。

## 2) 風力選別におけるガラス・セルの選別機構

風力選別において、比重差が少なく、形状の異なるガラスとセル粒子の選別挙動を、実験結果を組合せて理論的に解明した。

流体中の球形粒子の運動と比較して、ガラス粒子およびセル粒子の抵抗形状係数を算出することにより、ガラスは抵抗形状係数がほとんど粒子径に依存しないことを示し、等方性粒子の形状の影響であると推察した。また、セルは粒径が増大すると抵抗形状係数が増大することを示し、扁平粒子の形状の影響であると推察した。

また、セル粒子の断面形状の影響について、長短度(外接四角形の長辺に対する短辺の比)が0から1に近づくと、軽産物側への回収率が低くなることを示した。また、断面形状が細長い形になると、空気流を受けるセル後方に渦が形成されるためであると推察した。

## 3) エアテーブル選別におけるセルの分離機構

エアテーブル選別において、比重差が少なく、形状の異なるガラスとセル粒子の選別挙動を、ガラス粒子層間隙中の風速によるセルの浮上機構に関する計算モデルを用いて理論的に解明した。

ガラス粒子が面心立方格子の形に配置し、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し、ガラス粒子層の空隙率 $\epsilon$ の変化に伴う、自由に移動可能なセルの最大粒径 $d_{cellmax}$ とガラス粒子層間隙中風速 $u'$ を算出した。そして、セルに働く抗力差 $R-mg$ が粒径に関わらずすべて正になることから、本実験においてセル粒子は粒径に関わらず、全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、この解析結果を一般化し、エアテーブル選別において、ある空隙を持った媒体粒子(本実験ではガラス粒子)中を扁平粒子(セル粒子)が移動する際の抗力差 $R-mg$ をその空隙率と両者のサイズの関係として示した。

## 引用文献

- [1] ガラス再資源化協議会：使用済太陽電池モジュールの新たなリサイクル、リユースシステムの構築実証事業報告書(GReAT4 最終報告書)、pp.1-73、2017
- [2] 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
- [3] NEDO：太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測、pp.1-19、2019 <https://www.nedo.go.jp/content/100902095.pdf>
- [4] Bohland、 J. R.、 Anisimov、 I. I.：Possibility of Recycling of Silicon PV Modules、26th IEEE PV Specialist Conf.、pp.1173-1175、1997
- [5] 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>
- [6] 大和田秀二： 粉砕・選別技術総論、J. Min. Mater. Proc. Inst. Jap. (資源と素材)、製錬・リサイクリング大特集号、123 巻、 1 号、 (2007)、 pp.575-581、
- [7] 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
- [8] <https://www.h-rc.co.jp/recycle/index.html>
- [9] <http://www.mac.or.jp/mail/200701/03.shtml>
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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、

### 3.3. 選別処理の連続試験

前項で検討を行った選別技術の開発で得られた結果をもとに、数トンオーダーでの選別試験を実施した。ここで得られた選別品は、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。

#### 3.3.1. 選別フロー

処理フローは、図 3.3.1 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の品位を向上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。

また、ここで得られた選別回収物は、図 3.3.2 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用いた。

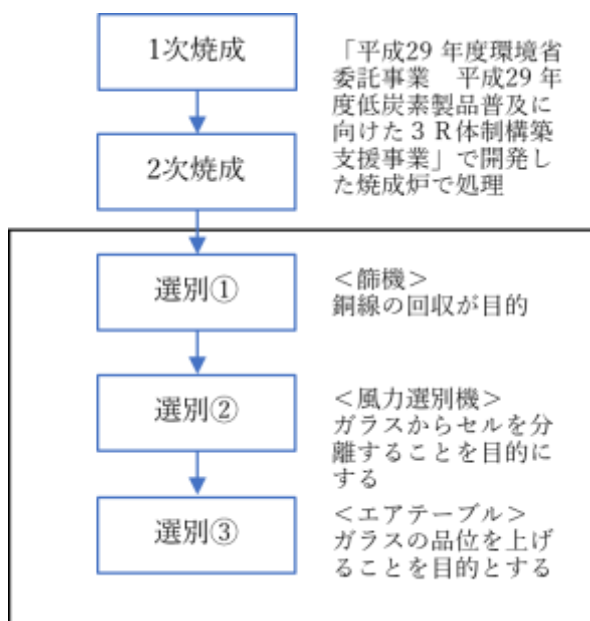


図 3.3.1 処理フロー

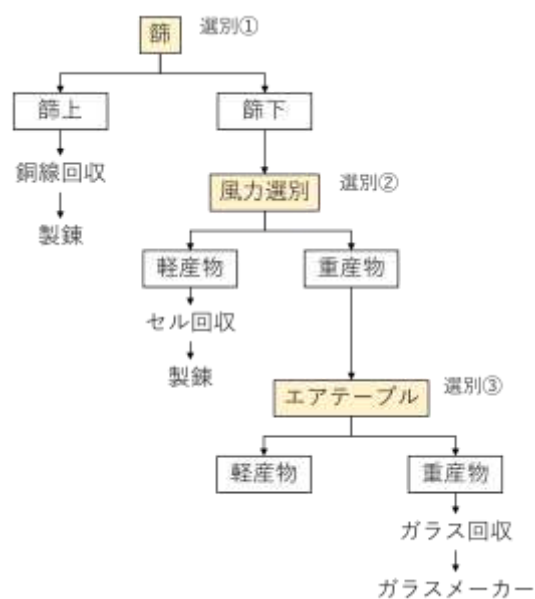


図 3.3.2 選別フローと回収物

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 3.3.1 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 3.3.2 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 3.3.3 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。

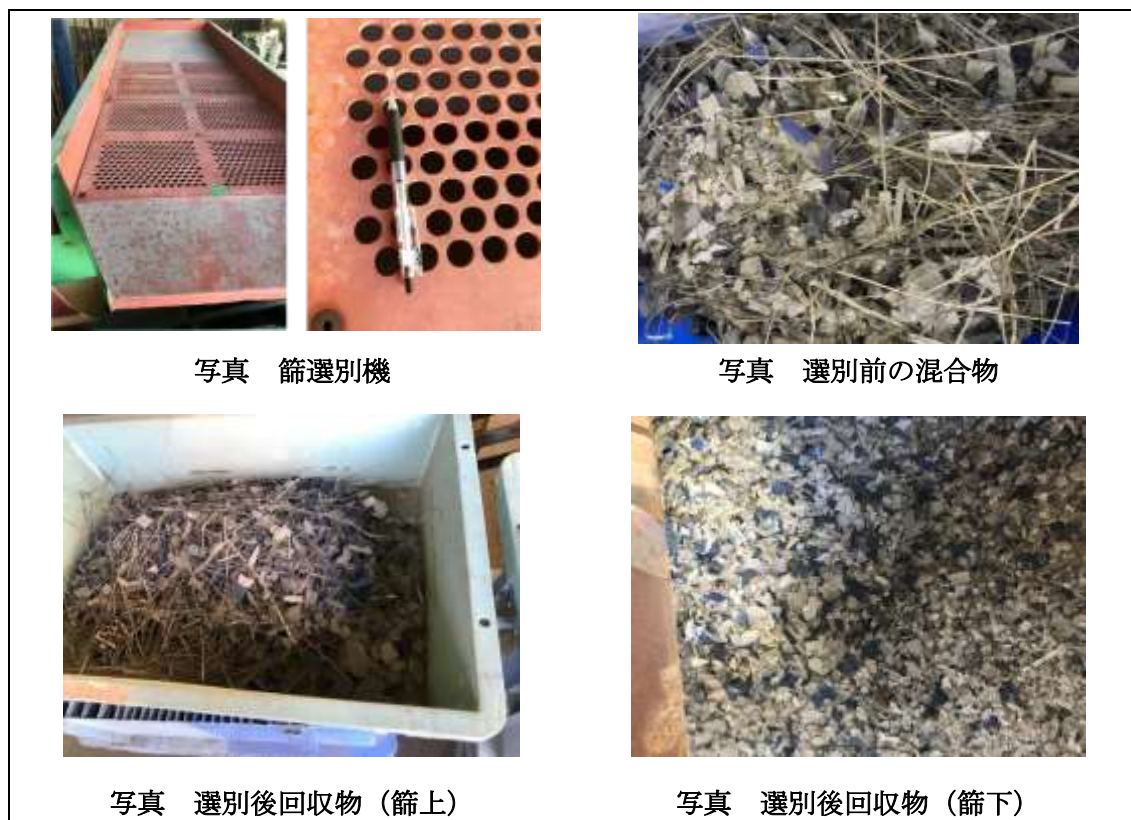


写真 篩選別機

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 3.3.1 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 3.3.2 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 3.3.3 選別③ エアテーブル

### 3.3.2. 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 3.3.3 及び表 3.3.1 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 3.3.1 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、99.999%の品位を得ることが出来た。

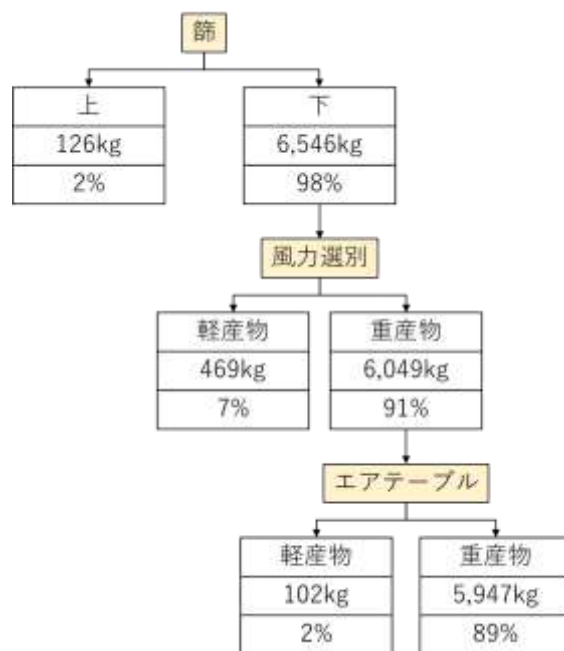


図 3.3.3 選別マスバランス

表 3.3.1 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%	-	-

### 3.3.3. 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 3.3.5 及び図 3.3.4 に示す。



写真 銅線



写真 シリコンセル

写真 3.3.4 ガラス中に確認された異物（銅線・シリコンセル）



写真 3.3.5 はんだボール

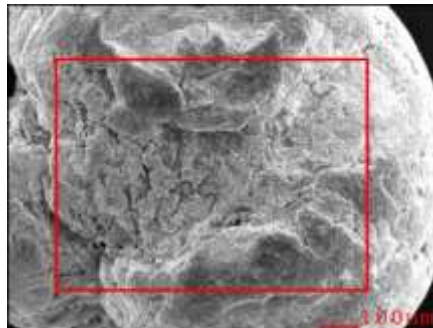
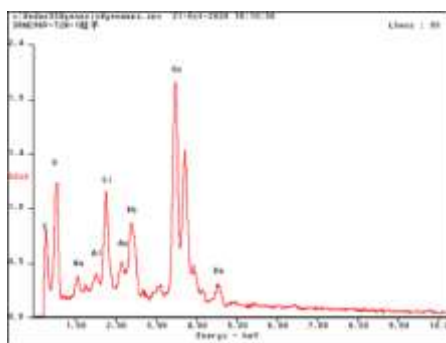


写真 3.3.6 SEM 画像（はんだボール）



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 3.3.4 分析結果



### 3.3.4. PV ガラスカレットの組成分析結果

選別後に回収したガラスの組成分析結果の一例を表 3.3.2 に示す。選別は複数のパネルが混在した状態で実施している。そのため、PV ガラスカレットの組成は複数種のガラスが混在した状態となっている。PV ガラスカレット組成は、3.4 章で示すカバーガラス組成一覧に示した濃度範囲に入っている。

表 3.3.2 選別 PV ガラスカレットの組成分析結果例  
(株式会社ワンワールド向けガラスウール試作用サンプル)

単位：mass%

	成分	定量下限	組成		成分	定量下限	組成
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	70.3	定性 分析	F	0.2	<0.2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	1.12		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01
	MgO	0.02	3.15		Cl	0.02	0.03
	CaO	0.01	10.2		V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05
	Na <sub>2</sub> O	0.04	14.6		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.03		NiO	0.01	<0.01
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.34		ZnO	0.01	<0.01
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02		SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05
	TiO <sub>2</sub>	0.01	0.02				
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	0.010				
	SrO	0.001	0.005				
	BaO	0.1	<0.1				
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.007				
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.15				
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01				
	PbO	0.002	<0.002				

### 3.3.5. 選別後ガラスの表面付着物の分析

ガラスの組成分析とは別に、選別後のガラスの表面に付着しているメタルについて分析を行った。

#### 1) 分析試料の調整

分析用サンプルは、3.1 で実施したエアテーブルでの選別後のガラスを用いた。

#### 2) 分析方法

ビーカーにガラスサンプル 5g を採取後、王水 20mL 添加し電熱ヒーターで 5 分煮沸させる。冷却後ろ紙(5C)にてろ過した液を 50mL メスフラスコへ移し入れ超純水で定容した。この液を ICP-AES で測定し濃度を算出した。

#### 3) 分析結果

分析結果を表 3.3.3 に示す。検出された項目は、Na, Ca, Pb であった。検出濃度は、Na 及び Ca が 9ppm、Pb が 1ppm であった。

参考までに、別途一般のカレットを入手し測定した結果も記載している。このように、PV 選別ガラスの表面は、その他カレットと比較して特異的な付着メタルは確認できなかった。また、その他カレットと比較して表面に付着しているメタル分は少ない結果であった。

表 3.3.3 ガラス表面の付着メタル分析結果

単位：ppm

項目	PV選別ガラス	カレットA	カレットB	カレットC	カレットD
Ag	<1	<1	<1	<1	<1
Al	<1	<1	5	4	<1
B	<1	<1	<1	4	<1
Ba	<1	<1	<1	2	4
Ca	9	4	28	100	4
Ce	<1	<1	<1	<1	<1
Cr	<1	<1	<1	<1	<1
Cu	<1	<1	<1	<1	<1
Fe	<1	2	14	9	13
In	<1	<1	<1	<1	<1
K	<1	<1	3	95	3
La	<1	<1	<1	<1	<1
Mg	<1	1	8	5	<1
Mn	<1	<1	<1	<1	<1
Mo	<1	<1	<1	<1	<1
Na	9	8	36	68	6
Ni	<1	<1	<1	<1	<1
P	<1	<1	<1	2	<1
Pb	1	<1	<1	<1	<1
Si	<1	<1	4	9	<1
Sn	<1	<1	<1	1	<1
Sr	<1	<1	<1	8	3
Ti	<1	<1	<1	<1	<1
Y	<1	<1	<1	2	<1
Zn	<1	8	<1	2	<1
Zr	<1	<1	<1	<1	<1

測定方法：試料5gを採取し、王水処理後に50mL定容しICP-AES測定

### 3.3.6. まとめ

処理量を増加させ選別を実施した結果、下記のことが確認できた。

- ・ 少量スケールで行った検討と同じく、高純度で素材を回収することが出来た。
- ・ 篩選別では、銅濃度が 50%以上、銀濃度が 8,500mg/kg 以上と高濃度で金属成分を回収できた。
- ・ 風力選別では、シリコンセルを高品位で回収することが出来、銀濃度も 5,600mg/kg 以上と高濃度で回収することが出来た。
- ・ エアテーブルでは、ガラスカレットを高品位で選別回収でき、得られたガラスカレットの品位は 99.999%を達成した。
- ・ 多量に選別を行うことで回収したガラスカレット中に、微量の異物が存在することが確認できた。異物量としては、銅：10mg/kg、シリコンセル：2mg/kg、はんだボール：30mg/kg であった。
- ・ ガラスカレット組成は、選別前後で変化はなかった。
- ・ PV ガラスカレットの表面には、一般的に使用されているガラスカレットと比較して、特異的な付着物は確認できず、付着量も少なかった。

ここで得られた選別回収物は、製錬会社及びガラスメーカーの評価用サンプルとした。

### 3.4. 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PV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。

#### 3.4.1. 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 23 社、型番数は 36 種類となる。

- ・ 製造メーカー数：23 社
- ・ 製造メーカー国数：7 か国（中国、日本、韓国、その他）
- ・ 型番数：36 種類

#### 3.4.2. 分析試料の調整

入手した太陽光パネルは、新菱が保有する焼成炉で処理後、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 36 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。

#### 3.4.3. 分析方法

組成分析は、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/cm<sup>2</sup>×1 分間）でディスクを作製した。

粉碎機で破碎（写真 3. 4. 1～3. 4. 5）



写真 3. 4. 1 粉碎容器にガラスを入れる



写真 3. 4. 2 粉碎容器の上カバーをはめる



写真 3. 4. 3 粉砕機に容器をセット



写真 3. 4. 4 所定条件で粉砕する



写真 3. 4. 5 ガラスが粉末であることを確認

加圧成形 (写真 3. 4. 6~3. 4. 8)



写真 3. 4. 6 加圧成型機外観





写真 3.4.7 ガラス粉末を治具に入れる



写真 3.4.8 ディスクが成型される

蛍光 X 線測定 (写真 3. 4. 9～3. 4. 11)



写真 3. 4. 9 蛍光 X 線装置外観



写真 3. 4. 10 測定治具にディスクをセット



写真 3.4.11 所定位置にセットし測定

#### 3.4.4. 分析結果

##### 1) カバーガラスの組成分析結果

分析結果は、表 3.4.1 に示す。分析を実施した 36 種類の各組成の平均値、最小値及び最大値を記載した。また、表 3.4.2~3.4.7 には、36 種類それぞれの分析結果を示した。表に示す通り、分析結果は、SiO<sub>2</sub> が 70.20~72.40%含有されおり、平均値は 71.13%であった。また、CaO は 9.19~11.86%、Na<sub>2</sub>O は 12.83~15.00%含有されており、平均値は CaO が 10.08%、Na<sub>2</sub>O が 13.93%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 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> も 36 検体中 33 検体で検出されており、平均値は 0.21%、最大値で 0.32%検出であった。廃棄物処理法に関連する項目として、As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は 36 検体中 8 検体で検出されており、最大値では 0.013%含有されているものも存在した。その他に PbO については、全て定量下限値以下ではあったが、検出されるものも存在した。

表 3.4.1 PV カバーガラスの分析結果まとめ

単位：mass%

	成分	定量下限	Ave	Max	Min
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	71.13	72.40	70.20
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	1.09	1.61	0.14
	MgO	0.02	3.18	4.15	0.10
	CaO	0.01	10.08	11.86	9.19
	Na <sub>2</sub> O	0.04	13.93	15.00	12.83
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.03	0.05	<0.01
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.24	0.38	0.17
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.03	0.01
	TiO <sub>2</sub>	0.01	0.04	0.26	<0.01
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	0.01	0.02	<0.01
	SrO	0.001	0.02	0.23	<0.01
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.01	0.013	<0.001
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.21	0.32	<0.05
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
PbO	0.002	0.00	0.005	<0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	0.03	0.04	<0.02
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05

表 3.4.2 カバーガラス組成一覧 (その1)

	成分	定量下限	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
			日本	日本	アメリカ	中国	日本	日本
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	72.3	71.9	72.0	71.7	71.0	71.7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.14	0.96	1.58	1.31	1.11	1.61
	MgO	0.02	3.59	3.53	0.13	3.69	2.69	0.10
	CaO	0.01	9.87	9.47	11.2	9.98	11.3	11.9
	Na <sub>2</sub> O	0.04	13.5	13.6	14.5	12.8	13.3	13.8
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.02	<0.01	0.03
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.18	0.22	0.25	0.18	0.20	0.38
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
	TiO <sub>2</sub>	0.01	0.07	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	0.26
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	<0.05	<0.01	<0.05	0.01	0.01	<0.01
	SrO	0.001	0.08	<0.01	0.23	<0.01	<0.01	<0.01
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.05	0.23	<0.05	0.18	0.32	0.20
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PbO	0.002	<0.002	0.004	<0.002	<0.002	0.005	<0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	<0.02	0.03	0.03	0.03	<0.02	0.04
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

表 3.4.3 カバーガラス組成一覧 (その2)

	成分	定量下限	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
			日本	カナダ	韓国	韓国	ノルウェー	日本
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	72.3	72.1	70.5	71.5	71.9	72.4
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.98	1.03	1.35	1.25	1.15	0.17
	MgO	0.02	3.36	3.76	3.54	3.53	3.69	3.71
	CaO	0.01	9.32	9.67	10.6	9.78	9.98	9.89
	Na <sub>2</sub> O	0.04	13.5	13.0	13.5	13.4	12.8	13.3
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	<0.01	0.02
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.23	0.21	0.29	0.22	0.21	0.22
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
	TiO <sub>2</sub>	0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.05
	SrO	0.001	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.002	<0.002
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.24	0.17	0.17	0.22	0.18	<0.05
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PbO	0.002	0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	<0.02
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

表 3.4.4 カバーガラス組成一覧 (その3)

	成分	定量下限	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18
			中国	中国	韓国	中国	中国	中国
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	71.0	70.9	70.8	70.2	70.7	70.2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	1.20	1.19	1.18	1.00	1.00	1.00
	MgO	0.02	2.69	3.64	3.93	2.83	2.74	2.84
	CaO	0.01	11.1	10.1	9.43	10.4	10.5	10.5
	Na <sub>2</sub> O	0.04	13.4	13.5	14.0	14.9	14.6	14.9
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.28	0.27	0.27	0.22	0.20	0.23
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	TiO <sub>2</sub>	0.01	<0.05	0.02	<0.01	0.01	0.02	0.01
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	<0.01	0.007	0.002	0.008	0.004	0.009
	SrO	0.001	<0.01	0.004	0.003	0.006	0.007	0.005
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	<0.002	0.002	<0.002	0.006	<0.002	0.009
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.20	0.20	0.22	0.22	0.21	0.22
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PbO	0.002	<0.002	0.002	0.002	0.004	<0.002	0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

表 3.4.5 カバーガラス組成一覧（その4）

	成分	定量下限	No.19	No.20	No.21	No.22	No.23	No.24
			韓国	中国	中国	中国	中国	中国
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	71.1	70.3	71.3	71.1	70.6	70.6
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	1.40	1.12	0.90	0.95	1.33	1.18
	MgO	0.02	2.45	3.15	4.03	4.14	3.28	3.19
	CaO	0.01	9.40	10.2	9.45	9.26	10.3	10.1
	Na <sub>2</sub> O	0.04	15.0	14.6	13.8	14.0	13.9	14.3
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.33	0.34	0.21	0.25	0.18	0.30
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
	TiO <sub>2</sub>	0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	0.02	0.01
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	0.010	0.010	0.002	0.002	0.006	0.004
	SrO	0.001	0.004	0.005	0.002	0.002	0.005	0.003
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.002	0.007	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.22	0.15	0.17	0.19	0.18	0.29
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PbO	0.002	0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05



表 3.4.6 カバーガラス組成一覧 (その5)

	成分	定量下限	No.25	No.26	No.27	No.28	No.29	No.30
			中国	中国	中国	中国	中国	中国
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	70.9	70.5	70.7	71.4	70.7	70.8
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	1.14	1.21	1.23	0.87	1.09	1.18
	MgO	0.02	2.39	3.12	3.36	4.00	2.73	4.15
	CaO	0.01	10.4	10.0	10.2	9.30	10.5	9.19
	Na <sub>2</sub> O	0.04	14.3	14.4	13.9	14.0	14.4	14.0
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.05	0.01	0.03	<0.01	0.04	0.03
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.29	0.30	0.22	0.17	0.22	0.22
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	TiO <sub>2</sub>	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.01	0.04
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	0.005	0.006	0.007	0.005	0.008	0.005
	SrO	0.001	0.005	0.003	0.004	0.003	0.006	0.005
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.006	<0.002
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.30	0.28	0.19	0.17	0.21	0.26
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PbO	0.002	<0.002	<0.002	0.003	<0.002	<0.002	0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

表 3.4.7 カバーガラス組成一覧 (その6)

	成分	定量下限	No.31	No.32	No.33	No.34	No.35	No.36
			中国	中国	中国	オーストラリア	中国	韓国
定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	71.5	70.9	70.6	70.5	70.3	71.7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.95	1.17	0.94	1.08	1.07	1.16
	MgO	0.02	3.90	3.68	3.35	3.02	3.24	3.45
	CaO	0.01	9.28	9.92	9.89	10.3	10.2	10.1
	Na <sub>2</sub> O	0.04	13.9	13.8	14.6	14.5	14.5	13.0
	K <sub>2</sub> O	0.01	<0.01	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.18	0.19	0.30	0.24	0.32	0.23
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	TiO <sub>2</sub>	0.01	0.02	0.01	<0.01	0.03	0.01	<0.05
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	0.006	0.008	0.004	0.010	0.005	<0.01
	SrO	0.001	0.002	0.006	0.004	0.005	0.005	0.02
	BaO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.013	<0.002
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.17	0.29	0.15	0.24	0.17	0.18
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PbO	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	
定性 分析	F	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ZnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

### 3.5. PV パネルのリサイクルシステム構築の実証事業

#### 3.5.1. グラスウール試作検討

3.3 章 選別処理の連続処理で選別したガラスカレットを原料に、旭ファイバーグラス株式会社及び株式会社ワンワールドにてグラスウールの試作検討を行った。旭ファイバーグラス株式会社では、原料に対し選別ガラスカレットを 5%及び 10%添加したケースで実炉試作を行った。株式会社ワンワールドでは、試作炉で 100%選別カレットを用いた試作を行った。

#### 3.5.2. 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の試作】

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 2 回の試作を実施した。

第 1 回目は、割れていない PV パネルを当社で焼成処理し得られた板状ガラスを、株式会社西日本ガラスリサイクルセンターで破碎したものをサンプルとして準備した。旭ファイバーグラス株式会社にて、破碎サンプルを原料の 5%相当量になるようにその他ガラスカレット原料と混合したものをを用いて試作を行った。また、実炉試作が可能かを判断するために、実炉試作の前に、ラボテストを行った。

第 2 回目は、カバーガラスが割れたパネルを当社で焼成処理後、3.3 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。

### <太陽光パネルリサイクルカレット実炉使用テスト 第 1 回 実炉前ラボテスト>

#### 1) 目的

PV ガラスカレットに含まれるアンチモン(Sb)やヒ素(As)は生産設備への影響が懸念されており、本テストは、当社から旭ファイバーグラス株式会社に提供した PV ガラスカレットを用いて、PV ガラスカレットの使用可否及び使用可能な場合、使用量の上限を把握することを目的に、旭ファイバーグラス株式会社九州工場の実炉にて試作検討を行った。

#### 1)-1 実炉前ラボテスト

評価項目及び方法は、下記①~④を実施した。

- ① 粒度分布及び異物評価
- ② 強熱減量  
付着有機物量の確認を行った。
- ③ 組成分析  
蛍光 X 線による組成分析を行った。
- ④ 溶解試験ガラスカレットを一部 PV ガラスカレットに置換し溶解し、目視評価及び組成分析を行った。

<ラボスケール事前評価結果>

① 粒度分布及び異物確認結果

- ・粒径 2~19mm にカレットの 90% 以上が分級でき、ガラスカレットに適した粒度であった。
- ・分級時に異物や水分は確認されず、カレットはほとんど無色透明であった。
- ・粒度のほとんどが 2~20mm であること、異物や水分の無いこと、カレットが無色透明であることは、代替カレット原料として有用であると思われる。

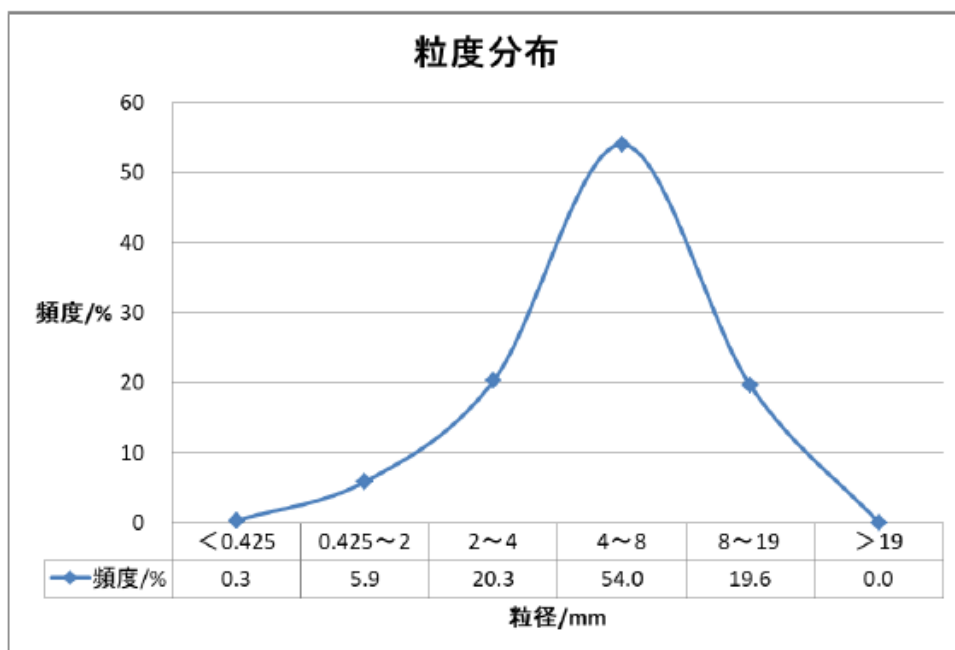


図 3.5.1 粒度分布測定結果

表 3.5.1 PV ガラスカレットの事前テスト結果

粒度	<2mm	6.2%
	2~20mm	93.8%
	>20mm	0.0%
異物	鉄	Non
	非鉄金属	Non
	紙、プラド	Non
	陶磁器	Non
	結晶化ガラス	Non
水分		0.0%
ガラス色		殆ど無色透明

## ② 強熱減量

カレットを電気炉で加熱（550℃、1時間）し付着有機物の除去を行い、その重量差から強熱減量を算出した（n3計測）。測定の結果、強熱減量は0.007%であり、PVパネルの透明封止材に用いられEVA樹脂樹脂（エチレン酢酸ビニル）のような有機物はほとんど除去されていることが確認できた。

## ③ 組成分析

カレットを粉砕して加圧成形し、蛍光X線装置（ファンダメンタルパラメータ法、Pb0のみ定量分析）で組成分析を行った。表3.5.2に分析結果を示す。また、一般的なガラスの組成として、グラスウール（以下、GW）、板ガラス及びビンガラスの組成を記載した。

表 3.5.2 PV ガラスカレット及び一般的なガラス組成

単位：mass%

	PVカレット	GW	板ガラス	ビンガラス
SiO <sub>2</sub>	72	60~70	70~73	69~73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3	0~5	0~3	2~3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0~8		
MgO	3	0~5	1~5	0~1
CaO	8.8	5~13	7~12	10~12
SrO	0.004	0~2		
BaO		0~3		
Na <sub>2</sub> O	14.4	13~18	13~15	13~14
K <sub>2</sub> O	0.02	0~2	0~2	0~2
TiO <sub>2</sub>		0~0.5		0~0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0~0.5	0~0.1	
SO <sub>3</sub>	0.25	0~0.5		
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30mg/kg			
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,100mg/kg			
PbO	80mg/kg			

PV ガラスカレット組成は板ガラスと同等であり、GW 原料に適した組成であったが、ヒ素やアンチモンの含有が確認された。これらの成分は生産設備の腐食が懸念されるため、PV ガラスカレットの使用可能量に関しては今後検証が必要である。

#### ④ 溶解試験

旭ファイバーグラス株式会社九州工場と同様の調合をベースとして、ガラス原料中の板カレットを PV ガラスカレットに一部置換し、以下の 4 水準を白金るつぼで溶解 (1,200 °C、2 時間、攪拌なし) した。各ガラスカレットは 2~8mm に分級して用いた。溶解後、徐冷 (600 °C、1 時間) を行い、目視観察した。

(ア) ベース

(イ) ベース+PV ガラスカレット (ガラス原料全体の 10%相当)

(ウ) ベース+PV ガラスカレット (ガラス原料全体の 20%相当)

(エ) ベース+PV ガラスカレット (ガラス原料全体の 30%相当)

板カレットを PV ガラスカレットに (置換ガラス原料全体の 10~30% 相当) して溶解しても、目視では大きな違いはなかった。下面から照射した際に茶色に見える箇所は、ビンカレット由来と思われる。









	①九州工場ベース	②九州工場+PV(10%置換)
全体		
下面から照射		
	③九州工場+PV(20%置換)	④九州工場+PV(30%置換)
全体		
下面から照射		

写真 3. 5. 11 九州工場ベース及びガラス原料全体の 10, 20, 30%を PV カレットで置換した場合の溶解結果

板カレットをPV ガラスカレットに置換（ガラス原料全体の10~30%相当）して溶解し、ヒ素は検出限界以下、アンチモンは PV ガラスカレット置換率に伴って増加傾向にあった。30%置換の場合、アンチモン量は旭ファイバーグラス株式会社ガラス原料の約3倍となる。相関係数（0.99）は非常に高いため、PV ガラスカレット置換率からガラス中のアンチモン量は推定できる。PV ガラスカレットの使用可能量に関しては今後検証が必要である。

#### <事前テスト結果>

実炉での生産テスト事前調査として、粒度、異物、強熱減量、溶解試験、組成分析を実施した。粒度、異物、強熱減量に関して、PV ガラスカレットは旭ファイバーグラス株式会社のカレット原料の代替となり得ることを確認した。また、ガラス原料の30%を板カレットからPV ガラスカレットに置換した場合、旭ファイバーグラス株式会社ガラス原料のみの場合と比較して、溶解性においては目視で差がないことを確認した。

ガラスウール原料への使用に関しては、基本組成は板ガラスと同様であるため問題ないと考えられるが、カレット中の金属や有機物の混入、微量元素として含まれるアンチモンによる窯内の生産設備への影響、さらにはヒ素やアンチモンのガラスからの溶出量などの環境課題を検証していく必要がある。



## <太陽光パネルリサイクルカレット実炉使用テスト 第1回 本試験>

### 1)-1 使用するPVガラスカレット

- PVガラスカレット量：1.7t
- PVパネルの内訳：韓国製2社（重量：19.7%）、中国製5社（重量：80.3%）
- 当社の分離方法：割れていないPVパネルを焼成しガラスのみを分離したもの。
- 株式会社西日本ガラスリサイクルセンターの粉砕方法：分離されたPVカバーガラスを破砕し(<10mm)、金検通過したもの。株式会社西日本ガラスリサイクルセンターでの破砕・選別フローを図3.5.2に示す。

表 3.5.3 PVガラスカレットの組成 (%)



写真 3.5.2 PVガラスカレットの外観

SiO <sub>2</sub>	69.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1
CaO	10.1
MgO	2.9
Na <sub>2</sub> O	12.9
K <sub>2</sub> O	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.01
TiO	<0.05
SO <sub>3</sub>	0.27
NiO	<0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.05
Cl	0.03
C	0.7

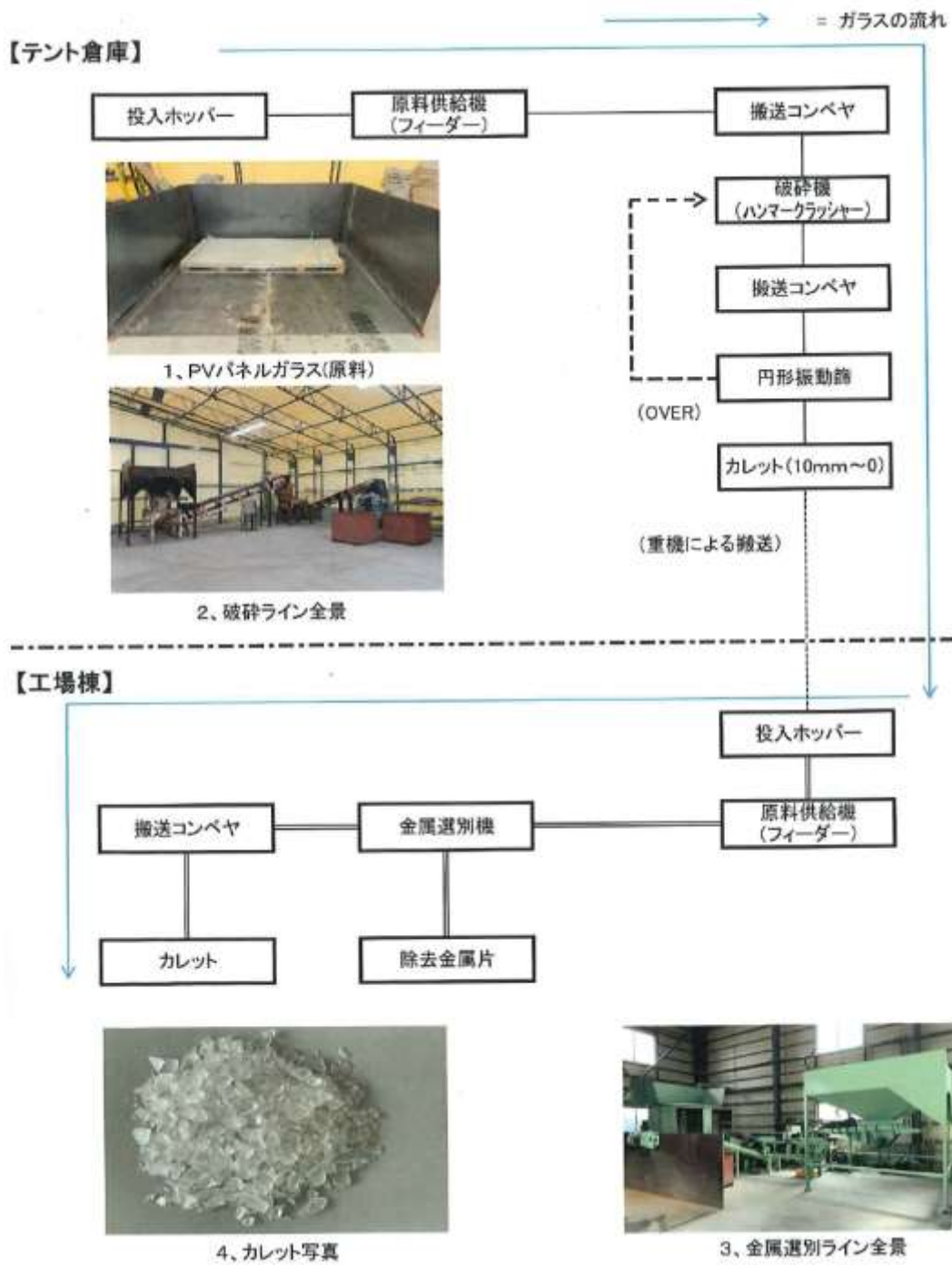


図 3.5.2 株式会社西日本ガラスリサイクルセンターでの破碎選別フロー

### 1)-2 テストスケジュール

第1回目のテストスケジュールは下表 3.5.4 の通り実施した。

表 3.5.4 第1回目テストスケジュール

2020年	10/1	10/2	10/3	10/4	10/5
	木	金	土	日	月
貯蔵サイロへ投入	●				
PV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)		●	★	★	●

### 1)-3 結果一覧

- ① カレット調合：PV ガラスカレット、その他カレットはブルドーザーで十分な混合を確認。
- ② 生産状況：PV が溶解～回収期間は、10/3PM～10/5AM。生産量、窯温は安定。
- ③ 繊維径、製品復元厚さ：PV 使用前後で変化なし。
- ④ 組成：PV 使用前後で大きな変化なし、アンチモン量は想定通り。
- ⑤ 粘度：PV 使用前後で大きな変化なし。

## 2) テスト詳細

### 2)-1 カレット調合及び実炉へのカレット投入状況



写真 3.5.3 混合後のカレット外観 (PV ガラスカレット 5%相当)



写真 3.5.4 貯蔵サイロへのカレット投入状況

- PV が原料の 5%相当 (Sb 量 : 250mg/kg 相当) になるよう調合。
- PV (1.7t)、その他カレット (23t) を九州工場ヤードにて、ブルドーザーで十分に混合。

## 2)-2 繊維径、製品復元厚さ

- ・ 繊維手触り(柔らかさ、滑らかさ)はPV使用前後で変わらず、繊維径も基準値内。
- ・ 製品厚みの復元もPV使用前後で変わらない。
- ・ テスト中、テスト後に窯や製品への影響は見られなかった。

## 2)-3 ガラス組成

ガラス組成調査は、アンチモン及びヒ素に着目し測定を行った。測定結果は表 3.5.5 に示す。測定は蛍光 X 線を用いて、定性分析を行った。

アンチモンは約 240mg/kg で、予測通りの結果となった。

表 3.5.5 第 1 回試作サンプルの組成 単位：mg/kg

採取日	10月14日	10月5日
採取時刻	10:00	1:15
Sb2O3	244	240
As2O3	検出下限値以下	検出下限値以下

## 2)-4 ガラス粘度

ガラス粘度の測定結果を図 3.5.3 に示す。測定は粘度計を用いて実施した。ガラス粘度は、PV ガラスカレット使用前後で変化はなかった。

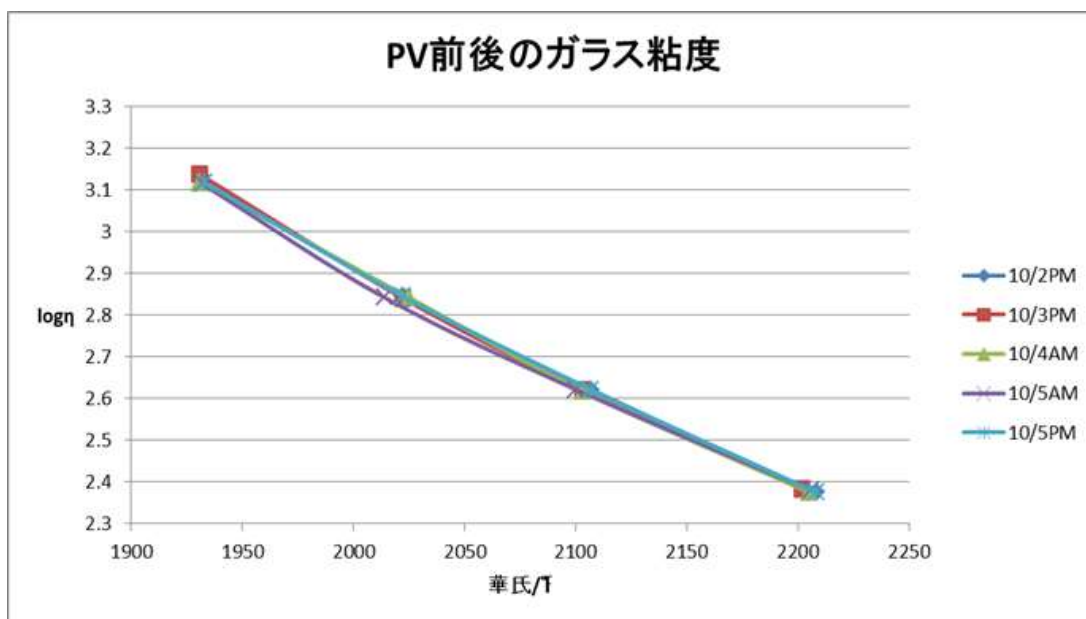


図 3.5.3 PV ガラスカレット処理前後のガラス粘度

## 2)-5 第1回テスト結果のまとめ

原料に対し5%のPVガラスカレットを混合した試作の結果、下記のことが把握できた。

- 生産状況において、テスト前後での大きな変化はなかった
- 繊維質、繊維径については、テスト前後で大きな変化はなく、繊維径は全て合格品質であった。
- 製品品質については、テスト前後で大きな変化はなく、復元厚さは全て合格であった。
- ガラス組成については、テスト前後で大きな変化はなかった。
- ガラス粘度については、テスト前後で大きな変化はなかった。
- 有害物質の溶出テスト結果は、今回のテスト及び水準では全て法令基準値未満であった。

## 太陽光パネルリサイクルカレット実炉使用テスト 第2回

### 1) テスト概要

#### 1)-1 目的

本テストは、第1回目と同様に当社で選別した選別ガラスが原料の10%になるように、株式会社西日本ガラスリサイクルセンターでその他カレットと混合したものを、旭ファイバーグラス株式会社九州工場の実炉実窯での試作を行い、PV ガラスカレットの使用可否を検討する。第1回目は原料の5%相当となるよう添加し生産や製品への影響が見られなかったため、今回は10%相当添加してその影響がないか確認する。なお、第1回目は板状ガラスを原料ガラスカレットとしており、銅線及びシリコンセルが完全に除去できているが、選別品は、銅線及びシリコンセルがそれぞれ0.08mg/kg及び0.02mg/kg含まれており、その影響を確認することも目的とした。

#### 1)-2 今回使用する PV ガラスカレット

- PV ガラスカレット量：3.06t、内訳：ヒ素含有あり(0.30t、70mg/kg)、ヒ素含有なし(2.76t、検出下限値以下)、ヒ素量は定性分析値(参考値)。
- 当社の分離方法：割れているPVパネルを二度焼成し、選別工程でガラスを分離。
- サンプル粒度：5kg中2~19mmに全て分級され、第1回サンプルに比べて粉体混入のない状態。

表 3.5.6 PV ガラスカレットの組成 (mass%)

	成分	定量下限	PVガラスカレット
定角測定	SiO <sub>2</sub>	0.03	70.7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	1.10
	MgO	0.02	3.48
	CaO	0.01	9.88
	Na <sub>2</sub> O	0.04	14.19
	K <sub>2</sub> O	0.01	0.02
	SO <sub>3</sub>	0.01	0.26
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01
	TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01
	ZrO <sub>2</sub>	0.001	0.005
	SrO	0.001	0.003
	BaO	0.1	<0.1
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.001
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.15	0.23
定性分析	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	<0.01
	PbO	0.003	0.001
	F	0.2	<0.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	<0.01
	Cl	0.01	0.03
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<0.05
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	<0.05
	NiO	0.01	<0.01
ZnO	0.01	<0.01	
SnO <sub>2</sub>	0.05	<0.05	

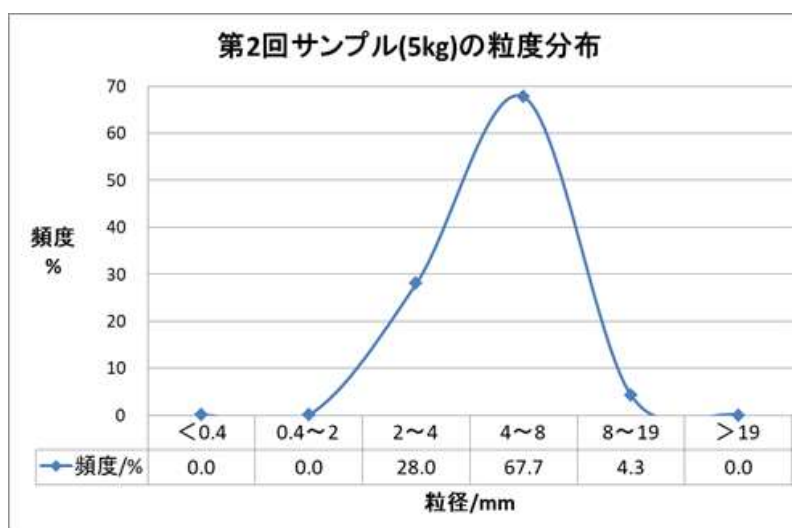


図 3.5.4 PV ガラスカレットの粒度分布



写真 3.5.5 PV ガラスカレットの外観

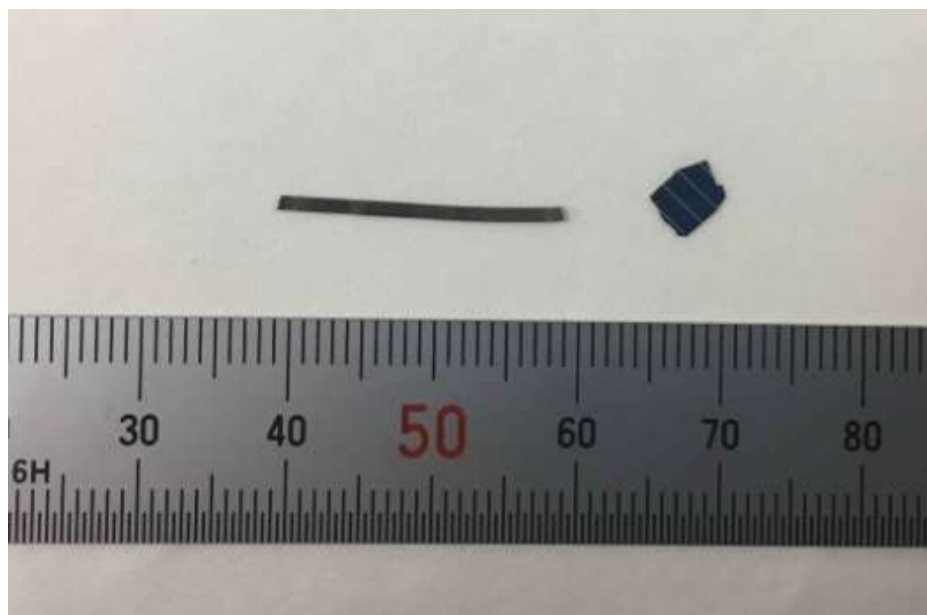


写真 3.5.6 カレットに含まれる異物（銅線及びセル）

PV ガラスカレットの分級時に異物や水分は確認できなかった。また、カレットは無色と黒っぽいものが混在していた。

PV ガラスカレットに含まれる異物量は、3.3 章で実施した選別ガラスカレット約 500kg を手選別し確認した。異物量は、銅線が約 0.08mg/kg 相当、セルが約 0.02mg/kg 相当であった。





写真 3.5.7 PV ガラスカレットの外観（無色透明のもの）



写真 3.5.8 PV ガラスカレットの外観（黒っぽいものを選択的に撮影）

黒っぽい着色があった PV ガラスカレットの着色の要因が、有機物か確認を行うため、強熱減量の測定を行った。測定は、無色のカレット、黒っぽいカレットそれぞれを、サンプル

量 20~30g を 550℃×1 時間行い、強熱前後の重量を測定した。測定の結果、減量は殆どなく EVA 等有機物は残っていないことが確認できた。また、加熱前後での両サンプルの色に変化はなかった。

#### 1)-3 テストスケジュール

表 3.5.7 に、第 2 回目の試作試験スケジュールを示す。

表 3.5.7 第 2 回目試作試験スケジュール

2021年	1/14	1/15	1/16	1/17	1/18
	木	金	土	日	月
貯蔵サイロへ投入	●				
PV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)		●	★	★	●

#### 1)-4 結果一覧

- ① カレット：株式会社西日本ガラスリサイクルセンターにてブルドーザーとサイロを使って混練作業を 2 回実施。
- ② 生産状況：PV が溶解～回収期間は、1/16PM～1/17PM。生産量は安定。
- ③ 繊維径、製品復元厚さ：PV 使用前後で変化なし。
- ④ 組成：PV 使用前後で大きな変化なし、アンチモン量は想定より少し多い(400～450mg/kg)。
- ⑤ 排気系統：PV テスト中、排気系へのヒ素やアンチモンの回収が確認された。
- ⑥ 粘度：PV テスト中、粘性が僅かに下がった。

#### 2) テスト詳細

##### 2)-1 株式会社西日本ガラスリサイクルセンターでの事前調査

PV が原料の 10%相当 (Sb 量：300～350mg/kg 相当)になるよう調査した。カレットの調査は、株式会社西日本ガラスリサイクルセンターにて実施し、作業状況及び混合カレットの外観については、写真 3.5.9 から 3.5.12 に示した。



写真 3.5.9 カレット混合前の状況（手前の白いガラスが PV ガラスカレット）



写真 3.5.10 カレットの一次混錬作業状況



写真 3.5.11 一次混錬後のカレットの状況



写真 3.5.11 カレットの二次混錬作業状況





写真 3.5.12 二次混錬後のカレットの外観

#### 2)-2 繊維径、製品復元

- ・ 繊維手触り(柔らかさ、滑らかさ)はPV使用前後で変わらず、繊維径も基準値内。
- ・ 製品厚みの復元もPV使用前後で変わらなかった。
- ・ テスト中、テスト後に窯や製品への影響は見られなかった。

#### 2)-3 ガラス組成

ガラス組成調査は第1回目と同様、アンチモン及びヒ素に着目し測定を行った。測定結果は表 3.5.8 に示す。測定は蛍光 X 線を用いて、定性分析を行った。

アンチモンは約 400~440mg/kg となり、事前予測 (約 350mg/kg) よりも高い値となった。

これは、事前調合の混ぜムラやPV ガラスカレットのばらつきの影響と推察される。

表 3.5.8 第2回試作サンプルの組成 単位：mg/kg

採取日	1月16日	1月17日
採取時刻	11:20	6:00
Sb2O3	408	444
As2O3	検出下限値以下	検出下限値以下

## 2)-4 ガラス粘度

カレット粘度の測定結果を図 3.5.5 に示す。測定は粘度計を用いて実施した。

ガラス粘度は、PV 使用中低い傾向が示唆された。粘度が僅かに下がる場合、生産上対応できるため問題はない。

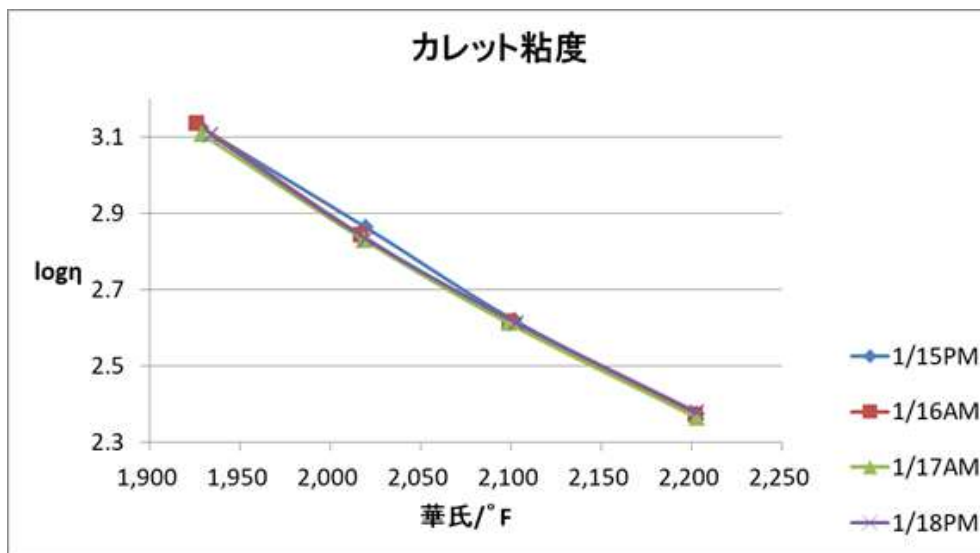


図 3.5.5 カレット粘度測定結果

## 3) 第2回テスト結果まとめ

原料に対し 10%の PV ガラスカレットを混合した試作の結果、下記のことが把握できた。

- ・ 生産状況において、テスト前後での大きな変化はなかった。
- ・ 繊維質、繊維径については、テスト前後で大きな変化はなく、繊維径は全て合格品質であった。
- ・ 製品品質については、テスト前後で大きな変化はなく、復元厚さは全て合格であった。
- ・ ガラス組成については、アンチモン量が計算値より増加傾向にあった。
- ・ ガラス粘度については、PV ガラスカレットを用いた系が僅かに低下傾向にあった。
- ・ 有害物質の溶出テスト結果は、今回のテスト及び水準では全て法令基準値未満であった。

#### 4) テスト結果総括（第1,2回テスト総括）

第1回及び第2回の試作検討の条件及び結果を表3.5.9及び表3.5.10に示す。

表に示す通り、PVガラスカレットの添加率5%及び10%では、短期間のテストにおいては運転面及び製品の品質面で問題はなく、良好な結果が得られた。

表 3.5.9 試作条件まとめ

テスト条件	第1回	第2回
PVカレットサンプル	板状パネルを新菱で焼成処理後、破碎	破碎パネルを新菱で焼成処理後、ガラスのみを選別
粒度分布(5kg)	<2mm：6%、2～19mm：94%	<2mm：0%、2～19mm：100%
色	無色	無色、黒っぽいものが混在
付着水分、異物(5kg)	なし/なし	なし/ほぼなし(<0.1ppm)
使用量	5%相当	10%相当

\*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。

表 3.5.10 試作結果まとめ

テスト結果	第1回	第2回
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	
製品品質	テスト前後で大きな変化なし、復元厚は全て合格	
ガラス組成	テスト前後で大きな変化なし	アンチモン量が計算値より増加
ガラス粘度	テスト前後で大きな変化なし	僅かに低下
有害物質の溶出	法令基準値未滿	法令基準値未滿

#### 5) 今後の課題

今後の課題は、下記の4点である。

- ① 長期的な設備への影響（特にアンチモン、ヒ素）
  - ② 土壌汚染対策法の遵守（特にヒ素）
  - ③ 設備面、環境面、法令等の想定される制限要因を満たす上限使用量の設定
  - ④ カレット組成の事前把握（安定的な工程・製品品質管理のため、ばらつきを把握する）
- 上記4点については、長期的・継続的に影響を把握する必要がある、これら課題を解決することで、原料への添加量と求められる組成等、基準値づくりに取り組んでいく必要がある。

## PV パネル・リサイクルガラスを原料としたグラスウール試作結果（株式会社ワンワールドでの試作）

選別で得られたガラスサンプルを用いて、硝子繊維協会会員企業である株式会社ワンワールドにてグラスウールの試作を行った。株式会社ワンワールドは、試作用の炉を所有しており、比較的小ロットでの試作が可能である。今回の実証事業では、選別により得られたPVガラスカレットを100%原料としたグラスウールの試作を行った。試作1は本試作の事前テストの位置づけで、200kgスケールで実施した。試作2は正式テストとして、約2tのPVガラスカレットを用いて実施した。

### 1) 概要

<試作1>：2020年12月6日 事前テスト（200 kg）

- ・ 性状把握（熔融温度、粘性、異物トラブル等）
- ・ 熔融、線維化したものの成分分析サンプル採取
- ・ 廃棄物となった際の溶出試験サンプルの採取

<試作2>：2021年1月13日 正式テスト（2,000 kg）

- ・ 試作用炉にて、供給されたPVガラスカレットを原料として試作
- ・ 試作品は株式会社ワンワールドの正式検査後、（一財）建材試験センターによる外部分析を行った。

提供したPVガラスカレットの組成は表3.5.11に示す。また、試作フローは図3.5.6に示す通りである。これまでの分析結果から、アンチモンは0.15%と、PVガラスカレットとしては標準的な組成と考えられる。

表 3.5.11 選別 PV ガラスカレットの組成

単位：mass%

	成分	定量下限	組成		成分	定量下限	組成
	定角 測定	SiO <sub>2</sub>	0.03		70.3	定性 分析	F
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.01	1.12	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01		<0.01
MgO		0.02	3.15	Cl	0.02		0.03
CaO		0.01	10.2	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05		<0.05
Na <sub>2</sub> O		0.04	14.6	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05		<0.05
K <sub>2</sub> O		0.01	0.03	NiO	0.01		<0.01
SO <sub>3</sub>		0.01	0.34	ZnO	0.01		<0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.01	0.02	SnO <sub>2</sub>	0.05		<0.05
TiO <sub>2</sub>		0.01	0.02				
ZrO <sub>2</sub>		0.001	0.010				
SrO		0.001	0.005				
BaO		0.1	<0.1				
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.002	0.007				
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.01	0.15				
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.01	<0.01				
PbO		0.002	<0.002				



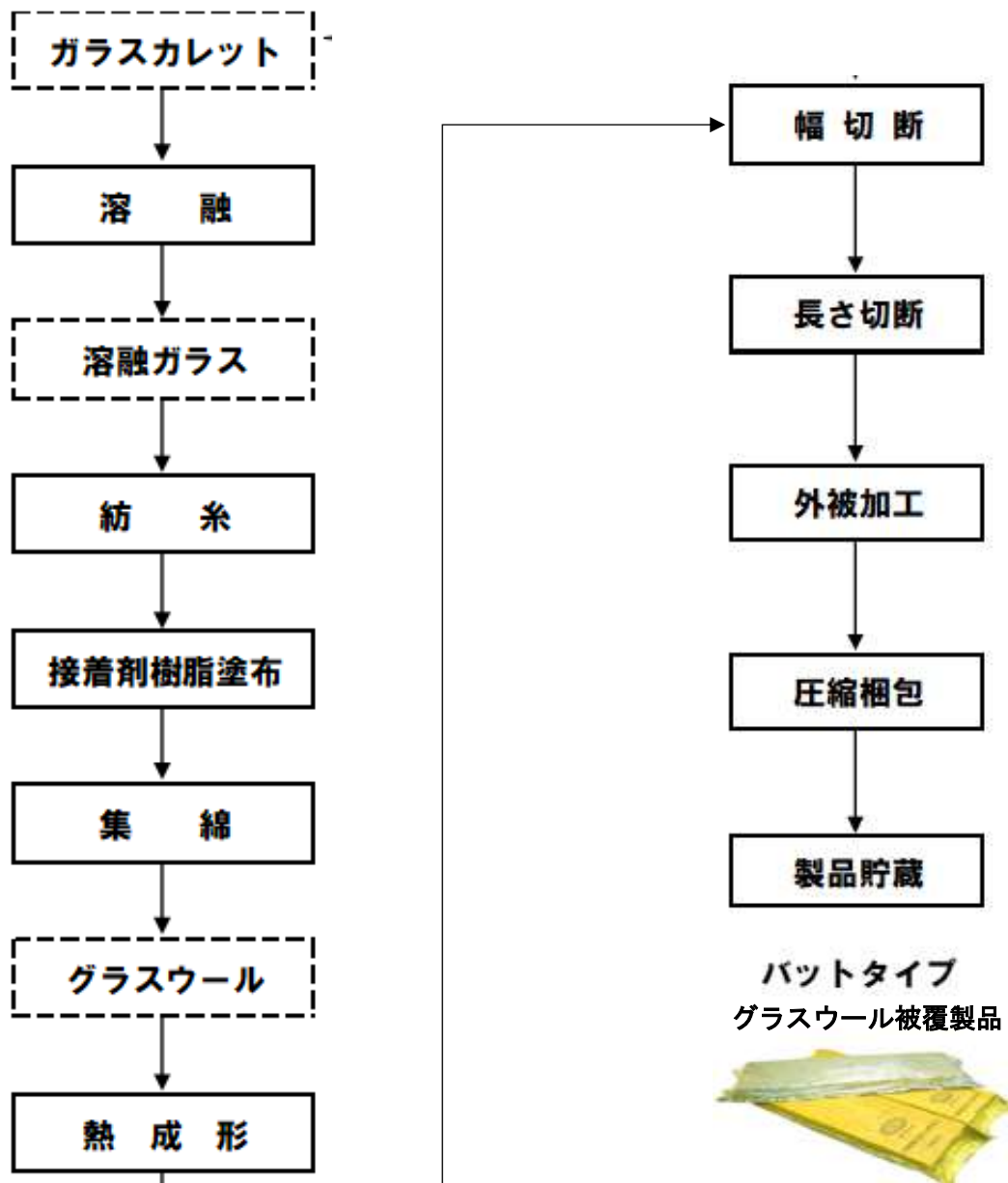





図 3.5.6 試作フロー

## 2) 試作1の状況及び写真

<p>日時：2020年12月6日12:00～          作業：試験炉仮運転          通常板ガラス約200kgを原料にし、          試験前運転を実施。</p>	<p>写真無し</p>
<p>日時：2020年12月7日7:00          作業：先行サンプル開梱・検品</p>	
<p>日時：2020年12月7日7:00          作業：同上          異物：なし</p>	
<p>日時：2020年12月7日8:00          作業：先行サンプル投入、1袋目</p>	

<p>日時：2020年12月7日8:00          作業：先行サンプル投入、2袋目</p>	
<p>日時：2020年12月7日9:00          作業：全量投入終了          炉内のガラスが置換されるまで          2時間経過を待つ。</p>	
<p>日時：2020年12月7日11:00          作業：繊維化開始          ※炉内はPVガラスカレットに          置き換わった          状態。匂い・排煙・工程上問題と          なる異常なし</p>	
<p>日時：2020年12月7日11:30          作業：分析サンプル採取          →成分、溶出用サンプルとする。</p>	

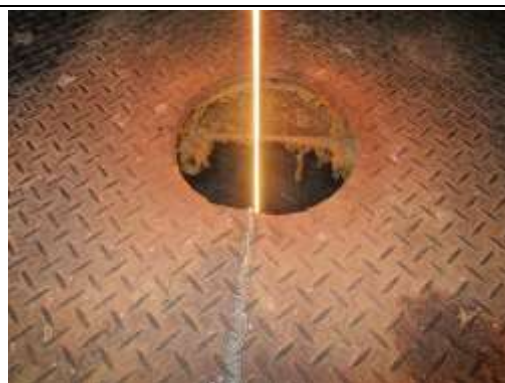
<p>日時：2020年12月7日12:00          作業：繊維化+バインダー塗布</p>	
<p>日時：2020年12月7日12:30          作業：硬化（グラスウール半製品化）          PV原料試作分（溶出試験用サンプル          10kg採取）          株式会社ワンワールド通常の原料に          切り替え試験を継続する。</p>	
<p>日時：2020年12月7日13:30          作業：硬化（グラスウール半製品化）          株式会社ワンワールド通常板ガラス          原料分          ※成分用サンプルの比較用とする。</p>	
<p>日時：2020年12月7日14:00          作業：試験終了          原料比較写真撮影          左：PVガラスカレット          右：通常板ガラス          試験終了までトラブルなし</p>	

### 3) 試作2の状況及び写真

<p>日時：2020年12月24日11:00          作業：本試験サンプル受け入れ</p>	
<p>作業：同上          フレコン5袋  <math>491+488+372+402+372</math> kg          合計 2,125 kg</p>	
<p>作業：受入検査          先行サンプルと差異無し</p>	
<p>混入の認められた異物 ※1円玉は比較用          金属系の混入が確認された。          銅関連と予測。本来NGだが、全体からすると極々微量であるため、そのまま試験するものとした 150kgに対して4~5g          全量は取り除けず。</p>	
<p>日時：2021年1月12日21:00          通常板ガラスにより、試験炉を暖機運転</p>	<p>写真なし</p>



日時：2021年1月13日 8:00 試験開始  
比較用として  
・原料：株式会社ワンワールド通常板ガラス  
・製品：通常性能GW16K100  
作業安定まで1h







日時：2021年1月13日 9:00  
PV原料投入開始  
写真：移動用ホッパー移し替え



日時：2021年1月13日 9:30  
比較用製品サンプル採取  
炉内は、株式会社ワンワールド通常原料の板ガラス



<p>日時：2021年1月13日 10:00～11:00  板ガラス～PV ガラスカレットの切り替わりの境を確認。(不安定)  約1時間、炉内がPV ガラスカレットに完全に切り替わるのを待つ。  前後、約600～700kgを廃棄とした。  ※切り替わりに伴うもので、PV ガラスカレットによる不良ではない。</p>	
<p>日時：2021年1月13日 11:10  PV ガラスカレットの紡糸（線維化）直後、乾燥前</p>	
<p>同繊維を必要な重量まで重ねる作業</p>	
<p>日時：2021年1月13日 11:15  試作（フィルムを除いた製品化後）</p>	

日時：2021年1月13日 11:15  
PV ガラスカレット流量測定風景



同上、単位時間当たりの製造繊維量の把握



日時：2021年1月13日 11:20  
PV ガラスカレット最後の 100kg を投入する。



日時：2021年1月13日 11:20  
PV ガラスカレット原料のグラスウール化  
正式サンプル採取開始  
製品同等のフィルムパックとする。







成果物として1本保管  
標準原料ではないため JIS は消印する。



#### 4) 試作品評価（基本性能）

本件の試作は以下の製品に相当する試作品として制作した。

表 3.5.12 試作相当品の概要

商品名	山びこTES		
製品記号	TES-100W		
JISの種類	JIS A 9521 建築用断熱材		
JISによる呼び方	GW16-45 F☆☆☆☆ λ45 R2.2 100×430×2740 L VC		

項目	単位	規格	区分あるいは記号
密度	kg/m <sup>3</sup>	16 -2、+2	
厚さ	mm	100 以上	
幅	mm	430 0、+20	
長さ	mm	2,740 以上	
熱抵抗	m <sup>2</sup> ·K/W	2.2 以上	R2.2
熱伝導率 (平均温度23℃)	W/(m·K)	0.045 以下	λ45
ホルムアルデヒド 放散特性	μg/(m <sup>3</sup> ·h)	5 以下	F☆☆☆☆

※ホルムアルデヒドは、樹脂成分に由来するものなので本件では評価対象外

外観上も異常なし（左：PV原料試作品、右：OW原料製品）



写真 3.5.13 試作品の外観（左：PV原料試作品、右：OW原料製品）

写真 3.5.14 は、株式会社ワンワールドで行った熱伝導率試験の評価用サンプルである。試験後、同一のものを（一財）建材試験センターにて外部分析を実施した。

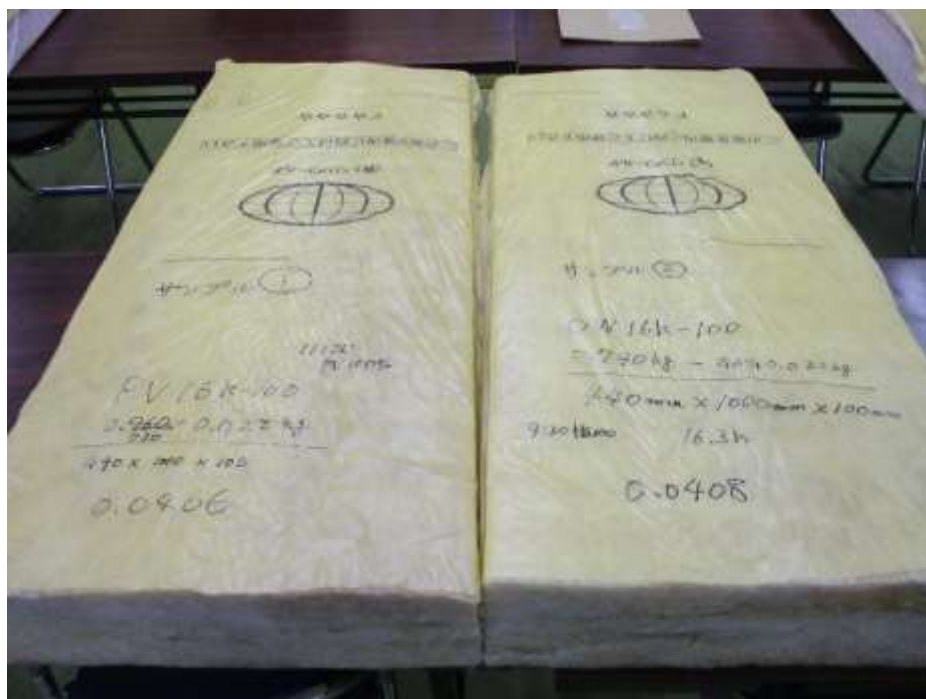


写真 3.5.14 熱伝導率試験用サンプル写真

表 3.5.13 建材試験センターへの依頼内容

試験体概要	試験の目的：製品性能の確認のため		
	一般名称：グラスウール断熱材	材質：グラスウール	
	商品名：16Kグラスウール試作品	寸法：430×1000×100	
	種類：2	数量：2（サブは下記）	試験体搬入予定日：1月22日

試験項目	試験方法（条件等）	試験数量	
試験内容	性能試験	熱伝導率（JIS A 9521による）	2
		①16K-100 PV原料	
		②16K-100 OW原料	
		※①用430×2740×100サイズ1枚	
		※②用430×2740×100サイズ1枚	

表 3.5.14 試作品の熱伝導率試験結果

	PV原料試作品	OW原料製品
（株）株式会社ワンワールド内評価	$\lambda = 0.041$ (0.0406)	$\lambda = 0.041$ (0.0408)
（一財）建材試験センター試験結果	$\lambda = 0.040$ (0.0403)	$\lambda = 0.041$ (0.0410)

いずれも断熱材製品として必要な性能 $\lambda = 0.045$ 以下を満足した。

5) 試作品評価 (成分・環境影響)

2020年12月7日に行われた先行サンプルのグラスウール繊維を分析した。

左P：PV原料試作品、右O：OW原料製品

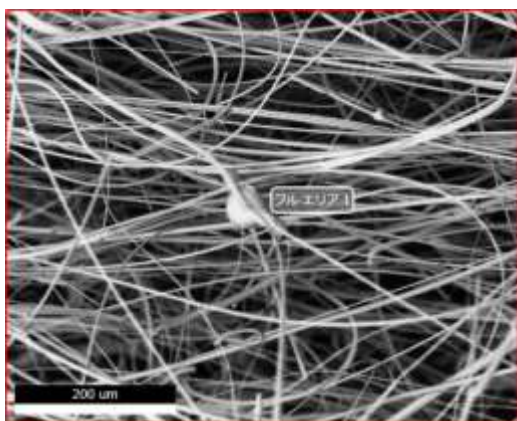
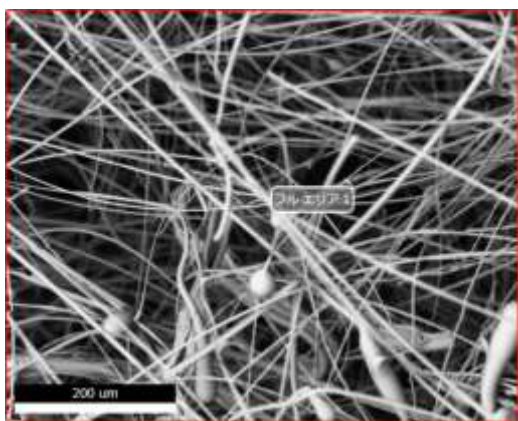
表 3.5.15 成分分析結果

成分	P	O
SiO <sub>2</sub>	72.81%	71.34%
CaO	17.21%	16.60%
Na <sub>2</sub> O	6.33%	5.99%
MgO	1.60%	1.88%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.10%	1.82%
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09%	<0.01%
SO <sub>3</sub>	0.43%	0.41%
K <sub>2</sub> O	0.30%	1.73%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13%	0.23%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.01%	<0.01%
BaO	<0.01%	<0.01%
StO	<0.01%	<0.01%
TiO <sub>2</sub>	<0.01%	<0.01%
As	22	<10
Cd	1	<1
Cr	5	<5
Hg	<5	<5
Pb	7	7
Se	<10	<10

蛍光X線により分析  
 おおよそ、コップや窓ガラスと同じ、  
 一般的なソーダライムガラスと  
 判定できる。

ICP-AESにより分析  
 フッ酸・硝酸による分解を実施  
 (単位：ppm)  
 僅かに検出された成分有

下写真は分析時のSEM画像





## 6) PV原料試作品の汚泥溶出試験の結果

PV原料試作品の汚泥溶出試験の結果を表3.5.16に示す。溶出試験は、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」昭和48年環境庁告示13号に従って実施した。また、基準は「産業廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行規則」昭和48年厚生省令35号の基準を参考値として評価した。

表 3.5.16 試作品の溶出試験結果

分析項目	単位	結果	基準	分析方法	定価下限値
水銀又はその化合物	mg/L	0.0005 未満	0.005以下	昭和48年 環境庁告示第13号 付表2	0.0005
カドミウム又はその化合物	mg/L	0.009 未満	0.09以下	JIS K 0102 55.4	0.009
鉛又はその化合物	mg/L	0.03 未満	0.3以下	JIS K 0102 54.4	0.03
六価クロム化合物	mg/L	0.13	1.5以下	JIS K 0102 65.2.1	0.05
砒素又はその化合物	mg/L	0.03 未満	0.3以下	JIS K 0102 61.4	0.03
トリクロロエチレン	mg/L	0.002 未満	0.1以下	JIS K 0125 5.2	0.002
テトラクロロエチレン	mg/L	0.002 未満	0.1以下	JIS K 0125 5.2	0.002
ジクロロメタン	mg/L	0.002 未満	0.2以下	JIS K 0125 5.2	0.002
ベンゼン	mg/L	0.002 未満	0.1以下	JIS K 0125 5.2	0.002
セレン又はその化合物	mg/L	0.03 未満	0.3以下	JIS K 0102 67.4	0.03
弗化物	mg/L	0.8 未満	—	JIS K 0102 34.1	0.8
ほう素又はその化合物	mg/L	0.1 未満	—	JIS K 0102 47.3	0.1
以下余白					

上記の試験は、ガラスウールが普通に住宅の壁の中に組み込まれた場合よりも過酷な条件で有害物質の溶出を検定したと考えることができ、少なくとも今回行った原料に関しては問題がないと判断する。

なお、六価クロム化合物として僅かに検出されるが、基準値の1/10以下で問題ないと判断する。

アンチモンの溶出試験も同サンプルで行った。結果を表3.5.17に示す。株式会社ワンワールドの標準品（OW品）に対し、PVガラスカレット（PV原料）共に、若干アンチモンの溶出が確認できた。

表 3.5.17 溶出試験結果 単位：mg/L

	六価クロム	アンチモン
PV原料	<0.07	0.05
OW品	<0.07	0.02

7) その他、PV原料試作品のガラス繊維 電子顕微鏡写真



## 8) 評価

表 3.5.18 株式会社ワンワールドでの試作品の評価結果

項目	評価及び備考
原料寸法	当社が標準的に使う原料より小さめではあるが、粒度は安定しており問題ないと判断する。
異物	少量の異物はあるものの、溶融炉への投入で問題は起きなかった。ただし、長期で使った際の炉材への影響を注視する必要があると判断。
工程（操業）	溶融に際して匂い（ガス等）の発生はなかった。 溶融条件等も当社の工程条件範囲内でコントロール可能であった。
成分	微量ではあるが忌避される成分の反応があり注意は必要だが、ガラスの分類で考えると、当社の原料と 99%同じソーダライムガラスと分類できる。
原料採用の可能性	購入のコストや保管方法、工場内外の搬送方法について課題はあるが試作においては製造工程上の問題もなく、製品化した際も必要な断熱性能の基準はクリアしており、採用の可能性は十分であると判断する。



### 3.5.3. ガラス受入基準の作成に向けた取り組み

今回得られたガラス組成の分析結果及び試作結果を踏まえて、硝子繊維協会及び全国板カレットリサイクル協議会を中心に、PV ガラスカレットの受入基準の作成に取り組んでいる。受入基準（目安）が出来ることによって、PV ガラスカレットの使用促進に寄与すると考える。ただし、会社毎（工場毎）に受入基準が異なるため、受入の可否及び使用可能量については、都度調整が必要になる。今回は、数トンレベルの試作を行ったが、長期的な視点で設備等への影響等を確認する必要がある。長期的・継続的な影響を把握するためには、100 トン／月程度（3 トン／日）程度の評価を行う必要がある。

### 3.6. 金属リサイクルの検討

太陽光パネルには有価金属として、アルミ、銅及び銀が使用されている。現在、廃棄された太陽光パネルは、アルミ枠のみを回収し、その他ガラス・銅線・セルは破碎され、(a)埋立処理、(b)溶融処理後路盤材へのリサイクル、また(c)破碎処理後にその他金属含有が多い廃棄物と混合され製錬会社にて金属回収で処理されている（図 3.6.1 現在の廃棄パネル処理フロー参照）。太陽光パネルは凡そ6割がガラスで構成されており、そのまま破碎された場合は、金属品位が低く経済合理性がない。また、パネルからガラスを剥離したのみのケースでも、EVA 等有機物が残存しており、金属品位が低いため廃棄パネル由来単独でのリサイクルが難しい現状がある。また、その他廃棄物と混合されて製錬会社で金属回収されているケースでは、廃棄パネル量が少ない現状ではリサイクル可能であるが、今後廃棄パネル量が増加した場合は対応に限りがある。

一方で、銅及び銀は、製錬事業者等によりリサイクルシステムが既に構築されており、太陽光パネル原料のマテリアルリサイクルを推進するためには、選別品における銅及び銀の品位を向上させこのリサイクルシステムに乗せることが必要になる。

本事業では、これまでに記した通り、熱分解及び選別技術開発に取り組み、廃太陽光パネルからガラス、銅線及びセルを品位良く選別することに取り組み、それぞれの素材について一定の品位で回収することが可能になった。

そこで本章では、まず初めに太陽光パネルに使用されている銅線及びセル中の、銅及び銀濃度を測定を行った。その次のステップで、選別回収した選別品を分析し、製錬会社において経済合理性の評価を行った。

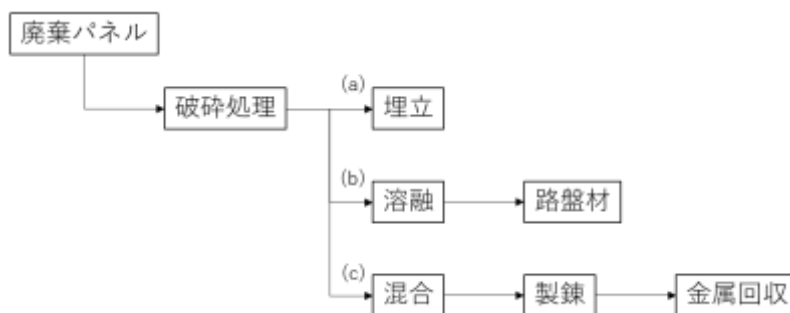


図 3.6.1 現在の廃棄パネル処理フロー

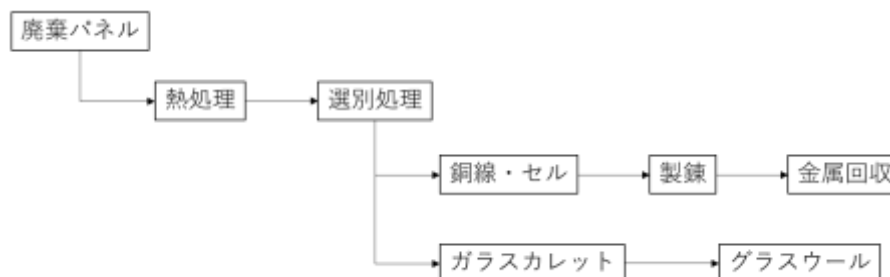


図 3.6.2 本実証事業で検討した処理フロー

### 3.6.1. 銅線及びセルの組成分析

分析用試料は、熱分解後の PV パネルから銅線及びセルをサンプリングし、下記分析方法に準じて測定した。

#### 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、銀は鉱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

分析結果の代表例を表 3.6.1 に示す。銅線には、銅が 88.5%、銀が 6,910mg/kg 含有されており、セルには銀が 7,300mg/kg 含有されていた。

表 3.6.1 銅線及びシリコンセル中の銅及び銀含有量の例

品名	Cu (%)	Ag (mg/kg)
銅線	88.5	6,910
セル	<0.01	7,300

### 3.6.2. 選別回収物の評価

選別回収物の評価を国内の製錬会社で実施した。選別品は、3.3 章で示した篩回収物（選別品①、）風力選別軽産物（選別品②）及びエアテーブル軽産物（選別品③）として、それぞれを評価した。分析結果及び評価結果を表 3.3.2 に示す。また、選別品の写真を写真 3.3.1～3.3.3 に示す。

選別品①は、銅線リッチであり、銅及び銀の品位が高い結果となった。選別品②はセルリッチであり、銀の品位が高い結果となった。選別品③は、ガラスの品位を向上する目的で、銅線/セル/ガラスが混在しており、銅及び銀の品位としては、選別品①及び②と比べ低い結果となった。

選別品①及び②については、銅及び銀の品位が高く、製錬会社で有価物として回収が可能なレベルであった。しかし、選別品③は銅及び銀の品位が比較的安く有価物ではあるが、製錬会社にとり経済合理性のあるレベルに達していなかった。なお、選別品①と③を混合すると、有価物として評価が可能なレベルであった。このように、今回実証で得られた回収物は、現時点の相場で有価物としての価値があることが確認できた。

表 3.6.2 選別品の品位と有価物としての評価結果

		Cu濃度 (%)	Ag濃度 (mg/kg)	焼成後パネル1 トン当たりの重 量 (kg/t)	有価物として の評価結果
選別品①	乾式振動篩上	55.2	8,539	40	○
選別品②	風力選別 (軽産物)	1.9	5,683	73	○
選別品③	エアテーブル (軽産物)	15.0	3,291	22	△
選別品①+③		41.0	6,597	62	○

※ガラス：865kg



写真 3.6.1 選別品① (乾式振動篩上)



写真 3.6.2 選別品② (風力選別軽産物)



写真 3.6.3 選別品③ (エアテーブル軽産物)

### 3.6.3. 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。

- 銅線やセル中の銅及び銀の品位は、個別に選別が出来れば有価物になる品位であること。
- 今回得られた選別品では、調査時点の銅及び銀の価格であれば、有価物としての品位を有していること。
- 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（PVパネルの単純な破碎品等）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。

### 3.6.4. 今後の課題

今後の課題は、下記の2点である。

- 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。
- PVパネルに使用される銅線及びセルの銅及び銀濃度を引き続き調査すること。

### 3.7. 環境改善効果の評価

#### 3.7.1. 目的

当社は、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事業の実現と、それによる環境改善を目指している。現在は、破砕後埋め立て処分、または破砕し溶融後、路盤材としての活用が主な処理方法となっている。本事業のリサイクルプロセスは、EVA を熱分解後、選別工程にて、ガラスカレットと、セル及び銅線を高度に選別することで、効率的にマテリアルリサイクル行うことが出来、その結果として、CO<sub>2</sub> の排出量削減及び最終処分量の削減に貢献することを目的としている。

#### 3.7.2. 評価前提

CO<sub>2</sub> 削減効果の算出は、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) ベースケースのシステム境界

現在太陽光パネルは主に、破砕後に最終処分（埋立処分）または溶融処理後に路盤材として活用されている。よって、ベースシステムを、最終処分（埋立処分）のケース及び路盤材のケースの2ケースとした。評価範囲は、図 3.7.1 及び図 3.7.2 に記載した。

＜ケース1：最終処分（埋立処分）＞

システム境界としては、太陽光パネルの使用後からとし、破砕処理～破砕処理物の運搬～最終処分を対象とした。使用済みパネルの撤去～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。

＜ケース2：路盤材＞

システム境界としては、太陽光パネルの使用後からとし、破砕処理～破砕処理物の運搬～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、最終処分（埋立処分）と同様、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。

##### 2) 本事業の評価のシステム境界

システム境界としては、ベースケースと同様、太陽光パネルの使用後からとし、焼成処理～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、各素材に選別される。選別サンプルは、銅線とセルは精錬会社で銅と銀の回収を行い、ガラスはグラスウールを製造することとした。

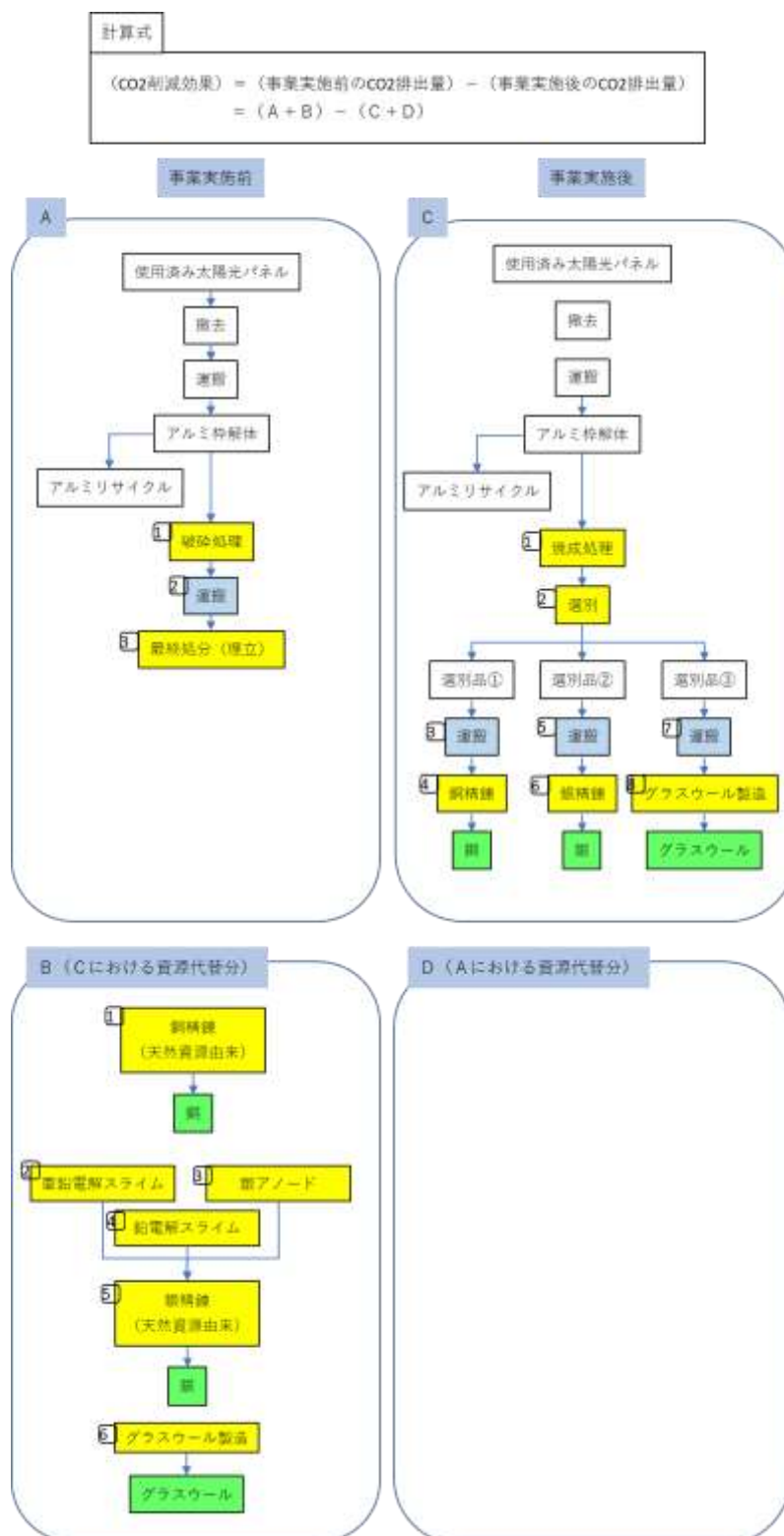


図 3.7.1 計算式と各事業のフローの構造 (比較対照：埋立)



計算式

$$\begin{aligned}
 (\text{CO2削減効果}) &= (\text{事業実施前のCO2排出量}) - (\text{事業実施後のCO2排出量}) \\
 &= (A + B) - (C + D)
 \end{aligned}$$

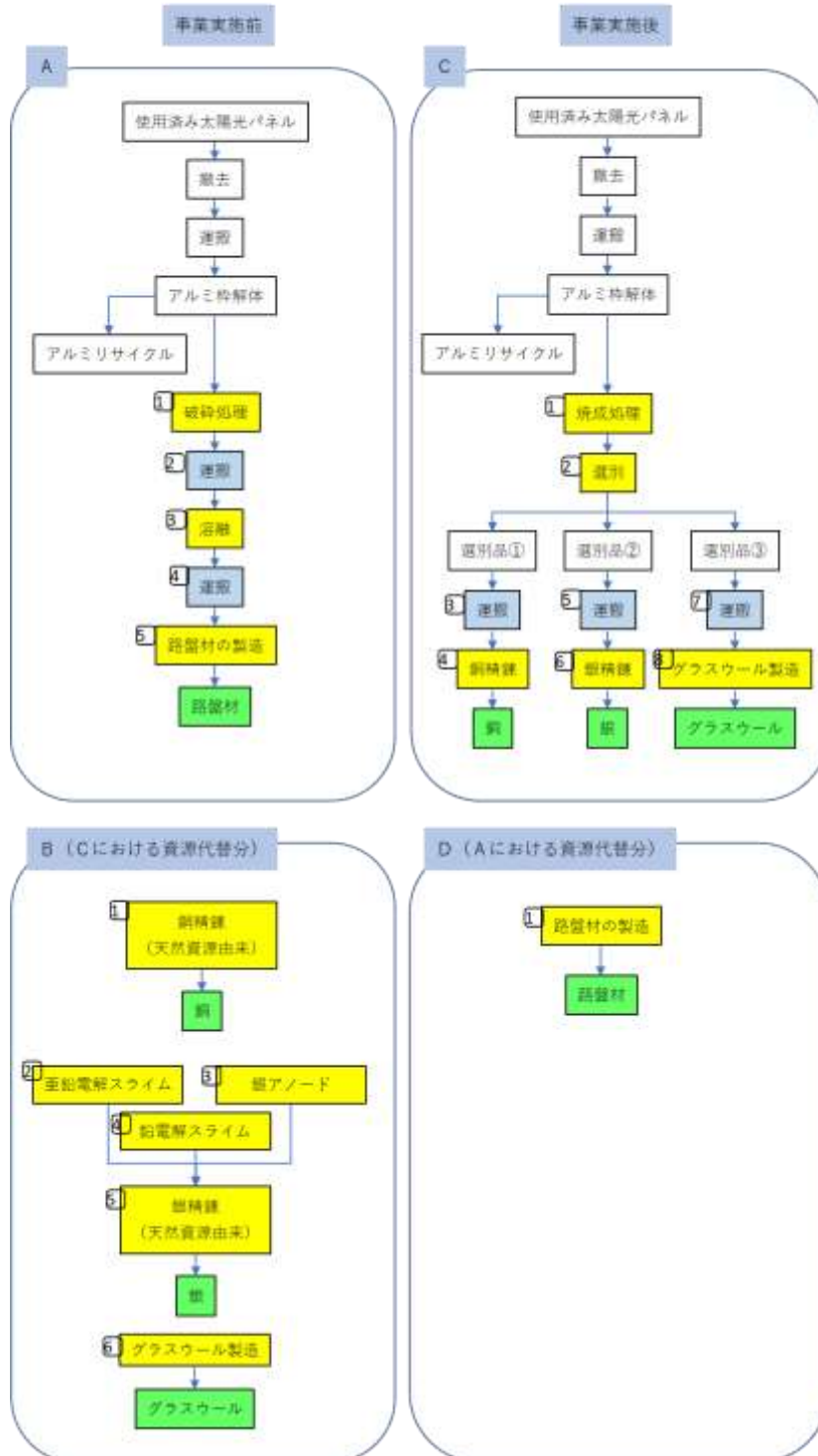


図 3.7.2 計算式と各事業のフローの構造 (比較対照：路盤材)

### 3.7.3. 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 (m<sup>3</sup>/year)

### 3.7.4. 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 3.7.1 及び表 3.7.2 に示す。

表 3.7.1 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：埋立)

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 2.3 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%	LCI データベース IDEA version 2.3 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
	埋立処分サービス, 産業廃棄物	LCI データベース IDEA version 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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
	銀地金	LCI データベース IDEA version 2.3 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
	ガラス短繊維・同製品	LCI データベース IDEA version 2.3 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
C	焼成処理 (電力使用量)	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 3 R 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
	焼成処理 (液化石油ガス使用量)	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 3 R 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
	焼成処理 (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 3 R 体制構築支援事業

	<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>
液化石油ガス (LPG)	<p>LCI データベース IDEA version 2.3</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 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>
窒素	<p>LCI データベース IDEA version 2.3</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 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>
乾式振動篩	<p>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</p>
風力選別	<p>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</p>
エアテーブル	<p>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</p>
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 2.3</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 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>
銅再生地金	<p>LCI データベース IDEA version 2.3</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 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>
銀再生地金	<p>LCI データベース IDEA version 2.3</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 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>

<p>埋立処分サービス, 産業廃棄物</p>	<p>LCI データベース IDEA version 2.3          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</p>
<p>グラスウール製造</p>	<p>LCI データベース IDEA version 2.3          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</p>

表 3.7.2 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 2.3 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%	LCI データベース IDEA version 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3

	鉛電解スライム中 銀 (Ag) 含有量	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 2.3 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%	LCI データベース IDEA version 2.3 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
	銀地金	LCI データベース IDEA version 2.3 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
	ガラス短繊維・同 製品	LCI データベース IDEA version 2.3 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
C	焼成処理 (電力使 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 3 R 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
	焼成処理 (液化石 油ガス使用量)	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 3 R 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

焼成処理（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 3 R 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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 2.3 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



		<p>一般社団法人 産業環境管理協会 値を引用</p>
	埋立処分サービス, 産業廃棄物	<p>LCI データベース IDEA version 2.3 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</p>
	グラスウール製造	<p>LCI データベース IDEA version 2.3 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</p>
D	山砂, 骨材用	<p>LCI データベース IDEA version 2.3 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</p>

### 3.7.5. LCA 評価結果

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 3.7.3 に示す。比較対照が埋立のケースにおいて、ベースラインの排出量 (A) は 8.09kg-CO2/枚、事業実施時の代替分 (B) は 73.4kg-CO2/枚、事業実施時の排出量 (C) は 64.5kg-CO2/枚であり、CO2 の削減効果は、17.0kg-CO2/枚であった。また、比較対象が路盤材のケースにおいては、ベースラインの排出量 (A) は 20.7kg-CO2/枚、事業実施時の代替分 (B) は 73.4kg-CO2/枚、事業実施時の排出量 (C) は 64.5kg-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、29.6kg-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。また、パネルの重量 1 トン当たりの CO2 削減効果を表 3.7.4 に示す。

表 3.7.3 パネル 1 枚当たりの CO2 削減量

単位：kg-CO2/枚

	項目	比較対照：埋立	比較対照：路盤材
A	ベースラインの排出量	8.1	20.7
B	事業実施時の代替分	73.4	73.4
C	事業実施時の排出量	64.5	64.5
D	ベースラインの代替分	0.0	0.001
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	17.0	29.6

表 3.7.4 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：埋立	比較対照：路盤材
A	ベースラインの排出量	506	1,293
B	事業実施時の代替分	4,589	4,589
C	事業実施時の排出量	4,030	4,030
D	ベースラインの代替分	0	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	1,065	1,852

#### <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ている。この事業規模での、年間の CO2 削減効果は表 3.7.5 に示す通り、比較対照が埋立の場合が 1,534 トン、比較対照が路盤材の場合が 2,667 トンとなった。

表 3.7.5 1年間のCO2削減量（当社処理予定規模）

単位：t-CO2/年

	項目	比較対照：埋立	比較対照：路盤材
	年間処理量（新菱想定）	1,440	
A	ベースラインの排出量	728	1,862
B	事業実施時の代替分	6,609	6,609
C	事業実施時の排出量	5,803	5,803
D	ベースラインの代替分	0	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	1,534	2,667

<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に示す。年間のPV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、比較対照を埋立とした場合は約30万トン、比較対照を路盤材とした場合は約52万トンの削減効果を見込むことが出来る。

表 3.7.6 1年間のCO2削減量（全国）

単位：千t-CO2/年

	項目	比較対照：埋立	比較対照：路盤材
	年間処理量（全国ピーク値）	280千t/年	
A	ベースラインの排出量	142	362
B	事業実施時の代替分	1,285	1,285
C	事業実施時の排出量	1,128	1,128
D	ベースラインの代替分	0	0
(A+B)-(C+D)	CO2削減効果	298	519

<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3.7.7に示す。ここで、年間のPV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（1,215m<sup>3</sup>）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3.7.8に示す。1年間の最終処分量削減効果は、約23万トン（23万m<sup>3</sup>）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 3.7.7 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 (m3/Y)	1,215

最終処分時の嵩比重を 1.0 t/m3とした

表 3.7.8 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m3/Y)	236

最終処分時の嵩比重を 1.0 t/m3とした

### 3.7.6. まとめ

PV 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。

- PV パネルのリサイクルを推進することにより、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 削減効果は、比較対照が埋立の場合 17.0kg-CO<sub>2</sub>/枚、比較対照が路盤材の場合 29,6kg-CO<sub>2</sub>/枚であった。パネル 1 トン当たりに換算すると、比較対照が埋立の場合 1,065kg-CO<sub>2</sub>/t、比較対照が路盤材の場合 1,852kg-CO<sub>2</sub>/t であった。
- 最終処分量の削減効果は、当社計画の事業規模で 1,215m<sup>3</sup>/年となり、全国展開した場合には約 23 万 m<sup>3</sup>/年となった。

#### 4. 出口戦略の検討

これまでの検討で、選別回収された PV 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、銅線とシリコンセルは精錬会社での銅及び銀の回収について評価を行った。その結果、当社での前処理に係る処理費用を除くと、選別後のものについてはそれぞれ有価物となることが確認出来、出口に目途がついた。

当社のシステムでは、事前に EVA 等樹脂成分は分解除去されており、選別回収されるものは、PV ガラスカレットと銅やシリコンセル等の混合物である。これらは、先に示した通り、今回の実証事業でリサイクルの可能性が認められており、既存の循環システムでの運用が可能であると考えられる。PV ガラスカレットの活用については、3 章で示した通り、硝子繊維協会が品質規格化に取り組んでいる。ただし長期的な視点での影響評価も必要であると考えられており、引き続き評価を行い、PV ガラスカレットの利用促進に貢献したい。

## 5. 本事業のまとめ

本事業で取り組んだ各課題に対する達成状況について、表 3.9.1 に示す。

表 3.9.1 本事業の達成状況まとめ

	項目	課題	達成状況
①	PV 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の品位は、99.999%を達成した。
②	PV 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	・廃 PV パネルのリサイクルによる CO2 低減効果の確認	・廃 PV 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	・PV 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。	・PV 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。

【学会発表】

【1】梅津えみ，阿部優香里，大和田秀二（早稲田大学）、守谷大輔，村山彰宏（株式会社新菱），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開発，資源・素材学会春季大会， 2021 年 3 月