

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

P V ・液晶等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発
(3 - 1 7 0 8)

平成29年度～令和元年度

Development of Rational Recycling Technology for Laminated Hard-to-Handle Panels
such as PV and LC

〈研究代表機関〉

早稲田大学

〈研究分担機関〉

ハリタ金属株式会社

〈研究協力機関〉

ガラス再資源化協議会

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 攪拌型粉砕・電気パルス粉砕による廃PVパネル破砕・選別産物からの高品質ガラス製造およびそのファイバー・タイル製造への応用と全体プロセスの評価（早稲田大学）	19
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 廃PVパネルの実用設備での破砕・選別の最適化および攪拌型粉砕の実証試験（ハリタ金属(株)）	74
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	113

I. 成果の概要

課題名 3-1708 PV・液晶等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発

課題代表者名 大和田 秀二 (早稲田大学理工学術院 創造理工学部環境資源工学科 教授)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費(累計額) 82,290,千円

(平成29年度:27,895千円、平成30年度:26,500千円、令和元年度:27,895千円)

本研究のキーワード: PVパネル, ガラス, リサイクル, 攪拌型粉砕, 電気パルス粉砕, 湿式テーブル選別

研究体制

- (1) 攪拌型粉砕・電気パルス粉砕による廃PVパネル破砕・選別産物からの高品質ガラス製造およびそのファイバー・タイル製造への応用と全体プロセスの評価(早稲田大学)
- (2) 廃PVパネルの実用設備での破砕・選別の最適化および攪拌型粉砕の実証試験(ハリタ金属株式会社)

*申請時のサブテーマ名称は、(1)「表面粉砕・電気パルス粉砕による廃積層型薄膜パネル破砕・選別産物からの高品質ガラス原料製造およびそのファイバー・タイル製造への応用と全体プロセスの評価」、(2)「廃積層型薄膜パネルの実用設備での破砕・選別の最適化および攪拌型粉砕の実証試験」、であったが、採択審査時に、多くの対象物は検討できなから廃PVパネルに絞るべき、とのご意見を頂戴し、2017年度中間報告以降では「廃積層型薄膜」を「廃PVパネル」と変更した。また、旧題の「表面粉砕」は、2017年度の研究において、本試料に対する粉砕機構は「表面粉砕」でなくむしろガラス成分の「選択粉砕」であることが明らかとなり、やはり2017年度中間報告時より、もう一つの「電気パルス粉砕」の呼称の構造に合わせて「攪拌型粉砕」と変更することとした。なお、この粉砕の名称変更に関しては、2018年度第2回アドバイザーボード会合(2018年7月13日開催)にてその了承を得ている。

研究協力機関

ガラス再資源化協議会

1. はじめに(研究背景等)

PVパネルの使用後の排出量は20年後には20～30万t/y規模になるとも予測されているが、その中でも重量割合の多いガラス素材のリサイクルについては技術開発が進んでいないのが現状である。廃PVパネルからガラス濃縮物の製造に関しては、環境省・経産省の委託・補助による多くの事業が実施されているが、提案者の視点からは、大量処理が可能でかつ高品位ガラス濃縮物を製造する技術開発は世界的にもほとんど行われていない。特にガラス表面に付着するEVA(Ethylene-Vinyl Acetate)原料中に混入すると、ガラス熔解炉内雰囲気還元化して耐火煉瓦の寿命を短縮させるので、極力低減する必要がある。こうした技術開発例としては、PVパネル全体を加熱する方法やホットナイフ法などがあるが、前者は熱エネルギーの有効利用が図られてはいるものの経済合理性が低く、後者は高純度ガラスの製造にはある程度有効であるが、その処理速度に限度がある、などの欠点を持っている。

ハリタ金属では、廃PVパネルをそのままシュレッダーに掛け、その後、各種の物理選別法を適用してガラス濃縮物を製造しているが、それにはまだ少なからずEVAが含有されており、高純度ガラスとしての原料化が困難な状況にある。そこで、本事業では、ここで製造されるガラス濃縮物に各種の先進的な粉砕・物理選別技術を組み合わせることにより、高純度ガラス原料を、経済合理性を持って製造する技術開発を行った。

2. 研究開発目的

本事業では、商業規模でのシュレディングと物理選別によって製造されるガラス濃縮物から、高純度ガラス原料を製造することを目的とする。ガラス濃縮物にはまだ少なからずEVAがガラスと付着した状態で存在するので、これらの剥離に有効な力学的エネルギーを利用する攪拌型粉砕法および異相境界面を優先的に破壊する電氣的エネルギーを利用する電気パルス粉砕法を適用し、ガラスとEVAの単体分離を図る。この両粉砕法は、近年注目を集めており当研究室でも長年にわたって検討を続けているが、その詳細な粉砕機構は不明であり、本研究では、これら両粉砕法の高純度ガラス濃縮物製造への適用とともに、それらの詳細機構の解明も行う。また、両法によって製造された高品位ガラス原料のセラミックタイル製造やグラスファイバー製造の原料としての特性について検討するとともに、こうした新プロセスが導入された際のLCAについて検討する。

また、現在、実用規模で行われているシュレディングと物理選別によるガラス濃縮物製造プロセスにおいても、ガラス回収率が低い等の改善点があり、本事業では、このプロセスの改善を行って、より質の高いガラス濃縮物をより効率的に製造する新プロセスの開発を行う。ここで特に注目するのは湿式テーブル選別である。また、実用規模での攪拌型粉砕機を選定し、同機による粉砕試験を行ってその挙動を実験室規模のものと比較する。

3. 研究開発の方法

(1) 攪拌型粉砕・電気パルス粉砕による廃PVパネル破碎・選別産物からの高品質ガラス製造およびそのファイバー・タイル製造への応用と全体プロセスの評価

本研究では、廃PVパネルを実操業プラントにてシュレディング・選別して得られたガラス濃縮物が本研究の対象試料となるが、この実装業において、ガラス濃縮物をより歩留り高く製造する操業条件を見出すとともに、そのようにして得られたガラス濃縮物の各種物理・化学組成を把握する。

また、改善された操業条件で得られるガラス濃縮物中のガラス分とEVA分の単体分離を促進する目的で攪拌型粉砕および電気パルス粉砕を施し、その産物について、ガラス・EVAの分離を目的として湿式テーブル選別を施す。以下に両粉砕法および湿式テーブル選別に関する詳細を記す。

- ・攪拌型粉砕： 上記のガラス濃縮物のうち、EVA濃度の高い粒群を用いて各種条件にて攪拌型粉砕を適用し、同粉砕の基礎的挙動を把握するとともに、その最適条件を見出す。また、得られた最適条件とほぼ同様の条件にて実用規模での攪拌型粉砕を実施し、その適用性を検討する。

- ・電気パルス粉砕： 上記のガラス濃縮物の粗粒・細粒群および全粒群の3粒群試料について各種条件にて電気パルス粉砕を適用し、同粉砕の基礎的挙動を把握するとともに、その最適条件を見出す。また、同粉砕の機構解明を目的として、ガラス・EVA等の素材について二成分系人工試料を作製して電気パルス粉砕を実施し、その基礎的挙動を把握する。

- ・湿式テーブル選別： 上記2選択粉砕法によって得られる比重の高いガラス分は小さなサイズとして、比重の低いEVA分は大きなサイズとして得られるので、重小粒子と軽大粒子の選別に最適な手法である湿式テーブル選別を施して、その相互分離に最適な条件を見出す。

このようにして得られた高純度ガラス濃縮物を原料としてセラミックタイルを製造し、その特性を評価する。また、同濃縮物のファイバーガラス原料としての基礎特性についても評価も行い、より経済合理性の高い循環利用について検討する。

また、上記の全プロセスにわたってLCAを行い、従来プロセスに対する本プロセスの有効性を明らかにする。

(2) 廃PVパネルの実用設備での破碎・選別の最適化および攪拌型粉砕の実証試験

既述のように、現状わずかに排出されている使用済みPVパネルの多くはリサイクラーによりシュレッター破碎およびその後の物理選別が行われているが、その主たる目的は銀濃縮物の製造であり、ガラ

スはその残渣が濃縮物として扱われている。本研究では、まずは、ハリタ金属・射水リサイクルセンター（富山県射水市）に既設のシュレッタープラントの現状でのガラス濃縮物の分離状況を確認し、その後、ガラス回収率を向上すべく実作業条件の改善を実施する。

また、早稲田大学での攪拌型粉砕機の実験室規模試験により得られた最適条件を丸美陶料（岐阜県土岐市）に既設の商用機に適用するための条件設定を行うとともに、同条件にて実施した粉砕試験産物を分析し、実験室規模試験との比較を行う。

図 3.1.1 に、想定される廃 PV パネルからの高純度ガラスの製造プロセスの全体像を示した。

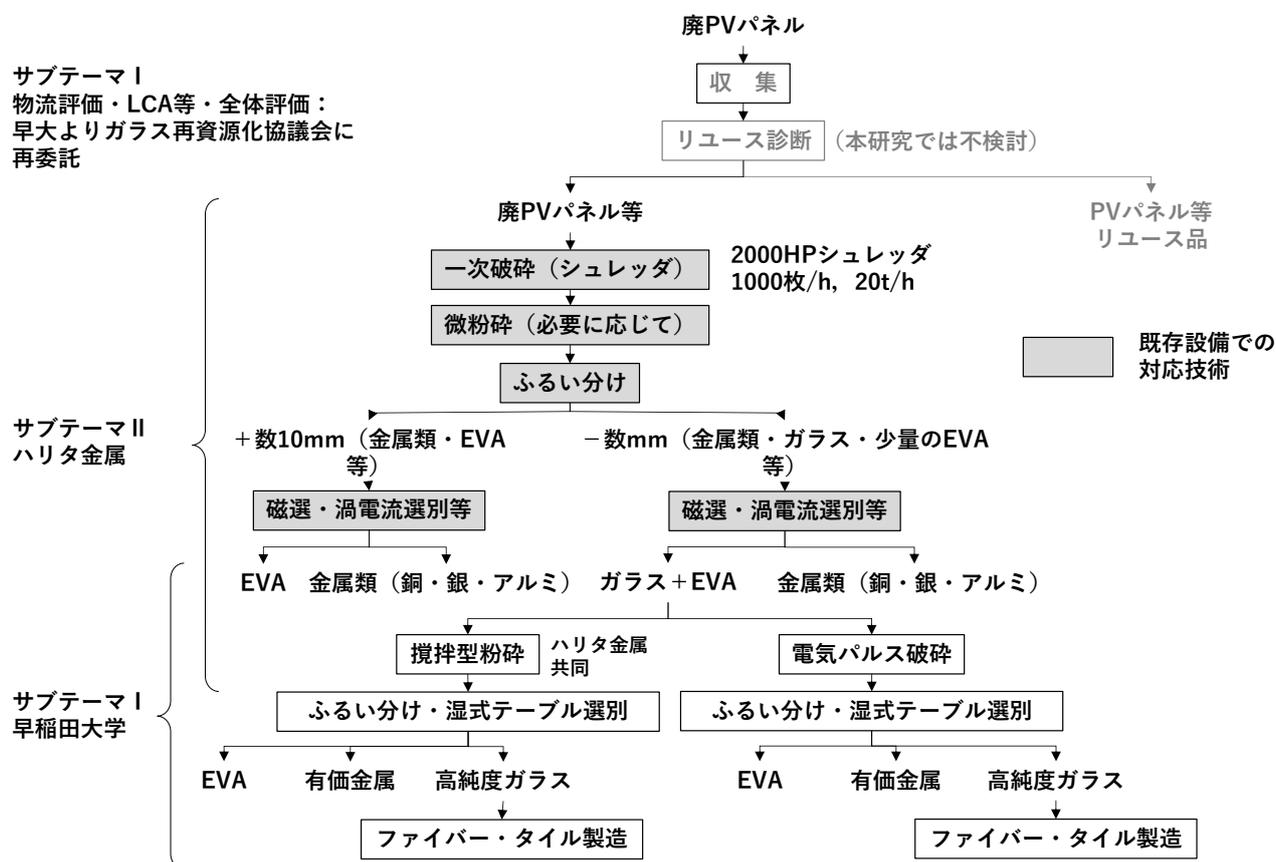


図3.1.1 想定される廃PVパネルからの高純度ガラスの製造プロセスの全体像

4. 結果及び考察

(1) 攪拌型粉砕・電気パルス粉砕による廃PVパネル破碎・選別産物からの高品質ガラス製造およびそのファイバー・タイル製造への応用と全体プロセスの評価

実験室規模の各種実験における試料

ガラス再資源化協議会の協力を得て、各種の使用済みPVパネルを合計6670枚収集し、それらをハリタ金属の横型シュレッタープラントで破碎・選別したガラス濃縮物を試料とした。廃PVパネルからA1枠を取り外したのちに、シュレッター破碎し、風力選別で軽質ダストを取り除き、磁力選別で鉄を取り除き、ふるい分けののちに渦電流選別を施して得られたガラス濃縮物（本研究の対象試料）を実験室規模での各種実験に供した。また、将来の動向を鑑みて、A1枠を付けた状態でのシュレッター破碎・選別も行った。

実験室規模での攪拌型粉砕挙動

上記ガラス濃縮物の成分組成を図1に示した。同図よりEVAは比較的粗粒域に濃集しており、細粒になるに従ってその含有率が低下することが分かった。ここででは、攪拌型粉砕への代表試料として、試料量が多くかつEVA含有率の高い2.8-4.0 mm粒群を採用した。

攪拌型粉碎は、当研究室での過去の研究より、回収対象試料の周囲に付着している不純物を、対象試料の破壊を極力抑えて剥離する能力が高いことが知られている方法であり、ここでは、ガラス表面に付着しているEVAの剥離粉碎を目的として使用した。

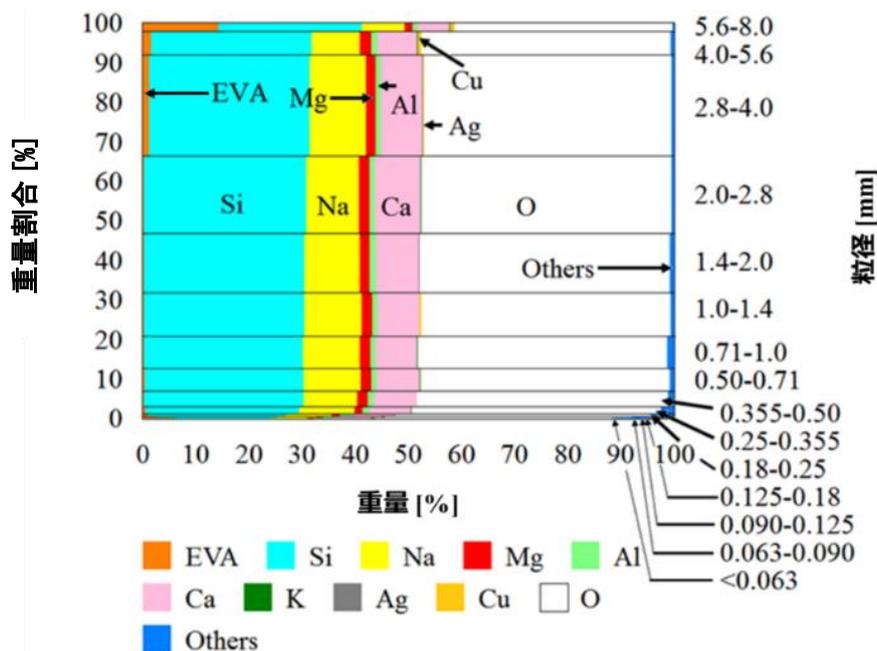


図1 Al枠なしの廃PVパネルから製造されたガラス濃縮物の成分組成

実験室規模の攪拌型粉碎機を使用して、乾式粉碎、湿式粉碎、媒体添加乾式粉碎、薬剤添加湿式粉碎、長時間乾式粉碎を検討し、それぞれの粉碎条件におけるガラス回収率を比較し、その挙動に関する考察を行った。なお、ガラス成分は粉碎後に細粒側に EVA は粗粒側に分布することが分かった、つまり、ガラス・EVA の組合せでは、ガラスが体積破壊をおこして選択粉碎が進み、EVA は粉碎されにくいことが分かったため、ここでは、粉碎産物をその後ふるい分けしてガラスを細粒側に回収することとした。

乾式粉碎を行った産物に対して 0.063-2.8 mm の範囲で、カットサイズ（分級点）、その際のガラスの EVA に対する分離効率を、また、湿式粉碎、媒体添加乾式粉碎、薬剤添加湿式粉碎および長時間乾式粉碎を行った産物に対しても、同様の指標を算出し、以下のような結果を得た。

乾式粉碎： ガラスと EVA の最大分離効率が得られる条件はアジテータ回転速度 2500 rpm、粉碎時間 5 min のときであり、その際の実効分離効率は 51.80 %、2.8 mm 以下粒径へのガラス回収率 64.89 %、当該粒径中の EVA 濃度は 0.21 % であった。乾式粉碎ではアジテータ回転速度・粉碎時間が大きくなるほど、分離効率が上昇することが確認された。すなわち、ガラスから EVA を分離するためにはガラス表面に付着している EVA の攪拌型粉碎でなく、ガラス自体の体積粉碎が有効であることが示唆された。全般的に、乾式粉碎は湿式粉碎に比べてガラスの EVA に対する分離効率の高いことが分かった。

湿式粉碎・薬剤添加湿式粉碎： 乾式粉碎の場合と比べて、回収率は上昇するがガラスの EVA に対する最大分離効率は低下することが確認された。したがって、ガラスから EVA を分離には、EVA の剥離粉碎よりもガラスの体積破壊による選択粉碎が有効であることが確認された。

媒体添加乾式粉碎： 乾式粉碎よりもさらにガラスの体積粉碎が進行すると考えられる媒体添加乾式粉碎では、最大分離効率・ガラス回収率ともに乾式粉碎より低下することが確認された。このことは、ガラスの体積粉碎を進行させすぎると、EVA もガラスとともに粉碎されてしまい、相互分離が困難になることを示している。したがって、EVA とガラスの分離には、ガラスの適切な体積粉碎の起こる条件に設定することが重要であることが確認された。

長時間乾式粉碎： 粉碎時間を長くすると、ガラス回収率はほぼ変わらず、細粒側への EVA 含有率が高くなることが分かった。つまり、ガラス自体の体積粉碎は粉碎時間 5 min でほぼ終了しており、それ以

上の粉砕時間ではEVAも粉砕されてしまい、5 min以上の長時間粉砕は選択粉砕の効率を低くすることが分かった。

以上のガラス回収率とEVA含有量との関係を図2にまとめた。同図より、湿式粉砕や媒体添加乾式粉砕はガラスの回収率を増加させるが、同時にEVAの混入量も増加することが確認できた。なお、既述のように、ガラスのEVAに対する最大分離効率は、乾式粉砕アジテータ回転速度2500 rpm、粉砕時間5 minの条件において51.8%と得られ、その際の2.8 mm以下の粒群へのガラス回収率は64.9%、当該粒群中のEVA濃度は0.21%であった。これらのガラスとEVAの単体分離機構は、主に、ガラスが選択的に破砕されてEVAから剥離し、微粒へ移行するものであることが分かった。長時間粉砕や、湿式粉砕、粉砕媒体を加えた粉砕等では、ガラスのみならずEVAの一部も粉砕されて微粒化することから、ガラスの回収率は向上するもののEVAの混入率も増加した。したがって、最適な粉砕方法は許容されるEVA混入量によると考えられた。

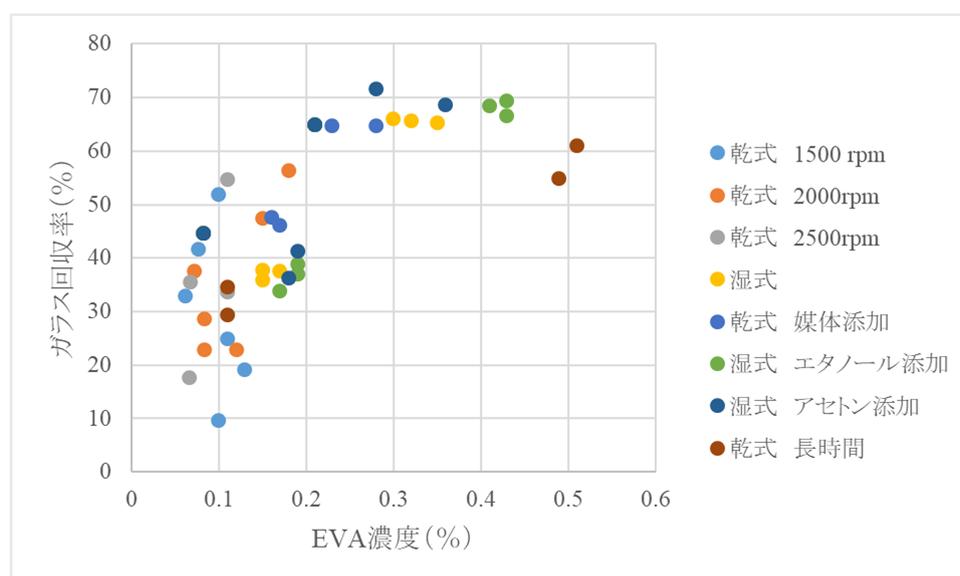


図2 攪拌型粉砕の各種条件下におけるEVA濃度と細粒側へのガラス回収率の関係

実験室規模での電気パルス粉砕挙動

複数成分混合物の粉砕において構成成分の単体分離性の向上が顕著である電気パルス粉砕法を用いて、ガラス濃縮物中のガラスとEVAの単体分離を図った。

印加パルス電圧を150 kV一定とし、パルス印加回数およびその後のふるい分けカットサイズを種々に変化させて、細粒側でのガラス・EVA分の含有率・回収率、そしてガラスのEVAに対する分離効率への影響を検討した。それらの結果を総合すると、電位パルス粉砕におけるガラスとEVAの分離機構は以下のように推定された（図3参照）。

- ① 2.0-5.6 mm 試料： ガラス表面の一部にEVAが付着した状態で存在しており、印加回数が少ない場合には、主にガラスの粉砕が進み、印加回数を増やすにつれてEVAがガラス粒子から分離し、さらに印加回数を増やすとガラスとEVAがそれぞれ粉砕される。電気パルス粉砕では、ガラス/EVAの境界面に選択的にアーク放電が起こり、発生するジュール熱によって境界面物質が昇華してマイクロ爆発が起こるが、それによって生ずる衝撃波によって、脆性物質であるガラスが選択的に破壊されることが判明した。
- ① 5.6-13 mm 試料： EVAシートにガラス粒子が付着した状態で存在しており、印加回数を増やすにつれて、EVAシートから多くのガラス粒子が分離する。また、分離したガラスは2.0-5.6 mm 試料と同様に粉砕され、印加回数が多い場合にはEVAシートも粉砕されるが元々のサイズが大きいので、1 mm以下にはなりにくかった。

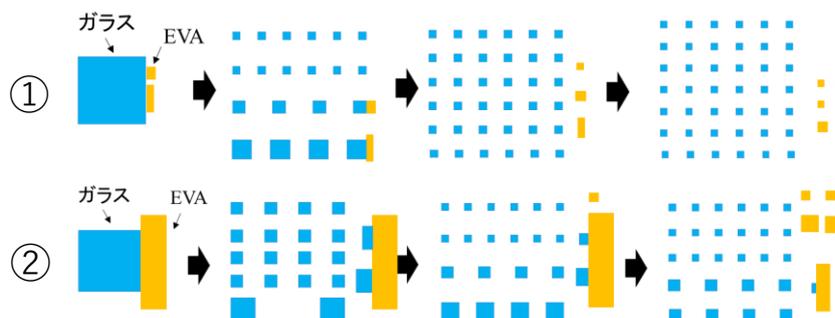


図3 各粒群における分離概念図 (① 2.0-5.6 mm、② 5.6-13 mm)

実験においては、ガラスのEVAからの分離に関して、パルス印加回数、試料導入量、上下部電極間距離の影響を検討し、試料全体としてガラスのEVAに対する最大分離効率(91.4%)が得られるのは、試料パルプ濃度0.8%、印加電圧150 kVの際、パルス印加回数320とした際の粉砕産物をカットサイズ1.0 mmでふるい分けした際の細粒側が高純度ガラス濃縮物となり、その際のガラス回収率は98.0%、EVA品位は0.124 wt%、であった。

試料導入量の影響： ベルトコンベヤにて試料を連続的に処理する実装業を想定すると、その処理能力は、パルプ中の試料濃度(パルプ濃度)、上・下電極間距離によって決まるので、ここでは、この両者のガラス・EVA選択粉砕に対する影響を検討した。まとめの図を図4に示した。この図より、(ガラスの粉砕比/EVAの粉砕比)が最大となるパルプ濃度は、印加回数160以下では0.80~1.60%、同320では3.1%まで増大可能であることが分かった。そして、試料濃度を増した際のガラスのEVAに対する分離効率は、パルプ濃度6.4%では分離効率94.6%が、パルプ濃度2.8%でも分離効率93.6%を達成し、この程度のパルプ濃度までは分離効率はむしろ増大することが判明した。

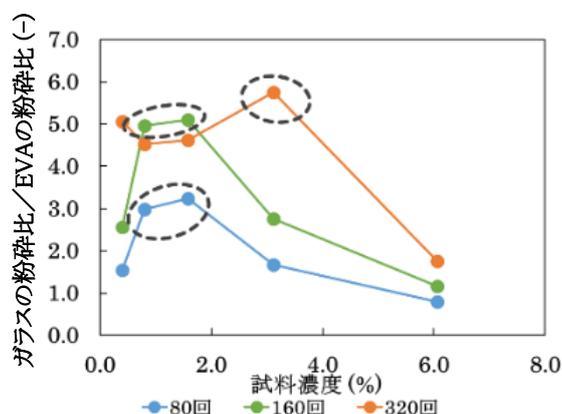


図4 パルス濃度と(ガラスの粉砕比/EVAの粉砕比)の関係

電極間距離の影響： 電極間距離を大きくとることは、その間に試料を導入することができるため、処理能力の増大繋がる。両者の関係を図5に示した。ここに、凡例の240・480 gはそれぞれパルプ濃度6.4・12.8%に相当する。同図より、(ガラスの粉砕比/EVAの粉砕比)は電極間距離の増大に従っていずれのパルプ濃度においても増加傾向にあり、少なくとも40 mm(本装置の最大値)までは高い値を維持ことが分かった。

連続式電気パルス粉砕装置の処理能力は、上記2条件に加えて、装置条件によって決まるパルスの有効範囲、コンベアベルトの容量と速度、そして試料が適切な印加回数を受けるまでの上記有効範囲内での滞留時間、等が関係するが、適切なパルプ濃度や電極間距離が大きくとれることを考えると、この試料

のガラス選択粉碎には大規模連続装置の適用が比較的容易であると考えられた。

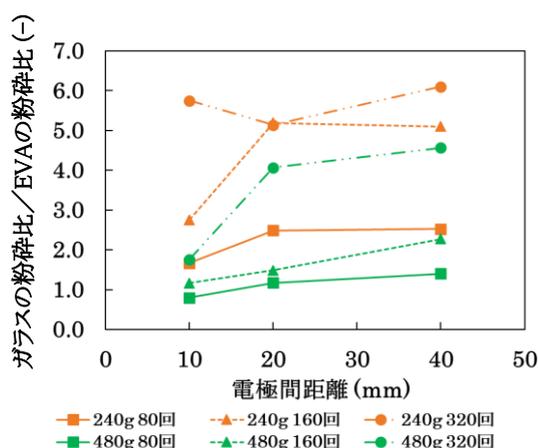


図5 電極間距離と（ガラスの粉砕比/EVAの粉砕比）との関係

アルミ 碎混入の影響： シュレッダー破碎時に、PVパネルのAl 碎を外す場合「Al 碎なし」と外さない場合「Al 碎あり」の試料について検討を行った結果、ガラスのEVAに対する分離効率、「Al 碎あり」試料の方が「Al 碎なし」試料よりも高いことが分かった。試料に高電圧を印加した際、Al 粒子が存在する場合には、(i)陽極から発生するストリーマがAl 粒子を経由することで複数の放電経路が生成されてより多くのガラス・EVA粒子にエネルギーが与えられること、(ii)Al 粒子がない場合はその代わりに存在する水のブレークダウンが起こって電気パルスエネルギーが消費・散逸するが、Al 粒子がある場合はそれが電極の役割をすることにより上記のエネルギー消費・散逸が起こらないこと、が原因と考えられた。

電気パルス粉碎に関する基礎研究

ここでは、電気パルス粉碎による高純度ガラス濃縮物製造の実用化に資するための基礎的な検討結果を報告する。

ガラス・EVAの粉砕速度論的検討： ポピュレーションバランスモデルを用いてガラス・EVAそれぞれの電気パルス粉碎における速度定数 k を印加回数との関係で表すと図6のようになる。つまり、粉砕初期においてはガラス・EVAともに大きな速度で粉砕が進行するが、粉砕の進行とともに速度定数は次第に低下する。しかし、大凡印加100回まででEVAの粉砕はほぼ終了し、ガラスの粉砕速度は低下しながらも粉砕自体はその後にも継続することが分かる。つまり、印加回数の増大とともに、選択粉碎の際のカットサイズは図7（左）のように低下するが、ガラスのEVAに対する分離効率は次第に向上する（図7（右））ことが分かった。例えば、1000回以上の印加ではカットサイズ0.5 mmでC品位が0.1 wt%以下となることも推定され、板ガラス原料としても使用可能な高純度のガラス濃縮物を製造できる可能性が示唆された。

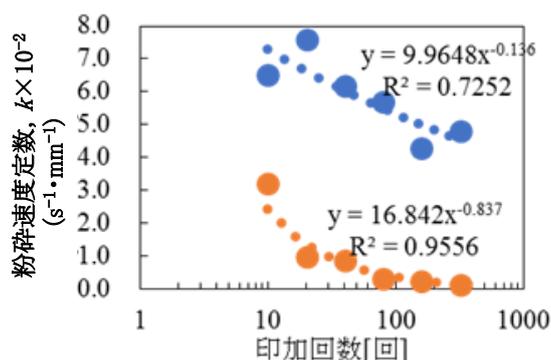


図6 パルス印加回数とガラス（上部プロット）・EVA（下部プロット）の k との関係

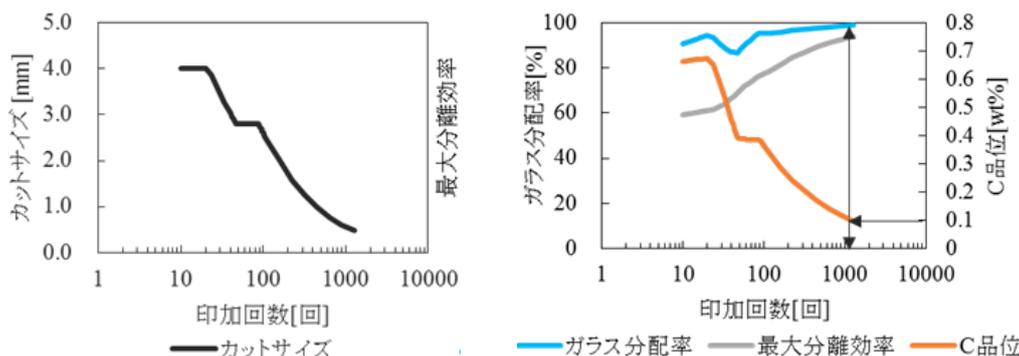


図6 粉砕速度論から予測したガラス・EVAの分離効率が最大となるカットサイズ(左)およびその際のガラス濃縮物へのガラス分配率・最大分離効率・C品位(右)

ガラス・EVA剥離機構のモデル化： EVAの表面にガラス粒子がいずれも直方体形状で相互に接着しており、EDによってEVAは破壊されずガラスのみが破壊されてEVAから剥離すると仮定し、EVAの単位面積あたりのガラス粒子の剥離確率をパルス印加回数の関数として求めた。その結果、同剥離確率は、パルス印加回数とともに特に粉砕初期において急激に減少し、以後ほぼ一定となることが分かった。ガラス・EVAの接着強度は場所によって異なる（ある分布を持つ）ため、その強度の低い部分から選択的に剥離が進行することが推定された。

静電場解析とDBMによる電気パルス進展モデル： 良導体・不良導体の組合せによる人工二成分系試料を想定し、静電場解析によりその系の電場分布を求め、DBM (Dielectric Breakdown Method) によりパルス進展経路の推定を行った。その結果、いずれの組合せによっても、パルスはその系の電場最大位置に沿って進展し、最終的に固体試料の異相境界面に到着することが分かった。

実験室規模での湿式テーブル選別

電気パルス粉砕で得られる1.0 mm以上のガラス濃縮物にさらに湿式テーブル選別を施して、ガラスとEVAの粗粒状態での分離を検討した。湿式テーブル選別は、重小粒子と軽大粒子の分離に特徴を持つ選別法であり、選択粉砕された高比重の細粒ガラス粒子を低比重の粗粒EVAから分離するには最適の比重選別法であると言える。

これら1.0 mm以上の粒群の湿式テーブル選別産物と、ED後の1.0 mm以下の高純度ガラス産物を合わせた場合の、ガラスのEVAに対する分離効率は56.3 %であったが、湿式テーブル選別を加えることによって、1.0-4.0 mm粒群中のガラス成分をEVAから分離できることが分かった。ED+粒度選別 およびED+粒度選別+（粗粒群への）湿式テーブル選別のどちらがより適当かは、ガラス原料の供給先のサイズスペックによると考えられる。

実験室規模の粉砕で得られた高純度ガラス濃縮物のセラミックスタイル原料評価

廃PVパネルをハリタ金属にて一次破碎（シュレディング）および微粉砕、磁選・過電流選別を施して得られたガラス濃縮物に攪拌型粉砕および電気パルス粉砕を施した高純度ガラス産物を用いて、丸美陶材株式会社（岐阜県土岐市）にてセラミックスタイル化試験を実施した。その結果、製造されたタイルの吸水率は、いずれもJISタイル吸水率磁器質の規格内に収まっていた。タイルの外観としては、電気パルス粉砕で得られた高純度ガラスを原料として製造したタイルはいずれも表面粗度が大きく光沢があるが、攪拌型粉砕で得られた原料では、表面粗度が小さく光沢はないが色調は良好であった。電気パルス粉砕で得られた高純度ガラス原料中でEVA含有率と外観を比較すると、EVA含有率の低いものの色彩は良好であるが、その高いものは黒色が強く、両者を混ぜたものではその中間色を示した。なお、攪拌型粉砕で製造したものはEVA含有率が電気パルス粉砕産物より高いにもかかわらず、色彩は良好であっ

た。

以上より、製造されたタイルの外観から判断すると、攪拌型粉砕で製造した高純度ガラス原料は電気パルス粉砕でのそれよりもタイル特性がよいといえる。電気パルス粉砕の産物は、フィードが2.0-13 mmと粒度幅が広く、タイル製造時には粘土と混合して微粉砕を行っているが、粗粒のEVAは室温での粉砕では微粒にならず、それが表面粗度の増大および色彩の黒色化の原因と推定された。

使用済みPVパネルのリサイクルに関するLCA

本プロジェクトにおいて、使用済みPVパネルから高純度ガラス濃縮物を得て、セラミックタイルにリサイクル一連のプロセスについて、LCA (Life Cycle Assessment) を実施した。

表1に、使用済みPVパネルリサイクル全工程におけるCO₂排出量を比較した。ここに、破砕選別①は、ハリタ金属での従来型シュレッダー破砕および物理選別工程であり、破砕選別②が今回導入した新プロセスであり、【1-1】攪拌型粉砕（ラボ機）＋ふるい分け、【1-2】攪拌型粉砕（実機）＋ふるい分け、【2-1】攪拌型粉砕（ラボ機）＋湿式テーブル、【2-2】攪拌型粉砕（実機）＋湿式テーブル、【3】電気パルス粉砕（ラボ機）＋湿式テーブル、【4】電気パルス粉砕（実機）＋湿式テーブル、である。

破砕選別工程②から排出されるCO₂量は非常に小さく（6通りの組合せにおいてリサイクル全プロセスの0.09～0.42%）、プロセス全体でのCO₂排出量はほとんど変わらなかった。すなわち、ガラスの単体分離と濃縮の効果の高いこうした破砕選別工程の導入はCO₂排出量の点からも合理的であることが判明した。

破砕選別工程②のみの各単位操作の組合せについて比較すると、図8のようである。同図より、破砕工程では、攪拌型ミル（インテンシブミキサー）に比べて電気パルス粉砕が、選別工程では、湿式テーブル選別（ウォーターテーブル選別）に比べてふるい分けが、それぞれCO₂排出量が低く、【2-1】のインテンシブミキサー＋ウォーターテーブルの組み合わせが温室効果ガス排出量が最も多く、【4】パルス破砕＋ふるい選別が最も少なく算定された。

表1 プロセスフロー別のPVパネル処理1 tあたりの温室効果ガス排出量比較

(単位：kg-CO_{2eq}/t-PVパネル)

	【1-1】	【1-2】	【2-1】	【2-2】	【3】	【4】
破砕選別①	40.28	40.28	40.28	40.28	40.28	40.28
破砕選別②	3.40	2.63	4.33	3.56	0.96	1.88
坏土製造	211.87	211.87	211.87	211.87	211.87	211.87
セラミックタイル製造	713.46	713.46	713.46	713.46	713.46	713.46
輸送	71.67	71.67	71.67	71.67	71.67	71.67
計	1,040.68	1,039.91	1,041.61	1,040.84	1,038.24	1,039.16

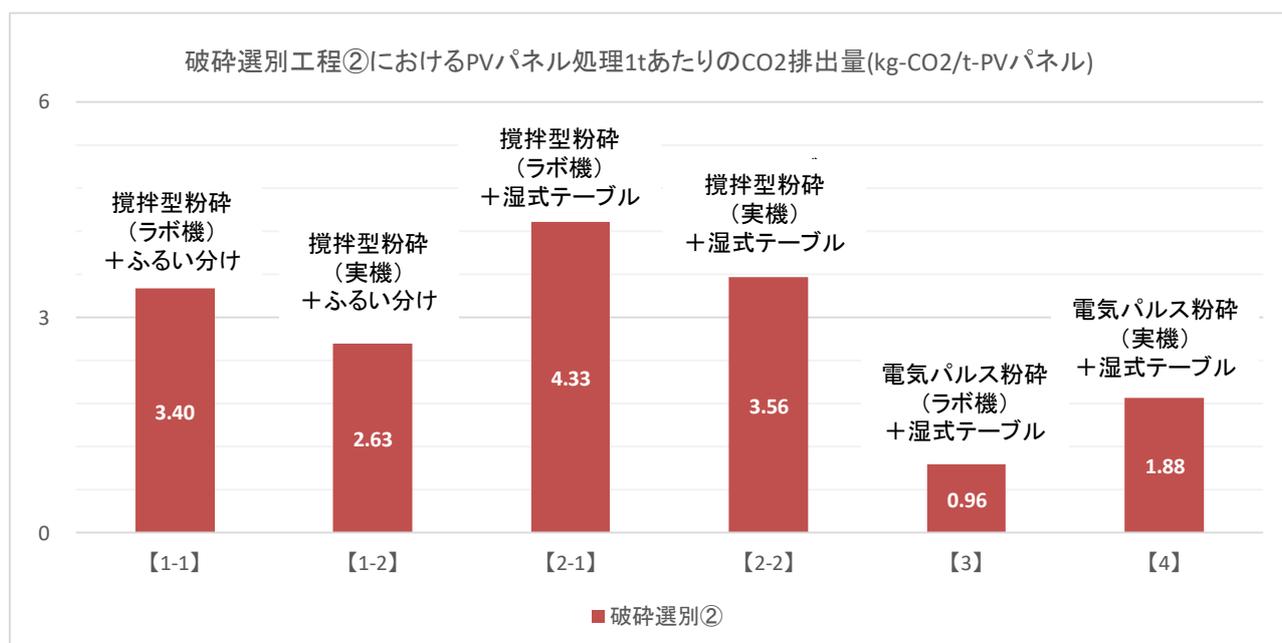


図8 破砕選別工程②におけるPVパネル処理1tあたりの温室効果ガス排出量比較

(2) 廃PVパネルの実用設備での破砕・選別の最適化および攪拌型粉砕の実証試験

2000 HPシュレッダープラントにおけるガラス濃縮物の製造と操業改善

使用済みPVパネルの実用化プラント活用による大量処理が可能なりサイクル技術開発を目的として、ハリタ金属・射水リサイクルセンターに既設の2000 HPシュレッダープラントにて同パネルの破砕・選別実験を実施し、本事業の検討対象物となるガラス濃縮物の製造を行った。また、その破砕・選別状況を把握するとともに、ガラス濃縮物製造のための改善を行った。

通常の操業では、使用済みPVパネルからの銀の濃縮を主目的として操業が行われており、この際のガラス濃縮物の歩留りは、30.7%と非常に低かった。この原因は、シュレッダー破砕時のダスト吸引風量が、高品位金属分の回収には適するが、金属に比べて比重の低いガラスの多くがダストとして吸引されてしまうことであった。そこでこの点を改善すべく、ダストの吸引力の低減およびダンパーの調整を行った結果、ガラス濃縮物の歩留りを55.8%まで向上させることができた。しかし、得られたガラス濃縮物中には、PVパネルのバックシートを構成するプラスチック（PET）が比較的多く混入することとなり、有機C低減を目指す本事業の目的から外れることとなった。そこで、ダスト吸引の条件を以前のものに戻し、シュレッダー運転手のこれまでの経験を生かして、プラスチック類は吸引するがガラスは吸引しないようなPVパネルのフィード方法を見出した結果、ガラス濃縮物の歩留りは52.3%と従来に比べて73%の向上を実現することができた。

実用規模攪拌型粉砕機によるガラス濃縮物中のガラス・EVAの単体分離とふるい分けによる分離

ハリタ金属所有の2000 HPシュレッダープラントにて製造されたガラス濃縮物を丸美陶料所有の攪拌型粉砕機（インテンシブミキサー、DE-14型）にて粉砕し、その後のふるい分けによって、ガラスとEVAの分離性を検討した。攪拌型粉砕の条件は、早稲田大学が実験室規模の同型装置にて見出したアジテータ端部の周速が実機のそれと同等となるように設定した。ふるい分け後の結果を表2に示す。

同表より、ガラスのEVAに対する最大分離効率はアジテータ回転速度600 rpm、粉砕時間3 minの時に49.2%であった。実験室規模での攪拌型粉砕の場合の最大分離効率は51.8%であり、実機でもほぼ同様の値が得られることが分かった。また、細粒側へのガラス回収率は実験室規模での試験よりも高いものの、細粒側産物中のEVA含有率は実験室規模試験よりも高いことも判明し、実用規模の試験においては、粉砕時間をもう少し長くする必要があると考察された。その後、粉砕時間5 minでの粉砕試験を行い、より良い結果が得られている。

表2 実機攪拌型粉碎実験におけるガラスに対するEVAの最大分離効率、その際のカットサイズ、細粒側へのガラス回収率（粉碎時間 3 min）

回転速度 [min]	最大分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
500	36.10	2.8	75.57	2.33
	46.00	2.0	45.95	1.30
600	49.16	2.8	75.61	1.55
	41.87	2.0	47.34	0.52

実用規模湿式テーブル選別によるガラス濃縮物の製造

丸美陶料にて攪拌型粉碎とふるい分けにより得られたガラス濃縮物試料約1,200kgのうち、572kgをハリタ金属に送り、同社が保有する実用規模の湿式テーブル（Wilfley 7000型）にてガラスとその他不純物の分離を試みた。その結果、比較的純度の高いガラス濃縮物が歩留り50～55%にて得られたが、湿式テーブルが実装業中のものを使用せざるを得なかったため、通常操業時の不純物の混入が多く、ガラスとごく微量に含まれるEVAの分離に関する詳細なデータを得ることはできなかった。EVAは湿式テーブルでは最軽量物（ダスト）中に紛れているはずだが、その含有率の分析には至らなかった。しかし、通常操業で銅等の重産物としての分離に使用されている湿式テーブルが、比較的軽比重のガラスの濃縮にも適用可能であることが判明した。

2000 HP型シュレッダーにて製造されたガラス濃縮物の乾式・湿式テーブル選別

以上は、ハリタ金属が従来所有していた2000 HP（横型）シュレッダーを主破砕機とする破砕・選別プラントにより製造されたガラス濃縮物であったが、ハリタ金属がこの時機に新たに導入した2000 HP型シュレッダーを主破砕機とする破砕・選別プラントにより製造されたガラス濃縮物についても検討を行った。このシュレッダーは最近のシュレッダー業者の実績によると、破砕産物の単体分離性が比較的良好であることが知られているものであり、この工程で製造されたガラス濃縮物は横型シュレッダーのそれに比べてガラス品位が高いことが期待された。なお、このシュレッダーでは、横型シュレッダープラントに比べて細粒を製造する仕様となっており、ガラス濃縮物は「13 mmアンダー」でなく「6 mmアンダー」として製造されている。ここでは、この「6 mmアンダー」を2.0～6.0 mmおよび0.5～2.0 mmの2粒群に分け、そのそれぞれについて、湿式テーブルに加えて乾式テーブルでの実験も行い、両者を比較・検討した。結果の概要を以下に記す。

- ・ 2.0～6.0mmにおいては湿式・乾式でのガラス濃縮産物の粒度分布にはほとんど違いが見られないが、0.5～2.0 mmでは、湿式テーブル選別のガラス製品の方が0.5 mm以下の粒群の割合が高い傾向が見られた。これは、原理的に乾式に比べて湿式の方が分離精度の良いことが知られており、湿式テーブル選別では、乾式テーブル選別では回収できない細粒側も回収可能であることが示されたと言える。
- ・ 2.0～6.0 mm粒群でのガラス濃縮物では、その中の粒群によってガラス含有率にはばらつきがあるが、合計では乾式で93.4 wt%、湿式で95.0 wt%と若干であるが後者の方が品位の高いことが分かった。一方、0.5～2.0 mm粒群については、合計するとガラス品位は乾式で97.6 wt%、湿式で97.2 wt%とほぼ同様の結果となった。
- ・ 以上より、運転コスト低い乾式テーブル選別においては、若干、湿式テーブル選別のせいせきにはおとるものの、ほぼ同等のガラス濃縮産物の得られることが判明した。

実用規模プラントで製造されたガラス濃縮物の評価

ここでの出発材料は、ハリタ金属で型シュレッダープラントにて製造されたガラス濃縮物「6 mmアンダー」産物に湿式テーブル選別を施して得られた0.5～2.0 mm粒群（以下試料A）および2.0～6.0 mm粒群（以下試料B）である。

セラミックタイル評価： 両試料を基に粘土等所定成分を配合し、ポットミルにて18 h摩砕して作成し

た微粉スラリーを乾燥・粉碎・成型後に電気炉に入れ、温度1000、1100、1200℃として焼成して製造したタイルの外観を図9に示す。試料Aの調合試料では、1100℃で吸水率0%、試料Bの調合試料では1200℃で吸水率0%となった。なお、試料A調合試料の1200℃での焼成条件では、原料の一部が熔融してしまい焼成用の台から取れなくなったため、試験後の試料が得られなかった。タイル原料としてガラスを調合することにより焼成温度が低温化できることが知られており、試料Aの調合原料ではガラス含有率が高く、試料Bに比べてその融点が低かったと推測された。なお、いずれの場合も、吸水率・色彩および光沢はセラミックタイルとしてほぼ問題のないものが製造できることが分かった。

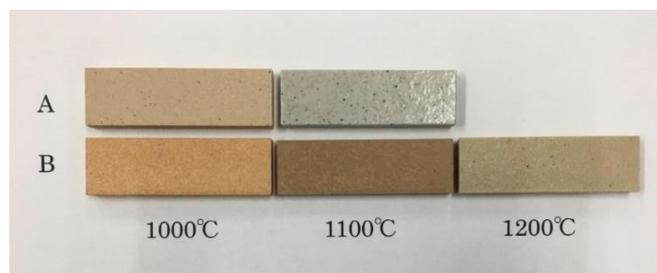


図9 試料A（上）、試料B(下)を調合した原料の焼成試験後のタイル外観（いずれも長径：80 mm）

セラミックブロック評価： 所定成分との調合した試料を焼成してセラミックブロック作成した。その外観を図10に示す。いずれの試料も焼成による収縮は4辺ともに約7%程度であり、生地色は茶褐色SP粉焼成色となった。また、一部には、各面から1~5 mm大の乳白色のガラスや金属酸化物が表面に突出した部分が認められた。特に、混在物を選別除去しなかった試料Cではそれが顕著であった。外観上、形状品質上に問題があり、現状のままではセラミックブロック原料としては不適であると判断された。今回の試験では、実用規模の操業中の装置のみを用いて製造されたガラス濃縮物を出発物質としたため、EVA以上にその他の不純物の混入が多かったことが主たる原因と考えられた。本事業で研究対象となった攪拌型粉碎や電気パルス粉碎を施して、構成成分の単体分離・不純物除去が行うことにより、これらの問題をクリアできる可能性が非常に高いと言える。電気パルス粉碎は世界的にもリサイクル分野での実用化例は1プラントのみだが、攪拌型粉碎はすでに実用機が存在するため、特にその利用が大いに期待される。

なお、セラミックタイル・セラミックブロック製造にあたっては、試料の微粉碎が不可欠であり、攪拌型粉碎や電気パルス粉碎ではガラスの選択粉碎によりEVAとの分離が促進されるため、この工程の微粉碎（摩砕）の負荷を大きく減じることが可能と思われた。ただ、グラスファイバー・板ガラス原料に求められるのは逆に粗粒のカレットであり、この点では、本事業の開発研究工程はセラミックタイル・ブロック原料の製造が最も適していると考えられる。



図10 焼成された試料A(左)、試料C（中）、試料C'（右）のセラミックブロック

グラスファイバー原料評価： 上記2試料を、大手グラスファイバーメーカーに依頼して、異物試験・組成試験・粒度試験・腐食試験（溶解装置腐食・ガス腐食・酸処理による表面観察・腐食量測定・溶出成分分析等）評価を行ったところ、両試料ともに、事前に数mm程度の金属・有機物等の異物を取り除けば、従来の原料に30 wt%の比率を混合しても、装置的にはグラスファイバー製造に供

することは問題のないことが判明した。

以上の各種原料化評価試験の結果、本事業での検討対象である攪拌型粉砕・電気パルス粉砕を経ずに製造した試料においては、そのままではセラミックタイル原料としての可能性のみがあり、セラミックブロック・グラスファイバー原料としては不適であることが分かった。しかし、これら原料化の前に、手選等にて数mm程度の金属・有機物等の異物を取り除けば、セラミックタイルのみならず、セラミックブロック・グラスファイバー原料としても十分な品質のものが製造できることが判明した。もちろん、そのためには攪拌型粉砕・電気パルス粉砕等にて各種成分の単体分離を促進することが必要であり、これら技術の導入によって、より高純度のガラス濃縮物が製造できると期待された。

4（補足）．研究計画時の目標の達成度

研究計画時に設定された処理フローの概要を以下に記し、項目別に本研究における実施の状況およびその達成度を記した。

- (1) 廃棄されたPVパネルの合理的な収集システムの提案を行う。廃PVパネルが排出される前にリユース用とリサイクル用を判別して別途収集する、PVガラスと液晶ガラスとは保管場所を分けるなどの対策を練る。
 - 本研究においては、実施予定でなかったが、廃PVパネルを合計6670枚収集することにより、収集の実態をある程度把握することができた。
- (2) 廃PVパネル類を、実用プラントを有するハリタ金属にて破砕・選別し（既存実用設備にて）、①各種金属類、②EVA、③EVA付きガラス、等に高度選別する。
 - ハリタ金属における操業の改善を行い、金属類の回収率を低下させることなく、ガラス濃縮物の回収率を30.7 %から52.3 %に向上させることができた。＜達成度：100 %＞
- (3) 研究の主対象である上記③からのEVA等不純物の除去を目的として、①攪拌型粉砕、電気パルス粉砕を適用するとともに、その粉砕機構解明と効果の特徴の検討を行う。また、この2種の粉砕法は今後のリサイクル分野への応用が期待されるので、②各種人工試料等による機構解明に特化した基礎研究も実施する。さらに、③実用機の入手が比較的容易な攪拌型粉砕については、得られた知見を基にパイロット規模での実証試験を行い、各種成分（特にガラスとEVA等不純物）の単体分離性の評価を行う。
 - ① 廃PVガラスからのEVAの除去における攪拌型粉砕・電気パルス粉砕両方法に適用に関して、各種条件の影響を把握し、その最適条件を決定した。＜達成度：100 %＞
 - ② 電気パルス粉砕に関して、各種の人工二成分系試料を作成し、その静電場解析とDBMによりパルスの進展経路を予測し、異相境界面での選択的破壊機構を明らかにした。＜達成度：100 %＞
 - ③ 実験室規模での最適条件から実用規模の攪拌型粉砕機における最適条件を導き出し、その運転において、実験室規模と同様のガラスのEVAに対する分離効率を得た。＜達成度：100 %＞
- (4) ①上記で得られた高ガラスからファイバーおよびセラミック配合タイルを製造する新たなプロセスを開発する。また、②製品に見合ったガラス受入基準を作成し、As, Pb, Cd,等の含有もチェックする。
 - ① 研究計画時に想定したものと同様の処理プロセスを提案し、その各単位操作の最適条件を決定した。＜達成度：100 %＞
 - ② セラミック原料として受入れ基準を協力研究機関であるガラス再資源化協議会と、グラスファイバー受入れ基準をガラス繊維協会および某大手グラスファイバーメーカーと、それぞれ協議し、前者については本研究においてほぼ問題ないことを確認し、グラスファイバーとしての品質および同製造装置への悪影響がほぼないことを確認したが、業界としての原料品質のコンセンサスが得られていない状況であり、受入れ基準の作成には至らなかった。＜達成度：80 %＞
- (5) 提案されたプロセス全体のLCAを行うとともに、同処理フローの国内での適用性について検討し、物

流を含めた最適化システムを構築する。

- セラミックタイル製造における本研究での提案フローを作成し、追加すべき粉碎・選別工程のCO2排出量が全工程の多くとも1%以下であることを確認して、省エネルギーの立場からもその適用性の高いことを証明した。なお、PVパネルの排出には災害での廃棄、FIT終了後の排出量の変化等、不確定要素が大きく、国内における物流システムの構築には至らなかった。〈達成度：80%〉

本研究では、研究計画時に設定した上記目標項目に対して、多くの追加的成果を上げることができたので、その概要を以下に記す。

- (5) 電気パルス粉碎における異相境界面の選択破壊機構について、本研究での対象試料であるガラス・プラスチックの組合せに限らず、良導体同士、良導体+不良導体の組合せについても、静電場解析とDBMを駆使して、パルスの進展経路予測を可能とするとともに、二成分系人工試料を作成してそれを証明した。この機構解明は、今後の電気パルス粉碎の資源循環における利用拡大の大きな礎になると確信している。
- (6) ハリタ金属型シュレッダープラントより製造されたガラス濃縮物について、当初予定されていた湿式テーブル選別のみならず、実操業においてより簡易的で安価な乾式テーブル選別を実施し、湿式テーブルとほぼ遜色のないガラス濃縮物を得ることに成功した。
- (7) 本年度の対象試料は、ハリタ金属の横型シュレッダープラントにて製造されたガラス濃縮物が対象であったが、ハリタ金属に2018年度に新たに導入された型シュレッダープラントにて製造されたガラス濃縮物について、そのままセラミックタイルおよびセラミックブロックの原料適正を評価し、それらに混入する比較的粗い金属・プラスチック類を除去すれば、両者ともに十分なポテンシャルを有することを確認した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

攪拌型粉碎： この手法によるPVパネル処理に関してはこれまでに知見がなく、ガラスからEVAを剥離する表面粉碎が有効であろうと予測していたが、本研究より、EVAに付着しているガラスを選択的に体積粉碎してEVAの付着力を低減させ、それを表面（攪拌型）粉碎によってEVAから剥離させることが有効であることが確認された。このことは、PVパネル中のEVAとガラスの単体分離には、適切な体積粉碎と表面粉碎との割合を達成させることが重要であることを示唆しており、今後の最適プロセス設計への指針として重要な知見と言える。また、その手法を用いて実用規模での攪拌型粉碎を実施したのは世界初の試みであり、その意義は大きいと考えている。

電気パルス粉碎： 大量処理が可能なシュレディングと物理選別を組み合わせ得られたガラス濃縮物に電気パルス粉碎を適用して高純度ガラス原料を製造するプロセスは世界初の提案であり、また、その結果も、実験室規模ではあるが、攪拌型粉碎を上回るものとなったことは意義ある知見と考えている。また、この手法による各種試料の異相境界面選択破壊については数々の報告がなされているが、その基本原理についてはほとんど不明の状況にあったが、本研究では、静電場電場解析とDBMシミュレーションを組み合わせることで、複雑系を含む各種試料におけるストリーマの到達点を予測できること分かった。この成果は、今後の本手法のリサイクル・鉱石処理そしてその他の応用において画期的知見になると考えている。

湿式テーブル選別： 従来、主として鉱石処理に用いられてきた選別技術だが、本事業で得られる小重ガラス粒子と大軽EVA収支の分離には原理的に最適の比重選別法であり、これを適用することによって、ガラス・EVAの分離が画期的に向上することを見出した。特に、フィード中の数wt%程度のEVA粒子を1wt%以下にでき、こうした少量の精密分離に適用できたことは、この選別法の応用範囲を大幅に広げる意義を持っている。

(2) 環境政策への貢献

本事業では、廃PVパネルのリサイクルに関して、大量処理が可能でかつ高純度のガラス原料を製造で

きるプロセスが提案できた。特にこうした高度な粉砕と物理選別を組み合わせる技術は省エネルギー性が高く、今後の経済合理性のあるPVパネルリサイクルプロセスとして有望と考えている。特に今回のLCAでは、実用規模の工程においても、そのCO₂排出量はセラミックタイル製造工程全体の0.09～0.42%と極小であり、その導入によってほとんど環境負荷を生じないことが判明し、今後のリサイクル技術開発において、こうした固体粉砕・選別技術導入の有効性が環境面からも明らかとなった。

<行政が既に活用した成果>

本研究で得られた知見の一部を活かし、東京都の大学研究者による事業提案制度へ「太陽光パネル高度循環利用に対する東京モデルの提案：技術と社会システムの最適パッケージの追求」の提案に至り、採択された。2020年度からは東京都事業として、本研究で得られた知見を活かした分離技術の一部が比較検討される予定である。

<行政が活用することが見込まれる成果>

上記(2)でも指摘したように、粉砕・選別技術のような固体状態での成分分離技術は、従来、その薄弱な理論的背景と低い信頼性のために、資源循環技術の核と言われながら、なかなかその進展が見られなかった。本事業において、比較的精緻な分離においても、CO₂発生量を極小に抑えながらそれが効果的に機能することが明らかとなった。今後の資源循環技術開発において、行政としてもこうした伸びしろのある技術開発の高度化に多大なる支援を送るべきと考えている。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) S. Owada, R. Suzuki, Y. Kamata, T. Nakamura: Novel Pretreatment Process of Critical Metals Bearing E-Scrap By Using Electric Pulse Disintegration, J. Sustainable Metallurgy, pp. 1-6, Mar. 17, 2018

*本学術雑誌は、Springerが最近の新たなMetallurgyの重要性に鑑みて2015年に刊行したものであり、現状ではIF (Impact Factor)は発表されていないが、多くの研究者間では、2020年度には2.5～5.0のIFとして発表されることが予想されている。

<査読付論文に準ずる成果発表>

<論文(査読あり)>

- 1) S. Owada, R. Suzuki, Y. Kamata, T. Nakamura: Novel Pretreatment Process of Critical Metals Bearing E-Scrap By Using Electric Pulse Disintegration, J. Sustainable Metallurgy, pp. 1-6, Mar. 17, 2018

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) S. Owada: "Smart Comminution" and "Smart Sorting" for Sustainable Recycling, Plenary Lecture, Special Symposium on Living Waste Recycling Carbon Value System in the 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Keynote Lecture, Pyeongchang, Korea, pp. 3-24, Oct 15, 2019
- 2) Y. Matsumoto, S. Omi, S. Owada, M. Harita, H. Terasaki, S. Kato: Production of High Purity Glass from Wasted Photovoltaic Panels by Electrical Disintegration, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 347-351, Oct 15, 2019
- 3) T. Senga, S. Maruyama, S. Omi, S. Owada, T. Namihira: Preferential Breakage Mechanism at Phase Boundary in the Electrical Disintegration -in case of an artificial

- conductor/insulator binary sample-, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 337-341, Oct 15, 2019
- 4) S. Owada, C. Tokoro, Y. Matsumoto, S. Omi, M. Nishi, M. Harita, and S. Kato: Novel Process of Glass Recycling in Wasted PV panels, Invited Lecture, 2nd Int. Conf. & Expo. Recycling, Osaka, p.26, Oct. 7, 2019
 - 5) S. Owada, T. Suwa, and N. Sasai: Concentration of Cathode Materials from Post-Consumer Lithium ion Battery by Roasting, Selective Grinding and Physical-Physicochemical Separation, Plenary Lecture, 2nd Inter Conf & Expo on Recycling and Waste Management, Rome, May 22, 2019
 - 6) A. Yoshihara, T. Senga, S. Maruyama, S. Owada: Clarifying the Behavior of Selective Breakage in Electrical Disintegration by using Electrostatic Field Analysis and Dielectric Breakdown Model, 16th Korea/Japan Symp. Resources Recycling & Material Science, p.133, May 17, 2018
 - 7) Y. Matsumoto, S. Owada, M. Harita, and S. Kato: Effect of Electrical Disintegration for the Production of High Purity Glass from Wasted Photovoltaic Panels, Study on determining optimum conditions of roasting and electrical disintegration for removing impurity elements of non-ferrous metals smelting from wasted PCBs, 16th Korea/Japan Symp. Resources Recycling & Material Science, p. 155, May 17, 2018
 - 8) T. Suwa, N. Sasai, and S. Owada: Concentration of Cathode Materials from Spent Lithium Ion Battery by Combining Roasting, Selective Crushing, Sieving, Magnetic Separation, and Flotation, 16th Korea/Japan Symp. Resources Recycling & Material Science, May 17, 2018
 - 9) A. Yoshihara and S. Owada: Electrostatic field analysis for clarifying the detachment mechanism of Ta-capacitors from wasted PCBs by electrical disintegration, MMIJ/EARTH 2017, Sapporo, pp. 1-6, Sept. 26, 2017
 - 10) S. Owada, S. Terada, T. Senga, and T. Namihira: Investigation on the Energy Distribution of Electrical Disintegration, Conference of Metallurgist (COM) 2017, no. 9627, p. 5-6 (1-7) , Vancouver, Aug. 28, 2017
 - 11) S. Owada: Technical and Process Innovation in Resources Recycling by Applying Intelligent Comminution and Physical Separation, European Metallurgical Conference (EMC) 2017, Plenary Lecture, pp. 1-9, Leipzig, Germany, June 27, 2017
 - 12) T. Senga, S. Terada, and S. Owada: Study on the Energy Consumption at Water and Solid Breakdown in Electrical Disintegration, 15th Japan/Korea Inter. Symp. on Resources Recycling and Material Science, Osaka, p. 276, April 19, 2017
 - 13) 大和田秀二： 日本における太陽光パネルリサイクル技術最新動向，太陽光パネルリサイクルセミナー～国内外の技術動向と最新の取り組み～，中部経済産業局，AP 名古屋，pp. 1-15, 0218, 2020
 - 14) 大和田秀二： サーキュラーエコノミーにおける金属リサイクル技術の動向，廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会，令和元年度第 1 回廃棄物処理・リサイクル IoT ビジネスセミナー，TKP 虎ノ門駅前カンファレンスセンター，0620, 2019
 - 15) 大和田秀二： PV・液晶パネル等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発，平成 30 年度循環型社会形成推進研究発表会・シンポジウム，pp.31-37, 1226, 2018
 - 16) S. Owada: Next Generation Metal Recycling Process, Inter. Symp. on Resource Sciences and Engineering, JICA Global Plaza, Tokyo, pp.1-19, 1121, 2018
 - 17) 大和田秀二： 資源循環のための次世代型分離技術プロセスー金属回収を中心としてー，第 16 回レアメタル資源再生技術研究会，名古屋市工研，0720, 2018
 - 18) 大和田秀二・所千晴： 製品ライフサイクル管理とそれを支える革新的解体技術開発による統合循環生産システムの構築：電気パルス解体への期待，プラスチックリサイクル化学研究会，東工大，

0613, 2018

- 19) 大和田秀二： 資源循環における次世代型分離技術，グローバル産学連携シンポジウム，北京聯合大学健康与環境学院，pp. 1-19, 1208, 2017
- 20) C. Tokoro, "Novel electrical disintegration for selective dismantling between multi-material", ICACC 2020, (1月26日-29日, Daytona beach, USA), 2020, ICACC-S8-021-2020. (Invited Lecture)
- 21) C. Tokoro, S. Murakami, I. Daigo, Y. Kikuchi. "Proposal of "Tokyo Model" for Advanced Reuse/Recycling System of Photovoltaic Panels", EcoDesign2019, (11月25日-27日, パシフィコ横浜, 神奈川県), 2019, D9-1.
- 22) C. Tokoro. "Novel electrical disintegration for selective dismantling of spent products (Invited lecture)", GFMAT-2(July 21-26, Toronto, Canada). 2019, GFMAT-005-2019, p.5. (Invited Lecture)
- 23) N. Nishi, Y. Tsunazawa, S. Kato, M. Harita, S. Owada, C. Tokoro. "Application of the eccentric stirring milling on the efficient glass recovery from photovoltaic panel", GFMAT-2(July 21-26, Toronto, Canada). 2019, GFMAT-007-2019, p.5.
- 24) S. KATO and I. DAIGO: "Technical Feasibility of Recycling PV Panel Glass to Ceramics and Tiles", 11th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2019), Yokohama, Japan, p.D10-1, 2019 (加藤聡)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 梅津えみ, 松本祐一郎, 尾見苑子, 大和田秀二, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡： 廃太陽光パネルからの高純度ガラス回収における電気パルス粉砕の適用性およびその機構解明, MMIJ 春季大会, pp. 1-6, 0317, 2020
- 2) 尾見苑子, 大和田秀二： 電気パルス粉砕における不良導体同士の異相境界面優先破壊機構解明, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
- 3) 松本祐一郎, 尾見苑子, 梅津えみ, 大和田秀二, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡： 電気パルス粉砕による太陽光パネルからの高純度ガラス回収, 資源・素材学会関東支部「第16回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0802, 2019
- 4) 西麻依子, 綱澤有輝, 加藤聡, 張田真, 大和田秀二, 所千晴： 偏心型攪拌ミルによる廃太陽光パネルからのガラス粉砕の速度論的考察, 粉体工学会春季大会, 早大国際会議場, 0509, 2019
- 5) 千賀太喜, 丸山修平, 大和田秀二, 浪平隆男, 松田樹也： 良導体-不良導体界面における電気パルス粉砕の異相境界面優先破壊機構に関する研究, 資源・素材学会春季大会講演集, 千葉工大, vol. 6, no. 1, pp. 1-7, 0308, 2019
- 6) 松本祐一郎, 尾見苑子, 大和田秀二, 張田真, 寺崎 樹, 加藤聡： 電気パルス粉砕および湿式テール選別を利用する大量処理かつ高純度ガラス製造可能な PV パネルのリサイクルプロセス開発, 資源・素材学会春季大会講演集, 千葉工大, vol. 6, no. 1, pp. 1-6, 0308, 2019
- 7) 千賀太喜, 丸山修平, 大和田秀二, 浪平隆男： 人工二成分系試料の電気パルス粉砕における印加電圧・電極試料間距離の影響, 資源・素材学会関東支部「第15回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0803, 2018
- 8) 大和田秀二, 松本祐一郎, 尾見苑子, 張田真, 加藤聡： 電気パルス粉砕を用いた太陽光パネルからの高純度ガラス製造, 資源・素材学会関東支部「第15回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0803, 2018
- 9) 西麻依子, 深來健一郎, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡, 大和田秀二, 所千晴： 偏心型攪拌ミルを用いた廃太陽光パネルからのガラス回収の基礎的検討, 資源・素材学会関東支部「第15回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0803, 2018
- 10) 松本祐一郎・大和田秀二・張田真： 太陽光パネルからの高純度ガラス製造における電気パルス粉

砕の効果, MMIJ 春季大会 (東京), vol. 5, no. 1 pp. 1-6, 0328, 2018

- 11) 吉原彩華・千賀太喜・丸山修平・林芳樹・大和田秀二： 静電場解析および絶縁破壊モデル (DBM) による電気パルス粉碎選択破壊挙動の解明, MMIJ 春季大会 (東京), vol. 5, no. 1, pp. 1-7, 0327, 2018<学生優秀発表賞受賞>
- 12) 大和田秀二： 資源循環における分離技術の将来像－東北大学・金属資源プロセス研究センターへの期待－, 資源・素材学会秋季大会 (MMIJ/EARTH 2017), pp. 1-20, 0926, 2017
- 13) 張田真： 太陽光パネルリサイクルの技術開発と処理状況、第1回資源リサイクルEXPO、東京ビックサイト、2019
- 14) M. Harita: Japan and Thai environment week 2020, Ministry of the Environment, Japan and Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand, Bangkok, 2020
- 15) M. Harita: DGE-METI WG ON NEW ENERGY SYSTEMS, DGE METI, Grenoble, 2020
- 16) 張田真： 令和元年度太陽光パネルリサイクルセミナー 国内外の技術動向と最新の取り組み、経産省中部経済産業局、2020

7. 研究者略歴

研究代表者： 大和田秀二

早稲田大学理工学部資源工学科卒業、早稲田大学大学院理工学研究科資源及金属工学専攻博士前期・後期課程修了、現在、早稲田大学理工学術院教授

研究分担者： 所千晴

早稲田大学理工学部資源工学科卒業、東京大学大学院工学系研究科修士・博士課程修了、現在、早稲田大学理工学術院教授

研究分担者： 張田真

摂南大学薬学部薬学科卒業 (薬剤師)、現在、ハリタ金属株式会社代表取締役

II. 成果の詳細

II-1 攪拌型粉砕・電気パルス粉砕による廃PVパネル破砕・選別産物からの高品質ガラス製造およびそのファイバー・タイル製造への応用と全体プロセスの評価

早稲田大学理工学術院 創造理工学部環境資源工学科
 資源循環工学研究室 大和田秀二（教授）
 環境資源処理工学研究室 所千晴（教授）

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：66,790千円（研究経費は間接経費を含む）
 （平成29年度：22,395千円、平成30年度：21,500千円、令和元年度：22,895千円）

【要旨】

本研究項目においては、使用済みPVパネルからの高純度ガラス回収を目的として、当研究室が従来検討してきた破壊の選択性に富む攪拌型粉砕および電気パルス粉砕という新しい粉砕技術を適用した。特に、ガラスにEVAが接着している状態から両者を単体分離し、その後この分離に最も適している比重選別法である湿式テーブルを適用して、品質的にはグラスファイバー、セラミックタイル・ブロックの原料として使用できる高純度ガラスを製造した。セラミックタイル製造工程に関するLCAの結果からは、このプロセスは全体プロセスに比べて多くとも1%以下のCO2排出の超省エネルギー的であることも証明された。また、今後、資源循環分野で特にその適用が期待される攪拌型粉砕および電気パルス粉砕の選択破壊機構についても基礎研究を行い、新たな知見を得た。

【キーワード】

PVパネル、高純度ガラス製造、攪拌型粉砕、電気パルス粉砕、LCA

1. はじめに

欧州等では、使用済みPVパネルの多くは破砕・選別され、そこから銀を回収するリサイクルプロセスが主流であり、PVパネル全体の6～7割を占めるガラスの回収はほとんど行われていない。日本でも、上記のようなプロセスはいくつかのリサイクラーで行われているが、やはり主目的は銀回収であり、副産物で生産されるガラス濃縮物ではまだ多くの異物が含まれており、特にガラスとEVAの接着は強固なため、喫緊の課題は、このガラスとEVAの単体分離そして相互分離にある。本研究では、その単体分離に攪拌型粉砕および電気パルス粉砕を、その相互分離に最も相応しい湿式テーブル選別をそれぞれ適用し、大量処理が可能でかつ高純度ガラス濃縮物の製造を可能とするプロットの開発を試みた。

2. 研究開発目的

本事業では、商業規模でのシュレディングと物理選別によって製造されるガラス濃縮物から、高純度ガラス原料を製造することを目的とする。ガラス濃縮物にはまだ少なからずEVAがガラスと付着した状態で存在するので、これらに力学的エネルギーを利用する攪拌型粉砕法および電気的エネルギーを利用する電気パルス粉砕を適用し、ガラスとEVAの分離を図る。この両粉砕法は、攪拌型粉砕および異相境界面優先破壊を促進する方法として近年注目を集めており、当研究室でも検討を続けているが、その詳細な粉砕機構は不明であり、本研究では、これら両粉砕法のガラス濃縮物への適用とともに、それらの詳細機構の解明も行う。また、両法によって製造された高品位ガラス原料のセラミックタイル原料としての製造やグラスファイバー製造の原料としての特性について検討するとともに、こうした新プロセスが導入された際のLCAについて検討する。

3. 研究開発方法

廃PVパネルを対象として、その各種有価成分の回収技術、特にこれまでその品質の低さにより活用が困難であったガラス類の高純度での回収とその利用（製品化）技術について検討し、合理的な処理フローを提案する。以下にそのフローの概要を説明する。このフローは、PVパネルと特性の類似する液晶パネル等他の積層型薄膜ガラスについても適用が可能と考えている。

- (1) 廃棄された PV パネルの合理的な収集システムの提案を行う。廃 PV パネルが排出される前にリユース用とリサイクル用を判別して別途収集する。（この部分は本事業の対象でない）
- (2) リサイクル用の廃 PV パネル類を、実用プラントを有するハリタ金属にて破碎・選別し（既存実用設備にて）、①各種金属類、②EVA、③EVA 付きガラス、等に高度選別する。この際、ガラスの回収率を高めるためのシュレッダー破碎（風力選別）条件の改善を行う。
- (3) 研究の主対象である上記③からの EVA 等不純物の除去を目的とて、攪拌型粉碎および電気パルス粉碎を適用するとともに、その粉碎機構解明と効果の特徴の検討を行う。また、この 2 種の粉碎法は今後のリサイクル分野への幅広い応用が期待されるので、とくに後者については、各種人工試料等による機構解明に特化した基礎研究も実施する。さらに、実用機の入手が比較的容易な攪拌型粉碎については、得られた知見を基に実用規模での実証試験を行い、各種成分（特にガラスと EVA 等不純物）の単体分離性の評価を行う。
- (4) 上記で得られた高純度ガラスからファイバーおよびセラミック配合タイルを製造する新たなプロセスを開発する。
- (5) 提案されたプロセス全体の LCA を行うとともに、同処理フローの国内での適用性について検討し、物流を含めた最適化システムを構築する。

本処理フローの概要を図3.1.1に記した。

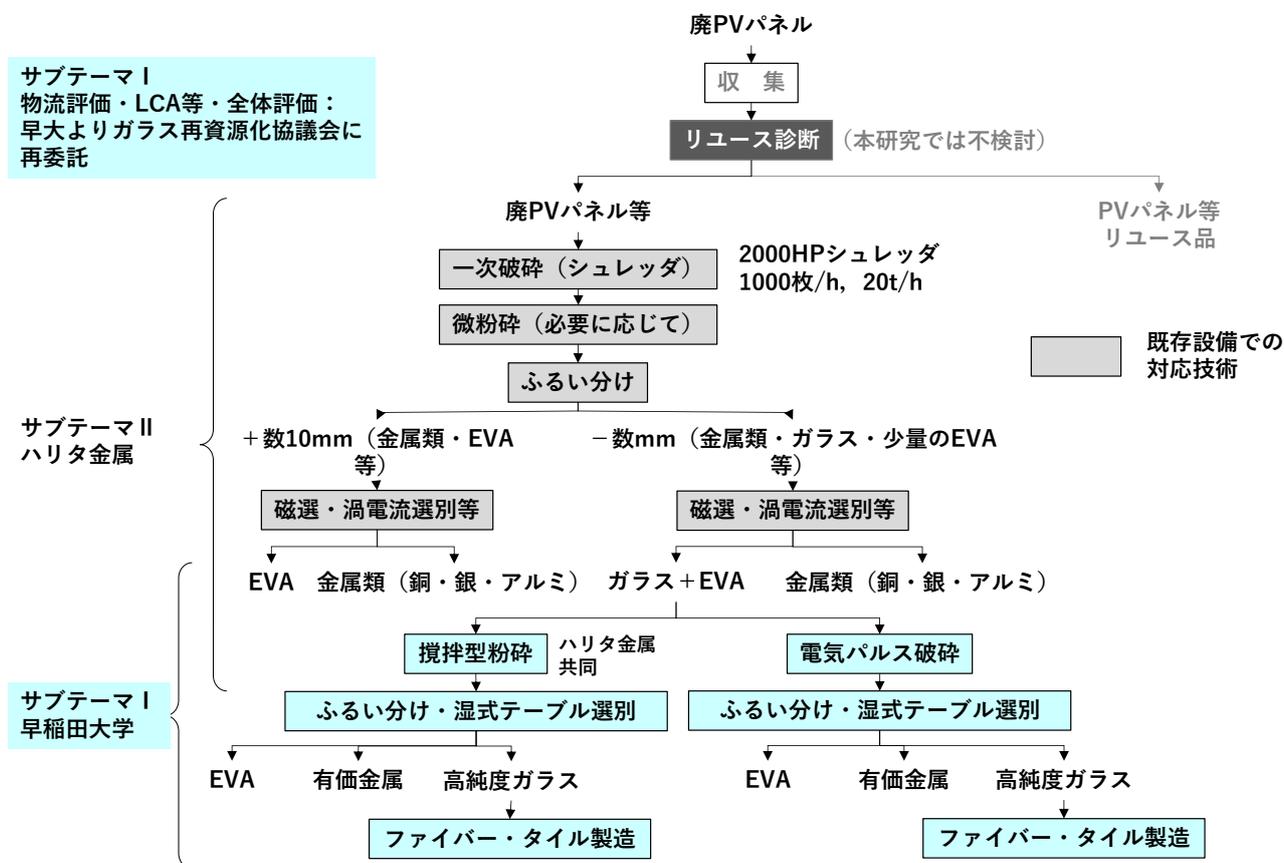


図3.1.1 想定される廃PVパネルからの高純度ガラスの製造プロセス（水色部分がサブテアー I）

4. 結果及び考察

4. 1 試験用廃PVパネルの調達

本研究の供資材として廃PVパネル3,335枚、重量にして約51トン分を調達した。詳細を表4.1.1に記す。パレット数とは、図4.1.1に示すような荷姿により搬入されることから、廃PVパネルが平置きされ積まれている1つの塊として計上されている。これは排出地点における枚数や、その型式等の統一性によって制約を受けると考えられる。例えば図4.1.1(a)はパレット3枚しか見えていないが、パレット6枚分の搬入があり、全てシャープ社製NE-L0A1H（多結晶型）で210枚の搬入であったため、パレットあたり35枚の廃PVパネルが積まれていたことが分かる。一方、図4.1.1(b)は前面左2枚のパレットは同じ型式のパネルが積まれているように見えるものの、右のパレットは様々な型式の廃PVパネルの混載になっているため、同じ枚数を積上げられずに搬入されている。これは、搬送時の効率性に影響すると考えられた。

1パレットあたりに積むPVパネルの枚数が決まっている理由は、パネルの高さによる制約と重量による制約両方を受けていると考えられる。一般的な木パレット（パレット寸法1100*1100*124）の耐荷重量は約1 tであり、この場合平均的なPVパネルでは50枚前後積める計算になる。一方、リフトでの荷役作業を考えた場合、荷は2 m近い高さになるため、十分に梱包されていないとリフトで荷役する際にPVパネルの据わりが悪くなり荷崩れる恐れがあり、作業に危険を伴うことが想像される。なお、搬送時に一般に用いられる大型ウイング車のコンテナ内寸は高さ2.5 m前後であり、2 mの高さに積んでもコンテナの高さによる制約は受けない。しかし、1パレットに30枚程度の高さ（≒荷の高さ約1.2m程度）に留め、大型ウイング車に積み上げればパレットを2段重ねにでき充填率を上げることができると考えられる。このため、リフトの荷役作業の安全面と、大型ウイング車の荷台高さ限界まで積める枚数を考慮し、パレットあたりの枚数が決められているように考えられた。

また、回収された廃PVパネルの半導体材料の種別を見ると、8割近くが多結晶であった。2017年に多結晶を抜いて単結晶の割合が一番多くなったものの、今排出されるPVパネルでは、10年以上前のパネルも多いことから、その当時の市場シェアを反映しているものと考えられる。

なお、収集は2018年中に3回（7月13日、8月22日、11月14日）、2019年に3回（1月31日、2月26日、3月13日）実施された。そこで、表1-2において、さらに詳細な搬入の6回分それぞれの回収パネルの情報を示した。なお、2019年回収分は、3月22日時点では、破碎が未実施である。また、パレットに積載のパネルについて全ての情報が不明なものに関しては、その重量はパレット全体の重量をパネル枚数で除した重量として記されている。

表4.1.1 収集された廃PVパネルの内訳

搬入期間		2018年度 合計	2018年 4～12月	2019年 1～3月
パレット数		80	38	42
PVパネル枚数		3,335	1,026	2,309
PVパネル総重量[kg]		(e)51,270	15,773 ^{*1}	(e)35,497 ^{*2}
半導体 材料	単結晶[枚]	107	56	51
	多結晶[枚]	1,139	796	343
	薄膜・化合物[枚]	9	0	9
	不明[枚]	2,080	174	1,906
	合計[枚]	3,335	1,026	2,309

*1 PVパネル総重量は、搬入時に計測しておらず、ハリタ金属射水リサイクルセンターにて破碎試験を実施した時点でPVパネル重量として計測された正味重量である。

*2 2019年搬入分のPVパネル総重量は、計測しておらず、2018年の搬入分の1枚当たり重量を用いて総重量を推計した値となっている。



(a) 2018年7月13日搬入分



(b) 2018年8月22日搬入分



(c) 2018年11月14日搬入分



(d) 2019年1月31日搬入分



(e) 2019年2月26日搬入分



(f) 2019年3月13日搬入分

図4.1.1 試験用に調達された廃PVパネルの搬入時の荷姿

4.2 攪拌型粉碎

4.2.1 ハリタ金属で製造されたガラス濃縮物（ガラス+EVA）の成分構成

廃PVパネルからAl枠を取り外したのちに、シュレッダー破碎し、風力選別で軽質ダストを取り除き、磁力選別で鉄を取り除き、ふるい分けののちに渦電流選別を施して得られたガラス濃縮物（本研究の対象試料）の成分組成を図4.1.1に示した。攪拌型粉碎へのフィード試料としては、試料量が多くかつEVA含有率の高い2.8-4.0 mmを対象とした。

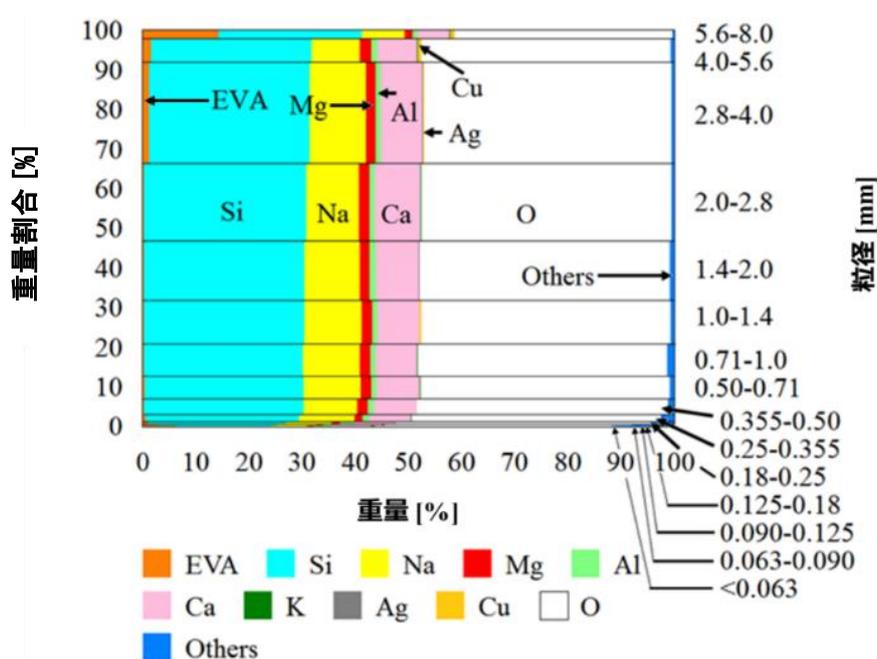


図4.2.1 Al枠なしの廃PVパネルから製造されたガラス濃縮物の成分組成

4. 2. 2 実験室規模での攪拌型粉砕挙動

実験室規模の攪拌型粉砕機を使用して、乾式粉砕、湿式粉砕、媒体添加乾式粉砕、薬剤添加湿式粉砕、長時間乾式粉砕を検討し、それぞれの粉砕条件におけるガラス回収率を比較し、その挙動に関する考察を行った。なお、ガラス成分は粉砕後にガラスは細粒側に EVA は粗粒側に分布するので、ここでは、粉砕産物をその後ふるい分けしてガラスを細粒側に回収することを念頭に置いている。

乾式粉砕を行った産物に対して 0.063-2.8 mm の範囲で、カットサイズ（分級点）、その際のガラスの EVA に対する分離効率およびガラス回収率を表 4.2.1~4 に示す。また、湿式粉砕、媒体添加乾式粉砕、薬剤添加湿式粉砕および長時間乾式粉砕を行った産物に対しても、同様の指標を表 4.1.5~8 に示す。各粉砕の特徴を以下に記す。

乾式粉砕： 表 4.2.1~6 より、ガラスと EVA の最大分離効率が得られる条件はアジテータ回転速度 2500 rpm、粉砕時間 5 min のときであり、その際の実効分離効率は 51.80 %、2.8 mm 以下粒群へのガラス回収率 64.89 %、当該粒群中の EVA 濃度は 0.21 %であった。乾式粉砕ではアジテータ回転速度・粉砕時間が大きくなるほど、分離効率が上昇することが確認された。すなわち、ガラスから EVA を分離するためにはガラス表面に付着している EVA の攪拌型粉砕でなく、ガラス自体の体積粉砕が有効であることが示唆された。全般的に、乾式粉砕は湿式粉砕に比べてガラスの EVA に対する分離効率の高いことが分かった。湿式粉砕・薬剤添加湿式粉砕： 表 4.2.4、4.2.6、4.2.7 より、乾式粉砕の場合と比べて、回収率は上昇するが最大分離効率は低下することが確認された。よって、ガラスから EVA を分離するためには EVA の攪拌型粉砕よりもガラスの体積粉砕が有効であることが確認された。

媒体添加乾式粉砕： 乾式粉砕よりもさらにガラスの体積粉砕が進行すると考えられる媒体添加乾式粉砕では、最大分離効率・ガラス回収率ともに乾式粉砕より低下することが確認された。このことは、ガラスの体積粉砕を進行させすぎると、EVA もガラスとともに粉砕されてしまい、相互分離が困難になることを示している。したがって、EVA とガラスの分離には、ガラスの適切な体積粉砕の起こる条件に設定することが重要であることが確認された。

長時間乾式粉砕： 表 4.2.8 より、粉砕時間を長くすると、ガラス回収率はほぼ変わらず、細粒側への EVA 含有率が高くなることが分かる。つまり、ガラス自体の体積粉砕は粉砕時間 5 min ではほぼ終了しており、それ以上の粉砕時間では EVA も粉砕されてしまい、5 min 以上の長時間粉砕は選択粉砕の効率を低くすることが分かった。

表4.2.1 乾式粉砕を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率
(アジテータ回転速度 1500 rpm)

粉砕時間 [min]	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
1	16.90	2.8	18.93	0.13
	8.79	2.0	9.57	0.10
3	39.26	2.8	41.62	0.077
	22.71	2.0	24.70	0.11
5	46.79	2.8	51.78	0.10
	30.82	2.0	32.72	0.062

表4.2.2 乾式粉砕を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率
(アジテータ回転速度 2000 rpm)

粉砕時間 [min]	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
1	20.18	2.8	22.76	0.12
	11.74	2.0	22.76	0.083

3	39.81	2.8	47.32	0.15
	26.13	2.0	28.57	0.083
5	47.24	2.8	56.28	0.18
	35.03	2.0	37.42	0.072

表4.2.3 乾式粉砕を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率
(アジテータ回転速度 2500 rpm)

粉砕時間 [min]	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
1	30.40	2.8	33.53	0.11
	16.45	2.0	17.47	0.066
3	48.38	2.8	54.59	0.11
	32.87	2.0	35.31	0.067
5	51.80	2.8	64.89	0.21
	40.98	2.0	44.54	0.082

表4.2.4 湿式粉砕を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率

固液比 [-]	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
0.00	51.80	2.8	64.89	0.21
	40.98	2.0	44.54	0.082
0.20	46.43	2.8	65.89	0.30
	31.32	2.0	37.35	0.17
0.30	45.23	2.8	65.61	0.32
	32.34	2.0	37.68	0.15
0.40	42.95	2.8	65.20	0.35
	30.56	2.0	35.72	0.15

表4.2.5 粉砕媒体乾式粉砕を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率

	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
粉砕媒体なし	51.80	2.8	64.89	0.21
	40.98	2.0	44.54	0.082
GMC	42.26	2.8	64.66	0.28
	36.49	2.0	45.99	0.17
GML	47.29	2.8	64.60	0.23
	37.96	2.0	47.43	0.16

表4.2.6 エタノール添加湿式粉砕を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率

固液比 [-]	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
0.00	51.80	2.8	64.89	0.21
	40.98	2.0	44.54	0.082
0.20	41.07	2.8	68.37	0.41
	30.02	2.0	36.92	0.19
0.30	40.20	2.8	69.28	0.43
	31.62	2.0	38.68	0.19
0.40	39.69	2.8	66.48	0.43
	28.23	2.0	33.78	0.17

表4.2.7 アセトン添加湿式粉碎を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率

固液比 [-]	分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
0.00	51.80	2.8	64.89	0.21
	40.98	2.0	44.54	0.082
0.20	51.66	2.8	71.43	0.28
	33.58	2.0	41.10	0.19
0.30	45.11	2.8	68.56	0.36
	29.81	2.0	36.12	0.18

表4.2.8 長時間乾式粉碎を行った産物の分離効率、カットサイズ、ガラス回収率
(アジテータ回転速度 2000 rpm)

粉碎時間 [min]	最大分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [wt%]
5	47.24	2.8	56.28	0.18
	35.03	2.0	37.42	0.072
8	31.12	2.8	54.70	0.49
	26.39	2.0	29.28	0.11
12	32.95	2.8	60.98	0.51
	31.25	2.0	34.44	0.11

以上のガラス回収率とEVA含有量との関係を図4.2.2にまとめる。同図より、湿式粉碎や媒体添加乾式粉碎はガラスの回収率を増加させるが、同時にEVAの混入量も増加することが確認できる。したがって、許容されるEVA混入量によって最適な粉碎法が決定される。なお、既述のように、ガラスに対するEVAの最大分離効率は、乾式粉碎アジテータ回転速度2500 rpm、粉碎時間5 minの条件において51.8 %と得られ、その際の2.8 mm以下の粒径へのガラス回収率は64.9 %、当該粒径中のEVA濃度は0.21 %であった。これらのガラスとEVAの単体分離機構は、主に、ガラスが選択的に破碎されてEVAから剥離し、微粒へ移行するものであることが分かった。長時間粉碎や、湿式粉碎、粉碎媒体を加えた粉碎等では、ガラスのみならずEVAの一部も粉碎されて微粒化することから、ガラスの回収率は向上するもののEVAの混入率も増加した。したがって、最適な粉碎方法は許容されるEVA混入量によると考えられた。

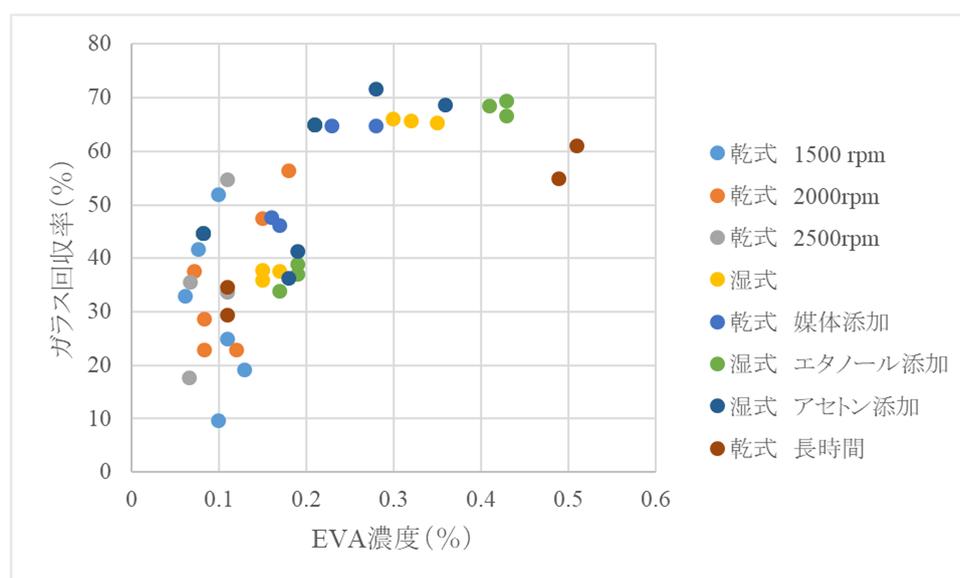


図4.2.2 攪拌型粉碎の各種条件下におけるEVA濃度と細粒側へのガラス回収率の関係

4. 3 実験室規模での電気パルス粉碎挙動

4. 3. 1 ハリタ金属で製造されたガラス濃縮物の成分構成

廃PVパネルからAl枠を取り外してから、シュレッダー破碎し、風力選別で軽質ダストを取り除き、磁力選別で鉄を取り除き、ふるい分けのちに渦電流選別を施して得られたガラス濃縮物（-13 mm、「Al枠なし」と呼ぶ）と、同パネルからAl枠を取り外さずに同様の処理を行なったガラス濃縮物（-13 mm、「Al枠あり」と呼ぶ）の2種類の試料を電気パルス粉碎のフィードとした。電気パルス粉碎ではAl枠の存在がその挙動に影響を及ぼすことが考えられたためである。両ガラス濃縮物の粒群毎の分析結果を図4.3.1に示す。-2.0 mm粒群はEVA含有率が非常に低いこと、また、この粒群にはAgが多く分配される（そのまま銅製錬所に売却される）ため、本実験対象としては2.0-13 mm粒群を採用した。また、詳細に観察すると、2.0-5.6 mm粒群ではガラス表面の一部にEVAが付着しており、5.6-13 mm粒群ではEVAシートにガラス粒子が付着している状態にあったため、ここでは、①2.0-5.6 mm粒群、②5.6-13 mm粒群、③2.0-13 mm粒群の3通りの試料について電気パルス粉碎を施した。なお、試料全体（③）における①の割合は92.6 wt%、②のそれは7.4 wt%であった。

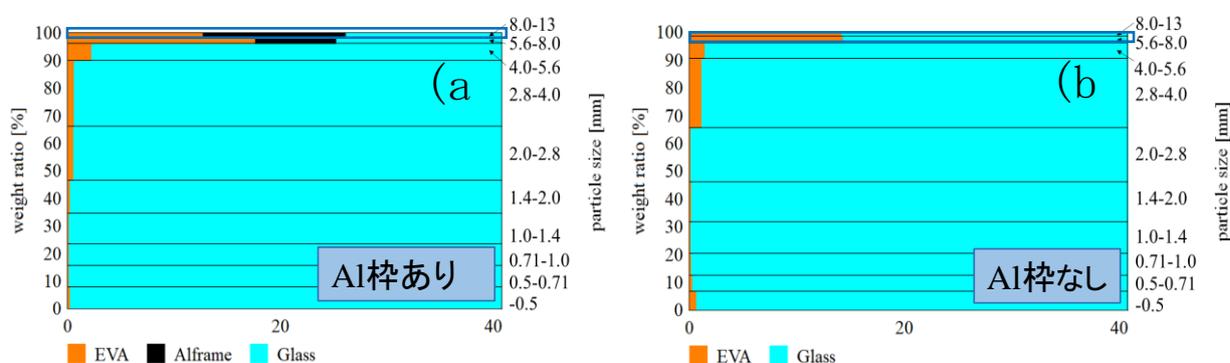
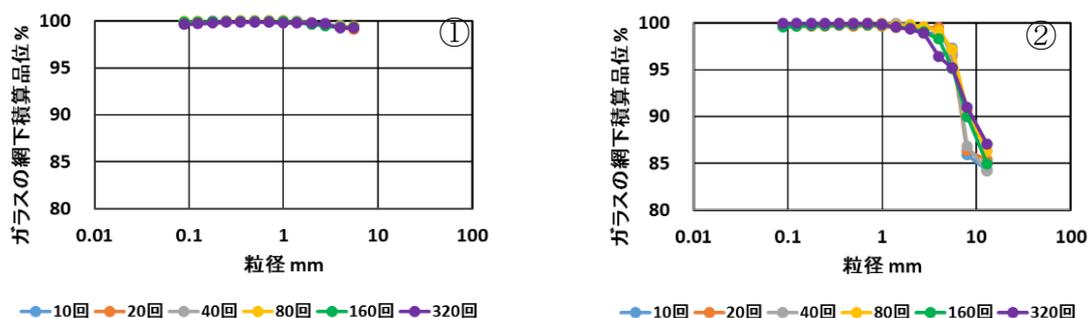


図 4. 3. 1 重量品位図 ((a) Al 枠なし、(b) Al 枠あり)

4. 3. 2 実験室規模での電気パルス粉碎挙動

(1) ガラス濃縮に及ぼすパルス印加回数およびその後のふるい分けカットサイズの影響

ここでは、印加電圧5 kV、電圧印加周期5 Hz、電極間距離10 mmを統一条件とし、印加回数を変えて粉碎挙動の変化を把握した。「Al枠なし」試料における①2.0-5.6 mm、②5.6-13 mm、③2.0-13 mm各粒群試料のガラスの網下積算品位を図4.3.2に示す。①、②、③いずれに試料、いずれのパルス印加回数においても、ガラス品位は細粒群で高く、ガラスのみが選択的に体積粉碎されることが分かる。印加回数を増やすにつれてガラスはより細粒側にシフトする一方、EVAはほとんど粉碎されず粗粒群に残ることも判明した。



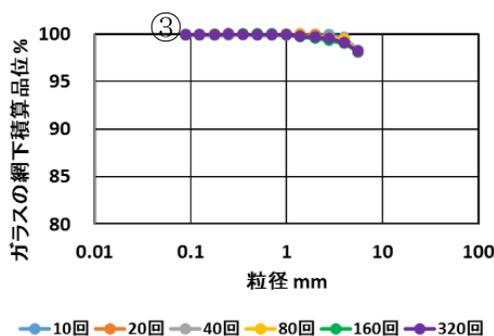


図 4.3.2 各条件における ED 産物におけるガラスの網下積算品位

(① 2.0-5.6 mm、② 5.6-13 mm、③ 2.0-13 mm)

図4.3.3には、ガラスの網下積算回収率を示す。印加回数を増やすにつれてガラスはより細粒群に濃縮する。また、②では、特に印加回数が少ないときに細粒におけるガラスの回収率が大きく低下した。これは、印加回数が少ない場合にはEVAシートとガラス粒子が分離せず、一部のガラス粒子がEVAに付着したままの状態にあることを示している。印加回数を増やすことで、徐々に細粒側でのガラスの回収率が増加しており、EVAシートからガラス粒子が次第に分離することが分かった。

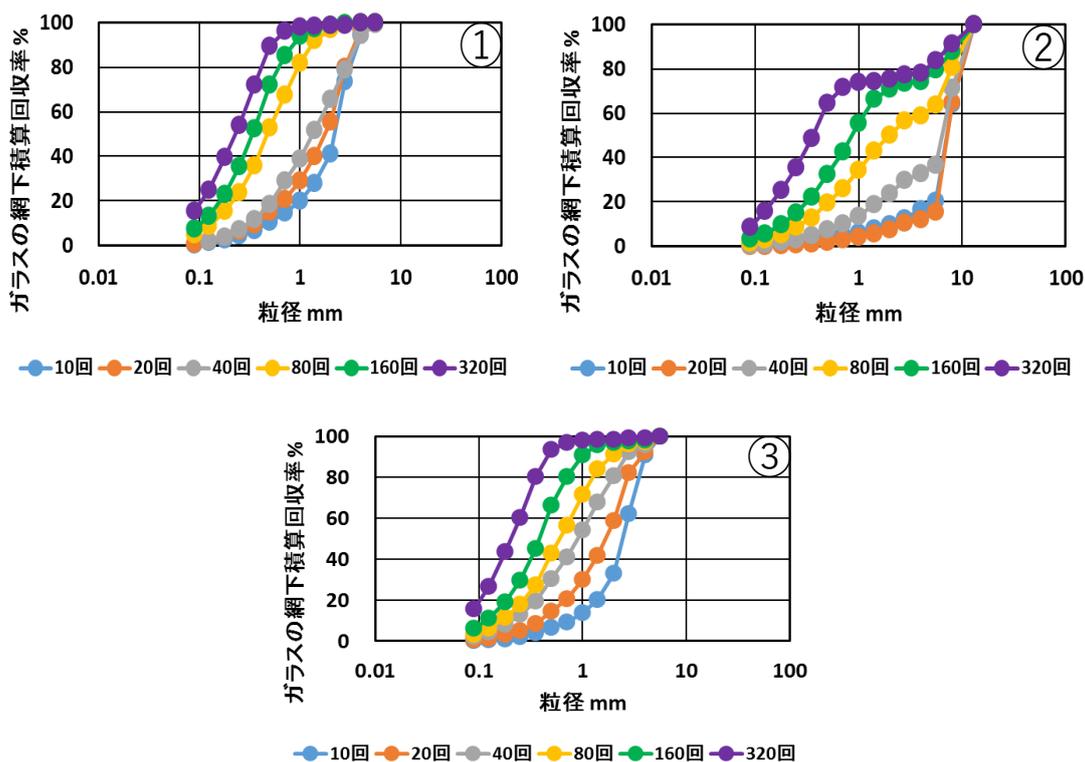


図 4.3.3 各条件における ED 産物におけるガラスの網下積算回収率

(① 2.0-5.6 mm、② 5.6-13 mm、③ 2.0-13 mm)

図4.3.4には、各条件下におけるガラスのEVAに対する分離効率をカットサイズごとに示した。①の粒群を除き、印加回数が増大とともに分離効率は向上し、同320回のとときに最大分離効率を示した。すなわち、ガラスの選択的な体積粉砕が効果的に起こっていることが分かった。①では印加回数160で最大分離効率をとったが、この粒群では試料中に含まれるEVAの割合が②や③よりも少なく、320回ではガラスのみでなくEVAの粉砕も促進されるものと判断された。試料全体 (③) におけるガラスのEVAに対する最大分離効率 (91.4 %) は印加回数320回の粉砕産物をカットサイズ1 mmでふるい分けする場合に得られ、そ

の際のガラス回収率は98.0 %、EVA品位は0.124 wt%、であった。

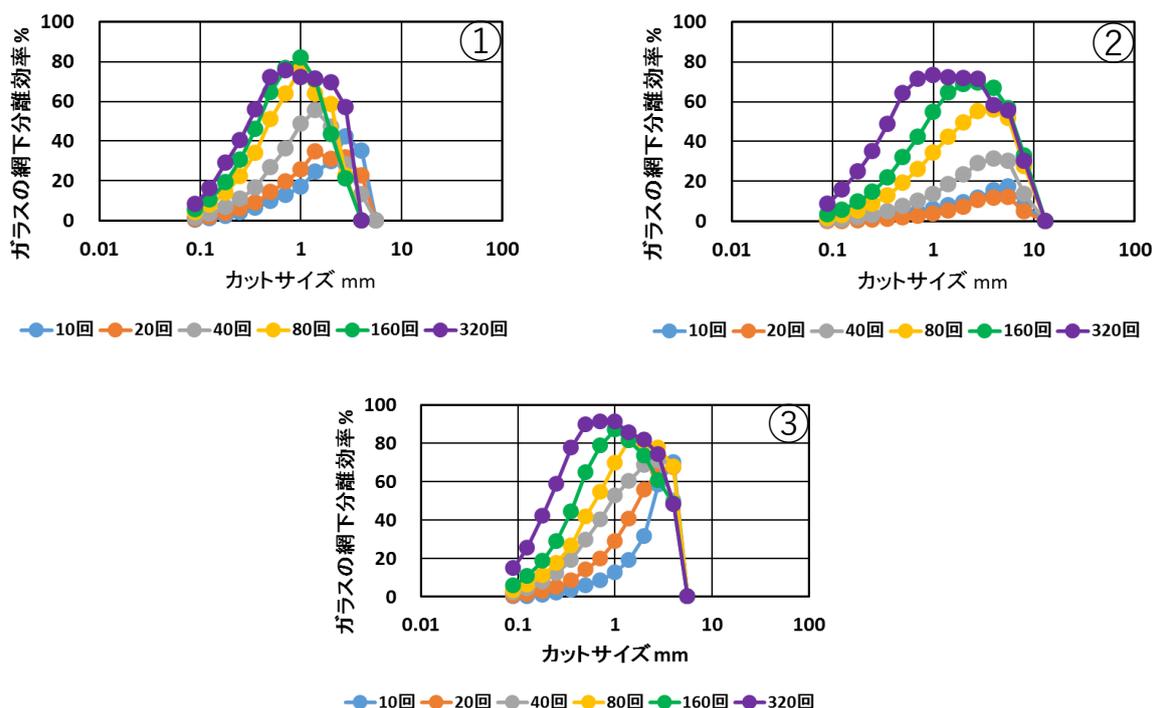


図 4.3.4 ガラスのEVAに対する分離効率 (① 2.0-5.6 mm、② 5.6-13 mm、③ 2.0-13 mm)

以上の結果から、各試料のEDにおけるガラスとEVAの分離機構を推測した。①2.0-5.6 mmおよび②5.6-13 mm試料におけるその概念図を図4.3.5に示す。各粒群の分離機構は以下のように考えられる。

- ① 2.0-5.6 mm 試料： ガラス表面の一部にEVAが付着した状態で存在しており、印加回数が少ない場合には、主にガラスの粉砕が進み、印加回数を増やすにつれてEVAがガラス粒子から分離し、さらに印加回数を増やすとガラスとEVAがそれぞれ粉砕される。電気パルス粉砕では、ガラス/EVAの境界面に選択的にアーク放電が起こり、発生するジュール熱によって境界面物質が昇華してマイクロ爆発が起こるが、それによって生ずる衝撃波によって、脆性物質であるガラスが選択的に破壊されることが判明した。
- ② 5.6-13 mm 試料： EVAシートにガラス粒子が付着した状態で存在しており、印加回数を増やすにつれて、EVAシートから多くのガラス粒子が分離する。また、分離したガラスは2.0-5.6 mm試料と同様に粉砕され、印加回数が多い場合にはEVAシートも粉砕されるが元々のサイズが大きいため、1 mm以下にはなりにくい。

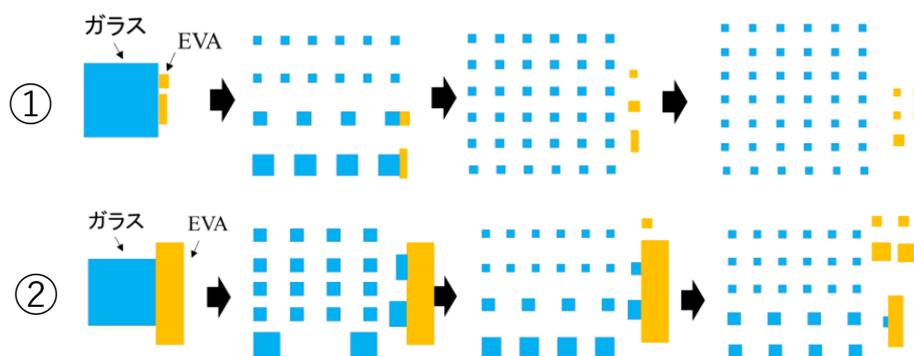


図 4.3.5 各粒群における分離機構 (① 2.0-5.6 mm、② 5.6-13 mm)

次に、「A1枠なし」と「A1枠あり」の試料について検討を行った。A1枠は試料中に5.6-13 mmにのみ含まれていたため、②5.6-13 mm粒群試料を用いて両者の結果を比較した。A1の有無の両試料について、ガラスのEVAに対する分離効率を図4.3.6に示す。最大分離効率は両者に顕著な差はなかったが、印加回数が少ない場合には、「A1枠あり」試料の方が「A1枠なし」試料よりも高い分離効率をとる結果が得られた。

試料に高電圧を印加した際、A1粒子が存在する場合には、(i)陽極から発生するストリーマがA1粒子を経由することで複数の放電経路が生成されてより多くのガラス・EVA粒子にエネルギーが与えられること、(ii)A1粒子がない場合はその代わりに存在する水のブレークダウンが起こって電気パルスのエネルギーが消費・散逸するが、A1粒子がある場合はそれが電極の役割をすることにより上記のエネルギー消費・散逸が起こらないこと、が原因と考えられた。

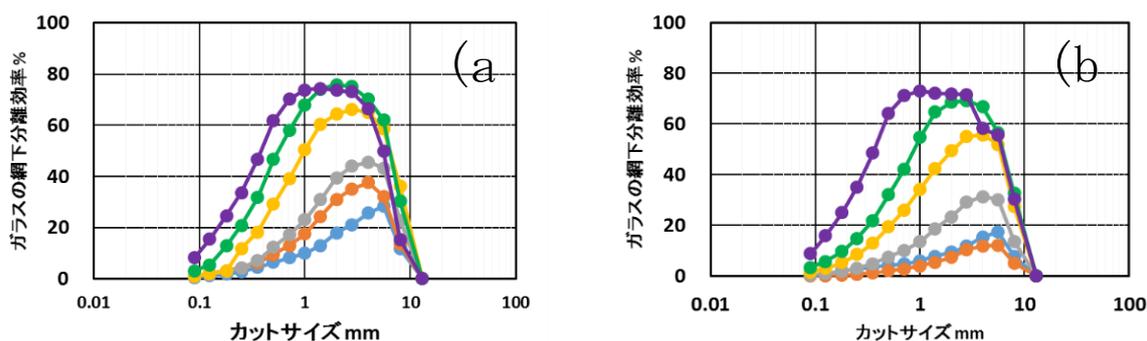


図4.3.6 ガラスのEVAに対する分離効率 (a) A1枠あり5.6-13 mm、(b) A1枠なし5.6-13 mm)

(2) ガラス濃縮に及ぼす試料導入量および電極間距離の影響

a. 試料導入量の影響

まず、電気パルス粉砕 (ED) においてフィード重量 m を変化させて実験を行った。得られたED産物の粒度分布を図4.3.6に示した。 $m=30\sim 120$ gまでは産物の粒度分布に差がほとんど見られなかったが、 $m=120$ g以上では、 m の増大に伴い、試料が粉砕されにくくなる傾向が認められた。 $m=120$ g、パルス印加回数 $N=320$ の条件で最もガラスが選択粉砕され際粒群に濃縮し、ガラスのEVAに対する分離効率が最大となった(カットサイズ: 1.0 mm, 分離効率: 93.2%)。

図4.3.6は、試料重量の変化に伴うED産物の粒度分布変化も示している。この図からガラスおよびEVAそれぞれの80%粒径(D_{80})を算出し、 m と D_{80} の関係を求めた。なお、EDを実操業化した際を想定し、 m を粉砕装置の容器内の固体濃度(パルプ濃度)に換算し、図4.3.7に示した。これらから、ガラスおよびEVAはそれぞれ D_{80} を最小にする、つまり粉砕比を最大にする試料濃度が存在することが示唆された。ED+粒度選別によりガラスとEVAを分離するためには、両者の粉砕比の比(ガラスの粉砕比/EVAの粉砕比)が大きいことが望ましい。この両者の粉砕比の比を算出し図4.3.8に示した。それが最大であるパルプ濃度を求めたところ、 $N=80\sim 160$ の場合は、0.80~1.60%が合理的であり、 $N=320$ まで増大させると、試料濃度を3.1%まで増大可能であることが分かった。

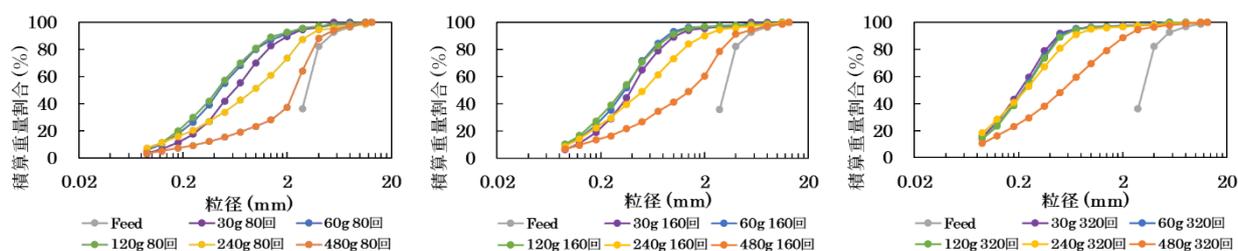


図4.3.6 各試料重量 m におけるED産物の粒度分布(左: $N=80$ 、中: $N=160$ 、右: $N=320$)

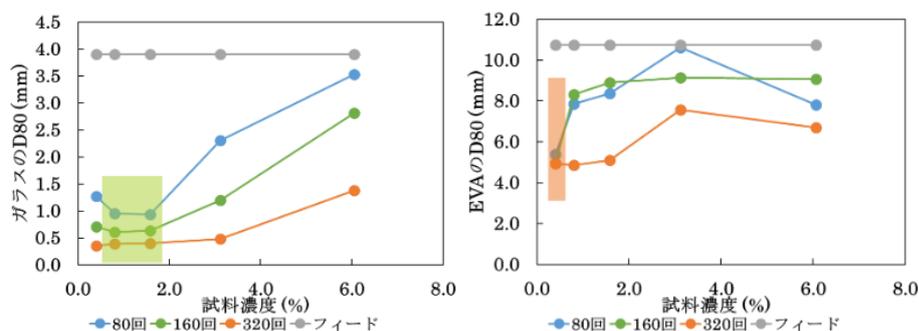


図 4.3.7 試料濃度と D80 の関係(左：ガラス, 右：EVA)

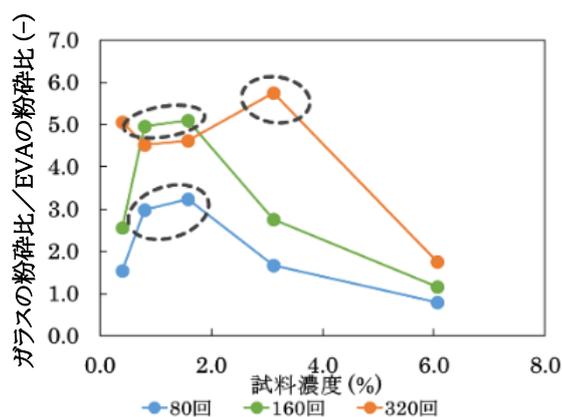


図 4.3.8 試料濃度と (ガラスの粉砕比/EVA の粉砕比) の関係

b. 電極間距離の影響

次に、電極間距離 d を変化させた ED 実験を行った。まず、各種条件における ED 産物の粒度分布を図 4.3.9 に示した。これらから、 $d=10$ mm の場合は、 $d=20$ mm および 40 mm と比較すると、粉砕されにくい傾向があり、それは N が少ないほど顕著であった。また、 d と (ガラス粉砕比/EVA粉砕比) の関係から、 $d=20$ mm あるいは 40 mm において (ガラス粉砕比/EVA粉砕比) が最大をとることから、ガラスの選択粉砕にはこの両電極間距離範囲が適当であることが分かった。 $m=240$ g の場合、 $d=40$ mm、 $N=160$ 、カットサイズ: 1.4 mm で最大分離効率 94.6 %、 $m=480$ g の場合、 $D=20$ mm、 $N=320$ 、カットサイズ 1.0 mm に最大分離効率 93.6 % を達成した。

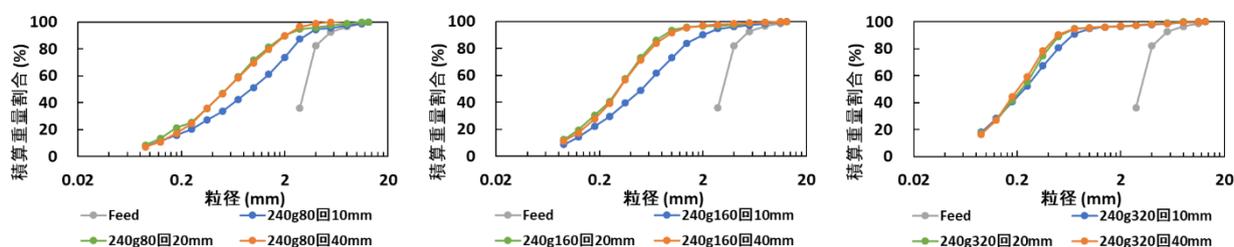


図 4.3.9 各電極間距離 d における ED 産物の粒度分布(左: $N=80$ 、中: $N=160$ 、右: $N=320$)

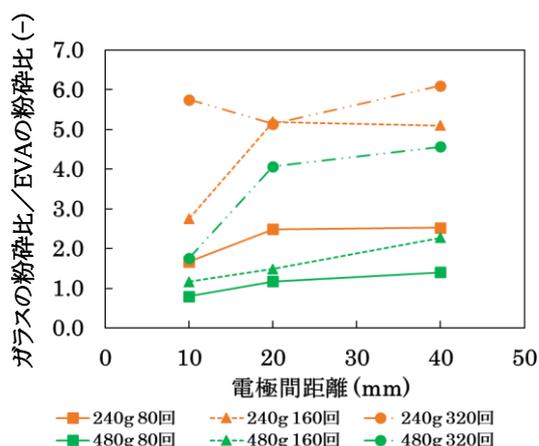


図4.3.10 電極間距離 d と（ガラスの粉砕比/EVAの粉砕比）の関係

c. 試料導入量および電極間距離の影響に関する考察

EDにおいては、電気パルスの作用を受けることのできる範囲（電極からの距離、Working Distance（以下WD））が存在し、Selfrag社へのヒアリングによると、本装置の場合、WDは一般に100 mmとされている。そこで、電極間の中心から半径100 mmの球をその範囲とし、その領域に含まれている試料のみが粉砕され、その領域外の試料は粉砕されないと仮定した。各電極間距離における本装置におけるWD内およびWD外の容積を表に示した。パルス印加時、試料は水中を均一に舞っていると考えられるので、粒子がWD内およびWD外に存在する割合は上記容積の比に等しいとする。例えば、電極間距離 $d=20$ mmの場合、表より、WD内容積：WD外容積=0.40：0.60である。したがって、パルスを80回印加した場合、各粒子には32回(80回×40%)分のエネルギーが与えられていると仮定する。この32回をパルス印加80回に対する実質印加回数と定義した。これらの仮定のもと、各電極間距離におけるガラスおよびEVAのD80を実質印加回数で割ることで、単位実質印加回数におけるガラスおよびEVAの粒径の減少の程度を算出した。

フィード重量 $m=240$ gにおける電極間距離 d と、単位実質印加回数におけるガラスおよびEVAのそれぞれのED前後のD80の割合（(ED前のD80-ED後のD80) / 実質印加回数）の関係を図4.3.11に示した。同図より、 $d=20$ mmの場合にガラス・EVAともにそれが最大になる、つまり、試料に最も効果的にエネルギーが与えられることになる。その理由について、エネルギー計算をもとに考察した。パルスを印加する際に電極間で有効に消費されるエネルギー E_{arc} は、ED装置のコンデンサーに充電されたエネルギー E_c から、ストリーマの進展段階で消費されたエネルギー E_{st} を引くことで求まる(4.3.1)。この E_{st} は電極間距離の増大に伴い増大するため、 E_{arc} は減少する。

$$E_{arc} = E_c - E_{st} \quad (4.3.1)$$

また、EDにおいて水中で消費される全エネルギー E_w は(4.3.1)の E_{arc} と回路全体の抵抗 R に対する水の抵抗 R_w の積で求まる(4.3.2)。

$$E_w = E_{arc} \times \frac{R_w}{R} \quad (4.3.2)$$

したがって、単位電極間距離あたりの水中で消費されるエネルギーは(4.3.3)のように求まる。

$$E_{w/d} = E_{arc} \times \frac{R_w}{R} \times \frac{1}{d} \quad (4.3.3)$$

(4.3.3)において d の増大に伴って E_{arc} および $\frac{1}{d}$ は減少し $\frac{R_w}{R}$ は増大する。したがって、 $E_{w/d}$ を最大にする

d の値が存在し、今回の条件では、それが $d=20$ mmであったと考えられる。

$m=480$ g場合に関する同様の計算結果を2に示した。ガラスに関しては $d=40$ mmの場合に $\Delta D80$ が最大となった。これは、 $d=40$ mmの場合WD体積が最も大きくなり、一度のパルス印加でエネルギーを受ける粒子数が最大となるためと考えられる。一方、EVAに関しては $N=80$ 、 $d=10$ mmの場合を除いてD80の比に大きな差はみられなかった。これは、電極間距離が増大すると、水中で発生する衝撃波の粉砕に寄与するエ

エネルギーは低下するが、WD内の領域は増加するため考えられた。

表 4.3.1 各電極間距離におけるWD内体積およびWD外体積

電極間距離 (mm)	WD内体積 (mm ³)×10 ⁶	WD外体積 (mm ³)×10 ⁶	体積比(WD内体積：WD外体積)
10	1.11	1.89	0:37 : 0.63
20	1.19	1.81	0:40 : 0.60
40	1.36	1.64	0.45 : 0.55

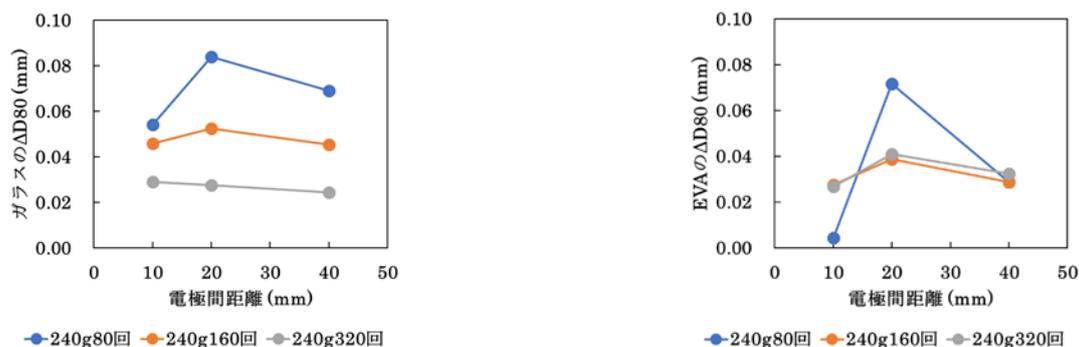


図 4.3.11 $m=240$ g における各電極間距離における単位実質印加回数に対する $\Delta D80$ (左：ガラス，右：EVA)

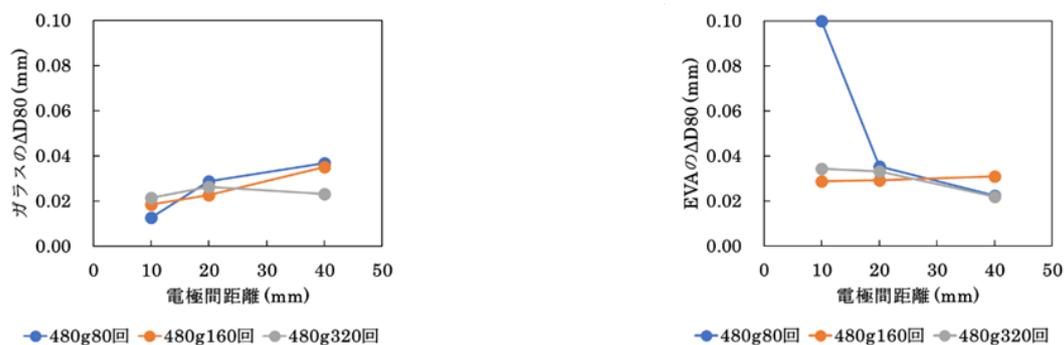


図 4.3.12 $m=480$ g における各電極間距離における単位実質印加回数に対する $\Delta D80$ (左：ガラス，右：EVA)

(3) パルス印加回数とガラス・EVA濃縮挙動の粉砕速度論的考察

電気パルス粉砕 (ED) の後、粉砕産物をふるい分けし、+1.0 mm(-1.0 mmは全て単体粒子と見なされた) について、粒群ごとに島津製作所製の全有機体炭素計を用いて有機C含有率を測定し、ガラスとEVAの分離性の評価を行った。単体分離性の評価には、(株)日本ローパー製画像解析ソフトImage-Pro10を使用し、試料の観察画像から求めたガラス・EVA粒子それぞれの面積を、形状を考慮して体積に換算し、ガラス密度 (2.47 g/cm³)、EVA密度 (0.92 g/cm³) から各粒子の部分比 (一粒子に占める着目成分の重量割合) を算出した。

先行研究⁴⁾では、EDにおいて、ガラスが選択粉砕されて細粒群へ濃縮し、電極間距離10 mm、印加電圧150 kV、印加回数320のとき、-1.0 mm粒群にC品位0.10 wt%のガラス濃縮物が得られ、ガラスのEVAに対する最大分離効率が91.4 %となることを示した。図4.3.13には、その際の各種ED実験での産物におけるガラスおよびEVAの各粒群への分配率分布を示した。

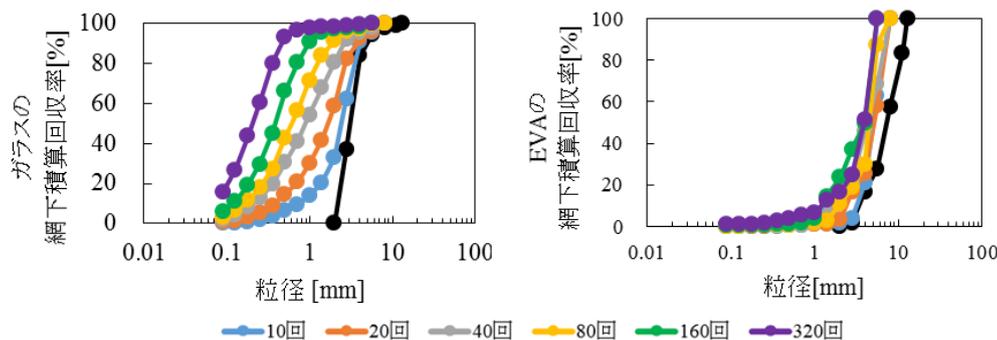


図4.3.13 各種ED産物中のガラス（左）・EVA（右）の各粒群への分配率分布⁴⁾

ここでは、このデータを基に、EDの印加回数変化におけるガラスおよびEVAそれぞれの粉砕速度定数 k を、ポピュレーションバランスモデルを用いて算出した。このモデルは、粉砕時間 t における粒径 x 以下の積算重量割合 $D(x, t)$ の時間変化を以下のように表すものであり、本実験ではパルス印加周期が5 Hzであることから、それを時間に換算して速度定数を求めた。

$$\frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = \int_x^{x_{max}} S(a, t) \cdot \frac{\partial D(a, t)}{\partial a} \cdot B(a, x) da \quad (4.3.4)$$

同式において、 S は選択関数、 B は破壊関数である。

$$S(x, t) = kx^n \quad (4.3.5)$$

$$B(a, x) = \left(\frac{x}{a}\right)^m \quad (4.3.6)$$

ここでは、粒径区間 $x \sim x+dx$ における重量変化を考え、粉砕によってこの区間から細粒側へ移動する割合を選択関数 S にて、粒径区間 $x \sim x+dx$ より大きい粒径区間 $a \sim da$ に存在する粒子が粉砕されてこの区間に移動する割合を破壊関数 B にて表している。 m, n は定数、 k は粉砕速度定数である。今回、ガラスおよびEVAの各粒群への分配率分布を各印加回数条件において $m=n=1$ とし、最小二乗法により実験データにフィッティングして粉砕速度定数 k を決定し、得られた k と印加回数の関係に累乗近似曲線を適用した(図4.3.14)。同図より、ガラスの粉砕される速度はEVAが粉砕される速度よりも圧倒的に速いことが定量的に示された。また、累乗近似曲線を用いることにより、印加回数とガラス・EVAそれぞれの k 値との関係を連続的に表すことができ、さらに印加回数320を超えた場合の k 値の推定も可能となり、それから求めたガラスおよびEVAの各粒群への分配率分布から、各種のカットサイズにおけるガラスのEVAに対する分離効率を求めることができる。図4.3.15（左）には、上記分離効率が最大となるカットサイズと印加回数の関係、図4.3.15（右）には、そのカットサイズで得られる細粒側（ガラス濃縮産物）へのガラス分配率、C品位、分離効率と印加回数との関係を示した。これらの関係より、パルス印加回数を増大させた場合、カットサイズを小さくすれば、ガラスのEVAに対する選択粉砕が進行し続け、両者の分離効率も増大し続けることが示された。例えば1000回以上の印加ではC品位が0.1 wt%以下となることも推定された。

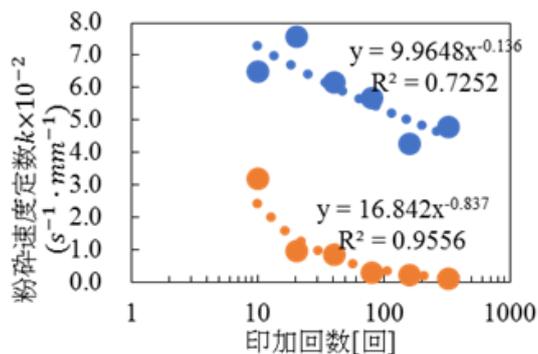


図4.3.14 パルス印加回数とガラス（上部プロット）・EVA（下部プロット）の k との関係

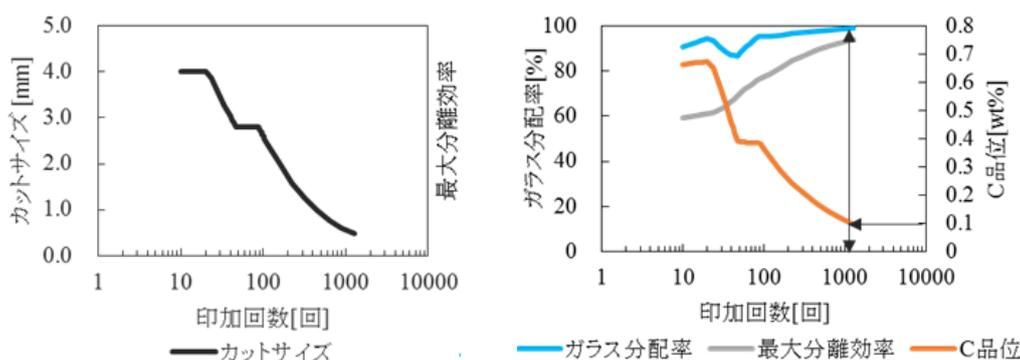


図4.3.15 粉砕速度論から予測したガラス・EVAの分離効率が最大となるカットサイズ(左)およびその際のガラス濃縮物へのガラス分配率・最大分離効率・C品位(右)

(4) ガラス・EVAの単体分離機構のモデル化

次に、EDによるガラスの単体分離機構の解明を目指し、本研究で用いた試料に合わせた新たなモデルを作成した。本研究で用いたガラス-EVA試料の特徴として、ガラスとEVAが1面で接着していること、ガラスは脆性物質で粉砕されやすく、EVAはシート状の弾性物質で粉砕されにくい性質を持っていることが挙げられる。また、本研究では測定した粉砕前後の部分比分布のデータを活用することができることから、以下のような仮定を置いて、ガラス-EVAの単体分離モデルを作成した(図4.3.16参照)。

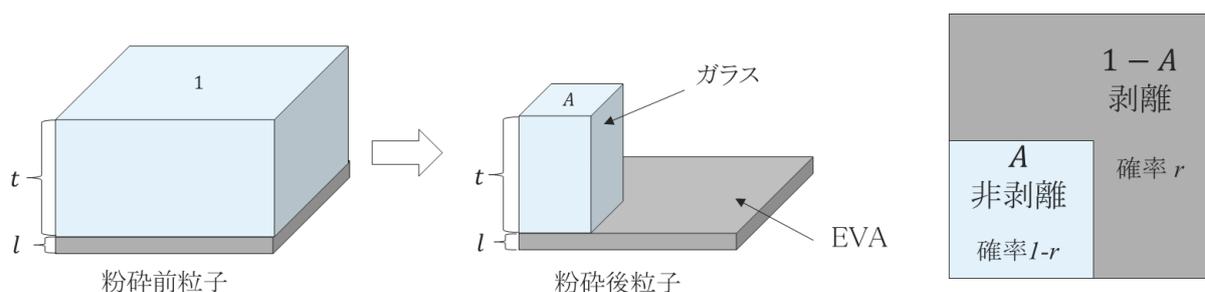


図4.3.16 ガラス-EVA単体分離モデルの概念図(左)およびガラス剥離の概念を示す平面図(右)

- ① 粉砕前粒子中のガラス・EVA成分は1面で接着し、それぞれ高さ t 、 l の直方体である。
- ② 破壊は平面図上にて縦横方向のみ起こり(高さ方向には起こらず)、剥離したガラス分はすべて単体粒子として存在し、粉砕前のガラス・EVA接着面積を1としたときの、粉砕後に剥離せずEVAに接着したままの「ガラス接着面積」を A ($0 \leq A \leq 1$) とする。ガラス接着面積 A は粉砕後に片刃粒子として残るガラスの部分比を決定する値となる。このとき、EVAの破壊が生じないことから、粒子全体の(平面図上での)縦横方向の大きさも変化しないため、粒径はEVAの底面積(粉砕前のガラス・EVA接着面積に等しい)に依存する、つまり粉砕前の粒径のままとみなし、粉砕によって粒径の変化は起きないとする。

このモデルでは、粉砕前粒子の底面積を z (今回は $z=1000$ とした) 等分した微小区域を設定し、各微小区域にてガラスが剥離する確率を剥離確率 r とした。また、剥離確率 r は微小区域によらず一定とした。

ある粒子の粉砕前後のガラス部分比をそれぞれ M 、 M' とすると、それぞれは式(4.3.7)、(4.3.8)のように表せる。ここに、 d_e はEVAの密度、 d_g はガラスの密度である。

$$M = \frac{td_g}{td_g + ld_e} \quad (4.3.7)$$

$$M' = \frac{Ktd_g}{Ktd_g + ld_e} \quad (4.3.8)$$

上式を整理すると、 A は以下の式(4.3.9)のように表せる。

$$A = \frac{M'}{1 - M'} \frac{1 - M}{M} \quad (4.3.9)$$

ここで、あるガラス部分比 M （ガラス接着面積は1）の粒子が、粉碎によってガラスの一部がEVAから剥離してガラス接着面積 A となる確率を考える。このモデルでは、仮定した z 個の微小区域のうちどの微小区域が剥離せずに残るかは確率的に決まり、粉碎後に残った微小区域の接着面積の合計が A になるとは、全微小区域のうち zA 個の微小区域が粉碎後に残ることに相当する。したがって、粉碎後のガラス接着面積が A となる確率 P_A は、微小区域 z 個の中から zA 個が剥離（その確率は r ）し、 $z(1-A)$ 個が非剥離（その確率は $1-r$ ）となる確率であり、微小区域 z 個の中から zA 個を選ぶ組み合わせの数を考えて、以下の式(4.3.10)のように表すことができる。

$$P_A = r^{z(1-A)} \cdot (1-r)^{zA} \cdot {}_z C_{zA} \quad (4.3.10)$$

したがって、この粒子の部分比 R_0 （重量割合）は、次式(4.3.11)により求めることができる。

$$R_0 = P_A A \quad (4.3.11)$$

粉碎後における R_0 の分布（重量分布）は、ここでは $z=1000$ としているので、式(8)にて、 A を0から1まで変化させることで剥離確率 r のみをパラメータとして作成することができる。

図4.3.17には、このように求めたED印加回数40における粉碎産物中の5.6-8.0 mm粒群の部分比分布を示した。ここで、部分比分布は部分比0から0.05ごとに階級を区切っており、剥離確率 r は、粉碎産物の実測の部分比分布に最も近似する値と（最小二乗法を適用）して決定することができる。

今回のED実験では表1のようにパルス印加回数を変化させたが、パルス印加のたびに粒度分布および部分比分布は変化する。ここでは印加の増大に伴う剥離確率 r の変化を把握したいので、ある印加回数での剥離確率は、その1段階前の印加回数での産物をこの段階でのフィードと考慮して算出した。このようにして、各粒群における各印加回数での剥離確率 r を算出した結果を図4.3.18に示した。

また、ある粉碎段階における部分比分布の粉碎前後での変化と、その段階に要したパルス印加回数から、パルス印加1回あたりの剥離確率 r を算出し、各粉碎段階における印加回数との関係として図4.3.19に示した。同図より、印加回数が増えるほど剥離確率が低下することから、パルス印加はその初期ほど単体分離に対する効果が大きいことが分かる。また、パルス印加初期では、4.0-5.6 mm, 5.6-8.0 mm粒群の剥離確率が極めて高くなった。これは、より粗粒群ではガラス接着面積が大きいため剥離が生じにくいこと、より細粒群では、このモデルの課題である、粗粒群から剥離によって着目粒群に落ちてくるガラス単体粒子が考慮されていないこと、が原因と考えられた。細粒群では、後者の効果がより大きく出ることを、今後、考慮する必要があると示唆された。

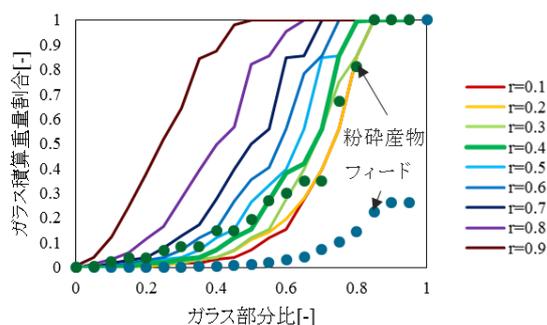


図4.3.17 部分比分布の実測値と計算値の一例（印加回数40，粒群5.6-8.0 mmの場合で、 $r=0.42$ と決定された）

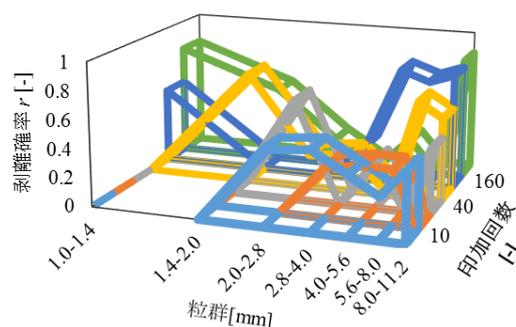


図4.3.18 ED産物粒群および印加回数の変化に伴う剥離確率 r の変化

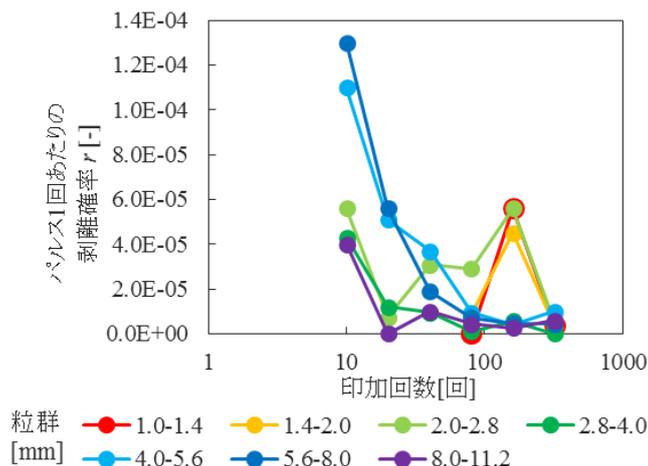


図4.3.19 パルス印加1回あたりの剥離確率の比較

4.4 電気パルス粉砕機構に関する基礎研究

4.4.1 試料および実験方法

電気パルス粉砕の異相境界面優先破壊機構を解明するために、人工二成分系試料を作成し、その静電場解析を行った。電気パルス粉砕では、基本的にパルスは、試料に静電場を与えられた際の最大電場部分に優先的に向かうことが知られている^{1) Andres}。ここでは、有限要素法静電場解析ソフトとしてムラタソフトウェア社製のFemtet 2016.1を使用し、水中での人工二成分系試料における電場分布を求めた。対象試料としては過去の実粉砕試験に使用した(1)上記人工二成分系試料および(2)複雑系試料としてPCB上のTaコンデンサを想定した。また、(1)の素材には、本事業で関連する素材である銅、はんだ、エポキシ樹脂、石英ガラスを使用し、①導体-導体、②導体-絶縁体、③絶縁体-絶縁体の3種類の組み合わせを考慮した。

(1) 人工二成分系試料

本試料に対しては熊本大学所有の装置を使用し、低電圧 (30 kV) における試験を行った。装置電極と試料の位置関係を図4.4.1に示した。

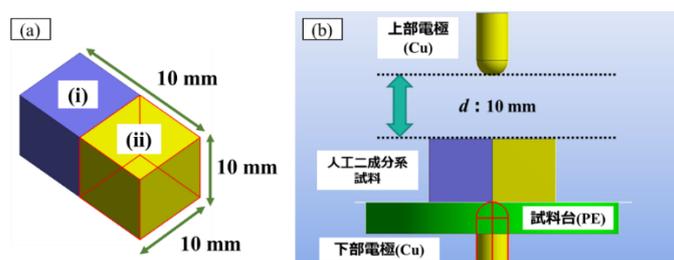


図4.4.1 (a) 静電場解析で模擬した人工二成分系試料、(b) 装置電極と試料の位置関係

(2) Ta コンデンサ試料

本試料に対しては東北大学設置のSelfrag社のLABS 2.0型装置を使用し、高電圧 (170 kV) における試験を行った。装置電極と試料の位置関係および試料の詳細な構造を図4.4.2に示す。

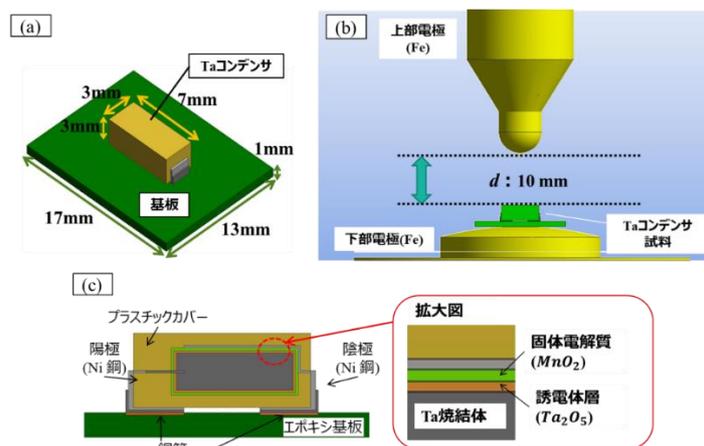


図4.4.2 (a) 静電場解析で模擬したTaコンデンサ付き基板試料、(b) 装置電極と試料の位置関係、(c) Taコンデンサ付き基板の断面図

4.4.2 DBM (Dielectric Breakdown Method) による電流経路の推定方法

DBMは従来、雷などの気相プラズマの進展予測手法として使用されてきたが、本研究では、液相プラズマであるストリーマに対して適用すべくDBMシミュレーションを行って、ストリーマが最も進展する可能性の高い電流経路の導出を行った。具体的な手法を以下に記す(図4.4.3参照)。また、一連のアルゴリズムを図4.4.4に示した。

- ① 陽極先端から試料上面までを均一な進展幅 Δd で区切る。
- ② 装置の陽極先端をストリーマ開始点として電場計算を行い、進展候補箇所 $E_1 \sim E_3$ (図4.4.3(a)参照)のうち最も高い電場の高い箇所へ Δd の距離分ストリーマを進展させる。
- ③ 段階②で進展させたストリーマ先端を開始点とし、その左右および直下の点を新たな進展候補箇所(図4.4.3(b)、 $E_4 \sim E_6$)として同様の操作を行う。
- ④ 上記①～③の操作を繰り返し行い、ストリーマ先端が試料外面または対向電極に到達した時点で解析が終了とする。

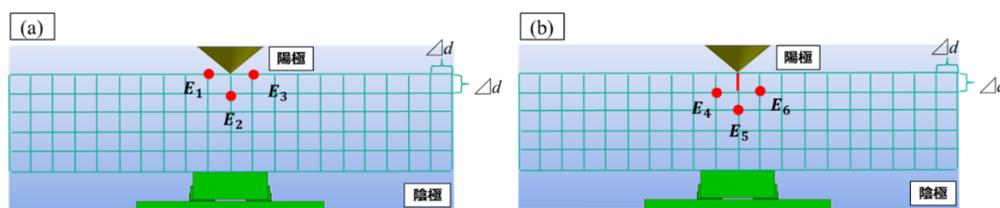


図4.4.3 DBMで考慮した試料-装置電極の位置関係((a) 段階①・②、(b) 段階③)



図4.4.4 DBMで使用したアルゴリズム

4.4.3 静電場解析・DBMシミュレーションにおけるパルスの進路推定

まずは、上記試料・装置条件を用いて、静電場解析により特定した試料内電場最大箇所とDBMにより導出した電流経路の比較および解析結果-実試験結間の比較から、解析結果の整合性・妥当性の確認を行った。3種類の人工二成分系試料に対する結果を図4.4.5～8に、Taコンデンサ試料に対する結果を図4.4.9に示す。各図中(a)の背景はストリーマ進展前の初期段階における等電位線を示している。

- ① 銅-はんだ試料 ($\Delta d = 0.1 \text{ mm}$)

導体-導体試料に対しては、電場最大箇所は試料の端点で水との界面にあるが、 $\Delta d = 0.1 \text{ mm}$ における

ストリーマ到達箇所は銅-はんだ界面となった。これは電場（最大値）が非常に小さく、また、上部電極から遠い位置にあったため、 $\Delta d=0.1$ mm ではそこまで追従できなかったためと考えられ、 Δd をごく微小に設定すればその位置は一致するはずである。ただし、実際の実験では、この試料においても、ストリーマは銅-はんだ界面に到達しており、 Δd を微小にした際のシミュレーション挙動とも異なることが分かった。なお、本試料に対して試料-電極間距離・印加電圧条件を複数考慮したED試験では、いずれの条件においても二成分系試料の破壊は起こらなかった。

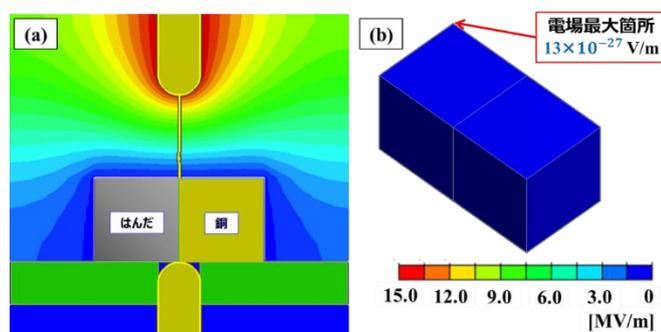


図4.4.5 銅-はんだ試料の解析結果

((a)DBMによる電流経路予測結果、(b)試料内電場最大箇所)

② 銅-エポキシ樹脂試料 ($\Delta d=0.05$ mm)

導体-絶縁体試料に対しては、試料内電場最大箇所と $\Delta d=0.05$ mm におけるストリーマ到達箇所が概ね一致する結果となった。本試料は誘電率・導電率の大きく異なる素材から構成されているため、異相境界面における最大電場の値は15 MV/mと①の場合に比べて 10^{33} 倍大きく、局所的な電場の増強が確認された。このように、試料内部に局所的に電場の強い箇所が存在する場合には両解析の結果が合致すると推測される。実際の試験においても、3種の試料のうち界面における選択的な破壊が起こった試料数が最も多く、局所的な最大電場位置にストリーマが到達して選択破壊に寄与することが知られた。

また、 $\Delta d=0.1$ mmと設定した際のDBMでのストリーマ到達箇所は、静電場解析で得られた最大電場位置から僅かに銅側に逸れる結果となった(図4.4.5参照)。これは、試料内部での局所的な電場の増強が顕著であることから、系内の上部電極側の電場分布にも影響を及ぼしたことが原因であると考えられ、導体-絶縁体界面を含む場合には Δd をより小さく設定する必要があることが分かった。

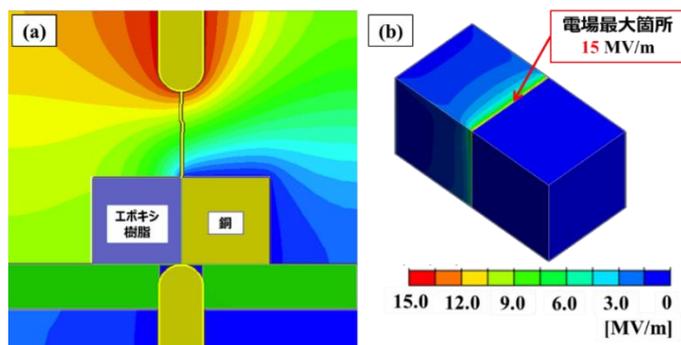


図4.4.6 銅-エポキシ樹脂試料の解析結果 ($\Delta d=0.05$ mm)

((a)DBMによる電流経路予測結果、(b)試料内電場最大箇所)

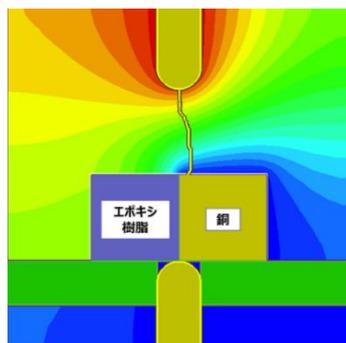


図4.4.7 銅-エポキシ樹脂試料に対するDBMによる電流経路予測結果 ($\Delta d=0.1$ mm)

③ 石英-エポキシ樹脂試料 ($\Delta d=0.1$ mm)

絶縁体-絶縁体試料に対しても、②の場合と同様に2種類の解析間における整合性が確認された。本試料においては、試料構成素材間における誘電率の差は小さいものの、試料構成素材に対する水の誘電率が非常に大きいことから、試料-水界面における局所的な電場の増強が起こったと考えられる。DBMの結果は二次元的に示したが、静電場解析での最大電場は試料を構成する二成分および水との境界面にあり、ストリーマ到達点もその部分であると予測される。また、水は今回使用した絶縁性素材のみならず、他の多くの絶縁性素材に対しても誘電率が大きいことから、素材を変えた場合にも図4.4.6に類似した結果が得られると推測できる。

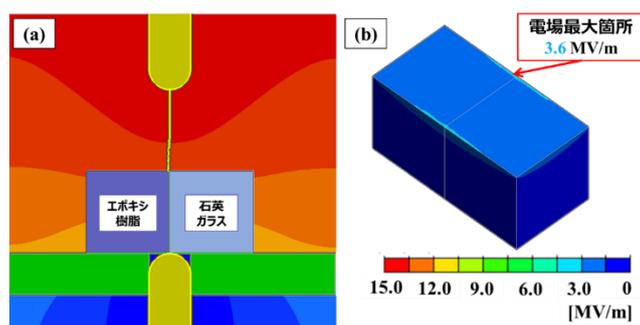


図4.4.8 石英ガラス-エポキシ樹脂試料の解析結果
((a)DBMによる電流経路予測結果、(b)試料内電場最大箇所)

④ Ta コンデンサ試料に対する結果 ($\Delta d=0.1$ mm)

Taコンデンサ試料に対しては、電場最大箇所が部品内部の点となったことから、ストリーマは内部の点に向かう途中で外部導電性素材である電極端子へ到達する結果が得られた。図4.4.10に示す実粉砕試験の観察結果とDBMの結果は概ね一致することから、本試料のような複雑形状の試料に対しても解析の整合性および解析結果の妥当性が確認された。また、本試料に対するED試験では、ほぼ100%のTaコンデンサが基板から非破壊剥離されることが分かっている。その選択破壊機構として、電極端子へ到達したストリーマは電極端子およびそれに隣接する導電性素材である基板内の銅箔を経由した後、局所的な電場の増強が起こる箇所である基板-銅箔界面へ到達し、基板外面もしくは内部を通り短絡に至ることが、上記解析結果より推測される。

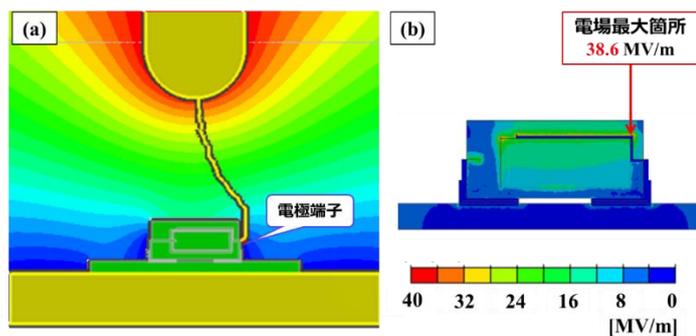


図4.4.9 Taコンデンサ試料の解析結果
 ((a)DBMによる電流経路予測結果、(b)試料内電場最大箇所)

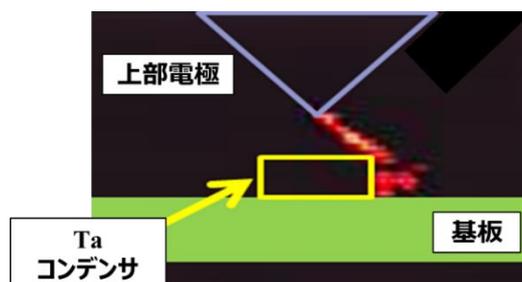


図4.4.10 EDによるTaコンデンサ粉碎試験における電流経路観察結果 (高速度カメラ撮影)

以上の結果から、静電場解析により求めた最大電場位置は、 $\angle d$ を適切に設定すればDMBによるストリーマ到達点および実際の観察結果をよく一致することが分かった。したがって、今後は静電場解析のみによっても、ある程度信頼性の高い電流経路が推測できると考えられた。

4.5 実験室規模での湿式テーブル選別挙動

4.5.1 湿式テーブル選別機構

湿式テーブル選別は、テーブルが緩やかに前進し急速に後退する揺動および揺動方向に対して垂直方向に流れる水薄流の作用によって、小さくて重い粒子(小重粒子)と大きくて軽い粒子(大軽粒子)の選別を可能にする(粒子配列は図4.5.1左を参照)。湿式テーブル選別機は、Wilfley mining machinery社製の実験用WilfleyテーブルW87032型を用いた。本試料は、比重の大きいガラス粒子が選択的に破壊されて章粒子として存在するので、比重が小さくサイズの大きいEVAとの分離には最適の比重選別法と考えられる。ここで、小重(ガラス)粒子が分配される側をHeavy側、大軽(EVA)粒子が分配される側をLight側と呼ぶことにする。また、回収口をHeavy側から①として順に番号を付け、そこで回収された産物を産物①とする(図4.5.1右)。各産物を分析し、ガラスのEVAに対する分離効率が最大となるカット回収口番号を決定した。

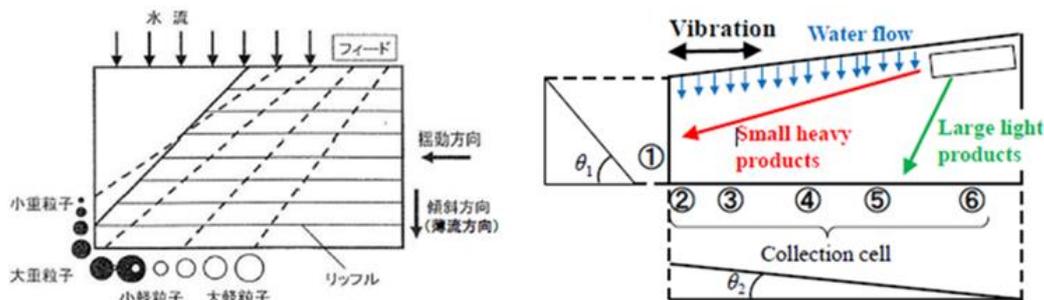


図4.5.1 湿式テーブル選別における粒子挙動図(左)および装置の基本構造(右)

4. 5. 2 湿式テーブル選別

電気パルス粉砕 (ED) + 粒度選別により得られた高純度ガラスは粒度が1.0 mm以下と非常に細粒である。ガラスの高純度化を達成することができても、その粒度が小さすぎるとガラス原料としての供給先が限られてしまう。そこで、粗粒の高純度ガラスを製造するためにはある程度印加回数を少なくする必要がある。したがって、少ないパルス印加回数でガラスとEVAの単体分離を以下に達成するかが重要となる。予備実験の結果、 $m=480$ gにおいてED+粒度選別で最大分離効率を得られたのは、 $d=20$ mm、 $N=320$ の条件であったが、ここでは、粗粒ながら比較的単体分離性の高かった $d=20$ mm、 $N=320$ 条件を選択し、ED+粒度選別+湿式テーブル選別による高純度ガラス回収を試みた。湿式テーブル選別の各種条件は過去の研究の最適条件を参考に表1.5.1のように設定した。

湿式テーブル選別産物の各回収口におけるガラスおよびEVAの分配率分布を図4.5.2に示した。また、各粒群の最大分離効率および選別前後でのEVA品位を4.5.2に示した。全ての粒群において選別前後でガラス濃縮物中のEVA含有率が大きく減少しており、 $N=80$ でもガラスとEVAの単体分離が進んでおり、後段に湿式テーブル選別プロセスを加えることで粗粒のガラスの高純度化が可能であることが示唆された。

表 1.5.1 湿式テーブル選別条件

薄流方向角度 θ_1 (deg)	5
揺動方向角度 θ_2 (deg)	-1
流量 (L/min)	10.0
衝程 (mm)	9
振動数 (Hz)	5.3
フィード速度 (乾式手動フィード) (g/min)	600

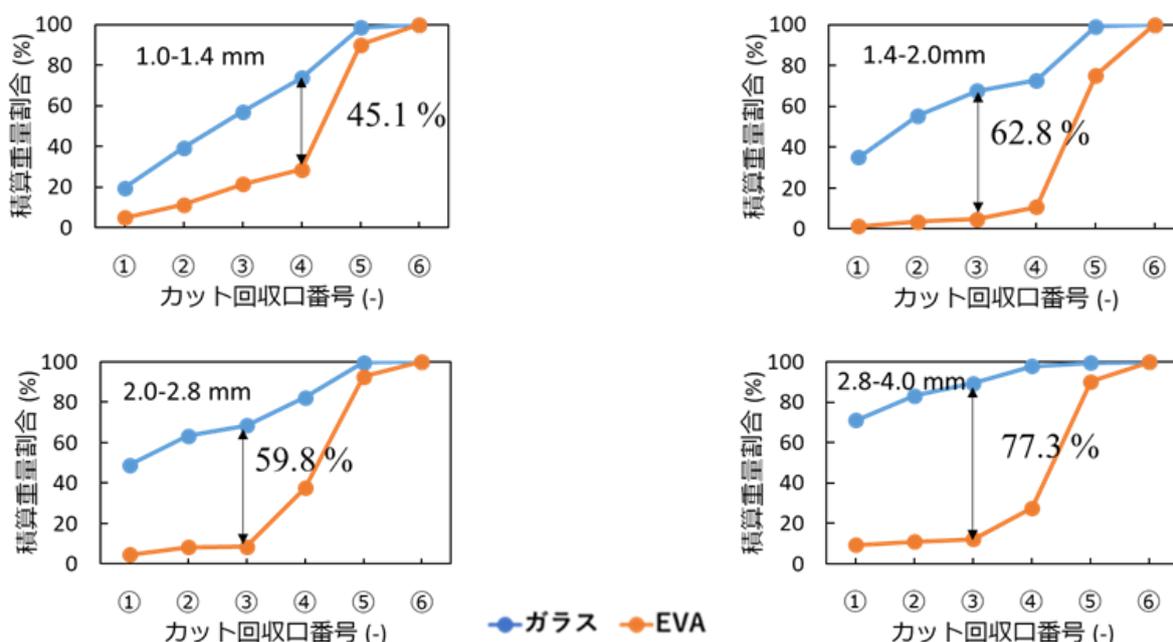


図 4.5.2 各粒群におけるガラスおよびEVAの分配率分布

(フィード粒群 左上: 1.0-1.4 mm, 右上: 1.4-2.0 mm, 左下: 2.0-2.8 mm, 右下: 2.8-4.0 mm)

表 4.5.2 湿式テーブル選別前後でのEVA品位の比較

粒群 (mm)	選別前EVA含有率 (wt%)	選別後EVA含有率 (wt%)	最大分離効率 (%)
1.0-1.4	0.62	0.043	45.1
1.4-2.0	1.69	0.035	62.8

2.0-2.8	2.76	0.34	59.8
2.8-4.0	4.71	0.51	77.3

なお、これら1.0 mm以上の粒径の湿式テーブル選別産物と、ED後の1.0 mm以下の高純度ガラス産物を合わせた場合の、ガラスのEVAに対する分離効率は56.3 %となったが、湿式テーブル選別を加えることによって、1.0-4.0 mm粒径中のガラス成分をEVAから分離できることが分かった。ED+粒度選別 およびED+粒度選別+（粗粒径への）湿式テーブル選別のどちらがより適当かは、ガラス原料の供給先のスペックによると考えられる。例えば、セラミックタイル原料とする場合はガラスの粒度はむしろ小さいことが好ましく、グラスファイバー原料する場合の粒度が大きい方が好ましい。

4. 6 本事業で得られた高純度ガラス濃縮物のセラミックスタイル原料評価

4. 6. 1 実験室規模で得られた高純度ガラス産物の評価

廃PVパネルをハリタ金属にて一次破碎（シュレディング）および微粉碎、磁選・過電流選別を施して得られたガラス濃縮物に攪拌型粉碎および電気パルス粉碎を施した高純度ガラス産物を用いて、丸美陶料株式会社（岐阜県土岐市）にてセラミックスタイル化試験を実施した。図4.6.1に、高純度ガラス原料からタイル原料を調合する工程を示した。焼成においては、1.5 hで1050 °Cまで昇温して同温度を30 min保持し、その後自然冷却した。



図4.6.1 丸美陶料における原料調合工程

使用した高純度ガラス原料および調合の割合を表4.6.1に、製造されたセラミックスタイルの外観を図4.6.2に、高純度ガラス原料の特性と製造されたセラミックスタイルの吸水率および外観の特徴を表4.6.2に、それぞれ示した。タイル製造原料は、早大で製造された電気パルス粉碎産物6試料および攪拌型粉碎産物1試料の合計7試料である。

製造されたタイルの吸水率は、いずれもJISタイル吸水率磁器質の規格内に収まっていた。タイルの外観としては、電気パルス粉碎で得られた高純度ガラスを原料として製造したタイルはいずれも表面粗度（凹凸の度合い）が大きく光沢があるが、攪拌型粉碎で得られた原料では、表面粗度が小さく光沢はないが色調は良好であった。電気パルス粉碎で得られた高純度ガラス原料中でEVA含有率と外観を比較すると、EVA含有率の低いもの（①④、2.0-5.6 mm）の色彩は良好であるが、その高いもの（②⑤、5.6-13.0 mm）は黒色が強く、両者を混ぜたもの（③⑥、2.0-13.0 mm）ではその中間色を示した。なお、攪拌型粉碎で製造したもの（⑦、2.8-4.0 mm）はEVA含有率が電気パルス粉碎産物の③⑥より高いにもかかわらず、色彩は良好であった。

以上より、製造されたタイルの外観から判断すると、攪拌型粉砕で製造した高純度ガラス原料は電気パルス粉砕でのそれよりもタイル特性がよいといえる。電気パルス粉砕の産物は、フィードが2.0-13 mmと粒度幅が広く、タイル製造時には粘土と混合して微粉砕を行っているが、粗粒のEVAは室温での粉砕では微粒にならず、それが表面粗度の増大および色彩の黒色化の原因と推定された。この条件では、攪拌型粉砕と電気パルス粉砕でそのフィードとなるガラス濃縮物の粒度が異なるが、これ以降では、それらを揃えてタイルを製造し、ガラス原料特性とセラミックスタイル特性との関係をさらに明らかにしてゆきたい。

また、通常、タイル特性を判断は、より多くの粘土との配合率、焼成条件（温度・時間等）で様々なタイルを製造し、それらを総合して行うが、今回は各種粉砕で得られた試料が少量であったために、丸美陶料にお願いして、大凡最適と思われる1条件のみでタイル製造を行っていただいた。これに関しても、以降では、より多量の高純度ガラス原料を作製し、タイル製造においてもより多くの条件で行った。

表4.6.1 セラミックスタイル化に用いた試験の原料の配合

試験区分	粉砕種類	粉砕条件および その他の原料	配合割合 (wt%)
A1枠有り	①電気パルス粉砕産物	フィード： 2.0-5.6 mm、160回	2 5
		フィード： 2.0-5.6 mm、320回	2 5
		粘土A	2 5
		粘土B	2 5
	②電気パルス粉砕産物	フィード： 5.6-13 mm、160回	2 5
		フィード： 5.6-13 mm、320回	2 5
		粘土A	2 5
		粘土B	2 5
	③電気パルス粉砕産物	フィード： 2.0-13 mm、160回	2 5
		フィード： 2.0-13 mm、320回	2 5
		粘土A	2 5
		粘土B	2 5
A1枠無し	④電気パルス粉砕産物	フィード： 2.0-5.6 mm、160回	2 5
		フィード： 2.0-5.6 mm、320回	2 5
		粘土A	2 5
		粘土B	2 5
	⑤電気パルス粉砕産物	フィード： 5.6-13 mm、160回	2 5
		フィード： 5.6-13 mm、320回	2 5
		粘土A	2 5
		粘土B	2 5
	⑥電気パルス粉砕産物	フィード： 2.0-13 mm、160回	2 5
		フィード： 2.0-13 mm、320回	2 5
		粘土A	2 5
		粘土B	2 5

⑦ 攪拌型粉砕産物	フィード： 2.8-4.0 mm	50
	粘土A	25
	粘土B	25



図4.6.2 製造されたセラミックスタイルの外観（いずれも長径：80 mm）

表4.6.2 セラミックスタイル化試験のフィード特性と製造されたタイルの特徴

試料区分		フィードのEVA品位 (wt%)	ガラス濃縮物のEVA品位 (wt%)	ガラス回収率 (%)	ガラス-EVA分離効率	吸水率 (%)	タイルの特徴
A1 枠有り	① 電気パルス粉砕産物	0.757	0.063	96.9	86.9	0.00	色はよいが表面粗度大
	② 電気パルス粉砕産物	15.157	0.676	78.5	74.5	0.00	EVAの黒色が強く表面粗度も大
	③ 電気パルス粉砕産物	1.954	0.103	95.2	91.0	0.00	上記2種の間
A1 枠無し	④ 電気パルス粉砕産物	0.770	0.161	96.3	75.5	0.00	色はよいが表面粗度大
	⑤ 電気パルス粉砕産物	14.210	0.177	74.0	73.2	0.91	EVAの黒色が強く表面粗度も大
	⑥ 電気パルス粉砕産物	1.761	0.124	98.0	91.4	0.00	上記2種の間
	⑦ 攪拌型粉砕産物	1.137	0.206	64.9	51.8	0.00	色・表面粗度ともに良好

4.7 使用済みPVパネルのリサイクルに関するLCA

4.7.1 使用済みPVパネルのリサイクルプロセス全体のインベントリデータの収集

(1) 使用済みPVパネルの処理プロセス

本プロジェクトにおいて、使用済みPVパネルのリサイクルに関わる一連のプロセスについて、LCA (Life Cycle Assessment) を実施した。LCAを実施するために必要なデータの一部はフォアグラウンドデータを収集し、一部は文献からインベントリデータを収集した。表4.7.1ならびに表4.7.2に、使用済みPVパネルの処理プロセスについて、リユースプロセスも含めて収集したデータを整理した。各インベントリデータはGate to Gateとし、表4.7.1には、それらプロセスの主要な入力ならびに出力をそれぞれの量とともに記し、そのプロセスに複数の工程が含まれる場合には、その概要を記した。それらプロセスの詳細な入力の情報からインベントリ分析された結果の温室効果ガス誘発量を表4.7.2に記した。なお、本プロジェクトの主題が、使用済みPVパネルのリサイクルであることから、使用済みPVモジュール1.00 tの投入を基本とし、その入力フロー量をベースとした、使用済みPVモジュール1.00 t処理あたりで原単

位化している。表4.7.3以下についてもすべて同様で、表4.7.2のフロー量においても、例えば、プロセス番号2の投入量は、その前のプロセス番号1の使用済みPVモジュール1.00 t処理した結果に生成されたパネルの重量が入力となっているのがわかる。

プロセス番号10と11はやや特殊で、使用済みPVモジュールのリユースプロセスであり、さらにプロセス番号11は使用済みリチウムイオン電池（Lithium Ion Battery: LiB）との組み合わせによる電力システムとしてのリユースである。

表4.7.1 使用済みPVモジュールならびにパネルの処理プロセスやリユースプロセスにおける投入から生成に至るまでのプロセス概要とフロー量

番号	メイン インプット	投入量	単位	メインプロセス	メイン アウトプット	生成量 (メイン)	単位
1	使用済みPV モジュール	1.00	t	手解体 (RTJ)	使用済みPV パネル	985.0	kg
2	使用済みPV パネル	985.0	kg	フレーム外し・圧縮破碎・風 力選別・ポールミル等 (RTJ)	ガラスパウダ ー(100 μm)	438.0	kg
5	使用済みPV モジュール	1.00	t	手解体 (RTJ)	使用済みPV パネル	981.3	kg
6	使用済みPV パネル	981.3	kg	フレーム外し・圧縮破碎・風 力選別等 (RTJ)	ガラスカレット	375.0	kg
12	使用済みPV モジュール	1.00	t	破碎・選別(ハリタ)	ガラス・EVA	818.8	kg
16	使用済みPV モジュール	1.00	t	破碎・磁力/風力/粒度/渦 電流選別(ハリタ)	ガラスカレット	488.0	kg
10	使用済みPV モジュール	1.0	枚	使用済みPVモジュールの輸 送・検査、リユース品の輸送・ 発電 (NPC)	リユース太陽 光パネル	1.0	枚
11	使用済みLiB と使用済み PVモジュール	1.0	Unit	使用済みLiBとPVモジュール の輸送・検査・輸送、系統 電力の使用	低炭素電力 システム	1.0	Unit

表4.7.2 前表に掲載の各プロセスにおけるGate to Gateの温室効果ガス誘発原単位

番号	温室効果 ガス誘発 原単位	単位	備考(メイン以外の発生量等)	参 照
1	3.7	kg-CO _{2eq} /t	ジャンクションボックスの処理によるCO ₂ を含む	3
2	133.1	kg-CO _{2eq} /t	ガラスカレットの他、アルミスクラップ、バックシート、風力選別 からの残渣などが発生	3
5	4.6	kg-CO _{2eq} /t	ジャンクションボックスの処理によるCO ₂ を含む	4
6	101.8	kg-CO _{2eq} /t	ガラスカレットの他、アルミスクラップ、バックシート、風力選別 からの残渣などが発生	4
12	-	kg-CO _{2eq} /t	詳細なインベントリデータなし。他に金属類も回収	5
16	40.3	kg-CO _{2eq} /t	副産物ゼロの仮定	2
10	1.0	kg-CO _{2eq} /枚	1枚あたりの発電量を187.5 kWh/枚と仮定。輸送を含む	4
11	13,203	kg-CO _{2eq} /Unit	1ユニットのシステム能力はPV 50 kW、LiB 100 kWh、 10年稼働と設定。輸送を含む。	5

(2) 使用済み PV パネルから回収されたガラスの破碎・選別プロセス

使用済みPVパネルからガラスカレットが得られたとき、ガラスを破壊せずに板のまま混在物なく回収しないかぎり、今回の想定のような破碎プロセスを経ると、回収されたガラスカレットには、多くの混

雑物が存在することになる。そこで本プロジェクトでは、それら混雑物入りガラスカレットから、ガラスカレットを単体分離するためのプロセス技術を開発している。ここでは、それら新開発プロセスも評価の対象とし、表4.7.3において上表と同様にGate to Gateのプロセスをリストアップし、そのインベントリ分析の結果としての温室効果ガス誘発原単位を表4.7.4に示した。

ただし、一部のプロセスのデータは、研究室における試験機から得られたデータである。インベントリデータにおいて、実測によって得られるフォアグラウンドデータは、粗い区分でしか整備されていないバックグラウンドデータに比べて、特定のプロセスのデータであり、地域や時期によっても依存するかもしれないデータであれば、その地域のその時期のデータが得られることから、なるべくフォアグラウンドデータを得ることが望ましいと考えられる。しかしながら、試験機での実測データは、今後、商用で操業することを想定すると、その規模から効率の悪いプロセスとなっているため、実測データではあるものの、フォアグラウンドデータというには少し特異なデータであることがわかる。インテンシブミキサーについては、試験機での実測とともに、商用実機でも実測したため、ともに算定した。

表4.7.3の他のプロセスならびに、以降の表4.7.5に掲載のプロセスに関しても、商用機での通常操業におけるインベントリデータの収集に努めた。ただ、工場などでは同じメータに複数の装置がつながっており一般に各装置の電力消費量は、消費電力計によって実測しない限り、得られないことが多い。そのため、一部のデータでは、各装置の定格出力を用いた推計をするなど、消費電力計による実測ではないことに留意されたい。

また、以降のプロセスでは、ガラスカレットやガラスパウダーなど、使用済みPVパネルからのガラス回収物が入力物や生成物として掲載されている。しかしながら、実際には、それぞれに混雑物の量が違ったり、粒度が違ったりと、異なるグレードのガラスカレットであることに留意が必要である。そのため、そのあとに続くプロセスにおいても異なるグレードのカレットであれば異なるインベントリデータとなったり、そもそもそのプロセスで目的のものが生産できないなどの技術的な制約となることもあり得るが、ここではガラスカレットのグレードまでは情報として保持させていない。

表4.7.3 ガラスカレットの選別プロセスにおける投入から生成に至るまでのプロセス概要とフロー量

番号	メイン インプット	投入量	単位	メインプロセス	メイン アウトプット	生成量	単位
17	ガラスカレット	488.0	kg	インテンシブミキサー&ふるい選別	ガラスカレット	488.0	kg
18	ガラスカレット	488.0	kg	インテンシブミキサー(実機)&ふるい選別	ガラスカレット	488.0	kg
19	ガラスカレット	488.0	kg	インテンシブミキサー&ウォーターテーブル	ガラスカレット	488.0	kg
20	ガラスカレット	488.0	kg	インテンシブミキサー(実機)&ウォーターテーブル	ガラスカレット	488.0	kg
21	ガラスカレット	488.0	kg	パルス破碎&ふるい選別	ガラスカレット	488.0	kg
22	ガラスカレット	488.0	kg	パルス破碎&ウォーターテーブル	ガラスカレット	488.0	kg

表4.7.4 前表に掲載の各プロセスにおけるGate to Gateの温室効果ガス誘発原単位

番号	温室効果 ガス誘発 原単位	単位	備考(メイン以外の発生量等)	参照
17	3.4	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号12から得られるカレットを使用	2
18	2.6	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号12から得られるカレットを使用	2
19	4.3	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号12から得られるカレットを使用	2
20	3.6	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号12から得られるカレットを使用	2
21	1.0	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号12から得られるカレットを使用	2
22	1.9	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号12から得られるカレットを使用	2

(3) 使用済みPVパネルから回収されたガラスカレットからのリサイクル材生産プロセス

本プロジェクトでは、分離されたカレットを用いて、セラミックブロックやセラミックタイルなど、種々の混在物の許容が広いと考えられるカレットのリサイクル用途における技術的な課題の抽出と、それら用途からの分離プロセスへの要求項目を明確にすることを旨とした。本LCAでは、それら想定されるリサイクル用途を含め、他の可能性のあるリサイクル先としての防音パネルや、グラスウールなども含めて、リサイクル材の製造プロセスについても、Gate to Gateのインベントリデータを整備した。特に、本プロジェクトで技術評価の対象としたプロセスにおいて、フォアグラウンドデータが整備された。

表4.7.5において、それらプロセスのGate to Gateのプロセスデータを、表4.7.6においてインベントリ分析の結果としての温室効果ガス誘発原単位を示した。

表4.7.5 ガラスカレットのリサイクルプロセスにおける投入から生成に至るまでのプロセス概要とフロー量

番号	メイン インプット	投入量	単位	メインプロセス	メイン アウトプット	生成量 (メイン)	単位
3	ガラスパウダー (100 μm)	438.0	kg	調合・振動成型・焼成(クリスタルクレイ)	セラミックブロック	4,380.0	kg
4	ガラスパウダー (100 μm)	438.0	kg	混合・離型剤塗布・焼成・エアブロー等(ライテック)	防音パネル	589.9	kg
7	ガラスカレット	375.0	kg	ボールミル・攪拌・スプレードライヤー等(丸美)	ガラス入り坯土	729.0	kg
8	ガラス入り坯土	729.0	kg	高圧成型・焼成等(クリスタルクレイ)	セラミックタイル	675.0	kg
9	ガラスカレット	375.0	kg	グラスウール化	グラスウール	441.2	kg
13	ガラス・EVA	818.8	kg	パルス破砕(ハリタ)	高純度ガラス	818.8	kg
14	高純度ガラス	818.8	kg	ボールミル・攪拌・スプレードライヤー等(丸美)	ガラス入り坯土	-	kg
15	ガラス入り坯土	-	kg	高圧成型・焼成等(クリスタルクレイ)	セラミックタイル	1,473.8	kg
23	ガラスカレット	488.0	kg	ボールミル・攪拌・スプレードライヤー(丸美)	ガラス入り坯土	948.7	kg
24	ガラス入り坯土	948.7	kg	高圧成型・焼成(クリスタルクレイ)	セラミックタイル	878.4	kg
26	ガラスびんパウダー	438.0	kg	調合・振動成型・焼成(クリスタルクレイ)	セラミックタイル	4,380.0	kg

表4.7.6 前表に掲載の各プロセスにおけるGate to Gateの温室効果ガス誘発原単位

番号	温室効果 ガス誘発 原単位	単位	備考(メイン以外の発生量等)	参照
3	1,760.2	kg-CO _{2eq} /t	原料として陶磁器くずを調合。プロセス番号2により得られるガラスパウダーを使用	3
4	84.9	kg-CO _{2eq} /t	発泡剤、離型剤等と調合。プロセス番号2により得られるガラスパウダーを使用	4
7	190.3	kg-CO _{2eq} /t	カレット以外の坯土原料を調合。プロセス番号6により得られるカレットを使用	4
8	555.3	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号6により得られるカレットを使用	5
9	626.9	kg-CO _{2eq} /t	プロセス番号6により得られるカレットを使用	5
13	3.8	kg-CO _{2eq} /t	副産物や処理物の発生はゼロと仮定	5

14	415.4	kg-CO ₂ eq /t	輸送は除く。カレット以外の坏土原料を調合。プロセス番号13により得られるカレットを使用。坏土生成量は記載なく、プロセス番号15に続き、セラミックタイルの生成量のみ記載あり。	5
15	1,212.4	kg-CO ₂ eq /t		5
23	211.9	kg-CO ₂ eq /t	カレット以外の坏土原料を調合。プロセス番号12により得られるカレットを使用	2
24	713.5	kg-CO ₂ eq /t	カレット以外のタイル原料を調合。プロセス番号12により得られるカレットを使用	2
26	1,760.2	kg-CO ₂ eq /t	ガラスびんパウダー以外のタイル原料を調合。輸送は除く。	3

(4) ガラスカレットからのリサイクル材によって回避される生産プロセス

最後に、ガラスカレットのリサイクルによって生産されることによって、天然資源からの生産プロセスが回避されると考えられる。例えば、回収されたガラスカレットから水平に板ガラスを生産したとすると、熔融窯以降のプロセスは同じであるものの、その原料となる珪砂などの天然鉱物資源の採掘から、窯に輸送されてくるまでのプロセスが回避されることとなる。このような天然資源消費の回避分は、リサイクルによる回避効果ともいわれ、その対比されるプロセスをベースラインなどと呼ぶこともある。

以下には、上表までにおいてリサイクル材として生産される材料を天然資源から生産するプロセスについて取りまとめた。表4.7.7にはプロセスの概要を、表4.7.8にはインベントリ分析の結果としての温室効果ガス誘発原単位を示した。なお、上表では明確に記されていないが、使用済みPVパネルからは、その配線に使用される銀や銅が回収される。(1)で記したように、使用済みPVモジュール1.00 t 処理あたりでフロー量が記されているため、プロセス番号33ならびに34に記されているように、回収される銀は使用済みPVモジュール1.00 tあたり1.3 kg、同様に銅は14.2 kgである。銀や銅の原料となる鉱物は、複数の資源を併産するため、単純に逆算によって鉱石消費量が導出できないため、プロセス番号33や34の鉱石の投入量は不明となっている。

プロセス41は、(1)にて使用済みPVモジュールのリユースもプロセスとしてリストしたが、そのリユースによって回避されるプロセスであるため、少し特殊なプロセスとなっている。表4.7.1のプロセス番号11と照らし合わせると理解できる。

表4.7.7 ガラスカレットのリサイクルによって回避される天然資源からの生産プロセスにおける投入から生成に至るまでのプロセス概要とフロー量

番号	メイン インプット	投入量	単位	メインプロセス	メイン アウトプット	生成量 (メイン)	単位
27	岩石	782.4	kg	採掘・破碎	路盤材	782.4	kg
28	ワイヤー除去 ガラス	560.1	kg	スプレードライヤー加工・混合・焼成・エアブロー等	防音パネル	589.9	kg
30	長石	-	kg	長石採取～選鉱・製錬	長石10mm	375.0	kg
31	長石10mm	375.0	kg	ポールミル・攪拌・スプレード ライヤー(丸美)	坏土	729.0	kg
32	坏土	729.0	kg	高圧成型・焼成(クリスタルク レイ)	セラミックタ イル	675.0	kg
33	鉱石	-	kg	採掘～精錬	銀	1.3	kg
34	鉱石	-	kg	採掘～精錬	銅	14.2	kg
35	ガラス屑、け い砂等	-	kg	採取～調合・溶解・繊維化	グラスウール	441.2	kg
37	長石	-	kg	採取～選鉱・製錬	長石10mm	818.8	kg
38	長石10mm	818.8	kg	ポールミル・攪拌・スプレード ライヤー(丸美)	坏土	-	kg

39	坏土	-	kg	高压成型・焼成(クリスタルクレイ)	セラミックタイル	1,473.8	kg
41	新品LiB、新品PVモジュール	1.0	Unit	LiBとPVの新品製造・輸送・使用後の輸送・廃棄・リサイクル、系統電力の使用	電力システム	1.0	Unit

表4.7.8 前表に掲載の各プロセスにおけるGate to Gateの温室効果ガス誘発原単位

番号	温室効果ガス誘発原単位	単位	備考(メイン以外の発生量等)	参照
27	5.8	kg-CO _{2eq} /t	輸送を含む。	3
28	103.4	kg-CO _{2eq} /t	ガラス以外の原料を調合。	3
30	0.4	kg-CO _{2eq} /t	輸送を含む。	4
31	164.6	kg-CO _{2eq} /t	長石以外の原料も調合。輸送は除く。	4
32	805.4	kg-CO _{2eq} /t	輸送は除く。	4
33	35.6	kg-CO _{2eq} /t	輸送を含む。	4
34	52.2	kg-CO _{2eq} /t	輸送を含む。	4
35	935.3	kg-CO _{2eq} /t	輸送を含む。	4
37	0.9	kg-CO _{2eq} /t	輸送を含む。	5
38	359.5	kg-CO _{2eq} /t	長石以外の原料も調合。坏土生成量は記載なく、プロセス番号39に続き、セラミックタイルの生成量のみ記載あり。輸送は除く。	5
39	1,758.5	kg-CO _{2eq} /t		5
41	39,661	kg-CO _{2eq} /Unit	1ユニットのシステム能力はPV 50 kW、LiB 100 kWh。輸送を含む。	5

(5) 使用済みPVモジュールのリサイクルによって回避される処理プロセス

表4.7.7に挙げたように、ガラスのリサイクルによって生産される材料によって回避されるプロセスがある一方、それらガラスをはじめ資源が回収されたことで、回避された処理もある。これら処理プロセスも、回避される天然資源からの生産プロセスと同様に、ベースラインプロセスとも呼ばれる。表4.7.9では、使用済みPVモジュールがリサイクルされていなかった場合に実施されていた処理プロセスを挙げ、リサイクルによってそれらの処理が回避された効果も評価した。

表4.7.9 使用済みPVモジュールのリサイクルによって回避される処理プロセスにおける投入から生成に至るまでのプロセス概要とフロー量

番号	メインインプット	投入量	単位	メインプロセス	メインアウトプット	生成量(メイン)	単位
25	使用済みPVパネル	985.0	kg	アルミフレーム外し・破碎・乾式製錬・ジョークラッシャー	路盤材	782.4	kg
29	使用済みPVパネル	981.3	kg	アルミフレーム外し・破碎・管理型埋立	埋立	818.8	kg
36	使用済みPVモジュール	1.00	t	破碎・選別～管理型埋立	埋立	818.8	kg

表4.7.10 前表に掲載の各プロセスにおけるGate to Gateの温室効果ガス誘発原単位

番号	温室効果ガス誘発原単位	単位	備考(メイン以外の発生量等)	参照
----	-------------	----	----------------	----

25	315.7	kg-CO2eq /t	アルミフレーム外しによるアルミ、乾式精錬による銅、銀の回収あり。輸送は除く。	3
29	99.4	kg-CO2eq /t	アルミフレーム外しによるアルミ回収あり。輸送は除く。	4
36	31.0	kg-CO2eq /t	金属回収あり。輸送を含む。	5

4. 7. 2 評価対象プロセス

使用済みPVパネルのリサイクルについて、使用済みパネルの収集、その後、リサイクルよりもリユースが望まれ、リユースできるかどうか診断するなどのプロセスがあり得るが、ここでは評価の対象としなかった。そのため、本研究では、使用済みとなったPVパネルが収集され、シュレツダ処理されることから評価対象とし、回収された二次資源がリサイクルされるまで評価した。それに伴って回避される、天然資源由来の製造プロセスならびに回避される最終処分についても、比較対象のベースラインとして評価した。

対象としたプロセスでは、破碎選別を2段階に分けて行ったことから、破碎選別①、破碎選別②として区別した。破碎選別にて生成されたガラスカレットによるリサイクルタイルを製造するプロセスについては、タイル原料を調製する坯土製造プロセスと、原料を成型し焼結するセラミックタイル製造の2つの工程として区別した。

図4. 7. 1および表4. 7. 11に、本プロジェクトでのリサイクルプロセスのパターンの前提を、図4. 7. 2～4. 7. 7にて各リサイクルプロセスフロー、表4. 7. 12～4. 7. 17にて算定結果を示す。表4. 7. 18ならびに図4. 7. 8、図4. 7. 9にて、それら各パターンの算定結果の比較を示した。最後に、表4. 7. 19に、用いたデータリストを示した。

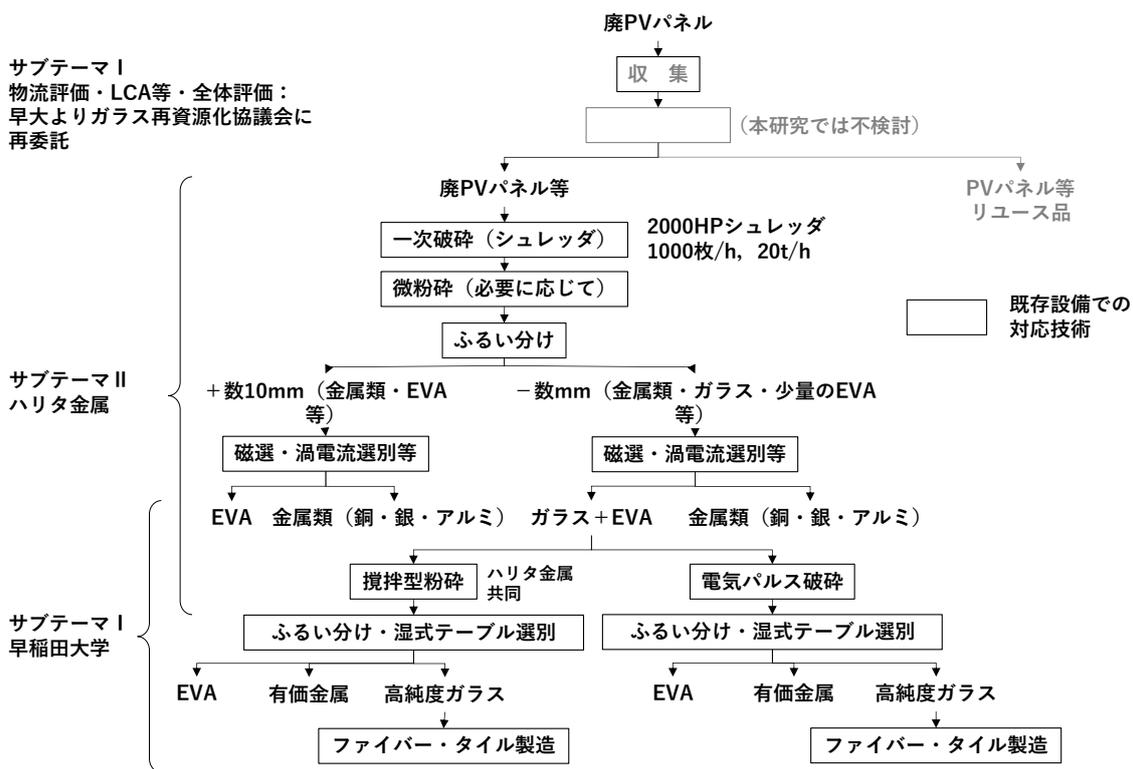


図4. 7. 1 ガラス化タイル原料化試験に提供されたサンプルの廃PVからの処理フロー

表4.7.11 本プロジェクトでのリサイクルプロセス

	破碎選別① (実機)	破碎選別② (ラボ実験)	坯土製造 (実機)	セラミックタイル 製造(実機)	輸送 (実機)
【1-1】	シュレツダー破 碎,	インテンシブミキサー, ふるい選別	ポールミル, ポンプ,	高圧成型機, 大型集塵機,	共通

【1-2】	風力選別, 磁力選別, 渦電流選別 ①, 粒度選別①, 渦電流選別 ②, 粒度選別②, 渦電流選別③	インテンシブミキサー (実機), ふるい選別	攪拌, スプレードラ イヤー, ベルトコンベ ア	ベルトコンベア, 焼成, セッタ輸送	
【2-1】		インテンシブミキサー, ウォーターテーブル			
【1-2】		インテンシブミキサー (実機), ウォーター テーブル			
【3】		パルス破碎, ふるい 選別			
【4】		パルス破碎, ウォータ ーテーブル			

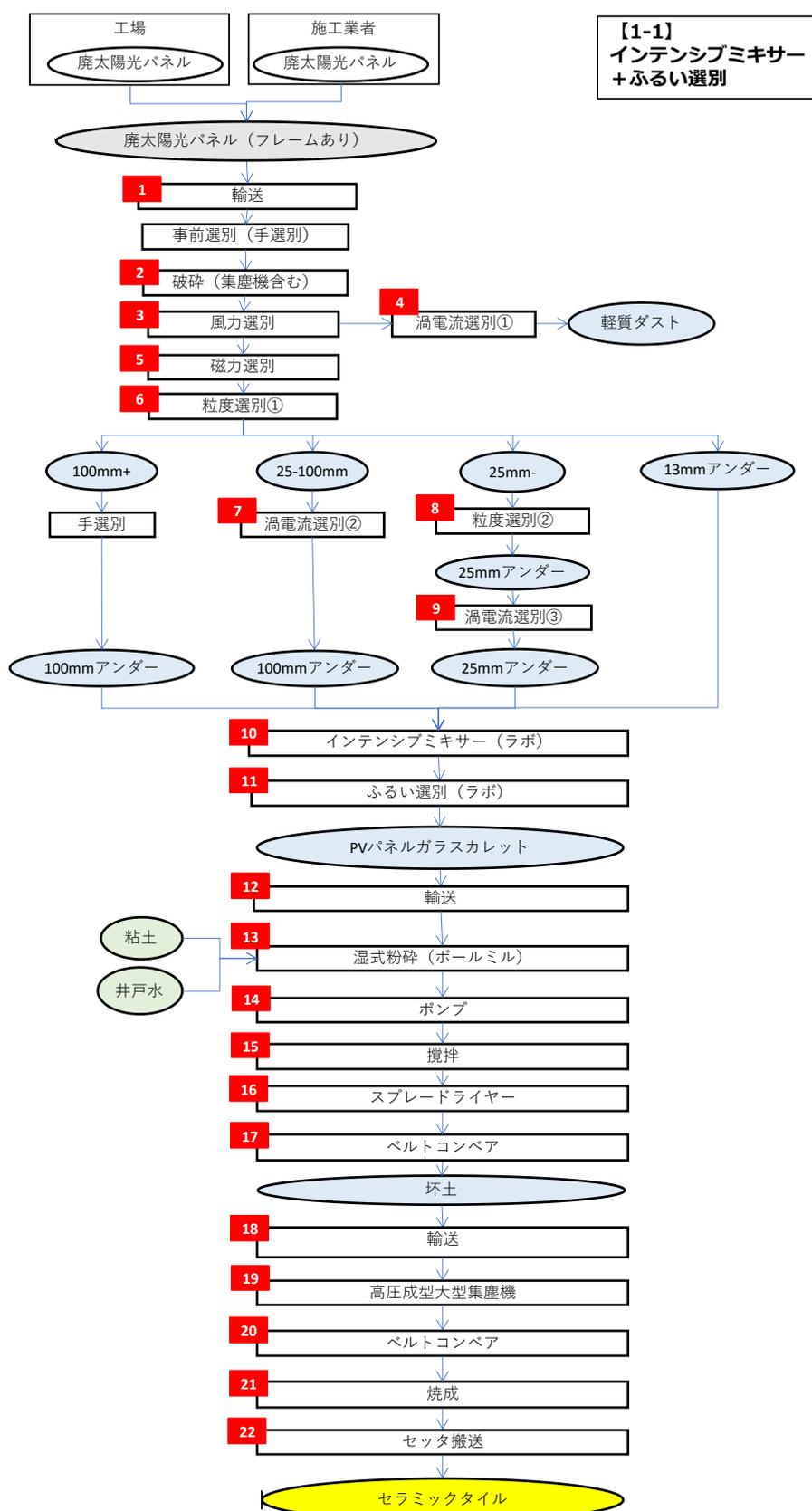


図4.7.2 【1-1】 インテンシブミキサー+ふるい選別を含むプロセスフロー

表4.7.12 【1-1】 インテンシブミキサー+ふるい選別を含むプロセスフローにおける
CO₂排出量の算定結果

(1) CO₂排出量① PVパネル1tあたりのCO₂排出量

カテゴリ	項目	排出量 (kg-CO ₂ /t)
A	破砕選別①	40.28
B	破砕選別②	3.40
C	坏土製造	211.87
D	セラミックタイル製造	713.46
T	輸送	71.67
	CO₂排出量	1,040.7

(2) 算出結果の詳細

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
A	2.3.4	破砕・風力選別・渦電流選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	5	磁力選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	6.7.8.9	粒度選別等工程	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	12.539	kwh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	6.420
	合計								40.278

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
B	10	インテンシブミキサー	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	4.784	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	2.449
	11	ふるい選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	1.865	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.955
	合計								3.404

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
C	13	湿式粉砕(ボールミル)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	5.693	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	2.915
	14	ポンプ	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.196	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.100
	15	攪拌	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.147	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.075
	16	スプレードライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	18.362	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	9.401
	16	スプレードライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかるA重油使用量	73.200	L/PVパネルt	A重油1LあたりのCO ₂ 排出量	2.710	kg-CO ₂ /L	198.372
	17	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	1.974	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.011
	合計								211.875

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
D	19	高圧成型(集塵機ふくむ)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	44.512	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	22.790
	20	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	10.640	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	5.448
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	63.166	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	32.341
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる都市ガス使用量	291.954	Nm ³ /PVパネルt	都市ガス1L使用あたりのCO ₂ 排出量	2.230	kg-CO ₂ /Nm ³	651.057
	22	セッタ搬送	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	3.561	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO ₂ 排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.823
	合計								713.459

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
T	1	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	8.670	L/tkm	軽油1LあたりのCO ₂ 排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	22.369
	12	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	9.052	L/tkm	軽油1LあたりのCO ₂ 排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	23.355
	18	輸送	坏土輸送におけるPVパネル1tkmあたりの軽油消費量	10.056	L/tkm	軽油1LあたりのCO ₂ 排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	25.944
	合計								71.688

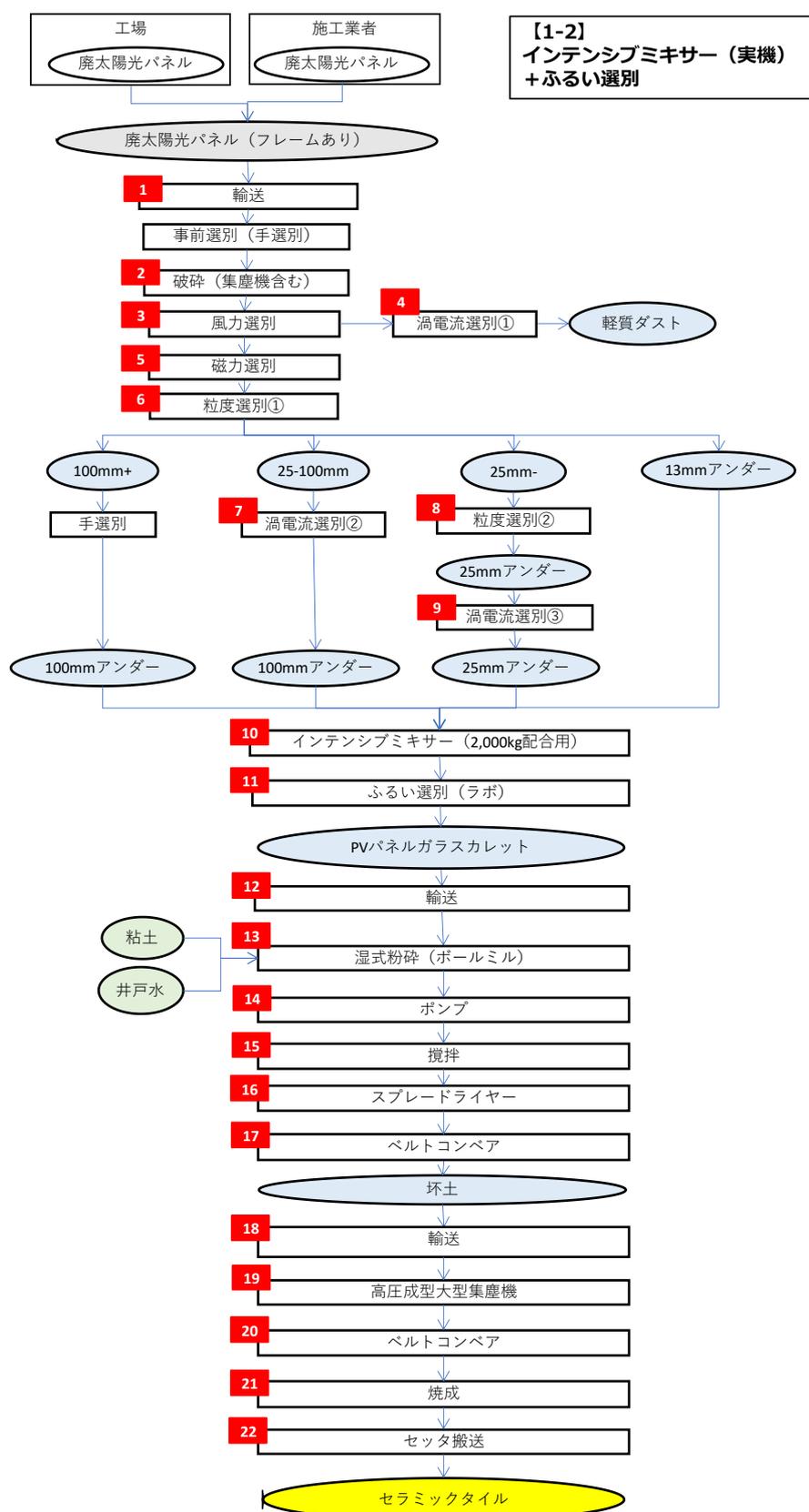


図4.7.3 【1-2】 インテンシブミキサー（実機）+ふるい選別を含むプロセスフロー

表4.7.13 【1-2】 インテンシブミキサー(実機) + ふるい選別を含むプロセスフローにおける
CO2排出量の算定結果

(1) CO2排出量

① PVパネル1t当たりのCO2排出量

カテゴリ	項目	排出量 (kg-CO ₂ /t)
A	破碎選別①	40.28
B	破碎選別②	2.63
C	坏土製造	211.87
D	セラミックタイル製造	713.46
T	輸送	71.67
	CO2排出量	1,038.9

(2) 算出結果の詳細

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
A	2.3.4	破碎・風力選別・渦電流選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	16.929
	5	磁力選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	16.929
	6.7.8.9	粒度選別等工程	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	12.539	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	6.420
	合計								40.278

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
B	10	インテンシブミキサー(2,000kg配合用)	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	3.275	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	1.677
	11	ふるい選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	1.865	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	0.955
	合計								2.632

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
C	13	湿式粉碎(ボールミル)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	5.693	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	2.915
	14	ポンプ	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.196	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	0.100
	15	攪拌	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.147	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	0.075
	16	スプレードライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	18.366	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	9.401
	16	スプレードライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかるA重油使用量	73.200	L/PVパネルt	A重油1LあたりのCO2排出量	2.710	kg-CO ₂ /L	198.372
	17	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	1.974	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	1.011
	合計								211.875

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
D	19	高圧成型(兼塵機ふくむ)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	44.512	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	22.790
	20	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	10.640	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	5.448
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	63.166	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	32.341
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる都市ガス使用量	291.954	Nm ³ /PVパネルt	都市ガス1L使用あたりのCO2排出量	2.230	kg-CO ₂ /Nm ³	651.057
	22	セッタ搬送	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	3.561	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kWh	1.823
	合計								713.459

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
T	1	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	8.670	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	22.369
	12	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	9.052	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	23.355
	18	輸送	坏土輸送におけるPVパネル1tkmあたりの軽油消費量	10.056	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	25.944
	合計								71.668

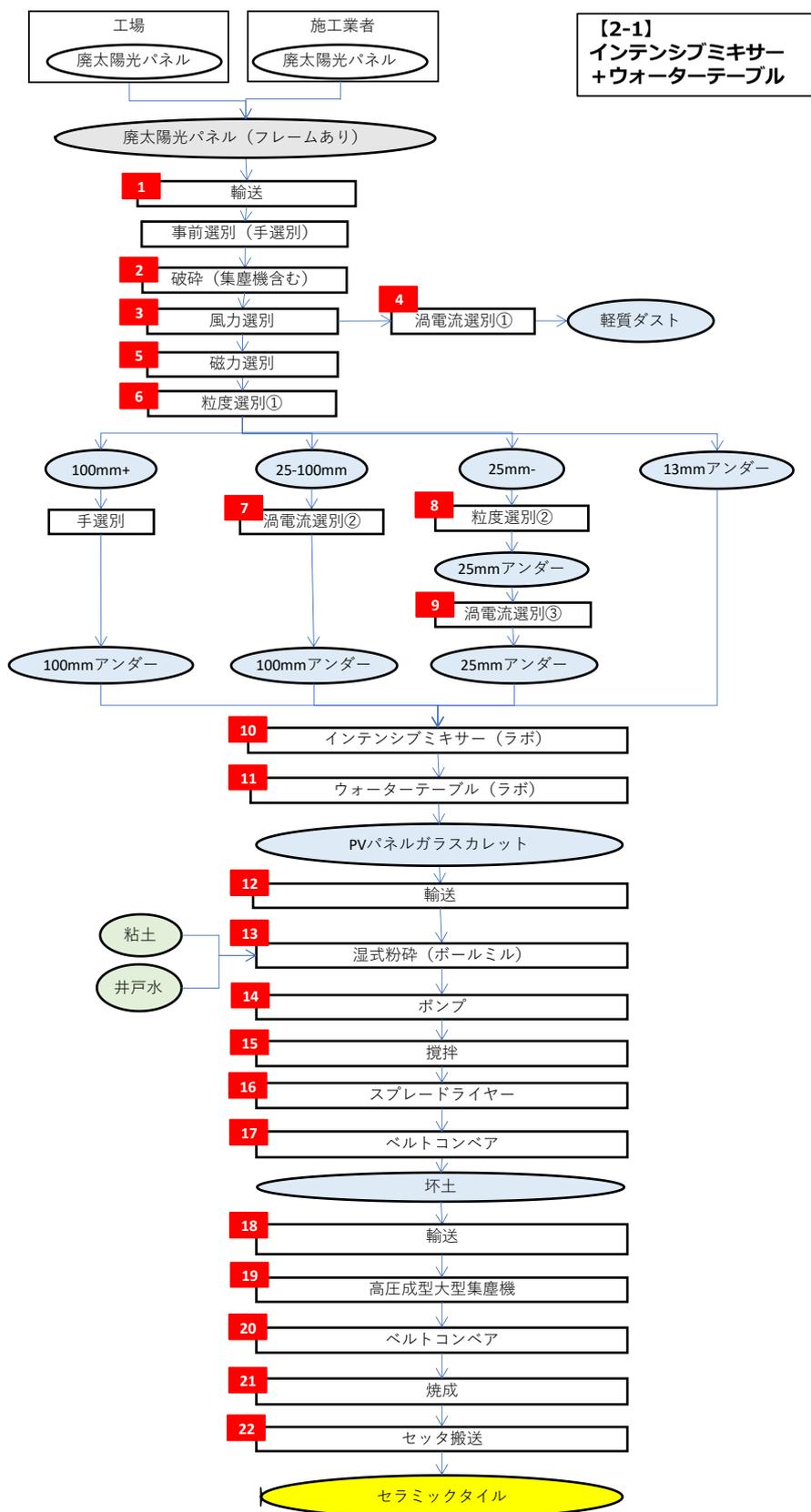


図4.7.4 【2-1】 インテンシブミキサー+ウォーターテーブルを含むプロセスフロー

表4.7.14 【2-1】 インテンシブミキサー+ウォーターテーブルを含むプロセスフローにおけるCO2排出量の算定結果

(1) CO2排出量

① PVパネル1t当たりのCO2排出量

カテゴリ	項目	排出量 (kg-CO ₂ /t)
A	破碎選別①	40.28
B	破碎選別②	4.33
C	坏土製造	211.87
D	セラミックタイル製造	713.48
T	輸送	71.67
	CO2排出量	1,041.8

(2) 算出結果の詳細

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
A	2.3.4	破碎・風力選別・渦電流選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	16.929
	5	磁力選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	16.929
	6.7.8.9	粒度選別等工程	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	12.539	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	6.420
	合計								40.278

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
B	10	インテンシブミキサー	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	4.784	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	2.449
	11	ウォーターテーブル	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	3.673	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	1.881
	合計								4.330

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
C	13	湿式粉碎(ボールミル)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	5.693	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	2.915
	14	ポンプ	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.196	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	0.100
	15	攪拌	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.147	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	0.075
	16	スプレッドライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	18.362	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	9.401
	16	スプレッドライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかるA重油使用量	73.200	L/PVパネルt	A重油1LあたりのCO2排出量	2.710	kg-CO2/L	198.372
	17	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	1.974	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	1.011
	合計								211.875

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
D	19	高圧成型(集塵機ふくむ)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	44.512	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	22.790
	20	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	10.640	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	5.448
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	63.166	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	32.341
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる都市ガス使用量	291.954	Nm3/PVパネルt	都市ガス1L使用あたりのCO2排出量	2.230	kg-CO2/Nm3	651.057
	22	セッタ搬送	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	3.561	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	1.823
	合計								713.459

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
T	1	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	8.670	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	22.369
	12	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	9.052	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	23.355
	18	輸送	坏土輸送におけるPVパネル1tkmあたりの軽油消費量	10.056	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	25.944
	合計								71.868

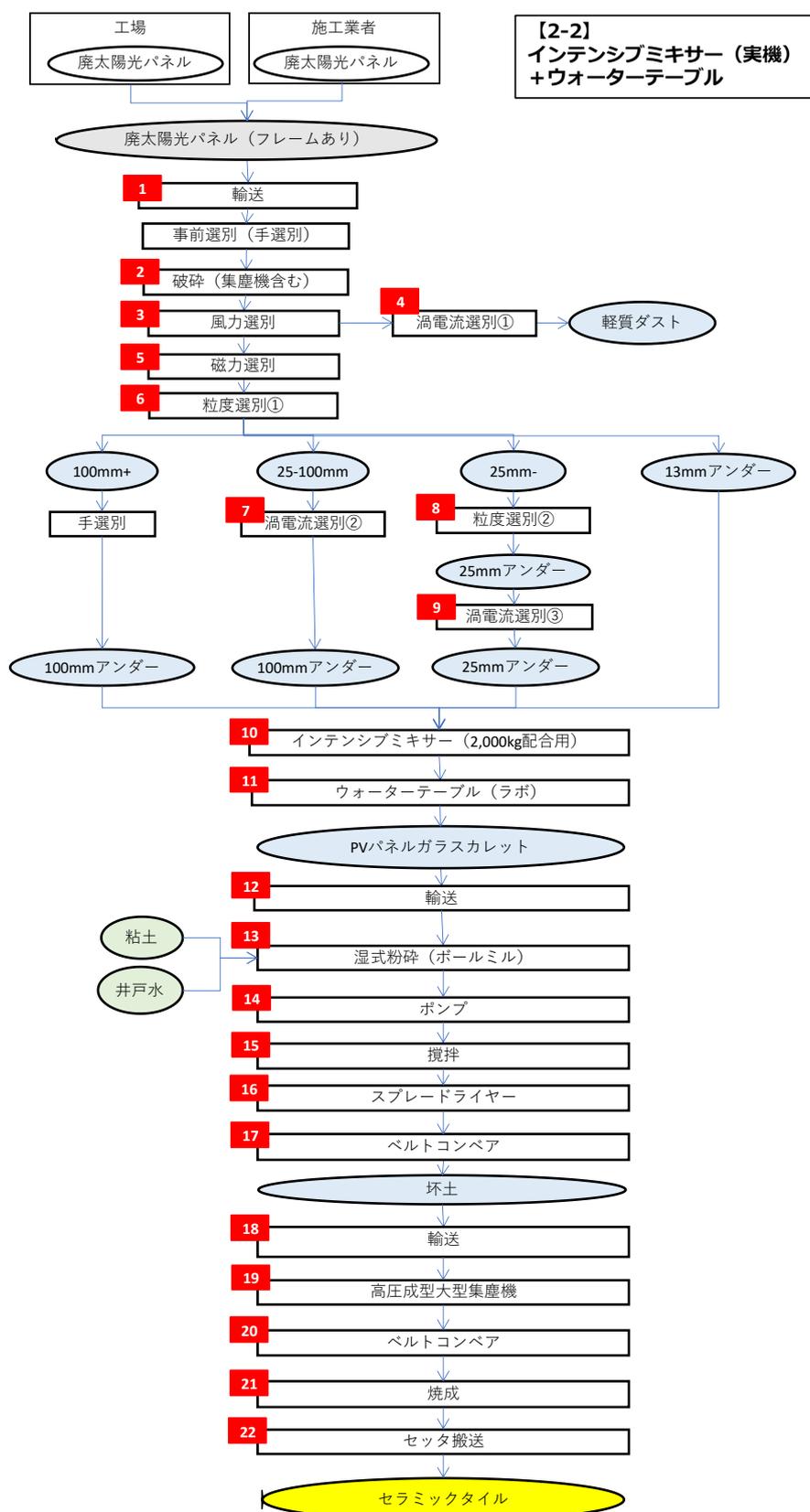


図4.7.5 【2-2】 インテンシブミキサー(実機)+ウォーターテーブルを含むプロセスフロー

表4.7.15 【2-2】 インテンシブミキサー(実機)＋ウォーターテーブルを含むプロセスフローにおけるCO2排出量の算定結果

(1)CO2排出量

①PVパネル1t当たりのCO2排出量

カテゴリ	項目	排出量 (kg-CO ₂ /t)
A	破碎選別①	40.28
B	破碎選別②	3.56
C	坏土製造	211.87
D	セラミックタイル製造	713.46
T	輸送	71.67
	CO2排出量	1,040.8

(2)算出結果の詳細

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
A	2.3.4	破碎・風力選別・渦電流選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	5	磁力選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	6.7.8.9	粒度選別等工程	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	12.539	kwh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	6.420
	合計								40.278

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
B	10	インテンシブミキサー(2,000kg配合用)	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	3.275	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.677
	11	ウォーターテーブル	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	3.673	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.881
	合計								3.557

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
C	13	湿式粉碎(ボールミル)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	5.693	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	2.915
	14	ポンプ	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.196	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.100
	15	攪拌	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.147	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.075
	16	スプレードライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	18.362	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	9.401
	16	スプレードライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかるA重油使用量	73.200	L/PVパネルt	A重油1LあたりのCO2排出量	2.710	kg-CO ₂ /L	198.372
	17	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	1.974	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.011
	合計								211.875

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
D	19	高圧成型(集塵機ふくむ)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	44.512	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	22.790
	20	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	10.640	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	5.448
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	63.166	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	32.341
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる都市ガス使用量	291.954	Nm ³ /PVパネルt	都市ガス1L使用あたりのCO2排出量	2.230	kg-CO ₂ /Nm ³	651.057
	22	セッタ搬送	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	3.561	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.823
	合計								713.469

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
T	1	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	8.670	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	22.369
	12	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	9.052	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	23.355
	18	輸送	坏土輸送におけるPVパネル1tkmあたりの軽油消費量	10.056	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	25.944
	合計								71.088

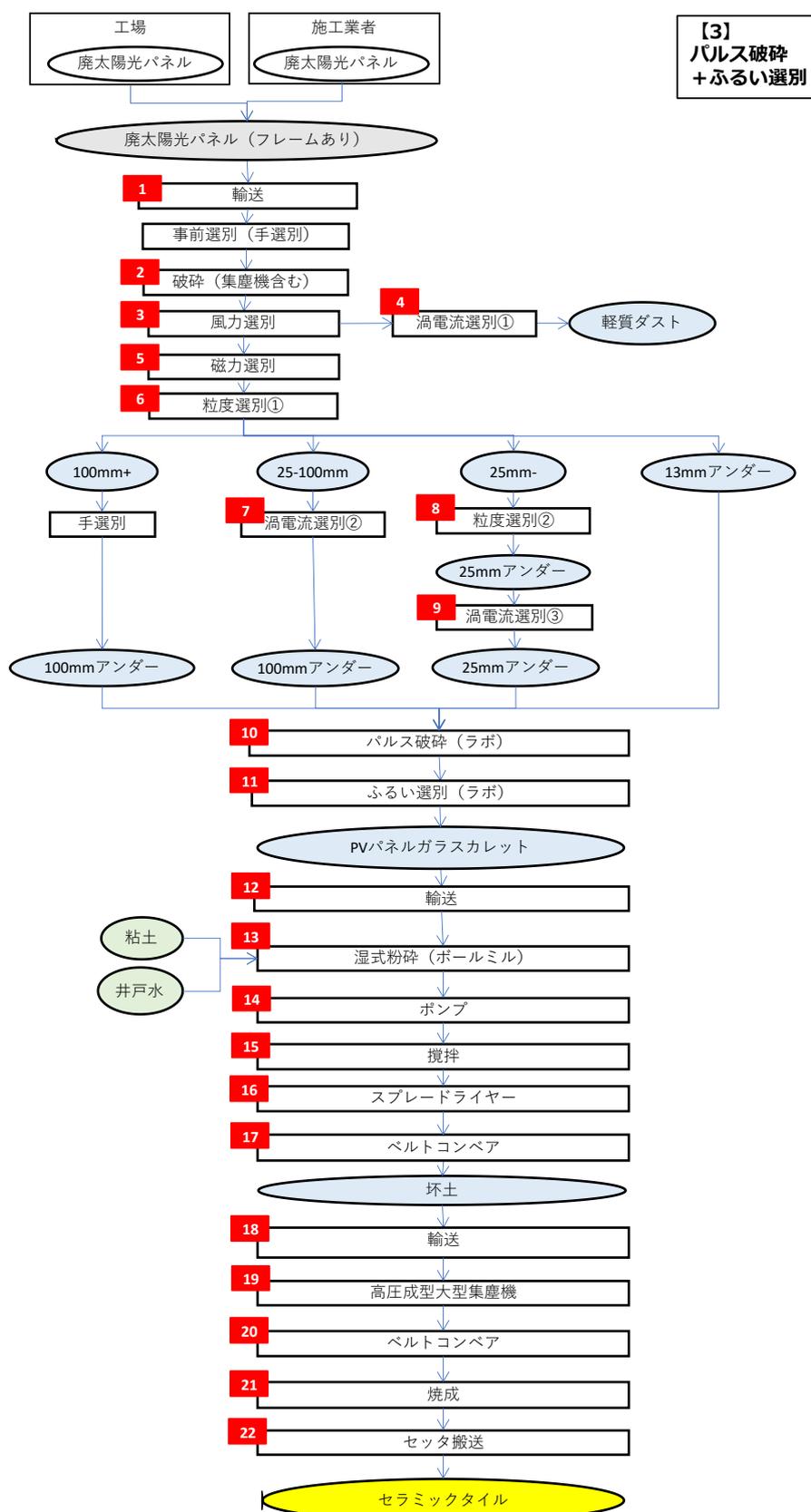


図4.7.6 【3】 パルス破碎+ふるい選別を含むプロセスフロー

表4.7.16 【3】 パルス破碎+ふるい選別を含むプロセスフローにおけるCO2排出量の算定結果

(1) CO2排出量

① PVパネル1tあたりのCO2排出量

カテゴリ	項目	排出量 (kg-CO ₂ /t)
A	破碎選別①	40.28
B	破碎選別②	0.96
C	坏土製造	211.87
D	セラミックタイル製造	713.46
T	輸送	71.67
	CO2排出量	1,038.2

(2) 算出結果の詳細

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
A	2.3.4	破碎・風力選別・渦電流選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	5	磁力選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	6.7.8.9	粒度選別等工程	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	12.539	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	6.420
	合計								40.278

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
B	10	パルス破碎	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	0.004	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.002
	11	ふるい選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	1.865	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.955
	合計								0.957

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
C	13	湿式粉碎(ボールミル)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	5.693	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	2.915
	14	ポンプ	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.196	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.100
	15	攪拌	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.147	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.075
	16	スプレッドライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	18.362	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	9.401
	16	スプレッドライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかるA重油使用量	73.200	L/PVパネルt	A重油1LあたりのCO2排出量	2.710	kg-CO ₂ /L	198.372
	17	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	1.974	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.011
	合計								211.875

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
D	19	高圧成型(集塵機ふくむ)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	44.512	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	22.790
	20	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	10.640	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	5.448
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	63.166	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	32.341
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる都市ガス使用量	291.954	Nm ³ /PVパネルt	都市ガス1L使用あたりのCO2排出量	2.230	kg-CO ₂ /Nm ³	651.057
	22	セツタ搬送	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	3.561	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.823
	合計								713.450

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			数値	単位	数値	単位			
T	1	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	8.670	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	22.369
	12	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	9.052	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	23.355
	18	輸送	坏土輸送におけるPVパネル1tkmあたりの軽油消費量	10.056	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	25.944
	合計								71.668

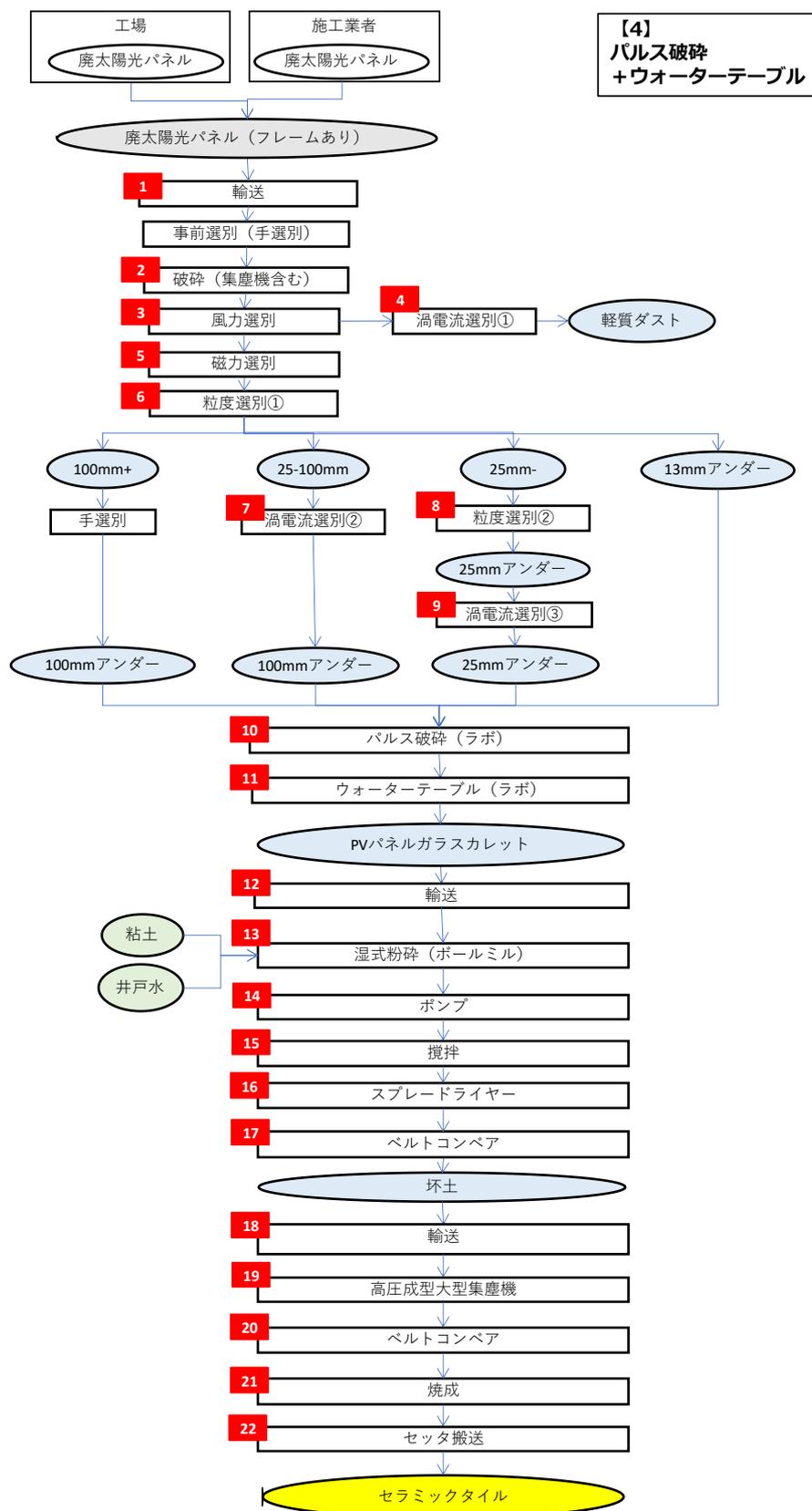


図4.7.7 【4】パルス破碎+ウォーターテーブルを含むプロセスフロー

表4.7.17 【4】パルス破碎+ウォーターテーブルを含むプロセスフローにおけるCO2排出量の算定結果

(1)CO2排出量

①PVパネル1t当たりのCO2排出量

カテゴリ	項目	排出量 (kg-CO ₂ /t)
A	破碎選別①	40.28
B	破碎選別②	1.88
C	坏土製造	211.87
D	セラミックタイル製造	713.46
T	輸送	71.67
	CO2排出量	1,038.2

(2)算出結果の詳細

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	2.3.4	破碎・風力選別・渦電流選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	5	磁力選別	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	33.065	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	16.929
	6.7.8.9	粒度選別等工程	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	12.539	kwh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	6.420
	合計								40.278

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	10	パルス破碎	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	0.004	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.002
	11	ウォーターテーブル	PVパネル1tあたりの処理にかかる電気使用量	3.673	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.881
	合計								1.883

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	13	湿式粉碎(ボールミル)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	5.693	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	2.915
	14	ポンプ	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.196	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.100
	15	攪拌	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	0.147	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	0.075
	16	スプレッドライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	18.362	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	9.401
	16	スプレッドライヤー	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかるA重油使用量	73.200	L/PVパネルt	A重油1LあたりのCO2排出量	2.710	kg-CO ₂ /L	198.372
	17	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	1.974	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.011
		合計							211.875

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	19	高圧成型(集塵機ふくむ)	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	44.512	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	22.790
	20	ベルトコンベア	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	10.640	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	5.448
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	63.166	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	32.341
	21	焼成	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる都市ガス使用量	291.954	Nm ³ /PVパネルt	都市ガス1L使用あたりのCO2排出量	2.230	kg-CO ₂ /Nm ³	651.057
	22	セッタ搬送	PVパネル1t処理あたりのセラミックタイル製造にかかる電気使用量	3.561	kWh/PVパネルt	1kWhあたりのCO2排出量	0.512	kg-CO ₂ /kwh	1.823
	合計							713.459	

カテゴリ	NO	プロセス	項目名			原単位名			排出量 (kg-CO ₂ /t)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
T	1	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	8.670	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	22.369
	12	輸送	PVパネル1tkmあたりの輸送にかかる軽油消費量	9.052	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	23.355
	18	輸送	坏土輸送におけるPVパネル1tkmあたりの軽油消費量	10.056	L/tkm	軽油1LあたりのCO2排出量	2.580	kg-CO ₂ /L	25.944
	合計							71.688	

4. 7. 3 LCA結果

表4. 7. 18ならびに図4. 7. 8に、使用済みPVパネルリサイクル全工程におけるCO₂排出量を比較した。ここに、破碎選別①は、ハリタ金属での従来型シュレッダー破碎および物理選別工程であり、破碎選別②が今回導入した新プロセスである。破碎選別工程②から排出されるCO₂量は非常に小さく（6通りの組合せにおいてリサイクル全プロセスの0.09～0.42%）、プロセス全体でのCO₂排出量はほとんど変わらなかった。すなわち、ガラスの単体分離と濃縮の効果の高いこうした破碎選別工程の導入はCO₂排出量の点からも合理的であることが判明した。

破碎選別工程②のみの各単位操作の組合せについて比較すると、図4. 7. 9のようである。同図より、破碎工程では、攪拌型ミル（インテンシブミキサー）に比べて電気パルス粉碎が、選別工程では、湿式テーブル選別（ウォーターテーブル選別）に比べてふるい分けが、それぞれCO₂排出量が低く、【2-1】のインテンシブミキサー＋ウォーターテーブルの組み合わせが温室効果ガス排出量が最も多く、【4】パルス破碎＋ふるい選別が最も少なく算定された。

表4. 7. 18 プロセスフロー別のPVパネル処理1 tあたりの温室効果ガス排出量比較

(単位：kg-CO_{2eq}/t-PVパネル)

	【1-1】	【1-2】	【2-1】	【2-2】	【3】	【4】
破碎選別①	40.28	40.28	40.28	40.28	40.28	40.28
破碎選別②	3.40	2.63	4.33	3.56	0.96	1.88
坏土製造	211.87	211.87	211.87	211.87	211.87	211.87
セラミックタイル製造	713.46	713.46	713.46	713.46	713.46	713.46
輸送	71.67	71.67	71.67	71.67	71.67	71.67
計	1,040.68	1,039.91	1,041.61	1,040.84	1,038.24	1,039.16

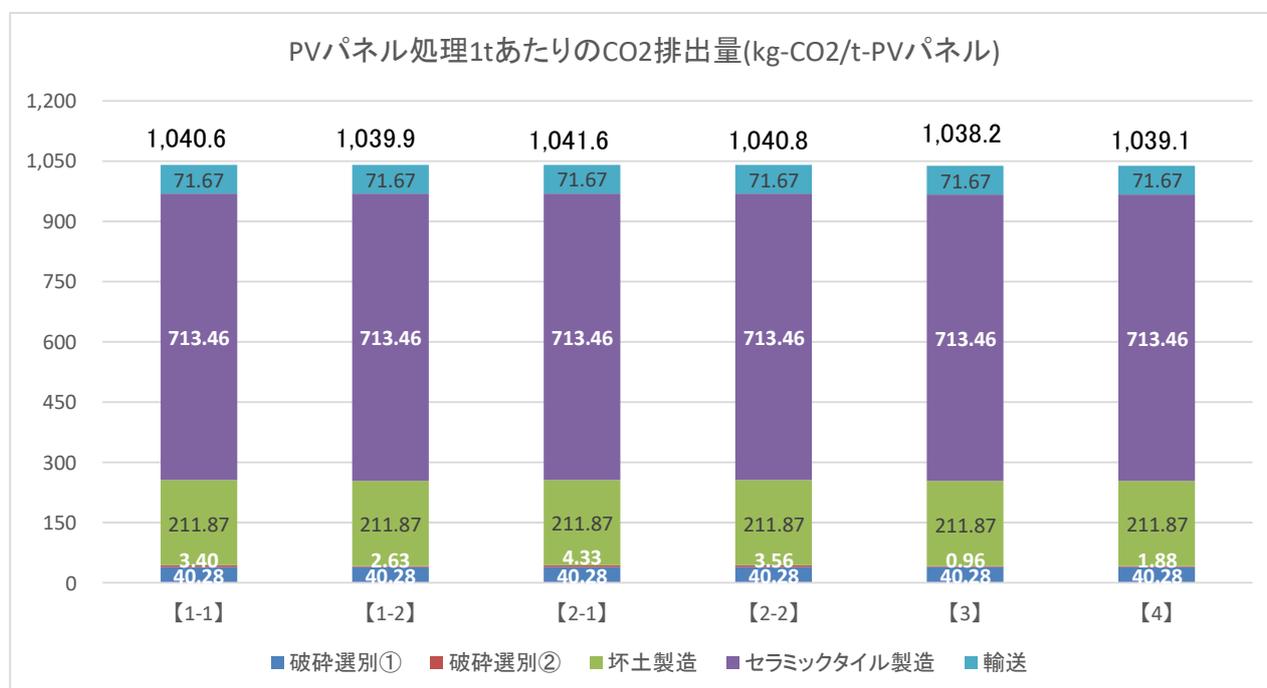


図4. 7. 8 プロセスフロー別のPVパネル処理1tあたりの温室効果ガス排出量比較

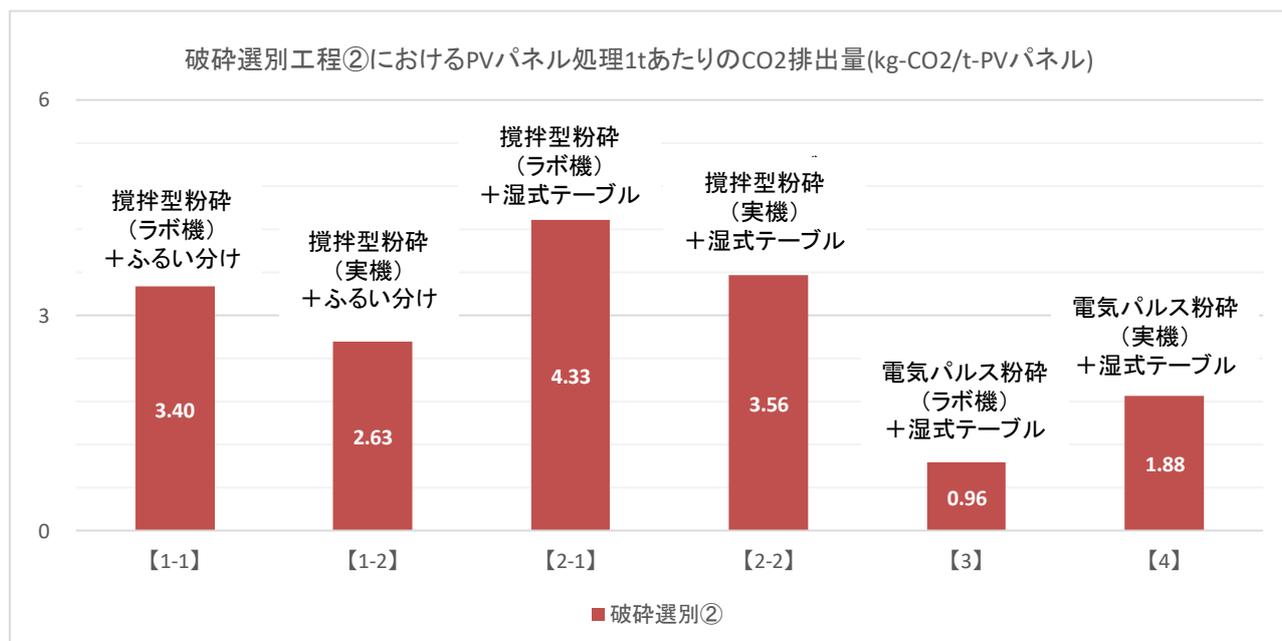


図4.7.9 破砕選別工程②におけるPVパネル処理1tあたりの温室効果ガス排出量比較

表4.7.19 本プロジェクトの算定に使用したデータの出典一覧

データ項目	出典
破砕選別工程① (シュレッダー破砕、風力選別、磁力選別、渦電流選別①、粒度選別①、渦電流選別②、粒度選別②、渦電流選別③) における設備データ	ハリタ金属株式会社ヒアリング
破砕選別工程② (インテンシブミキサー、ふるい選別、ウォーターテーブル) における処理実測データ	早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科ヒアリング
破砕選別工程② (パルス破砕) における処理実測データ	SELFRAG AG, 3210 Kerzers, Switzerland / CLIENT Bottom Ash Treatment - SELFRAG HV Pulse Power Process / TEST Report to client' Swiss incinerator Dr. Alexander Weh;SELFRAG AG;Biberenzelgli 18, 3210 Kerzers / Dezember 2015
破砕選別工程② (インテンシブミキサー (実機)) における設備データ	丸美陶料株式会社ヒアリング
坯土製造工程における材料比データ	丸美陶料株式会社ヒアリング
坯土製造工程 (ボールミル、ポンプ、攪拌、スプレードライヤー、ベルトコンベア) における設備データ	丸美陶料株式会社ヒアリング
セラミックタイル製造工程 (高圧整形大型集塵機、ベルトコンベア、焼成、セッタ輸送) における設備データ	クリスタルクレイ株式会社ヒアリング
坯土製造工程およびセラミックタイル製造工程 (高圧整形大型集塵機、ベルトコンベア、焼成、セッタ輸送) における各設備の効率	JIS C 4210:2010 「一般用低圧三相かご形誘導電動機」を参考に仮定
電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	「電気事業者別排出係数一覧 (H29年度実績 代替値)」 ー平成29年度実績ー H30.12.27環境省・経済産業省公表
軽油の使用におけるCO ₂ 排出係数	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (参考1)」
A重油の使用におけるCO ₂ 排出係数	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (参考1)」
灯油の使用におけるCO ₂ 排出係数	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (参考1)」
都市ガスの使用におけるCO ₂ 排出係数	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (参考1)」
燃料別最大積載量別積載率別輸送トンキロ当たり燃料使用量 (改良トンキロ法)	「ロジスティクス分野におけるCO ₂ 排出量算定方法 共同ガイドラインVer. 3.1 (平成28年7月)経済産業省,国土交通省」

4.7.4 まとめ

今後、多くの使用済みPVパネルが発生することが予想されるため、大量に処理するプロセスが必要である。また、現在でも災害発生時のPVパネルが発生しているように、板ガラスの状態では回収できない使用済みPVパネルの処理が必要である。そのため、使用済みPVパネルはシュレッダ処理され、そこから回収されるガラスカレットは、混在物のためガラス原料としてリサイクルすることは困難であることが想定される。その発生量から、相当量の需要のあるリサイクル先であり、混在物のあるガラスカレットを原料とできる用途として、セラミックタイルやセラミックブロックが有力な候補と考えられる。そこで、

本プロジェクトでは、多くの使用済みPVパネルをシュレツダ処理し、それらをさらにガラス単体分離・濃縮技術を用いて、それらから実際にガラスカレットを回収した。この工程におけるCO2発生量はリサイクルプロセス全体に比べて極小であり、これらの工程を導入してガラス濃縮産物を製造する意義の大きいことが分かった。

さらに、使用済みPVパネルのリサイクルでは、リサイクル材の生産により、天然資源からの生産ならびに最終処分が回避される。回避されることによる温室効果ガスの削減効果をLCAによって評価することで、低炭素な使用済みPVパネルのリサイクルシステムの構築を目指した。LCAの結果から、今後の課題として、坯土製造工程のスプレードライヤー処理と、セラミックタイル製造工程の焼成にて多くのエネルギーを消費するため、これらの工程における省エネの促進が重要であることが分かった。

参考文献

- 1) ガラス再資源化協議会：平成29年度環境研究総合推進費事業「P V・液晶等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発」報告書。2018年3月
- 2) ガラス再資源化協議会：平成30年度環境研究総合推進費事業「P V・液晶等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発」報告書。2019年3月
- 3) 株式会社レノバ：平成27年度環境省低炭素型3R技術・システム実証事業「使用済太陽光パネルユニット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。2016年3月
- 4) リサイクルテック・ジャパン株式会社：平成28年度環境省低炭素型3R技術・システム実証事業「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。2017年3月
- 5) 株式会社啓愛社：平成29年度環境省低炭素製品普及に向けた3R体制構築支援事業「リユースEV蓄電池(LiB)・リユース太陽電池モジュール(PV)を活用した低炭素電力システムの構築実証事業」報告書。2018年3月

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

攪拌型粉砕： この手法によるPVパネル処理に関してはこれまでに知見がなく、ガラスからEVAを剥離する表面粉砕が有効であろうと予測していたが、本研究より、EVAに付着しているガラスを選択的に体積粉砕してEVAの付着力を低減させ、それを表面（攪拌型）粉砕によってEVAから剥離させることが有効であることが確認された。このことは、PVパネル中のEVAとガラスの単体分離には、適切な体積粉砕と表面粉砕との割合を達成させることが重要であることを示唆しており、今後の最適プロセス設計への指針として重要な知見と言える。また、その手法を用いて実用規模での攪拌型粉砕を実施したのは世界初の試みであり、その意義は大きいと考えている。

電気パルス粉砕： 大量処理が可能なシュレツディングと物理選別を組み合わせ得られたガラス濃縮物に電気パルス粉砕を適用して高純度ガラス原料を製造するプロセスは世界初の提案であり、また、その結果も、実験室規模ではあるが、攪拌型粉砕を上回るものとなったことは意義ある知見と考えている。また、この手法による各種試料の異相境界面選択破壊については数々の報告がなされているが、その基本原理についてはほとんど不明の状況にあったが、本研究では、静電場電場解析とDBMシミュレーションを組み合わせることで、複雑系を含む各種試料におけるストリーマの到達点を予測できることが分かった。この成果は、今後の本手法のリサイクル・鉱石処理そしてその他の応用において画期的知見になると考えている。

湿式テーブル選別： 従来、主として鉱石処理に用いられてきた選別技術だが、本事業で得られる小重ガラス粒子と大軽EVA収支の分離には原理的に最適の比重選別法であり、これを適用することによって、ガラス・EVAの分離が画期的に向上することを見出した。特に、フィード中の数wt%程度のEVA粒子を1 wt%以下にでき、こうした少量の精密分離に適用できたことは、この選別法の応用範囲を大幅に広げる意義を持っている。

(2) 環境政策への貢献

本事業では、廃PVパネルのリサイクルに関して、大量処理が可能でかつ高純度のガラス原料を製造できるプロセスが提案できた。特にこうした高度な粉砕と物理選別を組み合わせる技術は省エネルギー性が高く、今後の経済合理性のあるPVパネルリサイクルプロセスとして有望と考えている。特に今回のLCAでは、実用規模の工程においても、そのCO2排出量はセラミックタイル製造工程全体の0.09～0.42%と極小であり、その導入によってほとんど環境負荷を生じないことが判明し、今後のリサイクル技術開発において、こうした固体粉砕・選別技術導入の有効性が環境面からも明らかとなった。

<行政が既に活用した成果>

本研究で得られた知見の一部を活かし、東京都の大学研究者による事業提案制度へ「太陽光パネル高度循環利用に対する東京モデルの提案：技術と社会システムの最適パッケージの追求」の提案に至り、採択された。2020年度からは東京都事業として、本研究で得られた知見を活かした分離技術の一部が比較検討される予定である。

<行政が活用することが見込まれる成果>

上記(2)でも指摘したように、粉砕・選別技術のような固体状態での成分分離技術は、従来、その薄弱な理論的背景と低い信頼性のために、資源循環技術の核と言われながら、なかなかその進展が見られなかった。本事業において、比較的精緻な分離においても、CO2発生量を極小に抑えながらそれが効果的に機能することが明らかとなった。今後の資源循環技術開発において、行政としてもこうした伸びしろのある技術開発の高度化に多大なる支援を送るべきと考えている。

6. 国際共同研究等の状況

- ・ 国際協力： Mr. Frédéric von der Weid、Selfrag社社長、スイス、電気パルス粉砕に関して、その世界唯一の実操業リサイクルプラントを建設したスイスのSelfrag社と最近8年間にわたり、ほぼ毎年、情報交換を行っている。
- ・ 国際協力： Prof. Thomas Pretz、Aachen大学教授（2020年3月引退）、ドイツ、最近8年にわたり、ほぼ毎年、廃棄物の粉砕・選別に関する情報交換を行っている。
- ・ 国際協力： Prof. Hermann Wotruba、Aachen大学教授、ドイツ、最近8年にわたり、毎年、鉱石の粉砕・選別に関する情報交換を行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) S. Owada, R. Suzuki, Y. Kamata, T. Nakamura: Novel Pretreatment Process of Critical Metals Bearing E-Scrap By Using Electric Pulse Disintegration, J. Sustainable Metallurgy, pp. 1-6, Mar. 17, 2018

*本学術雑誌は、Springerが最近の新たなMetallurgyの重要性に鑑みて2015年に刊行したものであり、現状ではIF (Impact Factor)は発表されていないが、多くの研究者間では、2020年度には2.5～5.0のIFとして発表されることが予想されている。

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) S. Owada: “Smart Comminution” and “Smart Sorting” for Sustainable Recycling, Plenary Lecture, Special Symposium on Living Waste Recycling Carbon Value System in the 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Keynote Lecture, Pyeongchang, Korea, pp. 3-24, Oct 15, 2019

- 2) Y. Matsumoto, S. Omi, S. Owada, M. Harita, H. Terasaki, S. Kato: Production of High Purity Glass from Wasted Photovoltaic Panels by Electrical Disintegration, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 347-351, Oct 15, 2019
- 3) T. Senga, S. Maruyama, S. Omi, S. Owada, T. Namihira: Preferential Breakage Mechanism at Phase Boundary in the Electrical Disintegration -in case of an artificial conductor/insulator binary sample-, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 337-341, Oct 15, 2019
- 4) S. Owada, C. Tokoro, Y. Matsumoto, S. Omi, M. Nishi, M. Harita, and S. Kato: Novel Process of Glass Recycling in Wasted PV panels, Invited Lecture, 2nd Int. Conf. & Expo. Recycling, Osaka, p.26, Oct. 7, 2019
- 5) S. Owada, T. Suwa, and N. Sasai: Concentration of Cathode Materials from Post-Consumer Lithium ion Battery by Roasting, Selective Grinding and Physical-Physicochemical Separation, Plenary Lecture, 2nd Inter Conf & Expo on Recycling and Waste Management, Rome, May 22, 2019
- 6) A. Yoshihara, T. Senga, S. Maruyama, S. Owada: Clarifying the Behavior of Selective Breakage in Electrical Disintegration by using Electrostatic Field Analysis and Dielectric Breakdown Model, 16th Korea/Japan Symp. Resources Recycling & Material Science, p.133, May 17, 2018
- 7) Y. Matsumoto, S. Owada, M. Harita, and S. Kato: Effect of Electrical Disintegration for the Production of High Purity Glass from Wasted Photovoltaic Panels, Study on determining optimum conditions of roasting and electrical disintegration for removing impurity elements of non-ferrous metals smelting from wasted PCBs, 16th Korea/Japan Symp. Resources Recycling & Material Science, p. 155, May 17, 2018
- 8) T. Suwa, N. Sasai, and S. Owada: Concentration of Cathode Materials from Spent Lithium Ion Battery by Combining Roasting, Selective Crushing, Sieving, Magnetic Separation, and Flotation, 16th Korea/Japan Symp. Resources Recycling & Material Science, May 17, 2018
- 9) A. Yoshihara and S. Owada: Electrostatic field analysis for clarifying the detachment mechanism of Ta-capacitors from wasted PCBs by electrical disintegration, MMIJ/EARTH 2017, Sapporo, pp. 1-6, Sept. 26, 2017
- 10) S. Owada, S. Terada, T. Senga, and T. Namihira: Investigation on the Energy Distribution of Electrical Disintegration, Conference of Metallurgist (COM) 2017, no. 9627, p. 5-6 (1-7) , Vancouver, Aug. 28, 2017
- 11) S. Owada: Technical and Process Innovation in Resources Recycling by Applying Intelligent Comminution and Physical Separation, European Metallurgical Conference (EMC) 2017, Plenary Lecture, pp. 1-9, Leipzig, Germany, June 27, 2017
- 12) T. Senga, S. Terada, and S. Owada: Study on the Energy Consumption at Water and Solid Breakdown in Electrical Disintegration, 15th Japan/Korea Inter. Symp. on Resources Recycling and Material Science, Osaka, p. 276, April 19, 2017
- 13) 大和田秀二： 日本における太陽光パネルリサイクル技術最新動向，太陽光パネルリサイクルセミナー～国内外の技術動向と最新の取り組み～，中部経済産業局，AP名古屋，pp. 1-15, 0218, 2020
- 14) 大和田秀二： サーキュラーエコノミーにおける金属リサイクル技術の動向，廃棄物処理・リサイクルIoT導入促進協議会，令和元年度第1回廃棄物処理・リサイクルIoTビジネスセミナー，TKP 虎ノ門駅前カンファレンスセンター，0620, 2019

- 15) 大和田秀二： PV・液晶パネル等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発，平成30年度循環型社会形成推進研究発表会・シンポジウム，pp.31-37，1226，2018
- 16) S. Owada: Next Generation Metal Recycling Process, Inter. Symp. on Resource Sciences and Engineering, JICA Global Plaza, Tokyo, pp.1-19, 1121, 2018
- 17) 大和田秀二： 資源循環のための次世代型分離技術プロセス—金属回収を中心として—，第16回レアメタル資源再生技術研究会，名古屋市工研，0720，2018
- 18) 大和田秀二・所千晴： 製品ライフサイクル管理とそれを支える革新的解体技術開発による統合循環生産システムの構築：電気パルス解体への期待，プラスチックリサイクル化学研究会，東工大，0613，2018
- 19) 大和田秀二： 資源循環における次世代型分離技術，グローバル産学連携シンポジウム，北京聯合大学健康与環境学院，pp. 1-19，1208，2017
- 20) C. Tokoro, "Novel electrical disintegration for selective dismantling between multi-material", ICACC 2020, (1月26日-29日, Daytona beach, USA), 2020, ICACC-S8-021-2020. (Invited Lecture)
- 21) C. Tokoro, S. Murakami, I. Daigo, Y. Kikuchi. "Proposal of "Tokyo Model" for Advanced Reuse/Recycling System of Photovoltaic Panels", EcoDesign2019, (11月25日-27日, パシフィコ横浜, 神奈川), 2019, D9-1.
- 22) C. Tokoro. "Novel electrical disintegration for selective dismantling of spent products (Invited lecture)", GFMAT-2(July 21-26, Toronto, Canada). 2019, GFMAT-005-2019, p.5. (Invited Lecture)
- 23) N. Nishi, Y. Tsunazawa, S. Kato, M. Harita, S. Owada, C. Tokoro. "Application of the eccentric stirring milling on the efficient glass recovery from photovoltaic panel", GFMAT-2(July 21-26, Toronto, Canada). 2019, GFMAT-007-2019, p.5.
- 24) S. KATO and I. DAIGO: "Technical Feasibility of Recycling PV Panel Glass to Ceramics and Tiles", 11th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2019), Yokohama, Japan, p.D10-1, 2019 (加藤聡)

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) S. Owada: Next Generation Recycling Process, Invited Lecture, Guangxi Univ., pp. 1-21, Dec. 3, 2019
- 2) S. Owada: Next Generation Recycling Process, Chulalongkorn Univ., Invited Lecture, pp. 1-23, Aug. 7, 2019
- 3) 大和田秀二： 次世代型リサイクリングプロセス--Smart Comminution and Sorting--，日高洋行・バンコク，pp.1-51，Aug. 9，2019
- 4) S. Owada: Smart Comminution and Smart Sorting --Next Generation Recycling Process--，Invited Lecture, Liberty, Phoenix, pp. 1-49, Apr. 12, 2019
- 5) S. Owada: Next Generation Separation Technology in the Field of Resources Recycling, 6th Int. Conf. Characterization & Control of Interfaces for High Quality advanced Materials, and 54th Summer Symp. Powd. Tech., July 11, 2018
- 6) S. Owada: Novel Resources Recycling Process by Applying Intelligent Comminution and Separation Technology, The 10th AUN/SEED-NET Regional Conference on Geological and Geo-Resource Engineering, Plenary Lecture, Phnom Penh, Cambodia, p. 7, Aug. 3, 2017
- 7) 大和田秀二： 太陽光発電パネルリサイクル技術の動向，JX 金属定時特別講演 via Zoom, 0326, 2020

(3) 口頭発表(学会等)

- 1) 梅津えみ, 松本祐一郎, 尾見苑子, 大和田秀二, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡: 廃太陽光パネルからの高純度ガラス回収における電気パルス粉砕の適用性およびその機構解明, MMIJ 春季大会, pp. 1-6, 0317, 2020
- 2) 尾見苑子, 大和田秀二: 電気パルス粉砕における不良導体同士の異相境界面優先破壊機構解明, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
- 3) 松本祐一郎, 尾見苑子, 梅津えみ, 大和田秀二, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡: 電気パルス粉砕による太陽光パネルからの高純度ガラス回収, 資源・素材学会関東支部「第16回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0802, 2019
- 4) 西麻依子, 綱澤有輝, 加藤聡, 張田真, 大和田秀二, 所千晴: 偏心型攪拌ミルによる廃太陽光パネルからのガラス粉砕の速度論的考察, 粉体工学会春季大会, 早大国際会議場, 0509, 2019
- 5) 千賀太喜, 丸山修平, 大和田秀二, 浪平隆男, 松田樹也: 良導体-不良導体界面における電気パルス粉砕の異相境界面優先破壊機構に関する研究, 資源・素材学会春季大会講演集, 千葉工大, vol. 6, no. 1, pp. 1-7, 0308, 2019
- 6) 松本祐一郎, 尾見苑子, 大和田秀二, 張田真, 寺崎 樹, 加藤聡: 電気パルス粉砕および湿式テーブル選別を利用する大量処理かつ高純度ガラス製造可能な PV パネルのリサイクルプロセス開発, 資源・素材学会春季大会講演集, 千葉工大, vol. 6, no. 1, pp. 1-6, 0308, 2019
- 7) 千賀太喜, 丸山修平, 大和田秀二, 浪平隆男: 人工二成分系試料の電気パルス粉砕における印加電圧・電極試料間距離の影響, 資源・素材学会関東支部「第15回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0803, 2018
- 8) 大和田秀二, 松本祐一郎, 尾見苑子, 張田真, 加藤聡: 電気パルス粉砕を用いた太陽光パネルからの高純度ガラス製造, 資源・素材学会関東支部「第15回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0803, 2018
- 9) 西麻依子, 深來健一郎, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡, 大和田秀二, 所千晴: 偏心型攪拌ミルを用いた廃太陽光パネルからのガラス回収の基礎的検討, 資源・素材学会関東支部「第15回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0803, 2018
- 10) 松本祐一郎・大和田秀二・張田真: 太陽光パネルからの高純度ガラス製造における電気パルス粉砕の効果, MMIJ 春季大会 (東京), vol. 5, no. 1 pp. 1-6, 0328, 2018
- 11) 吉原彩華・千賀太喜・丸山修平・林芳樹・大和田秀二: 静電場解析および絶縁破壊モデル(DBM)による電気パルス粉砕選択破壊挙動の解明, MMIJ 春季大会 (東京), vol. 5, no. 1, pp. 1-7, 0327, 2018<学生優秀発表賞受賞>
- 12) 大和田秀二: 資源循環における分離技術の将来像-東北大学・金属資源プロセス研究センターへの期待-, 資源・素材学会秋季大会 (MMIJ/EARTH 2017), pp. 1-20, 0926, 2017

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(2) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 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技術の動向, ~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と展望, 技術情報センター, 連合会館, 0221, 2020
- 2) 大和田秀二: 賢く壊して賢く分ける-太陽光 (PV) パネルのリサイクル等-, エコプロ2019・環境再生保全機構サイエンスカフェ, pp. 1-15, 1206, 2019
- 3) 大和田秀二: 環境調和型資源循環プロセスと破砕・選別技術, 第19期フォーラム環境塾, pp. 1-44, 1204, 2019
- 4) 大和田秀二: 地球環境と資源循環, 早大理工オープンキャンパス, 環境資源工学科模擬講義, pp. 1-12, 0804, 2019
- 5) 大和田秀二: 次世代型資源循環プロセスの提案, 招待講演, J&T環境, pp. 1-24, 0712, 2019

- 6) 大和田秀二： 循環型社会構築のための次世代型リサイクル技術ー「東京2020」都市鉱山メダル製造を含むー, 招待講演, 「TIRIクロスミーティング2019」, 東京都立産業技術研究センター本部, 0705, 2019<国民>大和田秀二： 次世代型リサイクルプロセス, 啓愛社特別講演, pp. 1-60, 0514, 2019
- 7) 大和田秀二： 最近の破碎・選別技術動向, JX金属特別講演, pp. 1-40, 0325, 2019
- 8) 大和田秀二： 資源分離技術の新たな展開, 第1回資源リサイクルEXPO, 東京ビッグサイト, pp. 1-27, 0228, 2019
- 9) 大和田秀二： 環境調和型資源循環プロセスと破碎・選別技術, 第18期フォーラム環境塾, pp. 1-44, 1205, 2018
- 10) 大和田秀二： 次世代型物理選別プロセスー選鉱・分離技術のリサイクル応用, 2ー, 国際資源開発研修センター・国際資源大学平成30年度製錬・リサイクル研修 リサイクル(含む廃掃法)コース, pp. 1-48, 1107, 2018
- 11) 大和田秀二： 環境調和型資源循環概論ー選鉱・分離技術のリサイクル応用, 1ー, 国際資源開発研修センター・国際資源大学平成30年度製錬・リサイクル研修 リサイクル(含む廃掃法)コース, pp. 1-12, 1107, 2018
- 12) 大和田秀二： 次世代型物理選別プロセス, 「早稲田・松代塾」ー環境と資源: 持続可能な社会を創るためにPart 2ー, pp. 1-17, 1104, 2018
- 13) 大和田秀二： 次世代型資源分離プロセスの展望, 特別講演, エヌ・イー ケムキャット(沼津), 0112, 2018
- 14) 大和田秀二： 環境調和型資源循環プロセスと破碎・選別技術, 第17期フォーラム環境塾, pp. 1-44, 1206, 2017
- 15) 大和田秀二： 非鉄金属および家電のリサイクルに関する最新の技術動向について, 三井業際研究所静脈産業技術調査研究招待講演, 三井業際研究所大会議室, pp. 1-45, 1024, 2017
- 16) 大和田秀二： リサイクリング概論, 資源・素材塾, DOWA研修センター・錦糸町, pp. 17-32, 0826, 2017
- 17) 大和田秀二： 環境調和型資源循環システムと分離技術, あきたア-バンマイル開発マスター養成コース, pp. 1-54, 0708, 2017

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(4) その他

- 1) 学生優秀発表賞： 吉原彩華、千賀太喜、丸山修平、林芳樹、大和田秀二： 静電場解析および絶縁破壊モデル(DBM)による電気パルス粉碎選択破壊挙動の解明、資源・素材学会春季大会、pp. 1-6、2018年3月

8. 引用文献

- 1) U. Andres : Electrical Disintegration of Rock, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol.14, pp.87-110 1995
- 2) 経済産業省：2030年エネルギーミックス実現へ向けた対応について, 2018
- 3) 太陽光発電協会：太陽光発電 2050年の黎明「脱炭素・持続可能社会実現に向けて」, 2017
- 4) 伊藤雅文, ホットナイフ技術を用いた太陽光パネルのリサイクル処理ーガラスを割らずに回収する, 持続可能な社会を目指して 生活と環境 特集進む! 太陽光発電設備のリユース・リサイクル
- 5) 松本祐一郎・大和田秀二：太陽光パネルからの高純度ガラス製造における電気パルス粉碎の効果, 資源・素材講演集 Vol.5, 2018

- 6) 加藤聡・猪子兼行：廃太陽光パネルの最先端リサイクル技術について，持続可能な社会を目指して生活と環境，10月号，pp.10-15，2016
- 7) 諏訪貴大・齋藤拓哉・大和田秀二・所千晴・薄井正治郎：携帯電話用廃リチウムイオン二次電池からの正極材濃縮を目的とした最適選別フローの提案，資源・素材講演集，Vol.3，2016
- 8) 鎌田悠暉，大和田秀二，波平隆男，中村崇：二成分系人工試料を用いた電気パルス粉砕による異相境界面選択破壊機構の解明，資源・素材講演集 Vol.3 No.1，(2016)
- 9) 寺田翔，千賀太喜，大和田秀二，波平隆男：電気パルス粉砕における異相境界面優先破壊の駆動エネルギーに関する研究，資源・素材講演集(2017)
- 10) 吉原彩華，大和田秀二，中村崇：電気パルス粉砕による廃電子基板からの Ta コンデンサ剥離機構解明を目的とした静電場解析，資源・素材講演集(2017)
- 11) 加藤聡・猪子兼行：廃太陽光パネルの最先端リサイクル技術について，持続可能な社会を目指して生活と環境，10月号，pp.10-15，2016
- 12) 工藤透：板ガラスのリサイクル，Reports Res. Asahi Glass Co., Ltd., 58, 2008
- 13) 松本祐一郎・大和田秀二：太陽光パネルからの高純度ガラス製造における電気パルス粉砕の効果，資源・素材講演集 Vol.5，2018
- 14) 松本祐一郎・尾見苑子・大和田秀二・張田真・寺崎英樹・加藤聡：電気パルス粉砕および湿式テーブル選別を利用する大量処理かつ高純度ガラス製造可能な PV パネルのリサイクルプロセス開発，資源・素材講演集 Vol.6，2019
- 15) (株)三菱総合研究所：平成 24 年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務報告書，2012

Ⅱ－２ 廃PVパネルの実用設備での破碎・選別の最適化および攪拌型粉碎の実証試験（ハリタ金属株式会社）

ハリタ金属(株) 張田真（代表取締役）
寺崎英樹（取締役ゼネラルマネージャー）

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：15,500千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：5,500千円、平成30年度：5,000千円、令和元年度：5,000千円）

【要旨】

ハリタ金属では、2000 HP横型シュレッダー破碎・選別プラントにてガラスの濃縮物を副産物として製造しているが、同プラントの主目的は銀等の金属回収であり、ガラス濃縮物の歩留りは非常に低い状況であった。これをシュレッダー破碎時の操業状況を改善することにより、歩留り30.9%から52.3%へと大幅に向上することができた。ここで得られたガラス濃縮物について、同じくハリタ金属所有の実用規模湿式テーブル選別機にて選別を行い、さらなるガラス濃縮物を製造することができた。また、その際の、操業改善の課題を抽出した。また、実用規模で得られた各種ガラス濃縮物のセラミックタイル・ブロック原料およびグラスファイバー原料としての評価を行った。また、同社が新規に設置した2000 HP縦型シュレッダー破碎・選別プラントにて同様にガラス濃縮物を製造し、従来プラントに比べてガラス単体分離の良い濃縮物を製造することができることが証明された。

【キーワード】

PVガラス、横型・縦型シュレッダー、セラミックタイル・ブロック、グラスファイバー

1. はじめに

欧州では、使用済みPVパネルを大量に破碎・選別して銀濃縮物を製造するプロセスが主流であるが、PVパネルの6～7割を占めるがガラスの高純度化には至っていないのが現状である。今後、PVパネルの大量廃棄が予想される中で、こうした大量処理が可能なプロセスから安価に高純度ガラスを濃縮するプロセスが求められている。

2. 研究開発目的

ここでは、上記のような状況を踏まえ、まずは従来型シュレッダー破碎・選別プラントの操業改善によるガラス濃縮物のより効率的な回収の可能性を探るとともに、得られたガラス濃縮物に湿式テーブル選別を施し、その効果を明らかにすることが本研究の主目的である。また、こうして得られたガラス濃縮物について、セラミックタイル・ブロックおよびグラスファイバー原料としての評価も行う。さらに、構成成分の単体分離が進むことが知られている縦型シュレッダープラントにおいてもガラス濃縮物を製造し、その効果を明らかにする。

3. 研究開発方法

本研究全体におけるサブテーマⅡの位置づけを図3.1.1に示した。既述のように、サブテーマⅡで検討する事項は、以下のようなものである。

- (1) ガラス濃縮物を大量処理できる従来（横）型シュレッダープラントの操業改善
- (2) 従来（横）型シュレッダープラントで製造されるガラス濃縮物の実用規模攪拌型粉碎試験
- (3) 従来（横）型シュレッダープラントで製造されるガラス濃縮物の湿式テーブル選別によるガラス濃縮物の高純度化
- (4) 実用規模試験で得られた各種ガラス濃縮物のセラミックタイル・ブロック、グラスファイバー原料としての評価

(5) 新規型シュレッダープラントにおけるガラス濃縮物製造の検討

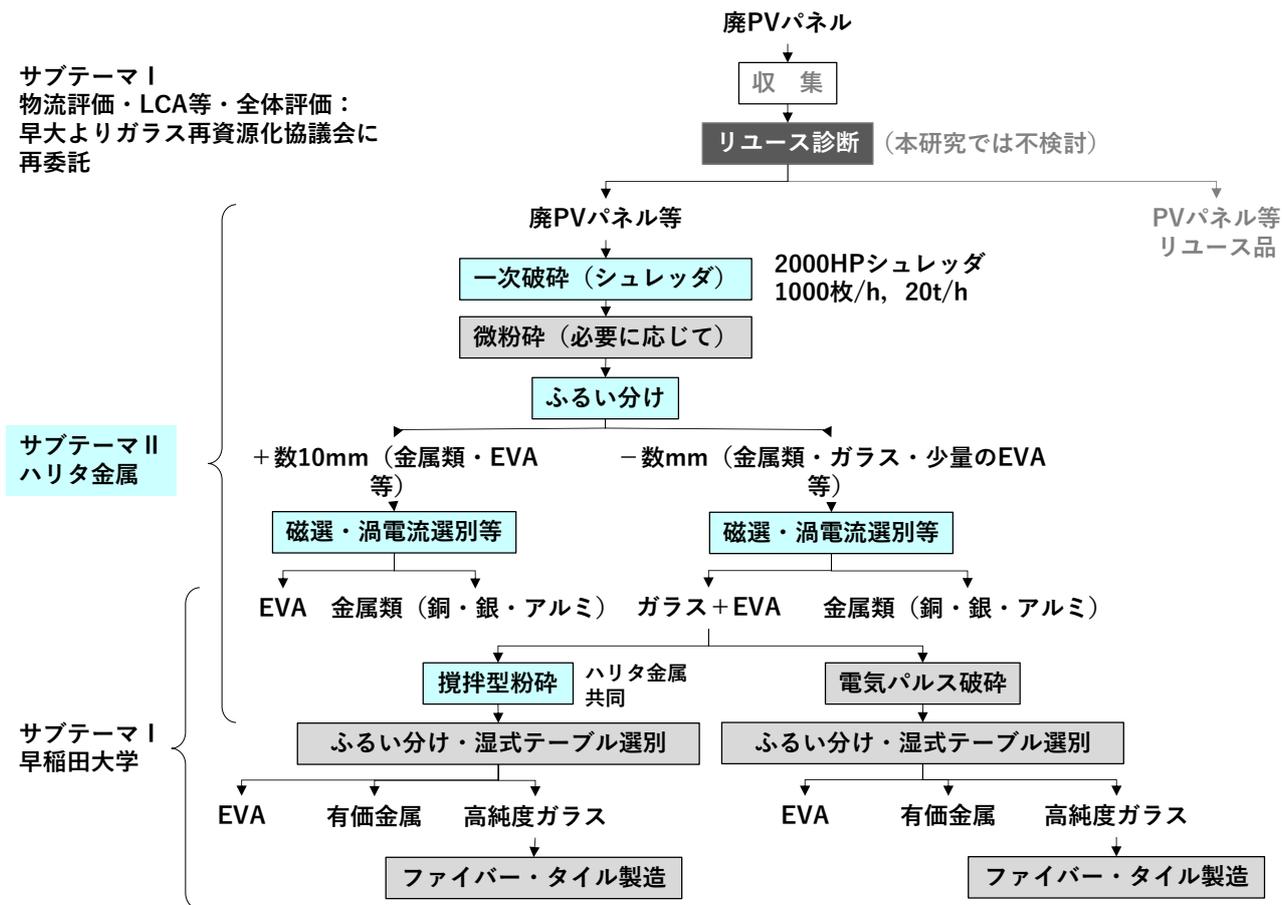


図3.1.1 想定される廃PVパネルからの高純度ガラスの製造プロセス（水色部分がサブテーマII）

4. 結果及び考察

4.1 2000HP横型シュレッダー破碎・選別処理フロー

廃PVパネルの実用化プラント活用による大量処理が可能なりサイクル技術開発を目的として、ハリタ金属 射水リサイクルセンター（富山県射水市）既設の2000HPシュレッダープラントにて廃積層薄膜パネルの破碎・選別実験を実施し、その分離状況を確認した。同プラントの図面を図4.1.1に、PVパネルの破碎・選別フローを図4.1.2に示した。

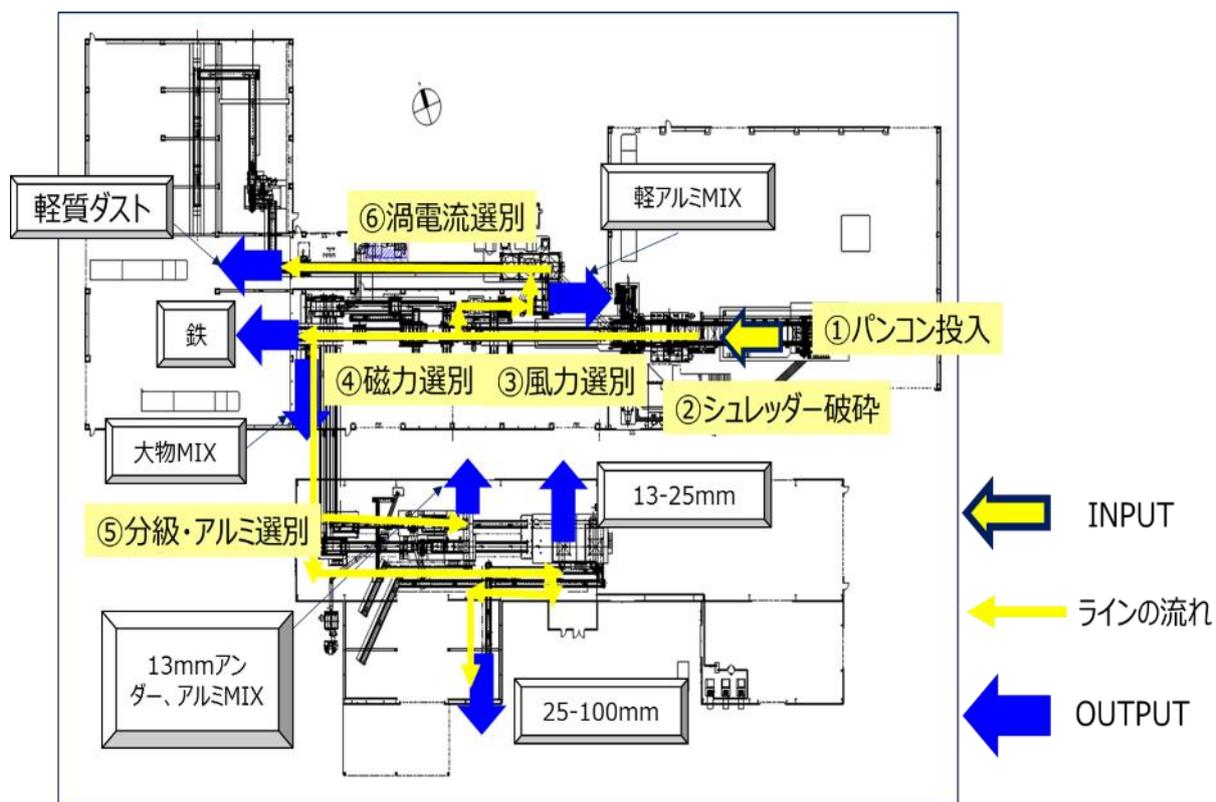


図4.1.1 ハリタ金属(株)射水リサイクルセンター 2000HPシュレッダープラント

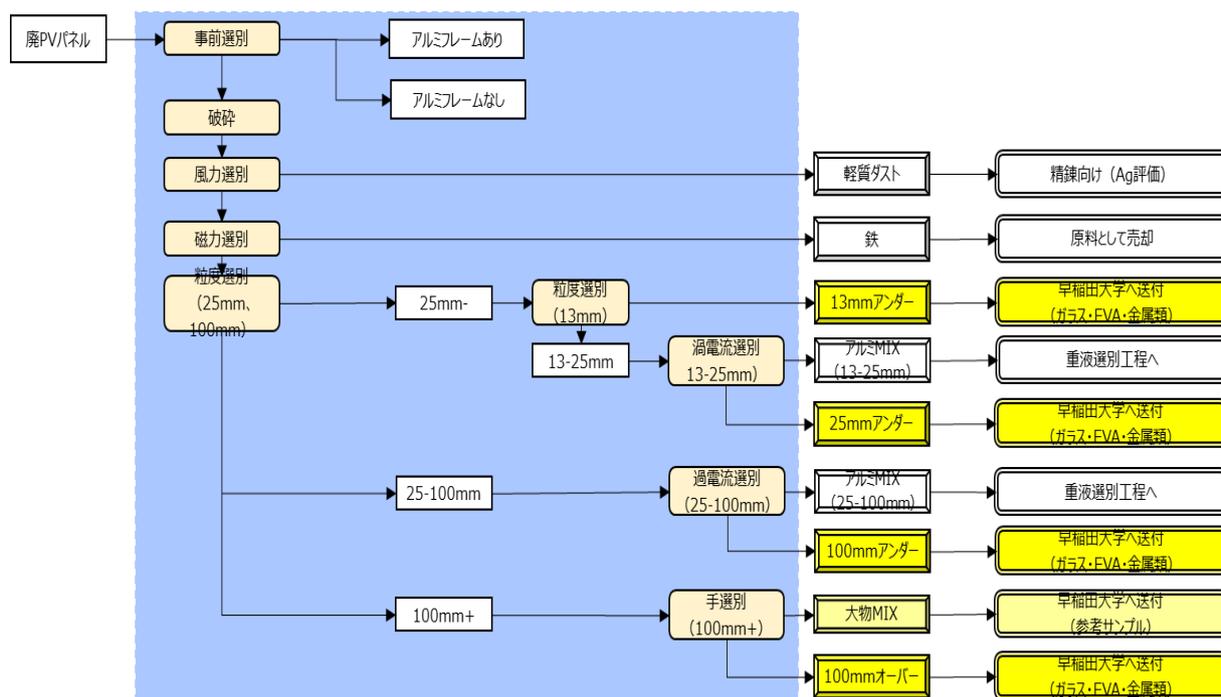


図4.1.2 ハリタ金属(株)におけるPVパネル 2000HPシュレッダー破碎・選別フロー

4.2 シュレッダー破碎条件によるガラス濃縮物の歩留りの改善

4.2.1 平成30年3月破碎試験

○破碎母材…PVパネル合計503枚

○試験条件

・破碎日…平成30年3月9日

アルミフレームは解体作業を実施せず、シュレッダーへ有姿のまま全量投入。歩留り測定を実施した。破碎・選別状況を図4.1.3に、各種破碎産物の外観を図4.1.4に示す。また、本破碎・選別により得られた各産物の歩留りを表4.1.1に表した。

この破碎・選別プラントで製造される「13 mmアンダー」がガラス濃縮物となる。

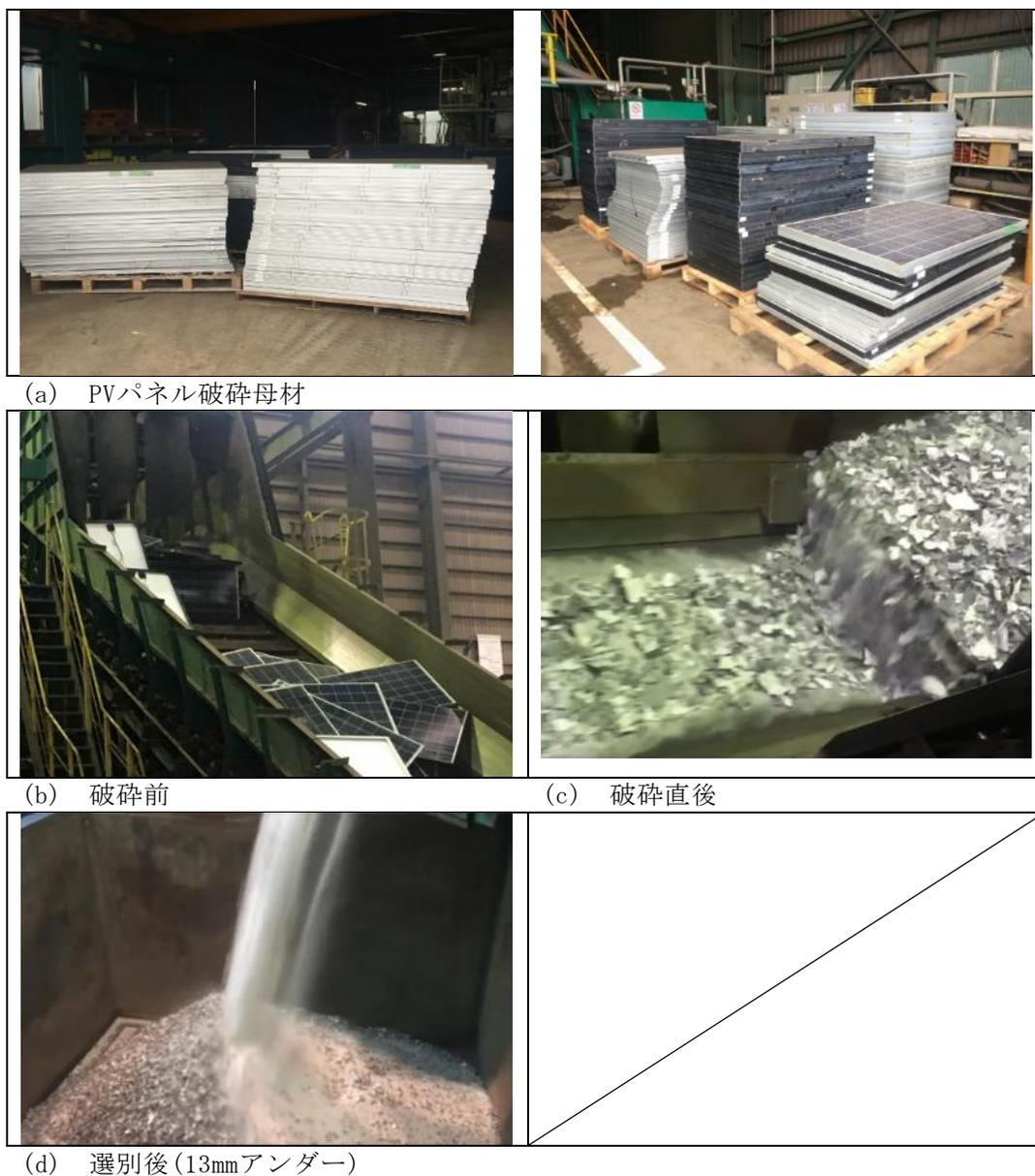


図4.1.2 PVパネルの破碎・選別状況（平成30年3月9日破碎実施）





図4.1.3 PVパネルシュレッダー各種破碎産物の外観（平成30年3月9日破碎実施）

表4.1.1 PVパネル破砕歩留（平成30年3月9日破砕分）

品名		PVパネル（アルミフレーム付き）	
重量		9,006	kg
処理時間		65	分
歩留り結果			
品名		重量 (kg)	歩留り (%)
軽アルミMIX		16	0.2%
アルミMIX		1,289	14.3%
手選アルミ		13	0.1%
軽質ダスト		3,826	42.5%
13mm アンダー	2~13mm	1,194	13.3%
	2mm-	1,567	17.4%
25mmアンダー		262	2.9%
25~100		428	4.8%
大物MIX		4	0.0%
ダスト鉄		2	0.0%
目切れ		405	4.5%
合計		9,006	100.0%

4.1.2 平成30年9月破砕試験

○破砕母材…PVパネル合計774枚

○試験条件

・破砕日…平成30年9月19日

アルミフレームは解体作業を実施せず、シュレッダーへ有姿のまま全量投入。歩留り測定を実施した。前節の試験では、破砕時のダスト吸引のための風量が大きく、高濃度金属類の回収には適切だが、ガラス分の歩留りが30.7%と低かったため、シュレッダーのダンパー条件および風量を低く調節することにより、ガラス分の歩留りの向上を図った。

本破砕・選別により得られた各産物の歩留りを表4.1.2に表した。

表4.1.2 PVパネル破砕選別マテリアルバランス（平成30年9月19日破砕分）

品名		PVパネル（アルミフレーム付き）	
重量		11,285	kg
処理時間		43	分
歩留り結果			
品名		重量 (kg)	回収率 (%)
軽アルミMIX		0	0.0
アルミMIX		2,110	18.7
手選アルミ		0	0.0
軽質ダスト		431	3.8
13mm アンダー	2~13mm	2,369	21.0
	2mm-	3,927	34.8

25mmアンダー	340	3.0	
25～100	750	6.6	
大物MIX	105	0.9	
鉄	38	0.3	0.4
ダスト鉄	5	0.0	
機内残留・こぼれ	700	6.2	10.2
目切れ	510	4.5	
合計	11,285	100.0	

4. 1. 3 平成31年1月破砕試験

○破砕母材…PVパネル合計252枚

○試験条件

・破砕日…平成31年1月30日

アルミフレームは解体作業を実施せず、シュレッダーへ有姿のまま全量投入。歩留り測定を実施した。

破砕産物中の「13 mmアンダー」を先の平成30年3月9日破砕試験のものと比べると、破砕時の風力による吸引力を弱めたため、PVパネルバックシートの素材であるプラスチック類の多くがここに混入することとなった。本研究での主目的は、ガラス分からのEVAの分離だが、こうした他の構成素材のプラスチック類の混入はその本質的な目的を損なうため、ここでは、破砕中のダンパー条件や風量を平成30年3月9日のそれらに戻し、破砕機操縦者の目視による判断でPVガラス投入速度を制御していただくこととした。

本破砕・選別により得られた各産物の歩留りを表4. 1. 3に表した。

表4. 1. 3 PVパネル破砕選別マテリアルバランス（平成31年1月30日破砕分）

品 名	PVパネル（アルミフレーム付き）		
重 量	4,488	kg	
処理時間	20	分	
歩留り結果			
品 名	重 量 (kg)	回収率 (%)	
軽アルミMIX	0	0.0	
アルミMIX	486	10.8	
手選アルミ	19	0.4	
軽質ダスト	231	5.1	
13mm アンダー	2～13mm	171	3.8
	2mm-	140	3.2
	未分級品	2,034	45.3
25mmアンダー	115	2.6	
25～100	668	14.9	
大物MIX	195	4.3	
鉄	4	0.1	
ダスト鉄	5	0.1	
目切れ	420	9.4	
合計	4,488	100.0	

4. 1. 4 まとめ

破碎時のダンパー条件および吸引の風量を調節することにより、ガラス濃縮物である「13 mmアンダー」産物の歩留りを向上させることを試みた。表4. 1. 4に、比較した3条件とでの条件と「13 mmアンダー」産物の歩留りをまとめて示した。平成30年3月試験では、「13 mmアンダー」の歩留りは30.7 %と低く、風量を落とした平成30年9月試験では「13 mmアンダー」歩留りは55.8 %に向上したが、既述のように、本来、吸引されていたPVパネルバックシートのプラスチック類の一部がこの「13 mmアンダー」に混入してしまった。そこで、平成31年1月試験では、ダンパー条件、風量を平成30年3月試験のそれに戻し、運転者の判断にてPVガラスの破碎機への投入速度を制御していただくことで、「13 mmアンダー」産物にバックシート混入のほとんどない状態でその歩留りを52.3 %まで向上させることができた。

従来の破碎工程での風量制御および運転条件は、品位の高い金属類の回収を主目的とするものであったが、そうした条件を変更せずに、ガラス分の「13 mmアンダー」産物への回収率を高めることができると判明した。

表4. 1. 4 PVパネル破碎試験におけるシュレッダー破碎条件と「13 mmアンダー」産物の歩留り

	平成30年3月	平成30年9月	平成31年1月
上部ダンパー	4	4	4
下部ダンパー	2	5	2
シャッター	2	2	2
上中下	中	中	中
本体集塵機	30	25	30
非鉄集塵機	20	10	20
13mmアンダー歩留り (%)	30.7	55.8	52.3

4. 1. 4 実用規模での攪拌型粉碎産物の湿式テーブル選別

(1) PVガラスの攪拌型粉碎

- 日時：平成30年3月22日
- 場所：丸美陶料株式会社
- 試料：アルミフレームを外した状態で破碎したPVパネル由来のガラス濃縮物2.0-13.0 mm
- 使用粉碎機：インテンシブミキサー DE-14型

丸美陶料株式会社所有の大型攪拌型ミルを借用して太陽光パネル由来のガラスカレットの攪拌型粉碎試験を行い、EVAから単体分離した高純度ガラス濃縮物を製造し、粉碎の特性、ガラス再資源化について検討を行った。ラボ機と今回使用するインテンシブミキサーの比較を表4. 1. 4に示す。

表4. 1. 4 実験室規模および実用規模の攪拌型粉碎機の比較

	ラボ機	実用機
型式	EL-1	DE-14
容量	1 L	900 L
許容重量	1 kg	1440 kg

事前の早大ラボ機 (EL-1) での粉碎試験では、以下の最適条件が得られた。

- ✓ 粉碎時間：3 min
- ✓ アジテータ回転速度：2500 rpm

✓ 乾式粉碎

この結果を基に、実用機（DE-14）でのアジテータ端部の周速をラボ機のそれと同様になるように、実験条件を以下のように設定した。

✓ 粉碎時間：3 min

✓ アジテータ回転速度：513 rpm

✓ 乾式粉碎

✓ 試料投入量：600 kg（容量に対してセル容積の約 42 %）

フィード試料の粒度分布を図 4.1.4 に示した。

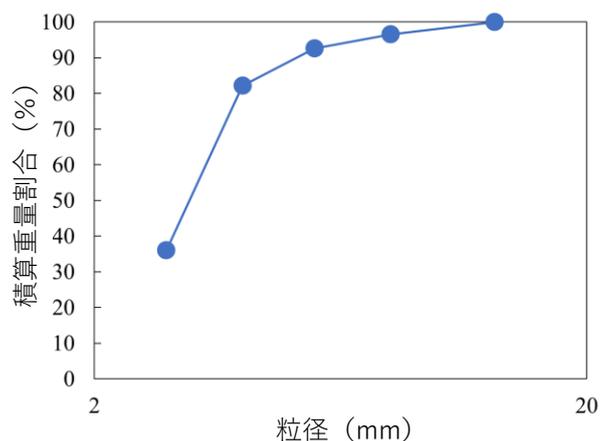


図 4.1.4 フィード試料の粒度分布

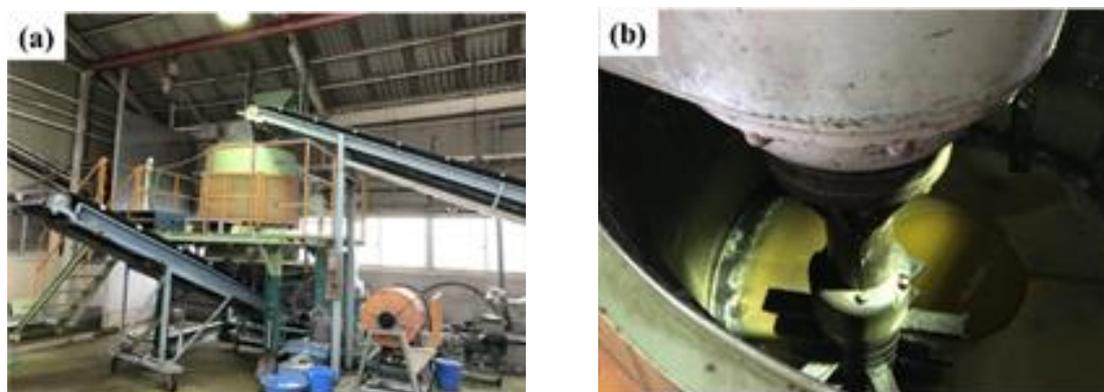


図 4.1.5 (a) 使用した実用規模攪拌型粉碎機の外観および (b) 同攪拌型粉碎機の内部

実機試験での粉碎後の産物については32分の1になるように縮分を行い、早大にて粒度分布測定・粒群ごとの成分分析を実施した。以下にその結果を記す。

(2) 実用機攪拌が粉碎産物の分析

図4.1.6に、アジテータの回転速度を500、600 rpmとした際の粉碎産物の粒度分布を、表4.1.5に、その50%粒径を示す。同図表より、アジテータの回転速度を大きくすると50%粒径はごく僅かに小さくなるが、粒度分布はほぼ変わらないことが分かる。

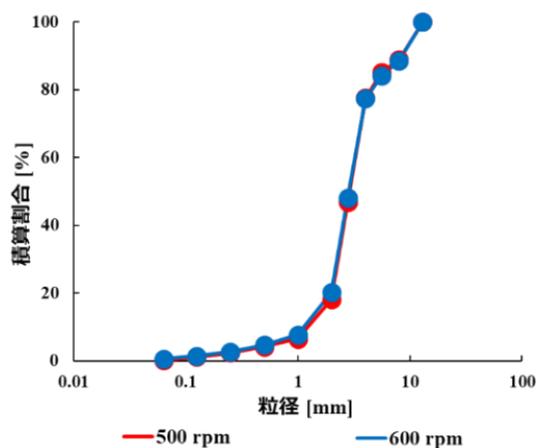


図4.1.6 実機攪拌型粉砕産物の粒度分布（粉砕時間 3 min）

表4.1.5 実機攪拌型粉砕産物の50%粒径

回転速度 [rpm]	平均粒径 [mm]
500	2.92
600	2.88

図 4.1.7 には、アジテータ回転速度 500、600 rpm における粉砕産物の粒群別の各種成分（特に EVA）の含有率を示す。同図より、EVA は 8.0-13 mm の粗粒群に多く存在することが分かる。また、アジテータの回転速度が大きい（600 rpm）場合には、8.0-13 mm に存在する EVA の量が増加することも確認された。ガラスは体積粉砕によって微粒化するため、粒径の大きい粒群では相対的に EVA の存在率が大きくなっており、回転速度 600 rpm の際にガラスが EVA に対してより選択的に体積粉砕されたことが理解される。

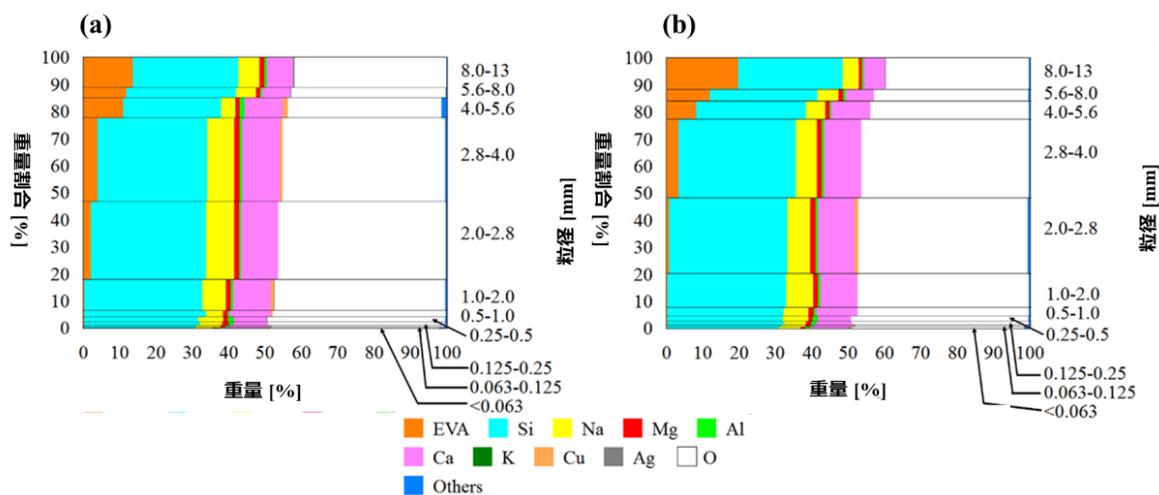


図 4.1.7 実機攪拌型粉砕産物の各主成分の粒群ごとの含有率
（アジテータ回転速度 (a) 500 rpm、(b) 600 rpm、粉砕時間 3 min）

図 4.1.8 には、アジテータの回転速度 500、600 rpm での粉砕産物における、EVA の各粒群への分配率分布を示した。また、表 4.1.6 には、ガラスの EVA に対する最大分離効率（2 種カットサイズ別）、その条件下でのカットサイズ、およびその際の細粒側へのガラス回収率を示した。同図表より、ガラスの EVA に対する最大分離効率はアジテータ回転速度 600 rpm、粉砕時間 3 min の時 49.2 %であった。実験室規模での攪拌型粉砕の場合の最大分離効率は 51.8 %であり、実機でもほぼ同様の値が得られた。また、細粒側へのガラス回収率は実験室規模での試験よりも高いものの、細粒側産物中の EVA 含有率は実験室規

模試験よりも高かった。この結果から、実用規模の試験においては、粉碎時間をもう少し長くする必要があると考察された。

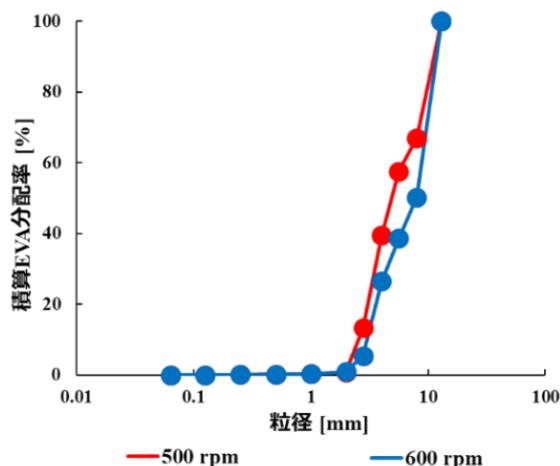


図4.1.8 実機攪拌型粉碎実験から得られたEVAの各粒群への分配率分布（粉碎時間 3 min）

表4.1.6 実機攪拌型粉碎実験におけるガラスに対するEVAの最大分離効率、その際のカットサイズ、細粒側へのガラス回収率（粉碎時間 3 min）

回転速度 [rpm]	最大分離効率 [%]	カットサイズ [mm]	ガラス回収率 [%]	EVA含有率 [%]
500	36.10	2.8	75.57	2.33
	46.00	2.0	45.95	1.30
600	49.16	2.8	75.61	1.55
	41.87	2.0	47.34	0.52

（2）攪拌型粉碎産物の湿式テーブル選別

○日時：平成31年4月14日

○場所：ハリタ金属株式会社 本社第3工場

○試料：平成30年3月22日に丸美陶料で攪拌型粉碎（インテンシブミキサー破碎）試験した試料約1,200kgのうち、572kg（平成30年12月13日にハリタ金属 本社第3工場へ搬入）

○使用設備：Holman Wilfley社製 湿式テーブル（モデル：Wilfley 7000）

湿式テーブルに投入する前に6mmのふるいに掛けて、+6 mm、6 mmの両粒群について湿式テーブル選別試験を実施した。図4.1.9にフィードの外観を、図4.1.10に選別状況を、図4.1.11に各産物の外観を示した。なお、湿式テーブルで得られた中間回収物および軽質回収物に対して、湿式テーブルにて再選別を実施した。湿式テーブル選別におけるマテリアルバランスを表4.1.7および表4.1.8に示した。

1次選別を実施した結果、ガラスは中間回収物と軽質回収物に濃縮したことを確認した（図19-2）。それでもアルミやダストの混入が若干見られたため、2次選別を行ったが、中間回収物と軽質回収物にアルミの混入が見られた（図19-3）。

ガラスは軽質物中に比較的高品位で回収することができたが、本装置の作業中の各種不純物の混入が避けられず、その歩留りは50～55 %と低くとどまった。

表4.1.7 湿式テーブル選別試験における各産物の歩留り

実施日	2019年4月11日	
品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル（6mmオーバー）	
重量	572	kg
処理時間	235	min

工程		品名	重量[kg]		回収率[%]	
篩選別 (6mmオーバー)		6mmオーバー	110	110	19.2	19.2
篩選別 (6mmアンダー)	湿式選別 (重質回収)	重質回収	20	20	3.5	3.5
	湿式選別 (中間・軽質回収→再選別)	重質回収	4	346	0.7	60.5
		中間回収	12		2.1	
		軽質回収 (ガラス濃縮物)	290		50.7	
		ダスト	32		5.6	
		目切れ	8		1.4	
	湿式選別 (ダスト)	ダスト	76	76	13.3	13.3
湿式選別 (目切れ)	目切れ	20	20	3.5	3.5	
合計			572	572	100.0%	100.0%

表4.1.8 湿式テーブル1次選別品ダスト調査

実施日	2019年4月18日～8月3日		
品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル (6mmアンダー)		1.29 t/h
重量	76	kg	
処理時間	15	min	

品名	重量[kg]	回収率[wt%]		摘要
重質回収	1	1.3	1.3	
中間回収	0.02	0.0	0.0	
軽質回収 (ガラス濃縮物)	42	55.3	55.3	※ガラス
ダスト	38	30.0	50.0	
目切れ	-5	-6.6	-6.6	水引 (水分)
合計	76	100.0%		



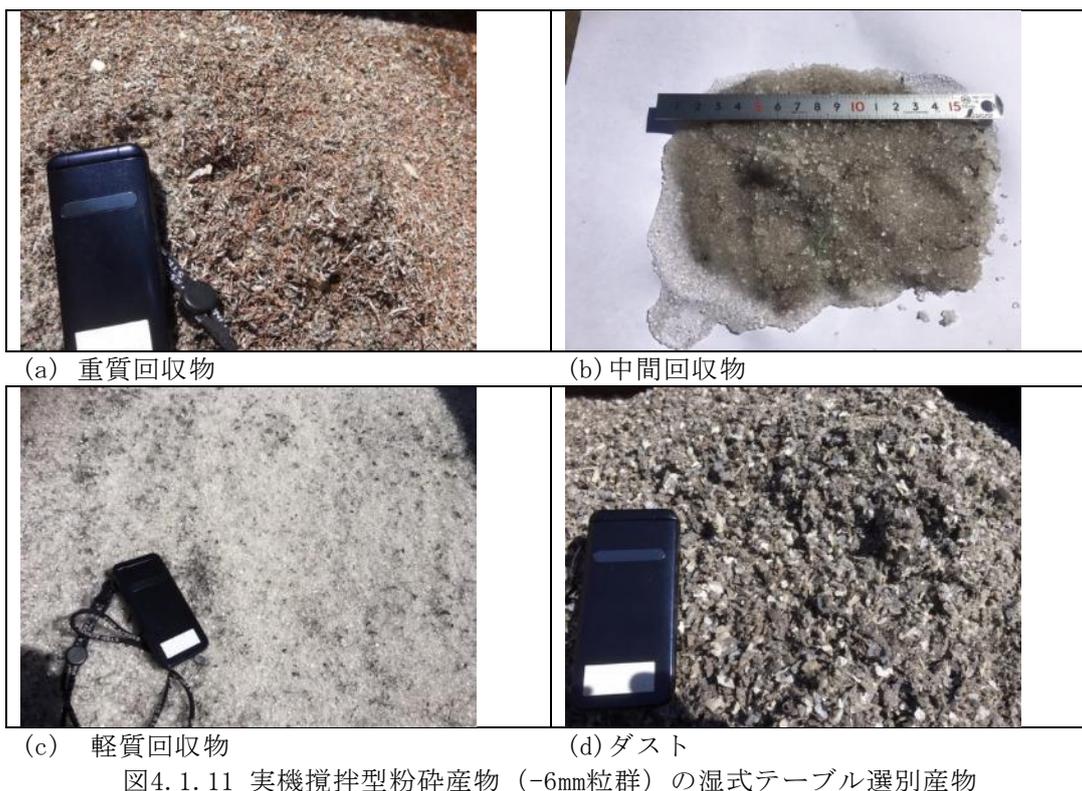
(a) 6mmオーバー

(b) 6mm アンダー

図4.1.9 攪拌型粉碎産物（湿式テーブル選別フィード）



図4.1.10 湿式テーブル選別状況



4.2 2000HP 縦型シュレッダーの導入

4.2.1 破碎・選別処理フロー

以上は、2000HP 横型シュレッダーによる破碎、そしてその後の物理選別に関する試験であるが、このシュレッダーとは別に、破碎産物の単体分離性が比較的良好であることが知られているの2000HP 縦型シュレッダーによる破碎選別プラントにてPVガラスの破碎選別を実施した。このプラントの図面を図4.2.1に、破碎・選別フローを図4.2.2に示した。

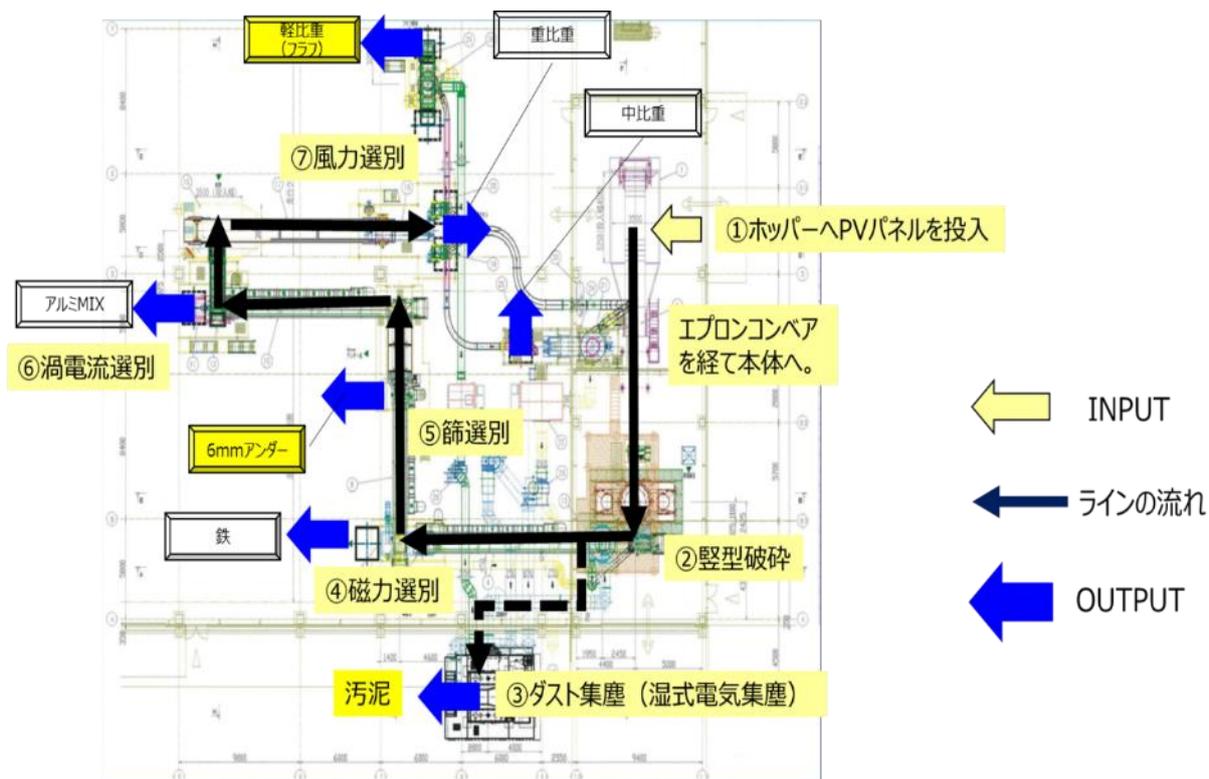


図4.2.1 ハリタ金属㈱射水リサイクルセンター 縦型シュレッダー破砕・選別プラント

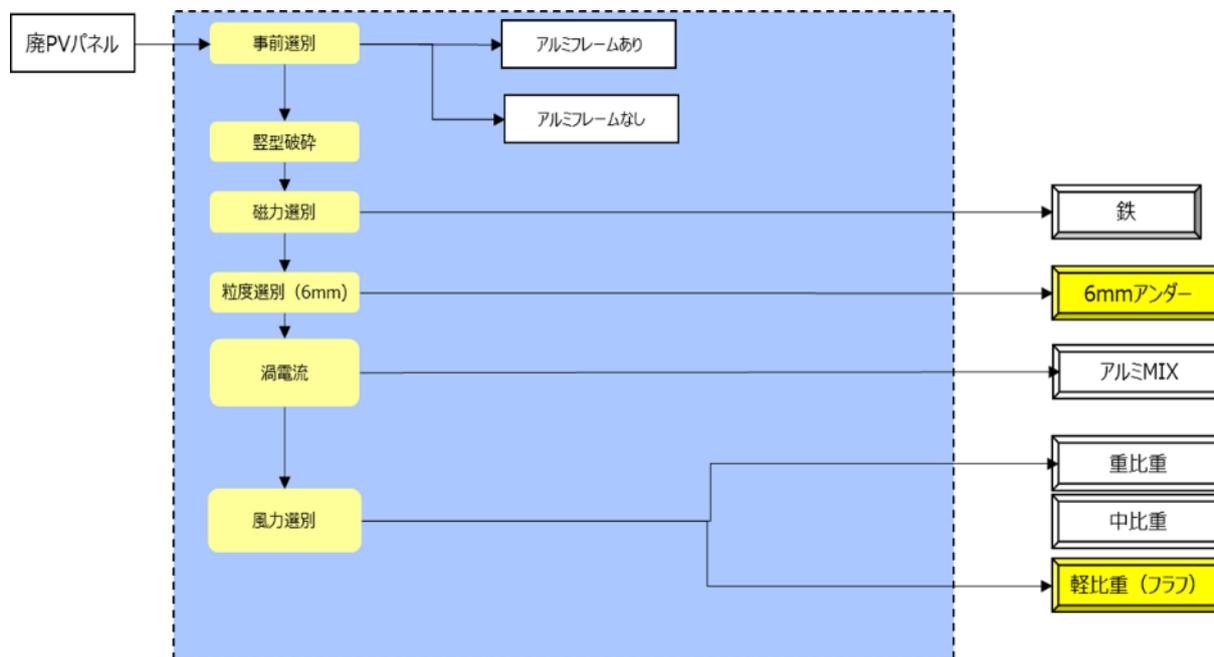


図4.2.2 ハリタ金属㈱におけるPVパネル 2000H Pシュレッダー破砕・選別フロー

4.2.2 試験概要

○破砕母材…瓦型PVパネル合計11,030枚

○試験条件

- ・破砕日…令和元年6月3日～12月5日（複数回に分けて破砕）

通常のPVパネルは縦型シュレッダーに有姿の状態直接投入が物理的に困難であることから、ここでは比較的小型の瓦型PVパネルを使用した。アルミ枠の付いた有姿の状態縦型シュレッダーへ全量投入し歩留り測定を実施した。

破碎・選別状況を図4.2.3に、各種破碎産物の外観を図4.2.4に示す。また、本破碎・選別により得られた各産物の歩留りを表4.1.1に表した。

縦型シュレッダーでは横型シュレッダーに比べて、産物が比較的細粒となり、このプラントでの選別は、横型のそれに比べて異なっている。ここでは「6 mmアンダー」産物がガラス濃縮物となる。

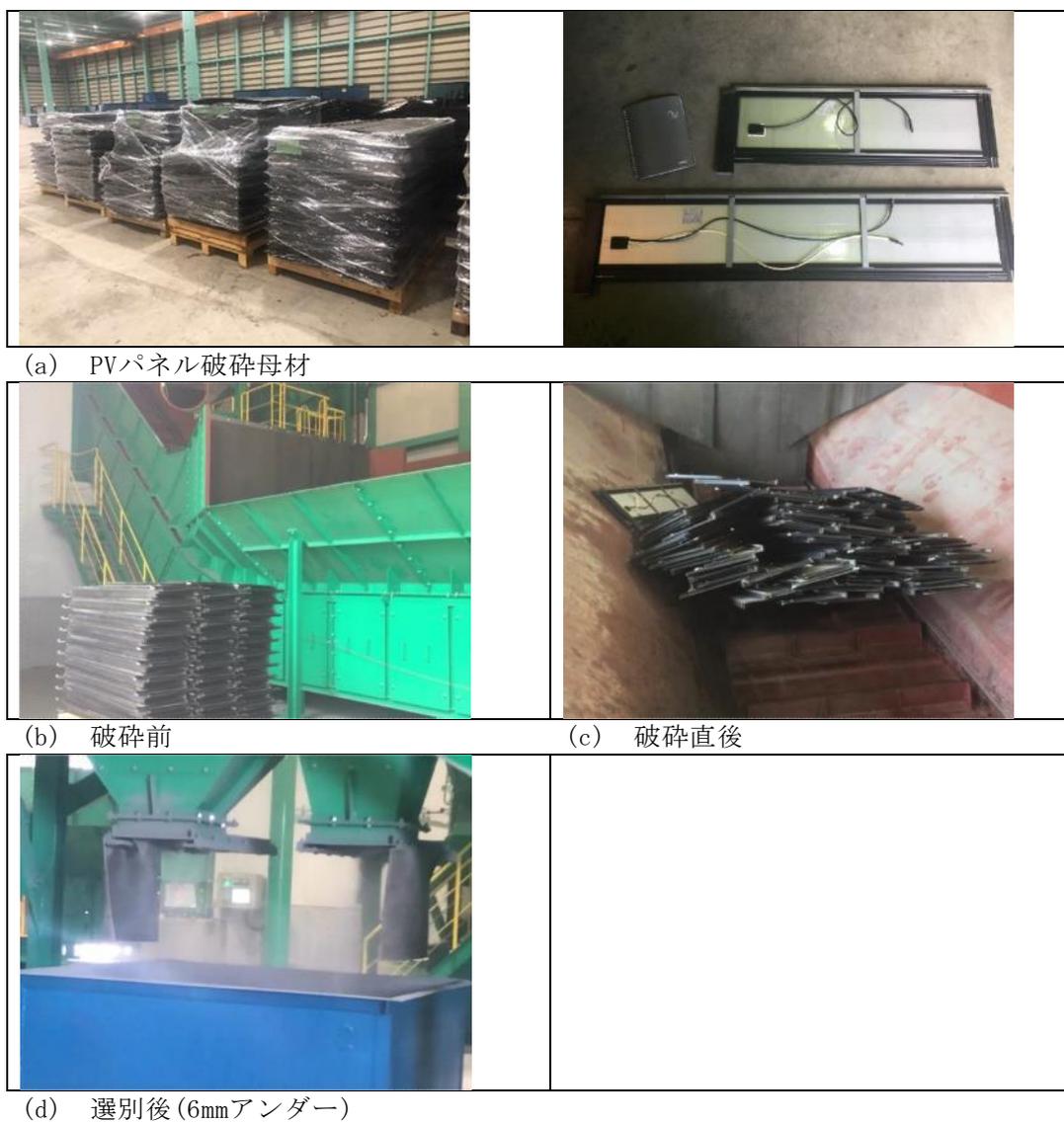
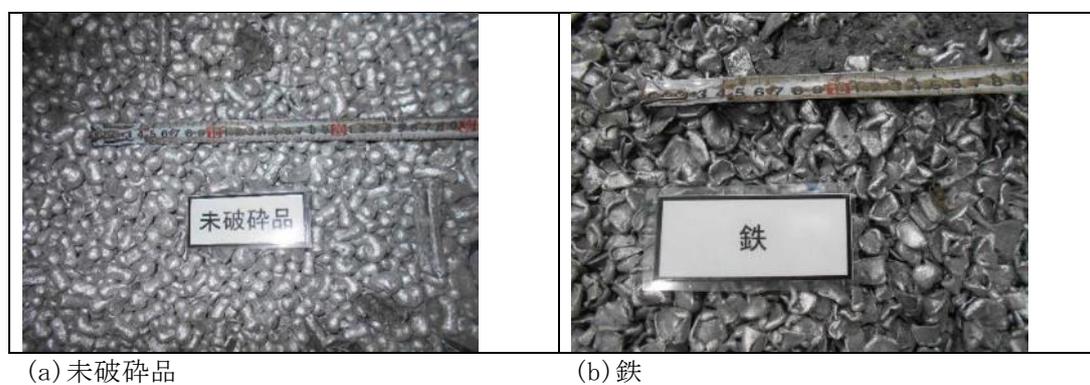


図4.2.3 PVパネル縦型シュレッダー破碎・選別状況



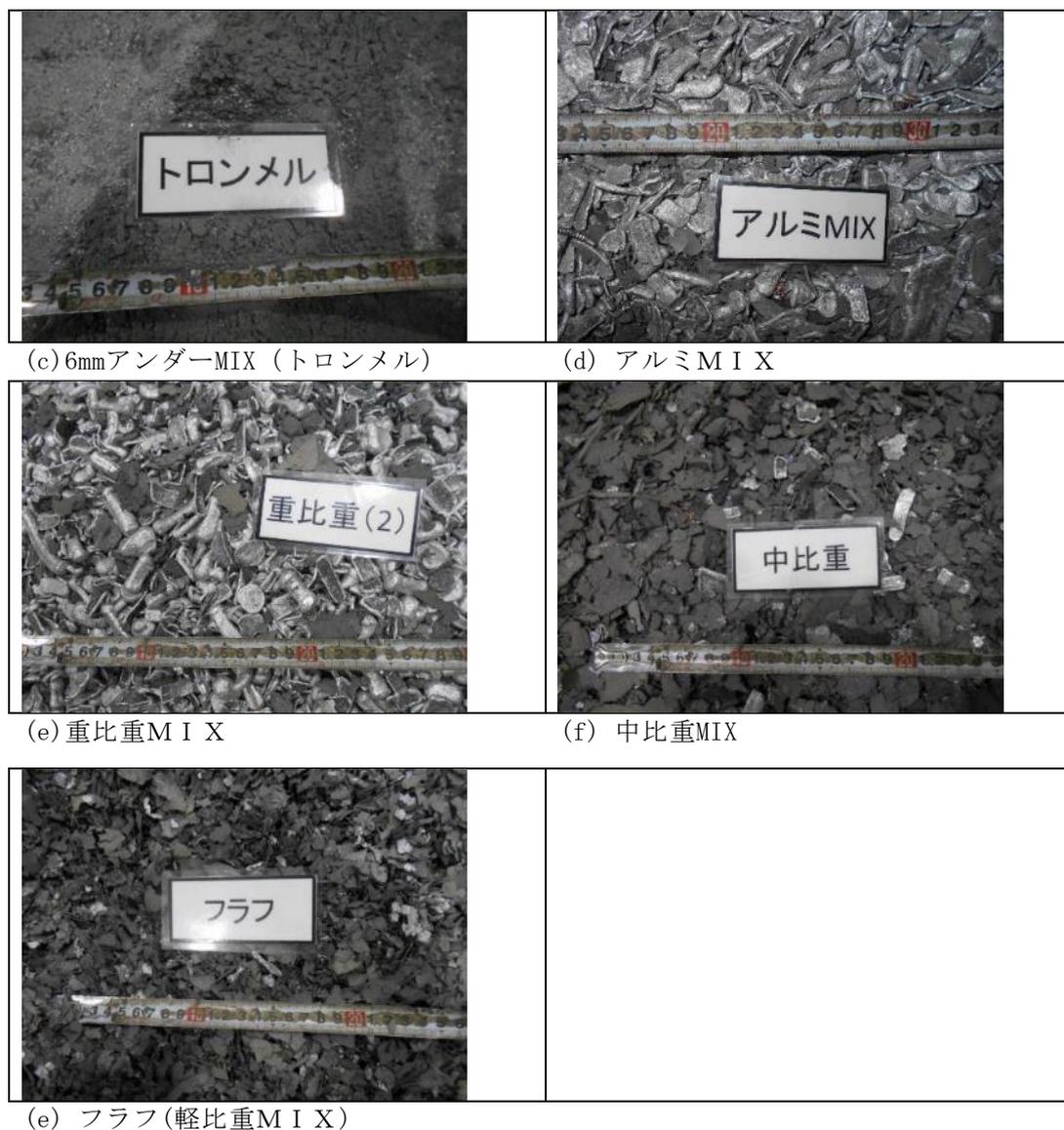


図4.2.4 瓦型PVパネル堅型シュレッダー破碎・選別産物

4.2.3 ガラス濃縮物の特性と歩留り

図4.2.4より、堅型シュレッダープラントから製造される選別産物類は横型シュレッダーのそれらに比べて、比較的バルキーな形状で粒度が揃っており、概して単体分離性の高いことが容易に理解される。堅型プラントでは、横型のそれに比べて、PVパネルに関しては、より良い破碎・選別が実現されていると言える。

「6mmアンダー」産物の歩留りは40.4%であり、横型のそれよりは若干低い、品質はより高い（不純物は少ない）ものと判断された。ただし、縦型シュレッダーでは、通常サイズのPVパネルが物理的に投入できないため、その前処理に課題が残った。

表4.2.1 PVパネル堅型シュレッダー破碎選別試験歩留結果

品名	重量[kg]	回収率		摘要
6mmアンダーMIX	28,788	40.4%	40.4%	ガラス
鉄	7,423	10.4%	29.4%	鉄
アルミMIX	13,564	19.0%		アルミMIX
重比重MIX	10,647	14.9%	25.0%	非鉄MIX

中比重MIX	1,037	1.5%		バックシート、EVAなど
軽比重MIX	6,135	8.6%		バックシート、EVAなど
未破砕品	463	0.6%	5.2%	
目切れ	3,271	4.6%		
合計	71,328	100.0%		

4.2.4 「6 mmアンダー」産物の湿式・乾式テーブル選別

(1) 「6 mmアンダー」産物の粒度調整

○日時：令和元年7月10日～11日、令和元年8月3日

○場所：ハリタ金属株式会社、射水リサイクルセンター

○使用設備：（ジグ式湿式比重選別機既設）パイブロスクリン（SFW-120-240LB）

○試料：PVパネル堅型破砕物6mmアンダー 28,788kgの内26,710kg

PVパネルを縦型シュレッダーで破砕、物理選別を施して製造されたガラス濃縮物である「6 mmアンダー」を湿式・乾式のテーブル選別に供する前に、ある程度粒度分布幅の狭い産物とする必要があることが早大の研究で明らかとなっており、ここでは、そのためのサイズスクリーニングを行った。得られた産物の粒度は、-0.5 mm、0.5～2.0 mm、2.0～6.0 mmの3種類である。その工程の概略を図4.2.5に、産物の写真を図4.2.6に、そしてそれぞれの粒群の分離状況を表4.2.2に示した。

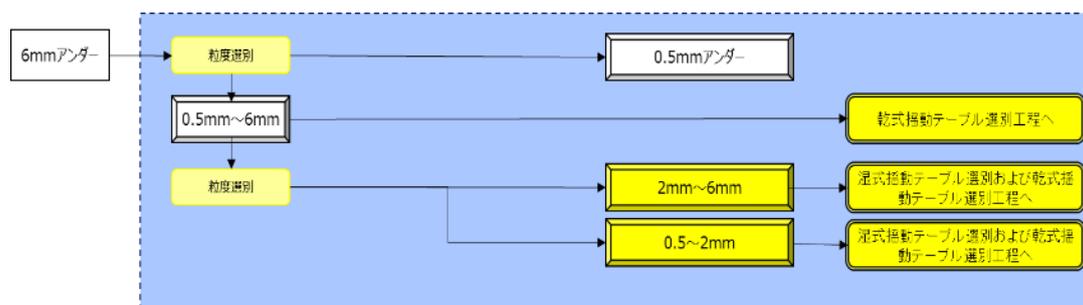
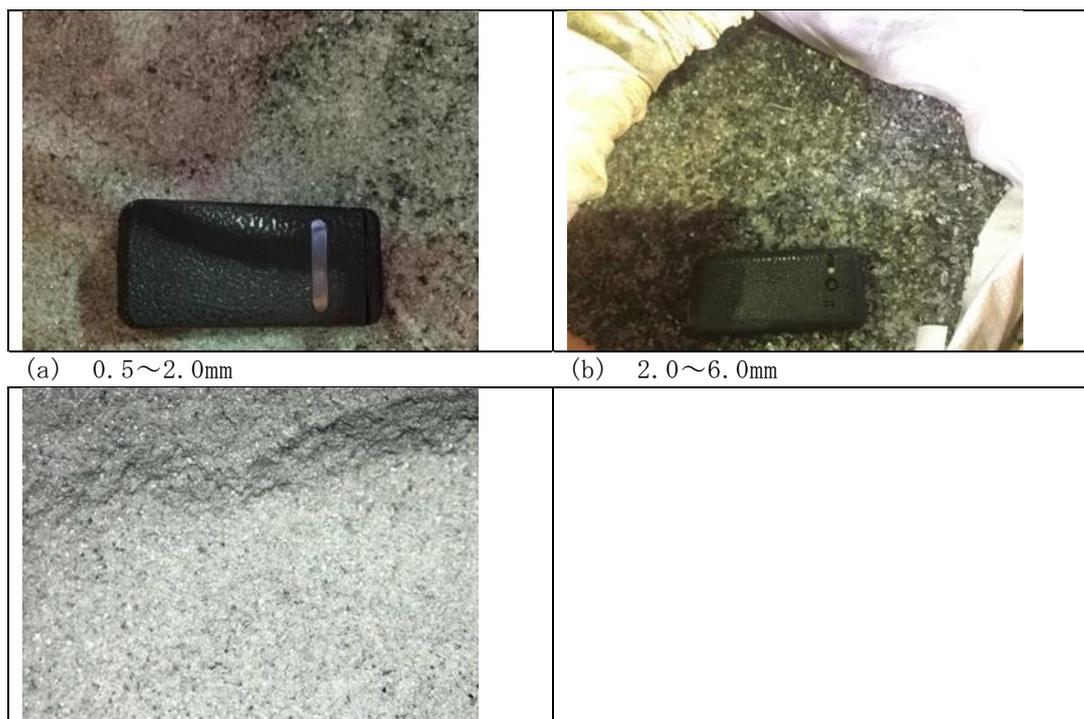


図4.2.5 PVパネル堅型シュレッダー品の分級フロー



(a) 0.5～2.0mm

(b) 2.0～6.0mm

(c) 0.5mmアンダー

図4.2.6 PVパネル堅型破砕物分級産物

表4.2.2 PVパネル堅型破砕物分級試験結果

実施日	2019年7月10日～8月3日			
品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル (6mmアンダー)			1.29 t/h
重量	26,710	kg		
処理時間	1,238	mn		
品名	重量[kg]	回収率		
0.5～6mm	768	2.9%	2.9%	乾式テーブル用(2.7.1)
2～6mm	2,765	10.4%	21.0%	乾式テーブル用(2.7.2)
	2,844	10.6%		湿式テーブル用(2.6)
0.5～2mm	5,946	22.3%	44.6%	乾式テーブル用(2.7.2)
	5,948	22.3%		湿式テーブル用(2.6)
0.5mm アンダー	7,692	28.8%	31.6%	
目切れ	747	2.8%		
合計	71,328	100.0%		

(2) 「6 mmアンダー」産物の湿式テーブル選別

- 試験日：令和元年10月28日（月）
- 試験場所：ハリタ金属株式会社 第3工場
- 試験試料：PVパネル堅型シュレッダープラント産物(0.5～2.0 mm 2,844kg 2.0～6.0 mm 5,948kg)
- 選別条件：6mmの分級選別を経た後、6mmアンダーの製品について湿式選別を実施。

横型に比べて構成成分の単体分離性の高い産物が得られる堅型シュレッダーを用いて破砕し、その後物理選別を行って得られた「6 mmアンダー」産物について、実用規模の湿式テーブル選別を施し、高純度ガラス濃縮物を得ることを目的とした。

湿式テーブルで選別して得られた各産物の歩留りを表22に、それらのあり姿を図20に示した。選別後の2種類（粒群）のガラスリッチ産物について、約1 kgを採取したもののついて粒度分析および成分分析を行い、ガラス分の選別状況を検討した。粒度分析および成分分析の結果を表22-1、22-2に示す。

なお、EVAはこの選別ではダストに濃縮するはずだが、その割合は非常に低く、目視での判別は困難であった。

表4.2.3 PVパネル堅型破砕物 湿式テーブル選別産物の歩留り

(i) 2.0～6.0 mm粒群

実施日	平成31年10月28日			
品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル (2～6mm)			0.50 t/h
重量	2,944	kg		
処理時間	350	min		
品名	重量[kg]	歩留り		
重質回収	34	1.2%	1.2%	
中間回収	15	0.5%	0.5%	
ガラス	2,360	80.2%	80.2%	
ダスト	558	19.0%	19.0%	
目切れ	-23	-0.8%	-0.8%	水引き
合計	2,765	100.0%		

(ii) 0.5～2.0 mm粒群

実施日 2019年10月28日

品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル (0.5~2mm)		0.89 t/h
重量	5,948	kg	
処理時間	400	min	

品名	重量[kg]	歩留り		摘要
ガラスリッチ	65	1.1%	1.1%	
乾式テーブルMIX	22	0.4%	0.4%	
乾式テーブルダスト	3,134	52.7%	52.7%	
集塵ダスト	2,612	43.9%	43.9%	
目切れ	115	1.9%	1.9%	
合計	5,948	100.0%	100.0%	



(a) 重質回収物

(b) 中間回収物



(c) 軽質回収物 (ガラスリッチ)

(d) ダスト

(i) 2.0~6.0 mm粒群



(a) 重質回収物

(b) 中間回収物



(c) 軽質回収物 (ガラスリッチ) (d) ダスト

(ii) 0.5~2 mm粒群

図4.2.7 湿式PVパネル型シュレッダー産物の湿式テーブル選別産物類

表4.2.4 PVパネル型シュレッダー破砕物の湿式テーブル選別ガラス製品の粒度分布

(i) 2.0~6.0 mm粒群

(ii) 0.5~2.0 mm粒群

粒群	回収量[g]	回収率[wt%]
4.0mm~6.0mm	22.0	2.1
2.8mm~4.0mm	499.0	47.1
2.0mm~2.8mm	461.0	43.5
~2.0mm	78.0	7.4
合計	1060	100.0

粒群	回収量[g]	回収率[wt%]
2.0mm~	15.3	1.5
1.0mm~2.0mm	315.3	31.3
0.5mm~1.0mm	292.0	29.0
~0.5mm	384.7	38.2
合計	1007.3	100.0

表4.2.5 PVパネル型シュレッダー破砕物の湿式テーブル選別ガラス製品の成分分析

(i) 2.0~6.0 mm粒群

粒群		ガラス		ダスト	金属類
		異物なし	異物付き		
4.0mm~6.0mm	回収量[g]	14.4	4.3	0.0	3.3
	回収率[wt%]	65.4 %	19.5 %	0.0 %	0.0 %
2.8mm~4.0mm	回収量[g]	477.7	12.6	0.0	8.7
	回収率[wt%]	95.7 %	2.5 %	0.0 %	1.7 %
2.0mm~2.8mm	回収量[g]	443.4	5.0	0.4	12.2
	回収率[wt%]	96.2 %	2.5 %	0.1 %	2.7 %
~2.0mm	回収量[g]	69.5	0.7	0.1	7.7
	回収率[wt%]	89.1 %	0.9 %	0.2 %	9.8 %
合計	回収量[g]	1007.3	22.4	0.5	29.8
	回収率[wt%]	95.0 %	2.1 %	0.0 %	2.8 %

(ii) 0.5~2.0 mm粒群

粒群		ガラス		ダスト	金属類
		異物なし	異物付き		
2.0mm~	回収量[g]	9.2	0.0	0.0	0.4
	回収率[wt%]	95.4 %	0.2 %	0.1 %	4.2 %
1.0mm~2.0mm	回収量[g]	272.3	0.8	0.2	4.3
	回収率[wt%]	98.1 %	0.3 %	0.1 %	1.5 %
0.5mm~1.0mm	回収量[g]	331.4	1.8	0.6	9.6
	回収率[wt%]	96.5 %	0.5 %	0.2 %	2.8 %
合計	回収量[g]	612.9	2.7	0.8	14.3
	回収率[wt%]	97.2 %	0.3 %	0.1 %	1.3 %

(3) 「6 mmアンダー」産物の乾式テーブル選別

○日時：令和元年11月13日

○場所：ハリタ金属株式会社 射水リサイクルセンター工場

○試料：廃PVパネル堅型破碎製品（2～6mm：2,765kg、0.5～2mm：5,946kg）

○使用設備：Eldan R recycling社製 乾式テーブル（モデル：KA2200）

乾式テーブルにて選別した場合の各産物の歩留りを表4.2.6に示す。得られた産物の外観を図4.2.8に示す。選別後の2種類のガラスリッチな製品について、事前に縮分したものから任意で1kg採取したもののについて粒度分析および成分分析を行い、ガラスの回収率の変化を検討した。各製品の粒度分布および分析結果を各々表4.2.7に示す。選別前後においてガラスの回収率が2.0～6.0mmにおいて6.5%、0.5～2.0mmでは2.4%向上することが確認できた。

表4.2.6 PVパネル堅型シュレッダープラント産物の乾式テーブル歩留り

(i) 2.0～6.0 mm

実施日	令和含年11月13日			
品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル（2～6mm）			0.83
重量	2,765	kg		t/h
処理時間	200	min		
品名	重量[kg]	歩留り		摘要
ガラスリッチ	812	29.4%	29.4%	中比重・ガラスリッチ
乾式テーブルMIX	127	4.6%	4.6%	非鉄金属リッチ
乾式テーブルダスト	1,593	57.6%	57.6%	ダスト・微細ガラス混合
集塵ダスト	0	0.0%		
13mmアンダー	176	6.4%	7.4%	
目切れ	57	1.0%		
合計	2,765	100.0%		

(ii) 0.5～2.0 mm

実施日	令和元年11月13日			
品名	SHARP製瓦型廃太陽光パネル（0.5～2mm）			2.38
重量	5,946	kg		t/h
処理時間	150	分		
品名	重量[kg]	回収率		摘要
ガラスリッチ	890	15.0%	15.0%	中比重・ガラスリッチ
乾式テーブルMIX	202	3.4%	3.4%	非鉄金属リッチ
乾式テーブルダスト	4,180	70.3%	78.5%	ダスト・微細ガラス混合
集塵ダスト	487	8.2%		
13mmアンダー	117	2.0%	7.4%	
目切れ	70	1.2%		
合計	5,946	100.0%		



(a) 乾式テーブルMIX

(b) 中間回収物（ガラスリッチ）

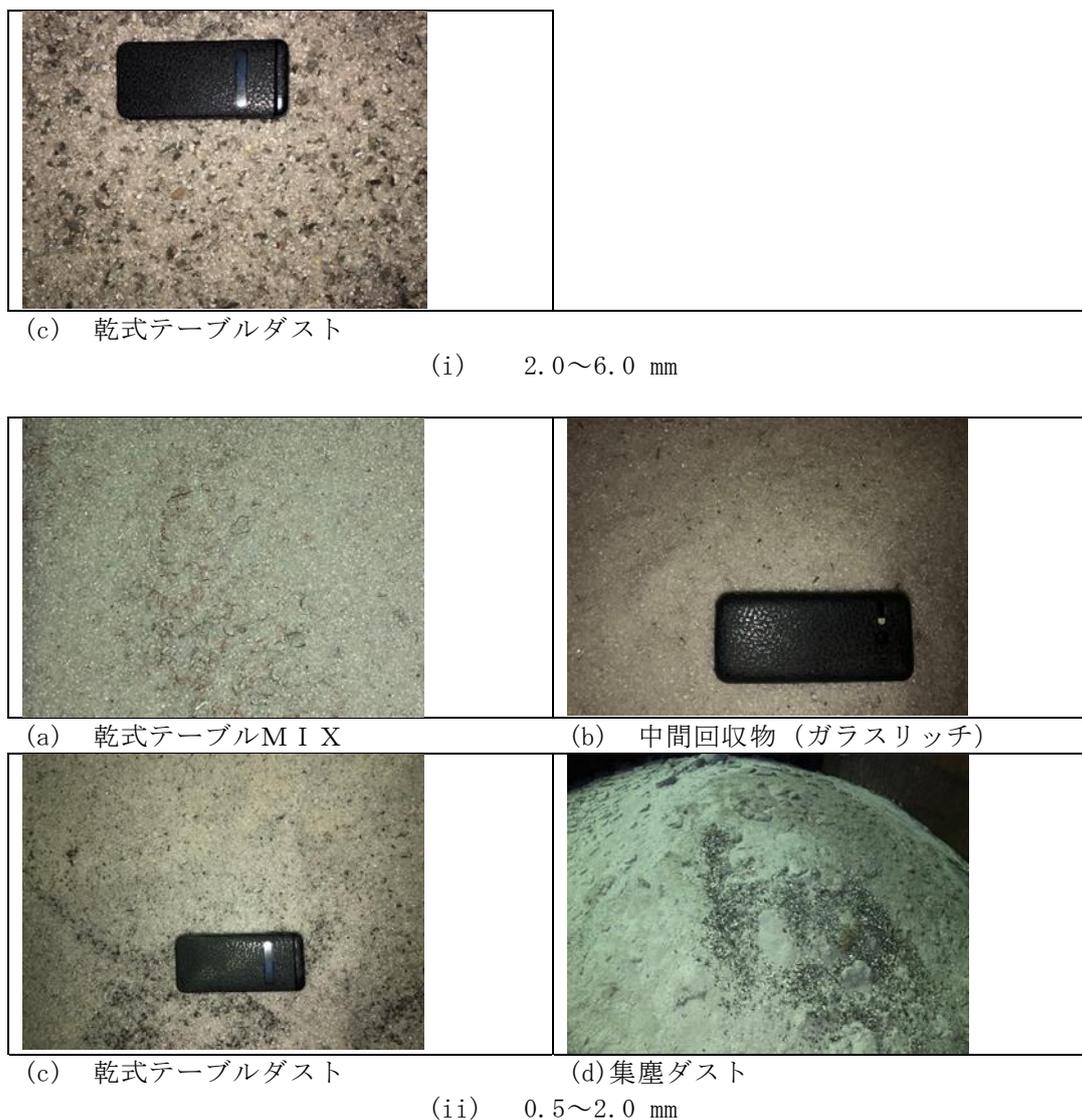


図4.2.8 乾式テーブル工程 選別産物

表4.2.7 PVパネル堅型破砕物乾式テーブル選別試験検討結果

乾式テーブル選別済みガラス製品の粒度分布

(i) 2.0~6.0mm

粒群	回収量[g]	回収率[wt%]
4.0mm~6.0mm	61.3	5.8 %
2.8mm~4.0mm	469.2	44.1 %
2.0mm~2.8mm	456.0	42.9 %
~2.0mm	77.5	7.3 %
合計	1064.0	100.0 %

(ii) 0.5~2.0mm

粒群	回収量[g]	回収率[wt%]
2.0mm~	29.1	2.9 %
1.0mm~2.0mm	586.4	57.6 %
0.5mm~1.0mm	290.0	28.5 %
~0.5mm	112.5	11.1 %
合計	1018.0	100.0 %

表4.2.8 乾式テーブル選別済みガラス製品の粒群ごとの成分含有分析

(i) 2.0~6.0 mm

粒群		ガラス		ダスト	金属類
		異物なし	異物付き		
4.0mm~6.0mm	回収量[g]	36.7	15.5	0.3	8.8
	回収率[wt%]	59.9 %	25.3 %	0.5 %	14.4 %
2.8mm~4.0mm	回収量[g]	435.5	19.9	1.2	12.6
	回収率[wt%]	92.8 %	4.2 %	0.3 %	2.7 %
2.0mm~2.8mm	回収量[g]	446.5	2.1	0.9	6.5

	回収率[wt%]	97.9 %	0.5 %	0.2 %	1.4 %
～2.0mm	回収量[g]	75.4	0.2	0.2	1.7
	回収率[wt%]	97.3 %	0.3 %	0.3 %	2.2 %
合計	回収量[g]	994.1	37.7	2.6	29.6
	回収率[wt%]	93.4 %	3.5 %	0.2 %	2.8 %

(ii) 0.5～2.0 mm

粒群		ガラス		ダスト	金属類
		異物なし	異物付き		
2.0mm～	回収量[g]	16.4	0.1	0.1	12.5
	回収率[wt%]	56.4 %	0.3 %	0.3 %	43.0 %
1.0mm～2.0mm	回収量[g]	580.1	1.1	0.6	4.6
	回収率[wt%]	98.9 %	0.2 %	0.1 %	0.8 %
0.5mm～1.0m	回収量[g]	287.6	0.4	0.2	1.8
	回収率[wt%]	99.2 %	0.1 %	0.1 %	0.6 %
合計	回収量[g]	884.1	1.6	0.9	18.9
	回収率[wt%]	97.6 %	0.2 %	0.1 %	1.9 %

表4.2.7 乾式テーブル選別前後の成分含有率の比較

(i) 2.0～6.0 mm

		乾式テーブル 選別前		中比重 (ガラスリッチ)	
		回収量[g]	回収率[wt%]	回収量[g]	回収率[wt%]
ガラス	異物なし	924.9	86.9 %	994.1	93.4 %
	異物付き	38.5	3.6 %	37.7	3.5 %
ダスト		36.5	3.4 %	2.6	0.2 %
金属類		64.1	6.0 %	29.6	2.8 %
合計		1064.0	100.0 %	1064.0	100.0 %

(ii) 0.5～2.0mm

		乾式テーブル 選別前		中比重 (ガラスリッチ)	
		回収量[g]	回収率[wt%]	回収量[g]	回収率[wt%]
ガラス	異物なし	968.8	95.2 %	884.1	97.6 %
	異物付き	8.0	0.8 %	3.6	0.4 %
ダスト		7.8	0.8 %	3.1	0.3 %
金属類		33.4	3.3 %	17.1	1.7 %
合計		1018.0	100.0 %	1064.0	100.0 %

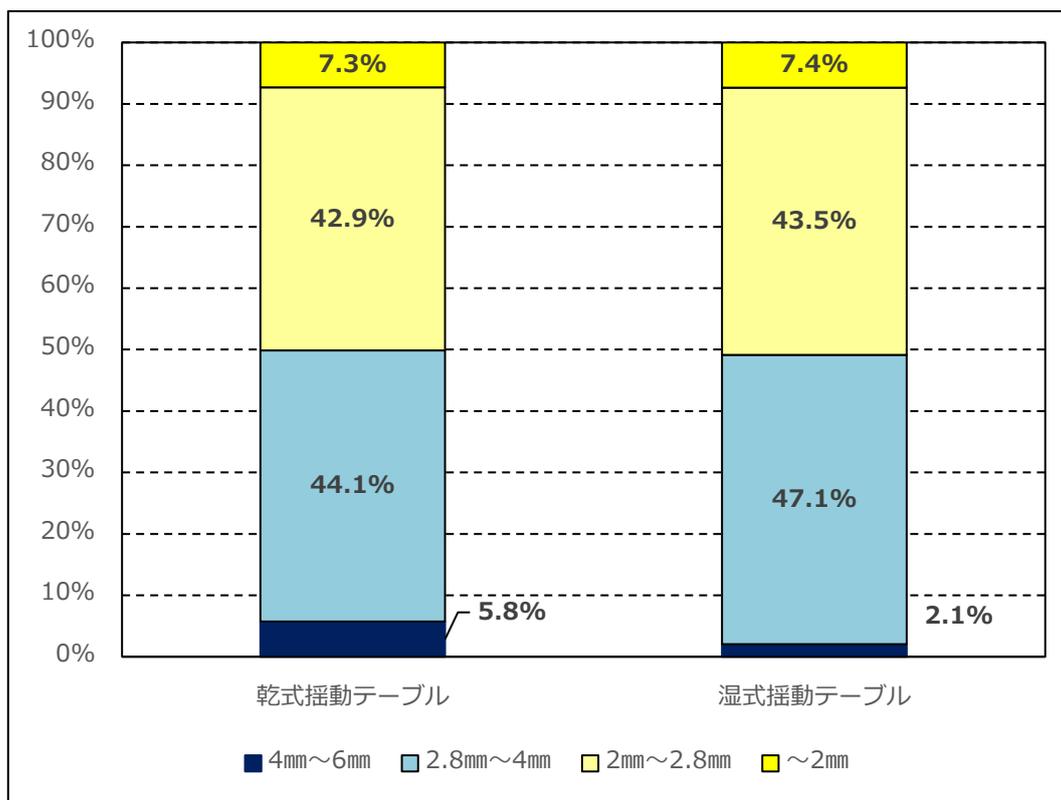
(4) 湿式テーブル選別試験と乾式テーブル選別試験の比較

湿式テーブル選別試験の結果(表4.2.4および表4.2.5)および乾式テーブルの選別試験の結果(表4.2.7および表4.2.8)から、それぞれの選別品について、粒群ごとおよび成分ごとに比較・検討を行った。

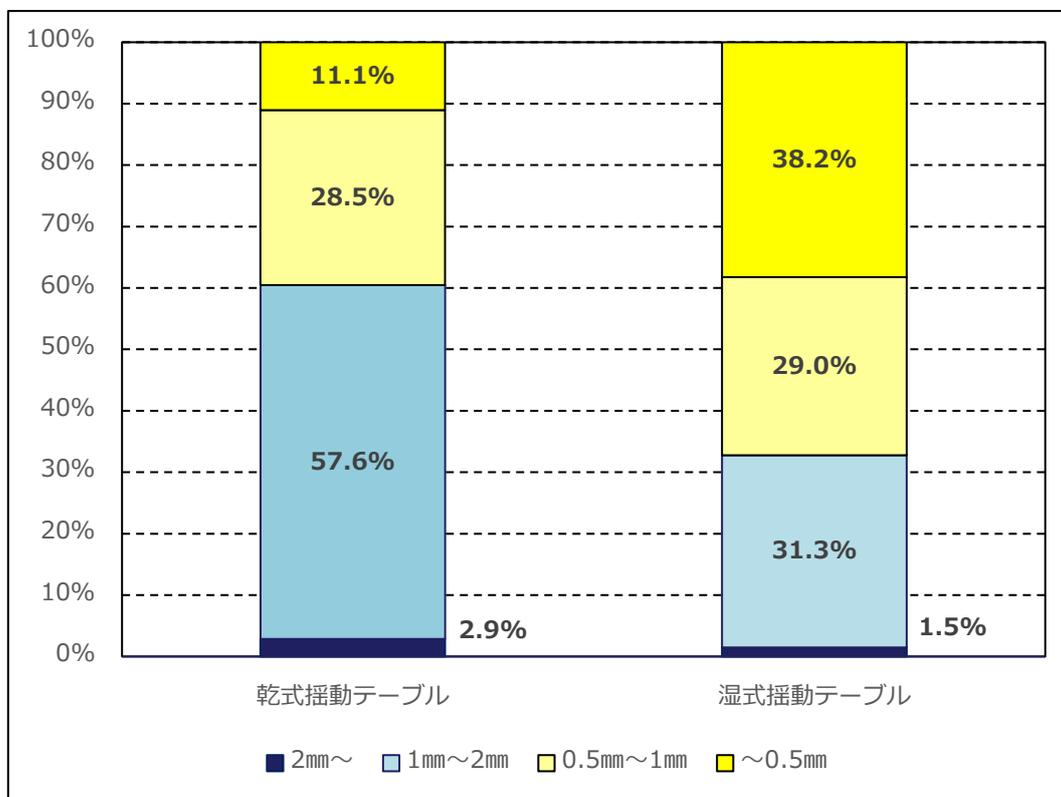
図4.2.9は、2.0～6.0 mmおよび0.5～2.0 mm粒群の乾式・湿式テーブル選別において得られたガラス製品(ガラスリッチ)の粒度分布の比較である。2.0～6.0mmにおいては湿式・乾式で粒度分布の違いはほとんどあまり見られないが、0.5～2.0 mmでは、湿式テーブル選別のガラス製品の方が0.5 mm以下の粒群の割合が高い傾向が見られた。これは、原理的に乾式に比べて湿式の方が分離精度の良いことが知られており、湿式テーブル選別では、乾式テーブル選別では回収できない細粒側も回収可能であることが示されたと言える。

図4.2.10は、2.0～6.0 mmおよび0.5～2.0 mm粒群の乾式・湿式テーブル選別において得られたガラス製品(ガラスリッチ)中の粒群別の成分割合を比較している。2.0～6.0 mm粒群でのガラス製品を比べると、粒群によってガラス含有率にはばらつきがあるが、合計では乾式で93.4 wt%、湿式で95.0 wt%と若干であるが後者の方が品位の良いことが分かった。一方、0.5～2.0 mm粒群については、合計するとガラ

ス品位は乾式で97.6 wt%、湿式で97.2 wt%とほぼ同様の結果となった。



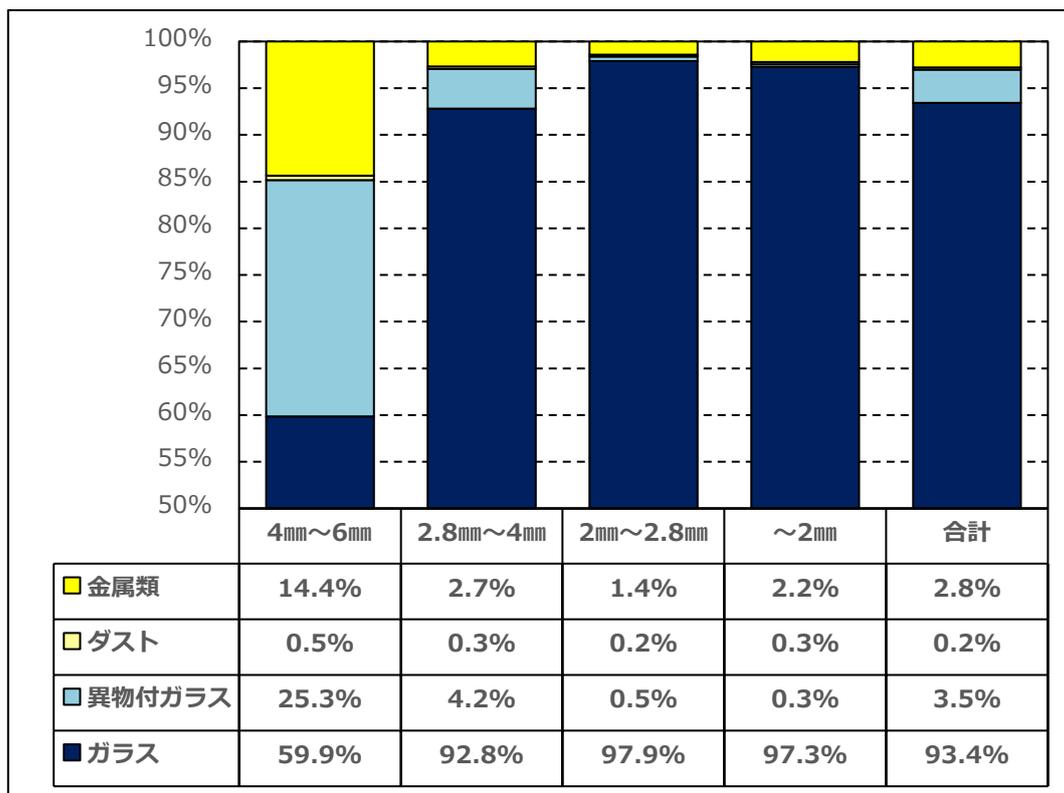
(i) 2.0~6.0 mm



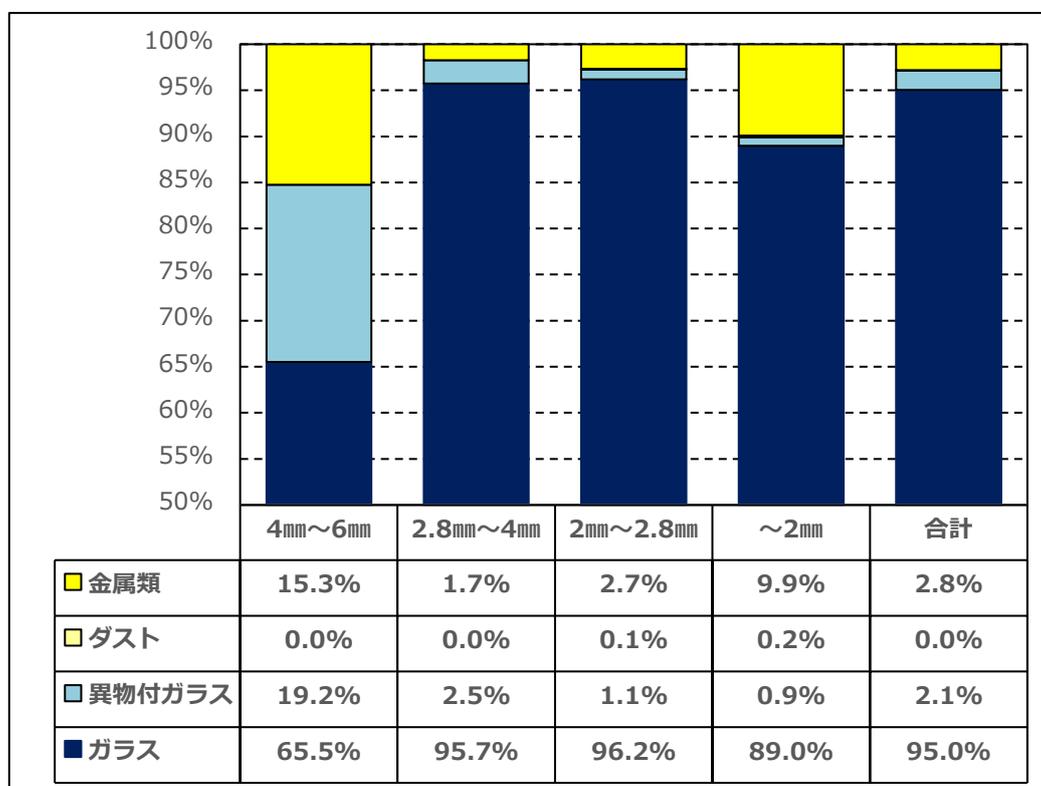
(ii) 2.0~6.0 mm

図4.2.9 乾式・湿式両テーブル選別における2.0~6.0 mmおよび0.5~2.0 mm粒群の

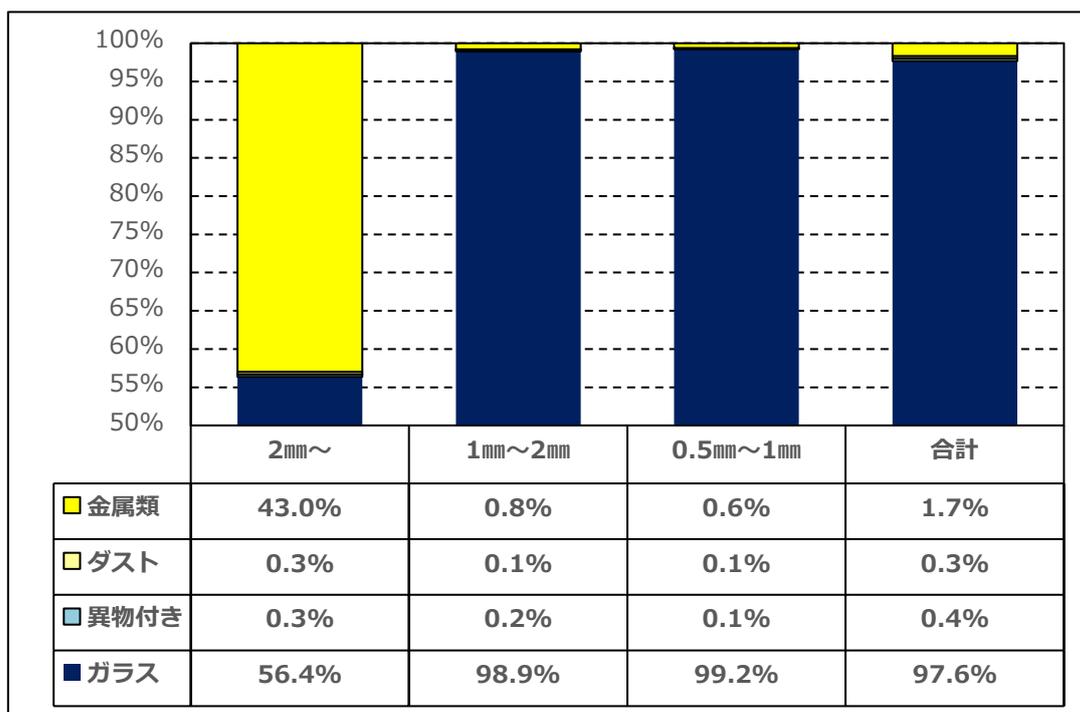
ガラス製品の粒度分布



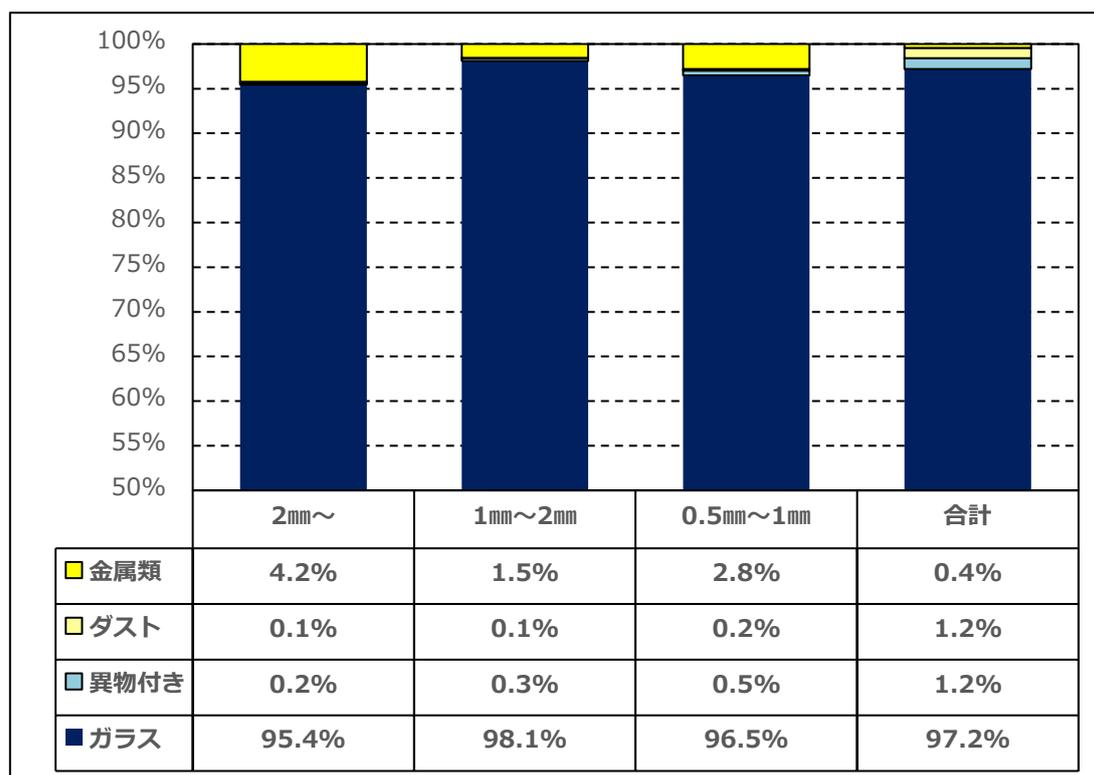
(i) 乾式テーブル、2.0~6.0 mm



(ii) 湿式テーブル、2.0~6.0 mm



(iii) 湿式テーブル、0.5~2.0 mm



(iv) 湿式テーブル、0.5~2.0 mm

図4.2.10 2.0~6.0 mmおよび0.5~2.0 mm粒径の乾式・湿式両テーブル選別におけるガラス製品中の成分構成

(5) 鉛の溶出試験

- 試験日時：令和元年9月5日
- 分析場所：大和環境分析センター（石川県能美郡川北町）
- 試験品：以下の2種類の製品について分析試験を実施した。

PVパネル堅型破砕物 (0.5~6.0 mm・乾式テーブル選別前原料)

PVパネル堅型破砕物 (0.5~6.0 mm・乾式テーブル選別後製品)

○試験方法：ICP質量分析法

堅型シュレッダー破砕物の選別前後の0.5~6.0 mm粒群を、(株)大栄環境分センターに依頼して鉛の分析を行ったが、いずれにおいても鉛は0.03 mg/L未満と基準である0.3 mg/L未満であることが確認された。

4. 3 実用規模プラントで製造されたガラス濃縮物の評価

4. 3. 1 供資材と前処理

PVパネルに使用されているカバーは、PVパネル上面のカバーガラスであり、板ガラスとして生産されている。板ガラスのリサイクルにおいては、製品の品質を確保するために、二次原料として利用するガラスカレットの品質が厳しく制限されている。特に、混在するアルミ金属が最も厳しく制限されており、PVパネルがフレームなどにアルミ圧延品を多用していることから、カレットに不純物を混入させない回収プロセスの管理が重要と考えられる。加えて、ガラスの天然資源は価格が安価であり、プロセスコストも比較的安価であるため、リサイクルコストを低く抑えることが要請されることも、ガラスリサイクルを困難にしていると考えられる。

このような現状に鑑み、廃ガラスを成分的制約の少ない用途へ、なるべく手間をかけない回収方法でリサイクルすることが望ましい。酸化物系セラミックスは、ガラスと組成が類似していることから、期待される用途である。使用済みPVパネルが将来に多く廃棄されることが予想されることから、それらリサイクル先の生産量が一定規模ないことには、リサイクル技術の社会的意義は高くない。成分的制約と生産量を考慮すると、タイルは有力な候補となる。しかしながら、これら用途における成分制約について十分な知見が整備されていないため、技術的検討が必要である。そこで、熔融温度を変化させての試験ならびに、通常タイル生産にて用いる粘土と配合した坯土の焼成試験を実施した。

出発材料は、ハリタ金属でシュレッダー破砕ののちに、磁力選別、渦電流選別によって金属分を分離するしたものをスクリーンにて6.0 mm以下の粒群とし、それらに湿式テーブル選別を施して得られた0.5-2.0 mm粒群 (以下試料A)と2.0-6.0 mm粒群 (以下試料B)である。

4. 3. 2 セラミックタイル原料化試験

(1) 熔融温度帯試験

a. 試験方法

試料AとBをそれぞれ、電気炉にて熔融した。条件として、600、700、800、900、1000℃の5つの異なる温度にて30 min保持をした。なお、昇温は10℃/min、設定温度にて30 min保持の後、徐冷した。

各温度にて熔融試験を実施した結果を図4.3.1に示した。前節の試験にて、0.5 mm以下の試料を熔融した際には、600℃で熔融はしないもの、一部の粉が不均一に焼結するものが散見された。今回の試料では、それらよりも粒度が大きい、600℃ではそのような挙動はほとんど見られなかった。700℃では、一部のカレット間が熔融しているように見られた。この傾向は、粒度の小さな試料Aの方が強くみられた。これは、前節での状況と同様に、熔融初期には、融液と隣接する粒子との界面における反応が進行するが、その傾向が粒度が小さくなるにつれて大きくなるものと考えられた。800℃では、2つの試料とも全体的に熔融していることがわかる。一方、さらに高温での条件と比較すると、完全に熔融してはならず、中には元のカレットの間にできていた空隙が残っているものが認められた。1000℃まで昇温することで完全に熔融体となり試料中の空隙がなくなり、試料外観としては減容化したように観察される。EVAは250℃付近から分解が始まり、400℃を超えると熱分解・ガス化するため、これらの熔融温度の条件下ではこのEVAの分解・ガス化が空隙を生じさせたとも考えられる。

混雑物の金属分は熔融体中に残存している。試料Aでは全体的に黒い不透明な試料となった一方、試料Bでははっきりと混雑物の存在がわかり、混雑物のない箇所では透明な試料が得られた。試料AとBでの混

雑物の違いは確認していないが、混雑物の粒度にも違いがあるため一概には言えないものの、試料Aの方が金属成分が多かったことが推定され、これら一部の金属元素が酸化することで発色した可能性も考えられた。



図4.3.1 試料A（上）とB（下）の各温度での熔融後の試料外観（いずれも長径：80 mm）

b. 調合試料のセラミックタイル評価

試料A試料Bと、実操業にてタイル原料に使用している蛙目水簾粘土とを、各500 gずつ調合し、水500 gとともに容量1.5 Lのポットミルに装填し、9 h摩砕した。

試料Aを調合した試料では問題なくスラリーが得られたが、試料Bを調合した試料では、ポットミルでガラスが全て摩砕されず、ガラスの含有分が少ないスラリーになった。試料Bを調合した試料を、さらに時間をかけ18 h以上摩砕したものの、やはり摩砕されないものが残った。摩砕できなかった原因としては、アルミやプラスチック類の混雑物がガラスの摩砕を阻害したためと考えられた。両試料の混雑物の割合に違いはないと仮定しても、粒度の大きな混雑物が摩砕を阻害することが分かった。

これらの試験結果から、粒度が最大で6.0 mmとなるガラスを摩砕する場合は、ポットミル内のボールを混雑物が阻害しない大きさとなるよう混雑物の状況に応じて慎重に選定することや、通常操業のガラス原料配合割合よりも少なくするなどの対策が必要と考えられた。しかしながら、これらの対策は、操業時のコストアップにつながるため、原料として調達する際には、その追加的コスト分を勘案する必要が生じるものと考えられる。

得られたスラリーを乾燥し、粉碎、成型後、電気炉にて焼成した。条件として、1000、1100、1200 °Cの3つの異なる温度にて30 min保持をした。なお、昇温は10 °C/min、設定温度にて30 min保持の後、徐冷した。焼成後の各試料の外観を図4.3.2に示す。試料Aを調合した試料では1100 °Cで吸水率0 %、試料Bを調合した試料では1200 °Cで吸水率0 %となった。なお、試料Aを調合した試料の1200 °Cでの焼成条件では、原料の一部が熔融してしまい焼成用の台から取れなくなったため、試験後の試料が得られなかった。ガラスを調合することにより焼成温度が低温化できることが知られている。先に記したように試料Bを調合した原料では一部のガラスが摩砕されずに残ったため原料中のガラス含有率が低く、試料Aの調合試料に比べて試料Bのそれは融点が高かったものと推測された。

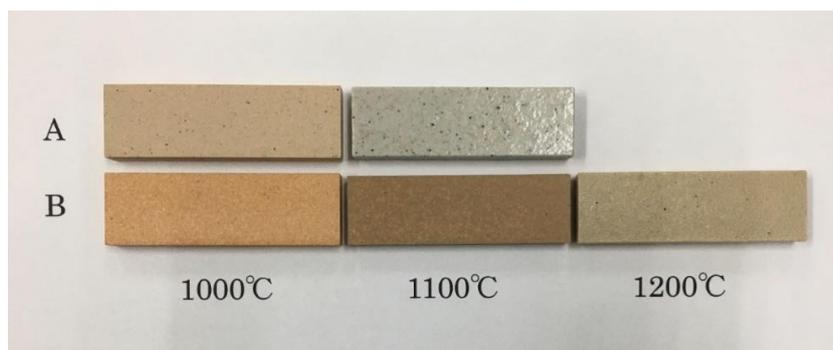


図4.3.2 試料A（上）、試料B(下)を調合した原料の焼成試験後のタイル外観（いずれも長径：80 mm）

4.3.3 セラミックブロック原料化試験

(1) 供資材と前処理

前節と同様に、熔融試験によるセラミック原料化の可否判断ならびに、50%原料に使用したセラミックブロックの製作試験を実施した。

出発材料は、シュレッダーで破碎ののち、磁力選別、渦電流選別によって金属分を分離したのちに、分級機にて6.0 mm以下の粒群を取り出し、湿式テーブル選別にて得られた0.5-2.0 mm（以下試料A）と、最後のプロセスの湿式テーブル選別を乾式テーブルに変えて得られた0.5-2.0 mm（以下試料C）、シュレッダーで破碎ののち、攪拌型粉碎を実施し、その後、磁力選別、渦電流選機によって金属分を分離するとともに、分級機にて6.0 mm以下の粒群を取り出し、湿式テーブル選別の小重産物として得られた0.5-6.0 mm（以下試料D）とした。

供試材の外観を図4.3.3に示す。試料Dのみ、試料A、Cよりも粒度が大きい。試料Aは、水分を含んでいたため外観は白色ではなくグレーで、異物の混入は少なく見えた。試料Cは、白色のガラス中に、銅線、アルミ、黒いフィルムが混在しているのが確認できた。試料Dは粗いガラスの中に、銅線、アルミ、黒いフィルムが混雑物として確認できた。



図4.3.3 試料A(左)、試料C（中）、試料D（右）の試料外観

本プロセスで得られるガラスカレットには、封止剤としてのEVA (Ethylene-Vinyl Acetate) や微量の金属分が混雑物として存在する可能性が考えられたが、金属分は、主に銅線やアルミであることが分かった。また、黒いフィルムはバックシートからの混雑物で樹脂製であると考えられた。ただ、バックシートは各社が独自技術にて市場を争っているため、その素材情報が得られず、それらの昇温時の熱分解特性などは調べられなかった。

(2) 熔融試験

各試料A, C, Dを40 g秤量し、100 mm径の耐火物皿の上に乗せ、小型電気炉にて1050 °Cで15 min保持した。各試料の熔融後の外観を図4.3.4に示す。試料Aの表面はガラス様の光沢を示したものの、全体的には黒く、表面に多くの孔が見られた。試料Cは、黒い粒状の塊と気泡を含み、試料A同様に表面に孔のある、全体としては透明な試料となった。熔融後の試料Dは、ガラス様の光沢はなく、黒く硬い試料とな

り表面は凹凸が多くみられた。試料Aの表面の孔、試料Cでは表面の孔ならびに内部にも存在する孔は、EVAあるいはバックシートの樹脂分が熱分解して発生したガスによって生じたものと考えられた。特にEVAは色を有さないため、混雑を視認するのが困難であることが考えられる。また、黒色を呈したものは、金属由来のものやバックシートの着色成分が残った可能性が考えられた。

試料Aは熔融前の外観からは混雑物が少ないと思われたが、水分を含んでいたことで、混雑物の存在が分かりにくかったものと考えられた。一方、試料Cの方が熔融後の結果からは混雑物の存在が少なかったように見受けられた。試料Dについては、混雑物が多く、セラミックブロックの原料には不適であると判断した。



図4.3.4 試料A(左)、試料C(中)、試料D(右)の熔融試験後試料の外観

(3) ブロック焼成試験

熔融試験から、不適と判断された試料Dを除いて試料Aと試料Cについてブロック焼成試験を実施した。ただし、試料Cについては、目視にて混雑物が多いと判断し、試料Cのうちの一部を取り出し、1 mm以上の粒径の混雑物を選別除外した。選別された混雑物の重量割合と外観写真を表4.3.1に示す。選別により全体として1.5%が混雑物として除外された。混雑物を選別除外したガラス試料を、以降、試料C'とする。

表4.3.1 試料Cにおける混雑物の割合ならびにそれら外観写真

混雑物	アルミ系	銅線	フィルム
重量比	1.0 wt%	0.3 wt%	0.2 wt%
外観写真			

試料A、試料C、試料C'をセラミックブロックに焼成するために、成型した。成型に際しては、表4.3.2にて原料を調合した。調合に際しては、ビニル袋で混練調合

表4.3.2 成型の場合の原料調合比率

調合原料	試料	SP粉	バインダー
配合比率	50 wt%	30 wt%	20 wt%

成型体形状が100 mm四方、厚み40 mmとなるよう成型した。成型された試料外観を図4.3.5に示した。それぞれの重量は650 gであった。



図4.3.5 試料A(左)、試料C(中)、試料C'(右)を調合した試料の成型体

成型体を、小型電気炉によって1050℃で15 min保持し、焼成した。焼成したセラミックブロックの外観を図4.3.6に示した。



図4.3.6 焼成された試料A(左)、試料C(中)、試料C'(右)のセラミックブロック

いずれの試料も、焼成による収縮は4辺ともに約7%程度であった。いずれの試料も生地色は、茶褐色SP粉焼成色となった。いずれの試料も、全面から1~5 mm大の乳白色のガラスが表面に突出した部分が見られた。試料CならびにC'では、黒褐色の金属酸化物が表面に突出した部分が見られた。特に、混在物を選別除去しなかった試料Cではそれが顕著であった。試料Aならびに試料C'についても、外観上、形状品質上に問題があり、現状のままではセラミックブロック原料としては不適であると判断された。特に、試料C'では調合前に大きな混雑物を除去したにも関わらず、試料Aとほぼ同様の外観であった。

ガラスの表面への突出現象は、焼成時に熔融し軟化したガラスと、酸化し膨張した金属が、SP粉が収縮する際、ブロック表面の外側に押し出されたものと考えられた。図4.3.6からは、試料Aよりも試料Cの方が熔融後に全面が黒くならず混雑物が少ないようにも見られたが、焼成の結果からは、試料Aの方がバックシートが多いため熔融時に黒色を呈し、一方試料Cの方が金属分が多いため焼成時に突出部を形成したと考えられた。ブロックの原料としての品質という観点からは、バックシートやEVAではなく、金属分の混在に気を遣うことになると考えられた。

そのため、混雑物としての金属は少なくとも試料Aの水準まで抑えた原料であり、ガラスについては、突出物を形成しない粒度にまで小さくする必要があると考えられた。今までの作業上の経験から、期待する粒度としては、1 mm以下と考えている。

今回の試験では、実用規模の装置のみを用いて製造されたガラス濃縮物をセラミックブロック原料として用いたため、攪拌型粉碎や電気パルス粉碎を施していない。この両粉碎においては、ガラスが選択的に1 mm以下の細粒群に濃縮するため、この問題をクリアできる可能性が大いにあると言える。電気パルス粉碎は世界的にもリサイクル分野での実用化例は1プラントのみだが、攪拌型粉碎はすでに実用機が存在するため、その利用が大いに期待される。

4.3.4 グラスファイバー原料化試験

ハリタ金属の縦型シュレッタープラントにて製造されたガラス濃縮物に湿式テーブル選別を施したガラス濃縮物(試料A・B)について、某大手グラスファイバーメーカーにて、その原料評価をおこなって

いただいたので、以下のその結果を記す。評価内容は以下の4項目である。

異物： 目視による異物除去および簡易EDAXによる異物分析

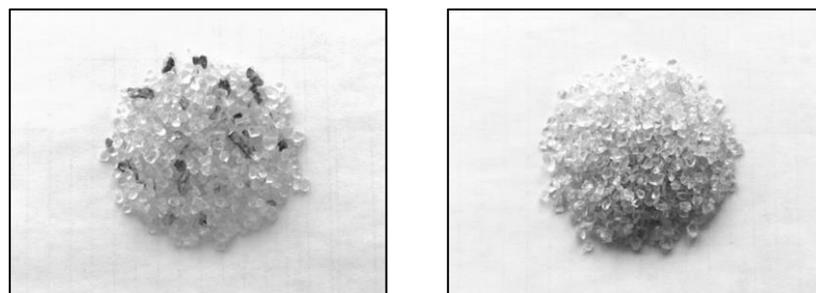
組成： 蛍光X線による組成分析（異物除去したカレットを使用）

粒度： ふるい分けによる粒度分布評価

腐食試験： 腐食試験機によるスピナー合金腐食評価（異物除去したカレットを使用）

（1）異物

ガラス濃縮物中の異物は約4%混入しており、Al、Sn、Cuなどの金属、有機物が確認された。元の試料と異物除去後の試料を図4.3.7に、異物の分析結果を図4.3.8に、それぞれ示した。



試料B
異物除去品
図4.3.7 ガラス濃縮物に含まれる異物

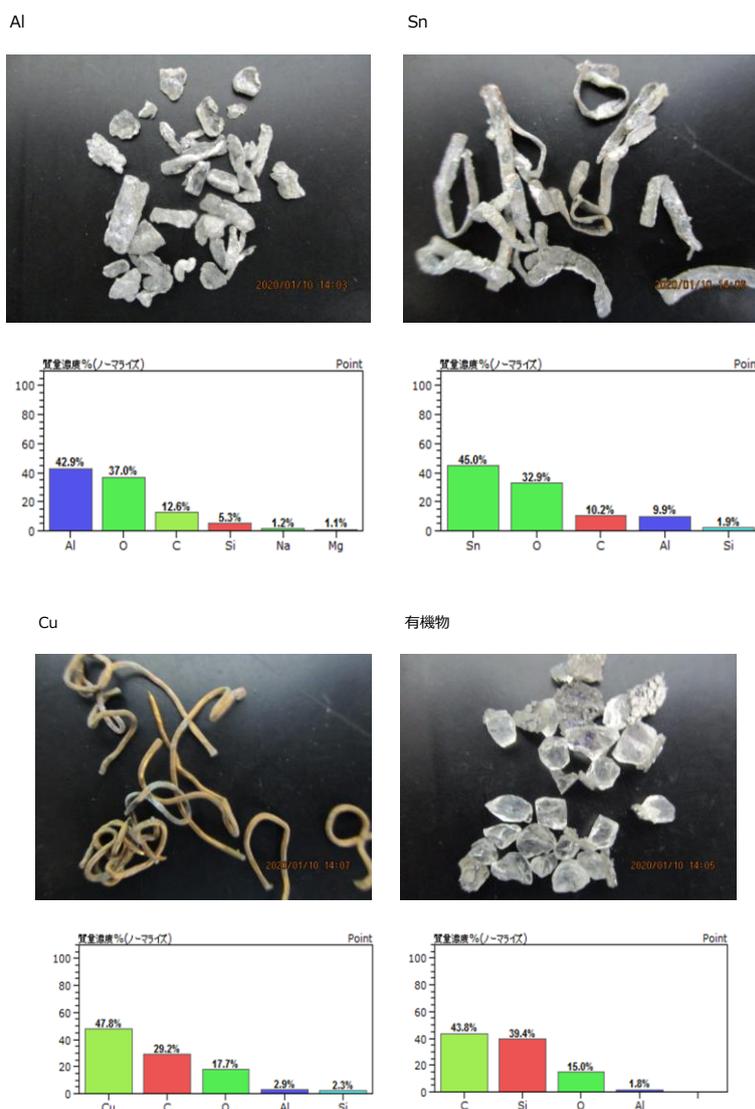


図4.3.8 異物の分析結果

(2) 組成

本試料の組成は、板ガラスと同等であり、ガラスファイバー原料に適した組成であったが、PVガラス特有のAs、Sbの含有が懸念され、使用に際してはそれらの微量分析による確認が必要である。

表4.3.2 ガラス濃縮試料（表中ではPVカレット）の蛍光X線分析による化学分析値
蛍光X線 分析結果 【単位:%】

	PVカレット (異物除去品)	GW	板ガラス	ビンガラス
SiO ₂	71.80	60~70	70~73	69~73
Al ₂ O ₃	1.37	0~5	0~3	2~3
B ₂ O ₃		0~8		
MgO	3.57	0~5	1~5	0~1
CaO	8.20	5~13	7~12	10~12
SrO	0.01	0~2		
BaO		0~3		
Na ₂ O	14.50	13~18	13~15	13~14
K ₂ O	0.03	0~2	0~2	0~2
TiO ₂	0.02	0~0.5		0~0.1
Fe ₂ O ₃	0.02	0~0.5	0~0.1	
SO ₃	0.22	0~0.5		
As ₂ O ₃	0.01			
Sb ₂ O ₃	0.16			
PbO	0.00			

(3) 粒度

粒度はコントロールされており（粒度分布は図4.3.9）、試料Aは細粒に過ぎるが、試料Bはガラスファイバー原料に適した粒度であった。

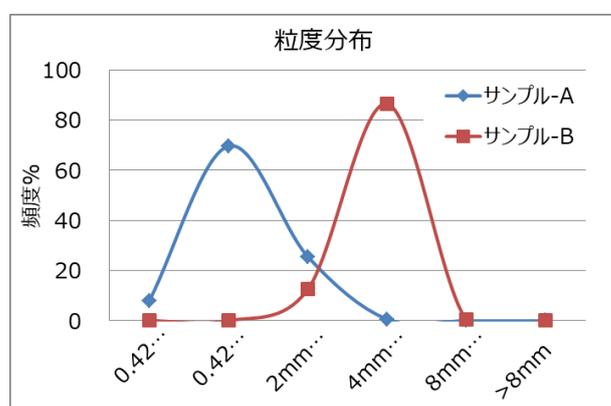


図4.3.9 試料A・Bの粒度分布

(4) 腐食試験

a. 試験方法概略（詳細は別紙参照）及び条件



図4.3.10 試験方法概略

b. 試験後外観

大気暴露部分において、テスト②（図4.3.10）で腐食がやや進んでいるように見えたが、明瞭ではない（図4.3.11）。

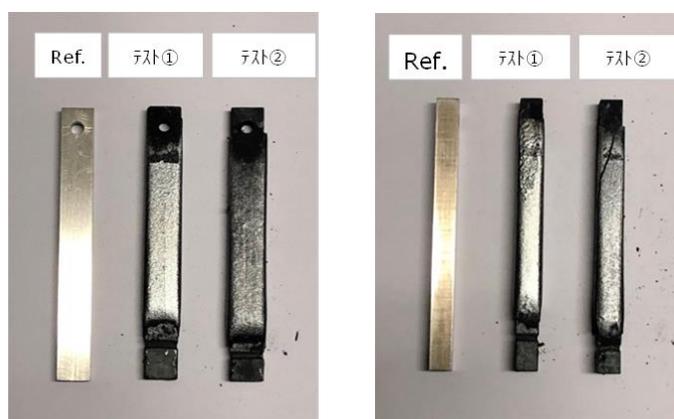


図4.3.11 腐食試験後の試料外観

c. ガス腐食部除去後外観

大気暴露部分において、テスト①、テスト②（図4.3.10）ともに腐食部は手で剥離することができる状態であり、大きな違いは認められなかった（図4.3.12）。



図4.3.12 腐食試験前（左）後（中央・右）の試料外観

d. 試験片酸処理後外観

フッ酸55%で48h処理（外部にて処理）

*テスト①、テスト②で酸処理後の外観（図4.3.13）に差は確認できなかった。



図4.3.13 酸処理後試料の外観

e. 腐食量測定（寸法変化）

腐食量を測定した結果（表4.3.3）より、以下のことが分かった。

- *テスト①、テスト②で浸食量の差は確認できなかった
- *テスト①、テスト②ともに大気暴露部分は、約8%の腐食が確認された
- *テスト①、テスト②ともに大気-ガラス部のガラス境界側で極端に腐食が見られた。
これは大気暴露で腐食された部分がガラス中に溶出したためと考えられる。

表4.3.3 腐食量測定結果

(mm)

	ガラス種	試験前	試験後							
			大気暴露部	差	大気-ガラス部A	差	大気-ガラス部B	差	ガラス浸漬部	差
長辺	テスト①	9.53	8.70	0.83	9.55	-0.02	9.10	0.43	9.53	0.00
	テスト②	9.53	8.70	0.83	9.55	-0.02	9.00	0.53	9.53	0.00
短片	テスト①	5.99	5.50	0.49	6.05	-0.06	5.50	0.49	6.03	-0.04
	テスト②	6.00	5.50	0.50	6.07	-0.07	5.50	0.50	6.02	-0.02

f. 腐食表面顕微鏡観察

結果を図4.3.14に示すが、テスト①、テスト②で試験後の表面状態に差は確認できなかった。

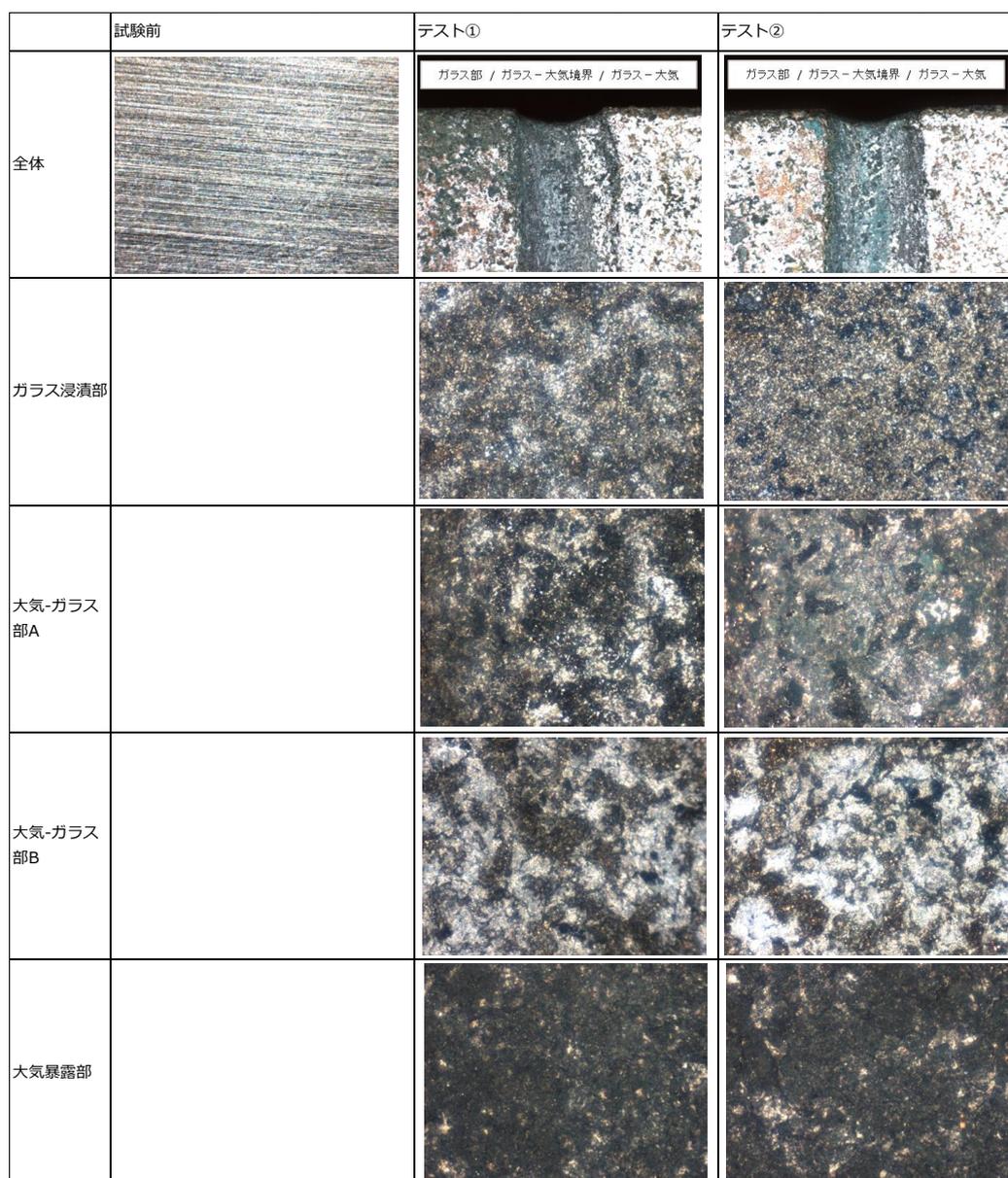


図4.3.14 腐食試料の表面顕微鏡観察像

g. 腐食表面元素分析

試験片外観、腐食量、試験後のガラス分析の結果（表4.3.4）からテスト①、テスト②の差が確認できなかったことから、今回、表面元素分析は実施しなかった。

表4.3.4 腐食試料の傾向X線分析結果

蛍光X線定性分析結果 SQX分析

【単位:%】

	GWガラス	PVガラス	GWガラス 70%+PVガ ラス30%	①GWガラス 腐食試験後	△試験前後	②GWガラス 70%+PVガ ラス30% 腐食 試験後	△試験前後
NiO	0.006	0.004	0.003	0.013	0.007	0.012	0.010
Co2O3	0.006	ND	0.004	0.025	0.018	0.020	0.016
Cr2O3	0.058	ND	0.045	0.088	0.030	0.063	0.019
WO3	0.030	0.015	0.014	0.036	0.006	0.024	0.010
Y2O3	ND	ND	ND	0.007	0.007	0.002	0.002
Nb2O5	ND	ND	ND	0.002	0.002	0.002	0.002

h. 溶出成分分析

試験後のガラス分析を実施した結果、ガラス中へのスピナー合成分の溶出を確認したが、テスト①、テスト②で溶出量の差はほとんどなかった。

以上の結果から、今回の試料A・Bについては、事前に異物を訓除けば、従来の原料に30 wt%の比率を混合しても、装置的にはグラスファイバー製造に供することに問題のないことが判明した。

4. 3. 5 まとめ

本研究では、サブテーマⅡで決定された「EVA等不純物付きガラス原料を攪拌型粉碎にて処理し、その不純物の剥離状況を確認しながら、それらの最適条件を決定する。」に基づき、廃PVパネルを最適化された実用設備（ハリタ金属所有のカーシュレッダープラント）にて破碎・選別し、後段の処理フローに供給するとともに、実機規模の攪拌型粉碎機（丸美陶料所有のインテンシブミキサー：DE-14型）を用いてEVA等不純物付きガラス産物からセラミックタイル・ブロック、グラスファイバー原料となり得る高純度ガラス原料を製造した。

平成29年度の既存実用シュレッダープラントによる破碎選別試験で課題であった、破碎時の目切れが大きい問題については、シュレッダー破碎時のダスト吸引の風量設定の影響によるものと考えられたため、平成30年度の破碎試験では、シュレッダープラントのダスト吸引の風量設定をはじめとした処理フローの見直しを行い、改善されたプロセスで破碎試験を行った結果、目切れが改善される結果となった。ただし、ガラス濃縮物にPVパネルバックシートのプラスチック類が混入することとなり、吸引条件は基本的に平成29年度と同様とするが、PVパネル投入時に運転員の経験によりガラス微粒子の吸引を抑制することができた。

また、攪拌型粉碎試験では実機規模の攪拌型粉碎機の基礎挙動の把握するために3条件下で粉碎実験を実施した。この実験により、EVA等不純物付きガラス産物からセラミックタイル・ブロック、グラスファイバー原料となり得る高純度ガラス原料を製造する最適条件を見出すことができた。

さらに、得られた各種のガラス濃縮物について実機規模の乾式・湿式テーブル選別を実施し、セラミックタイル原料として良好な産物を製造することができた。また、乾式・湿式両テーブル選別では後者の方が若干精度の高い選別ができることが分かったが、乾式テーブル選別でも比較的良好的なガラス濃縮物を製造できることも確認された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

攪拌型粉碎では、粉碎容器自体の回転とその中に設置された（容器と逆回転する）アジテータとの摩擦効果によって、試料は摩擦と衝撃力を受けて選択粉碎が起こる。今回、実験室規模の結果を実用規

模の装置に反映する際に、特にシミュレーションは行わず、アジテータ端部の周速を同等とすることで実用規模の粉砕条件を決定したが、粉砕状況およびガラスとEVAの各粒群への分配率は両者でほぼ同様となった。この攪拌型粉砕特有の現象とも思われるが、アジテータの周速を管理することにより、粉砕挙動を大凡把握できることが分かった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で使用した攪拌型粉砕および電気パルス粉砕によって単体分離されたガラスとEVAは、その後にふるい分けあるいは湿式テーブル選別を施すことによって、セラミックタイル・ブロックまたはグラスファイバーの原料としてそれぞれ相応しい特性を持つことが判明し、今後の大量廃棄が予想される使用済みあるいは災害廃棄となるPVガラスのリサイクル用途がほぼ確立された。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 張田真：太陽光パネルリサイクルの技術開発と処理状況、第1回資源リサイクルEXPO、東京ビックサイト、2019
- 2) M. Harita: Japan and Thai environment week 2020, Ministry of the Environment, Japan and Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand, Bangkok, 2020
- 3) M. Harita: DGE-METI WG ON NEW ENERGY SYSTEMS, DGE METI, Grenoble, 2020
- 4) 張田真：令和元年度太陽光パネルリサイクルセミナー 国内外の技術動向と最新の取り組み、経産省中部経済産業局、2020

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) タイ工業省関係者によるPVパネル処理見学、ハリタ金属株式会社・射水リサイクルセンター、約30名、(2019年8月1日)
- 2) 環境パートナーシップ・CLUB 循環型社会分科会によるPVパネル処理見学、ハリタ金属株式会社・射水リサイクルセンター、約40名、(2019年12月5日)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

III. 英文Abstract

Development of Rational Recycling Technology for Laminated Hard-to-Handle Panels such as PV and LC

Principal Investigator: Shuji OWADA

Institution: Waseda University

Okubo 3-4-1, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8885 JAPAN

Tel: +81-3-5286-3319 / Fax: +81-3-5286-3319

E-mail: owadas@waseda.jp

Cooperated by: Harita Metal Co., Ltd.

[Abstract]

Key Words: PV panel, Glass, Recycling, Agitator grinding, Electrical disintegration, Wet tabling

In Europe and some of other countries, used PV panels are mostly crushed and sorted, and the main recycling process is to recover silver, and glass, which accounts for 60 to 70% of all PV panels, is rarely recovered. Even in Japan, the above process is carried out in some recyclers, but the main purpose is still silver recovery, and the glass concentrate produced as a by-product still contains many impurity substances, especially organic carbon content. Since the adhesion between glass and EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) is usually strong, the urgent issue is first to liberate the glass and EVA and to separate them from each other. In this study, a mechanical agitator type grinding and an electrical disintegration are applied to liberate both substances, and a wet tabling which must be most suitable for the mutual separation of these materials is applied to develop a process a process capable of producing high-purity glass and of mass processing.

The LCA was carried out for the ceramic tile manufacturing process and was proved that our process was super energy saving with CO₂ emissions of less than 1% of the whole manufacturing processes. Basic research was also conducted and new findings were obtained on the selective breakage mechanism of agitation type grinding and electrical disintegration, which were expected to be applied especially in the field of resource recycling.

At the Harita Metal Co., Ltd., a 2000 HP horizontal shredder crushing/sorting plant produces glass concentrate as a by-product, but the main purpose of the plant is to recover metals such as silver, and the yield of glass concentrate was very low. By improving the operating conditions during shredder crushing, the yield could be significantly increased from 30.9 % to 52.3 %. The glass concentrate obtained here was sorted by a commercial scale wet table, and a higher purity glass concentrate could be produced. In addition, operational problems/difficulties were pointed out.

Moreover, various glass concentrates obtained in a commercial scale

operations were evaluated as raw materials for a ceramic tile/block and a glass fiber. In addition, it was proved that the same 2000 HP vertical type shredder shredding/sorting plant, newly installed in the company, could produce a higher grade glass concentrates.