

平成 28 年度環境省委託事業

平成 28 年度低炭素型 3 R 技術・システム実証事業

太陽電池リサイクルにおける  
ガラス再生と高効率解体工程の実証

報告書

平成 29 年 3 月 1 日

パナソニック株式会社

## 目次

要 約.....	i
1. 背景・目的.....	1
1.1. 背景.....	1
1.2. 目的.....	5
2. 評価範囲の検討.....	6
2.1. 概要.....	6
2.2. 建材へのガラス再利用について.....	7
3. 解体工法の実証方法.....	8
3.1. 本実証に用いた省エネ破碎システムについて.....	8
3.1.1. 自社開発のマルクス式パルス破碎装置.....	8
3.2. 事前破碎工法実証の進め方について.....	11
3.2.1. 事前破碎工法の実証.....	12
3.2.2. パルス破碎機の電極構成の検討.....	15
3.2.3. パルス破碎による事前破碎工法の実証.....	17
3.3. パルス破碎によるガラス回収工法実証.....	19
3.3.1. 密閉型処理容器の検討.....	20
3.3.2. パルス破碎条件最適化検証.....	21
3.3.2.1. 放電回数とガラス回収効率の相関把握.....	22
3.3.2.2. 放電電圧とガラス回収効率の相関把握.....	24
4. 解体工法 実証結果のまとめ.....	26
4.1. 解体工程フローと各工程のマテリアルバランス.....	26
4.2. 解体工程の消費電力とCO <sub>2</sub> 排出量.....	27
4.3. 今後の取組み・課題.....	28
5. ガラス再生工程の実証方法.....	29
5.1. 実証方法の概要.....	29
5.1.1. 概要.....	29
5.1.2. 外壁材用発泡ガラスの製造フロー.....	29
5.1.3. 外壁材用発泡ガラスの目標スペック.....	31
5.2. 1次検証評価.....	32
5.2.1. 概要.....	32
5.2.2. 発泡ガラスの作製.....	32
5.2.3. 外壁材への添加検証.....	35
5.3. 2次検証評価.....	38
5.3.1. 発泡ガラス軽量化の取組み.....	38
5.3.2. 加熱条件の最適化.....	39

5.3.3. 発泡剤の量/種類の評価及び粉砕条件の改善 .....	42
5.3.4. 外壁材への添加検証 .....	47
5.3.5. モルタルへの添加検証 .....	49
5.3.6. 発泡ガラス粉体の粒径拡大による軽量効果検証 .....	52
5.4. 課題・今後の取組み .....	54
6. CO <sub>2</sub> 削減効果の算出 .....	57
7. まとめ .....	61
8. 資料編 .....	64

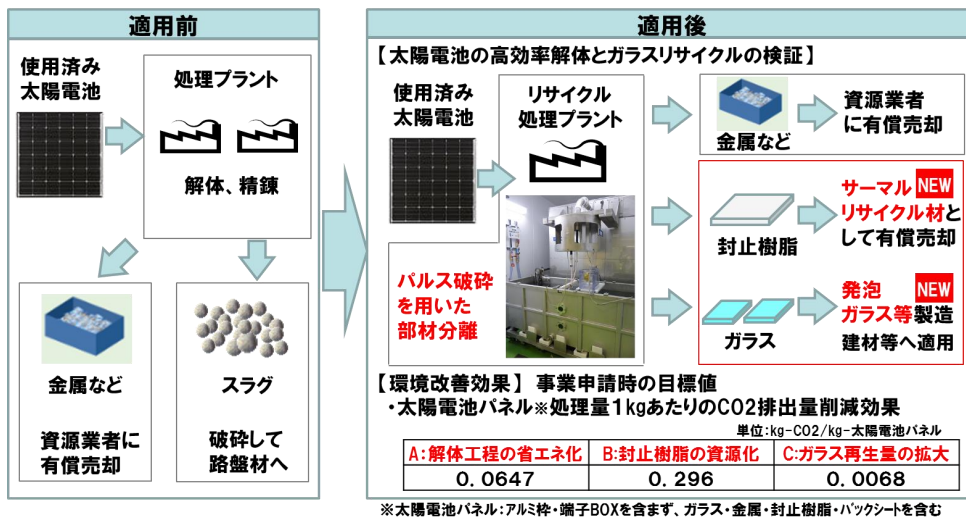
# 要 約

## 1. 背景・目的

再生可能エネルギーへのニーズの高まりにより、太陽電池の廃棄量は2020年には年間1万トン、2030年には年間8万トンに達し、大きな社会問題となることが想定されている。太陽電池は、主に精錬処理となっており、重量比で約2/3がガラスであるが、現状は素材を有効に活用し切れていない。各構成素材を有効に再利用するためには、太陽電池を高効率に解体することが重要であるが、屋内で使用される組み立て系の商品ではなく、屋外で使用される商品のため、封止工法で素材が強固に接合されており、解体の難易度を高くさせている。本事業では、太陽電池の効率的な解体方法と、構成素材中で重量比率が高いガラスのリサイクル技術に焦点を当て、CO2排出量削減に貢献するとともに、リサイクルを目的とした太陽電池モジュールの回収スキーム構築の促進に寄与することを目的とする。

## 2. 本事業の概要

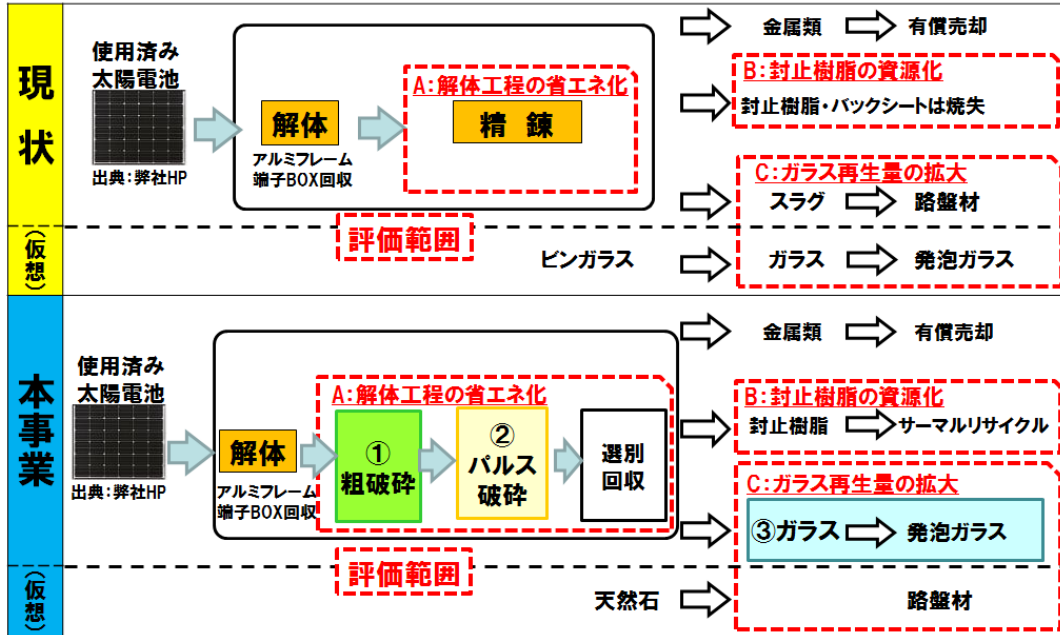
以下の通り、弊社で保有する自社開発のパルス破碎装置を用いて、太陽電池パネルを解体し、ガラスを資源として回収する工程の実証を行った。パルス破碎装置は、電気エネルギーを極めて短時間に一気に放出することで、液体の気化膨張により衝撃波を発生させ、ガラス、封止樹脂、金属等を、非加熱で高純度に分離することができる。燃焼工法や溶解工法では活用が困難であるが、この手法により封止樹脂を回収し得る。よって、資源活用の観点にて、回収分をCO2削減効果の対象とみなし、その削減量を評価した。またスラグを経ずに、ガラスを建材などに再利用することをターゲットにガラス再生の検証評価を行った。



## 本事業の概要

### 3. 評価範囲（バウンダリー）

以下の通り、現状と本事業で工程フローと評価範囲を設定した。「C:ガラス再生量の拡大」については、現状でも本事業でも路盤材と発泡ガラスを製造する工程を設定して評価を行った。



本事業での評価範囲




### 4. 粗破碎工程の評価

パルス破碎機へ太陽電池パネルを投入するためには、適正なサイズに裁断する必要がある。株式会社 環境保全サービスの保有装置を用いて、以下の実験を行った。その結果、破碎サイズばらつきが少ないスパイラルカッターが、適していると判断した。

使用装置	ロータリーカッター	ロータリーカッター +ワイドクラッシャー	スパイラルカッター
破碎の特長	回転刃 固定刃 引き裂くように破碎 スクリーンで破碎 サイズを均一化	＜ワイドクラッシャー＞ 処理物を 旋回する刃物に ぶつけて破碎	固定刃 回転刃 破碎物を 短冊形状 に裁断・破碎
破碎結果	破碎サイズ10~40cm 破碎が 不十分で 繋がっている	破碎サイズ10~40cm 破碎が 不十分で 繋がっている	破碎サイズ10~20cm 短冊状に 破碎され バラツキ少ない

粗破碎工程の検証

また、粗破碎方法の違いによるパルス破碎の優位性の検証を行ったが、以下の通り、破碎時の衝撃でパネルが処理容器から飛び出し、ガラス剥離が不十分であり、飛び出し対策を施した治具を製作しての評価が必要と判断した。

粗破碎 使用装置	ロータリーカッター	ロータリーカッター +ワイドクラッシャー	スパイラルカッター
破碎の 特長	パネルの破碎はバックシートの剥離から始まり『封止樹脂+ガラスのシート』と『バックシート』に分離した後に、『封止樹脂+ガラスのシート』が粉碎		
破碎結果 放電 200回			

粗破碎方法の違いによるパルス破碎の優位性の検証

## 5. パルス破碎工程の評価

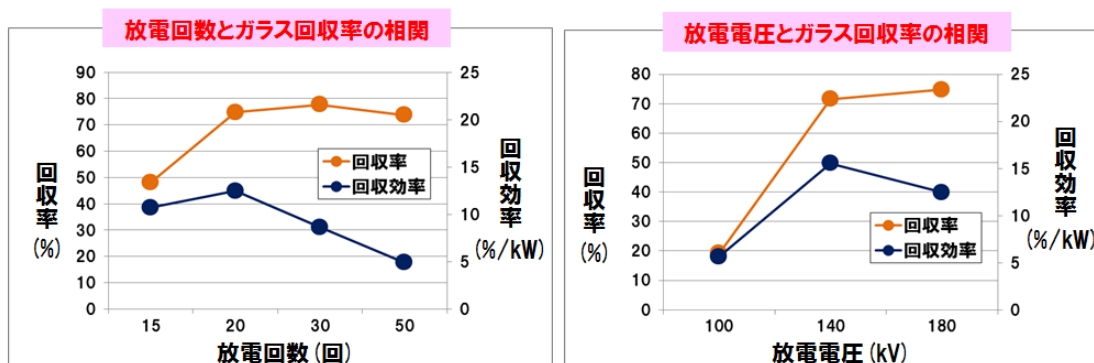
パルス破碎は、放電回数/放電電圧の相関からガラス回収効率の最適条件を求めるべく、破碎時の飛び出し防止機構付き処理容器を使用して、以下に示す条件と評価式を用いて実験評価を行った。

	目的	電圧 (kV)	放電回数 (回)	投入枚数 (枚)
条件1	放電回数/ガラス回収効率の相関把握	180 (電圧固定)	15~50	1
条件2	放電電圧/ガラス回収効率の相関把握	100~180	20 (回数固定)	1

$$\text{回収率} = \frac{0.3 \sim 5.6 \text{mmのガラス重量}}{50 \times 50 \text{mmの太陽電池パネルガラス重量}} (\%) \quad \text{回収効率} = \frac{\text{回収率}}{\text{使用電力 (放電回数に比例)}} (\% / \text{kW})$$

パルス破碎効率の実験条件と評価式

実験の結果、放電回数20回、放電電圧140kVが最良条件となり、この条件でCO2排出量を算出することとした。

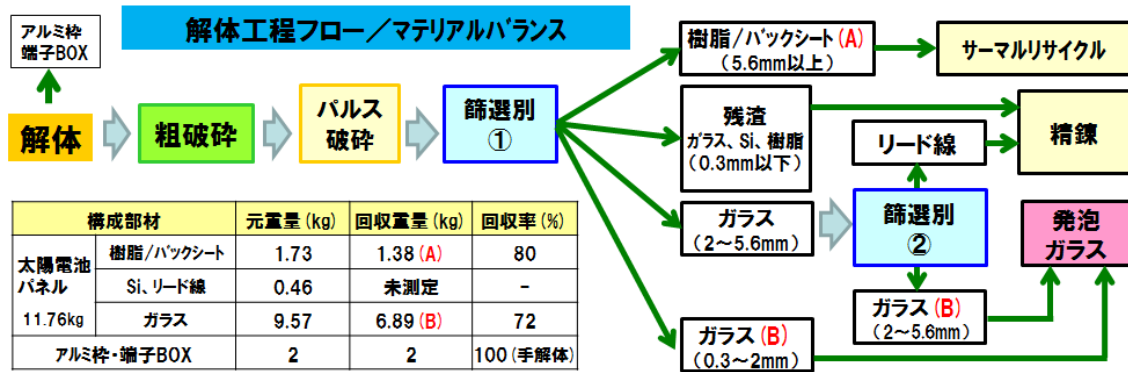


条件1の実験結果

条件2の実験結果

## 6. 解体工程のCO2排出量算出

解体工程全体のフローとマテリアルバランスは、以下の通りである。



解体工程フローとマテリアルバランス

各工程のCO2消費電力は以下の通りで、合計で0.112 kWhとなった。

項目	粗破碎	パルス破碎	篩選別①	篩選別②
使用設備	スパイラルカッター	パルス破碎機	振動式篩機	振動式篩機
消費電力 (kWh/kg)	0.004	0.095	0.005	0.008
計算条件	処理能力 1800 kg/h 動力 8 kWh	・放電電圧 140kV ・放電回数 9000回/パネル1枚 ・パルス放電の消費電力 0.23kW/回 = 6.39E-05 kWh/回 = 0.062 kWh/kg ・搬送、供給排出系の消費電力 0.033 kWh/kg	処理能力 1000 kg/h 動力 5 kWh	処理能力 500 kg/h 動力 4 kWh

解体工程における工程別の消費電力

従って、解体工程全体のCO2排出量は、 $0.112 \text{ kWh} \times 0.587 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}$  (環境負荷に係る電力原単位：平成27年度実績代替値) =  $0.066 \text{ kg-CO}_2/\text{kg-太陽電池パネル}$  となった。

## 7. ガラス再生工程の検証の概要と1次検証評価

発泡ガラスを外壁材の軽量骨材として添加する検証を、ケイミュー株式会社 (株式会社クボタ50%出資、パナソニック株式会社50%出資) と連携して、実施した。概要を以下に示す。

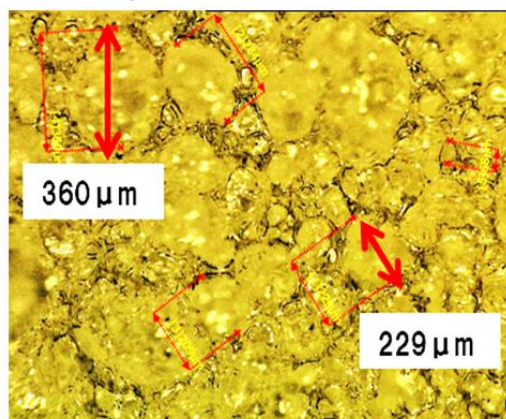


ガラス再生工程の検証概要

1次評価のため、太陽電池ガラスを $\phi 100 \mu\text{m}$ 以下に粉碎、炭酸カルシウム5%を添

加し、850°Cで30分加熱した後粉砕して、粒子状の発泡ガラスを作製した。建材用発泡ガラスの要求仕様は、嵩密度：0.2g/cm<sup>3</sup>、粒径600μm以下であるが、1次評価用の発泡ガラスは、嵩密度：0.5g/cm<sup>3</sup>、平均粒径183μmであった。この発泡ガラスを外壁材に添加して、曲げ試験と加熱収縮の値を評価したところ、以下の通り、従来品と大きな差異はなく、添加による重大な悪影響は認められないという結果となった。また、要求される粒径に対して、気泡サイズが大きくなっており、気泡の微細化に向け、2次評価を実施していくこととした。

評価項目		従来品	発泡ガラス添加
曲げ試験	破壊荷重(N)	695	693
	変位(mm)	0.40	0.40
	応力(Mpa)	12.7	11.6
	弾性率(Mpa)	4221	3595
加熱収縮(%)		6.2	5.9

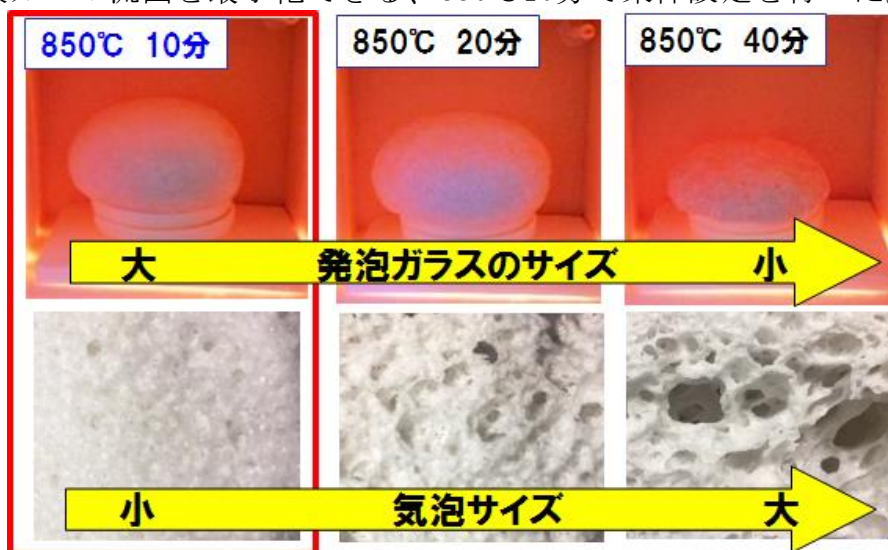


外壁材としての曲げ・加熱収縮評価

発泡ガラスの気泡観察(粉砕前)

## 8. ガラス再生工程の2次検証評価

2次評価に向けては、加熱時間の最適化、発泡剤の添加条件、発泡ガラス粒径の最適化が課題である。加熱時間については、窓付き電気炉で、以下の通り、発泡ガラスのサイズの変化と、気泡サイズの変化を把握した。加熱時間が長いと、ガラス粘性が低くなるため、気泡が繋がって大きくなり、炭酸ガスがガラス外部に流出し、発泡ガラスサイズが小さくなると推察されるため、炭酸ガスの流出を最小化できる、850°C10分で条件設定を行った。



加熱時間による発泡ガラスのサイズと気泡の状況



発泡剤の添加条件としては、炭酸カルシウムで添加量を最適化した上で、炭酸カルシウムの添加量と体積が同等となるドロマイト (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) を添加する実証を行った。ドロマイトは、炭酸カルシウムより発泡温度が低く、ガラス粘性が高い状態の発泡による気泡の微細化が期待できる。また粒子径については、平均粒径が従来 183 μm より大きくなるよう、粉砕条件を見直した。

上記の条件で発泡ガラスを作製し、嵩密度を計測した結果は、以下の通りである。炭酸カルシウムは添加量 3.5% が嵩密度最小の条件で、0.38g/cm<sup>3</sup> であった。ドロマイト添加品は、気泡が繋がって大きくなり、嵩密度が 0.44g/cm<sup>3</sup> と大きくなったと推定される。

発泡剤 種類	炭酸カルシウム				ドロマイト
	発泡剤 添加量	2%	3.5%	5%	7.5%
外 観					
(顕微鏡)				発泡せず	
嵩密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.40	0.38	0.45		0.44
平均孔径 [μm]	157	122	101		77
平均粒径 [μm]	243	231	253		255
総細孔容 [cc/g]	3.03	3.57	3.48		3.21

※平均孔径と総細孔容は1mm以下サイズを対象

### 2次評価用の発泡ガラス作製結果

次に、炭酸カルシウム 3.5% を添加して作製した嵩密度 0.38g/cm<sup>3</sup> の発泡ガラスを、外壁材に添加して比重を測定する検証を行ったが、以下の通り、明確な軽量化効果は確認できず、期待値に届かなかった。

		測定値			期待値※	
発泡ガラス 添加条件	嵩密度 (g/cm <sup>3</sup> )	—	0.38			
	添加量 (相対値)	0	100	200	100	200
外壁材絶乾比重 (g/cm <sup>3</sup> )		1.16	1.15	1.15	1.10	1.05

※絶乾比重の期待値はプレス工程や気泡への外壁ベース材の流れ込みを考慮し、実際の計算値より大き目に設定

### 発泡ガラスを添加した外壁材の比重測定結果

問題点としては、以下の2点が考えられるため、発泡ガラスをモルタルに添加し、プレス工程無しで硬化させ、比重を測定する実験を行った。

- ①発泡ガラスの強度が不足し、外壁材成型時のプレス工程で潰れが発生
- ②気泡が独立ではなく、気泡内に外壁ベース材が充填

結果は、以下の通りで、期待値を超える比重の減少を確認できた。従って、プレスによる潰れの影響が大きいと推定される。

		測定値				期待値※		
発泡ガラス 添加条件	嵩密度(g/cm <sup>3</sup> )	—	0.38					
	添加量(相対値)	0	100	200	300	100	200	300
<b>モルタル絶乾比重(g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>2.09</b>	<b>1.84</b>	<b>1.68</b>	<b>1.58</b>	<b>1.87</b>	<b>1.73</b>	<b>1.62</b>

※絶乾比重の期待値はプレス工程や気泡への外壁ベース材の流れ込みを考慮し、実際の計算値より大き目に設定

発泡ガラスを添加したモルタル（プレス無しで作製）の比重測定結果

今後に向けては、ドロマイト添加品の発泡プロセス改善が必要と考える。ガラス粘性と発泡温度の関係を踏まえ、気泡が繋がる現象を抑制し、強度と連続気泡の問題を改善するため、焼成温度を低減（現状 850℃→830℃等）、加熱時間の短縮（現状 10分→7分等）が必要である。また、篩いながら粉砕できる粉砕設備への変更などにより、粒径を大きくする改善も必要と考える。

## 9. CO<sub>2</sub> 削減効果の算出

本事業による、CO<sub>2</sub> 削減効果は、以下の通りである。0.572/kg-太陽電池パネルという結果であった。これは精錬をメインとする従来工法に対して 60%強の削減という結果であり大幅な削減が期待できる結果となった。

単位: kg-CO<sub>2</sub>/kg-太陽電池パネル

		A:解体工程の 省エネ化	B:封止樹脂の 資源化	C:ガラス再生量の拡大		合計
				路盤材製造	発泡ガラス製造	
CO <sub>2</sub> 排出量	現状	0.500	0.141	0.004	0.160	0.805
	本事業	0.066	0	0.011	0.156	0.233
CO <sub>2</sub> 削減量		0.434	0.141	-0.007	0.004	0.572
				-0.003		

本事業による CO<sub>2</sub> 削減効果

なお、CO<sub>2</sub>削減効果算出における工程フローは「3. 評価範囲（バウンダリー）」に示しているが、各評価範囲の工程概要を以下に示す。

	A:解体工程の省エネ化	B:封止樹脂の資源化	C:ガラス再生量の拡大	
			路盤材製造	発泡ガラス製造
現状	精錬しガラスはスラグへ (フロントガラス溶融によりスラグ化するプロセスでCO <sub>2</sub> 排出量を導出)	封止樹脂が焼失	スラグを 破砕して路盤材へ	ピンガラスを破砕、微粒子化、 加熱して発泡ガラスへ
本事業	粗破砕、パルス破砕し、ふるいで 選別回収	封止樹脂をサーマル リサイクル化	自然石を採石し、 破砕して路盤材へ	破砕済みガラスを微粒子化、 加熱して発泡ガラスへ

本事業による CO<sub>2</sub> 削減効果算出における工程概要

## 10. まとめ

### 【効果まとめ】

- ◆解体工程（粗破碎、パルス破碎、選別回収）
  - ・破碎の省エネ化で、精錬よりガラス分離のCO2排出量を削減可能
  - ・非加熱処理のため、封止樹脂の資源化可能
- ◆ガラス再生工程
  - ・発泡ガラスの外壁材添加検証では、重大な悪影響は認められない
  - ・発泡プロセスと軽量化の関係を検証、今後の改善指針を導出

### 【経済合理性】

本事業の実証工程フローの設備償却費（新規投資）/原動費/人件費、等から以下の通り、経済合理性を試算した。

#### ◆解体工程(粗破碎、パルス破碎、選別回収)

(試算条件)	処理量 330トン/年(28000枚) 8枚/hr	処理費収入 1500円※/枚(排出者より徴収)
※システム価格の5%が処理費として売電価格に含まれると想定(FIT制度)		
(試算結果)	処理による収益 675万円/年 (ランニングコストに設備償却含む)	
	回収資源売却益 1400万円/年 (回収資源売却益 500円/枚)	

#### ◆ガラス再生工程(微粒子化、加熱)

(試算条件)	生産量 1500トン/年	購入材料費(ガラス・添加剤) 1.9円/kg
(試算結果)	発泡ガラス製造コスト 32.1円/kg (運送費含まず)	
	本事業で創出される利益	①破碎工程削減 150万円/年 (パルス破碎使用のため)
		②原動費削減 300万円/年 (低温加熱等の工法開発)

経済合理性の試算結果

### 【今後の予定と事業化検討】

今後、解体工程では、パルス破碎装置の放電部や連続処理部の改善など、量産を見据えた生産性向上を検討する。ガラス再生工程では、発泡ガラス工法最適化や、他材料（タイル等）再利用を検討する。日程案を以下に示す。

	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	H32年度	H33年度	H34年度	H35年度
解体工程	量産設備開発 生産性向上/信頼性向上				● H32.3 設備導入	社内プラントにて量産		
						立上げ	H35.3 パルス破碎 設備を 他社販売	
ガラス再生工程	量産工法・設備開発 発泡ガラス工法/他材料検討/信頼性・省エネ設備					ガラス再生材を用いた社内製品製造		
						H37.3 他分野での ガラス再生材 製造開始		

今後の予定と事業化検討の日程案

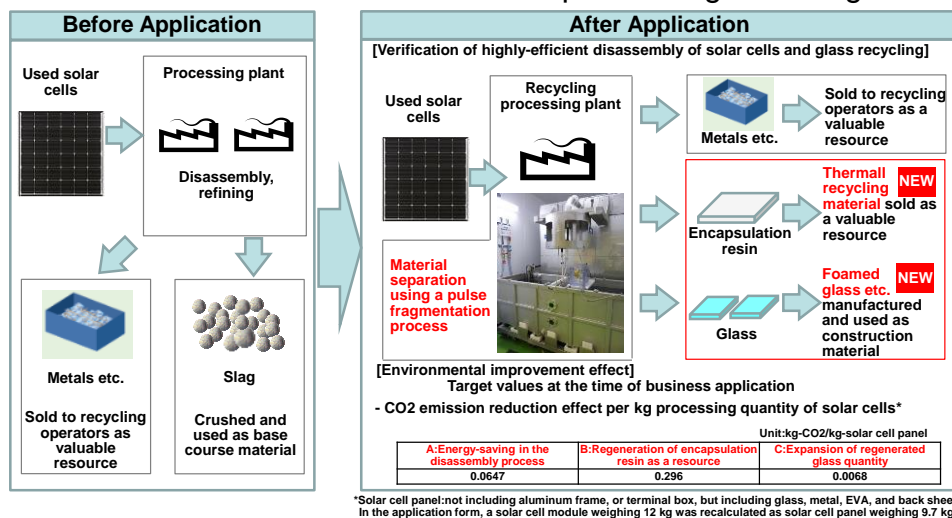
## Summary

### 1. Purpose and Background

With increasing demand for renewable energy, the quantity of end-of-use solar cells is likely to reach 10,000 tons in 2020, and is predicted to total 80,000 tons in 2030. This represents a major challenge. Recycling of solar cells primarily requires a refining process, but glass accounts for approximately 2/3 of their weight. The current process does not effectively utilize this raw material. To be able to effectively reuse every structural material, it is important to improve the efficiency of disassembly of solar cells; however, recycling is not easy because the cell structures were not initially designed with this in mind. This operation focuses on finding efficient methods of disassembling solar cells and developing recycling technology for the glass they contain, which accounts for most of the weight of the product. The aim is to reduce CO2 emissions quantity as well as promoting construction of a collection scheme for used solar cells for recycling.

### 2. Outline of this Operation

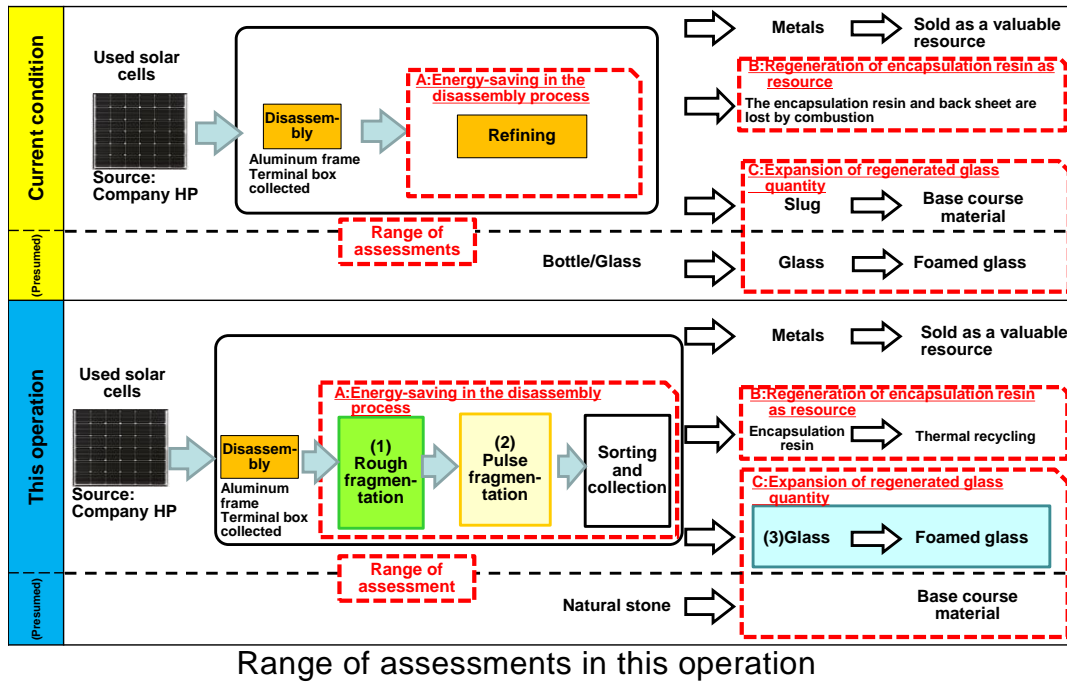
As shown below, the company verified the process of disassembling solar panels and collecting glass as a resource by using the in-house-developed pulse fragmentation equipment owned by the company. The pulse fragmentation equipment can separate glass, encapsulation resin, metal, etc., at high levels of purity without heating by releasing electrical energy in form of a pulse wave in an extremely short time, which generates an extremely powerful shock wave by vaporizing the liquid. The encapsulation resin that can be collected by this technique is usually difficult to obtain for reuse when using combustion or dissolution methods. For this reason, from the viewpoint of resource reuse, reduction of CO2 production was evaluated by assuming that the collected quantity can be used as an index of CO2 emission reduction effect. Glass regeneration verification was carried out by setting the target for its reuse as a construction material without processing it as slag.



### Outline of this Operation

### 3. Range of Assessment (Boundary)

As shown below, in the current process and this operation, the process flow and a range of assessments were determined. For "C: Expansion of regenerated glass quantity," a presumed process was determined as shown below for making the output compatible.






### 4. Assessment of the Rough Fragmentation Process

To be able to feed solar cell panels into the pulse fragmentation machine, the panels need to be cut into appropriate sizes. The following experiment was carried out using equipment owned by the Environmental Preservation Services Company. The results showed the use of a spiral cutter to be the most appropriate for generating smaller variations in fragmentation size.

Equipment used	Rotary cutter	Rotary cutter+Wide crusher	Spiral cutter
Features of fragmentation			
Fragmentation result	Fragmentation size 10-40 cm Debris is stuck together if fragmentation is insufficient	Fragmentation size 10-40 cm Debris is stuck together if fragmentation is insufficient	Fragmentation size 10-40 cm Less variation after fragmentation into a slab shape

Verification of rough fragmentation process

In the verification of superiority of pulse fragmentation using different methods, separation of glass was determined insufficient due to popping out of crushed panels from the processing container due to the impact of crushing, as shown below, indicating the need for further assessment after installing pop-out-prevention measures.

Equipment used for rough fragmentation	Rotary cutter	Rotary cutter+Wide crusher	Spiral cutter
Features of fragmentation	Panel fragmentation starts from separation of "back sheet" from "encapsulation resin+glass sheet", followed by crushing of the "encapsulation resin+glass sheet."		
Fragmentation result Discharge 200 times			

Verification of pulse fragmentation superiority using different rough fragmentation methods

### 5. Assessment of Pulse Fragmentation Process

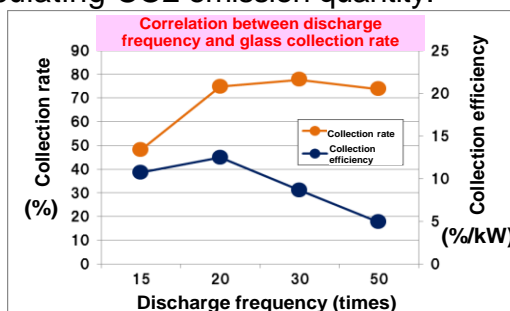
Pulse fragmentation was evaluated using the conditions and assessment formulae shown below and by using the processing container with a pop-out prevention mechanism for obtaining the optimum condition of glass collection efficiency by changing the number of discharges and the discharge voltage.

	Purpose	Voltage(kV)	Discharge frequency (times)	Supplied quantity(sheets)
Condition 1	Obtaining the correlation between discharge frequency/glass collection efficiency	180 (Fixed voltage)	15 - 50	1
Condition 2	Obtaining the correlation between discharge voltage/glass collection efficiency	100 - 180	20 (Fixed frequency)	1

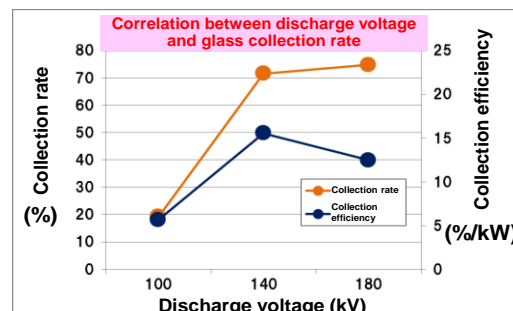
$$\text{Collection rate} = \frac{\text{Weight of glass in 0.3 - 5.6 mm}}{\text{Weight of solar cell panel glass measuring } 50 \times 50 \text{ mm}} (\%) \quad \text{Collection efficiency} = \frac{\text{Collection rate}}{\text{Power consumption (proportional to discharge frequency)}} (\%/kW)$$

Experimental condition and assessment formula used for pulse fragmentation efficiency

The experimental results indicated the best conditions to be 20 times discharges at 140 kV discharge voltage. This condition was used for calculating CO2 emission quantity.



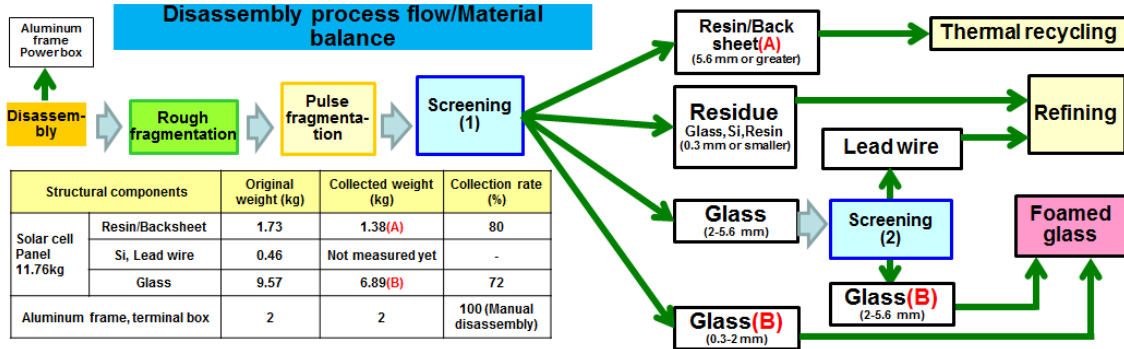
Experimental result for Condition 1



Experimental result for Condition 2

## 6. CO2 Emission Quantity Calculation from the Disassembly Process

The total disassembly process flow and material balance are as shown below.



Disassembly process flow and material balance

Power consumption for CO2 reduction by process is as shown below, with a total value of 0.112 kWh.

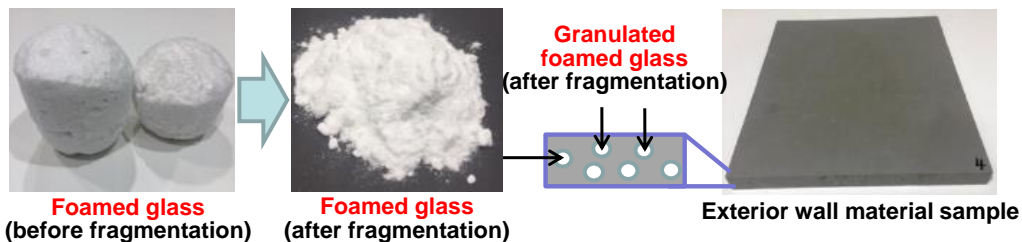
Item	Rough fragmentation	Pulse fragmentation	Screening (1)	Screening (2)
Equipment used	Spiral cutter	Pulse fragmentation machine	Vibration screener	Vibration screener
Power consumption (kWh/kg)	0.004	0.095	0.005	0.008
Calculation conditions	Processing capacity 1800 kg/h Power 8 kWh	- Discharge voltage 140 kV - Discharge frequency 9000 times/panel - Power consumption used for pulse discharge (measured value) 0.23 kW/discharge = 9.44E-05 kWh/time = 0.071 kWh/kg - Power consumption by transport, supply/discharge system 0.033 kWh/kg	Processing capacity 1000 kg/h Power 5 kWh	Processing capacity 500 kg/h Power 4 kWh

Power consumption by process in the disassembly process

Therefore, the CO2 emission quantity of the entire disassembly process is  $0.112 \text{ kWh} \times 0.587 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} = 0.066 \text{ kg-CO}_2/\text{kg-solar cell panel}$ .

## 7. Verification Outline of Glass Regeneration Process and the Primary Verification Assessment

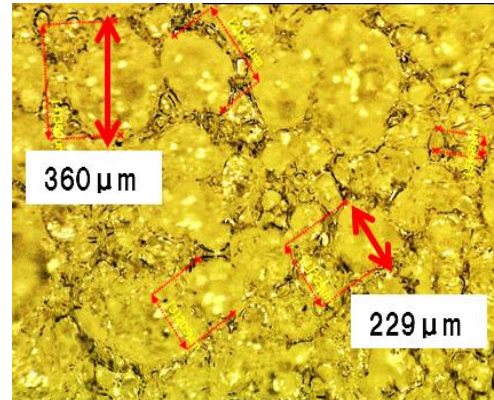
Verification of adding foamed glass to exterior wall material as lightweight filler was conducted by coordinating with KMEW Company (a joint venture between Kubota [50%] and Panasonic [50%]). The outline is shown below.



Verification outline of glass regeneration process

In the primary assessment, the solar cell glass was crushed to a particle size diameter of 100  $\mu\text{m}$  or below; 5% of calcium carbonate was added and the mixture heated to 850  $^{\circ}\text{C}$  for 30 minutes. It was then crushed to produce particle-type foamed glass. The required specification of foamed glass for construction material is bulk density of 0.2  $\text{g}/\text{cm}^3$ , particle size 600  $\mu\text{m}$  or below. However, the foamed glass made in the primary assessment had a bulk density of 0.5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , and its average particle was 183  $\mu\text{m}$ . Adding this foamed glass to exterior wall material and testing its bending strength and heated compression showed little difference from the conventional product and revealed no serious problems caused by its inclusion as shown below. Because the foam size was greater than the required particle size, secondary assessment was scheduled with a smaller foam size.

Assessment item		Conventional	Added with foamed glass
Bending test	Breakage load (N)	695	693
	Displacement (mm)	0.40	0.40
	Stress (MPa)	12.7	11.6
	Elasticity (MPa)	4221	3595
Thermal shrinkage (%)		6.2	5.9



Assessment of bending and thermal compression as external wall material

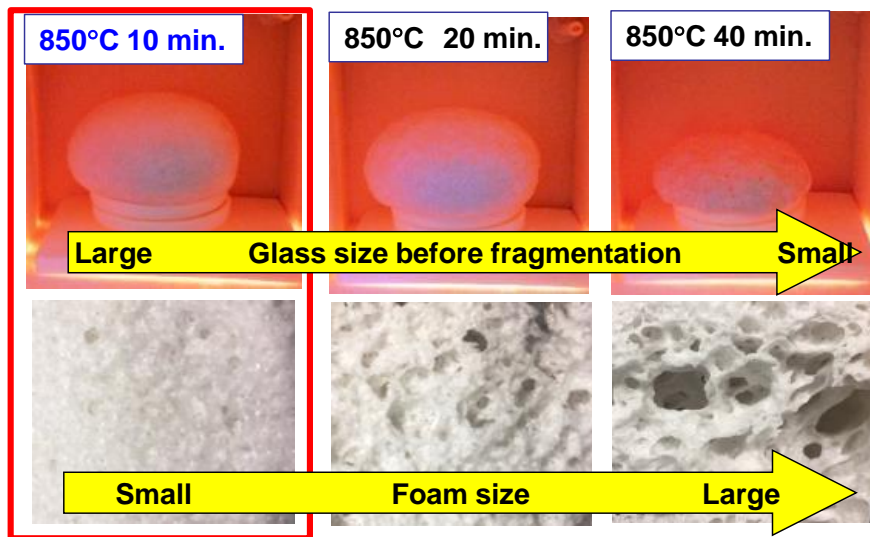
Foam observation of foamed glass (before crushing)

## 8. Secondary Verification Assessment of Glass Regeneration Process

The problems faced in the secondary assessment are optimization of heating time, adding condition of foaming agent, and optimization of particle size. Heating time was determined by observing the size of the foamed glass and foam size by using a windowed electric furnace as shown below. Longer heating time lowers glass viscosity and makes foam size greater by connecting with each other, and  $\text{CO}_2$  gas leaks out of the glass, shrinking the size of the foamed glass particles.

From this observation, the condition of 850  $^{\circ}\text{C}$  at 10 minutes was selected for minimizing leak-out of  $\text{CO}_2$  gas.

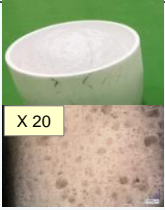
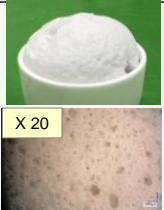
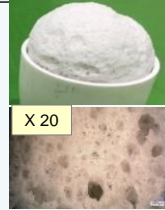
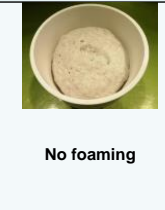
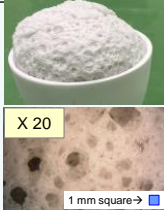




Size of foamed glass and foam size with different heating times

To determine the additive condition of foaming agent, the additive quantity was optimized with calcium carbonate. A test was then made by adding dolomite (composed of calcium carbonate 2 and magnesium carbonate 1) that would make the volume equal to the added quantity of calcium carbonate. The foaming temperature of dolomite is lower than that of calcium carbonate, so that a smaller foam size was expected because foaming occurs with higher viscosity of glass. The fragmentation conditions were also reviewed for making the average particle size greater than conventional 183  $\mu\text{m}$ .

With the conditions shown above, foamed glass was produced and we obtained the bulk density shown below. Additive quantity of 3.5% of calcium carbonate made a minimum bulk density of 0.38g/cm<sup>3</sup>. Dolomite-added glass produced larger foams due to fusing together, and resulting in a greater bulk density of 0.44 g/cm<sup>3</sup>.

Foaming agent	Calcium carbonate				Dolomite
Added quantity of foaming agent	2%	3.5%	5%	7.5%	5% <small>3.7% : by converting to the specific weight of calcium carbonate</small>
Appearance (microscope)					
Bulk density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.40	0.38	0.45		0.44
Average pore diameter [ $\mu\text{m}$ ]	157	122	101		77
Average particle size [ $\mu\text{m}$ ]	243	231	253		255
Total fine pore volume [cc/g]	3.03	3.57	3.48		3.21

\*Average pore diameter and total fine pore volume apply to the size of 1 mm or smaller.

Result of producing foamed glass for secondary assessment

As a next step, verification was made by measuring the specific weight of exterior wall material by adding foamed glass of  $0.38 \text{ g/cm}^3$  produced by adding 3.5% of calcium carbonate. As shown below, a lighter weight effect was observed (glass raw material had a specific weight of  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ) but it did not achieve the expected value.

		Measured value			Expected value*1	
Adding condition of foamed glass	Bulk density ( $\text{g/cm}^3$ )	-	0.38			
	Added quantity (relative value)	0	100	200	100	200
Specific weight of exterior wall material ( $\text{g/cm}^3$ )		1.16	1.15	1.15	1.10	1.05

\*1: In reality, as the effect of the pressing process and inflow of material, the expected value was set in heavy than calculated value.

Specific weight measurement result of exterior wall material added with foamed glass

As the following two problems are anticipated, an experiment was carried out by adding foamed glass to mortar and solidifying without a pressing process, then measuring the specific weight.

- (1) Insufficient strength of foamed glass causes crushing during the pressing process of external wall material.
- (2) Forms do not stay independent but are filled with external wall base material.

The experimental results are as shown below, indicating a greater than expected reduction of specific weight. This result suggests a significant influence of crushing during the pressing process.

		Measured value				Expected value*2		
Adding condition of foamed glass	Bulk density ( $\text{g/cm}^3$ )	-	0.38					
	Added quantity (relative value)	0	100	200	300	100	200	300
Specific weight of mortar ( $\text{g/cm}^3$ )		2.09	1.84	1.68	1.58	1.87	1.73	1.62

\*2: In reality, as the effect of the pressing process and inflow of material, the expected value was set in heavy than calculated value.

Specific weight measurement result of mortar added with foamed glass without pressing

In future steps, improvements in the foaming process of dolomite-added material need to be made. Based on the relationship between glass viscosity and foaming temperature, baking temperature needs to be reduced (now  $850^\circ\text{C} \rightarrow 830^\circ\text{C}$ , etc.) and the heating time needs to be made shorter (current 10 min  $\rightarrow$  7 min) in order to prevent foam from fusing and thereby solve the problems with the strength and open-cell structures. Improvement in the form of larger particle size is also required by changing the crushing equipment to a type capable of crushing and sifting at the same time.

## 9. Calculation of CO2 Emission Reduction Effect

The CO2 emission reduction effect due to this operation is as follows.

Unit: kg-CO2/kg-CO2/kg-solar cell panel

		A:Energy-saving in the disassembly process	B:Regeneration of encapsulation resin as resource	C:Expansion of regenerated glass quantity		Total
				Base course material manufacturing	Foamed glass manufacturing	
CO2 emission quantity	Current condition	0.500	0.141	0.004	0.160	0.805
	This operation	0.071	0	0.011	0.156	0.238
CO2 reduction quantity		0.429	0.141	-0.007	0.004	0.567
				-0.003		

CO2 emission reduction effect by this operation

The process outline of calculating CO2 emission reduction effect in this operation is as follows.

	A:Energy-saving in the disassembly process	B:Regeneration of encapsulation resin as resource	C:Expansion of regenerated glass quantity	
			Base course material manufacturing	Foamed glass manufacturing
Current condition	Refining process turns glass to slag (CO2 emission quantity is obtained in the process of melting float glass into slag)	Encapsulation resin is lost	Crushing slag to produce base course material	Crushing bottle glass into fine particles, and heating it to produce foamed glass
This operation	Rough fragmentation, pulse fragmentation, screening and sorting/collecting	Thermal recycling of encapsulation resin	Natural gravel is crushed to produce base course material	Granulating crushed glass and heating to produce foamed glass

Process outline used for calculating CO2 emission reduction effect by this operation

## 10. Summary

Summary of effects

- ◆ Disassembly process (Rough fragmentation, pulse fragmentation, sorting and collection)
  - By improving energy consumption during crushing, CO2 emission can be reduced in the process of separating glass in the refining process.
  - Due to non-heating processing, the encapsulation resin can be recycled as a resource.
- ◆ Glass regeneration process
  - Tests on addition of foamed glass to external wall material do not indicate any negative influence.
  - The relationship between the foaming process and material weight reduction was verified for obtaining future improvement guidelines.

[Economic rationale]

Economic rationale of the verification process flow used in this operation was calculated as shown from the equipment amortization (new investment), energy cost, personnel cost, etc.

◆ Disassembly process (rough fragmentation, pulse fragmentation, sorting /collection)

(Trial calculation condition)	Processing quantity	330 tons/year(28000 sheets) 8 sheets/hr	Processing cost income	1500 yen*/sheet (collected from emitting party)
-------------------------------	---------------------	--	------------------------	--

\*Assuming that 5% of system price is included in the generated power price sold as processing cost (FITprogram)

(Trial calculation result)	Profit by processing	6.75 million yen/year	(running cost includes equipment amortization cost)
	Profit from selling collected resources	14 million yen/year	(Profit from selling collected resources 500 yen/sheet)

◆ Glass regeneration process (granulation, heating)

(Trial calculation condition)	Production quantity	1500 tons/year	Purchased material cost (glass, additive)	1.9 yen/kg
-------------------------------	---------------------	----------------	---	------------

(Trial calculation result)	Foamed glass manufacturing cost	32.1 yen/kg	(Not including transport cost)
	Profit	1.50 million yen/yen	(Included in the manufacturing cost:by using pulse fragmentation)
	(1) Reduce fragmentation process	3.00 million yen/yen	(Not included in the manufacturing cost:by requiring process development such as low-temp heating)
	(2) Reduce energy cost		

Economic rationale calculation results

[Future schedule and commercialization review]

The disassembly process will be reviewed for improved productivity toward mass production by improving the discharge unit of the pulse fragmentation equipment, and adopting continuous processing flow. Optimization of foamed glass process and reuse of other materials (tiles etc.) will be studied in the glass regeneration process. The outline schedule is shown below.

	FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
Disassembly process		Mass-production equipment development Productivity improvement/ Reliability improvement			Mar. 2020 Equipment introduction	Startup	Mass-production in the in-house plant	
							Mar. 2023	Selling pulse fragmentation equipment to other companies
Glass regeneration process		Mass-production process/equipment development Foamed glass process/Other material review/Reliability/Energy-saving equipment				Manufacturing company products by using glass regenerated material		
								Mar. 2025 Starting manufacturing of glass regenerated material in other fields of industry

Future schedule and commercialization review

# 1. 背景・目的

## 1.1. 背景

再生可能エネルギーへのニーズの高まりにより、太陽電池の普及率は年々向上している。一方で製品寿命は20～30年と言われており、その廃棄量は、図 1-1 に示す通り、2020年には年間1万トン、2030年には年間8万トンに達し、大きな社会問題となることが想定されている。

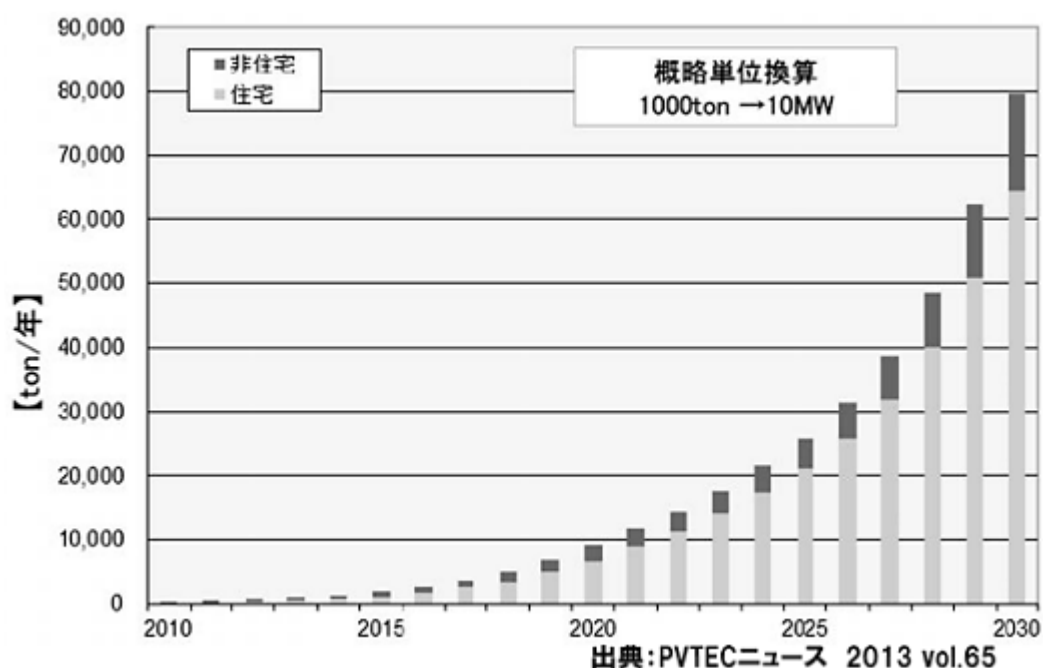


図 1-1: 太陽電池の廃棄量推移予測

太陽電池は、重量比で約2/3がガラスだが、グラスウール等に使われる以外は埋め立てや精錬処理となっており、素材を有効に活用し切れていない。ガラスをはじめ、各構成素材を有効に再利用するためには、太陽電池を高効率に解体することが重要であるが、屋内で使用される組み立て系の商品ではなく、屋外で使用される商品のため、封止工法で素材が強固に接合されており、解体の難易度を高くさせている。課題解決に向けては、解体とガラス再生の2つの切り口で、取組みを行う必要があると考える。

まず、太陽電池の解体について課題を述べる。図 1-2 はこれまでの技術開発の事例を示す図である。

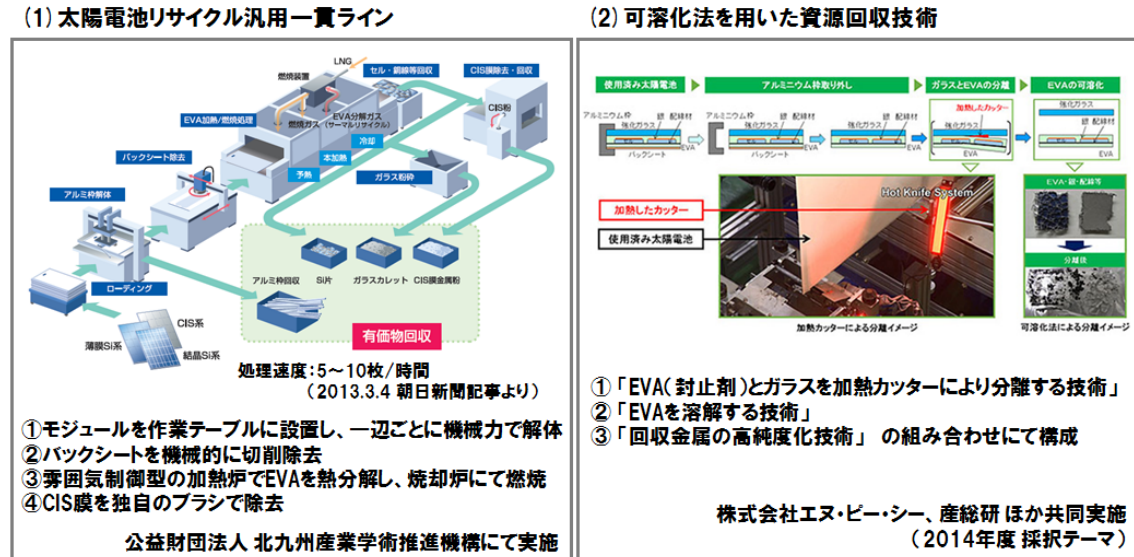


図 1-2 : 太陽電池リサイクルにおけるこれまでの技術開発の事例

図 1-2(1) の方式は、ガラスや封止樹脂の解体工程にて熱源を用いており、消費電力（ランニングコスト）が高く、多くの CO2 排出を伴うと推測される。図 1-2(2) の方式は、ホットナイフによるガラスの分解後、溶剤を用いて封止樹脂を溶解している。この方式によると、溶解には長時間を要すると想定される。そのため、溶解工程では設備が大型化し、広い設置面積が必要になると推測される。なお封止樹脂は、溶解せずに回収すれば、サーマルリサイクルが可能となり、CO2 削減の観点で重要と考える。

次に、ガラス再生について課題を述べる。廃ガラスは、図 1-3 に示すように、ガラスウールとしての再利用や、廃ガラスとして分離されず、そのまま精錬工程に提供され、スラグと化した後にセメント原料や路盤材に利用されることが多い。加えて、廃ガラスからガラスへの水平リサイクルの取組みは、品質保証が困難なため進んでおらず、今後の廃棄量拡大を踏まえると、ガラスウールのみでは、受け入れ市場が飽和してしまうことが予測される。このため、路盤材や建材など市場規模の大きい分野向けに、スラグを経ずに直接再利用し得る用途の開発を行うことが重要と考える。

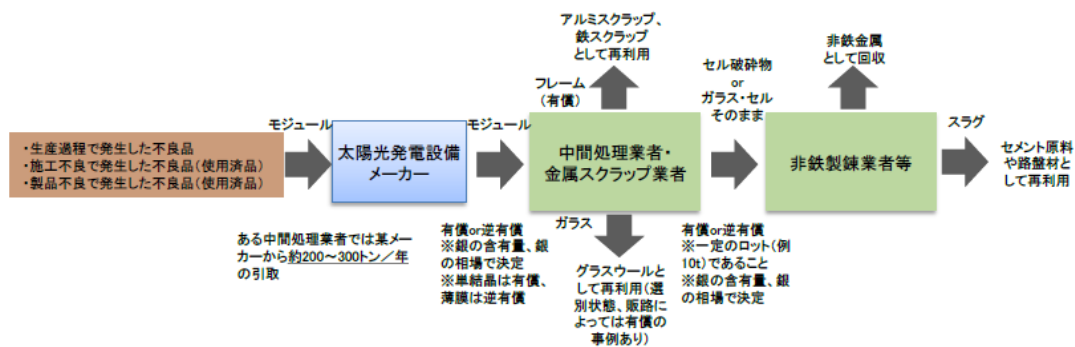


図 1-3：（平成 26 年 3 月）使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する調査結果（引用：環境省、経産省）

それでは、解体とガラス再生について、本事業でのアプローチを述べる。

まず、解体については、弊社で保有する自社開発のパルス破碎装置を用いて、太陽電池を解体し、ガラスを資源として回収する実証を行う。

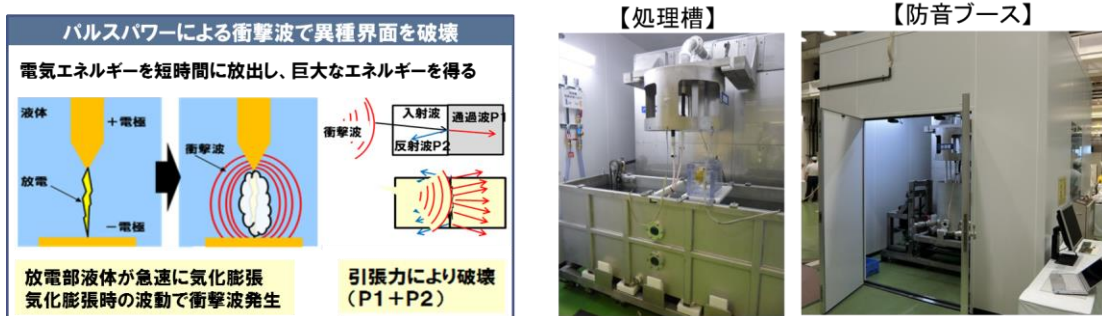


図 1-4：パルス破碎のメカニズムと自社開発の検証装置

原理としては、図 1-4 に示すように、電気エネルギーを極めて短時間に一気に放出（パルス波）することで莫大なエネルギーを液体中の電極先端から発生させ、液体の気化膨張により衝撃波を発生させる。その際、衝撃波は異種境界面で通過する波と反射する波に分かれ、境界面で引張力を発生させ境界面で材料を分離する。この原理を利用して、ガラス、封止樹脂、金属等を高純度で分離し有用資源を回収する。また、解体工程全体としては、パルス破碎装置に投入するための粗破碎工程や資源回収選別工程なども含めて、評価を行う。なお、この手法により回収し得る封止樹脂に関しては、燃焼工法や溶解工法では活用が困難である。よって、資源活用の観点にて、回収分をCO2削減効果の対象とみなし、その削減量についても評価を行う。

次に、ガラス再生については、スラグを経ずに直接、路盤材や建材などに転換することをターゲットにガラス再生の調査、検証、評価を行う。量産を見据えて、キーとなる工程や再生商品性能の基礎検証も実施する。

ガラス再生の課題は、付加価値の向上による、再生量の拡大である。先述の通り、現在は精錬処理が主であるが、廃棄量増加に伴い、精錬のキャパシティがオーバーしてしまい、精錬が困難になる可能性が高いと考えている。現在、ガラスはカレットとして1kgあたり1～2円程度で取り引きされており、付加価値が低いいため、再利用が進んでいない。太陽電池に用いられているガラスは、透明度の高いガラスであり、水平利用が可能であれば付加価値は高いと推定されるが、ガラスメーカーへのヒアリング結果も踏まえると、主に品質上の問題で、太陽電池のガラスの水平利用は困難であると考えられる。

従って、太陽電池ガラスの特質を活かした上で、比較的安い製造コストで、付加価値の高い商品へ転換できる実証が必要であると考え、本事業では、発泡ガラスの実証を行うこととした。

発泡ガラス製造のメリットは、以下の通りである。

- ・太陽電池ガラスは、ソーダガラスであるため、融点が比較的安く、発泡させやすい素材である。
- ・発泡ガラスは、太陽電池ガラスを砕いて、炭酸カルシウムなど安価な少量の発泡剤を加え、短時間加熱するだけで、製造が可能のため、薬液処理や長時間の加熱等を必要とするゼオライトなどに比べて、製造コストが安い。
- ・発泡ガラスを使った路盤材は、自然石やスラグを破碎して製造した路盤材に比べて軽量であるため付加価値が高い。
- ・水質改善に必要な浄化の機能などを持たせることで、付加価値を向上させることができる。



## 1.2. 目的

本事業では、太陽電池の効率的な解体方法と、構成素材中で重量比率が高いガラスのリサイクル技術に焦点を当て、CO2排出量削減に貢献するとともに、リサイクルを目的とした太陽電池モジュールの回収スキーム構築の促進に寄与することを目的とする。

図 1-5 に本事業の概要を示す。図 1-5 は、本事業の適用前後のフローを示している。本事業の適用前は、金属としての資源回収と精錬によりスラグ化されたガラスを路盤材等へ処理する形であるが、本事業の適用により、サーマルリサイクルとしての封止樹脂の再生や、建材など市場規模の大きい分野向けの再利用の拡大が期待できる。そのことにより、リサイクルを目的とした太陽電池モジュールの回収スキーム構築の促進に寄与できると考える。

環境改善効果としては、図 1-5 に示す通り、A：解体工程の省エネ化、B：封止樹脂の資源化、C：ガラス再生量の拡大、の3つの視点で評価を行う。

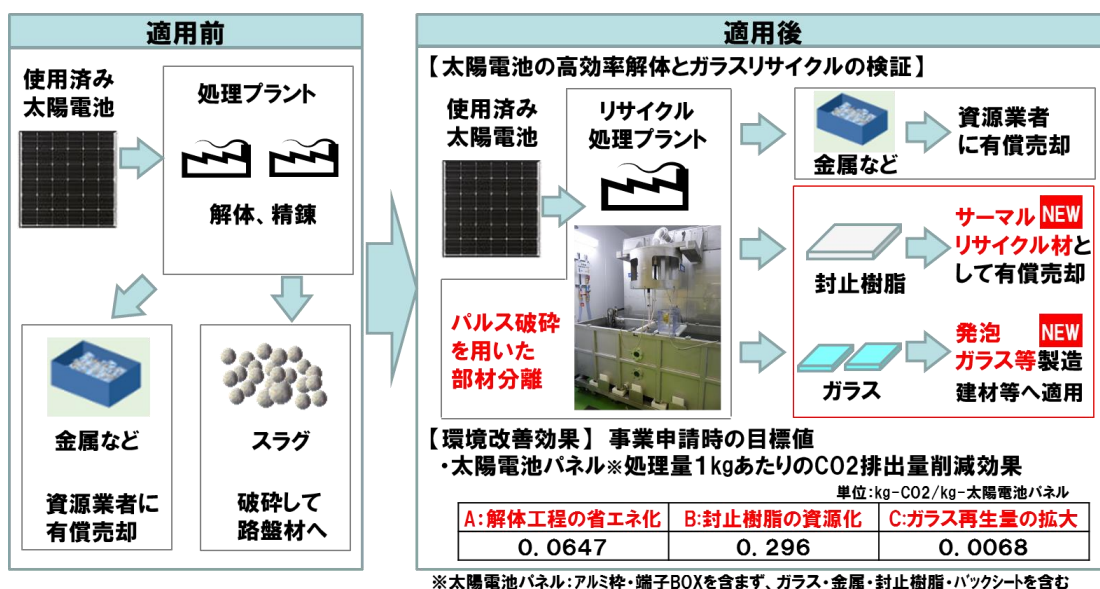


図 1-5：事業の概要（適用前後のフロー）

## 2. 評価範囲の検討

### 2.1. 概要

図 2-1 に示す通り、現状と本事業で工程フローと評価範囲を設定した。

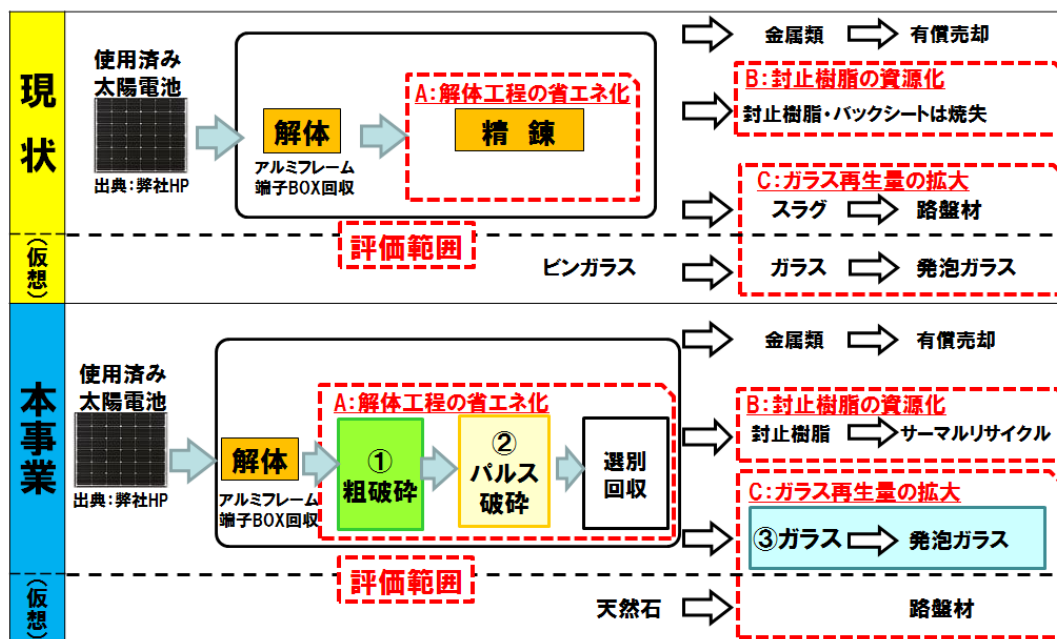


図 2-1：本事業の評価範囲（バウンダリー）

まず、使用済みの太陽電池を解体するためには、太陽電池モジュールから、アルミフレーム・端子BOXの回収を行う必要がある。アルミフレームや端子BOXの回収は、手作業もしくは簡易治具を用いた解体が一般的である。本事業においても、この工程は現状と同等と考え、評価対象には含めない。次は、現状と本事業で、資源を回収する工程について述べる。現状は、主に有価物である金属を精錬により回収するスキームが一般的である。対して本事業では、パルス破碎による解体実証を行う。パルス破碎機へ太陽電池パネルを投入するためには、適正なサイズに裁断する必要があるため、パルス破碎の前に粗破碎工程を設定することとした。またパルス破碎工程の後には、選別回収工程が必要であるため、図 2-1 に示す通り、工程フローに追加を行っている。上記を踏まえ「A：解体工程の省エネ化」では、現状を精錬工程、本事業では、粗破碎→パルス破碎→選別回収として比較評価を行った。なお、現状の「A：解体工程の省エネ化」では、太陽電池パネルの重量比で大きな割合を占める、ガラスを熔融してスラグ化する工程を想定してCO2排出量の評価を行った。

次に、解体工程以降の資源の活用についてであるが、金属類に関しては、従来工法でもパルス破碎工法でも、CO2削減効果は同等とみなし、評価対象には含めていない。封止樹脂については、現状は精錬で焼失してしまうが、本事業で用いるパルス破碎装置は非加熱処理のため、封止樹脂を焼失させずに回収することが可能である。従って「B:封止樹脂の資源化」については、回収した資源をサーマルリサイクル化した場合の熱量換算で、CO2削減効果を評価した。

また、「C:ガラス再生量の拡大」において、現状、精錬で発生したスラグは、破碎して路盤材として再利用されるのが一般的である。それに対し、本事業では、ガラスを付加価値の高い商品へ再利用すべく、発泡ガラスを製造する工程を設定している。なお、アウトプットを揃えるため、図 2-1 に示す通り、仮想工程をおいて評価を行った。まず現状は、リサイクルとしては、ビンガラスを破碎しガラスカレット化した後に、発泡ガラス化する工程を仮想工程として設定した。それに対し、本事業では、路盤材は天然石を採石し、破碎することによって製造する工程を仮想工程として設定した。

また、本事業でのCO2削減効果であるが、評価範囲として、アルミフレーム・端子BOXの解体工程を含んでいないため、アルミフレーム・端子BOXを含めない「太陽電池パネル」1kgあたりでCO2排出量を算出することとした。

## 2.2. 建材へのガラス再利用について

ガラス再生については、先述の通り、発泡ガラスの製造について、調査、検証、評価を行うこととした。一般的な適用先は、軽量の路盤材、緑化、水質改善等であるが、さらなる適用先の拡大を検討する中で、ケイミュー株式会社（株式会社クボタ50%出資、パナソニック株式会社50%出資）へ訪問してヒアリングしたところ、外壁材の軽量骨材のニーズがあることが分かった。外壁材市場は約165万トン※であり、外壁材への適用は需要面で非常にインパクトがある。また、パナソニックの社内製品への適用という観点でもスキームを構築しやすく、実用化に向けてのストーリーも描きやすいため、外壁材へ添加する発泡ガラスについて、以降の検証と評価を行うこととした。

※外壁材市場はリフォーム産業新聞HP掲載の市場規模9880万㎡×重量0.0167t/m<sup>3</sup>で計算

### 3. 解体工法の実証方法

#### 3.1. 本実証に用いた省エネ破碎システムについて

##### 3.1.1. 自社開発のマルクス式パルス破碎装置



図3-1：自社開発マルクス式パルス破碎装置

図 3-1 は自社開発のマルクス式パルス破碎装置であり、マルクス回路を用いた多段式パルス電圧発生器を備える。その回路図を、図 3-2 に示す。

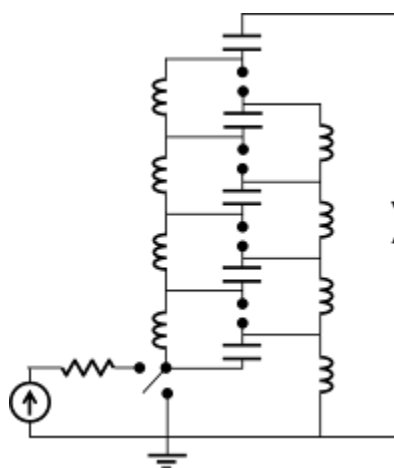


図 3-2：マルクス式パルス電源の回路図（5 段）

放電時の放電電圧はコンデンサへの充電電圧とギャップスイッチのギャップ調整により100kVから180kVの範囲で可変可能である。

また、図3-3 に示すように、電極部材の組み換えにより、破碎対象物を挟むように正極（出力側電極）とGND極（受電側電極）を配置し、破碎対象物に直接パルス放電を印加して破碎を行うED（Electrical disintegration）放電と、水の絶縁破壊によって発生する衝撃波により破碎を行う、EHD（Electro-hydraulic disintegration）放電の選択が、可能な構造となっている。

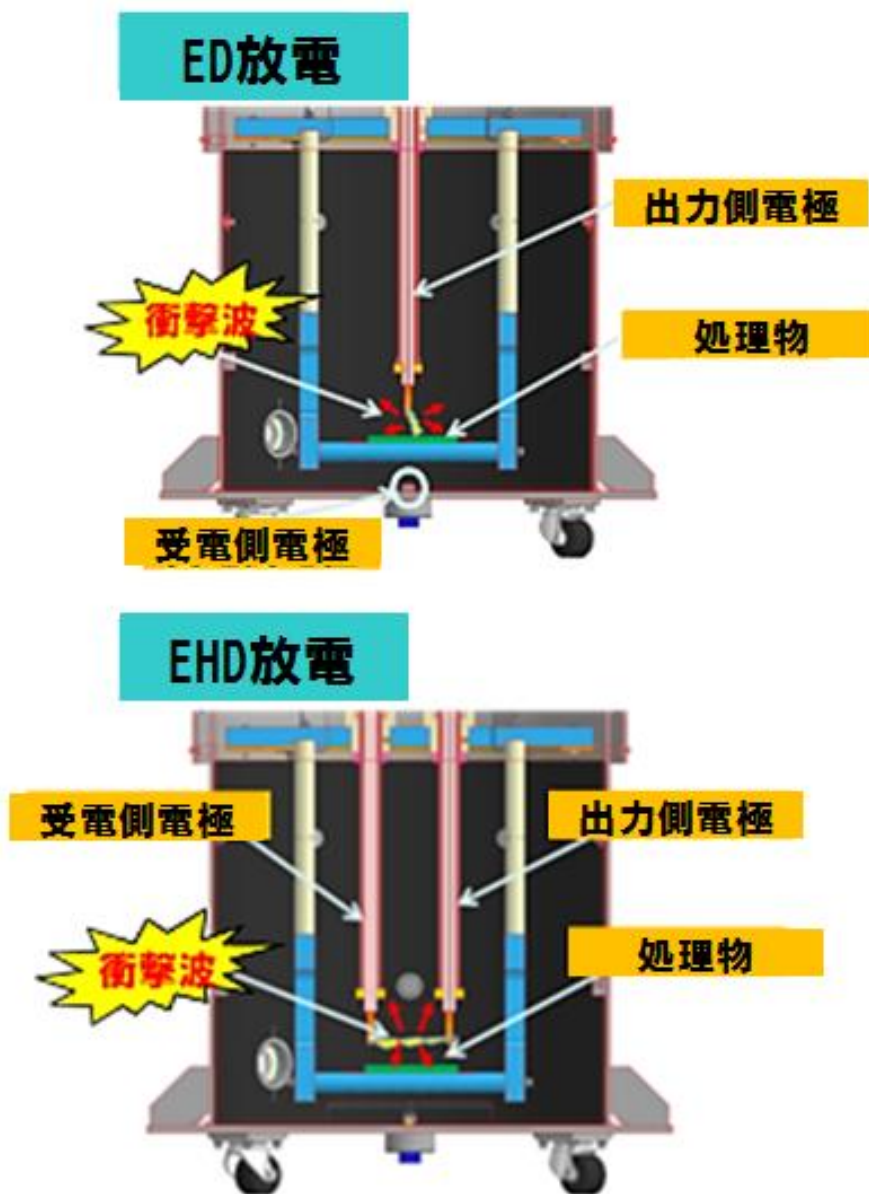


図 3-3 : 開発設備（放電治具）

自社装置の特長として、図 3-4 に示すように、処理物を搭載したパレットをコンベア搬送することで、連続処理検証が可能である。パレットの形状は処理対象物に応じて載せ替えが可能な構造となっている。自社装置は原理検証機という位置づけからパレットの取り付け数に制限があるが、量産機開発においてはコンベアを延長し循環させることで、処理物投入⇒破碎⇒破碎物回収の一連の破碎を連続処理にて行うことが可能であると考えられる。

パルス破碎は水中で行うため、パレット、及び、破碎物処理容器は水中を移動することになる。本実証では、太陽電池パネル用に設計した処理容器をパレットに載せて破碎実証を行った。

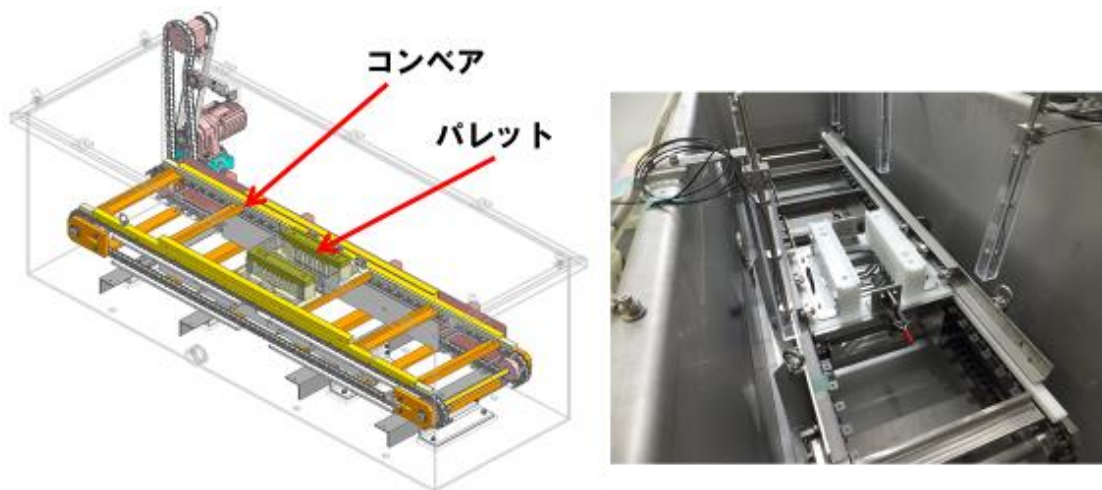


図 3-4 : 開発設備 (連続処理実証)

### 3.2. 事前破碎工法実証の進め方について

事前破碎工法の実証については、図 3-5 に示す実証フローにて進めた。

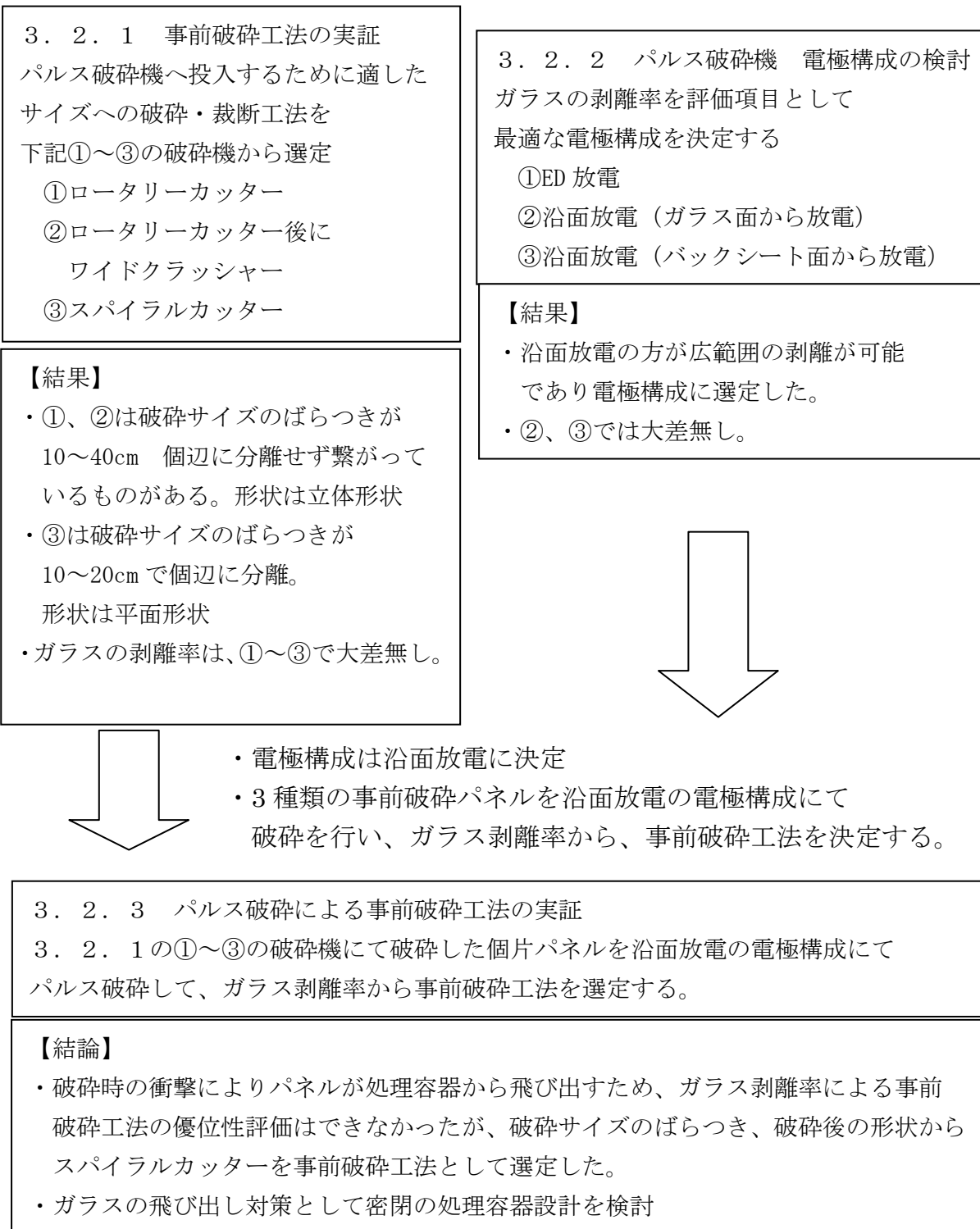


図 3-5：事前破碎工法の実証フロー

### 3.2.1. 事前破碎工法の実証

太陽電池パネルをパルス破碎するためには、予めパネルを適切な大きさに裁断する必要がある。裁断を行わず大きなサイズの状態でも破碎を行うことも可能ではあるが、パルス破碎は水中にて行うためパネル全体が入る大きさの処理槽が必要となる。また、パネルの全面を覆っているガラスを破碎して剥離するためには、パルス破碎装置の電極側、もしくはパネル側を X-Y 方向に動かしてパネル全面をスキャニングしながら破碎することになるため、パネルの搬送や電極の可動構造など、複雑な機構を備えた装置構成となるため設備コストの増大や稼働率の低下など量産実用化を目論んだ場合の課題が多いため、本実証ではパネルを適切なサイズに事前に破碎して、処理容器に投入するバッチ処理方式にて実証を進めることにした。

本事業では、株式会社 環境保全サービスの協力を得て、ガラスの破碎・裁断に適した破碎機を 3 種類選定し、それぞれの破碎機にてパネルの破碎を行い、破碎物の状態を評価することで、パルス破碎機に適した事前破碎工法の選定実証を行った。

#### 【目的】

- ・パルス破碎機に投入するために適したパネルの事前破碎工法の選定
- ・ガラスを部分剥離し減容すると同時に破碎の衝撃により、封止樹脂とガラスの密着強度も下げることで、パルス破碎の負荷を軽減し破碎効率の向上を狙う。

#### 【実証条件】

- ・使用パネル：HIT224α (Panasonic 製)
- ・使用した破碎機：図 3-6 に示す。


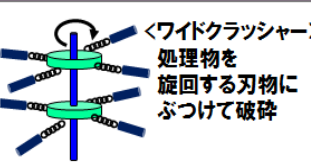

使用装置	①ロータリーカッター	②ロータリーカッター + ワイドクラッシャー	③スパイラルカッター
破碎の特長			

図 3-6：事前破碎工法実証に使用した装置



①のロータリーカッターは回転刃と固定刃の間に太陽電池パネルを挟み、引き裂くように破碎した後に、スクリーンを通過させることで破碎物のサイズを均一化することが可能な破碎機である。②の破碎で使用したワイドクラッシャーは円筒型の破碎室の中心に旋回軸があり、旋回軸に取り付けられた刃物（旋回軸とはチェーンで連結）を旋回させて破碎室上方より投入された処理物とぶつけることにより破碎する破碎方法である。ただし、太陽電池パネルを丸ごと投入することはできないため、ロータリーカッターにて破碎された状態の破碎物を投入する。③のスパイラルカッターはロータリーカッターと同様に固定刃と回転刃で太陽電池パネルを挟み、双方の刃にて短冊形状に裁断、破碎する破碎工法である。図 3-7 にロータリーカッターとワイドクラッシャーの破碎部を示す。

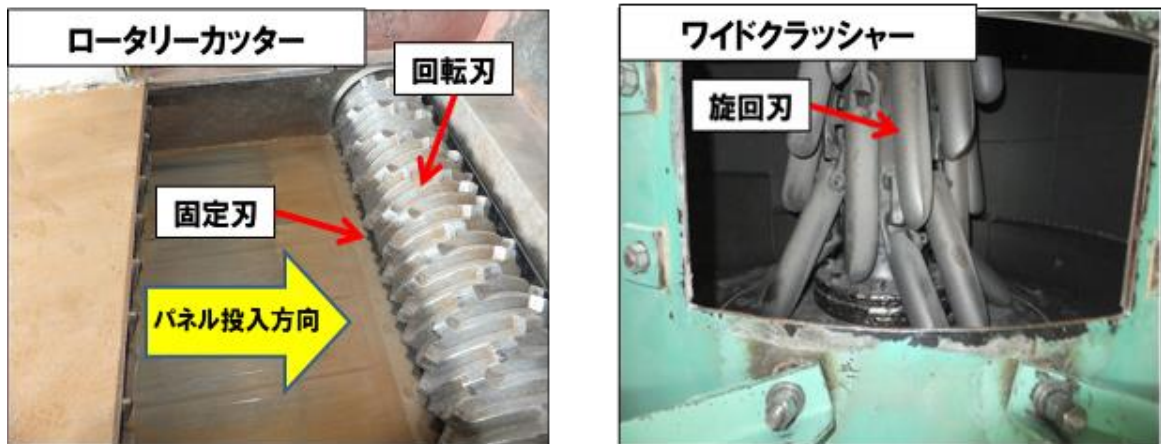





図 3-7：ロータリーカッターとワイドクラッシャーの破碎部

【実証結果】

使用装置	①ロータリーカッター		②ロータリーカッター + ワイドクラッシャー		③スパイラルカッター	
破碎結果		破碎サイズ		破碎サイズ		破碎サイズ
		10~40cm 破碎が 不十分で 繋がっている		10~40cm 破碎が 不十分で 繋がっている		10~20cm
ガラス 剥離率 (%) ※1)	14.7		14.6		14.5	

※1) ガラス剥離率 (%) = 回収したガラスの重量 (kg) / 破碎前のパネル重量 (kg)

図 3-8 : 事前破碎工法実証結果

図 3-8 に事前破碎検証の結果を示す。①ロータリーカッター、②ロータリーカッター⇒ワイドクラッシャーによる破碎では、破碎のサイズにばらつきが多く破碎後もパネルが繋がっている状態が見られた。③スパイラルカッターによる破碎では、破碎後のサイズも①、②に比べてばらつきが小さく、それぞれが個片に分離裁断されている状態であった。

破碎によるガラスの剥離率については、破碎前の重量と破碎により剥離したガラスの重量から求めた結果、3種類の破碎工法では大きな差は見られなかった。

パルス破碎機に投入する場合、破碎物のサイズは重要な要素であり、投入サイズや投入重量が変化すると、放電条件が安定しないため破碎の効率に影響を及ぼす原因となる。また、ロータリーカッターやワイドクラッシャーの破碎物は個片の形状が立体的な形状に変形しているという特徴がある。

パルス破碎は密閉された処理容器内で放電を行う。このような立体的な形状（見かけ上、体積の大きい形状）を収納するためには容積の大型化が必要となり設備の大型化の要因となる可能性がある。これを避けるため、小さな容器に詰め込んだりすると、容器内で破碎物が動けないため、放電が局所的に集中して破碎効率を落とす原因になる。③スパイラルカッターによる破碎物は①ロータリーカッター、②ワイドクラッシャーに比べて、平面形状を維持した状態で破碎されているのが特徴である。

### 3.2.2. パルス破碎機の電極構成の検討

パルス放電の電極構成には、出力側電極と受電側電極が処理対象物を挟むように配置して、処理対象物を貫通するような放電経路を形成し破碎を行う ED 放電 (Electrical disintegration) と出力側電極と受電側電極を処理物の表面と平行に配置して処理対象物の表面に放電経路 (沿面放電) を形成し、この沿面放電による水の絶縁破壊により発生する衝撃波にて処理対象物を破碎する EHD 放電 (Electro-hydraulic disintegration) の 2 種類について検討した。

#### 【目的】

パルス破碎機の電極構成の検証

#### 【実験条件】

ED 放電、EHD 放電 (沿面放電) の電極配置を図 3-9 に示す。

- ・使用パネル：HIT224 $\alpha$  (Panasonic 製) 120×120mm
- ・放電条件：放電電圧 100kV  
放電距離 10mm (ED 放電) / 100mm (沿面放電)

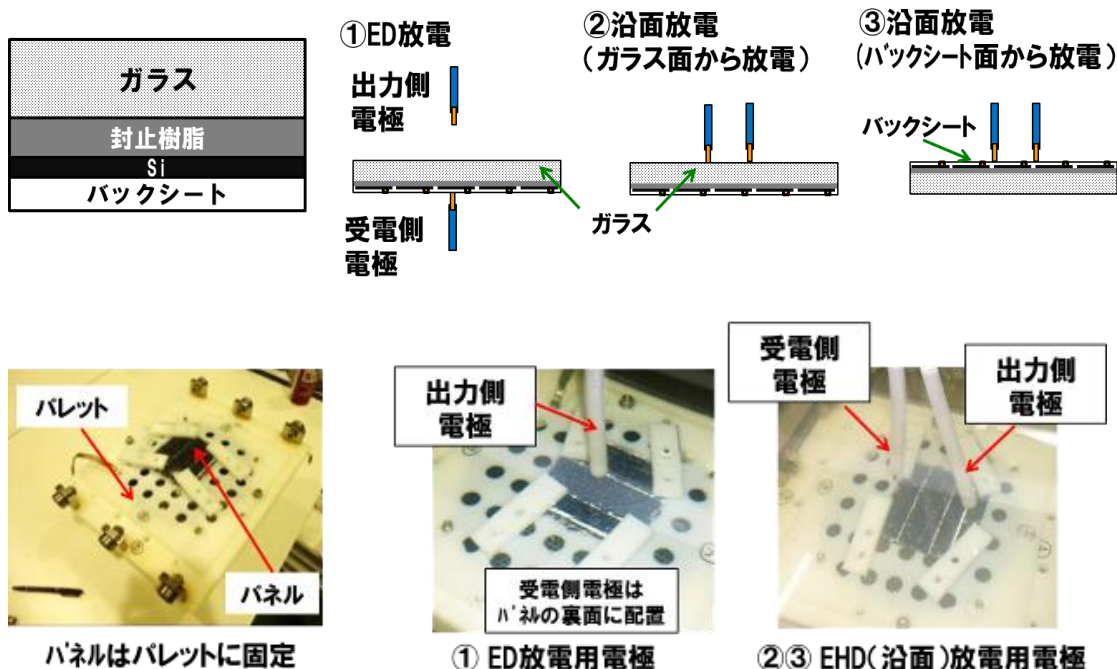


図 3-9：パルス破碎機の電極構成

図 3-9 において、②、③はどちらも沿面放電の電極構成を示すが、②は太陽電池パネルのガラス面側に電極を配置し、③はバックシート側に配置した。こ

の条件の違いは、放電により剥離したガラスが②の配置の場合、ガラス上に堆積して剥離したガラスの過破碎を発生させることを想定した配置である。これに対して③はバックシート側で沿面放電を発生させてガラスを剥離させることになり、バックシート、封止樹脂を介して衝撃波がガラスへ伝播するため衝撃波の減衰が考えられるが、一度、剥離したガラスは下方へ落下するため過破碎を防ぐ効果を期待しての配置である。

【実験結果】

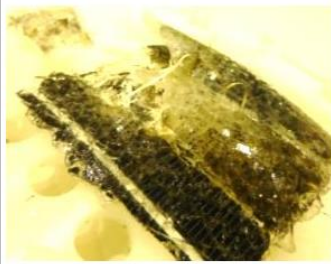


電極構成	① ED放電	② 沿面放電 (ガラス側から放電)	③ 沿面放電 (バックシート側から放電)
放電回数	5回	3回	3回
状態			
特長	放電が貫通した場所を中心に、バックシート側から剥離している。	①と同じくバックシート側から剥離し始める。3回の放電でバックシートは、ほぼ剥離。	②と同様にバックシート側から剥離し始める。

図 3-10 : 方式の異なるパルス破碎による実験結果

図 3-10 に放電の結果を示す。①～③のいずれの電極構成においても、太陽電池パネルの破碎は、まずバックシートから剥離し始めることが分かった。放電回数と破碎の進行状態を各電極構成で比較した場合、①ED 放電より②③の沿面放電構成の方が、少ない放電回数で広範囲に剥離することが分かった。①ED 放電後のパネルを観察すると、放電がパネルを貫通した様子が見られるが、5回の放電は、ほぼ1箇所に集中しており、一度、放電が貫通した場所に連続して放電が集中している。これは、最初の放電によりガラスの下にある、リード線が放電空間に曝露されリード線 (= 金属の導電体) に放電が集中したためだと推測する。

一方、②③の沿面放電の場合は、設定した出力側電極と受電側電極の電極間距離 100mm の間で沿面放電した結果、パネルがバックシートと封止樹脂の間から層状に剥離される結果となった。②③において、ガラスの剥離状態について大差は見られなかった。

以上の結果から、電極構成については、広範囲に剥離が可能な沿面放電の電極構成にて検証を進めることにした。

### 3.2.3. パルス破碎による事前破碎工法の実証

3.2.1.にて述べた各種の破碎機にて破碎した個片パネルを沿面電極の電極構成にてパルス破碎して、ガラス剥離率から事前破碎工法の選定を行った。

#### 【目的】

パルス破碎機に投入するために適したパネルの事前破碎工法の選定

#### 【実験条件】

- ・ 使用パネル：HIT224α (Panasonic 製)
- ・ 放電条件：放電電圧 100kV  
放電距離 10mm (出力側電極～ガラス表面)  
100mm (沿面放電)  
放電回数 200回
- ・ 処理量：量産導入時の処理能力を想定し、約 200g の破碎済みパネルを投入

#### 【実験結果】

図 3-11 に実験結果を示す。

粗破碎 使用装置	① ロータリーカッター	② ロータリーカッター + ワイドクラッシャー	③ スパイラルカッター
破碎結果  200回 放電後			
特長	・パネルの破碎はバックシートの剥離から始まり『封止樹脂+ガラスのシート』と『バックシート』に分離した後に、『封止樹脂+ガラスのシート』が粉碎され細分化される。		

図 3-11 : パルス破碎による事前破碎工法実験結果

①～③の各破碎機にて破碎したパネル個片を約 200g 投入し、上記実験条件にて破碎した結果、いずれの場合も、パネルの破碎はバックシートの剥離から始まり『封止樹脂+ガラス』と『バックシート』に分離した後に、『封止樹脂+ガラス』からガラスの剥離、粉碎が始まり細分化される現象が確認できた。

今回の実験では、放電回数とガラスの剥離量からパルス破碎前の事前破碎の工法を選定するのが目的であったが、パネル個片を投入した容器の上面隙間から放電時の衝撃波による水流でパネルが飛び出すという現象が発生し、①～③のいずれのパネル個辺においてもガラスの剥離が不十分な状態であり優位性の判断に至る結果を得られなかった。

図 3-12 に実験時の様子を示す。

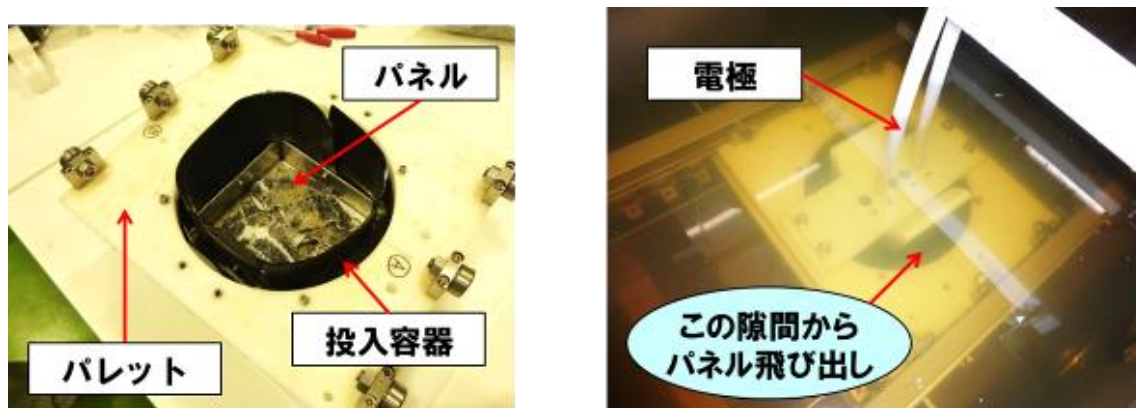


図 3-12 : パルス破碎による事前破碎工法の実験の様子

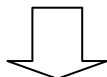
本実験にて、ガラスの剥離率による定量的な事前破碎工法の優位性の評価はできなかった。3.2.1. で述べたように、ロータリーカッター、ワイドクラッシャーによる破碎物は形状が立体的であり、見かけ上の体積が大きいため本実験で使用した処理容器のサイズでは、破碎物が処理容器の中で動くことが困難なため放電経路が分散せず一箇所に放電が集中するという現象が想定される。加えて、破碎サイズのばらつき、破碎後の形状から、スパイラルカッターを事前破碎工法として選定した。放電時のガラス飛び出しについては、密閉型の処理容器を検討し後の実証を進める。

### 3.3. パルス破砕によるガラス回収工法実証

パルス破砕工法の実証については、図 3-13 に示すフローにて進めた。

#### 3. 3. 1 密閉型処理容器の検討

放電時の衝撃波による水流でパネルが処理容器から飛び出すのを防ぐために、密閉型処理容器の検討・製作を行った。



#### 3. 3. 2 パルス条件最適化検証

- ・放電回数とガラス回収率／放電電圧とガラス回収率の相関を把握する。
- ・パネルの破砕物を、篩選別にて各サイズに分類し、それぞれの組成からリサイクルへの適応先（サーマル／マテリアル）を決める。

#### 【結論】

- ・放電回数 20 回／放電電圧 140kV の放電条件が最もガラス回収効率が高い。  
放電回数・電圧を増やすと回収量は微増するが消費電力が増えるため回収効率は低下する。

図 3-13 : パルス破砕工法の実証フロー

### 3.3.1. 密閉型処理容器の検討

図 3-14 にガラスの飛び出しを防止した密閉型容器を示す。

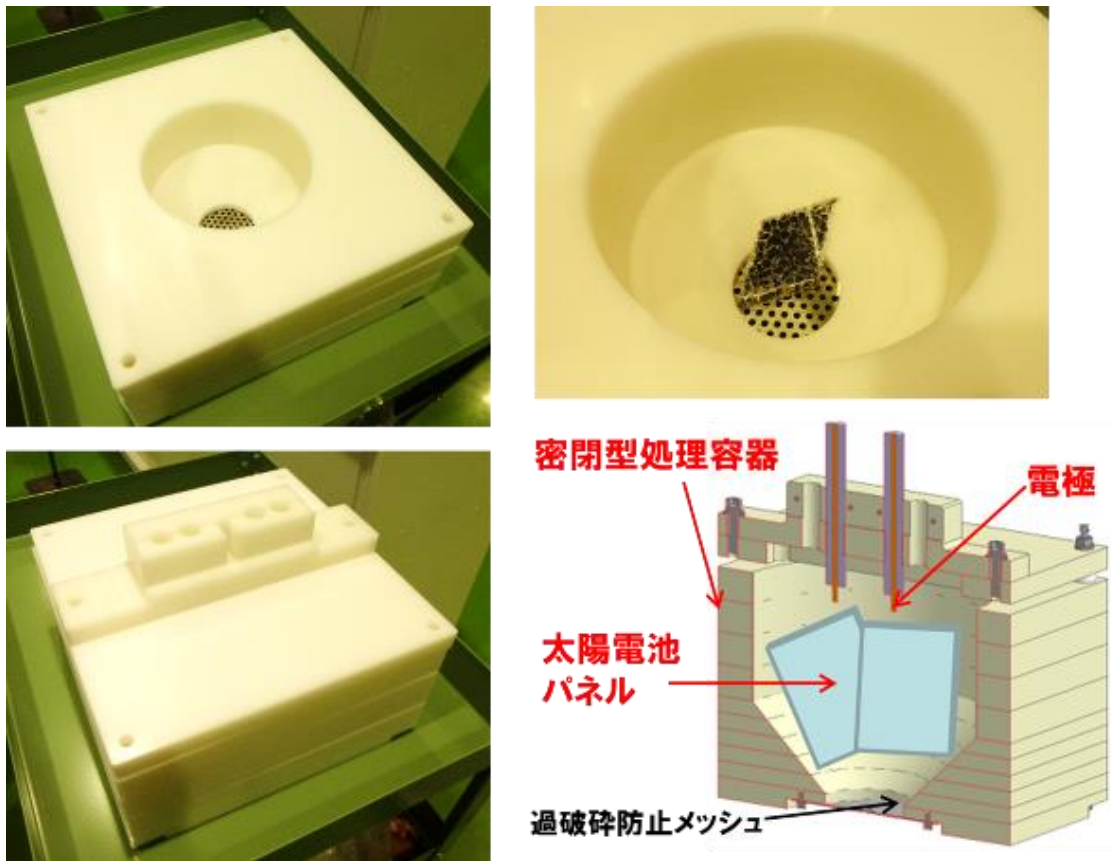


図 3-14 : ガラスの飛び出しを防止した密閉型容器

今回、製作した密閉型容器は、容器の底部が円錐形状なので放電時の衝撃・水流で容器内を移動するパネルが常に底部、つまり電極の直下に集まるため放電による衝撃波を有効に浴びせることができるのが特長である。

また底部が円錐形状であるため、複数枚のパネルを投入した場合、パネルが底面で互いに重なり合うことを抑制する効果も期待できる。底面がこのような円錐形状でなく平らな場合、パネル同士の重なりが発生する可能性が高く重なった下側のパネルは衝撃波が減衰されて届くためガラスの剥離が効果的に行われない可能性があり、全体として破碎・剥離の効率の低下になる。

本密閉型容器の底面はメッシュ構造となっているため過破碎による破碎効率低下の抑制も期待できる構造となっている。




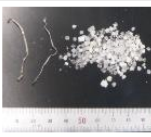

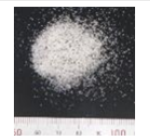


### 3.3.2. パルス破碎条件最適化検証

パルス破碎条件の最適化検証の進め方を図 3-15 に示す。

**実験条件** 以下の条件1と2で実験

	目的	電圧 (kV)	放電回数 (回)	投入枚数 (枚)
<b>条件1</b>	放電回数/ガラス回収効率の相関把握	180 (電圧固定)	15~50	1
<b>条件2</b>	放電電圧/ガラス回収効率の相関把握	100~180	20 (回数固定)	1

**破碎物の分類** 破碎時の飛び出し防止機構付き処理容器を使用して検証

大きさ	5.6mm以上	2~5.6mm	0.5~2mm	0.3~0.5mm	0.1~0.3mm	0.1mm以下
状態※						
主な構成材料	・封止樹脂 ・バックシート	・ガラス ・リード線			・ガラス ・金属 (Si, Ag, Cu)	
リサイクル適用先	サーマルリサイクル	マテリアルリサイクル ⇒ 発泡ガラスへ適用 ※ 2~5.6mmに含まれるリード線は篩選別 ※ Si, Agは選別せずそのまま適用 <b>0.3~5.6mmの破碎物をガラス回収量とする</b>			マテリアルリサイクル(精錬) ※ ガラスとの選別せず この状態で精錬に持って行く	

※状態の写真は サンプル:50×50mm/放電電圧:180kV/放電回数:20回

図 3-15 : パルス破碎条件の最適化検証

パルス破碎条件の最適化検証は、条件1：放電回数/ガラス回収効率、条件2：放電電圧/ガラス回収効率の2条件で進めた。

条件1の放電電圧は、これまでの事前実証実験の結果から180kVで固定とした。破碎サンプルは、破碎後、篩選別を行い各サイズでの重量を精緻に測定する必要があるため、スパイラルカッターにて事前破碎したパネルを、さらに50mm×50mmに切断したものをを用いた。

次に破碎物の分類について説明する。今回、破碎物は図3-15に示すように、5.6mm以上~0.1mm以下の6段階のサイズに分類した。各サイズに篩選別された破碎物の主な構成材料から、封止樹脂、バックシートが多く含まれる5.6mm以上の破碎物はサーマルリサイクルに、ガラスの微粉に混じって、Si, Ag, Cuなど金属が含まれる、0.3mm以下の破碎物は精錬による金属回収に適用することとした。ガラスとリード線が主な構成材料である、0.5~5.6mmの破碎物は、さらに篩い分けし、ガラスは発泡ガラスへ、リード線は精錬へ適用することとした。なお、この0.5~5.6mmサイズに含まれるガラスの重量を、パルス破碎によるガラス回収量として評価を行った。

### 3.3.2.1. 放電回数とガラス回収効率の相関把握

#### 【目的】

放電回数とガラス回収効率の相関を定量的に把握し、パルス破碎における放電条件の最適化を検討する。

#### 【実験条件】

- ・使用パネル：HIT224α (Panasonic 製) 50mm×50mm
- ・放電条件：放電電圧 180kV (固定)  
放電距離 40mm (電極～ガラス表面)  
50mm (電極間距離)  
放電回数 15～50 回

#### 【実験結果】

図 3-16 に実験結果を示す。

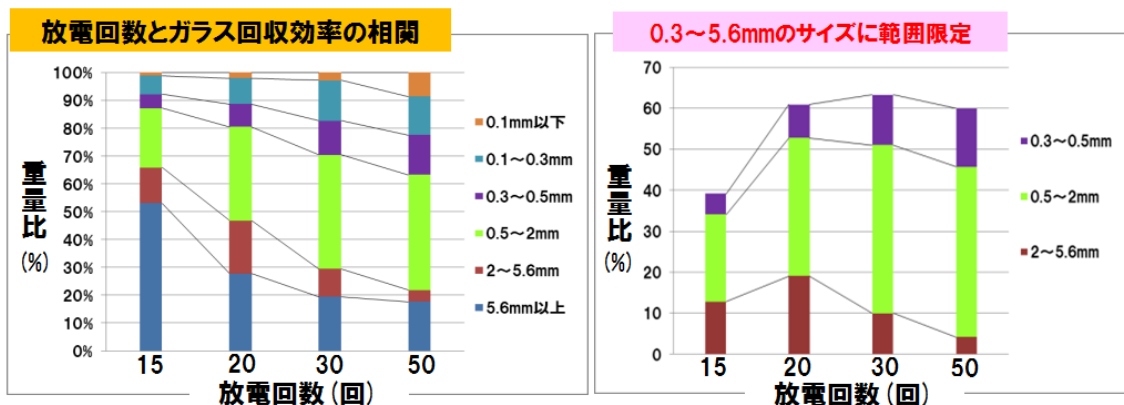


図 3-16 : 放電回数とガラスサイズの関係

放電回数が 15 回の場合、5.6mm 以上の封止樹脂、バックシートが 53%の重量を占める。ガラス自体の剥離量も少ないため、ガラス回収量 (0.3~5.6mm) は 40%どまりだった。放電回数を 20 回に増やすと、封止樹脂からのガラス剥離が進み、ガラス回収量は 61%に増加した。さらにガラス回収量を増やすために、30 回、50 回と放電回数を増やしたが、破碎物の微細化、微粉化が増えるばかりで、ガラス回収量は放電回数 30 回の 63%をピークにサチレーションする結果となった。

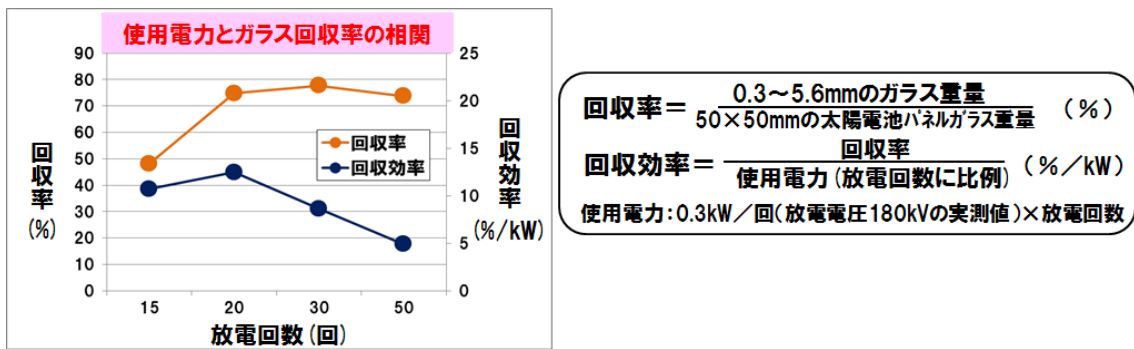


図 3-17 : 放電回数とガラスサイズの関係

図 3-17 にガラス回収量と放電回数から求めた使用電力の相関を示す。回収効率の計算方法は、ガラス回収量から求めた回収率と放電回数から求めた使用電力を用いて計算を行った。放電回数に比例して使用電力が増加するのに対して、ガラス回収量は微増であるため、回収効率としては放電回数 20 回が最も高い結果となった。

### 3.3.2.2. 放電電圧とガラス回収効率の相関把握

#### 【目的】

放電電圧とガラス回収効率の相関を定量的に把握し、パルス破碎における放電条件の最適化を検討する。

#### 【実験条件】

- ・使用パネル：HIT224 $\alpha$  (Panasonic 製) 50mm×50mm
- ・放電条件：放電電圧 100kV～180kV  
放電距離 40mm (電極～ガラス表面)  
50mm (電極間距離)  
放電回数 20回 (固定)

#### 【実験結果】

図 3-18 に実験結果を示す。

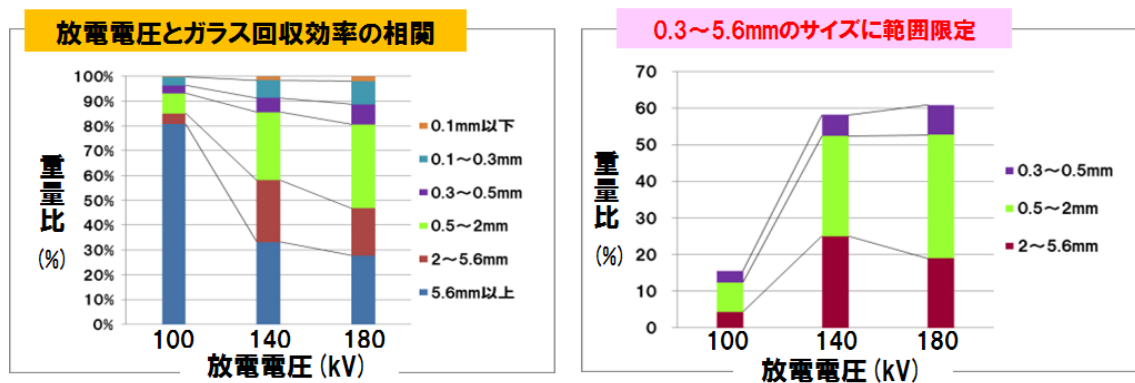


図 3-18 : 放電電圧とガラスサイズの関係

放電電圧が 100kV の場合、放電エネルギーが小さいため、封止樹脂からのガラス剥離量が極端に少なく、ガラス回収量は 15% と非常に低い回収量であった。3.3.2.1. にて述べた放電回数と回収効率の結果から、放電電圧は 180kV であれば、ガラスの剥離が可能であることが判っていたため、100kV との中間をとって、140kV で破碎を行った結果、ガラス回収量は、180kV と比較しても僅かに低い 58% であった。必要以上に放電電圧を大きくしてもガラス剥離量の増加には繋がらず、ガラス回収量の内訳を見ると、微粉化が進む傾向であることが確認できる。

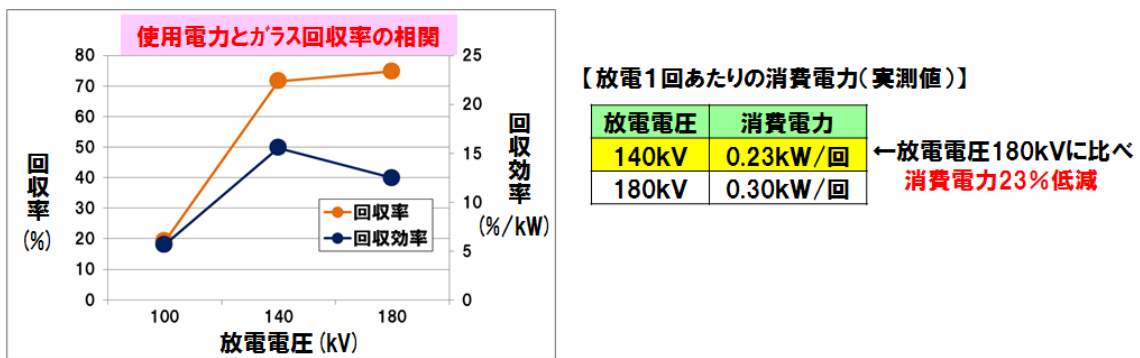


図 3-19 : 放電回数とガラスサイズの関係

図 3-19 にガラス回収量と放電電圧から求めた使用電力の相関を示す。回収効率の計算方法は、ガラス回収量から求めた回収率と放電電圧から求めた使用電力を用いて計算を行った。放電電圧に比例して使用電力が増加するのに対して、ガラス回収量は微増であるため、回収効率としては、放電電圧 140kV が最も高い結果となった。

## 4. 解体工法 実証結果のまとめ

### 4.1. 解体工程フローと各工程のマテリアルバランス

解体工程全体のフローとマテリアルバランスは、図 4-1 の通りである。

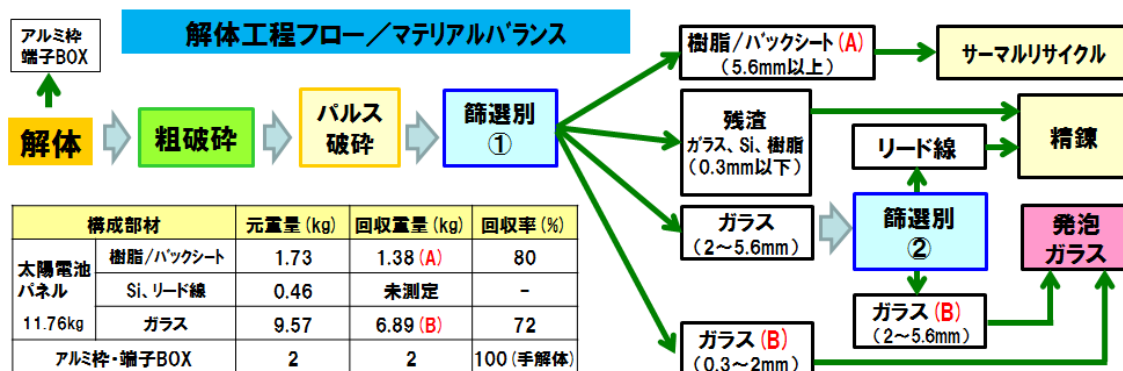


図4-1：解体工程フローとマテリアルバランス

ガラスのマテリアルバランスの算出については、3.3.2.2. で述べた、放電電圧140kV、放電回数20回の破碎条件にて得られたガラスの回収率72%を用いて計算を行った。本事業におけるガラスの回収率は先述したように、0.3mm～5.6mmの範囲の回収物をガラスとして試算を進めている。よって、0.3mm以下の破碎物は残渣という扱いにした。また、0.3mm以下の残渣の重量と回収された72%のガラスの重量を和しても元の重量より少なくなるが、これは、破碎機内部に取り残された破碎物を全て回収するためには破碎機の一部を分解する必要があるため、本実証では見送った。

次に本事業の実証により考案された解体工程を回収物の組成と合わせて説明する。まず、廃棄物として回収された太陽電池パネルは、手解体により、アルミ枠と端子BOXが取り外され回収される。その後、パルス破碎機へ投入するために適切なサイズへ破碎・裁断するために、粗破碎を行う。粗破碎は、3.2.3. で実証を行った結果から、破碎後の形状が平板形状で破碎サイズのばらつきが小さい、スパイラルカッターを使用する。粗破碎されたパネル個片は、パルス破碎機の密閉型容器に投入し破碎を行う。

破碎後、回収された破碎物は篩選別機より、0.3mm以下から5.6mm以上の4サイズに選別される。5.6mm以上の破碎物は封止樹脂、EVAなど樹脂材料が主成分となるため、これらはサーマルリサイクルへの適用が考えられる。0.3mm以下の破碎物は、Ag、Cuなど金属材料が含まれるため、ガラスへのリサイクル材料とはせず、精錬工程へのリサイクル適用が考えられる。本事業の狙

いである、回収されたガラスのリサイクルについては2.6mm～5.6mmの範囲で回収されたガラスを使用することとしてCO2削減、経済合理性の試算を行った。ただし、この範囲の破砕物の中には、太陽電池パネルの構成部品である、リード線が含まれる。リード線にも、多くの金属が含まれるため、2.6mm～5.6mmの回収物は、さらに2回目の篩選別を行い、リード線を回収した後にガラスリサイクルへ適用する工程で検討を進めた。

## 4.2. 解体工程の消費電力とCO2排出量

解体工程の各工程の消費電力は表4-1の通りで、合計で0.112kWhとなった。

表4-1：解体工程の消費電力

項目	粗破砕	パルス破砕	篩選別①	篩選別②
使用設備	スパイラルカッター	パルス破砕機	振動式篩機	振動式篩機
消費電力 (kWh/kg)	0.004	0.095	0.005	0.008
計算条件	処理能力 1800 kg/h 動力 8 kWh	・放電電圧 140kV ・放電回数 9000回/パネル1枚 ・パルス放電の消費電力 0.23kW/回 = 6.39E-05 kWh/回 = 0.062 kWh/kg ・搬送、供給排出系の消費電力 0.033 kWh/kg	処理能力 1000 kg/h 動力 5 kWh	処理能力 500 kg/h 動力 4 kWh

パルス破砕機の消費電力は、最も回収効率が高かった破砕条件である、放電電圧140kV、放電回数20回、この条件で50mm×50mmの太陽電池パネルを破砕した時の消費電力の実測値を用いて、パネル1枚分の面積へ換算し、得られた電力をパネル重量で除して、パネル1kgあたりの消費電力とした。また、パネル破砕機の設備構成として破砕部以外に粗破砕されたパネル個片を処理容器へ投入する材料投入部、処理容器を搬送する搬送コンベア部、破砕物を取り出し回収する回収部など破砕部以外にも電力を必要とするユニットが付帯するため、これらの消費電力についても含めた値で設備全体の消費電力を計算した。粗破砕機、篩選別機の消費電力については、処理能力から使用動力（主にモータ）を推定し計算を行った。従って、解体工程全体のCO2排出量は、0.112 kWh × 0.587 kg-CO2/kWh（環境省 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度 電気事業者別排出係数 平成27年度実績代替値） = 0.066kg-CO2/kg-太陽電池パネル となった。

### 4.3. 今後の取組み・課題

本事業における今後の取組みと課題については、表 4-2 に示す内容を予定している。

表4-2：解体工程の消費電力

検討項目	現 状	目 標	対 策
放電回数削減	9000 回/枚	2000 回/枚	・放電部(電極・容器)の構造改善 1バッチ投入量を増やす構造 ガラスの過破碎防止構造
処理速度アップ	2 枚/hr	8 枚/hr	・コンベアによる連続処理部の構造改善

表 4-2 に示すように、パルス破碎機の課題は生産性（処理速度）にある。本事業にて求めた破碎条件（放電電圧 140kV/放電回数 20 回）にて太陽電池パネル 1 枚を破碎するために必要な放電回数は、約 9000 回である。また、放電の周波数を 5Hz に設定した場合、破碎にかかる時間は、 $9000 \text{ 回} / 5\text{Hz} = 1800 \text{ 秒}$ （搬送時間含まず）となり、その処理速度は 2 枚/hr となる。7. まとめ に詳細は説明するが、経済合理性を成立させるためには、8 枚/hr の処理速度が必要と考える。放電周波数をさらに速くすれば放電に必要な時間は削減できるが、周波数を上げるためには非常に高度なパルス放電の制御と、大容量のコンデンサが必要となり設備価格が大幅アップする結果となる。また、消費電力という観点からも処理速度をアップさせる方向性は、放電回数を減らすことが重要となってくる。具体的な検討内容としては電極構造の改善を行い、1 回の放電で、より広範囲での破碎が可能な電極開発に着手する予定である。さらに、1 バッチあたりの投入量も増やすことで合わせて生産性の向上を目指す予定である。



## 5. ガラス再生工程の実証方法

### 5.1. 実証方法の概要

#### 5.1.1. 概要

発泡ガラスを外壁材の軽量骨材として添加する検証を、ケイミュー株式会社（株式会社クボタ50%出資、パナソニック株式会社50%出資）と連携して、実施した。概要を図 5-1 に示す。



図 5-1 : ガラス再生工程の検証概要

#### 5.1.2. 外壁材用発泡ガラスの製造フロー

発泡ガラスを外壁に添加するには、太陽電池パネルより回収したガラスから発泡ガラスを製造する工程と、製造した発泡ガラスを外壁添加用サイズに加工する工程の大きく2つの工程がある。一連の発泡ガラス製造/加工フローを、図 5-2 に示す。

### 【発泡ガラス製造工程】

発泡ガラス製造工程では、まず太陽電池より回収したガラスの粉砕を行う。パルス破碎にて破碎した太陽電池のガラスは大きいもので5mm程度のサイズである。ガラスの粒径が大きいと発泡剤との混合分散が困難な上、ガラスの熔融にも大きな熱量がいることから、粉砕工程でガラスを粉砕する必要がある。本検証ではボールミル、及び、株式会社 環境保全サービス所有のガラス粉砕機で粉砕を行い、分級装置にて100 $\mu$ m以下に篩い分けしたガラス粉体を発泡ガラスの原料として使用した。次に篩い分けした100 $\mu$ m以下のガラス粉末に発泡剤（炭酸カルシウム CaCO<sub>3</sub>）を一定量混合し、十分に攪拌を行った。攪拌した材料は坩堝に入れ加熱炉で加熱させ、発泡ガラスを製造した。この加熱工程で発泡剤の分解（CO<sub>2</sub>発生）が起こり、熔融したガラスを発泡させ発泡ガラスが形成される。

### 【外壁添加用 加工工程】

加工工程では外壁に添加できるサイズに発泡ガラスの粉砕加工を行う。発泡ガラスを粗破碎し、ミル（回転刃方式）で粉砕後、分級装置にて篩い分けを行った。最終600 $\mu$ m以下に篩い分けされた発泡ガラス粉体を外壁添加用に使用した。

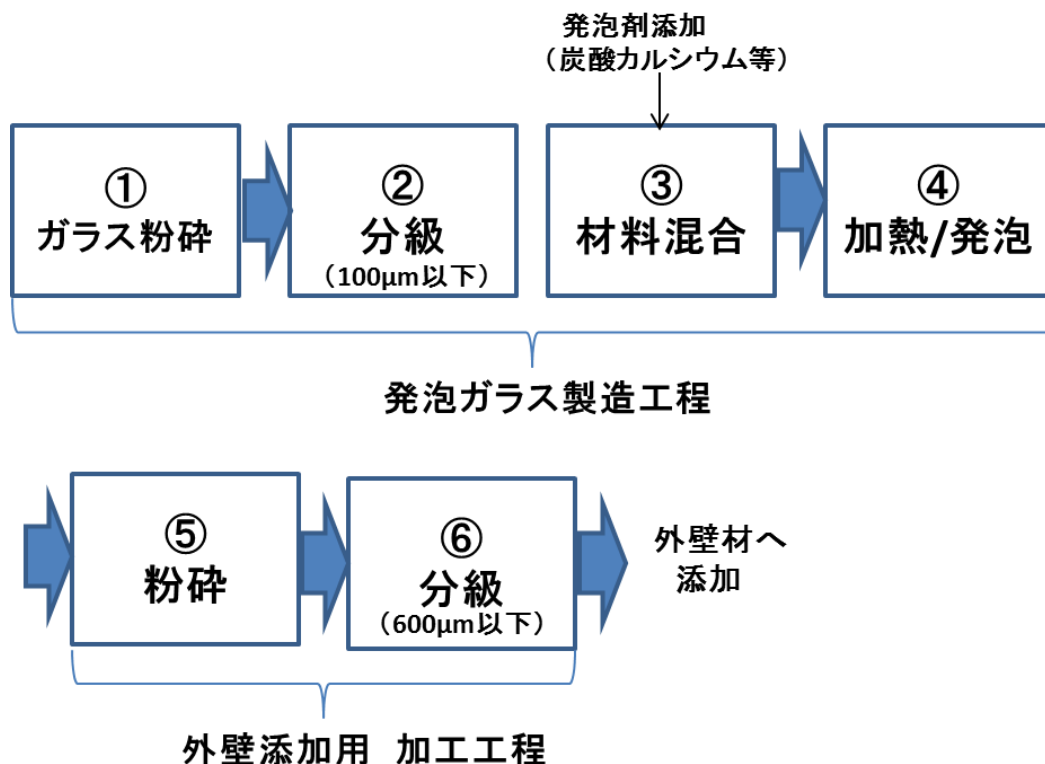


図 5-2 : 外壁材用発泡ガラス 製造フロー

### 5.1.3. 外壁材用発泡ガラスの目標スペック

表 5-1 に外壁材用の発泡ガラス粉体の目標スペックを示す。本事業では軽量化を目的に発泡ガラスを外壁材に添加するが、軽量化の指標として嵩密度を用いた。目標スペックはガラスバルーンなど他の軽量骨材を参考に 0.2g/cm<sup>3</sup> とした。またこれ以上の軽量化は外壁製造時の材料混合やプレス時に浮いてしまう可能性がある。

外壁材に添加する発泡ガラス粉体のサイズはケイミュー株式会社の知見の元に、600  $\mu$ m 以下とした。小さすぎると発泡ガラス粒子内に気泡が存在し難くなり軽量化が見込めず、また大きすぎると外壁強度の低下、材料混合やプレス時に発泡ガラスが浮く問題が発生する恐れがある。

表 5-1 : 外壁用発泡ガラス粉体 仕様

項目	単位	目標スペック
嵩密度	g/cm <sup>3</sup>	0.2
平均粒径 (発泡ガラス粉砕品)	$\mu$ m	600 以下

## 5.2. 1次検証評価

### 5.2.1. 概要

実際に太陽電池パネルから回収したガラスを用いて発泡ガラスを製造し、外壁添加用に加工後、外壁材に添加するまでの一連の工程について基礎検証を実施した。

### 5.2.2. 発泡ガラスの作製

#### 【実施内容】

太陽電池のガラスを用いて発泡ガラス製造から外壁添加用加工までを実施し、外壁添加用発泡ガラス粉体の目標スペックに対し、嵩密度及び粉砕サイズがどの程度であるか評価を行った。

#### 【製造条件】

- ・ガラス原料サイズ：100  $\mu\text{m}$  以下
- ・発泡剤種類：炭酸カルシウム
- ・発泡剤配合比：5wt/%
- ・加熱ピーク温度：850 $^{\circ}\text{C}$
- ・加熱ピーク保持時間：30分
- ・発泡ガラス粉砕条件：回転5600rpm 10秒
- ・発泡ガラス粉末篩目開き：600  $\mu\text{m}$

#### 【評価項目】

- ・嵩密度：緩め嵩密度
- ・発泡ガラス粉体粒径：レーザー解析、散乱法

#### 【評価結果】

製造した発泡ガラスを図 5-3 に、外壁添加用に粉砕、篩い分けした発泡ガラス粉末を図 5-4 に示す。また発泡ガラス粉体の嵩密度、粒径を評価した結果を表 5-2 に示す。

嵩密度については0.5g/cm<sup>3</sup>と目標値0.2g/cm<sup>3</sup>より大きく、粒径については平均粒径182  $\mu\text{m}$ と目標600  $\mu\text{m}$ 以下はクリアしているが、上限よりかなり小さく粉砕されている結果となった。嵩密度が大きくなった要因としては、発泡ガラ

ス粉末の粒径と気泡サイズが関係していると考えられる。図 5-5 に製造した発泡ガラスの断面写真を示すが、発泡ガラス内に 200~500  $\mu\text{m}$  程度の大きな気泡が多数存在しているのに対し、粉碎した発泡ガラス粉末は平均粒径 182  $\mu\text{m}$  と小さいため、発泡ガラス粉体内に気泡が存在し難くなり、嵩密度が大きくなったと推察される。嵩密度を小さくするためには、粒径を大きくするとともに、気泡サイズを小さくする対策が必要である。



図 5-3 : 発泡ガラス

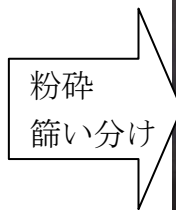


図 5-4 : 外壁材添加用 発泡ガラス粉末

表 5-2 : 外壁用発泡ガラス粉体評価結果

評価項目	単位	評価結果	目標スペック
嵩密度	$\text{g/cm}^3$	0.5	0.2
平均粒径 (発泡ガラス粉碎品)	$\mu\text{m}$	182	600 以下

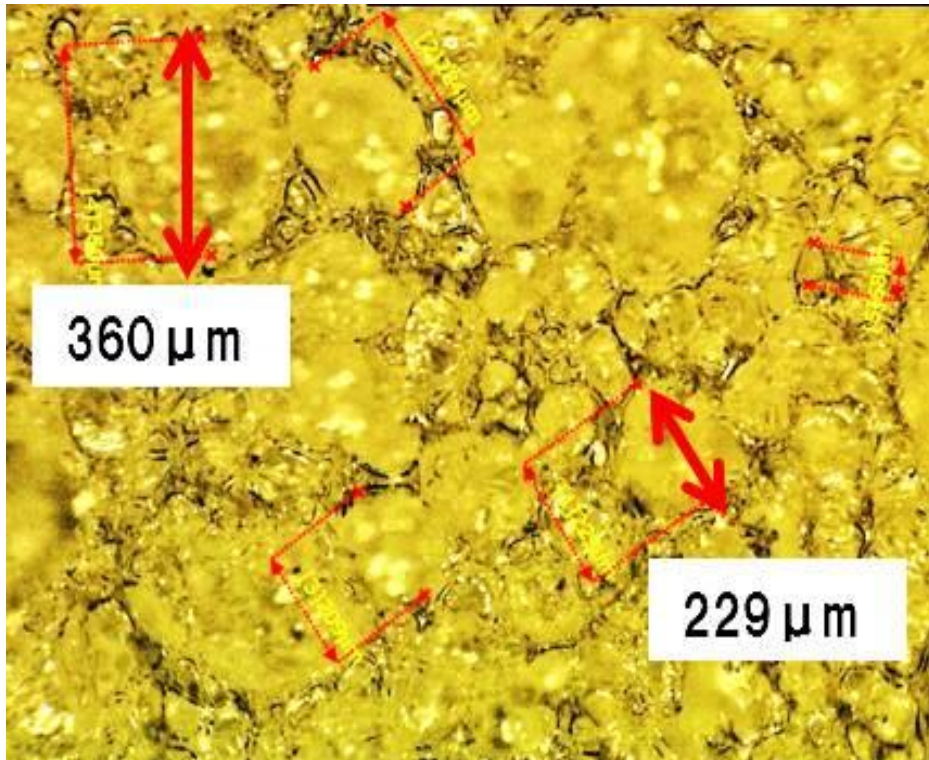


図 5-5：発泡ガラス断面写真

### 5.2.3. 外壁材への添加検証

#### 【実施内容】

製造した外壁用発泡ガラス粉体を実際に外壁材に添加し、軽量効果及び外壁材の基本性能について評価を行った。

#### 【外壁製造プロセス】

外壁材については製造装置を保有していないため、ケイミュー株式会社と連携して実施した。製造工程のフローを図 5-6 に示す。粉砕した発泡ガラス粉体を材料調合工程でセメント等の外壁材料と調合/攪拌し、容器にて外壁形状に成型後、余分な水分を除去するため、脱水を行った。脱水した外壁はプレスし、板状に成型後、オートクレーブにて硬化させた。



図 5-6 : 外壁材製造フロー

### 【評価項目】

外壁材の評価については発泡ガラスを添加していない外壁材と比較し評価を行った。評価項目は下記に示す通りで、ケイミュー株式会社で実施している外壁材の評価方法に準じて実施した。

- ・ 曲げ試験（破壊加重、変位、応力、弾性率）
- ・ 加熱収縮
- ・ 絶乾比重

### 【評価結果】

図 5-7 に、製造した発泡ガラス添加外壁材の写真を、表 5-3 に外壁材の評価結果を示す。

5.2.2. で述べた通り、発泡ガラスの嵩密度が目標未達であることもあり、今回の1次評価では、絶乾比重により外壁材の比重低減効果を確認することはできなかった。外壁材の基本特性である、曲げ試験、加熱収縮においては製品品質許容範囲内で、発泡ガラスを添加することによる重大な影響は見られなかった。この検証で外壁材への添加には問題ないことが分かったが、さらなる軽量化が必要である。



図 5-7：発泡ガラス添加外壁材写真



表 5-3 : 発泡ガラス添加外壁材 評価結果

評価項目		従来品	発泡ガラス添加
曲げ試験	破壊荷重(N)	695	693
	変位(mm)	0.40	0.40
	応力(Mpa)	12.7	11.6
	弾性率(Mpa)	4221	3595
加熱収縮(%)		6.2	5.9
絶乾比重		1.17	1.21

## 5.3 2次検証評価

### 5.3.1. 発泡ガラス軽量化の取組み

1次検証評価の結果を踏まえ、軽量化の改善策として次の①～③を実施することとした。

- ① 発泡条件の最適化（発泡サイズの最大化）
- ② 発泡剤量、発泡剤種類の変更（気泡微細化）
- ③ 粉砕条件の改善（発泡ガラス粉体の粒径拡大）

改善策の①発泡条件の最適化（発泡サイズの最大化）についてはガラスの発泡率が高いほど嵩密度は低下するという考え方で、1次検証では850℃30分加熱で発泡ガラスを製造したが、発泡時間をさらに長くすると逆に縮む現象が確認されており、同じピーク温度でも加熱時間によって発泡状態が変化している。今回の1次検証で用いた加熱炉では炉内の状態が確認できないため、膨張がピークの状態では製造できていない可能性がある。そこで炉内を確認できる加熱炉を用意し、発泡状態を確認しながら、最適な発泡条件の割り出しを行うこととした。検証した内容については5.3.2.で述べる。

次に改善策の②発泡剤量、発泡剤種類の変更（気泡微細化）については、発泡剤が多いと発泡率が上がる効果も期待できるが、多すぎると気泡同士が繋がり気泡が大きくなる可能性があるため、最適な発泡剤量の見極めが必要である。発泡剤種類の変更については主に気泡サイズの微細化を狙ったものである。対象とする発泡剤はドロマイト（ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）で1次検証に用いた炭酸カルシウムと比べ20℃程度、発泡領域が低いとされている（660～770℃）。ガラスの粘度が低い、より低温側から発泡させることで気泡が大きくなることを抑え、気泡を小さくできると考えた。

改善策③粉砕条件の改善（発泡ガラス粉体の粒径拡大）については、5.2.の1次検証で述べたように目標粒径600 $\mu\text{m}$ 以下に対し、実際の粉砕平均粒径が182 $\mu\text{m}$ と小さくなっており、気泡サイズに対し、粒径が小さいため、発泡ガラス粉体内に気泡が存在し難くなっていると推察される。発泡ガラスの粉砕はミル（回転刃式）を用いているが、粉砕の回転数を変え、発泡ガラス粉体の粒径を大きくする取組みを行うこととした。②～③について検証した内容については5.3.3.で述べる。

### 5.3.2. 加熱条件の最適化

1次検証の結果を元に、発泡ガラスのさらなる軽量化を行うため、発泡ガラスの膨張がピークとなる最適な加熱条件の検証を行った。

#### 【実施内容】

図 5-8 に検証に使用した電気炉（アズワン MMF-2F）の写真を示す。この電気炉は観察窓付きであるため、加熱中の炉内状態を確認できる。本検証では加熱しながらガラスの発泡状態変化を確認し、発泡が最大となる加熱時間の割り出し、加熱時間毎の発泡ガラス断面を観察し、気泡の状態について評価を行った。

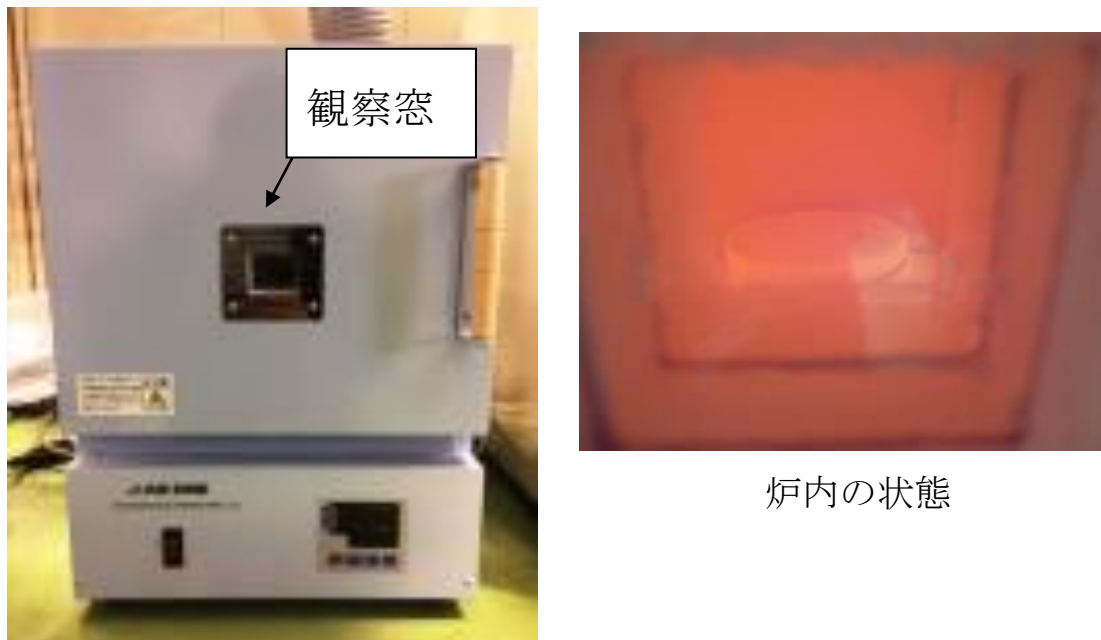


図 5-8 : 観察窓付き電気炉

#### 【製造条件】

- ・ ガラス原料サイズ：100  $\mu\text{m}$  以下
- ・ 発泡剤種類：炭酸カルシウム
- ・ 発泡剤配合比：5wt/%
- ・ 加熱ピーク温度：850 $^{\circ}\text{C}$
- ・ 加熱ピーク保持時間：850 $^{\circ}\text{C}$ 到達後 0～40 分

### 【評価結果】

図 5-9 に温度プロファイルと観察を実施した加熱時間を、図 5-10 に各加熱時間のガラス発泡状態の写真を示す。発泡状態については、850°C到達時点では僅かに発泡している状態であるが、850°C10分で発泡がピークに達し、さらに時間が経過するにつれ、発泡ガラスが縮み、850°C40分の発泡サイズはピークの1/3程度まで縮む結果となった。

図 5-11 に各加熱時間の発泡ガラスの断面写真を示すが、気泡の状態を発泡ガラス断面から観察すると、発泡ガラスが最も膨らんだ850°C10分に対し、20分、40分と時間が経過するにつれ大きな気泡が確認された。

これらの結果をまとめると、ガラスが膨らみピークを過ぎると発泡ガラスは縮み、かつ気泡は大きくなることが分かった。この結果について考察すると、今回の検証では発泡剤に炭酸カルシウムを用いており、加熱によりCO<sub>2</sub>が発生し、ガラスが発泡するが、ガラスが熔融し、粘度が下がっている状態で加熱時間が長くなればなるほど発泡ガラス内部の気泡が繋がり、気泡が大きくなっていると推察される。また大きくなった気泡は時間経過とともに発泡ガラス外部に放出されるため、発泡サイズは経過時間毎に縮んでいったと推察される。

今回の検証では発泡が最大でかつ、気泡の繋がりが抑制された850°C10分を最適条件とした。

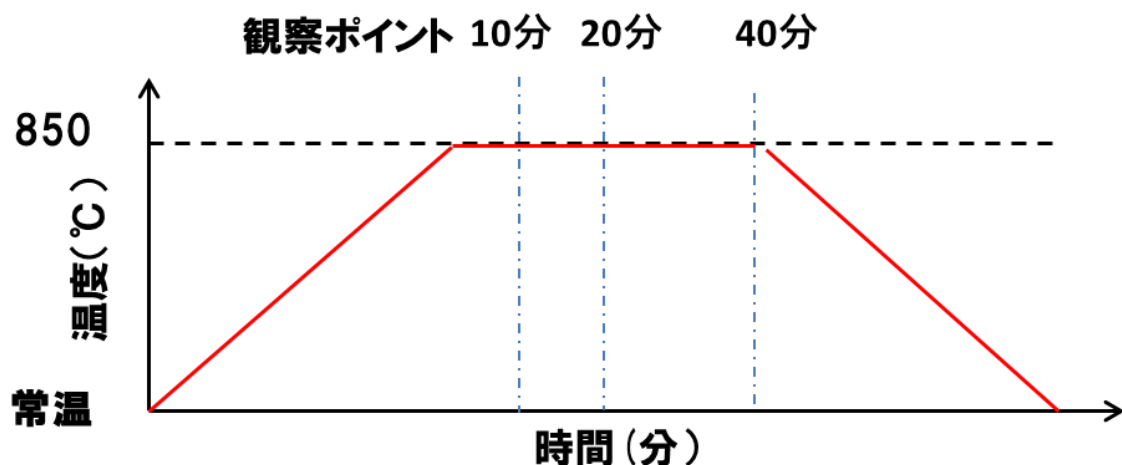


図 5-9 : 発泡ガラス製造 温度プロファイル

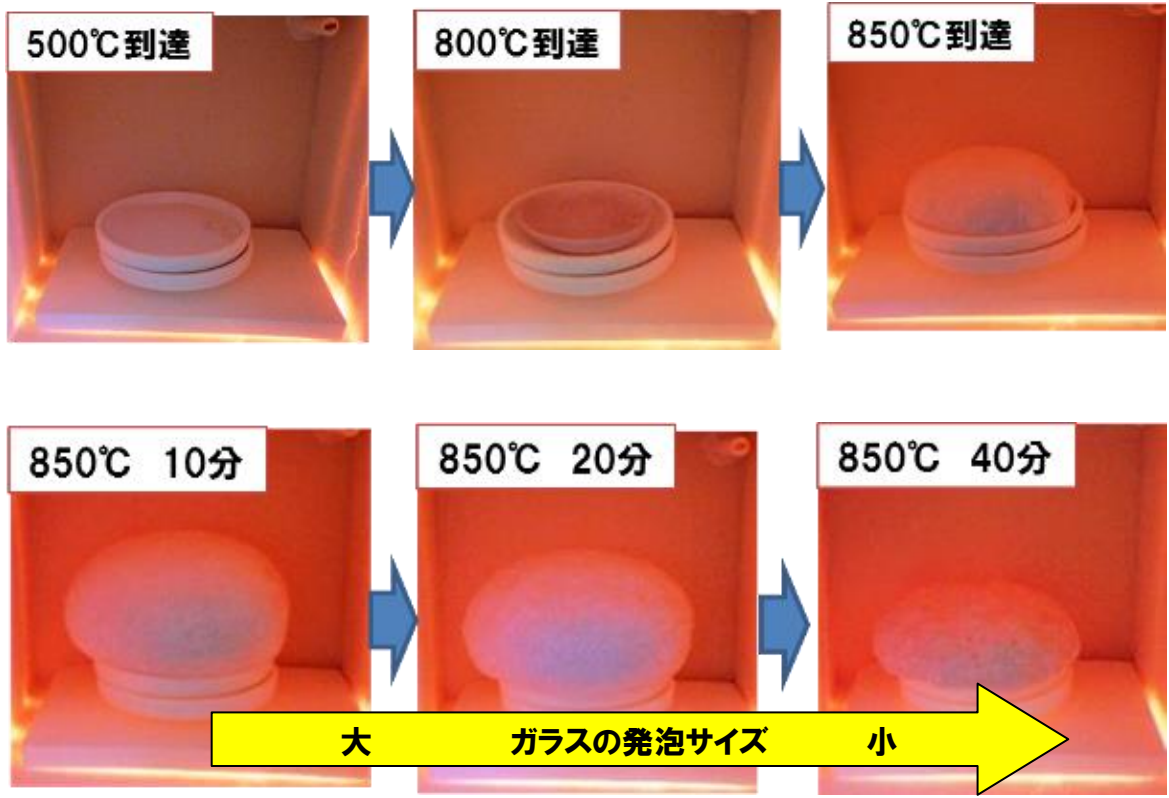


図 5-10 : 各加熱時間のガラスの発泡状態



図 5-11 : 各加熱時間の発泡ガラスの断面写真

### 5.3.3. 発泡剤の量/種類の評価及び粉碎条件の改善

発泡ガラスの軽量化を行うため、発泡剤量及び発泡剤種類を変えての気泡微細化、粉碎条件を変えての発泡ガラス粉体の粒径拡大について検証を実施した。

#### 【実施内容】

発泡剤量の検証については発泡剤に炭酸カルシウムを用い、添加量を 2～7.5wt/%で振って嵩密度、気泡サイズの評価を行った。

発泡剤種類については炭酸カルシウムとドロマイトで嵩密度及び気泡サイズの比較評価を行った。

粉碎条件の改善についてはミルの回転数を 5600rpm から 4200rpm に下げ、粉碎時間は 10 秒を維持したまま、粒径の比較を行った。

いずれの検証においても発泡ガラスを製造する時の温度プロファイルは 5.3.2 で導き出した 850℃10 分の温度プロファイルで製造を行った。

#### 【製造条件】

- ・ガラス原料サイズ：100  $\mu\text{m}$  以下
- ・発泡剤種類：炭酸カルシウム、ドロマイト
- ・発泡剤配合比：炭酸カルシウム：2、3.5、5、7.5wt/%  
ドロマイト：5wt/%

(ドロマイトは炭酸カルシウムより比重が重いいため、体積で考えると炭酸カルシウム 3.7wt/%相当)

- ・加熱ピーク温度：850℃
- ・加熱ピーク保持時間：10 分
- ・破碎条件：回転数 4200rpm 10 秒

#### 【評価方法】

- ・嵩密度：緩め嵩密度
- ・気泡サイズ：水銀圧入法 (POREMASTER 60GT(Quantachrome 社製))  
※気泡サイズは 1mm 以下のみ測定
- ・発泡ガラス粒径：レーザー解析、散乱法

#### 【評価結果】

炭酸カルシウムの添加量を振って作製した発泡ガラスの写真を図 5-12 に、嵩密度、気泡サイズ、発泡ガラス粒径の評価結果を表 5-4 に示す。

炭酸カルシウムの添加量を 2～5wt/%に増やすにつれて発泡は大きくなったが、7.5wt/%まで添加するとほとんど発泡が見られなくなった。気泡サイズについては顕微鏡写真では明らかに添加量 5wt/%が大きく見えるが、測定結果では最も小

さい結果となった。添加量 5wt/%は添加量が多いため、孔が繋がり数百～数ミリサイズの大きな気泡が多く形成され、微小気泡と大きな気泡の2極化が起きていると推察されるが今回の水銀圧入法では1mmより大きいサイズはカウントされないため、平均孔径は小さくなったと思われる。嵩密度については添加量 3.5wt/%が最も小さい結果となった。



図 5-12 : 炭酸カルシウム添加量を変えた発泡ガラス写真

表 5-4 : 炭酸カルシウムを添加した発泡ガラスの評価結果

発泡剤 種類	炭酸カルシウム			
	2%	3.5%	5%	7.5%
発泡剤 添加量	2%	3.5%	5%	7.5%
嵩密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.40	0.38	0.45	発泡せず
平均孔径 [μm]	157	122	101	
平均粒径 [μm]	243	231	253	
総細孔容 [cc/g]	3.03	3.57	3.48	

次にドロマイトで作製した発泡ガラスの写真を図 5-13 に、嵩密度、気泡サイズ、発泡ガラス粒径の評価結果（炭酸カルシウムとの比較）を、表 5-5 に示す。

発泡剤種類をドロマイトに変えた検証では炭酸カルシウム同様、顕微鏡写真では大きな気泡が確認されたが、1mm 以下の平均孔径は炭酸カルシウム配合に比べ 77 μm と最も小さくなった。嵩密度では 0.44g/cm<sup>3</sup> で炭酸カルシウム添加量 3,5wt/%に及ばなかったが、孔径が炭酸カルシウムよりオーダーが低いため、配合比や発泡温度の変更（発泡温度領域が低い特性の活用）により嵩密度の低い発泡ガラスを製造できる可能性がある。





図 5-13：ドロマイトを添加した発泡ガラス写真

表 5-5：ドロマイトを添加した発泡ガラスの評価結果

発泡剤 種類	炭酸カルシウム	ドロマイト
発泡剤 添加量	3.5%	5% <small>炭カルの比重に換算すると3.7%</small>
高密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.38	0.44
平均孔径 [μm]	122	77
平均粒径 [μm]	231	255
総細孔容 [cc/g]	3.57	3.21

次に粉砕粒径についてだが、回転数 5600rpm 10 秒（1 次検証条件）で行った粒径は 182  $\mu\text{m}$ 、今回の条件である回転数 4200rpm 10 秒の結果は 231  $\mu\text{m}$ （添加量 3.5wt/%）であった。回転数を変えることで前回の 182  $\mu\text{m}$  から 231  $\mu\text{m}$  と改善し、嵩密度減少に寄与していると思われるが、依然として目標値 600  $\mu\text{m}$  に比べ粒径が小さい。表 5-6 に炭酸カルシウム添加量 3.5wt/%の時の粒径 600  $\mu\text{m}$  以下と 250  $\mu\text{m}$  以下を省いた粒径 250  $\mu\text{m}$ ～600  $\mu\text{m}$  の嵩密度結果を示す。粒径を大きくすると嵩密度が下がる効果があるため、粒径拡大の改善が必要である。今回は密閉式のミルで粉砕しており、回転数を下げると粒径は大きくなるが、歩留まりも悪くなる。逆に回転数を上げると過破碎され粒径は小さくなる。パルス破碎同様に、発泡ガラスの過破碎を防止するため、メッシュ機構などを用いた粉砕しながらの篩い分けを検討していく必要がある。

本検証では嵩密度が最も小さいものは炭酸カルシウム添加量 3.5wt/%、気泡が最も小さいものはドロマイト添加量 5wt/%と一致せず、先に述べたようにドロマイトの深堀が必要であるが、嵩密度を重視し、現時点で最も嵩密度の低い炭酸カルシウム 3.5wt/%を用い 5.3.4. に示す外壁添加検証の再トライを行った。

表 5-6：粒径変化による発泡ガラス粉嵩密度

粒子径	嵩密度
～600 $\mu\text{m}$	0.38g/cm <sup>3</sup>
250～600 $\mu\text{m}$	0.31g/cm <sup>3</sup>

#### 5.3.4. 外壁材への添加検証

5.3.3. で最も嵩密度が小さかった炭酸カルシウム添加量 3.5wt/%の発泡ガラスを用いて外壁添加の再検証を実施した。

##### 【実施内容】

発泡ガラスを入れていない外壁をブランクサンプルとし、発泡ガラスを相対値 100、200 と入れたサンプルを作製し、絶乾比重を測定、外壁が軽くなるか評価を実施した。

##### 【製造条件（発泡ガラス）】

- ・ガラス原料サイズ：100  $\mu$ m 以下
- ・発泡剤種類：炭酸カルシウム
- ・発泡剤配合比：炭酸カルシウム：3.5wt/%
- ・加熱ピーク温度：850℃
- ・加熱ピーク保持時間：10 分
- ・破碎条件：4200ppm 10 秒
- ・外壁への発泡ガラス添加量

サンプル①：発泡ガラス添加無し（ブランク）

サンプル②：発泡ガラス添加量 100（相対値）

サンプル③：発泡ガラス添加量 200（相対値 ※サンプル②の 2 倍）

外壁材は、5.2.3. 同様、ケイミュー株式会社と連携して製造を行った。

##### 【評価項目】

- ・絶乾比重

##### 【評価結果】

外壁材の絶乾比重を測定した結果を表 5-7 に示す。

表 5-7 の期待値は外壁材と発泡ガラスの配合比、比重を元に計算した外壁材の比重の理論値を元に設定している。実際には、5.2.3. の図 5-6：外壁材製造フローに記載されているように、外壁材の製造工程にはプレス工程が含まれており、プレス時に発泡ガラスの潰れが発生し、比重が大きくなることが考えられる。また、発泡ガラスの気泡が連続気泡となっており、外壁ベース材料が流入する影響も想定される。これらのプレス工程や外壁ベース材の流入の影響も考慮し、期待値は、理論値より若干大きい値を設定した。

評価の結果、発泡ガラスを添加していない外壁材の絶乾比重が 1.16g/cm<sup>3</sup> に対し、発泡ガラスを添加した外壁材は添加量（相対値）100、200 共に 1.15g/cm<sup>3</sup> で比重の減少が見られなかった。原因として、プレス時の発泡ガラスの潰れや発泡ガラス気泡への外壁材ベースの流入が、想定以上に影響していると考えられる。

原因を特定するため、モルタル材料に発泡ガラスを添加し、擬似的にプレスを行わないプロセスで発泡ガラスの軽量効果を検証した。検証結果については 5.3.5. で述べる。

表 5-7 : 発泡剤添加外壁材の絶乾比重測定結果

		測定値			期待値※	
発泡ガラス 添加条件	嵩密度 (g/cm <sup>3</sup> )	—	0.38			
	添加量 (相対値)	0	100	200	100	200
外壁材 絶乾比重 (g/cm <sup>3</sup> )		1.16	1.15	1.15	1.10	1.05

※絶乾比重の期待値はプレス工程や気泡への外壁ベース材の流れ込みを考慮し、実際の計算値より大き目に設定

### 5.3.5. モルタルへの添加検証

外壁材製造のプレス工程における発泡ガラス粉体の潰れ影響調査及び、発泡ガラス粉体が潰れない場合の軽量効果を確認するため、プレスを行わないプロセスでの検証を実施した。

#### 【実施内容】

発泡ガラス粉体の添加量を変え、モルタル材料に添加し、プレスを行わずにモルタル試験片を作製した。製作したモルタル試験片の絶乾比重を測定し、発泡ガラスの添加量によって軽量効果がどの程度であるか検証を行った。

#### 【製造条件】

- ・ガラス原料サイズ：100  $\mu\text{m}$  以下
- ・発泡剤種類：炭酸カルシウム
- ・発泡剤配合比：炭酸カルシウム：3.5wt/%
- ・加熱ピーク温度：850 $^{\circ}\text{C}$
- ・加熱ピーク保持時間：10分
- ・破碎条件：4200ppm 10秒
- ・発泡ガラス粉体サイズ：600  $\mu\text{m}$  以下
- ・モルタルへの発泡ガラス添加量

サンプル①：発泡ガラス添加無し（ブランク）

サンプル②：発泡ガラス添加量 100（相対値）

サンプル③：発泡ガラス添加量 200（相対値 サンプル②の2倍）

サンプル④：発泡ガラス添加量 300（相対値 サンプル②の3倍）

モルタル試験片の製造は市販のモルタル材に水、上記の発泡ガラス粉体を加え、混練後、自然硬化させ製造した。

#### 【評価項目】

- ・絶乾比重

#### 【評価結果】

発泡ガラス粉体の添加量を変えて作製したモルタル材について、絶乾比重の測定を行った、測定結果を表 5-8 に示す。また作製したモルタル材の外観写真を図 5-14 に示す。

評価の結果、発泡ガラスを添加していないモルタル材の絶乾比重が 2.09g/cm<sup>3</sup> に対し、発泡ガラス添加量 100（相対値）では絶乾比重が 1.84g/cm<sup>3</sup> となり、約 12%減少した。作製した発泡ガラス入りのモルタル材の絶乾比重は発泡ガラス量

を増やすほど小さくなり、発泡ガラス添加量 300（相対値）では 1.58g/cm<sup>3</sup> となり、約 24%減少する結果となった。

以上の通り、プレス工程を行わない本実験では、期待値を超える比重の減少が確認できた。従って 5.3.4. で外壁の比重が期待値に届かなかったのは、発泡ガラスの強度が不足し、5.2.3. の図 5-6：外壁材製造フローに示されるプレス工程で、発泡ガラスが潰れてしまったことが主な原因であると推察される。

今回、モルタルへの発泡ガラス添加検証において添加量を増やすにつれ比重の減少が確認できたことから、次にもう一つの課題である発泡ガラス粉体粒径について粒径を大きくすることでモルタル比重が低くなるかどうかの検証を行った。検証の内容については 5.3.6. で述べる。

表 5-8：発泡ガラスの添加量を変えたモルタル材の絶乾比重測定結果

		測定値				期待値※		
発泡ガラス 添加条件	嵩密度 (g/cm <sup>3</sup> )	—	0.38					
	添加量 (相対値)	0	100	200	300	100	200	300
モルタル絶乾比重 (g/cm <sup>3</sup> )		2.09	1.84	1.68	1.58	1.87	1.73	1.62

※絶乾比重の期待値はプレス工程や気泡への外壁ベース材の流れ込みを考慮し、実際の計算値より大き目に設定

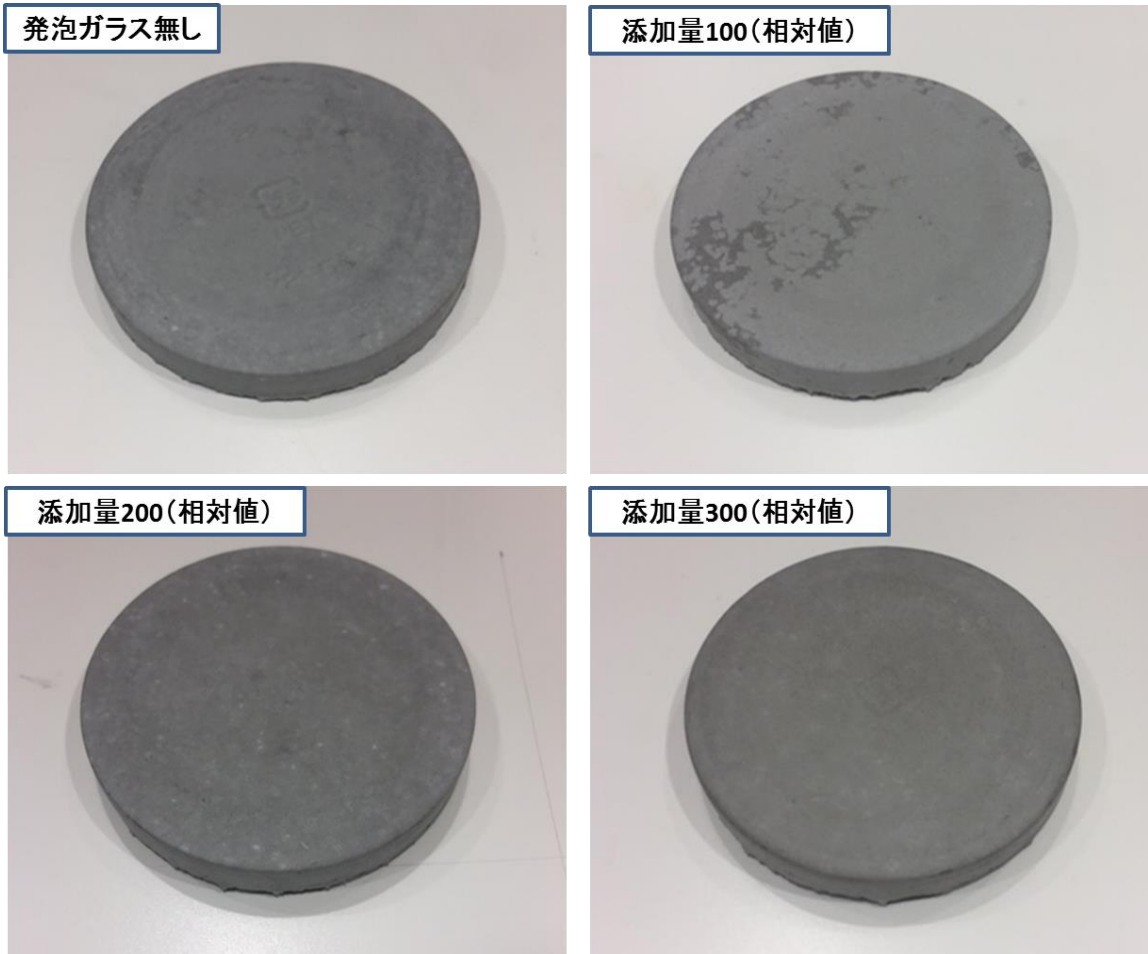


図 5-14 : 発泡ガラス添加モルタル材の外観

### 5.3.6. 発泡ガラス粉体の粒径拡大による軽量効果検証

発泡ガラス粉体の粒径については5.3.3.で述べたように、粉碎サイズが小さくなる課題があるが、粉碎サイズを大きくすればモルタル比重が小さくなるかどうか検証した。

#### 【実施内容】

粒径 600  $\mu\text{m}$  以下の発泡ガラス粉体をさらに篩い分けし、250  $\mu\text{m}$  以下を除去した発泡ガラス粉体 (250~600  $\mu\text{m}$ ) をモルタル材量に添加し、プレスを行わずにモルタル試験片を作製した。製作したモルタル試験片の絶乾比重を測定し、発泡ガラスの粒径を大きくすることで軽量効果が向上するか検証した。

#### 【製造条件】

- ・ガラス原料サイズ：100  $\mu\text{m}$  以下
- ・発泡剤種類：炭酸カルシウム
- ・発泡剤配合比：炭酸カルシウム：3.5wt/%
- ・加熱ピーク温度：850 $^{\circ}\text{C}$
- ・加熱ピーク保持時間：10分
- ・破砕条件：4200ppm 10秒
- ・発泡ガラス粉体サイズ：250~600  $\mu\text{m}$
- ・モルタルへの発泡ガラス添加量：200 (相対値)

モルタル試験片の製造は市販のモルタル材に水、上記の発泡ガラス粉体を加え、混練後、自然硬化させ製造した。

#### 【評価項目】

- ・絶乾比重

#### 【評価結果】

発泡ガラス粉体の粒径を変えて作製したモルタル材について、絶乾比重の測定を行った、測定結果を表5-9に示す。比較対象は5.3.4.で製造した発泡ガラスを入れていないblankサンプルと粒径600  $\mu\text{m}$  以下の発泡ガラスを200 (相対値) 添加したサンプルとした。

結果、発泡ガラス粒径250~600  $\mu\text{m}$  を添加したモルタル材の絶乾比重は1.52g/cm<sup>3</sup> となり、blankサンプルに対し27%、発泡ガラス粒径600  $\mu\text{m}$  以下添加サンプルに対し9.5%軽くなる結果となった。この結果により、粒径を大きくすることで嵩密度は低下し、それに伴い、モルタル比重も軽くできることが分かった。



表 5-9：発泡ガラスの粒径を変えたモルタル材の絶乾比重測定結果

		測定値			期待値※	
発泡ガラス 添加条件	粒径 ( $\mu\text{m}$ )	—	~600	250 ~600	~600	250 ~600
	嵩密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	—	0.38	0.31	0.38	0.31
	添加量 (相対値)	0	200			
モルタル 絶乾比重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2.09	1.68	1.52	1.73	1.66

※絶乾比重の期待値はプレス工程や気泡への外壁ベース材の流れ込みを考慮し、実際の計算値より大き目に設定

#### 5.4. 課題・今後の取組み

表 5-10 に課題と今後の取組みについてまとめた。粉砕した発泡ガラスを外壁の軽量骨材として使用する場合、発泡ガラスの強度アップと軽量化が課題で、今後、その両立に向けた取組みを行っていく。

そのために、原料となる太陽電池のガラスへ、発泡剤としてドロマイトを添加する発泡プロセスの最適化を行っていく。ガラス粘性と発泡温度の関係を踏まえ、気泡が繋がる現象を抑制するとともに、気泡の微細化による気泡の独立性向上を狙っていく。具体的には、焼成温度の低減（現状：850℃→830℃など）、加熱時間の短縮（現状：10分→7分など）等を検討していく。

なお、研究論文でも、発泡剤としてドロマイトを使用することによる、発泡ガラスの気泡微細化の事例が記載されている。図 5-15 は、東京都立産業技術研究センター研究報告、第 4 号、2009 年の「廃ガラス発泡体のリン酸吸着性能の改良とその特性」から引用した、各種ガラス発泡体の細孔径分布を示す図である。図 5-15 において、1 点鎖線が炭酸カルシウム、点線がドロマイト、実線がドロマイト+炭酸ナトリウムである。

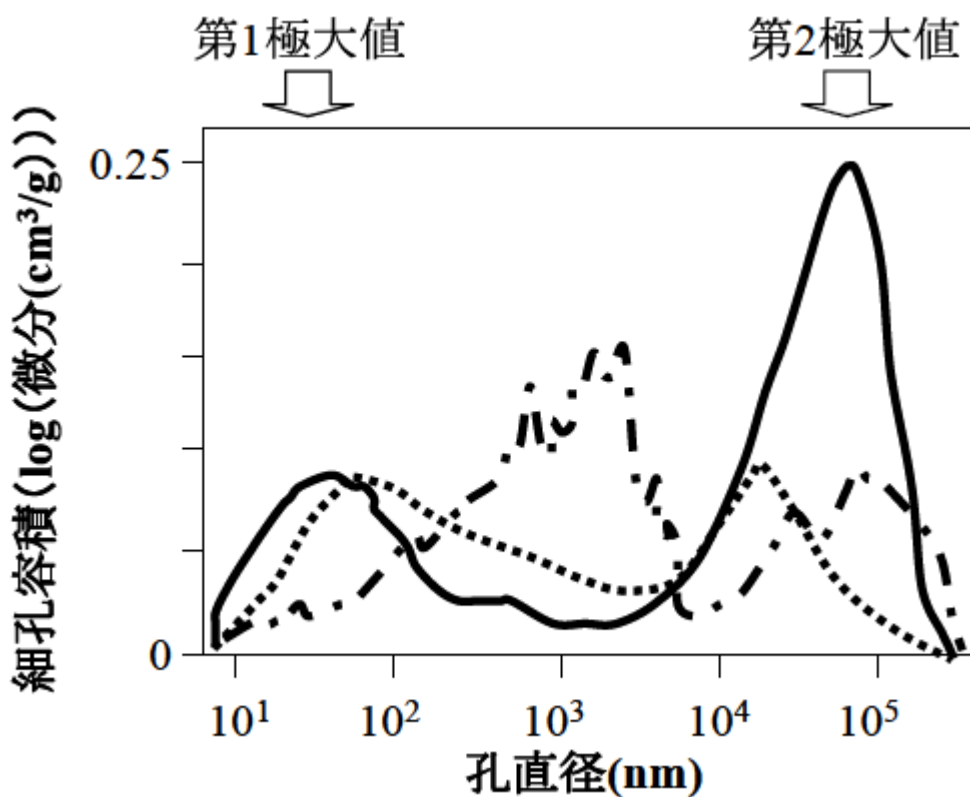


図 5-15：各種ガラス発泡体の細孔径分布

我々は、ガラス軟化温度 730℃に対し、発泡温度が 620～790℃である炭酸カルシウムより、20℃ほど発泡温度が低いドロマイト（発泡温度：600～770℃）を用いることで、ガラス粘性が高い状態の発泡により、気泡が繋がる現象の抑制や気泡の微細化が、期待できると考えている。一方で図 5-15 では、炭酸カルシウムより、ドロマイトの方が孔直径は小さい傾向にある。図 5-15 で引用した文献に記載されている発泡ガラスと、本実証における外壁材用の発泡ガラスとは用途が異なるので、一概には言えないが、技術的な方向性としては、矛盾はしていないと考える。

なお 5.3.5. で述べたように、外壁の比重が軽くならなかったのはプレス工程での発泡ガラス潰れが主原因だと推察されている。プレス成型の外壁に使用する場合は、プレス圧を小さくする方法も考えられるが、発泡ガラスとしては気泡を微細化し、気泡の独立性を高める構造を作っていくことが有効であると考ええる。気泡の壁の密度を増やし強度を上げる一方で、気泡内への外壁ベース材の流入を防ぐ効果が期待できる。図 5-16 に 1 次検証で製造した発泡ガラスの SEM 写真を示す。この写真を見る限り、定性的ではあるが、発泡ガラスの気泡の壁が薄くなっており、壁が割れて気泡の独立性が失われている部分が多く見受けられる。発泡ガラスの強度を上げ、かつ、気泡内への外壁ベース材の流入を防ぐためには、壁を厚くし、かつ、壁の割れを少なくするような、独立気泡化と壁の密度増加の改善が有効と考えられる。しかし、壁が厚くなりすぎることによって、比重が重くなる可能性も否定できないため、微細気泡化による軽量化も必要となる。

また、5.3.6. で述べたように、発泡ガラス粉体の粒径を大きくすることで嵩密度及びモルタル添加後の比重も小さくなることが確認されたことから、発泡ガラスの粒径を必要以上に小さくすることの無い破砕プロセスの改善が必要である。篩いながら粉砕できる設備への変更などにより、過破砕を防止していくような取組みも、重要であると考えている。

表 5-10：発泡ガラスの外壁利用についての課題と今後の取組み

課題	改善の方向性	今後の取組み
強度アップ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・独立気泡化</li> <li>・壁の密度増加</li> </ul>	<b>発泡剤の変更(ドロマイト)による 発泡温度低減、加熱時間短縮</b> ⇒ガラス粘性が高い状態の発泡により、 気泡を微細化させ、気泡の繋がり防止(独立気泡) 及び壁の密度増加
軽量化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気泡微細化</li> <li>・粒径拡大</li> </ul>	
		<b>篩ながらの粉砕(過破砕防止)</b>

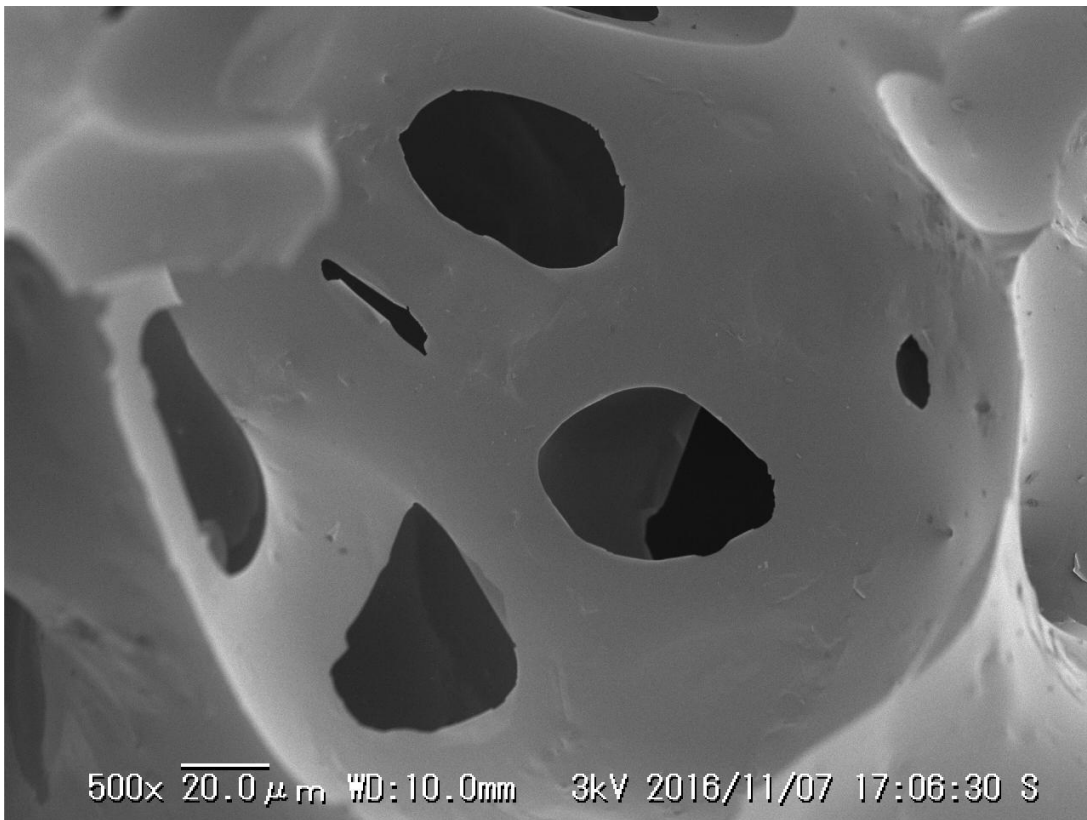
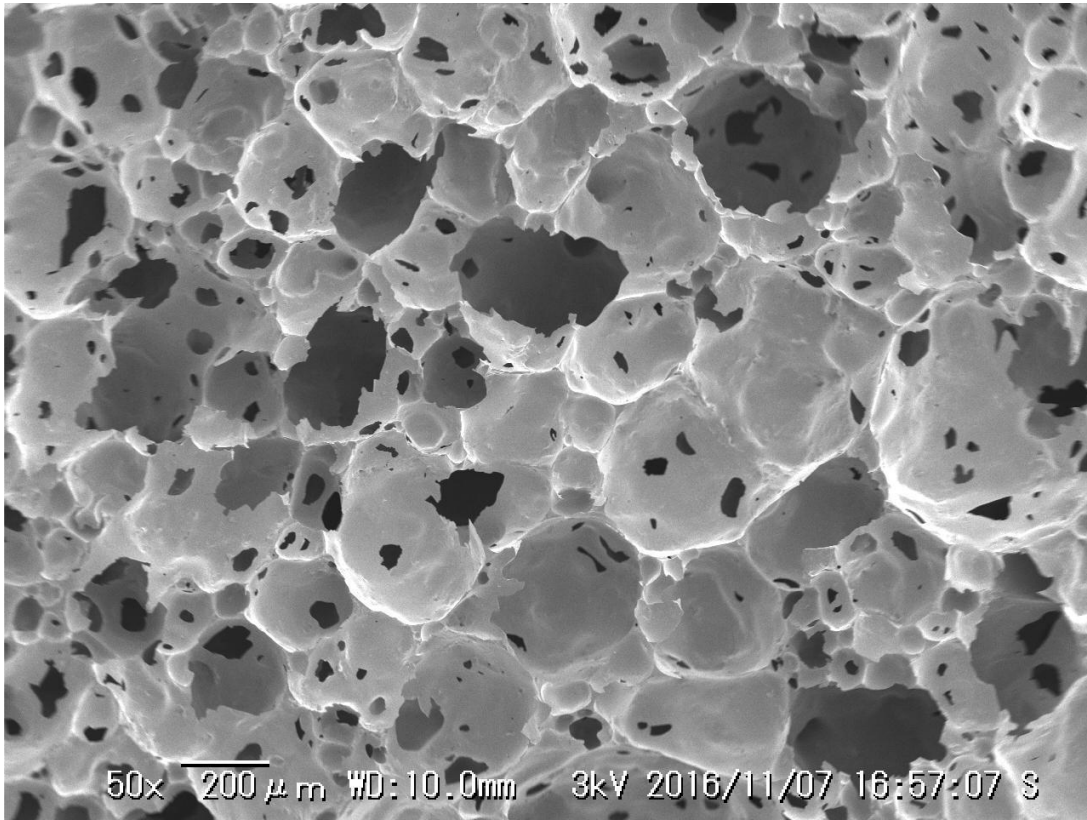


図 5-16：発泡ガラス SEM 観察写真

## 6. CO2 削減効果の算出

本事業で実証した工程と現状の肯定で CO2 排出量を算出した。本事業における算出した各評価範囲の CO2 排出量を図 6-1 に示す。図 6-1 は図 2-1 で示した本事業の評価範囲の図に CO2 排出量の数値を記す形としている。図 6-1 に示す通り、「A: 解体工程の省エネ化」「B:封止樹脂の資源化」「C:ガラス再生量の拡大」について、CO2 排出量を算出している。「C:ガラス再生量の拡大」については、路盤材製造と発泡ガラス製造にわけて、算出を行っている。また図 6-1 に示す通り、本事業での CO2 排出量の単位重量は、アルミ枠と端子 BOX を含まない太陽電池パネルを基準としている。

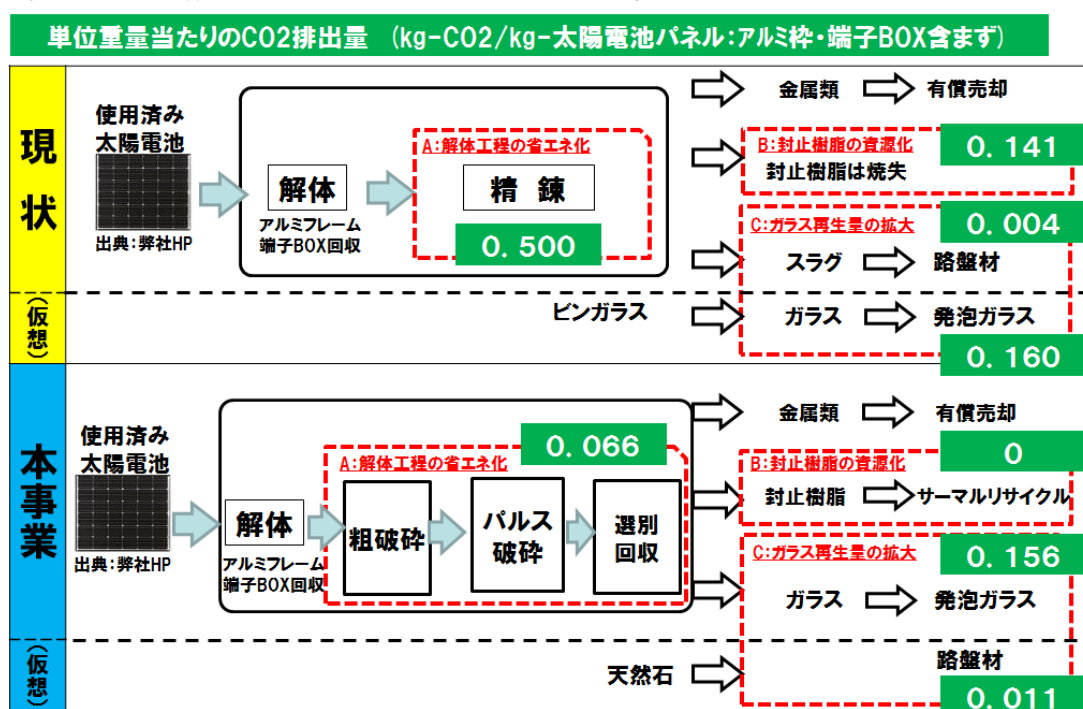


図 6-1 : 本事業における各評価範囲の CO2 排出量

なお、各評価範囲の工程概要を表 6-1 に示す。表 6-1 に示す工程については、  
2. 評価範囲の検討 2.1. 概要でも記載しており、詳細の説明を省略する。

表 6-1：各評価範囲の工程概要

	A:解体工程の省エネ化	B:封止樹脂の資源化	C:ガラス再生量の拡大	
			路盤材製造	発泡ガラス製造
現状	精錬しガラスはスラグへ (フロートガラス溶融によりスラグ化するプロセスでCO2排出量を導出)	封止樹脂が焼失	スラグを 破砕して路盤材へ	ビンガラスを破砕、微粒子化、 加熱して発泡ガラスへ
本事業	粗破砕、パルス破砕し、ふるいで 選別回収	封止樹脂をサーマル リサイクル化	自然石を採石し、 破砕して路盤材へ	破砕済みガラスを微粒子化、 加熱して発泡ガラスへ

各工程の CO2 排出量の算出根拠を表 6-2 に示す。

表 6-2：各工程の CO2 排出量の導出根拠

		導出根拠・出典	
A： 解体工程の 省エネ化	現状	フロートガラス熔融によりスラグ化するプロセスの CO2 排出量として、以下の出典に記載がある「フロートガラス 1 トンあたりの CO2 排出量約 0.5 トン」より導出 ・出典：日本板硝子ホームページ「ガラス製造工程と CO2 内包量」 <a href="http://www.nsg.co.jp/ja-jp/sustainability/glassandclimatechange/embodiedc02infoatglasiedc02infoatfloatglass">http://www.nsg.co.jp/ja-jp/sustainability/glassandclimatechange/embodiedc02infoatglasiedc02infoatfloatglass</a>	
	本事業	「4.2. 解体工程の消費電力」に記載の数値	
B： 封止樹脂の 資源化	現状	封止樹脂の 1 kg の発熱量÷重油 1 リットルの発熱量×EVA・バックシートの元重量 ÷太陽電池パネル重量×EVA・バックシートの回収率×サーマルリサイクル有効分 ×重油の CO2 排出原単位で導出 ・詳細は、表 6-3 封止樹脂の資源化に関する各項目の CO2 排出量の導出根拠を参照	
	本事業	0 とする	
C： ガラス 再生量 拡大	路盤材 製造	現状	弊社調査に基づき、スラグ破砕の CO2 排出量を 0.004 kg-CO2/kg と導出 ・現状のスラグ破砕と本事業の自然石破砕の CO2 排出量は同等と評価
		本事業	採石の CO2 排出量+自然石破砕の CO2 排出量で導出 ・採石の CO2 排出量は 0.0068kg-CO2/kg (出典：カーボンフットプリント制度試行事業 CO2 換算量共通原単位データベース 4.0) ・自然石破砕の CO2 排出量は 0.004 kg-CO2/kg (弊社調査に基づき必要な電力量を導出)
	発泡 ガラス 製造	現状	ガラス破砕の CO2 排出量+微粒子化・加熱・粉砕の CO2 排出量で導出 ・ガラス破砕の CO2 排出量は 0.004 kg-CO2/kg (弊社調査に基づき必要な電力量を導出) ・微粒子化・加熱・粉砕の CO2 排出量は 0.156 kg-CO2/kg (弊社調査に基づき必要な電力量を導出)
		本事業	弊社調査に基づきガラス微粒子化・加熱・粉砕の CO2 排出量を 0.156 kg-CO2/kg と導出 ・現状と本事業でガラス微粒子化・加熱・粉砕の CO2 排出量は同等と評価

また、表 6-2 内の封止樹脂の資源化に関する各項目の CO2 排出量の導出根拠を表 6-3 に示す。

表 6-3 : 封止樹脂の資源化に関する各項目の CO2 排出量の導出根拠

項目	数値	単位	導出根拠・出典
封止樹脂の 1 k g の発熱量	8222	kcal/kg	弊社調査による樹脂 1 0 種類の発熱量平均
重油 1 リットルの発熱量	9310	kcal/l	環境省 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度の A 重油の値使用
EVA・バックシートの元重量	1.73	kg	図 4-1 : 解体工程フローとマテリアルバランスに記載の数値
パネル重量	11.76	kg	
EVA・バックシートの回収率	80	%	
サーマルリサイクル有効分	50	%	弊社調査に基づき導出
重油の CO2 排出原単位	2.71	kg-CO2/l - 原油	環境省 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度 A 重油の値使用

図 6-1 に示した CO2 排出量に基づき、本事業の CO2 削減効果を算出しており、表 6-4 に示す。

表 6-4 : 本事業の CO2 削減効果

単位: kg-CO2/kg-太陽電池パネル

		A:解体工程の省エネ化	B:封止樹脂の資源化	C:ガラス再生量の拡大		合計
				路盤材製造	発泡ガラス製造	
CO2排出量	現状	0.500	0.141	0.004	0.160	0.805
	本事業	0.066	0	0.011	0.156	0.233
CO2削減量		0.434	0.141	-0.007	0.004	0.572
				-0.003		

また、各工程の CO2 削減のポイントを表 6-5 に示す。

表 6-5 : 各工程の CO2 削減のポイント

A:解体工程の省エネ化	B:封止樹脂の資源化	C:ガラス再生量の拡大	
		路盤材製造	発泡ガラス製造
破碎の省エネ化で、精錬より CO2 排出量の削減が可能	非加熱で樹脂が消失しないためサーマルリサイクル可能	破碎の CO2 排出は現状も本事業も同等、自然石の採石分 CO2 排出が多い	微粒子化・加熱の CO2 排出は現状も本事業も同等、破碎の CO2 排出分の CO2 排出削減可能

本事業による、CO2削減量は、0.572kg-CO2/kg-太陽電池パネル、という結果であった。これは精錬をメインとする従来方法と比較して60%強の削減という結果であり大幅な削減が期待できる結果となった。

主な削減要因として表6-4に示すように、解体工程での削減が大きく貢献している。また、従来工法では回収できなかった、封止樹脂、EVAといった樹脂を回収してサーマルリサイクルすることで得られる熱量が全て、従来工法に対してCO2削減量に加えられることも全体としてCO2削減に貢献していると言える。本事業では従来工程として精錬メインとしたリサイクルフローとして実証を進めたが、一方、本事業で用いたパルス破砕機以外の力学的破砕機（例えば、ハンマークラッシャーなど）との比較を考えた場合、パルス破砕機の生産性（処理速度）の観点から優位性の検証が今後の課題として認識しており、継続検討を行う予定である。ただし、従来の力学的破砕機の場合、生産性は非常に優れているが、破砕物の篩選別が困難であり、破砕の後工程での選別回収が困難である。破砕後に篩選別にて回収するためには、ある程度、細かい粒度まで破砕を行った場合、ガラス、Ag、Cuなど金属材料の過破砕による微粉化が原因となり回収物の歩留まり低下が懸念されると考える。パルス破砕では、破砕物の単品分離が可能であり、封止樹脂、バックシート、リード線は大きなサイズで分離できるため、破砕の後工程として篩選別の適用が可能である。表6-6に、以上で述べたパルス破砕と力学的破砕の比較について、まとめている。

表6-6：解体工程でのパルス破砕と力学的破砕の比較

比較項目	パルス破砕	力学的破砕
単品分離	可能	困難
破砕物の篩選別	可能 (素材毎に単品分離されるため) ※封止樹脂・バックシート・リード線は大きなサイズで分離可能	困難 (素材毎に単品分離されないため) ※太陽電池パネルは、基本として、素材と関係無く、同一サイズに破砕されるため、素材を分離するには、微粉レベルにまで破砕する必要があり、篩選別が困難
生産性 (処理速度)	8枚/hr (弊社開発目標)	100~150枚/hrは可能だが 後工程での選別回収が困難(歩留低下も懸念)



## 7. まとめ

### 【効果まとめ】

- ◆解体工程（粗破碎、パルス破碎、選別回収）
  - ・破碎の省エネ化で、精錬よりガラス分離の CO2 排出量を削減可能
  - ・非加熱処理のため、封止樹脂の資源化可能
- ◆ガラス再生工程
  - ・発泡ガラスの外壁材添加検証では、重大な悪影響は認められない
  - ・発泡プロセスと軽量化の関係を検証、今後の改善指針を導出

### 【経済合理性】

本事業の実証工程フローの設備償却費（新規投資）/原動費/人件費、等から図 7-1 の通り、経済合理性を試算した。

#### ◆解体工程(粗破碎、パルス破碎、選別回収)

(試算条件)	処理量 330トン/年(28000枚) 8枚/hr	処理費収入 1500円※/枚(排出者より徴収)
--------	---------------------------	-------------------------

※システム価格の5%が処理費として売電価格に含まれると想定(FIT制度)

(試算結果)	処理による収益	675万円/年 (ランニングコストに設備償却含む)
	回収資源売却益	1400万円/年 (回収資源売却益 500円/枚)

#### ◆ガラス再生工程(微粒子化、加熱)

(試算条件)	生産量 1500トン/年	購入材料費(ガラス・添加剤) 1.9円/kg
--------	--------------	------------------------

(試算結果)	発泡ガラス製造コスト	32.1円/kg (運送費含まず)
	本事業で創出される利益	①破碎工程削減 150万円/年(パルス破碎使用のため) ②原動費削減 300万円/年(低温加熱等の工法開発)

図 7-1：経済合理性の試算結果

解体工程とガラス再生工程では、事業形態が異なるため、試算の形態も変えている。図 7-1 にて解体工程の経済合理性について説明する。使用済みの太陽電池パネルは、産業廃棄物であるため排出者より処理費用の徴収が可能であること。処理費用については、FIT 制度によりシステム価格の 5%が処理費用として売電価格に含まれていることを前提条件として試算した。

また、使用済み太陽電池パネルが解体業者により取り外され解体を行うリサイクル工場へ運搬されるまでは試算範囲に含まず、リサイクル工場にて解体・選別までを試算範囲としている。

解体工程の処理量は設備の処理能力を 8 枚/hr、稼働時間は 12hr/日、年間稼働日 292 日と設定した。この稼働により、年間 28000 枚の処理が可能である。設備の稼働に伴うランニングコストとして、電気代、人件費、パルス破碎処理

設備からの廃水処理費、水道代、そして設備の償却費（償却年数5年）を含んで試算している。また、排出者より徴収する処理費から1500円/枚を解体費用として割り当てて試算した。

これらの前提条件により、使用済み太陽電池パネルを解体処理することにより、 $28000 \text{ 枚} \times 1500 \text{ 円} = 4200 \text{ 万円/年}$ が、解体を行うリサイクル工場の収入となる。ここからランニングコストを差し引いた結果、675万円/年がリサイクル工場の収益となる試算である。また、資源価格の変動により金額が変動するため本試算には解体・選別により回収される資源の売却による収益は含んでいない。参考までに、現在の資源価格をベースにした試算（500円/枚）では、1400万円/年の収益となる試算である。

今後、使用済み太陽電池パネルの排出量の増大に伴い、排出者より徴収される処理費用の引き下げを想定すると、解体工程の効率化や回収資源の歩留まりアップによる処理の効率化が一層、課題になると考える。

ガラス再生工程は、本事業で創出される利益として、まずパルス破碎装置を使用するため、図7-1の条件では、破碎工程のコスト削減が150万円/年が可能である。この効果は、既に発泡ガラスの製造コストに織り込み済みである。また、本事業の実証により、従来の発泡ガラス製造より、低温短時間加熱が必要との方向性が明確となった。低温加熱等の工法を開発することで、現状の工程より、加熱に必要な原動費（加熱炉の燃料費もしくは電気代）については、300万円/年程度の削減が見込まれる。

【今後の予定と事業化検討】

今後の日程について案を図 7-2 に示す。図 7-2 は本事業の着手時点で目論んでいた日程となっている。まず解体工程では、パルス破碎装置の放電部や連続処理部の改善など、量産を見据えた生産性向上を検討する。ガラス再生工程では、発泡ガラス工法を最適化するとともに、他材料（タイル等）への再利用についても並行して検討していく。

破碎工程としては、生産性向上、信頼性向上に取り組んだ後、設備を導入して、社内プラントでの量産を目論んでいく。パルス破碎装置については、将来的には他社販売も検討している。

ガラス再生工程としては、基本工法開発が終了した後に、信頼性や省エネ化を向上させ、ガラス再生材を用いた社内製品製造を目論んでいく。

事業化日程のさらなる前倒しについては、廃棄済みの太陽電池の処理だけでなく、工程内不良再生や、廃家電ガラスリサイクルへの応用も含めて、検討していく。

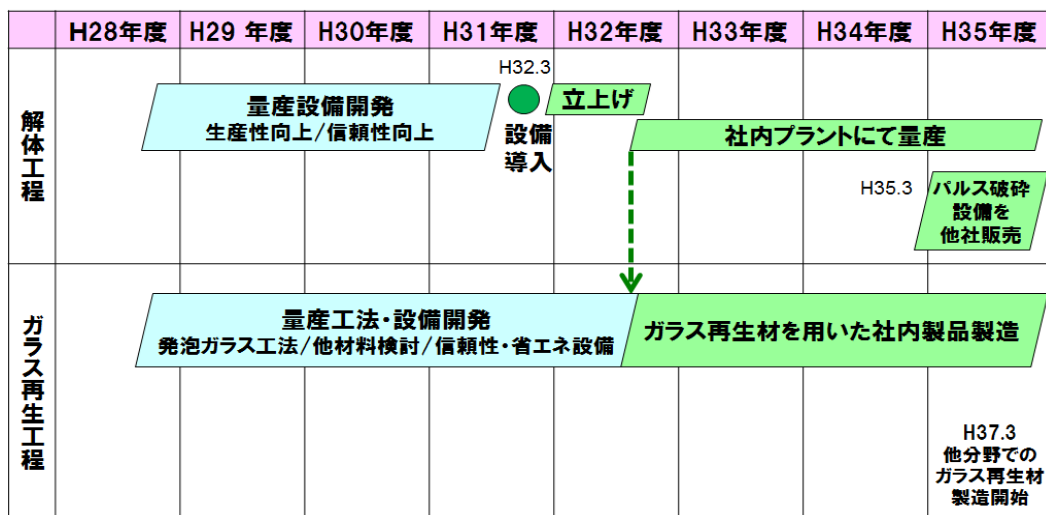


図 7-2：今後の予定と事業課検討の日程案経

## 8. 資料編

### 8.1 太陽電池パネル破砕物の組成分析

本実証で用いた太陽電池パネルをパルス破砕した破砕物の蛍光 X 線分析の結果を表 8-1 に示す。

表 8-1：パルス破砕による破砕物の組成

		破砕物 0.3mm 未満	破砕物 0.3~0.5mm	破砕物 0.5mm~5.6 mm	ガラス	計量方法
SiO <sub>2</sub>	Mass%	84.2	81.2	78.7	78.6	
Na <sub>2</sub> O	Mass%	7.05	8.69	10.6	10.7	
CaO	Mass%	4.58	6.29	4.05	4.32	
MgO	Mass%	1.92	2.36	3.49	3.47	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mass%	0.96	-	1.33	1.35	
C	Mass%	0.62	0.81	1.00	0.908	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mass%	0.17	0.14	0.11	0.07	
Ag <sub>2</sub> O	Mass%	0.16	0.09	-	-	
SO <sub>3</sub>	Mass%	0.14	0.17	0.22	0.22	
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mass%	0.12	0.17	0.30	0.28	
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mass%	0.03	0.02	-	-	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mass%	0.03	0.04	0.04	-	
NiO	Mass%	0.01	0.02	0.01	<0.01	
Cl	Mass%	<0.01	0.01	0.02	0.03	
CuO	Mass%	<0.01	-	-	-	
ZrO <sub>2</sub>	Mass%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
K <sub>2</sub> O	Mass%	<0.01	<0.01	0.03	0.03	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mass%	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	
SrO	Mass%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mass%	<0.01	<0.01	<0.01	-	
ZnO	Mass%	-	-	-	<0.01	
T-Hg	mg/kg・dry	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	JIS K 0102(2013) 66.1.1
Cr <sup>6+</sup>	mg/kg・dry	<1	<1	<1	1	JIS K 0102(2013) 65.2.1

それでは、表 8-1 の組成分析の結果について説明する。まず、破碎の条件は、以下の通りである。

**【破碎条件】**

- ・使用パネル：HIT224 $\alpha$  (Panasonic 製) 50mm×50mm
- ・放電条件：放電電圧 140kV  
放電回数 20回

上記の条件にてパルス破碎を行い、篩選別を行った結果、0.3mm 以下と 0.3mm～0.5mm の破碎サイズに、銀、インジウムが検出された。検出された物質の中で、上位を占める SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO は、ガラスに含まれる添加剤などに含まれている。また、太陽電池パネルの構成部品である、Si ウエハについては、組成がガラスと同じであることから蛍光 X 線分析で区別できないため、SiO<sub>2</sub> に含まれた形で検出されている。

本実証においてガラスの回収量は、0.3mm～5.6mm の範囲の破碎物をガラス回収量として計算を行い、0.3mm 以下の破碎物については残渣という扱いで精錬工程にてリサイクルすることとして検討を進めたが、組成分析の結果では、0.3mm～0.5mm の破碎物には、少量の Si ウエハが混ざっており、銀、インジウムが含まれていると考えられる。経済合理性の観点から考えると、0.3mm～0.5mm の破碎物は、さらに篩を用いて分離することが有効であると考ええる。Si ウエハは厚みが薄いため、スリットのメッシュを用いることで、ガラスとの分離が可能であると考ええる。

また、今回の分析ではパルス破碎したガラスの純度を知るために、実際にパルス破碎した太陽電池パネルとは別に、ガラスだけの組成分析を行っている。回収ガラスの大半の重量を占める、0.5mm～5.6mm の破碎物の組成とガラス単体の組成分析の結果を見ると、含有する元素やその配合比率はほとんど同じであることが判る。これは、パルス破碎により回収されたガラスに不純物が少なく高純度な状態で回収されたことを意味する。