使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化による環境負荷削減効果

ENVIRONMENTAL LOAD REDUCTION EFFECT
BY RECYCLING USED PHOTOVOLTAIC GENERATION PANEL GLASS湯 浅 和 博^{*}, 鶴 崎 敬 大^{**}, 山 崎 成^{***}*Kazuhiro YUASA, Takahiro TSURUSAKI and Sei YAMASAKI*

Considering future's enormous volume disposal of photovoltaic generation panels, it's an urgent problem to find recycling method of that. This research estimates CO₂ reduction effect by the recycling of photovoltaic generation panels through the inventory analysis. In order to considerate more efficient recycling method, it was analyzed targeted for several kinds of recycled products such as ceramic tile, block, and soundproof panel. Results showed that CO₂ reduction effect was confirmed about all targeted recycling products. In particular, the environmental load reduction effect by the recycling to the ceramic tile was remarkable.

Keywords : Photovoltaic Panel, Recycling, Glass, Inventory Analysis, Reducing CO₂ Emissions太陽光発電パネル, 再資源化, ガラス, インベントリ分析, CO₂削減

1. はじめに

近年、環境への配慮や固定価格買取制度などを背景に太陽光発電の導入が家庭用、産業用ともに増大傾向にあるが、将来的な太陽光発電パネル（以下 PV パネル）の大量廃棄が懸念されている。平成28年3月、環境省により太陽光発電設備のリサイクルに関するガイドライン¹⁾が発表され、使用済み PV パネルについても今後、再資源化に向けた動きが高まっていくと考えられる。PV パネルの廃棄量はその寿命を25年とした場合、2040年には80万tに達するという試算がなされているが²⁾、この廃棄量は現在の日本全体の最終処分量の6%に相当し、今後の最終処分場への負荷を考慮すると、その影響は甚大である。また、PV パネルのリサイクルと同時にリユースに関しても検討がなされているが、流通量は現在極めて少ない²⁾。

PV パネルのリサイクルに関しては岡島ら³⁾によって、太陽電池セル部分の再資源化に関する検討がなされており、従来の製造法と比較して投入エネルギー、CO₂抑制効果が得られることを明らかにしている。しかし、PV パネルの主要構成材料は重量比で50%以上を占める表面保護を目的としたカバーガラスであり、廃棄物の減容化という視点からはこれらの処理についても検討する必要がある。

PV パネルに用いられるガラスは製品の性質上、総じて高い透過性と耐久性が要求され、一般的な製品と比較して品質的に優れている。これらをリサイクル原料として利用することは加工二次製品の品質を担保する上で有効である。ガラスのリサイクルに関して、醍醐ら

^{4) 5)} は、びん、ガラス繊維、建築用および廃自動車⁶⁾の板ガラスの再資源化に関する評価を行っており、その環境性について言及している。清家ら⁶⁾は板ガラス等の建材に対して他産業を含めたマテリアルフローに基づいた再資源化評価を行っている。茂呂ら⁷⁾もアンケート調査に基づく、リサイクル資材製造時の環境負荷原単位の整備を実施しており、一部、廃ガラスを原料とした製品についても製造時の環境負荷原単位を算定している。

以上のように、廃ガラスの再資源化を行うことで環境負荷削減効果が得られることは定性的には言及され、PV パネルを対象とした再資源化の実証試験が進みつつあるが、将来の普及促進に向けて定量的な効果を明らかにすることが求められている。本研究では国内のガラスを対象とした再資源化製品を取り扱う業者を対象にヒアリング調査を実施し、実際の処理工程を考慮した PV パネルのガラスを再資源化した際の環境負荷削減効果について、インベントリ分析を用いて評価することを目的とした。

なお、本論文は2016年度日本建築学会大会学術講演^{15) 16)}において発表した内容に新たな分析結果を加え、作成したものである。

2. インベントリ分析に関する前提条件

2.1 インベントリデータの収集

分析に必要なインベントリデータの収集を目的に国内の PV パネル処理業者、ガラス再資源化製品の製造メーカーなどを対象に

^{*} 東京工業大学環境・社会理工学院 准教授・工博

^{**} 東京工業大学大学院理工学研究科 博士課程
(株住環境計画研究所)

^{***} 東京工業大学大学院理工学研究科 修士課程
(現在 (株)竹中工務店)

Assoc. Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.
Grad. Student, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
(Jyukankyo Research Institute Inc.)
Grad. Student, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
(Currently, Takenaka Corporation)

ヒアリング調査を実施した。調査概要を表1に示す。調査項目はPVパネルの中間処理や再資源化製品製造の処理工程、加工機器仕様、燃料消費量などである。また、使用済みPVパネルの中間処理業者からはPVパネル（本研究では単結晶系、多結晶系、アルミナ薄膜系、ソーダ石灰薄膜系、化合物系の5種類）の材料構成比と有価金属含有量についても回答を得た。なお、本研究で評価対象とするガラス再資源化製品はガラス使用率の違いを考慮して、タイル、ブロック、防音パネルの3種類の建材^{注1)}とした。

2.2 製品製造工程と評価方法

図1にヒアリング調査を基に設定したインベントリ分析に必要な製品製造工程を示す。工程Cは今回の主な評価範囲となるPVパネルをタイルへと再資源化する際の加工工程であり、集積したPVパネルからアルミフレームを取り除き、カバーガラスを破碎することでガラスカレットを回収、タイルの原料として利用する工程である。一方、工程Aは現状の最も単純なリサイクル方法である、PVパネルを破碎した後に製煉処理により熔融スラグ化、路盤材として活用する工程である。また、本検討では比較対象間の最終製品量を揃えた評価を行うため、工程Cと同量のタイルを天然原料から製造する工程B、工程Aと同量の路盤材を天然原料から製造する工程Dを設定した。現状工程[A+B]と提案工程[C+D]のCO₂排出量の比較を行うことでPVパネルをタイルへと再資源化した際の環境負荷削減効果を確認する。なお、分析に関してはPVパネル1tを処理した場合を想定したCO₂排出量（本報では[kgCO₂/t]と表記）を算定する。

タイルの製造工程である工程Bは原料が天然原料、工程Cは原料がガラスカレットであるが、ヒアリング調査により、其々の工程におけるタイル焼成プロセスにおいて燃料消費量に違いが生じるという回答を得た。表2にタイル焼成時の燃料消費量を示す。タイルの原料にガラスカレットを用いることで天然原料から作られる一般的な磁器質タイルを製造するときに比べ、焼成プロセスでの炉内温度を1250℃から1100℃まで下げることが可能となったことで燃料使用量を約33%削減でき、CO₂削減効果を得られることが示唆された。ブロックと防音パネルへリサイクルする場合、図1の工程BとCをそれぞれ図2,3に示した工程に置き換え、算定した。なお、これら2つの製品の工程Bについては、天然原料から製品を作る場合のデータをヒアリング調査から得られなかったため、既に市場で流通しているガラスカレット（びん製品や建材由来のガラスから発生するもの）を原料とする工程を設定した。

表1 ヒアリング調査概要

調査対象	廃棄PVパネル加工業者（A社、B社）
	ガラスカレット加工業者（C社）
調査期間	ガラスリサイクル製品製造メーカー（D社、E社）
	2015年10月～11月
調査項目	処理工程
	・作業工程フローとそれに伴うマテリアルバランス
	・各工程における機器の処理量と稼働時間
	加工機器仕様
	・各工程における機器の定格出力
生産品仕様	・処理能力・機器平均出力率
	・時間平均燃料消費量（LPG、都市ガス、A重油等）
生産量	寸法、重量、面積等
	日間、もしくは月間生産能力
PVパネル構成比	・材料構成比
	・有価金属含有量

表2 ガラスカレット利用によるタイル焼成時の燃料消費量

	材料構成	焼成温度℃	タイル1㎡あたりのLPG使用量kg
既存磁器質タイル	長石：50、粘土50	1250	6.0
ガラスカレット使用時	カレット：50、粘土50	1100	4.0

2.3 PVパネルの材料構成比と最終製品量

表3にPVパネルの材料構成比とPVパネル1tをリサイクルした際に得られる製品の生産量を示す。ガラスの含有率は単結晶系（43.9

図1 製品製造工程（タイル製造時）

図2 製品製造工程（工程B）

図3 製品製造工程（工程C）

％）、CIGS 系（40.0％）、多結晶系（37.5％）、薄膜系（33.0％）の順に大きい。アルミフレームの構成比に関しては薄膜系が最も大きく（33.0％）、次いで単結晶系（20.0％）、多結晶系（16.3％）であった。CIGS 系 PV パネルに関しては、今回の調査対象企業がアルミフレームを含まないものを取り扱っていたため、構成比は 0％である。また、銀と銅は多結晶系 PV パネルにおいて比較的含有量が多く、CIGS 系において最も少ないという結果が得られた。なお、今回薄膜系 PV パネルはアルミナ系とソーダ石灰系の 2 種類を取り扱ったが、材料構成比について個別の結果が得られなかった（両パネルが混成したものの材料構成比を得た）ため、有価金属含有量においてのみ差がみられるものとし、ガラス、アルミフレームの量などについてはそれぞれ同値であると仮定して分析を行う。

PV パネルをリサイクルすることで得られる再資源化製品の最終製品量は、PV パネルのガラス含有量に比例する。例えば、PV パネル 1 t から得られるガラスは単結晶系パネルで 439kg、多結晶系パネルで 375kg であり、製造できるタイルは其々 788.4kg、675.0kg となる。最終製品量はガラス含有率の高い単結晶系 PV パネルで最大となり、タイルは 788.4kg /t'（ガラス使用率 56％）、ブロックは 4380.0kg/t'（同 10.0％）、防音パネルは 461.3kg/t'（同 95％）となった。

2.4 分析に用いた設定値

本研究では、各プロセスにおいて分析に必要な情報が上記の調査で捕捉しきれない場合には、表 4 に示した設定値を用いて分析を行った。輸送プロセスについてはヒアリング対象である実際の工場などの立地を参考に PV パネル処理業者への集積時には 100km、それ以外の輸送プロセスは 50km と距離を設定した^{注 2)}。

分析に必要な CO₂ 原単位に関しては文献等^{8,9)}を参考に設定するが、該当するプロセスの原単位が不明な場合には代替となる原単位（表 5）を用いて分析を行った。電力消費に関する CO₂ 原単位は電力事業者ごとにその値が公表されているが本研究では特定の電力事業者の値は用いず、環境省が公表する排出係数に関する代替値¹²⁾（0.579kgCO₂/kWh）を適用した。燃料消費に関しても同様な設定を行った（LPG:3.00kgCO₂/kg, A 重油:2.71kgCO₂/L）。

各プロセスにおける加工機器の仕様を表 6 に示す。機器の効率に関しては定格出力の値を参考に文献¹³⁾より値を推定し設定を行った。また、ここでの平均出力率とは定格出力に対して各機器がどれほどの負荷で稼働しているのかを示す値であり、各プロセスにおける時間平均の値をヒアリング調査を基に設定した。

3. インベントリ分析

3.1 各プロセスの算定結果

表 7～10 に工程別（A～D）の各プロセスにおける CO₂ 排出量と、その算定式を記載する。ここでは単結晶系 PV パネルをタイルへとリサイクルする場合の分析結果を示す。電力を使用するプロセスについては以下の基本式に基づいて電力消費量を算定した。

$$\text{電力消費量}[\text{kWh}] = \text{定格出力}[\text{kW}] \times \text{平均出力率}[-] \times (\text{処理量}[\text{kg}] / \text{処理能力}[\text{kg/h}]) / \text{効率}[-]$$

機器の稼働時間は式中の処理量/処理能力に該当するが、処理が一連のライン状で進行する部分（例：カテゴリ C の圧縮破碎～風力選別）では、機器の稼働時間は各プロセスで一定であるとし、工程上で上流側の機器の稼働時間に依存するものとして算定した。

表 3 PV パネルの材料構成比[重量%]と最終製品量[kg/t’]

		単結晶系	多結晶系	薄膜系 (アルミナ)	薄膜系 (ソーダ石灰)	CIGS系	
材料 構成 比 [%]	端子箱	1.54	1.88	3.30	3.30	0	
	アルミフレーム	20.0	16.3	33.0	33.0	0	
	バックシート	32.8	42.2	23.3	24.0	52.9	
	ガラス	43.9	37.5	33.0	33.0	40.0	
	銀	0.074	0.133	0.045	0.018	0.0036	
	銅	0.19	1.42	0.84	0.14	0.011	
	その他	1.5	0.5	6.5	6.5	7.1	
最終 製品 量 [kg/㎡]	セラミックタイル	788.4	675.0	593.5	593.5	720.0	
	ブロック	4380	3750	3297	3297	4000	
	防音パネル	461.3	394.9	347.2	347.2	421.3	
	共通	アルミ	182.0	147.9	300.0	300.0	0
		銅	5.80	19.02	16.87	9.88	0.11
		銀	0.74	1.33	0.45	0.18	0.04

注) 再資源化商品の種類に依らず、有価金属の最終製品量は同量。

表 4 分析に用いた設定値

プロセス	該当工程	内容	仮定値	単位
輸送	A, B, C, D	輸送距離（パネル処理業者への輸送時）	100	km
		輸送距離（上記以外の輸送時）	50	km
		輸送トラックの積載重量	4	t/台
		輸送トラックの積載率（パネル処理業者への輸送時）	100	%
		輸送トラックの積載率（上記以外の輸送時）	75	%
手解体	A, B	ジャンクションボックスに含まれるハーネス量（重量%）	50	%
乾式製錬	A	被溶解物のスラグ化時の重量（重量%）	100	%

表 5 原単位に関する設定値

プロセス	該当工程	内容	使用原単位	排出量	単位
輸送	A, C	PV パネル処理業者への輸送時 CO ₂ 排出量	トラック輸送(4t車: 積載率100%)の CO ₂ 排出量	0.185	kg-CO ₂ /tkm
	B, C	上記以外の輸送時の CO ₂ 排出量	トラック輸送(4t車: 積載率75%)の CO ₂ 排出量	0.234	kg-CO ₂ /tkm
乾式製錬 (スラグ化)	A	処理物1kg溶融時の CO ₂ 排出量	アルミスクラップ1kg溶融時の CO ₂ 排出量 ¹⁰⁾	0.287	kg-CO ₂ /kg
乾式製錬 (銀再生)	C	製錬処理により銀1kgを再生する際の CO ₂ 排出量	銅乾式製錬の際、併産される銀1kgあたりの CO ₂ 排出量 ¹¹⁾	14.8	kg-CO ₂ /kg

注) 輸送プロセスにおける使用原単位は表4に示した設定値を基に文献8より設定した。

表 6 機器仕様に関する設定値

該当工程		プロセス	定格出力 [kW]	平均出力率	効率 ¹⁴⁾	処理能力 [kg/h]
A (共通)		フレームはずし機	2.2	0.5	0.8	216
		ジョークラッシャー	7.5	0.5	0.85	5000
		フレームはずし機	2.2	0.5	0.8	216
C (共通)		圧縮破砕機 (集塵機含む)	21 (3.7)	0.7 (0.7)	0.9 (0.8)	500
		ベルトコンベア①	0.4	0.8	0.7	500
		振動ふるい機	1.5	0.8	0.8	500
		風力選別機	0.75	0.8	0.8	500
		湿式粉砕機	45	0.7	0.9	9000
タイル	B・C	ベルトコンベア①	12.4	0.9	0.8	2000
		高圧成型機 (集塵機含む)	59.7 (3.7)	0.8 (0.7)	0.9 (0.7)	1200
		ベルトコンベア②	14.3	0.9	0.85	1200
		焼成機	28.2	0.85	0.9	400
		搬送器	11.2	0.8	0.85	2600
		スプレードライヤー	75, 22, 15	0.8, 0.8, 0.8	0.9, 0.9, 0.85	8000
	B	ポンプ	11	0.8	0.85	9900 [L/h]
		攪拌機	7.5	0.8	0.85	9000 [L/h]
		スプレードライヤー	37, 5, 5, 7.5	0.8, 0.8, 0.8	0.9, 0.85, 0.85	2000
	C	ポンプ	5.5	0.8	0.8	1660 [L/h]
攪拌機		0.75	0.8	0.7	3900 [L/h]	
ブロック	B・C	調合機 (集塵機含む)	5.9 (3.7)	0.75 (0.7)	0.8 (0.8)	1600
		ベルトコンベア	4	0.8	0.8	1600
		振動成型機	26	0.82	0.85	1600
		焼成機	11.9	0.77	0.85	380
	C	ボールミル	75	0.8	0.9	450
			スプレードライヤー	37, 5, 5, 7.5	0.8, 0.8, 0.8	0.9, 0.85, 0.85
防音 パネル	B・C	混合機	0.4	0.8	0.7	80
		コンプレッサー (離型剤塗布)	5.5	0.8	0.8	148
		焼成機	3.7	0.8	0.8	148
		ハンドソー (寸法出し)	2.2	0.7	0.75	148
		ベルトサンダー (厚み出し)	2.2	0.7	0.75	148
		コンプレッサー (エアブロー)	15	0.8	0.85	148
	C	ボールミル	75	0.8	0.9	450
			ジョークラッシャー	7.5	0.5	0.85

注) スプレードライヤーは機器の構成上、電動機を3つ搭載している。

工程 A では排出量の合計は 324.5kgCO₂/t'となった。そのうち 224.6kg-CO₂ はスラグ化時の乾式製錬プロセスにおける排出量であり、工程全体のおよそ 7 割を占めた。次いで、大きかったのはアルミ再生プロセスにおける 58.0 kgCO₂/t'であった。工程 B では排出量の合計は 890.9 kgCO₂/t'となった。そのうち 626.2 kgCO₂/t'はタイル焼成プロセスでの LPG 利用による排出量であり、このプロセスで工程全体のおよそ 7 割を占めることが判明した。次いで、大きかったのはスプレードライヤープロセスにおける A 重油利用による排出量で 178.1 kgCO₂/t'であった。工程 C では排出量の合計は 808.6 kgCO₂/t'となった。そのうち 417.4 kgCO₂/t'はタイル焼成プロセスにおける LPG 利用による排出であるが、工程 B の同プロセスと比較すると、208.7 kgCO₂/t'の低減がなされている。これは、天然原料に替えてガラスカレットを用いたことによる燃料削減効果によるものである。また、PV パネルからガラスカレットを製造するまで（表 9 中、管理型埋立まで）の排出量の合計は 104.0kgCO₂/t'となり、工程 C の排出量の合計に対し、1 割程度の値に留まった。工程 D では排出量の合計は 5.8 kgCO₂/t'であり、全体への影響は小さい。

3.2 PV パネル種類、リサイクル製品別 CO₂ 削減効果

表 11 に PV パネル種類、再資源化製品ごとの工程別 CO₂ 排出量、

表 7 タイル製造時のプロセス別 CO₂ 排出量（工程 A）

工程	プロセス	入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO ₂ /t']
A	輸送	1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬	7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし	985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生	200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	破碎	785 785	0.021×785 [kgCO2/kg] [kg]	16.86
		785 782	0.287×782 [kgCO2/kg] [kg]	224.55
	乾式製錬	スラグ化	785 782	0.287×782 [kgCO2/kg] [kg]
		銅再生	785 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]
		銀再生	785 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]
	ジョークラッシャー	782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計			324.50

表 8 タイル製造時のプロセス別 CO₂ 排出量（工程 B）

工程	プロセス	入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO ₂ /t']
B	長石採取～製錬	438 438	0.0011×438 [kgCO2/kg] [kg]	0.48
	輸送	438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	1.71
	湿式粉砕	438 1314	0.579×45×0.7/0.9×1314/9000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	2.96
	ポンプ	1314 1314	0.579×11×0.8/0.85×864/9900 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.52
	攪拌	1314 1314	0.579×7.5×0.8/0.85×864/9000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.39
	スプレードライヤー	電力使用	1314 851.5	0.579×(75/0.9+22/0.9+15/0.85) ×0.8×1314/8000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [kW] [-] [kg] [kg/h]
		燃料使用	1314 851.5	2.71×400×1314/8000 [kgCO2/L] [L/h] [kg] [kg/h]
	ベルトコンベア	851.5 851.5	0.579×12.4×0.9/0.8×851.5/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.44
	輸送	851.5 851.5	0.234×1×50×(851.5/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	3.32
	高圧成型	成型機	851.5 851.5	0.579×59.7×0.8/0.9×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
		集塵機	851.5 851.5	0.579×3.7×0.7/0.8×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
	ベルトコンベア	851.5 851.5	0.579×14.3×0.8/0.85×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	5.53
	焼成	電力使用	851.5 788.4	0.579×28.2×0.85/0.9×851.5/400 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
		燃料使用	851.5 788.4	3.00×98.05×851.5/400 [kgCO2/kg] [kg/h] [kg] [kg/h]
	搬送	788.4 788.4	0.579×11.2×0.8/0.85×788.4/2600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.85
	合計			889.91

及び CO₂ 削減量を示す。タイルへの再資源化時には、310～442kgCO₂/t'の CO₂ 削減効果が得られた。最大となるのは CIGS 系 PV パネルを処理した場合であり、次いで単結晶系、多結晶系、薄膜系の順となった。本検討では、タイル焼成プロセスにおける CO₂ 排出量が大きい、薄膜系 PV パネルのようなガラス含有率の比較的小さいものは、焼成プロセスでの処理量が他の PV パネルより小さく、工程 B,C における CO₂ 排出量は他の PV パネルの場合より小さくなった。

ブロックと防音パネルへのリサイクル時に関しても、142～238kgCO₂/t'の CO₂ 削減効果が得られることが分かった。ブロックはガラス使用率が 10%と低いものであり、1 t の PV パネルから生産される製品の量はタイルと比較して大きくなる（表 3 を参照）。そのため、ブロック焼成プロセスでの処理量が増えることで CO₂ 排出量が大きくなり、タイル製造時に比べ工程 B と C の値が大きくなっている。逆に防音パネルに関してはガラス使用率が 95.2%と高く、焼成に化石燃料を用いないため工程 B と C の値は他の製品に比べ小さく

表 9 タイル製造時のプロセス別 CO₂ 排出量（工程 C）

工程	プロセス	入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO ₂ /t']
C	輸送	1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬	7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし	985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生	200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	圧縮破碎	破碎機	785 453.9	0.579×21×0.7/0.9×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
		集塵機	785 453.9	0.579×3.7×0.7/0.8×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
	乾式製錬	銅再生	346.6 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]
		銀再生	346.6 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]
	ベルトコンベア	453.9 453.9	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	振動ふるい	453.9 238.5	0.579×1.5×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	1.36
	ベルトコンベア	238.5 238.5	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	風力選別	238.5 223.1	0.579×0.75×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.68
	輸送	15.4 15.4	0.234×1×50×(15.4/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	0.059
	管理型埋立	15.4 -	0.038×15.4 [kgCO2/kg] [kg]	0.57
	輸送	438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	1.71
	湿式粉砕	438 1314	0.579×1×0.7/0.75×1314/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.42
	ポンプ	1314 1314	0.579×5.5×0.8/0.8×864/3900 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.71
	攪拌	1314 1314	0.579×0.75×0.8/0.8×864/1660 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.26
	スプレードライヤー	電力使用	1314 851.5	0.579×(37/0.9+5/0.85+17.5/0.85) ×0.8×1314/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [kW] [-] [kg] [kg/h]
		燃料使用	1314 851.5	2.71×110×1314/2000 [kgCO2/L] [L/h] [kg] [kg/h]
	ベルトコンベア	851.5 851.5	0.579×12.4×0.9/0.8×851.5/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.44
	輸送	851.5 851.5	0.234×1×50×(851.5/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	3.32
	高圧成型	成型機	851.5 851.5	0.579×59.7×0.8/0.9×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
		集塵機	851.5 851.5	0.579×3.7×0.7/0.8×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
	ベルトコンベア	851.5 851.5	0.579×14.3×0.8/0.85×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	5.53
	焼成	電力使用	851.5 788.4	0.579×28.2×0.85/0.9×851.5/400 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]
		燃料使用	851.5 788.4	3.00×65.4×851.5/400 [kgCO2/kg] [kg/h] [kg] [kg/h]
	搬送	788.4 788.4	0.579×11.2×0.8/0.85×788.4/2600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.85
	合計			808.63

表 10 タイル製造時のプロセス別 CO₂ 排出量（工程 D）

工程	プロセス	入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO ₂ /t']
D	採石	782 782	0.0069×782 [kgCO2/kg] [kg]	5.43
	破碎	782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
合計				5.83

なった。

ブロックと防音パネルの場合、工程 B と C において製品の原料は共にガラスである（B は既存ガラスカレット、C は PV パネルから抽出したガラスカレット）。そのため、両製品とも工程 B と C の製品製造部分において CO₂ 排出量に差が生じない。依って、ブロックと防音パネルについては CO₂ 削減効果（[A+B]-[C+D]）が同じ値となった。

また、ガラス再資源化製品 1kg 当たりの CO₂ 削減効果はタイルの場合で 0.51～0.61、ブロックで 0.04～0.06、防音パネルで 0.38～0.57kgCO₂/kg となった。

図 4 に再資源化製品、PV パネル種類ごとの CO₂ 排出量の内訳を示す。いずれの製品化の場合でも、提案工程では乾式製錬プロセスが無くなることで、現状工程との CO₂ 削減量の差が大きくなっている。タイルへの再資源化時の CO₂ 排出量の内訳に着目すると、タイル焼成プロセスでの燃料削減効果が結果に影響を及ぼし、CO₂ 削減に大きく寄与していることが分かる。今回の分析では、ガラスカレット利用による燃料削減効果が大きいので、ガラスの含有量の大きい PV パネルほど大きな CO₂ 削減効果が見込まれるが、結果としては最もガラス含有率の大きい単結晶系より CIGS 系のほうが大きい削減効果を得た。これは今回、取り扱った CIGS 系 PV パネルがアルミフレームを含まないものであったためである。他の種類の PV パネルの場合、工程 A のスラグ化に関する乾式製錬プロセスでの処理量は PV パネル 1 t からアルミフレームを 163～330kg 取り除いたものになるが、CIGS 系 PV パネルに関してはアルミフレーム除去による乾式製錬プロセスでの処理量の減少は無い。そのため、図 4 に示すように、

CIGS 系 PV パネルの乾式製錬プロセスでの CO₂ 排出量は他の PV パネルの場合と比較して大きいものとなっている。

現状工程に対する提案工程の CO₂ 削減率については防音パネルへの再資源化時で 37～61%、タイルで 31～39%、ブロックで 11～16% となった。CO₂ 削減率という点では、ガラス使用率の高い製品へのリサイクルが有利となる。

3.3 埋立処理をした場合との比較

工程 A の PV パネルの処理方法を埋立処理とした場合についても分析を実施した。図 1 における、工程 A、B をそれぞれ図 5 に示した工程に置き換え、分析を行った。なお、この分析については工程 A において路盤材は生じないため、工程 D のプロセスは発生しない。また、本検討では工程 A で埋立処理を行うことで製錬スラグ化プロセスにおける副産物である再生銀、銅は回収できない。そこで、アウトプットを揃えるために、工程 B に天然原料から銀、銅を製造するプロセスを加えている。

図 6 に工程 A を埋立処理とした場合のリサイクル製品ごとの各工程における CO₂ 排出量、最終的な CO₂ 削減効果、及び現状工程と提案工程の CO₂ 排出量の内訳を示す。なお、ここでは単結晶系 PV パネルを処理した場合の結果を記載する。

現状工程を PV パネルを溶融スラグ化し路盤材として利用するとした場合の結果と比較して、埋立処理とした場合は、スラグ化に関する乾式製錬プロセスが無くなったことでいずれの製品化に関してもカテゴリ A の CO₂ 排出量が小さくなっている。その結果、提案工程との排出量の差が小さくなり、CO₂ 削減効果も小さくなっているが、タ

表 11 各工程の CO₂ 排出量算定結果

工程	タイルへのリサイクル時					ブロックへのリサイクル時					防音パネルへのリサイクル時				
	単結晶系	多結晶系	薄膜系 (アルミナ)	薄膜系 (ソーダ石灰)	CIGS 系	単結晶系	多結晶系	薄膜系 (アルミナ)	薄膜系 (ソーダ石灰)	CIGS 系	単結晶系	多結晶系	薄膜系 (アルミナ)	薄膜系 (ソーダ石灰)	CIGS 系
A	324.5	341.6	320.9	312.3	314.2	324.5	341.6	320.9	312.3	314.2	324.5	341.6	320.9	312.3	314.2
B	889.9	761.9	669.9	669.9	812.7	1298.6	1111.8	977.5	977.5	1185.9	83.1	71.5	63.2	63.2	76.1
C	808.6	718.0	676.3	665.6	677.9	1440.1	1258.9	1151.8	1141.2	1254.8	224.7	218.6	237.5	226.9	145.0
D	5.8	6.0	4.7	4.7	7.4	5.8	6.0	4.7	4.7	7.4	5.8	6.0	4.7	4.7	7.4
CO ₂ 削減量 (A+B)-(C+D)	400.0	379.5	309.8	311.8	441.6	177.1	188.6	141.9	143.9	237.9	177.1	188.6	141.9	143.9	237.9
再資源化製品1kg 当たりのCO ₂ 削減量※	0.507	0.562	0.522	0.525	0.613	0.040	0.050	0.043	0.044	0.059	0.384	0.478	0.409	0.414	0.565

図 4 再資源化実施時の CO₂ 排出量内訳

イルへの再資源化に関しては 227kgCO₂/t'の削減量を得た。また、ブロック、防音パネルの場合に関しても、PV パネルのリサイクルを実施することで、CO₂削減効果は正の結果を示した。このことにより、リサイクル事業を進めることで逆に環境負荷を増加させるという結果にはならないことが判明した。廃棄物減容化の効果と併せて、使用済み PV パネルの建材へのリサイクルは環境負荷削減効果をもたらすことが示された。

4. まとめ

使用済み PV パネルの処理業者、及びガラス再資源化製品製造メーカーに対するヒアリング調査をもとに、PV パネルガラスを用いた再資源化による CO₂削減効果をインベントリ分析により算定した。主な結果を以下に示す。

- ・PV パネルを再資源化する際、その主な構成品目であるガラスを再生原料としてタイル、ブロック、防音パネルなどの建材を製造することで現状工程（廃棄後、製錬スラグ化し路盤材と利用する）と比較して、10%以上の CO₂削減効果が得られることを示した。CO₂削減量はタイルへと再資源化した場合で 310～442 kgCO₂/t'、ブロック、防音パネルで 142～238 kgCO₂/t'となることを明らかにした。
- ・タイルへの再資源化時には原料にガラスを用いたことによる燃料削減効果が CO₂削減に大きく寄与することが確認された。
- ・埋立処理と比較した場合においても、単結晶系 PV パネルをタイルへと再資源化することで、227kgCO₂/t'の削減量が得られることを示した。

今後は、地域ごとの使用済み PV パネルの廃棄量の推定に基づく再資

源化工場の分散配置計画等を行う必要がある。その際には、地域の廃棄量に基づく再資源化工程の機器仕様の最適化、現実的な輸送距離の見直し等が課題となる。また、本報における埋立処理との比較では、埋めるまでのプロセスを評価対象としたが、最終処分場自体の環境負荷を検討することも必要と考えられる。

謝辞

本研究の調査にご協力を頂いた企業および関係者に感謝します。また、インベントリ分析にあたって、株式会社レノバの本田大作氏には貴重なご意見を賜り、感謝します。

注

- 注 1) 評価対象としたガラス再資源化製品は参考文献 14)に記載されている外装磁器質タイル（150×150×13mm）、舗装用床ブロック（200×100×60mm）、屋内外の騒音対策用ガラス発泡防音パネルとした。
- 注 2) 輸送プロセスはヒアリング対象の工場間の距離を参考に設定値を設けたが、日本全体の将来的な廃 PV パネル発生源とリサイクル工場間等の距離は本論の設定値より大きくなる可能性がある。但し、輸送プロセスにおける CO₂原単位は相対的には小さく、工程 C の場合、廃 PV パネルのリサイクル工場までの輸送に関わる CO₂排出量が工程 C に占める割合の増加は、距離の設定を 100km 延長するごとに 0.6%程度であることを確認している。

参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部企画課リサイクル推進室：太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン、2016.3
- 2) 環境省：太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書、2015.6
- 3) 岡島敬一、内山洋司：リサイクル技術を考慮した太陽電池ライフサイクル評価、LCA 学会誌、Vol.5、No4、pp.521-528、2009.10
- 4) 張玄庚、醍醐市郎、松野泰也：マテリアルフロー分析による日本におけるガラスのリサイクル可能性評価、LCA 学会誌、Vol.6、No.4、pp.288-294、2010.10
- 5) 醍醐市郎、張玄庚、松野泰也：使用済み自動車からの板ガラスリサイクルの環境性および事業採算性評価、LCA 学会誌、Vol.7、No.1、pp.72-78、2011.1
- 6) 清家剛、磯部孝行：他産業も含めたマテリアルフローを考慮した建設系廃棄物の再資源化評価システムの構築に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 683 号、pp.17-26、2013.1
- 7) 茂呂隆、多葉井宏、高口洋人：リサイクル建築資材製造時の環境負荷原単位に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 595 号、pp.113-119、2005.9
- 8) CFP プログラム web サイト、社団法人産業環境管理協会：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、Vol4、(<http://www.cms-cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html>) (参照 2016.10.24)
- 9) 社団法人産業環境管理協会：JEMAI-LCA Pro&オプションデータバック、2003
- 10) 日本アルミニウム協会：スクラップ溶解のインベントリ調査報告書、2007.9
- 11) 成田暢彦、田原聖隆、匂坂正幸、稲葉敦：貴金属（金、銀、白金）のインベントリ分析－CO₂排出に着目して－、第 1 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.74-75、2005.12
- 12) 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
- 13) 日本工業規格 JIS : C 4210、2001
- 14) 株式会社レノバ：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、環境省 HP、2016.2
- 15) 湯浅和博、山崎成、鶴崎敬大：使用済太陽光パネルのリサイクルに関する研究、第 1 報インベントリ分析の前提条件、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学 I、pp.1393-1394、2016.8
- 16) 山崎成、湯浅和博、鶴崎敬大：使用済太陽光パネルのリサイクルに関する研究、第 2 報 CO₂排出量の削減効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学 I、pp.1395-1396、2016.8

図 5 工程 A, B (工程 A—埋立処理時)

図 6 再資源化実施時の CO₂排出量内訳 (単結晶系 PV パネル、工程 A—埋立処理の場合)

ENVIRONMENTAL LOAD REDUCTION EFFECT BY RECYCLING USED PHOTOVOLTAIC GENERATION PANEL GLASS

Kazuhiro YUASA^{}, Takahiro TSURUSAKI^{**} and Sei YAMASAKI^{***}*

^{*} Assoc. Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

^{**} Grad. Student, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (Jyukankyo Research Institute Inc.)

^{***} Grad. Student, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (Currenty, Takenaka Corporation)

The demands of photovoltaic generation (PV) are increasing as the public eco-awareness grows, but there is concern of enormous volume disposal of PV panels in the near future. It is calculated by Ministry of the Environment that if the PV panels life expectancy were 25 years, its final disposal amount reaches 800,000 ton in 2040. And its disposal amount is equivalent to 6% of the present final disposal amount of whole Japan. Considering the load to future's final disposal site, its influence can't be ignored any more.

For this reason, some companies are already working to develop the recycling method of PV panels in Japan. However, details of its reductive effect of environmental load is not so certain. So the purpose of this study is to uncover the reduction in CO₂ emissions by the recycling of PV panel's glasses (main constituent materials of PV panels are glasses which accounts for more than 50 % by the weight ratio.) through the inventory analysis.

At first, we carried out hearing survey on PV panels disposal service vendors, recycled products manufacturers and so on, in order to grasp component materials of PV panels (5 kinds of PV panels were targeted in this research), manufacturing process of recycled products, specification of processing apparatus, etc.

Then we set two flow charts based on hearing survey. First are proposal procedures that are processes of PV panel's glasses recycling to ceramic tiles, paving blocks, and sound proof panels. Second is currently procedure as a comparison that is process of PV panels recycling to roadbed materials (we also considered that currently procedure is landfill disposing without PV panel's glass recycling). We calculated respective procedure's CO₂ emissions per PV panel ton treatment by the inventory analysis.

The followings are the main findings of this study:

- Each of PV panels are composed of different materials ratio, so there are difference of reduction in CO₂ emissions between respective PV panels.
- At the time of recycling to ceramic tiles, it was confirmed that the fuel consumption in the baking process can be reduced 33 % by using glass, not a natural raw material like a feldspar. Therefore, the substantial CO₂ reduction effect was suggested.
- Recycling to ceramic tiles, paving blocks and sound proof panels using glass of PV panels gave more than 10 % CO₂ reduction ratio, even when any PV panels were subjected. It was the case when CIGS PV panels are recycled to sound proof panel that the CO₂ reduction ratio becomes biggest, and its CO₂ reduction ratio was 61%.
- We showed that which productization or occasion of PV panel kinds are able to get the amount of CO₂ reduction beyond 140kg-CO₂. It was the case when CIGS PV panels are recycled to ceramic tiles that the amount of CO₂ reduction becomes biggest, and its amount of CO₂ reduction was 441.6kg-CO₂.
- Amount of CO₂ reduction didn't become substantial minus effects in the comparison even when the currently procedure is landfill disposing. Combined with the volume reduction of final waste, it is suggested that PV panel recycling reads to significant reduction of environmental load.

(2016 年 12 月 9 日原稿受理, 2017 年 7 月 18 日採用決定)