

令和 2 年度環境省委託業務

令和 2 年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期

社会実装化に向けた実証事業

(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の

回収に係る技術実証)

委託業務

成果報告書

令和 3 年 3 月

イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社

## 要約

我が国では、太陽光発電所にて発電装置としての役割を担う太陽光パネルについて、個別のリサイクル法が存在していない。結果、廃棄物の処理及び清掃に関する法律の要求事項を遵守する観点および経済合理性の観点から、現状、太陽光パネルはアルミフレームを取外し、残りは破碎して管理型最終処分場に廃棄することが合理的な選択肢と言える状況である。加えて、資源循環に伴う追加コストを排出事業者が許容する場合は、アルミフレーム取外後の太陽光パネルからさらにガラスを分離し、分離したガラスを二次資源化することまでは現状行われ得る。しかしながら、ガラスを分離した後の産物であるセル/EVAシートについては、その中には銀と銅という有用金属が含まれているにもかかわらず、一般にこれらの金属のセル/EVAシート中での品位が低いことから、破碎された後に最終処分される以外の処理ルートを想定し難い。

本業務では、非鉄製錬原料の濃縮の実施(実証事業 1)、セル/EVAシートの価値の評価方法の実証(実証事業 2)、処理ルートの構築の実証(実証事業 3)の 3 つの検証を行った。

実証事業 1 では、10 種類の異なる型番を起源とする太陽光パネルに対して、3 種類の異なるガラス除去方式適用後に得られるセル/EVAシートを各 20 枚、計 600 枚のセル/EVAシートを試験サンプルとして入手した。入手したセル/EVAシートに対して物理選別および熱処理による金属濃縮を行った。結果、物理選別で得られる金属濃縮物の産物は、非鉄製錬の製錬原料となり得ることが分かってきた。加えて、セル/EVAシートの物理選別で得られる産物のうち、非鉄製錬原料として扱い難い産物について、鉛の溶出試験を行った。結果、計 30 検体のうち 8 つの検体で、金属等を含む産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準(Pb:0.3mg/L)を超過した。

実証事業 2 では、本業務で入手したセル/EVAシートから特殊品である 2 つの型番を除いた計 8 種類の型番のセル/EVAシートを実サンプルとして用いて、セル/EVAシート中の銀、銅、鉛、およびフッ素の含有量を算出する方法を検証した。結果、手順を標準化することが今後望まれるものの、本業務で検証した価値の算出手法は設備、精度、期間、および費用の面で、妥当な手法と考えられた。

実証事業 3 では、埼玉県は愛知県に次いで全国で 2 番目に住宅用太陽光発電設備を導入している埼玉県をフィールドにして、最終処分場に依存しない太陽光パネルの処理ルート構築に係る検討を行った。2021 年度に継続実施を計画している本業務の下で太陽光パネルの回収試験を行うことを想定し、本年度は回収試験の計画を策定した。

実証事業 1～3 の他、本業務では、金属リサイクルに伴う CO2 削減効果を評価した。年間

1,200トンの太陽光パネルが処理されることを想定した場合、セル/EVAシートからの銀と銅の回収は、回収しない場合に比べて、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が 6,341t-CO<sub>2</sub>/年あると評価された。

本事業の成果を早期に社会実装し、我が国のリサイクルビジネスを活性化する観点から、本事業の最終実施年度である令和3年度(2021 年度)に、質の確保(金属濃縮の技術実証)、および金属濃縮プロセスの原料であるセル/EVA シートの量の確保(処理ルート構築の実証)に係る検証を行う。

## Summary

In Japan, no individual recycling law exists for solar panels, which play a role in power generation equipment at solar power plants. As a result, from the viewpoint of compliance with the requirements of Waste Management and Public Cleansing Act and from the viewpoint of economic rationality, the current situation is that the aluminum frame can be removed from solar panels and the remainder can be crushed and disposed of in a controlled landfill site for domestic wastes and industrial waste as a reasonable option. Furthermore, if the waste-discharging enterprise permits additional costs associated with resource circulation, it may be possible to separate the glass from the solar panel after the aluminum frame been removed, and to implement secondary recycling of the separated glass. However, for cells and EVA sheets, which are products of the separation of the glass, it is difficult to envision processing routes other than final disposal after crushing because of the generally low grade of these metals in the cells and EVA sheets, even though they contain useful metals such as silver and copper.

In this project, three verifications were implemented. They are: implementation of concentration of non-ferrous metal raw materials for smelters (verification project 1); verification of the evaluation method of the value of cells and EVA sheets (verification project 2); and verification of the installation of collection routes (verification project 3).

In verification project 1, 20 cells and EVA sheets were obtained after applying three different glass removal methods to solar panels originating from 10 different model numbers, and a total of 600 cells and EVA sheets were obtained as test samples. Metal concentration was implemented by physical sorting and heat treatment on the obtained cells and EVA sheets. As a result, it has been found that the product of the metal concentrate obtained by physical sorting can be a non-ferrous metal raw material for smelters. Furthermore, a lead leaching test was implemented on the product, which could not be regarded as non-ferrous metal raw materials, after physical sorting of cells and EVA sheets. As a result, it was found that 8 samples among all the 30 samples exceeded the judgment criteria (Pb: 0.3 mg/L) pertaining to landfill disposal of industrial waste that contains metals.

In verification project 2, the method of calculating the content of silver, copper, lead, and fluorine in cells and EVA sheets was verified by using a total of 8 model numbers of cells and EVA sheets, excluding two model numbers that are special products, as actual samples from

cells and EVA sheets obtained in this project. As a result, although it is desired to standardize the procedures in the future, the method of calculating the value verified in this project was considered to be a reasonable method in terms of equipment, accuracy, duration, and cost.

In the verification project 3, following Aichi Prefecture, Saitama Prefecture became the second in Japan to install residential solar power generation facilities, and conducted a study related to the installation of collection routes for solar panels that does not depend on a final disposal site. It is assumed that a solar panel collection test will be conducted under this project, which is planned to continue in 2021, and a collection test plan has been formulated for this year.

In addition to verification projects 1 to 3, the effect of CO<sub>2</sub> reduction associated with metal recycling was evaluated in this project. Assuming that 1,200 tons of solar panels would be processed annually, the recovery of silver and copper from cells and EVA sheets was assessed to have a 6,341 t-CO<sub>2</sub>/year reduction effect compared to having no recovery.

From the viewpoint of implementing the results of this project in society at an early stage and revitalizing the recycling business in Japan, verification related to ensuring the quality viewpoint (technical verification of metal concentration) and ensuring the quantity viewpoint for cells and EVA sheets that are the raw materials of the metal concentration process (verification of the installation of collection routes) will be implemented in 2021, which is the final implementation year for this project.

## 目次

第Ⅰ章 業務の概要 .....	1
Ⅰ-1 背景と目的 .....	1
Ⅰ-2 業務の内容 .....	4
Ⅰ-3 業務の実施体制 .....	7
Ⅰ-4 業務の進め方 .....	8
第Ⅱ章 非鉄製錬原料の濃縮の実証(実証事業 1) .....	10
Ⅱ-1 試験サンプルの入手 .....	10
Ⅱ-2 実サンプルを用いた検証 .....	17
Ⅱ-3 濃縮手法の提案 .....	28
第Ⅲ章 セル/EVA シートの価値の評価方法の実証(実証事業 2) .....	30
Ⅲ-1 既往知見の整理 .....	30
Ⅲ-2 実サンプルを用いた検証 .....	35
Ⅲ-3 評価手法の提案 .....	42
第Ⅳ章 処理ルート of 構築の実証(実証事業 3) .....	46
Ⅳ-1 協議の場の設置 .....	47
Ⅳ-2 試験計画の検討・準備 .....	50
Ⅳ-3 リユースのための検査 .....	55
第Ⅴ章 事業における環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果の評価 .....	59
Ⅴ-1 調査の実施方法 .....	59
第Ⅵ章 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討 .....	79
Ⅵ-1 リサイクルビジネス活性化に向けた検討 .....	79
Ⅵ-2 出口戦略 .....	79
第Ⅶ章 現地視察会の開催 .....	82
Ⅶ-1 工程・参加組織 .....	82
Ⅶ-2 プログラム .....	82

## 図表 一覧

図 I-1 業務の目的 .....	2
図 I-2 業務の内容 .....	4
図 I-3 業務の実施体制 .....	8
図 I-4 業務の実施経緯 .....	9
図 II-1 試験サンプルの入手フロー .....	10
図 II-2 入手した試験サンプルの外観(型番 1 と型番 2) .....	12
図 II-3 入手した試験サンプルの外観(型番 3 と型番 4) .....	13
図 II-4 入手した試験サンプルの外観(型番 5 と型番 6) .....	13
図 II-5 入手した試験サンプルの外観(型番 7 と型番 8) .....	14
図 II-6 入手した試験サンプルの外観(型番 9 と型番 10) .....	14
図 II-7 試験サンプルの重量(ブラスト方式を基準にした熱線カット方式とロール式破碎方式の比率) .....	16
図 II-8 実サンプルを用いた検証での役割分担 .....	17
図 II-9 本業務の下での濃縮方法(物理選別) .....	18
図 II-10 本業務の下での濃縮方法(熱処理) .....	18
図 II-11 物理選別の各産物の重量比 .....	20
図 II-12 金属濃縮物と熱処理での減少重量の割合 .....	21
図 II-13 物理選別で得られる軽量産物からの鉛の溶出試験結果 .....	26
図 II-14 金属濃縮プロセスの技術目標 .....	28
図 III-1 セル/EVA シートの価値の評価方法の実証のフロー .....	30
図 III-2 太陽光パネルの種類と素材構成 .....	31
図 III-3 太陽光パネルからのアルミフレーム・ガラスの分離手法 .....	33
図 III-4 セル/EVA シートの分析に適用でき得る分析装置 .....	35
図 III-5 セル/EVA シートの分析手順 .....	36
図 III-6 グリッド電極の断面拡大図 .....	38
図 III-7 試験サンプル中の鉛含有率 .....	40
図 III-8 前処理工程での試料 .....	41
図 IV-1 2020 年 3 月末時点の埼玉県での太陽光発電所の導入状況 .....	46

図 IV-2	埼玉県での住宅用太陽光発電設備の市町村別の導入件数 .....	46
図 IV-3	埼玉県の住宅用から発生する太陽光パネルの処理の現状(想定) .....	48
図 IV-4	回収試験の計画の骨子 .....	51
図 IV-5	回収拠点で利用を計画している太陽光パネルの保管容器 .....	52
図 IV-6	回収試験のスケジュール .....	54
図 IV-7	太陽光パネル A のリユース検査結果 .....	56
図 IV-8	太陽光パネル B のリユース検査結果 .....	57
図 V-1	CO2 排出量削減評価のシステムバウンダリー .....	59
図 V-2	事業実施前および事業実施後の CO2 排出量の比較 .....	63
図 V-3	太陽光パネル TMR 評価のシステムバウンダリー .....	64
図 V-4	輸送の流れ .....	66
図 V-5	アルミフレーム・ガラス除去の流れ .....	66
図 V-6	物理選別の流れ .....	67
図 V-7	太陽光パネル TMR の内訳 .....	69
図 V-8	アロケーション後の銀および銅の回収に関する TMR .....	70
図 VII-1	現地視察会のプログラム .....	83
図 VII-2	現地視察会の様子 .....	88
表 II-1	入手した試験サンプルの概要 .....	11
表 II-2	試験サンプルの重量の平均値と標準偏差 .....	15
表 II-3	物理選別で得られる産物中の金属の含有率 .....	23
表 II-4	物理選別の銀と銅の濃縮率 .....	24
表 II-5	熱処理で得られる産物中の金属の含有率 .....	25
表 II-6	物理選別で得られる軽量産物の工業分析結果 .....	27
表 III-1	構成部材の寸法測定結果 .....	37
表 III-2	バックシートの組成の推計結果 .....	38
表 III-3	試験サンプル中の有用金属と有害物質の品位(重量割合) .....	39
表 III-4	断面分析と化学分析の比較結果 .....	42
表 III-5	断面分析に用いた設備一覧 .....	44
表 IV-1	太陽光パネルの処理の現状に係る潜在的な課題 .....	48
表 IV-2	本業務の下で 2021 年度に実施を計画している回収試験への協力を求めた主体 .....	49



表 IV-3 本業務で実施したリユースの検査の内容 .....	55
表 V-1 工程 A における CO2 排出量の算定根拠 .....	60
表 V-2 工程 B における CO2 排出量の算定根拠 .....	61
表 V-3 工程 C の物理選別における CO2 排出量の算定根拠 .....	61
表 V-4 工程 C の埋立処分における CO2 排出量の算定根拠 .....	62
表 V-5 事業実施後の CO2 排出量の削減効果 .....	62
表 V-6 太陽光パネルの組成 .....	65
表 V-7 輸送に関する TMR .....	66
表 V-8 アルミフレーム・ガラス除去に関する TMR .....	67
表 V-9 物理選別に関する TMR .....	67
表 V-10 残渣に関する TMR .....	68
表 V-11 アロケーション後の銀および銅の回収に関する TMR .....	68
表 V-12 太陽光パネル TMR の内訳 .....	69
表 V-13 太陽光パネルの処理量の算定根拠 .....	71
表 V-14 輸送に関する TMR の算定根拠 .....	72
表 V-15 ガラス・アルミフレーム分離に関する TMR の算定根拠 .....	73
表 V-16 物理選別に関する TMR の算定根拠 <sup>1)</sup> .....	74
表 V-17 残渣に関する TMR の算定根拠 .....	75
表 V-18 各金属の市場価格比の算定根拠 .....	76
表 V-19 各シナリオにおける軽油の燃費、単位発熱量及び排出係数 .....	78
表 VII-1 現地視察会の工程 .....	82
表 VII-2 現地視察会への参加組織 .....	82

## 第I章 業務の概要

### I-1 背景と目的

電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法(以下、「FIT 法」)が 2012 年 7 月に施行されたことに伴い、我が国では太陽光発電所の導入が急速に促進された。この急速に導入された太陽光発電所がその使用停止後に不法投棄されることが懸念され、2020 年 6 月 12 日に FIT 法が改正された。今後、FIT 法の改正が施行される 2022 年 7 月からは、太陽光発電所の撤去・廃棄費用の外部積立が原則義務となり、撤去・廃棄に要する費用は太陽光発電事業者により確保される見込みである。

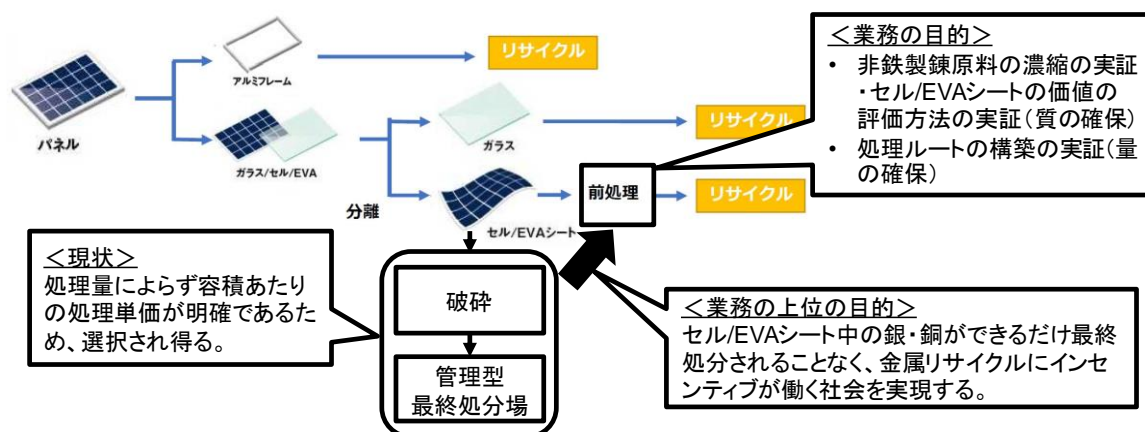
一方、太陽光発電所にて発電装置としての役割を担う太陽光パネル<sup>1</sup>については、特定家庭用機器再商品化法(以下、「家電リサイクル法」)のような個別リサイクル法が我が国には存在していない。結果、廃棄物の処理及び清掃に関する法律(以下、「廃棄物処理法」)の要求事項を遵守する観点および経済合理性の観点から、現状、太陽光パネルはアルミフレームを取外し<sup>2</sup>、残りは破砕して管理型最終処分場に廃棄することが最も容易でかつ合法であり、合理的な選択肢と言える状況である。

加えて、資源循環に伴う追加コストを排出事業者が許容する場合は、アルミフレーム取外後の太陽光パネルからさらにガラスを分離し、分離したガラスを二次資源化することまでは現状行われ得る。しかしながら、ガラスを分離した後の産物であるセル/EVAシートについては、その中には銀と銅という有用金属が含まれているにもかかわらず、一般にこれらの金属のセル/EVAシート中での品位は低く、金属回収が行われていない。現状、セル/EVAシートについては、破砕された後に最終処分される以外の処理ルートを想定し難い。

2020 年度の「太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証」(以下、「本業務」)では、太陽光パネルの大量廃棄が始まる 2035 年前後の将来を見据えながら、セル/EVA シート中の銀・銅ができるだけ最終処分されることなく、金属リサイクルにインセンティブが働く社会を実現するため、本業務の成果を早期に社会実装することを上位の目的に置く(図 I-1 参照)。

<sup>1</sup> 太陽光パネルは、「シリコン系」と「化合物系」に大別される。市場シェアの 9 割以上を占めると言われるシリコン系であれば、異なるメーカーのものでも概ね同じ素材で構成され、その素材構成は重量比が大きい順から、ガラス、アルミフレーム、封止材・バックシートからなる樹脂、シリコン、インターコネクタ・電極材からなる非鉄金属である。

<sup>2</sup> これまでのイー・アンド・イー ソリューションズ株式会社(以下、「E&ES」)の調査・検討によると、現在、太陽光パネルからアルミフレームを取外す装置は入手可能である。仮にそういった装置を導入したとしても、太陽光パネルから取外したアルミフレームをスクラップ業者へ販売することで得られる収入は、アルミフレームを取外すために要する費用を上回る。すなわち、太陽光パネルからのアルミフレームの取外し・販売には、既に経済的インセンティブが働いている。



(出典)環境省(2020a)に基づき E&ES が作成

図 1-1 業務の目的

本業務ではこの上位の目的の達成に向けて、次の 3 つの検討を行うことを主な目的とする。

- ・ 非鉄製錬原料の濃縮の実証
  - ✧ セル/EVA シート中の銀品位は、濃縮という前処理を行わない限り、非鉄製錬所により原料とみなされ得ない<sup>3</sup>。本業務では、非鉄製錬所が原料とみなし得る品位まで非鉄金属を濃縮する技術を実証する。
  - ✧ 濃縮技術としては、物理選別・熱処理を検討する。濃縮の単位技術はすでに存在しているものの、太陽光パネルのメーカー・製造年や上流のリサイクラーでのガラスの分離方法に応じて、濃縮産物中の銀・銅品位や難処理物であるフッ素の含有率が異なる。そのため、本業務では、異なる型番の太陽光パネルおよび異なるガラス分離方法が施された太陽光パネルに対して濃縮を施し、その結果を考察する。
- ・ セル/EVA シートの価値の評価方法の実証
  - ✧ セル/EVA シート中には銀や銅といった金属が含まれている一方で、難処理物であるフッ素が含有されていることがある。さらに、上流のリサイクラーでのガラス分離方法により、セル/EVA シート中でのガラスの残存率が異なる。したがって、これらのパラメーターを考慮してセル/EVA シートの取引価格が決定されるべきであるが、E&ES がこれまでに調査・検討したかぎり、現状、そういった価値の評価は行われていない。本業務では、セル/EVA シートの価値を評価する方法を実証する。
  - ✧ 検討する評価方法の単位技術はすでに存在している。本業務では、異なる型番

<sup>3</sup> 太陽光パネル中の銀品位は、製造年が古いほど高い傾向を示すものの、FIT 法が施行された 2012 年以降に製造された太陽光パネル中の銀品位は、濃縮という前処理を行わない限り、非鉄製錬所により原料とみなされ得ない(株式会社三菱総合研究所(2019))。

の太陽光パネルおよび異なるガラス分離方法が施された太陽光パネルの価値の評価を行い、その結果を考察する。

- 処理ルートの構築の実証

- ✧ 欧州連合(以下、「EU」)の事例によると、1つの工場で数千トン/年の太陽光パネルの処理量を確保できていれば、リサイクラーは適正な処理費を提示し得る<sup>4</sup>。
- ✧ 一方、我が国では、太陽光パネルのリサイクルを行おうとする廃棄物処理業者は処理量を確保できる目途が立たず、適正な処理費を提示できていない。そのため、処理量によらず容積あたりの処理単価が明確な管理型最終処分場が選択され得る状況である。廃棄物処理事業にも規模の経済が働くことから、より資源循環が促進される処理ルートで太陽光パネルが処理されることが既定路線になれば、埋立処分を代替する処理ルートの処理コストは下がり得る。
- ✧ この他、我が国で考慮すべき特徴は、太陽光発電所の発電所数の内訳である。2019年度の我が国の太陽光発電所は合計で約3,100,000か所あるが、この99%以上が50kW未満(以下、「低圧」)の発電所である(資源エネルギー庁(2020))。廃棄物処理の観点から見ると、低圧の太陽光発電所は小規模・分散的に存在するため廃棄物処理に規模の経済が働き難く、また、廃棄物処理法では「廃棄物を一定量までためる」という規模の経済を駆動し得る行為が一部制限されている。
- ✧ 本業務では、特に、低圧の発電事業者に着目して、現行の廃棄物処理法を逸脱しない範囲で太陽光パネルの処理ルートの構築を実証し、法的課題を整理する。

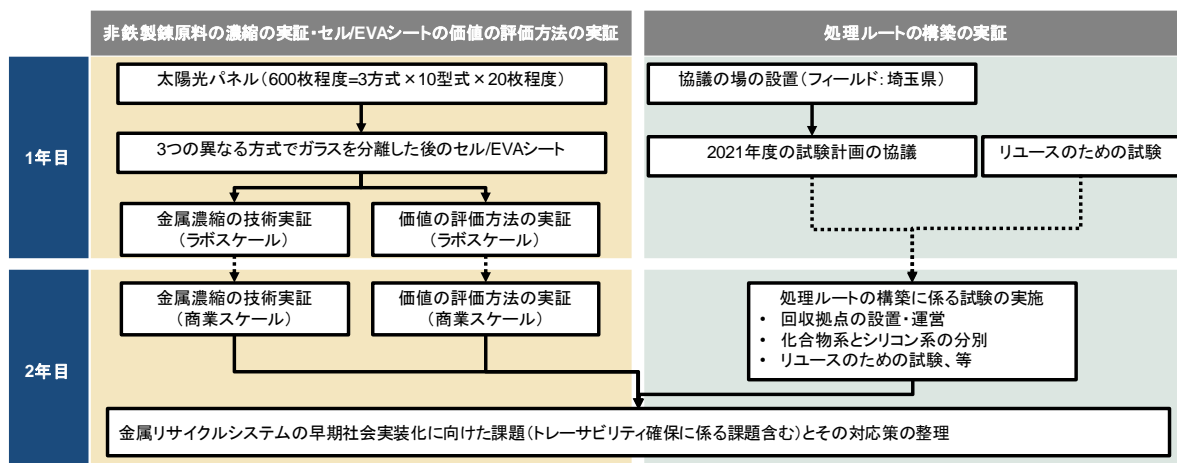
上記の他、本業務ではセル/EVAシート中の銀・銅を最終処分せずに回収する行為は、天然資源から銀精鉱・銅精鉱を生産する工程を代替し得ると仮定し<sup>5</sup>、この代替分もカウントしてCO<sub>2</sub>の削減効果等の環境改善効果を評価する。

本業務は2020年度に実施するものであるが、2021年度も後継業務を行うことを計画している(図 I-2 参照)。2020年度は基礎的な調査を行い、2021年度に全体とりまとめを行う。

---

<sup>4</sup> EUでは、有害物質が含まれる廃電気・電子機器(以下、「WEEE」)の埋立処分量の削減等を目的としたWEEE指令が施行されており、太陽光パネルも当該指令の対象品目である。E&ESがこれまでに調査・検討したところによると、法的要求事項遵守および経済合理性確保の観点から、EUでの太陽光パネルの廃棄方法としては、アルミフレーム、ガラス、および非鉄金属等を二次資源化することが合理的な選択肢となっている。

<sup>5</sup> 2017年の実績によると、我が国は、約2,000トン/年銀および約1,200,000トン/年の鉱物資源(便宜的に、以下それぞれを「銀精鉱」と「銅精鉱」という)を海外から輸入し、国内で製錬し、銀地金・銅地金を国内市場に供給している(JOGMEC(2019))。仮に、銀地金と銅地金の国内需要量が一定と仮定すると、セル/EVAシート中の銀・銅を最終処分せずに銀地金・銅地金として回収し、回収した銀地金・銅地金を国内市場に供給することにより、銀精鉱・銅精鉱の輸入量を削減でき、結果、海外での銀精鉱・銅精鉱の生産を抑制できる。すなわち、CO<sub>2</sub>の排出を伴い銀精鉱・銅精鉱を生産する工程は、セル/EVAシート中から銀・銅を回収する工程で代替されると、本業務では仮定する。



(出典)E&ES が作成

図 I-2 業務の内容

## I-2 業務の内容

### I-2-1 非鉄製錬原料の濃縮の実証(実証事業 1)

シリコンを半導体として用いる太陽光パネルからアルミフレームおよびガラスを分離した後の産物(セル/EVA シート)を対象として、銀・銅等の非鉄製錬原料の濃縮手法を検証する。

#### (1) 試験サンプルの入手

セル/EVA シートを試験サンプルとして入手する。入手する試験サンプルの総数は計 600 枚程度とする。内訳としては、10 種類程度の異なる型番の太陽光パネルを起源とするセル/EVA シート各 60 枚程度とする。加えて、これら各 60 枚程度は、以下の 3 つの異なるガラス分離装置を適用した後のセル/EVA シート各 20 枚程度とする。

- ブラスト方式によるガラスとセル/EVA シートの分離技術
- 熱線カット方式によるガラスとセル/EVA シートの分離技術
- ロール式破碎方式によるガラスとセル/EVA シートの分離技術

#### (2) 実サンプルを用いた検証

セル/EVA シートの実サンプルを対象として、ラボスケールでの金属濃縮を実際に行い、課題を整理する。具体的には、以下の項目について課題を整理する。

- 濃縮の手順・結果
- 太陽光パネルの種類の違い、ガラスの分離工程の違いによる濃縮結果の差異

### (3) 濃縮手法の提案

商業スケールでの運用も考慮して、セル/EVA シートの濃縮手法の提案を行う。具体的には、提案は以下を含むこと。

- 非鉄金属製錬の視点も踏まえた濃縮の技術目標
- 濃縮工程の経済合理性
- 商業スケールでの運用を想定した場合の検討課題

## I-2-2 セル/EVA シートの価値の評価方法の実証(実証事業 2)

セル/EVA シートを対象として、銀・銅等の有価性およびガラス・プラスチック分等の忌避性を考慮して、その価値の評価方法を検証する。

### (1) 既往知見の整理

机上調査および必要に応じて専門家に聞き取り調査を行い、既存のセル/EVA シートの価値の評価手法を整理するとともに、その課題を整理する。具体的には、以下の項目について、課題を整理する。

- 太陽光パネル、特にセル/EVA シートの素材構成
- 太陽光パネルからのアルミフレームおよびガラスの分離手法
- セル/EVA シートの価値評価に適用でき得る単位技術

### (2) 実サンプルを用いた検証

セル/EVA シートの実サンプルを対象として、ラボスケールでの価値評価を実際に行い、課題を整理する。具体的には、以下の項目について課題を整理する。

- 評価の手順・結果
- 評価の精度・期間・費用
- 太陽光パネルの種類の違い、ガラスの分離工程の違いによる価値の差異

### (3) 評価手法の提案

商業スケールでの運用も考慮して、セル/EVA シートの評価手法の提案を行う。具体的には、提案は以下を含む。

- 評価対象とする指標

- 評価に求められる要件(設備、精度、期間、費用等の観点を含む)
- 商業スケールでの運用を想定した場合の検討課題

### I-2-3 処理ルートの構築の実証(実証事業 3)

特に、低圧の発電事業者で発生する太陽光パネルに着目して、現行の廃棄物処理法を逸脱しない範囲で可能な限り最終処分場に依存しない太陽光パネルの処理ルートの構築について、検証を行う。検証は、住宅用太陽光発電所の導入量が日本で二番目に多い埼玉県をフィールドにして行う。

#### (1) 協議の場の設置

主に埼玉県内で太陽光パネルの処理に関与する主体とのネットワーク形成を目的にして、本業務について協議するための場を設置する。具体的には、以下の項目について、検討を行う。

- 協議の場へ参加する主体の要件・範囲
- 協議の場の名称・目的・スケジュール・協議結果の公開範囲
- 協議の場の事務局の役割

#### (2) 試験計画の検討・準備

処理ルート構築のための本格的な試験を 2021 年度に実施することを想定し、当該試験の計画を上記 (1) で設置した協議の場で検討するとともに、必要な準備を進める。明らかにする事項としては、以下が挙げられる。

- 試験実施前の準備事項
- 試験計画の内容(目的、実施事項、必要となるインフラ・備品・消耗品、参加者間でのコスト負担の考え方、参加者の範囲、スケジュール)
- 試験終了後の実施事項

#### (3) リユースのための検査

環境省の「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン(第二版)」(平成 30 年)に示される検査内容(外観検査、洗浄、絶縁検査、出力検査等)に依拠しながらも、オペレーションの実態に適合するように、検査内容を検討する。具体的には、380 枚程度の太陽光パネルを対象にしてリユースのための検査を行い、以下の項目について課題を整理する。

- 検査の手順・結果
- 検査工程の経済合理性
- 実際の処理ルートの中での検査実施を想定した場合の検討課題

#### **I-2-4 事業における環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果の評価**

事業における環境影響改善効果として、「海外での鉱物資源の採掘に伴う CO2 排出量削減」、「海外での鉱物資源の採掘量抑制」、「セル/EVA シートの最終処分場での埋立回避」および「有害金属の最終処分回避による浸出水への影響低減」等が見込まれることから、これらの評価方法を明確化するとともに、CO2 排出削減量(処理ルートの構築の考慮有無の 2 ケース)を算出する。なお、評価に当たっては、回収から処理・リサイクルといった最終工程までを範囲に含めてできないか検討する。

#### **I-2-5 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討**

本事業によってセル/EVA シートの適正価格の速やかな明確化やガラス分離の促進、国内の金属リサイクルの受け皿の構築によって、太陽光パネルの排出事業者や再エネ事業者のビジネス環境の整備や新規産業の育成、太陽光パネルのリサイクルに係るビジネスモデルの構築が見込まれることから、これらの展開可能性について検討する。

また、事業の将来的な展開可能性を経済的・技術的側面から評価するとともに、それらを実現するための、実証事業終了後の事業展開に係る出口戦略について検討する。

### **I-3 業務の実施体制**

本業務の実施体制を図 I-3 に示す。本業務では、E&ES が幹事法人の役割を務め、業務の統括・とりまとめを行うとともに、業務の品質・工程の管理を行った。加えて、E&ES が、環境省および「令和2年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業」の下で課題監理を行う事業者(以下、「課題監理業者」と)の連絡窓口を務めた。

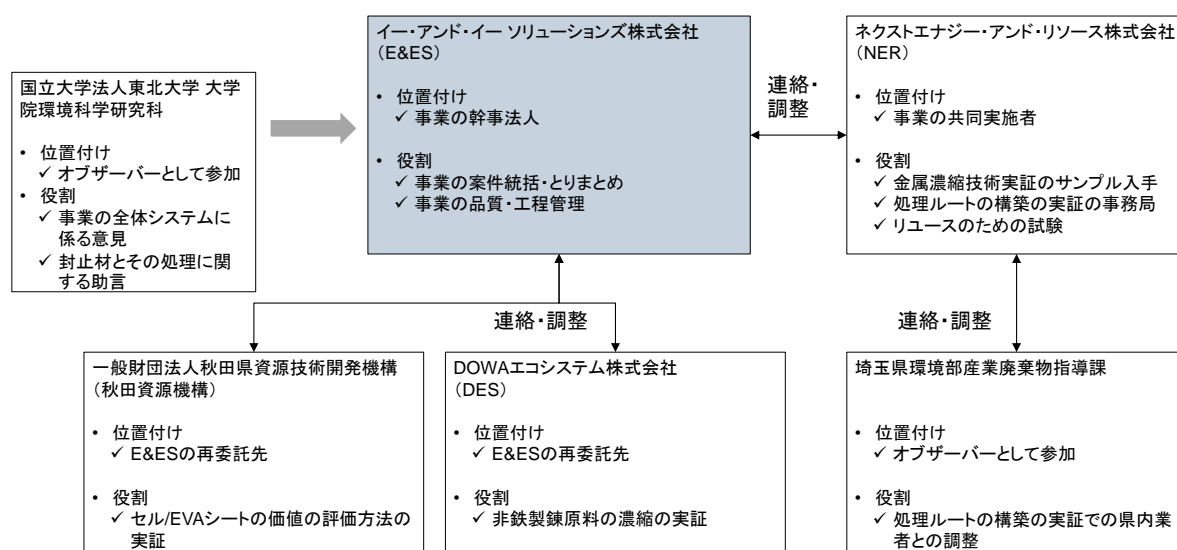
また、ネクストエナジー・アンド・リソース株式会社(以下、「NER」)が、本業務において、E&ES の共同事業者の役割を務めた。NER は、600 枚程度のセル/EVA シートのサンプルの入手を行うとともに、埼玉県をフィールドとして行う処理ルートの構築の実証の事務局の役割等を務めた。

E&ES は、外注先として、DOWA エコシステム株式会社(以下、「DES」)、および公益性の高い一般財団法人秋田県資源技術開発機構(以下、「秋田資源機構」)を起用し、DES は非



鉄製錬原料の濃縮の実証を、秋田資源機構は中立的な立場から価値の評価方法の実証を担当した。

また、本業務には、オブザーバーとして、国立大学法人東北大学大学院環境科学研究科および埼玉県環境部産業廃棄物指導課が参加した。東北大学は業務の全体システムに係る意見を E&ES に提供し、埼玉県環境部産業廃棄物指導課は処理ルートの構築の実証の下で県内業者との調整を行った。



(出典)EES が作成

図 I-3 業務の実施体制

#### I-4 業務の進め方

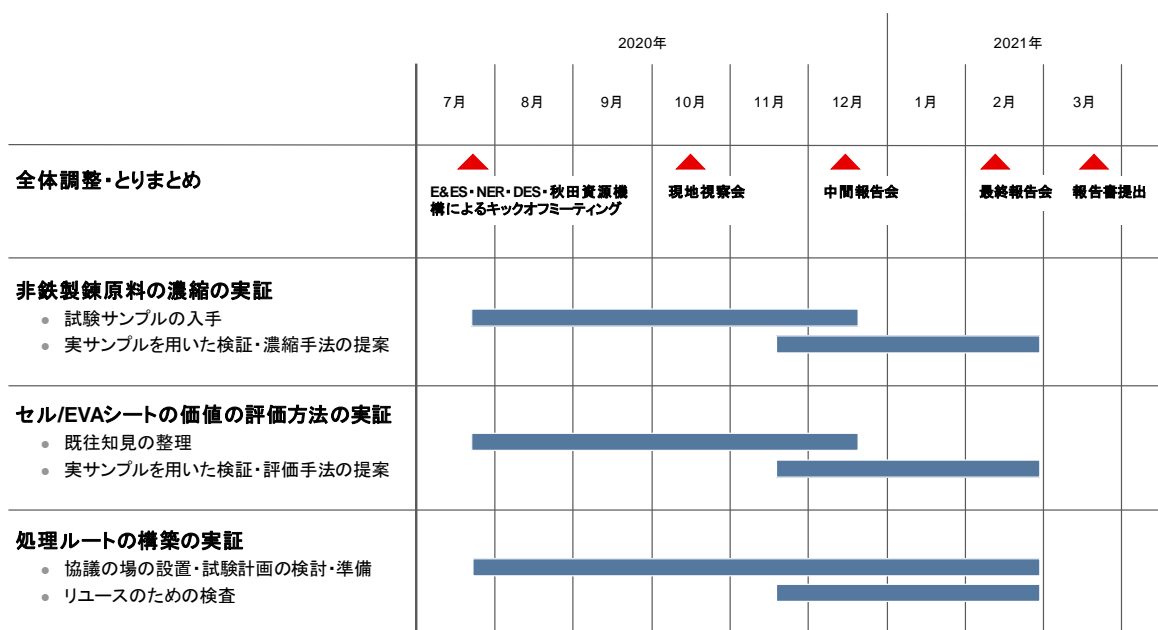
本業務は、図 I-4 に示すスケジュールにしたがって実施した。まず、全体調整・とりまとめの観点では、2020 年 7 月 20 日に、E&ES、NER、DES、および秋田資源機構の間でウェブミーティングを行い、本業務の実施内容・スケジュール・達成目標について、意見交換を行った。次いで、2020 年 10 月 5 日・6 日には、環境省および課題監理業者の参画を得て、秋田県小坂町・大館市にて現地視察会を開催した。現地視察会では、検証に供する試験サンプルや設備を視察するとともに、本業務の背景・目的や到達目標について意見交換を行った。現地視察会の概要は、本報告書第 VII 章にとりまとめている。さらに、E&ES と NER は、本業務の下で開催された中間報告会および最終報告会にて報告を行った。加えて、毎月、課題監理業者に対して月次の進捗報告を行った。E&ES は、中間報告会・最終報告会の報告内容の準備の段階で、また月次の進捗報告に先立ち、NER、DES、および秋田資源機構と業務の進

捗について都度意見交換を行った。

非鉄金属製錬の濃縮の実証では、試験サンプルを入手した後に、ラボスケールでの検証を行い、検証結果のとりまとめを行った。

セル/EVA シートの価値の評価方法の実証では、既往知見の整理を行った。既往知見の整理にあたっては、机上調査だけでなく、本業務に試験サンプルとしてセル/EVA シートを提供する事業者の工場も視察し、ガラス分離工程の目視での確認も行った。試験サンプル入手後は、ラボスケールでの検証を行い、検証結果のとりまとめを行った。

処理ルート構築の実証では、2020 年 7 月から 2021 年 2 月までの期間、概ね月に 1 度の頻度で、E&ES・NER は埼玉県と意見交換を行うとともに、2020 年 11 月からは県内業者との個別の協議も行った。来年度の準備のため、2020 年 11 月からはリユースのための検査も行った。



(出典)E&ES が作成

図 1-4 業務の実施経緯

## 第Ⅱ章 非鉄製錬原料の濃縮の実証(実証事業 1)

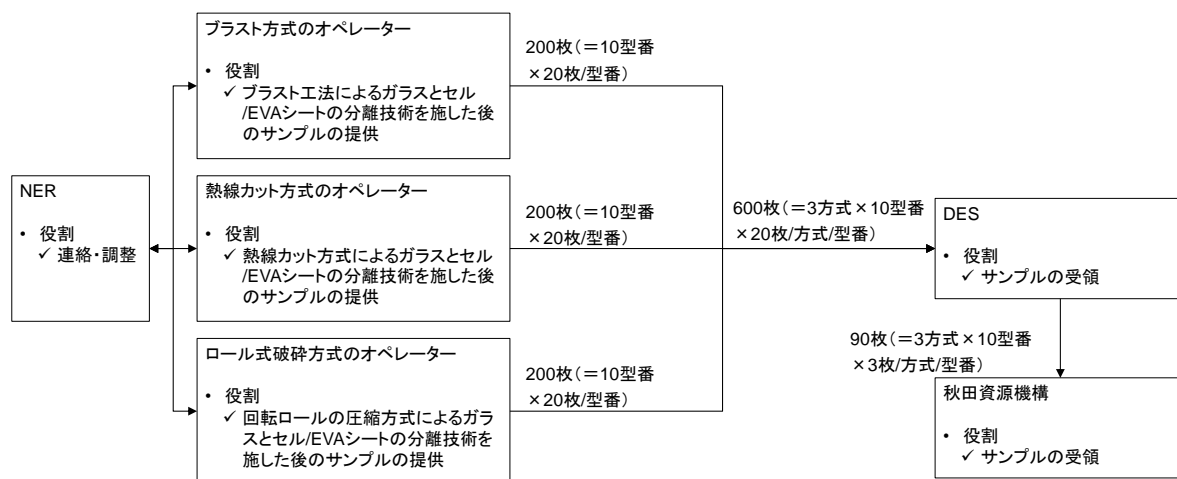
### Ⅱ-1 試験サンプルの入手

#### Ⅱ-1-1 試験サンプルの入手方法

本業務では、試験サンプルとして、600 枚のセル/EVA シートを入手した。内訳としては、10 種類の異なる型番の太陽光パネルを起源とするセル/EVA シート各 60 枚とした。加えて、これら各 60 枚は、以下の 3 つの異なる技術を適用した後のセル/EVA シート各 20 枚とした。

- ブラスト工法によるガラスとセル/EVA シートの分離技術(以下、「ブラスト方式」)
- 熱線カット方式によるガラスとセル/EVA シートの分離技術(以下、「熱線カット方式」)
- 回転ロールの圧縮方式によるガラスとセル/EVA シートの分離技術(以下、「ロール式破碎方式」)

また、計 600 枚の試験サンプルのうち、DES が自らの担当業務で用いる 510 枚の試験サンプル(=3 つのガラス分離方式×10 型番×17 枚/ガラス分離方式/型番)を除いた後の 90 枚の試験サンプル(=3 つのガラス分離方式×10 型番×3 枚/ガラス分離方式/型番)を、秋田資源機構に提供した(図 Ⅱ-1 参照)。



(出典)E&ES が作成

図 Ⅱ-1 試験サンプルの入手フロー

## II-1-2 試験サンプルの入手結果

### (1) 概要

本業務では、表 II-1 に示すとおり、ブラスト方式・熱線カット方式・ロール式破碎のガラス除去方式を施した後の試験サンプルを、DES が入手した。

表 II-1 入手した試験サンプルの概要

型番 <sup>1)</sup>	大きさ(mm)		セル数	発電方式	ガラス除去方式	入手枚数 (うち、ガラス未除去の枚数)
	縦	横				
型番 1	410	1,290	30	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(0 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 2	982	1,640	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(1 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 3	990	1,670	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(1 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 4	985	1,630	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(2 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 5	975	1,635	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(5 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 6	992	1,650	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(10 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 7	985	1,640	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(3 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 8	980	1,640	60	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(1 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 9	817	1,620	60	両面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(7 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)
型番 10	984	1,946	72	片面発電	ブラスト方式	20 枚(0 枚)
					熱線カット方式	20 枚(2 枚)
					ロール式破碎	20 枚(0 枚)

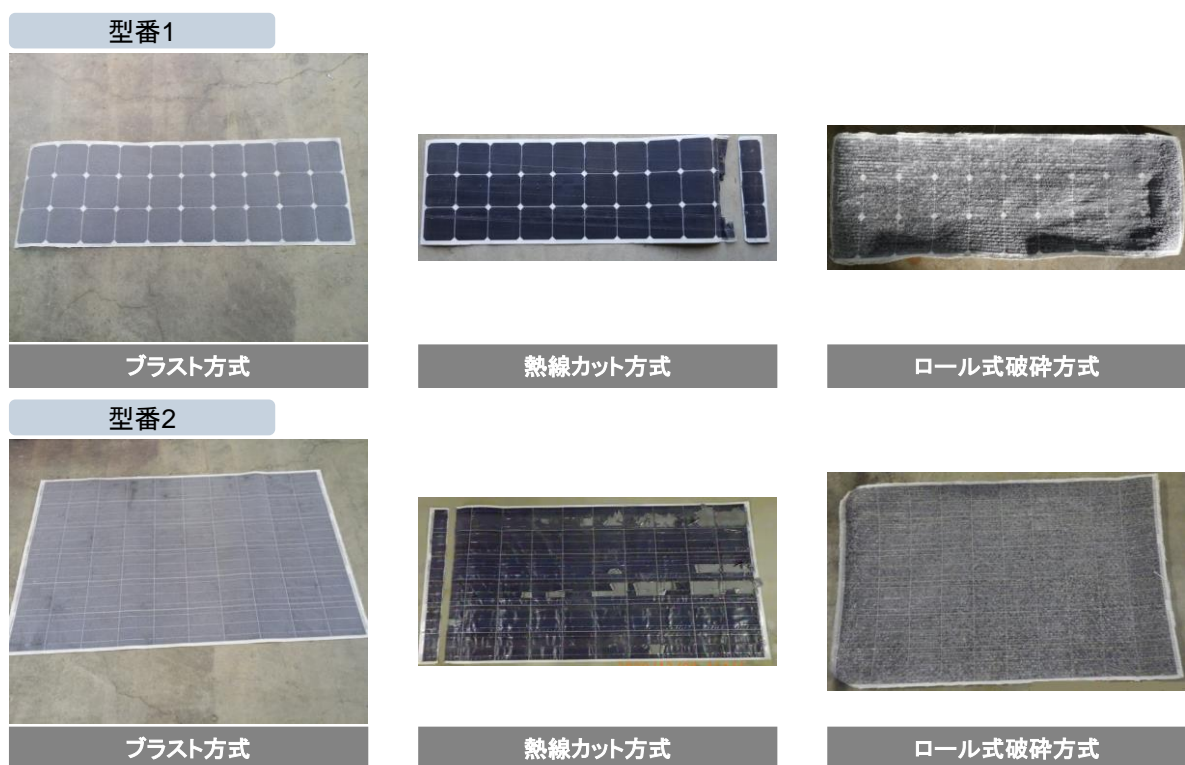
1) 入手した試験サンプルの外観は、図 II-2 から図 II-6 に示すとおり。

(出典)E&ES が作成

本業務の下で試験サンプルを入手することを通して、以下のことが明らかになった。

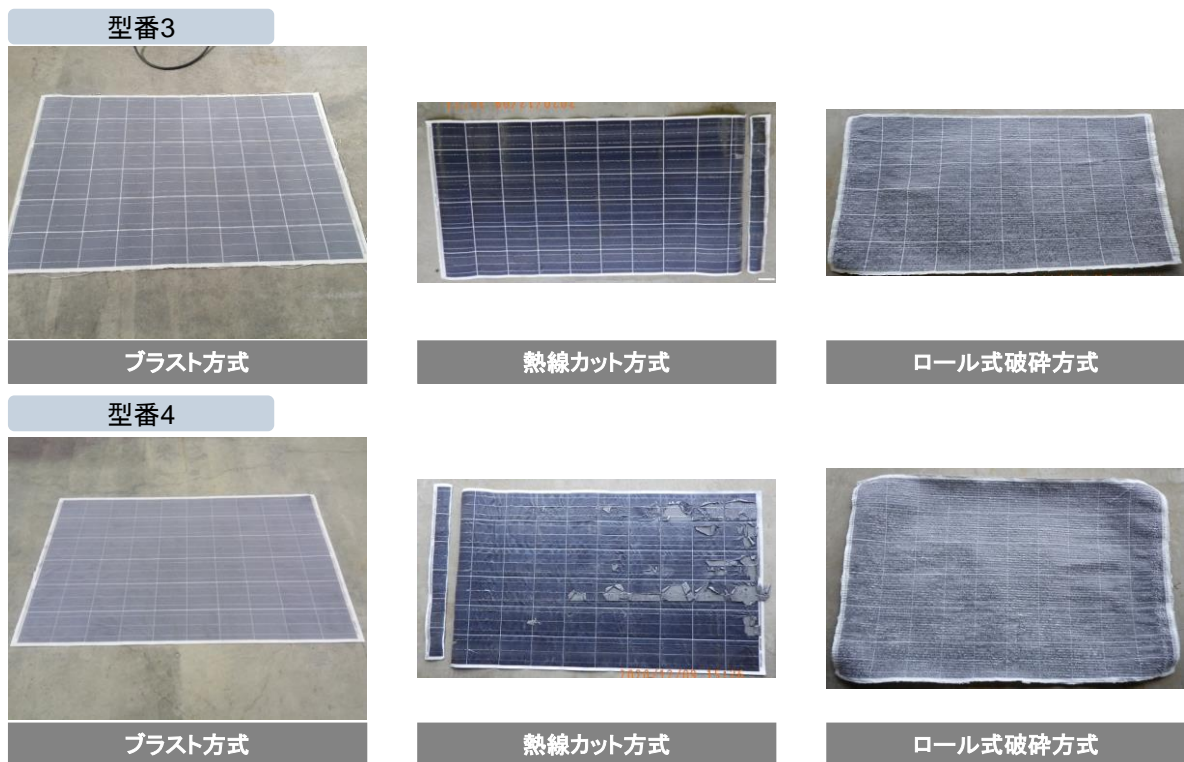
- 熱線カット方式を施した後のいずれの試験サンプルについても、片側約 1 セル分が切断されていた。熱線カット方式のオペレーターによると、当該装置の機構として、片側約 1 セル分は切断されるものであり、これは装置の不具合に由来するものではない。

- 程度の差はあったが、熱線カット方式を施した後の試験サンプルについては、計 10 の型番のうち、5 の型番(型番 2、型番 4、型番 5、型番 6、および型番 7)で封止材層とシリコン層が破けていた。熱線カット方式のオペレーターによると、当該装置の機構として、熱線カット方式によるガラス除去の工程で封止材層とシリコン層は破け得るものである。なお、封止材層とシリコン層が破れることで、セル/EVA シート中に含有されている有用金属(銀・銅)も一定程度失われていることが想定された。
- 熱線カット方式を施した後の試験サンプルについては、1 つの型番あたり、最も多い型番(型番 6)の場合、計 20 枚のサンプルのうち、10 枚のサンプルで、ガラスが一部または全く除去されていなかった。熱線カット方式のオペレーターによると、当該装置では、型番に応じてガラス除去の条件を探索・設定する必要があることから、条件付けの工程でガラス未除去の試験サンプルが生じ得る。



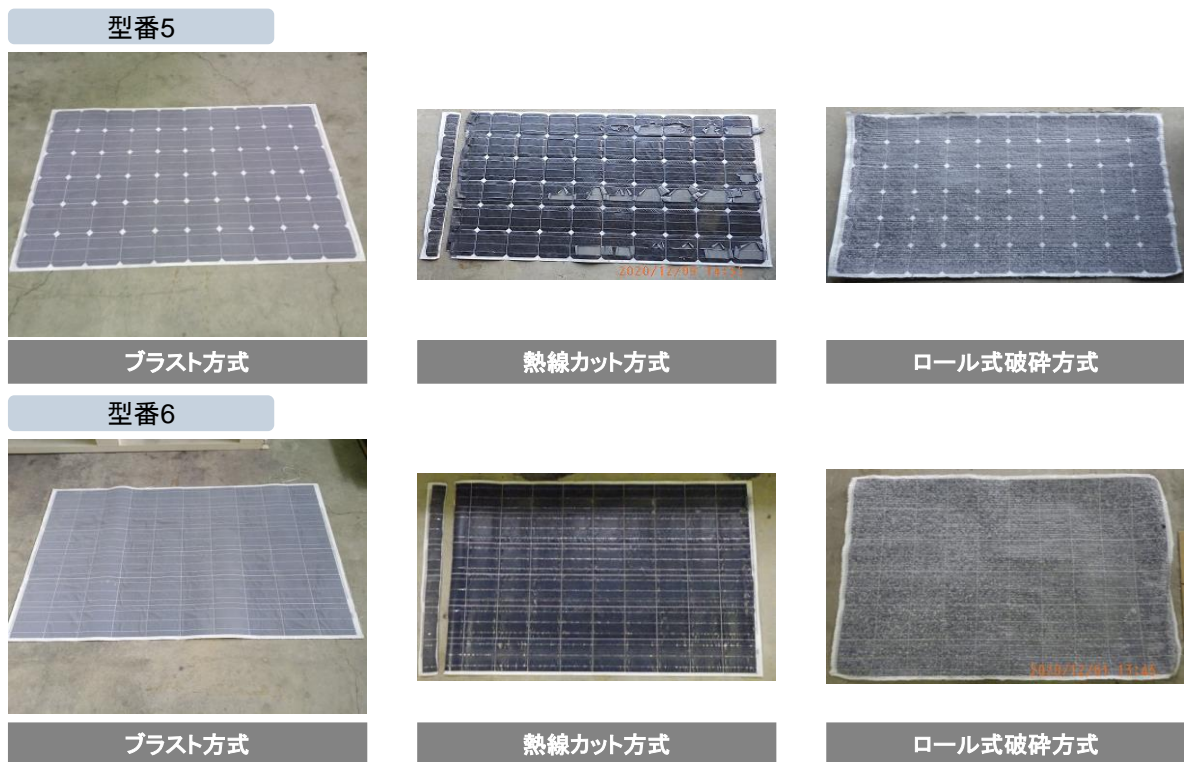
(出典)E&ES が作成

図 II-2 入手した試験サンプルの外観(型番 1 と型番 2)



(出典)E&ES が作成

図 II-3 入手した試験サンプルの外観(型番 3 と型番 4)



(出典)E&ES が作成

図 II-4 入手した試験サンプルの外観(型番 5 と型番 6)



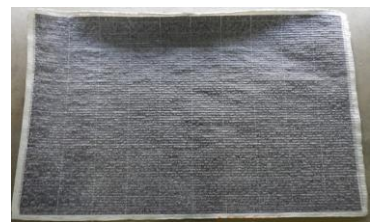
型番7



ブラスト方式



熱線カット方式

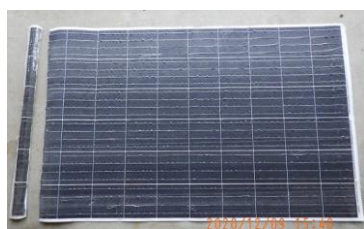


ロール式破碎方式

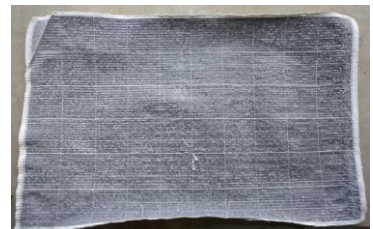
型番8



ブラスト方式



熱線カット方式

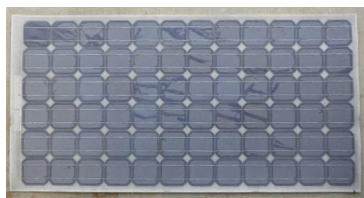


ロール式破碎方式

(出典)E&ES が作成

図 II-5 入手した試験サンプルの外観(型番 7 と型番 8)

型番9



ブラスト方式



熱線カット方式

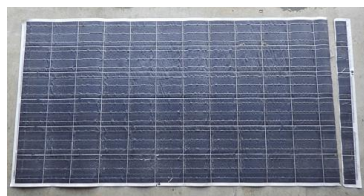


ロール式破碎方式

型番10



ブラスト方式



熱線カット方式



ロール式破碎方式

(出典)E&ES が作成

図 II-6 入手した試験サンプルの外観(型番 9 と型番 10)

(2) 試験サンプルの重量の平均値

DES で入手した試験サンプルについて、一部については秋田資源機構へ受け渡した分を除いて、重量を測定し、平均値を算出した(表 II-2 参照)。なお、熱線カット方式については、ガラスが一部または全く除去されていない試験サンプルがあったため、それらの試験サンプルは表 II-2 にて平均値・標準偏差を算出する際に除外した。

表 II-2 試験サンプルの重量の平均値と標準偏差

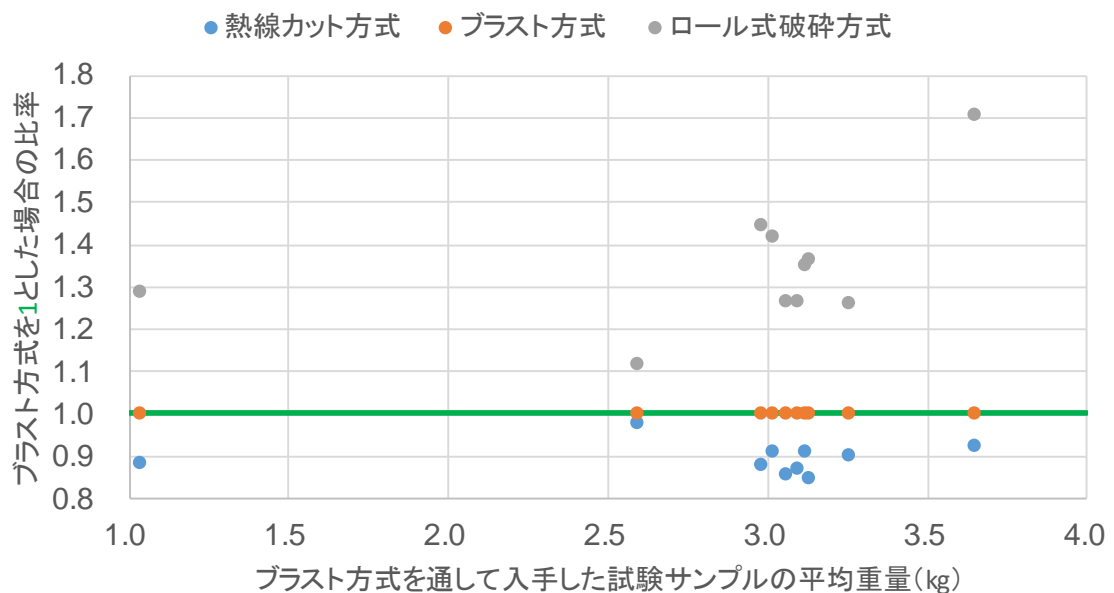
型番	ガラス除去方式	重量		
		平均値	標準偏差	重量測定に供したサンプル数
型番 1	ブラスト方式	1.0	0.0	17
	熱線カット方式	0.9	0.0	17
	ロール式破砕	1.3	0.0	17
型番 2	ブラスト方式	3.1	0.0	17
	熱線カット方式	2.6	0.1	16
	ロール式破砕	3.9	0.1	17
型番 3	ブラスト方式	3.0	0.0	20
	熱線カット方式	2.7	0.0	16
	ロール式破砕	4.3	0.1	17
型番 4	ブラスト方式	3.1	0.0	17
	熱線カット方式	2.7	0.1	15
	ロール式破砕	3.9	0.0	17
型番 5	ブラスト方式	3.0	0.0	17
	熱線カット方式	2.6	0.1	12
	ロール式破砕	4.3	0.1	17
型番 6	ブラスト方式	3.1	0.0	17
	熱線カット方式	2.8	0.1	7
	ロール式破砕	4.2	0.1	17
型番 7	ブラスト方式	3.1	0.0	20
	熱線カット方式	2.7	0.2	14
	ロール式破砕	4.3	0.1	17
型番 8	ブラスト方式	3.2	0.0	17
	熱線カット方式	2.9	0.0	16
	ロール式破砕	4.1	0.1	17
型番 9	ブラスト方式	2.6	0.0	20
	熱線カット方式	2.5	0.0	10
	ロール式破砕	2.9	0.1	17
型番 10	ブラスト方式	3.6	0.1	20
	熱線カット方式	3.4	0.1	18
	ロール式破砕	6.2	0.3	17

(出典)E&ES が作成

表 II-2 で示した平均重量について、ブラスト方式を通して入手した試験サンプルの平均重量を横軸にプロットし、縦軸にはブラスト方式を通して入手した試験サンプルの平均重量を 1 とした場合の熱線カット方式とロール式破砕方式を通して入手した試験サンプルの平均重量の比率を、図 II-7 に示す。図 II-7 から、以下のことが伺える。



- 10 の型番すべてについて、セル/EVA シートの平均重量は、熱線カット方式、ブラスト方式、ロール式破碎方式の順に大きくなる。
- セル数が30の型番1(ブラスト方式を通して入手した試験サンプルの平均重量が1.0kgの試験サンプル)の平均重量は、明らかに、セル数が60または72の他の試験サンプルの平均重量と異なる。
- 発電方式が両面発電の型番9(ブラスト方式を通して入手した試験サンプルの平均重量が2.6kgの試験サンプル)については、明らかに、発電方式が片面発電の他の試験サンプルと比べて、ブラスト方式を1とした場合の熱線カット方式とロール式破碎方式の平均重量の比率が異なる。
- セル数が72の型番10(ブラスト方式を通して入手した試験サンプルの平均重量が3.6kgの試験サンプル)のブラスト方式を1とした場合のロール式破碎方式の平均重量の比率は、明らかに、セル数が30または60の他の試験サンプルと異なる。
- 上記に挙げた型番1、型番9、および型番10を除いた後の7つの型番については、ブラスト方式を1とした場合の熱線カット方式の平均重量の比率は0.85～0.91であり、ロール式破碎方式の平均重量の比率は1.26～1.45である。



(出典)E&ES が作成

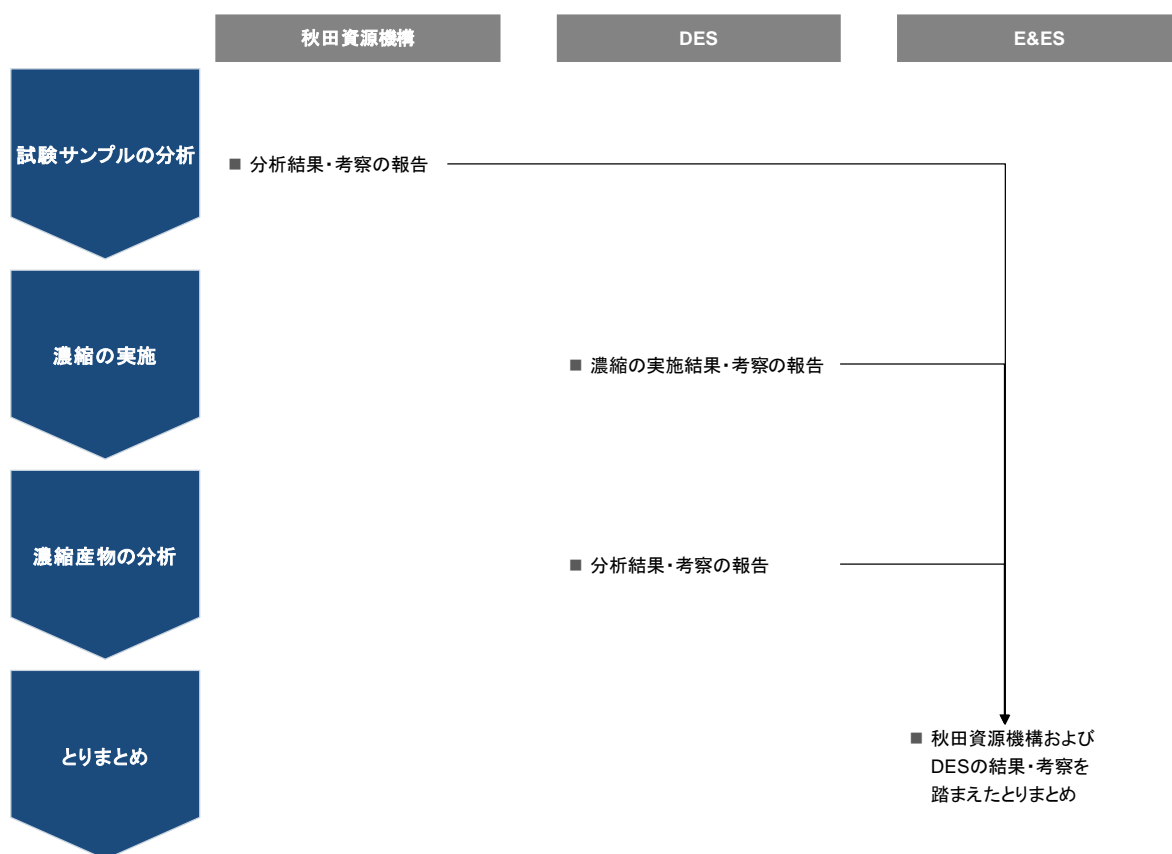
図 II-7 試験サンプルの重量(ブラスト方式を基準にした熱線カット方式とロール式破碎方式の比率)

## II-2 実サンプルを用いた検証

### II-2-1 検証方法

#### (1) 役割分担

本業務では、ラボスケールでの非鉄製錬原料の濃縮の実証およびセル/EVA シートの価値の評価方法の実証を行った。役割分担としては、試験サンプルの分析については、秋田資源機構が行った。秋田資源機構での実証の概要は、本報告書第 III 章にまとめている。金属の濃縮および濃縮産物の分析については、DES が行った。DES では、物理選別および熱処理により濃縮を行い、各濃縮手法の検証を行った。秋田資源機構および DES での検証結果はそれぞれ E&ES に報告され、E&ES がとりまとめを行った(図 II-8 参照)。



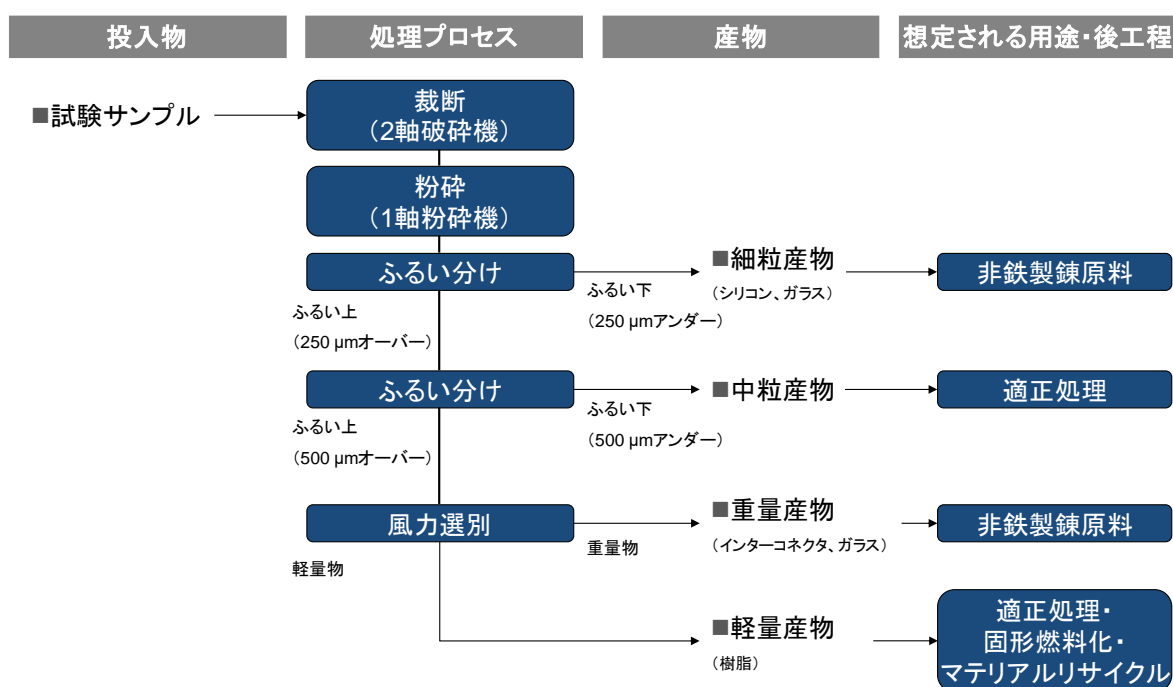
(出典)E&ES が作成

図 II-8 実サンプルを用いた検証での役割分担

## (2) 濃縮の実施方法

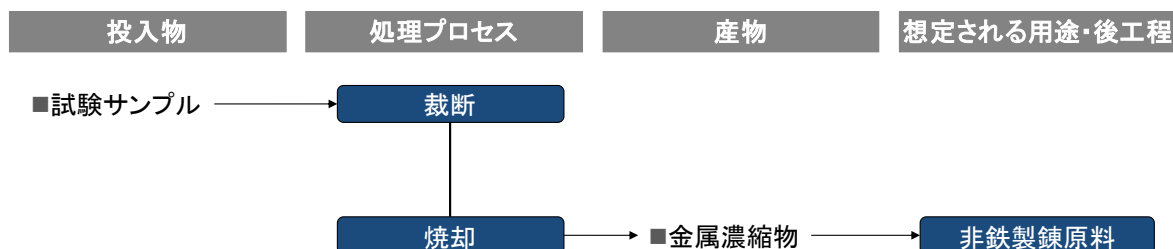
本業務では、図 II-9 と図 II-10 に示す物理選別と熱処理により金属濃縮を行った。物理選別では、主にシリコンセルとガラスから構成される「細粒産物」、主にインターコネクタとガラスから構成される「重量産物」、および主に樹脂から構成される「軽量産物」、ならびにそれらの混合物である「中粒産物」から構成される。

物理選別・熱処理プロセスには、30 の異なる試験サンプル(10 の異なる型番×3 つの異なるガラス除去方式)を投入した。物理選別へ投入するセル/EVA シートの重量は 10kg 前後となるように調整し、熱処理への投入物は 1 枚のセル/EVA シートとした。



(出典)E&ES が作成

図 II-9 本業務の下での濃縮方法(物理選別)



(出典)E&ES が作成

図 II-10 本業務の下での濃縮方法(熱処理)

### (3) 濃縮産物の分析項目

物理選別後の「細粒産物」、「重量産物」、および「軽量産物」、ならびに熱処理後の金属濃縮物については、銀・銅・鉛の含有量分析を行った。また、物理選別後の産物のうち、非鉄製錬原料として扱い難い「軽量産物」については、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」(昭和 48 年 2 月 17 日環境庁告示 13 号)にしたがって、鉛の溶出試験を行った。また、固形燃料化としての用途検討のため、物理選別後の軽量産物については、高位発熱量、水分、灰分、塩素、フッ素の工業分析を行った。

## II-2-2 試験・分析の結果(型番の違い、ガラスの分離工程の違いの考察を含む)

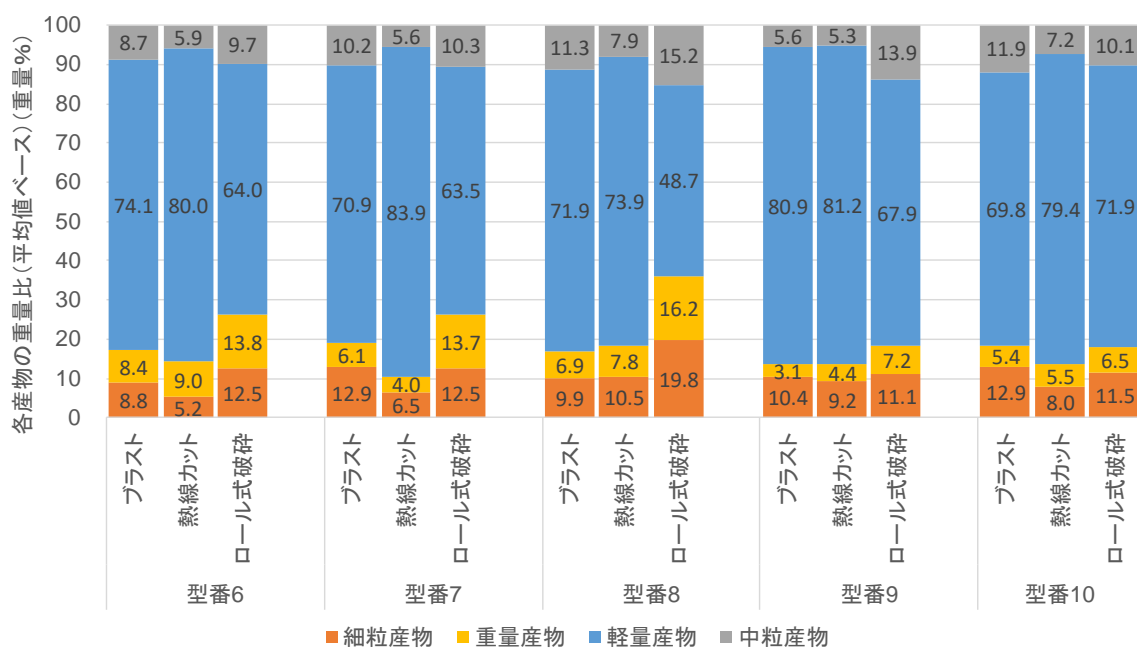
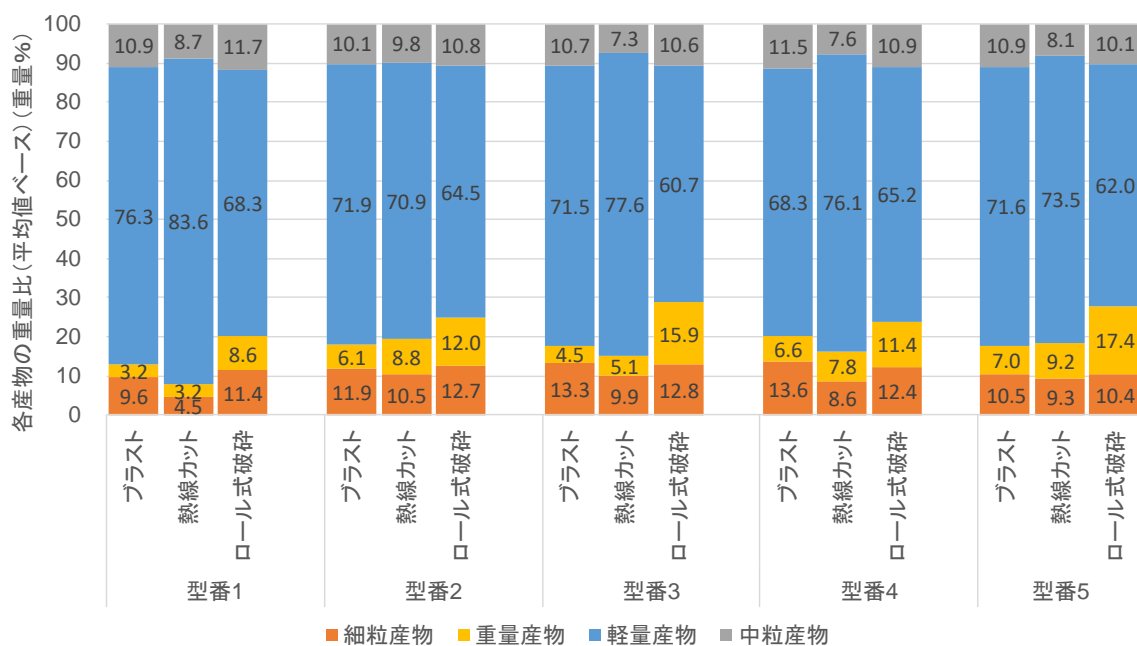
### (1) 物理選別・熱処理で得られる各産物の重量

物理選別を行った結果、各産物の重量比は図 II-11 に示すとおりであった。明らかになった事項は以下のとおりである。

- 型番 10 を除くいずれの型番でも、各型番の「細粒産物」および「重量産物」の重量割合の合計は、ロール式破碎方式が、他の二つのガラス分離方式に比べて大きい。ここから示唆されることとしては、ロール式破碎方式は、他の二つのガラス分離方式に比べてガラスの残留割合が多かったことから、物理選別を行うことで、セル/EVA シートに残留していたガラスは、「細粒産物」および「重量産物」に分配され得る。型番 10 は、他の型番に比べてロール式破碎方式へのガラス残留分が多かったことから、そういった場合、物理選別は異なる振る舞いを示す。
- 中粒産物の重量割合は、各産物の合計重量の全体の 10%程度を占める。

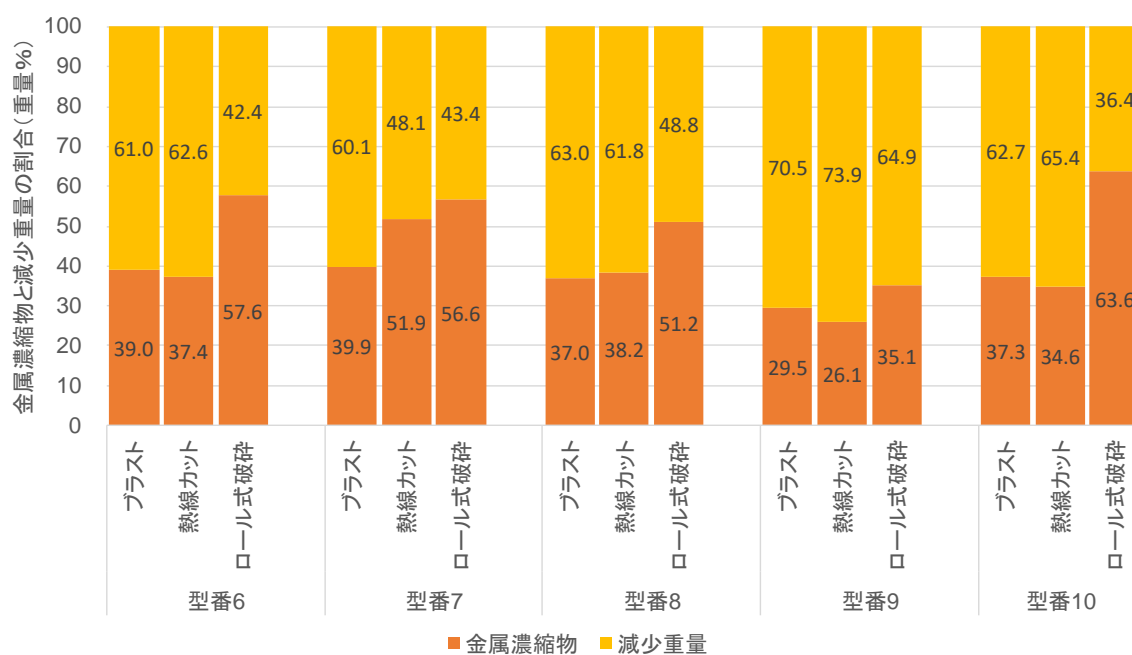
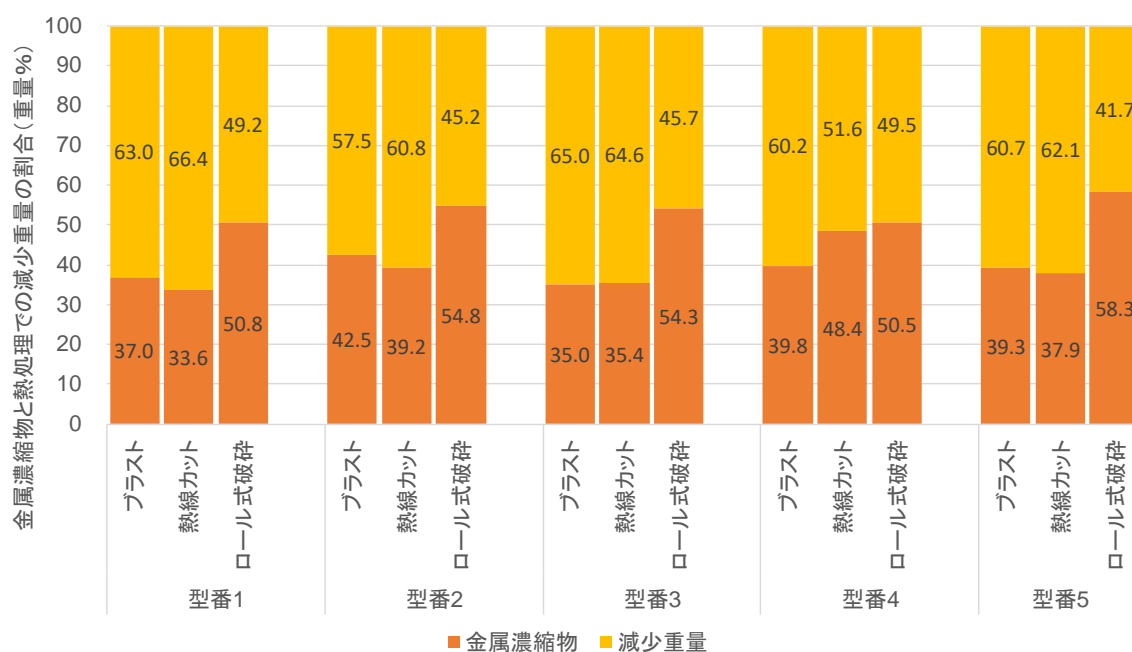
また、熱処理を行った結果、金属濃縮物の重量、および重量の減少割合は図 II-12 に示すとおりであった。明らかになった事項は、以下のとおりである。

- ブラスト方式および熱線カット方式での重量減少割合は概ね 6 割程度、ロール式破碎方式での重量減少割合は概ね 5 割程度である。不燃物であるガラスが多いほど、すなわちロール式破碎方式では、他の二つのガラス除去方式に比べて、熱処理での重量減少割合が小さい。



(出典)E&ES が作成

図 II-11 物理選別の各産物の重量比



(出典)E&ES が作成

図 II-12 金属濃縮物と熱処理での減少重量の割合

## (2) 濃縮産物の分析結果(物理選別)

物理選別で得られた産物のうち、銀が濃縮される「細粒産物」、銅が濃縮される「重量産物」、樹脂が濃縮される「軽量産物」について、銀と銅と鉛の含有量分析を行った(表 II-3 参照)。各産物について、銀の含有率が特殊な型番 1 と型番 9 を除いた型番の平均をとると、以下のとおりである。

- 細粒産物中の含有率
  - ✧ ブラスト Ag 6,638 g/t, Cu 451 g/t, Pb 1,700 g/t
  - ✧ 熱線カット Ag 8,450 g/t, Cu 691 g/t, Pb 2,550 g/t
  - ✧ ロール式破碎 Ag 4,588 g/t, Cu 605 g/t, Pb 1,600 g/t
- 重量産物中の含有率
  - ✧ ブラスト Ag 8,388 g/t, Cu 792,500 g/t, Pb 32,875 g/t
  - ✧ 熱線カット Ag 6,788 g/t, Cu 755,000 g/t, Pb 35,875 g/t
  - ✧ ロール式破碎 Ag 3,438 g/t, Cu 370,000 g/t, Pb 15,013 g/t
- 軽量産物中の含有率
  - ✧ ブラスト Ag 1,570 g/t, Cu 21,205 g/t, Pb 1,379 g/t
  - ✧ 熱線カット Ag 1,493 g/t, Cu 20,263 g/t, Pb 1,656 g/t
  - ✧ ロール式破碎 Ag 1,169 g/t, Cu 10,398 g/t, Pb 948 g/t

明らかになった事項は、以下のとおりである。

- ブラスト、熱線カット、ロール式破碎方式、いずれのガラス分離方式であっても、物理選別で得られる産物である細粒産物中の銀、それと重量産物中の銅は、非鉄製錬の製錬原料となり得る品位である。

また、特殊品である型番 1 と型番 9 を除く各型番について、本報告書表 III-3 に示すセル/EVA シート中の銀と銅の品位に基づき、物理選別で得られる細粒産物・重量産物の産物中の銀と銅の濃縮率を算出した(表 II-4 参照)。表 II-4 から、ブラスト、熱線カット、ロール式破碎方式、いずれのガラス分離方式であっても、物理選別を行うことで、セル/EVA シート中の銀と銅は、物理産別の産物である細粒産物・重量産物に濃縮されていることが伺える。

表 II-3 物理選別で得られる産物中の金属の含有率

細粒産物

メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]	メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]
型番1	ブラスト	49	12,000	890	型番6	ブラスト	4,800	450	1,500
	熱線カット	96	60,000	1,200		熱線カット	6,700	850	2,100
	ロール破砕	30	5,900	1,100		ロール破砕	3,900	570	1,400
型番2	ブラスト	8,200	530	1,900	型番7	ブラスト	6,000	370	1,500
	熱線カット	10,000	500	2,600		熱線カット	7,600	950	2,100
	ロール破砕	6,100	620	1,900		ロール破砕	4,500	660	1,300
型番3	ブラスト	6,700	420	1,200	型番8	ブラスト	6,100	480	1,600
	熱線カット	8,200	440	1,800		熱線カット	7,200	720	2,100
	ロール破砕	4,500	540	1,200		ロール破砕	4,300	680	1,500
型番4	ブラスト	4,100	410	1,500	型番9	ブラスト	21,000	310	5,600
	熱線カット	5,900	520	2,500		熱線カット	27,000	400	6,100
	ロール破砕	3,900	470	1,600		ロール破砕	15,000	230	4,100
型番5	ブラスト	9,400	360	2,300	型番10	ブラスト	7,800	590	2,100
	熱線カット	12,000	850	4,100		熱線カット	10,000	700	3,100
	ロール破砕	5,200	590	2,300		ロール破砕	4,300	710	1,600

重量産物

メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]	メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]
型番1	ブラスト	48	790,000	54,000	型番6	ブラスト	10,000	590,000	28,000
	熱線カット	3,200	690,000	46,000		熱線カット	4,800	550,000	26,000
	ロール破砕	1,300	400,000	27,000		ロール破砕	3,200	290,000	14,000
型番2	ブラスト	14,000	890,000	33,000	型番7	ブラスト	6,300	870,000	22,000
	熱線カット	10,000	840,000	37,000		熱線カット	3,400	650,000	27,000
	ロール破砕	1,900	250,000	12,000		ロール破砕	2,400	150,000	8,300
型番3	ブラスト	11,000	830,000	34,000	型番8	ブラスト	7,900	810,000	34,000
	熱線カット	9,300	800,000	44,000		熱線カット	6,400	820,000	39,000
	ロール破砕	5,200	500,000	9,400		ロール破砕	4,100	380,000	10,000
型番4	ブラスト	2,300	790,000	47,000	型番9	ブラスト	36,000	700,000	59,000
	熱線カット	7,800	870,000	38,000		熱線カット	22,000	710,000	63,000
	ロール破砕	7,700	860,000	39,000		ロール破砕	14,000	290,000	31,000
型番5	ブラスト	12,000	870,000	40,000	型番10	ブラスト	3,600	690,000	25,000
	熱線カット	8,400	730,000	32,000		熱線カット	4,200	780,000	44,000
	ロール破砕	1,400	410,000	21,000		ロール破砕	1,600	120,000	6,400

軽量産物

メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]	メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]
型番1	ブラスト	160	16,000	350	型番6	ブラスト	1,100	8,700	1,000
	熱線カット	25	43,000	1,000		熱線カット	1,400	11,000	1,500
	ロール破砕	6	19,000	470		ロール破砕	1,000	15,000	1,600
型番2	ブラスト	1,500	14,000	1,300	型番7	ブラスト	1,900	100,000	4,500
	熱線カット	2,100	14,000	1,500		熱線カット	990	39,000	2,500
	ロール破砕	2,500	22,000	1,400		ロール破砕	810	24,000	1,700
型番3	ブラスト	760	4,800	700	型番8	ブラスト	1,900	70	220
	熱線カット	970	45,000	2,900		熱線カット	1,500	8,100	620
	ロール破砕	780	7,900	810		ロール破砕	760	14,000	1,000
型番4	ブラスト	800	13,000	1,300	型番9	ブラスト	3,100	12,000	1,700
	熱線カット	880	12,000	860		熱線カット	2,300	12,000	1,500
	ロール破砕	1,400	77	300		ロール破砕	2,400	38,000	3,900
型番5	ブラスト	1,200	69	610	型番10	ブラスト	3,400	29,000	1,400
	熱線カット	2,000	23,000	2,700		熱線カット	2,100	10,000	670
	ロール破砕	1,100	78	500		ロール破砕	1,000	130	270

(出典)E&ES が作成



表 II-4 物理選別の銀と銅の濃縮率

型番	ガラス分離方法	セル/EVAシート		細粒産物・重量産物		濃縮率	
		含有率		含有率		銀	銅
		銀	銅	銀	銅		
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
		1)	2)	3)	4)		
型番2	ブラスト方式	3,485	76,501	10,166	302,011	2.9	3.9
	熱線カット方式	4,069	89,327	10,000	383,259	2.5	4.3
	ロール式破碎方式	2,747	60,294	4,060	121,775	1.5	2.0
型番3	ブラスト方式	2,273	59,535	7,777	208,188	3.4	3.5
	熱線カット方式	2,496	65,373	8,575	273,214	3.4	4.2
	ロール式破碎方式	1,602	41,956	4,887	276,477	3.1	6.6
型番4	ブラスト方式	1,411	73,353	3,509	259,494	2.5	3.5
	熱線カット方式	1,615	83,982	6,803	413,895	4.2	4.9
	ロール式破碎方式	1,113	57,904	5,726	413,452	5.1	7.1
型番5	ブラスト方式	3,247	101,259	10,447	350,486	3.2	3.5
	熱線カット方式	3,678	114,702	10,211	363,161	2.8	3.2
	ロール式破碎方式	2,244	69,979	2,823	256,640	1.3	3.7
型番6	ブラスト方式	1,750	108,643	7,328	287,082	4.2	2.6
	熱線カット方式	1,918	119,046	5,501	347,321	2.9	2.9
	ロール式破碎方式	1,292	80,171	3,532	152,667	2.7	1.9
型番7	ブラスト方式	2,502	70,254	6,096	278,712	2.4	4.0
	熱線カット方式	2,943	82,642	5,993	249,266	2.0	3.0
	ロール式破碎方式	1,831	51,415	3,402	78,769	1.9	1.5
型番8	ブラスト方式	1,668	62,990	6,842	334,088	4.1	5.3
	熱線カット方式	1,845	69,670	6,859	349,852	3.7	5.0
	ロール式破碎方式	1,323	49,945	4,210	171,488	3.2	3.4
型番10	ブラスト方式	2,119	51,597	6,556	204,838	3.1	4.0
	熱線カット方式	2,287	55,695	7,621	320,293	3.3	5.8
	ロール式破碎方式	1,241	30,213	3,329	43,622	2.7	1.4

(注 1) セル/EVA シート中の銀と銅の含有率は、表 III-3 から引用

(注 2) 細粒産物・重量産物中の銀と銅の含有率の算出にあたっては、まずセル/EVA シート 1 枚あたりの細粒産物と重量産物の重量を表 II-2 と図 II-11 から求め、次いで表 II-3 により細粒産物と重量産物中の銀と銅の含有量を求め、最後に銀と銅の含有量を細粒産物・重量産物の重量で除して求めた。

(出典)E&ES が作成

### (3) 濃縮産物の分析結果(熱処理)

熱処理で得られる金属濃縮物について、銀と銅と鉛の含有量分析を行った。結果は表 II-5 に示すとおりである。

表 II-5 熱処理で得られる産物中の金属の含有率

メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]	メーカー	方式	Ag [g/t]	Cu [g/t]	Pb [g/t]
型番1	ブラスト	23	200,000	3,200	型番6	ブラスト	5,700	40,000	5,500
	熱線カット	110	260,000	4,200		熱線カット	5,300	21,000	5,500
	ロール破碎	28	130,000	1,800		ロール破碎	4,600	86,000	3,400
型番2	ブラスト	6,300	8,400	3,200	型番7	ブラスト	7,000	1,100	1,000
	熱線カット	7,000	200,000	9,100		熱線カット	3,000	6,500	2,600
	ロール破碎	2,200	110	380		ロール破碎	6,700	7,000	930
型番3	ブラスト	5,300	3,600	2,500	型番8	ブラスト	4,600	90,000	5,100
	熱線カット	7,000	3,100	4,100		熱線カット	7,700	170,000	9,200
	ロール破碎	3,300	2,800	1,300		ロール破碎	4,200	25,000	2,700
型番4	ブラスト	5,700	300,000	16,000	型番9	ブラスト	18,000	120,000	12,000
	熱線カット	7,100	4,700	4,900		熱線カット	32,000	210,000	28,000
	ロール破碎	3,000	98,000	6,100		ロール破碎	16,000	25,000	5,400
型番5	ブラスト	6,700	6,000	2,300	型番10	ブラスト	9,900	93,000	4,700
	熱線カット	8,000	78,000	8,600		熱線カット	7,500	310,000	18,000
	ロール破碎	3,900	21,000	1,700		ロール破碎	2,200	1,800	1,200

(出典)E&ES が作成

ここで、含有率が特殊な型番1と型番9を除いた型番の平均をとると、以下のとおりである。

- 金属濃縮物中の含有率
  - ✧ ブラスト Ag 6,400 g/t, Cu 67,763 g/t, Pb 5,038 g/t
  - ✧ 熱線カット Ag 6,575 g/t, Cu 99,163 g/t, Pb 7,750 g/t
  - ✧ ロール式破碎 Ag 3,763 g/t, Cu 30,214 g/t, Pb 2,214 g/t

熱処理で得られる金属濃縮物中の銅と鉛の含有率は、ばらつきが大きい。これは、分析の前処理工程での縮分に由来すると考えられる。物理選別方式では数 mm まで粉碎するのに対し、熱処理では数十 mm の大きさを処理するため、金属濃縮物の個体差が大きく、どの個体を分析対象とするかで金属含有率にばらつきが生じる。

### (4) 鉛の溶出試験

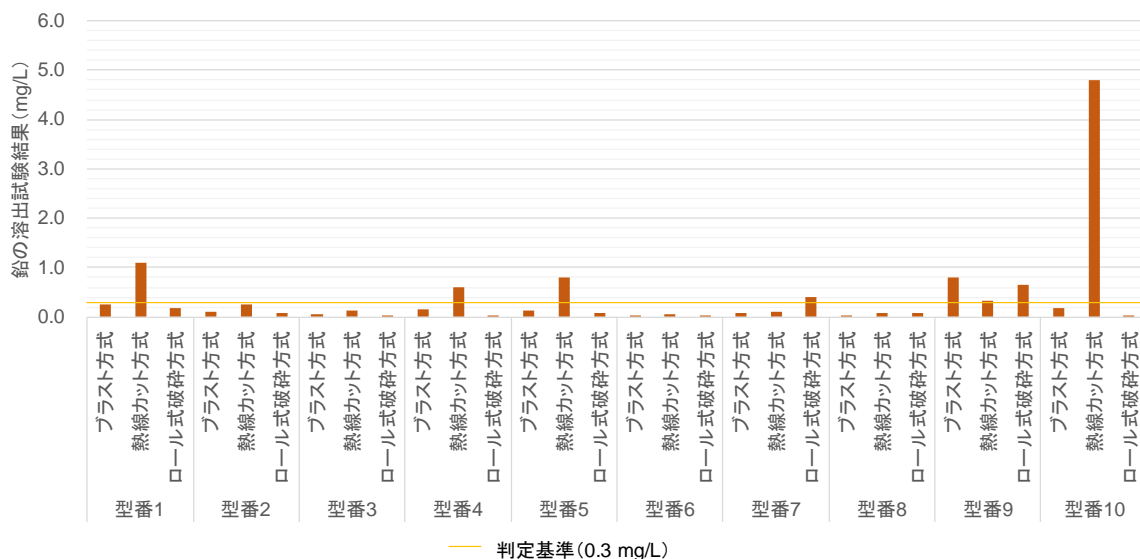
物理選別で得られる産物のうち、非鉄製錬原料として扱い難い軽量産物について、鉛の溶出試験を行った(図 II-13 参照)。計 30 の検体のうち、8 の検体で鉛に係る金属等を含む産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準(0.3mg/L)を超過している。

軽量産物の鉛が判定基準を超過するのは、セル/EVA シートを物理選別することでインタ

一コネクタのはんだ面が露出し、さらに、軽量産物にもインターコネクタが一定量分配されるためであると考える。

現在の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(環境省(2018))によると、太陽光パネルを管理型最終処分場に埋立処分する場合は、「廃棄物処理法に定める処理基準に基づき、廃プラスチック類を最大径おおむね 15 センチメートル以下になるよう破碎等をおこなったうえで、管理型最終処分場に埋立することが必要である。」という記載がなされている。この際、セル/EVAシートを管理型最終処分場に埋立処分するには、15 センチメートル以下になるように破碎等しなければならず、その操作によりインターコネクタのはんだ面が露出する可能性があり、結果、鉛に係る埋立処分の判定基準を超過する可能性がある。ガイドライン(環境省(2018))でも示唆されているが、鉛に係る埋立処分の判定基準を超過する廃棄物を管理型最終処分場に埋立することは、維持管理の観点から、管理型最終処分場の運用に支障をきたすことが、改めて懸念される。

以上から、セル/EVAシートは、その中に含有されている有用金属である銀と銅を回収する観点だけでなく、むしろ有害物質を固定するという観点から、金属濃縮を行い、濃縮産物を回収することが環境に配慮した対応と言える。



(出典)E&ES が作成

図 II-13 物理選別で得られる軽量産物からの鉛の溶出試験結果

(5) 固形燃料化としての用途の検討(工業分析)

物理選別で得られる産物のうち重量割合で 7 割程度を占める軽量産物について、固形燃料化としての用途検討のため、工業分析を行った。結果は、表 II-6 に示すとおりである。軽量産物を RPF (Refuse derived paper and plastics densified Fuel) 原料としてみた場合、灰分が多いのが欠点であるものの、高位発熱量は高く、また塩素分の低さが長所である。なお、RPF の規格にはフッ素が含まれていないものの、軽量産物には 0.5wt% でフッ素が含まれていることから、RPF 原料としての利用にあたっては、フッ素分に留意をする必要がある。

表 II-6 物理選別で得られる軽量産物の工業分析結果

型番	ガラス除去方式	高位発熱量 J/g	水分 %	灰分 %	塩素 %	フッ素 %
型番1	ブラスト	30,300	<0.1	23.2	<0.01	0.29
	熱線カット	30,300	<0.1	18.6	<0.01	0.65
	ロール式破砕	27,300	0.3	30.3	<0.01	0.34
型番2	ブラスト	31,100	0.3	26.8	<0.01	0.29
	熱線カット	30,900	3.35	23.8	<0.01	0.49
	ロール式破砕	25,000	0.35	48.2	<0.01	0.28
型番3	ブラスト	33,500	0.58	22.9	<0.01	<0.01
	熱線カット	32,600	0.45	21.4	<0.01	0.02
	ロール式破砕	26,500	0.25	35	<0.01	0.01
型番4	ブラスト	31,400	0.35	23.5	<0.01	<0.01
	熱線カット	31,500	0.55	29.6	<0.01	<0.01
	ロール式破砕	32,200	0.45	27.4	<0.01	<0.01
型番5	ブラスト	32,700	0.5	23.4	<0.01	0.51
	熱線カット	35,500	0.45	17.1	0.01	1.47
	ロール式破砕	29,300	0.1	30.8	<0.01	0.22
型番6	ブラスト	30,700	0.2	26.2	<0.01	0.85
	熱線カット	28,200	0.25	22.6	<0.01	0.8
	ロール式破砕	24,400	0.8	28	<0.01	0.38
型番7	ブラスト	31,400	0.55	26.6	0.01	0.36
	熱線カット	31,800	0.4	23.6	<0.01	0.59
	ロール式破砕	26,500	0.4	35.1	<0.01	0.19
型番8	ブラスト	33,700	0.5	27.4	<0.01	0.23
	熱線カット	32,500	0.45	25.6	<0.01	0.26
	ロール式破砕	29,800	0.35	23.1	<0.01	0.18
型番9	ブラスト	35,800	0.4	13.7	<0.01	0.41
	熱線カット	35,700	0.35	15.7	0.01	0.96
	ロール式破砕	33,800	<0.1	16.8	0.01	0.36
型番10	ブラスト	32,500	0.5	23	<0.01	0.04
	熱線カット	29,800	0.5	30.5	<0.01	0.16
	ロール式破砕	27,400	0.35	34.9	0.01	0.04
RPFの品質	RPF-coke	33,000以上	3以下	5以下	0.6以下	なし
	RPF A	25,000以上	5以下	10以下	0.3以下	なし
	RPF B	25,000以上	5以下	10以下	0.3を超え0.6以下	なし
	RPF C	25,000以上	5以下	10以下	0.6を超え2.0以下	なし

(注) RPF の品質は、一般社団法人日本 RPF 工業会のウェブページから引用した。

(出典) E&ES が作成

## II-3 濃縮手法の提案

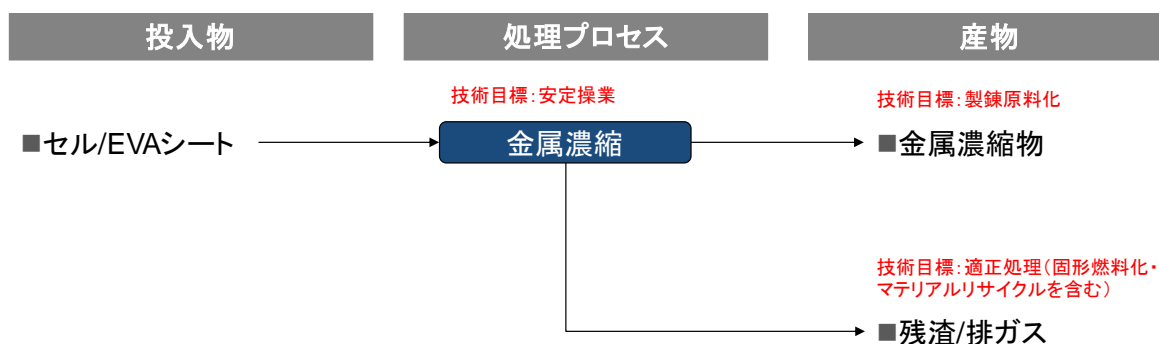
### (1) 非鉄金属製錬の視点も踏まえた濃縮の技術目標

金属濃縮プロセスの技術目標を、図 II-14 のとおり整理した。金属濃縮の事業化を想定した場合、1) 金属濃縮プロセスの安定操業、2) 金属濃縮物の製錬原料化、3) 残渣(排ガス含む)の適正処理が技術目標となり得る。

1) の金属濃縮プロセス安定操業については、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下で、安定操業の視点を含めた金属濃縮設備の運用検証を行う。

2) の製錬原料化については、II-2-2(2)に示したとおり、これまでに E&ES が得ている知見によると、本業務で入手した試験サンプルのうち特殊品である型番 1 と型番 9 を除いて平均をとれば、物理選別の産物である細粒産物中の銀、それと重量産物中の銅は、非鉄製錬の製錬原料となり得る。2021 年度に継続実施を計画している本業務の下では、金属濃縮の産物が製錬原料になり得るか非鉄製錬事業者に協力を求め、検証を行う計画である。

3) の適正処理については、II-2-2(4)に示したとおり、物理選別後の軽量産物は、鉛の溶出試験の結果によると、前処理なしには管理型最終処分場で埋立し難い。また、II-2-2(5)に示したとおり、固形燃料化としての用途は想定でき得るが、灰分とフッ素分についてさらなる検討が必要である。2021 年度に継続実施を計画している本業務の下では、金属濃縮で生じる残渣と排ガスの適正処理について、引き続き検証を行う。



(出典)E&ES が作成

図 II-14 金属濃縮プロセスの技術目標

### (2) 濃縮工程の経済合理性

金属濃縮の収入・費用の構造は、3 つの因子により決定される。1 つ目は金属濃縮(物理選別、または熱処理)に要する費用、2 つ目は残渣/排ガスの適正処理費(物理選別であれば主に軽量産物の適正処理費、熱処理であれば排ガス処理費)、3 つ目は金属濃縮物の非

鉄製鍊所への受け渡しに伴い生じる収入または費用である。これら 3 つの因子の収入と費用の和を取り、費用が収入に比べて大きい場合、セル/EVA シートの排出事業者からの処理費を得ることで、金属濃縮事業が成り立つ。

加えて、事業として成立するためには、他の処理方法に比べて、金属濃縮事業を選択することが経済的に合理的である必要がある。仮に、他の処理方法として、処理量によらず容積あたりの処理単価が一定の管理型最終処分場を比較対象とした場合、管理型最終処分場の処理費と金属濃縮の処理費が同等であれば、金属濃縮事業が排出事業者から選択され得る。

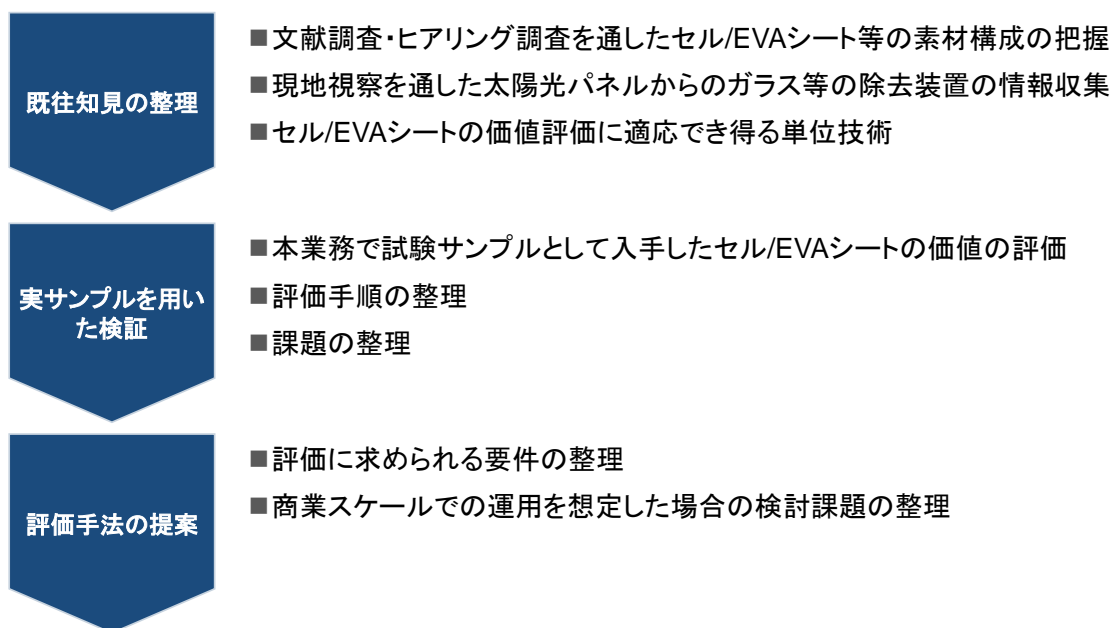
なお、これまでに E&ES が得た知見に基づき、セル/EVA シートは現状、処理量によらず容積あたりの処理単価が一定の管理型最終処分場で埋立されていると想定していたが、II-2-2(4)に示したとおり、廃棄物処理法の処理基準に従って 15cm 以下になるまでセル/EVA シートを破砕した場合、インターコネクタが露出し、結果、鉛に係る埋立処分の判定基準を超過することが想定される。現状は、情報不足等に起因してセル/EVA シートは管理型最終処分場で埋立処分され得るが、今後は埋立処分され難くなることが想定される。

### (3) 商業スケールでの運用を想定した場合の検討課題

上記の技術目標で述べた検討課題について、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下では検証を行う。

### 第Ⅲ章 セル/EVA シートの価値の評価方法の実証(実証事業 2)

本業務では、秋田資源機構が中心となって、セル/EVAシートの価値の評価方法の実証を行った。実証内容は大きく 3 つに分けることができる。まず、文献調査・ヒアリング調査・現地視察を通して既往知見の整理を行った。次いで、本業務で入手したサンプルを用いて、価値の評価を行った。そのうえで、評価手法の提案を行った(図 III-1 参照)。



(出典)E&ES が作成

図 III-1 セル/EVA シートの価値の評価方法の実証のフロー

#### Ⅲ-1 既往知見の整理

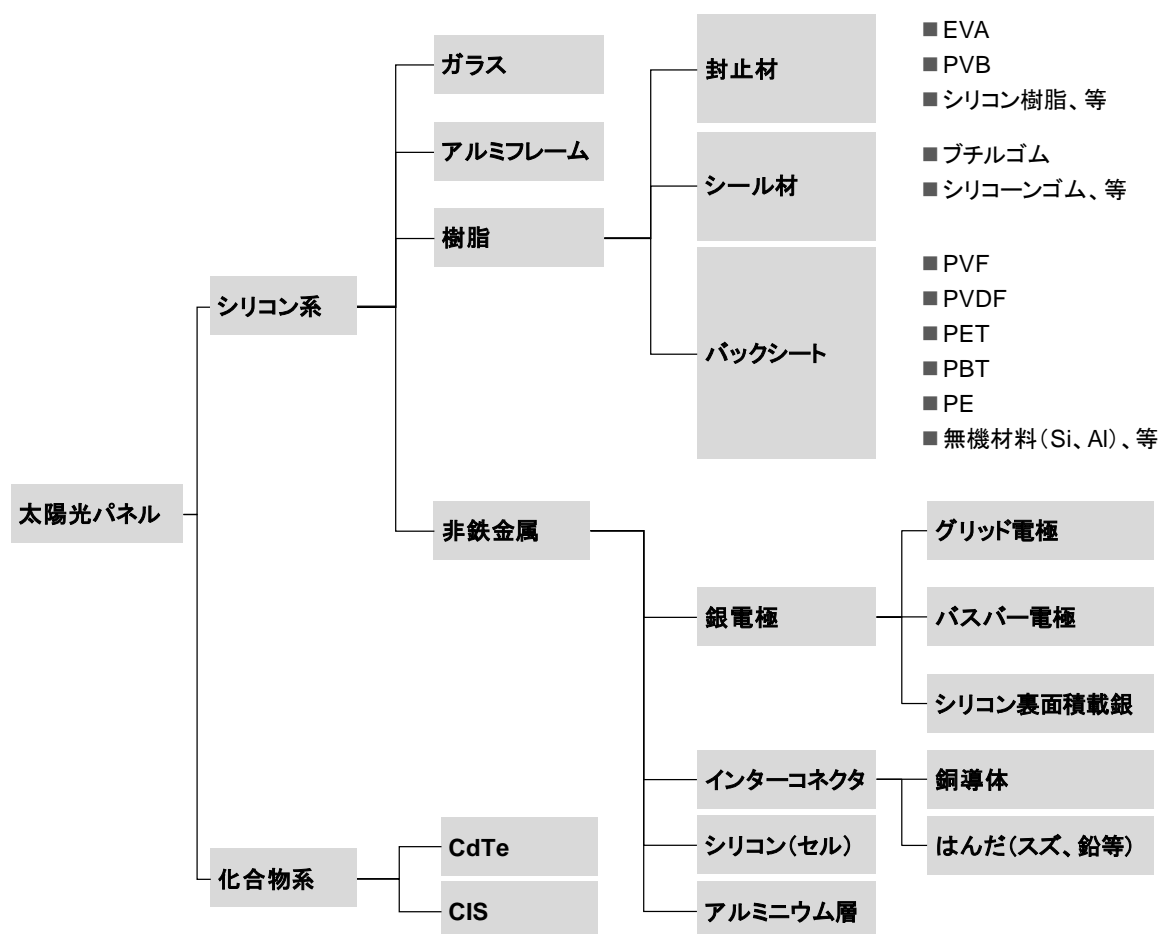
##### Ⅲ-1-1 セル/EVA シート等の素材構成

太陽光パネルは半導体を内蔵し、その半導体の特性を利用して太陽の光エネルギーを電気エネルギーに変換する装置であり、用いられる半導体の種類により「シリコン系」と「化合物系」<sup>6</sup>に大別される。

市場シェアの大半を占めるシリコン系の太陽光パネルであれば、異なるメーカーのものでも概ね同じ素材で構成され、その素材構成は重量比が大きい順から、ガラス、アルミフレーム、封止材・バックシートからなる樹脂、シリコン、インターコネクタ・電極材からなる非鉄金属である。本業務の「非鉄製錬原料の濃縮の実証(実証事業1)」と「セル/EVA シートの価値の評価方法の実証(実証事業2)」では、シリコン系の太陽光パネルからガラスとアルミフレームを除

<sup>6</sup> 日本に導入されている代表的な化合物系の太陽光パネルは、First Solar 社の CdTe 太陽光パネルとソーラーフロンティア社の CIS 太陽光パネルである。

去した後のセル/EVA シートを検証対象としている(図 III-2 参照)。



(出典)E&ES が作成

図 III-2 太陽光パネルの種類と素材構成

#### (1) セル/EVA シート中の樹脂

セル/EVA シート中の樹脂は、封止材、シール材、バックシートとして使用されている。

封止材は、耐候性・透明性、柔軟性、引張強度、接着性が求められるため、エチレン酢酸ビニル共重合体(以下、「EVA」)、ポリビニルブチラール(以下、「PVB」)、シリコン樹脂等が用いられ、必要に応じて過酸化剤(耐熱軟化性向上)、カップリング剤(接着性向上)、黄変防止剤、紫外線吸収剤等が添加されている。

シール材は、太陽光パネルの基板(ガラス、封止材、およびバックシート)とアルミフレームとを接着することにより太陽光パネル周囲部からの水分の浸入を防ぐ役割を果たし、弾力性や接着性を有し、水蒸気透過率が低いブチルゴム(IIR)やシリコンゴム等が用いられる。

バックシートは、耐久性や絶縁性を有する多積層膜構造となっている。2 種類以上の素材



が接着剤を介して重ね合わされており、素材としてはポリフッ化ビニル(以下、「PVF」)、ポリフッ化ビニリデン(以下、「PVDF」)、ポリエチレンテレフタレート(以下、「PET」)、ポリブチレンテレフタレート(以下、「PBT」)、ポリエチレン(以下、「PE」)、無機材料(Al、SiO<sub>2</sub>)等が用いられる(柳浦(2014)、環境省(2018)、株式会社東レリサーチセンター(2021))。

## (2) セル/EVA シート中の非鉄金属

セル/EVA シート中の非鉄金属は、主に銀電極、インターコネクタ、シリコン、シリコンの発電面に対して裏面に積載されているアルミニウム層として使用されている。

銀電極は銀から構成され、その機能により大きく、グリッド電極(シリコンの発電面から集電する役割を果たす)、バスバー電極(グリッド電極より集電し、インターコネクタに電気を流す役割を果たす)、シリコンの発電面に対して裏面に積載されている電極(アルミニウム層とインターコネクタを接合する役割を果たす)に分けられる。

インターコネクタは銅から構成され、太陽光パネル内に電圧を生じさせて電気を流す役割を果たす。インターコネクタは、バスバー電極上に移載した後、その隣のセルの裏面に接続する。インターコネクタはハンダで外側が覆われており、ハンダにはスズ、鉛、銀、ビスマス等が使用されている(瀧本(2010))、業界関係者へのヒアリング結果)。

## III-1-2 太陽光パネルからのガラス等の分離手法

### (1) アルミフレームの分離手法

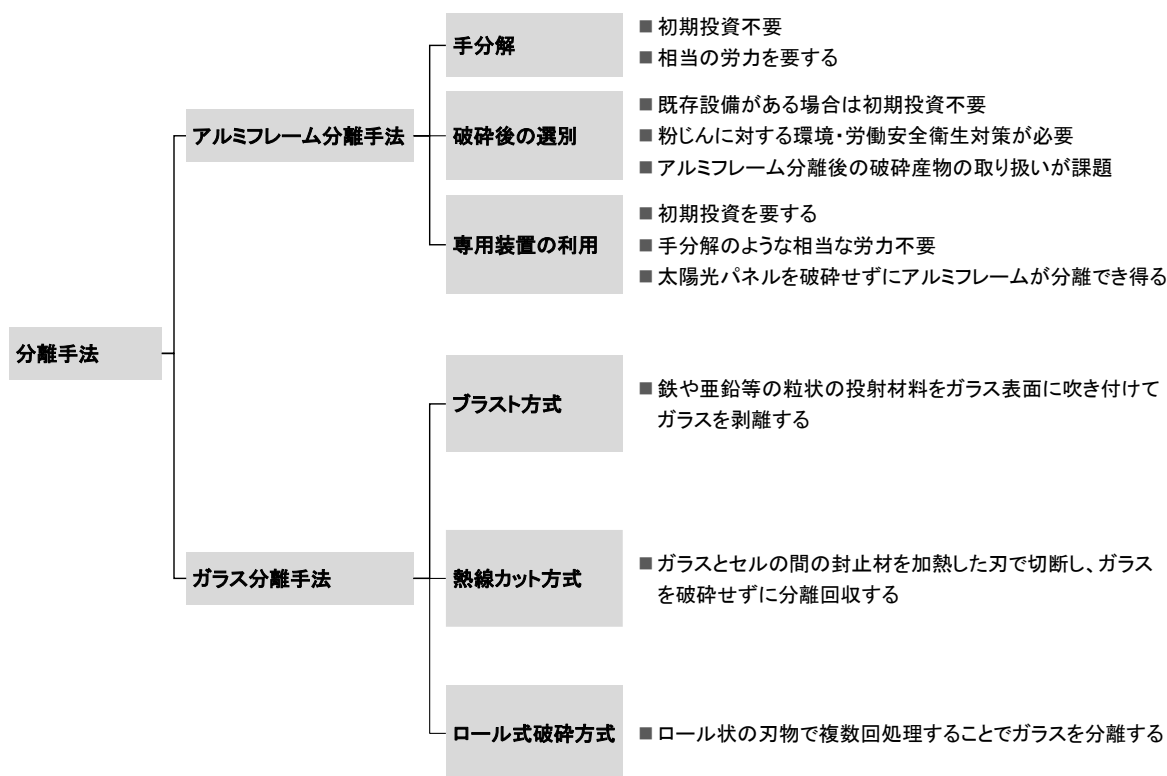
E&ES が知る限り、我が国では太陽光パネルからのアルミフレームの分離は、1) 手分解、2) 破碎後に選別、3) 専用装置の利用、この 3 つの方法により行われている(図 III-3 参照)。

手分解は、初期投資がなく実施できる利点があるものの、多くの太陽光パネルのアルミフレームはビスで固定されているうえに、アルミフレームの溝にはコーキング材またはパッキンが使用されている。そのため、手分解には相当の労力を要する。

破碎後に選別する方法としては、太陽光パネルそのものを破碎機で数 cm～10cm 程度に切断し、その後手選別や渦電流選別機、湿式比重選別機等でアルミフレームを分離する。既存設備がある場合は初期投資なく実施できる利点があるものの、太陽光パネルの破碎にあたっては集じん対策等の環境・労働安全衛生対策が必要になることと、アルミフレームを分離した後に残る破碎産物の取り扱いに課題が残る。

専用装置の利用としては、近畿工業株式会社の Resola に付帯されているアルミフレーム除去装置、株式会社エヌ・ピー・シーのセミオートフレーム・J-Box 分離装置、東芝環境ソリュ

ーション株式会社の PV フレームリムーバー等の装置の利用が想定される。専用装置の導入には初期投資費を要するが、手分解のような相当の労力を要することなく、また太陽光パネルを破砕することなくアルミフレームを分離でき得るという利点がある。



(出典)E&ES が作成

図 III-3 太陽光パネルからのアルミフレーム・ガラスの分離手法

## (2) ガラスの分離手法

太陽光パネルのガラスは、封止材(便宜的に、本業務では「EVA」とも呼ぶ)を介してセル、すなわちシリコンに接着されている。太陽光パネルからガラスを分離し、セル/EVAシートを生産する装置は既に存在している。これらの装置のうち、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(環境省(2018))で紹介されていること、またはこれまでに環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金の補助対象となったことの要件を満たす装置は、次の3つである。すなわち、ブラスト方式、熱線カット方式、およびロール式破砕機である。

ブラスト方式は、鉄や亜鉛等の粒状の投射材料をガラス表面に吹き付けてガラスを剥離する方法である。熱線カット方式は、ガラスとセルの間の封止材を加熱した刃で切断し、ガラスを破砕せずに分離回収する方法である。ロール式破砕方式は、ロール状の刃物で複数回処理することでガラスを分離する方法である。各装置に応じて、初期投資費、維持管理費、セル/EVAシートから分離されないガラスの割合、オペレーションの難易度が異なる。

本業務の下で、NER、秋田資源機構、およびE&ESは、ブラスト方式、熱線カット方式、ロール式破碎方式の装置を視察した。視察では、それぞれの装置がどのように太陽光パネルからガラスを分離するのを目視で確認するとともに、各装置のオペレーターからオペレーションの難易度等についての聞き取りを行った。

### (3) セル/EVA シートの価値の評価に適用でき得る単位技術

セル/EVA シートの価値の評価にあたっては、セル/EVA シートの構成素材中の有価金属と管理が必要な有害物質の含有量を把握することが重要となり、そのため適切な元素分析手法を検討し、選択する必要がある。

本業務の分析対象物であるセル/EVA シートは工業製品であり、次の特徴を持つ。

- 素材が規則的に偏在している
- 素材中の有価金属と管理が必要な有害物質の品位が比較的高い
- 組成の均一性が高い
- 構成素材の種類が限定されている
- メーカーが異なっても形状や構造の類似性が高い傾向を示す

このような特徴を持つセル/EVA シートの分析に適用でき得る分析手法および装置は、以下のとおりである(図 III-4 参照)。

- 対象物に含まれる元素の平均的な含有量を分析する蛍光 X 線分析装置(以下、「XRF」)
- 対象物の結晶構造を分析する X 線回折装置(以下、「XRD」)
- 対象物における微小部分の形状観察、元素分布や元素含有量を分析する電子線マイクロアナライザー(以下、「EPMA」) ※分析機能付き走査型電子顕微鏡(以下、「SEM」)で代用可
- 試料の形状や構造を観察する実体顕微鏡



XRF (波長分散型)



XRD



EPMA



実体顕微鏡 (解析機能付)

(出典)E&ES が作成

図 III-4 セル/EVA シートの分析に適用でき得る分析装置

## III-2 実サンプルを用いた検証

### III-2-1 評価の手順

本業務では、以下のとおり、有用金属と有害物質の分析を行った(図 III-5 参照)。

#### (1) 試験サンプルの寸法および重量測定

メジャーを用いて 30 種類(10 型番×3 つの異なるガラス分離方式)の試験サンプルの寸法を測定した。また、ガラス分離方式ごとの重量の違いを調査するため、台はかりを用いて DES より秋田資源機構が入手した全 90 枚(10 型番×3 つの異なるガラス分離方式×3 枚/型番/ガラス分離方式)の重量を測定し、30 種類の平均重量を算出した。

#### (2) 構成部材の寸法測定

セル/EVA シートの構成部材であるセル、インターコネクタ、グリッド電極等の寸法を、メジャーおよびノギス等を用いて測定した。

### (3) 構成部材の組成分析

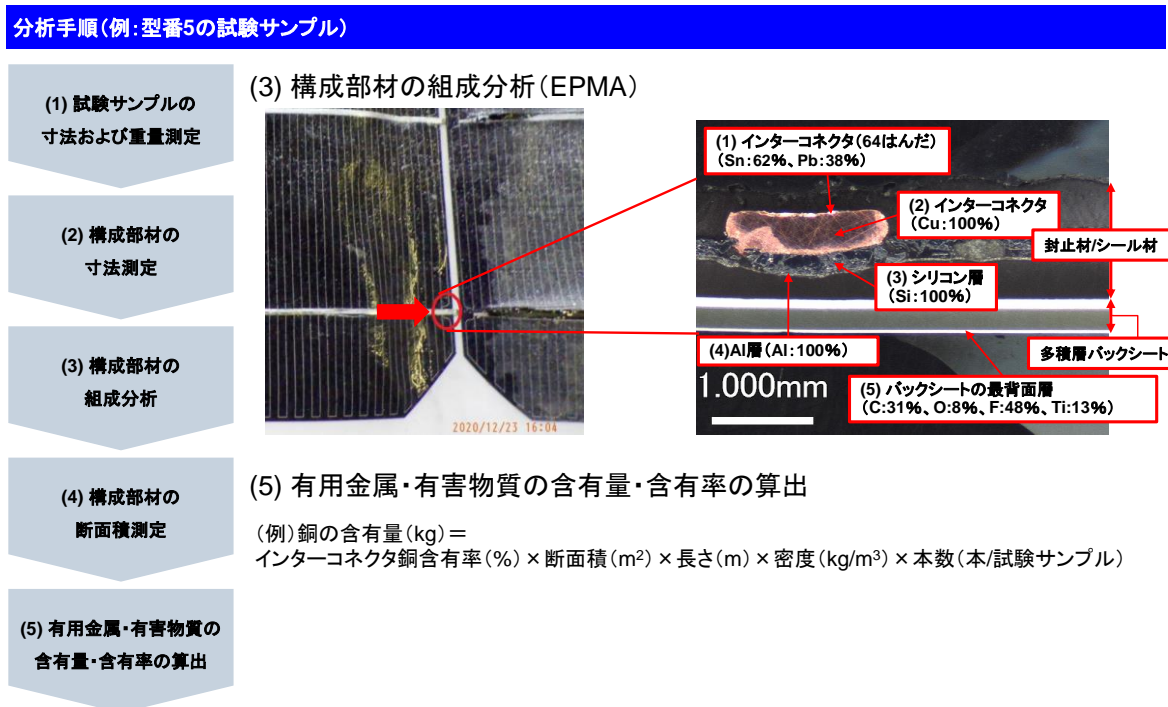
構造を調査するため、目視による表面観察や実体顕微鏡を用いた断面観察を行った。また、セル/EVA シートに含まれる有価金属、その他の元素含有量を調査するため、EPMA によりシート断面部の構成部材について組成を分析した。なお、シート全体の定性分析やバックシートには XRF、結晶構造の解析には XRD を使用した。

### (4) 構成部材の断面積測定

構成部材の断面積測定のため、画像処理ソフトで構成部材断面のピクセル数を計測した。

### (5) 有価物・有害物質の含有量・含有率の算出

(1)、(2)、(4)の結果から有用金属と有害物質の含有率を算出し、ガラス分離方法の違いによる品位の違いを評価した。なお、本業務では、銀はグリッド電極の銀含有率、銅と鉛はインターコネクタの銅と鉛の含有率から、フッ素はバックシートの含有率から含有量を算出した。



(出典)E&ES が作成

図 III-5 セル/EVA シートの分析手順

### III-2-2 評価の結果

#### (1) 試験サンプルの寸法および重量測定

試験サンプルの寸法の測定結果は、表 II-1 に示すとおりである。また、秋田資源機構で測定・算出した 30 種類の各試験サンプルの平均重量と、表 II-2 に示す DES が算出した平均重量との差は、表 II-2 に示す標準偏差の 3 倍の範囲内に収まった。本章では、表 II-2 に示す各試験サンプルの平均重量に依拠して、検討を行う。

#### (2) 構成部材の寸法測定

試験サンプルの各型番のグリッド電極とインターコネクタの寸法を測定した(表 III-1 参照)。インターコネクタは、セル内とセル外に存在している場合があるため、その場合はセル内とセル外のインターコネクタを分けて寸法を測定した。

表 III-1 構成部材の寸法測定結果

型番	セル数 (セル/試験サンプル)	グリッド電極		インターコネクタ(セル内)		インターコネクタ(セル外)
		本数(本/セル)	長さ(mm/本)	本数(本/セル)	長さ(mm/本)	長さ(mm)
型番1	30	207	125	1	125	—
型番2	60	79	154	3	156	1,704
型番3	60	86	154	3	156	2,233
型番4	60	92	154	3	156	1,706
型番5	60	76	153	3	155	2,243
型番6	60	102	155	3	157	1,374
型番7	60	82	154	3	156	2,525
型番8	60	104	154	4	156	1,742
型番9	60	70	121	2	125	1,471
型番10	72	92	154	3	156	2,390

(出典)E&ES が作成

#### (3) 構造部材の組成分析

試験サンプルの各型番の構成部材のグリッド電極、インターコネクタ、バックシートの組成を分析した。例えば、型番 5 の試験サンプルのインターコネクタについてであれば、図 III-5 の「(3)構成部材の組成分析」に示す赤丸の中で断面を取り、赤矢印の方向から当断面を実体顕微鏡および EPMA で観察・分析した。結果、同図右側に示すとおり、インターコネクタはスズと鉛で構成されるはんだで覆われており、インターコネクタの導体は銅から構成されていることが分かった。

なお、バックシートについてはフッ素や他の軽元素における分析精度の向上を図るため、波長分散型の XRF を用いて別途分析した。具体的には、フッ素と炭素の含有量からバックシートの素材を推定し、添加剤である酸化チタンの含有量から、各元素の推定含有率を推定し

た(表 III-2 参照)。

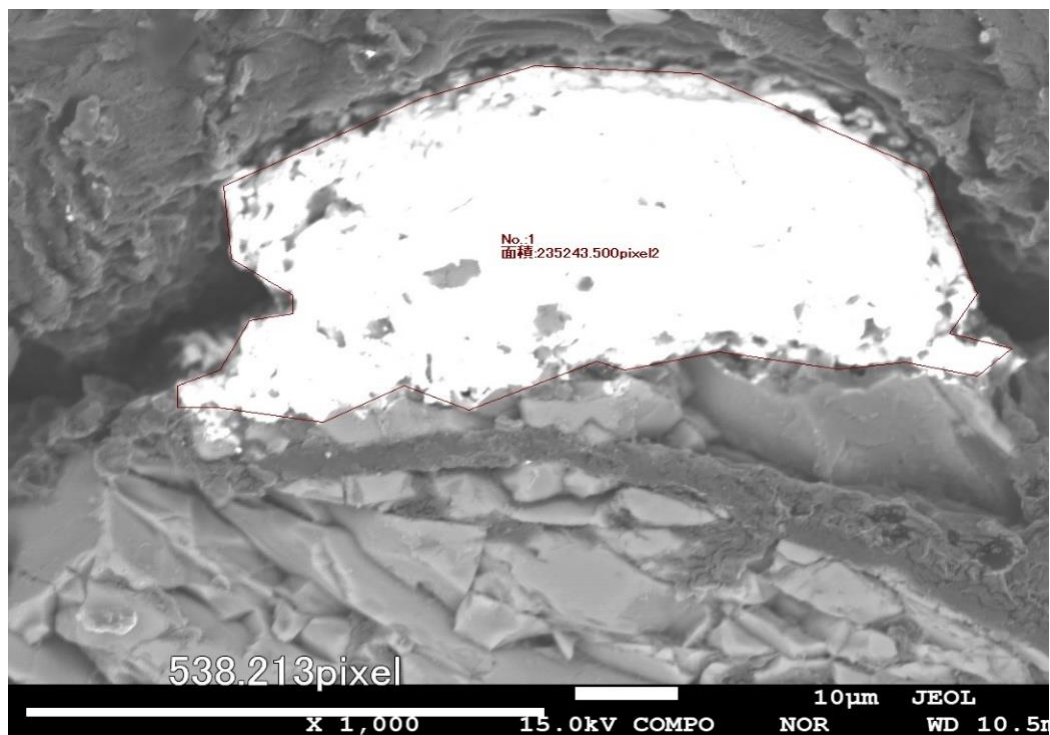
表 III-2 バックシートの組成の推計結果

型番	バックシートの素材 (推定)	推定値 (wt%)						計
		C	O	F	Al	Si	Ti	
型番1	PVDF	29.77	9.66	47.12	0.85	1.07	11.53	100
型番2	PVDF	30.26	9.19	47.91	0.86	1.19	10.60	100
型番3	-	40.02	55.56	-	-	-	4.42	100
型番4	-	35.35	52.49	-	-	-	12.16	100
型番5	PVDF	30.57	8.42	48.40	-	-	12.62	100
型番6	PVDF	28.48	5.49	57.80	-	-	8.23	100
型番7	PVDF	31.82	7.92	48.38	-	-	11.88	100
型番8	PVF	35.83	16.08	28.36	0.92	5.73	13.08	100
型番9	PVDF	38.71	-	61.29	-	-	0.00	100
型番10	-	42.34	52.21	-	-	-	5.45	100

(出典)E&ES が作成

#### (4) 構成部材の断面積測定

各構成部材の断面拡大図から 1mm あたりのピクセル数を割り出して、そこから断面積を測定した。例として、グリッド電極の断面拡大図を図 III-6 に示す。なお、断面積の測定には、実体顕微鏡および EPMA が有する画像解析機能を利用した。



(出典)E&ES が作成

図 III-6 グリッド電極の断面拡大図

(5) 有価物・有害物質の含有量・含有率の算出

本業務では、銀はグリッド電極の銀含有率、銅と鉛はインターコネクタの銅含有率から、フッ素はバックシートの含有率から含有量を算出した。図 III-5 には、例として、銅の含有量算出のための式を示している。また、銀、銅、鉛、フッ素の含有率については、各含有量を試験サンプルの重量で除すことで求めた。

セル数が 30 の型番 1 の特殊品、および発電方式が両面発電の型番 9 の特殊品を除く 8 つの型番の試験サンプルについて、図 III-5 にしたがって有用金属の銀・銅、および有害物質の鉛とフッ素を分析した結果は、表 III-3 に示すとおりである。

表 III-3 試験サンプル中の有用金属と有害物質の品位(重量割合)

型番	ガラス分離方法	平均重量 kg	銀		銅		鉛		フッ素	
			含有量 g	含有率 mg/kg	含有量 g	含有率 mg/kg	含有量 g	含有率 mg/kg	含有量 g	含有率 mg/kg
型番1	ブラスト方式	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—
	熱線カット方式	0.9	—	—	—	—	—	—	—	—
	ロール式破碎方式	1.3	—	—	—	—	—	—	—	—
型番2	ブラスト方式	3.1	10.65	3,485	233.79	76,501	6.87	2,248	36.47	11,934
	熱線カット方式	2.6	10.65	4,069	233.79	89,327	6.87	2,625	36.47	13,934
	ロール式破碎方式	3.9	10.65	2,747	233.79	60,294	6.87	1,772	36.47	9,405
型番3	ブラスト方式	3.0	6.85	2,273	179.40	59,535	7.75	2,572	0	0
	熱線カット方式	2.7	6.85	2,496	179.40	65,373	7.75	2,824	0	0
	ロール式破碎方式	4.3	6.85	1,602	179.40	41,956	7.75	1,812	0	0
型番4	ブラスト方式	3.1	4.36	1,411	226.73	73,353	13.96	4,516	0	0
	熱線カット方式	2.7	4.36	1,615	226.73	83,982	13.96	5,171	0	0
	ロール式破碎方式	3.9	4.36	1,113	226.73	57,904	13.96	3,565	0	0
型番5	ブラスト方式	3.0	9.67	3,247	301.56	101,259	7.05	2,367	37.01	12,427
	熱線カット方式	2.6	9.67	3,678	301.56	114,702	7.05	2,682	37.01	14,077
	ロール式破碎方式	4.3	9.67	2,244	301.56	69,979	7.05	1,636	37.01	8,588
型番6	ブラスト方式	3.1	5.45	1,750	338.26	108,643	1.95	626	31.69	10,178
	熱線カット方式	2.8	5.45	1,918	338.26	119,046	1.95	686	31.69	11,153
	ロール式破碎方式	4.2	5.45	1,292	338.26	80,171	1.95	462	31.69	7,511
型番7	ブラスト方式	3.1	7.82	2,502	219.62	70,254	9.71	3,106	37.78	12,085
	熱線カット方式	2.7	7.82	2,943	219.62	82,642	9.71	3,654	37.78	14,216
	ロール式破碎方式	4.3	7.82	1,831	219.62	51,415	9.71	2,273	37.78	8,845
型番8	ブラスト方式	3.2	5.42	1,668	204.66	62,990	10.24	3,152	32.19	9,907
	熱線カット方式	2.9	5.42	1,845	204.66	69,670	10.24	3,486	32.19	10,958
	ロール式破碎方式	4.1	5.42	1,323	204.66	49,945	10.24	2,499	32.19	7,856
型番9	ブラスト方式	2.6	—	—	—	—	—	—	—	—
	熱線カット方式	2.5	—	—	—	—	—	—	—	—
	ロール式破碎方式	2.9	—	—	—	—	—	—	—	—
型番10	ブラスト方式	3.6	7.72	2,119	188.00	51,597	4.48	1,230	0	0
	熱線カット方式	3.4	7.72	2,287	188.00	55,695	4.48	1,327	0	0
	ロール式破碎方式	6.2	7.72	1,241	188.00	30,213	4.48	720	0	0

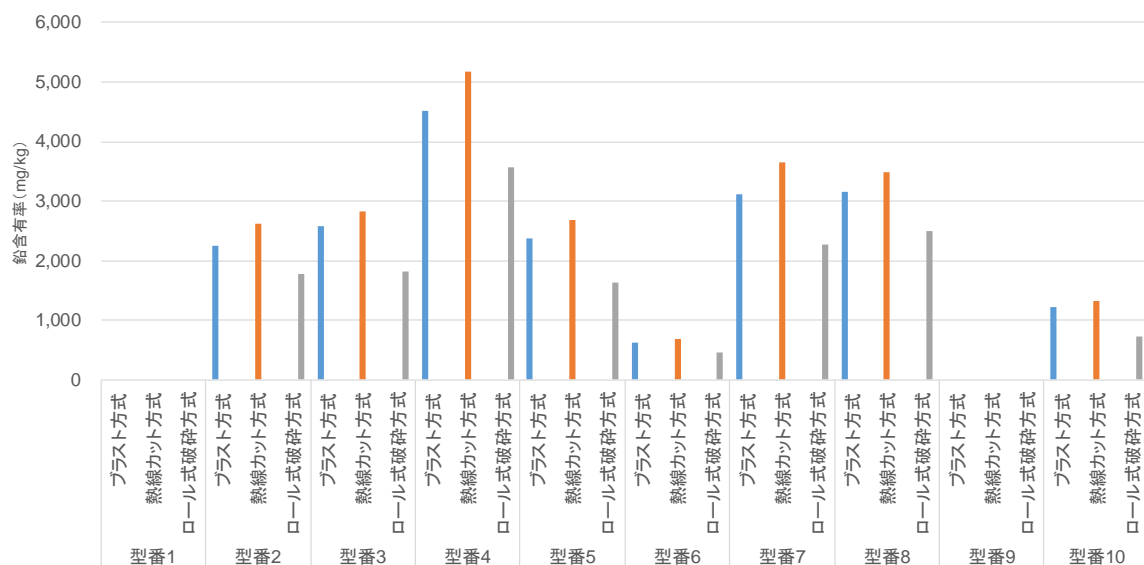
(出典)E&ES が作成

### III-2-3 太陽光パネルの種類の違い・ガラス分離工程の違いによる価値の差異

表 III-3 に示す試験サンプル中の有用金属と有害物質を分析した結果によると、以下が明らかになった。



- 太陽光パネルの型番の違いにより、試験サンプル中の有用金属と有害物質の品位がばらつく。例えば、銀について見ると、型番 4 のロール式破碎方式は 1,100mg/kg であるの対して、型番 2 の熱線カット方式は 4,000mg/kg 以上である。
- ガラスの分離工程の違いは、含有率に現れている。図 II-7 に示すとおり、同じ型番であればロール式破碎方式、ブラスト方式、熱線カット方式の順で試験サンプルの重量が小さいため、含有率は、ロール式破碎方式、ブラスト方式、熱線カット方式の順で大きくなる。
- 鉛は、計 8 つの型番のうち、6 つの型番で 1,000mg/kg 以上の含有率である(図 III-7 参照)。この含有率だけ見ると、太陽光パネルからアルミフレームとガラスを除去した後のセル/EVA シートというものは、有用金属を回収するという視点だけでなく、有害物質を固定するという観点から、金属濃縮を行い、濃縮産物は回収することが環境面に配慮した対応と言える。



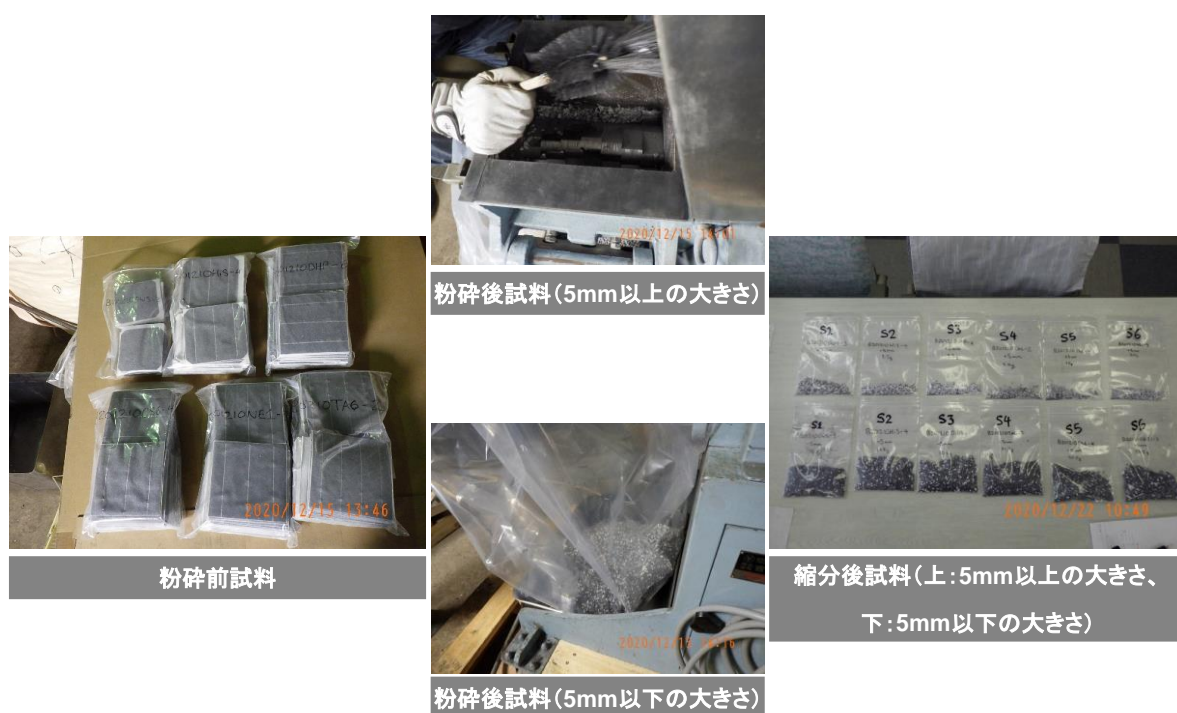
(出典)E&ES が作成

図 III-7 試験サンプル中の鉛含有率

#### III-2-4 評価の精度

図 III-5 に示す分析手順の精度を検証する目的で、計 10 の型番のうち、5 の型番の試験サンプルについて、化学分析による分析も行った。化学分析に供した試験サンプルとしては、ガラス残存量も少なく、またシリコンセルの破れも見られないブラスト方式を通して入手した試験サンプルとした。化学分析に供する試料の前処理手順は以下のとおりである。

- セル/EVA シート 1 枚の重量を測定
- ハサミまたは裁断機を用いて、セル/EVA シートを 1 セル単位の大きさ(面積:概ね 125mm×125mm～155mm×155mm)に裁断
- その後、粉碎機で処理可能な大きさにさらに加工
- 粉碎機により 5mm 以下の大きさに粉碎。ただし、5mm 以上の大きさの試料も一部残存。
- JIS A 1158(試験に用いる骨材の縮分方法)に準じて、縮分器により 5mm 以下の大きさの試料および 5mm 以上の大きさの試料をそれぞれ縮分し、縮分後の各産物から 3g 以上を分取し、これら分取した各試料を化学分析に供した(図 III-8 参照)。
- 化学分析では、縮分後の 5mm 以下の大きさの試料および 5mm 以上の大きさの試料それぞれについて分析を行い、5mm 以下と 5mm 以上の分析結果を重量で加重平均することで、各試験サンプル中の品位を求めた。



(出典)E&ES が作成

図 III-8 前処理工程での試料

化学分析による分析結果を、図 III-5 に示す分析手順(以下、便宜的に「断面分析」と呼称する)で得た分析結果と比較した結果は、表 III-4 のとおりである。表 III-4 から、断面分析と化学分析の結果は、型番に応じて概ね一致する場合とそうでない場合があることが確認された。単に精度という視点からだけでは化学分析は断面分析に比べて高精度であるものの、

化学分析は以下の課題を抱えることに留意する必要がある。

- 化学分析に供する試料は数グラムと少ないため、セル/EVA シート(重量:3kg 程度)の縮分を妥当に行う必要がある。しかし、セル/EVA シートは樹脂と非鉄金属の混合物であるため、裁断や粉碎によるサンプルの均一化が難しい。すなわち、セル/EVA シートから、化学分析に供する代表的な試料を分取することが難しい。

表 III-4 断面分析と化学分析の比較結果

(単位:mg/kg)

型番	銀			銅			鉛			フッ素		
	断面分析 1)	化学分析 2)	差 = 1) - 2)	断面分析 1)	化学分析 2)	差 = 1) - 2)	断面分析 1)	化学分析 2)	差 = 1) - 2)	断面分析 1)	化学分析 2)	差 = 1) - 2)
型番1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
型番2	3,485	3,000	485	76,501	121,000	-44,499	2,248	6,800	-4,552	11,934	7,700	4,234
型番3	2,273	-	-	59,535	-	-	2,572	-	-	0	-	-
型番4	1,411	2,600	-1,189	73,353	11,200	62,153	4,516	1,600	2,916	0	<100	-
型番5	3,247	2,200	1,047	101,259	76,400	24,859	2,367	4,200	-1,833	12,427	19,800	-7,373
型番6	1,750	2,400	-650	108,643	71,200	37,443	626	4,700	-4,074	10,178	7,000	3,178
型番7	2,502	-	-	70,254	-	-	3,106	-	-	12,085	-	-
型番8	1,668	2,100	-432	62,990	75,400	-12,410	3,152	3,900	-748	9,907	2,100	7,807
型番9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
型番10	2,119	-	-	51,597	-	-	1,230	-	-	0	-	-

(出典)E&ES が作成

一方、断面分析では各構成素材を直接分析するため、これは断面分析に供する機器の精度の低さを補い、結果として、化学分析と同等の精度を保ち得る。

### III-2-5 評価の期間・費用

本業務の下で図 III-5 にしたがってセル/EVA シート中の有用金属と有害物質を分析したところ、セル/EVA シート 1 枚あたり 6 営業日程度を要した。ただし、複数のセル/EVA シート複数枚を同時進行で分析することも可能であった。工数の内訳は、重量測定、寸法測定、分析前処理、形状観察で 2～3 営業日程度、元素分析、結晶構造同定に 1～2 営業日程度、データ入力、解析に 1 日営業日程度である。また、分析の費用の内訳としては、人件費、機器等の運転に伴う光熱費や維持管理費、樹脂や試料容器等の消耗品費である。

### III-3 評価手法の提案

#### III-3-1 評価対象とする指標

##### (1) 正の価値に寄与し得る元素

セル/EVA シートを構成する金属のうち銀と銅は、セル/EVA シートの正の価値に寄与し得る元素であるため、評価対象の指標として扱うことが望ましい。本業務で検証対象としている断面分析は、銀と銅の含有量と含有率を評価し得る。

## (2) 負の価値に寄与し得る元素

セル/EVA シートを構成する金属のうち鉛それとバックシートを構成に含まれるフッ素は、一般的に、製錬原料への含有が好ましくない元素であるため、評価対象の指標として扱うことが望ましい。本業務で検証対象としている断面分析は、鉛とフッ素の含有量と含有率を評価し得る。

また、セル/EVAシートに残存するガラスも、セル/EVAシートへの残存量が少ないことが好ましいため、評価対象の指標として扱うことが望ましい。本業務を通して、3つのガラス除去方式とセル/EVAシートへのガラス残存量の関係性に関するデータが得られてきた(図 II-7 参照)。また、セル/EVAシートに残存するガラス中のアンチモンの品位についても、本業務の中でデータを取得している<sup>7</sup>。結果、計9の型番のうち6の型番で、ガラス中のアンチモンの品位が1,000~1,500mg/kgの範囲内であった。ガラス除去方式に応じたガラスの残存量の関係と、一般的に処理にコストを要すると言われるアンチモンの品位を踏まえて、セル/EVAシートの価値を評価することが望ましい。

## (3) 価値の評価にあたり注視すべき元素

セルの主原料であるシリコンは、現状、非鉄製錬所で資源として回収され難く、非鉄製錬所の処理方式によっては、負の価値に寄与し得る元素となる。また、チタンは、セル/EVAシートのバックシートの添加剤として酸化チタンの形で使用されている場合がある<sup>8</sup>。酸化チタンも、シリコンと同様に、負の価値に寄与し得る元素となる。本業務で検証対象としている断面分析は、シリコンとチタンの含有量と含有率を評価し得る手法である。

### III-3-2 評価に求められる要件(設備、精度、期間、費用等の観点を含む)

セル/EVAシートの価値評価にあたっては、金属濃縮を行う事業者がセル/EVAシートを受け入れる前の段階で、その価値を速やかに、一定の精度の範囲内で、低コストで評価することが求められる。本業務で検証対象とした断面分析を、設備、精度、期間、費用の面から考察する。

<sup>7</sup> 分析手順としては、ロール式破碎方式の各セル/EVAシートに残存するガラス粒子をピンセット等で60~100g採取。その後、ガラス粒子を水洗し、65℃に設定した乾燥機で一昼夜乾燥。次いで、振動ミルを用いて150μm以下の大きさに粉碎。ここから40gを採取して、これを化学分析の試料とした。

<sup>8</sup> 本業務で入手したセル/EVAシート中のチタンの含有量は、断面分析で評価した限りでは、8.5~78.7gであった。

### (1) 設備

断面分析に用いた設備一覧を表 III-5 に示す。各設備は、特殊品ではなく、広く市場に流通しているものである。維持管理についても特に困難を伴うものはない。すべて調達する場合の初期投資費は数千万円規模であるものの、一定程度の試験所はすでに導入している。

表 III-5 断面分析に用いた設備一覧

No	用途	設備名
1	重量測定	台はかり、上皿天秤
2	寸法、面積測定	メジャー、ノギス、計測ソフトウェア
3	分析前処理	研磨機、プレス機
4	形状観察	実体顕微鏡
5	元素分析(局所)	EPMA (EPMA は SEM-EDS で代用可)
6	元素分析(平均)	XRF
7	結晶構造同定	XRD

(出典)E&S が作成

### (2) 精度

本業務を通して、断面分析と化学分析の結果は、型番に応じて概ね一致する場合とそうでない場合があることが確認された。本業務で検証した断面分析については、精度面で以下の課題がある。

- 本業務では、セル/EVA シート中の銀の含有量を、グリッド電極からの銀の寄与分を足すことで算出した。しかし、セル/EVA シートの銀は、その構造上、グリッド電極の銀だけでなく、バスバー電極の銀およびシリコン裏面積載銀から構成される。そのため、本業務で検証した断面分析は、バスバー電極の銀およびシリコン裏面積載銀の寄与分を含めることで精度が向上することが期待される。
- セル/EVA シート中の有価金属と有害物質の尤もらしい含有量と含有率は、化学分析を通して、縮分に課題があるため、評価し難い。そこで、縮分の課題解決の視点で既往知見のレビューやテーブル試験を行い、そのうえで化学分析を改めて行う等、セル/EVA シート中の有価金属と有害物質の尤もらしい含有量と含有率把握に向けた検討を重ねることが重要である。

### (3) 期間

断面分析によりセル/EVA シートの評価に要する時間は、6 営業日程度である一方、化学分析を取り入れて評価を実施した場合は1～2 週間程度必要である。

#### (4) 費用

断面分析の費用の内訳は、人件費、機器等の運転に伴う光熱費や維持管理費、樹脂や試料容器等の消耗品費である。断面分析は、化学分析と比較すると、分析期間が短い分人件費が安価である。加えて、化学分析は、1元素あたりの概ね数千円程度の分析費用を要する。

#### (5) 小括

本業務で E&ES が検討した範囲では、断面分析は、設備、精度、期間、および費用の面で、セル/EVA シートの価値の評価に適用し得る妥当な手法である。なお仮に、セル/EVA シートが廃電子基板のような品位で金を含有しているのであれば<sup>9</sup>、既に廃電子基板の商取引で採用されているような、相応の費用・期間を払いながらも、一定の精度を保つ分析手法<sup>10</sup>を採用すべきである。しかながら、セル/EVA シートは、廃電子基板とは異なる組成であるため、例えば断面分析のような分析手法の適用が妥当である。

### III-3-3 商業スケールでの運用を想定した場合の検討課題

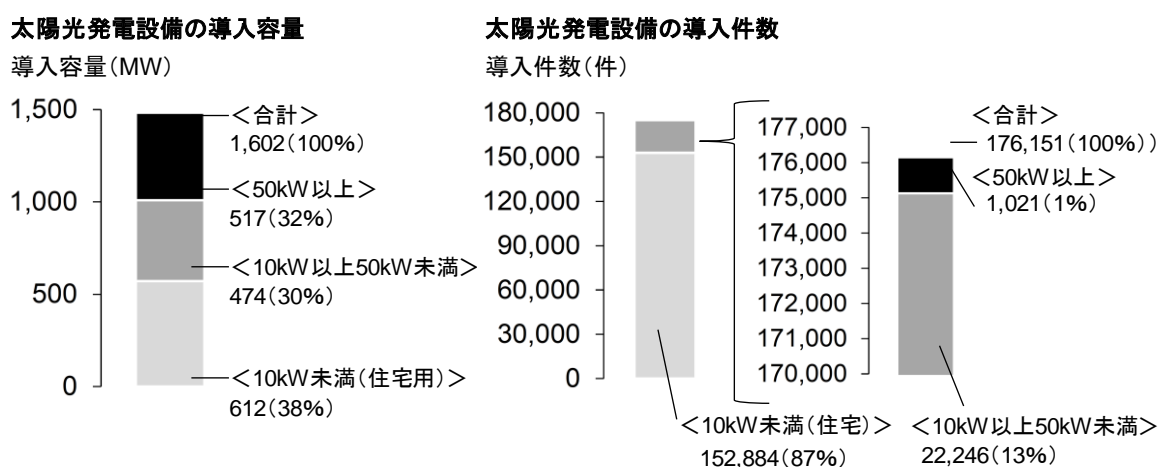
- 熱線カット方式の試験サンプルで見られたように、セル/EVA シートに損傷があった場合は、断面分析で求められる品位は過大評価となる可能性がある。そのため、セル/EVA シートに損傷があった場合は、どのように断面分析を行うか、さらなる検討が必要である。
- 発電方式が両面発電である等の特殊な構造を持つセル/EVA シートについては、その構造に応じた断面分析の方法を検討すべきである。
- 本業務では、図 III-5 に示す分析手順は、手作業によるところが大きい。特に、画像解析の部分に機械学習の技術を援用することにより、分析手順の標準化が進み得る。
- III-3-1 で検討した価値の評価で対象とする指標の分析・推計結果を踏まえて、セル/EVA シートの価値を簡易に計算する計算式を導出することが望ましい。

<sup>9</sup> 例えば、Pejman Hadia(2015)によると、電子基板中の金の品位は 80～1,500mg/kg とされている。

<sup>10</sup> これは、JIS M 8082(銅製錬用銅スクラップ—サンプリング，試料調製及び水分決定方法)に準拠して行われるマッ ト融解法と呼ばれる方法である(飯野(2016))。

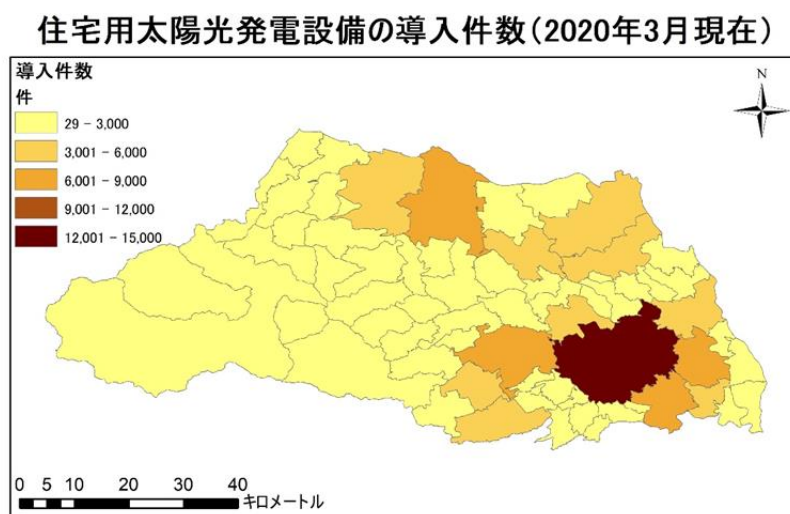
## 第Ⅳ章 処理ルートの構築の実証(実証事業 3)

資源エネルギー庁(2020)によると、2020 年 3 月末時点での埼玉県での太陽光発電設備の導入容量は計 1,602MW、導入件数は計 176,151 件である(図 IV-1 参照)。このうち、住宅用太陽光発電設備の導入容量は 612MW、導入件数は 152,884 件であり、埼玉県は愛知県に次いで全国で 2 番目に住宅用太陽光発電設備を導入している都道府県である。市町村別に見ると、さいたま市の住宅用太陽光発電設備の導入件数が最も多い(図 IV-2 参照)。



(出典)資源エネルギー庁(2020)に基づき E&ES が作成

図 IV-1 2020 年 3 月末時点の埼玉県での太陽光発電所の導入状況



(出典)資源エネルギー庁(2020)に基づき E&ES が作成

図 IV-2 埼玉県での住宅用太陽光発電設備の市町村別の導入件数

こうした太陽光発電設備の導入状況も背景として、埼玉県では、太陽光パネルの処理体制の確立等を目的として、「埼玉県太陽電池モジュールリサイクル協議会」(以下、「リサイクル協議会」)が 2019 年度に設立されている。当協議会の事務局は、埼玉県環境部産業廃棄物指導課と一般社団法人埼玉県環境産業振興協会に置かれている。

本業務では、埼玉県をフィールドにして、最終処分場に依存しない太陽光パネルの処理ルート構築の実証を行う。業務の内容としては、2021 年度に埼玉県内で太陽光パネルの回収試験を行うことを想定し、今年度は当試験の試験計画を策定した。また、本業務は、リサイクル協議会の事務局を務めている埼玉県環境部産業廃棄物指導課と協調して、実施した。

## IV-1 協議の場の設置

埼玉県内で最終処分場に依存しない太陽光パネルの処理ルートを構築するためには、県内の様々な主体と協力することが重要である。

### IV-1-1 協議の場へ参加する主体の要件・範囲

最初に、県内で処理ルート構築にあたってどういった主体に協力を求めるべきか、その要件を検討した。要件の検討にあたり、埼玉県内での太陽光パネルの処理は現状、図 IV-3 に示すとおり行われていると想定した。すなわち、住宅の解体に伴い太陽光パネルが産業廃棄物として発生するルート、および住宅の解体は伴わず太陽光パネルが産業廃棄物として発生するルート、これら 2 つのルートが存在すると想定した。次いで、処理の現状に係る潜在的な課題を、撤去、保管、リユース、収集・運搬、リサイクル、および適正処理の観点から、表 IV-1 に示すとおり整理した。

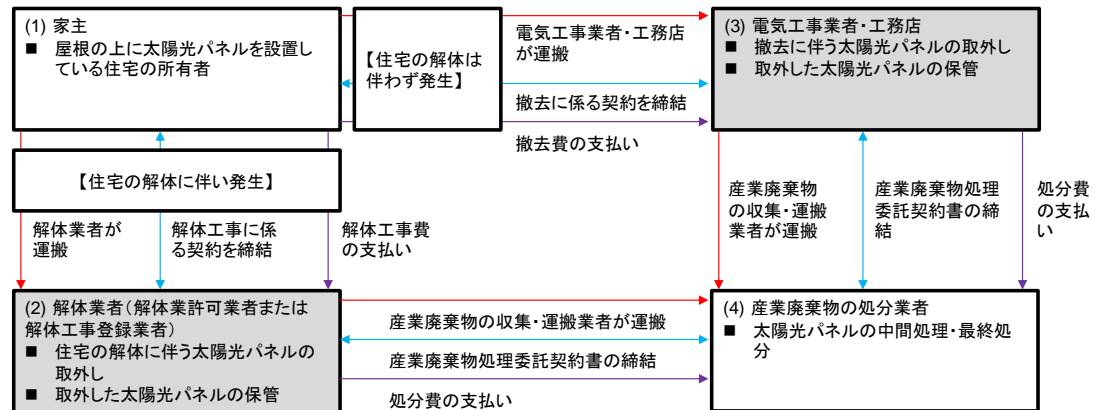
その上で、処理ルート構築にあたっては、以下の主体から協力を得ることが重要であると整理した。

- 住宅の解体工事の元請けとして、解体業者に解体工事を発注する主体
- 解体業者
- 電気工事業者
- 産業廃棄物の収集運搬業者
- 産業廃棄物の処分業者
- 産業廃棄物と一般廃棄物の規制当局



凡例

- 太陽光パネルの流れ
- 書面の流れ
- 金銭の流れ



(注 1) 灰色のハッチがかけたあるプレーヤーが、廃棄物処理法上の産業廃棄物の排出事業者該当する。  
(出典)E&ES が作成

図 IV-3 埼玉県住宅用から発生する太陽光パネルの処理の現状(想定)

表 IV-1 太陽光パネルの処理の現状に係る潜在的な課題

潜在的な課題	課題の明確化のために必要な行動
解体業者が住宅の解体に伴い太陽光パネルを取り外す場合の感電対策等の安全対策は妥当か？	解体業者への実態の聞き取り
床面積が計 80m <sup>2</sup> を超える住宅の解体を行う場合は建設リサイクル法対象工事に該当し、決められた手順により太陽光パネルを取り外す必要があるが、実態は？	解体業者に対する実態の聞き取り
排出事業者は、廃棄物処理法の保管基準を遵守して太陽光パネルを保管する必要があるが、実態は？	電気工事業者(工務店)と解体業者に対する実態の聞き取り
撤去した太陽光パネルは、買い取り業者や無料回収業者に譲り渡しているか？もしそうであれば、中期的視点でそれら業者は安定な処理の受け皿なのか？	電気工事業者(工務店)と解体業者に対する実態の聞き取り
排出事業者は、廃棄物データシート(WDS)の未添付を理由に、処理業者から太陽光パネルの処分を断られたり、処理費用が割高になったりしたことがあるか？	電気工事業者(工務店)、解体業者、産業廃棄物の収集運搬業者および処分業者に対する実態の聞き取り
排出事業者と処分業者が離れた場所に位置している場合、産業廃棄物として運搬する太陽光パネルの収集・運搬費は経済的に合理的な範囲か？	
太陽光パネルは安定 5 品目から除外され、最終処分する場合は原則として管理型最終処分場で処分すべきとされているが、実態は？	電気工事業者・工務店、解体業者、産業廃棄物の収集運搬業者および処分業者に対する実態の聞き取り
現状の処理フローは、資源の有効利用促進の観点から見た場合、妥当か？	規制当局内での意見整理
一般廃棄物として太陽光パネルが発生してしまうことはないか？もし発生した場合、処理の受け皿はあるか？	規制当局内での意見整理、市町村への実態の聞き取り

(出典)E&ES が作成

本業務では、表 IV-2 に示す各主体に対して、本業務の下で 2021 年度に実施を計画している太陽光パネルの回収試験への協力を求めた。なお、廃棄物・3R 研究財団 (2020) によると、株式会社ウム・ヴェルト・ジャパン (以下、「UWJ」) は、環境省の令和 2 年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金 (省 CO2 型リサイクル等高度化設備導入促進事業) の下で、太陽光パネルリサイクル設備の導入事業を行う事業者である。

**表 IV-2 本業務の下で 2021 年度に実施を計画している回収試験への協力を求めた主体**

主体の名称	主体の属性
株式会社ウム・ヴェルト・ジャパン	産業廃棄物の処分業者
埼玉県電気工事工業組合	電気工事業者の団体
市町村	－
埼玉県住まいづくり協議会	住宅関係企業・行政・公益団体による協議会。当協議会の会員が元請けとなり、解体業者に解体工事を発注することがある
埼玉県解体業協会事務局	解体業者の団体
個々の事業者	解体業者、産業廃棄物の収集運搬業者 (積替保管あり)
一般社団法人埼玉県環境産業振興協会	埼玉県内の産業廃棄物の収集運搬・処分業者が所属する団体

#### IV-1-2 協議の場の名称・目的・スケジュール・協議結果の公開範囲

##### (1) 名称

本業務および 2021 年度に継続実施を計画している本業務の名称と枠組みの下で、埼玉県内の各主体と協議を行う。

##### (2) 目的・スケジュール

本業務および 2021 年度に継続実施を計画している本業務の枠組みの下で、NER・E&ES が事務局となり、埼玉県内の各主体との連絡・調整の役割を担う。スケジュールとしては、2020～2021 年度の 2 年間とする。

##### (3) 協議結果の公開範囲

本業務および 2021 年度に継続実施を計画している本業務の下での協議結果については、公開可能な事項については、本業務の報告書としてとりまとめ、環境省への提出を行う。

#### IV-1-3 協議の場の事務局の役割

NER・E&ES が事務局となり、本業務および 2021 年度に継続実施を計画している本業務の

下で、埼玉県内の各主体との連絡・調整を行うとともに、2021 年度に埼玉県内で実施を計画している太陽光パネルの回収試験を全体統括する。

## IV-2 試験計画の検討・準備

### IV-2-1 試験実施前の準備事項

2021 年度に継続実施を計画している本業務は、埼玉県環境部廃棄物指導課と協調して実施することとした。

### IV-2-2 試験計画の内容

#### (1) 目的

2021 年度に継続実施を計画している本業務の下では、埼玉県内で太陽光パネルの回収試験を行うことで以下の 5 点を明らかにして、そのうえで、最終処分場に依存しない太陽光パネルの処理ルートの構築に向けたロードマップを作成することを目的とする。

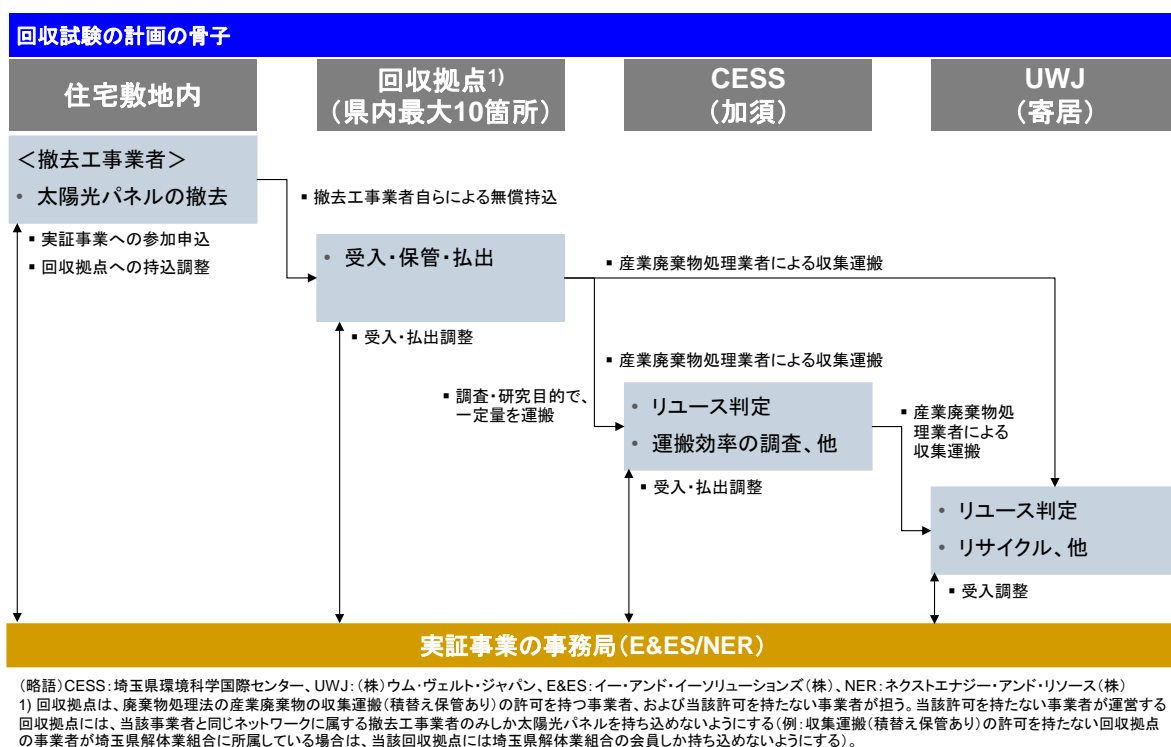
- 拠点回収のニーズと運用上の課題
- 回収した太陽光パネルのリユースとリサイクルの判別性
- リユース品の活用可能性(公共施設、工場屋根、等)
- 運搬効率に関する基礎データ
- 拠点回収を行う上での廃棄物処理法上の課題

#### (2) 実施事項

回収試験で扱う場所は、住宅敷地内、県内で最大 10 か所設置予定の回収拠点、埼玉県環境科学国際センター(以下、「CESS」)、および UWJ である。回収試験の流れとしては、以下のとおりである(図 IV-4 参照)。

- 住宅敷地内で住宅から太陽光パネルの撤去工事に従事するハウスメーカー、解体業者、および電気工事業者に広報を行う。広報では、埼玉県内で太陽光パネルの回収試験を行っていることを周知し、住宅から撤去した太陽光パネルについて、自ら回収拠点に持ち込んでいただくようお願いをする。
- 回収拠点では、撤去工事を行った業者から無償で太陽光パネルを受け入れ、一定量になるまで保管する。その後、回収した太陽光パネルの一部については試験研究目的で CESS に運搬するとともに、他の大部分は UWJ に運搬する。

- CESSでは、受け入れた太陽光パネルを用いて荷積みと運搬効率に関する基礎データを取得する。終了後、UWJに運搬する。
- UWJでは、簡易リユース検査装置によるリユース可能性の判別を行う。リユースでき得ると判別された太陽光パネルについては、埼玉県内外の公共施設や工場屋根等での活用可能性を、主に聞き取り調査をとおして、明らかにする。一方で、リユース不可と判別された太陽光パネルについては、適正処理を目的としてリサイクルを行う。



(出典) E&ES が作成

図 IV-4 回収試験の計画の骨子

回収試験は、2021年7～12月までの6か月間実施する。回収の目標量は、太陽光パネル1,000枚とする。外観から明らかにリユース不可と判断される太陽光パネルは回収対象外とする。回収の目標量達成のために、埼玉県内だけでなく、埼玉県外から回収することも検討する。また、必要があれば、住宅敷地外で発生する太陽光パネル、すなわち野立ての太陽光発電所から発生する太陽光パネルも回収する。さらに、拠点回収を基本としつつも、もし必要があれば、撤去現場まで太陽光パネルまで引き取りに行くことも検討する。

また、拠点回収を通してリユース・リサイクルを促進する上での廃棄物処理法上の課題について、廃棄物処理法の所轄官庁である環境省と意見交換を行い、課題を整理する。

### (3) 必要となるインフラ・備品・消耗品

回収拠点には、太陽光パネルの保管容器として、かご台車を配置する(図 IV-5 参照)。回収した太陽光パネルをリユース品として利用するためには、保管・輸送中に太陽光パネルが破損しないことが重要である。この観点から、かご台車の利用は適している。



(注)かご台車のイメージ。(外寸は幅1.1 m×奥行0.8 m×高さ1.7 m程度)(太陽電池モジュール20枚程度収容可)。1つの回収拠点に、2～3個のかご台車を保管する想定。

(出典)E&ES が作成

**図 IV-5 回収拠点で利用を計画している太陽光パネルの保管容器**

UWJ では、簡易リユース検査装置を用いて受け入れた太陽光パネルを対象として、リユース可能性の判別を行う。簡易リユース検査装置は現在開発中であるものの、短時間でリユース可能なパネルを見つけることをコンセプトとして設計・開発が進められている。

### (4) 参加者間でのコスト負担の考え方

太陽光パネルの撤去業者は、回収拠点までの太陽光パネルの持ち込みに係る運賃は自ら負担する。回収拠点では、撤去業者から持ち込まれる太陽光パネルを無償で受け入れる。

回収拠点の運営費(太陽光パネルの受入・払出に係る役務費、および太陽光パネルの保管費)、およびは太陽光パネルの保管容器(消耗品)の調達費は、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下で負担する。また、回収拠点から CESS および UWJ への太陽光パ

ネルの運賃も、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下で負担する。

CESS にて行う運搬効率に関する基礎データ取得に係る各種費用（測定費、運搬費、光熱費、消耗品費、等）は、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下で負担する。

また、UWJ にて行う太陽光パネルのリユース検査費用、リユース不可と判別された太陽光パネルの適正処理費は、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下で負担する。

#### (5) 参加者の範囲

本回収試験に参加する参加者のうち、太陽光パネルの撤去業者の範囲は、現時点で明確ではない。回収目標を達成する視点からは撤去業者の範囲は広いほうがよく、そのため、2021 年度に継続実施を計画している本業務の下では、ハウスメーカー、解体業者、および電気工事業者に広報を行う。加えて、広報と課題の聞き取りを主な目的として、2021 年度には、住宅系の業界団体との計 2 回程度の意見交換を行う計画である。

回収拠点は最大で 10 拠点配置する計画であり、現時点では未決定である。既に以下の 3 つの異なる属性の主体に協力を要請している。

- 埼玉県解体業協会
- 埼玉県電気工事工業組合
- 一般社団法人埼玉県環境産業振興協会

なお、本業務では、産業廃棄物の収集・運搬（積替え保管あり）の許可を持たない事業者が運営する回収拠点には、当該事業者と同じネットワークに属する撤去工事業者のみしか太陽光パネルを持ち込めないようにする。例えば、当許可を持たない回収拠点の事業者が埼玉県解体業組合に所属している場合は、当該回収拠点には埼玉県解体業組合の会員しか持ち込めないようにする。

#### (6) スケジュール

2021 年度に継続実施を計画している本業務のスケジュールを、図 IV-6 に示す。2021 年 4 月から準備を開始し、各種調整・試験を行い、2022 年 3 月までにとりまとめを行う。

項目	2021年			2022年
	4～6月	7～9月	10～12月	1～3月
回収拠点の候補の決定				
回収試験の広報				
回収拠点・CESS・UWJとの条件合意				
各種消耗品・資機材の配置				
住宅系業界団体との意見交換	1回実施	1回実施		
環境省との意見交換	1回実施			1回実施
回収試験				
ロードマップの作成				とりまとめ

(出典)E&ES が作成

図 IV-6 回収試験のスケジュール

#### IV-2-3 試験終了後の実施事項

2022 年度以降、埼玉県をフィールドにして、最終処分場に依存しない太陽光パネルの処理ルートを構築するためには、以下が明らかになっていることが重要である。

- 拠点回収のニーズと運用上の課題
- 回収した太陽光パネルのリユースとリサイクルの判別性
- リユース品の活用可能性(公共施設、工場屋根、等)
- 運搬効率に関する基礎データ
- 拠点回収を行う上での廃棄物処理法上の課題

2021 年度に継続実施を計画している本業務を通して上記を明らかにして、2022 年度以降の道筋を示すロードマップを、2021 年度業務の成果物としてとりまとめる。

### IV-3 リユースのための検査

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(環境省(2018))に示される検査内容(外観検査、洗浄、絶縁検査、出力検査等)に依拠しながらも、オペレーションの実態に適合するように、リユースの検査内容を検討した。具体的には、359枚の太陽光パネルを対象にしてリユースのための性能検査を行い、以下の項目について課題を整理した。

- 検査の手順・結果
- 検査工程の経済合理性
- 実際の処理ルートの中での検査実施を想定した場合の検討課題

#### IV-3-1 検査の手順・結果

##### (1) 検査の手順

本業務では、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(環境省(2018))に示される検査内容に準じて、太陽光パネルのリユースの検査を行った(表 IV-3 参照)。

表 IV-3 本業務で実施したリユースの検査の内容

検査項目	検査内容	検査結果の判定基準
外観検査	目視による検査	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 著しく品位を損なうレベルの外観不具合が見られないこと</li><li>・ 性能特性に異常をきたす外観不具合が見られないこと</li><li>・ 変形、傷等の安全性に影響のある外観不具合が見られないこと</li></ul>
絶縁検査	モジュール出力端子を短絡し、モジュールのシステム最大電圧を2分間加え、絶縁抵抗値を測定	絶縁抵抗値が 50MΩ 以上であること
EL カメラ検査	測定対象モジュールの定格 $I_{sc}$ の電流を外部より印加し、遮光状態にて EL 画像の撮影を行う	EL 画像に基づきランク分けを行う
出力特性検査 (I-V)	JIS C 8912 に規定する結晶系太陽電池モジュール測定用ソーラーシミュレータにより出力特性を測定する <測定条件> <ul style="list-style-type: none"><li>・ 放射照度:1,000W/m<sup>2</sup></li><li>・ 分光分布:AM1.5</li></ul>	公称最大出力の 80%以上であること

(出典)E&ES が作成

リユース検査は、2 つの異なるイベントで不用品となった太陽光パネルを対象に行った。1 つは、大型台風での被災(水没等)により不用品となった産業用太陽光発電所向けの太陽光パネル 230 枚である。設置年数は 2 年である。230 枚すべてが同じ型番であり、公称最大出

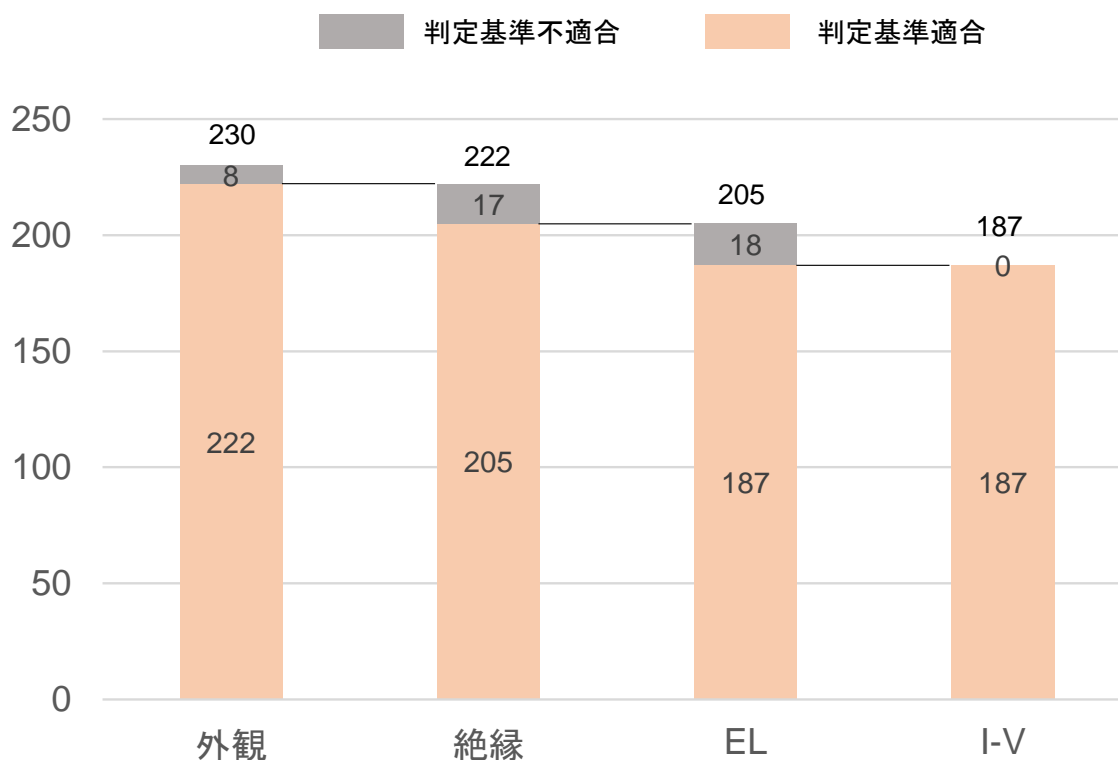


力は 270W である。以下、この太陽光パネルを「太陽光パネル A」と呼称する。

もう 1 つは、施工中止を理由にして、太陽光発電所施工現場で新品の太陽光パネルを開梱後 4 年間以上野ざらしで放置していたもの 129 枚である。129 枚すべてが同じ型番であり、公称最大出力は 250W である。以下、この太陽光パネルを「太陽光パネル B」と呼称する。

## (2) 検査の結果

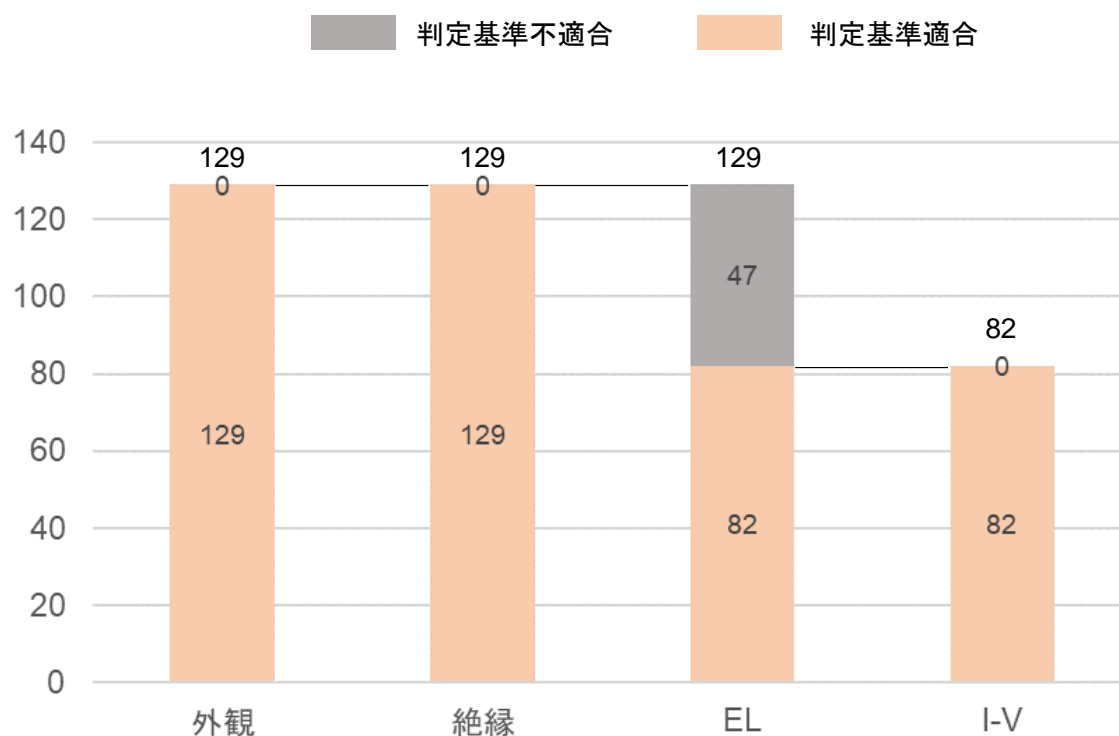
太陽光パネル A の検査結果は、図 IV-7 のとおりである。計 230 枚の太陽光パネルの外観を目視で検査したところ、8 枚で外観不具合が見られた。外観不具合が見られなかった 222 枚の太陽光パネルの絶縁検査を行ったところ、17 枚で絶縁抵抗値が  $50\text{M}\Omega$  未満であり、判定基準不適合であった。判定基準に適合した 205 枚の太陽光パネルについて EL カメラ検査を行ったところ、明らかに 18 枚は最低ランク、すなわち判定基準不適合であった。判定基準に適合した 187 枚の太陽光パネルの出力特性(I-V)検査を行ったところ、すべて公称最大出力の 80%以上であり、判定基準に適合した。この 187 枚を対象として、EL カメラ検査のランク分け等の評価結果に基づき、最終的にリユース品としてのランク分けを行った。



(出典)E&ES が作成

図 IV-7 太陽光パネル A のリユース検査結果

太陽光パネル B の検査結果は、図 IV-8 のとおりである。計 129 枚の太陽光パネルの外観を目視で検査したところ、外観不具合は確認されなかった。次いで絶縁検査を行ったところ、判定基準不適合の太陽光パネルは確認されなかった。その後、EL カメラ検査を行ったところ、明らかに 47 枚は最低ランク、すなわち判定基準不適合であった。判定基準に適合した 82 枚の太陽光パネルの出力特性(I-V)検査を行ったところ、すべて公称最大出力の 80%以上であり、判定基準に適合した。この 82 枚を対象として、EL カメラ検査のランク分け等の評価結果に基づき、最終的にリユース品としてのランク分けを行った。



(出典)E&ES が作成

図 IV-8 太陽光パネル B のリユース検査結果

#### IV-3-2 検査工程の経済合理性

表 IV-3 に示す検査方法は、リユース可否を判断する手法として妥当であるものの、手間を要するため、相応のコストが発生する。具体的には、表 IV-3 に示す絶縁検査、EL カメラ検査、ソーラーシミュレータを用いた出力特性検査は、定置型の検査装置により行うため、太陽光パネルの発生現場から検査装置がある場所まで太陽光パネルを持ち帰る必要があり、ここで荷役作業・輸送費が生じる。加えて、表 IV-3 に示す検査装置は特殊品であり、一式揃えるためには数千万円の初期投資費を要する。新品の太陽光パネルの販売価格も減少し続け

ている中、表 IV-3 に示す検査工程を経た後のリユース品の太陽光パネルは、新品の太陽光パネルに比べて、価格競争力を出しにくい。

そこで、太陽光パネルの発生現場で、短時間で、だれでも簡易に、リユース可否を判断する簡易リユース検査装置が望まれる。

#### **IV-3-3 実際の処理ルートの中での検査実施を想定した場合の検討課題**

2021 年度に継続実施を計画している本業務の下では、埼玉県内で太陽光パネルの回収試験を行い、UWJ では、簡易リユース検査装置を用いて受け入れた太陽光パネルを対象として、リユース可能性の判別を行う計画である。2021 年度に継続実施を計画している本業務で用いる簡易リユース検査装置に求められる要件は、以下である。

- 太陽光パネルを 1 枚ごと測定するものであること
- 外観上、アルミフレーム・ガラス・バックシートに劣化が見られない太陽光パネルを測定対象(アルミフレームの打痕があるもの、ガラスが割れているもの、バックシートに破れ・焦げがあるものは測定対象外)とすること
- 一部遮光が可能な屋外と倉庫内での測定を想定すること
- 測定未経験者でも使用できるものとする
- CIS 太陽光パネルまたは CdTe 太陽光パネルは測定対象外としてよい

## 第V章 事業における環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果の評価

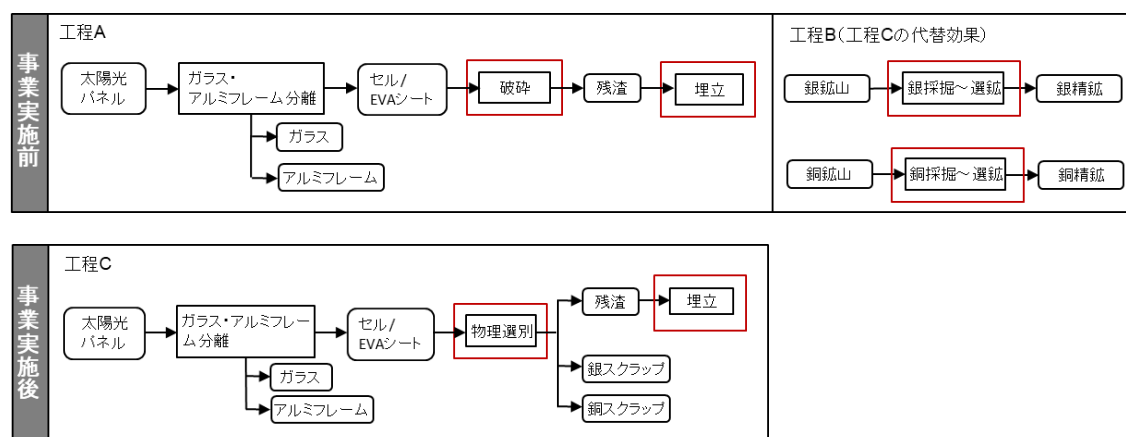
### V-1 調査の実施方法

#### V-1-1 海外での鉱物資源の採掘に伴う CO2 排出量削減

##### (1) 調査の実施方法

本事業において、太陽光パネル中の銀と銅を回収することにより、これらの循環利用が促進され、海外での鉱物資源の採掘による CO2 削減効果が期待される。本業務では、環境省が公開している「循環資源のリサイクル及び低炭素化に関する効果算出ガイドライン」に基づいて、この CO2 削減効果の評価を行った。

評価の実施に当たり、機能単位は「太陽光パネル 1t 当たりの処理」とし、システムバウンダリーは図 V-1 に示すとおり設定した。工程 A は、太陽光パネルからガラスおよびアルミフレームを除去し、セル/EVA シート中の銀と銅を回収せずに、破碎し、埋立処分する工程である。この工程は、現状、最も容易かつ合法的な処分方法である。一方、工程 C は、本実証事業の工程であり、ガラスおよびアルミフレーム除去後、物理選別のプロセスをとって、セル/EVA シート中の銀および銅を回収する工程である。なお、工程 C の代替効果<sup>11</sup>を評価するために、同工程において回収される銀と銅と同量分を天然資源から製造する工程 B の CO2 排出量も評価対象とした。CO2 削減効果は、工程 A および工程 B における CO2 排出量を加算し、そこから工程 C における CO2 排出量を差し引いて、算出した。ガラスおよびアルミフレームの分離プロセスは、事業実施前後で共に実施されると仮定し、図 V-1 の赤枠で囲まれたプロセスのみ CO2 排出量の試算対象とした。



(出典)E&ES が作成

図 V-1 CO2 排出量削減評価のシステムバウンダリー

<sup>11</sup> 本事業(工程 C)における生産物(銀および銅を含む金属スクラップ)について、本事業が実施されなかった場合、その生産物を天然資源から製造した場合の CO2 排出量のことである。

## (2) 調査結果

### ■ 工程 A

過去調査のデータによると、1 トンの太陽光パネルあたり、235kg のセル／EVA シートが含まれている。この重量に、太陽光パネルの破碎および産業廃棄物の埋立処理に関する CO<sub>2</sub> 排出量原単位を乗じることで、各プロセスでの CO<sub>2</sub> 排出量を算出した(表 V-1 参照)。

**表 V-1 工程 A における CO<sub>2</sub> 排出量の算定根拠<sup>1)</sup>**

プロセス	セル／EVA シート (kg)	CO <sub>2</sub> 排出量原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /kg)	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub> 係数の出典
破碎	235	0.021	4.941	湯浅ら(2017)
埋立	235	0.007	1.694	LCI データベース IDEA version 2.3 (製品コード: 852211000)
合計			6.635	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

### ■ 工程 B

過去調査のデータによると、1 トンの太陽光パネル中の銀含有量および銅含有量は、それぞれ 0.471g および 8.824g である。また、廃棄物処理業者へのヒアリングによると、工程 C の物理選別での各金属の回収率は、99%である。よって、1 トンの太陽光パネルを処理した場合、0.466g の銀および 8.735g の銅が回収される。

本調査において参照した LCI データベース IDEA version 2.3 の貴金属鉱石<sup>12)</sup>の品位は 20g/t であり、Risopatron, C. R.(2018)によると銅鉱石の平均品位は 0.62%である。よって、工程 C において回収される銀を貴金属鉱石、銅を銅鉱石に換算すると、それぞれ 23,294kg および 1,409kg となる。

これらの各鉱石の重量に、それぞれの鉱石の採掘～精鉱のプロセスに関する CO<sub>2</sub> 排出量原単位を乗じることで、各プロセスの CO<sub>2</sub> 排出量を算出した(表 V-2)。

<sup>12)</sup> 鉱物資源の採掘に関する CO<sub>2</sub> 排出量の原単位は、LCI データベース IDEA Version 2.3 より参照した。なお、同データベースでは、銀鉱石の採掘に関する CO<sub>2</sub> 排出量原単位が含まれていなかったため、銀を含む貴金属鉱石の採掘から精鉱のプロセスに関する CO<sub>2</sub> 排出量原単位を適用した。

表 V-2 工程 B における CO2 排出量の算定根拠<sup>1)</sup>

プロセス	鉱石重量(kg)	CO2 排出量原単位 (kg-CO2/kg)	CO2 排出量(kg-CO2)	CO2 係数の出典
銀採掘～精鉱	23,294	0.144	3,354.353	LCI データベース IDEA version 2.3 (製品コード : 053113211、 053113226、 053113241)
銀採掘～精鉱	1,409	1.381	1,946.059	LCI データベース IDEA version 2.3 (製品コード : 053125000)
合計			5,300.412	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

## ■ 工程 C

物理選別のプロセスでは、工程 A と同様に、1 トンの太陽光パネルあたり 235kg のセル／EVA シートが処理される。本プロセスは、裁断、粉碎および風力選別のサブプロセスより構成されている。廃棄物処理業者へのヒアリングより入手したデータに基づいて、各サブプロセスの電力消費量を算出した。処理されるマテリアルの重量および電力消費量に基づいて、工程 C における総電力消費量を算出し、これに CO2 排出量原単位を乗じることで、CO2 排出量を算出した(表 V-3 参照)。

表 V-3 工程 C の物理選別における CO2 排出量の算定根拠<sup>1)</sup>

プロセス	総電力消費量 (kwh)	CO2 排出量原単位 (kg-CO2/kg)	CO2 排出量(kg-CO2)	CO2 係数の出典
物理選別	45	0.488	21.981	環境省(2020b)

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

過去調査のデータによると、物理選別より生成される残渣は、セル／EVA シート重量の 7 割、金属スクラップは 3 割を締める。よって、工程 C の物理選別では、165kg の残渣が発生する。これに、埋立処分に関する CO2 排出量原単位を乗じることで、CO2 排出量を算出した(表 V-4 参照)。

表 V-4 工程 C の埋立処分における CO2 排出量の算定根拠<sup>1)</sup>

プロセス	残渣 (kg)	CO2 排出量原単位 (kg-CO2/kg)	CO2 排出量 (kg-CO2)	CO2 係数の出典
埋立	165	0.007	1.186	LCI データベース IDEA version 2.3 (製品コード: 852211000)

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

工程 C の各プロセスにおける CO2 排出量の合計値は、23.167kg-CO2 であった。

#### ■ まとめ

事業実施後の CO2 排出量の削減効果を表 V-5 に、事業実施前および事業実施後の CO2 年間排出量の比較を図 V-2 に示す。

表のとおり、太陽光パネル 1 トンあたりの CO2 排出量の削減効果は、5.284t-CO2/1t-太陽光パネルである。なお、本実証事業の実施後、年間 1,200 トンの太陽光パネルが処理されることを想定した場合、CO2 排出量削減効果は、6,341t-CO2/年である。また、事業実施前では「銀採掘～精鉱」に次いで、「銅採掘～精鉱」のプロセスにおける CO2 排出量の寄与が最も大きい一方、事業実施後では「物理選別」のプロセスの寄与が最も大きい。

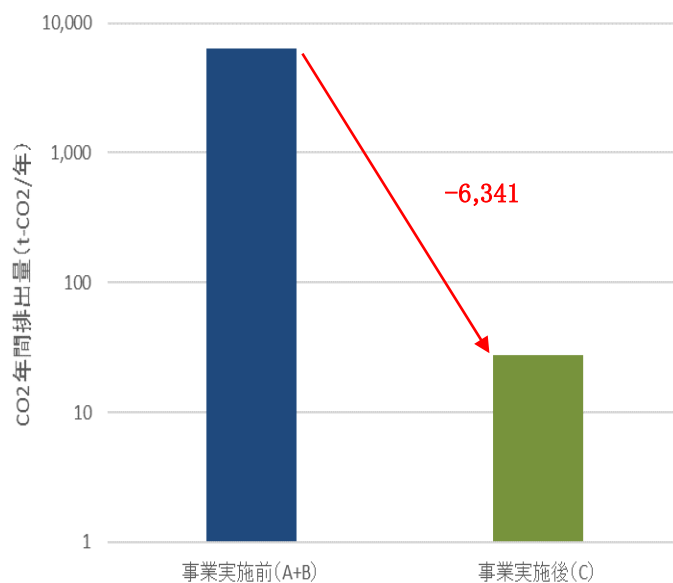
表 V-5 事業実施後の CO2 排出量の削減効果<sup>1)</sup>

工程			CO2 排出量 (t-CO2／1t-太陽光パネル)		CO2 年間排出量 <sup>2)</sup> (t-CO2／年)
事業実施前	A	破碎	0.005	0.007	8
		埋立	0.002		
	B	銀採掘～選鉱	3.354	5.300	6,360
		銅採掘～選鉱	1.946		
事業実施後	C	物理選別	0.022	0.023	28
		埋立	0.001		
CO2 削減効果 (A+B-C)				5.284	6,341

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

2) 年間 1,200 トンの太陽光パネルの処理を想定。

(出典)E&ES が作成



(出典)E&ES が作成

図 V-2 事業実施前および事業実施後の CO2 排出量の比較

### (3) 結論

本調査では、本事業による太陽光パネル中の銀と銅の循環利用の促進に伴う、海外での鉱物資源の採掘による CO2 削減効果の評価を目的とした。

結果として、太陽光パネル 1 トンあたりの CO2 排出量削減効果は 5.284t-CO2/1t-太陽光パネルであり、太陽光パネルの年間排出量が 1,200 トンであると想定した場合、CO2 排出量削減効果は 6,341t-CO2/年となる。

また、事業実施前では「銀採掘～精鉱」プロセス、「銅採掘～精鉱」プロセスの順に CO2 排出量の寄与が最も大きく、事業実施後では「物理選別」プロセスの寄与が最も大きいことが確認された。

以上より、CO2 排出量削減効果の観点から、本実証事業による環境改善効果が見込まれる。

なお、本調査結果の精度を向上するために、次年度業務では、本調査の算定方法の妥当性について専門家にコメントを求める方針である。



## V-1-2 海外での鉱物資源の採掘量抑制

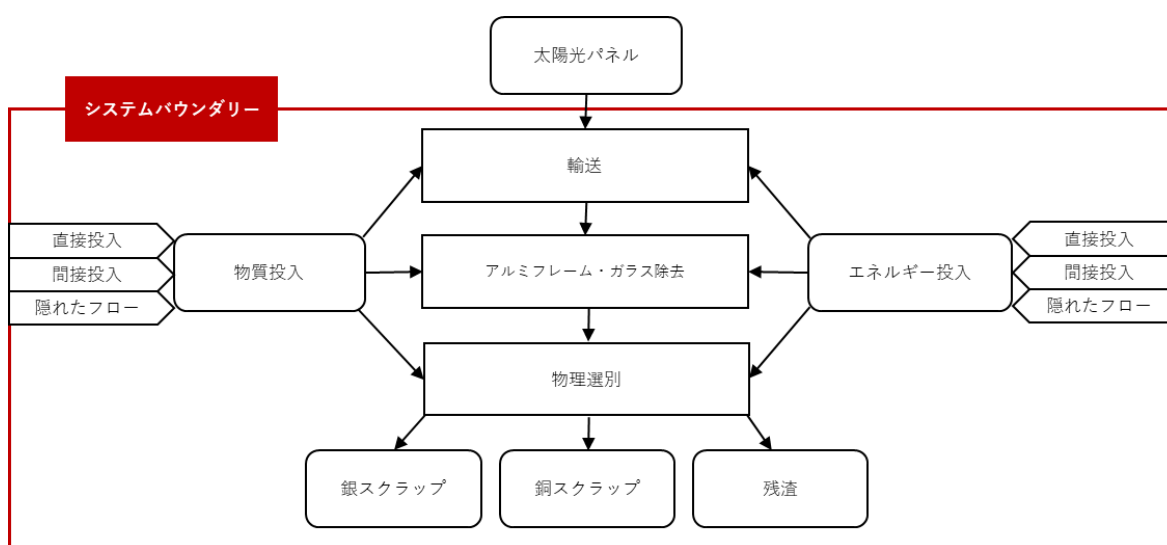
### (1) 調査の実施方法

Total Material Requirement (以下、「TMR」)は、経済活動に伴う直接的および間接的な物質投入に加え、経済活動に伴わない隠れたフロー(脈石、ずり等)を考慮する指標である。

本調査では、本事業による海外での鉱物資源の採掘量の抑制効果を評価することを目的に、銀と銅を対象に、自然鉱石の採掘に伴う TMR (以下、「自然鉱石 TMR」)、ならびに太陽光パネルからの金属スクラップ回収に伴う TMR (以下、「太陽光パネル TMR」)を比較した。

自然鉱石 TMR については、原田ら(2001)の研究結果を参照した。同研究では、1 トン分の金属を得るための精鉱の取得に伴う採掘土石の総量を TMR として算出している。なお、銀の TMR は粗鉱品位より推定、銅の TMR は実操業データより算出している。

太陽光パネル TMR については、図 V-3 に示すシステムバウンダリーに基づいて算出した。本調査では、使用済みとなった太陽光パネルが輸送され、ガラス・アルミフレーム分離を行う熱線カット方式の設備より処理され、最終的に物理選別をとおして、銀・銅スクラップが回収されるシナリオを想定して、TMR 評価を行った。



(出典)E&ES が作成

図 V-3 太陽光パネル TMR 評価のシステムバウンダリー

太陽光パネル TMR および自然鉱石 TMR の比較を可能にするために、前者の評価において、後者と同様の前提条件を設けた。そのため、太陽光パネル TMR の算出にあたり、銀・銅スクラップ回収後のそれらの製品化に関するプロセスおよび本事業より発生する残渣の無害化・処理プロセスに相当する TMR、ならびに銀・銅スクラップ回収プロセスにおける水の投入

量は対象外とした。

また、各工程および残渣に関する TMR は、銀スクラップおよび銅スクラップ、両者に共通するため、最終的に、各金属の市場価格比に基づいてアロケーション(配分)を行った。

TMR の算出方法と結果を以下に示し、各計算の算定根拠を表 V-13～表 V-18 に示す。

## (2) 調査結果

### ■ 太陽光パネルの組成

過去調査のデータによると、太陽光パネルの組成は、表 V-6 に示すとおりであり、上記の項目 V-1-1(2)のとおり、物理選別の工程で回収される銀および銅の重量は、それぞれ 0.466g/t-太陽光パネルおよび 8.735g/t-太陽光パネルである。

表 V-6 太陽光パネルの組成

素材	重量(kg/t-太陽光パネル)
アルミフレーム	176
ガラス	588
セル/EVA シート	235

(出典)E&ES が作成

太陽光パネル 1 トンあたりの銀および銅の回収量に基づいて、1 トン分の銀および銅の回収には、それぞれ 2,146 トンおよび 114 トンの太陽光パネルを処理する必要がある。また、各工程での投入量および出力量は、表 V-6 に示す太陽光パネル組成に関するデータに基づいて算出し、各工程のフロー図(図 V-4～図 V-6)に示す。

### ■ 輸送

輸送の流れを図 V-4 に示す。排出事業者から中間処理業者までの距離が 200km であり、積載率 100%の 10 トントラックで運搬されることを仮定し、これらのデータおよび輸送される太陽光パネルの重量に基づいて、総輸送距離を算出した。総輸送距離、営業用 10 トントラックの軽油の燃費および密度に基づいてその消費量を算出し TMR 原単位を乗じて、これを TMR に換算した。結果は、表 V-7 に示すとおりである。



(注 1) 赤字は 1 トン分の銀回収プロセスに関する投入量・出力量を示す。  
 (注 2) 青字は 1 トン分の銅回収プロセスに関する投入量・出力量を示す。  
 (出典)E&ES が作成

図 V-4 輸送の流れ

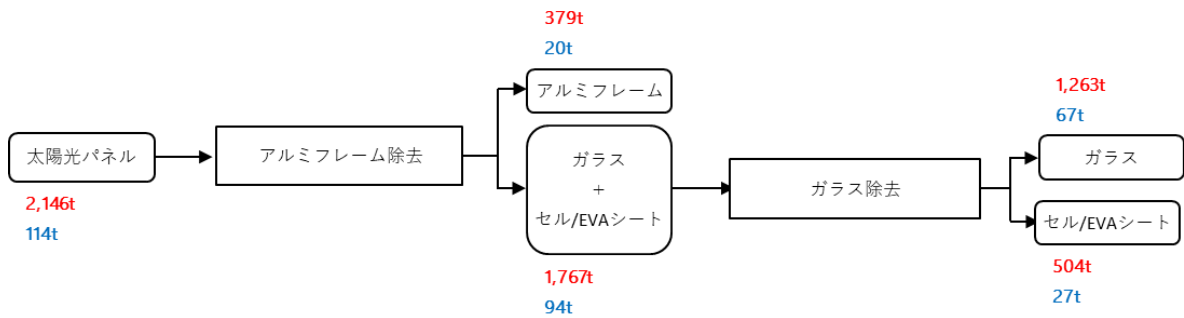
表 V-7 輸送に関する TMR

項目	銀回収	銅回収
総輸送距離 (km)	42,929	2,290
軽油消費量 (kg)	12,181	650
輸送に関する TMR (kg-TMR)	245,766	699

(出典)E&ES が作成

#### ■ アルミフレーム・ガラス除去

本調査の対象とした設備は、アルミフレーム除去およびガラス除去を行う設備である。本工程に関する TMR の評価では、設備に関する公開情報 (処理能力および皮相電力)、および各プロセス (アルミフレーム除去およびガラス除去) への投入量に基づいて、電力消費量を算出し、TMR に換算した。結果は、表 V-8 に示すとおりである。



(注 1) 赤字は 1 トン分の銀回収プロセスに関する投入量・出力量を示す。  
 (注 2) 青字は 1 トン分の銅回収プロセスに関する投入量・出力量を示す。  
 (出典)E&ES が作成

図 V-5 アルミフレーム・ガラス除去の流れ

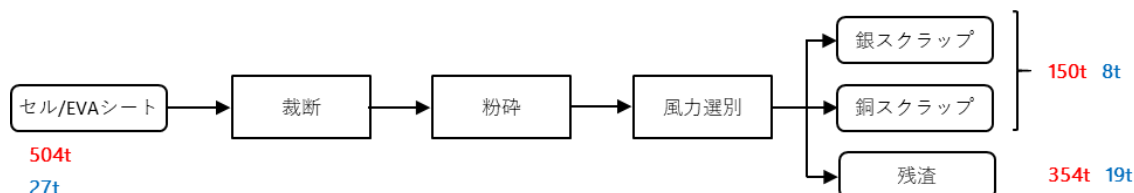
表 V-8 アルミフレーム・ガラス除去に関する TMR

項目	銀回収		銅回収	
	アルミフレーム除去	ガラス除去	アルミフレーム除去	ガラス除去
電力消費量(kwh)	143,098	48,493	7,632	2,586
TMR(kg-TMR)	270,455	91,652	14,424	4,888

(出典)E&ES が作成

## ■ 物理選別

物理選別は、裁断、粉碎および風力選別の工程より構成される(図 V-6 参照)。廃棄物処理業者へのヒアリングより入手した、各工程の処理能力および電力に関するデータ、ならびに工程への投入量に基づいて、消費電力量を算出し、TMR に換算した。結果は、表 V-9 に示すとおりである。



(注 1) 赤字は 1 トン分の銀回収プロセスに関する投入量・出力量を示す。

(注 2) 青字は 1 トン分の銅回収プロセスに関する投入量・出力量を示す。

(出典)E&ES が作成

図 V-6 物理選別の流れ

表 V-9 物理選別に関する TMR

項目	銀回収			銅回収		
	裁断	粉碎	風力選別	裁断	粉碎	風力選別
電力消費量(kwh)	5,138	57,798	33,628	274	3,083	1,793
TMR(kg-TMR)	9,710	109,238	63,557	518	5,826	3,390

(出典)E&ES が作成

## ■ 残渣

本調査のシステムバウンダリー内で発生する残渣は、表 V-6 に示す素材の総重量より、銀および銅スクラップの重量を差し引いたものになる。なお、過去調査のデータによると、これらのスクラップの重量は、セル/EVA シートの 3 割を締める。これらの情報に基づいて、算出した残渣に関する TMR は、表 V-10 のとおりである。

表 V-10 残渣に関する TMR

項目	銀回収 (kg-TMR)	銅回収 (kg-TMR)
アルミフレーム	378,788	20,202
ガラス	1,262,626	67,340
プラスチック+シリコン	353,535	18,855
合計	1,994,949	106,397

(出典)E&ES が作成

#### ■ アロケーション

本調査のシステムバウンダリー内では、銀および銅スクラップが生成される。そのため、1 トン分の銀または銅の回収に相当する TMR を算出するためには、各工程に関する TMR を、各金属に対しアロケーションする必要がある。本調査では、公開情報および過去調査より入手したデータに基づいて、各金属の市場価格比を算出し、アロケーションを行った。アロケーション後の銀および銅の回収に関する TMR は、表 V-11 のとおりである。

表 V-11 アロケーション後の銀および銅の回収に関する TMR

工程	銀回収 (kg-TMR)		銅回収 (kg-TMR)	
	合計 TMR	アロケーション後 TMR <sup>1)</sup>	合計 TMR	アロケーション後 TMR <sup>2)</sup>
輸送	245,766	215,730	699	85
アルミフレーム分離	270,455	237,402	14,424	1,763
ガラス分離	91,652	80,451	4,888	597
裁断	9,710	8,523	518	63
粉砕	109,238	95,888	5,826	712
風力選別	63,557	55,789	3,390	414
残渣	1,994,949	1,751,142	106,397	13,003

1) 市場価格比は、0.878 である。なお、表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

2) 市場価格比は、0.122 である。なお、表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

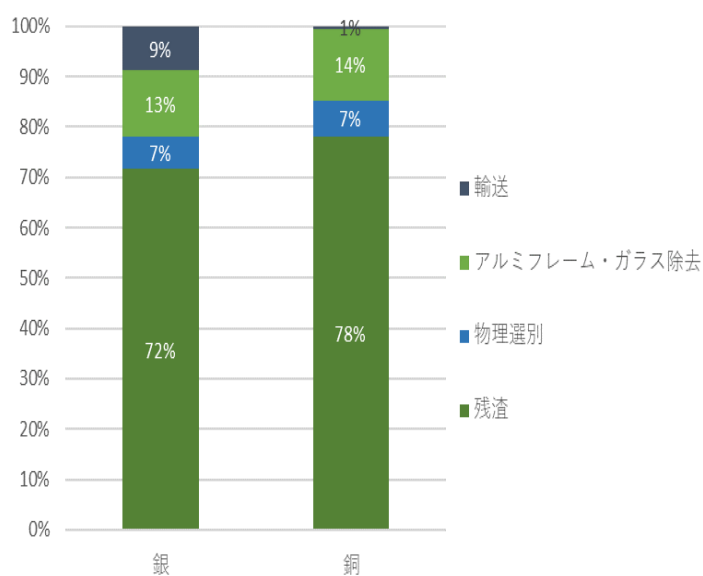
#### ■ まとめ

銀および銅の太陽光パネル TMR の内訳を、表 V-12 および図 V-7 に示す。図に示すとおり、両者に対し、残渣に関する TMR が大半を占める結果となった(前者では 72%、後者では 78%)。

表 V-12 太陽光パネル TMR の内訳

工程	太陽光パネル TMR (銀) (t/t)	太陽光パネル TMR (銅) (t/t)
輸送	216	0.1
アルミフレーム・ガラス除去	318	2.4
物理選別	160	1.2
残渣	1,751	13
合計	2,445	17

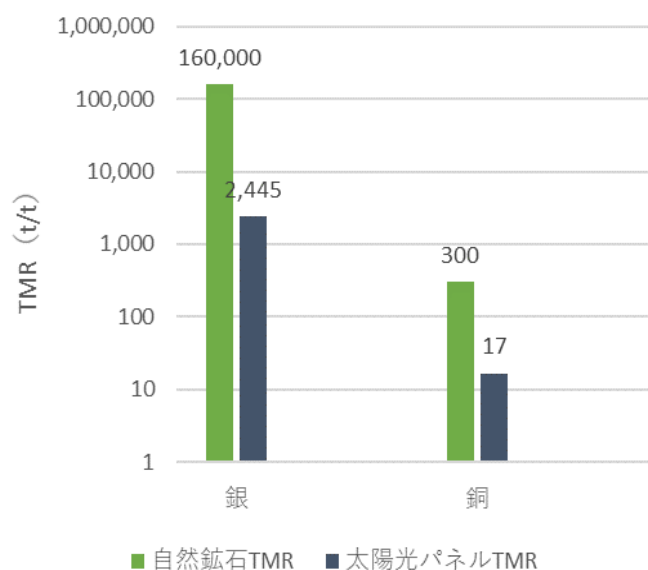
(出典)E&ES が作成



(出典)E&ES が作成

図 V-7 太陽光パネル TMR の内訳

自然鉱石および太陽光パネル鉱石の比較を図 V-8 に示す。図より確認できるように、銀および銅の太陽光パネル TMR は、自然鉱石 TMR を下回る結果となった。よって、自然鉱石から銀および銅を回収することに比べて、太陽光パネルから銀および銅を回収することは、環境への攪乱量が小さい。



(出典)E&ES が作成

図 V-8 アロケーション後の銀および銅の回収に関する TMR

### (3) 結論

本調査では、太陽光パネル中の銀および銅を回収することに伴い、海外での鉱物資源の採掘量を削減することによる環境改善効果を、TMR に基づいて評価した。評価にあたって、先行研究より引用した自然鉱石 TMR を、本調査において算出した太陽光パネル TMR と比較した。

銀および銅の太陽光パネル TMR は、それぞれ 2,445t/t および 17t/t という結果となった。また、両者において、残渣に関する TMR が大半を占める結果となった(前者では 72%、後者では 78%)。

自然鉱石 TMR および太陽光パネル TMR を比較したところ、銀および銅に関して、太陽光パネル TMR が自然鉱石 TMR を下回る結果となった。よって、太陽光パネル中の銀および銅を回収することにより、海外での鉱山活動に伴う環境への攪乱量を削減し、環境改善効果が得られることが見込まれる。

本調査は、パソコンや携帯電話等からの金属回収に伴う TMR を評価した先行研究を参考に、太陽光パネル TMR の評価を行った。次年度業務の課題として、本調査結果の精度を向上するために、本調査の算定方法の妥当性について専門家にコメントを求める方針である。

表 V-13 太陽光パネルの処理量の算定根拠<sup>1)</sup>

データ項目	数値	単位	計算式・備考	出典
銀回収				
太陽光パネル 1トンあたりの銀回収量	0.466	kg/t-太陽光パネル		過去調査
1 トン分の銀回収に、処理される太陽光パネルの重量	2,146	t-太陽光パネル	1t / (0.466kg/t-太陽光パネル / 1000kg / t)	
銅回収				
太陽光パネル 1トンあたりの銅回収量	8.735g	kg/t-太陽光パネル		過去調査
1 トン分の銅回収に、処理される太陽光パネルの重量	114	t-太陽光パネル	1t / (8.735kg/t-太陽光パネル / 1000kg / t)	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成



表 V-14 輸送に関する TMR の算定根拠 <sup>1)</sup>

データ項目	数値	単位	計算式・備考	出典
総輸送距離の算定				
1 台トラックの輸送距離	200	km／台		仮定
1 台トラックの積載量	10	t／台	積載率 100%	仮定
総輸送距離(銀回収)	42,929	km	(2,146t／10t／台) x 200km／台	
総輸送距離(銅回収)	2,290	km	(114t／10t／台) x 200km／台	
軽油消費量の算定				
営業用 10 トントラックの軽油の燃費	2.89	km/L		環境省(2021)
軽油の密度	0.82	kg/L		石油連盟
軽油の消費量(銀回収)	12,181	kg	(42,929km／2.89km／L) x 0.82kg／L	
軽油の消費量(銅回収)	650	kg	(2,290km／2.89km／L) x 0.82kg／L	
輸送に関する TMR の算定				
軽油の TMR 原単位	0.47	g-TMR/kg.km		山末ら(2010)
輸送に関する TMR(銀回収)	245,766	kg-TMR	12,181kg x 0.47g-TMR／kg.km	
輸送に関する TMR(銅回収)	699	kg-TMR	650kg x 0.47g-TMR／kg.km	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

表 V-15 ガラス・アルミフレーム分離に関する TMR の算定根拠<sup>1)</sup>

データ項目	数値	単位	計算式・備考	出典
アルミフレーム分離に関する TMR の算定				
処理能力	4	秒/kg	60 秒／枚 x 17kg／枚	株式会社エヌ・ピー・シー(2019)
皮相電力	85	KVA		株式会社エヌ・ピー・シー(2019)
力率	0.8			仮定
電力消費量(銀回収)	143,098	kwh	$((4 \text{ 秒} / \text{kg} / 3600 \text{ 秒} / \text{時}) \times (85 \text{ KVA} / 0.8)) \times 2,146,465 \text{ kg}$	
電力消費量(銅回収)	7,632	kwh	$((4 \text{ 秒} / \text{kg} / 3600 \text{ 秒} / \text{時}) \times (85 \text{ KVA} / 0.8)) \times 114,478 \text{ kg}$	
電力の TMR 原単位	1.89	kg-TMR/kwh		中島ら(2006)
アルミフレーム分離に関する TMR(銀回収)	270,455	kg-TMR	$143,098 \text{ kwh} \times 1.89 \text{ kg-TMR/kwh}$	
アルミフレーム分離に関する TMR(銅回収)	14,424	kg-TMR	$7,632 \text{ kwh} \times 1.89 \text{ kg-TMR/kwh}$	
ガラス分離に関する TMR の算定				
処理能力	4	秒/kg	60 秒／枚 x 17kg／枚	株式会社エヌ・ピー・シー(2019)
皮相電力	35	KVA		株式会社エヌ・ピー・シー(2019)
電力消費量(銀回収)	48,493	kwh	$((4 \text{ 秒} / \text{kg} / 3600 \text{ 秒} / \text{時}) \times (35 \text{ KVA} / 0.8)) \times 1,766,540 \text{ kg}$	
電力消費量(銅回収)	2,586	kwh	$(4 \text{ 秒} / \text{kg} / 3600 \text{ 秒} / \text{時}) \times (35 \text{ KVA} / 0.8) \times 94,215 \text{ kg}$	
ガラス分離に関する TMR(銀回収)	91,652	kg-TMR	$143,098 \text{ kwh} \times 1.89 \text{ kg-TMR/kwh}$	
ガラス分離に関する TMR(銅回収)	4,888	kg-TMR	$2,586 \text{ kwh} \times 1.89 \text{ kg-TMR/kwh}$	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

表 V-16 物理選別に関する TMR の算定根拠<sup>1) 2)</sup>

データ項目	数値	単位	計算式・備考	出典
裁断				
電力消費量(銀回収)	5,138	kwh	(電力[kw]／処理能力[kg/h]) x 504,419kg	電力・処理能力はヒアリングより入手
電力消費量(銅回収)	274	kwh	(電力[kw]／処理能力[kg/h]) x 26,902kg	電力・処理能力はヒアリングより入手
電力の TMR 原単位	1.89	kg-TMR/kwh		中島ら(2006)
裁断に関する TMR(銀回収)	9,710	kg-TMR	5,138kwh x 1.89kg-TMR/kwh	
裁断に関する TMR(銅回収)	518	kg-TMR	274kwh x 1.89kg-TMR/kwh	
粉砕				
電力消費量(銀回収)	57,798	kwh	(電力[kw]／処理能力[kg/h]) x 504,419kg	電力・処理能力はヒアリングより入手
電力消費量(銅回収)	3,083	kwh	(電力[kw]／処理能力[kg/h]) x 26,902kg	電力・処理能力はヒアリングより入手
裁断に関する TMR(銀回収)	109,238	kg-TMR	57,798kwh x 1.89kg-TMR/kwh	
裁断に関する TMR(銅回収)	5,826	kg-TMR	3,083kwh x 1.89kg-TMR/kwh	
風力選別				
電力消費量(銀回収)	33,628	kwh	(電力[kw]／処理能力[kg/h]) x 504,419kg	電力・処理能力はヒアリングより入手
電力消費量(銅回収)	1,793	kwh	(電力[kw]／処理能力[kg/h]) x 26,902kg	電力・処理能力はヒアリングより入手
裁断に関する TMR(銀回収)	63,557	kg-TMR	33,628kwh x 1.89kg-TMR/kwh	
裁断に関する TMR(銅回収)	3,390	kg-TMR	1,793kwh x 1.89kg-TMR/kwh	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

2) 廃棄物処理業者へのヒアリングより入手した、各サブプロセスに関する電力および処理能力の値は、企業秘密のため非公開にしている。

(出典)E&ES が作成

表 V-17 残渣に関する TMR の算定根拠<sup>1)</sup>

データ項目	数値	単位	計算式・備考	出典
1 トン太陽光パネルあたりのアルミフレームの含有量	176.471	kg-TMR/t-太陽光パネル		ヒアリング
1 トン太陽光パネルあたりのガラスの含有量	588.235	kg-TMR/t-太陽光パネル		ヒアリング
1 トン太陽光パネルあたりのプラスチックの含有量	176.471	kg-TMR/t-太陽光パネル		ヒアリング
1 トン太陽光パネルあたりのシリコンの含有量	58.824	kg-TMR/t-太陽光パネル		ヒアリング
1 トン太陽光パネルから回収される金属スクラップ	70.588	kg-TMR/t-太陽光パネル	(176.471kg/t-太陽光パネル+58.824kg/t-太陽光パネル) x 30%	ヒアリング
残渣に関する TMR(銀回収)	1,994,949	kg-TMR	((176.471+588.235+176.471+58.824-70.588)kg/t-太陽光パネル) x 2,146t-太陽光パネル	
残渣に関する TMR(銅回収)	106,397	kg-TMR	((176.471+588.235+176.471+58.824-70.588)kg/t-太陽光パネル) x 114t-太陽光パネル	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

表 V-18 各金属の市場価格比の算定根拠<sup>1)</sup>

データ項目	数値	単位	計算式・備考	出典
銀の市場価格	94,270	円/kg		日本マテリアル
銅の市場価格	700	円/kg		過去調査
銀回収				
銀の回収量	1,000	kg	0.466kg/t-太陽光パネル x 2,146t-太陽光パネル	
銅の回収量	18,750	kg	8.735kg/t-太陽光パネル x 2,146t-太陽光パネル	
市場価格比	0.878		$(1,000\text{kg} \times 94,270 \text{ 円/kg}) / (1,000\text{kg} \times 94,270 \text{ 円/kg} + 18,750\text{kg} \times 700 \text{ 円/kg})$	
銅回収				
銀の回収量	53	kg	0.466kg/t-太陽光パネル x 114t-太陽光パネル	
銅の回収量	1,000	kg	8.735kg/t-太陽光パネル x 114t-太陽光パネル	
市場価格比	0.122		$(1,000\text{kg} \times 700 \text{ 円/kg}) / (53\text{kg} \times 94,270 \text{ 円/kg} + 1,000\text{kg} \times 700 \text{ 円/kg})$	

1) 表中の一部の値は、端数処理しているため計算が合わない場合がある。

(出典)E&ES が作成

### V-1-3 セル/EVA シートの最終処分場での埋立回避

本調査では、本事業による最終処分場への埋立の回避を評価した。ここでは、埋立処分されているセル/EVA シートが、本事業により回収されることを想定して評価を行った。また、2030 年代後半には年間 200,000 トンの太陽光パネルが排出されるシナリオを想定し、セル/EVA シートの回収を 10 年間継続した場合の埋立処分場への負荷回避の効果を評価した。

上記の項目 V-1-1(2)のとおり、物理選別工程において、1 トンの太陽光パネルには 235kg のセル/EVA シートが含まれている。よって、200,000 トン/年の太陽光パネルを 10 年間排出した場合、470,588 トンのセル/EVA シートが回収される。

環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長(2006)によると、廃プラスチック類および金属くずの産業廃棄物の比重は、それぞれ  $0.35\text{t/m}^3$  および  $1.13\text{t/m}^3$  である。過去調査のデータによると、セル/EVA シートの約 7 割がプラスチック、約 3 割が金属くずより構成されていることから、10 年間にわたり、セル/EVA シートを回収することにより、 $274,824\text{m}^3$  の埋立容量が回避されることが見込まれる。

また、E&ES が保有する知見に基づき、最終処分場の平均工事単価を約 60,000 円/ $\text{m}^3$  と仮定する。したがって、本事業を 10 年間継続した場合、約 16 億円の最終処分場の建設費の削減が見込まれる。

### V-1-4 有害金属の最終処分回避による浸出水への影響低減

本事業では、物理選別後の濃縮産物および熱処理後の金属濃縮物について、鉛の溶出試験を実施した(II-2-2(4)参照)。

環境省(2018)によると、太陽光パネルの溶出試験の結果が「金属等を含む産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準」を超過した場合、管理型最終処分場への埋立処分は処理基準違反とはならないが、維持管理の観点から処分場の運用に支障を生じるおそれがあるとされている。

本実証で実施した溶出試験では、30 検体のうち 8 検体で、鉛に関する判定基準( $0.3\text{mg/L}$ )を超過する結果となった。維持管理の観点から、セル/EVA シートを破砕して、破砕後の産物を管理型最終処分場で最終処分する場合には、鉛の溶出が処分場の運用に支障を生じるおそれがある。太陽光パネルの埋立処분을回避することで、浸出水への鉛の影響低減が見込まれる。

### V-1-5 処理ルート構築に伴う CO2 排出量削減効果

本事業において、太陽光パネルの回収ルートを構築することにより、小規模・分散的に発生する太陽光パネルを一定の場所で一定量保管できるようになり、輸送効率の向上が図られ、CO<sub>2</sub> 削減効果が見込まれる。その効果の評価において、年間 200,000 トンの太陽光パネルを回収することを想定し、以下のシナリオを比較した。

- ベースライン:太陽光パネルを一定量保管することなく、排出事業者から中間処理業者まで積載率 100%の 4 トントラックで運搬されるシナリオ。
- 処理ルート構築後:太陽光パネルを一定量保管し、排出事業者から中間処理業者まで積載率 100%の 10 トントラックで運搬されるシナリオ。

各シナリオにおける CO<sub>2</sub> 排出量は、燃費法に基づいて、以下の式より算出した。環境省(2021)より引用した、軽油の燃費、単位発熱量及び排出係数を表 V-19 に示す。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = (\text{輸送距離} / \text{燃費}) \times \text{単位発熱量} \times \text{排出係数} \times (44 / 12)$$

**表 V-19 各シナリオにおける軽油の燃費、単位発熱量及び排出係数**

シナリオ	トラック積載量(t)	燃費 (km/l)	単位発熱量 (GJ/kl)	排出係数(t-C/GJ)
ベースライン	4	3.79	37.7	0.0187
処理ルート構築後	10	2.89		

(出典)環境省(2021)に基づき E&ES が作成

以上より、ベースラインおよび処理ルート構築後での CO<sub>2</sub> 排出量は、それぞれ 6,820t-CO<sub>2</sub>/年及び 3,578t-CO<sub>2</sub>/年となった。よって、処理ルート構築に伴う CO<sub>2</sub> 削減効果は、3,243t-CO<sub>2</sub> と見込まれる。

本年度は、仮定のデータを用いて CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価したが、次年度業務では、埼玉県の拠点回収で得られた実データを参照して評価を計画である。

## 第VI章 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討

### VI-1 リサイクルビジネス活性化に向けた検討

本実証事業の成果が社会実装化された場合、直接的な横展開の可能性として想定される事業者は、ガラス/セル/EVA シートからガラスを分離するリサイクラーである。当該リサイクラーは、これまでに比べて、セル/EVA シートのより適正な価格を速やかに知ることができるようになる。それにより、太陽光パネルの排出事業者に対して、より適正な処理価格を速やかに提示できるようになり、受注機会が増すことが想定される。

しかしながら、最もこの金属リサイクルシステムの構築を歓迎するのは再生可能エネルギーを進める事業者(海外の製造者・発電事業者・投資家を含む)と想定される。我が国での金属リサイクルの受け皿の構築は、健全な再生可能エネルギーの投資環境の整備に貢献する。

本業務は 2020 年度に実施するものであるが、2021 年度も後継業務を行うことを計画している(図 I-2 参照)。2020 年度は基礎的な調査を行い、2021 年度に全体とりまとめを行う。本事業の成果を早期に社会実装し、我が国のリサイクルビジネスを活性化する観点から、本事業の最終実施年度である令和3年度(2021 年度)に、質の確保(金属濃縮の技術実証)、および金属濃縮プロセスの原料であるセル/EVA シートの量の確保(処理ルートの構築の実証)に係る検証を行う。

### VI-2 出口戦略

#### VI-2-1 経済的・技術的側面からの評価

経済的観点については II-3(2)で検討したとおり、セル/EVA シートの金属濃縮プロセスの収入・費用の構造は、3 つの因子により決定される。1 つ目は金属濃縮に要する費用、2 つ目は残渣/排ガスの適正処理費、3 つ目は金属濃縮物の非鉄製錬所への受け渡しに伴い生じる収入または費用である。これら 3 つの因子の収入と費用の和を取り、費用が収入に比べて大きい場合、セル/EVA シートの排出事業者からの処理費を得ることで、金属濃縮事業が成り立つ。

事業として成立するためには、セル/EVA シートの所有者にとって、金属濃縮プロセスを選択することが他の処理方法を選択することに比べて経済的に合理的である必要がある。E&ES が知る限り、現時点でセル/EVA シートの安価な処分方法は、管理型最終処分場での埋立処理である。したがって、管理型最終処分場での埋立処理単価に比べて、金属濃縮の処理単価が同等であれば、金属濃縮は経済的に選択され得る。



加えて、本事業の結果、物理選別・熱処理後のセル/EVA シートの産物を対象として鉛の溶出試験をしたところ、鉛に係る埋立処分の判定基準を超過し得ることが明らかになってきた。このように、セル/EVA シートの物理化学特性が明らかになってくることにより、今後はセル/EVA シートの管理型最終処分場での埋立処分費用が上昇していくことも想定される。そうすれば、金属濃縮プロセスはより経済的に合理的という理由で、セル/EVA シートの処理方法として選択され得る。

技術的観点については、本業務で検討する事業を実現するために必要なインフラは、1) ガラス/セル/EVA シートからガラスを分離する工場、2) セル/EVA シートに非鉄金属の濃縮操作を行う工場、3) 金属濃縮物から非鉄金属を回収する工場(非鉄製錬所)である。1) と 3) については、すでに存在している。2) については、単位技術はすでに存在しているが、最適な濃縮技術を選択するためのノウハウの蓄積はまだないため、本業務で実証する。将来的な課題は、特に全国に分散する 1)と 2)の工場を実際の処理ルートの中で機能(ネットワーク化)させることである。

## VI-2-2 出口戦略

今回、太陽光パネルからアルミフレームとガラスを回収した後のセル/EVA シートに対して濃縮操作を施したところ、濃縮産物は非鉄製錬原料になり得え、結果、セル/EVA シートの濃縮処理の処理費は最終処分と同等レベルにでき得ることが分かってきた。さらに、セル/EVA シートの処理量を確保することができれば、スケールメリットが働き濃縮処理の処理費低減も可能となる。すなわち、環境配慮の観点および費用面から、セル/EVA シートの濃縮処理は、選択され得る技術である。

今後、非営利団体の PV CYCLE JAPAN の設立が予定されている。PV CYCLE JAPAN は、欧州で太陽光パネルの収集・適正処理を担う非営利団体の PV CYCLE と協調し、太陽光パネルの適正なリユースおよび金属回収を含むリサイクルを行う処理ルートに、環境面でのインセンティブと費用低減効果を付与する仕組みを構築する。

2021 年度に継続実施を計画している本業務では、金融・保険セクター側と協調した太陽光パネルのリユースおよび金属リサイクルへの環境面でのインセンティブ付与のあり方を検討することを計画している。また、2021 年度に継続実施を計画している本業務では、埼玉県をフィールドとして主に住宅用太陽光発電所で発生する太陽光パネルを対象として回収試験を行い、廃棄物処理法上の課題を整理することを計画している。これにより、効率化された運送や量の確保が期待できる。

2021 年度は、技術的な検証と並行して、こういった組織面、制度面、経済的側面の検討を継続し、金属リサイクルシステムの早期社会実装化を図る。

さらに、2022 年度は、本実証事業の結果を踏まえて、適正な処理ルートของいずれかで、セル/EVA シートの金属濃縮設備への設備投資を検討する。

## 第Ⅶ章 現地視察会の開催

### Ⅶ-1 工程・参加組織

本業務の円滑な実施を目的にして、2020 年 10 月 6 日（火）に、秋田県の小坂地区と大館地区にて現地視察会を開催した。表 Ⅶ-1 に現地視察会の工程を、表 Ⅶ-2 に現地視察会への参加組織を示す。

表 Ⅶ-1 現地視察会の工程

日付	時刻	内容	視察場所	宿泊地
10 月 6 日 （火）	午前	<小坂地区の視察> ・秋田資源機構の担当業務の説明 ・秋田資源機構内の視察	<視察場所> 秋田資源機構	-
		秋田資源機構発	-	
		大館の会議室着	-	
	午後	<大館地区の視察> ・DES の担当業務の説明 ・DES グループ会社の視察 ・意見交換	<視察場所> ・(株)エコリサイクル ・エコシステム花岡(株)	
		現地解散	-	

表 Ⅶ-2 現地視察会への参加組織

組織名	所属/役職
環境省	環境再生・資源循環局 総務課リサイクル推進室 主査
	環境再生・資源循環局 総務課リサイクル推進室
課題監理業者	リスクアドバイザー
東北大学大学院環境科学研究科	准教授
秋田資源機構	事務局長
	研究開発課上席研究員
DES	環境技術研究所長
NER	社長室スタッフ
	社長室スタッフ
E&ES	代表取締役社長
	環境事業部グローバル環境グループ 主任研究員
	環境事業部グローバル環境グループ 研究員

### Ⅶ-2 プログラム

現地視察会のプログラムは、図 Ⅶ-1 に示すとおりである。現地視察会では、実証事業に用いる試験サンプルや設備を実際に視察しながら、また実証事業の各事業の担当組織と意見交換をしながら、実証事業のねらいについて、参加者が共通認識を持つことを目的とした。なお、現地視察会は、コロナ禍での実施となったため、限定された範囲内で、視察やインタビューを行った。現地視察会の様子は、図 Ⅶ-2 に示すとおりである。

### ＜セッション 1:小坂地区の視察＞

#### (1) 主旨説明

##### ＜E&ES による発表事項＞

- ・ 小坂・大館地区の概要
- ・ 実証事業の概要・ねらい

#### (2) 秋田資源機構の担当業務の説明

##### ＜秋田資源機構による発表事項＞

- ・ 秋田資源機構の組織概要
- ・ 秋田資源機構の担当業務の概要
- ・ 業務の進捗状況、現時点での課題、今後の取組方針

#### (3) 小坂地区の視察

##### 【視察場所】

- ・ 秋田資源機構内での試験用 PV モジュールの保管場所
- ・ 秋田資源機構が担当業務で用いる資機材の設置場所

### ＜セッション 2:大館地区の視察＞

#### (4) DES の担当業務の説明

##### ＜DES による発表事項＞

- ・ DES の組織概要と環境技術研究所の組織内での位置づけ
- ・ DES の担当業務の概要
- ・ 業務の進捗状況、現時点での課題、今後の取組

#### (5) DES グループの視察

##### 【視察場所】

- ・ エコリサイクル:粉砕機
- ・ エコシステム花岡(管理型最終処分場)

#### (6) 意見交換

##### ＜ねらい＞

- ・ 視察をとおして提起された質問に対する意見交換。
- ・ 参加者が共通認識を持つという視点から、今後の案件の進め方について意見交換。

(出典)E&ES が作成

### 図 VII-1 現地視察会のプログラム

現地視察会を通して提起された主な意見は以下のとおりである。

- ・ 本業務の中の NER の担当業務は、太陽光パネルの回収、運搬、および保管の過程における課題を抽出し、それらの改善方法を検討すること。
- ・ 本業務の中の秋田資源機構の担当業務は、既往知見のレビューや試験サンプルの分析を通して、セル/EVA シートの妥当な評価方法を提案すること。
- ・ 本業務の中の DES の担当業務は、銀・銅のような有価金属の濃縮だけでなく、その過程で発生する有害物質・処理困難物の管理に係る技術的側面を検討すること。

- E&ESとしては、本業務をとおして、処理費を払うことで太陽光パネルのリサイクル、いわゆる逆有償リサイクルが事業として実現し得ること、また、その処理費が埋立処分の費用と同等または安価であるのか評価したい。
- 本業務では、太陽光パネルのリサイクル事業の良い点および悪い点を可視化し、報告書ではこれらの点をまとめていただきたい。
- 現在、太陽光パネルの排出者にとっての最大の課題は、太陽光パネルの適正処理をしたい場合、どこに連絡すればよいのか分からないこと。NER としては、今後、政府のバックアップも得て、これらの情報を管理する仕組みを構築していきたい。
- NER としては、2021 年度に埼玉県でどのように太陽光パネルのリユース検査手法を運用していくか、2020 年度中に計画する。
- 秋田資源機構としては、2020 年度、断面分析の妥当性を、設備、精度、期間、費用の面から検証する。
- DES としては、2020 年度と 2021 年度の実証を通して、セル/EVA シートを製錬原料として供せるか否か実証する。
- E&ESとしては、太陽光パネルのリサイクルに伴う環境負荷低減効果の検証も行う。

2020 年 10 月 6 日 (火)

場所:秋田資源機構の入口



場所:秋田資源機構会議室

内容:会議の様子



場所:秋田資源機構

視察の様子



<p>場所:大館の会議室</p> <p>内容:ロール式破碎方式のセル/EVAシート</p>	
<p>場所:大館の会議室</p> <p>内容:ブラスト方式のセル/EVAシート</p>	
<p>場所:大館の会議室</p> <p>内容:熱線カット方式のセル/EVAシート</p>	



場所:大館の会議室

内容:セル/EVA シートの物理選別による濃縮後の樹脂の濃縮産物



場所:大館の会議室

内容:セル/EVA シートの物理選別による濃縮後のインターコネクタの濃縮産物





<p>場所:大館の会議室</p> <p>内容:セル/EVA シートの物理選別による濃縮後のシリコンセルの濃縮産物</p>	
<p>場所:大館の会議室</p> <p>内容:セル/EVA シートの熱処理後の濃縮産物(右側)</p>	
<p>場所:エコリサイクル</p> <p>内容:太陽光パネルの保管容器</p>	

(出典)E&ES が作成

図 VII-2 現地視察会の様子

## 参考文献

- JOGMEC, 2019,「鉱物資源マテリアルフロー2018」, Available online at [http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2019/03/material\\_flow2018\\_revised.pdf](http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2019/03/material_flow2018_revised.pdf) Accessed 2021-2-22
- Pejman Hadi, Meng Xu, Carol S.K.Lin, Chi-Wai Hui, Gordon McKay, 2015, "Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization", Journal of Hazardous Materials, 283(2015)234–243
- Risopatron, C. R., 2018,「Impurities in Copper Raw Materials and Regulatory Advances in 2018: A Global Overview」, International Copper Study Group, Available online at <http://www.jogmec.go.jp/content/300358430.pdf> Accessed 2021-03-01
- 飯野 成憲・茂木 敏・宮脇 健太郎, 2016,「環境・製錬分野における金属資源の分析方法に関する考察- 環告 19 号試験, レアメタル等暫定分析法, マット融解法-」, 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 27. Pp.176-187, 2016
- 株式会社エヌ・ピー・シー, 2019,「ホットナイフ分離法による太陽光パネルのガラスと金属の完全リサイクル」, Available online at [http://www.cjc.or.jp/commend/pdf/senshinjirei/r01/09\\_sys\\_07.pdf](http://www.cjc.or.jp/commend/pdf/senshinjirei/r01/09_sys_07.pdf) Accessed 2021-01-20
- 株式会社三菱総合研究所, 2019,「平成 30 年度リサイクルシステム統合強化による循環資源利用高度化 促進業務報告書(リサイクルプロセスの横断的高度化・効率化編)」, 環境省, pp. 55-79 (2019)
- 株式会社東レリサーチセンター, 2021,「太陽電池封止材」, Available online at [https://www.toray-research.co.jp/businesses/analysis-evaluation/ana\\_011.html](https://www.toray-research.co.jp/businesses/analysis-evaluation/ana_011.html) Accessed 2021-2-22
- 環境省, 2021,「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver4.7)」Available online at <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual> Accessed 2021-01-20
- 環境省, 2020a,「使用済太陽光パネルのリユース、リサイクルについて」, 第 2 回 太陽光発電設備の廃棄等費用の確保に関するワーキンググループ(経済産業省資源エネルギー庁), Available online at [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin\\_energy/taiyoko\\_haikihyo\\_wg/002.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin_energy/taiyoko_haikihyo_wg/002.html) Accessed 2021-2-22
- 環境省, 2020b,「電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)ーH30 年度実績ー R2.1.7 環境省・経済産業省公表、R2.9.15 一部追加・修正」Available online at <https://www.env.go.jp/press/files/jp/114735.pdf> Accessed 2020-11-26
- 環境省, 2018,「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン(第二版)」
- 環境省, 2016,「循環資源のリサイクル及び低炭素化に関する効果算出ガイドライン(Ver. 1.0)」, Available online at <https://www.env.go.jp/recycle/ecotown/attach/guide.pdf> Accessed 2021-2-22
- 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長, 2006,「産業廃棄物管理票に関する報告書及び電子マニフェストの普及について(通知)」, 環産発第 061227006 号, Available online at [https://www.env.go.jp/recycle/waste/nt\\_061227006.pdf](https://www.env.go.jp/recycle/waste/nt_061227006.pdf), Accessed 2021-03-05
- 公益財団法人廃棄物・3R研究財団, 2020,「令和2年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金(省 CO2 型リサイクル等高度化設備導入促進事業)に係る補助事業の公募結果について」, Available online at [https://www.jwrf.or.jp/subsidiary/save\\_co2/current/images/r02\\_recommend\\_primary.pdf](https://www.jwrf.or.jp/subsidiary/save_co2/current/images/r02_recommend_primary.pdf) Accessed 2021-2-22
- 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ LCI データベース IDEA Version 2.3 (2019)
- 埼玉県, 2020,「埼玉県太陽電池モジュールリサイクル協議会 規約」, Available online at <https://www.pref.saitama.lg.jp/a0506/documents/pvrecycle-kiyaku.pdf> Accessed 2021-2-22
- 資源エネルギー庁, 2020,「固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト A 表都道府県別認定・導入量(2020 年 3 月末時点【訂正版】)」, Available online at <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary> Accessed 2021-2-22
- 石油連盟,「統計情報」, Available online at <https://www.paj.gr.jp/statis/kansan/> Accessed 2021-2-22
- 瀧本晋輔・石井僚二・山下浩儀・川杉直喜・金塚憲彦, 2010,「高出力太陽光発電モジュールの量産化技術」, 三菱電機技報, Vol.84 No.12(2010)

- <https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2010/1012110.pdf> Accessed 2021-2-22
- 中島ら, 2006, 「関与物質総量(TMR)の算定 —エネルギー資源および工業材料の TMR」, Journal of Life Cycle Assessment, Japan, vol.2, No.2, 特集「各分野における LCA 実践の現状」, Available online at [https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/2/2/2\\_2\\_152/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/2/2/2_2_152/_pdf) Accessed 2020-09-25
- 日本マテリアル, 「貴金属価格情報」, Available online at <https://www.material.co.jp/market.php> Accessed 2021-2-22
- 原田ら, 2001, 「金属の関与物質総量の概算」, 日本金属学会誌第 65, 巻第 7 号, p.564-570, 特集「エコマテリアル・セレクション」, Available online at [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jinstmet1952/65/7/65\\_7\\_564/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jinstmet1952/65/7/65_7_564/_pdf) Accessed 2020-09-16
- 柳浦聡, 2014, 「太陽電池モジュール用材料の動向」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.17 No.1(2014) p.2-5, Available online at [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17\\_2/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17_2/_pdf/-char/ja) Accessed 2021-2-22
- 山末ら, 2010, 「使用済み家電製品からの素材リサイクルに伴う関与物質総量(都市鉱石 TMR)の推算と評価」, 日本金属学会誌, 第 74 巻, 第 12 号, p.811-819, Available online at <https://www.jim.or.jp/journal/j/pdf3/74/12/811.pdf> Accessed 2020-09-11
- 湯浅ら, 2017, 「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」, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 741 号, p.949-955, Available online at [https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82\\_949/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf) Accessed 2020-05-29

## 略語集

略語	英語または原語	日本語
CESS	Center for Environmental Science in Saitama	埼玉県環境科学国際センター
DES	DOWA ECO-SYSTEM Co., Ltd.	DOWA エコシステム株式会社
EPMA	Electron Probe Micro Analyzer	電子線マイクロアナライザー
EU	European Union	欧州連合
EVA	Ethylene-vinylacetate copolymer	エチレン酢酸ビニル共重合体
E&ES	E&E Solutions Inc.	イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社
FIT 法	-	電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法
NER	Next Energy & Resources Co., Ltd.	ネクストエナジー・アンド・リソース株式会社
PBT	Poly Butylene Terephthalate	ポリブチレンテレフタレート
PE	Polyethylene	ポリエチレン
PET	Polyethylene terephthalate	ポリエチレンテレフタレート
PID	Potential Induced Degradation	電圧誘起出力低下
PVB	Polyvinyl butyral	ポリビニルブチラル
PVDF	PolyVinylidene DiFluoride	ポリフッ化ビニリデン
PVF	Polyvinyl fluoride	ポリフッ化ビニル
RPF	Refuse derived paper and plastics densified Fuel	-
SEM	走査型電子顕微鏡	Scanning Electron Microscope
UWJ	Um-Welt-Japan.co.ltd	株式会社ウム・ヴェルト・ジャパン
WDS	Waste Date Sheet	廃棄物データシート
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment	廃電気・電子製品
XRD	X-ray diffraction	X 線回折装置
XRF	X-ray fluorescence analysis	蛍光 X 線分析装置
家電リサイクル法	-	特定家庭用機器再商品化法
廃棄物処理法	-	廃棄物の処理及び清掃に関する法律
リサイクル協議会	-	埼玉県太陽電池モジュールリサイクル協議会