

令和3年度環境省委託業務

令和3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4年3月

イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社

要約

令和3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(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、太陽光パネル中の銅・銀ができるだけ最終処分されることなく、金属リサイクルが促進される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いて、イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社(以下、「E&ES」)が実施した。本業務では主に次の 4 つの項目の検討を行った。すなわち、1) 太陽光パネル中に含まれる銅・銀の濃縮処理に係る検証、2) 住宅用太陽光パネルの収集ルート導入に向けた回収実証実験、3) 太陽光パネルの金属リサイクルに伴う CO2 排出量の削減効果の評価、および4) 出口戦略の検討である。

1)については、結晶シリコン系の太陽光パネルからジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離した後に残るセル/EVA シートと呼ばれる素材を対象として、濃縮処理の検証を行った。本業務では、まず計 200 枚のセル/EVA シートを入手した。次いで、入手したセル/EVAシート中の有用金属(銅・銀等)、管理が必要な有害物質(鉛等)の含有率を評価した。さらに、銅、銀、鉛等の金属濃縮を目的に、セル/EVA シートの物理選別を行うとともに、物理選別で得られた産物中の銅・銀・鉛等の含有率を分析した。結果、セル/EVA シートの物理選別を行うことで、非鉄製錬の原料を製造でき得ることが分かった。また、セル/EVA シートの濃縮処理の処理単価は、セル/EVA シートを破碎・熱処理し、その熱処理後の残渣を管理型最終処分場に処分する場合の処理単価と比べて、大きな相違が生じることなく設定でき得ると評価された。なお、セル/EVA シートは鉛を含むものであり、そのため有害物の拡散をできるだけ防ぐという観点からは、セル/EVA シート中の鉛のトレーサビリティが確保される形で、セル/EVA シートの取り扱い・金属濃縮が行われることが望ましいと考えられた。

2)については、愛知県に次いで全国で 2 番目に住宅用太陽光発電所の導入量が多い埼玉県をフィールドとして、2021 年 7 月から 12 月までの期間、県内に 4 か所の回収拠点を設けて、住宅用太陽光パネルの回収実証実験を行った。結果、計 5 か所の撤去現場から、計 154 枚の住宅用太陽光パネルが回収拠点に持ち込まれた。5 か所の撤去現場での太陽光パネルの撤去要因のうち、3 か所が屋根工事に伴う撤去、1 か所が住宅解体に伴う撤去、残り 1 か所は住宅用太陽光パネルの設置・撤去に関する研修施設からの在庫管理に伴う撤去であった。回収した住宅用太陽光パネルの検査を行い、リユース可と判定された太陽光パネル 10 枚については、新たな引き取り手に譲ることができた。引き取り手は、引き取った太陽光パネ

ルをエコツアー客へのディスプレイ品として用いる予定である。拠点回収を行う上での廃棄物処理法上の課題を整理すると、住宅用太陽光パネルが大量に発生していない時期では、産業廃棄物管理票の返送期限の要求事項を遵守するという観点から、回収拠点での太陽光パネルの保管日数が制限され、結果、回収拠点を設置しても、効率的な運搬を実現し難いと考えられた。今後は、中立的な立場の組織が主導して、自治体間が住宅用太陽光パネルの適正処理の課題を共有するためのラウンドテーブルが設置されることが望ましいと考えられた。

3)については、本業務の成果が社会実装されて、金属リサイクルが促進されることを想定し、太陽光パネル中の銅と銀の循環利用の促進に伴う CO2 削減効果を評価した。ベースラインプロセスとしては、太陽光パネルが最終処分場に埋立されて、太陽光パネル中の銅と銀が回収されないフローとした。結果、太陽光パネル中の銅と銀の循環利用促進による CO2 排出量削減効果は 0.073t-CO2/t-太陽光パネルと評価された。仮に 1,200 トンの太陽光パネルの金属リサイクルが行われる場合、その CO2 排出量削減効果は、87t-CO2/年と計算された。また、太陽光パネルの回収拠点を設置し、運搬効率の向上が行われる場合、ベースラインプロセスに比べて、輸送に係る CO2 排出量は半減すると評価された。

4)については、本業務では、昨年設立された任意団体の PV CYCLE JAPAN (以下、「PVCJ」)を通して、太陽光パネルの流れをリサイクル側に促すことができないか検証した。PVCJ はその事業の一環で、太陽光パネルに含まれる有害物のトレーサビリティを確保し、金属リサイクル促進に向けた取り組みを行っている廃棄物処理業者を認定している。認定に先立ち、PVCJ は認定の基準を策定し、2021 年 12 月に公募を行い、公募への申請内容を当該基準に照らして審査している。結果、本報告書作成時点では、6 社の廃棄物処理業者が PVCJ に認定されている。PVCJ が目指す太陽光パネルの流れは、次のとおりである。すなわち、太陽光パネルの排出事業者は、PVCJ の認定業者に太陽光パネルの処理委託をすることができる。PVCJ の認定業者は、太陽光パネルからジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離し、セル/EVA シートは PVCJ の認定業者で処理が行われる。セル/EVA シートの処理では物理選別が行われ、製錬原料は非鉄製錬所にて鉛と有用金属の回収が行われる。物理選別の残渣は、適正処分が行われる。PVCJ の認定業者での処理実績は PVCJ に報告される。これらにより、太陽光パネル中の有害物質のトレーサビリティの確保が行われる。検証の結果、PVCJ による認定は法規制によらない自主的取り組みであることから、自治体や金融セクターとの協調など、PVCJ の自主的取り組みを後押しする仕組みが今後重要になると考えられた。

Summary

E&E Solutions Inc. (Hereinafter "E&ES") carried out the commissioned activities (Hereinafter collectively referred to as the "Concerned Activities") for the FY2021 Demonstration Project Aimed at Early Social Implementation of Decarbonization-type Metal Recycling (Technological Demonstration Related to Collection and Reuse of Solar Panels and Recovery of Nonferrous Metals), with the primary objective being to implement the achievements of the Concerned Activities in society as early as possible in order to realize a society which promotes recycling of metals without final disposal of the copper and silver contained in solar panels in anticipation of the period around the year 2035 when mass-scale disposal of solar panels will begin.

The Concerned Activities mainly focused on study of the following 4 items. 1) Study of the concentration processing of copper and silver contained in solar panels, 2) collection demonstration experiments aimed at introducing collection routes for residential solar panels, 3) assessment of the effects of reduction of CO₂ emissions resulting from recycling of metal from solar panels, and 4) study of exit strategies.

In relation to Item 1), verification was carried out of concentration processing on the materials called cell/EVA sheets which remain after the junction box, aluminum frame, and glass are separated from crystalline silicon type solar panels. For the Concerned Activities, first a total of 200 cell/EVA sheets were acquired. Next, the content ratios of useful metals (copper, silver, etc.) and harmful substances requiring control (lead, etc.) contained in the acquired cell/EVA sheets were accessed. In addition, physical separation of cell/EVA sheets was carried out and analysis was also carried out on the content ratios of copper, silver, lead, and other materials in products obtained through physical separation for the purposes of metal concentration of copper, silver, lead, and other materials. As a result, it was found that it was possible to produce raw materials for nonferrous smelting through physical separation of cell/EVA sheets. In addition, it was assessed that it was possible to set the unit processing cost for concentration processing of cell/EVA sheets so that there was no significant difference compared to the unit processing cost for pulverizing and heat treating cell/EVA sheets and then disposing of the residual substances in a controlled final landfill site after heat treatment. Furthermore, because cell/EVA sheets contain lead, it was considered preferable

that cell/EVA sheets be handled and undergo metal concentration processing in a manner which made it possible to maintain the traceability of the lead contained in the cell/EVA sheets in order to minimize the proliferation and spread of harmful substances.

In relation to Item 2), from July 2021 to December 2021, a residential solar panel collection demonstration experiment was conducted in Saitama Prefecture, which has the second highest amount of residential solar power generation in all of Japan behind Aichi Prefecture, by installing collection sites at 4 locations within the prefecture. As a result, a total of 154 residential solar panels were brought to the sites for collection after being removed from 5 locations. Among the 5 locations from which the solar panels were removed, for 3 locations the panels were removed due to roof construction, for 1 location the panels were removed due to the house being dismantled, and for 1 location the panels were removed due to a result of stock management of solar panels in a training center for installation and removal of residential solar panels. The collected residential solar panels were examined, and 10 of the solar panels which were determined to be reusable were able to be delivered to new owners. The new owners plan to use the received solar panels as display products for eco-tour customers. In terms of issues with Waste Management and Public Cleansing Act regarding carrying out collection at designated collection sites, it was determined it would be difficult to realize efficient transportation even if collection sites were established because during periods when large quantities of waste residential solar panels were not being generated, the number of days which solar panels could be stored at collection sites would be limited due to the requirements relating to return periods under industrial waste control manifests. It would be advisable for a roundtable to be established in the future, with a neutral organization leading, in order to share and discuss issues with appropriate disposal of residential solar panels between municipalities.

In relation to Item 3), assessment was carried out on the effects of CO₂ reduction resulting from promotion of cyclic usage of the copper and silver in solar panels based on the assumption that results of the Concerned Activities were implemented in society and metal recycling moved forward. A flow wherein solar panels were disposed of in landfill without recovering the copper and silver contained in the solar panels was used as the baseline process for comparison. As a result, it was estimated that the reduction of CO₂ emissions as a result of promoting cyclic use of the copper and silver found in solar panels would be 0.073t-CO₂/t-

solar panels. Therefore, supposing recycling of the metal from 1,200 tons of solar panels, the resulting CO₂ emissions reduction was calculated to be 87t-CO₂/year. In addition, if solar panel collection sites were established and transportation efficiency was improved, it was estimated that CO₂ emissions related to transport could be reduced by half compared to the baseline process.

In relation to Item 4), study was conducted as part of the Concerned Activities to determine if flow of solar panels could be driven toward recycling through the PV CYCLE JAPAN (Hereinafter "PVCJ") private organization established last year. As part of this project, PVCJ is certifying waste processors which will both maintain the traceability of harmful substances contained in solar panels and carry out activities aimed at promoting metal recycling. Before commencing certification, PVCJ established certification standards and issued a public offering in December of 2021, and carried out screening of applicants through the public offering by comparing the contents of applications to the requirements of said standards. As a result, as of the time of the creation of this report, 6 companies have been certified as waste processors by PVCJ. The flow of solar panels which PVCJ aims for is as follows. The party disposing of the solar panels is able to commission the disposal to a solar panel waste processor certified by PVCJ. The PVCJ certified waste processor shall separate junction box, aluminum frame, and glass from the solar panels, and then the PVCJ certified waste processor shall carry out processing of the cell/EVA sheets. For processing of cell/EVA sheets, physical separation shall be carried out with the smelting raw materials being smelted at a nonferrous smelter to recover lead and useable metals. Any residual material from physical separation shall be processed appropriately. The PVCJ certified waste processor shall then report the results of the processing to PVCJ. This will allow for the maintenance of traceability of harmful substances in solar panels. As a result of this study, it was thought that as the certification by PVCJ is a voluntary activity rather than a legal requirement, systems to support PVCJ's voluntary practices, such as cooperation with municipalities and financial sectors, will become increasingly important going forward.

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.....	3
I-3 業務の実施体制.....	5
I-4 業務の進め方.....	6
第 II 章 商業スケールの設備を用いた非鉄製錬原料の濃縮の実証.....	8
II-1 試験サンプルの入手.....	8
II-2 試験サンプルの評価.....	12
II-3 運用検証.....	26
第 III 章 処理ルート構築の運用検証.....	30
III-1 拠点回収の運用検証.....	30
III-2 廃棄物処理法上の課題の整理.....	51
III-3 まとめ.....	54
第 IV 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.....	57
IV-1 環境負荷低減.....	57
IV-2 資源効率性.....	73
第 V 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.....	81
V-1 太陽光パネルの排出量予測(需要)と金属リサイクルシステム(供給)のバランスの経年的・地理的な推定とそれに基づく金属リサイクルビジネスのあり方.....	81
V-2 金融・保険セクター側と協調した金属リサイクルへの経済的インセンティブ付与のあり方.....	85
V-3 化合物を半導体として用いる太陽光パネルも含めた金属リサイクルシステムへの展開のあり方 ...	87
第 VI 章 現地視察会の開催.....	89
VI-1 工程・参加組織.....	89
VI-2 発表のポイント.....	90
VI-3 現地視察会で提起された主な意見.....	93
第 VII 章 メディア等での掲載.....	94

図表 一覧

図 I-1 業務の上位目的	2
図 I-2 業務の実施体制	6
図 I-3 業務の実施スケジュール	7
図 II-1 一般的な結晶シリコン系の太陽光パネルの構造	8
図 II-2 シリコンの表面の集電線	9
図 II-3 本業務で入手したサンプルの外観	10
図 II-4 型番 3 のバックシートの組成	13
図 II-5 各構成部材の断面積を測定した位置(型番 2)	14
図 II-6 画像処理ソフトウェアを用いた断面積の測定結果(型番 1)	15
図 II-7 本業務で入手したサンプル中の銅の含有率のばらつき	17
図 II-8 本業務で入手したサンプル中の銀の含有率のばらつき	17
図 II-9 本業務で入手したサンプル中の鉛の含有率のばらつき	18
図 II-10 本業務で入手したサンプル中のフッ素の含有率のばらつき	18
図 II-11 本業務での物理選別のフロー	19
図 II-12 本業務の物理選別で得られた産物	20
図 II-13 物理選別で得られた各産物の重量割合	21
図 II-14 セル/EVA シートと物理選別で得られる各産物での銅含有率の関係	23
図 II-15 セル/EVA シートと物理選別で得られる各産物での銀含有率の関係	24
図 II-16 セル/EVA シートと物理選別で得られる各産物での鉛含有率の関係	25
図 II-17 軽量産物の鉛の溶出試験結果	27
図 II-18 中粒産物の鉛の溶出試験結果	28
図 III-1 回収実証実験のフロー	31
図 III-2 回収拠点での太陽光パネルの保管場所	32
図 III-3 回収実証実験の下での廃棄物処理法への対応	33
図 III-4 回収実証実験への参加申込書	35
図 III-5 回収実証実験で回収した太陽光パネルに付与した ID	36
図 III-6 太陽光パネルの個体管理のデータベースのスクリーンショット	36
図 III-7 回収実証実験専用ウェブページのトップページ	37

図 III-8 回収実証実験のチラシ.....	38
図 III-9 PVCJ のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報	39
図 III-10 NER のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報	39
図 III-11 E&ES のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報.....	40
図 III-12 埼玉県のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報	40
図 III-13 回収実証実験専用ウェブページのページビュー数.....	41
図 III-14 回収実証実験での住宅用太陽光パネルの回収実績	42
図 III-15 回収実証実験で回収した太陽光パネル.....	44
図 III-16 回収した太陽光パネルの裏面	44
図 III-17 回収拠点から処理の拠点まで太陽光パネルの運搬に用いたゲート車.....	46
図 III-18 回収拠点での太陽光パネルの入荷の様子	47
図 III-19 伸縮性のバンドを用いた太陽光パネルのかご台車への固定	48
図 III-20 住宅用太陽光パネルの拠点回収を行う上での運用上の課題.....	50
図 III-21 CESS での試験に用いた太陽光パネルの専用保管容器.....	54
図 IV-1 CO ₂ 排出量削減評価のシステムバウンダリー	59
図 IV-2 本業務で想定した輸送ルート.....	60
図 IV-3 事業実施前および事業実施後の年間 CO ₂ 排出量の比較.....	63
図 IV-4 工程 C における CO ₂ 排出量の内訳 (%).....	63
図 IV-5 輸送効率向上による CO ₂ 排出の比較.....	64
図 IV-6 太陽光パネル TMR 評価のシステムバウンダリー.....	74
図 IV-7 太陽光パネル TMR の内訳	76
図 IV-8 自然鉱石 TMR と太陽光パネル TMR の比較	77
図 V-1 PVCJ の目的のイメージ図	82
図 V-2 PVCJ のパネル申込受付ページ.....	83
図 V-3 PVCJ が目指している太陽光パネルの流れの模式図.....	84
図 V-4 現状と今後の展開のアプローチ(案).....	87
図 V-5 PVCJ での使用済太陽光パネルの受付ページ	88
図 VI-1 簡易リユース検査装置の概要	90
図 VI-2 アルミ枠分離装置の概要	90
図 VI-3 現地視察会で画面共有した簡易リユース検査装置の実演動画のスクリーンショット(1/2) 91	
図 VI-4 現地視察会で画面共有した簡易リユース検査装置の実演動画のスクリーンショット(2/2) 91	

図 VI-5 現地視察会で画面共有したアルミ枠分離装置の実演動画のスクリーンショット(1/2)	92
図 VI-6 現地視察会で画面共有したアルミ枠分離装置の実演動画のスクリーンショット(2/2)	92
表 II-1 サンプルの入手結果	10
表 II-2 各型番のサンプルの寸法・重量・公称出力・セル数	10
表 II-3 各型番のサンプルの構成部材の寸法の測定結果	12
表 II-4 集電電極、バスバー電極、インターコネクタの組成の分析結果	13
表 II-5 集電電極、バスバー電極、インターコネクタの断面積の測定結果	14
表 II-6 セル/EVA シート中の有用金属と管理すべき有害物質の含有量と含有率	16
表 II-7 金属濃縮で得られた各産物中の銅・銀・鉛の含有率	22
表 II-8 軽量産物の工業分析結果	28
表 III-1 住宅用太陽光パネルの撤去要因	42
表 IV-1 工程 A の輸送距離	60
表 IV-2 工程 C の輸送距離	61
表 IV-3 輸送の推計方法と前提条件	61
表 IV-4 本業務による CO2 排出量の削減効果	62
表 IV-5 太陽光パネルの組成とリサイクル率	66
表 IV-6 工程 A における CO2 排出量の算定根拠	67
表 IV-7 工程 B における CO2 排出量の算定根拠	68
表 IV-8 工程 C の物理選別における CO2 排出量の算定根拠	69
表 IV-9 セル/EVA シートの最終処分場での埋立回避	71
表 IV-10 金属 1t 分の回収に必要な太陽光パネル	75
表 IV-11 銀と銅のアロケーション比率	75
表 IV-12 アロケーション後の太陽光パネル TMR	76
表 IV-13 輸送に関する TMR	78
表 IV-14 アルミフレーム・ガラス除去に関する TMR	79
表 IV-15 物理選別に関する TMR	80
表 IV-16 残渣に関する TMR	80
表 VI-1 現地視察会当日のプログラム	89
表 VI-2 現地視察会の参加組織	89
表 VII-1 本業務または本業務に付帯する取り組みのメディア等での掲載の一覧	94

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事業終了後に放置・不法投棄されることが懸念され、2020 年 6 月に FIT 法が改正された。法改正が行われることで、出力 10kW 以上の太陽光発電所は、調達期間の終了前 10 年間をかけて、すなわち最も早い太陽光発電所の場合は 2022 年 7 月¹から、その撤去・廃棄費用の外部積立が原則義務化される²。積立金は、太陽光発電所を実際に撤去し、廃棄物の処理及び清掃に関する法律(以下、「廃棄物処理法」)に従って廃棄することで取り戻すことができるため、撤去・廃棄にインセンティブが働く制度となっている。

ただし、FIT 法の改正は放置・不法投棄の懸念に対処することを目的として行われたため、資源循環の観点が十分に考慮されているとは言い難い。具体的には例えば、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³を撤去し、撤去した太陽光パネルを中間処理した後に管理型最終処分場に処分しても、その廃棄が廃棄物処理法で定められる処理の基準に従って行われている限り、撤去・廃棄の積立金を取り戻すことができる⁴。特定家庭用機器再商品化法(以下、「家電リサイクル法」)のような資源の有効利用促進を目的とした制度が太陽光パネルには存在していないなか、我が国に大量導入された太陽光パネルをいかに長く使い、リユースできるものはリユースし、リユースし難いものは資源をできるだけ回収し、最終処分量を最小化するかは社会的な課題である。

イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社(以下、「E&ES」)の自主的な調査結果によるが、現状、太陽光パネルの資源循環は促進されているとは言い難く、本実証事業のメインテ

¹ FIT 法の施行日は 2012 年 7 月 1 日、出力 10kW 以上の太陽光発電所の調達期間は 20 年間であったため。

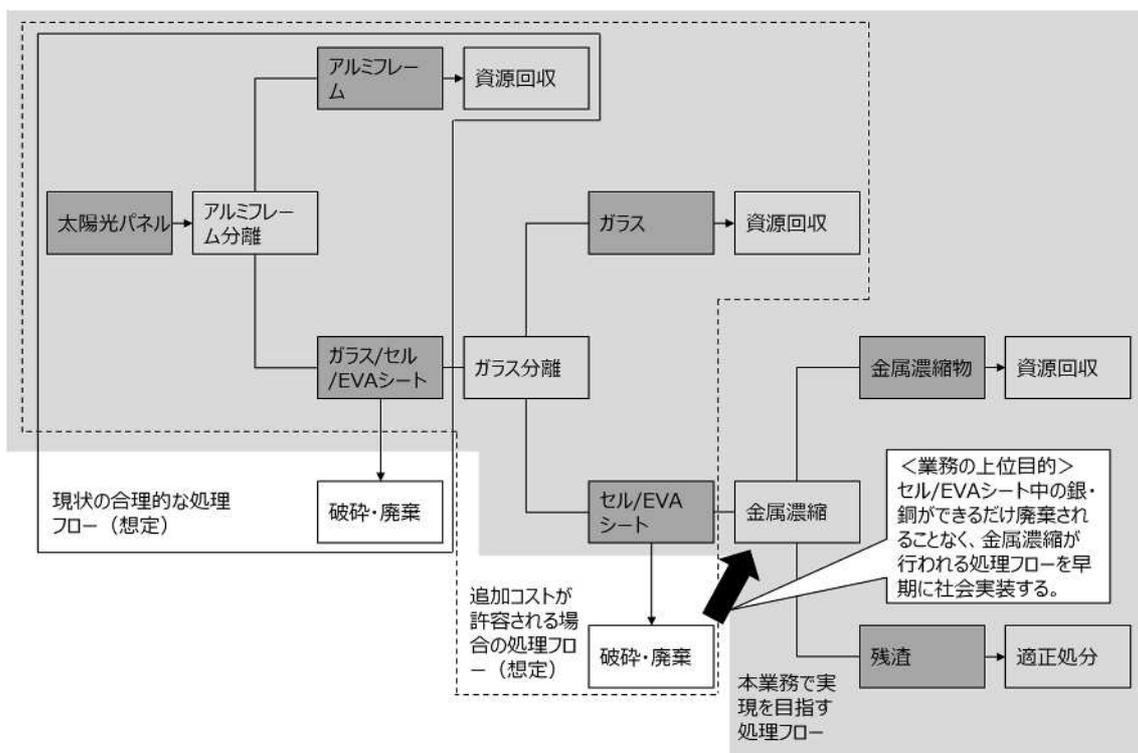
² 資源エネルギー庁(2021)によると、出力 10kW 未満の太陽光発電所(いわゆる住宅用太陽光発電所)は、調達期間終了後も自家消費等で継続利用され、太陽光発電設備は建物の解体と同時に撤去・処分される場合が多いと想定されるという背景を踏まえて、外部積立の対象外となっている。

³ 太陽光パネルは、「結晶シリコン系」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結晶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、封止樹脂・バックシートからなる樹脂、シリコン、集電線からなる非鉄金属である。

⁴ 当然、最終処分場に処分することで太陽光パネル中に含まれる有用金属も廃棄されることになる。仮に、2030 年後半に 200 千トン/年の太陽光パネルが廃棄物として発生し、太陽光パネル中には銀が 8g/枚、銅が 150g/枚含まれると仮定し、太陽光パネル全量が処分されたとすると、2030 年後半には、90 トン/年の銀、1,800 トン/年の銅が回収されずに廃棄されることになる。1 ミドルを 110 円として、2006 年～2021 年の銀と銅の London Metal Exchange(以下、「LME」)の平均建値(World Bank(2022))に基づくと、90 トンの銀は 62 億円、1,800 トンの銅は 14 億円の価値に相当する。

ーマである「金属リサイクル」に着目すると、太陽光パネルはアルミフレームを分離し、残りは破砕して廃棄することが、合理的な選択肢と言える。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であれば、アルミフレーム分離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、金属回収が行われ難い。そのため、セル/EVAシートについては、破砕された後、処理量によらず処理単価が明確な管理型最終処分場での処分が行われていると考えられる。

2021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、金属リサイクルが促進される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)。なお、本業務は、2020年度に実施した「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」(環境省(2021a)) (以下、「過年度業務」)の結果を踏まえて実施しているものである。



(出所)E&ES

図 I-1 業務の上位目的

I-2 業務の内容

I-2-1 商業スケールの設備を用いた非鉄製錬原料の濃縮の実証

以下の(1)~(3)を実施し、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した。

(1) 試験サンプルの入手

過年度業務では、セル/EVA シートは、ガラスの残存率にばらつきが大きいこと、また、太陽光パネルの型番に応じて、有用金属と管理すべき有害物質の含有量はばらつきがあることを確認していたため、これらのばらつきに関するデータを拡充する目的で、試験サンプルとして熱分離法およびブラスト方式を施した後のセル/EVA シートを計 200 枚入手した。

(2) 試験サンプルの評価

入手した試験サンプルを評価し、以下を明らかにした。

- 銀・銅等の有用金属の含有量
- 鉛・フッ素等の管理すべき有害物質の含有量
- 金属濃縮の容易性・困難性

(3) 運用検証

商業スケールの非鉄金属製錬原料の濃縮設備を運用する上での課題を整理した。具体的には、以下の項目について、検討を行った。

- 原料評価を含む集荷のあり方
- 設備の運用のあり方

I-2-2 処理ルート構築の運用検証

特に、住宅用太陽光発電所で発生する太陽光パネルに着目して、廃棄物処理法を遵守し、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、検証を行った。検証は、以下の(1)と(2)を実施し、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った。

(1) 拠点回収の運用検証

4か所の回収拠点を埼玉県内に配置し、県内で太陽光パネルの拠点回収(以下、「回収実

証実験)を行い、その運用上の課題を整理した。具体的には、以下の項目について、調査検討を行った。

- 住宅用太陽光発電所から排出される太陽光パネルの排出要因と排出される太陽光パネルの特徴
- 太陽光パネルの拠点回収、収集・運搬、リユース・リサイクル・処分を行う上での課題
- 住宅メーカーの要望把握を目的とした、住宅系の業界団体との計 2 回程度の意見交換(オンラインで実施予定)

(2) 廃棄物処理法上の課題の整理

回収実証実験の検証状況を踏まえて、廃棄物処理法上の課題を整理した。具体的には、以下の項目について、検討を行った。

- 回収実証実験を通してリユース・リサイクルを促進する上での廃棄物処理法上の課題
- 課題解決に向けた展望

I-2-3 事業における環境影響改善効果、CO2 排出量削減効果の評価

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における埋め立て回避」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(処理ルート構築の考慮有無の2ケース)を算出した。なお、処理ルート構築を考慮するケースでは、埼玉県の実証実験で得られる実データにも基づき、CO2 排出削減量を算出した。

I-2-4 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討、出口戦略の検討

本事業によってセル/EVA シートの適正価格が速やかに明確化されることやガラス分離の促進、国内の金属リサイクルの受け皿構築によって、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した。

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した。

以上から、具体的には、以下の項目について、検討を行った。検討に当たっては、太陽光発電事業に出融資や付保を行う金融・保険セクターや化合物を半導体として用いる太陽光

パネルのメーカーとの意見交換をそれぞれ2回程度(オンラインを想定)行った。

- 太陽光パネルの排出量予測(需要)と金属リサイクルシステム(供給)のバランスの経年的・地理的な推定およびそれに基づく金属リサイクルビジネスのあり方
- 金融・保険セクター側と協調した金属リサイクルへの経済的インセンティブ付与のあり方
- 化合物を半導体として用いる太陽光パネルも含めた金属リサイクルシステムへの展開のあり方

I-3 業務の実施体制

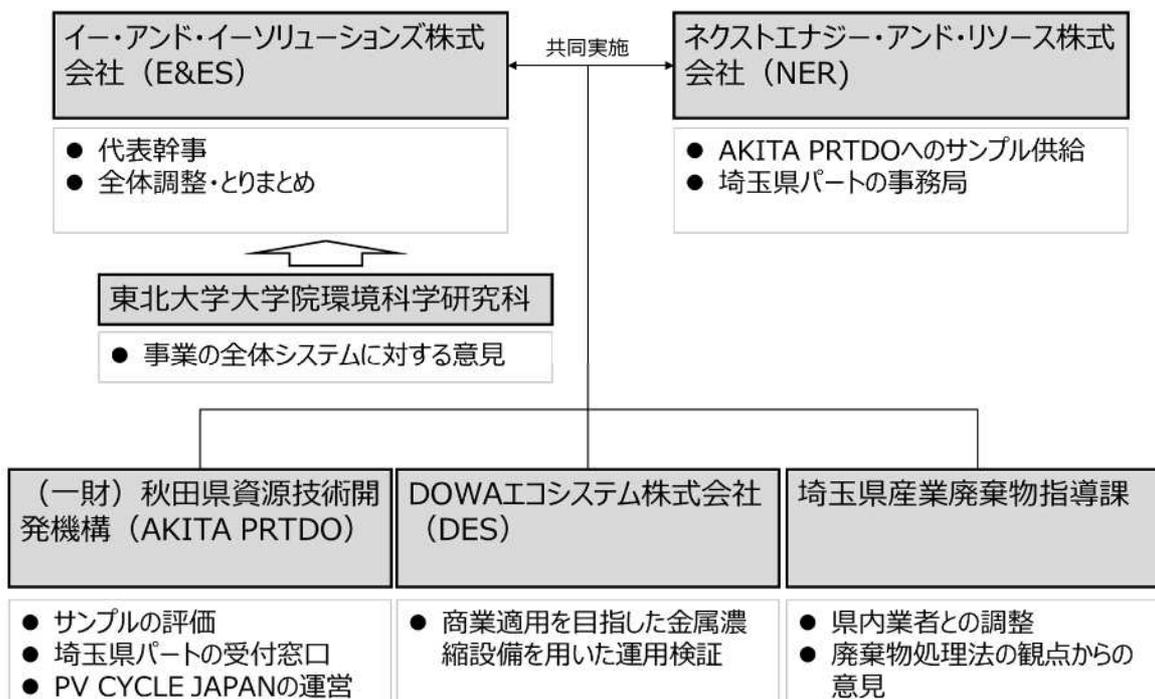
本業務の実施体制を図 I-2 に示す。本業務では、E&ES が幹事法人の役割を務め、業務の統括・とりまとめを行うとともに、業務の品質・工程の管理を行った。加えて、E&ES が、環境省および「令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業」の下で課題監理を行う事業者(以下、「課題監理業者」と)との連絡窓口を務めた。

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、200 枚のセル/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 of 構築の実証実験の事務局の役割を務めた。

E&ES は、外注先として、一般財団法人秋田県資源技術開発機構(以下、「AKITA PRTDO」)および DOWA エコシステム株式会社(以下、「DES」)を起用し、AKITA PRTDO はセル/EVA シートの評価、埼玉県での太陽光パネルの回収実証実験の受付窓口、および PVC⁵の運営を行った。DES は、商業適用を目指した金属濃縮設備を用いた運用検証を担当した。

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埼玉県での太陽光パネルの回収実証実験の下での県内業者との調整、および廃棄物処理法の観点からの意見を E&ES に提供した。

⁵ 2021 年に設立された任意団体。運営母体は、AKITA PRTDO。



(出所)E&ES

図 I-2 業務の実施体制

I-4 業務の進め方

本業務は、図 I-3 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、2021年4月16日にE&ESと共同実施者のNER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、2021年4月20日にE&ESは外注先のDESとウェブミーティングを行い、2021年4月23日にE&ESは外注先のAKITA PRTDOの事務所を訪問して、各外注先の担当パートの業務内容の確認を行った。

2021年9月8日には、評価審査委員、環境省、および課題監理業者の参画を得て、リモート会議形式の現地視察会を開催した。現地視察会では、リモート会議の画面共有機能を用いて、本業務の検証に利用する資機材を参加者に紹介するとともに、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VI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AKITA PRTDOと業務の進捗について都度意見交換を行った。

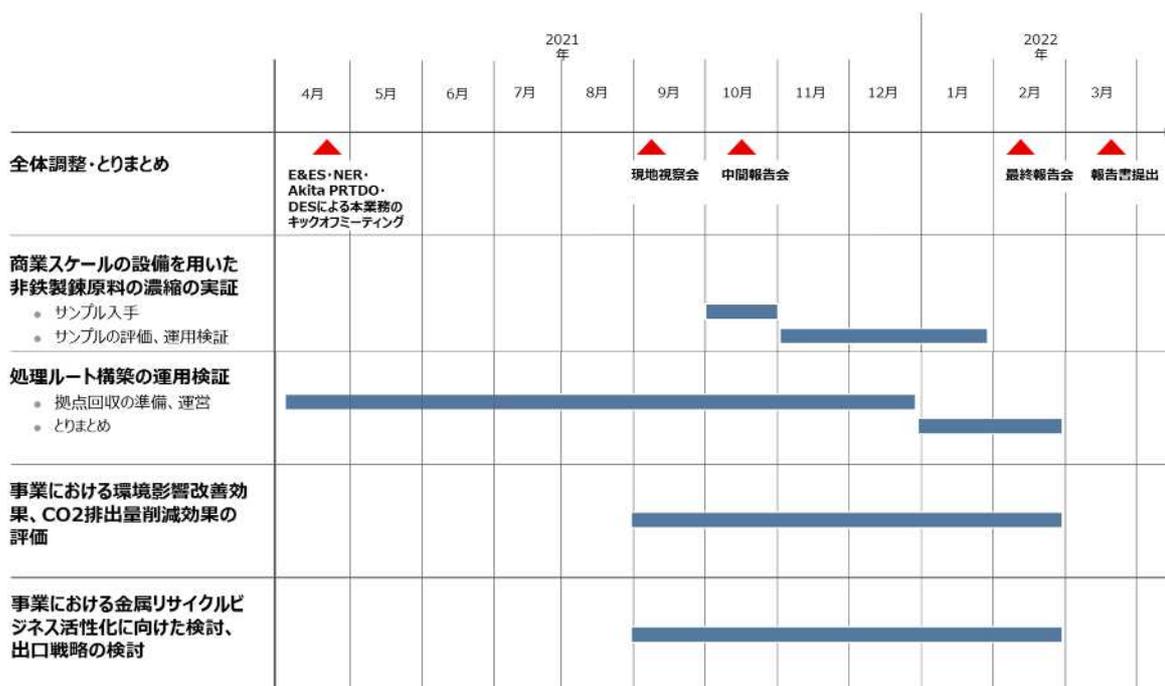
商業スケールの設備を用いた非鉄製錬原料の濃縮の実証では、試験サンプルを入手した

後に、昨年度のベンチスケールの設備からスケールアップした設備を用いて、試験サンプルの評価を行うとともに、運用検証のとりまとめを行った。

処理ルート構築の運用検証では、埼玉県での太陽光パネルの回収実証実験を 2021 年 7 月から 12 月まで行った。その準備、実施状況の進捗共有、およびとりまとめのために、2021 年 4 月から 2022 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った。また、2021 年 11 月 30 日には、埼玉県環境科学国際センター（以下、「CESS」）にて太陽光パネルのリユースおよび運搬効率に関する基礎データ取得のための試験を行った。

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では、埼玉県での太陽光パネルの回収実証実験が開始した後、回収実証実験の実データにも基づき、昨年度の評価結果の見直しを行った。

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、出口戦略の検討では、主に、PVCJ を通して太陽光パネルの流れをリサイクル側に促すことができないかを検証した。



(出所)E&ES

図 1-3 業務の実施スケジュール

第II章 商業スケールの設備を用いた非鉄製錬原料の濃縮の実証

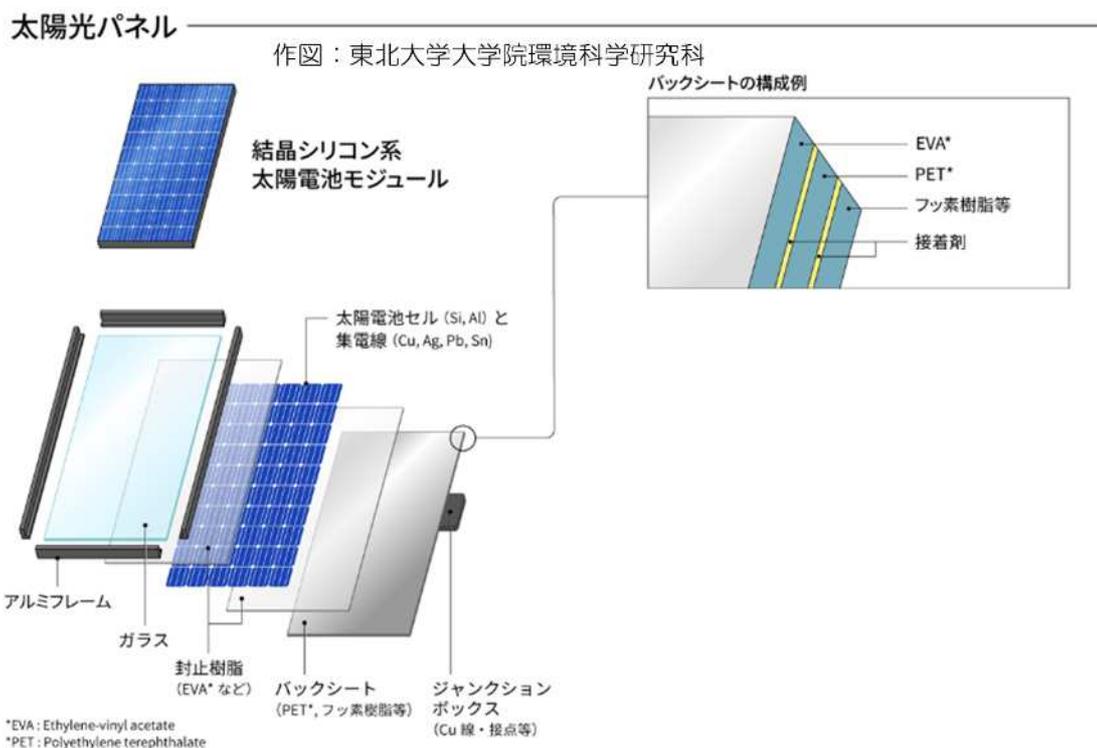
II-1 試験サンプルの入手

II-1-1 背景・目的

過年度業務の検討結果から、太陽光パネルの型番に応じて、セル/EVA シートの有用金属(銅や銀等)と管理すべき有害物質(鉛やフッ素等)の含有率にばらつきがあることが確認された。本業務では、ばらつきに関するデータを拡充することを目的として、3種類の異なる型番からなるセル/EVA シートを入手した。なお、型番による品位の違いを確認することが目的であるため、ブラスト工法⁶を施した後のセル/EVA シートを一定数量入手することとした。

他方、過年度業務の検討結果から、熱分離法⁷を施した後のセル/EVA シートでは、封止樹脂とセルが破けているもの、太陽光パネルからガラスが一部または全く除去されていないものが確認された。そのため、熱分離法を施した後のセル/EVA シートも入手することとした。

ここで、太陽光パネルを構成する素材の用語について簡単に確認する(図 II-1 参照)。



(作図)東北大学大学院環境科学研究科

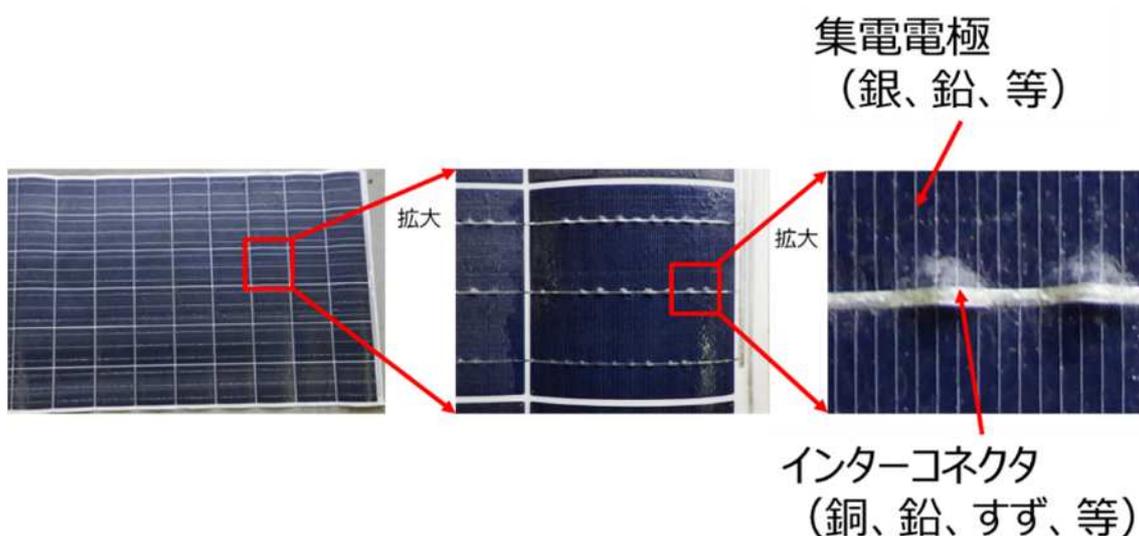
図 II-1 一般的な結晶シリコン系の太陽光パネルの構造

⁶ 鉄や亜鉛等の粒状の投射材料を太陽光パネルの表面に吹き付けて、ガラスを剥離する方法。過年度業務では、3種類のガラス分離方法(ブラスト工法、熱分離法、ロール式破砕法)の特徴を考察したが、ブラスト工法が他の2つのガラス分離方法に比べて、セル/EVA シートのガラス残存率のばらつきが最も小さかった。

⁷ 太陽光パネルのガラスとセルの間にある封止樹脂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。

本報告書では、特段断りがない限り、セル/EVA シートとは、結晶シリコン系の太陽光パネルからジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離した後のものを指す。なお、セル/EVA シートは、集電線が積載されたシリコンを封止樹脂とバックシートで挟み込んだものから構成されるものである。

ここで集電線とは、シリコンの表面と裏面に積載されている素材を指す。シリコンの表面の集電線は、集電電極とインターコネクタとバスバー電極からなる(図 II-2 参照)。集電電極は主に銀から構成されるが、通常わずかに鉛も含まれる⁸。また、インターコネクタは、通常わず鉛はんだでコーティングされた銅線である。インターコネクタは、バスバー電極の上に積載されるものである。そのため、バスバー電極はインターコネクタに隠れて通常見えない。バスバー電極は主に銀から構成される。



(出所)E&ES

図 II-2 シリコンの表面の集電線

シリコンの裏面の集電線は、インターコネクタと銀の電極からなる。シリコンの裏面はアルミニウム製の素材でコーティングされており、このアルミニウム製の素材へインターコネクタを接合させる目的で、インターコネクタとアルミの間には銀の電極が積載される。そのため、この銀の電極は、インターコネクタに隠れて通常見えない。

⁸ 集電電極の製造工程では、銀粉にガラスフリットという素材が添加される。このガラスフリットには通常鉛が含まれる。

II-1-2 試験サンプルの入手結果

本業務では、計 200 枚のセル/EVA シートを入手した(表 II-1 参照)。また、入手したセル/EVA シートの寸法・重量を測定するとともに、公称出力をセル/EVA シートの裏面のラベルから読み取り、また、セル数もカウントした(表 II-2 参照)。入手したセル/EVA シートの外観は図 II-3 に示すとおりである。

表 II-1 サンプルの入手結果

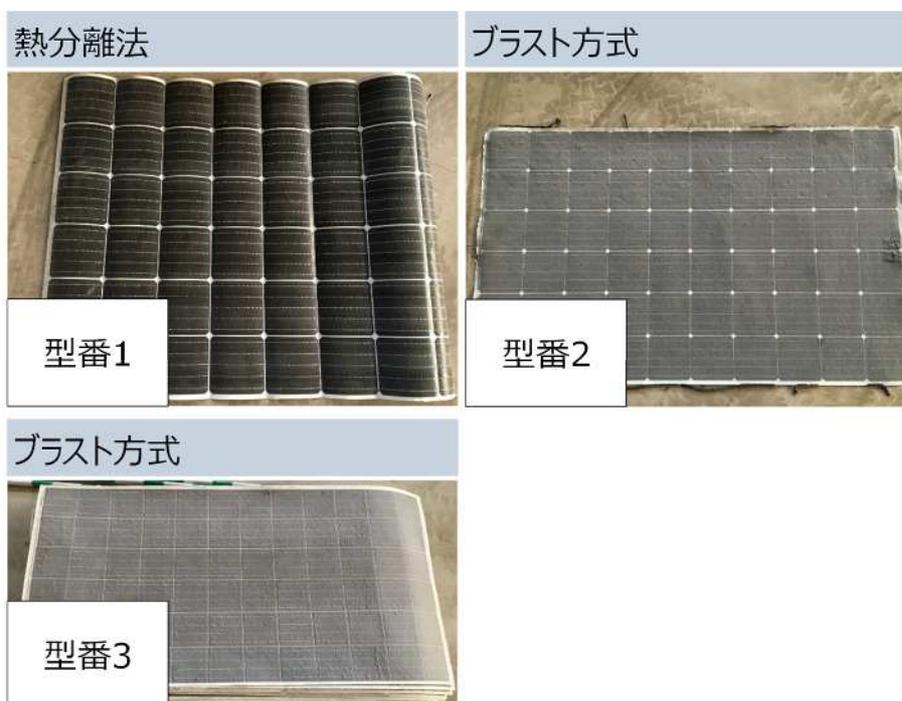
ガラス分離方法	枚数	型番	供給者	受領者	受け取り日	受け取り場所
熱分離法	100 枚	型番 1:100 枚	NER	DES	2021 年 10 月 15 日	秋田県大館市
ブラスト方式	100 枚	型番 2:85 枚 型番 3:15 枚	NER	DES	2021 年 10 月 14 日	秋田県大館市

(出所)E&ES

表 II-2 各型番のサンプルの寸法・重量・公称出力・セル数

型番	1 枚の寸法	1 枚の重量	公称出力	セル数
型番 1	985mm×1,210mm	1.8kg	240W	48
型番 2	980mm×1,630mm	2.3kg	315W	60
型番 3	975mm×1,950mm	3.7kg	305W	72

(出所)E&ES



(出所)E&ES

図 II-3 本業務で入手したサンプルの外観

本業務でサンプルを入手することで、新たに分かったことは以下のとおりである。

- 単一型番の太陽光パネルに対して熱分離法を施した後のセル/EVAシート100枚を入手したが、封止樹脂やセルが破けているものは確認されなかった。また、ガラスの残存率の高いサンプルも確認されなかった。さらに、ガラス未除去のサンプルも確認されなかった。
- 本業務で入手した試験サンプルと過年度業務での熱分離法の装置のオペレーターへのヒアリング結果⁹に基づくと、本業務のように1つのロットが単一型番で100枚単位であれば、熱分離法ではガラスの分離工程が安定し、結果、ガラス残存率のばらつきの小さいセル/EVAシートを供給し得ると考えられる。
- 型番1のセル数は48であった。小型であることから、住宅用太陽光パネルの用途であったと推定された。
- ブラスト工法を施した型番2と型番3は、過年度業務と同様に、ガラス残存率のばらつきは小さかった。

⁹ 熱分離法の装置では、「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サンプルが生じ得る」との旨のコメントを得た。

II-2 試験サンプルの評価

II-2-1 有用金属と管理すべき有害物質の含有量

過年度業務で採用した方法に準じて、本業務でもサンプル中の有用金属(銅、銀等)の品位、および管理すべき有害物質(鉛、フッ素等)の品位を評価した。評価方法の概要と評価結果は、以下のとおりである。

(1) サンプルの寸法・重量の測定

メジャーを用いてサンプルの寸法を、台はかりを用いてサンプルの重量を測定した。各型番のサンプルの寸法と重量の測定結果は、表 II-2 に示すとおりである。

(2) 構成部材の寸法の測定

セル/EVA シートの集電線である、集電電極、バスバー電極、およびインターコネクタの寸法を、メジャーおよびノギス等を用いて測定した¹⁰。各型番のサンプルの構成部材の寸法の測定結果は、表 II-3 に示すとおりである。なお、バスバー電極の長さは、インターコネクタ(セル内)と同じであると仮定した。

表 II-3 各型番のサンプルの構成部材の寸法の測定結果

型番	集電電極		バスバー電極		インターコネクタ		
					セル内		セル外
	本/セル	mm/本	本/セル	mm/本	本/セル	mm/本	mm
型番 1	112	157	5	314	5	314	2,563
型番 2	110	156	4	312	4	312	2,531
型番 3	103	156	4	283	4	283	2,454

(出所)E&ES

(3) 構成部材の組成分析

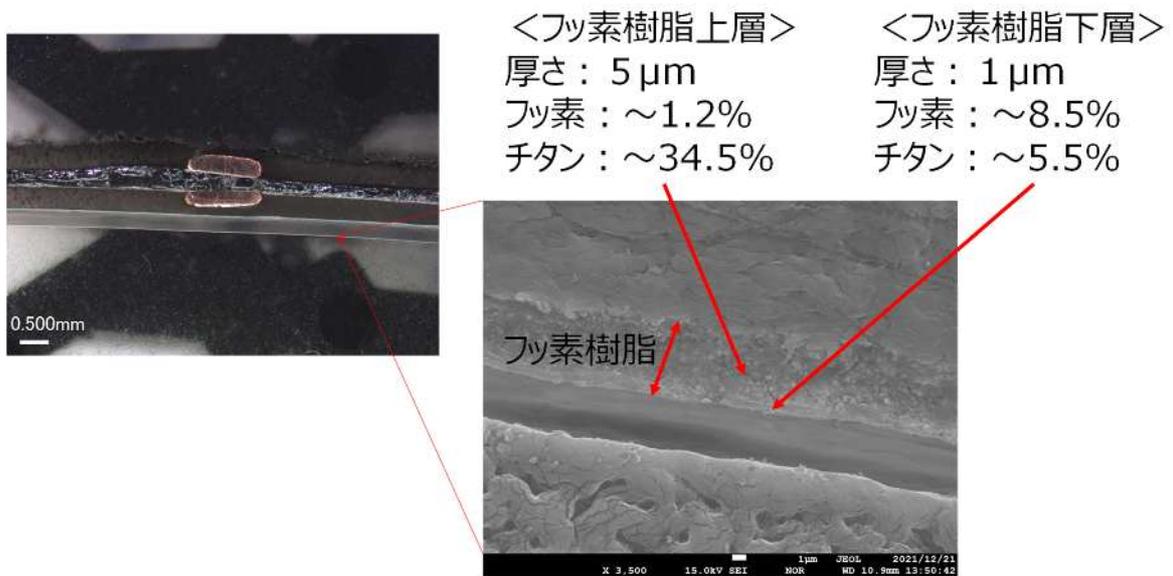
EPMA を用いて、集電電極、バスバー電極、インターコネクタの組成を分析した(表 II-4 参照)。また、同じく EPMA を用いて、バックシートの組成を分析した。結果、型番 1 と型番 2 のバックシートにはフッ素は含まれておらず、型番 3 のバックシートにはフッ素が含まれていると評価された(図 II-4 参照)。

¹⁰ セル/EVA シートの集電線は、集電電極、バスバー電極、インターコネクタ、およびシリコン裏面の銀の電極から構成されるが、本報告書では、シリコン裏面の銀の電極はバスバー電極の一つの構成素材として扱った。

表 II-4 集電電極、バスバー電極、インターコネクタの組成の分析結果

型番	集電電極	バスバー電極	インターコネクタ(セル内)		
	銀(重量%)	銀(重量%)	銅(重量%)	鉛(重量%)	すず(重量%)
型番 1	100	100	82.4	4.4	13.2
型番 2	100	100	86.6	8.4	5.0
型番 3	100	100	93.8	4.6	1.5

(出所)E&ES



(出所)E&ES

図 II-4 型番 3 のバックシートの組成

(4) 構成部材の断面積測定

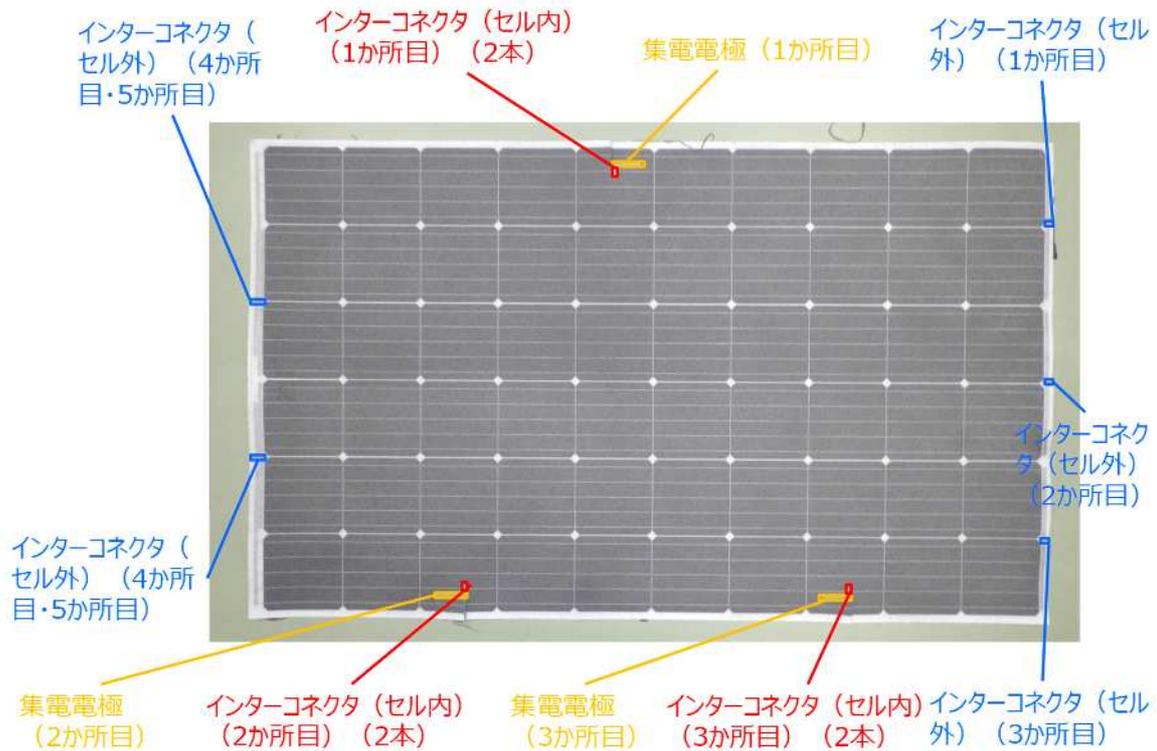
画像処理ソフトウェアを用いて、集電電極、バスバー電極、およびインターコネクタの断面積を測定した(表 II-5 参照)。断面積は、各構成部材について複数の位置で測定を行い、その平均値により算出した¹¹。例として型番 2 について、各構成部材の断面積を測定した位置を図 II-5 に示す。また、図 II-6 には、例として型番 1 について、画像処理ソフトウェアを用いた断面積の測定結果を示す。

¹¹ 精度向上を目的に、過年度業務に比べて、本業務では、断面積の測定箇所を増やした。測定箇所が増えたことにより、断面の変形に起因する断面積のばらつきの範囲が小さくなった。

表 II-5 集電電極、バスバー電極、インターコネクタの断面積の測定結果

型番	断面積(mm ²)			
	集電電極	バスバー電極	インターコネクタ (セル内)	インターコネクタ (セル外)
型番 1	5.6×10^{-4}	0.012	0.26	2.0
型番 2	5.9×10^{-4}	0.005	0.37	2.8
型番 3	7.6×10^{-4}	0.013	0.36	2.3

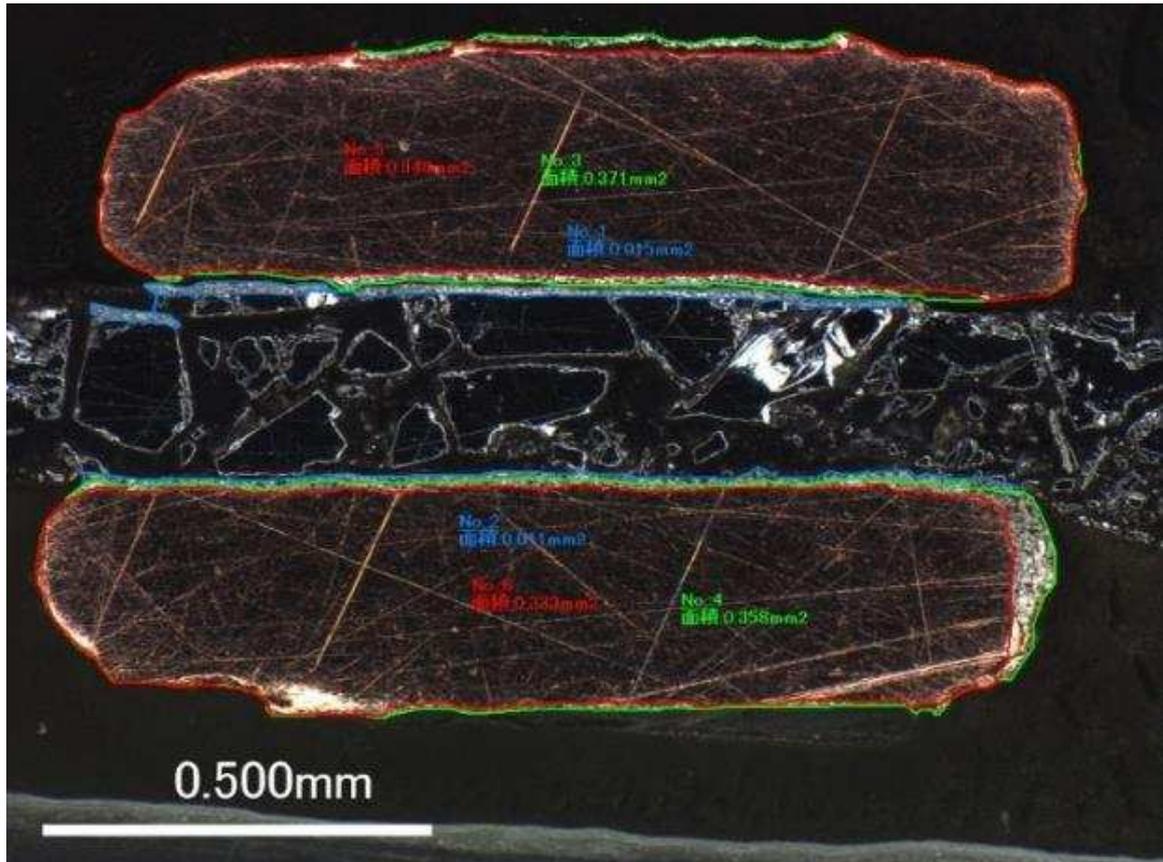
(出所)E&ES



(注釈)集電電極では計3か所、インターコネクタ(セル内)では計3か所、インターコネクタ(セル外)では計5か所の断面積を測定した。バスバー電極の断面積は、インターコネクタ(セル内)の断面積を測定した位置で測定した。

(出所)E&ES

図 II-5 各構成部材の断面積を測定した位置(型番 2)



(注釈) 青線内 (No.1・2) はバスバー電極の銀の断面、赤線内 (No.5・6) はインターコネクタ (セル内) 中の銅線の断面、緑線内 (N.3・4) はインターコネクタ (セル内) (すなわち、すず鉛はんだでコーティングされた銅線) の断面を示す。
 (出所) E&ES

図 II-6 画像処理ソフトウェアを用いた断面積の測定結果 (型番 1)

(5) 有価金属・有害物質の含有量の算出

上記の(1)~(4)の結果に基づき、有用金属と管理すべき有害物質の含有量を算出し、含有率は各サンプルの重量で除すことで求めた。例えば、銅について見ると、銅は集電電極、インターコネクタ、バスバー電極の各集電線のうち、インターコネクタのみに含まれていたことから、以下のとおり算出した。含有率と含有量は、表 II-6 に示すとおり求められた。

$$\begin{aligned}
 & \text{銅の含有量(mg)} \\
 &= \text{インターコネクタの銅含有率} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) \times \text{インターコネクタの断面積} (\text{m}^2) \\
 & \times \text{インターコネクタの長さ} \left(\frac{\text{m}}{\text{本}} \right) \times \text{インターコネクタの密度} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \\
 & \times \text{インターコネクタの数(本)}
 \end{aligned}$$

表 II-6 セル/EVA シート中の有用金属と管理すべき有害物質の含有量と含有率

型番	含有量(g)				含有率(mg/kg) ¹⁾			
	銅	銀	鉛	フッ素	銅	銀	鉛	フッ素
型番 1	175	14	9.9	0.0	97,322	8,033	5,494	0
型番 2	268	10	14	0.0	116,435	4,483	5,943	0
型番 3	296	20	4.6	0.5	80,027	5,503	1,235	132

1)型番 1 は熱分離法、型番 2 と 3 はプラスト方式のセル/EVA シートであることから、セル/EVA シートへのガラス残存率が異なる。過年度業務の検討では、同じ型番の太陽光パネルに熱分離法とプラスト工法を施した場合、セル/EVA シートの重量は、概ね熱分離法:プラスト工法=0.9:1 の割合となっていた(プラスト工法のセル/EVA シートは、熱分離法のセル/EVA シートに比べて、ガラス残存率が高い)。よって、上表の型番 1 と型番 2・3 の含有率の差異には、型番による違いだけでなく、ガラス残存率の違いも反映されていることに留意すべきである。

(出所)E&ES

有用金属と管理すべき有害物質のばらつきは、図 II-7～図 II-10 に示すとおりである。本業務でサンプルを評価することで、新たに分かったことは以下のとおりである。

- 銅については、本業務で入手したサンプルの銅の含有率は、本業務および過年度業務で入手したサンプルの銅の含有率の平均値に比べて、いずれも高い値であった。
- 銀については、本業務で入手したサンプルの銀の含有率はいずれも過年度業務で入手したサンプルに比べて高かった。
- 鉛については、ばらつきが大きく、本業務で入手したサンプルの鉛の含有率について、特記すべき規則性は認められなかった。
- フッ素については、本業務で入手したサンプルのうち、型番 1 と 2 はフッ素が含まれておらず、型番 3 はフッ素が含まれているが、その含有率は過年度業務で入手したサンプルに比べると非常に小さかった。

また、本業務で入手した 3 つの異なる型番中の銀含有率のばらつきについて、以下のとおり考察した。

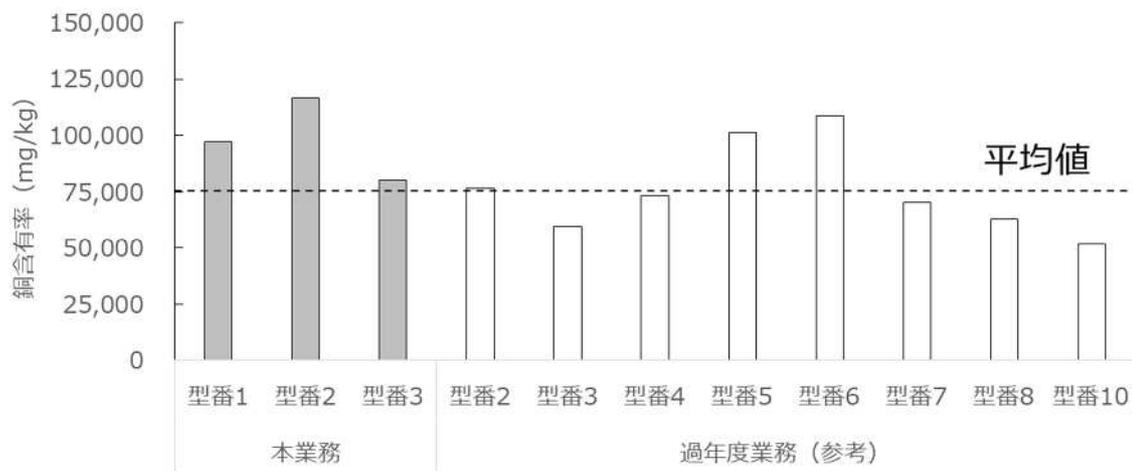
- 型番 1 の銀含有率が、本業務で入手したサンプルおよび過年度業務で入手したサンプルの中で最も高かった理由は、最も製造年が古い太陽光パネルだったからだと考えられる¹²⁾。型番 1 の製造年の正確な情報は得られなかったものの、型番 1 の太陽光パネルのセル数は 48 であり、通常セル数が 48 の太陽光パネルは住宅用である¹³⁾。型番 1 の太陽光パネルは、住宅用太陽光パネルとして長期間使用された後に廃棄されたも

¹²⁾ 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(株式会社三菱総合研究所(2019))。

¹³⁾ 本業務で入手したサンプルおよび過年度業務で入手したサンプルの中でセル数が 48 の太陽光パネルは、本業務で入手した型番 1 のサンプルのみである。

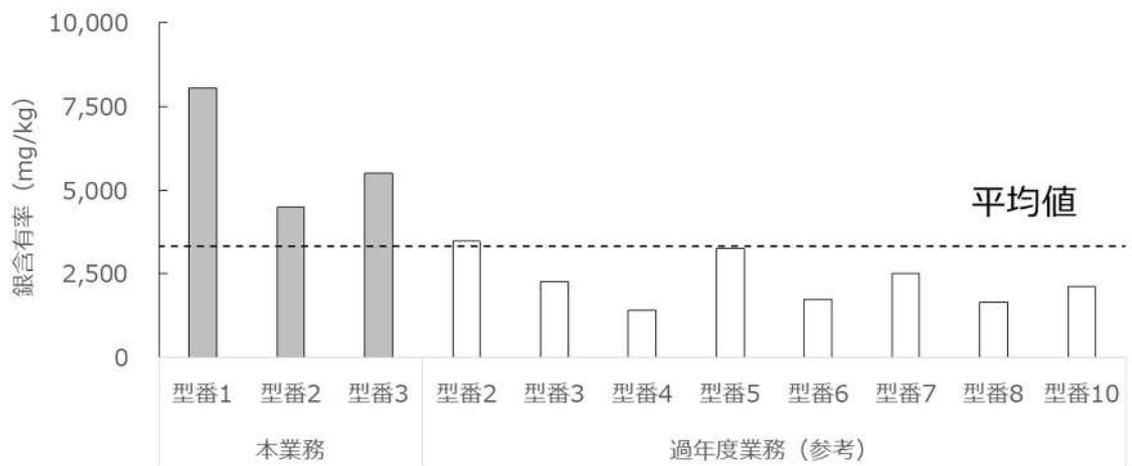
のと考えられる。

- 型番 2 と型番 3 の出力を比較すると、型番 2 の出力は 315W、型番 3 の出力は 305W であり、型番 2 は型番 3 に比べて出力が高い。一方、型番 2 と型番 3 の寸法を比べると、型番 2 は型番 3 に比べて寸法が小さい。つまり、型番 2 は型番 3 に比べて、単位面積あたりの出力が高く、このことから型番 2 は型番 3 に比べて製造年が新しいと推定された。銀の含有率で比較すると、型番 2 は型番 3 に比べて銀含有率が低い。以上から、型番 2 の銀含有率が、型番 3 に比べて低い理由は、型番 2 が型番 3 に比べて製造年が新しいことに由来すると推定された。



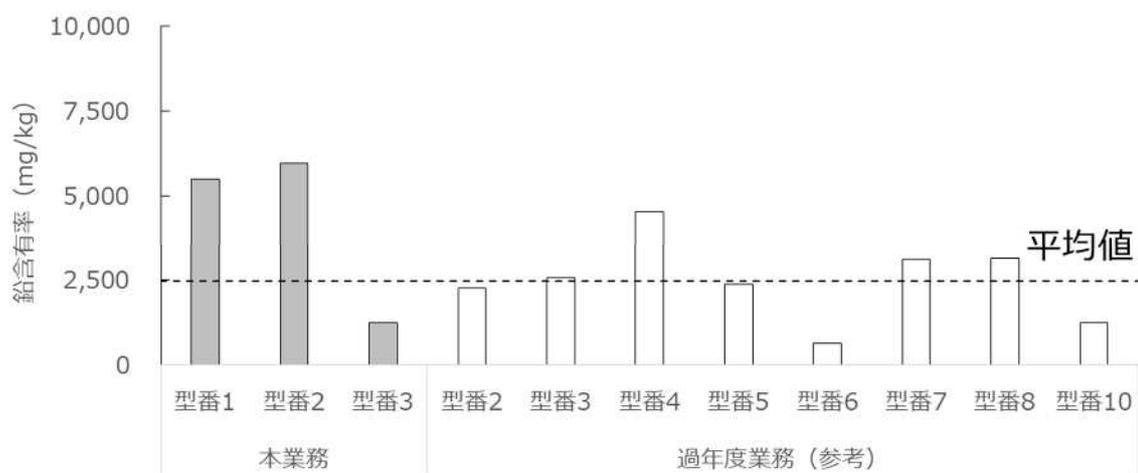
(出所)E&ES

図 II-7 本業務で入手したサンプル中の銅の含有率のばらつき



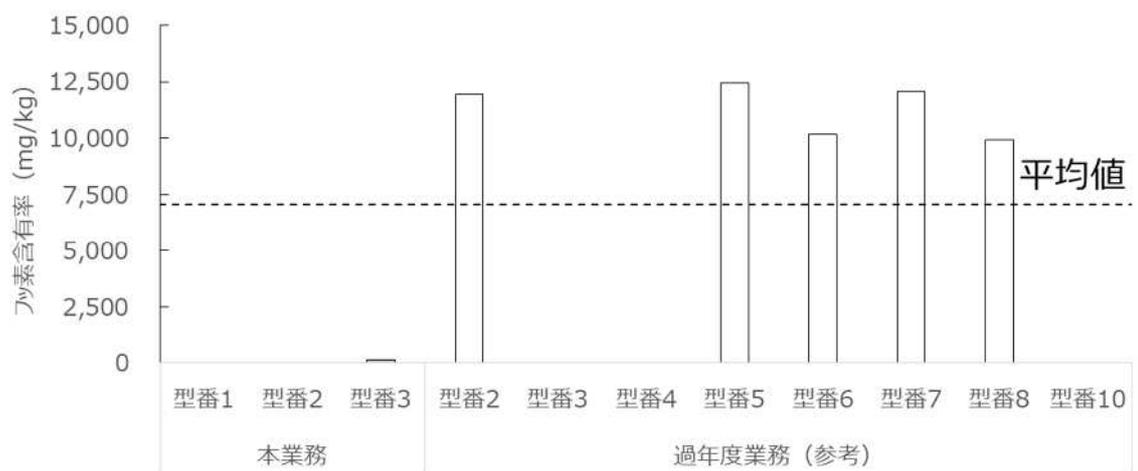
(出所)E&ES

図 II-8 本業務で入手したサンプル中の銀の含有率のばらつき



(出所)E&ES

図 II-9 本業務で入手したサンプル中の鉛の含有率のばらつき



(出所)E&ES

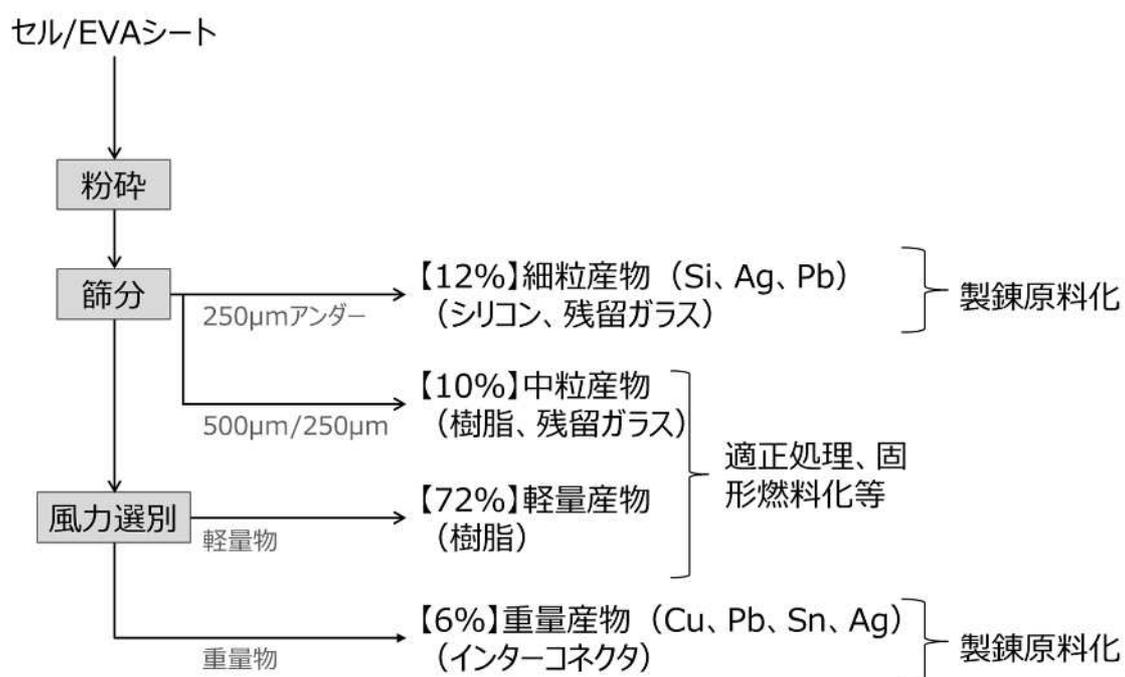
図 II-10 本業務で入手したサンプル中のフッ素の含有率のばらつき

II-2-2 金属濃縮の容易性・困難性

本業務では、型番 1～3 のサンプルの金属濃縮を行った。金属濃縮は、200kg/時の処理能力の物理選別の設備を用いた。過年度業務では、30kg/時の処理能力の物理選別の設備を用いて金属濃縮の技術検証を行っていたところ、本業務では設備の処理能力をスケールアップしても、過年度同様に製錬原料を製造でき得るかを検証のポイントとした。

(1) 物理選別のフロー

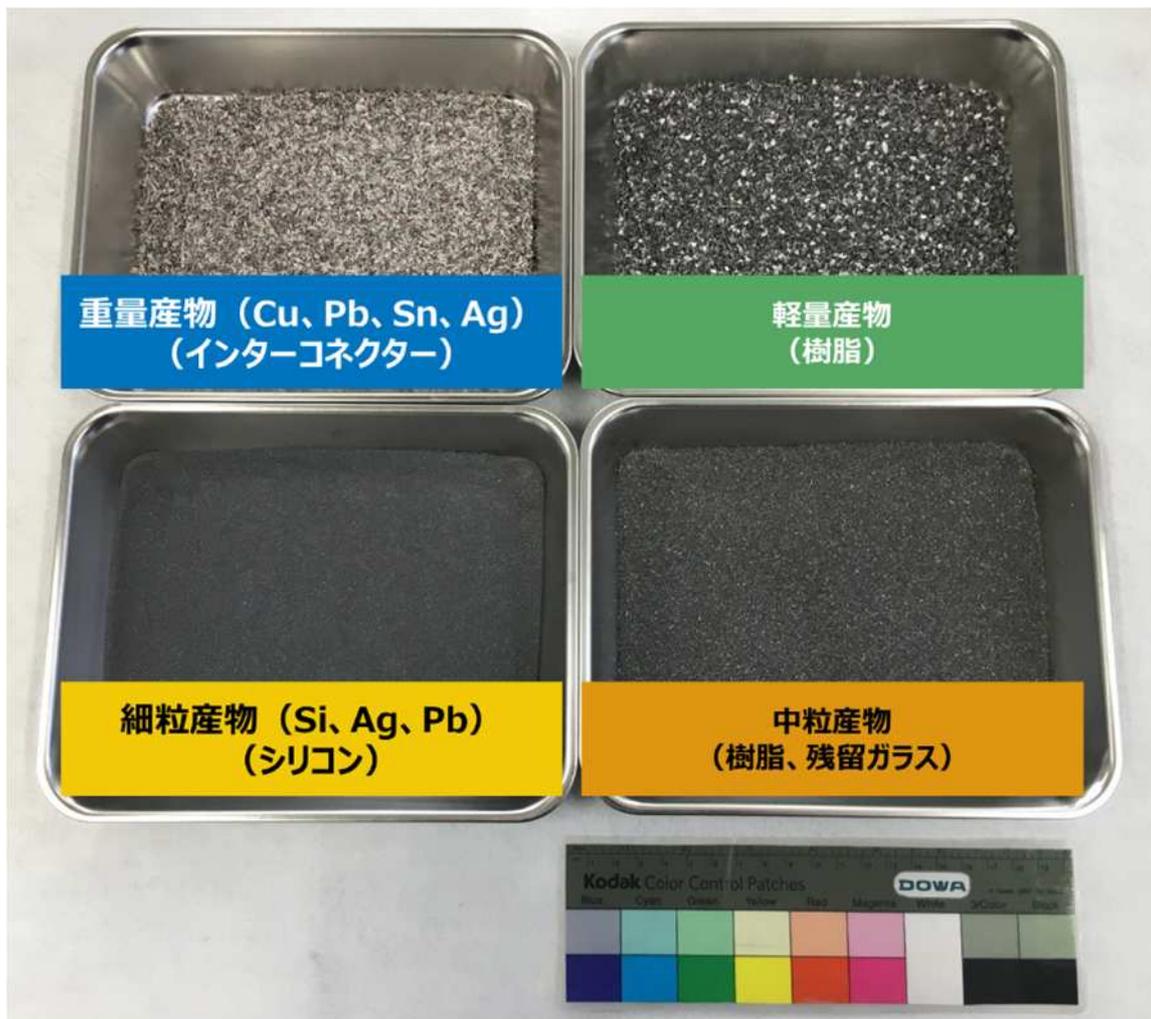
本業務では、図 II-11 に示すフローに従って型番 1～3 の物理選別を行った。また、物理選別で得られた産物を図 II-12 に示す。



(注) 括弧【】内の数字は、参考値として、過年度業務の物理選別で得られた各産物の重量割合の平均値を示す。この平均値は、プラスト方式のサンプル(型番の数:10 種類の異なる型番)を原料として用いて、物理選別を行った結果に基づき得られた各産物の平均値である。

(出所)E&ES

図 II-11 本業務での物理選別のフロー

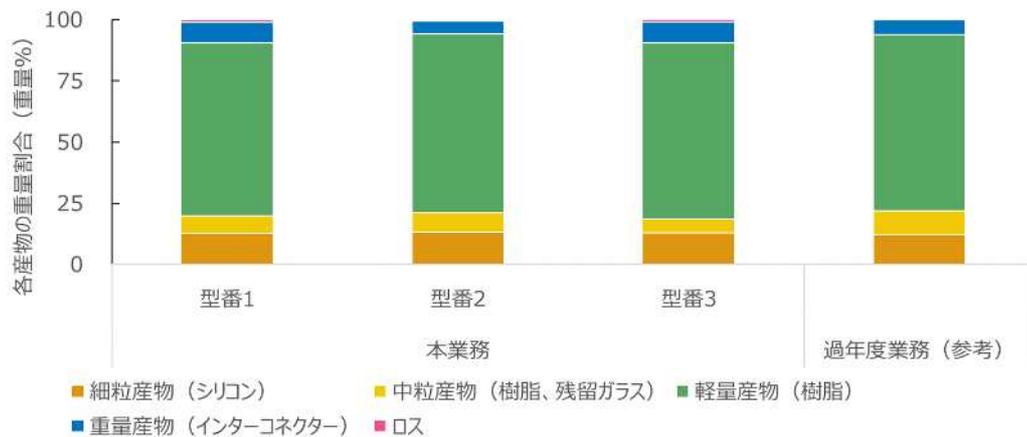


(出所)E&ES

図 II-12 本業務の物理選別で得られた産物

(2) 物理選別後の各産物の重量割合

本業務の物理選別で得られた各産物の重量を測定した。各産物の重量割合は、図 II-13 に示すとおりである。参考値として、図 II-13 には、過年度業務の物理選別で得られた各産物の重量割合の平均値も示す。設備の能力をスケールアップしても、過年度業務と同等の重量割合の産物を製造でき得ることが分かった。



(注) 過年度業務(参考)は、過年度業務の物理選別で得られた各産物の重量割合の平均値を示す。この平均値は、プラスト方式のサンプル(型番の数:10種類の異なる型番)を原料として用いて、物理選別を行った結果に基づき得られた各産物の平均値である。

(出所)E&ES

図 II-13 物理選別で得られた各産物の重量割合

(3) 物理選別後の各産物中の金属の含有率

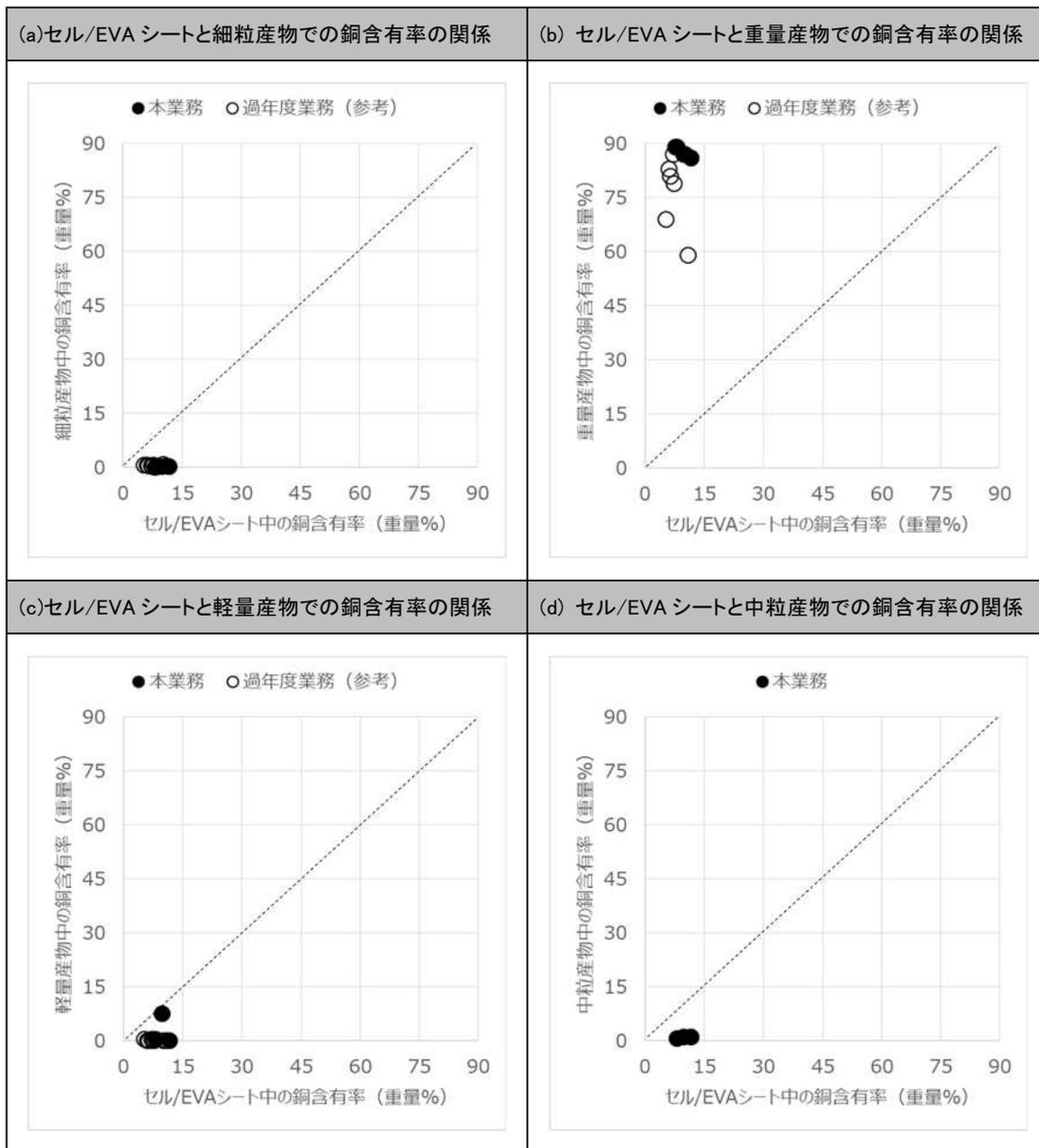
本業務では、物理選別で得られた各産物を分析した。分析結果は、表 II-7 に示すとおりである。また、セル/EVA シートと物理選別で得られる各産物での銅・銀・鉛の関係を、図 II-14～図 II-16 のとおりプロットした。本業務を実施することで、以下が明らかになった。

- 銅は、重量産物中に濃縮する。また、重量産物中の銅含有率は、本業務で分析した型番 1～型番 3 の場合、いずれも 85%を超えていた。
- 銀は、細粒産物および重量産物中に濃縮する。これら産物中の銀含有率は、本業務で分析した型番 1～3 の場合、いずれも 5,000mg/kg を超えていた。なお、一点留意すべき点は、中粒産物の扱いである。中粒産物には、セル/EVA シートに残存するガラスが濃縮する傾向を示す。そのため、もしガラスの残存率の高いセル/EVA シートを物理選別した場合は、その分、中粒産物中の銀含有率が低下する。
- 鉛は、重量産物中に濃縮するが、細粒産物、軽量産物、および中粒産物にも分配する。
- 以上から、細粒産物中の銀と重量産物中の銀・銅は、設備の能力をスケールアップしても、製錬原料となり得る品位となることが分かった。
- また、有害物質管理の観点からは、鉛は、物理選別後のすべての産物に分配されるため、物理選別後の各産物は適正管理が求められる点に留意が必要であることが分かった。

表 II-7 金属濃縮で得られた各産物中の銅・銀・鉛の含有率

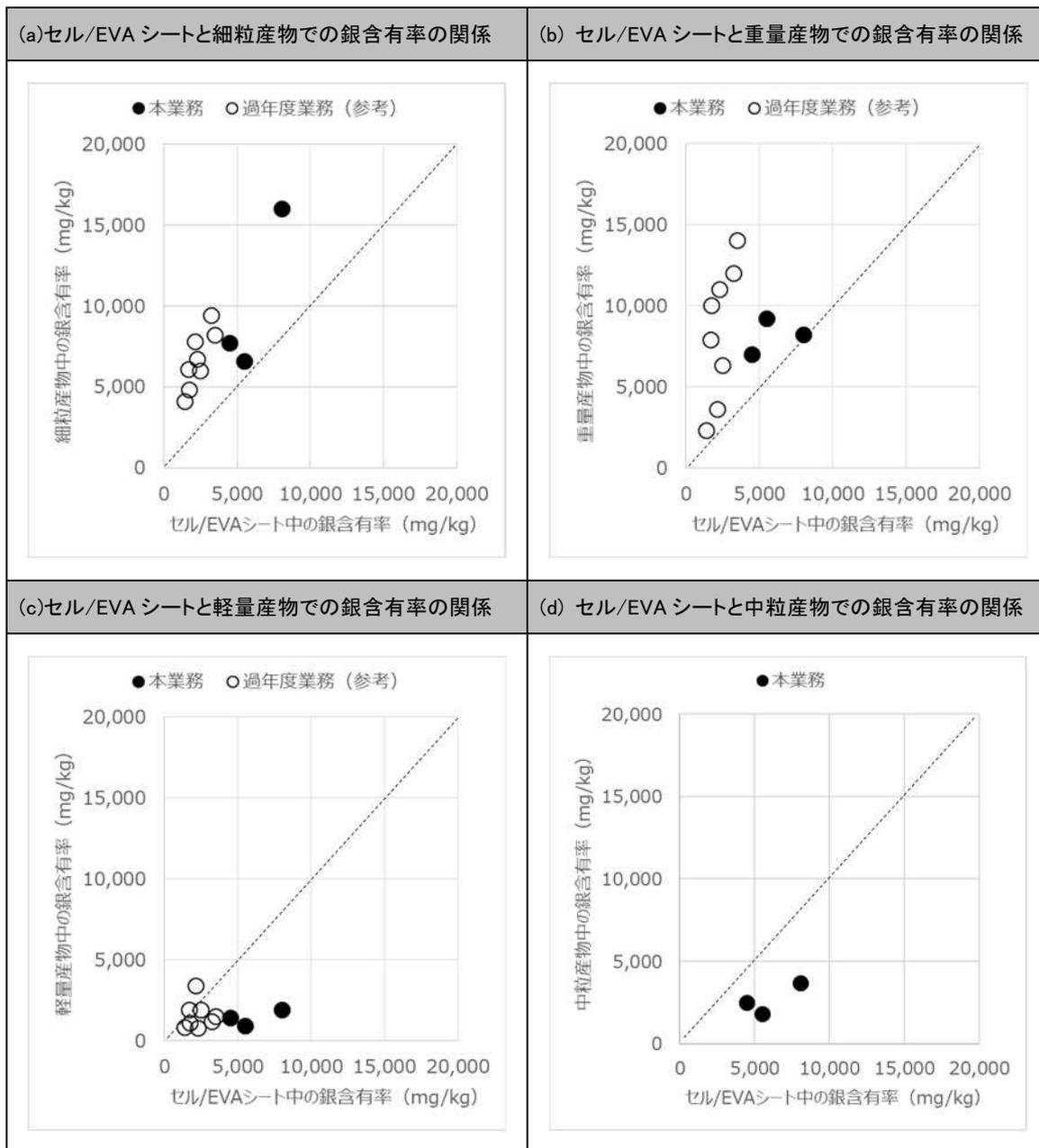
型番	産物	含有率 (mg/kg)		
		銅	銀	鉛
型番 1	細粒産物	3,700	16,000	9,800
	重量産物	870,000	8,200	38,000
	軽量産物	75,000	1,900	2,000
	中粒産物	10,000	3,700	7,100
型番 2	細粒産物	3,600	7,700	7,000
	重量産物	860,000	7,000	34,000
	軽量産物	580	1,400	570
	中粒産物	11,000	2,500	8,000
型番 3	細粒産物	1,400	6,600	2,400
	重量産物	890,000	9,200	35,000
	軽量産物	4,900	920	350
	中粒産物	7,600	1,800	1,100

(出所) E&ES



(注 1)過年度業務(参考)は、参考値として、過年度業務の値を示す。過年度業務(参考)のサンプルとしては、型番の数としては特殊品であった型番 1 と型番 9 を除いた計 8 つの型番、ブラスト方式を施されたものを指す。
(注 2)過年度業務では中粒産物中の金属の含有率の値は公表されていないため、上図ではblankとした。
(出所)E&ES

図 II-14 セル/EVAシートと物理選別で得られる各産物での銅含有率の関係

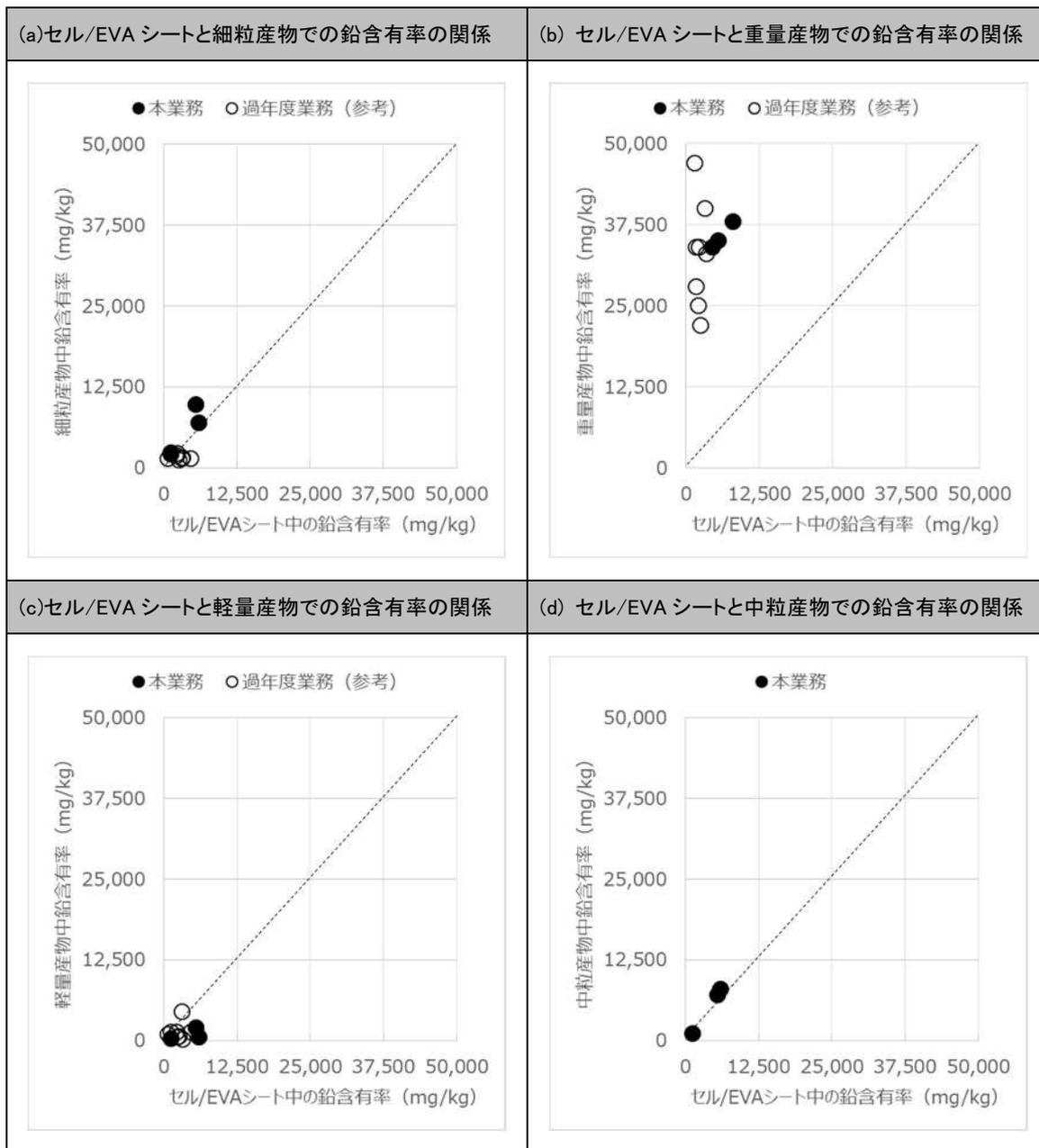


(注 1)過年度業務(参考)は、参考値として、過年度業務の値を示す。過年度業務(参考)のサンプルとしては、型番の数としては特殊品であった型番 1 と型番 9 を除いた計 8 つの型番、ブラスト方式を施されたものを指す。

(注 2)過年度業務では中粒産物中の金属の含有率の値は公表されていないため、上図ではブランクとした。

(出所)E&ES

図 II-15 セル/EVAシートと物理選別で得られる各産物での銀含有率の関係



(注 1) 過年度業務(参考)は、参考値として、過年度業務の値を示す。過年度業務(参考)のサンプルとしては、型番の数としては特殊品であった型番 1 と型番 9 を除いた計 8 つの型番、ブラスト方式を施されたものを指す。

(注 2) 過年度業務では中粒産物中の金属の含有率の値は公表されていないため、上図ではblankとした。

(出所)E&ES

図 II-16 セル/EVAシートと物理選別で得られる各産物での鉛含有率の関係

II-3 運用検証

II-3-1 原料評価を含む集荷のあり方

セル/EVA シートは、その集電線のうちインターコネクタは通常鉛はんだでコーティングされているものであり、また集電電極も通常わずかながら鉛が含まれているものである¹⁴。そのため、有害物である鉛の拡散をできるだけ防止するという観点からは、セル/EVA シート中の鉛について、処理が行われる工程でトレーサビリティが確保されていることが望ましい。なお、セル/EVA シートの集電線には非鉄金属が使用されていることから、セル/EVA シートを有価物として取り扱うことを試みる業者も存在する。ただし、仮に有価物として取り扱われると、鉛の適正処分が行われたかどうかは確認し難い。

本業務では、太陽光パネルを産業廃棄物として扱うとともに、ジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離することで得られるセル/EVA シートも産業廃棄物として扱い、廃棄物処理法および PVCJ による自主的取り組みの下で、セル/EVA シート中の鉛のトレーサビリティを確保することを想定している。本業務の出口戦略の検討パートの中で、セル/EVA シートの取扱いのあり方に関する検証結果を述べる(本報告書 V-1-3 参照)。

II-3-2 設備の運用のあり方

(1) 残渣の処理

セル/EVA シートの物理選別で得られる産物のうち軽量産物および中粒産物は、製錬原料にはなり得ず、そのため軽量産物および中粒産物は適正処分し、または主に樹脂から構成される軽量産物は固形燃料化して利用することが考えられる。

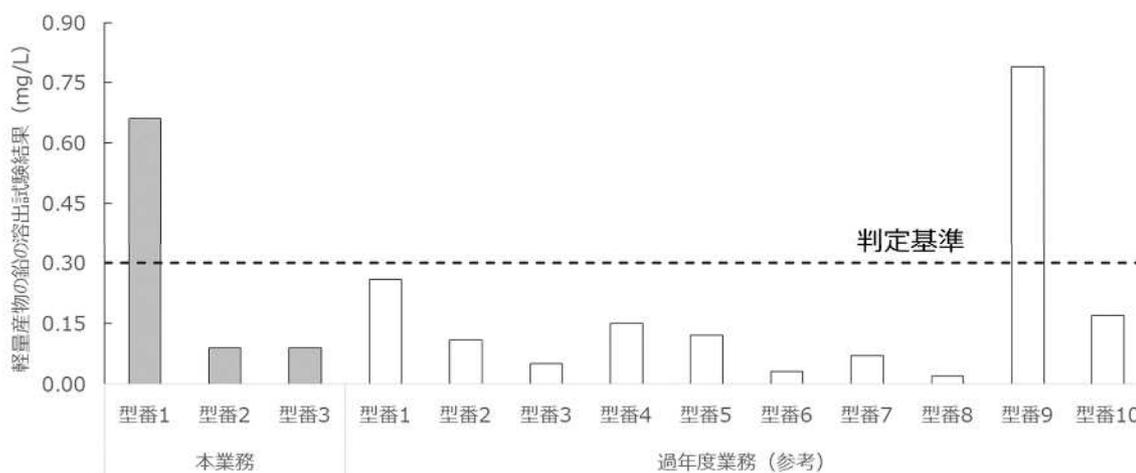
まず、軽量産物および中粒産物を管理型最終処分場で埋立処分することを考える。本業務では、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」(公布日:昭和 48 年 2 月 17 日、環境庁告示 13 号)にしたがって、軽量産物と中粒産物について鉛の溶出試験を行った。結果は、

¹⁴ 本業務ではセル/EVA シートのリサイクル促進を目的としているものの、実態としては今後もセル/EVA シートが破碎され、埋め立て処分されることは起こり得る。そこで本業務では予察的に、破碎後のセル/EVA シートを管理型最終処分場で埋立処分する場合の留意事項について検討を行った。具体的には、本実証事業で入手した型番 1 のセル/EVA シートの物理選別を行い、各産物(細粒産物、重量産物、軽量産物、および中粒産物)それぞれに対して、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」(公布日: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い、各産物の重量割合にしたがってセル/EVA シートからの鉛の溶出結果を再構成した。結果、型番 1 のセル/EVA シートからの鉛の溶出試験結果は 0.14mg/L と評価された。これは「金属等を含む産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準」(鉛:0.3mg/L)を満たすため、鉛の溶出試験結果からは、管理型最終処分場が維持管理の観点から受け入れ可能であれば、追加処理を行わずに埋立できる性状である。ただし、試験方法が異なるため一概に比較はできない点に留意が必要であるが、鉛の溶出試験結果は鉛の土壤環境基準である 0.01mg/L を超過していることから、セル/EVA シートの破碎物は環境に放置せず管理すべきものであり、有害物質管理としてのトレーサビリティの確保が重要であると考えられる。

図 II-17 と図 II-18 に示すとおりである。型番 2 と型番 3 の軽量産物、および型番 1～3 の中粒産物は、鉛の溶出試験結果に基づくと、管理型最終処分場が維持管理の観点から受け入れ可能であれば、追加処理を行わずに埋立できる性状である。ただし、型番 1 の軽量産物の鉛の溶出試験結果は、「金属等を含む産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準」（鉛：0.3mg/L）を超過しているため、追加の処理を施して溶出値を下げなければ管理型最終処分場での処分は難しいと評価された。

これまでの知見では、破碎された太陽光パネル、あるいは裁断されたセル/EVA シートは、鉛を含む金属溶出はあったが、その濃度は管理型処分場への埋立処分に係る判定基準（環境庁告示 13 号）を超過することはないと言うこともあり、環境省（2018a）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）」（以下、「ガイドライン」）では埋め立ても否定されていなかった。

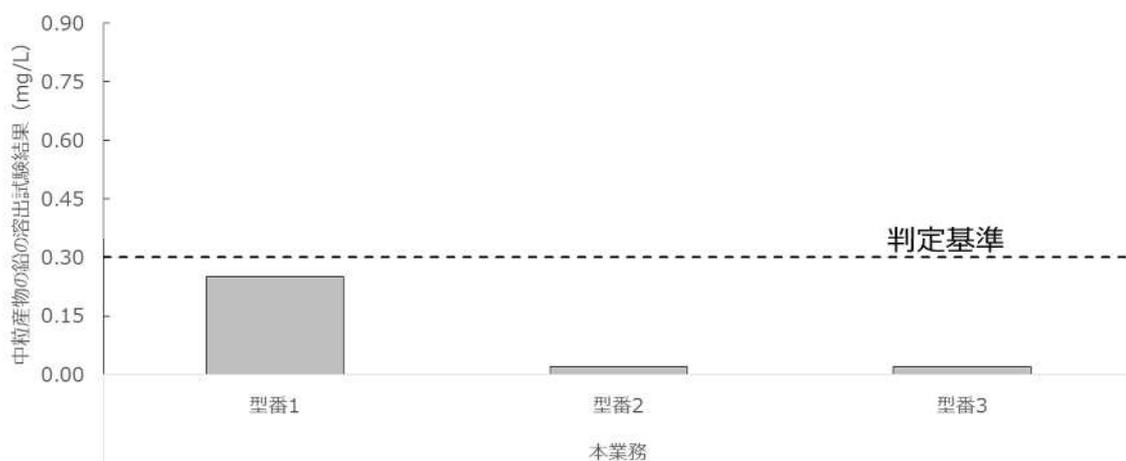
しかしながら、金属回収を目指しより細かな破碎選別を行った場合の軽量産物・中粒産物（シリコン、樹脂、金属、および残留するガラス）は、仮に直接埋め立てを行おうとする場合は、環境庁告示 13 号の判定基準を超過するものもあることがわかった。そのため、セル/EVA シートから金属を回収する工程では、産物や残渣を注意深く管理する必要があることが示唆された。



(注 1) 過年度業務(参考)は、参考値として、過年度業務の値を示す。過年度業務(参考)のサンプルとしては、プラスト方式を施されたものを指す。

(出所)E&ES

図 II-17 軽量産物の鉛の溶出試験結果



(注 1) 過年度業務(参考)は、参考値として、過年度業務の値を示す。過年度業務(参考)のサンプルとしては、プラスト方式を施されたものを指す。

(注 2) 過年度業務では中粒産物の中利の溶出試験結果は公表されていないため、上図ではblankとした。

(出所)E&ES

図 II-18 中粒産物の鉛の溶出試験結果

次いで、主に樹脂から構成される軽量産物については、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-8 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。

表 II-8 軽量産物の工業分析結果

型番	高位発熱量	水分	灰分	塩素	フッ素	
	J/g	%	%	%	%	
型番 1	34,800	0.6	18.93	<0.01	<0.01	
型番 2	32,400	0.5	21.94	<0.01	<0.01	
型番 3	32,500	0.6	21.61	<0.01	<0.01	
RPF の品質 (参考)	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。

(出所)E&ES

(2) 濃縮処理の有効性

本業務では、セル/EVA シートの濃縮処理の有効性を評価した。評価にあたっては、1トンのセル/EVA シートを濃縮することを想定し、ヒアリングを通して費用の原単位を収集した¹⁵。まず、セル/EVA シートの物理選別を行うことで、1) 120kg の細粒産物、2) 60kg の重量産物、3) 720kg の軽量産物、4) 100kg の中粒産物の 4 つの産物が得られると想定する。

1)～4)の産物のうち、1)と 2)は製錬原料としての価値を有し、その価値は次のとおり評価され得る。すなわち、1)は銀品位を 0.7 重量%および銀の製錬実収を 96%と想定すると、52,000 円の価値である。2)は銀品位を 0.8 重量%および銀の製錬実収を 96%、ならびに銅品位を 79 重量%および銅の製錬実収を 97%と想定すると、67,000 円の価値である¹⁶。

一方、物理選別の費用として、物理選別の設備の減価償却費、および運転費が発生する。減価償却費は、200kg/時の処理能力の物理選別設備に対して一定の処理量を想定し、70,000 円と仮定した。物理選別の運転費用は、35,000 円と想定した。加えて、製錬の費用として、熔錬費および精製費が発生する。細粒産物と重量産物の熔錬費は、12,000 円と想定した。ここには、鉛が含まれることのペナルティーも含まれている。銀と銅の精製費はそれぞれ 3,000 円、精製費は計 6,000 円と想定した。軽量産物・中粒産物は、熱処理して、熱処理後の残渣は管理型最終処分場に埋立処分することを想定し、45,000 円の費用と想定した。

結果、製錬原料としての評価価値は 119,000 円であるものの、処理費用が 168,000 円であることから、濃縮処理の利益なしの原価は-49,000 円/t と評価された。ここで、仮にセル/EVA シートが破碎され、その後減容のために熱処理され、熱処理後の残渣が管理型最終処分場で処分される場合の処理単価を 90 円/kg と想定すると¹⁷、濃縮処理の処理単価は、破碎・熱処理・熱処理後の残渣の処分の処分単価と大きな相違が生じることなく設定でき得ると評価された。

¹⁵ ヒアリング協力者からの要請で出所と一部の原単位は本報告書では非開示。

¹⁶ 銀と銅の価格はそれぞれ 69 円/g と 0.75 円/g とした。これは 1 米ドルを 110 円とした場合の 2006～2021 年までの LME 価格の平均値である。

¹⁷ ガイドラインに従って、太陽光パネル(セル/EVA シートを含む)は、管理型最終処分場で中間処分を経ないものは受け入れられない、または太陽光パネルは安定型最終処分場では処分されないと仮定。

第Ⅲ章 処理ルート構築の運用検証

本業務では以下をねらいとして、埼玉県¹⁸で太陽光パネルの回収実証実験を行った。

- 住宅用太陽光発電所で発生する太陽光パネル(以下、「住宅用太陽光パネル」)の適正処理を、本報告書第Ⅲ章で取り扱う主なテーマとする。
- 住宅用太陽光パネルのように、少量が、広い範囲で、不定期に発生する太陽光パネルの回収方法としては、太陽光パネルを回収する拠点(以下、「回収拠点」)を設置し、そこに太陽光パネルが持ち込まれるフロー(以下、「拠点回収」)¹⁹を想定する。
- 本業務では、廃棄物処理法に従って住宅用太陽光パネルの拠点回収を行うことを想定し、その運用上の課題を整理することを目的とした。
- 本業務の成果を踏まえて、住宅用太陽光パネルの収集ルートが構築され、それが将来的に本報告書 V-1 で議論する PVCJ の認証ルートにあてはまることが期待されるが、本業務では太陽光パネルの収集ルートの PVCJ の認証ルートへのあてはめの検証は業務の範囲に含めない。

Ⅲ-1 拠点回収の運用検証

Ⅲ-1-1 検証方法の概要

(1) 回収実証実験の主な流れ

本業務の回収実証実験のフローを図 III-1 に示す。ポイントは以下のとおりである。

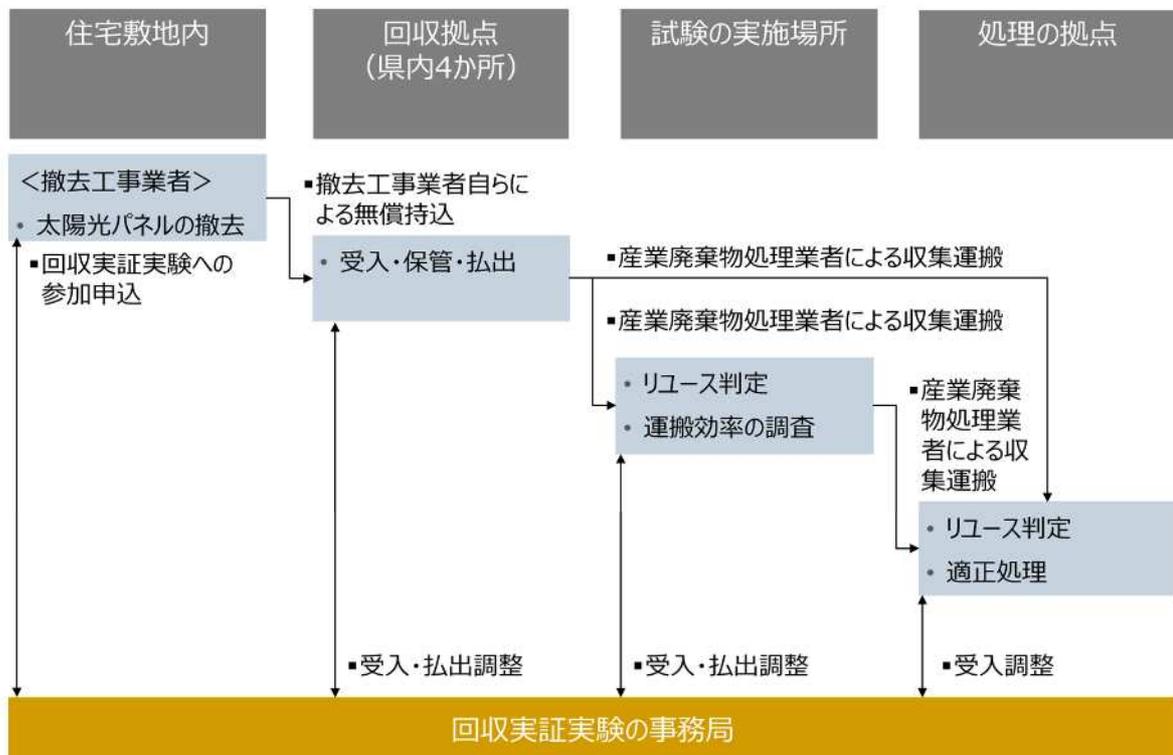
- 回収実証実験は、2021年7月1日～12月24日の期間に実施した。
- 主に住宅敷地内で住宅用太陽光パネルの撤去工事を行う業者を対象に広報を行った。
- 基本的に住宅用太陽光パネルの撤去工事業者自らが、回収拠点への太陽光パネルの持ち込みを行った。回収拠点は、持ち込まれた太陽光パネルを無償で引き取った。
- 回収拠点は、以下の産業廃棄物の収集運搬(積替え保管あり)の許可業者が担った(図 III-2 参照)。

◇ 株式会社河野解体工業(埼玉県久喜市)

¹⁸ 過年度業務の検討結果によると、2020年3月末時点で、埼玉県の住宅用太陽光発電所(出力:10kW未満)の導入容量は612MW、導入件数は約150,000件である。これは愛知県に次いで全国に2番目に多い導入量である。本業務では、住宅用太陽光パネルの導入量が多い埼玉県をフィールドとして、実際に住宅用太陽光パネルの回収実証実験を行うことを通して、住宅用太陽光パネルの適正処理に係る課題の洗い出し・整理・とりまとめを行った。

¹⁹ 太陽光パネルの拠点回収は欧州ですで行われ、わが国でもこれまでも試験的に検討が行われたことがある。例えば、E&ES(2016)、E&ES(2017)、株式会社三菱総合研究所(2018)、および株式会社三菱総合研究所(2019)には、住宅用太陽光パネルに限ってはいないが、拠点回収を通した太陽光パネルの回収の試験結果が掲載されている。なお、太陽光パネルの撤去現場に収集運搬業者が、その都度赴いて、太陽光パネルを収集運搬する回収方法は、廃棄物処理法にしたがって通常行われるものであることから、本業務で特段注力して検討する対象としては扱わなかった。

- ◇ 株式会社サニタリーセンター(埼玉県本庄市)
- ◇ 株式会社ワイエムエコフューチャー(埼玉県草加市)
- ◇ 松田産業株式会社(埼玉県狭山市)
- 本業務で回収した太陽光パネルのうち一定量を用いて、太陽光パネルのリユース・運搬効率に関する基礎データ取得のための試験を CESS で行った。
- CESS での試験に供した太陽光パネルを除き、本業務で回収したすべての太陽光パネルは、産業廃棄物の処分業の許可を持つ処理の拠点でリユース判定を行った。不良品でないと判定され、引き取り手が見つかった太陽光パネルは、リユース品としての販売も行った。
- リユース品として販売された太陽光パネルを除き、本業務で回収したすべての太陽光パネルは処理の拠点で処理した。
- 回収実証実験へ参加申し込みをした主体と回収拠点、回収拠点と CESS、回収拠点と処理の拠点、および CESS と処理の拠点は直接コミュニケーションを取らず、いずれのコミュニケーションも事務局(PVCJ、NER、または E&ES)が仲介した。



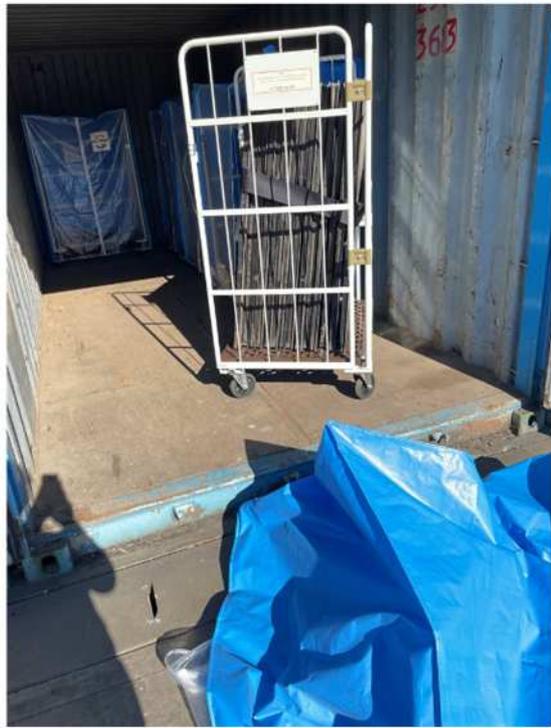
(出所)E&ES

図 III-1 回収実証実験のフロー

株式会社河野解体工業
(埼玉県久喜市)



株式会社サニタリーセンター
(埼玉県本庄市)



株式会社ワイエムエコフューチャー
(埼玉県草加市)



松田産業株式会社
(埼玉県狭山市)

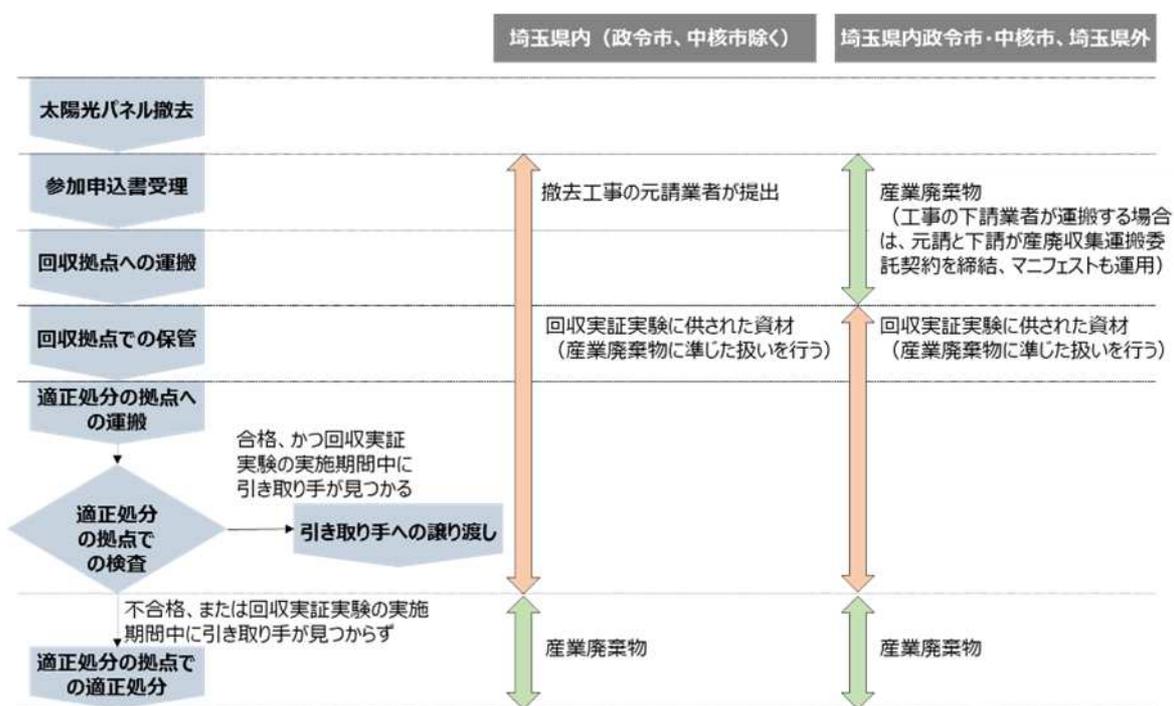


(撮影)E&ES

図 III-2 回収拠点での太陽光パネルの保管場所

(2) 回収実証実験の下での廃棄物処理法への対応

回収実証実験の下での廃棄物処理法への対応にあたっては、太陽光パネルの撤去場所が、政令市および中核市を除く埼玉県内に位置するか、もしくは埼玉県内の政令市、中核市、または埼玉県外に位置するかで、異なる対応を行った(図 III-3 参照)。



(出所)E&ES

図 III-3 回収実証実験の下での廃棄物処理法への対応

- 太陽光パネルの撤去場所が政令市および中核市を除く埼玉県内に位置する場合
 - 回収実証実験の参加申込書(図 III-4 参照)を、回収実証実験の事務局が受理した段階で、太陽光パネルを資材として扱った²⁰。その後、撤去現場から回収拠点までの太陽光パネルの運搬、回収拠点での太陽光パネルの保管、回収拠点から処理の拠点への太陽光パネルの運搬、処理の拠点での太陽光パネルの保管、処理の拠点でのリユースの検査、および検査合格品のリユース品としての引き取り手への譲り渡しはいずれも、太陽光パネルを資材として扱った。
 - 処理の拠点でリユース検査を行い、リユース検査に不合格、または合格したが回

²⁰ 撤去現場から回収拠点までの太陽光パネルの運搬は、産業廃棄物の取扱いに準じて、運搬車両へ必要な掲示を行い、ドライバーは必要な書類を提携した。また、回収拠点は、産業廃棄物の収集運搬(積替え保管あり)の許可業者が担い、回収拠点から処理の拠点までの運搬も産業廃棄物の収集運搬の許可業者が担った。すなわち、資材であっても産業廃棄物に準じて太陽光パネルを取り扱った。

収実証実験期間中に引き取り手が見つからなかった太陽光パネルは、産業廃棄物として処理した。

- 太陽光パネルの撤去場所が政令市または中核市、または埼玉県外に位置する場合
 - ◇ 回収拠点での太陽光パネルの受け入れが完了するまでは、太陽光パネルを産業廃棄物として扱った。回収拠点で太陽光パネルの受け入れが完了した後は、太陽光パネルを実証事業に供された資材として扱った。そのため、太陽光パネルの撤去工事の下請業者が回収拠点まで太陽光パネルを運搬する場合は、廃棄物処理法に従って当該撤去工事の元請業者と当該下請業者が産業廃棄物収集運搬委託契約を締結し、元請業者はマニフェストも発行した。
 - ◇ 回収拠点で太陽光パネルを受け入れた後は、上記の「撤去場所が政令市および中核市を除く埼玉県内に位置する場合」と同様に太陽光パネルを取り扱った。

また、回収実証実験の事務局は、回収拠点に太陽光パネルが持ち込まれる前に、太陽光パネルの撤去現場・回収拠点が位置する自治体の産業廃棄物所管部署に対して、本実証事業の概要、および廃棄物処理法への対応方針の説明を行った。なお、自治体への説明にあたっては、所在不明な太陽光パネルが生じないように管理を行うと説明した。

具体的には、回収実証実験で回収した各太陽光パネルには ID を付与するとともに(図 III-5 参照)、回収実証実験の中で簡易的なデータベースを構築し、各太陽光パネルの入出荷が行われるたびにデータベースを更新した。すなわち、各太陽光パネルが、ある時点でどこにあるかを、デジタル上でも追跡できるように管理を行った(図 III-6 参照)。

		提出日: 2021 年 月 日
<提出先> PV CYCLE JAPAN 担当者 電話番号 電子メールアドレス: 実証事業のホームページ: https://www.jpvcollection.jp/		
令和3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)		
回収事業への参加申込書		
提出者の連絡先	組織名	
	住所	
	氏名	
	電話番号	
	電子メールアドレス	
太陽光パネルの概要	種類(○で選択)	<input type="radio"/> シリコン系 <input type="radio"/> 化合物系(CIS系・CdTe系)
	数量	枚
	現在の保管場所(住所) 型番(もし分かれば)	
搬入の概要	搬入希望の回収拠点 (○で選択ください)	<input type="radio"/> 1: [狭山市]松田産業(株) <input type="radio"/> 2: [久喜市](株)河野解体工業 <input type="radio"/> 3: [本庄市](株)サニタリーセンター <input type="radio"/> 4: [草加市](株)ワイエムエコフューチャー
	搬入希望日	2021 年 月 日
	搬入時荷姿 (○で選択。「3. その他()」選択の場合、括弧内に搬入時荷姿を記入)	<input type="radio"/> 1: パレット積み <input type="radio"/> 2: バラ積み <input type="radio"/> 3: その他()
	本書類の提出者は、本実証事業のホームページ(https://www.jpvcollection.jp/purpose)に掲載の本実証事業の主旨に賛同し、以下の5点に留意して、太陽光パネルを回収拠点に自ら搬入する。	
	1.	太陽光パネルの運搬車には、必要な表示を行い、また必要な書類の備え付けを行う。表示する事項と備え付ける書類への記載事項は、以下に準じるとともに、備え付ける書類の書式は本実証事業のホームページ(https://www.jpvcollection.jp/participate)を参照する。 http://www.env.go.jp/recycle/waste/pamph/
2.	外観から著しく破損していることが分かる太陽光パネルは、回収拠点で受け取りを拒否することがある。	
3.	本書類の提出者は、本実証事業の事務局に対して、太陽光パネルの回収拠点への搬入に要する費用、または太陽光パネルの譲渡に伴う費用を請求しない。また、本実証事業の事務局も、本書類の提出者に対して、太陽光パネルの提出者に対して、太陽光パネルの譲渡に伴う費用を請求しない。すなわち、本書類の提出者は、自らの費用で回収拠点に太陽光パネルを搬入し、回収拠点に太陽光パネルを無償で譲渡する。	
4.	回収拠点に搬入された太陽光パネルに対しては、本実証事業事務局により再使用可否を判別する検査が行われる。再使用でき得ると判別された太陽光パネルについては、使用済製品として使用されることを拒否しない。	
5.	解体工事業者・撤去工事業者が本書類の提出者の場合は、当該工事の発注者に対して、以下の文書を案内するとともに、本実証事業の主旨の説明を行い、発注者の理解を得た上で、本回収事業に参加する。 http://www.env.go.jp/recycle/refa.pdf	
アンケート(分かる範囲で回答)	撤去前設置場所(○で選択ください)	<input type="radio"/> 住宅屋根 <input type="radio"/> 架台(野立て)
	撤去現場(住所)	
	撤去総枚数	枚
	撤去理由 (○で選択。「8. その他()」選択の場合、括弧内に撤去理由を記入)	<input type="checkbox"/> 1: 余剰電力買取制度またはFIT制度の買取期間が終了したため <input type="checkbox"/> 2: 初期投資を回収したため <input type="checkbox"/> 3: 自然災害(台風、地震等に起因する災害)で破損したため <input type="checkbox"/> 4: 自然災害以外の要因(カラスの落石等)で破損したため <input type="checkbox"/> 5: 性能向上を目的として新パネルへ交換したため <input type="checkbox"/> 6: 付帯設備であるパワーコンディショナーが機能していないため <input type="checkbox"/> 7: 不明(発電事業者から撤去理由を聞いていないため) <input type="checkbox"/> 8: その他()
	撤去費用(もし分かれば)	円(税抜)
	撤去費用には産業廃棄物処理費用が含まれますか?(○で選択)	<input type="radio"/> 1: はい <input type="radio"/> 2: いいえ <input type="radio"/> 3: 不明
	産業廃棄物処理費用(もし分かれば)	円(税抜)
備考・通信欄		

(出所)E&ES

図 III-4 回収実証実験への参加申込書



(注)回収実証実験で回収した太陽光パネルの裏面。「001」が当該太陽光パネルに付与した ID。
 (出所)E&ES

図 III-5 回収実証実験で回収した太陽光パネルに付与した ID

PVモジュール管理_ver1 (meta2021)
 ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(M) レコード(R) スクリプト(S) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

40 合計 (未ソート) レコード

すべてを表示 新規レコード レコード削除 検索 ソート 共有

レイアウト: 一覧/パネル 表示方法の切り替え: フレッシュ レイアウトの編集

パネル一覧

保管場所でのフィルタ

撤去業者 松田産業 阿野解体工業 サコタニセンター YM Eco CESS UWJ 輸送中 すべて

パネル合計: 40 枚

PM ID	保管場所	申込番号	回収拠点名	回収拠点入荷日	CESS入荷日	UWJ入荷日	最終出荷先	事務局メモ
001	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				
002	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				
003	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				
004	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				
005	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				
006	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				
007	松田産業	MO03	松田産業	2021/08/10				

(注)「PM ID」が回収拠点で回収した太陽光パネルに付与した ID を指す。
 (出所)Clariss International Inc. の Clariss FileMaker を用いて E&ES が作成

図 III-6 太陽光パネルの個体管理のデータベースのスクリーンショット

(3) 広報の概要

本業務では、回収実証実験の下での太陽光パネルの回収量向上を目的として、主に住宅敷地内で住宅用太陽光パネルの撤去工事を行う業者を対象に、以下のとおり広報を行った。

- 回収実証実験専用ウェブページの公開
- 回収実証実験のチラシの作成、業界団体または個別の企業へのチラシの配布
- 本業務の実施主体等のウェブページでの回収実証実験に係る広報
- 住宅系の業界団体との意見交換

また、上記の広報を行った結果、各種メディアでも本業務の下で回収実証実験が行われている旨が取り上げられた(本報告書第 VII 章参照)。

■ 回収実証実験専用ホームページの公開

本業務では、回収実証実験専用のホームページを構築し、2021年7月1日～12月18日までの期間、「<https://jpvcollection.jp>」の URL で公開した(図 III-7 参照)。回収実証実験専用ウェブページからは、回収実証実験への参加申込書(図 III-4 参照)を入手できるようになっていた。



(注)本ウェブページは2022年7月1日～12月18日までの期間公開されていた。2022年2月1日現在は閉鎖中。
(出所)E&ES

図 III-7 回収実証実験専用ウェブページのトップページ

■ チラシの作成と配布

本業務では、回収実証実験のチラシを作成した(図 III-8 参照)。本業務で作成したチラシは、埼玉県内の解体工事の業界団体、埼玉県内で住宅産業の発展のために活動を行っている業界団体、全国規模で活動を行う住宅メーカーの業界団体に配布を行うとともに、回収実証実験の紹介のために適宜個別の企業への広報資料として使用した。



環境省令和3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）



太陽光パネルの回収事業を行います



回収事業へご協力ください。
～不要になった太陽光パネルを回収しています～

環境省の太陽光パネルのリユース・リサイクル推進を目的とした実証事業の下で、住宅用太陽光パネル導入量が全国で2番目に多い埼玉県をフィールドにして、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構築に向けて、太陽光パネルの回収事業を行います。

回収事業の期間中、不要になった太陽光パネルを、回収拠点で無償で引き取ります。不要になった太陽光パネルを回収拠点までお持ち込みください。ただし、外観から著しく破損していることが分かる太陽光パネルは、引き取り対象外です。

回収拠点への太陽光パネルの持ち込み前に、PV CYCLE JAPANへ参加申込書を提出いただく必要があります。申込書受領後、回収拠点での受取の段取りの相談のため、折り返し連絡します。

＜回収事業の実施期間＞
● 2021年7月1日～12月31日
※ 回収事業の実施期間内であっても、一定の目標枚数を回収した段階で、回収事業を終了いたします。

回収事業への参加方法等の詳細情報は、ホームページをご覧ください。
<https://www.jpvcollection.jp>



太陽光パネルの回収拠点を埼玉県内に4か所設置

● 回収拠点の位置



埼玉県マスコット「コバトン」

(出所)E&ES

図 III-8 回収実証実験のチラシ

■ 本業務の実施主体等のウェブページでの回収実証実験に係る広報

本業務では、2021年7月1日にはPVCJのウェブページで、2021年8月2日にはNERとE&ESのウェブページで、2021年9月2日には埼玉県の記事発表資料のウェブページで、回収実証実験を行っている旨を広報した(図 III-9～図 III-12 参照)。各ウェブページには、回収実証実験専用のウェブページの URL へのハイパーリンクを付した。



(出所)PVCJ ウェブサイト, <https://pvcycle.jp/%e4%ba%8b%e6%a5%ad%e6%a6%82%e8%a6%81/>、2022年2月24日取得

図 III-9 PVCJ のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報



(出所)NER(2021)

図 III-10 NER のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報



(出所)E&ES(2021)

図 III-11 E&ES のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報



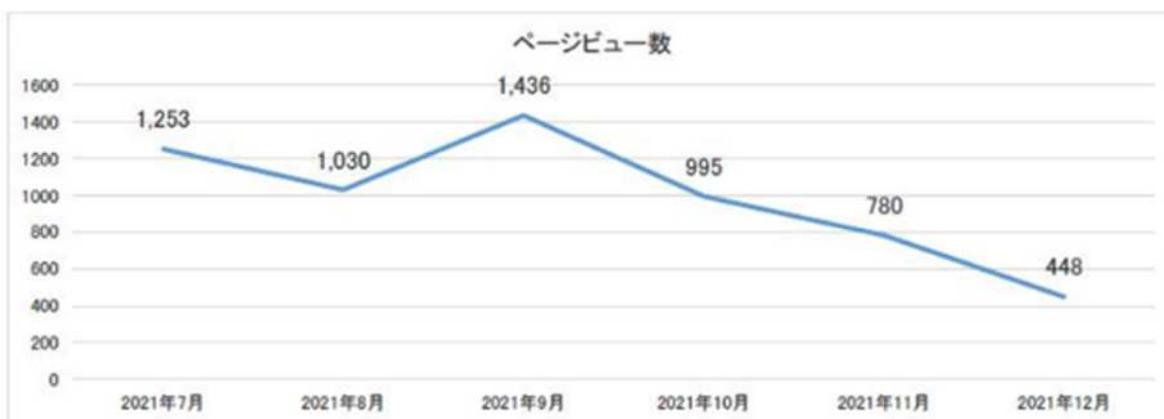
(出所)埼玉県(2021)

図 III-12 埼玉県のウェブサイトでの回収実証実験に係る広報

なお、本業務では、回収実証実験専用のウェブページ(URL:「<https://jpvcollection.jp>」)を公開していた2021年7月1日～12月18日の期間を対象に、当該ウェブページのアクセスログを収集し、集計した(図 III-13 参照)。結果、ウェブページを公開した7月のページビュー数は1,000を超えており、8月にいったんページビュー数は減り、9月のページビュー数は他の月に比べて最も多かった。これは、9月2日に埼玉県が回収実証実験を行っている旨を報道発表(図 III-12 参照)し、その後、同日の9月2日には環境展望台とスマートメディア

が、9月6日には環境ビジネスオンラインが回収実証実験を取り上げたためと推測される。

回収実証実験で太陽光パネルを集めるポイントは、不要になった太陽光パネルの保有者(潜在的な保有者含む)に対して、いかに回収実証実験を行っていることを知ってもらうかにかかっている。回収実証実験を知らない、太陽光パネルの保有者(潜在的な保有者含む)へのアプローチという点で、埼玉県の記事発表は重要な役割を果たしたと考えられる。



(注)ウェブページの公開期間中での総ページビュー数は5,942ページビューであった。

(出所)E&ES(2021)

図 III-13 回収実証実験専用ウェブページのページビュー数

■ 住宅系の業界団体との意見交換

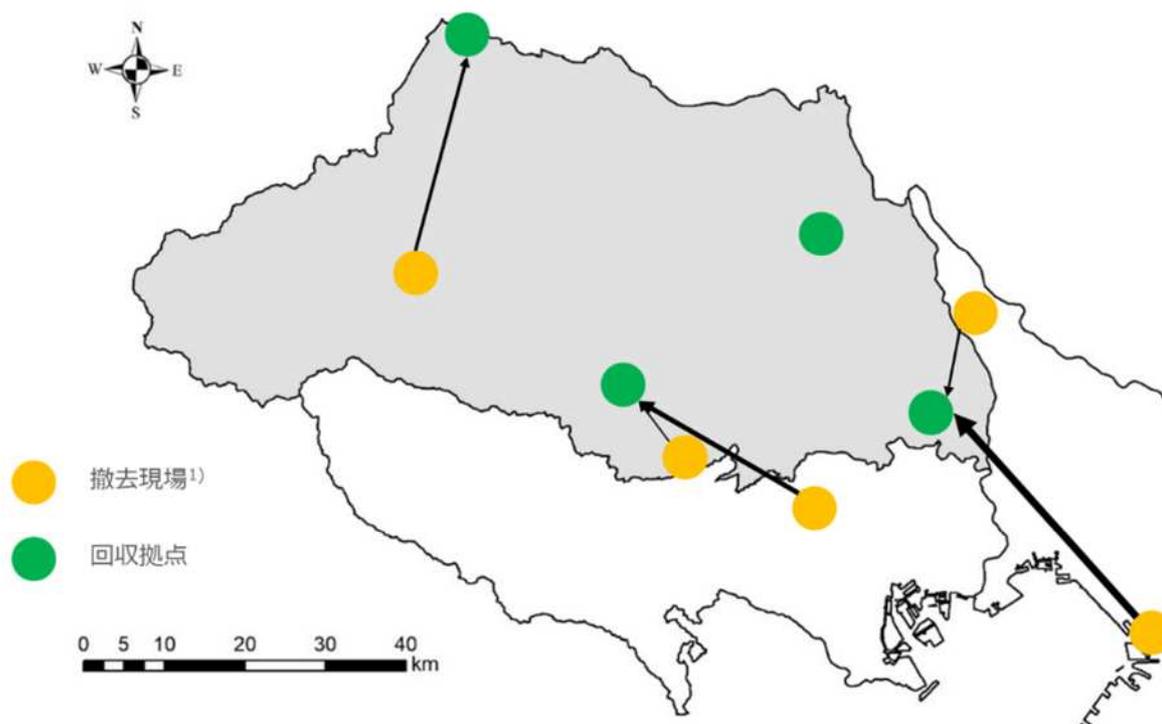
埼玉県内で住宅産業の発展のために活動を行っている業界団体、全国規模で活動を行う住宅メーカーの業界団体と各1回、計2回意見交換を行った。主な聞き取り事項は以下のとおりである。

- 仮に埼玉県およびその周辺で住宅用太陽光パネルの撤去案件が確認された場合は、可能な範囲で回収実証実験の事務局に連絡をして、本業務に協力したい。
- 我が国で住宅用太陽光パネルの導入が加速され始めたのは15年程度前である一方で、住宅の寿命は15年よりも長いことから、現時点で住宅用太陽光パネルが廃棄物として大量に発生して、困っているという話はまだまだあまり聞かない。

III-1-2 住宅用太陽光発電所からの太陽光パネルの排出要因と排出される太陽光パネルの特徴

(1) 排出要因

回収実証実験を行うことで、合計 5 か所の撤去現場から、合計 154 枚の住宅用太陽光パネルを回収した。5 か所の撤去現場の中で、3 か所が屋根工事に伴う太陽光パネルの撤去、1 か所が住宅解体に伴う太陽光パネルの撤去であった(図 III-14 および表 III-1 参照)。



1) 個人情報保護の観点から撤去現場の位置は表示せず、代わりにその撤去現場が立地する市区の市区役所の位置を表示。

(出所)ESRI 社の ArcGIS を用いて E&ES が作成

図 III-14 回収実証実験での住宅用太陽光パネルの回収実績

表 III-1 住宅用太陽光パネルの撤去要因

撤去現場	撤去工事の発注者	撤去業者 ¹⁾	撤去枚数	撤去要因
東京都練馬区	不特定	ハウスメーカー	40	屋根工事
千葉県野田市	個人	リフォーム業者	18	屋根工事
埼玉県秩父市	個人	屋根工事業業者	26	屋根工事
埼玉県所沢市	不動産業者	解体業者	13	住宅解体
千葉県千葉市	-	ハウスメーカー	57	在庫管理の一環 ²⁾

1) 工事の元請け業者。

2) 研修の一環で住宅用太陽光パネルを使用。研修では、模擬的な屋根を用いて太陽光パネルの設置・撤去を実施。
(出所)E&ES

回収実証実験を行うことで、以下のことが明らかになった。

- 本業務実施前は、住宅用太陽光パネルは主に建物の解体に伴って排出されると予想していたものの、予想に反して主に屋根工事に伴い排出されていた。資源エネルギー庁(2021)でも、出力 10kW 未満の太陽光発電所(いわゆる住宅用太陽光発電所)は、建物の解体と同時に撤去・処分される場合が多いと想定されるという背景を踏まえて、外部積立の対象外となっている。仮に、住宅用太陽光パネルの主な撤去要因が屋根工事に伴うものであっても、FIT 法の撤去・廃棄の積立金制度から住宅用太陽光パネルを除外した前提条件が成立するのか、更なる調査の意義が示唆された。

(2) 太陽光パネルの特徴(リユースをする上での課題を含む)

回収実証実験で回収した太陽光パネルを図 III-15 に示す²¹。回収実証実験を通して分かったことは、以下のとおりである。

- 回収した住宅用太陽光パネルはいずれも国産メーカーのものであった。
- 裏面が変色している住宅用太陽光パネルがあることが分かった(図 III-16)。リユース品として販売しようとした場合、性能等で問題がない場合でも購入者はこれをマイナス要素として捉える可能性がある。
- 現在の非住宅の太陽光パネルの出力は 250W を超えた出力が一般的になってきている。今回の収集パネルの出力は 250W が一件あったが、他は 200W 未満であった(68W~145W)。住宅用太陽光パネルをリユース品として販売しようとした場合、購入者に出力の低さが敬遠される可能性がある。
- 使用期間については、特定できないものが 3 件、10 年を大きく超えているものが 2 件であった。リユース品としての活用を考えた場合、購入可能性のある者が使用期間をどの程度マイナス要素として捉えるかは不明である。
- 本業務を通して、リユース可否の結果を左右する要因については、特定し難かった。例えば、図 III-15 で示す 68W の住宅用太陽光パネルはなぜ全量リユース可と判定され、130W の住宅用太陽光パネルはなぜ半数以上がリユース不可と判定されたのか、それらの要因は特定し難かった。

²¹ メーカーと出力は、太陽光パネルの裏面のラベルから読み取った。使用期間は、住宅用太陽光パネルの保有者(住宅のオーナー)へヒアリングすることで、可能な範囲で情報収集した。本報告書第 VI 章に示す機材を用いて、CESS および処理の拠点で、回収した各太陽光パネルに対して簡易リユース検査を行った。リユース可と判定された太陽光パネルの枚数も、図 III-15 に示した。

					
メーカー	SHARP	京セラ	三菱電機	東芝	京セラ
出力	130W	145W	134W	250W	68W
使用期間	不明	21年	14年	不明	不明
リユース検査結果が「リユース可」	11枚/40枚	11枚/18枚	22枚/26枚	7枚/13枚	57枚/57枚

(出所)E&ES

図 III-15 回収実証実験で回収した太陽光パネル



(注)左側と右側の太陽光パネルは、同一の型番であり、同一の撤去現場から撤去されたもの。
(出所)E&ES

図 III-16 回収した太陽光パネルの裏面

III-1-3 太陽光パネルの拠点回収、収集・運搬、リユース・リサイクル・処分を行う上での課題

(1) 拠点回収を行う上での課題

回収実証実験の実施期間終了後、回収拠点の役割を果たした事業者には、回収拠点の運

用上の課題をヒアリングした。主な聞き取り事項を廃棄物処理法に関連する課題と、事業面の課題を分けて整理すると、以下のとおりである。

- 廃棄物処理法に関連する課題

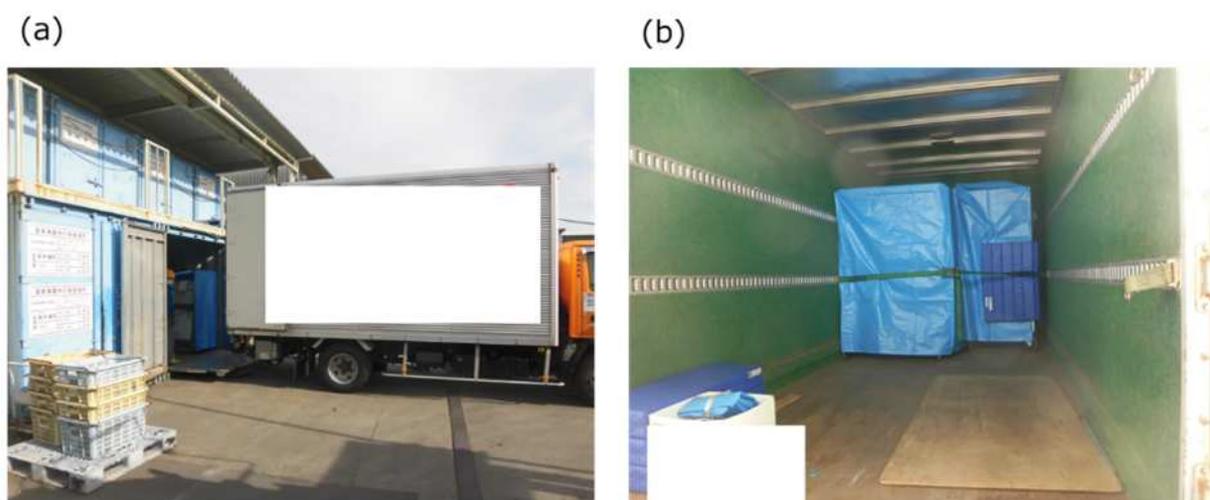
- ◇ 今後、自社が太陽光パネルの回収拠点の役割を担う場合、現在の収集運搬（積替え保管あり）の許可の範囲内で事業ができるのかが分からない。
- ◇ 現在の収集運搬（積替え保管あり）の許可の範囲内で実施できるか分からないことは、(1)回収拠点に入荷した太陽光パネルに対するリユース検査の実施と、リユース検査に合格し、引き取り手が見つかった太陽光パネルの取扱い、(2)回収拠点に入荷した太陽光パネルからのアルミフレームの分離と、分離したアルミフレームをスクラップとして買い取ってもらうこと、(3)回収拠点に入荷した太陽光パネルの一定量までの保管、である。
- ◇ マニフェストの返送期限のルールを遵守するという観点からは、回収拠点への太陽光パネルの入荷頻度・量が限られている現時点では、運送効率向上のために回収拠点で太陽光パネルを一定量になるまで保管することは難しいのではないかと。

- 事業面の課題

- ◇ 住宅用太陽光パネルは1ロットが小さいため、(1)本業務のように、回収実証実験の事務局が排出事業者・回収拠点・収集運搬業者・処理の拠点のコミュニケーションの仲介をする、および(2)積替保管費用を排出事業者が回収拠点に支払うのであれば、太陽光パネルの回収拠点を事業として行うことは検討可能。
- ◇ 本業務のように回収実証実験の事務局が、排出事業者と回収拠点のコミュニケーションの仲介をするのであれば、事務手続き軽減というメリットがある。
- ◇ リユース品となり得る太陽光パネルの取扱いには注意を払った。具体的には、産業廃棄物の数量はトラックスケールで計測、産業廃棄物の積替え保管はコンテナへのダンプアップで行っている一方、太陽光パネルの数量は枚数単位で計測し、太陽光パネルの積替え保管はかご台車への手作業での積替え、出荷もゲート車を使うものであった²²。太陽光パネルを扱う場合、その分追加の作業量が生じ得る。
- ◇ 本業務のように、回収実証実験の事務局が排出事業者と回収拠点のコミュニケー

²² 回収実証事業では、回収拠点に入荷された太陽光パネルをかご台車(外寸:1,100mm×800mm×1,700mm)で保管した(図 III-2 中の白色のかご台車が、本業務で用いたかご台車)。また、回収拠点から処理の拠点までの太陽光パネルの運搬では、ゲート車を用いた(図 III-17 参照)。

ションを仲介することにより、回収拠点の営業機会が抑制されることはないか。太陽光パネルを扱うことができるようになれば、他の建設系の産業廃棄物を取り扱う機会が増えることも期待され、事務手続き低減だけの視点だけでは、第3者による排出事業者と回収拠点のコミュニケーションの仲介の是非は議論し難い。



(注)(a)ゲート車の外観、(b)はゲート車の内観。
(出所)E&ES

図 III-17 回収拠点から処理の拠点まで太陽光パネルの運搬に用いたゲート車

(2) 収集・運搬を行う上での課題

■ 撤去現場から回収拠点までの運搬

図 III-18 には、回収拠点への太陽光パネルの入荷の様子を示す。撤去現場から回収拠点への太陽光パネルの入荷には、様々な種類の車両が使われることが分かった。また、運搬中の太陽光パネルの荷姿も、ばら積み、木箱内への保管、トラックとの接触面のみの養生など、各種荷姿があることも分かった。さらに、持ち込み対象の太陽光パネルの大きさや量に応じて、各排出事業者が都度、持ち込み車両と運搬中の荷姿を検討・決定している状況と考えられる。

太陽光パネルを安全に運搬するという観点からは、持ち込み車両と運搬中の荷姿を一定の範囲内で標準化することが望ましいと考えられた。ただし、標準化を図るにあたっては、持ち込み対象となる太陽光パネルの量と大きさが都度変わり得る点に留意が必要である。

■ 回収拠点から処理の拠点までの運搬

回収拠点から処理の拠点まで太陽光パネルを運搬する時にかご台車の中で太陽光パネ

ルが動いてしまい、太陽光パネルのガラスの破損・飛散が起り得ること、したがって安全に運搬するためには固定が重要な役割を果たすことが分かった。本業務では、両端にフックが付いている伸縮性のバンドを用いて太陽光パネルをかご台車に固定し、運搬を行ったところ、運搬時にかご台車の中で太陽光パネルは固定されたまま運搬することができ、安全な運搬を実現可能なことが分かった。

また、運搬中にケーブルの断線が発生しないように、図 III-16 に示すように、「太陽電池モジュールの適正なリユース促進ガイドライン」(令和3年5月、環境省)(環境省(2021b))に準じて、ケーブルを太陽光パネルの裏面にテープで固定した。

さらに、太陽光パネルは光があたると発電するものであることから、遮光の目的で、図 III-17 に示すとおり、太陽光パネルを保管するかご台車をビニール製のカバーで覆い、取り扱った。

回収拠点での太陽光パネルの入荷の様子 (事例1)



回収拠点での太陽光パネルの入荷の様子 (事例2)



回収拠点での太陽光パネルの入荷の様子 (事例3)



(出所)E&ES

図 III-18 回収拠点での太陽光パネルの入荷の様子



(出所)E&ES

図 III-19 伸縮性のバンドを用いた太陽光パネルのかご台車への固定

(3) リユースを行う上での課題

本業務では、回収実証実験で回収した太陽光パネルのうち、リユース可と判定されたものについては、新たな使用者を見つけることを行った。結果、図 III-15 に示す 145W の太陽光パネルのうち、リユース可と判定された太陽光パネル 10 枚については、引取価格はゼロ円、運賃は引き取り手負担で、新たな引き取り手に譲ることができた。引き取り手は、環境教育の一環で 3R(リデュース・リユース・リサイクル)の重要性を普及させる目的で、引き取った太陽光パネルをエコツアー客へのディスプレイ品として用いる予定である。

その他、公共施設での活用、工場屋根・地上設置型での活用、SDGs の教材としての活用の可能性を、自治体、太陽光発電所の設計・施工を行う業者、および大学関係者に聞き取ったものの、譲り渡しまでには至らなかった。この障害となったのは、太陽光パネルの設置場所が限定されていること、予算措置を講じるためには時間を要すること(本業務の実施期間中での予算確保が難しいこと)などの要因であった。

本報告書 III-1-2(2)で見たように、住宅用太陽光パネルは 10 年以上使用された後に廃棄物として発生し得るものである。リユース品として再設置して、再利用を考える場合には、住宅用太陽光パネルは、小出力で経年劣化も進んでいるであろうことから、新たに設置工事費を追加しての利用は難しいと本業務では考えた。また、住宅用太陽光パネルのリユースに関する検討をさらに進めるためには、様々な種類の住宅用太陽光パネルの特徴について、別途さらなる調査を行うことが望ましいと考えられる。

(4) リサイクル・処理を行う上での課題

本業務では、瓦一体型太陽光パネル²³は回収拠点への持ち込み対象外の品目として扱った。その理由は、技術面で、瓦一体型太陽光パネルを処理できるのか不確かであったためである。今後、瓦一体型太陽光パネルも排出されると想定されることから、処理の体制を整備しておくことが重要と考えられる。

(5) その他

回収実証実験を通して、住宅用太陽光パネルを設置している住宅所有者(個人)、および住宅用太陽光パネルの撤去工事を行う事業者からも、住宅用太陽光パネルの適正処理に係る課題を聞く機会があった。聞き取りで浮かび上がった主な課題は以下のとおりである。

- 住宅所有者の意見
 - ◇ 太陽光パネルを設置した業者は既に倒産している。住居の屋根から太陽光パネルを撤去の際、どのように適正な撤去業者を見つけるかが分からない。
- 撤去工事を行う事業者の意見
 - ◇ 鉛が含まれているという理由で、産業廃棄物の処分業者に住宅用太陽光パネルの引き取りを断られたことがある。どのように適正処理業者を見つけるかが不明。

(6) 小括

以上の(1)～(5)をまとめると、図 III-20 のとおり整理される。なお、排出事業者と回収拠点のコミュニケーションの仲介をする第三者について補足する。本業務を通して明らかになったことは、住宅用太陽光パネルの排出事業者は、住宅用太陽光パネルを適正に処理する業者を知らない場合があるということである。これは課題であり、課題解決のためには、本業務の回収実証実験の事務局のように、排出事業者に対して適正な処理業者を連絡し、排出事業者と処理業者のコミュニケーションを仲介する第三者が、住宅用太陽光パネルの適正処理を検討する上で重要な役割を果たすと考えられる²⁴。

²³ 屋根一体型太陽光パネルとも言われ、瓦をふくように屋根に設置される太陽光パネル。通常の住宅用太陽光パネルに比べてサイズが小さいのが特徴。

²⁴ 廃棄物処理法上、排出事業者には自らの産業廃棄物を適正処理する責任が課せられており、仮に産業廃棄物の処理業者に処理委託する場合、排出事業者は産業廃棄物の処理業者と処理委託契約を締結する必要がある。したがって、排出事業者責任の希薄化が生じるようなことは廃棄物処理法の法益にかなわず、「排出事業者と処理業者のコミュニケーションを仲介する第三者」を議論する際は、排出事業者責任の希薄化が生じないように留意する必要がある。

本業務で聞き取った/抽出した主な運用上の課題	
住宅所有者	<ul style="list-style-type: none"> ■どのようにして、住宅用太陽光パネルを撤去する適正な業者を見つければよいのか分からない。
撤去業者	<ul style="list-style-type: none"> ■どのようにして、住宅用太陽光パネルを処理する適正な業者を見つければよいのか分からない。
運搬事業者	<ul style="list-style-type: none"> ■撤去現場から回収拠点までの太陽光パネルの運搬車両と運搬荷姿には、一定程度の標準化が望ましい。
回収拠点	<ul style="list-style-type: none"> ■排出事業者と回収拠点のコミュニケーションの仲介を第三者が行うと、事務手続き軽減というメリットがある。 ■排出事業者から回収拠点に積替保管費用が支払われるのであれば、回収拠点の運営を事業として行うことは検討可能。 ■ただし、廃棄物処理法上、産業廃棄物の収集運搬（積替え保管あり）の許可の範囲内で、回収拠点として何ができて何ができないか、事業化の検討前には確認が必要。
運搬事業者	<ul style="list-style-type: none"> ■回収拠点から処分業者までの運搬では、太陽光パネルのガラス飛散・ケーブル断線・遮光に留意する。
処分業者	<ul style="list-style-type: none"> ■瓦一体型の太陽光パネルを処分できる拠点を整備しておくことが、技術面では重要。

(出所)E&ES

図 III-20 住宅用太陽光パネルの拠点回収を行う上での運用上の課題

III-2 廃棄物処理法上の課題の整理

III-2-1 回収拠点の運営

廃棄物処理法によると、産業廃棄物である太陽光パネルの積替え保管をするには、産業廃棄物の収集運搬（積替え保管あり）の許可²⁵が必要である。そのため、産業廃棄物の収集運搬（積替え保管あり）の許可を有する業者が、住宅用太陽光パネルの回収拠点の役割を果たすことは妥当である。ただし、廃棄物処理法の観点から、以下が留意事項である。

- マニフェストの返送期限と確認義務
- 保管上限

■ マニフェストの返送期限と確認義務

廃棄物処理法によると、産業廃棄物管理票（マニフェスト）は交付の日から一定期間内に排出事業者宛に返送される必要がある²⁶。もし返送されない場合は、廃棄物処理法第 12 条の 3 第 8 項の規定に従って、排出事業者は処理業者に問い合わせ処理の状況を把握するとともに、生活環境の保全上の支障の除去または発生の防止のために必要な措置を講じ、30 日以内にその講じた措置等を都道府県知事に報告することが義務づけられている。

回収拠点を設ける意義は、住宅用太陽光パネルを一定量になるまで保管し、回収拠点から処理拠点までの運送を大きなロットで行い、効率的な運送を実現することにある。しかしながら、例えば、回収実証実験では、ある回収拠点で 8 月に 40 枚の住宅用太陽光パネルを入荷し、その 40 枚の太陽光パネルを処理の拠点に搬出したのは 11 月であった。そのため、回収拠点での保管日数が 90 日を超過していた。仮に、住宅用太陽光パネルを産業廃棄物として扱っていた場合は、マニフェストの返送期限を遵守できていなかったことになる。マニフェストの返送期限を遵守するためには回収拠点での保管日数が制限され、結果として、効率的な運送の実現が困難になる可能性がある。

将来、住宅用太陽光パネルが産業廃棄物として大量に発生し、回収拠点にも高頻度・大量の住宅用太陽光パネルが持ち込まれれば、マニフェストの返送期限は懸念事項にはなり得ない。しかし、現在のように住宅用太陽光パネルの発生量が限られる状況においては、マニフェストの返送期限に留意して、回収拠点設置の是非を検討する必要がある。

²⁵ 環境省(2018a)によると、許可の品目としては、「金属くず」、「ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず」、「廃プラスチック類」が一般的と考えられるが、許可品目のどれに該当するか不明な場合は、当該地域における産業廃棄物に関する指導監督権限を有する都道府県等に相談することが望ましい。

²⁶ 処分終了を確認するためのマニフェスト D 票は交付の日から 90 日以内、最終処分終了を確認するためのマニフェスト E 票は交付の日から 180 日以内に排出事業者宛に返送される必要がある。

■ 保管上限

廃棄物処理法によると、産業廃棄物の収集運搬（積替え保管あり）の許可を持つ業者は、1日あたりの平均的な搬出量の7日分を超える産業廃棄物を保管してはならないとされている。住宅用太陽光パネルの発生量が限られる現在の場合、仮に回収拠点を設置したとしても、回収拠点からの太陽光パネルの搬出量も限定的になり、保管上限も限定的な値となる。

仮に回収拠点が太陽光パネル以外の産業廃棄物の積替え保管、搬出を行っている場合、保管上限は、搬出する産業廃棄物全体の1日あたりの平均的な搬出量に基づき計算することが可能であれば、太陽光パネル以外の産業廃棄物の搬出計画との調整次第では、回収拠点で一定量になるまで太陽光パネルを保管することもでき得る²⁷。

III-2-2 リユースの促進

回収拠点を設置し、回収拠点に住宅用太陽光パネルが産業廃棄物として持ち込まれる場合、産業廃棄物の流れから太陽光パネルをリユース品として取り出す場所は、以下の2つが想定される。

- 回収拠点
- 処理の拠点

環廃産第110329004号平成23年3月30日付け環境省課長通知に基づけば、産業廃棄物の収集運搬（積替え保管あり）の許可を持つ業者の下で、産業廃棄物からリユース品を取り出すことは、産業廃棄物の排出事業者と処理業者が合意できていれば、実施でき得る。また、産業廃棄物に関する指導監督権限を有する都道府県等による運用に委ねられている点に留意が必要であるが、処理の拠点で、産業廃棄物からリユース品を取り出すことも、実施でき得る。

III-2-3 リサイクルの促進

■ 試験の実施

本業務では、回収拠点を通して住宅用太陽光パネルのリサイクルを促進することを想定し、運搬効率の基礎データを取得するための試験をCESSで行った。試験のポイントは以下のと

²⁷ 具体的な運用は、当該地域で産業廃棄物に関する指導監督権限を有する都道府県等に相談することが望ましい。

おりである。

- 運搬効率向上のため、回収拠点で太陽光パネルからアルミフレームを分離し、アルミフレームを分離した後の太陽光パネルは処理の拠点で処理、分離したアルミフレームはスクラップとして買い取ってもらうことを想定した。
- 太陽光パネルからのアルミフレームの分離は、本報告書第VI章に示す装置を用いた。
- アルミフレームを分離した後の太陽光パネルからは、ガラスが飛散するおそれがある。そのため、アルミフレームを分離した後の太陽光パネルの運搬には、内容物を飛散流出することなく運搬できる太陽光パネルの専用保管容器が用いられると想定した(図III-21 参照)。
- ベースラインとしては、太陽光パネルを太陽光パネルの専用保管容器に保管し、回収拠点から処理の拠点に運搬されると想定した。
- 試験には、以下の2つの異なる種類の住宅用太陽光パネルを用いた。
 - ◇ 1種類目: 大きさ 0.8m×1.25m×0.04m、重さ 12.4 kg、数量 26 枚
 - ◇ 2種類目: 大きさ 0.8m×1.56m×0.045m、重さ 14.2 kg、数量 11 枚
- 1種類目と2種類目の住宅用太陽光パネルを専用保管容器に保管する場合は、それぞれ1容器あたり25枚と22枚の保管量と計算できる。
- 1種類目と2種類目の住宅用太陽光パネルからアルミフレームを分離した後、それぞれを専用保管容器の上部に積み上げて、1種類目と2種類目の合計37枚分の高さを測定したところ、計0.19mであった(1枚あたりの平均高さは0.005m)。1枚あたりの平均高さに基づき、専用保管容器が満載になる枚数を計算すると、200枚となった。
- 以上から、アルミフレームを分離した後の太陽光パネルの運搬効率は、ベースラインに比べて、8~9倍向上すると評価された。
- また、太陽光パネルは積み上げて保管・運搬すると荷崩れが懸念されるが、アルミフレームを分離すれば、保管・運送時の荷崩れの懸念は低減すると考えられた。

(a)



(b)



(注1)左図(a)は組み立てて蓋をした状態の専用保管容器。右図(b)はアルミフレームを分離した後の太陽光パネルが底部に積み上げられている専用保管容器(専用保管容器からは、蓋と側面が取り外された状態)。

(注2)専用保管容器の内寸は、1.15m×1.79m×1.0m。重さは52kg。

(注3)収集ボックスは遮光効果を持つとともに、蓋をすることで密閉されるため、これが内容物の飛散流出防止措置(破損ガラスでのけがの発生予防措置)として働き、利便性だけでなく、安全面への配慮も考慮されている。

(出所)E&ES

図 III-21 CESS での試験に用いた太陽光パネルの専用保管容器

■ 廃棄物処理法上の留意事項

回収拠点での太陽光パネルからのアルミフレームの機械による分離が、産業廃棄物の収集運搬(積替え保管あり)の許可の範囲内で実施できるかどうかは、産業廃棄物に関する指導監督権限を有する都道府県等による運用に委ねられている点に留意が必要である。

III-3 まとめ

本業務では、埼玉県をフィールドに、住宅用太陽光パネルを対象として回収実証実験を行った。本業務の計画立案段階では、住宅用太陽光パネルの適正処理に関する基礎データが不足していた。そこで本業務では、実際に回収実証実験を行うことを通して、住宅用太陽光パネルの適正処理に係る課題の洗い出し・整理・とりまとめを行った。埼玉県に限らず、住宅用太陽光パネルの適正処理は一般に以下の課題を内在し、また各課題への対応方針としては以下が妥当であると本業務では考えられた。

■ 住宅所有者への情報提供

住宅用太陽光パネルを設置している住宅の所有者の多くは、事業者ではなく、個人である。住宅の所有者は、どのようにして、住宅用太陽光パネルを撤去する適正な業者を見つけられ

ばよいのか分からないといった課題を抱えていることがある。

これについては、自治体が住宅用太陽光パネルを撤去する適正な業者のリストや問い合わせ窓口を公表することで、課題は一定程度解決することが想定される。例えば、自治体が、住宅用太陽光パネルの撤去を行う事業者からなる業界団体と協定を締結等することで、住宅所有者が、自治体・業界団体を通して、住宅用太陽光パネルの撤去を行う事業者を知ることができるようになることが期待される。

■ 撤去業者への情報提供

住宅用太陽光パネルを撤去する事業者は、産業廃棄物となる住宅用太陽光パネルを自ら処理できない場合は、産業廃棄物の処理の許可を持つ業者に処理を委託する必要がある。課題は、どのようにして、住宅用太陽光パネルの撤去業者は、住宅用太陽光パネルを処理する産業廃棄物の処理業者を見つけるかという点にある。

これについては、本報告書 V-1 で取り上げた PVCJ の取り組みが参考になる。PVCJ は、使用済 PV モジュールの排出者が安心して処理委託できるネットワークを形成することを目的として設立された任意団体である。PVCJ はその事業の一貫で、太陽光パネルに含まれる有害物のトレーサビリティを確保し、金属リサイクル促進に向けた取り組みを行っている廃棄物処理業者を認定する事業を行っている。撤去業者は、PVCJ のウェブページから、PVCJ が認定した産業廃棄物の処理業者を確認することができる。

■ 収集ルート構築と廃棄物処理法上の課題への対応

本業務では、回収実証実験の下で期限を定めて回収拠点を設置し、太陽光パネルを資材として扱い、太陽光パネルの拠点回収を行った。回収実証実験終了後、拠点回収としての役割を果たした事業者にはヒアリングを行ったところ、産業廃棄物の収集運搬（積替え保管あり）の許可の範囲内で、回収拠点として何ができて何ができないのかが要確認事項であるとのコメントであった。

これについては、現在のように住宅用太陽光パネルの発生量が限定的であると考えられる場合、マニフェストの返送期限を遵守するためには、回収拠点での太陽光パネルの保管日数が制限され得ると考えられる。また、将来、住宅用太陽光パネルが産業廃棄物として大量に発生し、回収拠点にも高頻度・大量の住宅用太陽光パネルが持ち込まれれば、マニフェストの返送期限は懸念事項にはなり得ないと考えられる。

■ 自治体間での住宅用太陽光パネルの移動

産業廃棄物である住宅用太陽光パネルは自治体をまたいで移動する。一方で、太陽光パネルのように新しい製品を対象とした産業廃棄物に対する指導監督については、まだ自治体間で統一した運用が行われていないはずである。

そのため、自治体同士が意見交換するためのラウンドテーブル(意見交換の場)があることが望ましい。中立的立場の組織を通して、ラウンドテーブルが作られることがよい。

■ 中央官庁も関与した制度上の課題解決に向けた取り組み方針の検討

太陽光パネルは、腐敗するものではないことから、この点では公衆衛生上の課題は懸念されない一方で、不用意に取り扱うと感電するおそれがあり、またガラスが破損している太陽光パネルに接触するとけがのおそれがある。そのため、取り扱いには注意が必要である。

本業務の下での CESS での試験からも確認・示唆されたが、太陽光パネルを運搬する際は、アルミフレームを分離すると、効率的・安全な運搬が実現できる。ただし、回収拠点で太陽光パネルからアルミフレームを分離することは産業廃棄物の収集運搬(積替え保管あり)の許可の範囲内で実施できるのか、あるいは太陽光パネルからのアルミフレームの分離は産業廃棄物の中間処分とみなすのか、産業廃棄物に関する指導監督権限を有する都道府県等による運用に委ねられている。この点については、有害物質管理、減容、生活環境上の保全などの廃棄物処理法の目的を踏まえつつ、太陽光パネルのリサイクルのガイドラインなどで早期に方向性を示すことが重要である。

第IV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

本業務による環境影響改善効果を評価するため、事業からの環境汚染物質排出量の削減である環境負荷低減(アウトプット)と事業への資源投入量の削減である資源循環性(インプット)に区分し、以下の4つの観点で定量的な評価を行った。

- 環境負荷低減(アウトプット)
 - ◇ 本業務の実施に伴うCO2 排出量削減
 - ◇ セル/EVA シートの最終処分場での埋立回避
 - ◇ 有害金属の最終処分回避による浸出水への影響低減
- 資源効率性(インプット)
 - ◇ 海外での鉱物資源の採掘量抑制

なお、評価に用いたデータについて、本業務および過年度業務の検討・検証で得られたデータを可能な限り活用した。データが存在しない場合は、入手可能な範囲で信頼性の高いと考えられる文献データを参照するとともに、専門家等へのヒアリング調査を通してギャップを補完し、可能な限り現実に即した評価となることを目指した。

IV-1 環境負荷低減

IV-1-1 本業務の実施に伴うCO2 排出量削減

本業務の成果が社会実装されると、太陽光パネル中の銀と銅の循環利用が促進され、海外での鉱物資源の採掘抑制によるCO2 削減効果が期待される。また、拠点回収による収集運搬の効率化に伴うCO2 削減効果も期待される。そこで、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、CO2 削減効果の評価を行った。

(1) バウンダリー

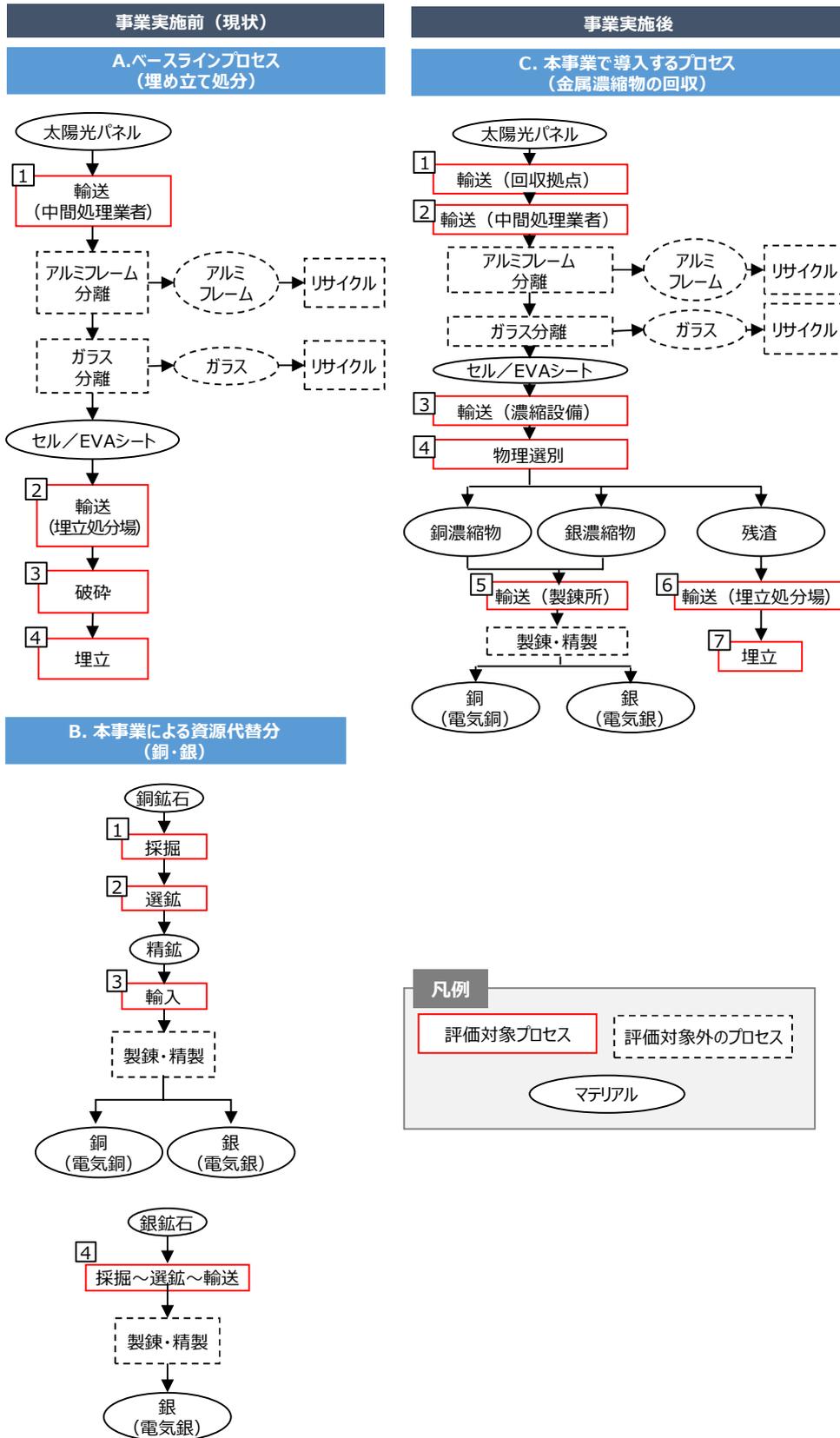
評価にあたり、機能単位は「太陽光パネル 1t 当たりの処理」とし、システムバウンダリーは、事業実施前(工程A・B)と事業実施後(工程C)に区別し、設定した(図IV-1参照)。CO2 削減効果は、工程Aおよび工程BにおけるCO2 排出量から工程CにおけるCO2 排出量を差し引いて算出した。各工程の詳細は以下のとおりである。

- 事業実施前
 - ◇ 工程 A: 太陽光パネルからガラスと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、埋立処分する。これをベースラインプロセスとする。この工程は、現状の合理的な処分方法のはずである。
 - ◇ 工程 B: 下記の工程 C において回収される銀と銅の同量分を天然資源から製造するプロセス。工程 C における天然資源の代替効果を評価するための工程。
- 事業実施後
 - ◇ 工程 C: 本実証事業の成果が社会実装された場合に想定される工程。ガラスおよびアルミフレーム除去後、物理選別を通じて、セル/EVA シート中の銀および銅の濃縮物を回収する。

(2) 前提条件

本業務の効果を適切に評価するため、以下の前提条件を設けた。

- ガラスおよびアルミフレームの分離プロセスは、事業実施前後で共通して実施されるため評価対象外とした。
- リユース検査およびリユース品の使用から処分プロセスについては、バウンダリーの外側に位置付けた。
- 製錬プロセスについては、事業実施前後ともに銅精鉱と 2 次資源の双方を受け入れる同一の製錬所に投入されると仮定し、評価対象外とした。
- 金属濃縮の残渣については、本報告書 II-3-2(1)で固形燃料化・熱処理を検討しているものの、それらの原単位等のデータ把握が困難であったことから、埋立処分されると仮定した。



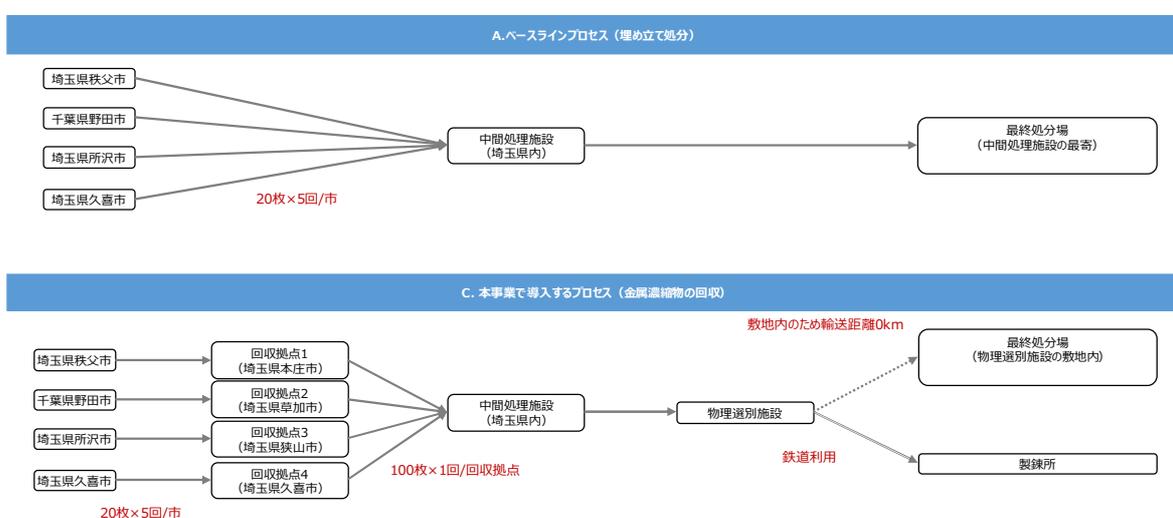
(出所)E&ES

図 IV-1 CO2 排出量削減評価のシステムバウンダリー

(3) 輸送プロセスのシナリオ設計・推計

輸送に係るCO2排出量については、本業務では過年度業務に比べて、本報告書第III章で取り上げた拠点回収のプロセスをより反映したシナリオを設計し、推計を行った。輸送ルートと推計方法の概要を以下に示す(図IV-2および表IV-1～表IV-3参照)。

輸送プロセスの評価にあたって特記すべき点は、排出者から中間処理施設に直接搬入する工程Aと、回収拠点4か所に集約し運搬する工程Cを比較したことである。これにより、収集運搬の効率化によるCO2排出量削減効果を評価することができた。



(出所)E&ES

図 IV-2 本業務で想定した輸送ルート

表 IV-1 工程 A の輸送距離

工程 A			着地までの距離 (km) ¹⁾	
			中間処理施設	最終処分場
発地	発生源 ²⁾	埼玉県秩父市	24	
		千葉県野田市	89	
		埼玉県所沢市	52	
		埼玉県久喜市	55	
	中間処理施設			2

1) 各距離は Google Map を用いて推計。

2) 発生源は各市役所の所在地を起点とした。

(出所)E&ES

表 IV-2 工程 C の輸送距離

工程 C			着地までの距離 (km) ¹⁾							
			回収拠点				中間処理施設	物理選別施設	最終処分場	製錬所
			1	2	3	4				
発地	発生源 ²⁾	埼玉県秩父市	35							
		千葉県野田市		20						
		埼玉県所沢市			13					
		埼玉県久喜市				2				
	回収拠点	1					27			
		2					85			
		3					42			
		4					63			
	中間処理施設							665		
	物理選別施設								0	
								1,675		

1) 各距離は Google Map を用いて推計

2) 発生源は各市役所の所在地を起点とした
(出所)E&ES

表 IV-3 輸送の推計方法と前提条件

項目	工程 A	工程 C
推計方法	<ul style="list-style-type: none"> 車両運搬には燃費法、鉄道には従来トンキロ法を用いた 燃費は標準燃費データ¹⁾を活用 使用車両は本業務の回収実証実験の実データベースまたはヒアリングに基づく推定 車両は全て貸切便と仮定 	
前提条件	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光パネル 400 枚が排出されるというシナリオを設定 排出源は、埼玉県内・近郊の 4 つの市に位置すると設定(本報告書第 III 章で記載の住宅用太陽光パネルの排出場所も踏まえて、設定) 各排出源から 20 枚のパネルが 5 回ずつ排出されると仮定 排出源から中間処理施設・回収拠点まで距離は、排出源が位置する市の各市役所を起点として目的地までの距離を推計 	
	<ul style="list-style-type: none"> 最終処分場は、中間処理施設の最寄りの施設を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> 本報告書第 III 章に記載の 4 つの回収拠点が設置されると想定 物理選別施設は秋田県、製錬所は大分県と仮定 製錬所までの運搬は鉄道を利用すると仮定 物理選別後の残渣の処理は、同施設内の処分場で処分されるとし、輸送距離はなしと仮定

1) 経済産業省・国土交通省(2016)を参照
出所)ヒアリング等に基づき E&ES が作成

(4) 評価結果

■ 本業務による削減効果

CO2 排出量の削減効果を表 IV-4 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 IV-3 に、工程 C の内訳を図 IV-4 に示す(計算根拠となる各種データと活動量・原単位については、本節(6)を参照)。

事業実施前の工程 A と事業実施後の工程 C を比較すると、事業実施後の CO2 排出量は増加すると評価されたものの、事業実施後は天然資源の採掘の抑制が期待され、結果として天然資源の採掘の抑制により CO2 排出量(図 IV-3 の B の分)が削減される。この削減分を含めると、事業実施に伴い CO2 排出量が削減される(天然資源の採掘の抑制による削減効果について、次項にて検証)。また、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の CO2 排出量削減効果は、87t-CO2/年である(図 IV-3 参照)。

以下に、天然資源の採掘抑制および処理ルート構築による削減効果について示す。

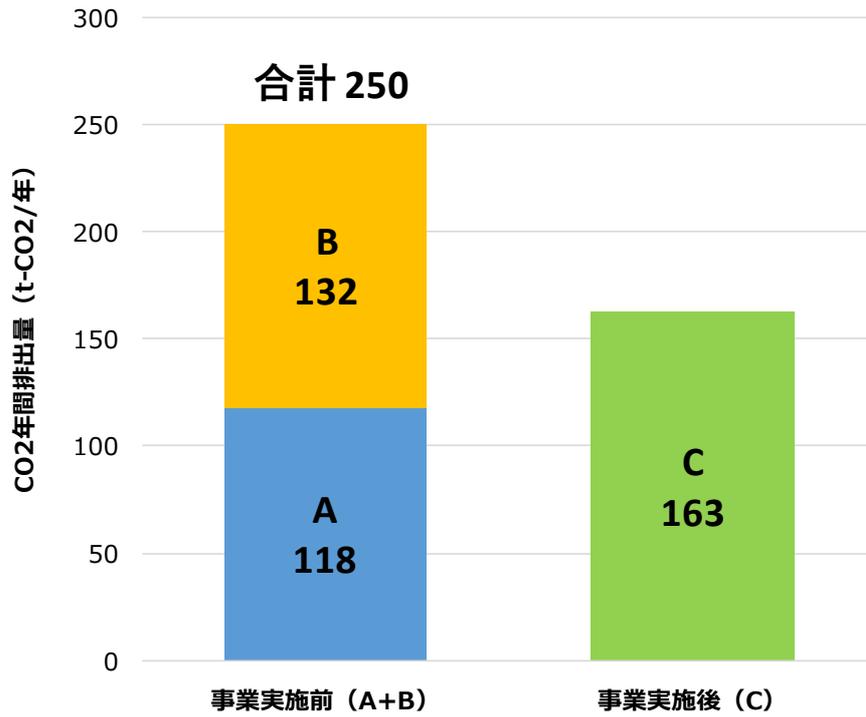
表 IV-4 本業務による CO2 排出量の削減効果

工程			CO2 排出量 (t-CO2/t-太陽光パネル)	CO2 年間排出量 ¹⁾ (t-CO2/年)		
事業実施前	A	1 輸送(中間処理施設)	0.091	0.098	118	
		2 輸送(埋立処分場)	0.0001			
		3 破碎	0.005			
		4 埋立	0.002			
	B	1 銅の採掘～破碎処理	0.002	0.110		132
		2 銅精鉱の生産	0.027			
		3 銅精鉱の輸入	0.028			
		4 銀精鉱の採掘～輸送	0.053			
事業実施後	C	1 輸送(回収拠点)	0.029	0.135	163	
		2 輸送(中間処理施設)	0.018			
		3 輸送(金属濃縮施設)	0.055			
		4 物理選別	0.022			
		5 輸送(製錬所)	0.010			
		6 輸送(埋立処分場) ²⁾	0.000			
		7 埋立	0.001			
CO2 削減効果(A+B-C)			0.073	87		

1) 年間 1,200 トンの太陽光パネルの処理を想定²⁸⁾。

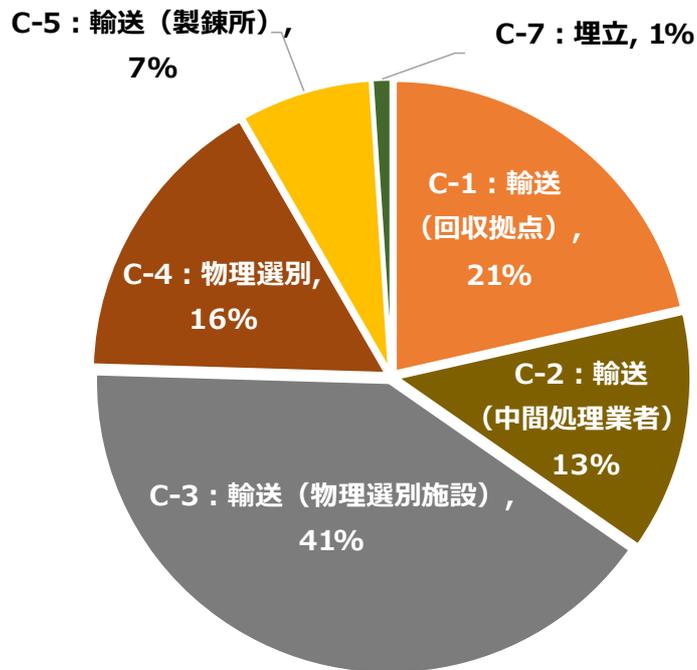
2) 物理選別施設と同じ事業所内の最終処分場で処分を行うとし、輸送は発生しない。
(出所)E&ES

²⁸⁾ 環境省(2018)によると、2018 年時点で 1,000 トン/年の太陽光パネルがリサイクルされていると推計されていることから、現状は 1,200 トン/年の太陽光パネルが発生していると想定した。



(出所) E&ES

図 IV-3 事業実施前および事業実施後の年間 CO2 排出量の比較



(出所) E&ES

図 IV-4 工程 C における CO2 排出量の内訳 (%)

■ 海外での資源採掘抑制による削減効果

事業実施前の工程 A と比較すると、事業実施後の工程 C で生じる追加的な CO₂ 排出は、物理選別施設までの運搬、物理選別の実施、製錬所への運搬 (C3~5) に起因する。これらによる追加的排出量は 0.087t-CO₂/t-太陽光パネルであり、工程 C の約 6 割を占めている (表 IV-4 および図 IV-4 参照)。しかし、工程 B の海外での天然資源採掘による排出量 (0.110 t-CO₂/t-太陽光パネル) と比べると少なく、国内での銅・銀リサイクルによる削減効果が見込まれる。すなわち、バウンダリーを海外の銅鉱山または銀鉱山の採掘現場まで広げることで、CO₂ 排出量が削減される結果となった。

■ 処理ルート構築による削減効果

事業実施後は太陽光パネルの回収拠点を設置した。工程 A と工程 C の輸送パートを比較し、運搬効率向上による CO₂ 削減効果を検証した。図 IV-5 に示すとおり、回収拠点を設けた場合、太陽光パネルの中間処理施設までの輸送で生じる CO₂ 排出量は約半減した。



(注) 物理選別後の残渣は、同敷地内の埋立処分場で処理されると想定し、残渣の最終処分場までの輸送による CO₂ 排出量はなしと推計
(出所) E&ES

図 IV-5 輸送効率向上による CO₂ 排出の比較

(5) 結論

本業務では、太陽光パネル中の銀と銅の循環利用の促進に伴う CO₂ 削減効果を評価した。結果、太陽光パネル 1 トンあたりの CO₂ 排出量削減効果は 0.073t-CO₂/t-太陽光パネルであり、太陽光パネルの年間排出量を 1,200 トンと想定した場合、CO₂ 排出量削減効果は 87t-CO₂/年と評価された。工程 C では追加的な CO₂ 排出が見込まれるが、海外での天然資源採掘の抑制の方がより削減効果が高いことがわかった。また、回収拠点の設置による運搬効率の向上により、CO₂ 排出量は半減すると評価された。以上から、CO₂ 排出量削減効果の観点から、本業務の成果が社会実装された場合は、CO₂ 排出量削減効果が見込まれる。

なお、事業実施後(工程 C)の内訳(図 IV-4 参照)をみると、工程 C での CO₂ 排出量全体に対して輸送プロセスの寄与が大きい。輸送プロセスの CO₂ 排出を推計するにあたっては、次の仮定を置いた。

- ・ 輸送重量に対して積載量に余裕のある貸し切り便を用いた
- ・ 燃費についても実測値に依拠するのではなく、ヒアリングで車両の最大積載量を設計し、標準燃費データを活用した

特に 1 点目の仮定により、実際の CO₂ 排出量に対して保守的な推計結果となっていると考えられる。また、輸送プロセスの推計は、輸送距離・燃費・積載条件(貸切便もしくは混載便、使用車両タイプ等)といった各条件の不確実性が高い。将来的に商業スケールでのリサイクルシステムが社会実装された場合、最適なこれらの条件を選択していくことで、さらなる削減効果が見込まれる。特に、社会実装後はここで検討した物量に比べて多くの物量がリサイクルされることが見込まれ、積替え保管・混載便・鉄道等を活用することで運搬効率が向上し、それに伴い太陽光パネルの1トン当たりの排出量も削減されると期待される。

また、本業務では、銀・銅の循環利用と収集ルート構築による CO₂ 排出量の削減効果を評価することを主な目的に置いていたため、製錬プロセスは評価対象外とした(自然鉱石と二次資源を同じ製錬所で製錬すると仮定した)。しかしながら、セル/EVA シートの金属濃縮物は、自然鉱石の取扱量が限定的な製錬所で製錬・精製することも想定される。そのため、二次資源の投入を考慮した製錬・精製プロセスの原単位を今後収集し、評価に組み込むことが課題であるものの、実態として、そういったデータは本業務の実施期間中に特定し難かった。二次資源投入による CO₂ 削減効果に関する今後のデータ整備が求められる。

(6) 算定根拠

各プロセスのCO₂排出量の算定に必要な活動量とCO₂排出原単位の根拠を以下に示す。

■ 太陽光パネルの組成とリサイクル率

表 IV-5 太陽光パネルの組成とリサイクル率

素材	重量割合 (%)	重量 (kg/枚)	重量 (kg/t-太陽光パネル)	リサイクル/実収率 ¹⁾ (%)	金属回収率 ²⁾ (%)	金属回収量 (kg/t-太陽光パネル)
アルミ枠	17.600	3.000	176	100		
ガラス	58.800	10.000	588	100		
プラスチック (EVA+バックシート)	17.600	3.000	176			
その他(シリコン+金属)	5.900	1.000	59			
計	100	17	1000			
銀(Ag)	0.047	0.008	0.471	60	95	0.268
銅(Cu)	0.882	0.150	8.824	60	93	4.924

1) 過年度業務の結果に基づく

2) 日本鋳業協会(2021)を参照
(出所)E&ES

■ 工程 A: ベースラインプロセス(埋立処分)

表 IV-6 工程 A における CO2 排出量の算定根拠

No.	プロセス	活動量/ 原単位	データ項目	数値	単位	計算式、説明	出典
1	輸送 (中間処理施設)	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの運搬燃料使用量	0.035	kl/t- 太陽光 パネル	燃費法	ヒアリング
		原単位	軽油の CO2 排出係数	2584.963	kg-CO2/kl	—	環境省「算定方法及び排出係数一覧」 ²⁹
2	輸送 (埋立処分場)	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートの運搬燃料使用量	0.0001	kl/t- 太陽光 パネル	燃費法	ヒアリング
		原単位	軽油の CO2 排出係数	2584.963	kg-CO2/kl	—	環境省「算定方法及び排出係数一覧」
3	破砕	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートの破砕処理量	235.294	kg/t- 太陽光 パネル	セル/EVA シートの重量	過年度業務データ
		原単位	破砕処理の CO2 発生係数	0.021	kg-CO2/kg		湯浅ら(2017)
4	埋立	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートの埋立処分量	235.294	kg/t- 太陽光 パネル	セル/EVA シートの重量	過年度業務データ
		原単位	産業廃棄物埋立処理の CO2 発生係数	- ¹⁾	kg-CO2/kg	—	LCI データベース IDEA version 2.3

1) IDEA エンドユーザーライセンス規約にしたがって、原単位は非開示。
(出所)E&ES

²⁹ https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf(2022年2月10日取得)

■ 工程 B:本事業による資源代替分

表 IV-7 工程 B における CO2 排出量の算定根拠

No.	プロセス	活動量/ 原単位	データ項目	数値	単位	計算式、説明	出典
1	銅鉱石の採掘 ～破碎処理	—	太陽光パネル 1t 当たりの処理により得られる銅回収量 (a)	4.924	kg/t- 太陽光 パネル	—	過年度業務データ
		—	銅鉱石の品位 (b)	0.62	%	—	Risopatron, C. R. (2018)
		活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理により得られる銅回収に必要な銅鉱石の重量	794.118	kg/t- 太陽光 パネル	=(a)/(b)	—
		原単位	銅鉱石の採掘～破碎処理プロセスに係る CO2 発生係数	- ¹⁾	kg-CO2/kg	—	LCI データベース IDEA version 2.3
2・3	銅精鉱の生産 ～輸入	—	太陽光パネル 1t 当たりの処理により得られる銅回収量 (a)	4.924	kg/t- 太陽光 パネル	—	過年度業務データ
		—	銅精鉱の品位 (b)	25	%	—	Risopatron, C. R. (2018)
		活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理により得られる銅回収に必要な銅精鉱の重量	19.694	kg/t- 太陽光 パネル	=(a)/(b)	—
		原単位	銅精鉱の生産～輸入に係る CO2 発生係数	- ¹⁾	kg-CO2/kg	—	LCI データベース IDEA version 2.3
4	銀鉱石の採掘 ～輸送	—	太陽光パネル 1t の処理によって得られる銀回収量	0.268	kl/t- 太陽光 パネル	—	—
		—	銀鉱石の品位 (b)	0.0732	%	—	LGC Standard ³⁰⁾
		活動量	太陽光パネル 1t の処理によって得られる銀回収に必要な銀鉱石の量	366.442	kg/t- 太陽光 パネル	=(a)/(b)	—
		原単位	銀鉱石の生産の CO2 排出係数	- ¹⁾	kg-CO2/kg	—	LCI データベース IDEA version 2.3

1) IDEA エンドユーザーライセンス規約にしたがって、原単位は非開示。なお、銀鉱石の原単位の取得が困難であった、銀を含む貴金属鉱石の原単位を代替として用いた。
(出所)E&ES

³⁰⁾ <https://www.lgcstandards.com/OM/en/Ag-in-Silver-ore/p/NCS%20DC90006> (2022 年 2 月 10 日取得)

■ 工程 C:本事業で導入するプロセス(金属濃縮)

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 シートが投入される。本プロセスは、粉碎、ふるい分けおよび風力選別のサブプロセスより構成されている。これらのサブプロセスに関する消費電力や産物重量等のデータは、物理選別設備を導入した廃棄物処理業者へのヒアリングによって確認した。

表 IV-8 工程 C の物理選別における CO2 排出量の算定根拠

No.	プロセス	活動量/ 原単位	データ項目	数値	単位	計算式、説明	出典
1	輸送(回収拠点)	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの運搬燃料使用量	0.011	kl/t- 太陽光パネル	燃費法	ヒアリング
		原単位	軽油の CO2 排出係数	2584.963	kg-CO2/kl		環境省「算定方法及び排出係数一覧」
2	輸送(中間処理施設)	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの運搬燃料使用量	0.001	kl/t- 太陽光パネル	燃費法	ヒアリング
		原単位	軽油の CO2 排出係数	2584.963	kg-CO2/kl		環境省「算定方法及び排出係数一覧」
3	輸送(物理選別施設)	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートの運搬燃料使用量	0.021	kl/t- 太陽光パネル	燃費法	ヒアリング
		原単位	軽油の CO2 排出係数	2584.963	kg-CO2/kl		環境省「算定方法及び排出係数一覧」
4	物理選別	活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートの粉碎に必要な電気使用量	43.529	kWh/t- 太陽光パネル	=各機器の電力消費量×投入量	ヒアリング
		活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートのふるい分けに必要な電気使用量	0.980	kWh/t- 太陽光パネル		ヒアリング

No.	プロセス	活動量/ 原単位	データ項目	数値	単位	計算式、説明	出典
		活動量	太陽光パネル 1t 当たりの処理で発生するセル/EVA シートの選別に必要な電気使用量	0.591	kWh/t- 太陽光パネル		ヒアリング
		原単位	電力 1kWh 当たりの CO2 排出量	0.488	kg-CO2/kwh		環境省(2020)電気事業者別排出係数
5	輸送(製錬所)	活動量	太陽光パネル 1t 当たりのリサイクルで発生する金属濃縮物の運搬燃料使用量(車両)	0.001	kl/t- 太陽光パネル	最寄り駅までの運搬	ヒアリング
		原単位	軽油の CO2 排出係数	2584.963	kg-CO2/kl		環境省「算定方法及び排出係数一覧」
		活動量	太陽光パネル 1t 当たりのリサイクルで発生する金属濃縮物の輸送量(鉄道)	328.120	tkm/t-太陽光パネル	鉄道は従来トンキロ法で計算	ヒアリング
		原単位	鉄道の CO2 排出係数	0.020	kg-CO2/tkm		ロジスティクス分野における CO2 排出量算定方法 共同ガイドライン Ver.3.1
6	輸送(埋立処分場) ¹⁾	—	—	—	—	—	—
7	埋立	活動量	太陽光パネル 1t 当たりのリサイクルで派生する残渣の埋立処分量	195.059	kg/t- 太陽光パネル	物理選別後の残渣量	ヒアリング
		原単位	産業廃棄物埋立処理の CO2 発生係数	- ²⁾	kg-CO2/kg		LCI データベース IDEA version 2.3

1) 物理選別と同敷地内のため輸送は発生しないと想定
(出所)E&ES

IV-1-2 セル/EVA シートの最終処分場での埋立回避

本業務では、現在最終処分場で埋立処分されていると想定されるセル/EVA シートが、本業務の成果が社会実装されることで金属リサイクルの原料として利用されることを想定し、最終処分場での埋立の回避量を評価した。年間 1,200 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 シートの金属濃縮を 10 年間継続した場合の最終処分場での埋立回避の効果を評価した。

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と仮定すると、1,200 トン/年の太陽光パネルの排出が 10 年間継続した場合、2,824 トンのセル/EVA シートが排出される。

排出されたセル/EVA シートは物理選別を通じて、銀・銅を含む金属濃縮物と樹脂・残留ガラスを含む軽量産物と中粒産物に選別される。金属濃縮物は製錬原料化、軽量産物と中粒産物については熱処理または固形燃料化³¹により直接埋立処分が回避されると想定した。

埋立回避する量の算出結果を表 IV-9 に示す。10 年間にわたりセル/EVA シートを原料として用いた金属リサイクルが行われることで、1,365m³ の埋立容量が回避されることが見込まれた。また、E&ES の知見に基づき、最終処分場の平均工事単価を約 60,000 円/m³ と仮定すると、セル/EVA シートが金属リサイクルの原料として 10 年間利用され続けた場合、約 8 千万円の最終処分場の建設費の削減が見込まれる。

表 IV-9 セル/EVA シートの最終処分場での埋立回避

項目	金属濃縮物	軽量産物・中粒産物	出典
10 年間のセル/EVA シート回収量	2,834 t		セル/EVA シート 235kg/t-PV*1,200t*10 年間
産業廃棄物の比重	1.13 t/m ³	0.35 t/m ³ ¹⁾	環境省通知(2006)
物理選別後の重量割合	17%	83%	過年度業務データ
物理選別後の回収容量	546 m ³	819 m ³	-
埋立回避容量の合計	1,365 m ³		

1) 主に樹脂から構成される軽量産物と中粒産物は、「廃プラスチック」の重量換算係数を用いた。
(出所)E&ES

³¹ 残渣利用に係る技術的な課題に関しては、II-3-2(1)に記している。

IV-1-3 有害金属の最終処分回避による浸出水への影響低減

本業務では、物理選別で得られる産物のうち、製錬原料になり得ない軽量産物と中粒産物について、鉛の溶出試験を実施した(本報告書 II-3-2(1)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、型番 1 の軽量産物について、鉛に関する判定基準(0.3mg/L)を超過する結果となった(図 II-17 参照)。維持管理の観点から、セル/EVAシートを破碎して、破碎後の産物を管理型最終処分場で最終処分する場合には、鉛の溶出により処分場の運用に支障が生じるおそれがある。太陽光パネルの埋立処分を回避することで、浸出水への鉛の影響低減が見込まれる。

IV-2 資源効率性

IV-2-1 海外での鉱物資源の採掘量抑制

本業務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ため、関与物質総量 (Total Material Requirement: 以下、「TMR」) を用いた分析を行った。TMR とは、必要な原材料やエネルギーを入手するために必要な資源の利用総量を表す指標であり、その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が考慮される。隠れたフローとは、経済行為に伴って起きる物質の移動や攪乱の量を指す。よって、TMR を用いることで、採掘によって生じるズリや捨石など、経済取引の対象とされない物質も含めた資源攪乱量を評価できる。

本調査では、銀と銅のそれぞれの自然鉱石の採掘に伴う TMR (以下、「自然鉱石 TMR」) と太陽光パネルからの金属濃縮物回収に伴う TMR (以下、「太陽光パネル TMR」) を比較し、本業務における海外での資源採掘量の抑制効果を推計した。

銀と銅の自然鉱石 TMR については、原田ら (2009) 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取得に伴う採掘土石類の総量を TMR として算出している。

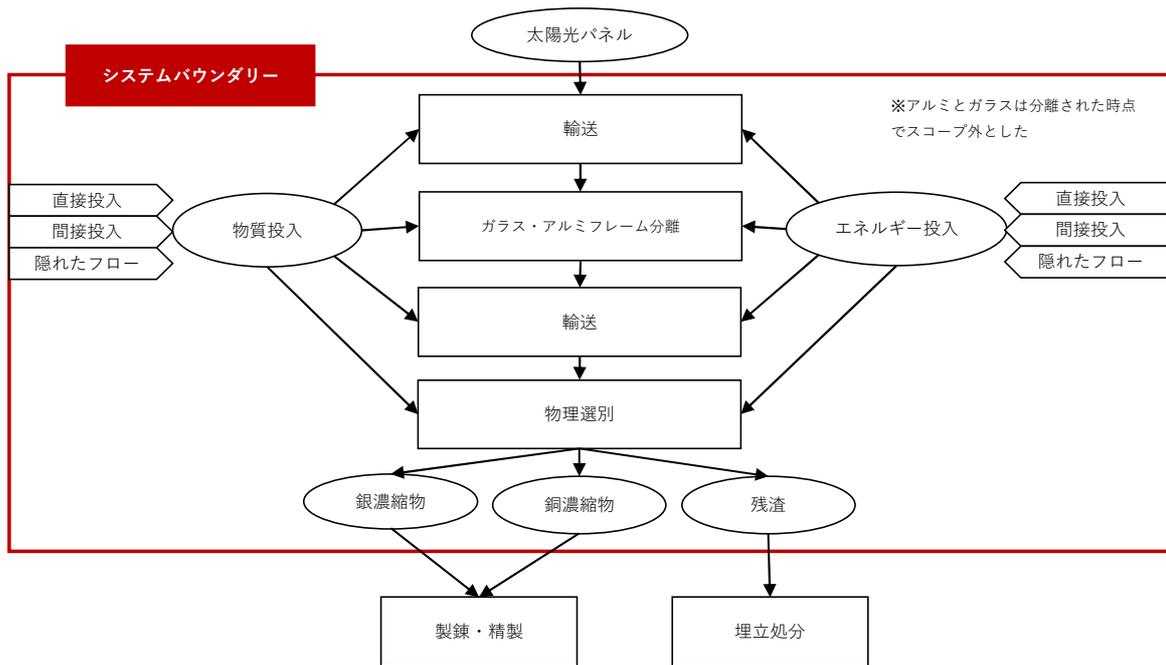
太陽光パネル TMR については、南埜ら (2010) を参照し、使用済みの太陽光パネルを「都市鉱山³²」と見立てて、銀と銅を 1t 生産するために必要な金属濃縮物の回収に係る TMR をそれぞれ推計した。

以下に、太陽光パネル TMR の算出に関する詳細と自然鉱石 TMR との比較結果を示す。

(1) バウンダリー

太陽光パネル TMR については、南埜ら (2010) が設定した「都市鉱石 TMR のシステムバウンダリー」を参照し、図 IV-6 に示すシステムバウンダリーを設定した。本業務では、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い、最終的に物理選別プロセスを通じて、銀・銅の金属濃縮物が素材として 1t 回収されるシナリオを想定して、TMR の評価を行った。

³² 使用済み製品の集まりを「都市鉱山」、都市鉱山に含まれる個々の製品を「都市鉱石」と呼んでいる。



(出所)E&ES

図 IV-6 太陽光パネル TMR 評価のシステムバウンダリー

(2) 前提条件

自然鉱石 TMR と太陽光パネル TMR を比較するため、以下の条件を設けた。

- 自然鉱石 TMR は精鉱生産までが対象となっており、以後の製錬所の輸送から製錬プロセスは考慮されていない。よって、太陽光パネル TMR のバウンダリーにおいても、銀・銅濃縮後の製錬プロセス(製錬所までの輸送含む)を境界外とした。
- 太陽光パネル TMR における都市鉱石ずり³³は、物理選別後の残渣と想定。ただし、自然鉱石 TMR と同様に、当該残渣の無害化・処理プロセスは境界外とした。
- ガラス・アルミフレームについては評価対象素材ではないため、分離された時点でバウンダリーから除外した。

また、太陽光パネル TMR の各工程は、銀濃縮物および銅濃縮物の両者に共通するプロセスのため、最終的な TMR は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。太陽光パネル TMR の算出結果と自然鉱石 TMR との比較を以下に示す。

³³ 南埜ら (2010) では、都市鉱石のリサイクルされない部分を「都市鉱石ずり」と呼んでいる。

(3) 評価結果

■ 太陽光パネルの処理量

IV-1-1(6)の表 IV-5 示した太陽光パネルの組成に基づき、1 トン分の銀・銅の回収に係る処理量を算出した(表 IV-10 参照)。

表 IV-10 金属 1t 分の回収に必要な太陽光パネル

素材	銀	銅
太陽光パネル 1t 当たりの回収量	0.268 kg/t-PV	4.924 kg/t-PV
銀回収量	1,000 kg/t-Ag	54 kg/t-Cu
銅回収量	18,355 kg/t-Ag	1,000 kg/t-Cu
金属 1t 分の回収に必要な太陽光パネル	3,728 t-PV/t-Ag	203t-PV/t-Cu

(出所)E&ES

■ アロケーション比率

本調査のシステムバウンダリー内では、共通する工程を通じて、銀および銅の金属濃縮物が生成される。そのため、1 トン分の銀または銅の回収に相当する TMR をそれぞれ算出するためには、共通する工程に関する 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、各金属の市場価格比を算出し、アロケーションを行った(表 IV-11 参照)。

表 IV-11 銀と銅のアロケーション比率

項目	銀回収	銅回収
単価 ¹⁾	96,690 円/kg	1,068 円/kg
処理量当たりの価格 ²⁾	銀 96,690,000 円/t-Ag	5,267,699 円/t-Cu
	銅 19,596,070 円/t-Ag	1,067,600 円/t-Cu
市場価格比	0.831	0.169

1) 銀価格の出典: 日本マテリアル(<https://www.material.co.jp/market.php>) (2022 年 1 月 18 日取得)、銅価格の出典: 日本電線工業会(<https://www.jcma2.jp/files/toukei/dou/dousouba.pdf>) (2022 年 1 月 18 日取得)

2) 単価×1t 金属の回収に必要な太陽光パネル処理量(表 IV-4 参照)

(出所)E&ES

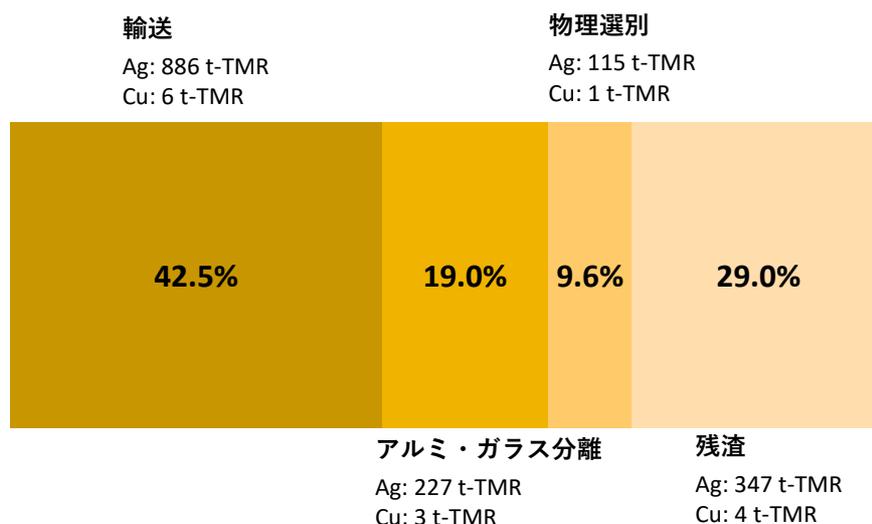
■ アロケーション後の太陽光パネル TMR

アロケーション後の銀および銅の回収に関する太陽光パネル TMR の内訳を表 IV-12 および表 IV-13 に示す。輸送に係る TMR の割合が約 4 割と最も多く占めており、次に残渣が多い結果となった。

表 IV-12 アロケーション後の太陽光パネル TMR

工程	銀回収に係る TMR (t-TMR)	銅回収に係る TMR (t-TMR)
輸送	886	10
ガラス・アルミフレーム分離	396	4
物理選別	200	2
残渣	605	7
合計	2,087	23

(出所)E&E

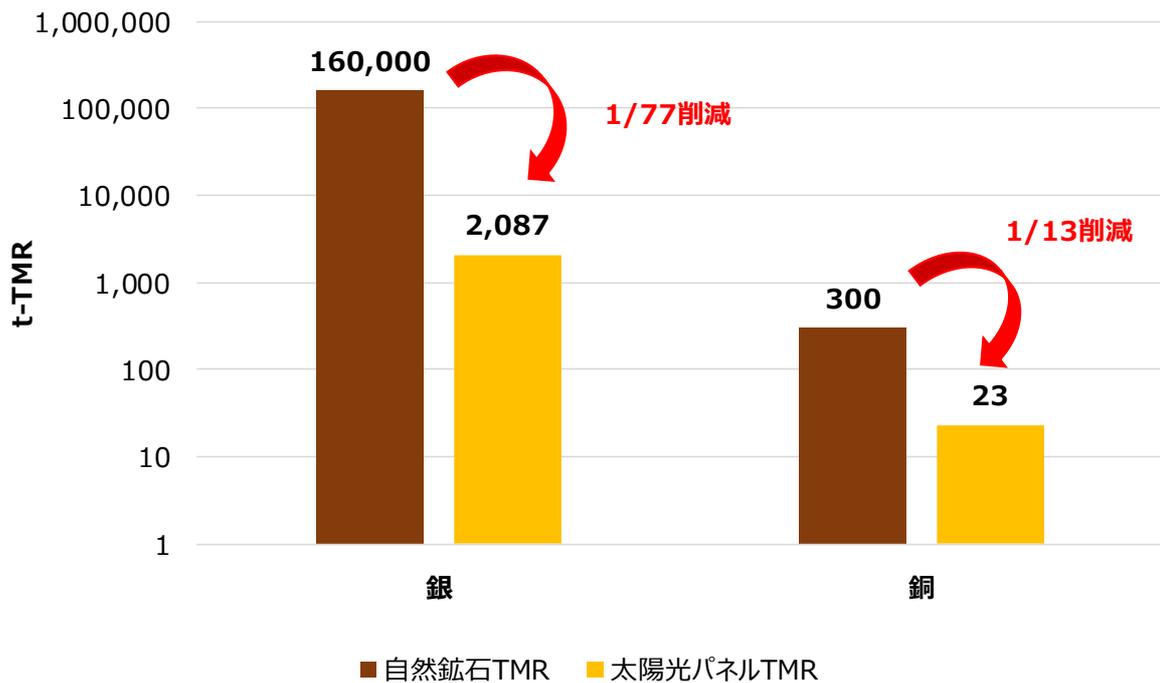


(出所)E&ES

図 IV-7 太陽光パネル TMR の内訳

■ 本業務における鉱物資源採掘抑制

自然鉱石 TMR と太陽光パネル TMR の比較を図 IV-8 に示す。銀と銅ともに、各金属を自然鉱石から回収することに比べて、太陽光パネルのリサイクルで得た金属濃縮物で回収することは、資源の攪乱量を大幅に抑制できる評価された。銀 1t を回収するための太陽光パネル TMR は自然鉱石 TMR の 77 分の 1、銅 1t を回収するための太陽光パネル TMR は自然鉱石 TMR の 13 分の 1 となる結果になった。



(出所)E&ES

図 IV-8 自然鉱石 TMR と太陽光パネル TMR の比較

(4) 結論

本業務では、太陽光パネル中の銀および銅を回収し、海外での鉱物資源の採掘量を抑制することによる環境の攪乱を低減する効果を、TMR を用いて評価した。

銀 1t、銅 1t を得るための金属濃縮物に必要な太陽光パネル TMR は、それぞれ 2,087t-TMR/t-銀、23t-TMR/t-銅である。先行研究より引用した自然鉱石 TMR と比較したところ、銀および銅に関して、太陽光パネル TMR が自然鉱石 TMR を大幅に下回る結果となった。よって、太陽光パネルのリサイクルを通じて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。

(5) 算定根拠

■ 輸送

輸送に関する詳細は IV-1-1(3)で示したとおりである。燃費法に基づき、各輸送に係る燃料消費量を推計し、燃料の TMR 原単位を乗じて輸送に係る TMR を算出した。

輸送トラックの燃料である軽油の TMR 原単位は、環境省(2011)に基づき、軽油の標準発熱量と石油燃料 TMR を乗じて 7.23kg-TMR/L と求めた。

表 IV-13 輸送に関する TMR

項目	銀回収	銅回収	出典
1) 軽油 TMR の算出			
(a) 軽油の標準発熱量	38.04 MJ/L		資源エネルギー庁(2020)
(b) 石油 TMR	0.19 kg-TMR/MJ		原田ら(2009)
軽油 TMR	7.228 t-TMR/kl		(a)*(b)
2) 排出源～回収拠点に係る輸送 TMR			
(a) 軽油消費量(t-太陽光パネル当たり)	0.011 kl/t-PV		ヒアリングに基づく推計
(b) 軽油消費量(t-金属当たり)	41.896 kl/t-Ag	2.283 kl/t-Cu	(a)*パネル処理量/t-金属
輸送 TMR (回収拠点)	302.811 t-TMR	16.497 t-TMR	(b)*軽油 TMR
3) 回収拠点～中間処理施設に係る輸送 TMR			
(a) 軽油消費量(t-太陽光パネル当たり)	0.01 kl/t-PV		ヒアリングに基づく推計
(b) 軽油消費量(t-金属当たり)	25.976 kl/t-Ag	1.415 kl/t-Cu	(a)*パネル処理量/t-金属
輸送 TMR (回収拠点)	187.743 t-TMR	10.228 t-TMR	(b)*軽油 TMR
4) 中間処理施設～物理選別施設に係る輸送 TMR			
(a) 軽油消費量(t-太陽光パネル当たり)	0.02 kl/t-PV		ヒアリングに基づく推計
(b) 軽油消費量(t-金属当たり)	79.603 kl/t-Ag	4.337 kl/t-Cu	(a)*パネル処理量/t-金属
輸送 TMR (回収拠点)	575.341 t-TMR	31.345 t-TMR	(b)*軽油 TMR
合計	1065.895 t-TMR	58.070 t-TMR	2)+3)+4)

(出所)E&ES

■ アルミフレーム・ガラス除去

アルミフレームおよびガラス除去工程に関する TMR については、昨年度と同様に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。電力 TMR については、原田ら(2009)の各種発電に係る TMR および東京電力の電力構成(2020 年実績)³⁴に基づき、1.431kg-TMR/kWh と推計した。結果は、表 IV-14 に示すとおりである。

表 IV-14 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	出典
1) 電力 TMR の算出			
電力 TMR	1.431 kg-TMR/kWh		E&ES による推計
2) アルミフレーム除去に係る TMR			
(a) 処理能力	1,020 kg/h		昨年度データ
(b) 消費電力	68 kW		昨年度データ
(c) 電力消費量(t-太陽光パネル当たり)	66.667 kWh/t-PV		(a)/(b)*1,000kg
(d) 電力消費量(t-金属当たり)	41.896 kWh/t-Ag	2.283 kWh/t-Cu	(c)*パネル処理量/t-金属
アルミ除去 TMR	355.658 t-TMR	19.376 t-TMR	(d)*電力 TMR
3) ガラス除去に係る TMR			
(a) 処理能力	1,020 kg/h		昨年度データ
(b) 消費電力	28 kW		昨年度データ
(c) 電力消費量(t-太陽光パネル当たり)	22.592 kWh/t-PV		(a)/(b)*1,000kg
(d) 電力消費量(t-金属当たり)	84,225.146 kWh/t-Ag	4,588.610 kWh/t-Cu	(c)*パネル処理量/t-金属
ガラス除去 TMR	120.526 t-TMR	6.566 t-TMR	(d)*電力 TMR
合計	476.184 t-TMR	25.943 t-TMR	2)+3)

(出所)E&ES

³⁴ 東京電力エナジーパートナー「電源構成・非化石証書の使用状況」(2022 年 1 月 18 日取得) (https://www.tepco.co.jp/ep/power_supply/)

■ 物理選別

物理選別は、粉碎、ふるい分け、風力選別の工程より構成される。物理選別を行う事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、ならびに工程へのセル/EVA シート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 IV-15 に示すとおりである。

表 IV-15 物理選別に関する TMR

項目	銀回収	銅回収	出典
1) 電力 TMR の算出			
電力 TMR	1.431 kg-TMR/kWh		E&ES による推計
2) 物理選別に係る TMR			
(a) 電力消費量(t-太陽光パネル当たり)	45.100 kWh/t-PV		=各機器の電力消費量×投入量 (今年度ヒアリングに基づく)
(b) 電力消費量(t-金属当たり)	168,137.719 kWh/t-Ag	9,160.191 kWh/t-Cu	(a)*パネル処理量/t-金属
物理選別 TMR	240.605 t-TMR	13.108 t-TMR	(b)*電力 TMR

(出所)E&ES

■ 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、物理選別後の残渣である。物理選別を行う事業者へのヒアリングより入手したデータに基づき、下表のとおり残渣 TMR を推計した。

表 IV-16 残渣に関する TMR

項目	銀回収	銅回収	出典
(a) 物理選別後の残渣量(t-太陽光パネル当たり)	195.059 kg/t-PV		今年度ヒアリングに基づく
残渣 TMR	727.193 t/t-Ag	39.618 t/t-Cu	(a)*パネル処理量/t-金属

(出所)E&ES

第V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

V-1 太陽光パネルの排出量予測(需要)と金属リサイクルシステム(供給)のバランスの経年的・地理的な推定とそれに基づく金属リサイクルビジネスのあり方

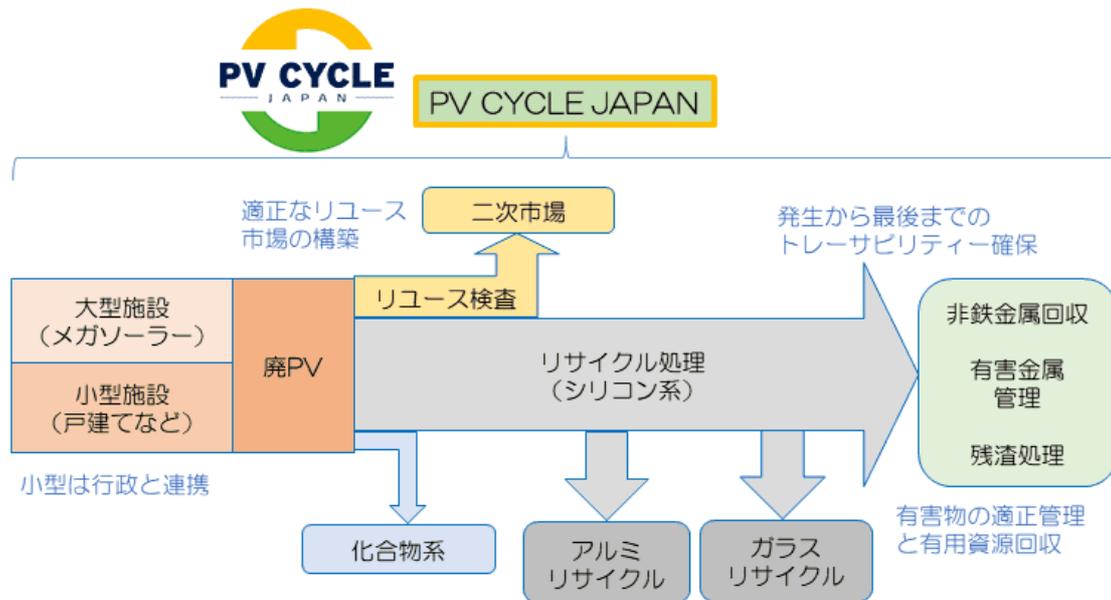
本業務では、セル/EVA シートは有害物である鉛を含むものであり、そのためセル/EVA シート中の鉛のトレーサビリティが確保される形で、太陽光パネルの金属リサイクルが促進されることが望ましいと検討してきた(本報告書 II-3-2 参照)。また、過年度業務で検討したように、セル/EVA シート中の金属を製錬所で回収するのは、有用金属の銀と銅を回収するためだけではなく、むしろ有害物の鉛を固定するという点に意義があるからである。

本業務では、出口戦略の検討の一環として、昨年設立された任意団体である PVCJ を通して、有害物のトレーサビリティを確保しつつ、太陽光パネルの流れをリサイクル側に促すことができるか検証を行った。

V-1-1 PVCJ の概要

PVCJ は、使用済 PV モジュールの排出者が安心して処理委託できるネットワークを形成することを目的として設立された任意団体である(図 V-1 参照)。PVCJ は、以下の 4 項目を達成目標に掲げている。

- 健全なリユースの実施(必要な検査と二次市場形成)
- 最終処分量の最小化と資源回収量の最大化
- 大型発電所から戸建てまで、同様なサービスの提供
- 全てのタイプの PV の有害物質の適正処理



出所)一般財団法人秋田県資源技術開発機構ウェブサイト, <https://akita-sigen.jp/pages/64/>、2022年2月10日取得

図 V-1 PVCJ の目的のイメージ図

PVCJ は、本業務の下で E&ES の外注先である AKITA PRD TO の一部門である。PVCJ の設立にあたっては、ベルギーに本部を置く PV CYCLE が重要な役割を果たしている。PVCJ の組織面での留意事項は、欧州で 15 年にわたり使用済 PV モジュールの回収・処理の管理業務を担ってきた PV CYCLE と協調している点である。EU では、法制度の下で使用済 PV モジュール中の有害物を管理すること、収集率・リカバリー率(いわゆるリサイクル率)の目標を達成することなどが求められている。PVCJ は、PV CYCLE を通して欧州の優良事例へアクセスできる。

V-1-2 PVCJ によるリユース・リサイクル業者の自主的認定事業

PVCJ は、廃棄物処理法を含む国内の各種法規制を遵守しつつ、太陽光パネルに含まれる有害物のトレーサビリティを確保し、金属リサイクル促進に向けた取り組みを行っている廃棄物処理業者を認定する事業を行っている。認定にあたって PVCJ は、PVCJ 処理基準と呼ばれる基準を策定し、2021 年 12 月に公募を行い、公募への申請内容を PVCJ 処理基準に照らして審査し、業者の認定を行っている。公募開始から約 2 か月経過した本報告書作成時点では PVCJ の認定業者数は 6 社であり、カバーするエリアは全国である(図 V-2 参照)。PVCJ によると、認定業者数は今後拡大させる方針である。



出所) 一般財団法人秋田県資源技術開発機構ウェブサイト, https://akita-sigen.jp/pages/71/b_id=184/r_id=8/#block184-8, 2022年2月24日取得

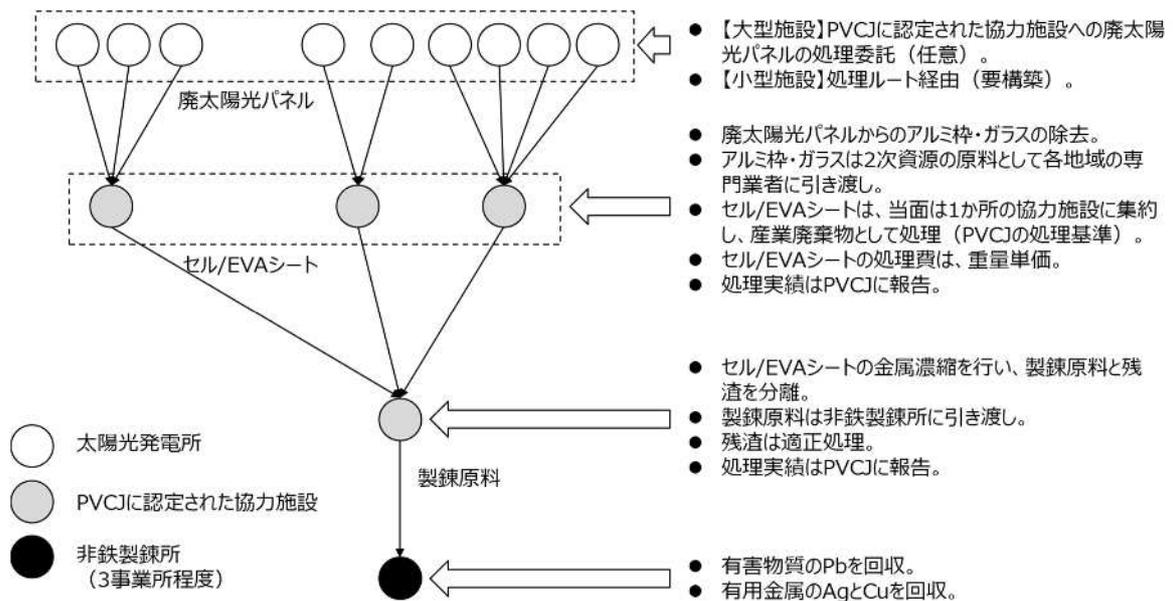
図 V-2 PVCJ のパネル申込受付ページ

V-1-3 セル/EVA シートの取扱いのあり方と今後の課題

PVCJ の認定業者 6 社のうち、1 社はセル/EVA シートを物理選別する産業廃棄物処理業者であり、残り 5 社は太陽光パネルからジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離する技術を持つ産業廃棄物処理業者である。PVCJ 処理基準により、有害物のトレーサビリティを確保する観点から、太陽光パネルからジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離した後に残るセル/EVA シートは、PVCJ の認定業者である 1 社に集約して、そこで産業廃棄物として処理することを求めている。

PVCJ が目指している太陽光パネルの流れを、図 V-3 に示す。太陽光パネルの排出事業者は、PVCJ の認定業者に太陽光パネルの処理委託をすることができる。PVCJ の認定業者は、太陽光パネルからジャンクションボックス・アルミフレーム・ガラスを分離し、セル/EVA シートは PVCJ の認定業者で再中間処理が行われる。再中間処理では、セル/EVA シートの物理選別が行われ、製錬原料は非鉄製錬所にて鉛と有用金属の回収が行われる。物理選別の残渣は、適正処分が行われる。PVCJ の認定業者での処理実績は PVCJ に報告され、これによりトレーサビリティの確保が行われる。また、PVCJ によると、運送効率向上のために、今後いくつかの地域で図 V-3 に示す流れを作っている方針である。

ポイントは、PVCJ による自主的認定事業は法規制によらない自主的取り組みであることから、自治体との協調、次の V-2 節で述べる金融セクターとの協調など、PVCJ の自主的取り組みを後押しする仕組みが今後重要になると考えられた。



出所) E&ES

図 V-3 PVCJ が目指している太陽光パネルの流れの模式図

V-2 金融・保険セクター側と協調した金属リサイクルへの経済的インセンティブ付与のあり方

V-2-1 検討方法

太陽光発電事業に出融資や付保を行う金融・保険セクターは、太陽光発電所で廃棄物として発生する太陽光パネルの行方にも影響力を持つ。具体的には、例えば、出融資の対象となる太陽光発電事業が大規模なものであって、それがプロジェクトファイナンスの場合、事業体に融資を行う銀行セクターは、リスク管理の観点から以下のような視点を持つことが想定される。

- 事業体は、FIT 法の下で太陽光発電所の撤去・廃棄のための費用を積み立てしているものの、はたして撤去・廃棄はどういった事業者が行うのか、撤去・廃棄は各種規制やガイドラインに適合して行われるのか、またその撤去・廃棄の費用は事業体が積み立てている費用でカバーできるのだろうか？
- (赤道原則³⁵を採択している銀行の場合)仮に太陽光パネルが全量埋立処分されて、埋立処分という廃棄方法が廃棄時点での規制やガイドラインに適合していたとしても、果たして有害な物質である鉛を含み、有用な金属の銅・銀を含む太陽光パネルを全量埋立処分することは、自然環境に与える影響に十分配慮してプロジェクトが実施されていると言えるのだろうか？

その他、銀行ではなくても、リース会社の場合は、リース期間終了後の太陽光パネルをどのように活用するか、もしくは廃棄する場合は、どういった事業者に、どういった価値基準に照らして処理を委託するか、検討する必要がある。単純に、コストを最小限にすることと法律を遵守することのみに着目して廃棄するのであれば、太陽光パネルの処理は完了することはでき得るが、ESG や SDGs といった新たな価値基準が浸透してきているなか、太陽光パネルの廃棄方法によりリース会社の評判を落とすことはないか、検討の余地がある。

保険セクターについては、災害で大量の太陽光パネルが廃棄物になった場合、保険金の査定や支払いのプロセスの中で、廃棄物となった太陽光パネルをどのように扱うか、廃棄物管理に関する専門的な知見が求められているはずである。

このような課題意識を持ち、本業務では複数の金融・保険セクターと意見交換を行った。意見交換の結果は秘匿性が高いため公開はできない。ただし、2021 年 10 月に、21 世紀金融行動原則主催の公開セミナーにて、E&ES が「ESG 地域金融実践セミナー 第 3 回 ～旬

³⁵ 赤道原則とは、金融機関が大規模なプロジェクトに融資を実施する場合に、プロジェクトが自然環境や地域社会に与える影響に十分配慮して実施されることを確認するための枠組み。

のトピック:太陽光発電の課題とエネルギー供給強靱化法、PV CYCLE JAPAN について～」の演題で講演を行った(本報告書第 VII 章も参照)。セミナーには、銀行、保険等の金融機関、政府機関等からなる計 50 人以上が出席した。PVCJ のコンセプトを中心に E&ES が講演を行い、質疑応答をとおして、金融機関側の関心事項をヒアリングした。

V-2-2 検討結果

金融機関側からは各種の意見を得られたが、総論として以下のとおりまとめられた。

- FIT 法が改正されることで、太陽光発電所の撤去・廃棄の費用が積立されることとなった。しかしながら、その撤去・廃棄のイベントは、FIT 期間が終了する 2030 年代後半に発生するものである。そのため、撤去・廃棄の費用が積み立てられたとしても、実体としてどのように撤去・廃棄が行われるのか、見通しが立てにくかった。
- PVCJ が設立されたことで、PVCJ が将来の廃棄の受け皿となる団体になってくれることを期待する。

太陽光発電事業への出融資や付保やリースの条件に、太陽光パネル中の有害物を管理することおよび金属リサイクルを促進することという条件が含まれることになれば、法規制によらずとも、PVCJ を通して太陽光パネルの流れをリサイクル側に促すことができ得ると期待される。

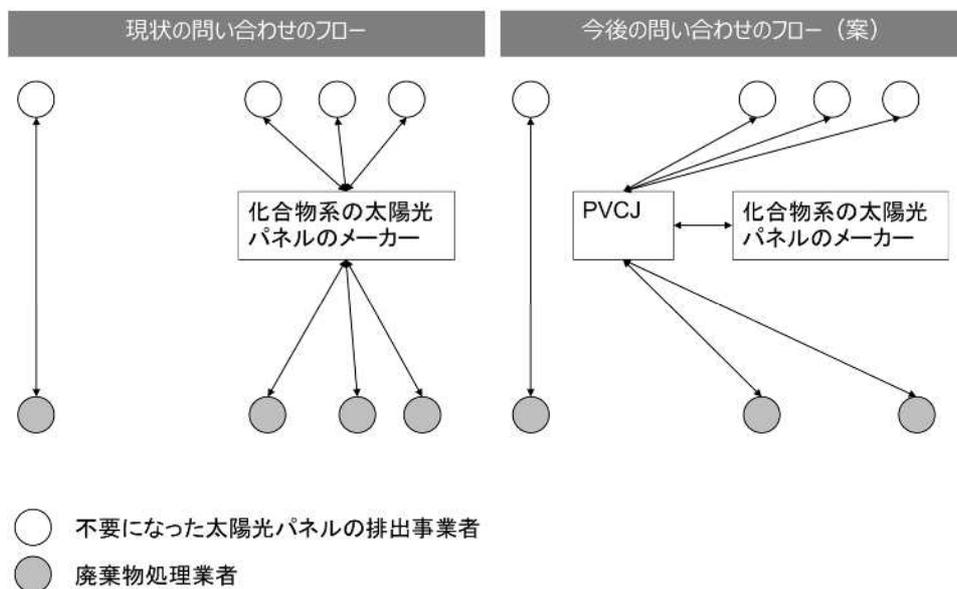
V-3 化合物を半導体として用いる太陽光パネルも含めた金属リサイクルシステムへの展開のあり方

V-3-1 検討方法

太陽光パネルはその半導体の種類により、「結晶シリコン系」と「化合物系」³⁶に大別できる。本業務で検討したリサイクルシステムは結晶シリコン系の太陽光パネルを意図してきたものであるものの、その対象には化合物系の太陽光パネルも含み得る。本業務では化合物系の太陽光パネルのメーカーと2回意見交換を行い、展開のアプローチを検討した。

V-3-2 検討結果

ヒアリング結果によると、現状、不要になった化合物系の太陽光パネルの排出事業者は、産業廃棄物処理業者と処理委託契約を締結し、適正処理を行っている。ここで排出事業者には、太陽光発電所の工事中であれば工事請負業者などが、太陽光発電所の操業中であれば発電事業者自身やメンテナンス業者、撤去工事業者などが該当する。なお、化合物系の太陽光パネルの適正処理を行う産業廃棄物処理業者を照会する目的で、排出事業者は化合物系の太陽光パネルのメーカーにコンタクトすることがある(図 V-4 の左図を参照)。



(出所)E&ES

図 V-4 現状と今後の展開のアプローチ(案)

³⁶ 例えば、カドミウムテルライド(CdTe)やCIGSなどの化合物半導体を用いた太陽光パネルが市販されている。

現状の課題は、少なくとも以下と想定された。

- 化合物系の太陽光パネルの排出事業者は、基本的に産業廃棄物処理業者と対でのコミュニケーションを行っている。化合物系の太陽光パネルのメーカーがそのコミュニケーションを仲介することはあっても、その役割は限定的である。そのため、仮に複数の化合物系の太陽光パネルの排出事業者が地理的に近い場所に位置していても、各排出事業者が別々の産業廃棄物処理業者に処理委託している場合は、異なる排出事業者の太陽光パネルを、一回の収集運搬でまとめて取り扱うということは起こり得ない。

ここでは、本業務の出口戦略の一貫で検証した PVCJ を通して、化合物系の太陽光パネルへの展開のアプローチを検討する。図 V-5 に PVCJ のウェブページに公開されている使用済太陽光パネルの受付ページを示す。PVCJ では、結晶シリコン系と化合物系の太陽光パネルを、受付段階で分けて扱っている。また仮に今後、化合物系の太陽光パネルのメーカーと PVCJ が協力関係を構築し、PVCJ が適正処理に関する排出事業者からの照会窓口の役割を担うことができるようになれば、次のようなことが期待される。すなわち、仮に複数の化合物系の太陽光パネルの排出事業者が地理的に近い場所に位置している場合は、その情報を統合することで、効率的な収集運搬に関する助言を PVCJ が各排出事業者に対して行うことが可能である。

使用済み太陽光パネルの受付

ホーム > 事業紹介 > PVCJ 事業のご案内 > 使用済み太陽光パネルの受付

パネル受付申込フォーム

提出者の連絡先

社名	<input type="text"/>
住所	〒 <input type="text"/> <input type="text"/>
氏名	<input type="text"/>
電話番号	<input type="text"/>
メールアドレス <small>※必須</small>	<input type="text"/>

(注) 半角英数字のみ

太陽光パネルの概要

種類	<input type="radio"/> シリコン系	<input checked="" type="radio"/> 化合物系 (CIS系・CdTe系)
----	-----------------------------	--

(注) 赤枠は E&ES が追記。

出所) 一般財団法人秋田県資源技術開発機構ウェブサイト,
https://akita-sigen.jp/pages/71/b_id=184/r_id=8/#block184-8, 2022 年 2 月 19 日取得

図 V-5 PVCJ での使用済太陽光パネルの受付ページ

第VI章 現地視察会の開催

VI-1 工程・参加組織

本業務の円滑な実施を目的として、2021年9月8日(水)に現地視察会を開催した。なお、新型コロナウイルス感染症の感染予防のため、現地視察会は完全リモートで行った。表 VI-1 に現地視察会当日のプログラム工程を、表 VI-2 に現地視察会の参加組織を示す。

表 VI-1 現地視察会当日のプログラム

時刻	内容	担当
13:15	開会挨拶、事務連絡(ウェブ会議システムの確認)	環境省、課題監理業者
13:20	事務連絡(プログラムの確認、参加組織の確認)	E&ES
13:25	実証事業の概要説明	E&ES
13:45	簡易リユース検査実演	株式会社アイテス
13:55	DOWA エコシステムの担当業務の説明	DOWA エコシステム株式会社
14:10	アルミ枠分離実演	株式会社チヨダマシンナリー
14:20	質疑応答	-
14:30	意見交換	モデレーター:東北大学
15:00	閉会挨拶	環境省
15:05	事務連絡	E&ES

表 VI-2 現地視察会の参加組織

参加組織	人数	位置付け
環境省 環境再生・資源循環局 総務課リサイクル推進室	4人	-
評価審査委員(非公開)	1人	-
課題監理業者	2人	-
東北大学大学院環境科学研究科	1人	意見交換パートのモデレーター
埼玉県環境部産業廃棄物指導課	2人	実証事業へのフィールドの提供
埼玉県環境科学国際センター	1人	試験実施場所の提供
一般財団法人秋田県資源技術開発機構	3人	セル/EVAシートの分析
DOWA エコシステム株式会社	2人	セル/EVAシートの金属濃縮
株式会社チヨダマシンナリー	2人	アルミ枠分離装置の説明
株式会社アイテス	6人	簡易リユース検査装置の説明
その他オブザーバー	1人	太陽光パネルの処理業者
ネクストエナジー・アンド・リソース株式会社	1人	実証事業の共同実施者
イー・アンド・イノベーションズ株式会社	4人	実証事業の幹事法人

VI-2 発表のポイント

(1) 埼玉県をフィールドにした実証事業で利用した資機材の説明

現地視察会では、埼玉県をフィールドにした実証事業で利用した簡易リユース検査装置(設計・製造:株式会社アイテス)およびアルミ枠分離装置(設計・製作:株式会社チヨダマシナリー)それぞれについて、その設計コンセプト等を説明した(図 VI-1 および図 VI-2 参照)。

設計コンセプト
<ul style="list-style-type: none">■ 未経験者でも、不良品を判別できること■ 短時間で、リユース可能な太陽光パネルを判別できること■ 太陽光パネルを1枚ごとに測定できること■ 測定データの改ざん防止
制約条件
<ul style="list-style-type: none">■ 外観上、破損・劣化が見られない太陽光パネルを測定対象とすること■ 倉庫内または一定程度の遮光が可能な屋外で測定すること■ シリコン系の太陽光パネルを測定対象とすること
設計・製造者
<ul style="list-style-type: none">■ 株式会社アイテス
測定値・判定項目
<ul style="list-style-type: none">■ インピーダンス測定と開放電圧測定により、クラスタ断線(高抵抗化)・バイパスダイオード短絡故障を判定■ 特定の信号を入力して、バイパスダイオードの開放故障を判定■ 絶縁抵抗を測定

(出所)E&ES

図 VI-1 簡易リユース検査装置の概要

設計コンセプト
<ul style="list-style-type: none">■ 太陽光パネルからアルミ枠とジャンクションボックスを自動で分離■ パネルをセットし、自動スタートすると、上端で位置決めし高圧で解体■ 外したアルミ枠は極力曲がりがないように分解工程を設定した。
制約事項
<ul style="list-style-type: none">■ 対応するパネルの外形寸法：800mm～1000mm×1500mm～2000mm×厚み35mm～55mmアルミ枠は外周4辺のみ取り外し可能。■ 配線は手動で切断■ ジャンクションボックスは幅140mm以内、枠端より200mm以内の事
設計・製造者
<ul style="list-style-type: none">■ 株式会社チヨダマシナリー
設計能力
<ul style="list-style-type: none">■ 200枚/日

(出所)E&ES

図 VI-2 アルミ枠分離装置の概要

また、現地視察会では、ウェブ会議の画面共有を通して、あらかじめ撮影した簡易リユース検査装置およびアルミ枠分離装置の実演動画を視聴した(図 VI-3～図 VI-6 参照)。



(撮影)E&ES

図 VI-3 現地視察会で画面共有した簡易リユース検査装置の実演動画のスクリーンショット(1/2)



(撮影)E&ES

図 VI-4 現地視察会で画面共有した簡易リユース検査装置の実演動画のスクリーンショット(2/2)



(撮影)E&ES

図 VI-5 現地視察会で画面共有したアルミ粹分離装置の実演動画のスクリーンショット(1/2)



(撮影)E&ES

図 VI-6 現地視察会で画面共有したアルミ粹分離装置の実演動画のスクリーンショット(2/2)

(2) 秋田県をフィールドにした実証事業で利用した資機材の説明

また、現地視察会では、秋田県をフィールドにした実証事業で利用したセル/EVAシートの金属濃縮設備についても、説明を行った。本実証事業で利用したセル/EVAシートの金属濃縮設備のポイントは、本報告書第II章に示したとおりである。

VI-3 現地視察会で提起された主な意見

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。

- 埼玉県をフィールドにした実証事業の期間中は、撤去業者が住宅用太陽光パネルを無償で回収拠点に持ち込むフローとなっている。これが実証事業終了後に実運用となった場合、どのようなフローになるのだろうか。
- 埼玉県と秋田県での各県の取り組みはよく理解できたが、2つの県がどのようにつながるのだろうか。
- 埼玉県をフィールドにした実証事業の中で、解体工事の発生はどのように把握するのだろうか。
- 住宅用太陽光パネルのうち、確実にリユースできるのはどの程度だろうか。長期間使用した後のものが出る場合、リサイクルすることが多いのか。データとしてまとめてほしい。
- 住宅用太陽光パネルのリユースを推進するために、適正処理とどう両立すべきなのかというのを議論してはいかがか。出口を決めつけずに、現状の制度でどうやるのか、発展的に議論をまとめるのがよいのではないか。
- 埼玉県をフィールドにした実証事業の中で、回収拠点まで住宅用太陽光パネルを持ち込むことのインセンティブはあるのか。
- 埼玉県をフィールドにした実証事業を行うことで、これまでの取り組み・行動をどのように変化させることができるのだろうか。
- 住宅用太陽光パネルの屋根からの取り外し作業について、解体工事業者にとって難しいことはあるのだろうか。
- 一つの意見として、太陽光パネル、リチウムイオン電池などについては、海外流出はあり、課題は海外での適正処理の受け皿の有無。長期的な視点では、国内リサイクルのインフラ整備、産業整備がサーキュラーエコノミーの観点から必要。日本では個別リサイクル法で対応しているが、新しい製品について、2次資源確保のほか有害物質管理の観点からも国内対応が必要ではないか。一旦海外に流出すると回収ができない。

第VII章 メディア等での掲載

本業務の実施期間中、実証事業の内容や実証事業に付帯する取り組みが、メディア等に掲載された。掲載された内容の一覧を、参考として表 VII-1 に示す。

表 VII-1 本業務または本業務に付帯する取り組みのメディア等での掲載の一覧

No.	時期	メディア・主催者等	概要
1	2021年7月	Solar News ³⁷ 、等	PV CYCLE と AKITA PRTO が協調して、PVCJ を設立したとのニュース。ニュースの内容は、PV CYCLE が 2021 年 6 月 30 日にウェブページ上でリリースしたニュース(PV CYCLE (2021)) に準じる。
2	2021年7月～12月	環境展望台 ³⁸ 、環境ビジネスオンライン ³⁹ 、スマートメディア ⁴⁰ 等	2021年7月1日～12月31日にかけて実施した住宅用太陽光パネルの回収実証実験での太陽光パネルの回収量向上に向けて、NER・埼玉県・E&ES の各組織のウェブページ(NER(2021)、埼玉県(2021)、および E&ES(2021)) で広報したところ、メディアで取り上げられた。
3	2021年10月	21世紀金融行動原則 ⁴¹	ウェブ会議システムを通して、銀行、保険等の金融機関、政府機関等からなる計50人以上の出席者に対して、E&ES が「ESG 地域金融実践セミナー 第3回 ～旬のトピック:太陽光発電の課題とエネルギー供給強化法、PV CYCLE JAPAN について～」の演題で講演を行った。PVCJ のコンセプトを中心に講演を行い、質疑応答をとおして、金融側の関心事項をヒアリングした。
4	2022年1月	NHK おはよう日本 ⁴²	朝7時代のNHKのおはよう日本で、計約7分間の時間をかけて「太陽光パネル “大量廃棄”時代へ」とのタイトルの特集が放映された。特集の中で、埼玉県をフィールドとして実施した住宅用太陽光パネルの回収実証実験も紹介された。

³⁷ https://www.solarnews.es/solarnews_internacional/2021/07/01/joint-take-back-and-recycling-scheme-for-japanese-pv-market/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=joint-take-back-and-recycling-scheme-for-japanese-pv-market (2022年2月10日取得)

³⁸ <https://tenbou.nies.go.jp/news/jnews/detail.php?i=32401> (2022年2月10日取得)

³⁹ <https://www.kankyo-business.jp/news/029366.php> (2022年2月10日取得)

⁴⁰ <https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/2109/06/news051.html> (2022年2月10日取得)

⁴¹ <https://pfa21.jp/28428> (2022年2月10日取得)

⁴² <https://www.nhk.jp/p/ohayou/ts/QLP4RZ8ZY3/episode/te/5ZVZLP296R/> (2022年2月10日取得)

参考文献

- E&ES, 2021, “太陽電池モジュールの回収実証事業を開始いたしました”, Available online at <https://www.eesol.co.jp/news/1929/> Accessed 2022-02-10
- E&ES, 2017, “平成 28 年度地域循環拠点(エコタウン等)高度化モデル事業廃太陽光発電パネルの広域収集網の連携に係るモデル事業”, 環境省, Available online at https://www.env.go.jp/recycle/1_e%20-%20and%20solutions%20report%2028.pdf Accessed 2022-02-10
- E&ES, 2016, “平成 27 年度地域循環拠点(エコタウン等)高度化モデル事業(廃太陽光発電パネルの広域収集網の構築に係るモデル事業)”, 環境省, Available online at https://www.env.go.jp/recycle/1_e%20and%20esolutions%20report%2027.pdf Accessed 2022-02-10
- NER, 2021, “太陽電池モジュールの回収実証事業を開始いたしました”, Available online at <https://www.nextenergy.jp/information/21802> Accessed 2022-02-10
- PV CYCLE, 2021, “PV CYCLE and AKITA PRTDO create PV CYCLE JAPAN”, Available online at <https://pvcycle.org/2021/07/01/joint-take-back-and-recycling-scheme-for-japanese-pv-market/> Accessed 2022-02-10
- Risopatron C. R., 2018, “Impurities in Copper Raw Materials and Regulatory Advances in 2018: A Global Overview”, <http://www.jogmec.go.jp/content/300358430.pdf> Accessed 2022-02-10
- World Bank, 2022, “Commodity Markets”, Available online at <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets#1> Accessed 2022-02-10
- 環境省, 2021a, 「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, Available online at https://www.env.go.jp/recycle/recycle/circul/EES_revise%2010625.pdf Accessed 2022-02-10
- 環境省, 2021b, 「太陽電池モジュールの適正なリユース促進ガイドライン」
- 環境省, 2018a, 「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, 2018b, 「太陽光発電のリサイクル・適正処分等に関する検討チームの取りまとめについて」, Available online at <https://www.env.go.jp/press/105678.html> Accessed 2022-02-10
- 環境省, 2011, 「資料4 リサイクルの費用対効果分析の考え方(案)」, 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会(第2回), Available online at <https://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y0324-02/mat04.pdf> Accessed 2022-02-10
- 環境省, 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)」, 環産産発第 061227006 号, Available online at <https://www.env.go.jp/hourei/11/000154.html>, Accessed 2022-02-10
- 経済産業省・国土交通省, 2016, 「ロジスティクス分野における CO2 排出量算定方法 共同ガイドライン Ver.3.1」, Available online at <https://www.greenpartnership.jp/asset/46989/view> Accessed 2022-02-10
- 埼玉県, 2021, “住宅用太陽光パネル無償回収中! ~処理の課題解決に向けて、御協力をお願いします~”, Available online at <https://www.pref.saitama.lg.jp/a0506/news/page/news2021090201.html> Accessed 2022-02-10
- 資源エネルギー庁, 2021, 「事業計画策定ガイドライン(太陽光発電)」, Available online at https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/fit_2017/legal/guideline_sun.pdf Accessed 2022-02-10
- 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)
- 株式会社三菱総合研究所, 2018, 「平成 29 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. 78-95 (2018)
- 日本鋳業協会, 2021, 「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律との連携 2021_同法における非鉄製錬所の有価物回収率の設定」, Available online at https://www.kogyo-kyokai.gr.jp/image/2021_C6B1CBA1A4CBA4AAA4B1A4EBC8F3C5B4C0BDCFA3BDEAA4C

- [ECDADB2C1CAAAB2F3BCFDCEA8A4CEC0DFC4EA.pdf](#) Accessed 2022-02-10
- 南埜ら, 2010, 「ノートパソコンおよび携帯電話からの金属およびプラスチックリサイクルに必要な TMR (都市鉱石 TMR) の算出と評価」, Journal of Life Cycle Assessment, Japan, 第 6 巻, 第 3 号, p.251-258, Available online at https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/6/3/6_251/_pdf/-char/ja Accessed 2022-02-10
- 原田ら, 2009, 「概説資源端重量」, NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18, Available online at <https://www.nims.go.jp/genso/0ej00700000039eq-att/0ej00700000039ld.pdf> Accessed 2022-02-10
- 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 Accessed 2022-02-10

略語集

略語	英語または原語	日本語
AKITA PRTDO	Akita Prefectural Resources Technology Development Organization	一般財団法人秋田県資源技術開発機構
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
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
LME	London Metal Exchange	ロンドン金属取引所
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
PVCJ	PV CYCLE JAPAN	-
PV CYCLE	PV CYCLE a.i.s.b.l.	-
TMR	Total Material Requirement	関与物質総量
ガイドライン	-	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)」
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