

太陽光パネルの高度循環に向けた
実証調査業務委託

報告書

令和4年3月

みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

目次

1	調査の背景	1
1.1	東京都における背景	1
1.2	本件提案における背景	1
2	調査の目的	2
3	現状と目指すべき姿	3
3.1	現状の資源循環型社会	3
3.2	目指す太陽光パネル循環	4
3.3	解決すべき課題	5
4	調査概要	10
5	課題解決に向けた取り組み	19
5.1	使用済み太陽光パネル発生量の将来推計	19
5.1.1	使用者の意図を考慮した排出量推計	19
5.1.2	リユース可能なパネルの排出量について	22
5.1.3	パネルの種類について	23
5.1.4	より詳細な地理的空間レベルでの予測の実施	25
5.1.5	参考文献	25
5.2	太陽光パネル取り外し実証試験	26
5.2.1	取り外し先の選定	26
5.2.2	協力者・施工事業者等との調整	27
5.2.3	計測項目の検討	28
5.2.4	取り外しの実施	37
5.2.5	太陽光パネル取り外し作業内容	52
5.2.6	太陽光パネル取り外し作業検討	56
5.3	住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験	60
5.3.1	診断項目の検討	60
5.3.2	診断方法の検討	61
5.3.3	診断の実施及び評価	66
5.3.4	診断を実施するにあたっての課題と対処方法	80
5.3.5	点検方法及び診断法（案）	82
5.3.6	参考文献	85
5.4	使用済み太陽光パネル収集運搬実証	86
5.4.1	運搬方法の検討と実証	86
5.4.2	収集運搬ルート of 検討	91
5.5	太陽光パネルのリユースに関する検討	96

5.5.1	リユース基準の検討	96
5.5.2	リユースパネルに求められる最低限の品質の検討	101
5.5.3	グレード設定	102
5.5.4	グレードごとの用途等の検討	110
5.6	太陽光パネルの分解方法	111
5.7	太陽光パネルのリビルド実証試験	113
5.7.1	リビルド方法の検討	113
5.7.2	使用済み太陽光パネルの分解技術の検討	117
5.7.3	分解部品の品質評価方法の検討	118
5.7.4	リビルドの実施	122
5.7.5	リビルド太陽光パネルの性能診断	126
5.7.6	リビルトパネルの製作コスト	129
5.7.7	太陽光パネルのリビルト品製作に関する課題	131
5.7.8	リビルト製品の評価	132
5.7.9	実用化可能性の検討	141
5.8	太陽光パネルリサイクルの検討	142
5.8.1	リサイクル実証試験	142
5.8.2	カバーガラス用途の拡大	246
5.8.3	参考文献	286
5.9	サプライチェーンの構築	287
5.9.1	サプライチェーンの検討	287
5.9.2	ライフサイクルアセスメント	289
5.9.3	サプライチェーンの具体化	309
5.9.4	太陽光パネルに関する情報共有の検討	317
5.9.5	排出手続きの検討	321
5.9.6	参考文献	337
5.10	まとめ（成果と課題）	340
5.10.1	使用済み太陽光パネル発生量の将来推計	340
5.10.2	太陽光パネル取り外し実証試験	340
5.10.3	住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験	340
5.10.4	使用済み太陽光パネル収集運搬実証	341
5.10.5	太陽光パネルのリユースに関する検討	341
5.10.6	太陽光パネルの分解方法	342
5.10.7	太陽光パネルのリビルド実証試験	342
5.10.8	太陽光パネルリサイクルの検討	343
5.10.9	サプライチェーンの構築	346

6 東京都における太陽光パネルの高度循環に向けた今後の課題	348
終わりに	353

1 調査の背景

1.1 東京都における背景

東京都（以下「都」）は、平成 28 年 3 月に公表した「東京都資源循環・廃棄物処理計画」に基づき、持続可能な資源利用への転換と良好な都市環境の次世代へ継承を実現するための施策を展開している。

国内での個別リサイクル法の整備に伴い、都内においても、容器包装、家電、小型家電などのリサイクルが促進された。今後、都内で大量に廃棄されると見込まれている太陽光発電設備についても、その 3R（リデュース、リユース、リサイクル）促進に向け、処理に係る技術開発、その他取組が行われている。しかし、太陽光パネルについては、有害物質を含む添加剤が使われることもあり、リサイクル用途が限られているのが現状である。リデュースやリユースにいたっては一部の事業者で取り組まれているに過ぎない。

一方、都は、学識経験者及び関係者で構成する「東京都使用済太陽光発電設備リサイクル検討会」を設置し、今後、大量廃棄が見込まれる使用済太陽光発電設備の 3R 及び適切処理が推進されるよう、使用済太陽光発電設備に含まれる有用金属及びガラスの効果的なリサイクル手法などについて検討している。

また、国においても、第四次循環型社会形成推進基本計画（2018 年閣議決定）の中で、「循環型社会形成に向けた取組の中長期的な方向性」として、太陽光発電設備に関して「適正なリユース・リサイクル・処分が確実に行われている」としており、そのための取組として「関連事業者による自主的な回収・適正処理・リサイクルスキームの運用状況や欧州の動向等を踏まえながら、リサイクルを促進・円滑化するための制度的支援や必要に応じて義務的リサイクル制度の活用を検討する。」としている。

このような状況の中、都が平成 30 年度（2018 年度）に創設した大学研究者による事業提案制度において、早稲田大学から提案があった「太陽光パネル高度循環利用に対する東京モデルの提案」（以下「本件提案」）が採択された。

1.2 本件提案における背景

本件提案では、都における太陽光パネルは、小規模ながら導入件数が多く、家屋等の建設廃棄物と共に継続的に排出される可能性が高いという特徴を有すると予想している。また、多くの消費者を抱え、今後も太陽光パネルの設置件数が増加する可能性があることから、比較的長期にわたって使用済み太陽光パネルが排出されるポテンシャルが高い状態が続く可能性があるとしている。

その一方で、現状では排出された使用済み太陽光パネルのリユースやリサイクルを促進するためのサプライチェーンが構築されているとは言い難く、不適切な処理やリユース先が拡大することによる環境汚染が懸念されている。更に、リサイクルについても使用済み太陽光パネルから回収したカバーガラス等の高度リサイクル先が検討されているものの、そ

の受入基準が不透明なため、資源の高度循環利用は促進されづらい状況にあるとしている。

このような背景のもと、本件提案では、都内に設置された太陽光パネルの特徴と、使用済み太陽光パネルのリユース・リサイクルの状況を踏まえ、使用が終了した太陽光パネルの高度循環利用と適正処理システムを構築することを目的として、2019年度に「研究調査」を実施し、その結果にもとづき2020年度から2ヶ年度かけて実証事業（以下「本実証」）を実施することを提案し、上述のとおり、都に採択されたところである。

2 調査の目的

これらの背景のもと、都は、本件提案にもとづく調査研究として2019年度に太陽光パネルの3Rに係る最適社会システム、分離濃縮技術及びサプライチェーンの在り方についての研究調査（以下「2019年度研究調査」）を早稲田大学と共同で行ってきたところである。

これを受け、2020年度は本実証の1年目として実証事業（以下「2020年度実証」）を実施した。

2021年度は、2020年度実証に引き続き、太陽光パネルの高度循環の仕組みを社会に実装するために必要となる3R各工程におけるデータ収集、処理技術の適用可否、部材別の3R方策などの検討、フィールドにおいて太陽光パネルの3Rを実施とその効果等の検証のための実証事業（以下「2021年度実証」）を実施することにより、都が今後予定している太陽光パネルの高度循環仕組みづくりに資することを目的とする。

3 現状と目指すべき姿

3.1 現状の資源循環型社会

循環型社会形成推進基本法が2000年に施行されて以降、循環型社会推進基本計画が四次にわたって策定されるなど国全体で循環型社会の形成に取り組んでいる。その間、リサイクル率が向上する等の進捗があるものの、現状では図3.1のように大量の天然資源が投入された大量生産大量消費型の一方通行の物質フロー（大きいループ）が中心で、リユースやリサイクルされる製品とそのルートは限られている（小さいループ）のが現状である。

天然資源を投入して製造された製品が使用済みとなり廃棄・回収されてもリユース可能な製品や部品であってもリユースされるものは限られている。その理由としては、リユース品の品質を保証できない、新しい製品を販売する方が利益が多い、新しい製品の規格に合わないなど様々なサプライチェーン上の問題が挙げられる。次にリユースされなかった製品は破碎・粉砕されて素材や元素ごとに選別される。しかし、そこで回収されるのは経済的に価値の高いものに限定されており、その多くは廃棄処理されている。また、選別回収されたものも天然資源から製錬されたのと同等の高精度な素材にリサイクルすることが求められ、環境負荷が大きい化学的処理によりリサイクルされている。

これらの結果、製品を製造するために必要な素材の量に比べて、リユースやリサイクルされる製品や素材の量が少ないため、天然資源の投入量が大きく資源効率が低い資源循環になっている。

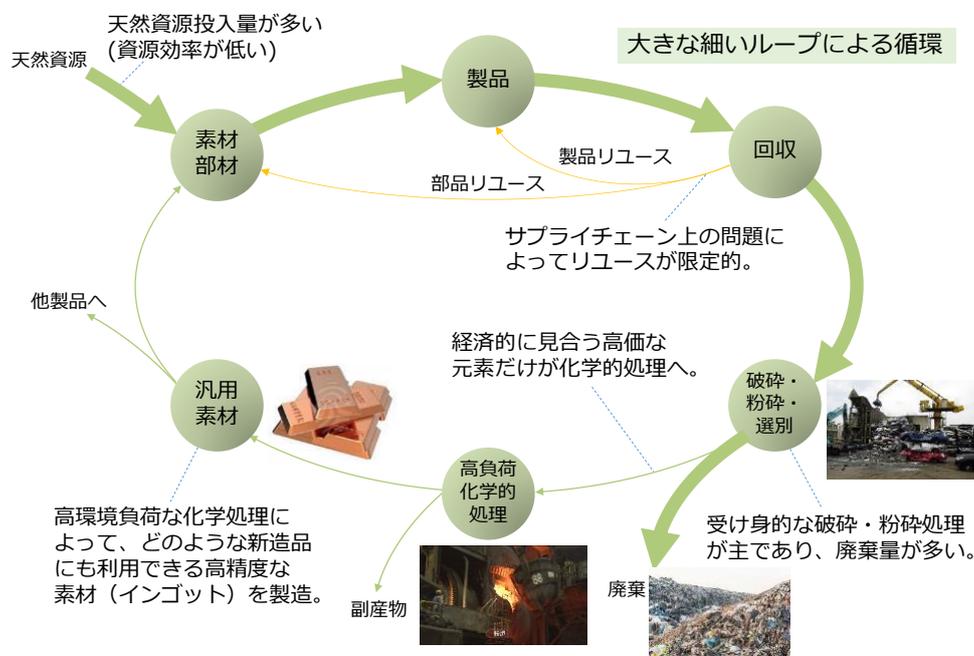


図 3.1. 現状の資源循環型社会

3.2 目指す太陽光パネル循環

天然資源の投入量が多く資源効率が低いと将来的に天然資源の枯渇を招くなど社会活動を維持・持続していくことが難しくなる。前節のような現状から持続可能な資源循環型社会を実現するためには、図 3.2 に示すように、使用済みとなった製品のリユースを積極的に進めるとともに、リユースできない製品は高度な物理的選別により素材のリユースや元の製品の素材にリサイクルすることが求められる。このようにすることで、破碎・粉砕・選別を経た化学的処理よりも環境負荷と新たな天然資源を抑制できる。また、高度な物理的選別後に化学的処理が必要になる場合でも、粉砕・破碎・選別処理したものよりも金属など素材の含有率が高いことが期待されるため、従来よりも省エネ、低環境負荷を期待できる。このようにサプライチェーンの各段階で循環できる多様なリサイクルループ（小さな多重ループ）を構築し、そのループでリユースやリサイクルされる割合を多くする（太いループにする）ことが持続可能な社会を構築するために必要である。

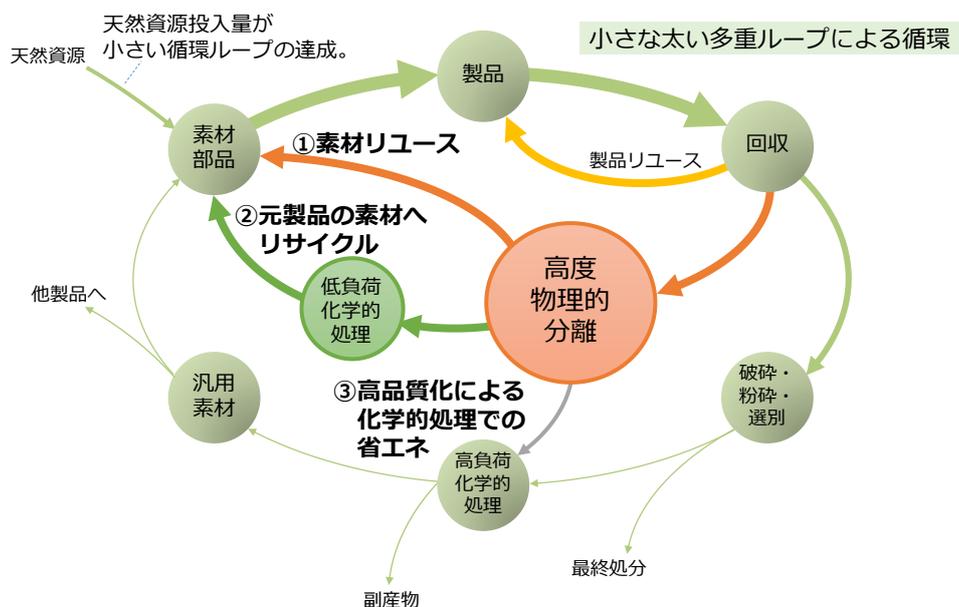


図 3.2. 目指すべき資源循環型社会

再生可能エネルギー活用による脱炭素を目指して太陽光パネルの導入が進んでいる一方で、太陽光パネルのリユースや水平リサイクルがされていない現状においては、その生産量に応じて生産に投入される天然資源の量も増加してしまう。そのため、太陽光パネルの導入による脱炭素を進めると天然資源の消費拡大を招いてしまう。更に、太陽光パネルはセルを構成する半導体をはじめ製造過程における温暖化ガス排出などの環境負荷が大きい部材が使われている。そのため、製造から廃棄までのライフサイクル全体で見ると脱炭素の効果が小さくなってしまいう可能性もある。太陽光パネルの導入による脱炭素促進の効果をより高めるとともに、天然資源の消費も極力抑制するために太陽光パネルのサプライチェーン

ンも図 3.3 に示すような小さな太い多重ループによる循環とすることが望ましい。

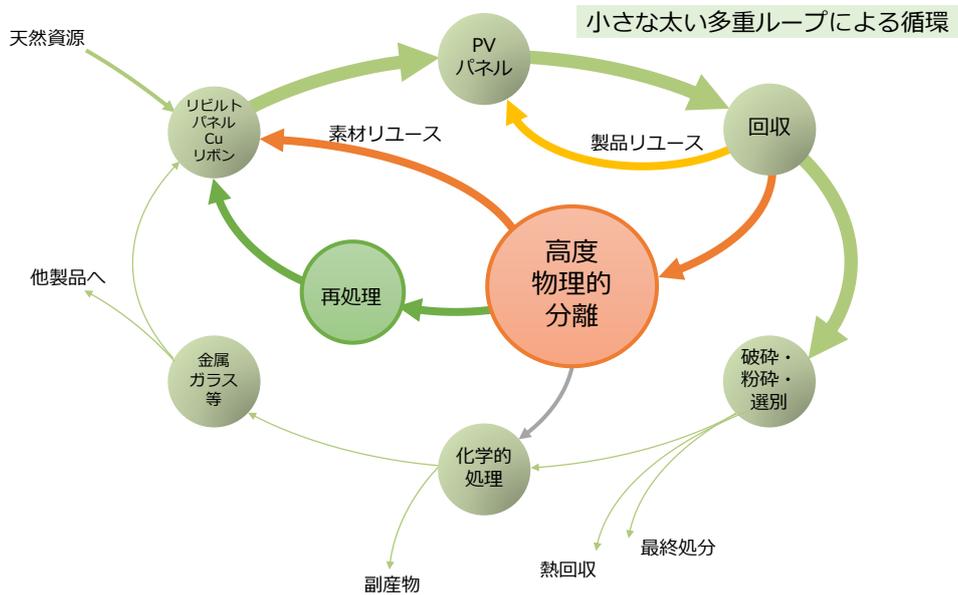


図 3.3. 目指す太陽光パネル循環

3.3 解決すべき課題

前節に示した太陽光パネル循環を実現するため、2019 年度調査研究で太陽光パネルの 3R に係る最適社会システム、分離濃縮技術及びサプライチェーンの在り方について検討した結果、高度循環利用の実現における問題点と、それを解決するために取り組むべき課題を表 3.1 のとおりまとめた。

表 3.1. 高度循環利用の実現における問題点と、それを解決するために取り組むべき課題

課題番号	問題点	取り組むべき課題
(1)	太陽光パネルの高度循環利用を実現するための基礎情報の不足	都道府県よりも細かい地域別、種類別の発生量予測
(2)	太陽光パネルの撤去に関わる業者の太陽光パネルに関する知識不足	太陽光パネルの撤去に関わる事業者間での役割分担の明確化と、習得すべき知識や技能の整理
(3)	太陽光パネルの効率的な運搬方法が不明確	太陽光パネルを破損させず、かつ、効率的に運搬する方法を明確化
(4)	使用済み太陽光パネルの収集運搬システムが未検討	地域別の発生量などに基づいた収集運搬方法と拠点配置などの検討

課題番号	問題点	取り組むべき課題
(5)	太陽光パネルのリビルト技術が未確立	開発すべき要素技術の整理と、その技術の開発
(6)	リビルトに関わる環境負荷等が未評価	ライフサイクルアセスメントに必要なデータの収集と、それに基づく評価の実施
(7)	ガラスリサイクルの受け入れ基準が不明確	ファイバー等へのリサイクルガラス使用条件を検討
(8)	効率的な太陽光パネルの性能診断手法が未開発	設置された状態である程度精緻に性能を診断できる手法の開発
(9)	高度分離技術が未確立	新規電気パルス法等による高度分離法の開発
(10)	分離技術の横断的・定量的な検討が不十分	ライフサイクルアセスメントに必要なデータの収集と、それに基づく評価の実施
(11)	オンサイトガラス分析技術が未確立	固体分析技術の組み合わせによるオンサイト分析技術の検討

なお、各問題点の問題意識は次のとおりである。

(1) 太陽光パネルの高度循環利用を実現するための基礎情報の不足

高度循環利用を実現するためには、使用済みとなった太陽光パネルを回収する仕組みをはじめ、施設の配置、導入する処理技術やその処理能力などの社会システム像を予め検討しておく必要がある。そのための基礎情報の一つとして将来的に発生する使用済み太陽光パネル発生量がある。現在、国や都道府県単位での発生量の予測値は存在するものの、これだけでは不十分である。

高度循環利用を実現する社会システム像を検討するためには、都道府県単位よりも細かい地域区分で発生量を把握するとともに、その種類の内訳や使用状況などの情報が必要になる。

(2) 太陽光パネルの撤去に関わる業者の太陽光パネルに関する知識不足

住宅に設置された太陽光パネルの撤去や更新がまだ少ない現状においては、住宅の解体処理業者やリフォーム業者が太陽光パネルの撤去に関する知識や技能を保有する必要性は低く、これらの事業者の多くはその知識や技能を保有していないものと考えられる。

しかし、太陽光パネルは光が当たると発電するため、不適切な取り扱いや破損によって作

業者が感電するなどの危険性があるため、その撤去等に従事する作業員はその取扱いに関する適切な知識を有することが必要である。

また、撤去された太陽光パネルは、廃棄物として適切に処理される必要がある。しかし、これらを適切に処理できる事業者は限られており、その存在を認知している住宅の解体処理業者やリフォーム業者は極めて少ないと思われる。太陽光パネルの撤去などを委託する住宅の所有者すなわち一般消費者も状況は同じと考えられる。

このような状況に鑑みると、使用済み太陽光パネルを安全に撤去し、かつ、適正に処理するためには、その撤去に関わる事業者間での役割分担を明確にするとともに、習得すべき知識や技能を整理する必要がある。

(3) 太陽光パネルの効率的な運搬方法が不明確

使用済み太陽光パネルのリユースなどの高度循環利用を実現するためには、使用済みの太陽光パネルを破損しないように梱包して慎重に運搬する必要がある。その一方で過剰な梱包は、輸送コストの増加の原因となり望ましくない。しかし、現状では太陽光パネルを破損させず、かつ、効率的に運搬する方法が不明確なため、これを明らかにする必要がある。

(4) 使用済み太陽光パネルの収集運搬システムが未検討

将来的に使用済み太陽光パネルが大量に発生することが予想されている一方で、それらを回収する仕組みについては検討されていない。リユースやリサイクルなどにおいては一般的にその収集運搬コストが大きな割合を占めていることが多く、太陽光パネルにおいてもその割合を下げるのがその高度循環利用の促進に資するものと考えられる。

一般に貨物の収集運搬方法には大きく分けて、二点間を往復する拠点間輸送、集積所を設けてそこに小口の貨物を集約してまとめて運ぶ中継輸送、集配地点を巡回するミルクラン輸送の三種類がある。これらのうち、どの方法を選ぶかによって収集運搬コストは大きく変わり、どの方法が最適かは収集運搬する貨物が発生する場所と量によって変わってくる。また、中継拠点などを設ける場合は、その立地によっても輸送コストが変わる。

将来大量に発生することが予想される使用済み太陽光パネルを効率的に回収して運搬するには、地域別の発生量などに基づいた収集運搬方法や拠点の配置などの検討が必要である。

(5) 太陽光パネルのリビルト技術が未確立

使用中の破損や劣化によりリユースには不相当と判断された太陽光パネルであっても、その部材を再利用して太陽光パネルのリビルドが可能なものがある。特に、太陽光パネルの重量の半分以上を占めるカバーガラスを再利用できれば使用済みの太陽光パネルの処理に伴う環境負荷などを低減できる可能性がある。

しかしその一方で使用済み太陽光パネルの部材を再利用したリビルドの技術は現時点で未確立である。そのため、今後は開発すべき要素技術を整理し、その技術を開発することが必要である。

(6) リビルドに関わる環境負荷等が未評価

使用済み太陽光パネルを再利用したリビルドは、その製造段階において新品の部材を使用するよりも環境負荷は低いと予想される。しかし、リビルドのためには、使用済み製品からリビルドに再利用する部材を分離し、必要に応じて修理等をする必要がある。

環境負荷を評価する場合には、これらを考慮したライフサイクルを通じた負荷を評価すべきであるが、現時点では評価に必要なデータが存在していない。そこで、今後は、リビルドに関わるエネルギー消費量などのデータを収集するとともに、これらを利用したライフサイクルアセスメントにより、最適な処理方法を明らかにする必要がある。

(7) ガラスリサイクルの受け入れ基準が不明確

ガラスの再利用先には、カレット、ファイバー、タイル、ブロック等、様々な用途があるが、それぞれに求められる元素濃度や粒度などの基準が明確ではないことが、サプライチェーンを構築できない 1 つの原因となっている。特にガラス再利用先としてポテンシャルが高いと考えられるファイバーに関しては、リサイクル起源のガラスを利用した際に得られる品質について実証しながらその基準を明らかにすることが求められる。

(8) 効率的な太陽光パネルの性能診断手法が未開発

高度循環利用において最初に目指すべきは、環境負荷低減効果が最も高いリユースである。そのためには、使用済みとなった太陽光パネルがリユースできる性能を維持しているかを確認する必要がある。リユース可能性を確認するためには、国際電気標準会議規格（以下「IEC」）60904-1 や日本産業規格（以下「JIS」）C8913 で定められた標準試験条件のもとで性能を診断することが望ましく、そのためには、性能診断設備が整った工場などに運ぶ必要がある。このような現状では、そのための輸送コストをリユース太陽光パネルの価格に上乗せされることになり、結果としてリユースの進展を妨げることになる。

このような非効率をなくし、リユースを促進するためには、設置された状態で太陽光パネルの性能を診断する手法の開発が求められる。

(9) 高度分離技術が未確立

リユースやリビルドに適さない使用済み太陽光パネルや、リビルドに利用されなかった部材などはリサイクルされることが望ましい。このリサイクルにあたっては、部品や部材ごとに選別された後、破碎され素材ごとに分離回収される。しかし、大量処理が可能な集合粉

碎法は分離の精度が低く、分離精度が高い処理法は大量処理が困難でコスト上の制約がある。この課題を解決するために、分離精度をさらに向上させる高度分離技術の検討が必要である。電気パルスを用いた分離法は、従来の機械的な分離方法とは異なる選択性を有し、分離精度を大きく向上させることができる可能性を有しているため、太陽光パネルへの適用可能性を検討すべきである。

(10) 分離技術の横断的・定量的な検討が不十分

使用済み太陽光パネルをリサイクルするための分離技術は複数存在するが、その分離精度や分離に伴う環境負荷はその技術によって異なることが予想される。しかし、それらの環境負荷や経済性が横断的に検討されていないことから、パネルの状態やその後の再利用方法に応じてどの分離技術を採用すべきかが明らかではない。そのためには LCA に必要な各分離技術のデータを充実させ、処理前後のプロセスも視野に入れた評価検討が必要である。

(11) オンサイトでガラス分析技術が未確立

多様なガラスのサプライチェーンを考慮しながらガラスをリサイクルするためには、リサイクルプロセスの前にガラス成分をある程度正確にオンサイトで迅速に分析する必要があることが確認されたが、その技術は確立されていない。XRF や FT-IR 等の非破壊型の固体分析技術を組み合わせ、オンサイトで迅速なガラス分析技術を確立する必要がある。

4 調査概要

目指すべき太陽光パネルの高度循環を実現するために取り組むべき課題は前章の表 3.1 に示したとおりである。これを受け、本実証ではこれらを解決するため表 4.1 に示す項目を実施した。この表 4.1 の課題番号は、表 3.1 に対応しているので具体的な内容は表 3.1 を参照いただきたい。また、実施項目の前の数字は本報告書における章番号を示している。

表 4.1. 高度循環利用の実現に向けた課題を解決するために実施した項目

課題番号	課題解決のために実施した項目	
	2020 年度実証	2021 年度実証
(1)	5.1 使用済み太陽光パネル発生量予測	5.1 使用済み太陽光パネル発電性能別発生量予測
	5.9.4 太陽光パネルに関する情報共有の検討	5.9.4 データベースの構築
(2)	5.2 太陽光パネル取り外し実証試験	—
(3)	5.4.1 運搬方法の検討・実証試験の実施	—
(4)	5.4.2 収集運搬シミュレーションの実施	5.4.2 収集運搬シミュレーション
(5)	5.7 太陽光パネルのリビルト実証試験	5.7 リビルト製品の評価
(6)	5.9.2 ライフサイクルアセスメント	5.9.2 ライフサイクルアセスメントの実施
(7)	5.8.2 リサイクル受け入れ基準の検討	5.8.2 カバーガラスのリサイクル用途拡大の検討
	5.8.2 グラスウールの試作	5.8.2 有機物がグラスウールに及ぼす影響及び事業化の可能性の検討
	5.8.2 グラスウールサプライチェーンの検討	
(8)	5.3 住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験	5.5 リユースの検討
	5.5 太陽光パネルのリユースに関する検討	
(9)	5.8.1 リサイクル方法の検討	5.8.1 物理選別の実証
	5.8.1 分離濃縮技術の検討	5.8.1 分離・選別における回収率向上のための検討
	5.8.1 分離濃縮の実施	5.8.1 LCAの対象となる分解・分離・濃縮プロセスの検討

課題 番号	課題解決のために実施した項目 ※実施項目の前の数字は本報告書における章番号	
	2020 年度実証	2021 年度実証
(10)	5.9.2 ライフサイクルアセスメント	5.9.1 サプライチェーンの検討 5.9.2 ライフサイクルアセスメントの実施
(11)	5.8.1 カバーガラスの成分分析の実施	5.8.1 オンサイト成分分析実証
		5.9.5 排出手続きの検討
		5.9.3 サプライチェーンの具体化

また、実施項目の概要と担当機関を表 4.2 と表 4.3 に示す。さらに、実施体制図を図 4.1 と図 4.2 に示すとともに、太陽光パネル高度循環のサプライチェーンと実施項目の対応を調査の全体像として図 4.3 に示す。

表 4.2. 実施項目と担当機関（2020 年度実証）

実施項目	実施概要	担当機関
使用済太陽光パネル発生量予測	太陽光パネルの発生量を予測することにより、収集運搬シミュレーションとライフサイクルアセスメントに利用する使用済み太陽光パネルの発生シナリオを提供した。	東京大学 村上進亮研究室
太陽光パネルに関する情報共有の検討	使用済み太陽光パネルの高度循環に必要な情報をサプライチェーンで共有するためのデータベースについて検討した。	
住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験	住宅屋根上に設置された太陽光パネルのリユース可否等を判断するための性能診断方法について実証するとともにその課題等を整理した。	エヌ・ピー・シー
太陽光パネル取り外し実証試験	住宅屋根上に設置された太陽光パネルのリユースを想定した取り外しを実証するとともに、その課題等を整理した。	早稲田大学 所千晴研究室
使用済み太陽光パネル収集運搬実証	—	—
運搬方法の検討・実証試験の実施	住宅屋根上から取り外された太陽光パネルの収集運搬を実証するとともに、収集運搬シミュレーションとライフサイクルアセスメントに利用するデータを収集した。	浜田 東京大学 村上進亮研究室

実施項目		実施概要	担当機関	
	収集運搬シミュレーションの実施	将来の使用済み太陽光パネルの発生シナリオにもとづき、東京 23 区を対象に効率的な収集運搬方法を検討するためのシミュレーションを実施した。	東京大学 村上進亮研究室 白井グループ	
	太陽光パネルのリユースに関する検討	使用済み太陽光パネルをリユースするための安全基準を検討した。	エヌ・ピー・シー	
	太陽光パネルのリビルド実証試験	使用済み太陽光パネルから分離したカバーガラスを再利用したリビルドを実施し、その発電性能を確認した。	エヌ・ピー・シー	
	太陽光パネルのリサイクル実証試験	—	—	
	リサイクル方法の検討	使用済み太陽光パネルのリサイクル方法として、粉碎法とホットナイフ分離法®を対象に、分離・分解の効果と技術上の課題等について比較評価した。	早稲田大学 所千晴研究室 アイアイエスマテリアル リトカ研究者 工房	
	分離濃縮技術の検討	粉碎法においては一次粉碎物、ホットナイフ分離法®においてはセルシートを対象に有用金属等の分離濃縮の効果と技術上の課題等について比較評価した。		
	分離濃縮の実施	ここまでの比較評価にもとづいて選定した技術を利用して太陽光パネルからの有用金属等の分離濃縮を実施し、その効果と課題などを整理した。		
	カバーガラスの成分分析の実施	使用済み太陽光パネルの受け入れ時に簡易にガラス成分を把握するオンサイト型分析技術の可能性を検討するため、定性分析（非破壊分析）と、定量分析（粉碎処理した溶出試験）を実施し、その結果を比較検討した。		
	リサイクル受け入れ基準の検討	ホットナイフ分離法®によって太陽光パネルから分離したカバーガラスをガラス製品等として受け入れる際の基準について情報を整理した。		東京大学 醍醐市朗研究室
	ガラスウールの試作	ホットナイフ分離法®によって太陽光パネルから分離したカバーガラスを使用してガラスウールを試作し、その可能性と課題を整理した。		JW ガラスリサイクル 東京大学 醍醐市朗研究室
	ガラスウールサプライチェーンの検討	使用済み太陽光パネルから得られたカバーガラスからのカレット生産、ガラスウール生産工場での受け入れ可能性に関わる情報を整理した。		東京大学 醍醐市朗研究室

実施項目	実施概要	担当機関
ライフサイクルアセスメント	使用済み太陽光パネルの高度循環に関わるサプライチェーンの環境負荷を評価するための指標を検討するとともにその評価に必要なデータを収集した。	東京大学 菊池康紀研究室

表 4.3. 実施項目と担当機関（2021 年度実証）

実施項目	実施概要	担当機関
使用済み太陽光パネル発電性能別発生量予測	使用者の意志決定に関するアンケート結果に基づき使用済み太陽光パネル発生量を予測した。更に、その中でリユース可能な量についても推計した。	東京大学 村上進亮研究室
排出手続きの検討	本実証と太陽光パネル排出に関わる関係者へのヒアリング結果をもとに、排出に関わる課題を整理した。その結果にもとづきそれらの課題を解決するための方策を検討した。	早稲田大学 所千晴研究室
収集運搬シミュレーション	将来の使用済み太陽光パネルの発生シナリオにもとづき、東京多摩地区を対象に効率的な収集運搬方法を検討するためのシミュレーションを実施した。	東京大学 村上進亮研究室 白井グループ
リユースの検討	使用済み太陽光パネルをリユースするために必要な再現の品質を検討した。更に、この基準を満たしたものについてのグレード分けを検討するとともに、グレードごとの用途を検討した。	エヌ・ピー・シー 東京大学 村上進亮研究室
リビルト製品の評価	2020 年度実証で製作したリビルトパネルを対象に長期使用を想定した加速試験（高温高湿試験）を実施してその耐久性を確認した。また、それらの結果にもとづき、リビルトパネルの実用化の可能性を検討した。	エヌ・ピー・シー
リサイクルの実用化の検討	—	—
分離・選別技術の確立に向けた実証	—	—
オンサイト成分分析実証	実プロセスに装備されているオンサイト XRF 分析装置によるカバーガラスの自動成分分析結果と、湿式化学分析結果等を比較することでオンサイト XRF 分析の有効性を確認した。	早稲田大学 所千晴研究室 浜田
物理選別の実証	ホットナイフ分離法®で分離したセルシートを実プロセスで破碎、選別等を実施して得られたサンプルを粒群ごとに成分分析を実施して実プロセスの有効性を確認した。	早稲田大学 所千晴研究室 浜田

実施項目		実施概要	担当機関
	分離・選別における回収率向上のための検討	2020 年度実証で有効性を確認した新規電気パルス法における金属回収率の向上を検討した。更に、その前後のプロセスと組み合わせた金属回収率の向上についても検討した。	早稲田大学 所千晴研究室
	LCA の対象となる分解・分離・濃縮プロセスの検討	本実証における分解・分離・濃縮プロセスの検討にもとづき、使用済太陽光パネルの循環に係るサプライチェーンの一部を構成する可能性のある分解、分離、濃縮プロセスを抽出し、それぞれの特徴、課題等を整理した。	早稲田大学 所千晴研究室 東京大学 菊池康紀研究室 東京大学 醍醐市朗研究室
用途開発		—	—
	カバーガラスのリサイクル用途拡大の検討	カバーガラスのリサイクル先の可能性を拡大するため、板ガラス、ガラスびん、タイル、セラミックブロック、グラスウールを対象として、その原料に要求される受け入れ基準を整理した。	東京大学 醍醐市朗研究室 JW ガラスリサイクル
	有機物がグラスウールに及ぼす影響及び事業化の可能性の検討	2020 年度実証においてカバーガラスを原料としてグラスウールを作成するにあたっては、付着した有機物の影響を受ける可能性が示唆されたことを受け、カバーガラスを希釈して熔融・繊維化試験とグラスウールの試作を実施するとともに、その事業化の可能性を検討した。	東京大学 醍醐市朗研究室 JW ガラスリサイクル 浜田
サプライチェーンの構築		—	—
	サプライチェーンの検討	使用済み太陽光パネルの分離・選別技術の検討、カバーガラスの用途の検討などの結果をふまえ、ライフサイクルアセスメントの対象とするサプライチェーンを検討した。	東京大学 菊池康紀研究室 東京大学 醍醐市朗研究室
	LCA の実施	評価の対象としたサプライチェーンについてフォアグラウンドデータとバックグラウンドデータを収集してライフサイクルアセスメントを実施した。	東京大学 菊池康紀研究室
	サプライチェーンの具体化	使用済み太陽光パネルの分離・選別技術の検討、カバーガラスによるグラスウール試作およびライフサイクルアセスメントの結果を受けてサプライチェーンを具体化した。	東京大学 菊池康紀研究室 東京大学 醍醐市朗研究室 早稲田大学 所千晴研究室

実施項目	実施概要	担当機関
データベースの構築	2020 年度実証で整理した使用済みの太陽光パネルを高度循環するために必要な情報と、それらをデータベース化するための構造の検討結果にもとづき、実際にデータを収集してデータベースを構築した。	東京大学 村上進亮研究室

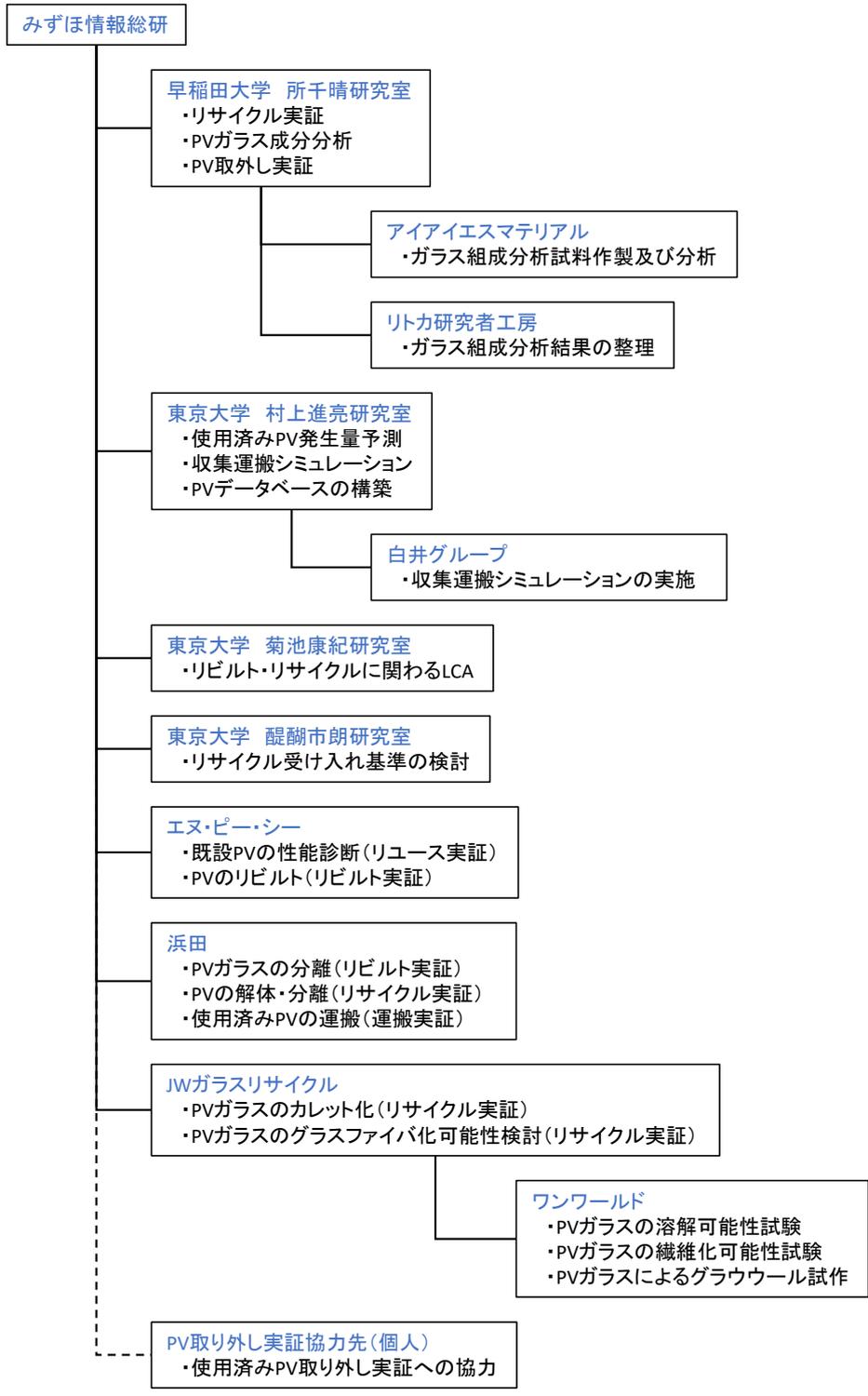


図 4.1. 実施体制 (2020 年度実証)

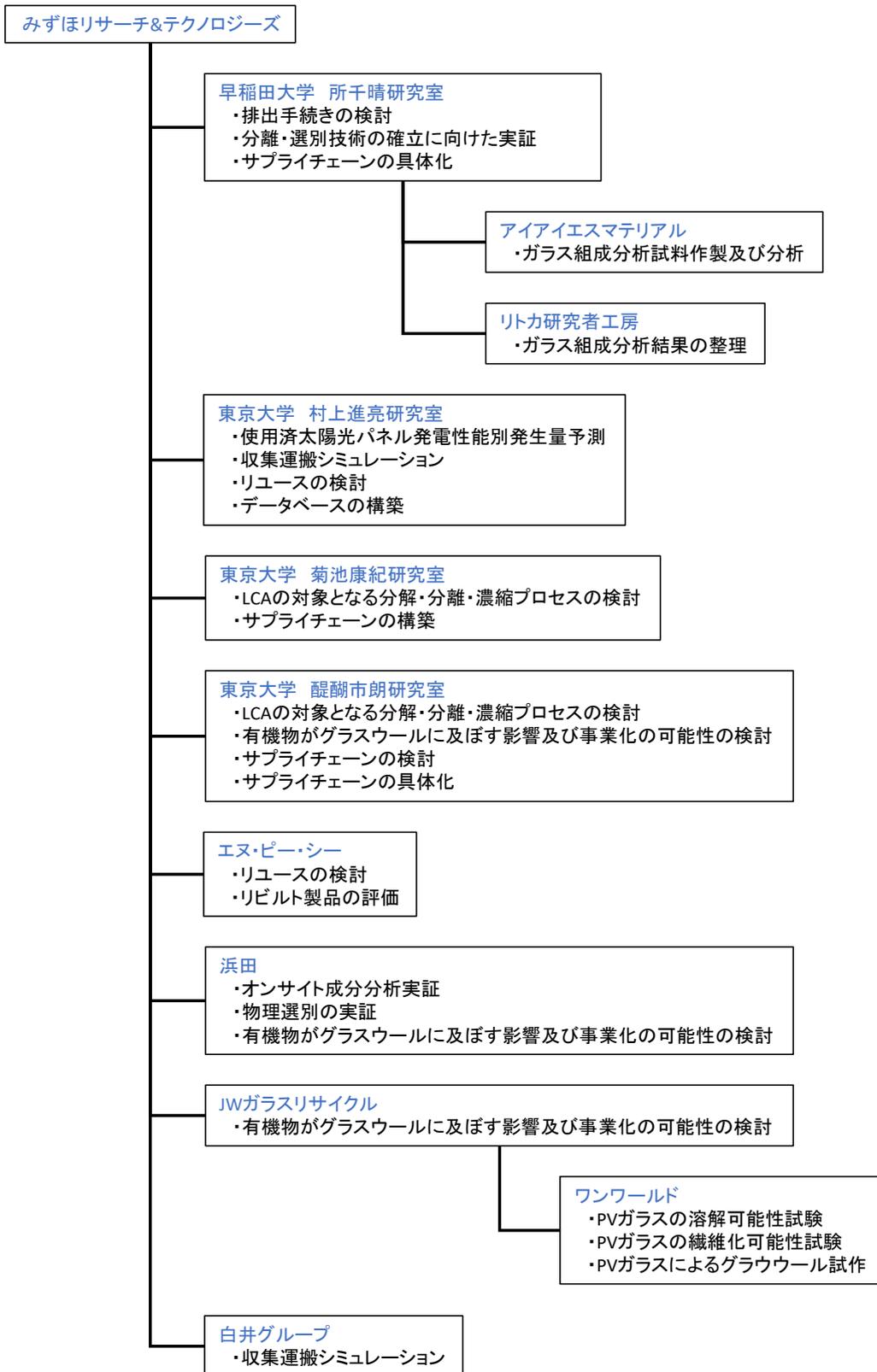


図 4.2. 実施体制（2021 年度実証）

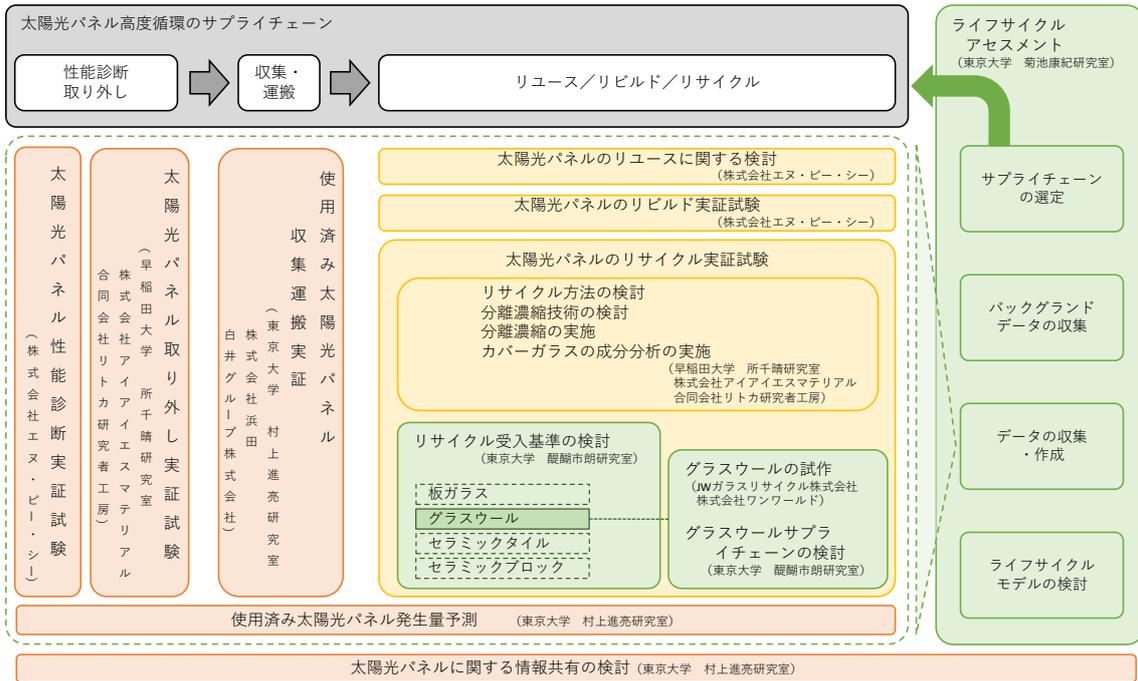


図 4.3. 調査の全体像

5 課題解決に向けた取り組み

5.1 使用済み太陽光パネル発生量の将来推計

5.1.1 使用者の意図を考慮した排出量推計

廃棄物処理の研究においても、またマテリアルフロー分析/マテリアルストック分析 (Material Flow Analysis (MFA) / Material Stock Analysis(MSA)) においても使用済み品の発生量予測の研究は多いが、その多くは機械的な寿命のみを考えた製品寿命分布を考え予測を行うか、消費者意図等も含めて実際の寿命データから統計的に推計した分布を用いるものである。

他方で、太陽光パネルについては、機械的寿命は非常に長いと考えられており、またそこに影響を与える使用者の意志決定も極めて多い。ここで、表 5.1 に発生量予測における主要なパラメータとそれぞれが持つ予測精度に与える影響度を記す。

表 5.1. 発生量予測モデルにおけるパラメータ

パラメータ	補足説明	予測精度への影響
使用者の行動(意志決定)に依存するもの		
利用中の以下の段階における意志決定		
1. FIT 期間終了	家庭系は FIT 期間が短いことから、事業者ほどのインパクトはない。	△
2. 初期投資回収時点	初期投資回収時点を認識できていない可能性がある。	△
3. 営業を受けた場合	上記 2 に加えて営業を受けた場合と、上記 2 を認識できていない場合の両方とする。	○
4. 理想使用年数経過時	一般に耐久消費財の研究において昨今注目されているパラメータ。ただし、その年数が変化する可能性がある。	△
人の意志決定以外の外的要因		
5. 住宅の改築	住宅の築年数と太陽光パネル設置のタイミングの組み合わせは実年数ではない。	△ (データが取れば改善するが困難)
6. 太陽光パネルの劣化	最も支配的な要因と考えられるが、実データは少なく、改善の余地はある。	○
7. 太陽光パネルの進化	新規パネルの効率向上は導入済みパネルの相対的劣化につながる。	△

本実証では表中の項目 1-4, 5 という太陽光パネルの機械的寿命そのもの以外の外的要因

を考慮しつつ発生量予測を行うモデルを作成した。モデルの詳細については論文化し公表済みである[1]。

使用者の意志決定についても、実データが存在しないことからアンケート調査により表 5.1 の項目 1～4 の場面において買換や廃棄をするのかを問うことでこうした場面において使用済み品が発生する確率の分布を得た。更に太陽光パネルの機械的寿命については IRENA[2]による予測で用いられているワイブル分布に、形状パラメータとして 5.25、平均寿命として 30 年を与えることとした。ただしこの平均寿命 30 年という数字は短いと言う声が我々のヒアリング調査等から多く聞かれたことから、文献等から劣化率等の数字を用い算出した 57 年をより長い寿命を持つ場合のシナリオとして与えた。

その他、住宅の寿命等については、パネル設置時に既設住宅であったか新築であったか、既設であった場合にはその築年数の情報等を与えつつ、住宅に対しても文献等から得られたワイブル分布で寿命を設定した。

新規導入量については、2019 年までは実データとし、それ以降 2050 年までは太陽光発電協会(JPEA)のシナリオに合致するように都道府県市区町村レベルに比例配分し、その後は一定とした。

こうして大きく 3 つの要素、すなわち使用者の意志決定、パネルの寿命、住宅の寿命という 3 つの独立した要素が設定した分布に基づいて決定されるようなモデルを構築し、その組み合わせについてはモンテカルロシミュレーションを用い、具体的には 100 回の試行を通して平均的な結果を算出することとし、その結果を図 5.1 に示す。

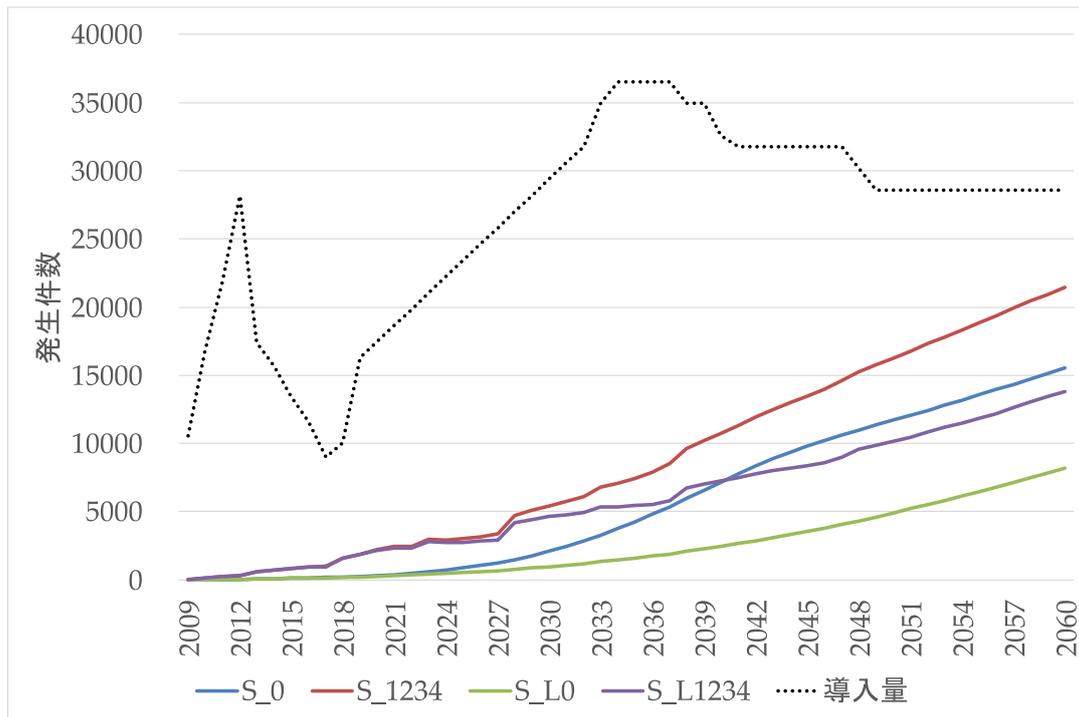


図 5.1. 使用済みパネルの発生量予測

シナリオについてはシナリオ名に L とあるものはパネルの平均寿命を 57 年と設定した長寿命のもの、それ以降の数値は表 5.1 の項目 1~4 のどれを考慮しているかを示す。よって図中の 1234 の場合にはすべてを考慮していることを示す。そして一つも考慮していない場合については 0 を付すこととした。

当然ながらパネルの寿命の 2 つのシナリオの持つ影響は大きい。ただし、それぞれの寿命設定に対し、使用者の意志決定が持つ影響もまた大きいことが分かる。消費者の意志決定項目 1~4 すべてを考慮に入れた場合(S_1234)と、全く入れない場合のシナリオ(S_0)を比較すると、当初から全く異なる結果を示す。この差はすなわち使用者意図による排出分であって、故障前に使用済みとなるパネルを意味している。S_1234 と S_L1234 の両シナリオで、2023, 2028 年で不連続な増加が見られるが、これらは導入の変曲点である 2013、2018 年の変化に対して 10 年の FIT 切れの影響を受けたものと考えられる。また、2038 年にも小さな不連続な変化が見られるが、その他の消費者意図について 20 年とする回答が少なからずあったことにも影響を受けている。具体的には意志決定要因の 2(及び 3), 4 についてはイベントの発生点としては利用者の思う初期投資の回収年ならびに理想使用年数をアンケート内で聞きその年数に発生しているわけだが、20 年とする回答は少なくない。これが導入から 20 年のピークとして現れていると考えられる。また逆に S_1234 と S_L1234 を比べると 2030 年近くまでは似たような挙動を示しつつその後に差が現れるのは故障による発生ペースの違いが見えるレベルに到達してきたことを示す。それは S_0 と S_L0 という

使用者意図を考えない二つの結果の比較からも明らかである。結論としては、使用者意図を考えなければ 2030 年頃までは非常に少ない発生しかおきないが、もしこれを考えるならばより早い段階から対策を講じる必要があることになる。逆に S_0 を基軸に考えれば、どんなに遅くとも 2040 年頃までには何らかの対策が必要であろう。

5.1.2 リユース可能なパネルの排出量について

前項で述べたとおり、ここで開発した使用済み品発生量予測モデルでは、パネル故障による発生か、それ以外の理由(使用者意図に加え住宅がパネルよりも先に寿命を迎えるケースもある)での発生かについては識別可能である。そこで、仮にパネル故障によるものをリユース不可、それ以外のものをリユース可能と考えた際にどの程度の比率になるのかについて図 5.2 に示す。

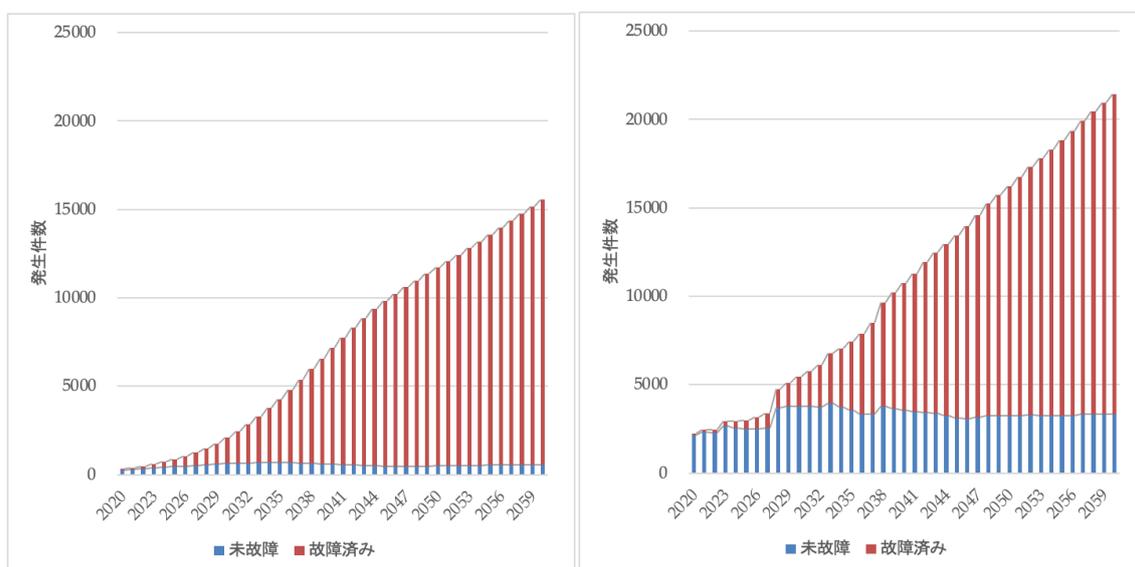


図 5.2. パネル故障以外の使用済み品の発生量 (左 : S_0, 右 : S_1234))

S_0 における再利用可能な使用済み品の発生はすべてパネル寿命よりも先に住宅の寿命が来た場合によるものであり、これと S_1234 との差は主として使用者意図によると考えられる。したがって図 5.2 で示した結果はある意味中古利用可能性のあるパネルの最大量を示していると理解すべきである。S_0 についてみると 2020 年代後半までかけ緩やかに 500 件程度まで増加した後はその前後の数値で安定する。使用者意図が加わる S_1234 の場合、2030 年頃までかけ 3500 件程度まで増加した後同様に安定する。これはシミュレーションの性質上すべてのパラメタにある種の分布を持たせていることもあり、導入側がある程度安定してくればこれを受けて発生する量もまた安定することを意味する。

ただし、実際には、故障していないとは言え余りに古いもののリユースは難しいと考えられる。このモデルに例えばパネルの種類等を与え、より最新型の高リユース可能性が高い

と判断することも可能ではあるが、これにつながる導入側のデータを得ることが出来なかったことから、今回は使用後経過年数によって識別するものとする。S_1234 について、使用年数ごとのシェアを図 5.3 に示す。

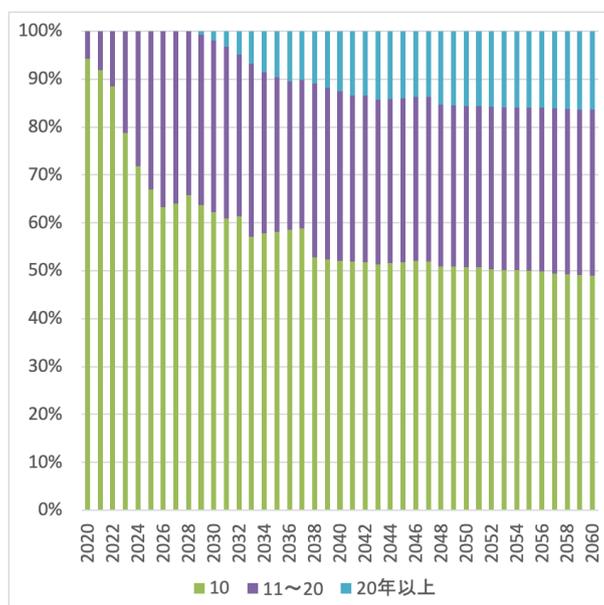


図 5.3. 未故障品の使用年数の違い（凡例中の数値は使用年数）

なお、図 5.3 の結果は図 5.2 の中にある未故障品の使用年数別にみた内訳である。初期においては内訳としては 10 年以下ばかりになるが、導入から期間が経っていないゆえそもそも導入後 10 年以上経過したパネルが余り存在しないことによる結果であり、徐々に使用期間が 10 年以上経過したパネルが増えていく。ただし、2040 年頃を境にある程度飽和していくように見える。図 5.2 に示した量とあわせて言うと、2020 年代には 2000 件程度の数の使用年数 10 年以下のパネルが発生する可能性があり、その後はより古い未故障のパネルが発生することとなる。その後使用年数 10 年以下のパネルは若干減少しそれより古い未故障のパネルが増加する。もし使用年数 10 年以下のパネルにリユース可能性があるのであれば潜在的な可能性は十分であり、それより古い物についてもリファーマビリティやリマニュファクチャリングと言ったより積極的な再利用の形を検討する価値はあろう。ただしこれがリサイクルよりも望ましいものかについては別項にある LCA の結果等に譲り、ここでは潜在的な量を示すにとどめたい。

5.1.3 パネルの種類について

リユース可能性に影響を与えるのは年式だけではない。例えば、パネルの種類は一つのパラメータとなり得る。そこで、中古利用、リサイクル利用にかかわらず排出されたパネルを収集している事業者に対して情報提供を依頼し、その結果を整理することで、現時点までの

発生量に関する何らかのパターンの抽出を試みた。調査から得られた 2020 年および 2019 年の発生に関する情報を図 5.4 に示す。

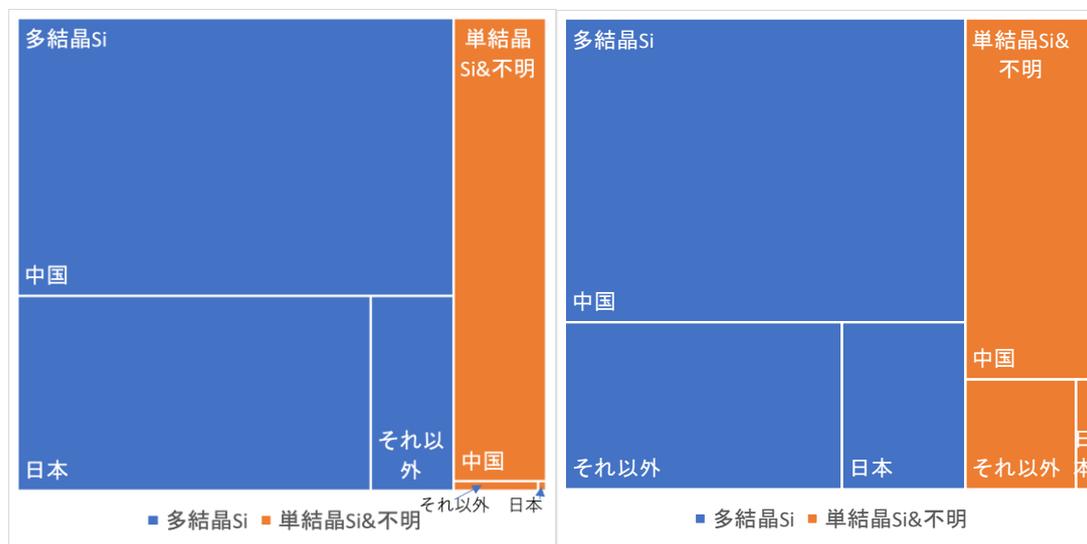


図 5.4. 回収された使用済みパネルの変化（左 2020、右 2019 年）

まず、多結晶 Si、単結晶 Si の比率から、すでに多結晶 Si の方がはるかに多いことが分かる。よく知られているように、かつてスタンダードな単結晶 Si が市場を席巻していた 1980-90 年前半の時期を過ぎ、製造コストの安い多結晶 Si が取って代わっていたが、いわゆる「裏面不動態型セル」(PERC: Passivated Emitter and Rear Cell) の普及が進む中で多結晶 Si と p 型単結晶 Si の 2 種類の中、後者が支配的になり、数年前から単結晶 Si が市場シェアで 1 位にたったと言われている。PERC にも多結晶も存在したが、p 型単結晶を使った PERC は多結晶のものに比してコストが低く市場を席巻したとされている。この傾向と図 5.1 より、故障して使えないほど古くはないパネルがそれなりの量、発生していると推察できる。

しかしながら、特にリサイクル、廃棄物処理に回っているパネルについて網羅的な調査を実施することは極めて困難であった。また、図 5.1 に示したデータの中には家庭系も、そうではないものも含まれていることから、今回の推計精度の改善に至る情報はえられなかった。

他方で、故障前に、ある程度のパネルがリユース可能な状況で発生していることについては、量的にも、また、その中の種類からも、それほど古くない製造年のパネルが発生していることを示すエビデンスをある程度得ることが出来た。これにより、2019 年度研究調査の予測に関してある程度の妥当性があることは確認でき、また、本実証がリユースに関する検討を実施していることの妥当性も確認されたと考える。

5.1.4 より詳細な地理的空間レベルでの予測の実施

前項まで述べたとおり、直接的に予測精度の向上につながる情報の取得には至らなかったが、2019年度研究調査で既に収集しているデータを用い、本実証ではより詳細に地理的な発生分布の推計を試みた。この結果は5.4節に示す収集運搬のシミュレーションでも用いるものである。

結果の一例として、標準的なシナリオにおける2030、2050年それぞれにおける新宿区の町丁目レベルでの発生量予測を図5.5に示す。

本実証で実施する収集運搬のシミュレーションは、2019年度研究調査と比して詳細なものとなることから、このレベルでの発生量予測値が必要になる。

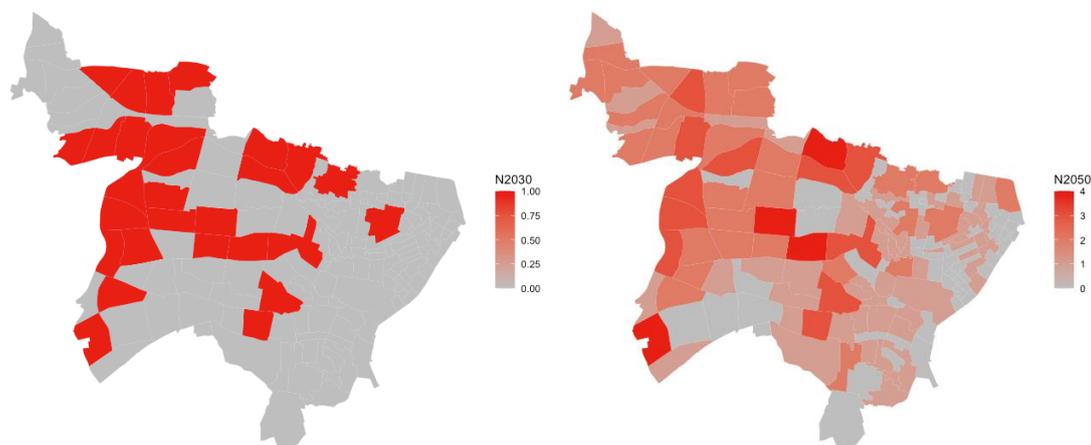


図 5.5. 新宿区における町丁目レベルでの発生量予測（左：2030年、右：2050年）
（町丁目ごとの年間あたり発生件数）

5.1.5 参考文献

- [1] Murakami, S., Yamamoto, H., Toyota, T., 2021. Potential Impact of Consumer Intention on Generation of Waste Photovoltaic Panels : A Case Study for Tokyo. Sustainability 13, 10507.
- [2] IRENA and IEA - PVPS. End - of - Life Management: Solar Photovoltaic Panels; International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems: Abu Dhabi, UAE, 2016.

5.2 太陽光パネル取り外し実証試験

5.2.1 取り外し先の選定

住宅の屋根に設置された太陽光パネルをリユース可能な状態に取り外すための手順や課題などを実際の施工現場で確認するため、太陽光パネルを取り外す予定の住宅の所有者に本実証試験への協力を依頼することにした。

2012年に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」という。）が施行されて以降、住宅にも太陽光パネルが普及している。しかし、太陽光パネルは、十数年以上の長期使用を想定しているため、FIT法施行後に設置された住宅用の太陽光パネルの取り外しを計画している所有者は極めて少ないことが予想された。そこで、太陽光パネルを設置してから十数年以上経過している住宅の所有者を中心に本実証試験への協力者を募ることとした。

1990年代後半から2000年代初頭にかけて住宅用太陽光パネルが製品化され始めた時期に太陽光パネルを導入した所有者の団体に「クリーンエネルギーライフクラブ」（以下「CELC」）がある。この団体は、東京都と神奈川県に在住の会員を中心に構成されている。更に、会員の多くは太陽光発電設備を設置して20年以上経過していることに加え、使い終わった太陽光発電パネルの撤去やリサイクルに取り組んでいる。

このように、CELC会員の太陽光パネル設置後の経過年数だけでなく、活動内容も本実証試験の趣旨に合致するものであった。そこで、CELCの運営に携わる会員に本実証試験の趣旨を説明したうえで、協力者募集への協力を打診したところ、快諾いただいた。そこで、CELC会報誌配布に併せ、図5.6に示す協力者募集のパンフレットを配布いただいた。

CELC会員で戸建て住宅の太陽光パネルの更新・取外しをお考えの皆様

太陽光パネル取外し実証にご協力いただける方募集中

**2020年度
取外し費用の一部※を負担します!**

※取外しに関わる足場と撤去の費用を負担します（屋根の葺替え費用等は対象外）。
 詳細は個別にご説明とご相談させていただきます。まずはお問い合わせください！
 ※太陽光パネルの設置状況等によってはご要望に沿えない場合があります。

太陽光パネル高度循環利用に向けた東京都モデルの構築事業

本事業は、東京都の「大学研究者による事業提案制度」により早稲田大学所研究室が中心となって実施しており、リユース、リビルト、リサイクルなどの技術を駆使して使用済みとなった太陽光パネルの高度循環利用システムを構築することにより、家庭でも安心して太陽光パネルが導入できる環境先進都市実現に貢献することを目指しています。

お問い合わせ先 — CELC会員番号をお伝えください —

早稲田大学 創造理工学部 (担当: ○○)
 TEL: 00-000-0000 e-mail: xxxxx@wwwww.jp

図 5.6. 協力者募集のパンフレット

このパンフレット配布以降、応募のあった会員に対し、個別に本実証試験の趣旨と、実施方法、協力内容などについて説明するとともに、改めて協力の意向を確認した。更に、建物形態や屋根形状を確認したうえで、表 5.2 に示す 3 件に協力いただくこととした。

表 5.2. 取り外し実証試験協力先

実施場所	建物形態	屋根形状
神奈川県藤沢市 S 様邸	戸建て 2 階	招き屋根
神奈川県鎌倉市 H 様邸	戸建て 2 階	寄棟屋根
神奈川県横浜市 K 様邸	戸建て 2 階	切妻屋根

5.2.2 協力者・施工事業者等との調整

本実証試験は、協力者が施主として発注する工事に実証試験の関係者が立ち会って実施する。したがって、実証試験、協力者とその発注先である施工業者によって決まった施工日に実証試験を実施した。

また、本実証試験を実施することにより、通常の工事では発生しない作業や負担が協力者と施工業者双方に生じるため、予め両者に表 5.3 に示す事項について協力を依頼し、了承を得たうえで実証試験を実施した。

表 5.3. 協力者（施主）と施工業者への依頼事項

依頼先	依頼内容
協力者（施主）	① 書類の写しの提供 <ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光発電設備の仕様書、設計図書（実証試験の実施手順等の検討のため） ・ 太陽光発電電力の売電等の契約書（取り外しにおける課題の整理のため） ・ その他実証試験に必要な書類 ② 施工業者との打ち合わせ等への実証実施者同席の承諾 ③ ヒアリング等への回答 ④ 施工時に敷地、屋内への立ち入り、撮影の承諾 ⑤ 取り外した太陽光発電設備の実証実施者への提供 ⑥ その他、実証試験に必要なこと
施工業者	① 施主との打ち合わせ等への実証実施者同席の承諾 ② 施工手順・計画の事前確認 ③ 施工の立ち合い、記録、撮影の承諾 ④ ヒアリング、アンケートへの回答 ⑤ その他、実証試験に必要なこと

5.2.3 計測項目の検討

(1) 取り外し前の性能診断

太陽光パネル取り外し後の仕向先の峻別、特にリユース可能性の確認を想定して実施した太陽光パネルの性能診断については、5.3 節で述べる。

(2) 取り外し作業の計測・記録

今回実際の太陽光パネル取り外し作業について、実際の作業に立ち会い、下記方法にて作業を記録した。作業の記録においては、太陽光パネル取り外し作業の全てをもれなく記録することを目標とした。本取り外し作業立ち会いでは、従来の写真・メモによる記録のみならず、作業員全員にウェアラブルカメラを装着していただき、作業開始から作業終了までを録画する事とした。記録項目を以下に示す。収集した立ち会い記録より太陽光パネル取り外し作業について、下記、記録項目について資料作成、検証、測定を実施した。

表 5.4. 取り外し作業の計測・記録項目

ウェアラブルカメラでの作業記録	写真撮影
	聞き取り取材
	立ち会い記録の作成
	取り外し太陽光パネルについてのハンディ XRF による分析
作業のタイムライン作成	各作業における時間・工数
作業内容記録	作業状況（作業人員、使用機材）
ハンディ XRF でのオンサイト分析の可能性調査	現地にて取り外された太陽光パネルについてオンサイト分析を実施する

(3) ウェアラブルカメラ

太陽光パネル取り外し作業では、屋外作業とパワーコンディショナ取り外しの屋内作業が混在する。屋外作業では日射、降雨、作業に伴う振動、衝撃が懸念される。また、一般にパワーコンディショナは、屋根裏や建屋の隅に設置されることが多く狭小な場所での撮影となることが予想されることから、軽量で撮影協力を頂く作業者の負担を最小限にする必要もあり、撮影機材には通常のビデオカメラではなく、ウェアラブルカメラを採用した。本調査では作業者全員にウェアラブルカメラをヘルメットに装着して、作業開始から作業終了まで、メモリ交換、バッテリー交換、休憩時間以外のすべてを録画した。

作業状況録画機材には GoPro 社製の Hero7 および 8 を使用した。同社のウェアラブルカメラは、本体サイズの小ささと、テレビ局での撮影にも採用される画質の高さが特徴として挙げられる。それらの特徴により、身に着けてその人の視点に近いところから撮影したり、一般的なビデオカメラだと設置しにくい狭い場所から撮影したり出来るため、現在標準的なウェアラブルカメラとして広く利用されている。作業状況の記録では作業者の視線で記録するため、ヘルメット装着器具により GoPro を装着して録画をした。

今回の藤沢市、鎌倉市、横浜市 3 カ所の太陽光パネル取り外し立ち会いでは、のべ 10 台の GoPro により、合計 1960 分（32.7 時間）の映像を記録した。記録した映像は、それぞれ撮影したカメラ毎に、約 15 分毎に作成される映像ファイルを統合しひとつの映像ファイルとした上で、映像の不要部分（メモリ切替え、電池交換、休憩時間等）を削除編集し、作業風景の映像記録とした。合わせて撮影生データも記録映像として保管対象とした。

表 5.5. ウェアラブルカメラ仕様

メーカー	GoPro
型式	Hero7、Hero8
寸法	44.9×62.3×33mm
映像	4K60



(出典) GoPro ホームページ (<https://gopro.com/ja/jp/compare>、<https://gopro.com/ja/jp/shop/mounts-accessories/%E3%83%98%E3%83%83%E3%83%89-%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%83%E3%83%97-plus-quickclip/ACHOM-001.html>)

図 5.7. 使用したウェアラブルカメラ



図 5.8. ウェアラブルカメラの撮影視野

(4) ハンディ XRF を用いたオンサイト分析の可能性調査

本実証ではガラスの非破壊分析であることが必要であり、かつその場（In-situ）分析が可能な条件を満たす機器分析法として、ハンドヘルド XRF による調査分析を行っている。

本実証では分析必要元素における分析精度、オンサイト分析法としての可能性を調査してきた。これまでの調査では屋根から撤去された太陽光パネルが解体工場に入荷した時点でのガラス種確認・選別を想定したいわば、屋内でのオンサイト分析を検討してきた。

2020 年度実証では、太陽光パネルの設置状態もしくは太陽光パネル取り外し作業時のオンサイト分析、すなわち屋外での XRF 分析の可能性を調査した。調査に使用した機材を以下に示す。

表 5.6. ハンディ XRF の仕様

項目	内容
メーカー	オリンパス
型式	VANTA Geochem
外形寸法	8.3×28.9×24.2cm
質量	1.5kg（バッテリーを除く）

項目	内容
X線管球、ターゲット材	4W X線管球 Rh、W
検出器	好感度シリコンドリフトディテクター
測定元素範囲	Mg～U
電源	14.4V リチウムイオン電池またはACアダプター
動作環境	温度：-10℃～50℃ 湿度：非結露の相対的湿度 10%～90%
落下試験	米国 MIL-STD 810-G、1.2m（4フィート）の落下試験合格
防塵・防水性能	IP55 準拠



図 5.9. ハンディ XRF

調査に使用したオリンパス社製ハンディ XRF は、バッテリー駆動が可能な上、耐落下、防塵・防水性を有している。

本太陽光パネルの取り外し作業立ち会いでは、実際の屋外におけるハンディ XRF 使用に必要な性能の確認と作業性を調査し、今後の課題を検討した。

太陽光パネル取り外し現場での分析は“in-situ”での使用条件に、屋外かつ作業現場という条件が付加されるため、使用する分析機器には分析精度の他に、可搬性、独立電源での稼働、分析精度、耐候性、耐衝撃性、耐粉塵性が求められる。

本調査を実施するに当たり、本条件にする分析器としてオリンパス社製ハンディ XRF VANTA を使用した。本機種は屋外での使用も想定されており、上述の条件を満たす。今回は実際の太陽光パネル取り外し現場にこの分析器を持ち込み、必要な性能の確認と作業性を調査した。



(出典) オリンパスホームページ (<https://www.olympus-ims.com/ja/vanta-for-environmental-assessments/>)

図 5.10. ハンディ XRF 屋外使用例

今回の調査では、安全面と太陽電池パネル取り外し作業を阻害することを避けるために屋根から取り外した太陽電池パネルについて分析を実施している。

本装置は外形寸法 8.3×28.8×24.2cm、重量 1.5kg であり、本体、バッテリー、充電器を耐衝撃性のキャリングケースに収納することができ、そのまま運搬が可能である。

分析器本体は片手で扱うことの出来る大きさである。1.5kg の重量は軽くはないが、1 回の分析時間は 45 秒程度であり、現場で分析位置に装置を密着させるにあたっては持ち手があり装置保持は十分可能である。装置は条件が許せば平面上に置いた状態での分析が可能であり身体的負担を軽減することもできる。また、45 秒という分析時間は現場での太陽電池パネル取り外し作業を阻害する事は無い。

本装置はバッテリー駆動が可能であり、メーカーへの取材ではフル充電のバッテリーで実働 4 時間稼働、予備のバッテリーを使用すれば 8 時間使用することができる。これはフル充電の予備バッテリーを携行することで、終日電源の無い場所での使用が可能であることを意味する。

装置のメーカー仕様では IP55 に準拠した防塵・耐水性を有し、水没のような極端な場合を除いて分析作業中の不意の降雨程度の水濡れは問題ない。耐衝撃性では、米国 MIL-STD 810-G (1.2m の落下試験) に合格しており通常使用範囲の衝撃では問題ない。メーカーへの取材では、旧機種から本機種に移行した際に前述の衝撃性能保証となり、以降、落下等による故障修理依頼は入っていない、との事であった。

操作は装置端面にあるタッチパネル式の情報ディスプレイを通じて行う。基本動作は分析対象に装置を当て、分析開始ボタンを押すのみであり、少しのレクチャーを受ければ誰でも使用が出来ると考える。

オンサイト分析は藤沢市 S 様邸および横浜市 K 様邸にて実施した。太陽光パネル取り外し作業を阻害することのないように、太陽光パネル取り外し後の仮置き、もしくはトラックへの積み込み時に実施している。

実際のオンサイト分析時に想定される、太陽光パネルの立て掛け位置（垂直）、積み重ね（水平）状態で分析作業を行った。

太陽光パネル取り外し作業現場でのオンサイト分析の様子を図 5.11 に示す。

本装置を用いたオンサイト分析作業は写真にあるように、特に作業に困難を伴うものではなかった。特に太陽光パネルを積み上げた水平状態での測定は、積み上げた太陽光パネルが安定した状態であれば、装置を直接太陽電池パネル上に自立する事も出来るため、手を添えるのみで分析が可能であった。タッチパネル式の操作性は屋外の現場においても操作に問題はなかった。分析値は自動的に装置内メモリに記録されるため、現場に記憶装置や PC は必要なく、分析値は別途装置からダウンロードする事ができる。



図 5.11. ハンディ XRF によるオンサイト分析の様子

分析結果を表 5.7 に示す。分析結果には比較のため、別途研究室 XRF で分析した別の太陽光パネルのカバーガラス試料の分析値も併記した。

本装置の分析範囲は Mg～U である。分析は GeoChem モード、定量は FP 法である。太陽光パネルのカバーガラスであるソーダガラスを構成する主要組成は SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O である。このうち分析値において分析可能な元素において Al の検出はなかったが、Si、Ca、Mg の分析値において良い一致を見ることが出来る。Mg 以下であり元素の特定は出来ないが軽元素（Lite Elements）分析値も良い一致が得られた。また、微量元素については分析値について検討の余地があると考え、数十 ppmw の感度で検知をしている。これは、現場でガラス性能改質の為に添加材や As 等の忌避元素の有無を検知するには十分な感度を持っていることが分った。ガラスを構成する主要元素の分析値からソーダガラス、ホウケイ酸ガラス等のガラス種を、また添加材の分析結果からデータベースに照合してその場で対象の太陽光パネルの製品名の判定ができる可能性を確認できた。また、データベースにない未知の太陽光パネルであっても、As 等の忌避元素の有無の判定が出来る事が確認できた。

表 5.7. 現地での分析結果

測定場所	軽元素	Si	Ca	Mg							
単位	wt%										
藤沢市 S 様邸	65.6	28.0	4.0	1.9							
横浜市 K 様邸	67.0	27.0	4.9	0.01							
参考値 (SH01)	65.0	28.1	4.3	ND							
参考値 (SH02)	64.4	28.5	4.4	2.2							
測定場所	Sr	Ti	Ag	Fe	Mn	Ba	Sb	Cu	As	Cd	Pb
単位	ppmw										
藤沢市 S 様邸	571	187	277	319	117	2595	91	25	3*	35*	1*
横浜市 K 様邸	43	1235	75	601	117	1455	1684	27	2*	9*	2*
参考値 (SH01)	40	ND	60	110	180	1520	1250	10	ND	ND	ND
参考値 (SH02)	50	ND	30	150	120	1010	1260	20	3	ND	ND

ND：不検出

*：検出下限付近のため、ND（濃度 0）を含めた平均値

(5) オンサイト分析の可能性と課題

現地でのオンサイト分析結果から、下記点について可能性を確認した。いずれもオンサイト分析には十分な性能を有しており、本装置を用いた太陽光パネルのカバーガラスのオンサイト分析は十分に可能であると考ええる。

表 5.8. ハンディ XRF 装置のオンサイト分析適合性

可搬性	本体 1.5kg 専用キャリーバッグ
操作性	タッチパネル式
耐久性	米国 MIL-STD 810-G 規格適合 IP55 適合
バッテリー駆動時間	8 時間（4 時間バッテリーパック×2）
分析必要時間	45 秒
分析感度	数十 ppmw

オンサイト分析の課題は、ハンディ XRF 分析器の価格に起因すると考える。

装置は以前から比して低価格化が進んでいるとは言え高価な装置であり、取り外し業者等での導入、装置の紛失・盗難対策、落下等による破損の際の修理費等が課題となると考えられる。

5.2.4 取り外しの実施

(1) 実地調査対象

取り外しの実地調査対象は、本件調査協力者募集に一般から応募のあった個人住宅 3 件を調査対象として選定した。いずれも太陽光パネル設置後 20 年程度の戸建て住宅である。

表 5.9. 取り外し実証試験の実施場所と実施日

実施場所	実施日
神奈川県藤沢市 S 様邸	2020 年 10 月 24 日 (土)
神奈川県鎌倉市 H 様邸	2020 年 11 月 27 日 (金)
神奈川県横浜市 K 様邸	2020 年 12 月 11 日 (金)

(2) 実地調査記録

本実地調査は、使用済みとなった太陽光パネルの高度循環の仕組み作りに資するため、太陽光パネルの取り外しにおける方策の検討と課題の抽出を行う事を目的とする。

① 藤沢市 S 様邸

藤沢市 S 様邸における取り外し実証試験の実施概要を表 5.10 に、航空写真と太陽光パネルの配置をそれぞれ図 5.12 と図 5.13 に示す。

表 5.10. 取り外し実証試験の実施概要 (藤沢市 S 様邸)

項目		内容
日時		2020 年 10 月 24 日 (土) 8:30~14:30
天気		晴れ
現地状況	作業車駐車位置	敷地内に 2 台可
	取り外し太陽光パネル保管場所	敷地内仮置き可
太陽光パネル設置条件	建屋形態	戸建て 2 階
	屋根形状	招き屋根
	パネル設置枚数	25 枚
太陽光パネル情報 ※太陽光パネル銘板より	メーカー	三洋電機
	形式	HIP-F47B1
	最大システム電圧	区分:H バイパスダイオード:有
	耐風圧性	等級: 217
	アレイの組立て形態	区分: A
	外形寸法	1320×895×35 (mm)

項目		内容
	公称重量	15.0kg
	最大出力	150.0W
	製造年月日	2000年11月
施工体制	作業人員	4名（監督者1名、作業者3名）
	機材車	1台
	作業内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光パネル取り外し ・ パワーコンディショナ取り外し ・ ラック取り外し ・ 架台取り外し ・ 屋外止水処理
記録・計測体制	作業人数	6名（記録、視察、機材）
	記録・計測	<ul style="list-style-type: none"> ・ ウェアラブルカメラによる作業動画記録（合計986分） ・ 作業写真撮影（227枚） ・ ハンディXRFによるオンサイト分析



画像©2021 Google, 地図データ©2021 Google

図 5.12. 航空写真

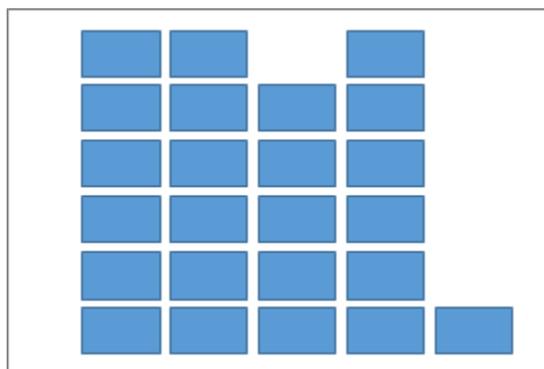


図 5.13. 藤沢市 S 様邸パネルレイアウト



図 5.14. パネルの外観と銘板

藤沢市 S 様邸太陽光パネル取り外しにおいても、太陽光パネル取り外し中に作業員 1 名が 30 分程度作業を移行してパワーコンディショナ取り外しに掛かる場面もあった。

また、作業員への取材から、一般的な太陽光パネル撤去では太陽光パネル取り付け用の架台の撤去は実施するものの、屋根本体への取り付けベース板の撤去はしないとのことであった。これは屋根本体への取り付け用ベース板を外すことにより固定用ボルト跡の空孔は止水処理をしても雨漏りの原因となる恐れがあるためである。

藤沢市 S 様邸では太陽光パネル撤去に伴い架台と共にベース板を撤去している。そのため、一般では生じないベース板取り外し作業とそれに伴う止水工事が付加されている。当日はベース板取り外しに必要な工具を現地調達することとなり、60 分の待ち時間が生じている。藤沢市 S 様邸での特徴として、屋根の形状が「招き屋根」であり、他所に見られる「切妻屋根」や「寄棟屋根」に比して屋根面の傾斜がきつく作業性に影響を与えていると考えられる。

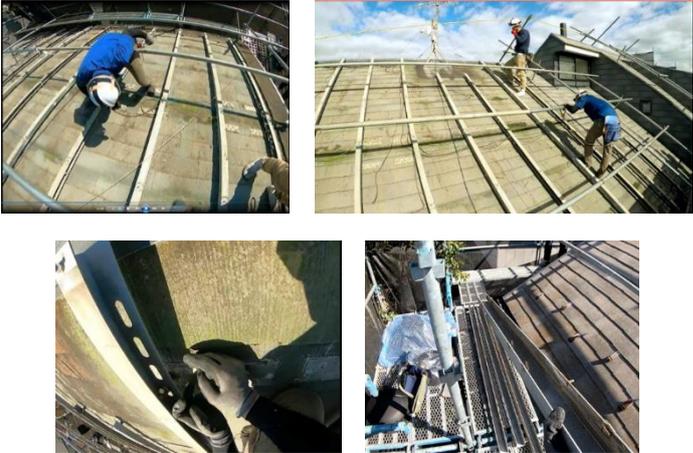
撤去後の太陽光パネルは敷地内に一時保管し、翌日に 2t トラック 1 台で運び出された。

作業者のヘルメットに設置したカメラから得られた動画をもとに、太陽光パネル取り外し作業における、作業人数、所要時間から所要工数を算出した結果を表 5.11 に、また、これをまとめるために作成したタイムラインを表 5.12. に示す。なお、実際の作業では、作業は一部並列で進行する場面もあり、タイムラインにおいては単純化している。

表 5.11. 動画タイムラインから測定した作業内容と所要時間および所要人数

作業内容	所要時間 (時間)	作業人数 (人)	所要工数 (人時間)
作業準備 (段取り)	0.25	4	1.0
太陽光パネル取り外し作業 (運び出し)	1.00	3	3.0
パワーコンディショナ取り外し	0.50	1	0.5
架台解体	1.00	3	3.0
ベース板取り外し (含む止水工事)	1.50	3	4.5
撤収作業	0.50	4	2.0
合計	—	18	14.0

表 5.12. ウェアラブルカメラの動画記録から作成したタイムライン

時間	作業内容	作業状況
8:30	作業開始 段取り (15分)	
8:45	パネル降ろし 運び出し パワーコンディ ションナ取り外し (90分)	
10:15	休憩 (15分)	—
10:30	工具調達 (60分)	—
11:30	架台解体 (60分)	
12:30	休憩 (昼食) (60分)	—

時間	作業内容	作業状況
13:30	ベース板取り外し 止水工事（ねじ 穴養生） （75分）	
14:15	掃除 撤収作業 30分	
14:45	作業完了	

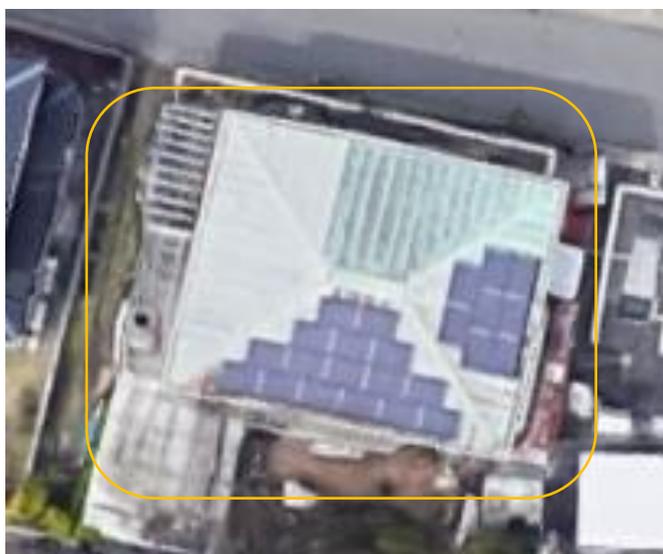
② 鎌倉市 H 様邸

鎌倉市 H 様邸における取り外し実証試験の実施概要を表 5.13 に、航空写真と太陽光パネルの配置をそれぞれ図 5.15 と図 5.16 に示す。

表 5.13. 鎌倉市 H 様邸

項目		内容
日時		2020年11月27日（土）8:30～11:00
天気		晴れ
現地状況	作業車駐車位置	隣接コインパーキング
	取り外し太陽光パネル保管場所	取り外した太陽光パネルは直接運搬用トラックへ積み込み
太陽光パネル設置条件	建屋形態	戸建て 2階
	屋根形状	寄棟屋根
	パネル設置枚数	24枚
太陽光パネル情報 ※太陽光パネル銘板より	メーカー	シャープ
	形式	NE-M1 25A
	最大システム電圧	500A 区分:H
	耐風圧性	等級：217

項目	内容	
	アレイの組立て形態	区分：A
	外形寸法	—
	公称重量	12.5kg
	最大出力	126W
	製造年月日	—
施工体制	作業人員	3名（作業者3名）
	機材車	バン型車1台（機材・人員運搬） トラック1.5t車1台（太陽光パネル運搬）
	作業内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光パネル取り外し ・ パワーコンディショナ取り外し ・ ラック取り外し ・ 屋外止水処理
記録・計測体制	作業人数	3名（記録、視察、機材）
	記録・計測	<ul style="list-style-type: none"> ・ ウェアラブルカメラによる作業動画記録（合計480分） ・ 作業写真撮影（78枚）



画像©2021 Google, 地図データ©2021 Google

図 5.15. 航空写真

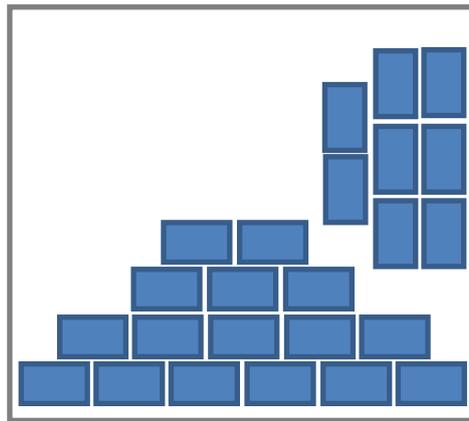


図 5.16. 鎌倉市 H 様邸パネルレイアウト

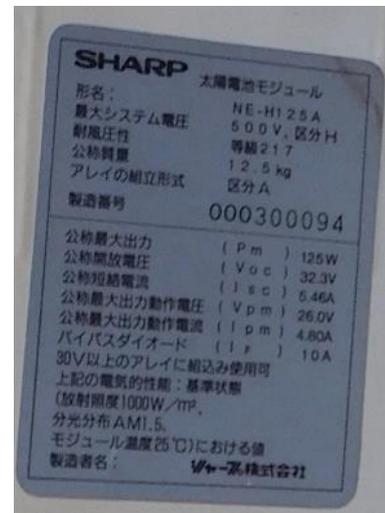


図 5.17. パネルの外観と銘板

鎌倉市 K 様邸は、住宅地にあり通りの交通は少ない。敷地内に作業車両の駐車スペースはないが、隣接したコインパーキングがあり、今回の取り外し作業では、このパーキングを利用して作業車両を駐車することが出来た。屋上へのアクセスや物流は駐車場から梯子を兼ねた電動式の簡易リフトで荷揚げ、荷下ろしを行った。角度の浅い寄棟屋根であり、屋上での作業性は良好であった。

太陽光パネルの設置用のベース外し作業はなかった。しかしながら、パワーコンディショナ取り外し中に、太陽電池電源系統に後付けのエアコン用配電回路が存在することが判明したため、急遽エアコンの稼働を確保するための、ブレーカー設置とバイパス回路の設置が作業として発生したため、パワーコンディショナ取り外し時間が余計に掛かっている。

作業者のヘルメットに設置したカメラから得られた動画をもとに、太陽光パネル取り外し作業における、作業人数、所要時間から所要工数を算出した結果を表 5.14 に、また、

これをまとめるために作成したタイムラインを表 5.15 に示す。なお、実際の作業では、作業は一部並列で進行する場面もあり、タイムラインにおいては単純化している。

表 5.14. 動画タイムラインから測定した作業内容と所要時間および所要人数

作業内容	所要時間 (時間)	作業人数 (人)	所要工数 (人時間)
作業準備 (段取り)	0.25	3	0.75
太陽光パネル取り外し作業 (運び出し)	0.83	3	2.49
屋上片付け、安全索等撤収	0.50	2	1.00
パワーコンディショナ取り外し	0.50	1	0.50
解線、止水処理、撤収作業	2.00	2	2.00
合計	4.08	11	6.74

表 5.15. ウェアラブルカメラの動画記録から作成したタイムライン

時間	作業内容	作業状況
8:30	作業開始 段取り 15分	
8:45	パネル降ろしおよび、 トラックへの積み込み 50分	

③ 横浜市 K 様邸

横浜市 K 様邸における取り外し実証試験の実施概要を表 5.16 に、太陽光パネルの配置を図 5.18 に示す。

表 5.16. 横浜市 K 様邸

項目		内容
日時		2020 年 12 月 11 日 (金) 8:30~11:30
天気		晴れ
現地状況	作業車駐車位置	敷地内
	取り外し太陽光パネル保管場所	取り外した太陽光パネルは直接運搬用トラックへ積み込み
太陽光パネル設置条件	建屋形態	戸建て 2 階
	屋根形状	切妻屋根
	パネル設置枚数	24 枚
太陽光パネル情報 ※太陽光パネル銘板より	メーカー	シャープ
	形式	NT51EM6
	最大システム電圧	500A 区分:H
	耐風圧性	等級:217
	アレイの組立て形態	区分:A
	外形寸法	—
	公称重量	12.5kg
	公称最大出力	136W
施工体制	製造年月日	—
	作業人員	3 名 (作業員 3 名)
	機材車	バン型車 1 台 (機材・人員運搬) トラック 1.5t 車 1 台 (機材運搬)
	作業内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光パネル取り外し ・ パワーコンディショナ取り外し ・ ラック取り外し ・ 屋外止水処理
記録・計測体制	作業人数	2 名 (記録、視察、機材)
	記録・計測	<ul style="list-style-type: none"> ・ ウェアラブルカメラによる作業動画記録 (合計 484 分) ・ 作業写真撮影 (222 枚) ・ XRF オンサイト分析

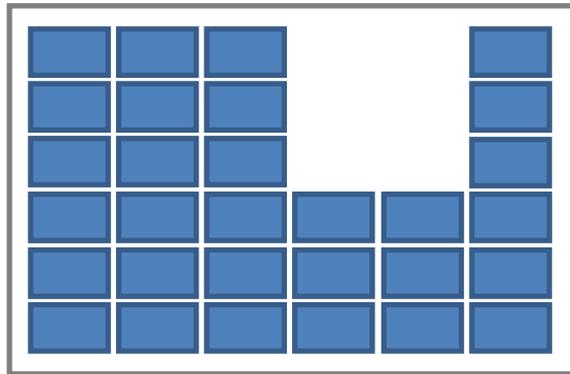


図 5.18. 横浜市 K 様邸パネルレイアウト



図 5.19. パネルの外観と銘板

横浜市 K 様邸は高台の住宅地に立地している。住宅地であり通り抜ける車は少なかった。作業車両は敷地内に駐車することができた。建屋には庭があり、そこから梯子（電動簡易リフト）を掛けて屋上へのアクセスや荷揚げ、荷下ろしを行った。

屋上には、太陽光パネルに挟まれるような形で、太陽光温水器が設置されていた、また屋根の中心には TV 受信用のアンテナとそれを支えるワイヤーが張っており作業中には注意が必要であった。作業自体はパネル取り付け用ラックおよび架台の取り外しを行って止水処理を施している。現地での追加工事はなく、標準的な太陽光パネル取り外し作業条件と考えられる。

作業者のヘルメットに設置したカメラから得られた動画をもとに、太陽光パネル取り外し作業における、作業人数、所要時間から所要工数を算出した結果を表 5.17 に、また、

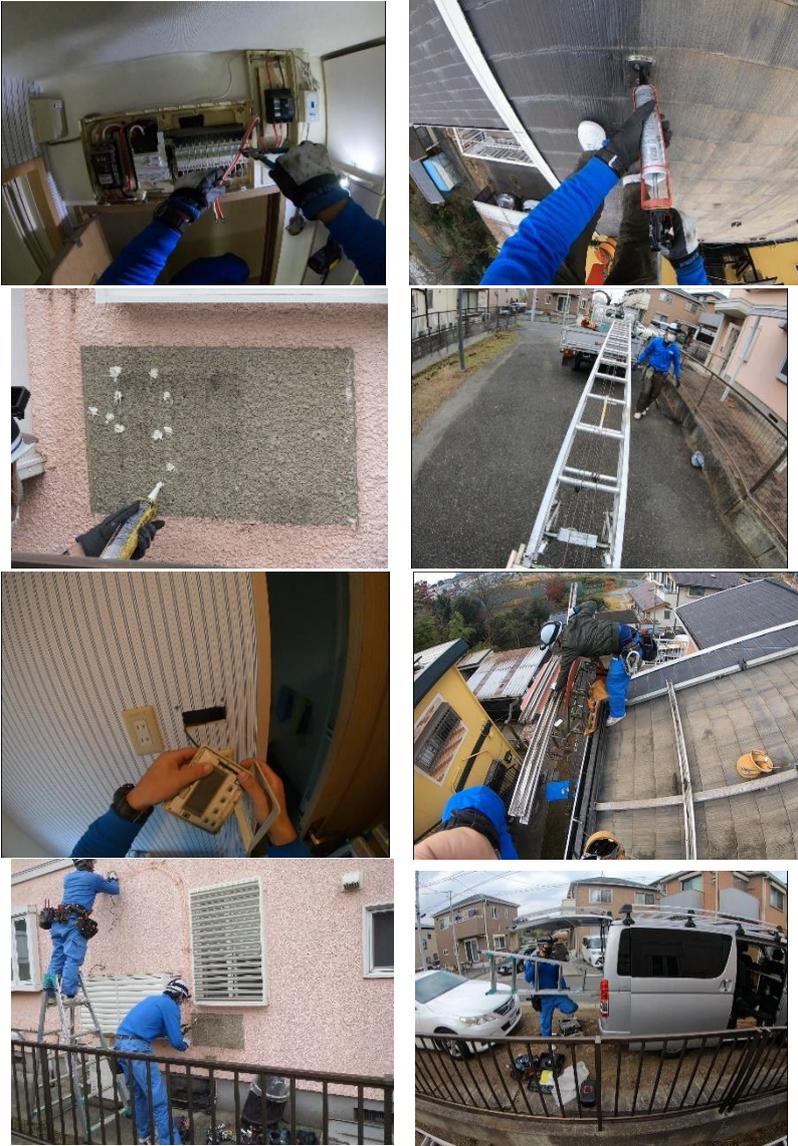
これをまとめるために作成したタイムラインを表 5.18 に示す。なお、実際の作業では、作業は一部並列で進行する場面もあり、タイムラインにおいては単純化している。

表 5.17. 動画タイムラインから測定した作業内容と所要時間および所要人数

作業内容	所要時間 (時間)	作業人数 (人)	所要工数 (人時間)
作業準備 (段取り)	0.25	3	0.75
太陽光パネル取り外し作業 (運び出し)	0.75	3	2.25
ラック取り外し	0.33	2	0.66
パワーコンディショナ取り外し 解線、止水処理、撤収作業	1.75	3	5.25
補正 (重複作業時間)	-0.33	-2	-0.66
合計	2.75	9	8.25

表 5.18. ウェアラブルカメラの動画記録から作成したタイムライン

時間	作業内容	作業状況
8:45	作業開始 段取り (15分)	
9:00	パネル取り外し、降ろしおよび、トラックへの積み込み (45分)	

<p>9:45</p>	<p>→2名 ラック取り外し、屋上撤収（20分） その後、パワーコンディショナ取り外し、および解線作業（85分） →1名 パワーコンディショナ取り外しおよび解線作業（105分）</p>	
<p>10:00</p>	<p>休憩（30分） 引き続き作業</p>	
<p>11:30 11:40</p>	<p>作業完了 解散</p>	

5.2.5 太陽光パネル取り外し作業内容

最初の作業は、太陽光パネルシステムの電気系統切断（ブレーカー切）である。太陽光パネルは、光が当たると発電をしてしまうため、システムの電源が落ちていることを確認することで作業が始まる。太陽光パネル取り外しにおいても、外した後の電気ケーブルは丸められショートしないように処理される。これは廃パネルの運送時にも配慮されていた。

太陽光パネル取り外し作業を以下にまとめる。

- 1) 作業手順打合せ
- 2) 太陽光パネル系統切断
- 3) 荷揚げ機（兼はしご）設置
- 4) 屋上の安全索設置
- 5) 太陽光パネル取り外し
- 6) 架台取り外し
- 7) 取り外し太陽光パネル積み込み
- 8) パワーコンディショナ取り外し
- 9) 配線類撤去
- 10) 止水処理
- 11) 清掃
- 12) 安全索撤去
- 13) 荷揚げ機（兼はしご）撤去
- 14) 機材積み込み
- 15) 撤収



図 5.20. 作業風景（左から、系統切断確認、荷揚げ機設置、安全索張り）

(1) 作業フロー

今回立ち会いの 3 件の太陽光パネル取り外し作業はそれぞれ個別状況があるが、最も標準的作業に近いと思われる横浜市 K 様邸での作業から作業フローを作成した。作業は必ずしもしっかりと切り取れるものではないので、作業フロー作成の上では、齟齬の生じない範囲で一部簡略化して表現している

作業員 3 名であって、リーダーとなる作業員、中堅的作業員、若手作業員で構成されていた。リーダーとなる作業員が中心となり、中堅作業員が常に近くにおり作業を進め、若手作業員は機材運搬や手元作業、同時並行的に完了した作業工程の片付けが進められており、効率的に作業がされていたと考える。

表 5.19. 標準的な太陽光パネル取り外し作業フロー

	作業員 1 (中核作業員)		作業員 2 (中堅作業員)		作業員 3 (若手作業員)	
	現地着 段取り (15分)	安全索設置	屋上	安全索設置	屋上	梯子(荷揚機) 設置
パネル撤去 (40分)	パネル外し	屋上	パネルボルト 外し→ パネル降ろし	屋上	パネル運受取 → パネル積み込み	地上
架台外し (20分)	架台外し	屋上	架台ボルト外 し	屋上	架台受取	地上
休憩 (30分)						
パワコン取り 外し (100分)	パワコン取り 外し時	建屋周り 屋内	屋上撤収作業 清掃、安全索撤 去	屋上	機材受取 機材片付け	地上
			パワーコンデ ィション配線 撤去作業	建屋周り	荷揚機撤収 作業員手元 片付け	地上
撤収						

(2) 使用機材

太陽光パネルは 1 件あたり 25 枚程度設置されている。1 枚の太陽光パネルは 15kg 程度であり、架台から取り外し後は人力で運搬できるため、大がかりな機材は使用されていない。

自動車以外の主な使用機材としては、荷揚げ機である。屋上からの荷下ろしには、はしごを兼ねた簡易荷揚げ機が使用される。この荷揚げ機は簡易型ながら最大 100kg 程度の荷揚げが可能である。今回の計測では 1 回に 5 枚程度の太陽光パネルを荷下ろしがされていた。他は、太陽光パネルを固定するボルト外しに使用する電動工具、落下防止用の安全索が使用されており、作業員は自身に個縛した安全帯を接続して作業をする。

太陽光パネルはボルトで固定されているが、電動ドリルの使用でボルト 1 カ所当たり 1～2 秒で取り外しが完了していた。最も重要な機材であり、1 名に付 1 台装備の他に電気作業用小型の電動ドリルを携行していた。現地では常に予備バッテリーが用意され充電されて

いた。

- ・自動車
 人員・機材運搬車（バンタイプ）
 機材運搬車（トラック）
- ・荷揚機
- ・安全索
- ・安全帯
- ・工具



図 5.21. 機材（左から、安全帯、持ち込み機材、安全帯使用状況）

(3) 作業測定値比較

今回の太陽光パネル取り外し作業立ち会いを下記のとおりまとめる。

表 5.20. 藤沢市 S 様邸

タイトル	タイトル
パネル設置枚数	25 枚
作業人数	4 名（監督者 1 名、作業者 3 名）
パネル搬出経路	屋根→ベランダ→屋内→敷地内仮置き場（翌日搬出）
作業時間	4.75 時間
特記事項	<ul style="list-style-type: none">・ 架台ベース板の取り外し、止水処理作業・ 必要工具の現地調達（待機時間）が発生

表 5.21. 鎌倉市 H 様邸

タイトル	タイトル
パネル設置枚数	24 枚
作業人数	3 名
パネル搬出経路	屋根→簡易昇降機→仮置き→搬出トラック
作業時間	3.17 時間
特記事項	・ ブレーカー設置とバイパス回路の設置作業（現地追加工事）

表 5.22. 横浜市 K 様邸

タイトル	タイトル
パネル設置枚数	24 枚
作業人数	3 名
パネル搬出経路	屋根→簡易昇降機→仮置き→搬出トラック
作業時間	2.75 時間
特記事項	・ なし

今回の立ち会い現場における太陽光パネル取り外しの実作業において、通常の作業項目にない点が藤沢市 S 様邸、鎌倉市 H 様邸それぞれに発生しており、追加の作業時間が発生している。一方、横浜市 K 様邸では、特記すべき事項は発生しておらず、今回の立ち会いでは、最も標準的作業であったと考えられる。この点は表 5.23 にあるとおりに発生した所要工数からも読み取れる。

太陽光パネル取り外し作業では太陽光パネル取り外し作業そのものよりも、パワーコンディショナ取り外し、関連配線撤去、止水工事および復旧工事に工数が掛かっていることが分る。今回のパネル取り外し枚数は、藤沢市 S 様邸 25 枚、鎌倉市 H 様邸 24 枚、横浜市 K 様邸 24 枚であった。取り外しに掛かった時間は、藤沢市 S 様邸 75 分、鎌倉 H 様邸 50 分、横浜市 K 様邸 45 分であった。藤沢市 S 様邸では、建屋の外装リフォーム中であり、足場が組んであったこと、招き屋根と呼ばれる屋根の片面に大きな傾斜がついており足場が不安定であったこと、太陽光パネル搬出経路が、屋根→ベランダ→屋内→敷地内仮置き場と長かった事が、作業時間に影響していると考えられる。

パワーコンディショナ取り外し時間は、藤沢市 S 様邸 75 分、鎌倉市 H 様邸 120 分、横浜市 K 様邸 105 分であった。これは、藤沢市 S 様邸の撤去作業に比して、鎌倉市 H 様邸では、太陽電池電源系統に後付けのエアコン用配電回路が存在することが判明したため、急遽現場でブレーカー設置とバイパス回路設置の追加工事が発生しており、取り外し時間が掛かっている。鎌倉市 H 様邸では特記事項は発生していないものの、屋外配線撤去において足場がないため、藤沢市 S 様邸に比して作業効率が低かったと考えられる。

以上のような点を考慮すると、一般的な家屋における太陽光パネル撤去作業は休憩時間を入れて3.5時間程度と推察される。標準的な作業であれば作業車2台に3人分乗して現場入り、午前中に1件、途中に移動時間を入れても午後1件と、1日で2件程度の太陽光パネル取り外しが可能であると考えられる。

作業は電気配線作業を伴うため、作業員チームには電気工事士の資格者が必須となる。

表 5.23. 場所毎の総作業量比較

実施場所	作業時間 (時間)	作業人数 (人) ※	総所要工数 (人時間)
藤沢市 S 様邸	4.75	3	14.25
鎌倉市 H 様邸	3.17	3	9.51
横浜市 K 様邸	2.75	3	8.25

※監督者 1 名を含まず

表 5.24. 場所毎のパネル降ろし作業量および比較

実施場所	作業時間 (時間)	作業人数 (人)	総所要工数 (人時間)	パネル枚数 (枚)	パネル 1 枚当たりの作業時間 (分)
藤沢市 S 様邸	1.00	3	3.00	25	2.40
鎌倉市 H 様邸	0.83	3	2.49	24	2.08
横浜市 K 様邸	0.75	3	2.25	24	1.89

5.2.6 太陽光パネル取り外し作業検討

太陽光パネル取り外し作業について下記のとおり検討した。

(1) 作業員の熟練度の違い

今回立ち会いを実施した、藤沢市 S 様邸、鎌倉市 H 様邸、横浜市 K 様邸それぞれの現場では、作業員がそれぞれの熟練度に合わせた役割分担を持っており互いに作業上の補完関係にあった。作業員の熟練度における作業性の数量的比較は難しいが、それぞれの役割分担については、表 5.19 に示す標準的な太陽光パネル取り外し作業フローから以下のとおり、読み取ることが出来る。

① 高熟練度作業員

作業の中心を担う。太陽光パネル取り外し作業に精通している。現地での作業の責任者として自ら中心になって作業を進める。屋根上作業の熟練のみではなく、電気工事士の資

格を有することを含め、電気配線や太陽光パネルの性質を熟知していることが求められる。作業全般について他の作業員に都度指示を与える。

② 中熟練度作業員

高熟練度作業員を補佐する。高熟練度作業員と同様に太陽光パネル作業そのものに精通している。一通りの作業について単独で作業を進められる知識と技能を持つ。作業現場では高熟練度作業員の補助をしつつ、指示を受け単独で作業を進める。高熟練度作業員から細かな作業指示は基本的に無い。低熟練度作業員に取り外した太陽光パネルの荷下ろし、工具の受け渡しを指示しつつ、作業工程に合わせて動く。

③ 低熟練度作業員

屋上で直接太陽光パネル取り外し作業をする事は少ない。作業現場では作業機材の設置や機材、荷物の受け渡し等、主に中熟練度作業員からの指示で動く。屋上の高・中熟練度作業員からの指示に従って動く場面が多い。前述のとおり、作業は屋上から太陽光パネルの荷下ろし、必要機材の荷揚げ等、地上と屋上の物流も多く、補助的作業、いわゆる“手元作業”が必須であり、高・中熟練度作業員との組み合わせは、人員配置としては効率の良い組み合わせと考える。

(2) 足場の有無の違い

今回立ち会った、藤沢市 S 様邸、鎌倉市 H 様邸、横浜市 K 様邸では、藤沢市 S 様邸において足場の設置があった。藤沢市 S 様邸では太陽光パネル取り外し作業の後、別途屋根の葺き替え工事等、外装リフォームが予定されていたため足場の設置されていた。建屋の周りは近隣の住宅が密接しており、その間を縫うように足場が配置されていた。

通常、必要機材の屋上への荷揚げ、取り外した太陽光パネルの荷下ろしは、はしごを兼ねた荷揚げ機が使用される。しかしながら、藤沢市 S 様邸では足場が設置されていたため、荷揚げ機の設置のためのスペースが確保出来ない状況であった。従って、機材の荷揚げや、取り外した太陽光パネル荷下ろしは、屋上→バルコニー→室内→玄関→仮置き場、の経路を辿ったため、機材・太陽光パネルの荷揚げ、荷下ろしには余計な時間を要した。これは、表 5.24 に示す場所毎のパネル降ろし作業量および比較からも読み取れる。

(3) 屋根へのアプローチの違い

屋根へのアプローチは荷揚げ機を兼ねたはしごで人も機材も行われる。今回の現場では藤沢市 S 様邸のみ足場が設置されていたため、前述のとおり人は、屋上→バルコニー→室内→玄関→仮置き場、の経路を辿っており、靴の脱ぎ履き、長い経路による時間を要している。しかしながら、作業者は基本的に屋上での作業、地上での作業が役割を分担し

ており、作業そのものによる、作業車の地上、屋上の行き来は少ないため、作業全般におけるアプローチによる作業時間差は少ない。

屋内を太陽光パネルや機材を通す場合は、経路の養生等による作業工程増が発生する。



図 5.22. 屋根へのアプローチ（左から屋内経路、はしご、荷揚げ機）

(4) 架台取り付け用ベース板撤去の有無の違い

一般的な太陽光パネル撤去では、屋根本体への取り付け用ベース板（以下、ベース板）を外すことにより固定用ボルト跡の空孔は止水処理をしても雨漏りの原因となる恐れがあるため、太陽光パネル取り付け用の架台の撤去は実施するものの、ベース板の撤去はしない。今回の立ち会い現場では、藤沢市 S 様邸においてベースの取り外し作業が行われている。

ベース板取り外し作業は下記に示す。

- 1) ベース板取り付けボルト外し
- 2) ベース板取り外し
- 3) ベース板取り付けボルト用穴のシリコーンシールによる穴埋め
- 4) ベース板取り外し跡の養生

作業後の雨漏りを防止するため、養生作業は、シリコーンシールによる穴埋め、ベース取り外し跡にアスファルトテープを貼る事により厳重に行われる。藤沢市 S 様邸でのベース取り外し（養生作業時間を含む）の作業時間は 75 分であった。これは同所太陽光パネル取り外し作業 90 分（パワーコンディショナ取り外し時間を含む）よりは短いものの、鎌倉市 H 様邸 50 分や横浜市 K 様邸 45 分に比して、長時間の作業が発生していた。



図 5.23. ベース取り外し作業（左から、ベース板、剥離作業、養生後）

5.3 住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験

5.3.1 診断項目の検討

使用済みとなった太陽光パネルのリユース可能性を判断するための診断項目とその診断手法を検討するため、太陽光パネルの性能診断実証試験を実施した。

太陽光パネルの性能診断のためのガイドラインとして、一般的に日本電機工業会（以下「JEMA」）／太陽光発電協会（以下「JPEA」）の太陽光発電システム保守点検ガイドライン[1]が使用される。本項についても、上記ガイドラインに基づいた内容を記載している。

使用済み太陽光パネルをリユース製品として提供するための重要な要求事項は、次の2つと考えている。

- ① 安全性の確保
- ② 十分な発電性能の確認

なお、リユース製品として提供しようとする太陽光パネルの外観については、住宅に設置している関係上、設置したまま点検を実施することは困難となる。他方、安全性に関わらない外観不良については審美性を考慮しなければ使用可能となる。よって、提供する際に考慮する一要素ではあるものの、重要な要求事項とはしていない。

また、リユースをする際に太陽光パネルやシステムに係る法令はないが、法改正などによって適合すべき法律などが発生した場合には、重要な要求事項として考慮する必要がある。

さて、①については、太陽光発電技術研究組合（以下「PVTEC」）が定義した太陽光発電設備の安全性[2]のうち、太陽光パネルに起因する下記2項目について確保する必要があると考える。

- (1) 絶縁性の確保
- (2) 火災リスクの軽減

具体的には、(1)については、絶縁不良による感電のリスクが低いこと、(2)については、絶縁不良や太陽光パネルの抵抗値増加により発生する、発熱（火災）のリスクが極力低いことをチェックすることが望まれる。また、発熱が疑われる場合においては、発熱箇所を特定しておくことが望ましい。

また、安全性が確保されていた場合でも、発電性能が十分でない場合は、リユース品としては適さないため、②の発電性能が十分に発揮されていることを診断する必要がある。発電性能の確認のため、電流・電圧特性曲線（以下「I-V 特性曲線」）を測定することが一般的である。

なお、現在実施されている太陽光パネルの点検手法をみると、絶縁抵抗測定と開放電圧測定のみを実施している場合が多いようである。この点検手法では、絶縁抵抗の診断は可能であるが、他の項目について安全性の診断ができない。また、開放電圧測定を実施しても、太陽電池で発電された電気が接続箱もしくはパワーコンディショナまで到達しているかどうかを確認することはできるが、電流すなわち電力を測定していないため、発電性能の診断としては不十分である。

製品としての要求事項に対する診断項目を表 5.25 に示す。

表 5.25. 製品としての要求事項に対する診断項目一覧

製品としての 要求事項	確保すべき項目	診断項目	詳細
安全性	絶縁性	絶縁抵抗	太陽光パネルとフレームの間の絶縁抵抗を測定する
安全性	火災リスク軽減	絶縁抵抗	同上
安全性	火災リスク軽減	電路断線 (抵抗値)	太陽光パネル内部に抵抗値が高い箇所があるかどうかを確認する (電流 ² ×抵抗=ジュール熱)
安全性	火災リスク軽減	発熱箇所特定	太陽光パネル内部の抵抗値が高い箇所を特定する
発電性能	開放電圧	開放電圧	太陽電池が発電した電気が、出力端子まで到達していることを確認する
発電性能	発電性能 (最大出力)	電流・電圧特性曲線 (I-V 特性曲線)	太陽電池の最大出力電力(電圧×電流)を測定する

5.3.2 診断方法の検討

本節では、前節で提示した重要な要求事項及びその診断項目をふまえ、大規模発電所で実施している診断方法をもとに、これを住宅向けに適応させることを検討する。具体的には、以下で、大規模発電所における診断方法を整理する。次に、大規模発電所と住宅における診断環境の違いを整理したうえで、住宅向けに改良した診断方法を検討する。

(1) 大規模発電所における診断方法の整理

大規模発電所において、前節で整理した診断項目を診断するための方法は、表 5.26 のとおりである。

「①安全性の確保」のためには、絶縁抵抗及び電路断線を診断する。DC Fault Tester を用いることにより、絶縁抵抗と電路断線を同時に測定することが可能となる。電気回路遮断後、接続箱もしくはパワーコンディショナの端子台に計測器のプローブを当てて計測する。

さらに、電路断線によるジュール熱が疑われる場合においては、発熱箇所を特定する。パワーコンディショナ運転中、赤外線カメラ（サーモカメラ）を使用して太陽光パネルを観察することにより、温度分布を観測する。モジュール正面より熱分布を観測することを主目的とし、ドローンに搭載した赤外線カメラで上空から太陽光パネルを撮影する。地上から熱分布を観測するのと比較し、発熱箇所の特定が容易となるメリットがある。

「②発電性能の確認」のためには、I-V 特性曲線を測定する。多機能高速 I-V 計測システム（以下「Rakit®」）を使用する。電気回路遮断後、接続箱もしくはパワーコンディショナの端子台に Rakit®専用プローブを当てて複数回路同時に計測する。

I-V 特性曲線の測定中に、太陽光パネル温度及び設置面日射強度を測定する必要がある。目的は、IEC 60891[3]に記載されている式を用いて、I-V 特性曲線をセル温度 25°C、日射強度 1000W/m²の基準状態（以下「STC」）に補正することによって太陽光パネルの出力特性評価をするためである。大規模発電所における太陽光パネル温度及び設置面日射強度の測定方法を紹介する。太陽光パネル温度に関しては、被測定パネル裏面に白金測温抵抗体若しくは熱電対をポリイミドテープで貼付けて得られた温度を太陽光パネル温度とする方法が一般的である。設置面日射強度測定に関しては、被測定パネル近傍に同一角度にて日射センサを取り付け、得られた日射強度を用いる。

表 5.26. 診断のための機器及び測定方法

要求事項	測定項目	機器	測定方法（手順）
安全性	絶縁抵抗 測定	DC Fault Tester	①安全に配慮し、電気回路の電源を off ②接続箱もしくはパワーコンディショナに計測器 のプローブを当てて計測
安全性	電路断線 (抵抗値) 測定		
発電性能	開放電圧 測定		
安全性	発熱箇所 特定測定	ドローン +赤外線カメラ	パワーコンディショナ運転中、ドローンに搭載した赤外線カメラにて上空から動画を撮影し、発熱箇所を観測
発電性能	I-V 特性 曲線測定	多機能高速 I-V 計測 システム	①安全に配慮し、電気回路の電源を off ②接続箱もしくはパワーコンディショナに計測器 のプローブを当てて計測（複数回路同時測定）

(2) 住宅と大規模発電所における診断環境の相違点と課題

大規模発電所は開けた敷地に設置されているため、診断のための計測機器を設置しやすく、かつ、容易に太陽光パネルに近づくことができる。一方で、住宅に設置されている太陽光パネルのほとんどが屋根に設置されているため、計測機器を設置する場所が限られており、太陽光パネルへの接近も容易ではない。ここで、課題となるのが測定した I-V 特性曲線を STC 補正するために必要な太陽光パネルの温度と、接地面の日射強度の測定である。大規模発電所では、これらは容易に計測できるが、住宅の屋根に設置されている太陽光パネルでこれを計測するのは難しい。

また、もう一つ異なるのが周囲の環境である。大規模発電所は、郊外の比較的人口密度の低い地域に建設されることが多く、検査対象となる太陽光パネルは周囲の民家や道路などの社会インフラから離れていることが多い。一方、都内の住宅の多くが人口集中地区(DID)の密集した住宅街に立地しており、近隣の住宅や道路などの社会インフラに隣接している。ここで、課題となるのは、赤外線カメラで太陽光パネルを撮影するために利用するドローンの飛行である。ドローンをはじめとする小型無人機を DID で飛行させる場合は、航空法などの定めにより様々な制約が生じる。一方、ドローンを利用することで屋上に設置されていて近づきにくい太陽光パネルにも容易に近づいて診断できるという利点もある。

(3) 住宅における診断方法の検討

前節までをふまえると、表 5.26 にまとめた診断方法で住宅の太陽光パネルを診断するためには、次の 2 つの課題を解決する必要がある。

- ・ 太陽光パネル温度及び設置面日射強度の測定
- ・ 住宅密集地（人口集中地区）でのドローン飛行撮影

本節ではこれらの課題の解決方法を検討する。

① 太陽光パネル温度及び設置面日射強度の測定

一般の住宅において、屋根に登って太陽光パネルに直接、測定器（日射センサ及び温度センサ）を設置することは困難である。

今回の検証では、JIS C8907 付属書 3[4]に記載されている方法（設置面日射強度と外気温と風速を用いた太陽電池温度推定法を用いることにより、太陽光パネル温度を推定する。

JIS C8907 付属書 3 に記載されている機器設置の条件は以下の通りとなる。

①日射計を太陽光パネルと同一方位・同一傾斜角で設置する

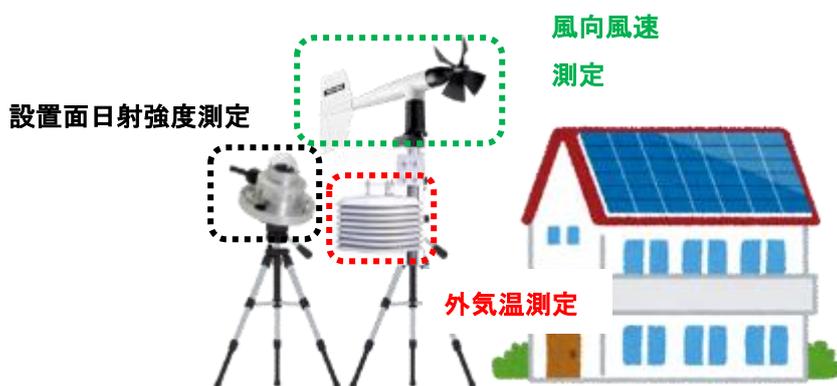
太陽光パネル面と同一方位・同一傾斜角による日射強度を算出するため、三脚に日射計を取付け、設置面と同一方位・角度となるように目視調整する。太陽電池温度推定のみならず、設置面日射強度の値としても、本取得データを使用する。

②外気温温度計は、直達光の影響を受けないようにする必要がある

ラジエーションシールドの内部に温度計を入れることにより、直達光の影響を受けない測定が可能となる。

③太陽光パネルとほぼ同一レベルの高さに風向風速計を設置して風速を計測する

太陽光パネルとほぼ同一となる高さの風向風速を測定するため、長尺ポール三脚の先端に風向風速計を設置する。



(ラジエーションシールド・風向風速計出典) クリマテック株式会社ホームページ (<http://www.weather.co.jp/>)

(三脚・住宅出典) いらすとやホームページ (<https://www.irasutoya.com/>)

図 5.24. JIS C8907 付属書 3 に記載されている太陽光パネル温度測定法の実践

上記①、②、③の条件を充たした状態で計測したデータを用いて、図 5.25 に示す補正式によって太陽電池モジュール温度を推定する。

$$T_{PA} = T_A + (A / (B \times V^{0.8} + 1) + 2) \times G_A - 2$$

T_{PA} : 太陽電池モジュール温度(°C)

T_A : 外気温(°C)

A : 係数

B : 係数

V : 風速(m/s)

G_A : 日射強度(kW/m²)

太陽電池アレイ設置方式	A	B
架台設置形	46	0.41
屋根置き形	50	0.38
屋根材形(裏面通風構造があるタイプ)	57	0.33

(出典) PVTEC 発行 太陽光発電システム保守・点検のための屋外環境下における I-V 特性測定方法 ガイドライン

図 5.25. JIS C8907 付属書 3 に記載されている太陽光パネル温度補正式

② 住宅密集地（人口集中地区）でのドローン飛行撮影

1) ドローン飛行による赤外線動画撮影を実施する目的

赤外線動画撮影を実施する際、ドローンを使用する目的は、

- 1) 人間が立ち入ることが難しいエリアの赤外線画像撮影
- 2) 人間より素早く移動できることによる撮影時間の短縮
- 3) 太陽光パネル正面に近い場所からの撮影による発熱箇所特定の容易化

である。今回は、住宅用において同手法を適用することによるメリット（長所）及びデメリット（短所）について検証する。

2) 航空法

平成 27 年 9 月に「航空法」が改正され、重量 200g 以上のドローン飛行について、運用に係る規則や違反時の罰則が明文化されている。

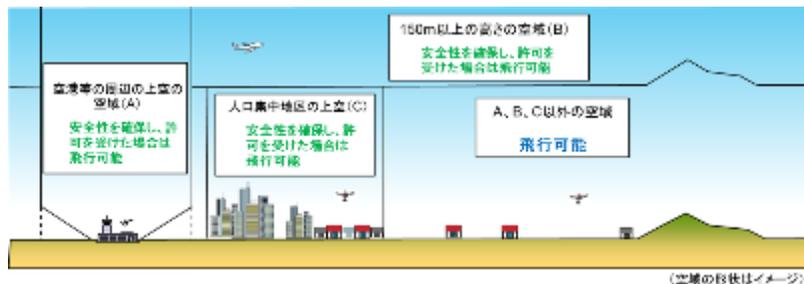
図 5.26 に示すように、

(A) 空港周辺の上空

(B) 150m 以上の高さの空域

(C) 人口集中地区（以下「DID」）の上空

については、地方航空局長の事前許可を必要とする。なお、DID に関しては、総務省統計局のホームページ¹を参照されたい。



(出典) 国土交通省ホームページ (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html#a)

図 5.26. 無人航空機の飛行の許可が必要となる空域

また、飛行場所に関わらず、無人航空機を飛行させる際には以下を遵守する必要がある。

- 1) 日中に飛行させること
- 2) 目視範囲内で無人航空機とその周囲を常時監視して飛行させること
- 3) 人（第三者）又は物件（第三者所有）との間に 30m 以上の距離を保って飛行させること
- 4) 祭礼、縁日など催しの上空で飛行させないこと
- 5) 爆発物など危険物を輸送しないこと
- 6) 無人航空機から物を投下しないこと

上記に抵触する飛行を実施する場合は、図 5.27 のように、地方航空局長の事前許可を必要とする。

1 http://www.stat.go.jp/data/chiri/map/c_koku/kyokaizu/index.html



(出典) 国土交通省ホームページ

(https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html#a)

図 5.27. 無人航空機の飛行の許可が必要となる飛行方法

ドローン飛行の際、事前に上記空域に該当するかどうかを確認し、必要に応じて地方航空局長への事前許可を行ったうえ、飛行させる必要がある。なお、上記空域(C: DID の上空)及び飛行方法 1)、2)、3)、5)、6)に対しては、日本全国を対象とし、場所を特定せず一括で地方航空局長への事前許可・承認を得ることが可能となっている。期間は一年間となっているが、期間終了前に都度更新が可能である。

ドローン操縦実施者に関しては、ドローン (DJI 社製 Inspire1) を上記空域(C)及び飛行方法 2)、3)で飛行させる場合について、地方航空局長 (大阪航空局長) に対し、日本全国を対象として一括で許可・承認実施済みであるため、住宅密集地においても原則として「航空法」上、無人航空機の飛行は可能となる。また、期間終了前に都度更新しており、許可・承認期間が途切れないようにしている。

3) 対人・対物補償

万が一、事故が発生した場合には損害賠償が発生する。したがって、第三者賠償責任保険へ加入することが、ドローン飛行者にとっての責務であると考え補償金額：(対人) 3 億円 (対物) 3 億円の第三者賠償責任保険へ加入している。(対物) の中には、太陽光パネル等にドローンが落下した場合におけるパネルの交換費用のみならず、発電量も含んだ補償を可能としている。

5.3.3 診断の実施及び評価

本実証では、I-V 測定と絶縁抵抗診断・パネル抵抗値診断を、14 件の住宅に設置された太陽光パネルについて実施した。そのうち、首都圏 (東京・神奈川) の 8 件については、クリーンエネルギーライフクラブ (CELC) ご協力の下、実施した。また、東京大学生産技術研究所にご協力いただき、COMMA ハウスにおいてドローンに取り付けた赤外線カメラによる太陽光パネル性能診断検証を実施させていただいた。

診断実施場所及び測定結果の一覧を表 5.27 に示す。なお、横浜市 K 様邸 (11/11 測定) については、2 つの異なる太陽光パネルシステムを並行して運転中のため、2 件分となる。

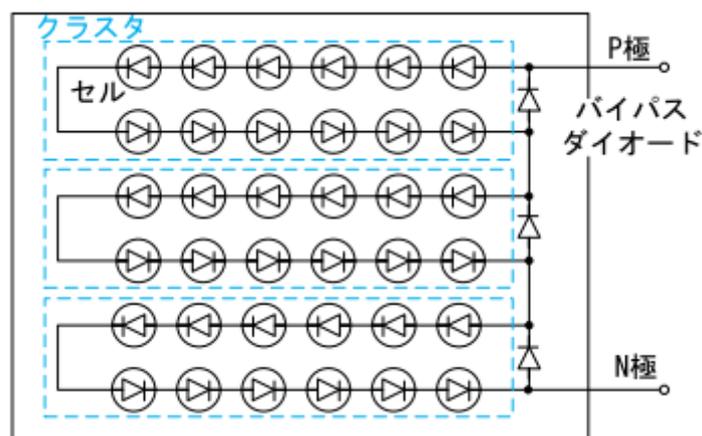
表 5.27. 太陽光パネル性能診断検証における測定結果一覧

場所	測定日時	天候	使用機器	日射計 取付	パネル 温度	所見
東京大学 生産技術研究所 COMMA ハウス	11/10	快晴	ドローン +赤外線カメラ	なし	なし	異常なし
目黒区 O 様邸	11/10	曇/晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	なし ※1	なし ※1	電路断線 (複数)
昭島市 U 様邸	11/12	曇	DC Fault Tester I-V 計測システム	なし	なし	電路断線 (複数)
鎌倉市 H 様邸	10/21	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	直接 取付	直接測 定※2	電路断線 (複数)
藤沢市 S 様邸	10/22	曇	DC Fault Tester I-V 計測システム	直接 取付	直接測 定※2	異常なし
横浜市 K 様邸	11/11	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	三脚 取付	JIS 推定	異常なし
横浜市 Y 様邸	11/11	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	なし	なし	電路断線
横浜市 O 様邸	11/12	曇	DC Fault Tester I-V 計測システム	なし	なし	異常なし
松山市 Y 様邸	10/31	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	直接 取付	直接測 定※2	異常なし
伊予市 M 様邸	10/31	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	三脚 取付	JIS 推定	異常なし
西予市 K 様邸	11/3	曇/晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	三脚 取付	JIS 推定	異常なし
喜多郡 N 様邸	11/3	晴/曇	DC Fault Tester I-V 計測システム	三脚 取付	JIS 推定	バイパス 回路短絡
松山市 Y 様邸	11/4	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	三脚 取付	JIS 推定	異常なし
松山市 N 様邸	11/4	快晴	DC Fault Tester I-V 計測システム	なし	なし	異常なし

※1 測定中に日射計設置場所が木陰となり、日射強度測定及び JIS C8907 付属書 3 によるパネル温度推定不可。

※2 気温と風速も同時に測定し、JIS C8907 付属書 3 の式によるパネル温度推定とパネル裏面温度との比較を実施。

I-V 特性曲線測定と絶縁抵抗診断・パネル抵抗値診断を実施した 14 件のうち、5 件において不具合を発見した。そのうち 4 件は DC Fault Tester により、電路断線の所見あり、と診断された。I-V 特性曲線測定と併せて診断した結果、3 件で不具合箇所が複数あることが確認できた。なお、太陽光発電協会に倣い、直列した太陽電池セルとバイパスダイオードを含むバイパス回路の単位をクラスタと呼ぶこととする。(図 5.28 参照)



(出典) 日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料 太陽光発電システム保守点検ガイドライン

図 5.28. 太陽光パネルにおけるクラスタの定義

まず始めに、I-V 特性曲線測定において使用する用語について説明する。

「Voc」：開放電圧。太陽電池の出力端子を開放したときの両端子間の電圧。

「Isc」：短絡電流。太陽電池の出力端子を短絡したときの両端子間に流れる電流。

「Pmax」：太陽電池の I-V 特性曲線上で電流と電圧の積が最大になる点での出力。

「FF」：曲線因子。Pmax を、Voc と Isc の積で除した値。太陽電池の特性を表すパラメータの一つであり、一般的に数値が大きいほど良い。

「Vpm」：最大出力動作電圧。Pmax における電圧値。

「Ipm」：最大出力動作電流。Pmax における電流値。

「P-V 特性曲線」：電力・電圧特性曲線。太陽電池の出力電圧に対する出力電力の関係を示す特性。Pmax の点が目で見える。

例として、目黒区 O 様邸における DC Fault Tester 及び I-V 特性曲線測定の結果を図 5.29 に示す。当該モジュールの STC 時 Voc は 33[V]となっている。よって、出力端子回路開放時のクラスタ電圧は、STC において $33[V] \div 3 = 11[V]$ となる。

日付	時刻	接続種	番号	測定モード	判定結果	ストリング電圧	125
2025/11/10	14:01:47	001	0001	地絡	正常	240.3	
2025/11/10	14:01:51	001	0001	断線	正常	240.3	
2025/11/10	14:02:11	001	0002	地絡	正常	219.3	
2025/11/10	14:02:18	001	0002	断線	注意	219.3	7110.5
2025/11/10	14:02:18	001	0003	地絡	正常	251.4	287.4M
2025/11/10	14:02:46	001	0003	断線	注意	251.4	7420.2

端子番号 2 及び 3 : 電路断線を検知

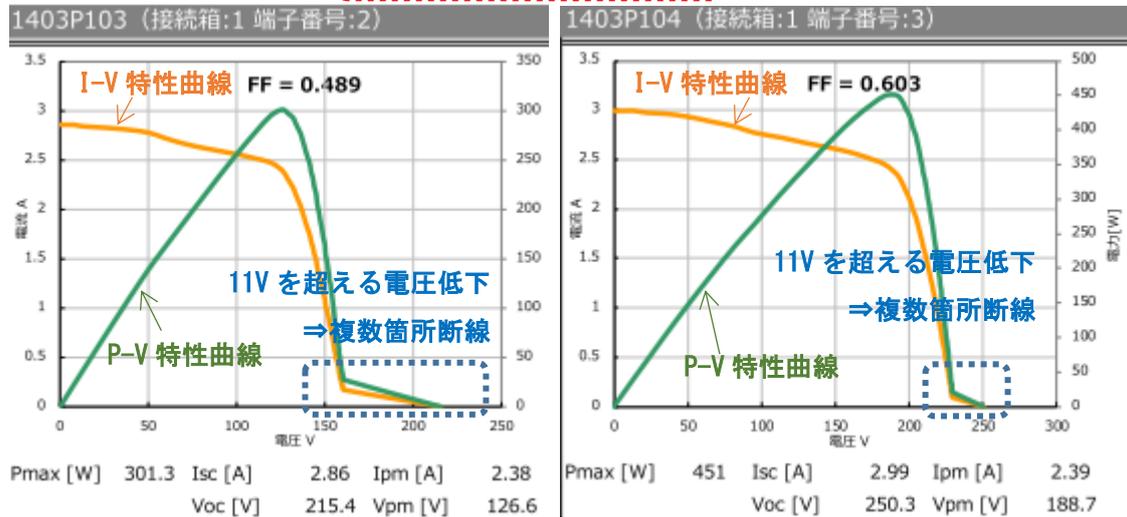


図 5.29. 目黒区 O 様邸 DC Fault Tester 結果と I-V 特性曲線

ストリング番号（端子番号）2 及び 3 において DC Fault Tester にて断線を検知した。I-V 特性曲線測定の結果、Voc 近傍において断線ストリング特有の電圧低下を示す結果となり、電路断線が発生していることを追認した。1つのクラスタに不具合が発生しているのであれば、理論上 11[V]以下の電圧低下となるが、2ストリングとも 11[V]を超える電圧低下を引き起こしているため、不具合箇所が複数あると診断することができた。

また、喜多郡 N 様邸における DC Fault Tester 及び I-V 特性曲線測定の結果を図 5.30 に示す。

日付	時刻	接続箱	番号	測定モード	判定結果	ストリング電圧	推定抵抗値	絶縁計
2023/11/03	14:20:06	001	0001	地絡	正常	212.8	441.8M	1
2023/11/03	14:20:12	001	0002	地絡	異常	212.3	441.8M	1
2023/11/03	14:20:45	001	0002	地絡	正常	176.4	364.8M	1
2023/11/03	14:20:50	001	0002	断線	正常	176.4	3.5	100
2023/11/03	14:25:21	001	0002	地絡	異常	169.3	295.1M	1
2023/11/03	14:25:26	001	0003	断線	正常	169.3	3.7	100
2023/11/03	14:26:55	001	0004	地絡	正常	169.8	412.3M	1
2023/11/03	14:29:00	001	0004	断線	正常	169.6	10.5	100

端子番号 2 : 異常所見なし

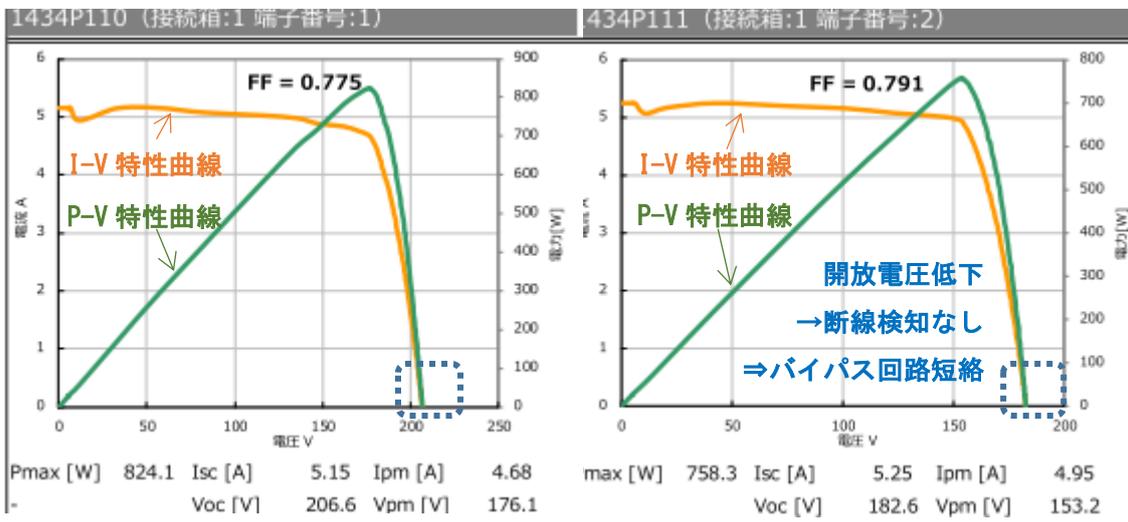


図 5.30. 喜多郡 N 様邸 DC Fault Tester 結果と I-V 特性曲線

DC Fault Tester では異常なしと診断されたが、I-V 特性曲線測定の結果、ストリング番号（端子番号）2 において開放電圧が低下している端子を発見した。DC Fault Tester が電路断線を検知していないため、バイパスダイオードを含むバイパス回路が短絡したことにより、当該クラスタの開放電圧が出力されないため、開放電圧が低下した I-V 特性曲線となったものと考えられる。

(1) JIS C8907 付属書 3 の式によるパネル温度推定

① 測定器設置検証

日射計・気温計・風向風速計の設置について評価する。設置の際、十分なスペース及び隣家の陰に遮られない離隔が必要となるが、実施した実証において測定器を庭に設置しようとすると、隣家や庭木から十分な離隔を確保するのが困難な場合があり、測定器を設置できた住宅は 8 件中 5 件（目黒区 O 様邸、鎌倉市 H 様邸、藤沢市 S 様邸、横浜市 K 様邸（1 件で 2 システム設置しているため 2 件とした））であった。うち 3 件は、三脚を 2 本以上置くことが可能な相当に広い 2 階ベランダに、残りの 2 件（横浜市 K 様邸）は隣の駐車場に設置させていただいた。



図 5.31. 横浜市 K 様邸 駐車場における測定器設置

風向風速計を設置する際、図 5.31 のように、庭や駐車場など、地上から屋根の高さまでポールを伸ばそうとすると、相当の長さまで伸ばす必要がある。11月11日当日の気象条件は、平均風速 2.1m/s、最大風速 6.1m/s であった。ポールを 4m 程度伸ばした時点で揺れが大きく、これ以上ポールを伸ばすと倒れる危険があると判断し、それ以上伸ばすことを断念した。よって、屋根の高さまでポールを伸ばすことができなかった。地上から屋根の高さまでポールを伸ばしても倒れる危険が発生しないためには、強固な基礎が必要となる。

2階ベランダからであれば、三脚のポールを 2m 程度伸ばすことによって、太陽光パネルとほぼ同一レベルの高さに風向風速計を設置することが可能であった。

日射計の設置は地上から屋根の角度を目視で確認しながら調整した。横浜市 K 様邸は東西に太陽光パネルが設置されているため、東側と西側それぞれにおいて、日射計角度を調整した。パネル面方位ごとの STC 補正後の短絡電流 I_{sc} を比較したものを表 5.28 に示す。本来であれば、日射強度と太陽光パネルの I_{sc} はほぼ比例するため、STC 補正後 I_{sc} は似たような値を示すはずであるが、計算した結果、東面のパネル I_{sc} が西側と比較し 1.5 倍以上となっていた。これは、日射計の角度が太陽光パネルの角度と異なっているため、受光面の日射強度がミスマッチしていることに起因する。

表 5.28. パネル面方位ごとの STC 補正後 I_{sc} 比較

パネル面方位	日射強度 (測定値)	STC 補正後 I _{sc} [A]
東	743	10.29
西	397	6.52

② パネル裏面温度と温度推定値の比較

3 件（鎌倉市 H 様邸、藤沢市 S 様邸、松山市 Y 様邸）の邸宅において屋上の太陽光パネルにアクセス可能であったため、パネル裏面温度と温度推定値の比較を実施した。本評価の際、日射計は被測定パネル近傍に同一角度で取付けを行っている。風向風速計の設置は、2 階ベランダに三脚を立て、太陽光パネルとほぼ同一レベルの高さとしている。そのため、JIS C8907 付属書 3 に記載されている機器設置のポイントを充たしており、測定器の設置方法に問題はない。

パネル裏面温度と JIS C8907 付属書 3 の式によるパネル温度推定値との比較は表 5.29 に示す。2 つの温度がほぼ一致する場合もあるが、10℃以上差が生じる事象もあった。これは、風向によっては太陽光パネルと風速計の風の当たり方が異なる場合があり、風速測定値と太陽光パネルへの風速とが mismatch を起こしていることが主な原因と推察される。なお、最大電力温度係数 γ を一般的な値である $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ と仮定すると、JIS 推定温度と実温度が 10℃異なった場合、最大出力電力において 5%程度の誤差を有することとなる。

表 5.29. JIS 推定温度とパネル裏面温度との比較

場所	測定日時	天候	パネル裏面温度 [°C]	JIS C8907 推定温度 [°C]	差 [°C]
鎌倉市 H 様邸	10/21	快晴	50.2	37.9	12.3
藤沢市 S 様邸	10/22	曇	25.8	25.6	0.2
松山市 Y 様邸	10/31	快晴	41.7	52.3	-10.6

③ JIS C8907 付属書 3 の式によるパネル温度推定 考察

日射計を被測定太陽光パネル設置面と同一方位・角度となるように地上より目視で調整することは、錯覚などによる誤差が発生する可能性がある。その結果、STC 補正後の短絡電流 I_{sc} の値が、被測定太陽光パネルの基準状態における I_{sc} 値と異なる事象が発生する。

また、JIS C8907 付属書 3 の式によるパネル温度推定は、日射計角度調整及び風向風速計設置作業が容易ではないこと、十分なスペース及び隣家の陰に遮られない離隔を必要とすることに加え、JIS C8907 付属書 3 に記載されている機器設置のポイントを充たした場合においても、得られるデータ精度が 10°C 以上となり、最大出力電力において 5% 程度の誤差を生じる。

したがって、地上に設置した日射計を被測定太陽光パネル設置面と同一方位・角度となるよう調整する方法、及び JIS C8907 付属書 3 の式によるパネル温度推定法を採用することは難しいと考えられる。

(2) ドローンを利用した発熱分布の診断

① 診断実施準備

本計測を実施させていただいた COMMA ハウス（東京大学生産技術研究所）は、DID 地区に該当することを総務省統計局のホームページで確認している。今回の評価において、ドローン飛行実施者は、大阪航空局長に対し日本全国を対象として一括許可・承認実施済みであり、「航空法」上問題はない。

但し、大学研究所内であり、第三者が立ち入りしやすいため、第三者へのケガを防止しなければならない。また、京王井の頭線が COMMA ハウス至近（直線距離 55m 程度）を走行しており、絶対に電車走行の妨げとなってはならない。そのため、独自の安全対策を設定し、関係者（東京大学生産技術研究所 荻本先生他ご担当者様各位、ドローン飛行見学者各位）に対し事前に承諾を得た。安全対策項目は下記の①から⑦である。

①使用前点検の徹底

下記 6 項目に対し、使用前に点検を実施して、異常がないことを確認し、飛行させる。

- 1) リモートコントローラ、機体のバッテリー、およびモバイル端末が完全に充電されているか。
- 2) プロペラは正しい箇所へしっかり装着されているか。
- 3) Micro-SD カードが確実に挿入されているか。
- 4) ジンバルは通常とおり機能しているか。
- 5) モーターは起動して通常とおり動くか。
- 6) 飛行アプリと正常に接続完了しているか。

②ドローンにプロペラガードを装着

建物・人へのプロペラの巻き込みを防止するため、プロペラガードを装着する。

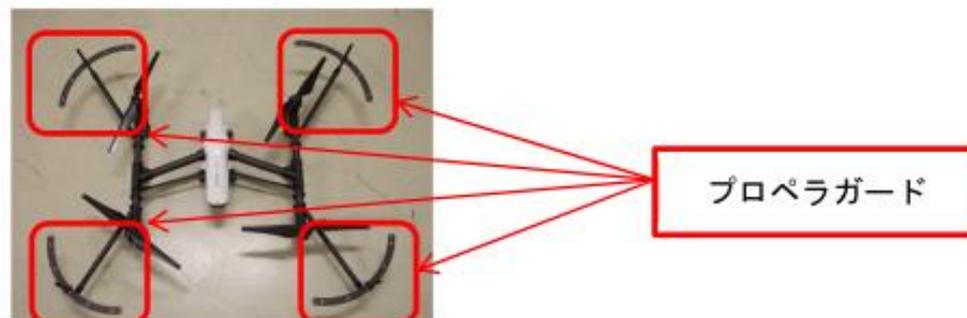


図 5.32. ドローンに取り付けるプロペラガード

③COMMA ハウス付近に第三者立ち入りエリアを設定

④COMMA ハウス付近への第三者立ち入りを防ぐため、補助員配置

⑤飛行経路を予め設定し、飛行経路を外れないように運転

第三者が飛行経路に立ち入らないようにするため、図 5.33 のように、立ち入り禁止エリアを設定し、三角コーンとコーンバーで境界を定める。さらに、立ち入りしないように呼び掛けるため、補助員を配置し、注意喚起を行う。飛行経路を予め定め、飛行経路を外れないようにドローンを操縦する。飛行経路は、発着点と COMMA ハウス上空のみとする。予期せぬ理由で飛行経路を外れた場合、下記⑦のドローン係留装置を使用し、飛行範囲を制限する。



画像©2021 Digital Earth Technology, The Geoinformation Group, 地図データ©2021 Google

図 5.33. 立ち入り禁止エリア、飛行経路及び補助員配置位置

⑥操縦不能となった場合、その場で待機するように設定

今回使用するドローン (DJI 社製 Inspire1) においては、Wi-Fi 信号ロストとなった場合の動作を設定することが可能である。周囲構造物が多いため、信号ロスト時に「離陸点自動帰還後の着陸 or その場で着陸」とする設定では、周囲構造物に接触する可能性が高くなる。そのため、図 5.34 のように、その場でホバリングしながら Wi-Fi 信号の回復を待つ設定とする。なお、Wi-Fi 接続の回復が見込めない (ドローン制御ができない) 場合、下記⑦のドローン係留装置を使用し、飛行範囲を制限する。

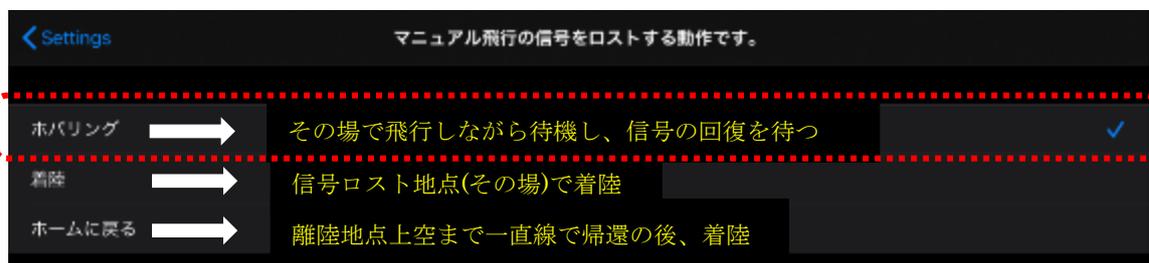


図 5.34. Wi-Fi 信号ロストとなった場合の動作設定

⑦ドローン係留装置を使用し、半径 (糸長) 35m を超えない範囲で飛行

ドローン制御が不能となった場合、京王井の頭線に向かって飛行し、走行の妨げとなってしまう可能性が否定できない。それを完全に防止するため、物理的に発着点からの飛行半径

を制限する。直線距離 55m 程度の地点に京王井の頭線が走行しているため、ドローンが制御不能となった場合若しくは理由に関わらず糸長 35m を超えた場合は、緊急ブレーキを作動させ、糸長より遠くにドローンを落下させないようにする。本安全対策は、法律やガイドラインに基づくものではなく、ドローン飛行の安全対策に関するホームページなどを参考に、独自に設定したものとなる。



(出典) ドローンレンタルネットホームページ (https://drone-rental.net/dronespider_ds-003pro/)

図 5.35. ドローン係留装置



画像©2021 Digital Earth Technology, The Geoinformation Group, 地図データ©2021

Google

図 5.36. ドローン係留装置の糸長範囲

② ドローンによる発熱分布診断の実施

試験準備中及び飛行中の写真を図 5.37 に示す。



図 5.37. ドローンによる赤外線画像撮影準備の様子

(左：プロペラガード取付け 中：使用前点検（アプリとの接続） 右：飛行直後）

実際の準備から撮影（飛行）までのプロセスについて記す。ドローンをケースより取り出し、プロペラを装着した後、プロペラガードを装着する。ケースのサイズ上、予めプロペラ及びプロペラガードを装着したまま運搬できないため、現地で取り付け作業を行う必要がある。建物・人へのプロペラの巻き込みを防止する観点より、プロペラとプロペラガードは水平に取り付けられている必要があるため、目視によって水平に取り付ける。その後、赤外線カメラに Micro-SD カードを挿入し、ジンバルが通常とおり機能していることを確認しながら赤外線カメラを取り付ける。ドローン係留装置とドローン本体とを接続した後、飛行アプリの接続完了とモーターの起動を確認する。以上に問題がなければ、飛行前の風速が常時 5m/s 未満の状態であることを確認してから、屋根上までドローンを飛行させる。ドローンが屋根上に到着したところで太陽光パネルを撮影する。

実際に必要とした時間については以下の通りとなる。

表 5.30. ドローンによる撮影の作業時間

作業項目	所要時間（およそ）
準備	40 分
撮影（飛行）	5 分
片付け	20 分

途中手間取ることもなく順調に準備と片付けが進んだため、想定される時間の中で早い時間内に準備と片付けを終えることができた。実際に撮影に要した時間についても、想定される時間内での作業となった。よって、当日の検査スケジュールについては、当初に想定し

た検査スケジュールとおりでも問題ないと考えられる。

③ ドローンによる発熱分布診断の考察

住宅屋根に設置されている太陽光パネルは高所に取り付けられており、立ち入りが容易ではない。ドローンを用いることにより、高所作業を実施する必要がなくなる。そのため、容易に発熱分布を得ることができ、かつ、作業員に対するケガのリスクを抑えることができると推察する。

ドローンに設置した赤外線カメラで撮影した太陽光パネルの赤外線画像を図 5.38 に示す。この図のように、ドローンを使用することによって、太陽光パネルの正面に近い角度から発熱分布を観測することが可能となる。今回撮影した赤外線画像から、COMMA ハウス屋上に設置されている太陽光パネルに異常発熱箇所はないものと考えられる。

今回得られた赤外線画像と、大規模発電所での実績などを併せて考えると、今後、同じ手法で住宅の異常発熱箇所のある太陽光を撮影した場合、容易に発熱箇所を特定できると考えられる。

準備と片付けを含め、ドローンによる診断では、撮影に 1 時間程度を要する。したがって、屋根に登って赤外線カメラで撮影することが可能な場合にはドローンを用いることによる時間短縮効果はなく、むしろドローンを用いることで測定時間が長くなると推察される。



図 5.38. COMMA ハウス屋上 ドローン IR 撮影画像

他方、地上に設置したデジタル風速計の表示値が国土交通省航空局標準マニュアルでドローンを飛行させることができるとされている 5m/s 未満であったにもかかわらず、機体は数十 cm 程度ふらつくような挙動を示した。大規模発電所においては周囲構造物がないため気にならないが、東京都などの住宅密集地においては隣家や電柱/電線が密集しているため、撮影中の突風などによりそれら周囲の構造物に干渉する可能性があると考えられる。また、飛行中のふらつき等により、太陽光パネル周辺の構造物（隣家等）を撮影してしまう可能性

が否定できない。ドローンの飛行音に関しては、周囲の建物などからの音の反射により、地上までよく響いていたように感じる。

上述より、周囲構造物に対する接触事故の可能性及び騒音やプライバシーの問題に発展する可能性を考慮する必要がある。飛行させることができる条件を独自で設定するなど、むやみに飛行させないことが望ましいと考える。

参考までに、住宅密集地においてドローンによる赤外線撮影飛行を実施するための独自条件として、以下のように設定することが望ましい。

- ①周囲の構造物（電線、隣家の樹木等）が飛行場所より 5m 以上離れていることとする。
5m 以上の離隔を得ることが困難な場合は、飛行させない。
- ②周辺の住民（撮影対象より半径 30m 以内の物件）に対し、ドローン飛行実施、飛行時刻を事前通知し、騒音が発生する旨を伝える。また、撮影対象を事前に通知しておく。許諾が得られない場合は、飛行させない。
- ③DC Fault Tester による性能測定や I-V 特性曲線測定の結果不具合が疑われ、温度分布観測によって不具合箇所の有無及び特定を必要とする場合のみ、ドローン飛行による撮影を実施する。

また、必要に応じ、以下の独自対応を実施する。

- ④ドローンが落下や接触すると重大な影響を及ぼす場所（高速道路、幹線道路、線路、高圧電線等）の付近でドローンを飛行させる場合、当該場所にドローンが落下や接触しないよう、ドローン係留装置を使用する。

④ ドローンが飛ばせない場合における温度分布診断実施方法

周辺の住民からの許諾が得られない等、諸事情によりドローンを飛行させることが不可能な場合において、温度分布観測を必要とする場合、下記 2 つの方法が考えられる。

1) 住宅の屋根に登り、温度分布を観測

住宅屋根に登るための梯子等が設置されている場合はそれを使えばよいが、設置されていない場合が大半である。その際は、足場を組んで屋根にアクセスする経路を確保する必要がある。ドローン飛行と比較した場合、工期と費用が大幅に上昇することは避けられない。但し、近隣住民に対する許可は不要となる。

2) 高所作業車に乗り、温度分布を観測

高所作業車を駐車するための庭及びアクセス経路が確保できる場合はよいが、確保できない場合が大半である。その際は、公道に高所作業車を配備する必要がある、関係機関に許可を得る必要が生じる。また、高所作業車を操縦するためには資格が必要となり、専門の人員を確保する必要がある。ドローン飛行と比較した場合、費用が大幅に上昇することは避けられない。必要な許可/許諾及び費用面の両面から、現実的とはいえないと考える。

ドローン飛行及び上記①、②が難しい場合は、住宅の屋根に設置したまま温度分布を観測することはできない。屋根からモジュールを取り外した後、モジュール 1 枚ずつ DC Fault Tester による性能測定や I-V 特性曲線測定を実施し、リユースの可否判断を行う。

5.3.4 診断を実施するにあたっての課題と対処方法

(1) 住宅設置太陽光パネル性能診断の課題

住宅屋根設置太陽光発電システム特有の事象として、完成図書の全部もしくは一部紛失など種々の理由より、下記 2 点の事前情報が入手できない可能性がある。

①回路（ストリング）ごとの設置条件（配置・直並列数）

②設置している太陽光パネル型式（基準状態におけるパネル出力値）

本来、IEC60891 に記載されている式を用いて I-V 特性曲線の STC 補正による特性評価を実施するためには、事前に太陽光パネル型式、回路ごとの直並列数及び回路ごとのパネル配置を把握しておく必要がある。

今回の検証において、完成図書をどこに保存したかわからなくなっており、太陽光パネル型式及びストリングの直並列数を事前に知ることができないケースが散見された。また、実際に現場を確認したところ、屋根の形状や面積に合わせて設置するケースがあり、ストリングごとに設置方位が異なるだけでなく、直並列数がストリング毎に異なるケースも散見された。直並列数が異なる場合の I-V 特性曲線例を図 5.39 に示す。

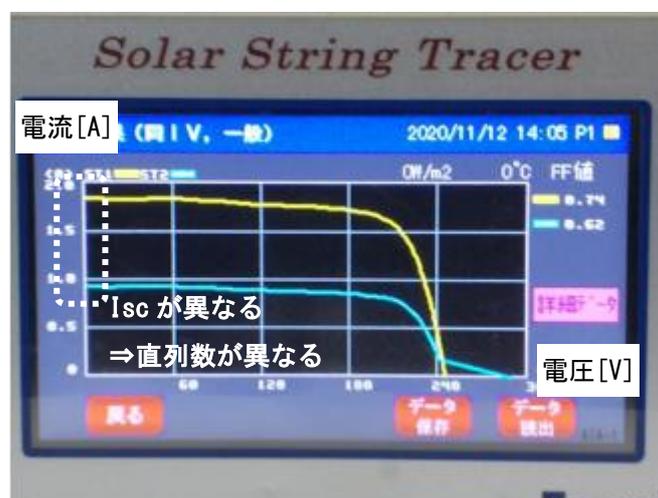
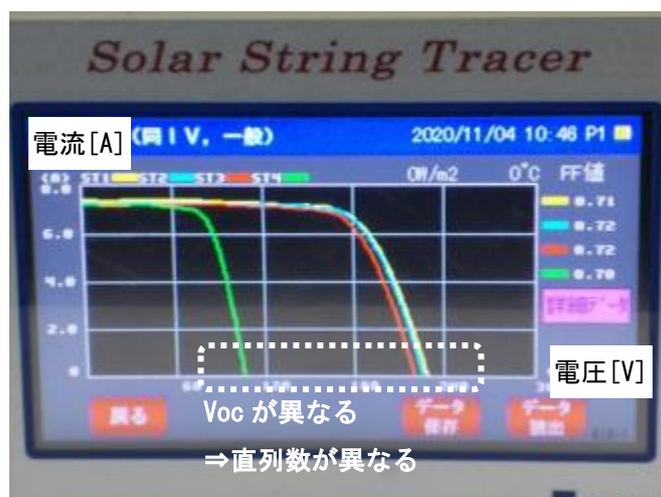


図 5.39. 直並列数が異なる場合における I-V 特性曲線の例
(上：直列数が異なる場合、下：並列数が異なる場合)

(2) 課題に対する対処方法

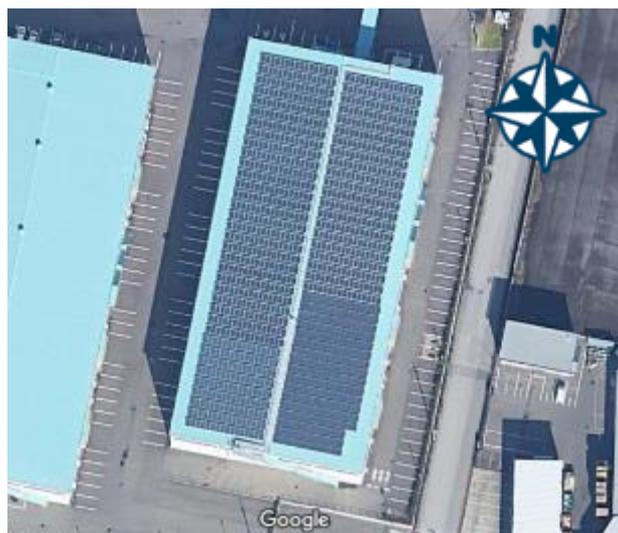
回路（ストリング）ごとの設置条件（配置・直並列数）を事前に知っておくことができれば、設置条件による出力差を踏まえた上、測定値を相対比較し、発電性能を診断することが可能となる。事前情報が入手できない場合、航空写真等を使用し、以下の情報を事前確認しておくことにより、設置条件（配置・直並列数）が推定できる可能性があると考えられる。

- ① パネル設置方位
- ② 周囲の構造物
- ③ パネル枚数（総数）

例として、株式会社エヌ・ピー・シー松山工場 C 棟（図 5.40 参照）における事前確認項目とその結果を表 5.31 に示す。

表 5.31. 株式会社エヌ・ピー・シー松山工場 C 棟における事前確認項目と結果

事前確認項目	確認結果
パネル設置方位	西南西
周囲の構造物	特になし
パネル枚数（総数）	1178 枚



画像©2021 Digital Earth Technology, Maxar Technologies, Planet.com, 地図データ©2021 Google
 (方位磁石出典) いらすとやホームページ (<https://www.irasutoya.com/>)

図 5.40. 株式会社エヌ・ピー・シー松山工場 C 棟航空写真

事前確認項目を踏まえた上、現地において太陽光パネルの測定を実施する。現地測定時に回路数と I-V 特性曲線測定結果が判明するため、1 回路あたりの直並列数及び並び順が推定可能となることが多いように感じる。

なお、設置している太陽光パネル型式は、現在のところ、完成図書若しくは太陽光パネル裏面に貼付してあるラベルを直接確認する以外の方法はないと考える。

5.3.5 点検方法及び診断法（案）

今回の診断実証から得られた知見より、住宅屋根設置太陽光パネル診断のための点検方法を以下のように提案する。診断・点検に際しては、前節にて示した太陽光発電システムの事前情報が入手可能な場合は入手することが望ましく、さらに、太陽光パネルと同一方位・同一傾斜角における日射強度・パネル裏面温度の測定が物理的に容易な場合は、測定する事が望ましい。しかしながら、上記が困難であることが多いことに鑑み、不要とする場合における診断法についても記載する。

(1) DC Fault Tester による性能測定

DC Fault tester を用いて、下記 3 種類の測定を一度に実施する。

- 絶縁抵抗測定
- 電路断線（抵抗値）測定
- 開放電圧測定

絶縁抵抗不良検出時は、I-V 特性曲線測定結果が不安定になるおそれがあるため、(2)項以降の測定を実施する必要はない。

電路断線（高抵抗）検出時は、不具合モジュール枚数推定及び不具合発生モジュール特定のため、(2)項及び(3)項の測定を実施する。

不具合が検出されなかった場合においても、発電性能が十分に発揮されていることを確認するため、(2)項及び(3)項の測定を実施する。

(2) 多機能高速 I-V 計測システムによる I-V 特性曲線測定

① 太陽光発電システムの事前情報が入手できない場合

複数回路同時に I-V 測定する。I-V 特性曲線形状及び出力値を相対比較することにより、太陽光パネル状況を診断する。回路（ストリング）ごとの設置条件（配置・直並列数）を可能な限り推定する。推定可能な場合は、設置条件による出力差を踏まえた上、相対比較による発電性能診断を実施する。I-V 特性曲線形状の解釈については、JEMA/JPEA 太陽光発電システム保守点検ガイドライン付属書 E[1]を参照する。但し、全てのストリングで一律に出力パラメータが低下している場合には、不具合を見落としてしまう可能性が高くなることに留意する必要がある。また、パネルの設置条件（配置・直並列数）が異なることが推定される場合には、出力差の要因を設置条件と推察しがちであるため、不具合を見落としてしまう可能性が高くなることに留意する必要がある。留意事項に該当する場合、システムの情報不明のため基準となるパラメータがなく、不具合検出手法を発見することは難しい。

①回路（ストリング）ごとの設置条件（配置・直並列数）②設置している太陽光パネル型式（基準状態におけるパネル出力値）を確認できれば、後述する③項の手法が適用できるため、太陽光パネル状況及び不具合が推定しやすくなる。完成図書を PCS 近傍など、いつでも手に取れる場所に保管しておき、すぐに確認できることが望まれる。また、屋根形状や面積などにより制限され難しい場合があるが、パネル設置条件（配置・直並列数）を一定とした太陽光発電システムとすることが望まれる。

② 太陽光発電システムの事前情報が入手可能であり、かつアレイと同一方位・同一傾斜角における日射強度・パネル裏面温度測定が物理的に容易な場合

大規模発電所で実施している測定方法と同様、日射強度・パネル裏面温度測定を実施する。IEC60891 に記載されている式を用い、I-V 特性曲線を STC 補正することにより、太陽光パネルの出力評価をする。太陽光パネル仕様値と比較した出力低下の割合により、太陽光パ

ネルの状態を診断する。基準状態におけるパネル仕様と比較し、出力がほぼ低下していないストリングであれば、上位グレード品としてリユースが可能であると言える。

③ 太陽光発電システムの事前情報（太陽光パネル型式・設置条件）が入手可能であるが、同一方位・傾斜角における日射強度・パネル裏面温度測定が難しい場合

基準状態におけるパネル仕様（ V_{oc} , I_{sc} , V_{pm} , I_{pm} ）に基づき、1Diode モデルを使用した推定 I-V 特性曲線を描画する[5][6][7]。 I_{sc} , V_{oc} が合致するような推定 I-V 特性曲線を、放射照度/温度を変化させることによって収束により求め、測定した I-V 特性曲線と比較する。全てのストリングが一律に出力パラメータ低下している太陽光発電システムにおいて、I-V 特性曲線形状及び出力値について 1Diode モデルを使用した推定 I-V 特性曲線と定性的に比較することにより、太陽光パネル状況を診断することが可能となる。例えば、実測 I-V 特性曲線が 1Diode モデルを使用した推定 I-V 特性曲線と比較した場合、 P_{max} の低下が著しいものについては、太陽光パネルの劣化・不具合があることが推定可能となる。また、放射照度/温度が通常想定される値と大きく異なると判断することが可能であれば、 I_{sc} , V_{oc} に起因する不具合があると推定することも可能となる。但し、設置条件が異なる太陽光発電システムの場合、出力差の要因を設置条件と推定しがちであるため、不具合を見落としてしまう可能性が高くなることに留意する必要がある。

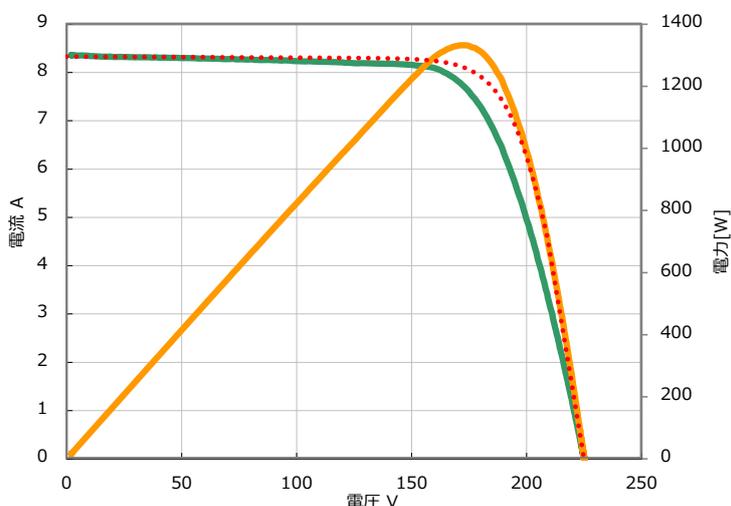


図 5.41. 1Diode モデル推定と実測定 I-V 特性曲線の比較評価 イメージ
(赤点線…1Diode モデル推定 I-V 特性曲線)

(3) ドローン+赤外線カメラによる動画撮影

発熱箇所を検出することによって、不具合発生モジュールを特定診断する。

但し、5.3.3 項(2)③で述べたとおり、周囲構造物に対する接触事故の可能性及び騒音/プライバシー問題に発展する可能性に鑑み、むやみに飛行させることは控え、条件を独自で設定

した上で飛行させることができるようにすることが望ましい。

首都圏の住宅密集地においては、ドローンが落下/接触すると重大な影響を及ぼす場所(高速道路、幹線道路、線路、高圧電線等)が各所に存在している。ドローン係留装置を使用することにより、物理的に当該場所にドローンが落下/接触しないように対策を施すことが肝要と考えられる。

5.3.6 参考文献

- [1] JEMA/JPEA 太陽光発電システム保守点検ガイドライン (2019)
- [2] 太陽光発電技術研究組合, 「中小太陽光発電所の保守点検項目に関する調査報告書」(2018)
- [3] IEC 60891:2009, Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics
- [4] JIS C8907:2005, 太陽光発電システムの発電電力量推定方法
- [5] 拵博人, 植田譲, 菱川善博, 「セル間の性能ばらつきを考慮した屋外条件下での太陽電池モジュール発電性能評価手法」 太陽/風力エネルギー講演論文集 2018, 23-26 (2018)
- [6] 植田譲, 「PV 日射計測によるシステム性能測定手法」 第 9 回太陽電池性能高度評価技術研究会 (2018)
- [7] Mohamed Saleem ABDUL KAREEM, Manimaran SARAVANAN, A new method for accurate estimation of PV module parameters and extraction of maximum power point under varying environmental conditions, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 24: 2028-2041 (2016)

5.4 使用済み太陽光パネル収集運搬実証

5.4.1 運搬方法の検討と実証

(1) 太陽光パネルの運搬方法の検討

住宅の屋根から取り外した段階ではリユースやリビルドできる太陽光パネルであっても、運搬中に破損してしまうと当初の目的で使用できなくなってしまう。また、取り外し当初からリサイクルするものであっても、カバーガラスなどが破損すると処理方法が限定されてしまう。したがって、使用済み太陽光パネルを高度に循環利用するためには、取り外した太陽光パネルを破損させぬよう運搬することが必須であり、合わせて発電防止や飛散防止を行わなければならない。また産業廃棄物として収集運搬する場合は、廃棄物処理法に基づき収集運搬業者が運搬する必要がある。

① 破損防止

運搬中に太陽光パネルが壊れやすく不適切な状態の梱包（荷姿）の例を図 5.42 に、壊れにくい適切な梱包（荷姿）の例を図 5.43 にそれぞれ示す。

これらの図のうち図 5.42 は PP バンドで梱包はしているが、太陽光パネルの角を合わせて積み重ねられていない為、運搬途中の振動で横ずれを起こす可能性がある。横ずれした場合、下段の太陽光パネルのカバーガラス部分に上段の太陽光パネルアルミフレームが接触し、破損する可能性がある為、図 5.43 に示すように太陽光パネルの角を合わせた状態で積み重ね、アルミフレームの上に積載されるように積み重ね、その後横ずれ防止の為に PP バンド及びストレッチフィルムで梱包することが望ましい。



図 5.42. 不適切な梱包



図 5.43. 適切な梱包

② 発電防止

太陽光パネルは受光面に光が当たると発電し、ガラスの破損やケーブルの断線等で感電する恐れがある為、遮光されるようにブルーシート等で覆うまたは太陽光パネルを積み重ねて運搬する場合は、図 5.44 のように最上段に積み重ねるパネルの受光面を裏向きにするなどして受光面に光が当たらないような措置を行っただけで運搬することが望ましい。



図 5.44. 発電防止措置

③ 飛散防止

飛散防止措置をした例を図 5.45 に示す。パワーコンディショナ等固縛できないもの等を積載する場合はシートで覆うなどして飛散防止措置を行わなければならない。



図 5.45. 飛散防止措置

(2) 収集データ項目の検討

最終年度でのシミュレーションのパラメータ精度を上げるために、シミュレーション側、及び LCA において必要になるパラメータとして、時間別走行データ、総走行距離、実車走行距離、空車走行距離、積み込み作業時間のデータを収集した。

表 5.32. 収集データ

日時	作業状態	稼働	実車	道路	GPS測位緯度	経度	速度	方位区分	エンジン回転数	総走行距離
2020/11/27 7:27	走行中	稼働	空車	一般道路	10 N35.40391	E139.5218	39.7km/h	北西	2,007rpm	176,995.6km
2020/11/27 7:30	走行中	稼働	空車	一般道路	8 N35.40521	E139.5201	24.4km/h	北西	1,836rpm	176,996.2km
2020/11/27 7:31	走行中	稼働	空車	一般道路	8 N35.40501	E139.5158	0km/h	東	0rpm	176,996.6km
2020/11/27 7:33	走行中	稼働	空車	一般道路	8 N35.40502	E139.5158	0km/h	東	0rpm	176,996.6km
2020/11/27 7:36	走行中	稼働	空車	一般道路	8 N35.40525	E139.5202	16.1km/h	北東	1,899rpm	176,996.7km
2020/11/27 7:39	走行中	稼働	空車	一般道路	9 N35.40574	E139.5204	0km/h	北	645rpm	176,996.9km
2020/11/27 7:41	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.41040	E139.5138	25.7km/h	南西	981rpm	176,997.7km
2020/11/27 7:42	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.40412	E139.5122	64.9km/h	南西	1,914rpm	176,998.5km
2020/11/27 7:45	走行中	稼働	空車	高速道路	11 N35.38533	E139.5114	72.6km/h	南	2,133rpm	177,002.1km
2020/11/27 7:48	走行中	稼働	空車	高速道路	11 N35.38383	E139.5014	32.8km/h	西	1,656rpm	177,004.1km
2020/11/27 7:51	走行中	稼働	空車	高速道路	11 N35.38330	E139.4918	35.3km/h	西	1,371rpm	177,005.6km
2020/11/27 7:54	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.37566	E139.4744	71.6km/h	南西	2,106rpm	177,008.3km
2020/11/27 7:57	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.37187	E139.4636	23.6km/h	南西	1,191rpm	177,010.5km
2020/11/27 8:00	走行中	稼働	空車	高速道路	0		43km/h	南西	1,665rpm	177,011.9km
2020/11/27 8:03	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.35114	E139.4530	67.1km/h	南	1,965rpm	177,015.2km
2020/11/27 8:06	走行中	稼働	空車	高速道路	0		75.6km/h	南東	2,220rpm	177,018.9km
2020/11/27 8:09	走行中	稼働	空車	高速道路	9 N35.31575	E139.4754	78.6km/h	南	2,310rpm	177,022.8km
2020/11/27 8:11	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.30400	E139.4731	81.2km/h	南西	2,394rpm	177,025.4km
2020/11/27 8:12	走行中	稼働	空車	高速道路	0		77.7km/h	南西	2,268rpm	177,026.8km
2020/11/27 8:15	走行中	稼働	空車	高速道路	10 N35.29148	E139.4441	74.9km/h	南西	2,187rpm	177,030.7km

(3) 収集運搬の実施

実際の運搬方法の検証、及び収集運搬に関わる K 様邸（横浜市栄区）、S 様邸（神奈川県藤沢市）、H 様邸（神奈川県鎌倉市）の 3 件の収集運搬の実証を行い、表 5.33 の収集運搬実績に示すとおり、収集運搬効率のみを優先した場合は、前日に撤去を行い、空きスペースに残置したものを積込することがもっとも効率的と考えられる。なお、各収集運搬の実績を表 5.34 から表 5.36 に示す。

車種別の巡回軌跡を表 5.37 に示す。収集運搬効率を上げる為には、より大きな車両で引き取りを行うべきであるが、東京や首都圏近郊での戸建て住宅では、道幅の狭い場所が多いこと想定され、本実証で実際の収集運搬を実施した 3 件についても道幅が 4,000mm 以下の現場であった。K 様邸付近の道路幅に軌跡図を記載したものが図 5.46 になるが、2t ロング以上の車両では道幅が狭く、現場に行けない可能性がある。

また、首都圏近郊の戸建て住宅では駐車スペースが無い現場が想定される為、近隣のコインパーキング等に停車させる、あるいは道路交通法に従い、道路に停車させて積み込みを行う必要がある事から、コインパーキングにも停車可能な 2t 標準の車両が望ましい。

表 5.33. 収集運搬実績

実施場所	パネル枚数	架台取り外し有無	作業条件	積込作業時間
K 様邸	24 枚	有	当日撤去 (24 枚中 16 枚取り外し完了後より積み込み作業)	1.75h
S 様邸	25 枚	有	前日撤去	0.75h

実施場所	パネル枚数	架台取り外し有無	作業条件	積込作業時間
H 様邸	24 枚	無	当日撤去 (作業開始時から待機)	1.58h

表 5.34. S 様邸収集運搬実績

時間	住所	住所	経過時間	走行距離
6:30	江戸川区	出庫		-
9:00	神奈川県藤沢市	到着 積込	2:30	75.8km
9:45	神奈川県藤沢市	出発	0:45	-
11:25	太田区	到着 待機	1:40	-
11:40	太田区	荷卸	0:15	53.9km
11:50	太田区	出発	0:10	-
12:45	江戸川区	帰庫	0:55	23.8km
合計	-	-	6:15	153.5km

表 5.35. H 様邸収集運搬実績

時間	住所	住所	経過時間	走行距離
7:15	江戸川区	出庫		-
9:15	神奈川県鎌倉市	到着 積込	2:00	77.5km
11:20	神奈川県鎌倉市	出発	1:55	-
12:45	太田区	到着	1:25	-
12:45	太田区	荷卸	0:15	54.6km
13:00	太田区	出発	0:10	-
13:35	江戸川区	帰庫	0:35	23.0km
合計	-	-	6:20	155.1km

表 5.36. K 様邸収集運搬実績

時間	住所	住所	経過時間	走行距離
7:10	江戸川区	出庫		-
9:15	神奈川県横浜市栄区	到着 積込	2:05	62.0km
11:00	神奈川県横浜市栄区	出発	1:45	-

時間	住所	住所	経過時間	走行距離
12:05	太田区	到着	1:05	-
12:20	太田区	荷卸	0:15	44.9km
12:25	太田区	出発	0:05	-
13:05	江戸川区	帰庫	0:40	23.8km
合計	-	-	5:55	130.7km

表 5.37. 車種別旋回軌跡

車種	全長 (mm)	全幅 (mm)	旋回角度	所要道路幅 (mm)	最小旋回半径 (mm)
2t ショート	4,685	1,695	90°	3,300	4,500
2t ロング	6,065	1,890	90°	3,900	5,900
4t	8,485	2,260	90°	5,000	7,200
大型車	11,950	2,490	90°	6,400	10,300

(出典) いすゞ自動車ホームページ (<https://www.isuzu.co.jp/cv/data/index.html>)

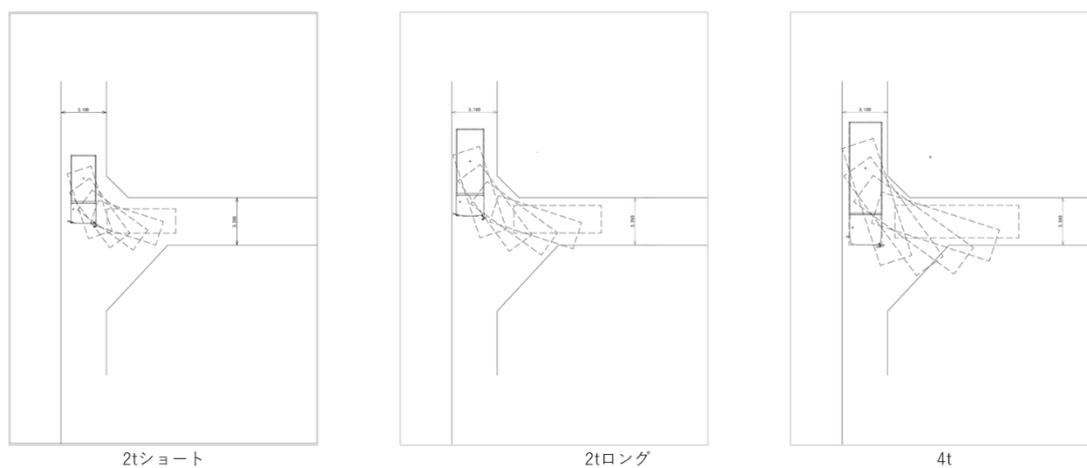


図 5.46. K 様邸近隣道路車種別旋回軌跡



図 5.47. 荷締め作業（左）と積載（右）の様子

5.4.2 収集運搬ルートを検討

(1) 収集運搬方法形式検討のための最適化モデル

本節では使用済み発生量シナリオを念頭にいくつかのパターンの回収についての検討を行う。検討を行う回収システムは次の図 5.48 に示す 3 パターンである。



図 5.48. 収集運搬の 3 モデル

現状のように極めて発生量の少ない段階においては A のように排出されたパネルの発生地点から実際の処理先まで運搬を行う以外の手段はない。これがある程度の量が発生するようになると、途中に集積所を作る B のモデルや、巡回路を回る C のいわゆるミルクランモデルを用いる可能性が発生する。ここで分析したい最大の目的は、それぞれのモデルの詳細なコストを計算することではなく、どの程度の件数が発生した段階で A に対して B, C が優位性を持つのかという点である。発生地点は各市区町村の幾何学的重心におき、走行ルートの距離は Open Street Map から、またこれら以外のパラメータ（費用単価など）は既存文献のものを用いた。こうした詳細な情報は次年度以降、さらに精度の高い計算を実施する際に修正について検討すべきである。

まず B モデルについて、都内における年間発生件数と集積所の数による費用の違いを図 5.49 に示す。

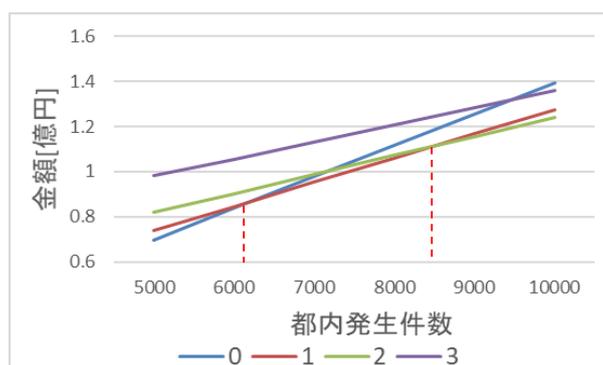


図 5.49. B モデルにおける集積所数と総費用

この図からもわかるように、発生件数が少ない間は集積所数 0、すなわちモデル A が B に対して経済面での優位性を持つことがわかる。しかし年間 6000 件強あたりで集積所数 1 の場合が A を上回り 8500 件程度で集積所の数が 2 で最適となる。このまま発生件数が伸びれば最適な集積所の数が上がることは間違いない。

モデル C の検討結果も併せて示す。モデル C については一度に何件まわることができれば平均的にどの程度の費用削減につながるかを先に計算し、これが年間発生件数としてどの程度にあたるのかについて検討することとした。その結果、1日に 2 件ずつ巡回することができるだけでモデル A に対して平均で 37.6%の費用削減につながるということがわかった。ただし、1日 2 件の場合平均的にはこのような削減幅につながるものの、同じ日に近傍で発生するとは限らず、実際の収集 1 回ごとの削減の幅は極めて大きく不安定である。これが仮に 1日に 10 件巡回できるレベルで発生する場合、より近傍での発生が期待できることとなり、削減幅は安定してくる。10 件を回収するためには当然ながら年間 3650 件の発生が必要になるが、図 5.1 に示す発生量予測のシナリオからもこれは遠い将来ではない。

この結果を踏まえ、次節では実際に収集・運搬事業者が用いている配車システムの中では非常に先進的であると思われるシステムを用い、いくつかのパターンでの検討を行う。基本的には 2030 年頃の発生量を念頭に、都内全域でミルクラン的な収集（モデル C）を実施するが、西部多摩地区においてはそれに加えて一次集積所を用いるパターンも検討する。これは本実証において設定される処理工場が浜田(株)の京浜島工場であることも影響を与えているが、発生量が多摩地区では均等ではなく、また必ずしも密でもないために、集積所の優位性があると考えられるためである。

シミュレーションにおける収集・運搬ルートの設定について示す。ここで想定した収集運搬方法は次のようなものである。

- ・ 浜田(株)または白井エコセンター(株)の 2 トン車を用い、1日 3 か所を回収する。
- ・ 両社の車庫から発生場所に向かい、回収作業は 30 分で行う。
- ・ 2 トン車には 2 件分（架台発生時はそれも含む）を積載できる。
- ・ 処理工場は浜田(株)の京浜島工場とする。

(2) シミュレーション用データの整備

既に示した 2030 年に関する詳細な地理的空間レベルの発生量予測に基づき、以下の件数を満たすようなデータを作成し、実際に収集・運搬業を行っている事業者が持つ配車システムを用いて収集・運搬ルートを作成、実施した。AI 配車システムと呼ばれるこのシステムは、白井グループが保有し、動脈分野における多数車の配車システムを静脈分野にカスタマイズしたものである。複数の収運会社が複数車を利用して複数排出先を回収し処理先に移動するための、最小台数、最短コースを AI で計算する。アルゴリズムは非公開であるが、既に 7 年間の稼働実績を持つ。

まず東京都区部について、これを中央行きと外延部に分割し、中央域(15 区)を 30 件 (3 件×10 回)、外延部 8 区は世田谷区を除いて各区 3 件、世田谷区は 6 件 (3 件×2 回) のデータを、2030 年推定住所の母集団 1214 件から乱数発生で住所を 57 件に絞り特定した。住所は丁目までの分解精度であったので、便宜的に 1 番 1 号の住所を割り当てた。

西部多摩地区についても発生量の設定は同様であるが、集積所の利用、さらに複数の収集・運搬事業者が連携する場合などいくつかのシナリオを設定、結果を比較することとした。詳細は次節に示す。

こうした発生量の分布とシナリオに基づき、最適な収運会社、移動コースを AI 配車システムで計算し、移動時間、移動距離を割りだした。

(3) シミュレーションの実施

以下に、一例として、江戸川区内で設定された 3 カ所の収集先と計算されたシミュレーションルートを図 5.50 および表 5.38 に示す。シミュレーションの設定としては、それぞれ巡回先に指定時刻を制約条件として指定し、それを満たすように回収を行っている。

表 5.38. 算出されたルートおよび関連情報

回転	名称	住所	数量 (kg)	積荷 (kg)	卸荷 (kg)	到着	出発	指定時刻
1	浜田	東京都江戸川区松江 5-19-8	0	0	0	7:00	7:00	7:00 ~ 7:00
1	回収先 2	東京都江戸川区西瑞江 3 丁目 1-1	350	350	0	7:12	9:30	9:00 ~ 14:00
1	回収先 1	東京都江戸川区平井 7 丁目 1-1	350	350	0	9:57	10:27	9:00 ~ 14:00
1	京浜島エコロジーセンター	東京都大田区京浜島 2-7-5	700	0	700	11:32	11:52	5:00 ~ 15:30
2	回収先 3	東京都江戸川区清新町 1 丁目 1-1	350	350	0	12:50	13:20	9:00 ~ 14:00
2	京浜島エコロジーセンター	東京都大田区京浜島 2-7-5	350	0	350	14:16	14:36	5:00 ~ 15:30
2	浜田	東京都江戸川区松江 5-19-8	0	0	0	15:32	15:32	7:00 ~ 17:00

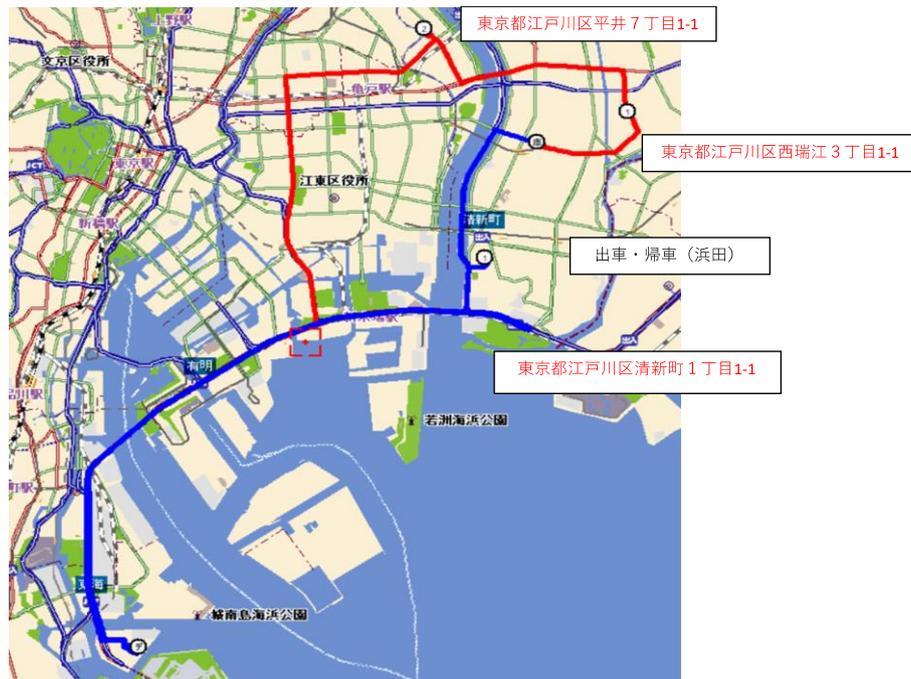


図 5.50. 計算されたルートの一例

多摩地区についても一つ一つのルートについては同様の結果が得られる。ここで 23 区についても集計結果を表 5.39 に、多摩地区に関するものを表 5.40 に示す。

表 5.39. 23 区部の 1 件あたりの走行距離と走行時間

各地域内でミルクラン回収	対象区	1 件あたり 走行距離 [km]	1 件あたり 走行時間 [hr]
多摩地区で行う 手法 1 (C)	中央域(15 区) (高速道路使用)	35.6	2.7
	江戸川区 (高速道路使用)	32.3	2.8
	板橋区	32.7	2.6
	練馬区	48.3	3.8
	杉並区	37.3	3.1
	葛飾区 (高速道路使用)	39.3	2.9
	大田区	27.7	2.5
	足立区	38.7	3.2
	世田谷区	30.8	2.7
	平均	35.5	2.8

この表 5.39 から分かることは、このような地域分割であっても 1 件あたりの走行距離や時間に大きな差がない事である。これに比べると多摩地区のシナリオ 0 (モデル A の実装) では、地点によって大きな差が生じており、これも非効率の一因かも知れない。そこで、表 5.40 に示したように、様々なシナリオを設定することで最終的には 1 件あたりの走行距離や時間が 23 区部よりも小さな値となった。特にシナリオ 2 までの結果に対してシナリオ 3-1 および 2 の持つ優位性は大きく、少なくとも今回の設定においては東京西部に一次集積所を設けることは必要になることが明らかになった。

表 5.40. 多摩地区の 1 件あたりの走行距離と走行時間

シナリオ		総走行距離(上) 1 件あたり(中) 1 件辺りの標準 偏差(下) [km]	総走行時間(上) 1 件あたり(下) [hr]	必要台数
0 (A)	A:すべての発生点に 1 事業者が専用便を出す	4,007 95.4 8.8	340 8.1	42
1 (C)	C:1 事業者がミルクラン的に収集 (23 区のパターンに近い)	1,506 35.9 9.8	139 3.3	15
2	B の発展系 : 上に対し、6 事業者がそれぞれの立地を考え近くを収集するように連携収集する。	1,304 31 5.1	127 3	14
3-1	BC ハイブリッド : 2 に対して中間集積を行う。事業者間の回収場所の割り当ては地域で割り当てる。	799 19 7.1	99 2.4	15(1 次)+6
3-2	3-1 に対して割り当てを AI 配車システムにより最適化する。	788 18.8 4.3	93 2.2	14(1 次)+ 5

シナリオ 3-1 と 3-2 を比べた場合、平均走行距離や平均走行時間の違いは少ない。ただし、車両必要台数が減ったこと、もう一つは 1 件あたりの必要な走行距離の標準偏差が減少したことが注目に値する。3-2 については今回のシミュレーションでは 3-1 と比べ全体としての効果は大きく見られていないが、より平滑化された解をシステムが提供したことが分かる。そもそも収集先の組み合わせが変わるために個別の比較は難しいが、実際 3-1 では存在する 1 ルート辺りの収集件数のブレが 3-2 では見られなくなる。これは発生パターンの偏りが大きくなったときに、より効率的な収集の経路をシステムが提供する可能性を強く示唆しており、事業者連携に際して可能な限りシステムによる最適化を実施することが望ましいことを意味している。

5.5 太陽光パネルのリユースに関する検討

5.5.1 リユース基準の検討

本実証における使用済み太陽光パネルのリユースの判断は、現地にて実施することを想定することから、5.3 章に記載した試験項目がリユースの判断項目となる。

(1) 絶縁不良（直流地絡）測定

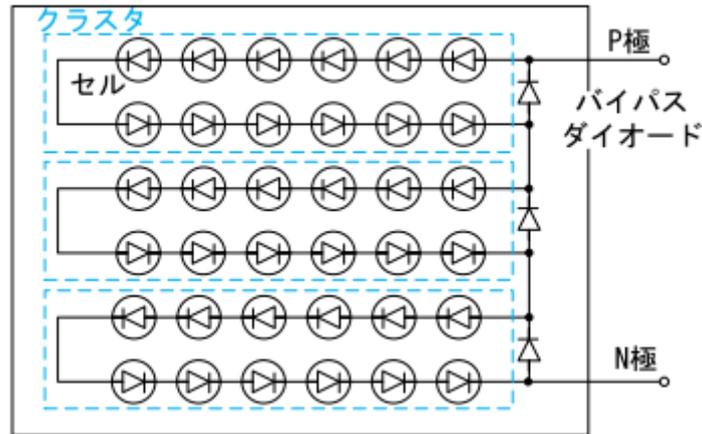
絶縁性能は、『電気設備に関する技術基準を定める省令第 58 条』により技術基準が定められていることから、省令に従い表 5.41 に示す判定基準となる。

表 5.41. 電気設備に関する技術基準を定める省令第 58 条

試験項目	電路の使用電圧		判定基準
絶縁不良（直流地絡）測定	300V 以下	対地電圧 150V 以下	0.1MΩ 以上
		対地電圧 150V 以上	0.2MΩ 以上
	300V 以上		0.4MΩ 以上

(2) 開放電圧測定

開放電圧測定の目的は、太陽電池が発電した電気が、出力端子まで到達していることを確認することであるが、開放電圧の測定により、太陽光パネルの不具合を見つけることも可能である。検出できる不具合は、クラスタ断線及びバイパスダイオードの短絡故障である。一般的な太陽光パネルは、図 5.51 のように 3 クラスタにて構成されている。



(出典) 日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料 太陽光発電システム保守点検ガイドライン

図 5.51. 太陽光パネルにおけるクラスタの定義

もし、1 クラスタ断線若しくはバイパスダイオードの短絡故障した場合、開放電圧は正常な状態の電圧の 3 分の 2 まで低下することから、3 分の 2 以上の電圧が出ていれば、クラスタ断線若しくはバイパスダイオードの短絡故障は発生していないと考えられる。

しかしながら、測定環境(日射・気温)により、測定する開放電圧は異なることを考慮し、開放電圧測定の判定基準は表 5.42 のとおりとする。

表 5.42. 開放電圧測定判定基準

試験項目	判定基準
開放電圧測定	ストリング毎に測定した電圧の平均値よりも各ストリングの測定電圧がパネル 1 枚の 1/3 (1 クラスタ相当) を下回らないこと

(3) 太陽光パネル抵抗値測定

太陽光パネルの抵抗値測定について、『日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料 太陽光発電システム保守点検ガイドライン 5.5.7 インピーダンス測定試験』にて測定結果によるストリング状態の判定事例が示されており、抵抗値が大きいことで太陽光パネルの高抵抗化/太陽光パネル内電路の断線が疑われる。

その為、パネル抵抗値測定の判定基準は、表 5.43 のとおりとする

表 5.43. パネル抵抗値測定判定基準

試験項目	判定基準
パネル抵抗値測定 (断線検査)	他のストリングと比較して、抵抗値(インピーダンス(直列抵抗成分))が大きくなっていないこと

(4) I-V 特性曲線測定

I-V 特性曲線測定を実施することにより、I-V 特性曲線により視覚的に良否を判定することが可能である。不具合(断線等)が発生している太陽光パネルの場合、滑らかな曲線を描くことが無い。その為、I-V 特性曲線測定における判定基準は、表 5.44 のとおりとする。なお、不具合のある I-V 特性曲線は図 5.52 を参照のこと。

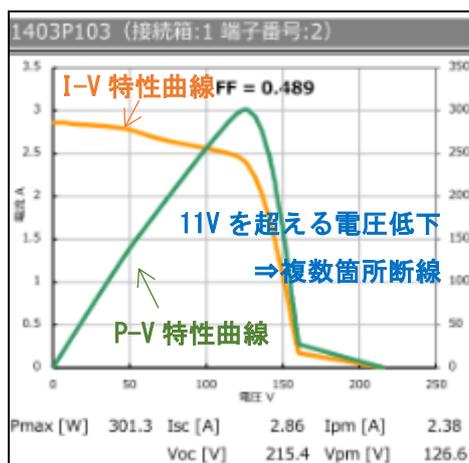


図 5.52. 不具合のある I-V 特性曲線

表 5.44. I-V 特性曲線測定判定基準

試験項目	判定基準
I-V 特性曲線測定	<p>I-V 特性曲線形状に異常が無いこと</p> <p>※日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料 太陽光発電システム保守点検ガイドライン表 B.3-2 に従う</p> <p>※日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料 太陽光発電システム保守点検ガイドライン 付属書 E 【I-V 曲線形状の解釈】に従う</p>

(5) 外観

使用済み太陽光パネルが外観点検できる環境にある場合は、表 5.45 の項目によって検査及び判定を実施する。外観点検に必要な照度の確保、及びパネル運搬のコストを勘案し、パネルを取り外した後、その場(屋外)で検査及び判定を実施することが望ましい。なお、表 5.45 の項目の一つでも該当する場合はリユース不可となる

表 5.45. 外観検査判定基準

項目(部位)	判定基準
表面(受光面)	ガラス破損、封止材剥離、封止材内シミがないこと
セル及び接続部	セル割れ、配線材の焦げ、配線部の腐食及び錆がないこと
裏面(バックシート)	バックシート傷(封止材に達する傷)、焦げ、膨らみ(剥離)がないこと
フレーム	破損、変形、ガラス端面接着部の剥がれがないこと
ジャンクションボックス	破損、剥がれ、変形、蓋無しがないこと
配線ケーブル	断線、コネクタ破損変形、重度の傷(銅線まで達したもの)がないこと

外観検査におけるリユース判定基準の具体例を図 5.53 から図 5.58 に示す。これらの判定基準は、絶縁性能低下やパネル高抵抗化、及び再施工時の障害につながると考えられるために設定したものである。

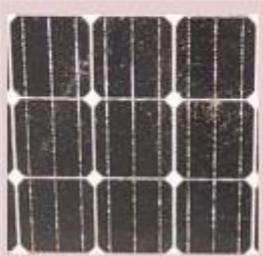
ガラス破損	封止材剥離	タブ上封止材剥離	封止材内シミ
			
・少しでも亀裂や割れが発生している物。	・セル上で白濁していれば封止材剥離状態になっている。	・セルタブ周辺が白濁していれば封止材剥離状態になっている。	・はっきりとしたシミは水分の侵入が多いため封止材不良と判断。

図 5.53. 表面(受光面) 外観検査判定基準

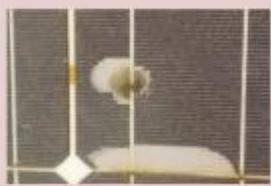
セル割れ	配線材焦げ	配線材焦げ	配線材腐食
			
・目視にて確認できる割れ。	・配線材上が茶色く焦げている。	・配線材上が茶色く焦げている。	・配線材が他の部分と色が違う。

図 5.54. セル及び接続部 外観検査判定基準

バックシート傷	焦げ	膨らみ
		
・バックシートが完全に破れ封止材が見えている。	・バックシートが茶色く変色し焦げている。	・バックシートが盛り上がり浮いている。

図 5.55. 裏面(バックシート) 外観検査判定基準

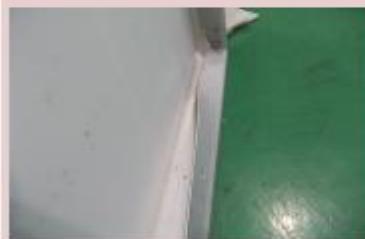
破損	変形	接着部の剥がれ
		
・完全に折れ曲がったり破断している。	・フレームに反りや凹凸ができています。	・接着部が剥がれている。

図 5.56. フレーム 外観検査判定基準

剥がれ	変形	蓋無し
		
・J-Boxが剥がれ接続部が剥き出しになっている。	・内部が過熱し変形している。	・蓋がなくなっている。

図 5.57. ジャンクションボックス 外観検査判定基準

断線	コネクタ破損変形	重度の傷
		
・断線しコネクタ部分が無くなっている。	・コネクタ部が変形し接続できない。	・ケーブルの被服が変形や劣化している。

図 5.58. 配線ケーブル 外観検査判定基準

5.5.2 リユースパネルに求められる最低限の品質の検討

上述の 5.3 節でも述べたように、使用済み太陽光パネルをリユース製品として提供するための重要な要求事項は、次の 2 つと考えている。

- ① 安全性の確保
- ② 十分な発電性能の確認

①については、5.5.1 項の(1)、(2)、(4)、(5)によって分別することができる。その上で②を充たさない場合はリユース品として適さない。お客様毎に最低限の発電性能として求める出力値は異なり、一様に定義することは難しい。他方、各メーカーは一般的に仕様値の 80%以上の太陽光パネルについて出力保証を謳っていることが多い。

よって、使用済み太陽光パネルをリユース製品として提供するための十分な発電性能を、本報告書においては各メーカー仕様値の 80%以上と定義する。

5.5.3 グレード設定

前述したように、安全性を担保できないパネルはリユース不可となる。よって、リユースパネルは、発電性能のみによって2等級に分けることができると考える。

(A) 新品と(ほぼ)遜色なく使用できるもの

(B) 新品よりも発電量は低下しているものの、それを考慮した上で使用することが可能なもの

リユースパネルのグレード(等級)は表5.46に基づき決定する。

表 5.46. リユースパネルのグレード(等級)

グレード(等級)	定格値と比較した出力低下の割合	備考
A	$P_{max} \geq 90\%$	JIS C8918 (90%)を参考
B	$90\% > P_{max} \geq 80\%$	各社保証範囲 (80%)を参考
NG	$80\% > P_{max}$	リサイクル対象

(1) リユースパネルのグレードごとの便益、コスト

リユースパネルのグレードに対する正当性を検証するため、屋上設置パネルをリユースパネルとした場合にパネル設置者(太陽光発電システムをリユースしようと考えているお客様)が得られる便益・コストをグレードごとに試算する。なお、太陽光パネルをリユース若しくはリサイクルする際、取り外しに係るコストは一律に発生する。そのため、本節での価格試算はしない。

試算では、仕様値 150W 5直×3並=2250W 質量 15kg/枚 の太陽光パネル 15枚をリユース用に買い取ることを想定する。また、太陽光パネルを買い取る事業者(リユース事業者)は、リユースの可否を判断する性能診断実施したうえで買い取ることとし、性能診断の費用と太陽光パネルの買い取り価格の差額がパネル設置者に支払われるものとして試算する。

■ 測定・点検に係る人件費・諸経費の試算

人件費 30,000[円/日]*1×2人=60,000円 諸経費 30,000[円/日]とすると
計 90,000[円/日]

一日3件点検実施すると仮定し、 30,000[円/件]

*1 公共工事設計労務単価：東京都 電気工事士 ¥25,700-(R3年度)を参考

■ パネル廃棄価格の試算

廃棄費用 150円/kgとすると 150[円/kg]×15kg×15枚=33,750円の負担

～モジュール発電容量に対する買取価格の試算～

■ パネル設置者に提示する買取価格の試算

⇒グレード A(Pmax : 90%)と仮定した場合

発電容量(150W×5直×3並)×0.9=2025W

リユースパネルの買取価格が性能診断コストを上回ること（性能診断コスト+リユースパネル買取価格>0（性能診断コストの符号は負（-）とする））を目標とする。つまり、パネル設置者が支払う性能診断コストを見かけ上0とした上、取り外し費用を通常より安価に提示することを目標とする。

このとき、

30,000円(性能診断コスト)/2,025W(発電容量)=14.81円/W

よりも高価買取を行うと、目標であるリユースパネルの買取価格が性能診断コストを上回ること（性能診断コスト+リユースパネル買取価格>0）を実現することができる。

⇒グレード B(Pmax : 80%)と仮定した場合

発電容量(150W×5直×3並)×0.8=1800W

この場合は、性能診断コストが廃棄費用以下であるため、1円/W_p以上でリユースパネルの買取ができれば、パネル設置者が支払う費用負担を下げるができる。

30,000円（性能診断コスト）<33,750円（廃棄費用）

昨今、パネル価格が高騰しているとはいえ、安価な新品の太陽光パネル販売価格は30円/W程度といわれている。グレードA（Pmax : 90%）であれば中古パネルの余命は十分にあると考えられる。点検コスト<リユースパネル買取価格となる15円/Wでの買取も可能ではないかと考える。パネル管理や販売に係る諸経費を考慮しても、性能診断コスト+リユースパネル買取価格>0となる15円/Wでのパネル設置者からの買取も可能と考える。

対してグレードB(Pmax : 80%)に関しては発電量も少ないことと期待余命が少ないことを踏まえると、10円/W以下で販売することが望まれる。そのためには、パネル管理や販売に係る諸経費を考慮すると、パネル設置者からの買取価格を限りなく0円に近づける必要が生じてくる。性能診断コスト+リユースパネル買取価格>0とはならないものの、リユースパネルの買取により、単に廃棄するよりもトータル費用が安くなるため、パネルをリユース買取することにコスト的メリットがある。

但し、リユースに不適なパネルが混在していた場合、廃棄処理に回す他なく、点検コストが単純にお客様の費用負担として上乗せされてしまう。グレードB（Pmax : 80%）に達するかどうか、事前の電話ヒアリングなどである程度見極めをしておくことが、お客様の負担を減らす方策として有効となるのではないかと考える。

(2) リユース/リサイクルの分別及びリユースパネルのグレード選別法

太陽光パネルのグレード選別法について記す。下記(3)に記載している I-V 測定におけるストリング状態での判定条件を下回った場合、リユース不可モジュールが混在している可能性があるとして判定する。その場合、ドローンを用いた赤外線カメラによる熱画像撮影診断が可能であれば、ホットスポット等不具合所見が発生しているモジュールをリサイクル品として抽出することにより、リユースとリサイクルの分別実施が可能となる。ドローン飛行不可であれば、取り外した際に太陽光パネル(モジュール)ごとにその場(屋外)でモジュール単体 I-V 測定を実施する。その際、日射強度とモジュール裏面温度を同時に測定し、IEC 60891 に基づく STC 補正を行い、リユースとリサイクルの分別及びリユースグレードの判定を行う。

リユースグレード A 若しくは B と判定されたモジュールに関しては、5.5.1 項(5)に基づく外観検査を実施し、リユースとリサイクルの分別を行う。

(3) I-V 測定におけるストリング状態でのリユース判定条件及び判定基準

I-V 測定におけるストリング状態での判定条件及び判定基準について、下記 3 パターンに分けて記す。なお、測定方法については 5.3.5 項を参照のこと。

① 太陽光発電システムの事前情報が入手できない場合

複数回路同時に I-V 測定を行い、I-V 特性曲線形状及び出力値を相対比較することにより、太陽電池ストリング状況を診断する。判定条件及び判定基準について表 5.47 と表 5.48 に示す。

表 5.47. 太陽光発電システムの事前情報が入手できない場合における判定条件

測定項目	測定器	測定条件	ストリングにおけるリユース可否判定条件
I-V 測定	戸上電機 SPST-A1A	日中、安定した放射照度が十分にあると思われる状況において測定する。 放射照度が低いと思われる条件(例えば雨天、朝夕など)のときは	●発電性能の診断(相対比較) 複数回路同時に I-V 特性測定を実施する。ストリングごとの設置条件(配置・直並列数)を可能な限り推定し、設置条件による出力差を踏まえた上、出力電力を相対的に比較する。相対比較した際、FF が低下したストリング、若しくは出力が低下したストリングを発見した場合、リユース不可モジュールが混在している可能性があるとして判断する。

測定項目	測定器	測定条件	ストリングにおけるリユース可否判定条件
		試験を行わないことが望ましい。	<p>●I-V 特性曲線形状の診断</p> <p>I-V 特性曲線に段差や変形がある場合は、モジュールの部分影を確認する。部分影の影響がない場合は、リユース不可モジュールが混在している可能性があるとして判断する。</p> <p>(JEMA/JPEA 太陽光発電システム保守点検ガイドライン P91~93 付属書 E 参照)</p> <p>●バイパス回路短絡故障判定</p> <p>電路断線 (インピーダンス)測定での判定”良”であり、被測定ストリングが下記条件を満たす場合、バイパス回路短絡を起因とするリユース不可モジュールが混在していると判断する。</p> <p>被測定ストリングの開放電圧 \leqストリングごとに測定した開放電圧の平均値-1 クラスタ相当の電圧</p>

表 5.48. 太陽光発電システムの事前情報が入手できない場合における判定基準

判定	判定条件 1	判定条件 2	判定条件 3	リユース/リサイクル判定	注意事項
A	ストリング発電容量の中央値からの出力低下割合が 97% 以上*1	FF 値を相対比較した際、中央値からの低下割合が 97% 以上*1	I-V 特性曲線が滑らかな曲線形状を描く	判定条件 1~3 をすべて満たす場合、全モジュールリユース対象品としてもよい	<ul style="list-style-type: none"> 全てのストリングで一律に出力パラメータが低下している場合、不具合を見落としてしまう可能性あり リユース等級を決定するためには、モジュールごとの特性測定が必要

判定	判定条件 1	判定条件 2	判定条件 3	リユース/リサイクル判定	注意事項
B	ストリング 発電容量の 中央値から の出力低下 の割合が 97%未満*1	FFを相対 比較した 際、中央値 からの低下 割合が 97%未満*1	I-V特性曲 線に段差や 変形がある	判定条件1~3に 該当する場合、リ ユース不可モジュ ール混在の可能性 があると判定	設置条件による出力 差、部分影の影響を 考慮の上、判断す る。
NG1	バイパス回 路短絡故障 判定	・絶縁不良 ・電路断線	-	リユース不可モジ ュールを特定診断	-

上記表 5.48 の*1 に関して、97%を閾値とした理由について述べる。

結晶 Si の場合、住宅屋根設置では 8 直とするのが標準的。8 直ストリングのうち 1 枚だけ出力 80%のものが混在していた場合、ストリングの出力は 97.5%となる。

また、相対出力が低いということは、全体的にそれぞれのモジュールが劣化しているとは考えづらく、特定モジュールの不具合に起因するものと考えられる。よって、相対出力 97%未満である場合、リユース不可モジュールが混在している可能性ありと判定する。

なお、HIT®（パナソニック独自技術によるヘテロ接合型太陽電池を実装した太陽電池モジュール）の場合、5~6 直が標準的。5 直とすると、1 枚だけ出力 80%のものが混在していた場合、ストリングの出力は 96.0%となる。よって、相対出力 96%未満である場合、リユース不可モジュールが混在している可能性がありと判定する。

② 太陽光発電システムの事前情報が入手可能であり、かつアレイと同一方位・同一傾斜角における日射強度・パネル裏面温度測定が物理的に容易な場合

日射強度・パネル裏面温度測定を実施し、IEC60891 に記載されている式を用いて I-V 特性曲線を STC 補正することにより、太陽電池ストリングの出力評価をする。判定条件及び判定基準について表 5.49 と表 5.50 に示す。

表 5.49. 日射強度・パネル裏面温度測定が物理的に容易な場合における判定条件

測定項目	測定器	測定条件	ストリングにおけるリユース可否判定条件
I-V 測定	戸上電機 SPST-A1A	放射照度が 0.3kW/m ² 以上であることを確認し、測定する。 放射照度が安定していると判断される状況において測定する。	<ul style="list-style-type: none"> ●発電性能の診断 ①IEC60891 に記載されている式を用い、ストリング I-V 特性曲線を STC 補正する。ストリング発電容量の平均値及び太陽光パネル定格値と比較した出力低下の割合により、太陽光パネルの状態を診断する。 ②取得生データの FF 散布図近似曲線からの低下割合により、太陽光パネルの状態を診断する。
	日本カーネ ルシステム PVA14300 等、一般的 I-V カーブ トレーサ		<ul style="list-style-type: none"> ●バイパス回路短絡故障判定 電路断線（インピーダンス）測定の判定”良”であり、被測定ストリングが下記条件を満たす場合、バイパス回路短絡を起因とするリユース不可モジュールが混在していると判断する。 被測定ストリングの開放電圧 ≤ストリングごとに測定した開放電圧の平均値- 1 クラスタ相当の電圧

表 5.50. 日射強度・パネル裏面温度測定が物理的に容易な場合における判定基準

判定	判定条件 1	判定条件 2	判定条件 3	リユース/リサイクル判定	注意事項
A	ストリング発電容量の中央値からの出力低下割合が 97% 以上*1	FF 値を相対比較した際、中央値からの低下割合が 97% 以上*1	太陽光パネル定格値と比較した出力低下の割合が 90% 以上	判定条件 1~3 をすべて満たす場合、全モジュール等級 A リユース品としてよい	-
B	ストリング発電容量の中央値からの出力低下の割合が 97% 未満*1	FF を相対比較した際、中央値からの低下割合が 97% 未満*1	太陽光パネル定格値と比較した出力低下の割合が 90% 未満	判定条件 1~3 に該当する場合、リユース不可モジュール混在の可能性があると判定	部分影の影響を考慮の上、判断する。
NG1	バイパス回路短絡故障判定	・絶縁不良 ・電路断線	-	リユース不可モジュールを特定診断	-
NG2	太陽光パネル定格値と比較した出力低下の割合が 75% 未満	-	-	全モジュールリサイクル対象(リユース不可)とする	各社保証範囲(80%)を参考。 モジュールごとの出力ばらつきを考慮し、75% 未満とする。

③ 太陽光発電システムの事前情報（太陽光パネル型式・設置条件）が入手可能であるが、同一方位・傾斜角における日射強度・パネル裏面温度測定が難しい場合

1Diode モデルを使用した推定 I-V 特性曲線と、測定した I-V 特性曲線とを比較することにより太陽電池ストリングの出力評価をする。判定条件及び判定基準について表 5.51 及び表 5.52 に示す。

表 5.51. 事前情報入手可能であるが、環境測定が難しい場合における判定条件

測定項目	測定器	測定条件	ストリングにおけるリユース可否判定条件
I-V 測定	戸上電機 SPST-A1A	短絡電流が銘板値の 3/10 以上であることを確認し、測定する。(PVTEC 太陽光発電システム保守・点検のための屋外環境下における I-V 特性測定方法ガイドライン P3 参照)	<p>●発電性能の診断</p> <p>①取得生データを、太陽光パネル定格値に基づいた 1Diode モデルを使用した推定 I-V 特性曲線と比較し、出力低下の割合により、太陽光パネルの状態を診断する。このとき、Isc,Voc 実測値と合致するように放射照度/温度を合わせ込む。</p> <p>②取得生データの FF 散布図近似曲線からの低下割合により、太陽光パネルの状態を診断する。</p>
	日本カーネ ルシステム PVA14300 等、一般的 I-V カーブ トレーサ	放射照度が安定していると判断される状況において測定する。	<p>●バイパス回路短絡故障判定</p> <p>電路断線（インピーダンス）測定の判定”良”であり、被測定ストリングが下記条件を満たす場合、バイパス回路短絡を起因とするリユース不可モジュールが混在していると判断する。</p> <p>被測定ストリングの開放電圧 \leqストリングごとに測定した開放電圧の平均値-1 クラスタ相当の電圧</p>

表 5.52. 事前情報入手可能であるが、環境測定が難しい場合における判定基準

判定	判定条件 1	判定条件 2	判定条件 3	リユース/リサイクル判定	注意事項
A	ストリング発電容量の中央値からの出力低下割合が 97%以上*1	FF 値を相対比較した際、中央値からの低下割合が 97%以上*1	太陽光パネル 1Diode モデルと比較した出力低下の割合が 90%以上	判定条件 1~3 をすべて満たす場合、全モジュール等級 A リユース品としてよい	-
B	ストリング発電容量の中央値からの出力低下の割合が 97%未満*1	FF を相対比較した際、中央値からの低下割合が 97%未満*1	太陽光パネル 1Diode モデルと比較した出力低下の割合が 90%未満	判定条件 1~3 に該当する場合、リユース不可モジュール混在の可能性があると判定	部分影の影響を考慮の上、判断する。
NG1	バイパス回路短絡故障判定	・絶縁不良 ・電路断線	-	リユース不可モジュールを特定診断	-
NG2	太陽光パネル 1Diode モデルと比較した出力低下の割合が 75%未満	-	-	全モジュールリサイクル対象(リユース不可)とする	各社保証範囲(80%)を参考。 モジュールごとの出力ばらつきを考慮し、75%未満とする。

5.5.4 グレードごとの用途等の検討

① グレードごとの用途

リユースパネルは新品と比較して安価で提供できることが最大の魅力である。但し、新品と比較すると期待寿命が短いことが最大の難点となる。

A 等級のモジュールは期待寿命が新品に近いことが期待されるため、取り替え/取り外しが容易ではない施設にも使用することが可能と考える。B 等級のモジュールは期待寿命が短いため、再度取り替え/取り外しが短い周期で訪れることが予想され、トータルコストを勘案すると取り替え/取り外しが比較的容易な施設に使用することが有用となるであろう。リユースパネルのグレードごとの用途例について表 5.53 に記す。

表 5.53. リユースパネルのグレードごとの用途例

等級	用途例
A	取り替え/取り外しが容易ではない施設 例)陸屋根以外の屋根設置(一戸建て、集合住宅、商業施設 等)
B	取り替え/取り外しが比較的容易な施設 例)野建て、陸屋根(集合住宅、商業施設、工場 等)
NG	-(リサイクル対象)

② リユースパネルを使用することによる便益、課題

リユースパネル使用による便益・課題について、表 5.54 に記載する。リユースパネルの便益を考慮すると、特に稼働済み太陽光発電所において一部分のみ交換または追加する場合、顧客のニーズと合致する可能性が高いかと考える。課題に関しては、必要以上に対策を実施すると最大の便益となる低価格販売を実現することが難しくなる。トラブルを避けるため、便益だけではなく課題を十分に説明した上で販売することが肝要であり、保証等はオプションに留めておくのがよいのではないかと考える。

表 5.54. リユースパネル使用による便益・課題

便益	<ul style="list-style-type: none"> ・低価格でパネルを購入できる ・(販売者がリユースパネル在庫を所有している場合)お客様への提供が早い ・生産停止したパネルに関しても入手可能な場合がある
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・新品と比較し、一般的に製品寿命が短い ・メーカー保証期間を過ぎているものに関しては、保証が受けられない ・提供するモジュールの出力特性が一定でない可能性がある ・出荷時の発電量を担保できない(IEC 規格 60891 に基づく STC 補正を行ったモジュール I-V 測定を実施した場合を除く)

5.6 太陽光パネルの分解方法

使用済み太陽光パネルの分解方法は、一般的に破碎による方法が知られているが、回収した太陽光パネルに使用されている部材の再利用率を上げる為には、使用済み太陽光パネルに使用されているカバーガラスを割らずに回収する必要がある。カバーガラスを粉砕してしまうと金属とガラスが混在することになり、それぞれ分別することが難しい。そのため、カバーガラスを割らずに分離することで、金属が含まれていないガラスはリサイクルし易く、ガラスが含まれていない残りのセルシートは有価物を取り出し易くなる。

工程としてはまず、ジャンクションボックス及びアルミフレームを分離するが、その際ガラスに負荷をできるだけかけないことでカバーガラスを割らずに分離させる。自動フレー

ム分離装置を図 5.59 に示す。その後、約 300 度に熱したホットナイフにてカバーガラスを割ることなく、その他の部材を分離する。このようにカバーガラスを割ることなく分離する方法は、ホットナイフ分離法®が有効であり、ホットナイフ分離法®が用いられている装置を図 5.60 に示す。

分離後のアルミフレームは比較的有価物として販売しやすく、相場にもよるが 100～150 円/kg 程度で販売できる。パネル 1 枚当たり、2.5～4kg 程がアルミフレームであることから経済性が高い。カバーガラスは金属が含まれていないことでリサイクルし易く、セルシートに関してもガラスが含まれていないことで Ag 等の有価金属を抽出できる。



図 5.59. フレーム分離装置外観



図 5.60. ガラス分離装置外観

5.7 太陽光パネルのリビルド実証試験

使用済み太陽光パネルの取り外し後の取扱いとして、リユース、もしくは廃棄されているのが大半である。太陽光パネルをリペアする場合もあるかもしれないが、破損部分のみの修理は、太陽電池セルの交換の場合、部分的に太陽電池セル・封止材を除去し、除去した部分に新しい太陽電池セル・封止材を取り付け、再度ラミネーション工程を行うことになると推察する。しかし、交換前の材料と同じセルを入手することは困難であり、フレームが取り付けられたままラミネーション工程を行うことはラミネータの構造上、ダイヤフラムシートの破れの懸念、また十分な封止も見込めない。また異なる材料で太陽光パネルをリペアした場合、耐久性が懸念される。その為、本実証試験では、使用済み太陽光パネルをリペアするのではなく、分解して、リビルドする方法を検討する。

使用済み太陽光パネルに使用される材料を用いてリビルドする為には、カバーガラスを割らずに分離する必要があるが、ホットナイフ分離法®が有効である。ホットナイフ分離法®であれば、「カバーガラス」「アルミフレーム」「セルシート」「ジャンクションボックス」まで分離が可能であるが、分離した材料の中で、リユースできるのは、「カバーガラス」「アルミフレーム」のみである。「セルシート」は、カバーガラスとの分離の際に、一部を切断すること、及び、分離の際に、ロール状に変形することからセル内部が破損し、「ジャンクションボックス」は、内部に水分の侵入等を防ぐ目的から封止材が充填されており、封止材が硬化していることから、再度、太陽光パネルの出力端子を接続することは困難であり、リユースは困難である。

廃棄される使用済み太陽光パネルに使用されている材料のリユースを促進する為、使用済み太陽光パネルから取り出した材料を用いて、再度太陽光パネルとして組み立て、発電能力等を評価する。

5.7.1 リビルド方法の検討

本実証の為に、使用済み太陽光パネルから取り出された部材は表 5.55 のとおりとなる。

表 5.55. 使用済み太陽光パネルから取り出された部材の一覧

品名	数量	備考
分離後ガラス	4 枚	<ul style="list-style-type: none">・ 寸法：650(mm)×530(mm)×3.2(mm)・ ホットナイフ分離法®でセルシートから分離したカバーガラス・ ガラス表面に EVA の付着、汚れ等あり
ケミカル研磨ガラス	2 枚	<ul style="list-style-type: none">・ 寸法：650(mm)×530(mm)×3.2(mm)・ 上記の分離後ガラスから付着した EVA や汚れ等を除去するためにケミカル研磨したカバーガラス

品名	数量	備考
分離後アルミフレーム(長辺側)	10本	<ul style="list-style-type: none"> ・ コーナーキー仕様 ・ 手作業により取り出されたアルミフレーム
分離後アルミフレーム(短辺側)	10本	<ul style="list-style-type: none"> ・ コーナーキー仕様 ・ 手作業により取り出されたアルミフレーム

上表部材を使用して、表 5.56 に示すリビルトパネル 4 種類を製作する。

表 5.56. リビルトパネル仕様

仕様	表面仕様	裏面仕様
バックシート 仕様	分離後ガラス	バックシート
	ケミカル研磨ガラス	バックシート
ダブルガラス 仕様	分離後ガラス	分離後ガラス
	分離後ガラス	新品ガラス

上記に基づきリビルトパネルの構想を進める。

(1) 使用装置の確認

本実証期間中（2020年4月～2021年3月）に使用する装置は下記となる。

- ・ セル自動配線装置（6inch3本バスバー仕様）
- ・ ラミネータ
- ・ モジュールテスター（絶縁耐圧試験機付き）
- ・ 電界発光（EL）検査装置

使用可能装置が無い製作工程（例_横タブ付け）は、手作業で製作を行う。

(2) 購入必要部材の洗出し

本実証にて、購入が必要な部材は表 5.57 のとおりとなる。

使用する装置仕様及び購入できる部材の種類により、リビルトパネルの仕様が決まる。

また、これら部材の選定のポイントを表 5.58 に示す。

表 5.57. 購入必要部材一覧

No.	品名	画像	No.	品名	画像
1	太陽電池セル		7	ポッティング材	
2	インターコネクタ		8	封止用シリコン	
3	横タブ		9	糸半田	
4	封止材		10	フラックス	
5	バックシート		11	セル止めテープ	
6	ジャンクションボックス		12	アルミフレーム	

表 5.58. 部材選定ポイント

No.	品名	ポイント
1	太陽電池セル	セル自動配線装置(以下装置と記載)を使用して配線を行う。その為、装置仕様に合わせて太陽電池セルを選定する必要がある。本実証にて使用する装置に合わせて太陽電池セルを選定すると、太陽電池セル 6inch 3 本バスバーである。
2	インターコネクタ	No.1 同様に装置を使用して配線を行う。また、太陽電池セルのバスバー幅も考慮する必要がある。それらを考慮してインターコネクタを選定する。
3	横タブ	本実証では手作業で半田を行う為、装置による制約もなく、入手可能な部材を使用する。
4	封止材	装置仕様に左右される部材ではないことから、本実証では、入手可能な部材を使用する。ただし、システム電圧 1000V でも使用できるように選定は行う。
5	バックシート	

No.	品名	ポイント
6	ジャンクションボックス	本実証では、リビルトパネル裏面にジャンクションボックスを取り付ける仕様とリビルトパネル側面にジャンクションボックスを取り付ける仕様の2種類制作することから、2種類のジャンクションボックスを選定する。どちらのジャンクションボックスもシステム電圧 1000V でも使用できるように選定する。
7	ポッティング材	ジャンクションボックスのメーカー推奨品を選定する。
8	接着剤シリコーン	
9	糸半田	入手可能な部材を選定する。
10	フラックス	
11	セル止めテープ	

アルミフレームは、調達先を調査したが、調達は困難であり入手不可能であった。

調達できた場合にも、アルミフレームの金型からの製作が必要であり、非常に高額になることが予想される。また、アルミフレームの切り欠き部分には特許も関係しており、十分な注意が必要である。

また、上記内容にて部材選定を行ったが、どの部材にも最低購入ロットがあり、必要な数量だけを購入できるわけではないことに注意が必要である。

(3) 入手可能部材からのリビルトパネル構成

上記(2)にて選定した部材より、リビルトパネルの構成を検討した結果、本実証で製作できるリビルトパネルの構成は図 5.61 のとおり、3直列4並列のものとなる。

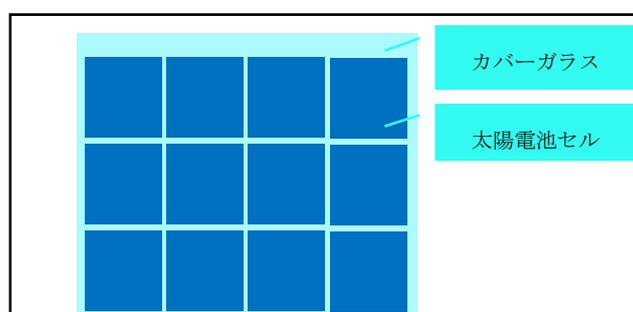


図 5.61. リビルトパネル構想図

(4) リビルトパネル製作手順

リビルトパネルの製作手順は、新品太陽光パネルと同様に図 5.62 に示す手順で進める。

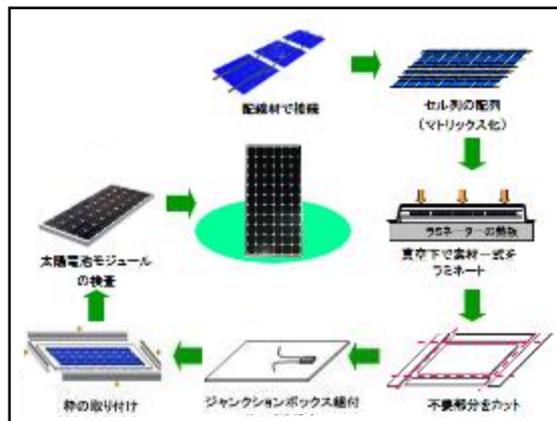


図 5.62. 太陽光パネル製作フロー

5.7.2 使用済み太陽光パネルの分解技術の検討

使用済み太陽光パネルの分解方法は、一般的に破砕による方法が知られているが本実証では、リビルト品を製作する為に、使用済み太陽光パネルからカバーガラスを割らずに回収する必要がある。

カバーガラスを割ることなく、カバーガラスとその他の部材とを分離するには、ホットナイフ分離法[®]が有効である。

本実証では、図 5.63 に示すホットナイフ分離法[®]による中間処理装置を用いてカバーガラスを回収する。

本実証にて使用する中間処理装置の注意点は、処理できる使用済み太陽光パネルは現在主流の結晶シリコン系太陽光パネルのみである。ダブルガラス太陽光パネル、薄膜系太陽光パネルは装置仕様に適さない為、カバーガラスの回収は不可能である。



図 5.63. ガラス分離装置外観

5.7.3 分解部品の品質評価方法の検討

分解部品の種類及び再利用の可否を表 5.59 に示す。

表 5.59. 使用済み太陽光パネル分解部品の再利用可否一覧

NO.	品名	再利用の可否
1	カバーガラス	再利用可
2	アルミフレーム	再利用可
3	ジャンクションボックス	再利用不可
4	セルシート	再利用不可

再利用できる部品は表 5.59 の中で「カバーガラス」、「アルミフレーム」のみで、「ジャンクションボックス」「セルシート」は分離時の破損等の影響により再利用は難しい。ただし、「ジャンクションボックス」「セルシート」は、リビルトパネルへの再利用はできないが、各部材に含まれる金属を分離・回収できれば再利用が可能である。

再利用が可能と考えられる「カバーガラス」、「アルミフレーム」について、具体的な再利用の可否判断について検討する。

① 「カバーガラス」の再利用の可否

分離後ガラスには、図 5.64 に示すように封止材、セル片、半田、ガラス傷、フレームシリコン等が微量であるが、残留している。

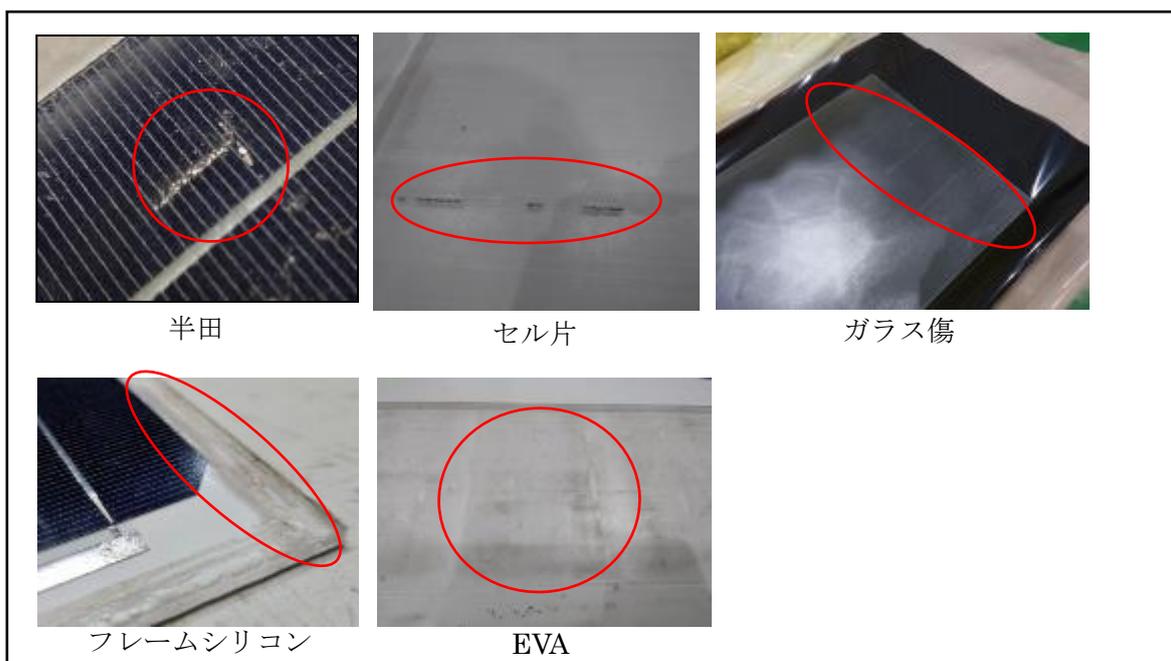


図 5.64. 分離後ガラス 附着物例

各残留物の割合は、おおよそ図 5.65 のとおりと推定され、大半が汚れとなる。

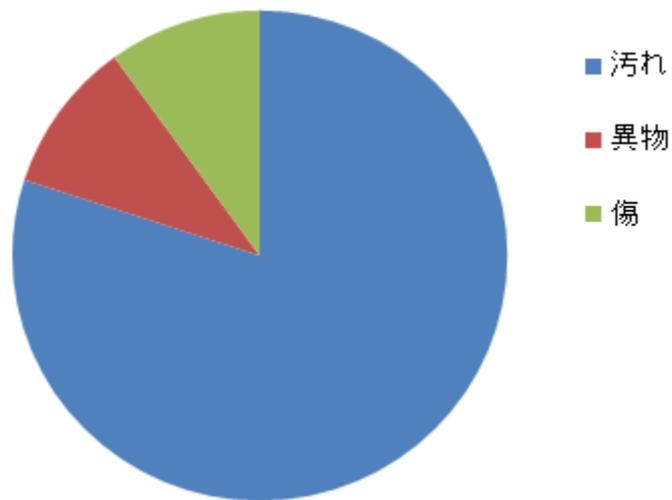


図 5.65. 分離後ガラス 付着物割合イメージ

そこで、分離後ガラスの評価方法（ランク分け）として、下記の内容を提案する。

ただし、本実証で提供された分離後ガラスが 1 種類 5 枚のみであることから判定基準の妥当性は今後、検討する必要がある。本実証で提供された分離後ガラスを表 5.60 に当てはめるとランク C となる。

表 5.60. 再利用カバーガラスランク分け案

ランク	品名
A	1m 離れた距離から目視にて確認し、封止材の白濁りのみが見える
B	1) 1m 離れた距離から目視にて確認し、封止材が多少汚れている 2) 異物が 1mm×1mm 以内の大きさである。 3) 1m 離れた距離から目視にて確認し、ガラス傷が見えない
C	ランク A,B 以外の状態

上記付着物のリビルトパネルへの影響について、製作直後は、出力特性 (IV) への影響のみと考えられる。セル片の混入による内部ショートの可能性も考えられるが、セル片とリビルドで使用する太陽電池セルとの間に封止材を入れることから、ショートの可能性は低いと考える。

しかしながら、屋外へ長期間設置した際に、封止材の剥離等の不具合が発生することが懸念される。そのため、カバーガラスの再利用の可否の最終判断については、屋外へ長期間設置した後に封止材の剥離が発生していないかなどを確認することが重要であり、今後の課題なる。

② アルミフレームについて

使用済み太陽光パネルからアルミフレームを取り外す際、アルミフレームには接着剤 (シリコーン樹脂など) が塗布されているため、アルミフレームに力を加えて取り外す必要がある。結果として、取り外したアルミフレームは図 5.66 のように歪んだ状態となる。

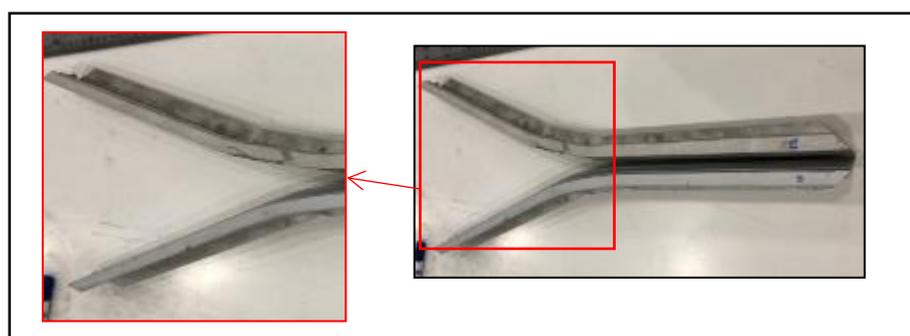


図 5.66. 使用済み太陽光パネルから取り出したアルミフレーム

リビルトパネルへ再利用する為には、歪みの修正が必要となる。この歪みの修正は、本実証では、工具 (スパナレンチ等) を用いて手作業により実施する。

修復した結果を図 5.67 に示す。リビルトパネルへ取り付けられる状態まで修復を行った。

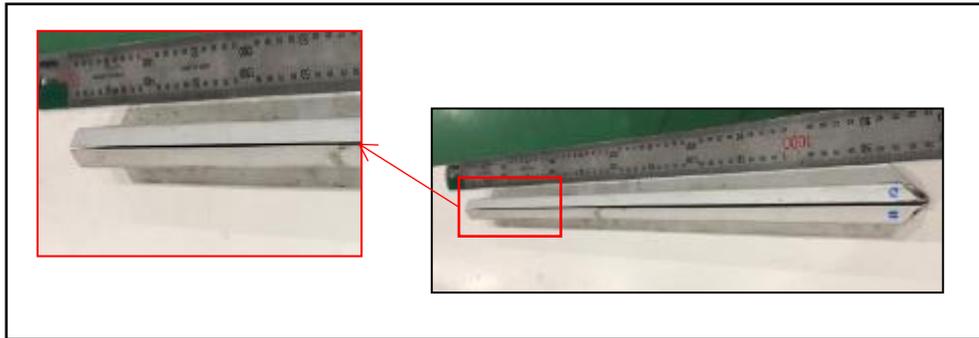


図 5.67. アルミフレームの修復状況

ここで、太陽光パネルに取り付けるアルミフレームの役割を整理し、今回修復したフレームを評価した結果を表 5.61 に示す。評価は、使用可 (○)、条件付きで使用可 (△)、使用不可 (×) の 3 段階で行った。

表 5.61. 再利用アルミフレーム評価

NO.	役割項目	修復フレームの状態	備考
1	架台への取付け	△	歪みを取り除けていない為、パネル設置時に都合が悪い可能性有り
2	漏電時の接地	○	フレーム間の導通がある為
3	パネル内部への水分侵入防止	○	フレーム間隙間も無く、シリコーンも塗布している為

結果として、今回提供されたアルミフレームは、ユーザー（設置する消費者やリユースパネルの販売者）に条件を了承してもらうことで再利用は可能と考えられる。

（条件）

- ① アルミフレームの外観上、歪みがある
- ② 歪みの影響で架台への設置時に架台、もしくはパネル間に隙間が発生する可能性がある
- ③ パネル間隙間の影響で架台取り付け時には現合での穴開け加工が必要の可能性はある

次に、本実証で提供された以外のアルミフレームについて、再利用の可否を検討する。

検討に使用するアルミフレームは、図 5.68 に示すように、複数箇所に歪みのあるアルミフレームである。これらのアルミフレームを手作業にて修復を試みたところ、元々歪んでいた箇所にさらに力が加わり、図 5.69 に示すような割れが発生した。

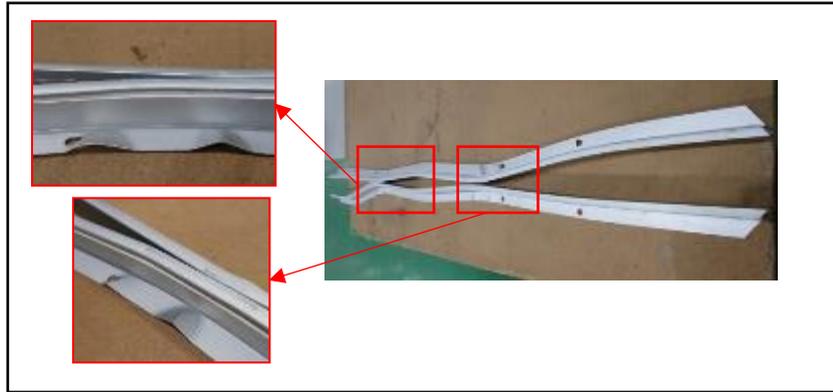


図 5.68. 使用済み太陽光パネルから取り出したアルミフレーム（その他）



図 5.69. アルミフレーム修復に伴う、破損状況

このように、アルミフレームに歪みが多いと修復の過程で破損が発生することが明らかとなり、再利用できるアルミフレームの条件として下記3点が挙げられる。

- a) 歪みが少ないこと
- b) 厚みが小さいこと
- c) 捻っていないこと

5.7.4 リビルドの実施

① リビルトパネルの製作

リビルトパネルの製作フローは、通常の太陽光パネルの製作工程と同様である。(5.7.1(4)項参照)

② 使用済み太陽光パネルから取り出した修正済みアルミフレームの取り付け

本実証において、提供されたアルミフレームは図 5.70 に示すようにコーナーキー仕様である。



図 5.70. アルミフレーム仕様

ビス止め仕様であれば、ビスで再度、太陽光パネルに取り付けることも可能であるが、コーナーキーの場合は、カシメており、コーナーキーの再利用は不可能である。その為、本実証では、図 5.71 のようにアルミフレームの端（長辺・短辺アルミフレームの接合面）を加工し、ブラケットでビス止めを行い、アルミフレーム同士を固定するようにした。



図 5.71. アルミフレーム固定状況①

リビルトパネルへの取り付け状況は図 5.72 のとおり、アルミフレーム間の隙間もほぼ無く、綺麗に取り付けることができた。

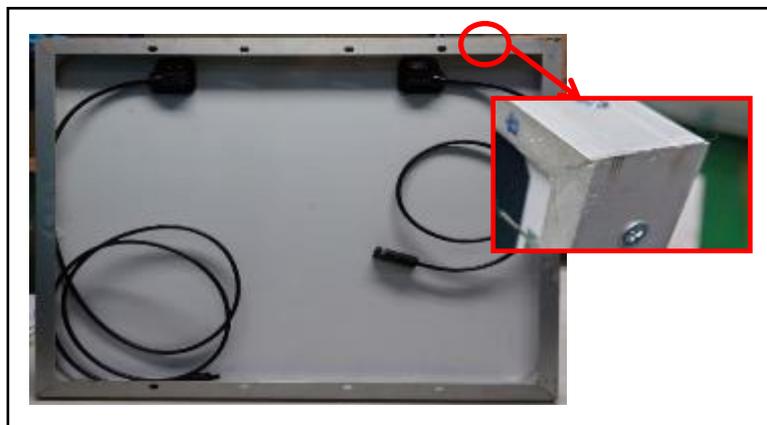


図 5.72. アルミフレーム固定状況②

また、図 5.73 のようにアルミフレーム 4 辺の導通確認をテスターにて実施し、4 辺共に導通があることが確認され、アルミフレームに求められる仕様を満たしていることを確認した。

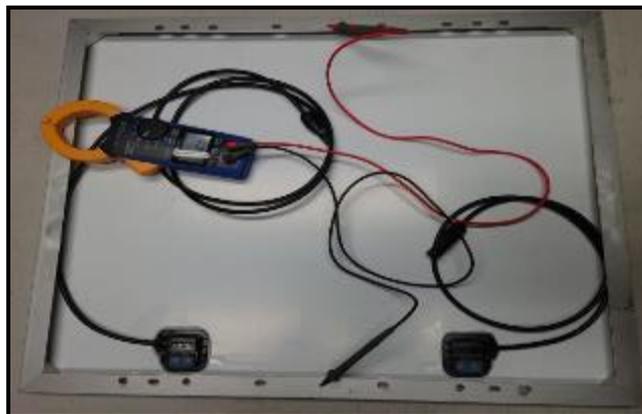


図 5.73. アルミフレーム導通確認状況

なお、アルミフレームを取り付けるのはバックシート仕様の 2 種類のリビルトパネルのみである。ダブルガラス仕様は、ガラス 2 枚分のパネル厚みがあることから、使用済み太陽光パネルから取り出したアルミフレームを取り付けることは難しい。

③ リビルトパネルの完成

リビルトパネル 4 種類の完成状況を図 5.74 に示す。

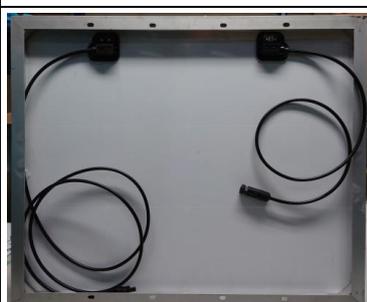
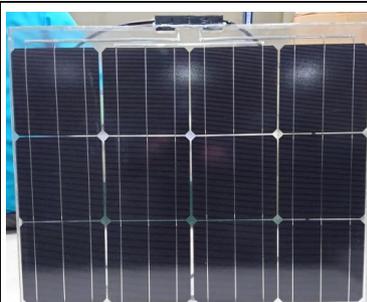
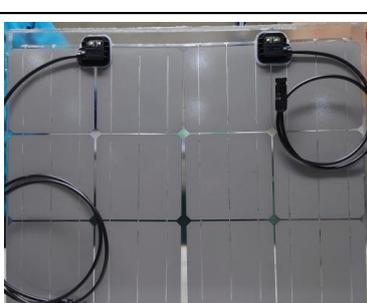
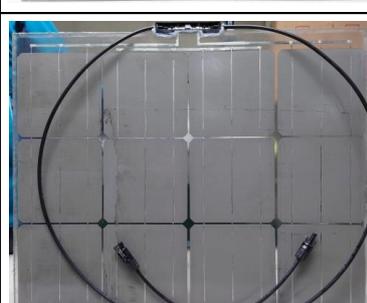
項目		バックシート仕様	
		分離後ガラス	ケミカル研磨ガラス
外観	表面		
	裏面		
項目		ダブルガラス仕様	
		新品カバーガラス	分離後ガラス
外観	表面		
	裏面		

図 5.74. リビルトパネル外観

5.7.5 リビルド太陽光パネルの性能診断

リビルド太陽光パネルの性能診断は、新品太陽光パネルの出荷検査と同様の内容（絶縁試験・出力試験・電界発光（EL）検査）を実施する。

1) 絶縁試験

絶縁試験の実施方法は、JIS C 8991 に基づいた試験方法にて絶縁試験を実施する。
規格要求事項は、下記となる。

表 5.62. DC 耐圧試験の試験条件等

項目	試験条件等
印加電圧	システム電圧×2 + 1000V
印加時間	60 秒
判定基準	絶縁破壊が無いこと

表 5.63. 絶縁抵抗試験の試験条件等

項目	試験条件等
印加電圧	1000V
印加時間	120 秒
判定基準	測定値×モジュール面積 > 40MΩ以上

上記、規格要求事項より、本実証試験での判定基準は

- a) 絶縁破壊の無いこと
- b) 120MΩ以上抵抗値があること（パネル面積:0.3445m²）

となる。

絶縁試験は、アルミフレームを取り付けたバックシート仕様リビルトパネルを、試験機の負極端子をアルミフレームに接続し、実施した。ダブルガラス仕様リビルトパネルは、負極端子の接続先が無いことから、ガラス周囲を金属箔で覆い、金属箔を試験機の負極端子へ接続することで試験を実施した。絶縁試験実施状況を図 5.75 と図 5.76 に示す。



図 5.75. 絶縁試験状況①

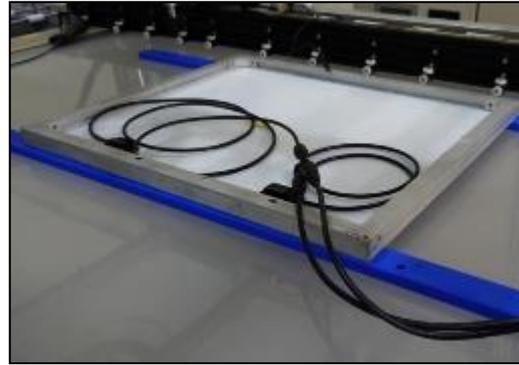


図 5.76. 絶縁試験状況②

絶縁試験の結果は表 5.64 に示すとおりである。この結果から 4 種類のリビルトパネルは、十分な絶縁性能を有していることがわかった。

表 5.64. 絶縁抵抗試験結果

試験項目	バックシート仕様		ダブルガラス仕様	
	分離後ガラス	ケミカル研磨 ガラス	新品カバー ガラス	分離後ガラス
耐電圧試験	3 μ A	3 μ A	3 μ A	3 μ A
絶縁抵抗試験	99.9G Ω >	99.9G Ω >	37G Ω	37G Ω

2) 出力試験

出力試験は、室内温度 25℃に設定した空調部屋にてモジュールテスターを使用し、以下の方法で実施する。

「モジュールテスターにてパネルを固定した状態で、30 秒間隔連続 10 回測定し、その平均値を測定値として採用する」

30 秒間隔での測定は、出力試験時のパネル温度上昇による試験結果への影響を考慮したものである。測定結果を表 5.65 に示す。

表 5.65. 出力試験結果

パネルの種類	Isc (短絡電流)	Voc (開放電圧)	Pmax (最大出力)	I _{pm} (最大出力 動作電流)	V _{pm} (最大出力 動作電圧)	FF (曲線因子)
分離後ガラス	8.70	7.69	50.6	8.13	6.22	0.76
ケミカル研磨ガラス	8.89	7.79	51.8	8.33	6.22	0.75
W ガラス バックサイド新品	8.54	7.43	47.3	7.88	6.00	0.75
W ガラス バックサイド 分離ガラス	8.32	7.58	48.8	7.95	6.14	0.77

試験結果より、ケミカル研磨ガラスを使用したパネルの出力（Pmax）が最も高い出力となった。短絡電流（Isc）にて各パネルを比較すると、ケミカル研磨ガラスに比べて他のパネルは低くなっている。このことより、ガラス表面に付着した異物・汚れ・傷の影響により、太陽電池セルへの光の照射量が減少していることが推察できる。

また、ダブルガラス仕様のリビルトパネルは、製造上の都合により、封止材を二重にして製作している。このことも影響している可能性もある。

3) 電界発光（EL）検査

電界発光（EL）検査は、図 5.77 に示す EL 検査装置「エプティフ」を用いて実施した。



図 5.77. EL 検査装置

測定結果を図 5.78 に示す。太陽電池セルの輝度ムラはあるが、割れ等は発生していない。

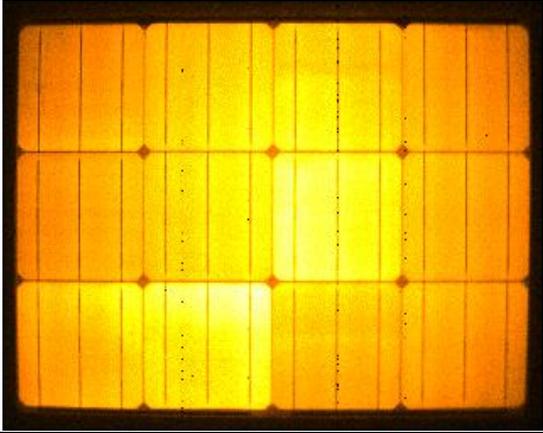
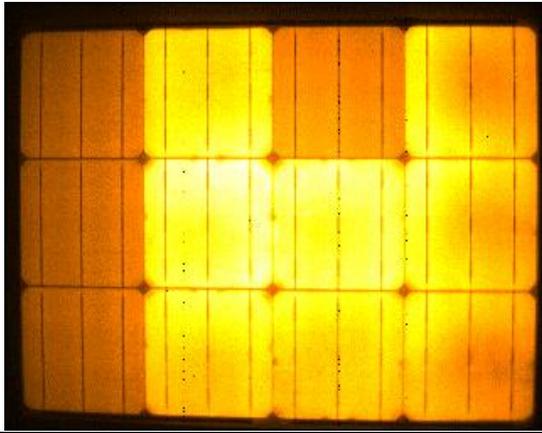
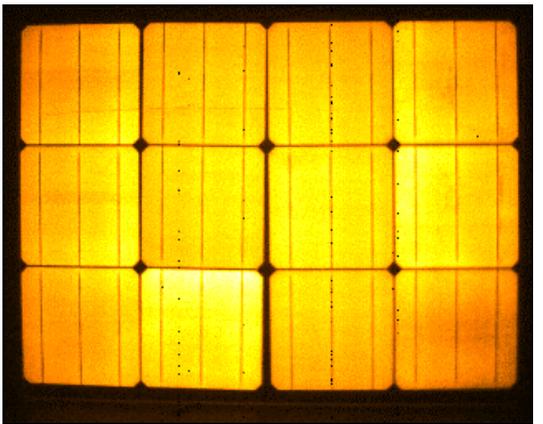
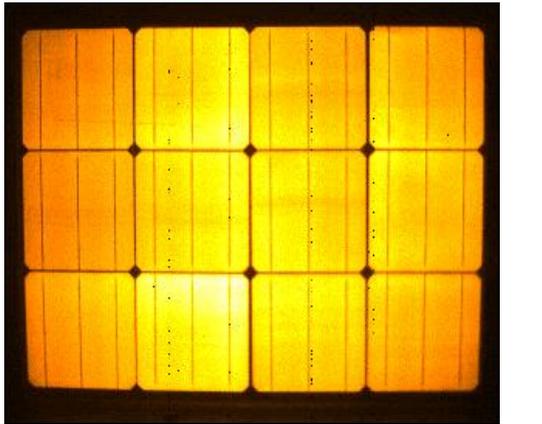
項目	バックシート仕様	
	分離後ガラス	ケミカル研磨ガラス
EL		
	ダブルガラス仕様	
	新品カバーガラス	分離後ガラス
		

図 5.78. EL 検査結果

5.7.6 リビルトパネルの製作コスト

リビルトパネルの製作コストの内訳は人件費・部材費となる。

本実証における 4 枚のリビルトパネルの製作コストを表 5.66 に示す。

表 5.66. 製作コスト

項目	金額/工数
人件費	32 人日
部材費	¥2,460,000

(1) 人件費

本実証で必要となったリビルトパネル製作工数は表 5.67 のとおりである。

表 5.67. リビルトパネル製作工数

項目	人数	日数
部材検討・パネル仕様検討	1	8
装置調整	2	8
パネル製作	2	4

① 部材検討・パネル仕様検討

提供されるカバーガラス仕様・製作期間における使用可能装置より、リビルトパネルの仕様を決めるためには、8 日間は必要となる。使用済み太陽光パネルの種類は多種多様であることから、製作枚数に関係なく、提供されるカバーガラスの種類・リビルトパネルの種類によって日数は増減する。

② 装置調整

本実証で使用した装置は以下の 4 種類である。

- ・ セル自動配線装置（6inch3 本バスバー仕様）
- ・ ラミネータ
- ・ モジュールテスター（絶縁耐圧試験機付き）
- ・ 電界発光（EL）検査装置

モジュールテスター（絶縁耐圧試験機付き）は、校正機器である為、1 年に 1 度の校正作業が必要となる。電界発光（EL）検査装置は校正作業も無く、設定も容易である為、製作過程の中で調整は可能である。

装置調整にて時間を要するのは「セル自動配線装置」「ラミネータ」である。これら装置は、使用する部材に応じて都度調整が必要である。

③ パネル製作

本実証では、配線工程・ラミネーション工程以外は手作業であり、アルミフレームの修復作業も発生している。また、仕様の異なるパネルも製作していることから、4 日間の作業が発生している。

(2) 部材費

本実証で、手配した部材は 5.7.1 (2)項に記載の部材であり金額は下記となる。

部材費	¥2,460,000 (税抜)
-----	-----------------

部材の購入は、1点から購入できる物とロット単位での購入となる物がある。例えば、ジャンクションボックスは1個から購入できるが、封止材は1ロールの購入であり、1ロールの全長が110mある為、必要数量以上のもの購入しなければならない。

5.7.7 太陽光パネルのリビルト品製作に関する課題

(1) 装置

リビルトパネル製作には、セル自動配線装置・ラミネータを使用する必要があり、また、購入可能な部材の仕様が装置の仕様と合致しているとも限らず、購入可能な部材に装置仕様を合わせ込むとなると装置改造が必要となる。リビルト品のコスト増の要因となる。

(2) リビルトパネルの仕様

回収される使用済み太陽光パネルは、ガラスサイズが多種多様であるため、カバーガラスのサイズに合わせて都度、レイアウトを変更する必要がある。レイアウト変更に伴い、部材仕様の再検討も必要であることから、リビルト品のコスト増の要因となる。

(3) 購入部材

前述の5.7.1(2)項にて記述したように、部材の中にはロット単位での購入となり、必要数量だけを購入することができないものもある。リビルトパネルの製作枚数が少量では1枚あたりの部材費が高額となる。

また、部材に関する懸念事項として、保管条件がある。例えば、シリコーン接着材の場合、使用可能期限が定められており、封止材であれば温湿度管理が必要である。リビルト品を安定的に製作しない場合、部材の保管期限切れ等により廃棄部材が発生する。また、封止材は空調室での保管となることからエアコンの電気代が発生する。

(4) アルミフレームの修復作業

使用済み太陽光パネルから取り出したアルミフレームを再利用する為には、修復作業が発生する。修復用の装置は無いことから、手作業となる。

本実証で提供されたアルミフレームの修復時間は5分/本である。また、本実証のアルミフレームはコーナーキー仕様である為、パネルへの取り付けはブラケットを用いて行うことになり、現合での穴開け作業も必要となる。1枚のパネルにアルミフレームを取り付けるのに約30分程度の時間を要することになり、修復から取り付けまでの合計時間は約1時間となる。その場合、作業員1名で8時間勤務の場合、8枚しか製作することができない計算となる。アルミフレームを修復して取り付けるとはコスト増の要因である。

(5) リビルト品の屋外設置時の懸念事項

本実証では、使用済み太陽光パネルから取り出したカバーガラスを使用し、そのカバーガラスには微量の封止材が残っていた。リビルト品を製作する為に、新たな封止材を使用しているが、ガラスに残っていた封止材とは異なる封止材を使用している可能性が高く、物性値の異なる封止材同士がどのような影響を及ぼすかが不明である。その為、リビルトパネルに気泡の発生及びガラスからの剥離が懸念されるため、長期使用を想定した検査が必要である。

5.7.8 リビルト製品の評価

(1) 試験計画の策定

リビルトパネルの性能劣化を確認するための長期試験を行うために表 5.68 内容にて試験計画書を策定し、評価を実施する。

表 5.68. 試験計画書内容

項目	内容
試験の目的	2020 年度実証にて試作したリビルトパネルには、使用済み太陽光パネルから取り出したカバーガラスを使用しており、残 EVA が付着していることから、実用下で長期間使用している間に残 EVA の影響によりリビルトパネルに気泡の発生及びガラスの剥離が発生し、リビルトパネル内部に水分が侵入することが懸念される。そこで、リビルトパネルの実用下での長期使用を想定して、高温高湿試験を実施する。
準拠規格	IEC61215-2(2021)に準拠した状態で試験を実施する。
試験対象	試験対象パネルの仕様は表 5.69 を参照
試験条件	・試験温度：85℃±2℃、相対湿度：(85±5)%、1000 時間 上記試験条件にて 3 回実施
試験項目/ 試験頻度	・最大出力測定（測定頻度：[初期、1000 時間後、2000 時間後、3000 時間後]） ・EL 画像検査（測定頻度：[初期、1000 時間後、2000 時間後、3000 時間後]） ・絶縁抵抗試験（測定頻度：[初期、1000 時間後、2000 時間後、3000 時間後]） ・湿潤リーク電流試験（測定頻度：[初期、1000 時間後、2000 時間後、3000 時間後]）
実施者/ 実施場所	会社名：株式会社ケミトックス 住所：山梨県北杜市須玉町江草 18349
スケジュール	試験スケジュールは図 5.79 を参照

表 5.69. 信頼性評価対象パネル

仕様	管理番号	表面仕様	裏面仕様	枚数
バックシート仕様	B1	分離後ガラス	バックシート	1
	B2	ケミカル研磨ガラス	バックシート	1
	B3	新品ガラス	バックシート	1
W ガラス仕様	W1	分離後ガラス	新品ガラス	1
	W2	分離後ガラス	分離後ガラス	1
	W3	新品ガラス	新品ガラス	1

項目	詳細内容	5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月		1月	
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
比較用パネル試作	リビルドパネルとの比較用に新品ガラスを用いたパネルを製作																		
初回測定	試験槽に入れる前に『●測定項目及び頻度』の測定を実施																		
高温高湿試験	試験槽に投入し、試験を開始																		
1000時間後測定	試験開始後1000時間後に『●測定項目及び頻度』の測定を実施																		
高温高湿試験	試験槽に再投入し、試験を継続																		
2000時間後測定	試験開始後2000時間後に『●測定項目及び頻度』の測定を実施																		
高温高湿試験	試験槽に再投入し、試験を継続																		
3000時間後測定	試験開始後3000時間後に『●測定項目及び頻度』の測定を実施																		
試験結果取りまとめ	計4回分(初回・1000時間後・2000時間後・3000時間後)のデータ集計																		

図 5.79. 信頼性評価試験スケジュール

(2) 試験の実施

① 比較用パネル試作

リビルドパネルとの高温高湿試験における比較対象として、新品の部材を使用してリビルドパネルと同仕様のパネルの製作を実施した。

使用部材は、表 5.57 に示す部材と同様であり、製作過程も図 5.80 に示す新品太陽光パネルと同様の手順となる。

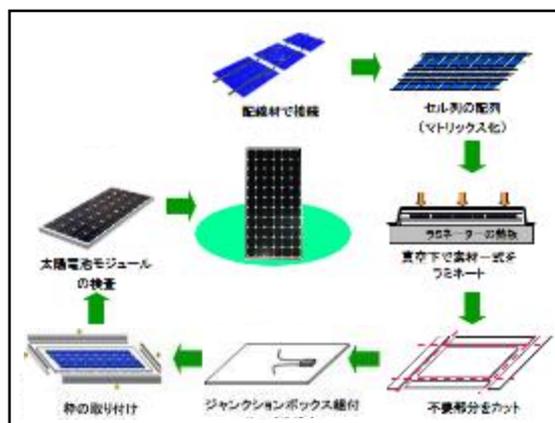


図 5.80. 太陽光パネル製作手順 (図 5.62 再掲)

② 高温高湿試験の実施

高温高湿試験は、IEC61215-2(2021)に基づき、試験温度 $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $85 \pm 5\%$ で 1000 時間を 1 サイクルとして、合計 3 サイクル実施する。

試験フロー及び試験条件、試験のポイント、試験フローを表 5.70 に示す。

表 5.70. 高温高湿試験 試験フロー及び試験条件・ポイント

作業工程		試験条件・ポイント
①	初期測定	【測定項目】 最大出力測定/EL 画像検査/絶縁抵抗試験/ 湿潤リーク電流試験
②	試験パネルの高温高湿試験準備	<ul style="list-style-type: none"> 試験パネルは温度調整等の前処理は実施しない 試験パネルのコネクタは短絡させる
②	試験槽の準備	<ul style="list-style-type: none"> 試験槽を下記条件に設定する 温度：$85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 湿度：$(85 \pm 5)\%$
④	試験槽内に試験パネル投入	<ul style="list-style-type: none"> 試験槽内に投入し、試験槽の稼働と共に試験開始 試験時間は下記の通り 1000 時間
⑤	1000 時間後、試験槽より試験パネル取り出し	<ul style="list-style-type: none"> 取り出し後、2~4 時間保管し、安定させる 保管環境条件は下記のとおりとする。 温度 $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$・湿度 75%未満
⑥	1000 時間後の測定を実施	【測定項目】 最大出力測定/EL 画像検査/絶縁抵抗試験/ 湿潤リーク電流試験
⑦	②~⑥を 2 回繰り返す、実施する	<ul style="list-style-type: none"> 試験時間は合計で 3000 時間

(3) 試験結果の取りまとめ

高温高湿試験（以下「DH 試験」）の試験前と各サイクル後に実施した、EL 画像検査、最大出力測定、絶縁抵抗試験、湿潤リーク電流試験、外観検査の結果をそれぞれ表 5.71 から表 5.75 に示す。

表 5.71. EL 画像検査結果

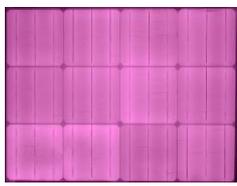
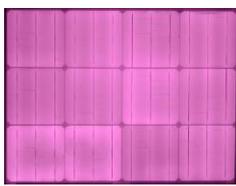
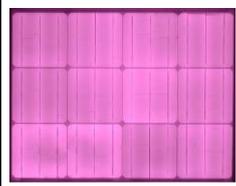
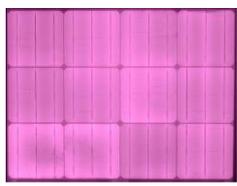
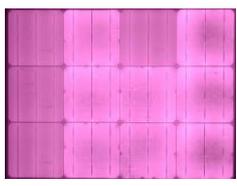
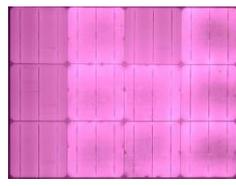
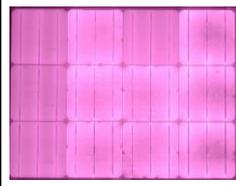
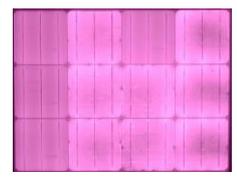
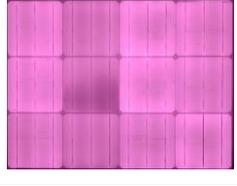
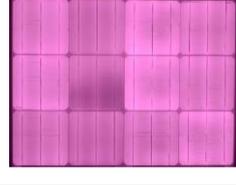
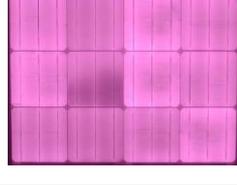
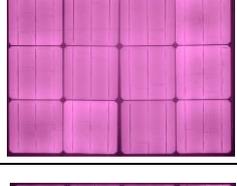
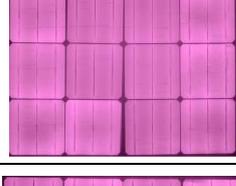
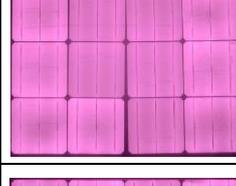
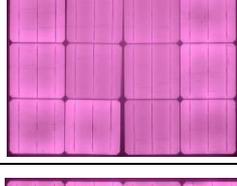
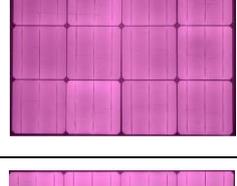
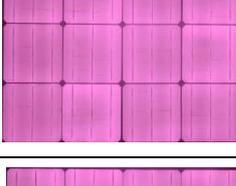
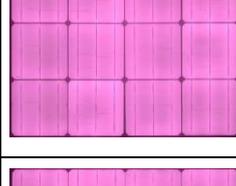
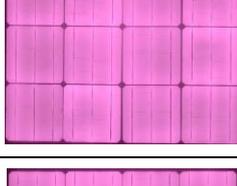
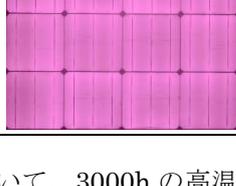
管理番号	試験前	1000h 後	2000h 後	3000h 後
B1				
B2				
B3				
W1				
W2				
W3				
<p>管理番号 B1～W3 の 6 種類について、3000h の高温高湿試験を実施したが、EL 画像に変化は見られないことから、分離後ガラスを用いたリビルトパネルでも、3000h 後も太陽電池セルの劣化は見受けられない。</p>				

表 5.72. 最大出力測定結果

管理 番号	試験時間	Isc (短絡電流)	Voc (開放電圧)	Pmax (最大出力)	Pmax 保持率
B1	試験前	9.03	7.57	50.11	-
	1000h 後	9.03	7.61	49.64	99.1
	2000h 後	9.00	7.61	49.41	98.6
	3000h 後	8.95	7.63	48.85	97.5
B2	試験前	9.20	7.64	50.40	-
	1000h 後	9.28	7.66	49.94	99.1
	2000h 後	9.23	7.66	49.82	98.8
	3000h 後	9.21	7.66	48.76	96.7
B3	試験前	9.23	7.62	51.39	-
	1000h 後	9.32	7.63	50.92	99.1
	2000h 後	9.28	7.61	51.17	99.6
	3000h 後	9.27	7.60	50.47	98.2
W1	試験前	8.933	7.59	49.17	-
	1000h 後	8.96	7.61	48.94	99.5
	2000h 後	8.97	7.61	49.07	99.8
	3000h 後	8.95	7.61	48.48	98.6
W2	試験前	8.77	7.55	49.21	-
	1000h 後	8.81	7.63	49.85	101.3
	2000h 後	8.79	7.63	49.97	101.5
	3000h 後	8.74	7.64	49.71	101.0
W3	試験前	9.04	7.61	50.45	-
	1000h 後	9.10	7.65	50.63	100.4
	2000h 後	9.10	7.65	50.83	100.8
	3000h 後	9.08	7.63	50.29	99.7
出力試験について、試験時間が長くなるにつれて、出力値が若干低下しているが(最大低下率_3.3%)、リビルトパネル・新品パネルでの比較において、差は見受けられない。					

表 5.73. 絶縁抵抗試験結果

管理番号	試験時間	絶縁破壊	表面トラッキング	絶縁抵抗値 【MΩ・m ² 】
B1	試験前	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	1000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	2000h 後	無し	無し	3×10^3
	3000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
B2	試験前	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	1000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	2000h 後	無し	無し	2×10^3
	3000h 後	無し	無し	4×10^3
B3	試験前	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	1000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	2000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	3000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
W1	試験前	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	1000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
	2000h 後	無し	無し	3×10^3
	3000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$
W2	試験前	無し	無し	2×10^3
	1000h 後	無し	無し	2×10^3
	2000h 後	無し	無し	2×10^3
	3000h 後	無し	無し	2×10^3
W3	試験前	無し	無し	3×10^3
	1000h 後	無し	無し	3×10^3
	2000h 後	無し	無し	3×10^3
	3000h 後	無し	無し	$>3 \times 10^3$

リビルトパネル・新品パネルともに、判定基準である $>40\text{M}\Omega$ 以上を十分に満たしており、3000時間経過後も絶縁性能は十分に保有している

表 5.74. 湿潤リーク電流試験結果

管理番号	試験時間	絶縁抵抗値 【MΩ・m ² 】
B1	試験前	$>3 \times 10^3$
	1000h 後	3×10^3

管理番号	試験時間	絶縁抵抗値 【MΩ・m ² 】
	2000h 後	2×10 ³
	3000h 後	2×10 ³
B2	試験前	>3×10 ³
	1000h 後	2×10 ³
	2000h 後	1×10 ³
	3000h 後	1×10 ³
B3	試験前	>3×10 ³
	1000h 後	>3×10 ³
	2000h 後	>3×10 ³
	3000h 後	>3×10 ³
W1	試験前	>3×10 ³
	1000h 後	3×10 ³
	2000h 後	>3×10 ³
	3000h 後	>3×10 ³
W2	試験前	1×10 ³
	1000h 後	1×10 ³
	2000h 後	2×10 ³
	3000h 後	>3×10 ³
W3	試験前	1×10 ³
	1000h 後	1×10 ³
	2000h 後	1×10 ³
	3000h 後	1×10 ³
絶縁抵抗測定同様に、リビルトパネル・新品パネルともに、判定基準である>40MΩ以上を十分に満たしており、3000時間経過後も絶縁性能は十分に保有している		

表 5.75. 外観検査

管理番号	試験時間	状況	判定	参考画像
B1	試験前	異常無し	OK	-
	1000h 後	異常無し	OK	-
	2000h 後	異常無し	OK	-
	3000h 後	異常無し	OK	-

管理番号	試験時間	状況	判定	参考画像
B2	試験前	異常無し	OK	-
	1000h 後	異常無し	OK	-
	2000h 後	異常無し	OK	-
	3000h 後	異常無し	OK	-
B3	試験前	異常無し	OK	-
	1000h 後	異常無し	OK	-
	2000h 後	異常無し	OK	-
	3000h 後	異常無し	OK	-
W1	試験前	異常無し	OK	-
	1000h 後	気泡発生	OK	図 5.81
	2000h 後	気泡発生	OK	図 5.82
	3000h 後	気泡発生	OK	図 5.83
W2	試験前	異常無し	OK	-
	1000h 後	気泡発生	OK	図 5.84
	2000h 後	内部回路へ気泡 が侵食	NG	図 5.85
	3000h 後	内部回路へ気泡 が侵食	NG	図 5.86
W3	試験前	異常無し	OK	-
	1000h 後	異常無し	OK	-
	2000h 後	パネル隅に白濁 が発生	OK	図 5.87
	3000h 後	パネル隅に白濁 が発生	OK	図 5.88

管理番号 B1～B3(バックシート仕様)については、3000h 経過後も外観目視検査に異常は無い。

管理番号 W1～W3(ダブルガラス仕様)では、1000 時間から気泡が発生し、W2 については、2000h で気泡が電極まで達し、IEC 規格に則り、NG 判定となる。

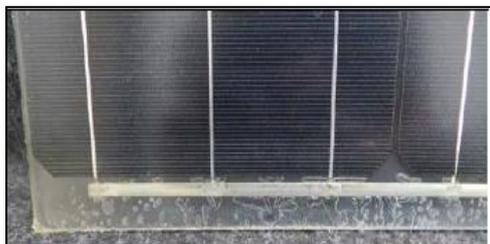


図 5.81. W1 の気泡発生状況（1000h 後）



図 5.82. W1 の気泡発生状況（2000h 後）



図 5.83. W1 の気泡発生状況（3000h 後）



図 5.84. W2 の気泡発生状況（1000h 後）



図 5.85. W2 の気泡発生状況（2000h 後）

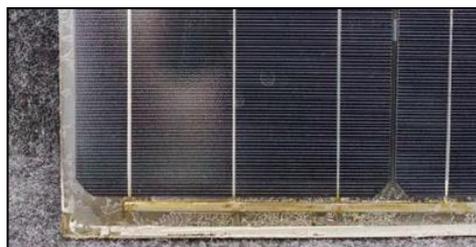


図 5.86. W2 の気泡発生状況（3000h 後）



図 5.87. W3 の白濁発生状況（2000h 後）



図 5.88. W3 の白濁発生状況（3000h 後）

高温高湿試験結果のまとめを表 5.76 に示す。IEC 規格に準拠した試験を実施した結果、電気特性にはどのパネルも問題は無い。パネル外観において、表面・裏面ともに分離後ガラスを使用したリビルトパネル(管理番号 W2)のみ気泡が電極まで達したことで、NG 判定となった。

表 5.76. 高温高湿試験 試験結果まとめ

管理番号	EL 検査	出力試験	絶縁抵抗試験	湿潤リーク電流試験	外観検査
B1	OK	OK	OK	OK	OK
B2	OK	OK	OK	OK	OK
B3	OK	OK	OK	OK	OK
W1	OK	OK	OK	OK	OK
W2	OK	OK	OK	OK	NG
W3	OK	OK	OK	OK	OK

5.7.9 実用化可能性の検討

2020 年度実証にて試作したリビルトパネルについて高温高湿試験を実施した結果、一部のリビルトパネルにおいては、ガラスに付着した残 EVA の影響による気泡の発生が懸念されることがわかった。

バックシート仕様は、気泡の発生も見られず、電気特性も異常は発生しなかったが、ダブルガラス仕様については、リビルトパネル(管理番号 W1,W2)にて気泡が発生する結果となった。

上記を踏まえ、実用化可能性を以下に述べる。

(1) 性能面

バックシート仕様であれば、リビルトパネルによる実運用下での使用は可能と考える。ダブルガラス仕様については、気泡の発生という課題が残ることから、現状での実運用は困難である。対策案として、①ダブルガラス仕様にもアルミフレームを取り付ける、②パネルを取り付ける架台側に封止性を向上させる仕組みを取り入れる等が挙げられ、気泡発生の課題がクリアできるのであれば実運用下での使用も可能と考える。

(2) 製作コスト

製作コストは 5.7.7 項に記載したとおり、回収される。太陽光パネルは多種多様であり、数量にも変動があることから、レイアウト変更による設計費・部材費・製作費が高額となる。リビルトパネルには、製作費以外にも廃棄太陽光パネルの回収費用等も計上されると思われることから、新品パネルと価格比較した場合、新品パネルよりも高額となることが予想される。

5.8 太陽光パネルリサイクルの検討

5.8.1 リサイクル実証試験

(1) リサイクル方法の検討

太陽光パネルのリサイクルは社会的要請も年々高まっており、様々な手法が提案・研究・実用化されてきている。本実証では、多結晶シリコン系太陽光パネルを対象として、大量処理の代表例として一次粉砕（シュレッダー）を軸とするプロセスおよび高度処理の例としてホットナイフ分離法[®]を軸とするプロセスを図 5.89 のとおり検討した。いずれの方法も、原則として、まずはアルミフレームが取り外される。外されたフレームはアルミスクラップとして回収され、リサイクルされる。フレームの取り外し工程は、自動化などの作業効率向上が主な課題であり、ここでは、アルミスクラップのさらなる選別・高品位化の検討は扱わない。

太陽光パネルは多数の材料で構成されているが、原則として層状構造であるため、原理的には、界面に沿って切断あるいは剥離すれば、異なる材料同士が混ざり合うことなく分離回収することが可能であるといえる。しかし、大量処理における一次粉砕では、フレームを外したパネルをそのまま処理するため、多数の成分が混在する粗粉砕物となる。一方、高度処理のホットナイフ分離法[®]では、最初にカバーガラスとセルシートに分離されるため、カバーガラスは高品位のまま回収できる。取り外されたカバーガラスは欠陥が生じていなければ、リビルド太陽光パネルの材料としてリユースできる可能性もある。ガラスカレットとしてリサイクル原料とする際にも、夾雑物として混入するのは EVA 樹脂のみで、比較的コンタミの少ないガラスカレットが得られる。

大量処理を想定した一次粉砕を軸とするプロセスのイメージを図 5.90 に示す。一次粉砕後の粗粉砕物は、必要に応じてサイズ選別や比重選別といった分離工程を経て、この段階で分離回収できる成分は除かれたうえで、二次粉砕あるいは従来型電気パルス処理などの二次処理が行われる。二次処理の目的は、多数の成分が混在した状態から、あらためてガラス濃縮物、金属濃縮物のようにリサイクル原料としての品位を高めることである。一次粉砕で得られる比較的大きなチップ状の粗粉砕物は、単独のチップがガラス、樹脂、金属といった複数の成分を含み、分離していない。二次粉砕を行うことで、それらの成分を分離濃縮するプロセスとなる。二次粉砕の手法が機械式の物理粉砕であっても、電気パルス処理であっても、基本的な考え方は同じである。最終的に得られたガラス濃縮物はグラスファイバーなどの原料としてリサイクルされ、金属濃縮物は銅製錬を受け入れ先として、Cu および Ag が再生される（銅製錬は銀精錬工程も含んでいる）。

高度処理の代表例として検討するホットナイフ分離法[®]を軸とするプロセスを図 5.91 に示す。このプロセスでは、カバーガラスは上述のように、そのまま回収して利用することができるため、リサイクルに向けた高品位化の対象はセルシートである。ここでは、精密な分離を可能とする新規電気パルス法を用いることで、Ag と Cu が別々かつ高品位で回収できるプロセスを検討した。Ag はプラズマ化を経て微粒子として回収される。回収粒子中の銀

濃度は数%のオーダーで、主に混在しているのはSiであり、Cuはほとんど含まれない。したがって、Cuと分離することなく直接的に硝酸処理による銀リサイクルが検討可能となる。Cuについては、電気パルス処理で発生する衝撃波によって、そのままの形状を保って脱離することが可能となれば、銅線のリサイクルプロセスを受け入れ先とすることができる。錫メッキが施されていることもあり、高純度のCuとはいえないが、それでもほとんど単体分離された状態でそのまま回収できることの利点は大きい。

さらに本手法では、フッ素を含有する樹脂を燃焼させることなく金属を分離できるという利点も有する。分離された樹脂はマテリアルリサイクル、あるいはフッ素ガス処理を備えた設備でサーマルリサイクルできる可能性を有する。

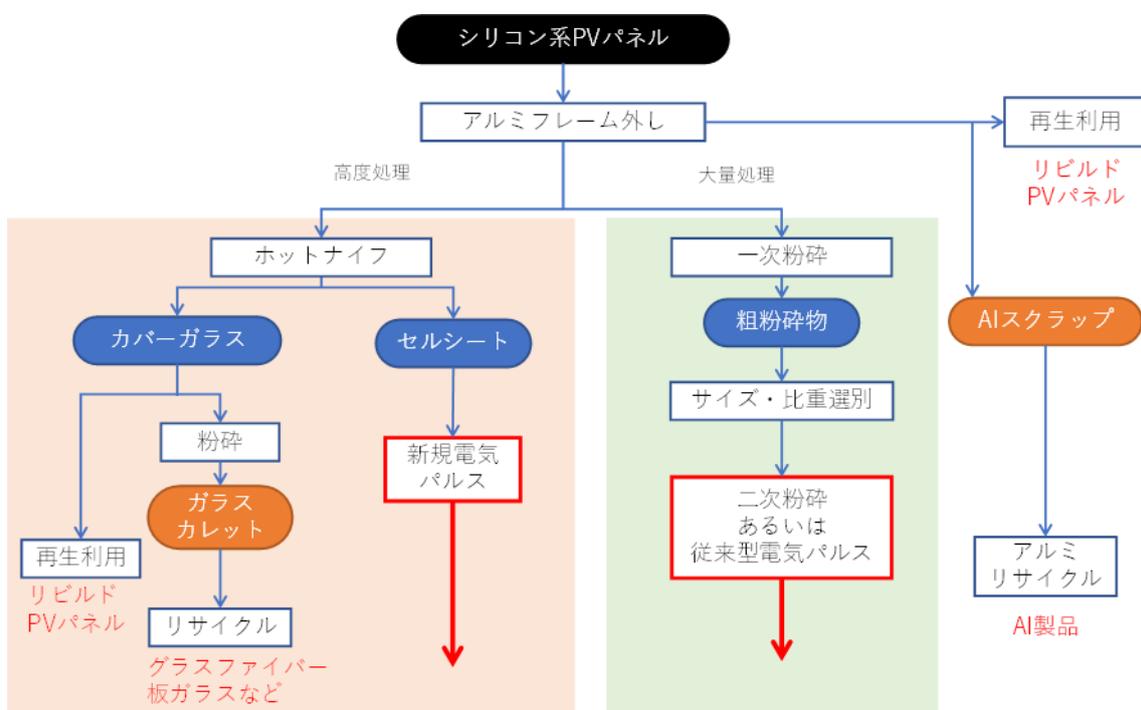


図 5.89. ホットナイフ分離法®と一次粉碎（シュレッダー）法

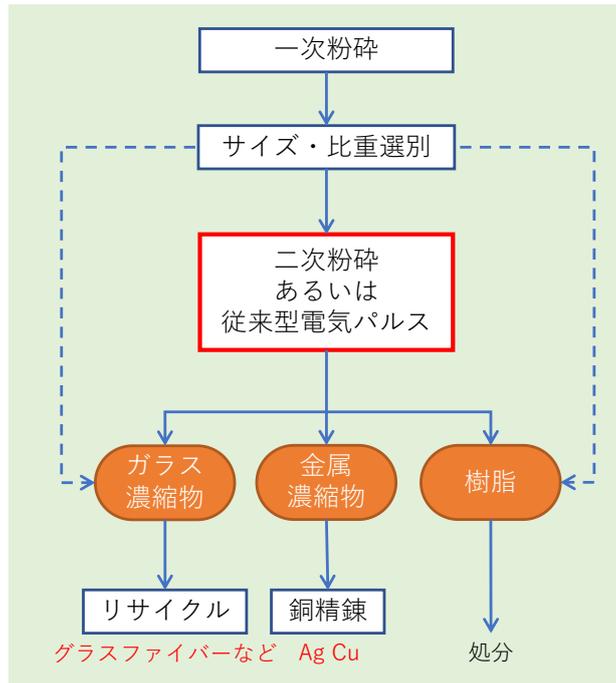


図 5.90. 一次粉碎を軸とするプロセス

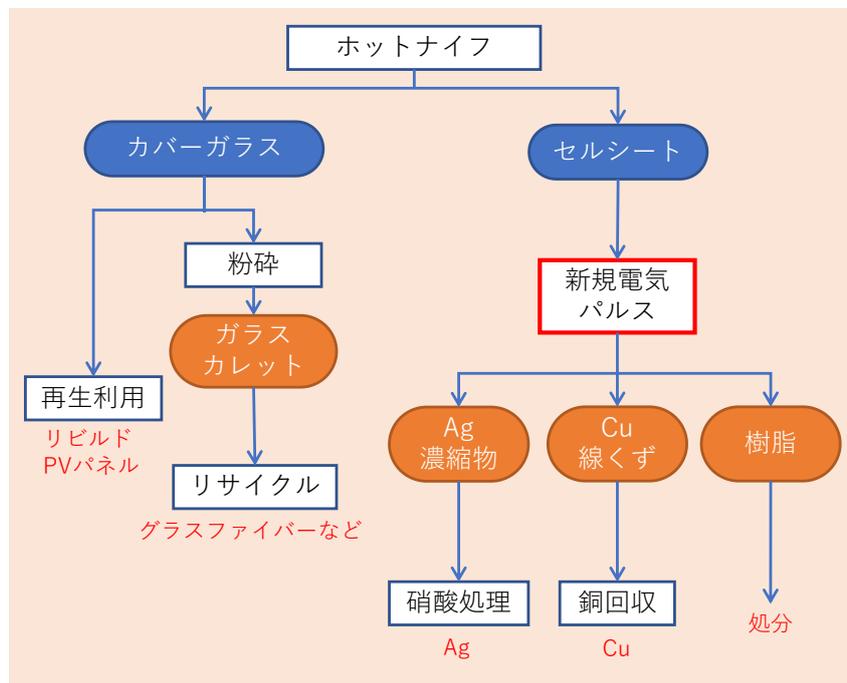


図 5.91. ホットナイフ分離法®を軸とするプロセス

シリコン系太陽電池は単結晶あるいは多結晶のウェハをベースとする製品に大別されるとともに、一部で微結晶やアモルファスシリコンの薄膜や複合セル形式の製品も上市され

ている。結晶系シリコン太陽電池は、2020年のIEA PVPSの報告によると、全世界の生産量の95%を占めている（出展：“TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS 2020,” Report IEA-PVPS T1-38:2020）。したがって、現状におけるリサイクルの対象は、ほとんどがシリコン系太陽光パネルであると考えて差し支えない。

その一方で、種々の金属化合物系や有機物系の薄膜型太陽電池の製品化が進んでおり、製品の普及に合わせてリサイクル技術の研究も実施されている。薄膜系太陽光パネルは素材が多種多様であり、回収対象とする成分や分離回収方法といったリサイクル技術をすべて一元化することは困難であるといえるが、カバーガラスと基板ガラスの合わせガラス構造に対して、カバーガラスを分離して低コストかつ高効率で有価物回収を行う技術開発は薄膜型太陽電池リサイクルの基盤技術として期待が高い（ソーラーフロンティア（株）：NEDO「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」）。金属化合物系薄膜型太陽光パネルの代表例である、CIS（Cu、In、セレン化合物）、CIGS（Cu、In、Ga、セレン化合物）を対象に、基板ガラスからカバーガラスを分離し、薬液により基板ガラス上の有価物（CIGS化合物等）およびEVAを分離し、回収する技術である。太陽光パネル全体の焼成によるEVA熱分解を出発とする従来法と比較して、工程にかかる時間の短縮や必要なエネルギーの削減が期待できるとされている。

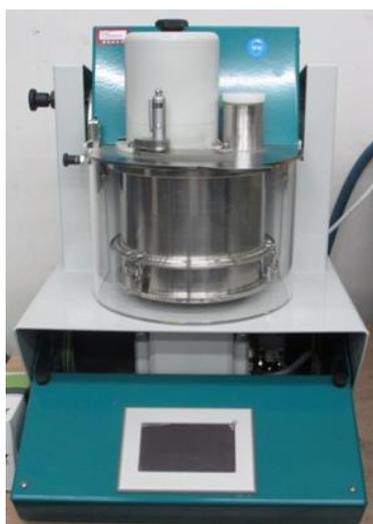
(2) 分離濃縮技術の検討

現在のところ、結晶シリコン太陽光パネルのリサイクルでは、金属や樹脂を容易にかつ精度よく分離出来る手法が確立されていないが、ここでは、物理粉碎法と電気パルス法の適用について検討した。

一次粉碎（シュレッダー）を行った後の粉碎物に対して、分離濃縮を目的とする二次粉碎技術としては、強力な粉碎力で対象を微細化する微粉碎処理と選択的に表面のみを磨砕に削る表面粉碎処理に分類される。実際の粉碎においては、全体が大きく割れて細粒化が進む体積粉碎と表面が剥離して小径粒子となる表面粉碎が同時に生じており、その組み合わせで粉碎が進行する。表面粉碎装置は、選択的に表面粉碎が進行するように設計されている。ここでは、二次粉碎装置として、振動ミル、インテンシブミキサー、アトライタを検討した。振動ミルとは、粉碎媒体を挿入した粉碎容器を高速振動させて大きな衝撃力を与えることで、短時間で微粉碎を可能とする装置である。この方式では、ガラスも含めて試料全体の微粉化が進行する。一方、図 5.92 に示すインテンシブミキサーは、傾斜した容器と偏心した攪拌羽根を有した装置であり、効果的に表面粉碎を行うことができる装置である。一次粉碎後の試料に対して、ガラスに付着した樹脂の剥離、樹脂に付着した金属の剥離が進みながらも、体積粉碎によるガラスの微粉化は抑制されることが想定される。アトライタは、粉碎容器内に設置した回転アームによって対象物を強制的に攪拌することで粉碎に要する衝撃力を与える装置である。回転アームのみでの粉碎も可能であるが、必要に応じて、粉碎媒体（ボール）を加えた運転も可能である。回転アームのみの処理では表面粉碎に近く、粉碎媒体を

加えた処理では、より微粉化が進行する。以上のような特徴を持つ粉砕方式について、次節では、実験的なアプローチで分離濃縮効果を評価した。

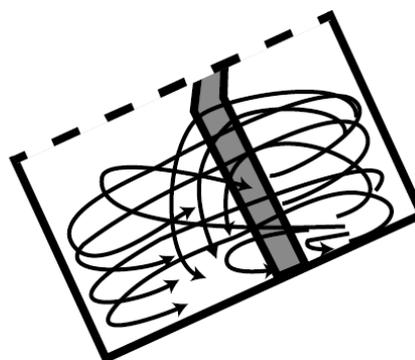
上記のような物理粉砕に対し、アーク放電に伴う衝撃波等を利用して、導電体と絶縁体、あるいは密度や強度の異なる材料の界面を選択的に破壊する電気パルス処理の利用が注目されている。ここでは、図 5.93 に示す主にアーク放電の衝撃波を利用する方式を「従来型」とする。それに対し、本実証で着目した「新規電気パルス法」は、図 5.94 に示すように、放電経路や電圧・電力波形を精緻にコントロールし、熱や衝撃波が発生する場所を制御して、より局所的かつ選択的な分離を実現する方法である。マイクロ秒以下のごく短時間の放電によって、精度の高い破壊・分離濃縮が期待できる。新規電気パルス法では、太陽電池セル自身の電気回路を放電経路として利用するため、一次粉砕を行った粗粉砕物には適用できない。ここでは、ホットナイフ分離法^⑥後の太陽電池セルシートを対象に、Cu、Ag、Si と樹脂との分離を評価することとした。実験的検証結果は次節に記す。



(出典) 日本アイリッヒ株式会社 高速攪拌混合器「アイリッヒ インテンシブ ミキサー」カタログ



上から見た材料の動き



横から見た材料の動き

図 5.92. インテンシブミキサーの構造

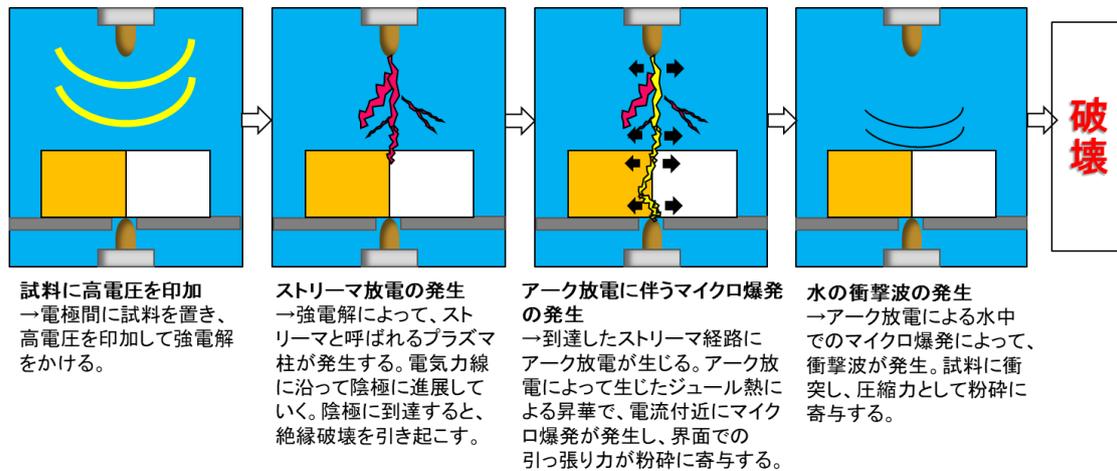


図 5.93. 従来型電気パルス法の概要

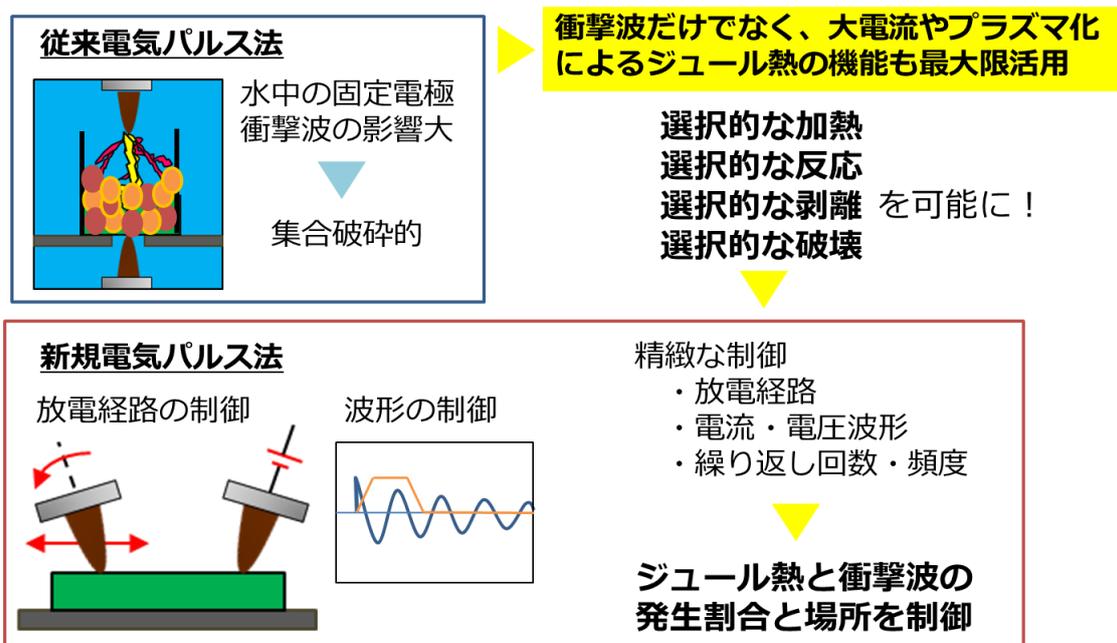


図 5.94. 新規電気パルス法の概要

(3) 分離濃縮の実施

① 一次粉碎

一次粉碎（粗粉碎）として、高速回転するハンマーに粉碎を行うハンマーミル（榎野産業（株）：HC-20-3.7）および回転刃による粉碎を行うオリエンタミル（オリエンタ粉碎機（株）：VM-16）を用い、1セル相当に切り分けた太陽光パネルサンプルの粉碎試験を実施した。それぞれの実験では消費電力の測定を行い、ライフサイクルアセスメントの検討に提供した。

ハンマーミルでは、回転するハンマーでの衝撃によってガラスのみが粉碎されてガラス

とセルシート（樹脂）が分離することが想定されたが、図 5.96 のように粉砕されないセルシートが回転部分に絡むため、本装置での連続使用は困難と判断された。回転刃に刃付けがされていない（刃が摩耗している）オリエントミルでも衝撃による粉砕が行われるが、スタンドカッターによる切断がなされないと、図 5.98 のようにサンプルからガラスが剥離することがほとんどない状態でチャンバー内に留まることとなり、良好な運転ができないという結果となった。一方、回転刃に刃付けを行っている状態のオリエントミルでは、ガラスの粉砕および樹脂の切断が可能であり、一部残存があるものの、粉砕物は直径 8mm のパンチングメタルスクリーンを経て排出され、安定した連続運転が実施できた。その際の、オリエントミルのチャンバー内の様子を図 5.99 に、排出された粉砕物を図 5.100 に示す。ガラスも樹脂も粉砕されるため単体分離度は低いものの、粒群によっては分離効果も認められた。従って、一次粉砕はオリエントミルを用いて実施することとした。なお、8 mm のスクリーンを通過せずに残存する成分は主に EVA 樹脂とバックシートであった。毎分 2 枚のセル投入速度では残存成分の蓄積が問題となったが、毎分 1 枚の投入速度では、チャンバー残存量が 5%以内に抑えることができた。ここで明らかとなったことは、ガラス付きパネルの一次粉砕では、衝撃式の破砕機で、かつ、その衝撃がガラス面に一様に与えられる衝突確率の高い粉砕機の選定が要件であるということである。



図 5.95. ハンマーミル（HC-20-3.7）外観



図 5.96. ハンマーミル回転部に絡んだ太陽光パネルサンプルの様子



図 5.97. オリентミル (VM-16) 外観



図 5.98. オリентミル（刃付けなし）のチャンバー内の様子



図 5.99. オリентミル（刃付けあり）のチャンバー内の様子

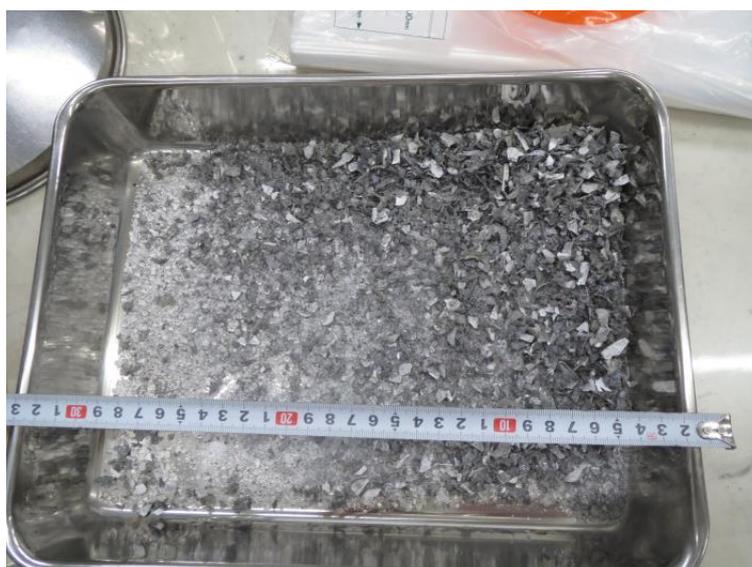


図 5.100. オリентミル（刃付けあり）処理で排出された粉砕物

ガラスを剥離していない状態の太陽光パネルサンプル SH01w（東芝製：15cm 角セル）および SH02w（Panasonic 製：12cm 角セル）を用い、オリентミルによる粉砕試験を実施した。毎分 1 枚の投入速度にて 3 枚連続あるいは 10 枚連続で投入し、最後に 2 分間の排出待ち時間を設けた。その際の粒度分布を図 5.101 から図 5.103 に示す。比較のため、2 種類のパネルの結果を重ね合わせたところ、図 5.104 に示すとおり両サンプルの粒度分布に顕著な差異は認められなかった。また、連続処理枚数の比較では、傾向は概ね一致しているが、小粒子の生成が若干少なかった。連続投入によって、チャンバー内の残留物が嵩んで粉砕を妨げたことにより、微粒化がわずかに抑制されたと考えられる。

各粒群の様子として、SH01w を 3 枚処理した際の写真を図 5.106 に示す。4-8 mm の粒群はガラスの含有量が少なく、0.5-1 mm および <0.5 mm の粒群は樹脂が少ないことが見て取れる。大きな粒群に含まれる粉砕物の拡大写真を図 5.107 に示す。ガラス片は樹脂から分離しているものと、樹脂に付着したままで存在するものが確認された。銅線はカットされるものの微細化はせず、一定の長さのまま排出された。また、メッキもほとんど残った状態であった。樹脂（EVA 層）には半導体および Ag のラインが残っていた。二次粉砕によって、ガラスや半導体・Ag の単体分離が進むことが期待される。小さな粒群は、図 5.108 と図 5.109 のように、ガラスは単体分離しており、微細化された樹脂や金属が混合している状態である。従って、小径粒子は二次粉砕を行っても全体的に粒径がさらに小さくなるだけで、大きな分離効果は期待できない。これらのことから、2 mm 以上の粒群を二次粉砕の対象とした。

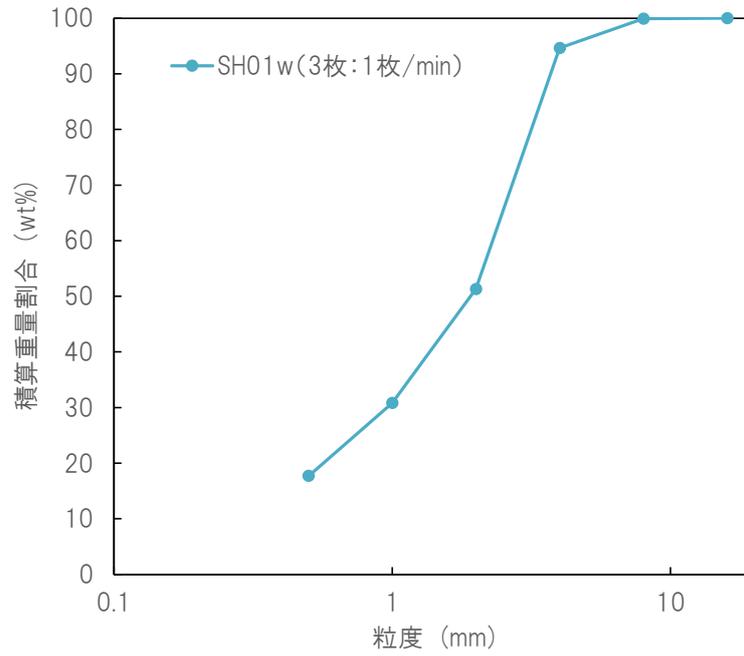


図 5.101. オリентミル粉碎による粒度分布 (SH01w を 3 枚連続)

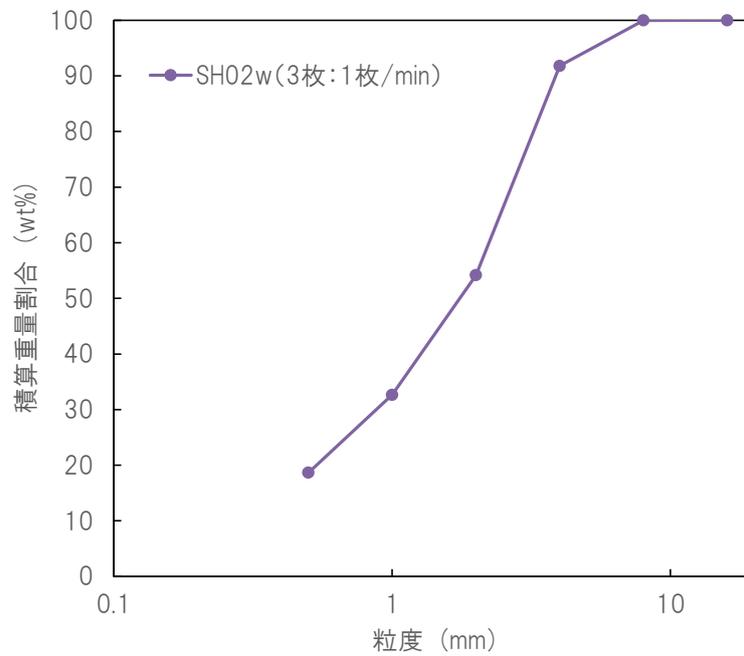


図 5.102. オリентミル粉碎による粒度分布 (SH02w を 3 枚連続)

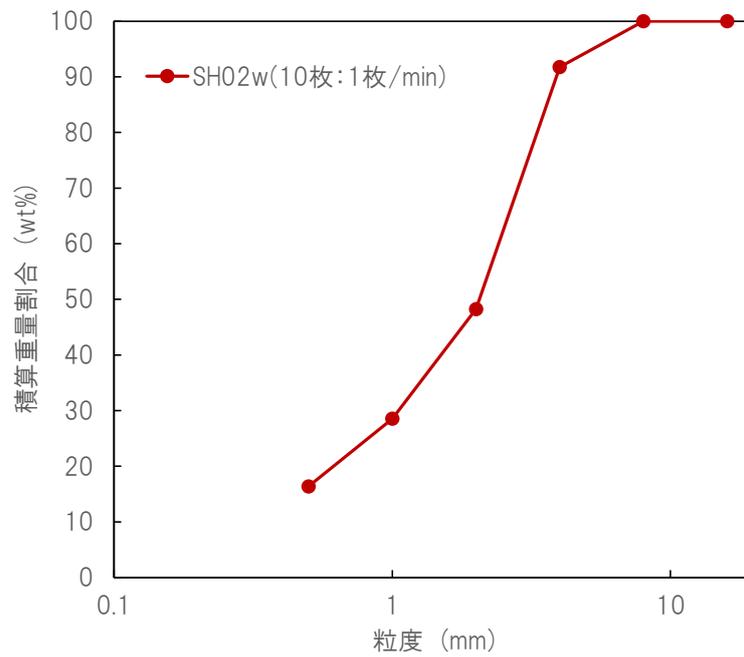


図 5.103. オリентミル粉砕による粒度分布 (SH02w を 10 枚連続)

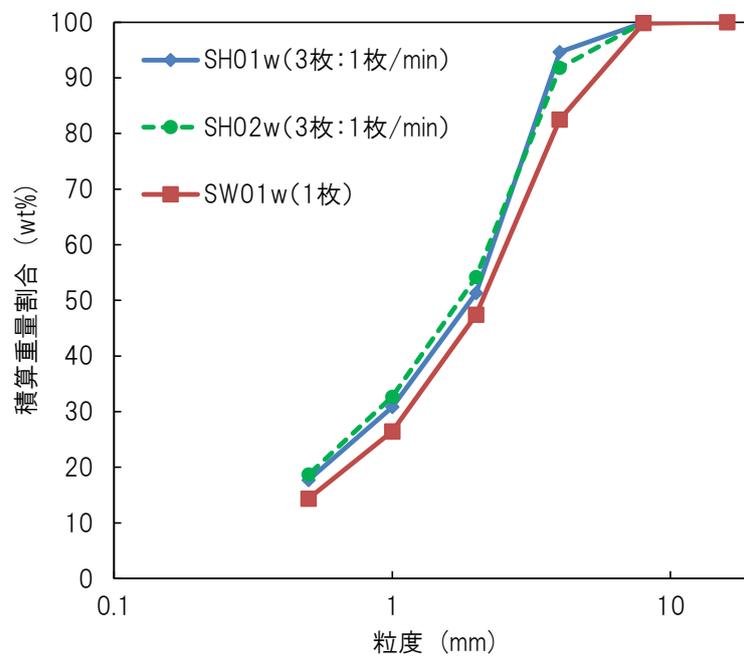


図 5.104. パネル種類による粒度分布の比較

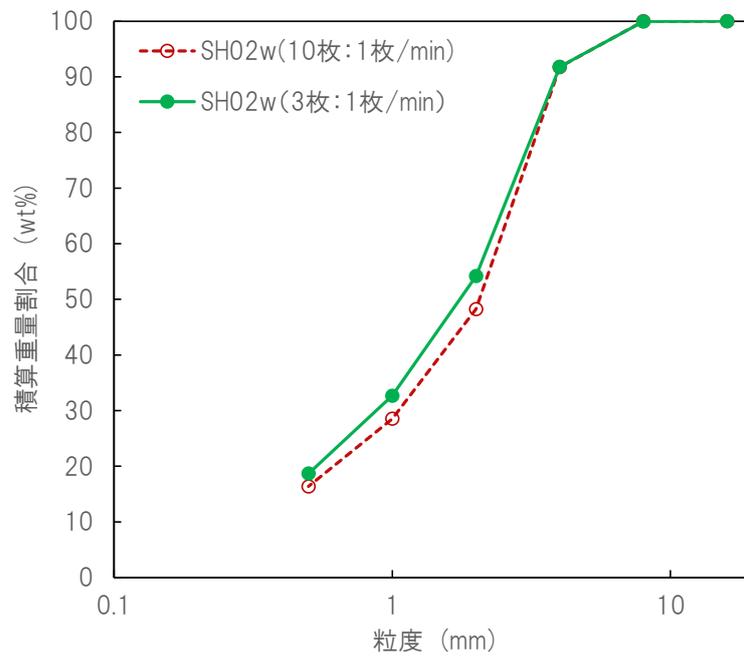


図 5.105. 連続処理枚数による粒度分布の比較

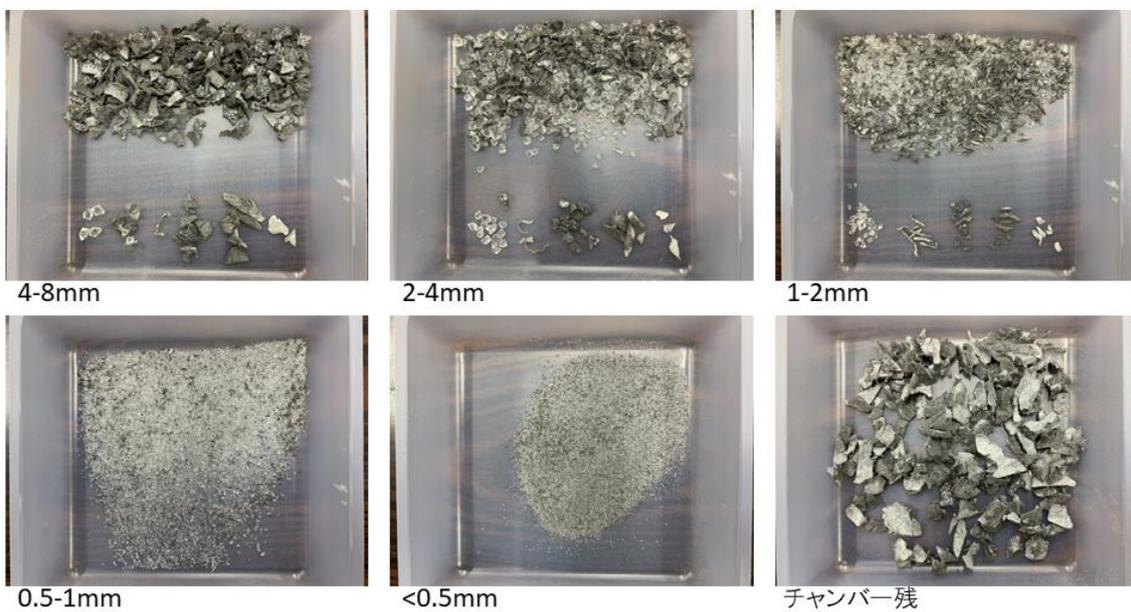


図 5.106. 得られた粒群の写真 (SH01w : 3枚処理)

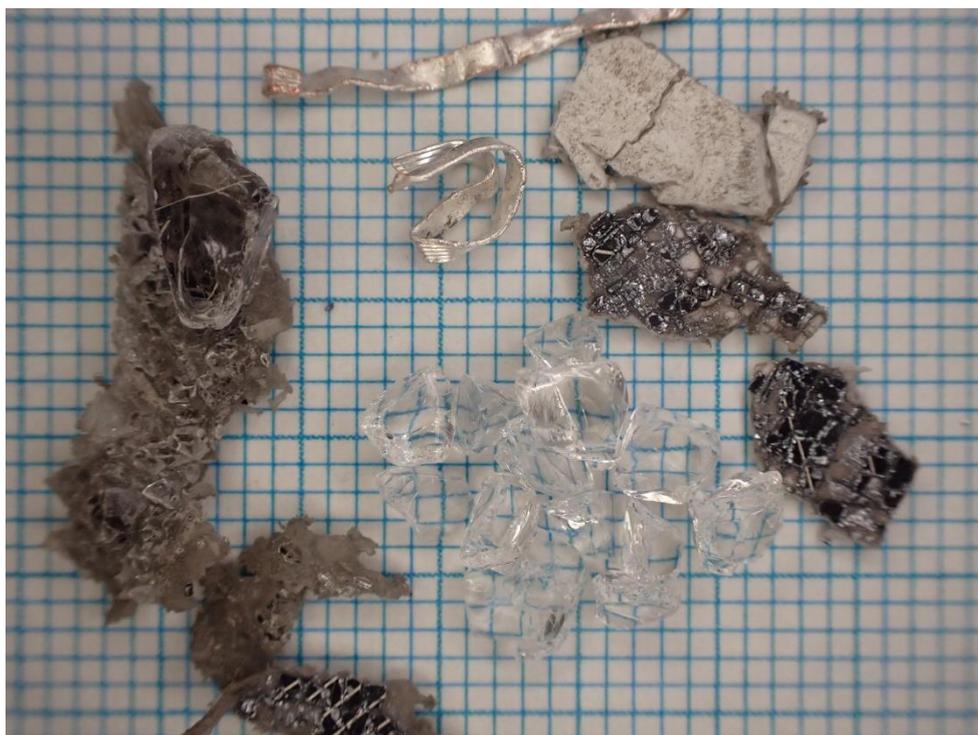


図 5.107. 粒群 4-8 mm の粉碎物 (1 mm 方眼)



図 5.108. 粒群<0.5 mm の粉碎物 (1 mm 方眼)

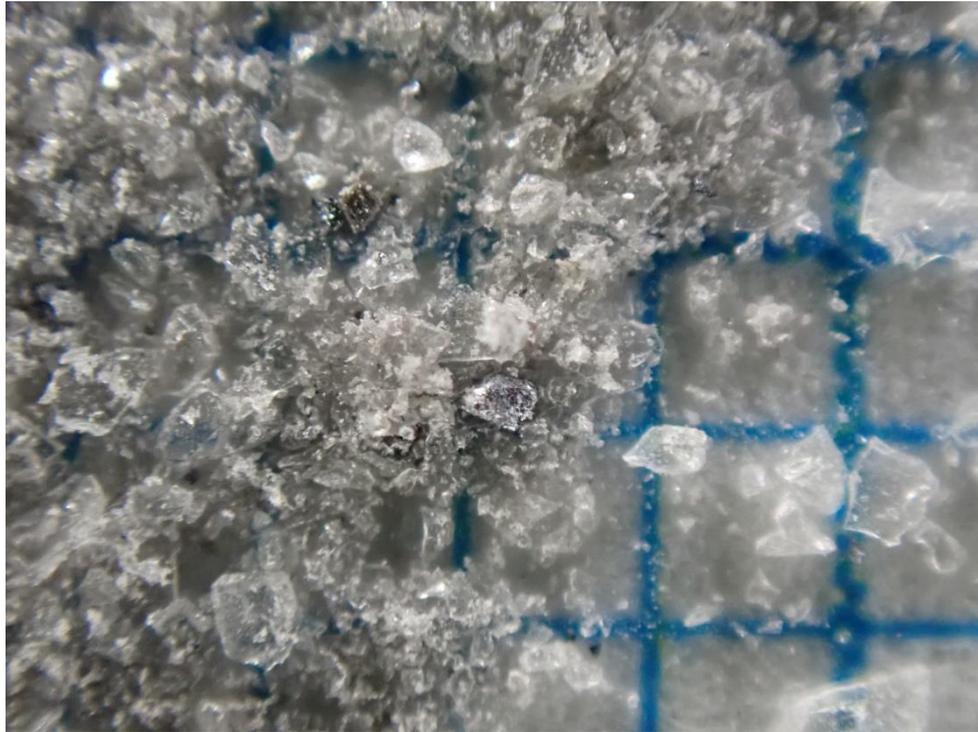


図 5.109. 粒群<0.5 mm の粉碎物 (1 mm 方眼 : 高倍率)

オリエンTMilにおいて、当初に示したように、刃付け状態によって粉碎性能が大きく異なる。従って、刃の摩耗の影響は無視できない。ガラスの粉碎は刃の摩耗が激しく、安定した処理性能を維持するためには、場合によっては高い頻度での研磨や交換が求められる。実際に刃が消耗すると、図 5.98 で示すように、粉碎は不可能となった。ここで、ホットナイフ分離法®でガラスを分離したセルシート (SH01c および SH02c) を用いて、1セルサイズおよび1セルサイズを16分割した試料の粉碎を試みた(ガラス付き試料を実験室にて16分割することは困難であったため、本検討はセルシートで実施している)。1セルサイズのSH01cは粉碎できずに異常終了となったのに対し、SH02cは大きな残存物が残るものの、処理は進行した。これはバックシートの硬さ差異によるものであると考えられる。オリエンTMilは上部のスタンドカッター(鋭角衝撃刃)によって荒く粉碎されて下部の壁面固定刃と回転刃による切断・粉碎部(シュレッダー部)に送り込まれる構造となっているが、スタンドカッターが摩耗すると試料を粗粉碎して下部に送り込むことができなくなる。そこで、あらかじめセルを16分割して投入すると、図 5.110 に示すとおり下部の切断・粉碎部に支障なく落下し、粉碎が進行する結果となった。従って、スタンドカッターが良好に機能していれば、下部のシュレッダー部での粉碎は進行する。スタンドカッターを再研磨してガラス付き試料の粉碎試験を行った。シュレッダー部の壁面固定刃・回転刃の研磨は行っていないが、スタンドカッターの研磨のみで良好な処理が可能となった。シュレッダー部については、鋭利な刃を維持するというよりは、図 5.111 に示すように、固定刃と回転刃のクリアラン

スの影響が大きい。2020 年度実証の範囲では、シュレッダー部の刃は再研磨を要する状態までの損耗は認められなかった。処理性能を維持するためには、スタンドカッターの定期的な研磨と下部シュレッダー部のクリアランス調整が重要である。

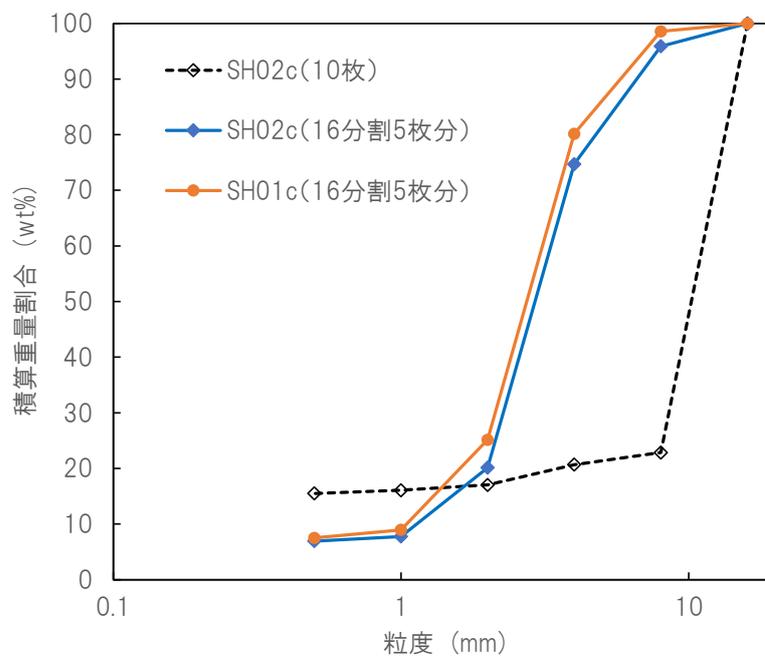


図 5.110. セルシートのための粉砕試験結果の比較

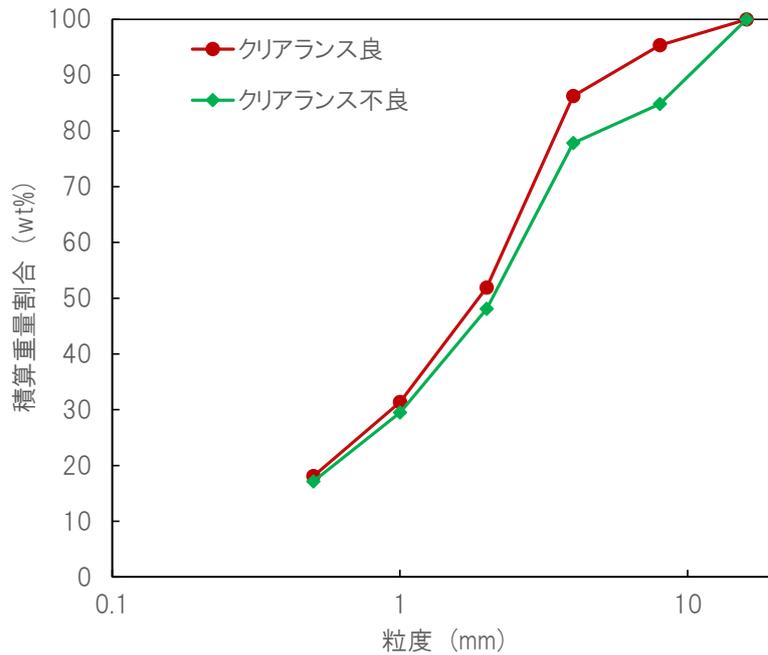


図 5.111. オリエントミル下部シュレッター部のクリアランスの影響
(SH01w (10 枚 : 1 枚/min))

② 二次粉砕

二次粉砕は、回転する容器（混合パン）とその中心に対し偏心した位置に配置されたアジテータが回転して試料を解砕するインテンシブミキサー（日本アイリッヒ（株）：EL-1）、粉砕容器を高速振動して試料を粉砕する振動ミル（（株）シー・エム・ティー：Ti100）および容器内の回転アームによって試料や粉砕メディアを強力に強制攪拌するアトライタ（日本コークス工業（株）：PWB-0007）を用いて試験を実施した。インテンシブミキサーが表面粉砕、振動ミルが微粉砕に相当する。アトライタはそれらの中間と位置付けられる。いずれも回分式の粉砕装置である。試験の対象は、図 5.112 に示すとおり、オリエントミルで一次粉砕を行った 2mm 以上の粒群とした。また、それぞれの粉砕実験では消費電力の測定を行い、ライフサイクルアセスメントの検討に提供した。

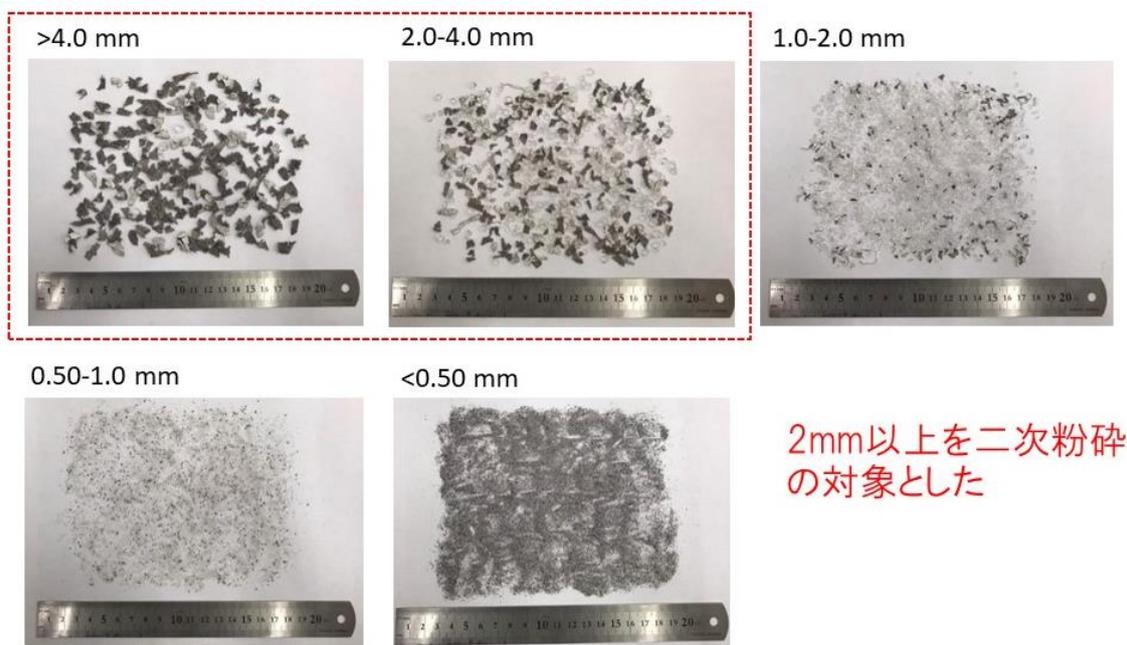


図 5.112. 二次粉碎の対象とする粒群 (SH02w)

インテンシブミキサーの装置写真と基本的な実験条件を図 5.113 および表 5.77 に示す。試料の投入量は 1 L (680 g)、混合パンの傾斜は 30°、回転数は 85 rpm の固定とした。アジテータの回転数は予備試験の結果、2,000 rpm とした。試料として SH02w を用い、処理時間 1、3、5 分で得られた粒度分布を図 5.114 に示す。表面粉碎であるインテンシブミキサーでは、顕著な微粉化は認められなかった。処理時間 3 分と 5 分では粒度分布に大きな差異が生じていないことから、ガラス同士が衝突したり擦れあったりすることによるガラスの微粉化の進行は緩やかであり、小粒径の粒群の増加は、主に樹脂からのガラスや金属成分の剥落によるものと考えられる。樹脂は 4-8 mm の粒群に多く残存し、2-4 mm の粒群は主にガラスとなった。卓上 EDX による金属測定と固体燃焼式 TOC 計による炭素測定によって得られた組成 (図 5.115~図 5.117: インテンシブミキサーのみ、成分分析は 11 粒群にふるい分けを行ってから測定を行った) から、4-8 mm の粒群には樹脂を由来とする C が多く含まれていることが分かる。一方で、2 mm 以下の粒群には C はほとんど含まれておらず、樹脂の微粉化は生じていない。処理時間 3 分と 5 分では、粒度分に顕著な差異は認められなかったが、Ag の回収に着目すると、EDX は半定量分析であり、また検出限界付近での測定であるため、定量的な評価は困難ではあるものの、3 分では中粒径の粒群に残存していた Ag が 5 分で 2-2.8 の粒群からはほとんどが剥落したという結果となった。ただし、インテンシブミキサーでは粒径が大きな樹脂は浮上してしまうことで、攪拌による効果を受けにくくなるため、比較的大きな樹脂に対してはインテンシブミキサーによる金属の剥離が進行しにくいという結果となった。なお、一次粉碎を行った後の Cu は一定の長さを保持したワイヤー形状で存在しており、観察により、表面粉碎ではほとんど微細化されない

ことが分かったが、成分分析のための均一なサンプリング（縮分操作）が困難であったため、成分分析による Cu の物質収支を正確に得ることができなかった。ワイヤー状の Cu の分析の精度向上は今後の課題である。なお、同様の条件で SH01w を用いて 3 分間の処理を行ったが、結果は図 5.118 に示すように、粉碎挙動に顕著な違いは認められなかった。

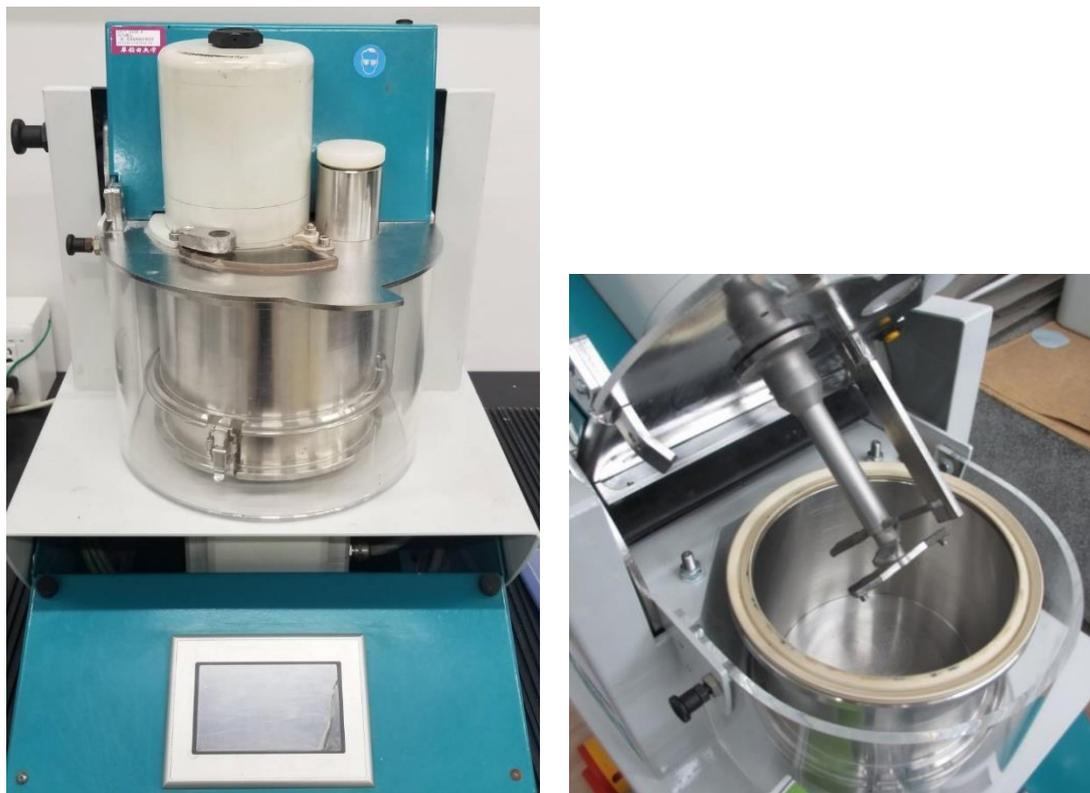


図 5.113. インテンシブミキサー（EL-1）外観と容器内部

表 5.77. インテンシブミキサー実験条件

項目	単位	値
試料投入量	[L]	1
混合パンの傾斜	[°]	30
混合パンの回転速度	[rpm]	85
アジテータの回転速度	[rpm]	2000
粉碎時間	[min]	1~5

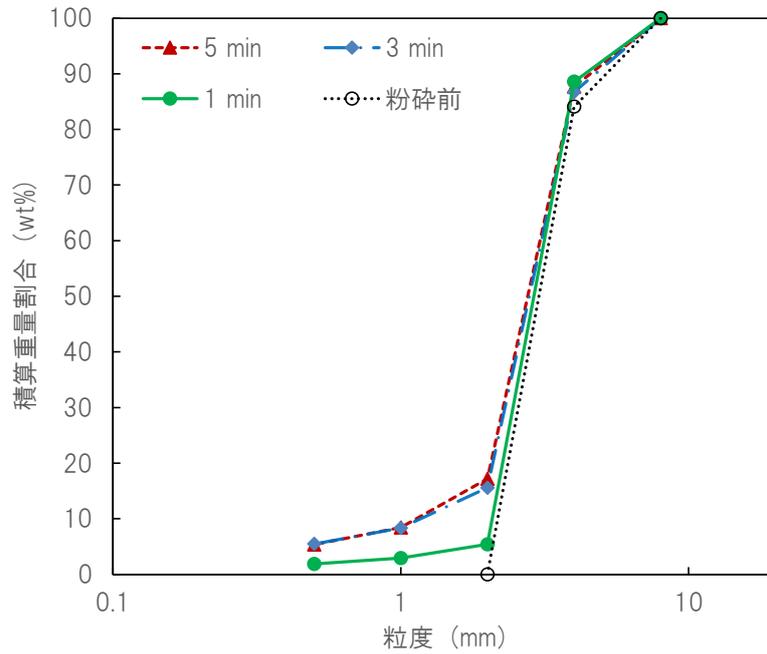


図 5.114. インテンシブミキサーの処理時間による粒度分布の比較

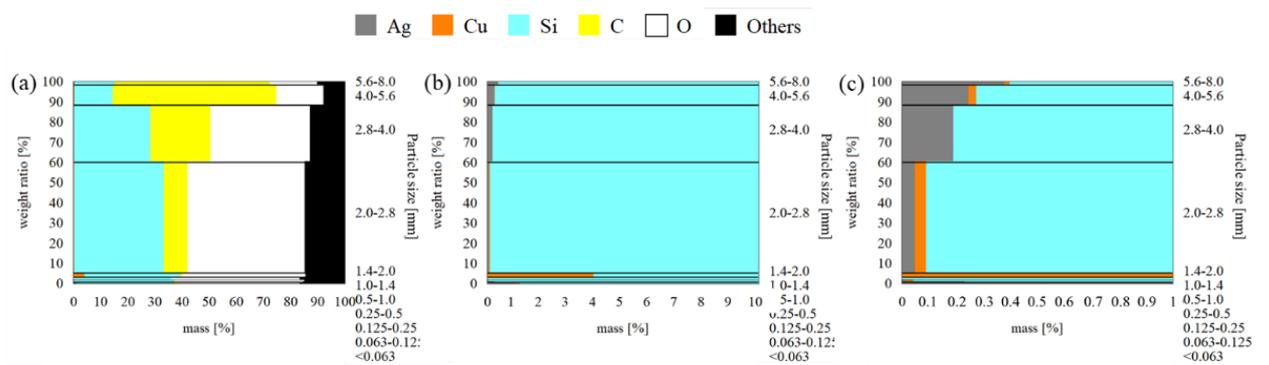


図 5.115. インテンシブミキサー1分処理における量率図：
((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

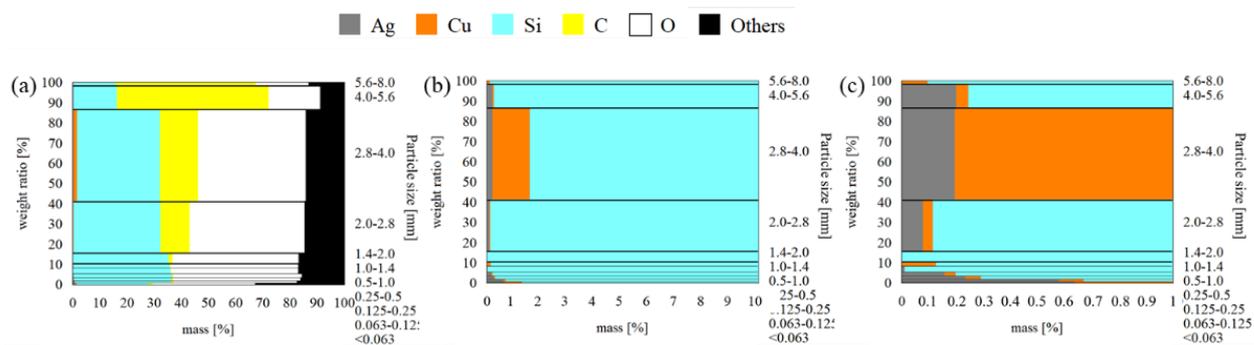


図 5.116. インテンシブミキサー3分処理における量率図：
 ((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

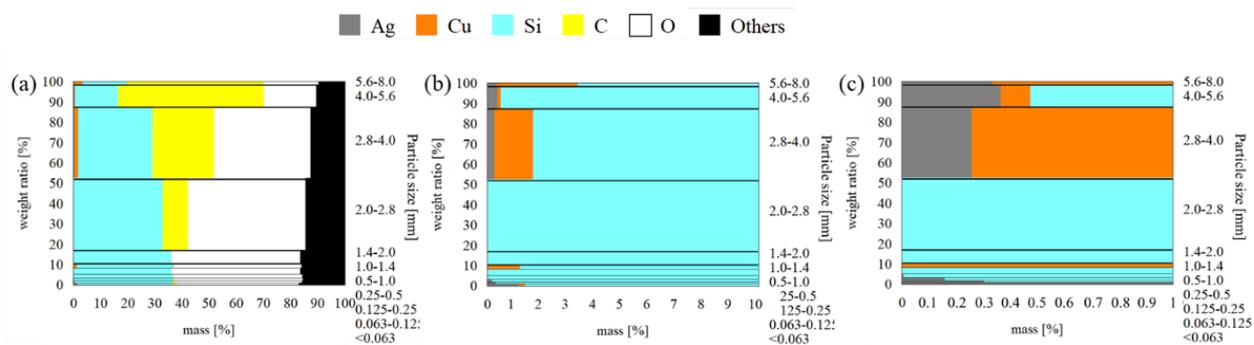


図 5.117. インテンシブミキサー5分処理における量率図：
 ((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

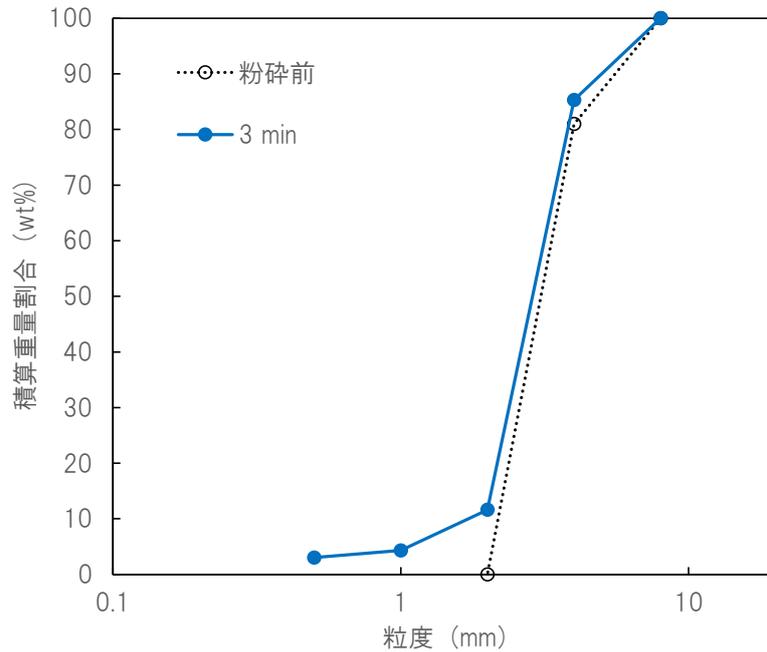


図 5.118. インテンシブミキサー処理の結果 (SH01w)

振動ミルの装置写真と基本的な実験条件を図 5.119 および表 5.78 に示す。振動ミルは短時間で強力な粉砕が進行するが、予備実験の結果より、処理時間は 1 分間で十分に粉砕が完了することが分かった。粒度分布の一例を図 5.120 に示す。ほとんどのガラスは 0.5 mm 以下まで微細化する一方で、2 mm 以上の粒群に残存するのはほとんどが樹脂であった。得られた量率図を図 5.121 に示す。このことから 2 mm 以上の粒群は、若干の Si 成分が残っているものの、大部分は樹脂および銅線であるといえる。Ag はほぼ全量が剥落し、小粒径成分に移っていた。振動ミルによる微粉砕では、確実に樹脂から Ag を分離することが可能であることが示された。ただし、大部分のガラスも微細化されてしまうので、リサイクル用のガラスと Ag はこの段階では分けられておらず、樹脂成分と銅線が除去されるというプロセスである。ガラスとともに銀回収の原料とする選択肢もあるが、ガラスと Ag は単体分離しているので、適切な後分離工程を加えることで、リサイクル用のガラス回収も想定しながら、Ag のさらなる濃縮も期待できる。



図 5.119. 振動ミル (Ti100) と粉碎容器

表 5.78. 振動ミル実験条件

項目	単位	値
試料投入量	[g]	5
媒体形態	-	円柱
ポッドの材質	-	タングステン
粉碎時間	[min]	1

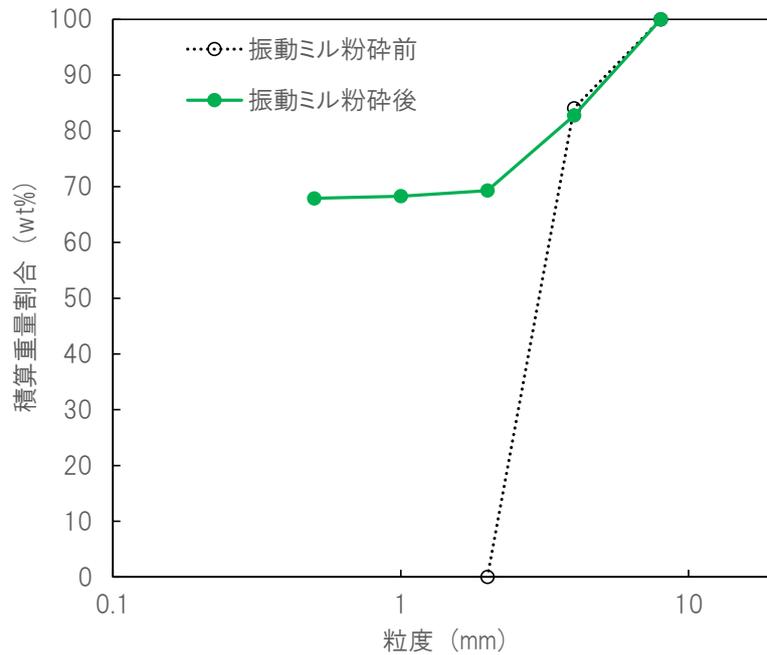


図 5.120. 振動ミル 1 分処理による粒度分布

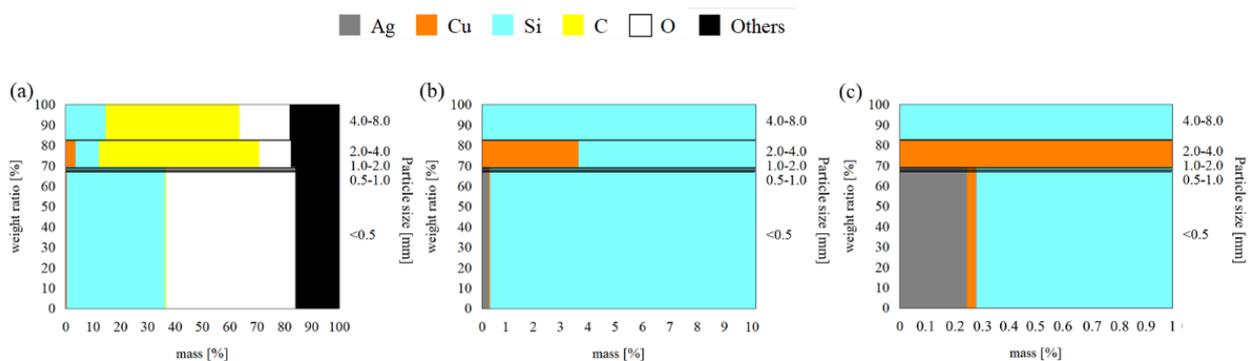


図 5.121. 振動ミル 1 分処理における量率図
((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

アトライタの装置写真と基本的な実験条件を図 5.122 および表 5.79 に示す。アトライタは粉碎メディア（ボール）使用の有無を選択することができる。粉碎メディアを使用する際は、直径 10 mm のジルコニアボールを 54 個（50 mL 相当）とした。回転数は 400 rpm に固定し、試料 15g および 30 g（それぞれ 20 mL および 40mL 相当）、処理時間は 1-5 分で種々の比較を行った。

試料投入量の影響および粉碎メディア有無の影響を調べたところ、図 5.123 に示すように、投入試料が少ない方が粉碎は進み、また、粉碎メディアの効果は顕著に現れた。なお、

炭素測定の結果より、ボールミルを使用しない条件では、樹脂のサイズはほとんど変化が認められなかったのに対し、粉砕メディアを用いることで、4-8 mm の粒群に含まれていた樹脂が減少した。その分、2-4 mm の粒群で樹脂の増加が見られたが、2 mm 以下まで樹脂が粉砕されることはなかった。

粉砕メディアを使用し、試料投入量を 15g とした場合の処理時間の影響を図 5.124 に示す。4-8 mm の粒群の重量減少は 1 分経過後、ほとんど変化していない。この重量減少分は運転初期段階で速やかに生じ、樹脂に付着していたガラスの剥落によると考えられる。4 mm 以下の粒群では、時間の経過とともに微粉化が進行しており、インテンシブミキサーではほとんど生じなかったガラスの粉砕も生じていることが分かった。得られた量率図を図 5.125 から図 5.127 に示す。樹脂を表す炭素量については、2-4mm の粒群での増加が見られた。これは、4-8 mm の粒群に含まれていた樹脂から来るものによる増加もあるが、ガラスの粉砕が進んで小粒径に移ったことで、相対的に樹脂 (C) の割合が増加したと結論付けられる。Ag については、前述のように EDX では高い定量性は得られないため、結果にばらつきがあるものの、傾向としてはインテンシブミキサーに類似したもので、樹脂からの剥落による小粒径粒群へ Ag が移行するものと樹脂上に残っているため大粒径粒群に留まるものに分かれた。また、インテンシブミキサーの結果ほど顕著ではなかったが、中粒径の粒群には Ag が含まれにくいという傾向が認められた。



図 5.122. アトライタ (PWB-0007) 外観と容器内部

表 5.79. アトライタ実験条件

項目	単位	値
試料投入量	[g]	15-30
回転速度	[rpm]	400
粉碎メディア ($\phi 10\text{mm}$ ジルコニアボール)	-	有 (54 個) / 無
粉碎時間	[min]	1-5

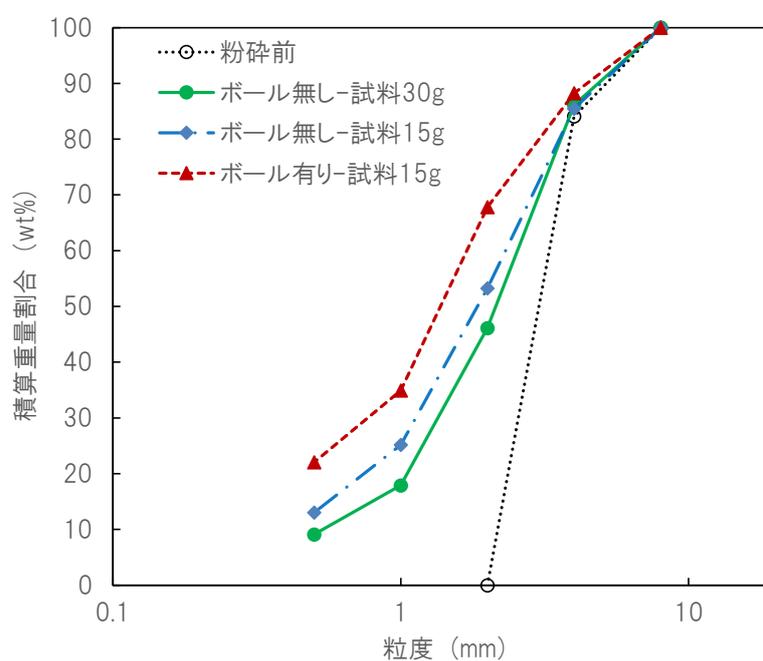


図 5.123. アトライタの試料投入量およびボール有無における粒度分布の比較
(処理時間：2分)

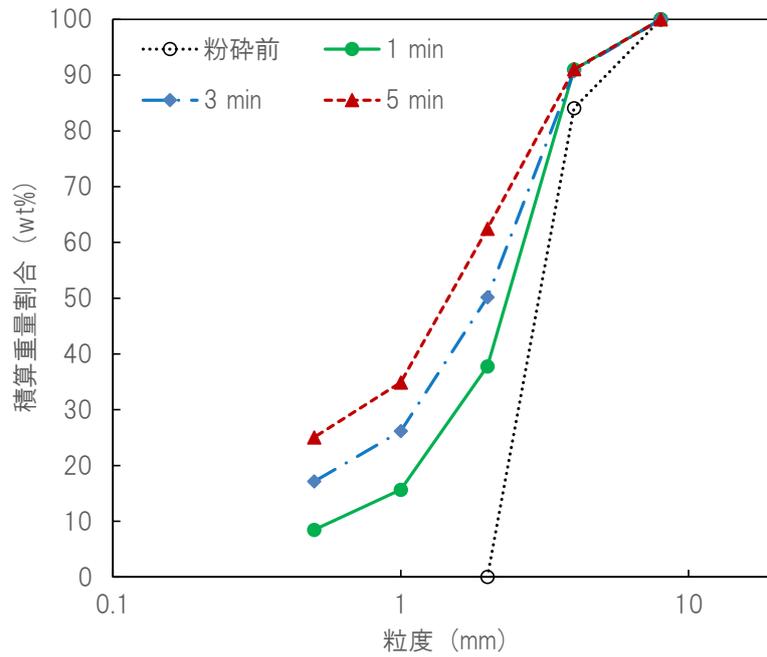


図 5.124. アトライタの処理時間による粒度分布の比較 (ボール有-試料 15g)

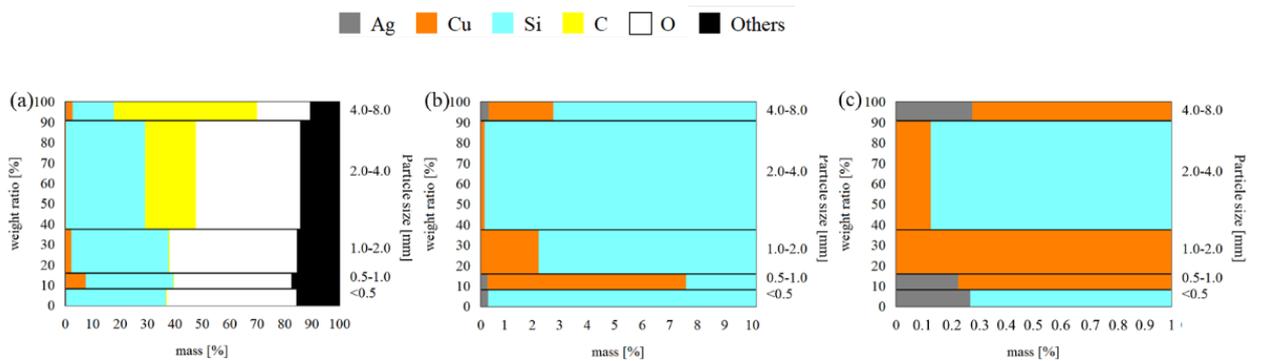


図 5.125. アトライタ処理時間 1 分、ボール有り-試料 15g における量率図
 ((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

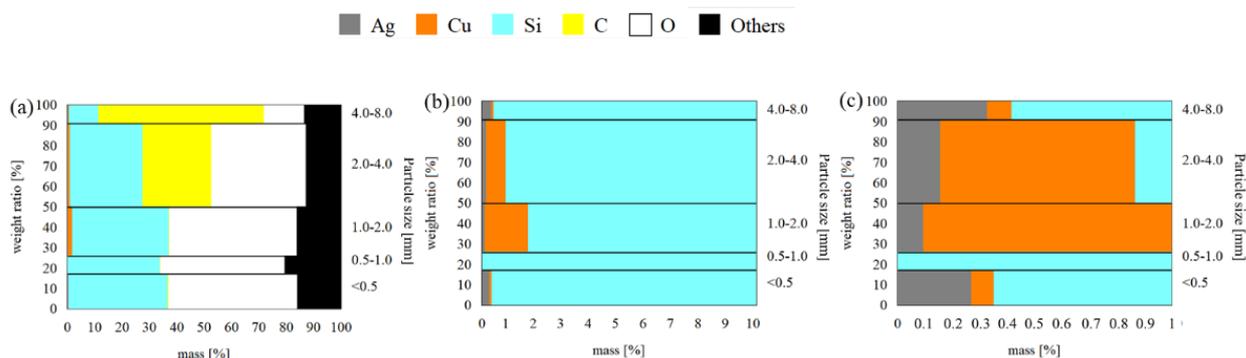


図 5.126. アトライタ処理時間 3 分、ボール有り-試料 15g における量率図
 ((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

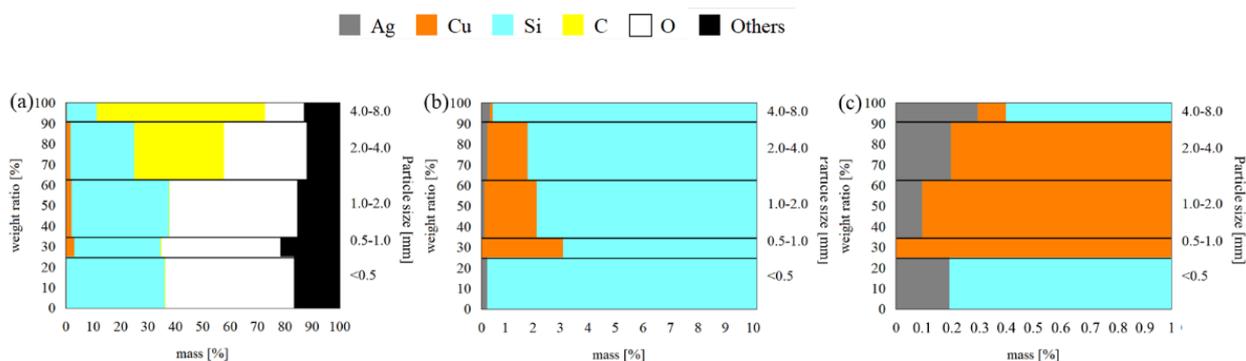


図 5.127. アトライタ処理時間 5 分、ボール有り-試料 15g における量率図
 ((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

大量処理を想定し、カバーガラスを分離しないまま全体を粉砕した場合、回収したい金属とガラスが混在する粉砕物となるため、改めて成分分離する手法の考え方が課題となる。オリエンタミルによる一次粉砕では、粒径 2 mm 以上の粒群では単体分離が進んでおらず、樹脂に付着したままのガラスが多く存在していると共に、半導体および Ag も EVA 樹脂に付着している状態である。したがって、2 mm 以上の粒群を対象として二次粉砕の試験を行ったところ、表面粉砕では、樹脂とガラスの剥離が生じることで、ある程度の大きさを保ったままのガラス単体分離が期待できる。一方で、樹脂からの半導体や Ag の分離効率は低く、一部は剥落して小粒径成分に移るものの、多くは EVA 樹脂に残っている結果となった。ガラスが剥離した樹脂は軽くなるため、粉砕チャンバー内で浮き上がりやすく、浮き上がった樹脂同士では互いが擦れあって表面の金属を剥離する効果は乏しい。このことから、表面粉砕では、中粒径の粒群として、金属が残らず、樹脂の残存も少ないガラスリサイクル原料として利用しやすいものを回収し、Ag は小粒径の粒群および大粒径のまま残る樹脂の双方からの回収を検討することとなる。大粒径の粒群として得られる Ag を付着した樹脂は、そのまま Ag の回収プロセスに供するという選択肢もあるが、振動ミルなどの強力な粉砕装置

で三次処理を行うことで、樹脂から Ag を分離することも有望な手法である。それに対して、微粉碎処理では、樹脂および銅ワイヤーが大粒径粒群に残存し、樹脂上にはガラスも金属成分も残らない。振動ミルに微粉碎では、ガラスも大部分が 0.5 mm 以下に粉碎されるため、Ag はガラスと共に小粒径粒群としてほぼ全量が回収される。銅ワイヤーは振動ミルでも微粉化されにくく、表面が削られるなどで一部は小粒群に移るものの、ほとんどは形状を保ったままである。すなわち、微粉碎は樹脂と銅ワイヤーで構成される大粒径粒群とガラス、半導体、Ag で構成される小粒群に分ける操作と位置付けられる。単体分離した Ag としては非常に高い回収率となるが、同様に微粉化したガラスのリサイクルが可能であるかどうかの検討が課題となる。以上の考察の内容を整理すると図 5.128 のようになる。

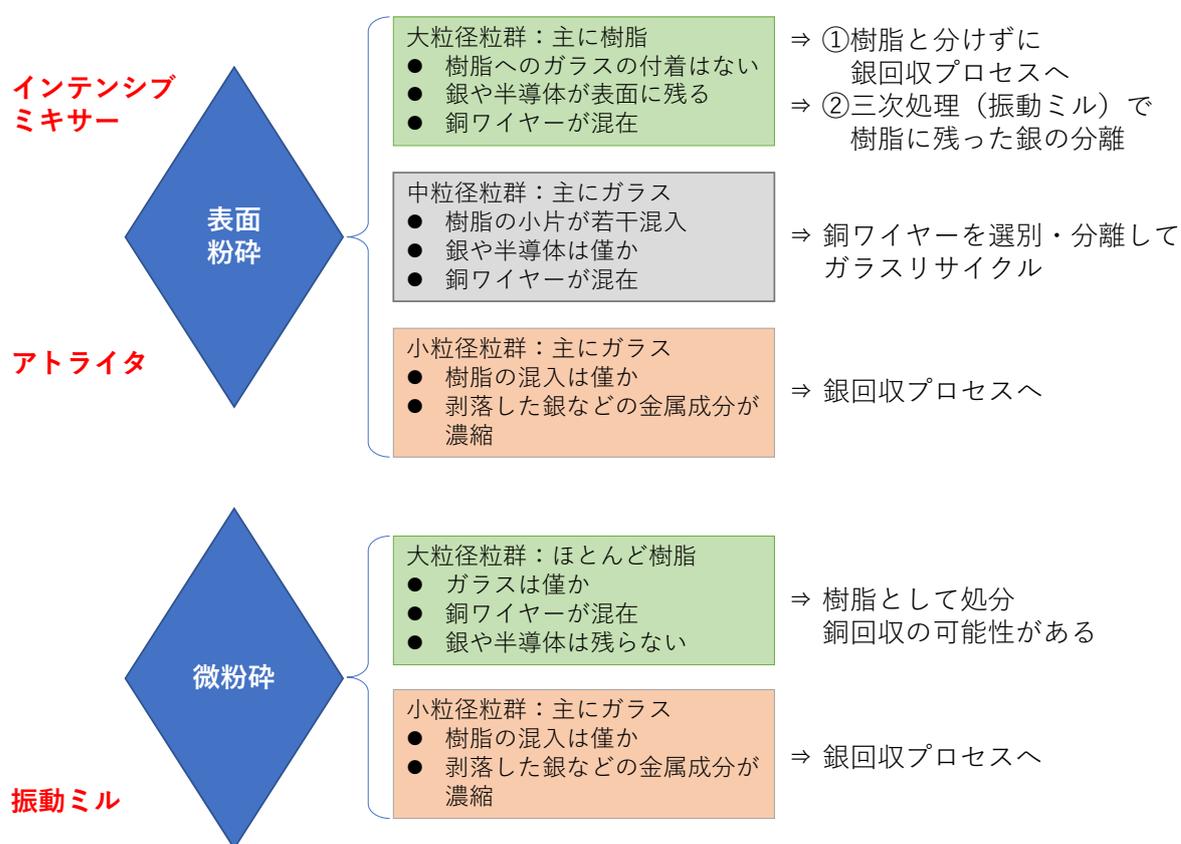


図 5.128. 表面粉碎と微粉碎の考え方の比較

本実証では、粉碎を行った後はサイズ分離（ふるいを用いた分級）による評価を基本としているが、樹脂、ガラス、金属は密度が大きく異なるため、比重選別も有効な手法と考えられる。オリエントミルによる一次粉碎で得られた 2-4 mm および 4-8 mm の粒群に対して、水との密度差（水への浮き沈み）を用いた簡易的な比重選別を行った。これらの粒群では、Ag は EVA 樹脂上に存在している。2-4 mm の粒群では図 5.129 に示すように、樹脂の存在量が少なく、浮上した成分は少なかったが、Ag は浮上する成分に濃縮された。一方、4-

8 mm の粒群では、図 5.130 に示すように半分以上、Ag の沈降が含まれているという結果となった。これは、ガラスと樹脂の分離が進んでおらず、ガラスに付着した樹脂とともに Ag が沈降したためである。一次粉砕のみではガラスと樹脂の分離が十分ではないが、表面粉砕によってガラスと樹脂の分離が進めば、樹脂上に残った Ag は浮上成分として濃縮される。沈降成分は単体分離されたガラスと銅ワイヤーとなる。ガラスと Cu の密度差も大きいいため、流れを伴う比重選別装置を用いることで、選別は困難ではないと考えられる。

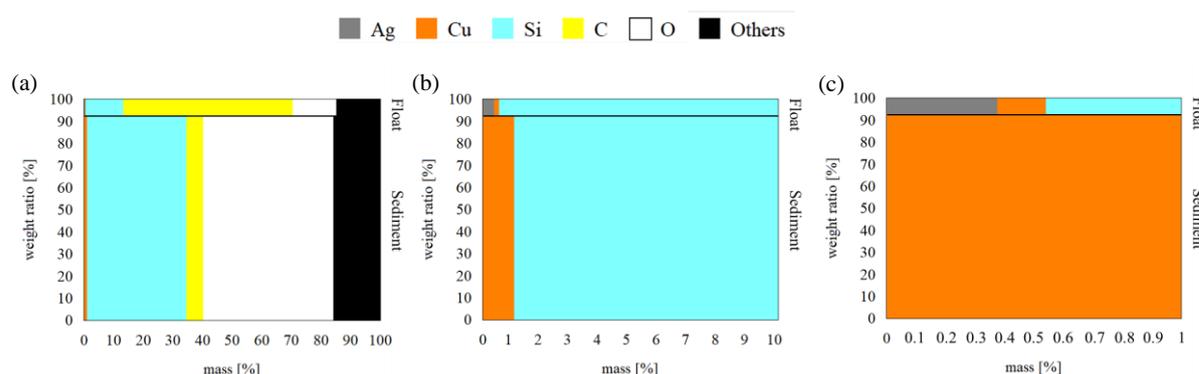


図 5.129. 2-4 mm 粒群の比重選別における量率図

((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

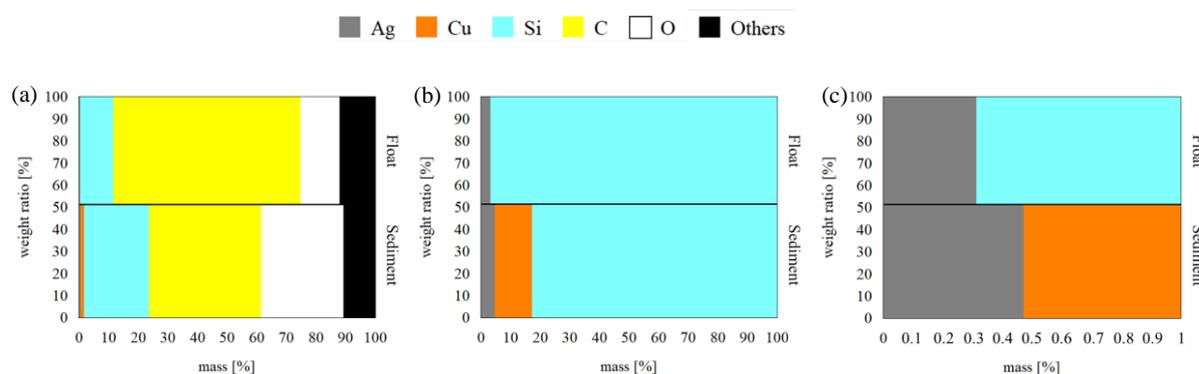


図 5.130. 4-8 mm 粒群の比重選別における量率図

((a)全体表示、(b)10%表示、(c)1%表示)

③ 電気パルス処理

ホットナイフ分離法®にてカバーガラスを除去したセルシートを単セル単位に切り出し、実験試料とした。電気パルス実験回路を図 5.131 に、主要構成機器の写真を図 5.132、図 5.133 にそれぞれ示す。電極はセルの対角位置で銅ワイヤー（バスバー）上部に設置した。電流はバスバーを経由して銀細線（フィンガー線）に流れる。本回路は単純なコンデンサバンク回路である。DC 電源装置から供給される電力をコンデンサに蓄え、メカニカルスイッチを放電側に切り替えることでコンデンサに蓄積した電気エネルギーをサンプルに放電す

る。機械的な移行スイッチを用いてコンデンサに蓄積されたエネルギーを放電する方式である。試料は水槽（水量 18 L）の中に設置し、水中放電実験を行った。回路には電流および電圧のプローブを設置し、オシロスコープにて放電時の電流・電圧を計測した。本実験装置は最大 15 kV の充電が可能である。ここでは、9、11、13、15 kV の条件で実験を行った。

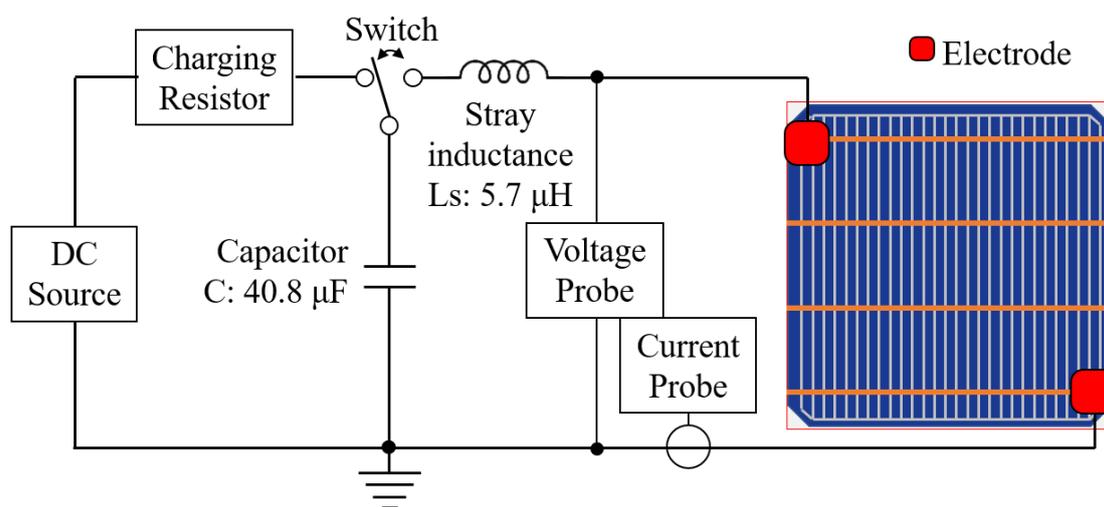


図 5.131. 電気パルス実験回路



図 5.132. 充電コントローラーおよびコンデンサの外観



図 5.133. クランプ式電極

パルス放電を行うと、ジュール熱による急激な温度上昇によって銀線の細線爆発が生じ、プラズマ化する。電流はプラズマを通して流れ、その電気エネルギーによりプラズマは水中で膨張し、衝撃波が発生する。オシロスコープで観測された電流波形より、通電開始から 10～20 μs で細線爆発が起こり、100 μs 程度で放電は終了していた。充電エネルギーが高い 15 kV の条件では、図 5.134 と図 5.135 に示すように衝撃波によって 4 本の銅ワイヤーが形状を維持したまま脱離し、セルシートの EVA 樹脂の剥離や破れが生じた。13 kV では 2 本の銅ワイヤーが脱離したが、9 および 11 kV の条件では銅ワイヤーの脱離や EVA 層の剥離は認められなかった。プラズマ化した Ag は水中で冷却されることで粒子になるが、Si (半導体) など付近に存在する物質も、熱や衝撃波によって微粒子となる。水中から回収された粒子の粒度分布の比較を図 5.136 に示す。印加電圧 9 および 11 kV の条件で得られた粒子は、13 あるいは 15 kV と比較して全体的に小粒径であることが分かった。高電圧の条件では、大きな衝撃波が発生するため、衝撃波による周辺への粉碎効果も大きいと考えられる。なお、粒度分布で表される小径粒子の割合は高電圧側の条件で低い値であるが、重量ベースの回収量としては高電圧側の条件の方が大きい。それぞれの粒子に含まれる Ag と Si の濃度は、表 5.80 のように、両者を合わせると 13 kV 以下の条件では 90%以上となるが、15 kV では 90%を下回る結果となった。顕著な差異ではないが、大きな衝撃波が発生する条件では周辺の樹脂を巻き込む量も増加することが推察される。低電圧の条件では最大で 7.8% と非常に高い銀濃度を示したが、絶対的な回収量が小さいため、印加電圧 9 kV では Ag の回収率は 16%に留まる。一方、印加電圧 15 kV における Ag の回収率は 71%と最も高くなった。電極はバスバーに設置されるため、バスバーの外側には電流が流れない。上記 71% の銀回収率は、電極が設置されているバスバーの内側の面積比とほぼ一致するため、通電可能な部分では Ag のほぼ全量が微粒子として回収できたといえる。

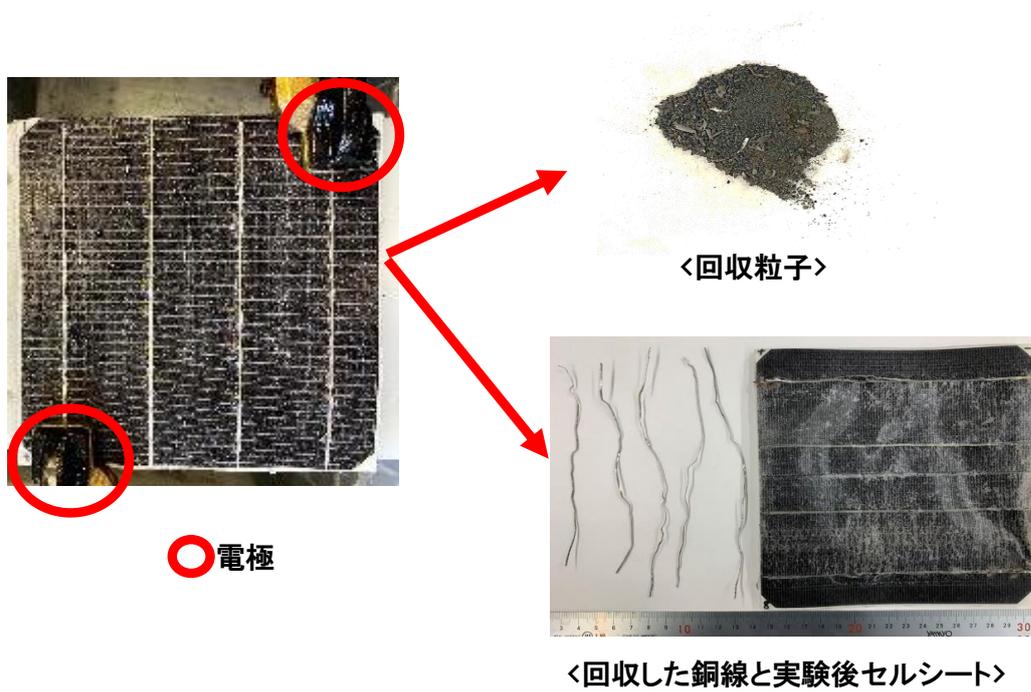


図 5.134. セルへの電極配置と電気パルス処理結果の様子

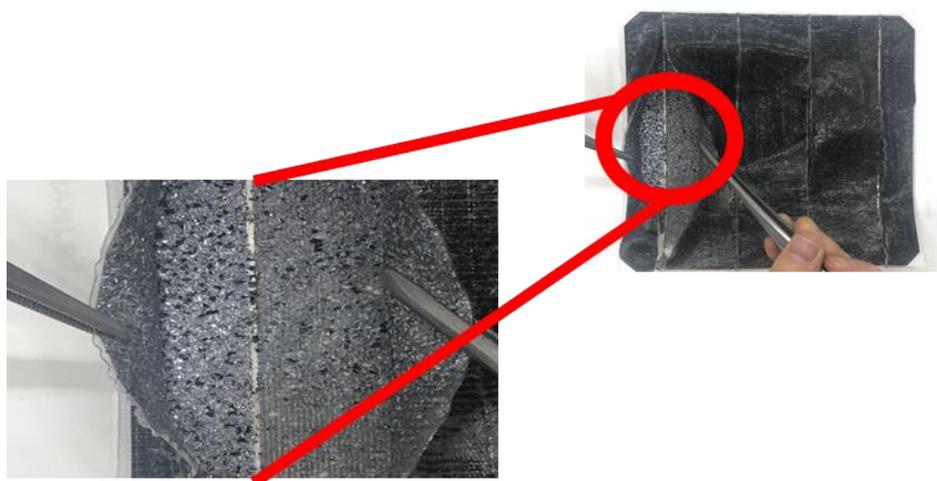


図 5.135. EVA 樹脂層の剥離

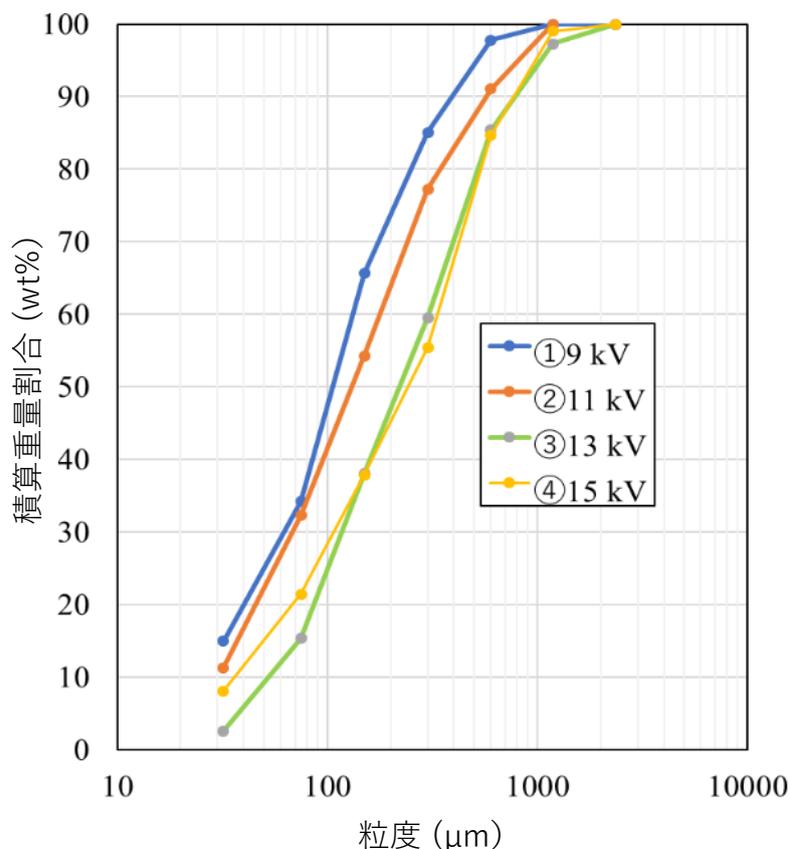


図 5.136. 電気パルス処理で得られた回収粒子の粒度分布の比較

表 5.80. 得られた粒子に含まれる銀およびケイ素の分析結果

粒子径 (μm)	9 kV		11 kV		13 kV		15 kV	
	Ag (wt%)	Si (wt%)	Ag (wt%)	Si (wt%)	Ag (wt%)	Si (wt%)	Ag (wt%)	Si (wt%)
<32	7.8	83.5	5.4	85.3	6.8	86.5	3.3	71.3
32-75	4.7	92.7	4.4	93.7	4.3	94.4	3.2	82.7
75-150	2.9	95.2	2.2	97.0	2.0	88.4	2.1	86.1
150-300	2.4	95.1	2.0	96.6	1.5	91.5	1.5	87.4
300-600	1.2	96.6	2.4	92.8	1.0	93.6	0.7	89.2
600-1180	*	*	2.7	96.0	2.7	95.0	0.3	87.8

*回収重量が小さいため分析不可

今回実施したバスバーを介する方式での電気パルス処理では、セルの両端に通電ができない部分が生じてしまうという課題はあるものの、電気パルス処理では、高濃度の Ag を含む粒子を回収することができる。共存物質も大部分は金属ケイ素である。後段の銀リサイクル

ルプロセスに対して、非常に有利なリサイクル原料であるといえる。シートの両端に Ag が残存することへの対策としては、電極の接続方法の検討なども課題であるが、ここでは、電気パルス処理後のセルシートに対して、オリエントミル (VM-16) による物理粉砕処理の効果を検討した。チャンバーにセルを投入した後、5 分間の粉砕で 8 mm スクリーンを通じた粉砕物とチャンバー内の残存物を回収した。パルス処理後のセルシートの未処理セルシートでは、得られた粒度分布に若干の差異はあるものの、同一の傾向であるといえる (図 5.137)。各粒群に含まれる Ag を測定したところ、図 5.138 に示すように、未処理のセルでは、4・8 mm の粒群および 8mm 以上 (チャンバー残存物) にも Ag が含まれていたのに対し、パルス処理後の粉砕物では、それらの粒群に Ag は含まれておらず、Ag は小径粒子側に濃縮する傾向が見られた。未処理のセルでは、銀線を含む中心のレイヤーは EVA 層で保護されているため、せん断力を主とするオリエントミル粉砕では Ag が剥落して小粒径側に濃縮されることは起こりにくい。それに対し、パルス処理を施したセルシートは Ag の細線爆発・プラズマ化によって EVA 層が剥離しており、通電できなかった両端も剥がれやすい状態となっている。したがって、露出した Ag が剥落することで <5 mm の粒群への移行が促進されたといえる。

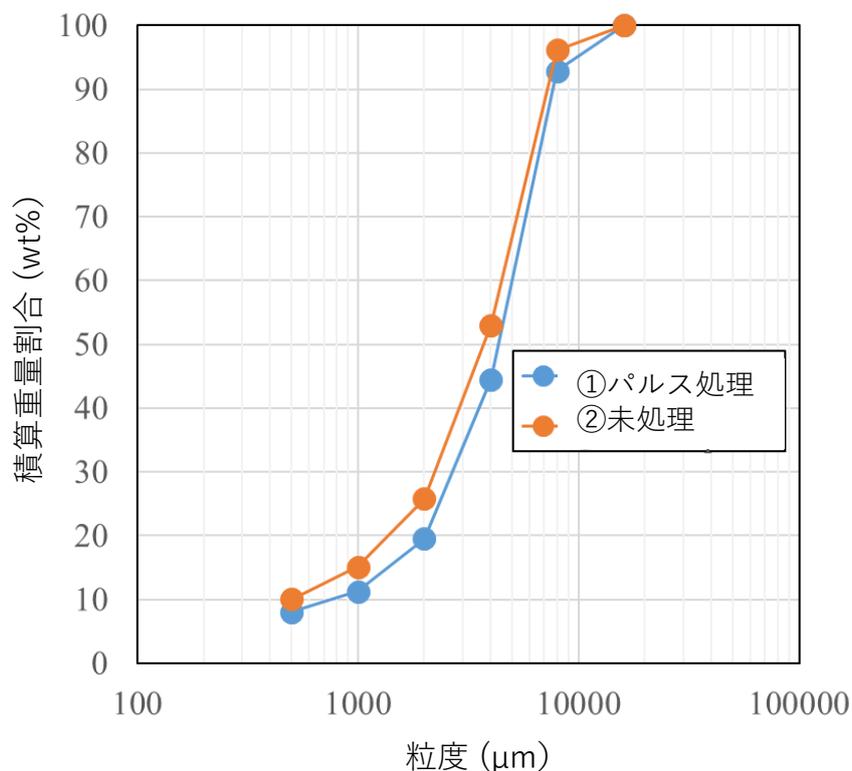


図 5.137. オリエントミル粉砕における粒度分布

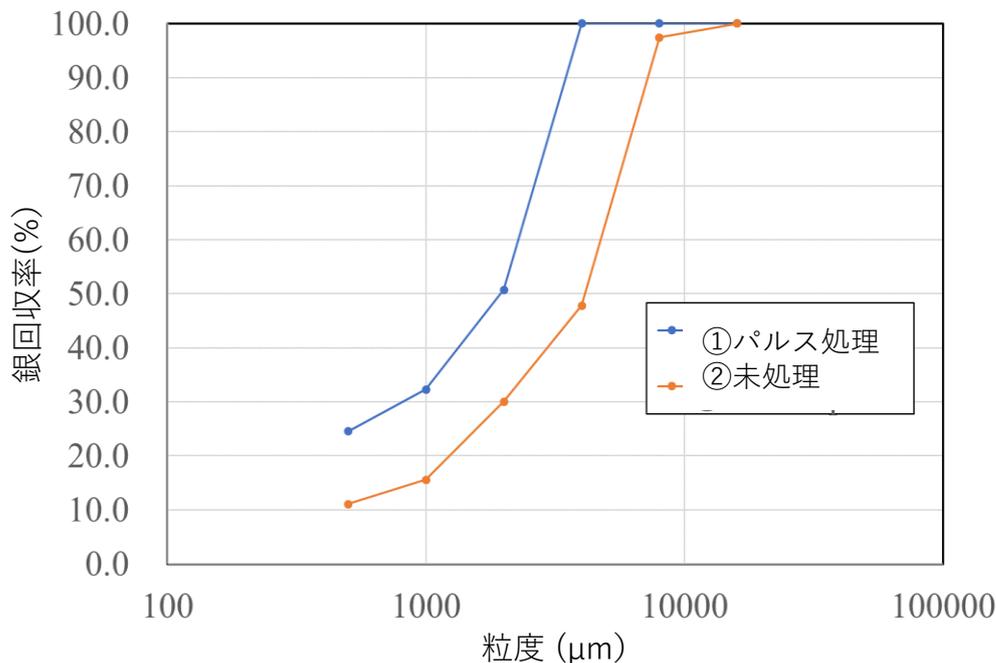


図 5.138. 銀回収の挙動

(4) 物理選別の実証

株式会社浜田・京都 PV リサイクルセンターの実プロセスにおけるセルシートの破碎、選別等の検討を実施した。同プロセスは、アルミフレームを取り外した太陽光パネルをホットナイフ分離法® (図 5.140) にてカバーガラスとセルシートに分離し、セルシートはカッターミル (図 5.141) にて粉碎後 (排出スクリーンの目開き 2 mm)、振動篩機 (図 5.142) で 20 mesh (目開き 0.87 mm) で篩分けを行うフローとなっている (図 5.139)。3 種の太陽光パネル (表 5.81) を現場にて粉碎・篩分け処理を行ったサンプルを提供いただき、早稲田大学にて破碎物の評価を実施した。それぞれの篩上および篩下のサンプル (図 5.143、図 5.144) について、さらに粒度分布を測定した結果を図 5.145 から図 5.147 に示す。分析篩は 2、1.4、1、0.5、0.25、0.125、0.063 mm としたが、サンプル SH04c および SH05c の粒度分布測定においては、市販の分析篩で現場の篩機が目開きに最も近い 0.85 mm を追加した。3 種の太陽光パネルについて、篩上サンプルの粒度分布では顕著な差異は見られなかったが、粒度の小さい篩下のサンプルでは若干の違いが認められた。現場の装置は新設であり、また、SH03c は 2021 年 8 月、SH04c と SH05c は 2021 年 10 月に処理されたものであり、ミルの刃の劣化等による影響は少ないと考えられるので、粒度分布に生じた差異はサンプルに由来するものと考えられる。篩上のサンプルで排出スクリーンの目開きに相当する 2 mm を通過しない粒子、篩下のサンプルでは現場の篩機が目開きに近い 0.85 mm を通過しない粒子はほとんど存在せず、機器の仕様に応じた良好な粉碎・篩分けが行われていると評価できる。ただし、現場での篩分けはサイズの精度を要する精密な分別ではないので

大きな問題ではないものの、篩上サンプルの約 20%が 0.85 mm の分析篩を通過していた。

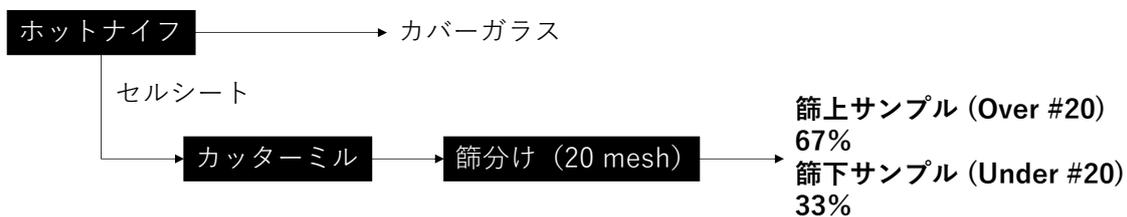


図 5.139. 実プロセスにおけるホットナイフ分離後セルシートの物理粉碎・選別



図 5.140. 実プロセスでの使用機器：ホットナイフ分離法®



図 5.141. 実プロセスでの使用機器：破碎機



図 5.142. 実プロセスでの使用機器：粒度選別機

表 5.81. 実プロセスの試験に用いた太陽光パネル

ID	公称最大出力 [W]	公称開放電圧 [V]	公称短絡電流 [A]
SH03c	185	28.98	8.17
SH04c	125	32.3	5.46
SH05c	195	27.41	9.4



図 5.143. サンプル SH03c 粉碎物の篩上 (1 mm 方眼)

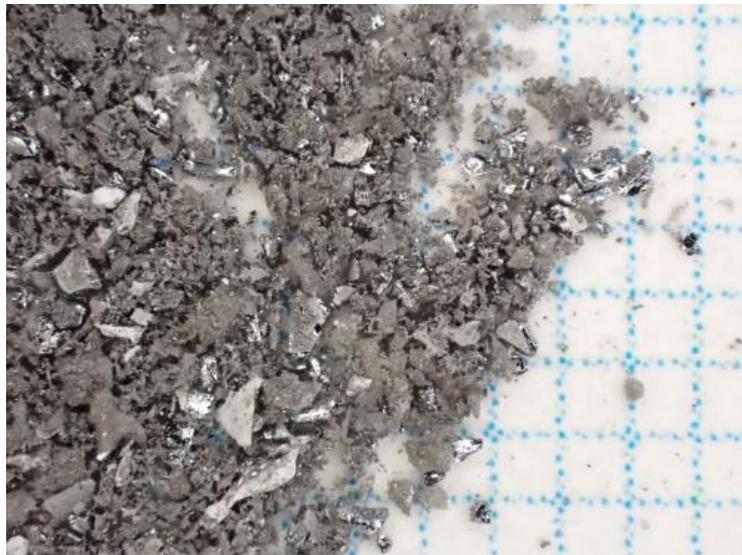


図 5.144. サンプル SH03c 粉碎物の篩下 (1 mm 方眼)

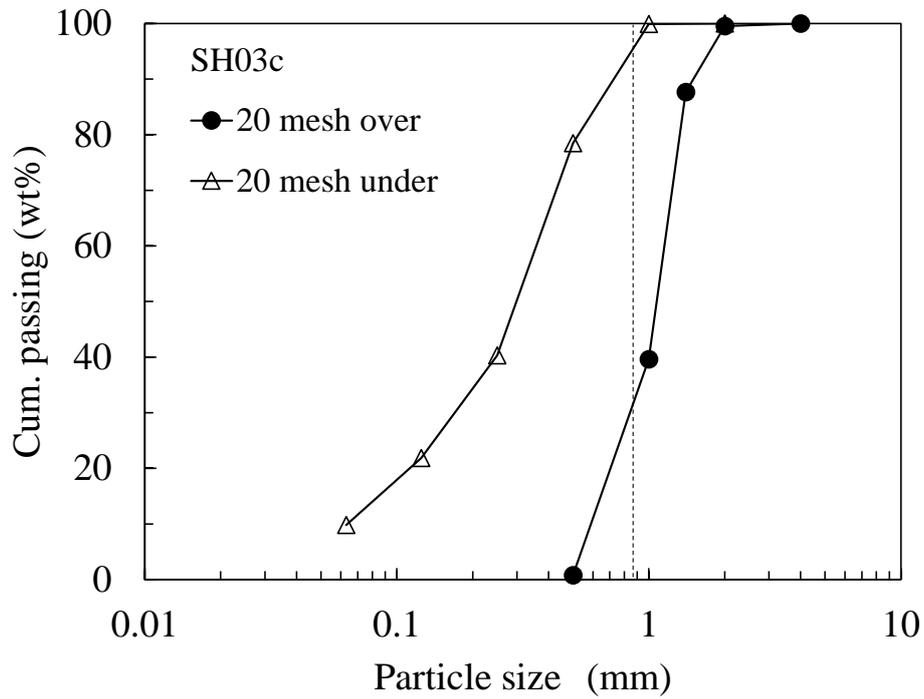


図 5.145. 実プロセスで得られた粉碎物の粒度分布 (SH03c : 篩上・篩下)

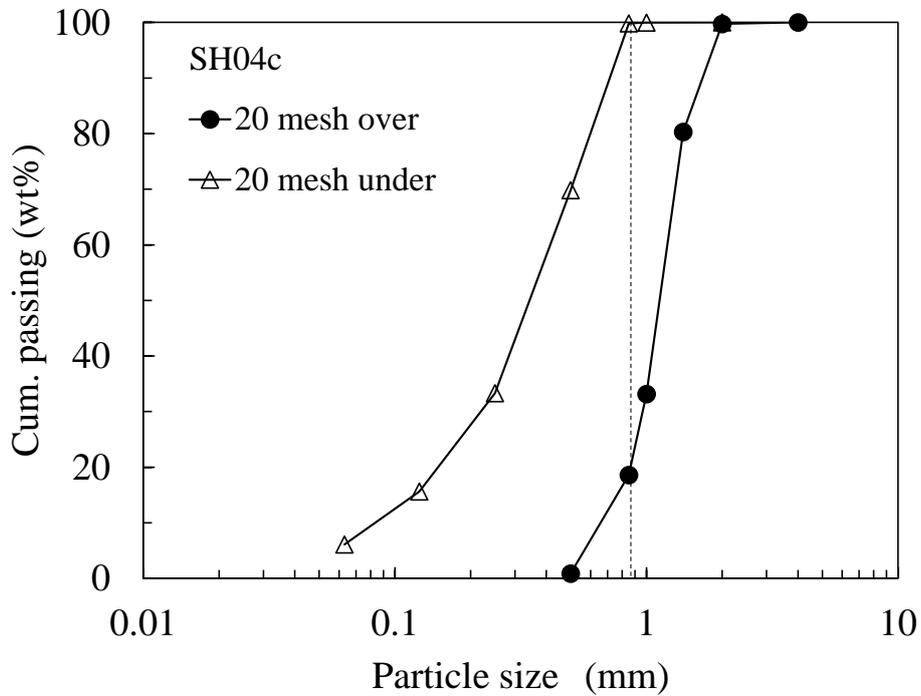


図 5.146. 実プロセスで得られた粉碎物の粒度分布 (SH04c : 篩上・篩下)

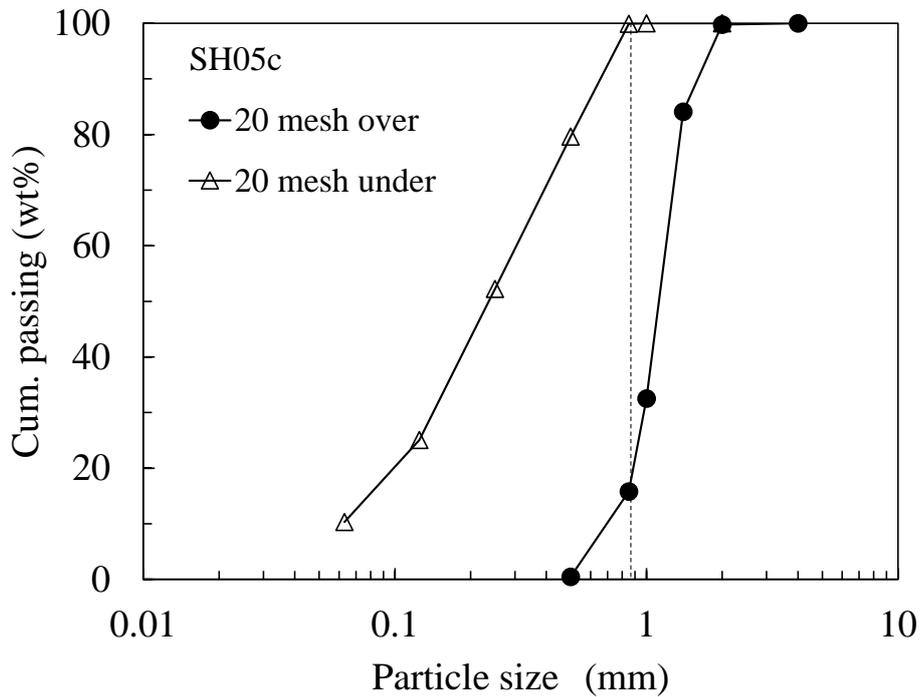


図 5.147. 実プロセスで得られた粉碎物の粒度分布 (SH05c : 篩上・篩下)

実プロセスでの粉碎物について、粒群ごとの成分をハンディ XRF (VANTA Geochem) および湿式化学分析にて測定した。湿式化学分析と比較すると、半定量法である XRF の結果は絶対値としては精度が低いものであるが、特に Ag や Cu の傾向は両者で一致が見られた。また、ガラスの成分である Na および Ca の湿式化学分析における分析結果が検出限界付近あるいはそれ以下であることから、ガラスの混入はほとんどないことが確認され、検出された Si は半導体ウェハ由来であるといえる。結果の一覧を表 5.82 に、同結果の篩下サンプルについて粒群ごとの比較を図 5.148 にそれぞれ示す。ケイ素存在量の傾向から、篩下サンプルは剥離した金属ケイ素 (半導体ウェハ) が主成分であり、Ag は原則として小粒径粒群に濃縮される傾向があるが、半導体ウェハに伴って樹脂と分離されている。

表 5.82. 粉碎サンプル粒群ごとの成分分析結果 (SH03c)

	XRF測定 [wt.%]						TOC計	
	Ag	Cu	Al	Si	Others	LE	TC	
Under #20	<0.063	0.85	2.06	9.87	45.6	10.3	31.3	29.0
	0.063-0.125mm	1.32	0.98	6.46	68.9	6.3	16.0	28.4
	0.125-0.25mm	0.57	0.49	3.93	80.3	3.3	11.4	26.9
	0.25-0.5mm	0.42	0.62	3.06	80.2	1.5	14.2	23.0
	0.5-1.0mm	0.19	3.74	3.78	70.2	2.5	19.6	41.4
Over #20	0.5-1.0mm	0.08	7.06	3.64	35.0	3.4	50.9	55.1
	1.0-1.4mm	0.05	4.80	3.40	27.7	4.3	59.8	54.5
	1.4-2.0mm	0.04	0.24	4.76	53.5	4.5	36.9	64.7

	湿式化学分析 [wt.%]							
	Ag	Cu	Al	Si	Others	Na	Ca	
Under #20	<0.063	1.86	0.98	6.26	31.8	59.1	<0.1	0.10
	0.063-0.125mm	2.80	0.38	3.21	28.5	65.1	<0.1	<0.01
	0.125-0.25mm	1.20	0.35	3.02	34.8	60.6	<0.1	0.03
	0.25-0.5mm	0.68	1.07	1.55	34.2	62.5	<0.1	0.02
	0.5-1.0mm	0.40	3.42	1.54	25.4	69.2	<0.1	<0.01
Over #20	0.5-1.0mm	0.18	10.20	1.11	10.8	77.7	<0.1	<0.01
	1.0-1.4mm	0.14	9.58	0.79	6.1	83.4	<0.1	0.05
	1.4-2.0mm	0.11	0.07	0.83	9.5	89.5	0.2	0.14

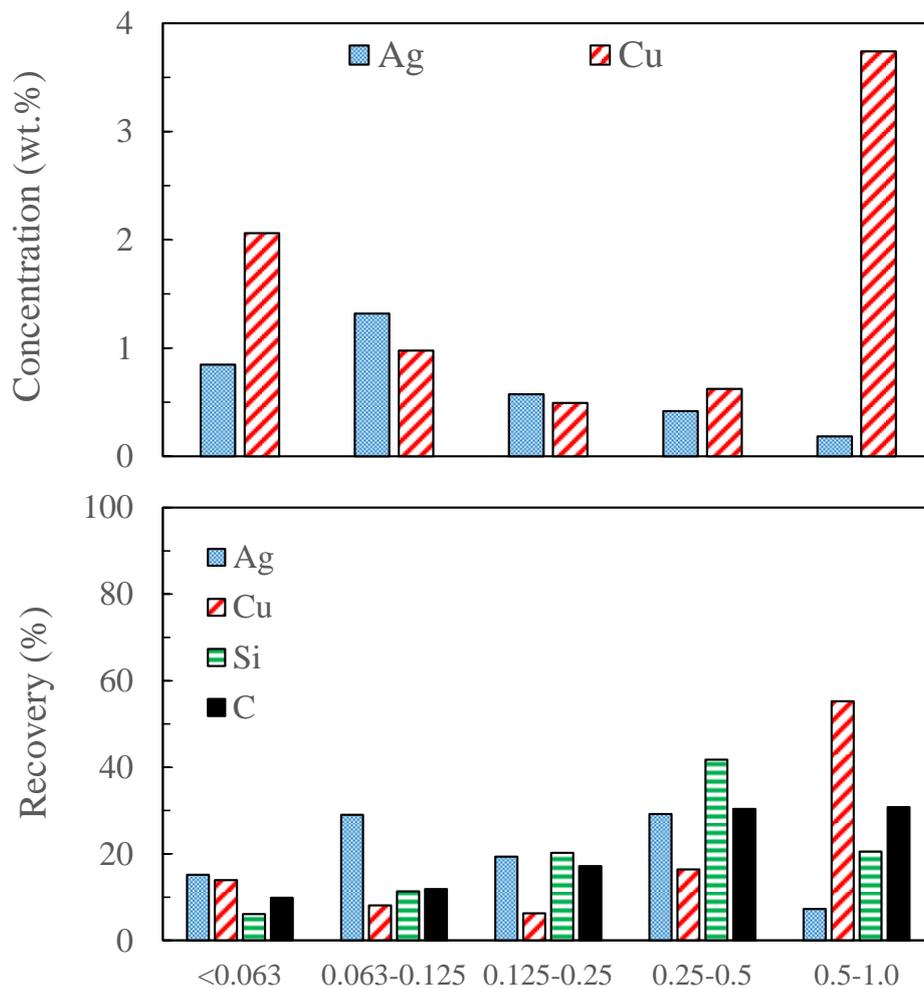


図 5.148. 篩下サンプルにおける粒群ごとの成分の比較 (SH03c)

(5) 分離・選別における回収率向上のための検討

回収率の検討として、ガラス付きセルの二次粉碎で得られた成分分析の結果（インテンシブミキサー：図 5.115～図 5.117、振動ミル：図 5.121、アトライタ：図 5.125～図 5.127）に対して、追加の実験・分析を実施するとともに、データを再整理した。カバーガラスを含む全量粉碎のため、Ag や Cu といったリサイクルの対象となる有用元素の濃度は低い値に留まる。

インテンシブミキサーによる二次粉碎では、図 5.149 に示すように剥離した Ag は小粒径粒群に濃縮されるものの、大部分は 2 mm 以上の大粒径粒群に残存している結果となった。Ag は半導体ウェハ（金属ケイ素）の上にカレントコレクタの細線として存在するが、インテンシブミキサーでは樹脂からの半導体ウェハの剥離には大きな期待はできないと結論付けられる。Cu は一次粉碎にて細分化されたバスバーとして、主に 1～4 mm の粒群に含まれる。バスバーの細分化は一次粉碎によるものであり、図 5.150 に示すように、イン

テンシブミキサーによる銅粒子の微細化はほとんど生じていない。Si および C の挙動を図 5.151 と図 5.152 にそれぞれ示す。Si の濃度は 4 mm 以下の各粒群において 35% 付近ではほぼ一定であるのに対し、4-8 mm の粒群では若干濃度が低い。これは、二次粉砕により樹脂からガラスが剥離し、4-8 mm には樹脂が多く残存したことによる。カバーガラス（ソーダ石灰ガラス）の成分分析から本サンプルのガラスの Si/Ca 比を求めたところ、6.5 程度であった。4 mm 以下の粒群では、半導体ウェハ由来の金属ケイ素の影響でばらつきはあるものの Si/Ca 比は 6.5 前後であったが、4-8mm の粒群では Si/Ca 比は 7~10 となり、樹脂からガラスは剥離に対して、金属ケイ素は剥離せずに残存していることを示している。上述の Ag の剥離に関する検討でも言及したように、樹脂からの半導体ウェハの剥離が困難なため、Ag および Si の小粒径粒群への移行が進まなかったといえる。C（樹脂）は微細化されていない。

振動ミルによる二次粉砕では、樹脂を除くすべての成分が 0.5mm 以下まで微粉化された。各成分の挙動を図 5.153 から図 5.156 に示す。Ag および Cu は基本的に小粒径粒群に集まるが（一部、粉砕されない銅バスバーが残る場合がある）、同時にガラスも微粉化されるので、濃縮効果は高くない。樹脂は大粒径粒群に残っているので、サイズ分離（篩分け）で除くことができる。0.5 mm 以下の粒群においてガラスと金属（Ag、Cu、Si）は分離しているので、比重差などによる分離が期待できる。ただし、Ag と金属ケイ素の単体分離度は確認できておらず、場合によっては Si が付着した状態の Ag が一定量存在する可能性がある。ガラスと金属ケイ素の比重は近いので、比重分離の際には Ag の金属ケイ素（半導体ウェハ）からの分離の状態に注意が必要である。

アトライタを用いた二次粉砕の結果を図 5.157 から図 5.160 に示す。短時間の処理ではインテンシブミキサーに、長時間の処理では振動ミルに類似した挙動となった。

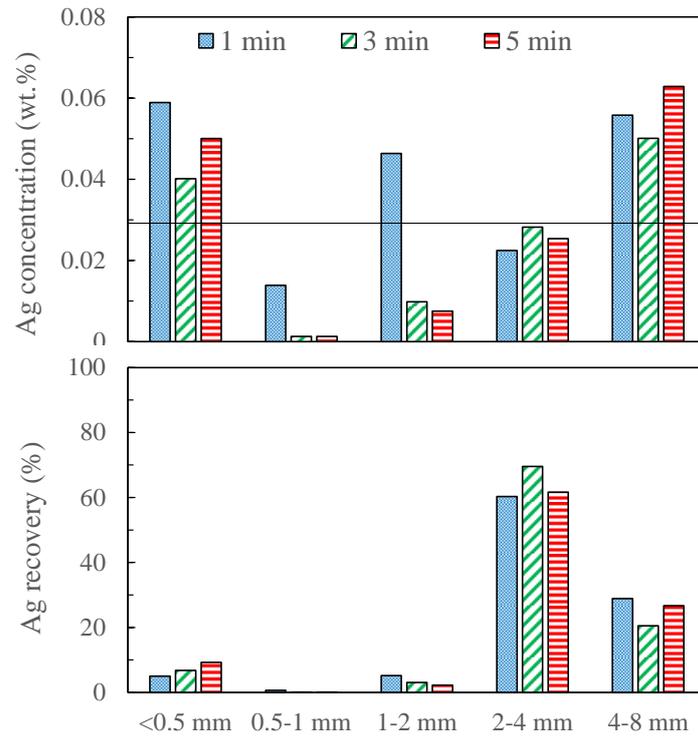


図 5.149. インテンシブミキサー二次粉碎における銀の挙動

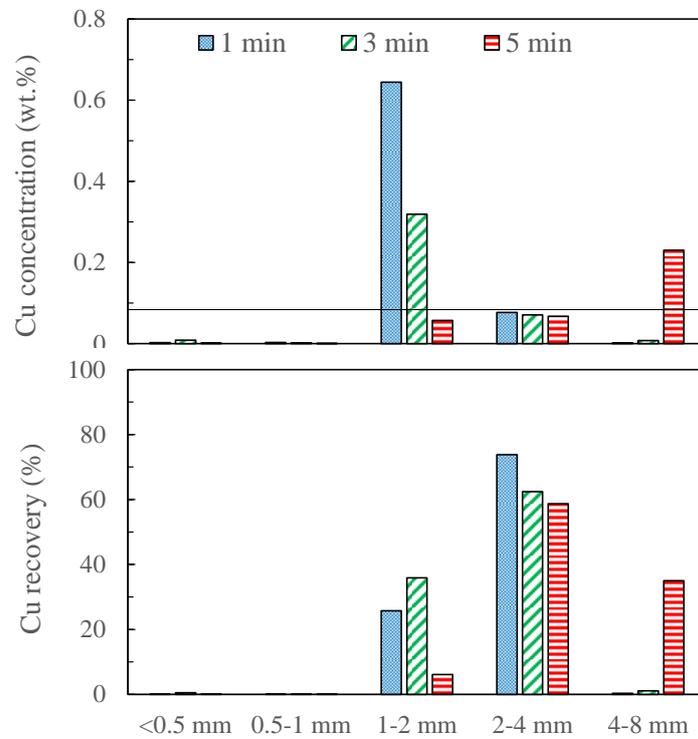


図 5.150. インテンシブミキサー二次粉碎における銅の挙動

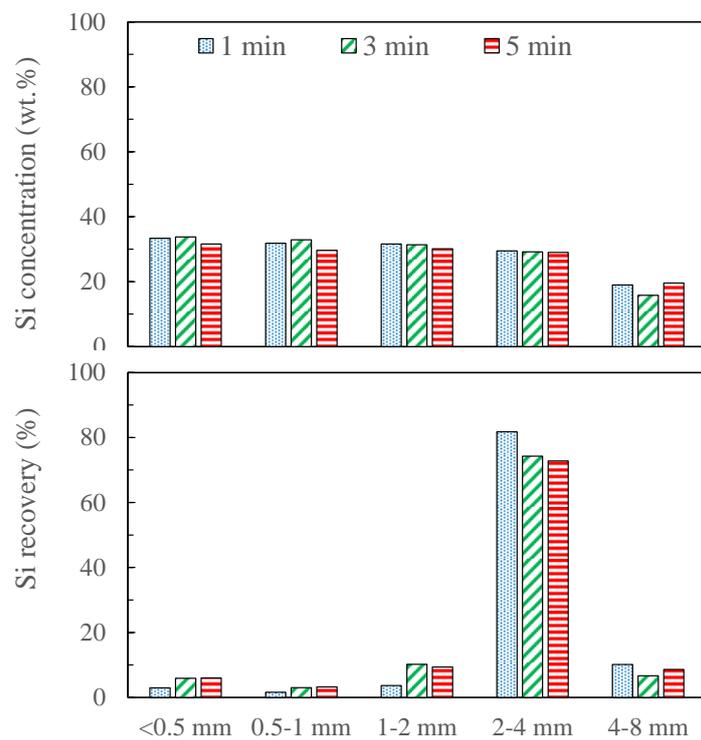


図 5.151. インテンシブミキサー二次粉砕におけるケイ素の挙動

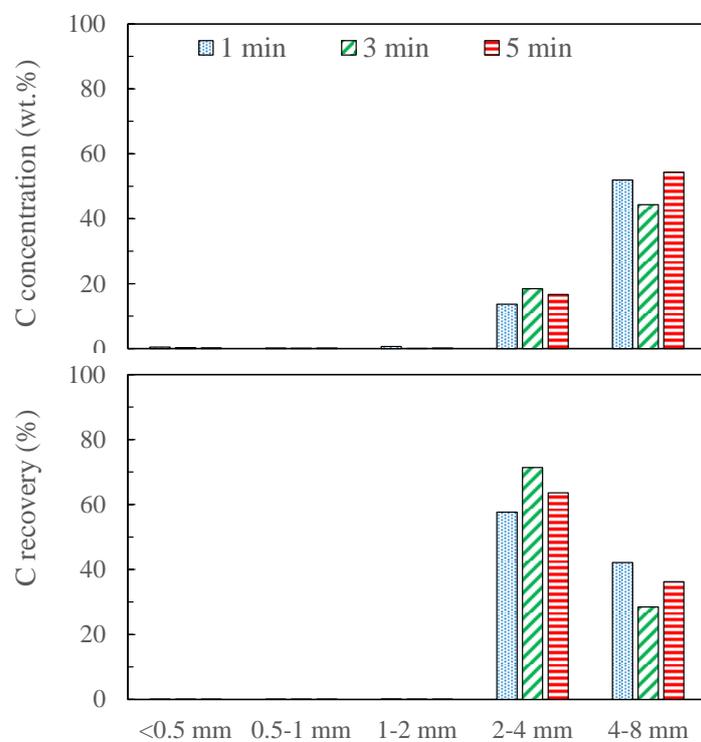


図 5.152. インテンシブミキサー二次粉砕における炭素（樹脂成分）の挙動

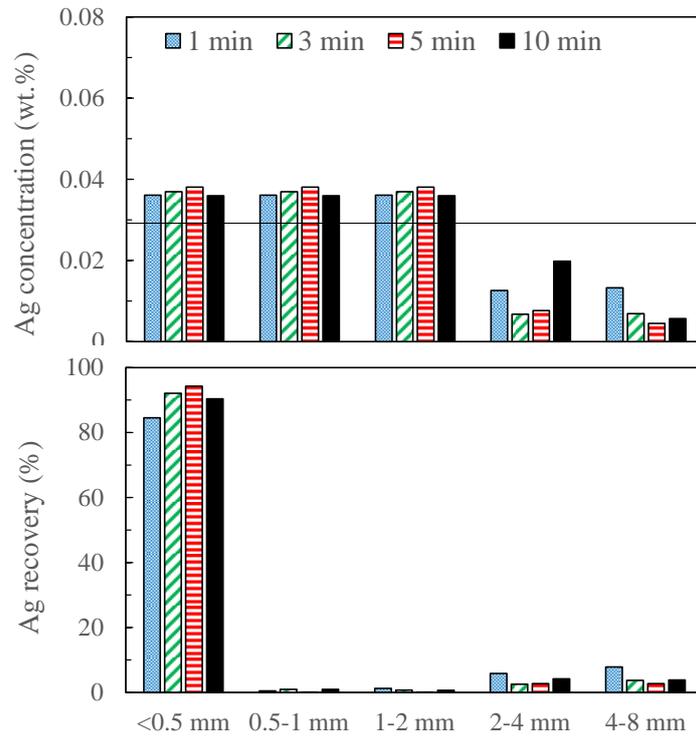


図 5.153. 振動ミル二次粉砕における銀の挙動

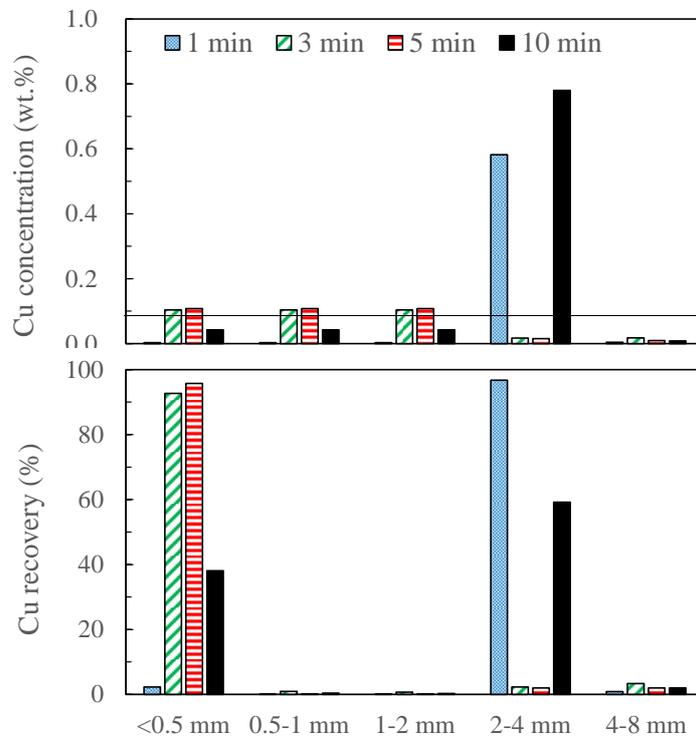


図 5.154. 振動ミル二次粉砕における銅の挙動

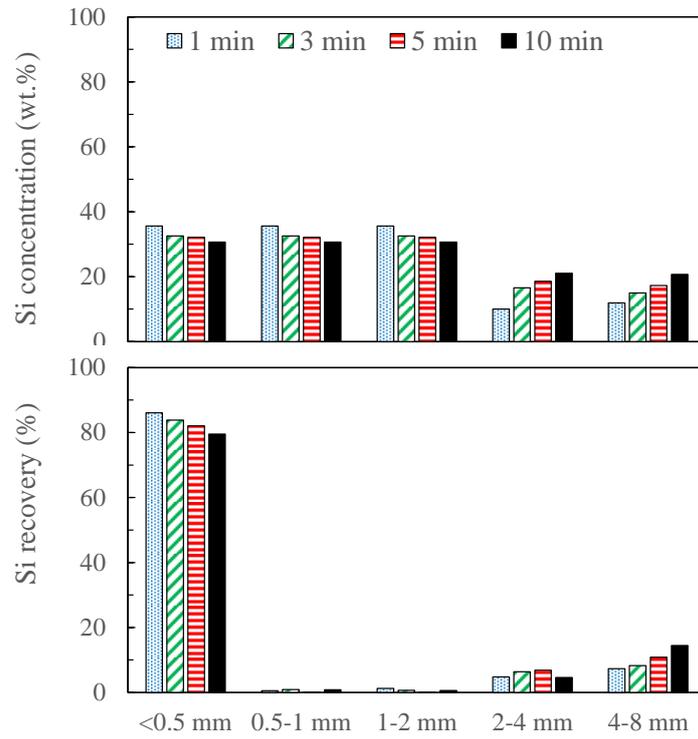


図 5.155. 振動ミル二次粉碎におけるケイ素の挙動

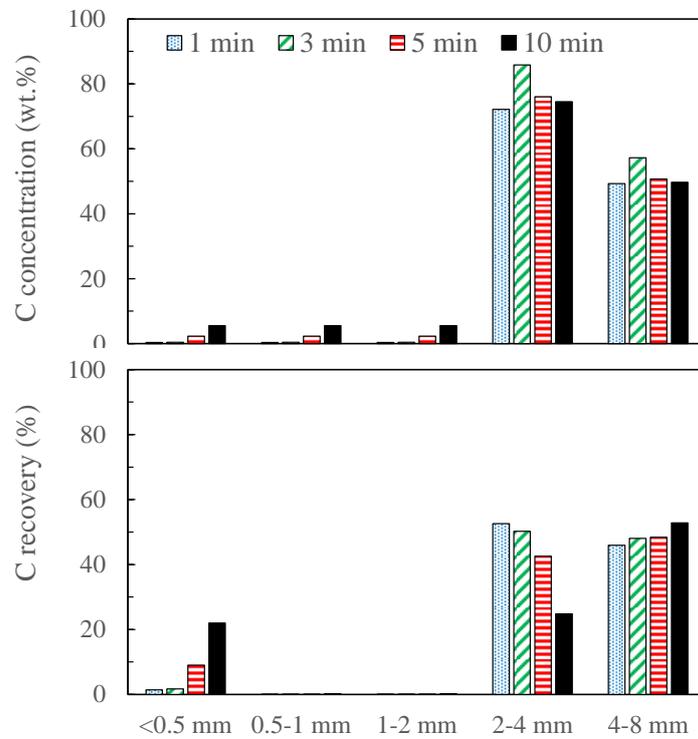


図 5.156. 振動ミル二次粉碎における炭素（樹脂成分）の挙動

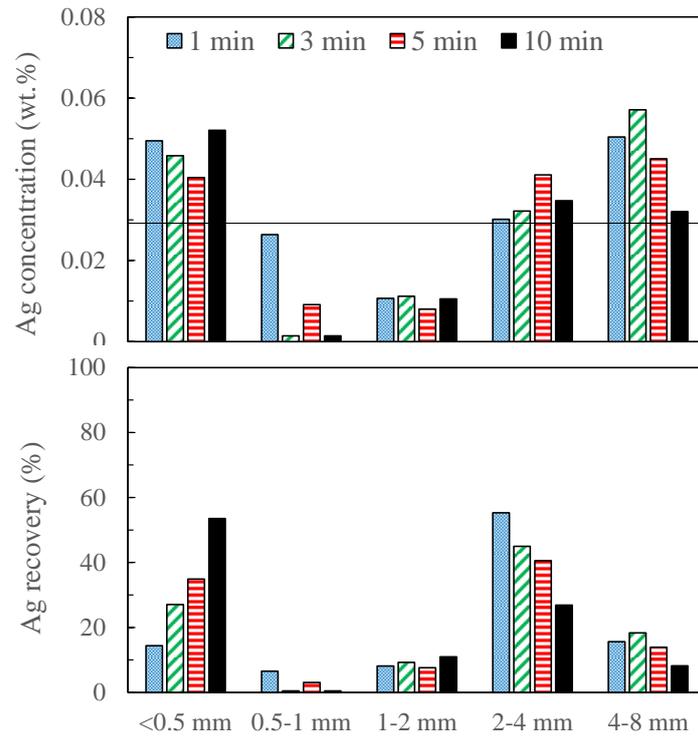


図 5.157. アトライタ二次粉碎における銀の挙動

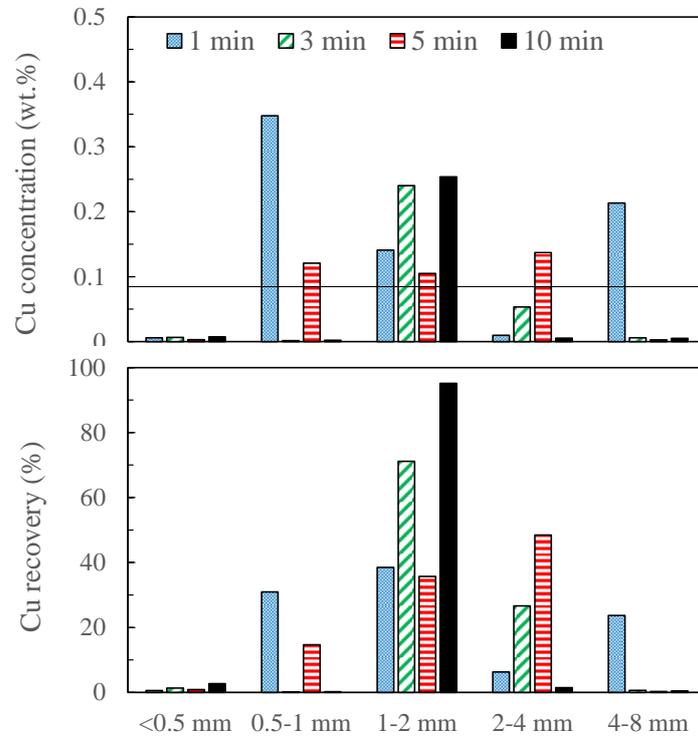


図 5.158. アトライタ二次粉碎における銅の挙動

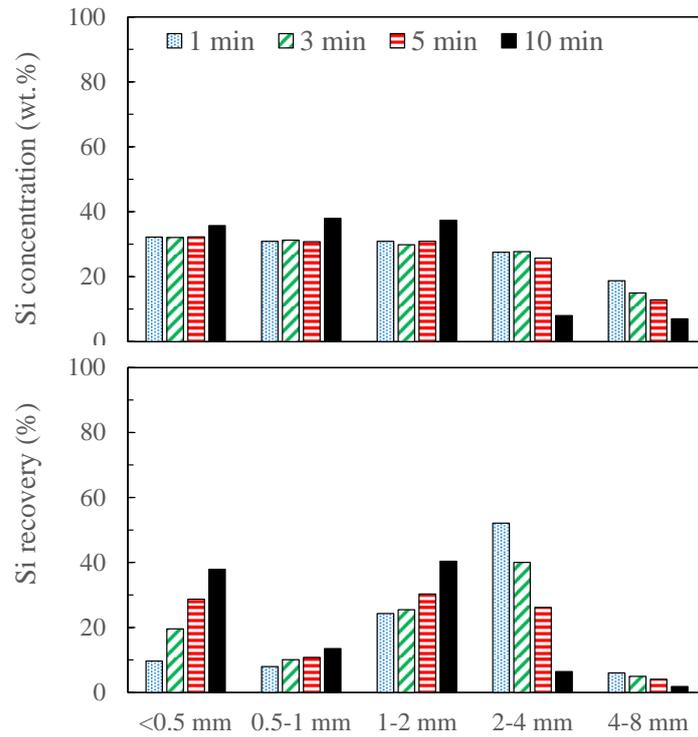


図 5.159. アトライタ二次粉砕におけるケイ素の挙動

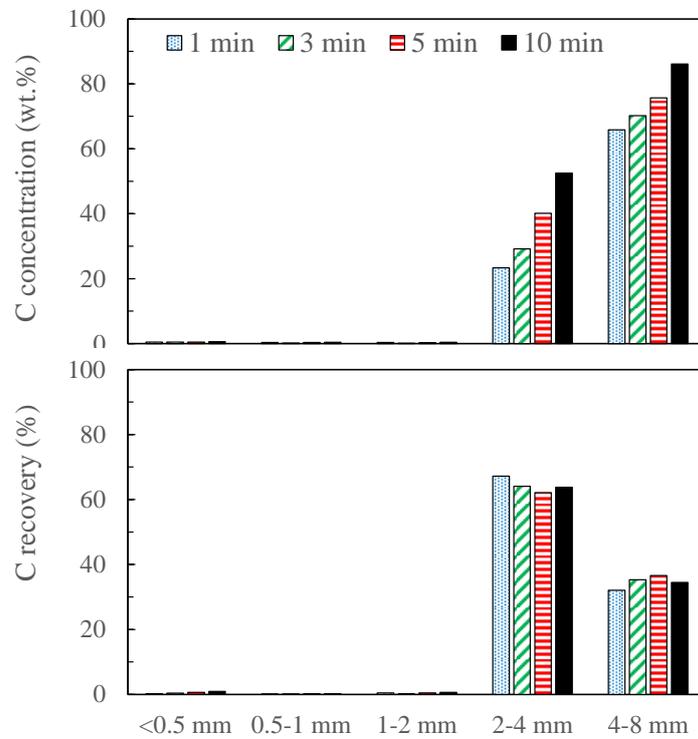


図 5.160. アトライタ二次粉砕における炭素（樹脂成分）の挙動

カバーガラスを分離せずに粉砕処理を行った場合、条件によっては二次粉砕で Ag を小粒径粒群に移行させることができるものの、同時にガラスの微細化も生じるために大きな濃縮効果が得られないという課題がある。ここでは、ホットナイフ分離法[®]で分離したセルシート粉砕物に対して二次粉砕の適用を試みた。具体的には、株式会社浜田の実プロセスで得られた 3 種の太陽光パネルセルシート粉砕物の 20mesh（目開き 0.87 mm）篩上と篩下に対し、早稲田大学にて前出の振動ミルおよびアトライタ（粉砕メディアあり）を用い、種々の条件にて二次粉砕実験を実施した。

振動ミルの結果を図 5.161 から図 5.163 に示す。二次粉砕では、金属の剥離や微粒化が主体で、樹脂自体の粉砕が大幅に進行することはない。篩上は樹脂成分が多いため、SH04c の 5 分間処理では 0.5mm 以下の粒群が 20%となったものの、全体的には粒度分布が大きく変化することにはなかった。Ag および Si が樹脂から剥離し、バスバー由来の銅粒子が微粒化されることで、0.5 mm 以下の粒群には金属が高濃度で濃縮される結果となった。一方、篩下を対象とする振動ミル二次粉砕では微粒化が顕著に現れている。ただし、粉砕時間を 5 分とした場合では、いずれのサンプルにおいても小粒径粒群の増加とともに、0.5 mm 以上の大粒径側の増加も認められた。これは、振動ミルで長時間処理すると、微粒子同士が凝集して 2 次粒子を形成することによるものである。金属の濃縮効果は表 5.83 と表 5.84 に示すとおり、Ag は篩上の二次粉砕では 0.5mm 以下、篩下の二次粉砕では 0.063mm 以下の粒群に濃縮される傾向が認められたが、長時間処理では、場合によっては凝集のために分離効果は低下する結果となった。振動ミル二次粉砕は、特に篩上のサンプルに対し、樹枝状に残った Ag を剥離させ、小粒径（0.5 mm 以下）に濃縮されるような条件で実施することが効果的である。なお、アトライタによる二次粉砕は、図 5.164 から図 5.166 および表 5.85 から表 5.86 に示すようにサンプルによっては若干の微細化が認められるものの、粒度分布および金属濃縮に対して顕著な効果は得られなかった。このように、物理的な二次粉砕による金属回収では振動ミルによる樹脂からの銀の剥離の効果が高いといえる。金属回収フローの概略を図 5.167 に示す。

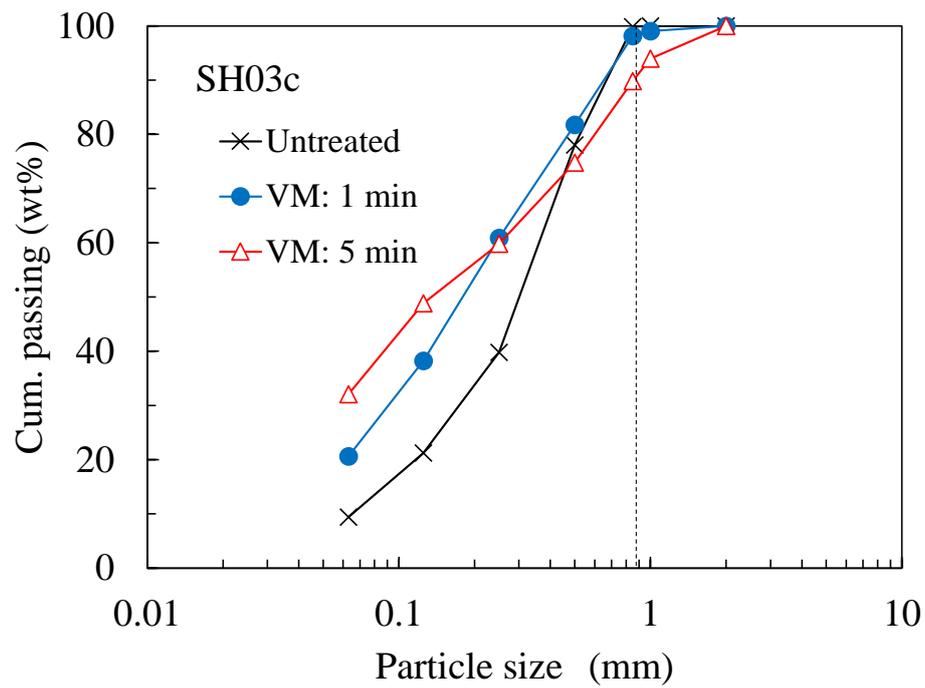
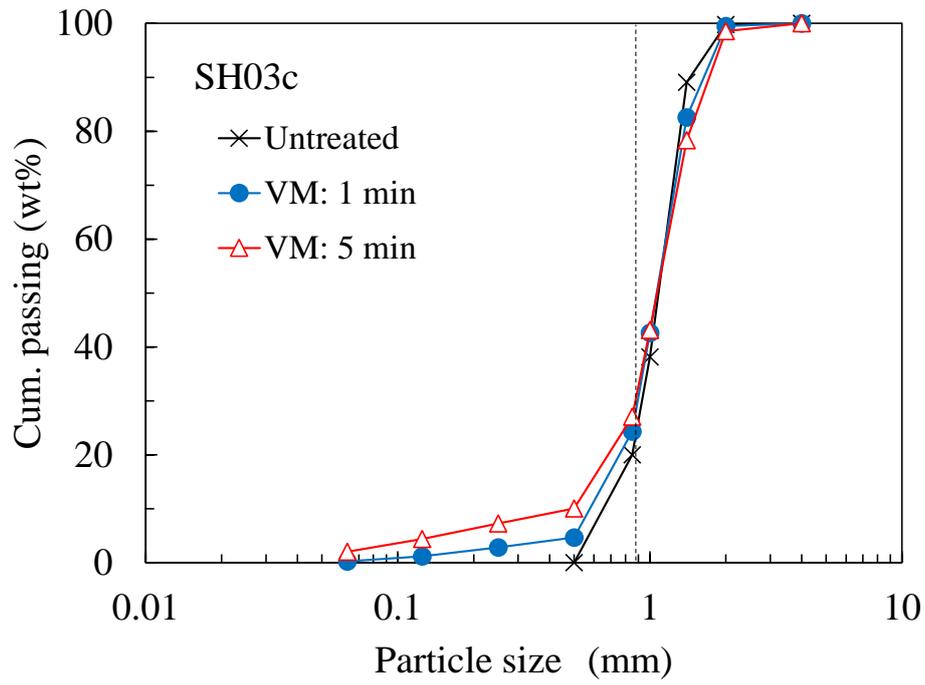


図 5.161. 実プロセスで得られたセルシートの振動ミル二次粉砕 (SH03c)

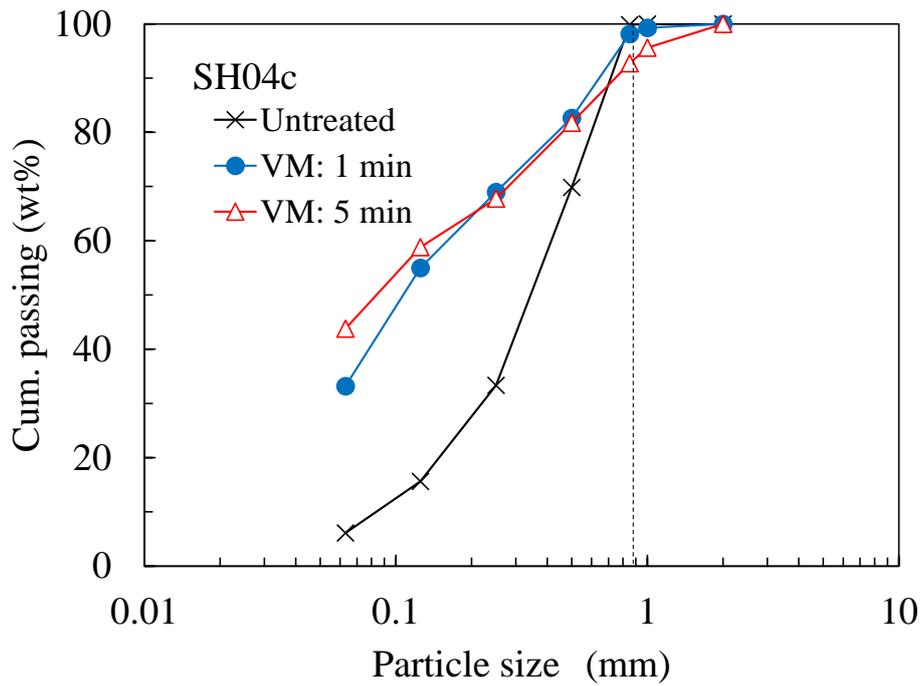
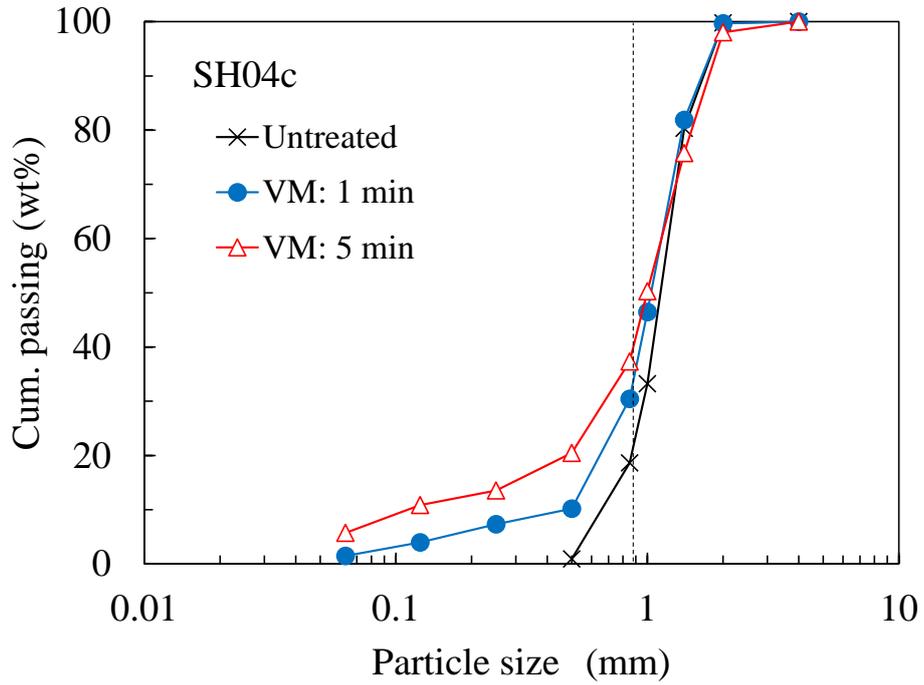


図 5.162. 実プロセスで得られたセルシートの振動ミル二次粉砕 (SH04c)

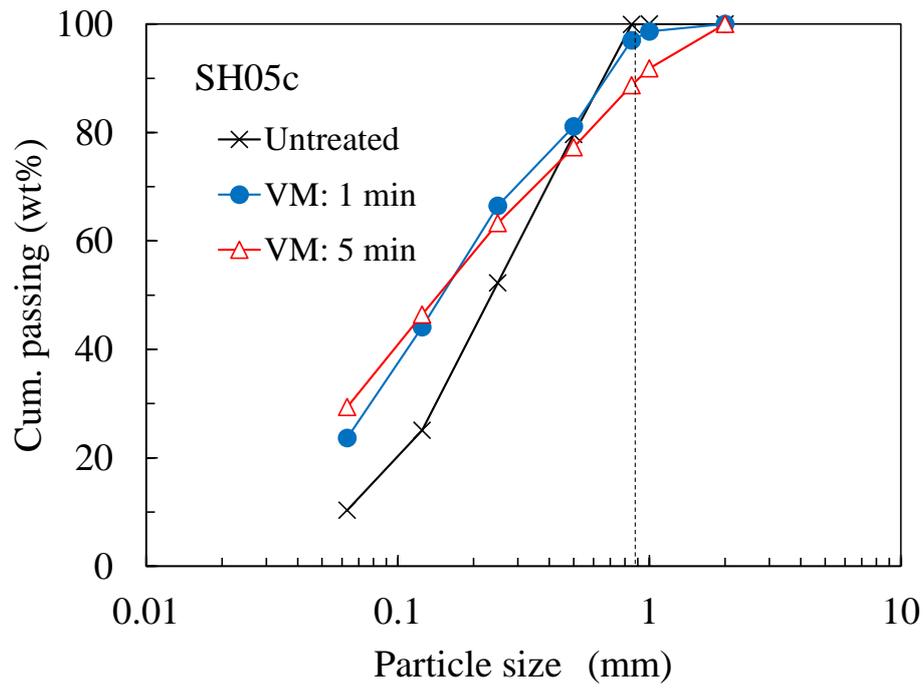
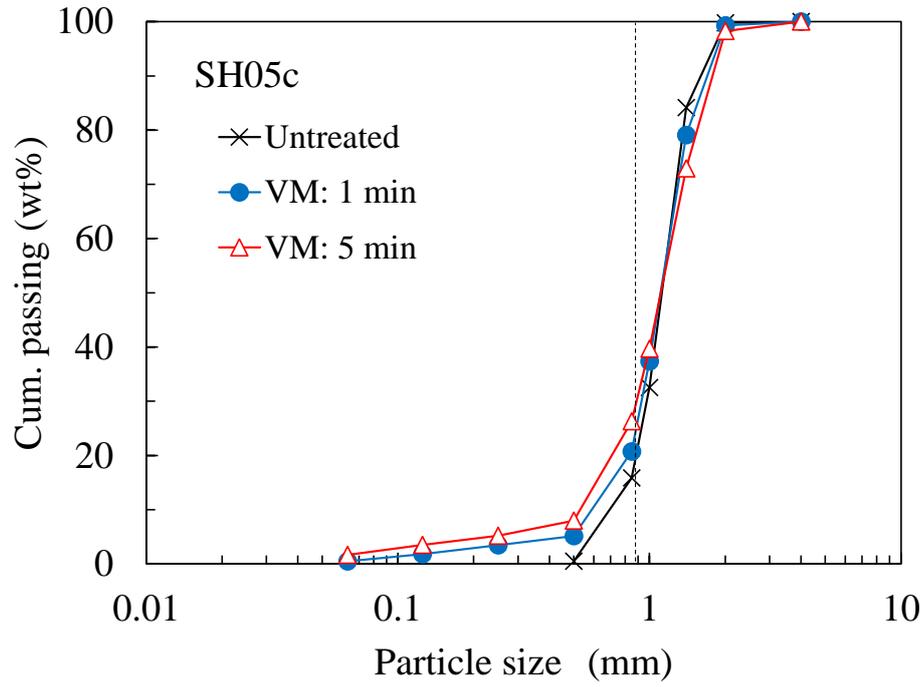


図 5.163. 実プロセスで得られたセルシートの振動ミル二次粉砕 (SH05c)

表 5.83. 振動ミル二次粉砕における金属分析結果 (SH03c)

SH03c		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.04	0.24	4.8	53.5	4.5	36.9
	1.0-1.4mm	0.05	4.80	3.4	27.7	4.3	59.8
	0.5-1.0mm	0.08	7.06	3.6	35.0	3.4	50.9
Under #20	0.5-1.0mm	0.19	3.74	3.8	70.2	2.5	19.6
	0.25-0.5mm	0.42	0.62	3.1	80.2	1.5	14.2
	0.125-0.25mm	0.57	0.49	3.9	80.3	3.3	11.4
	0.063-0.125mm	1.32	0.98	6.5	68.9	6.3	16.0
	<0.063	0.85	2.06	9.9	45.6	10.3	31.3

SH03c VM: 1 min		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.01	0.18	3.9	9.2	2.5	84.3
	1.0-1.4mm	0.02	0.68	3.5	11.9	2.7	81.2
	0.85-1.0mm	0.01	0.14	3.7	10.4	3.7	82.0
	0.5-0.85mm	0.03	0.85	4.8	16.7	2.2	75.5
	<0.5mm	0.55	1.13	3.6	85.1	2.9	6.6
Under #20	0.5-1.0mm	0.06	0.83	5.9	26.1	5.9	61.2
	0.25-0.5mm	0.10	1.13	6.5	39.6	5.5	47.1
	0.125-0.25mm	0.38	0.61	5.8	52.2	4.5	36.5
	0.063-0.125mm	1.12	0.48	4.3	64.6	3.4	26.1
	<0.063	1.05	0.85	5.7	72.1	3.8	16.5

SH03c VM: 5 min		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.01	0.47	4.5	22.1	2.4	70.4
	1.0-1.4mm	0.02	0.56	4.4	20.1	4.3	70.7
	0.85-1.0mm	0.02	0.53	4.1	17.9	3.4	74.0
	0.5-0.85mm	0.02	4.90	4.2	15.7	3.8	71.4
	<0.5mm	0.45	13.11	3.8	56.2	4.6	21.8
Under #20	0.5-1.0mm	0.13	0.79	6.4	42.9	4.6	45.2
	0.25-0.5mm	0.16	1.99	5.9	38.7	4.8	48.5
	0.125-0.25mm	0.17	1.61	5.1	43.4	5.0	44.8
	0.063-0.125mm	0.61	0.44	3.4	67.0	3.1	25.5
	<0.063	0.76	0.55	5.5	74.4	2.7	16.1

表 5.84. 振動ミル二次粉砕における金属分析結果 (SH04c)

SH04c		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.02	0.65	4.9	17.8	1.8	74.8
	1.0-1.4mm	0.04	3.80	3.8	12.1	3.6	76.6
	0.85-1.0mm	0.13	7.16	3.7	31.1	3.7	54.2
	0.5-0.85mm	0.16	2.87	3.6	48.7	2.4	42.4
Under #20	0.5-1.0mm	0.06	1.64	7.2	15.5	2.2	73.5
	0.25-0.5mm	0.11	0.92	9.5	14.6	3.9	71.0
	0.125-0.25mm	0.89	0.63	10.3	37.5	4.0	46.7
	0.063-0.125mm	3.28	1.02	6.5	37.1	6.9	45.2
	<0.063	0.92	2.15	8.5	26.8	7.7	53.9

SH04c VM: 1 min		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.01	0.36	7.3	16.4	1.6	74.4
	1.0-1.4mm	0.01	0.54	7.1	13.9	4.0	74.4
	0.85-1.0mm	0.04	1.62	4.7	17.1	4.0	72.5
	0.5-0.85mm	0.02	3.72	6.4	19.3	4.2	66.4
	<0.5mm	0.33	1.02	4.7	77.9	2.9	13.1
Under #20	0.5-1.0mm	0.09	1.03	3.6	20.2	3.0	72.1
	0.25-0.5mm	0.11	1.57	4.1	27.0	4.8	62.4
	0.125-0.25mm	0.46	0.64	4.8	38.6	3.6	52.0
	0.063-0.125mm	2.61	0.38	6.4	63.8	3.4	23.4
	<0.063	1.45	0.55	4.6	69.2	3.8	20.3

SH04c VM: 5 min		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.02	0.87	8.5	31.6	2.5	56.5
	1.0-1.4mm	0.02	0.91	6.2	26.4	2.2	64.2
	0.85-1.0mm	0.04	1.56	4.0	25.1	5.3	63.9
	0.5-0.85mm	0.03	1.03	3.4	22.3	3.8	69.4
	<0.5mm	0.04	6.31	4.1	22.4	5.0	62.1
Under #20	0.5-1.0mm	-	-	-	-	-	-
	0.25-0.5mm	0.24	0.59	4.1	40.6	3.8	50.6
	0.125-0.25mm	0.25	1.33	3.5	37.4	4.5	53.0
	0.063-0.125mm	0.44	2.40	4.0	41.3	4.9	47.0
	<0.063	1.66	0.96	5.7	72.3	4.1	15.3

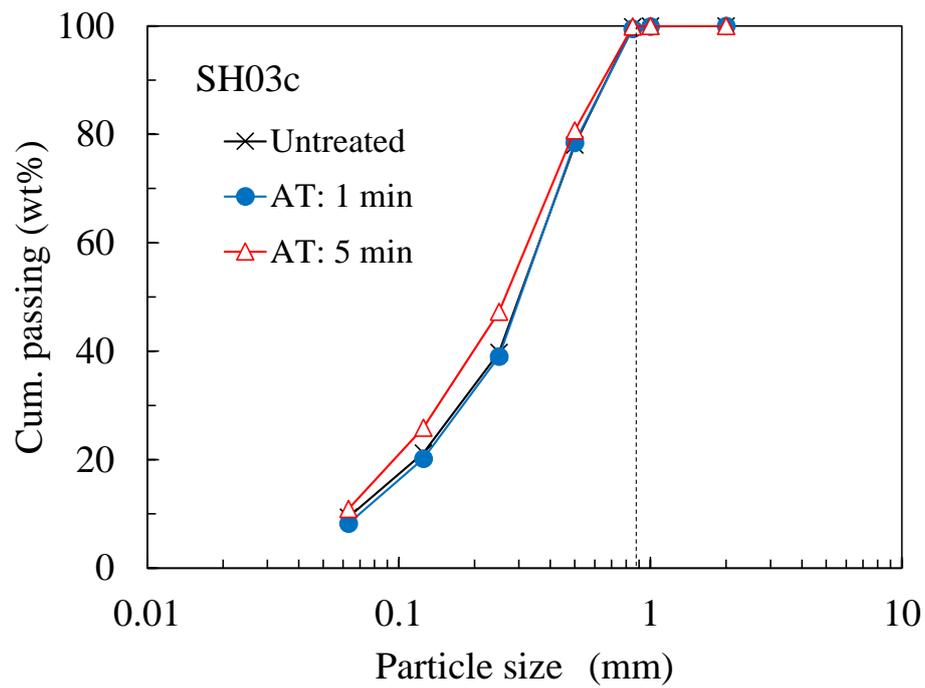
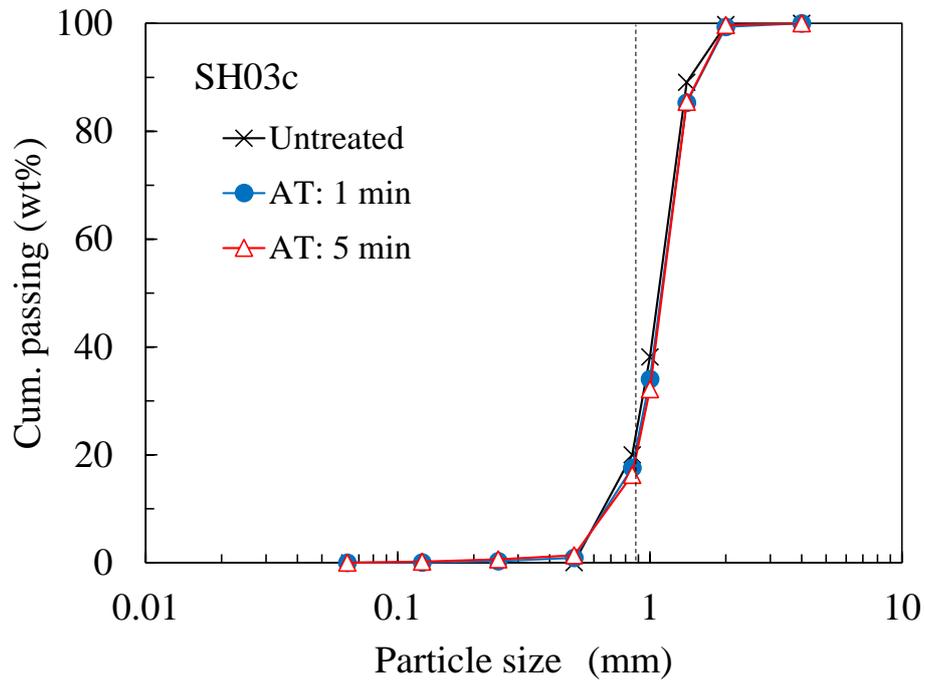


図 5.164. 実プロセスで得られたセルシートのアトライタ二次粉砕 (SH03c)

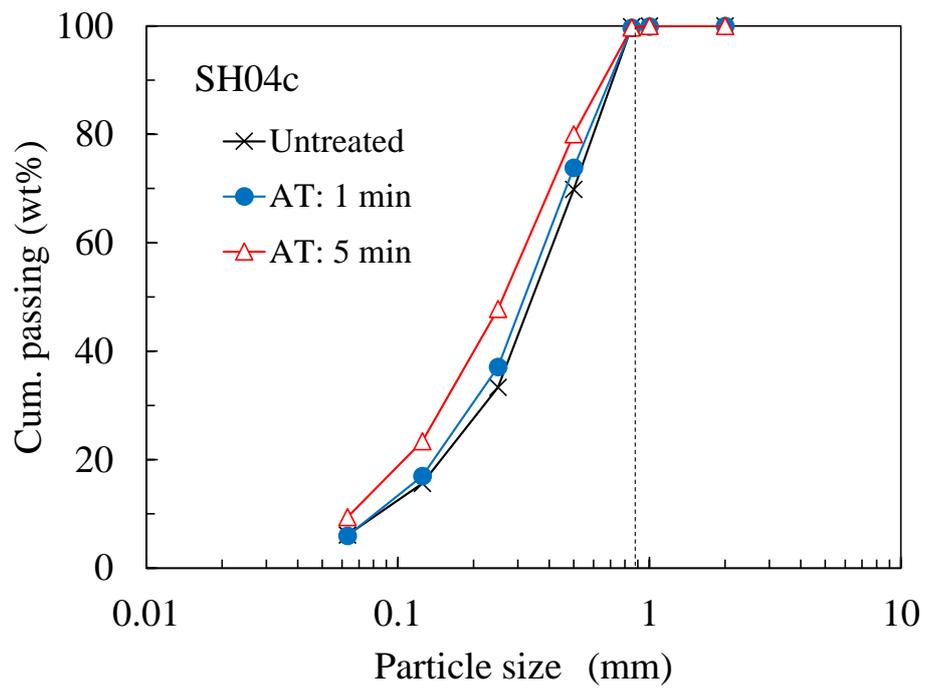
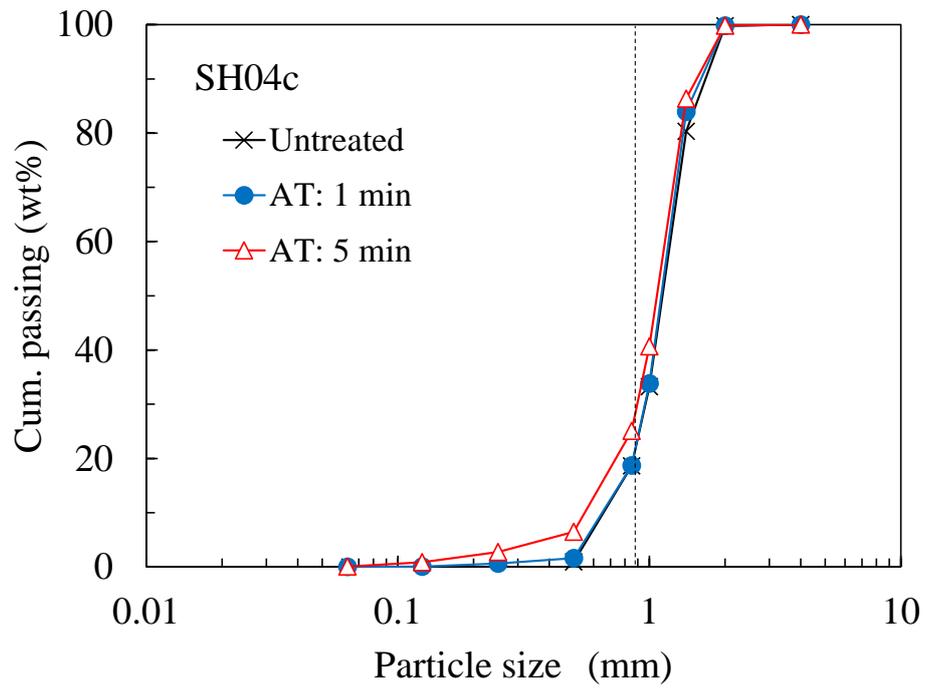


図 5.165. 実プロセスで得られたセルシートのアトライタ二次粉砕 (SH04c)

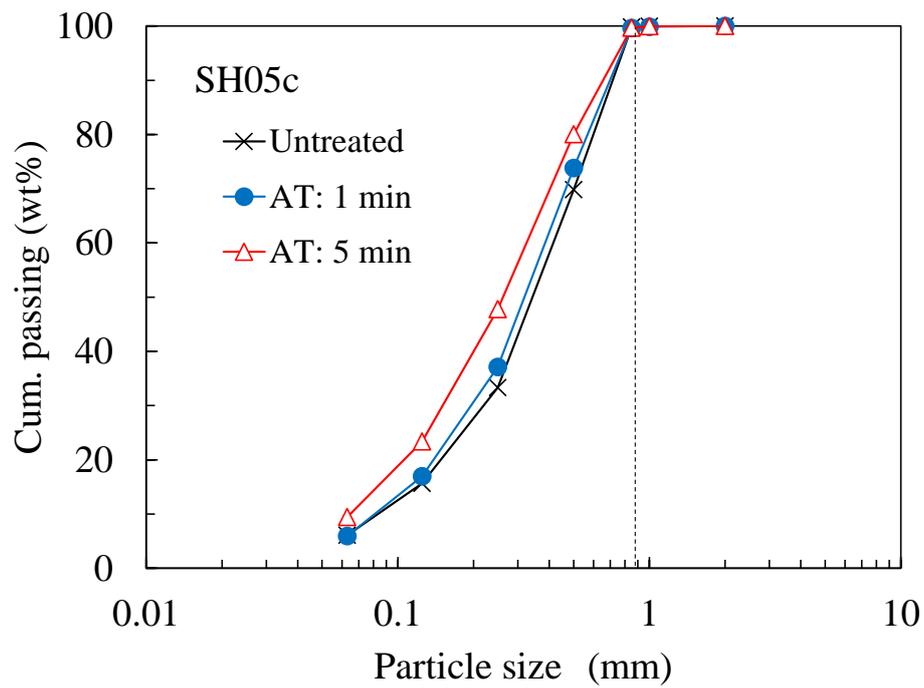
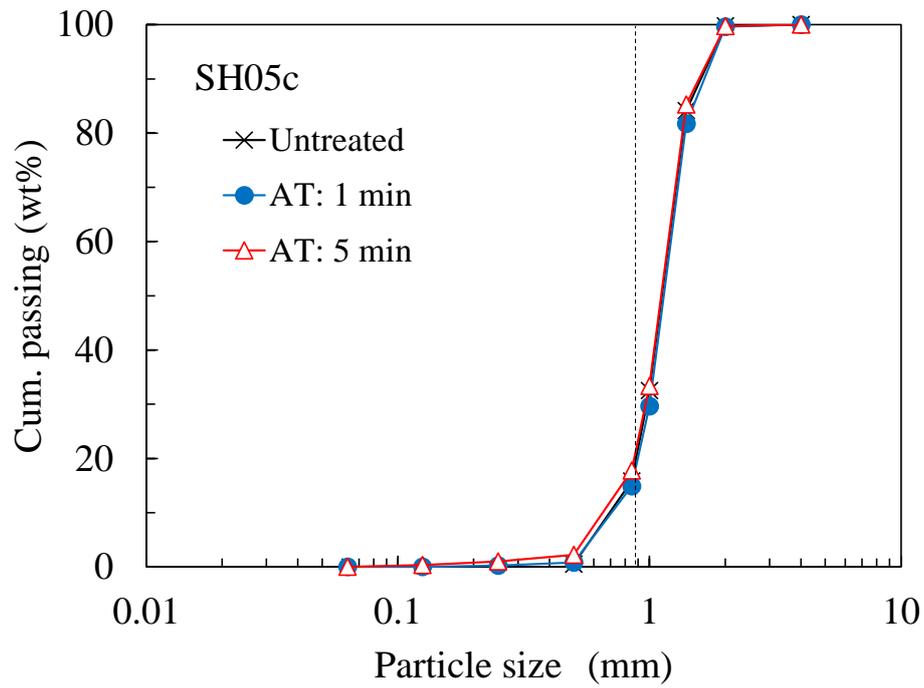


図 5.166. 実プロセスで得られたセルシートのアトライタ二次粉砕 (SH05c)

表 5.85. アトライタ二次粉碎における金属分析結果 (SH03c)

SH03c		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.04	0.24	4.8	53.5	4.5	36.9
	1.0-1.4mm	0.05	4.80	3.4	27.7	4.3	59.8
	0.5-1.0mm	0.08	7.06	3.6	35.0	3.4	50.9
Under #20	0.5-1.0mm	0.19	3.74	3.8	70.2	2.5	19.6
	0.25-0.5mm	0.42	0.62	3.1	80.2	1.5	14.2
	0.125-0.25mm	0.57	0.49	3.9	80.3	3.3	11.4
	0.063-0.125mm	1.32	0.98	6.5	68.9	6.3	16.0
	<0.063	0.85	2.06	9.9	45.6	10.3	31.3

SH03c AT: 1 min		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.06	0.98	2.0	22.3	2.7	72.0
	1.0-1.4mm	0.06	4.43	2.1	16.4	2.5	74.5
	0.85-1.0mm	0.08	3.19	2.6	27.8	2.8	63.6
	0.5-0.85mm	0.06	6.29	2.3	20.1	3.2	68.1
Under #20	0.5-1.0mm	0.19	2.45	3.0	51.5	2.2	40.7
	0.25-0.5mm	0.83	0.43	3.0	67.6	2.3	25.9
	0.125-0.25mm	0.43	0.65	2.7	70.8	1.2	24.1
	0.063-0.125mm	-	-	-	-	-	-
	<0.063	1.17	1.28	7.7	38.3	7.2	44.4

SH03c AT: 5 min		XRF測定 [wt.%]					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.05	0.66	2.2	25.8	3.0	68.3
	1.0-1.4mm	0.07	4.57	1.9	14.9	3.1	75.4
	0.85-1.0mm	0.08	5.59	2.3	16.8	3.2	72.1
	0.5-0.85mm	0.08	3.76	2.4	22.7	3.2	68.0
Under #20	0.5-1.0mm	0.14	3.78	3.0	41.2	2.7	49.2
	0.25-0.5mm	0.36	0.94	2.8	67.3	1.8	26.8
	0.125-0.25mm	0.89	0.38	2.8	66.2	1.8	27.9
	0.063-0.125mm	1.45	0.51	5.7	42.0	4.7	45.6
	<0.063	0.99	1.15	7.0	48.9	6.5	35.5

表 5.86. アトライタ二次粉碎における金属分析結果 (SH04c)

SH04c		XRF測定					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.02	0.65	4.9	17.8	1.8	74.8
	1.0-1.4mm	0.04	3.80	3.8	12.1	3.6	76.6
	0.85-1.0mm	0.13	7.16	3.7	31.1	3.7	54.2
	0.5-0.85mm	0.16	2.87	3.6	48.7	2.4	42.4
Under #20	0.5-1.0mm	0.06	1.64	7.2	15.5	2.2	73.5
	0.25-0.5mm	0.11	0.92	9.5	14.6	3.9	71.0
	0.125-0.25mm	0.89	0.63	10.3	37.5	4.0	46.7
	0.063-0.125mm	3.28	1.02	6.5	37.1	6.9	45.2
	<0.063	0.92	2.15	8.5	26.8	7.7	53.9

SH04c AT: 1 min		XRF測定					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.01	1.48	5.9	23.1	2.8	66.6
	1.0-1.4mm	0.15	9.57	2.8	10.5	4.3	72.6
	0.85-1.0mm	0.15	13.55	3.0	27.7	4.5	51.2
	0.5-0.85mm	0.21	4.84	2.9	44.0	2.7	45.4
Under #20	0.5-1.0mm	0.13	2.63	2.8	67.0	1.8	25.6
	0.25-0.5mm	0.40	0.95	2.9	67.7	1.6	26.5
	0.125-0.25mm	2.76	0.50	4.0	62.5	4.7	25.6
	0.063-0.125mm	5.49	0.72	4.0	44.3	8.3	37.2
	<0.063	0.96	1.99	9.0	41.9	7.4	38.8

SH04c AT: 5 min		XRF測定					
		Ag	Cu	Al	Si	Others	LE
Over #20	1.4-2.0mm	0.01	2.49	4.4	14.8	2.3	75.9
	1.0-1.4mm	0.12	14.29	2.9	9.5	4.4	68.8
	0.85-1.0mm	0.17	17.76	3.1	18.6	4.9	55.5
	0.5-0.85mm	0.19	7.04	2.9	42.9	2.9	44.1
Under #20	0.5-1.0mm	0.09	3.95	4.2	44.9	3.1	43.7
	0.25-0.5mm	0.35	1.16	3.5	68.8	1.8	24.3
	0.125-0.25mm	1.99	0.32	3.1	66.5	3.1	24.9
	0.063-0.125mm	4.01	0.49	2.8	57.8	5.7	29.3
	<0.063	0.82	1.41	7.4	53.6	5.8	30.9

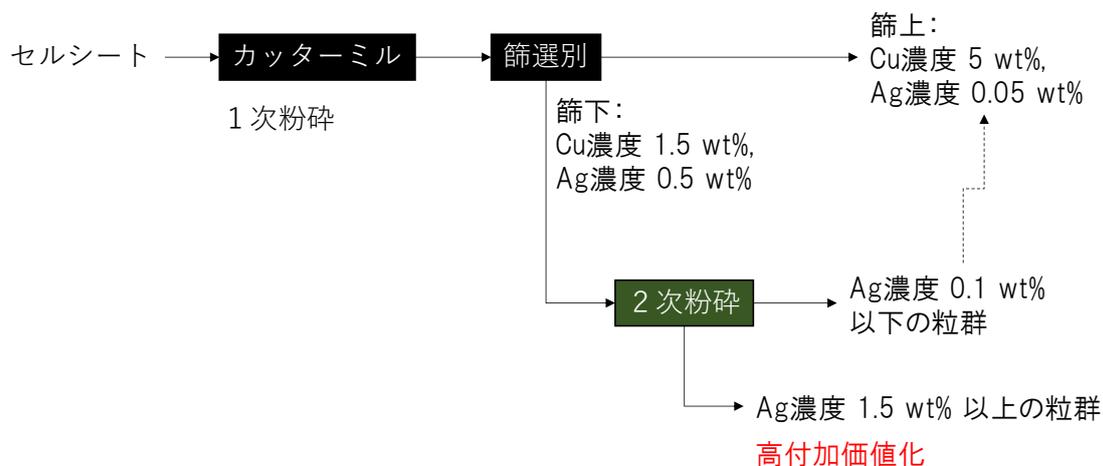


図 5.167. セルシートからの金属回収の検討

電気パルス処理で Ag が微粒子として回収できることが示されたが、半分以上の Ag はセルシートに残存している結果となった。パルス処理後のセルシートの物理粉碎が有効であることが示唆されたので、ここでは、電気パルス処理とオリエントミルの組み合わせによる各成分の挙動の詳細について検討した。電気パルス処理で得られた量率図を図 5.168 に示す。微粒子として分離・回収される重量は全体の 6%程度であり、半導体ウェハを由来とする Si が主成分であるが、プラズマ化を経て生成した Ag および Cu の微粒子が小粒径粒群に濃縮する結果となっている。表面側の銅バスバーは電気パルスの衝撃により剥離するため、分離回収は容易である。パルス処理後のセルシートは C (樹脂) が大部分を占めるが、裏面側の同バスバーおよび未分離の Si および Ag が残存している。未処理のセルシートおよび電気パルス処理後の残存セルシートに対してカッターミル (オリエントミル: 排出スクリーン 8mm) で粉碎を行った場合の量率図を図 5.169 および図 5.170 に示す。いずれの場合も、Cu はバスバーとして存在しているため、オリエントミルでは 1~4 mm 程度に裁断されるに留まり、微粉化は進行しなかった。Ag および Si については、未処理セルシートでは有意な濃縮は認められなかった。未処理のセルシートに対して、カッターミルはシートの裁断を行うが、封止材である樹脂に挟まれた Si (半導体ウェハ) や Ag (ウェハ上の細線) を分離するには至らなかったといえる。ガラス付きのセルをオリエントミルで処理した場合は、比較的比重の大きいガラスが粉碎メディアとして働くため、粒子の微細化および Ag や Si の剥離が進行するという結果が得られているが、軽いセルシートのみでは粉碎粒子同士の衝突や摩擦の影響が非常に小さいため、カッターによる裁断以上の効果は生じていなかったと結論付けられる。パルス処理後の残存セルシートでは、パルスによって樹脂層が剥離しているため、強力な粉碎・摩擦が得られなくても、Ag および Si が 0.5 mm 以下に濃縮されるという結果が得られた。電気パルスとオリエントミルを組み合わせた処理における Ag の回収を炭素 (樹脂) 回収率と比較すると、2 mm までの粒群の積算 (カットサイズ)

で 80%以上の Ag が回収できるのに対して C の回収率は 20%以下であることから、樹脂と Ag はサイズによる分離が可能である (図 5.171)。カットサイズ 2 mm とした場合、回収物中の炭素濃度は 40 wt%となる。オリエントミルによって、残存セルシートはチップ状に裁断・粉砕され、樹脂の 80%以上は 2 mm 以上のサイズで存在し、Ag と Si はともに樹脂から剥離して微細な粒子となる。したがって、図 5.172 (上段) のように、Ag と Si の回収率の比較に関しては、全体的に Ag の回収率の方が高いものの、顕著な分離効果は現れていなかった。なお、電気パルス処理の段階で回収された微粒子では、カットサイズを大きくしていくと Si の濃度が上昇したが、残存セルシートの粉砕物が加わる範囲では、樹脂が混入するのでカットサイズを大きくするとケイ素濃度は低下する結果となった。電気パルス処理とオリエントミル粉砕を組み合わせた銀および銅の回収フローの検討結果を図 5.173 に示す。

なお、上述の実証試験 (株式会社浜田実施) では同様の仕組みのカッターミルでセルシートの粉砕を行った場合では、小粒径粒群への Ag の濃縮効果が現れている。実証試験で用いた装置は排出スクリーンが 2mm であり、細かく裁断・粉砕されるため、半導体ウェハ層の露出が進行し、ミルのチャンバー内の滞留時間も長いため、Ag や Si の剥離が生じたといえる。すなわち、高負荷で細かく裁断することによって、カッターミルでも一定の Ag の濃縮は可能であるが、電気パルス処理後の残存セルシートは、8 mm の排出スクリーンによる粗い裁断 (低負荷) でも良好な Ag の濃縮を達成できている。

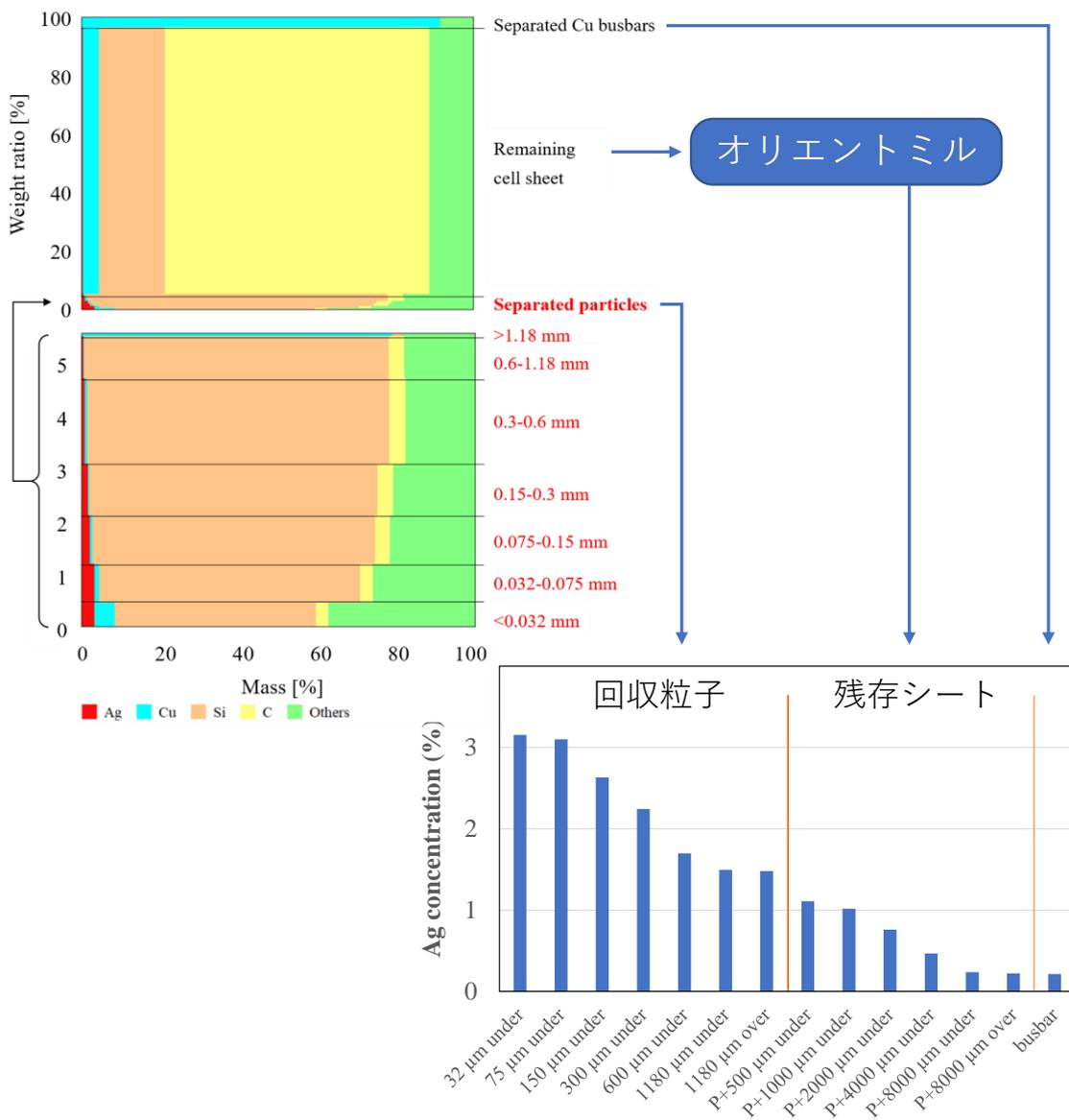


図 5.168. 電気パルス処理における量率図と Ag 濃度の比較

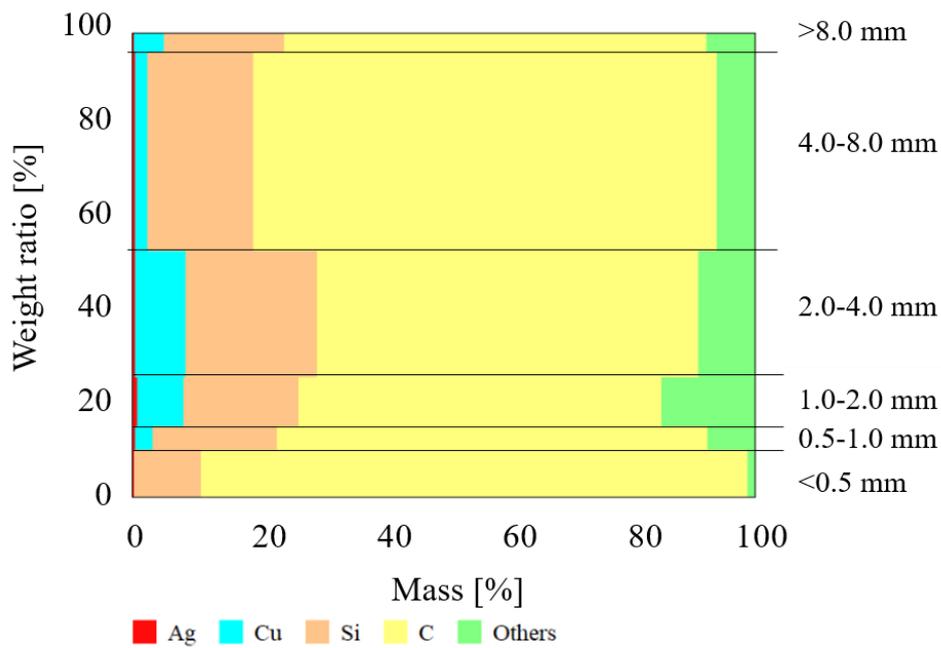


図 5.169. 未処理セルシートのオリエンタミル粉砕で得られた量率図

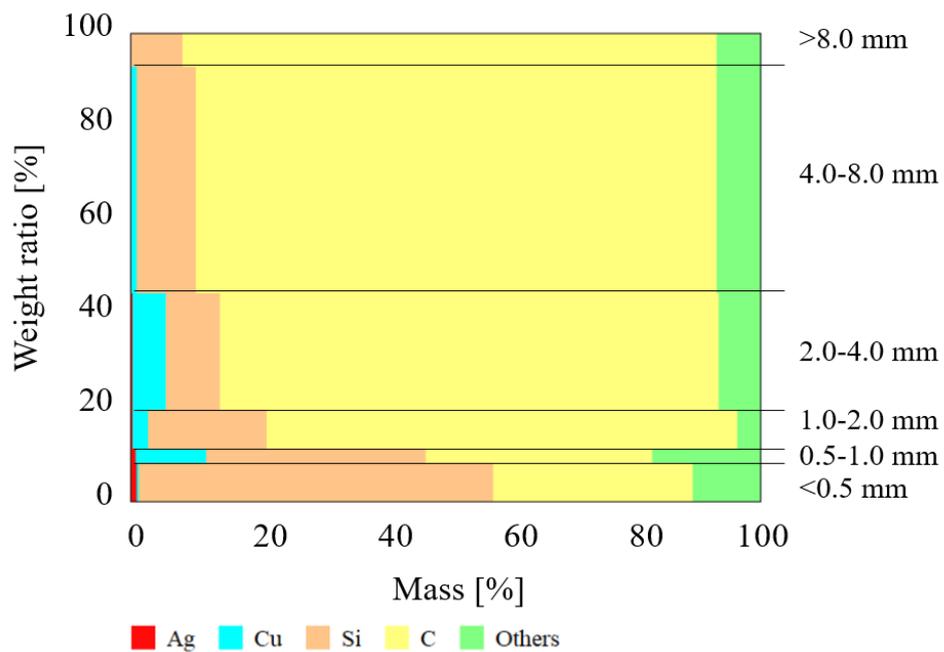


図 5.170. 電気パルス処理セルシートのオリエンタミル粉砕で得られた量率図

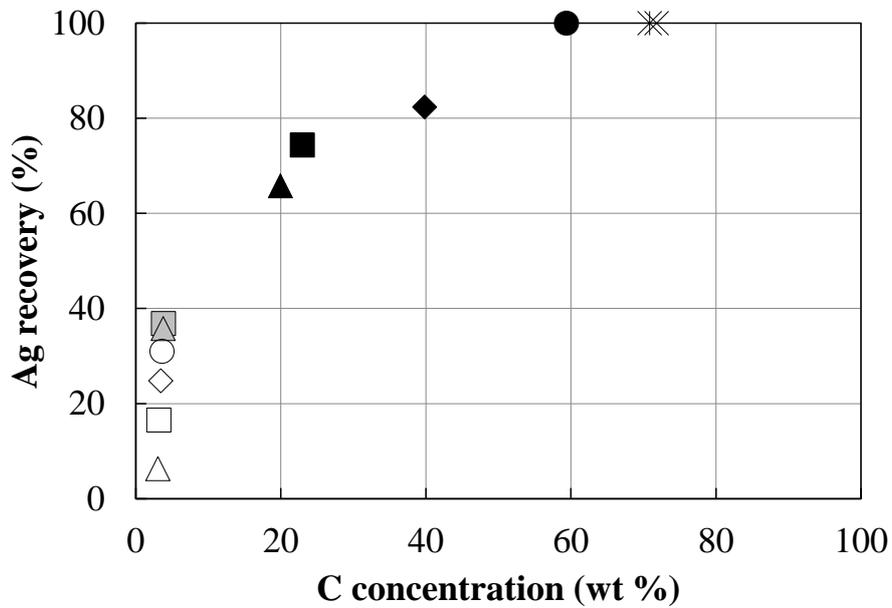
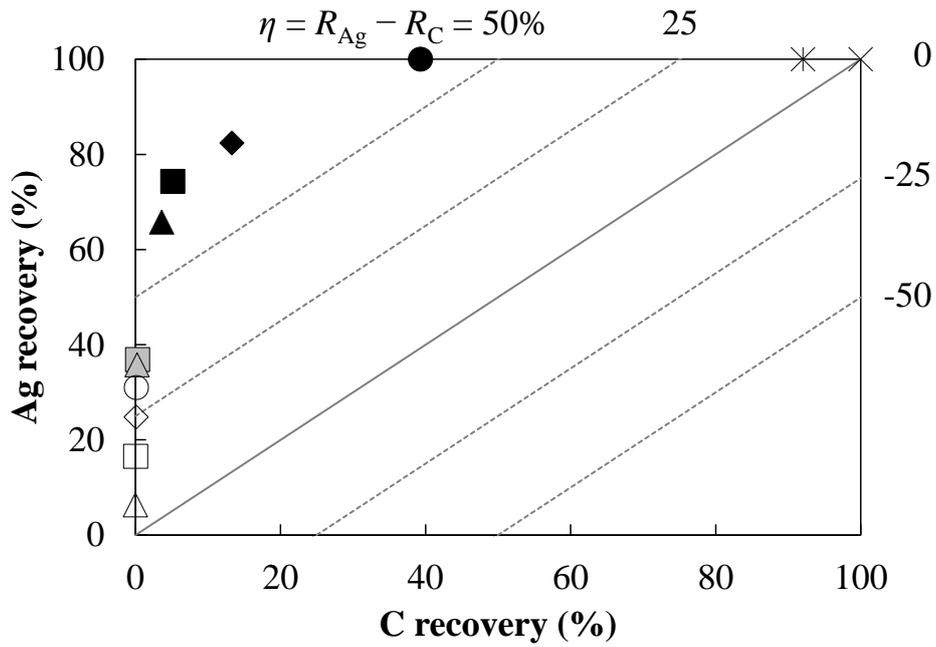
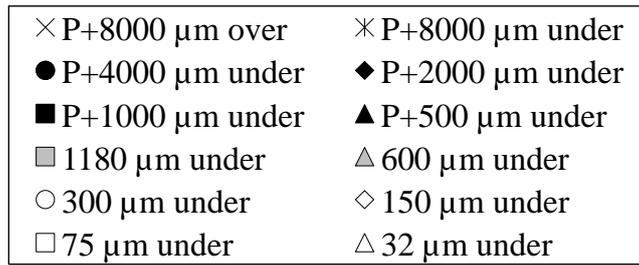


図 5.171. 炭素に対する銀回収率の比較

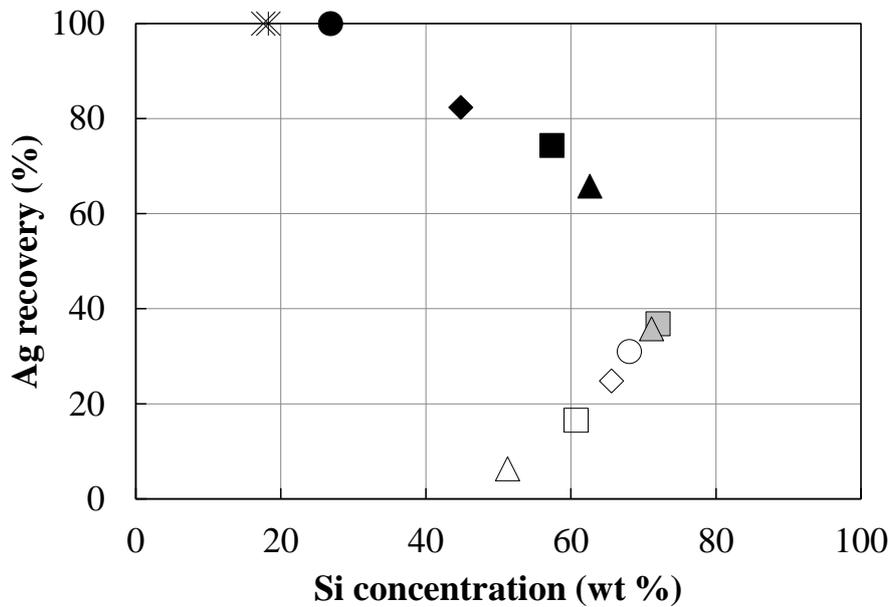
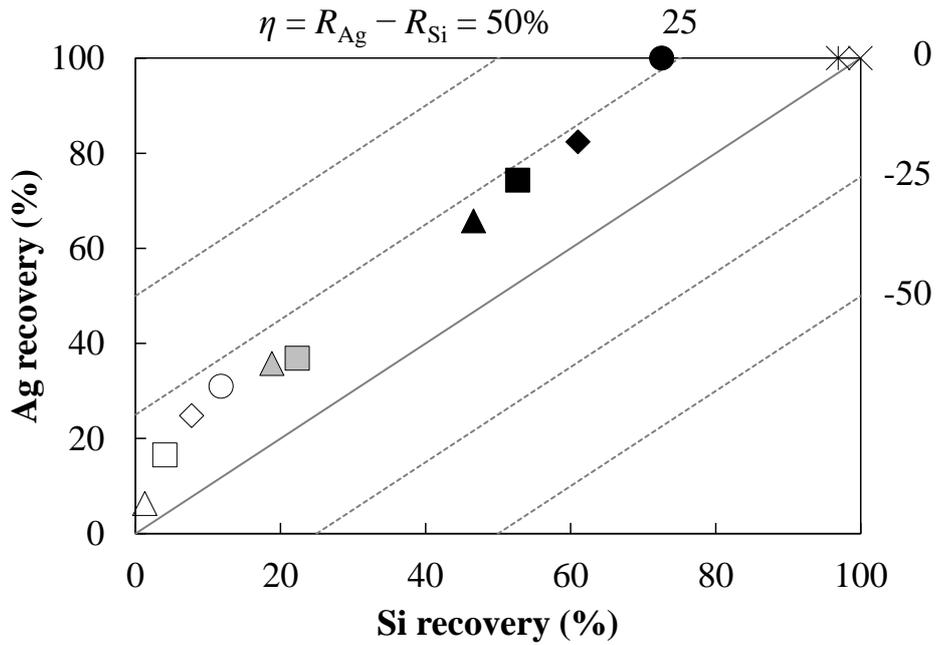
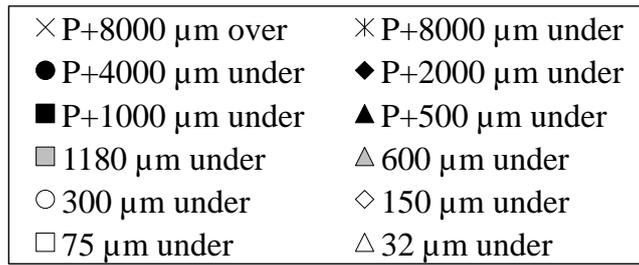


図 5.172. ケイ素に対する銀回収率の比較

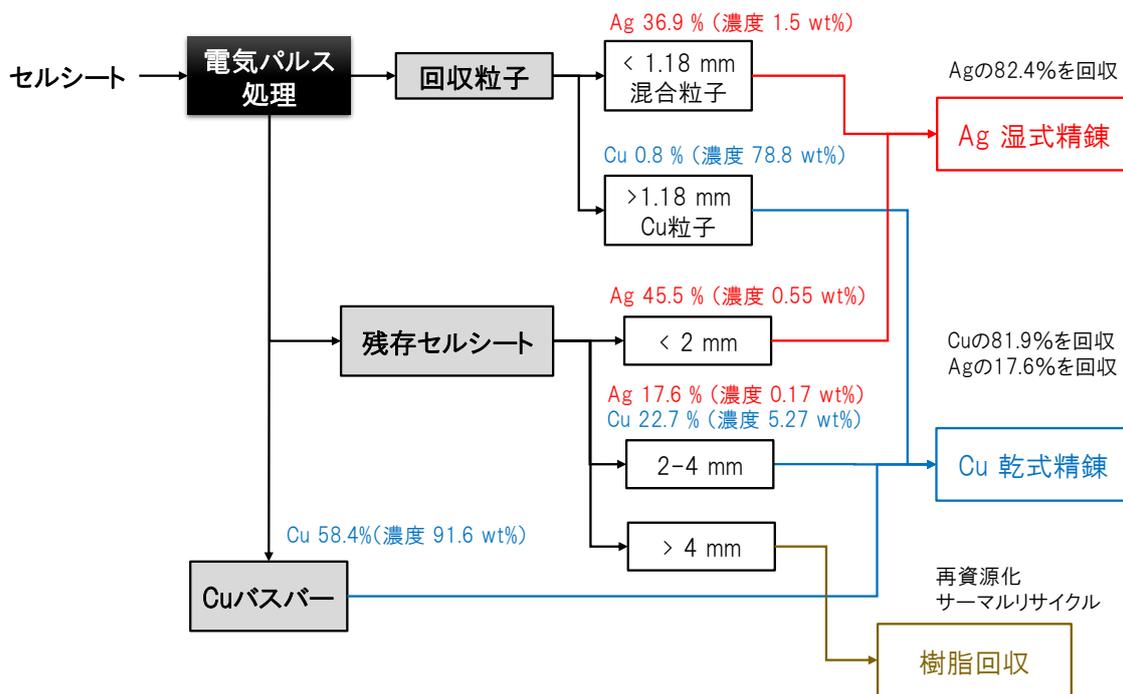


図 5.173. 電気パルス処理・オリエントミル粉砕による Ag・Cu 回収のフロー

(6) カバーガラスの成分分析の実施

① 定性分析

ホットナイフ分離法®にて太陽光パネルから分離されたカバーガラスに対し、蛍光 X 線装置 (XRF) およびフーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) を用いた非破壊型の簡易測定を実施した。

オンサイトでの簡易測定に有望なハンディ型装置として、ハンドヘルド XRF (オリンパス (株) : VANTA Geochem) およびハンディ FT-IR システム (アジレント・テクノロジー (株) : FTIR4500a) を用いた。

XRF は波長分散型 XRF (WDX) とエネルギー分散型 XRF (EDX) に大別される。WDX は波長分解能が優れているため、軽元素や微量成分の検出に対応できる。EDX は検出能力では WDX より劣るものの、構造が簡素であるため検出器設計の制約が少なく、応用範囲が広い。ハンドヘルド XRF も EDX 方式である。WDX、EDX とともに、定性分析に加え、一般的にファンダメンタルパラメータ (FP) 法と呼ばれる計算にて半定量分析が可能である。卓上型の WDX 装置 ((株) リガク : ZSX Primus II) および EDX 装置 ((株) 島津製作所 : EDX-700HS) で測定した半定量結果や湿式化学分析による定量分析結果と比較することで、ハンディ型装置の性能を確認した。



図 5.174. ハンドヘルド XRF 装置 (VANTA Geochem)

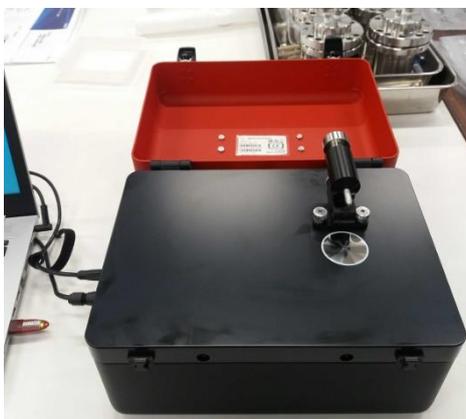


図 5.175. ハンディ FT-IR システム (FTIR4500a)

② 定量分析

上記定性分析と同じカバーガラスを対象に、分析機関にて湿式化学分析による定量分析を実施した。試料は $105\ \mu\text{m}$ 以下に粉碎した後、溶融・溶解し、下記のプロトコルで分析を行った。それぞれ対象とする元素は表 5.87 の通りである。

FUS-MS : 過酸化ナトリウム溶融法にて試料を分解して水溶液とした後、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) により濃度を測定した。

FUS-ICP : メタホウ酸リチウム/四ホウ酸リチウム溶融法にて試料を分解して水溶液とした後、誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-OES) により濃度を測定した。

INAA : メタホウ酸リチウム/四ホウ酸リチウム溶融法にて試料を分解して水溶液とした後、中性子放射化分析法 (INAA) により濃度を測定した。

PGNAA : メタホウ酸リチウム/四ホウ酸リチウム溶融法にて試料を分解して水溶液とした後、即発ガンマ線中性子放射化分析法 (PGNAA) により濃度を測定した。

表 5.87. 分析プロトコルと対象元素の関係

プロトコル	対象元素
FUS-MS	Cd (2 ppm), Cr (30 ppm), Li (3 ppm), Mo (1 ppm), Pb (0.8 ppm), W (0.7 ppm)
FUS-ICP	Al (0.01 %), Ba (2 ppm), Ca (0.01 %), Fe (0.01 %), K (0.008 %), Mg (0.01 %), Na (0.1 %), Si (0.1 %), Sr (2 ppm), Ti (0.01%), Zr (2 ppm)
INAA	As (0.5 ppm), Sb (0.2 ppm)
PGNAA	B (5 ppm)

③ 分析結果のまとめと評価

ソーダ石灰ガラスの主成分である Si、Na、Ca に加え、硬度強化の目的で添加されることが多い Al、耐水性向上の添加物である Mg はパーセントオーダーで評価できる含有量であった。湿式化学分析の結果 (x 軸) に対する各 XRF (y 軸) の比較を図 5.176 から図 5.180 に示す。凡例中の Handy はハンドヘルド XRF、EDX および WDX はそれぞれ卓上装置を表す。なお、XRF で検出されなかったデータ (ND) は、便宜的に 0 としてプロットした。

湿式化学分析 (プロトコル FUS-ICP) で得られた Si は 33.1~34.5% (平均: 33.8%、標準偏差 0.34) と、いずれの試料もほとんど同程度の濃度であった。平均値である 33.8% を SiO₂ に換算すると 72.3% となるが、ソーダ石灰ガラスとして妥当な値である。WDX は FUS-ICP と比較して僅かに低い値となる傾向だがよく一致しているといえる (平均 33.0%、標準偏差 0.52)。EDX は高めの値 (平均 35.3%、標準偏差 0.45)、Handy は低い値 (平均 28.5%、標準偏差 0.56) となる傾向であるが、値のばらつきは大きいものではなかった。

プロトコル FUS-ICP では、Na は 9.1~10.6%、Ca は 6.0~8.0% の範囲であり、Na₂O 換算、CaO 換算ではそれぞれ 13.5% 前後および 9.5% 前後に相当する。いずれもソーダ石灰ガラスの組成として妥当である。XRF の結果との比較では、Na については EDX、WDX とともに低い値を示す傾向であった (Handy は測定範囲外)。Ca は、WDX および EDX は FUS-ICP と同程度の濃度範囲の結果であった。Handy は、低い値を示すものの、直線性は最も良好であった。

ガラスの性能をコントロールするための添加物である Al および Mg の濃度は広い分布を示した。プロトコル FUS-ICP の結果では、Al、Mg とともに 0.1% 以下に集団が見られる。これは意図して添加をしていない製品と判断される。添加量の範囲は Al が 0.3~0.9%、Mg が 1.1~2.2% であった。なお、0.9% の Al は 1.7% の Al₂O₃ に、2.2% の Mg は 3.6% の MgO に相当する。XRF の結果の比較を行ったところ、ばらつきはあるものの、Handy および WDX は FUS-ICP の結果に近い範囲に分布していた。EDX は Al が約 2 倍の濃度で算出され、逆に、Mg はほとんどのサンプルで検出されないという結果であった。定量分析 (プロトコル

FUS-ICP) によって得られた、カバーガラスごとの Al と Mg の含有量の関係を図 5.181 に示す。Al と Mg の双方が添加されていないカバーガラスは存在しなかった。また、比較的高濃度 (0.8%以上) で Al が添加されたガラスには Mg は添加されていないという結果が得られた。このような判定は、図 5.182 に示すように、Handy XRF によるオンサイト分析でも十分に対応可能であるといえる。なお、Al 添加、Mg 添加のメーカー別および国別の比較を図 5.183 および図 5.184 に、製造年別の比較を図 5.185 および図 5.186 にそれぞれ示す (サンプル数が 1 点の場合は最大値と最小値が同じ)。Al や Mg が添加されていないカバーガラスは大部分が日本の製品であることが分かった。ただし、年代別で比較すると、2000 年代に生産されたものであることが分かる。2010 年代の製品は、日本製、中国製ともに、Al および Mg の添加があり、生産国というよりは生産時期によるものである可能性が高い。

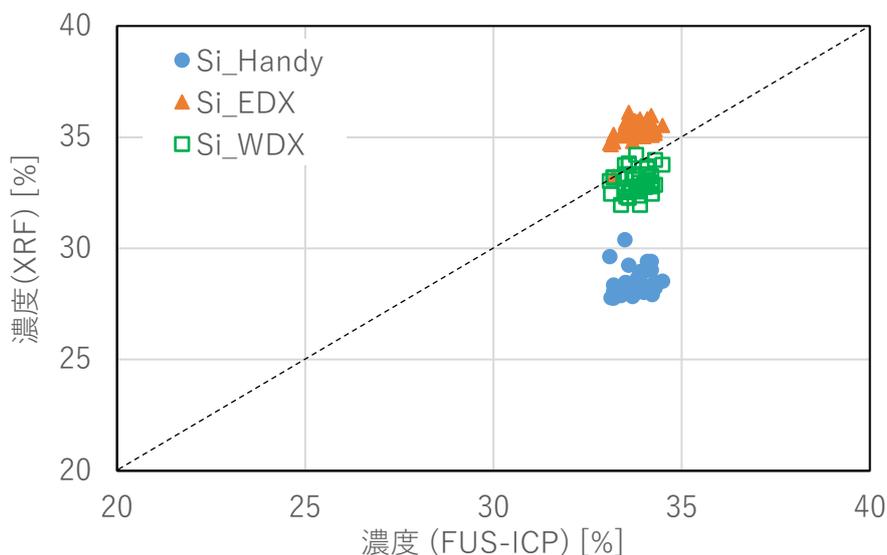


図 5.176. Si 測定結果の比較

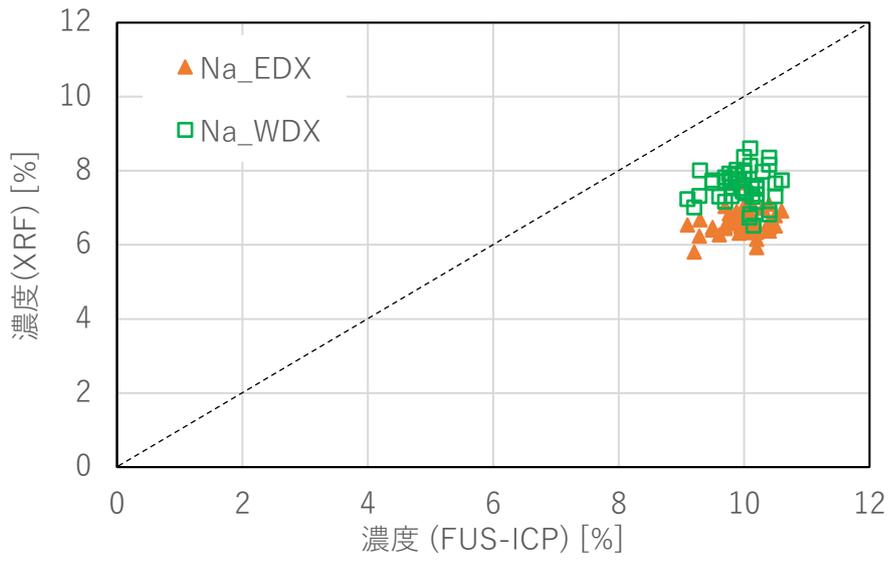


図 5.177. Na 測定結果の比較

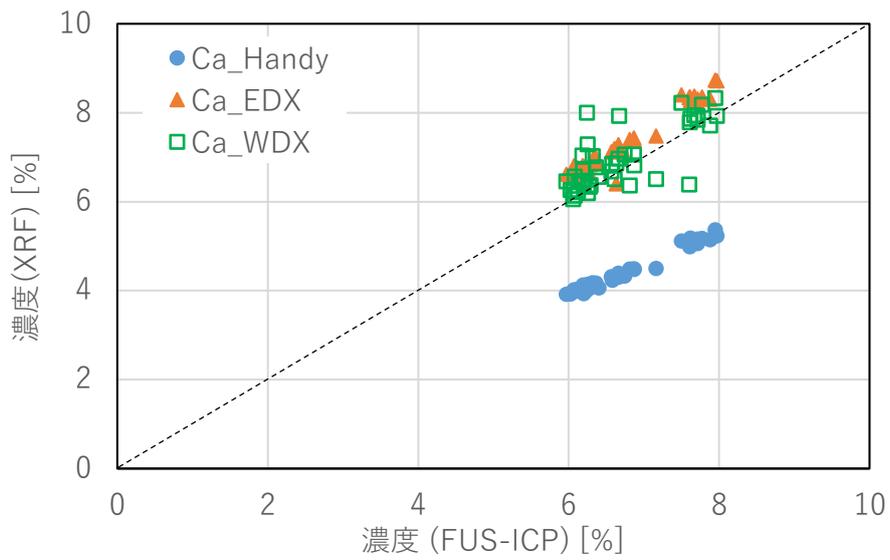


図 5.178. Ca 測定結果の比較

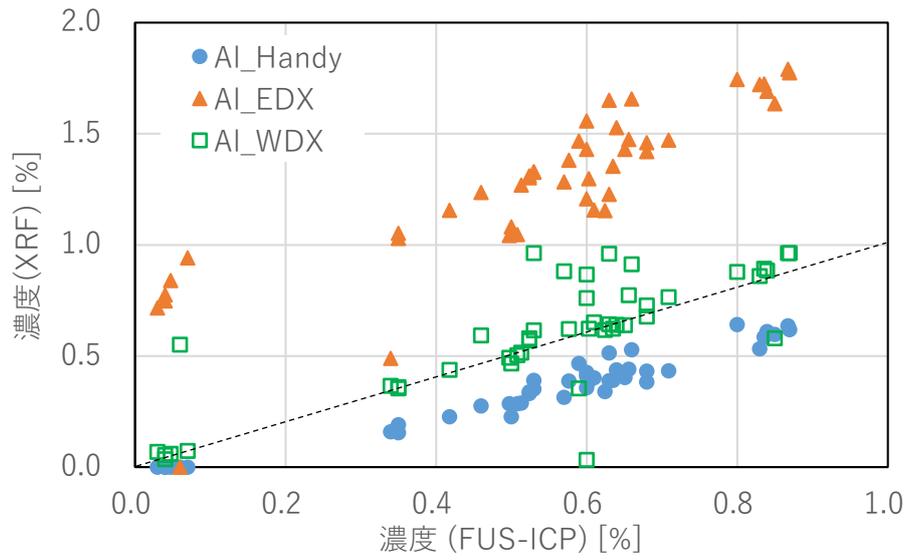


図 5.179. Al 測定結果の比較

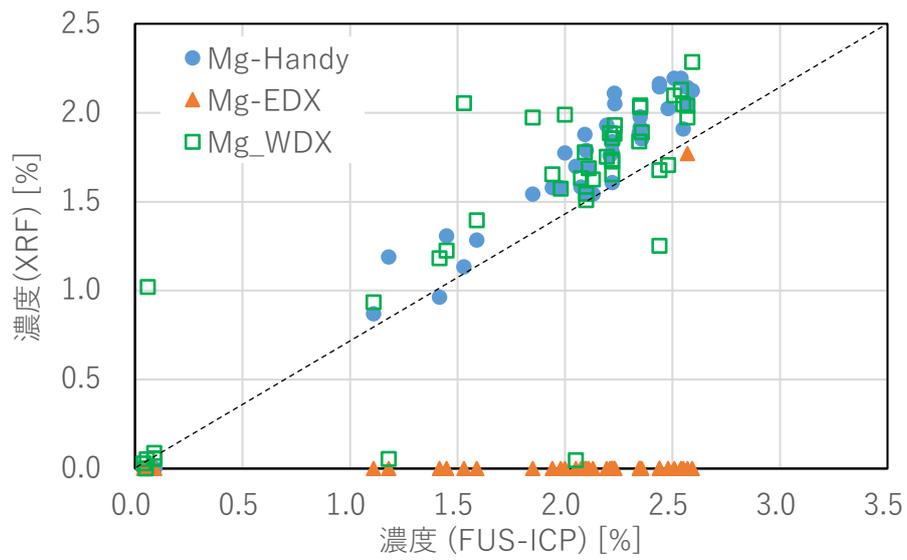


図 5.180. Mg 測定結果の比較

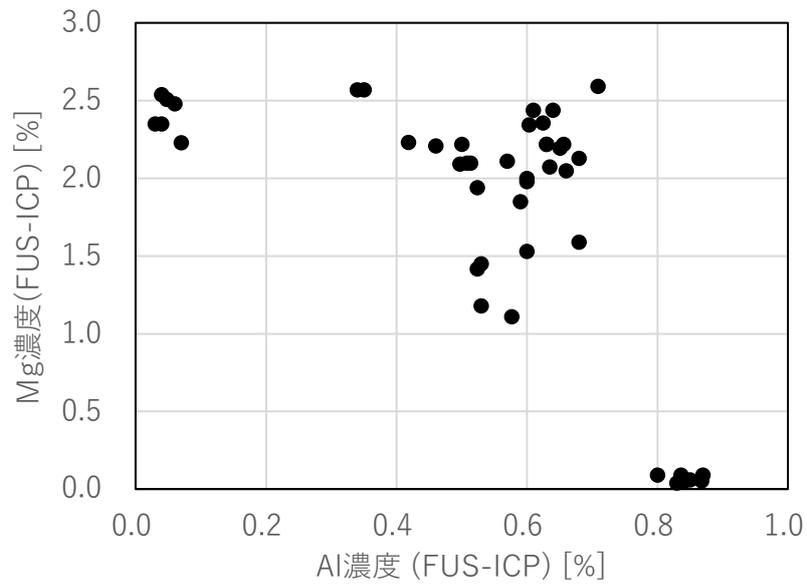


図 5.181. カバーガラスごとの Al と Mg 含有量の関係 (FUS-ICP 測定)

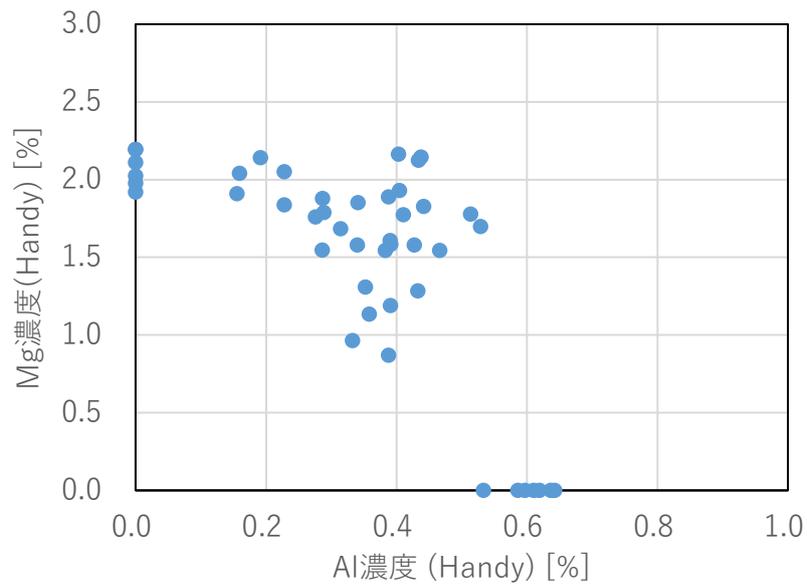


図 5.182. カバーガラスごとの Al と Mg 含有量の関係 (ハンドヘルド XRF 測定)

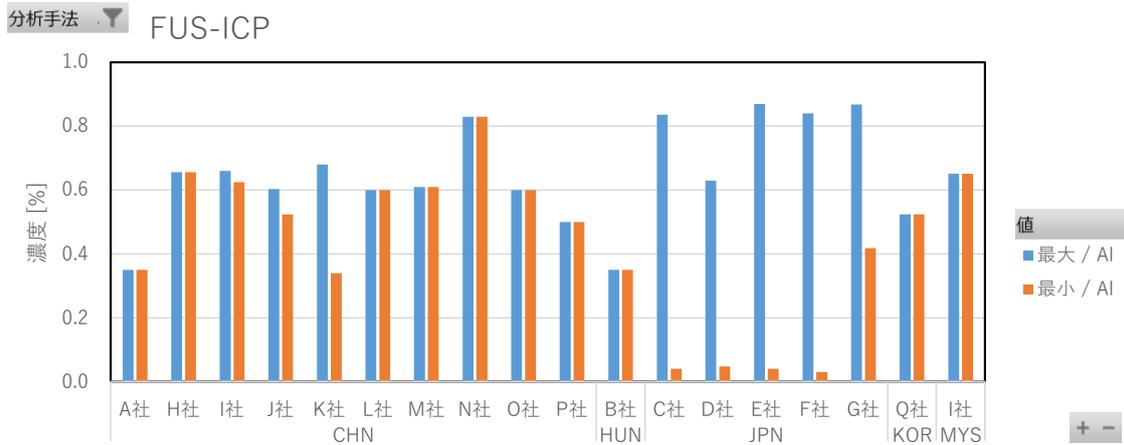


図 5.183. メーカー別・生産国別の Al 含有量の比較 (FUS-ICP 測定)
CHN=中国、JPN=日本、MYS=マレーシア、HUN=ハンガリー、KOR=韓国

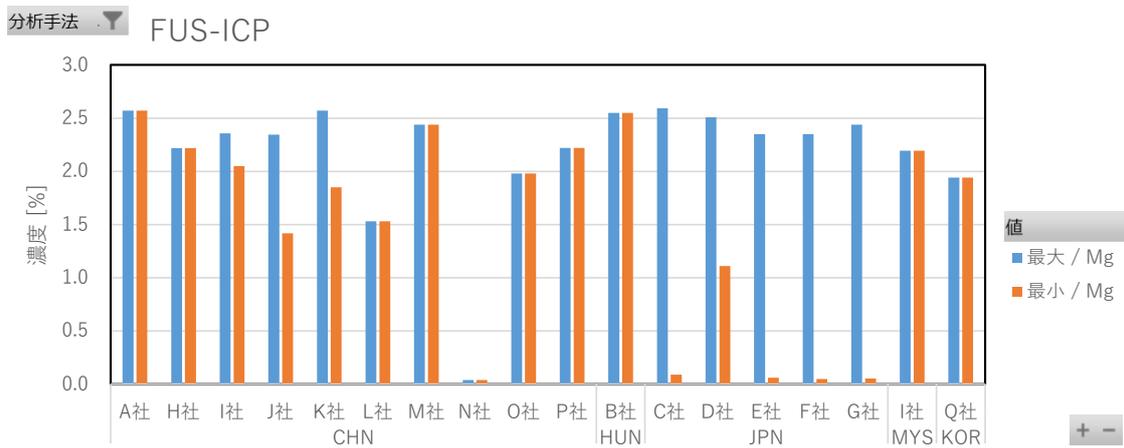


図 5.184. メーカー別・生産国別の Mg 含有量の比較 (FUS-ICP 測定)
CHN=中国、JPN=日本、MYS=マレーシア、HUN=ハンガリー、KOR=韓国

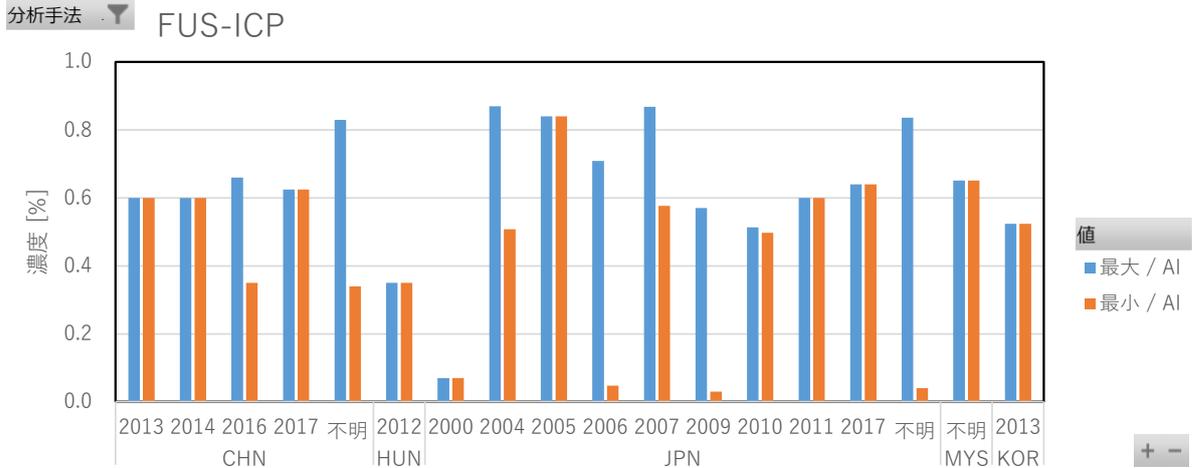


図 5.185. 製造年別・生産国別の Al 含有量の比較 (FUS-ICP 測定)
CHN=中国、JPN=日本、MYS=マレーシア、HUN=ハンガリー、KOR=韓国

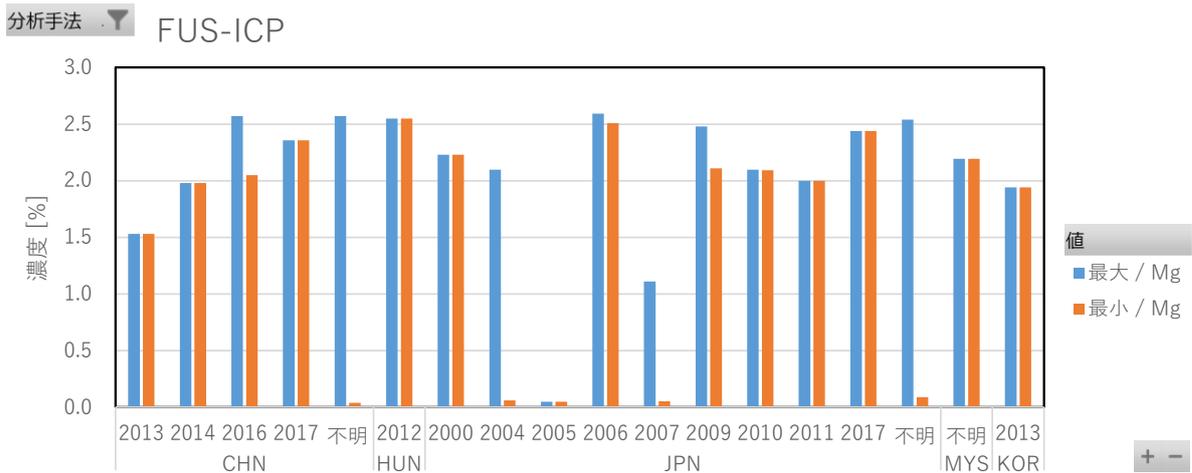


図 5.186. 製造年別・生産国別の Mg 含有量の比較 (FUS-ICP 測定)
CHN=中国、JPN=日本、MYS=マレーシア、HUN=ハンガリー、KOR=韓国

有害性などの観点から、忌避物質としてリストアップした、Cr、As、Mo、Cd、Sb、Pb の分析結果を図 5.187 から図 5.192 に示す。微量の成分であるため、濃度単位は ppm とした。なお、湿式化学分析の定量限界以下および XRF の未検出 (ND) は便宜的に 0 としてプロットしている。

最も高濃度で含まれていた Sb の最大値は 3,500 ppm (0.35%) である。Sb については 1,000 を超える試料が多く、意図して添加した結果である可能性が高い。Sb はガラスの澄清剤として利用されている。従来は As が澄清剤として用いられていたが、ガラスの As フリー化に伴い、Sb で代替されるようになった。実際、プロトコル INAA ではすべての試料

で検出限界以下 (<0.5 ppm) であった。Sb は比較的高濃度でもあるため、INAA と XRF の相関は高く、特に Handy では検出漏れが発生していないという結果であった。As については、INAA での 0.5 ppm 以下という結果に対し、EDX および WDX は基本的に ND であったが (WDX で 1 件の検出あり)、Handy は多くの試料で As を検出した。Handy の解析ソフトウェアは、極小のピークを検出限界以下とせず、少しでも可能性があれば計算するというアルゴリズムであると推察する。半定量の濃度計算では数値の正確性は乏しいが、微量成分混入の簡易スクリーニングとしては、検出漏れが少なくなる安全側の設定であるといえる。

仕向け先を、①窓 (型板) 硝子、② (フロート) 板ガラス、③グラスウール、④ガラス瓶 (食器) と想定し、As および Sb の許容について以下のような議論を進めた。参考に、Handy で得られた As と Sb の分析結果を図 5.193 に示す。なお、Sb 含有量について、生産年、生産国、メーカーによる特定の傾向は認められなかった。参考として、生産国別の Sb 含有量 (INAA 測定) の比較を図 5.194 に示す。

- As が 100ppm 以上ならば管理処分
 - 管理処分対象となるサンプルは無い
 - 土壌の基準は 150ppm (mg/kg)
- As がゼロならば①③に使用可
 - INAA の測定結果のように、検出限界 0.5 ppm 以下をゼロと見做すことができれば、今回測定を行ったすべての試料が対象となる
 - 水質基準のように 0.01ppm (mg/L≒mg/kg) レベルが閾値だとすると、さらなる微量分析による評価が必要だが、検査としての現実性の議論が必要となる。
 - 低濃度領域は XRF では正確な値は得られないが、Handy は INAA で検出限界と報告される試料に対しても存在の可能性を示す。オンサイト分析では、例えば、Handy の 10 ppm を閾値に、それを越えた資料は要注意と判定するといった考え方ができる。
- As・Sb とともにゼロならば②④に使用可
 - ほとんどの試料が 1,000ppm 以上の Sb を含むので、原則的に②④については対象外と判断される。
 - 数百 ppm 以上の濃度範囲では、Handy も含め、XRF は INAA の結果との相関が比較的高いので、Handy によるオンサイト分析の結果は信頼に足るものと判断できる。

プロトコル FUS-MS にて、Cr (200 ppm 以下)、Mo (30 ppm 以下)、Cd (5 ppm 以下)、pb (110 ppm 以下) が測定された。EDX および WDX ではほとんどの試料で検出できなかった (ND)。それに対し、Handy による検出率は若干高かった。Handy の結果において、Cr は濃度域が高いにも関わらず ND が多かったが、Mo、Cd は良く検出されていた。ただ

し、半定量計算は不正確であり、FUS-MS に比べ高い値が算出された。Pb については、FUS-MS で得られた濃度とも一致した試料も多くみられた。

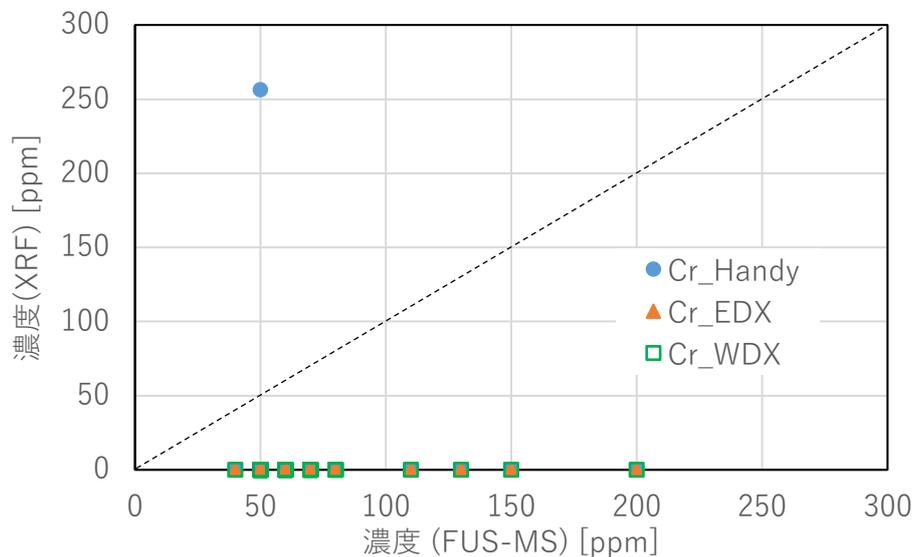


図 5.187. Cr 測定結果の比較

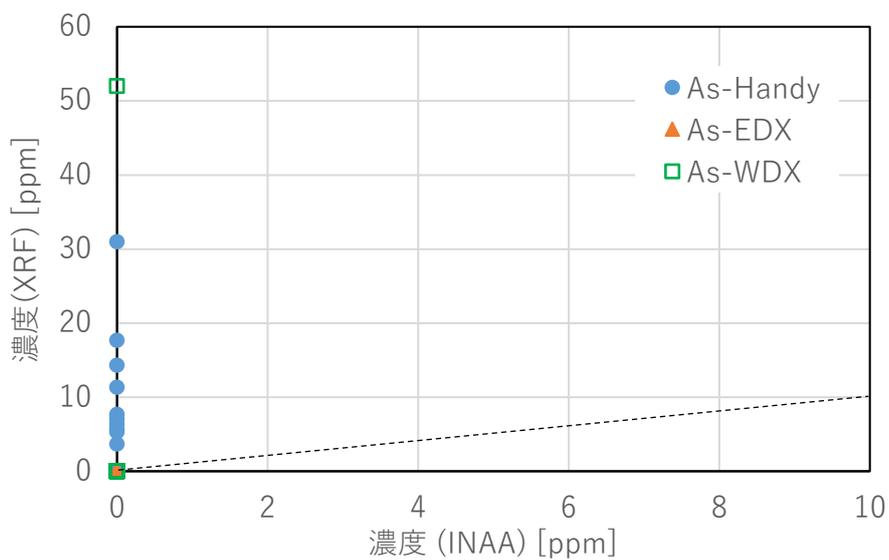


図 5.188. As 測定結果の比較

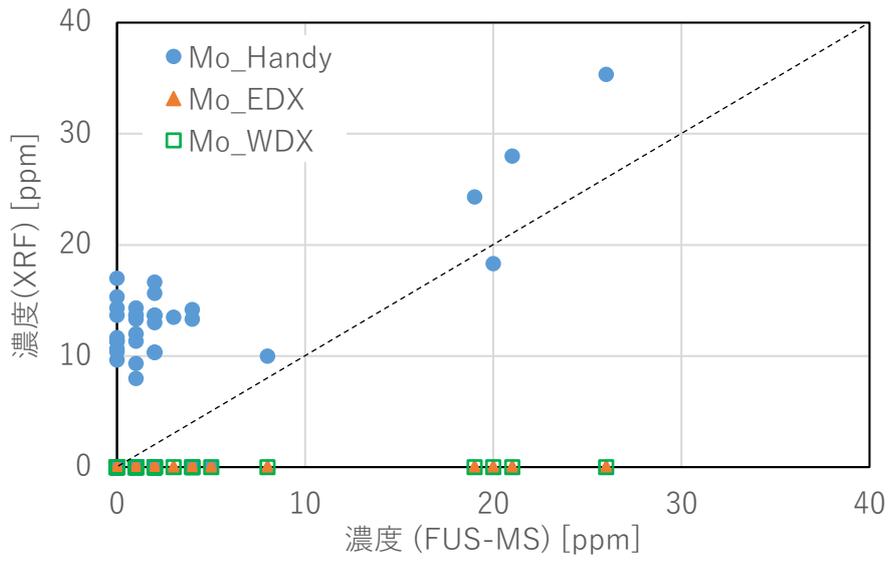


図 5.189. Mo 測定結果の比較

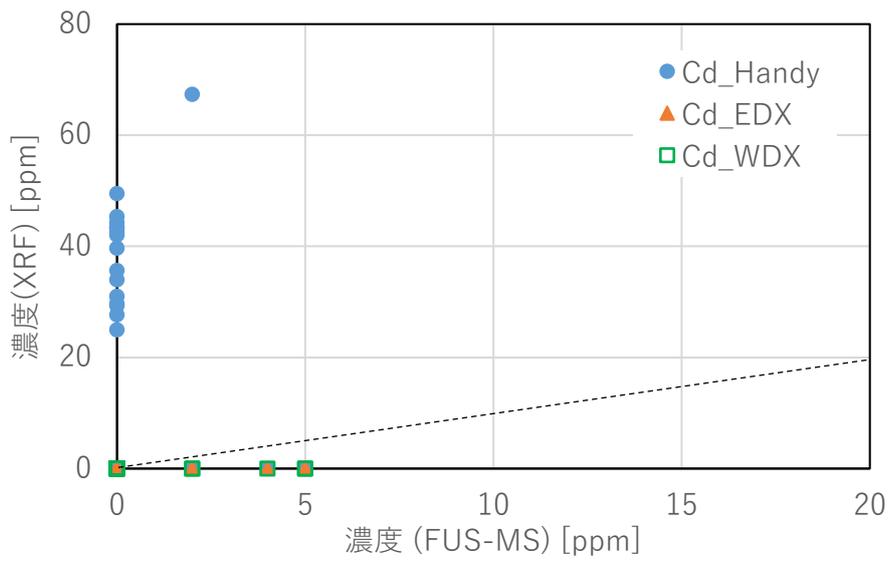


図 5.190. Cd 測定結果の比較

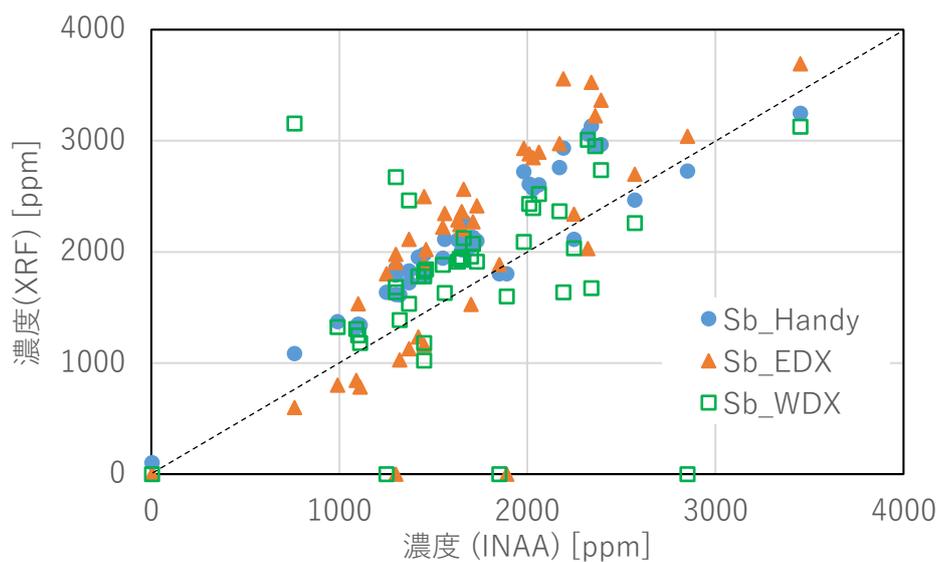


図 5.191. Sb 測定結果の比較

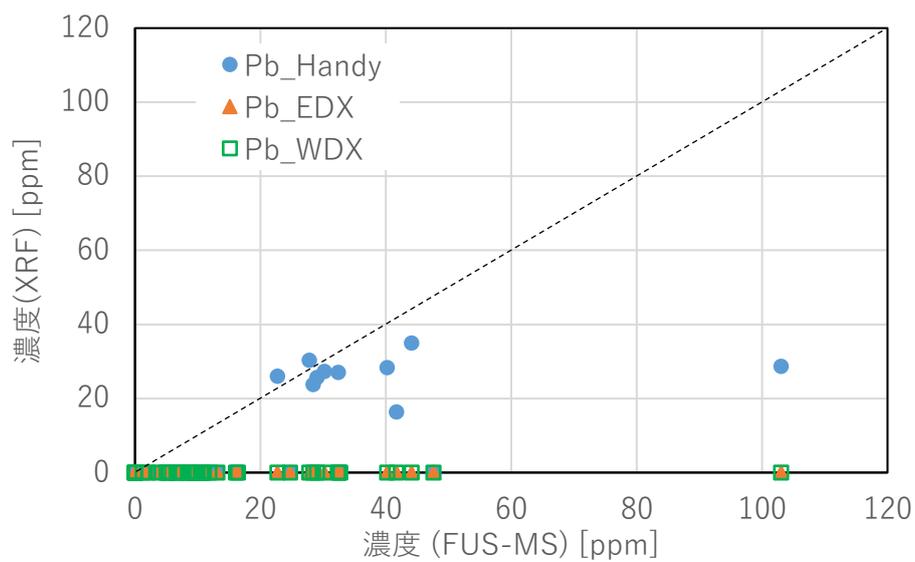


図 5.192. Pb 測定結果の比較

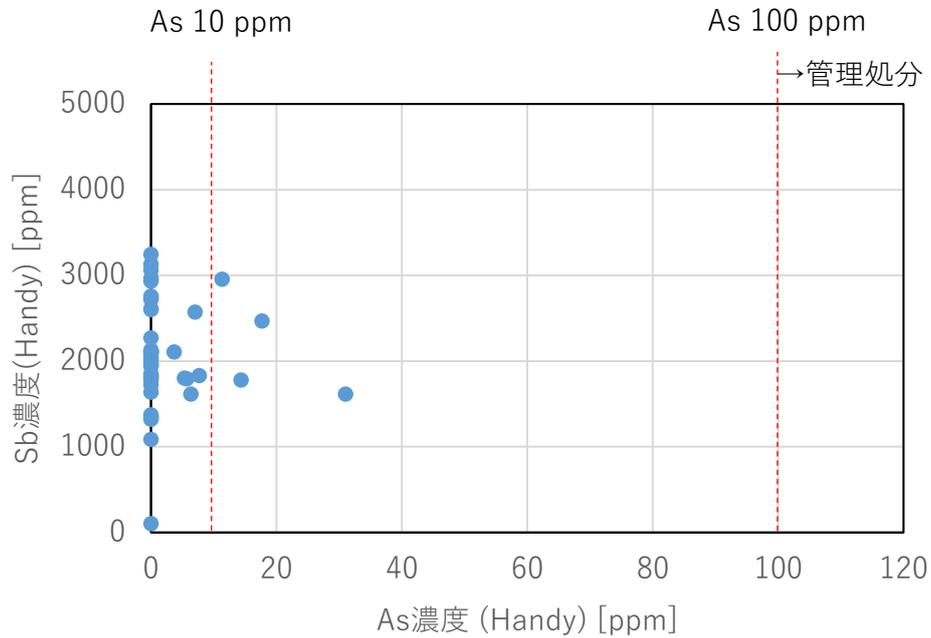


図 5.193. ハンドヘルド XRF 装置による As および Sb 測定結果

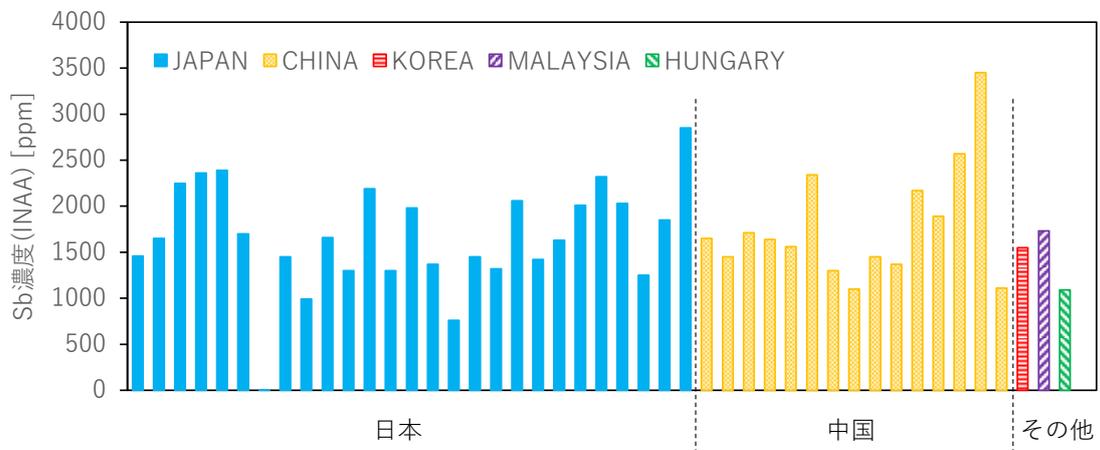


図 5.194. 生産国別 Sb 含有量の比較 (INAA 測定)

ここで、有害物質の基準について検討する。例えば、土壤汚染対策法において特定有害物質（第二種・重金属等）に指定されているものは、Cd、Cr(VI)、Pb、As および B であり、基準値はそれぞれ 150、250、150、150、4,000 mg/kg (ppm) である。このうち、Cd、Cr(VI)、Pb は RoHS 指令の対象物質となっている（現在のところ太陽光パネルは適用除外）。湿式化学分析では、すべてのサンプルで As は検出限界以下であり、XRF で検出され FP 法（半定量）で算出された濃度も最大で 50 ppm 程度なので、基準値は下回っている。また、Cd、

Cr (ガラス中で安定している Cr は 6 価ではないと考えられるが) および Pb についても土壌の基準値を超えたサンプルは無かった。後述の B についても同様である。

その他微量成分としてリストアップした Li、W、Ba、Fe、K、Sr、Ti、Zr の測定について、検出限界を下回らず有効な値が得られた試料の数 (有効検出数)、得られた値の平均および最大値を表 5.88 にまとめた。軽元素の Li はいずれの XRF でも分析対象外なので、湿式化学分析のみの結果であるが、検出限界以下が 15 試料、得られた値の平均が 8.4 ppm、最大で 20 ppm と含有量は非常に低かった。W および Ba も低い値であり、W についてはいずれの XRF でも検出されなかったが、Ba は Handy のみ検出された。ただし、Handy で検出された場合の半定量計算では非常に大きな濃度が算出され、湿式化学分析の 100 倍以上の濃度が示されるため、注意が必要である。湿式化学分析で得られた Fe の値は各種 XRF に対して大きな値であるが、これは、分析機関での分析前処理としての粉砕に鉄系 (ステンレススチール) の粉砕容器を用いていることによるコンタミネーションの影響が認められる。各種 XRF の結果では、Fe は 300 ppm 以内の結果となっている。確認のため、早稲田大学にてタングステンカーバイドの粉砕容器で所定の粉砕を行って分析機関に送付したサンプルと粉砕から分析機関で行った結果を表 5.89 にまとめた。分析は分析機関による湿式化学分析 (同じプロトコル) である。ステンレススチールでは Fe、タングステンカーバイドでは W の無視できない濃度上昇が認められた。また、Cr もステンレススチール由来の濃度上昇の可能性が否定できない。湿式化学分析は前処理として十分な粉砕を行うことが不可欠だが、粉砕容器に由来するコンタミネーションは避けられないことに注意が必要である。K については、湿式化学分析と WDX が良い対応を示したが、Handy ではすべての試料で検出できず、EDX でも 1 検体のみしか検出できなかった。一方、Sr、Ti、Zr については、Handy が最も湿式化学分析との対応が良く、検出漏れも少なかった。

いずれにしても、微量成分としてリストアップした元素のうち特別高濃度で含まれるものは認められず、ほとんどの試料において 1,000 ppm (0.1%) を超えることはないといえる (後述の B も数百 ppm)。主成分 (Si、Na、Ca) および主要添加物 (Al、Mg) に次いで含有量が多いのは数千 ppm のオーダーである Sb であることが分かった。

表 5.88. 微量成分の測定結果のまとめ

		Li	W	Ba	Fe	K	Sr	Ti	Zr
湿式化学分析*	有効検出数**	30	14	45	45	39	45	22	45
	平均 [ppm]	8.4	1.1	8.1	1900	210	89	370	70
	最大 [ppm]	20	2.1	20	3400	400	640	1300	220
Handy	有効検出数**	/	0	23	45	0	45	17	45
	平均 [ppm]	/	—	1300	170	—	100	880	97
	最大 [ppm]	/	—	3000	230	—	680	2100	230
EDX	有効検出数**	/	0	0	27	1	23	1	26
	平均 [ppm]	/	—	—	140	240	160	1500	110
	最大 [ppm]	/	—	—	200	240	770	1500	270
WDX	有効検出数**	/	0	0	34	37	31	6	40
	平均 [ppm]	/	—	—	200	270	150	1300	110
	最大 [ppm]	/	—	—	310	450	800	1500	210

* : FUS-MS (Li, W), FUS-ICP (Ba, Fe, K, Sr, Ti, Zr)

** : 測定を行った45試料のうち

表 5.89. 湿式化学分析における粉碎容器の影響

ID	ミル材質	Cr	Li	W	Ba	Fe	K	Sr	Ti	Zr
SK15g	SS(2020)	50	6	0.9	10	2100	< 1000	499	< 100	220
SK15g	SS	40	3	1	11	3400	< 1000	509	100	258
SK15g	WC	4	< 3	558	10	200	< 1000	481	100	241
SK16g	SS(2020)	50	< 3	< 0.7	6	1800	< 1000	83	< 100	109
SK16g	SS	40	5	1	8	3200	< 1000	84	< 100	116
SK16g	WC	5	4	1370	7	300	< 1000	80	< 100	111
SH03g	SS	40	11	0.8	15	2500	< 1000	23	100	41
SH03g	WC	40	6	1220	70	1100	< 1000	32	100	37
SH04g	SS	30	7	1	37	2800	< 1000	29	100	33
SH04g	WC	30	12	699	10	200	< 1000	22	100	39

SS: ステンレススチール WC: タングステンカーバイド

単位 [ppm]

ソーダライムガラスとホウ珪酸ガラスの判別は B の有無が最も明確な基準である。原子番号が小さい B は、EDX では卓上、Handy とともに装置によらず測定対象外である。WDX では検出可能であるが、測定したすべての試料について ND であった。プロトコル PGNAA による結果のみ図 5.195 に示す。ほぼすべての試料において B は数十 ppm の範囲であり、1 件のみ 200 ppm を超えてはいるが、ホウ珪酸ガラスであればパーセントオーダーで B が含まれるはずであるので (B₂O₃ として 10%以上)、いずれにしても意図して配合されたものではないと判断できる。

オンサイトで B の有無の判定を行うため、ハンディ FT-IR システムにて、B に由来する

1,350 cm^{-1} の吸収を調べた。既知のホウ珪酸ガラスサンプルの測定結果を図 5.196 と図 5.197 に、既知ソーダ石灰ガラスの測定結果を図 5.198 に示す。ホウ珪酸ガラスサンプルでは 1,350 cm^{-1} の吸収が明確に現れているのに対し、ソーダ石灰ガラスでは相当する吸収は認められない。FT-IR のソフトウェアでは、ライブラリに格納されているスペクトルとマッチングする機能を有しており、付属のライブラリには複数のガラス関連のスペクトルが格納されていたが、すべて 1,350 cm^{-1} の吸収を持つホウ珪酸ガラスであった。従って、図中に示したように、ホウ珪酸ガラスが候補として挙げられることになる。そこで、ホウ珪酸ガラスとソーダ石灰ガラスを区別するため、既知ソーダ石灰ガラスのスペクトルをライブラリにユーザー登録した。

本実証で入手したカバーガラスの測定例を図 5.199 から図 5.204 に示す。ライブラリにユーザー登録を行ったことで、マッチングによるソーダ石灰ガラスと判定が可能となった。なお、入手したすべての試料で同様の結果が得られており、FT-IR による検査からも、B を含むホウ珪酸ガラスである可能性はないと判定できた。

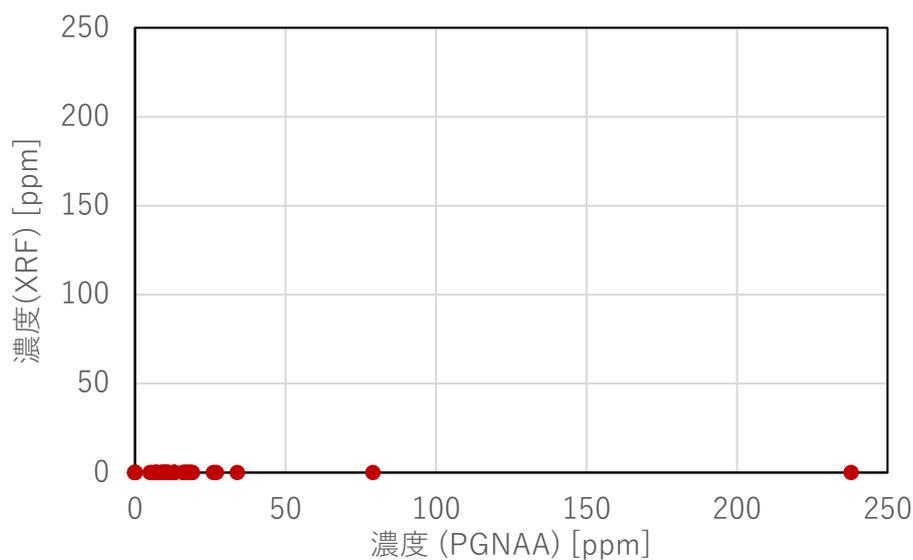


図 5.195. 湿式化学分析による B の測定結果

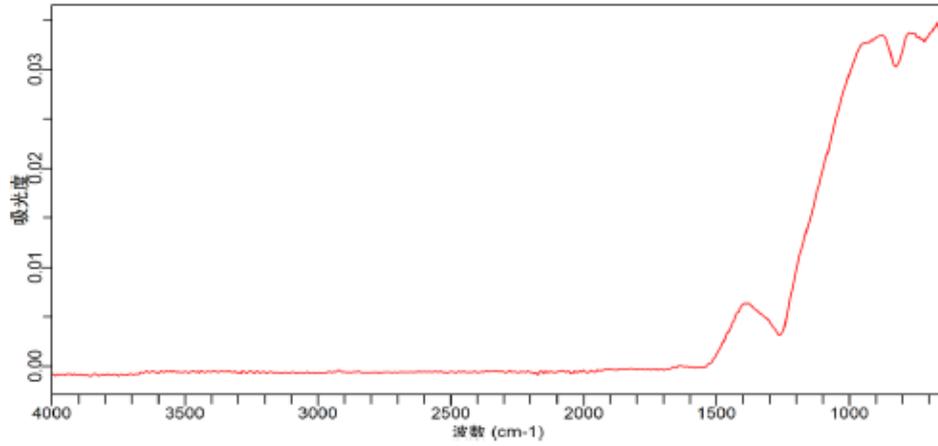


図 5.196. 既知ホウ珪酸ガラスサンプル①の FT-IR 測定結果

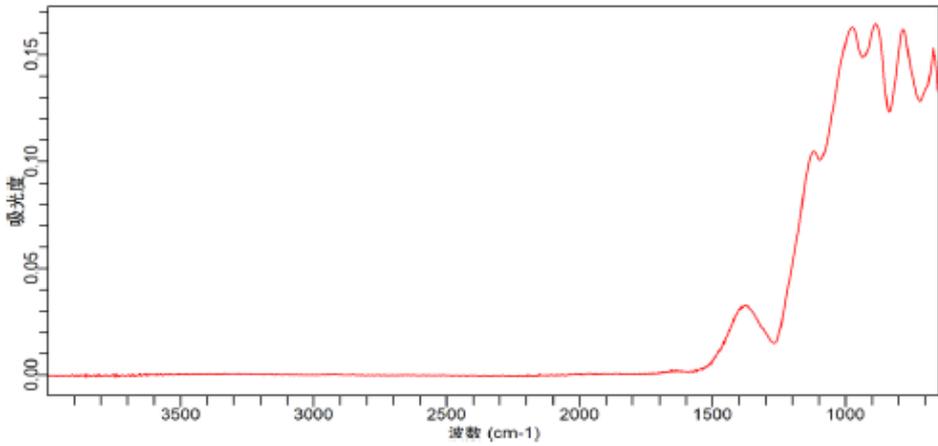


図 5.197. 既知ホウ珪酸ガラスサンプル②の FT-IR 測定結果

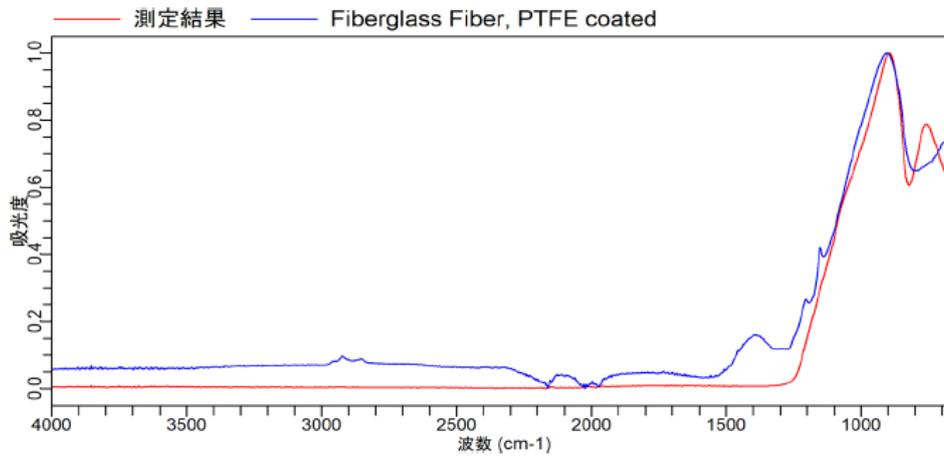


図 5.198. 既知ソーダライムガラスの FT-IR 測定結果

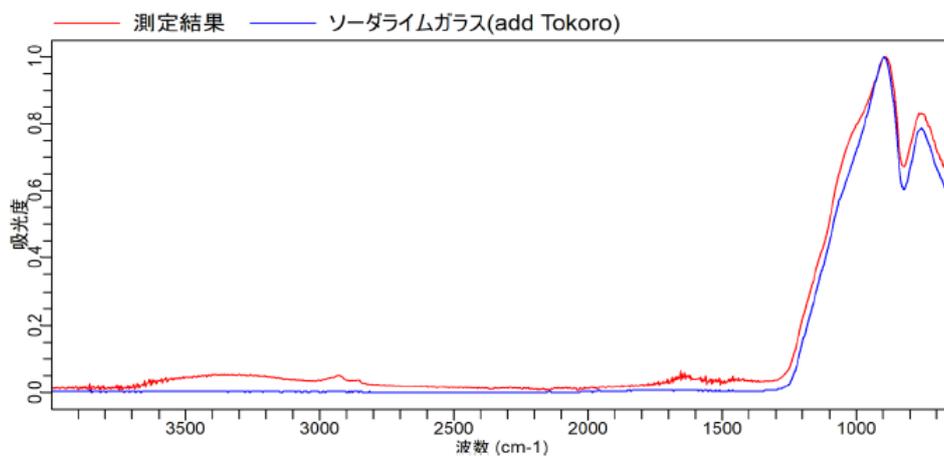


図 5.199. カバーガラス試料 SH01g の FT-IR 測定結果

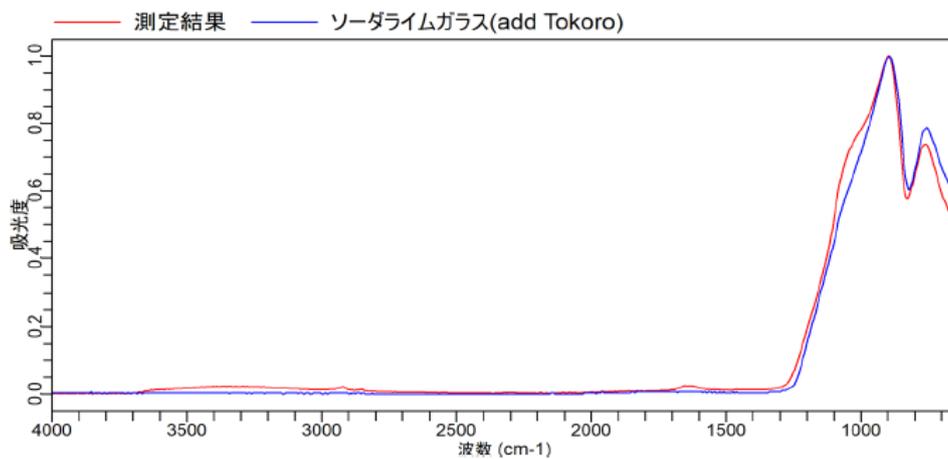


図 5.200. カバーガラス試料 SH02g の FT-IR 測定結果

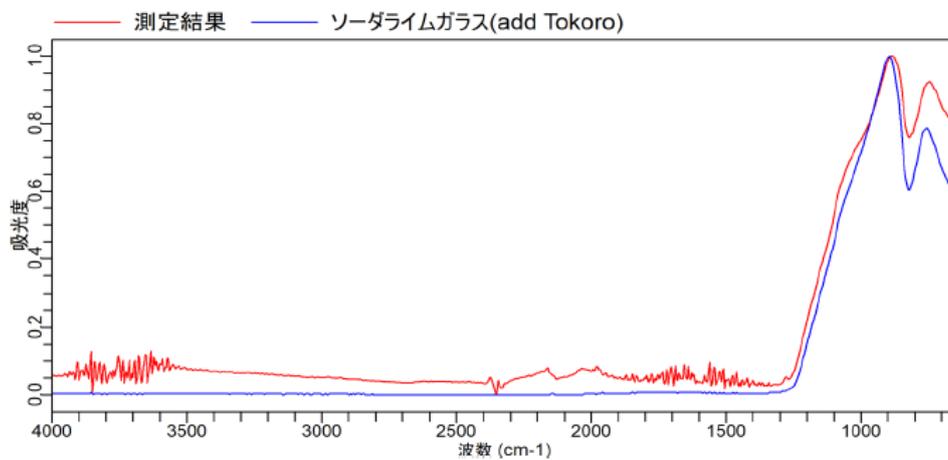


図 5.201. カバーガラス試料 SK02g の FT-IR 測定結果

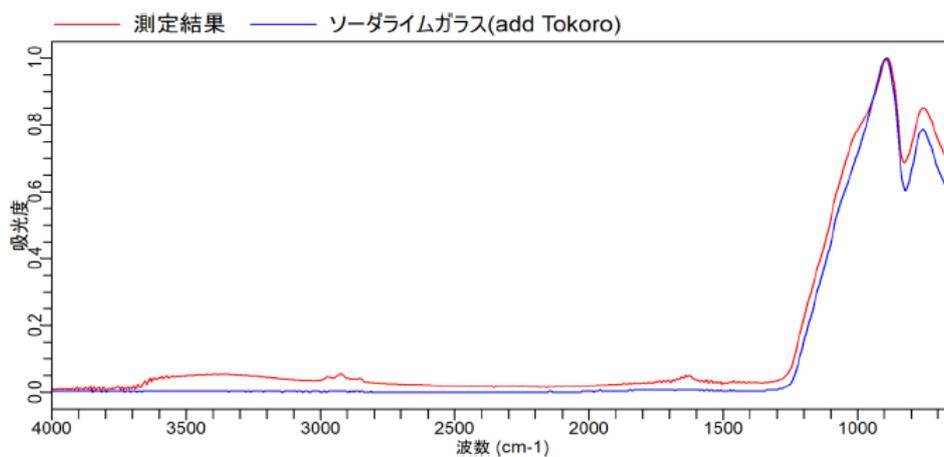


図 5.202. カバーガラス試料 SK07g の FT-IR 測定結果

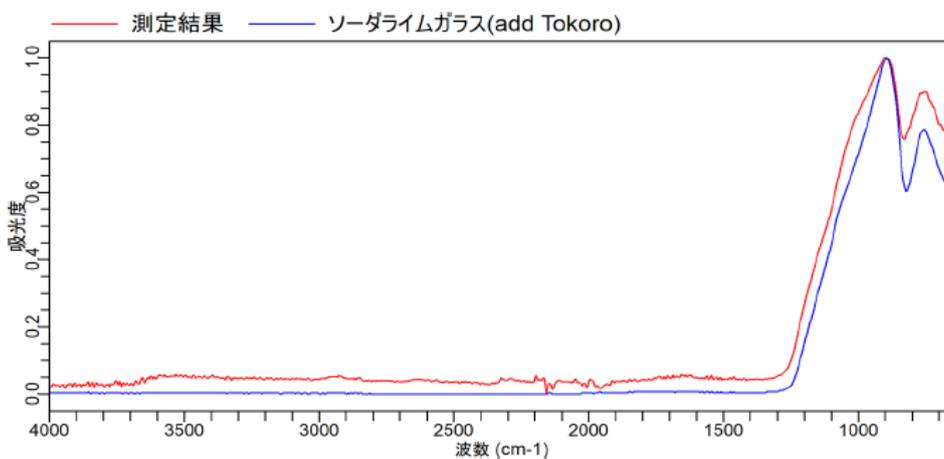


図 5.203. カバーガラス試料 SK33g の FT-IR 測定結果

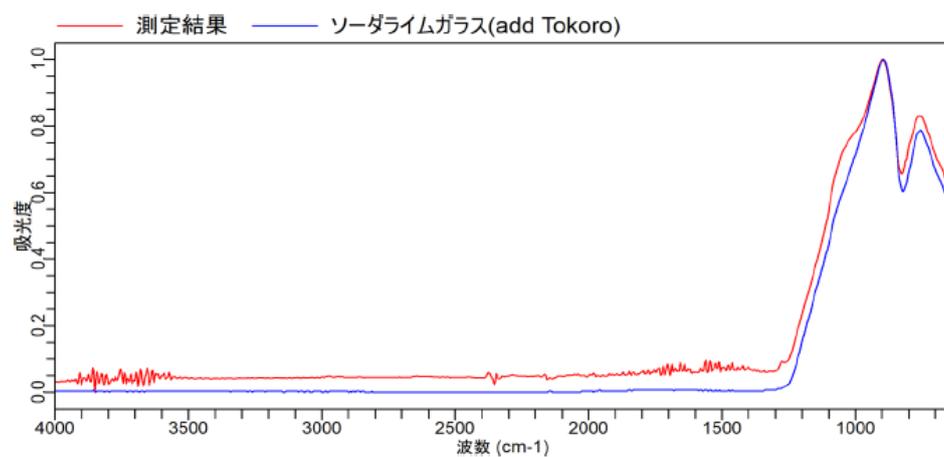


図 5.204. カバーガラス試料 SK72g の FT-IR 測定結果

④ カバーガラスに残存する有機物の評価

カバーガラスのリサイクルとして、ホットナイフ分離法®で分離したカバーガラスを原料とするグラスウールの試作を行ったところ、ガラスに含まれる微量成分とは別に、残存する有機物（主に EVA など封止材）の影響が問題となることが判明した。そこで、ホットナイフ分離法®による処理後のカバーガラスの有機物残存量の評価、有機物の種類や燃焼・熱分解挙動の検討を実施した。

ここでは、JW ガラスリサイクル株式会社にてグラスウール試作の原料としてパレット積載で保管されているカバーガラスのストック（パレット A～E と呼称）を対象とした。なお、カバーガラスは株式会社浜田にてホットナイフ分離法®で分離されたものである。ストックされているカバーガラスはメーカーや型番は不明だが、同型の太陽光パネルから分離されたことが分かっているパレット B を中心に評価を実施した。カバーガラス 1 枚に対して、図 5.205 のように 9 が所からサンプル（12～15 cm 角：約 100 g）を採取し、それぞれに対し、強熱減量（イグニッションロス：イグロス）とマイクロメータによる膜厚の測定を行った。なお、ホットナイフに対して、①⑤が入口側、④⑧が出口側である。イグロスは、図 5.206 のように、サンプルをるつぼに投入して電気炉（ヤマト科学機器：マッフル炉 FO510）で焼成した際の重量変化より求めた。温度を 550℃として 1 時間以上保持した後、デシケーター内で放冷して重量を測定し、この操作を恒量（重量変化が 0.3 mg 以下）となるまで繰り返した。また、樹脂層が付着している焼成前とガラスのみとなった焼成後でマイクロメータを用いて厚さを計測し、その差を樹脂の残厚とした。

9点採取×3枚（パレットB）

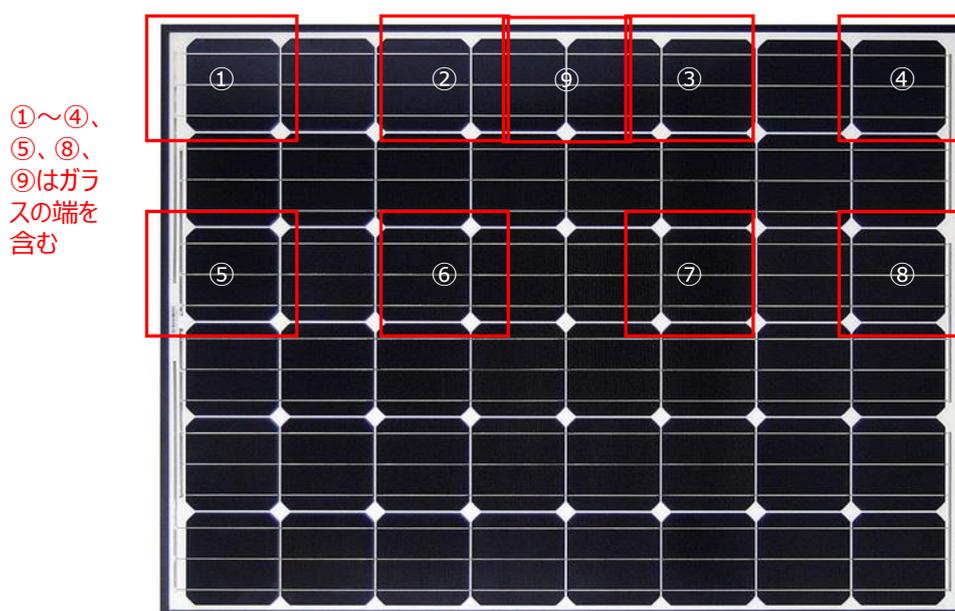


図 5.205. サンプル採取箇所



図 5.206. イグロス測定における電気炉へのるつぼのセット

得られた結果を図 5.207 に示す。サンプル B1 と B3 は同型の太陽光パネルから分離されたカバーガラスであるが、B1 の樹脂残厚は 0.08~0.20 mm、B3 は 0.04~0.13 mm であり、同一ガラスでの位置および個体差によってある程度の差異があることが判明した。ガラス自体の厚さも 3.4~3.5 mm の範囲で若干のばらつきが認められた。同一ガラスでの樹脂量の傾向は、長さ方向についてホットナイフに対する入口側が少なく出口側が多かった。また、幅方向は外側が多く中心側が少なかった。ここで、図 5.208 に示すように樹脂残厚に対してイグロスをプロットすると、若干のばらつきがあるものの一定の相関が認められた。ガラスの厚さを 3.4 mm (密度 2.5) とすると、EVA 樹脂残厚 1 mm (密度 0.95) ではガラス 1g あたり 0.112 g の付着量となるが、グラフ相関における直線の傾き (0.115) とほぼ一致する。したがって、残厚計測からガラスと EVA 樹脂の密度を用いて、図 5.209 に示すように樹脂残量を推算できる。

サンプルB1

上段: 強熱減量 [g/g-ガラス], 中段: 樹脂残厚 [mm], 下段: ガラス厚 [mm]

① 0.00878 0.086 3.391		② 0.01521 0.125 3.356	⑨ 0.01847 0.140 3.346	③ 0.01926 0.157 3.356		④ 0.02090 0.202 3.376	樹脂多
							⇕
⑤ 0.00380 0.077 3.407		⑥ 0.01069 0.080 3.425		⑦ 0.01170 0.082 3.391		⑧ 0.01670 0.140 3.471	
樹脂少	⇐—————→						樹脂多

サンプルB3

上段: 強熱減量 [g/g-ガラス], 中段: 樹脂残厚 [mm], 下段: ガラス厚 [mm]

① 0.00711 0.038 3.434		② 0.0485 0.054 3.497	⑨ 0.00897 0.055 3.504	③ 0.01816 0.132 3.431		④ 0.01187 0.110 3.489	樹脂多 △
							⇕
⑤ 0.00403 0.053 3.540		⑥ - 0.086 3.572		⑦ 0.00938 0.093 3.556		⑧ 0.01241 0.124 3.558	
樹脂少	⇐—————→						樹脂多 △

図 5.207. 強熱減量と膜厚測定の結果

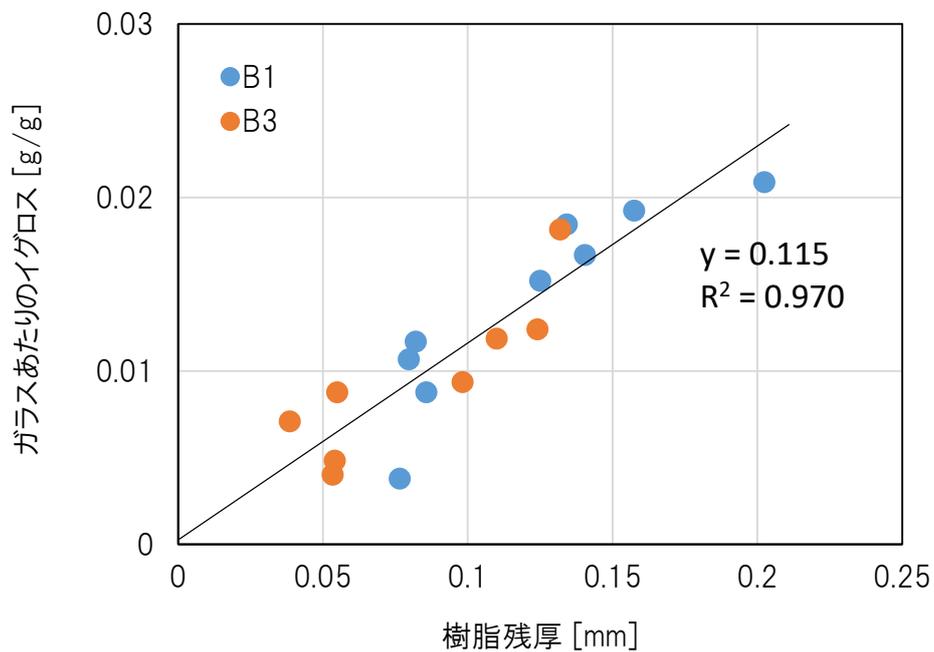


図 5.208. 樹脂残厚と強熱減量の関係



ガラス基準の樹脂付着量

$0.95L_f/2.5L_g$ [g/g-ガラス] または $(0.95L_f/2.5L_g) \times 100$ [%-ガラス基準]

総量基準の樹脂付着量

$0.95L_f/(0.95L_f + 2.5L_g)$ [g/g-総量] または $\{0.95L_f/(0.95L_f + 2.5L_g)\} \times 100$ [%-総量基準]

図 5.209. 厚さ計測からの樹脂残量推算

上記一連の評価では、カバーガラスの半面を 21 分割して、そのうちの 9 カ所についてサンプルを採取し、測定を実施したことになる。9 カ所のイグロスの測定結果を単純に平均すると 0.0139 g/g-ガラスとなるが、図 5.210 のように位置関係の考慮を加えた平均の算出を試みると 0.0136 g/g-ガラスとなる。位置によってばらつきがあるとはいえ、分割数の 1/3 である 9 カ所を測定しているため、単純に平均したとしても大きな誤差は生じていない。な

お、サンプル B3 の平均は単純計算では 0.0096 g/g-ガラス、位置関係を考慮した計算では 0.0093 g/g-ガラスとなった。長さ方向に対して中央の⑨を代表値とした場合、サンプル B1-9 は 0.0185 g/g-ガラスと平均を 2 割程度上回るが、最も平均に近い B1-2 の 0.0152 g/g-ガラスに次いで平均に近い値である。B3-9 は 0.0088 g/g-ガラスと平均に近い値を示している。実際のリサイクル工程では多数のサンプリング箇所に対して計測を行うことは困難なので、必ずしも高精度とはいえないが、1 点のサンプル箇所を代表値とする際には、採取箇所⑨を選択することが現実的である。サンプリング箇所⑨を代表値としてパレット B における個体差を評価した結果を表 5.90 に示す。各サンプルから 4 点の小片について、それぞれ 4 回のマイクロメータによる厚さ計測を行い、図 5.209 に基づいて樹脂残量を推算した。樹脂残膜厚の最大は 0.216 mm、最小は 0.029 mm と大きな開きがあった。同型のパネルであっても残されている樹脂の厚さは大きく異なる結果であった。なお、平均は 0.111 mm であり、樹脂残量に換算すると 1.24 %-ガラス基準 (0.22 %-総量基準) となる。異なるパレット (A および C~E) から採取したサンプルの計測結果を表 5.91 に示す。各パレットから 1 枚ずつのサンプリングなので、パレット内の個体差は評価できないが、いずれもパレット B のカバーガラスとは異なる太陽光パネルを由来とするが、パレット B の計測で得られた樹脂残量の範囲内である。樹脂残膜厚はホットナイフの動作に依存すると考えられるが、太陽光パネルの種類は大きく影響していないものと推察できる。リサイクル工程における樹脂混入の目安として、平均値は 1~1.5 %-総量基準、最大値は 2.5 %-総量基準 程度と考えることができる (目安として範囲を持たせた数値なので、ガラス基準と総量基準に差異はない)。

赤文字がイグロス測定結果。測定を行っていないセルは左右または上下の平均とする。

0.0088	0.0120	0.0152	0.0185	0.0193	0.0201	0.0209
0.0063	0.0097	0.0130	0.0143	0.0155	0.0172	0.0188
0.0038	0.0072	0.0107	0.0112	0.0117	0.0142	0.0167
0.0038	0.0072	0.0107	0.0112	0.0117	0.0142	0.0167
0.0063	0.0097	0.0130	0.0143	0.0155	0.0172	0.0188
0.0088	0.0120	0.0152	0.0185	0.0193	0.0201	0.0209

反転

サンプルB1の全セル平均

0.0136 g/g-ガラス (1.36%-ガラス基準)

0.0134 g/g-総量 (1.34%-総量基準)

図 5.210. 平均値算出方法の考え方 (サンプル B1)

表 5.90. パレット B における個体差の評価

	膜付き計測 [mm]	ガラス厚 [mm]	←標準偏差	樹脂残膜厚 [mm]	←標準偏差	樹脂残量 [%-ガラス基準]	樹脂残量 [%-総量基準]
B4-9	3.402	3.373	0.028	0.029	0.014	0.33	0.33
B5-9	3.434	3.321	0.023	0.113	0.133	1.29	1.27
B6-9	3.422	3.371	0.055	0.052	0.020	0.58	0.58
B7-9	3.424	3.354	0.025	0.070	0.026	0.80	0.79
B8-9	3.440	3.392	0.041	0.048	0.007	0.54	0.53
B9-9	3.598	3.397	0.009	0.200	0.013	2.24	2.19
B10-9	3.517	3.472	0.025	0.045	0.014	0.49	0.49
B11-9	3.510	3.446	0.032	0.064	0.038	0.70	0.70
B12-9	3.675	3.494	0.013	0.181	0.037	1.97	1.93
B13-9	3.645	3.480	0.011	0.165	0.054	1.80	1.77
B14-9	3.614	3.414	0.003	0.200	0.011	2.22	2.18
B15-9	3.372	3.268	0.047	0.103	0.021	1.20	1.19
B16-9	3.624	3.483	0.023	0.141	0.052	1.54	1.51
B17-9	3.420	3.320	0.025	0.100	0.007	1.14	1.13
B18-9	3.477	3.376	0.019	0.101	0.029	1.14	1.13
B19-9	3.432	3.376	0.038	0.056	0.031	0.63	0.63
B20-9	3.565	3.349	0.012	0.216	0.034	2.46	2.40
平均		3.393		0.111		1.24	1.22
最大		3.494		0.216		2.46	2.40
最小		3.268		0.029		0.33	0.33
標準偏差		0.064		0.062		0.69	0.67

表 5.91. 異なるパレットから採取したサンプルの計測結果

	膜付き計測 [mm]	ガラス厚 [mm]	樹脂残膜厚 [mm]	樹脂残量 [%-ガラス基準]	樹脂残量 [%-総量基準]
A-9	3.407	3.253	0.155	1.80	1.77
C-9	3.455	3.239	0.216	2.53	2.47
D-9	3.235	3.149	0.086	1.03	1.02
E-9	3.199	3.147	0.052	0.63	0.62

一般に太陽光パネルのセル封止材としては EVA 樹脂 (Ethylene-Vinyl Acetate copolymer: エチレン酢酸ビニル共重合体) が用いられている。実際にパレット B から採取したサンプルの残存樹脂に対して FT-IR 測定を実施したところ、EVA であると判定された。FT-IR 測定結果を図 5.211 に示す。

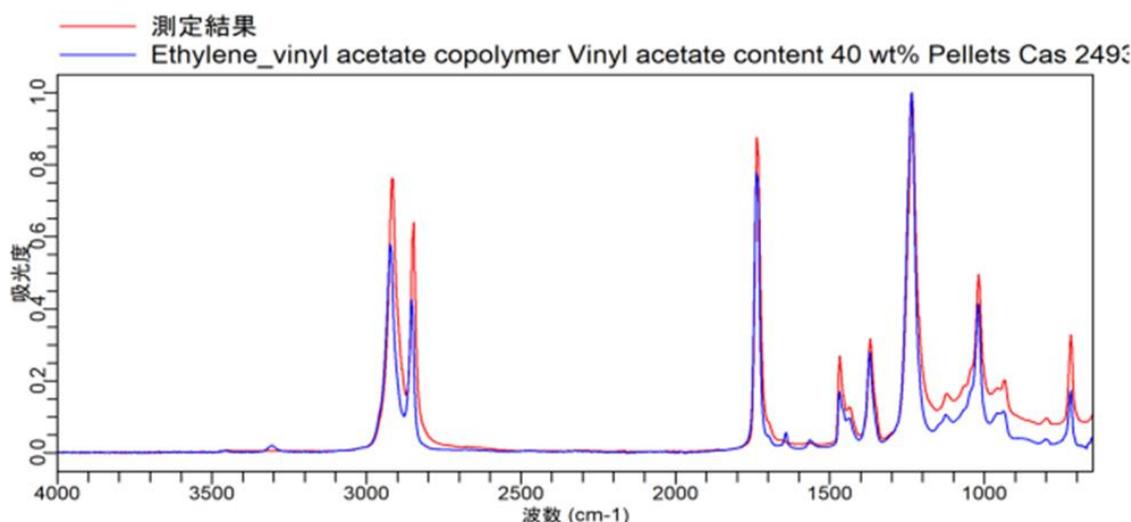
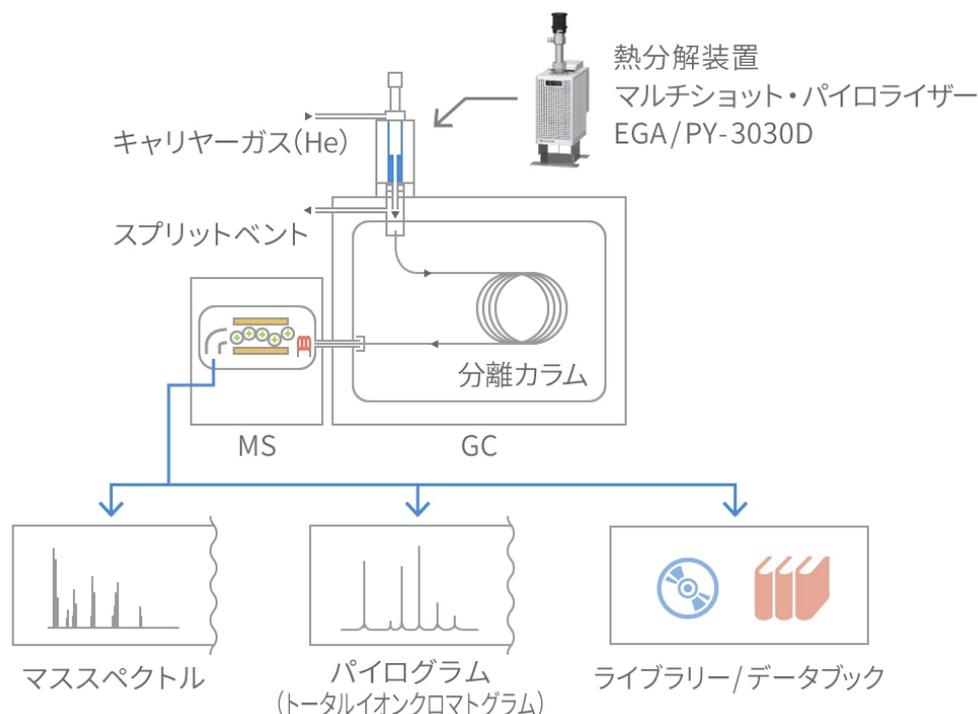


図 5.211. パレット B のサンプルから採取した残存樹脂の FT-IR 測定結果

樹脂膜が残存しているカバーガラスを原料としたグラスウール試作では、黒煙や異臭の発生が認められ、その対策は重要な課題である。ガラス熔融炉は高温ではあるが酸素は積極的に供給されないため、有機物の燃焼は進行せず、熱分解が支配的となる。EVA の熱分解では、酢酸ビニルから脱離した酢酸やアセトアルデヒドが発生するため、これらが異臭の原因であると推察される。また、黒煙は低酸素状態の熱分解で生じる C (煤) であると考えられる。残存樹脂の分解温度や分解生成物を確認し、ガラス熔融炉における分解挙動の検討に資するデータを得るため、熱分解 GC/MS および TG-DTA-MS を用いて実サンプルから採取した EVA 樹脂の分析を実施した。

熱分解 GC/MS は、熱分解装置にて有機物を分解し、発生する熱分解ガスあるいは燃焼ガスを GC (ガスクロマトグラフ) で分離した後、MS (質量分析計) で検出する分析手法である。その概要を図 5.212 に、分析条件を表 5.92 にそれぞれ示す。本条件では、熱分解の雰囲気流体を空気としているため、EVA の酸化燃焼が進行する。得られたクロマトグラムを図 5.213 に、またそれぞれのピークに一致する化合物の一覧を表 5.93 に示す。燃焼反応であるため、大きなピークとして二酸化炭素が検出されている。また、アセトアルデヒドや酢酸といったアセチル基の脱離によって生成する化合物も明確なピークとして現れている。

また、ベンゼンなどの芳香族化合物や C6 以上の比較的大きな脂肪族化合物が多数検出されている。これらの化合物は低酸素状態ではチャー（煤）の前駆物質となり得る。



(出典) FRONTIER LAB: <https://www.frontier-lab.com/jp/technical-information/methodology/part3/>

図 5.212. 熱分解 GC/MS システム図

表 5.92. 熱分解 GC/MS 分析条件

前処理条件	試料をカットし、測定に供した
熱分解条件	熱分解装置 フロンティアラボ社製 PY3030D 加熱条件: 600℃、瞬間加熱 発生したガスを液体窒素にて冷却トラップ後、GC/MS 測定 加熱雰囲気: Air
GC/MS 条件	測定装置: Agilent Technologies 7890B GC System 日本電子 JMS-T200GC AccuTOF GCx-plus カラム: Ultra ALLOY+5 (Length:30m, Diam:0.25mm, Film:0.25 μm) 注入口温度: 280℃ キャリアーガス: He イオン化法: EI 法 GC 昇温条件: 40℃(2min 保持)→10℃/min 昇温→280℃(14min 保持)

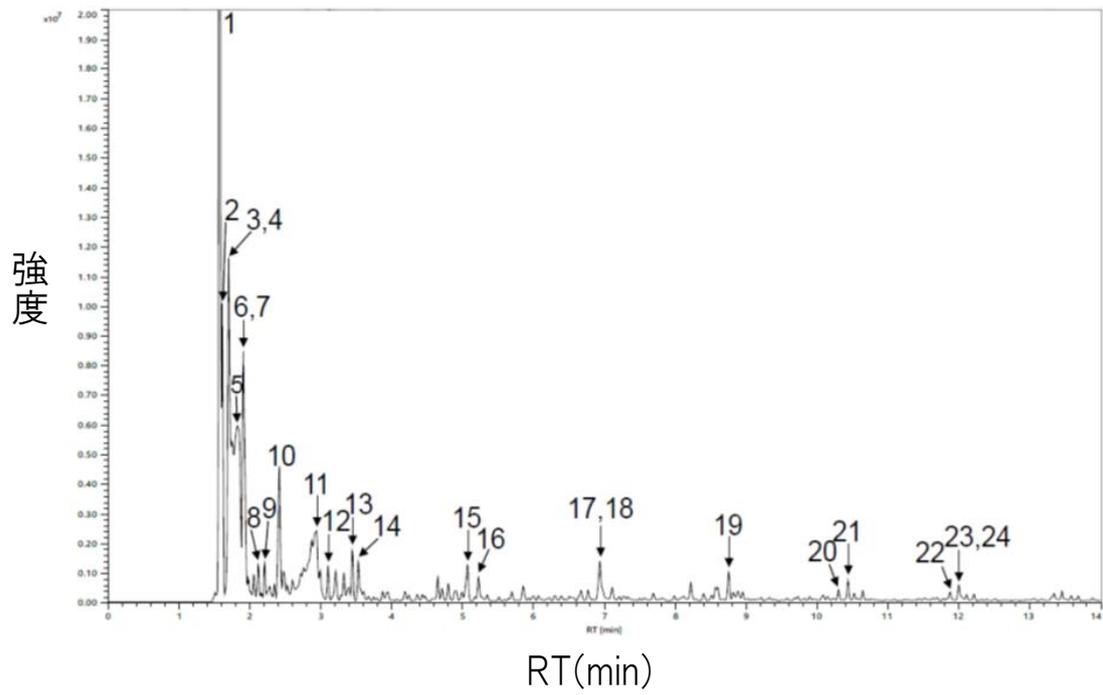


図 5.213. 残存樹脂の熱分解 GC/MS 分析で得られたクロマトグラム

表 5.93. 熱分解 GC/MS で検出された化合物

ピーク番号	R.T	化合物名	組成式
1	1.58	二酸化炭素	CO ₂
2	1.61	プロペン	C ₃ H ₆
3	1.7	アセトアルデヒド	C ₂ H ₄ O
4	1.7	1-ブテン	C ₄ H ₈
5	1.83	水	H ₂ O
6	1.9	2-プロパノール	C ₃ H ₈ O
7	1.91	1-ペンテン	C ₅ H ₁₀
8	2.12	1,3-シクロペンタジエン	C ₅ H ₆
9	2.21	シクロペンテン	C ₅ H ₈
10	2.42	1-ヘキセン	C ₆ H ₁₂
11	2.95	酢酸	C ₂ H ₄ O ₂
12	3.1	ベンゼン	C ₆ H ₆
13	3.44	1-ヘプテン	C ₇ H ₁₄
14	3.53	ペンタノール	C ₅ H ₁₂ O
15	5.07	1-オクテン	C ₈ H ₁₆
16	5.23	ヘキサノール	C ₆ H ₁₄ O
17	6.94	1-ノネン	C ₉ H ₁₈
18	6.94	エチルベンゼン	C ₈ H ₁₀
19	8.75	1-デセン	C ₁₀ H ₂₀
20	10.3	1,10-ウンデカジエン	C ₁₁ H ₂₀
21	10.43	1-ウデセン	C ₁₁ H ₂₂
22	11.87	1,11-ドデカジエン	C ₁₂ H ₂₂
23	11.99	1-ドデセン	C ₁₂ H ₂₄
24	12	ナフタレン	C ₁₀ H ₈

TG-DTA-MS は、図 5.214 に示すように加熱時の重量変化を計測する TG（熱重量分析）と対象物の熱変化を測定する DTA（示差熱分析）を組み合わせた熱分析と同時に、発生するガスに含まれる成分を MS（質量分析計）によって分析する手法である。分析条件は表 5.94 のとおりである。雰囲気ガスは窒素の代わりにヘリウムを酸素と混合した疑似空気を用いた。得られた TG 曲線および DTA 曲線を図 5.215 に示す。TG 曲線には、230～400℃にかけて初期の緩やかな重量減少が現れており、400℃付近で急速な減少が見られ、その後 550℃まで重量は減少し続けた。初期の 400℃までの重量変化は 34%、後半の重量減少は 61%で、5%が残渣という結果になった。樹脂を加熱していくと様々な化学反応が併発し、発熱反応と吸熱反応が混在することになるが、DTA 曲線は常に正の範囲（発熱側）にあり、

燃焼の挙動として妥当な結果である。重量減少が開始した 230℃付近より発熱が認められ、約 400℃で大きな発熱が発生した。これは発火の過程を示しており、重量も瞬間的に大きく減少し、発生した熱によって昇温速度のコントロールを超えた温度上昇も記録されている。昇温に伴って発生するガスを MS によって分析した結果を図 5.216 に示す。上述の GC/MS のようにクロマト分離を経ないで質量分析を行うため、同じ分子量を持つ化合物の区別はできない。今回の反応で重要な化合物では、アセトアルデヒドと二酸化炭素が同じ分子量 (44) である。発火と判断された 400℃付近での急激な重量減少に伴って大量にガスが発生するが、MS の結果からも様々な m/z で 400℃付近にシャープなピークが得られている。ここで、発火後に $m/z=44$ として検出される化合物は主に二酸化炭素であると考えられるが、初期段階ではアセトアルデヒドの可能性が高い。また、 $m/z=60$ が低温の範囲でピークを示しているが、これは酢酸である。なお、 $m/z=15$ および 43 は酢酸およびアセトアルデヒドのフラグメンテーションであると判断できる。

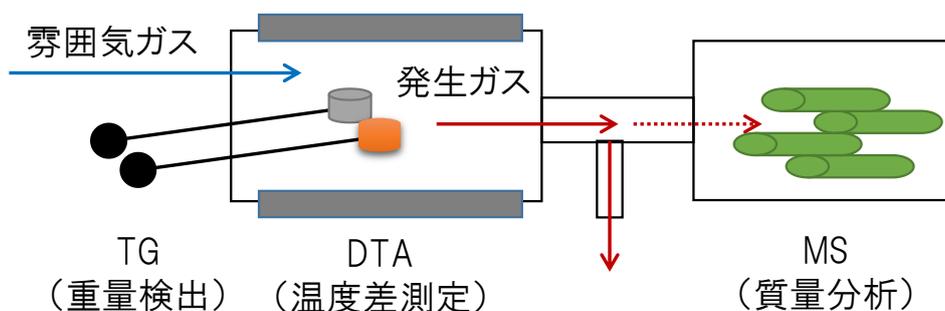


図 5.214. TG-DTA-MS システム図

表 5.94. TG-DTA-MS の分析条件

試料重量	5.697 mg
測定装置	リガク製 Thermo Mass Photo
MS 条件	イオン化法： EI 法 質量範囲： $m/z = 10 \sim 200$
分析条件	温度： 25 °C → 600 °C 昇温速度： 10 °C/min 測定雰囲気： 疑似 Air (80%He+20%O ₂)

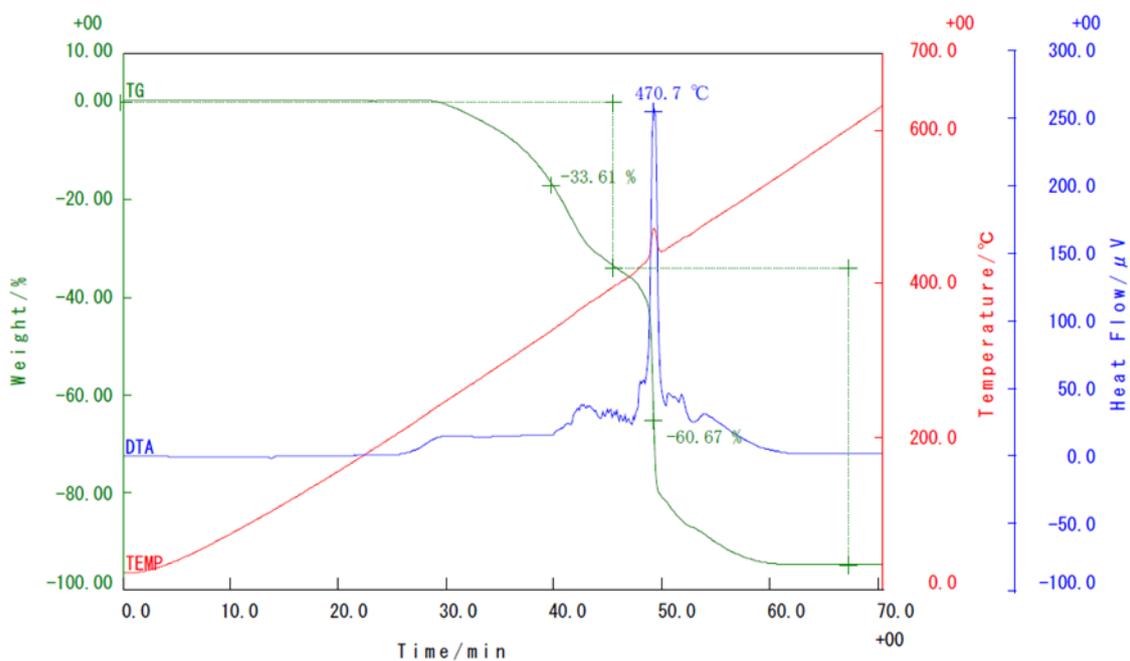


図 5.215. TG-DTA の結果

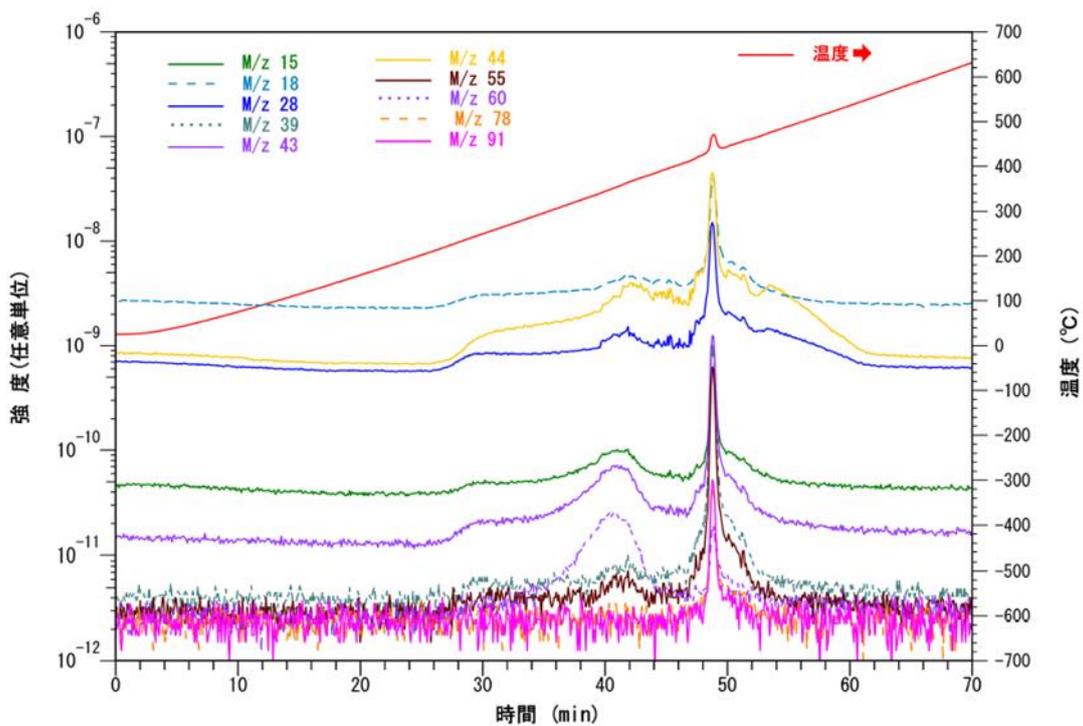


図 5.216. MS の結果

(7) オンサイト成分分析実証

株式会社浜田・京都 PV リサイクルセンターに設置された実プロセスに装備されているオ

ンサイト XRF 分析装置によるカバーガラスの自動成分分析の結果を検証した。オンサイト XRF は成分濃度の定量計算に 1 点検量線法を採用している（標準物質：NIST620 ソーダライムガラス）。現場で記録された分析結果の一例を表 5.95 に示す。成分の合計が 100% を大幅に超えているが、各成分に対し、それぞれの検量線を適用して定量計算を行うため、プラス側に生じている分析誤差が累積させているためである。本記録における濃度は元素の「換算値」とラベルが付されているが、酸化物相当の値である。元素基準に換算した結果を表 5.96 に示す。また、分析機関での湿式化学分析および早稲田大学での XRF 分析結果の比較を表 5.97 に示す。オンサイト分析における Na、Mg、Si、Sb の濃度の定量結果がラボでの計測結果と比べて大きい値となる傾向が見られたが、K、As、Pb は定量下限付近であることなどを含め、微量成分の検出挙動は一致していた。

なお、オンサイト XRF の分析では、Si 濃度が高く算出される傾向にあるものの、Na および Ca はソーダライムガラスとして妥当な値である。XRF では B が検出できないため、B の存在によるホウ珪酸ガラスの特定ができないため FT-IR による判定を検討しているが、ホウ珪酸ガラスは Ca を含まないので、オンライン XRF にて Ca の値をモニターすることで、ホウ珪酸ガラス等の一次スクリーニングが可能である。

表 5.95. オンサイト XRF による分析結果の一例

サンプルID	個体	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	As	Sb	Pb
		換算値	換算値	換算値	換算値	換算値	換算値	換算値	換算値	換算値
SH03 g	1	17.02	4.26	1.16	90.16	0.02	9.70	0.00	0.50	0.01
SH03 g	2	15.50	4.83	1.26	94.63	0.05	9.82	0.00	0.46	0.00
SH04g	1	14.39	3.69	0.06	72.08	0.41	7.11	0.06	0.00	0.00
SH04g	2	12.68	1.82	1.56	92.77	0.00	11.07	0.00	0.42	0.00
SH05g	1	12.27	1.02	1.63	92.80	0.00	11.94	0.00	0.38	0.00
SH05g	2	10.91	0.99	1.81	92.77	0.00	11.92	0.00	0.39	0.00

表 5.96. オンサイト XRF による分析結果の元素基準への換算

サンプルID	個体	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	As	Sb	Pb
SH03 g	1	12.63	2.57	0.61	42.15	0.02	6.93	0.00	0.42	0.01
SH03 g	2	11.50	2.91	0.67	44.24	0.04	7.02	0.00	0.38	0.00
SH04g	1	10.68	2.23	0.03	33.70	0.34	5.08	0.04	0.00	0.00
SH04g	2	9.41	1.10	0.83	43.37	0.00	7.91	0.00	0.35	0.00
SH05g	1	9.10	0.62	0.86	43.39	0.00	8.53	0.00	0.32	0.00
SH05g	2	8.09	0.60	0.96	43.37	0.00	8.52	0.00	0.33	0.00

表 5.97. 湿式化学分析およびラボにおける XRF 測定の結果

ID-個体	分析手法	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	As	Sb	Pb
SH03g-1	FUS-MS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00073
	FUS-ICP	10.40	2.28	0.68	33.8	< 0.1	6.30	—	—	—
	INAA	—	—	—	—	—	—	< 0.00005	0.18	—
	PGNAA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	WDX-XRF	7.56	1.67	0.84	32.2	0.048	6.47	ND	0.19	ND
	EDX-XRF	6.67	1.87	1.56	35.2	ND	6.8	ND	0.12	ND
	Handy-XRF	-	2.26	0.69	35.5	ND	6.05	ND	0.19	0.0008
SH03 g -2	FUS-MS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00256
	FUS-ICP	10.30	1.80	0.43	33.1	< 0.1	6.78	—	—	—
	INAA	—	—	—	—	—	—	< 0.00005	0.12	—
	PGNAA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	WDX-XRF	6.92	1.30	0.38	31.7	0.032	6.87	ND	0.12	ND
	EDX-XRF	6.64	1.47	0.96	35.6	ND	7.5	ND	0.15	ND
	Handy-XRF	-	1.86	0.34	35.9	ND	6.60	ND	0.12	ND
SH04g-1	FUS-MS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00083
	FUS-ICP	10.40	0.09	0.79	33.7	< 0.1	7.66	—	—	—
	INAA	—	—	—	—	—	—	< 0.00005	0.15	—
	PGNAA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	WDX-XRF	6.64	0.08	0.83	32.8	ND	8.22	ND	0.16	ND
	EDX-XRF	6.61	ND	1.65	35.4	ND	8.30	ND	0.19	ND
	Handy-XRF	—	ND	0.77	35.0	ND	7.52	ND	0.16	0.0004
SH04g-2	FUS-MS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00089
	FUS-ICP	10.50	0.09	0.79	33.4	< 0.1	7.70	—	—	—
	INAA	—	—	—	—	—	—	< 0.00005	0.15	—
	PGNAA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	WDX-XRF	5.90	0.07	0.87	33.1	0.029	8.25	ND	0.16	ND
	EDX-XRF	6.02	ND	1.70	35.7	ND	8.34	ND	0.19	ND
	Handy-XRF	—	ND	0.78	36.1	ND	7.38	ND	0.18	0.0003
SH05g-1	FUS-MS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00218
	FUS-ICP	10.40	2.11	0.50	33.4	< 0.1	6.02	—	—	—
	INAA	—	—	—	—	—	—	< 0.00005	0.18	—
	PGNAA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	WDX-XRF	7.25	1.39	0.51	32.7	0.034	6.32	ND	0.20	ND
	EDX-XRF	6.44	ND	1.04	36.1	ND	6.53	ND	0.23	ND
	Handy-XRF	—	2.12	0.46	36.0	ND	5.83	ND	0.20	0.0019
SH05g-2	FUS-MS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00144
	FUS-ICP	10.50	2.14	0.51	33.7	< 0.1	6.09	—	—	—
	INAA	—	—	—	—	—	—	< 0.00005	0.18	—
	PGNAA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	WDX-XRF	7.27	1.43	0.51	32.5	0.027	6.39	ND	0.19	ND
	EDX-XRF	6.95	ND	1.07	35.7	ND	6.57	ND	0.24	ND
	Handy-XRF	—	2.09	0.50	35.4	ND	5.79	ND	0.19	0.0014

(8) LCA の対象となる分解・分離・濃縮プロセスの検討

実験結果に基づき、フレーム等を取り外した太陽光パネルに対して、①ガラス付太陽光パネルの物理粉砕、②ガラス分離後セルシートの物理粉砕、③ガラス分離後セルシートの電気

パルス処理のプロセスを以下のようにまとめた。太陽光パネルからのガラス分離はホットナイフ分離法®とする。

①ガラス付太陽光パネルの物理粉砕プロセスは、早稲田大学のラボ機を用いた試験結果をもとに整理した（図 5.217）。一次粉砕のカッターミル（オリエントミル）で粗粉砕を行い、小粒径粒群は Ag の濃縮が認められるため、そのまま金属回収に仕向けられる。ここでは、2 mm 以下の粒群とした。2 mm 以上の粒群に対し、二次粉砕（インテンシブミキサー、アトライタ、振動ミル）によって樹脂に付着している Si や Ag といった金属が剥離することで小粒径粒群に濃縮される。

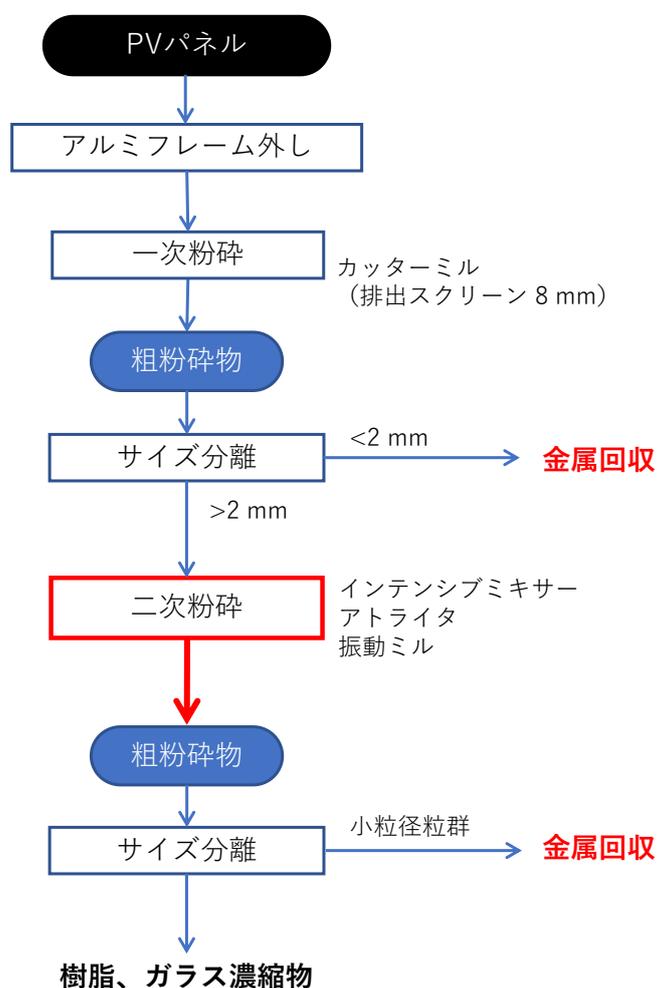


図 5.217. ガラス付太陽光パネルの物理粉砕プロセス

②ガラス分離後セルシートの物理粉砕プロセスは、株式会社浜田・京都 PV リサイクルセンターの実プロセスでカッターミル粉砕およびサイズ選別を行った結果を中心に整理した（図 5.218）。目開き 20 mech (0.87 mm) の篩機によるサイズ分離を行い、金属が濃縮している小粒径粒群は金属回収に仕向けられる。篩下に金属が濃縮されるため、篩上の粒群の

金属（特に Ag）は低濃度となる。金属価格によっては金属回収の対象にもなり得るが、さらなる金属濃縮のため二次粉碎などを追加するといった選択肢もある。

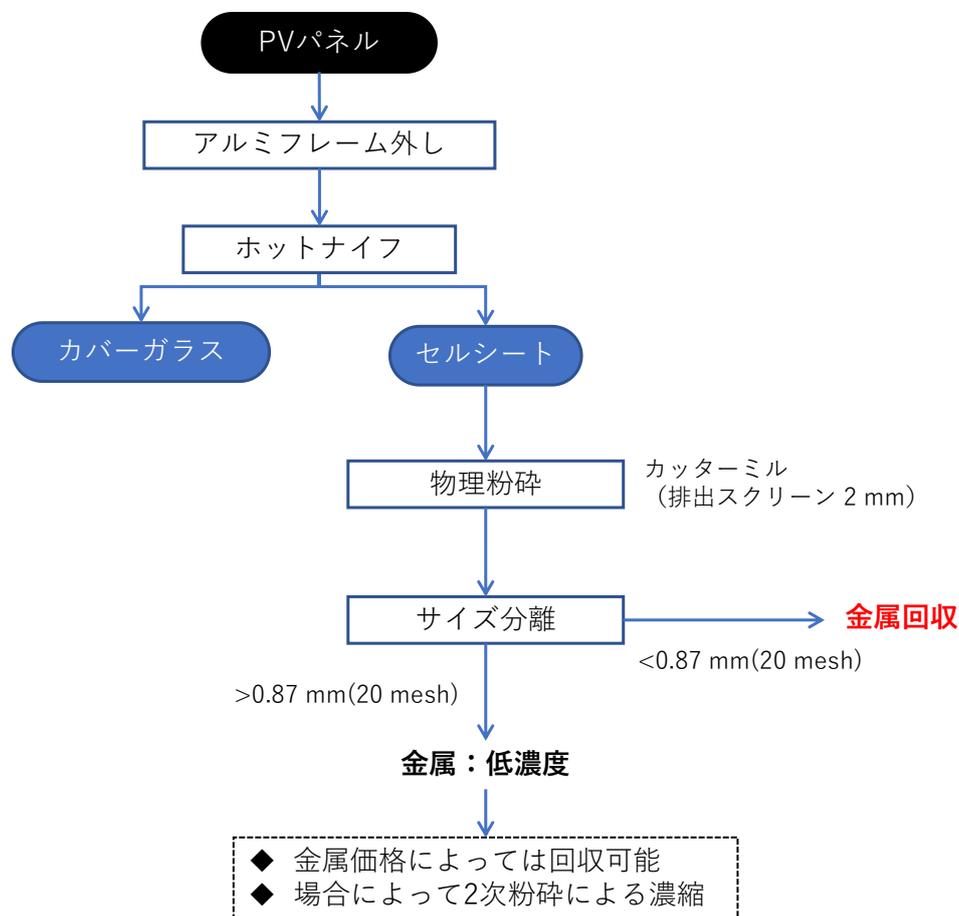


図 5.218. ガラス分離後セルシートの物理粉碎

③ガラス分離後セルシートの電気パルス処理は、後段にオリエントミル粉碎を組み合わせたプロセスを検討した（図 5.219）。電気パルス処理の段階でプラズマ化の効果で約半分の Ag が微粒子で回収されるとともに、発生する衝撃波によって一部の銅バスバーが脱離する。これら微粒子やバスバーは金属回収に仕向けられる。残存するセルシートは、カッターミル（オリエントミル）によって処理することで、樹脂表面に残った Ag や Si が容易に剥離するので、粉碎後のサイズ分離で金属が濃縮した小粒径粒群を得ることができる。

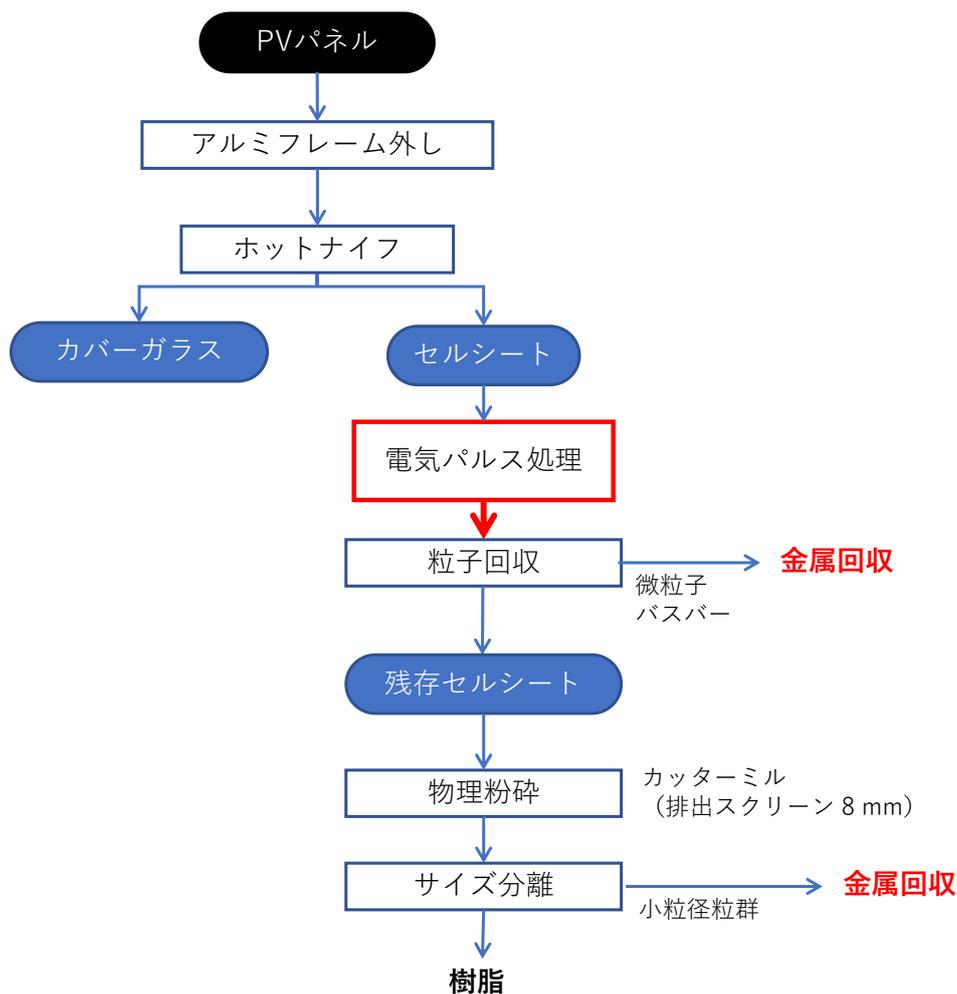


図 5.219. ガラス分離後セルシートの電気パルス処理プロセス

5.8.2 カバーガラス用途の拡大

(1) リサイクル受け入れ基準の検討

ガラスカレットのリサイクルでは、異物の混在が大きな問題になる。しかしながら、異物の他にも、太陽光パネルに固有の問題として、太陽光パネルで用いられるカバーガラスは、日本で生産されているとは限らない。その結果、一部の太陽光パネル用カバーガラスでは、As や Sb が用いられているものがあると懸念されていた。例えば、As 濃度が 100ppm 程度を超えるものは、製品中の As 濃度が問題になるため、受入側で許容されないと考えられている。Sb が用いられている場合には、ある程度は許容されると考えられるが、工場排水中の濃度、製造工程へのダメージ、製品からの溶出などの課題が考えられており、原料中の Sb の濃度許容値があると考えられている。しかしながら、少なくとも本実証においてカバーガラスの組成を実際に観測した結果からは、As や Sb が問題になるような濃度で使用されているカバーガラスはなかった。そのため、太陽光パネルに固有の問題として考えられてきたこれら元素の問題は考慮しないこととした。

As ならびに Sb が入っていないカバーガラスのみであれば、板ガラスやガラスびんの原料にもなり得る。一方、カバーガラスには、アルカリ (Na₂O) が含まれており、膨張率が大きいため、無アルカリガラスが用いられるガラスファイバー（長繊維）や LCD ディスプレー用ガラスの原料には適さない。

本節では、既にカレットの受入基準に関する情報が得られる板ガラス、ガラスびん、用途として期待されるグラスウール、タイル、セラミックブロックについて、受入基準に関する情報を集約した。特にグラスウールについては、十分な情報が得られないため、次節の実証試験を通して、使用済み太陽光パネル由来のカレットに固有の受入基準を検討した。

① 板ガラスへのリサイクル

板ガラスにおけるガラスカレット受入れ基準は、板硝子協会より使用済み自動車由来のガラスカレットの受入れの検討において示されたことがある。ただし、使用済み自動車由来と特定されていたため、合わせガラスの中間膜やステッカー、フィルムといった、実情に照らして混在する可能性のあるものを特定して記されていた。そこで、それらの混在物を構成物質によって再整理したものを表 5.98. に示す。

表 5.98. 板ガラスにおけるガラスカレット受入れ基準

不純物の種類	大きさ	許容量
① 有機物（樹脂、紙、ゴム、木片等）	10 mm 以上	0
	10 mm 未満	20ppm 以下
② 酸化物系無機物（石、砂、セラミックス、セメント等）	0.5 mm 以上	0
	0.5 mm 未満	10ppm 以下
③ 金属 Fe（炭素鋼スクラップ）	1 mm 以上	0
	1 mm 未満	10ppm 以下
④ 金属 Al、金属 Ni、金属 Cu（Al、Ni 合金、Ni 系特殊鋼、Cu）		0

有機物については、ガラスの熔融プロセスが高温であることから、熱分解されることが想定され、10 mm 未満の大きさのものであれば 20ppm の許容とされた。ただし、大きなサイズになると、熱分解に時間がかかることが想定され、周りの原料が熔融したのちに熱分解することで、発生する気体がうまく抜けないなどのトラブルの要因が考えられた。そのため、10 mm 以上の大きさのものは許容されないとされた。

酸化物系の無機物は、物質によってはガラス原料と変わらないものもあると考えられるが、融点が高かったり、S 分を含んでいたり、一部のは製品性能に悪影響を及ぼすことが考えられた。そのため、熔融を担保するためのサイズと成分のための許容量が、酸化物系無機物の中でも問題になる混在物を想定して設定されているものと考えられた。

金属 Fe に関しては、ソーダ石灰系板ガラスの原料にも酸化鉄があるため、酸化されてしまえば問題はない。そのため、反応のためのサイズと反応しきらずに金属として残ることを回避するための許容量が設定されているものと考えられた。反応しなかったものは、ガラスよりも比重が高く炉の底に溜まることが想定される。

金属 Al に関しては、ソーダ石灰系板ガラスの原料にも酸化アルミニウムはあるものの、Fe とは異なり、大気中の O₂ ガスと反応するよりも、周りの酸化物の O と反応し、周りの酸化物を還元してしまうため、混在が問題となる。そのため、一切の混入が許容されていない。金属 Ni ならびに金属 Cu については、酸化物にはなりにくいものの、S (硫黄) と反応しやすく、NiS では低温での形態変化に伴う体積膨張により、強化ガラスの使用時自然破損の要因として知られている。また、金属として残る場合は、これらの金属はガラスよりも比重が高いため熔融炉の底に溜まることが考えられる。そのため、考え方によっては製品には悪影響はないものの、一度操業を始めると年単位で補修はしない炉であるため、その混入は一切許容されていないと考えられた。

② ガラスびんへのリサイクル

ガラスびん向けの原料に関する受入れ基準が、日本容器包装リサイクル協会から示されている。こちらも、容器包装由来のガラスカレットを想定した基準となっていたため、先の板ガラスの受入れ基準と同様に、それぞれの物質の系統ごとに基準を再整理した (表 5.99)。なお、ここでは、混在物の大きさに関する規定は特に記されていない。

表 5.99. ガラスびん向け原料受入れ基準

不純物の種類	大きさ	許容量
① 有機物 (樹脂、木片等)	—	50ppm 以下
② 酸化物系無機物 (クロマト等の鉱石類、難溶耐火物、異質ガラス (結晶化ガラス))	—	0
同 (陶器・磁器)	—	15ppm 以下
同 (レンガ、砂礫、コンクリート等)	—	30ppm 以下
異質ガラス (結晶化ガラス)	—	0
同 (クリスタルガラス、光学ガラス)	—	0.1%以下
③ 金属 Fe	—	1.0ppm 以下
④ 金属 Al	—	0.2ppm 以下
その他金属 (Cu, Pb, Cu-Zn)	—	1.5ppm 以下

有機物については、板ガラスの 20ppm よりも高い 50ppm となっている。考えられる理由の一つとして、そのプロセスにおいて熱分解したガスが抜けやすいかどうかの違いが挙げられる。酸化物系無機物について、ガラスびん用の溶解窯にて溶解しないものを特定して

いる点が特徴的である。それらの混在は許容していない。陶器・磁器については、構成する元素が共通していることが要因と考えられるが、15ppm まで許容されている。同様の理由と考えられるが、その他の氧化物系無機物は 30ppm まで許容されている。さらに類似の異物として異質ガラスがある。クリスタルガラスや光学ガラスは、0.1%まで許容されている。

金属 Fe は、板ガラスの基準よりも低い許容値となっている。これも考えられる理由の一つはプロセスの違いであり、溶解時間が板ガラスに比べて短いことが要因と考えられた。金属 Al は、板ガラスの基準では許容されなかった一方、ガラスびんでは 0.2ppm と極低濃度ではあるものの許容された。おそらく、リングやラベルとして混入がやむを得ない、という実態を反映した基準になっていることが想定される。その他の金属も、酸化しないリスクがあると考えられるが、1.5ppm の許容がある。

③ タイルへの受入れ基準

環境研究総合推進費 3-1708 (代表：早稲田大学大和田秀二教授) において、使用済み太陽光パネルを破碎・選別したガラスカレットを用いて、用途として有望なセラミックタイルの作製を目指して、高温温度帯試験と配合試験を実施している。配合後の摩砕工程にて、粒度の大きな試料では、大きな混在物が摩砕を阻害することを明らかにしている。

④ セラミックブロックへの受入れ基準

環境研究総合推進費 3-1708 (代表：早稲田大学大和田秀二教授) において、同じく使用済み太陽光パネルを破碎・選別したガラスカレットを用いて、セラミックブロックの試作を行っている。金属の混在物は製品表面に突出部を形成するため、混雑物が一定水準以下でなければ原料として不適であることが分かった[8]。また、粒度の大きなガラスも同様に製品表面に突出部を形成することが分かり、粒度は 1mm 以下のものが望まれることを明らかにしている。

⑤ グラスウールへの受入れ基準

2019 年度自動車リサイクルの高度化等に資する調査・研究・実証等に係る助成事業「地理条件及び選好・忌避成分に着目した自動車ガラス再資源化実証」(実施者：三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社) において、廃自動車から回収されるガラスカレットを用いて、熔融試験、繊維化試験、ならびにグラスウールの試作を行っている[9]。その結果、廃自動車由来のガラスを 100%原料として、従来製品と同等の性能を提供するグラスウールの作成に成功している。当研究を通して、受入基準を明確化することが必要と結論付けるとともに、受入基準を以下のように提案している。金属類ならびに有機物の許容については、ガラスびん向け原料の基準を参照し、同程度としている。他の種々の異物について、含まないこととしているのは、当然品質に対してリスクがないことになる。実際には、それらの中でも一部の混在物に対しては少しの許容はあるものと考えられるが、まだそこまでの知見が

得られないため、現行の提案としては含まないこととなっていると考えられる。

さらには、先の研究では、廃自動車由来のガラスカレットであったため、廃太陽光パネル由来のガラスカレットとは混在する可能性のある異物の種類が異なる。本研究では、次節の実証実験により、廃太陽光パネル由来のガラスカレットにおける許容基準を明らかにすることが望まれる。

表 5.100. 廃自動車からのガラスカレットを用いた試作に基づく、グラスウール向けガラスカレット原料の受入基準（案）と解体業者に要求される事項

異物の区分		許容値	解体業者に要求される事項
金属類	鉄	1.0 ppm 以下	端子を取り除く必要がある
	アルミニウム	0.2 ppm 以下	
	その他（銅素材・鉛など）	1.5 ppm 以下	
陶磁器	陶器・磁器	含まないこと	—
石類	クロマイト等の鉱石類・難熔性耐火物・コンクリート・がれき類など	含まないこと	床面に落ちがモノの回収時、石類を混入させない
異質ガラス	結晶化ガラス・クリスタルガラス・光学ガラスなど	含まないこと	
有機物	プラスチック・木片など	50 ppm 以下	基準以下までプラスチックをあらかじめ除去する

1 つには、太陽光パネルの構成要素から、混在する可能性のあるものを明らかにする必要がある。実際のホットナイフ分離法®や電気パルス法などを用いた分離・選別技術を用いて、廃太陽光パネルから回収したカレットについて、混在する異物の種類を同定する。ホットナイフ分離法®で回収されたガラスカレットは、カバーガラスを鋭利に分離するため不純物が混在していないと考えられていた。しかしながら、次節で得られた結果からすると、本事業実施前に想定されていたよりも多くの異物が混在していたということがわかった。実際に見られた異物は、別途の早稲田大学の調査の結果も参照すると、金属（銀配線）と樹脂類（EVA 樹脂とシリコーンゴム）であると考えられた。シリコーンゴムは、外周部とアルミパネルとのシール剤と推察された。

異物によって制約を受ける可能性があるのは、プロセス異常、製品性能、製品組成の 3 つである。ここで、技術的な知見に応じて許容値を考察する。

○プロセス

プロセスにおいては、黒煙（煤）ならびに異臭が発生した。これは、手選別では除去しきれなかった樹脂を構成する有機物成分が燃焼したものと考えられる。ただし、シリコーンゴ

ムは煙や異臭のする物質を排出せず、燃焼時には CO₂、水蒸気、シリカのみと考えられる。そのため、EVA に起因して発生した可能性が高い。単純な EVA の燃焼試験では、燃焼後すぐに煙が発生し、200 秒程度まで煙の発生量は増加し、250 秒くらいでほぼ燃焼しきる[10]。グラスウールメーカーからのコメントとして、作業環境への影響、近隣住民からのクレームが懸念されるものの、排煙装置を設置することにより対応できる可能性があると考えられている。

○製品性能

熔解中に発泡が見られた。その結果、炉内でのカレットの温度が均質にならずに、スピナーで重要な特性となる粘性がバラついてしまい、試作品では、その大半が製品としての要求を満たさなかった。熔解中の発泡の要因は、混在する樹脂類から発生した CO₂ や水蒸気であると考えられる。グラスウールメーカーからのコメントとして、熔解のための炉の長さを十分にとれば、スピナーに投入するまでにそれらが燃焼しつくすため、対応できる可能性があると考えられている。また、一部では、製品表面に焼け焦げによる黒い発色が見られた。上記同様、発泡とともに、燃え残りもあったものと考えられる。

○製品組成

主要な酸化物成分については、従来のグラスウールと少し異なる組成のものもあったが、特に問題はなかった。本節はじめに記したように、カバーガラスの組成を分析した結果からは、As と Sb の問題を考慮する必要はないと考えられた。

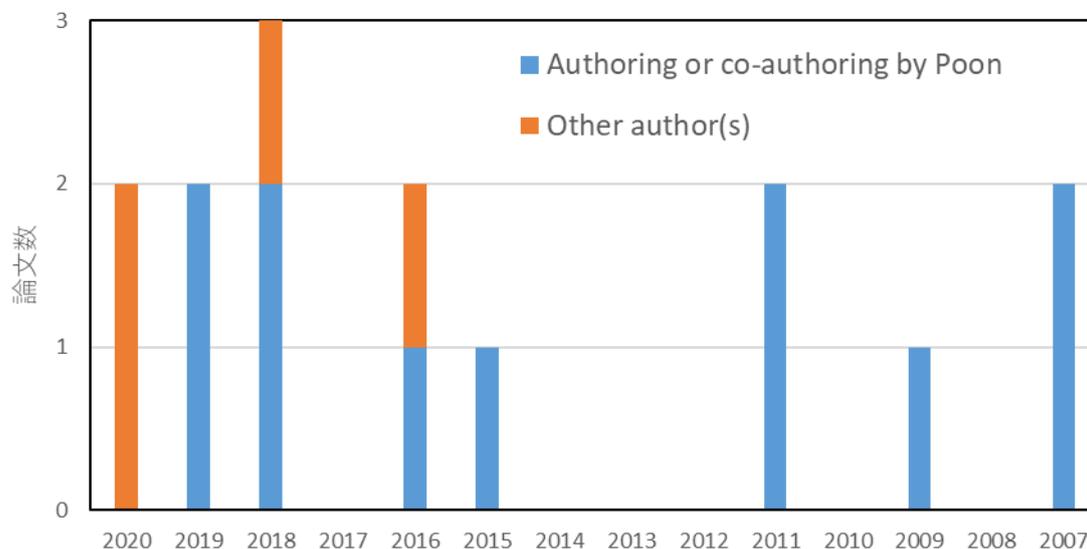
最後に、EVA やシリコーンゴムの受入基準は、他の異物と異なり、廃太陽光パネルに固有の混入異物であるため、グラスウールメーカーにて、原料のうちの何パーセントを本カレットとして使うかによって異なると考えられる。例えば、原料の 50%として利用する想定より、25%として利用する想定の方が、許容値が倍になると考えられる。そのため、先述の 5.8.1 項リサイクル実証試験の結果、ならびに本項(3)グラスウールの試作の結果を踏まえ、5.8.4 項有機物がグラスウールに及ぼす影響及び事業化の可能性の検討にて考察する。

(2) カバーガラスのリサイクル用途拡大の検討

ガラスカレットの二次資源としての利用について、近年、コンクリート製品への利用を検討した論文の掲載数が増えていることが分かった。Web of Science の論文データベースにて、「glass cullet」、「recycling」、「concrete block」の 3 つのキーワードを and で検索した結果、2018 年以降は、毎年 2 報以上の文献が出版されていた (図 5.220(a))。また、2019 年までは、ほとんど 1 つの研究グループ (Chi Sun Poon at The Hong Kong Polytechnic University) からの報告であったが、他の研究グループからも報告されてきている。さらに、これら文献の被引用数が、近年顕著に増えてきている (図 5.220(b)) ことも、これら技術へ

の関心の高まりを示しているとも考えられた。

(a)



(b)

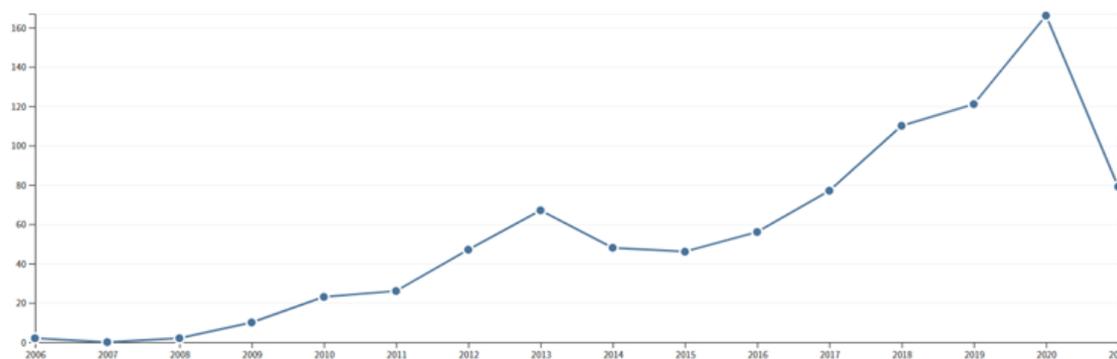


図 5.220. Web of Science でキーワード (“glass cullet,” “recycling,” and “concrete block”で検索した結果の出版年別論文数(a)とそれら論文の各年引用数の推移(b)

さて、これら論文から、ガラスカレットをコンクリートブロックの原料として利用する際、以下のことが分かった。

コンクリートブロック製造時の乾燥収縮が抑制される (図 5.221)。ただし、粉末フライアッシュ (pulverized fly ash (PFA)) との混合によりさらに抑制される。

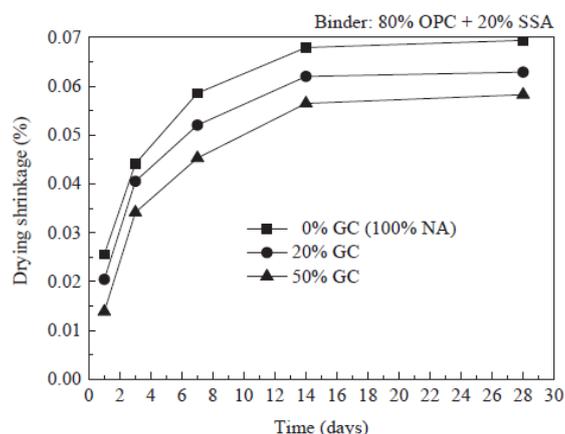


図 5.221. コンクリートブロックにおける乾燥圧縮率の時間変化 ordinary Portland cement (OPC), sewage sludge ash (SSA) [1]

透水性コンクリートの生産時にガラスカレットにより天然骨材 (natural aggregate (NA)) を 100% 代替しても、工業規格の強度を満たす。さらに、リサイクル骨材を利用するよりも、圧縮強度が高い (図 5.222)。これらは、代替率あるいは代替骨材による密度低下が原因であると考えられている[2]。

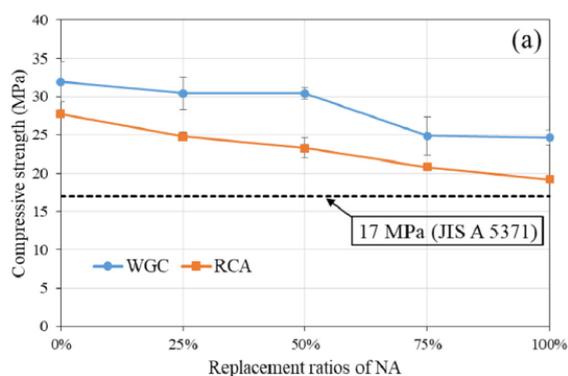


図 5.222. 天然骨材 (natural aggregate (NA)) の代替率による透水性コンクリートの圧縮強度の変化 waste glass cullet (WGC), recycled concrete aggregate (RCA) [2]

同様に、舗装ブロック用のプレキャストコンクリート (PC) の生産にガラスカレットを用いた際にも、下図のように、ガラスカレットやガラス粉 (glass power (GP)) を用いることで圧縮強度が低下することはなかった[3]。

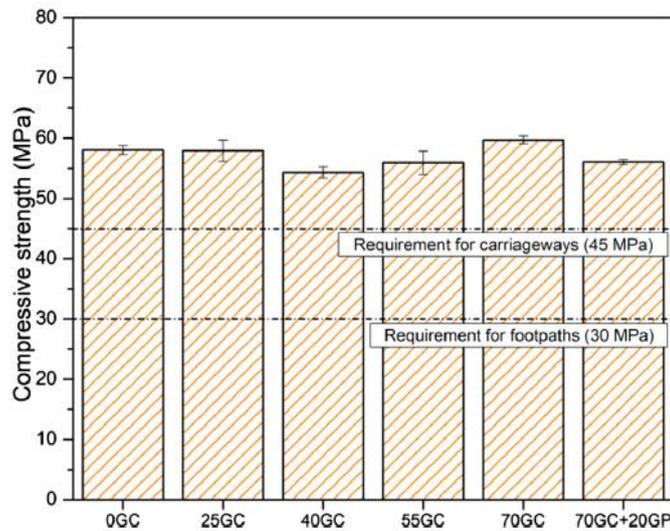


図 5.223. ガラスカレットとガラス粉の舗装ブロックの圧縮強度に対する影響[3]。

コンクリートにおけるアルカリ骨材反応は、構造用コンクリートにおいても、その劣化の要因としてよく知られている。これは、本来アルカリ性を示すコンクリートが **alkali-silica reaction (ASR)**により、劣化する。具体的には、ASR の反応場において生成される ASR ゲルが膨張圧を生じ、セメントの引張強度の限界を超えるとクラックとなる。ここで、ガラスカレットがシリカを多く含むことから、これらが反応性を有すると、ASR による膨張を引き起こす可能性があると考えられる[4][5]。

ガラスカレットを 70%含有した舗装ブロック用のプレキャストコンクリートにおける加速試験(80℃の NaOH に浸漬)では、21 日後には、ASR による膨張の許容度とされる 0.10% に近くなり、28 日後の試料にて 0.15%を超える膨張が見られ、試料表面にクラックが観察された[3]。

この ASR は、混合するバインダーにより抑制できることが示されており、SSA(Sewage Sludge Ash)などがその効果が高いと示された[1]。その他にも、面白いことにガラスカレットをさらにミリングしたガラス粉をバインダーに混合することでも同様の効果が得られると報告されている[3]。詳細なメカニズムは明確にはなっていないものの、SSA についてもガラス粉についても、シリカ質微粉末の供給により ASR による膨張が緩和されるとされる[6]。さらにガラス粉については、ガラスカレットに比べて比表面積が大きいことから、優先的にガラス粉が ASR を生じると考えられる。一方、ASR によるクラックの起点がガラスカレット内部と言われていることから、ガラス粉による ASR ではクラックが生じないと考えられた。さらに、ガラス粉の添加によって、ガラスカレットからの溶出が著しく減少することも報告されている[7]。これはガラス粉による ASR によりガラスカレット近傍の水酸化物イオン濃度の低下に寄与したと考えられた。

これら上記の論文では、ガラスカレットを利用した実験においては、ガラスびん由来の

“きれいな” ガラスカレットを利用しており、2020 年度実証のグラスウール試作において問題となったような、ガラスカレットに有機物が付着している場合の影響について論じた報告は見当たらなかった。ただ、板ガラスやグラスウールとは異なり、焼成プロセスがないため、異なる挙動を生じることが想定される。

(3) グラスウールの試作

① 試作試験（2020 年 7 月～11 月実施）

1) 試作用カレットの作成（2020 年 7 月 31 日、9 月 14 日）

ホットナイフ分離法®によって太陽光パネルから取り外したカバーガラスを使用し、JW ガラスリサイクル(株)若柳工場にて試作用のカレットを作成した。カレット作成の主なプロセスは、手選別 2 人にて目視で確認できる異物（樹脂及び金属等）を除去、金属検知器、破碎機を使用した。カバーガラスに付着していた異物と溶解前のカバーガラスを図 5.224 に示す。

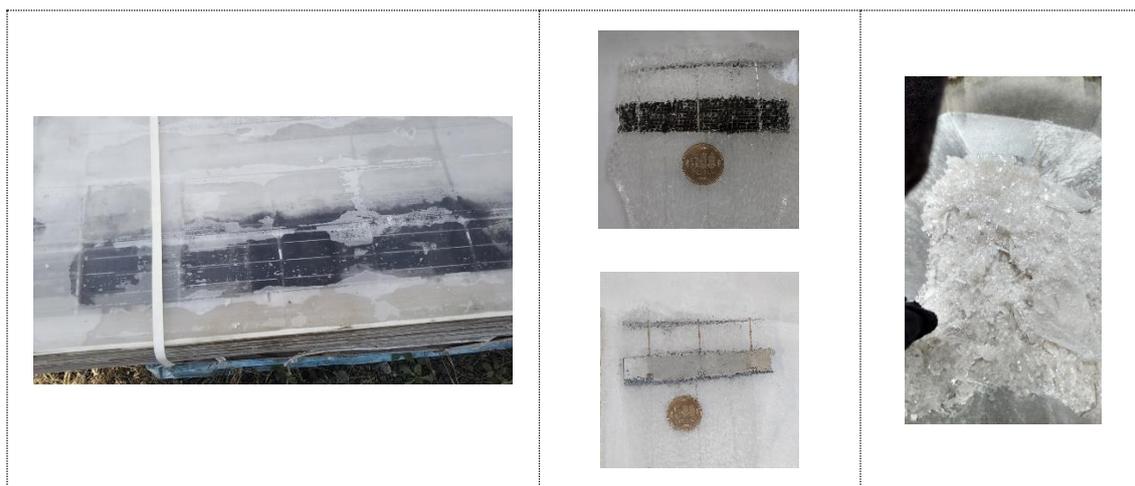


図 5.224. 破碎・手選別前のカバーガラス（左）、付着していた樹脂（中央上）・金属（中央下）、カレット化後、溶解前のカバーガラス（右）

2) 溶解性試験（2020 年 8 月 3 日）

前項①で作成したカレット 400kg を使用し、(株)ワンワールド若柳工場にて溶解性試験を実施した。カレットが溶解する際、黒煙、異臭、煤が発生したが、溶解及び後述の繊維化もできた。発生した黒煙、異臭、煤は、カレットの表面に付着していたシリコン等の樹脂に由来するものと思われる。煤が付着する前の溶解試験炉と、溶解試験炉内の煤の様子を図 5.225 に示す。



図 5.225. 煤が付着する前の熔解試験炉（左）、熔解試験炉内の煤（右）

- 3) 繊維化試験（2020年8月3日）前項①で作成したカレットを使用して、㈱ワンワールド若柳工場にて繊維化試験を実施するとともに、採取した繊維の成分分析を実施した。測定装置は、波長分散型蛍光X線分析装置（ブルカーエイエックス社製、S8TIGER）、ICP 発光分光分析装置（堀場製作所製、ULTIMA II）を用いた。蛍光X線分析では、試料をカップに移し、真空雰囲気下で測定を行った。検出された元素に関しては、酸化物として演算を行った。ホウ素等の微量元素に関しては、フッ酸および硝酸による分解を行い、ICP-AESにて測定を行った。成分分析の結果を表 5.101 に示す。

作成したカレットを用いて形成された繊維の顕微鏡写真を、通常カレットを使用したものとの比較として図 5.226 に示す。適正な繊維が形成されていたことがわかった。

表 5.101. 成分分析結果（公益財団法人岩手県南技術研究センター）

成分	PV カレットを 使用した繊維	通常カレットを 使用した繊維	ワンワールド社の評価
SiO ₂	72.25%	71.32%	基本的な成分だが誤差の範囲で問題なし。
CaO	17.76%	17.09%	
Na ₂ O	6.32%	6.18%	
MgO	1.52%	1.75%	
Al ₂ O ₃	1.32%	1.58%	
Sb ₂ O ₃	0.07%	<0.01%	(※1)。
SO ₃	0.35%	0.46%	
K ₂ O	0.23%	1.39%	
Fe ₂ O ₃	0.07%	0.24%	通常繊維よりも少ないが問題なし。
As	730ppm	130ppm	通常繊維よりも多い。(※2)
B	95ppm	72ppm	
Cd	<1ppm	<1ppm	
Cr	10ppm	18ppm	熔融炉で発生したものと推測。(※3)
Hg	<5ppm	<5ppm	
Pb	16ppm	20ppm	
Se	<10ppm	<10ppm	

※1 (SbO₃)：規格に対しては判断対象外だが（規格として定めていない）、溶出量によっては忌避対象となる可能性あり。

※2 (As)：規格に対しては判断対象外だが（規格として定めていない）、溶出量によっては忌避対象となる可能性あり。板ガラスカレットを使用している従来の繊維では検知されない（上記表における通常繊維で 130ppm は、汚染が僅かに入った可能性あり）。亜ヒ酸にならない限り問題ないとは考えるが、消費者に対してイメージが非常に悪いため、許容はできない。

※3 (Cr)：酸化クロム耐火煉瓦を一部で使用しており、機械汚染と考える。

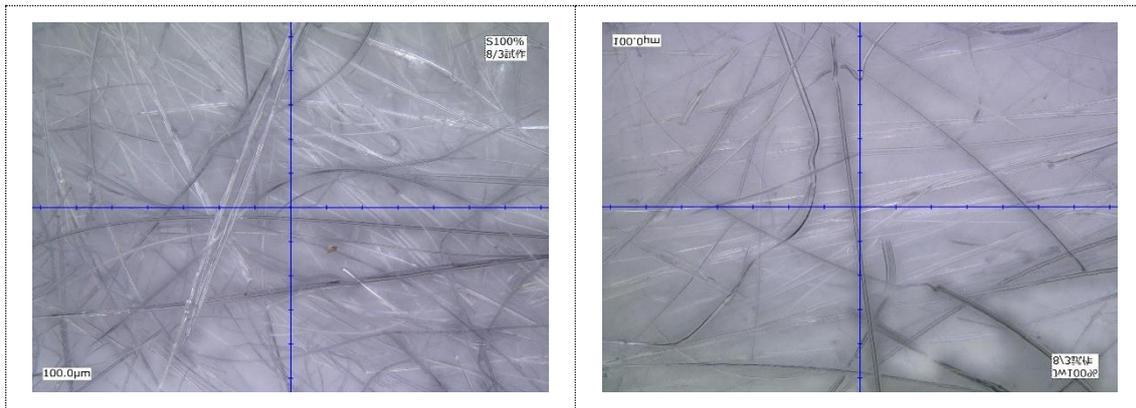


図 5.226. 繊維の顕微鏡写真（カバーガラスカレット使用）（左）、
繊維の顕微鏡写真（通常カレット使用）（右）

4) グラスウールの試作（9月25日）

カバーガラスのカレット 800kg を使用して、(株)ワンワールド若柳工場にてグラスウールを試作した。カレットが熔解する際、熔解炉周辺で黒煙と異臭が発生した。又、熔解炉内の温度が、通常よりも上昇してしまった。さらに、開始から1時間ほど経過後、熔解炉内で泡が発生した。泡が熔解炉内でとどまり、スピナーへの落下速度が不規則となり、繊維化できなくなってしまった。ここまでのところで、出荷基準を満たすグラスウール 50kg を採取して成形、残りは出荷基準を満たせず廃棄した。黒煙や異臭の発生源と考えられる溶解炉内の火炎ならびに黒煙の発生により堆積した煤の写真を図 5.227 に示す。また、試作した製品の不良のものと良品の写真を図 5.228 に示す。

ワンワールド社の見解では、黒煙と異臭の発生、熔解炉内温度の必要以上の上昇、熔解炉内での泡の発生は、ガラス表面に付着していた有機物等が燃えたことによるもので、熔解炉内の温度が必要以上に上昇したことにより、ガラスの粘度が変わったものと推察しており、熔解炉の長さを延長する等の改修を行えば、泡の発生を抑制できるのではないかと見込んでいる。なお、10.6.2 の熔解試験では、原料投入量が 10.6.4 よりも少なかったため、炉内温度に影響は出ず、泡は発生しなかった。



図 5.227. 煤（投入口の直上）（左）、熔解炉内の火炎（右）



図 5.228. 不良品（密度不足）（左）、不良品（焼け焦げ）（中央）、良品（製品）（右）

5) 試作結果の分析（11月25日）

前項 4) で試作したグラスウールの内、出荷基準を満たす 50kg を採取し、品質性能試験（断熱材の熱伝導率試験）を実施した。試験は JIS-A9521（建材用断熱材）の 6.7 熱伝導率 6.7.1 人造鉱物繊維断熱材により、JIS-A1412-2 [熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-第 2 部：熱流計法（HFM 法）] 附属書 B（規定）保護熱板式熱流計法に従って行った。なお、熱流方向は上向きとした。品質性能の試験結果を表 5.102 に示す。なお、表 5.102 には比較のために製品の製造に使用するカレットで試作したグラスウールの測定結果を合わせて示す。太陽光パネルのガラスカレットで試作したグラスウールの熱伝導率は $0.036\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ で、JIS-A9521（建材用断熱材）に定める熱伝導率の基準 ($0.038\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下) を満たすものであった。

表 5.102. 品質性能試験結果（一般財団法人建材試験センター）

評価項目	PV カレットで試作した グラスウール	通常カレットで試作した グラスウール
試験体厚さ [m]	0.100	0.100
単位面積あたりの熱量 [W/m^2]	7.22	7.34
試験体高温側表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]	33.2	33.2

評価項目	PV カレットで試作した グラスウール	通常カレットで試作した グラスウール
試験体低温側表面温度[°C]	13.2	13.2
試験体表面温度差[K]	20.0	20.0
試験体平均温度[°C]	23.2	23.2
熱伝導率[W/(m・K)]	0.036	0.037

② 試作試験（2021年8月～11月実施）

1) 試作用カレットの作製（2021年8月24日、9月21日）

2020年度実証のグラスウール試作においては、熔解プロセスにおいて黒煙が発生する等のプロセス上の課題と、生産物自体にも多くの着色が見られたため、繊維化されたもののうち一部のみしか製品としての適格性がなかったという結果であった。これは、使用済み太陽光パネルから回収されたカバーガラスカレットを原料の100%としていたためであると考えられたため、今年度は、他のガラスカレットとの混合によるグラスウール試作を実施した。なお、2020年度は、同一型式の太陽光パネルからの廃カバーガラスを用いたのに対し、2021年度の実施においては多品種の太陽光パネルからの廃カバーガラスを用いた。

グラスウール試作は、グラスウールメーカーである(株)ワンワールド社の炉にて実施するため、グラスウールの生産プロセスのことを熟知する(株)ワンワールド側のエキスパートの知見ならびに判断を重視した。2020年度の試験結果から、(株)ワンワールド側でのエキスパートジャッジとして、カバーガラスを20%として1回目の試験を実施した。

ホットナイフ分離法[®]によって太陽光パネルから取り外したカバーガラスを使用し、JWガラスリサイクル(株)若柳工場にて試作用のカレットを作製した。カレット作製の主なプロセスは、手選別2人にて目視で確認できる異物（樹脂及び金属等）を除去、金属検知器、破砕機を使用した。残りの80%は通常操業で利用するカレット（建築用の板ガラス由来）とし、コンクリートミキサーを使用して配合した試料での試験を実施した。

今後、使用済み太陽光パネルの発生量の増加が見込まれることから、カレットの発生量と需要量のバランスを考えると、配合比率を上げることが望まれる。そこで、2回目の試験として、ワンワールド側において試験実施を認めていただけるほぼ上限として50%の配合での試験を実施した。

1回目と同様に、配合比率だけを変更し、カバーガラスを50%とし、残りの50%は通常操業で利用するカレット（建築用の板ガラス由来）とし、コンクリートミキサーを使用して配合した試料での試験を実施した。各作業段階での試料等の外観を図5.229に示す。

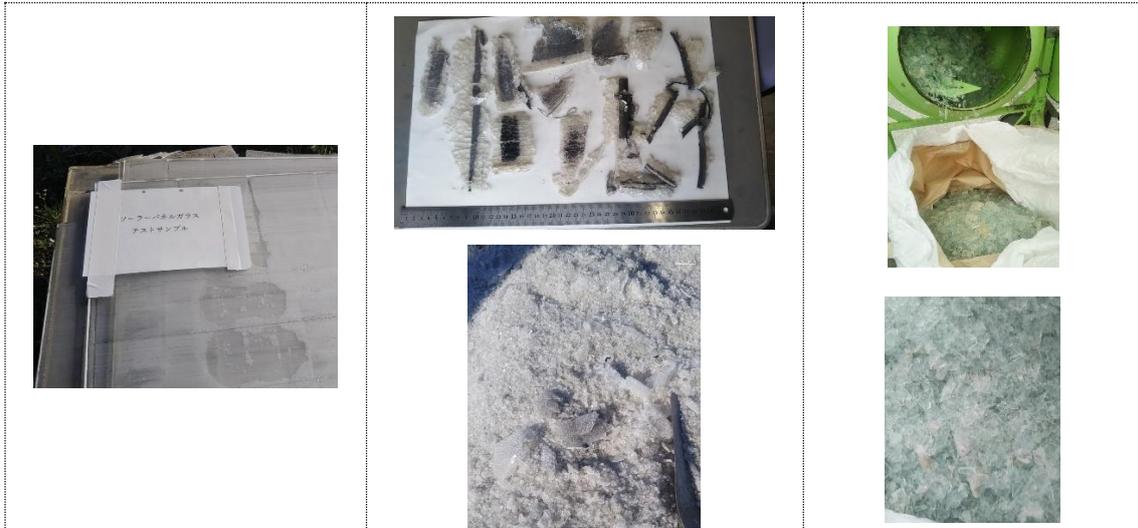


図 5.229. 選別前（左）、除去した樹脂・金属（中央上）、破碎後（中央下）、
攪拌作業（右上）、攪拌後カレット（右下）

- 2) カバーガラス 20%繊維化試験(2021年9月1日)先述の方法で作成したカレット 300 kg を使用して、(株)ワンワールド若柳工場にて熔解性試験を実施した。試作におけるカレット混合比は、先述のようにカバーガラス 20%+板ガラス 80% (重量比) とした。各カレットは、質量計量後、コンクリートミキサーで混合した。試験内容としては、①熔融テストと②繊維化テストを並列で実施した。8:15 にサンプル投入し、9:30 から 11:30 まで熔融炉ならびに、スピナーから排出される繊維を観察した。熔融炉に投入した出発材料としてのガラスカレットの写真を図 5.230 に示す。次に、試験中の熔融炉の原料入り口付近の外観写真を図 5.231 に示す。原料入り口部からは、若干の白煙や刺激臭が感じられたが、昨年度に比べると若干であった。また、炉内の様子を図 5.232 に示す。前年度試験のような、炉内でタール状に燃え続けるような現象は見られなかった。



図 5.230. 出発材料としてのガラスカレットの写真



図 5.231. 試験中の熔融炉入り口の観察写真



図 5.232. 試験中の熔融炉内の観察写真

9:30 と 11:30 のスピナーから排出される繊維の写真を図 5.233 に示す。熔融・繊維化試験は約 3 時間続けた。昨年度の試験のように、ガラスの流量が減る現象も確認されなかった。

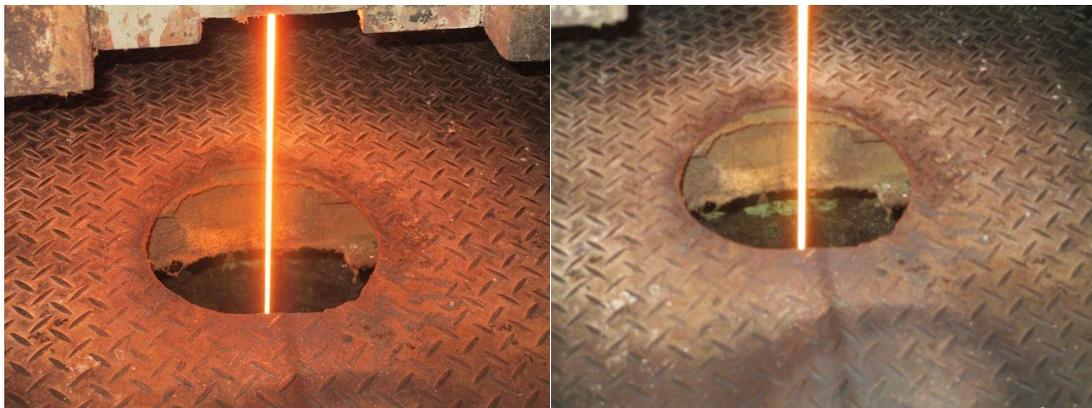


図 5.233. (左) 9:30、(右) 11:30 におけるスピナーから排出される繊維の観察写真

以上のように、20%の配合で熔解試験をしたところ、昨年度と同様に発煙等はあったものの、製品に影響を及ぼすものではなかった。前述の図 5.233 から見て取れるように、比較的良好的な結果であり、この配合比率であれば、実操業でも利用できるのではないかと考えられた。

繊維化できたもののガラス組成を測定した結果を表 5.103 に示す。試料は、0.5 g 精秤し、硝酸 4 ml ならびにフッ酸 6 ml を用いて、マイクロウェーブ処理によりホウ素等の微量元素は溶液として 50 ml を定容したのちに ICP 発光分光分析装置（堀場製作所製 ULTIMA II）にて測定した。その他の元素は、繊維を走査型電子顕微鏡（日立ハイテクノロジーズ社製 SU-3500、アメテック社製 Element）を用いた SEM-EDX にて測定した。なお、元素濃度に関しては、酸化物として換算することでこれら成分を同定した。

表 5.103. ガラス組成測定結果（公益財団法人岩手県南技術研究センター）

成分	PV20%混合カレットを使用した繊維	通常カレットを使用した繊維	ワンワールド社の評価
SiO ₂	69.91%	71.32%	基本的な成分だが誤差の範囲で問題なし。
CaO	11.65%	17.09%	
Na ₂ O	12.27%	6.18%	通常繊維よりも多いが問題なし。
MgO	2.93%	1.75%	
Al ₂ O ₃	2.06%	1.58%	
Sb ₂ O ₃	<0.01%	<0.01%	
SO ₃	<0.01%	0.46%	
K ₂ O	1.18%	1.39%	
Fe ₂ O ₃	<0.01%	0.24%	通常繊維よりも少ないが問題なし。
As	<10ppm	130ppm	
B	44ppm	72ppm	
Cd	<1ppm	<1ppm	
Cr	<5ppm	18ppm	
Hg	<5ppm	<5ppm	
Pb	<5ppm	20ppm	
Se	<10ppm	<10ppm	

成分分析の結果、通常原料として使用しているソーダ石灰ガラスと同等と判断できる。

3) カバーガラス 50%試験 (2021 年 10 月 4 日)

1 回目の試験と同様に、配合比率だけを変更し、カバーガラスを 50%とし、残りの 50%

は通常操業で利用するカレット（建築用の板ガラス由来）とし、コンクリートミキサーを使用して配合した試料での試験を実施した。なお、サンプル量としては 300 kg とした。試料の外観を図 5.234 に、熔融炉への投入状況を図 5.235 に示す。



図 5.234. カバーガラス 50%-板ガラス 50%試料の熔融試験出発材料



図 5.235. カバーガラス 50%-板ガラス 50%試料の熔融炉への投入外観

熔融試験開始から 20 分程度経った際に、発煙が見られた。さらに熔融試験開始から 50 分程度経ったときには、昨年の試験と同様に、炉内での燃焼現象が確認され、異臭も確認された。50%の配合比率では、2020 年度実証と同様のプロセス上の課題が発現したと言える。

次に、繊維化においては、ガラスフィラメントが安定せず（図 5.236）、途中で切れるという現象が見られた。これも灰分や燃え残り有機物などの異物によるものと考えられ、2020 年度実証の結果と類似することとなった。

これらの不具合により繊維化は不可と判断され、炉内の試験用ガラスを取り出した。しかしながら、異常をきたした試験用ガラスを全ては除去することができないため、通常操業にて用いる板ガラスを投入し、炉のクリーンナップをした。クリーンナップ時に、温度が急上昇するなどの不具合も発生し、操業が安定するまでに 1 時間程度を要した。

この結果からは、2020 年度実証の試験と同様に、カバーガラスに付着していた EVA やシリコンが燃焼したものと考えられ、炉のクリーンナップにおいても温度が上昇したことから、残留した PV カレットの中にもまだ燃え残った異物があつたものと考えられた。

さらに、今回の試験においては、100%で実施した 2020 年度実証の試験よりも試験開始からの経過時間が短いタイミングで不具合が発生した。この結果は、付着していた可燃物量が多かったと思われるのが 1 つであるが、必ずしもそれだけではないとも考えられる。他に考えられる要因としては、2020 年度実証の試験において炉内の温度が均一でなかったことから、配合比率が 50%となり、通常操業で用いるカレットがまんべんなく存在することで、熱のばらつきが小さくなり、炉の中で均一に燃焼したことが要因であることも考えられた。つまり、必ずしも今回の供試材中の異物が、2020 年度実証の供試材よりも異物が多かったとは限らないことに留意すべきである。



図 5.236. カバーガラス 50%-板ガラス 50%試料の試験のスピナー出口の安定しない繊維

③ カバーガラスの再調査（2021 年 12 月 20 日）

ここまでの結果から、必ずしも太陽光パネルカバーガラス由来のカレットの混合率に応じて、熔融あるいは繊維化において問題が生じる訳ではないことが分かった。ここまでの考察で、問題を生じている原因は、アルミ枠との接合を得るためのシリコンの付着ならびに、封止剤としてセルとの間に用いられている EVA 樹脂の付着であることが想定された。そのため、これらの混合比だけで説明できない要因としては、試験ごとに用いているカレットに付着するこれら有機物の量に、大きなバラツキがあるものと考えられた。さらに、上記の 2 回の試験結果を受けて、試験を実施いただいた(株)ワンワールドから、試料により付着するシリコン等の有機物の付着量のバラツキの大きさに対する危惧が伝えられた。今後の操業においてカバーガラスを定常的に用いていくことを考えると、妥当な懸念であると言える。同時に、(株)ワンワールドからは、そのバラツキを確認するデータの提供が求められた。

そこで、今回の試験のために本プロジェクトで準備したサンプルのシリコン付着状況を目視により観察することで再調査した。その結果を表 5.104 に示す。今回の準備試料は

5つの異なるパレットで管理されており、パレット B ならびに C は、他のパレットに比べると、付着量が少ないことがわかった。少なくともパレット B においては、単一の日本製メーカーのものをホットナイフ分離法®で回収したものであり、ホットナイフ実施時の印象としても、非常にきれいに分離できていたということである。

シリコーンは、有色であるため、視認できたが、EVA 樹脂は、その付着厚みから、色による視認が容易ではなかった。そこで、5.8.1 項で記したように、ホットナイフ分離法®での分離プロセスの特性もヒアリングした上で、代表的な付着量として測定できると考えられるサンプリング法によってサンプリングし、早稲田大学所研究室において測定を行った。

表 5.104. 太陽光パネルカバーガラスのロット別有機物付着状況

パレット	シリコーン付着状況	合計ガラス重量 [kg]
A	白いシリコーンがガラスの端（周囲）に付着	600
B	シリコーン残りなし	510
C	シリコーン残りなし	355
D	白いシリコーンがガラスの端（周囲）に付着	850
E	白いシリコーンがガラスの端（周囲）に付着	1,000

B パレットのカバーガラス 1 枚につき 9 ヶ所をサンプル採取し（図 5.237 参照）、A、C～E パレットは、パレットの一番上の 1 枚を 1 ヶ所サンプル採取した（図 5.238 参照）。サンプルは 1 点につき 12～15 cm 角で、およそ 100 g となった。

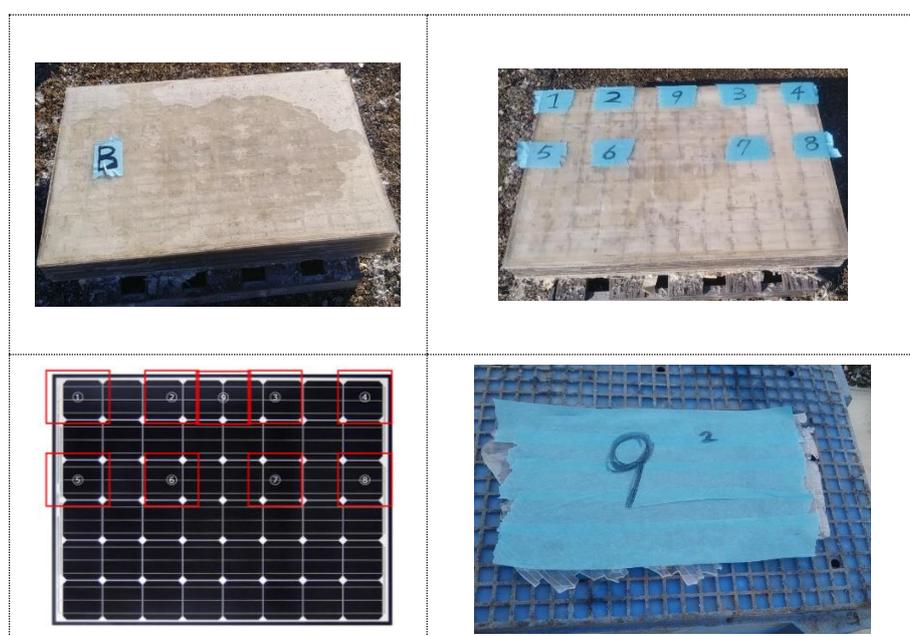


図 5.237. B パレット（左上）、サンプル採取 9 ヶ所（右上）、採取箇所イメージ（左下）、サンプル 1 点（右下）



図 5.238. A パレット (左上)、C パレット (右上)、
D パレット (左下)、E パレット (右下)

(4) 有機物がガラスウールに及ぼす影響及び事業化の可能性の検討

① 付着有機物のバラツキの検討 (2021年12月27日)

前項で記したように、カレットのパレットごとの有機物付着量のバラツキが特定できないままでは、試験を実施したところで、有益な知見とならないことがわかった。前述の 5.8.1 項において調査した結果、パレット B から採取した 9 点サンプリングに付着する EVA 樹脂の重量比は、0.1wt%程度と同定された。

先述のように、早稲田大学で実施した分析は、割れていないカバーガラスの状態から、ホットナイフ分離法®のプロセス特性を加味して、サンプリング方法を考慮したものの、必ずしも代表値である保証はない。そこで、ガラスウールのメーカーの現場においても、粗破碎されカレットになっているコンテナから、試料をランダムに採取した上で、有機物付着量を分析した。

B パレットから太陽光カバーガラス 150 kg を採取し、5 回ランダムにサンプリングし、1 つあたり 200g から 400g 程度をアルミパンに入れ (図 5.239 (左))、400℃に加熱できる樹脂焼却炉にて 15 分加熱処理を行い (図 5.239 (中))、樹脂を熱分解あるいは焼却したのち (図 5.239 (右)) に、再びアルミパン重量を測定することで、付着 EVA 樹脂の重量を同定した。



図 5.239.アルミパンに（左）20 kg カレット、（中）400℃で加熱処理、（右）処理後の試料外観

試験を実施した結果を表 5.105 に示す。その結果、同じロットであっても、樹脂の含有率は、0.92%から 1.21%までのバラツキがみられた。含有量としては、3 割程度の違いがあることが分かったが、これは、200 g 程度のサンプルでの結果であり、実際に投入する際には 10 kg から 100 kg ほどの混合をするため、同じロットで、そこまでの違いは生じないかもしれない。

これらの結果、5 回サンプルの平均値として、樹脂の付着率は、1.06%であった。これは、5.8.1 項で実施した評価とよく一致した。

表 5.105. サンプルごとの計測重量ならびに樹脂含有率

	#1	#2	#3	#4	#5
アルミパン [g]	16.28	16.23	16.19	16.21	16.21
焼却前重量 [g]	230.7	247.7	232.7	218.7	426.8
焼却後重量 [g]	228.1	245.1	230.7	216.7	422.4
樹脂付着率	1.21%	1.12%	0.92%	0.99%	1.07%

5.8.1 項ならびに 5.8.3(4)項で実施した分析から、試作に用いるカレットの代表的な有機物付着率は 1%と同定されたため、それを基に、カバーガラスの混合率を再検討した。グラスウールメーカーの操業でのノウハウにより、約 1000ppm の有機物含有率となるよう混合すると問題なく作製できるのではないかと考えられた。そこで、太陽光パネルカバーガラスカレットを 10%の混合比率になるよう設定し、再度試作試験を実施することとした。

② 試作試験（2022 年 1 月～2 月実施）

1) カレット作製（2022 年 1 月 20 日）

先の調査結果から、有機物濃度 1,000ppm 程度でのグラスウール試作となるよう、板ガラス 95 kg と太陽光パネルカバーガラス 10 kg をコンクリートミキサーで攪拌し、同様に計 10 セットを作成（図 5.240 参照）、合計 1,050kg の試作用カレットを準備した。



図 5.240. 攪拌作業（左）、攪拌後カレット（右）

2) グラスウール試作（2022年1月25日）

試作試験の出発材料の外観写真を図 5.241（左）に示す。熔融炉入り口での投入時の写真が図 5.241（右）ならびに、その近接写真が図 5.238（左）である。試験では、炉内に通常操業のカレット 100%の状態での熔融している中に、太陽光パネルカバーガラスカレット 10%含有の試験試料を投入する。試料投入前の炉内の様子が、図 5.242（右）である。

試験途中に、連続的にガスの発生を確認した。投入から 2 時間後、5 台のテスト炉のうち 1 台から煤が発生しガラス流量がやや不安定になるが、繊維化に影響なくグラスウールの作成に成功した。溶解中の熔融炉の様子を図 5.243 に、繊維化の様子を図 5.244 に示す。これまでの溶解・繊維化試験やグラスウール試作で発生していた黒煙は確認されなかった。異臭は確認されなかったが、煤が発生したことから、煤の発生と同じくして少なからず異臭が発生していたものと推測される。



図 5.241. 試作試験の（左）出発材料、（右）熔融炉入り口



図 5.242. 試作試験の（左）熔解炉入り口近接写真、（右）熔解炉内初期状態



図 5.243. 試作試験（左）中盤の熔融炉写真、（右）繊維化サンプル採取直前の熔融炉写真



図 5.244. （左）繊維化写真、（右）硬化終了後断熱材製品写真

3) 異臭調査 (2022年1月25日)

■ EVAの構造・添加物等

試作試験においてカバーガラスカレットが50~100%含まれる場合、黒煙、異臭、煤が生じた。カバーガラスに付着する不純物としては、EVA、PET（ポリエチレンテレフタレート）、シリコンなどが考えられるが、充填材として広く使われているEVAを対象として、EVAの構造や添加剤、熱分解の挙動について文献調査を実施した。

EVAはエチレンと酢酸ビニルのランダム共重合体であり、エチレンモノマーと酢酸ビニルモノマーがラジカル共重合することで製造される非結晶性プラスチックである。ポリエチレンは結晶性ポリマーであるが、酢酸ビニルが添加されることでポリエチレンの結晶性が低下し、透明性や柔軟性などの物性が加わる[11]。

太陽光パネルに使用されるEVA中の酢酸ビニル含有率は25~30%程度とされている[12]。

2020年度実証において、カバーガラスの有機物分析が実施されており、CHNコーダーによる測定で窒素原子が0.18~0.21%（選別後）含まれていることが分かっている。含窒素物質でアミン等の臭気を有する物質はあるが、試作試験時の臭気の原因となりうるかは現段階で情報は得られなかった。参考として、EVAに使用される可能性のある添加剤を表5.106に示す。

表 5.106. EVAに用いられる可能性のある添加剤

名称	目的	構造
紫外線吸収剤	紫外線を吸収し劣化を防ぐ	ベンゾトリアゾール系、トリアジン系、ベンゾフェノン系など（多くは窒素含有）
光安定剤	紫外線により発生したラジカルと反応し劣化を防ぐ	ヒンダードアミン系、NH系、Nメチル系、NOアルキル系など（多くは窒素含有）
酸化防止剤	酸化分解による劣化を防ぐ	フェノール系、ホスファイト系、チオエーテル系など
難燃剤	発火を遅らせ燃焼の拡大を防ぐ	リン酸エステル系、酸化アンチモン、臭素系、塩素系、金属水酸化物系など
架橋剤	ポリマー同士を化学的に結合させ、物理的・化学的性質を向上させる	有機過酸化物、アミン系、エポキシ系、シラノール系など
シランカップリング剤	無機材料への密着性向上（例えばEVA樹脂とガラス）	Siに反応性官能基（樹脂側：アミン、ビニル基など）と加水分解性基（ガラス側：メトキシ基など）が結合

太陽光パネルに使用される EVA を 600℃まで加熱し、熱重量・示差熱同時測定 (TG-DTA) による解析が実施されている。300℃程度まで加熱されると熱分解により酢酸が生成される。また、空気雰囲気中ではアルデヒドの生成が確認されている[13]。

酢酸及びアルデヒドは悪臭物質の一つであり、試作時試験時にも生じた可能性が考えられる。

■ 検知管による簡易測定

2022年1月25日に実施した、カバーガラス混合率10%の試作試験において、熔融炉レンガから漏れだす排ガスについて検知管を用いて簡易測定した。

測定対象物質としては、酢酸に加えて酢酸系の酢酸ビニル及び酢酸エチル、EVA 添加剤から生成する可能性のあるアミン類等とした。測定結果を表 5.107 から表 5.110 と図 5.245 に示す。

表 5.107. 測定結果 (定量分析)

検知管名称	測定対象物質	測定結果	検知限度	反応原理	干渉ガス	この検知管で測定できる他のガス
ガステック 81L	酢酸	0.67 ppm	0.05 ppm	酢酸はアルカリと中和反応して指示薬は淡黄色を呈する。 $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} + \text{NaOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}$	アンモニア、ギ酸、無水酢酸塩素、二酸化イオウ、二酸化窒素	無水酢酸、アクリル酸、酪酸、ギ酸、イソ吉草酸、メタクリル酸、プロピオン酸、吉草酸
ガステック 143	酢酸ビニル	(5 ppm) 他物質の干渉を受けている可能性が高い	1 ppm	酢酸ビニルはメシチレンと反応して縮重合物を生成し、茶色を呈する。 $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{CH}:\text{CH}_2 + \text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3 + \text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{縮重合物 (茶色)}$	アルデヒド類、ケトン類、エチレン、塩化ビニル	
ガステック 141L	酢酸エチル	(9.4 ppm) 他物質の干渉を受けている可能性が高い	5 ppm	酢酸エチルによりクロム酸が還元され黒褐色を呈する。 $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{C}_2\text{H}_5 + \text{Cr}^{6+} (\text{黄色}) + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cr}^{3+} (\text{黒褐色})$	アルコール類 (メタノール)、ケトン類 (アセトン)、エステル類 (酢酸メチル)、芳香族炭化水素 (ベンゼン)、芳香族炭化水素 (トルエン)	アクリル酸エチル、アクリル酸メチル、イソプロピルエーテル、ジイソプロピルベンゼン、シメン、2-ヘキシルアルコール、メシチルオキシド、メチルイソチオシアネート
ガステック 180L	アミン類	<0.09 ppm	0.1 ppm	アミン類は硫酸と中和反応して指示薬は、黄色～淡黄橙色または灰紫色を呈する。 $2\text{R}\cdot\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{R}\cdot\text{NH}_3)_2\text{SO}_4$		イソプロピルアミン、エタノールアミン、エチルアミン、N-エチルモルホリン、エチレンジアミン、ジイソプロピルアミン、ジエチルアミン、N,N-ジエチルエタノールアミン、ジエチレントリアミン、シクロヘキシルアミン、ジ-n-ブチルアミン、ジプロピルアミン、ジメチルアミノプロピルアミン、ジメチルアミン、N,N-ジメチルエタノールアミン、N,N-ジメチルエチルアミン、テトラメチレンジアミン、トリエチルアミン、トリメチルアミン、n-ブチルアミン、プロピルアミン、プロピレンイミン、ヘキサメチレンジアミン、ヘキシルアミン、ペンタメチレンジアミン、メチルアミン、N-メチルモルホリン、モルホリン、アリルアミン

表 5.108. 測定結果（定性分析）

検知管名称	測定対象物質	測定結果	検知限度
ガステック ポリテックIV	アンモニア	<25 ppm	25 ppm 以上
	ジエチルアミン	<25 ppm	25 ppm 以上
	塩化水素	<5 ppm	5 ppm 以上
	硫化水素	<10 ppm	10 ppm 以上
	塩素	<5 ppm	5 ppm 以上
	二酸化イオウ	<10 ppm	10 ppm 以上
	二酸化窒素	<5 ppm	5 ppm 以上
	一酸化炭素	<25 ppm	25 ppm 以上
	水素	<50000 ppm	50000 ppm 以上
	リン化水素	<50 ppm	50 ppm 以上
	アセチレン	<200 ppm	200 ppm 以上
	エチレン	<10000 ppm	10000 ppm 以上
	プロピレン	<10000 ppm	10000 ppm 以上
	メチルメルカプタン	<200 ppm	200 ppm 以上
	二酸化炭素	<5000 ppm	5000 ppm 以上

表 5.109. 測定結果記録表（定量分析）

記号	測定対象物質	測定前の色	測定結果		吸引回数補正		温度補正		測定結果濃度 (A×B×C)	測定開始時刻
			変色の有無と色	A:濃度 (測定時読み値)	吸引回数	B:補正係数	測定時温度	C:補正係数		
81L	酢酸	桃色	淡黄色	1.5 ppm	2	1/2	35.4℃	0.89	0.67ppm	13時05分
143	酢酸ビニル	白色	淡黄色 (本来は茶色) ^{a)}	10 ppm	4	1/2	36.6℃	—	(5ppm) 他物質の干渉を受けている可能性が高い	13時13分
141L	酢酸エチル	黄色	淡赤～橙色 (本来は黒褐色) ^{b)}	20 ppm	2	—	35.3℃	0.47	(9.4ppm) 他物質の干渉を受けている可能性が高い	13時40分
180L	アミン類	桃色	なし	<0.1 ppm	1	—	40.5℃	0.9	<0.09ppm	13時51分

a)143 酢酸ビニル検知管は、エチレン（1,000ppm 以上）、塩化ビニル（500ppm 以上）が共存する場合、黄色に変色する。ポリテックIVでエチレンが 10,000ppm 未満であることは確認済であるが、干渉ガスの影響を受けているかは不明。

b)淡赤～橙色を示す干渉ガスは記載されておらず、原因不明。

表 5.110. 測定結果記録表（定性分析）

記号	測定対象	測定前 の色	測定結果	吸引 回数	測定開始時刻	温度	備考	
			変色の有無					
27	ポリテック M	1層	紫色	なし	1	13時53分	40.6℃	
		2層	黄色	なし				
		3層	白色	なし				
		4層	青色	なし				
		5層	白色	なし				
		6層	黄色	なし				
		7層	青色	なし				

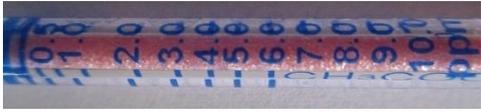
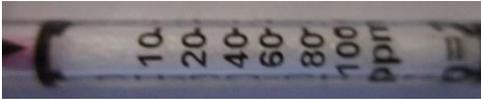
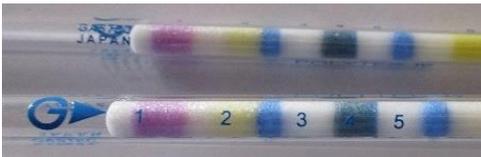
81L 酢酸	
	吸引前
	100ml×2回
	100ml×4回
143 酢酸ビニル	
	吸引前
	100ml×4回
	100ml×8回
141L 酢酸エチル	
	吸引前
	100ml×2回
180L アミン類	
	吸引前
	100ml×2回
27 ポリテックⅣ	
	吸引前
	吸引後 100ml×1

図 5.245 検知管 吸引後の変色状況

検知管による簡易測定では、酢酸が 0.67ppm 検出され、これは嗅覚閾値 0.006ppm を 100 倍上回る[14]。

従って、試作試験時の臭気は EVA が分解したことにより生じた酢酸が原因である可能性が高い。今後の課題として、太陽光パネルガラスウール工場周辺において悪臭公害が発生しないか確認・検討する必要性が示唆された。

なお、作業環境における指針値（日本産業衛生学会許容濃度、TLV-TWA）は下回るため、現在得られている濃度では作業環境における健康被害が生じないと考えられる。

日本産業衛生学会 許容濃度：10ppm

（日本産業衛生学会が、職場における有害物質による労働者の健康障害を予防する手引きに用いることを目的とし、産業衛生学会雑誌の「許容濃度等の勧告」に公表したもの）

TLV-TWA：10ppm

（米国産業衛生専門家会議によって設定された時間加重平均の許容濃度；1日8時間、週40時間の繰り返し労働において作業員に対し有害な影響を及ぼさない時間加重平均濃度）

4) 試作結果の分析（2022年2月10日）

試作したガラスウールの外観写真を図 5.246 に示す。そのうち1つを検査用製品として採取した（図 5.247）。試作したガラスウールの性能分析のため、一般社団法人建材試験センターで同様の試験方法で性能試験を実施した。試験の結果は、図 5.248 に示すように、ガラスウール製品として問題なく使用可能な性能であることが得られた。過去の試験や一般的な製品との比較を表 5.111 に示す。

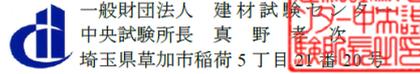


図 5.246（左）寸法裁断後写真、（右）被服完了製品写真



図 5.247 検査用製品採取写真

品質性能試験報告書



試験名称	20220210 断熱材性能試験結果	
依頼者	名称：JWガラスリサイクル株式会社 所在地：宮城県栗原市若柳川北荒町前 1	
試験項目	熱伝導率	
試験片	<p>名称：グラスウール断熱材 商品名：試験製品 材質：グラスウール 製品寸法：100mm×430mm×1370mm 寸法：910mm×910mm，呼び厚さ 100mm 密度：24.2kg/m³ 備考：名称，商品名，製品寸法，材質及び呼び厚さは依頼者提出資料による。 製品を突き合わせて約 910mm×910mm の試験片とした。密度は外被材を含む試験片の密度である。</p>	
	<p>[試験片図]</p> <p>単位: mm</p>	
試験方法	JIS A 9521 の 6.7 熱伝導率 6.7.1 人造鉱物繊維断熱材に準じて，JIS A 1412-2 [熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第 2 部：熱流計法(HFM 法)] 附属書 B (規定) 保護熱板式熱流計法に従って行った。なお，熱流方向は上向きとした。	
試験結果	試験片厚さ	(m) 0.100
	単位面積あたりの熱流量	(W/m ²) 7.31
	試験片高温側表面温度	(°C) 33.1
	試験片低温側表面温度	(°C) 13.1
	試験片表面温度差	(K) 20.0
	試験片平均温度	(°C) 23.1
	熱伝導率	[W/(m·K)] 0.037
試験期間	2022年 2月 8日～10日	
担当者	環境グループ 統括リーダー 萩原 伸 治 参事 高木 亘 主任 新井 太 一 (主担当)	
試験場所	中央試験所 (埼玉県草加市稲荷 5 丁目 21 番 20 号)	

以上

試験所長の文書による承認なしでは，完全な複製を除き，一部分のみを複製してはならない。

図 5.248. 試作した建築用断熱材の性能試験結果

表 5.111. 有機物濃度約 1,000ppm でのグラスウール品質性能試験結果

評価項目	有機物濃度 約 1,000ppm での グラスウール性能	PV カバーガラスのみ でのグラスウール性能 (2020 年 11 月実施 分)	通常カレットのみでの グラスウール性能
試験体厚さ (m)	0.100	0.100	0.100
単位面積あたりの熱量 (w/m ²)	7.31	7.22	7.34
試験片高温側表面温度 (°C)	33.1	33.2	33.2
試験片低温側表面温度 (°C)	13.1	13.2	13.2
試験片表面温度差 (K)	20.0	20.0	20.0
試験片平均温度 (°C)	23.1	23.2	23.2
熱伝導率 [W/(m・K)]	0.037	0.036	0.037

③ 熔解・繊維化試験 (2022 年 3 月実施)

最後に、上述のカレット作成において、用いるカレット中の有機物濃度について特定できているため、同カレットを用いることで、配合の結果の有機物濃度を 1,000ppm からさらに高く設定して配合したカレットを用いた熔解ならびに繊維化試験を実施した。

試験は、今までと同様に、従来カレットを熔解している中に、今回準備したカレットを投入することとした。また、今回の実施では、1,500ppm、2,000ppm、3,000ppm の 3 パターンで熔解・繊維化試験を実施し、濃度の低いものから順に連続して投入する (図 5.249)。

時刻	記録	炉入口	出口	匂い	煙	事象考察
12:45	1500ppm投入	1500		無し	無し	1,500ppm投入開始。
13:00				無し	無し	
13:15				やや有り	無し	投入後30分ほどで匂いを感じる。
13:30			1500	やや有り	無し	
13:40				やや有り	無し	ガラスの切り替わりが発生。泡等の兆候なし。
13:45				やや有り	無し	
13:51	薬品の匂い			やや有り	無し	
14:00	1500ppm繊維採取			やや有り	無し	採取した繊維は手触り含め問題なし。
14:10	茶色に変色したEVA視認	2000		やや有り	無し	2,000ppm投入開始。茶色のガラスは150~200°C程に加熱。粘性があり壁に張り付く。
14:20	炉内炭化物（黒確認）			やや有り	無し	炉内溶融途中のガラスに親指程度の黒点を数個確認。炉内中腹で消える。
14:40				有り	無し	許容範囲と判断。続行。
14:45	内部燃焼確認		2000	有り	無し	炉内へのガラス進入直後にガラス表面で燃焼する炎が確認できる。
14:55				有り	無し	燃焼は入口だけで済んでおり、黒煙までは発生していない。
15:10	2000ppm繊維採取			有り	無し	採取した繊維の手触りはあまり良くないが許容範囲。
15:15		3000		有り	無し	3,000ppm投入開始。
15:42	マスク越しでも匂いあり			強く有り	やや有り	強くおいを感じる。炉内ガラスがやや暗く、泡の大量発生兆候有。
16:00			3000	強く有り	やや有り	この辺りから、炉周辺での作業には不快。
16:10				強く有り	やや有り	
16:20	3000ppm繊維採取			強く有り	やや有り	繊維は採取も排出が不安定となり、炉内ガラスが暗く見える。採取した繊維の手触りは問題なし。
	泡の傾向有			強く有り	やや有り	泡は入口まで済んでいるものの、もう1時間継続すると問題が発生すると推測。

考察（ワンワールド社）
最終判断としては2000ppmまでが限界と推察する。炉内部に炭素が取り込まれ、泡が発生していないように見えるが、3000ppmではガラスの明るさが失われ、全体的に暗さが目立つことから、炭素分散したというよりはガラス表面に見えないレベルで泡が発生し、温度低下を招いていた可能性が高いと考えられる。

図 5.249. 熔解・繊維化試験（2022年3月実施分）の実施工程と異臭・発煙

④ 小括

ここで、(3)ガラスウールの試作ならびに、(4)有機物がガラスウールに及ぼす影響及び事業化の可能性の検討にて本実証を通して実施した試験等について、表 5.112 に時系列にてまとめる。

表 5.112. 実施試験等の時系列報告

日付	報告項	実施内容
2020年7月31日 2020年9月14日	①	PVカバーガラスのみでガラスウールを作成できるか検討する為、ガラスウール試作用カレットを作成。
2020年8月3日	②	①の試作に向け熔解性試験を実施。
2020年8月3日	③	①の試作に向け繊維化試験を実施。

日付	報告項	実施内容
2020年9月25日	④	グラスウール試作。不具合発生。一部出荷基準未達。
2020年11月25日	⑤	④の試作で出荷基準を満たした製品を分析。
2021年8月24日	⑥	グラスウールの通常生産時に使用する板ガラスにPVカバーガラスを20%混合してグラスウールを作成できるか検討する為、グラスウール試作用カレットを作成。
2021年9月1日	⑦	⑥の試作に向け熔解性試験を実施。
2021年9月1日	⑧	⑥の試作に向け繊維化試験を実施。
2021年9月21日	⑨	⑥同様に、50%混合してグラスウールを作成できるか検討する為、グラスウール試作用カレットの作成。
2021年10月4日	⑩	⑨の試作に向け熔解性試験を実施。
2021年10月4日	⑪	⑨の試作に向け繊維化試験を実施。繊維化できず。
2021年12月20日	⑬	⑪の結果、PVカバーガラスに残存する有機物濃度の差異を確認する為のサンプル採取。
2022年1月20日	⑯	有機物濃度約1,000ppmとなるようなグラスウール試作用カレットの作成。
2022年1月25日	⑰	有機物濃度約1,000ppmでのグラスウール試作。作成に成功。
2022年2月10日	⑲	⑰の性能試験を実施。
2022年3月2日	⑳	有機物濃度1,500ppm、2,000ppm、3,000ppmそれぞれでの熔解試験を実施。
2022年3月2日	㉑	⑳の繊維化試験を実施。いずれも繊維化に成功。

先述の(1)のとおり、廃自動車由来のガラスカレットを目途としたグラスウール向けガラスカレット受入基準があった。しかし、廃太陽光パネル由来のガラスカレットとは混在する可能性のある異物の種類が異なる。そのため、ELV由来のカレット基準も参照しつつ、本プロジェクトを通して、太陽光パネルカバーガラスカレットをグラスウール向けに用いるに際しては、残留有機物の含有率が重要であることが明らかになったため、有機物に対する許容濃度を表 5.113 のように同定する。

表 5.113. グラスウール向け使用済み太陽光パネル由来のガラスカレット原料の受入基準
(案)

異物の区分		許容値
金属類	鉄	1.0 ppm 以下
	アルミニウム	0.2 ppm 以下
	銀配線	1.5 ppm 以下
有機物	EVA	有機物分合せて
	シリコーンゴム	1000 ppm 以下

ただし、この基準が明らかになった一方、発生物である太陽光パネルによって、カバーガラスカレットに付着する有機物量は異なることも考えられた。さらには、使用済み太陽光パネル処理のプロセスによっても、その付着量は大きく異なる。さらには、同じコンテナに入ったカレットの中でも、サンプリングによって異なることも考えられた。

しかしながら、ホットナイフ分離法®で分離されたカバーガラスカレットでは、有機物付着率は 0.1%程度であることが同定できた成果は大きい。つまり、表 5.11 の許容濃度 1000ppm の情報と合わせると、10%の混合率であれば、十分に太陽光パネルカバーガラスカレットをグラスウール向け原料として利用できると言えた。

今後は、使用済み太陽光パネルからのカバーガラスの分離プロセス、あるいは、回収したカバーガラスへのプロセスを追加するなどして、事業性を担保しつつ、この付着する有機物量を低減する技術開発が望まれると言えよう。

(5) グラスウールサプライチェーンの検討

試作試験からわかったように、カバーガラスに残留する EVA やシリコーンゴムの有機物の炉内での燃焼が課題であることがわかった。そこで、サプライチェーンの検討において、最初に、それらの問題が生じやすい用途先と生じる可能性の低い用途先を選定することを考えた。これは、炉の容量に応じて、炉内での滞留時間が異なるため、容量が大きい方が、熔解にかかる時間が長くなり、異物や異質ガラスが混入していても、その影響が小さいと考えられる。そのため、グラスウールの生産拠点について、炉の容量と生産量を分かる限り列挙した。今後、サプライチェーンの検討に向けては、炉の容量や生産量の大ききところが消費先として候補になると考えている。

炉の容量自体は情報として得られなかったものの、その相対的な容量の大きさでは、各社の主力工場に大きな容量の炉があることがうかがえる。特に、マグ・イゾベール株式会社の明野工場ならびに旭ファイバーガラス株式会社の湘南工場は、関東圏に位置する工場でもあり、これらが東京都で回収された使用済み太陽光パネル由来のガラスカレットのリサイクル先として有力であると考えられる。

表 5.114. グラスウールの生産拠点

会社名	工場名	所在地
マグ・イゾベール株式会社	明野工場	〒300-4522 茨城県筑西市向上野 100 番地
	土浦工場	〒315-8518 茨城県かすみがうら市上稲吉 2046 番地 1 号
旭ファイバーグラス株式会社	湘南工場	〒253-0111 神奈川県高座郡寒川町一之宮六丁目 11 番 1
	中部工場	〒441-8074 愛知県豊橋市明海町 4-31
	九州工場	〒808-0027 福岡県北九州市若松区北湊町 13 番 1
パラマウント硝子工業株式会社	長沼工場	〒962-0122 福島県須賀川市木之崎大ヶ久保 24-4
	鈴鹿工場	〒513-0816 三重県鈴鹿市南玉垣町 40650
	江別工場	〒067-0051 北海道江別市工業町 11-1
セントラルグラスファイバー(株)	春日井工場	〒486-0804 愛知県春日井市鷹来町字米野 4387 番地 1
株式会社ワンワールド	若柳工場	〒989-5501 宮城県栗原市若柳字川北荒町前 1 番地

5.8.3 参考文献

- [1] Z. Chen et al. (2018): Journal of Cleaner Production 171, 1447-1459
- [2] J.-X. Lu et al. (2019a): Journal of Cleaner Production 234, 1102-1112
- [3] J.-X. Lu et al. (2019b): Construction and Building Materials 223, 210-220
- [4] T.-C. Ling, C.-S. Poon(2011): Materials and Design 32, 2675-2684
- [5] G. Lee et al. (2011): Construction and Building Materials 25, 2611-2618
- [6] M.H. Shehata, M.D.A. Thomas (2000): Cement and Concrete Research 30, 1063-1072
- [7] M. Kamali, A. Ghahremaninezhad (2015): Construction and Building Materials 98, 407-416.

- [8] 大和田秀二(2020) 環境研究総合推進費 (3-1708) 「PV・液晶等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発」 終了研究成果報告書
- [9] 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 (2020) 自動車リサイクルの高度化等に資する調査・研究・実証等に係る助成事業「地理条件及び選好・忌避成分に着目した自動車ガラス再資源化実証」 最終報告書
- [10] Shaojie Zhou, Shanshan Li, Xuesong Cao, Yi Qian, Long Li, Xilei Chen (2019): Combustion behavior and thermal stability of ethylene-vinyl acetate composites based on CaCO₃-containing oil sludge and carbon black. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 136:1135-1145.C
- [11] プラスチック技術協会、大阪市立工業研究所(2015) 「プラスチック読本 第21版」
- [12] 増田淳(2013) 「太陽電池モジュールの信頼性向上技術ならびに試験法開発」 フジコー技報, 21, 17-22.
- [13] 塚目孝裕ら(2014) 「太陽電池モジュール燃焼時の生成ガスについて」 消防研究報告, 116, 1-10.
- [14] 公益財団法人におい・かおり環境協会、「嗅覚閾値」,
<https://orea.or.jp/gijutsu/kyuukakusokuteihou/odor-threshold-values/> (参照日 2022年1月20日)

5.9 サプライチェーンの構築

5.9.1 サプライチェーンの検討

使用済み太陽光パネルのあるべきリサイクルシステム（太陽光パネル高度循環技術システム）が確立しておらず、不適切な処理の拡大による環境汚染が懸念される昨今の状況下において、開発段階にある技術を適用したあるべき姿を想定し、そのシステム導入に伴う影響を調査することは適切なシステム構築において重要となる。ここでは、既存の社会システムを構成するプロセスと本実証の実験・実証プロセスを含めた新たなシステムのサプライチェーンの検討を行う。使用済み太陽光パネルがリサイクルまたは産業廃棄物として処分されるフローは、表 5.115 に示すとおり技術・プロセスの組み合わせによって 8 通りのサプライチェーンが考えられる。また、表 5.116 に本実証の実験・実証プロセスの概要を記す。既存システムのサプライチェーンは Case c-1～c-3、太陽光パネル高度循環技術システムのサプライチェーンは Case a-1～a-5 で記述した。既存システムでは、使用済み太陽光パネルの回収・処理方法が確立していないため、Case c-1 のように他の廃棄物と混合して処分されることが懸念される。Case c-2 と Case c-3 の違いは、アルミフレームの解体を伴うかどうかとなっている。既存システムでは、他の廃棄物と同様の産業廃棄物プロセスが適用されるため、太陽光パネルの資源回収・リサイクルフローを追うことが困難であり、ガラス付着物として埋立または一部セメント原燃料等への利用が考えられるが実態は不明である。それに対し、Case a-1～a-5 では、本実証の実験・実証プロセスの適用により、アルミフレーム、カバーガラス、金属（Cu、Ag）回収において、既存の処理システムとは異なるサプライチェーンが生じることになる。

表 5.115. 使用済み太陽光パネルのサプライチェーン

Case	設定等
Case c-1	<u>建設物解体処理</u> 太陽光パネルを回収しない。建設物解体処理により建設混合廃棄物として処分する。
Case c-2	<u>粉砕・選別</u> 回収した太陽光パネルを産業廃棄物として中間処理（破砕・選別）を経て処分する。
Case c-3	<u>アルミフレーム回収+粉砕・選別</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルは c-2 同様に産業廃棄物として中間処理（破砕・選別）を経て処分する。
Case a-1	<u>アルミフレーム回収+物理粉砕（一次粉砕・二次粉砕）・選別</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルから 2 段階の物理粉砕によって金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。

Case	設定等
Case a-2	<p><u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+粉碎・選別</u></p> <p>回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートを破碎・選別した金属濃縮物から製錬で Cu・Ag を回収する。</p>
Case a-3	<p><u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+電気パルス法+産業廃棄物処理</u></p> <p>回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートから電気パルス法で金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。電気パルス法後のセルシート残渣は産業廃棄物として処分する。</p>
Case a-4	<p><u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+電気パルス法</u></p> <p>回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートから電気パルス法で金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。電気パルス法後のセルシート残渣の Cu・Ag を製錬で回収する。</p>
Case a-5	<p><u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+電気パルス法+物理粉碎・選別</u></p> <p>回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートから電気パルス法で金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。電気パルス法後のセルシート残渣を物理粉碎することで、金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。</p>

表 5.116. 実験・実証プロセスの概要

実験・実証プロセス	概要
診断・回収・輸送	屋根等に設置された太陽光パネルを診断し、再利用（リユース）か廃棄（リサイクル）を決定し、回収・輸送する。
アルミフレーム分離[1]	アルミフレームの引張力により自動分離装置で分離する。ガラスを割ることなくアルミフレームが回収できる。
物理選別（一次粉碎、二次粉碎）	<p>一次粉碎：ガラス付き太陽光パネルの粗破碎により、<2mm の小粒群に Cu・Ag が濃縮される。また 2-8mm の金属・ガラス・樹脂混合物と >8mm のバックシート残渣となる。</p> <p>二次粉碎：2-8mm 粒群を表面粉碎することで、金属、樹脂、ガラスが単体分離する。</p>
ホットナイフ分離法®[1][2]	ホットナイフを太陽光パネルの EVA 部分に接することでカバーガラスを割ることなくセルシートと分離する。

実験・実証プロセス	概要
ガラス成分分析	ホットナイフ分離法®により分離したカバーガラスの成分をインラインに設置した蛍光 X 線分析器で計測する。
セルシート破碎・選別	ホットナイフ分離法®により分離したセルシートを破碎し、金属濃縮度の異なる粒群 (<20mesh と >20mesh) にふるい分ける。
電気パルス法[3]	電気エネルギーを非常に短い時間で一気に放電するパルス波を発生させたときに生じる引っ張り力と気化膨張に伴う衝撃波によって、選択的に金属 (Cu・Ag) を分離する。
ガラスリサイクル	カバーガラスを破碎・選別しカレット化することで、グラスウールや他のガラス製品原料を製造する。
リビルド	ホットナイフ分離法®により分離したカバーガラスを用いて、新たな太陽光パネルを製造する。

5.9.2 ライフサイクルアセスメント

複数の技術・プロセスの組み合わせにより、装置やプレイヤーが多様化・複雑化するサブライチェーンにおいて、適切な資源・生産・消費を管理するためには、システム全体の可視化と定量化が重要となる。そこで本章では製品のゆりかごから墓場までのライフサイクル全体を対象とした定量的分析手法であるライフサイクルアセスメントを行うことで、太陽光パネル高度循環技術システムの影響を調査した。ライフサイクルアセスメントを用いることで、リサイクル技術によって発生する追加的なエネルギーや工程による環境負荷が、リサイクルの効果を上回って逆効果とならないような技術の組み合わせやシナリオを検討できるようになる。

太陽光パネル高度循環技術システムに関するライフサイクルアセスメントの全体像を図 5.250 に示す。2020 年度実証の実証試験の進捗にあわせて、対象技術の整理（バウンダリ設定）を行い、文献・データベースからのバックグラウンドデータの収集および、実証試験等に基づくフォアグラウンドデータの収集、サプライチェーン選定と分析・評価を行った。

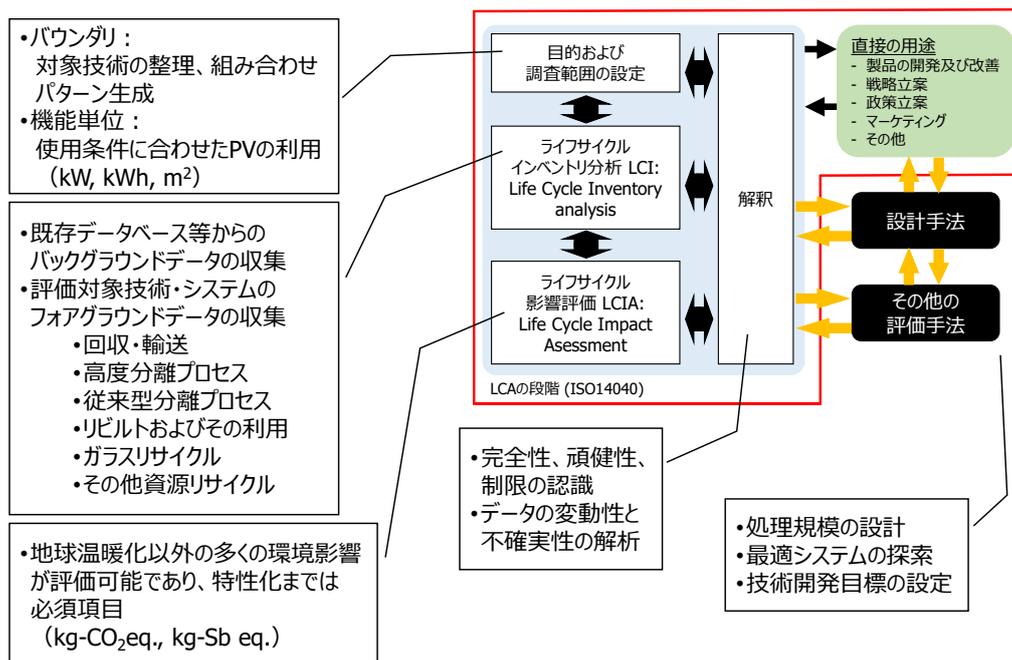


図 5.250. 太陽光パネル高度循環技術システムに関するライフサイクルアセスメント

(1) ライフサイクルモデルの検討

ライフサイクルアセスメントでは太陽光パネルの原料採掘、製造、廃棄・リサイクルまでを網羅的に評価する。原料採掘から製造については、後述するとおりバックグラウンドデータを用い、本実証で扱っている廃棄・リサイクルプロセスはフォアグラウンドデータに基づくインベントリ分析を行う。モデル構築に先立ち、使用済み太陽光パネル処理方法を文献調査に基づいて類型化した結果（図 5.251 文献[4]）、回収した使用済み太陽光パネルは主に、メカニカルリサイクル、サーマルリサイクル、ケミカルリサイクルを経て、ガラスとAlを回収し、Cu・Ag・Si等は湿式製錬等で資源回収されるのが一般的なフローとなっている。

本実証で実証試験を進めている技術を含めた使用済み太陽光パネルの処理・リサイクルフローを図 5.252 に示す。使用済み太陽光パネルは、診断によりリユースまたは使用済み太陽光パネルとなり回収・輸送される。使用済み太陽光パネルは、アルミフレーム・ジャンクションボックス分離装置によって、アルミフレーム、ジャンクションボックス、フレームなし太陽光パネルに分けることが可能となる。フレームなし太陽光パネル（ガラス付き太陽光パネル）は、一次粉砕・二次粉砕で構成される物理選別により、金属濃縮物とガラス濃縮物に分離が可能となることが本実証事業によりわかった。また、ホットナイフ分離法®を適用した場合、フレームなし太陽光パネルはカバーガラスとセルシートに分離することができ、カバーガラスのリサイクルとセルシートの金属濃縮処理が可能となる。

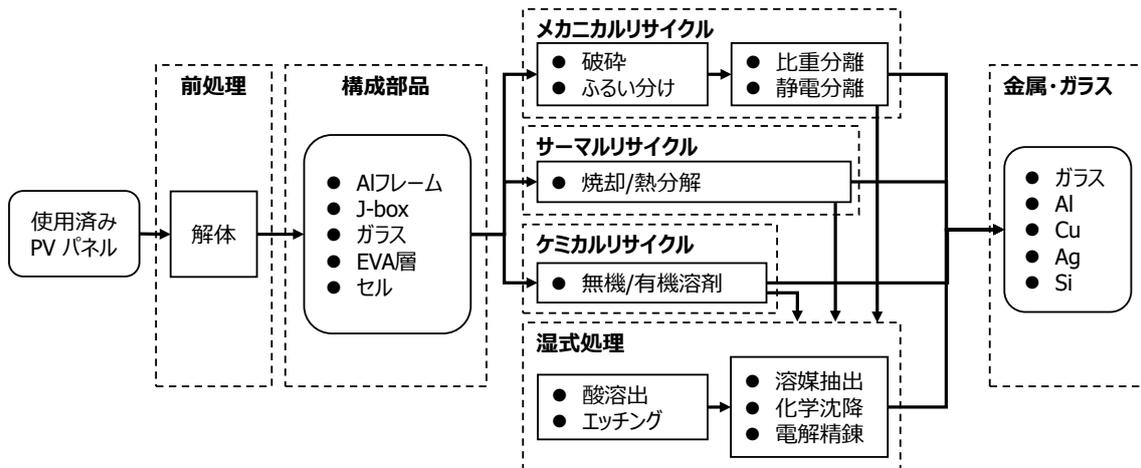


図 5.251. 文献調査に基づく使用済み太陽光パネル処理方法の類型化 (文献[4])

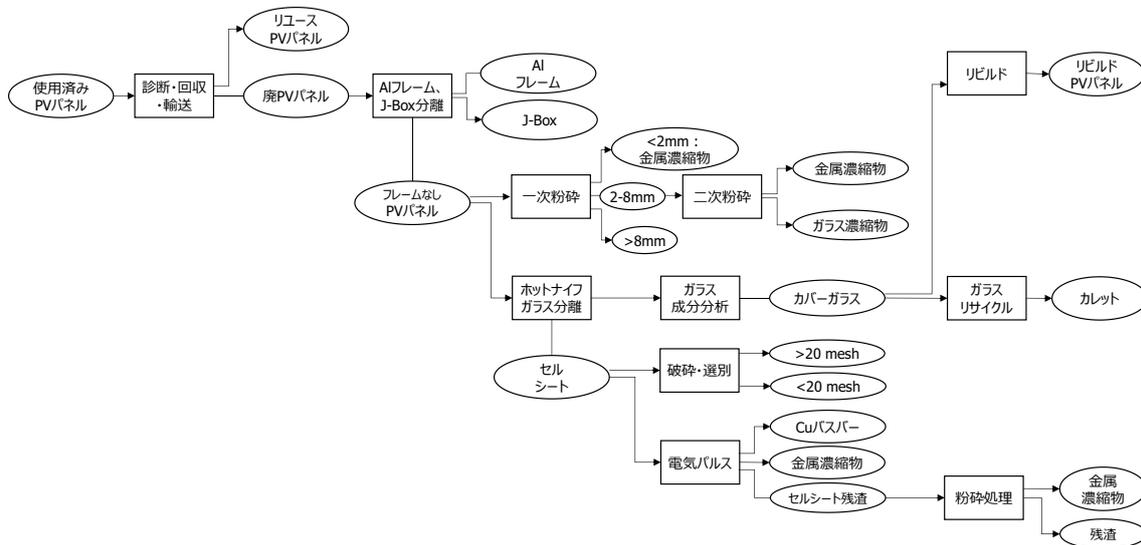


図 5.252. 本実証で実験・実証対象としたプロセスを含めた太陽光パネルのサプライチェーン

(2) 回収・輸送に関するデータの収集・作成

① フォアグラウンドデータの収集

本実証で想定する回収・輸送プロセス（図 5.253）について、これまでの実績等、回収方法（個別回収／拠点回収）、年間回収量（見込／実績）、使用済太陽光パネルの実態、回収場所から輸送先までの最大移動距離、回収した太陽光パネルの品質、後工程（リユース、リペア、リサイクルなど）への選定基準とその割合、リユース太陽光パネルおよびリビルト太陽光パネルの利用先に関する調査を行い、以下のとおり回答を得た。

回収方法（個別回収／拠点回収）

- 現状は、非住宅用でロットが大きい個別回収を実施
- 住宅用に関しては回収拠点を設置し、拠点回収が望ましい
- 経済性の観点から複数個所の一括回収を考えているが、排出量の少ない段階では個別回収となる。

年間回収量（見込／実績）

- 実績：2,710 枚（2017 年度）、22,638 枚（2018 年度）、14,268 枚（2019 年度）
- 見込：110,000 枚（2020 年度）
- 2018 年度以降は災害での保険交換で依頼が増加した。また 2020 年度は大型発電所からの依頼が発生した為、大幅に増加した。

使用済み太陽光パネルの実態

- パネルの種類：結晶系太陽光パネル（ほぼ 100%）
- パネル使用年数：5 年以内
- 回収・輸送：250 回
- 枚数：59,500 枚
- 走行距離：33,000km（実測以外にもシミュレーションを実施）
- 車種・燃費：2t 車（7.40km/ℓ、軽油）、3t 車（6.52 km/ℓ、軽油）、4t 車（5.03 km/ℓ、軽油）、大型車（4.31km/ℓ、軽油）

回収場所から輸送先までの最大移動距離

- 400km 程度
- 区内周回だと概ね 40km

回収した太陽光パネルの品質

- 破損率：85%（2020 年度予定含むと破損率は 25%程度になる見込み）

後工程（リユース、リペア、リサイクルなど）への選定基準

- まず、リユースを検討
- リユース不可でガラスが割れていないものはリサイクル
- リユース不可でガラスが割れているものは管理型埋立

回収した太陽光パネルの後工程への割合

- 2020年度は、見込みも含めて、リユースが70%、リペアからリユースは0%、リビルトは0%、リサイクルが3%、管理型埋立が27%

リユース太陽光パネルおよびリビルト太陽光パネルの利用先

- 中近東・東南アジアではほぼ100%

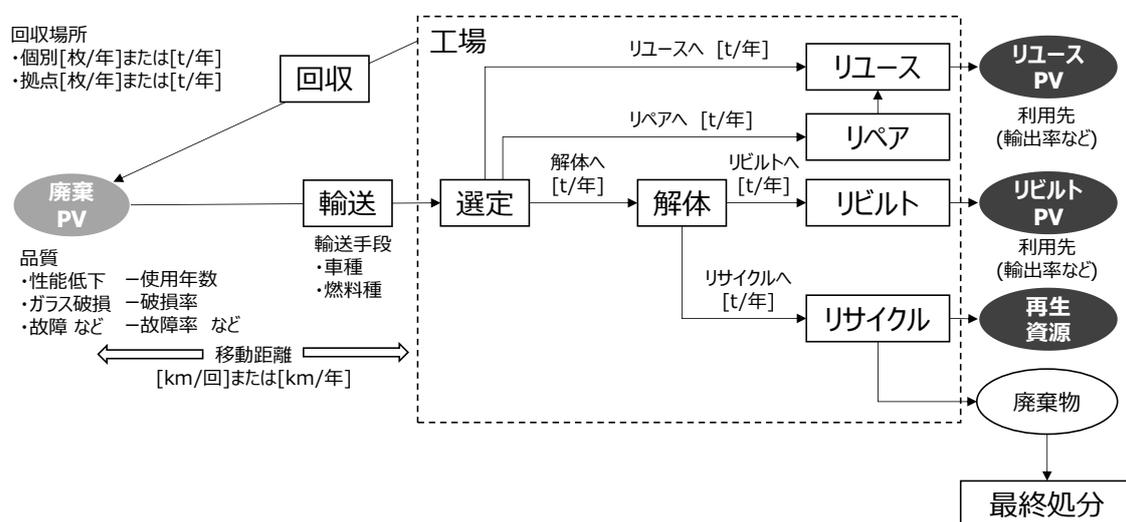


図 5.253. 回収・輸送に関する調査対象範囲

② 分析用データの作成

上述したフォアグラウンドデータと本実証で行ったシミュレーション結果に基づき、積載量と移動距離のインベントリデータを作成した。

(3) 高度分離法に関するデータの収集・作成

① フォアグラウンドデータの収集

高度分離法としてデータ収集の対象としたプロセスは、ガラス・EVA 分離を行うホットナイフ分離法[®]と高濃度の Cu、Ag 回収を行う電気パルス法である。また、これらに加えて比較対象となる物理粉砕プロセスのデータを収集した。

1) ホットナイフ分離法[®]

アルミフレームの取り外しおよびガラス・EVA 分離のフォアグラウンドデータとして、装置製造に伴う環境負荷算定のために装置重量の情報を入手した。また、装置稼働時の電力消費量、処理時間等を計測した。

2) セルシートの破碎・選別

ホットナイフ分離法[®]で得られたセルシートを破碎・選別し金属濃縮するプロセスの装置稼働に伴う電力消費量、処理時間等を計測した。

3) 電気パルス法

電気パルス法では、装置のインベントリデータを収集し、装置製造負荷に伴う環境負荷の算定に用いた。また 40 μ F のコンデンサで、複数の充電器 (5kV, 10kV, 15kV) における作動中消費電力を測定した。

4) 物理粉砕

物理粉砕は粗粉砕（一次粉砕）と精密粉砕（二次粉砕）の 2 段階で構成される。2020 年度実証として適切な粉砕機の実証試験が行われ、一次粉砕に用いるオリエントミルと二次粉砕の候補であるインテンシブミキサー、アトライタ、振動ミルについて電力測定を行った。

5) オリエントミル

オリエントミルでは、単セルに切断した太陽光パネルサンプルを 1 枚/min 投入し 10 枚処理したときの消費電力を測定した。

6) インテンシブミキサー

二次粉砕装置として用いるインテンシブミキサーには、粗粉砕後に得られる 2-8 mm 粒径が投入される。インテンシブミキサーの攪拌羽回転数は 2,000rpm、容器回転数は 85rpm、容器傾斜 30 度で、処理時間は 60 秒である。機器の電力消費特性を把握するために、試料ありと試料なしの 2 パターンの電力測定を行った。試料ありの電力消費が試料なしの場合の約 3 倍で、負荷変動性を有することを確認した。

7) アトライタ

アトライタにも、粗粉碎後に得られる 2-8 mm 粒群が投入される。いずれも Zr ボール 54 個を含んだ状態で、試料ありと試料なしの 2 パターンで、処理時間を 1 分、3 分、5 分としたときの合計 6 パターンの電力を測定した。電力消費量は処理時間に応じて大きくなった。なお、試料ありでは、試料なしより 10~19%の電力消費量の増加が確認された。

8) 振動ミル

振動ミルに対しても粗粉碎後に得られる 2-8 mm 粒群が投入される。試料ありと試料なしの 2 パターンを、稼働時間 1 分、3 分、5 分、10 分それぞれ電力を測定した。その結果、試料なしと試料ありに大きな差はなく、稼働時間に応じて電力消費量が増加することが確認された。

② 分析用データの作成

後述するバックグラウンドデータ調査に基づき、処理対象となる太陽光パネルは多結晶シリコン 0.96m²を想定し、各プロセスで用いた分析用データを作成した。ただし、物理粉碎（オリエントミル、インテンシブミキサー、アトライタ、振動ミル）の装置はいずれも実験室スケールであり、すでに市場導入が行われている商用スケールで処理した場合には、下記データと異なる可能性がある点に留意が必要である。

(4) 太陽光パネル向け前処理に関するデータの収集・作成

① フォアグラウンドデータの収集

想定するリビルトプロセス（図 5.254）に関する実態・想定を把握するため、リビルトを想定している太陽光パネル、リビルトで扱えない太陽光パネルとその処理方法、回収した太陽光パネルのリビルト工程の確認、リビルトに追加的に必要な部材、リビルト太陽光パネルの品質、リビルト太陽光パネルの利用先、リビルト工程での欠損品に関する調査を行い、以下のとおり回答を得た。

リビルトを想定している太陽光パネル

- 結晶系モジュールでバックシートタイプの太陽光パネル
- 2020年度実証ではガラスサイズが 650mm×530mm×3.2mm を使用

リビルトで扱えない太陽光パネルとその処理方法

- ガラスが割れているものは扱えない
- ダブルガラスモジュールや薄膜モジュールは不可
- リサイクル後に使用可能な部材はガラスのみ
- リサイクル対応できないパネルは協力会社にて処理

回収した太陽光パネルのリビルト工程の確認

- ホットナイフ分離法®でガラスとそれ以外に分離→ガラスを溶剤に浸透→ブラッシング

（ガラス取り出し後のリビルト工程：バックシートタイプ、フレーム無しの場合）

- ① 取り出したガラスの上に EVA を配置
- ② ガラスサイズに合ったセルストリングの作成
- ③ ①上でストリングを並列に並べ、横タブ・出力タブの取り付け
- ④ ③の上に EVA/バックシートを配置
- ⑤ ④をラミネータにてラミネーション
- ⑥ ⑤にて出来たワークをトリミング
- ⑦ IV シミュレータ/耐電圧試験機にて出力・絶縁抵抗測定
- ⑧ EL 検査

リビルトに追加的に必要な部材

- ガラス以外すべて（セル、導電性リボン、EVA、バックシート、ジャンクションボックス）

リビルト太陽光パネルの品質

- リビルト前の新規製品の情報があることが大前提で、出力のみ計測可能

リビルト太陽光パネルの利用先

- リビルトパネルの輸出等の実績はなし。

リビルト工程での欠損品

- 欠損品が出た場合、①再度リサイクル装置にてガラスを分離し、再リビルトか、②廃棄になる。

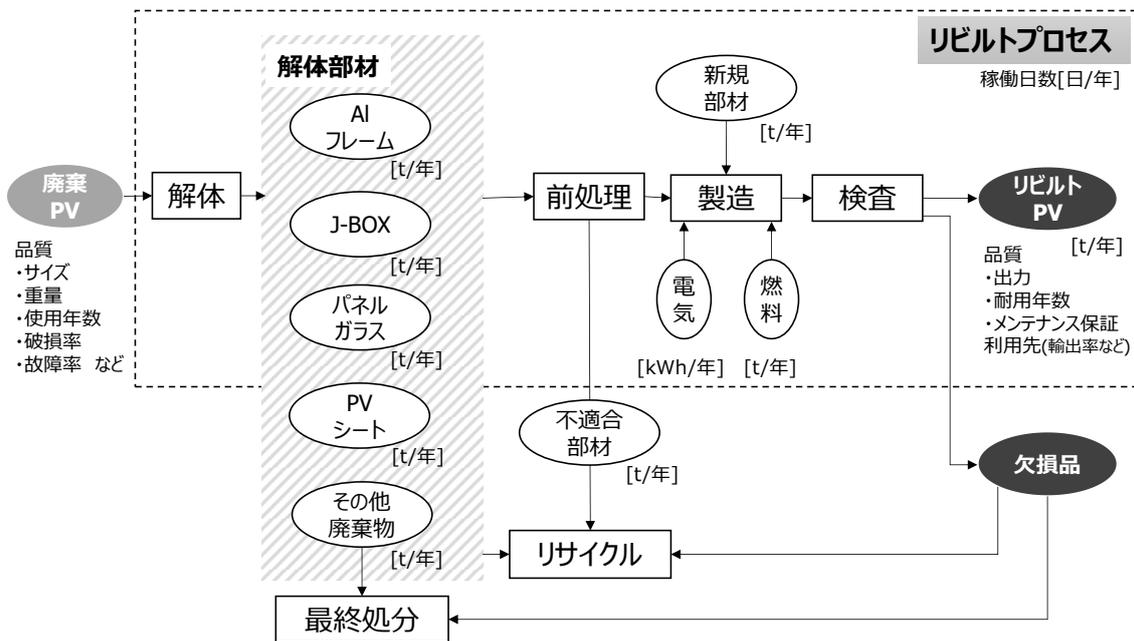


図 5.254. リビルトに関する調査範囲

② 分析用データの作成

上述したフォアグラウンドデータと試作実績を踏まえてより実態に即したデータを収集、分析・評価が可能となった。また追加で必要なリビルトに関するデータ項目（ユーティリティ（電力、熱、圧縮空気、薬剤など）およびそれらの消費量）を明らかにした。

(5) 太陽光パネル製造に関するデータの収集・作成

太陽光パネル製造については、既存システムと提案システムに差がないことがわかった。ただし、太陽光パネルの種類によって環境負荷のホットスポットが異なる可能性があるため、インベントリに関して調査した（詳しくは(8)項に記述）。

(6) 太陽光パネル使用に関するデータの収集・作成

太陽光パネルの使用段階は、既存システムと提案システムに差がないことがわかった。

(7) 素材リサイクルに関するデータの収集・作成

① フォアグラウンドデータの収集

素材リサイクルとして、アルミフレームの回収・利用とガラスリサイクル、Cu・Ag回収が対象となる。

アルミフレーム

アルミフレームはホットナイフ分離法®における前処理装置として、フレーム外しが行われる。アルミフレーム外しのフォアグラウンドは計測した電力測定結果を用いる。

ガラスリサイクル

太陽光パネルのカバーガラスはホットナイフ分離法®により分離・回収され、カバーガラスのまま再利用する場合と、グラスウールや他のガラス製品向けにカレットにして天然資源等の代替に活用するケースが想定される。グラスウールや他のガラス製品向けにカレット化するガラスリサイクルプロセスのインベントリデータは、実稼働している工場での電力測定等を実施し収集した。カバーガラスのカレット化に適用されると考えられる製造ラインの電力と付帯設備の電力消費量の合計を算出した。

Cu・Ag

電気パルス法および粉砕法で回収できる Cu、Ag それぞれの重量については実証試験で計測したマテリアルバランスのデータを集めた。

(8) バックグラウンドデータの収集

太陽光パネル製造の上流プロセスは、世界最大のインベントリデータベースである ecoinvent3.6[5]を参照し、国内最大のインベントリデータベースである IDEAv3.1[6]と、日本版被害算定型影響評価手法 (LIME2 : Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) [7]に基づいて環境影響を評価した。バックグラウンドプロセスのインベントリデータは様々なデータベースが開発されており、地理的または時間的な適用可能性、資質、データセットの境界など異なる性質を有する。以下では、網羅性の高い2種のデータベースと国内の影響評価に適した LIME2 を用いた。ecoinvent3.6 で参照したデータは、photovoltaic panel production, multi-Si wafer、photovoltaic cell production, multi-Si wafer、multi-Si wafer production、solar glass production, low-iron、tempering、flat glass、aluminium alloy production、metallization paste production、silicon carbide production、wire drawing、copper である。また、IDEAv3.1 を参照し用いたデータは、電力、日本平均、2017年度 (IDEA 製品コード 331111017pJPN)、埋立処理サービス、産業廃棄物 (IDEA 製品コード 852211000 pJPN)、工業用排水処理サービス (IDEA 製品コード 852500000

pJPN)、沈殿処理サービス、工業用水 (IDEA 製品コード 882511201pJPN) の他、素材リサイクルに関する Cu・銀再生地金プロセス (IDEA 製品コード 232912000pJPN、232913000pJPN) と回収・輸送プロセス (IDEA 製品コード 441111211pJPN ~ 441111237pJPN) である。現在実用化されている太陽光パネルの種類と特徴を表 5.117 に示す。太陽光パネルの種類による LCA 結果の影響を把握するため、既往研究を調査し、様々な太陽光パネルの製造に関するデータを収集し、環境負荷の特徴を調べた。また、電気パルス法や粉砕で回収した Cu と Ag の回収プロセスを検討するために、製錬プロセスの情報を収集した。

表 5.117. 現在市場で実用化され、廃棄されてきうる太陽光パネルの種類と特徴[8][9]
(最先端研究における太陽光パネルの効率[10]とは異なる)

種類			特徴
シリコン系	結晶系	単結晶	160~200 mm 程度の薄い単結晶シリコン基板を使用。シリコンの原子が規則正しく配列した構造で、変換効率が高い。製品の歴史が長く豊富な実績を持つ。 モジュールの変換効率：15-17% 特長：性能・信頼性 課題：コスト
		多結晶	小さい結晶が集まった多結晶の基板を使用。単結晶に比べて変換効率は低いが高価に製造できる。 モジュールの変換効率：13-15% 特長：単結晶より安価 課題：単結晶より変換効率が低い
	薄膜系	アモスファス (非晶質) シリコンや微結晶シリコン薄膜を基板上に形成。薄くても発電可能。 モジュール変換効率：6-7% (アモスファス)、8-10% (多接合) 特長：大面積で量産可能 課題：効率が低い	
化合物系	CIGS/CIS 系	Cu・In・Ga・Se 等を原料とする薄膜型。 モジュール変換効率：11-12% 特長：省資源・量産可能・高性能可能性 課題：In の資源量	
	CdTe 系	Cd・Te を原料とする薄膜型。 モジュールの変換効率：11-12% 特長：省資源・量産可能・低コスト 課題：Cd の毒性	

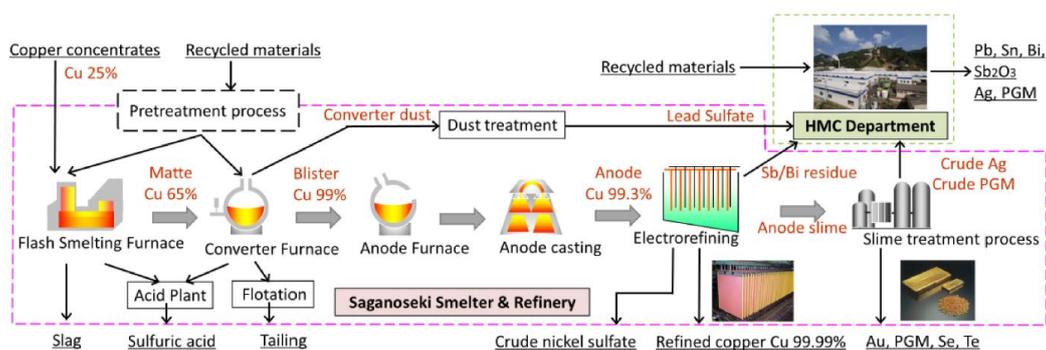
太陽光パネル製造

様々な種類の太陽光パネルのライフサイクル温室効果ガス（以下「LC-GHG」）排出量に関するレビュー（文献[11]）を基に整理した結果、パネルの種類によって LC-GHG が異なること、同一種であっても文献によって差が生じていることがわかった。Ecoinvent と IDEA から作成した多結晶シリコンの環境負荷（気候変動と資源消費）における太陽光パネル製造の内訳を見ると気候変動、資源消費共に太陽電池セルの負荷割合が大きいことがわかった。また、太陽電池セルの内訳を見ると、気候変動ではウェハ製造の負荷が大きく、資源消費では Ag の負荷が大きいことがわかった。オーストラリアの太陽光パネル（結晶系シリコン、アモルファスシリコン、CdTe 系、CIGS を含む）のマテリアルインベントリ（文献[12]）によると、重量割合ではガラスが大きな割合を占めるが、経済的価値でみると Ag や Cu などの金属類が占める割合が大きくなった。

銅精錬 (Cu、Ag)

粉碎・選別や電気パルス法で回収した金属含有物からの Cu・Ag 生産プロセスを明らかにするために、金属精錬フローを調査した。製錬フロー図の一例[13]を図 5.255 に示している。自溶炉は鉱石を溶融し金属硫化物を鉱脈から分離することを目的としている。世界で産出されている鉱石には硫化鉱が多く、そのうち黄銅鉱、輝銅鉱が大部分を占めている。また銅精錬の原料鉱石は、採掘した鉱石を濃縮し、銅含有率を高めた銅精鉱(含有銅濃度:27.9%)が大半を占める。硫化鉱の溶融工程では、鉱石の熱分解や酸化反応、造鍍反応、燃料の燃焼などの反応が起こる。転炉における精錬工程は造鍍期と造鋼期があり、それぞれで Fe や S を取り除く。続く電解精錬では基本的に酸性硫酸銅溶液を電解液とし、粗銅をアノードに、純銅の種板をカソードに用いて電解することでカソードに 99.99%以上の電気銅を析出させる。そのため、回収物の銅濃度が銅精鉱相当であれば、当該プロセスの原料代替を想定することになる。

他方、近年金属資源循環の観点で E-Scrap からの金属資源回収技術開発が進められている。E-Scrap は Cu が 15~25%、Ag が 300~1,500 g/t 程度であり、銅精鉱 (Cu 20~30%、Ag 20~100g/t) とは異なる特性を有する[14]ため、前処理プロセスによる濃縮操作が行われる (図 5.255 Recycled materials→Pretreatment process のフロー)。本実証の回収物についても E-Scrap と同等のプロセスで扱われる可能性が高いことから、LCA データベース IDEA v3.1[6]の銅再生地金プロセスと銀再生地金プロセスの適用を検討し、銅・銀生産量に対する原料投入量(非鉄金属屑+銅鉱石)の割合を基準として、回収物の銅・銀濃度に応じた計算により環境負荷を算出した。



(出典) 佐々木・大塚(2021)日本金属学会誌, 85(8), 274-278

図 5.255. 製錬フローの例 (JX 金属) (文献[13] Fig.5 から引用)

(9) サプライチェーンの選定

① 評価項目の検討

前述の 5.9.1 項で検討したサプライチェーンに基づき、評価バウンダリを設定した。回収可能資源は、アルミ (Al) フレーム、カバーガラス、Cu、Ag である。ジャンクションボックスの回収およびそのリサイクルは本実証では対象としていない。原料採掘から太陽光パネル製造、使用プロセスを経て、使用済み太陽光パネルの処理を評価範囲とし、3つの既存システムと 5つの高度循環システムを比較する。ただし、使用プロセスは両システムで差がないため、共通プロセスとして評価には含んでいない。8つの評価ケースの処理フローの分岐および処理プロセス/リサイクル効果の有無を表 5.118 に記す。また、ケースの詳細として表 5.115 の内容を表 5.119 に再掲する。

処理フローの分岐は、使用済み太陽光パネルの回収、回収した廃棄太陽光パネルのアルミフレーム分離、フレームなし太陽光パネルのガラス分離 (ホットナイフ分離法®)、セルシートへの電気パルス法の適用、電気パルス処理残渣 (残渣セルシート) への追加プロセスとなっている。

既存システム (c-1~3) のうち、c-1 は建物に設置された太陽光パネルの回収を伴わない処理を想定しており、建設物解体と同時に産業廃棄物処理される。c-2 以降は太陽光パネルの回収を伴う処理であり、c-2 は回収した廃太陽光パネルを産業廃棄物として処理、c-3 は回収した廃太陽光パネルのアルミフレームを解体・回収してから産業廃棄物処理となる。

高度循環システムでは、回収した廃太陽光パネルのアルミフレームを外すところまでは、a-1~5 すべてに共通となっており、このうち a-1 のみがアルミフレームのない太陽光パネル (ガラス付き太陽光パネル) を処理対象物とする。具体的には、ガラス付き太陽光パネルの物理粉碎・選別が適用され、一次粉碎と二次粉碎によって得られる金属濃縮物に含まれる Cu、Ag が製錬プロセスを経て回収される。同時にガラス濃縮物が選別・回収されるが樹脂付着状況なども踏まえて再利用可能性は低いと考え、ガラス濃縮物は産業廃棄物処理となる。a-2~a-5 は、ホットナイフ分離法®によるカバーガラスとセルシートの分離およびカバーガラスの回収までが共通である。a-2 はセルシートを粉碎・選別し、銀濃度の高い小粒径粒群の回収物に含まれる Cu、Ag を製錬プロセスで回収する。粒径の大きい回収物は産業廃棄物処理、または製錬プロセスで処理される。a-3~5 はセルシートへの電気パルス法を適用するケースで、電気パルス後の残渣 (セルシート) の処理フローが異なる。電気パルス法では、セルシートから Cu バスバーと金属粒子が分離・濃縮され、残渣として表面が破碎したセルシートが得られる。a-3 では残渣セルシートを産業廃棄物として処理する。a-4 では残渣セルシートに残った金属回収を目的として、残渣セルシートを製錬プロセスに投入する。a-5 は残渣セルシートに追加で粉碎選別処理を行い、得られた金属濃縮物を製錬プロセスに投入し、樹脂残渣は産業廃棄物処理となる。

表 5.118. 評価ケースの設定

処理プロセス・リサイクル効果		従来システム			高度循環システム				
		c-1	c-2	c-3	a-1	a-2	a-3	a-4	a-5
処理 プロセス	原料採掘～PVパネル製造	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	建設物解体	✓							
	取り外し・回収・輸送		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	AIフレーム解体			✓	✓	✓	✓	✓	✓
	ホットナイフ法(EVA・ガラス分離)					✓	✓	✓	✓
	電気パルス法						✓	✓	✓
	破砕*・篩分け *ガラスつきPVパネルは2段階				✓	✓			✓
	製錬				✓	✓	✓	✓	✓
	従来の中間処理(破砕・選別)	✓	✓	✓		✓	✓		✓
	埋立	✓	✓	✓	✓	✓			
リサイクル 効果	AIフレーム製造代替効果			○	○	○	○	○	○
	ガラス製品*製造代替効果 *カバーガラス代替または再生カレットによる回避					○	○	○	○
	銅・銀製造代替効果				○	○	○	○	○

表 5.119. 太陽光パネルの LCA における想定サプライチェーン (表 5.115 再掲)

Case	設定等
Case c-1	<u>建設物解体処理</u> 太陽光パネルを回収しない。建設物解体処理により建設混合廃棄物として処分する。
Case c-2	<u>粉碎・選別</u> 回収した太陽光パネルを産業廃棄物として中間処理（破碎・選別）を経て処分する。
Case c-3	<u>アルミフレーム回収+粉碎・選別</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルは c-2 同様に産業廃棄物として中間処理（破碎・選別）を経て処分する。
Case a-1	<u>アルミフレーム回収+物理粉碎（一次粉碎・二次粉碎）・選別</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルから 2 段階の物理粉碎によって金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。
Case a-2	<u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+粉碎・選別</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートを破碎・選別した金属濃縮物から製錬で Cu・Ag を回収する。
Case a-3	<u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+電気パルス法+産業廃棄物処理</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートから電気パルス法で金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。電気パルス法後のセルシート残渣は産業廃棄物として処分する。
Case a-4	<u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+電気パルス法</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートから電気パルス法で金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。電気パルス法後のセルシート残渣の Cu・Ag を製錬で回収する。
Case a-5	<u>アルミフレーム回収+ホットナイフ分離法®+電気パルス法+物理粉碎・選別</u> 回収した太陽光パネルのアルミフレームを分離・回収する。フレームなし太陽光パネルをホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートに分離する。セルシートから電気パルス法で金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。電気パルス法後のセルシート残渣を物理粉碎することで、金属濃縮物を回収し、製錬で Cu・Ag を回収する。

② 温室効果ガスによる評価

上述したフォアグラウンドデータとバックグラウンドデータを用いて、太陽光パネルの環境影響をライフサイクルアセスメントで評価する。機能単位は多結晶シリコン系太陽光パネル 1m²の使用とし、評価項目は気候変動（GWP100a）（LC-GHG[kgCO₂eq.]）および資源消費（LC-RCP[kg-Sbeq.]）とした。得られた結果は Case c-1 を 1 とした指数で示す（図 5.256、図 5.257）。気候変動、資源消費ともに太陽光パネルの製造負荷が最も支配的であったため、製造負荷を除き廃太陽光パネルの処理・リサイクルの影響を図示する（図 5.258、図 5.259）。また、太陽光パネルの製造負荷の内訳を気候変動、資源消費それぞれ図示する（図 5.260）。

まず、気候変動の結果（図 5.256、図 5.258、図 5.260）について記す。また、図 5.256 には参考として埋立処分量を併記した。すべてのケースに共通して、太陽光パネル製造負荷が大きく、特にシリコンウェハの製造負荷がその 59%を占めた。この他に太陽光パネル製造で環境負荷が高いプロセスは、アルミフレーム製造 13%、パネルガラス 5%となっている。太陽光パネル製造過程で消費する電力が主な要因として挙げられる。Case c-1 の処理プロセスの負荷は、使用済み太陽光パネルを回収する他のケースと比べて大きかった。そのため、太陽光パネルの回収は低環境負荷実現においては重要なプロセスとなることが示唆される。Case c-2 の LC-GHG と、Case c-3 の LC-GHG の差は、アルミフレーム回収によるリサイクル効果となっている。Case a-1～a-5 はいずれも既存システムである Case c-1～3 よりも低い値となった。Case c-3 と比べて 6～15%低環境負荷であり、太陽光パネル製造を除いた比較では約 2～3 倍の環境負荷削減に寄与することがわかった。Case a-1 では Case a-2～5 と比べて、処理負荷が大きいことがわかった。これはガラス付き太陽光パネルを処理対象物としていることに起因する。この結果より、ホットナイフ分離法®でカバーガラスとセルシートを分離する方が、ガラスリサイクルと環境負荷の観点で優位であることがわかった。Case a-2 の LC-GHG は、カバーガラスおよび金属回収効果により低環境負荷となっており、電気パルス法を適用する Case a-3～5 と比べて装置製造負荷が小さいことも特徴のひとつである。これはホットナイフ分離法®の処理速度に合わせて、粉碎・選別装置が稼働しているため、効率的に一連の処理を行えていることを意味する。また、カバーガラスの回収効果は埋立処分量の削減に寄与しており、従来の 10 分の 1 以下となることがわかった。他方、Case a-3～a-5 で装置環境負荷が大きいのは、ホットナイフ分離法と電気パルス法の処理速度が異なっており、モジュールあたりの装置製造負荷の算出においてホットナイフ分離法®の装置環境負荷が大きくなるためである。電気パルス法を適用した Case a-3～a-5 においては、製錬投入量と銅・銀濃度、セルシート残渣の処理方法が異なる。いずれも電気パルス法によって、高濃縮度の Cu バスバーや金属粒子を得ることができる。Case a-3 は製錬投入量が最も小さいため、製錬負荷は最小であるが Cu・Ag が残存しているセルシート残渣を産業廃棄物として処理するため、処理負荷が足され、銅・銀回収効果も他と比べて小さくなる。Case a-4 はセルシート残渣を製錬投入するため、製錬負荷が大きくなるが、銅・

銀回収効果も大きくなる。Case a-5 はセルシート残渣を物理粉碎・選別することで、さらに金属粒子を回収し銅・銀回収を行う。そのため、物理粉碎・選別の負荷は追加されるが、Case a-4 より少ない製錬投入量で銅・銀回収効果を大きくできることがわかった。

次に資源消費の結果（図 5.257、図 5.259、図 5.260）について以下に記す。資源消費においても、すべてのケースにおいて太陽光パネルの製造負荷が大きく、内訳で見ると銀製造負荷が 60%で最も大きく、次いでアルミフレーム製造負荷が 25%となった。また、処理負荷の全体への影響は桁が異なっており、資源消費インパクトは非常に小さいことがわかった。各ケースの傾向は気候変動とほぼ同じであるが、処理負荷においては、銅製錬投入量が多いほど銅精錬の負荷が目立つことがわかった。リサイクル効果については、銀回収量が多いほど効果的であることがわかった。

気候変動、資源消費ともに既存システム（Case c-1～c-3）よりも高度循環システム（Case a-1～a-5）が低環境負荷であることがわかった。特に、太陽光パネルの製造負荷の大きい部材を回収することができている資源消費において、その効果が大きいことがわかった。

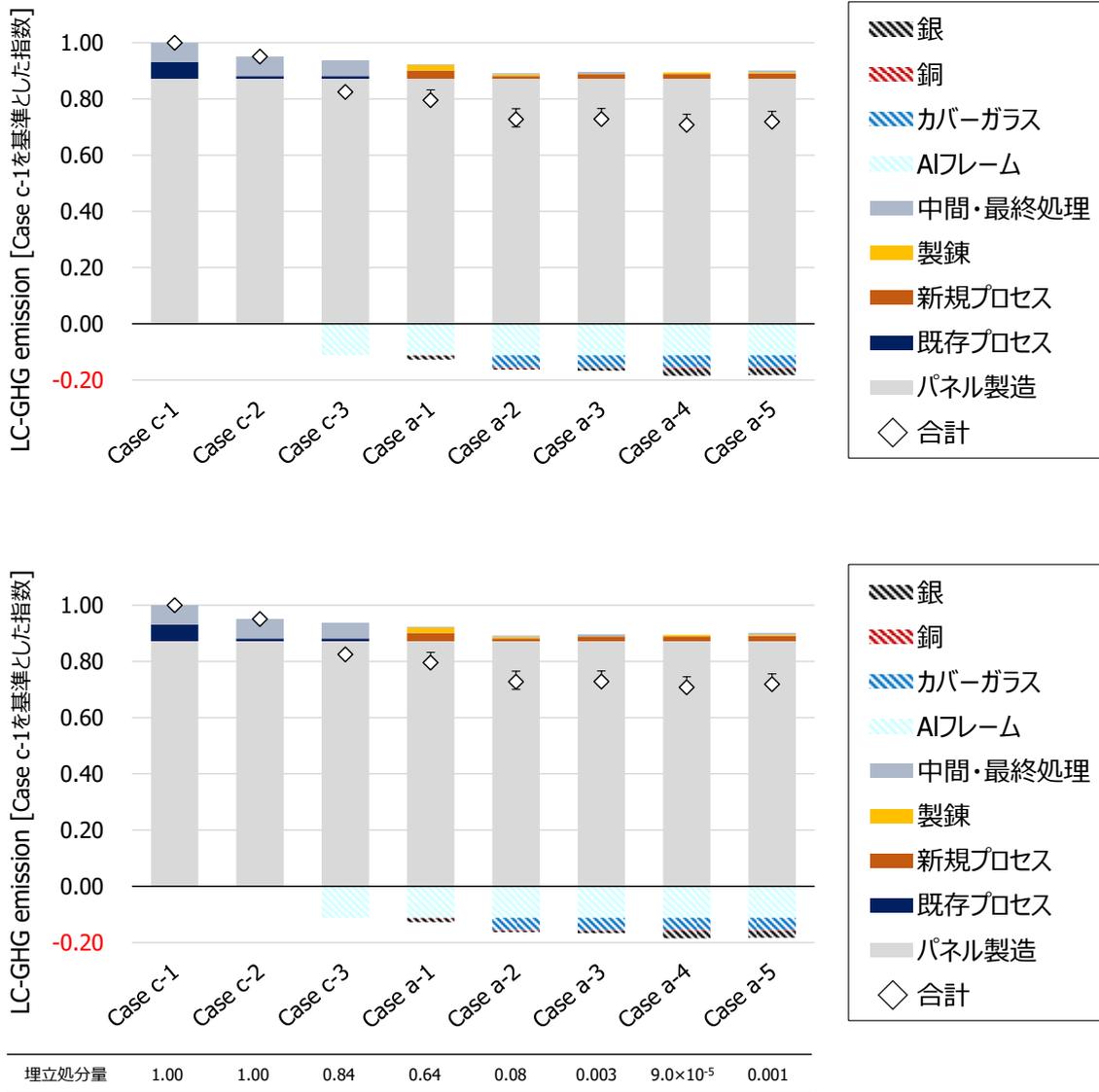


図 5.256. 使用済み太陽光パネルの LCA (気候変動)

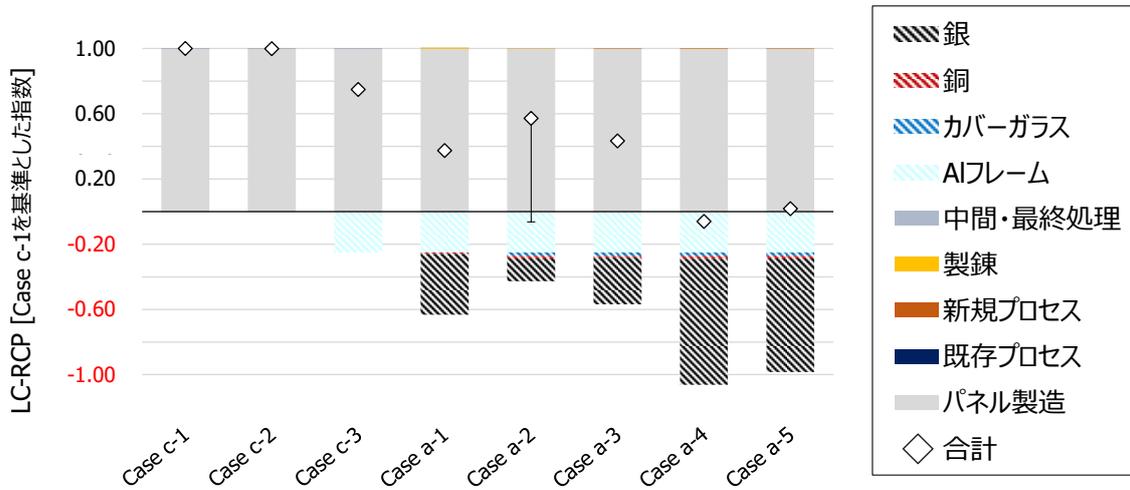


図 5.257. 使用済み太陽光パネルの LCA (資源消費)

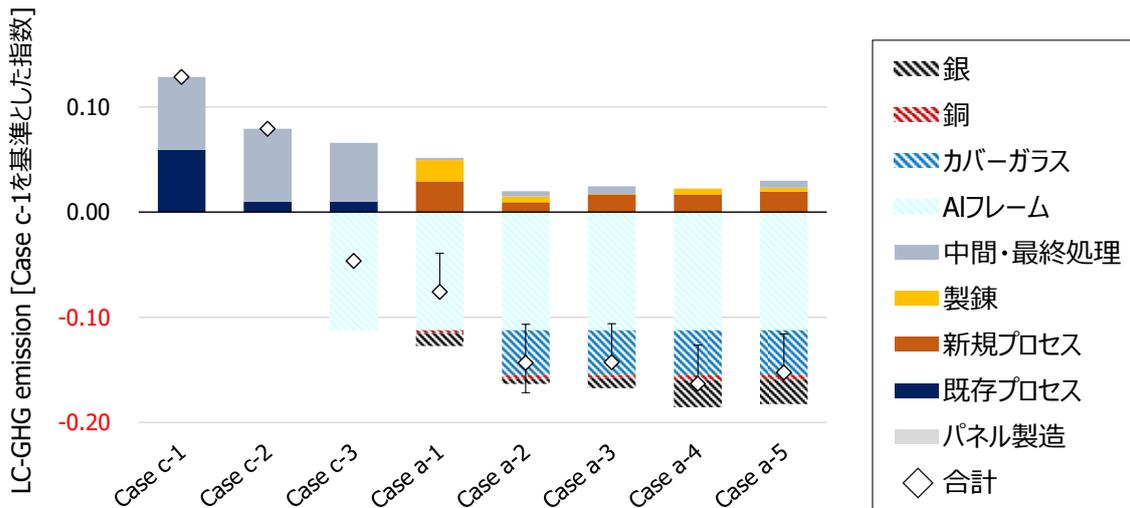


図 5.258. 太陽光パネル製造を除いた結果 (気候変動)

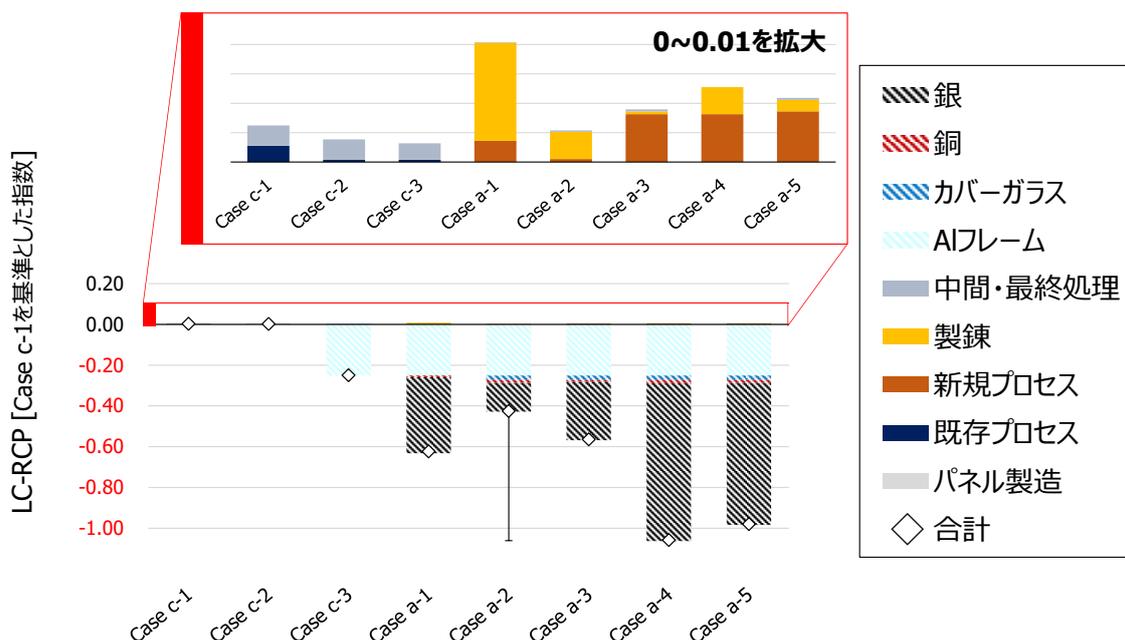


図 5.259. 太陽光パネル製造を除いた結果（資源消費）

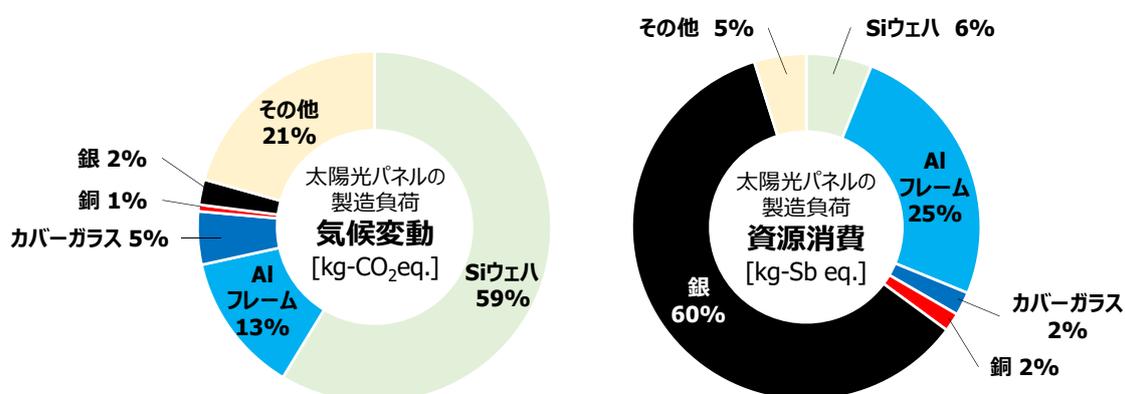


図 5.260. 太陽光パネル製造の内訳（右：気候変動、左：資源消費）

5.9.3 サプライチェーンの具体化

(1) LCA 結果の解釈からの検討

先述の 5.9.2 項のライフサイクルアセスメントにおいて、本実証の提案システムが既存システムよりも気候変動、資源消費ともに負荷が小さくなることが明らかとなった。ただし、実験・実証サイトの情報では不確かだった点に関しては以下を前提としている。

- 物理選別後のガラス選別（金属濃縮物とガラス濃縮物の選別）は、本実証には含まれていないため、選別負荷を推計している。
- 物理選別、粉碎選別、電気パルス法で得られる金属濃縮物、ガラス濃縮物、セルシート

残渣などの回収物の輸送は考慮していない。

- 各プロセスで得られる金属濃縮物（Cu 0.08～91.60wt%、Ag 0.03～1.49wt%）は銅・銀濃度によらず製錬がある程度は受け入れると仮定している。このうち、電気パルスで得られる銅バスバー（Cu 91.6wt%）は特に銅濃度が高いため、他の回収物とは異なるプロセスを経ることがありうる。

提案システムにおける特徴として、ホットナイフ分離法®によりカバーガラス回収やセルシートに含まれる Cu・Ag の選択的回収が可能になる点が挙げられる。Case a-1 と Case a-2～a-5 の比較からわかるとおり、太陽光パネル重量の 6 割を占めるガラス回収効果はそれなりに大きい。また、埋立処理量を指標とした場合には、ガラス回収効果はさらに大きくなる。そのため、設置場所からの回収輸送後のホットナイフ分離法®へのサプライチェーンはあるべき姿の一要素として必要と考えられる。

ガラス分離後のセルシートは、破碎選別（Case a-2）または電気パルス法（Case a-3～a-5）で処理される。本実証の評価結果は、Case a-2 が最も低環境負荷となった。他方、電気パルス法のケースの内訳をみると、装置製造負荷や電気パルス法運用の負荷（電力消費）が大きい。これは電気パルス法ではセル単位処理を想定しており、処理時間が他のプロセスよりも長いことが影響している。そのため、実証装置設計においてホットナイフ分離装置との接続設計などが行われ、処理時間のギャップがなくなれば装置環境負荷が無視できるほど小さくなる可能性もある。また、国内や工場の電源構成が再生可能エネルギー技術等の導入により電力生産の環境負荷が下がれば、運用時の負荷についてもさらに下がる可能性がある。こうした改良の方向性を踏まえた社会実装が期待される。

(2) 住宅の高断熱化の傾向とガラスウール断熱材使用量

カレットは、そのかさ密度の低さから、遠くまで輸送するのはコスト的に見合わないことが知られているものの、東京都と同様に、全国的に使用済み太陽光パネルからカバーガラス由来のカレットが発生することが見込まれることから、日本全体でのガラスウールの将来需要と、使用済み太陽光パネル由来のカレット発生量を比較した。はじめに、ガラスウールの需要量に関して外観した。

1980 年に施行された「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」の建物向けの「省エネルギー基準」は、改正に伴って昭和 55 年（1980 年）基準、平成 4 年（1992 年）基準、平成 11 年（1999 年）基準、平成 25 年（2013 年）基準と変遷し、改正のたびに断熱効果の向上が求められてきている。平成 25 年基準をベースにしつつ、「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律（建築物省エネ法）」が 2016 年に施行され、努力義務だったものが、2021 年 4 月より全ての建築物に対して適合義務化されてきている。建築物省エネ法では、脱炭素社会へ向けた取り組みとして、平成 25 年基準よりさらに厳しい省エネルギー基準として ZEH（net zero energy house）基準が設けられている。日本を気候別に 8 地域に区

分した中での第5地域や第6地域（関東圏を含む）では、断熱性の指標である U_A 値（外皮平均熱貫流率）を平成25年基準で $0.87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ に対し ZEH 基準で $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 以下と、より高断熱化を求めている。現在、ZEH 基準をクリアした住宅に対し、国から補助金が出されており、2030年には、新築の約半分が ZEH 基準を達成することを目的としている。

表 5.120. 省エネ基準による U_A 値（外皮平均熱貫流率）の違い（単位： $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ）

	1 地域	2 地域	3 地域	4 地域	5 地域	6 地域	7 地域	8 地域
	佐呂間等	札幌・旭川等	盛岡・青森等	秋田・山形等	つくば・仙台等	大阪・京都等	鹿児島・高知等	沖縄
省エネ基準 (H25 基準)	0.46	0.46	0.56	0.75	0.87	0.87	0.87	—
ZEH 基準	0.46	0.46	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	—
HEAT20 G1	0.34	0.34	0.38	0.46	0.48	0.56	0.56	—
HEAT20 G2	0.28	0.28	0.28	0.34	0.34	0.46	0.46	—
HEAT20 G3	0.20	0.20	0.20	0.23	0.23	0.26	0.26	—

※ZEH 基準のさらに上の目標として HEAT20 G1、HEAT20 G2、HEAT20 G3 という目標が設けられており、それぞれの U_A 値はより低いものに設定されている

参照：一般財団法人 20 年先を見据えた日本の高断熱住宅研究会「HEAT20ガイドブック PLUS」

この高断熱化のためには、断熱材の利用が必須である。断熱材としては、グラスウール、ロックウール、気泡プラスチック系断熱材などがあり、住宅用断熱材のシェアは、全体の55%がグラスウールであり、次いで33%が気泡プラスチック系断熱材である[15]。実態としては、同じ建物の中でも屋根と壁にはグラスウールを使用し、床には気泡プラスチック系を用いている住宅メーカーもあるなど、用途に合わせて最適な種類が選ばれている。一方、プラスチック系断熱材は火災の際に有害化学物質を発生させることもあり、グラスウールが選ばれることも多いようである。先述の表 5.120 に示す第4地域を例に、省エネ基準による熱損失係数（床面積あたり熱損失量）とそれに伴うグラスウール使用量の違いを表 5.121 に示す。基準の変遷に伴って、グラスウールの使用量（厚み）が大きく変わっている様子がわかる。

表 5.121. 省エネ基準による熱損失係数（床面積あたり熱損失量）とそれに伴うガラスウール使用量の違い

項目		昭和 55 年基準	平成 4 年基準	平成 11 年基準
性能基準	熱損失係数	5.2 W・m ² ・K ⁻¹ 以下	4.2 W・m ² ・K ⁻¹ 以下	2.7 W・m ² ・K ⁻¹ 以下
仕様基準	断熱材(外壁)	グラスウール 30 mm	グラスウール 55 mm	グラスウール 100 mm
	断熱材(天井)	グラスウール 40 mm	グラスウール 85 mm	グラスウール 180 mm
	開口部	アルミサッシ +単板	アルミサッシ +単板	アルミサッシ +複層ガラス

※一定の仮定において、国土交通省において試算（表 5.120 の 4 地域の例）

出典：低炭素社会に向けた住まいと住まい方推進会議資料より

平成 11 年基準から平成 25 年基準の変更では、高機能グラスウールを求められている。高性能品の住宅用グラスウール 16K（16 kg/m²）は通常使われる住宅用グラスウール 10K（10 kg/m²）より高密度であり、グラスウールの使用量は約 1.4 倍である。住宅全体に使用されるグラスウールも増加していると考えられる。

表 5.122. グラスウール断熱材の密度と断熱性能

		相当密度 (kg/m ³)	熱伝導率 Wm ⁻¹ K ⁻¹ (平均温度 25°C)	断熱材区分
住宅用グラスウール断熱材	10K	10	0.050	A-2
	16K	16	0.045	B
	20K	20	0.042	B
	24K	24	0.038	C
	32K	32	0.036	C
高性能グラスウール断熱材	16K	16	0.038	C
	24K	24	0.036	C
	32K	32	0.035	C
	40K	40	0.034	D
	48K	48	0.033	D

参照：JFE ロックファイバー株式会社 HP「高断熱住宅の基礎知識」

省エネ基準が ZEH になり熱還流率 U_A 値で規定されていることから、グラスウールの熱

伝導率を一般的な木造住宅の外皮平均熱貫流率 U_A 値に換算した。換算条件として、一般部面積 85%、熱橋部 15%とし、それぞれに外壁下地材 12 mm、断熱材 105 mm、内壁下地材 12 mm ならびに、外壁下地材 12 mm、柱 105 mm、内壁下地材 12 mm の構造を想定した。また、外壁下地材は構造用合板とし熱伝導率 $0.16 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、内壁下地材は石膏ボードとし熱伝導率 $0.22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、柱はスギ材とし熱伝導率 $0.12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ とした。最後に、外気側ならびに室内側の表面熱抵抗をとともに $0.11 \text{ m}^2\text{K/W}$ とした[16]。グラスウール断熱材ごと(表 5.122 参照)に、この条件で使用した際の U_A 値(外皮平均熱貫流率)を以下に示す。開口部は、面積割合 0.10、熱貫流率 $2.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (複層ガラス程度)とした条件での U_A 値も示した。ただし、ここでは開口部の熱貫流率を無視しているため、実際の U_A 値に対して過大推計しているものと考えられる。

表 5.123. グラスウール断熱材の性能と木造住宅外皮平均熱貫流率

		熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	U_A 値 (外皮平均熱貫流率) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
			壁部分のみ	開口部含む
住宅用グラスウール断熱材	10K	0.050	0.469	0.673
	16K	0.045	0.439	0.645
	20K	0.042	0.421	0.629
	24K	0.038	0.396	0.606
	32K	0.036	0.383	0.594
高性能グラスウール断熱材	16K	0.038	0.396	0.606
	24K	0.036	0.383	0.594
	32K	0.035	0.376	0.589
	40K	0.034	0.370	0.583
	48K	0.033	0.363	0.577

近年(2003年以降)の住宅着工床面積とグラスウール断熱材生産量ならびに販売量の推移をそれぞれ図 5.261 ならびに図 5.262 に示す。なお、グラスウール断熱材は、経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編におけるガラス短繊維製品(フェルト、ボード、その他ガラス短繊維製品の合計)の値を用いた。2003年から住宅着工床面積は図 5.261 図 5.262 で示すように減少傾向にあるものの、ガラス短繊維製品の生産量、販売量ともに大きな減少は見られていない。これは、先述のように断熱性を高めるために床面積あたりのグラスウール断熱材使用量の増加が理由と考えられた。

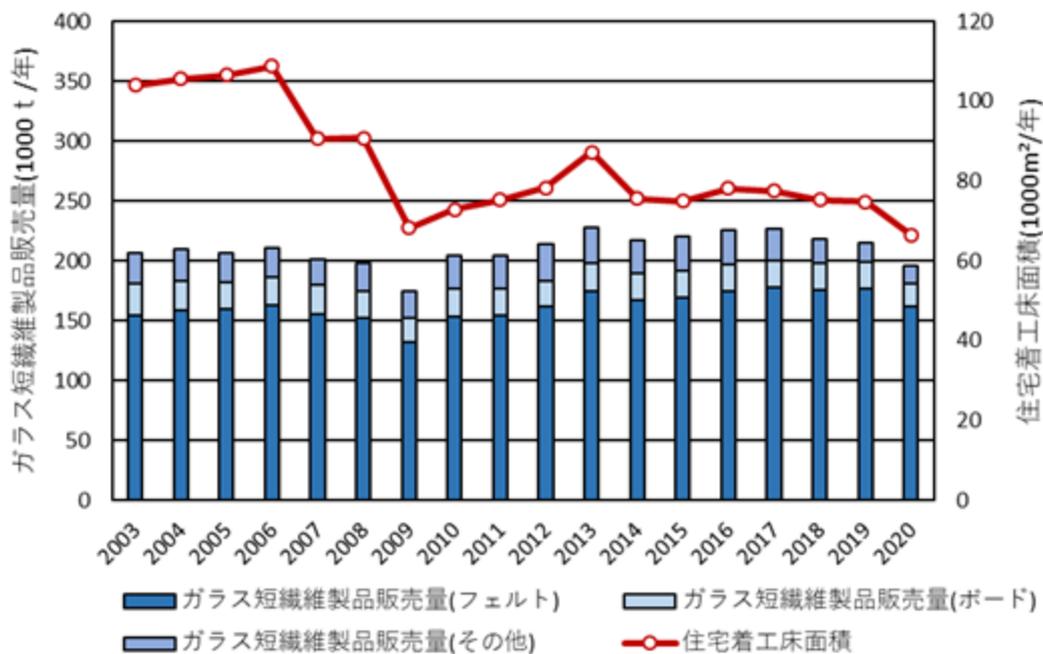


図 5.261. ガラス短繊維製品販売量と住宅着工床面積の推移

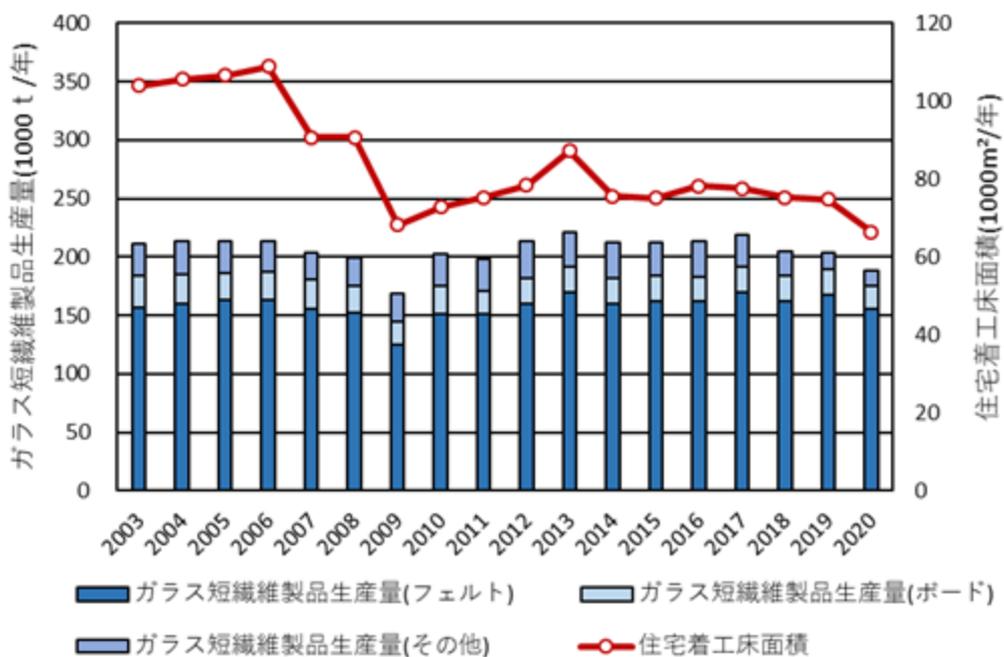


図 5.262. ガラス短繊維製品生産量と住宅着工床面積の推移

そこで、住宅着工床面積とガラス短繊維製品生産量、販売量を対散分布図として図 5.263 図 5.264 に示す。省エネ基準の変化は、1999 年、2013 年、2016 年であったが、施工において、速やかに新基準に対応している訳ではないと考えられている。そのため、1999 年基準により、その後、その基準を満たす住宅の割合が増加し、さらに 2013 年基準により同様に割合が増加してきたと考えられる。

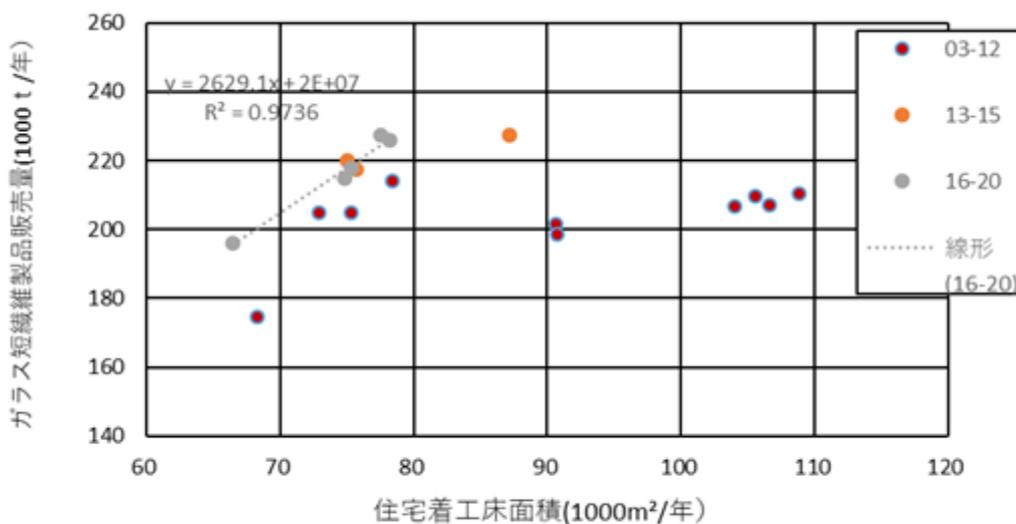


図 5.263. 年度別住宅着工床面積とガラス短繊維製品販売量

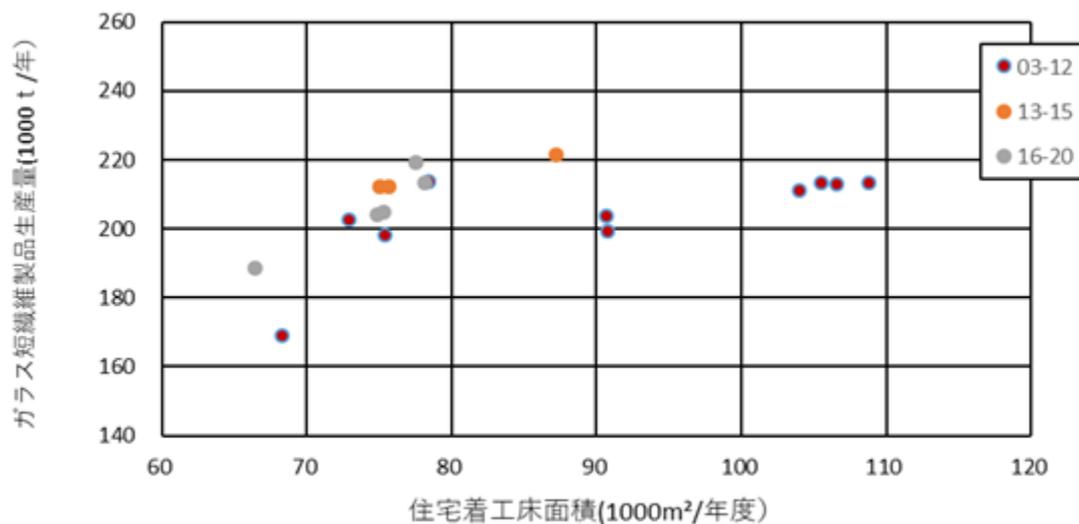
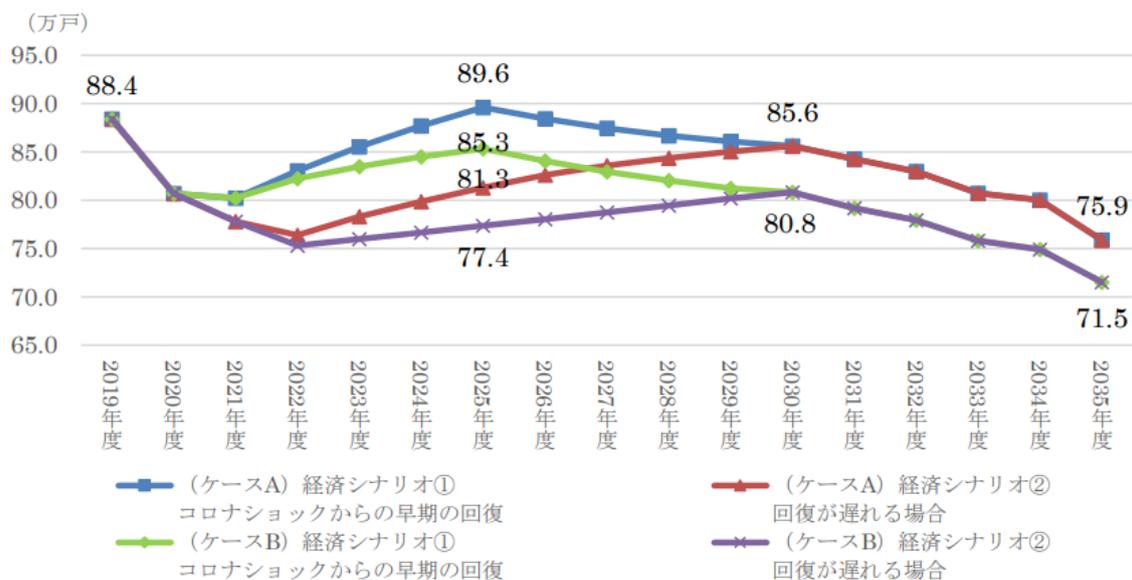


図 5.264. 年度別住宅着工床面積とガラス短繊維製生産量

過去の統計からは、グラスウール出荷量は、建築着工面積と比例関係にあり、その傾きは省エネ基準の変遷により、高断熱化が進んだことで、床面積あたりのグラスウール出荷量も大きくなっていることが分析されており[17]、本研究においても、近年の傾向として同じ結果を得た。今後の住宅の高断熱化に向けて、グラスウールの需要が大きくなることが予想された。将来の住宅着工戸数は、図 5.265 のように予測されている。



(出典) 2019年度は国土交通省「住宅着工統計調査」、2020年度以降は当研究所で試算

(出典) 一般社団法人建設経済研究所: NO.73 建設経済レポート (2021.3) p.49

図 5.265. 住宅着工戸数 将来推計

そこで、2030年について、住宅着工戸数の85.6万戸を参照し、1戸あたりの現在の平均床面積94m²/戸とし、2030年には住宅は80,464千m²の新規着工面積とした。そこで、省エネ基準の変遷もあることから、最新の期間である2016-2020年の住宅新規着工面積とガラス短繊維製品販売量との比例関係より、ガラス短繊維製品販売量として、24万トンと推計された。将来の省エネ性能の向上による高断熱化を加味したとして、30万トン程度であろうと想定される。

一方、断熱材としてのガラス短繊維の重量に占めるグラスウールの重量は、90%程度であるため、22~27万トン程度の住宅用断熱材用途として、カレットの需要量はあると考えられた。

本実証からは、丁寧な選別によってのみ使用済み太陽光パネル由来のガラスカレットは、その全量がグラスウール原料として利用できるものの、ホットナイフ分離法[®]等、分離したとしても有機物の残存量があるカレットであれば、10%程度のカレット利用率であり、2~

3 万トン程度が利用できることとなる。

一方、太陽光パネル由来のガラスカレット発生量の推計として約 30 万トンとされており、グラスウール以外の用途の模索も必要と考えられる。先述のコンクリート製品には、遠心力鉄筋コンクリート製品（管、ポール、パイプ）、空洞コンクリートブロック、護岸用コンクリートブロック、道路用コンクリート製品、プレストレストコンクリート製品（はり・けた、その他）、木毛・木片セメント板、気泡コンクリート製品がある。その中で最も生産量の大きい製品が、道路用コンクリート製品であり、年間 200 万トンから 250 万トン程度生産されている。次いで、遠心力鉄筋コンクリート製品と気泡コンクリート製品が 100-150 万トン程度である。他に、プレストレストコンクリート製品と護岸用コンクリートブロックが、それぞれ 75 万トン、50 万トン程度の生産量となっている。グラスウールよりも 1 桁生産量の大きなこれらの土木製品は、カレットのリサイクル先用途として有望であると考えられる。しかしながら、先述のように世界的にも研究が進んでいるものの、まだまだ技術として確立したものはない。今後、これらコンクリート製品の原料を調査し、ガラスカレットで代替可能な骨材の量を推計するとともに、場合によってはバインダーをガラス粉による代替も考えられることから、バインダーへの技術的な代替可能性についても調査する必要があると考えられた。

以上のように、現況からは、先述のようにコンクリートブロック原料等の、他の利用先を検討するか、グラスウール用原料としての利用率が上げられるように、選別プロセス等の検討をするかが必要であると結論付けられる。

5.9.4 太陽光パネルに関する情報共有の検討

本実証が目指すような高度循環を考える際に、これにかかわる多様なデータを一括して管理することは極めて重要である。そして、現時点で明言できる「高度循環のため」という目的だけではなく、データを蓄積することで将来新しい利用方法が生まれる可能性も踏まえ、本実証で構築するデータベースについては、太陽光パネルの基礎的な情報から、実際の処理や試験的な分析等から得られた情報をすべて柔軟に取り込むことが出来るように、またその拡張も容易になるように設計する必要がある。

(1) データベースに格納するデータの検討

本実証で作成する予定のデータベースは図 5.266 に示すような構成要素からなる。

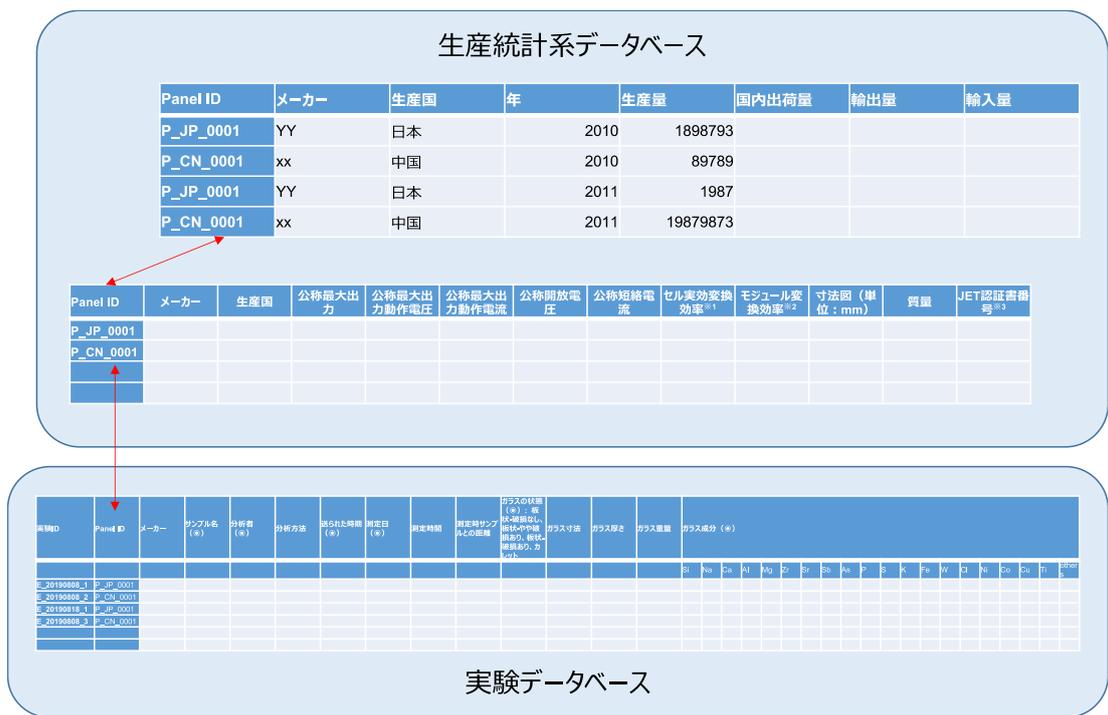


図 5.266. データベースの構成要素

基本的に公開情報を集約するための生産統計系データベース (DB) と、本実証で実験の対象としたパネルの情報(分析の結果、評価の結果、そして可能な限りの使用履歴)を蓄積すべき実験データベース (DB) をパネルの ID で紐付けることになる。実験 DB の詳細については、本実証の別項目からのフィードバックを受けつつ取捨選択、追加を繰り返す。そして、本実証の成果が実際に社会実装された際には、共同事業実施者の中で実験 DB は事業者が収集したデータを追加していくことになる。また、生産統計系 DB についても毎年更新を繰り返すことになる。ここで言うパネル ID とはパネルの種類ごとに与えられる ID であり、製品固有のものである。

(2) データベースの設計

前項で示したデータベースを実際に設計、実装する際に想定している利用のイメージを以下の図 5.267 に示す。

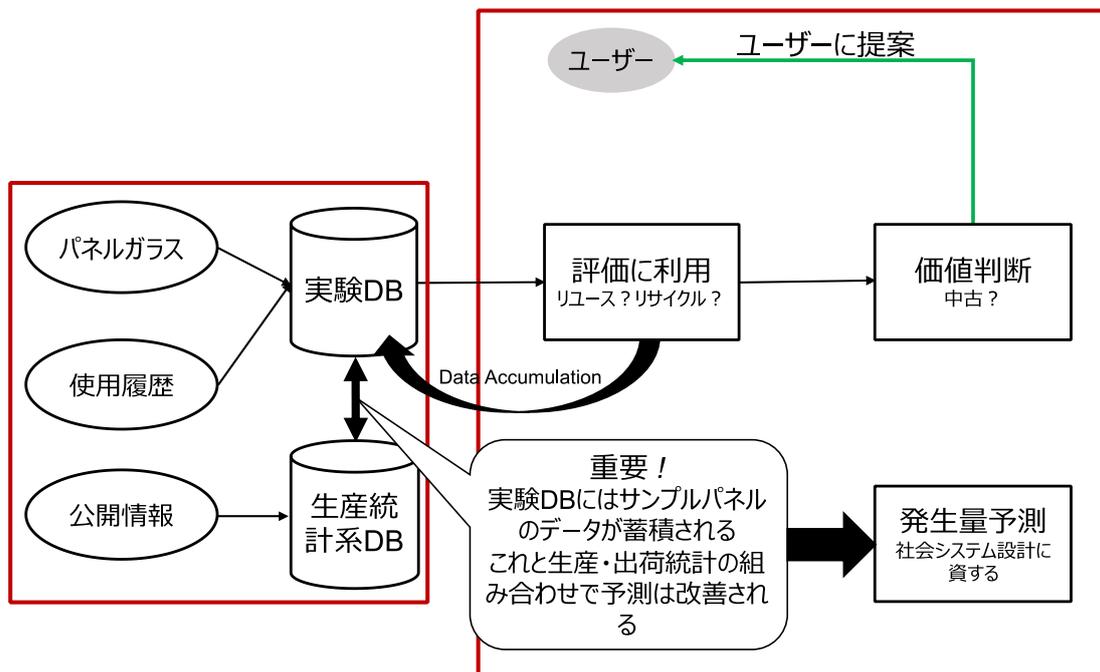


図 5.267. データベースの利用イメージ

本実証期間中は図 5.267 に示すように、基本的にはデータの蓄積に徹することになるが、データが積み重なることで、実験 DB は排出されたパネルの評価に利用されることになる。すなわち、本実証期間中や社会実装後もデータの蓄積が進むことで、ここに蓄積されたデータを教師データとし、新しく排出されるデータについてまず簡易的な評価、より正確には評価の予測を実施する。取り外すまでもなく、リサイクルに回すべきパネルなどは診断をせずに次ステージに進むことも考えられる。また、発生量予測等も常に更新することで、行政等が用意する社会システムの更新に寄与することを目指す。

実験 DB の中では不必要な個人情報は記載しないものの、使用履歴の一部として設置場所に関する地理情報等を格納する場合には個人情報になりうる。したがって、本 DB の全てにアクセスできるのは事業関係者のみであるが、情報にはアクセスできないとしても、例えば、発生したパネルの情報を入力することで、本 DB に基づく簡易評価予測結果を返すようなシステムを実装することはあり得る。その結果を事業に直接関係しない事業者も利用可能とする一方、入力されたデータを DB に蓄積、後日、正確な評価結果のフィードバックを受けることで、本 DB に基づく診断システムはその精度を増すことが期待できる。

(3) 本実証から得られたデータの格納の試行

前項までに示した概念設計に基づき、まずは本実証の中で得られたもののうち、秘匿性の低い情報を中心に DB への格納を試行した。将来的な展開を念頭に、DB の管理に関してある程度の知識がある担当者であればこれを行うことが出来るように、また複数の関係者がアクセスする上でのセキュリティ等を考え、今回は AWS (Amazon Web Services) 上に SQL

AWS を用いること自体による問題は特に発見されなかった。ただし、AWS 上で展開する SQL サーバーのアップデート等はユーザーが行う必要があり、セキュリティに関する設定等も含め、ある程度以上の知識のある管理者は必要不可欠であった。

また、潜在的な用途として、LCA 情報と組み合わせることで自動的にカーボンフットプリントを計算するようなツールを作成することもあり得る。ただし、本実証内で収集したフォアグラウンドデータは個社データであること、またバックグラウンドデータとして用いた値は有料データベースからのものであり、ライセンス上問題が生じうることから今回は DB への実装は見送った。ただし、付加価値となり得る機能であり、例えば合意の取れたコンソーシアム内で利用する場合などにおいてはこれを検討すべきである。

5.9.5 排出手続きの検討

太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT 制度）が 2012 年に始まって以降、住宅にも太陽光パネルが急速に普及している。これらの太陽光パネルが寿命を迎え、使用済みとなった太陽光パネルが大量に排出されるのは 2035 年から 2040 年ごろと予測されている。その一方で、住宅用太陽光パネルは 1990 年代後半に製品化されており、その寿命が 20～30 年と言われているなかで、徐々に住宅用太陽光パネルが排出され始めている。

しかし、現時点で使用済み太陽光パネルが住宅から排出される事案は僅かであり、情報も限られている。そのため、住宅の所有者から太陽光パネルの取り外しを委託された事業者が図らずも不適切な方法で取り外したり処理する懸念がある。また、このような懸念を持った所有者や事業者から行政への問い合わせも発生している。

このような現状をふまえ、今後、使用済みとなった太陽光パネルが大量に排出されることが予想されているなか、排出に関わる準備や手続きに関する課題を整理し、その対応策を検討することが有益と考えこの検討を実施した。

使用済みとなった太陽光パネルが排出される流れは図 5.269 に示すものが一般的と考えられる。所有者がその利用中止を決定した後、解体事業者や工務店などの委託事業者による施工と処理を委託する。また、所有者が施工を委託するにあたり、太陽光パネルを処理するために必要な情報を施工事業者へ提供するとともに、取り外しに伴う FIT 等の廃止手続きをおこなう必要がある。一方、委託事業者は、太陽光パネルの取り外し工事を施工し、取り外したものの収集運搬と中間処理を委託することになる。太陽光パネルの高度循環を想定した場合、その過程でリユースの可否を判断する性能診断を経て、リユースあるいは、リサイクルと最終処分される。

この流れに沿って、現状における課題を整理したうえでその解決方策を検討した。

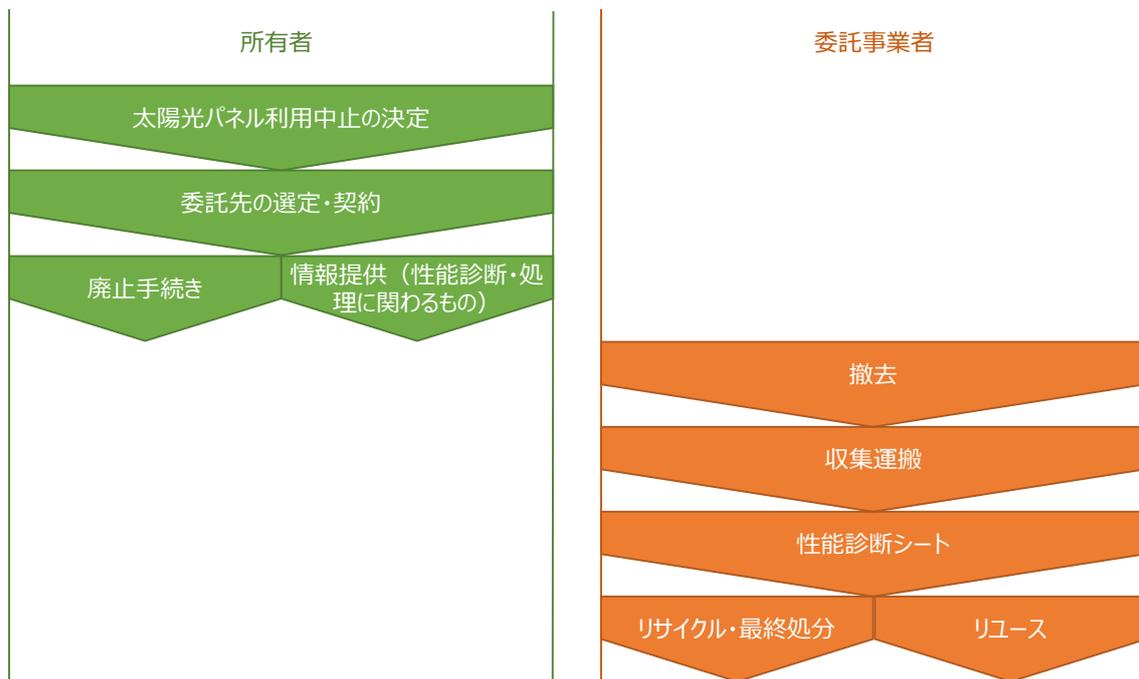


図 5.269. 使用済み太陽光パネル排出の流れ

(1) 排出における課題

使用済み太陽光パネル排出の各過程における課題を抽出するため、自宅の太陽光パネルを取り外した経験者や、取り外しを施工した事業者など表 5.124 に示す先にヒアリングを実施した。また、2019 年度研究調査と本実証を進める過程で抽出された課題と併せて表 5.125 のとおり整理した。

表 5.124. ヒアリング先一覧

ヒアリング先	主なヒアリング内容	備考
個人 A	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光パネルを取り外した理由 太陽光パネルを取り外して処理するまでの流れ 太陽光パネルを取り外す際の課題 	使用済み太陽光パネル取り外し経験者
事業者 B	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光パネル取り外し工事の施工状況 太陽光パネル取り外し工事施工における課題 	屋根工事専門の工務店（太陽光パネルの設置・取り外し工事の施工事例あり）
事業者 C	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光パネル取り外し工事の施工状況 太陽光パネル取り外し工事施工における課題 	住宅工務店（太陽光パネルの設置・取り外し工事の元請事例あり（施工は事業者 D に委託））

ヒアリング先	主なヒアリング内容	備考
事業者 D		電気工事業 (太陽光パネルの設置・取り外し工事の施工事例あり)
事業者 E	・ 太陽光パネルのリサイクル技術	リサイクル事業者 (太陽光パネル処理装置を開発)
事業者 F	・ 太陽光パネルのカバーガラスを原料として受け入れるための課題	グラスウールメーカ

表 5.125. 排出における課題

実施主体	作業	課題 (排出手続の検討で対象とするもの)
所有者	利用中止の決定	
	委託先の選定・契約	適切に施工と処理ができる事業者と相談しやすくする
	情報提供 (性能診断・処理に関わるもの)	リサイクルやリユースのために提供すべき情報とその取得方法を整理する
	廃止手続き	廃止に必要な手続きを整理する
委託事業者	取り外し・撤去	適切な取り外し・撤去方法を提示する 施工に必要な資格・許認可等を整理する
	収集運搬	太陽光パネルをリユース可能な状態で運搬する方法の検討 必要な資格・許認可等を整理する
	性能診断	効率的に診断するために必要な情報とその取得方法の整理
	リユース	リユース可能な太陽光パネルの基準の整理 必要な資格・許認可等を整理する
	リサイクル・最終処分	リサイクルする手法の整理 必要な資格・許認可等を整理する

(2) 所有者に関わる課題への対応

① 委託先の選定・契約

太陽光パネルのリユースやリサイクルに関する情報を持つ所有者や事業者が限られている現状では、所有者や事業者が使用済みとなった太陽光パネルをリユースやリサイクルするという選択をしづらい状況にある。一方で、住宅用太陽光パネルが普及し始めた 1990 年代後半から FIT 制度が導入された 2012 年までの間に住宅用太陽光パネルを設置した所有者は経済的な利益よりも環境貢献を強く意識していることが想定される。例えば、1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて住宅用太陽光パネルを設置した所有者の団体にクリーンエネルギーライフクラブ (以下「CELC」) がある。CELC では、設置当初から太陽光パネ

ルが寿命を迎え廃棄される時のことが議論になっており、太陽光パネルも最後はリサイクルしてほしいと考える会員が多かったとのことである。しかし、近年、会員の太陽光パネルが寿命を迎えて排出する際、取り外しの施工業者にリサイクルするよう依頼しても、事業者がリサイクルに対応できず、やむを得ず埋め立て処分された事例が多数あったとのことである。

現状においてはこのような状況ではあるものの、使用済み太陽光パネルの排出が始まった初期段階でリサイクルやリユースの流れと仕組みを作ることは、今後予想される大量排出におけるリサイクルとリユースの促進に資するもので意義のあることである。

このような事例は、施工事業者にリサイクルやリユースに関する情報がなく対応できなかったことが埋め立て処分の要因となっていると考えられる。また、今後、経済性を考慮して太陽光パネルを設置した所有者からの排出も増えてくることを考えると、施工事業者に限らず所有者にもリサイクルとリユースに関する情報を行政や業界団体が提供してその必要性を啓発する必要があると考えられる。

行政による情報提供手段としてホームページや広報誌、パンフレットなどの活用のほか、問い合わせ窓口の設置が考えられる。例えば、長野県は一般社団法人自然エネルギー信州ネットに委託して「長野県太陽光ヘルプデスク」を2021年9月に開設した[18]（図 5.270 参照）。この中で相談内容の例として「太陽光発電設備の設置から廃棄に関する手続きについて」を上げるとともに、ホームページのFAQでは、太陽光パネルのリサイクル可能性に言及している[19]。



太陽光発電に関する相談窓口 「長野県太陽光ヘルプデスク」を開設します

長野県では、「すべての屋根に太陽光を！」を合言葉に、屋根上での太陽光発電の普及を推進しています。太陽光発電設備の設置に関するご相談に対応する「長野県太陽光ヘルプデスク」を新たに設置し、県民の皆様の疑問にお答えします。

1 開設日

令和3年9月1日(水)

2 設置場所

次のホームページに開設します。

<https://www.shin-ene.net/pv-helpdesk>

※委託事業者(一般社団法人自然エネルギー信州ネット)のホームページ内

※ホームページのお問い合わせフォームでの相談受付、メールによる回答となり、電話では対応していません。

3 ご利用者の例

- ・住宅屋根への太陽光発電設備の設置を検討している方
- ・自社の屋根等への太陽光発電設備の設置を検討している事業者の方
- ・太陽光発電設備を施工、販売する事業者の方 など

4 ご相談内容の例

- ・太陽光発電に関する固定価格買取制度について
- ・太陽光発電の補助制度について
- ・太陽光発電設備の設置から廃棄に関する手続について
- ・多雪地帯での太陽光発電について など

5 その他

ヘルプデスクは、個別事業者等の紹介や斡旋を行うものではありません。

図 5.270. 「長野県太陽光ヘルプデスク」開設のプレスリリース[18]

このほか、一般社団法人太陽光発電協会が「太陽光発電設備の廃棄に関する情報」[20]の中で「太陽電池モジュールの適正処理(リサイクル)が可能な産業廃棄物中間処理事業者名一覧表」(27社(2022年2月現在))[21]を公表している(図 5.271 参照)。



図 5.271. 一般社団法人太陽光発電協会「太陽光発電設備の廃棄に関する情報」[20]

このような情報が提供されるものとして、リサイクルやリユースを希望する所有者が委託事業者と契約するまでの流れを検討した。

まず、本実証とヒアリングの結果をもとに、排出に関わる一連の作業の実施可能性を業種別に表 5.126 のとおり整理する。

表 5.126. 排出に関わる作業の実施可能性の業種別整理

作業	ハウスメーカー ／工務店	PV 設置 事業者 (*1)	O&M 事業者 (*2)	解体 事業者	中間処理 事業者	収集運搬 事業者
取り外し・ 撤去	○	○		○	△	
収集運搬	△	△		△～○	△～○	○
性能診断		△	○		△	

作業	ハウスメーカー ／工務店	PV 設置 事業者 (*1)	O&M 事業者 (*2)	解体 事業者	中間処理 事業者	収集運搬 事業者
リユース			△		△	
リサイクル・ 最終処分					○	

*1 太陽光パネル設置事業者

*2 保守管理事業者

また、太陽光パネルの取り外しについての相談のしやすさと、取り外しに関わる作業を一括して実施できる可能性を表 5.127 のとおり整理する。なお、一括作業の可能性については、表 5.126 をもとにする。

表 5.127. 所有者の利便性による整理

業種	アクセスのしやすさ	一括作業の可能性 (作業面、手続き面)
ハウスメーカー ／工務店	○ (住宅の) 所有者には身近 リフォームの際にはアクセスが必須	△ 委託先のネットワークがあれば 可能
太陽光パネル 設置事業者	○ 既設の住宅に設置した所有者は 設置時にアクセス済み	△ リユース、リサイクルが難しい 可能性
保守管理 事業者	× 住宅の太陽光パネルの保守点検を 委託しているのは現時点では稀	△ 性能診断の技術はあるが、 その他の作業は難しい可能性
解体事業者	× 接点を持っている所有者は稀	× 撤去と収集運搬以外は難しい 可能性
中間処理 事業者	× 接点を持っている所有者は稀	○ 事業者によっては一括作業可能
収集運搬 事業者	× 接点を持っている所有者は稀	× 収集運搬以外は難しい可能性

所有者がその利用中止を決断した後、その後の工事内容等に応じて取り外しや撤去を、ハウスメーカーや工務店、太陽光パネル設置事業者に相談すると考えられる。相談先別に想定される太陽光パネル取り外しの理由を表 5.128 に示す。

表 5.128. 相談先別に想定される太陽光パネル取り外しの理由

相談先	想定される太陽光パネル取り外しの理由
ハウスメーカー	建て替え、リフォームなど
工務店	リフォーム、建て替え、太陽光パネルの使用終了など
太陽光パネル 設置事業者	太陽光パネルの更新、太陽光パネルの使用終了など

これらの相談先に対して所有者が、太陽光パネルの取り外しと併せてそのリサイクルやリユースを依頼する。相談先がリサイクルやリユースに対応できない場合は、上述の行政や業界団体からの情報を活用して所有者がリサイクルやリユースに対応できる中間処理事業者と連携するように依頼する。相談先が解体事業者等に施工を委託する場合は、相談先の事業者が委託先事業者に太陽光パネルの運搬先を指示する。一連の流れを図 5.272 に示す。なお、建て替えの場合、ハウスメーカーや工務店は住宅の解体を解体事業者に委託することが考えられることから、太陽光パネルの処理方法や処理できる中間処理事業者を解体業者に周知することも有効と思われる。

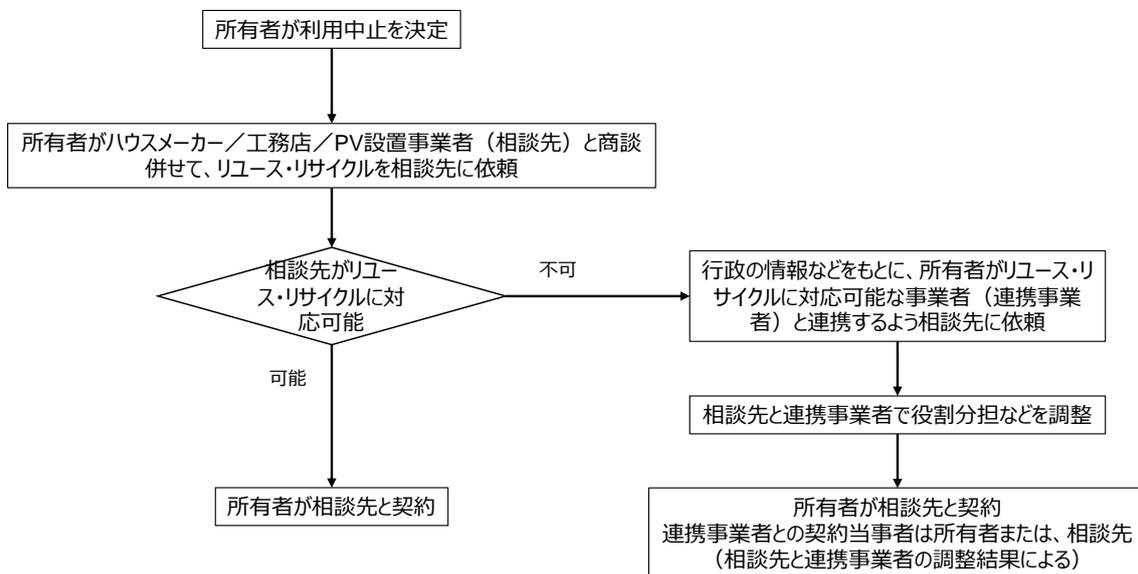


図 5.272. 現状における所有者による利用中止の決定から委託事業者との契約までの流れ

将来的には、ハウスメーカーや工務店、太陽光パネル設置事業者および、下請けとして携わる可能性が高い解体事業者が自ら使用済み太陽光パネルのリユースやリサイクルに対応できる体制（中間処理事業者等との連携を含む）を構築することが望ましく、これが実現すると図 5.273 に示す流れが考えられる。

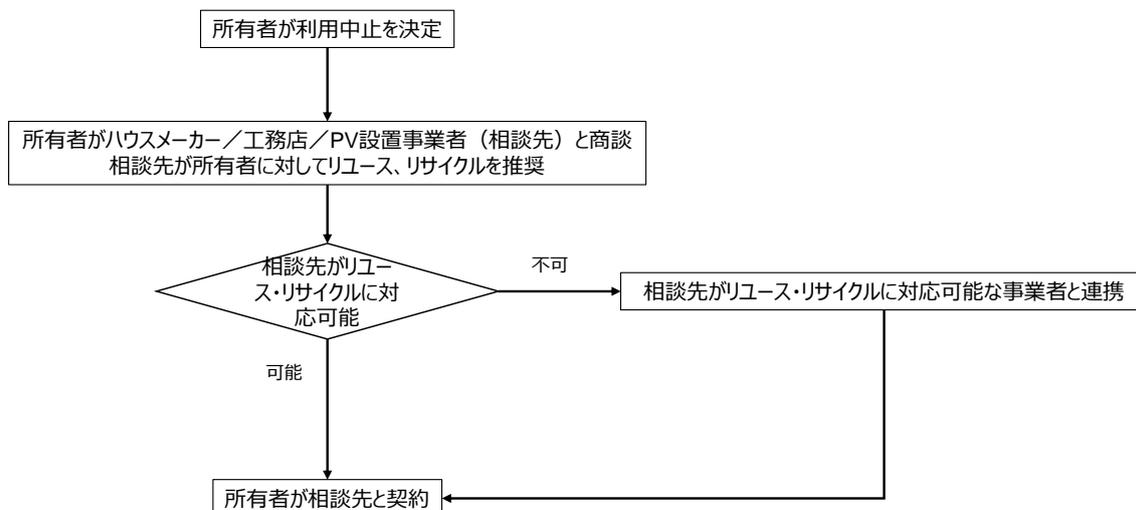


図 5.273. 将来的に目指す所有者による利用中止の決定から委託事業者との契約までの流れ

【委託内容に関する注意事項】

- ・ 取り外した太陽光パネルを住宅の所有者などの個人が排出する場合、一般廃棄物として区市町村に処理方法を確認することが必要
- ・ 例えば、次のような場合が該当
 - 太陽光パネルの取り外しのみを事業者に委託した場合
 - 個人の所有者が自ら太陽光パネルを取り外した場合
- ・ しかし、太陽光パネルの排出が少ない現状においては、その処理体制が整っていない区市町村も多く処理ができない事態も想定される
- ・ その場合、所有者で太陽光パネルを受け入れている一般廃棄物処理事業者と、そこへ運ぶための一般廃棄物収集運搬事業者を探すことが必要
- ・ このような事態を避けるためにも、太陽光パネルの取り外しを事業者に委託する場合は、その処理も含めて委託することが望ましい

② 性能診断・処理に関わる情報提供

使用済みとなった太陽光パネルのリユース可能性を確認するための性能診断においては、5.3.4 項で示す次の情報を事前に把握する必要がある。

- ・ 回路（ストリング）ごとの設置条件（配置・直並列数）
- ・ 設置している太陽光パネル型式（基準状態におけるパネル出力値）

これらの情報は完成図書に記載されていることから、完成図書は太陽光パネルを排出するまで保存することが望まれる。また、太陽光パネルの型式は取扱説明書に記載されているので、取扱説明書も保存することが望まれる。

また、太陽光パネルの排出段階で中間処理する際、太陽光パネルの含有物質による受け入れ基準を設けている中間処理事業者がある。そのような事業者で中間処理を委託する場合は、太陽光パネルの含有物質を把握する必要がある。そのような情報は、太陽光パネルメーカーのホームページ等で公開されている場合がある。また、一般社団法人太陽光発電協会では、「情報提供ガイドライン賛同者一覧表」を公表しており、各メーカーのホームページへのリンクを提供している[22]。各メーカーのホームページから含有物質の情報を得る場合でも太陽光パネルの型式によって含有物質とその量は異なる可能性があるため、型式は必須の情報となる。したがって、適切に処理するためにも完成図書あるいは、取扱説明書を保存することが望まれる。

なお、「情報提供ガイドライン賛同者一覧表」、「使用済太陽電池モジュールの適正処理に資する情報提供のガイドライン（第1版）」にもとづき自社ウェブサイトにおいて情報提供しているとの連絡が一般社団法人太陽光発電協会宛てにあった企業の一覧である[22]。

③ 廃止手続き

住宅用太陽光パネルの設置に関わる契約や制度は、東京電力パワーグリッドなどの一般送配電事業者と売電契約、固定価格買取制度（FIT 制度）、自治体等の補助金等に大別される。それぞれについて太陽光パネルの取り外しに伴う手続き（廃止手続き）について整理する。

1) 売電契約

住宅に設置した太陽光パネルで発電した電力を自家消費したうえで余った余剰電力を一般送配電事業者（東京電力パワーグリッドなど）に売却するための売電契約を締結していることが一般的である。太陽光パネルを含む太陽光発電設備を撤去する場合、この売電契約を解消するための手続きが必要になる（表 5.129 参照）。この手続きは、所有者が行えば電話やホームページで実施できる。しかし、施工などを委託した事業者が代行する場合は、所有者の委任状等の書類が必要になる。

表 5.129. 売電契約の解消手続きの概要

手続き先（連絡先）	契約している電力会社（東京電力パワーグリッド等）
手続きの内容	売電契約の解消
手続きの時期	撤去工事に着工する前
手続きの方法	電話または、ホームページ（東京電力パワーグリッドの場合） ※電力会社によって異なるので各社の方法にしたがって手続きする

2) 固定価格買取制度 (FIT 制度)

2012 年に再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT 制度) が始まって以降に太陽光発電設備を導入した場合は、この制度を利用している可能性が高い。住宅の場合 FIT 制度の適用期間は 10 年間である。この期間内に太陽光パネルを取り外して撤去する場合は廃止の手続きが必要になる (表 5.130 参照)。

郵送または、電子申請で手続きできる。手続きの際には、マニフェストと、写真 3 枚 (太陽光パネル撤去前、撤去中、撤去後各 1 枚) を添付しなければならない。この手続きを委任する場合は、委任状と印鑑証明が必要になる。

表 5.130. 固定価格買取制度 (FIT 制度) 廃止手続きの概要

手続き先 (連絡先)	JPEA 代行申請センター (JP-AC)
手続きの内容	太陽光発電設備の廃止
手続きの時期	撤去工事後
手続きの方法	郵送 (JPEA 代行申請センター) 電子申請 (固定価格買取制度再生可能エネルギー電子申請)

3) 補助金等

自治体等が太陽光パネルの導入を促進するために補助金を交付している場合がある。補助金によっては 10 年あるいは 15 年など一定期間太陽光パネルを維持することを義務付けている。この期間内に太陽光パネルを取り外して撤去する場合、補助金を返還する義務が生じることがある。

したがって、太陽光パネルを設置した際に補助金等の交付を受けた場合は、交付要綱や実施要綱などの定めに従い、必要に応じて手続きと補助金の返還をおこなわなければならない。

(3) 事業者に関わる課題への対応

① 取り外し・撤去

使用済みとなった太陽光パネルを埋立処分する場合であっても、廃棄物処理法に定める処理基準に基づき、最大径おおむね 15 センチメートル以下になるよう破碎等をおこなったうえで、管理型最終処分場に埋め立てることが必要である[23]。しかしながら、高度循環するか否かに関わらず太陽光パネルを適切に処理するためには、ミンチ解体などせず、その形状を保った状態で取り外し撤去することが必要である。

住宅に設置された太陽光パネルを取り外す方法等については、本実証で実施した「太陽光パネル取り外し実証試験」の結果 (5.2 節) のほか、環境省から公表されているガイドライン[23][24]を参照することが望ましい。

また、取り外し・撤去に関わる許認可と遵守すべき法令について以下で述べる。

1) 取り外し・撤去に関わる許認可

太陽光パネルの取り外しや撤去を施工するにあたっては各種法令にもとづく許認可等を取得した事業者が実施しなければならない。

経済産業省の「太陽電池発電設備を設置する場合の手引き」[25]によると、太陽電池発電設備の出力は、太陽電池モジュールの合計出力で判断される。電気事業法にもとづき、出力50kW以上の設備は発電用の電気工作物（発電所）となり「自家用電気工作物」、50kW未満の設備は小出力発電設備となり「一般用電気工作物」として扱われる。

これらの工作物を設置する電気工事は、以下の資格者が作業する必要がある。

- ・ 自家用電気工作物：第1種電気工事士または認定電気工事従事者
- ・ 一般用電気工作物：第1種電気工事士または第2種電気工事士

更に、これらの工事は、電気事業法にもとづき電気事業の登録等をおこなった事業者が施工する必要がある。

また、経済産業省「電気工事士法（昭和35年8月1日法律第139号）の逐条解説」によれば電気工作物の撤去も電気工事に該当する[26]。また、「工事が、電路が既に遮断され、以降電気をうけない場合に、遮断された部分についての設備を撤去する作業に該当する場合（建物を取り壊す場合など）には、そもそも「電気工事」に該当しない。ただし、電路を遮断する行為自体としての取り外す作業や、接続を外す作業等は、「電気工事」となる」[26]としている。

したがって、太陽光パネルの取り外しや撤去の施工にあたって、最初に実施する系統電力からの電路遮断を施工するためには、電気事業法の登録と、電気工事士の資格が必要になる。

電路を遮断した後の工事は「電気工事」に該当しないものの、建設業法と建設リサイクル法にもとづき請け負った工事の内容や規模によって、必要な許認可や届けが必要になる。建物の解体に伴う太陽光パネルの取り外しには建設業の許可として、「建築一式工事」または、「解体工事」の許可が必要[27][28]になる。ただし、「建築一式工事」で請負金額1500万円未満または延べ床面積150m²未満の木造住宅の工事、または、「解体工事」で請負金額500万円未満の工事では許可は不要である。この許可の不要に該当する場合で建設リサイクル法に基づく解体事業者の登録は必要である[29]。更に、床面積の合計が80m²以上の建築物の解体工事、または、請負金額が500万円以上の建築物以外の工作物の解体工事の場合、リサイクル法に基づく届出が必要である[30]。

建物等からの太陽光パネルのみを取り外す工事の場合、国土交通省の「業種区分、建設工事の内容、例示、区分の考え方」[31]によると、「屋根一体型の太陽光パネル設置工事は建設工事の「屋根工事」に該当するとされている。また、太陽光発電設備の設置工事は「電気工事」に該当し、太陽光発電パネルを屋根に設置する場合は、屋根等の止水処理を行う工事が含まれる。」となっている。したがって、屋根一体型の太陽光パネルを取り外す場合は、

建設業の許可として「屋根工事」の許可が必要になる。また、非一体型の太陽光パネルを取り外す場合は、建設業の許可として「電気工事」の許可が必要になる。

これらをまとめると表 5.131 のとおりとなる。

表 5.131. 取り外し・撤去に関わる許認可

請負内容	請負条件		許認可等	根拠法
電路の遮断	施工する全ての工事業者		電気工事業法の登録	電気事業法
	太陽光発電設備の出力	50kW 未満	第 1 種電気工事士または、第 2 種電気工事士	電気工事士法
		50kW 以上	第 1 種電気工事士または、認定電気工事従事者	
建て替えに伴う解体工事	請負金額 1500 万円未満、または、延べ床面積 150m ² 未満の木造住宅		建設業（建築一式工事）の許可または、解体工事業者の登録	建設業法 建設リサイクル法
	請負金額 1500 万円以上、または、延べ床面積 150m ² 以上の木造住宅		建設業（建築一式工事）の許可	建設業法
	床面積の合計が 80m ² 以上の建築物の解体工事		建設リサイクル法に基づく届出	建設リサイクル法
解体工事	請負金額 500 万円未満		建設業（解体工事）の許可または、解体工事業者の登録	建設業法 建設リサイクル法
	請負金額 500 万円以上		建設業（解体工事）の許可	建設業法
	床面積の合計が 80m ² 以上の建築物の解体工事		建設リサイクル法に基づく届出	建設リサイクル法
撤去	屋根一体型のパネル	請負金 500 万円以上	建設業（屋根工事）の許可	建設業法
	非一体型のパネル	請負金 500 万円以上	建設業（電気工事）の許可	建設業法

2) 撤去において遵守すべき法令

太陽光パネルを撤去する場合、先述の許認可に関わる法規制（電気工事業法、電気工事士法、建設業法、建設リサイクル法）に加え、次の法規制を遵守しなければならない。

- ・ 労働契約法
- ・ 労働安全衛生法

- ・ 廃棄物処理法

以下、遵守すべき事項をまとめて記載する。なお、詳細は、環境省から公表されている「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）」[23]を参照いただきたい。

■ 労働契約法、労働安全衛生法

労働契約法第5条において、使用者（雇用主）は、契約に伴い、労働者がその生命、身体等の安全を確保しつつ労働することができるよう、必要な配慮をすることが義務付けられている。

太陽光パネルを撤去するにあたっては、特に次の点について十分な対策が必要である[23]。

- ・ 転落の防止
- ・ 感電の防止
- ・ 破損等によるけがの防止
- ・ 水濡れ防止

これらのうち、転落の防止に関連して、労働安全衛生法の労働安全衛生規則で次の定めがある。

- ・ 作業床の設置等（第518～520条）
- ・ 要求性能墜落制止用器具等の取付設備等（第521条）
- ・ 悪天候時の作業禁止（第522条）
- ・ 照度の保持（第523条）
- ・ スレート等の屋根の危険の防止（第524条）
- ・ 昇降するための設備の設置等（第526条）
- ・ 移動はしご（第527条）
- ・ 脚立（第528条）

また、感電の防止の観点から作業にあたっては、厚手のゴム手袋、ゴム長靴を着用し、絶縁処理された工具を使用して作業することが重要である[23]。更に、太陽光パネルは配線を切断しても受光面に光が当たると発電してしまうことから、架台等から太陽光パネルを取り外したら都度、絶縁処理することが望ましい。また、太陽光パネルを裏返すあるいは、覆いをするなどして極力受光面に光が当たらないようにすることが必要である。

■ 廃棄物処理法

使用済みとなった太陽光パネルを排出する場合は、他の廃棄物と同様に廃棄物処理法にしたがって処理する必要がある。

また、撤去した太陽光パネルがリユース目的であっても、廃棄物に該当する可能性があり、廃棄物に該当する場合は、廃棄物処理法にしたがって取り扱うことが必要である。廃棄物該当性の判断は、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又は

政令市等に事前に確認することが望ましい。

所有者がハウスメーカーや工務店、太陽光パネル設置事業者等の事業者に太陽光パネルの取り外しのみを委託し、別途処理する場合、排出者は所有者となる。特に、所有者が個人（設置場所が住宅）の場合、取り外した太陽光パネルは、一般廃棄物として処理する必要があるので注意が必要になる。

② 収集運搬

取り外した太陽光パネルを高度循環するためには、収集運搬段階では太陽光パネルを破損しないようにすることが重要である。また、安全性の観点からは、発電しない状態で収集運搬することが望ましい。更に、取り外した太陽光パネルは廃棄物として扱われるため、廃棄物処理法などにしたがって飛散しないようにしなければならない。これらについては、本実証で実施した「運搬方法の検討と実証」（5.4.1 項）で検討している。また、廃棄物処理法への対応も含めて環境省から公表されているガイドライン[23][24]が参考になる。

③ 性能診断

使用済みとなった太陽光パネルのリユース可能性を判断するための性能診断は、所有者等から提供された太陽光パネルの型式や回路（ストリング）ごとの設置条件などの事前情報をもとに実施することになる。しかし、これらの事前情報が得られない場合もある。このような場合も含めて、本実証の「住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験」（5.3 節）で診断方法を検討している。また、環境省から公表されているガイドライン[23][24]が参考になる。

④ リユース

太陽光パネルをリユースするためには、使用済みとなった太陽光パネルの発電性能と安全性を確認する必要がある。そのための診断方法とグレード分け等については、本実証の「住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験」（5.3 節）と「太陽光パネルのリユースに関する検討」（5.5 節）で検討している。また、取り外した現場でリユース品を選別した場合を除き取り外した太陽光パネルは廃棄物として扱わなければならない。その場合は、廃棄物処理法にしたがって取り扱う必要がある。また、リユース品を扱う際は、古物営業法にもとづき都道府県公安委員会から「古物商」の営業許可を受ける必要がある。環境省から公表されているガイドライン[23][24]はこれらの法令について整理している。また、技術的な内容についても参考になる。

⑤ リサイクル・最終処分

使用済みとなった太陽光パネルはリユースやリサイクルされることが望ましい。リユースについては上述のとおりである。リサイクル技術については本実証の「太陽光パネルリサイクルの検討」（5.7 節）で検討しているほか、様々な技術の検討と開発がなされている。

また、リサイクルを委託する場合は一般社団法人太陽光発電協会が「太陽電池モジュールの適正処理（リサイクル）が可能な産業廃棄物中間処理事業者名一覧表」（27社（2022年2月現在））[21]を公表しており参考になる。

太陽光パネルをやむを得ず埋立処分する場合、一般的に太陽光パネルは産業廃棄物の品目である「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」の混合物として取り扱われる[23]。また、最大径おおむね15センチメートル以下になるよう破碎等をおこなったうえで、管理型最終処分場に埋め立てることが必要である[23]。

埋立処分に限らずリサイクルにおいても使用済み太陽光パネルは廃棄物処理法にしたがって取り扱う必要があり、環境省から公表されている「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）」[23]に詳しく記載されている。

5.9.6 参考文献

- [1] 村越まり(2018)「ホットナイフ分離法®によるガラスと金属のリサイクルについて」
化学工学会誌, 82(8), 447-449
- [2] 松本健司 (2020)「ホットナイフ分離法®による太陽光パネルの自動解体ライン」一般
社団法人日本産業機械工業会, 産業機械, No.840.
- [3] Chiharu Tokoro, Soowon Lim, Yukihiro Sawamura, Masataka Kondo, Kazuhiro
Mochidzuki, Taketoshi Koita, Takao Namihira, and Yasunori Kikuchi (2020):
Copper/Silver Recovery from Photovoltaic Panel Sheet by Electrical Dismantling
Method,” *Int. J. of Automation Technology*, 14(6), 966-974
- [4] Yasunori Kikuchi, Aya Heiho, Yi Dou, Izuru Suwa, I-Ching Chen, Yasuhiro
Fukushima, Chiharu Tokoro (2020) “Defining Requirements on Technology
Systems Assessment from Life Cycle Perspectives: Cases on Recycling of
Photovoltaic and Secondary Batteries” *International Journal of Automation
Technology*, 14(6), 890-908
- [5] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, “Ecoinvent version 3.6,”
<http://www.ecoinvent.org/>, 2019.
- [6] 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グルー
プ・一般社団法人 産業環境管理協会、LCI データベース IDEA version 2.3 (2019)
- [7] 日本 LCA フォーラム (JLCA : Life Cycle Assessment Society of Japan)、JLCA デ
ータベース, <https://lca-forum.org/database/>, (参照日 2021 年 3 月 10 日)
- [8] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、「再生可能エネ
ルギー技術白書 (第 2 版)」(2014)
- [9] 一般社団法人太陽光発電協会、「太陽光発電システムの設計と施工 (改訂 5 版)」
(2015)
- [10] The National Renewable Energy Laboratory (NREL), Best Research-Cell
Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, (参照日 2021 年 3 月
9 日)
- [11] Ludin, N. A., et al. (2018) *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96: 11-28.
- [12] Mahmoudi, S., et al. (2019) *Resources, Conservation and Recycling* 146: 192-205.
- [13] 佐々木康勝, 大塚教正(2021) 「JX 金属(株)における貴金属・レアメタルのリサイク
ル」 *日本金属学会誌*, 85(8), 274-278
- [14] 化学工学会 関東支部編, 化学工学会 環境部会リサイクル分科会著(2020)「最近の化
学工学 69 バリューチェーンと単位操作から見たリサイクル」 p.188-199
- [15] 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構 2013 年度調査.
- [16] ホームズ君.com ホームページ: よくわかる省エネ「熱貫流率 (U 値) とは」
https://jutaku.homeskun.com/syouene/h25_kijun/syouene/Uti.html

- [17] 独立行政法人 建築研究所 住宅の高断熱化目標水準に関する基礎調査 No.154 号 P8～10
- [18] 長野県、「太陽光発電に関する相談窓口「長野県太陽光ヘルプデスク」を開設します」、長野県プレスリリース、
<https://www.pref.nagano.lg.jp/zerocarbon/happyou/documents/210901press.pdf> (参照日 2022 年 2 月 3 日)
- [19] 長野県太陽光ヘルプデスク、「太陽光発電 FAQ (よくあるご質問)」,
<https://www.shin-ene.net/pv-helpdesk> (参照日 2022 年 2 月 3 日)
- [20] 一般社団法人太陽光発電協会、「太陽光発電設備の廃棄に関する情報」,
<https://www.jpea.gr.jp/feature/disposal/> (参照日 2022 年 2 月 24 日)
- [21] 一般社団法人太陽光発電協会、「太陽電池モジュールの適正処理 (リサイクル) が可能な産業廃棄物中間処理業者名一覧」(2022 年 2 月現在)
- [22] 一般社団法人太陽光発電協会、「情報提供ガイドライン賛同者一覧表」,
<https://www.shin-ene.net/pv-helpdesk> (参照日 2022 年 2 月 3 日)
- [23] 環境省「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン (第二版) 平成 30 年」,
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf> (2021 年 12 月 1 日閲覧)
- [24] 環境省「太陽電池モジュールの適切なリユース促進ガイドライン」,
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/116250.pdf> (2021 年 12 月 1 日閲覧)
- [25] 経済産業省「太陽電池発電設備を設置する場合の手引き」,
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/taiyoudenchi.html (参照日 2021 年 10 月 18 日)
- [26] 経済産業省「電気工事士法 (昭和 35 年 8 月 1 日法律第 139 号) の逐条解説」,
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/koujisichikujyou.pdf (参照日 2021 年 10 月 18 日)
- [27] 国土交通省「建設業の許可とは」
(https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/const/1_6_bt_000080.html) (2021 年 10 月 18 日閲覧)
- [28] 国土交通省「業種区分、建設工事の内容、例示、区分の考え方 (H29.11.10 改正)」
(<https://www.mlit.go.jp/common/001209751.pdf>) (2021 年 10 月 18 日閲覧)
- [29] 国土交通省「解体工事業に係る登録等に関する省令の公布について」
(https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d03project/d0303/page_03030302law2.htm) (2021 年 10 月 19 日閲覧)
- [30] 国土交通省「建設リサイクル法の対象となる建設工事では届出が必要です！」
(<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/recyclehou/todokede/todokede10.pdf>) (2021 年 10 月 18 日閲覧)
- [31] 国土交通省「業種区分、建設工事の内容、例示、区分の考え方 (H29.11.10 改正)」

(<https://www.mlit.go.jp/common/001209751.pdf>) (2021年10月18日閲覧)

5.10 まとめ（成果と課題）

5.10.1 使用済み太陽光パネル発生量の将来推計

既に示したとおり、家庭からの使用済み太陽光パネルの発生量の推計は非常に難しいものである。それは純粋な事業として実施している場合と比較して、経済合理性できちんとした意志決定がなされないことが想定されるがゆえである。本研究では使用者の意志決定についてアンケートを実施、それを反映することで、単なるパネルの寿命を考えた場合よりもはるかに早い段階での排出が起こりうることを示すことが出来た。

しかしながら、このアンケート調査は通常の非事業者ユーザーにとっては余りに未来の話を問うものであり、これが現実には起こると断定することは難しい。よって、時間が経過し、徐々に実データが蓄積された際には、実データを反映した新たな予測を行うべきである。ただ、良く言われるパネルの寿命よりも早い段階での排出が起こる可能性が高いことは間違いないだろう。

5.10.2 太陽光パネル取り外し実証試験

住宅に設置された太陽光パネルの取り外しの作業内容や外された後のパネルの取り扱いを整理するため、設置から 20 年程度が経過している太陽光パネルを取り外す個人住宅に協力をいただき、3 件の取り外し実証を行った。なお、本事業では、太陽光パネルはリユース可能な状態で回収することを想定し、実作業の計測・記録に加え、取り外し前の性能診断、取り外したパネルのオンサイト分析を実施した。

いずれの住宅も 2 階建て、パネル枚数は 24 ないし 25 枚、取り外し作業員は 3 名（監督者を除く）で対応した。作業員のヘルメットにウェアラブルカメラを装着し、録画された情報より、作業内容および所要時間を記録した。パネル自体の取り外し作業そのものより、架台やパワーコンディショナ、関連配線の撤去、屋根の止水工事などの復旧作業に時間がかかることが明らかとなった。撤去のトラブル防止の観点からも、確実な復旧作業は重要であるが、当日の準備から復旧も含めた作業終了までに要する作業時間は、特別な追加作業が発生しない標準的な取り外し工事であれば、3.5 時間程度と結論付けられた。電気工事士を含む 3 名を作業員チームとして作業を実施する場合、1 日で 2 件程度の太陽光パネル取り外しが可能であると考えられる。

5.10.3 住宅向け太陽光パネル性能診断実証試験

大規模発電所における診断方法をベースとし、住宅特有の環境を踏まえた点検方法及び診断法(案)を策定した。点検手順のフローチャート図を作った。点検を開始するにあたり、点検に必要な情報の入手、アレイへのアクセスが容易か確認する。その結果によって検査項目を変更し、検査結果によって不具合個所の確認を行う。

点検をする前に必要な情報は下記となるが、住宅屋根設置太陽光発電システム特有の事

象として、①回路（ストリング）ごとの設置条件（配置・直並列数）と②設置している太陽光パネル型式（基準状態におけるパネル出力値）が入手できない可能性があることが課題である。①に関しては、航空写真等を使用し、パネル設置方位・周囲の構造物・パネル枚数（総数）を確認しておくことにより推定できる可能性がある。②に関しては、現在のところ、完成図書若しくは太陽光パネル裏面に貼付してあるラベルを直接確認する以外の方法はないと考える。設置した状態でパネル型式が確認できない場合は、完成図書を保有していない場合が多く、その型式の把握方法が課題となっている。

5.10.4 使用済み太陽光パネル収集運搬実証

(1) 運搬方法の検討と実証

太陽光パネルは、取り外された後でも日射があると発電してしまう為、受光面を裏向きにするなどして、発電しないような状態にして運搬し、運搬途中で破損しないように固縛を行い、飛散防止処置を取ることが望ましい。また、東京都内での発生は住宅地などの道路幅の狭い場所での発生が見込まれる為、大型車両では侵入できないケースや駐車スペースが無い場所では、近隣のコインパーキングに駐車させる事が想定される為、2t 車のような小さい車両での引取りが良いが運搬効率が悪くなってしまふ事が課題と考える。

(2) 収集運搬ルートを検討

現在のような収集量においては、発生地点と搬入先を結ぶピストン輸送的な収集運搬にならざるを得ない。これがある程度の量になるにつれ、ミルクラン方式などと呼ばれるような巡回ルートを考える必要が現れる。更に量が増えた場合、23 区部のように比較的人口密度がなだらかで、すなわち発生の密度もある程度一定である場合には単純に巡回すれば良いものの、東京都西部のように人口密度に濃淡がある場合には中間集積地点をもうけることで更に大きく輸送の効率を上げることが出来ることを示した。発生量推計の結果とあわせ考えれば、2030 年頃にはこうした取り組みが必要になる可能性もあり、それを主導するような取り組みが必要である。

5.10.5 太陽光パネルのリユースに関する検討

大規模発電所における診断方法をベースとし、住宅特有の環境を踏まえた点検方法及び診断法(案)を策定した。リユース/リサイクル分別及びグレード選定方法の手順をフローチャートで示した。ストリング単位での IV 測定を行い、問題がないパネルに関しては追加で外観目視検査を行い、問題がなければリユースとして分別を行う。ストリングにおける IV 測定やドローン IR、外観目視検査にて NG 判定したものに関してはリサイクルに分別する。

新品と比較した場合、出力が低下しており製品寿命が短いことが一般的である。またモジュール I-V 測定を実施せずに出力行特性を担保することは難しい。それらの観点より安価で

顧客に提供することが求められる。一方、パネル引き取りの際、買取価格を安くしすぎると使用済みパネルのリユースに躊躇するケースが出てくることが予想される。高価買取と安価販売を両立させるための価格レートを顧客のニーズに応じ適切に調整することが、リユースパネル普及に向けての課題と考える。

5.10.6 太陽光パネルの分解方法

使用済み太陽光パネルの分解方法は、一般的に破砕による方法が知られているが、回収した太陽光パネルに使用されている部材の再利用率を上げる為には、使用済み太陽光パネルに使用されているカバーガラスを割らずに回収する必要がある。カバーガラスを粉砕してしまうと金属とガラスが混在することになり、それぞれ分別することが難しい。そのため、カバーガラスを割らずに分離することで、金属が含まれていないガラスはリサイクルし易く、ガラスが含まれていない残りのセルシートは有価物を取り出し易くなる。

工程としてはまず、ジャンクションボックス及びアルミフレームを分離するが、その際ガラスに負荷をできるだけかけないことでカバーガラスを割らずに分離させる。その後、約300度に熱したホットナイフにてカバーガラスを割ることなく、その他の部材を分離する。このようにカバーガラスを割ることなく分離する方法は、ホットナイフ分離法[®]が有効である。

5.10.7 太陽光パネルのリビルド実証試験

使用済み太陽光パネルから分離したカバーガラスを使用してリビルドパネル製作した。製作したリビルドパネルは、①分離後のカバーガラスとバックシート、②分離後のカバーガラスをケミカル研磨したカバーガラスとバックシート、③分離後のカバーガラス2枚を用いたダブルガラス、④分離後のカバーガラスと新品のカバーガラスを使用したダブルガラスの4種類である。これらのリビルドパネルを実運用下で長期使用した場合、使用済み太陽光パネルから分離したカバーガラスに付着したEVAの影響による気泡の発生やカバーガラスの剥離による水分の侵入が懸念された。そこで、リビルトパネルの高温高湿試験を実施して長期信頼性評価を実施した。

この試験の結果、バックシート仕様の①と②は、気泡等の発生は確認されず、電気特性についても問題はなかった。一方、ダブルガラス仕様の③と④は気泡が発生した。これらのうち④は検査規格上はOKとなったが、③は外観検査でNGとなった。分離後のカバーガラスを片面で使用した④よりも、両面で使用した③の方が気泡の浸食が広いことを考えると、両面で使用した③の方がカバーガラスに付着したEVAの影響が顕著に出たものと考えられる。

これらをふまえると、バックシート仕様のリビルトパネルであれば、実運用可能であり、ダブルガラス仕様は、カバーガラスに付着したEVAの影響による気泡や剥離の発生に対する対策が課題となる。

5.10.8 太陽光パネルリサイクルの検討

(1) リサイクル実証試験

シリコン系太陽光パネルを対象に、大量処理を想定したガラス付きのパネルの物理粉碎から出発する手法および高度処理の例としてホットナイフによるカバーガラスとセルシートとの分離を出発点とする手法を検討した。

ガラス付きパネルに対しては、カッターミル方式の一次粉碎を行うことで、小粒径粒群には Ag などの金属が濃縮するが、大粒径粒群中にも一定量の金属が残存する。大粒径粒群に対して種々の二次粉碎手法を比較しながら、さらなる金属の濃縮挙動を調べた。一次粉碎後の大粒径粒群には、樹脂に付着したままのガラスや銅バスバーが多く存在していると共に、半導体ウエハ (Si) および Ag も EVA 樹脂に付着している状態である。表面粉碎を主とする二次粉碎では、樹脂からガラスや銅バスバーの剥離が生じることで、ある程度の大きさを保ったままでのそれらの単体分離が期待できる。一方、樹脂からの Si や Ag の分離効率は低く、一部は剥落して小粒径成分に移るものの、多くは樹脂に残っている結果となった。この場合における Ag の挙動を考えると、小粒径の粒群および大粒径のまま残る樹脂の双方からの回収を検討することとなる。振動ミルのように、体積粉碎が顕著で微粉化が進行する二次粉碎では、樹脂および銅ワイヤーの一部が大粒径粒群に残存し、ガラスや金属成分は微粉化されており樹脂上には残らない。カバーガラスを分離しないまま全体を粉碎するプロセスでは、回収したい金属とガラスが混在する粉碎物となるため、ガラスリサイクルの要不要も重要な因子となる。本事業で試験を行った範囲では、粉碎後は篩によるサイズ分離の評価を基本としているが、樹脂、ガラス、金属は密度が大きく異なるため、比重選別も有効な手法と考えられる。

ホットナイフにてカバーガラスを分離したセルシートに対しては、物理粉碎・選別による手法と電気パルス処理による手法を検討した。分離されたセルシートの物理粉碎(カッターミル)では、小粒径粒群に Si や Ag の濃縮が認められたものの、ガラス付きでの粉碎と比較すると、金属の剥離効果は小さかった。ガラス付きで粉碎を行うと粉碎されたガラス片が粉碎メディアの役割を持つことで樹脂表面からの金属剥離を促進するが、軽い樹脂を主体とするセルシートのみでの粉碎では、粉碎物同士の衝突などによる粉碎効果が乏しいことによる。例えば、衝撃や摩擦が強力な二次粉碎を追加することは、樹脂に残存する金属の剥離に有効である。セルシートの電気パルス処理では、プラズマ化の効果で約半分の Ag が微粒子で回収されるとともに、発生する衝撃波によって一部の銅バスバーが脱離する。セルシートに残存した金属は電気パルス処理で表面に露出して剥がれやすい状態となっているので、カッターミルによって処理することで、樹脂表面に残った Ag や Si が容易に剥離するといった結果が得られた。

分離したカバーガラスは XRF による定性・半定量分析および湿式法による定量化学分析を実施し、ソーダライムガラスの主成分である Si、Na、Ca、主要添加物である Mg、Al、

および As や Sb をはじめとする有害成分、各種微量成分含有量を評価した。いずれもソーダ石灰ガラスと妥当な組成であり、並行して実施した FT-IR 分析でもソーダ石灰ガラスであることが判定されている。すべてのサンプルについて As は検出下限レベルであることが確認された一方、数千 ppm オーダーの Sb が含まれていることが分かった。カバーガラスのリサイクルにおいては、原則として Sb が含まれていることを認識しておく必要があるといえる。なお、ホットナイフで分離する際には、ガラスとセルの間の樹脂層をナイフが進むため、カバーガラスのセルシート側の面には樹脂が残存する。残存樹脂の定量を行ったところ、2.5%程度の樹脂が残存する可能性があることが示された。

(2) カバーガラス用途の拡大

カバーガラスは、リユースできれば、それが望ましいものの、割れてしまうものあるいはリユースに向かないものもあり、使用済み太陽光パネルの約 6 割の重量物として、そのリサイクルが望まれる。ガラスカレットの利用先としては、元々のガラス製品である板ガラスが望まれるが、その受入基準の厳しさから (表 5.132 参照)、板ガラスへの水平リサイクルは困難であることがわかった。次に、グラスウールへのリサイクルが期待された。グラスウールは、ガラス短繊維製品として、住宅用断熱材に利用されている。

使用済み太陽光パネルは近い将来に大量の発生が危惧されていることと、東京都と同様に、全国的に使用済み太陽光パネルからカバーガラス由来のカレットが発生することが見込まれることから、日本全体でのグラスウールの将来需要と、使用済み太陽光パネル由来のカレット発生量を比較した。2030 年について、住宅着工床面積を 80,464 千 m² とし、省エネ基準の変遷もあることから、最新の期間である 2016-2020 年の住宅新規着工面積とガラス短繊維製品出荷量との比例関係より、ガラス短繊維製品出荷量として、24 万トンが見込まれると推計された。将来の省エネ性能の向上による高断熱化を加味したとして、30 万トン程度であろうと想定された。一方、断熱材としてのガラス短繊維の重量に占めるグラスウールの重量は 90%程度であるため、22-27 万トン程度の住宅用断熱材用途として、カレットの需要量はあると考えられた。本プロジェクトからは、丁寧な選別によってのみ使用済み太陽光パネル由来のガラスカレットは、その全量がグラスウール原料として利用できるものの、ホットナイフ分離法®を利用して分離したカバーガラスは、有機物の残存があり、20%程度のカレット利用率にとどまることがわかった。つまり、全グラスウールの生産に利用したところで、5 万トン程度が利用できることとなる。

一方、太陽光パネル由来のガラスカレット発生量の推計として約 30 万トンとされており、グラスウール以外の用途の模索も必要と考えられる。可能性のあるリサイクル先の 1 つであるコンクリート製品には、遠心力鉄筋コンクリート製品 (管、ポール、パイル)、空洞コンクリートブロック、護岸用コンクリートブロック、道路用コンクリート製品、プレストレストコンクリート製品 (はり・けた、その他)、木毛・木片セメント板、気泡コンクリート製品がある。その中で最も生産量の大きい製品が、道路用コンクリート製品で

あり、年間 200 万トンから 250 万トン程度生産されている。次いで、遠心力鉄筋コンクリート製品と気泡コンクリート製品が 100～150 万トン程度である。他に、プレストレストコンクリート製品と護岸用コンクリートブロックが、それぞれ 75 万トン、50 万トン程度の生産量となっている。ガラスウールよりも 1 桁生産量の大きなこれらの土木製品は、カレットのリサイクル先用途として有望であると考えられる。しかしながら、先述のように世界的にも研究が進んでいるものの、まだまだ技術として確立したものはない。今後、これらコンクリート製品の原料を調査し、ガラスカレットで代替可能な骨材の量を推計するとともに、場合によってはバインダーをガラス粉による代替も考えられることから、バインダーへの技術的な代替可能性についても調査する必要があると考えられた。

表 5.132. 種々のガラス製品の原料受入れ基準と太陽光パネルカバーガラス由来カレット中の不純物濃度

不純物の種類	板ガラス		ガラスびん 許容量	ガラスウール 許容量	カバーガラ スカレット
	大きさ	許容量			
① 有機物（樹脂、シリコン等）	10 mm 以上	0	50ppm 以下	2000ppm 以下	
	10 mm 未満	20ppm 以下			
② 酸化物系無機物（がれき、異質ガラス）	0.5 mm 以上	0	0		0
	0.5 mm 未満	10ppm 以下			0
うち 陶器・磁器	—	—	15ppm 以下		0
うち レンガ、コンクリート	—	—	30ppm 以下		0
うち 結晶化ガラス	—	—	0		0
うち 光学ガラス	—	—	0.1%以下		0
③ 金属	—	0			0
うち 鉄鋼	—	0	1.0ppm 以下	1.0ppm 以下	0
うち アルミニウム金属	—	0	0.2ppm 以下	0.2ppm 以下	0
うち その他金属	—	0	1.5ppm 以下	1.5ppm 以下	0

本プロジェクトからは、先述のようにコンクリートブロック原料等の、他の利用先を検討するか、ガラスウール用原料としての利用率が上げられるように、選別プロセス等の検討をするかが必要であると結論付けられた。

5.10.9 サプライチェーンの構築

(1) サプライチェーンの検討

太陽光パネル高度循環技術システムの確立に向けて、開発段階にある技術を適用したあるべき姿を想定しその概念実証を行うために、本実証の実験・実証プロセスを整理した。使用済み太陽光パネルがリサイクルまたは廃棄物として処分されるフローは、技術・プロセスの組み合わせによって 8 通りのサプライチェーンとなる。既存システムでは、他の廃棄物と同様の産業廃棄物処理プロセスが適用されるため、太陽光パネルの資源回収・リサイクルフローを追うことが困難であり、ガラス付着物として埋立または一部がセメント原燃料等に利用されると考えられるが後者の実態は不明である。これに対し、新規システムでは本実証の実験・実証プロセスの適用により、アルミフレーム、カバーガラス、金属 (Cu・Ag) 回収において、既存の処理システムとは異なるサプライチェーンが生じることになる。

(2) ライフサイクルアセスメント

本実証の実験・実証プロセスを含むライフサイクルモデルを構築し、実験・実証サイトで得られたフォアグラウンドデータとバックグラウンドデータを用いてライフサイクル評価を行った。ライフサイクルモデルの構築に先立って行った文献調査によって、使用済み太陽光パネル処理方法を類型化した。また、各プロセス (回収・輸送、高度分離法、リビルド前処理、使用、素材リサイクル) のフォアグラウンドデータを実験・実証サイトから収集し、不足している情報や環境影響評価に用いる係数は LCA データベース等のバックグラウンドデータを適用した。3 つのケースの既存システムと 5 つのケースの高度循環システムを気候変動と資源消費を指標として比較した。その結果、本実証の提案システムの環境負荷が既存システムよりも低くなることを定量的に明らかにした。

(3) サプライチェーンの具体化

実験・実証データに基づくサプライチェーンの検討およびライフサイクルアセスメントの結果をうけて、サプライチェーンの具体化を行った。ライフサイクルアセスメントの結果より、ホットナイフ分離法[®]によるカバーガラス回収効果が気候変動の観点では大きいことから、サプライチェーンのあるべき姿として、ホットナイフ分離法[®]を経ることが重要な要素のひとつとして挙げられる。また、ホットナイフ分離法[®]と電気パルス法の装置製造負荷が無視できない大きさとなっている。これは両手法の処理時間のギャップが要因となっているため、実証装置設計において適切な接続設計が期待される。さらに多くの物理的処理の環境負荷は電力生産に起因しているため、国内や工場の電源構成の再エネ化が進めば運用負荷はさらに下がる可能性がある。このように評価結果から得られた要件定義を踏まえたシステム設計・社会実装が期待される。

(4) 太陽光パネルに関する情報共有の検討

本実証で収集されたデータをデータベースとしてクラウド上に整理することは特に問題なく行うことが出来た。他方で、そもそもの製品側の情報が余りに少なく、そうした情報の開示、共有が望まれる。また、昨今の社会情勢を踏まえれば、リサイクル素材、リユース、リマニファクチャリングされた製品等について、その出自を明らかにし、製造・加工工程での CO₂ 排出量に代表される環境性能を開示することは必要不可欠になろう。その時に、ここで作成したデータベースがこれを計算する機能を実装できれば非常に有意義なものとなることは間違いなく、また技術的には全く問題なく可能である。他方で、LCA で言うフォアグラウンドデータは参加事業者の実操業に関わる情報であり、また排出者の個人情報が含まれる可能性もある。さらにバックグラウンドデータとして LCA データベースを用いるのであればそのライセンスの問題もある。こうした課題を解決することが必要である。

(5) 排出手続きの検討

使用済みとなった太陽光パネルが排出される際の一般的な流れを想定し、この流れに沿って、排出における課題を整理したうえでその解決方法を検討した。課題の整理は、本実証の検討結果をふまえるとともに、自宅の太陽光パネルを取り外した経験者や、取り外しを施工した事業者など 6 者にヒアリングを実施した。その結果、所有者においては、使用済みとなった太陽光パネルをリユースやリサイクルすることを希望してもそのための委託先が見つけづらいことなどが問題であり、それを解決するためには所有者が適切に施工と処理ができる事業者と相談しやすくすることが課題であるとした。この課題に対して、所有者が太陽光パネルの利用中止を決定してから事業者へ委託するまでの流れを提示するとともに、その流れを実現するために必要な情報提供の方法を提示した。また、事業者においては、使用済みとなった太陽光パネルの取り外し工事の施工方法と、施工に必要な許認可等の整理が課題であると整理した。この課題に対しては、施工の流れと工事の種類ごとに事業者に求められる許認可等を整理した。

6 東京都における太陽光パネルの高度循環に向けた今後の課題

本実証の結果をふまえ、東京都において太陽光パネルの高度循環を実現するための今後の課題を次のとおりである。

- (1) 使用済み太陽光パネルを回収する仕組み作り
- (2) 既存の技術を活用した高度循環の基礎作り（現状における対応）
- (3) 高度循環に資する技術への研究開発支援（将来を見据えた対応）
- (4) 公共施設における使用済み太陽光パネルを循環利用した製品の活用
- (5) サプライチェーンでの連携支援
- (6) 太陽光パネルの循環利用を進めるための情報提供・発信
- (7) 太陽光発電設備の更新の支援

これらの具体的な内容について以下で述べる。

(1) 使用済み太陽光パネルを回収する仕組み作り

東京都は住宅に設置されている太陽光パネルが多い。そのため、使用済み太陽光パネルの排出量が増える 2030 年以降は、20～30 枚程度の少量の太陽光パネルが分散して排出されることが予想されると共に、経済合理性だけで意志決定がなされない住宅用の発生量は極めて予測が難しい。本実証においては、少量の太陽光パネルを逐次処理施設に輸送するよりも、それらを集積してから輸送する、あるいは巡回回収した方が効率的で環境負荷も低減されることが示された。このような結果をふまえ、2030 年以降の使用済み太陽光パネルの大量排出を見据えつつ過渡期にも適切な処理を担保するための回収の仕組み作りを検討する必要がある。

(2) 既存の技術を活用した高度循環の基礎作り（現状における対応）

現在、使用済みとなった太陽光パネルの処理は、破碎後に埋め立て処分されるのが主流である。一方、本実証の結果、既存の技術で太陽光パネルを循環利用できることが示された。高度循環の基礎作りのためにも既存の技術を活用することが望ましい。例えば、本実証の結果、活用が期待される技術は次のとおりである。

- ・ 太陽光パネルの発電性能と安全性の診断技術
- ・ アルミフレーム・ジャンクションボックス分解技術
- ・ セルシートとカバーガラスの分離技術（例えば、ホットナイフ分離法®）
- ・ セルシートの破碎・選別技術
- ・ カバーガラスに従来のガラスカレットを混合した原料によるグラスウールの製造

(3) 高度循環に資する技術への研究開発支援（将来を見据えた対応）

本実証の結果、新しい技術の導入や、既存の技術の改良により太陽光パネル循環利用の高度化や、循環利用に伴う環境負荷の低減の可能性が示された。一方で、そのためには技術的な課題があることも分かった。そこで、これらの課題を解決するための研究開発を支援することが、太陽光パネルの高度循環を促進すると考えられる。例えば、本実証の結果、太陽光パネルの高度循環の促進に資すると考えられる研究開発は次のとおりである。

- ・ 太陽光パネルの発電性能と安全性の診断技術の簡易化と低コスト化
- ・ カバーガラスに有機物等が残留しないカバーガラスの分離技術
- ・ カバーガラスをリユースした太陽光パネル製造技術
- ・ カバーガラスに付着した有機物の除去技術
- ・ 新規電気パルス法の大規模化と回収率の向上
- ・ セルシートから分離したカバーガラスを原料とした製品の製造技術（板ガラス、ガラスびん、タイル、セラミックブロックなど）
- ・ カバーガラスによるガラスウール製造時に混合する従来カレットの割合を低減するための技術

(4) 公共施設における使用済み太陽光パネルを循環利用した製品の活用

本実証では太陽光パネルのカバーガラスを循環利用してガラスウールを試作し、既存の製品と同等の性能であることを確認した。また、使用済み太陽光パネルの中にはリユース可能なものも含まれている可能性も示した。一方でこれらリサイクル製品やリユース製品の市場は未確立である。使用済み太陽光パネルの高度循環を実現するためにはそのリサイクル製品やリユース製品が市場で受け入れられる必要があることから、東京都グリーン購入ガイドに太陽光パネルのリユース製品とリサイクル製品の積極的な使用を謳うなどして都などの公共施設でこれらの製品を積極的に活用して都民による利用を喚起することが必要である。

(5) サプライチェーンでの連携支援

本実証の特徴の一つは、使用済み太陽光パネルの循環利用のサプライチェーン全体を対象としていることである。その中で循環利用の障壁の一つが情報の分断である。これを解消してサプライチェーンの主体間で必要な情報を共有する方策を次のとおり提案する。

① 情報共有の仕組みづくり

太陽光パネルをより高度に循環利用しようするとそれに伴ってより詳細な製品情報が必要になる。例えば、一部のメーカーは太陽光パネルの含有物質情報を公開しているが、カバーガラスやセルなどの部材別の情報は公開されていない。また、発電量の履歴などが分かれば使用済みとなった段階で性能診断をしなくてもリユースの可否を判断できる可能性

がある。このように循環利用に必要な情報が共有されていないために改めて検査や分析をしなければならず、循環利用の障壁とコスト要因になっている。このような障壁と非効率を解消し、使用済み太陽光パネルの高度な循環利用を促進するためには、循環利用に必要な情報をサプライチェーンの上流から下流に共有する仕組みが必要である。

② 各主体間で情報交換する機会の提供

太陽光パネルのサプライチェーンが確立していない現状においては、製造から循環利用までの各主体間で共有する情報を共有できておらず、また明確にもなっていない。例えば太陽光パネルのカバーガラスを循環利用しようとしてもその用途ごとの受け入れ基準が明確になっていなかったため、本実証において調査している。また、カバーガラスを受け入れる側も提供側がどのような性状のカバーガラスカレットを提供できるか把握できていなかった。これはあくまでも一例であり、サプライチェーンを構築する上では主体間で情報を交換して共有できる機会が必要である。その結果、技術的や制度的な課題が明らかになれば、それを解決するための技術開発や仕組み作りを検討することができる。

(6) 太陽光パネルの循環利用を進めるための情報提供・発信

本実証を進める過程では、適切な情報がないために使用済みとなった太陽光パネルが循環利用されていない事例に巡り会うことがあった。例えば、自宅の屋根に設置した太陽光パネルを取り外す際、その太陽光パネルを循環利用する事業者へ施工を委託しようとした。しかし、そのような施工事業者が見つからず埋立処分せざるを得なかった。また、太陽光パネルを取り外した経験がなくどのように取り外せばよいか分からないと訴える解体事業者もあった。このような事例と、現時点では使用済み太陽光パネルの排出が始まりつつある段階であることを考慮すると、太陽光パネルの循環利用を進めるためには、適切な情報提供が必要と考えられ、例えば次のような対応が考えられる。

① 太陽光発電に関するワンストップ問い合わせ窓口の設置

太陽光パネルの設置に関する情報は自治体や事業者など様々な主体から発信されており情報量も豊富である。一方、取り外しや廃棄などに関する情報は少なく、また、現状では施工や手続きなどの情報が分散しているため、求める情報を得づらい状況にある。そこで、既存の問い合わせ窓口を活用するなどして、太陽光パネル設置から廃棄に至るまでのライフサイクル全体に関する問い合わせにワンストップで対応する窓口の設置が有効であると考えられる。

② 各主体への情報発信（ホームページ等による）

太陽光パネルの循環利用に関する取り組みは始まったばかりで公になっている情報は限られている。また、各主体のどのような行動が太陽光パネルの循環利用に資するかは十分

に知られていないことが予想されるため、ホームページ等を活用して各主体への情報発信が必要と考えられる。情報発信の内容は多岐にわたると想定されるが、本実証の結果にもとづく発信内容の例を表 6.1 に示す。

表 6.1. 本実証の結果にもとづいた各主体への発信内容（例）

主体	本実証の結果にもとづく発信内容（例）
全主体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光パネルの循環利用の必要性 ・ 設備や技術、仕組みの導入による環境負荷低減効果
住宅（太陽光発電設備）の所有者	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光発電設備の完成図書・取扱説明書の保存の必要性 ・ 太陽光発電設備の発電実績や伝票の保存の有効性 ・ 太陽光発電設備の撤去に伴う手続き ・ 太陽光パネルの循環利用に対応できる事業者の情報
ハウスメーカー、工務店、撤去・解体事業者	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光パネルを損傷せずに取り外すことの有効性 ・ 太陽光パネルの循環利用に対応できる中間処理事業者の情報
収集運搬事業者	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光パネルを損傷せずに運搬することの有効性 ・ 太陽光パネルを損傷せずに運搬するための方法
中間処理事業者	<ul style="list-style-type: none"> ・ 循環資源（再生資源）を受け入れているメーカー等の情報 ・ 各種製品のメーカー等（循環資源利用事業者）による循環資源（再生資源）の受け入れ基準等の情報
各種製品のメーカー等（循環資源利用事業者）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 循環資源（再生資源）の受け入れ基準等の情報提供の有効性
太陽光パネルメーカー	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製品仕様、部材別の含有物質等の製品情報提供の有効性

(7) 太陽光発電設備の更新の支援

再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT 制度）をはじめ、現在の太陽光発電設備の導入を促進、支援する制度は、新規導入に限定されている。一方、本実証では太陽光パネルの発電性能は失われていないものの、パワーコンディショナーなどの周辺機器が故障してしまい、その修理の経済的な負担を理由に修理交換せず、太陽光パネルで発電した電力が利用されていない事例があった。また、太陽光パネルの製品寿命が 20～30 年といわれており、新規導入した太陽光パネルもいずれは寿命を迎える。そのときに、経済的な負担を理由に設備を更新せず太陽光発電設備を廃止してしまう可能性がある。このようなことが多発すると、FIT 制度等により導入が進んだ太陽光発電設備が減少し、結果として再生可能エネルギーによる発電量の減少を招く可能性がある。このような事態にならぬように太陽光発電設備の修理や更新を支援することについて検討することが望ましい。

また、更新にあたっては使用済みとなった太陽光パネルの適正処理が前提となるが、更に踏み込んで太陽光パネルのリサイクルを支援の要件にするなど、導入や更新を支援する仕組みに太陽光パネルの循環利用を促す仕掛けを組み込むことも考えられる。

終わりに

温室効果ガスの排出量を 2050 年にネットゼロとするため、再生可能エネルギーの導入が進められています。これに伴い、太陽光発電も急速に普及しています。このことは将来的に使用済みとなった太陽光パネルが大量に発生する可能性があることも示しています。このような太陽光パネルをリサイクルするための技術開発が NEDO をはじめ、様々な研究機関や企業で進められています。一方、リサイクルに関わるサプライチェーンに注目した取り組みは始まったばかりであり、その多くがサプライチェーンの一部に注目したものです。

また、リサイクルに関する一般的な課題の一つとして市中に薄く広がった製品を如何にして効率的に集めるかということがあります。太陽光パネルのリサイクルも同様の課題を抱えています。太陽光発電設備は大きく事業用と住宅用に分けることができます。東京都の場合、事業用よりも分散して設置される住宅用の割合が多く、使用済み太陽光パネルを効率的に集めることがより難しい状況です。

このような課題認識のもと、東京都の「大学研究者による事業提案制度」の第一期生として本実証を提案し、採択していただいたことで、2019 年から 3 年間の事業として実施することができました。その成果を本報告書にまとめ、その要約を「5.10. まとめ (成果と課題)」に記しました。また、本実証の特徴は、使用済みとなった太陽光パネルの取り外しから、リユース、リサイクルなど静脈側の一連の流れを対象にしていることです。その中で様々な実証試験と研究開発を有機的に実施できたことは太陽光パネルを循環利用する上で大変意義深いものと考えています。

さて、本実証は、参画した大学と企業だけでなく、多くの方々のご協力とご尽力のもとで実施することができました。

本実証の立ち上げにあたっては、静脈側で太陽光パネルを扱う多くの企業からお話を伺いました。特に当事者ならではのご意見や最新の動向は、各種実証試験を具体化するために大いに参考にさせていただきました。

太陽光パネルの診断実証試験では、住宅の屋根に設置した太陽光パネルをドローンで診断することを試みました。しかし、都内で実施する方策が見つからず難渋していたところ、東京大学生産技術研究所のご厚意で COMMA ハウスを使用させていただきました。また、クリーンエネルギーライフクラブ (CELC) の N 氏のご尽力くださったことで、CELC 会員の皆様に実証の現場を提供していただきました。更に、愛媛県松山市、伊予市、西予市、喜多郡にお住いの方にもご協力いただきました。

続く住宅の屋根から太陽光パネルを取り外す実証試験では、住宅からの太陽光パネルの排出が少ない現状において 3 件の実証を実施することができました。これも CELC の N 氏のご尽力のもと、会員の藤沢市 S 様ご夫妻、鎌倉市 H 様ご夫妻、横浜市 K 様ご夫妻がご厚意でご自宅を実証の現場として提供してくださったからです。また、工事を施工した事業者の方々には、現場での計測と情報収集にご協力いただきました。

リサイクルに関する実証では、ガラス再資源化協議会にご尽力いただき多種の太陽光パネルを集めていただきました。

使用済み太陽光パネルから分離したカバーガラスでのグラウスール試作にあたっては、非常に挑戦的な条件のもとでお願いしたにもかかわらず株式会社ワンワールドには快く引き受けていただき、その上、貴重な知見をご提供いただきました。

この他にもここに記すことができなかつた多くの方々のご尽力を賜りました。本実証を実施するにあたりご協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございます。

このように多くの方々に携わっていただいて本実証を実施した結果、既存の技術で太陽光パネルを循環利用するサプライチェーンの構築ができることを示すことができました。また、多様で太く繋がれた循環利用のサプライチェーンを実現するための方策と課題を整理することができました。近い将来、使用済み太陽光パネルが大量に発生することが現実となることでしょう。そのときには、太陽光パネルが製品や素材として循環利用され、また、そのためのサプライチェーンが多様で太く繋がれたものになっていることを期待します。それには、個別の技術開発と並行して、今から、行政、教育・研究機関、企業が連携して循環利用のための仕組作りに取り組む必要があります。本実証の成果がそのような取り組みに貢献できれば幸いです。

2022年3月

早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科
所 千晴